



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Δομοστατικής

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

## ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΒΑΣΗΣ ΠΥΛΩΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΟΡΦΗΣ ΤΡΙΠΟΔΟΥ



Διπλωματική Εργασία

Αναστάσιος Γ. Μαυραγάνης

ΕΜΚ ΔΕ 2021 18

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

Αθήνα, Ιούλιος, 2021





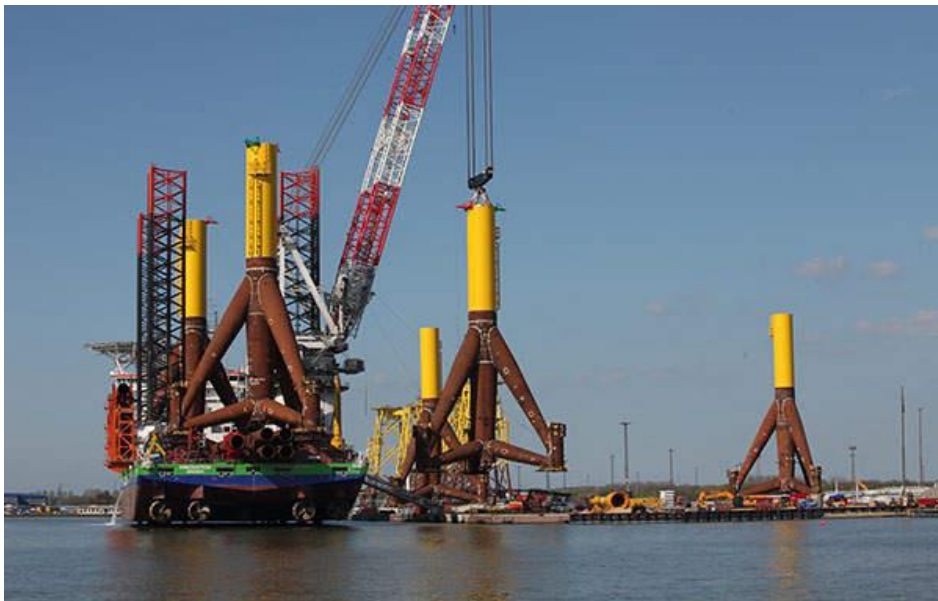
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Δομοστατικής

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

## ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΒΑΣΗΣ ΠΥΛΩΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΟΡΦΗΣ ΤΡΙΠΟΔΟΥ



Διπλωματική Εργασία

Αναστάσιος Γ. Μαυραγάνης

ΕΜΚ ΔΕ 2021 18

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

Αθήνα, Ιούλιος, 2021

Copyright © Αναστάσιος Μαυραγάνης, 2021

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 Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Anastasios Mavraganis, 2021

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).



Αναστάσιος Μαυραγάνης (2021)

Αριθμητική Προσομοίωση και Παραμετρική Διερεύνηση Βάσης Πυλώνων Ανεμογεννητριών  
Μορφής Τριπόδου

Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2021 18

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Anastasios Mavraganis (2021)

Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2021 18

Numerical Simulation and Parametric Analysis of Tripod Base for Wind Turbine Towers

Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας ολοκληρώνεται ο ακαδημαϊκός κύκλος σπουδών μου ως προπτυχιακός φοιτητής στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Θα ήθελα στο σημείο αυτό να ευχαριστήσω προσωπικά τον Καθηγητή μου Κ. Χάρη Γαντέ ο οποίος με εμπιστεύτηκε από την πρώτη στιγμή δίνοντας μου την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον θέμα το οποίο άπτεται του ενεργειακού τομέα. Η συμβολή του στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας ήταν αναμφισβήτητα καθοριστική. Με άμεσες, σαφείς και εύστοχες διευκρινίσεις και συμβουλές με καθοδηγούσε πάντα στη σωστή πορεία εργασίας. Ήταν μία άριστη εμπειρία συνεργασίας τόσο σε επιστημονικό όσο και σε προσωπικό επίπεδο η οποία θα με συνοδεύει στο μέλλον.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον κύριο Ι. Ψαρά για τις πολύτιμες συμβουλές και χρήσιμες πληροφορίες τις οποίες μοιράστηκε μαζί μου σχετικά με θέματα προσομοίωσης και χρήσης του λογισμικού που χρησιμοποίησα.

Επιπλέον θα ήθελα να μεταφέρω τις ευχαριστίες μου προς τους κυρίους Παύλο Θανόπουλο και Τάσο Αβραάμ, καθηγητές μου στη σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ τόσο για τις άριστες γνώσεις τις οποίες μου μετέδωσαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου όσο και για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, η οποία κατέχει την μεγαλύτερη αξία στην ζωή μου, για την απεριόριστη και ανιδιοτελή υποστήριξη την οποία μου παρείχε τόσο σε υλικό όσο και σε πνευματικό επίπεδο σε όλα τα βήματα των ακαδημαϊκών μου χρόνων.

Αφιερώνω την διπλωματική μου εργασία στους γονείς μου Γεώργιο και Ευανθία, στην αδερφή μου Παναγιώτα, στον παππού μου Αναστάσιο και στην γιαγιά μου Παναγιώτα.





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ  
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΕΜΚ ΔΕ 2021 18

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΒΑΣΗΣ ΠΥΛΩΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ  
ΜΟΡΦΗΣ ΤΡΙΠΟΔΟΥ**

**Αναστάσιος Γ. Μαυραγάνης**

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές

Ιούλιος 2021

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην σύγχρονη εποχή, όπου η ζήτηση ενέργειας διαρκώς μεγαλώνει, παρατηρείται έντονο ενδιαφέρον στην αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ιδίως της αιολικής ενέργειας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επιτακτική ανάγκη για διερεύνηση διαφόρων κρίσιμων θεμάτων που σχετίζονται με τον σχεδιασμό, την κατασκευή και λειτουργία των ανεμογεννητριών. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και την προσπάθεια να αξιοποιηθεί καλύτερα το αιολικό δυναμικό το μέγεθος των ανεμογεννητριών διαρκώς αυξάνεται, τόσο ως προς το ύψος του πυλώνα όσο και ως προς το μήκος των πτερυγίων τους. Αυτό έχει ως επακόλουθο την αύξηση του μεγέθους των φορτίων που καταπονούν τα δομικά μέρη των ανεμογεννητριών. Συνεπώς η μελέτη της απόκρισης των επιμέρους δομικών μελών της κατασκευής κρίνεται αναγκαία. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς και η παραμετρική διερεύνηση του τριπόδου στη βάση του πυλώνα μιας ανεμογεννήτριας με τη βοήθεια κατάλληλων αριθμητικών προσομοιωμάτων.

Αρχικά με την χρήση κατάλληλου λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων προσομοιώθηκε ο υπό εξέταση φορέας ούτως ώστε να γίνουν οι απαραίτητες υπολογιστικές αναλύσεις. Ο φορέας αποτελείται από ένα κεντρικό κατακόρυφο στέλεχος, δύο ομάδες άνω και κάτω κεκλιμένων μελών και ένα γωνιακό μέλος σε κάθε ένα από τα τρία τμήματα του τριπόδου. Η στήριξη του φορέα επιτυγχάνεται με ζεύγη πασσάλων θεμελίωσης κάτω από κάθε γωνιακό μέλος, συνδεδεμένων μέσω κεφαλόδεσμου. Η προσομοίωση του κατακόρυφου στελέχους και των κεκλιμένων, γωνιακών μελών γίνεται με χρήση γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων κοίλης κυκλικής διατομής, ενώ η προσομοίωση των πασσάλων θεμελίωσης και του κεφαλόδεσμου μέσω της χρήσης γραμμικών στοιχείων κυκλικής και ορθογωνικής διατομής αντίστοιχα. Η προσομοίωση του εδάφους έγινε με χρήση κατάλληλων ελατηρίων μη γραμμικής συμπεριφοράς κατά μήκος των γραμμικών στοιχείων των πασσάλων και κεφαλόδεσμων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ιδιομορφικής ανάλυσης του φορέα κατά την οποία έχουν αφαιρεθεί οι πάσσαλοι, οι κεφαλόδεσμοι και τα ελατήρια για την αποφυγή φαινομένων μη γραμμικότητας. Ακολούθως παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τρία βασικά σενάρια φόρτισης, στα οποία εξετάζονται οι μετατοπίσεις στην κορυφή του τριπόδου και του κεφαλόδεσμου καθώς και τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών των επιμέρους μελών, μέσω των οποίων εκτιμάται η συνολική απόκριση της κατασκευής.

Τέλος πραγματοποιείται διερεύνηση της απόκρισης της συνολικής κατασκευής μέσω της μεταβολής ορισμένων κρίσιμων παραμέτρων. Πιο συγκεκριμένα επιλέγονται τρεις γενικές κατηγορίες παραμετρικών αναλύσεων που σχετίζονται με την γεωμετρία των επιμέρους μελών του τριπόδου, το έδαφος θεμελίωσης και τα φορτία σχεδιασμού. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζονται σε συγκριτικά διαγράμματα ούτως ώστε να προκύψουν ασφαλή συμπεράσματα για την συνολική συμπεριφορά της κατασκευής.





NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING

INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

DIPLOMA THESIS

EMK ΔΕ 2021 18

**NUMERICAL SIMULATION AND PARAMETRIC ANALYSIS OF TRIPOD BASE FOR WIND TURBINE TOWERS**

**Anastasios G. Mavraganis**

Supervisor: Professor Charis Gantes

July, 2021

**ABSTRACT**

In our era, when the demand for energy is constantly growing, there is a strong interest in the utilization of renewable energy sources and especially wind energy. This results in the urgent need to address various critical issues related to the design, construction and operation of wind turbines. With the development of know-how and the effort to make better use of the wind potential, the size of the wind turbines is constantly increasing, both in terms of the height of the pylon and in terms of the length of their blades. This results in an increase in the size of the loads exerted on the wind turbine components. Therefore the study of the response of the individual structural components of the construction is considered necessary. The purpose of this dissertation is to study the mechanical behavior and parametric investigation of the tripod at the base of a wind turbine tower with the help of appropriate numerical simulations.

Initially, with the use of appropriate finite element analysis software, the structure under examination was simulated in order to make the necessary computational analyses. The structure consists of a central vertical component, two groups of upper and lower inclined components and an angular component in each of the three parts of the tripod. The support of the structure is achieved by pairs of foundation piles, under each angular component, restrained by their pilecap. The simulation of the vertical stem and the inclined, angular members is done using linear finite elements of pipe cross section while the simulation of the foundation piles and the pilecap is done through the use of linear elements of circular and rectangular cross section respectively. The soil was simulated using suitable non-linear line springs along the linear elements of the piles and pilecaps. Next results of modal analysis of the structure are presented, during which the piles, pilecaps and springs have been removed to avoid non-linearity phenomena. The results of the analyzes for three basic load scenarios are then described, in which the displacements at the top of the tripod and the pilecap are examined as well as the axial, shear force and bending moment diagrams of the individual components, through which the overall response of the construction is estimated.

Finally, the response of the overall structure is tested through changing some critical parameters. In particular, three general categories of parametric analyses are selected related to the geometry of the individual components of the tripod, the soil foundation and the design loads. The results are presented in comparative diagrams so as to draw safe conclusions about the overall behavior of the construction.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Ιστορική αναδρομή.....	1
1.2 Πλεονεκτήματα αιολικής ενέργειας.....	4
1.3 Αποθήκευση αιολικής ενέργειας.....	7
1.4 Διάρκεια ζωής ανεμογεννήτριας.....	7
1.5 Αντικείμενο παρούσας διπλωματικής εργασίας.....	8
<b>2. ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....</b>	<b>9</b>
2.1 Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών.....	9
2.2 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα.....	11
2.3 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα.....	12
2.4 Αριθμός πτερυγίων.....	13
2.5 Θεμελίωση ανεμογεννήτριας.....	14
2.6 Βέλτιστη παραγωγή ενέργειας.....	17
<b>3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΡΙΠΟΔΟΥ.....</b>	<b>19</b>
3.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά τριπόδου.....	19
3.2 Διατομές.....	19
3.3 Υλικά.....	21
3.4 Θεμελίωση.....	21
3.4.1 Συνοριακές συνθήκες.....	21
3.4.2 Προσομοίωση εδάφους.....	21
3.5 Φορτίσεις.....	24
3.6 Ιδιομορφική ανάλυση.....	25
3.7 Αποτελέσματα στατικών αναλύσεων φορέα.....	27
3.7.1 Συνδυασμός φόρτισης COMB4.....	27
3.7.2 Συνδυασμός φόρτισης COMB5.....	48
3.7.3 Συνδυασμός φόρτισης COMB6.....	69
<b>4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΤΡΙΠΟΔΟΥ.....</b>	<b>91</b>
4.1 Επίδραση της γεωμετρίας του τριπόδου.....	91
4.1.1 Επίδραση ύψους κατακόρυφου στελέχους.....	92
4.1.2 Επίδραση ακτινικής απόστασης αρχής αξόνων-γωνιακού μέλους.....	96
4.2 Επίδραση των διατομών των μελών.....	98
4.2.1 Επίδραση εξωτερικής διαμέτρου και πάχους άνω κεκλιμένων μελών.....	100
4.2.2 Επίδραση εξωτερικής διαμέτρου και πάχους κάτω κεκλιμένων μελών.....	103
4.2.3 Επίδραση εξωτερικής διαμέτρου και πάχους κατακόρυφου στελέχους.....	107
4.3 Επίδραση του εδάφους θεμελίωσης.....	112



4.4	Επίδραση των φορτίων σχεδιασμού.....	120
<b>5.</b>	<b>ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>123</b>
5.1	Σύνοψη.....	123
5.2	Συμπεράσματα.....	124
5.3	Θέματα για περαιτέρω μελέτη.....	128
<b>6.</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>129</b>



## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αιολική ενέργεια αποτελεί μία από τις παλαιότερες φυσικές μορφές ενέργειας, η οποία παράγεται μέσω της αξιοποίησης της κίνησης του ανέμου με ποικίλους τρόπους και προκαλείται από την ανομοιογενή θέρμανση των διαφόρων περιοχών της γης από την ηλιακή ακτινοβολία. Το γεγονός ότι αποτελεί μία καθαρή μορφή ενέργειας καθώς και ότι η πρώτη ύλη παραμένει ανεξάντλητη στο χρόνο την καθιστούν ιδιαίτερα ανταγωνιστική στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μία συνεχώς αυξανόμενη ανάπτυξη και εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ιδίως της αιολικής λόγω της μείωσης του κόστους παραγωγής και της προσπάθειας που γίνεται σε παγκόσμιο επίπεδο για περιορισμό του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής. Πιο συγκεκριμένα η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς της αιολικής ενέργειας σε χερσαίες και υπεράκτιες εγκαταστάσεις αυξήθηκε κατά 75 περίπου φορές στη διάρκεια των τελευταίων δύο δεκαετιών από 7.5GW το 1997 σε 564GW το 2018. Πολλά μέρη του κόσμου εμφανίζουν υψηλές ταχύτητες ανέμου οι οποίες αποτελούν βασική παράμετρο για την επιλογή της τοποθεσίας μιας εγκατάστασης αιολικής ενέργειας. Οι περιοχές αυτές ενίοτε είναι αρκετά απομακρυσμένες.

### 1.1 Ιστορική αναδρομή

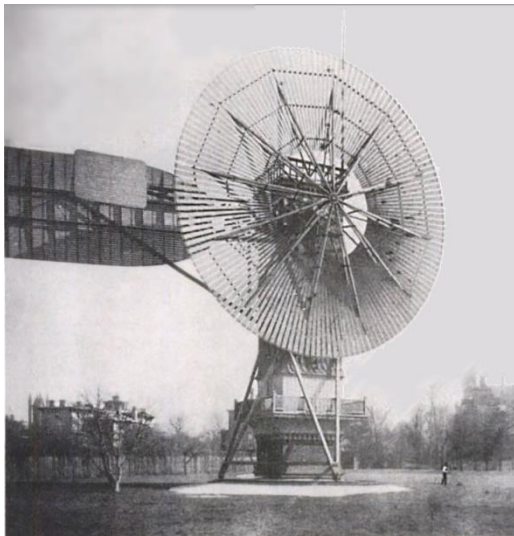
Ο άνθρωπος από την αρχαιότητα είχε αντιληφθεί την αξία της αιολικής ενέργειας και της αξιοποίησής της. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα ιστία των πρώτων ιστιοφόρων πλοίων μέσω των οποίων γινόταν εφικτή η κίνησή τους καθώς επίσης οι ανεμόμυλοι στους οποίους γινόταν η άλεση των σιτηρών με τη βοήθεια της κίνησης των πτερυγίων τους.

Στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας κατέστη εφικτή μέσω της χρήσης των ανεμογεννητριών. Η κατασκευή της πρώτης ανεμογεννήτριας πραγματοποιήθηκε τον Ιούλιο του 1987 στη Σκωτία από τον καθηγητή James Blyth στο πανεπιστήμιο του Anderson. Το ύψος της ήταν 10m και η παραγόμενη ενέργεια χρησιμοποιήθηκε για τη φόρτιση μπαταριών και τη φωταγώγηση του σπιτιού του. Επόμενος σημαντικός σταθμός ήταν η κατασκευή μιας μεγαλύτερων διαστάσεων ανεμογεννήτριας στο Cleveland του Ohio το έτος 1887 από τον Charles F. Brush. Η κατασκευή αποτελούνταν από έναν πυλώνα ύψους 18m και έναν ρότορα διαμέτρου 17m. Η ύπαρξη μεγάλου αριθμού πτερυγίων στην κατασκευή εξασφάλιζε χαμηλή ταχύτητα περιστροφής με αποτέλεσμα η παραγόμενη ισχύς να είναι αρκετά μικρή της τάξης των 12kW.

Στη Δανία το 1891 ο φυσικός Poul La Cour μαζί με μία ομάδα επιστημόνων στην προσπάθειά του να εξασφαλίσει ηλεκτρική ενέργεια για τις αγροτικές περιοχές με εναλλακτικούς τρόπους κατασκεύασε μία ανεμογεννήτρια με δυναμό. Η ανεμογεννήτρια αυτή θεωρείται ότι αποτελεί την προγενέστερη μορφή της σημερινής ανεμογεννήτριας. Αξίζει να σημειωθεί ότι αντιμετωπίστηκε συγχρόνως και το πρόβλημα αποθήκευσης ενέργειας καθώς αφενός μεν γινόταν χρήση του παραγόμενου ρεύματος αφετέρου δε αποθηκευόταν το παραγόμενο υδρογόνο μέσω της ηλεκτρόλυσης. Στο πρότυπο La Cour κατασκευάστηκαν τα επόμενα

χρόνια 72 ανεμογεννήτριες ισχύος από 5 έως 25kW. Οι μεγαλύτερες από αυτές διέθεταν πυλώνα ύψους 24m και ρότορα τεσσάρων πτερυγίων διαμέτρου 23m.

Στις ΗΠΑ το 1931 κατασκευάστηκε η πρώτη ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα και στη Yalta μία προγενέστερη μορφή της σημερινής ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα η οποία πήρε την ονομασία WIME D-30 και η οποία διέθετε πυλώνα ύψους 32m και ισχύ 100kW. Όπως έχει αναφερθεί η ετήσια ικανότητα παραγωγής της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας άγγιζε το 32% ποσοστό το οποίο δεν διαφέρει σημαντικά από τις σύγχρονες ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου.



Σχήμα 1.1: Η ανεμογεννήτρια του Charles F.Brush (Cleveland Ohio,1887) [1]



Σχήμα 1.2: Η ανεμογεννήτρια του Poul La Cour (Δανία,1891) [2]

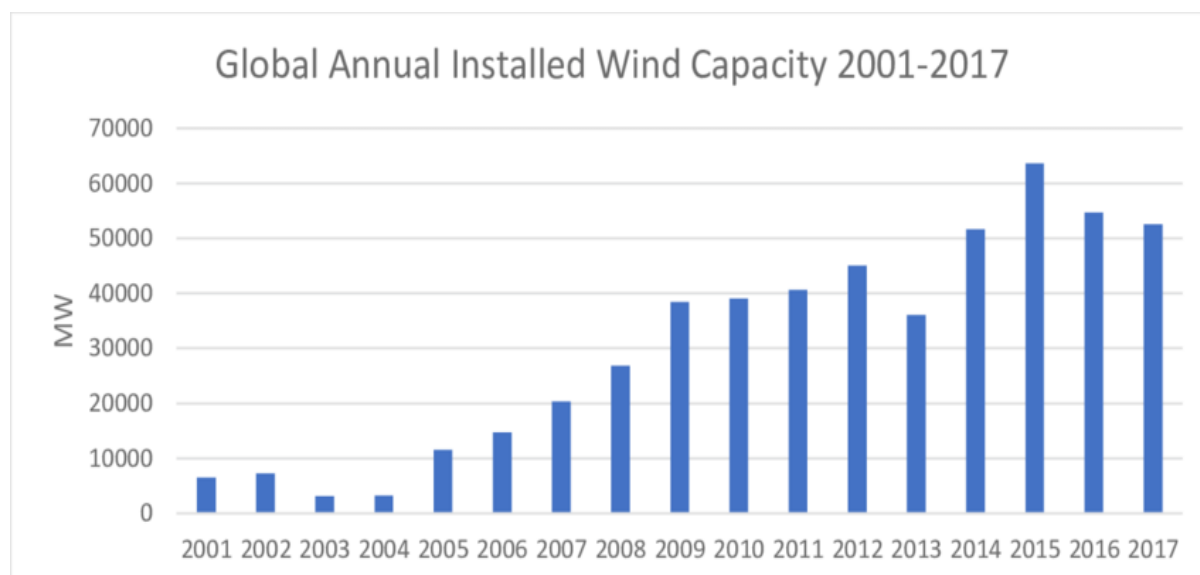


Σχήμα 1.3: Η ανεμογεννήτρια WIME D-30 (Yalta, 1931) [3]

Με την πάροδο των χρόνων και τη βελτίωση της τεχνολογίας ο αριθμός των ανεμογεννητριών αυξήθηκε ταχύτατα και η μορφή τους πλησίασε σταδιακά τη σημερινή έχοντας ως βασικό κριτήριο την παραγωγή ενέργειας με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο. Τα περιορισμένα αποθέματα ορυκτών καυσίμων σε συνδυασμό με τον απαιτούμενο περιορισμό των εκπομπών CO<sub>2</sub> συντέειναν καθοριστικά στην αναζήτηση εναλλακτικών μεθόδων παραγωγής ενέργειας.

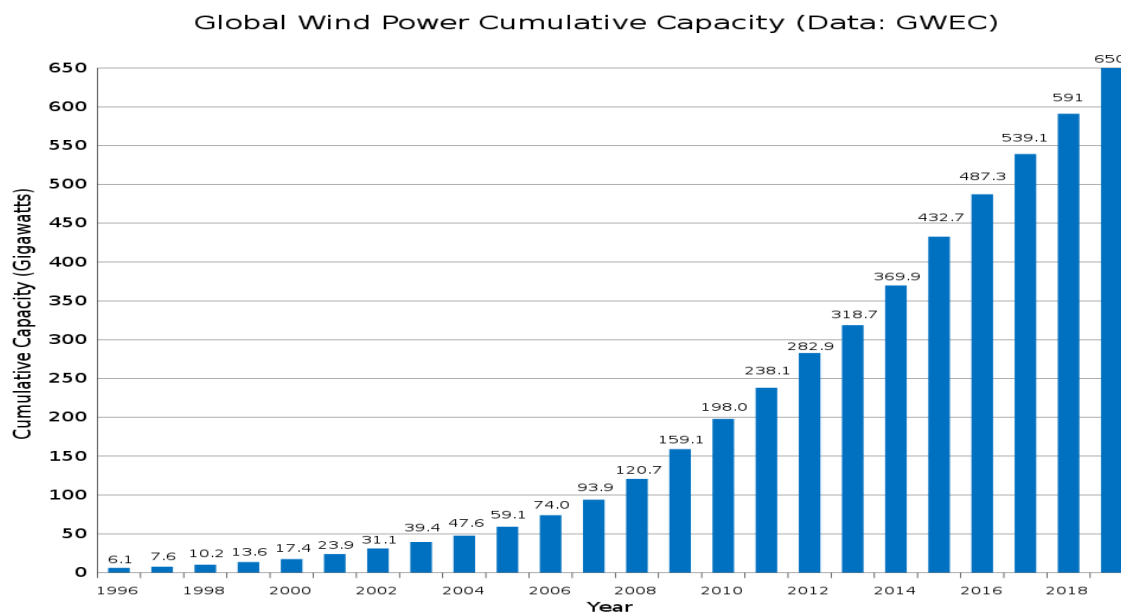
Οι αποφάσεις επιχορήγησης της παραγωγής καθαρής ενέργειας καθώς και η θέσπιση ενεργειακών στόχων από πλευράς Ευρωπαϊκής Ένωσης για τις επόμενες δεκαετίες συνέβαλλαν αποφασιστικά στη αλματώδη αύξηση της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος προερχόμενης από την αιολική ενέργεια. Πιο συγκεκριμένα σύμφωνα με την ισχύουσα οδηγία 2018/2001 την οποία εξέδωσε η Ε.Ε. έως το 2030 το 32% της ενέργειας που καταναλώνεται στο έδαφος της θα πρέπει να προέρχεται από ΑΠΕ. Μεταξύ των ΑΠΕ η μεγαλύτερη ανάπτυξη παρατηρείται στην αιολική ενέργεια καθώς αυτή καταλαμβάνει το 18,4% της συνολικής εγκατεστημένης δυναμικότητας παραγωγής ενέργειας της Ε.Ε. και καλύπτει το 14% της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Με τα σημερινά δεδομένα η συνολική δυναμικότητα αιολικής ενέργειας στην Ευρώπη ανέρχεται στα 189GW εκ των οποίων τα 171GW προέρχονται από χερσαίες και τα 18GW από υπεράκτιες εγκαταστάσεις.

Μεταξύ των χωρών οι οποίες ηγούνται στον τομέα της αιολικής ενέργειας είναι η Δανία, το Ηνωμένο Βασίλειο και η Ιρλανδία. Η Δανία συγκεκριμένα κατάφερε το 2016 να καλύψει το 41% των ενεργειακών της αναγκών αποκλειστικά από αιολική ενέργεια κατέχοντας έτσι το ρεκόρ στην εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών της σε ευρωπαϊκό και διεθνές επίπεδο.



Σχήμα 1.4: Παγκόσμια ετήσια εγκατεστημένη ισχύς για την περίοδο 2001-2017 σε MW

(Πηγή:www.researchgate.net) [4]



Σχήμα 1.5: Παγκόσμια συνολική εγκατεστημένη ισχύς για την περίοδο 1996-2019 σε GW

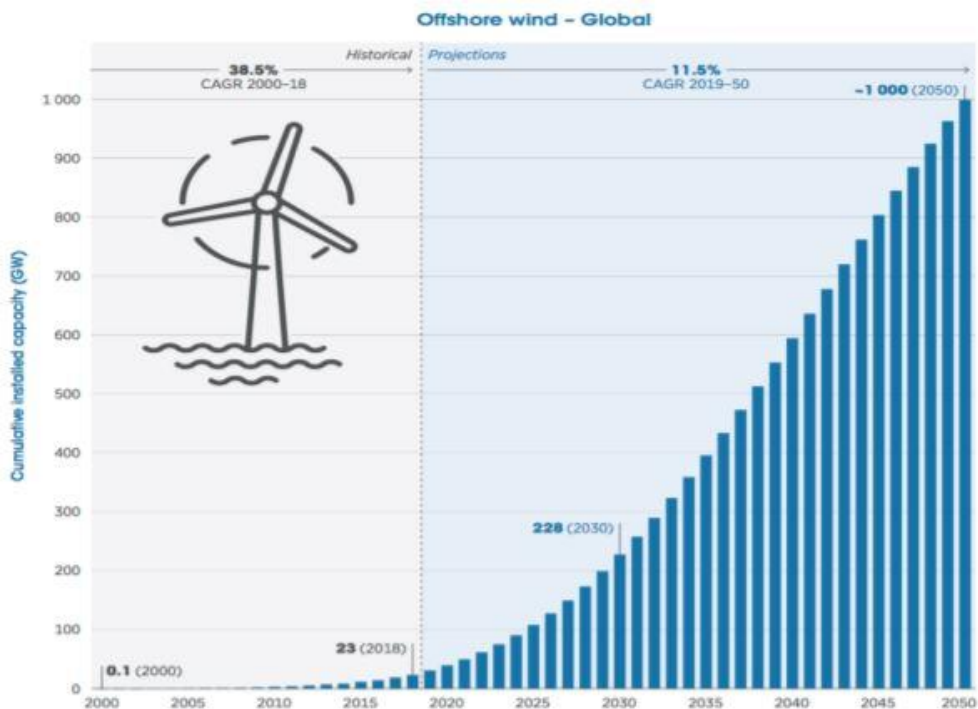
(Πηγή: en.wikipedia.org) [5]

## 1.2 Πλεονεκτήματα αιολικής ενέργειας

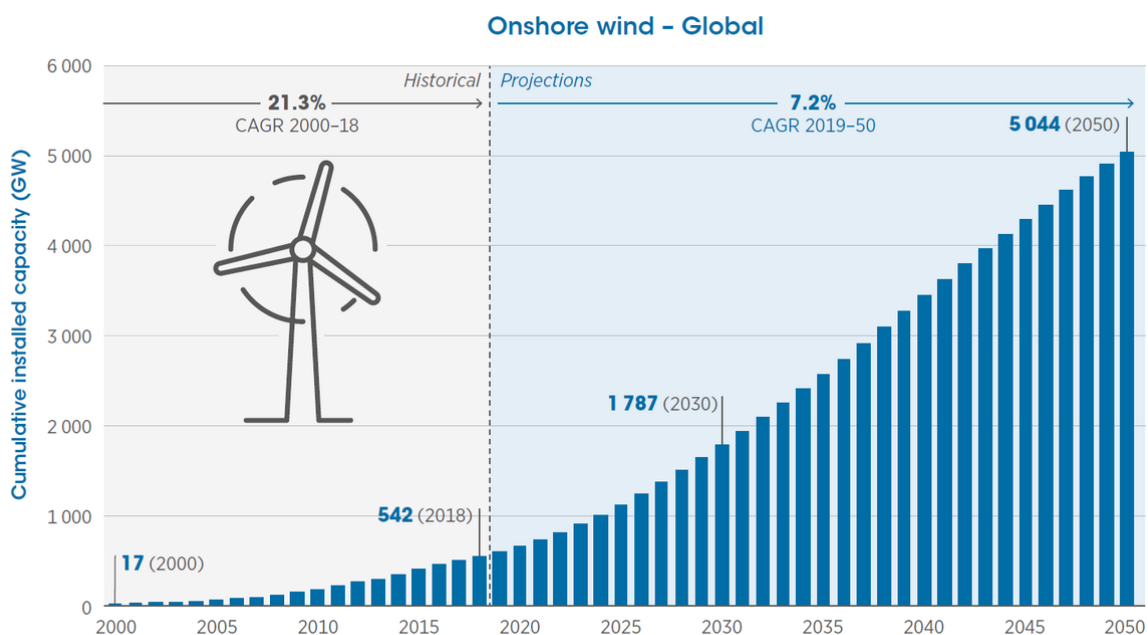
Η αιολική ενέργεια ανήκει στην ομάδα των καθαρών μορφών ενέργειας καθώς είναι ανεξάντλητη και δεν δημιουργεί ρύπους. Τα τελευταία χρόνια σημειώνει ταχεία ανάπτυξη λόγω των συγκριτικών πλεονεκτημάτων της έναντι των υπολοίπων μορφών ενέργειας. Ορισμένα από αυτά τα πλεονεκτήματα είναι τα ακόλουθα:

- Είναι μία ανεξάντλητη καθαρή πηγή ενέργειας
- Καταλαμβάνει περιορισμένο χώρο επιτρέποντας την ομαλή ανάπτυξη καλλιεργειών στη γύρω περιοχή
- Είναι οικονομικά αποδοτική σε πληθώρα περιοχών
- Παρουσιάζει χαμηλό λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης
- Εξασφαλίζει ενέργεια σε δυσπρόσιτες περιοχές
- Είναι άμεσα διαθέσιμη και δεν καταστρέφει τους φυσικούς πόρους
- Συμβάλλει στην αντιμετώπιση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής καθώς δεν εκπέμπει CO<sub>2</sub> και άλλους επιβλαβείς ρύπους

Μέχρι το 2030 η αιολική ενέργεια πρόκειται να αντισταθμίσει 2,5 δισεκατομμύρια τόνους άνθρακα ανά έτος σύμφωνα με εκτίμηση της εταιρείας GE Renewable Energy. Παράλληλα η ανάπτυξη της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας θα ακολουθήσει ανοδική πορεία αγγίζοντας την τιμή των 1000GW της συνολικής εγκατεστημένης δυναμικότητας έως το 2050 (Σχήμα 1.6) [6]. Η εγκατεστημένη δυναμικότητα αθροιστικής χερσαίας αιολικής ενέργειας πρόκειται να αυξηθεί περισσότερο από τρεις φορές έως το 2030 και επτά φορές έως το 2050 σε σχέση με τα δεδομένα του 2018 (Σχήμα 1.7) [7].

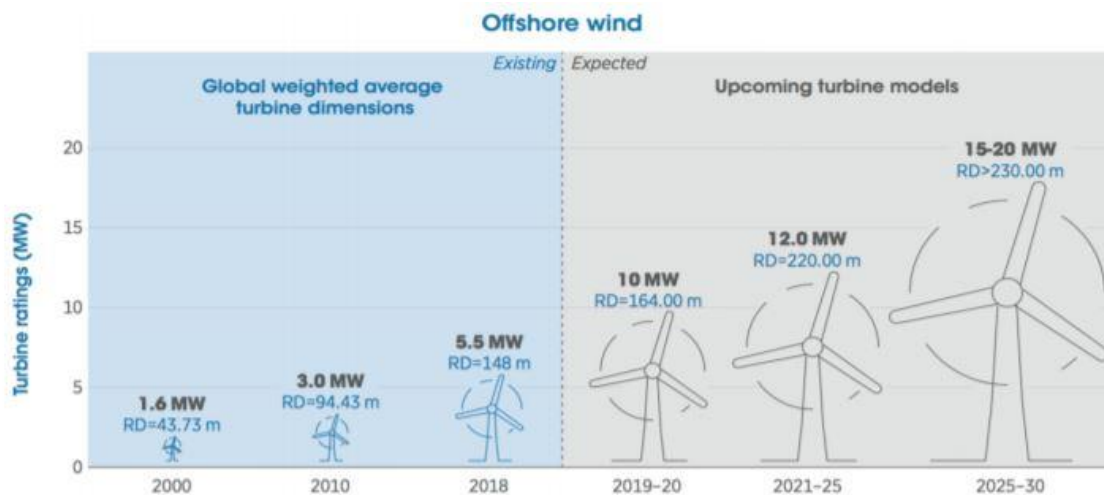


Σχήμα 1.6: Η εκτιμώμενη εξάπλωση της υπεράκτιας (offshore) αιολικής ενέργειας έως το 2050 σε παγκόσμιο επίπεδο σε GW (Πηγή:www.researchgate.net) [6]



Σχήμα 1.7: Η εκτιμώμενη εξάπλωση της χερσαίας (onshore) αιολικής ενέργειας έως το 2050 σε παγκόσμιο επίπεδο σε GW (Πηγή:www.irena.org) [7]

Μέσω της διαρκούς καινοτομίας και εξέλιξης της τεχνογνωσίας στο τμήμα της χωρητικότητας των στροβίλων, του ύψους και της διαμέτρου του δρομέα εκτιμάται ότι θα βελτιωθεί σημαντικά η ενεργειακή απόδοση και θα μειωθεί περαιτέρω το λειτουργικό κόστος και το κόστος κεφαλαίου ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος. Πιο συγκεκριμένα το μέσο μέγεθος των υπεράκτιων ανεμογεννητριών αυξήθηκε περισσότερο από τρεις φορές στο διάστημα 2000-2018 ενώ η παραγωγική τους ικανότητα αναμένεται να ανέλθει στο επίπεδο των 15-20MW έως το 2030 (Σχήμα 1.8) [8]. Παρομοίως αύξηση παρουσίασε το μέσο μέγεθος και η παραγωγική ικανότητα των χερσαίων ανεμογεννητριών (Σχήμα 1.9) [9].



Σχήμα 1.8: Η σταδιακή αύξηση του μεγέθους των υπεράκτιων ανεμογεννητριών και της παραγωγικής τους ικανότητας (Πηγή:www.irena.org) [8]



Σχήμα 1.9: Η σταδιακή αύξηση του μεγέθους των χερσαίων ανεμογεννητριών και της παραγωγικής τους ικανότητας (Πηγή:www.irena.org) [9]



### 1.3 Αποθήκευση αιολικής ενέργειας

Στις μέρες μας οι υπάρχουσες και οικονομικά αποδοτικές λύσεις στον τομέα της αποθήκευσης ενέργειας βρίσκονται σε αναπτυσσόμενο στάδιο, γεγονός το οποίο θα μπορούσε να αποτελέσει τροχοπέδη στην ευρεία διείσδυση της τεχνολογίας στο πεδίο εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας. Η έρευνα και δημιουργία προηγμένων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας συμβάλλει καθοριστικά στην ικανοποίηση των ενεργειακών αναγκών και τη σταθεροποίηση του συστήματος παραγωγής ενέργειας. Ορισμένα από αυτά τα συστήματα αποθήκευσης αιολικής ενέργειας έχουν αναπτυχθεί εδώ και αρκετά χρόνια μετατρέποντας την αιολική ενέργεια σε άλλες μορφές, όπως:

- Χημική ενέργεια μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού
- Ηλεκτροχημική ενέργεια με τη χρήση μπαταριών και πυκνωτών
- Δυναμική ενέργεια μέσω άντλησης νερού σε μεγαλύτερα υψόμετρα

Η έρευνα και ανάπτυξη καινοτόμων μπαταριών ιόντων-λιθίου αποτελεί τη δημοφιλέστερη μέθοδο αποθήκευσης αιολικής ενέργειας η οποία σταδιακά κερδίζει έδαφος εξασφαλίζοντας σταθερότητα στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και απρόσκοπτη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Εντούτοις υπάρχουν και ορισμένα μειονεκτήματα τα οποία αφορούν κυρίως τις μπαταρίες παλαιότερης τεχνολογίας και σχετίζονται με το κόστος αγοράς τους, τον μικρό κύκλο ζωής τους, τη διάβρωση και την προκληθείσα ρύπανση κατά την απόρριψη τους. Οι πιο σύγχρονες και εξελιγμένες μπαταρίες ιόντων-λιθίου παρέχουν μεγαλύτερη ασφάλεια και αξιοπιστία και είναι ικανές να συνδεθούν με φωτοβολταϊκά συστήματα και ανεμογεννήτριες. Μία ακόμα προηγμένη κατηγορία μπαταριών είναι αυτή των νατρίου-θείου η οποία ενδείκνυται για την αποθήκευση αιολικής, ηλιακής ενέργειας και γεωθερμίας.

### 1.4 Διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας

Ο μέσος κύκλος ζωής μιας σύγχρονης ανεμογεννήτριας είναι 20-30 έτη. Η επίτευξη αυτού του στόχου αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα για τους κατασκευαστές ανεμογεννητριών οι οποίοι καλούνται συγχρόνως να αντιμετωπίσουν με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο το κόστος συντήρησης και επισκευής. Η εξασφάλιση της εύρυθμης λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας και της παράτασης του κύκλου ζωής της είναι διαδικασίες ιδιαίτερα δύσκολες καθώς:

- Η ανεμογεννήτρια είναι εκτεθειμένη σε ακραίες καιρικές συνθήκες (ηλιακή ακτινοβολία, άνεμο, χιόνι, υγρασία, βροχόπτωση) οι οποίες συμβάλλουν καθοριστικά στη φθορά της μακροπρόθεσμα
- Το πλήθος εξαρτημάτων από τα οποία απαρτίζεται μία ανεμογεννήτρια είναι αρκετά μεγάλο με αποτέλεσμα η συνολική αξιοπιστία της κατασκευής να εξαρτάται άμεσα από τη διάρκεια ζωής καθενός εξ αυτών

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες υπόκεινται σε μεγάλα εύρη δυναμικών φορτίσεων λόγω της διασποράς που χαρακτηρίζει την ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου και των εναλλασσόμενων ενάρξεων και διακοπών της λειτουργίας τους. Συνεπώς μία σημαντική παράμετρος η οποία πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν στον σχεδιασμό των κύριων μελών και των βασικών εξαρτημάτων μιας ανεμογεννήτριας είναι η κόπωση. Οι ολοένα και μεγαλύ-

τερες απαιτήσεις για αύξηση της γεωμετρίας των ανεμογεννητριών μέσω της επιμήκυνσης των πτερυγίων τους και του ύψους του πυλώνα καθιστούν επιτακτική ανάγκη την επιλογή προηγμένων υλικών υψηλής αντοχής και ανθεκτικότητας σε κόπωση.

### 1.5 Αντικείμενο παρούσας διπλωματικής εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα διερευνηθεί η μηχανική συμπεριφορά και ο παραμετρικός σχεδιασμός ενός τριπόδου πάνω στο οποίο στηρίζεται ο πυλώνας μιας ανεμογεννήτριας. Αρχικά στο πρώτο μέρος γίνεται μία αναλυτική περιγραφή του αριθμητικού προσομοιώματος το οποίο δημιουργήθηκε σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά του τριπόδου. Η βασική γεωμετρία αποτελείται από ένα κατακόρυφο στέλεχος, τα άνω και κάτω κεκλιμένα μέλη, τα γωνιακά μέλη δακτυλιοειδούς διατομής και τους πασσάλους θεμελίωσης. Η μοντελοποίηση των παραπάνω μελών πραγματοποιήθηκε με χρήση γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων. Ακολούθως γίνεται αναφορά στην επιλογή των υλικών, στις συντοριακές συνθήκες του μοντέλου και στον τρόπο με τον οποίο προσομοιώθηκε το έδαφος θεμελίωσης με τη χρήση μη γραμμικών ελατηρίων. Στο συγκεκριμένο αριθμητικό προσομοίωμα εξετάζεται η συμπεριφορά του φορέα σε τρεις διαφορετικούς συνδυασμούς φόρτισης. Πιο συγκεκριμένα σε κάθε έναν από αυτούς τους συνδυασμούς φόρτισης εφαρμόζεται στον ανώτατο κόμβο κορυφής του τριπόδου δύναμη και ροπή στις τρεις διευθύνσεις. Κατόπιν εκτελείται η ανάλυση και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για κάθε έναν συνδυασμό φόρτισης με τη βοήθεια σχημάτων του παραμορφωμένου φορέα και των διαγραμμάτων εντατικών μεγεθών.

Στο δεύτερο μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας εξετάζεται ενδελεχώς η επίδραση ορισμένων χαρακτηριστικών παραμέτρων στην απόκριση της συνολικής κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιούνται τέσσερις βασικές ομάδες παραμετρικών αναλύσεων. Στην πρώτη ομάδα παραμετρικών αναλύσεων εξετάζεται η επιρροή της γεωμετρίας του τριπόδου. Η τροποποίηση στη γεωμετρία του τριπόδου επιτυγχάνεται μέσω αυξομείωσης του υψομέτρου του κόμβου των άνω και κάτω κεκλιμένων μελών και της ακτινικής απόστασης μεταξύ της αρχής των αξόνων και του γωνιακού μέλους. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κάθε τροποποίηση στη γεωμετρία του τριπόδου είναι διακριτή και συνοδεύεται από την αντίστοιχη τροποποίηση στο αριθμητικό μοντέλο. Στην δεύτερη ομάδα παραμετρικών αναλύσεων εξετάζεται η επίδραση της διατομής των μελών μέσω αυξομείωσης της εξωτερικής διαμέτρου και του πάχους των άνω, κάτω κεκλιμένων μελών και του κατακόρυφου στελέχους. Στην τρίτη ομάδα παραμετρικών αναλύσεων ερευνάται η επίδραση του εδάφους θεμελίωσης της κατασκευής μέσω της χρήσης ελατηρίων μη γραμμικής συμπεριφοράς για τέσσερις διαφορετικούς τύπους εδάφους. Στην τέταρτη ομάδα παραμετρικών αναλύσεων εξετάζεται η επιρροή των φορτίων σχεδιασμού της κατασκευής.

Στο τελευταίο μέρος της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιείται μία συνοπτική ανασκόπηση του περιεχομένου της με ανάδειξη των σημαντικών σημείων. Παράλληλα εξάγονται σημαντικά συμπεράσματα για την συνολική συμπεριφορά της κατασκευής και τέλος προτείνονται θέματα για περαιτέρω μελέτη στο μέλλον.

## 2. ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

### 2.1 Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών

Με τον όρο ανεμογεννήτρια εννοούμε μία μεταλλική κατασκευή αποτελούμενη από επιμέρους εξαρτήματα. Ο ρόλος της ανεμογεννήτριας εστιάζεται στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος μέσω της μετατροπής της κινητικής ενέργειας των πτερυγίων σε ηλεκτρική ενέργεια.

Ο σχεδιασμός των πρώτων ανεμογεννητριών πραγματοποιήθηκε με γνώμονα την αντοχή τους στις επιβαλλόμενες φορτίσεις. Ορισμένα από τα αρχικά σχέδια ανεμογεννητριών περιελάμβαναν μεταξύ άλλων τους στροβίλους οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα. Ο στρόβιλος της εκάστοτε ανεμογεννήτριας αποτελούμενος από κατάλληλο αριθμό πτερυγίων παρήγαγε την απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύ μέσω της περιστροφής του γύρω από τον οριζόντιο ή κατακόρυφο άξονα.

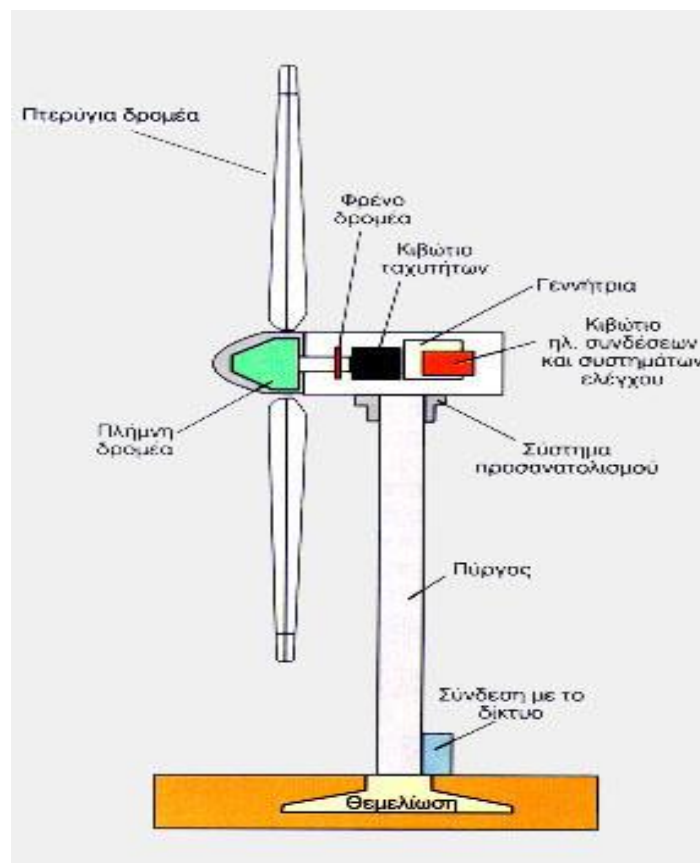
Με την εξέλιξη της τεχνολογίας τα αρχικά σχέδια τροποποιήθηκαν με στόχο την καλύτερη αεροδυναμική απόδοση, την μείωση του λειτουργικού κόστους και κόστους συντήρησης, την μείωση του παραγόμενου θορύβου και την βελτίωση της αισθητικής. Ορισμένες επιπλέον σημαντικές παράμετροι οι οποίες λαμβάνονται υπ' όψιν κατά τον σχεδιασμό του στροβίλου είναι το μικροκλίμα της περιοχής και τα ειδικά χαρακτηριστικά του ανέμου στην περιοχή εγκατάστασης, ο τύπος του δρομέα και της γεννήτριας καθώς και η δυνατότητα προσβασιμότητας για τον αναγκαίο έλεγχο, επιθεώρηση και συντήρηση.

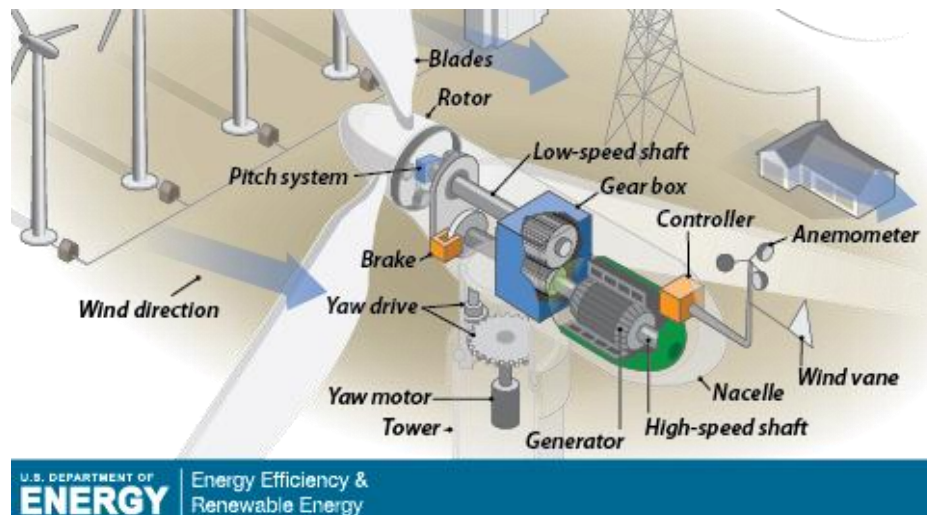
Τα σύγχρονα δεδομένα στην αγορά ενέργειας τα οποία σχετίζονται με το ισχύον καθεστώς λειτουργίας επιτρέπουν τον σχεδιασμό και την κατασκευή στροβίλων χαμηλής ηλεκτρικής ισχύος, βάρους και κόστους. Παρά το γεγονός ότι η πλειοψηφία των εγκατεστημένων στροβίλων λειτουργούν με σταθερή ταχύτητα στροφέα, εντούτοις παρατηρείται μία σταδιακή αύξηση των στροβίλων εναλλασσόμενης ταχύτητας στροφέα. Το γεγονός αυτό συμβάλλει θετικά στην βελτιστοποίηση της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος, στην αξιοπιστία και σταθεροποίηση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και στη δυνατότητα βελτίωσης του τρόπου ελέγχου της ισχύος.

Τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται μία ανεμογεννήτρια είναι τα ακόλουθα:

- **Δρομέας:** Αποτελείται από την πλήμνη και δύο ή περισσότερα πτερύγια. Τα πτερύγια συνδέονται με την πλήμνη και παραμένουν σταθερά ή περιστρέφονται γύρω από τον διαμήκη άξονα. Ο δρομέας μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε περιστροφική.
- **Σύστημα μετάδοσης:** Αποτελείται από τον διαμήκη άξονα, τα έδρανα και το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών. Η στροφική κινητική ενέργεια μεταφέρεται στην ηλεκτρική γεννήτρια μέσω της κίνησης του κύριου άξονα εντός της γεννήτριας. Η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα παραμένει σταθερή στην κατάσταση κανονικής λειτουργίας και συγχρονίζεται με την ταχύτητα της ηλεκτρικής γεννήτριας με τη βοήθεια του κιβωτίου πολλαπλασιασμού στροφών.
- **Σύστημα προσανατολισμού:** Εξασφαλίζει την διαρκώς παράλληλη τοποθέτηση του κύριου άξονα του δρομέα ως προς την κατεύθυνση του ανέμου.

- **Ηλεκτρική γεννήτρια:** Είναι τοποθετημένη στον πύργο της ανεμογεννήτριας και μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Αποτελείται από 4 έως 6 πόλους και μπορεί να είναι σύγχρονη ή επαγωγική. Φέρει επίσης σύστημα πέδησης το οποίο συγκρατείται στον κύριο άξονα ή στον άξονα της γεννήτριας. Η σύνδεσή της με το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών επιτυγχάνεται μέσω είτε εύκαμπτου είτε υδραυλικού συνδέσμου.
- **Πύργος:** Είναι ο πυλώνας της ανεμογεννήτριας ο οποίος εξασφαλίζει την ευστάθεια της κατασκευής και τη συγκράτηση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού.
- **Ηλεκτρονικός πίνακας και πίνακας ελέγχου:** Είναι τοποθετημένος στη βάση του πυλώνα της ανεμογεννήτριας. Ελέγχει τη σωστή λειτουργία και συνεργασία των επιμέρους μερών και εγγυάται την ασφάλεια των επιμέρους διαδικασιών.





Σχήμα 2.1: Τα κύρια μέρη μιας ανεμογεννήτριας (Πηγές: [www.cres.gr](http://www.cres.gr), [www.energy.gov](http://www.energy.gov)) [10],[11]

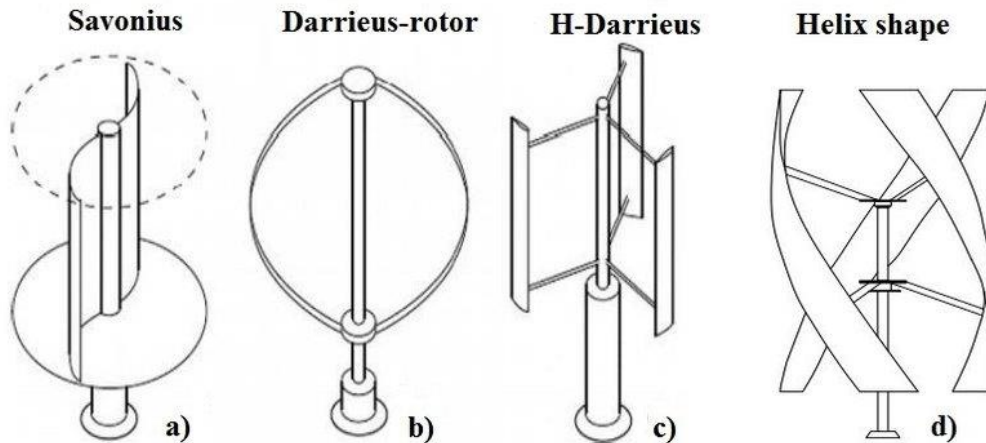
## 2.2 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα

Στις ανεμογεννήτριες αυτής της κατηγορίας ο κύριος άξονας του δρομέα είναι τοποθετημένος κάθετα ως προς το έδαφος και το σύνολο του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού είναι εγκατεστημένο στη βάση του πυλώνα. Τα πτερύγια έχουν ελικοειδή μορφή ούτως ώστε να αξιοποιείται σε ικανοποιητικό βαθμό η κινητική ενέργεια του ανέμου και να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή απόδοση του στροβίλου.

Τα συγκριτικά πλεονεκτήματα αυτού του τύπου ανεμογεννητριών είναι ότι ο η ηλεκτρική γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων είναι τοποθετημένα στο έδαφος διευκολύνοντας έτσι την επιθεώρηση και συντήρηση καθώς και ότι δεν χρειάζεται μηχανισμός περιστροφής. Στα μειονεκτήματα θα μπορούσαν να αναφερθούν ο συνολικά χαμηλότερος βαθμός απόδοσης της κατασκευής, ο οποίος οφείλεται στην τοποθέτηση του δρομέα κοντά στο έδαφος όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι μικρότερη και η δυσκολία εκκίνησης της περιστροφής η οποία απαιτεί χρήση ειδικού εξοπλισμού.



Σχήμα 2.2: Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα (Πηγή: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)) [12]

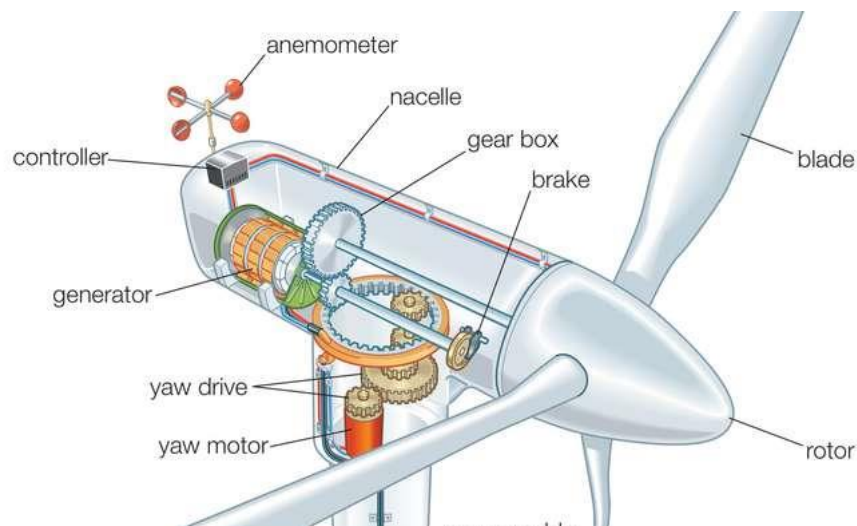


Σχήμα 2.3: Διάφορα είδη ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα (Πηγή: [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)) [13]

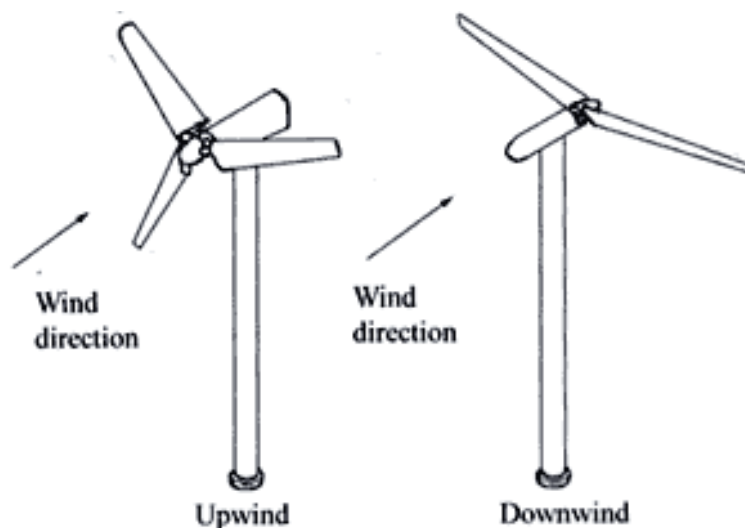
### 2.3 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα αποτελούν στις μέρες μας τον πιο διαδεδομένο τύπο ανεμογεννητριών που συνδέονται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτή την κατηγορία ανεμογεννητριών ο κύριος άξονας του δρομέα είναι τοποθετημένος οριζόντια ως προς το έδαφος και συνδέεται με πτερύγια μορφής έλικα. Επιπλέον σε αυτού του είδους τις ανεμογεννήτριες είναι απαραίτητη η ευθυγράμμιση ούτως ώστε η ροή του ανέμου να είναι παράλληλη ως προς τον άξονα περιστροφής και κάθετη ως προς τα πτερύγια. Ο αριθμός των πτερυγίων τους μπορεί να ποικίλει, προτιμάται όμως μικρός αριθμός ούτως ώστε να προκύπτει μείωση του κόστους κατασκευής και αύξηση της αποδοτικότητας.

Μία επιπλέον διάκριση των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα είναι αυτή μεταξύ προσήνεμου και υπήνεμου δρομέα. Οι προσήνεμοι δρομείς δέχονται τον άνεμο μπροστά από τον κατακόρυφο πύργο καθώς αυτός προσπίπτει αρχικά στα πτερύγια και έπειτα στον πυλώνα της ανεμογεννήτριας. Σε αυτήν την περίπτωση εξασφαλίζεται καλύτερης ποιότητας άνεμος καθώς εμφανίζονται λιγότερα φαινόμενα τύρβης, απαιτείται όμως η εγκατάσταση ενός επιπλέον μηχανισμού περιστροφής της ατράκτου έτσι ώστε ο άξονας του δρομέα να παραμένει ευθυγραμμισμένος με την κατεύθυνση του ανέμου. Αντίθετα στους υπήνεμους δρομείς η άτρακτος είναι ελεύθερη να περιστραφεί και η ροή του ανέμου συναντά τα πτερύγια αφού πρώτα διέλθει από τον πυλώνα και την άτρακτο. Σε αυτού του είδους τους δρομείς παρατηρούνται διακυμάνσεις στην ενέργεια του ανέμου με αποτέλεσμα την εμφάνιση φαινομένων τύρβης αυξημένης έντασης η οποία προκαλεί περισσότερα φορτία κόπωσης στην κατασκευή.



Σχήμα 2.4: Δομικά μέρη τυπικής ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα (Πηγή: [www.britannica.com](http://www.britannica.com))[14]



Σχήμα 2.5: Τυπική ανεμογεννήτρια προσήνεμου και υπήνεμου προσανατολισμού πτερυγίων (Πηγή: [www.mstudioblackboard.tudelft.nl](http://www.mstudioblackboard.tudelft.nl)) [15]

## 2.4 Αριθμός πτερυγίων

Μία βασική παράμετρος η οποία θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν στον σχεδιασμό των ανεμογεννητριών είναι η επιλογή του αριθμού των πτερυγίων. Η πιο διαδεδομένη περίπτωση ανεμογεννήτριας είναι αυτή με τα τρία πτερύγια. Η επιλογή στον σχεδιασμό μικρότερου αριθμού πτερυγίων εξυπηρετεί την μείωση του κόστους και του βάρους. Ωστόσο στην περίπτωση επιλογής ενός ή δύο πτερυγίων απαιτείται μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής ή χορδής ούτως ώστε να επιτευχθεί ο ίδιος βαθμός ενεργειακής απόδοσης με την περίπτωση ενός στροβίλου με τρία πτερύγια και παρόμοια διατομή. Παράλληλα η επιλογή ενός ή δύο πτερυγίων συνεπάγεται μεγαλύτερη διακύμανση στα φορτία η οποία οφείλεται στη μεταβολή της αδράνειας ανάλογα με το εάν τα πτερύγια βρίσκονται σε



οριζόντια ή κατακόρυφη θέση. Τέλος μεταβολή παρατηρείται και στην ταχύτητα του ανέμου η οποία εξαρτάται από το εάν το πτερύγιο έχει φορά προς τα πάνω ή προς τα κάτω.

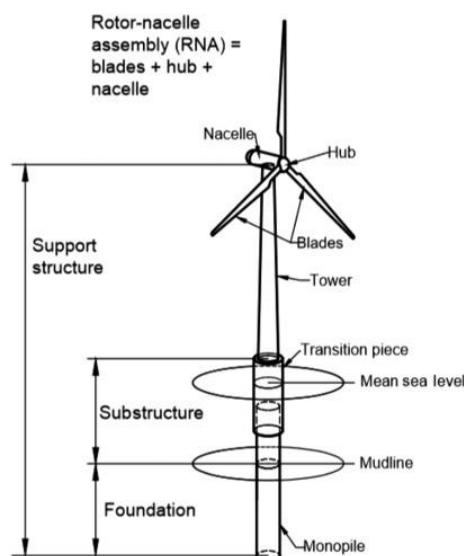


Σχήμα 2.6: Τυπική ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα με ένα, δύο και τρία πτερύγια  
(Πηγές: [www.wind-energy-the-facts.org](http://www.wind-energy-the-facts.org), [www.wind-turbine-models.com](http://www.wind-turbine-models.com), [www.terna-energy.com](http://www.terna-energy.com))  
[16], [17], [18]

## 2.5 Θεμελίωση ανεμογεννήτριας

Ένα σημαντικό θέμα στον σχεδιασμό των ανεμογεννητριών είναι η σωστή επιλογή του φορέα στήριξης και του είδους της θεμελίωσης, παράμετροι οι οποίες εξαρτώνται από τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του εδάφους και οικονομικά κριτήρια. Η κατασκευή στήριξης του δρομέα περιλαμβάνει τα ακόλουθα μέρη:

- Τον πυλώνα της ανεμογεννήτριας (tower)
- Τον φορέα στήριξης της ανεμογεννήτριας (substructure)
- Την θεμελίωση της ανεμογεννήτριας (foundation)

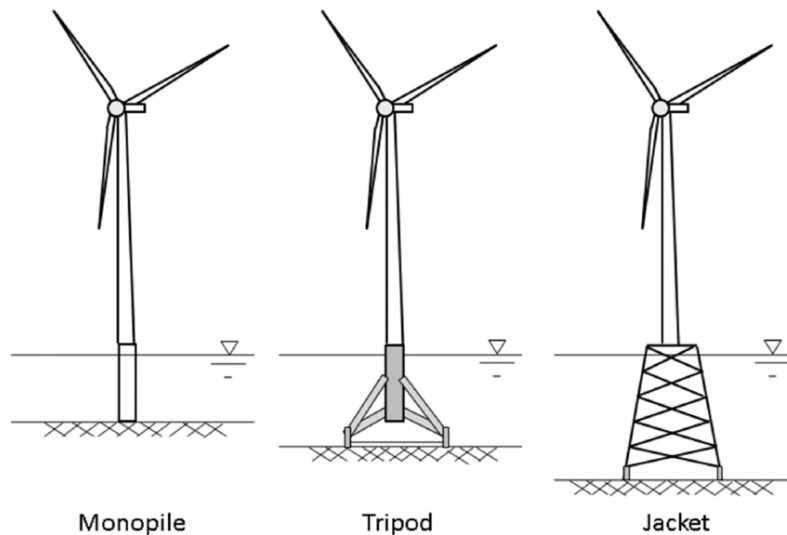


Σχήμα 2.7: Τα κύρια μέρη στήριξης μιας ανεμογεννήτριας (Πηγή: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)) [19]



Τα κυριότερα είδη φορέα στήριξης μιας ανεμογεννήτριας είναι τα ακόλουθα:

- Φορέας στήριξης μορφής μεμονωμένου πασσάλου (monopile)
- Φορέας στήριξης μορφής τριπόδου (tripod)
- Φορέας στήριξης μορφής δικτυώματος (jacket)



Σχήμα 2.8: Τα κύρια είδη φορέα στήριξης μια ανεμογεννήτριας (Πηγή: [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)) [20]

Το σύνολο των επιβαλλόμενων δυνάμεων σε μία ανεμογεννήτρια καταλήγουν στη βάση θεμελίωσης και μπορούν να αναλυθούν σε μία οριζόντια  $H$  και μία κατακόρυφη δύναμη  $V$ . Στην περίπτωση κατά την οποία το σημείο εφαρμογής αυτών των δυνάμεων δεν συμπίπτει με το γεωμετρικό κέντρο της θεμελίωσης παρατηρείται εκκεντρότητα. Στις χερσαίες ανεμογεννήτριες επιλέγεται συνήθως είτε η χρήση πλάκας θεμελίωσης είτε πασσάλων. Η χρήση πλάκας θεμελίωσης επιλέγεται όταν τα ανώτερα στρώματα εδάφους είναι αρκετά ανθεκτικά ούτως ώστε να μπορούν να μεταφερθούν σε αυτά τα επιβαλλόμενα φορτία με ασφάλεια. Αντιθέτως η χρήση πασσάλων επιλέγεται όταν η ανθεκτικότητα η οποία απαιτείται για την ασφαλή παραλαβή των φορτίων παρατηρείται στα κατώτερα στρώματα του εδάφους θεμελίωσης. Επιπλέον και στις δύο περιπτώσεις θα πρέπει να ερευνείται πόσο βαθύτερα από το επίπεδο θεμελίωσης βρίσκεται ο υδροφόρος ορίζοντας.

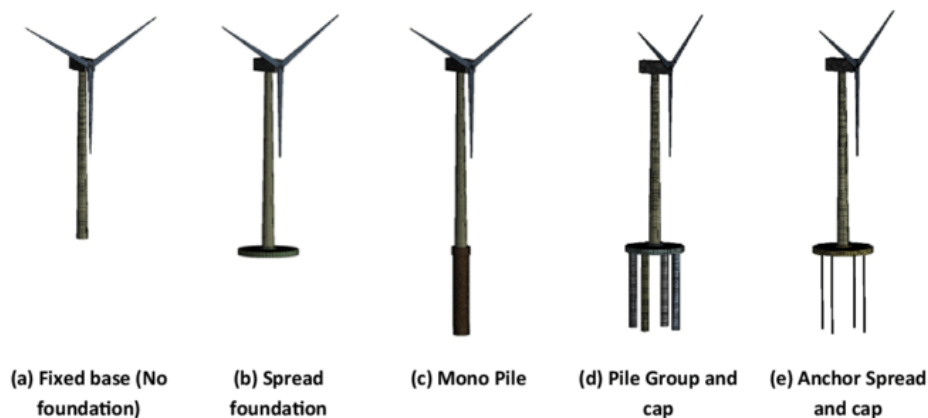
Στην επιφανειακή θεμελίωση χρησιμοποιούνται κυκλικά, ορθογωνικά, πολυγωνικά πέδιλα και απαιτείται ιδιαίτερος έλεγχος των επιφανειακών στρωμάτων σε διάφορα βάθη ούτως ώστε να αποκλείεται κάθε πιθανή επιφάνεια αστοχίας.

Στην θεμελίωση με πασσάλους χρησιμοποιούνται ένας ή περισσότεροι πάσσαλοι οι οποίοι συνδέονται μέσω μιας πλάκας έδρασης και μεταβιβάζουν τα φορτία στο έδαφος. Τα φορτία αυτά παραλαμβάνονται από το έδαφος μέσω της αντίστασης πλευρικής τριβής και της αντίστασης αιχμής στη βάση του πασσάλου. Ο συγκεκριμένος τρόπος θεμελίωσης επιλέγεται σε εδάφη μικρής αντοχής.

Τα κυριότερα είδη θεμελίωσης μιας ανεμογεννήτριας είναι τα ακόλουθα:

- Θεμελίωση μέσω θεμελίου βαρύτητας
- Θεμελίωση μέσω εμπηγνυόμενων πασσάλων
- Θεμελίωση μέσω φρεατίων αναρρόφησης

Ο τρόπος θεμελίωσης μιας ανεμογεννήτριας είναι σημαντικός παράγοντας κατά την κατασκευή μιας ανεμογεννήτριας. Για τον λόγο αυτό προϋποθέτει ολοκληρωμένη συλλογή και επεξεργασία των γεωλογικών δεδομένων και πληροφοριών της περιοχής. Παράλληλα απαιτείται η εκτέλεση γεωτεχνικών μελετών μέσω της λήψης δειγμάτων και διεξαγωγής δοκιμών στο εργαστήριο. Εξίσου σημαντική είναι η επιτόπου εξέταση της περιοχής ούτως ώστε να προκύψουν ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με την αντοχή του εδάφους θεμελίωσης.

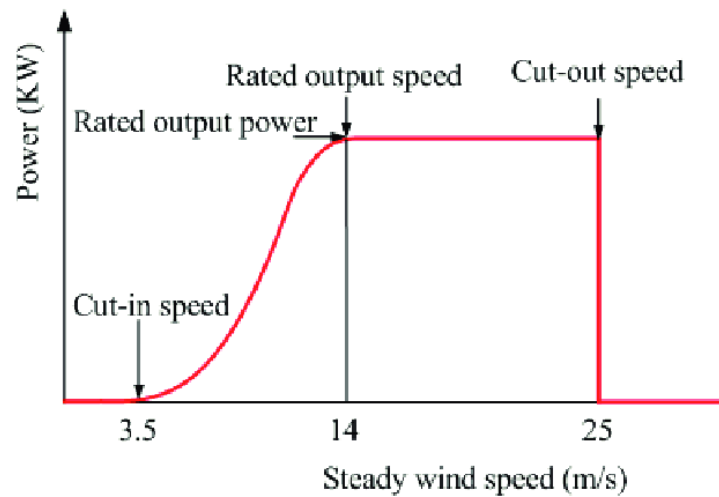


Σχήμα 2.9: Διαφορετικά είδη θεμελίωσης ανεμογεννητριών (Πηγή:www.researchgate.net) [21]

## 2.6 Βέλτιστη παραγωγή ενέργειας

Η βελτιστοποίηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας προϋποθέτει την αύξηση της αποδοτικότητας με ταυτόχρονη μείωση του συνολικού κόστους. Η πλειονότητα των ανεμογεννητριών έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε η απόδοσή τους να μεγιστοποιείται για ταχύτητα ανέμου περί τα 15m/s. Υψηλότερες ταχύτητες ανέμου εμφανίζονται πιο σπάνια συνεπώς η κατασκευή μιας ανεμογεννήτριας της οποίας η απόδοση μεγιστοποιείται σε αυτές τις ταχύτητες θα αύξανε το κόστος χωρίς ταυτόχρονη αύξηση της παραγωγής ενέργειας. Εντούτοις εάν στην υπό μελέτη περιοχή η πιθανότητα εμφάνισης ισχυρότερων ανέμων είναι υψηλή θα πρέπει να γίνονται οι απαραίτητοι έλεγχοι ούτως ώστε να αποκλειστεί το ενδεχόμενο καταστροφής του εξοπλισμού.

Μία χαρακτηριστική ιδιότητα κάθε ανεμογεννήτριας είναι η ταχύτητα ανέμου στην οποία ξεκινά η λειτουργία της και η ταχύτητα ανέμου στην οποία σταματά για αποφυγή βλαβών. Συνεπώς ορίζεται από τον κατασκευαστή της ανεμογεννήτριας ένα εύρος ταχυτήτων ανέμου μέσα στο οποίο η ανεμογεννήτρια λειτουργεί με ασφάλεια.



Σχήμα 2.10: Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου (Πηγή:www.researchgate.net) [22]

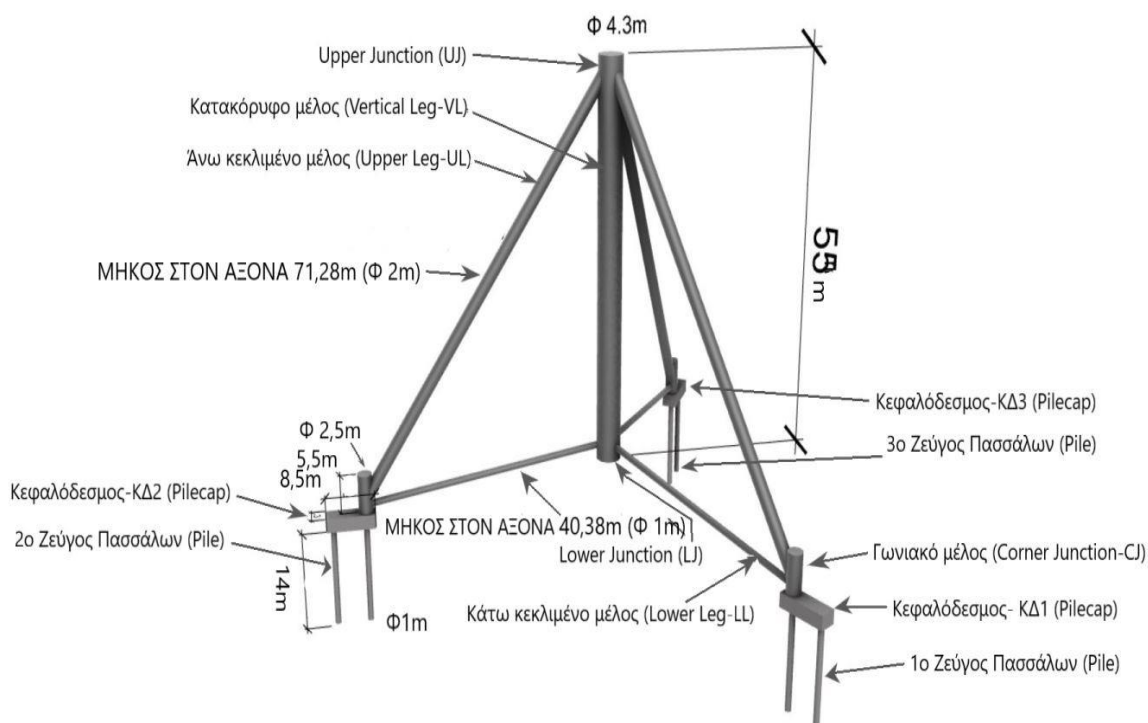
Η καμπύλη παραγωγής ενέργειας μιας ανεμογεννήτριας αντιπροσωπεύει τον τρόπο λειτουργίας της, εξάγεται από πειραματικές μετρήσεις και παρέχεται από τον κατασκευαστή. Η βέλτιστη παραγόμενη ισχύς εξαρτάται από την αποδοτικότητα και τα κόστη κατασκευής και λειτουργίας της.



### 3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΡΙΠΟΔΟΥ

#### 3.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά τριπόδου

Αρχικά με την χρήση κατάλληλου λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων προσομοιώθηκε ο υπό εξέταση φορέας προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες υπολογιστικές αναλύσεις. Ο φορέας αποτελείται από ένα κεντρικό κατακόρυφο μέλος, δύο ομάδες άνω και κάτω κεκλιμένων μελών και τρία γωνιακά μέλη. Κάτω από κάθε γωνιακό μέλος υπάρχει ένα ζεύγος πασσάλων συνδεδεμένο μέσω κεφαλόδεσμου ούτως ώστε να εξασφαλίζεται η στήριξη του φορέα όπως φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 3.1. Στο συγκεκριμένο προσομοίωμα εξετάζονται τρία βασικά σενάρια φόρτισης και εξάγονται αριθμητικά αποτελέσματα για τις μετατοπίσεις στην κορυφή του τριπόδου και των κεφαλόδεσμων καθώς και για τα εντατικά μεγέθη των επιμέρους μελών μέσω των οποίων εκτιμάται η συνολική απόκριση της κατασκευής.



Σχήμα 3.1: Γεωμετρική απεικόνιση τριπόδου και επιμέρους μελών

#### 3.2 Διατομές

Η ομάδα άνω κεκλιμένων, κάτω κεκλιμένων, γωνιακών μελών καθώς και το κατακόρυφο μέλος του τριπόδου έχουν κοίλη κυκλική διατομή. Οι πάσσαλοι έχουν κυκλικές συμπαγείς διατομές σκυροδέματος ενώ οι κεφαλόδεσμοι συμπαγείς ορθογωνικές διατομές σκυροδέματος. Οι διαστάσεις των επιμέρους μελών του φορέα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον ακόλουθο πίνακα.

<b>PART</b>	<b>LENGTH (mm)</b>	<b>D (mm)</b>	<b>t (mm)</b>
UJ	6500	4300	60
VL1	2000	4300	40
VL2	2000	4300	39
VL3	2000	4300	38
VL4	2000	4300	37
VL5	2000	4300	36
VL6	2000	4300	35
VL7	2000	4300	34
VL8	2000	4300	33
VL9	2000	4300	32
VL10	2000	4300	31
VL11	2000	4300	30
VL12	2000	4300	29
VL13	2000	4300	28
VL14	2000	4300	27
VL15	2000	4300	26
VL16	2000	4300	25
VL17	2000	4300	24
VL18	2000	4300	23
VL19	2000	4300	22
VL20	2000	4300	21
VL21	2000	4300	20
VL22	2000	4300	19
VL23	2000	4300	18
LJ	2500	4300	30
UL1	3831.36	2000	100
UL2	2475	2000	40
UL3	60272.24	2000	20
UL4	2475	2000	40
UL5	2227.53	2000	100
LL1	2170.22	1000	50
LL2	1068.75	1000	25
LL3	34342.83	1000	10
LL4	1532.78	1000	25
LL5	1261.76	1000	50
CJ	5500	2500	30
CORNER_LEG_INNER	1000	1000	
PILE	1000	1000	
PILE_INNER	1000	1000	
PILE_CAP	8500X3000		2000

Πίνακας 3.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά επιμέρους μελών τριπόδου

### 3.3 Υλικά

	Weight per unit Volume (kN/m <sup>3</sup> )	E (GPa)	Poisson (ν)	G (GPa)	f <sub>y</sub> (MPa)	f <sub>u</sub> (MPa)	f <sub>c</sub> (MPa)
S355	76,9729	210	0,3	80,769	355	510	
B500	76,9729	200			500	620,52	
C25/30	24,99	31	0,2	12,9			25

Πίνακας 3.2: Μηχανικές ιδιότητες υλικών

### 3.4 Θεμελίωση

#### 3.4.1 Συνοριακές συνθήκες

Στο συγκεκριμένο προσομοίωμα επιλέχθηκε να περιοριστεί η κατακόρυφη μετακίνηση στους κατώτατους κόμβους των πασσάλων θεμελίωσης.

#### 3.4.2 Προσομοίωση εδάφους

Στο συγκεκριμένο προσομοίωμα επιλέχθηκε η προσομοίωση του εδάφους με εισαγωγή ελατηρίων μη γραμμικής συμπεριφοράς κατά μήκος των γραμμικών στοιχείων του πασσάλου και του κεφαλόδεσμου. Πιο συγκεκριμένα ορίστηκε ο νόμος μη γραμμικής συμπεριφοράς p-γ του ελατηρίου στις δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις (ακτινική, εφαπτομενική). Η στιβαρότητα των ελατηρίων στο συγκεκριμένο μοντέλο στο οποίο εξετάζεται η περίπτωση πολύ στιφρής αργίλου παραμένει σταθερή με την αύξηση του βάθους.

Η καμπύλη p-γ μέσω της οποίας περιγράφεται η μη γραμμική συμπεριφορά των ελατηρίων για την περίπτωση πολύ στιφρής αργίλου εξάγεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{p}{p_u} = 0.5 \left( \frac{y}{y_c} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (p \leq p_u) \quad (1) \quad [23], \text{ εξ. (9.36), σελ. 519}$$

Η τιμή του οριακού φορτίου  $p_u$  μπορεί να υπολογιστεί βάσει διαφόρων προτάσεων μία εκ των οποίων είναι η ακόλουθη (Broms):

$$p_u = 9c_u d \quad \text{όπου} \quad (2) \quad [23], \text{ σελ. 518}$$

$c_u$  η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους στη συγκεκριμένη στάθμη [23], σελ. 491, πιν. 9.01 και  $d$  η διάμετρος του πασσάλου. Στην περίπτωση στιφρών αργίλων η τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής παραμένει σταθερή με την αύξηση του βάθους με αποτέλεσμα η τιμή της οριακής φόρτισης να εξαρτάται αποκλειστικά από την τιμή της διαμέτρου.

Η τιμή της μετατόπισης  $y_c$  η οποία αντιστοιχεί σε τιμή φορτίου  $p=0.5p_u$  μπορεί να υπολογισθεί βάσει του τύπου:

$$y_c = y_{50} = 2.5\varepsilon_{50}d \quad (3) \quad [23], \text{ σελ. 518}$$

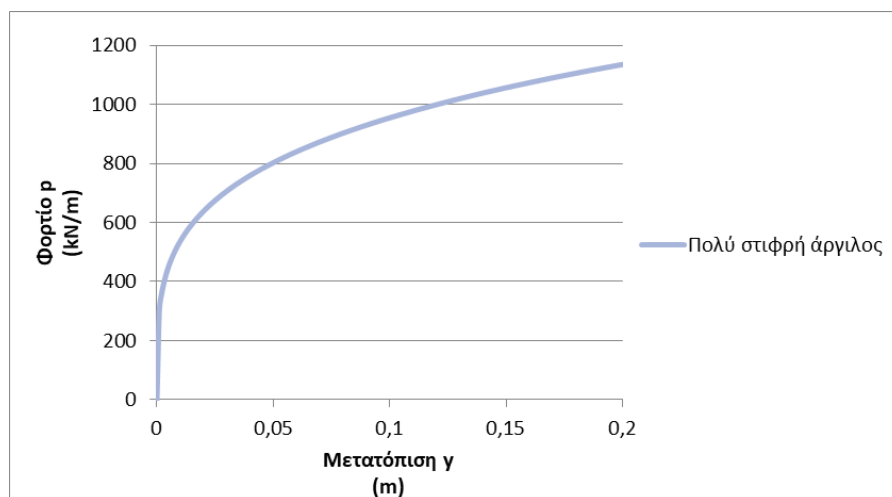
Το μέγεθος  $\varepsilon_{50}$  μπορεί να υπολογισθεί από κατάλληλη δοκιμή τριαξονικής θλίψης ή εναλλακτικά να εκτιμηθεί εντός των συνηθών ορίων  $\varepsilon_{50}=(0.5 \div 1)10^{-2}$  [23], σελ. 519

Οι τιμές των προαναφερθεισών παραμέτρων για την περίπτωση εδάφους πολύ σιφρής αργίλου η οποία εξετάζεται στο συγκεκριμένο προσομοίωμα παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

d (m)	$\varepsilon_{50}$	$\gamma_c$ (m)	$c_u$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\rho_u$ (kN/m)
1	0.01	0.025	150	1350

Πίνακας 3.3: Πίνακας τιμών εδαφικών χαρακτηριστικών περίπτωσης πολύ σιφρής αργίλου κατά μήκος του πασσάλου στην ακτινική, εφαπτομενική διεύθυνση

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (1) την τιμή της μετατόπισης  $\gamma$  με βήμα  $\gamma=0.01\text{m}$  έως  $\gamma=0.2\text{m}$  προκύπτει η ακόλουθη καμπύλη  $p-\gamma$  για την περίπτωση πολύ σιφρής αργίλου.



Σχήμα 3.2: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης κατά μήκος του πασσάλου στην ακτινική, εφαπτομενική διεύθυνση για την περίπτωση πολύ σιφρής αργίλου

Για την περίπτωση των ελατηρίων κατά μήκος του κεφαλόδεσμου η εισαγωγή του νόμου μη γραμμικής συμπεριφοράς στην περιφερειακή διεύθυνση πραγματοποιήθηκε μέσω αντικατάστασης στις εξισώσεις (2), (3) της διαμέτρου  $d$  του πασσάλου με το ύψος  $h=2\text{m}$  του κεφαλόδεσμου. Η εισαγωγή του νόμου μη γραμμικής συμπεριφοράς στην ακτινική διεύθυνση πραγματοποιήθηκε μέσω αντικατάστασης στις εξισώσεις (2),(3) της διαμέτρου  $d$  του πασσάλου με το πλάτος  $b$  του κεφαλόδεσμου και την εισαγωγή των συγκεκριμένων ελατηρίων κατά μήκος του γραμμικού τμήματος του εσωτερικού πασσάλου το οποίο εισέρχεται στον κεφαλόδεσμο.



Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην ακτινική και εφαπτομενική διεύθυνση παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στους ακόλουθους πίνακες.

#### Ακτινική διεύθυνση

b (m)	$\epsilon_{50}$	$\gamma_c$ (m)	$c_u$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\rho_u$ (kN/m)
3	0.01	0.075	150	4050

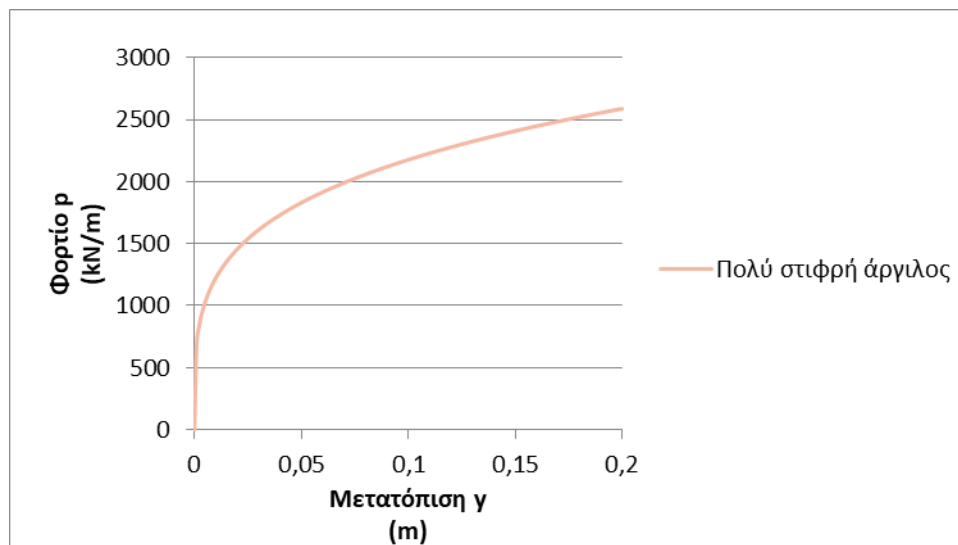
Πίνακας 3.4: Πίνακας τιμών εδαφικών χαρακτηριστικών περίπτωσης πολύ στιφρής αργίλου κατά μήκος του γραμμικού στοιχείου που εισέρχεται στον κεφαλόδεσμο στην ακτινική διεύθυνση

#### Εφαπτομενική διεύθυνση

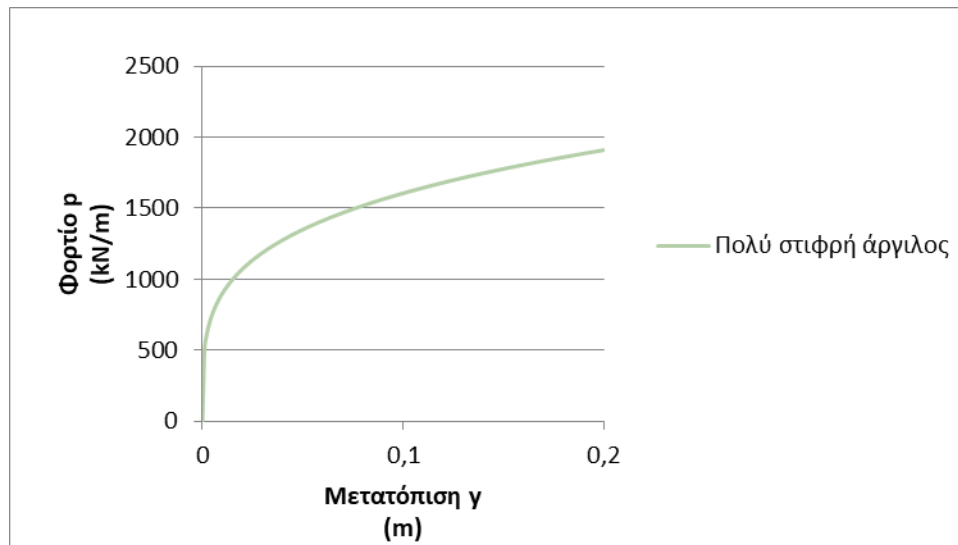
h (m)	$\epsilon_{50}$	$\gamma_c$ (m)	$c_u$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\rho_u$ (kN/m)
2	0.01	0.05	150	2700

Πίνακας 3.5: Πίνακας τιμών εδαφικών χαρακτηριστικών περίπτωσης πολύ στιφρής αργίλου κατά μήκος του κεφαλόδεσμου στην εφαπτομενική διεύθυνση

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (1) την τιμή της μετατόπισης  $\gamma$  με βήμα  $\gamma=0.001\text{m}$  έως  $\gamma=0.2\text{m}$  προκύπτουν οι ακόλουθες καμπύλες  $p$ - $\gamma$  στην ακτινική, εφαπτομενική διεύθυνση για την περίπτωση πολύ στιφρής αργίλου.



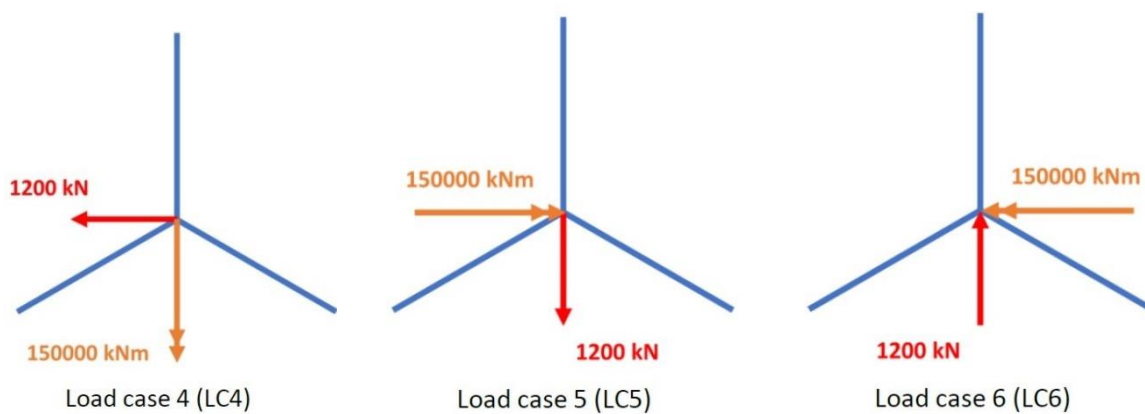
Σχήμα 3.3: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης ελατηρίων κατά μήκος του εισερχόμενου γραμμικού τμήματος στον κεφαλόδεσμο στην ακτινική διεύθυνση για την περίπτωση πολύ στιφρής αργίλου



Σχήμα 3.4: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης ελατηρίων κατά μήκος του κεφαλόδεσμου στην εφαπτομενική διεύθυνση για την περίπτωση πολύ στιφρής αργίλου

### 3.5 Φορτίσεις

Τα σενάρια φόρτισης που εφαρμόστηκαν στο προσομοίωμα είναι αντιπροσωπευτικά των μεγεθών τα οποία ασκούνται στη βάση του πυλώνα μιας ανεμογεννήτριας ύψους 100-120m και παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.5: Σχηματική απεικόνιση σεναρίων φόρτισης LC4,LC5,LC6

	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Mx (kNm)	My(kNm)	Mz (kNm)
LC4	-1200		-8915		-150000	3170
LC5		-1200	-8915	150000		3170
LC6		1200	-8915	-150000		3170

Πίνακας 3.6: Πίνακας τιμών δυνάμεων και ροπών των σεναρίων φόρτισης LC4,LC5,LC6

Η εισαγωγή των σεναρίων φόρτισης στο προσομοίωμα πραγματοποιήθηκε με την δημιουργία αρχικά προτύπων φόρτισης και έπειτα σεναρίων φόρτισης μη γραμμικής ανάλυσης.

Οι συνδυασμοί των επιμέρους σεναρίων φόρτισης που εφαρμόστηκαν είναι οι ακόλουθοι:

### **1ος Συνδυασμός**

COMB4: 1.35XTRIPOD SELF WEIGHT + LC4

### **2ος Συνδυασμός**

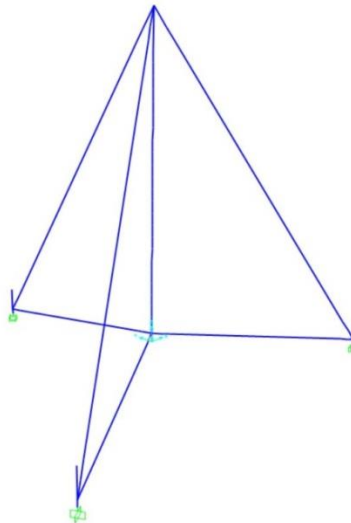
COMB5: 1.35XTRIPOD SELF WEIGHT + LC5

### **3ος Συνδυασμός**

COMB6: 1.35XTRIPOD SELF WEIGHT + LC6

## **3.6 Ιδιομορφική Ανάλυση**

Στην συγκεκριμένη ανάλυση επιλέχθηκε η αφαίρεση από το προσομοίωμα των πασσάλων, κεφαλοδέσμων, ελατηρίων, η πάκτωση των κατώτατων κόμβων των γωνιακών μελών όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα και κατόπιν η εκτέλεση της ιδιομορφικής ανάλυσης. Επιλέχθηκε η συγκεκριμένη μέθοδος διότι τα εδαφικά ελατήρια μη γραμμικής συμπεριφοράς των πασσάλων και των κεφαλόδεσμων δεν είναι συμβατά με την γραμμική ιδιομορφική ανάλυση.



Σχήμα 3.6: Σχηματική απεικόνιση φορέα ιδιομορφικής ανάλυσης

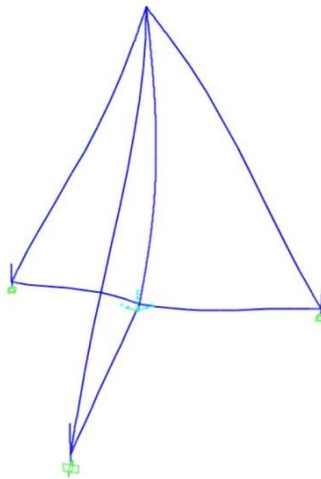
Στον παρακάτω πίνακα εμφανίζονται οι 12 πρώτες ιδιομορφές του φορέα. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι:

1<sup>η</sup> Ιδιομορφή: η οποία είναι μεταφορική κατά τη διεύθυνση Y με ποσοστό ενεργοποιούμενης μάζας του φορέα 49.54%.

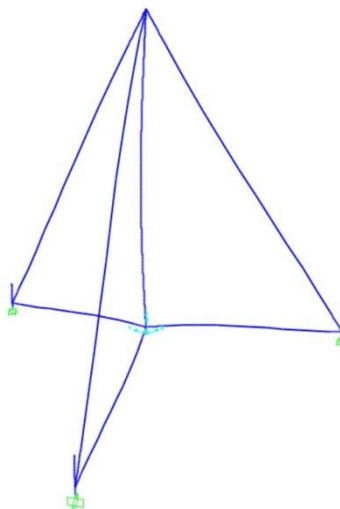
2<sup>η</sup> Ιδιομορφή: η οποία είναι μεταφορική κατά τη διεύθυνση X με ποσοστό ενεργοποιούμενης μάζας του φορέα 49.54%.

Units: As Noted		Modal Participating Mass Ratios													
OutputCase	StepType Text	StepNum	Period Sec	UX Unitless	UY Unitless	UZ Unitless	SumUX Unitless	SumUY Unitless	SumUZ Unitless	RX Unitless	RY Unitless	RZ Unitless	SumRX Unitless	SumRY Unitless	SumRZ Unitless
MODAL	Mode	1	0,293757	0,08125	0,49542	0	0,08125	0,49542	0	0,11535	0,01892	0	0,11535	0,01892	0
MODAL	Mode	2	0,293757	0,49542	0,08125	0	0,57866	0,57866	0	0,01892	0,11535	2,881E-19	0,13427	0,13427	2,975E-19
MODAL	Mode	3	0,1945	0	1,385E-20	0	0,57866	0,57866	0	1,145E-20	0	0,01152	0,13427	0,13427	0,01152
MODAL	Mode	4	0,154735	0,00025	0,02714	3,044E-20	0,57891	0,6038	3,993E-20	0,23099	0,0021	7,678E-18	0,36526	0,13637	0,01152
MODAL	Mode	5	0,154735	0,02714	0,00025	9,618E-19	0,60405	0,60405	1,002E-18	0,0021	0,23099	4,251E-17	0,36736	0,36736	0,01152
MODAL	Mode	6	0,135055	6,361E-18	7,147E-17	0,67577	0,60405	0,60405	0,67577	4,342E-17	1,285E-17	1,714E-16	0,36736	0,36736	0,01152
MODAL	Mode	7	0,080907	0,07653	0,00861	3,407E-17	0,68058	0,61266	0,67577	0,00296	0,02629	4,159E-18	0,37032	0,39365	0,01152
MODAL	Mode	8	0,080907	0,00861	0,07653	8,413E-16	0,68919	0,68919	0,67577	0,02629	0,00296	3,993E-16	0,39661	0,39661	0,01152
MODAL	Mode	9	0,057757	0,0016	0,00291	1,832E-15	0,6908	0,6921	0,67577	0,02024	0,01115	1,585E-17	0,41685	0,40776	0,01152
MODAL	Mode	10	0,057757	0,00291	0,0016	5,852E-16	0,69371	0,69371	0,67577	0,01115	0,02024	1,228E-15	0,428	0,428	0,01152
MODAL	Mode	11	0,051218	1,831E-15	7,22E-16	7,834E-17	0,69371	0,69371	0,67577	1,655E-15	8,804E-16	0,00116	0,428	0,428	0,01268
MODAL	Mode	12	0,049624	0,00371	0,06358	5,836E-17	0,69742	0,75729	0,67577	0,04643	0,00271	7,048E-17	0,47442	0,43071	0,01268

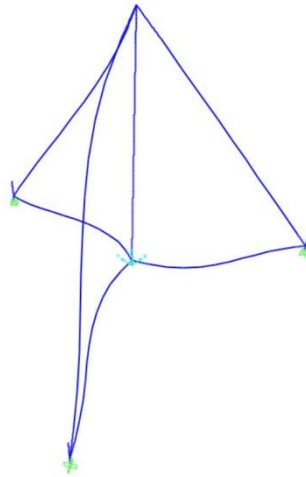
Σχήμα 3.7: Πίνακας ιδιομορφών και ποσοστά συμμετοχής μαζών ιδιομορφικής ανάλυσης φορέα Ακολουθούν εικόνες του παραμορφωμένου φορέα στις 3 πρώτες ιδιομορφές ταλάντωσης



Σχήμα 3.8: Σχηματική απεικόνιση παραμορφωμένου φορέα 1<sup>ης</sup> ιδιομορφής



Σχήμα 3.9: Σχηματική απεικόνιση παραμορφωμένου φορέα 2<sup>ης</sup> ιδιομορφής

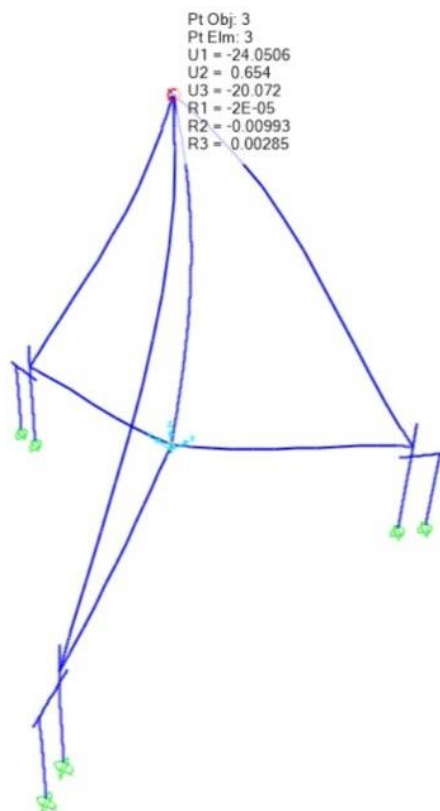


Σχήμα 3.10: Σχηματική απεικόνιση παραμορφωμένου φορέα 3<sup>ης</sup> ιδιομορφής

### 3.7 Αποτελέσματα στατικών αναλύσεων φορέα

#### 3.7.1 Συνδυασμός φόρτισης COMB4

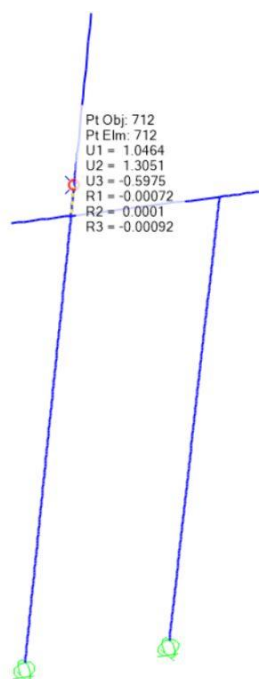
Τιμές μετακινήσεων στην κορυφή του τριπόδου συνδυασμού φόρτισης COMB4



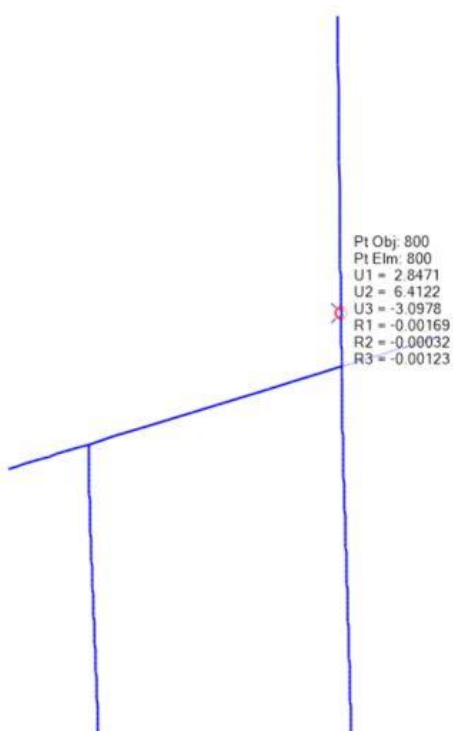
Σχήμα 3.11: Σχηματική απεικόνιση παραμορφωμένου φορέα συνδυασμού φόρτισης COMB4 και μετακινήσεων στην κορυφή του τριπόδου. Οι τιμές των μετακινήσεων εμφανίζονται σε mm.

Οι τοπικοί άξονες σε κάθε έναν από τους τρεις κεφαλόδεσμούς είναι ορισμένοι με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε ο άξονας 1 να ταυτίζεται με την ακτινική διεύθυνση, ο άξονας 2 να ταυτίζεται με την περιφερειακή διεύθυνση και ο άξονας 3 με την κατακόρυφη διεύθυνση.

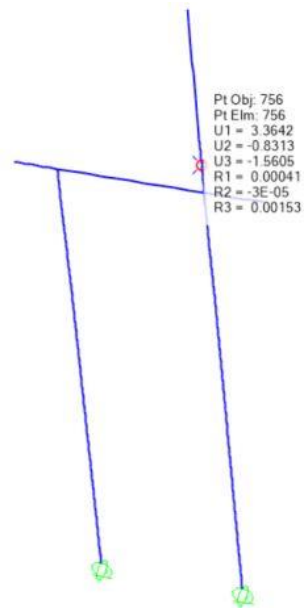
Τιμές μετακινήσεων στην κορυφή κεφαλόδεσμου συνδυασμού φόρτισης COMB4



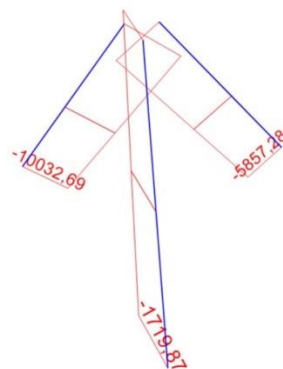
Σχήμα 3.12: Απεικόνιση μετακινήσεων στην κορυφή κεφαλόδεσμου ΚΔ1 συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των μετακινήσεων εμφανίζονται σε mm.



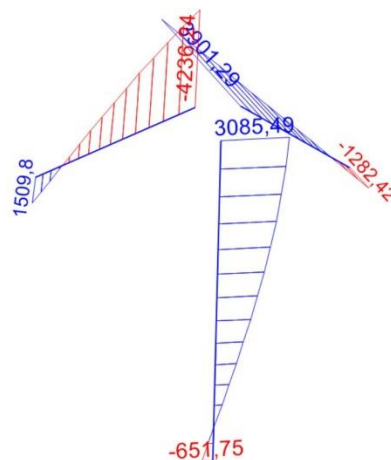
Σχήμα 3.13: Απεικόνιση μετακινήσεων στην κορυφή κεφαλόδεσμου ΚΔ2 συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των μετακινήσεων εμφανίζονται σε mm.



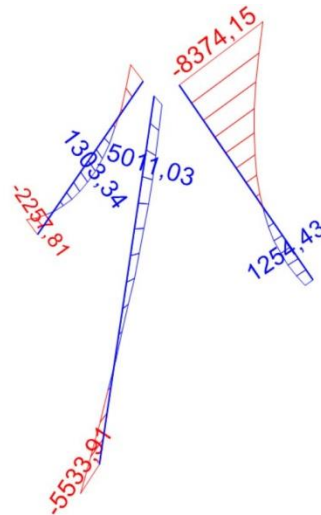
Σχήμα 3.14: Απεικόνιση μετακινήσεων στην κορυφή κεφαλόδεσμου ΚΔ3 συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των μετακινήσεων εμφανίζονται σε mm.



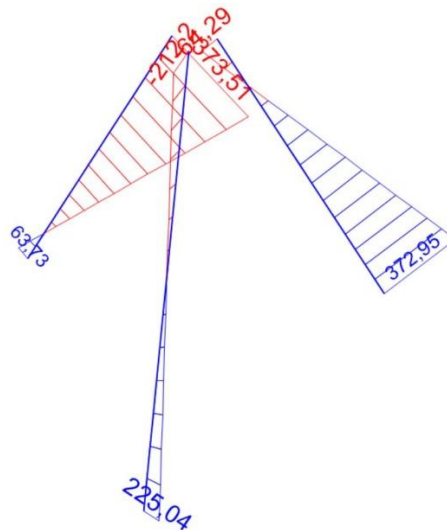
Σχήμα 3.15: Απεικόνιση διαγράμματος αξονικών δυνάμεων μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



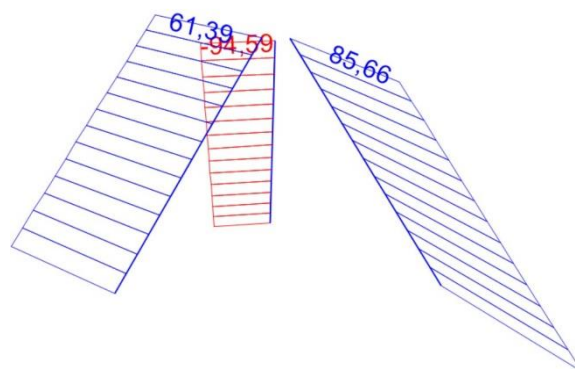
Σχήμα 3.16: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M2-2 μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



Σχήμα 3.17: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M3-3 μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.

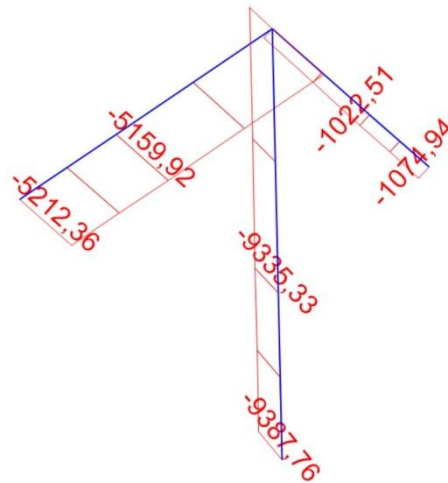


Σχήμα 3.18: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V2-2 μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.

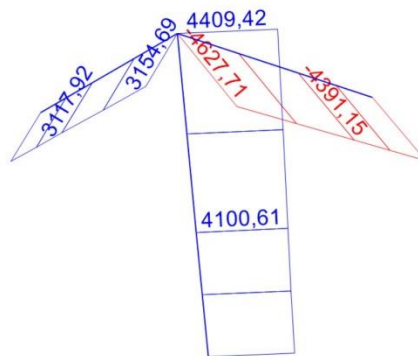


Σχήμα 3.19: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V3-3 μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.

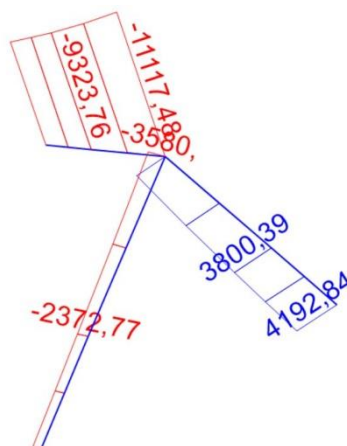




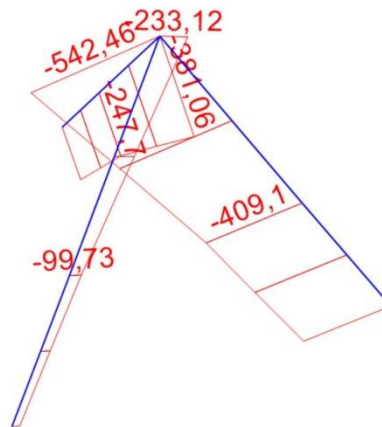
Σχήμα 3.20: Απεικόνιση διαγράμματος αξονικών δυνάμεων άνω ακραίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



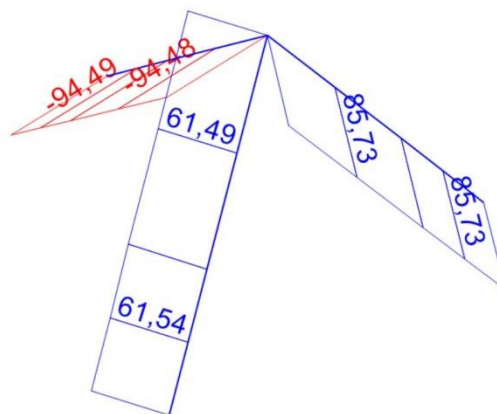
Σχήμα 3.21: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M2-2 άνω ακραίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



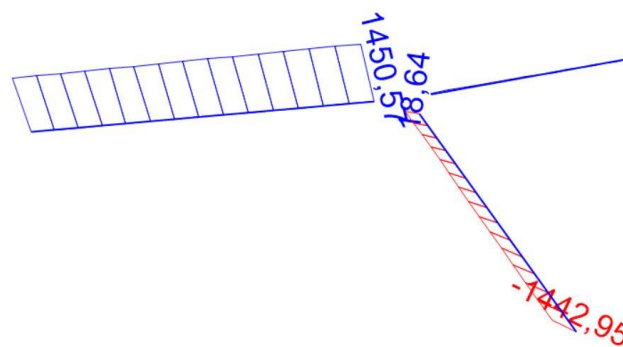
Σχήμα 3.22: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M3-3 άνω ακραίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



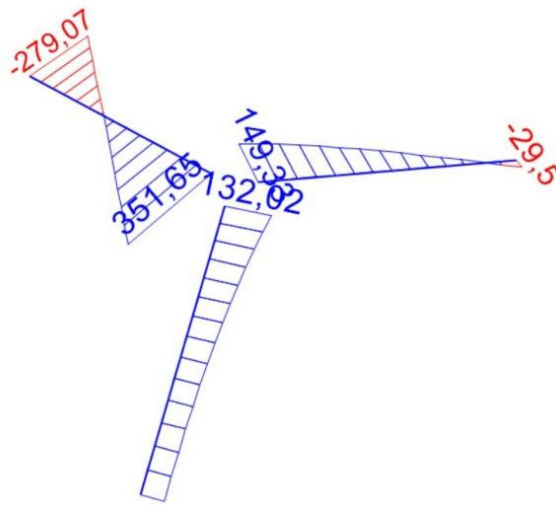
Σχήμα 3.23: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V2-2 άνω ακραίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



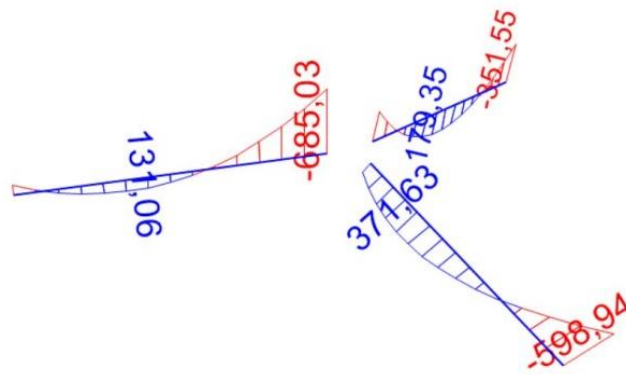
Σχήμα 3.24: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V3-3 άνω ακραίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



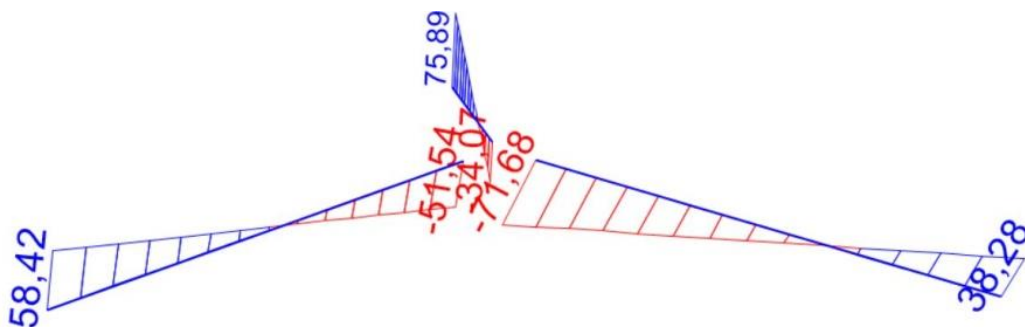
Σχήμα 3.25: Απεικόνιση διαγράμματος αξονικών δυνάμεων μεσαίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



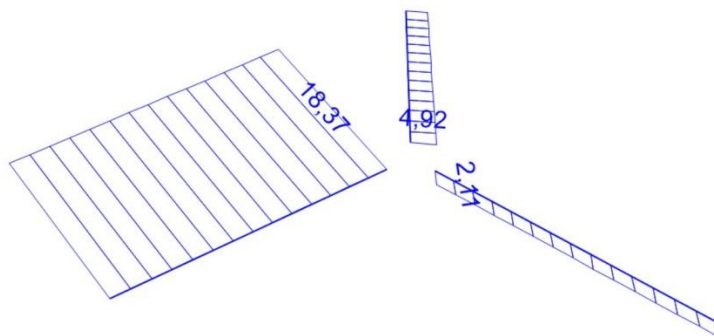
Σχήμα 3.26: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M2-2 μεσαίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



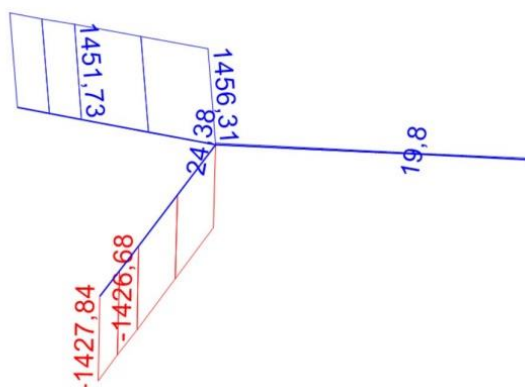
Σχήμα 3.27: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M3-3 μεσαίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



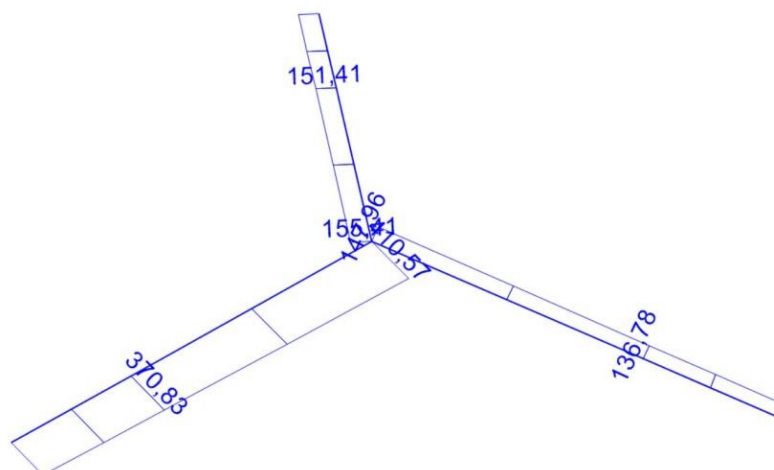
Σχήμα 3.28: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V2-2 μεσαίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



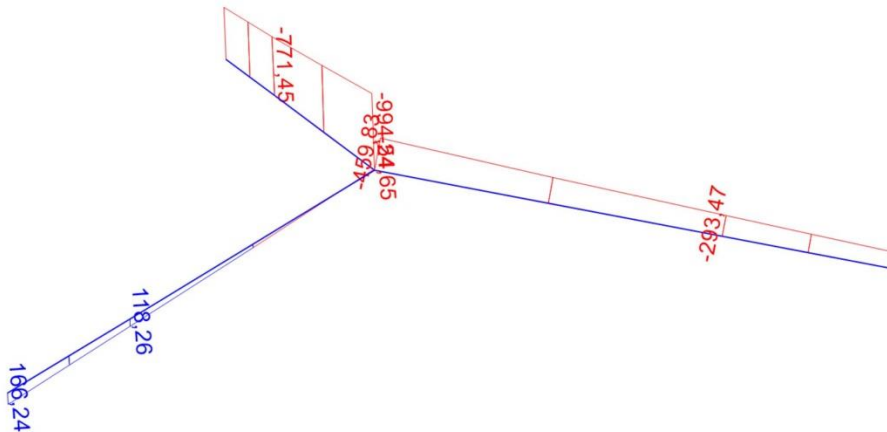
Σχήμα 3.29: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V3-3 μεσαίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



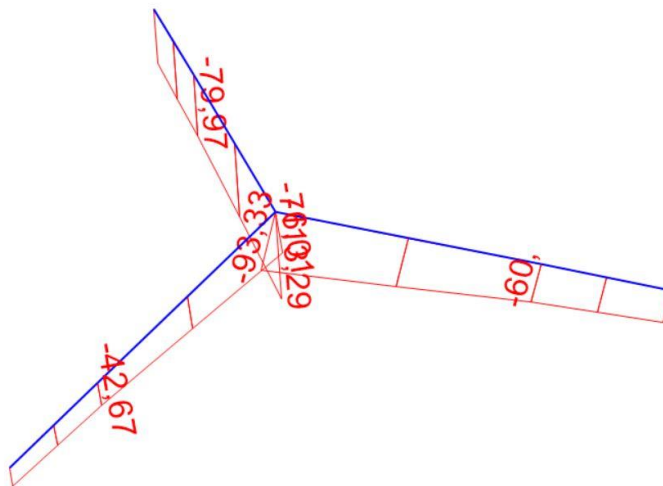
Σχήμα 3.30: Απεικόνιση διαγράμματος αξονικών δυνάμεων άνω ακραίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



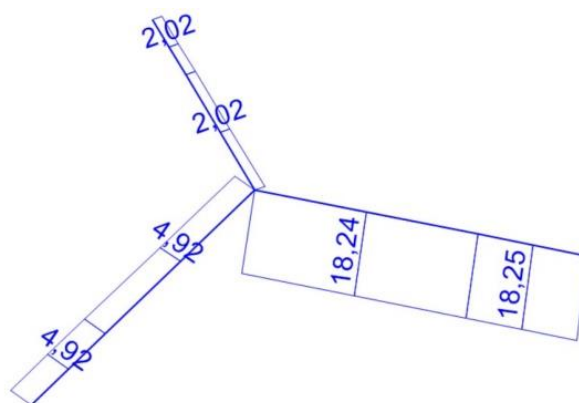
Σχήμα 3.31: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M2-2 άνω ακραίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



Σχήμα 3.32: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M3-3 άνω ακραίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



Σχήμα 3.33: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V2-2 άνω ακραίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



Σχήμα 3.34: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V3-3 άνω ακραίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



Σχήμα 3.35: Απεικόνιση διαγράμματος αξονικών δυνάμεων κατακόρυφου μέλους συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



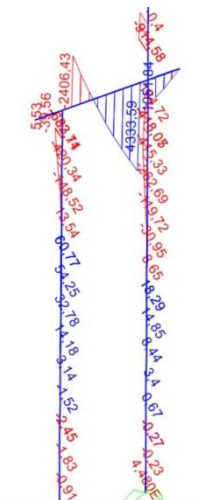
Σχήμα 3.36: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M2-2 κατακόρυφου μέλους συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



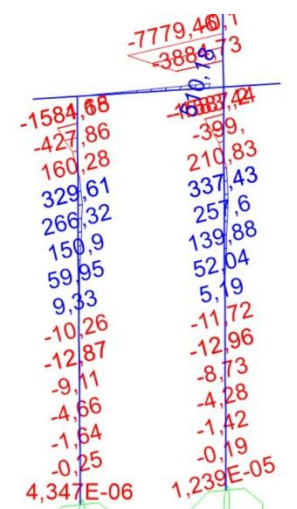




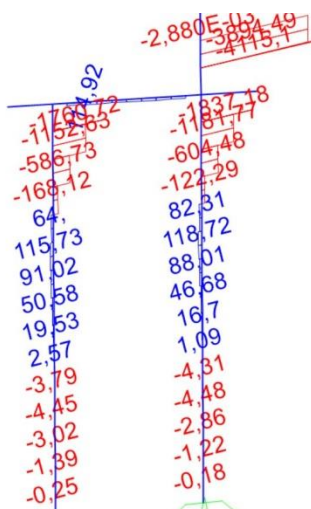




Σχήμα 3.46: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M2-2 2<sup>ου</sup> ζεύγους πασσάλων συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



Σχήμα 3.47: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M3-3 2<sup>ου</sup> ζεύγους πασσάλων συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.

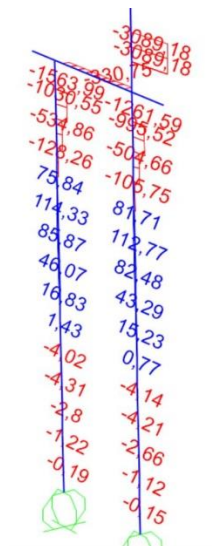


Σχήμα 3.48: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V2-2 2<sup>ου</sup> ζεύγους πασσάλων συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.

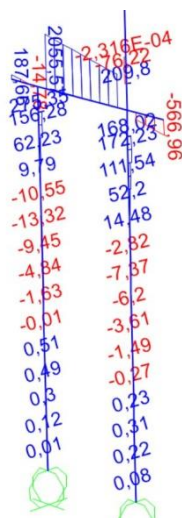




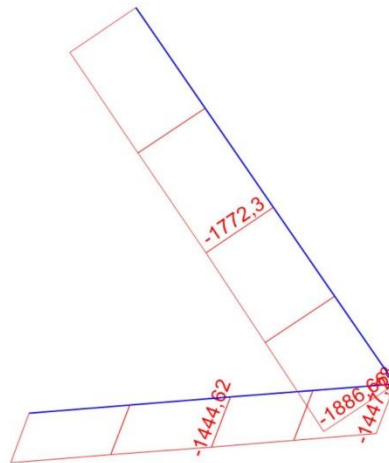
Σχήμα 3.52: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M3-3 3<sup>ου</sup> ζεύγους πασσάλων συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



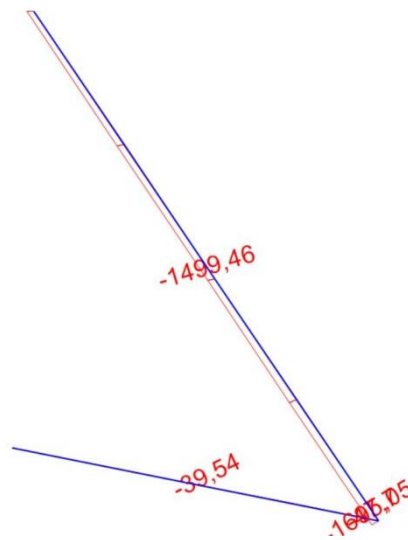
Σχήμα 3.53: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V2-2 3<sup>ου</sup> ζεύγους πασσάλων συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



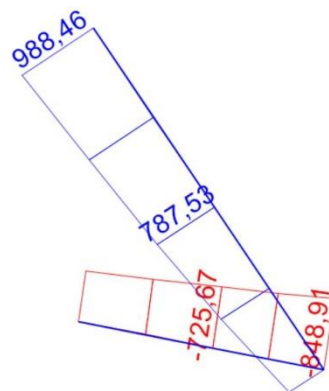
Σχήμα 3.54: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V3-3 3<sup>ου</sup> ζεύγους πασσάλων συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



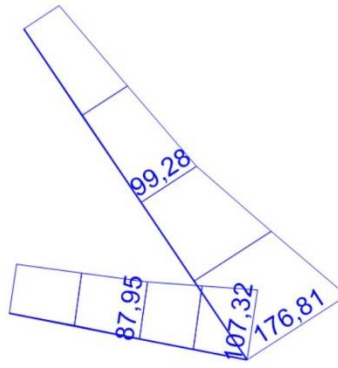
Σχήμα 3.55: Απεικόνιση διαγράμματος αξονικών δυνάμεων 1<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



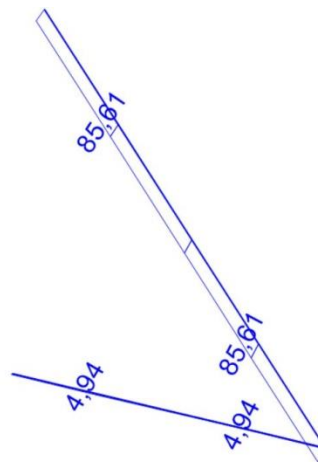
Σχήμα 3.56: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M2-2 1<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



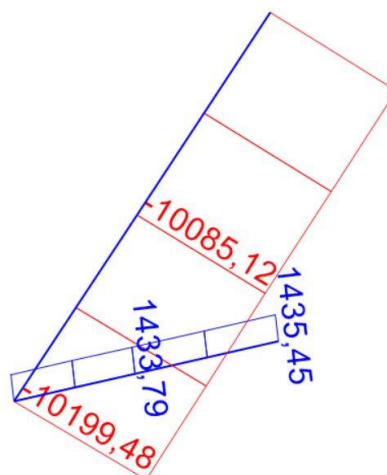
Σχήμα 3.57: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M3-3 1<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



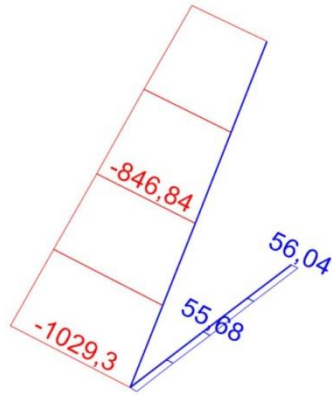
Σχήμα 3.58: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V2-2 1<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



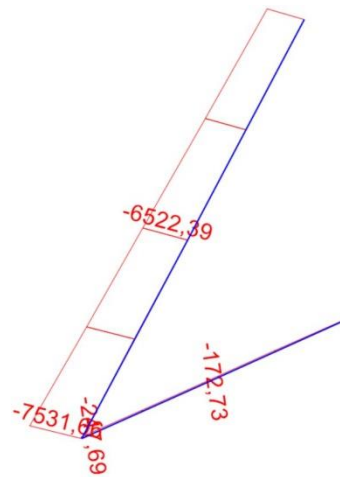
Σχήμα 3.59: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V3-3 1<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



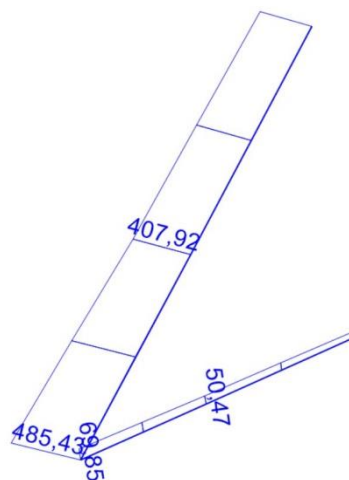
Σχήμα 3.60: Απεικόνιση διαγράμματος αξονικών δυνάμεων 2<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



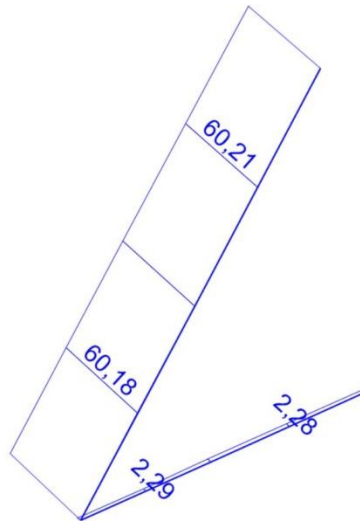
Σχήμα 3.61: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M2-2 2<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



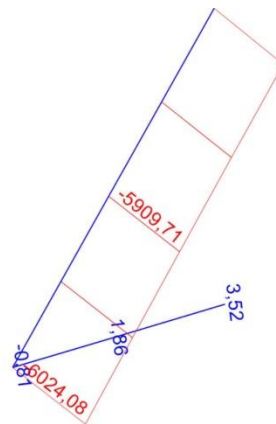
Σχήμα 3.62: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M3-3 2<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



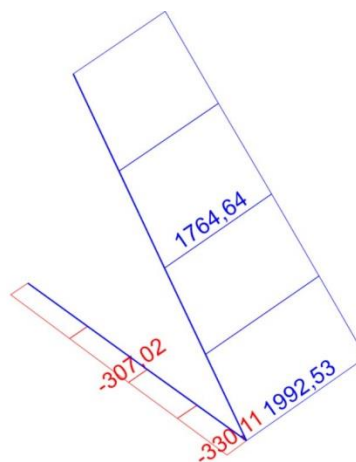
Σχήμα 3.63: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V2-2 2<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



Σχήμα 3.64: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V3-3 2<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.

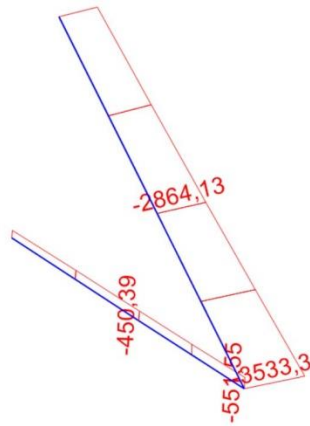


Σχήμα 3.65: Απεικόνιση διαγράμματος αξονικών δυνάμεων 3<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.

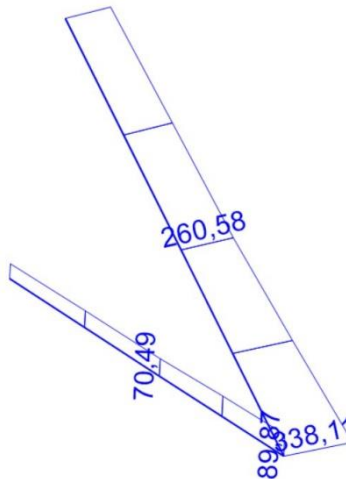


Σχήμα 3.66: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M2-2 3<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.

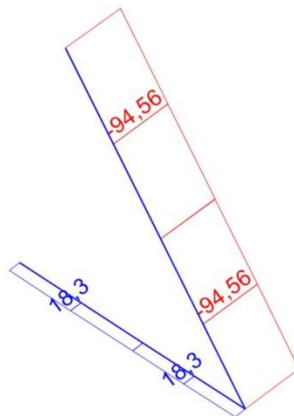




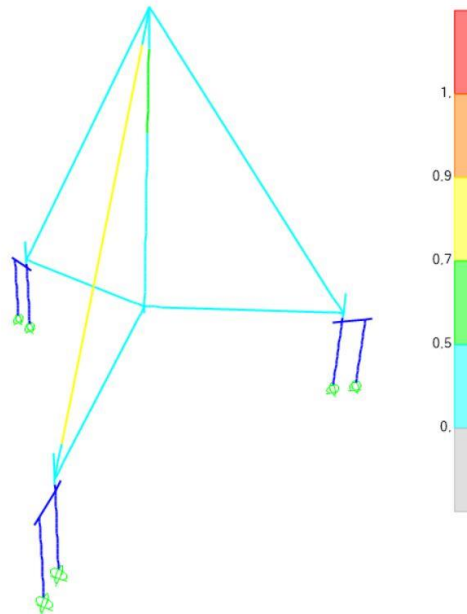
Σχήμα 3.67: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M3-3 3<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



Σχήμα 3.68: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V2-2 3<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



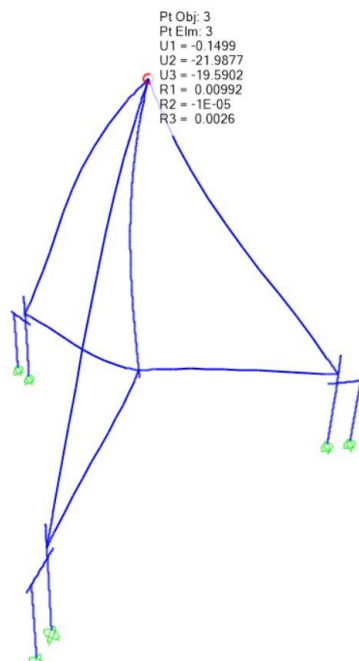
Σχήμα 3.69: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V3-3 3<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB4. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



Σχήμα 3.70: Σχηματική απεικόνιση βαθμού αξιοποίησης φορέα συνδυασμού φόρτισης COMB4.

### 3.7.2 Συνδυασμός φόρτισης COMB5

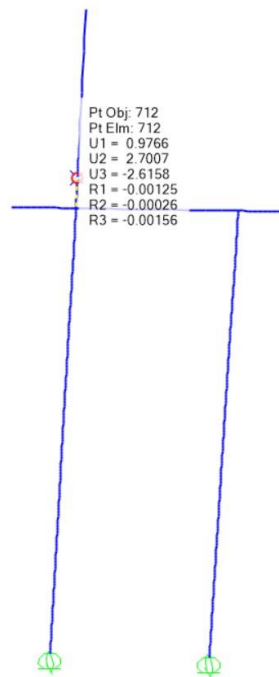
Τιμές μετακινήσεων στην κορυφή του τριπόδου συνδυασμού φόρτισης COMB5



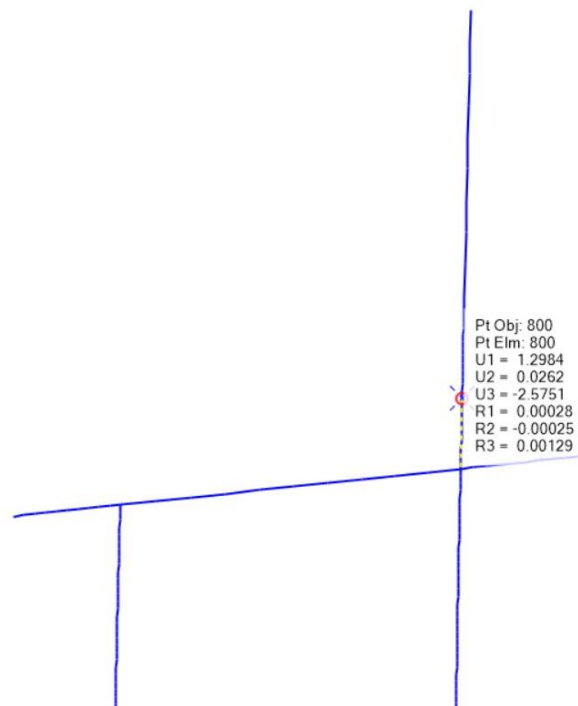
Σχήμα 3.71: Σχηματική απεικόνιση παραμορφωμένου φορέα συνδυασμού φόρτισης COMB5 και μετακινήσεων στην κορυφή του τριπόδου. Οι τιμές των μετακινήσεων απεικονίζονται σε mm.

Οι τοπικοί άξονες σε κάθε έναν από τους τρεις κεφαλόδεσμους είναι ορισμένοι με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε ο άξονας 1 να ταυτίζεται με την ακτινική διεύθυνση, ο άξονας 2 να ταυτίζεται με την περιφερειακή διεύθυνση και ο άξονας 3 με την κατακόρυφη διεύθυνση.

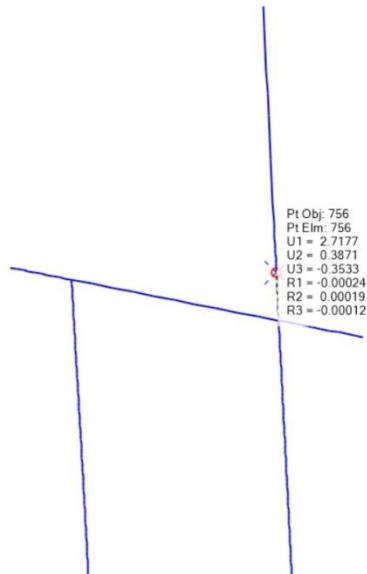
Τιμές μετακινήσεων στην κορυφή κεφαλόδεσμου συνδυασμού φόρτισης COMB5



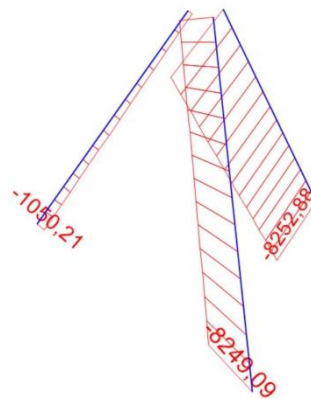
Σχήμα 3.72: Απεικόνιση μετακινήσεων στην κορυφή κεφαλόδεσμου ΚΔ1 συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των μετακινήσεων απεικονίζονται σε mm.



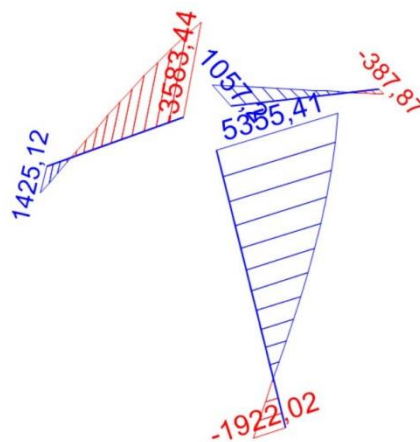
Σχήμα 3.73: Απεικόνιση μετακινήσεων στην κορυφή κεφαλόδεσμου ΚΔ2 συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των μετακινήσεων απεικονίζονται σε mm.



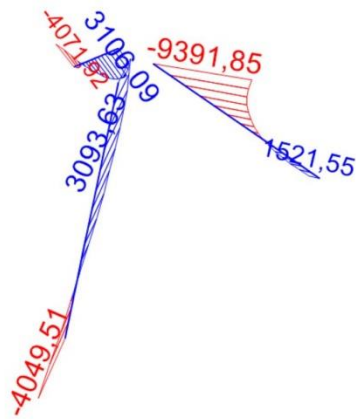
Σχήμα 3.74: Απεικόνιση μετακινήσεων στην κορυφή κεφαλόδεσμου ΚΔ3 συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των μετακινήσεων απεικονίζονται σε mm.



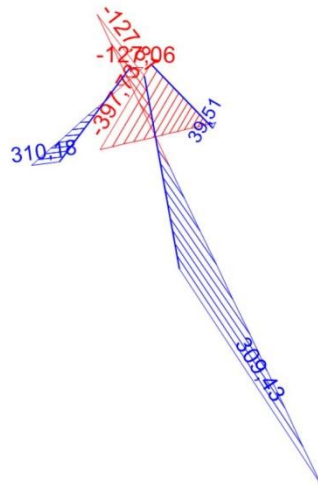
Σχήμα 3.75: Απεικόνιση διαγράμματος αξονικών δυνάμεων μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



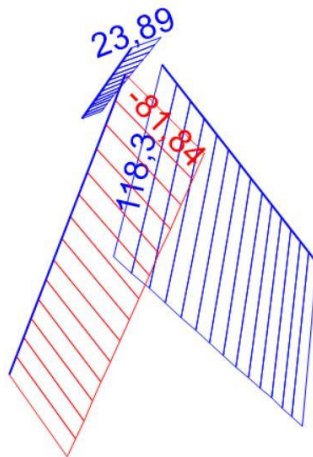
Σχήμα 3.76: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M2-2 μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



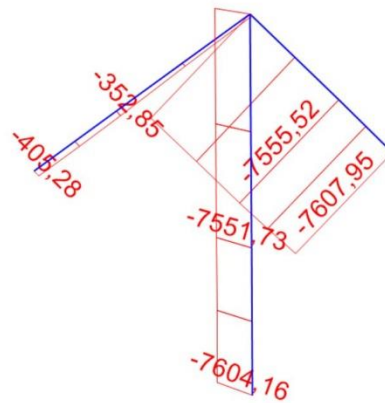
Σχήμα 3.77: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M3-3 μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



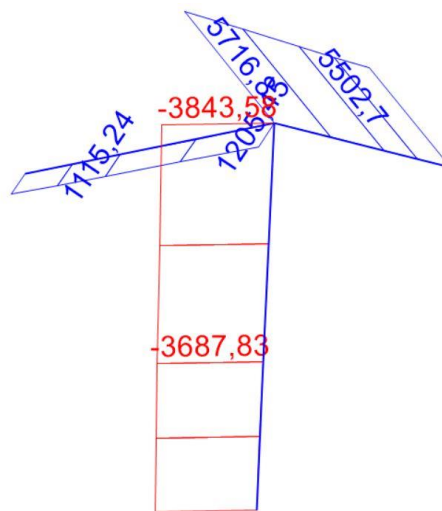
Σχήμα 3.78: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V2-2 μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



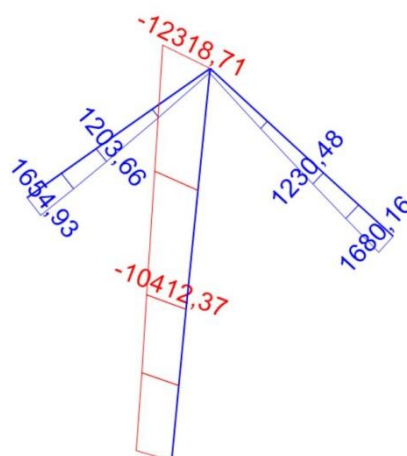
Σχήμα 3.79: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V3-3 μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



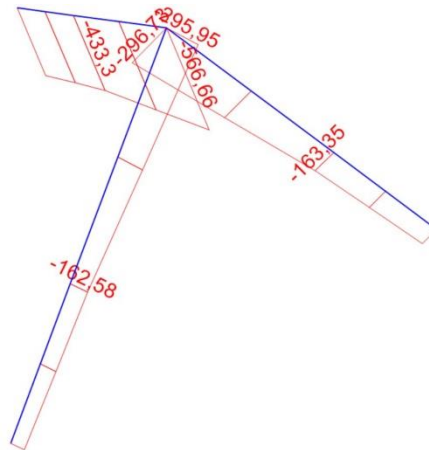
Σχήμα 3.80: Απεικόνιση διαγράμματος αξονικών δυνάμεων άνω ακραίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



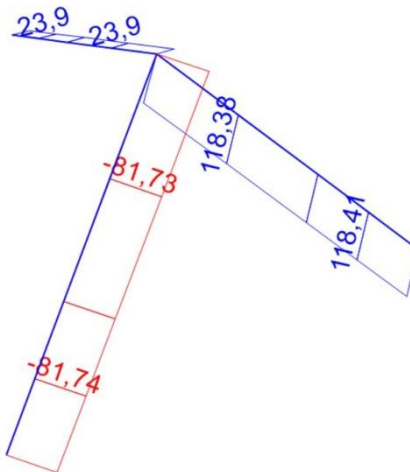
Σχήμα 3.81: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M2-2 άνω ακραίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές ροπών απεικονίζονται σε kNm.



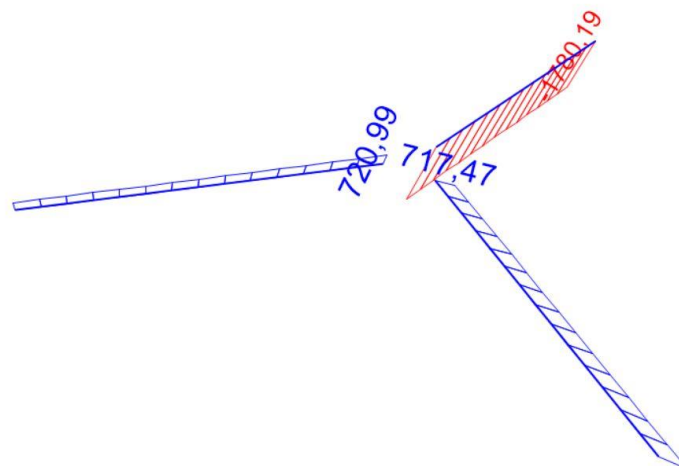
Σχήμα 3.82: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M3-3 άνω ακραίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



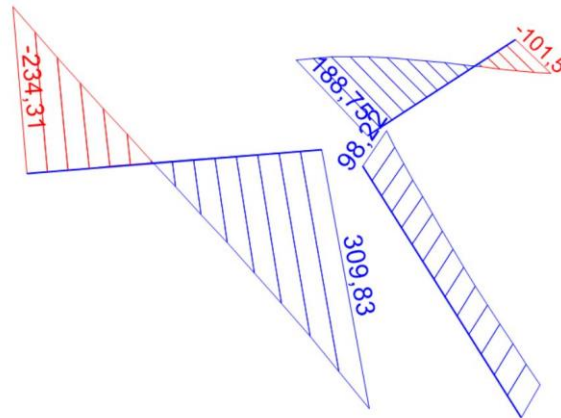
Σχήμα 3.83: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V2-2 άνω ακραίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



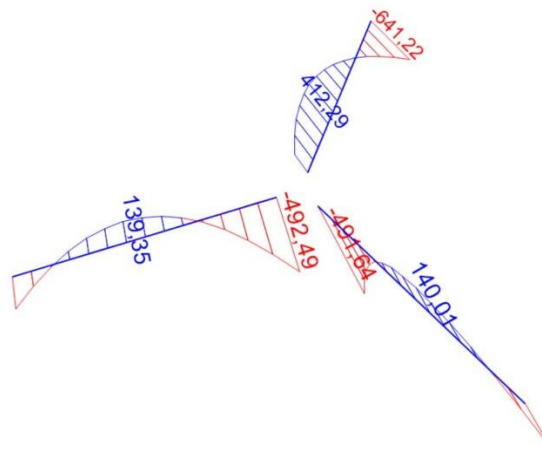
Σχήμα 3.84: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V3-3 άνω ακραίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται kN.



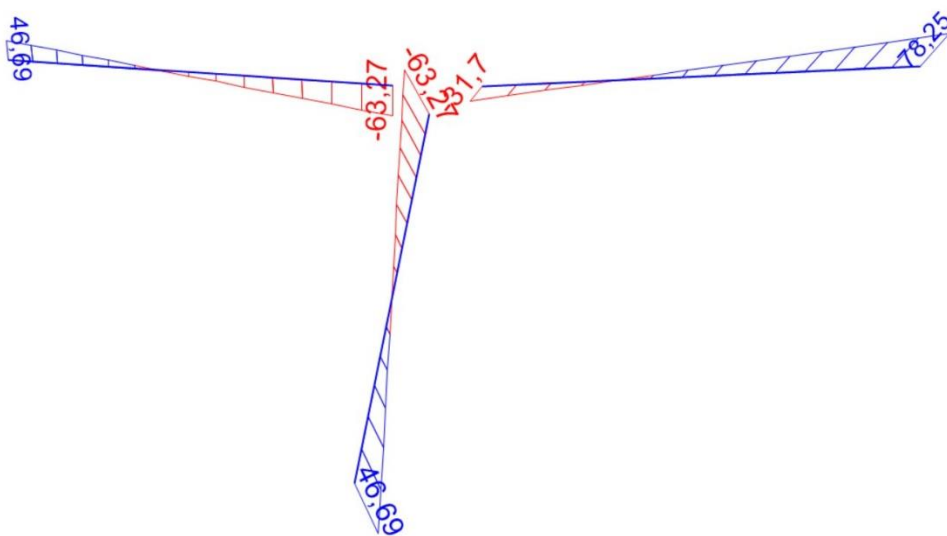
Σχήμα 3.85: Απεικόνιση διαγράμματος αξονικών δυνάμεων μεσαίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



Σχήμα 3.86: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M2-2 μεσαίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.

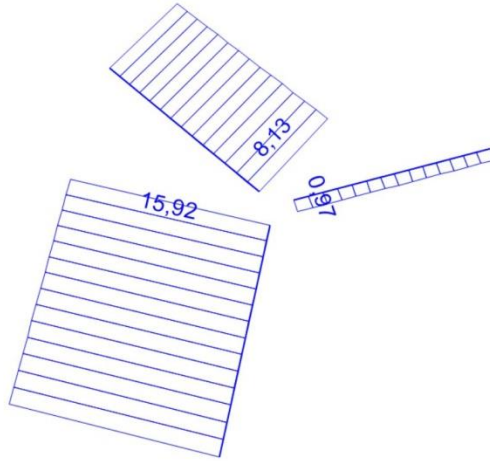


Σχήμα 3.87: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M3-3 μεσαίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.

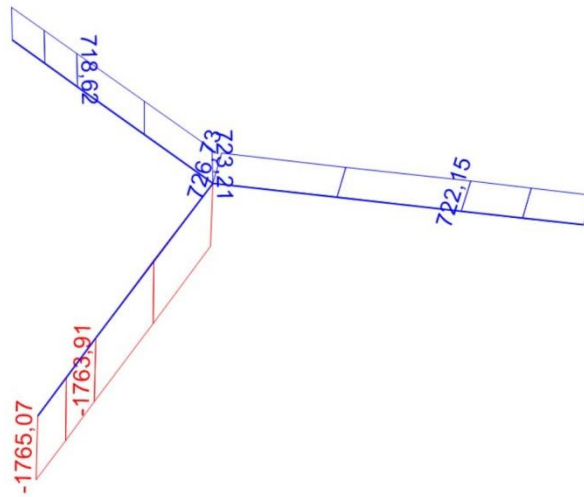


Σχήμα 3.88: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V2-2 μεσαίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.

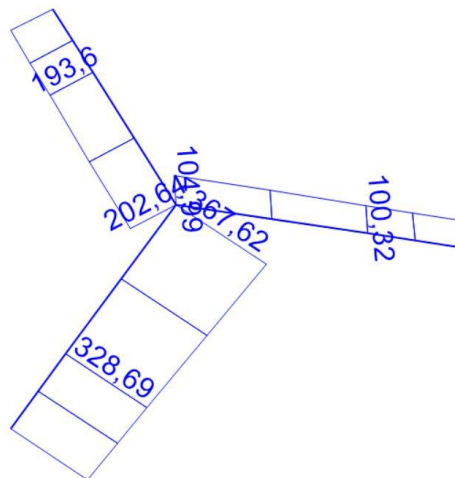




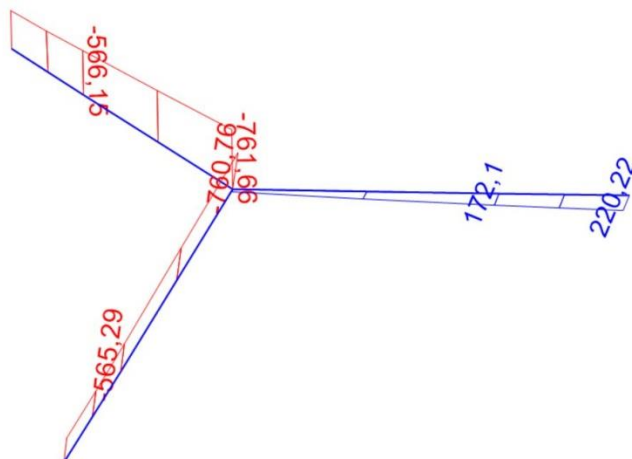
Σχήμα 3.89: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V3-3 μεσαίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



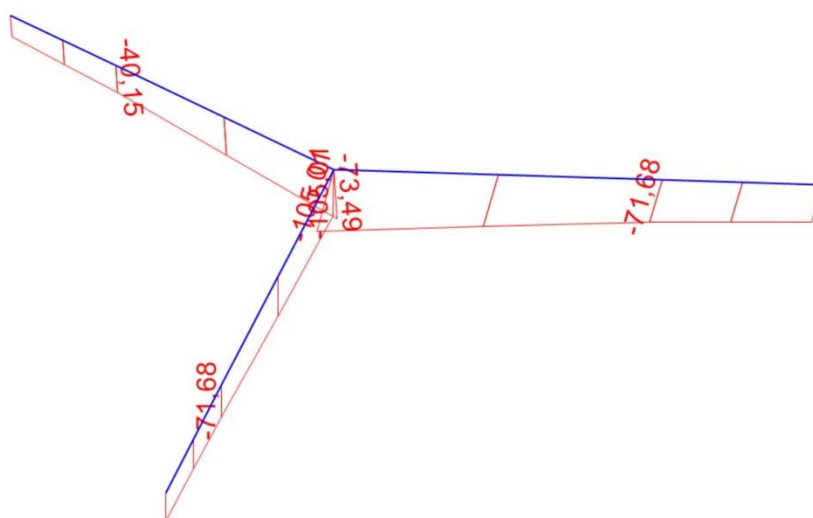
Σχήμα 3.90: Απεικόνιση διαγράμματος αξονικών δυνάμεων άνω ακραίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



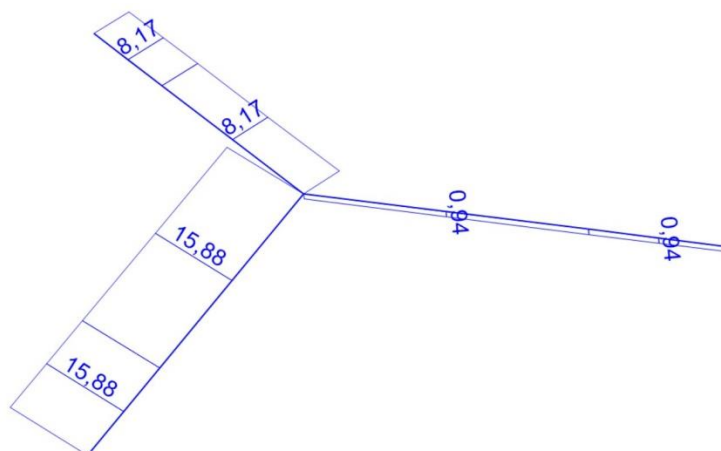
Σχήμα 3.91: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M2-2 άνω ακραίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



Σχήμα 3.92: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M3-3 άνω ακραίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



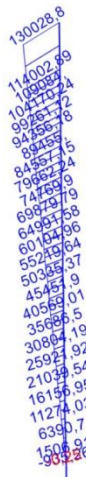
Σχήμα 3.93: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V2-2 άνω ακραίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



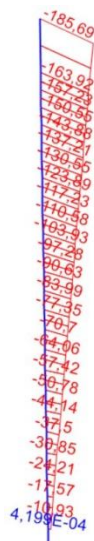
Σχήμα 3.94: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V3-3 άνω ακραίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.

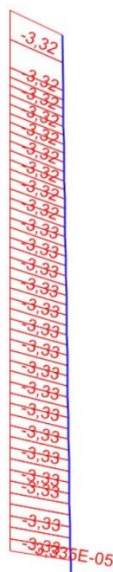


Σχήμα 3.95: Απεικόνιση διαγράμματος αξονικών δυνάμεων κατακόρυφου μέλους συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.

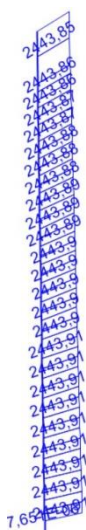


Σχήμα 3.96: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M2-2 κατακόρυφου μέλους συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.





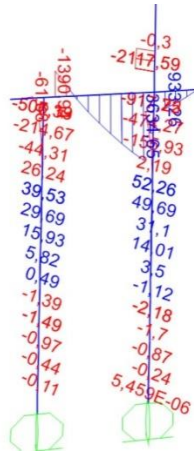
Σχήμα 3.98: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V2-2 κατακόρυφου μέλους συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



Σχήμα 3.99: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V3-3 κατακόρυφου μέλους συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



Σχήμα 3.100: Απεικόνιση διαγράμματος αξονικών δυνάμεων 1<sup>ου</sup> ζεύγους πασσάλων συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



Σχήμα 3.101: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M2-2 1<sup>ου</sup> ζεύγους πασσάλων συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



Σχήμα 3.102: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M3-3 1<sup>ου</sup> ζεύγους πασσάλων συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.

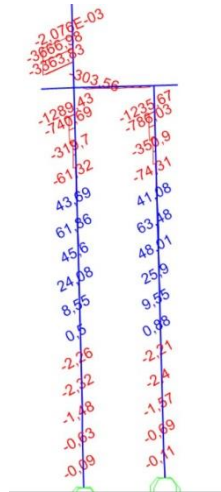


Σχήμα 3.103: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V2-2 1<sup>ου</sup> ζεύγους πασσάλων συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.

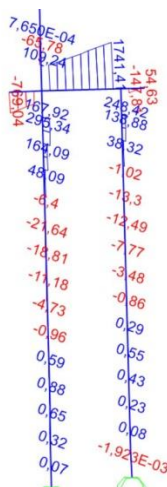




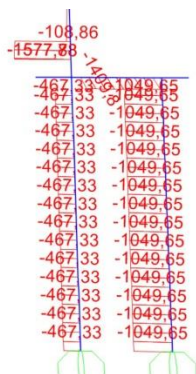
Σχήμα 3.107: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M3-3 2<sup>ου</sup> ζεύγους πασσάλων συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



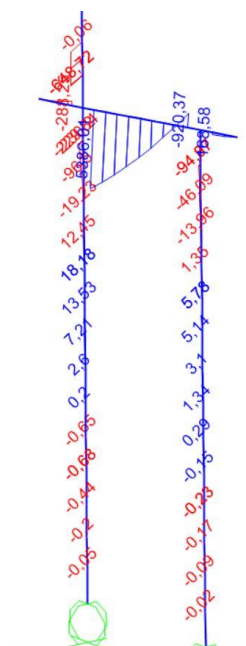
Σχήμα 3.108: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V2-2 2<sup>ου</sup> ζεύγους πασσάλων συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



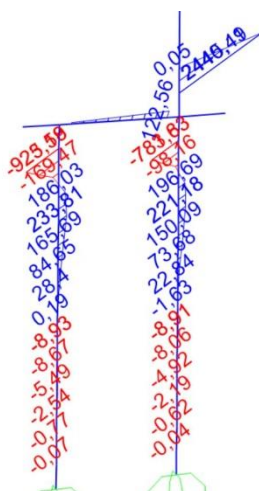
Σχήμα 3.109: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V3-3 2<sup>ου</sup> ζεύγους πασσάλων συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



Σχήμα 3.110: Απεικόνιση διαγράμματος αξονικών δυνάμεων 3<sup>ου</sup> ζεύγους πασσάλων συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



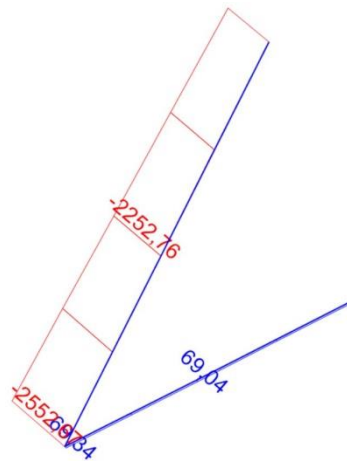
Σχήμα 3.111: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M2-2 3<sup>ου</sup> ζεύγους πασσάλων συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



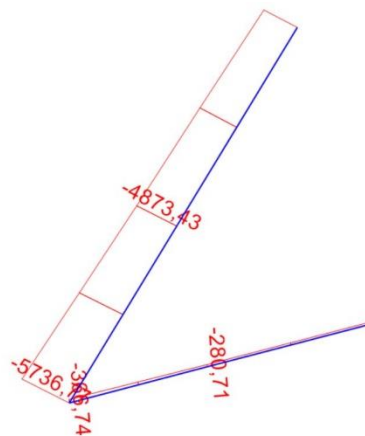
Σχήμα 3.112: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M3-3 3<sup>ου</sup> ζεύγους πασσάλων συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



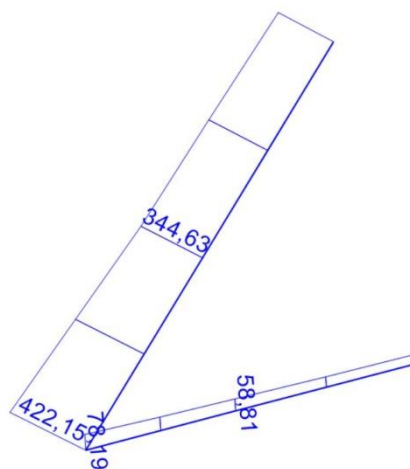




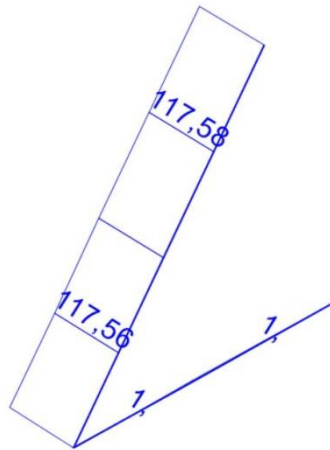
Σχήμα 3.116: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M2-2 1<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι ροπές απεικονίζονται σε kNm.



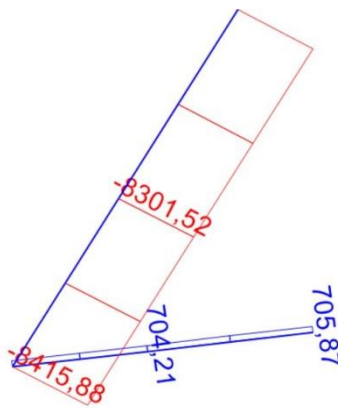
Σχήμα 3.117: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M3-3 1<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



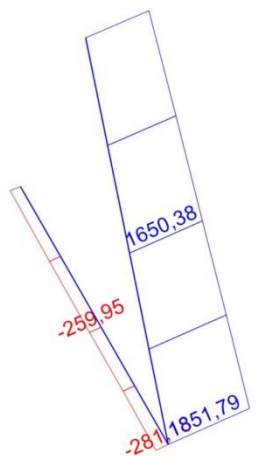
Σχήμα 3.118: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V2-2 1<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



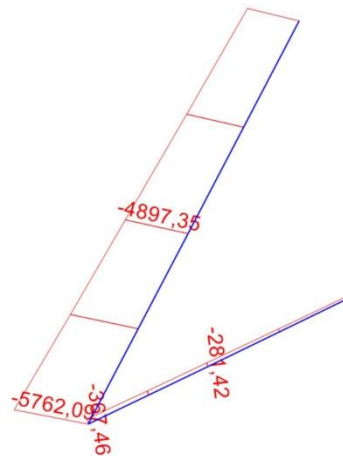
Σχήμα 3.119: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V3-3 1<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



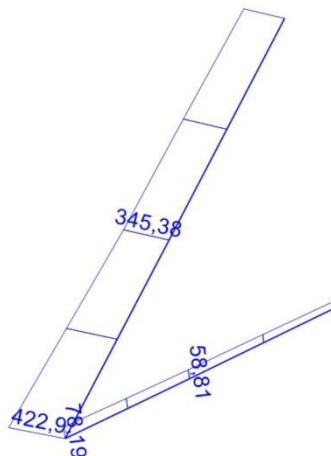
Σχήμα 3.120: Απεικόνιση διαγράμματος αξονικών δυνάμεων 2<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



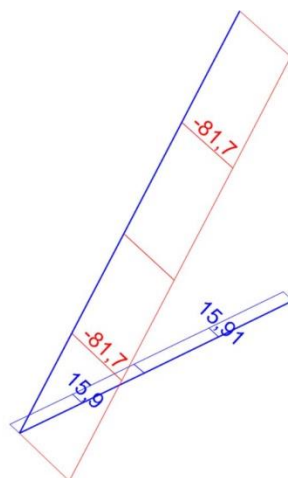
Σχήμα 3.121: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M2-2 2<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



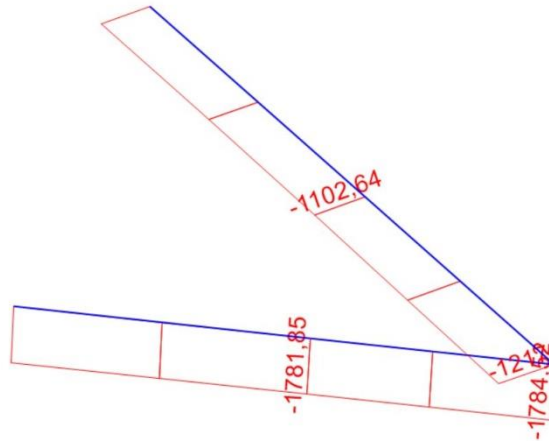
Σχήμα 3.122: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M3-3 2<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



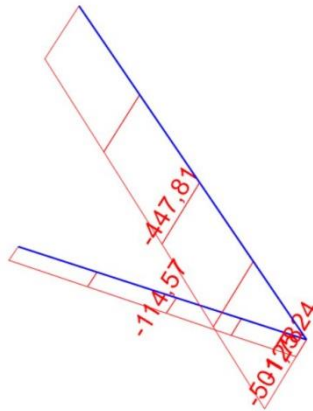
Σχήμα 3.123: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V2-2 2<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



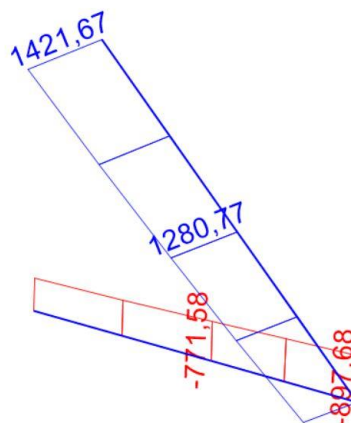
Σχήμα 3.124: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V3-3 2<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



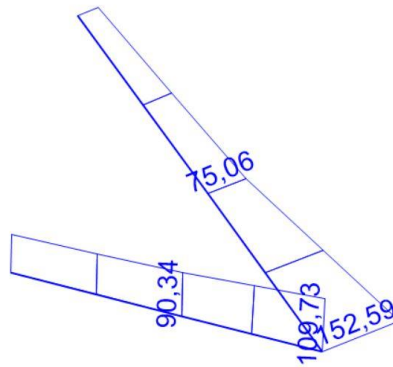
Σχήμα 3.125: Απεικόνιση διαγράμματος αξονικών δυνάμεων 3<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



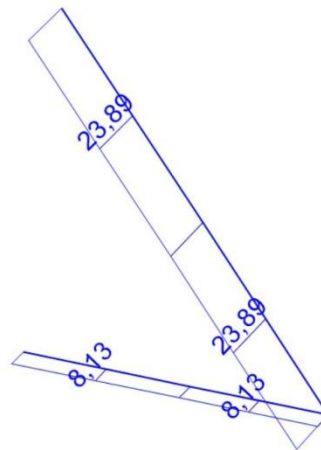
Σχήμα 3.126: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M2-2 3<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



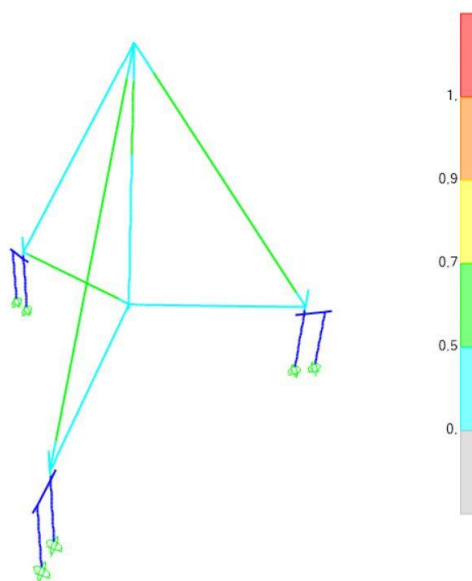
Σχήμα 3.127: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M3-3 3<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



Σχήμα 3.128: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V2-2 3<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



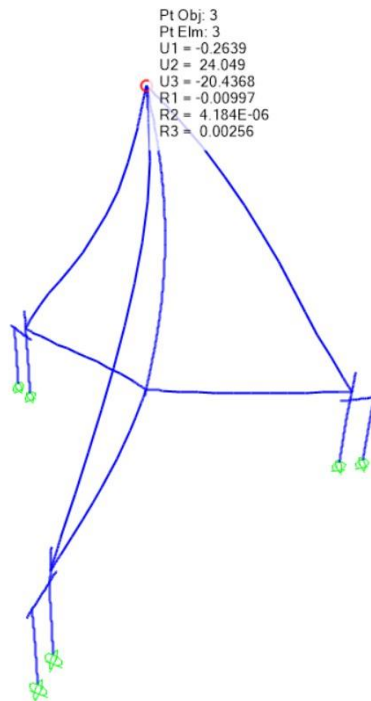
Σχήμα 3.129: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V3-3 3<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB5. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



Σχήμα 3.130: Σχηματική απεικόνιση βαθμού αξιοποίησης φορέα συνδυασμού φόρτισης COMB5.

### 3.7.3 Συνδυασμός φόρτισης COMB6

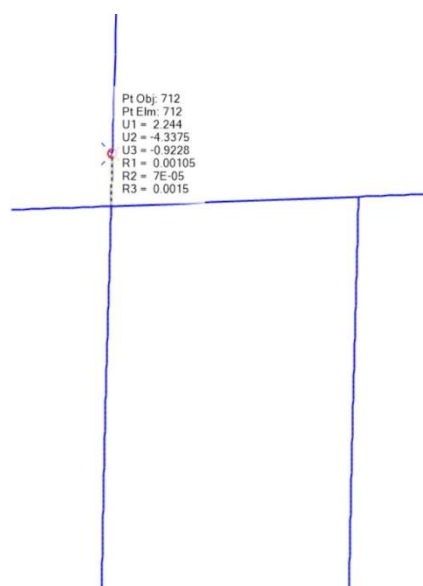
Τιμές μετακινήσεων στην κορυφή του τριπόδου συνδυασμού φόρτισης COMB6



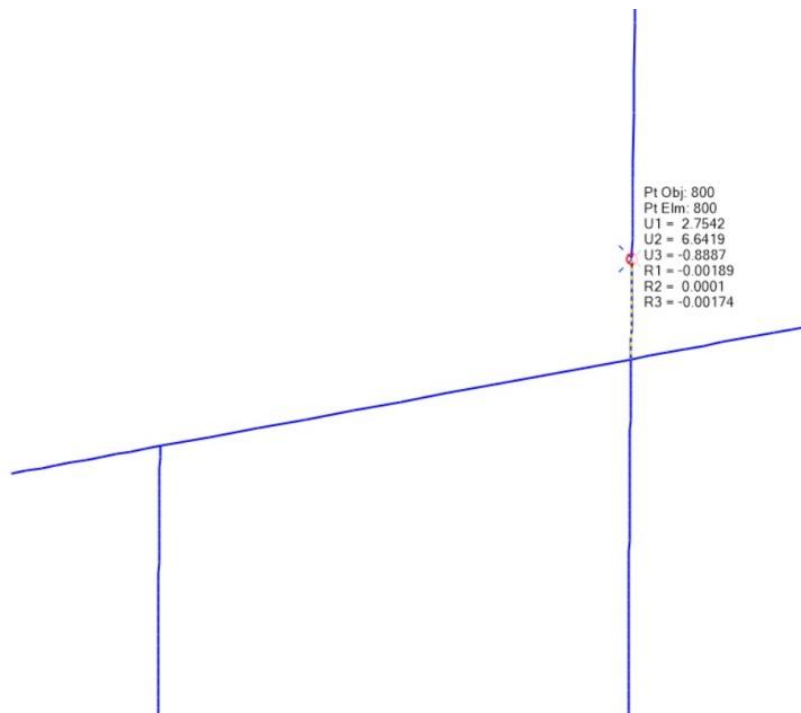
Σχήμα 3.131: Απεικόνιση παραμορφωμένου φορέα συνδυασμού φόρτισης COMB6 και μετακινήσεων στην κορυφή του τριπόδου. Οι τιμές των μετακινήσεων εμφανίζονται σε mm.

Οι τοπικοί άξονες σε κάθε έναν από τους τρεις κεφαλόδεσμους είναι ορισμένοι με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε ο άξονας 1 να ταυτίζεται με την ακτινική διεύθυνση, ο άξονας 2 να ταυτίζεται με την περιφερειακή διεύθυνση και ο άξονας 3 με την κατακόρυφη διεύθυνση.

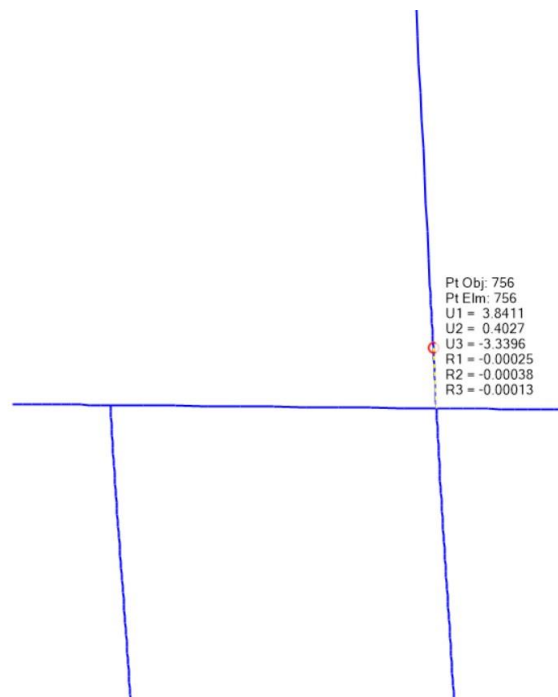
Τιμές μετακινήσεων στην κορυφή κεφαλόδεσμου συνδυασμού φόρτισης COMB6



Σχήμα 3.132: Απεικόνιση μετακινήσεων στην κορυφή κεφαλόδεσμου ΚΔ1 συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των μετακινήσεων εμφανίζονται σε mm.

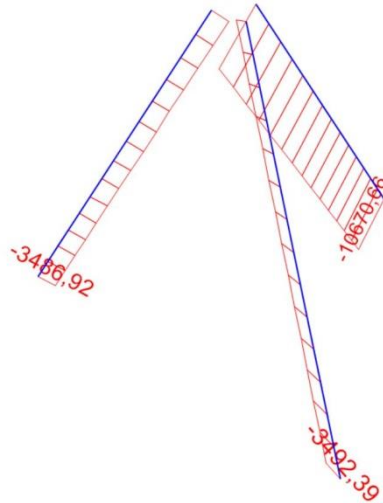


Σχήμα 3.133: Απεικόνιση μετακινήσεων στην κορυφή κεφαλόδεσμου ΚΔ2 συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των μετακινήσεων εμφανίζονται σε mm.

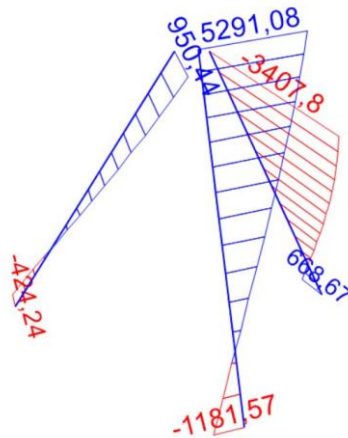


Σχήμα 3.134: Απεικόνιση μετακινήσεων στην κορυφή κεφαλόδεσμου ΚΔ3 συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των μετακινήσεων εμφανίζονται σε mm.

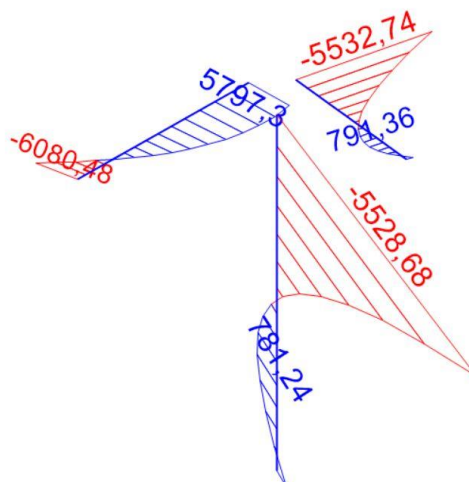




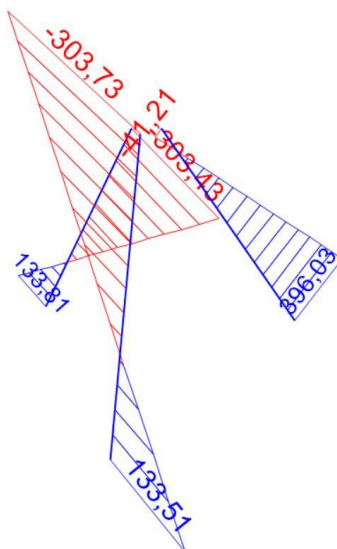
Σχήμα 3.135: Απεικόνιση διαγράμματος αξονικών δυνάμεων μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



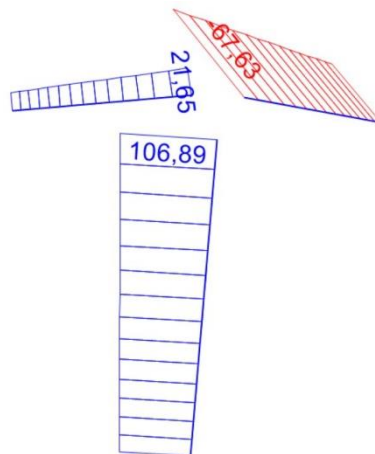
Σχήμα 3.136: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M2-2 μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



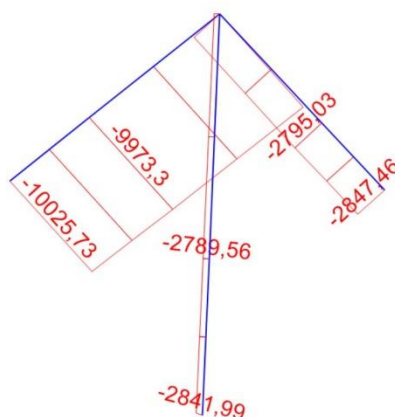
Σχήμα 3.137: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M3-3 μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



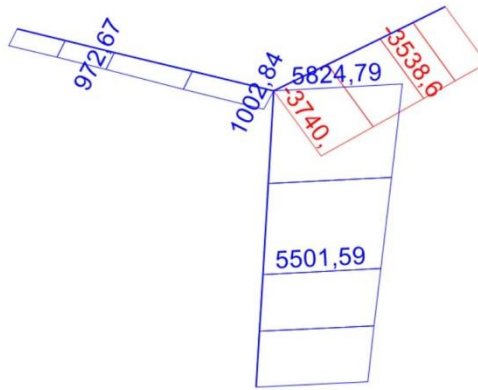
Σχήμα 3.138: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V2-2 μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



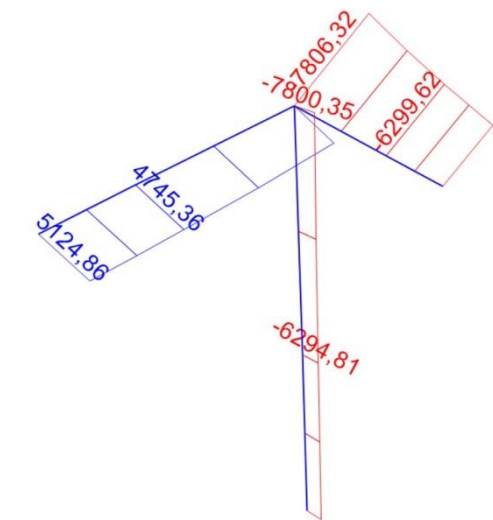
Σχήμα 3.139: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V3-3 μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



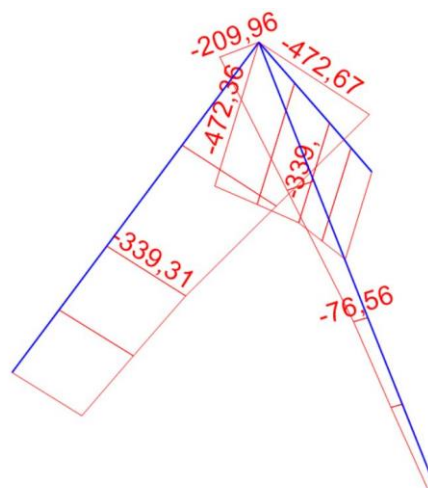
Σχήμα 3.140: Απεικόνιση διαγράμματος αξονικών δυνάμεων άνω ακραίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



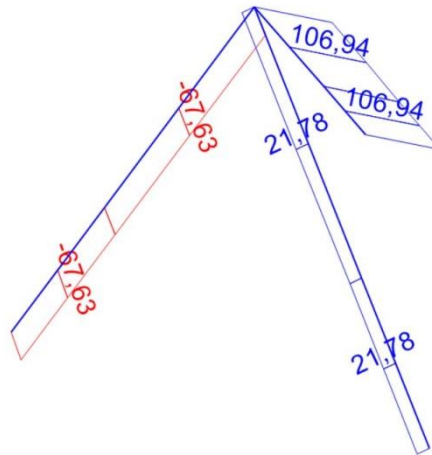
Σχήμα 3.141: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M2-2 άνω ακραίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



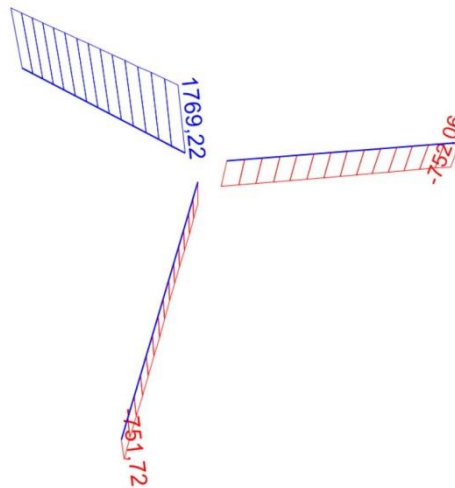
Σχήμα 3.142: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M3-3 άνω ακραίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



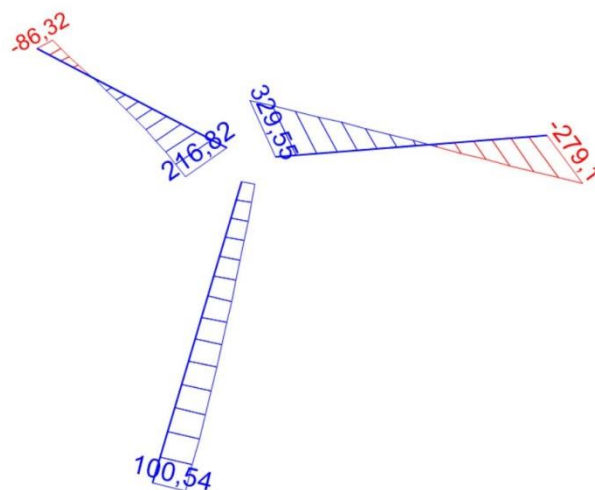
Σχήμα 3.143: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V2-2 άνω ακραίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



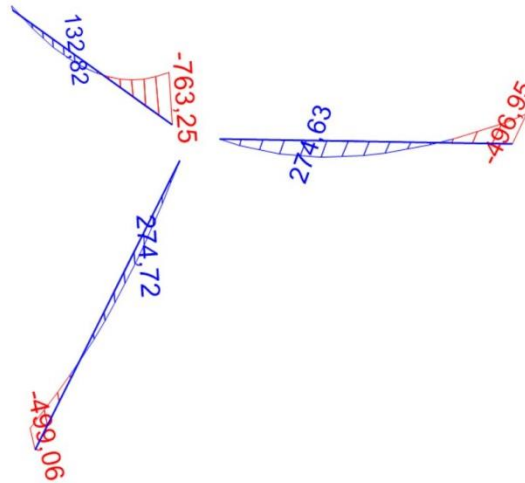
Σχήμα 3.144: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V3-3 άνω ακραίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



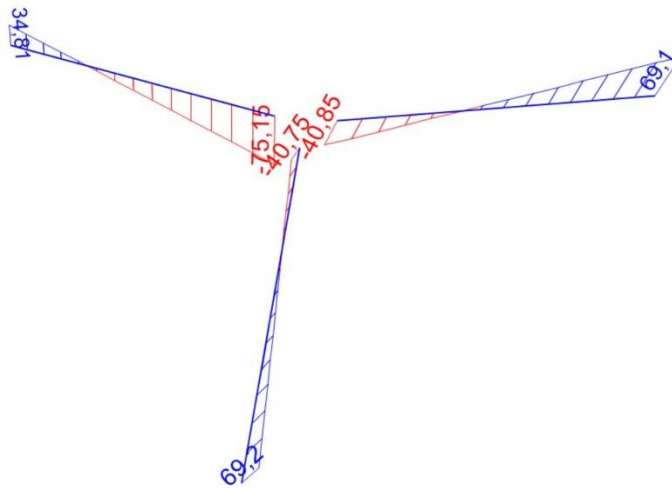
Σχήμα 3.145: Απεικόνιση διαγράμματος αξονικών δυνάμεων μεσαίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



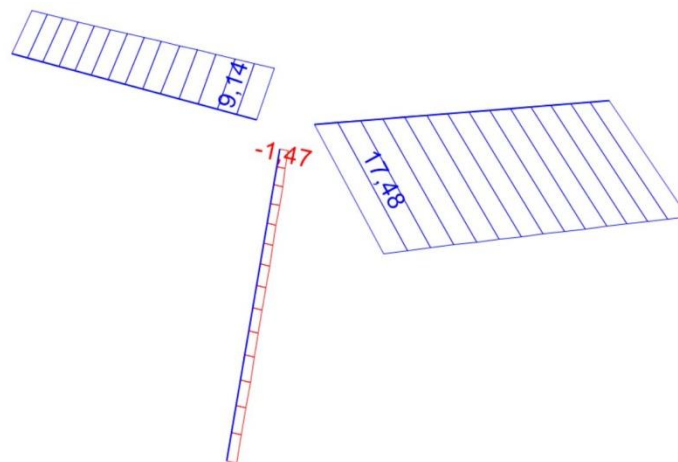
Σχήμα 3.146: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M2-2 μεσαίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



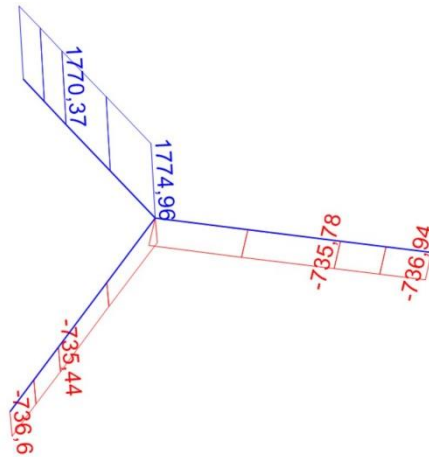
Σχήμα 3.147: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M3-3 μεσαίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



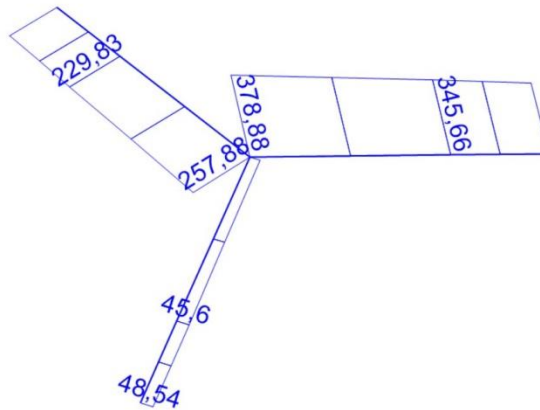
Σχήμα 3.148: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V2-2 μεσαίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



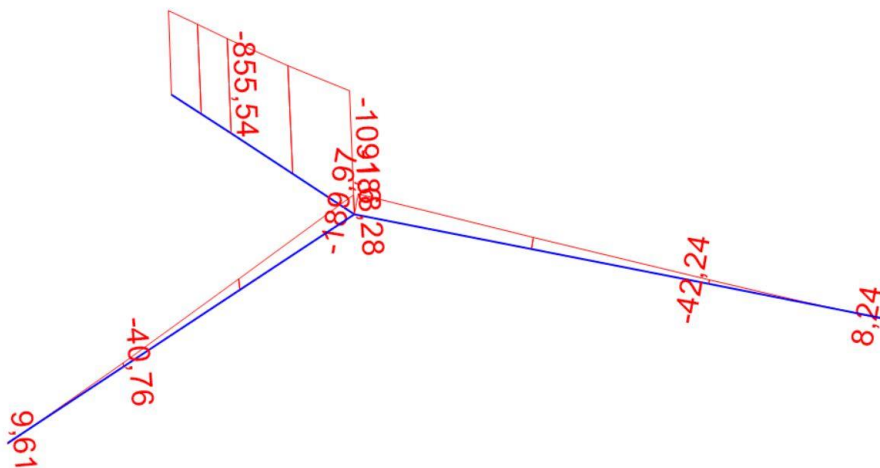
Σχήμα 3.149: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V3-3 μεσαίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



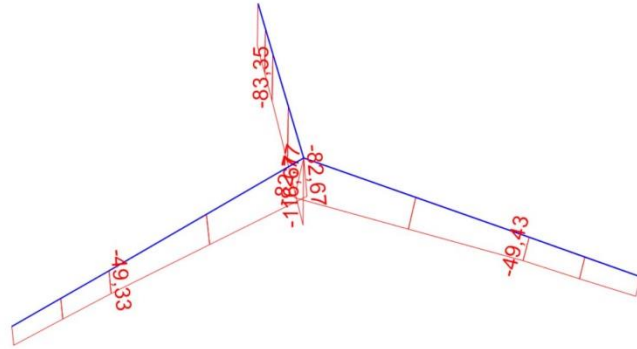
Σχήμα 3.150: Απεικόνιση διαγράμματος αξονικών δυνάμεων άνω ακραίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



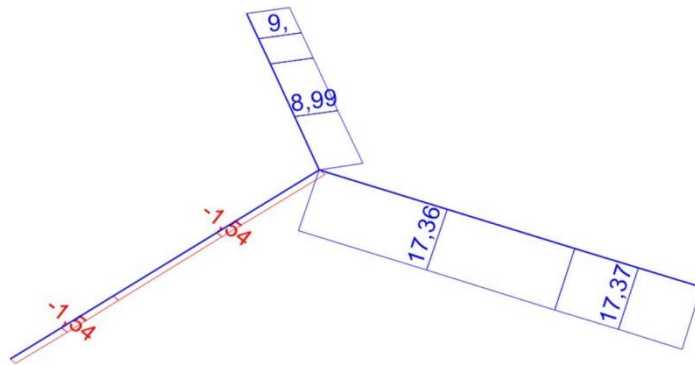
Σχήμα 3.151: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M2-2 άνω ακραίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



Σχήμα 3.152: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M3-3 άνω ακραίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



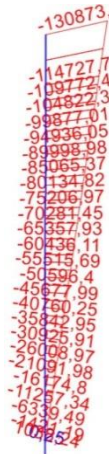
Σχήμα 3.153: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V2-2 άνω ακραίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



Σχήμα 3.154: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V3-3 άνω ακραίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



Σχήμα 3.155: Απεικόνιση διαγράμματος αξονικών δυνάμεων κατακόρυφου μέλους συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



Σχήμα 3.156: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M2-2 κατακόρυφου μέλους συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



Σχήμα 3.157: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M3-3 κατακόρυφου μέλους συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



Σχήμα 3.158: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V2-2 κατακόρυφου μέλους συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.





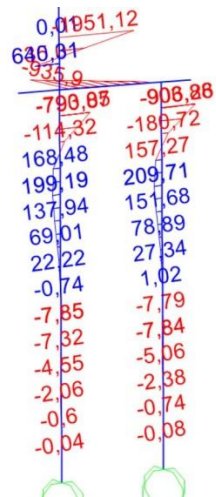
Σχήμα 3.159: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V3-3 κατακόρυφου μέλους συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



Σχήμα 3.160: Απεικόνιση διαγράμματος αξονικών δυνάμεων 1<sup>ου</sup> ζεύγους πασσάλων συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



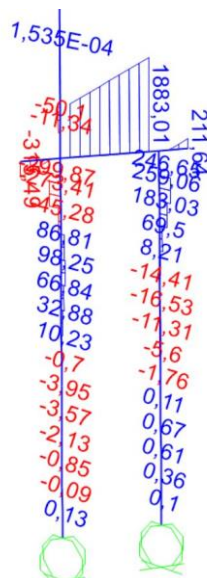
Σχήμα 3.161: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M2-2 1<sup>ου</sup> ζεύγους πασσάλων συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



Σχήμα 3.162: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M3-3 1<sup>ου</sup> ζεύγους πασσάλων συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



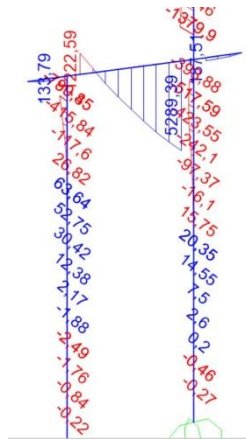
Σχήμα 3.163: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V2-2 1<sup>ου</sup> ζεύγους πασσάλων συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



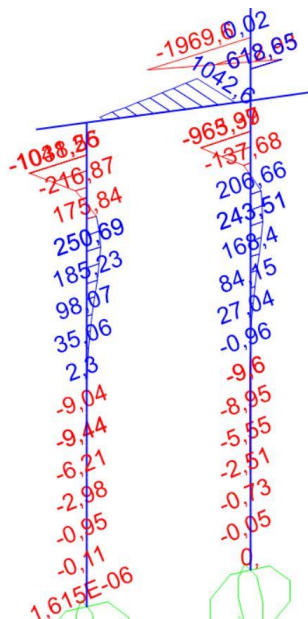
Σχήμα 3.164: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V3-3 1<sup>ου</sup> ζεύγους πασσάλων συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



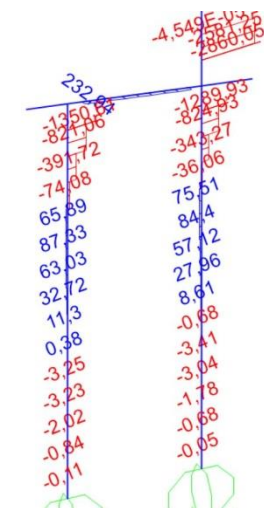
Σχήμα 3.165: Απεικόνιση διαγράμματος αξονικών δυνάμεων 2<sup>ου</sup> ζεύγους πασσάλων συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



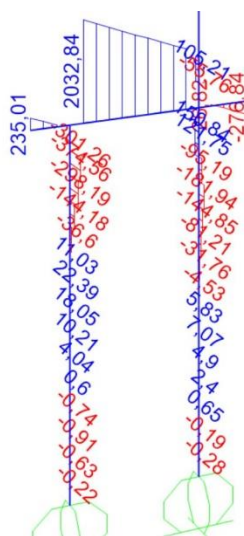
Σχήμα 3.166: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M2-2 2<sup>ου</sup> ζεύγους πασσάλων συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



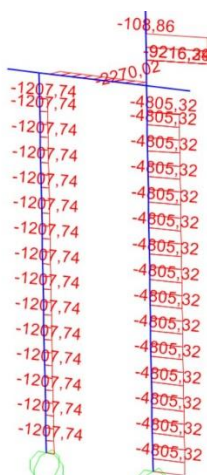
Σχήμα 3.167: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M3-3 2<sup>ου</sup> ζεύγους πασσάλων συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



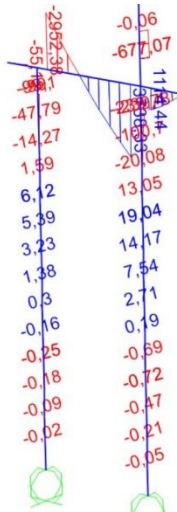
Σχήμα 3.168: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V2-2 2<sup>ου</sup> ζεύγους πασσάλων συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



Σχήμα 3.169: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V3-3 2<sup>ου</sup> ζεύγους πασσάλων συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



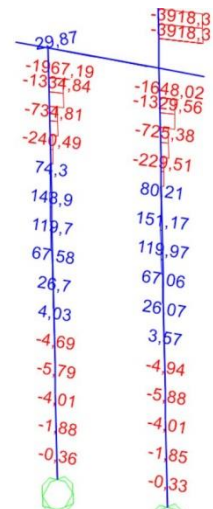
Σχήμα 3.170: Απεικόνιση διαγράμματος αξονικών δυνάμεων 3<sup>ου</sup> ζεύγους πασσάλων συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



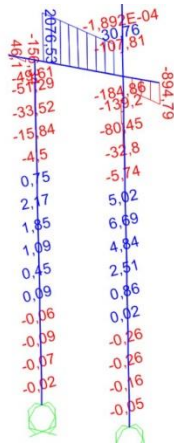
Σχήμα 3.171: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M2-2 3<sup>ου</sup> ζεύγους πασσάλων συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



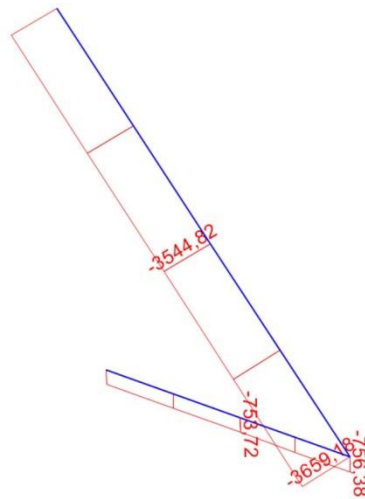
Σχήμα 3.172: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M3-3 3<sup>ου</sup> ζεύγους πασσάλων συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



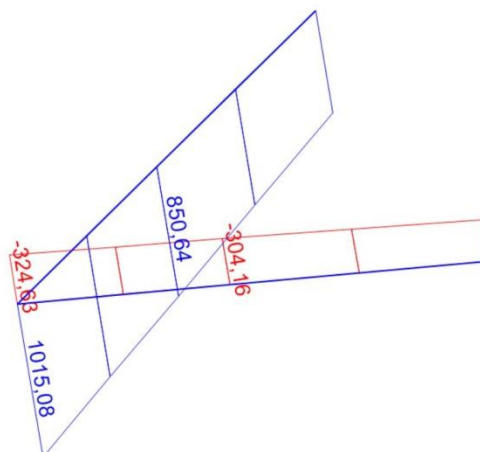
Σχήμα 3.173: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V2-2 3<sup>ου</sup> ζεύγους πασσάλων συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



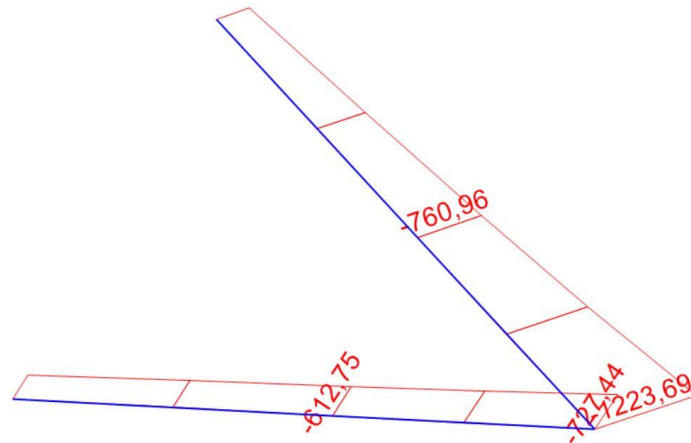
Σχήμα 3.174: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V3-3 3<sup>ου</sup> ζεύγους πασσάλων συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



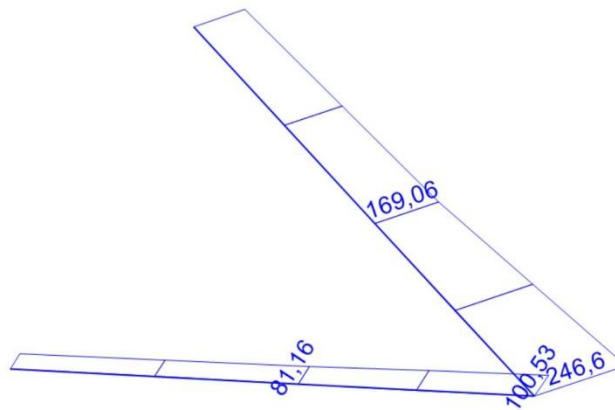
Σχήμα 3.175: Απεικόνιση διαγράμματος αξονικών δυνάμεων 1<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



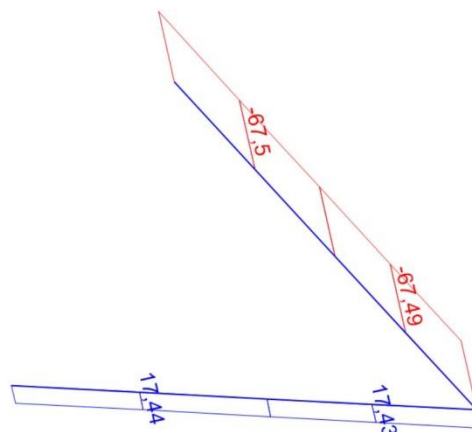
Σχήμα 3.176: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M2-2 1<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



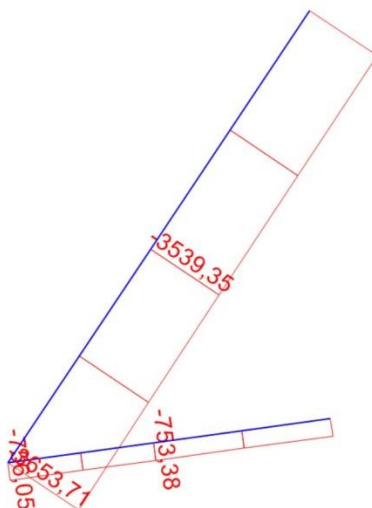
Σχήμα 3.177: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M3-3 1<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



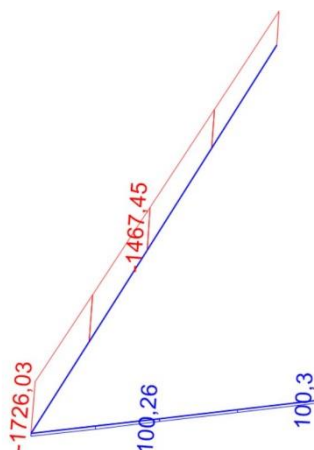
Σχήμα 3.178: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V2-2 1<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



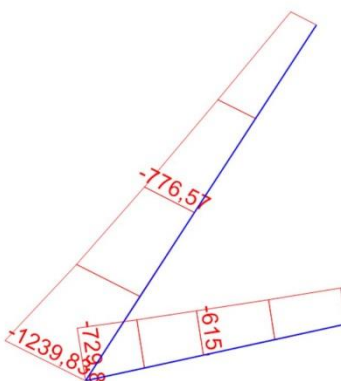
Σχήμα 3.179: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V3-3 1<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



Σχήμα 3.180: Απεικόνιση διαγράμματος αξονικών δυνάμεων 2<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.

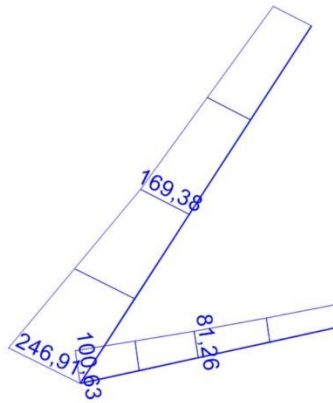


Σχήμα 3.181: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M2-2 2<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.

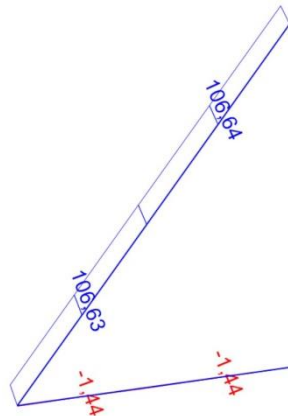


Σχήμα 3.182: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M3-3 2<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.

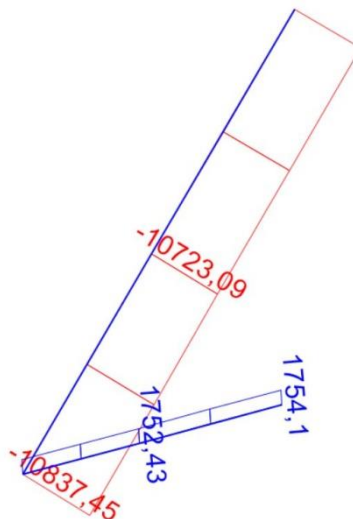




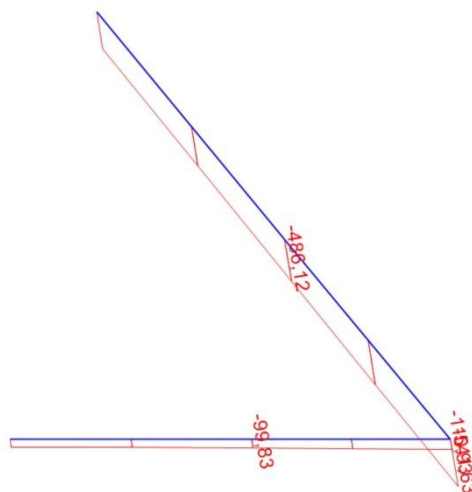
Σχήμα 3.183: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V2-2 2<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



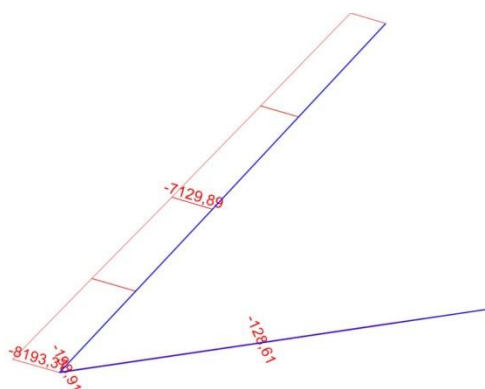
Σχήμα 3.184: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V3-3 2<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



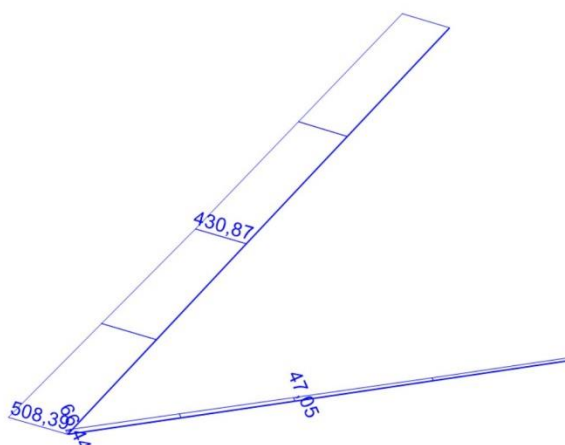
Σχήμα 3.185: Απεικόνιση διαγράμματος αξονικών δυνάμεων 3<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



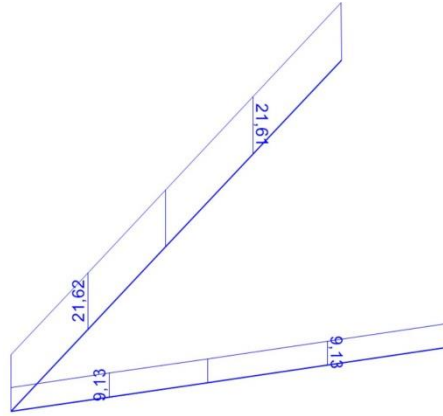
Σχήμα 3.186: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M2-2 3<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



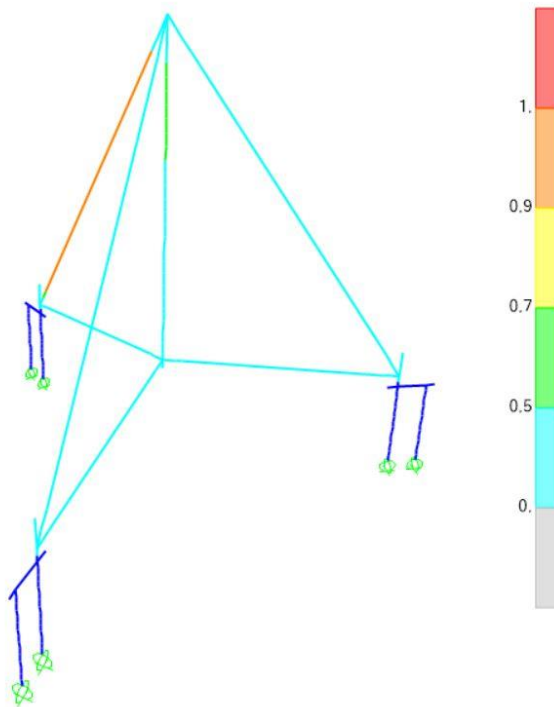
Σχήμα 3.187: Απεικόνιση διαγράμματος καμπτικών ροπών M3-3 3<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των ροπών απεικονίζονται σε kNm.



Σχήμα 3.188: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V2-2 3<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



Σχήμα 3.189: Απεικόνιση διαγράμματος τεμνουσών δυνάμεων V3-3 3<sup>ου</sup> ζεύγους κάτω ακραίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών συνδυασμού φόρτισης COMB6. Οι τιμές των δυνάμεων απεικονίζονται σε kN.



Σχήμα 3.190: Σχηματική απεικόνιση βαθμού αξιοποίησης φορέα συνδυασμού φόρτισης COMB6.



## 4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΤΡΙΠΟΔΟΥ

### 4.1 Επίδραση της γεωμετρίας του τριπόδου

Στην συγκεκριμένη ενότητα πραγματοποιούνται τρεις ομάδες παραμετρικών αναλύσεων ούτως ώστε να διερευνηθεί η επιρροή τριών βασικών γεωμετρικών παραμέτρων. Ως μοντέλο αναφοράς χρησιμοποιείται αυτό του οποίου τα χαρακτηριστικά περιγράφηκαν αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Στην πρώτη ομάδα παραμετρικών αναλύσεων εξετάζεται η επίδραση της αλλαγής του ύψους του κατακόρυφου στελέχους. Συγκεκριμένα δημιουργούνται τέσσερα προσομοιώματα στα οποία μεταβάλλεται το υψόμετρο του κόμβου των άνω κεκλιμένων μελών με βήμα 5m. Ειδικότερα εξάγονται αριθμητικά αποτελέσματα για προσομοιώματα με υψόμετρο κόμβου άνω κεκλιμένων μελών 50m, 55m, 65m, 70m και συγκρίνονται με το ήδη υπάρχον προσομοίωμα με υψόμετρο κόμβου άνω κεκλιμένων μελών 60m.

Στην δεύτερη ομάδα παραμετρικών αναλύσεων διερευνάται η επίδραση του ύψους του κατακόρυφου στελέχους μέσω της αλλαγής του υψομέτρου του κόμβου κάτω κεκλιμένων μελών. Ειδικότερα συγκρίνονται πέντε διαφορετικά προσομοιώματα στα οποία μεταβάλλεται το υψόμετρο κόμβου κάτω κεκλιμένων μελών με βήμα 2m. Πιο συγκεκριμένα εξάγονται αριθμητικά αποτελέσματα για τέσσερα προσομοιώματα με υψόμετρο κόμβου κάτω κεκλιμένων μελών 2,5m, 4,5m, 8,5m, 10,5m τα οποία συγκρίνονται με τα αντίστοιχα του ήδη υπάρχοντος προσομοιώματος με υψόμετρο κόμβου κάτω κεκλιμένων μελών 6,5m.

Στην τρίτη ομάδα παραμετρικών αναλύσεων εξετάζεται η επιρροή της ακτινικής απόστασης μεταξύ της αρχής των αξόνων και του γωνιακού μέλους. Ειδικότερα σε αυτήν περίπτωση δημιουργούνται τέσσερα προσομοιώματα στα οποία μεταβάλλεται η ακτινική απόσταση αρχής αξόνων-γωνιακού μέλους με βήμα 5m. Κατόπιν εξάγονται αριθμητικά αποτελέσματα για τα τέσσερα αυτά προσομοιώματα με ακτινική απόσταση αρχής αξόνων-γωνιακού μέλους 30m, 35m, 45m, 50m και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα του ήδη υπάρχοντος προσομοιώματος με ακτινική απόσταση αρχής αξόνων-γωνιακού μέλους 40m.

Για τις τρεις ομάδες παραμετρικών αναλύσεων επιλέχθηκε να εξάγονται αριθμητικά αποτελέσματα για τις ακόλουθες χαρακτηριστικές τιμές:

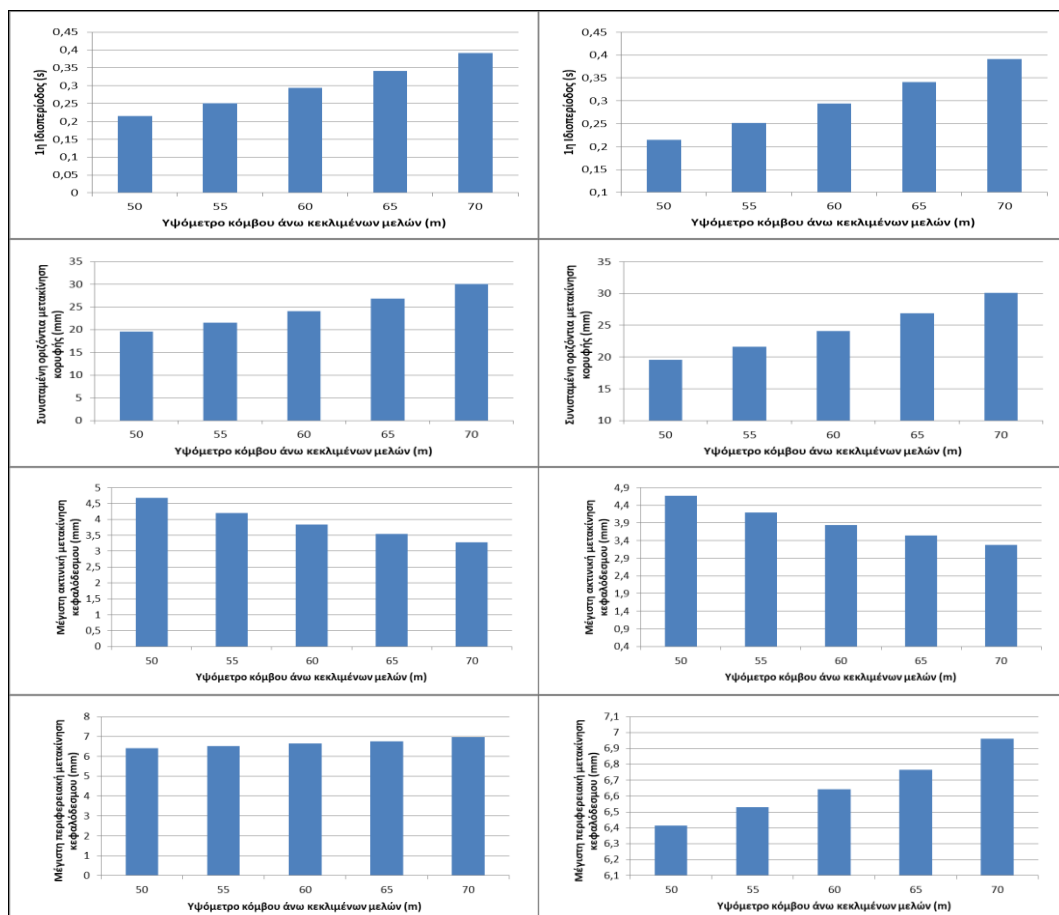
- 1<sup>η</sup> Ιδιοπερίοδος
- Συνισταμένη οριζόντια μετακίνηση κορυφής
- Μέγιστη ακτινική μετακίνηση κεφαλόδεσμου
- Μέγιστη περιφερειακή μετακίνηση κεφαλόδεσμου
- Μέγιστη αξονική δύναμη μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών
- Μέγιστη συνισταμένη καμπτική ροπή μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών
- Βαθμός αξιοποίησης άνω κεκλιμένων μελών
- Μέγιστη αξονική δύναμη μεσαίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών
- Μέγιστη συνισταμένη καμπτική ροπή μεσαίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών
- Βαθμός αξιοποίησης κάτω κεκλιμένων μελών
- Μέγιστη συνισταμένη καμπτική ροπή κατακόρυφου μέλους
- Βαθμός αξιοποίησης κατακόρυφου μέλους

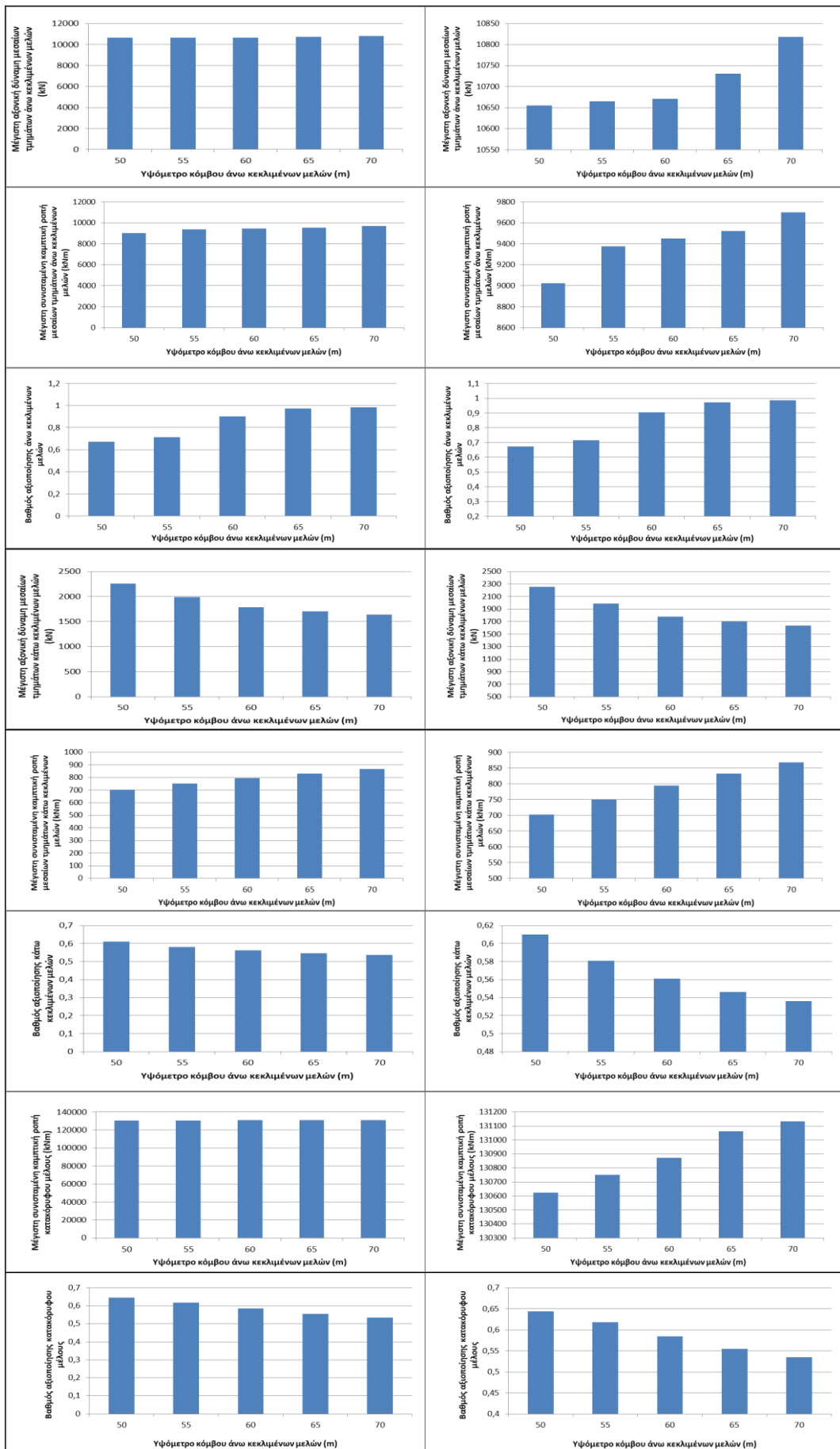
- Μέγιστη θλιπτική αξονική δύναμη πασσάλου
- Μέγιστη συνισταμένη καμπτική ροπή πασσάλου

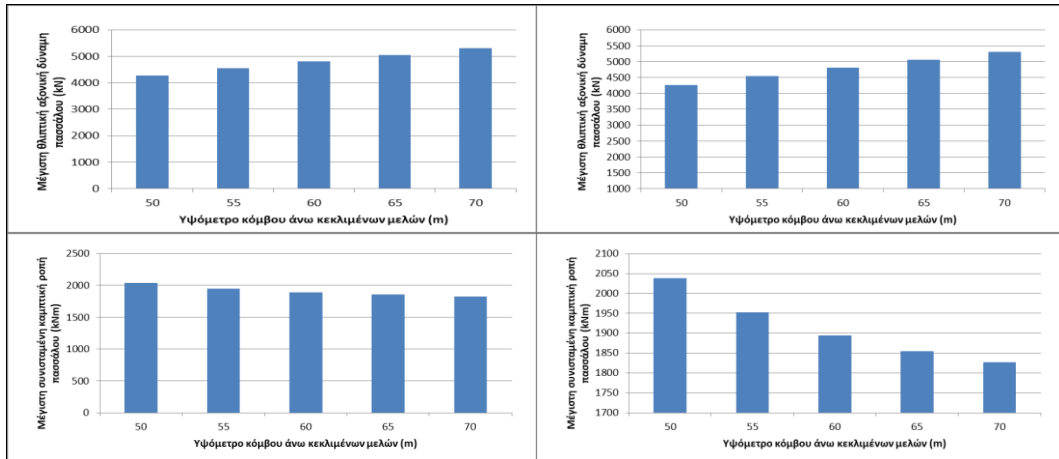
Αξίζει να σημειωθεί ότι σε όλα τα προσομοιώματα των παραμετρικών αναλύσεων εφαρμόστηκαν οι ίδιοι συνδυασμοί φόρτισης όπως αυτοί περιγράφηκαν στην ενότητα 3.5 καθώς και ότι τα αριθμητικά αποτελέσματα τα οποία εξήχθησαν αφορούν τις μέγιστες τιμές μεταξύ των τριών συνδυασμών φόρτισης.

#### 4.1.1 Επίδραση ύψους κατακόρυφου στελέχους

Τα αριθμητικά αποτελέσματα της πρώτης ομάδας παραμετρικών αναλύσεων παρουσιάζονται μέσω των ακόλουθων συγκριτικών διαγραμμάτων. Στην αριστερή στήλη παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για εύρος κατακόρυφου άξονα από μηδέν έως την μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή, ενώ στη δεξιά στήλη παρουσιάζονται τα ίδια αποτελέσματα για εύρος κατακόρυφου άξονα από την ελάχιστη έως την μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή.

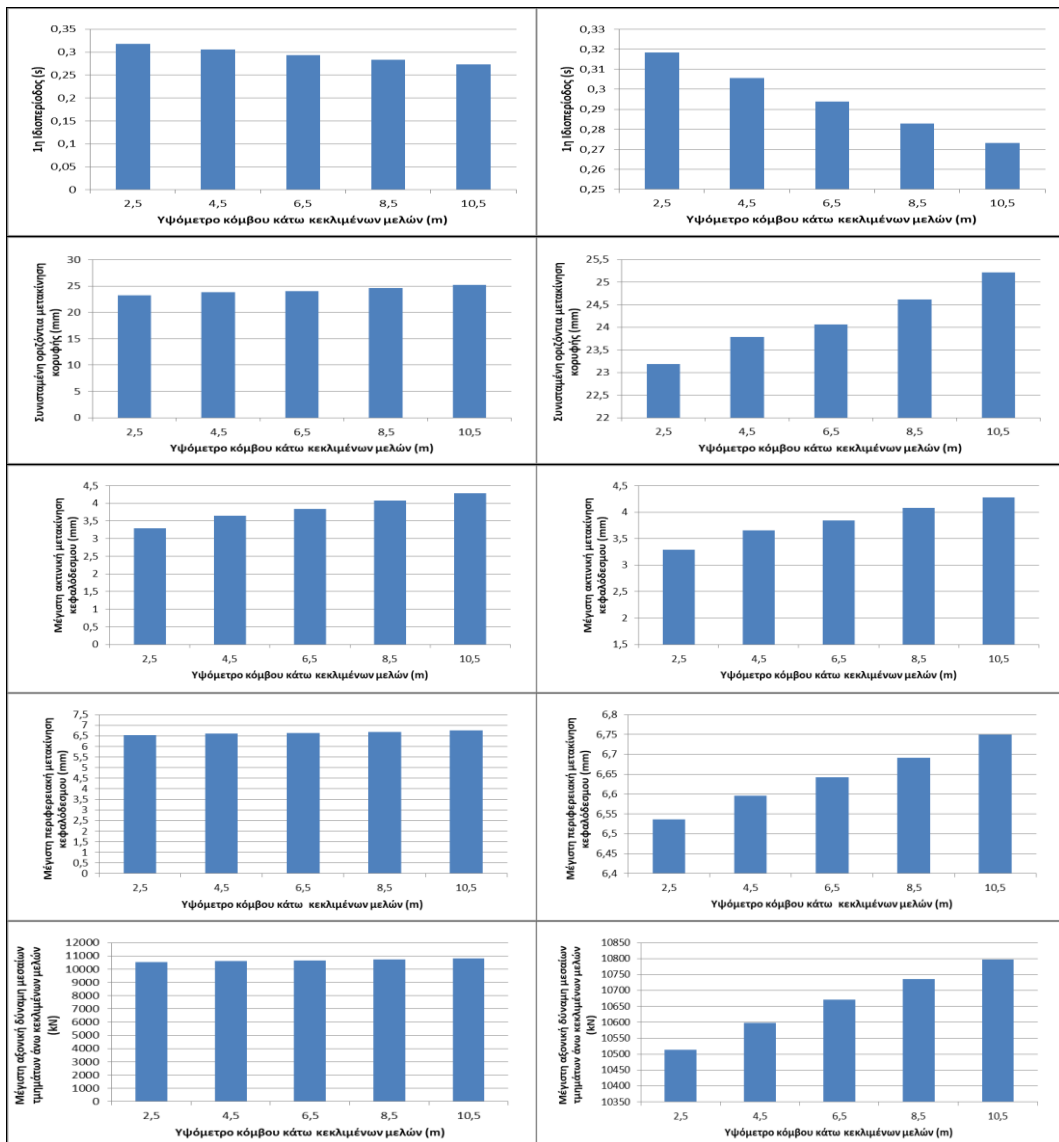




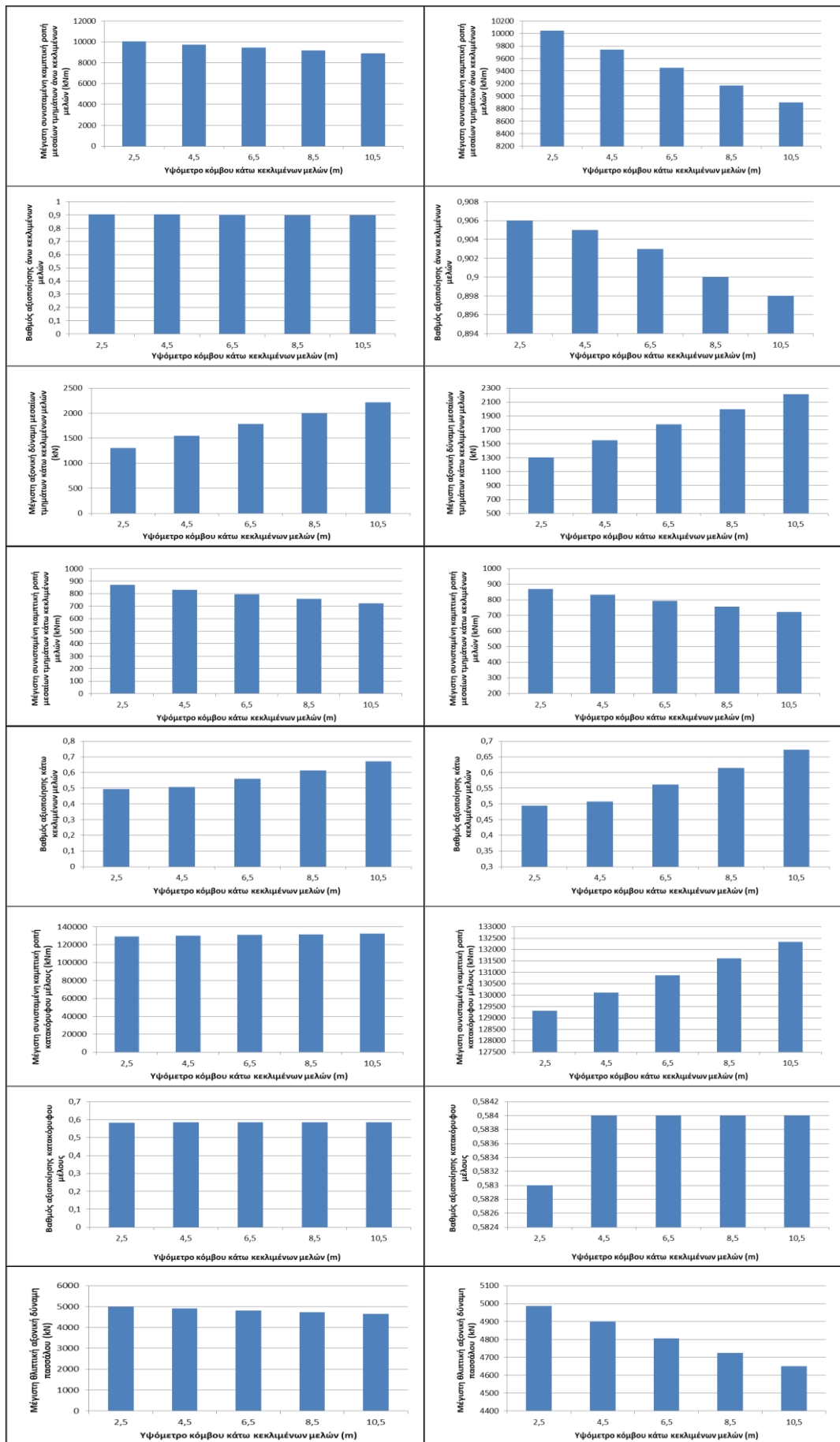


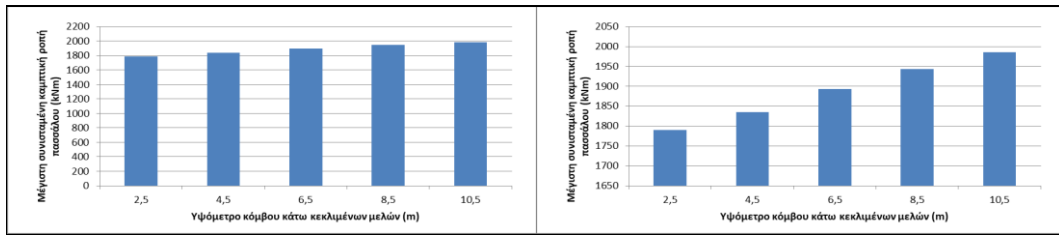
Σχήμα 4.1: Συγκριτικά διαγράμματα επιρροής υψομέτρου κόμβου άνω κεκλιμένων μελών

Τα αριθμητικά αποτελέσματα της δεύτερης ομάδας παραμετρικών αναλύσεων παρουσιάζονται μέσω των ακόλουθων συγκριτικών διαγραμμάτων.





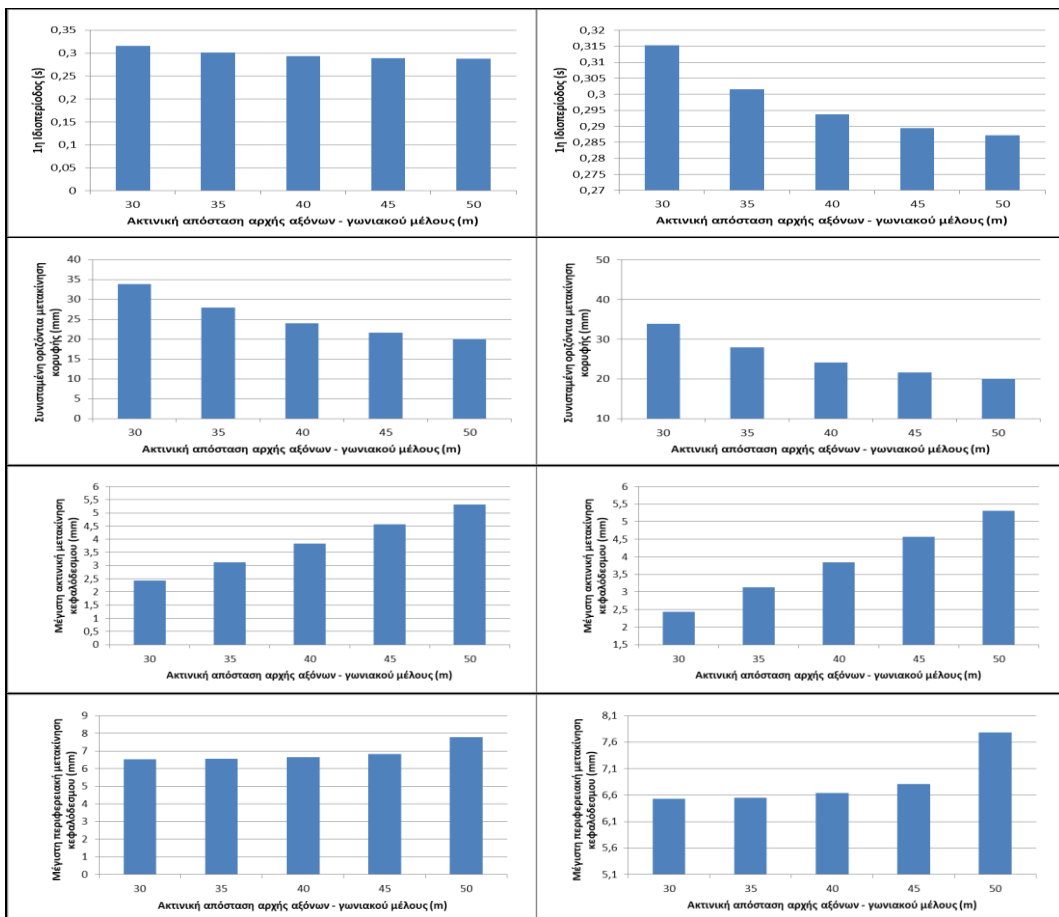


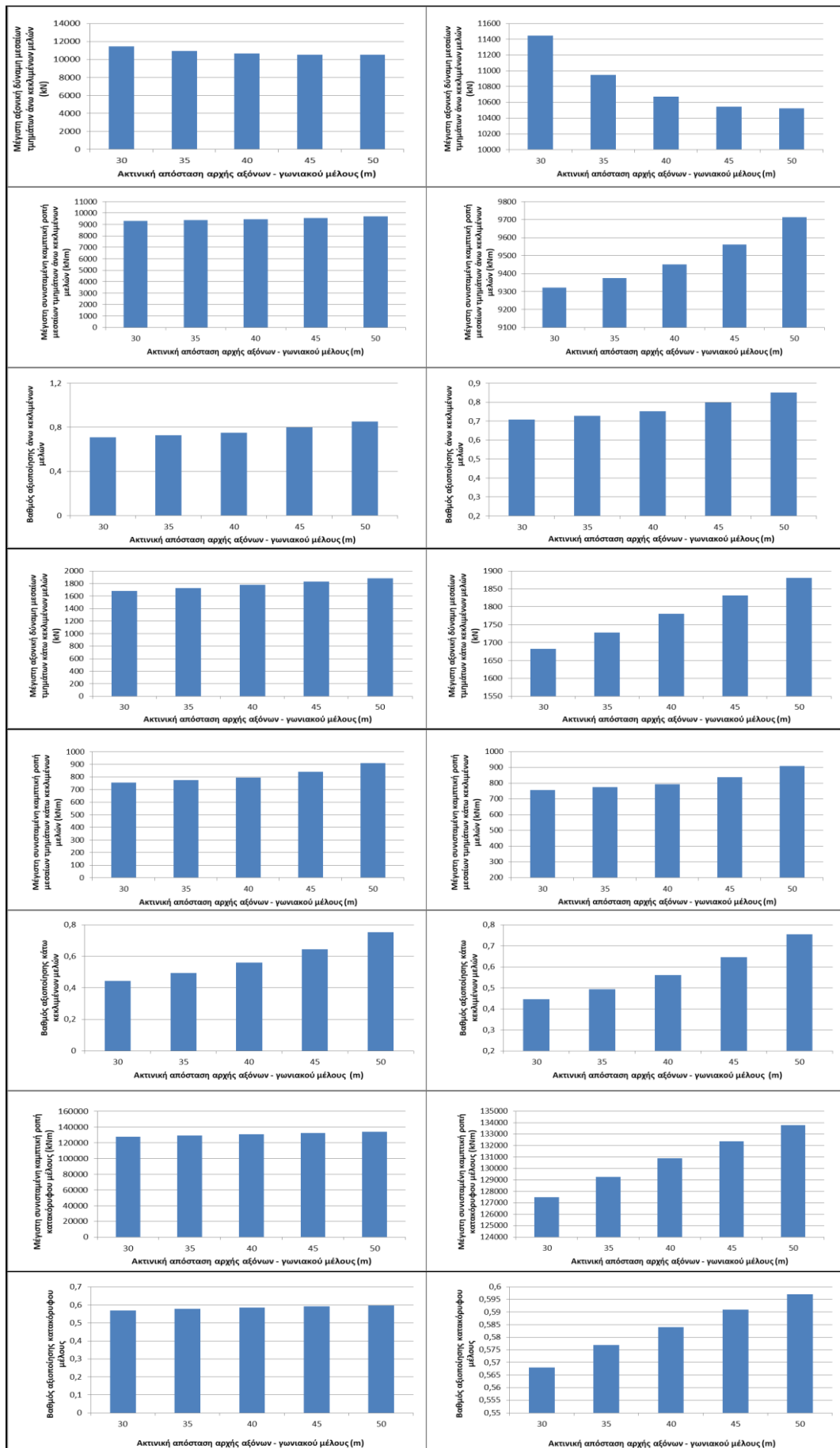


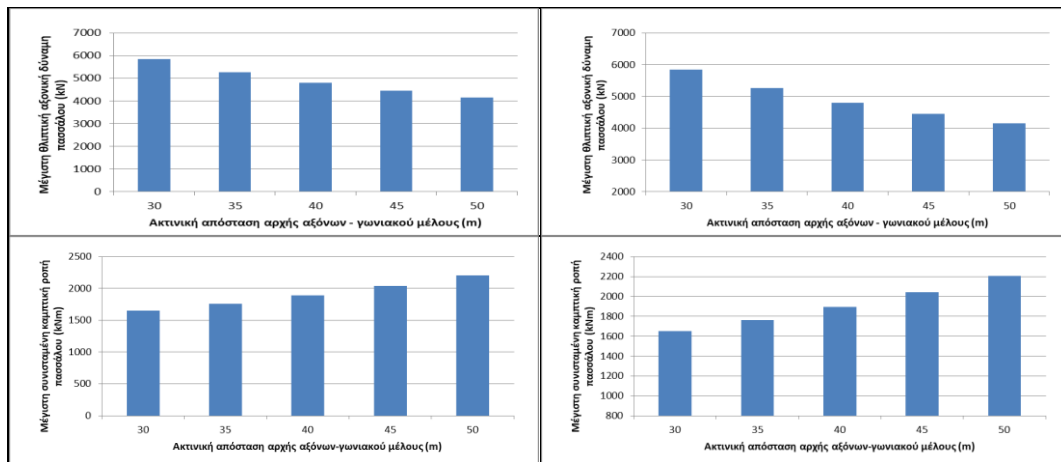
Σχήμα 4.2: Συγκριτικά διαγράμματα επιρροής υψομέτρου κόμβου κάτω κεκλιμένων μελών

### 4.1.2 Επίδραση ακτινικής απόστασης αρχής αξόνων-γωνιακού μέλους

Τα αριθμητικά αποτελέσματα της τρίτης ομάδας παραμετρικών αναλύσεων παρουσιάζονται μέσω των ακόλουθων συγκριτικών διαγραμμάτων.







Σχήμα 4.3: Συγκριτικά διαγράμματα επιρροής ακτινικής απόστασης αρχής αξόνων-γωνιακού μέλους

## 4.2 Επίδραση των διατομών των μελών

Στην συγκεκριμένη ενότητα πραγματοποιούνται έξι ομάδες παραμετρικών αναλύσεων ούτως ώστε να διερευνηθεί η επιρροή έξι βασικών γεωμετρικών παραμέτρων. Ως μοντέλο αναφοράς χρησιμοποιείται αυτό του οποίου τα χαρακτηριστικά περιγράφηκαν αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Στην πρώτη ομάδα παραμετρικών αναλύσεων εξετάζεται η επίδραση της αλλαγής της εξωτερικής διαμέτρου των άνω κεκλιμένων μελών. Συγκεκριμένα δημιουργούνται τέσσερα προσομοιώματα στα οποία μεταβάλλεται η εξωτερική διάμετρος των άνω κεκλιμένων μελών με βήμα 0,2m. Ειδικότερα εξάγονται αριθμητικά αποτελέσματα για προσομοιώματα με εξωτερική διάμετρο άνω κεκλιμένων μελών 1,6m, 1,8m, 2,2m, 2,4m και συγκρίνονται με το ήδη υπάρχον προσομοίωμα με εξωτερική διάμετρο άνω κεκλιμένων μελών 2m.

Στην δεύτερη ομάδα παραμετρικών αναλύσεων διερευνάται η επίδραση του πάχους των άνω κεκλιμένων μελών. Ειδικότερα συγκρίνονται πέντε διαφορετικά προσομοιώματα στα οποία μεταβάλλεται το πάχος των άνω κεκλιμένων μελών με βήμα 2mm. Πιο συγκεκριμένα εξάγονται αριθμητικά αποτελέσματα για τέσσερα προσομοιώματα με πάχος άνω κεκλιμένων μελών 16mm, 18mm, 22mm, 24mm τα οποία συγκρίνονται με τα αντίστοιχα του ήδη υπάρχοντος προσομοιώματος με πάχος άνω κεκλιμένων μελών 20mm.

Στην τρίτη ομάδα παραμετρικών αναλύσεων εξετάζεται η επιρροή της εξωτερικής διαμέτρου των κάτω κεκλιμένων μελών. Ειδικότερα σε αυτήν περίπτωση δημιουργούνται τέσσερα προσομοιώματα στα οποία μεταβάλλεται η εξωτερική διάμετρος των κάτω κεκλιμένων μελών με βήμα 0,1m. Κατόπιν εξάγονται αριθμητικά αποτελέσματα για τα τέσσερα αυτά προσομοιώματα με εξωτερική διάμετρο κάτω κεκλιμένων μελών 0,8m, 0,9m, 1,1m, 1,2m και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα του ήδη υπάρχοντος προσομοιώματος με εξωτερική διάμετρο 1m.

Στην τέταρτη ομάδα παραμετρικών αναλύσεων εξετάζεται η επίδραση του πάχους των κάτω κεκλιμένων μελών. Ειδικότερα πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ πέντε διαφορετικών προσομοιωμάτων στα οποία μεταβάλλεται το πάχος των κάτω κεκλιμένων

μελών με βήμα 1mm. Δημιουργούνται τέσσερα προσομοιώματα με πάχος κάτω κεκλιμένων μελών 8mm, 9mm, 11mm, 12mm και κατόπιν εξάγονται από αυτά αριθμητικά αποτελέσματα τα οποία συγκρίνονται με τα αντίστοιχα του ήδη υπάρχοντος προσομοιώματος με πάχος κάτω κεκλιμένων μελών 10mm.

Στην πέμπτη ομάδα παραμετρικών αναλύσεων εξετάζεται η επίδραση της εξωτερικής διαμέτρου του κατακόρυφου μέλους. Πιο συγκεκριμένα δημιουργείται ένα προσομοίωμα στο οποίο μεταβάλλεται η εξωτερική διάμετρος του κατακόρυφου στελέχους από 4,3m στην κορυφή σε 3m στη βάση ούτως ώστε αυτό να αποκτήσει κωνικό σχήμα. Στη συνέχεια εξάγονται αριθμητικά αποτελέσματα τα οποία συγκρίνονται με τα αντίστοιχα του ήδη υπάρχοντος προσομοιώματος στο οποίο το κατακόρυφο μέλος έχει κυλινδρικό σχήμα με εξωτερική διάμετρο 4,3m.

Στην έκτη ομάδα παραμετρικών αναλύσεων διερευνάται η επιρροή του πάχους του κατακόρυφου στελέχους. Για τον σκοπό αυτό δημιουργείται ένα προσομοίωμα στο οποίο μεταβάλλεται το πάχος των επιμέρους μελών του κατακόρυφου στελέχους κατάλληλα ούτως ώστε ο βαθμός αξιοποίησης του να κυμαίνεται μεταξύ 70%-100%. Κατόπιν εξάγονται αριθμητικά αποτελέσματα τα οποία συγκρίνονται με τα αντίστοιχα του ήδη υπάρχοντος προσομοιώματος το οποίο περιγράφηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.

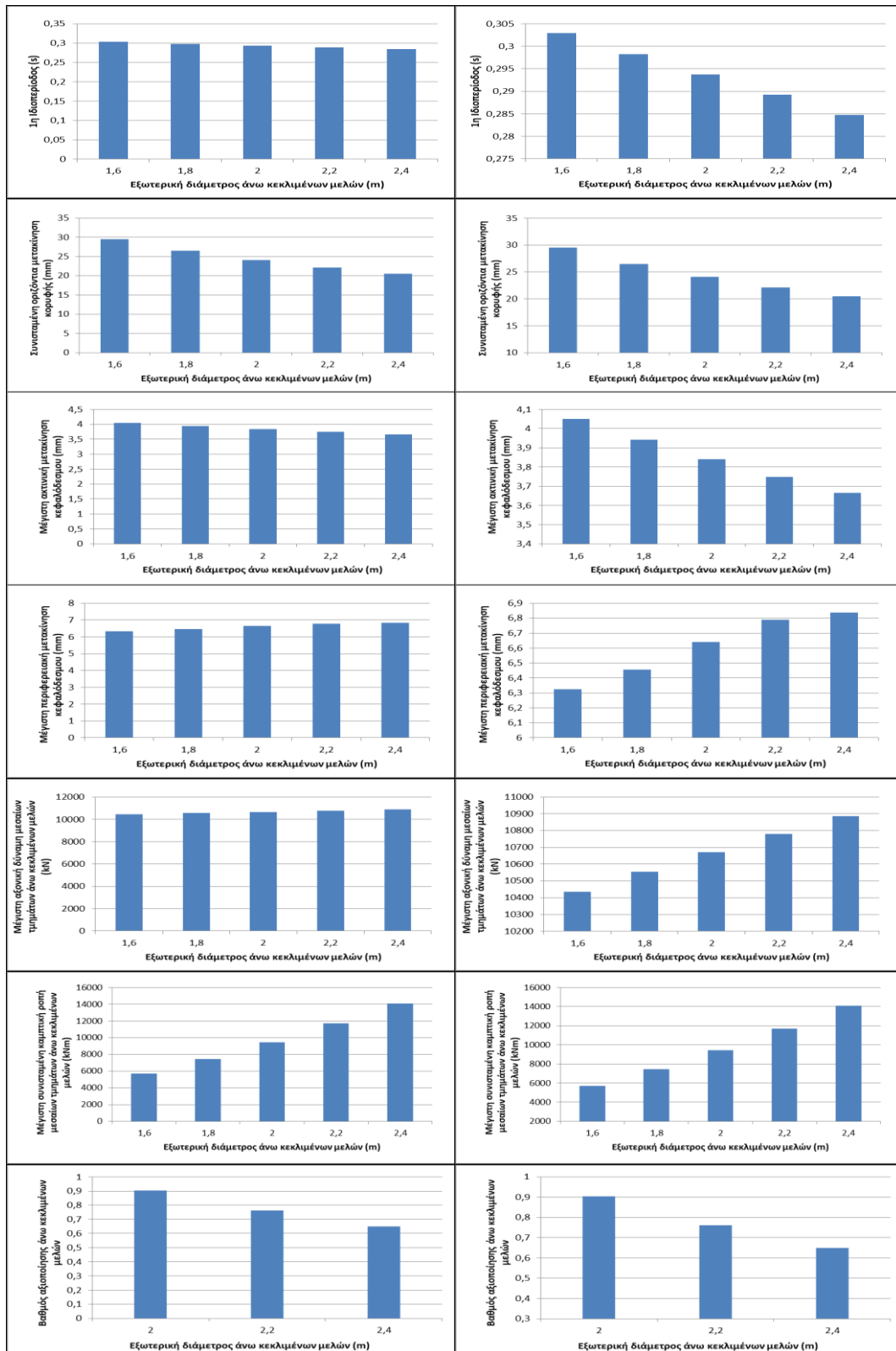
Για τις έξι ομάδες παραμετρικών αναλύσεων επιλέχθηκε να εξάγονται αριθμητικά αποτελέσματα για τις ακόλουθες χαρακτηριστικές τιμές:

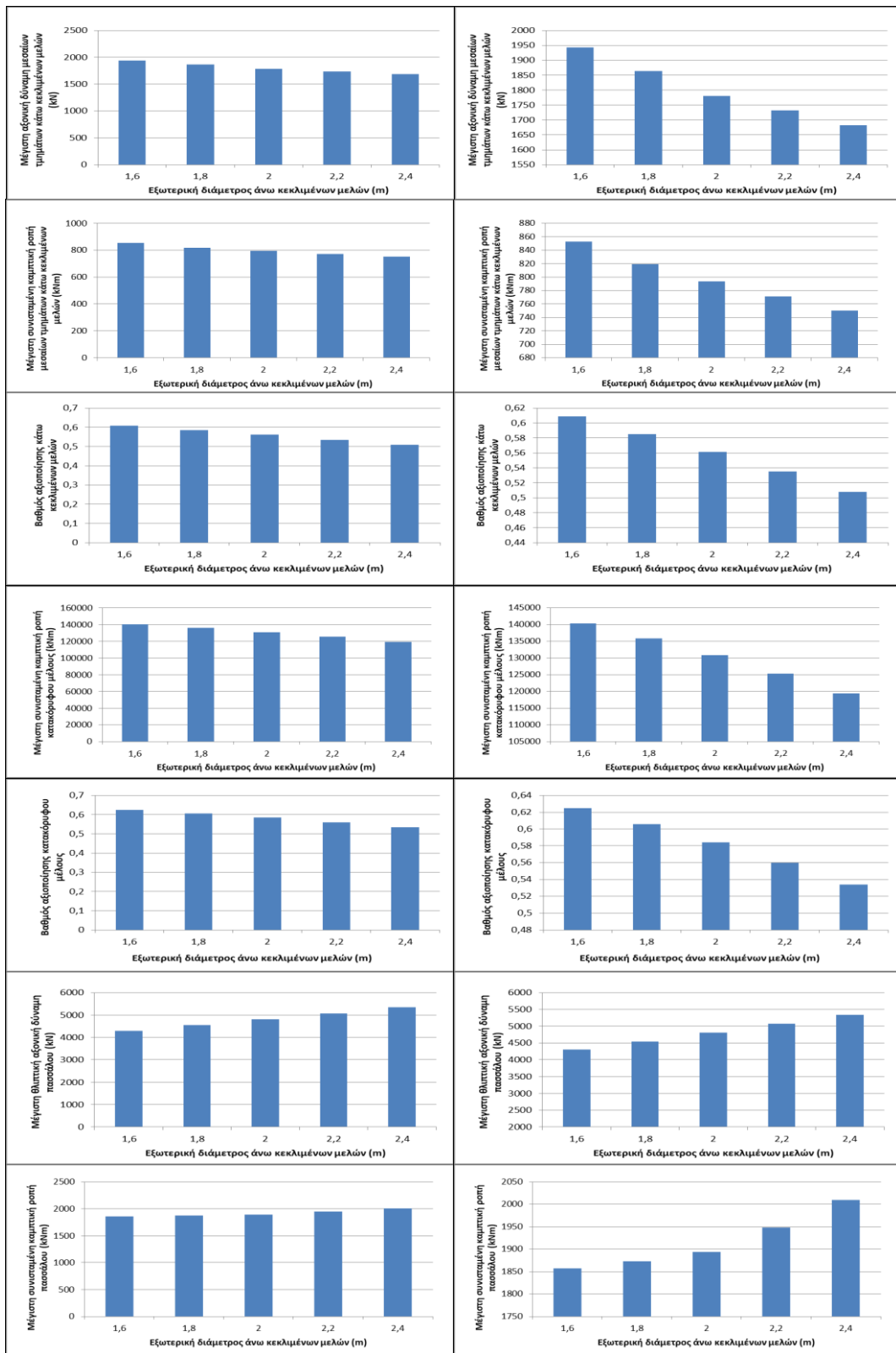
- 1<sup>η</sup> Ιδιοπερίοδος
- Συνισταμένη οριζόντια μετακίνηση κορυφής
- Μέγιστη ακτινική μετακίνηση κεφαλόδεσμου
- Μέγιστη περιφερειακή μετακίνηση κεφαλόδεσμου
- Μέγιστη αξονική δύναμη μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών
- Μέγιστη συνισταμένη καμπτική ροπή μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών
- Βαθμός αξιοποίησης άνω κεκλιμένων μελών
- Μέγιστη αξονική δύναμη μεσαίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών
- Μέγιστη συνισταμένη καμπτική ροπή μεσαίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών
- Βαθμός αξιοποίησης κάτω κεκλιμένων μελών
- Μέγιστη συνισταμένη καμπτική ροπή κατακόρυφου μέλους
- Βαθμός αξιοποίησης κατακόρυφου μέλους
- Μέγιστη θλιπτική αξονική δύναμη πασσάλου
- Μέγιστη συνισταμένη καμπτική ροπή πασσάλου

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε όλα τα προσομοιώματα των παραμετρικών αναλύσεων εφαρμόστηκαν οι ίδιοι συνδυασμοί φόρτισης όπως αυτοί περιγράφηκαν στην ενότητα 3.5 καθώς και ότι τα αριθμητικά αποτελέσματα τα οποία εξήχθησαν αφορούν τις μέγιστες τιμές μεταξύ των τριών συνδυασμών φόρτισης.

### 4.2.1 Επίδραση εξωτερικής διαμέτρου και πάχους άνω κεκλιμένων μελών

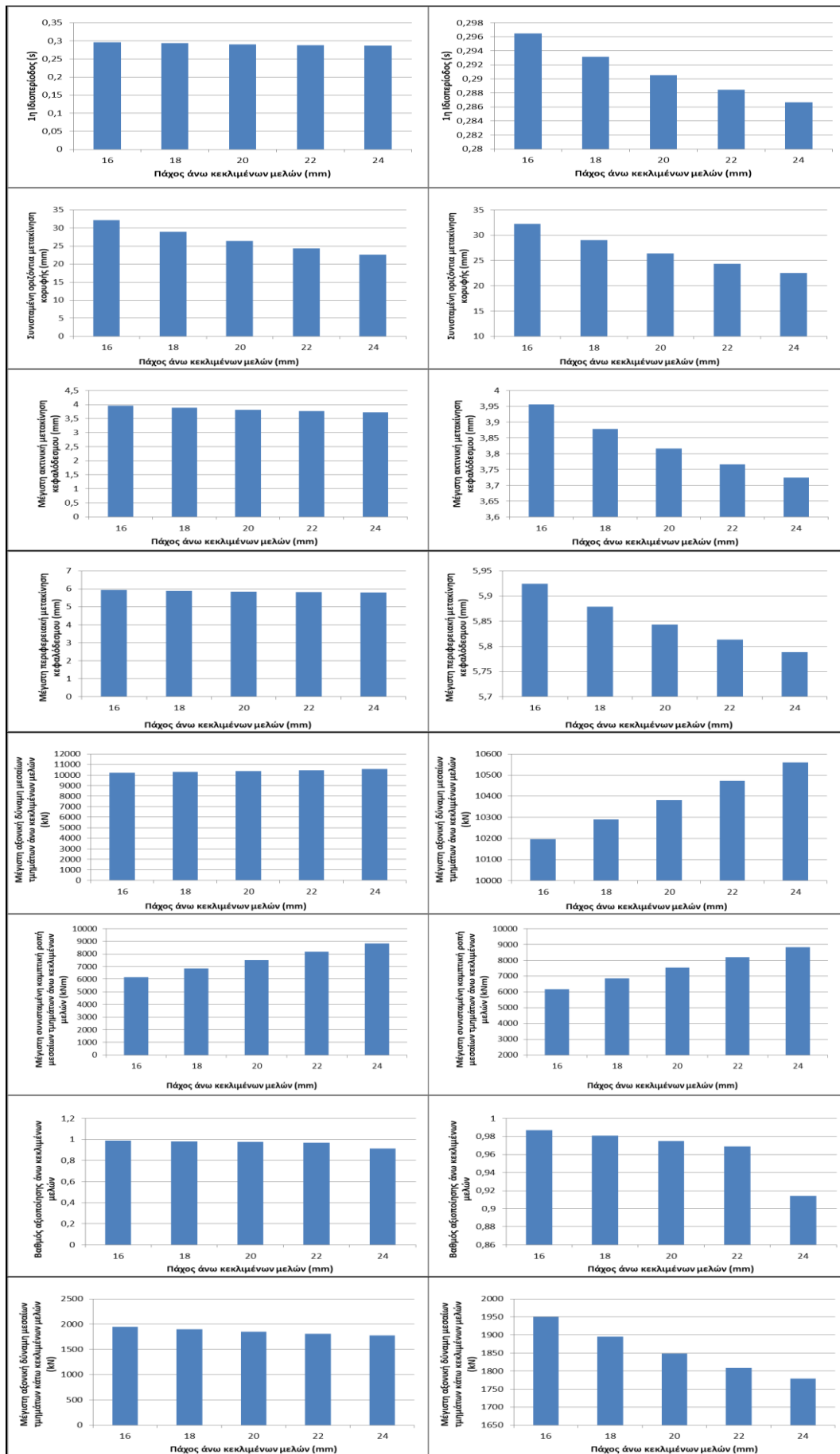
Τα αριθμητικά αποτελέσματα της πρώτης ομάδας παραμετρικών αναλύσεων παρουσιάζονται μέσω των ακόλουθων συγκριτικών διαγραμμάτων.



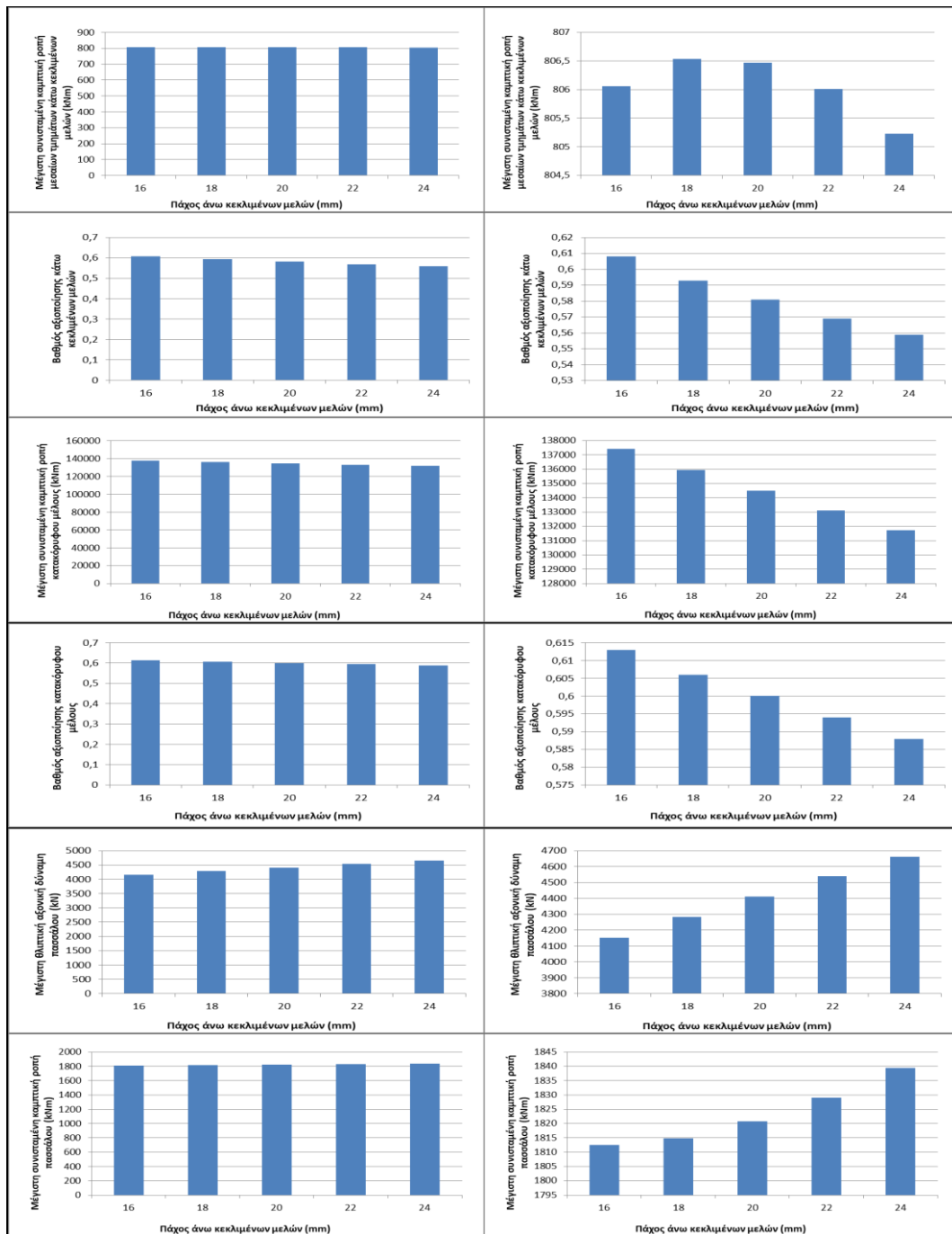


Σχήμα 4.4: Συγκριτικά διαγράμματα επιρροής εξωτερικής διαμέτρου άνω κεκλιμένων μελών

Τα αριθμητικά αποτελέσματα της δεύτερης ομάδας παραμετρικών αναλύσεων παρουσιάζονται μέσω των ακόλουθων συγκριτικών διαγραμμάτων.



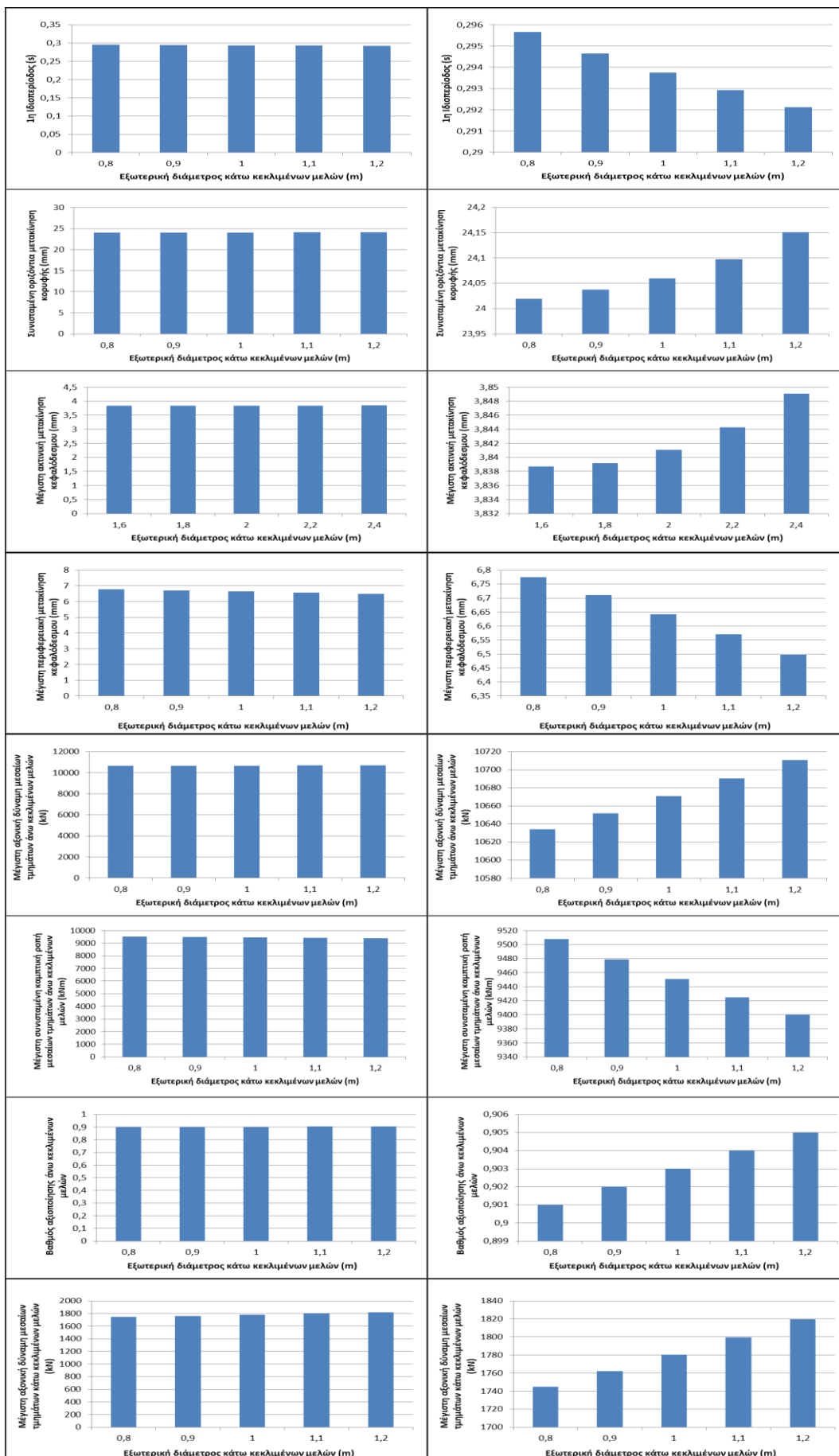


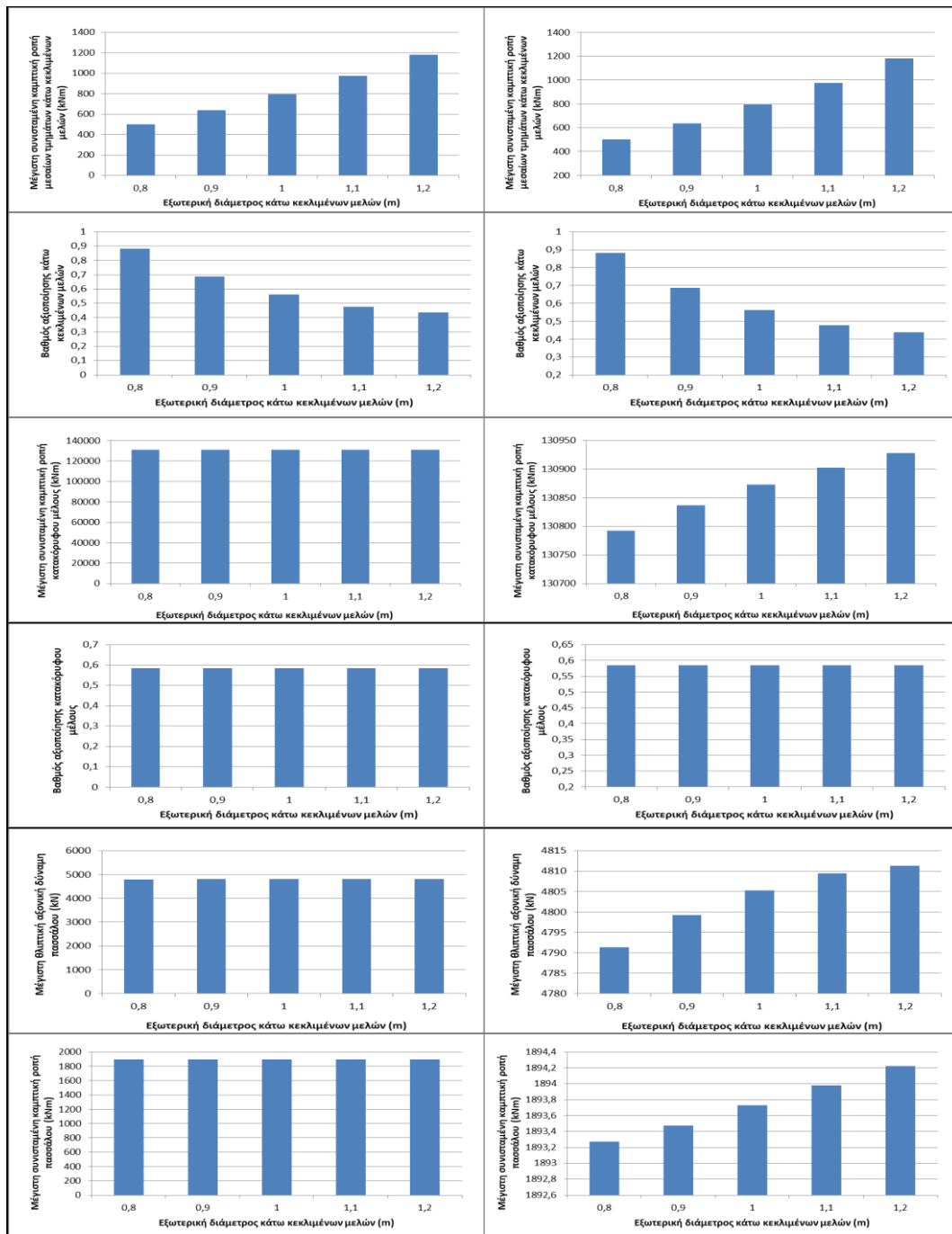


Σχήμα 4.5: Συγκριτικά διαγράμματα επιρροής πάχους άνω κεκλιμένων μελών

#### 4.2.2 Επίδραση εξωτερικής διαμέτρου και πάχους κάτω κεκλιμένων μελών

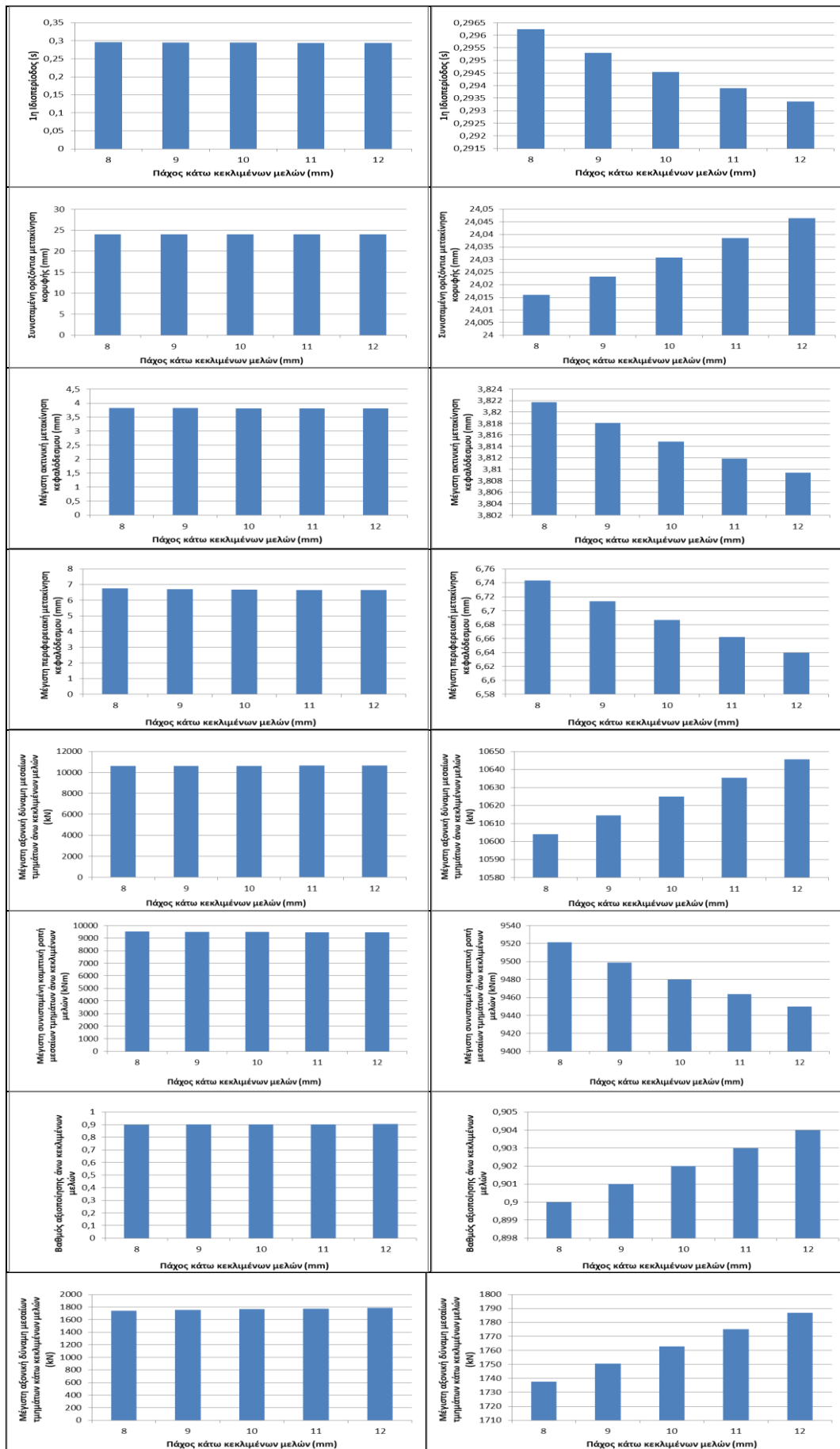
Τα αριθμητικά αποτελέσματα της τρίτης ομάδας παραμετρικών αναλύσεων παρουσιάζονται μέσω των ακόλουθων συγκριτικών διαγραμμάτων.

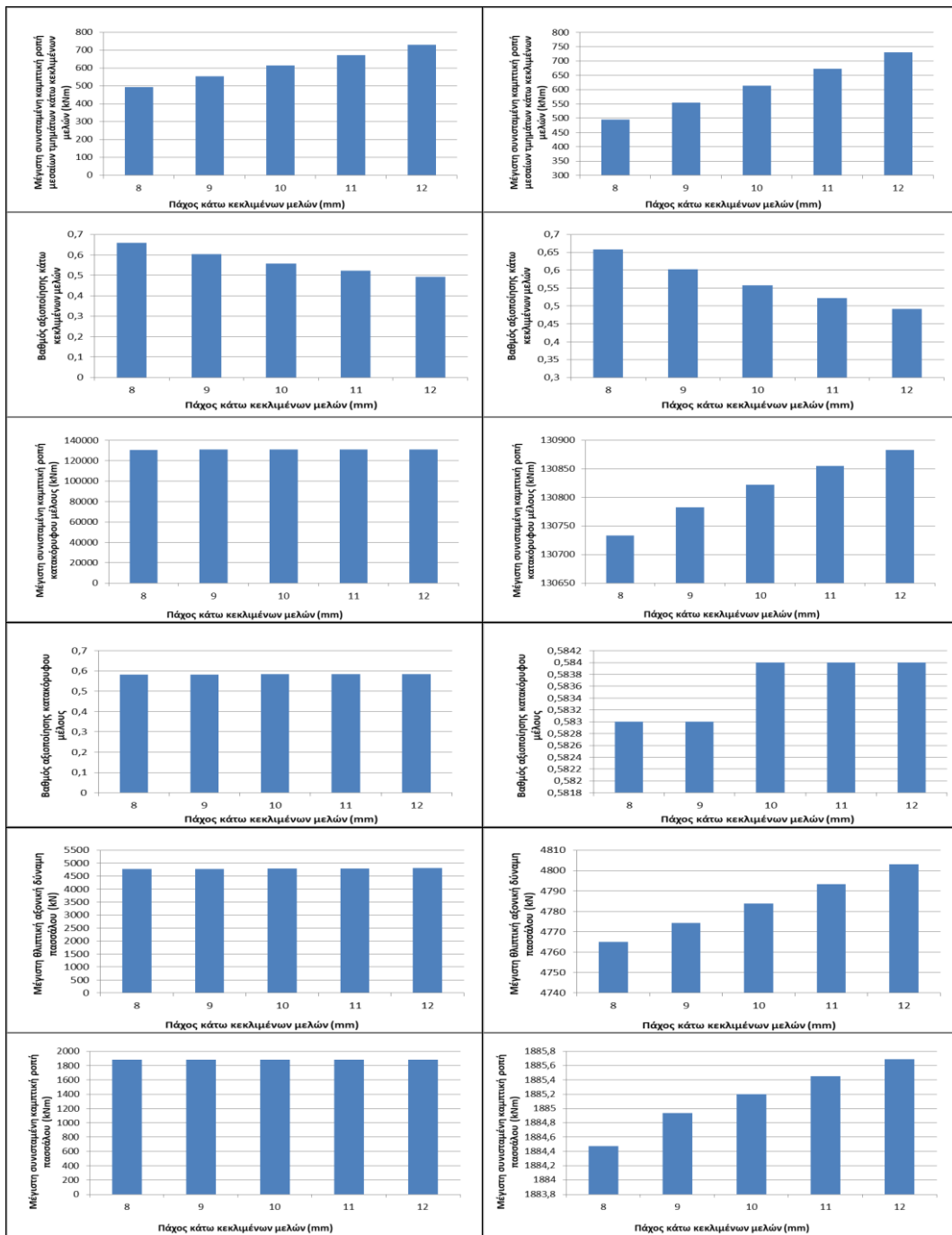




Σχήμα 4.6: Συγκριτικά διαγράμματα επιρροής εξωτερικής διαμέτρου κάτω κεκλιμένων μελών

Τα αριθμητικά αποτελέσματα της τέταρτης ομάδας παραμετρικών αναλύσεων παρουσιάζονται μέσω των ακόλουθων συγκριτικών διαγραμμάτων.

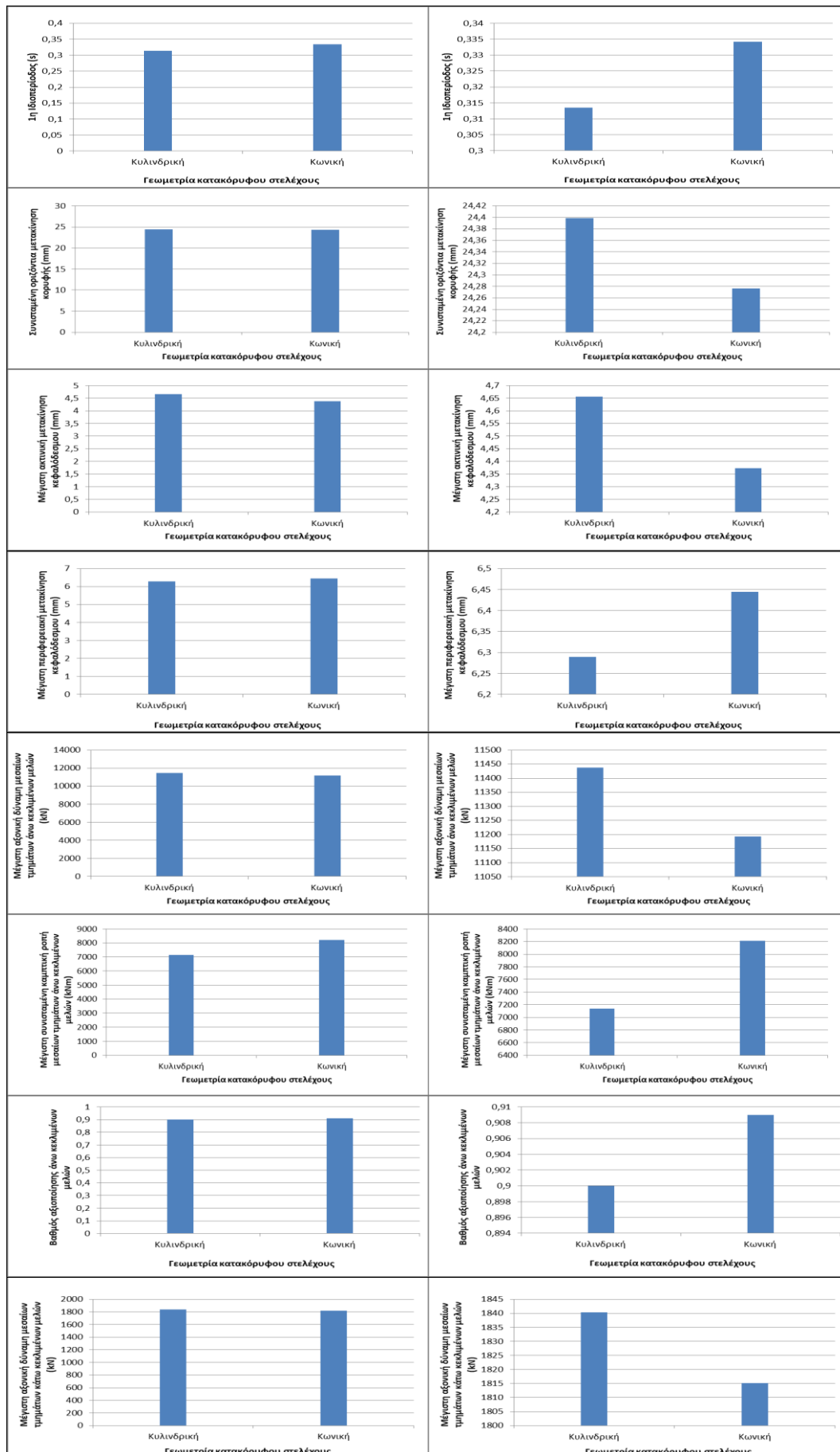


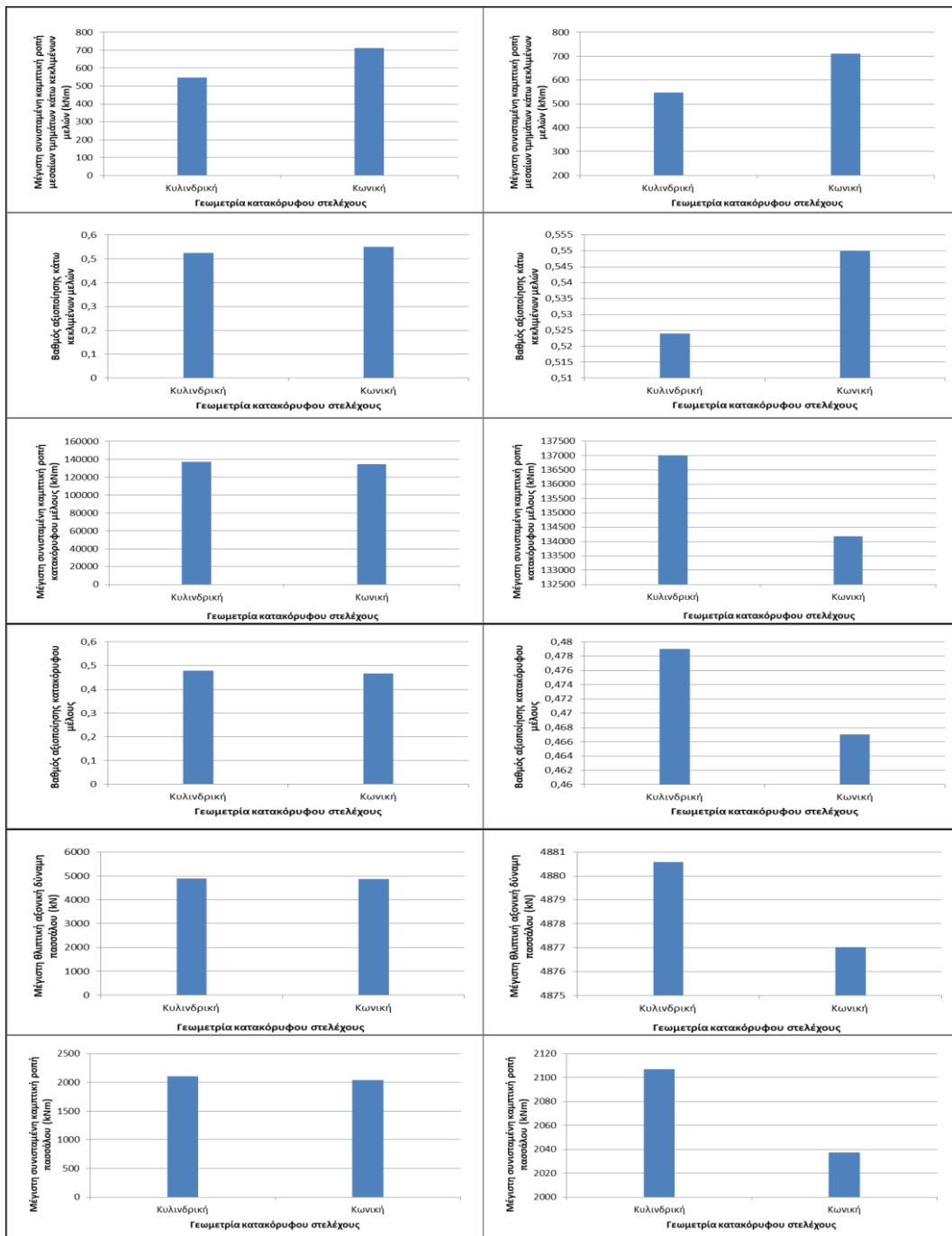


Σχήμα 4.7: Συγκριτικά διαγράμματα επιρροής πάχους κάτω κεκλιμένων μελών

### 4.2.3 Επίδραση εξωτερικής διαμέτρου και πάχους κατακόρυφου στελέχους

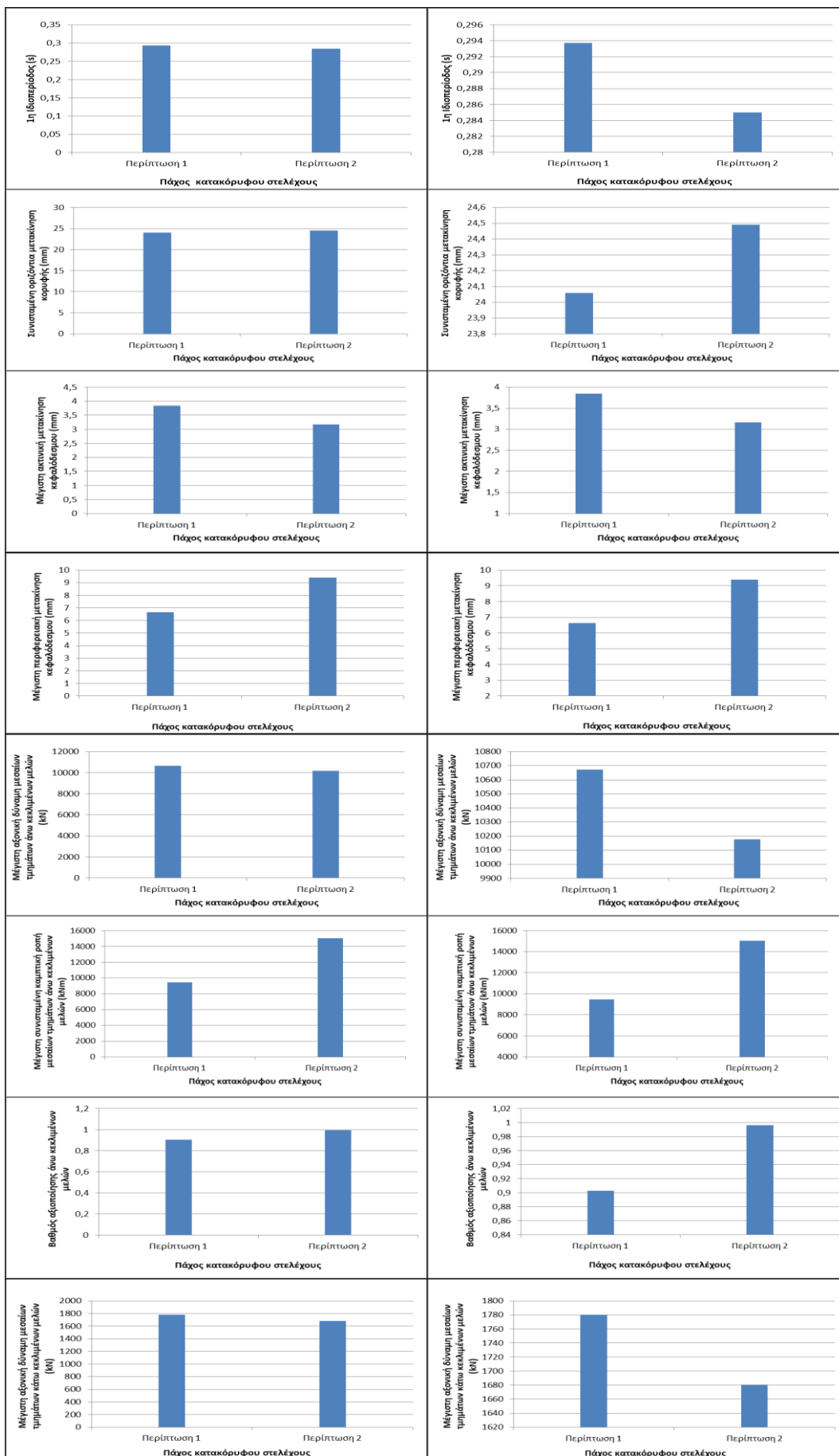
Τα αριθμητικά αποτελέσματα της πέμπτης ομάδας παραμετρικών αναλύσεων παρουσιάζονται μέσω των ακόλουθων συγκριτικών διαγραμμάτων.



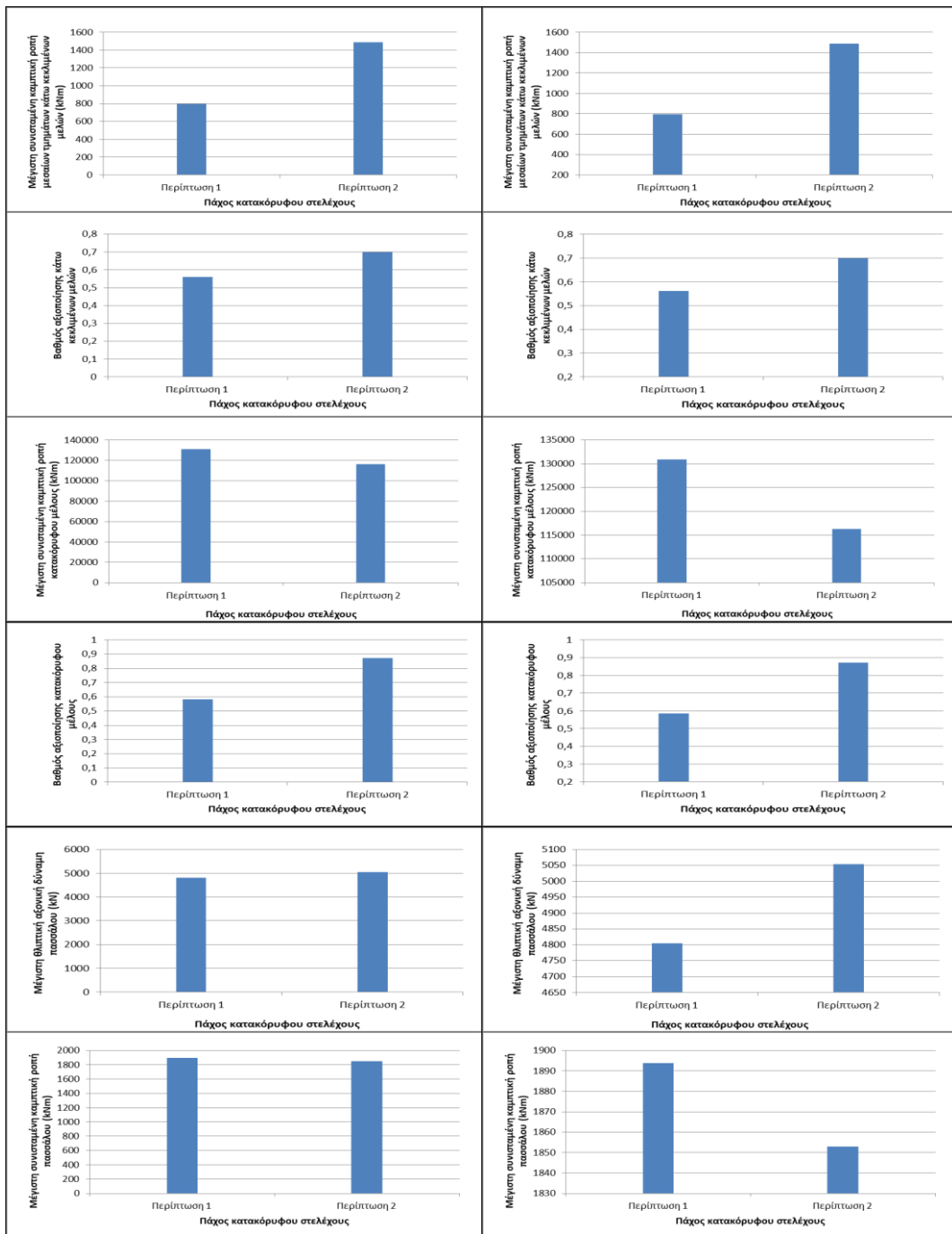


Σχήμα 4.8: Συγκριτικά διαγράμματα επιρροής εξωτερικής διαμέτρου κατακόρυφου στελέχους

Τα αριθμητικά αποτελέσματα της έκτης ομάδας παραμετρικών αναλύσεων παρουσιάζονται μέσω των ακόλουθων συγκριτικών διαγραμμάτων.







Σχήμα 4.9: Συγκριτικά διαγράμματα επιρροής πάχους κατακόρυφου στελέχους

### 4.3 Επίδραση του εδάφους θεμελίωσης

Στην συγκεκριμένη ενότητα πραγματοποιείται μία ομάδα παραμετρικών αναλύσεων ούτως ώστε να διερευνηθεί η επιρροή του εδάφους θεμελίωσης στη συνολική απόκριση της κατασκευής. Ως μοντέλο αναφοράς χρησιμοποιείται αυτό του οποίου τα χαρακτηριστικά περιγράφηκαν αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Πιο συγκεκριμένα με αυτήν την ομάδα παραμετρικών αναλύσεων εξετάζεται η επίδραση της κατηγορίας εδάφους στο οποίο θεμελιώνεται η κατασκευή. Για το σκοπό αυτό δημιουργούνται τέσσερα προσομοιώματα στα οποία μεταβάλλεται κάθε φορά ο τρόπος με τον οποίο προσομοιώνεται το έδαφος θεμελίωσης με τη βοήθεια των ελατηρίων μη γραμμικής συμπεριφοράς. Στη συνέχεια εξάγονται αριθμητικά αποτελέσματα για τα τέσσερα αυτά προσομοιώματα τα οποία παρουσιάζονται σε συγκριτικά διαγράμματα.

Στα τέσσερα αυτά προσομοιώματα επιλέχθηκε η διερεύνηση τεσσάρων κατηγοριών εδάφους. Συγκεκριμένα εξετάστηκαν οι περιπτώσεις της χαλαρής άμμου, της στιφρής αργίλου, της ενδιάμεσης αργίλου και της πολύ στιφρής αργίλου η οποία αφορά το μοντέλο αναφοράς το οποίο περιγράφηκε αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η προσομοίωση του εδάφους επιτυγχάνεται με την εισαγωγή ελατηρίων μη γραμμικής συμπεριφοράς κατά μήκος των γραμμικών στοιχείων του πασσάλου και του κεφαλόδεσμου.

Στα προσομοιώματα των περιπτώσεων αργιλικών εδαφών η στιβαρότητα των ελατηρίων παραμένει σταθερή με την αύξηση του βάθους. Στις περιπτώσεις αυτές στα ελατήρια των πασσάλων ορίστηκε ο νόμος μη γραμμικής συμπεριφοράς  $p$ - $\gamma$  του ελατηρίου στις δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις (ακτινική, εφαπτομενική).

Η καμπύλη  $p$ - $\gamma$  μέσω της οποίας περιγράφεται η μη γραμμική συμπεριφορά των ελατηρίων για την περίπτωση των αργιλικών εδαφών εξάγεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{p}{p_u} = 0.5 \left( \frac{\gamma}{\gamma_c} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (p \leq p_u) \quad (1) \quad [23], \text{ εξ. (9.36), σελ. 519}$$

Η τιμή του οριακού φορτίου  $p_u$  μπορεί να υπολογιστεί βάσει διαφόρων προτάσεων μία εκ των οποίων είναι η ακόλουθη (Broms):

$$p_u = 9c_u d \quad \text{όπου} \quad (2) \quad [23], \text{ σελ. 518}$$

$c_u$  η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους στη συγκεκριμένη στάθμη [23], σελ. 491, πιν. 9.01 και  $d$  η διάμετρος του πασσάλου. Στην περίπτωση στιφρών αργίλων η τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής παραμένει σταθερή με την αύξηση του βάθους με αποτέλεσμα η τιμή της οριακής φόρτισης να εξαρτάται αποκλειστικά από την τιμή της διαμέτρου.

Η τιμή της μετατόπισης  $\gamma_c$  η οποία αντιστοιχεί σε τιμή φορτίου  $p=0.5p_u$  μπορεί να υπολογισθεί βάσει του τύπου:

$$\gamma_c = \gamma_{50} = 2.5\varepsilon_{50} d \quad (3) \quad [23], \text{ σελ. 518}$$

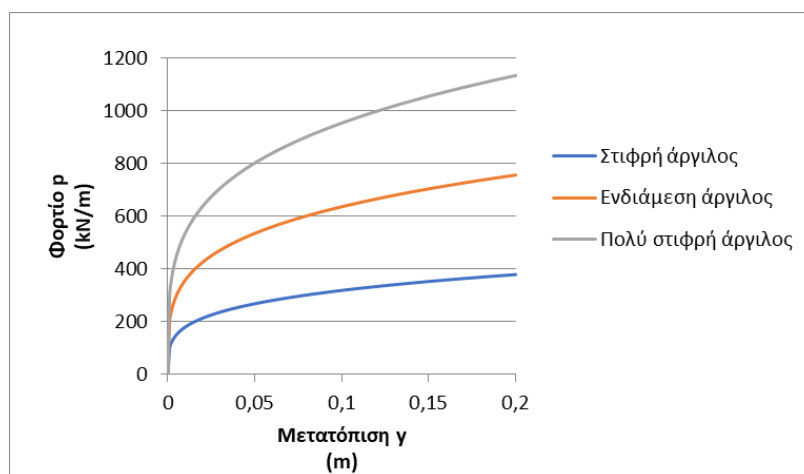
Το μέγεθος  $\epsilon_{50}$  μπορεί να υπολογισθεί από κατάλληλη δοκιμή τριαξονικής θλίψης ή εναλλακτικά να εκτιμηθεί εντός των συνηθών ορίων  $\epsilon_{50}=(0.5 \div 1)10^{-2}$  [23], σελ. 519

Οι τιμές των προαναφερθεισών παραμέτρων για τις περιπτώσεις των αργιλικών εδαφών οι οποίες εξετάζονται στα τρία προσομοιώματα παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

d (m)	$\epsilon_{50}$	$\gamma_c$ (m)	$c_u$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\rho_u$ (kN/m)
1	0.01	0.025	50	450
1	0.01	0.025	100	900
1	0.01	0.025	150	1350

Πίνακας 4.1: Πίνακας τιμών εδαφικών χαρακτηριστικών περιπτώσεων αργιλικών εδαφών κατά μήκος του πασσάλου στην ακτινική, εφαπτομενική διεύθυνση

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (1) την τιμή της μετατόπισης  $\gamma$  με βήμα  $\gamma=0.01m$  έως  $\gamma=0.2m$  προκύπτουν οι ακόλουθες καμπύλες  $p-\gamma$  για τις περιπτώσεις αργιλικών εδαφών.



Σχήμα 4.10: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης κατά μήκος του πασσάλου στην ακτινική, εφαπτομενική διεύθυνση για τις περιπτώσεις αργιλικών εδαφών

Στο προσομοίωμα της περίπτωσης χαλαρής άμμου η στιβαρότητα των ελατηρίων μεταβάλλεται με την αύξηση του βάθους. Στην περίπτωση αυτή στα ελατήρια των πασσάλων ορίστηκε σε κάθε στάθμη ο νόμος μη γραμμικής συμπεριφοράς  $p-\gamma$  του ελατηρίου στις δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις (ακτινική, εφαπτομενική).

Η καμπύλη  $p-\gamma$  μέσω της οποίας περιγράφεται η μη γραμμική συμπεριφορά των ελατηρίων για την περίπτωση της χαλαρής άμμου σε κάθε ξεχωριστή στάθμη εξάγεται από την ακόλουθη σχέση:

$$p = \frac{\gamma}{\left(\frac{1}{kiz}\right) + \left(\frac{\gamma}{pu}\right)} \quad (4) \quad [24]$$

Η τιμή του οριακού φορτίου  $\rho_u$  μπορεί να υπολογιστεί βάσει της ακόλουθης σχέσης:

$$\rho_u = \sigma'vd \min\left(c1 \left(\frac{z}{d}\right) + c2; c3\right) \quad (5) \quad [24] \text{ όπου}$$

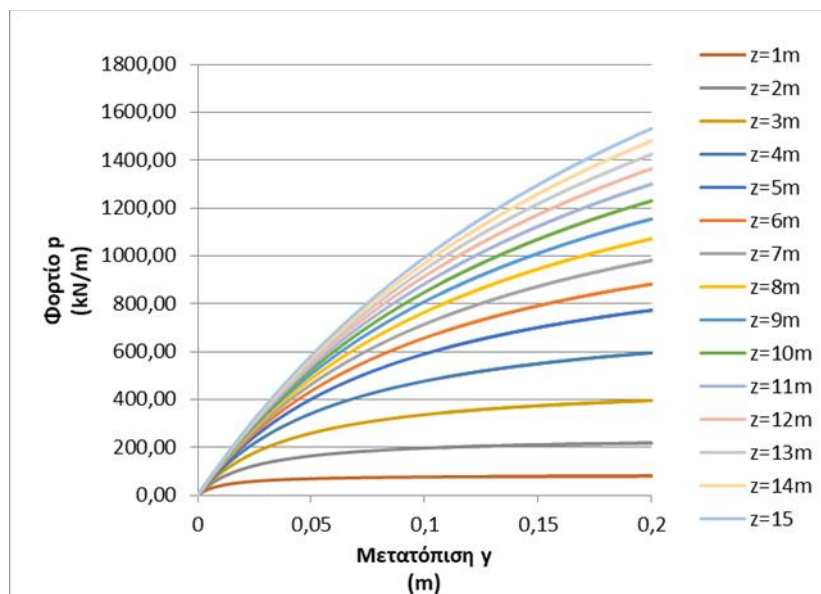
$\sigma'v=\gamma z$ ,  $\gamma=16,5\text{kN/m}^3$  [24],  $c1=0,115(10^{0,0405\phi})$  όπου  $\phi=32^\circ$  [24],  $c2=0,571(10^{0,022\phi})$ , [24]  
 $c3=0,646(10^{0,0555\phi})$  [24],  $kini = kini,0\left(\frac{1-z}{1+\frac{z}{d}}\right)\left(\frac{d}{0,6}\right)^{-0,35}$  [24],  $d$  η διάμετρος του πασσάλου  
 και  $z$  η αντίστοιχη στάθμη εδάφους.

Οι τιμές των προαναφερθεισών σταθερών παραμέτρων για την περίπτωση χαλαρής άμμου η οποία εξετάζεται στο ένα εκ των τεσσάρων προσομοιωμάτων παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

d (m)	$\phi$ (degrees)	c1	c2	c3	kini,0 (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
1	32	2,274	2,888	38,568	18000	16,5

Πίνακας 4.2: Πίνακας τιμών εδαφικών χαρακτηριστικών περίπτωσης χαλαρής άμμου κατά μήκος του πασσάλου στην ακτινική, εφαπτομενική διεύθυνση

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4) την τιμή της μετατόπισης  $\gamma$  με βήμα  $\gamma=0.002\text{m}$  έως  $\gamma=0,2\text{m}$ , την τιμή της διαμέτρου  $d$  του πασσάλου και την στάθμη  $z$  του εδάφους προκύπτουν οι ακόλουθες καμπύλες  $p-\gamma$  για την περίπτωση χαλαρής άμμου.



Σχήμα 4.11: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης κατά μήκος του πασσάλου στην ακτινική, εφαπτομενική διεύθυνση στις διαφορετικές στάθμες εδάφους για την περίπτωση χαλαρής άμμου

Για την περίπτωση των αργιλικών εδαφών η εισαγωγή του νόμου μη γραμμικής συμπεριφοράς στα ελατήρια των κεφαλόδεσμων στην περιφερειακή διεύθυνση πραγματοποιήθηκε μέσω αντικατάστασης στις εξισώσεις (2), (3) της διαμέτρου  $d$  του πασσάλου με το ύψος  $h=2\text{m}$  των κεφαλόδεσμων. Η εισαγωγή του νόμου μη γραμμικής συμπεριφοράς στην ακτινική διεύθυνση πραγματοποιήθηκε μέσω αντικατάστασης στις εξισώσεις (2), (3) της διαμέτρου  $d$  του πασσάλου με το πλάτος  $b=3\text{m}$  του κεφαλόδεσμου και την εισαγωγή των συγκεκριμένων ελατηρίων κατά μήκος του γραμμικού τμήματος του εσωτερικού πασσάλου που εισέρχεται στον κεφαλόδεσμο.

Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην ακτινική και εφαπτομενική διεύθυνση παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στους ακόλουθους πίνακες.

Ακτινική διεύθυνση

b (m)	$\epsilon_{50}$	$\gamma_c$ (m)	$c_u$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\rho_u$ (kN/m)
3	0.01	0.075	50	1350
3	0.01	0.075	100	2700
3	0.01	0.075	150	4050

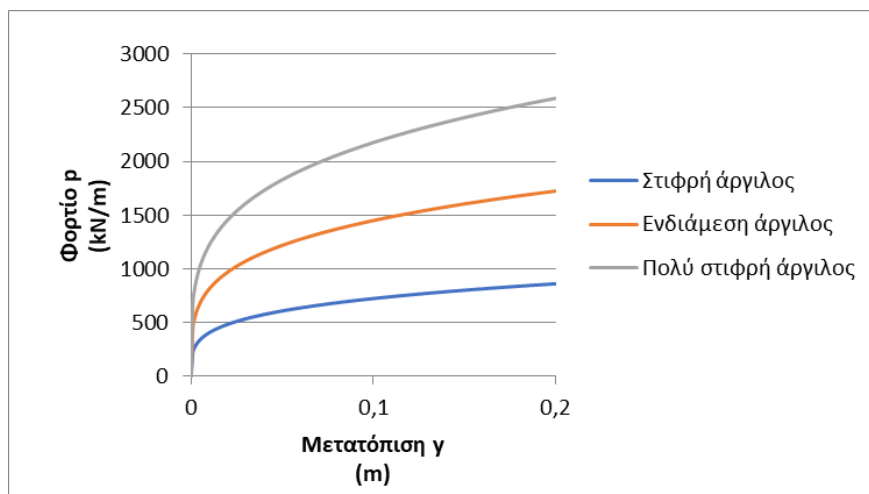
Πίνακας 4.3: Πίνακας τιμών εδαφικών χαρακτηριστικών αργιλικών εδαφών κατά μήκος του γραμμικού στοιχείου που εισέρχεται στον κεφαλόδεσμο στην ακτινική διεύθυνση

Εφαπτομενική διεύθυνση

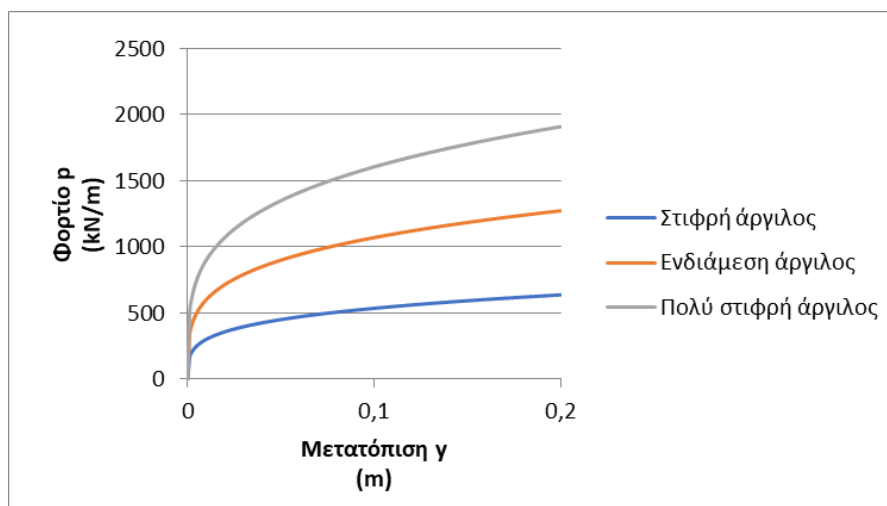
h (m)	$\epsilon_{50}$	$\gamma_c$ (m)	$c_u$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\rho_u$ (kN/m)
2	0.01	0.05	50	900
2	0.01	0.05	100	1800
2	0.01	0.05	150	2700

Πίνακας 4.4: Πίνακας τιμών εδαφικών χαρακτηριστικών αργιλικών εδαφών κατά μήκος του κεφαλόδεσμου στην εφαπτομενική διεύθυνση

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (1) την τιμή της μετατόπισης  $\gamma$  με βήμα  $\gamma=0.001m$  έως  $\gamma=0.2m$  προκύπτουν οι ακόλουθες καμπύλες  $p-\gamma$  στην ακτινική, εφαπτομενική διεύθυνση για την περίπτωση των αργιλικών εδαφών.



Σχήμα 4.12: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης ελατηρίων κατά μήκος του εισερχόμενου γραμμικού τμήματος στον κεφαλόδεσμο στην ακτινική διεύθυνση για την περίπτωση αργιλικών εδαφών



Σχήμα 4.13: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης ελατηρίων κατά μήκος του κεφαλόδεσμου στην εφαπτομενική διεύθυνση για την περίπτωση αργιλικών εδαφών

Για την περίπτωση της χαλαρής άμμου η εισαγωγή του νόμου μη γραμμικής συμπεριφοράς στα ελατήρια των κεφαλόδεσμων στην περιφερειακή διεύθυνση πραγματοποιήθηκε μέσω αντικατάστασης στις εξισώσεις (4), (5) της διαμέτρου  $d$  του πασσάλου με το ύψος  $h=2\text{m}$  των κεφαλόδεσμων. Η εισαγωγή του νόμου μη γραμμικής συμπεριφοράς στην ακτινική διεύθυνση πραγματοποιήθηκε μέσω αντικατάστασης στις εξισώσεις (2), (3) της διαμέτρου  $d$  του πασσάλου με το πλάτος  $b=3\text{m}$  του κεφαλόδεσμου και την εισαγωγή των συγκεκριμένων ελατηρίων κατά μήκος του γραμμικού τμήματος του εσωτερικού πασσάλου που εισέρχεται στον κεφαλόδεσμο.

Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην ακτινική και εφαπτομενική διεύθυνση παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στους ακόλουθους πίνακες.

#### Ακτινική διεύθυνση

$b$ (m)	$\phi$ (degrees)	$c1$	$c2$	$c3$	$k_{ini,0}$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$\gamma$ ( $\text{kN/m}^3$ )
3	32	2,274	2,888	38,568	18000	16,5

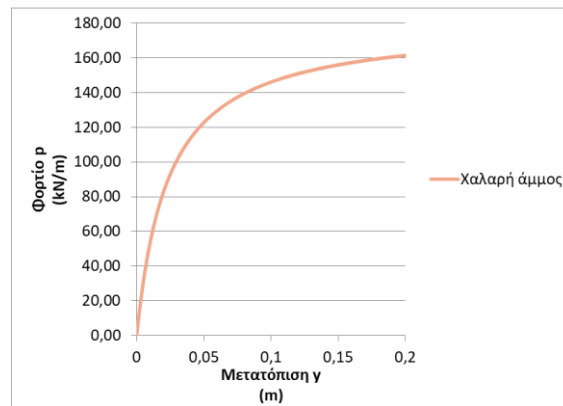
Πίνακας 4.5: Πίνακας τιμών εδαφικών χαρακτηριστικών χαλαρής άμμου κατά μήκος του γραμμικού στοιχείου που εισέρχεται στον κεφαλόδεσμο στην ακτινική διεύθυνση

#### Εφαπτομενική διεύθυνση

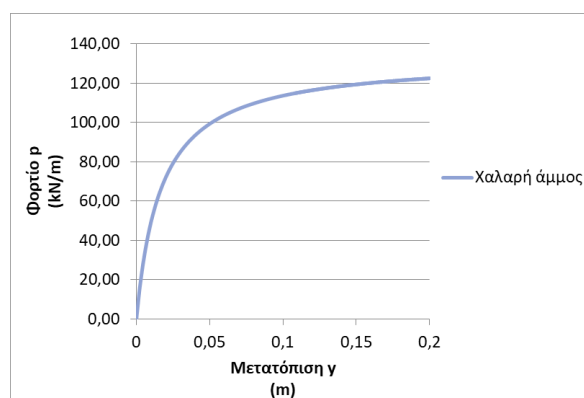
$h$ (m)	$\phi$ (degrees)	$c1$	$c2$	$c3$	$k_{ini,0}$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$\gamma$ ( $\text{kN/m}^3$ )
2	32	2,274	2,888	38,568	18000	16,5

Πίνακας 4.6: Πίνακας τιμών εδαφικών χαρακτηριστικών χαλαρής άμμου κατά μήκος του κεφαλόδεσμου στην εφαπτομενική διεύθυνση

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4) την τιμή της μετατόπισης  $\gamma$  με βήμα  $\gamma=0.002\text{m}$  έως  $\gamma=0.2\text{m}$  και την στάθμη  $z$  του εδάφους προκύπτουν οι ακόλουθες καμπύλες  $p-\gamma$  στην ακτινική, εφαπτομενική διεύθυνση για την περίπτωση της χαλαρής άμμου.



Σχήμα 4.14: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης ελατηρίων κατά μήκος του εισερχόμενου γραμμικού τμήματος στον κεφαλόδεσμο στην ακτινική διεύθυνση για την περίπτωση χαλαρής άμμου



Σχήμα 4.15: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης ελατηρίων κατά μήκος του κεφαλόδεσμου στην εφαπτομενική διεύθυνση για την περίπτωση χαλαρής άμμου

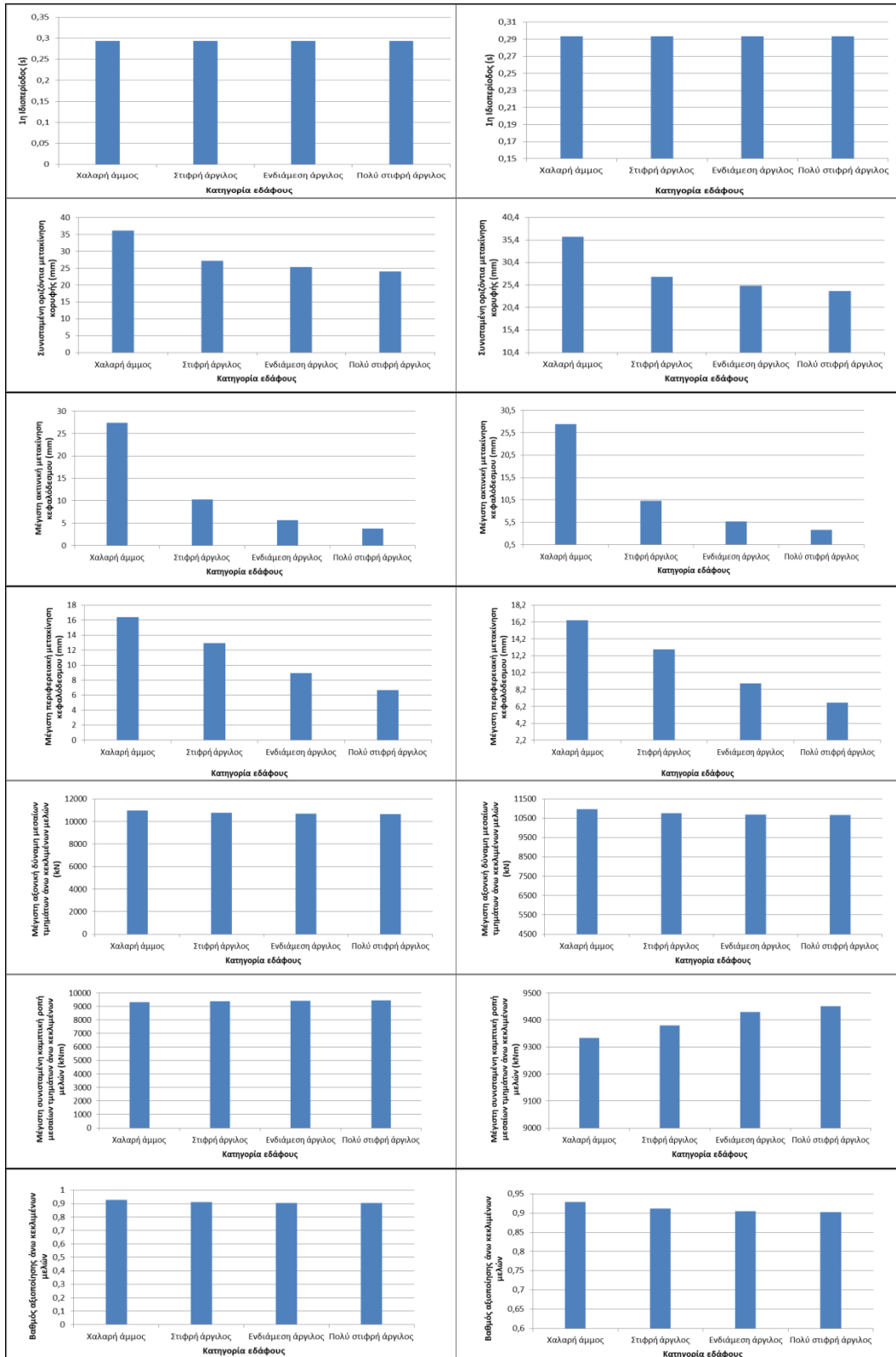
Για την συγκεκριμένη ομάδα παραμετρικών αναλύσεων επιλέχθηκε να εξάγονται αριθμητικά αποτελέσματα για τις ακόλουθες χαρακτηριστικές τιμές:

- 1<sup>η</sup> Ιδιοπερίοδος
- Συνισταμένη οριζόντια μετακίνηση κορυφής
- Μέγιστη ακτινική μετακίνηση κεφαλόδεσμου
- Μέγιστη περιφερειακή μετακίνηση κεφαλόδεσμου
- Μέγιστη αξονική δύναμη μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών
- Μέγιστη συνισταμένη καμπτική ροπή μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών
- Βαθμός αξιοποίησης άνω κεκλιμένων μελών
- Μέγιστη αξονική δύναμη μεσαίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών
- Μέγιστη συνισταμένη καμπτική ροπή μεσαίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών
- Βαθμός αξιοποίησης κάτω κεκλιμένων μελών
- Μέγιστη συνισταμένη καμπτική ροπή κατακόρυφου μέλους
- Βαθμός αξιοποίησης κατακόρυφου μέλους
- Μέγιστη θλιπτική αξονική δύναμη πασσάλου
- Μέγιστη συνισταμένη καμπτική ροπή πασσάλου

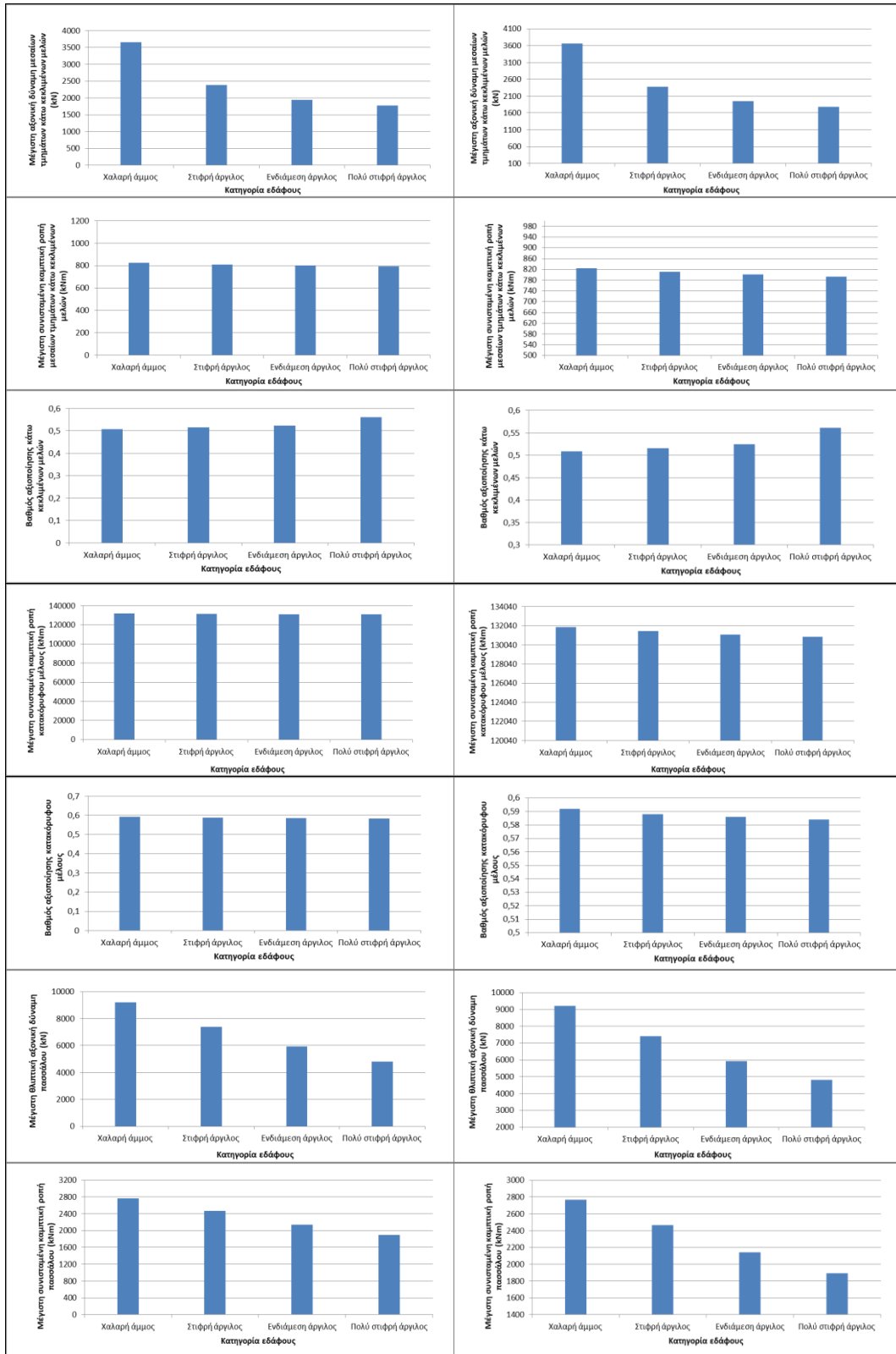
Αξίζει να σημειωθεί ότι σε όλα τα προσομοιώματα των παραμετρικών αναλύσεων εφαρμόστηκαν οι ίδιοι συνδυασμοί φόρτισης όπως αυτοί περιγράφηκαν στην ενότητα 3.5

καθώς και ότι τα αριθμητικά αποτελέσματα τα οποία εξήχθησαν αφορούν τις μέγιστες τιμές μεταξύ των τριών συνδυασμών φόρτισης.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα της συγκεκριμένης ομάδας παραμετρικών αναλύσεων παρουσιάζονται μέσω των ακόλουθων συγκριτικών διαγραμμάτων.







Σχήμα 4.16: Συγκριτικά διαγράμματα επιρροής εδάφους θεμελίωσης

#### 4.4 Επίδραση των φορτίων σχεδιασμού

Στην συγκεκριμένη ενότητα πραγματοποιείται μία ομάδα παραμετρικών αναλύσεων ούτως ώστε να διερευνηθεί η επιρροή των φορτίων σχεδιασμού στη συνολική απόκριση της κατασκευής. Ως μοντέλο αναφοράς χρησιμοποιείται αυτό του οποίου τα χαρακτηριστικά περιγράφηκαν αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Πιο συγκεκριμένα με αυτήν την ομάδα παραμετρικών αναλύσεων εξετάζεται η επίδραση του εφαρμοζόμενου συνδυασμού φόρτισης στην απόκριση της κατασκευής. Ειδικότερα δημιουργούνται πέντε προσομοιώματα στα οποία μεταβάλλεται ο συνδυασμός φόρτισης που εφαρμόζεται στον ανώτατο κόμβο του κατακόρυφου στελέχους. Στη συνέχεια εξάγονται αριθμητικά αποτελέσματα για τα πέντε αυτά προσομοιώματα τα οποία παρουσιάζονται σε συγκριτικά διαγράμματα.

Οι συνδυασμοί φόρτισης των πέντε προσομοιωμάτων παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον ακόλουθο πίνακα:

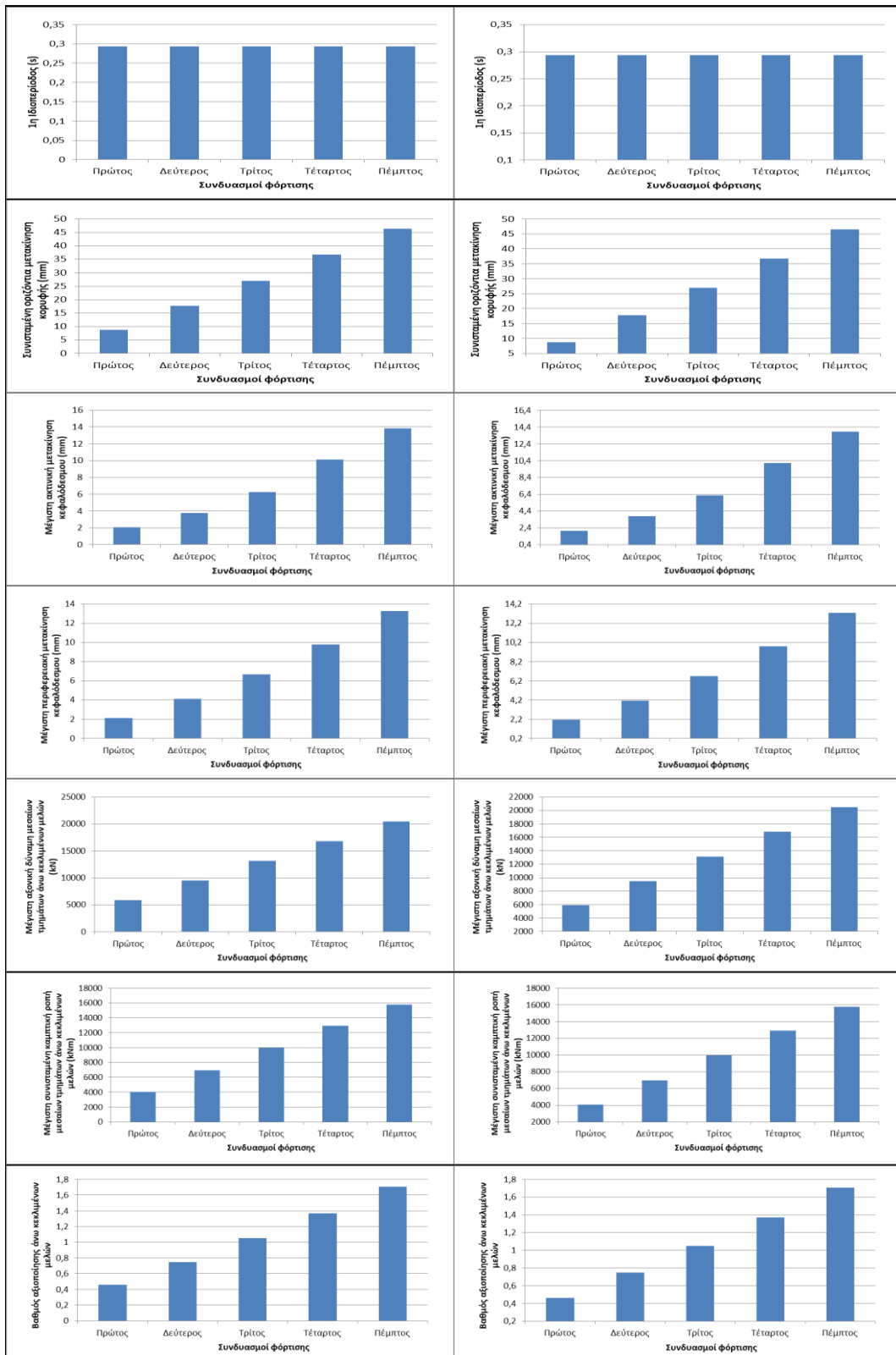
	1 <sup>ος</sup> Συνδυασμός	2 <sup>ος</sup> Συνδυασμός	3 <sup>ος</sup> Συνδυασμός	4 <sup>ος</sup> Συνδυασμός	5 <sup>ος</sup> Συνδυασμός
Οριζόντια Δύναμη (kN)	600	1200	1800	2400	3000
Κατακόρυφη Δύναμη (kN)	5000	10000	15000	20000	25000
Ροπή Κάμψης (kNm)	50000	100000	150000	200000	250000
Ροπή Στρέψης (kNm)	5000	10000	15000	20000	25000

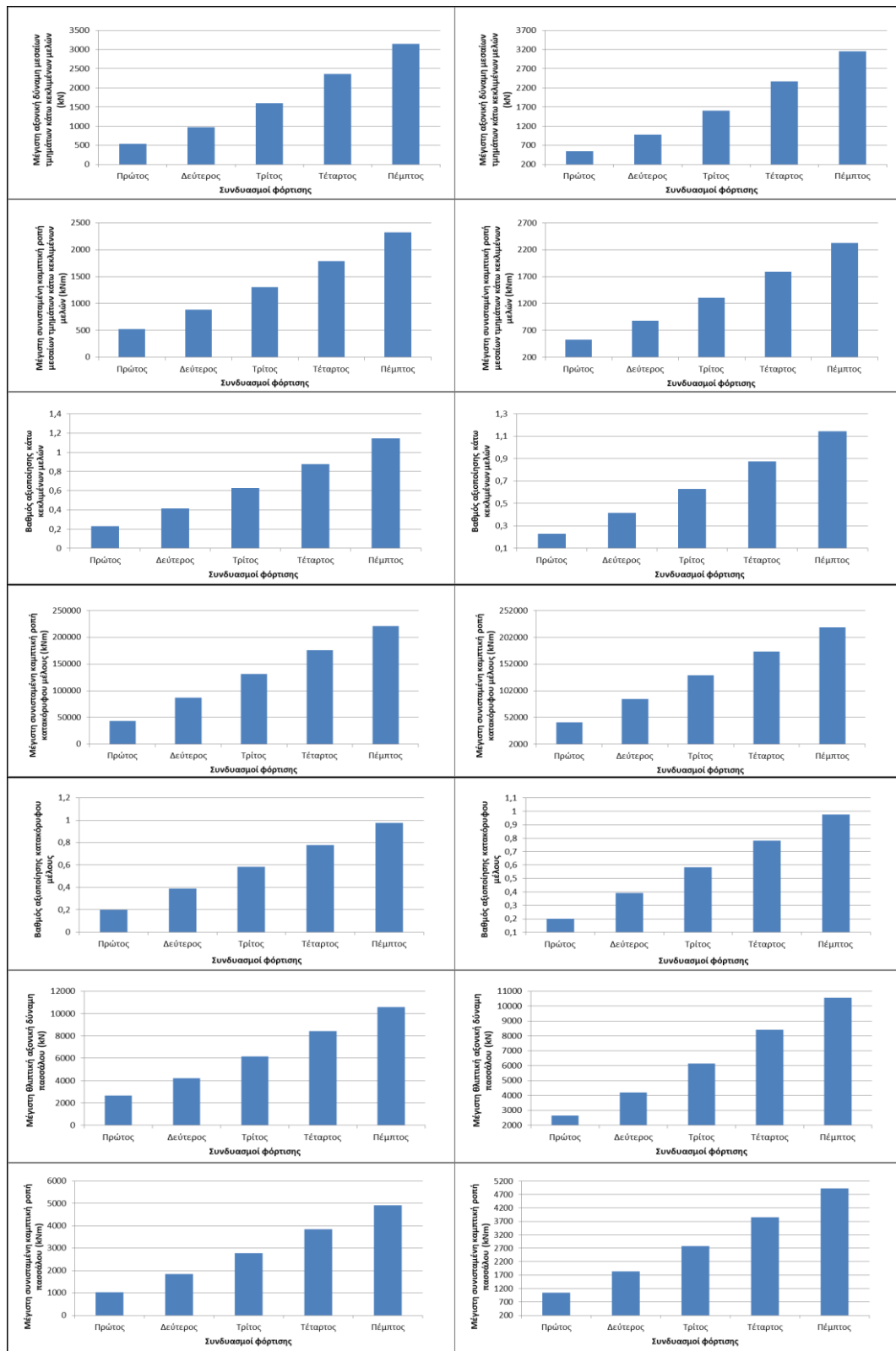
Πίνακας 4.7: Συγκεντρωτικός πίνακας συνδυασμών φόρτισης των επιμέρους προσομοιωμάτων

Για την συγκεκριμένη ομάδα παραμετρικών αναλύσεων επιλέχθηκε να εξάγονται αριθμητικά αποτελέσματα για τις ακόλουθες χαρακτηριστικές τιμές:

- 1<sup>η</sup> Ιδιοπερίοδος
- Συνισταμένη οριζόντια μετακίνηση κορυφής
- Μέγιστη ακτινική μετακίνηση κεφαλόδεσμου
- Μέγιστη περιφερειακή μετακίνηση κεφαλόδεσμου
- Μέγιστη αξονική δύναμη μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών
- Μέγιστη συνισταμένη καμπτική ροπή μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών
- Βαθμός αξιοποίησης άνω κεκλιμένων μελών
- Μέγιστη αξονική δύναμη μεσαίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών
- Μέγιστη συνισταμένη καμπτική ροπή μεσαίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών
- Βαθμός αξιοποίησης κάτω κεκλιμένων μελών
- Μέγιστη συνισταμένη καμπτική ροπή κατακόρυφου μέλους
- Βαθμός αξιοποίησης κατακόρυφου μέλους
- Μέγιστη θλιπτική αξονική δύναμη πασσάλου
- Μέγιστη συνισταμένη καμπτική ροπή πασσάλου

Τα αριθμητικά αποτελέσματα της συγκεκριμένης ομάδας παραμετρικών αναλύσεων παρουσιάζονται μέσω των ακόλουθων συγκριτικών διαγραμμάτων.





Σχήμα 4.17: Συγκριτικά διαγράμματα επιρροής φορτίων σχεδιασμού

## 5. ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 5.1 Σύνοψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς και η παραμετρική διερεύνηση του τριπόδου στη βάση του πυλώνα μιας ανεμογεννήτριας μέσω κατάλληλων αριθμητικών προσομοιωμάτων.

Αρχικά μελετήθηκε ο υπό εξέταση φορέας μέσω της δημιουργίας του αριθμητικού προσομοιώματος και τη χρήση του υπολογιστικού προγράμματος SAP2000. Ο φορέας αποτελείται από ένα κεντρικό κατακόρυφο στέλεχος, δύο ομάδες άνω και κάτω κεκλιμένων μελών και τρία γωνιακά μέλη. Η στήριξη του επιτυγχάνεται μέσω ενός ζεύγους πασσάλων θεμελίωσης ανά γωνιακό μέλος. Η προσομοίωση του κατακόρυφου στελέχους, των άνω και κάτω κεκλιμένων μελών πραγματοποιήθηκε με χρήση γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων δακτυλιοειδούς διατομής ενώ η προσομοίωση των πασσάλων θεμελίωσης και των κεφαλόδεσμων συγκράτησής τους με χρήση γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων κυκλικής και ορογωνικής διατομής αντίστοιχα. Η προσομοίωση του εδάφους στο συγκεκριμένο προσομοίωμα αφορά την περίπτωση πολύ στιφρής αργίλου και πραγματοποιήθηκε με χρήση κατάλληλων ελατηρίων μη γραμμικής συμπεριφοράς στην ακτινική και εφαπτομενική διεύθυνση, τα οποία τοποθετήθηκαν κατά μήκος των γραμμικών στοιχείων των πασσάλων και κεφαλόδεσμων. Στο συγκεκριμένο προσομοίωμα εφαρμόστηκαν τρία διαφορετικά σενάρια φόρτισης και προέκυψαν αριθμητικά αποτελέσματα τα οποία παρουσιάστηκαν μέσω των μετατοπίσεων στην κορύφη του τριπόδου και των κεφαλόδεσμων καθώς και των διαγραμμάτων εντατικών μεγεθών των επιμέρους μελών του.

Το δεύτερο μέρος της διπλωματικής εργασίας αφορούσε την παραμετρική διερεύνηση και την εκτίμηση της επιρροής ορισμένων βασικών παραμέτρων στη συνολική απόκριση της κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκαν τρεις γενικές κατηγορίες παραμετρικών αναλύσεων οι οποίες σχετίζονται με την γεωμετρία των επιμέρους μελών του φορέα, το έδαφος θεμελίωσης, και τα φορτία σχεδιασμού. Τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων παρουσιάστηκαν μέσω κατάλληλων συγκριτικών διαγραμμάτων ούτως ώστε να προκύψουν ορθά συμπεράσματα για την συνολική συμπεριφορά της κατασκευής.

Αρχικά μελετήθηκε η επιρροή του ύψους του κατακόρυφου στελέχους. Αυτό πραγματοποιήθηκε με τη δημιουργία δύο ομάδων παραμετρικών αναλύσεων. Στην πρώτη επιλέχθηκε η μεταβολή του υψομέτρου του κόμβου των άνω κεκλιμένων μελών ενώ στη δεύτερη η μεταβολή του υψομέτρου του κόμβου των κάτω κεκλιμένων μελών. Ακολούθως εξετάστηκε η επιρροή της ακτινικής απόστασης του γωνιακού μέλους από την αρχή των αξόνων μέσω της εκτέλεσης μίας ομάδας παραμετρικών αναλύσεων. Τα αποτελέσματα των τριών αυτών ομάδων παραμετρικών αναλύσεων παρουσιάστηκαν με τη βοήθεια συγκριτικών διαγραμμάτων από τα οποία μπορούν προκύψουν ασφαλή συμπεράσματα.

Στη συνέχεια μελετήθηκε η επιρροή των διατομών των επιμέρους μελών στην συνολική απόκριση της κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα δημιουργήθηκαν έξι ομάδες παραμετρικών αναλύσεων. Στην πρώτη ομάδα επιλέχθηκε η μεταβολή της εξωτερικής διαμέτρου των άνω κεκλιμένων μελών ενώ στη δεύτερη ομάδα η μεταβολή του πάχους τους. Στην τρίτη ομάδα

παραμετρικών αναλύσεων μεταβάλλεται η εξωτερική διάμετρος των κάτω κεκλιμένων μελών ενώ στη τέταρτη ομάδα μεταβάλλεται το πάχος τους. Στην πέμπτη ομάδα παραμετρικών αναλύσεων μεταβάλλεται η εξωτερική διάμετρος του κατακόρυφου στελέχους και στην έκτη ομάδα μεταβάλλεται το πάχος του. Τα αποτελέσματα κάθε ομάδας παραμετρικών αναλύσεων παρουσιάστηκαν με τη βοήθεια συγκριτικών διαγραμμάτων ούτως ώστε να προκύψουν ορθά συμπεράσματα.

Ακολούθως εξετάστηκε η επιρροή του εδάφους θεμελίωσης στην συνολική απόκριση της κατασκευής. Αυτό πραγματοποιήθηκε με την δημιουργία μίας ομάδας παραμετρικών αναλύσεων η οποία αποτελείται από τρεις διαφορετικούς τύπους εδάφους, την στιφρή άργιλο, την ενδιάμεση άργιλο και την πολύ στιφρή άργιλο. Παρομοίως τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων αυτής της ομάδας παρουσιάστηκαν μέσω συγκριτικών διαγραμμάτων από τα οποία μπορούν να προκύψουν ασφαλή συμπεράσματα.

Τέλος μελετήθηκε η επιρροή των φορτίων σχεδιασμού στην συνολική απόκριση της κατασκευής. Για τον σκοπό αυτόν δημιουργήθηκε μία ομάδα παραμετρικών αναλύσεων η οποία αποτελείται από πέντε διαφορετικούς συνδυασμούς φόρτισης. Τα αριθμητικά αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων αυτής της ομάδας παρουσιάστηκαν με την βοήθεια συγκριτικών διαγραμμάτων ούτως ώστε να μπορούν να προκύψουν ορθά συμπεράσματα.

## 5.2 Συμπεράσματα

Από τις παραπάνω διαδικασίες μπορούν να προκύψουν ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα τα οποία αφορούν την συνολική συμπεριφορά της κατασκευής. Αρχικά στο προσομοίωμα το οποίο εξετάστηκε για τους τρεις συνδυασμούς φόρτισης COMB4, COMB5, COMB6 παρατηρούμε με την βοήθεια των αριθμητικών αποτελεσμάτων ότι στον συνδυασμό φόρτισης COMB4 εμφανίζονται η μέγιστη καμπτική ροπή M2 κάτω κεκλιμένων μελών, η μέγιστη καμπτική ροπή M3 κάτω κεκλιμένων μελών και κατακόρυφου μέλους, η μέγιστη τέμνουσα δύναμη V2 κατακόρυφου μέλους και η μέγιστη τέμνουσα δύναμη V3 κάτω κεκλιμένων μελών. Επίσης στον συνδυασμό φόρτισης COMB5 εμφανίζονται η μέγιστη μετατόπιση κορυφής του τριπόδου, η μέγιστη αξονική δύναμη κάτω κεκλιμένων μελών, η μέγιστη καμπτική ροπή M2 των πασσάλων, η μέγιστη καμπτική ροπή M3 των άνω κεκλιμένων μελών, η μέγιστη τέμνουσα V2 των άνω κεκλιμένων μελών και η μέγιστη τέμνουσα δύναμη V3 των πασσάλων. Αντίστοιχα στον συνδυασμό φόρτισης COMB6 εμφανίζονται η μέγιστη μετακίνηση κορυφής κεφαλόδεσμου, η μέγιστη αξονική δύναμη άνω κεκλιμένων, κατακόρυφου μέλους και πασσάλων, η μέγιστη καμπτική ροπή M2 άνω κεκλιμένων μελών και κατακόρυφου μέλους, η μέγιστη καμπτική ροπή M3 πασσάλων, η μέγιστη τέμνουσα δύναμη V2 κάτω κεκλιμένων μελών και πασσάλων, η μέγιστη τέμνουσα δύναμη V3 άνω κεκλιμένων μελών και κατακόρυφου μέλους.

Από το κεφάλαιο των παραμετρικών αναλύσεων θα μπορούσαν επίσης να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα για την συνολική απόκριση της κατασκευής και τον βαθμό επιρροής των υπό εξέταση παραμέτρων.

Από την ομάδα παραμετρικών αναλύσεων στην οποία εξετάστηκε η επίδραση του υψομέτρου κόμβου άνω κεκλιμένων μελών παρατηρούμε με την βοήθεια των συγκριτικών

διαγραμμάτων ότι η  $1^{\text{η}}$  χαρακτηριστική ιδιοπερίοδος, η συνισταμένη οριζόντια μετακίνηση κορυφής, η μέγιστη περιφερειακή μετακίνηση κεφαλόδεσμου, η μέγιστη αξονική δύναμη των μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών, η μέγιστη συνισταμένη καμπτική ροπή των μεσαίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών και κατακόρυφου μέλους, ο βαθμός αξιοποίησης των άνω κεκλιμένων μελών και η μέγιστη θλιπτική αξονική δύναμη πασσάλου αυξάνονται με την αύξηση του υψομέτρου του κόμβου άνω κεκλιμένων μελών. Αντιθέτως η μέγιστη ακτινική μετακίνηση κεφαλόδεσμου, η μέγιστη αξονική δύναμη μεσαίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών, ο βαθμός αξιοποίησης κάτω κεκλιμένων μελών και κατακόρυφου μέλους, η μέγιστη συνισταμένη καμπτική ροπή πασσάλου παρουσιάζουν μείωση καθώς το υψόμετρο κόμβου άνω κεκλιμένων μελών αυξάνεται.

Από την ομάδα παραμετρικών αναλύσεων στην οποία μελετήθηκε η επιρροή του υψομέτρου κόμβου κάτω κεκλιμένων μελών μέσω των αντίστοιχων συγκριτικών διαγραμμάτων παρατηρούμε ότι η  $1^{\text{η}}$  χαρακτηριστική ιδιοπερίοδος, η μέγιστη συνισταμένη καμπτική ροπή των μεσαίων τμημάτων άνω και κάτω κεκλιμένων μελών, ο βαθμός αξιοποίησης άνω κεκλιμένων μελών και η μέγιστη θλιπτική αξονική δύναμη πασσάλου παρουσιάζουν πτωτική συμπεριφορά με την αύξηση του υψομέτρου του κόμβου κάτω κεκλιμένων μελών. Αντιθέτως η συνισταμένη οριζόντια μετακίνηση κορυφής, η μέγιστη ακτινική και περιφερειακή μετακίνηση κεφαλόδεσμου, η μέγιστη αξονική δύναμη μεσαίων τμημάτων άνω και κάτω κεκλιμένων μελών, ο βαθμός αξιοποίησης κάτω κεκλιμένων μελών και κατακόρυφου μέλους, η μέγιστη συνισταμένη καμπτική ροπή κατακόρυφου μέλους και πασσάλου παρουσιάζουν ανοδική συμπεριφορά με την αύξηση του υψομέτρου του κόμβου κάτω κεκλιμένων μελών.

Από τα αριθμητικά αποτελέσματα της ομάδας παραμετρικών αναλύσεων στην οποία εξετάστηκε η ο βαθμός επίδρασης της ακτινικής απόστασης μεταξύ του γωνιακού μέλους και της αρχής των αξόνων μέσω των αντίστοιχων συγκριτικών διαγραμμάτων μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η αύξηση της συγκεκριμένης παραμέτρου προκαλεί μείωση στην  $1^{\text{η}}$  χαρακτηριστική ιδιοπερίοδο του φορέα, στην συνισταμένη οριζόντια μετακίνηση κορυφής, στην μέγιστη αξονική δύναμη μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών και στην μέγιστη θλιπτική αξονική δύναμη πασσάλου ενώ αντιθέτως αυξάνει την μέγιστη ακτινική και περιφερειακή μετακίνηση κεφαλόδεσμου, την μέγιστη συνισταμένη καμπτική ροπή των μεσαίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών, κατακόρυφου μέλους και πασσάλου, τον βαθμό αξιοποίησης άνω, κάτω κεκλιμένων μελών και κατακόρυφου μέλους και την μέγιστη αξονική δύναμη των μεσαίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών.

Στην ομάδα παραμετρικών αναλύσεων η οποία σχετίζεται με την επιρροή της εξωτερικής διαμέτρου των άνω κεκλιμένων μελών στην απόκριση της κατασκευής, μέσω των αντίστοιχων συγκριτικών διαγραμμάτων γίνεται αντιληπτό ότι η αύξηση της συγκεκριμένης παραμέτρου οδηγεί σε μείωση της  $1^{\text{ης}}$  χαρακτηριστικής ιδιοπερίόδου, της συνισταμένης οριζόντιας μετακίνησης κορυφής, της μέγιστης ακτινικής μετακίνησης κεφαλόδεσμου, του βαθμού αξιοποίησης άνω κεκλιμένων μελών, της μέγιστης αξονικής δύναμης των μεσαίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών, της μέγιστης συνισταμένης καμπτικής ροπής των μεσαίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών και κατακόρυφου μέλους και του βαθμού αξιοποίησης κάτω κεκλιμένων μελών και κατακόρυφου μέλους. Αντιθέτως προκαλεί

αύξηση στην μέγιστη αξονική δύναμη των μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών, στην μέγιστη συνισταμένη καμπτική ροπή των μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών και πασσάλου καθώς και στην μέγιστη θλιπτική αξονική δύναμη πασσάλου.

Παρομοίως παρατηρώντας τα συγκριτικά διαγράμματα της ομάδας παραμετρικών αναλύσεων στην οποία μελετήθηκε η επιρροή του πάχους των άνω κεκλιμένων μελών συμπεραίνουμε ότι καθώς η συγκεκριμένη παράμετρος αυξάνεται η 1<sup>η</sup> χαρακτηριστική ιδιοπερίοδος του φορέα, η συνισταμένη οριζόντια μετακίνηση κορυφής, η μέγιστη ακτινική και περιφερειακή μετακίνηση κεφαλόδεσμου, ο βαθμός αξιοποίησης άνω κεκλιμένων μελών, η μέγιστη αξονική δύναμη μεσαίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών, ο βαθμός αξιοποίησης κάτω κεκλιμένων μελών, η μέγιστη συνισταμένη καμπτική ροπή του κατακόρυφου μέλους και ο βαθμός αξιοποίησης κατακόρυφου μέλους μειώνονται. Εντούτοις η αύξηση του πάχους των άνω κεκλιμένων μελών συνεπάγεται αύξηση της μέγιστης αξονικής δύναμης των μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών, της μέγιστης συνισταμένης καμπτικής ροπής των μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών και πασσάλου καθώς και της μέγιστης θλιπτικής αξονικής δύναμης πασσάλου.

Από τα συγκριτικά διαγράμματα της ομάδας παραμετρικών αναλύσεων στην οποία εξετάστηκε η επίδραση της εξωτερικής διαμέτρου των κάτω κεκλιμένων μελών προκύπτει ότι η αύξηση της παραμέτρου αυτής προκαλεί μείωση στην 1<sup>η</sup> χαρακτηριστική ιδιοπερίοδο, στην μέγιστη περιφερειακή μετακίνηση κεφαλόδεσμου, στην μέγιστη συνισταμένη καμπτική ροπή των μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών και στον βαθμό αξιοποίησης κάτω κεκλιμένων μελών. Αντιθέτως αύξηση της τιμής της συγκεκριμένης παραμέτρου οδηγεί επίσης σε αύξηση της συνισταμένης οριζόντιας μετακίνησης κορυφής, της μέγιστης ακτινικής μετακίνησης κεφαλόδεσμου, της μέγιστης αξονικής δύναμης των μεσαίων τμημάτων άνω και κάτω κεκλιμένων μελών, του βαθμού αξιοποίησης άνω κεκλιμένων μελών, της μέγιστης συνισταμένης καμπτικής ροπής των μεσαίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών, κατακόρυφου μέλους, πασσάλου καθώς και της μέγιστης θλιπτικής αξονικής δύναμης πασσάλου. Ο βαθμός αξιοποίησης του κατακόρυφου μέλους παρέμεινε αμετάβλητος σε όλες τις παραμετρικές αναλύσεις της συγκεκριμένης ομάδας.

Στην ομάδα παραμετρικών αναλύσεων όπου μελετήθηκε η επίδραση του πάχους των κάτω κεκλιμένων μελών παρατηρώντας τα συγκριτικά διαγράμματα συμπεραίνουμε πως αυξάνοντας την τιμή αυτής της παραμέτρου η 1<sup>η</sup> χαρακτηριστική ιδιοπερίοδος, η μέγιστη ακτινική και περιφερειακή μετακίνηση κεφαλόδεσμου, η μέγιστη συνισταμένη καμπτική ροπή των μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών και ο βαθμός αξιοποίησης κάτω κεκλιμένων μελών μειώνονται ενώ η συνισταμένη οριζόντια μετακίνηση κορυφής, η μέγιστη αξονική δύναμη των μεσαίων τμημάτων άνω και κάτω κεκλιμένων μελών, ο βαθμός αξιοποίησης άνω κεκλιμένων μελών, η μέγιστη συνισταμένη καμπτική ροπή των μεσαίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών κατακόρυφου μέλους και πασσάλου, ο βαθμός αξιοποίησης κατακόρυφου μέλους και η μέγιστη θλιπτική αξονική δύναμη πασσάλου αυξάνονται.

Ακολουθώντας παρατηρώντας τα συγκριτικά διαγράμματα της ομάδας παραμετρικών αναλύσεων στην οποία διερευνήθηκε η επιρροή της εξωτερικής διαμέτρου του κατακόρυφου μέλους γίνεται αντιληπτό πως η μεταβολή της εξωτερικής διαμέτρου από



σταθερή τιμή (κυλινδρικό κατακόρυφο μέλος) σε μεταβλητή τιμή (κωνικό κατακόρυφο μέλος) προκαλεί αύξηση της 1<sup>ης</sup> χαρακτηριστικής ιδιοπεριόδου, της μέγιστης περιφερειακής μετακίνησης κεφαλόδεσμου, της μέγιστης συνισταμένης καμπτικής ροπής των μεσαίων τμημάτων άνω και κάτω κεκλιμένων μελών και του βαθμού αξιοποίησης άνω και κάτω κεκλιμένων μελών. Αντίθετα η συγκεκριμένη μεταβολή προκαλεί μείωση στην συνισταμένη οριζόντια μετακίνηση κορυφής, στην μέγιστη ακτινική μετακίνηση κεφαλόδεσμου, στην μέγιστη αξονική δύναμη των μεσαίων τμημάτων άνω και κάτω κεκλιμένων μελών, στην μέγιστη συνισταμένη καμπτική ροπή κατακόρυφου μέλους και πασσάλου, στον βαθμό αξιοποίησης κατακόρυφου μέλους καθώς και στην μέγιστη θλιπτική αξονική δύναμη πασσάλου.

Από τα συγκριτικά διαγράμματα της ομάδας παραμετρικών αναλύσεων στην οποία μελετήθηκε η επίδραση της μεταβολής του πάχους του κατακόρυφου μέλους, προκειμένου ο βαθμός αξιοποίησής του να κυμαίνεται μεταξύ 70%-100%, συμπεραίνουμε ότι αυτή προκαλεί μείωση της 1<sup>ης</sup> χαρακτηριστικής ιδιοπεριόδου, της μέγιστης ακτινικής μετακίνησης κεφαλόδεσμου, της μέγιστης αξονικής δύναμης των μεσαίων τμημάτων άνω και κάτω κεκλιμένων μελών, της μέγιστης συνισταμένης καμπτικής ροπής κατακόρυφου μέλους και πασσάλου, ενώ αντίθετως προκαλεί αύξηση στην συνισταμένη οριζόντια μετακίνηση κορυφής, στην μέγιστη περιφερειακή μετακίνηση κεφαλόδεσμου, στην μέγιστη συνισταμένη καμπτική ροπή των μεσαίων τμημάτων άνω και κάτω κεκλιμένων μελών, στον βαθμό αξιοποίησης άνω, κάτω κεκλιμένων μελών και κατακόρυφου μέλους καθώς και στην μέγιστη θλιπτική αξονική δύναμη πασσάλου.

Στην ομάδα παραμετρικών αναλύσεων στην οποία εξετάστηκε η επιρροή του εδάφους παρουσιάστηκαν τα αριθμητικά αποτελέσματα μέσω συγκριτικών διαγραμμάτων από τα οποία προκύπτει ότι καθώς η συνεκτικότητα του εδάφους θεμελίωσης αυξάνεται, η συνισταμένη οριζόντια μετακίνηση κορυφής, η μέγιστη ακτινική και περιφερειακή μετακίνηση κεφαλόδεσμου, η μέγιστη αξονική δύναμη των μεσαίων τμημάτων άνω και κάτω κεκλιμένων μελών, ο βαθμός αξιοποίησης άνω κεκλιμένων μελών και κατακόρυφου μέλους, η μέγιστη συνισταμένη καμπτική ροπή των μεσαίων τμημάτων κάτω κεκλιμένων μελών, κατακόρυφου μέλους και πασσάλου καθώς και η μέγιστη θλιπτική αξονική δύναμη πασσάλου μειώνονται. Αντίθετα η μέγιστη συνισταμένη καμπτική ροπή των μεσαίων τμημάτων άνω κεκλιμένων μελών και ο βαθμός αξιοποίησης κάτω κεκλιμένων μελών αυξάνονται.

Τέλος με την βοήθεια των συγκριτικών διαγραμμάτων της ομάδας παραμετρικών αναλύσεων στην οποία μελετήθηκε η επίδραση των φορτίων σχεδιασμού προκύπτει το συμπέρασμα ότι καθώς οι τιμές των φορτίων σχεδιασμού αυξάνονται αυτό προκαλεί επίσης αύξηση στην συνισταμένη οριζόντια μετακίνηση κορυφής, στην μέγιστη ακτινική και περιφερειακή μετακίνηση κεφαλόδεσμου, στην μέγιστη αξονική δύναμη των μεσαίων τμημάτων άνω και κάτω κεκλιμένων μελών, στην μέγιστη συνισταμένη καμπτική ροπή των μεσαίων τμημάτων άνω, κάτω κεκλιμένων μελών, κατακόρυφου μέλους και πασσάλου, στον βαθμό αξιοποίησης άνω, κάτω κεκλιμένων μελών και κατακόρυφου μέλους καθώς επίσης και στην μέγιστη θλιπτική αξονική δύναμη πασσάλου.

### 5.3 Θέματα για περαιτέρω μελέτη

Με την παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρήθηκε να δοθούν αξιόπιστες απαντήσεις σε ορισμένα βασικά ερωτήματα τα οποία σχετίζονται με την μηχανική συμπεριφορά και την παραμετρική διερεύνηση του τριπόδου στην βάση του πυλώνα μιας ανεμογεννήτριας. Στην προσπάθεια αυτή προέκυψαν νέοι προβληματισμοί οι οποίοι θα μπορούσαν να αποτελέσουν το αντικείμενο μελέτης μελλοντικών εργασιών.

Αρχικά θα ήταν χρήσιμο να διεξαχθούν επιπλέον παραμετρικές αναλύσεις οι οποίες θα αφορούσαν τον κεφαλόδεσμο συγκράτησης των πασσάλων. Θα μπορούσαν να επιλεγθούν διαφορετικές γεωμετρίες κεφαλόδεσμου ούτως ώστε να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για τον βαθμό με τον οποίο η γεωμετρία του κεφαλόδεσμου επιδρά στην συνολική απόκριση της κατασκευής.

Παρομοίως θα ήταν ιδιαίτερα ωφέλιμο να διερευνηθεί περαιτέρω η επίδραση του εδάφους θεμελίωσης με την πραγματοποίηση επιπλέον παραμετρικών αναλύσεων σε διαφορετικούς τύπους εδάφους.

Τελος θα ήταν σκόπιμο στις παραμετρικές αναλύσεις να συμπεριληφθεί το πλήθος των πασσάλων ανα κεφαλόδεσμο καθώς επίσης και η γεωμετρία τους μέσω της μεταβολής της διαμέτρου και του μήκους τους ούτως ώστε να προκύψει με ξεκάθαρο τρόπο ο βαθμός επιρροής των συγκεκριμένων παραμέτρων στην συνολική συμπεριφορά της κατασκευής.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wind\\_turbine\\_1888\\_Charles\\_Brush.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wind_turbine_1888_Charles_Brush.jpg)
- [2] [https://www.researchgate.net/publication/4261241\\_Useful\\_Simulation\\_Tool\\_for\\_Induction\\_Generators\\_Used\\_In\\_Wind\\_Power\\_Plants/download](https://www.researchgate.net/publication/4261241_Useful_Simulation_Tool_for_Induction_Generators_Used_In_Wind_Power_Plants/download)
- [3] <https://fuergy.com/sk/blog/first-blows-of-energy-independence-wind-power-ii>
- [4] [https://www.researchgate.net/figure/Global-Annual-Capacity-Source-Global-Wind-Energy-Council-3\\_fig1\\_334313874](https://www.researchgate.net/figure/Global-Annual-Capacity-Source-Global-Wind-Energy-Council-3_fig1_334313874)
- [5] [https://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_power\\_by\\_country#/media/File:Global\\_Wind\\_Power\\_Cumulative\\_Capacity.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power_by_country#/media/File:Global_Wind_Power_Cumulative_Capacity.svg)
- [6] [https://www.researchgate.net/figure/Outlook-of-global-cumulative-installed-offshore-wind-capacity-from-2000-until-2050\\_fig1\\_348356086](https://www.researchgate.net/figure/Outlook-of-global-cumulative-installed-offshore-wind-capacity-from-2000-until-2050_fig1_348356086)
- [7] <https://irena.org>
- [8] <https://irena.org>
- [9] <https://irena.org>
- [10] [http://www.cres.gr/kape/energeia\\_politis/energeia\\_politis\\_windmill.htm](http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_windmill.htm)
- [11] <https://www.energy.gov/eere/wind/inside-wind-turbine>
- [12] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/main-rotor>
- [13] [https://www.researchgate.net/figure/Different-kinds-of-vertical-axis-wind-turbines-VAWT-a-Savonius-b-Darrieus-with\\_fig1\\_333316757](https://www.researchgate.net/figure/Different-kinds-of-vertical-axis-wind-turbines-VAWT-a-Savonius-b-Darrieus-with_fig1_333316757)
- [14] <https://www.britannica.com/technology/horizontal-axis-wind-turbine>
- [15] [http://mstudioblackboard.tudelft.nl/duwind/Wind%20energy%20online%20reader/Static\\_pages/upwind\\_downwind.htm](http://mstudioblackboard.tudelft.nl/duwind/Wind%20energy%20online%20reader/Static_pages/upwind_downwind.htm)
- [16] <https://www.wind-energy-the-facts.org/design-styles-7.html>
- [17] <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/284-envision-e128-3.6mw-pp-2b>
- [18] <https://www.terna-energy.com/activities-en/wind-energy/>
- [19] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/fixed-structure>
- [20] [https://www.researchgate.net/figure/Support-structures-for-offshore-wind-turbines\\_fig4\\_326534988](https://www.researchgate.net/figure/Support-structures-for-offshore-wind-turbines_fig4_326534988)

- [21] [https://www.researchgate.net/figure/Finite-element-model-of-1-MW-wind-turbine-with-different-foundation-types\\_fig5\\_318441939](https://www.researchgate.net/figure/Finite-element-model-of-1-MW-wind-turbine-with-different-foundation-types_fig5_318441939)
- [22] [https://www.researchgate.net/figure/Power-curve-as-a-function-of-wind-speed\\_fig2\\_281761561](https://www.researchgate.net/figure/Power-curve-as-a-function-of-wind-speed_fig2_281761561)
- [23] Α. Αναγνωστόπουλος και Β. Παπαδόπουλος, «Σχεδιασμός των θεμελιώσεων», Αθήνα, 2016.
- [24] Γ. Χαλούλος, Γ. Μπουκοβάλας, Β. Παπαδόπουλος, Α. Βαλσαμής, «Αριθμητική Διερεύνηση Καμπυλών  $p$ - $\gamma$  για Κινηματική Στατική Φόρτιση Πασσάλων σε Άμμους».
- [25] Ανδρέας Μπέντας, "Φορτία, ανάλυση, συμπεριφορά και δομοστατικός σχεδιασμός θαλασσίων ανεμογεννητριών", Αθήνα, 2014