

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Π.Μ.Σ. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ
ΜΟΝΟΠΑΣΣΑΛΗΣ ΥΠΕΡΑΚΤΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΕ
ΑΡΓΙΛΙΚΟ ΕΔΑΦΟΣ

υπό

ΜΑΡΙΑ ΓΙΑΝΝΑΚΟΠΟΥΛΟΥ
ΑΡΓΕΤΤΑ ΚΟΥΤΣΟΥΡΑΔΗ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

2019

© Γιαννακοπούλου Μαρία, Κουτσογράδη Αργέττα

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ.202 παρ.2).

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα ευχαριστούμε ιδιαίτερω την επιβλέπουσα καθηγήτριά μας, Λέκτορα κα. Πολυξένη Καλλιόγλου, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή της καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής Επίκουρο Καθηγητή κ. Εφραιμίδα και Καθηγητή κ. Ντακούλα για τις υποδείξεις τους. Είμαστε ιδιαίτερα ευγνώμονες στον κ. Ντακούλα για την άμεση ανταπόκριση και προθυμία του να βοηθήσει στην αντιμετώπιση των προβλημάτων μας κατά την εξέλιξη της εργασίας. Επιπλέον, ευχαριστούμε τις οικογένειες και τους φίλους μας για τη στήριξή τους.

Γιαννακοπούλου Μαρία

Κουτσουράδη Αργέττα

ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΟΠΑΣΣΑΛΗΣ ΥΠΕΡΑΚΤΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΕ ΑΡΓΙΛΙΚΟ ΕΔΑΦΟΣ

Γιαννακοπούλου Μαρία, Κουτσοβράδη Αργέτα

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2019

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Καλλιόγλου Πολυξένη, Λέκτορας

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία ολοκληρωμένου τρισδιάστατου αριθμητικού προσομοιώματος υπεράκτιας ανεμογεννήτριας, η οποία θεμελιώνεται σε αργιλικό έδαφος, και η μελέτη της απόκρισης του συστήματος αυτού, έπειτα από την επιβολή διαφόρων φορτίσεων. Τα τελευταία χρόνια κατασκευάζονται παγκοσμίως πλήθος ανεμογεννητριών και αιολικών πάρκων σε ξηρά και σε θάλασσα, με σκοπό την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας. Ιδιαίτερη ανάπτυξη φέρουν οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες, καθώς η ποιότητα του ανέμου που πνέει πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας θεωρείται ανώτερη από αυτή του ανέμου στη στεριά. Η θεμελίωση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών υλοποιείται με πολλούς τρόπους, ο συνηθέστερος εκ των οποίων είναι ο μονοπάσσαλος, λόγω της απλότητας στο σχεδιασμό του και της οικονομικής του απόδοσης. Στα πλαίσια λοιπόν της παρούσας εργασίας, επιλέχθηκε να μελετηθεί υπεράκτια ανεμογεννήτρια, η οποία θεμελιώνεται στο έδαφος μέσω μονοπασσάλου μεγάλης διαμέτρου. Ακολούθησε η επιλογή των χαρακτηριστικών της υπό μελέτη ανεμογεννήτριας και του εδάφους θεμελίωσης. Ιδιαίτερη έμφαση στη συγκεκριμένη μελέτη δίδεται στο έδαφος θεμελίωσης και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται τρεις διαφορετικοί τύποι αργιλικού εδάφους, ανάλογα με την αντοχή του. Ακολούθησε η δημιουργία του τρισδιάστατου αριθμητικού προσομοιώματος για κάθε τύπο εδάφους, με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Στη συνέχεια, βάσει του Νορβηγικού Κανονισμού DNV, υπολογίσθηκαν οι δυναμικές φορτίσεις όπως είναι ο άνεμος, ο ανεμογενής κυματισμός και ο σεισμός, και συντέθηκαν οι συνδυασμοί φόρτισης που επιβάλλονται στο προσομοίωμα. Όσον αφορά τα αποτελέσματα, επιλέχθηκαν να μελετηθούν οι οριζόντιες και οι κατακόρυφες απόλυτες και σχετικές μετακινήσεις και οι τάσεις Von Mises που αναπτύσσουν το έδαφος, η θεμελίωση και η ανωδομή του προσομοιώματος. Στόχος της συγκεκριμένης εργασίας, αποτελεί η μελέτη της απόκρισης του εδάφους και της κατασκευής στις διάφορες περιπτώσεις φόρτισης, η σύγκριση της συμπεριφοράς των τριών τύπων εδάφους και ο εντοπισμός των τμημάτων του προσομοιώματος που πλήττονται περισσότερο από τις φορτίσεις, μέσα από τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου αριθμητικού προσομοιώματος.

THREE DIMENSIONAL NUMERICAL SIMULATION OF A MONOPILE OFFSHORE WIND TURBINE BASED ON A CLAYEY SOIL

Giannakopoulou Maria, Koutsouradi Argetta

University of Thessaly, Department of Civil Engineering

Supervisor: Kallioglou Polyxeni, Lecturer

ABSTRACT

The objective of this postgraduate diploma thesis is the creation of a three-dimensional numerical model of an offshore wind turbine, which is based on a clayey soil, and the study of the response of this system, under the imposition of various loads. In recent years, a large number of wind turbines and wind farms have been constructed globally on land and at sea in order to exploit wind power. The offshore wind turbines are particularly developed, as the quality of the wind blowing above the surface of the sea is considered superior to that of the wind on the land. The foundation of offshore wind turbines is implemented in many ways, the most common of which is the monopile foundation, because of its simplicity in design and its cost efficiency. In the framework of this thesis, it was chosen to study an offshore wind turbine, which is grounded on the soil, using a large diameter monopile. Consequently, the characteristics of the wind turbine and the soil were selected. In this study, particular emphasis, is given to the soil and therefore three different types of clayey soil are used depending on its strength. This was followed by the creation of the three-dimensional arithmetic model for each type of soil, using the Abaqus finite element program. Subsequently, based on the Norwegian DNV Standards, dynamic loads such as wind, wave and earthquake motion, and the combinations of the previous loads that were applied to the model, were calculated. With regard to the results, it was chosen to analyze absolute and relative horizontal and vertical displacements and Von Mises stresses of the soil, monopile and tower of the wind turbine. In conclusion, the aim of this work is to study the response of the soil and the construction in various load cases, to compare the behavior of the three soil types and to locate the most affected parts of the model due to loading, through the creation of a complete numerical simulation.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	5
Πίνακας Σχημάτων	8
Πίνακας Πινάκων	14
Κεφάλαιο 1	15
Εισαγωγή	15
1.1 Γενικά	15
1.2 Οργάνωση της διπλωματικής εργασίας ανά κεφάλαιο	15
Κεφάλαιο 2	17
Αιολική ενέργεια και ανεμογεννήτριες - αιολικά πάρκα.....	17
2.1 Κατηγορίες πηγών ενέργειας.....	17
2.1.1 Μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	17
2.1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	18
2.2 Αιολική ενέργεια	18
2.2.1 Αιολικό δυναμικό στην Ελλάδα και στην Ευρώπη	19
2.3 Ανεμογεννήτριες.....	21
2.3.1 Ιστορία των ανεμογεννητριών	21
2.3.2 Κατηγορίες ανεμογεννητριών	21
2.4 Υπεράκτιες ανεμογεννήτριες.....	26
2.5 Σύγκριση των χερσαίων με τις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες	29
2.6 Αιολικά πάρκα.....	29
2.7 Η εξέλιξη των υπεράκτιων αιολικών πάρκων	30
Κεφάλαιο 3	32
Θεμελίωση υπεράκτιων ανεμογεννητριών	32
3.1 Γενικά	32
3.2 Σταθερές κατασκευές	32
3.3 Πλωτές κατασκευές	36
3.4 Σύστημα θεμελίωσης μονοπασσάλου.....	39
Κεφάλαιο 4	44
Η υπό μελέτη ανεμογεννήτρια.....	44
Κεφάλαιο 5	46
Κανονισμοί	46
Κεφάλαιο 6	47
Μελέτη Υπεράκτιας Ανεμογεννήτριας.....	47
6.1 Επιλογή κατάλληλης μεθόδου μελέτης της θεμελίωσης	47
6.1.1 Μέθοδος καμπυλών p-y.....	48

6.1.2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων για τη θεμελίωση (3D).....	53
6.2 Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus.....	54
6.2.1 Γενικά στοιχεία για το πρόγραμμα Abaqus.....	54
6.2.2 Τα καταστατικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στο Abaqus.....	56
Κεφάλαιο 7	59
Προσομοίωση στο πρόγραμμα Abaqus.....	59
7.1 Part Module: Γεωμετρία των μελών της διάταξης.....	59
7.2 Property Module: Ιδιότητες υλικών και αντιστοίχιση στη γεωμετρία.....	62
7.3 Assembly Module: Δημιουργία ενιαίου μοντέλου.....	63
7.4 Mesh Module: Διακριτοποίηση μοντέλου.....	64
7.5 Step Module: Καθορισμός του είδους της ανάλυσης, και προσδιορισμός των ζητούμενων αποτελεσμάτων.....	65
7.6 Interaction Module: Δημιουργία αλληλεπιδράσεων μεταξύ των τμημάτων του μοντέλου....	66
7.7 Load Module: Εισαγωγή φορτίσεων και συνοριακών συνθηκών.....	67
7.7.1 Φορτία κατασκευής.....	68
7.7.1.1 Ίδια βάρη κατασκευής, νερού και εδάφους.....	68
7.7.1.2 Φορτία ανέμου.....	71
7.7.1.3 Φορτία ανεμογενών κυματισμών.....	78
7.7.1.4 Φόρτιση σεισμού.....	84
7.7.2 Συνοριακές συνθήκες προσομοιώματος.....	88
7.7.3 Συνδυασμοί και περιπτώσεις φόρτισης.....	89
7.7.3.1 Οριακές καταστάσεις.....	89
7.7.3.2 Συνδυασμοί και Περιπτώσεις Φόρτισης στην υπεράκτια ανεμογεννήτρια.....	91
Κεφάλαιο 8	93
Αποτελέσματα Αναλύσεων.....	93
8.1 Γενικά.....	93
8.2 Αποτελέσματα για το συνδυασμό φόρτισης των ίδιων βαρών και του ανέμου.....	96
8.2.1 Αποτελέσματα οριζόντιων μετακινήσεων των αργίλων 1, 2 και 3.....	96
8.2.1.1 Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων για τις αργίλους 1, 2 και 3.....	103
8.2.2 Αποτελέσματα κατακόρυφων μετακινήσεων των αργίλων 1, 2 και 3.....	107
8.2.2.1 Σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων των αργίλων 1, 2 και 3.....	115
8.2.3 Αποτελέσματα τάσεων Von Mises των αργίλων 1, 2 και 3.....	118
8.3 Αποτελέσματα για το συνδυασμό φόρτισης των ίδιων βαρών, του ανέμου και του ανεμογενούς κυματισμού.....	124
8.3.1 Αποτελέσματα οριζόντιων μετακινήσεων των αργίλων 1, 2 και 3.....	124
8.3.1.1 Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των αργίλων 1, 2 και 3.....	132

8.3.2 Αποτελέσματα κατακόρυφων μετακινήσεων των αργίλων 1, 2 και 3.....	135
8.3.2.1 Σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων των αργίλων 1, 2 και 3.....	143
8.3.3 Αποτελέσματα τάσεων Von Mises των αργίλων 1, 2 και 3.....	147
8.4 Αποτελέσματα για την περίπτωση φόρτισης των ίδιων βαρών και του σεισμού.....	152
8.4.1 Αποτελέσματα απόλυτων και σχετικών οριζόντιων μετακινήσεων των 3 αργίλων.....	152
8.4.1.1 Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των αργίλων 1, 2 και 3.....	161
8.4.2 Αποτελέσματα κατακόρυφων μετακινήσεων των αργίλων 1, 2 και 3.....	163
8.4.2.1 Σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων των αργίλων 1, 2 και 3.....	170
8.5 Αποτελέσματα για την περίπτωση φόρτισης των ίδιων βαρών, του ανέμου, του κύματος και του σεισμού.....	172
8.5.1 Αποτελέσματα απόλυτων και σχετικών οριζόντιων μετακινήσεων των αργίλων 1, 2 και 3 (για τη διεύθυνση X).....	172
8.5.1.1 Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των αργίλων 1, 2 και 3 (διεύθυνση X).....	178
8.5.2 Αποτελέσματα απόλυτων και σχετικών οριζόντιων μετακινήσεων των αργίλων 1, 2 και 3 (για τη διεύθυνση Y).....	181
8.5.2.1 Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των αργίλων 1, 2 και 3 (διεύθυνση Y).....	187
8.5.3 Αποτελέσματα κατακόρυφων μετακινήσεων των αργίλων 1, 2 και 3.....	189
8.5.3.1 Σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων των αργίλων 1, 2 και 3.....	193
Κεφάλαιο 9	196
Συμπεράσματα.....	196
Βιβλιογραφία	199
Παράρτημα Α.....	202
Παράρτημα Β.....	205
Παράρτημα Γ.....	208
Παράρτημα Δ.....	211

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 7.11: Ταχύτητα ανέμου συναρτήσει του ύψους, για στατικό φορτίο (κόκκινη γραμμή) και για δυναμικό φορτίο (μπλε γραμμή).....	76
Σχήμα 7.12: Κατανομή ανέμου συναρτήσει του ύψους του πύργου.....	77
Σχήμα 7.13: Φορτίο ανέμου στον πύργο της ανεμογεννήτριας.....	78
Σχήμα 7.14: Νομογράφημα για την εύρεση του συντελεστή ψ (DNV-OS-J101, 2007).....	82
Σχήμα 7.15: Κατανομή φορτίου κύματος συναρτήσει του ύψους του φορέα στήριξης.....	83
Σχήμα 7.16: Φορτίο κύματος στο φορέα στήριξης της ανεμογεννήτριας.....	84
Σχήμα 7.17: Διορθωμένο επιταχυνσιογράφημα στην οριζόντια διεύθυνση (X διεύθυνση).....	85
Σχήμα 7.18: Διορθωμένο επιταχυνσιογράφημα στην κατακόρυφη διεύθυνση (Z διεύθυνση).....	85
Σχήμα 7.19: Επιβολή σεισμικής φόρτισης στη βάση του εδάφους (X και Z διεύθυνση).....	86
Σχήμα 7.20: Εισαγωγή περιορισμών για τη σεισμική φόρτιση.....	88
Σχήμα 7.21: Επιβολή συνοριακών συνθηκών περιμετρικά του εδάφους.....	89
Σχήμα 7.22: Επιβολή συνοριακών συνθηκών στη βάση του εδάφους.....	89
Σχήμα 8.1: Θέση των κόμβων του εδάφους (A) στο 3D προσομοίωμα και (B) σε κάτοψη.....	95
Σχήμα 8.2: Θέση κόμβων (A) του πασσάλου, (B) του φορέα στήριξης και (Γ) του πύργου.....	95
Σχήμα 8.3: Οριζόντιες μετακινήσεις στην άργιλο 1 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.....	96
Σχήμα 8.4: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.....	96
Σχήμα 8.5: Οριζόντιες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 1 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.....	97
Σχήμα 8.6: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου για την άργιλο 1.....	98
Σχήμα 8.7: Οριζόντιες μετακινήσεις στην άργιλο 2 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.....	98
Σχήμα 8.8: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου για την άργιλο 2.....	99
Σχήμα 8.9: Οριζόντιες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 2 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.....	100
Σχήμα 8.10: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 2.....	100
Σχήμα 8.11: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 3.....	101
Σχήμα 8.12: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου για την άργιλο 3.....	101
Σχήμα 8.13: Οριζόντιες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 3 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.....	102
Σχήμα 8.14: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 3.....	103
Σχήμα 8.15: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 17 (A) και 7719 (B) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.....	104
Σχήμα 8.16: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 2323 (A), 1672 (B) και 3275 (Γ) συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.....	106
Σχήμα 8.17: Κατακόρυφες μετακινήσεις στην άργιλο 1 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.....	108
Σχήμα 8.18: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου για την άργιλο 1.....	108

Σχήμα 8.19: Κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 1 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.....	109
Σχήμα 8.20: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.	109
Σχήμα 8.21: Κατακόρυφες μετακινήσεις στην άργιλο 2 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης..	110
Σχήμα 8.22: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου για την άργιλο 2.....	110
Σχήμα 8.23: Κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 2 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.....	111
Σχήμα 8.24: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 2.	112
Σχήμα 8.25: Κατακόρυφες μετακινήσεις στην άργιλο 3 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης..	112
Σχήμα 8.26: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου για την άργιλο 3.....	113
Σχήμα 8.27: Κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 3 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.....	114
Σχήμα 8.28: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 3.	114
Σχήμα 8.29: Σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων των κόμβων 17 (A) και 7719 (B) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.	115
Σχήμα 8.30: Κατακόρυφη μετακίνηση του κόμβου 21 συναρτήσει του χρόνου για τα αρχικά βήματα της ανάλυσης, για τις αργίλους 1, 2 και 3.	116
Σχήμα 8.31: Σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων των κόμβων 2323 (A), 1672 (B) και 3275 (Γ) συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.....	117
Σχήμα 8.32: Οι τάσεις Von Mises στην άργιλο 1 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.	119
Σχήμα 8.33: Οι τάσεις Von Mises στα μεταλλικά μέλη στην άργιλο 1 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.	119
Σχήμα 8.34: Οι τάσεις Von Mises στην άργιλο 2 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.	120
Σχήμα 8.35: Οι τάσεις Von Mises στα μεταλλικά μέλη στην άργιλο 2 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.	121
Σχήμα 8.36: Οι τάσεις Von Mises στην άργιλο 3 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.	122
Σχήμα 8.37: Οι τάσεις Von Mises στα μεταλλικά μέλη στην άργιλο 3 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.	123
Σχήμα 8.38: Οριζόντιες μετακινήσεις στην άργιλο 1 για τον δεύτερο συνδυασμό φόρτισης....	124
Σχήμα 8.39: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.	125
Σχήμα 8.40: Οριζόντιες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 1 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.	126
Σχήμα 8.41: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.	126
Σχήμα 8.42: Οριζόντιες μετακινήσεις στην άργιλο 2 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.....	127
Σχήμα 8.43: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 2.	127
Σχήμα 8.44: Οριζόντιες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 2 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.	128
Σχήμα 8.45: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 2.	129
Σχήμα 8.46: Οριζόντιες μετακινήσεις στην άργιλο 3 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.....	129

Σχήμα 8.47: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 3.	130
Σχήμα 8.48: Οριζόντιες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 3 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.	131
Σχήμα 8.49: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 3.	131
Σχήμα 8.50: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 17 (Α) και 7719 (Β) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου για τις αργίλους 1, 2 και 3.	132
Σχήμα 8.51: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 2323 (Α), 1672 (Β) και 3275 (Γ) συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.	134
Σχήμα 8.52: Κατακόρυφες μετακινήσεις στην άργιλο 1 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.	136
Σχήμα 8.53: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.	136
Σχήμα 8.54: Κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 1 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.	137
Σχήμα 8.55: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.	137
Σχήμα 8.56: Κατακόρυφες μετακινήσεις στην άργιλο 2 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.	138
Σχήμα 8.57: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου για την άργιλο 2.	139
Σχήμα 8.58: Κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 2 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.	140
Σχήμα 8.59: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 2.	140
Σχήμα 8.60: Κατακόρυφες μετακινήσεις στην άργιλο 3 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.	141
Σχήμα 8.61: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου για την άργιλο 3.	141
Σχήμα 8.62: Κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 3 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.	142
Σχήμα 8.63: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 3.	143
Σχήμα 8.64: Σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων των κόμβων 17 (Α) και 7719 (Β) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου για τις αργίλους 1, 2 και 3.	144
Σχήμα 8.65: Κατακόρυφες μετακινήσεις του κόμβου 21 σε συνάρτηση με το χρόνο, για τα αρχικά βήματα της ανάλυσης, για τις αργίλους 1, 2 και 3.	145
Σχήμα 8.66: Σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων των κόμβων 2323 (Α), 1672 (Β) και 3275 (Γ) συναρτήσει του χρόνου για τις αργίλους 1, 2 και 3.	146
Σχήμα 8.67: Οι τάσεις Von Mises στην άργιλο 1 για τον δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.	147
Σχήμα 8.68: Οι τάσεις Von Mises στα μεταλλικά μέλη στην άργιλο 1 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.	148
Σχήμα 8.69: Οι τάσεις Von Mises στην άργιλο 2 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.	149
Σχήμα 8.70: Οι τάσεις Von Mises στα μεταλλικά μέλη στην άργιλο 2 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.	149
Σχήμα 8.71: Οι τάσεις Von Mises στην άργιλο 3 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.	150
Σχήμα 8.72: Οι τάσεις Von Mises στα μεταλλικά μέλη στην άργιλο 3 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.	151
Σχήμα 8.73: Οριζόντιες μετακινήσεις στην άργιλο 1, για τον τρίτο συνδυασμό φόρτισης.	152

Σχήμα 8.74: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.	153
Σχήμα 8.75: Οριζόντιες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 1, για τον τρίτο συνδυασμό φόρτισης.....	153
Σχήμα 8.76: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.	154
Σχήμα 8.77: Σχετικές μετακινήσεις των 3 σημείων των μεταλλικών μελών ως προς τη βάση του πασσάλου σε συνάρτηση με το χρόνο.	154
Σχήμα 8.78: Οριζόντιες μετακινήσεις στην άργιλο 2, για τον τρίτο συνδυασμό φόρτισης.	155
Σχήμα 8.79: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 2.	156
Σχήμα 8.80: Οριζόντιες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 2, για τον τρίτο συνδυασμό φόρτισης.....	156
Σχήμα 8.81: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 2.	157
Σχήμα 8.82: Σχετικές μετακινήσεις των 3 σημείων των μεταλλικών μελών ως προς τη βάση του πασσάλου σε συνάρτηση με το χρόνο.	157
Σχήμα 8.83: Οριζόντιες μετακινήσεις στην άργιλο 3, για τον τρίτο συνδυασμό φόρτισης.	158
Σχήμα 8.84: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 3.	159
Σχήμα 8.85: Οριζόντιες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 3, για τον τρίτο συνδυασμό φόρτισης.....	159
Σχήμα 8.86: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 3.	160
Σχήμα 8.87: Σχετικές μετακινήσεις των 3 σημείων των μεταλλικών μελών ως προς τη βάση του πασσάλου σε συνάρτηση με το χρόνο.	160
Σχήμα 8.88: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 17 (A) και 7719 (B) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.	161
Σχήμα 8.89: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 2323 (A) και 3275 (B) συναρτήσει του χρόνου για τις αργίλους 1, 2 και 3.....	162
Σχήμα 8.90: Κατακόρυφες μετακινήσεις στην άργιλο 1, για τον τρίτο συνδυασμό φόρτισης..	164
Σχήμα 8.91: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.....	164
Σχήμα 8.92: Κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 1, για τον τρίτο συνδυασμό φόρτισης.....	165
Σχήμα 8.93: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.	165
Σχήμα 8.94: Κατακόρυφες μετακινήσεις στην άργιλο 2, για τον τρίτο συνδυασμό φόρτισης..	166
Σχήμα 8.95: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 2.....	166
Σχήμα 8.96: Κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 2, για τον τρίτο συνδυασμό φόρτισης.....	167
Σχήμα 8.97: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 2.	168
Σχήμα 8.98: Κατακόρυφες μετακινήσεις στην άργιλο 3, για τον τρίτο συνδυασμό φόρτισης..	168
Σχήμα 8.99: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 3.....	169

Σχήμα 8.100: Κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 3, για τον τρίτο συνδυασμό φόρτισης.....	169
Σχήμα 8.101: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 3.	170
Σχήμα 8.102: Σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων των κόμβων 17 (A) και 7719 (B) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.	171
Σχήμα 8.103: Σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων των κόμβων 2323 (A) και 3275 (B) συναρτήσει του χρόνου για τις αργίλους 1, 2 και 3.....	172
Σχήμα 8.104: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.	173
Σχήμα 8.105: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.	173
Σχήμα 8.106: Σχετικές μετακινήσεις των 3 σημείων των μεταλλικών μελών ως προς τη βάση του πασσάλου σε συνάρτηση με το χρόνο.	174
Σχήμα 8.107: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 2.	175
Σχήμα 8.108: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 2.	175
Σχήμα 8.109: Σχετικές μετακινήσεις των 3 σημείων των μεταλλικών μελών ως προς τη βάση του πασσάλου σε συνάρτηση με το χρόνο.	176
Σχήμα 8.110: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 3.	176
Σχήμα 8.111: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 3.	177
Σχήμα 8.112: Σχετικές μετακινήσεις των 3 σημείων των μεταλλικών μελών ως προς τη βάση του πασσάλου σε συνάρτηση με το χρόνο.	178
Σχήμα 8.113: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 17 (A) και 7719 (B) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.	179
Σχήμα 8.114: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 2323 (A) και 3275 (B) συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.....	180
Σχήμα 8.115: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.	181
Σχήμα 8.116: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.	182
Σχήμα 8.117: Σχετικές μετακινήσεις των 3 σημείων των μεταλλικών μελών ως προς τη βάση του πασσάλου σε συνάρτηση με το χρόνο.	183
Σχήμα 8.118: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 2.	183
Σχήμα 8.119: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 2.	184
Σχήμα 8.120: Σχετικές μετακινήσεις των 3 σημείων των μεταλλικών μελών ως προς τη βάση του πασσάλου σε συνάρτηση με το χρόνο.	185
Σχήμα 8.121: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 3.	185
Σχήμα 8.122: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 3.	186
Σχήμα 8.123: Σχετικές μετακινήσεις των 3 σημείων των μεταλλικών μελών ως προς τη βάση του πασσάλου σε συνάρτηση με το χρόνο.	187

Σχήμα 8.124: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 17 (A) και 7719 (B) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.	188
Σχήμα 8.125: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 2323 (A) και 3275 (B) συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.	189
Σχήμα 8.126: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.	190
Σχήμα 8.127: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.	190
Σχήμα 8.128: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 2.	191
Σχήμα 8.129: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 2.	192
Σχήμα 8.130: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 3.	192
Σχήμα 8.131: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 3.	193
Σχήμα 8.132: Σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων των κόμβων 17 (A) και 7719 (B) του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.	194
Σχήμα 8.133: Σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων των κόμβων 2323 (A) και 3275 (B) συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.	195
Σχήμα A.1: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 21 (A), 635 (B), 2292 (Γ), 4888 (Δ) και 26975 (E) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.	203
Σχήμα A.2: Σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων των κόμβων 21 (A), 635 (B), 2292 (Γ), 4888 (Δ) και 26975 (E) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.	204
Σχήμα B.1: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 21 (A), 635 (B), 2292 (Γ), 4888 (Δ) και 26975 (E) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.	206
Σχήμα B.2: Σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων των κόμβων 21 (A), 635 (B), 2292 (Γ), 4888 (Δ) και 26975 (E) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.	207
Σχήμα Γ.1: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 21 (A), 635 (B), 2292 (Γ), 4888 (Δ) και 26975 (E) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.	209
Σχήμα Γ.2: Σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων των κόμβων 21 (A), 635 (B), 2292 (Γ), 4888 (Δ) και 26975 (E) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.	210
Σχήμα Δ.1: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 21 (A), 635 (B), 2292 (Γ), 4888 (Δ) και 26975 (E) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.	212
Σχήμα Δ.2: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 21 (A), 635 (B), 2292 (Γ), 4888 (Δ) και 26975 (E) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.	213
Σχήμα Δ.3: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 21 (A), 635 (B), 2292 (Γ), 4888 (Δ) και 26975 (E) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.	215

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 4.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας τύπου NREL 5 MW (http://www.twinktoesengineering.info).....	44
Πίνακας 6.1: Μονάδες σύμφωνα με το S.I.....	56
Πίνακας 7.1: Ταχύτητα και πίεση ανέμου στα διάφορα ύψη του πύργου της ανεμογεννήτριας..	74
Πίνακας 7.2: Τιμές των συντελεστών α και β για όλες τις περιπτώσεις αργίλων.	87
Πίνακας 7.3: Συντελεστές ασφαλείας για τους συνδυασμούς φορτίσεων σύμφωνα με τον κανονισμό DNV (DNV-OS-J101, 2007).....	92
Πίνακας 8.1: Σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις της κορυφής του πασσάλου και του πύργου ως προς τη βάση του πασσάλου.....	163

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Μια από τις πλέον αναπτυσσόμενες, καθαρές και ήπιες μορφές ενέργειας είναι η αιολική ενέργεια. Τόσο στην Ελλάδα όσο και στην υπόλοιπη Ευρώπη κατασκευάζονται πλήθος ανεμογεννητριών και αιολικών πάρκων, με σκοπό την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας. Ιδιαίτερη ανάπτυξη φέρουν οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες, καθώς η ποιότητα του ανέμου που πνέει πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας θεωρείται ανώτερη από αυτή του ανέμου στη στεριά. Η θεμελίωση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών υλοποιείται με πολλούς τρόπους, ο συνηθέστερος εκ των οποίων είναι ο μονοπάσσαλος. Ο μονοπάσσαλος διακρίνεται ως τύπος θεμελίωσης για βάθη θάλασσας έως 40 m, για την απλότητα του ως προς το σχεδιασμό και για την οικονομική του απόδοση.

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία ολοκληρωμένου τρισδιάστατου αριθμητικού προσομοιώματος υπεράκτιας ανεμογεννήτριας. Η ανεμογεννήτρια θεμελιώνεται μέσω της έμπηξης μονοπασσάλου σε αργιλικό έδαφος. Στόχος της εργασίας αυτής, αποτελεί η σύγκριση των διαφορετικών αποκρίσεων του μοντέλου κατά τις διάφορες περιπτώσεις φόρτισης, η σύγκριση της συμπεριφοράς των 3 τύπων εδαφών και ο εντοπισμός των τμημάτων του προσομοιώματος που πλήττονται περισσότερο από τις φορτίσεις, μέσα από τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου αριθμητικού προσομοιώματος.

1.2 Οργάνωση της διπλωματικής εργασίας ανά κεφάλαιο

Στο Κεφάλαιο 1, παρατίθενται κάποια γενικά στοιχεία για τη συγκεκριμένη εργασία και παρουσιάζεται η οργάνωση της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας σε κεφάλαια.

Στο Κεφάλαιο 2, παρατίθενται πληροφορίες και στοιχεία για την αιολική ενέργεια, τις υπεράκτιες και τις χερσαίες ανεμογεννήτριες και τα αιολικά πάρκα. Επίσης, δίδονται ιστορικά στοιχεία για τις ανεμογεννήτριες και τα αιολικά πάρκα.

Στο Κεφάλαιο 3, αναλύονται οι διάφοροι τύποι θεμελίωσης των υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην κατηγορία θεμελίωσης του μονοπασσάλου, ο οποίος επιλέγεται και για τη θεμελίωση της υπό μελέτη ανεμογεννήτριας.

Στο Κεφάλαιο 4, πραγματοποιείται η επιλογή των διαστάσεων, των υλικών και των χαρακτηριστικών της ανωδομής και της θεμελίωσης της υπό μελέτη ανεμογεννήτριας. Ακόμη, αναφέρεται συνοπτικά ότι θα μελετηθούν τρεις διαφορετικοί τύποι αργιλικών εδαφών.

Στο Κεφάλαιο 5, αναφέρονται οι βασικότεροι κανονισμοί σχετικά με το σχεδιασμό των υπεράκτιων ανεμογεννητριών και της θεμελίωσής τους στο έδαφος, έναντι διαφόρων μεμονωμένων φορτίσεων ή συνδυασμών φόρτισης. Επίσης, επισημαίνεται ότι στη

συγκεκριμένη εργασία, εφαρμόστηκαν οι οδηγίες του Νορβηγικού Κανονισμού DNV-OS-J101.

Στο Κεφάλαιο 6, πραγματοποιείται η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου μελέτης της θεμελίωσης. Μεταξύ της μεθόδου των καμπυλών $p-y$ και της τρισδιάστατης αριθμητικής ανάλυσης, επιλέγεται η δεύτερη για συγκεκριμένους λόγους. Για την προσομοίωση της κατασκευής επιλέγεται το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Τέλος, παρατίθενται γενικά στοιχεία για το πρόγραμμα και για τα καταστατικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν.

Στο Κεφάλαιο 7, πραγματοποιείται η προσομοίωση της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας, θεμελιωμένη σε μονοπάσσαλο. Συγκεκριμένα, σχεδιάζεται η γεωμετρία των τμημάτων του μοντέλου, ορίζονται οι ιδιότητες των υλικών του εδάφους, πραγματοποιείται η διακριτοποίηση του μοντέλου, δημιουργούνται οι διεπιφάνειες μεταξύ των τμημάτων του μοντέλου και εισάγονται και υπολογίζονται οι φορτίσεις και οι συνοριακές συνθήκες. Τέλος, συντίθενται οι διαφορετικές περιπτώσεις φόρτισης και οι συνδυασμοί φορτίσεων.

Στο Κεφάλαιο 8, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από πλήθος αριθμητικών αναλύσεων. Συγκεκριμένα, παρατίθενται αποτελέσματα των απόλυτων ή/και σχετικών οριζόντιων και κατακόρυφων μετακινήσεων και των τάσεων Von Mises, για κάθε έναν από τους τρεις τύπους αργιλικών εδαφών και για κάθε περίπτωση φόρτισης.

Στο Κεφάλαιο 9, συγκεντρώνονται και παρατίθενται τα γενικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τις αριθμητικές αναλύσεις.

Κεφάλαιο 2

Αιολική ενέργεια και ανεμογεννήτριες - αιολικά πάρκα

2.1 Κατηγορίες πηγών ενέργειας

Είναι γεγονός ότι η παγκόσμια ζήτηση ενέργειας αυξάνεται διαρκώς. Η αύξηση αυτή οφείλεται κυρίως στη σημαντική αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού, στην αύξηση των οικονομικών και αναπτυξιακών δραστηριοτήτων σε όλο τον πλανήτη καθώς και στη σημαντική βελτίωση του βιοτικού επιπέδου και όσων αυτή συνεπάγεται. Οι πηγές ενέργειας που μπορούν να προσφέρουν την απαραίτητη ενέργεια για την κάλυψη των αναγκών χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Οι κατηγορίες αυτές είναι:

- Μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας
- Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

2.1.1 Μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Ως μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας χαρακτηρίζονται οι πηγές οι οποίες δεν αναπληρώνονται ή αναπληρώνονται εξαιρετικά αργά για τα ανθρώπινα μέτρα από φυσικές διαδικασίες.

Οι μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι οι εξής:

- τα στερεά καύσιμα των γαιανθράκων (π.χ. λιγνίτης, ανθρακίτης)
- τα υγρά καύσιμα, τα οποία προκύπτουν ως προϊόν από την κατεργασία υδρογονανθράκων (π.χ. πετρέλαιο, βενζίνη)
- τα αέρια καύσιμα (π.χ. φυσικό αέριο, υγραέριο)
- η πυρηνική ενέργεια, η οποία λαμβάνεται από τη σχάση ραδιενεργών υλικών

Ωστόσο, οι μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρουσιάζουν κάποια σημαντικά μειονεκτήματα. Τα κυριότερα μειονεκτήματα των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι τα εξής:

- οι υψηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και διοξειδίου του θείου (εκτός από την πυρηνική)
- η περιορισμένη διαθεσιμότητά τους
- η περιβαλλοντική ρύπανση

Τα μειονεκτήματα αυτά σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις σε ενέργεια και τον ανταγωνισμό για τον έλεγχο της αγοράς ενέργειας δημιούργησαν την ανάγκη για στροφή στην ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

2.1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) έχουν οριστεί οι ενεργειακές πηγές που υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό περιβάλλον και προέρχονται από φυσικές διαδικασίες, όπως είναι ο άνεμος και η κυκλοφορία του νερού. Σύμφωνα με την οδηγία 2009/28/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, ως κατηγορίες ενέργειας η οποία προκύπτει από ανανεώσιμες, μη ορυκτές πηγές μπορούν να θεωρηθούν οι εξής:

- Αιολική
- Ηλιακή
- Αεροθερμική
- Γεωθερμική
- Υδροθερμική και η ενέργεια των ωκεανών,
- Υδροηλεκτρική,
- Ενέργεια από βιομάζα,
- Ενέργεια από τα εκλυόμενα αέρια στους χώρους υγειονομικής ταφής
- Ενέργεια από αέρια μονάδων επεξεργασίας λυμάτων
- Ενέργεια από βιοαέρια

Τα βασικά πλεονεκτήματα των ΑΠΕ είναι ότι η αξιοποίησή τους δεν απαιτεί ενεργητική παρέμβαση, όπως είναι η εξόρυξη, η άντληση ή η καύση, όπως με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας. Η εκμετάλλευση των ΑΠΕ γίνεται μέσω της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Επιπλέον, πρόκειται για «καθαρές» μορφές ενέργειας, οι οποίες είναι πολύ φιλικές στο περιβάλλον, που δεν αποδεδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα.

Οι ΑΠΕ αποτελούν σήμερα, για πολλές χώρες, μια εγχώρια πηγή ενέργειας με ευνοϊκές προοπτικές συνεισφοράς στο ενεργειακό τους ισοζύγιο, συμβάλλοντας στη μείωση της εξάρτησης από το ακριβό εισαγόμενο πετρέλαιο και στην ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού τους εφοδιασμού. Παράλληλα, συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος καθώς και στην αειφόρο ανάπτυξη μιας περιοχής.

2.2 Αιολική ενέργεια

Μια από τις πλέον αναπτυσσόμενες, καθαρές και ήπιες μορφές ενέργειας είναι η αιολική ενέργεια. Η αιολική ενέργεια, της οποίας το όνομα προέρχεται από τον Αίοιο, ο οποίος ήταν ο Θεός του ανέμου στην ελληνική μυθολογία, χρησιμοποιήθηκε παλαιότερα για διάφορους σκοπούς όπως η άντληση υδάτων από τα πηγάδια και η άλεση των σιτηρών στους ανεμόμυλους. Στη σύγχρονη εποχή, η αιολική ενέργεια χρησιμοποιείται ευρέως για τη μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια (Λιόλιου, 2018).

Η αιολική ενέργεια δημιουργείται έμμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία. Περίπου 1 έως 2% της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης μετατρέπεται σε άνεμο, καθώς η ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της Γης προκαλεί τη μετακίνηση μεγάλων

μαζών αέρα από μια περιοχή σε μια άλλη. Η αιολική ενέργεια χαρακτηρίζεται ως ήπιας μορφής ενέργεια, φιλική προς το περιβάλλον και πρακτικά ανεξάντλητη, με αποτέλεσμα να κατατάσσεται στην κατηγορία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

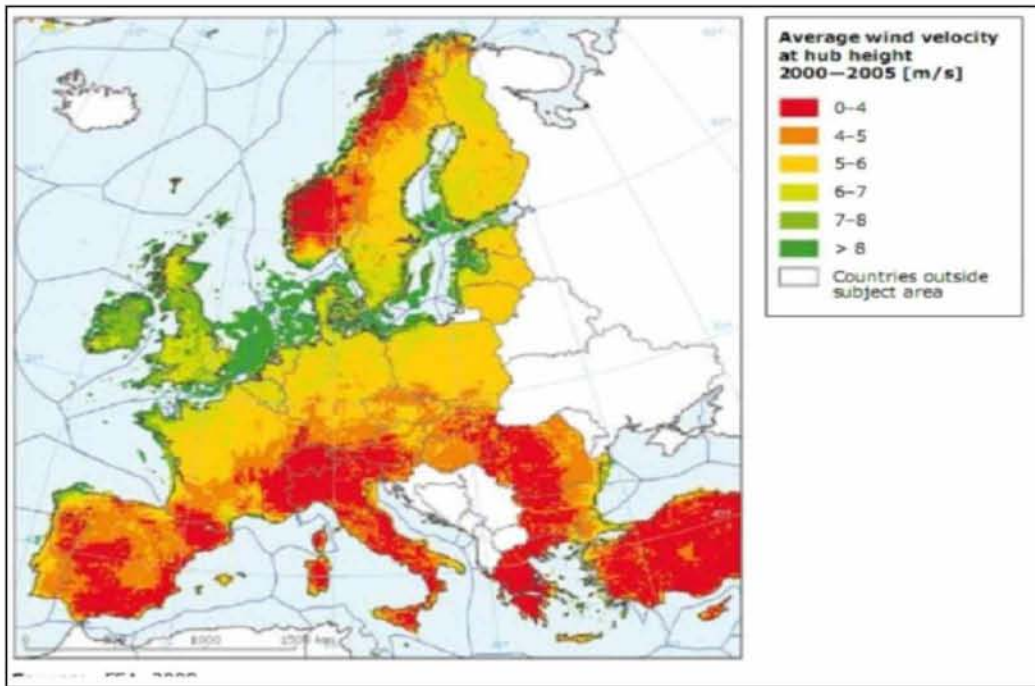
Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους πραγματοποιείται η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας. Έναν από τους πιο διαδεδομένους, αποτελεί η χρήση των ανεμογεννητριών, οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια που προκαλεί η κίνηση του δρομέα της ανεμογεννήτριας, λόγω της ροής του ανέμου, σε ηλεκτρική. Η μετατροπή αυτή πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, μέσω της περωτής της ανεμογεννήτριας, πραγματοποιείται η μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική μέσω της περιστροφής του άξονα της περωτής ενώ στο δεύτερο στάδιο, επιτυγχάνεται η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική, μέσω της γεννήτριας. Οι ανεμογεννήτριες θα μελετηθούν εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

2.2.1 Αιολικό δυναμικό στην Ελλάδα και στην Ευρώπη

Τόσο στην Ελλάδα όσο και στην υπόλοιπη Ευρώπη κατασκευάζονται πλήθος ανεμογεννητριών και αιολικών πάρκων, με σκοπό την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας.

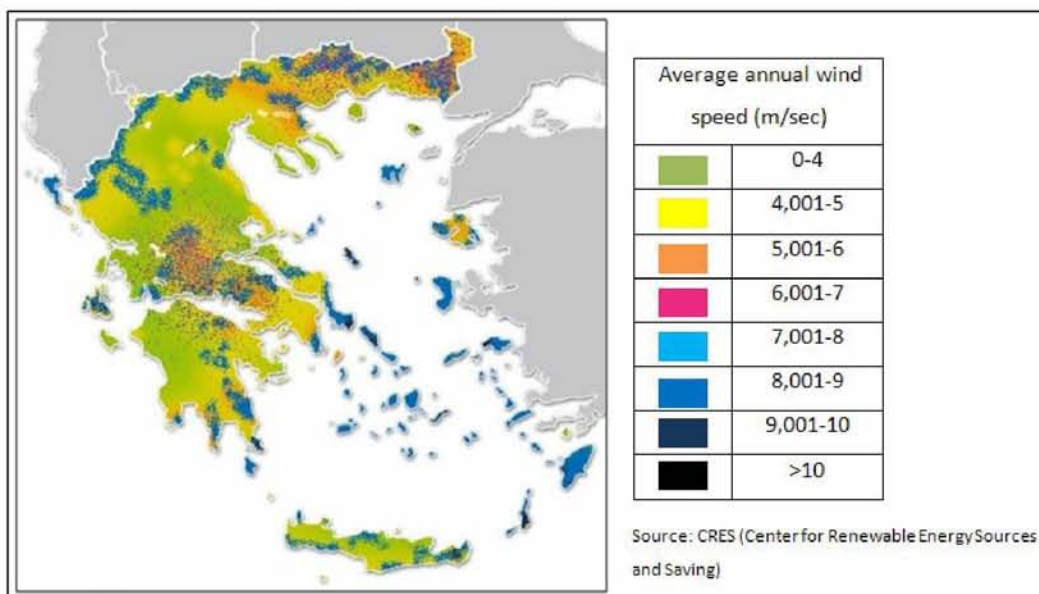
Για να θεωρηθεί μια περιοχή κατάλληλη για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας, θα πρέπει η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου (η οποία υπολογίζεται σε ύψος 10 m πάνω από την επιφάνεια της γης) να είναι μεγαλύτερη από 4 m/s. Οι ταχύτητες του ανέμου διαφέρουν ανάλογα με το ανάγλυφο μιας περιοχής και ποικίλλουν σημαντικά με την εποχή και την ημέρα.

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 2.1), το υψηλότερο αιολικό δυναμικό παρουσιάζεται στο Ηνωμένο Βασίλειο, ενώ ακολουθεί η Ελλάδα. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ενώ οι μέσες ταχύτητες ανέμου σε χώρες οι οποίες πρωταγωνιστούν στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας, όπως η Γερμανία και η Δανία, είναι 5.5-6.5 m/s, στην Ελλάδα οι αντίστοιχες θέσεις θα αγνοούνταν μιας και στη χώρα μας υπάρχουν περιοχές με μεγαλύτερο αιολικό δυναμικό, το οποίο κατά τόπους αγγίζει ταχύτητες που φτάνουν ακόμα και τα 8-9 m/s (Χρήστου, 2012).



Σχήμα 2.1: Το αιολικό δυναμικό στην Ευρώπη (<https://www.energy.eu>).

Το υψηλό αιολικό δυναμικό της Ελλάδας οφείλεται κυρίως στη μεγάλη ακτογραμμή της, στο ανάγλυφο και στο τεράστιο πλήθος νησιών της. Όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 2.2), η Ελλάδα διαθέτει εξαιρετικά υψηλό αιολικό δυναμικό, σε αρκετές περιοχές, όπως η Κρήτη, η Πελοπόννησος, η Εύβοια και φυσικά τα νησιά του Αιγαίου. Σε αυτές τις περιοχές βρίσκονται και τα περισσότερα αιολικά πάρκα, τα οποία αποτελούνται από συστοιχίες ανεμογεννητριών σε βέλτιστη διάταξη για την καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού.



Σχήμα 2.2: Το αιολικό δυναμικό στην Ελλάδα (<http://www.energyproject.gr>).

Συνεπώς, η σωστή εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας μέσω των ανεμογεννητριών και των αιολικών πάρκων, για περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό, όπως είναι η Ελλάδα, μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα ευεργετική για αυτές σε διάφορους τομείς.

2.3 Ανεμογεννήτριες

Ως ανεμογεννήτρια ορίζεται η μηχανή που μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια, χρήσιμη για τον άνθρωπο. Η συνεχώς εξελισσόμενη γνώση της αιολικής ενέργειας αξιοποιεί την χρήση νέων υλικών, της μηχανικής, των ηλεκτρονικών και αεροδυναμικών τεχνολογιών. Αποτέλεσμα της αξιοποίησης και της εφαρμογής της συνεχώς εξελισσόμενης γνώσης για την αιολική ενέργεια, αποτελεί η ανάπτυξη πολλαπλών κατηγοριών ανεμογεννητριών (Λιόλιου, 2018).

2.3.1 Ιστορία των ανεμογεννητριών

Για μεγάλο μέρος του 20^{ου} αιώνα υπήρξε μικρό ενδιαφέρον στη χρήση ανεμογεννητριών για τη γένεση ηλεκτρισμού. Μια αξιοσημείωτη ανακάλυψη ήταν η ανεμογεννήτρια των 1250 kW Smith-Putnam, που κατασκευάστηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής το 1941. Οι Shepherd και Divone παρουσίασαν την ιστορία ανάπτυξης των πρώτων ανεμογεννητριών. Οι έρευνές τους, συμπεριλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, την ανεμογεννήτρια Balaclava, 100 kW, διαμέτρου 30 m στη Ρωσία το 1931 και την Andrea Enfield, 100 kW και διαμέτρου 24 m που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο το 1950, των 200 kW με διάμετρο 24 m Gedser machine στη Δανία το 1956, και των 11 MW διαμέτρου 35 m τουρμπίνας που δοκιμάστηκε από την Electricitede France το 1963.

Πέραν κάποιων τεχνικών εξελίξεων, δεν υπήρξε συστηματικό ενδιαφέρον στις ανεμογεννήτριες μέχρι την κρίση των καυσίμων πετρελαίου στις αρχές του 1970. Η δραματική αύξηση της τιμής του πετρελαίου κινητοποίησε σημαντικά ερευνητικά προγράμματα που χρηματοδοτήθηκαν από τις κυβερνήσεις. Για παράδειγμα, στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, η έρευνα οδήγησε στην κατασκευή σειρών από τουρμπίνες, ξεκινώντας με 38 m διάμετρο και 100 kW Mod-0 το 1975 και εξελίχθηκαν σε διάμετρο 97.5 m και 2.5 MW Mod-5B το 1987. Παρόμοια προγράμματα ξεκίνησαν και στο Ηνωμένο Βασίλειο, στη Γερμανία και στη Σουηδία. Μεγάλες τουρμπίνες κατασκευάστηκαν με 2 και 3 λεπίδες μέχρι την ιδέα της Δανέζικης ανεμογεννήτριας που προέκυψε από έναν ανεστραμμένο (upwind) ρότορα με 3 λεπίδες και ένα σύστημα μετάδοσης κίνησης, σταθερής ταχύτητας. Αυτός ο σχεδιασμός αποδείχθηκε επιτυχής και υλοποιήθηκε σε ανεμογεννήτρια διαμέτρου 60 m και πάνω από 15 MW (Καγνία, 2017).

2.3.2 Κατηγορίες ανεμογεννητριών

Η συνεχής τεχνολογική ανάπτυξη στον τομέα της αιολικής ενέργειας συνέβαλε στην ανάπτυξη αιολικών πάρκων τόσο στην ξηρά όσο και στη θάλασσα. Μια από τις πιο βασικές διακρίσεις των ανεμογεννητριών, επομένως, αποτελεί αυτή ανάλογα με τη θέση λειτουργίας τους. Οι ανεμογεννήτριες διακρίνονται στις χερσαίες, οι οποίες βρίσκονται στην ξηρά, και στις υπεράκτιες, οι οποίες βρίσκονται στη θάλασσα και στους ωκεανούς (Λιόλιου, 2018).

Επίσης, μια από τις βασικότερες διακρίσεις των ανεμογεννητριών αποτελεί αυτή με βάση τον τρόπο εκμετάλλευσης του ανέμου. Ανάλογα λοιπόν, με τον προσανατολισμό του ανέμου στη διεύθυνση ροής του ανέμου, οι ανεμογεννήτριες διαχωρίζονται στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου και στις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα.

Στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα ο δρομέας είναι τύπου έλικα και βρίσκεται συνεχώς παράλληλος με την κατεύθυνση του ανέμου (Σχήμα 2.3A), όπως είναι οι παραδοσιακοί ανεμόμυλοι, ενώ στις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα ο δρομέας παραμένει σταθερός και είναι κατακόρυφος και κάθετος προς την κατεύθυνση του ανέμου (Σχήμα 2.3B), όπως είναι το μοντέλο Darrieus.



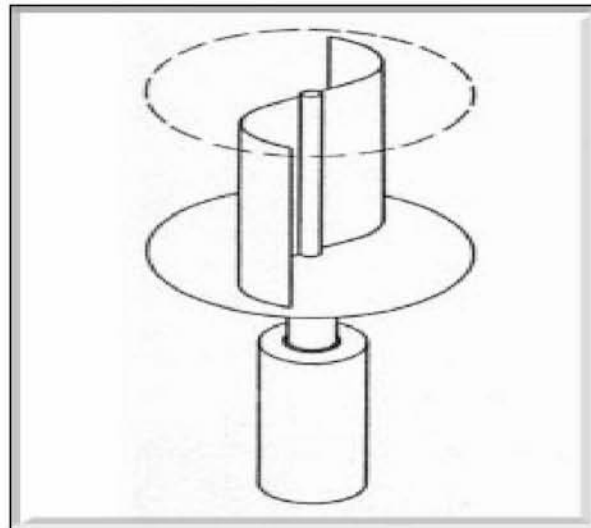
Σχήμα 2.3: (A) Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα Darrieus (μεγάλου μεγέθους) και (B) ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα (<http://www.zeroenergybuildings.org> και <https://www.ge.com>).

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα έχουν τη δυνατότητα να εκμεταλλεύονται την ταχύτητα του ανέμου ανεξάρτητα της κατεύθυνσης του. Επομένως, δε χρειάζεται σύστημα προσανατολισμού και ρύθμιση του δρομέα σύμφωνα με την κατεύθυνση του ανέμου.

Η λειτουργία των ανεμογεννητριών αυτού του τύπου βασίζεται στην περιστροφή των πτερυγίων γύρω από τον κάθετο, στην κατεύθυνση του ανέμου, άξονα. Το αποτέλεσμα της περιστροφής αυτής είναι η παραγωγή μηχανικού έργου, το οποίο στη συνέχεια μεταφέρεται στη γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που έχει τοποθετηθεί στο έδαφος.

Τα σύγχρονα μοντέλα ανεμογεννήτριας κατακόρυφου άξονα είναι τύπου Savonius και Darrieus. Οι κύριες διαφορές αυτών των δυο βρίσκονται στο σχεδιασμό και την αποδοτικότητά τους. Συγκεκριμένα, οι ανεμογεννήτριες τύπου Savonius (Σχήμα 2.4), παρουσιάζουν ευκολία στην εκκίνησή τους και σχετικά μεγάλη ροπή, αλλά μικρή ταχύτητα σχετικά με τον άνεμο και μικρή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συγκριτικά με το μέγεθος,

το βάρος και το κόστος της συσκευής. Από την άλλη, οι μηχανές τύπου Darrieus, που θεωρούνται και ο επικρατέστερος τύπος στις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα, παρουσιάζουν αρχικά χαμηλές ροπές και υψηλές ταχύτητες σε σχέση με τον άνεμο λόγω των καμπύλων πτερυγίων τους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ικανοποιητική παραγωγή ενέργειας σε σχέση με το μέγεθος, το βάρος και το κόστος της συσκευής. Πέραν των παραπάνω, πλεονεκτούν γιατί έχουν μικρό βάρος, είναι απλές και οικονομικές στην κατασκευή τους.



Σχήμα 2.4: Ανεμογεννήτρια τύπου Savonius (<http://www.reuk.co.uk>).

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα βασικά πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα.

Πλεονεκτήματα:

- Εκμετάλλευση του ανέμου από όλες τις διευθύνσεις
- Εύκολη τοποθέτηση και συντήρηση των μηχανικών μερών της γεννήτριας και του κιβώτιου ταχυτήτων που είναι τοποθετημένα στη βάση της ανεμογεννήτριας
- Παραγωγή λιγότερου θορύβου
- Δυνατότητα τοποθέτησης σε θέσεις περιορισμένης πρόσβασης λόγω του μεγέθους
- Απλή κατασκευή με σχετικά χαμηλό κόστος

Μειονεκτήματα:

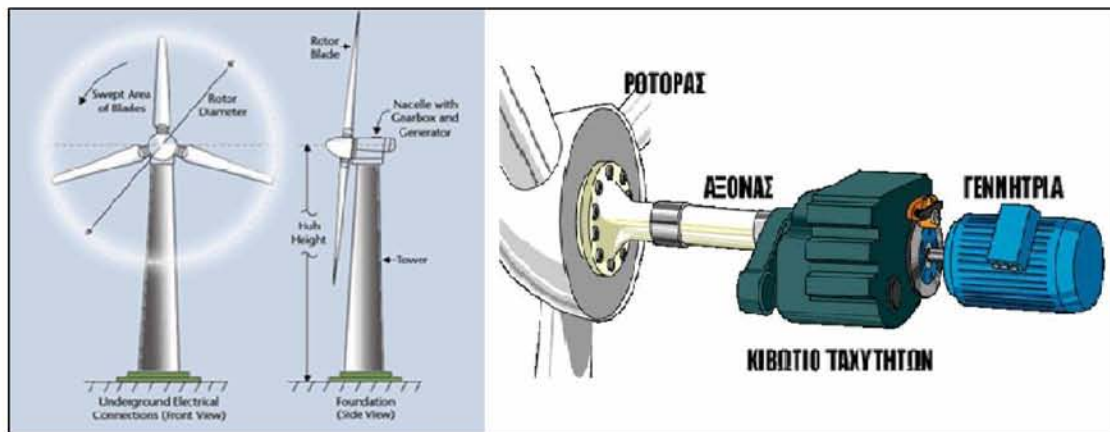
- Χαμηλή απόδοση
- Υψηλή ροπή εκκίνησης (χαμηλή ταχύτητα περιστροφής)
- Αδυναμία εκμετάλλευσης ανέμων υψηλών ταχυτήτων, λόγω του μικρού μεγέθους που έχουν

- Δυσκολία συντήρησης σε κάποια μηχανικά μέρη (π.χ. η αλλαγή των εδράνων κύλισης)

Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι οι τελευταίες ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα κατασκευάστηκαν τη δεκαετία του 1980 και έκτοτε δεν έχει σημειωθεί κάποια σημαντική τεχνολογική εξέλιξη για τις ανεμογεννήτριες αυτού του είδους. Αντίθετα, οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα είναι αυτές οι οποίες χρησιμοποιούνται κατά κόρον τις τελευταίες δεκαετίες, καθώς εξελίσσονται συνεχώς και προσαρμόζονται στις συνθήκες του κάθε έργου.

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν τον άξονά τους παράλληλο προς την επιφάνεια της Γης και συνήθως παράλληλα και με τη διεύθυνση του ανέμου. Στην κορυφή τους έχουν τοποθετημένη την κύρια άτρακτο (nacelle) που περιέχει την ηλεκτρογεννήτρια και τον ρότορα. Ο ρότορας πρέπει να είναι στραμμένος προς τη φορά που φυσάει ο άνεμος. Οι ανεμογεννήτριες μικρού μεγέθους προσανατολίζονται με τη βοήθεια ενός ανεμοδείκτη, ενώ οι ανεμογεννήτριες μεγάλου μεγέθους χρησιμοποιούν έναν αισθητήρα ανέμου συνδυασμένο με το μηχανισμό περιστροφής του ρότορα. Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν συνήθως 2 ή 3 πτερύγια. Ένα χαρακτηριστικό των πτερυγίων αυτών είναι ότι έχουν μεγάλο αεροδυναμικό βαθμό απόδοσης. Οι περισσότερες έχουν ένα κιβώτιο ταχυτήτων, που μετατρέπει την αργή περιστροφή των λεπίδων του ρότορα σε μια ταχύτερη, η οποία είναι πιο κατάλληλη για να αποδώσει μία ηλεκτρική γεννήτρια.

Μια ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα, ανεξαρτήτως μεγέθους, αποτελείται από το ρότορα, τη γεννήτρια, τα πτερύγια, το σύστημα ελέγχου ταχύτητας και τον πύργο (Σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5: Βασικά μέρη ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα (<https://www.eac.com> και <https://www.oleng.eu>).

Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά τα βασικά μηχανολογικά μέρη, από τα οποία αποτελείται μια τυπική ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα (Λιόλιου, 2018).

- Πύργος (tower)

Ο πύργος αποτελεί το κύριο μέρος ολόκληρης της κατασκευής, καθώς στην κορυφή του είναι τοποθετημένος ο ηλεκτρολογικός εξοπλισμός, δηλαδή ο δρομέας, το σύστημα πέδησης, σύμφωνα με το οποίο η ανεμογεννήτρια πρέπει να μειώνει ταχύτητα όταν υπερβαίνει ένα όριο ταχύτητας προκειμένου να μην υποστεί βλάβη, καθώς και το σύστημα ελέγχου, σύνδεσης και αποθήκευσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Ο πύργος κατασκευάζεται συνήθως από μέταλλο (χάλυβα) ενώ είναι δυνατόν να κατασκευαστεί και από σκυρόδεμα. Το ύψος του μπορεί να φτάσει τα 120 m. Το σχήμα του είναι κωνικό με τη διάμετρο να μειώνεται με την αύξηση του ύψους, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη αντοχή με το μικρότερο κόστος.

- Ρότορας - Δρομέας (rotor)

Ρότορας ονομάζεται το σύστημα που συγκεντρώνονται τα πτερύγια (blades) και η κεφαλή του θαλάμου. Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες αποτελούνται πλέον από τρία πτερύγια. Η διάμετρος του ρότορα κυμαίνεται από 40 έως 120 m. Ο ρότορας περιστρέφεται από τον κεντρικό άξονα που είναι κατασκευασμένος συνήθως από ενισχυμένο χάλυβα.

- Θάλαμος (nacelle)

Ο θάλαμος περιέχει τα βασικά τεχνικά μέρη της ανεμογεννήτριας τα οποία είναι: η γεννήτρια, το κιβώτιο ταχυτήτων, οι άξονες χαμηλής και υψηλής ταχύτητας, το φρένο, τη μονάδα ψύξης, το ανεμόμετρο, το μηχανισμό περιστροφής προσανεμισμού και το υδραυλικό σύστημα που ελέγχει τη γωνία των πτερυγίων. Βρίσκεται στην κορυφή του πύργου και κατασκευάζεται συνήθως από υαλόνημα (fiberglass).

- Κιβώτιο ταχυτήτων

Το κιβώτιο ταχυτήτων μετατρέπει την αργή περιστροφή των λεπίδων του ρότορα σε μια ταχύτερη περιστροφή που είναι πιο κατάλληλη για να αποδώσει μία ηλεκτρική γεννήτρια.

- Πτερύγια

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, όπως ήδη αναφέρθηκε, έχουν συνήθως 2 ή 3 πτερύγια. Η περιστροφή των πτερυγίων οφείλεται στη συνδυασμένη δύναμη της άνωσης και της πίεσης που ασκείται, όταν οι μάζες του αέρα προσπίπτουν στα πτερύγια. Όσο μικρότερη είναι η γωνία πρόσπτωσης τόσο καλύτερη η απόδοση. Τα πτερύγια μιας ανεμογεννήτριας έχουν αεροδυναμικό σχήμα και μπορεί να είναι ενιαία ή να διαθέτουν ακροπτερύγια. Το υλικό κατασκευής τους είναι συνήθως το υαλόνημα, λόγω της αντοχής του και του μικρού βάρους κατασκευής.

Παρακάτω συνοψίζονται τα βασικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα.

Πλεονεκτήματα:

- Δυνατότητα εκμετάλλευσης της ενέργειας του ανέμου από μεγαλύτερα ύψη, όπου συνήθως ο άνεμος έχει μεγαλύτερες ταχύτητες (λόγω του μεγάλου ύψους της ανεμογεννήτριας)
- Εύκολη συναρμολόγηση
- Υψηλός αεροδυναμικός συντελεστή
- Υψηλότερη αποδοτικότητα και καλύτερη απόδοση σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα

Μειονεκτήματα:

- Παραγωγή θορύβου κατά τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας
- Μεγάλο κόστος κατασκευής και μεταφοράς, λόγω του μεγέθους τους
- Σε αντίθεση με τις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα απαιτείται ένας μηχανισμός περιστροφής για τον προσανατολισμό των πτερυγίων στην διεύθυνση του ανέμου

Όσον αφορά την κατάσταση σήμερα και την παγκόσμια αγορά για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, έχουν επικρατήσει οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα σε ποσοστό που ανέρχεται στα 90%. Η ισχύς αυτών των ανεμογεννητριών ξεπερνά σήμερα τα 5 MW και το πεδίο ταχυτήτων ανέμου στο οποίο καθίστανται λειτουργικές κυμαίνεται από 3 έως 30 m/s.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, θα μελετηθεί η περίπτωση της ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα, λόγω των πλεονεκτημάτων που προαναφέρθηκαν για το είδος αυτό σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα.

2.4 Υπεράκτιες ανεμογεννήτριες

Οι άνεμοι της ατμόσφαιρας που κινούνται κυκλικά γύρω από τη γη δημιουργούνται λόγω της ανομοιομορφίας θέρμανσης της επιφάνειας της γης από τον ήλιο (οι πόλοι δέχονται λιγότερη ηλιακή ενέργεια από τον ισημερινό) και λόγω της περιστροφικής κίνησης του πλανήτη (Μακρή, 2013).

Ο θερμός αέρας έχει μικρότερη πυκνότητα και είναι ελαφρύτερος από τον ψυχρό. Ο αέρας στις θερμές περιοχές κινείται προς τα επάνω και στη θέση του εισρέουν ψυχρότερες, κατά συνέπεια και πυκνότερες, αέριες μάζες, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ανέμου.

Η στεριά και το νερό έχουν διαφορετικές θερμοχωρητικότητες, με το νερό να έχει τη μεγαλύτερη, με αποτέλεσμα να απορροφούν τη θερμότητα του ήλιου σε διαφορετικό βαθμό. Ο αέρας της στεριάς θερμαίνεται και ψύχεται ταχύτερα απ' ό,τι ο αέρας που βρίσκεται πάνω από το νερό. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, ο επί της ξηράς αέρας διαστέλλεται, αρχίζει να κινείται προς τα επάνω και αντικαθίσταται από τον ψυχρότερο αέρα της θάλασσας, δημιουργώντας έτσι τις θαλάσσιες αύρες στις ακτές. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, η κίνηση των ανέμων αντιστρέφεται.

Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ανέμου, τόσο περισσότερη ενέργεια περικλείει. Οι ταχύτητες των ανέμων στην ανοικτή θάλασσα είναι γενικά μεγαλύτερες από αυτές στην ξηρά. Καθώς ο άνεμος κινείται επάνω από την επιφάνεια του νερού και δημιουργεί κύματα χάνει μέρος της ενέργειάς του λόγω τριβής. Η ενέργεια που περικλείει ο άνεμος είναι μεγαλύτερη σε απόσταση μακριά από την ακτή και αυξάνει σε μέγεθος με την αύξηση του ύψους επάνω από την επιφάνεια του νερού.

Συνεπώς, είναι κοινώς αποδεκτό ότι η ποιότητα του αέρα επάνω από τη θάλασσα και τους ωκεανούς είναι ανώτερη σε σχέση με αυτή της στεριάς, με αποτέλεσμα τα τελευταία χρόνια να αναπτύσσονται και να εξελίσσονται όλο και περισσότερο οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες σε σχέση με τις χερσαίες.

Ακόμη, πέραν του προηγούμενου πλεονεκτήματος, κάποια επιπλέον πλεονεκτήματα των υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι τα εξής:

- η απουσία περιβαλλοντικών και εδαφικών περιορισμών
- οι μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου με μικρότερη τύρβη
- η ομοιόμορφη ροή
- η αποφυγή της οπτικής ρύπανσης

Πέραν από τα πλεονεκτήματα υπάρχουν και μειονεκτήματα των υπεράκτιων ανεμογεννητριών κατά τη λειτουργία τους. Τα βασικότερα μειονεκτήματα είναι τα εξής:

-Η υποθαλάσσια θεμελίωση, τα διάφορα συστήματα αγκίστρωσης, τα υλικά προστασίας των μερών της αιολικής μηχανής από την διάβρωση, τα διάφορα υλικά καθαρισμού και συντήρησης, η ηχητική όχληση καθώς και το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από την λειτουργία τους, είναι πιθανόν να προκαλέσουν μείωση του βένθους του θαλάσσιου οικοσυστήματος με αντίκτυπο βέβαια σε όλη την τροφική αλυσίδα. Επομένως, αυτή η παρέμβαση ενδέχεται μακροπρόθεσμα να επιφέρει αλλαγή στο φυσικό περιβάλλον.

-Η δημιουργία υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι πιθανόν να έχει αρνητικές συνέπειες στις θαλάσσιες μεταφορές, καθώς αφενός θα καταστεί υποχρεωτική η χάραξη νέων γραμμών πλεύσης, αφετέρου το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο από τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας ενδέχεται να επηρεάζει τα ραντάρ των πλοίων αλλά και τον έλεγχο της εναέριας κυκλοφορίας.

-Ο τομέας των υπεράκτιων ανεμογεννητριών αναπτύσσεται συνεχώς, με τις νέες εγκαταστάσεις να είναι μεγαλύτερες, μακρύτερα από την ακτή, σε μεγαλύτερα βάθη και να αποδίδουν μεγαλύτερη ισχύ. Όσο αυξάνουν αυτά τα μεγέθη, αυξάνουν παράλληλα και οι κατασκευαστικές δυσκολίες και απαιτήσεις για ακριβέστερη πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους. Τα μηχανολογικά μέρη της ανεμογεννήτριας είναι συγκεντρωμένα στην κορυφή της, με αποτέλεσμα να είναι πολύ ευαίσθητη στις επιτρεπόμενες μετακινήσεις και στροφές.

-Ιδιαίτερη πρόκληση, όπως θα αναφερθεί και στη συνέχεια, αποτελεί για τους γεωτεχνικούς μηχανικούς η θεμελίωση, καθώς οι συνθήκες είναι δυσμενείς (μεγάλο βάθος θάλασσας, προβληματικά εδάφη) και οι απαιτήσεις αυξημένες (μεγάλη ροπή ανατροπής, ανακυκλικός χαρακτήρας φόρτισης για χρόνο ζωής 20 έτη).

Λειτουργία και διάταξη υπεράκτιας ανεμογεννήτριας

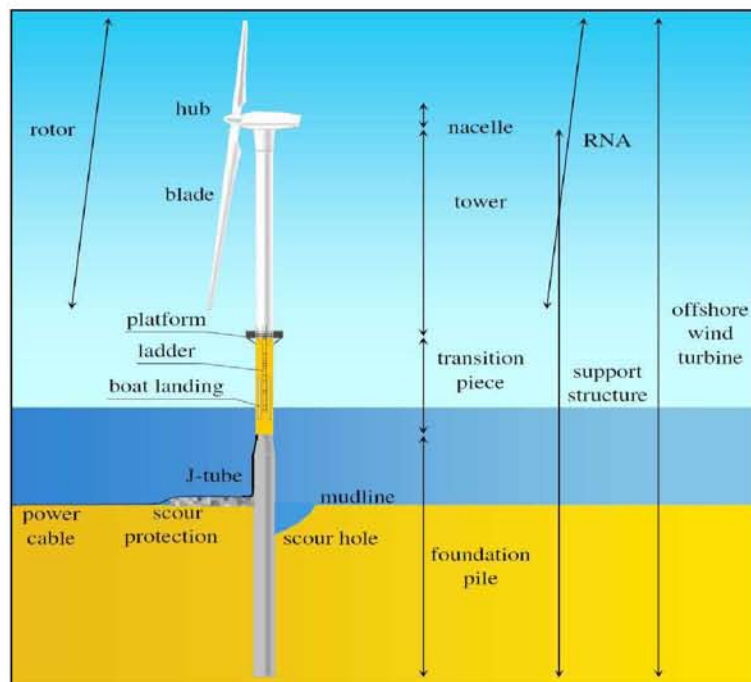
Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες είναι αποκλειστικά οριζοντίου άξονα περιστροφής και έχουν κυρίως 3 πτερύγια. Τα κύρια μέρη μιας τυπικής υπεράκτιας ανεμογεννήτριας μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Κατασκευαστικά μέρη
- Μηχανολογικά μέρη

Τα μηχανολογικά μέρη μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας είναι τα ίδια που αναφέρθηκαν και για τις χερσαίες ανεμογεννήτριες, ενώ όσον αφορά τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της, σημαντικό ρόλο κατέχει η θεμελίωση της ανεμογεννήτριας, η οποία αναλύεται εκτενέστερα στη συνέχεια. Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 2.6) παρουσιάζονται τα κατασκευαστικά τμήματα μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας.

Συνοπτικά, τα βασικότερα κατασκευαστικά μέρη μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας είναι:

- Πύργος (tower)
- Φορέας στήριξης (transition piece)
- Θεμελίωση (foundation pile)



Σχήμα 2.6: Κατασκευαστικά τμήματα τυπικής υπεράκτιας ανεμογεννήτριας (Χρήστου, 2012).

2.5 Σύγκριση των χερσαίων με τις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι κοινώς αποδεκτό ότι η ποιότητα του αέρα επάνω από τη θάλασσα και τους ωκεανούς είναι ανώτερης ποιότητας σε σχέση με αυτή της στεριάς, με αποτέλεσμα τα τελευταία χρόνια να αναπτύσσονται όλο και περισσότερο οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες.

Ακόμη, πέραν της υποβαθμισμένης ποιότητας του αέρα της στεριάς σε σχέση με αυτόν της θάλασσας, υπάρχουν επιπλέον αρνητικές επιπτώσεις των χερσαίων ανεμογεννητριών, όπως άλλωστε σε κάθε ανθρώπινη κατασκευή. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι οι εξής:

-Ηχητική όχληση. Ο θόρυβος σε μία ανεμογεννήτρια είναι είτε αεροδυναμικός είτε μηχανικός. Ωστόσο αξίζει να σημειωθεί ότι, στις μέρες μας, χάρις τη συνεχή εξέλιξη των ανεμογεννητριών, ο θόρυβος έχει περιοριστεί σημαντικά.

-Πρόκληση τραυματισμών ή θανατώσεις πουλιών (κυρίως αποδημητικών). Γι' αυτό καλύτερα να μην κατασκευάζονται αιολικά πάρκα σε δρόμους μετανάστευσης πουλιών.

-Ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση. Το πρόβλημα της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης δημιουργείται από την ανάκλαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων πάνω στα περιστρεφόμενα πτερύγια.

-Απαιτούνται πολλές ανεμογεννήτριες για την παραγωγή αξιόλογης ισχύος και αρκετά μεγάλο αρχικό κόστος εφαρμογής σε μεγάλη επιφάνεια γης. Γι' αυτό το λόγο μέχρι σήμερα, οι ανεμογεννήτριες, χρησιμοποιούνται σαν συμπληρωματική πηγή ενέργειας.

-Οπτικοαισθητική επίδραση. Η εγκατάσταση μιας τεράστιας ανεμογεννήτριας σε μια όχι και τόσο ανοιχτή περιοχή μπορεί να δημιουργεί οπτική όχληση.

Τα παραπάνω μειονεκτήματα και οι αρνητικές συνέπειες που προκαλούν οι χερσαίες ανεμογεννήτριες οδήγησαν πολλούς στην αναζήτηση ανεμογεννητριών που να καλύπτουν όλα ή κάποια από τα αρνητικά των χερσαίων. Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες λοιπόν, καλύπτουν πολλά από αυτά τα μειονεκτήματα.

Παρά τις δυσκολίες, όπως όλα δείχνουν η υπεράκτια αιολική ενέργεια θα παίξει σημαντικό ρόλο στις ανανεώσιμες πηγές τα επόμενα χρόνια. Χώρες όπως η Ελλάδα, με υψηλό αιολικό δυναμικό στις θαλάσσιες περιοχές, θα μπορούσαν να την χρησιμοποιήσουν ευρέως για να καλύψουν σημαντικό ποσοστό των ετήσιων ενεργειακών αναγκών τους.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, θα μελετηθεί η περίπτωση της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα, με βάση και τα πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν για αυτό τον τύπο ανεμογεννήτριας προηγουμένως.

2.6 Αιολικά πάρκα

Η συνεχής εξέλιξη και χρήση των ανεμογεννητριών, οδήγησε στην ιδέα δημιουργίας αιολικών πάρκων από τη δεκαετία του 1980. Η δημιουργία αιολικών πάρκων αποτελούσε και αποτελεί μια ελκυστική πρόταση στις περιπτώσεις παραγωγής μεγάλων ποσοτήτων

ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες καλύπτουν τις ενεργειακές ανάγκες ακόμη και μεγάλων πληθυσμών. Από την δεκαετία του '80 μέχρι και σήμερα τοποθετούνται αιολικά πάρκα σε ανεμώδεις, λοφώδεις ή ορεινές περιοχές, όπου αναπτύσσονται και οι μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου (Νηφάκου, 2015).

Όσον αφορά τα αιολικά πάρκα στην Ελλάδα, η περιφέρεια Δυτικής Ελλάδας αν και έχει μικρότερο αιολικό δυναμικό σε σύγκριση με άλλες περιοχές, διαθέτει ένα ισχυρό ηλεκτρικό δίκτυο και το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την ύπαρξη ανεμωδών νησίδων (όπως λόφοι, υψώματα), με εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό, την καθιστούν ενδιαφέρουσα για την ανάπτυξη αιολικών πάρκων. Αιολικά πάρκα υπάρχουν και σε πλήθος νησιών. Για παράδειγμα, η Κεφαλονιά, με τη λειτουργία τριών αιολικών πάρκων, τροφοδοτεί το δίκτυο ηλεκτροδότησης της χώρας με σύνολο 75,6 MW ηλεκτρικής ισχύος.

Τα πρώτα υπεράκτια αιολικά πάρκα, έκαναν την εμφάνισή τους γύρω στις αρχές της δεκαετίας του '90. Οι λόγοι που εμπόδιζαν την μέχρι τότε κατασκευή τους ήταν:

- Το υψηλό κόστος κατασκευής (τοποθέτηση, ηλεκτρική διασύνδεση, χρήση υλικών με αντοχή στο θαλάσσιο διαβρωτικό περιβάλλον)
- Προστασία του εξοπλισμού
- Μεταφορά πληρώματος

Με την πάροδο των χρόνων, την εξέλιξη της τεχνολογίας, των υλικών και την ταυτόχρονη ανάπτυξη των υπεράκτιων κατασκευών για την εξόρυξη πετρελαίου και φυσικού αερίου, τα υπεράκτια αιολικά πάρκα αποτέλεσαν πια, πραγματικότητα. Η εκμετάλλευση λοιπόν της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, δηλαδή της παραγόμενης ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες τοποθετημένες μέσα στην θάλασσα και μακριά από την ακτή, έχει ξεκινήσει εδώ και 20 χρόνια.

2.7 Η εξέλιξη των υπεράκτιων αιολικών πάρκων

Η Ευρώπη είναι πρωτοπόρος στην εκμετάλλευση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, με την εγκατάσταση του πρώτου υπεράκτιου αιολικού πάρκου στη Δανία (στο Vindeby) το 1991. Το 2008 η υπεράκτια αιολική ενέργεια συνέβαλε 0.8 GW στο σύνολο των 28 GW της αιολικής ενέργειας των αιολικών πάρκων που κατασκευάστηκαν εκείνη τη χρονιά. Μέχρι τον Οκτώβριο του 2009, είχαν κατασκευαστεί στην Ευρώπη 26 υπεράκτια αιολικά πάρκα με μέσο όρο δυναμικότητας 76 MW. Από το 2010 το Ηνωμένο Βασίλειο έχει τη μεγαλύτερη δυναμικότητα στα υπεράκτια αιολικά πάρκα με 1.3 GW, ενώ ακολουθούν η Δανία (854 MW), η Ολλανδία (249 MW), το Βέλγιο (195 MW), η Σουηδία (164 MW), η Γερμανία (92 MW), η Φινλανδία (26 MW), η Ιρλανδία (25 MW) και η Νορβηγία (2.3 MW). Στο τέλος του 2011, υπήρχαν 53 ευρωπαϊκά υπεράκτια αιολικά πάρκα στα ανοιχτά του Βελγίου, της Δανίας, της Φινλανδίας, της Γερμανίας, της Ιρλανδίας, της Ολλανδίας, της Νορβηγίας, της Σουηδίας και του Ηνωμένου Βασιλείου με συνολική δυναμικότητα 3.813 MW ενώ 5.603 MW είναι υπό κατασκευή. Από τον Ιούλιο του 2013, το London Array στο Ηνωμένο Βασίλειο είναι το μεγαλύτερο υπεράκτιο αιολικό πάρκο στο κόσμο με 175 θαλάσσιες ανεμογεννήτριες, συνολικής ισχύς 630 MW, ενώ ακολουθείται από το Greater Gabbard (504 MW) και το Wanley Wind Farm (367 MW). Μέχρι το 2017, σύμφωνα με στοιχεία της Ευρωπαϊκής

Ένωσης Αιολικής Ενέργειας (EWAE), οι ανεμογεννήτριες σε όλη την Ευρώπη ξεπέρασαν τις 15000, ενώ η συνολική τους απόδοση ήταν 169.957 MW. Η απόδοση αυτή, σύμφωνα με την EWAE, κρίθηκε αρκετή για την κάλυψη του 6.3 % του ηλεκτρισμού της Ευρωπαϊκής Ένωσης, σε έτος με φυσιολογικές καιρικές συνθήκες. Μέχρι σήμερα, έχουν κατασκευαστεί πολλά μεγάλα υπεράκτια αιολικά πάρκα, ενώ άλλα βρίσκονται υπό κατασκευή. Η EWAE προβλέπει ότι θα έχουν εγκατασταθεί 40 GW μέχρι το τέλος του 2020 και 150 GW μέχρι το τέλος του 2030.

Κεφάλαιο 3

Θεμελίωση υπεράκτιων ανεμογεννητριών

3.1 Γενικά

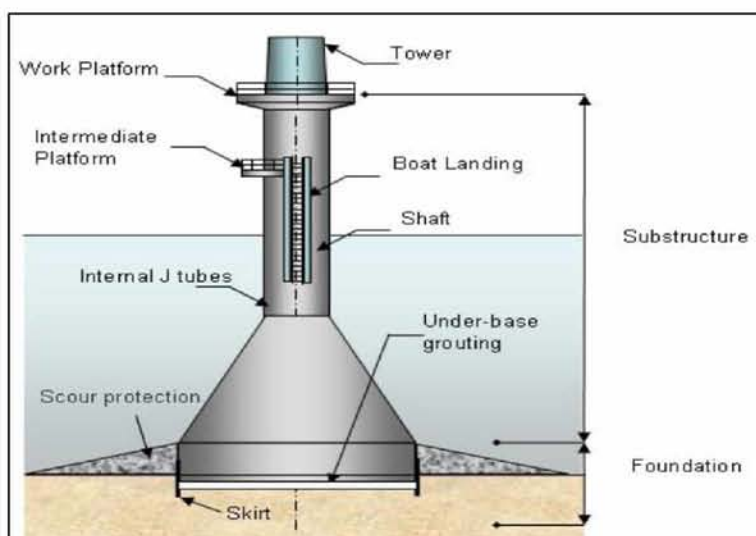
Ο σχεδιασμός και η κατασκευή των θεμελίων για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, είναι δύσκολος και απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή λόγω των περιβαλλοντικών συνθηκών. Υπάρχουν διάφοροι τύποι θεμελίωσης. Οι τύποι θεμελίωσης διαφέρουν ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες και απαιτήσεις του έργου, ενώ χωρίζονται σε δυο κατηγορίες: στις σταθερές και στις πλωτές κατασκευές (Μακρή, 2013).

3.2 Σταθερές κατασκευές

Οι σταθερές κατασκευές είναι αυτές οι οποίες στηρίζονται στον πυθμένα της θάλασσας. Στις κατασκευές αυτού του είδους απαιτείται ο προσδιορισμός της σχετικής αλληλεπίδρασης μεταξύ κατασκευής, θαλάσσιου περιβάλλοντος και εδάφους. Η θεμελίωσή τους πραγματοποιείται με τους εξής τρόπους:

- **Θεμέλιο βαρύτητας (Gravity-based foundation)**

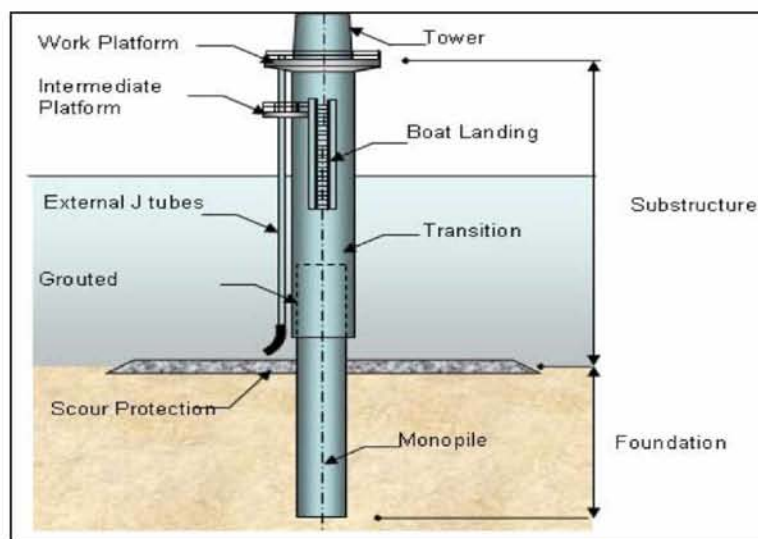
Αυτού του είδους οι κατασκευές παραμένουν στη θέση τους λόγω του βάρους της δομής τους και του έρματος που φέρουν (Σχήμα 3.1). Έχουν ένα κεντρικό άξονα, είτε από χάλυβα είτε από σκυρόδεμα, στον οποίο στηρίζεται ο πύργος της ανεμογεννήτριας, και αυτός με τη σειρά του στηρίζεται σε μια μεγάλη επίπεδη βάση από σκυρόδεμα και ατσάλι, ικανή να αντιστέκεται στα φορτία που επιβάλλονται από τον άνεμο και τα κύματα. Η μορφή της εξαρτάται από την τοποθεσία εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας. Δε χρειάζεται να γίνει διάτρηση του εδάφους, όμως αυτό θα πρέπει πρώτα να έχει προετοιμαστεί κατάλληλα. Εγκαθίστανται σε βάθη από 0 έως 25 m και μπορούν να υποστηρίξουν ανεμογεννήτριες έως και 5 MW.



Σχήμα 3.1: Θεμέλιο βαρύτητας (<https://www.wind-energy-the-facts.org>).

- **Μονοπάσσαλος (Monopile)**

Ο μονοπάσσαλος είναι ο πιο κοινός τύπος θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών, κυρίως λόγω της ευκολίας εγκατάστασής τους (Σχήμα 3.2). Πρόκειται για κατασκευές απλές στο σχεδιασμό τους, στις οποίες ο πύργος της ανεμογεννήτριας στηρίζεται είτε απευθείας, είτε μέσω ενός μεταβατικού τμήματος (transition piece) σε ένα συνήθως κυλινδρικό (κοίλο) χαλύβδινο πάσσαλο, ο οποίος εισχωρεί στον πυθμένα της θάλασσας. Το ενδιάμεσο μεταβατικό κομμάτι που υπάρχει μεταξύ του πύργου και της έδρασης, χρησιμεύει ώστε να αφομοιώνει τις ανοχές από την κλίση του πυλώνα και να μειώνει το χρόνο συναρμολόγησης του πύργου στο υπεράκτιο περιβάλλον. Ο χαλύβδινος πάσσαλος μεταφέρει όλα τα φορτία της ανωδομής στο έδαφος. Οι κατασκευές τέτοιου τύπου, για τις οποίες θα γίνει λεπτομερέστερη περιγραφή στη συνέχεια, τοποθετούνται σε βάθη έως 40 m, ανάλογα με τον τύπο του εδάφους, και μπορούν να υποστηρίξουν ανεμογεννήτριες έως 5 MW.



Σχήμα 3.2: Μονοπάσσαλη θεμελίωση (<https://www.wind-energy-the-facts.org>).

- **Τριπλός πυλώνας (triple pile)**

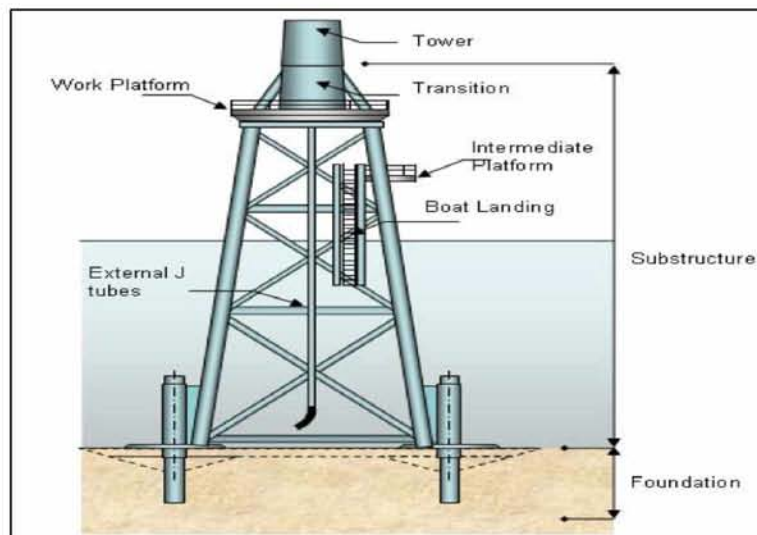
Η θεμελίωση τριπλού πυλώνα ακολουθεί τη λογική σχεδίασης της μονοπάσσαλης θεμελίωσης, με τη διαφορά ότι ο πύργος στηρίζεται σε τρεις πασσάλους, αντί για έναν, που εισχωρούν κάθετα στον πυθμένα της θάλασσας (Σχήμα 3.3). Πάνω από το νερό υπάρχει ένα μεταβατικό κομμάτι που συνδέει τους τρεις πυλώνες και πάνω σε αυτό τοποθετείται ο πύργος της ανεμογεννήτριας. Αυτού του είδους η κατασκευή δίνει μεγαλύτερη σταθερότητα στην ανεμογεννήτρια και μπορεί να μεταφέρει μεγαλύτερα φορτία και γρηγορότερα στον πυθμένα. Τοποθετούνται σε βάθη από 20 έως 40 m.



Σχήμα 3.3: Θεμελίωση τριπλού πύλωνα (Μακρή, 2013).

- **Μεταλλικός πύργος (jacket)**

Πρόκειται για μεταλλικούς πύργους, οι οποίοι προκατασκευάζονται, ρυμουλκούνται, ποντίζονται και θεμελιώνονται στο θαλάσσιο πυθμένα με συστήματα βαρύτητας ή με πασσάλους σε περιπτώσεις δυσμενών γεωτεχνικών συνθηκών. Αποτελούνται από κύρια κοίλα μέλη τα οποία συνθέτουν έναν πλαισιακό φορέα και από ενδιάμεσα δευτερεύοντα στοιχεία (Σχήμα 3.4). Χρησιμοποιούνται σε βάθη από 20 έως και 50 m και μπορούν να υποστηρίξουν ανεμογεννήτριες από 2 έως 5 MW.

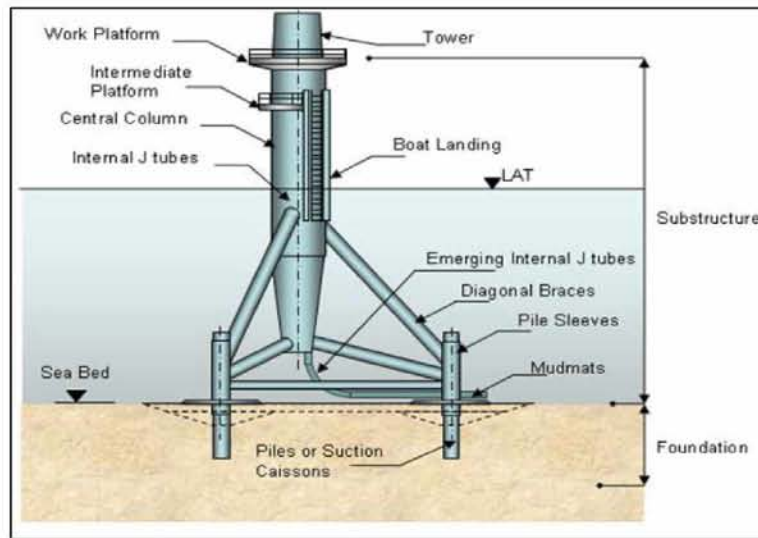


Σχήμα 3.4: Θεμελίωση με μεταλλικό πύργο (<https://www.wind-energy-the-facts.org>).

- **Τρίποδο (tripode)**

Το τρίποδο αποτελείται από ένα κύριο άξονα ο οποίος υποστηρίζεται από τρεις διαγώνιους συνδέσμους καθένας από τους οποίους οδηγεί και σε ένα πύλωνα που εισχωρεί στον πυθμένα

της θάλασσας (Σχήμα 3.5). Αποτελεί ουσιαστικά μια μικρή jacket κατασκευή τριών χαλύβδινων ποδιών. Η κατασκευή αυτή δίνει καλή ευστάθεια και ακαμψία στην ανεμογεννήτρια, ενώ είναι κατάλληλη για βάθη από 20 έως 50 m.



Σχήμα 3.5: Θεμελίωση με τρίποδο (<https://www.wind-energy-the-facts.org>).

- **Αναρρόφηση (suction/bucket)**

Οι κατασκευές αυτές, όπως και οι κατασκευές τριπλού πυλώνα, συγκαταλέγονται στην κατηγορία του μονοπασσάλου. Ωστόσο, διαφέρει ο τρόπος θεμελίωσής τους. Για την ακρίβεια, οι κατασκευές αυτές μπορούν να θεωρηθούν ως ένας συνδυασμός θεμελίου βαρύτητας και μονοπάσσαλης στήριξης, λόγω της συμπεριφοράς τους. Αποτελούνται από ένα κύριο, χαλύβδινο άξονα κωνικής μορφής, με το κάτω μέρος του να αποτελείται από κοιλότητες περιμετρικά του άξονα (Σχήμα 3.6). Κατά την εγκατάστασή τους, καθώς το κάτω άκρο του κωνικού άξονα ακουμπά τον πυθμένα, αντλείται το νερό από την εσωτερική κοιλότητα προς τα έξω. Έτσι, εμφανίζεται μια διαφορά πίεσης, η οποία δημιουργεί μια δύναμη προς τα κάτω. Μόλις ολοκληρωθεί η εγκατάσταση της κατασκευής, αφαιρούνται οι αντλίες και κάθε έξοδος σφραγίζεται με βαλβίδες. Η διαφορά αυτών των κατασκευών από όλες τις υπόλοιπες είναι πως δε χρειάζεται να γίνει διάτρηση ή κάποια ειδική προετοιμασία του εδάφους. Επίσης, μπορεί να μετακινηθεί ή να αφαιρεθεί εύκολα αφήνοντας νερό. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται διαφορά πίεσης με αποτέλεσμα την ανωστική δύναμη. Οι θεμελιώσεις τέτοιου τύπου εφαρμόζονται σε βάθη έως 25 m.



Σχήμα 3.6: Θεμελίωση με τη μέθοδο της αναρρόφησης (<https://www.vanoord.com>).

3.3 Πλωτές κατασκευές

Αποτελείται από μια επιπλέουσα πλατφόρμα και το σταθερό σύστημα που συγκρατείται. Η επαφή ωστόσο με το έδαφος γίνεται μέσω αγκυρώσεων όπου κρατούν την πλατφόρμα προσδεμένη στη θέση της.

Τα κύρια πλεονεκτήματα μιας πλωτής κατασκευής έναντι μιας σταθερής κατασκευής είναι τα εξής:

- Σημαντικά μειωμένο συνολικό βάρος κατασκευής (συνεπώς και κόστος)
- Συναρμολόγηση επί ξηράς και ρυμούλκηση μακριά από την ακτή
- Εγκατάσταση σε βάθη μεγαλύτερα των 50 m
- Μικρότερα φορτία κυματισμού

Η αγκυροβόληση των πλωτών πλατφόρμων γίνεται με δύο διαφορετικούς τρόπους. Με συμβατικούς κλάδους αγκύρωσης (catenary moorings) και με συρματόσχοινα υπό προένταση (taut-leg moorings).

Υπάρχουν διαφορετικού τύπου πλωτές κατασκευές, η προέλευση των οποίων στηρίζεται στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου. Κάθε μια από αυτές εφαρμόζεται ανάλογα με τις ανάγκες κατασκευής και το περιβάλλον εγκατάστασής τους. Οι κύριες κατηγορίες πλωτών κατασκευών που μπορούν να υποστηρίξουν μια ανεμογεννήτρια είναι οι εξής:

- **Spar-buoy**

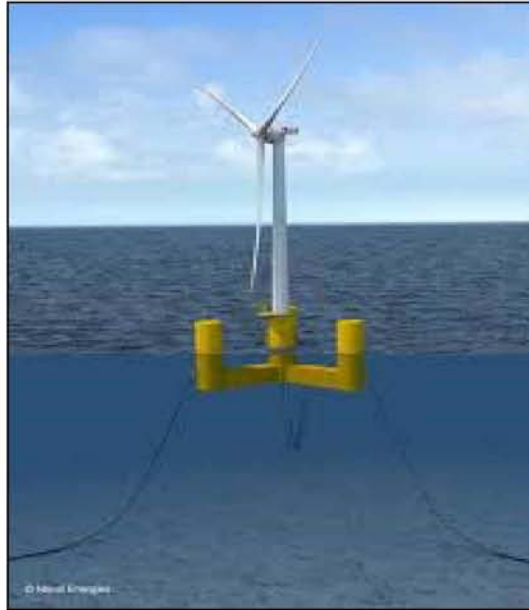
Αυτού του είδους οι κατασκευές αποτελούνται από ένα μεγάλο κυλινδρικό σωλήνα, ο οποίος βρίσκεται σε κατακόρυφη θέση και επιπλέει λόγω των μεγάλων ποσοτήτων αέρα, που υπάρχουν στην κορυφή του, και του έρματος που φέρει στο κάτω μέρος του, για να χαμηλώσει το κέντρο βάρους του κάτω από το κέντρο πλευστότητας (Σχήμα 3.7). Η αγκυροβόληση της κατασκευής πραγματοποιείται είτε με συμβατικούς κλάδους είτε με συρματόσχοινα σε προένταση. Το πλεονέκτημα τους σε σχέση με άλλες πλωτές κατασκευές είναι η μικρή τους ίσαλος και έτσι δεν είναι τόσο ευαίσθητες σε κινήσεις που οφείλονται σε κυματισμούς. Το μόνο μειονέκτημά τους είναι πως γέρνουν ελαφρά λόγω των φορτίων που δέχονται από τον άνεμο και το κύμα, φαινόμενο το οποίο μπορεί να μειωθεί με την αύξηση του έρματος. Οι κατασκευές τέτοιου είδους είναι κατάλληλες και για πολύ μεγάλα βάθη.



Σχήμα 3.7: Θεμελίωση με Spar-buoy (<https://www.materialstoday.com>).

- **Barge (semi-submersible)**

Οι κατασκευές αυτές είναι γνωστές ως ημιβυθισμένες πλατφόρμες (Σχήμα 3.8). Αποτελούνται από μια φορτηγίδα η οποία αγκυρώνεται με συμβατικούς κλάδους, με αποτέλεσμα τον περιορισμό των κινήσεων του πλωτήρα. Βασικό τους πλεονέκτημα είναι πως κατασκευάζονται και συναρμολογούνται πλήρως στην ξηρά και ρυμουλκούνται μέχρι το σημείο εγκατάστασής τους. Η υποστηριζόμενη κατασκευή μπορεί να τοποθετηθεί σε αρκετά μεγάλο ύψος σε σχέση με την επιφάνεια της θάλασσας λόγω της καλής της ευστάθειας, κρατώντας την μακριά από τα θαλάσσια κύματα. Από την άλλη μεριά, όπως μια κατασκευή τέτοιου τύπου είναι αρκετά ευάλωτη σε απότομες αλλαγές φορτίου, λόγω της μικρής επιφάνειας που έχει με το νερό. Όπως άλλωστε και όλες οι πλωτές κατασκευές, είναι κατάλληλες και για μεγαλύτερα βάθη.



Σχήμα 3.8: Θεμελίωση με barge (<https://www.naval-energies.com>).

- **TLP (Tension Leg Platforms)**

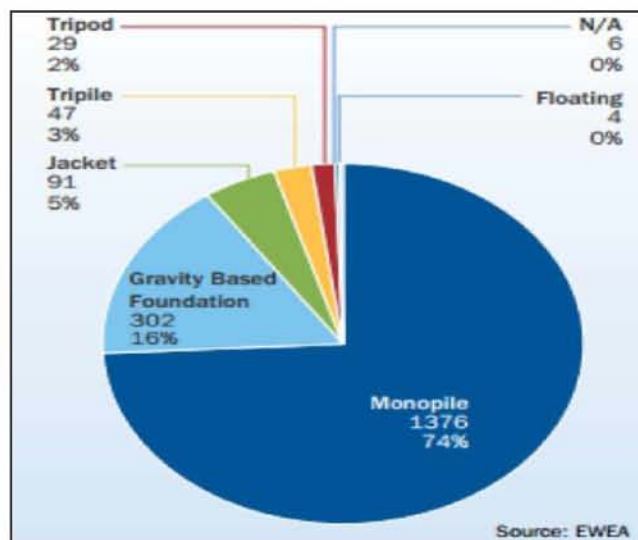
Οι κατασκευές αυτές είναι πλωτές κατασκευές αγκυρωμένες υπό κατακόρυφη προένταση με χαλύβδινους τένοντες που ομαδοποιούνται σε κάθε γωνία της δομής τους (Σχήμα 3.9). Χαρακτηριστικό αυτού του είδους πρόσδεσης είναι ότι οι τένοντες έχουν σχετικά υψηλή αξονική ακαμψία μειώνοντας τις κατακόρυφες κινήσεις. Διατηρούνται λίγο κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας για να δημιουργείται μικρή ίσαλος επιφάνεια, ώστε να περιορίζονται τα υδροδυναμικά φορτία που ασκούνται από τα κύματα.



Σχήμα 3.9: Θεμελίωση με TLP (<https://en.paperblog.com>).

3.4 Σύστημα θεμελίωσης μονοπάσσάλου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι μονοπάσσαλοι είναι οι πιο συνηθισμένοι τύποι θεμελίων για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες. Η διάμετρος, το πάχος και το μήκος έμπηξης του πασσάλου καθορίζονται από το βάθος της θάλασσας, τα όρια αντοχής και λειτουργικότητας της ανεμογεννήτριας. Η συχνή χρήση του εν λόγω συστήματος οφείλεται κυρίως στην απλότητα του σχεδιασμού και της κατασκευής ενός τέτοιου συστήματος, καθώς και στη σημαντική τεχνογνωσία και εμπειρία που υπάρχει παγκοσμίως πάνω σε τέτοιου είδους συστήματα. Σύμφωνα με στοιχεία του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Αιολικής Ενέργειας (Σχήμα 3.10), μέχρι το 2012, το 74 % του συνόλου των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών θεμελιώνονται με μονοπάσσαλο.



Σχήμα 3.10: Τρόποι θεμελίωσης θαλάσσιων ανεμογεννητριών σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Αιολικής Ενέργειας μέχρι το 2012 (Κουκούλας, 2014).

Οι μονοπάσσαλοι αποτελούν ακόμα και σήμερα τον ιδανικό τρόπο θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών για βάθη έως 40 m, ανάλογα με τον τύπο του εδάφους. Ωστόσο, για μεγαλύτερα βάθη η κατασκευή γίνεται πιο ασταθής εξαιτίας των σημαντικών υδροδυναμικών φορτίων που της ασκούνται και επομένως προτιμάται κάποιο άλλο σύστημα θεμελίωσης (πλωτό).

Ακόμα ένας σημαντικός λόγος για τον οποίο προτιμάται η θεμελίωση με μονοπάσσαλο είναι λόγω της τυπικής εδαφικής στρωματογραφία του πυθμένα της θάλασσας, η οποία συνίσταται από μια στρώση πολύ μαλακού εδάφους μεγάλου πάχους στην επιφάνεια. Η στρώση του μαλακού εδάφους έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση πολύ μικρής εδαφικής πλευρικής αντίστασης, ενώ τα φορτία μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας είναι κατά βάση πλευρικά, καθώς επίσης είναι επιρρεπής σε φαινόμενα υδραυλικής υποσκαφής. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται οι πάσσαλοι ώστε να μεταβιβάζονται τα στατικά, ανακυκλιζόμενα και παροδικά φορτία της κατασκευής με ασφάλεια σε μεγαλύτερα βάθη, όπου το έδαφος έχει μεγαλύτερη αντοχή καθώς και να ελέγχονται οι παραμορφώσεις (καθιζήσεις ή πλευρικές μετατοπίσεις) και οι στροφές της ανωδομής (πύργος).

Στις περιπτώσεις υπεράκτιων ανεμογεννητριών θεμελιωμένες σε μονοπάσσαλο σύστημα (Σχήμα 3.11) συνήθως χρησιμοποιούνται χαλύβδινοι πάσσαλοι κοίλης κυκλικής διατομής, των οποίων τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά έχουν ως εξής:

- Διάμετρος, D , που κυμαίνεται από 3 έως 6 m
- Μήκος έμπηξης πασσάλου, L , από 20 έως 50 m
- Λόγος διαμέτρου προς πάχος τοιχωμάτων, D/t , από 25 έως 120

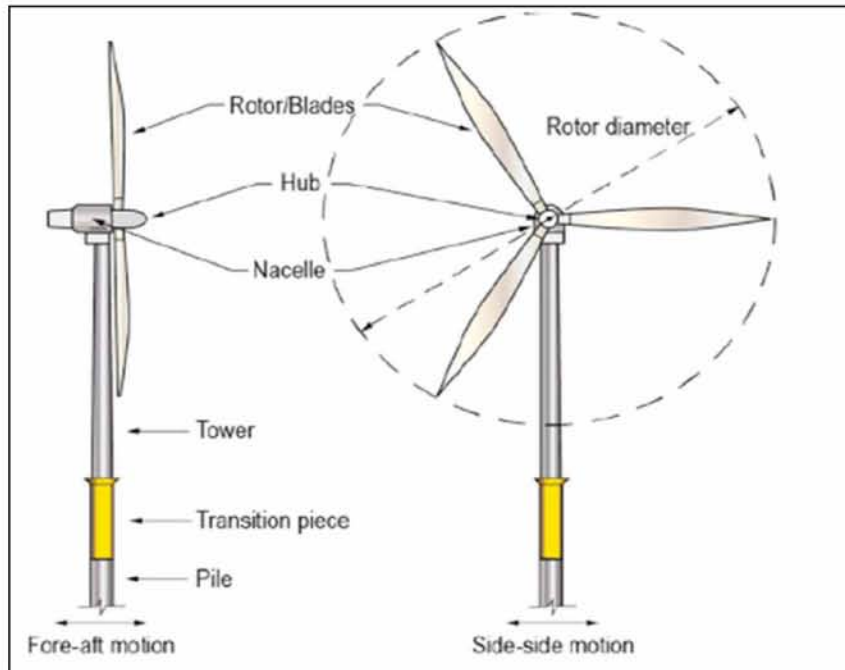


Σχήμα 3.11: Τμήματα μονοπασσάλων κατά τη μεταφορά τους (Μπέντας, 2014).

Ακόμη, η θεμελίωση της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας ενδιαφέρει ερευνητικά διότι οι διάμετροι των μονοπασσάλων είναι μεγάλες και συνεπώς δεν ισχύουν σε αυτή την περίπτωση οι κλασσικές μέθοδοι υπολογισμού δυσκαμψίας, στην περίπτωση οριζόντιας φόρτισης.

Το μονοπάσσαλο σύστημα είναι το μοναδικό στο οποίο ο πάσσαλος αποτελεί ταυτόχρονα τη θεμελίωση και το φορέα στήριξης της ανεμογεννήτριας. Μεταξύ του πασσάλου και του φορέα στήριξης υπάρχει ένα τμήμα μετάβασης (transition piece), το οποίο τοποθετείται στην κορυφή του πασσάλου και εξασφαλίζει τη σύνδεση μεταξύ του φορέα στήριξης και του πύργου της ανεμογεννήτριας χωρίς απόκλιση από την κατακόρυφο. Η σύνδεση αυτή επιτυγχάνεται με την ύπαρξη φλάντζας στην κορυφή του κομματιού μετάβασης και τη χρήση κοχλίων.

Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 3.12) παρουσιάζονται, τα μέρη που αποτελούν μια υπεράκτια μονοπάσσαλη ανεμογεννήτρια.



Σχήμα 3.12: Τα τμήματα που αποτελούν μια υπεράκτια ανεμογεννήτρια (Καυνία, 2018).

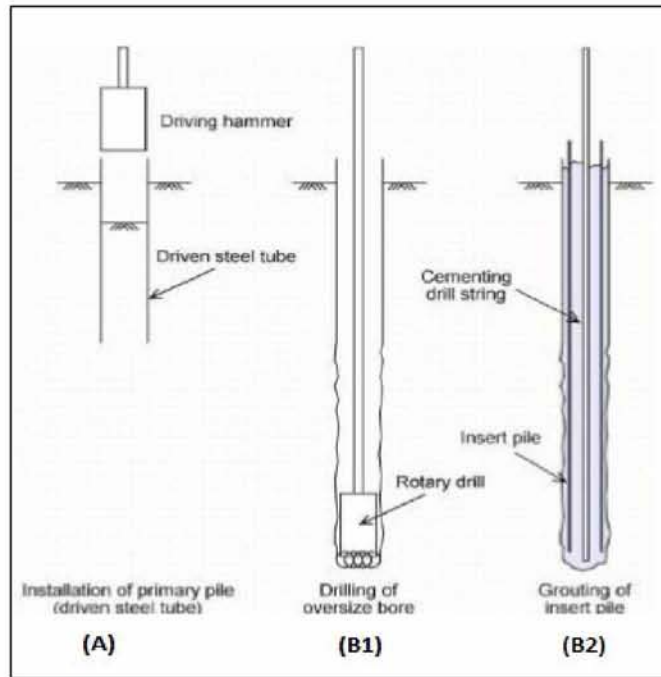
Τρόποι εγκατάστασης μονοπάσσαλης ανεμογεννήτριας

Η επιλογή του τρόπου εγκατάστασης μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας, εξαρτάται από τις τοπικές γεωλογικές συνθήκες και από τον διαθέσιμο μηχανολογικό εξοπλισμό.

Οι τρόποι εγκατάστασης των μονοπάσσάλων σύμφωνα με τον κανονισμό ISO 19902 είναι οι εξής (Σχήμα 3.13):

- Έμπηξη με ειδική σφύρα (driven piles) (Σχήμα 3.14) ή με ειδική δονητική σφύρα (vibro driven piles)
- Εκσκαφή και ενίσχυση (drilling and grouting)
- Συνδυασμός των δυο παραπάνω μεθόδων

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται οι τρεις βασικοί τρόποι εγκατάστασης μιας υπεράκτιας μονοπάσσαλης ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 3.13: Τρόποι εγκατάστασης μονοπάσσας θεμελίωσης (A) με έμψη, (B1) με εκσκαφή και (B2) ενίσχυση (Χρήστου, 2012).

Για τη θεμελίωση των θαλάσσιων ανεμογεννητριών προτιμάται η πρώτη μέθοδος τοποθέτησης (driven steel piles) στην πλειοψηφία των περιπτώσεων. Ο μεταλλικός αυτός σωλήνας είναι ανοικτός στη βάση του και γεμίζει με έδαφος κατά την έμψη του. Κατά την διαδικασία έμψης το σφυρί ασκεί τεράστιο θλιπτικό φορτίο στην κορυφή του πάσσαλο μέσω κρούσης, ώστε να τον σπρώξει στη θέση του. Οι γεωμετρικές διαστάσεις (διάμετρος και πάχος τοιχώματος) του πασσάλου πρέπει να είναι τέτοιες, ώστε να μπορεί να παραλάβει τα σημαντικά αξονικά και καμπτικά φορτία κατά τη φάση της εγκατάστασής του. Η διαδικασία έμψης χρειάζεται επιμελή επιτήρηση από τον χειριστή του μηχανήματος, ώστε να αποφεύγεται η απόκλιση του πασσάλου από την κατακόρυφο.

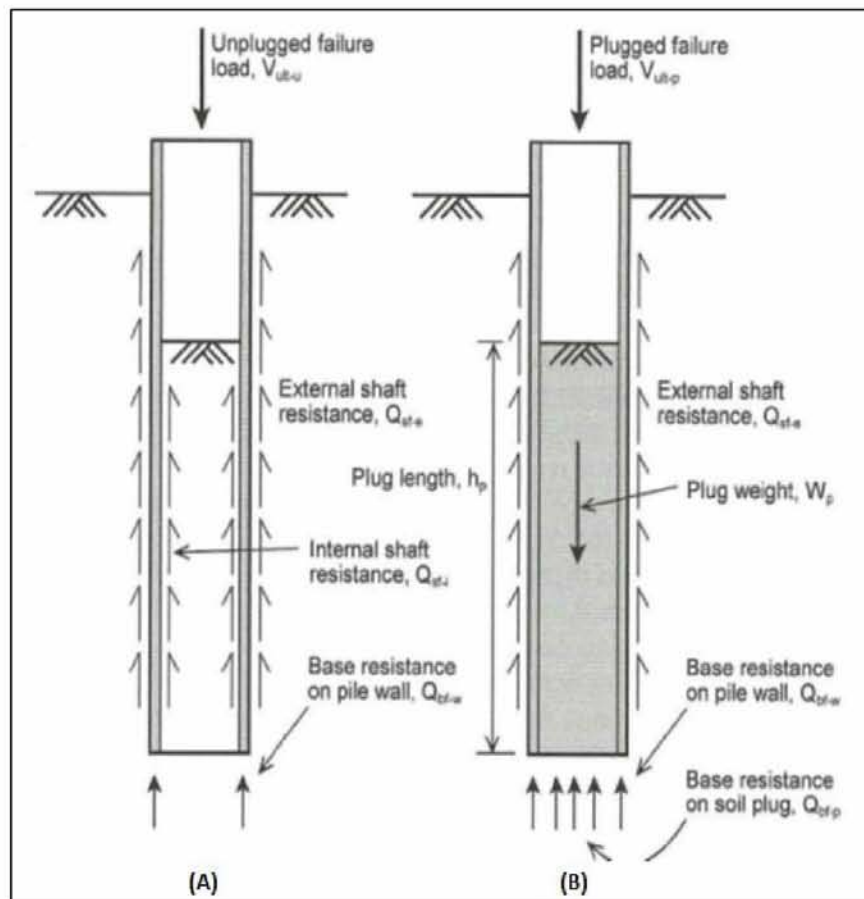


Σχήμα 3.14: Σφύρα έμψης μονοπασσάλου (Κουκούλας, 2014).

Τρόποι σύνδεσης του πασσάλου με το έδαφος εσωτερικά του πασσάλου

Η σύνδεση του πασσάλου με το έδαφος εσωτερικά αναπτύσσεται με διάφορους μηχανισμούς, όπως είναι (Σχήμα 3.15):

- Η ασύνδετη διείσδυση (unplugged penetration), όπου η εδαφική στήλη εσωτερικά του πασσάλου παραμένει ακίνητη κατά τη διάρκεια της έμπηξης
- Η διείσδυση με πλήρη επαφή (plugged penetration), όπου η εδαφική στήλη εσωτερικά του πασσάλου κινείται προς τα κάτω μαζί με τον πάσσαλο κατά τη διάρκεια της έμπηξης
- Η διείσδυση με μερική επαφή (partial plugging), όπου η εδαφική στήλη εσωτερικά του πασσάλου κινείται προς τα κάτω με μικρότερο ρυθμό σε σχέση με τον πάσσαλο



Σχήμα 3.15: (A) Ασύνδετη διείσδυση πασσάλου (B) διείσδυση πασσάλου με πλήρη επαφή (τα βελόνια απεικονίζουν την αντίδραση στην διεπιφάνεια εδάφους - πασσάλου) (Χρήστου, 2012).

Κεφάλαιο 4

Η υπό μελέτη ανεμογεννήτρια

Όπως προαναφέρθηκε, στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία επιλέχθηκε να μελετηθεί υπεράκτια μονοπάσσαλη ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα, καθώς το είδος αυτό παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα όπως είναι η υψηλή ποιότητα του ανέμου πάνω από τη θάλασσα, η απλότητα σχεδίασης και κατασκευής της θεμελίωσης κλπ.

Καθώς οι μονοπάσσαλοι αποτελούν ιδανικό τρόπο θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών, για βάθη έως 40 m, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ως βάθος του πυθμένα της θάλασσας, ένα μέσο βάθος, το οποίο είναι ίσο με 25 m. Συνεπώς, το ύψος του φορέα στήριξης της ανεμογεννήτριας (transition piece) επιλέχθηκε να είναι ίσο με 25 m, ίσο με το βάθος του πυθμένα της θάλασσας.

Όσον αφορά τις διαστάσεις και τις ιδιότητες της ανεμογεννήτριας, για την συγκεκριμένη μελέτη επιλέχθηκε ανεμογεννήτρια τύπου NREL 5-MW baseline wind turbine, η οποία αναπτύχθηκε από το εργαστήριο NREL (Natural Renewable Energy Laboratory). Τα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας απεικονίζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 4.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας τύπου NREL 5 MW (<http://www.twinkletoesengineering.info>).

Rating	5 MW
Rotor Orientation, Configuration	Upwind, 3 Blades
Control	Variable Speed, Collective Pitch
Drivetrain	High Speed, Multiple-Stage Gearbox
Rotor, Hub Diameter	126 m, 3 m
Hub Height	90 m
Cut-In, Rated, Cut-Out Wind Speed	3 m/s, 11.4 m/s, 25 m/s
Cut-In, Rated Rotor Speed	6.9 rpm, 12.1 rpm
Rated Tip Speed	80 m/s
Overhang, Shaft Tilt, Precone	5 m, 5°, 2.5°
Rotor Mass	110,000 kg
Nacelle Mass	240,000 kg
Tower Mass	347,460 kg
Coordinate Location of Overall CM	(-0.2 m, 0.0 m, 64.0 m)

Έτσι, ο πύργος της υπό μελέτη ανεμογεννήτριας έχει ύψος ίσο με 87.6 m πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας και πάνω σε αυτόν τοποθετείται ο ρότορας και ο δρομέας, οι οποίοι έχουν συνολικά μάζα ίση με 350 tn.

Επίσης, ως διάμετρος για τη θεμελίωση και το φορέα στήριξης επιλέχθηκε αυτή των 6 m. Επιλέχθηκε αυτή η διάμετρος, διότι οι μεγάλες διαμέτροι στη θεμελίωση των υπεράκτιων

ανεμογεννητριών παρουσιάζουν ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον σε σχέση με τις μικρές (έως 2.5 m), καθώς η μελέτη τους πραγματοποιείται με μη συμβατικές μεθόδους.

Η διάμετρος του πύργου της ανεμογεννήτριας θεωρήθηκε μεταβλητή και μειώνεται γραμμικά με την αύξηση του υψομέτρου, ξεκινώντας από τα 6 m στη βάση του πύργου και καταλήγοντας στα 3.87 m στην κορυφή του.

Με βάση προηγούμενες μελέτες που πραγματοποιήθηκαν για τον ίδιο τύπο ανεμογεννήτριας και με την ίδια διάμετρο στη θεμελίωση της, το μήκος της μονοπάσσαλης θεμελίωσης λήφθηκε ίσο με 35 m.

Τέλος, επιλέχθηκε η άργιλος ως έδαφος θεμελίωσης της υπό μελέτη κατασκευής. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν να μελετηθούν τρεις διαφορετικοί τύποι αργίλων ανάλογα με την αντοχή τους.

Κεφάλαιο 5

Κανονισμοί

Υπάρχουν διάφοροι κανονισμοί σχετικά με το σχεδιασμό των υπεράκτιων ανεμογεννητριών και της θεμελίωσής τους, έναντι διαφόρων μεμονομένων φορτίσεων ή συνδυασμών φορτίσεων.

Οι βασικότεροι από αυτούς είναι οι εξής:

- DNV-OS-J101_Design of offshore wind turbine structures
- Riso Guidelines for Design of wind turbines
- Guideline for the Certification of wind turbines by Germanischer Lloyd
- International Electrotechnical Commission's IEC 61400-1:Wind turbines-Part1: Design requirements
- BSI British Standards_Wind Turbines, Part 3 & Part 1
- ISO 19901-Part 4_Petroleum and natural gas industries-Specific requirements for offshore structures
- Ευρωκώδικας

Οι κανονισμοί δίνουν λιγότερο λεπτομερείς οδηγίες σχετικά με το σχεδιασμό σεισμού των ανεμογεννητριών σε σύγκριση με τα κτίρια και τις περισσότερες άλλες κατασκευές. Η πλειοψηφία των διαθέσιμων κατευθυντήριων γραμμών και κωδίκων βασίζεται σε εκείνες για τα κτίρια, επομένως, χρησιμοποιούν σεισμούς με περίοδο επιστροφής 475 ετών.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι οδηγίες του Κανονισμού DNV-OS-J101_Design of offshore wind turbine structures, ο οποίος κρίθηκε ως ο πιο λεπτομερής για την τρέχουσα μελέτη. Συγκεκριμένα, βάσει αυτού του κανονισμού, υπολογίσθηκαν διαστάσεις, όπως είναι το πάχος της θεμελίωσης της, ακολουθήθηκαν μεθοδολογίες για τον υπολογισμό των διάφορων περιβαλλοντικών φορτίων που ασκούνται στον πύργο της, λήφθηκαν οι συντελεστές με τους οποίους πολλαπλασιάζονται τα φορτία στους διάφορους συνδυασμούς φόρτισης κλπ.

Κεφάλαιο 6

Μελέτη Υπεράκτιας Ανεμογεννήτριας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται τόσο η ανωδομή όσο και η θεμελίωση μιας υπεράκτιας μονοπάσσαλης ανεμογεννήτριας. Η μελέτη της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας πραγματοποιείται με τη χρήση προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων στις 3 διαστάσεις, καθώς οι αναλύσεις αυτές θεωρούνται ότι δίνουν αποτελέσματα τα οποία ανταποκρίνονται σε μεγαλύτερο βαθμό στην πραγματικότητα σε τέτοιου είδους κατασκευές. Για το σκοπό αυτό, κατασκευάστηκε τρισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων της ανωδομής, της θεμελίωσης της ανεμογεννήτριας και του εδάφους που περικλείει την κατασκευή.

Όσον αφορά την ανωδομή, εφαρμόζονται διάφοροι συνδυασμοί φόρτισης στην κατασκευή της ανεμογεννήτριας, υπολογίζονται τα εντατικά μεγέθη, οι μετακινήσεις και οι παραμορφώσεις της κατασκευής και στη συνέχεια μελετάται η μεταφορά των φορτίων αυτών από την ανωδομή στην θεμελίωση. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η μελέτη της μονοπάσσαλης θεμελίωσης, για τα φορτία που μεταφέρονται από την ανωδομή στη θεμελίωση. Συγκεκριμένα, μελετώνται οι μετακινήσεις, οι τάσεις και οι παραμορφώσεις της θεμελίωσης της ανεμογεννήτριας καθώς και του εδάφους που την περιβάλλει.

Στόχος της μελέτης αυτής αποτελεί η δημιουργία ολοκληρωμένου αριθμητικού προσομοιώματος υπεράκτιας ανεμογεννήτριας, από τη θεμελίωση έως τον πύργο και το ρότορα και η επιβολή διάφορων συνδυασμών περιβαλλοντικών φορτίων, με απώτερο σκοπό την εύρεση του δυσμενέστερου συνδυασμού φόρτισης για την ανεμογεννήτρια. Ακόμη σκοπό της παρούσας μελέτης αποτελεί και η παραμετρική μελέτη των αργιλικών εδαφών με διαφορετικές ιδιότητες. Τέλος, μέσα από την εύρεση των μετακινήσεων, των τάσεων και των παραμορφώσεων εντοπίζονται τα τμήματα της κατασκευής, της θεμελίωσης και αυτά του εδάφους, τα οποία πλήττονται περισσότερο από τις φορτίσεις και ενδεχομένως χρειάζονται ενίσχυση ή επιπλέον προσοχή κατά τη μελέτη και το σχεδιασμό.

6.1 Επιλογή κατάλληλης μεθόδου μελέτης της θεμελίωσης

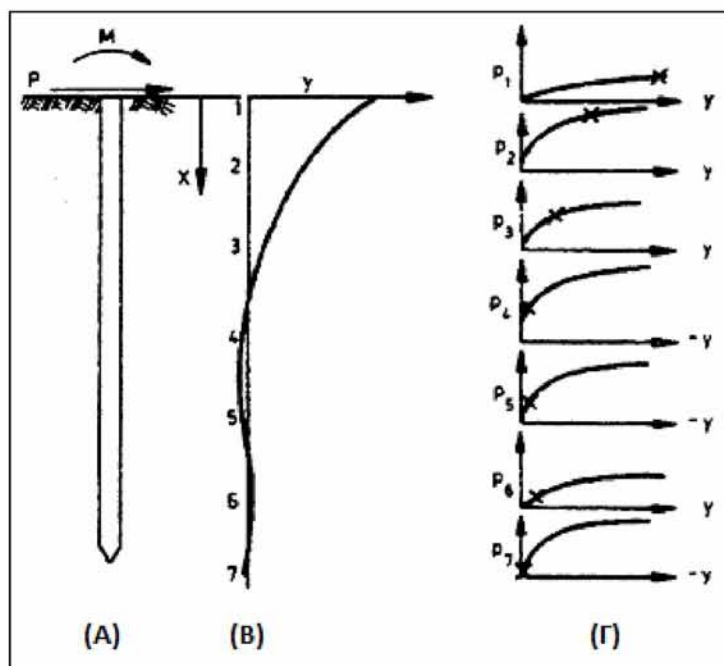
Στην περίπτωση της μονοπάσσαλης θεμελίωσης δύο εναλλακτικοί τρόποι για τη μελέτη της είναι οι εξής:

1. Μέθοδος καμπυλών p-y
2. Μέθοδος τρισδιάστατης αριθμητικής ανάλυσης με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων

6.1.1 Μέθοδος καμπυλών p-y

Στην περίπτωση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών, η κατακόρυφη φόρτιση δεν έχει κυρίαρχο ρόλο, καθώς πρόκειται για κατασκευές ελαφρά φορτισμένες στην κατακόρυφη διεύθυνση. Η πλευρική τριβή που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους είναι εξαιρετικά μεγάλη, οπότε η καθίζηση της αιχμής του είναι πρακτικά αμελητέα. Αντίθετα, οι πλευρικές φορτίσεις (φορτία ανέμου, κυματισμών) κυριαρχούν στην καταπόνηση της κατασκευής. Για τον προσδιορισμό της απόκρισης μεμονωμένου πασσάλου υπό οριζόντια φόρτιση έχουν προταθεί απλουστευμένες αριθμητικές προσεγγίσεις, οι οποίες προσμετρούν τις επιπτώσεις της μη γραμμικής απόκρισης που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση εδάφους-πασσάλου. Η ευρέως εφαρμοζόμενη μέθοδος p-y (Reese, 1977), η οποία αναπτύχθηκε από τον Αμερικάνικο Οργανισμό Πετρελαίου (API), θεωρείται ως η πλέον αντιπροσωπευτική και αποτελεσματική ανάμεσα στις απλουστευμένες αριθμητικές μεθόδους προσδιορισμού της απόκρισης μεμονωμένου πασσάλου υπό οριζόντια φόρτιση.

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο προσδιορίζονται καμπύλες φορτίου-οριζόντιων μετακινήσεων (p-y), οι οποίες προσομοιώνουν την αναπτυσσόμενη αντίδραση του παρακείμενου εδάφους για κάθε στάθμη πλευρικής μετακίνησης του πασσάλου. Οι καμπύλες αυτές υπολογίζονται με μη-γραμμικές σχέσεις και εξαρτώνται από το βάθος. Για την προσομοίωση, ο πάσσαλος χωρίζεται σε τμήματα (κατά μήκος), το καθένα από τα οποία συνδέεται με ένα μη-γραμμικό ελατήριο ανά διεύθυνση. Για καθένα από τα ελατήρια κατασκευάζεται μια καμπύλη p-y, από την οποία προκύπτει η αντίδραση του εδάφους, p, σε κάθε στάθμη, που προέρχεται από τη μετατόπιση του πασσάλου, y, στην ίδια στάθμη (Σχήμα 6.1). Το σύνολο των τετμημένων των καμπυλών p-y σε κάθε στάθμη, δίνει την μορφή της συνολικής μετατόπισης του πασσάλου κατά μήκος του.



Σχήμα 6.1: Ανάλυση πασσάλου με καμπύλες p-y. Α) εντατική κατάσταση, Β) παραμόρφωση πασσάλου και Γ) καμπύλες p-y (Κουκούλας, 2014).

Οι μετατοπίσεις και οι τάσεις του πασσάλου σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος του και για οποιαδήποτε φόρτιση στην κεφαλή του, προκύπτουν από την επίλυση των παρακάτω διαφορικών εξισώσεων (Κουκούλας, 2014):

$$EI \frac{d^4y}{dx^2} + Q_A \frac{d^2y}{dx^2} - p(y) + q = 0 \quad (6.1)$$

$$EI \frac{d^4y}{dx^2} + Q_A \frac{d^2y}{dx^2} - p(y) + q = 0 \quad (6.2)$$

$$EI \frac{d^3y}{dx^3} + Q_A \frac{dy}{dx} = Q_L \quad (6.3)$$

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = M \quad (6.4)$$

Όπου:

x: η θέση κατά μήκος του πασσάλου

y: η πλευρική μετατόπιση του πασσάλου

Q_A : η αξονική δύναμη του πασσάλου

Q_L : η τέμνουσα δύναμη του πασσάλου

$p(y)$: η αντίδραση του εδάφους

q: το κατανεμημένο φορτίο κατά μήκος του πασσάλου

M: η καμπτική ροπή του πασσάλου

Ο προσδιορισμός των καμπυλών p-y και κατά συνέπεια της δυσκαμψίας των μη-γραμμικών ελατηρίων, εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- τον τύπο του εδάφους
- τη διατμητική αντοχή του εδάφους
- την παραμορφωσιμότητα του εδάφους
- το είδος της φόρτισης του πασσάλου
- τη διάμετρο του πασσάλου
- το βάθος των ελατηρίων

Για την κατασκευή των καμπυλών p-y σε συνεκτικά (αργιλικά) εδάφη, ο κανονισμός DNV-OS-J101 προτείνει τη μεθοδολογία που ακολουθεί, για στατική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

Για στατική φόρτιση, οι καμπύλες p-y υπολογίζονται από τη σχέση:

$$p = \begin{cases} \frac{p_u}{2} \left(\frac{y}{y_c}\right)^{1/a} & , y \leq 8y_c \\ p_u & , y > 8y_c \end{cases} \quad (6.5)$$

$$p_u \quad , y > 8y_c \quad (6.6)$$

Στην περίπτωση της ανακυκλιζόμενης φόρτισης διακρίνονται δυο περιπτώσεις:

Για ανακυκλιζόμενη φόρτιση και $X > X_R$, οι καμπύλες p - y υπολογίζονται από τη σχέση :

$$p = \begin{cases} \frac{p_u}{2} \left(\frac{y}{y_c}\right)^{1/a} & , y \leq 3y_c \\ 0.72p_u & , y > 3y_c \end{cases} \quad (6.7)$$

$$0.72p_u \quad , y > 3y_c \quad (6.8)$$

Για ανακυκλιζόμενη φόρτιση και $X \leq X_R$, οι καμπύλες p - y υπολογίζονται από τη σχέση :

$$p = \begin{cases} \frac{p_u}{2} \left(\frac{y}{y_c}\right)^{1/a} & , y \leq 3y_c \\ 0.72p_u \left(1 - \left(1 - \frac{X}{X_R}\right) \frac{y-3y_c}{12y_c}\right) & , 3y_c < y \leq 15y_c \\ 0.72p_u \frac{X}{X_R} & , y > 15y_c \end{cases} \quad (6.9)$$

$$0.72p_u \left(1 - \left(1 - \frac{X}{X_R}\right) \frac{y-3y_c}{12y_c}\right) \quad , 3y_c < y \leq 15y_c \quad (6.10)$$

$$0.72p_u \frac{X}{X_R} \quad , y > 15y_c \quad (6.11)$$

Όπου:

p : το πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκους που ασκείται στον πάσσαλο

y : η πλευρική μετατόπιση του πασσάλου

p_u : το μέγιστο πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκους πασσάλου

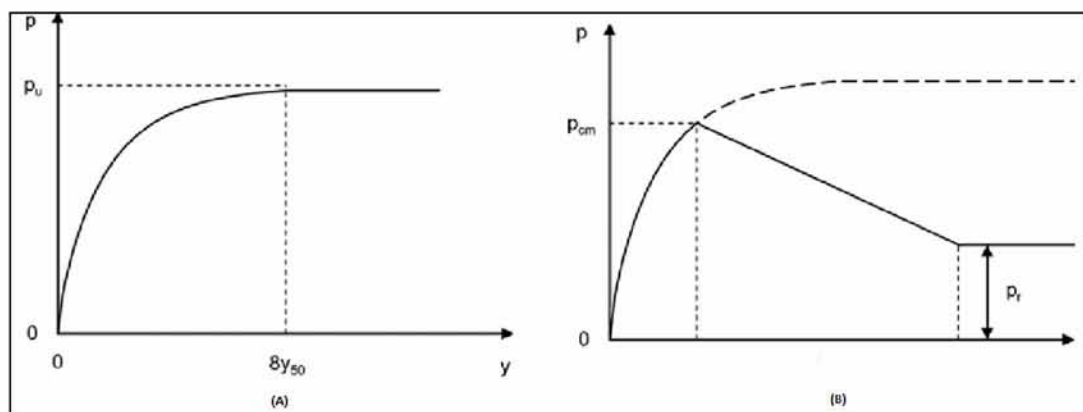
X : το βάθος κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας

X_R : είναι το βάθος κάτω από το οποίο η τιμή της παράστασης $[3c_u + \gamma'X]D + Jc_uD$ υπερβαίνει την τιμή $9c_uD$

y_c : προκύπτει από την εξίσωση: $y_c = 2.5\varepsilon_c D$

ε_c : η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στο 50% της τάσης αστοχίας η οποία καθορίζεται από δοκιμή τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες (kN/m)

Στο Σχήμα 6.2Α που ακολουθεί παρουσιάζεται η τυπική μορφή της καμπύλης p - y για άργιλο που υποβάλλεται σε στατική φόρτιση ενώ στο Σχήμα 6.2Β παρουσιάζεται η καμπύλη p - y για άργιλο που υποβάλλεται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση.



Σχήμα 6.2: Καμπύλες p - y αργίλων (Α) υπό στατική και (Β) ανακυκλιζόμενη φόρτιση (<https://www.researchgate.net/figure/p-y-Curves>).

Η οριακή πλευρική αντοχή του εδάφους (p_u) διαφέρει ανάλογα με την απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους. Έτσι η μέγιστη πλευρική αντοχή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$K_i = 3E_{u,50} \left(\frac{E_{u,50} D^4}{E_p I_p} \right)^{1/12} \quad (6.12)$$

Όπου:

K_i : η αρχική δυσκαμψία της καμπύλης p - y [kN/m^2]

$E_{u,50}$: το μέτρο ελαστικότητας που αντιστοιχεί στο 50% της τάσης αστοχίας, η οποία καθορίζεται από δοκιμή τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες [kPa]

D : η διάμετρος του πασσάλου [m]

$E_p I_p$: η καμπτική δυσκαμψία του πασσάλου [kNm^2]

Στη τριαξονική δοκιμή υπό αστράγγιστες συνθήκες ισχύει η εξής σχέση:

$$E_{u,50} = \frac{c_u}{\varepsilon_{u,50}} \quad (6.13)$$

Όπου:

c_u : η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους [kPa]

$\varepsilon_{u,50}$: η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στο 50% της τάσης αστοχίας, η οποία καθορίζεται από δοκιμή τριαξονικής θλίψης υπό αστράγγιστες συνθήκες

Συγκεκριμένα, στην περίπτωση των προφορτισμένων αργίλων ισχύει η σχέση:

$$E_{u,50} = 300c_u \Rightarrow \frac{c_u}{E_{u,50}} = \frac{1}{300} \Rightarrow \varepsilon_{u,50} = \frac{1}{300} \quad (6.14)$$

Στην περίπτωση των προφορτισμένων αργίλων, γίνεται η θεώρηση πως η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους παραμένει σταθερή με το βάθος. Συνεπώς, όπως φαίνεται και από την παραπάνω σχέση, προκύπτει ότι τόσο το μέτρο ελαστικότητας $E_{u,50}$ παραμένει σταθερό με το βάθος όσο και η παραμόρφωση $\varepsilon_{u,50}$. Συμπερασματικά προκύπτει πως η αρχική δυσκαμψία της καμπύλης p - y (K_i) παραμένει σταθερή με το βάθος και εξαρτάται από την τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής (c_u).

Στη περίπτωση των κανονικά φορτισμένων αργίλων, η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους (c_u) αυξάνεται με το βάθος με αποτέλεσμα το μέτρο ελαστικότητας $E_{u,50}$ να αυξάνεται με το βάθος.

Συμπερασματικά, προκύπτει πως η αρχική δυσκαμψία της καμπύλης p - y (K_i) αυξάνει με το βάθος και εξαρτάται από την τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής (c_u).

Το μέγιστο πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκους πασσάλου υπό αστράγγιστες συνθήκες (p_u) δίνεται από τη σχέση:

$$p_u = N_p c_u D \quad (6.15)$$

Όπου:

N_p : ο συντελεστής πλευρικής φέρουσας ικανότητας

c_u : η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους [kPa]

D : η διάμετρος του πασσάλου [m]

Ο συντελεστής πλευρικής φέρουσας ικανότητας (N_p) δίνεται από τη σχέση:

$$N_p = N_{pu} - (N_{pu} - N_{po})e^{-\lambda(z/D)} \quad (6.16)$$

Όπου:

N_{pu} : ο μέγιστος συντελεστής πλευρικής φέρουσας ικανότητας

N_{po} : ο συντελεστής πλευρικής φέρουσας ικανότητας στην επιφάνεια του εδάφους

λ : ένας αδιάστατος συντελεστής, ο οποίος εξαρτάται από την τραχύτητα στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους

z : το βάθος από τον πυθμένα της θάλασσας [m]

D : η διάμετρος του πασσάλου [m]

Ο συντελεστής πλευρικής φέρουσας ικανότητας (N_p) αυξάνεται με το βάθος στο ανώτερο τμήμα του πασσάλου, ξεκινώντας από την τιμή N_{po} στην επιφάνεια του εδάφους και φτάνει στη μέγιστη τιμή του N_{pu} σε μεγαλύτερα βάθη όπου και παραμένει σταθερός.

Ο αδιάστατος συντελεστής λ εξαρτάται από την τιμή του συντελεστή τραχύτητας στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας ($\alpha = \tau_{su}/c_u$). Συγκεκριμένα ο συντελεστής λ δίνεται από την εξής σχέση:

$$\lambda = 0.55 - 0.15\alpha \quad (6.17)$$

και παίρνει τιμές από 0.55 για $\alpha=0$ (λεία επιφάνεια) μέχρι 0.40 για $\alpha=1$ (τραχιά επιφάνεια).

Ο συντελεστής πλευρικής φέρουσας ικανότητας στην επιφάνεια του εδάφους (N_{po}) ορίζεται από τη σχέση:

$$N_{po} = 2 + 1.5\alpha \quad (6.18)$$

Ο μέγιστος συντελεστής πλευρικής φέρουσας ικανότητας (N_{pu}) ορίζεται από τη σχέση:

$$N_{pu} = \pi + 2\Delta + 2 \cos \Delta + 4(\cos \frac{\Delta}{2} + \sin \frac{\Delta}{2}) \quad (6.19)$$

$$\text{Όπου } \Delta, \text{ δίνεται από τη σχέση: } \Delta = \arcsin(a). \quad (6.20)$$

Παρά την ευρεία χρήση των καμπυλών αυτών, σε πολλές μελέτες έχουν επισημανθεί οι ανακρίβειες αυτών των ελατηρίων, ειδικά για πασσάλους μεγάλων διαμέτρων και λόγω της μαλακής (soft) συμπεριφοράς αυτών των ελατηρίων σε περιοχές μικρών έως μεσαίων παραμορφώσεων, οι οποίες είναι και οι σημαντικότερες και πιο συχνές κατά το σχεδιασμό των υπεράκτιων ανεμογεννητριών.

Έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες για τη βελτίωση των καμπυλών p-y σε σχέση τόσο με τη διάμετρο όσο και με τη δυσκαμψία των ελατηρίων σε μικρές παραμορφώσεις. Μια πρόσφατη δημοσίευση (Jeanjean, 2017) έχει παράσχει μια περιγραφή αυτών των μελετών και έχει συνοψίσει τις προτεινόμενες βελτιώσεις κυρίως με επίκεντρο τις εξελίξεις στην υπεράκτια πετρελαϊκή βιομηχανία. Επίσης, μια μελέτη (Byrne, 2017) που ξεκίνησε από την υπεράκτια αιολική βιομηχανία, έχει επικεντρωθεί σε πασσάλους με πολύ μεγάλες διαμέτρους και έχει χρησιμοποιήσει αποτελέσματα δοκιμών φορτίου πασσάλων και εκτεταμένης προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων για να προτείνει νέα σύνολα πλευρικών ελατηρίων σε συνδυασμό με στροφικά ελατήρια κατά μήκος του πασσάλου. Αυτά τα μοντέλα μπορούν να επεκταθούν σε σεισμικές αναλύσεις καθορίζοντας την κατάλληλη υστερητική κυκλική συμπεριφορά για τα ελατήρια.

Όσον αφορά την εφαρμογή των καμπυλών p-y σε υπεράκτιους μονοπασσάλους, οι έρευνες των Abdel-Rahman και Achmus (2005), Lesny και Weimann (2006) και Achmus et al (2011) έδειξαν ότι η μέθοδος p-y, όταν εφαρμόζεται σε μονοπασσάλους μεγάλης διαμέτρου, υπερεκτιμά τη δυσκαμψία πασσάλου-εδάφους και υποεκτιμά την μετακίνηση και την περιστροφή πασσάλου-κεφαλής.

Συνεπώς, η μελέτη της θεμελίωσης μονοπασσάλου, υπεράκτιας ανεμογεννήτριας με τη χρήση των καμπυλών p-y, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των ερευνών που προαναφέρθηκαν, κρίθηκε ακατάλληλη για τη συγκεκριμένη περίπτωση, καθώς θα μελετηθεί μονοπάσσαλος μεγάλης διαμέτρου.

6.1.2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων για τη θεμελίωση (3D)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι απλουστευμένες αριθμητικές προσεγγίσεις, όπως η χρήση των καμπυλών p-y, δεν ενδείκνυνται για ακριβείς αναλύσεις. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται πρακτικά τρισδιάστατη μη γραμμική ανάλυση για την προσομοίωση των μηχανισμών που ανακύπτουν λόγω της αλληλεπίδρασης εδάφους-πασσάλου. Πρόκειται ουσιαστικά για μηχανισμούς εκδήλωσης μη γραμμικής συμπεριφοράς, της οποίας η προσομοίωση απαιτεί εξαιρετική υπολογιστική ισχύ.

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων είναι η πλέον ακριβής, αφού σημαντικά φαινόμενα, όπως η μη-γραμμικότητα μπορούν να ληφθούν υπ' όψιν. Το πρόβλημα της

απόκρισης του πασσάλου σε κινηματική καταπόνηση μπορεί επομένως να προσεγγιστεί αριθμητικά, χρησιμοποιώντας πεπερασμένα στοιχεία με τέτοια σύνορα στις εδαφικές στρώσεις, ώστε να είναι εφικτή η μετάδοση σεισμικών κυμάτων.

Ωστόσο, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων έχει σαν βασικό μειονέκτημα το μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Για την παρούσα διπλωματική εργασία, εφαρμόστηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση υπεράκτιας ανεμογεννήτριας, με μονοπάσσαλη θεμελίωση, με τη χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων, ABAQUS.

6.2 Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus

6.2.1 Γενικά στοιχεία για το πρόγραμμα Abaqus

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, για την προσομοίωση της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας, έγινε χρήση του προγράμματος ABAQUS 6.13.

Το ABAQUS είναι μια ομάδα προγραμμάτων που προσομοιώνουν και αναλύουν πάσης φύσεως διατάξεις στον τομέα της μηχανικής, βασισμένο στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.

Το πρόγραμμα αυτό, μεταξύ άλλων, έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Περιέχει εκτεταμένη βιβλιοθήκη με στοιχεία τα οποία μπορούν να προσομοιώσουν πρακτικά οποιαδήποτε γεωμετρία. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής γεωμετρίας από πολλά διαφορετικά πακέτα λογισμικού CAD
- Παρέχει τη δυνατότητα χρήσης αρκετών διαφορετικών μοντέλων υλικών για την προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς τους, όπως μέταλλα, ελαστικά, πολυμερή, σύνθετα υλικά, οπλισμένο σκυρόδεμα και γεωτεχνικά υλικά όπως είδη εδαφών και βράχο
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση προβλημάτων, πέραν της τάσης/παραμόρφωσης, σε τομείς όπως μεταφορά θερμότητας, διάχυση μάζας, θερμική διαχείριση σε ηλεκτρονικά εξαρτήματα, ακουστική, πιεζοηλεκτρική ανάλυση και προβλήματα γεωλογίας
- Παρέχει μεγάλο εύρος δυνατοτήτων για μοντελοποίηση γραμμικών και μη γραμμικών εφαρμογών. Προβλήματα με πολλά μέλη προσομοιώνονται με το να συσχετιστεί η γεωμετρία ορίζοντας κάθε μέλος με το αντίστοιχο υλικό και διευκρινίζοντας τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μελών. Στη μη γραμμική ανάλυση, το Abaqus επιλέγει αυτόματα τα κατάλληλα επαυξητικά βήματα ανάλυσης και ανοχής για κάθε φορτίο και τα προσαρμόζει συνεχώς κατά την πορεία της ανάλυσης για να επιβεβαιώνει ότι επιτυγχάνεται μια ακριβής επίλυση.
- Παρέχει τη δυνατότητα στατικής και δυναμικής ανάλυσης

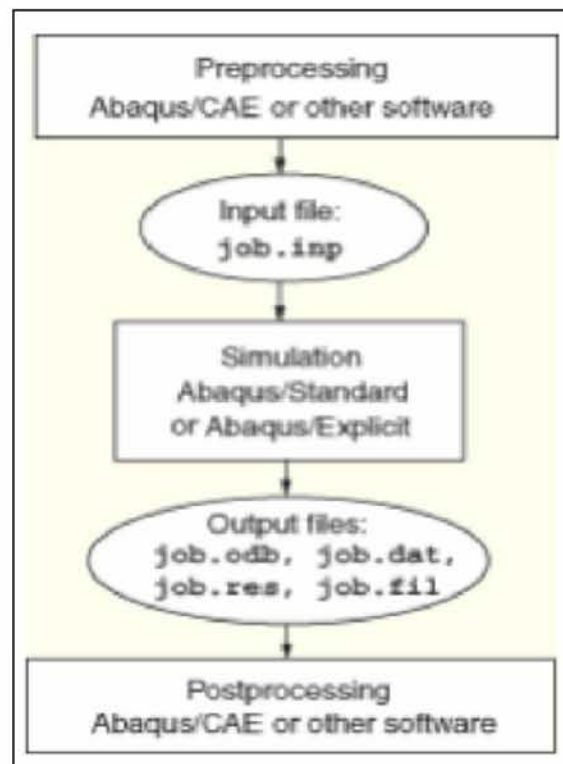
Από την άλλη πλευρά, ένα μειονέκτημα του προγράμματος είναι ότι δεν είναι τόσο φιλικό στο χρήστη. Το κυριότερο μειονέκτημά του είναι ότι τα υλικά πρέπει να ορίζονται πλήρως, όσον αφορά τις ιδιότητες τους, κάτι που καθιστά το ABAQUS λιγότερο εύχρηστο για τη

βιομηχανία. Ακόμα, χρειάζεται αρκετά βαθιά κατανόηση μη-γραμμικής ανάλυσης, δηλαδή χρήστες με μεγάλη εμπειρία σε ανάλογα προβλήματα.

Μια ολοκληρωμένη ανάλυση στο Abaqus συνήθως περιέχει τρία διαφορετικά στάδια:

- Την προεπεξεργασία (preprocessing)
- Την προσομοίωση (simulation) και
- Τη μετεπεξεργασία (postprocessing).

Τα τρία αυτά στάδια συνδέονται μεταξύ τους με αρχεία όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 6.3):



Σχήμα 6.3: Στάδια ανάλυσης στο Abaqus (Αθανασίου, 2015).

Το Abaqus/CAE (Complete Abaqus Environment), όπως ήδη αναφέρθηκε, παρέχει ένα απλό και ολοκληρωμένο περιβάλλον για τη δημιουργία προσομοιωμάτων, την κατάθεση και επίβλεψη εργασιών, την εκτίμηση των αποτελεσμάτων. Το Abaqus/CAE χωρίζεται σε ενότητες (modules), όπου κάθε ένα από αυτά ορίζει μια λογική όψη της διαδικασίας προσομοίωσης.

Πρέπει να σημειωθεί ότι για το πρόγραμμα αυτό χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των μονάδων. Στο Abaqus δεν υπάρχουν καθορισμένες μονάδες, αλλά ο χρήστης αποφασίζει τις μονάδες που πρόκειται να χρησιμοποιήσει για τη δημιουργία του μοντέλου. Για το συγκεκριμένο προσομοίωμα οι μονάδες λήφθηκαν σύμφωνα με το Διεθνές Σύστημα Μονάδων, όπως φαίνεται και στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 6.1: Μονάδες σύμφωνα με το S.I.

Ποσότητα	Μονάδα
Μήκος	m
Δύναμη	N
Τάση	Pa (N/m ²)
Μάζα	kg
Χρόνος	s
Επιτάχυνση	m/s ²
Πυκνότητα	kg/m ³

Τέλος, στο Abaqus/CAE οι άξονες αναφέρονται ως 1^η κατεύθυνση (άξονας X), 2^η κατεύθυνση (άξονας Y) και 3^η κατεύθυνση (άξονας Z).

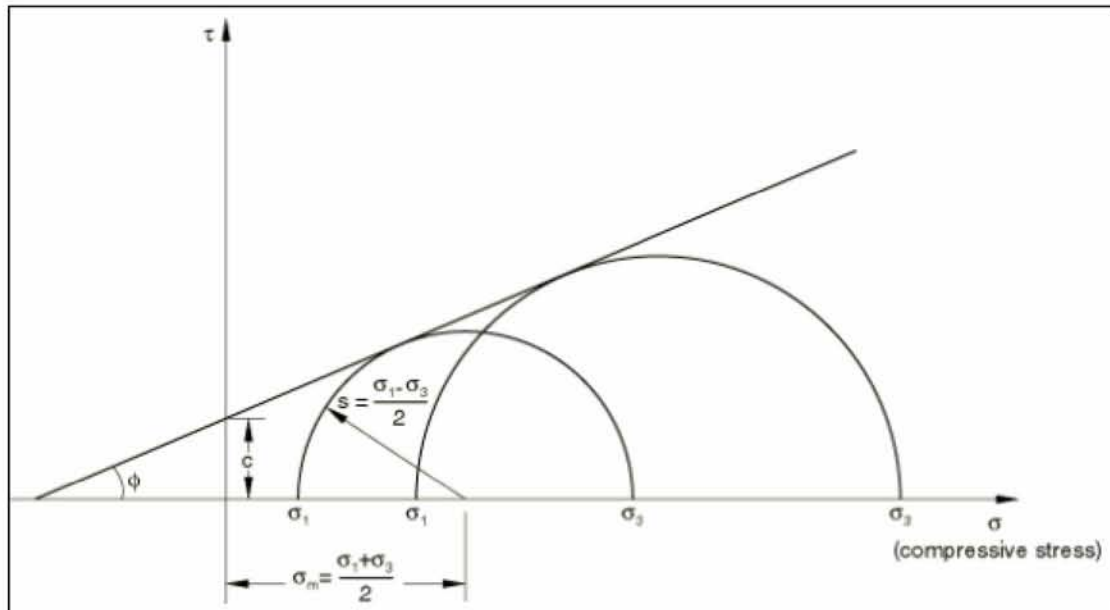
6.2.2 Τα καταστατικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στο Abaqus

Ένα καταστατικό προσομοίωμα υλικού προκύπτει από μια σειρά μαθηματικών εξισώσεων, οι οποίες περιγράφουν τη σχέση τάσης-παραμόρφωσης. Η βιβλιοθήκη του ABAQUS περιλαμβάνει αρκετά καταστατικά προσομοιώματα για την πρόβλεψη της πλαστικής συμπεριφοράς των υλικών, καθώς επίσης υπάρχει και η δυνατότητα εισαγωγής καταστατικών μοντέλων, τα οποία δεν εμπεριέχονται στη βιβλιοθήκη του προγράμματος (Abaqus/CAE User's Manual).

Το προσομοίωμα που επιλέχθηκε στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των αργίλων είναι το μοντέλο πλαστικότητας Mohr-Coulomb. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση υλικών σύμφωνα με το κλασσικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Επιτρέπει στο υλικό να σκληρύνει και/ή να χαλαρώσει ισότροπα και μπορεί να χρησιμοποιείται με το μοντέλο γραμμικού ελαστικού υλικού. Ακόμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές σχεδιασμού στη γεωτεχνική μηχανική για την προσομοίωση της απόκρισης υλικού υπό μονοτονική φόρτιση.

Η επιφάνεια αστοχίας κατά την πλαστική συμπεριφορά περιγράφεται από δυο διαφορετικά κριτήρια, ένα κριτήριο διάτμησης, γνωστό ως επιφάνεια Mohr-Coulomb και ένα προαιρετικό κριτήριο αποκοπής εντάσεων, που προσομοιώνονται χρησιμοποιώντας την επιφάνεια Rankine.

Σύμφωνα με το κριτήριο Mohr-Coulomb η αστοχία συμβαίνει όταν η διατμητική τάση σε οποιοδήποτε σημείο ενός υλικού φτάσει σε μια τιμή που εξαρτάται γραμμικά από την ορθή τάση στο ίδιο επίπεδο. Το μοντέλο Mohr-Coulomb βασίζεται στο γράφημα του κύκλου του Mohr για καταστάσεις έντασης με αστοχία στο επίπεδο της μέγιστης και ελάχιστης κύριας τάσης. Η γραμμή αστοχίας είναι η ευθεία που εφάπτεται με τους κύκλους του Mohr (Σχήμα 6.4).



Σχήμα 6.4: Κύκλος του Mohr (Abaqus/CAE User's Manual).

Το μοντέλο Mohr-Coulomb ορίζεται από τη σχέση: $\tau = c - \tan \varphi$ (6.21)

Όπου η τάση σ είναι αρνητική στη θλίψη.

Από τον κύκλο του Mohr προκύπτει ότι: $\tau = s * \cos \varphi$, $\sigma = \sigma_m + s * \sin \varphi$ (6.22)

Αντικαθιστώντας τις τ και σ , πολλαπλασιάζοντας και τις δύο πλευρές με $\cos \varphi$ και αφαιρώντας, προκύπτει ότι το μοντέλο Mohr-Coulomb μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$s + \sigma_m * \sin \varphi - c * \cos \varphi = 0 \quad (6.23)$$

Όπου:

η τάση s ισούται με το μισό της διαφοράς της μέγιστης από την ελάχιστη κύρια τάση και δίνεται από τον τύπο:

$$s = \frac{1}{2} * (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (6.24)$$

η τάση σ_m ισούται με το μέσο όρο των μέγιστων και ελάχιστων κύριων τάσεων και δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma_m = \frac{1}{2} * (\sigma_1 + \sigma_3) \quad (6.25)$$

φ είναι η γωνία τριβής

Για γενικές καταστάσεις έντασης το μοντέλο είναι γραμμένο με όρους τρίτων μεταβλητών και περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$F = R_{mc}q - p * \tan \varphi - c = 0 \quad (6.26)$$

Όπου:

R_{mc} δίνεται από τον τύπο:

$$R_{mc}(\Theta, \varphi) = \frac{1}{\sqrt{3} * \cos \varphi} * \sin(\Theta + \frac{\pi}{3}) + \frac{1}{3} * \cos(\Theta + \frac{\pi}{3}) * \tan \varphi \quad (6.27)$$

φ είναι η κλίση της επιφάνειας αστοχίας Mohr-Coulomb στο p - $R_{mc}q$ επίπεδο έντασης, η οποία συνήθως αναφέρεται ως γωνία τριβής του υλικού και μπορεί να εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τις προκαθορισμένες μεταβλητές του πεδίου

c είναι η συνοχή του υλικού

$$\Theta \text{ είναι η απόκλιση πολικής γωνίας που ορίζεται ως } \cos(3\Theta) = (\frac{r}{q})^3 \text{ και} \quad (6.28)$$

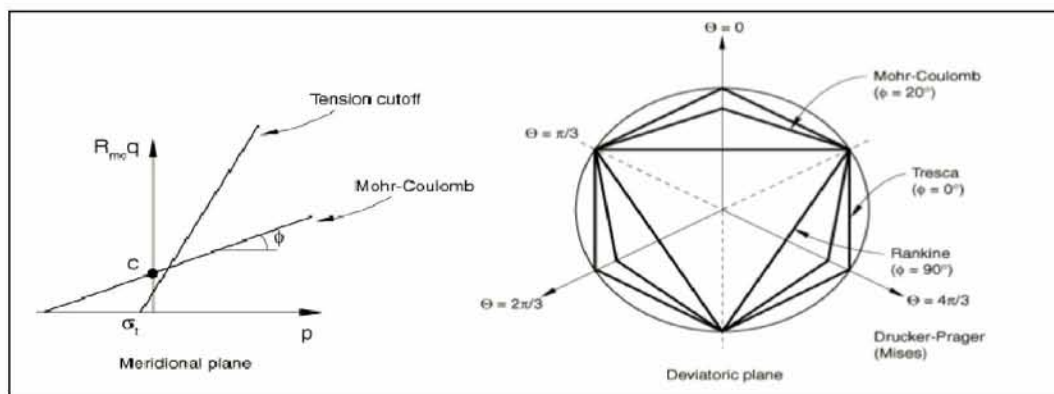
$$r = (\frac{9}{2} S * S : S)^{\frac{1}{3}} \quad (6.29)$$

$$p = -\frac{1}{3} \text{trace}(\sigma) \text{ ,είναι η ισοδύναμη τάση πίεσης} \quad (6.30)$$

$$q = \sqrt{\frac{3}{2} (S : S)} \text{ ,είναι η ισοδύναμη τάση Mises και } S = \sigma + pI \quad (6.31)$$

Η γωνία τριβής φ διαμορφώνει το σχήμα της επιφάνειας αστοχίας, όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί. Η επιφάνεια αποκοπής της τάσης εμφανίζεται για γωνία $\Theta=0^\circ$. Το εύρος της γωνίας τριβής είναι $0^\circ \leq \varphi < 90^\circ$ (Σχήμα 6.5). Στην περίπτωση $\varphi=0^\circ$ το μοντέλο Mohr-Coulomb μειώνεται στο ανεξάρτητο από την πίεση μοντέλο Tresca με ένα τέλειο εξαγωνικό τμήμα. Στην περίπτωση όπου $\varphi=90^\circ$ το μοντέλο Mohr-Coulomb μειώνεται στο μοντέλο Rankine με τριγωνικό τμήμα και $R_{mc}=\infty$ (η τάση σ_3 σε αυτή την περίπτωση δεν επιτρέπει στο μοντέλο Mohr-Coulomb που περιγράφεται παραπάνω).

Σημειώνεται ότι στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία και στην περίπτωση των αργίλων η γωνία τριβής είναι μηδενική.



Σχήμα 6.5: Επιφάνειες Mohr-Coulomb και αποκοπής τάσεων (Abaqus/CAE User's Manual).

Κεφάλαιο 7

Προσομοίωση στο πρόγραμμα Abaqus

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας ήταν η προσομοίωση μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας θεμελιωμένη σε μονοπάσσαλο. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Στη συνέχεια ακολουθούν λεπτομέρειες σχετικά με τη μεθοδολογία μοντελοποίησης στο ABAQUS.

Η δημιουργία ενός μοντέλου στο Abaqus CAE περιλαμβάνει κάποια βήματα που αναφέρονται ως ενότητες (modules) και οι ενότητες αυτές αναλύονται στα επόμενα υποκεφάλαια.

7.1 Part Module: Γεωμετρία των μελών της διάταξης

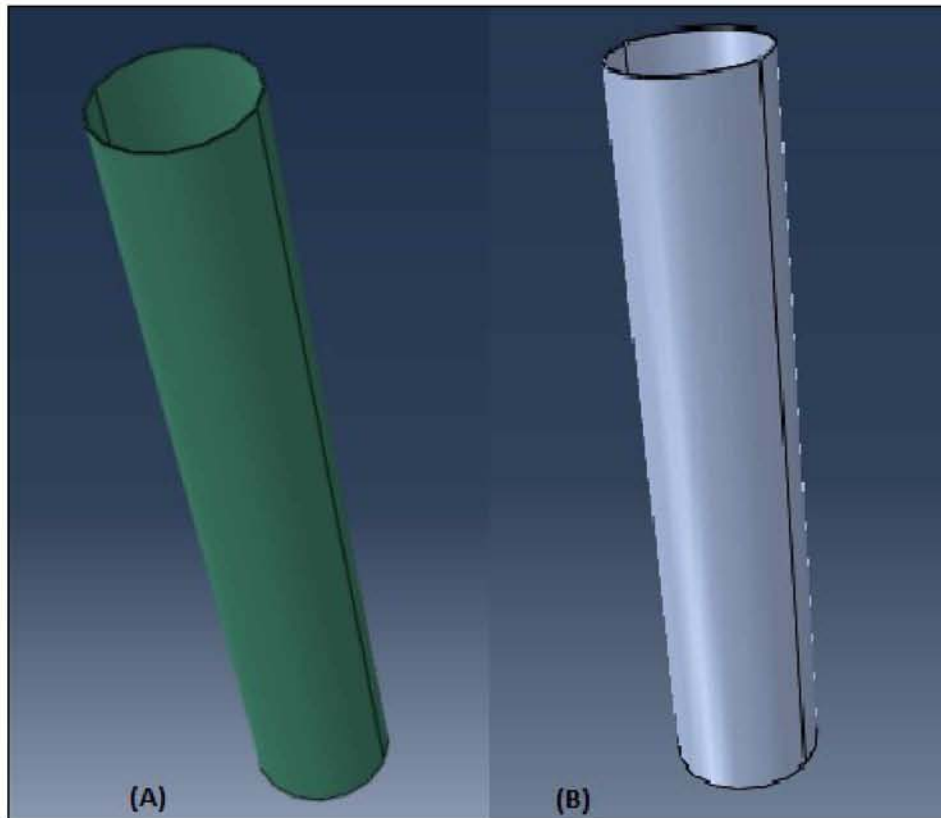
Στην ενότητα 'Part Module', πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός της γεωμετρίας των επιμέρους τμημάτων του μοντέλου. Το μοντέλο αποτελείται από το έδαφος, τον πάσσαλο που είναι μέσα στο έδαφος, το φορέα στήριξης και τον πύργο της ανεμογεννήτριας. Πιο αναλυτικά:

Ο πάσσαλος που επιλέχθηκε ήταν κοίλος με μήκος $L=35$ m και διάμετρο $D=6$ m. Το πάχος πασσάλου προσδιορίστηκε, σύμφωνα με τον κανονισμό API 2000, σύμφωνα με τη σχέση:

$$t = 6.35 + \frac{D(\text{mm})}{100} = 0.067\text{m} \quad (7.1)$$

Ο φορέας στήριξης είναι το κομμάτι που εκτείνεται πάνω από τον πυθμένα της θάλασσας μέχρι της επιφάνειά της και συνδέει τον πύργο με τη θεμελίωση. Το μήκος του φορέα στήριξης λήφθηκε ίσο με 25 m, ενώ η διάμετρος και το πάχος του λήφθηκαν ίδια με αυτά του πασσάλου.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η γεωμετρία του πασσάλου αριστερά (Σχήμα 7.1A) και η γεωμετρία του φορέα στήριξης δεξιά (Σχήμα 7.1B).



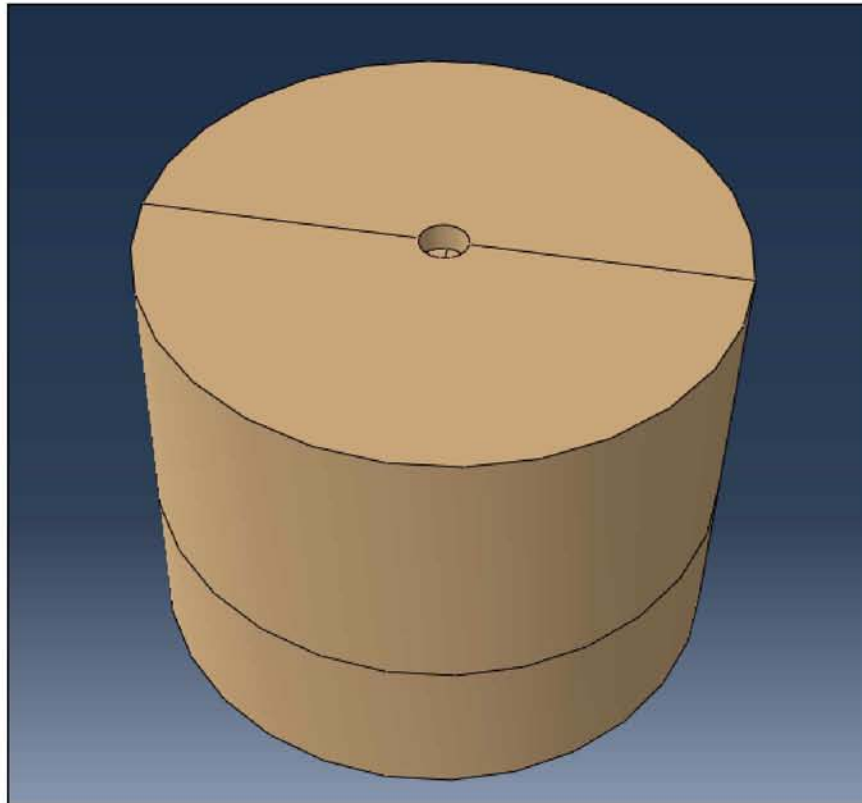
Σχήμα 7.1: Γεωμετρία (Α) πασσάλου και (Β) φορέα στήριξης.

Λόγω της διπλής συμμετρίας της κατασκευής, επιλέχθηκε να δημιουργηθεί μια κυλινδρική εδαφική μάζα, αντί τετραγωνικής, για να ανταποκρίνεται καλύτερα στην φύση του αξονοσυμμετρικού προβλήματος που μελετάται.

Η διάμετρος του εδάφους προσομοιώματος λήφθηκε ίση με 72 m ($D = 12 * D_{pile}$) και εκτείνεται σε βάθος 56 m ($L = 1.6 * L_{pile}$). Οι διαστάσεις του εδαφικού προσομοιώματος λήφθηκαν έτσι ώστε μακριά από την περιοχή ενδιαφέροντος το έδαφος να παραμένει ανεπηρέαστο. Επίσης, κατά το σεισμό, με την επιλογή των συγκεκριμένων διαστάσεων θα μειωθούν τα προβλήματα ανάκλασης και παγίδευσης των σεισμικών κυμάτων στα πλευρικά όρια.

Στο κέντρο της εδαφικής μάζας δημιουργήθηκε μια οπή, με βάθος 35 m και πάχος όσο το πάχος του πασσάλου, στην οποία θα τοποθετηθεί αργότερα (στην ενότητα assembly) ο πασσάλος. Το ύψος του εδάφους εσωτερικά του πασσάλου λήφθηκε ίσο με 0.9 φορές το μήκος του πασσάλου, που είναι ενσωματωμένος στο έδαφος (δηλαδή 31.5 m), λόγω της συμπίεσης του εδάφους κατά τη διάρκεια τοποθέτησης του πασσάλου.

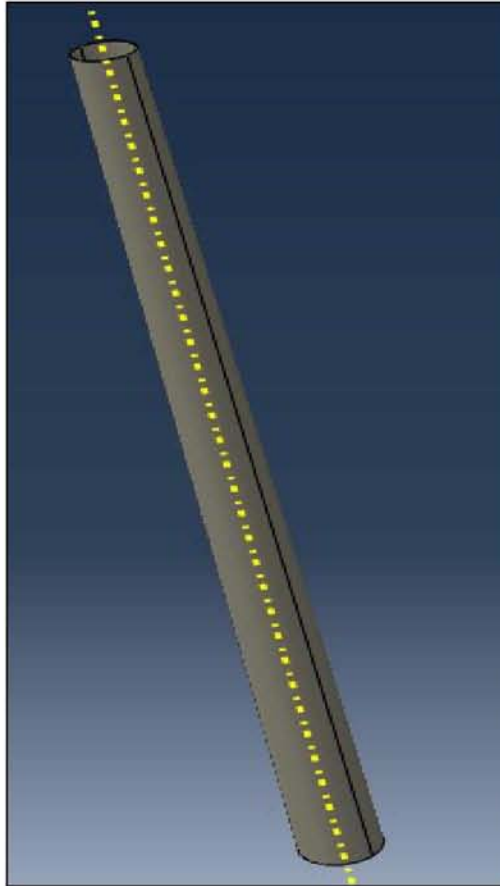
Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 7.2) παρουσιάζεται η γεωμετρία του εδάφους με την οπή στο κέντρο του.



Σχήμα 7.2: Γεωμετρία εδάφους.

Όσον αφορά τον πύργο της ανεμογεννήτριας, για την προσομοίωση επιλέχθηκε ανεμογεννήτρια τύπου NREL 5-MW baseline wind turbine, η οποία αναπτύχθηκε από το εργαστήριο NREL (Natural Renewable Energy Laboratory).

Για την προσομοίωση της ανεμογεννήτριας δημιουργήθηκε μόνο ο πύργος (απλοποίηση του προβλήματος). Παρ' όλα αυτά, όπως θα αναφερθεί και στη συνέχεια, λήφθηκαν υπόψιν οι μάζες του ρότορα και του θαλάμου. Το ύψος του πύργου της ανεμογεννήτριας λήφθηκε ίσο με 87.6 m από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας. Η διάμετρος του πύργου στη βάση λήφθηκε ίση με 6 m, ενώ στην κορυφή η διάμετρος μειώθηκε στα 3.87 m. Το πάχος του πύργου υπολογίστηκε ίσο με 0.067 m. Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 7.3) παρουσιάζεται η γεωμετρία του πύργου.



Σχήμα 7.3: Γεωμετρία πύργου.

Σημειώνεται ότι όλα τα επιμέρους τμήματα σχεδιάστηκαν ως τρισδιάστατα, παραμορφώσιμα και συμπαγή.

7.2 Property Module: Ιδιότητες υλικών και αντιστοίχιση στη γεωμετρία

Μετά τη δημιουργία των επιμέρους τμημάτων του μοντέλου, σειρά είχε η δημιουργία των υλικών και η αντιστοίχισή τους στα αντίστοιχα τμήματα του μοντέλου.

Ο πάσσαλος, ο φορέας στήριξης και ο πύργος της ανεμογεννήτριας αποτελούνται από χάλυβα. Για το χάλυβα επιλέχθηκε ελαστική συμπεριφορά. Οι ιδιότητες του χάλυβα που επιλέχθηκε είναι οι εξής:

- Πυκνότητα: 7850 kg/m^3
- Μέτρο ελαστικότητας: $210 \cdot 10^9 \text{ Pa}$
- Λόγος Poisson: 0.3

Όσον αφορά το έδαφος, επιλέχθηκαν 3 διαφορετικές περιπτώσεις αργίλου. Οι ιδιότητες των επιλεγμένων αργίλων λήφθηκαν οι προτεινόμενες από τους Haiderali & Madabhushi (2012). Για όλες τις προσομοιώσεις του εδάφους επιλέχθηκε ελαστοπλαστική συμπεριφορά, σύμφωνα με το ελαστικό-τέλεια πλαστικό κριτήριο Mohr-Coulomb. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι ιδιότητες για κάθε μια άργιλο:

Άργιλος 1

- Δείκτη πλαστικότητας 44%
- Πυκνότητα: 1800 kg/m^3
- Μέτρο ελαστικότητας: $19.15 \cdot 10^6 \text{ Pa}$
- Λόγος Poisson: 0.48
- Συνοχή: $5 \cdot 10^4 \text{ Pa}$

Άργιλος 2

- Δείκτη πλαστικότητας 40%
- Πυκνότητα: 1800 kg/m^3
- Μέτρο ελαστικότητας: $33.525 \cdot 10^6 \text{ Pa}$
- Λόγος Poisson: 0.48
- Συνοχή: $7.5 \cdot 10^4 \text{ Pa}$

Άργιλος 3

- Δείκτη πλαστικότητας 38%
- Πυκνότητα: 1800 kg/m^3
- Μέτρο ελαστικότητας: $47.9 \cdot 10^6 \text{ Pa}$
- Λόγος Poisson: 0.48
- Συνοχή: $10 \cdot 10^4 \text{ Pa}$

Σημειώνεται ότι η γωνία εσωτερικής τριβής, σε όλες τις αργίλους, λήφθηκε ίση με $\varphi=0^\circ$. Η γωνία διόγκωσης λήφθηκε ίση με 0.1° και η απόλυτη πλαστική παραμόρφωση μηδενική, διότι το έδαφος είναι ελαστοπλαστικό.

Οι άργιλοι που επιλέχθηκαν, ανάλογα με τη συνοχή τους, χαρακτηρίζονται ως:

Άργιλος 2: Μαλακή προς στιφρή άργιλο ($c_u=40-50 \text{ kPa}$)

Άργιλος 3: Στιφρή άργιλο ($c_u=50-75 \text{ kPa}$)

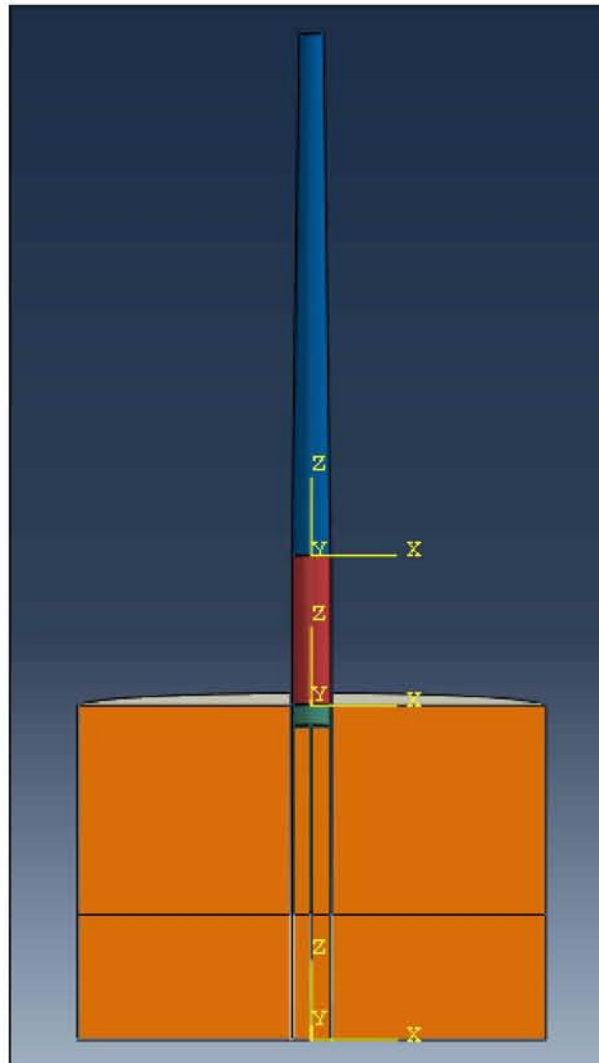
Άργιλος 4: Σκληρή άργιλο ($c_u=100-150 \text{ kPa}$)

Μετά τον ορισμό των ιδιοτήτων των υλικών πραγματοποιήθηκε η αντιστοίχσή τους στα επιμέρους τμήματα του μοντέλου.

7.3 Assembly Module: Δημιουργία ενιαίου μοντέλου

Στην ενότητα αυτή, τα επιμέρους τμήματα του μοντέλου συναρμολογήθηκαν σε ένα κοινό σύστημα συντεταγμένων. Τα τμήματα του μοντέλου δημιουργούν μια ανεξάρτητη (κατ' επιλογή) οντότητα. Η επιλογή ανεξάρτητης οντότητας δίνει τη δυνατότητα για διαφορετική διακριτοποίηση των τμημάτων που την αποτελούν. Σημειώνεται ότι ο κύριος άξονας συντεταγμένων βρίσκεται στη μέση του μοντέλου, στο κάτω τμήμα του εδάφους. Εκτός από τον κύριο άξονα δημιουργήθηκαν άλλοι δυο βοηθητικοί άξονες, στην επιφάνεια του εδάφους και στην επιφάνεια της θάλασσας, για την επιβολή των φορτίσεων, που θα αναλυθεί στη

συνέχεια. Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 7.4) παρουσιάζεται η διάταξη του μοντέλου μετά τη δημιουργία της οντότητας, σε τομή.



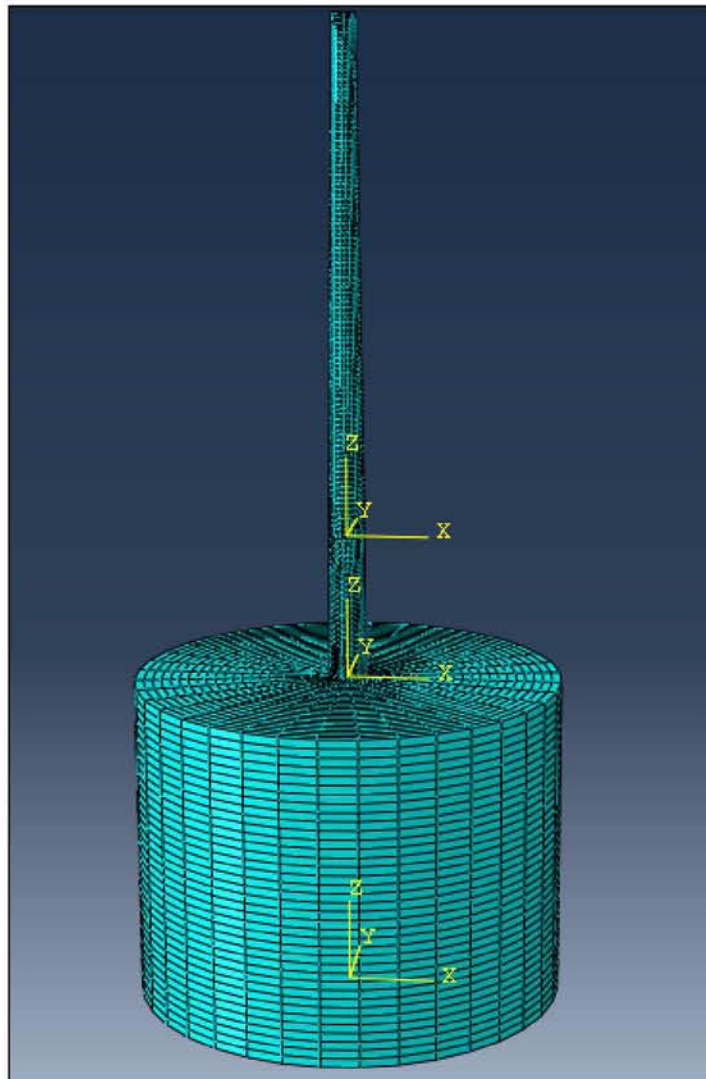
Σχήμα 7.4: Ενιαίο μοντέλο σε τομή.

7.4 Mesh Module: Διακριτοποίηση μοντέλου

Στην ενότητα αυτή προσδιορίστηκε το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων, με βάση το οποίο θα επιλυθεί το πρόβλημα. Η ακρίβεια της επίλυσης σχετίζεται άμεσα με το πλέγμα που επιλέχθηκε. Όσο πιο πυκνό είναι το πλέγμα διακριτοποίησης τόσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια της επίλυσης, όμως τόσο μεγαλύτερος είναι και ο υπολογιστικός χρόνος. Προκειμένου να επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ της ακρίβειας επίλυσης και του υπολογιστικού χρόνου επιλέχθηκε η ακόλουθη διακριτοποίηση για κάθε μέλος του μοντέλου. Σημειώνεται ότι για όλα τα τμήματα του μοντέλου επιλέχθηκαν εξαεδρικά 8-κομβά γραμμικά στοιχεία (Hex, C3D8R), καθώς προσφέρουν καλύτερο συνδυασμό ακρίβειας υπολογισμού και χρόνου επίλυσης για τη συγκεκριμένη γεωμετρία.

Ο πάσσαλος αποτελείται από 2698 στοιχεία και ο φορέας στήριξης από 1900 στοιχεία. Τα δυο αυτά τμήματα έχουν την ίδια πυκνότητα διακριτοποίησης. Όσον αφορά τον πύργο της ανεμογεννήτριας, αποτελείται από 5808 στοιχεία, ενώ η διακριτοποίηση του είναι ελαφρώς

αραιότερη από του πασσάλου και του φορέα στήριξης. Τέλος, το έδαφος αποτελείται από 33868 στοιχεία. Το μέγεθος κάθε στοιχείου του εδάφους επιλέγεται ίσο με 1.5. Στο σχήμα (Σχήμα 7.5) που ακολουθεί φαίνεται η διακριτοποίηση του μοντέλου.



Σχήμα 7.5: Διακριτοποίηση μοντέλου.

7.5 Step Module: Καθορισμός του είδους της ανάλυσης, και προσδιορισμός των ζητούμενων αποτελεσμάτων

Στην ενότητα αυτή ορίστηκε μια ακολουθία από ένα ή περισσότερα βήματα, με βάση τα οποία πραγματοποιήθηκε η ανάλυση. Μέσω των βημάτων μπορούν να πραγματοποιηθούν αλλαγές στα διάφορα στάδια της ανάλυσης, όπως αλλαγή στις συνοριακές συνθήκες, στις συνθήκες φόρτισης, στον τρόπο αλληλεπίδρασης των τμημάτων του μοντέλου κ.α. Εκτός από τα παραπάνω, στην ενότητα αυτή γίνεται ο καθορισμός του είδους της ανάλυσης και προσδιορίζονται τα δεδομένα εξόδου καθώς και διάφορα στοιχεία ελέγχου. Τα βήματα που δημιουργήθηκαν στο μοντέλο αφορούσαν: τα ίδια βάρη, τον άνεμο, το κύμα, το σεισμό. Αναλυτικότερη περιγραφή αυτών θα πραγματοποιηθεί στη συνέχεια.

7.6 Interaction Module: Δημιουργία αλληλεπιδράσεων μεταξύ των τμημάτων του μοντέλου

Στην ενότητα αυτή ορίστηκαν οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των περιοχών του μοντέλου. Για τη δημιουργία των αλληλεπιδράσεων είναι απαραίτητος ο καθορισμός μιας επιφάνειας ως κύρια και μίας άλλης ως δευτερεύουσα. Για την αποφυγή σφαλμάτων η επιλογή της κύριας και της δευτερεύουσας επιφάνειας δε θα πρέπει να είναι τυχαία. Η επιφάνεια με τη μεγαλύτερη δυσκαμψία θα πρέπει να επιλέγεται ως κύρια επιφάνεια.

Για τη σύνδεση του πύργου με το φορέα στήριξης και του φορέα στήριξης με τον πάσσαλο έγινε θεώρηση ότι δεν υπάρχει μετακίνηση μεταξύ των δύο τμημάτων που συνδέονται, ότι δηλαδή συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα και θα έχουν την ίδια παραμόρφωση. Η δημιουργία της σύνδεσης αυτής έγινε με τη χρήση της εντολής tie.

Η αλληλεπίδραση πασσάλου-εδάφους μπορεί να δημιουργήσει ολίσθηση μεταξύ των δυο επιφανειών. Για αυτό το λόγο θα πρέπει να εφαρμοστούν συνθήκες διεπαφής μεταξύ του πασσάλου και του εδάφους, στην κύρια και εφαπτομενική διεύθυνση.

Στην κύρια διεύθυνση, η τάση επαφής είναι μηδενική όταν αναπτύσσεται ένα διάκενο μεταξύ του πασσάλου και του εδάφους ή είναι θλιπτική όταν ο πάσσαλος έρχεται σε επαφή με το έδαφος.

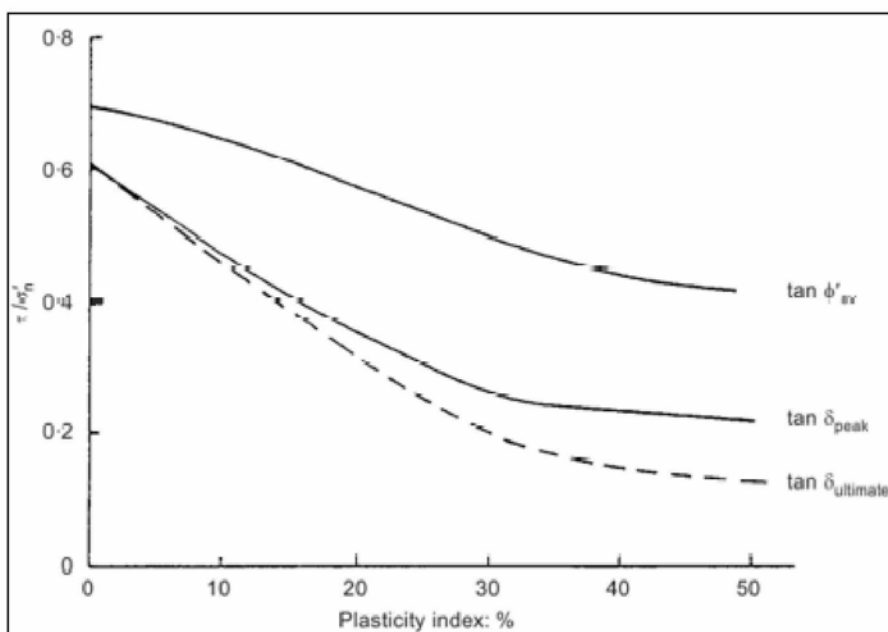
Στην εφαπτομενική κατεύθυνση χρησιμοποιείται νόμος τριβής Coulomb, σύμφωνα με τον οποίο η μέγιστη διατμητική τάση στην επιφάνεια επαφής είναι ίση με την κύρια τάση, πολλαπλασιασμένη με τον συντελεστή τριβής μ .

Και για την κύρια και για την εφαπτομενική διεύθυνση επιλέχθηκε η μέθοδος «penalty contact» για τον ορισμό της τριβής της διεπιφάνειας.

Για την κύρια διεύθυνση, η επιλογή hard contact επιτρέπει τη μετάβαση οποιασδήποτε πίεσης μεταξύ των επιφανειών, αν βρίσκονται σε επαφή. Οι επιφάνειες διαχωρίζονται αν η πίεση επαφής μειωθεί στο μηδέν. Οι ξεχωριστές επιφάνειες έρχονται σε επαφή όταν η απόσταση μεταξύ τους μειωθεί στο μηδέν.

Όσον αφορά την εφαπτομενική διεύθυνση, οι δύο επιφάνειες επαφής μπορούν να φέρουν διατμητικές τάσεις έως ένα ορισμένο μέγεθος κατά μήκος της διεπαφής τους, προτού αρχίσουν να ολισθαίνουν η μία σε σχέση με την άλλη. Το μοντέλο τριβής Coulomb είναι αυτό που ορίζει την κρίσιμη διατμητική τάση, στην οποία θα αρχίσει η ολίσθηση των επιφανειών. Το πρόγραμμα ζητά να δοθεί ο συντελεστής τριβής μ μεταξύ των επιφανειών.

Στο συγκεκριμένο μοντέλο, η τριβή μεταξύ πασσάλου και εδάφους εκτιμήθηκε χρησιμοποιώντας την καμπύλη $\tan\delta$ peak (Lehane et al 2000), που παρουσιάζεται στο επόμενο διάγραμμα (Σχήμα 7.6).



Σχήμα 7.6: Καμπύλη για τον προσδιορισμό του συντελεστή τριβής μ (Haiderali, 2012).

Για τα εδάφη που μελετώνται, σύμφωνα με τους Aliasger & Madabhushi (2012), προκύπτει ότι η άργιλος 1 (δείκτης πλαστικότητας 44%) έχει συντελεστή τριβής $\mu=0.24$, η άργιλος 2 (δείκτης πλαστικότητας 40%) $\mu=0.247$ και η άργιλος 3 (δείκτης πλαστικότητας 38%) $\mu=0.25$.

Η παραπάνω συνθήκη διεπαφής εφαρμόστηκε μεταξύ του πασσάλου και του εσωτερικού εδάφους του πασσάλου, του πασσάλου και του περιβάλλοντος εδάφους και τέλος του πασσάλου με το έδαφος στη βάση του (στην αιχμή του). Οι συνθήκες διεπαφής εφαρμόστηκαν από το αρχικό βήμα της ανάλυσης μέχρι το τελικό.

7.7 Load Module: Εισαγωγή φορτίσεων και συνοριακών συνθηκών

Στην ενότητα αυτή ορίστηκαν οι γεωστατικές τάσεις, οι συνθήκες φόρτισης καθώς και οι συνοριακές συνθήκες.

Όσον αφορά τις αρχικές τάσεις, επιβλήθηκαν στο αρχικό βήμα της ανάλυσης, ώστε να έρθουν σε ισορροπία με το βάρος του εδάφους και του νερού που επιβλήθηκαν στο επόμενο βήμα. Στην επιφάνεια του εδάφους (ύψος 56 m) η τάση, λόγω του υπερκείμενου νερού το οποίο έχει ύψος 25 m, ισούται με: $\sigma_v = \rho_w \times g \times h = 1025 \times (-9.81) \times 25 = -251381.25 \text{ Pa}$, ενώ στη βάση του εδάφους η τάση ισούται με: $\sigma_v = \rho \times g \times h = 1800 \times (-9.81) \times 56 = -988848 \text{ Pa}$. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, υπολογίσθηκαν οι αρχικές ολικές τάσεις και όχι οι ενεργές, καθώς δεν υπάρχει μέχρι στιγμής κατάλληλο καταστατικό μοντέλο το οποίο να υπολογίζει επακριβώς τις πιέσεις του νερού των πόρων που ασκούνται στην επιφάνεια του εδάφους. Τέλος, ο συντελεστής πλευρικών ωθήσεων, για γωνία τριβής μηδενική, ισούται με $K=1$. Οι αρχικές τάσεις είναι ίδιες και για τα τρεις αργίλους, διότι η πυκνότητα των αργίλων είναι ίση με 1800 kg/m^3 .

7.7.1 Φορτία κατασκευής

Τα κύρια φορτία που δέχεται η υπό μελέτη κατασκευή (ανωδομή και θεμελίωση) είναι τα εξής:

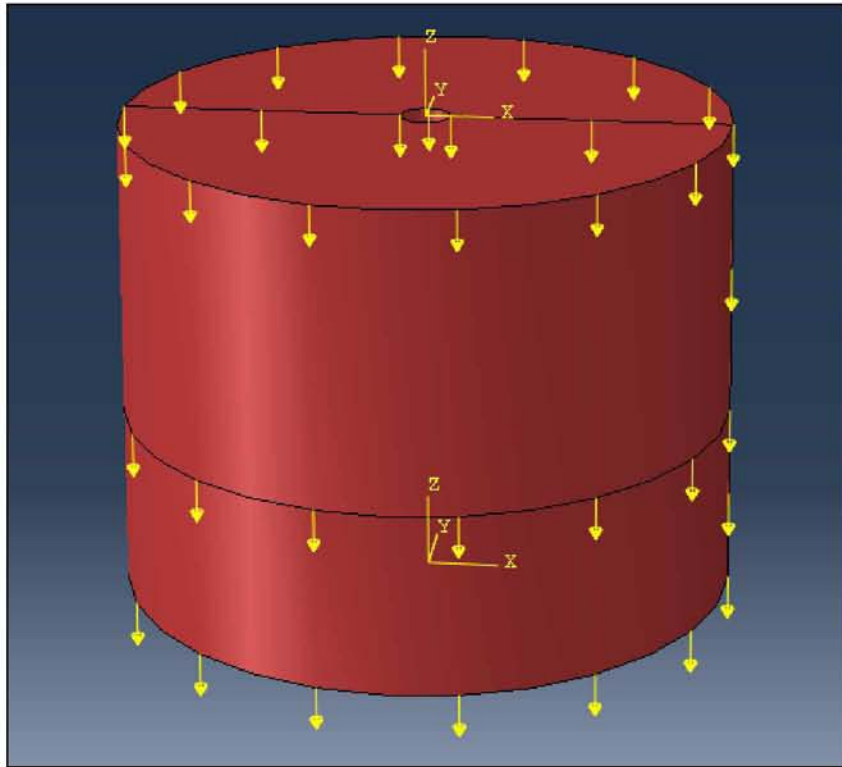
1. Ίδιο βάρος του αργιλικού κορεσμένου εδάφους
2. Βάρος υπερκείμενου νερού
3. Ίδιο βάρος της μονοπάσσαλης θεμελίωσης
4. Ίδιο βάρος του φορέα στήριξης
5. Ίδιο βάρος του πύργου
6. Βάρος του θαλάμου και του ρότορα
7. Φορτία ανέμου
8. Φορτία κύματος
9. Φόρτιση σεισμού

Πρέπει να σημειωθεί ότι, για τα φορτία ανέμου, δε λήφθηκε υπόψιν το φαινόμενο ‘shadow effect-blade shadow’, κατά το οποίο η περιστροφή των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας επηρεάζει τα φορτία που δέχεται ο πύργος. Συγκεκριμένα, όταν μια λεπίδα της ανεμογεννήτριας βρίσκεται μπροστά από τον πύργο, τότε τα φορτία του ανέμου που ασκούνται στην επιφάνεια του πύργου που καλύπτεται από τη λεπίδα είναι μειωμένα. Εφόσον πρόκειται για ένα ευμενές φαινόμενο, θα έπρεπε να χρησιμοποιηθεί μειωτικός συντελεστής στον υπολογισμό του φορτίου του ανέμου. Όμως, όπως ήδη αναφέρθηκε, στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, το φαινόμενο ‘shadow effect-blade shadow’ δε λήφθηκε υπόψιν, καθώς κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθεί η πιο δυσμενής περίπτωση (χωρίς τη χρήση μειωτικού συντελεστή).

7.7.1.1 Ίδια βάρη κατασκευής, νερού και εδάφους

- Ίδιο βάρος αργίλου

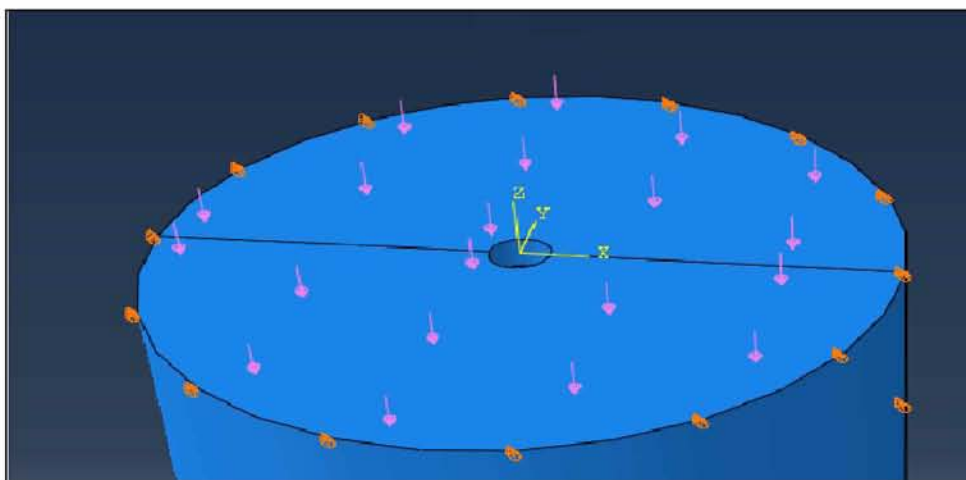
Στο πρώτο βήμα της ανάλυσης εφαρμόστηκε το ίδιο βάρος του εδάφους. Κατά την επιβολή του ιδίου βάρους, επιλέχθηκε όλο το έδαφος, στο οποίο δόθηκε ως πυκνότητα η τιμή 1800 kg/m^3 και εφαρμόστηκε σε αυτό ως φορτίο η επιτάχυνση της βαρύτητας (9.81 m/s^2). Η τιμή 9.81 m/s^2 δόθηκε στην κατακόρυφη διεύθυνση (Z) και με φορά προς τα κάτω. Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 7.7) παρουσιάζεται το μοντέλο του εδάφους, στο οποίο φαίνεται το φορτίο της βαρύτητας που ασκείται σε αυτό.



Σχήμα 7.7: Εφαρμογή του ίδιου βάρους του εδάφους.

- **Βάρος νερού**

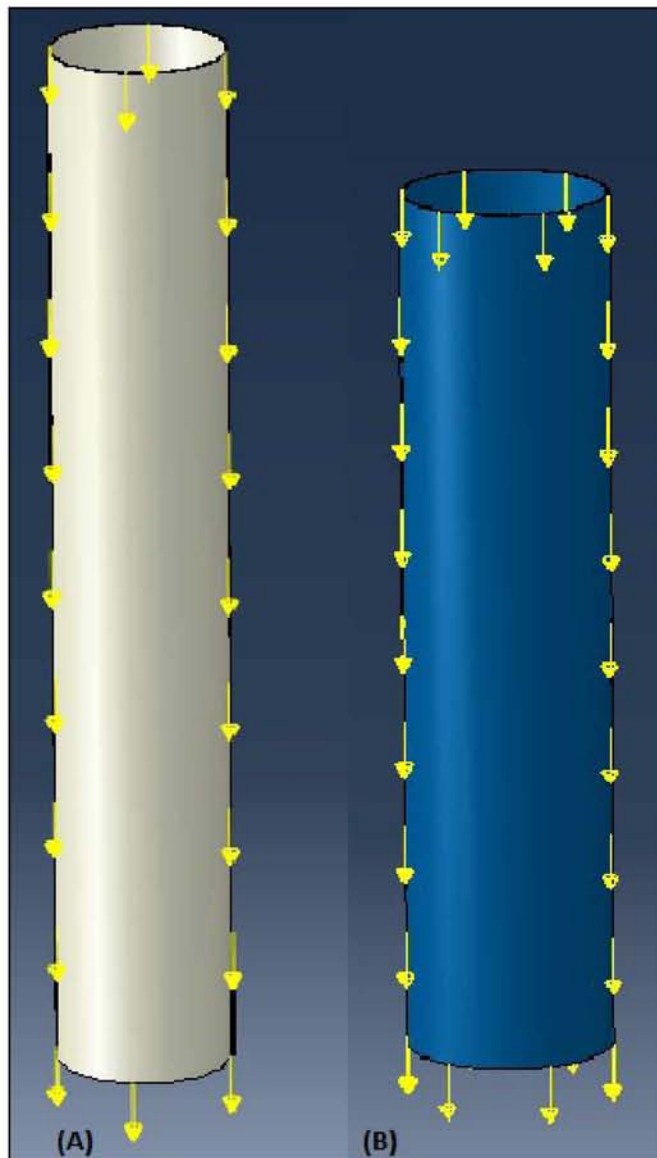
Στο ίδιο βήμα της ανάλυσης εφαρμόστηκε και το βάρος του νερού που βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του εδάφους (Σχήμα 7.8). Το βάρος του νερού εφαρμόστηκε σαν πίεση στην επιφάνεια του εδάφους, όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα. Η πίεση που ασκεί το νερό στο έδαφος υπολογίστηκε από τη σχέση: $\sigma_{vw} = \rho_w * g * h$, όπου $\rho_w=1025\text{kg/m}^3$ η πυκνότητα του θαλασσινού νερού και $h=25\text{ m}$ το ύψος του νερού.



Σχήμα 7.8: Βάρος νερού στην επιφάνεια του εδάφους.

- **Ίδιο βάρος μονοπάσσαλης θεμελίωσης και φορέα στήριξης**

Όσον αφορά το ίδιο βάρος του πασσάλου και του φορέα στήριξης, αυτό εφαρμόστηκε με τον ίδιο τρόπο που εφαρμόστηκε και το ίδιο βάρος του εδάφους, κατά το πρώτο βήμα της ανάλυσης. Η πυκνότητα των στοιχείων αυτών λήφθηκε ίση με 7850 kg/m^3 . Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 7.9) παρουσιάζεται το φορτίο βαρύτητας του πασσάλου και του φορέα στήριξης.

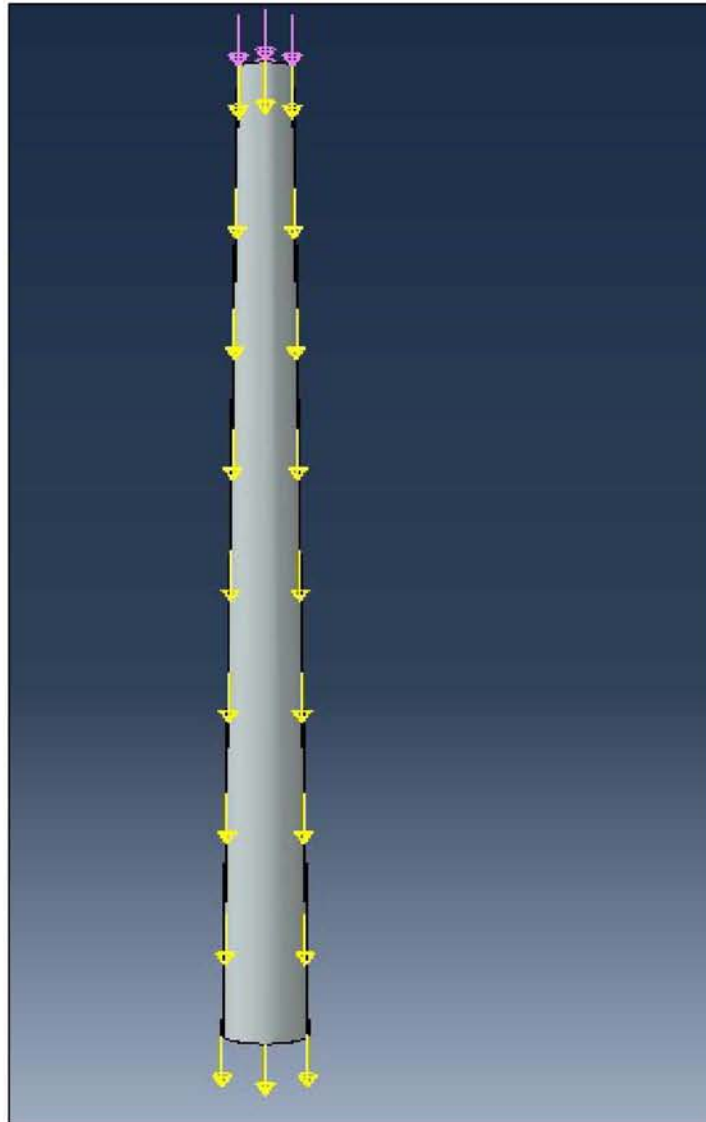


Σχήμα 7.9: Ίδιο βάρος (Α) πασσάλου και (Β) φορέα στήριξης.

- **Ίδιο βάρος πύργου, θαλάμου και ρότορα της ανεμογεννήτριας**

Το ίδιο βάρος του πύργου εφαρμόστηκε όπως και τα προηγούμενα, κατά το πρώτο βήμα της ανάλυσης. Εκτός από το ίδιο βάρος του πύργου, ο πύργος δέχεται και το βάρος του θαλάμου και του ρότορα που βρίσκονται στην κορυφή του (Σχήμα 7.10). Το βάρος του θαλάμου και

του ρότορα, αποτελεί μεγάλο ποσοστό του συνολικού βάρους που δέχεται η κατασκευή, συνεπώς κρίνεται αναγκαία η επιβολή του βάρους τους στην κορυφή του πυλώνα της ανεμογεννήτριας. Οι τιμές για τα βάρη του θαλάμου και του ρότορα λήφθηκαν, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, για τύπο ανεμογεννήτριας NREL 5 MW. Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.1, η μάζα του ρότορα ήταν 110 tn και η μάζα του θαλάμου 240 tn. Τα βάρη αυτά τοποθετήθηκαν ως κατανεμημένη δύναμη στην επιφάνεια που βρίσκεται στην κορυφή του πύργου. Συγκεκριμένα, τοποθετήθηκε κατανεμημένη δύναμη ίση με 4289190 N/m^2 . Τα βάρη που δέχεται ο πύργος φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 7.10: Βάρος θαλάμου και ρότορα στην κορυφή του πύργου.

7.7.1.2 Φορτία ανέμου

Μια από τις σημαντικότερες φορτίσεις που ασκούνται στις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες αποτελεί η φόρτιση του ανέμου. Ο άνεμος στην περίπτωση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών, ασκεί πιέσεις στον πύργο της ανεμογεννήτριας, ενώ παράλληλα είναι υπεύθυνος και για τη δημιουργία των ρευμάτων και των κυματισμών στη θάλασσα. Στην ενότητα αυτή θα μελετηθεί το φορτίου του ανέμου που ασκείται στον πύργο της

ανεμογεννήτριας. Για την εύρεση του φορτίου του ανέμου, χρησιμοποιήθηκε ο κανονισμός DNV-OS-J101.

Η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται μέσα στο χρόνο και με τη μεταβολή του ύψους. Συνεπώς, πρέπει να ορίζεται η μέση διάρκεια καταγραφής της ταχύτητας του ανέμου και το αντίστοιχο ύψος στο οποίο αναφέρεται. Ένα σύνηθες ύψος αναφοράς για τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου στη περίπτωση των θαλάσσιων ανεμογεννητριών είναι τα 10 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, ενώ οι πιο συνηθισμένες διάρκειες καταγραφής της ταχύτητας του ανέμου είναι το ένα λεπτό, τα δέκα λεπτά και η μία ώρα.

Οι συνθήκες πνοής του ανέμου που θεωρούνται για τον υπολογισμό των φορτίων που ασκούνται στην ανεμογεννήτρια, διακρίνονται στις κανονικές συνθήκες (normal wind conditions) και στις ακραίες συνθήκες (extreme wind conditions). Οι κανονικές συνθήκες ανέμου αφορούν γενικά επαναλαμβανόμενες συνθήκες φόρτισης της κατασκευής ενώ οι ακραίες συνθήκες ανέμου αναπαριστούν μη συνήθεις εξωτερικές συνθήκες φόρτισης. Οι κανονικές συνθήκες ανέμου χρησιμοποιούνται σαν βάση για τον καθορισμό των φορτίων κόπωσης της κατασκευής αλλά και των μέγιστων φορτίων σε συνθήκες λειτουργίας της κατασκευής. Οι ακραίες συνθήκες ανέμου επιβάλλουν ακραία φορτία στα μέλη της κατασκευής, στο φορέα και στη θεμελίωση της ανεμογεννήτριας.

Κανονικές συνθήκες ανέμου

Στη περίπτωση αυτή ο άνεμος αναπαριστάται από μια μέση ταχύτητα ανέμου κατά τη διάρκεια ενός τυπικού δεκαλέπτου (U_{10}) και την αντίστοιχη τυπική απόκλιση της ταχύτητας του ανέμου (σ_U). Σε μια περίοδο διάρκειας δέκα λεπτών ($T=10\text{min}$), θεωρείται ότι επικρατούν σταθερές συνθήκες ανέμου με μια σταθερή μέση ταχύτητα ανέμου (U_{10}) και μια σταθερή τυπική απόκλιση ταχύτητας ανέμου (σ_U). Η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται καθ' ύψος πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Συνήθως, η μέση ταχύτητα του ανέμου στο ύψος του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιείται σαν ταχύτητα αναφοράς

Ανάλογα με τις ταχύτητες του ανέμου που επικρατούν, ορίζονται κάποιες κατηγορίες συνθηκών ανέμου (DNV-OS-J101, 2007):

- Normal Wind Profile (NWP), το οποίο αναπαριστά μια μέση ταχύτητα του ανέμου ως συνάρτηση του ύψους πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Για θαλάσσιες περιοχές προτείνεται ο εκθέτης που αφορά την τραχύτητα του εδάφους να λαμβάνει τιμή ίση με $\alpha=0,14$.
- Normal Turbulence Model (NTM), το οποίο αναπαριστά ένα ταραχώδες προφίλ της ταχύτητας του ανέμου με μια χαρακτηριστική τυπική απόκλιση της ταχύτητας του ανέμου $\sigma_{U,c}$. Η χαρακτηριστική αυτή τυπική απόκλιση $\sigma_{U,c}$ ορίζεται ως το ποσοστμόριο 90% στη πιθανοτική κατανομή της τυπικής απόκλισης σ_U , με μέση ταχύτητα ανέμου κατά τη διάρκεια ενός τυπικού δεκαλέπτου στο ύψος του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας.
- Extreme Wind Speed Model (NTM), το οποίο αναπαριστά ακραίες συνθήκες ανέμου μιας συγκεκριμένης περιόδου επαναφοράς, συνήθως ένα ($T=1\text{ year}$) ή πενήντα ($T=50\text{ years}$) χρόνια. Προτείνεται η χρήση είτε ενός σταθερού προφίλ

ταχύτητας ανέμου είτε ενός παραχώδους προφίλ ταχύτητας ανέμου.

- Extreme Operating Gust (EOG)
- Extreme Turbulence Model (ETM)
- Extreme Direction Change (EDC)
- Extreme Coherent Gust with Direction Change (ECD)
- Extreme Wind Shear Model (EWS)
- Reduced Wind Speed Model (RWM)

Το προφίλ της ταχύτητας του ανέμου αντιπροσωπεύει τη μεταβολή της μέσης ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του ύψους πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και δίνεται από τον εξής τύπο:

$$U_{10,z} = U_{hub} * \left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^a \quad (7.2)$$

Όπου:

- $U_{10,z}$, η μέση ταχύτητα του ανέμου σε ύψος z πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, κατά τη διάρκεια ενός δεκαλέπτου
- U_{hub} η μέση ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια ενός δεκαλέπτου, στο ύψος που βρίσκεται ο δρομέας της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας
- Z το υψόμετρο πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας
- z_{hub} το ύψος του δρομέα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας
- a ο δυναμικός εκθέτης ο οποίος εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους.

Η πίεση του ανέμου ασκείται σε διεύθυνση κάθετη προς την εξεταζόμενη επιφάνεια, δηλαδή κάθετη στην επιφάνεια του κυλινδρικού πύργου της ανεμογεννήτριας και δίνεται από τον εξής τύπο:

$$P = 0.5 * \rho_a * U_{10,z}^2 \quad (7.3)$$

Όπου:

- $U_{10,z}$, η μέση ταχύτητα του ανέμου σε ύψος z πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, κατά τη διάρκεια ενός δεκαλέπτου
- ρ_a η πυκνότητα του ξηρού αέρα σε θερμοκρασία 15 °C και έχει τιμή 1.226 kg/m³

Στην υπό μελέτη κατασκευή, το ύψος του δρομέα είναι $z_{hub} = 87.6$ m και η μέση ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια ενός δεκαλέπτου, στο ύψος που βρίσκεται ο δρομέας είναι $U_{hub} = 25$ m/sec (Μπέντας, 2014).

Η ταχύτητα του ανέμου $U_{10,z}$, όταν ο άνεμος πρόκειται να εφαρμοσθεί ως στατικό φορτίο στον πύργο της ανεμογεννήτριας, είναι ανάγκη να πολλαπλασιασθεί με τον δυναμικό συντελεστή 1.4 έτσι ώστε να συμπεριληφθεί σε αυτή η δυναμική φύση του ανέμου.

Η πίεση του ανέμου δίνεται από την εξίσωση: $P = 0.5 * 1.226 * U_{10,z}^2$ (7.4)

Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται οι ταχύτητες και οι πιέσεις του ανέμου που ασκούνται στα διάφορα ύψη του πύργου της ανεμογεννήτριας.

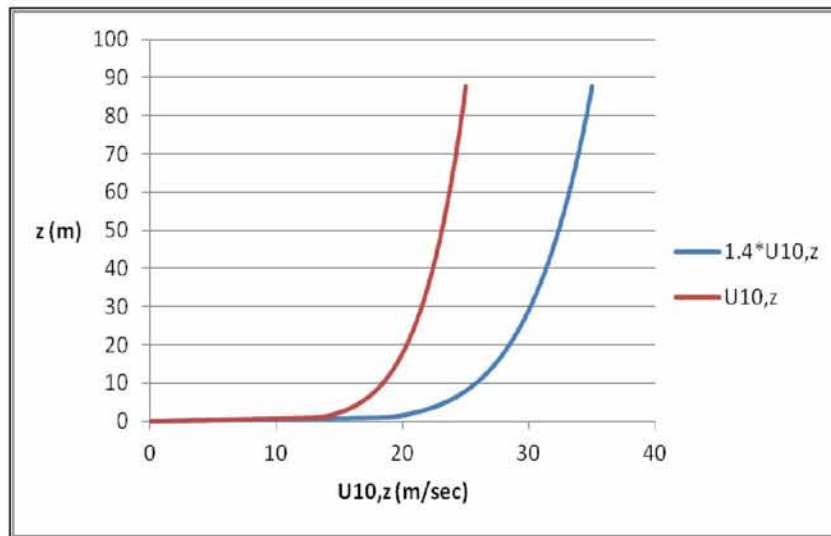
Πίνακας 7.1: Ταχύτητα και πίεση ανέμου στα διάφορα ύψη του πύργου της ανεμογεννήτριας.

z (m)	U _{10,z} (m/s)	U _{10,z'} =1.4*U _{10,z} (m/s)	P (Pa)
0	0.0	0.0	0.0
1	13.4	18.7	214.6
2	14.7	20.6	260.6
3	15.6	21.8	291.9
4	16.2	22.7	316.4
5	16.7	23.4	336.8
6	17.2	24.0	354.5
7	17.6	24.6	370.1
8	17.9	25.0	384.2
9	18.2	25.5	397.1
10	18.4	25.8	409.0
11	18.7	26.2	420.0
12	18.9	26.5	430.4
13	19.1	26.8	440.1
14	19.3	27.1	449.4
15	19.5	27.3	458.1
16	19.7	27.6	466.5
17	19.9	27.8	474.5
18	20.0	28.0	482.1
19	20.2	28.3	489.5
20	20.3	28.5	496.6
21	20.5	28.7	503.4
22	20.6	28.8	510.0
23	20.7	29.0	516.4
24	20.9	29.2	522.6
25	21.0	29.4	528.6
26	21.1	29.5	534.4
27	21.2	29.7	540.1
28	21.3	29.8	545.6
29	21.4	30.0	551.0
30	21.5	30.1	556.3
31	21.6	30.3	561.4
32	21.7	30.4	566.4
33	21.8	30.5	571.3
34	21.9	30.7	576.1
35	22.0	30.8	580.8
36	22.1	30.9	585.4
37	22.2	31.0	589.9
38	22.2	31.1	594.3
39	22.3	31.3	598.7
40	22.4	31.4	602.9

41	22.5	31.5	607.1
42	22.6	31.6	611.2
43	22.6	31.7	615.3
44	22.7	31.8	619.2
45	22.8	31.9	623.2
46	22.8	32.0	627.0
47	22.9	32.1	630.8
48	23.0	32.2	634.5
49	23.0	32.3	638.2
50	23.1	32.4	641.8
51	23.2	32.4	645.4
52	23.2	32.5	648.9
53	23.3	32.6	652.4
54	23.4	32.7	655.8
55	23.4	32.8	659.2
56	23.5	32.9	662.5
57	23.5	33.0	665.8
58	23.6	33.0	669.0
59	23.7	33.1	672.3
60	23.7	33.2	675.4
61	23.8	33.3	678.6
62	23.8	33.3	681.7
63	23.9	33.4	684.7
64	23.9	33.5	687.7
65	24.0	33.6	690.7
66	24.0	33.6	693.7
67	24.1	33.7	696.6
68	24.1	33.8	699.5
69	24.2	33.8	702.4
70	24.2	33.9	705.2
71	24.3	34.0	708.0
72	24.3	34.1	710.8
73	24.4	34.1	713.6
74	24.4	34.2	716.3
75	24.5	34.2	719.0
76	24.5	34.3	721.6
77	24.6	34.4	724.3
78	24.6	34.4	726.9
79	24.6	34.5	729.5
80	24.7	34.6	732.1
81	24.7	34.6	734.6
82	24.8	34.7	737.2
83	24.8	34.7	739.7
84	24.9	34.8	742.2
85	24.9	34.9	744.6
86	24.9	34.9	747.1
87	25.0	35.0	749.5
87.6	25.0	35.0	750.9

Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται η ταχύτητα του ανέμου σε συνάρτηση με το ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας. Η ταχύτητα του ανέμου $U_{10,z}$ όταν ο άνεμος πρόκειται να εφαρμοσθεί ως στατικό φορτίο στον πύργο της ανεμογεννήτριας, είναι ανάγκη να

πολλαπλασιασθεί με τον δυναμικό συντελεστή 1.4 έτσι ώστε να συμπεριληφθεί σε αυτή η δυναμική φύση του ανέμου. Συνεπώς, η τελική ταχύτητα του ανέμου αντιπροσωπεύεται από την μπλε καμπύλη του διαγράμματος (Σχήμα 7.11).



Σχήμα 7.11: Ταχύτητα ανέμου συνάρτησι του ύψους, για στατικό φορτίο (κόκκινη γραμμή) και για δυναμικό φορτίο (μπλε γραμμή).

Η δύναμη η οποία ασκείται στα τοιχώματα του πύργου της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F = C * S * P * \sin a \quad (7.5)$$

Όπου:

- C ο συντελεστής σχήματος, ο οποίος εξαρτάται από τον αριθμό Re, τη διάμετρο του πύργου και την τραχύτητα της επιφάνειας
- S το εμβαδόν της κάθετα προβαλλόμενης επιφάνειας στη διεύθυνση του ανέμου
- P η πίεση του ανέμου στα τοιχώματα του πύργου
- a η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης του ανέμου και της διεύθυνσης του πύργου της ανεμογεννήτριας

Στη συγκεκριμένη εργασία, θεωρήθηκε ότι ο άνεμος ασκείται κάθετα στον πύργο της ανεμογεννήτριας.

Ο συντελεστής σχήματος C είναι μεταβλητός και στη συγκεκριμένη περίπτωση δίνεται από την εξίσωση:

$$C = 1.2 + 0.18 * \frac{\log(\frac{10k}{D})}{1 + 0.4 \log(\frac{Re}{10^6})} \quad (7.6)$$

Όπου, ο συντελεστής k ορίζεται ως η τραχύτητα της επιφάνειας. Η τιμή της επιφανειακής τραχύτητας ποικίλει ανάλογα με το είδος του υλικού της κατασκευής. Ο συντελεστής k λοιπόν, λαμβάνει τις εξής τιμές:

- Για χάλυβα χωρίς επίστρωση ή βαμμένο χάλυβα, το $k=10^{-5}$

- Για υψηλά διαβρωμένο χάλυβα, το k λαμβάνεται ίσο με 0.003 m
- Για την περίπτωση ανάπτυξης θαλάσσιας ζώης, το k κυμαίνεται από 0.005 έως 0.05 m

Επειδή ο πύργος της ανεμογεννήτριας βρίσκεται πάνω από τη θαλάσσια επιφάνεια, η τιμή της τραχύτητας αλλάζει και είναι: $k=10^{-5}$.

Επίσης, ο αριθμός Reynolds υπολογίζεται από τον τύπο: $Re=\frac{u_{max}*D}{\nu}$. Η κινηματική συνεκτικότητα του αέρα είναι ίση με $\nu = 1.45 * 10^{-5}m^2/sec$.

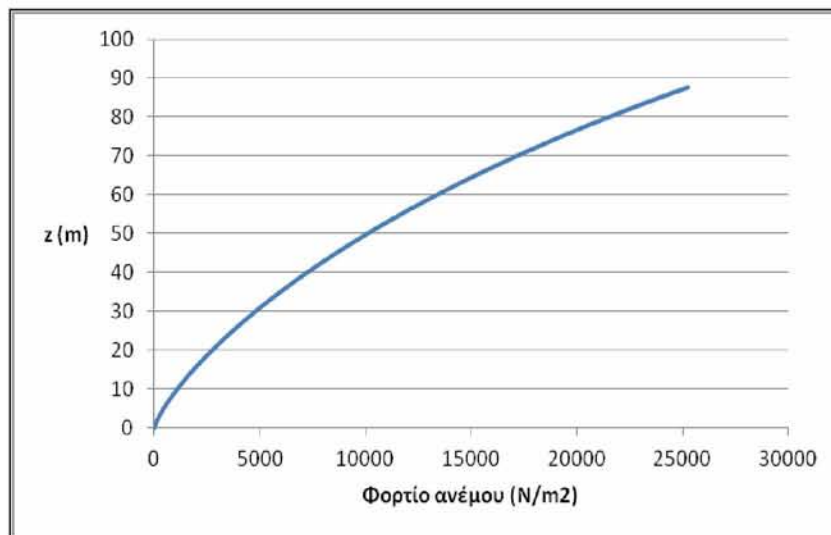
Το εμβαδόν της κάθετα προβαλλόμενης επιφάνειας στη διεύθυνση του ανέμου (S) είναι:

$$S(z) = b + \frac{(z - h)(b - a)}{(h - 5)} \quad (7.7)$$

Όπου:

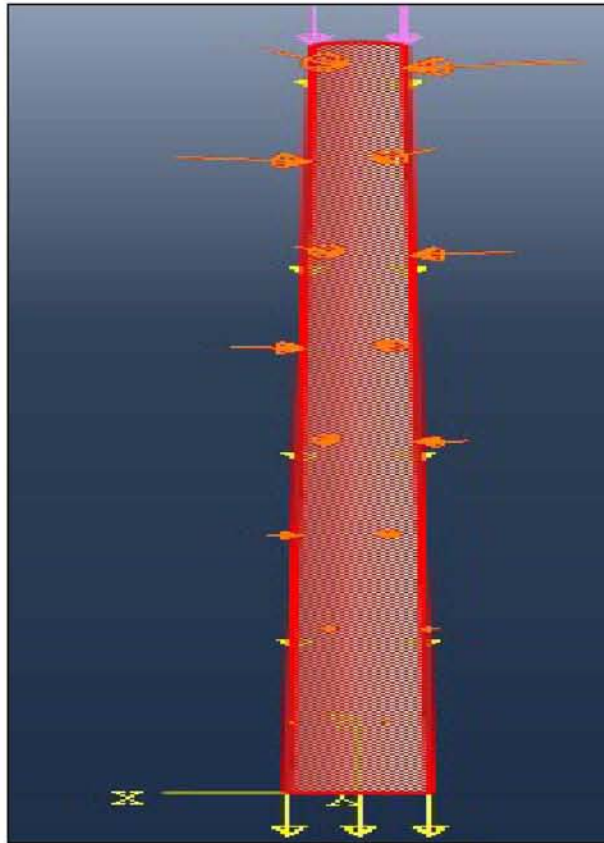
- b η διάμετρος του πύργου της ανεμογεννήτριας στο επίπεδο του ύψους του ρότορα
- a η διάμετρος του πύργου της ανεμογεννήτριας στο επίπεδο της βάσης του πύργου
- h το ύψος του πύργου της ανεμογεννήτριας, από την κορυφή του φορέα στήριξης έως και το επίπεδο του ρότορα
- z το ύψος πάνω από το επίπεδο της βάσης του πύργου

Στο ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 7.12), παρουσιάζεται η δύναμη του ανέμου σε συνάρτηση με το ύψος. Συγκεκριμένα, το φορτίο του ανέμου ασκείται σαν οριζόντια επιφανειακή δύναμη στον πύργο της ανεμογεννήτριας και μεταβάλλεται με τη μεταβολή του ύψους z .



Σχήμα 7.12: Κατανομή ανέμου συναρτήσει του ύψους του πύργου.

Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 7.13) παρουσιάζεται η φόρτιση του ανέμου στον πύργο της ανεμογεννήτριας. Η επιβολή του φορτίου του ανέμου ασκείται στο μισό πύργο, θεωρώντας ότι ο άνεμος προέρχεται από εκείνη την κατεύθυνση.



Σχήμα 7.13: Φορτίο ανέμου στον πύργο της ανεμογεννήτριας.

7.7.1.3 Φορτία ανεμογενών κυματισμών

Μια από τις σημαντικότερες φορτίσεις στις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες αποτελεί ο κυματισμός. Τα κυριότερα αίτια γένεσης των κυματισμών είναι ο άνεμος, που δημιουργεί τους ανεμογενείς κυματισμούς, ο σεισμός που δημιουργεί τα τσουνάμι, οι γρήγορες μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης που προκαλούν τα seiches και η έλξη της σελήνης που δημιουργεί την παλίρροια.

Οι ανεμογενείς κυματισμοί αποτελούν την πιο συνηθισμένη κατηγορία κυματισμού στη φύση. Η γένεση, η διάδοση και η αλληλεπίδραση των κυματισμών αυτών καθιστούν δύσκολη την περιγραφή τους. Η προσομοίωση των ανεμογενών κυματισμών πραγματοποιείται με τη χρήση μεθόδων στατιστικής.

Η ενέργεια του ανέμου που πνέει πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας μεταφέρεται στο νερό της θάλασσας και μετατρέπεται σε επιφανειακό ρεύμα ή σε βαρυντικό κυματισμό. Το ρεύμα δημιουργείται από τη διάτμηση που ασκεί ο άνεμος στην ελεύθερη επιφάνεια του νερού, ενώ ο κυματισμός από τις διακυμάνσεις του πεδίου της πίεσης που ασκεί ο άνεμος στην ελεύθερη επιφάνεια.

Για το σχεδιασμό των παράκτιων και υπεράκτιων έργων είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός του κύματος σχεδιασμού, μέσω της ανάλυση κυματικών καταγραφών. Οι κυματικές καταγραφές είναι σημειακές μετρήσεις της χρονικής μεταβολής της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για ένα χρονικό διάστημα αρκετών λεπτών. Η ανάλυση των καταγραφών κύματος πραγματοποιείται με τις εξής μεθόδους:

- Στατιστική ανάλυση της κυματικής καταγραφής απευθείας στο πεδίο του χρόνου
- Φασματική ανάλυση της καταγραφής κύματος στο πεδίο των συχνοτήτων

Η ανάλυση της κυματικής καταγραφής έχει ως στόχο την εύρεση κάποιων βασικών παραμέτρων για το κύμα, όπως το χαρακτηριστικό ύψος κύματος H_s , τη χαρακτηριστική περίοδος T_s και το μήκος κύματος λ . Το χαρακτηριστικό ύψος κύματος ορίζεται συνήθως ίσο με το ύψος H_{33} , το οποίο ισούται με τη μέση τιμή από το 1/3 των μεγαλύτερων τιμών της κυματικής καταγραφής. Με τον ίδιο τρόπο ορίζεται και η χαρακτηριστική περίοδος για το κύμα.

Το χαρακτηριστικό ύψος H_s , η χαρακτηριστική περίοδος T_s και το φάσμα του κυματισμού εξαρτώνται από:

- Την ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10 m από την επιφάνεια της θάλασσας (W)
- Το μήκος αναπτύγματος του κυματισμού (F)
- Τη διάρκεια πνοής του ανέμου (t_d)

Για την εύρεση των χαρακτηριστικών του κυματισμού χρησιμοποιούνται κατά κόρον δύο μεθοδολογίες, οι οποίες βασίζονται σε εμπειρικές σχέσεις για τον καθορισμό των σχέσεων μεταξύ των αδιάστατων παραμέτρων και είναι οι εξής:

- Μεθοδολογία πρόβλεψης SMB
- Μεθοδολογία πρόβλεψης SPM-JONSWAP

Στην παρούσα εργασία επιλέγεται η μεθοδολογία πρόβλεψης SMB.

Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα για τον κυματισμό από τη βιβλιογραφία (Μπέντας, 2014).

Συγκεκριμένα, λήφθηκαν από την παραπάνω εργασία οι εξής παράμετροι του κυματισμού:

- Ταχύτητα ανέμου σε ύψος 10 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας:
 $W=18$ m/sec
- Μήκος αναπτύγματος του κυματισμού: $F=200.000$ m
- Διάρκεια πνοής του ανέμου: $t_D=100$ hrs
- Βάθος πυθμένα $d=25$ m

Μέσω της μεθοδολογίας SMB πραγματοποιήθηκε η πρόβλεψη των παραμέτρων του χαρακτηριστικού κύματος, οι οποίες είναι:

- $H_s=3.93$ m
- $T_s=8.18$ sec

Στη συνέχεια, υπολογίσθηκαν από τον Μπέντας (2014), τα χαρακτηριστικά του κυματισμού, όταν αυτός έρχεται σε επαφή με τον πύργο της ανεμογεννήτριας και τα οποία είναι τα εξής:

- Βάθος πυθμένα $d=25$ m
- Μήκος κύματος $L=95.33$ m
- $H_s=4.21$ m

- $T_s=8.18 \text{ sec}$

Υπολογισμός υδροδυναμικών φορτίων που ασκούνται στον πύργο της ανεμογεννήτριας

Σύμφωνα με τον κανονισμό DNV-OS-J101, σε κατασκευές όπως η μονοπάσσαλη ανεμογεννήτρια, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση του Morison για τον υπολογισμό των φορτίων των κυμάτων.

Η οριζόντια δύναμη που ασκείται σε έναν κατακόρυφο κύλινδρο, ύψους dz , στο επίπεδο z είναι:

$$dF = dF_M + dF_D = 0.25C_M\rho D^2 u dz + 0.50C_D\rho D u^2 dz \quad (7.8)$$

Ο πρώτος όρος της εξίσωσης αναφέρεται στην 'inertia' δύναμη (αδραμειακή) ενώ ο δεύτερος στην 'drag' (συρτική). Το βάθος z μετριέται από το επίπεδο 'still water'.

Όπου:

- ρ η πυκνότητα του θαλασσινού νερού
- D η διάμετρος του πύργου της ανεμογεννήτριας
- u η οριζόντια ταχύτητα των ρευστών σωματιδίων
- C_M και C_D οι συντελεστές των δύο δυνάμεων που προαναφέρθηκαν

Οι συντελεστές C_M και C_D εξαρτώνται από τον αριθμό Reynolds, από τον αριθμό Keulegan-Carpenter και από τη σχετική σκληρότητα.

Ο αριθμός Reynolds υπολογίζεται από τον τύπο: $Re = \frac{u_{max} D}{\nu}$ (7.9)

Ο αριθμός Keulegan-Carpenter υπολογίζεται από τον τύπο: $KC = \frac{u_{max} T_i}{D}$ (7.10)

Όπου:

- u_{max} η μέγιστη οριζόντια ταχύτητα των ρευστών σωματιδίων στο επίπεδο της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας
- T_i η περίοδος του προσπίπτοντος κύματος

Για τον κυματισμό, στην παρούσα εργασία, θεωρείται απλοποιητικά πως η οριζόντια ταχύτητα του κυματισμού παραμένει σταθερή με το πέρασμα του χρόνου αλλά μεταβάλλεται με το βάθος. Δηλαδή, ο κυματισμός επιβάλλεται σαν στατικό φορτίο. Επίσης, απλοποιητικά επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η θεωρία του κύματος Airy.

Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, η οριζόντια ταχύτητα και η επιτάχυνση των σωματιδίων ρευστού δίνονται από τους εξής τύπους:

$$u = \frac{a * \omega * \cosh k(y + d)}{\sinh(kd)} * \sin(\omega t - kx) \quad (7.11)$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{a * \omega^2 * \cosh(kz) * \cos(\omega t - kx)}{\sinh(kd)} \quad (7.12)$$

Αρχικά, υπολογίζεται το k από την εξίσωση:

$\omega^2 = 9,81 * k * \tanh(kd)$, καθώς είναι γνωστά το βάθος του πυθμένα και η γωνιακή συχνότητα. Το k είναι ίσο με 0.065.

Η οριζόντια ταχύτητα των σωματιδίων λοιπόν εκφράζεται ως εξής:

$$U = 0.6624 * \cosh(0.065z) * \sin \Phi \quad (7.13)$$

Η μέγιστη ταχύτητα θεωρείται απλοποιητικά ότι εμφανίζεται στην ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας και είναι ίση με 1.747 m/s.

Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι συνιστώσες της εξίσωσης Morison και υπολογίζεται η γωνία του κύματος στην οποία εμφανίζονται η μέγιστη δύναμη Morison.

Οπισθέλκουσα Δύναμη (1^η συνιστώσα):

$$F_D = 0.5 * C_D * D * \rho * \int_0^d u^2 dz = 0.5 * C_D * 6 * 1025 * \int_0^{25} u^2 \quad (7.14)$$

Αδρανειακή Δύναμη (2^η συνιστώσα):

$$F_I = 0.25 * \pi * C_M * D^2 * \rho * \int_0^d \frac{du}{dt} dz \quad (7.15)$$

Επομένως, η συνολική δύναμη Morison ισούται με:

$$F = F_D + F_I = 0.5 * C_D * 6 * 1025 * \int_0^{25} u^2 dz + 0.25 * \pi * C_M * D^2 * \rho * \int_0^d \frac{du}{dt} dz \quad (7.16)$$

Για τον υπολογισμό του συντελεστή C_D είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του συντελεστή C_{DS} για μόνιμη ροή καθώς ο συντελεστής C_D υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$C_D = C_{DS} * \psi(C_{DS}, KC) \quad (7.17)$$

Ο συντελεστής αυτός υπολογίζεται ως εξής:

$$C_{DS} = \begin{cases} 0.65 & \text{for } \frac{k}{D} < 10^{-4} \text{ (smooth)} \end{cases} \quad (7.18)$$

$$C_{DS} = \begin{cases} \frac{29+4*\log_{10}(\frac{k}{D})}{20} & \text{for } 10^{-4} < \frac{k}{D} < 10^{-2} \end{cases} \quad (7.19)$$

$$C_{DS} = \begin{cases} 1.05 & \text{for } \frac{k}{D} > 10^{-2} \text{ (rough)} \end{cases} \quad (7.20)$$

Όπου k η τραχύτητα της επιφάνειας. Η τιμή της επιφανειακής τραχύτητας ποικίλει ανάλογα με το είδος του υλικού της κατασκευής.

Ο συντελεστής k λοιπόν, λαμβάνει τις εξής τιμές:

- Για χάλυβα χωρίς επίστρωση ή βαμμένο χάλυβα, το $k=10^{-5}$
- Για υψηλά διαβρωμένο χάλυβα, το k λαμβάνεται ίσο με 0.003 m
- Για την περίπτωση ανάπτυξης θαλάσσιας ζώης, το k κυμαίνεται από 0.005 έως 0.05 m

Ο συντελεστής k ανήκει στην 3^η κατηγορία, συνεπώς λαμβάνεται ίσος με 0.05. Ο λόγος k/D είναι ίσος με 0.0083, δηλαδή $10^{-4} < k/D < 10^{-2}$ και άρα ο συντελεστής C_{DS} υπολογίζεται από

$$\text{την εξίσωση: } C_{DS} = \frac{29+4\log(\frac{k}{D})}{20} = 1.034. \quad (7.21)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο συντελεστής ψ . Ο συντελεστής ψ βρίσκεται από το παρακάτω διάγραμμα, ανάλογα με τον λόγο KC/C_{DS} . Η διακεκομμένη καμπύλη του διαγράμματος αφορά την τραχειά (rough) ενώ η συνεχής καμπύλη τη λεία (smooth). Επειδή στην προκειμένη περίπτωση βρισκόμαστε στην κατηγορία της ενδιάμεσης τραχύτητας, ο συντελεστής ψ μπορεί να υπολογιστεί με γραμμική παρεμβολή μεταξύ της καμπύλης που αντιστοιχεί σε λείες και της καμπύλης που αντιστοιχεί σε τραχειές επιφάνειες (Σχήμα 7.14).

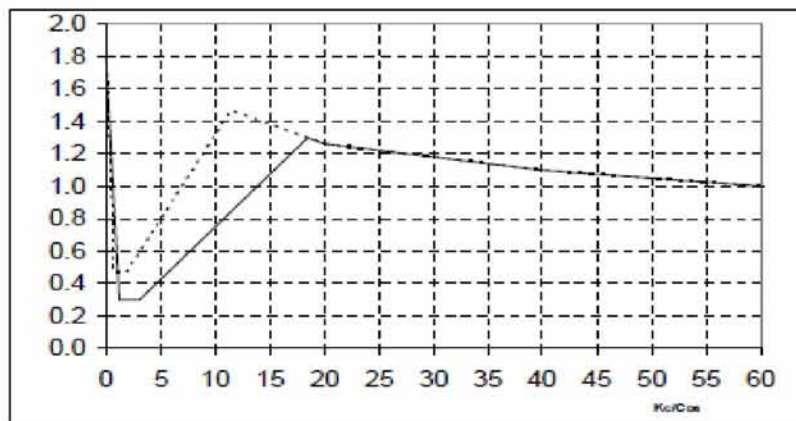
$$\text{Ο συντελεστής } KC \text{ είναι: } KC = \frac{U_{max} \cdot T}{D} \quad (7.22)$$

Για $KC/C_{DS}=1.69$ και με γραμμική παρεμβολή στο παρακάτω διάγραμμα, προκύπτει ότι $\psi=0.4$.

$$\text{Άρα, } C_D = 1.034 * 0.4 = 0.41. \quad (7.23)$$

Επίσης, σύμφωνα με τον κανονισμό DNV-OS-J101, εάν $KC < 3$ τότε $C_M=2$ και εάν $KC > 3$ τότε $C_M = \max \{2-0.044(KC-3); 1.6-(C_{DS}-0.65)\}$. Επομένως, ο συντελεστής $C_M=2$.

Έχοντας υπολογίσει τους συντελεστές C_M και C_D , η εξίσωση του Morison λαμβάνει την εξής μορφή: $F = F_D + F_I = 37232,115 * \sin^2 \Phi + 1107080,608 * \cos \Phi$ (7.24)



Σχήμα 7.14: Νομογράφημα για την εύρεση του συντελεστή ψ (DNV-OS-J101, 2007).

Για την εύρεση της μέγιστης δύναμης Morison, παραγωγίζεται η δύναμη ως προς τη φάση Φ . Δηλαδή:

$$\frac{\partial F}{\partial \Phi} = 0 \Rightarrow \sin \Phi (74464,23 * \cos \Phi - 1107080,608) = 0 \quad (7.25)$$

Η παραπάνω εξίσωση έχει δύο ρίζες:

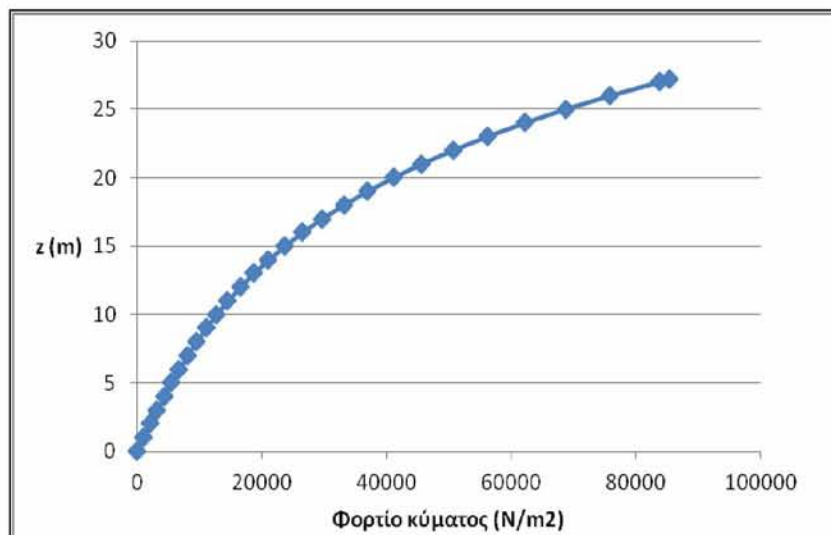
1^η ρίζα: $\sin \Phi = 0 \Rightarrow \Phi = 0^\circ$

2^η ρίζα: Απορρίπτεται καθώς το $\cos \Phi$ έχει τιμή μεγαλύτερη της μονάδας.

Συνεπώς, η φάση για την οποία εμφανίζεται η μέγιστη δύναμη Morison είναι οι 0° και η δύναμη Morison λαμβάνει την τελική της μορφή, η οποία είναι η εξής:

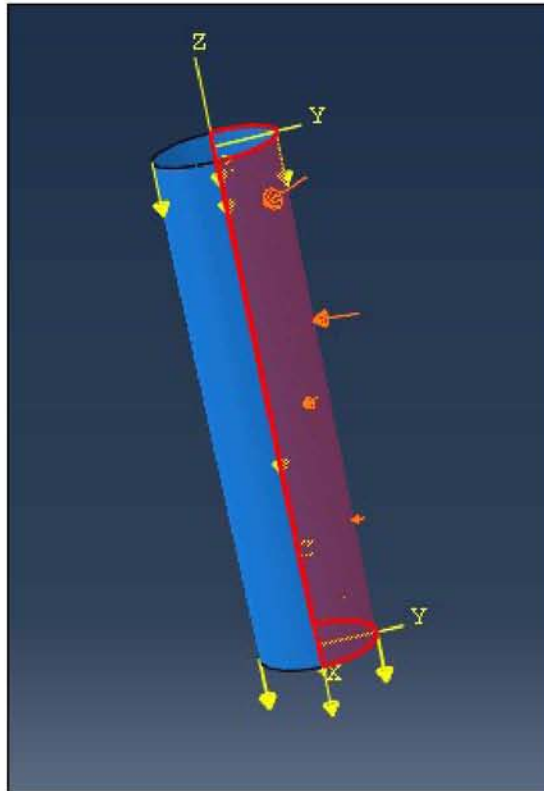
$$F_M = 29480.508 * \cosh(0.065z) \quad (7.26)$$

Στο ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 7.15), παρουσιάζεται η δύναμη του κύματος που ασκείται στο φορέα στήριξης σε συνάρτηση με το ύψος. Συγκεκριμένα, το φορτίο του κύματος ασκείται σαν οριζόντια επιφανειακή δύναμη και μεταβάλλεται με τη μεταβολή του ύψους z.



Σχήμα 7.15: Κατανομή φορτίου κύματος συναρτήσει του ύψους του φορέα στήριξης.

Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 7.16) παρουσιάζεται η κατανομή του φορτίου λόγω κύματος στο μισό τμήμα του φορέα στήριξης.



Σχήμα 7.16: Φορτίο κύματος στο φορέα στήριξης της ανεμογεννήτριας.

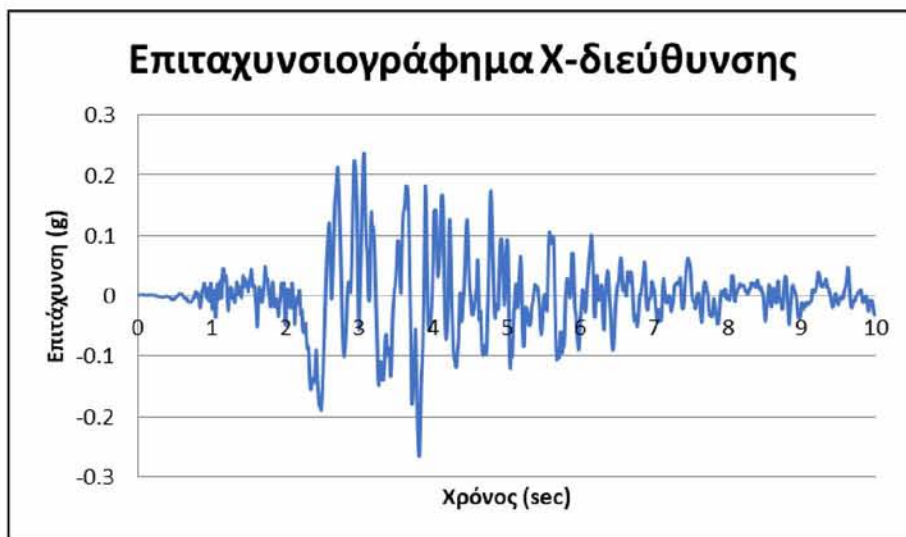
7.7.1.4 Φόρτιση σεισμού

Υπάρχουν λιγότερες λεπτομερείς οδηγίες σχετικά με το σχεδιασμό σεισμού των ανεμογεννητριών σε σύγκριση με τα κτίρια και τις περισσότερες άλλες κατασκευές. Η πλειοψηφία των διαθέσιμων κατευθυντήριων γραμμών και κωδίκων βασίζεται σε εκείνες για τα κτίρια, επομένως, χρησιμοποιούν σεισμούς με περίοδο επιστροφής 475 ετών (Καυρία, 2017). Αυτή η επιλογή περιόδου έχει το πλεονέκτημα που επιτρέπει τη χρήση δεδομένων σεισμικού κινδύνου που παρέχονται στους τοπικούς οικοδομικούς κώδικες.

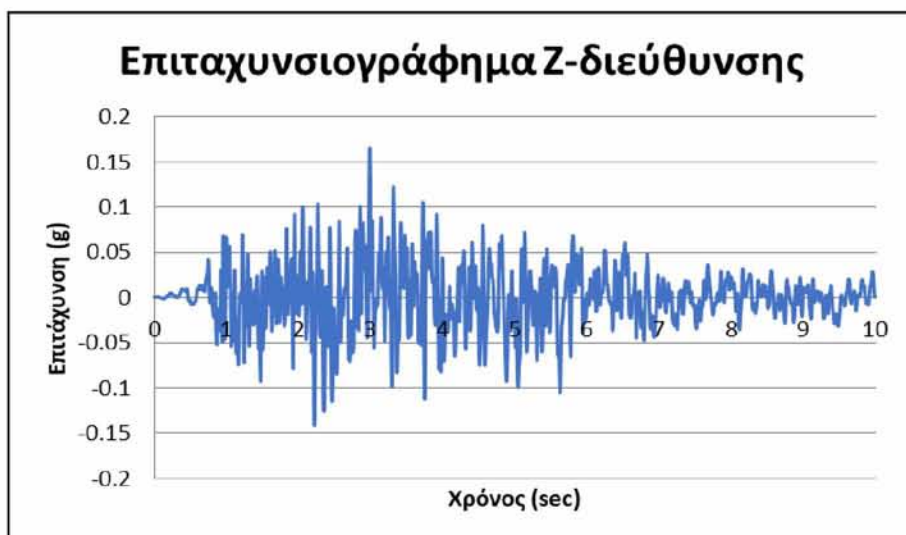
Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία θα μελετηθεί, για απλοποιητικούς λόγους, η περίπτωση της σεισμικής διέγερσης σε μια από τις δύο οριζόντιες διευθύνσεις (διεύθυνση X) αλλά και στην κατακόρυφη διεύθυνση (διεύθυνση Z). Στην περίπτωση του σεισμού στην οριζόντια διεύθυνση, η πρόκληση είναι ο υπολογισμός της μη γραμμικής απόκρισης του εδάφους και η πιθανή κλίση του πύργου, ενώ στην περίπτωση του σεισμού στην κατακόρυφη διεύθυνση, το βασικό ζήτημα είναι η πιθανώς μεγάλη ενίσχυση σεισμικών κινήσεων.

Η εισαγωγή του φορτίου του σεισμού πραγματοποιείται με την εισαγωγή σεισμικής επιτάχυνσης στη βάση του υπεδάφους στις δύο διευθύνσεις. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν τα επιταχυνσιογραφήματα του σεισμού της Κεφαλονιάς, ο οποίος συνέβη στις 02/03/2014, έχοντας επίκεντρο τα 14.88 km και ένταση $M=6.1$. Η περίοδος επαναφοράς, με βάση και τα παραπάνω, λήφθηκε ίση με 475 έτη. Επίσης, λόγω του υπερβολικά υψηλού χρόνου ανάλυσης που απαιτείται για την προσομοίωση της συνολικής διάρκειας της

σεισμικής διέγερσης, επιλέχθηκε χάριν απλοποίησης να εισαχθεί στο πρόγραμμα Abaqus ένα μέρος του σεισμού. Συγκεκριμένα, εισήχθη το κομμάτι της σεισμικής διέγερσης από τη χρονική στιγμή 23.01 s έως τα 33 s, καθώς εντός αυτού του χρονικού διαστήματος παρουσιάστηκε η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (peak ground acceleration/pga). Εφόσον λήφθηκαν μόνο τα 10 s του σεισμού, ήταν αναγκαίο να πραγματοποιηθεί διόρθωση των τιμών του επιταχυνσιογραφήματος, προκειμένου να ληφθούν αξιόπιστες τιμές ταχύτητας και μετατόπισης. Η διόρθωση του επιταχυνσιογραφήματος και το φιλτράρισμα των τιμών πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του προγράμματος SeismoSignal. Στα σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 7.17 & 7.18) παρατίθενται τα επιταχυνσιογραφήματα των 10 s και για τις 2 διευθύνσεις επιβολής του σεισμού της Κεφαλονιάς, μετά από τη διόρθωση.

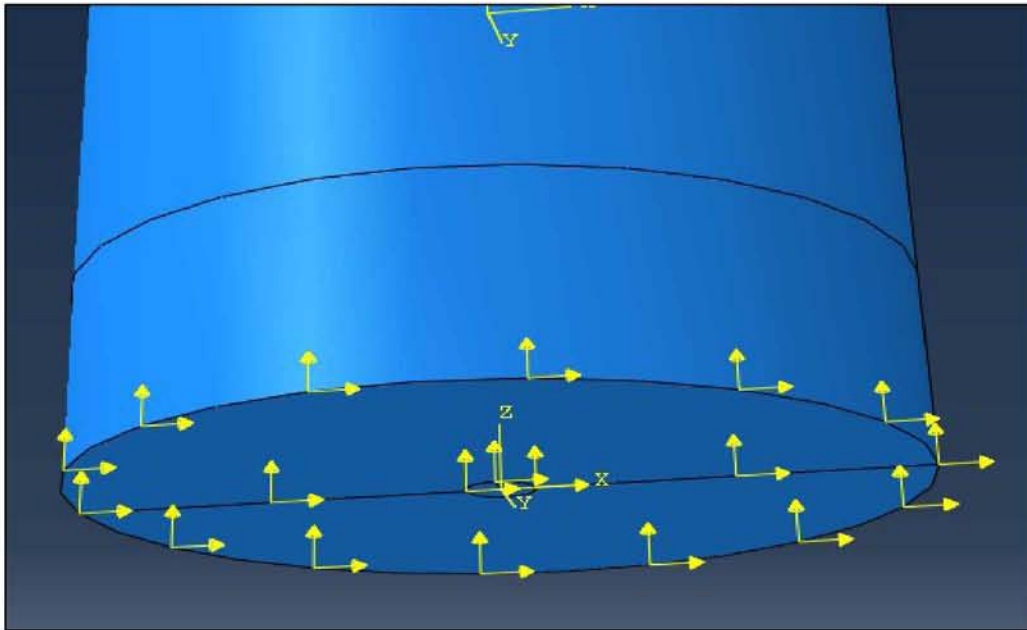


Σχήμα 7.17: Διορθωμένο επιταχυνσιογράφημα στην οριζόντια διεύθυνση (X διεύθυνση).



Σχήμα 7.18: Διορθωμένο επιταχυνσιογράφημα στην κατακόρυφη διεύθυνση (Z διεύθυνση).

Η εισαγωγή των σεισμικών επιταχύνσεων στο πρόγραμμα πραγματοποιήθηκε με τη μορφή συνοριακών συνθηκών. Τα παραπάνω επιταχυνσιογραφήματα εισήχθησαν στο πρόγραμμα με τη μορφή πινάκων, πολλαπλασιάστηκαν στην κάθε διεύθυνση με την επιτάχυνση 9.81 m/s^2 και εφαρμόστηκαν στη βάση του εδάφους. Στο σχήμα (Σχήμα 7.19) που ακολουθεί απεικονίζονται οι φορτίσεις λόγω σεισμού στη X και στη Z διεύθυνση.



Σχήμα 7.19: Επιβολή σεισμικής φόρτισης στη βάση του εδάφους (X και Z διεύθυνση).

Απόσβεση υλικού

Στη δυναμική ανάλυση των κατασκευών και των θεμελιώσεων η απόσβεση παίζει σημαντικό ρόλο. Ένας συνήθης τρόπος για την εύρεση της απόσβεσης του υλικού είναι η αντιμετώπιση της τιμής απόσβεσης ως ισοδύναμης απόσβεσης Rayleigh με τη μορφή (Chowdhury et. al, 2003):

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (7.27)$$

Όπου:

- [C] το μητρώο απόσβεσης του φυσικού συστήματος
- [M] το μητρώο μάζας του φυσικού συστήματος
- [K] το μητρώο δυσκαμψίας του συστήματος
- α ο συντελεστής αναλογικής απόσβεσης του μητρώου μάζας
- β ο συντελεστής αναλογικής απόσβεσης του μητρώου δυσκαμψίας

Το κύριο πλεονέκτημα που αποκτήθηκε στη μετατροπή της μήτρας απόσβεσης σε ισοδύναμη απόσβεση Rayleigh έγκειται στο γεγονός ότι χρησιμοποιώντας ορθογώνιο μετασχηματισμό μια κατασκευή που έχει n βαθμούς ελευθερίας μπορεί να μειωθεί σε n -αριθμό μη συζευγμένων εξισώσεων. Ωστόσο, για συστήματα με πολλούς βαθμούς ελευθερίας, είναι δύσκολο να βρεθούν σημαντικές τιμές α και β στην αρχή της ανάλυσης.

Οι συντελεστές Rayleigh α και β υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις χρησιμοποιώντας δύο γνωστές ιδιοσυχνότητες από τη δυναμική ανάλυση (ω_1, ω_2):

$$\alpha = 2\xi \frac{\omega_1 * \omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \quad (7.28)$$

$$\beta = 2\xi \frac{1}{\omega_1 + \omega_2} \quad (7.29)$$

Στην πλειονότητα των πρακτικών αναλύσεων, ο αναλυτής κάνει απλουστευτικές υποθέσεις κατά την επιλογή λόγων απόσβεσης βάσει της εμπειρίας του ή της τυποποιημένης βιβλιογραφίας που ισχύει για το συνολικό σύστημα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία λήφθηκε ο λόγος απόσβεσης για το έδαφος ίσος με 5 % και για τα χαλύβδινα μέλη ίσος με 1%. Συνεπώς, εάν υπολογισθούν και οι ιδιοσυχνότητες από τη δυναμική ανάλυση θα είναι δυνατόν να υπολογισθούν οι συντελεστές α και β . Γι' αυτό το λόγο, πραγματοποιήθηκε, στο πρόγραμμα, δυναμική ανάλυση ιδιομορφών και ιδιοσυχνοτήτων. Από την ανάλυση, με γνώμονα τη συγκέντρωση της μάζας, σαν πρώτη ιδιοσυχνότητα επιλέχθηκε η τρίτη κατά σειρά τιμή, σε όλες τις περιπτώσεις αργίλων. Για την άργιλο 1 η πρώτη ιδιοσυχνότητα λήφθηκε ίση με $f_1=0.5594$ Hz, για την άργιλο 2 $f_1=0.7402$ Hz, ενώ για την άργιλο 3 $f_1=0.8848$ Hz. Σαν δεύτερη ιδιοσυχνότητα, επειδή η περιοχή ενδιαφέροντος ενός σεισμού είναι από 0.5 Hz έως 8 με 10 Hz και προκειμένου να καλυφθεί ένα ευρύ φάσμα τιμών, λήφθηκε για όλες τις περιπτώσεις η ιδιοσυχνότητα $f_2=8$ Hz.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι συντελεστές α και β για όλες τις περιπτώσεις αργίλου, τόσο για το έδαφος όσο και για τον χάλυβα.

Πίνακας 7.2: Τιμές των συντελεστών α και β για όλες τις περιπτώσεις αργίλων.

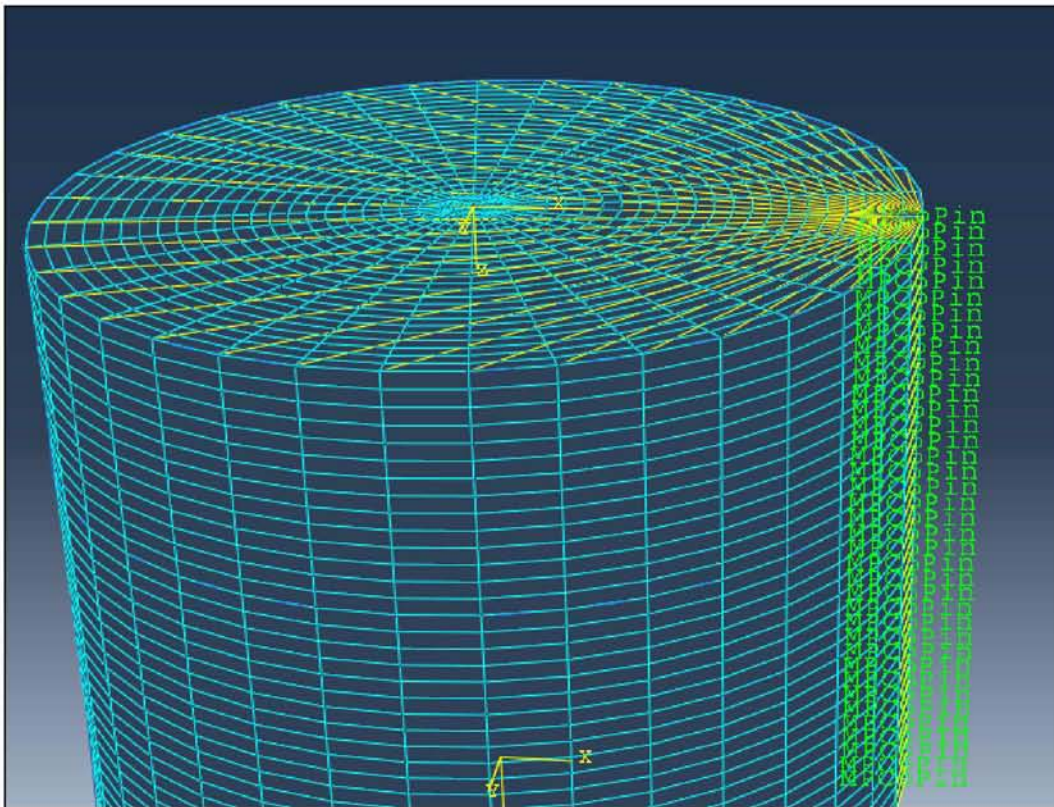
	ω_1 (rad/sec)	ω_2 (rad/sec)	Έδαφος ($\xi=5\%$)		Χάλυβας ($\xi=1\%$)	
			α	β	α	β
Άργιλος 1	3.515	50.265	0.328526	0.001859	0.0657	0.00037189
Άργιλος 2	4.651	50.265	0.42569	0.001821	0.085139	0.0003642
Άργιλος 3	5.559	50.265	0.500557	0.00179134	0.100111	0.00035827

Επειδή κατά την επιβολή της σεισμικής διέγερσης τα πλευρικά όρια αφέθηκαν ελεύθερα, παρουσιάστηκαν μη ρεαλιστικές μετακινήσεις στο μοντέλο εδάφους. Το έδαφος παραμορφώνεται κυρίως σε διάτμηση και συνεπώς είναι λογικό να θεωρηθεί ότι το κάθε επίπεδο εδαφικής μάζας θα ολισθαίνει διατμητικά σε σχέση με τα γειτονικά του επίπεδα, δηλαδή θα ολισθαίνει μεταξύ του υπερκείμενου και υποκείμενου και παράλληλα θα υπάρχει μια πλευρική δέσμευση που δεν θα επιτρέπει την πλευρική εξάπλωση του εδάφους.

Για την πραγματοποίηση μιας ρεαλιστικότερης προσομοίωσης εφαρμόστηκε περιορισμός στους περιμετρικούς μόνο κόμβους του εδάφους, προκειμένου να υπακούν σε έναν κανόνα. Αυτός ο περιορισμός είχε σαν αποτέλεσμα, κατά τη μετακίνηση κάποιου κόμβου ελέγχου, οι

υπόλοιποι περιμετρικοί κόμβοι, στο ίδιο καθ' ύψος επίπεδο, να έχουν την ίδια μετακίνηση. Με τον τρόπο αυτό, οι κόμβοι που συνδέονταν δεν είχαν τη δυνατότητα να εξαπλωθούν πλευρικά, αλλά μπορούσε το κάθε επίπεδο εδάφους να ολισθαίνει σε σχέση με το υποκείμενο και υπερκείμενό του (Αθανασίου, 2015).

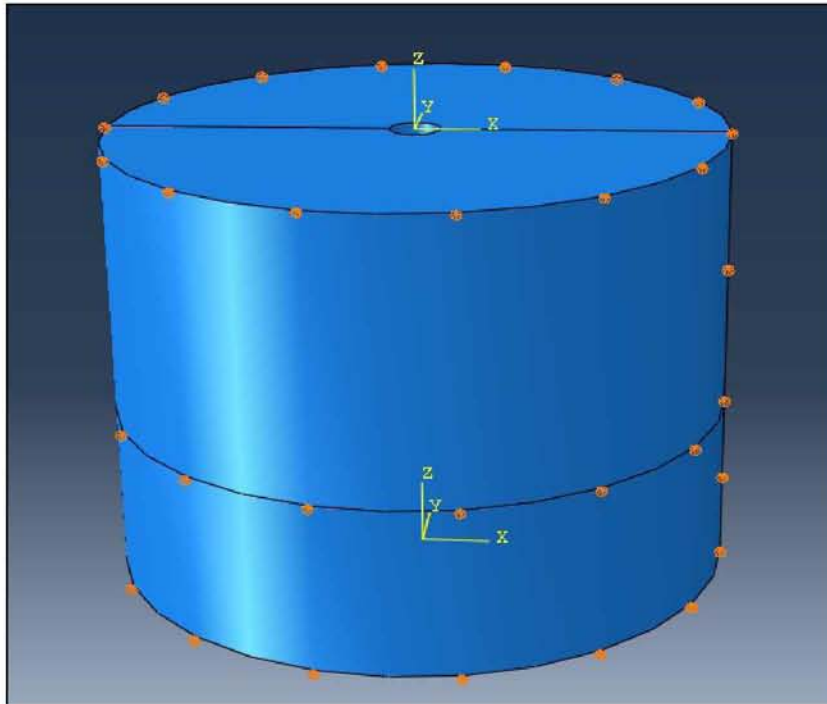
Υπολογιστικά, η διαδικασία αυτή επετεύχθη με την χρήση περιορισμού τύπου “MPC constraint” και συγκεκριμένα «Pin constraint». Ως επίπεδα καθ' ύψος ορίστηκαν τα οριζόντια επίπεδα στον άξονα xy που δημιουργήθηκαν με βάση την επιλεγθείσα διακριτοποίηση. Σχηματικά, η δημιουργία των περιορισμών αυτών απεικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 7.20).



Σχήμα 7.20: Εισαγωγή περιορισμών για τη σεισμική φόρτιση.

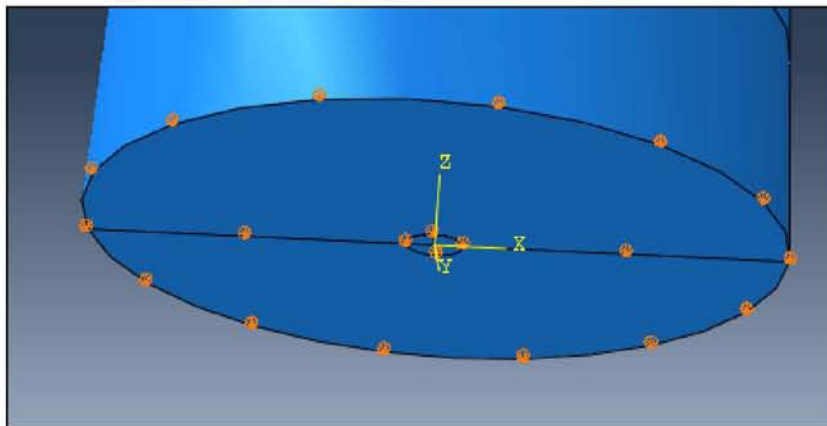
7.7.2 Συνοριακές συνθήκες προσομοιώματος

Οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν στο προσομοίωμα, από το αρχικό βήμα της ανάλυσης ήταν ο πλευρικός περιορισμός του εδάφους στην x και y διεύθυνση ($u_x=u_y=0$), όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 7.21).



Σχήμα 7.21: Επιβολή συνοριακών συνθηκών περιμετρικά του εδάφους.

Όσον αφορά τις συνοριακές συνθήκες στη βάση του εδάφους, περιορίστηκαν οι μετακινήσεις και κατά τις τρεις διευθύνσεις ($u_x=u_y=u_z=0$), θεωρώντας ότι το έδαφος εδράζεται σε βράχο. Οι περιορισμοί της βάσης φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 7.22).



Σχήμα 7.22: Επιβολή συνοριακών συνθηκών στη βάση του εδάφους.

Οι παραπάνω συνοριακές συνθήκες εφαρμόστηκαν για όλες τις συνθήκες φόρτισης εκτός από εκείνες που περιελάμβαναν τη σεισμική διέγερση. Κατά τη σεισμική διέγερση ελευθερώθηκαν οι συνοριακοί περιορισμοί που ασκούσαν στις διευθύνσεις που θα πραγματοποιούνταν η επιβολή της σεισμικής φόρτισης. Επειδή ο σεισμός επιβλήθηκε και κατά x και κατά z , τόσο πλευρικά όσο και στη βάση εφαρμόστηκε μόνο ο περιορισμός $u_y=0$.

7.7.3 Συνδυασμοί και περιπτώσεις φόρτισης

7.7.3.1 Οριακές καταστάσεις

Μια οριακή κατάσταση είναι μία συνθήκη πέραν της οποίας μία κατασκευή ή μέρος της κατασκευής δεν ικανοποιεί πλέον τα κριτήρια σχεδιασμού του.

Υπάρχουν 4 κατηγορίες οριακών καταστάσεων:

- Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ) που αντιστοιχεί στη μέγιστη φέρουσα ικανότητα φορτίου
- Οριακή Κατάσταση Κόπωσης (ΟΚΚ) που αντιστοιχεί σε αστοχία λόγω της επίδρασης/αποτελέσματος κυκλικής φόρτισης
- Τυχηματική Οριακή Κατάσταση (ΤΟΚ) που αντιστοιχεί σε βλάβη σε κάποιο μέρος λόγω ενός τυχηματικού συμβάντος ή λειτουργικής αστοχίας
- Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (ΟΚΛ) που αντιστοιχεί σε κριτήρια ανοχής εφαρμοζόμενα σε συνήθη χρήση (εδώ υπάρχουν και άλλοι ορισμοί από το βιβλίο των μεταλλικών λόγω του ότι ο τίτλος μπερδεύει λίγο)

Παρακάτω αναφέρονται κάποια σημαντικά παραδείγματα για τις 4 κατηγορίες οριακών καταστάσεων που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Παραδείγματα Οριακής Κατάστασης Αστοχίας (ΟΚΑ):

- Απώλεια αντοχής κατασκευής (υπερβολική διαρροή και λυγισμός)
- Αστοχία μερών λόγω ψαθυρής θραύσης
- Απώλεια στατικής ισορροπίας της κατασκευής, ή ενός μέρους της κατασκευής, θεωρώντας το ως άκαμπτο σώμα, π.χ. ανατροπή
- Αστοχία κρίσιμων μερών της κατασκευής που προκαλείται από υπέρβαση της αντοχής αστοχίας (η οποία σε μερικές περιπτώσεις μειώνεται λόγω επαναλαμβανόμενης φόρτισης) ή της μετακίνησης αστοχίας των μερών
- Μετατροπή της κατασκευής σε μηχανισμό (κατάρρευση ή υπερβολή μετακίνηση)

Παράδειγμα Οριακής Κατάστασης Κόπωσης (ΟΚΠ):

- Συσσωρευμένη βλάβη λόγω επαναλαμβανόμενων φορτίων

Παράδειγμα Τυχηματικής Οριακής Κατάστασης (ΤΟΚ):

- Τυχηματικές συνθήκες όπως βλάβη στην κατασκευή, η οποία προκλήθηκε από τυχηματικά φορτία και αντοχή κατασκευών που υπέστησαν βλάβη

Παραδείγματα Οριακής Κατάστασης Λειτουργικότητας (ΟΚΛ):

- Παρακτροπές που ίσως αλλάζουν το αποτέλεσμα των δρώντων δυνάμεων
- Παραμορφώσεις που ίσως αλλάζουν την κατανομή των φορτίων ανάμεσα στα υποστηριζόμενα άκαμπτα αντικείμενα και την υποστηριζόμενη κατασκευή
- Υπερβολικές δονήσεις που «ταλαιπωρούν» ή επηρεάζουν μη δομικά μέλη
- Κινήσεις που υπερβαίνουν τον περιορισμό του εξοπλισμού
- Μερικές εγκαταστάσεις θεμελίων εδάφους που προκαλούν δυσχερείς κλίσεις της ανεμογεννήτριας
- Παραμορφώσεις που προκαλούνται από τη θερμοκρασία

7.7.3.2 Συνδυασμοί και Περιπτώσεις Φόρτισης στην υπεράκτια ανεμογεννήτρια

Οι δράσεις που δέχεται κάθε κατασκευή διακρίνονται σε:

- Μόνιμες: π.χ. το ίδιο βάρος (IB) ενός στοιχείου
- Μεταβλητές (χωρικά και/ή χρονικά): π.χ. το ωφέλιμο φορτίο, το φορτίο χιονιού, ο άνεμος, το κύμα κ.ο.κ.
- Τυχηματικές: π.χ. φορτία με συνδυασμό πυρκαγιάς, κρούσης και ο σεισμός
- Προένταση

Ο σχεδιασμός μιας κατασκευής θα πρέπει να βασίζεται στη χρήση κατάλληλων προσομοιωμάτων του φορέα και να ελέγχονται όλες οι πιθανές φορτίσεις προκειμένου να μην υπάρχει υπέρβαση κάποιας οριακής κατάστασης. Για να αποφευχθεί η συγκεκριμένη υπέρβαση, ο κάθε μελετητής χρησιμοποιεί τους συνδυασμούς φόρτισης οι οποίοι αφορούν την επαλληλία δράσεων που δέχεται η κατασκευή (δηλαδή ταυτόχρονη συνύπαρξη των διαφόρων δράσεων) ώστε να προκύψει η απόκριση της κατασκευής και στη συνέχεια να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα τα οποία χρησιμοποιούνται για τη διαστασιολόγησή της ώστε να αποφευχθούν πιθανές αστοχίες.

Τα τεχνικά έργα σχεδιάζονται βάσει 2 οριακών καταστάσεων που είναι η Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ) και η Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (ΟΚΛ). Στη συγκεκριμένη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, που αφορά την ανάλυση υπεράκτιας ανεμογεννήτριας, μελετάται η Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ).

Στην παρούσα εργασία επιλέγονται να εφαρμοστούν οι παρακάτω περιπτώσεις φόρτισης στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας:

1. Ίδια Βάρη (εδάφους, πασσάλου, θάλασσας, φορέα στήριξης, πύργου, δρομέα, θαλάμου) + Άνεμος
2. Ίδια Βάρη (εδάφους, πασσάλου, θάλασσας, φορέα στήριξης, πύργου, δρομέα, θαλάμου) + Άνεμος + Κύμα
3. Ίδια Βάρη (εδάφους, πασσάλου, θάλασσας, φορέα στήριξης, πύργου, δρομέα, θαλάμου) + Σεισμός σε οριζόντια διεύθυνση + Σεισμός στην κατακόρυφη διεύθυνση
4. Ίδια Βάρη (εδάφους, πασσάλου, θάλασσας, φορέα στήριξης, πύργου, δρομέα, θαλάμου) + Σεισμός σε οριζόντια διεύθυνση + Σεισμός στην κατακόρυφη διεύθυνση + Άνεμος + Κύμα

Όταν πρόκειται να μελετηθεί μία κατασκευή, στη φάση εισαγωγής των φορτίσεων, χρησιμοποιούνται κάποιοι συντελεστές που πολλαπλασιάζονται με τα φορτία. Αυτό πραγματοποιείται προκειμένου να δοθεί ένα περιθώριο ασφάλειας. Ο συντελεστής ασφάλειας είναι πάντοτε μεγαλύτερος της μονάδας, ώστε να υποβαθμίσει το μέγεθος που μελετάται κατά συγκεκριμένο ποσοστό, ανάλογα με την κάθε περίπτωση. Κατά αυτό τον τρόπο ελαττώνεται η πιθανότητα αστοχίας του υλικού σε περίπτωση καταπόνησης που θα ξεπεράσει τη μέγιστη

επιτρεπτή λόγω βλάβης, λάθους ή ατυχήματος. Στην ΟΚΑ που εξετάζεται στην παρούσα εργασία, σύμφωνα με τον κανονισμό DNV, χρησιμοποιούνται κάποιοι συντελεστές με τους οποίους πολλαπλασιάζονται τα φορτία, οι οποίοι δίδονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7.3).

Πίνακας 7.3: Συντελεστές ασφαλείας για τους συνδυασμούς φορτίσεων σύμφωνα με τον κανονισμό DNV (DNV-OS-J101, 2007).

Load factor set	Limit state	Load categories			
		G	Q	E	D
(a)	ULS	ψ	ψ	1.35	1.0
(b)	ULS for abnormal wind load cases	ψ	ψ	1.1	1.0

Load categories are:
 G = permanent load
 Q = variable functional load, normally relevant only for design against ship impacts and for local design of platforms
 E = environmental load
 D = deformation load.
 For description of load categories, see Sec.4.
 For values of ψ , see items 103 and 104.

Σύμφωνα λοιπόν, με τον παραπάνω πίνακα, τα μόνιμα φορτία (G), όπως τα ίδια βάρη του εδάφους και της κατασκευής, πολλαπλασιάζονται με τον συντελεστή ψ , ο οποίος σύμφωνα με τον χρησιμοποιούμενο κανονισμό πρέπει να λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα ($\psi=1$). Όσον αφορά τα περιβαλλοντικά φορτία, όπως είναι ο άνεμος, το κύμα, ο συντελεστής με τον οποίο πολλαπλασιάζονται στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας είναι ίσος με 1.35.

Όσον αφορά τις περιπτώσεις φόρτισης (1) και (2), που αναφέρθηκαν παραπάνω, πρόκειται για συνδυασμούς φόρτισης, κατά τους οποίους τα φορτία του ίδιου βάρους, του ανέμου και του κύματος επιβάλλονται ταυτόχρονα στην κατασκευή και συγκεκριμένα σε 1 βήμα μέσω στατικής ανάλυσης. Ιδιαίτερα, για τις περιπτώσεις φόρτισης (3) και (4), στις οποίες σαν φορτίο συμπεριλαμβάνεται και ο σεισμός σε δύο διαφορετικές διευθύνσεις, τα φορτία του ίδιου βάρους, του ανέμου και του κύματος εφαρμόζονται ταυτόχρονα στην κατασκευή μέσω ενός στατικού βήματος, ενώ τα σεισμικά φορτία εφαρμόζονται στην κατασκευή σε επόμενα βήματα χρησιμοποιώντας δυναμική ανάλυση. Συνεπώς, οι περιπτώσεις φόρτισης (3) και (4), θεωρούνται εν μέρει συνδυασμοί φόρτισης, καθώς από τη μία οι φορτίσεις του ίδιου βάρους, του ανέμου και του κύματος εφαρμόζονται ταυτόχρονα ενώ από την άλλη οι φορτίσεις των δύο διαφορετικών σεισμών εφαρμόστηκαν σε επόμενα βήματα. Έτσι, οι συντελεστές φόρτισης εφαρμόζονται μόνο στα φορτία των ίδιων βαρών, του ανέμου και του κύματος και όχι στα φορτία των σεισμών. Η συγκεκριμένη απλοποιητική παραδοχή λήφθηκε καθώς δεν ήταν δυνατός από τους ερευνητές της συγκεκριμένης εργασίας ο συνδυασμός στατικών φορτίσεων διάρκειας 1 sec με δυναμικές φορτίσεις, όπως ο σεισμός, με μεγαλύτερη διάρκεια, όπως είναι τα 10 sec, που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη εργασία.

Κεφάλαιο 8

Αποτελέσματα Αναλύσεων

8.1 Γενικά

Για τους σκοπούς της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε πλήθος αριθμητικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα Abaqus για το μοντέλο της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν 4 διαφορετικές περιπτώσεις φορτίσεων και στην κάθε μία ξεχωριστά μελετήθηκαν 3 διαφορετικοί τύποι αργίλων. Συνολικά λοιπόν, εκτελέστηκαν 12 αριθμητικές αναλύσεις.

Όσον αφορά το είδος των αναλύσεων πραγματοποιήθηκαν τόσο στατικές όσο και δυναμικές αναλύσεις. Οι στατικές αναλύσεις περιλαμβάνουν τη φόρτιση του εδάφους με το ίδιο βάρος του, τα βάρη της θεμελίωσης, της κατασκευής, το βάρος του νερού της θάλασσας. Ακόμη, τα φορτία του ανέμου και των ανεμογενών κυματισμών, θεωρήθηκαν και αυτά ως στατικά φορτία έπειτα από απλοποιητικές παραδοχές, οι οποίες αναλύθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 7). Οι δυναμικές αναλύσεις περιλαμβάνουν τη δυναμική καταπόνηση του συστήματος μέσω της εφαρμογής σεισμικών επιταχύνσεων στη βάση του εδάφους του προσομοιώματος.

Τα στατικά φορτία εφαρμόστηκαν ταυτόχρονα προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητοί συνδυασμοί φόρτισης σε 1 βήμα με διάρκεια φόρτισης 1 sec, το οποίο αποτελείται από 15 υπο-στάδια (increments). Στις περιπτώσεις φόρτισης στις οποίες συμπεριλήφθηκε και ο σεισμός, αρχικά μέσω ενός βήματος επιβλήθηκαν τα στατικά φορτία και με το τέλος του βήματος ξεκίνησε η δυναμική ανάλυση, κατά την οποία επιβάλλονται τα φορτία του σεισμού. Η διάρκεια της φόρτισης του σεισμού στη δυναμική ανάλυση λήφθηκε ίση με 10 sec.

Ως μεγέθη ενδιαφέροντος στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκαν οι τάσεις Von Mises, οι οριζόντιες και οι κατακόρυφες μετακινήσεις σε επιλεγμένα σημεία τόσο της κατασκευής και της θεμελίωσης όσο και του εδάφους θεμελίωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι ιδιαίτερη βαρύτητα στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, δόθηκε στο έδαφος και στη θεμελίωση της ανεμογεννήτριας. Ιδιαίτερα, μέσω των αριθμητικών αναλύσεων προκύπτουν αποτελέσματα για τις οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις για 13 διαφορετικά σημεία του μοντέλου. Επιπλέον, προκύπτουν διαγράμματα των τάσεων Von Mises για κάποια σημεία του μοντέλου και στιγμιότυπα των μετακινήσεων και των τάσεων αυτών για όλο το προσομοίωμα.

Όσον αφορά την επιλογή των κόμβων στο μοντέλο, επιλέχθηκαν κόμβοι σε σημεία της κατασκευής και του εδάφους που θεωρούνται κρίσιμα ως προς τις μετακινήσεις, τις τάσεις και τα εντατικά μεγέθη και σε κόμβους οι οποίοι σύμφωνα με τα προκύπτοντα στιγμιότυπα

τάσεων και μετακινήσεων καταπονούνται περισσότερο σε σχέση με τους υπόλοιπους. Οι κόμβοι για τους οποίους προέκυψαν αποτελέσματα από τις αναλύσεις είναι οι ακόλουθοι για το έδαφος:

1) Κόμβος 17

Ο κόμβος 17 βρίσκεται σε σημείο που ακουμπά η βάση του πασσάλου στο έδαφος, δηλαδή στα 35 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

2) Κόμβος 21

Ο κόμβος 21 βρίσκεται στο έδαφος εντός του πασσάλου και σε βάθος 35 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

3) Κόμβος 635

Ο κόμβος 635 βρίσκεται στο κέντρο του εδάφους και σε βάθος λίγο μεγαλύτερο από 35 m.

4) Κόμβος 488

Ο κόμβος 4888 βρίσκεται στο έδαφος έξω από τον πάσσαλο και σε βάθος λίγο μεγαλύτερο από τα 35 m.

5) Κόμβος 26975

Ο κόμβος 26975 βρίσκεται πιο μακριά από τον πάσσαλο, σε βάθος 35 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

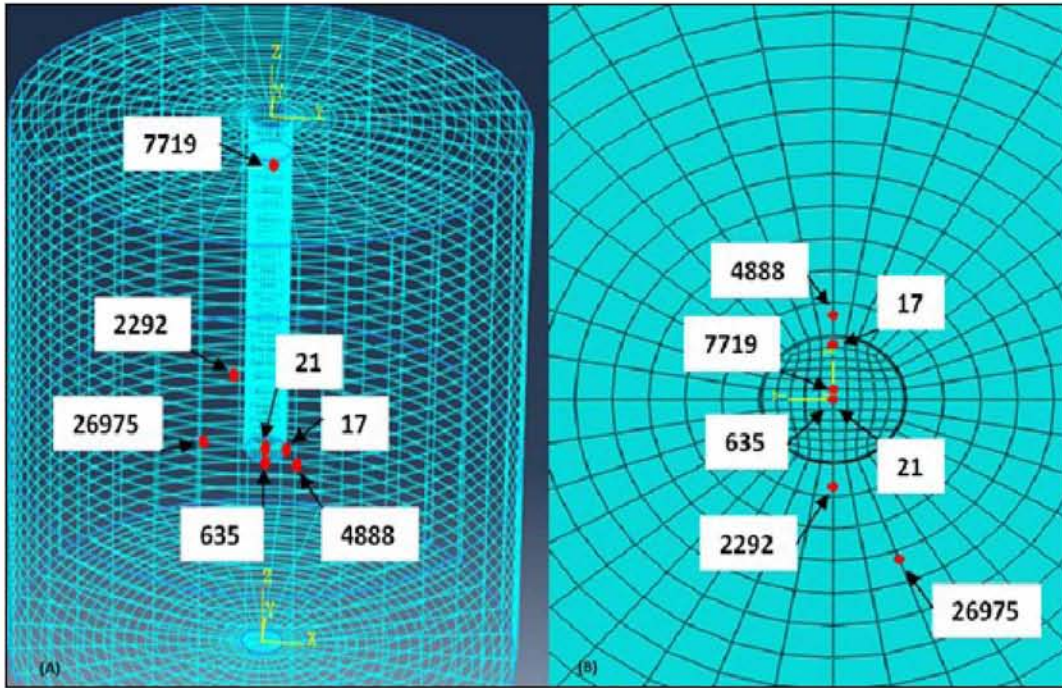
6) Κόμβος 2292

Ο κόμβος 2292 βρίσκεται στο έδαφος έξω από τον πάσσαλο και σε βάθος περίπου ίσο με το μισό του βάθους του πασσάλου θεμελίωσης.

7) Κόμβος 7719

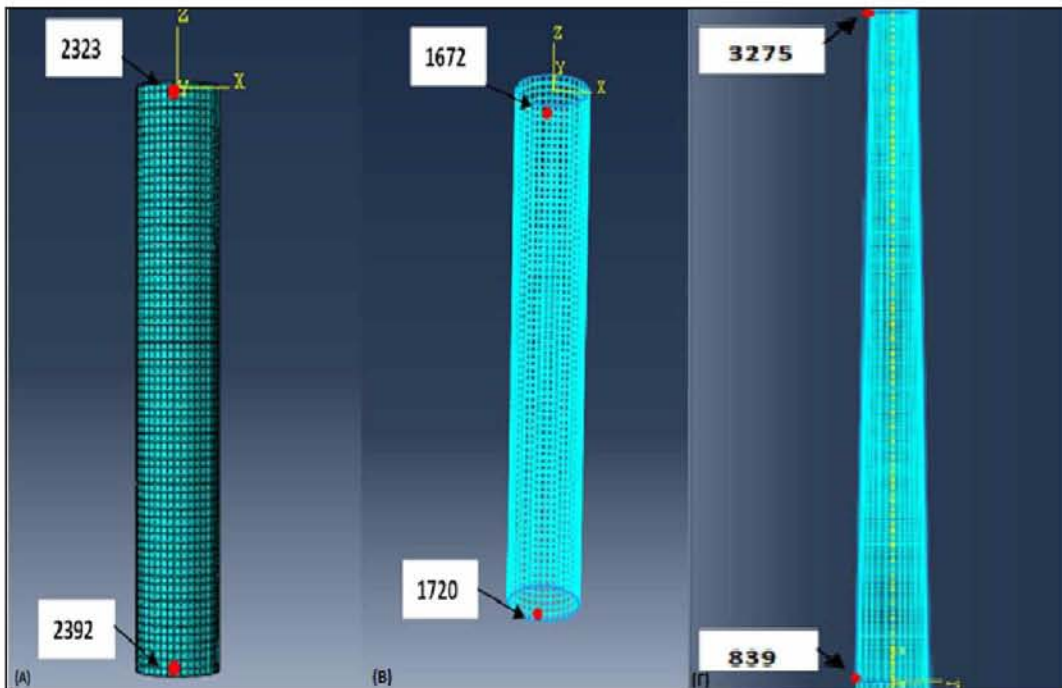
Ο κόμβος 7719 βρίσκεται εξωτερικά του πασσάλου, αλλά κοντά σε αυτόν και περίπου στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους.

Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.1) παρουσιάζονται, με κόκκινο χρώμα, οι 7 κόμβοι που επιλέχθηκαν για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα, στο αριστερό σχήμα φαίνεται η θέση των κόμβων στο τρισδιάστατο προσομοίωμα και στη δεξιά οι κόμβοι μέσω της κάτοψης του εδάφους.



Σχήμα 8.1: Θέση των κόμβων του εδάφους (Α) στο 3D προσομοίωμα και (Β) σε κάτοψη.

Ακόμη, επιλέχθηκαν 2 κόμβοι για τον μονοπάσσαλο θεμελίωσης, 2 κόμβοι για το φορέα στήριξης και 2 κόμβοι για τον πύργο της ανεμογεννήτριας. Ο ένας κόμβος από τους δύο, του κάθε κομματιού, τοποθετήθηκε στο ύψος της βάσης του, ενώ ο δεύτερος στο ύψος της κορυφής του. Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.2) παρουσιάζονται οι κόμβοι αυτοί για κάθε ένα από τα 3 προαναφερθέντα τμήματα της κατασκευής.



Σχήμα 8.2: Θέση κόμβων (Α) του πασσάλου, (Β) του φορέα στήριξης και (Γ) του πύργου.

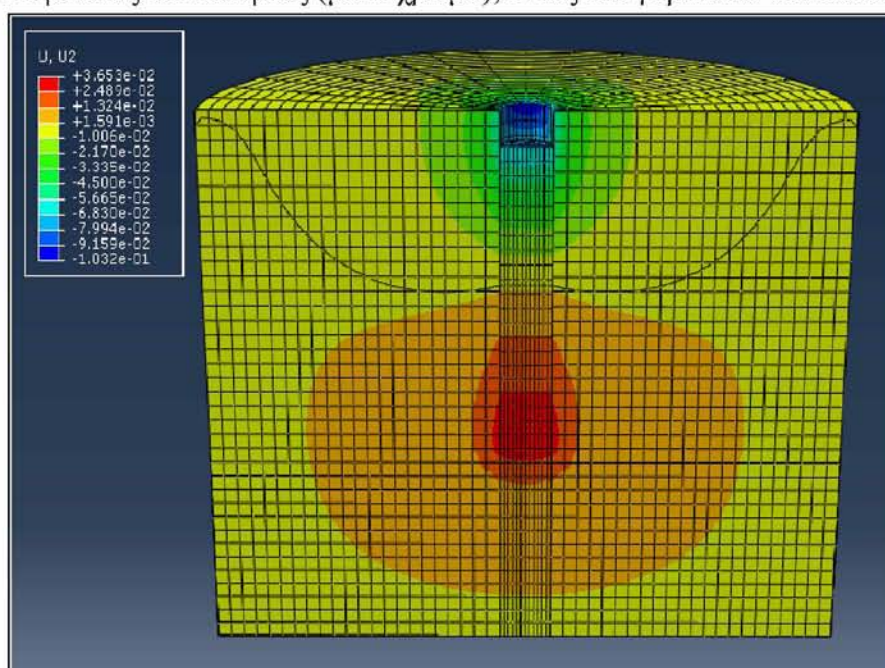
8.2 Αποτελέσματα για το συνδυασμό φόρτισης των ίδιων βαρών και του ανέμου

8.2.1 Αποτελέσματα οριζόντιων μετακινήσεων των αργίλων 1, 2 και 3

Για το συνδυασμό φόρτισης των ίδιων βαρών και του ανέμου προέκυψαν τα αποτελέσματα για 13 σημεία από το μοντέλο για τις οριζόντιες μετακινήσεις στη διεύθυνση Y και για τις τρεις αργίλους.

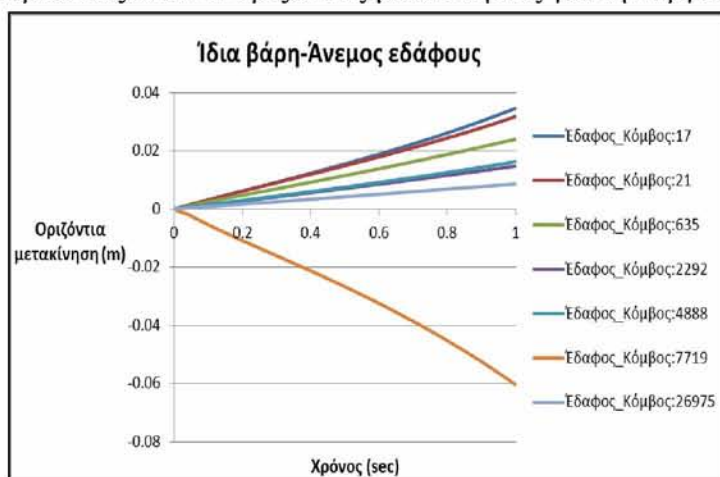
Αργίλος 1

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8.3) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις (U_2) που αναπτύσσονται. Οι μεγαλύτερες θετικές μετακινήσεις εμφανίζονται στα σημεία του εδάφους που βρίσκεται στη βάση του πασσάλου (κόκκινο χρώμα), ενώ οι μεγαλύτερες αρνητικές στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους (μπλε χρώμα), εντός και γύρω από τον πάσσαλο.



Σχήμα 8.3: Οριζόντιες μετακινήσεις στην άργιλο 1 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.

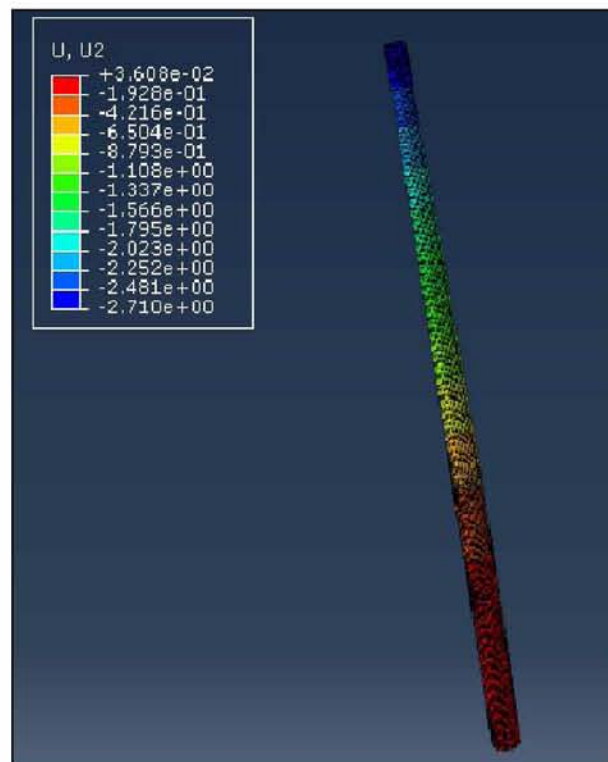
Στο Σχήμα 8.4 παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις για την άργιλο 1.



Σχήμα 8.4: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.

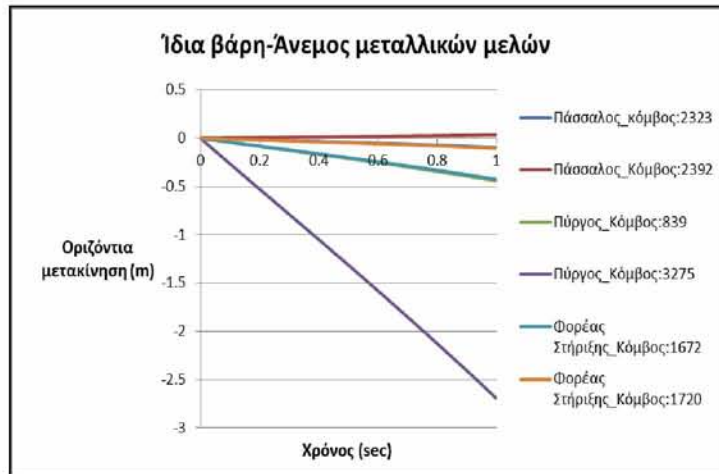
Η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση στο έδαφος προέκυψε για τον κόμβο 7719, δηλαδή για τον κόμβο που βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και είναι ίση με -6.04 cm. Ωστόσο, στους υπόλοιπους κόμβους του εδάφους που μελετήθηκαν οι μετακινήσεις είναι θετικές, με τη μεγαλύτερη να εμφανίζεται στον κόμβο 17, δηλαδή σε σημείο που ακουμπά η βάση του πασσάλου στο έδαφος (σε βάθος 35 m). Η μετακίνηση αυτή είναι ίση με 3.46 cm. Παρατηρείται ότι κατά απόλυτη τιμή οι μετακινήσεις που αναπτύσσονται στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές των υπόλοιπων κόμβων.

Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 8.5) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις (U_2) που αναπτύσσονται στα μεταλλικά μέλη που θεμελιώνονται στην άργιλο 1. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται στην κορυφή του πύργου (μπλε χρώμα) και έχουν αρνητική τιμή, ενώ οι μετακινήσεις κοντά στη βάση του πασσάλου θεμελίωσης είναι θετικές (κόκκινο χρώμα) και μικρότερες από τις κατά απόλυτη τιμή μετακινήσεις του φορέα στήριξης και του πύργου της ανεμογεννήτριας. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην ολίσθηση μεταξύ της βάσης του πασσάλου και του εδάφους.



Σχήμα 8.5: Οριζόντιες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 1 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.

Στο Σχήμα 8.6 παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις που προκύπτουν για τα μεταλλικά μέλη της κατασκευής για την άργιλο 1.

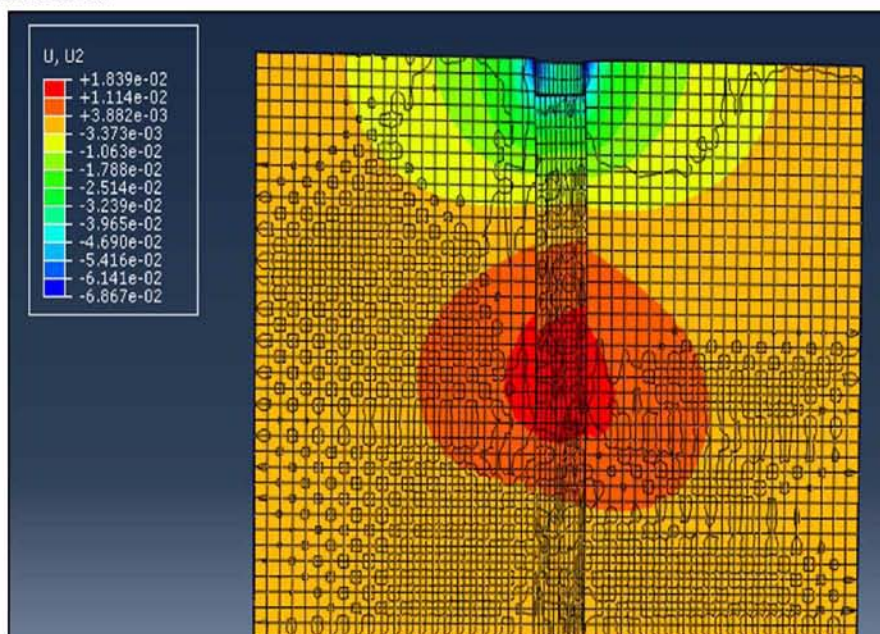


Σχήμα 8.6: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου για την άργιλο 1.

Οι οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών στον πρώτο συνδυασμό φόρτισης είναι αρνητικές, με εξαίρεση αυτών της βάσης του πασσάλου που είναι θετικές. Η μέγιστη αρνητική οριζόντια μετακίνηση της αργίλου 1 προέκυψε στον κόμβο 3275, ο οποίος βρίσκεται στο ύψος της κορυφής του πύργου και είναι ίση με -2.69 m , ενώ η μέγιστη θετική στον κόμβο 2392, ο οποίος βρίσκεται στη βάση του πασσάλου και είναι ίση με 3.5 cm . Παρατηρείται ότι κατά απόλυτη τιμή οι μετακινήσεις που αναπτύσσονται στην κορυφή του πύργου είναι πολύ μεγαλύτερες συγκριτικά με αυτές των υπόλοιπων μεταλλικών μελών, με αυτές που αναπτύσσονται στη βάση του πασσάλου να είναι οι μικρότερες.

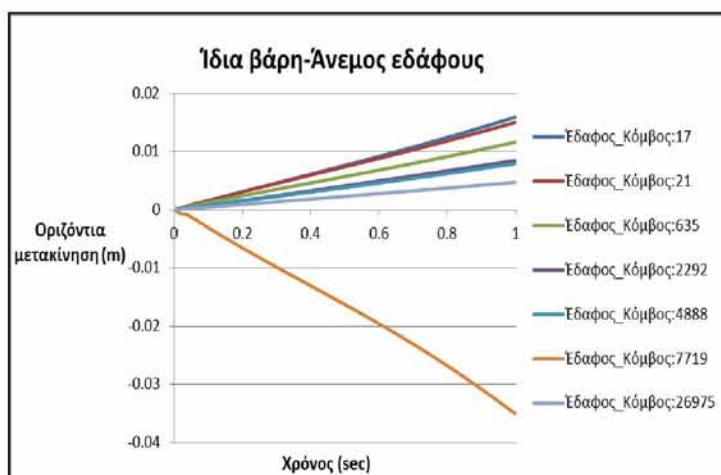
Άργιλος 2

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8.7) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις (U_2) που αναπτύσσονται στην άργιλο 2. Όπως και στην άργιλο 1, οι μεγαλύτερες θετικές μετακινήσεις εμφανίζονται στο έδαφος που βρίσκεται στη βάση του πασσάλου (κόκκινο χρώμα), ενώ οι μεγαλύτερες αρνητικές στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους (μπλε χρώμα), εντός και γύρω από τον πάσσαλο.



Σχήμα 8.7: Οριζόντιες μετακινήσεις στην άργιλο 2 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.

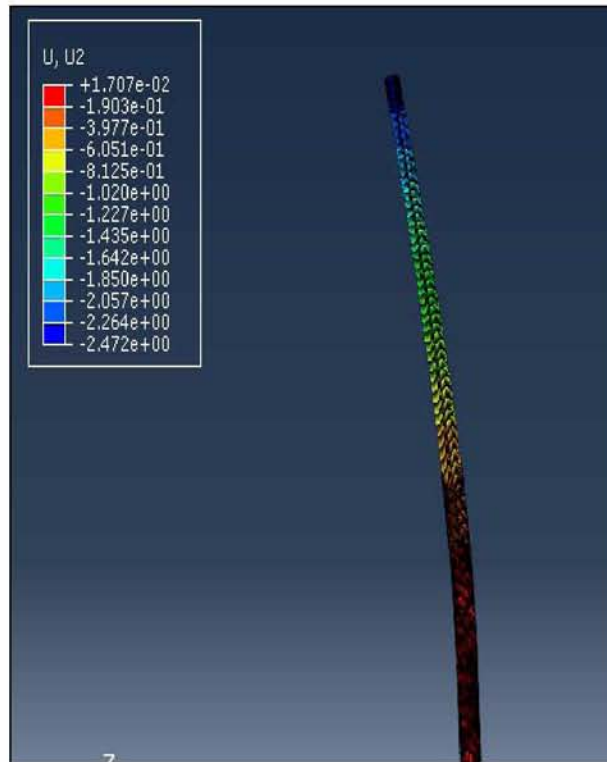
Στο Σχήμα 8.8 παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις για την άργιλο 2.



Σχήμα 8.8: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου για την άργιλο 2.

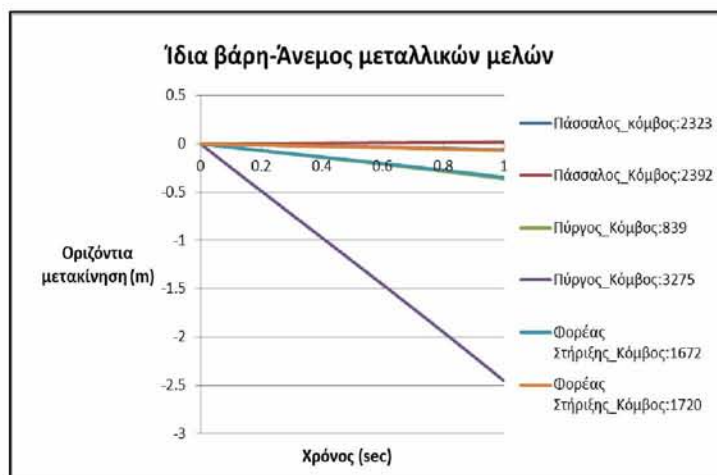
Όπως και στην προηγούμενη άργιλο, έτσι και για την άργιλο 2 η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση στο έδαφος προέκυψε στον κόμβο 7719 και ισούται με -3.5 cm. Στους υπόλοιπους κόμβους του εδάφους που μελετήθηκαν οι μετακινήσεις είναι θετικές, με τη μεγαλύτερη να εμφανίζεται στον κόμβο 17. Η μετακίνηση αυτή είναι ίση με 1.59 cm. Παρατηρείται ότι κατά απόλυτη τιμή οι μετακινήσεις που αναπτύσσονται στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές των υπόλοιπων κόμβων.

Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 8.9) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις (U_2) που αναπτύσσονται στα μεταλλικά μέλη που θεμελιώνονται στην άργιλο 2. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται στην κορυφή του πύργου (μπλε χρώμα) και έχουν αρνητική τιμή, ενώ οι μετακινήσεις κοντά στη βάση του πασσάλου θεμελίωσης είναι θετικές (κόκκινο χρώμα) και μικρότερες από τις κατά απόλυτη τιμή μετακινήσεις του φορέα στήριξης και του πύργου της ανεμογεννήτριας. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην ολίσθηση μεταξύ της βάσης του πασσάλου και του εδάφους.



Σχήμα 8.9: Οριζόντιες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 2 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.

Στο Σχήμα 8.10 παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις που προκύπτουν για τα μεταλλικά μέλη της κατασκευής για την άργιλο 2.



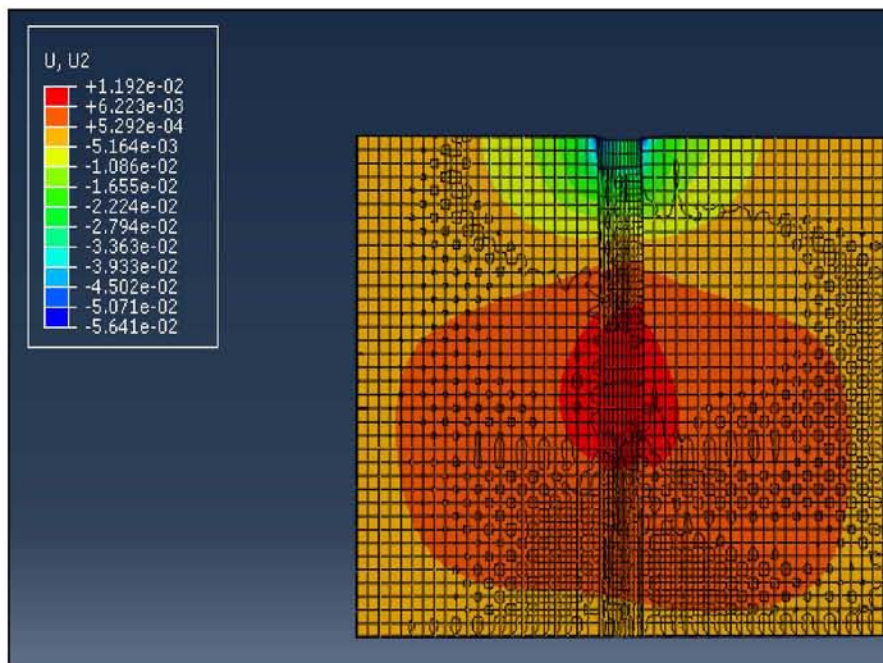
Σχήμα 8.10: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 2.

Οι οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών στον πρώτο συνδυασμό φόρτισης είναι αρνητικές, με εξαίρεση αυτών της βάσης του πασσάλου που είναι θετικές. Η μέγιστη αρνητική οριζόντια μετακίνηση της αργίλου 2 προέκυψε στον κόμβο 3275, ο οποίος βρίσκεται στο ύψος της κορυφής του πύργου και είναι ίση με -2.45 m, ενώ η μέγιστη θετική στον κόμβο 2392, ο οποίος βρίσκεται στη βάση του πασσάλου και είναι ίση με 1.69 cm. Και για την άργιλο 2 όπως και προηγουμένως για την άργιλο 1, παρατηρείται ότι κατά απόλυτη τιμή οι μετακινήσεις που αναπτύσσονται στην κορυφή του πύργου είναι πολύ μεγαλύτερες

συγκριτικά με αυτές των υπόλοιπων μεταλλικών μελών, με αυτές που αναπτύσσονται στη βάση του πασσάλου να είναι οι μικρότερες.

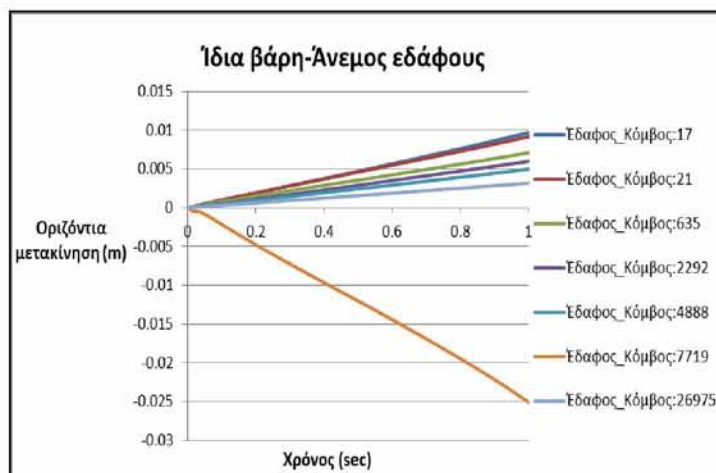
Άργιλος 3

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8.11) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις (U_2) που αναπτύσσονται στην άργιλο 3. Όπως και στις και αργίλους 1 και 2, οι μεγαλύτερες θετικές μετακινήσεις εμφανίζονται στο έδαφος που βρίσκεται στη βάση του πασσάλου (κόκκινο χρώμα), ενώ οι μεγαλύτερες αρνητικές στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους (μπλε χρώμα), εντός και γύρω από τον πάσσαλο.



Σχήμα 8.11: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 3.

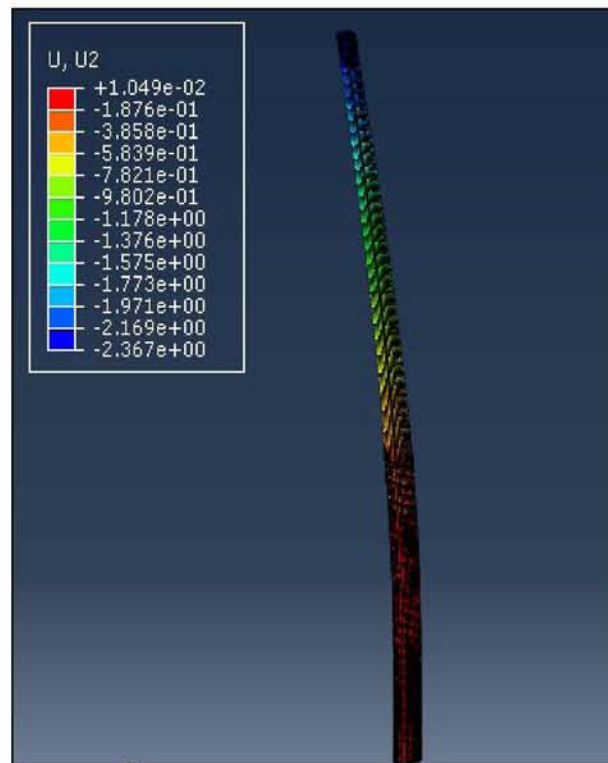
Στο Σχήμα 8.12 παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις για την άργιλο 3.



Σχήμα 8.12: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου για την άργιλο 3.

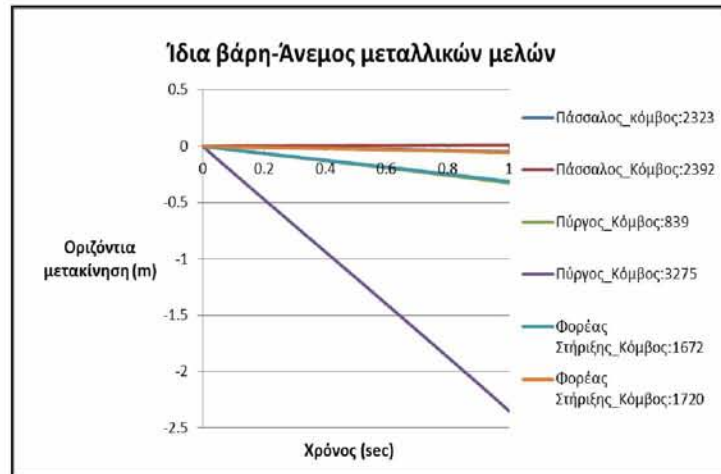
Όπως και στις προηγούμενες άργιλους, έτσι και για την άργιλο 3 η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση στο έδαφος προέκυψε στον κόμβο 7719 και ισούται με -2.51 cm. Στους υπόλοιπους κόμβους του εδάφους που μελετήθηκαν οι μετακινήσεις είναι θετικές, με τη μεγαλύτερη να εμφανίζεται στον κόμβο 17. Η μετακίνηση αυτή είναι ίση με 0.97 cm. Παρατηρείται ότι κατά απόλυτη τιμή οι μετακινήσεις που αναπτύσσονται στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές των υπόλοιπων κόμβων.

Στο Σχήμα 8.13 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις (U_2) που αναπτύσσονται στα μεταλλικά μέλη που θεμελιώνονται στην άργιλο 3. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται στην κορυφή του πύργου (μπλε χρώμα) και έχουν αρνητική τιμή, ενώ οι μετακινήσεις κοντά στη βάση του πασσάλου θεμελίωσης είναι θετικές (κόκκινο χρώμα) και μικρότερες από τις κατά απόλυτη τιμή μετακινήσεις του φορέα στήριξης και του πύργου της ανεμογεννήτριας. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην ολίσθηση μεταξύ της βάσης του πασσάλου και του εδάφους.



Σχήμα 8.13: Οριζόντιες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 3 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.

Στο Σχήμα 8.14 παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις που προκύπτουν για τα μεταλλικά μέλη της κατασκευής για την άργιλο 3.

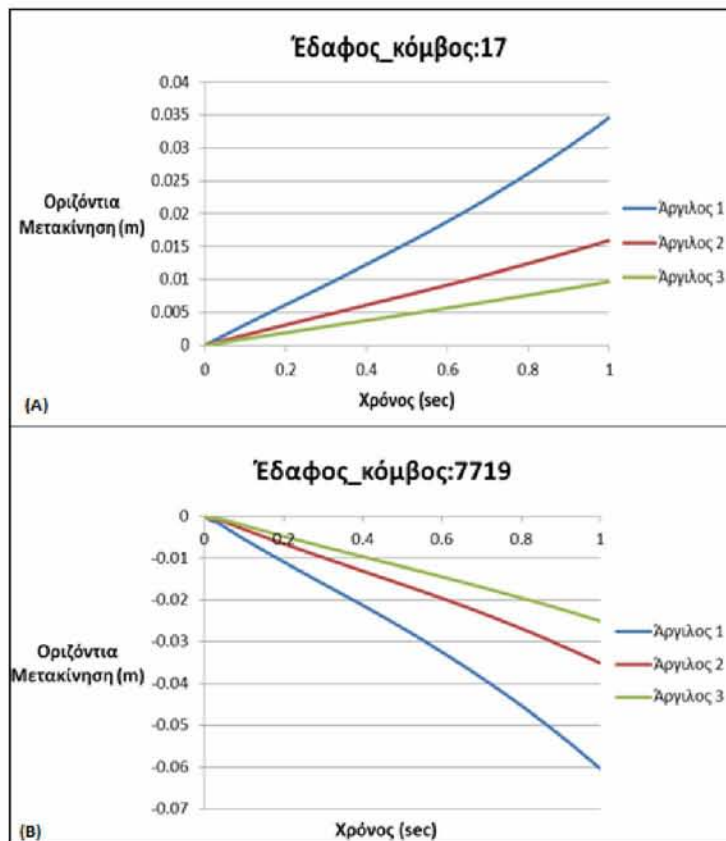


Σχήμα 8.14: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 3.

Και για την τρίτη άργιλο, οι οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών στον πρώτο συνδυασμό φόρτισης είναι αρνητικές, με εξαίρεση αυτών της βάσης του πασσάλου που είναι θετικές. Η μέγιστη αρνητική οριζόντια μετακίνηση της αργίλου 3 προέκυψε στον κόμβο 3275, ο οποίος βρίσκεται στο ύψος της κορυφής του πύργου και είναι ίση με -2.35 m, ενώ η μέγιστη θετική στον κόμβο 2392, ο οποίος βρίσκεται στη βάση του πασσάλου και είναι ίση με 1.05 cm. Όπως και από τις προηγούμενες αργίλους, παρατηρείται ότι κατά απόλυτη τιμή οι μετακινήσεις που αναπτύσσονται στην κορυφή του πύργου είναι πολύ μεγαλύτερες συγκριτικά με αυτές των υπόλοιπων μεταλλικών μελών, με αυτές που αναπτύσσονται στη βάση του πασσάλου να είναι οι μικρότερες.

8.2.1.1. Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων για τις αργίλους 1, 2 και 3

Στα Σχήμα 8.15 που ακολουθούν παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις (U_2) που αναπτύσσονται και στους τρεις τύπους αργίλων. Για τη σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων, στις τρεις αργίλους, επιλέχθηκαν για το έδαφος οι κόμβοι 17 και 7719. Η επιλογή αυτή έγινε καθώς στους κόμβους αυτούς εμφανίζονται η μέγιστη θετική και η μέγιστη αρνητική οριζόντια μετακίνηση, αντίστοιχα. Οι υπόλοιποι κόμβοι του εδάφους παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με τον κόμβο 17, τα διαγράμματα των οποίων παρουσιάζονται στο παράρτημα Α.



Σχήμα 8.15: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 17 (Α) και 7719 (Β) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.

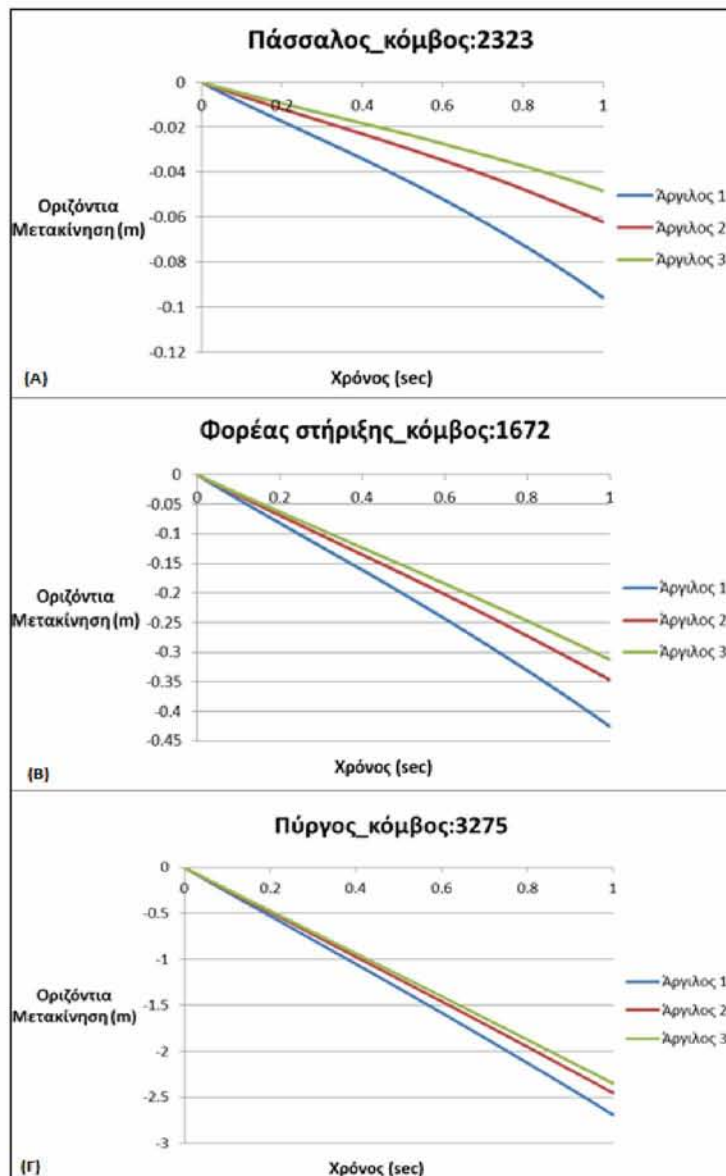
Παρακάτω συγκεντρώνονται κάποια από τα σημαντικότερα συμπεράσματα για τις οριζόντιες μετακινήσεις του εδάφους, από τη σύγκριση των αργίλων 1, 2 και 3:

- Όπως ήταν αναμενόμενο, η άργιλος 1 έχει τις μεγαλύτερες οριζόντιες μετακινήσεις για όλους τους κόμβους του εδάφους. Στη συνέχεια, ακολουθούν η άργιλος 2 και τις μικρότερες μετακινήσεις εμφανίζει η άργιλος 3.
- Οι άργιλοι 2 και 3 εμφανίζουν πιο κοντινές τιμές μετακινήσεων μεταξύ τους σε σχέση με την άργιλο 1, η οποία αποκλίνει από τις δυο προηγούμενες καθώς εμφανίζει αρκετά μεγαλύτερες οριζόντιες μετακινήσεις.
- Οι μεγαλύτερες αρνητικές οριζόντιες μετακινήσεις και στις τρεις αργίλους, εμφανίζονται στον κόμβο 7719, ο οποίος βρίσκεται στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους, κοντά στον πάσσαλο, ενώ οι μεγαλύτερες θετικές στον κόμβο 17, ο οποίος βρίσκεται στη βάση του πασσάλου. Όλοι οι υπόλοιποι κόμβοι του εδάφους δίνουν μικρότερες τιμές θετικών οριζόντιων μετακινήσεων.
- Οι μεγάλες μετακινήσεις στην επιφάνεια του εδάφους πιθανώς να οφείλονται στο τυπικό εδαφικό προφίλ του πυθμένα της θάλασσας, το οποίο συνίσταται από μια στρώση πολύ μαλακού εδάφους στην επιφάνεια. Η στρώση του μαλακού εδάφους

έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση πολύ μικρής εδαφικής πλευρικής αντίστασης, ενώ τα φορτία μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας είναι κατά βάση πλευρικά.

- Οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις όλων των κόμβων της αργίλου 1 είναι 1.7-2.2 φορές μεγαλύτερες από αυτές της αργίλου 2 και 2.4-3.6 φορές μεγαλύτερες από της αργίλου 3.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8.16) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις της κορυφής του πασσάλου, του φορέα στήριξης και του πύργου, για τις τρεις αργίλους. Επειδή οι μετακινήσεις στην κορυφή του πασσάλου (κόμβος 2323) είναι παρόμοιες με αυτές της βάσης του φορέα στήριξης (κόμβος 1720), επιλέχθηκαν να συγκριθούν, για τις τρεις αργίλους, μόνο οι μετακινήσεις του κόμβου 2323. Με την ίδια λογική επιλέχθηκαν να συγκριθούν οι μετακινήσεις στην κορυφή του φορέα στήριξης (κόμβος 1672), για τις τρεις αργίλους, ενώ παραλήφθηκαν αυτές στη βάση του πύργου (κόμβος 839). Τέλος, συγκρίθηκαν οι μετακινήσεις στην κορυφή του πύργου (κόμβος 3275), καθώς εκεί εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές.



Σχήμα 8.16: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 2323 (Α), 1672 (Β) και 3275 (Γ) συναρτήσει του χρόνου, για τις άργίλους 1, 2 και 3.

Παρακάτω συγκεντρώνονται κάποια από τα σημαντικότερα συμπεράσματα για τις οριζόντιες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών, από τη σύγκριση των άργιλων 1, 2 και 3:

- Και στα μεταλλικά μέλη, οι μεγαλύτερες οριζόντιες μετακινήσεις παρουσιάζονται στην άργίλο 1. Ακολουθούν η άργίλος 2 και τις μικρότερες μετακινήσεις εμφανίζει η άργίλος 3.
- Οι άργίλοι 2 και 3 εμφανίζουν πιο κοντινές τιμές μετακινήσεων μεταξύ τους σε σχέση με την άργίλο 1.

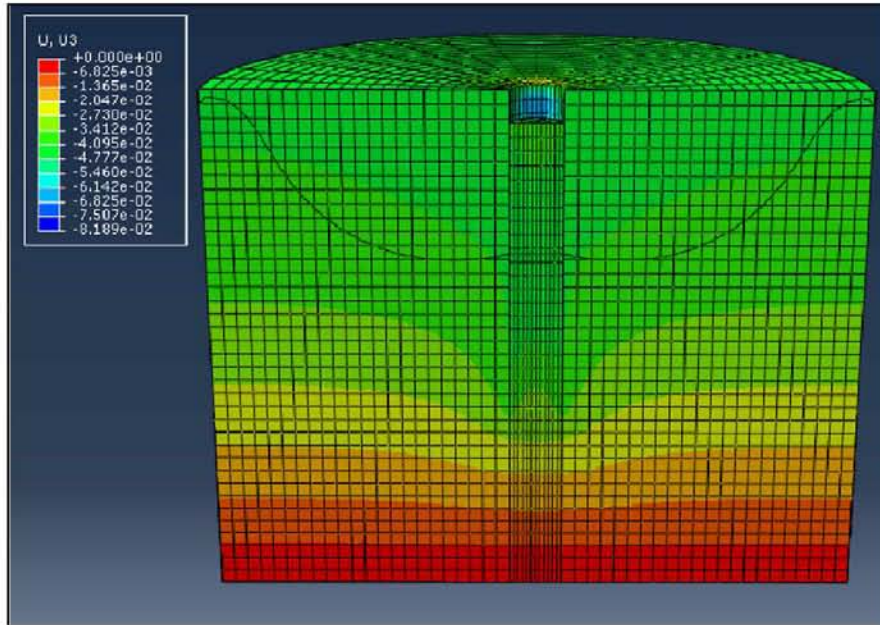
- Στην κορυφή του πασσάλου εμφανίζονται αρνητικές οριζόντιες μετακινήσεις, ενώ στη βάση θετικές. Κατά απόλυτη τιμή, οι οριζόντιες μετακινήσεις της κορυφής είναι μεγαλύτερες από αυτές της βάσης.
- Ο πύργος και ο φορέας στήριξης εμφανίζουν αρνητικές οριζόντιες μετακινήσεις. Στις κορυφές τους εμφανίζονται μεγαλύτερες οριζόντιες μετακινήσεις σε σχέση με τις βάσεις τους.
- Οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του μονοπασσάλου για την άργιλο 1 είναι 1.5-2.1 φορές μεγαλύτερες από αυτές της άργιλου 2 και 2-3.4 φορές μεγαλύτερες από της άργιλου 3. Οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του φορέα στήριξης της άργιλου 1 είναι 1.2-1.5 φορές μεγαλύτερες από αυτές της άργιλου 2 και 1.15-1.40 φορές μεγαλύτερες από της άργιλου 3. Τέλος, όσον αφορά τους κόμβους του πύργου, οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις για την άργιλο 1 είναι 1.1-1.22 φορές μεγαλύτερες από αυτές της άργιλου 2 και 1.15-1.36 φορές μεγαλύτερες από της άργιλου 3.

8.2.2 Αποτελέσματα κατακόρυφων μετακινήσεων των άργιλων 1, 2 και 3

Για το συνδυασμό φόρτισης των ίδιων βαρών και του ανέμου προέκυψαν τα αποτελέσματα για 13 σημεία από το μοντέλο για τις κατακόρυφες μετακινήσεις στη διεύθυνση Z και για τις τρεις άργιλους.

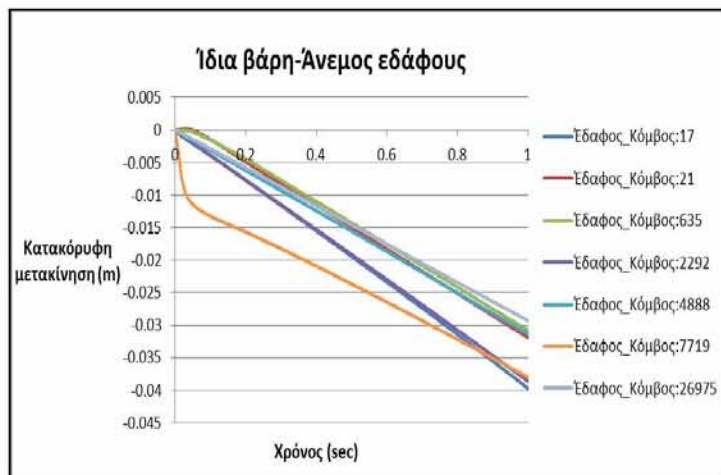
Άργιλος 1

Στο Σχήμα 8.17 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις (U_3) που αναπτύσσονται στην άργιλο 1. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται στο έδαφος που βρίσκεται στη βάση του πασσάλου (μπλε χρώμα), ενώ εξίσου μεγάλες μετακινήσεις παρουσιάζονται στους κόμβους του εδάφους που βρίσκονται στο ύψος της επιφάνειάς του, εντός και γύρω από τον πάσσαλο.



Σχήμα 8.17: Κατακόρυφες μετακινήσεις στην άργιλο 1 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.

Στο Σχήμα 8.18 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις για την άργιλο 1.

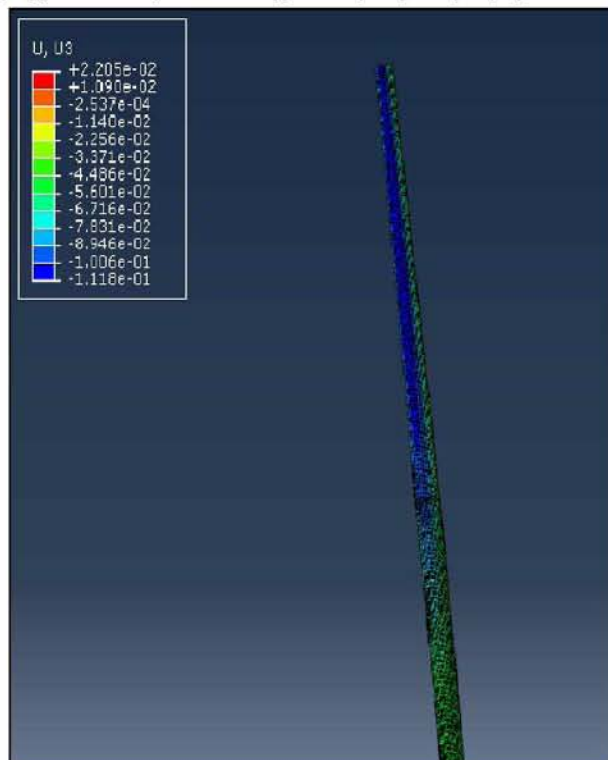


Σχήμα 8.18: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου για την άργιλο 1.

Για την άργιλο 1 η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση προκύπτει για τον κόμβο 17 και είναι ίση με -3.97 cm. Εξίσου μεγάλες κατακόρυφες μετακινήσεις εμφανίζουν ο κόμβος 7719 και ο κόμβος 2292. Η κατακόρυφη μετακίνηση του κόμβου 7719 ενώ αρχικά αυξάνεται απότομα, στη συνέχεια, αυξάνεται με μικρότερο ρυθμό έτσι ώστε στο τέλος να έχει κοντινές τιμές με τους άλλους 2 κόμβους που προαναφέρθηκαν. Οι υπόλοιποι 4 κόμβοι του εδάφους στους οποίους υπολογίστηκαν οι κατακόρυφες μετακινήσεις παρουσιάζουν πολύ κοντινές τιμές μεταξύ τους και έχουν μικρότερες μετακινήσεις σε σχέση με τους προηγούμενους 3 κόμβους.

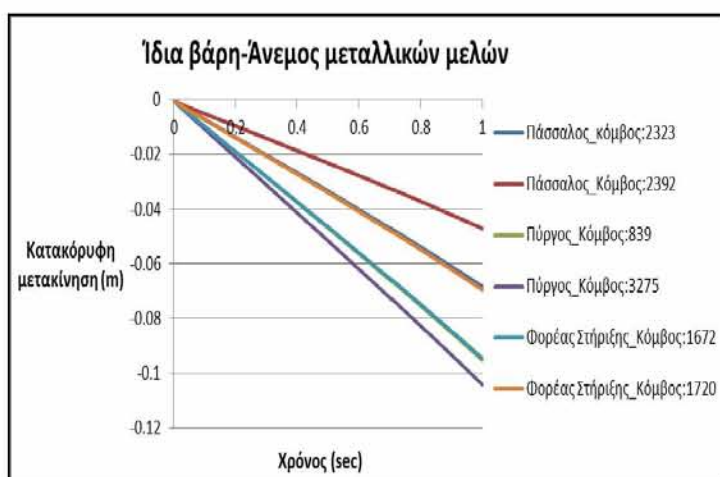
Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 8.19) παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις (U_3) που αναπτύσσονται στα μεταλλικά μέλη που θεμελιώνονται στην άργιλο 1. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται στην κορυφή του πύργου (μπλε χρώμα) από την πλευρά

εφαρμογής της δύναμης του ανέμου και έχουν αρνητική τιμή.



Σχήμα 8.19: Κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 1 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.

Στο Σχήμα 8.20 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών στην άργιλο 1.

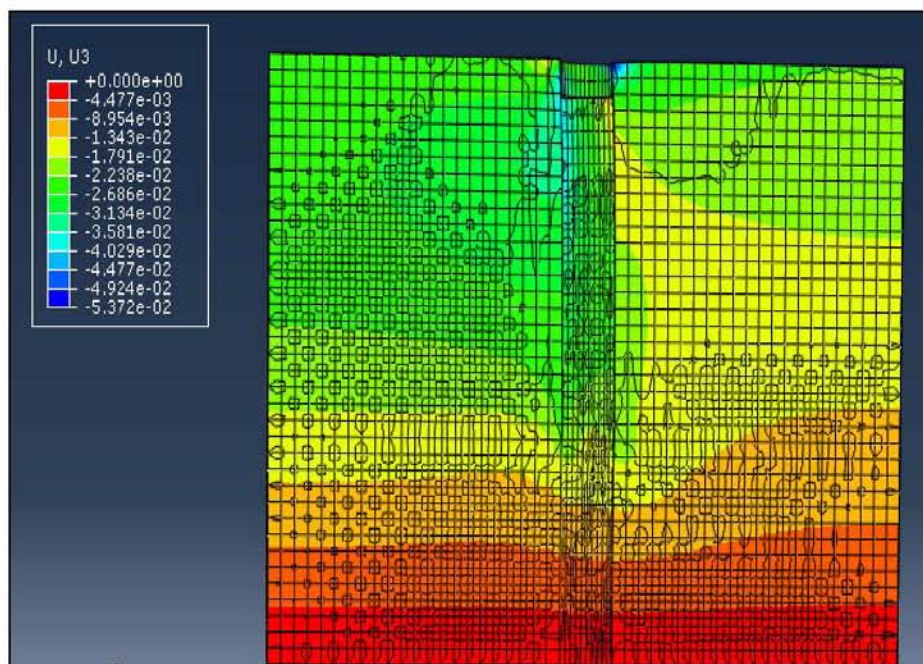


Σχήμα 8.20: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.

Για τα μεταλλικά μέλη η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση εμφανίζεται στον κόμβο της κορυφής του πύργου (κόμβος 3275) και είναι ίση με -10.4 cm. Επίσης, μεγάλες κατακόρυφες μετακινήσεις εμφανίζονται κοντά στη βάση του πύργου (κόμβος 839) και κοντά στην κορυφή του φορέα στήριξης (κόμβος 1672). Η μικρότερη κατακόρυφη μετακίνηση μεταξύ των μεταλλικών μελών εμφανίζεται στον κόμβο του πασσάλου 2392 και είναι ίση με -4.7 cm.

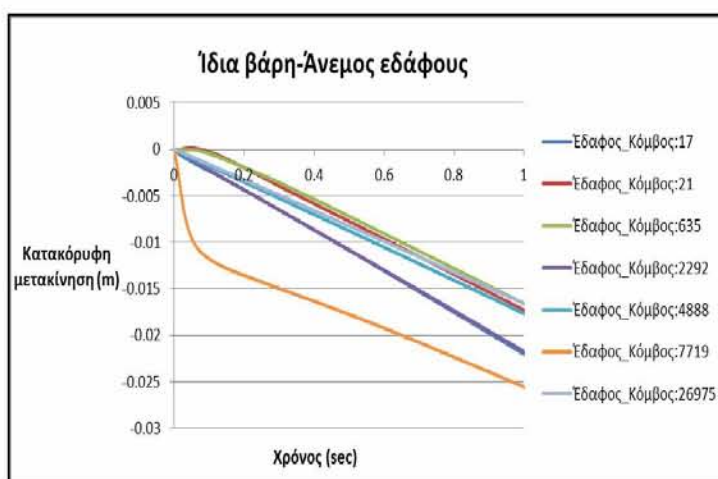
Άργιλος 2

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8.21) παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις (U_3) που αναπτύσσονται στην άργιλο 2. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους, εντός και γύρω από τον πάσσαλο (μπλε-πράσινο χρώμα), ενώ εξίσου μεγάλες μετακινήσεις παρουσιάζονται γύρω από τη βάση του πασσάλου.



Σχήμα 8.21: Κατακόρυφες μετακινήσεις στην άργιλο 2 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.

Στο Σχήμα 8.22 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις για την άργιλο 2.

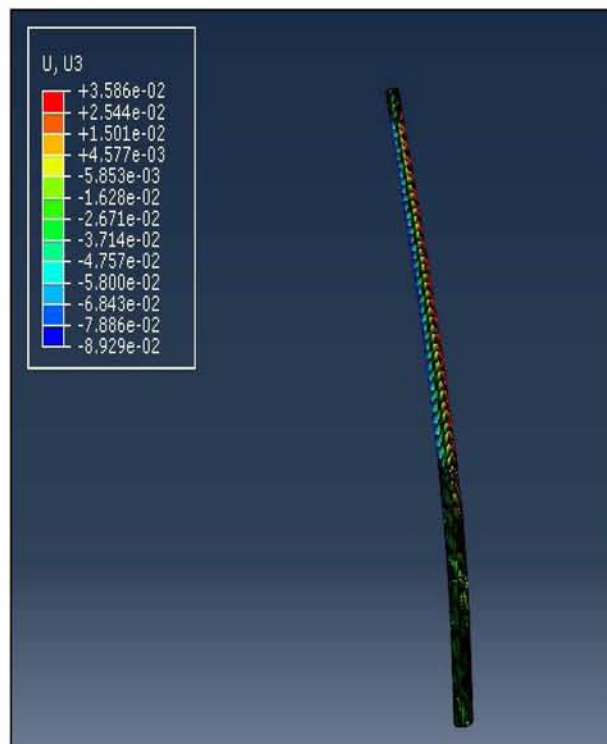


Σχήμα 8.22: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου για την άργιλο 2.

Για την άργιλο 2 η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση προκύπτει για τον κόμβο 7719 και είναι ίση με -2.55 cm. Εξίσου μεγάλες κατακόρυφες μετακινήσεις εμφανίζουν ο κόμβος 17 και ο κόμβος 2292. Η κατακόρυφη μετακίνηση του κόμβου 7719 ενώ αρχικά αυξάνεται απότομα,

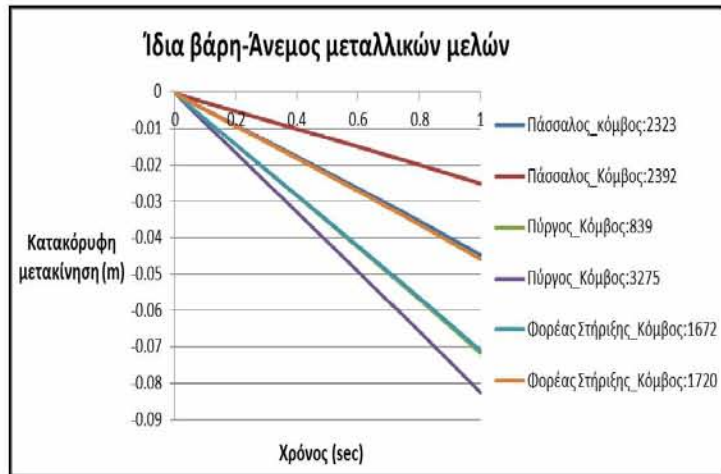
στη συνέχεια, αυξάνεται με μικρότερο ρυθμό, όμως παρ' όλα αυτά παρουσιάζει τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση στο τέλος του 1^{ου} βήματος. Οι υπόλοιποι 4 κόμβοι του εδάφους παρουσιάζουν πολύ κοντινές τιμές μεταξύ τους και έχουν μικρότερες μετακινήσεις σε σχέση με τους προηγούμενους 3 κόμβους.

Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 8.23) παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις (U_3) που αναπτύσσονται στα μεταλλικά μέλη που θεμελιώνονται στην άργιλο 2. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται στην κορυφή του πύργου (μπλε χρώμα) από την πλευρά εφαρμογής της δύναμης του ανέμου και έχουν αρνητική τιμή.



Σχήμα 8.23: Κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 2 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.

Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.24) παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών στην άργιλο 2.

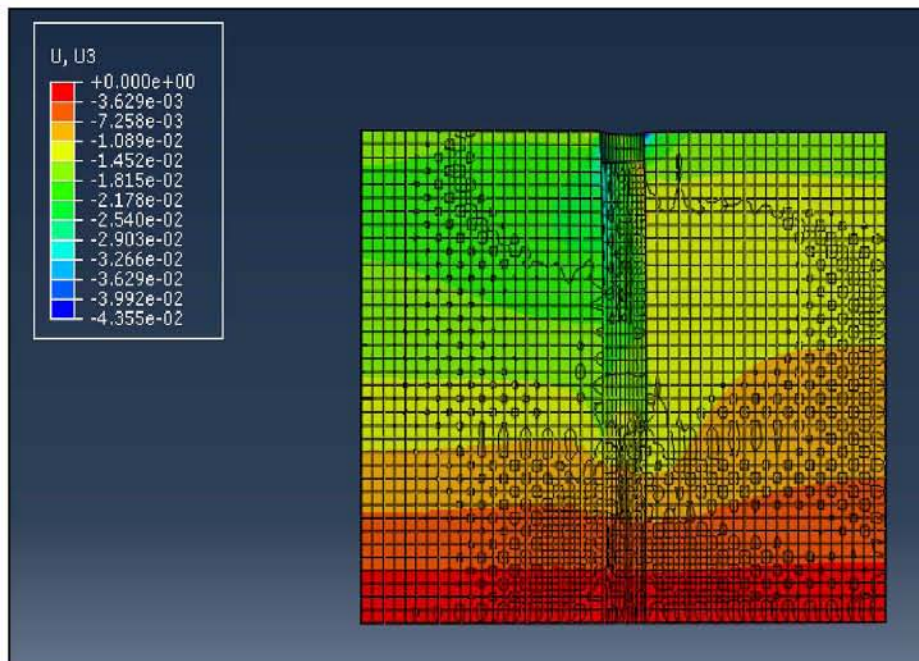


Σχήμα 8.24: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 2.

Για τα μεταλλικά μέλη η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση εμφανίζεται στον κόμβο της κορυφής του πύργου (κόμβος 3275) και είναι ίση με -8.2 cm. Επίσης, μεγάλες κατακόρυφες μετακινήσεις εμφανίζονται κοντά στη βάση του πύργου (κόμβος 839) και κοντά στην κορυφή του φορέα στήριξης (κόμβος 1672). Η μικρότερη κατακόρυφη μετακίνηση μεταξύ των μεταλλικών μελών εμφανίζεται στον κόμβο του πασσάλου 2392 και είναι ίση με -2.5 cm.

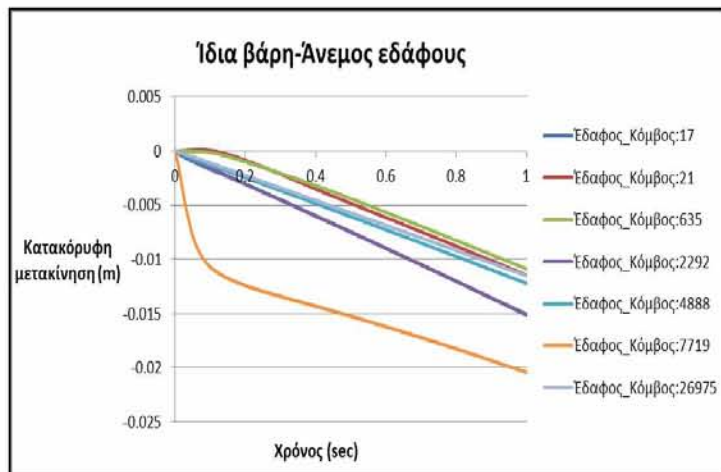
Άργιλος 3

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8.25) παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις (U_3) που αναπτύσσονται στην άργιλο 3. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους, εντός και γύρω από τον πάσσαλο (μπλε-πράσινο χρώμα), ενώ εξίσου μεγάλες μετακινήσεις παρουσιάζονται γύρω από τη βάση του πασσάλου.



Σχήμα 8.25: Κατακόρυφες μετακινήσεις στην άργιλο 3 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.

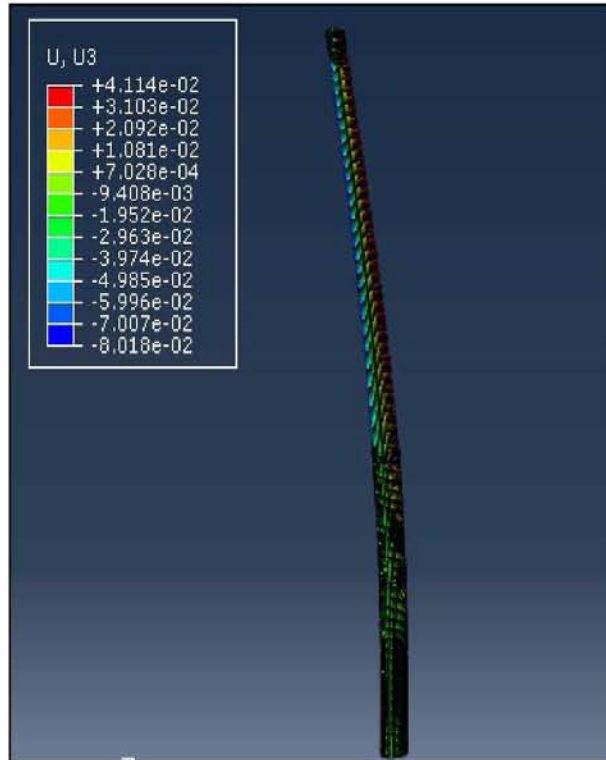
Στο Σχήμα 8.26 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις για την άργιλο 3.



Σχήμα 8.26: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου για την άργιλο 3.

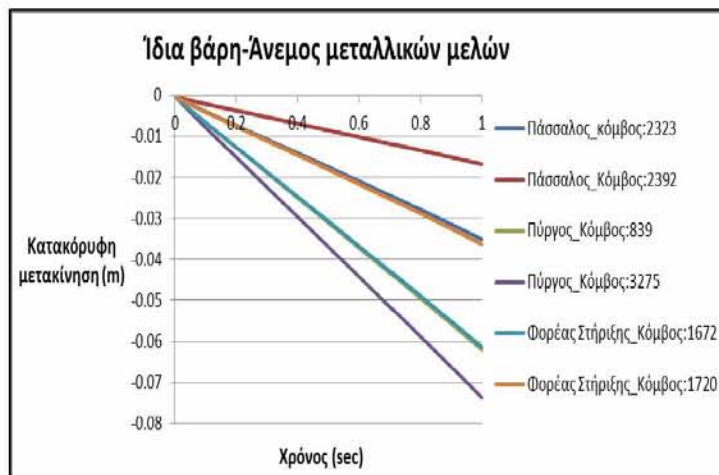
Και για την άργιλο 3 η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση προκύπτει για τον κόμβο 7719 και είναι ίση με -2.04 cm. Εξίσου μεγάλες κατακόρυφες μετακινήσεις εμφανίζουν ο κόμβος 17 και ο κόμβος 2292. Η κατακόρυφη μετακίνηση του κόμβου 7719 ενώ αρχικά αυξάνεται απότομα, στη συνέχεια, αυξάνεται με μικρότερο ρυθμό, όμως παρ' όλα αυτά παρουσιάζει τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση στο τέλος του 1^{ου} βήματος. Οι υπόλοιποι 4 κόμβοι του εδάφους παρουσιάζουν πολύ κοντινές τιμές μεταξύ τους και έχουν μικρότερες μετακινήσεις σε σχέση με τους προηγούμενους 3 κόμβους.

Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 8.27) παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις (U_3) που αναπτύσσονται στα μεταλλικά μέλη που θεμελιώνονται στην άργιλο 3. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται στην κορυφή του πύργου (μπλε χρώμα) από την πλευρά εφαρμογής της δύναμης του ανέμου και έχουν αρνητική τιμή.



Σχήμα 8.27: Κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 3 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.

Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.28) παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών στην άργιλο 3.



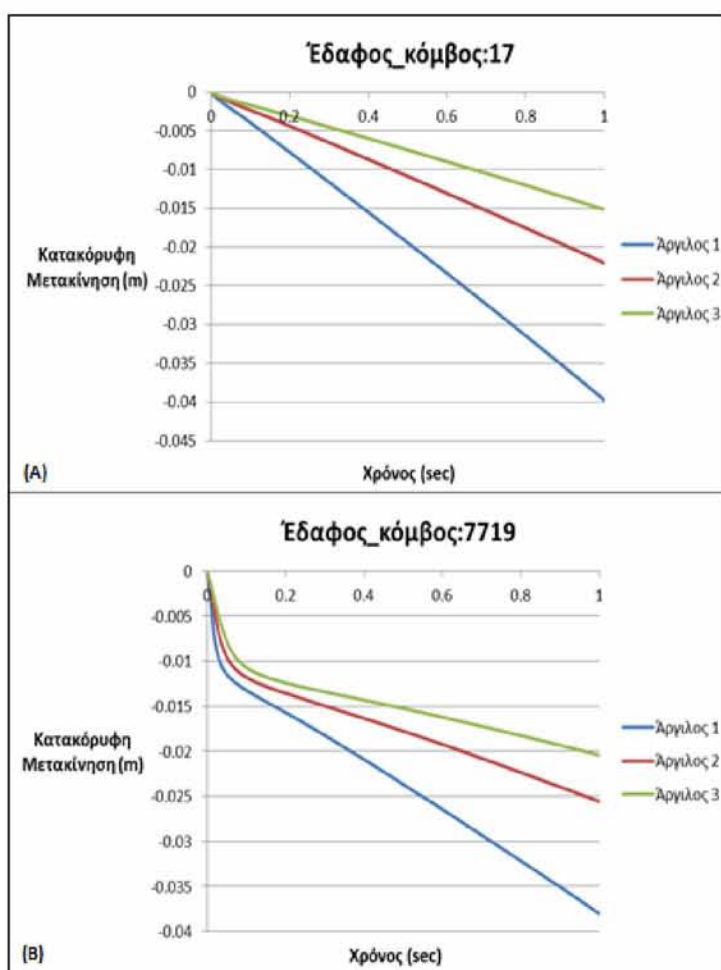
Σχήμα 8.28: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 3.

Για τα μεταλλικά μέλη η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση εμφανίζεται στον κόμβο της κορυφής του πύργου (κόμβος 3275) και είναι ίση με -7.37 cm. Επίσης, μεγάλες κατακόρυφες μετακινήσεις εμφανίζονται κοντά στη βάση του πύργου (κόμβος 839) και κοντά στην κορυφή του φορέα στήριξης (κόμβος 1672). Η μικρότερη κατακόρυφη μετακίνηση μεταξύ των

μεταλλικών μελών εμφανίζεται στον κόμβο του πασσάλου 2392 και είναι ίση με -2.5 cm.

8.2.2.1 Σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων των αργίλων 1, 2 και 3

Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 8.29) παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις (U_3) που αναπτύσσονται και στους τρεις τύπους αργίλων. Για τη σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων, στις τρεις αργίλους, επιλέχθηκαν για το έδαφος οι κόμβοι 17 και 7719. Η επιλογή αυτή έγινε καθώς στους κόμβους αυτούς εμφανίζονται οι μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις. Οι υπόλοιποι κόμβοι του εδάφους παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με τον κόμβο 17, τα διαγράμματα των οποίων παρουσιάζονται στο παράρτημα Α.



Σχήμα 8.29: Σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων των κόμβων 17 (Α) και 7719 (Β) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.

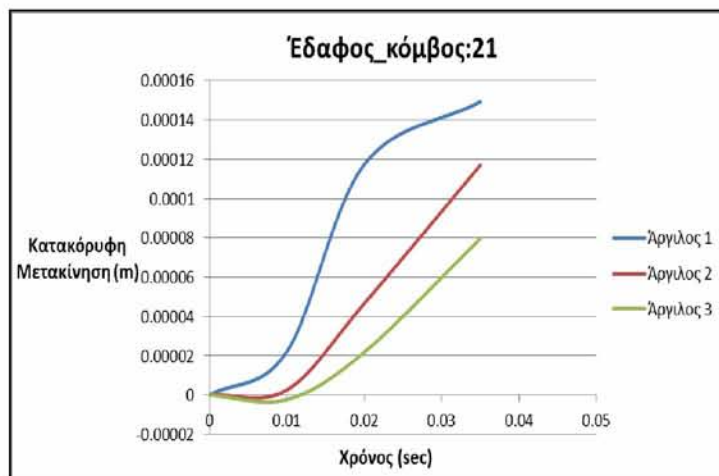
Παρακάτω συγκεντρώνονται κάποια από τα σημαντικότερα συμπεράσματα για τις κατακόρυφες μετακινήσεις του εδάφους, από τη σύγκριση των αργίλων 1, 2 και 3:

- Όπως ήταν αναμενόμενο, η άργιλος 1 έχει τις μεγαλύτερες κατακόρυφες μετακινήσεις για όλους τους κόμβους του εδάφους. Στη συνέχεια, ακολουθούν η άργιλος 2 και τις μικρότερες μετακινήσεις εμφανίζει η άργιλος 3.

- Οι άργιλοι 2 και 3 εμφανίζουν πιο κοντινές τιμές μετακινήσεων μεταξύ τους σε σχέση με την άργιλο 1, η οποία αποκλίνει από τις 2 προηγούμενες καθώς εμφανίζει αρκετά μεγαλύτερες μετακινήσεις.
- Όλοι οι κόμβοι του εδάφους που εξετάστηκαν παρουσιάζουν αρνητικές κατακόρυφες μετακινήσεις με τις μεγαλύτερες να εμφανίζονται για την άργιλο 1 στη βάση του πασσάλου και για τις άργιλους 2 και 3 κοντά στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους, γύρω από τον πάσσαλο.
- Οι μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις όλων των κόμβων της άργιλου 1 είναι 1.4-1.9 φορές μεγαλύτερες από αυτές της άργιλου 2 και 1.9-2.9 φορές μεγαλύτερες από της άργιλου 3.

Παρατήρηση:

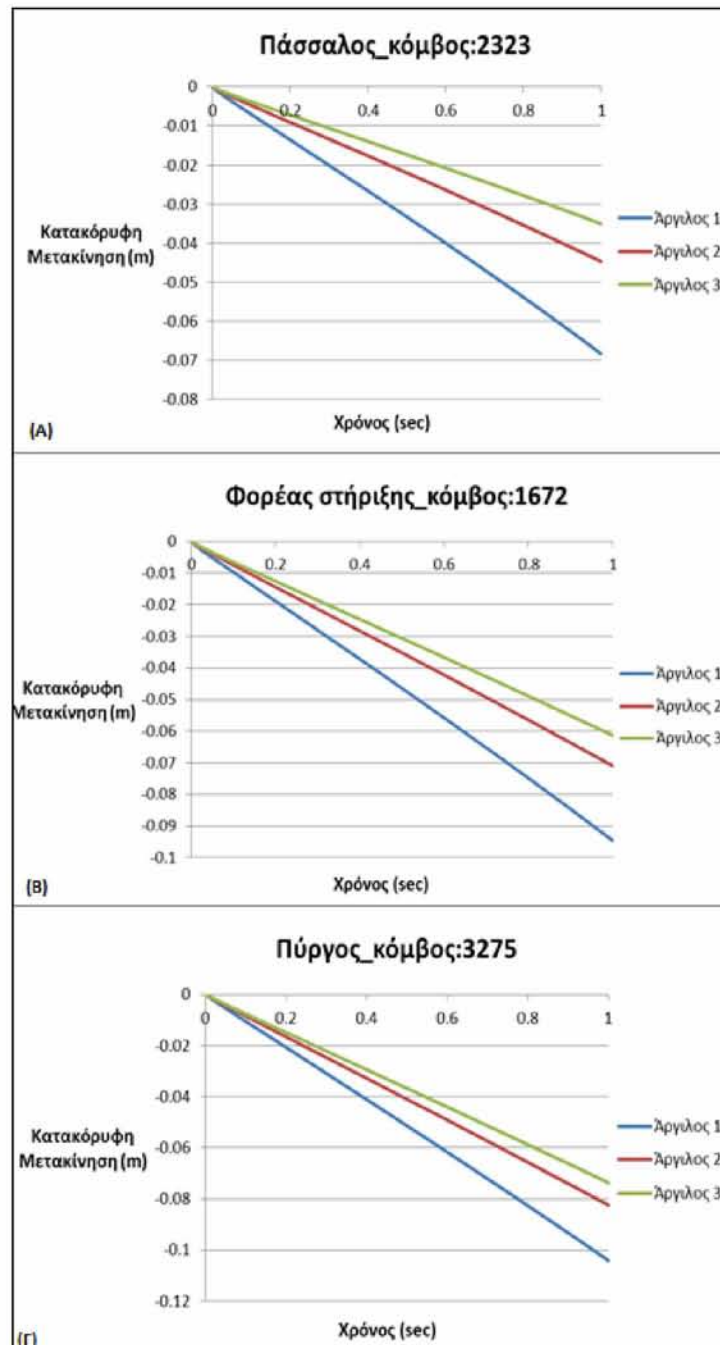
Όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 8.30), στον κόμβο 21, και για τις τρεις άργιλους παρατηρείται ότι στα 3 αρχικά υποστάδια του 1^{ου} βήματος παρουσιάζονται κάποιες μικρές θετικές κατακόρυφες μετακινήσεις, οι οποίες όμως στη συνέχεια γίνονται αρνητικές. Οι θετικές αυτές μετακινήσεις υποδηλώνουν τη διόγκωση της άργιλου, η οποία αποτελεί σύνηθες φαινόμενο στα αργιλικά εδάφη. Η διόγκωση αυτή οφείλεται πιθανώς στην αντίσταση που παρουσιάζει το έδαφος ως προς την οριζόντια φόρτίσή του αλλά και στην τριβή που υπάρχει μεταξύ του πασσάλου και του εδάφους. Η διόγκωση είναι μεγαλύτερη για την πιο μαλακή άργιλο, δηλαδή για την άργιλο 1.



Σχήμα 8.30: Κατακόρυφη μετακίνηση του κόμβου 21 συναρτήσει του χρόνου για τα αρχικά βήματα της ανάλυσης, για τις άργιλους 1, 2 και 3.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8.31) παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις της κορυφής του πασσάλου, του φορέα στήριξης και του πύργου, για τις τρεις άργιλους. Επειδή οι μετακινήσεις στην κορυφή του πασσάλου (κόμβος 2323) είναι παρόμοιες με αυτές της βάσης του φορέα στήριξης (κόμβος 1720), επιλέχθηκαν να συγκριθούν, για τις τρεις άργιλους, μόνο οι μετακινήσεις του κόμβου 2323. Με την ίδια λογική επιλέχθηκαν να συγκριθούν οι μετακινήσεις στην κορυφή του φορέα στήριξης (κόμβος 1672), για τις τρεις άργιλους, ενώ παραλήφθηκαν αυτές στη βάση του πύργου (κόμβος 839). Τέλος, συγκρίθηκαν

οι μετακινήσεις στην κορυφή του πύργου (κόμβος 3275), καθώς εκεί εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές.



Σχήμα 8.31: Σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων των κόμβων 2323 (Α), 1672 (Β) και 3275 (Γ) συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.

Παρακάτω συγκεντρώνονται κάποια από τα σημαντικότερα συμπεράσματα για τις κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών, από τη σύγκριση των αργίλων 1, 2 και 3:

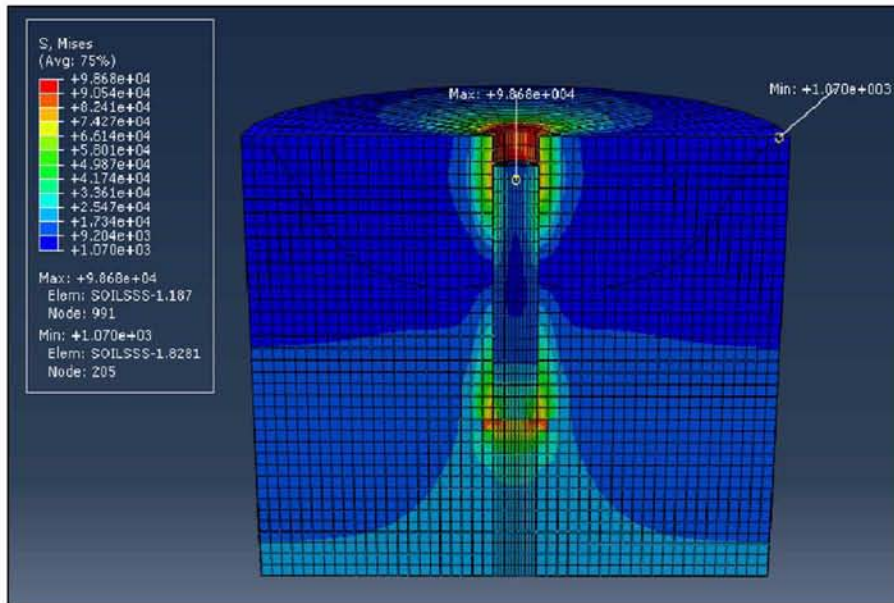
- Και σε αυτή την περίπτωση, η άργιλος 1 έχει τις μεγαλύτερες κατακόρυφες μετακινήσεις. Ακολουθεί η άργιλος 2 και τις μικρότερες μετακινήσεις εμφανίζει η άργιλος 3.
- Οι άργιλοι 2 και 3 εμφανίζουν πιο κοντινές τιμές μετακινήσεων σε σχέση με την άργιλο 1.
- Οι κατακόρυφες μετακινήσεις στην κορυφή του πύργου είναι ελαφρώς μεγαλύτερες συγκριτικά με της βάσης του. Οι κατακόρυφες μετακινήσεις της κορυφής του πασσάλου και του φορέα στήριξης είναι μεγαλύτερες συγκριτικά με αυτές των βάσεών τους.
- Οι μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων του μονοπασσάλου για την άργιλο 1 είναι 1.5-1.8 φορές μεγαλύτερες από αυτές της άργιλου 2 και 1.9-2.8 φορές μεγαλύτερες από της άργιλου 3. Οι μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων του φορέα στήριξης της άργιλου 1 είναι 1.33-1.51 φορές μεγαλύτερες από αυτές της άργιλου 2 και 1.54-1.92 φορές μεγαλύτερες από της άργιλου 3. Τέλος, όσον αφορά τους κόμβους του πύργου, οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις για την άργιλο 1 είναι 1.26-1.33 φορές μεγαλύτερες από αυτές της άργιλου 2 και 1.41-1.54 φορές μεγαλύτερες από της άργιλου 3.

8.2.3 Αποτελέσματα τάσεων Von Mises των αργίλων 1, 2 και 3

Για το συνδυασμό φόρτισης των ίδιων βαρών και του ανέμου προέκυψαν τα αποτελέσματα των τάσεων Von Mises και για τις άργιλους 1, 2 και 3.

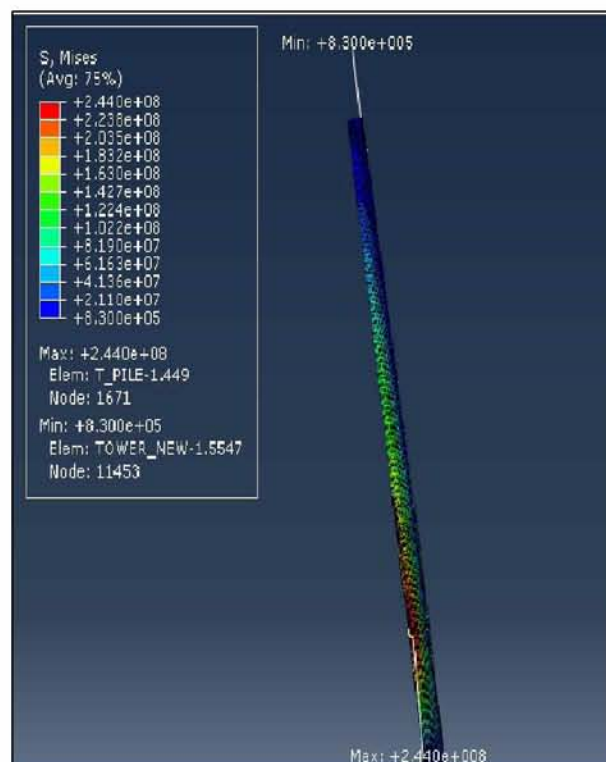
Άργιλος 1

Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.32) παρουσιάζονται οι μέγιστες (κόκκινο χρώμα) και οι ελάχιστες (μπλε χρώμα) τάσεις του εδάφους. Μεγάλες τάσεις εμφανίζονται στα σημεία του εδάφους που βρίσκονται σε επαφή με τον πάσσαλο, τόσο στην κορυφή όσο και στη βάση του, με τις μέγιστες να παρουσιάζονται στα σημεία του εδάφους που βρίσκονται γύρω από την κορυφή του. Οι τάσεις του εδάφους μικραίνουν καθώς αυξάνεται η απόσταση από τον πάσσαλο. Η μέγιστη τάση είναι ίση με 98.680 Pa και η ελάχιστη ίση με 1.070 Pa.



Σχήμα 8.32: Οι τάσεις Von Mises στην άργιλο 1 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.

Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.33) παρουσιάζονται οι μέγιστες (κόκκινο χρώμα) και οι ελάχιστες (μπλε χρώμα) τάσεις των μεταλλικών μελών. Οι μέγιστες τάσεις εμφανίζονται στην επιφάνεια σύνδεσης του πασσάλου με το φορέα στήριξης ενώ οι ελάχιστες στην κορυφή του πύργου. Η μέγιστη τάση είναι ίση με 244.000.000 Pa και η ελάχιστη ίση με 830.000 Pa.

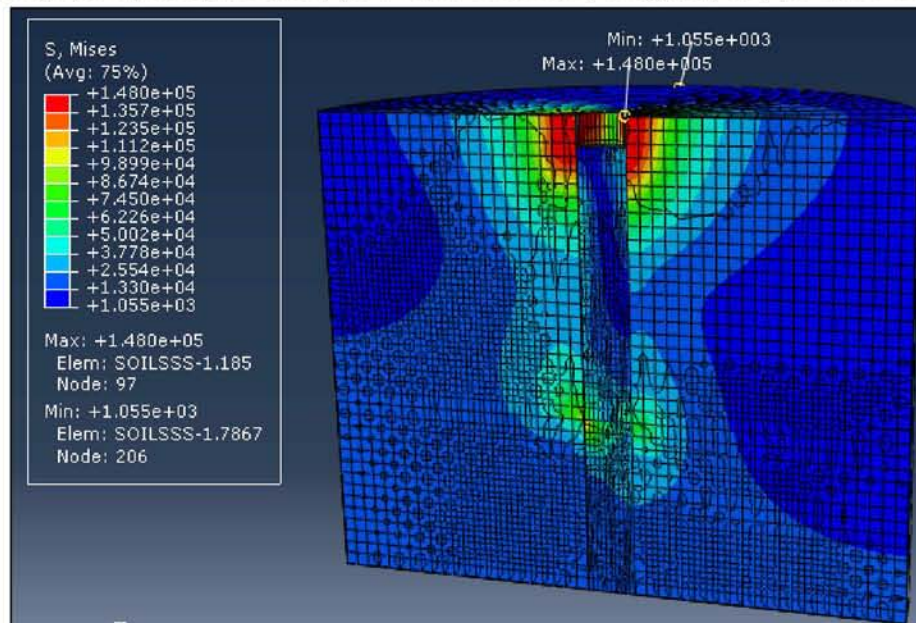


Σχήμα 8.33: Οι τάσεις Von Mises στα μεταλλικά μέλη στην άργιλο 1 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.

Άργιλος 2

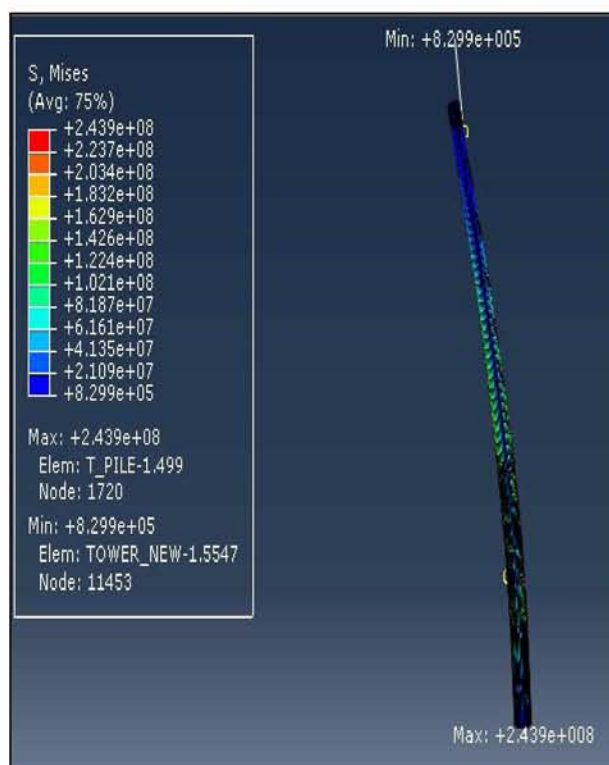
Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.34) παρουσιάζονται οι μέγιστες (κόκκινο χρώμα) και οι ελάχιστες (μπλε χρώμα) τάσεις του εδάφους. Μεγάλες τάσεις εμφανίζονται στα σημεία του

εδάφους που βρίσκονται σε επαφή με τον πάσσαλο, τόσο στην κορυφή όσο και στη βάση του, με τις μέγιστες να παρουσιάζονται στα σημεία του εδάφους που βρίσκονται γύρω από την κορυφή του. Οι τάσεις του εδάφους μικραίνουν καθώς αυξάνεται η απόσταση από τον πάσσαλο. Η μέγιστη τάση είναι ίση με 148.000 Pa και η ελάχιστη ίση με 1.055 Pa.



Σχήμα 8.34: Οι τάσεις Von Mises στην άργιλο 2 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.

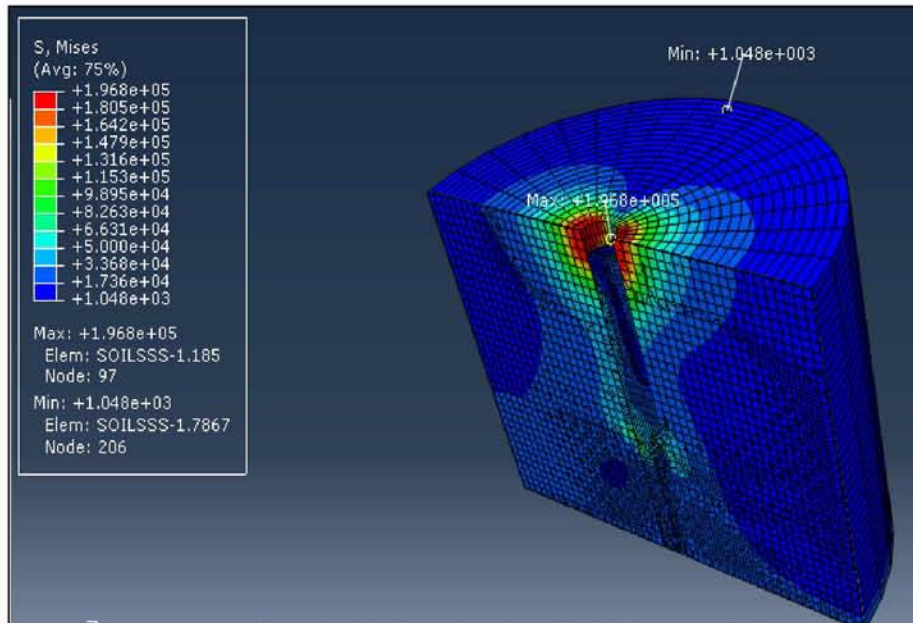
Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.35) παρουσιάζονται οι μέγιστες (κόκκινο χρώμα) και οι ελάχιστες (μπλε χρώμα) τάσεις των μεταλλικών μελών. Οι μέγιστες τάσεις εμφανίζονται στην επιφάνεια σύνδεσης του πασσάλου με το φορέα στήριξης ενώ οι ελάχιστες στην κορυφή του πύργου. Η μέγιστη τάση είναι ίση με 243.900.000 Pa και η ελάχιστη ίση με 829.900 Pa.



Σχήμα 8.35: Οι τάσεις Von Mises στα μεταλλικά μέλη στην άγκυρα 2 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.

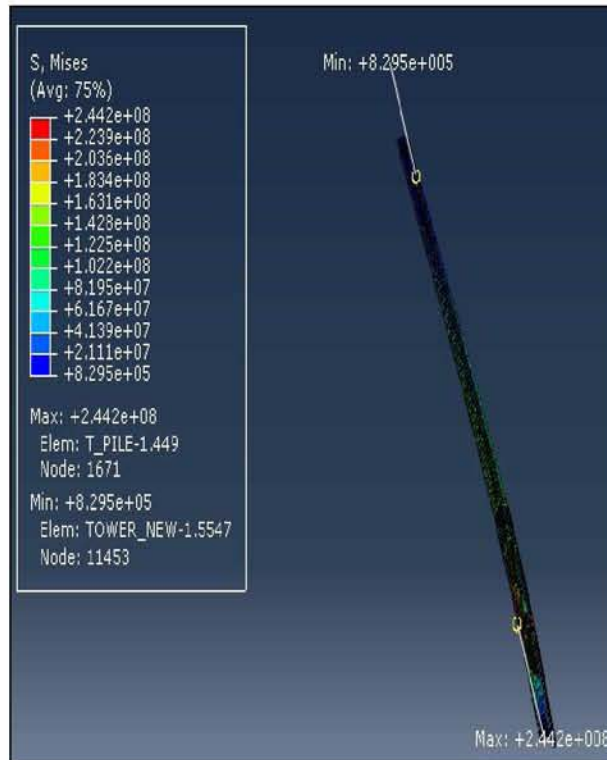
Άγκυρα 3

Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.36) παρουσιάζονται οι μέγιστες (κόκκινο χρώμα) και οι ελάχιστες (μπλε χρώμα) τάσεις του εδάφους. Μεγάλες τάσεις εμφανίζονται στα σημεία του εδάφους που βρίσκονται σε επαφή με τον πάσσαλο, τόσο στην κορυφή όσο και στη βάση του, με τις μέγιστες να παρουσιάζονται στα σημεία του εδάφους που βρίσκονται γύρω από την κορυφή του. Οι τάσεις του εδάφους μικραίνουν καθώς αυξάνεται η απόσταση από τον πάσσαλο. Η μέγιστη τάση είναι ίση με 196.800 Pa και η ελάχιστη ίση με 1.048 Pa.



Σχήμα 8.36: Οι τάσεις Von Mises στην άργλιο 3 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.

Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.37) παρουσιάζονται οι μέγιστες (κόκκινο χρώμα) και οι ελάχιστες (μπλε χρώμα) τάσεις των μεταλλικών μελών. Οι μέγιστες τάσεις εμφανίζονται στην επιφάνεια σύνδεσης του πασσάλου με το φορέα στήριξης ενώ οι ελάχιστες στην κορυφή του πύργου. Η μέγιστη τάση είναι ίση με 244.200.000 Pa και η ελάχιστη ίση με 829.500 Pa.



Σχήμα 8.37: Οι τάσεις Von Mises στα μεταλλικά μέλη στην άργιλο 3 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.

Παρακάτω παρατίθενται κάποια από τα βασικότερα συμπεράσματα από τη σύγκριση των τάσεων που αναπτύσσονται στις άργιλους 1, 2 και 3. Τα συμπεράσματα αυτά είναι τα εξής:

- Και για τις τρεις άργιλους οι μεγαλύτερες τάσεις εμφανίζονται στα σημεία του εδάφους που βρίσκονται σε επαφή με τον πάσσαλο, τόσο στην κορυφή όσο και στη βάση του. Μεταξύ των τριών άργιλων, η άργιλος 3 εμφανίζει τις μεγαλύτερες τάσεις με τη μέγιστη να ισούται με 196.800 Pa, ενώ ακολουθούν η άργιλος 2 και τέλος η άργιλος 1.
- Οι τάσεις του εδάφους σε όλες τις άργιλους μικραίνουν καθώς αυξάνεται η απόσταση από τον πάσσαλο. Μεταξύ των τριών άργιλων, η άργιλος 3 εμφανίζει τις μικρότερες τάσεις με την ελάχιστη να ισούται με 1.048 Pa, ενώ ακολουθούν η άργιλος 2 και τέλος η άργιλος 1.
- Και στις τρεις άργιλους, οι μεγαλύτερες τάσεις στα μεταλλικά μέλη εμφανίζονται στην επιφάνεια σύνδεσης του πασσάλου με το φορέα στήριξης ενώ οι μικρότερες στην κορυφή του πύργου. Ωστόσο, δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές στις τιμές των τάσεων μεταξύ των τριών άργιλων. Οι μέγιστες τάσεις των μεταλλικών μελών κυμαίνονται από 243.900.000 έως 244.000.000 Pa, ενώ οι ελάχιστες από 829.500 έως 830.000 Pa.

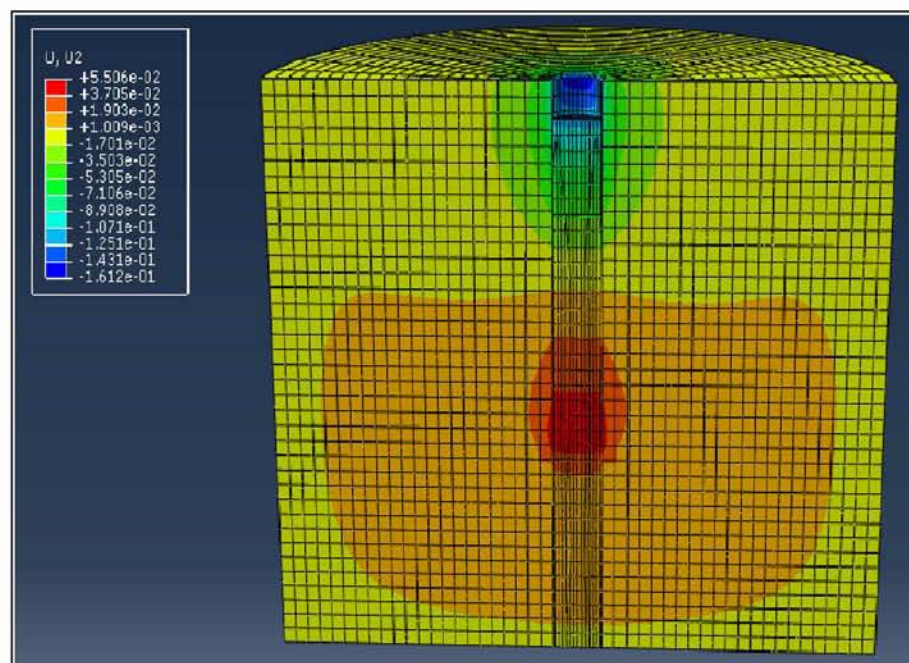
8.3 Αποτελέσματα για το συνδυασμό φόρτισης των ίδιων βαρών, του ανέμου και του ανεμογενούς κυματισμού

8.3.1 Αποτελέσματα οριζόντιων μετακινήσεων των αργίλων 1, 2 και 3

Για το συνδυασμό φόρτισης των ίδιων βαρών, του ανέμου και του ανεμογενούς κυματισμού προέκυψαν τα αποτελέσματα για 13 σημεία από το μοντέλο για τις οριζόντιες μετακινήσεις στη διεύθυνση Y και για τις τρεις αργίλους.

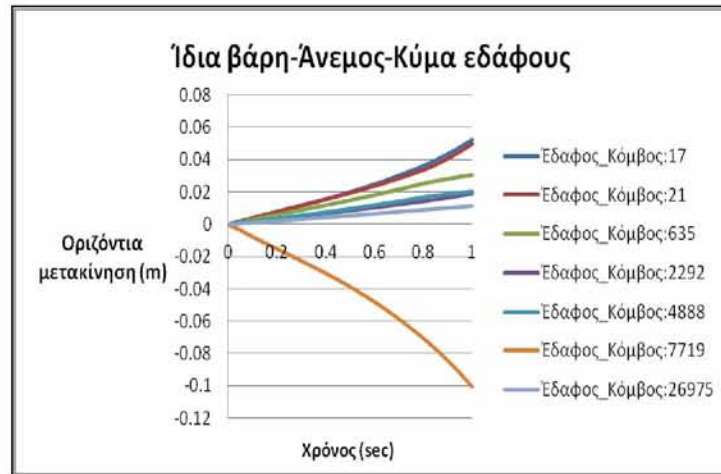
Άργιλος 1

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8.38) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις (U_2) που αναπτύσσονται στην άργιλο 1. Οι μεγαλύτερες θετικές μετακινήσεις εμφανίζονται στο έδαφος που βρίσκεται στη βάση του πάσσαλου (κόκκινο χρώμα), ενώ μεγαλύτερες αρνητικές στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους (μπλε χρώμα), εντός και γύρω από τον πάσσαλο.



Σχήμα 8.38: Οριζόντιες μετακινήσεις στην άργιλο 1 για τον δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.

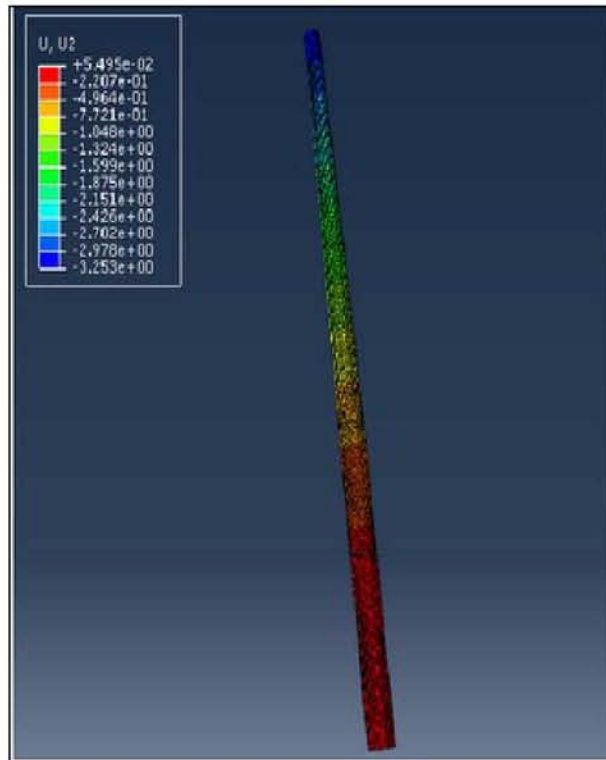
Στο Σχήμα 8.39 παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις για την άργιλο 1.



Σχήμα 8.39: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.

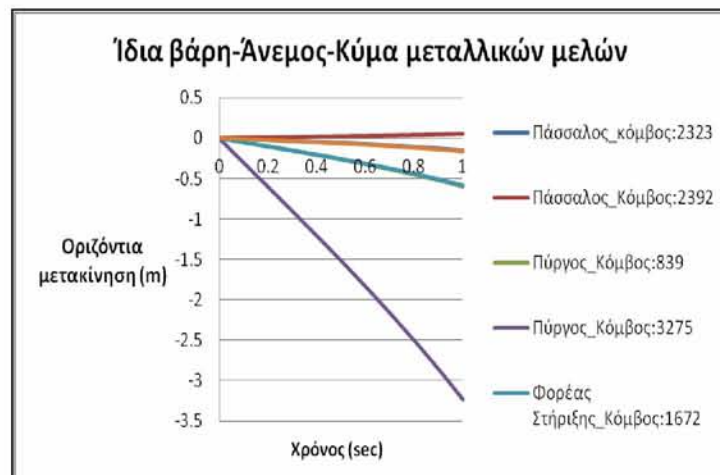
Η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση στο έδαφος προέκυψε, όπως και στον προηγούμενο συνδυασμό φόρτισης, για τον κόμβο 7719 και είναι ίση με -10.07 cm. Ωστόσο, στους υπόλοιπους κόμβους του εδάφους οι μετακινήσεις είναι θετικές, με τη μεγαλύτερη να εμφανίζεται στον κόμβο 17. Η μετακίνηση αυτή είναι ίση με 5.25 cm. Παρατηρείται ότι κατά απόλυτη τιμή οι μετακινήσεις που αναπτύσσονται στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές των υπόλοιπων κόμβων του.

Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 8.40) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις (U_2) που αναπτύσσονται στα μεταλλικά μέλη που θεμελιώνονται στην άργιλο 1. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται στην κορυφή του πύργου (μπλε χρώμα) και έχουν αρνητική τιμή ενώ οι μετακινήσεις κοντά στη βάση του πασσάλου θεμελίωσης είναι θετικές (κόκκινο χρώμα) και μικρότερες από τις κατά απόλυτη τιμή μετακινήσεις του φορέα στήριξης και του πύργου της ανεμογεννήτριας. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην ολίσθηση μεταξύ της βάσης του πασσάλου και του εδάφους.



Σχήμα 8.40: Οριζόντιες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 1 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.

Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.41) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις που προκύπτουν για τα μεταλλικά μέλη της κατασκευής για την άργιλο 1.



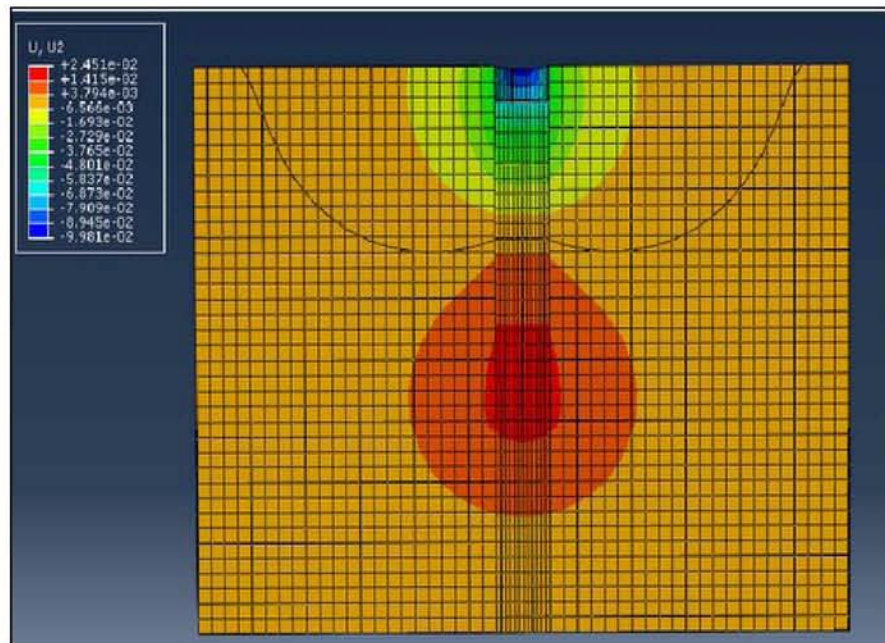
Σχήμα 8.41: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.

Οι οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών στον δεύτερο συνδυασμό φόρτισης είναι αρνητικές, με εξαίρεση αυτών της βάσης του πασσάλου που είναι θετικές. Η μέγιστη αρνητική οριζόντια μετακίνηση της άργιλου 1 προέκυψε στον κόμβο 3275 και είναι ίση με -3.233 m, ενώ η μέγιστη θετική στον κόμβο 2392 και είναι ίση με 5.35 cm. Παρατηρείται ότι κατά απόλυτη τιμή οι μετακινήσεις που αναπτύσσονται στην κορυφή του

πύργου είναι πολύ μεγαλύτερες συγκριτικά με αυτές των υπόλοιπων μεταλλικών μελών, με αυτές που αναπτύσσονται στη βάση του πασσάλου να είναι οι μικρότερες.

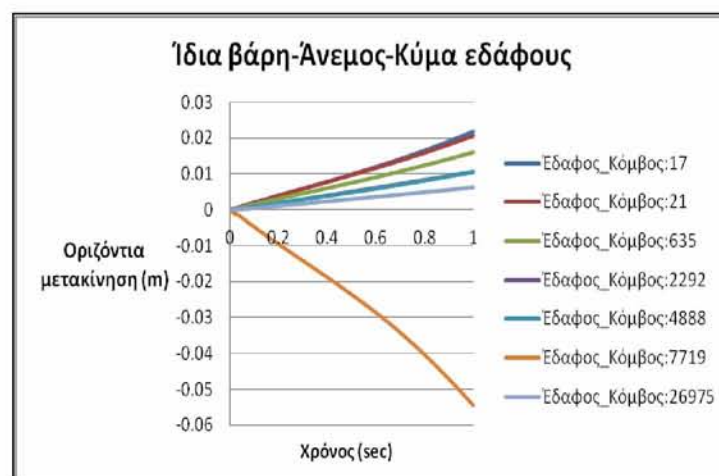
Άργιλος 2

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8.42) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις (U_2) που αναπτύσσονται στην άργιλο 2. Όπως και στην άργιλο 1, οι μεγαλύτερες θετικές μετακινήσεις εμφανίζονται στο έδαφος που βρίσκεται στη βάση του πασσάλου (κόκκινο χρώμα), ενώ μεγαλύτερες αρνητικές στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους (μπλε χρώμα), εντός και γύρω από τον πάσσαλο.



Σχήμα 8.42: Οριζόντιες μετακινήσεις στην άργιλο 2 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.

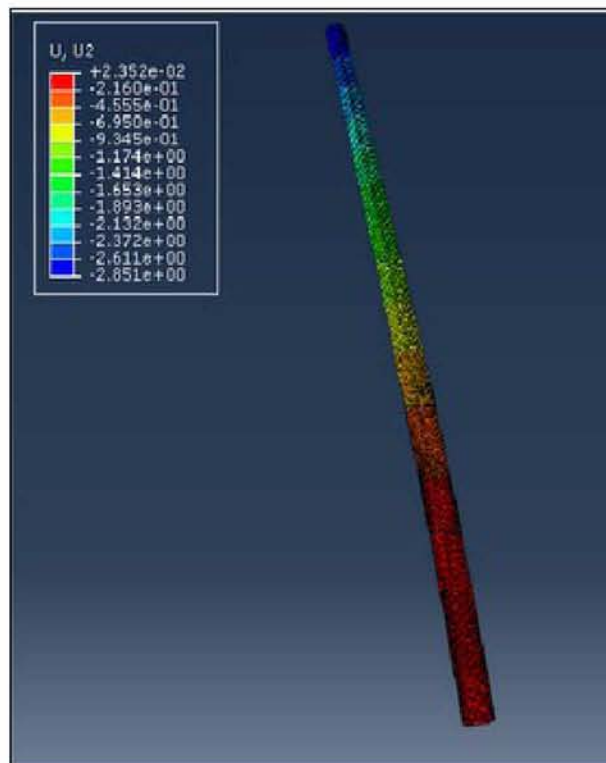
Στο Σχήμα 8.43 παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις για την άργιλο 2.



Σχήμα 8.43: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 2.

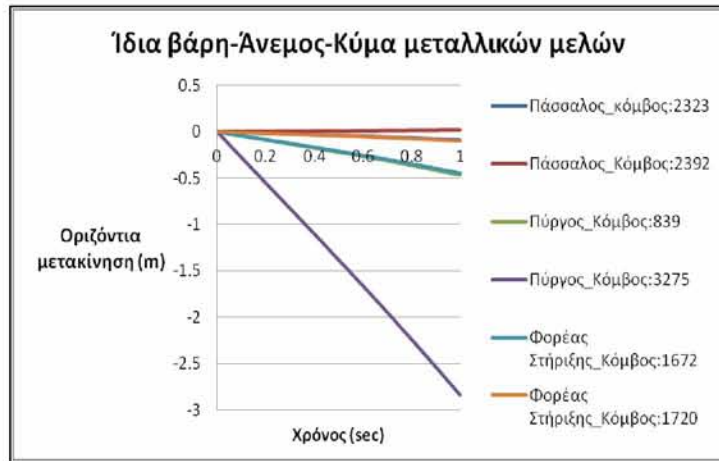
Η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση στο έδαφος προέκυψε, όπως και στον προηγούμενο συνδυασμό φόρτισης, στον κόμβο 7719 και είναι ίση με -5.5 cm. Στους υπόλοιπους κόμβους του εδάφους οι μετακινήσεις είναι θετικές, με τη μεγαλύτερη να εμφανίζεται στον κόμβο 17. Η μετακίνηση αυτή είναι ίση με 2.17 cm. Παρατηρείται ότι κατά απόλυτη τιμή οι μετακινήσεις που αναπτύσσονται στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές των υπόλοιπων κόμβων του.

Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 8.44) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις (U_2) που αναπτύσσονται στα μεταλλικά μέλη που θεμελιώνονται στην άργιλο 2. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται στην κορυφή του πύργου (μπλε χρώμα) και έχουν αρνητική τιμή ενώ οι μετακινήσεις κοντά στη βάση του πασσάλου θεμελίωσης είναι θετικές (κόκκινο χρώμα) και μικρότερες από τις κατά απόλυτη τιμή μετακινήσεις του φορέα στήριξης και του πύργου της ανεμογεννήτριας. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην ολίσθηση μεταξύ της βάσης του πασσάλου και του εδάφους.



Σχήμα 8.44: Οριζόντιες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 2 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.

Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.45) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις που προκύπτουν για τα μεταλλικά μέλη της κατασκευής για την άργιλο 2.

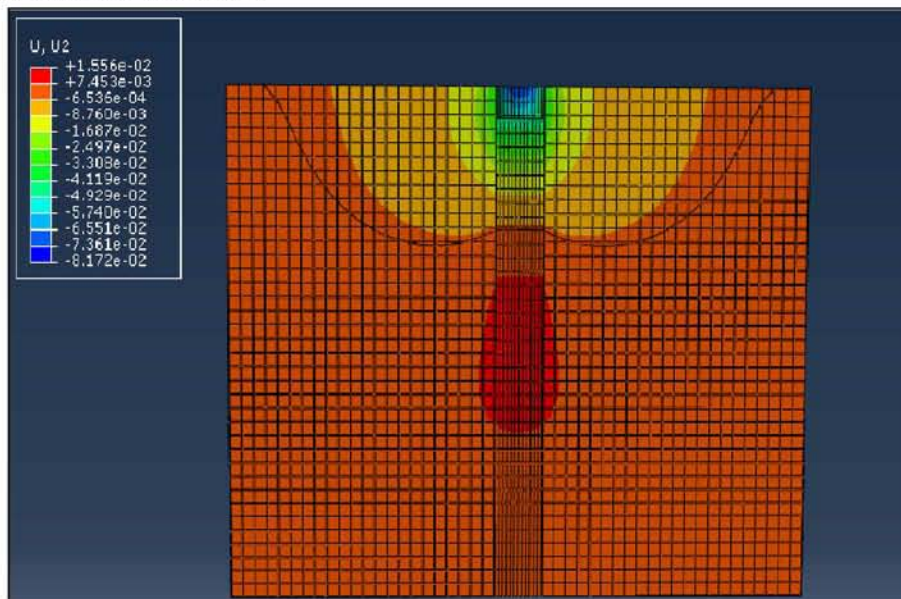


Σχήμα 8.45: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 2.

Οι οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών στον δεύτερο συνδυασμό φόρτισης είναι αρνητικές, με εξαίρεση αυτών της βάσης του πασσάλου που είναι θετικές. Η μέγιστη αρνητική οριζόντια μετακίνηση της αργίλου 2 προέκυψε στον κόμβο 3275 και είναι ίση με -2.83 m , ενώ η μέγιστη θετική στον κόμβο 2392 και είναι ίση με 2.31 cm . Παρατηρείται ότι κατά απόλυτη τιμή οι μετακινήσεις που αναπτύσσονται στην κορυφή του πύργου είναι πολύ μεγαλύτερες συγκριτικά με αυτές των υπόλοιπων μεταλλικών μελών, με αυτές που αναπτύσσονται στη βάση του πασσάλου να είναι οι μικρότερες.

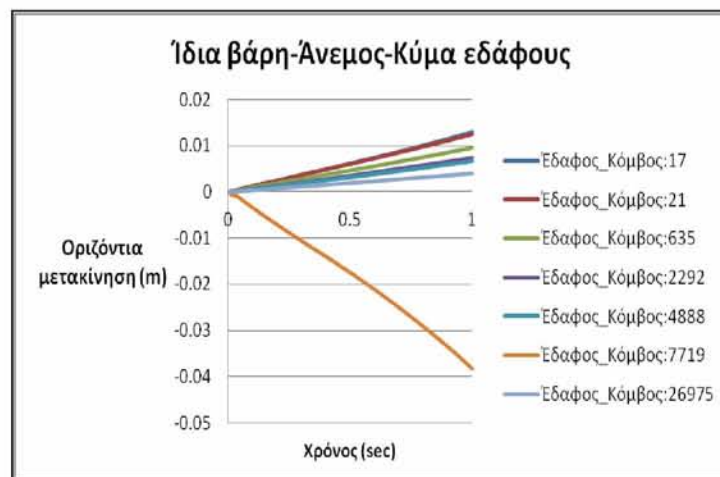
Άργιλος 3

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8.46) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις (U_2) που αναπτύσσονται στην άργιλο 3. Όπως και στις αργίλους 1 και 2, οι μεγαλύτερες θετικές μετακινήσεις εμφανίζονται στο έδαφος που βρίσκεται στη βάση του πασσάλου (κόκκινο χρώμα), ενώ μεγαλύτερες αρνητικές στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους (μπλε χρώμα), εντός και γύρω από τον πάσσαλο.



Σχήμα 8.46: Οριζόντιες μετακινήσεις στην άργιλο 3 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.

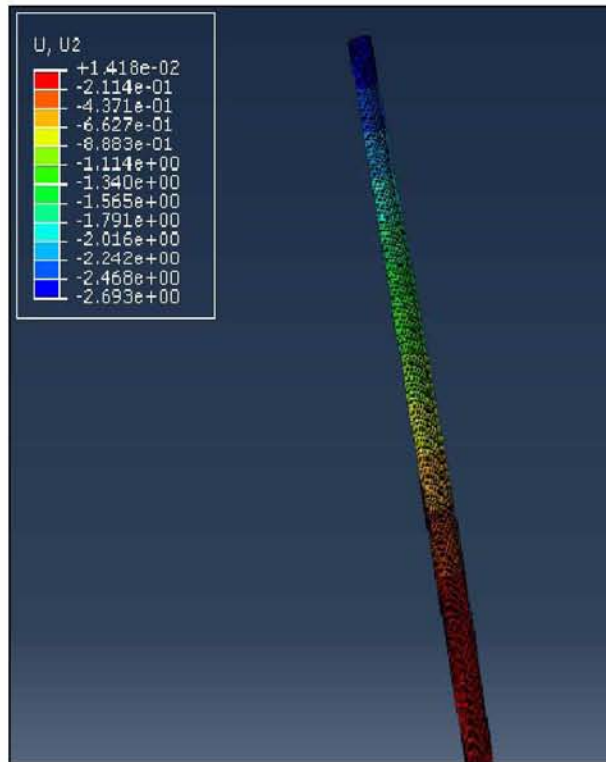
Στο Σχήμα 8.47 παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις για την άργιλο 3.



Σχήμα 8.47: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 3.

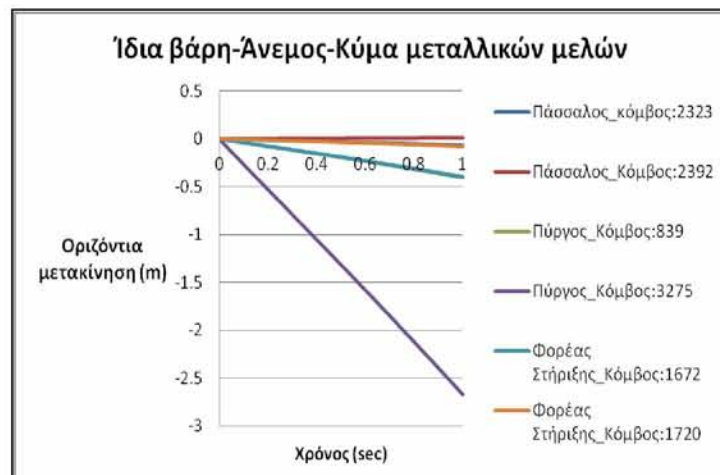
Η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση στο έδαφος προέκυψε, όπως και στον προηγούμενο συνδυασμό φόρτισης, στον κόμβο 7719 και είναι ίση με -3.81 cm. Στους υπόλοιπους κόμβους του εδάφους οι μετακινήσεις είναι θετικές, με τη μεγαλύτερη να εμφανίζεται στον κόμβο 17. Η μετακίνηση αυτή είναι ίση με 1.29 cm. Παρατηρείται ότι κατά απόλυτη τιμή οι μετακινήσεις που αναπτύσσονται στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές των υπόλοιπων κόμβων του.

Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 8.48) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις (U_2) που αναπτύσσονται στα μεταλλικά μέλη που θεμελιώνονται στην άργιλο 3. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται στην κορυφή του πύργου (μπλε χρώμα) και έχουν αρνητική τιμή ενώ οι μετακινήσεις κοντά στη βάση του πασσάλου θεμελίωσης είναι θετικές (κόκκινο χρώμα) και μικρότερες από τις κατά απόλυτη τιμή μετακινήσεις του φορέα στήριξης και του πύργου της ανεμογεννήτριας. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην ολίσθηση μεταξύ της βάσης του πασσάλου και του εδάφους.



Σχήμα 8.48: Οριζόντιες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 3 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.

Στο Σχήμα 8.49 παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις που προκύπτουν για τα μεταλλικά μέλη για την άργιλο 3.



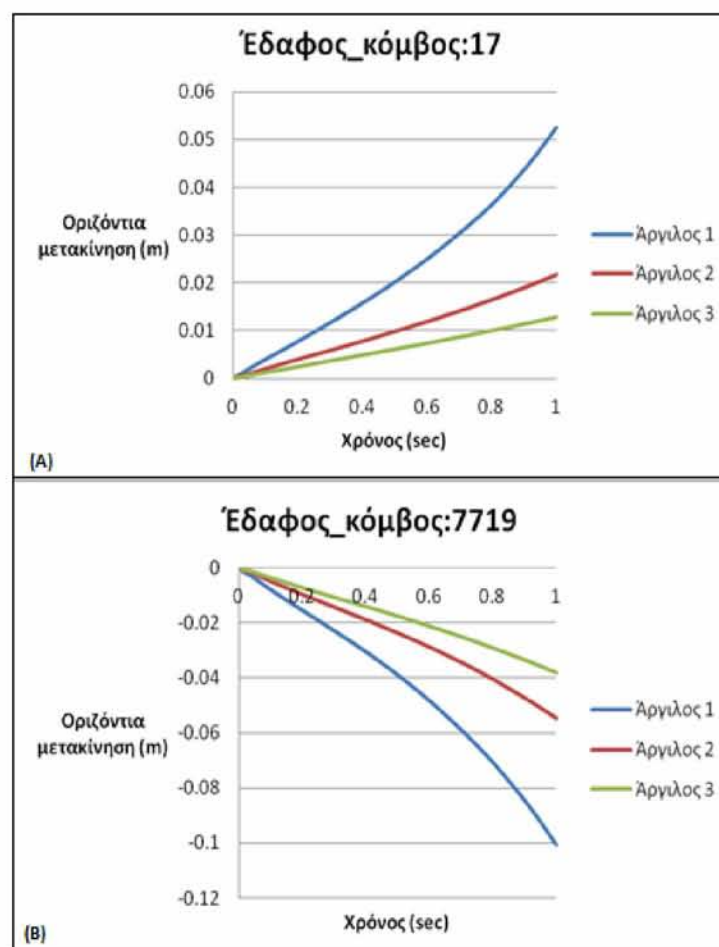
Σχήμα 8.49: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 3.

Οι οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών στον δεύτερο συνδυασμό φόρτισης είναι αρνητικές, με εξαίρεση αυτών της βάσης του πασσάλου που είναι θετικές. Η μέγιστη αρνητική οριζόντια μετακίνηση της άργιλου 3 προέκυψε στον κόμβο 3275 και είναι ίση με -2.68 m, ενώ η μέγιστη θετική στον κόμβο 2392 και είναι ίση με 1.41 cm. Παρατηρείται ότι κατά απόλυτη τιμή οι μετακινήσεις που αναπτύσσονται στην κορυφή του

πύργου είναι πολύ μεγαλύτερες συγκριτικά με αυτές των υπόλοιπων μεταλλικών μελών, με αυτές που αναπτύσσονται στη βάση του πασσάλου να είναι οι μικρότερες.

8.3.1.1 Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των αργίλων 1, 2 και 3

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8.50) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις (U_2) που αναπτύσσονται και στους τρεις τύπους αργίλων. Για τη σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων στις τρεις αργίλους επιλέχθηκαν για το έδαφος οι κόμβοι 7719 και 17. Η επιλογή αυτή έγινε καθώς στους κόμβους αυτούς εμφανίζονται η μέγιστη θετική και η μέγιστη αρνητική οριζόντια μετακίνηση, αντίστοιχα. Οι υπόλοιποι κόμβοι του εδάφους παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με τον κόμβο 17, τα διαγράμματα των οποίων παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.

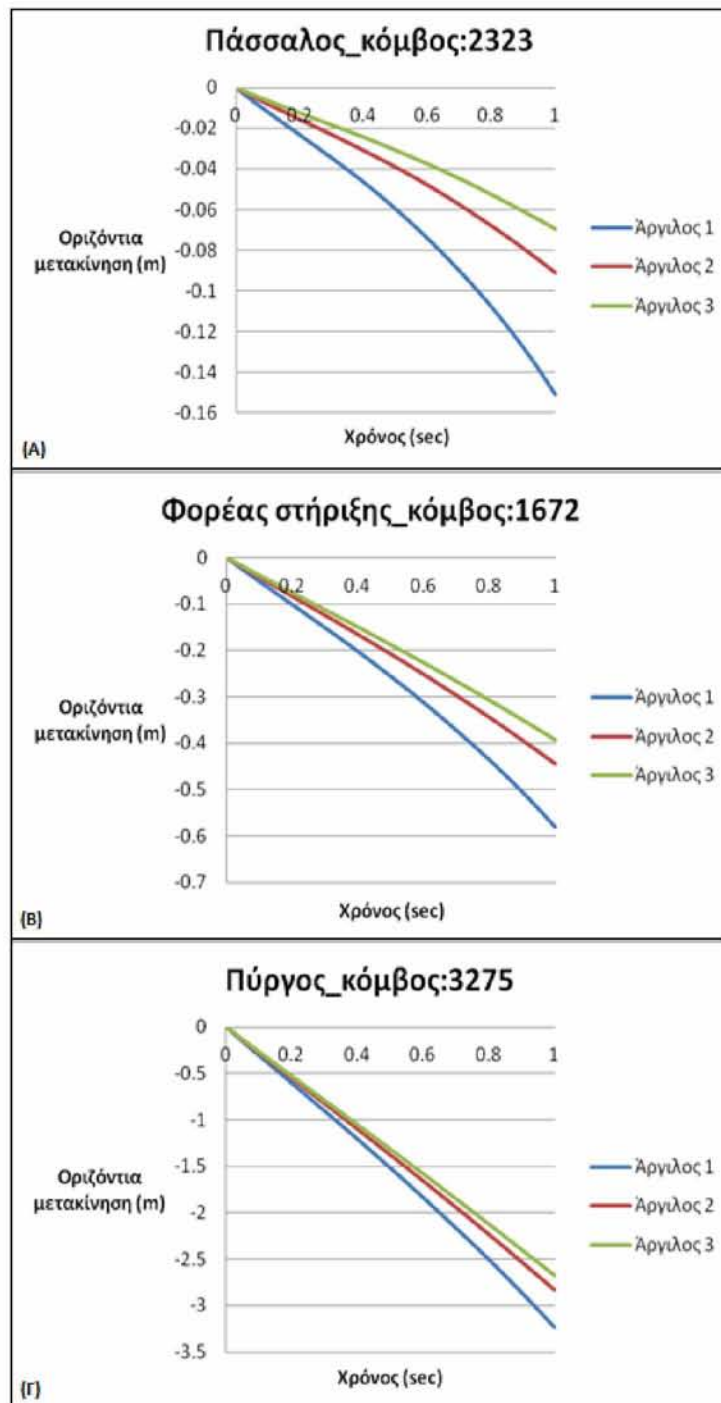


Σχήμα 8.50: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 17 (Α) και 7719 (Β) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου για τις αργίλους 1, 2 και 3.

Παρακάτω συγκεντρώνονται κάποια από τα σημαντικότερα συμπεράσματα για τις οριζόντιες μετακινήσεις του εδάφους, από τη σύγκριση των τριών αργίλων:

- Όπως ήταν αναμενόμενο, η άργιλος 1 έχει τις μεγαλύτερες οριζόντιες μετακινήσεις για όλους τους κόμβους του εδάφους. Στη συνέχεια, ακολουθούν η άργιλος 2 και τις μικρότερες μετακινήσεις εμφανίζει η άργιλος 3.
- Οι άργιλοι 2 και 3 εμφανίζουν πιο κοντινές τιμές μετακινήσεων μεταξύ τους σε σχέση με την άργιλο 1, η οποία αποκλίνει από τις 2 προηγούμενες καθώς εμφανίζει αρκετά μεγαλύτερες οριζόντιες μετακινήσεις.
- Οι μεγαλύτερες αρνητικές οριζόντιες μετακινήσεις και στις τρεις άργιλους, εμφανίζονται στον κόμβο 7719, ο οποίος βρίσκεται στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους, κοντά στον πάσσαλο, ενώ οι μεγαλύτερες θετικές στον κόμβο 17, ο οποίος βρίσκεται στη βάση του πασσάλου. Όλοι οι υπόλοιποι κόμβοι του εδάφους δίνουν μικρότερες τιμές θετικών μετακινήσεων.
- Οι μεγάλες μετακινήσεις στην επιφάνεια του εδάφους πιθανώς να οφείλονται στο τυπικό εδαφικό προφίλ του πυθμένα της θάλασσας, το οποίο συνίσταται από μια στρώση πολύ μαλακού εδάφους στην επιφάνεια. Η στρώση του μαλακού εδάφους έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση πολύ μικρής εδαφικής πλευρικής αντίστασης, ενώ τα φορτία μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας είναι κατά βάση πλευρικά.
- Οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις όλων των κόμβων της άργιλου 1 είναι 1.8-2.4 φορές μεγαλύτερες από αυτές της άργιλου 2 και 2.6-4 φορές μεγαλύτερες από της άργιλου 3.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8.51) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις της κορυφής του πασσάλου, του φορέα στήριξης και του πύργου για τις τρεις άργιλους. Επειδή, οι μετακινήσεις στην κορυφή του πασσάλου (κόμβος 2323) είναι παρόμοιες με αυτές της βάσης του φορέα στήριξης (κόμβος 1720), επιλέχθηκαν να συγκριθούν, για τις τρεις άργιλους, μόνο οι μετακινήσεις του κόμβου 2323. Με την ίδια λογική επιλέχθηκαν να συγκριθούν οι μετακινήσεις, για τις τρεις άργιλους, στην κορυφή του φορέα στήριξης (κόμβος 1672), ενώ παραλήφθηκαν αυτές στη βάση του πύργου (κόμβος 839). Επίσης, συγκρίθηκαν οι μετακινήσεις στην κορυφή του πύργου (κόμβος 3275), καθώς εκεί εμφανίζονται ο μέγιστες τιμές.



Σχήμα 8.51: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 2323 (Α), 1672 (Β) και 3275 (Γ) συναρτήσει του χρόνου, για τις άργιλους 1, 2 και 3.

Παρακάτω συγκεντρώνονται κάποια από τα σημαντικότερα συμπεράσματα για τις οριζόντιες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών, από τη σύγκριση των τριών άργιλων:

- Και στα μεταλλικά μέλη, οι μεγαλύτερες οριζόντιες μετακινήσεις παρουσιάζονται στην άργιλο 1. Ακολουθούν η άργιλος 2 και τις μικρότερες μετακινήσεις εμφανίζει η άργιλος 3.

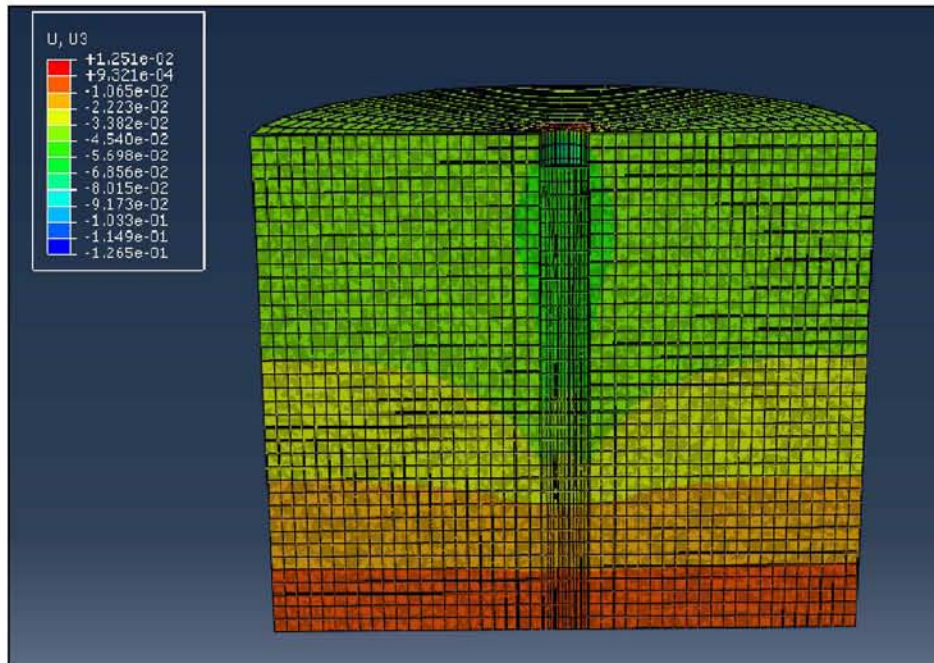
- Οι άργιλοι 2 και 3 εμφανίζουν πιο κοντινές τιμές μετακινήσεων μεταξύ τους σε σχέση με την άργιλο 1.
- Στην κορυφή του πασσάλου εμφανίζονται αρνητικές οριζόντιες μετακινήσεις, ενώ στη βάση θετικές. Κατά απόλυτη τιμή, οι οριζόντιες μετακινήσεις της κορυφής είναι μεγαλύτερες από αυτές της βάσης.
- Ο πύργος και ο φορέας στήριξης εμφανίζουν αρνητικές οριζόντιες μετακινήσεις. Στις κορυφές τους εμφανίζονται μεγαλύτερες οριζόντιες μετακινήσεις σε σχέση με τις βάσεις τους.
- Οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του μονοπασσάλου για την άργιλο 1 είναι 1.6-2.3 φορές μεγαλύτερες από αυτές της άργιλου 2 και 2.18-3.79 φορές μεγαλύτερες από της άργιλου 3. Οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του φορέα στήριξης για την άργιλο 1 είναι 1.3-1.62 φορές μεγαλύτερες από αυτές της άργιλου 2 και 1.48-2.1 φορές μεγαλύτερες από της άργιλου 3. Τέλος, όσον αφορά τους κόμβους του πύργου οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις για την άργιλο 1 είναι 1.14-1.3 φορές μεγαλύτερες από αυτές της άργιλου 2 και 1.2-1.47 φορές μεγαλύτερες από της άργιλου 3.

8.3.2 Αποτελέσματα κατακόρυφων μετακινήσεων των αργίλων 1, 2 και 3

Για το συνδυασμό φόρτισης των ίδιων βαρών, του ανέμου και του ανεμογενούς κυματισμού προέκυψαν τα αποτελέσματα για 13 σημεία από το μοντέλο για τις κατακόρυφες μετακινήσεις στη διεύθυνση Z και για τις 3 διαφορετικές περιπτώσεις αργίλων.

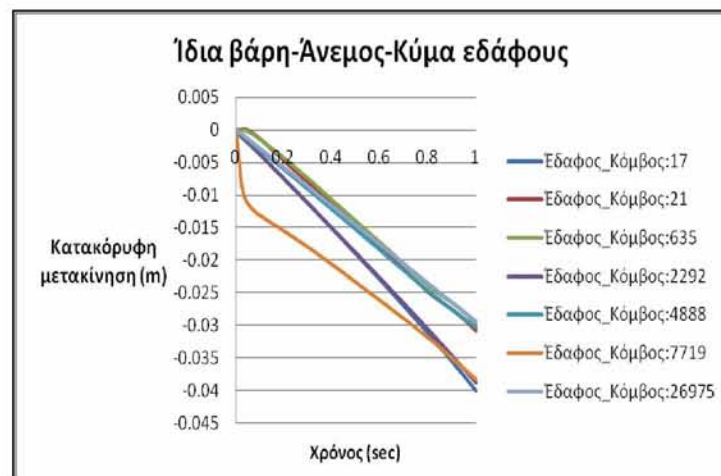
Άργιλος 1

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8.52) παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις (U_3) που αναπτύσσονται στην άργιλο 1. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται στο έδαφος που βρίσκεται στη βάση του πασσάλου (μπλε-γαλάζιο χρώμα), ενώ εξίσου μεγάλες μετακινήσεις παρουσιάζονται στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους (γαλάζιο χρώμα), εντός και γύρω από τον πάσσαλο.



Σχήμα 8.52: Κατακόρυφες μετακινήσεις στην άργιλο 1 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.

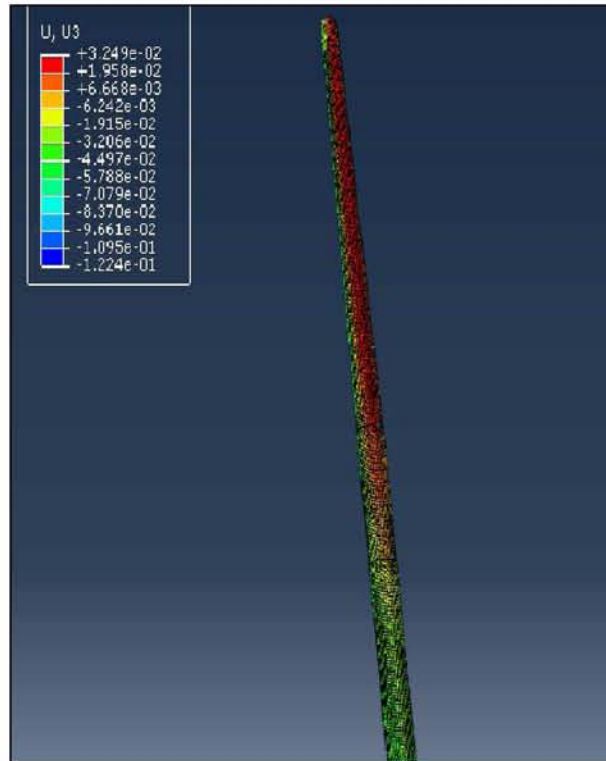
Στο Σχήμα 8.53 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις για την άργιλο 1.



Σχήμα 8.53: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.

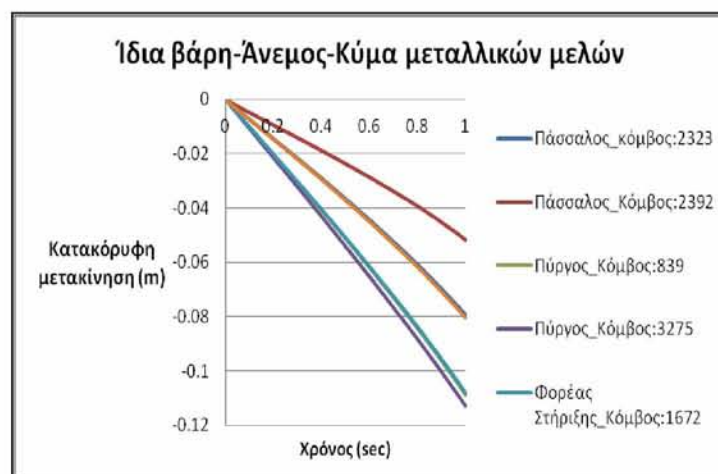
Για την άργιλο 1 η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση προκύπτει για τον κόμβο 17 και είναι ίση με -4 cm. Εξίσου μεγάλες κατακόρυφες μετακινήσεις εμφανίζουν ο κόμβος 7719 και ο κόμβος 2292. Η κατακόρυφη μετακίνηση του κόμβου 7719 ενώ αρχικά αυξάνεται απότομα, στη συνέχεια, αυξάνεται με μικρότερο ρυθμό, έτσι ώστε στο τέλος να έχει κοντινές τιμές με τους άλλους 2 κόμβους που προαναφέρθηκαν. Οι υπόλοιποι 4 κόμβοι του εδάφους στους οποίους υπολογίστηκαν οι κατακόρυφες μετακινήσεις παρουσιάζουν πολύ κοντινές τιμές μεταξύ τους και έχουν μικρότερες μετακινήσεις σε σχέση με τους 3 προηγούμενους κόμβους.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8.54) παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις (U_3) που αναπτύσσονται στα μεταλλικά μέλη που θεμελιώνονται στην άργιλο 1. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται (πράσινο-γαλάζιο χρώμα) στην κορυφή του πύργου και από την πλευρά εφαρμογής της δύναμης του ανέμου (αριστερή) και έχουν αρνητική τιμή.



Σχήμα 8.54: Κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 1 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.

Στο Σχήμα 8.55 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών στην άργιλο 1.

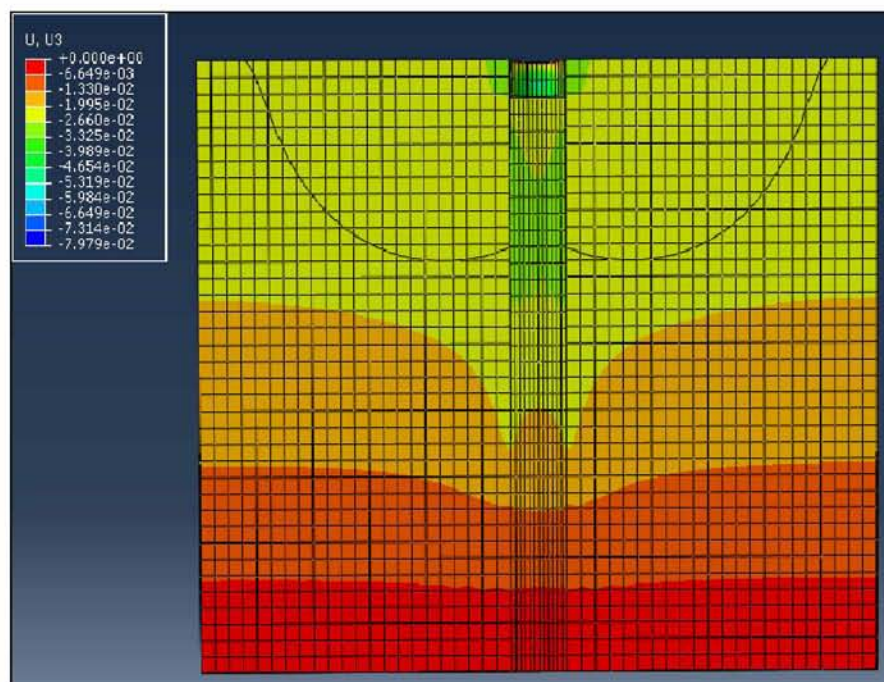


Σχήμα 8.55: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.

Για τα μεταλλικά μέλη η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση προκύπτει για τον κόμβο της κορυφής του πύργου (κόμβος 3275) και είναι ίση με -11.28 cm. Επίσης, μεγάλες κατακόρυφες μετακινήσεις εμφανίζονται κοντά στη βάση του πύργου (κόμβος 839) και κοντά στην κορυφή του φορέα στήριξης (κόμβος 1672). Οι μικρότερες κατακόρυφες μετακινήσεις μεταξύ των μεταλλικών μελών εμφανίζονται στον κόμβο του πασσάλου 2392 και είναι ίση με -5.17 cm.

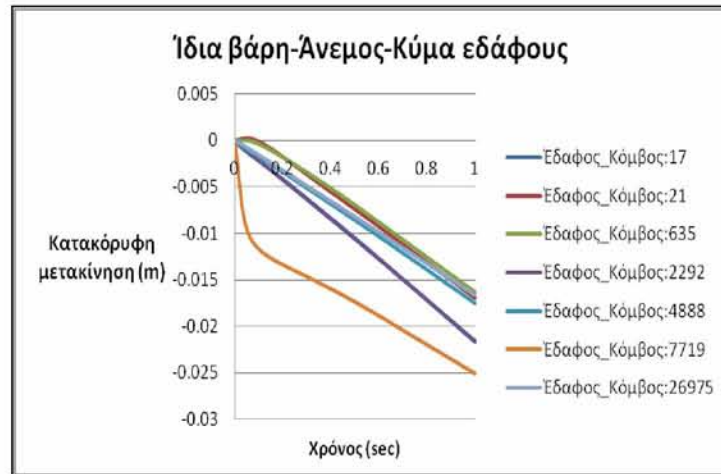
Άργιλος 2

Στο Σχήμα 8.56 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις (U_3) που αναπτύσσονται στην άργιλο 2. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται στο έδαφος που βρίσκεται στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους, εντός και γύρω από τον πάσσαλο (γαλάζιο χρώμα). Εξίσου μεγάλες κατακόρυφες μετακινήσεις παρουσιάζονται γύρω από τη βάση του πασσάλου.



Σχήμα 8.56: Κατακόρυφες μετακινήσεις στην άργιλο 2 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.

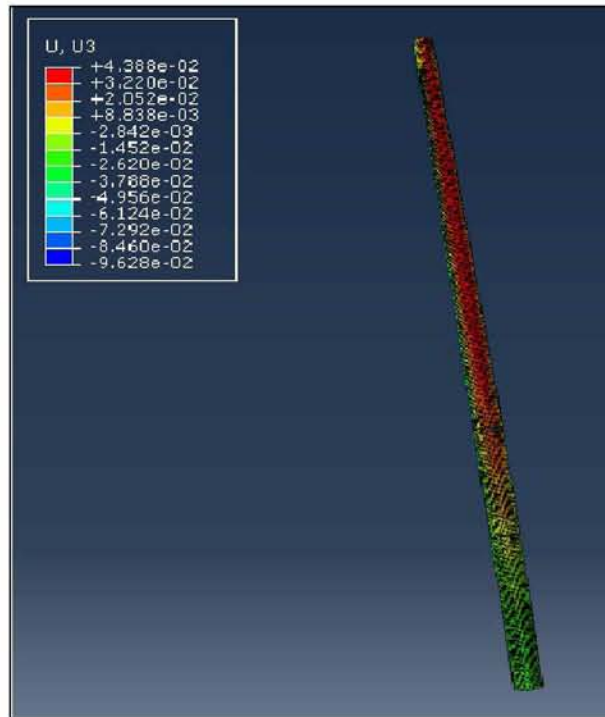
Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.57) παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις για την άργιλο 2.



Σχήμα 8.57: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου για την άργιλο 2.

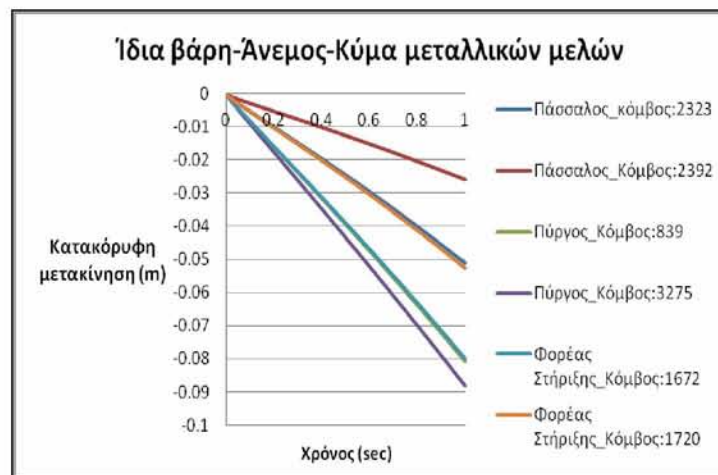
Για την άργιλο 2 η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση προκύπτει για τον κόμβο 7719 και είναι ίση με -2.5 cm. Εξίσου μεγάλες κατακόρυφες μετακινήσεις εμφανίζουν ο κόμβος 17 και ο κόμβος 2292. Η κατακόρυφη μετακίνηση του κόμβου 7719 ενώ αρχικά αυξάνεται απότομα, στη συνέχεια, αυξάνεται με μικρότερο ρυθμό, όμως παρ' όλα αυτά παρουσιάζει τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση στο τέλος του 1^{ου} βήματος. Οι υπόλοιποι 4 κόμβοι του εδάφους παρουσιάζουν πολύ κοντινές τιμές μεταξύ τους και έχουν μικρότερες μετακινήσεις σε σχέση με τους 3 προηγούμενους κόμβους.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8.58) παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις (U_3) που αναπτύσσονται στα μεταλλικά μέλη που θεμελιώνονται στην άργιλο 2. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται (πράσινο-γαλάζιο χρώμα) στην κορυφή του πύργου και από την πλευρά εφαρμογής της δύναμης του ανέμου (αριστερή) και έχουν αρνητική τιμή.



Σχήμα 8.58: Κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 2 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.

Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.59) παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών για το μοντέλο με την άργιλο 2.

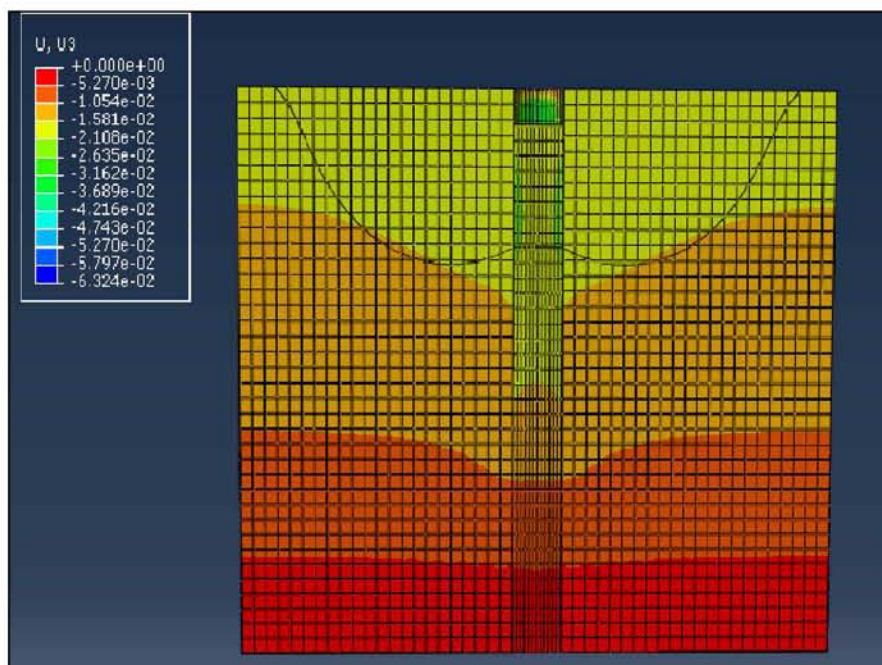


Σχήμα 8.59: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 2.

Για τα μεταλλικά μέλη η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση προκύπτει για τον κόμβο της κορυφής του πύργου και είναι ίση με -8.8 cm . Επίσης, μεγάλες κατακόρυφες μετακινήσεις εμφανίζονται κοντά στη βάση του πύργου (κόμβος 839) και κοντά στην κορυφή του φορέα στήριξης (κόμβος 1672). Η μικρότερη κατακόρυφη μετακίνηση μεταξύ των μεταλλικών μελών εμφανίζεται στον κόμβο του πασσάλου 2392 και είναι ίση με -2.6 cm .

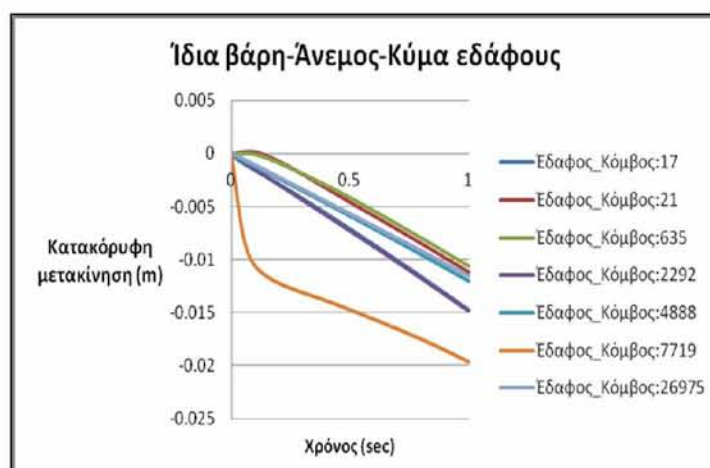
Άργιλος 3

Στο Σχήμα 8.60 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις (U_3) που αναπτύσσονται στην άργιλο 3. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται στο έδαφος που βρίσκεται στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους, εντός και γύρω από τον πάσσαλο (πράσινο χρώμα). Εξίσου μεγάλες κατακόρυφες μετακινήσεις παρουσιάζονται γύρω από τη βάση του πασσάλου.



Σχήμα 8.60: Κατακόρυφες μετακινήσεις στην άργιλο 3 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.

Στο Σχήμα 8.61 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις για την άργιλο 3.

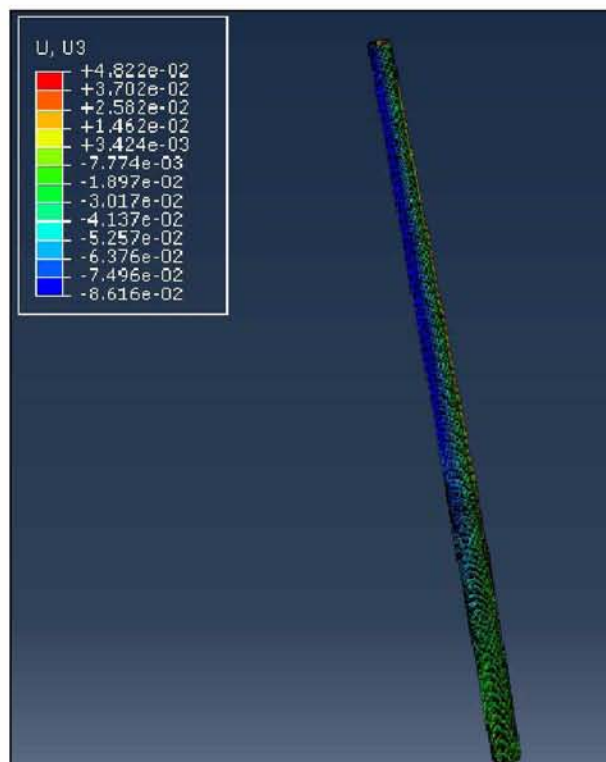


Σχήμα 8.61: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου για την άργιλο 3.

Και για την άργιλο 3, η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση προκύπτει για τον κόμβο 7719 και είναι ίση με -1.96 cm. Εξίσου μεγάλες κατακόρυφες μετακινήσεις εμφανίζουν ο κόμβος 17

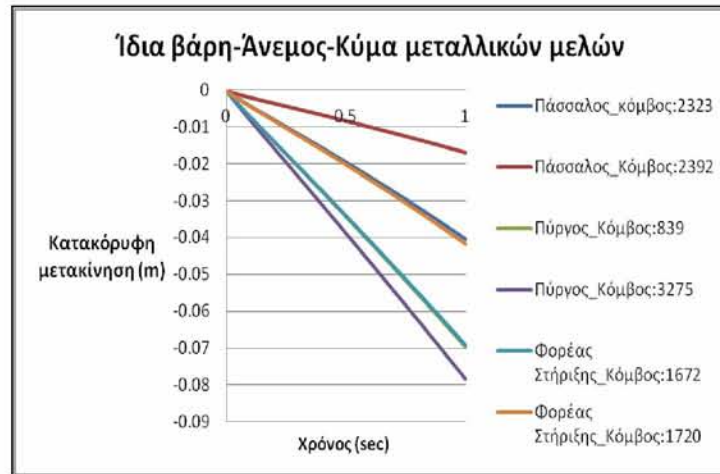
και ο κόμβος 2292. Η κατακόρυφη μετακίνηση του κόμβου 7719 ενώ αρχικά αυξάνεται απότομα, στη συνέχεια, αυξάνεται με μικρότερο ρυθμό, όμως παρ' όλα αυτά παρουσιάζει τη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση στο τέλος του 1^{ου} βήματος. Οι υπόλοιποι 4 κόμβοι του εδάφους παρουσιάζουν πολύ κοντινές τιμές μεταξύ τους και έχουν μικρότερες μετακινήσεις σε σχέση με τους προηγούμενους 3 κόμβους.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8.62) παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις (U_3) που αναπτύσσονται στα μεταλλικά μέλη που θεμελιώνονται στην άργιλο 3. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται στην κορυφή του πύργου (μπλε χρώμα) και από την πλευρά εφαρμογής της δύναμης του ανέμου (αριστερή) και έχουν αρνητική τιμή.



Σχήμα 8.62: Κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 3 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.

Στο Σχήμα 8.63 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών στην άργιλο 3.

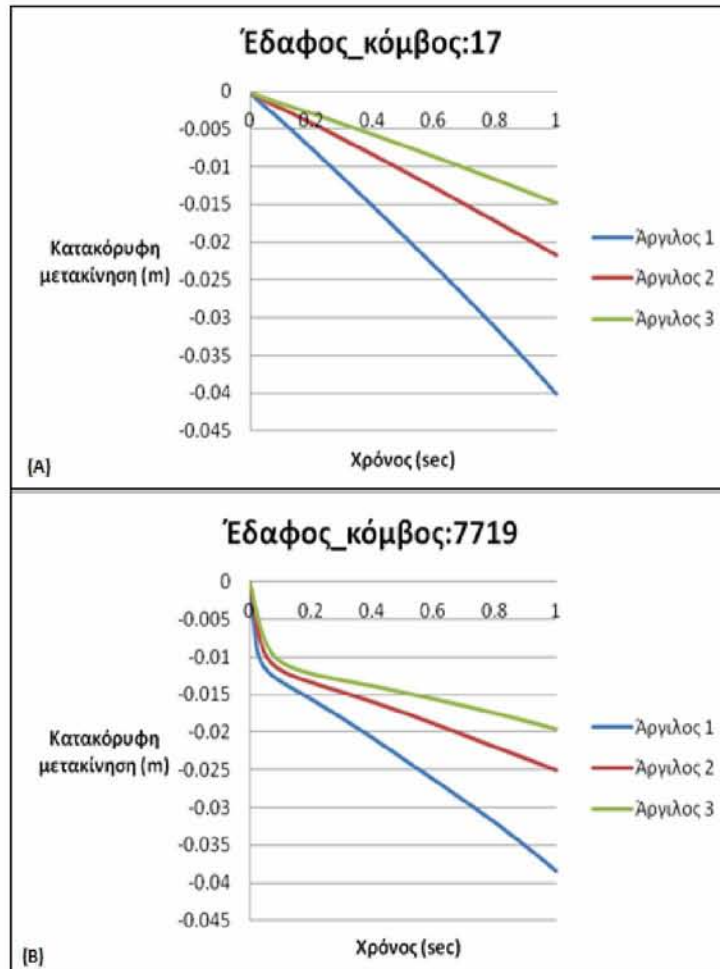


Σχήμα 8.63: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργυλο 3.

Για τα μεταλλικά μέλη η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση προκύπτει για τον κόμβο της κορυφής του πύργου και είναι ίση με -7.85 cm. Επίσης, μεγάλες κατακόρυφες μετακινήσεις εμφανίζονται κοντά στη βάση του πύργου (κόμβος 839) και κοντά στην κορυφή του φορέα στήριξης (κόμβος 1672). Η μικρότερη κατακόρυφη μετατόπιση μεταξύ των μεταλλικών μελών εμφανίζεται στον κόμβο του πασσάλου 2392 και είναι ίση με -1.7 cm.

8.3.2.1 Σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων των αργίλων 1, 2 και 3

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8.64) παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις (U_3) που αναπτύσσονται και στους τρεις τύπους αργίλων. Για τη σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων στις τρεις αργίλους επιλέχθηκαν για το έδαφος οι κόμβοι 7719 και 17. Η επιλογή αυτή έγινε καθώς στους κόμβους αυτούς εμφανίζονται οι μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις, αντίστοιχα. Οι υπόλοιποι κόμβοι του εδάφους παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με τον κόμβο 17, τα διαγράμματα των οποίων παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.



Σχήμα 8.64: Σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων των κόμβων 17 (A) και 7719 (B) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου για τις άργιλους 1, 2 και 3.

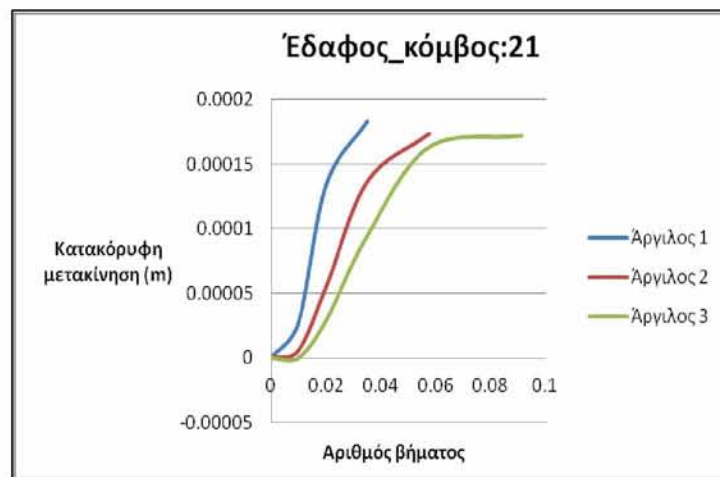
Παρακάτω συγκεντρώνονται κάποια από τα σημαντικότερα συμπεράσματα για τις οριζόντιες μετακινήσεις του εδάφους, από τη σύγκριση των τριών άργιλων:

- Όπως ήταν αναμενόμενο, η άργιλος 1 έχει τις μεγαλύτερες κατακόρυφες μετακινήσεις για όλους τους κόμβους του εδάφους. Στη συνέχεια, ακολουθούν η άργιλος 2 και τις μικρότερες μετακινήσεις εμφανίζει η άργιλος 3.
- Οι άργιλοι 2 και 3 εμφανίζουν πιο κοντινές τιμές μετακινήσεων μεταξύ τους σε σχέση με την άργιλο 1, η οποία αποκλίνει από τις 2 προηγούμενες καθώς εμφανίζει αρκετά μεγαλύτερες μετακινήσεις.
- Όλοι οι κόμβοι του εδάφους που εξετάστηκαν παρουσιάζουν αρνητικές κατακόρυφες μετακινήσεις με τις μεγαλύτερες να εμφανίζονται για την άργιλο 1 στη βάση του πασσάλου και για τις άργιλους 2 και 3 κοντά στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους, γύρω από τον πάσσαλο.

- Οι μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις όλων των κόμβων της αργίλου 1 είναι 1.5-1.88 φορές μεγαλύτερες από αυτές της αργίλου 2 και 1.95-2.8 φορές μεγαλύτερες από της αργίλου 3.

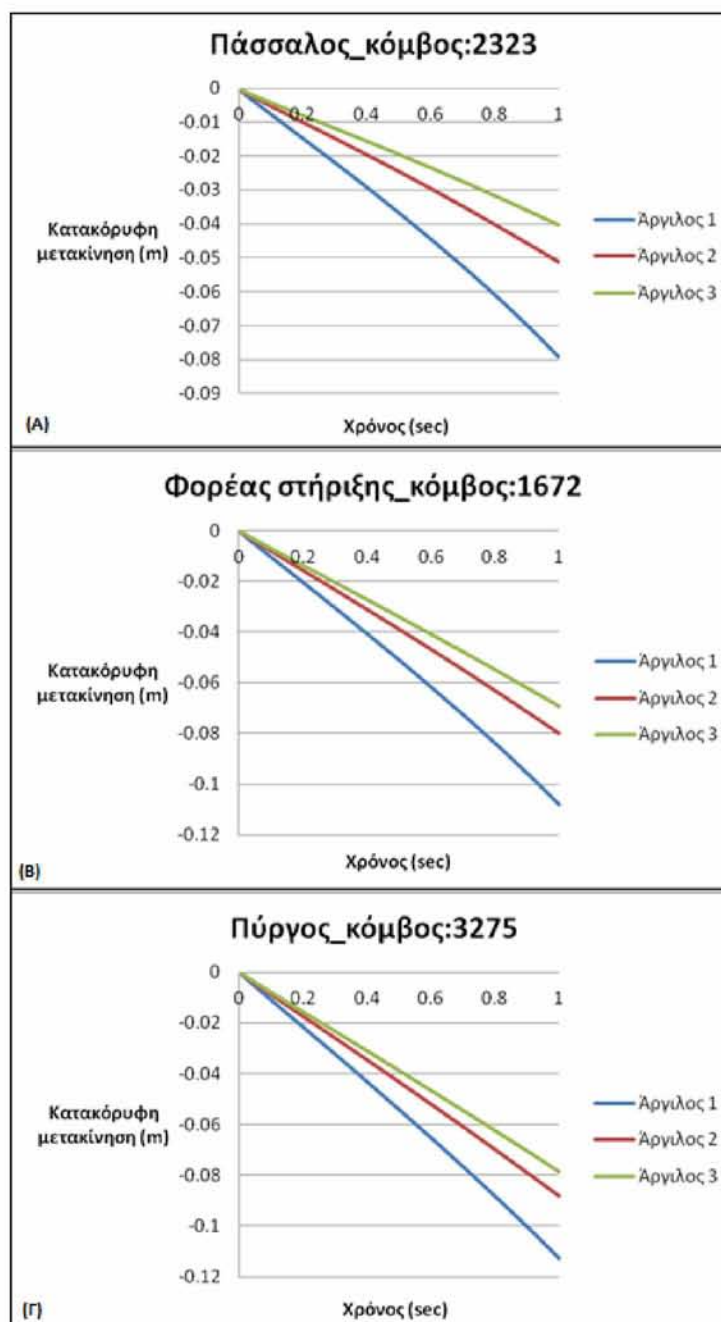
Παρατήρηση:

Όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 8.65), στον κόμβο 21 και για τις τρεις αργίλους παρατηρείται ότι στα 3 αρχικά υποστάδια του 1^{ου} βήματος παρουσιάζονται κάποιες μικρές θετικές κατακόρυφες μετακινήσεις, οι οποίες όμως στη συνέχεια γίνονται αρνητικές. Οι θετικές αυτές μετακινήσεις υποδηλώνουν τη διόγκωση της αργίλου, η οποία αποτελεί σύνηθες φαινόμενο στα αργιλικά εδάφη. Η διόγκωση αυτή οφείλεται πιθανώς στην αντίσταση που παρουσιάζει το έδαφος ως προς την οριζόντια φόρτισή του αλλά και στην τριβή που υπάρχει μεταξύ του πασσάλου και του εδάφους. Η διόγκωση είναι μεγαλύτερη για την πιο μαλακή άργιλο, δηλαδή για την άργιλο 1.



Σχήμα 8.65: Κατακόρυφες μετακινήσεις του κόμβου 21 σε συνάρτηση με το χρόνο, για τα αρχικά βήματα της ανάλυσης, για τις άργιλλους 1, 2 και 3.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8.66) παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις της κορυφής του πασσάλου, του φορέα στήριξης και του πύργου για τις τρεις άργιλλους. Επειδή, οι μετακινήσεις στην κορυφή του πασσάλου (κόμβος 2323) είναι παρόμοιες με αυτές της βάσης του φορέα στήριξης (κόμβος 1720), επιλέχθηκαν να συγκριθούν, για τις τρεις άργιλλους, μόνο οι μετακινήσεις του κόμβου 2323. Με την ίδια λογική επιλέχθηκαν να συγκριθούν οι μετακινήσεις, για τις τρεις άργιλλους, στην κορυφή του φορέα στήριξης (κόμβος 1672), ενώ παραλήφθηκαν αυτές στη βάση του πύργου (κόμβος 839). Επίσης, συγκρίθηκαν οι μετακινήσεις στην κορυφή του πύργου (κόμβος 3275), καθώς εκεί εμφανίζονται ο μέγιστες τιμές.



Σχήμα 8.66: Σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων των κόμβων 2323 (Α), 1672 (Β) και 3275 (Γ) συναρτήσει του χρόνου για τις άργιλους 1, 2 και 3.

Παρακάτω συγκεντρώνονται κάποια από τα σημαντικότερα συμπεράσματα για τις κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών, από τη σύγκριση των τριών άργιλων:

- Και σε αυτή την περίπτωση, η άργιλος 1 έχει τις μεγαλύτερες κατακόρυφες μετακινήσεις για όλους τους κόμβους των μεταλλικών μελών. Ακολουθεί η άργιλος 2 και τις μικρότερες μετακινήσεις εμφανίζει η άργιλος 3.
- Οι άργιλοι 2 και 3 εμφανίζουν πιο κοντινές τιμές μετακινήσεων σε σχέση με την άργιλο 1.

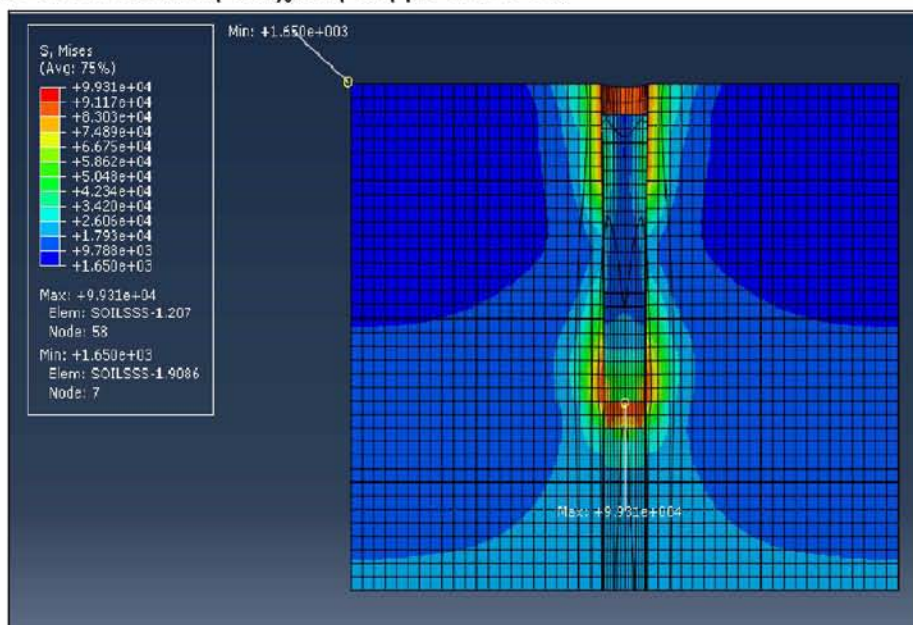
- Οι κατακόρυφες μετακινήσεις στην κορυφή του πύργου είναι ελαφρώς μεγαλύτερες συγκριτικά με της βάσης του. Οι κατακόρυφες μετακινήσεις της κορυφής του πασσάλου και του φορέα στήριξης είναι μεγαλύτερες συγκριτικά με αυτές των βάσεών τους.
- Οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του μονοπασσάλου για την άργιλο 1 είναι 1.55-2 φορές μεγαλύτερες από αυτές της άργιλου 2 και 1.96-3.05 φορές μεγαλύτερες από της άργιλου 3. Οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του φορέα στήριξης για την άργιλο 1 είναι 1.35-1.55 φορές μεγαλύτερες από αυτές της άργιλου 2 και 1.55-1.90 φορές μεγαλύτερες από της άργιλου 3. Τέλος, όσον αφορά τους κόμβους του πύργου οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις για την άργιλο 1 είναι 1.28-1.35 φορές μεγαλύτερες από αυτές της άργιλου 2 και 1.45-1.55 φορές μεγαλύτερες από της άργιλου 3.

8.3.3 Αποτελέσματα τάσεων Von Mises των άργιλων 1, 2 και 3

Για το συνδυασμό φόρτισης των ίδιων βαρών, του κύματος και του ανέμου προέκυψαν τα αποτελέσματα των τάσεων Von Mises και για τις τρεις άργιλους.

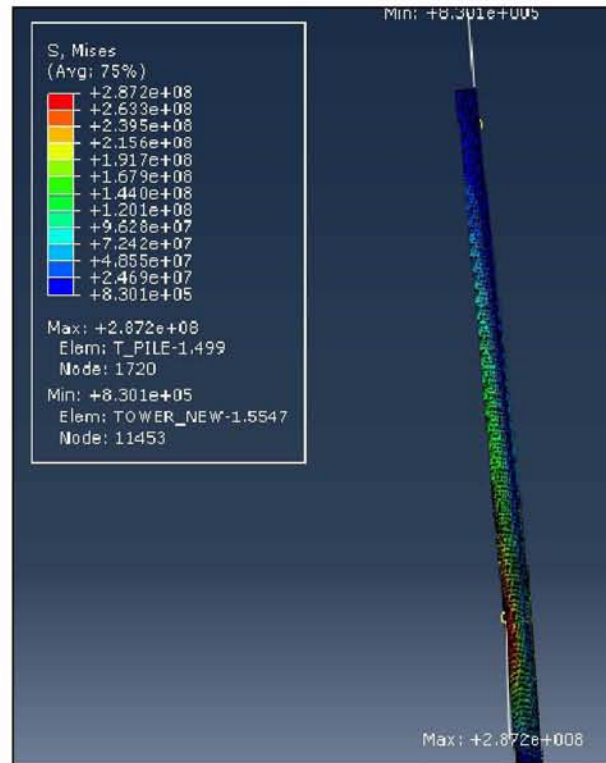
Άργιλος 1

Στο Σχήμα 8.67 παρουσιάζονται οι μέγιστες (κόκκινο χρώμα) και οι ελάχιστες (μπλε χρώμα) τάσεις του εδάφους. Μεγάλες τάσεις εμφανίζονται στα σημεία του εδάφους που βρίσκονται σε επαφή με τον πάσσαλο, τόσο στην κορυφή όσο και στη βάση του, με τις μέγιστες να παρουσιάζονται στα σημεία του εδάφους που βρίσκονται γύρω από τη βάση του. Οι τάσεις του εδάφους μικραίνουν καθώς αυξάνεται η απόσταση από τον πάσσαλο. Η μέγιστη τάση είναι ίση με 99.310 Pa και η ελάχιστη ίση με 1.650 Pa.



Σχήμα 8.67: Οι τάσεις Von Mises στην άργιλο 1 για τον δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.

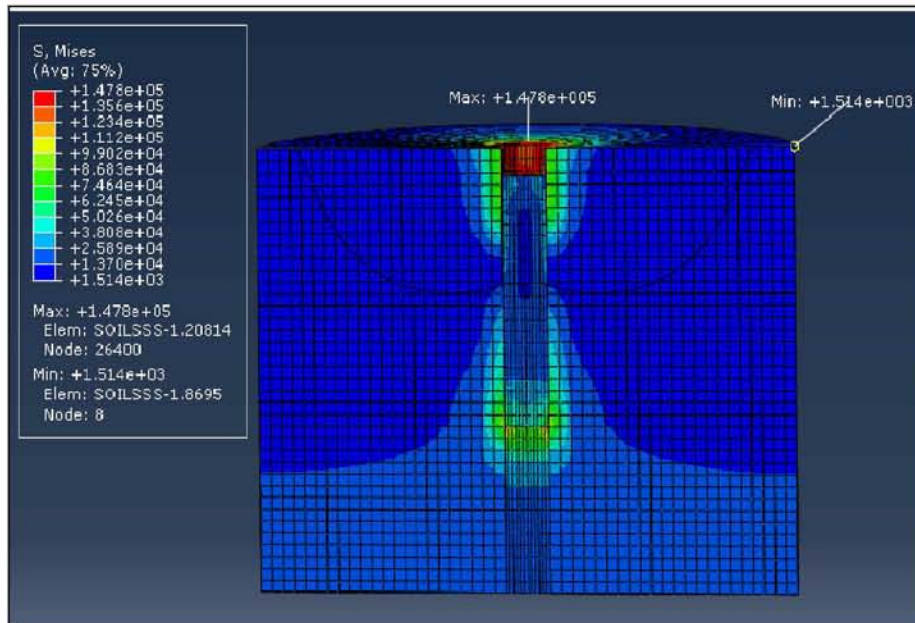
Στο Σχήμα 8.68 παρουσιάζονται οι μέγιστες (κόκκινο χρώμα) και οι ελάχιστες (μπλε χρώμα) τάσεις των μεταλλικών μελών. Οι μέγιστες τάσεις εμφανίζονται στην επιφάνεια σύνδεσης του πασσάλου με το φορέα στήριξης ενώ οι ελάχιστες στην κορυφή του πύργου. Η μέγιστη τάση είναι ίση με 287.200.000 Pa και η ελάχιστη ίση με 830.100 Pa.



Σχήμα 8.68: Οι τάσεις Von Mises στα μεταλλικά μέλη στην άργιλο 1 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.

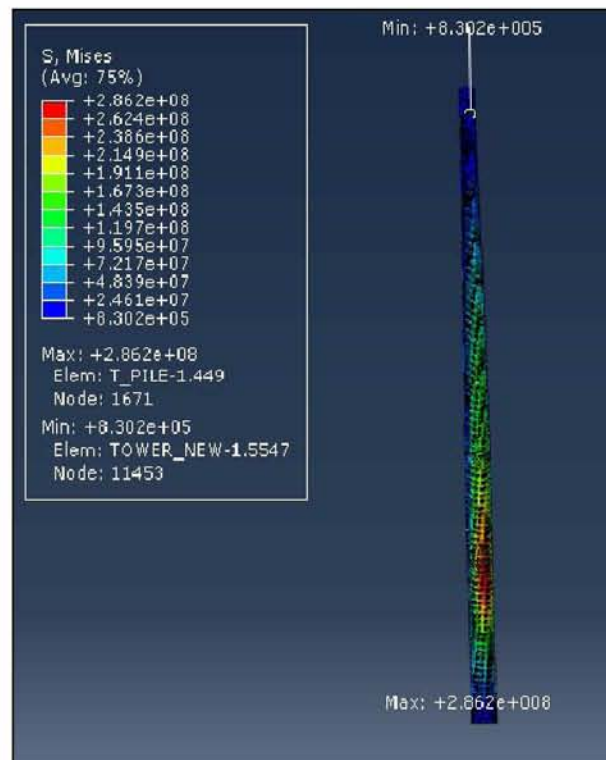
Άργιλος 2

Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.69) παρουσιάζονται οι μέγιστες (κόκκινο χρώμα) και οι ελάχιστες (μπλε χρώμα) τάσεις του εδάφους. Μεγάλες τάσεις εμφανίζονται στα σημεία του εδάφους που βρίσκονται σε επαφή με τον πάσσαλο, τόσο στην κορυφή όσο και στη βάση του, με τις μέγιστες να παρουσιάζονται στα σημεία του εδάφους που βρίσκονται στην κορυφή του εδάφους. Οι τάσεις του εδάφους μικραίνουν καθώς αυξάνεται η απόσταση από τον πάσσαλο. Η μέγιστη τάση είναι ίση με 147.800 Pa και η ελάχιστη ίση με 1.514 Pa.



Σχήμα 8.69: Οι τάσεις Von Mises στην άγκυλο 2 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.

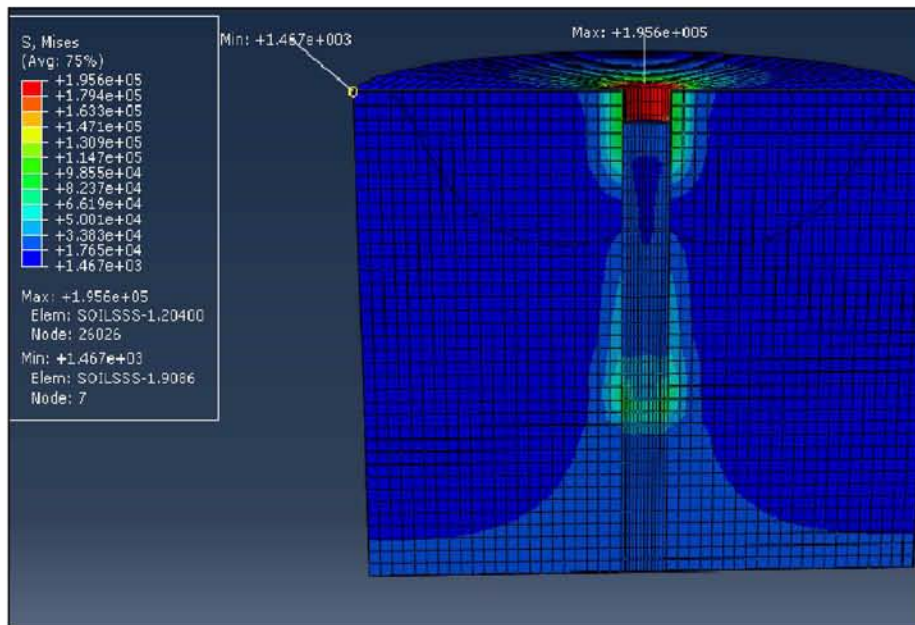
Στο Σχήμα 8.70 παρουσιάζονται οι μέγιστες (κόκκινο χρώμα) και οι ελάχιστες (μπλε χρώμα) τάσεις των μεταλλικών μελών. Οι μέγιστες τάσεις εμφανίζονται στην επιφάνεια σύνδεσης του πασσάλου με το φορέα στήριξης ενώ οι ελάχιστες στην κορυφή του πύργου. Η μέγιστη τάση είναι ίση με 286.200.000 Pa και η ελάχιστη ίση με 830.200 Pa.



Σχήμα 8.70: Οι τάσεις Von Mises στα μεταλλικά μέλη στην άγκυλο 2 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.

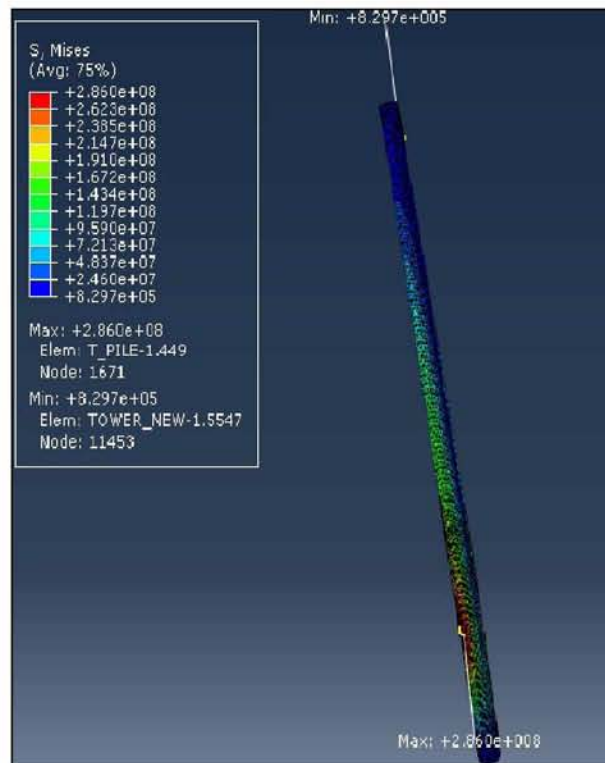
Άρθρο 3

Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.71) παρουσιάζονται οι μέγιστες (κόκκινο χρώμα) και οι ελάχιστες (μπλε χρώμα) τάσεις του εδάφους. Μεγάλες τάσεις εμφανίζονται στα σημεία του εδάφους που βρίσκονται σε επαφή με τον πάσσαλο, τόσο στην κορυφή όσο και στη βάση του, με τις μέγιστες να παρουσιάζονται στα σημεία του εδάφους που βρίσκονται στην κορυφή του εδάφους. Οι τάσεις του εδάφους μικραίνουν καθώς αυξάνεται η απόσταση από τον πάσσαλο. Η μέγιστη τάση είναι ίση με 195.600 Pa και η ελάχιστη ίση με 1.467 Pa.



Σχήμα 8.71: Οι τάσεις Von Mises στην άρθρο 3 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.

Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.72) παρουσιάζονται οι μέγιστες (κόκκινο χρώμα) και οι ελάχιστες (μπλε χρώμα) τάσεις των μεταλλικών μελών. Οι μέγιστες τάσεις εμφανίζονται στην επιφάνεια σύνδεσης του πασσάλου με το φορέα στήριξης ενώ οι ελάχιστες στην κορυφή του πύργου. Η μέγιστη τάση είναι ίση με 286.000.000 Pa και η ελάχιστη ίση με 829.700 Pa.



Σχήμα 8.72: Οι τάσεις Von Mises στα μεταλλικά μέλη στην άργιλο 3 για το δεύτερο συνδυασμό φόρτισης.

Παρακάτω παρατίθενται κάποια από τα βασικότερα συμπεράσματα από τη σύγκριση των τάσεων που αναπτύσσονται στις τρεις άργιλους. Τα συμπεράσματα αυτά είναι τα εξής:

- Και στις τρεις άργιλους, οι μεγαλύτερες τάσεις εμφανίζονται στα σημεία του εδάφους που βρίσκονται σε επαφή με τον πάσσαλο, τόσο στην κορυφή όσο και στη βάση του. Μεταξύ των τριών άργιλων, η άργιλος 3 εμφανίζει τις μεγαλύτερες τάσεις, με τη μέγιστη να ισούται με 195.600 Pa, ενώ ακολουθούν η άργιλο 2 και τέλος η άργιλος 1.
- Οι τάσεις του εδάφους σε όλες τις άργιλους μικραίνουν καθώς αυξάνεται η απόσταση από τον πάσσαλο. Μεταξύ των τριών άργιλων, η άργιλος 3 εμφανίζει τις μικρότερες τάσεις, με την ελάχιστη να ισούται με 1.467 Pa, ενώ ακολουθούν η άργιλο 2 και τέλος η άργιλος 1.
- Και στις τρεις άργιλους, οι μεγαλύτερες τάσεις στα μεταλλικά μέλη εμφανίζονται στην επιφάνεια σύνδεσης του πασσάλου με το φορέα στήριξης ενώ οι μικρότερες στην κορυφή του πύργου. Ωστόσο, δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές στις τιμές των τάσεων μεταξύ των τριών άργιλων. Οι μέγιστες τάσεις των μεταλλικών μελών κυμαίνονται από 286.000.000-287.200.000 Pa, ενώ οι ελάχιστες από 829.700-830.200 Pa.

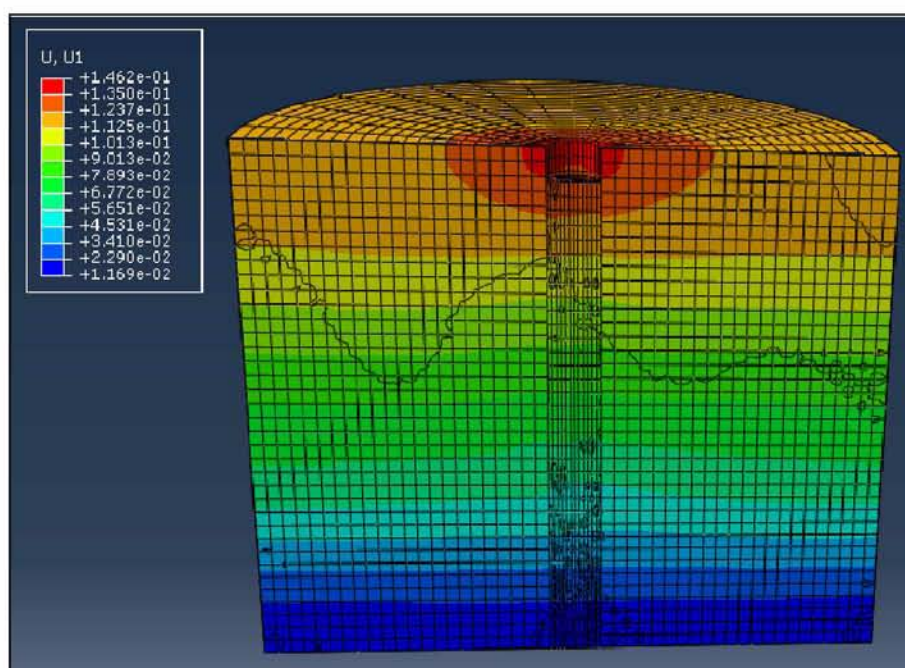
8.4 Αποτελέσματα για την περίπτωση φόρτισης των ίδιων βαρών και του σεισμού

8.4.1 Αποτελέσματα απόλυτων και σχετικών οριζόντιων μετακινήσεων των 3 αργίλων

Για την περίπτωση φόρτισης των ίδιων βαρών και του σεισμού που ενεργεί στις διευθύνσεις X και Z, προέκυψαν τα αποτελέσματα για 13 σημεία από το μοντέλο για τις οριζόντιες απόλυτες μετακινήσεις και για τις τρεις αργίλους. Ακόμα, υπολογίστηκαν οι σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις (διεύθυνση X) για την κορυφή του πύργου, του φορέα στήριξης και του πασσάλου, ως προς τη βάση του πασσάλου.

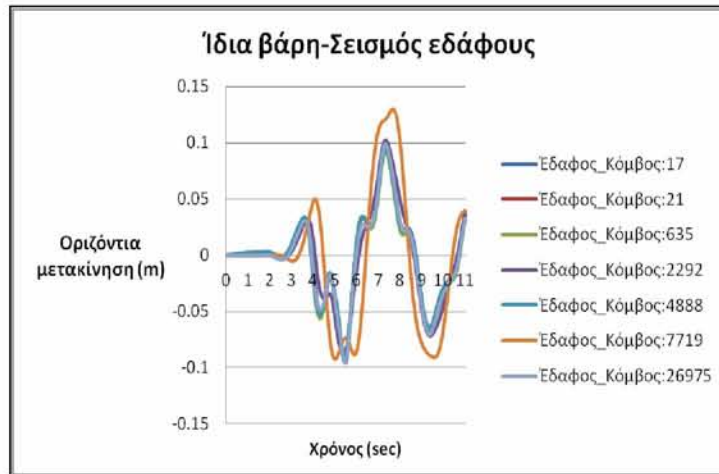
Αργίλος 1

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8.73) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις (U_1) που αναπτύσσονται στην άργιλο 1. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται στο έδαφος που βρίσκεται στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους (κόκκινο χρώμα), εντός και γύρω από τον πάσσαλο.



Σχήμα 8.73: Οριζόντιες μετακινήσεις στην άργιλο 1, για τον τρίτο συνδυασμό φόρτισης.

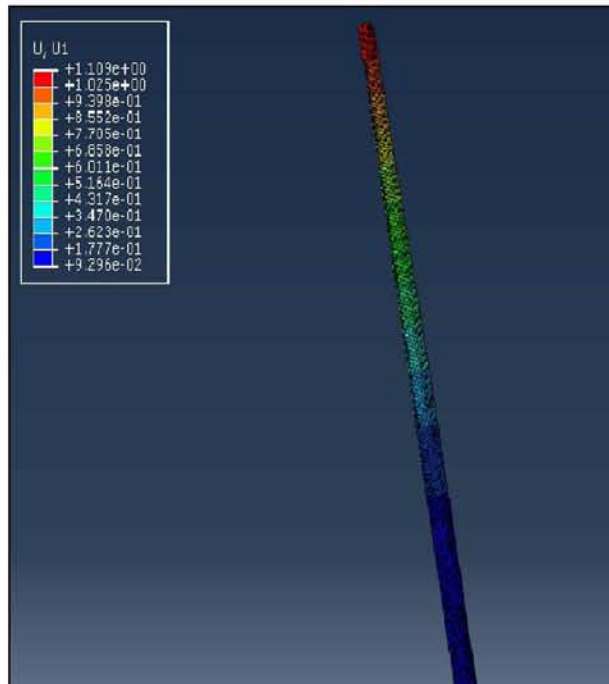
Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.74) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις για την άργιλο 1.



Σχήμα 8.74: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.

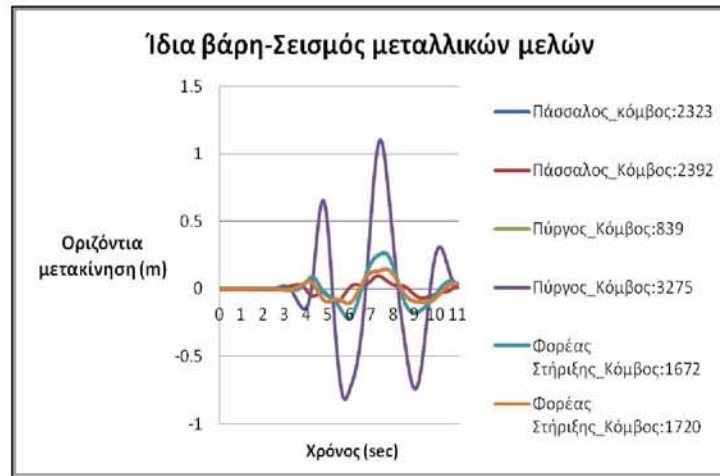
Η μέγιστη θετική οριζόντια μετακίνηση στο έδαφος εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 7.72 sec, για τον κόμβο 7719 και είναι ίση με 12.98 cm, ενώ η μέγιστη αρνητική εμφανίζεται στον κόμβο 26975, τη χρονική στιγμή 5.52 sec και ισούται με -9.6 cm. Οι καμπύλες των οριζόντιων μετακινήσεων των υπόλοιπων κόμβων του εδάφους έχουν την ίδια μορφή και παρουσιάζουν πολύ κοντινές τιμές, ιδιαίτερα με τον κόμβο 26975. Γενικά, οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις στους κόμβους του εδάφους, κατά απόλυτη τιμή, κυμαίνονται από 8.6-12.98 cm.

Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 8.75) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις (U_1) που αναπτύσσονται στα μεταλλικά μέλη που θεμελιώνονται στην άργιλο 1. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται κοντά στην κορυφή του πύργου (κόκκινο χρώμα).



Σχήμα 8.75: Οριζόντιες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 1, για τον τρίτο συνδυασμό φόρτισης.

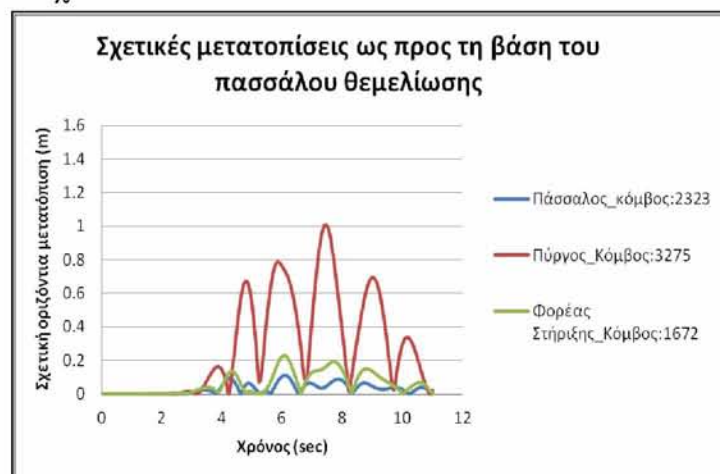
Στο Σχήμα 8.76 παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών της κατασκευής για την άργιλο 1.



Σχήμα 8.76: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.

Όπως παρατηρείται από το Σχήμα 8.76, οι μεγαλύτερες τιμές οριζόντιων μετακινήσεων στα μεταλλικά μέλη εμφανίζονται στην κορυφή του πύργου, ενώ οι μικρότερες στη βάση του πασσάλου. Συγκεκριμένα, η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση στον πύργο (κόμβος 3275) εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 7.42 sec και είναι ίση με 1.104 m, κατά απόλυτη τιμή, ενώ η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση στη βάση του πασσάλου (κόμβος 2392) εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 7.32 sec και ισούται με 9.66 cm (κατά απόλυτη τιμή).

Κατά τη διάρκεια της φόρτισης του σεισμού μελετήθηκαν οι σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις της κορυφής του πύργου, του φορέα στήριξης και του πασσάλου ως προς τη βάση του πασσάλου (Σχήμα 8.77). Όπως αναφέρθηκε και στους προηγούμενους συνδυασμούς, οι μετακινήσεις στη βάση του πύργου και του φορέα στήριξης δε μελετώνται καθώς παρουσιάζουν αρκετά κοντινές τιμές με αυτές της κορυφής του φορέα στήριξης και του πασσάλου, αντίστοιχα.

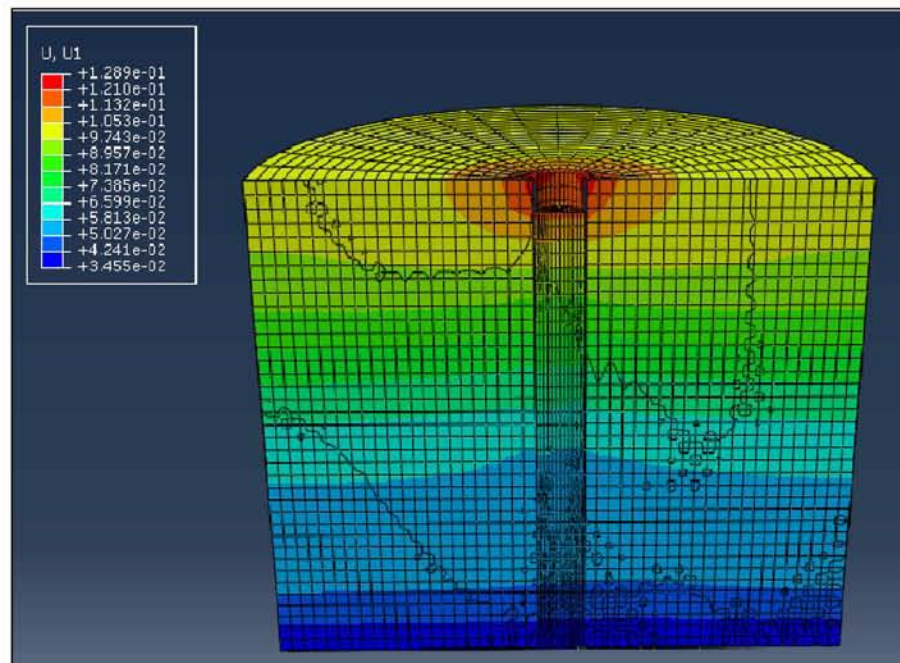


Σχήμα 8.77: Σχετικές μετακινήσεις των 3 σημείων των μεταλλικών μελών ως προς τη βάση του πασσάλου σε συνάρτηση με το χρόνο.

Από το παραπάνω σχήμα (Σχήμα 8.77) παρατηρείται ότι οι καμπύλες των σχετικών οριζόντιων μετακινήσεων, για τα 3 σημεία των μεταλλικών μελών, έχουν περίπου την ίδια μορφή. Οι σχετικές μετακινήσεις του κόμβου 3275 είναι πολύ μεγαλύτερες συγκριτικά με αυτές των άλλων 2 κόμβων, ενώ ακολουθεί ο κόμβος 1672, με τις μικρότερες σχετικές μετακινήσεις να εμφανίζονται στον κόμβο 2323. Η μέγιστη μετακίνηση στον κόμβο 3275 είναι ίση με 1.01 m και εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 7.42 sec, η μέγιστη στον κόμβο 1672 είναι ίση με 22.84 cm τη χρονική στιγμή 6.02 sec και του κόμβου 2323 ισούται με 11.31 cm τη χρονική στιγμή 6.12 sec.

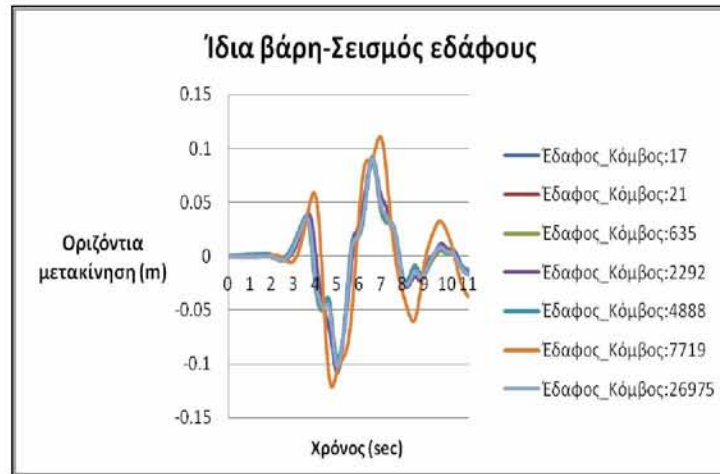
Άργιλος 2

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8.78) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις (U_1) που αναπτύσσονται στην άργιλο 2. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται στο έδαφος που βρίσκεται στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους (κόκκινο χρώμα), εντός και γύρω από τον πάσσαλο.



Σχήμα 8.78: Οριζόντιες μετακινήσεις στην άργιλο 2, για τον τρίτο συνδυασμό φόρτισης.

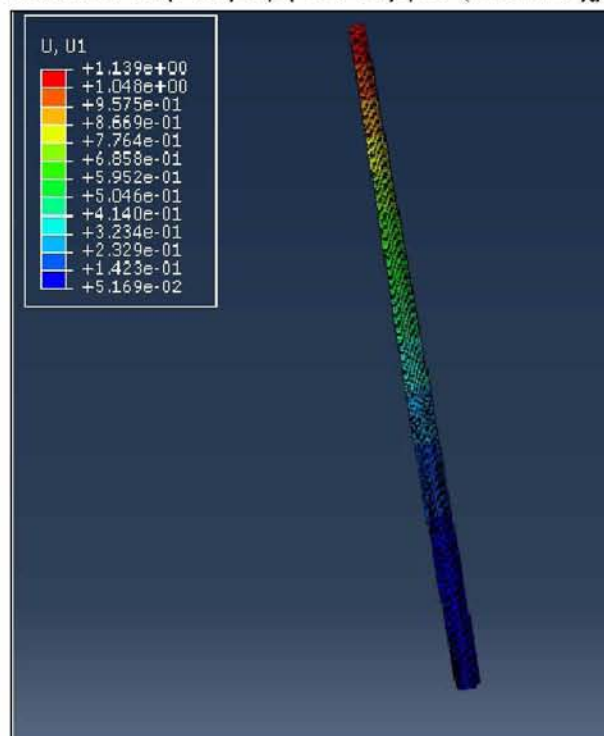
Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.79) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις για την άργιλο 2.



Σχήμα 8.79: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 2.

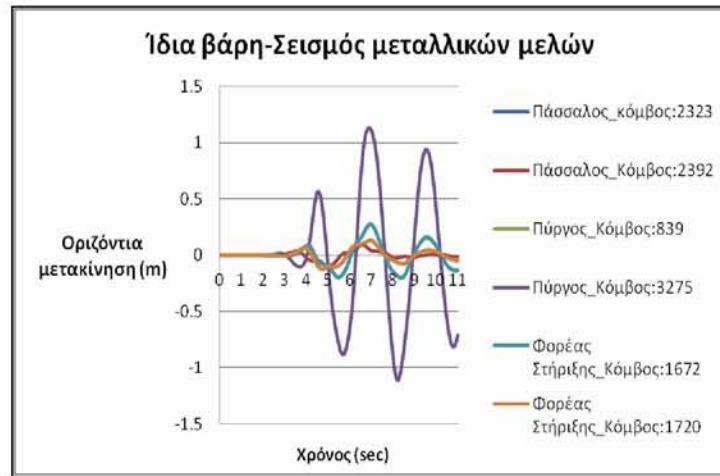
Για την άργιλο 2, η μέγιστη αρνητική οριζόντια μετακίνηση στο έδαφος εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 4.72 sec, για τον κόμβο 7719 και είναι ίση με -12.11 cm, ενώ η μέγιστη θετική τη χρονική στιγμή 6.92 sec και ισούται με 11.05 cm. Οι καμπύλες των οριζόντιων μετακινήσεων των υπόλοιπων κόμβων του εδάφους έχουν την ίδια μορφή και παρουσιάζουν πολύ κοντινές τιμές. Γενικά, οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις στους κόμβους του εδάφους κυμαίνονται, κατά απόλυτη τιμή, από 8.7-12.11 cm.

Στο Σχήμα 8.80 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις (U_1) που αναπτύσσονται στα μεταλλικά μέλη που θεμελιώνονται στην άργιλο 2. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται κοντά στην κορυφή του πύργου (κόκκινο χρώμα).



Σχήμα 8.80: Οριζόντιες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 2, για τον τρίτο συνδυασμό φόρτισης.

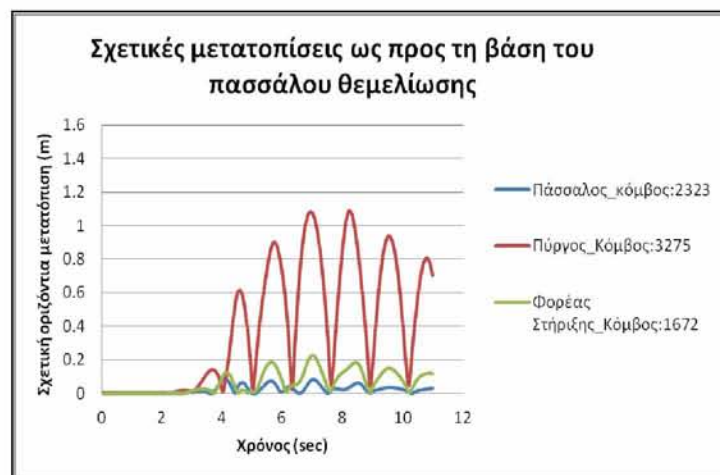
Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.81) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών της κατασκευής για την άργιλο 2.



Σχήμα 8.81: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 2.

Όπως παρατηρείται από το Σχήμα 8.81, οι μεγαλύτερες τιμές οριζόντιων μετακινήσεων στα μεταλλικά μέλη εμφανίζονται στην κορυφή του πύργου, ενώ οι μικρότερες στη βάση του πασσάλου. Συγκεκριμένα, η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση στον πύργο (κόμβο 3275) εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 6.92 sec και είναι ίση με 1.13 m, κατά απόλυτη τιμή, ενώ η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση στη βάση του πασσάλου (κόμβος 2392) εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 5.02 sec και ισούται με 10.57 cm (κατά απόλυτη τιμή).

Κατά τη διάρκεια της φόρτισης του σεισμού μελετήθηκαν οι σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις της κορυφής του πύργου, του φορέα στήριξης και του πασσάλου ως προς τη βάση του πασσάλου (Σχήμα 8.82).

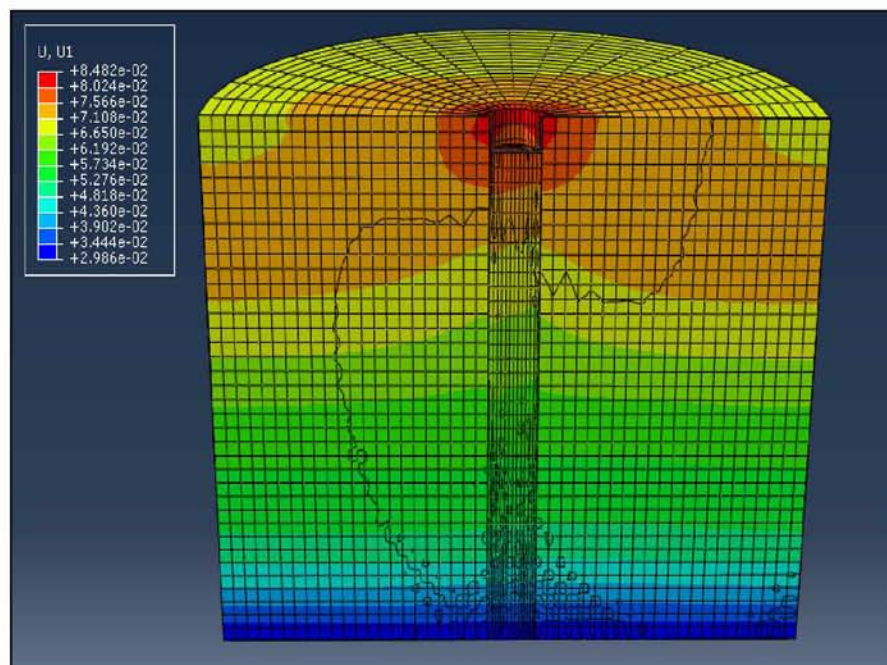


Σχήμα 8.82: Σχετικές μετακινήσεις των 3 σημείων των μεταλλικών μελών ως προς τη βάση του πασσάλου σε συνάρτηση με το χρόνο.

Από το παραπάνω σχήμα (Σχήμα 8.83) παρατηρείται ότι οι καμπύλες των σχετικών οριζόντιων μετακινήσεων, για τα 3 σημεία των μεταλλικών μελών, έχουν περίπου την ίδια μορφή. Οι σχετικές μετακινήσεις του κόμβου 3275 είναι πολύ μεγαλύτερες συγκριτικά με αυτές των άλλων 2 κόμβων, ενώ ακολουθεί ο κόμβος 1672, με τις μικρότερες σχετικές μετακινήσεις να εμφανίζονται στον κόμβο 2323. Η μέγιστη μετακίνηση στον κόμβο 3275 είναι ίση με 1.081 m και εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 6.92 sec, η μέγιστη στον κόμβο 1672 είναι ίση με 22.7 cm τη χρονική στιγμή 7.02 sec και του κόμβου 2323 ισούται με 8.66 cm τη χρονική στιγμή 4.12 sec.

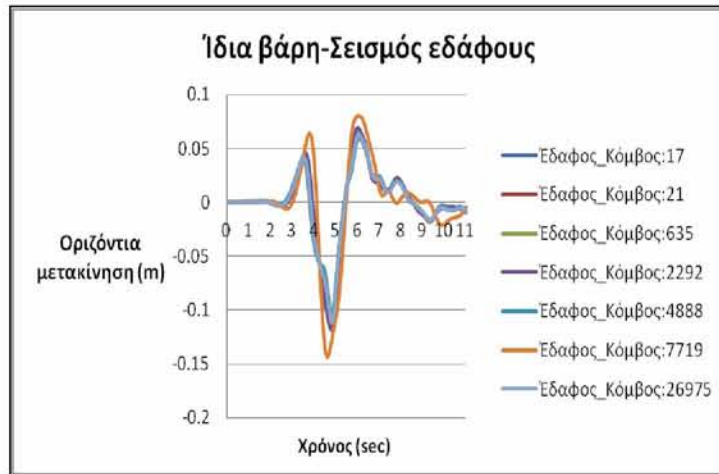
Άργιλος 3

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8.83) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις (U_1) που αναπτύσσονται στην άργιλο 3. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται στο έδαφος που βρίσκεται στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους (κόκκινο χρώμα), εντός και γύρω από τον πάσσαλο.



Σχήμα 8.83: Οριζόντιες μετακινήσεις στην άργιλο 3, για τον τρίτο συνδυασμό φόρτισης.

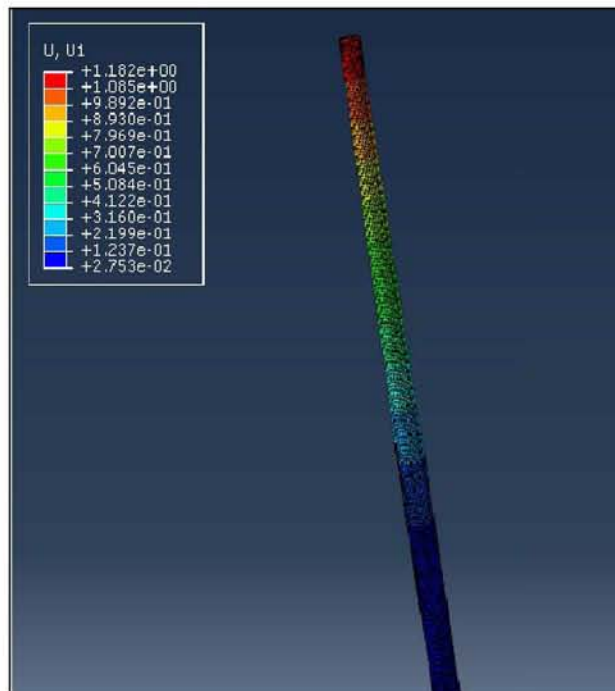
Στο Σχήμα 8.84 παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις για την άργιλο 3.



Σχήμα 8.84: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 3.

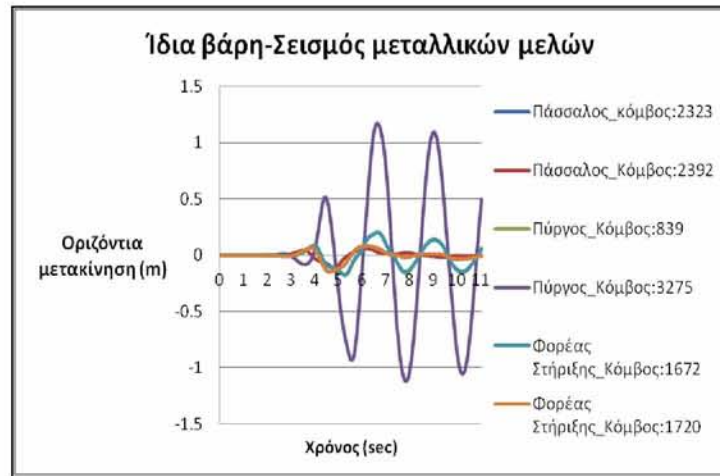
Για την άργιλο 3, η μέγιστη αρνητική οριζόντια μετακίνηση στο έδαφος εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 4.62 sec, για τον κόμβο 7719 και είναι ίση με -14.29 cm, ενώ η μέγιστη θετική τη χρονική στιγμή 6.12 sec και ισούται με 7.95 cm. Οι καμπύλες των οριζόντιων μετακινήσεων των υπόλοιπων κόμβων του εδάφους έχουν την ίδια μορφή και παρουσιάζουν πολύ κοντινές τιμές. Γενικά, οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις στους κόμβους του εδάφους κυμαίνονται, κατά απόλυτη τιμή, από 5.97-14.29 cm.

Στο Σχήμα 8.85 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις (U_1) που αναπτύσσονται στα μεταλλικά μέλη που θεμελιώνονται στην άργιλο 3. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται κοντά στην κορυφή του πύργου (κόκκινο χρώμα).



Σχήμα 8.85: Οριζόντιες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 3, για τον τρίτο συνδυασμό φόρτισης.

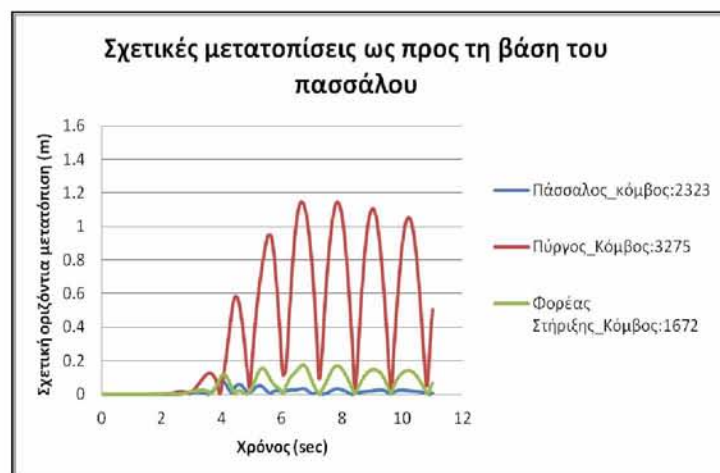
Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.86) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών της κατασκευής για την άργιλο 3.



Σχήμα 8.86: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 3.

Όπως παρατηρείται από το Σχήμα 8.86, οι μεγαλύτερες τιμές οριζόντιων μετακινήσεων στα μεταλλικά μέλη εμφανίζονται στην κορυφή του πύργου, ενώ οι μικρότερες στη βάση του πασσάλου. Συγκεκριμένα, η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση στον πύργο (κόμβος 3275) εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 6.62 sec και είναι ίση με 1.175 m, κατά απόλυτη τιμή, ενώ η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση στη βάση του πασσάλου (κόμβος 2392) εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 4.82 sec και ισούται με 11.22 cm, κατά απόλυτη τιμή.

Κατά τη διάρκεια της φόρτισης του σεισμού μελετήθηκαν οι σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις της κορυφής του πύργου, του φορέα στήριξης και του πασσάλου ως προς τη βάση του πασσάλου (Σχήμα 8.87).

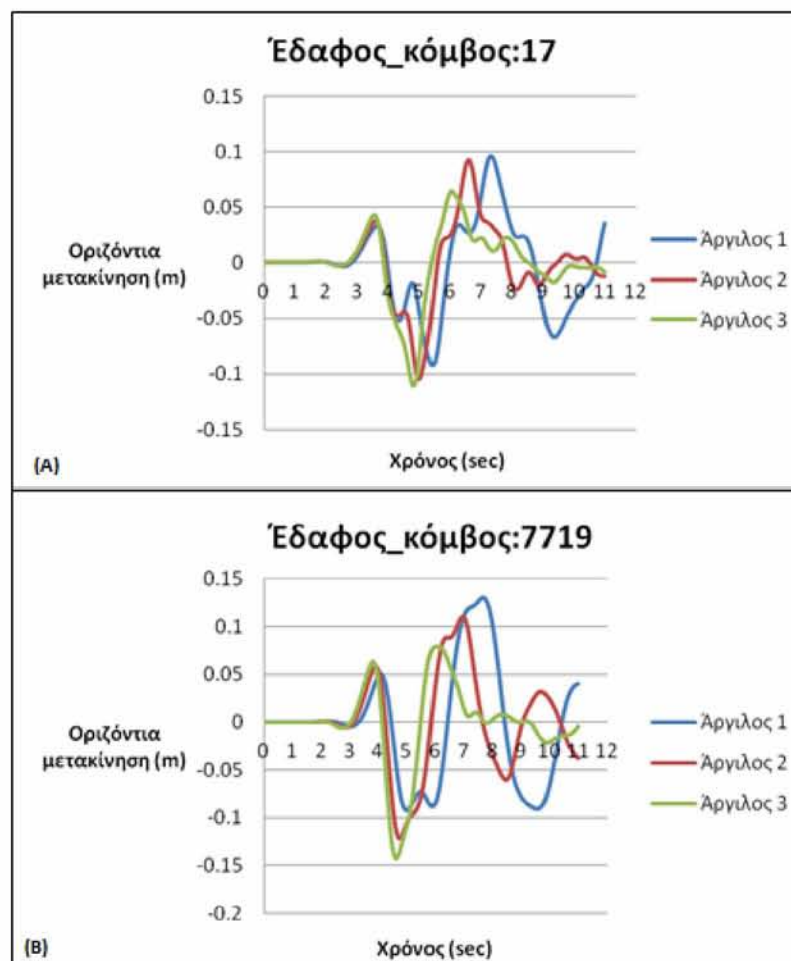


Σχήμα 8.87: Σχετικές μετακινήσεις των 3 σημείων των μεταλλικών μελών ως προς τη βάση του πασσάλου σε συνάρτηση με το χρόνο.

Από το παραπάνω σχήμα (Σχήμα 8.87) παρατηρείται ότι οι καμπύλες των σχετικών οριζόντιων μετακινήσεων, για τα 3 σημεία των μεταλλικών μελών, έχουν περίπου την ίδια μορφή. Οι σχετικές μετακινήσεις του κόμβου 3275 είναι πολύ μεγαλύτερες συγκριτικά με αυτές των άλλων 2 κόμβων, ενώ ακολουθεί ο κόμβος 1672, με τις μικρότερες σχετικές μετακινήσεις να εμφανίζονται στον κόμβο 2323. Η μέγιστη μετακίνηση στον κόμβο 3275 είναι ίση με 1.147 m και εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 6.62 sec, η μέγιστη στον κόμβο 1672 είναι ίση με 17.32 cm τη χρονική στιγμή 6.72 sec και του κόμβου 2323 ισούται με 8.05 cm τη χρονική στιγμή 4.02 sec.

8.4.1.1 Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των αργίλων 1, 2 και 3

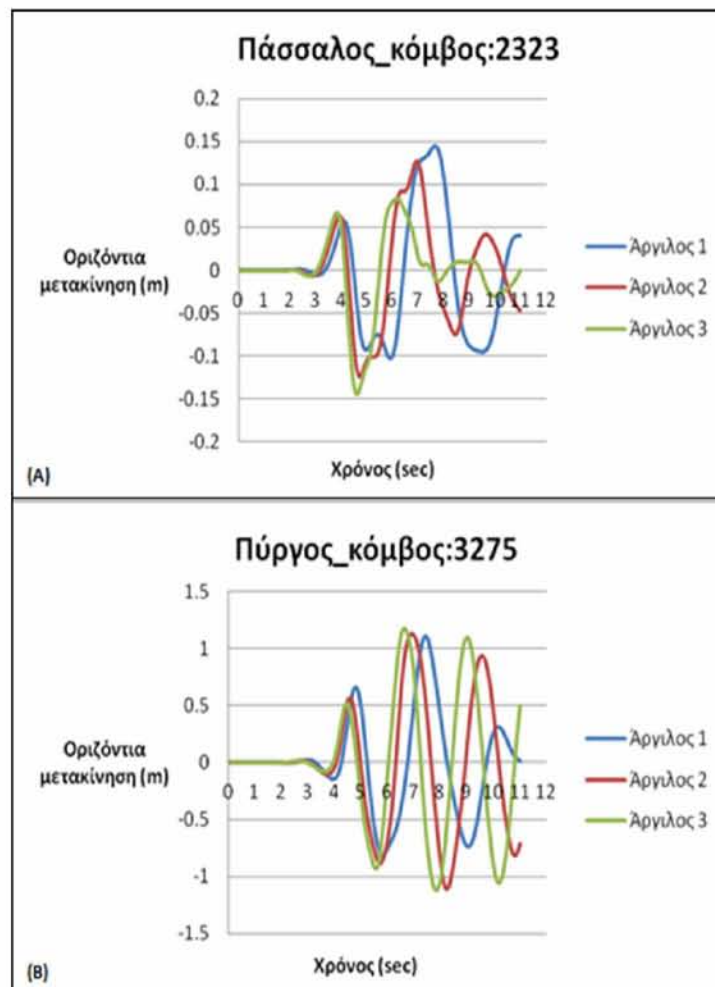
Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 8.88) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις (U_1) που αναπτύσσονται και στους τρεις τύπους αργίλων. Για τη σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων, στις τρεις αργίλους, επιλέχθηκαν για το έδαφος οι κόμβοι 17 και 7719. Η επιλογή αυτή έγινε καθώς οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται στον κόμβο 7719 ενώ όλοι οι υπόλοιποι κόμβοι του εδάφους συμπεριφέρονται όπως ο κόμβος 17. Τα διαγράμματα των υπόλοιπων κόμβων παρουσιάζονται στο παράρτημα Γ.



Σχήμα 8.88: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 17 (Α) και 7719 (Β) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.

Από το Σχήμα 8.88 παρατηρείται ότι τόσο στον κόμβο 17 όσο και στον κόμβο 7719 η άργιλος 3, σε σχέση με τις υπόλοιπες αργίλους, αποκτά σε μικρότερο χρόνο τις μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις της (τόσο τις αρνητικές όσο και τις θετικές), ενώ ακολουθεί η άργιλος 2 και τέλος η άργιλος 1. Μεταξύ των 3 αργίλων η άργιλος 3 εμφανίζει τη μέγιστη αρνητική ενώ η άργιλος 1 τη μέγιστη θετική οριζόντια μετακίνηση. Ανάμεσα στους κόμβους 17 και 7719, οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται στον κόμβο 7719, όπου η μέγιστη αρνητική μετακίνηση ισούται με -14.29 cm ενώ η μέγιστη θετική ισούται με 12.98 cm.

Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.89) παρουσιάζονται οι απόλυτες οριζόντιες μετακινήσεις της κορυφής του πασσάλου και του πύργου, για τις 3 διαφορετικές αργίλους.



Σχήμα 8.89: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 2323 (A) και 3275 (B) συναρτήσει του χρόνου για τις αργίλους 1, 2 και 3.

Από το Σχήμα 8.89A παρατηρείται ότι οι καμπύλες των οριζόντιων μετακινήσεων στην κορυφή του πασσάλου και για τις τρεις αργίλους, έχουν ίδια μορφή με αυτές που προέκυψαν παραπάνω για τον κόμβο 7719. Η άργιλος 3, σε σχέση με τις υπόλοιπες αργίλους, αποκτά σε μικρότερο χρόνο τις μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις της (τόσο τις αρνητικές όσο και τις θετικές), ενώ ακολουθεί η άργιλος 2 και τέλος η άργιλος 1. Μεταξύ των τριών αργίλων η άργιλος 3 εμφανίζει τη μέγιστη αρνητική ενώ η άργιλος 1 τη μέγιστη θετική οριζόντια

μετακίνηση. Η μέγιστη αρνητική μετακίνηση ισούται με -14.39 cm ενώ η μέγιστη θετική ισούται με 14.4 cm.

Από το Σχήμα 8.89B παρατηρείται ότι οι καμπύλες των οριζόντιων μετακινήσεων στην κορυφή του πύργου και για τις τρεις αργίλους, έχουν ίδια μορφή. Η άργιλος 3, σε σχέση με τις υπόλοιπες αργίλους, αποκτά σε μικρότερο χρόνο τις μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις της. Αυτό που διαφοροποιεί τον κόμβο της κορυφής του πύργου σε σχέση με τους υπόλοιπους κόμβους είναι ότι τόσο η μέγιστη θετική όσο και η μέγιστη αρνητική οριζόντια μετακίνηση, μεταξύ των τριών αργίλων, εμφανίζονται στην άργιλο 3. Η μέγιστη αρνητική μετακίνηση ισούται με -1.12 m ενώ η μέγιστη θετική ισούται με 1.175 m.

Στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 8.1) παρατίθενται οι μέγιστες σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις της κορυφής του πύργου και του πασσάλου, ως προς τη βάση του πασσάλου, για τις τρεις αργίλους.

Πίνακας 8.1: Σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις της κορυφής του πασσάλου και του πύργου ως προς τη βάση του πασσάλου.

Μέγιστες σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις ως προς τη βάση του πασσάλου (m)		
	Κορυφή πασσάλου	Κορυφή πύργου
Άργιλος 1	0.1131	1.01
Άργιλος 2	0.0866	1.081
Άργιλος 3	0.0805	1.147

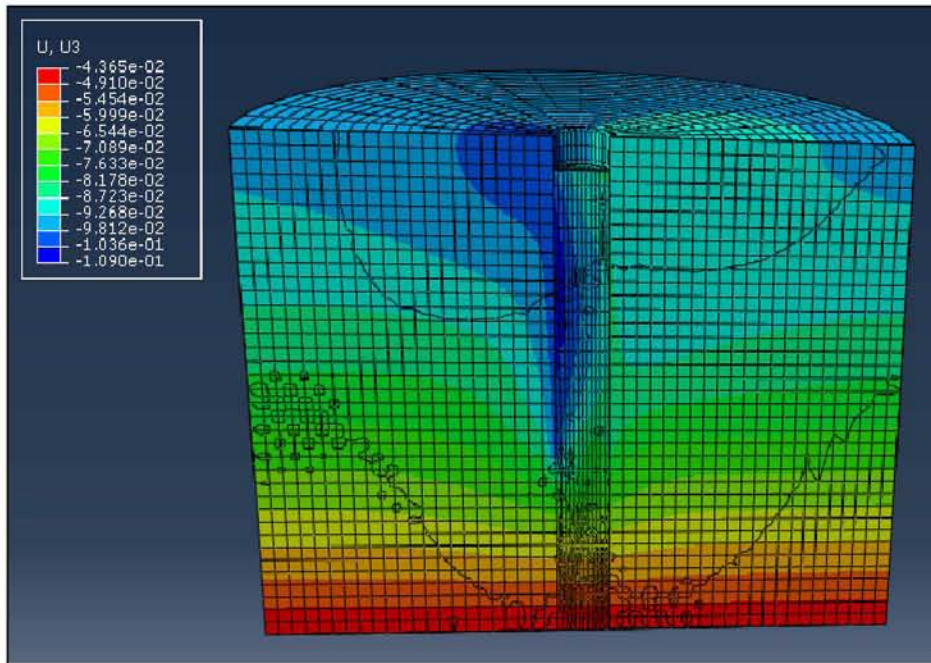
Αυτό που παρατηρείται από τον πίνακα, για τις τρεις αργίλους, είναι ότι η μέγιστη σχετική οριζόντια μετακίνηση για την κορυφή του πασσάλου εμφανίζεται στην άργιλο 1 και για την κορυφή του πύργου στην άργιλο 3.

8.4.2 Αποτελέσματα κατακόρυφων μετακινήσεων των αργίλων 1, 2 και 3

Για την περίπτωση φόρτισης των ίδιων βαρών και του σεισμού προέκυψαν τα αποτελέσματα για 13 σημεία από το μοντέλο για τις κατακόρυφες μετακινήσεις στη διεύθυνση Z και για τις τρεις αργίλους.

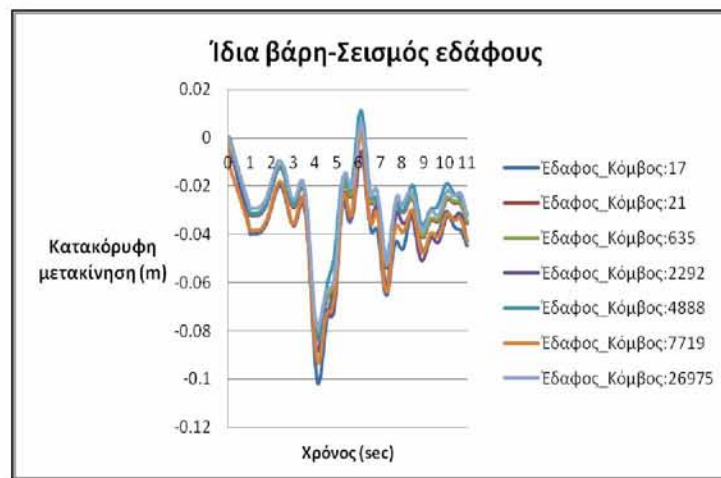
Άργιλος 1

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8.90) παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις (U_3) που αναπτύσσονται στην άργιλο 1. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται κυρίως στο έδαφος που βρίσκεται σε επαφή με τον πάσσαλο θεμελίωσης (μπλε-γαλάζιο χρώμα).



Σχήμα 8.90: Κατακόρυφες μετακινήσεις στην άργιλο 1, για τον τρίτο συνδυασμό φόρτισης.

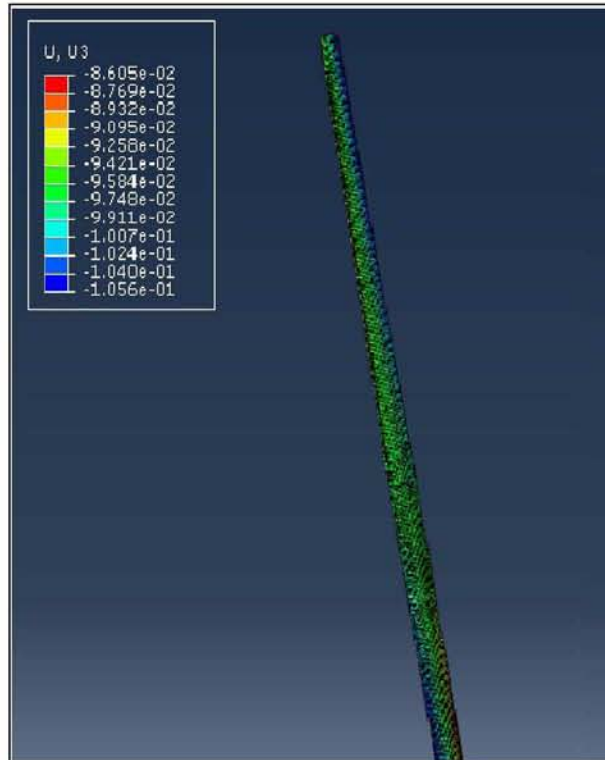
Στο Σχήμα 8.91 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις για την άργιλο 1.



Σχήμα 8.91: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.

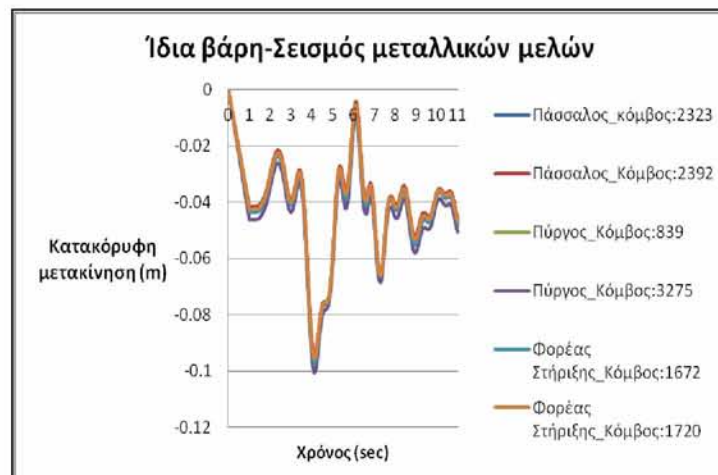
Όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα (Σχήμα 8.91), οι καμπύλες των κόμβων του εδάφους έχουν την ίδια μορφή. Για την άργιλο 1 η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση προκύπτει για τον κόμβο 17, τη χρονική στιγμή 4.12 sec και είναι ίση με -10.18 cm. Γενικά, οι μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις στους κόμβους του εδάφους κυμαίνονται, κατά απόλυτη τιμή, από 7.8-10.18 cm.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8.92) παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις (U_3) που αναπτύσσονται στα μεταλλικά μέλη που θεμελιώνονται στην άργιλο 1. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται κοντά στην κορυφή του πύργου (μπλε χρώμα).



Σχήμα 8.92: Κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 1, για τον τρίτο συνδυασμό φόρτισης.

Στο Σχήμα 8.93 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών της κατασκευής για την άργιλο 1.



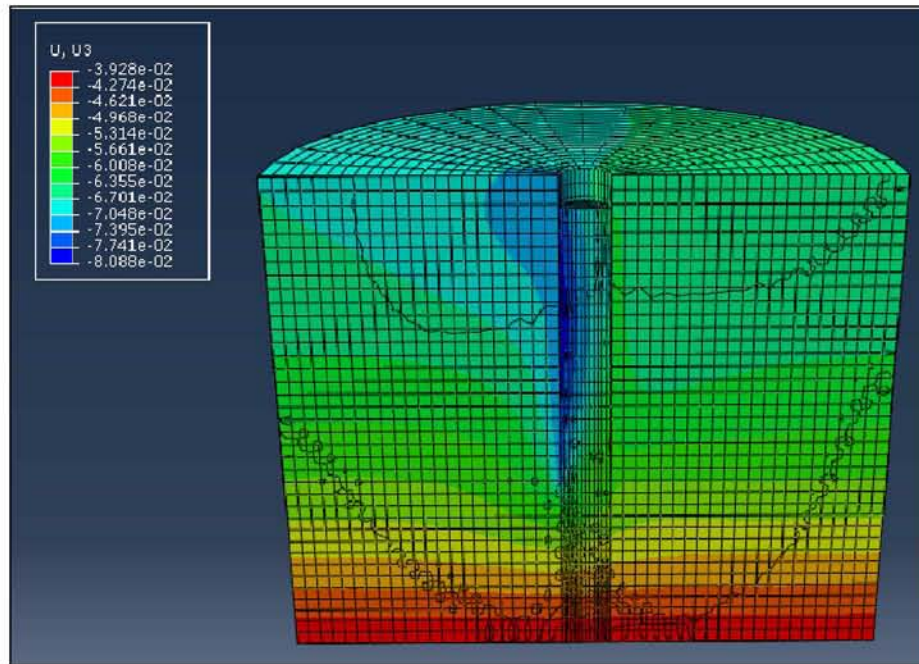
Σχήμα 8.93: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.

Από το παραπάνω σχήμα (Σχήμα 8.93) παρατηρείται ότι και στην περίπτωση των μεταλλικών μελών, οι καμπύλες των κατακόρυφων μετακινήσεων έχουν την ίδια μορφή και περίπου ίδιες τιμές μετακινήσεων. Στα μεταλλικά μέλη, η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση είναι ίση με -10 cm και εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 4.12 sec στον κόμβο 3275.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, δεν έχει νόημα η μελέτη των σχετικών μετακινήσεων, διότι οι τιμές τους τείνουν στο μηδέν, γεγονός το οποίο υποδεικνύει ότι τα μεταλλικά μέλη της κατασκευής κινούνται σαν ένα σώμα ως προς την κατακόρυφη διεύθυνση.

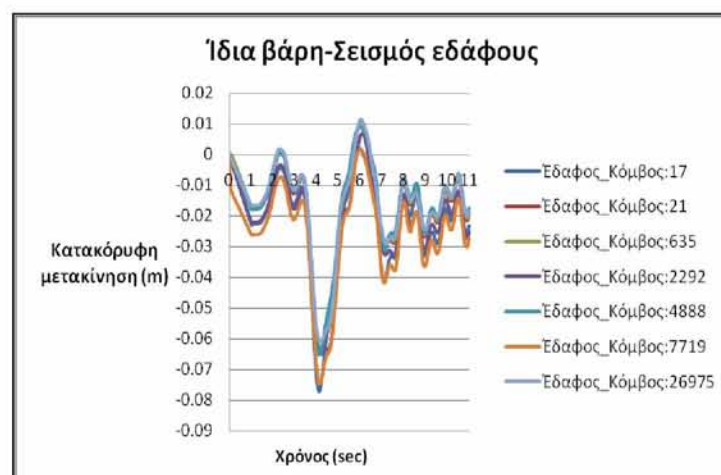
Άργιλος 2

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8.94) παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις (U_3) που αναπτύσσονται στην άργιλο 2. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται κυρίως στο έδαφος που βρίσκεται σε επαφή με τον πάσσαλο θεμελίωσης (μπλε-γαλάζιο χρώμα).



Σχήμα 8.94: Κατακόρυφες μετακινήσεις στην άργιλο 2, για τον τρίτο συνδυασμό φόρτισης.

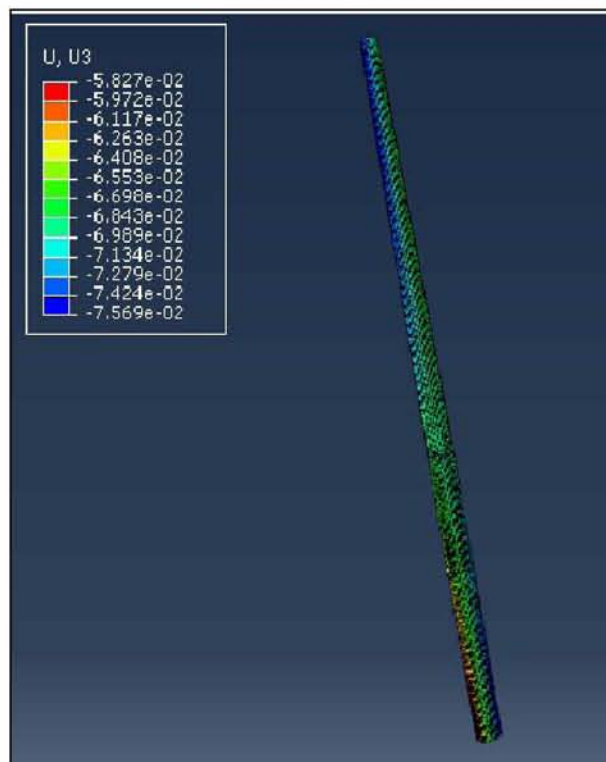
Στο Σχήμα 8.95 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις για την άργιλο 2.



Σχήμα 8.95: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 2.

Οι καμπύλες των κόμβων του εδάφους και στην άργιλο 2 έχουν την ίδια μορφή. Για την άργιλο 2 η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση προκύπτει για τον κόμβο 17, τη χρονική στιγμή 4.12 sec και είναι ίση με -7.7 cm. Πολύ κοντινές μετακινήσεις με τον κόμβο 17 παρουσιάζει και ο κόμβος 7719. Γενικά, οι μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις στους κόμβους του εδάφους κυμαίνονται, κατά απόλυτη τιμή, από 6.08-7.7 cm.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8.96) παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις (U_3) που αναπτύσσονται στα μεταλλικά μέλη που θεμελιώνονται στην άργιλο 2. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται κοντά στην κορυφή του πύργου (μπλε χρώμα).



Σχήμα 8.96: Κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 2, για τον τρίτο συνδυασμό φόρτισης.

Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών της κατασκευής για την άργιλο 2.

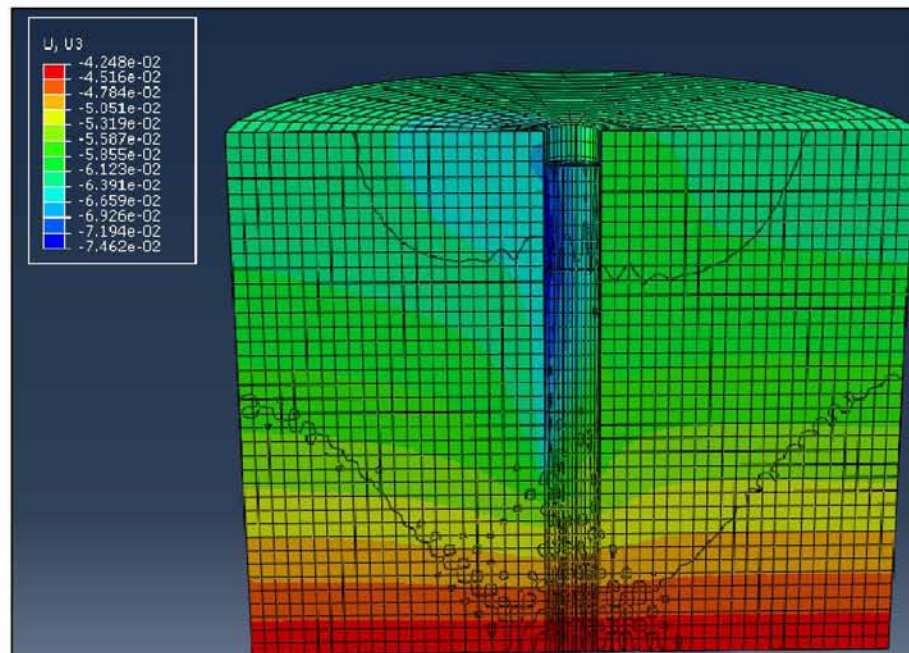


Σχήμα 8.97: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 2.

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι και στην περίπτωση των μεταλλικών μελών, οι καμπύλες των κατακόρυφων μετακινήσεων έχουν την ίδια μορφή και περίπου ίδιες τιμές μετακινήσεων. Στα μεταλλικά μέλη, η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση είναι ίση με -7.59 cm και εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 4.12 sec στον κόμβο 3275.

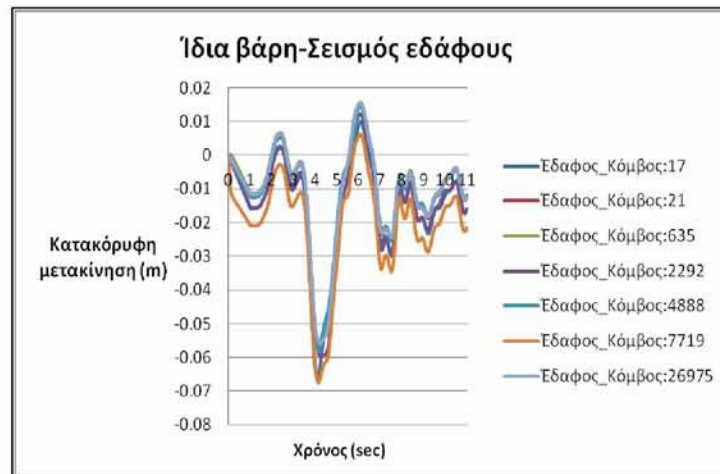
Άργιλος 3

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8.98) παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις (U_3) που αναπτύσσονται στην άργιλο 3. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται κυρίως στο έδαφος που βρίσκεται σε επαφή με τον πάσσαλο θεμελίωσης (μπλε-γαλάζιο χρώμα).



Σχήμα 8.98: Κατακόρυφες μετακινήσεις στην άργιλο 3, για τον τρίτο συνδυασμό φόρτισης.

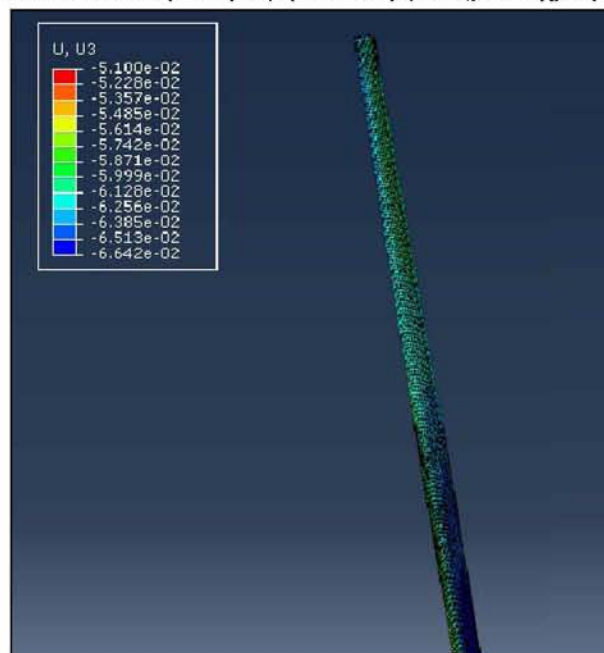
Στο Σχήμα 8.99 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις για την άργιλο 3.



Σχήμα 8.99: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 3.

Οι καμπύλες των κόμβων του εδάφους και για την άργιλο 3 έχουν την ίδια μορφή. Για την άργιλο 3 η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση προκύπτει για τον κόμβο 7719, τη χρονική στιγμή 4.12 sec και είναι ίση με -6.75 cm. Πολύ κοντινές μετακινήσεις με τον κόμβο 7719 παρουσιάζει και ο κόμβος 17, του οποίου η μέγιστη μετακίνηση ισούται με -6.59 cm, την ίδια χρονική στιγμή. Γενικά, οι μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις στους κόμβους του εδάφους κυμαίνονται, κατά απόλυτη τιμή, από 5.6-6.75 cm.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8.100) παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις (U_3) που αναπτύσσονται στα μεταλλικά μέλη που θεμελιώνονται στην άργιλο 3. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται κοντά στην κορυφή του πύργου (μπλε χρώμα).



Σχήμα 8.100: Κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών που θεμελιώνονται στην άργιλο 3, για τον τρίτο συνδυασμό φόρτισης.

Στο Σχήμα 8.101 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών της κατασκευής για την άργιλο 3.

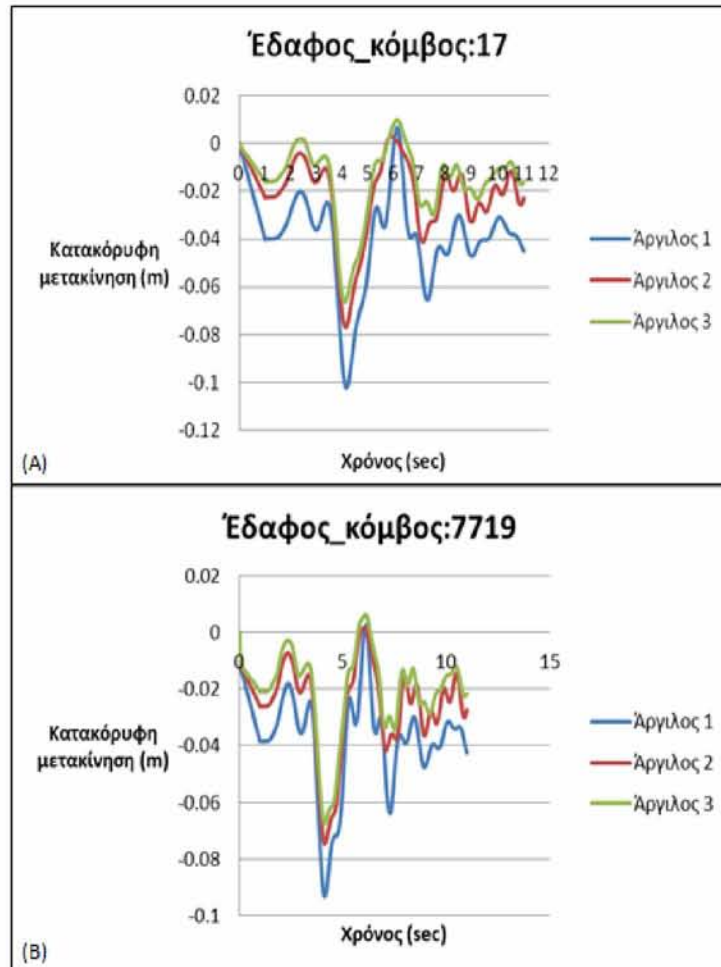


Σχήμα 8.101: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 3.

Από το παραπάνω σχήμα (Σχήμα 8.101) παρατηρείται ότι και στην περίπτωση των μεταλλικών μελών, οι καμπύλες των κατακόρυφων μετακινήσεων έχουν την ίδια μορφή και περίπου ίδιες τιμές μετακινήσεων. Στα μεταλλικά μέλη, η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση είναι ίση με -6.68 cm και εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 4.12 sec στον κόμβο 3275.

8.4.2.1 Σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων των αργίλων 1, 2 και 3

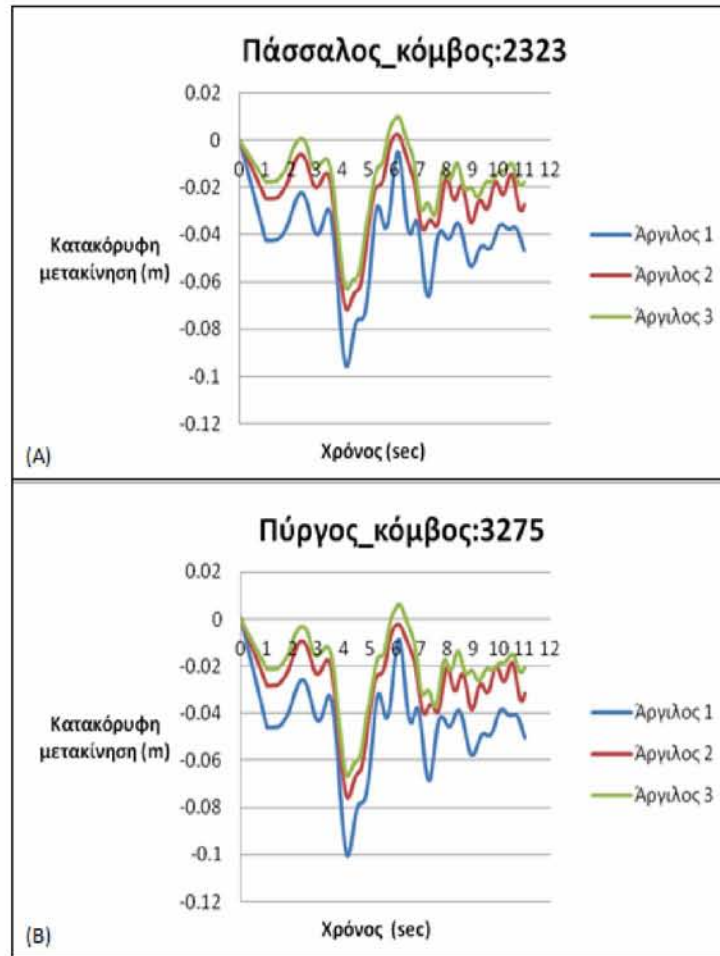
Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 8.102) παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις (U_3) που αναπτύσσονται και στους τρεις τύπους αργίλων. Για τη σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων, στις τρεις αργίλους, επιλέχθηκαν για το έδαφος οι κόμβοι 17 και 7719. Η επιλογή αυτή έγινε καθώς στους κόμβους αυτούς εμφανίζονται οι μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις. Οι υπόλοιποι κόμβοι του εδάφους παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά, τα διαγράμματα των οποίων παρουσιάζονται στο παράρτημα Γ.



Σχήμα 8.102: Σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων των κόμβων 17 (Α) και 7719 (Β) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για τις άργιλους 1, 2 και 3.

Από το Σχήμα 8.102 παρατηρείται ότι τόσο για τον κόμβο 17 όσο και για τον κόμβο 7719 η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση, μεταξύ των 3 άργιλων, εμφανίζεται στην άργιλο 1, τη χρονική στιγμή 4.12 sec, ενώ ακολουθούν η άργιλος 2 και η άργιλος 3. Η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση εμφανίζεται στην άργιλο 1 στον κόμβο 17 και ισούται με -10.18 cm.

Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.103) συγκρίνονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις της κορυφής του πασσάλου και του πύργου, για τις τρεις άργιλους.



Σχήμα 8.103: Σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων των κόμβων 2323 (Α) και 3275 (Β) συναρτήσει του χρόνου για τις αργίλους 1, 2 και 3.

Η μορφή των καμπυλών των κατακόρυφων μετακινήσεων για την κορυφή του πασσάλου και του πύργου είναι παρόμοια και στις τρεις αργίλους (Σχήμα 8.103). Οι μεγαλύτερες κατακόρυφες μετακινήσεις, των μεταλλικών μελών, εμφανίζονται στην άργιλο 1, ενώ οι μικρότερες στην άργιλο 3. Η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση στην κορυφή του πύργου είναι ίση με -10 cm, ενώ στην κορυφή του πασσάλου ισούται με -9.58 cm. Οι μέγιστες μετακινήσεις και στους 2 κόμβους παρουσιάζονται τη χρονική στιγμή 4.12 sec.

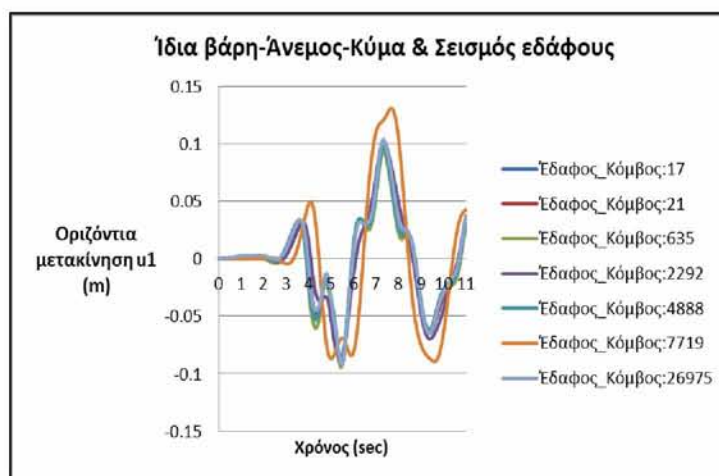
8.5 Αποτελέσματα για την περίπτωση φόρτισης των ίδιων βαρών, του ανέμου, του κύματος και του σεισμού

8.5.1 Αποτελέσματα απόλυτων και σχετικών οριζόντιων μετακινήσεων των αργίλων 1, 2 και 3 (για τη διεύθυνση X)

Για την περίπτωση φόρτισης των ίδιων βαρών, του ανέμου, του κύματος και στη συνέχεια του σεισμού, προέκυψαν τα αποτελέσματα για 13 σημεία από το μοντέλο για τις οριζόντιες απόλυτες μετακινήσεις (U_1) και για τις τρεις αργίλους. Ακόμα, υπολογίστηκαν οι σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις (διεύθυνση X) για την κορυφή του πύργου, του φορέα στήριξης και του πασσάλου, ως προς τη βάση του πασσάλου.

Άργιλος 1

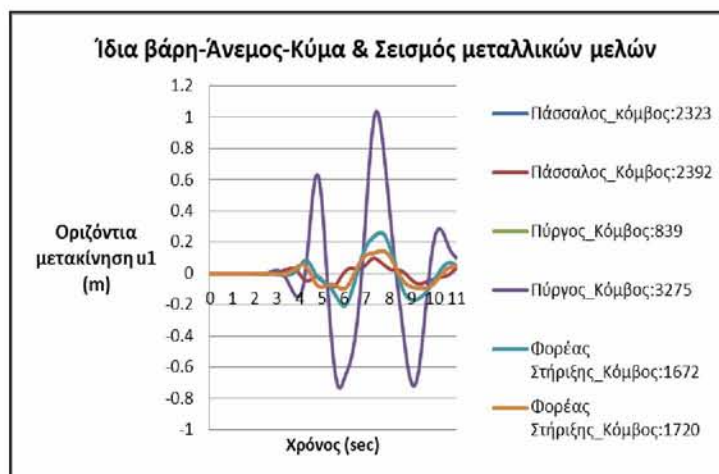
Στο Σχήμα 8.104 παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις για την άργιλο 1.



Σχήμα 8.104: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.

Η μέγιστη θετική οριζόντια μετακίνηση στο έδαφος εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 7.72 sec, για τον κόμβο 7719 και είναι ίση με 13.06 cm, ενώ η μέγιστη αρνητική εμφανίζεται στον κόμβο 635, τη χρονική στιγμή 5.42 sec και ισούται με -9.43 cm. Οι καμπύλες των οριζόντιων μετακινήσεων των υπόλοιπων κόμβων του εδάφους έχουν την ίδια μορφή και παρουσιάζουν πολύ κοντινές τιμές, ιδιαίτερα με τον κόμβο 635. Γενικά, οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις στους κόμβους του εδάφους κυμαίνονται, κατά απόλυτη τιμή, από 8.53-13.06 cm.

Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.105) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών της κατασκευής για την άργιλο 1.



Σχήμα 8.105: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.

Όπως παρατηρείται από το Σχήμα 8.105, οι μεγαλύτερες τιμές οριζόντιων μετακινήσεων στα μεταλλικά μέλη εμφανίζονται στην κορυφή του πύργου, ενώ οι μικρότερες στη βάση του πασσάλου. Συγκεκριμένα, η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση στον πύργο (κόμβος 3275) εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 7.42 sec και είναι ίση με 1.036 m, κατά απόλυτη τιμή, ενώ η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση στη βάση του πασσάλου (κόμβος 2392) εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 7.32 sec και ισούται με 9.75 cm (κατά απόλυτη τιμή).

Μελετήθηκαν οι σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις της κορυφής του πύργου, του φορέα στήριξης και του πασσάλου ως προς τη βάση του πασσάλου (Σχήμα 8.106). Όπως αναφέρθηκε και στους προηγούμενους συνδυασμούς, οι μετακινήσεις του κόμβου στη βάση του πύργου και του φορέα στήριξης δε μελετώνται καθώς παρουσιάζουν αρκετά κοντινές τιμές με αυτές των κόμβων της κορυφής του φορέα στήριξης και του πασσάλου αντίστοιχα.



Σχήμα 8.106: Σχετικές μετακινήσεις των 3 σημείων των μεταλλικών μελών ως προς τη βάση του πασσάλου σε συνάρτηση με το χρόνο.

Από το Σχήμα 8.106 παρατηρείται ότι οι καμπύλες των σχετικών οριζόντιων μετακινήσεων, για τα 3 σημεία των μεταλλικών μελών, έχουν περίπου την ίδια μορφή. Οι σχετικές μετακινήσεις του κόμβου 3275 είναι πολύ μεγαλύτερες συγκριτικά με αυτές των άλλων 2 κόμβων, ενώ ακολουθεί ο κόμβος 1672, με τις μικρότερες σχετικές μετακινήσεις να εμφανίζονται στον κόμβο 2323. Η μέγιστη μετακίνηση στον κόμβο 3275 είναι ίση με 94.1 cm και εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 7.42 sec, η μέγιστη στον κόμβο 1672 είναι ίση με 21.36 cm τη χρονική στιγμή 6.12 sec και του κόμβου 2323 ισούται με 10.88 cm τη χρονική στιγμή 6.12 sec.

Άργιλος 2

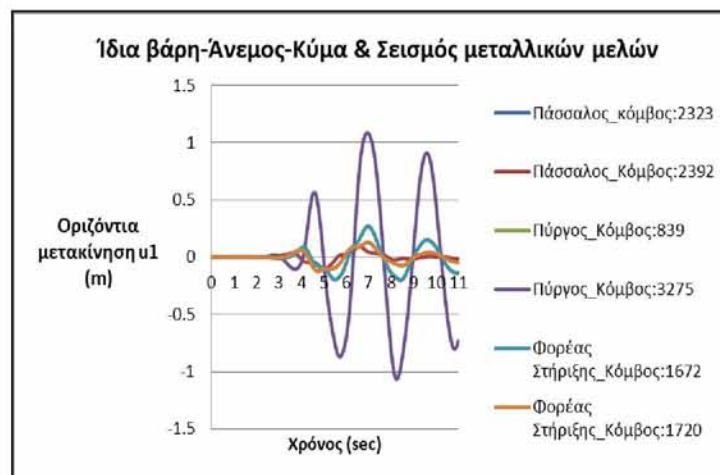
Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.107) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις για την άργιλο 2.



Σχήμα 8.107: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 2.

Για την άργιλο 2, η μέγιστη αρνητική οριζόντια μετακίνηση στο έδαφος εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 4.72 sec, για τον κόμβο 7719 και είναι ίση με -11.99 cm, ενώ η μέγιστη θετική τη χρονική στιγμή 6.92 sec και ισούται με 11.11 cm. Οι καμπύλες των οριζόντιων μετακινήσεων των υπόλοιπων κόμβων του εδάφους έχουν την ίδια μορφή και παρουσιάζουν πολύ κοντινές τιμές. Γενικά, οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις στους κόμβους του εδάφους κυμαίνονται, κατά απόλυτη τιμή, από 8.77-11.99 cm.

Στο Σχήμα 8.108 παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών της κατασκευής για την άργιλο 2.

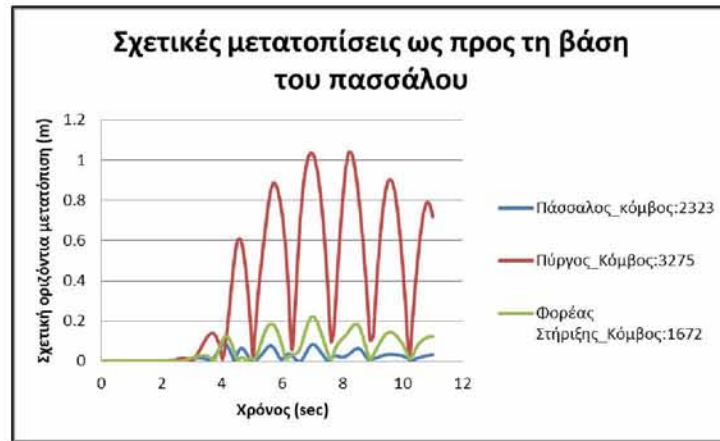


Σχήμα 8.108: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 2.

Όπως παρατηρείται από το Σχήμα 8.108, οι μεγαλύτερες τιμές οριζόντιων μετακινήσεων στα μεταλλικά μέλη εμφανίζονται στην κορυφή του πύργου, ενώ οι μικρότερες στη βάση του πασσάλου. Συγκεκριμένα, η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση στον πύργο (κόμβο 3275) εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 6.92 sec και είναι ίση με 1.084 m, κατά απόλυτη τιμή, ενώ η

μέγιστη οριζόντια μετακίνηση στη βάση του πασσάλου (κόμβος 2392) εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 5.02 sec και ισούται με 10.57 cm.

Μελετήθηκαν οι σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις της κορυφής του πύργου, του φορέα στήριξης και του πασσάλου ως προς τη βάση του πασσάλου (Σχήμα 8.109).

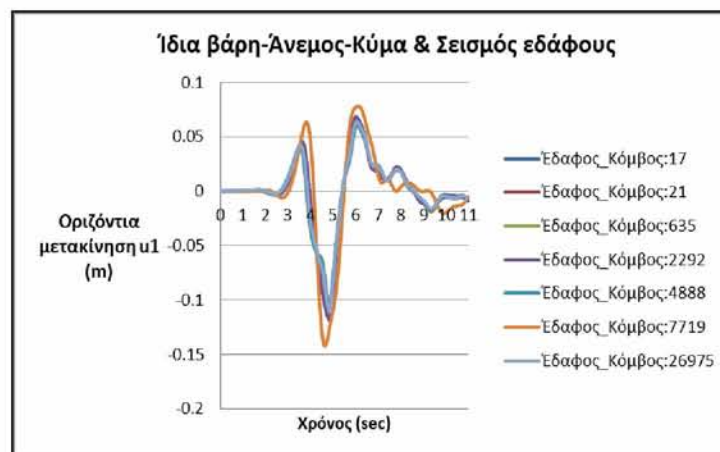


Σχήμα 8.109: Σχετικές μετακινήσεις των 3 σημείων των μεταλλικών μελών ως προς τη βάση του πασσάλου σε συνάρτηση με το χρόνο.

Από το παραπάνω σχήμα (Σχήμα 8.109) παρατηρείται ότι οι καμπύλες των σχετικών οριζόντιων μετακινήσεων, για τα 3 σημεία των μεταλλικών μελών, έχουν περίπου την ίδια μορφή. Οι σχετικές μετακινήσεις του κόμβου 3275 είναι πολύ μεγαλύτερες συγκριτικά με αυτές των άλλων 2 κόμβων, ενώ ακολουθεί ο κόμβος 1672, με τις μικρότερες σχετικές μετακινήσεις να εμφανίζονται στον κόμβο 2323. Η μέγιστη μετακίνηση στον κόμβο 3275 είναι ίση με 1.04 m και εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 8.22 sec, η μέγιστη στον κόμβο 1672 είναι ίση με 22.28 cm τη χρονική στιγμή 7.02 sec και του κόμβου 2323 ισούται με 8.63 cm τη χρονική στιγμή 4.12 sec.

Άργιλος 3

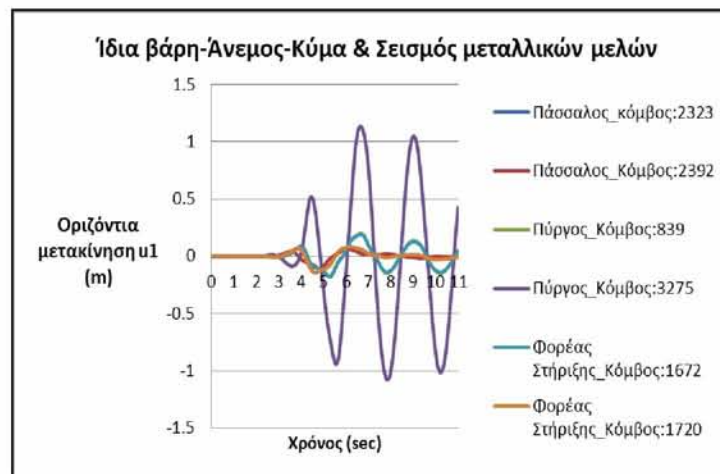
Στο Σχήμα 8.110 παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις για την άργιλο 3.



Σχήμα 8.110: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 3.

Για την άργιλο 3, η μέγιστη αρνητική οριζόντια μετακίνηση στο έδαφος εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 4.62 sec, για τον κόμβο 7719 και είναι ίση με -14.22 cm, ενώ η μέγιστη θετική τη χρονική στιγμή 6.12 sec και ισούται με 7.81 cm. Οι καμπύλες των οριζόντιων μετακινήσεων των υπόλοιπων κόμβων του εδάφους έχουν την ίδια μορφή και παρουσιάζουν πολύ κοντινές τιμές. Γενικά, οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις στους κόμβους του εδάφους κυμαίνονται, κατά απόλυτη τιμή, από 5.94-14.22 cm.

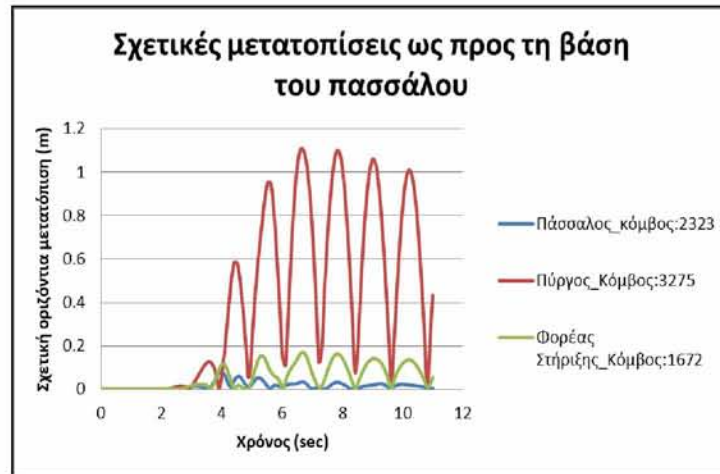
Στο Σχήμα 8.111 παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών της κατασκευής για την άργιλο 3.



Σχήμα 8.111: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 3.

Όπως παρατηρείται από το Σχήμα 8.111, οι μεγαλύτερες τιμές οριζόντιων μετακινήσεων στα μεταλλικά μέλη εμφανίζονται στην κορυφή του πύργου, ενώ οι μικρότερες στη βάση του πασσάλου. Συγκεκριμένα, η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση στον πύργο (κόμβο 3275) εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 6.62 sec και είναι ίση με 1.13 m, κατά απόλυτη τιμή, ενώ η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση στη βάση του πασσάλου (κόμβος 2392) εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 4.84 sec και ισούται με 11.33 cm (κατά απόλυτη τιμή).

Μελετήθηκαν οι σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις της κορυφής του πύργου, του φορέα στήριξης και του πασσάλου ως προς τη βάση του πασσάλου (Σχήμα 8.112).

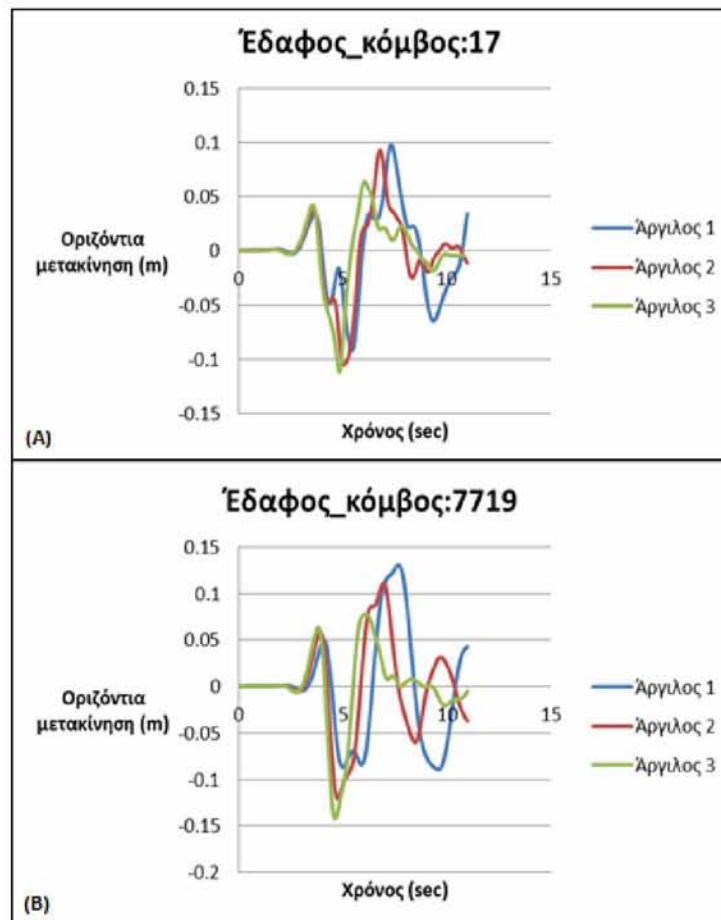


Σχήμα 8.112: Σχετικές μετακινήσεις των 3 σημείων των μεταλλικών μελών ως προς τη βάση του πασσάλου σε συνάρτηση με το χρόνο.

Από το παραπάνω σχήμα (Σχήμα 8.112) παρατηρείται ότι οι καμπύλες των σχετικών οριζόντιων μετακινήσεων, για τα 3 σημεία των μεταλλικών μελών, έχουν περίπου την ίδια μορφή. Οι σχετικές μετακινήσεις του κόμβου 3275 είναι πολύ μεγαλύτερες συγκριτικά με αυτές των άλλων 2 κόμβων, ενώ ακολουθεί ο κόμβος 1672, με τις μικρότερες σχετικές μετακινήσεις να εμφανίζονται στον κόμβο 2323. Η μέγιστη μετακίνηση στον κόμβο 3275 είναι ίση με 1.106 m και εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 6.62 sec, η μέγιστη στον κόμβο 1672 είναι ίση με 16.97 cm τη χρονική στιγμή 6.72 sec και του κόμβου 2323 ισούται με 8.07 cm τη χρονική στιγμή 4.02 sec.

8.5.1.1 Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των αργίλων 1, 2 και 3 (διεύθυνση X)

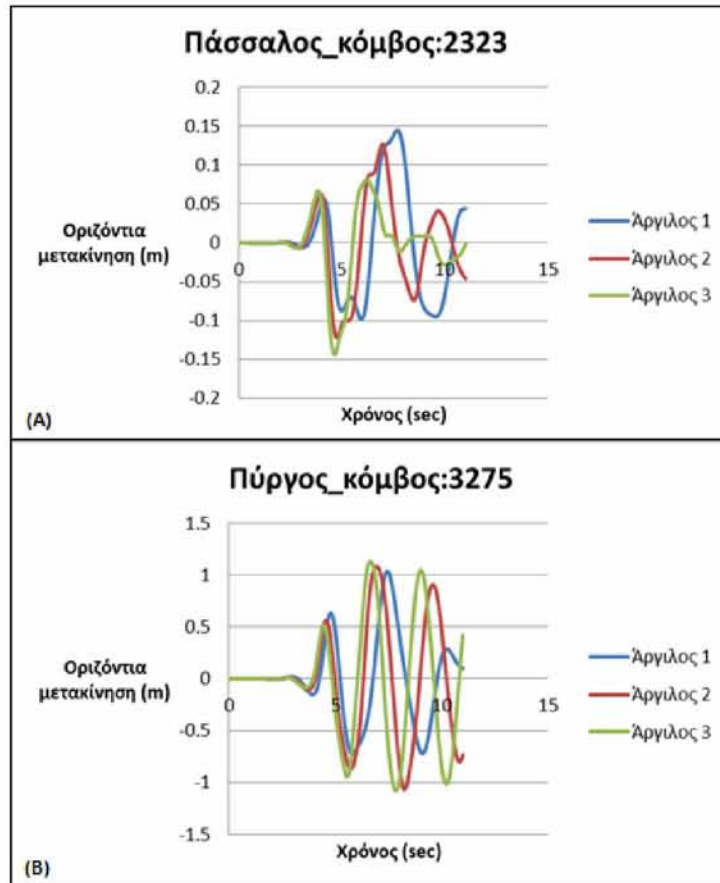
Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 8.113) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις (U_1) που αναπτύσσονται και στους τρεις τύπους αργίλων. Για τη σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων, στις τρεις αργίλους, επιλέχθηκαν για το έδαφος οι κόμβοι 17 και 7719 (Σχήμα 8.113). Η επιλογή αυτή έγινε καθώς οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται στον κόμβο 7719 ενώ όλοι οι υπόλοιποι κόμβοι του εδάφους συμπεριφέρονται όπως ο κόμβος 17. Τα διαγράμματα των υπόλοιπων κόμβων παρουσιάζονται στο παράρτημα Δ.



Σχήμα 8.113: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 17 (A) και 7719 (B) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.

Από το παραπάνω σχήμα (Σχήμα 8.113) παρατηρείται ότι τόσο στον κόμβο 17 όσο και στον κόμβο 7719 η άργιλος 3, σε σχέση με τις υπόλοιπες αργίλους, αποκτά σε μικρότερο χρόνο τις μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις της (τόσο τις αρνητικές όσο και τις θετικές), ενώ ακολουθεί η άργιλος 2 και τέλος η άργιλος 1. Μεταξύ των 3 αργίλων η άργιλος 3 εμφανίζει τη μέγιστη αρνητική ενώ η άργιλος 1 τη μέγιστη θετική οριζόντια μετακίνηση. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίζονται στον κόμβο 7719, όπου η μέγιστη αρνητική μετακίνηση ισούται με -14.22 cm ενώ η μέγιστη θετική ισούται με 13.06 cm.

Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.114) παρουσιάζονται οι απόλυτες οριζόντιες μετακινήσεις της κορυφής του πασσάλου και του πύργου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.



Σχήμα 8.114: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 2323 (A) και 3275 (B) συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.

Από το Σχήμα 8.114A παρατηρείται ότι οι καμπύλες των οριζόντιων μετακινήσεων στην κορυφή του πασσάλου και για τις τρεις αργίλους, έχουν ίδια μορφή με αυτές που προέκυψαν παραπάνω για τον κόμβο 7719. Η άργιλος 3, σε σχέση με τις υπόλοιπες αργίλους, αποκτά σε μικρότερο χρόνο τις μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις της (τόσο τις αρνητικές όσο και τις θετικές), ενώ ακολουθεί η άργιλος 2 και τέλος η άργιλος 1. Μεταξύ των τριών αργίλων η άργιλος 3 εμφανίζει τη μέγιστη αρνητική ενώ η άργιλος 1 τη μέγιστη θετική οριζόντια μετακίνηση. Η μέγιστη αρνητική μετακίνηση ισούται με -14.31 cm ενώ η μέγιστη θετική ισούται με 14.47 cm.

Από το Σχήμα 8.114B παρατηρείται ότι οι καμπύλες των οριζόντιων μετακινήσεων στην κορυφή του πύργου και για τις τρεις αργίλους, έχουν ίδια μορφή. Η άργιλος 3, σε σχέση με τις υπόλοιπες αργίλους, αποκτά σε μικρότερο χρόνο τις μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις της. Αυτό που διαφοροποιεί τον κόμβο της κορυφής του πύργου σε σχέση με τους υπόλοιπους κόμβους είναι ότι τόσο η μέγιστη θετική όσο και η μέγιστη αρνητική οριζόντια μετακίνηση, μεταξύ των 3 αργίλων, εμφανίζονται στην άργιλο 3. Η μέγιστη αρνητική μετακίνηση ισούται με -1.077 m ενώ η μέγιστη θετική ισούται με 1.13 m.

8.5.2 Αποτελέσματα απόλυτων και σχετικών οριζόντιων μετακινήσεων των αργίλων 1, 2 και 3 (για τη διεύθυνση Y)

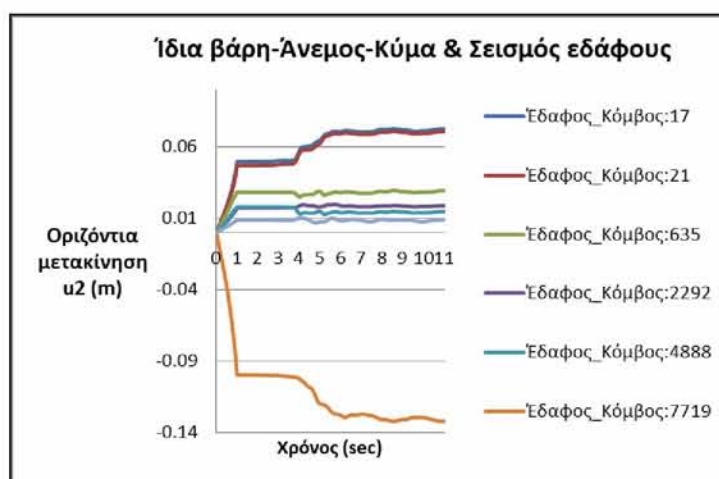
Για την περίπτωση φόρτισης των ίδιων βαρών, του ανέμου, του κύματος και στη συνέχεια του σεισμού, προέκυψαν τα αποτελέσματα για 13 σημεία από το μοντέλο για τις οριζόντιες απόλυτες μετακινήσεις (U_2) και για τις τρεις αργίλους. Ακόμα, υπολογίστηκαν οι σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις (διεύθυνση Y) για την κορυφή του πύργου, του φορέα στήριξης και του πασσάλου, ως προς τη βάση του πασσάλου.

Σημείωση:

Οι τιμές των οριζόντιων μετακινήσεων και για τις αργίλους 1, 2 και 3 κατά την επιβολή των ιδίων βαρών του ανέμου και του κύματος (δηλαδή κατά το πρώτο βήμα της ανάλυσης) στην 4^η περίπτωση φόρτισης, συγκριτικά με αυτές του δεύτερου συνδυασμού φόρτισης, είναι ίδιες ή ελαφρώς μικρότερες. Η μικρή μείωση των τιμών αυτών οφείλεται στη χρήση των περιορισμών (MPC), οι οποίοι ήταν απαραίτητοι για το βήμα της σεισμικής διέγερσης.

Αργίλος 1

Στο Σχήμα 8.115 παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις για την άργιλο 1.



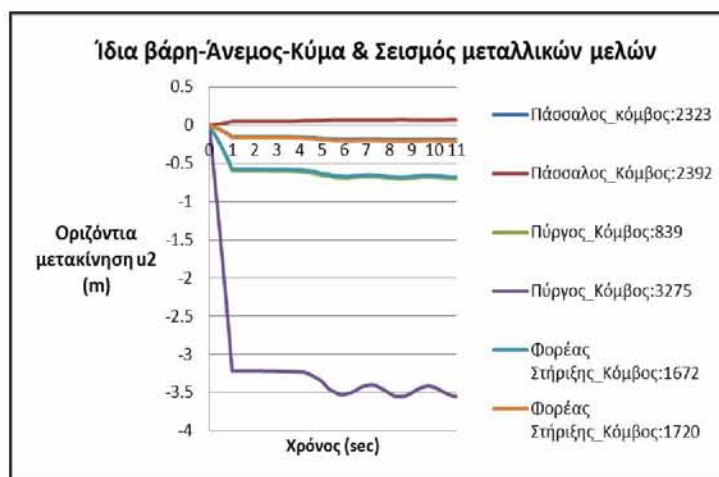
Σχήμα 8.115: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.

Από το Σχήμα 8.115 παρατηρείται ότι οι οριζόντιες μετακινήσεις αυξάνονται με μεγαλύτερο ρυθμό κατά το πρώτο βήμα της ανάλυσης (ίδια βάρη, άνεμος και κύμα), σε σχέση με τις μετακινήσεις που εμφανίζονται στη συνέχεια κατά την επιβολή της σεισμικής διέγερσης. Επίσης, παρατηρείται ότι κατά τα πρώτα στάδια επιβολής του σεισμού (δηλαδή από 1 έως περίπου 4 sec) οι οριζόντιες μετακινήσεις στη διεύθυνση Y, για όλους τους κόμβους του εδάφους, παραμένουν σχεδόν σταθερές. Μετά τα πρώτα 4 sec οι μετακινήσεις αυξάνονται, λόγω και της αύξησης της έντασης του σεισμού. Όπως θα παρουσιαστεί και στη συνέχεια, οι καμπύλες των οριζόντιων μετακινήσεων, έχουν την ίδια μορφή και για τις τρεις αργίλους.

Κατά την επιβολή της σεισμικής φόρτισης, η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση του εδάφους συνεχίζει να εμφανίζεται στον κόμβο 7719, όπως προέκυψε και για το 1^ο βήμα της ανάλυσης. Η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση, για τον κόμβο 7719, είναι ίση με -13.22 cm και εμφανίζεται

τη χρονική στιγμή 8.52 sec. Ωστόσο, στους υπόλοιπους κόμβους του εδάφους οι μετακινήσεις είναι θετικές, με τη μεγαλύτερη να εμφανίζεται στον κόμβο 17, τη χρονική στιγμή 8.62 sec και να ισούται με 7.28 cm. Παρατηρείται ότι κατά απόλυτη τιμή οι μετακινήσεις που αναπτύσσονται στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους είναι μεγαλύτερες από αυτές των υπόλοιπων κόμβων του.

Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.116) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις που προκύπτουν για τα μεταλλικά μέλη της κατασκευής για την άργιλο 1.

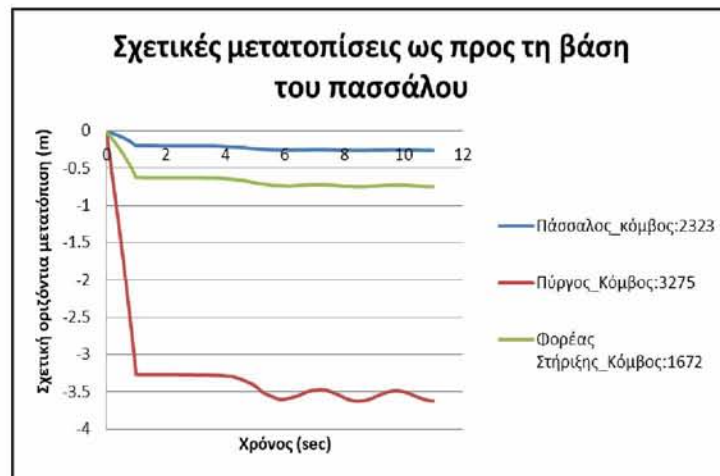


Σχήμα 8.116: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.

Από το παραπάνω σχήμα (Σχήμα 8.116) παρατηρείται ότι και στα μεταλλικά μέλη, οι οριζόντιες μετακινήσεις αυξάνονται με μεγαλύτερο ρυθμό κατά το πρώτο βήμα της ανάλυσης, σε σχέση με τις μετακινήσεις που εμφανίζονται στη συνέχεια κατά την επιβολή της σεισμικής διέγερσης. Επίσης, παρατηρείται ότι κατά τα πρώτα στάδια επιβολής του σεισμού (από 1 έως περίπου 4 sec) οι οριζόντιες μετακινήσεις στη διεύθυνση Y, για όλους τους κόμβους των μεταλλικών μελών, παραμένουν σχεδόν σταθερές. Μετά τα πρώτα 4 sec οι μετακινήσεις αυξάνονται, λόγω και της αύξησης της έντασης του σεισμού. Όπως θα παρουσιαστεί και στη συνέχεια, οι καμπύλες των οριζόντιων μετακινήσεων των μεταλλικών μελών, έχουν την ίδια μορφή και για τις τρεις αργίλους.

Κατά την επιβολή της σεισμικής φόρτισης, η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση για τα μεταλλικά μέλη συνεχίζει να εμφανίζεται στον κόμβο 3275, όπως προέκυψε και για το 1^ο βήμα της ανάλυσης. Οι οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών είναι αρνητικές, με εξαίρεση αυτών της βάσης του πασσάλου που είναι θετικές. Η μέγιστη αρνητική οριζόντια μετακίνηση της αργίλου 1 προέκυψε στον κόμβο 3275, τη χρονική στιγμή 8.42 sec και είναι ίση με -3.55 m, ενώ η μέγιστη θετική στον κόμβο 2392, τη χρονική στιγμή 8.62 sec και είναι ίση με 7.24 cm. Παρατηρείται ότι για όλα τα μεταλλικά μέλη, οι κόμβοι που βρίσκονται κοντά στην κορυφή αναπτύσσουν μεγαλύτερες οριζόντιες μετακινήσεις, κατά απόλυτη τιμή, σε σχέση με αυτούς κοντά στη βάση.

Μελετήθηκαν οι σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις της κορυφής του πύργου, του φορέα στήριξης και του πασσάλου ως προς τη βάση του πασσάλου (Σχήμα 8.117).

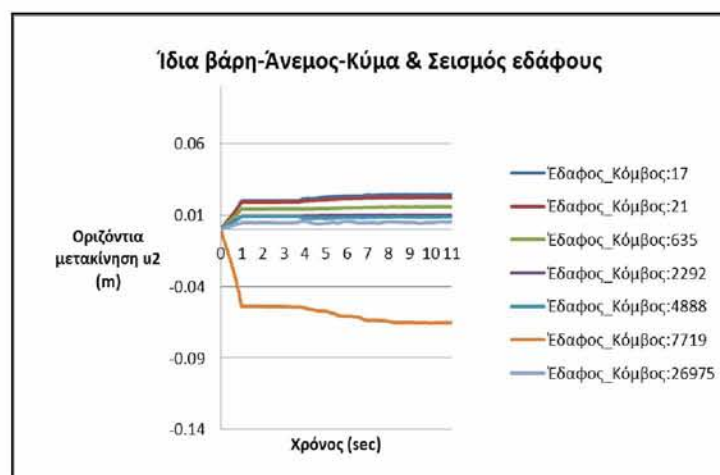


Σχήμα 8.117: Σχετικές μετακινήσεις των 3 σημείων των μεταλλικών μελών ως προς τη βάση του πασσάλου σε συνάρτηση με το χρόνο.

Από το Σχήμα 8.117 παρατηρείται ότι οι καμπύλες των σχετικών οριζόντιων μετακινήσεων, για τα 3 σημεία των μεταλλικών μελών, έχουν περίπου την ίδια μορφή. Οι σχετικές μετακινήσεις του κόμβου 3275 είναι πολύ μεγαλύτερες συγκριτικά με αυτές των άλλων 2 κόμβων, ενώ ακολουθεί ο κόμβος 1672, με τις μικρότερες σχετικές μετακινήσεις να εμφανίζονται στον κόμβο 2323. Η μέγιστη μετακίνηση στον κόμβο 3275 είναι ίση με -3.63 m, στον κόμβο 1672 είναι -75.02 cm και στον κόμβο 2323 ισούται με -26.27 cm. Και στις 3 περιπτώσεις οι μέγιστες μετακινήσεις εμφανίζονται τη χρονική στιγμή 8.52 sec.

Άργιλος 2

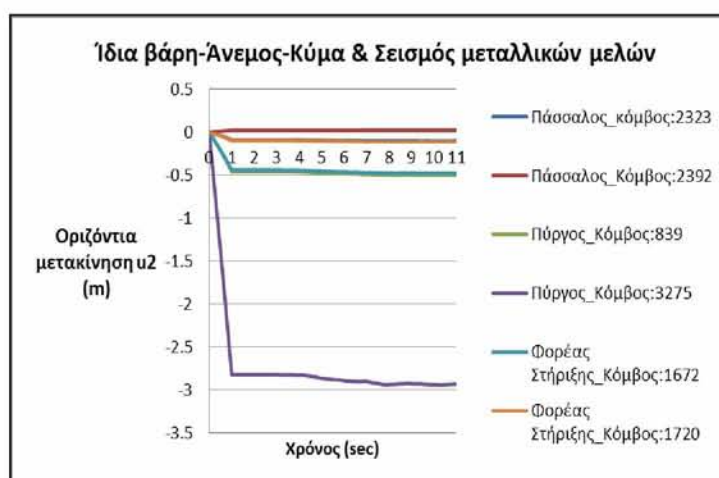
Στο Σχήμα 8.118 παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις για την άργιλο 2.



Σχήμα 8.118: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 2.

Κατά την επιβολή της σεισμικής φόρτισης, η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση του εδάφους συνεχίζει να εμφανίζεται στον κόμβο 7719, όπως προέκυψε και για το 1^ο βήμα της ανάλυσης. Η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση, για τον κόμβο 7719, είναι ίση με -6.55 cm και εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 10.02 sec. Ωστόσο, στους υπόλοιπους κόμβους του εδάφους οι μετακινήσεις είναι θετικές, με τη μεγαλύτερη να εμφανίζεται στον κόμβο 17, τη χρονική στιγμή 8.22 sec και να ισούται με 2.44 cm. Παρατηρείται ότι κατά απόλυτη τιμή οι μετακινήσεις που αναπτύσσονται στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους είναι μεγαλύτερες από αυτές των υπόλοιπων κόμβων του.

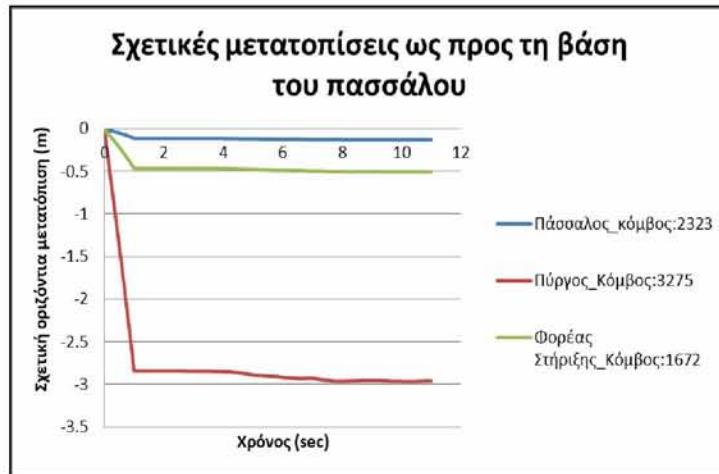
Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.119) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις που προκύπτουν για τα μεταλλικά μέλη της κατασκευής για την άργιλο 2.



Σχήμα 8.119: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 2.

Κατά την επιβολή της σεισμικής φόρτισης, η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση για τα μεταλλικά μέλη συνεχίζει να εμφανίζεται στον κόμβο 3275, όπως προέκυψε και για το 1^ο βήμα της ανάλυσης. Οι οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών είναι αρνητικές, με εξαίρεση αυτών της βάσης του πασσάλου που είναι θετικές. Η μέγιστη αρνητική οριζόντια μετακίνηση για την άργιλο 2 προέκυψε στον κόμβο 3275, τη χρονική στιγμή 10.32 sec και είναι ίση με -2.94 m, ενώ η μέγιστη θετική στον κόμβο 2392, τη χρονική στιγμή 10.02 sec και είναι ίση με 2.5 cm. Παρατηρείται ότι για όλα τα μεταλλικά μέλη, οι κόμβοι που βρίσκονται κοντά στην κορυφή αναπτύσσουν μεγαλύτερες οριζόντιες μετακινήσεις, κατά απόλυτη τιμή, σε σχέση με αυτούς κοντά στη βάση.

Μελετήθηκαν οι σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις της κορυφής του πύργου, του φορέα στήριξης και του πασσάλου ως προς τη βάση του πασσάλου (Σχήμα 8.120).

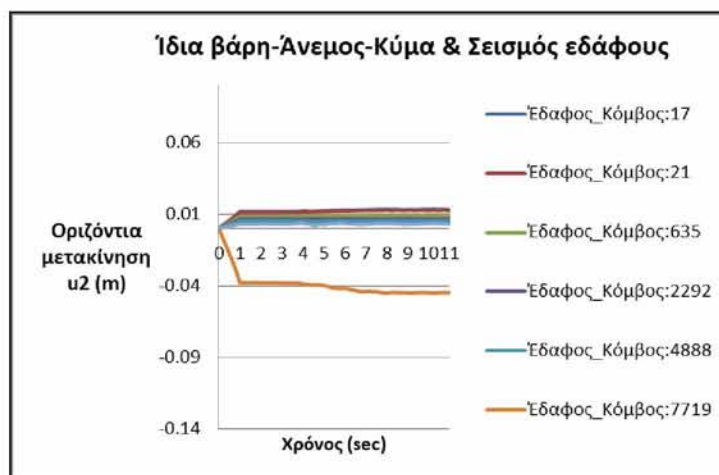


Σχήμα 8.120: Σχετικές μετακινήσεις των 3 σημείων των μεταλλικών μελών ως προς τη βάση του πασσάλου σε συνάρτηση με το χρόνο.

Από το παραπάνω σχήμα (Σχήμα 8.120) παρατηρείται ότι οι καμπύλες των σχετικών οριζόντιων μετακινήσεων, για τα 3 σημεία των μεταλλικών μελών, έχουν περίπου την ίδια μορφή. Οι σχετικές μετακινήσεις του κόμβου 3275 είναι πολύ μεγαλύτερες συγκριτικά με αυτές των άλλων 2 κόμβων, ενώ ακολουθεί ο κόμβος 1672, με τις μικρότερες σχετικές μετακινήσεις να εμφανίζονται στον κόμβο 2323. Η μέγιστη μετακίνηση στον κόμβο 3275 είναι ίση με -2.97 m και εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 10.32 sec, στον κόμβο 1672 είναι -50.52 cm και στον κόμβο 2323 ισούται με -12.89 cm. Στους κόμβους 1672 και 2323 οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται τη χρονική στιγμή 10.02 sec.

Άργιλος 3

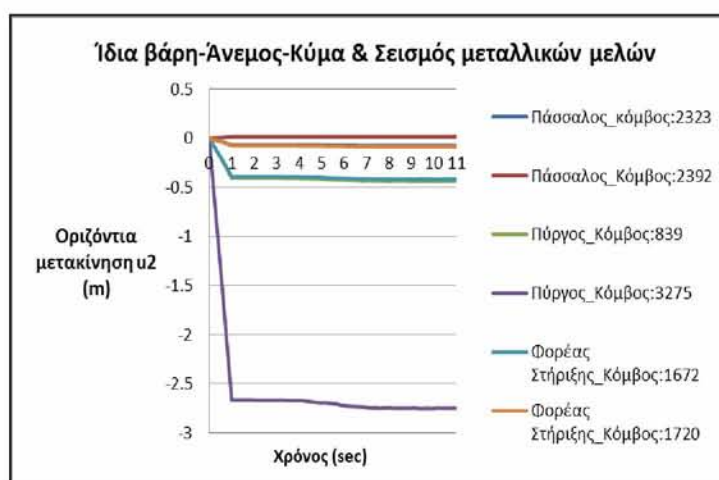
Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.121) παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις για την άργιλο 3.



Σχήμα 8.121: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 3.

Κατά την επιβολή της σεισμικής φόρτισης, η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση του εδάφους συνεχίζει να εμφανίζεται στον κόμβο 7719, όπως προέκυψε και για το 1^ο βήμα της ανάλυσης. Η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση, για τον κόμβο 7719, είναι ίση με -4.5 cm και εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 10.22 sec. Ωστόσο, στους υπόλοιπους κόμβους του εδάφους οι μετακινήσεις είναι θετικές, με τη μεγαλύτερη να εμφανίζεται στον κόμβο 17, τη χρονική στιγμή 10.22 sec και να ισούται με 1.35 cm. Παρατηρείται ότι κατά απόλυτη τιμή οι μετακινήσεις που αναπτύσσονται στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους είναι μεγαλύτερες από αυτές των υπόλοιπων κόμβων του.

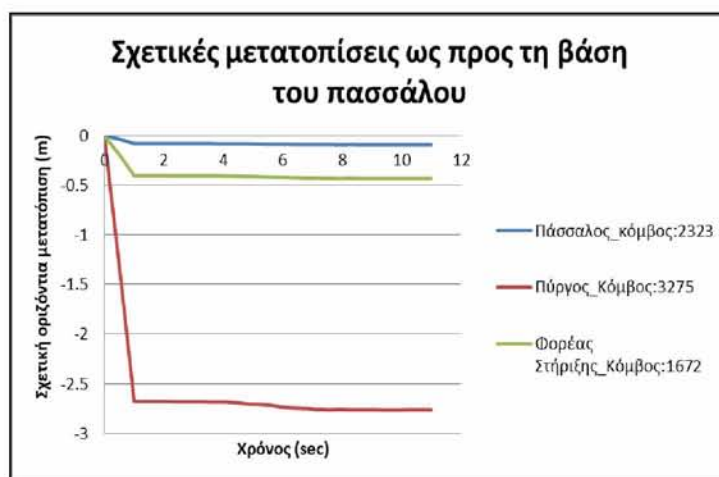
Στο Σχήμα 8.122 παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις που προκύπτουν για τα μεταλλικά μέλη της κατασκευής για την άργιλο 3.



Σχήμα 8.122: Οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 3.

Κατά την επιβολή της σεισμικής φόρτισης, η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση για τα μεταλλικά μέλη συνεχίζει να εμφανίζεται στον κόμβο 3275, όπως προέκυψε και για το 1^ο βήμα της ανάλυσης. Οι οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών είναι αρνητικές, με εξαίρεση αυτών της βάσης του πασσάλου που είναι θετικές. Η μέγιστη αρνητική οριζόντια μετακίνηση για την άργιλο 3 προέκυψε στον κόμβο 3275, τη χρονική στιγμή 9.42 sec και είναι ίση με -2.75 m, ενώ η μέγιστη θετική στον κόμβο 2392, τη χρονική στιγμή 9.12 sec και είναι ίση με 1.44 cm. Παρατηρείται ότι για όλα τα μεταλλικά μέλη, οι κόμβοι που βρίσκονται κοντά στην κορυφή αναπτύσσουν μεγαλύτερες οριζόντιες μετακινήσεις, κατά απόλυτη τιμή, σε σχέση με αυτούς κοντά στη βάση.

Μελετήθηκαν οι σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις της κορυφής του πύργου, του φορέα στήριξης και του πασσάλου ως προς τη βάση του πασσάλου (Σχήμα 8.123).

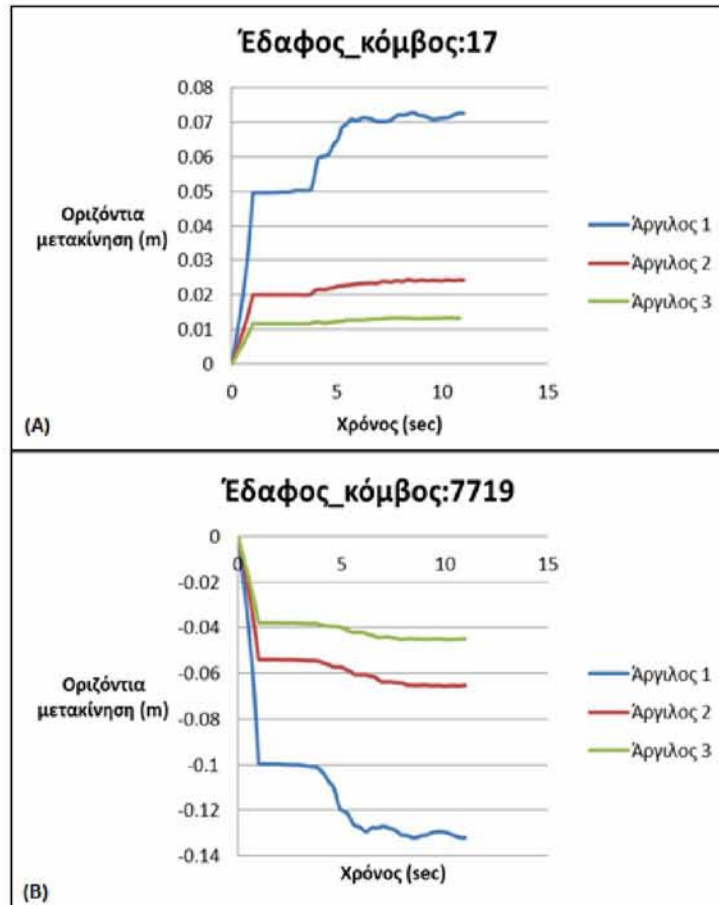


Σχήμα 8.123: Σχετικές μετακινήσεις των 3 σημείων των μεταλλικών μελών ως προς τη βάση του πασσάλου σε συνάρτηση με το χρόνο.

Από το Σχήμα 8.123 παρατηρείται ότι οι καμπύλες των σχετικών οριζόντιων μετακινήσεων, για τα 3 σημεία των μεταλλικών μελών, έχουν περίπου την ίδια μορφή. Οι σχετικές μετακινήσεις του κόμβου 3275 είναι πολύ μεγαλύτερες συγκριτικά με αυτές των άλλων 2 κόμβων, ενώ ακολουθεί ο κόμβος 1672, με τις μικρότερες σχετικές μετακινήσεις να εμφανίζονται στον κόμβο 2323. Η μέγιστη μετακίνηση στον κόμβο 3275 είναι ίση με -2.77 m και εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 9.42 sec, στον κόμβο 1672 είναι -43.27 cm και στον κόμβο 2323 ισούται με -9.17 cm. Στους κόμβους 1672 και 2323 οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται τη χρονική στιγμή 9.12 sec.

8.5.2.1 Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των αργίλων 1, 2 και 3 (διεύθυνση Y)

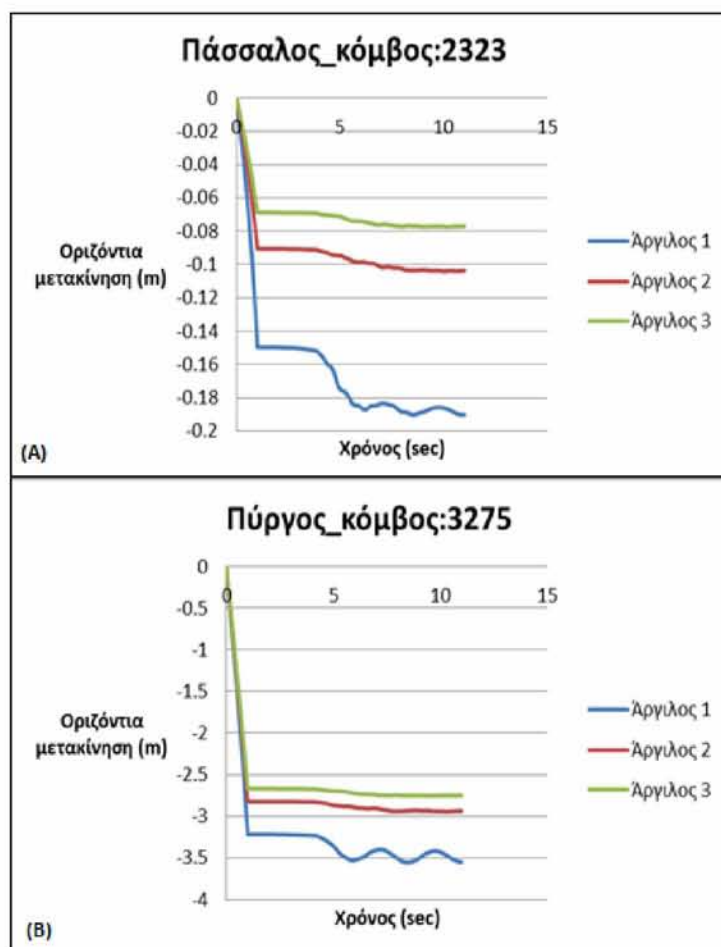
Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 8.124) παρουσιάζονται, για συγκεκριμένους κόμβους του εδάφους, οι οριζόντιες μετακινήσεις που αναπτύσσονται και στους τρεις τύπους αργίλων. Για τη σύγκριση των οριζόντιων (U_2) μετακινήσεων, στις τρεις αργίλους, επιλέχθηκαν οι κόμβοι 17 και 7719 του εδάφους. Η επιλογή αυτή έγινε καθώς στους κόμβους αυτούς εμφανίζονται η μέγιστη θετική και η μέγιστη αρνητική οριζόντια μετακίνηση, αντίστοιχα. Οι υπόλοιποι κόμβοι του εδάφους παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με τον κόμβο 17, τα διαγράμματα των οποίων παρουσιάζονται στο Παράρτημα Δ.



Σχήμα 8.124: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 17 (Α) και 7719 (Β) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.

Από τα Σχήμα 8.124 παρατηρείται ότι η άργιλος 1 έχει τις μεγαλύτερες οριζόντιες μετακινήσεις για όλους τους κόμβους του εδάφους, ενώ ακολουθούν η άργιλος 2 και η άργιλος 3. Οι μεγαλύτερες αρνητικές οριζόντιες μετακινήσεις και στις τρεις αργίλους, εμφανίζονται στον κόμβο 7719, ενώ οι μεγαλύτερες θετικές στον κόμβο 17. Για την άργιλο 1, η μέγιστη θετική οριζόντια μετακίνηση ισούται με 7.28 cm ενώ η μέγιστη αρνητική με -13.22 cm. Αυτό που παρατηρείται επίσης, είναι ότι οι καμπύλες των οριζόντιων μετακινήσεων, κατά τη διάρκεια του σεισμού, των αργίλων 3 και 2 είναι πιο ομαλές σε σχέση με την άργιλο 1. Στην άργιλο 1 παρατηρούνται μεγαλύτερες διακυμάνσεις των τιμών των μετακινήσεων (μεγαλύτερο εύρος τιμών).

Στο Σχήμα 8.125 παρουσιάζονται οι απόλυτες οριζόντιες μετακινήσεις της κορυφής του πασσάλου και του πύργου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.



Σχήμα 8.125: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 2323 (Α) και 3275 (Β) συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.

Και στα μεταλλικά μέλη, οι μεγαλύτερες οριζόντιες μετακινήσεις παρουσιάζονται στην άργιλο 1. Ακολουθούν η άργιλος 2 και τις μικρότερες μετακινήσεις εμφανίζει η άργιλος 3. Για την άργιλο 1, η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση στην κορυφή του πύργου ισούται με -3.55 m, ενώ στην κορυφή του πασσάλου με -19.03 cm. Και στην περίπτωση των μεταλλικών μελών, αυτό που παρατηρείται, είναι ότι οι καμπύλες των οριζόντιων μετακινήσεων, κατά τη διάρκεια του σεισμού, των αργίλων 3 και 2 είναι πιο ομαλές σε σχέση με την άργιλο 1. Στην άργιλο 1 παρατηρούνται μεγαλύτερες διακυμάνσεις των τιμών των μετακινήσεων (μεγαλύτερο εύρος τιμών).

8.5.3 Αποτελέσματα κατακόρυφων μετακινήσεων των αργίλων 1, 2 και 3

Για την περίπτωση φόρτισης των ίδιων βαρών, του ανέμου, του κύματος και στη συνέχεια του σεισμού, προέκυψαν τα αποτελέσματα για 13 σημεία από το μοντέλο για τις κατακόρυφες μετακινήσεις στη διεύθυνση Z και για τις τρεις αργίλους.

Σημείωση:

Οι τιμές των κατακόρυφων μετακινήσεων και για τις τρεις αργίλους κατά την επιβολή των ιδίων βαρών του ανέμου και του κύματος (δηλαδή κατά το πρώτο βήμα της ανάλυσης) στην

4^η περίπτωση φόρτισης, συγκριτικά με αυτές του δεύτερου συνδυασμού φόρτισης, είναι ίδιες ή ελαφρώς μικρότερες. Η μικρή μείωση των τιμών αυτών οφείλεται στη χρήση των περιορισμών (MPC), οι οποίοι ήταν απαραίτητοι για το βήμα της σεισμικής διέγερσης.

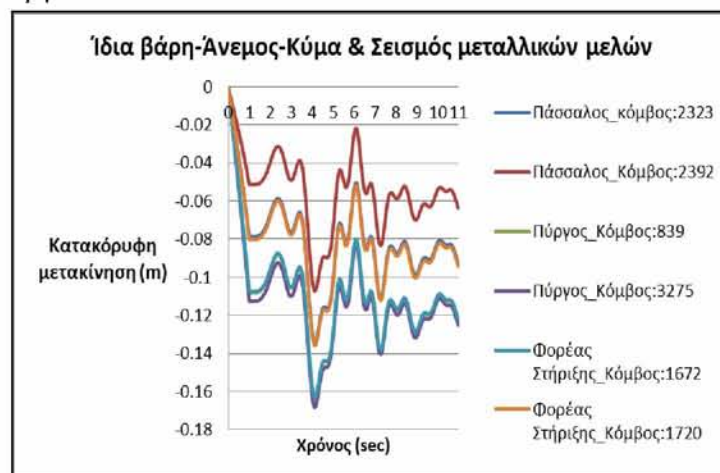
Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.126) παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις για την άργιλο 1.



Σχήμα 8.126: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 8.126, οι καμπύλες των κόμβων του εδάφους έχουν την ίδια μορφή. Για την άργιλο 1 η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση προκύπτει για τον κόμβο 17, τη χρονική στιγμή 4.12 sec και είναι ίση με -10.31 cm. Γενικά, οι μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις στους κόμβους του εδάφους κυμαίνονται, κατά απόλυτη τιμή, από 7.9-10.31 cm.

Στο Σχήμα 8.127 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών της κατασκευής για την άργιλο 1.



Σχήμα 8.127: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 1.

Από το Σχήμα 8.127 παρατηρείται ότι και στην περίπτωση των μεταλλικών μελών, οι καμπύλες των κατακόρυφων μετακινήσεων έχουν την ίδια μορφή. Στα μεταλλικά μέλη, η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση είναι ίση με -16.82 cm και εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 4.12 sec στον κόμβο 3275. Όπως παρατηρείται από το παραπάνω διάγραμμα, οι κατακόρυφες μετακινήσεις στην κορυφή του πύργου είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές στη βάση του πασσάλου.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, δεν έχει νόημα η μελέτη των σχετικών μετακινήσεων, διότι οι τιμές τους τείνουν στο μηδέν, γεγονός το οποίο υποδεικνύει ότι τα μεταλλικά μέλη της κατασκευής κινούνται σαν ένα σώμα ως προς την κατακόρυφη διεύθυνση.

Άργιλος 2

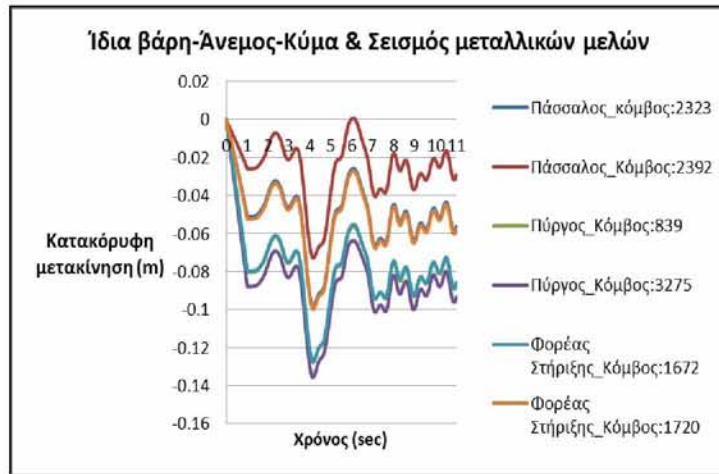
Στο Σχήμα 8.128 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις για την άργιλο 2.



Σχήμα 8.128: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 2.

Οι καμπύλες των κόμβων του εδάφους και στην άργιλο 2 έχουν την ίδια μορφή. Για την άργιλο 2 η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση προκύπτει για τον κόμβο 17, τη χρονική στιγμή 4.12 sec και είναι ίση με -7.64 cm. Πολύ κοντινές μετακινήσεις με τον κόμβο 17 παρουσιάζει και ο κόμβος 7719. Γενικά, οι μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις στους κόμβους του εδάφους κυμαίνονται, κατά απόλυτη τιμή, από 6.08-7.64 cm.

Στο Σχήμα 8.129 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών, της κατασκευής για την άργιλο 2.

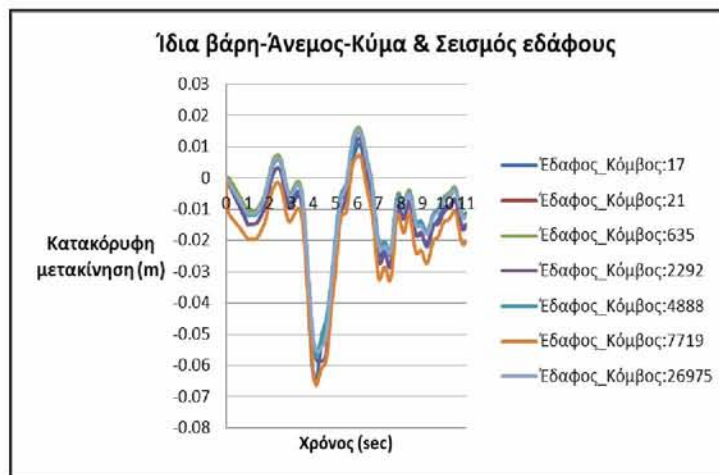


Σχήμα 8.129: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 2.

Από το Σχήμα 8.129 παρατηρείται ότι και στην άργιλο 2 οι καμπύλες των κατακόρυφων μετακινήσεων των μεταλλικών μελών έχουν την ίδια μορφή. Στα μεταλλικά μέλη, η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση είναι ίση με -13.57 cm και εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 4.12 sec στον κόμβο 3275. Όπως παρατηρείται από το παραπάνω διάγραμμα, οι κατακόρυφες μετακινήσεις στην κορυφή του πύργου είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές στη βάση του πασσάλου.

Άργιλος 3

Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.130) παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις για την άργιλο 3.

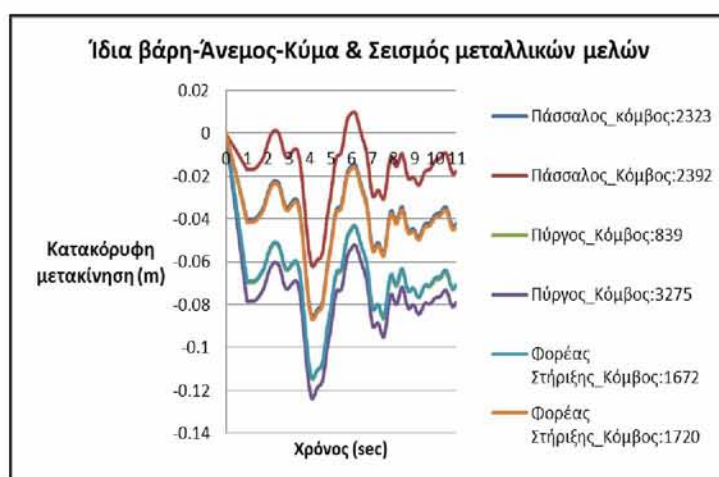


Σχήμα 8.130: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 3.

Οι καμπύλες των κόμβων του εδάφους και για την άργιλο 3 έχουν την ίδια μορφή. Για την άργιλο 3 η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση προκύπτει για τον κόμβο 7719, τη χρονική

στιγμή 4.12 sec και είναι ίση με -6.62 cm. Πολύ κοντινές μετακινήσεις με τον κόμβο 7719 παρουσιάζει και ο κόμβος 17, του οποίου η μέγιστη μετακίνηση ισούται με -6.59 cm, την ίδια χρονική στιγμή. Γενικά, οι μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις στους κόμβους του εδάφους κυμαίνονται, κατά απόλυτη τιμή, από 5.54-6.62 cm.

Στο Σχήμα 8.131 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις των μεταλλικών μελών, της κατασκευής για την άργιλο 3.

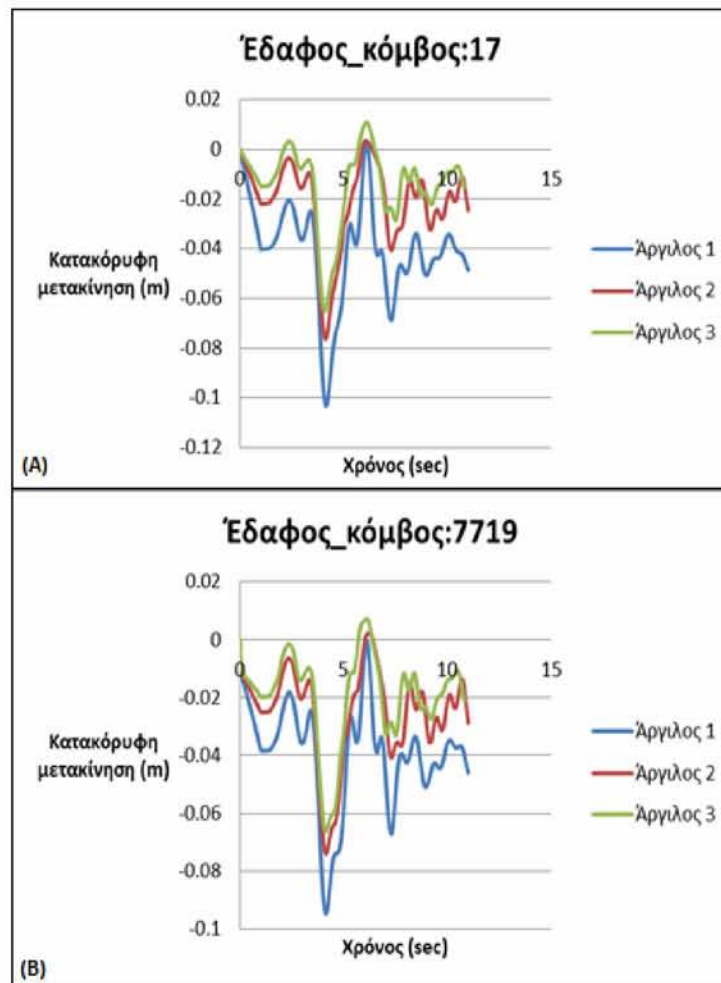


Σχήμα 8.131: Κατακόρυφες μετακινήσεις των κόμβων των μεταλλικών μελών συναρτήσει του χρόνου, για την άργιλο 3.

Από το Σχήμα 8.131 παρατηρείται ότι και στην άργιλο 3 οι καμπύλες των κατακόρυφων μετακινήσεων των μεταλλικών μελών έχουν την ίδια μορφή. Στα μεταλλικά μέλη, η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση είναι ίση με -12.39 cm και εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 4.12 sec στον κόμβο 3275. Όπως παρατηρείται από το παραπάνω διάγραμμα, οι κατακόρυφες μετακινήσεις στην κορυφή του πύργου είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές στη βάση του πασσάλου.

8.5.3.1 Σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων των αργίλων 1, 2 και 3

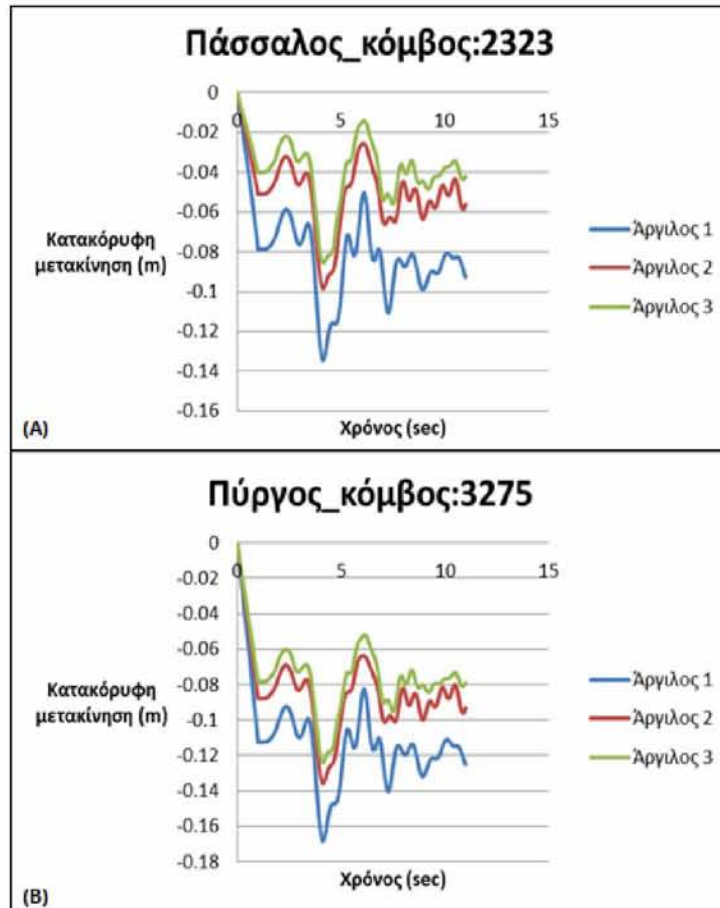
Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 8.132) παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις (U_3) που αναπτύσσονται και στους τρεις τύπους αργίλων. Για τη σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων, στις τρεις αργίλους, επιλέχθηκαν για το έδαφος οι κόμβοι 17 και 7719. Η επιλογή αυτή έγινε καθώς στους κόμβους αυτούς εμφανίζονται οι μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις. Οι υπόλοιποι κόμβοι του εδάφους παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά, τα διαγράμματα των οποίων παρουσιάζονται στο παράρτημα Δ.



Σχήμα 8.132: Σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων των κόμβων 17 (A) και 7719 (B) του εδάφους συναρτήσει του χρόνου, για τις άργιλους 1, 2 και 3.

Από το Σχήμα 8.132 παρατηρείται ότι τόσο για τον κόμβο 17 όσο και για τον κόμβο 7719 η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση, μεταξύ των τριών άργιλων, εμφανίζεται στην άργιλο 1, τη χρονική στιγμή 4.12 sec, ενώ ακολουθούν η άργιλος 2 και η άργιλος 1. Η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση εμφανίζεται στην άργιλο 1 στον κόμβο 17 και ισούται με -10.3 cm.

Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 8.133) συγκρίνονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις της κορυφής του πασσάλου και του πύργου, για τις τρεις άργιλους.



Σχήμα 8.133: Σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων των κόμβων 2323 (A) και 3275 (B) συναρτήσει του χρόνου, για τις άργιλους 1, 2 και 3.

Η μορφή των καμπυλών των κατακόρυφων μετακινήσεων για την κορυφή του πασσάλου και του πύργου είναι παρόμοια και στις τρεις άργιλους. Οι μεγαλύτερες κατακόρυφες μετακινήσεις, των μεταλλικών μελών, εμφανίζονται στην άργιλο 1, ενώ οι μικρότερες στην άργιλο 3. Η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση στην κορυφή του πύργου είναι ίση με -16.82 cm, ενώ στην κορυφή του πασσάλου ισούται με -13.44 cm. Οι μέγιστες μετακινήσεις και στους 2 κόμβους παρουσιάζονται τη χρονική στιγμή 4.12 sec.

Κεφάλαιο 9

Συμπεράσματα

Μετά την πραγματοποίηση των αναλύσεων και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, στις άργιλους 1, 2 και 3, προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα, για όλες τις περιπτώσεις φόρτισης:

- Οι μεγαλύτερες κατακόρυφες μετακινήσεις στη διεύθυνση Z εμφανίζονται στην άργιλο 1 και οι μικρότερες στην άργιλο 3. Όσον αφορά την άργιλο 2, αυτή εμφανίζει πιο κοντινές τιμές με την άργιλο 3 παρά με την άργιλο 1.
- Οι μεγαλύτερες οριζόντιες μετακινήσεις στη διεύθυνση Y, οι οποίες επηρεάζονται κυρίως από τον άνεμο και το κύμα, εμφανίζονται στην άργιλο 1 ενώ οι μικρότερες στην άργιλο 3. Και στην περίπτωση αυτή η άργιλος 2 εμφανίζει πιο κοντινές τιμές με την άργιλο 3 απ' ό,τι με την άργιλο 1.
- Οι μεγαλύτερες οριζόντιες αρνητικές μετακινήσεις στη διεύθυνση X, οι οποίες επηρεάζονται κυρίως από το σεισμό, ο οποίος δρα στην ίδια διεύθυνση, εμφανίζονται στην άργιλο 3, ενώ οι μεγαλύτερες θετικές στην άργιλο 1. Εξαιρεση αποτελεί η κορυφή του πύργου όπου οι μέγιστες θετικές και αρνητικές οριζόντιες μετακινήσεις, καθώς και οι μέγιστες σχετικές προκύπτουν στην άργιλο 3. Ωστόσο, οι μέγιστες σχετικές μετακινήσεις, του φορέα στήριξης και του πασσάλου, ως προς τη βάση του πασσάλου, εμφανίζονται στην άργιλο 1.

Από τη σύγκριση των συνδυασμών φόρτισης των ιδίων βαρών και του ανέμου (συνδυασμός 1) με των ιδίων βαρών, του ανέμου και του κύματος (συνδυασμός 2) προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Οι μεγαλύτερες οριζόντιες (διεύθυνση Y) και κατακόρυφες μετακινήσεις τόσο του εδάφους όσο και των μεταλλικών μελών εμφανίζονται στο συνδυασμό φόρτισης 2. Ωστόσο, δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές μεταξύ των δυο φορτίσεων στις κατακόρυφες μετακινήσεις, διότι αυτές επηρεάζονται κυρίως από τα ίδια βάρη. Όσον αφορά τις οριζόντιες μετακινήσεις, αν και οι μεγαλύτερες εμφανίζονται κατά την επιβολή του ανέμου και του κύματος, ο άνεμος είναι αυτός που τις επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό.
- Οι μεγαλύτερες τάσεις Von Mises παρουσιάζονται κατά το συνδυασμό φόρτισης 2. Οι μέγιστες και οι ελάχιστες τάσεις εμφανίζονται και στις δυο περιπτώσεις φόρτισης στα ίδια σημεία.

Επομένως, με βάση τα παραπάνω, ο συνδυασμός φόρτισης 2 κρίνεται ότι είναι δυσμενέστερος σε σύγκριση με το συνδυασμό 1.

Για την περίπτωση φόρτισης των ιδίων βαρών και του σεισμού (συνδυασμός 3) προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Στην οριζόντια διεύθυνση X παρατηρείται ότι η άργιλος 3 αποκτά γρηγορότερα (σε μικρότερο χρόνο) τις μέγιστές της μετακινήσεις, συγκριτικά με τις άλλες δυο αργίλους. Αυτό είναι πιθανό να οφείλεται στο γεγονός ότι η ιδιοσυχνότητα της αργίλου 3 είναι πιο κοντά στη συχνότητα του σεισμού, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται πρώτα στην άργιλο 3 φαινόμενα συντονισμού.

Από τη σύγκριση των συνδυασμών φόρτισης των ιδίων βαρών, του ανέμου και του κύματος (συνδυασμός 2) με των ιδίων βαρών και του σεισμού (συνδυασμός 3) προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Οι μεγαλύτερες κατακόρυφες (διεύθυνση Z) μετακινήσεις στο έδαφος προκύπτουν για το συνδυασμό φόρτισης 3, ενώ στα μεταλλικά μέλη για το συνδυασμό 2.

Επομένως, ο συνδυασμός 3 κρίνεται ότι είναι δυσμενέστερος ως προς το έδαφος, ενώ ο 2 ως προς τα μεταλλικά μέλη.

Από τη σύγκριση των συνδυασμών φόρτισης 2, 3 και 4 (ίδια βάρη, άνεμος, κύμα και σεισμός) προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Στην οριζόντια διεύθυνση X παρατηρείται ότι οι μετακινήσεις του εδάφους για τους συνδυασμούς φόρτισης 3 και 4 δεν εμφανίζουν σημαντικές διαφορές. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι ο άνεμος και το κύμα που προστίθενται κατά το συνδυασμό φόρτισης 4 δεν επηρεάζουν τις οριζόντιες μετακινήσεις της διεύθυνσης X. Για τα μεταλλικά μέλη τόσο οι απόλυτες όσο και οι σχετικές μετακινήσεις είναι μεγαλύτερες στο συνδυασμό φόρτισης 3, απ' ότι στον 4.
- Στην οριζόντια διεύθυνση Y παρατηρείται ότι τόσο οι μετακινήσεις του εδάφους όσο και των μεταλλικών μελών είναι μεγαλύτερες στο συνδυασμό φόρτισης 4, συγκριτικά με το συνδυασμό 2.
- Στην κατακόρυφη διεύθυνση Z παρατηρείται ότι τόσο οι μετακινήσεις του εδάφους όσο και των μεταλλικών μελών είναι μεγαλύτερες κατά το συνδυασμό φόρτισης 4, συγκριτικά με εκείνες του 3 και του 2.

Επομένως, η δυσμενέστερη περίπτωση φόρτισης είναι:

- Για την οριζόντια διεύθυνση X , ο δυσμενέστερος συνδυασμός φόρτισης για τα μεταλλικά μέλη είναι ο 3, ενώ για το έδαφος οι συνδυασμοί 3 και 4 παρουσιάζουν πολύ κοντινές τιμές. Συνεπώς, ο συνδυασμός φόρτισης 3 κρίνεται ως δυσμενέστερος για τη διεύθυνση X .
- Για την οριζόντια διεύθυνση Y , ως δυσμενέστερος συνδυασμός φόρτισης κρίνεται ο 4.
- Για την κατακόρυφη διεύθυνση Z , ως δυσμενέστερος συνδυασμός φόρτισης κρίνεται ο 4.

Βιβλιογραφία

1. Μπέντας, Α. (2014). Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία “Φορτία, Ανάλυση, Συμπεριφορά και Δομοστατικός σχεδιασμός θαλάσσιων ανεμογεννητριών”. Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
2. Στυλιανού, Σ. (2014). Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία “Θεμελίωση ανεμογεννητριών θαλάσσιου αιολικού πάρκου”. Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, ΕΜΠ.
3. Καρανάσιος, Χ., Χατζηκυριάκος, Χ-Η. (2018). Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία “Μηχανική Συμπεριφορά Εύκαμπτου Φράγματος και Υπόβαθρου Θεμελίωσης σε Στατικές και Δυναμικές Συνθήκες με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων”. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
4. Chowdhury, I., Dasgupta, S. (2003). Computation of Rayleigh Damping Coefficients for Large Systems. *Electronic Journal Of Geotechnical Engineering*.
5. DNV (2011), Design of Offshore Wind Turbine Structures DNV-OS-J101, Det Norske Veritas AS.
6. ABAQUS (Version 6.13) (Software) (2013) Providence, RI, USA: Dassault Systemes Simulia Corporation.
7. Seismosignal, Seismosoft Earthquake Engineering Software Solutions
8. Abdel-Rahman, K., Achmus, M. (2005), “Finite Element Modelling of Horizontally Loaded Monopile Foundations for Offshore Wind Energy Converters in Germany” In Susan Gourvenec, Mark Cassidy (ed.), Proc. of the International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, Taylor and Francis, Perth, Australia.
9. Kaynia, A.M. (2017). Seismic considerations in design of offshore wind turbines. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.
10. Haiderali, A., Madabhushi, G. (2012). Three-Dimensional Finite Element Modelling of Monopiles for Offshore Wind Turbines, University of Cambridge, Cambridge, UK.
11. Χρήστου, Ο-Α. (2012). Διπλωματική Εργασία “Αριθμητική ανάλυση της θεμελίωσης θαλάσσιων ανεμογεννητριών με μονοπάσσάλους”. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
12. Μακρή, Κ. (2013). Διπλωματική Εργασία “ Υπολογισμός φορτίσεων από τα κύματα σε θαλάσσιες κατασκευές έδρασης πλωτών ανεμογεννητριών με χρήση του τύπου του Morison”. Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
13. Νηφάκου, Χ-Φ., Φιλόπουλος, Π. (2015). Διερεύνηση της επάρκειας του αντισεισμικού σχεδιασμού ανεμογεννητριών σε συνθήκες κοντινού πεδίου. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
14. Κουκουλάς, Ν. (2014). Προκαταρκτικός σχεδιασμός μονοπάσσαλης θαλάσσιας ανεμογεννήτριας. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
15. Λιόλιου, Σ. (2018). Διπλωματική Εργασία “Ανάλυση και σχεδιασμός ανεμογεννήτριας από τσιμεντοειδή υλικά”. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
16. Chen Ong, M., Li, H., J. Leira, B., Myrhaug, D. (2013). Dynamic analysis of offshore monopile wind turbine including the effects of wind-wave loading and soil properties. *Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, June 9-14, Nantes, France.
17. Khodair, Y. & Abdel-Mohti, A. (2013). Numerical analysis of pile-soil interaction under axial and lateral loads. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol.8 (No.3), pp 39–249, September 2014.

18. Jeanjean, P., Zhang, Y., Zakeri, A., Andersen, KH., Gilbert, R., WJAP Beuckelears. (2017). A framework for monotonic p-y curves in clays. Proceeding of the 8th international conference on offshore site investigation and geotechnics. Royal Geographical Society. p. 108-41, London.
19. Byrne, BW., McAdam, RA., Burd, HJ., Houlsby, GT., Martin, CM., WJAP Beuckelears, Zdravkovic, L., DMG Taborda, Potts DM, Jardine, RJ., Ushev, E., Liu, T., Abadias, D., Gavin, K., Igoe, D., Doherty, P., Skov Grethlund J., Pacheco Andrade, M., Muir Wood, A., Schroeder, FC., Turner, S., Plummer MAL. (2017). New design methods for offshore wind turbine monopoles. Proceeding of the 8th international conference on offshore site investigation and geotechnics. Royal Geographical Society. p. 142-91, London.
20. Abhinav, K.A & Saha, N. (2015). Dynamic analysis of an offshore wind turbine including soil effects. 8th International Conference on Asian and Pacific Coasts. Procedia Engineering 116, pp 32 – 39.
21. Αθανασίου, Α. (2015). Μεταπτυχιακή Εργασία “Η επιρροή του φαινομένου της αλληλεπίδρασης εδάφους-θεμελίωσης-κατασκευής σεMPC
22. κατασκευές πυρηνικών αντιδραστήρων, λαμβάνοντας υπόψη γεωμετρικά μη-γραμμικά φαινόμενα έδρασης”. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Α.Π.Θ.

Διαδίκτυο:

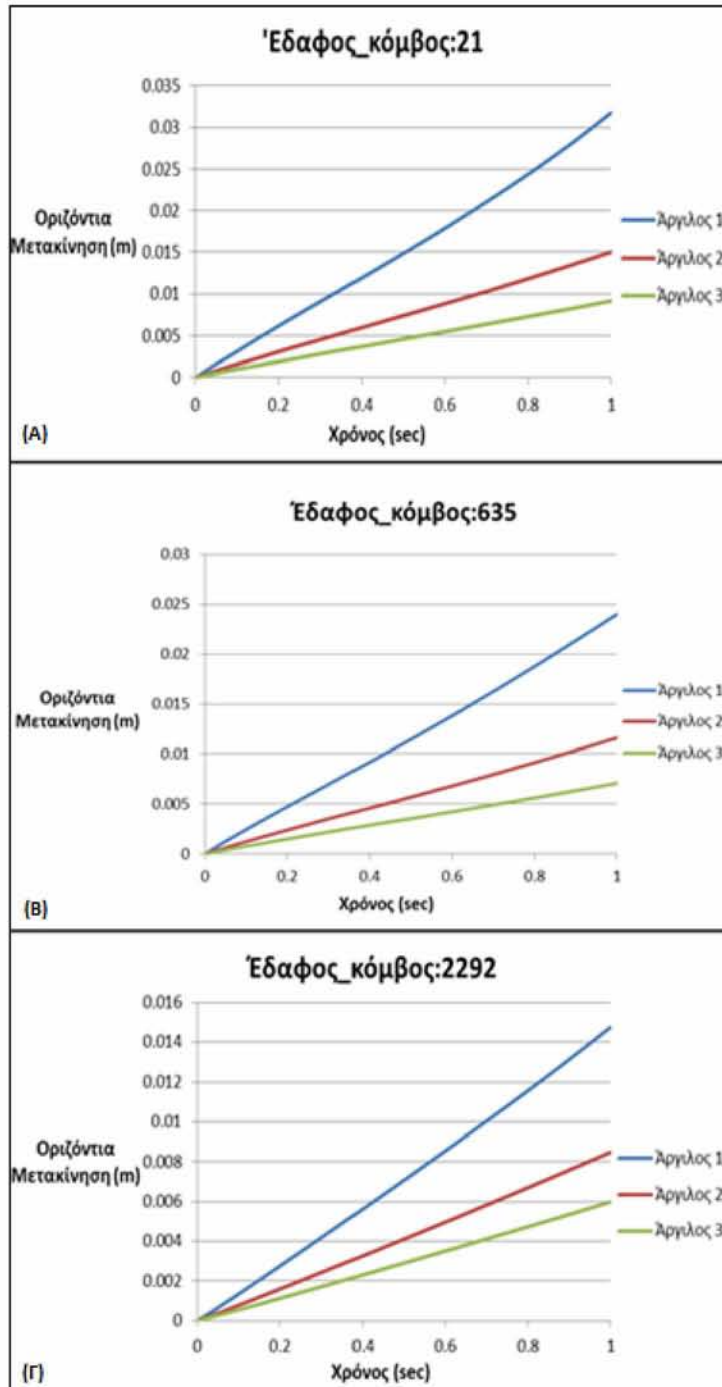
1. Αιολικό δυναμικό στην Ευρώπη. Ανακτήθηκε από την ιστοσελίδα: www.energy.eu/publications/a07.pdf (Ημερομηνία επίσκεψης 23/1/19)
2. Αιολικό δυναμικό στην Ελλάδα. Ανακτήθηκε από την ιστοσελίδα: <http://www.energyproject.gr/energywind.php> (Ημερομηνία επίσκεψης 23/1/19)
3. Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα. Ανακτήθηκε από την ιστοσελίδα: http://www.zeroenergybuildings.org/2012/03/blog-post_17.html (Ημερομηνία επίσκεψης 24/1/19)
4. Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα. Ανακτήθηκε από την ιστοσελίδα: <https://www.ge.com/reports/size-matters-next-big-thing-wind-turbines/> (Ημερομηνία επίσκεψης 24/1/19)
5. Ανεμογεννήτρια τύπου Savonius. Ανακτήθηκε από την ιστοσελίδα: https://www.researchgate.net/figure/Fig-2-Savonius-Vertical-Axis-Wind-Turbine_fig2_319449533 (Ημερομηνία επίσκεψης 24/1/19)
6. Μέρη ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα. Ανακτήθηκε από την ιστοσελίδα: <https://www.oleng.eu/anemogenitria-times-leitourgia/> (Ημερομηνία επίσκεψης 24/1/19)
7. Μέρη ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα. Ανακτήθηκε από την ιστοσελίδα: <https://www.eac.com.cy/EL/EAC/RenewableEnergySources/Pages/educationalmaterialres.aspx> 24/1 (Ημερομηνία επίσκεψης 24/1/19)
8. Θεμελιώσεις ανεμογεννητριών. Ανακτήθηκαν από την ιστοσελίδα: <https://www.wind-energy-the-facts.org/offshore-support-structures.html> (Ημερομηνία επίσκεψης 27/1/19)
9. Θεμέλιο αναρρόφησης. Ανακτήθηκε από την ιστοσελίδα: <https://www.vanoord.com/news/2018-van-oord-install-innovative-suction-bucket-foundations-deutsche-bucht-offshore-wind-farm> (Ημερομηνία επίσκεψης 27/1/19)
10. Θεμέλιο τύπου Spar-buoy. Ανακτήθηκε από την ιστοσελίδα: <https://www.materialstoday.com/composite-applications/features/hywind-floating-offshore-wind-turbine-foundation/> (Ημερομηνία ανάκτησης 27/1/19)

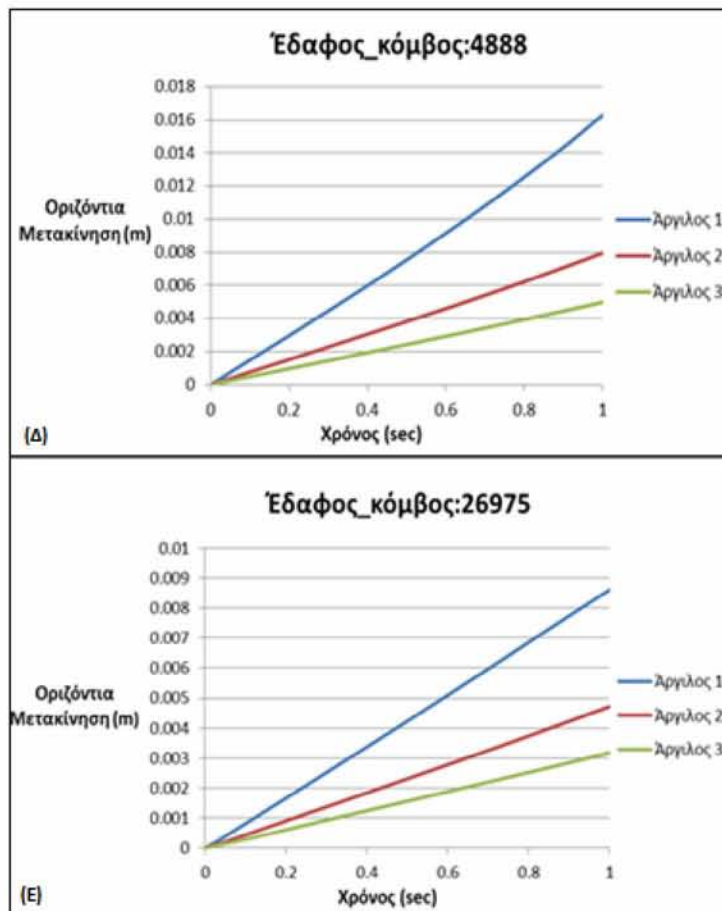
11. Θεμέλιο τύπου Barge. Ανακτήθηκε από την ιστοσελίδα: <https://www.naval-energies.com/en/our-offer/offshore-wind-energy/> (Ημερομηνία επίσκεψης 27/1/19)
12. Θεμέλιο τύπου TLP. Ανακτήθηκε από την ιστοσελίδα: <https://en.paperblog.com/pelastar-floating-offshore-turbine-platform-tests-completed-successfully-594070/> (Επίσκεψη 27/1/19)
13. Καμπύλες p-y. Ανακτήθηκαν από την ιστοσελίδα: https://www.researchgate.net/figure/p-y-Curves-for-Clays-a-Static-b-Cyclic-Loading-Conditions-Dunnavant-and-ONeill_fig2_284096292 (Ημερομηνία Επίσκεψης 30/1/19)
14. Πίνακας ανεμογεννήτριας τύπου NREL 5MW. Ανακτήθηκε από την ιστοσελίδα: http://www.twinkletoesengineering.info/wind_turbine.html (Επίσκεψη (9/2/19)
15. Ιστότοπος, http://www.itsak.gr/db/data/strong_motion/after2000/ (Ημερομηνία επίσκεψης 2/1/19)

Παράρτημα Α

Οριζόντιες μετακινήσεις για το συνδυασμό φόρτισης 1

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις για τους υπόλοιπους εδαφικούς κόμβους, για τις αργίλους 1, 2 και 3.

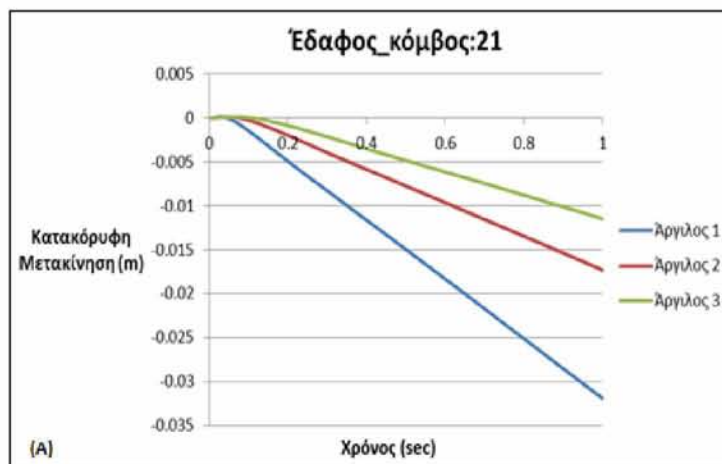


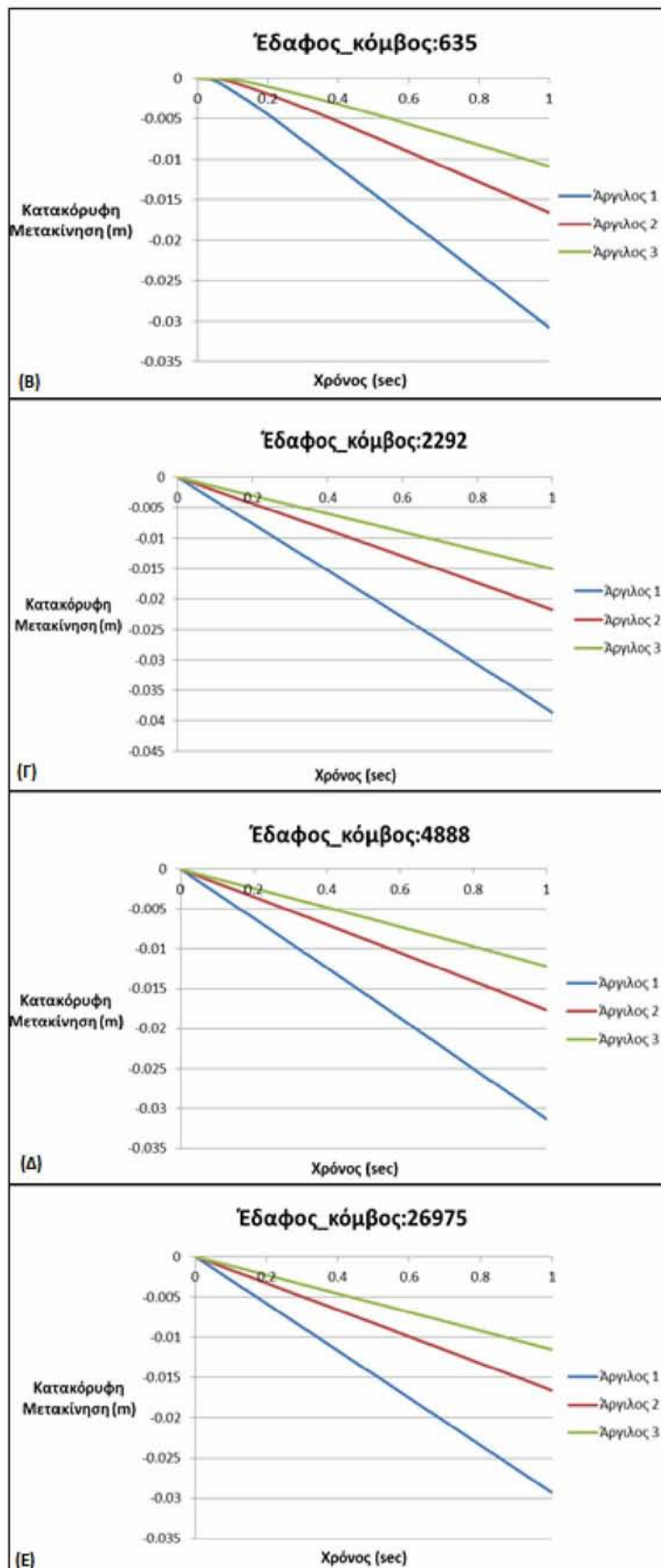


Σχήμα Α.1: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 21 (Α), 635 (Β), 2292 (Γ), 4888 (Δ) και 26975 (Ε) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.

Κατακόρυφες μετακινήσεις για το συνδυασμό φόρτισης 1

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις για τους υπόλοιπους εδαφικούς κόμβους, για τις αργίλους 1, 2 και 3.



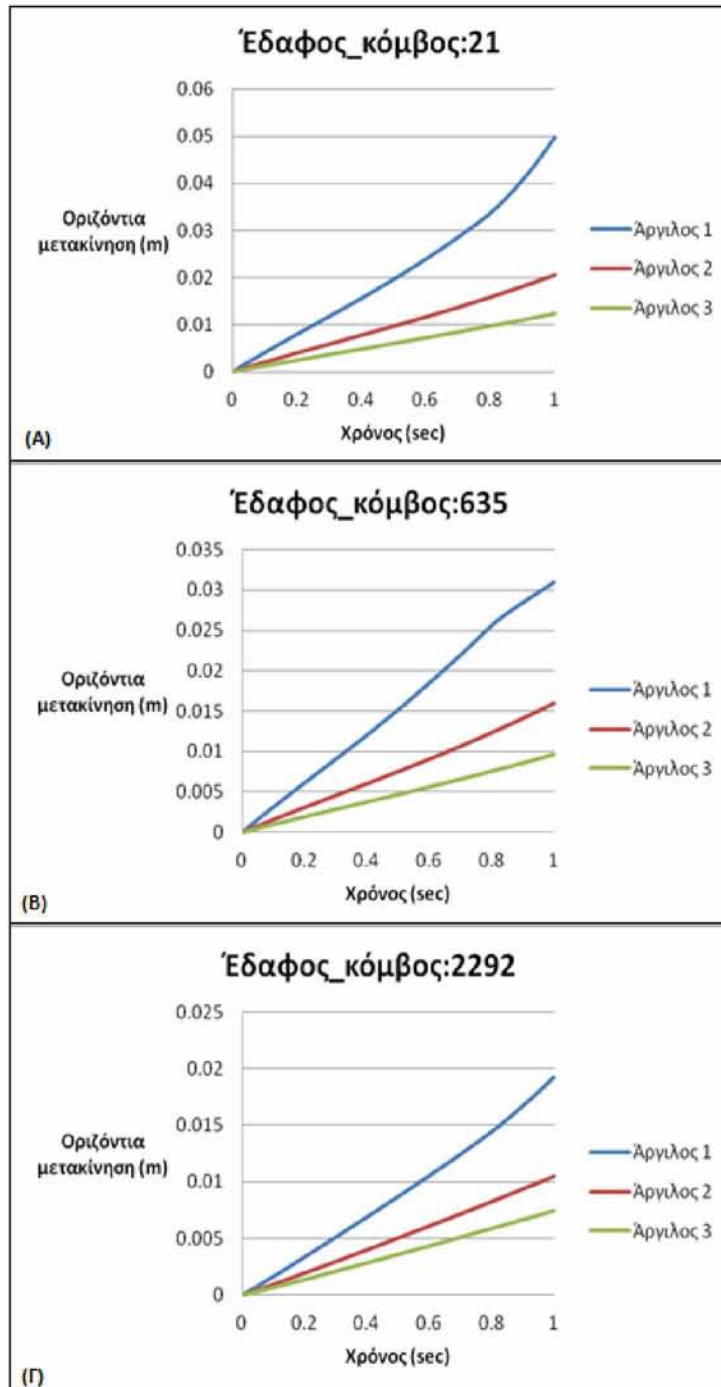


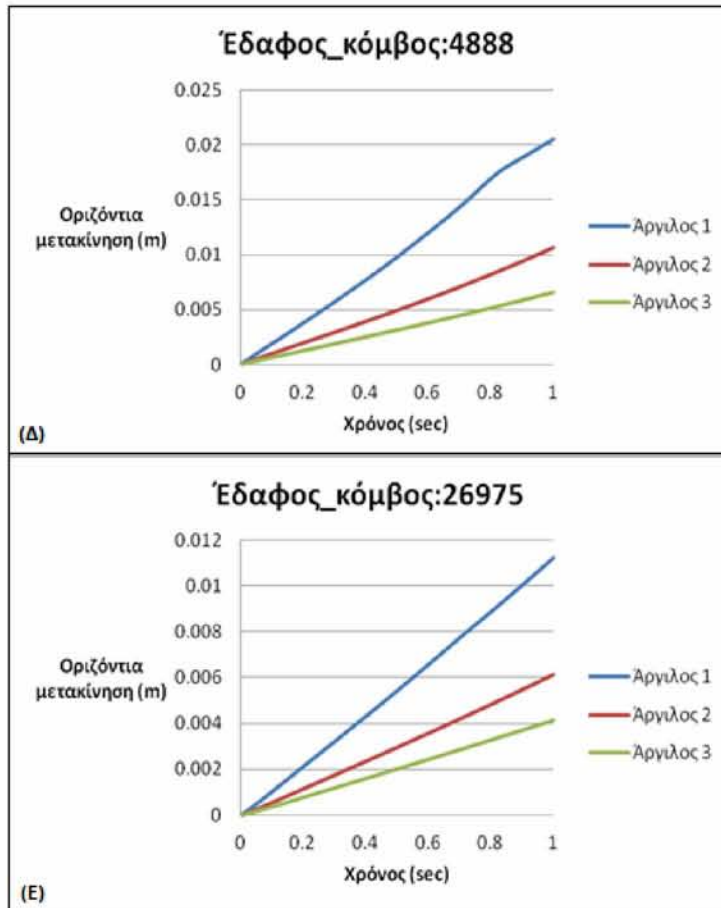
Σχήμα Α.2: Σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων των κόμβων 21 (Α), 635 (Β), 2292 (Γ), 4888 (Δ) και 26975 (Ε) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.

Παράρτημα Β

Οριζόντιες μετακινήσεις για το συνδυασμό φόρτισης 2

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις για τους υπόλοιπους εδαφικούς κόμβους, για τις αργίλους 1, 2 και 3.

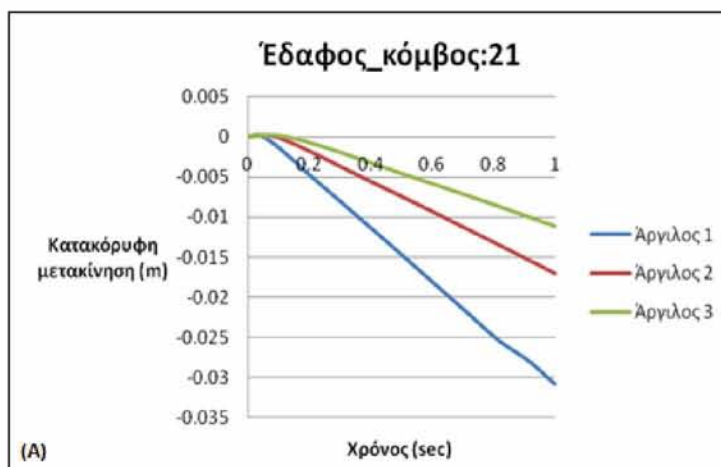


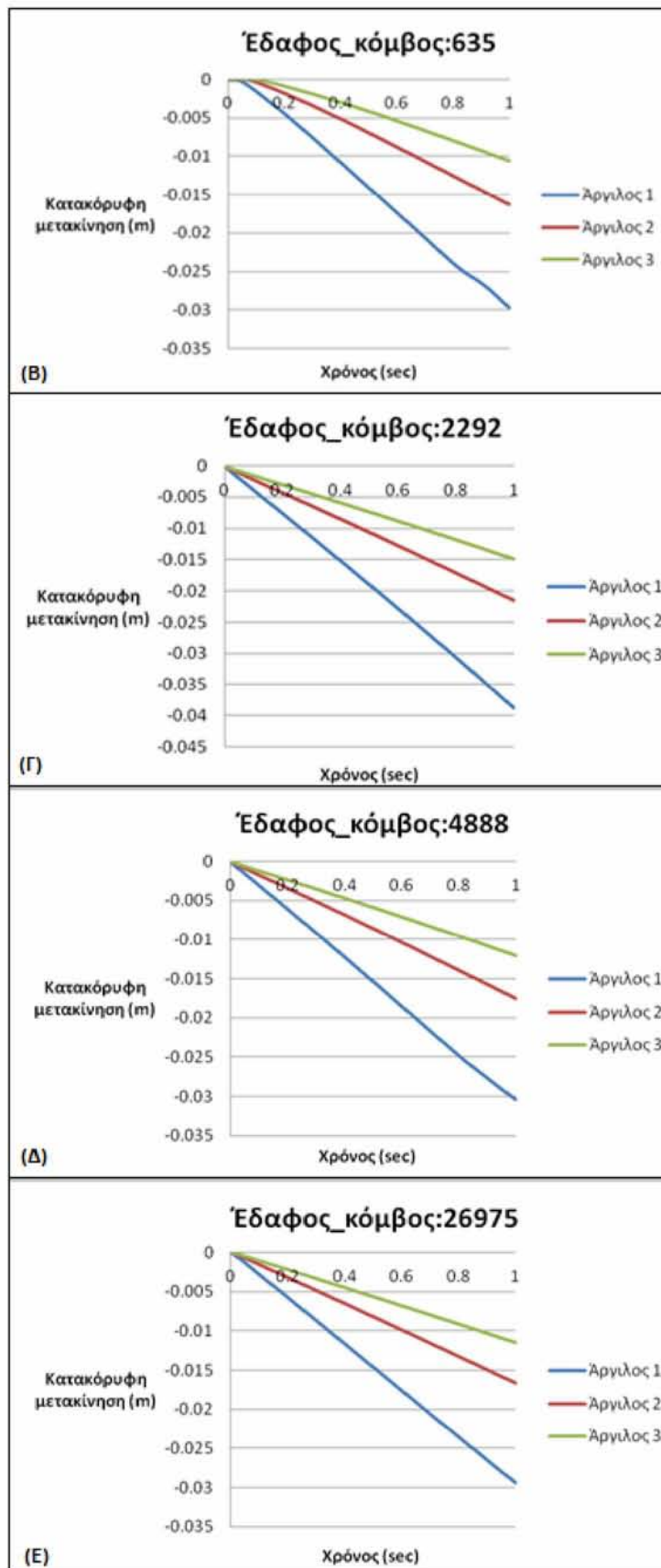


Σχήμα Β.1: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 21 (Α), 635 (Β), 2292 (Γ), 4888 (Δ) και 26975 (Ε) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.

Κατακόρυφες μετακινήσεις για το συνδυασμό φόρτισης 2

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις για τους υπόλοιπους εδαφικούς κόμβους, για τις αργίλους 1, 2 και 3.



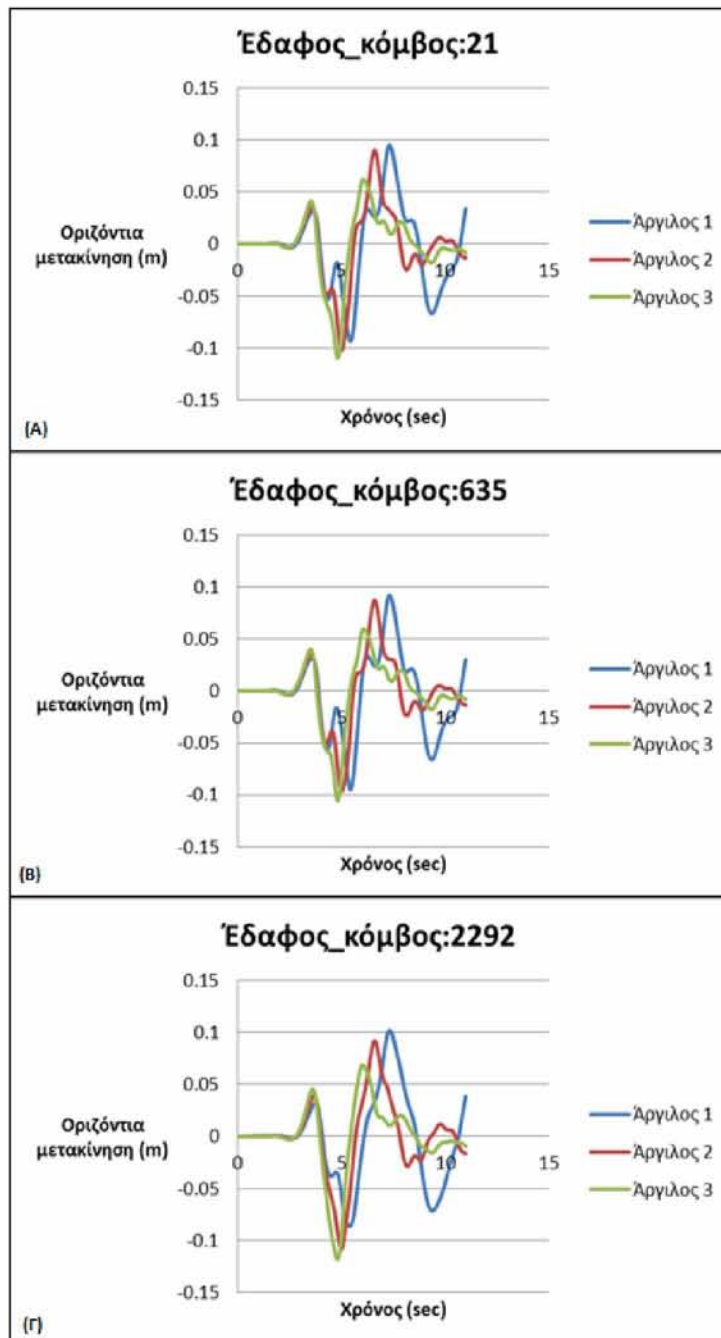


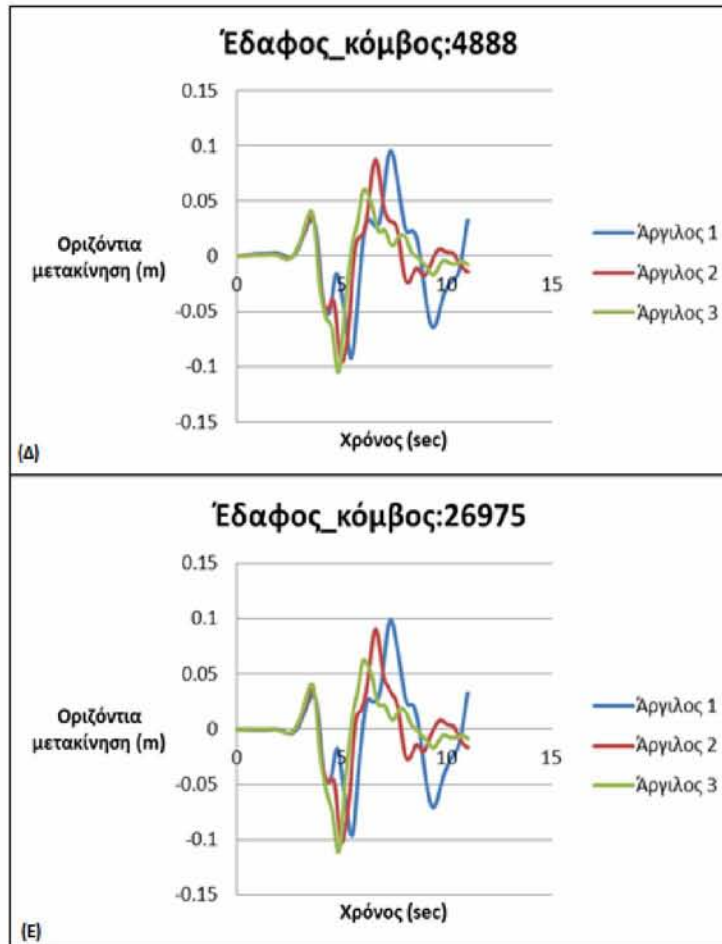
Σχήμα Β.2: Σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων των κόμβων 21 (Α), 635 (Β), 2292 (Γ), 4888 (Δ) και 26975 (Ε) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.

Παράρτημα Γ

Οριζόντιες μετακινήσεις για το συνδυασμό φόρτισης 3

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις για τους υπόλοιπους εδαφικούς κόμβους, για τις αργίλους 1, 2 και 3.

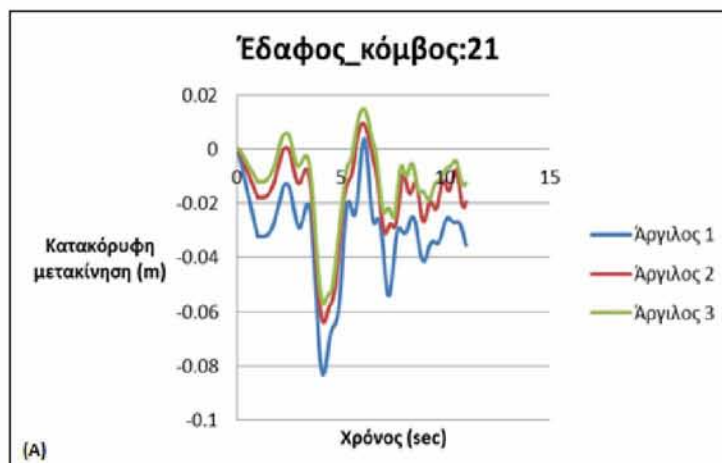


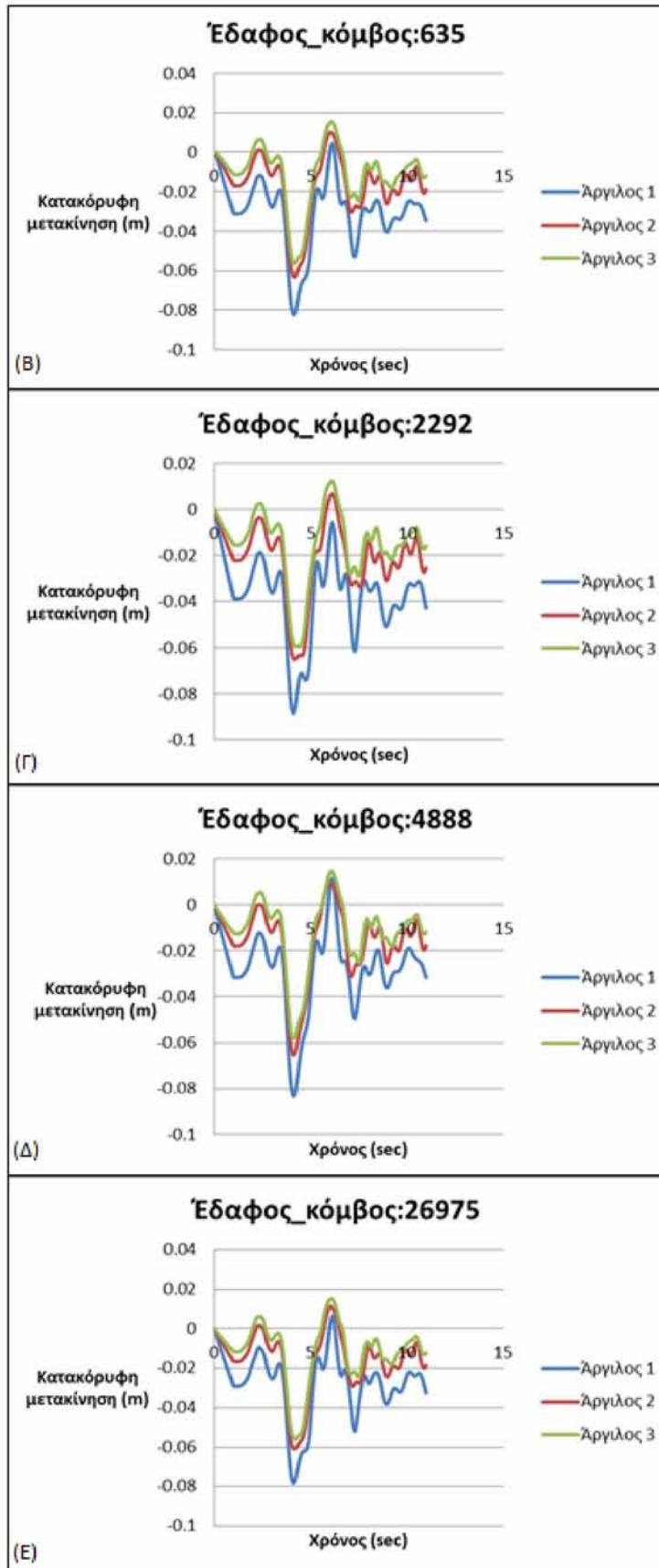


Σχήμα Γ.1: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 21 (Α), 635 (Β), 2292 (Γ), 4888 (Δ) και 26975 (Ε) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.

Κατακόρυφες μετακινήσεις για το συνδυασμό φόρτισης 3

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις για τους υπόλοιπους εδαφικούς κόμβους, για τις αργίλους 1, 2 και 3.



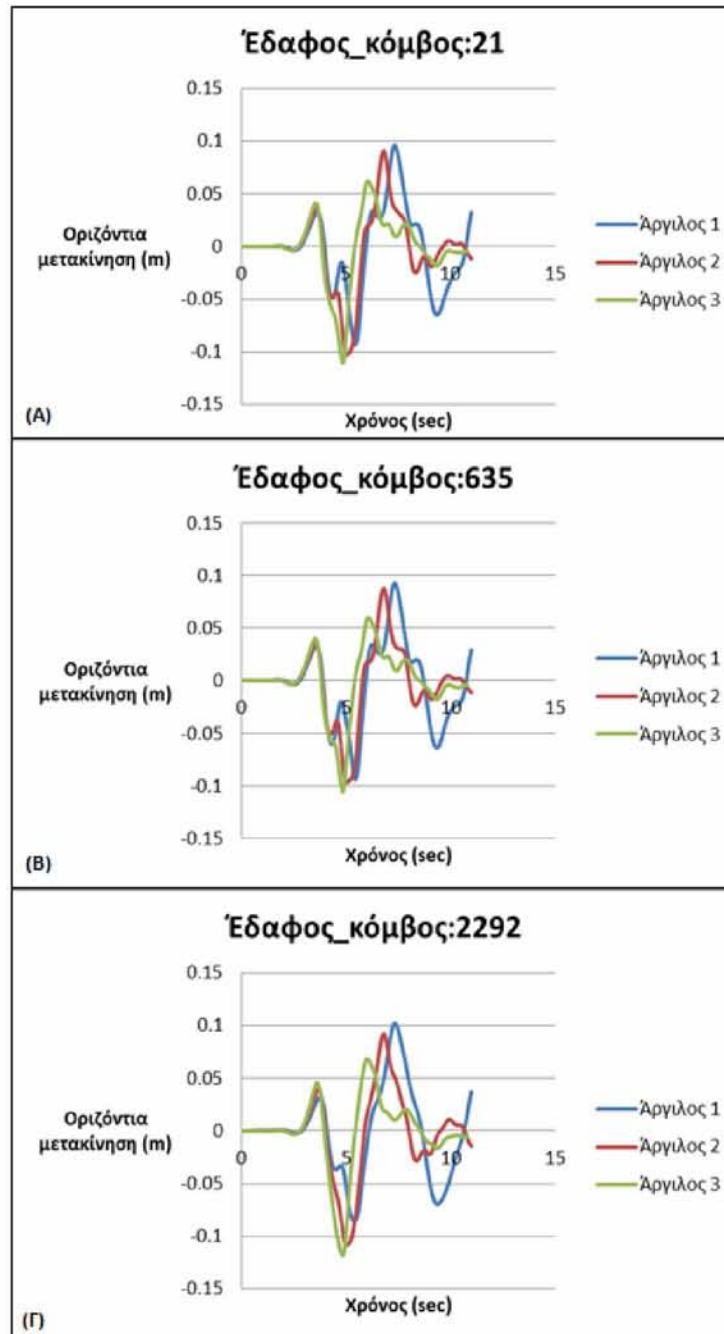


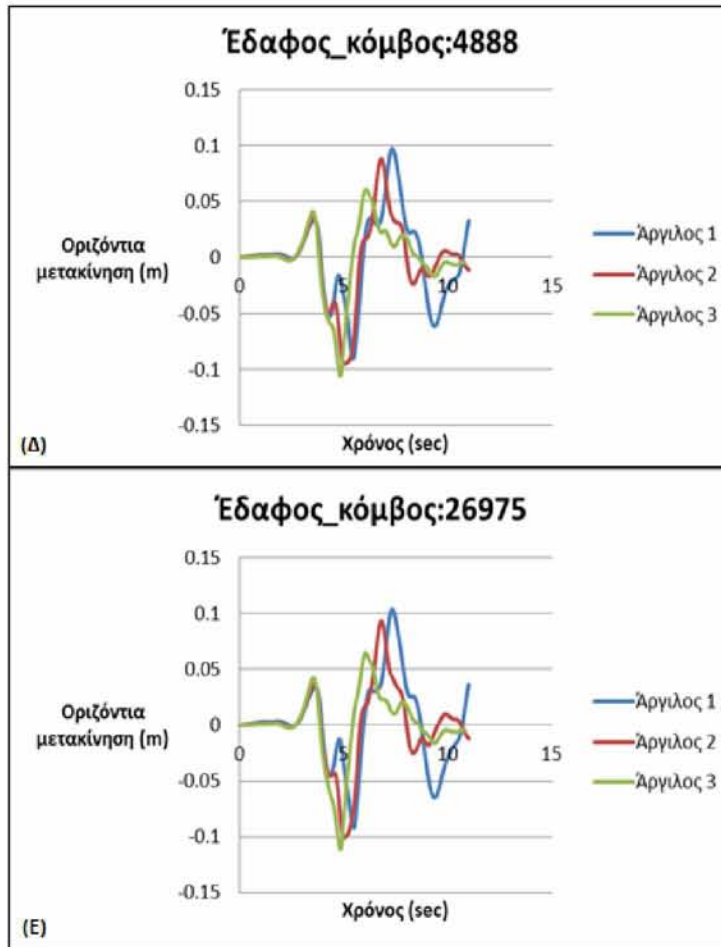
Σχήμα Γ.2: Σύγκριση των κατακόρυφων μετακινήσεων των κόμβων 21 (Α), 635 (Β), 2292 (Γ), 4888 (Δ) και 26975 (Ε) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.

Παράρτημα Δ

Οριζόντιες μετακινήσεις για το συνδυασμό φόρτισης 4 (διεύθυνση X)

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις για τους υπόλοιπους εδαφικούς κόμβους, για τις αργίλους 1, 2 και 3.

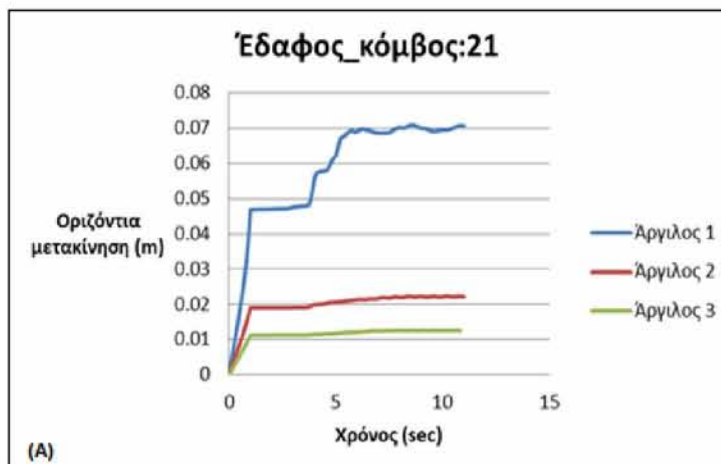


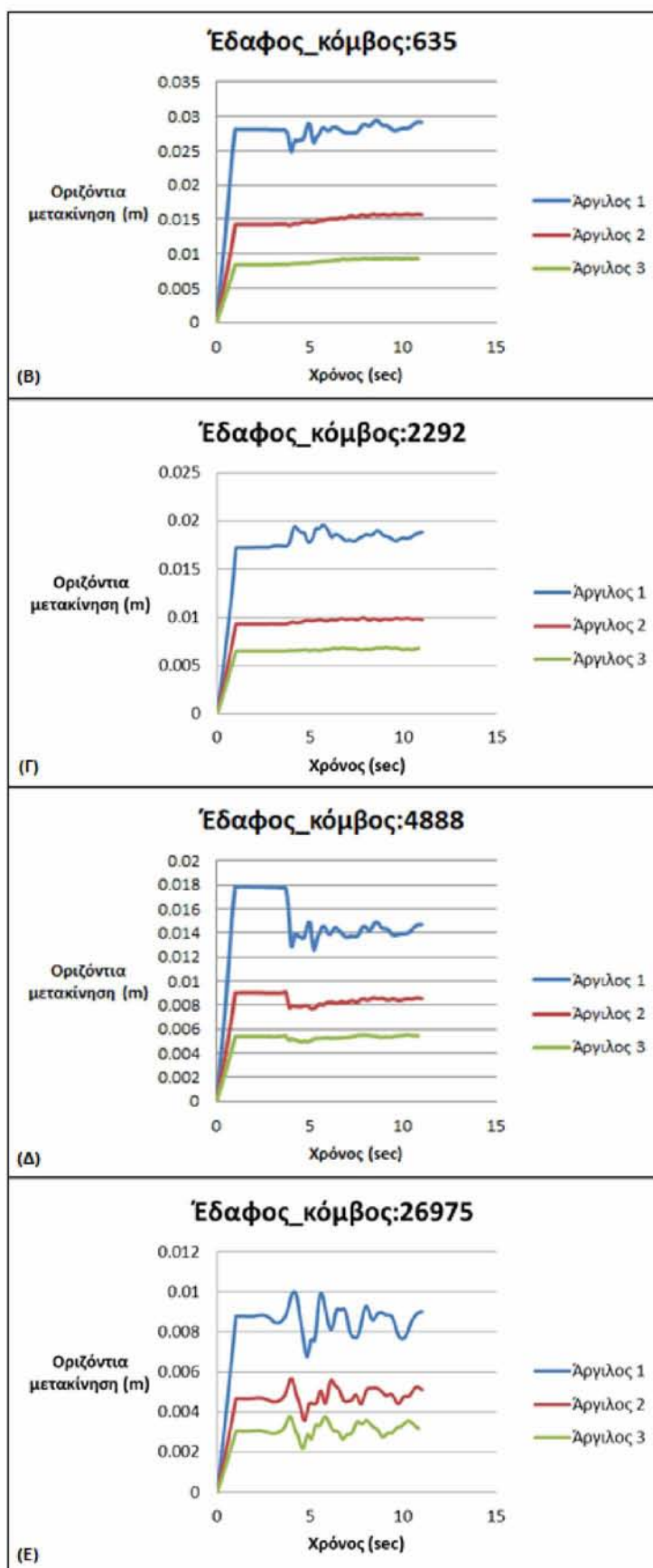


Σχήμα Δ.1: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 21 (Α), 635 (Β), 2292 (Γ), 4888 (Δ) και 26975 (Ε) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.

Οριζόντιες μετακινήσεις για το συνδυασμό φόρτισης 4 (διεύθυνση Y)

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις για τους υπόλοιπους εδαφικούς κόμβους, για τις αργίλους 1, 2 και 3.

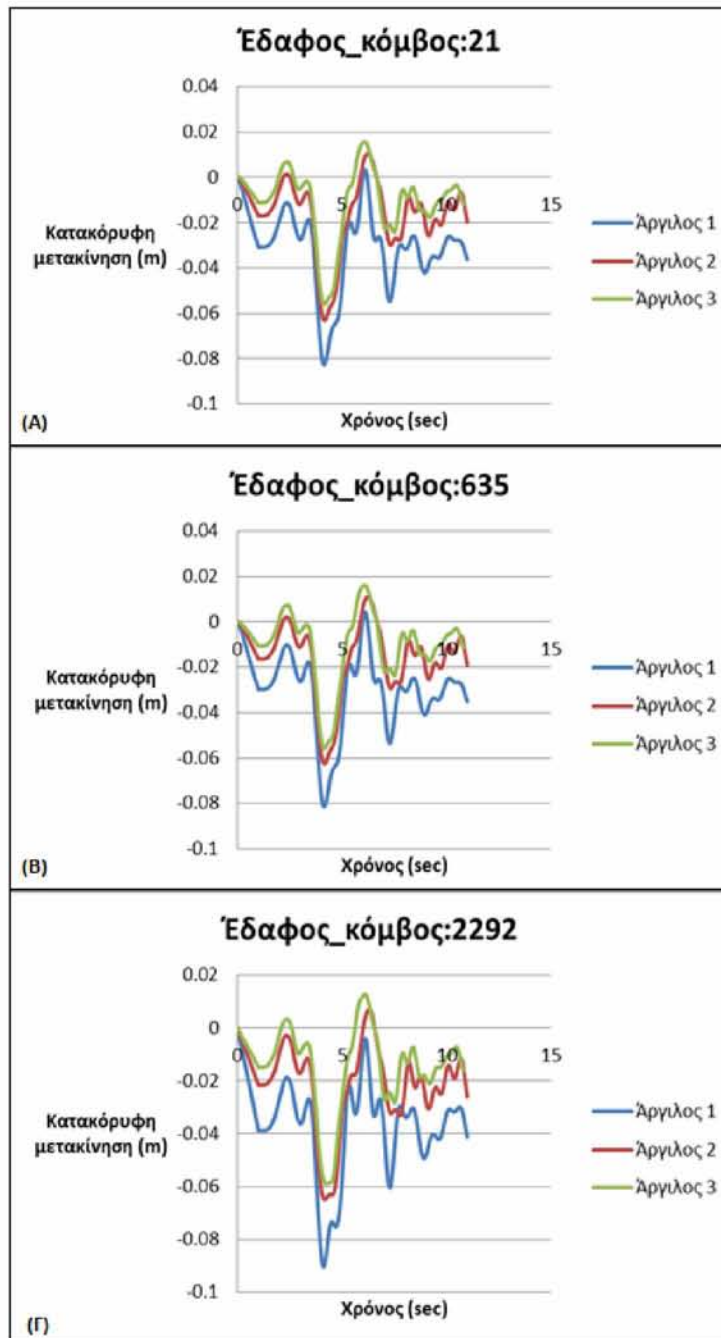


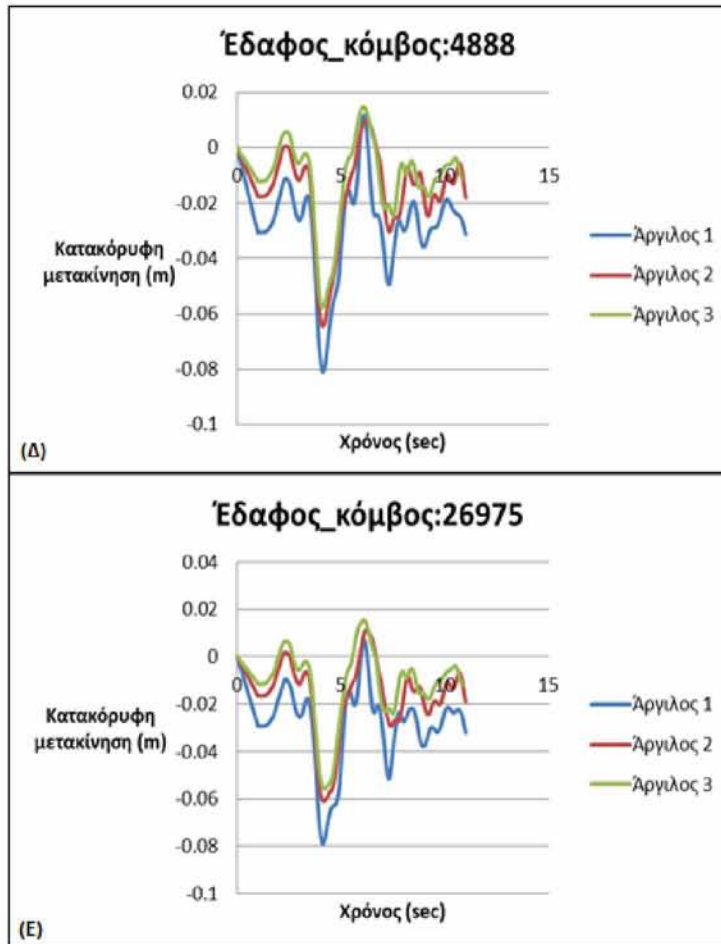


Σχήμα Δ.2: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 21 (Α), 635 (Β), 2292 (Γ), 4888 (Δ) και 26975 (Ε) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.

Κατακόρυφες μετακινήσεις για το συνδυασμό φόρτισης 4

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις για τους υπόλοιπους εδαφικούς κόμβους, για τις αργίλους 1, 2 και 3.





Σχήμα Δ.3: Σύγκριση των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων 21 (Α), 635 (Β), 2292 (Γ), 4888 (Δ) και 26975 (Ε) του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου, για τις αργίλους 1, 2 και 3.