



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***Δυναμική Αλληλεπίδραση Υπεράκτιας Ανεμογεννήτριας
με Μονοπάσσαλο Θεμελίωσης***

**Δήμητρα Βαλλιανάτου
Κωνσταντίνα Παπαδοπούλου**

Επιβλέπων: **Γεώργιος Δ. Μπουκοβάλας**, Καθηγητής Ε.Μ.Π.



DIPLOMA THESIS

***Dynamic Interaction of Offshore Wind Turbine with
Monopile Foundation***

**Konstantina Papadopoulou
Dimitra Vallianatou**

Supervisor: **George D. Bouckovalas**, Professor N.T.U.A.

MΑΡΤΙΟΣ/MARCH 2020

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα Διπλωματική Εργασία ορίζεται το τέλος ενός πολύ σημαντικού κεφαλαίου στη ζωή μας και αισθανόμαστε την ανάγκη να ευχαριστήσουμε όλους όσους συνέβαλαν σε αυτήν.

Πρώτο απ' όλους, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον δάσκαλο – καθηγητή μας κ. Γιώργο Δ. Μπουκοβάλα. Τον ευχαριστούμε για την καθοδήγηση και την επιμονή του να πράττουμε το καλύτερο, παροτρύνοντάς μας να υπερβούμε τον εαυτό μας και να επιζητούμε συνεχώς την ποιότητα στη δουλειά μας. Ακόμη τον ευχαριστούμε για την απλόχερη διάθεση του να μας κάνει να νιώσουμε τη Διπλωματική Εργασία σαν μια ευκαιρία να πάρουμε μια γεύση από την έρευνα σε θέματα Πολιτικού Μηχανικού και να διευρύνουμε το νού μας. Ήταν χαρά μας να ολοκληρώσουμε τις σπουδές μας με αυτή τη συνεργασία, έχοντας έναν επιβλέποντα – πρότυπο τόσο σε επιστημονικό όσο και σε ανθρώπινο επίπεδο.

Τίποτα βέβαια δεν θα ήταν ίδιο χωρίς τη βοήθεια του μεταδιδάκτορα κ. Ιωάννη Τσιάπα, ο οποίος ήταν πάντα πρόθυμος να μας βοηθήσει με τις γνώσεις και τη μεθοδικότητα του. Σε κάθε μας πρόβλημα ήταν διαθέσιμος και υποστηρικτικός. Οι συζητήσεις μας τόσο σε θέματα της διπλωματικής όσο και της καθημερινότητας θα μας μείνουν αξέχαστες.

Ακόμη θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον καθηγητή κ. Β. Π. Παπαδόπουλο και τον Δρ. Πολιτικό Μηχανικό κ. Α. Βαλσαμή για την σημαντική τους βοήθεια σε θέματα που αφορούσαν την εργασία μας.

Ο Τομέας Γεωτεχνικής αποτέλεσε για εμάς ένα πλαίσιο που ξεπέρασε τα όρια της μετάδοσης γνώσης και μας αγκάλιασε με κάθε μέσο.

Κλείνοντας, το πιο μεγάλο ευχαριστώ θα θέλαμε να το πούμε στις οικογένειες μας που στέκονται δίπλα σε κάθε μας επιλογή και μας γεμίζουν θάρρος για το επόμενο βήμα, αλλά και στους φίλους που εξερευνούν στο πλευρό μας τη ζωή.

Περιγραφή του Τεχνικού Προβλήματος

Οι θαλάσσιες ανεμογεννήτριες αποτελούν μια εναλλακτική και φιλική προς το περιβάλλον πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που αναπτύσσεται ραγδαία τα τελευταία χρόνια. Η μεγάλη πλειοψηφία των θαλάσσιων ανεμογεννητριών αλλά και γενικότερα όλων των υπεράκτιων κατασκευών (π.χ. εξέδρες εξόρυξης πετρελαίου) έχει εγκατασταθεί σε μη σεισμογενείς περιοχές (π.χ. Βόρεια Θάλασσα, Κόλπος Μεξικό) και ως εκ τούτου η έρευνα πάνω σε υπεράκτιες κατασκευές έχει επικεντρωθεί σε μη σεισμικά φορτία. Η αποκτηθείσα γνώση έχει αποτυπωθεί σε διάφορες κανονιστικές διατάξεις, όπως αυτές του API (2002) και του DNV (2013), όπου περιγράφονται αναλυτικά μεθοδολογίες στατικής διαστασιολόγησης των πασσάλων θεμελίωσης σε συνεκτικά και μη-συνεκτικά εδάφη, ενώ προτείνονται και μεθοδολογίες για τον υπολογισμό των σταθερών κατανεμημένων (κατακόρυφων και οριζόντιων) ελατηρίων κατά μήκος του πασσάλου.

Η τρέχουσα πρακτική σχεδιασμού, όπως αποτυπώνεται στους παραπάνω Κανονισμούς, είναι να αγνοείται η συνεισφορά της απόσβεσης της θεμελίωσης στο σχεδιασμό υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Αποβλέποντας στη μελλοντική εγκατάσταση υπεράκτιων ανεμογεννητριών σε σεισμογενείς περιοχές της Ευρώπης (π.χ. Ελλάδα, Ιταλία) αλλά και του υπόλοιπου κόσμου (π.χ. Καλιφόρνια, Ιαπωνία, Ταϊβάν) είναι απαραίτητη η μελέτη της πρόσθετης απόσβεσης ενέργειας λόγω της θεμελίωσης. Σε αυτή την περίπτωση, οι υψίσυχνες σεισμικές δράσεις θα οδηγήσουν σε ανάπτυξη σημαντικής απόσβεσης ενέργειας στη θεμελίωση, λόγω (α) της απόσβεσης ακτινοβολίας, που οφείλεται στη μετάδοση (ακτινοβολία) στο έδαφος των κυμάτων που προκαλεί η ταλάντωση της θεμελίωσης και μεταβάλλεται με την συχνότητα της φόρτισης και (β) της υστερητικής απόσβεσης, που οφείλεται στην απώλεια ενέργειας σε κάθε κύκλο δυναμικής φόρτισης λόγω της μη γραμμικής - υστερητικής συμπεριφοράς του εδάφους και είναι ανεξάρτητη από την

συχνότητα της φόρτισης, αλλά μεταβάλλεται με τη διατμητική παραμόρφωση που αναπτύσσεται στο έδαφος. Η αγνόηση της απόσβεσης της θεμελίωσης σε αυτές τις περιπτώσεις ενδέχεται να μην είναι τεχνικά και οικονομικά δόκιμη, δεδομένου ότι θα μπορεί να οδηγήσει σε υπερ-διαστασιολόγηση της ανωδομής της ανεμογεννήτριας και να επιβαρύνει σημαντικά το συνολικό κόστος κατασκευής του έργου.

Σκοπός και περιεχόμενο της Διπλωματικής Εργασίας

Πιο συγκεκριμένα, το αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι: (α) η διερεύνηση της αλληλεπίδρασης-εδάφους-θεμελίωσης-ανωδομής στην απόκριση της ανωδομής υπεράκτιων ανεμογεννητριών (επιμήκυνση ιδιοπεριόδου ταλάντωσης και αύξηση απόσβεσης) και (β) η αξιολόγηση του τρόπου βαθμονόμησης των εδαφικών ελατηρίων και αποσβεστήρων που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης ανωδομής-θεμελίωσης.

Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε αρχικά εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση που επικεντρώθηκε (α) στην επίδραση της αλληλεπίδρασης εδάφους-θεμελίωσης-ανωδομής και (β) στις πρακτικές μεθόδους προσομοίωσης της απόκρισης πασσάλων θεμελίωσης. Η αλληλεπίδραση πασσάλου θεμελίωσης – ανεμογεννήτριας εξετάστηκε μέσω μη γραμμικών αριθμητικών αναλύσεων στον κώδικα Πεπερασμένων Στοιχείων Ansys. Το πρώτο βήμα ήταν η στατική διαστασιολόγηση της θεμελίωσης της ανεμογεννήτριας τόσο σε κατακόρυφη όσο και σε οριζόντια φόρτιση σε όλα τα εξεταζόμενα εδάφη. Ο μονο-πάσσαλος προσομοιώθηκε με τη μέθοδο «δοκού επί ελατηριωτού εδάφους», με προσάρτηση σε κάθε κόμβο του ενός ελατηρίου και ενός αποσβεστήρα εν παραλλήλω. Τα εδαφικά ελατήρια υπολογίσθηκαν κατά API (2002) ως προς την μονοτονική συμπεριφορά και ακολουθούσαν τον κανόνα του Masing (1926) κατά την ανακυκλική φόρτιση-αποφόρτιση-επαναφόρτιση ώστε να προσομοιωθεί η υστερητική συμπεριφορά, ενώ οι αποσβεστήρες προσομοιώθηκαν κατά Gazetas & Dobry (1984). Στο κοινό ελεύθερο άκρο των ελατηρίων και αποσβεστήρων επιβλήθηκε η σεισμική κίνηση του ελεύθερου πεδίου, η οποία υπολογίσθηκε από ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις μονοδιάστασης κυματικής διάδοσης για αρμονική σεισμική διέγερση στην επιφάνεια του.

Η βασική αριθμητική ανάλυση πραγματοποιήθηκε για άμμο μέσης πυκνότητας, για μια τυπική ανεμογεννήτρια 5 MW με ύψος πύργου ίσο με 90m. Η ανεμογεννήτρια υπεβλήθη σε 15 κύκλους εξαναγκασμένης αρμονικής ταλάντωσης και ακολούθως αφέθηκε να ταλαντωθεί ελεύθερα προκειμένου να εκτιμηθεί η ιδιοπερίοδος ταλάντωσης και η συνολική ιξώδης απόσβεση του συστήματος.

Πέραν της βασικής ανάλυσης, πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις: (α) για το ίδιο έδαφος (άμμος μέσης πυκνότητας) αλλά πιο δύσκαμπτες ανεμογεννήτριες, και (β) για την ίδια ανεμογεννήτρια αλλά για άλλες εδαφικές συνθήκες: πυκνή άμμος, μαλακή και στιφρή άργιλο. Όλες οι παραμετρικές αναλύσεις επαναλήφθηκαν για άκαμπτο έδαφος (πακτωμένη ανεμογεννήτρια), για το πλήρες σύστημα εδαφικών ελατηρίων και αποσβεστήρων, για υστερητικά εδαφικά ελατήρια μόνον, για εδαφικούς αποσβεστήρες μόνον και χωρίς κάποια εδαφική απόσβεση (υστερητική ή ακτινοβολίας). Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν 35 μη-γραμμικές αναλύσεις Πεπερασμένων Στοιχείων για τη σεισμική απόκριση της ανεμογεννήτριας και του πασσάλου θεμελίωσης.

Επιμέρους ερευνητικά ερωτήματα

Κατά την εκπόνηση της Διπλωματικής Εργασίας διερευνήθηκαν τα ακόλουθα επιμέρους ερευνητικά ερωτήματα:

- i. Ποιες είναι οι μέθοδοι προσομοίωσης της απόκρισης πασσάλων θεμελίωσης;
- ii. Οι ισχύουσες μέθοδοι βαθμονόμησης των ελατηρίων και των αποσβεστήρων αντιπροσωπεύουν επαρκώς την αλληλεπίδραση εδάφους – πασσάλου στην περίπτωση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών;
- iii. Είναι σημαντική η συμβολή της εδαφικής απόσβεσης στην απόκριση της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας υπό σεισμικές διεγέρσεις;
- iv. Η μέθοδος της ελεύθερης ταλάντωσης είναι αξιόπιστη για την εκτίμηση της απόσβεσης της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας;
- v. Ποια είναι συμβολή των συνιστωσών της εδαφικής απόσβεσης στην απόκριση της ανεμογεννήτριας;

Κύρια συμπεράσματα

- α)** Οι δύο πρακτικές μέθοδοι προσομοίωσης της απόκρισης πασσάλων θεμελίωσης είναι (i) η μέθοδος «δοκού επί ελατηριωτού εδάφους», όπου τα εδαφικά ελατήρια και οι αποσβεστήρες είναι κατανομημένοι κατά μήκος του πασσάλου, και (ii) η μέθοδος των «μακρο-στοιχείων», όπου ο πάσσαλος θεμελίωσης αντικαθίσταται με συγκεντρωμένα ελατήρια και αποσβεστήρες στην βάση του πυλώνα. Παρά το γεγονός ότι η προσομοίωση με «μακρο-στοιχεία» παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα συγκρινόμενη με την προσομοίωση με τη μέθοδο «δοκού επί ελατηριωτού εδάφους», η τελευταία παραμένει η πλέον διαδεδομένη μέθοδος προσομοίωσης της αλληλεπίδρασης εδάφους - πασσάλου - κατασκευής.

- β)** Για την εκτίμηση της στιβαρότητας των ελατηρίων η πλέον διαδεδομένη μέθοδος είναι η χρήση **μη γραμμικών καμπύλων $p - \gamma$** , με επικρατέστερες τις καμπύλες του API, σε συνδυασμό με κατάλληλο κριτήριο που να προσδίδει υστερητικό χαρακτήρα. Οι ιδιότητες των υστερητικών εδαφικών ελατηρίων (καμπύλες $p-\gamma$) και της σταθεράς του ιξώδους αποσβεστήρα θα πρέπει να βαθμονομηθούν έναντι καλά τεκμηριωμένων πειραμάτων υπό κλίμακα ή τρισδιάστατων συζευγμένων αριθμητικών αναλύσεων. Στο πλαίσιο της προτεινόμενης βαθμονόμησης της μεθοδολογίας «δοκού επί ελατηριωτού εδάφους» πρέπει να εξετασθούν και εναλλακτικές διατάξεις ελατηρίων και αποσβεστήρων, όπως για παράδειγμα η «εν σειρά» διάταξη τους. Η χρήση της «εν παραλλήλω» διάταξης ελατηρίων και αποσβεστήρων οδηγεί στην ανάπτυξη πολύ μεγάλων και μη-ρεαλιστικών δυνάμεων απόσβεσης ακτινοβολίας.
- γ)** **Επίδραση της θεμελίωσης στη σεισμική απόκριση του πύργου.** Η συμμετοχή της θεμελίωσης οδηγεί σε μείωση της επιτάχυνσης της μάζας. Η συμβολή της απόσβεσης ενέργειας λόγω υστερητικής συμπεριφοράς των ελατηρίων (υστερητική απόσβεση) και λόγω ιξωδών αποσβεστήρων (απόσβεση ακτινοβολίας) είναι συγκρίσιμες. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η συμβολή του πασσάλου και μόνον, ως δομικού στοιχείου, είναι περισσότερο σημαντική από την συμβολή του περιβάλλοντος εδάφους, και ελέγχει ουσιαστικά την απόκριση της ανεμογεννήτριας.
- δ)** **Επίδραση της θεμελίωσης στην ιδιοπερίοδο ταλάντωσης.** Σε όλες ανεξαιρέτως τις παραμετρικές αναλύσεις, η προσθήκη του πασσάλου θεμελίωσης οδήγησε σε αύξηση της ιδιοπεριόδου ταλάντωσης του συστήματος. Μάλιστα, οι τιμές της ιδιοπεριόδου για το πλήρες σύστημα εδαφικών αποσβεστήρων και ελατηρίων (T_{SSI}) ήταν πρακτικά οι ίδιες με τις τιμές που προέκυψαν χρησιμοποιώντας μόνο εδαφικούς αποσβεστήρες (T_{rad}), μόνο για εδαφικά ελατήρια (T_{hyst}) ή χωρίς κάποια εδαφική απόσβεση (υστερητική ή ακτινοβολίας).
- ε)** **Επίδραση της θεμελίωσης στην (ισοδύναμη) ιξώδη απόσβεση.** Η προσθήκη του πασσάλου θεμελίωσης οδήγησε σε αύξηση της απόσβεσης ενέργειας, όπως εκφράζεται από τον ισοδύναμο λόγο ιξώδους απόσβεσης ζ_{total} , με τιμές σημαντικά μεγαλύτερες από αντίστοιχες της βιβλιογραφίας. Είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι η πληθώρα των τιμών της βιβλιογραφίας έχουν προκύψει για φόρτιση ανέμου και κυμάτων στην ανεμογεννήτρια, σε αντίθεση με τη σεισμική φόρτιση που εξετάζεται στην παρούσα Διπλωματική Εργασία. Η πρόσθετη απόσβεση ενέργειας λόγω τη

θεμελίωσης οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στην απόσβεση ακτινοβολίας ζ_{rad} , αφού η υστερητική απόσβεση ζ_{hyst} είναι πρακτικά μηδενική.

στ) Το εύρος της ελεύθερης ταλάντωσης είναι πολύ μικρότερο τόσο από το εύρος της εξαναγκασμένης ταλάντωσης όσο και από τη μετατόπιση διαρροής των ελατηρίων. Αυτό εξηγεί τη μηδενική πρακτικά συμβολή της υστερητικής απόσβεσης στην ελεύθερη ταλάντωση του συστήματος, αλλά οδηγεί σε ένα επιπλέον σημαντικό συμπέρασμα: **η μέθοδος εκτίμησης της απόσβεσης του συστήματος από την ελεύθερη ταλάντωση είναι λανθασμένη.** Επιπλέον, η πλειονότητα των συχνοτήτων της ελεύθερης ταλάντωσης εμπίπτει στην περιοχή των συχνοτήτων αποκοπής για τις οποίες απαιτείται μείωση έως και μηδενισμός της θεωρητικής τιμής της σταθεράς του αποσβεστήρα. Συνεπώς, η μέθοδος της ελεύθερης ταλάντωσης δεν είναι ενδεδειγμένη για την εκτίμηση της συνεισφοράς της θεμελίωσης στη συνολική απόσβεση ενέργειας του συστήματος.

Description of the technical problem

Offshore wind turbines consist an alternative and environmentally friendly energy production source which is rapidly expanding the last years. The vast majority of the offshore wind turbines and in general of all offshore structures (e.g. oil drilling platforms) are installed in non-seismic areas (e.g. North Sea, Gulf of Mexico) and as a result the study on offshore structures has focused on non-seismic actions. The obtained knowledge has been incorporated into various design codes, such API (2002) and DNV (2013), in which analytical methodologies for the static design of foundation piles in cohesive and cohesionless soils are described and in addition methodologies for the estimation of distributed (vertical and horizontal) springs constants along the pile are proposed.

The current design practice, as incorporated in the aforementioned Design Codes, is to ignore the contribution of the foundation damping at the design of offshore wind turbines. Aiming to the future installation of offshore wind turbines in earthquake-prone areas in Europe (e.g. Greece, Italy) and in the rest of the world (e.g. California, Japan, Taiwan), it is necessary to study the effect of the additional energy dissipation due to the foundation. In this case, the high frequency seismic action would lead to the development of significant damping on the foundation, due to (a) radiation damping, which is caused by the radiation of the waves generated by the vibration of the foundation into the surrounding ground and is frequency dependent and (b) hysteretic damping, which is attributed to the energy loss during each dynamic loading cycle due to the nonlinear – hysteretic behavior of the ground and is independent of frequency but varies with the shear strain level of the ground. Ignoring the foundation damping in these cases, would not be technically and economically feasible, given that it may lead to over-design of the wind turbine superstructure, increasing hence significantly the overall construction cost of the project.

Scope and content of Diploma Thesis

In particular, the scope of this Diploma Thesis is: a) to investigate the effect of the soil-foundation-structure interaction for monopile foundations and its impact on the dynamic response of the structure (i.e. natural period elongation and damping increase) and b) the evaluation of the calibration method of soil springs and dashpots that are utilized for the simulation of the foundation-superstructure interaction.

For this purpose, a comprehensive literature review was initially conducted focusing on (a) the effect of the soil-foundation-structure interaction for monopile foundations and (b) on the practical methods for the simulation of the foundation pile response. The pile foundation-wind turbine interaction was examined via nonlinear numerical analyses using the Finite Difference Code Ansys. The first step was the static design of the wind turbine foundation for vertical as well as horizontal loading for all the examined soil profiles. The monopile was simulated using the “Beam on nonlinear Winkler foundation (BNWF)” approach, and, in particular, a set of parallel nonlinear spring and dashpot was attached to each pile node. The spring stiffness was obtained from the static p-y curves proposed by API (2002) for monotonic loading, while the Masing rule was followed during unloading-reloading in order to simulate hysteresis. The dashpot coefficients representing the soil material damping were calculated following the methodology proposed by Gazetas & Dobry (1984). The free end of the springs and dashpots was subjected to seismic loading. The pertinent free-field displacement time-histories at each depth were estimated by conducting equivalent linear 1-D wave propagation analyses.

The baseline numerical analysis examined a typical 5-MW offshore wind turbine with tower height of 90m founded with a monopile in medium sand. The wind turbine was subjected to 15 cycles of forced harmonic vibration followed by a free vibration analysis in order to estimate the natural frequency as well as the total damping of the vibrating system.

A parametric investigation was conducted focusing on: a) for the same ground profile (i.e. medium density sand) but for more stiff wind turbines and b) for the same wind turbine but for different ground profiles: dense sand, soft and stiff clay. All parametric analyses were repeated for rigid soil, for the complete BNWF model of springs and dashpots, using only hysteretic springs, using only radiation dashpots and without the Masing rule on the springs and without dashpots. In total, 35 nonlinear Finite Elements analyses were conducted in order to examine the effect of the various parameters on the seismic response of the offshore wind turbine and the contribution of the monopile foundation.

Objectives of Diploma Thesis

During the present Diploma Thesis, the following questions of practical interest were examined:

- i. Which are the the dominant practical methods to simulate the response of pile foundations?
- ii. Do the current methods, used for the calibration of the spring stiffness and of the dashpot coefficients, represent sufficiently the soil-pile interaction in the case of offshore wind turbines?
- iii. Is the contribution of soil damping important to the response of offshore wind turbines under seismic loading?
- iv. Is it possible to reliably obtain the total damping during the response of offshore wind turbines using the “free vibration” method?
- v. What is the contribution of each component of soil damping to the response of offshore wind turbines?

Main Conclusions

- a) The two practical methods to simulate the response of pile foundations are (i) the “*beam on nonlinear Winkler foundation (BNWF)*” approach, in which the soil springs and the dashpots are distributed along the pile and the (ii) “*Macro-elements*” approach, in which the pile foundation is replaced by concentrated springs and dashpots at the base of the tower. Despite that the “*Macro-elements*” approach has some advantages compared to the “*Beam on nonlinear Winkler foundation (BNWF)*” approach, the latter remains the most common and popular simulation approach.
- b) The most common method to compute the spring stiffness is the use of nonlinear p-y curves. The most popular design practice is the use of the p-y curves proposed by the API (2002) in combination with a suitable criterion in order to obtain hysteretic behavior on the springs. The properties of the hysteretic soil springs (p-y curves) and the coefficients of the viscous dampers should be calibrated against experimental or three-dimensional coupled numerical analyses results. Regarding the proposed calibration of the “*Beam on nonlinear Winkler foundation (BNWF)*” approach, alternate configurations of springs and dashpots should be examined, for example “in series order”. The use of the model of “parallel” springs and dampers leads to the development of excessive and unrealistic radiation damping forces.

- c) **Effect of the foundation on the seismic response of the tower.**_ The contribution of the foundation leads to the reduction of the acceleration of the mass. The contribution of the energy dissipation due to the hysteretic behavior of the springs (hysteretic damping) and due to the viscous dampers (radiation damping) are comparable. It must be noted that, the contribution of the pile, as structural element, is more important than the contribution of the surrounding soil, and essentially controls the response of the wind turbine.
- d) **Effect of the foundation on the vibration eigenfrequency.**_ In all parametric analyses, the addition of the foundation pile leads to the increase of the vibration eigenfrequency of the system. The eigenfrequency values for a full system of soil springs and dampers (T_{ssi}) are practically the same to the values obtained for a system of soil dampers only (T_{rad}), for a system of soil springs only (T_{hyst}) or for a system without any springs or dampers.
- e) **Effect of the foundation on the (equivalent) viscous damping.**_ The addition of the foundation pile led to an increase of the energy dissipation, described by the equivalent viscous damping ratio ζ_{total} , to values significantly higher than those of the literature. It is necessary to mention that the vast majority of the values at the literature has been derived by wind and wave loading of the wind turbine, in contrast to the seismic loading, which is examined in this Diploma Thesis. The increase in the energy damping comes almost exclusively from radiation damping ζ_{rad} , as the hysteretic damping ζ_{hyst} is practically zero.
- f) The amplitude of the free vibration is significantly smaller than the amplitude of the forced vibration as well as the yield displacement of the soil springs. This explains the practically zero contribution of the hysteretic damping to the free vibration of the system and most importantly leads to an additional conclusion: The calculation of the total damping of the system using the “free vibration” method is incorrect. In addition, the majority of the free vibration frequencies fall within the area of the cut-off frequencies, for which a reduction, even to zero levels, of the theoretical value of the dashpot coefficients is required. Consequently, the “free vibration” method is not appropriate for the calculation of the foundation contribution to the total energy damping of the system.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	i
Εκτενής περίληψη.....	iii
Extended abstract.....	ix
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Περιγραφή τεχνικού προβλήματος.....	1
1.2 Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας.....	4
1.3 Δομή Διπλωματικής Εργασίας.....	5
2. Βιβλιογραφική Αναδρομή: Προσομοίωση πασσάλων θεμελίωσης με τη μέθοδο «Δοκού επί ελατηριωτού εδάφους»	7
2.1 Γενικά.....	7
2.2 Αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού δυναμικών συντελεστών κατανεμημένων ελατήριων και αποσβεστήρων.....	8
2.2.1 Gazetas & Dobry (1984).....	8
2.2.2 El Naggar & Novak (1996).....	10
2.2.3 Karatzia & Mylonakis (2017).....	12
2.3 Ανάλυση πασσάλων θεμελίωσης με τη μέθοδο «δοκού επί ελατηριωτού εδάφους»	17
2.3.1 Wang et al (1998).....	17
2.3.2 El Naggar et al. (2005).....	19
2.3.3 Chen & Duffour (2018).....	21
2.3.4 Markou & Kaynia (2018)	24
2.3.5 Page et al (2019)	28

2.4	Συμπεράσματα και επιλογή μεθόδου προσομοίωσης	31
3.	Βιβλιογραφική Αναδρομή: Προσομοίωση πασσάλων θεμελίωσης με μακρο-ελατήρια και μακρο-αποσβεστήρες	33
3.1	Γενικά.....	33
3.2	Αναλυτικές μεθοδολογίες υπολογισμού των δυναμικών συντελεστών ισοδύναμων ελατηρίων και αποσβεστήρων στην κεφαλή του πασσάλου	34
3.2.1	Gazetas & Dobry (1984).....	34
3.2.2	Gazetas (1991)	36
3.2.3	Zania (2014)	39
3.2.4	Shadlou & Bhattacharya (2016).....	43
3.2.5	Karatzia & Mylonakis (2017).....	47
3.3	Αριθμητική προσομοίωση αλληλεπίδρασης ανεμογεννητριών με μακρο-ελατήρια και μακρο-αποσβεστήρες θεμελίωσης.....	52
3.3.1	Damgaard et al. (2014)	52
3.3.2	Carswell et al. (2015)	54
3.3.3	Aasen (2016)	60
3.3.4	Krathe & Kaynia (2016).....	61
3.3.5	Oh et al. (2018)	64
3.3.6	Kaynia (2018)	66
3.3.7	Page et al. (2019)	67
3.4	Συμπεράσματα και επιλογή μεθόδου προσομοίωσης	69
4.	Διαστασιολόγηση θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών.....	71
4.1	Γενικά.....	71
4.2	Χαρακτηριστικά υπεράκτιων ανεμογεννητριών	71
4.2.1	Τυποποιημένες υπεράκτιες ανεμογεννήτριες	71
4.2.2	«Τυπική ανεμογεννήτρια 5-MW».....	75
4.2.3	Ανεμογεννήτρια «Vestas V90-3MW»	76
4.3	Μεθοδολογία σχεδιασμού θεμελίωσης	76
4.3.1	Μέθοδοι θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών	76
4.3.2	Περιβαλλοντικές φορτίσεις	78
4.3.3	Μεθοδολογία σχεδιασμού έναντι κατακόρυφης φόρτισης	81
4.3.4	Μεθοδολογία σχεδιασμού έναντι οριζόντιας φόρτισης.....	85
4.4	Διαστασιολόγηση θεμελίωσης.....	90

4.4.1	Εδαφικές συνθήκες.....	90
4.4.2	Επιβαλλόμενα φορτία	92
4.4.3	Σχεδιασμός θεμελιώσεων ανεμογεννητριών έναντι κατακόρυφης φόρτισης ..	94
4.4.4	Σχεδιασμός θεμελιώσεων ανεμογεννητριών έναντι οριζόντιας φόρτισης.....	104
4.5	Σύνοψη αναλύσεων διαστασιολόγησης θεμελιώσεων	111
4.5.1	«Τυπική ανεμογεννήτρια 5-MW».....	111
4.5.2	Ανεμογεννήτρια «Vestas V90-3MW»	112
4.5.3	Παρατηρήσεις.....	113
5.	Αριθμητική προσομοίωση υπεράκτιας ανεμογεννήτριας.....	115
5.1	Γενικά.....	115
5.2	Μεθοδολογία αριθμητικής προσομοίωσης.....	115
5.2.1	Κώδικας πεπερασμένων στοιχείων Ansys.....	115
5.2.2	Υπολογιστικό προσομοίωμα.....	117
5.2.3	Σεισμική διέγερση.....	122
5.2.4	Υπολογισμός καμπυλών οριζόντιας δύναμης-μετατόπισης (p-y)	123
5.2.5	Υπολογισμός αποσβεστήρων	129
5.3	Ερμηνεία αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων	130
5.3.1	Μεθοδολογία υπολογισμού της ιδιοπεριόδου	131
5.3.2	Μεθοδολογία υπολογισμού της απόσβεσης	132
5.4	Τυπικά αποτελέσματα αναλύσεων πακτωμένης ανεμογεννήτριας	133
5.4.1	Αναλύσεις χωρίς μάζα πύργου	133
5.4.2	Αναλύσεις με μάζα πύργου	137
5.5	Τυπικά αποτελέσματα αναλύσεων αλληλεπίδρασης εδάφους - ανεμογεννήτριας	142
5.5.1	Ταχύτητα διάδοσης σεισμικών (διατμητικών) κυμάτων V_s	143
5.5.2	Μονοδιάστατες αναλύσεις εδαφικής σεισμικής απόκρισης	145
5.5.3	Δυναμικές αναλύσεις αλληλεπίδρασης εδάφους – ανεμογεννήτριας.....	150
5.5.4	Επιρροή επιμέρους συνιστωσών απόσβεσης	154
6.	Παραμετρική διερεύνηση επίδρασης της θεμελίωσης	161
6.1	Γενικά.....	161
6.2	Επίδραση δυσκαμψίας πύργου ανεμογεννήτριας.....	161
6.3	Επίδραση εδάφους θεμελίωσης	175
6.3.1	Πυκνή άμμος.....	178

6.3.2	Μαλακή άργιλος.....	180
6.3.3	Στιφρή άργιλος.....	182
6.3.4	Σύγκριση αποτελεσμάτων	184
7.	Συμπεράσματα και προτάσεις.....	195
7.1	Συμπεράσματα από τη βιβλιογραφική αναδρομή	195
7.2	Συμπεράσματα από τις αριθμητικές αναλύσεις	201
7.3	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	208
	Βιβλιογραφία.....	209
	Παράρτημα Α: Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων	215

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή τεχνικού προβλήματος

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελούν μια εναλλακτική πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που αναπτύσσεται ραγδαία τα τελευταία χρόνια, δεδομένου ότι (α) δεν παράγει ρύπους και είναι επομένως φιλική προς το περιβάλλον και (β) τα αποθέματα ορυκτών πόρων που χρησιμοποιούνται για τη συμβατική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. πετρέλαιο, φυσικό αέριο, λιγνίτης κλπ.) περιορίζονται με ταχείς ρυθμούς. Εξέχουσα θέση ανάμεσα στις ΑΠΕ κατέχει η αιολική ενέργεια, δηλαδή η εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού για την παραγωγή ηλεκτρικής (κατά κανόνα) ενέργειας.

Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω ανεμογεννητριών (Α/Γ), οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική και οι οποίες εγκαθίστανται σε αιολικά πάρκα, στην ξηρά (onshore) ή στη θάλασσα (offshore). Η μεγάλη πλειοψηφία των αιολικών πάρκων ανά τον κόσμο είναι εγκατεστημένη στην ξηρά. Τα τελευταία χρόνια αυξάνεται όμως με ταχύτατους ρυθμούς ο αριθμός των υπεράκτιων αιολικών πάρκων λόγω μιας σειράς πλεονεκτημάτων, όπως: (α) η απουσία περιβαλλοντικών και εδαφικών περιορισμών, (β) η μεγαλύτερη ταχύτητα ανέμου στη θάλασσα και (γ) η αποφυγή οπτικής ρύπανσης. Τα δύο τρίτα των υπεράκτιων ανεμογεννητριών στην Ευρώπη είναι εγκατεστημένα στη Βόρεια Θάλασσα (Wind Europe 2018). Στην Ελλάδα αλλά και σε ολόκληρη τη Μεσόγειο δεν υπάρχουν προς το παρόν εγκατεστημένες υπεράκτιες ανεμογεννήτριες παρά το υψηλό αιολικό δυναμικό των περιοχών.

Οι μηχανισμοί στήριξης των υπεράκτιων ανεμογεννητριών διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: στις σταθερές κατασκευές και στις πλωτές - αγκυρωμένες κατασκευές. Οι σταθερές κατασκευές εδράζονται απευθείας στον πυθμένα της θάλασσας ενώ οι πλωτές/αγκυρωμένες κατασκευές αγκυρώνονται στη θεμελίωση μέσω προεντεταμένων

τενόντων. Για τους περισσότερους τύπους στήριξης των υπεράκτιων ανεμογεννητριών, η θεμελίωση γίνεται συνήθως με εμπηγνυόμενους μεταλλικούς πασσάλους, ενώ σε μεγαλύτερα βάθη θάλασσας χρησιμοποιούνται εναλλακτικά «φρέατα αναρρόφησης» (suction caissons). Ανεξαρτήτως τύπου ανωδομής, η θεμελίωση θα πρέπει να φέρει τα στατικά φορτία καθώς και τα ανακυκλικά - δυναμικά φορτία που ασκούνται λόγω:

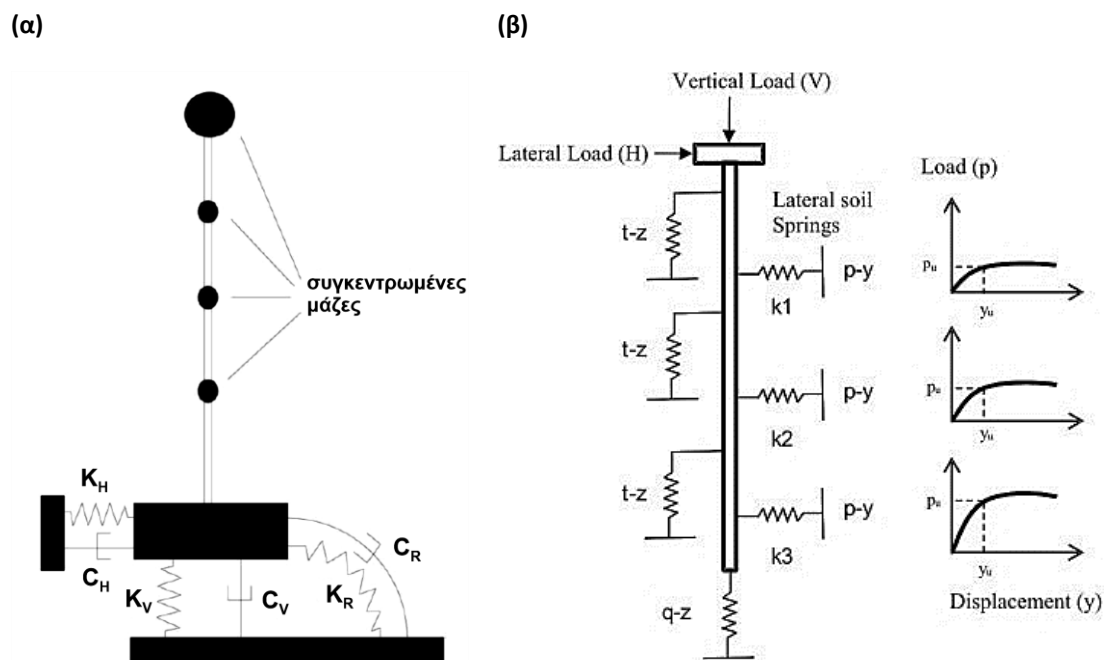
- i. Κυματισμών και ανέμου σε κατάσταση καταιγίδας
- ii. Σεισμικής φόρτισης
- iii. Δονήσεων λόγω λειτουργίας της ανεμογεννήτριας

Η ανακυκλική φόρτιση λόγω περιβαλλοντικών δράσεων (κυματισμοί και άνεμος) σε κατάσταση καταιγίδας έχουν περίοδο αρκετών δευτερολέπτων ($T= 3-15\text{sec}$) και επομένως είναι μεν ανακυκλική αλλά δεν θεωρείται δυναμική φόρτιση. Αντίθετα, τα σεισμικά φορτία ($T= 0.2-0.5\text{sec}$) και οι δονήσεις λειτουργίας (π.χ. $T = 0.005\text{sec}$) έχουν περίοδο μικρότερη του δευτερολέπτου και επομένως αποτελούν δυναμικές φορτίσεις με ανάπτυξη σημαντικών αδρανειακών δράσεων στην ανωδομή και στο έδαφος θεμελίωσης.

Ο ρόλος του γεωτεχνικού μηχανικού στο σχεδιασμό των υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι διπλός: (α) αφενός να διαστασιολογήσει τη θεμελίωση ώστε να εξασφαλίζεται η επάρκεια της έναντι των προαναφερθέντων στατικών και ανακυκλικών – δυναμικών φορτίσεων και (β) αφετέρου να παρέχει στο δομοστατικό μηχανικό τιμές για τα εδαφικά (κατακόρυφα, οριζόντια και στροφικά) μακρο-ελατήρια (K) και τους μακρο-αποσβεστήρες (C), που θα πρέπει να προσαρτηθούν στη βάση της ανεμογεννήτριας, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση του εδάφους και της ανωδομής κατά το δομοστατικό (στατικό και δυναμικό) σχεδιασμό της ανεμογεννήτριας (**Σχήμα 1.1**).

Τα τελευταία 40 χρόνια έχει υπάρξει συστηματική και εκτενής έρευνα στις θεμελιώσεις υπεράκτιων κατασκευών, λόγω κυρίως της εγκατάστασης πληθώρας υπεράκτιων εξεδρών άντλησης πετρελαίου στον Κόλπο του Μεξικό και στη Βόρεια Θάλασσα. Η αποκτηθείσα γνώση έχει αποτυπωθεί σε διάφορες κανονιστικές διατάξεις, όπως αυτές του API (2002) και του DNV (2013), όπου περιγράφονται αναλυτικά μεθοδολογίες στατικής διαστασιολόγησης των πασσάλων θεμελίωσης σε συνεκτικά και μη-συνεκτικά εδάφη, ενώ προτείνονται αναλυτικές μεθοδολογίες προς αντικατάσταση της θεμελίωσης με «ισοδύναμα (κατακόρυφα, οριζόντια και στροφικά) μακρο-ελατήρια», όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.1α**.

Οι διεθνείς κανονισμοί συντάχθηκαν έχοντας κυρίως κατά νου τον σχεδιασμό εξεδρών πετρελαίου σε μη-σεισμικές περιοχές (Κόλπος Μεξικού και Βόρεια Θάλασσα). Επομένως σε αυτή την περίπτωση οι αναλύσεις γίνονται ψευδο-στατικά.



Σχήμα 1.1: Παράδειγμα προσομοίωσης (α) της αλληλεπίδρασης εδάφους-θεμελίωσης-ανωδομής με μακρο-ελατήρια και μακρο-αποσβεστήρες και (β) των εδαφικών αντιδράσεων κατά μήκος του πασσάλου θεμελίωσης με ελατήρια τύπου Winkler.

Οι ανωτέρω συνθήκες όμως αλλάζουν δραστικά με τη μελλοντική εγκατάσταση υπεράκτιων ανεμογεννητριών σε σεισμογενείς περιοχές της Ευρώπης (π.χ. Ελλάδα, Ιταλία) αλλά και του υπόλοιπου κόσμου (π.χ. Καλιφόρνια, Ιαπωνία, Ταιβάν). Σε αυτή την περίπτωση, οι υψίσυχνες σεισμικές δράσεις θα οδηγήσουν σε ανάπτυξη σημαντικής απόσβεσης ενέργειας στη θεμελίωση, της ίδιας τάξης μεγέθους με την απόσβεση της ανωδομής, λόγω (α) της απόσβεσης ακτινοβολίας, (radiation damping) που οφείλεται στη μετάδοση (ακτινοβολία) στο έδαφος των κυμάτων που προκαλεί η ταλάντωση της θεμελίωσης και μεταβάλλεται με την συχνότητα της φόρτισης και (β) της υστερητικής απόσβεσης (hysteretic damping), που οφείλεται στην απώλεια ενέργειας σε κάθε κύκλο δυναμικής φόρτισης λόγω της μη γραμμικής - υστερητικής συμπεριφοράς του εδάφους και είναι ανεξάρτητη από την συχνότητα της φόρτισης, αλλά μεταβάλλεται με τη διατμητική παραμόρφωση που αναπτύσσεται στο έδαφος. Η αγνόηση της απόσβεσης της θεμελίωσης σε αυτές τις περιπτώσεις δεν είναι τεχνικά και οικονομικά δόκιμη, δεδομένου ότι θα οδηγήσει σε υπερ-διαστασιολόγηση της ανωδομής της ανεμογεννήτριας και θα επιβαρύνει σημαντικά το συνολικό κόστος κατασκευής του έργου.

Στη βιβλιογραφία υπάρχει εκτενής έρευνα [π.χ. Gazetas & Dobry (1984), Damgaard et al. (2014), Zania (2014), Karatzia & Mylonakis (2017)] σε σχέση με την απόσβεση ενέργειας πασσάλων και φρεάτων θεμελίωσης, αλλά τα σχετικά αποτελέσματα δεν είναι ακόμη

ώριμα για την άμεση εφαρμογή στη δυναμική ανάλυση της ανωδομής της ανεμογεννήτριας. Συγκεκριμένα, οι εν λόγω έρευνες αφορούν σε εδαφικά ελατήρια και αποσβεστήρες τύπου Winkler, τα οποία αντικαθιστούν την αντίδραση του εδάφους θεμελίωσης κατά μήκος του πασσάλου ή του φρέατος (**Σχήμα 1.1β**). Δεν αφορούν δηλαδή στα μακρο-ελατήρια και στους μακρο-αποσβεστήρες που θα πρέπει να τοποθετηθούν στη βάση της ανωδομής (**Σχήμα 1.1α**), αντί για τον πλήρη τριδιάστατο σχεδιασμό της θεμελίωσης. Τα ζητούμενα μακρο-ελατήρια και μακρο-αποσβεστήρες θα πρέπει να υπολογισθούν ακολούθως κατά περίπτωση, από ολοκλήρωση της αντίδρασης των ελατηρίων και αποσβεστήρων Winkler για δεδομένες μετατοπίσεις κατά μήκος του πασσάλου, οι οποίες δεν είναι εκ των προτέρων γνωστές. Ένας επιπλέον περιορισμός είναι ότι οι σταθερές των αποσβεστήρων Winkler έχουν ληφθεί για γραμμικό ιξωδο-ελαστικό και όχι για μη-γραμμικό υστερητικό έδαφος. Ως εκ τούτου, η απόσβεση ακτινοβολίας λαμβάνεται υπόψη αρκετά συστηματικά, μέσω ανάλυσης διάδοσης σεισμικών κυμάτων, αλλά η προσομοίωση της υστερητικής απόσβεσης ενέργειας είναι ιδιαίτερα προσεγγιστική έως και αυθαίρετη.

1.2 Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας

Ο στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι να μειώσει τις αβεβαιότητες και τον υπερ-συντηρητισμό κατά τον αντισεισμικό (δομοστατικό και γεωτεχνικό) σχεδιασμό υπεράκτιων ανεμογεννητριών, καλύπτοντας τα ανωτέρω κενά στην υπάρχουσα έρευνα και τις σχετικές οδηγίες/κανονισμούς, αναφορικά με την επίδραση της απόσβεσης της θεμελίωσης στην ανωδομή της ανεμογεννήτριας και τον τρόπο βαθμονόμησης των εδαφικών ελατηρίων και αποσβεστήρων τύπου Winkler που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης ανωδομής-θεμελίωσης. Πιο συγκεκριμένα, το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι (α) η ανάδειξη της επίδρασης της αλληλεπίδρασης εδάφους-θεμελίωσης-ανωδομής στην απόκριση της ανωδομής υπεράκτιων ανεμογεννητριών (επιμήκυνση ιδιοπεριόδου ταλάντωσης και αύξηση υστερικής απόσβεσης) και (β) η αξιολόγηση του τρόπου βαθμονόμησης των εδαφικών ελατηρίων και αποσβεστήρων τύπου Winkler που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης ανωδομής-θεμελίωσης. Με αυτόν τον τρόπο οι μελετητές μηχανικοί θα μπορούν να λαμβάνουν υπόψη με ορθότερο τρόπο την ευεργετική επίδραση της απόσβεσης του εδάφους θεμελίωσης στο δομοστατικό σχεδιασμό των υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Κάτι τέτοιο θα οδηγήσει σε μείωση των εντατικών δράσεων στην ανωδομή και κατ' επέκταση το κόστος κατασκευής των υπεράκτιων ανεμογεννητριών,

καθιστώντας πιο βιώσιμες και οικονομικά πιο ελκυστικές τις εν λόγω επενδύσεις με άμεσο κοινωνικό και περιβαλλοντικό όφελος.

1.3 Δομή Διπλωματικής Εργασίας

Συνοπτικά, η δομή της διπλωματικής εργασίας έχει ως ακολούθως:

Στο **Κεφάλαιο 2** πραγματοποιείται εκτενής βιβλιογραφική έρευνα, η οποία εστιάζει στην εύρεση δεδομένων για την προσομοίωση πασσάλων θεμελίωσης με ελατήρια τύπου Winkler .

Στο **Κεφάλαιο 3** πραγματοποιείται εκτενής βιβλιογραφική έρευνα, η οποία εστιάζει στην εύρεση δεδομένων για την προσομοίωση πασσάλων με μακρο-ελατήρια και μακρο-αποσβεστήρες στην κεφαλή τους.

Στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφονται το δομικό σύστημα των ανεμογεννητριών, τα εδαφικά προφίλ που θα εξεταστούν και πραγματοποιείται η διαστασιολόγηση της θεμελίωσής τους.

Στο **Κεφάλαιο 5** περιγράφεται η μεθοδολογία αριθμητικής ανάλυσης που αναπτύχθηκε για την προσομοίωση της απόκρισης των πασσάλων θεμελίωσης των ανεμογεννητριών και παρουσιάζονται των αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζεται η επίδραση των διαφόρων παραμέτρων στην απόκριση του συστήματος μέσω σύγκρισης και αξιολόγησης των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων.

Στο **Κεφάλαιο 7** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα τελικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα Διπλωματική Εργασία και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 2

Βιβλιογραφική Αναδρομή: Προσομοίωση πασσάλων θεμελίωσης με τη μέθοδο «Δοκού επί ελατηριωτού εδάφους»

2.1 Γενικά

Η συνήθης πρακτική για την προσομοίωση της απόκρισης οριζοντίως φορτιζομένου πασσάλου είναι μέσω της χρήσης των καμπυλών φορτίου – μετατόπισης (p - y). Στην προσέγγιση αυτή, ο πάσσαλος προσομοιώνεται ως δοκός και το έδαφος αναπαριστάται ως μια σειρά διακριτών, ασύζευκτων ελατηρίων προσαρμοσμένων σε κομβικά σημεία κατά μήκος του πασσάλου. Τα ελατήρια αυτά, συνδέουν την τοπική οριζόντια αντίσταση, p , με την τοπική οριζόντια μετατόπιση του πασσάλου, y .

Οι καμπύλες p - y έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία στον σχεδιασμό υπεράκτιων έργων για την πρόβλεψη της οριζόντιας αντοχής του πασσάλου σε στατικές αναλύσεις. Το Αμερικανικό Ινστιτούτο Πετρελαίου (API) παρέχει διάφορους τύπους καμπύλων p - y χαρακτηριστικά που μεταβάλλονται μη γραμμικά με την οριζόντια μετατόπιση (y) και το βάθος (z). Αυτές περιλαμβάνουν καμπύλες p - y αντίστοιχες της οριζόντιας απόκρισης, καμπύλες t - z αντίστοιχες της κατακόρυφης αντίστασης και Q - z αντίστοιχες της αντίστασης αιχμής, όπου p , t και Q είναι οι δυνάμεις του ελατηρίου. Οι κανονισμοί IEC 614000, DNV και GL προτείνουν την χρήση των καμπυλών του κώδικα API για τον σχεδιασμό της θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριων. Αυτές οι καμπύλες μπορούν να αναπτυχθούν και μέσω επιτόπου δοκιμών όπως η εκτροπή πασσάλου υποβαλλόμενου σε οριζόντια φορτία και οι δοκιμές CPT.

Παρόλα αυτά, η χρήση των ανωτέρω καμπυλών p - y σε δυναμικές αναλύσεις ενέχει σοβαρούς περιορισμούς. Καταρχάς, οι καμπύλες p - y που χρησιμοποιούνται συνήθως στη πράξη είναι μη-γραμμικές ελαστικές, το οποίο σημαίνει ότι κατά την ανακυκλική φόρτιση, η ίδια καμπύλη ακολουθείται τόσο κατά τη φόρτιση όσο και κατά την αποφόρτιση. Αυτό έχει δύο βασικά μειονεκτήματα. Αρχικά, εάν η θεμελίωση αποφορτιστεί μετά από μία σχετικά

υψηλή φόρτιση, χρησιμοποιείται η εφαπτόμενη στιβαρότητα φόρτισης αντί για την στιβαρότητα αποφόρτισης. Αυτό οδηγεί σε υποεκτίμηση της στιβαρότητας της θεμελίωσης και της θεμελιώδους ιδιοσυχνότητας της ανωδομής. Επιπλέον, δεν λαμβάνεται υπόψη στην προσομοίωση με αυτό τον τρόπο η υστερητική απόσβεση της θεμελίωσης. Ένας επιπλέον περιορισμός των καμπύλων p - γ για δυναμικές φορτίσεις είναι ότι δεν προβλέπουν την απόσβεση ενέργειας ακτινοβολίας, λόγω των κυμάτων που δημιουργεί στο έδαφος η ταλάντωση του πασσάλου.

2.2 Αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού δυναμικών συντελεστών κατανεμημένων ελατήριων και αποσβεστήρων

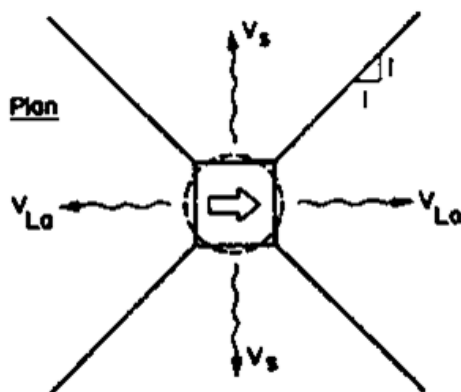
2.2.1 Gazetas & Dobry (1984)

Οι Gazetas & Dobry (1984) ανέπτυξαν μια μεθοδολογία εκτίμησης της οριζόντιας δυναμικής απόκρισης εύκαμπτων πασσάλων σε διαστρωματωμένες εδαφικές αποθέσεις, υπό αρμονική φόρτιση της κεφαλής. Στο πλαίσιο της έρευνας τους εξετάστηκαν τρία διαφορετικά εδαφικά προφίλ: α) μια ομοιογενής στρώση με σταθέρο μέτρο ελαστικότητας, β) μια ανομοιογενής στρώση με γραμμικά μεταβαλλόμενο μέτρο ελαστικότητας και γ) μια ρεαλιστικά διαστρωματωμένη εδαφική απόθεση. Ο πάσσαλος είναι πακτωμένης κεφαλής και τα χαρακτηριστικά των ελατηρίων μπορούν να ορισθούν για διάφορες διατομές κατά μήκος του πασσάλου.

Αρχική παραδοχή της μελέτης τους είναι ο καθορισμός του σχήματος παραμόρφωσης του πασσάλου σε στατική φόρτιση χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της «δοκού επί ελατηριωτού εδάφους». Σε αυτήν η εδαφική απόκριση στα διάφορα βάθη προσομοιώνεται με ανεξάρτητα γραμμικά ελατήρια των οποίων η παραμόρφωση περιγράφεται από καμπύλες p - γ (φορτίου – μετατόπισης) βασισμένες σε επί τόπου δοκιμές. Άλλες μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της συμπεριφοράς των ελατηρίων είναι η μέθοδος συνοριακών στοιχείων, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων ή αξιόπιστες εμπειρικές μεθοδολογίες από κανονισμούς ή την διεθνή βιβλιογραφία.

Δύο παράλληλοι αποσβεστήρες με σταθερές c_r και c_m , συνδεδεμένοι καθ' ύψος στον πάσσαλο, προσομοιώνουν την απόσβεση ενέργειας λόγω ακτινοβολίας και λόγω υστερητικής συμπεριφοράς του εδάφους αντίστοιχα. Ο ισοδύναμος συντελεστής απόσβεσης στην κεφαλή του πασσάλου υπολογίζεται από τις τιμές c_r και c_m των κατανεμημένων αποσβεστήρων σε συνδυασμό με το προφίλ στατικής απόκρισης του πασσάλου. Όσον αφορά την απόσβεση ακτινοβολίας οι Gazetas & Dobry (1984) ανέπτυξαν

ένα προσομοίωμα επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain, **Σχήμα 2.1**), σύμφωνα με το οποίο τα κύματα πίεσης (P) διαδίδονται στα δύο τεταρτημόρια κατά τη διεύθυνση της μετατόπισης, ενώ τα διατμητικά κύματα (S) διαδίδονται στα δύο εγκάρσια τεταρτημόρια. Στο προτεινόμενο προσομοίωμα το κάθε τεταρτημόριο ταλαντώνεται ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα.



Σχήμα 2.1: Προσομοίωμα επίπεδης καταπόνησης των Gazetas & Dobry (1984).

Με βάση τα παραπάνω οι Gazetas & Dobry (1984) κατέληξαν στην παρακάτω σχέση για τον υπολογισμό του συντελεστή της απόσβεσης ακτινοβολίας c_r :

$$\frac{c_r}{4 \cdot B \cdot \rho \cdot V_s} = \left\{ 1 + \left(\frac{3.4}{\pi \cdot (1 + \nu)} \right)^{5/4} \right\} \cdot \left(\frac{\pi}{4} \right)^{3/4} \cdot \alpha^{-1/4} \quad (2.1)$$

Για μικρά βάθη η παραπάνω σχέση μπορεί να αντικατασταθεί από τη σχέση:

$$\frac{c_r}{4 \cdot b \cdot \rho \cdot V_s} \approx 2 \cdot \left(\frac{\pi}{4} \right)^{3/4} \cdot \alpha^{-1/4} \quad (2.2)$$

Σχετικά με την υστερητική απόσβεση, ο υπολογισμός της συνδέεται άμεσα με την εκτίμηση του λόγου υστερητικής απόσβεσης στο έδαφος β , ο οποίος υπολογίζεται ως συνάρτηση της διατμητικής παραμόρφωσης γ_e . Η διατμητική παραμόρφωση γ_e υπολογίζεται συναρτήσει του βάθους z σύμφωνα με τη σχέση:

$$\gamma_e(z) = \frac{1 + \nu}{2.5 \cdot b} \cdot y_d(z) \quad (2.3)$$

όπου:

ν : λόγος Poisson του εδάφους

b : ακτίνα της διατομής του πασσάλου

y_d : δυναμική μετακίνηση του πασσάλου

Στην εξίσωση (2.3) η δυναμική μετακίνηση του πασσάλου y_d μπορεί να αντικατασταθεί από τη στατική μετακίνηση y_s . Ακολούθως, η υστερητική απόσβεση του εδάφους β μπορεί να εκτιμηθεί συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης γ_e από σχετικά διαγράμματα πειραματικών δοκιμών. Οι Gazetas & Dobry πρότειναν την παρακάτω σχέση υπολογισμού του συντελεστή υστερητικής απόσβεσης:

$$c_m = 2 \cdot k \cdot \frac{\beta}{\omega} \quad (2.4)$$

όπου

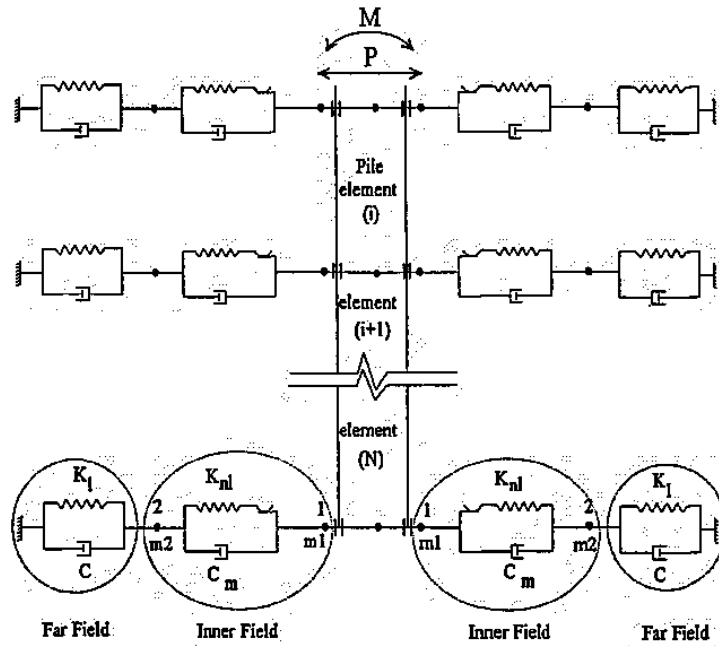
$k = k(z) = p_s(z)/y_s(z)$: ο λόγος της τοπικής στατικής εδαφικής απόκρισης ανά μέτρο πασσάλου $p_s(z)$ προς την απόκριση του πασσάλου $y_s(z)$

ω : συχνότητα διέγερσης σε rad/sec.

Στη συνέχεια βασιζόμενοι στην παραπάνω ανάλυση οι Gazetas & Dobry (1984) υπολόγισαν δυναμικούς συντελεστές ελατηρίων και αποσβεστήρων στην κεφαλή του πασσάλου, όπως θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο (3.2.1). Από εφαρμογή της μεθόδου τους στα τρία εδαφικά προφίλ που προαναφέρθηκαν και σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με τα αντίστοιχα ακριβών δυναμικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων, οι Gazetas & Dobry κατέληξαν ότι η μέθοδος που προτείνουν είναι αξιόπιστη και πολλά υποσχόμενη λόγω της απλότητάς της.

2.2.2 El Naggar & Novak (1996)

Οι El Naggar & Novak (1996) μελέτησαν την απόκριση οριζοντίως φορτιζομένων πασσάλων σε αρμονική δυναμική φόρτιση. Το προσομοίωμα τους βασίζεται στη μέθοδο προσομοίωσης «δοκού επί ελατηριωτού εδάφους» (Winkler) για μη γραμμικό και πολύστρωτο έδαφος και λαμβάνει υπόψη την ολίσθηση και την αποκόλληση στη διεπιφάνεια πασσάλου – περιβάλλοντος εδάφους. Η απώλεια ενέργειας στο έδαφος, λόγω των διάφορων μορφών απόσβεσης, λαμβάνεται επίσης υπόψη. Τα επιμέρους στοιχεία του προσομοιώματος φαίνονται στο **Σχήμα 2.2** που ακολουθεί:



Σχήμα 2.2: Στοιχεία του προτεινόμενου προσομοιώματος για μη γραμμική δυναμική ανάλυση οριζοντίως φορτιζομένων πασσάλων (El Naggar & Novak 1996)

Για κάθε εδαφική στρώση, το προσομοίωμα του εδάφους χωρίζεται σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος (Inner field) είναι ένα προσομοίωμα κοντινού πεδίου με έντονη μη γραμμικότητα. Το δεύτερο μέρος (Far field) είναι ένα προσομοίωμα μακρινού πεδίου που αφορά τη διάδοση των κυμάτων μακριά από τον πάσσαλο και στο οποίο η συμπεριφορά του εδάφους θεωρείται γραμμική ιξωδοελαστική. Στο προσομοίωμα του Σχήματος (Σχήμα 2.2) οι αντιδράσεις του εδάφους στις δύο πλευρές του πασσάλου προσομοιώνονται ξεχωριστά ώστε να υπολογισθούν οι συνθήκες έντασης και ασυνέχειας και στις δύο πλευρές καθώς η διεύθυνση της φόρτισης αλλάζει.

Προσομοίωμα κοντινού πεδίου: Η αντίδραση του εδάφους προσομοιώνεται μέσω ενός μη γραμμικού ελατηρίου με στιβαρότητα σύμφωνα με τους Novak & Sheta (1980) ίση με:

$$k_{nl} = \frac{8 \cdot \pi \cdot G_m \cdot (1 - \nu) \cdot (3 - 4 \cdot \nu) \cdot \left[\left(\frac{r_o}{r_1} \right)^2 + 1 \right]}{\left(\frac{r_o}{r_1} \right)^2 + (3 - 4 \cdot \nu)^2 \cdot \left[\left(\frac{r_o}{r_1} \right)^2 + 1 \right] \cdot \ln \left(\frac{r_o}{r_1} \right) - 1} \quad (2.5)$$

όπου r_0 και r_1 είναι η εσωτερική και η εξωτερική ακτίνα του εσωτερικού πεδίου, ν ο λόγος Poisson και G_m το απομειωμένο μέτρο διάτμησης ίσο με:

$$G_m = G_{\max} \cdot (1 - \eta) \quad (2.6)$$

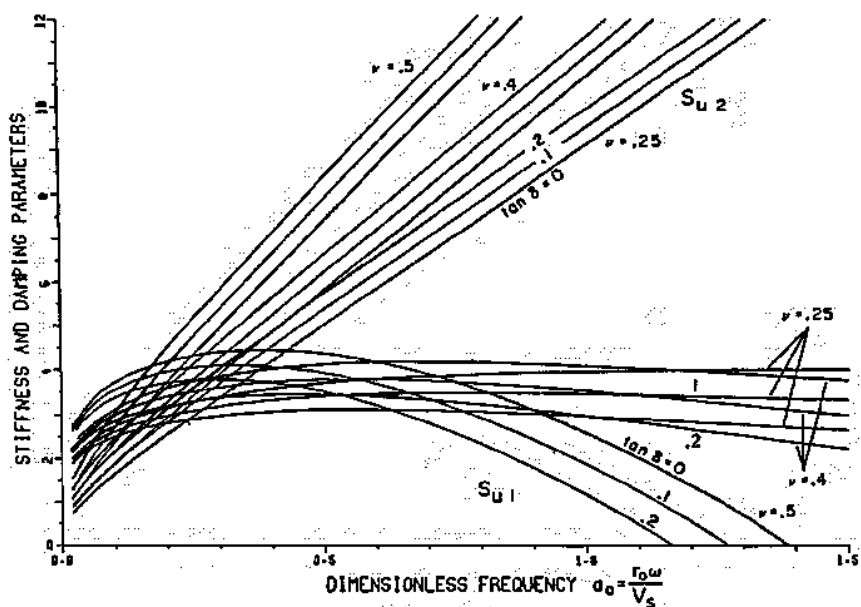
όπου $\eta = P/P_u$, με P το οριζόντιο φορτίο στο ελατήριο και P_u η οριακή αντίσταση του ελατηρίου σύμφωνα με τις γνωστές σχέσεις του API. Ο συντελεστής c_m αντιπροσωπεύει την υστερητική απόσβεση του εδάφους και πρέπει να επιλεγεί κατάλληλα.

Προσομοίωμα μακρινού πεδίου: Οι σταθερές των ελατηρίων και των αποσβεστήρων δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$K_1 = G \cdot S_{u1}(\nu) \quad (2.7)$$

$$c = \frac{G \cdot r_o}{V_s} \cdot S_{u2}(a_o = 0.5, \nu) \quad (2.8)$$

όπου οι συντελεστές S_{u1} και S_{u2} λαμβάνονται από το διάγραμμα που ακολουθεί (Σχήμα 2.3) συναρτήσει του λόγου Poisson (ν) και της αδιάστατης κύριας συχνότητας ($a_o = \omega r_o / V_s$).



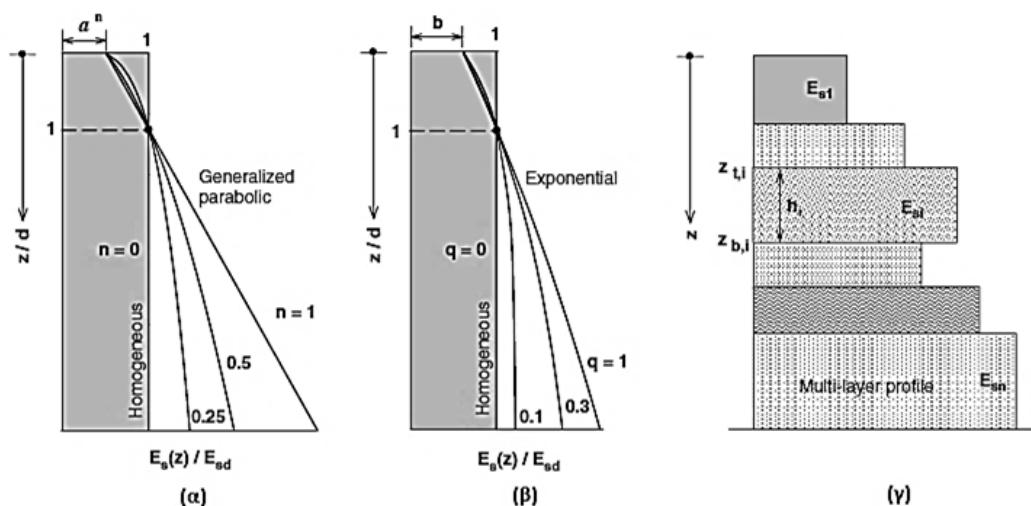
Σχήμα 2.3: Μεταβολή των παραμέτρων S_{u1} και S_{u2} βάσει συντελεστή Poisson (ν) και αδιάστατης κύριας συχνότητας (a_o) (Novak et al. 1978).

Τα αποτελέσματα εφαρμογής του προσομοιώματος βρέθηκαν σε πολύ καλή συμφωνία τόσο με δεδομένα από μετρήσεις πεδίου όσο και με πιο ακριβείς λύσεις στο πεδίο των συχνοτήτων (Nogami 1980).

2.2.3 Karatzia & Mylonakis (2017)

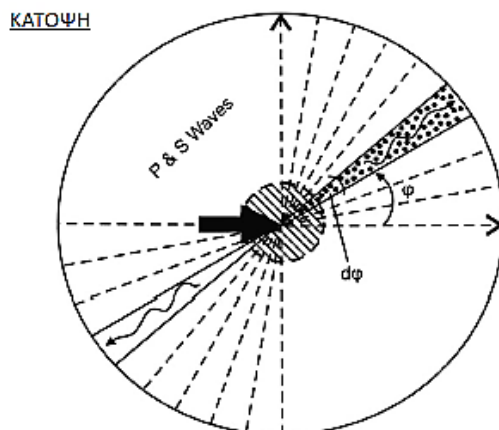
Οι Karatzia & Mylonakis (2017) ανέπτυξαν αδιάστατες σχέσεις κλειστής μορφής για τον προσδιορισμό των δυναμικών συντελεστών κατανεμημένων ελατηρίων (Winkler) και αποσβεστήρων. Η ανάλυση έγινε για πάσσαλο ο οποίος φορτίζεται οριζόντια με συγκεντρωμένη δύναμη ή/και ροπή στην κεφαλή του και τρεις τύπους εδάφους με

διαφορετική ανομοιογένεια με το βάθος (**Σχήμα 2.4**). Ο πάσσαλος θεωρείται ως γραμμική ιξωδο-ελαστική συμπαγής κυλινδρική δοκός διαμέτρου d , μέτρου ελαστικότητας E_p και με γραμμική υστερητική απόσβεση β_p . Επιπλέον, θεωρείται ότι ο πάσσαλος είναι αρκετά μακρύς ώστε να παραμορφώνεται μόνο μέχρι το (γνωστό στη βιβλιογραφία ως) ενεργό μήκος L_a , το οποίο είναι τυπικά της τάξεως των 10 διαμέτρων (Kulhemeyer 1979; Randolph 1981). Το έδαφος προσομοιώνεται ως γραμμικό ιξωδοελαστικό μέσου μέτρου ελαστικότητας Young E_s , λόγου Poisson ν και με γραμμική υστερητική απόσβεση β_s .



Σχήμα 2.4: Μεταβολή της σιβαρότητας του εδάφους με το βάθος: (α) προφίλ με παραβολική αύξηση σιβαρότητας (β) προφίλ με εκθετική αύξηση σιβαρότητας (γ) γενικό πολυστρωματικό προφίλ (Karatzia & Mylonakis 2017)

Για τον υπολογισμό των συντελεστών απόσβεσης ακτινοβολίας των κατανεμημένων αποσβεστήρων κατά μήκος του πασσάλου αναπτύχθηκε ένα νέο προσομοίωμα διάδοσης κυμάτων στο έδαφος, το οποίο ονομάστηκε προσομοίωμα απειροστών κυκλικών τομέων και παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.5**. Σύμφωνα με αυτό, το έδαφος διαιρείται σε άπειρο αριθμό λεπτών ανεξάρτητων κυκλικών τομέων, κάθε ένας από τους οποίους αποκρίνεται ανεξάρτητα από τους υπόλοιπους στη διάδοση κυμάτων P και S .

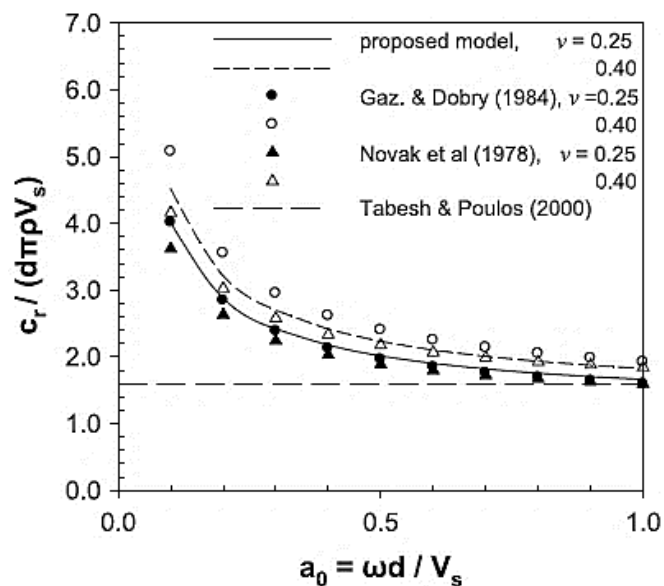


Σχήμα 2.5: Προσομοίωμα απειροστών κυκλικών τομών (Karatzia & Mylonakis 2017)

Βάσει του παραπάνω προσομοιώματος, ο συντελεστής απόσβεσης ακτινοβολίας σε έδαφος χωρίς άλλη πηγή απόσβεσης υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση για εύρος αδιάστατης κυκλικής συχνότητας $0.1 < \alpha_o < 1$:

$$\frac{c_r}{d \cdot \pi \cdot \rho_s \cdot V_s} = \left[0.25 + 0.8 \cdot \left(\frac{V_s}{V_c} \right)^{-1} \right] \cdot a_o^{-0.4} \quad (2.9)$$

Σύμφωνα με τους Karatzia and Mylonakis (2017) το προσομοίωμα αυτό δίνει πιο ορθά αποτελέσματα από τα ήδη υπάρχοντα της βιβλιογραφίας, καθώς ενσωματώνει με πιο ορθό τρόπο την επιρροή της ελεύθερης επιφάνειας θεωρώντας ότι η κατακόρυφη δυναμική τάση σ_z είναι μηδενική ενώ ταυτόχρονα η αντίστοιχη δυναμική παραμόρφωση ϵ_z είναι διάφορη του 0. Μέσω αυτής της θεώρησης οδηγεί σε λύσεις που δεν εξαρτώνται έντονα από το λόγο Poisson (ν), όπως επιβεβαιώνουν δημοσιευμένες αριθμητικές λύσεις (Veletsos & Younan 1994, Anoyatis & Mylonakis 2012). Επίσης, καλή συμφωνία προκύπτει από τη σύγκριση των προβλέψεων του προσομοιώματος αυτού με ήδη υπάρχοντα, τόσο αριθμητικά (Novak et al. 1978; Tabesh & Poulos 2000) όσο και αναλυτικά (Gazetas & Dobry 1984), όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.6**.



Σχήμα 2.6: Σύγκριση των αποτελεσμάτων του προτεινόμενου προσομοιώματος με αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία (Karatzia & Mylonakis 2017)

Για τον υπολογισμό των συντελεστών στιβαρότητας των κατανεμημένων ελατηρίων κατά μήκος του πασσάλου θεωρείται για το εδαφικό προφίλ με την παραβολική αύξηση της στιβαρότητας κατανομή με το βάθος σύμφωνα με τη σχέση:

$$E_s(z) = E_{sd} \cdot [a + (1-a) \cdot z/d]^n \quad (2.10)$$

όπου z = βάθος, a και n = αδιάστατες παράμετροι ανομοιογένειας και E_{sd} = μέτρο Young του εδάφους σε βάθος μια διαμέτρου d ($z=d$).

Τότε οι συντελεστές στιβαρότητας των κατανεμημένων ελατηρίων κατά μήκος του πασσάλου υπολογίζονται από τη σχέση:

$$k(z) = k_d \cdot [a + (1-a) \cdot z/d]^n \quad (2.11)$$

$$k_d = \delta \cdot E_{sd} \quad (2.12)$$

όπου k_d = τιμή της σταθεράς του ελατηρίου σε βάθος μια διαμέτρου d ($z=d$)

Όσον αφορά στον αδιάστατο συντελεστή δ αναπτύχθηκαν από τους Karatzia and Mylonakis (2017) αναλυτικές σχέσεις σύμφωνα με τις οποίες:

$$\delta = \frac{2 \cdot \pi \cdot \eta_u^2}{1 + \nu} \cdot \left\{ \ln \left[\eta_u \cdot \left(\frac{4}{a_c} \right)^{1 + \eta_u^2} \right] - \gamma \cdot (1 + \eta_u^2) \right\}^{-1} \quad (2.11)$$

όπου $\eta_u = [(2-\nu)/(1-\nu)]^{1/2}$ = συντελεστής συμπίεστότητας, $\gamma = 0.577$ = αριθμός Euler και α_c = αδιάστατη παράμετρος που αφορά τη μεταβολή της μετακίνησης του πασσάλου με το βάθος και δίνεται από τη σχέση:

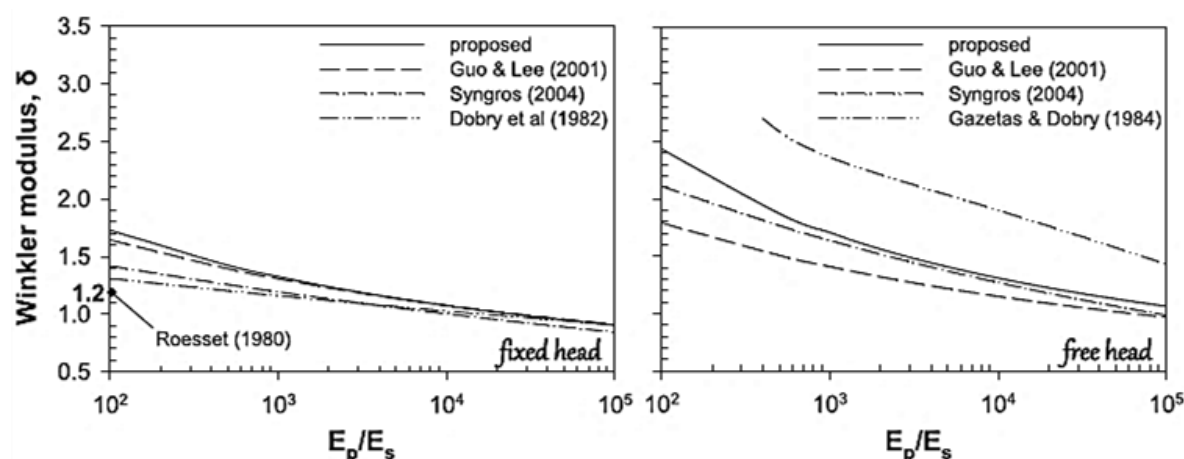
$$\alpha_c = \chi_\delta \cdot (E_p/E_s)^{n_\delta} \quad (2.12)$$

όπου οι τιμές των συντελεστών χ_δ και n_δ δίνονται στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 2.1), για διάφορα είδη εδαφικών προφίλ και συνοριακών συνθηκών στην κεφαλή του πασσάλου.

Πίνακας 2.1: Παράμετροι υπολογισμού της παραμέτρου α_c (Karatzia & Mylonakis 2017)

Εδαφικό προφίλ	χ_δ		n_δ
	Πακτωμένη κεφαλή	Ελεύθερη κεφαλή	
Ομογενές	$\sqrt{\frac{8}{3}} * \pi^{-0,25} = 1.227$	$\sqrt{8} * \pi^{-0,25} = 2.125$	-0.250
Εκθετικό	1.340	2.265	-0.230
Παραβολικό	1.428	2.272	-0.222
Γραμμικό	$\sqrt{\frac{8}{3}} = 1.633$	$\sqrt{6} = 2.449$	-0.200

Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης σχέσης τόσο με διαθέσιμες αναλυτικές σχέσεις από τη βιβλιογραφία (Dobry et al. 1982; Gazetas & Dobry 1984) όσο και με αποτελέσματα αριθμητικών λύσεων (Syngros 2004, Guo & Lee 2001). Όπως είναι εμφανές προκύπτει καλή συμφωνία μεταξύ τους.

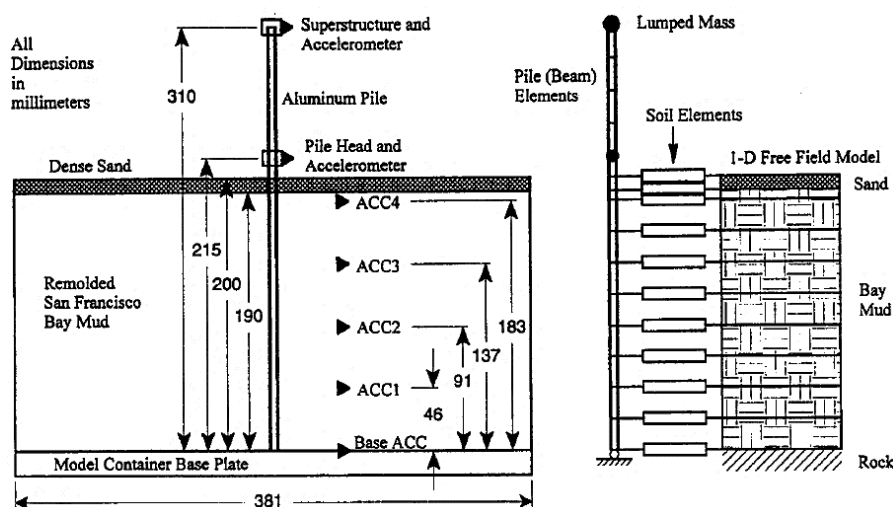


Σχήμα 2.7: Σύγκριση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης σχέσης υπολογισμού του δ με αποτελέσματα σχέσεων από τη βιβλιογραφία αλλά και αριθμητικών αναλύσεων (Karatzia & Mylonakis 2017)

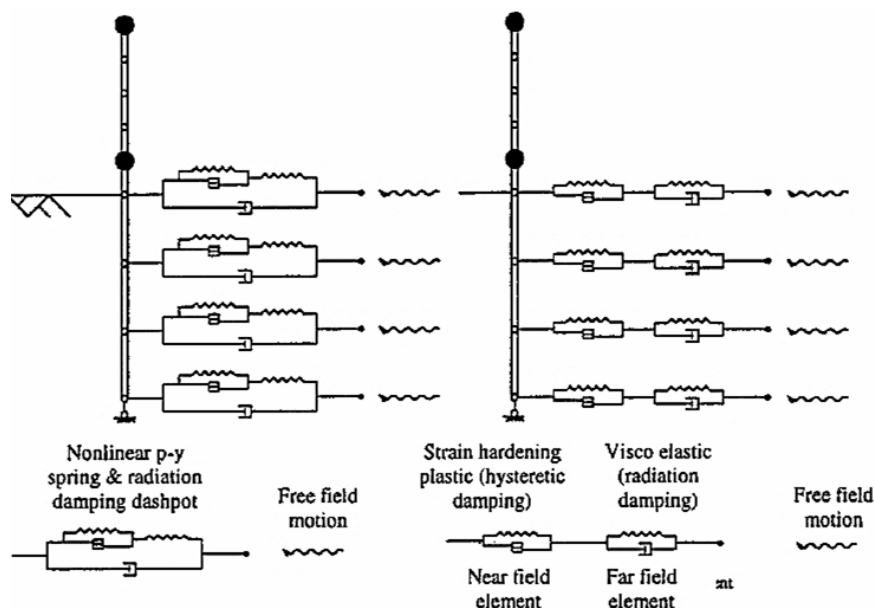
2.3 Ανάλυση πασσάλων θεμελίωσης με τη μέθοδο «δοκού επί ελατηριωτού εδάφους»

2.3.1 Wang et al (1998)

Οι Wang et al. (1998) διερεύνησαν την επιρροή της διάταξης των αποσβεστήρων ακτινοβολίας στο προσομοίωμα της «δοκού επί (μη γραμμικού) ελατηριωτού εδάφους» προσομοιώνοντας ένα πείραμα φυγοκεντριστή (Chacko 1994) με τρία διαφορετικά λογισμικά αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής. Συγκεκριμένα, τα πειράματα φυγοκεντριστή αναφέρονται στη σεισμική απόκριση συστήματος πασσάλου– ανωδομής θεμελιωμένου σε κανονικά στερεοποιημένη άργιλο που καλύπτεται από μια επιφανειακή κρούστα πυκνής άμμου. Σε πρωτότυπη κλίμακα, ο πάσσαλος ήταν χαλύβδινος κοίλης κυλινδρικής διατομής, διαμέτρου 31cm, πάχους 1cm και μήκους 9.5m, ενώ στη βάση του προσομοιώματος επιβλήθηκαν διάφορες πραγματικές σεισμικές διεγέρσεις. Στο **Σχήμα 2.8** παρουσιάζεται η διάταξη του πειράματος φυγοκεντριστή (Chacko 1994) καθώς και το αντίστοιχο αριθμητικό προσομοίωμα των Wang et al. (1998).



Σχήμα 2.8: (α) Προσομοίωμα δοκιμών φυγοκεντριστή και (β) υπολογιστικό προσομοίωμα (Wang et al. 1998).



Σχήμα 2.9: Προσομοίωμα εδάφους-πασσάλου-ανωδομής α) με παράλληλη σύνδεση β) σε σειρά (Wang et al. 1998).

Στις αναλύσεις των Wang et al. (1998) χρησιμοποιήθηκαν μη γραμμικά εδαφικά ελατήρια για την προσομοίωση της υστερητικής απόσβεσης και γραμμικώς ιξωδο-ελαστικά ελατήρια για την προσομοίωση της απόσβεσης ακτινοβολίας. Εξετάστηκαν δύο διαφορετικές διατάξεις των ιξωδο-ελαστικών ελατηρίων: (α) παράλληλα και (β) σε σειρά με τα αντίστοιχα υστερητικά ελατήρια, όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.9**.

Για τις αριθμητικές αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν 2 εμπορικά λογισμικά (PAR και DRAIN-2D) καθώς και ένα λογισμικό (NONSPS) που έχει αναπτυχθεί για ερευνητικούς σκοπούς. Οι αναλύσεις με την «παράλληλη» διάταξη (α) πραγματοποιήθηκαν με όλα τα λογισμικά, ενώ οι αναλύσεις με την διάταξη «σε σειρά» πραγματοποιήθηκαν μόνο με το λογισμικό DRAIN-2D. Και στα τρία λογισμικά, χρησιμοποιήθηκαν οι προτεινόμενες καμπύλες $p - \gamma$ του Matlock (1970) για την άργιλο και των Reese et al. (1974) για την άμμο. Στο λογισμικό PARS η αποφόρτιση θεωρείται γραμμικώς ελαστική, στο NONSPS η φόρτιση - αποφόρτιση γίνεται σύμφωνα με το νόμο του Masing, ενώ στο DRAIN-2D η καμπύλη $p-\gamma$ προσεγγίζεται με μια σειρά δι-γραμμικών ελατηρίων επιτρέποντας έτσι την ανάπτυξη πλαστικών παραμορφώσεων κατά την αποφόρτιση. Όσον αφορά την απόσβεση ακτινοβολίας, χρησιμοποιήθηκε το μονοδιάστατο προσομοίωμα των Berger et al. (1977) που ορίζει συντελεστή αποσβεστήρα ίσο με :

$$c = 2 \cdot B \cdot \rho \cdot (V_p + V_s) \quad (2.13)$$

όπου B η διάμετρος του πασσάλου, ρ η πυκνότητα του εδάφους και V_s , V_p η ταχύτητα διάδοσης διατμητικών και διαμήκων κυμάτων αντίστοιχα. Σε περιπτώσεις αστράγγιστης ανάλυσης σε αργίλους, όπου η ταχύτητα V_p παίρνει πολύ μεγάλες τιμές με αποτέλεσμα τον υπολογισμό μη ρεαλιστικών τιμών απόσβεσης, η παραπάνω εξίσωση τροποποιείται ως εξής:

$$c = 4 \cdot B \cdot \rho \cdot V_s \quad (2.14)$$

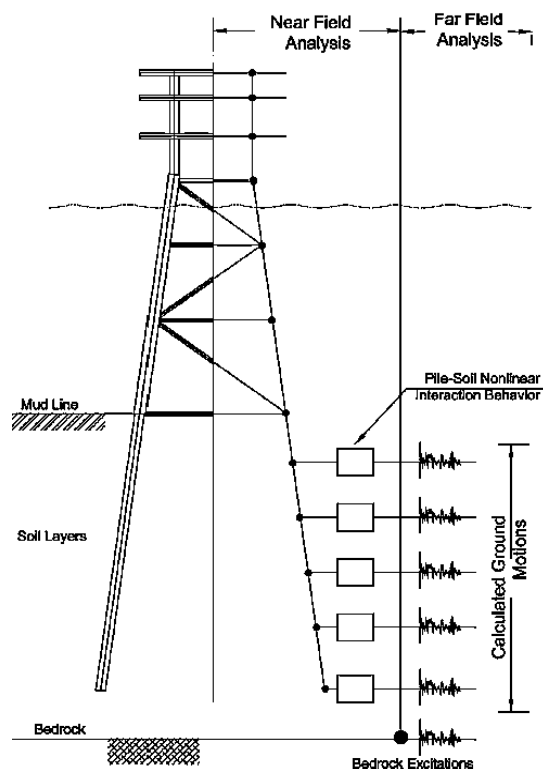
Η σεισμική απόκριση του εδάφους στο ελεύθερο πεδίο υπολογίστηκε μέσω ισοδύναμων γραμμικών αναλύσεων (για τις αναλύσεις στα λογισμικά PARS και DRAIN-2D ή μη γραμμικών αναλύσεων (για το λογισμικό NONSPS) και εισήχθησαν σαν επιβαλλόμενη μετατόπιση στα ελατήρια.

Η σύγκριση των αναλύσεων για τις δύο διατάξεις με τα αποτελέσματα του πειράματος έδειξε ότι η χρήση διάταξης «σε σειρά» προσομοιώνει πιο ρεαλιστικά την σεισμική κίνηση τόσο στην κορυφή του πασσάλου όσο και στην ανωδομή. Συγκεκριμένα, στην «παράλληλη» διάταξη τα φάσματα απόκρισης της ανωδομής υποεκτιμούν τόσο το μέγεθος των φασματικών επιταχύνσεων όσο και την ιδιοπερίοδο της κατασκευής. Σύμφωνα με τους Συγγραφείς, το γεγονός αυτό οφείλεται στις πολύ μεγάλες και μη-ρεαλιστικές δυνάμεις απόσβεσης ακτινοβολίας που αναπτύσσονται όταν το έδαφος πλαστικοποιείται, δεδομένου ότι οι συντελεστές απόσβεσης ακτινοβολίας προέρχονται από ελαστικές θεωρήσεις και δεν λαμβάνουν υπόψη τον εν λόγω μηχανισμό. Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με διπλάσια φέρουσα ικανότητα του εδάφους σε οριζόντια φόρτιση p_{ult} και παρατηρήθηκε ότι τα αποτελέσματα με την «παράλληλη» διάταξη δεν διαφοροποιήθηκαν παρά την αλλαγή των καμπύλων p - γ , καταδεικνύοντας ένα πρόσθετο μειονέκτημα της «παράλληλης» διάταξης. Σύμφωνα με τους Συγγραφείς, η διάταξη «σε σειρά» είναι πιο ρεαλιστική καθώς το έδαφος κοντά στον πάσσαλο παρουσιάζει έντονα μη-γραμμική συμπεριφορά (πλαστική ζώνη), ενώ στο ελεύθερο πεδίο το έδαφος συμπεριφέρεται γραμμικώς ελαστικά.

2.3.2 El Nagggar et al. (2005)

Οι El Nagggar et al. (2005), χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της «δοκού επί ελατηριώτου εδάφους», ανέπτυξαν μια μεθοδολογία απλοποιημένης εκτίμησης της οριζόντιας σεισμικής απόκρισης εύκαμπτων πασσάλων σε πολύστρωτες εδαφικές αποθέσεις η οποία να μπορεί να χρησιμοποιηθεί με διαθέσιμα εμπορικά λογισμικά. Η εν λόγω μεθοδολογία παρουσιάστηκε για την περίπτωση μίας υπεράκτιας πλατφόρμας εξόρυξης πετρελαίου η οποία θεμελιώνεται με πασσάλους και υποβάλλεται σε σεισμική διέγερση στο βραχώδες υπόβαθρο (**Σχήμα 2.10**) και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αντίστοιχες μετρήσεις από

δοκιμές φυγοκεντριστή που πραγματοποιήθηκαν στο Πανεπιστήμιο UC Davis (Wilson et al. 1997).



Σχήμα 2.10: Υπολογιστικό προσομοίωμα των μη γραμμικών ανάλυσεων σεισμικής απόκρισης υπεράκτιας πλατφόρμας (El Naggar et al. 2005).

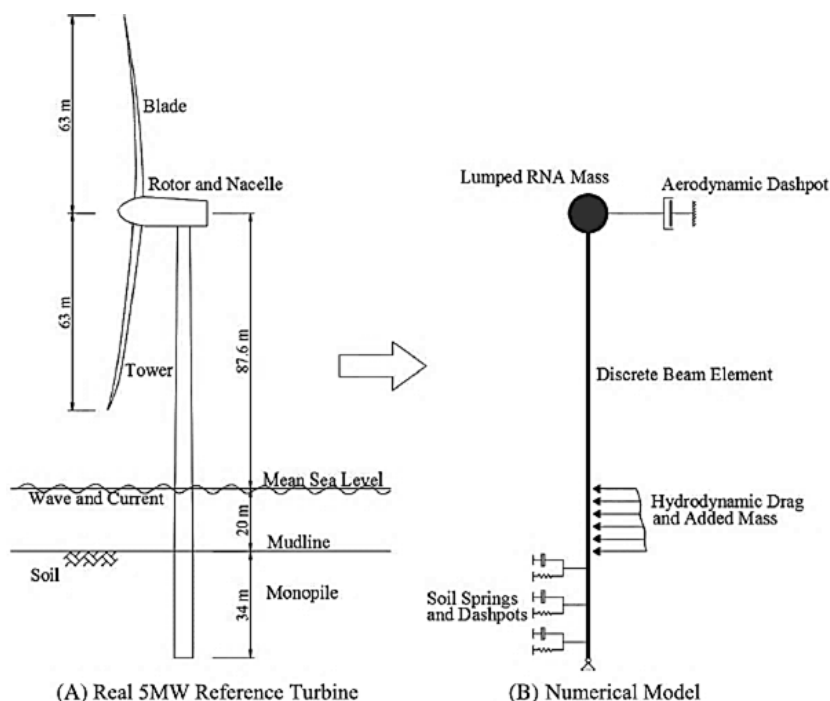
Για την ανάλυση της οριζόντιας απόκρισης του πασσάλου χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων ANSYS. Η προσομοίωση του πασσάλου έγινε με στοιχεία δοκού κοίλης κυλινδρικής διατομής (pipe elements) και απόσβεση τύπου Rayleigh. Το έδαφος προσομοιώθηκε με μια παράλληλη διάταξη μη γραμμικών ελατηρίων και γραμμικών αποσβεστήρων ακτινοβολίας. Για τα μη γραμμικά ελατήρια χρησιμοποιήθηκαν οι στατικές καμπύλες p - γ , που προτείνονται από τον κανονισμό API (2002), ενώ η σταθερά του αποσβεστήρα υπολογίστηκε από την Εξ. (2.14) των Berger et al. (1977). Μεταξύ του πασσάλου και της διάταξης ελατηρίων και αποσβεστήρων τοποθετήθηκαν στοιχεία διεπιφάνειας που αναπαριστούν την αποκόλληση του εδάφους από τον πάσσαλο και τη δημιουργία κενού. Η σεισμική κίνηση στο ελεύθερο πεδίο εκτιμήθηκε μέσω μονοδιάστατων μη-γραμμικών αναλύσεων σεισμικής απόκρισης και εισάχθηκε ως επιβαλλόμενες χρονοϊστορίες μετακίνησης σε κάθε ελατήριο.

Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα των Davis (Wilson et al. 1997) και παρατηρήθηκε καλή συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται

μεγαλύτερες τιμές απόσβεσης για τον πάσσαλο, από 3-10%, έτσι ώστε να προσομοιώνεται η απώλεια ενέργειας που συμβαίνει από άλλους παράγοντες στο έδαφος και δεν μπορούν να προσομοιωθούν με το συγκεκριμένο τρόπο (π.χ. η αντίσταση των αργίλων σε μετακινήσεις [drag resistance]).

2.3.3 Chen & Duffour (2018)

Οι Chen & Duffour (2018) εκτίμησαν μέσω αριθμητικών αναλύσεων την επιμέρους συνεισφορά στην συνολική απόσβεση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών της αεροδυναμικής και υδροδυναμικής απόσβεσης, καθώς και της απόσβεσης της ανωδομής και της θεμελίωσης. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό FAST (Jonkman & Buhl 2005) που πραγματοποιεί υδρο-αερο-ελαστο-δυναμικές προσομοιώσεις για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες κάτω από φορτία ανέμου και κυμάτων. Στο **Σχήμα 2.11** παρουσιάζεται η διάταξη της προσομοίωσης. Ο υπολογισμός της απόσβεσης πραγματοποιήθηκε ανεξάρτητα για την κάθε πηγή απόσβεσης (άνεμος, κυματισμοί, κατασκευή, θεμελίωση) και η συνολική απόσβεση προκύπτει ως το άθροισμα όλων των επιμέρους συντελεστών απόσβεσης.

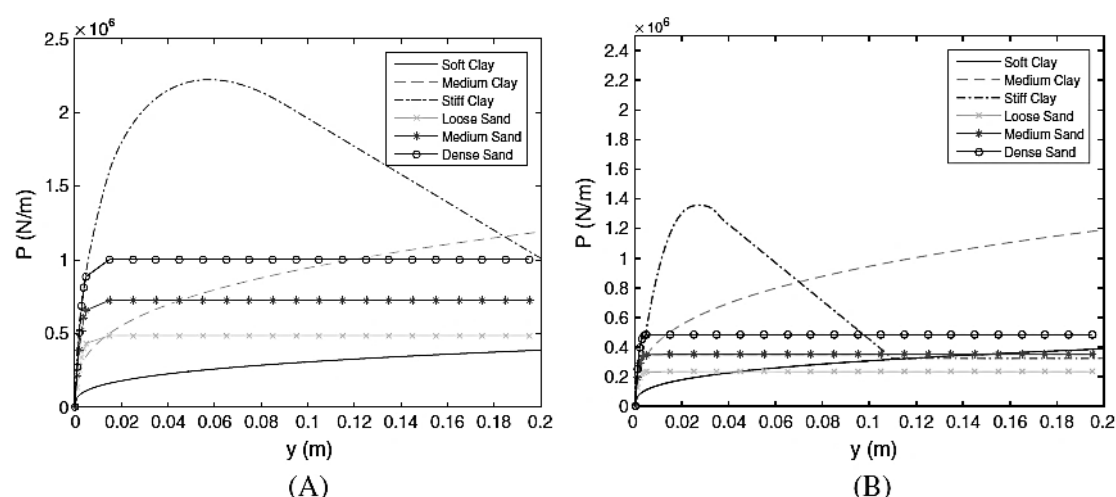


Σχήμα 2.11: Διάταξη προσομοίωσης στο πρόγραμμα FAST (Chen & Duffour 2018)

Για την εκτίμηση της απόσβεσης της θεμελίωσης, χρησιμοποιήθηκε παράλληλη διάταξη οριζόντιων μη-γραμμικών ελατηρίων για την υστερητική απόσβεση και γραμμικών αποσβεστήρων για την απόσβεση ακτινοβολίας κατά μήκος του πασσάλου. Ο συντελεστής

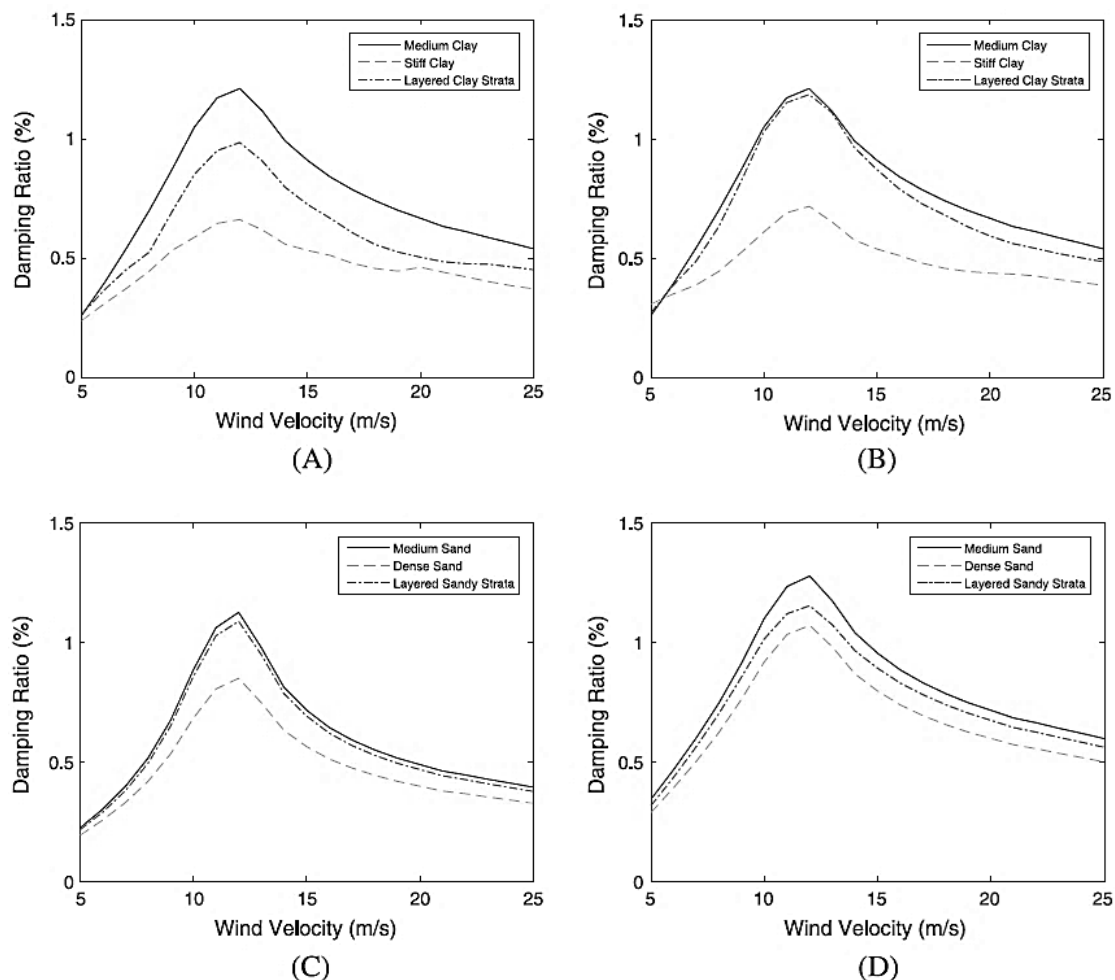
απόσβεσης προέκυψε από την Εξ. (2.5) των Gazetas & Dobry (1984). Η εκτίμηση του λόγου υστερητικής απόσβεσης του εδάφους β , που υπεισέρχεται στην Εξ. (2.5), προέκυψε με χρήση των καμπυλών $\beta - \gamma$ του Darendeli (2001). Για τους συντελεστές στιβαρότητας των ελατηρίων χρησιμοποιήθηκαν, για λόγους σύγκρισης, τόσο οι στατικές όσο και οι ανακυκλικές καμπύλες $p-\gamma$, των κανονισμών DNV και API.

Για την διερεύνηση της συνεισφοράς της απόσβεσης του εδάφους εξετάστηκαν έξι διαφορετικά εδαφικά προφίλ. Πιο συγκεκριμένα, τα τέσσερα εδαφικά προφίλ ήταν ομοιόμορφα με το βάθος (μεσαίας στιφρότητας άργιλος, στιφρή άργιλος, μεσαίας πυκνότητας άμμος και πυκνή άμμος), ενώ στα δύο υπόλοιπα προφίλ (ένα αμμώδες και ένα αργιλώδες) υπήρχαν τρεις εδαφικές στρώσεις με αυξανόμενες ιδιότητες με το βάθος. Στο **Σχήμα 2.12** παρουσιάζονται οι στατικές (**Σχήμα 2.12α**) και οι ανακυκλικές (**Σχήμα 2.12β**) καμπύλες $p-\gamma$ για κάθε εξεταζόμενο εδαφικό υλικό. Όπως φαίνεται από το **Σχήμα 2.12**, η μορφή των δύο τύπων καμπυλών προκύπτει παρόμοια, αν και με τη χρήση των ανακυκλικών καμπυλών η ανάλυση οδηγεί σε υψηλότερες δυνάμεις.



Σχήμα 2.12: (Α) Στατικές και (Β) ανακυκλικές καμπύλες $p - \gamma$ για τα εξεταζόμενα εδαφικά προφίλ (Chen & Duffour 2018)

Σε κάθε προσομοίωση η εδαφική απόσβεση υπολογιζόταν για μέση ταχύτητα ανέμου από 5 έως 25 m/sec, με χρήση χρονοϊστοριών ώθησης ανέμου που παρέχονται από το πρόγραμμα FAST. Προκειμένου να αποφευχθεί το στοχαστικό στοιχείο των χρονοϊστοριών, κάθε φόρτιση ανέμου ανάχθηκε σε μία μέση ώθηση, η οποία επιβλήθηκε στην κορυφή του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων ως στατική φόρτιση. Με αυτό τον τρόπο, η εδαφική απόσβεση υπολογίστηκε από την αποσβενόμενη ταλάντωση, που ακολούθησε τις αρχικά επιβαλλόμενες συνθήκες. Στο **Σχήμα 2.13** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τα διάφορα εδαφικά προφίλ για κάθε τύπο καμπύλης $p-\gamma$.



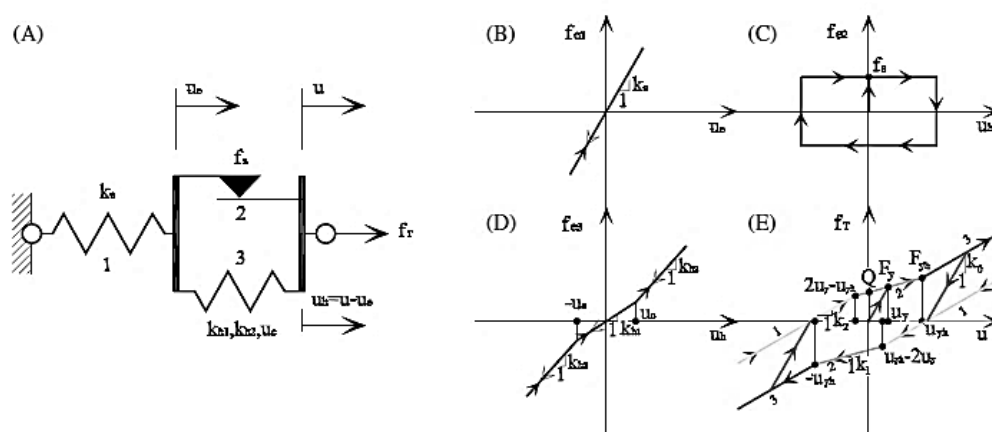
Σχήμα 2.13: Εδαφική απόσβεση συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου: για (A) αργιλικά προφίλ και στατικές καμπύλες ρ - γ , (B) αργιλικά προφίλ και ανακυκλικές καμπύλες ρ - γ , (C) αμμώδη προφίλ και στατικές καμπύλες ρ - γ και (D) αμμώδη προφίλ και ανακυκλικές καμπύλες ρ - γ (Chen & Duffour 2018)

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα η εδαφική απόσβεση κυμαίνεται από 0.2 – 1.3 % και εξαρτάται άμεσα από την στιβαρότητα του εδάφους, τιμές οι οποίες είναι συμβατές και με άλλες παρατηρήσεις [Tarp-Johansen et al. (2009), Damgaard et al. (2013), Carswell et al. (2015)]. Μια παρατήρηση, στην οποία κατέληξαν, η οποία δεν είχε διερευνηθεί προηγουμένως, είναι ότι αυξανόμενης της ώθησης η εδαφική απόσβεση αυξάνεται ενώ η στιβαρότητα μειώνεται, οδηγώντας δευτερογενώς σε αυξημένο λόγο απόσβεσης. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται εξαιτίας της μη γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους και της αύξησης της εδαφικής απόσβεσης με την αύξηση της ασκούμενης τάσης.

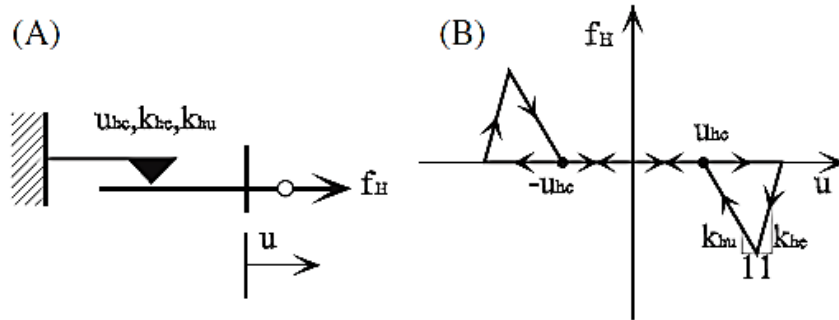
2.3.4 Markou & Kaynia (2018)

Οι Markou & Kaynia (2018) ανέπτυξαν δύο νέα μη γραμμικά γενικευμένα μηχανικά προσομοιώματα με διαφορετικά χαρακτηριστικά απόσβεσης για την προσομοίωση της μη γραμμικής υστερητικής συμπεριφοράς του εδάφους για ανακυκλική φόρτιση. Συγκεκριμένα στόχος ήταν η προσομοίωση της αλληλεπίδρασης ανάμεσα σε υπεράκτιες ανεμογεννήτριες που θεμελιώνονται σε μονο-πάσσαλο και στο περιβάλλον έδαφος. Τα μηχανικά αυτά προσομοιώματα ακολουθούν τη λογική της προσομοίωσης «δοκού επί ελατηριωτού εδάφους» (Winkler) και αποτελούνται από διαφορετικούς συνδυασμούς ελατηρίων και αποσβεστήρων. Συγκεκριμένα η πρώτη διάταξη, η οποία περιγράφεται ως μοντέλο 3, αποτελείται από ένα συνδυασμό ελαστοπλαστικών και τριπλά γραμμικών ελαστικών στοιχείων. Επιπλέον, η δεύτερη διάταξη, η οποία περιγράφεται ως μοντέλο 4, αποτελείται από τριπλά γραμμικά υστερητικά στοιχεία συνδεδεμένα παράλληλα με τριπλά γραμμικά ελαστικά ελατήρια και υστερητικούς αποσβεστήρες με στόχο να εξασφαλίζεται ότι η στιβαρότητα κατά την αποφόρτιση θα είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην αρχική στιβαρότητα του συστήματος (σε αντίθεση με το μοντέλο 3 στο οποίο η στιβαρότητα κατά την αποφόρτιση δεν είναι ίδια με την αρχική στιβαρότητα). Επιπλέον το μοντέλο 4 προσομοιώνει πιο ομαλή συμπεριφορά αποφόρτισης σε αντίθεση με το μοντέλο 3.

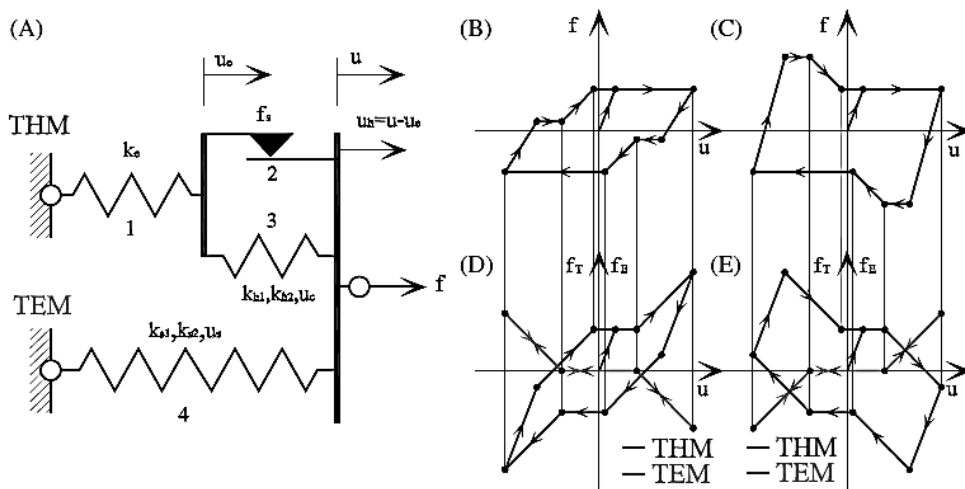
Συστατικά στοιχεία των προσομοιωμάτων αυτών αποτελούν οι διατάξεις που παρουσιάζονται στα παρακάτω Σχήματα (Σχήμα 2.14, Σχήμα 2.15 και Σχήμα 2.16).



Σχήμα 2.14: Τριπλά γραμμικό υστερητικό προσομοίωμα (THM): (Α) Μηχανικό προσομοίωμα /Καμπύλη δύναμης – μετατόπισης (Β) του ελατηρίου 1 (C) του πλαστικού στοιχείου ολίσθησης 2 (D) του μη γραμμικού ελατηρίου 3 (E) του συνολικού προσομοιώματος (Markou & Kaynia 2018)



Σχήμα 2.15: Υστερητικός αποσβεστήρας (HD): (Α) Μηχανικό προσομοίωμα (Β) Καμπύλη δύναμης – μετατόπισης του προσομοιώματος (Markou & Kaynia 2018)



Σχήμα 2.16: Συνδυασμός του τριπλά γραμμικού υστερητικού προσομοιώματος (THM) και του τριπλά ελαστικού προσομοιώματος (TEM): (Α) Μηχανικό προσομοίωμα /Καμπύλη δύναμης – μετατόπισης (Β) για τη δύσκαμπτη περίπτωση (C) για την εύκαμπτη περίπτωση (D) των THM και TEM για τη δύσκαμπτη περίπτωση (E) των THM και TEM για την εύκαμπτη περίπτωση (Markou & Kaynia 2018)

Τα προσομοιώματα αυτά αναπτύχθηκαν ώστε να προσομοιώνουν ποσοστά απόσβεσης μέσα στα επιτρεπτά όρια σύμφωνα με τους Vucetic & Dobry (1991) και συγκρίνονται με δύο προσομοιώματα που χρησιμοποιούνται συνήθως στην πράξη για τον σχεδιασμό. Το πρώτο από αυτά, το οποίο αναφέρεται ως μοντέλο 1, αποτελείται από ελαστοπλαστικά στοιχεία και αντιπροσωπεύει το προσομοίωμα κινηματικής αύξησης της στιβαρότητας του Iwan (Iwan 1967). Το μειονέκτημα του είναι ότι παράγει μεγάλη υστερητική απόσβεση, της τάξης του 60%, για μεγάλες μετακινήσεις. Το ποσοστό αυτό δεν είναι ρεαλιστικό καθώς ο μέγιστος λόγος απόσβεσης εδαφών δεν ξεπερνά το 15%-25% (Vucetic & Dobry 1991). Το δεύτερο προσομοίωμα, το οποίο αναφέρεται ως μοντέλο 2, αποτελείται από τριπλά γραμμικά ελαστικά ελατήρια. Σε αυτό η αποφόρτιση προσομοιώνεται με μη γραμμική



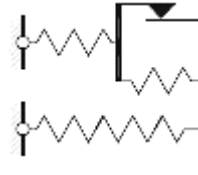

ελαστική συμπεριφορά και επομένως παράγει μηδενική απόσβεση γεγονός που το καθιστά λανθασμένο.

Όλα τα παραπάνω προσομοιώματα (Μοντέλο 1 έως 4) προσομοιάζουν την ίδια στιβαρότητα αλλά διαφορετικά ποσοστά απόσβεσης. Τα επιμέρους μηχανικά στοιχεία από τα οποία αποτελούνται παρουσιάζονται συνοπτικά στους παρακάτω Πίνακες (Πίνακας 2.2, Πίνακας 2.3).

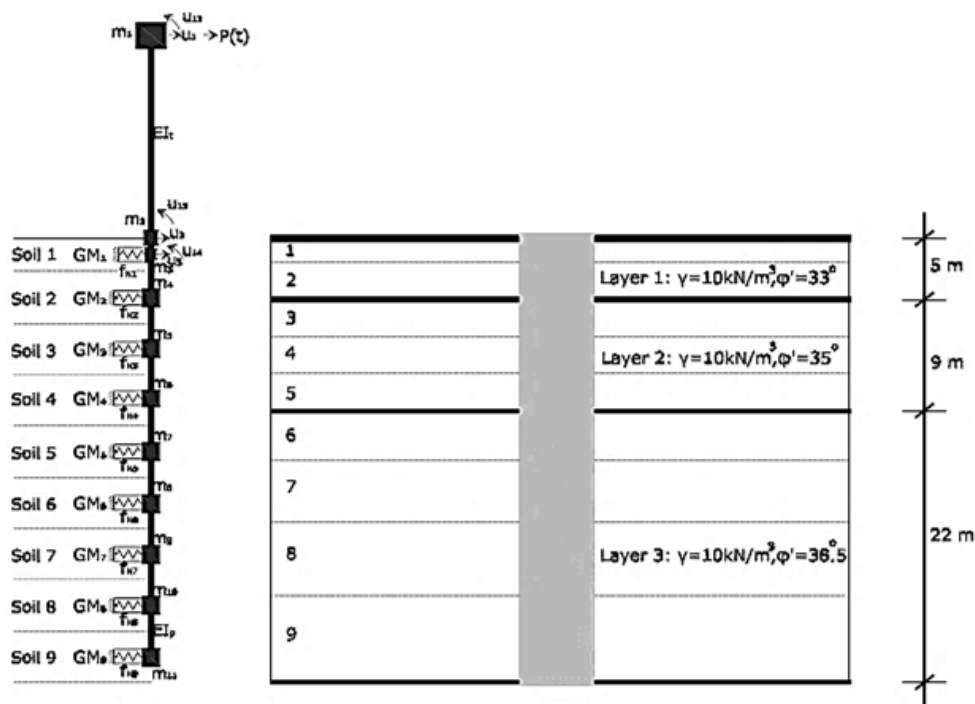
Πίνακας 2.2: Γενικευμένα μηχανικά προσομοιώματα για την αλληλεπίδραση εδάφους – πασσάλου (Markou & Kaynia 2018)

Στοιχεία	Μοντέλο 1	Μοντέλο 2	Μοντέλο 3	Μοντέλο 4
1 έως 5	EP	TEM	EP	THM - TEM
6 έως 10	EP	TEM	TEM	TEM
11 έως 15	HD

Πίνακας 2.3: Στοιχεία των γενικευμένων προσομοιωμάτων για την αλληλεπίδραση εδάφους - πασσάλου (Markou & Kaynia 2018)

EP	TEM	THM-TEM	HD
			

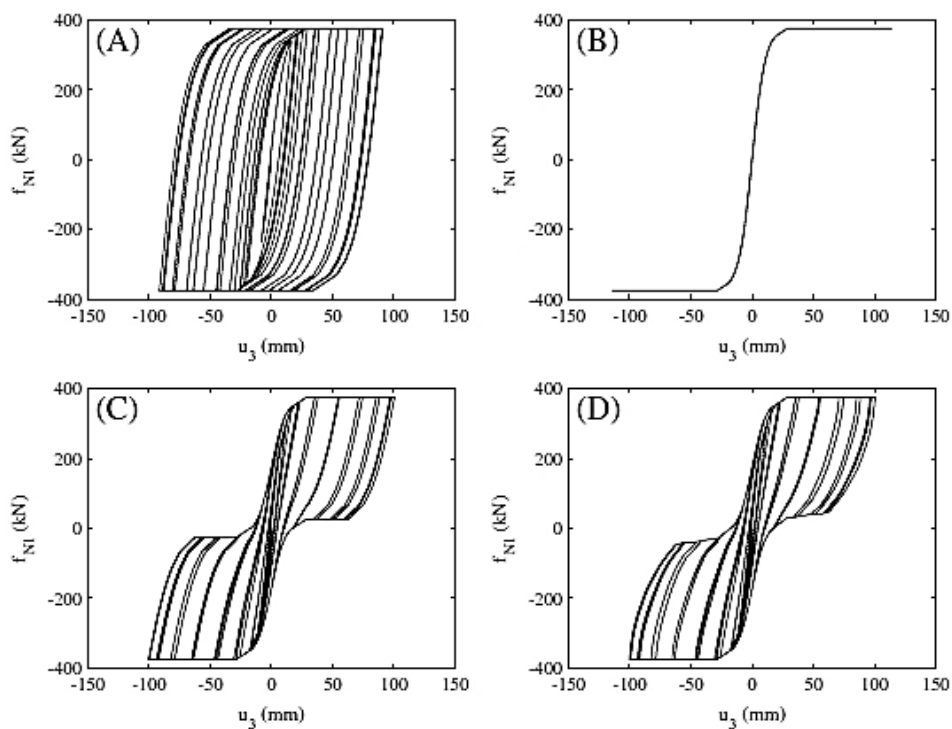
Για τον έλεγχο συμπεριφοράς των προσομοιωμάτων, οι Markou & Kaynia (2018) τα χρησιμοποίησαν στην επίλυση του συστήματος που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.17**. Η υπό εξέταση ανεμογεννήτρια επιλέχθηκε να αντιπροσωπεύει τα χαρακτηριστικά της εξιδανικευμένης ανεμογεννήτριας αναφοράς 5MW του National Renewable Energy Laboratory (Jonkman et al. 2009). Το υπό εξέταση έδαφος είναι άμμος και τα χαρακτηριστικά κάθε στρώσης παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.17**. Οι καμπύλες φορτίου – μετατόπισης ($p-y$) και για τα 4 προσομοιώματα βαθμονομήθηκαν βάσει των καμπύλων φορτίου – μετατόπισης ($p-y$) του API για τα χαρακτηριστικά εδάφους όπως παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.17**.



Σχήμα 2.17: Το υπό εξέταση σύστημα εδάφους – θεμελίωσης – ανεμογεννήτριας (Markou & Kaynia 2018)

Ακολούθως, το σύστημα εδάφους–θεμελίωσης–ανεμογεννήτριας επιλύθηκε για τις εξής φορτίσεις: α) Στατική ανακυκλική φόρτιση στην κεφαλή του πασσάλου με την ανωδομή να αγνοείται β) Ελεύθερη ταλάντωση του συστήματος με επιβολή αρχικής μετακίνησης στην κορυφή της ανεμογεννήτριας γ) Αρμονική διέγερση του συστήματος με φορτίσεις με συχνότητες 0.15 Hz, 0.30 Hz και 0.50 Hz. Η συχνότητα 0.30 Hz είναι κοντά στην ιδιοσυχνότητα της ανεμογεννήτριας (0.32 Hz).

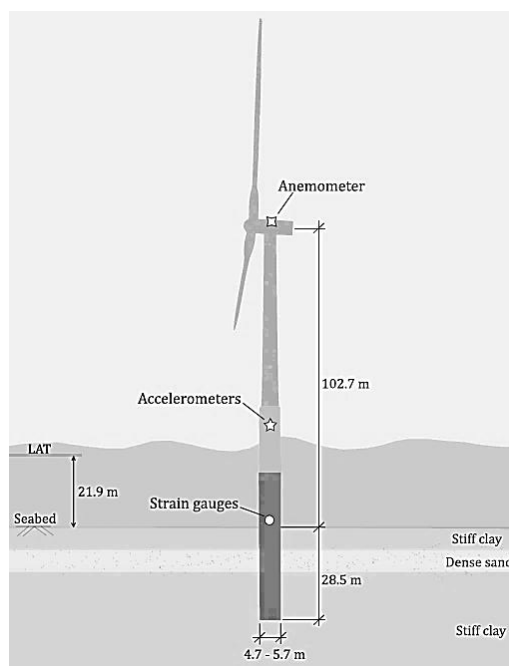
Στο **Σχήμα 2.18** παρουσιάζονται οι καμπύλες φορτίου - μετατόπισης για αρμονική φόρτιση με συχνότητα 0.30 Hz και για τα 4 προσομοιώματα. Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα αυτά, το μοντέλο 1 παράγει μεγάλες ποσότητες απόσβεσης ενέργειας, το μοντέλο 2 παράγει μηδενική απόσβεση, ενώ τα μοντέλα 3 και 4 περιορίζουν την απόσβεση σε αποδεκτά όρια σύμφωνα με τους Vucetic & Dobry (1991) όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Επιπλέον σύμφωνα με τους Συγγραφείς παρατηρείται ότι το μοντέλο 4 οδηγεί σε πιο ομαλή μεταβολή σε σχέση με το μοντέλο 3.



Σχήμα 2.18: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για το ελατήριο της πρώτης εδαφικής στρώσης (A) Μοντέλο 1 (B) Μοντέλο 2 (C) Μοντέλο 3 (D) Μοντέλο 4 (Markou and Kaynia 2018)

2.3.5 Page et al (2019)

Οι Page et al. (2019) μελέτησαν την επιρροή της μεθόδου προσομοίωσης της θεμελίωσης και της μεθόδου βαθμονόμησης του προσομοιώματος στην απόκριση υπεράκτιων ανεμογεννητριών θεμελιωμένων σε μονοπάσσαλο, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με δεδομένα πεδίου, όπως χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και ροπές της ανεμογεννήτριας. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε μία υπεράκτια ανεμογεννήτρια τοποθετημένη στη Βόρεια Θάλασσα και θεμελιωμένη σε μονοπάσσαλο (**Σχήμα 2.19**).

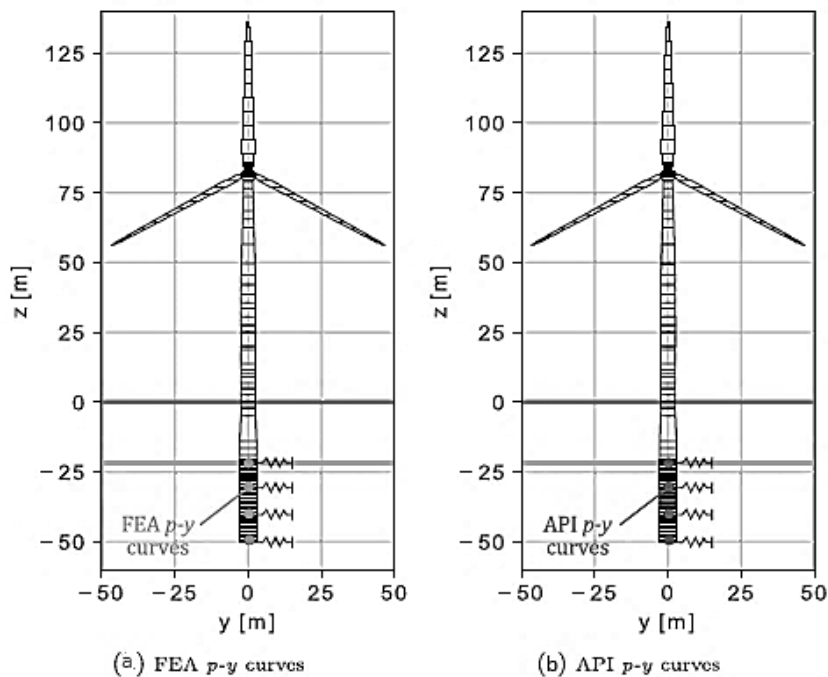


Σχήμα 2.19: Το υπό εξέταση σύστημα εδάφους – θεμελίωσης – αμενογεννήτριας καθώς και το σύστημα μετρήσεων (Page et al. 2019).

Για την προσομοίωση της απόκρισης του εδάφους χρησιμοποιήθηκαν οι καμπύλες φορτίου – μετατόπισης με την προσέγγιση των ελατηρίων Winkler, οι οποίες βαθμονομήθηκαν τόσο με ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία (FEA) όσο και με τις καμπύλες p - y του του API. Επομένως, προέκυψαν τα εξής βαθμονομημένα προσομοιώματα:

- a) Καμπύλες φορτίου – μετακίνησης βάσει του API: Δηλαδή ένα προσομοίωμα καμπύλων φορτίου – μετατόπισης οι οποίες ακολουθούν την μορφή των καμπύλων φορτίου – μετατόπισης του API για οριζοντίως φορτιζομένους πασσάλους.
- b) Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης βάσει της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. Δηλαδή ένα προσομοίωμα καμπύλων φορτίου – μετατόπισης, οι οποίες έχουν βαθμονομηθεί από την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία (πρόγραμμα Plaxis) του εδάφους και της θεμελίωσης.

Σχηματική αναπαράσταση των προσομοιωμάτων αυτών παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.20**. Σύμφωνα με τους Page et al. (2019), η βαθμονόμηση με ανάλυση σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων σε συνδυασμό με κατάλληλο προσομοίωμα εδάφους θεωρείται σημαντικά πιο ρεαλιστική από την βαθμονόμηση με γνωστές καμπύλες φορτίου – μετατόπισης.



Σχήμα 2.20: (α) Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης βάσει του API (2002) (β) Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης βάσει της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία (Page et al. 2019)

Το σύστημα για τα 2 διαφορετικά προσομοιώματα της θεμελίωσης επιλύθηκε με το λογισμικό 3Dfloat (Nygaard et al. 2016) για περιβαλλοντικά φορτία ανέμου και κυμάτων. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα της επίλυσης αυτής συγκρίθηκαν με τις μετρήσεις πεδίου που αφορούν επιταχύνσεις στη βάση της ανεμογεννήτριας και ροπές στον πυθμένα της θάλασσας.

Ο **Πίνακας 2.4** παρουσιάζει ενδεικτικά τα αποτελέσματα και τη σύγκριση για τις επιταχύνσεις στη βάση της ανεμογεννήτριας. Η σύγκριση των μετρήσεων της επιτάχυνσης με τα αποτελέσματα τόσο της προσομοίωσης με καμπύλες φορτίου – μετατόπισης βάσει του API και της προσομοίωσης με καμπύλες φορτίου – μετατόπισης βάσει της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. Παρόμοια είναι τα συμπεράσματα που προκύπτουν και από τη σύγκριση για τις ροπές στη βάση του πυθμένα. Αξίζει να σημειωθεί ότι μέσω της βαθμονόμησης με γνωστές καμπύλες φορτίου – μετατόπισης δεν λαμβάνεται υπόψη η απόσβεση της θεμελίωσης.

Πίνακας 2.4: Τιμές των μετρημένων επιταχύνσεων και των υπολογισμένων από τα διαφορετικά προσομοιώματα θεμελίωσης (Page et al. 2019)

Προσανατολισμός Ανεμογεννήτριας		Μέτρηση	FEA p-y curves		API p-y curves	
		RMS (m/s ²)	RMS (m/s ²)	Διαφορά	RMS (m/s ²)	Διαφορά
Περίπτωση 1	FA	0.0174	0.0183	5%	0.0685	294%
	SS	0.0175	0.0085	-51%	0.0325	86%
Περίπτωση 2	FA	0.0438	0.0452	3%	0.0816	86%
	SS	0.0421	0.0452	7%	0.0728	73%
Περίπτωση 3	FA	0.0193	0.0187	-3%	0.0682	253%
	SS	0.0171	0.0303	77%	0.1093	539%
Μέση τιμή				6%		222%

Τονίζεται τέλος ότι στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την άλλη μέθοδο προσομοίωσης και βαθμονόμησης που ακολουθείται στο συγκεκριμένο άρθρο (προσομοίωμα ισοδύναμων ελατηρίων και αποσβεστήρων στην κεφαλή του πασσάλου βάσει ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία). Επιπλέον πραγματοποιείται συνολική σύγκριση των συνδυασμών μεθόδων προσομοίωσης και βαθμονόμησης της απόκρισης της θεμελίωσης που αναπτύχθηκαν στο άρθρο.

2.4 Συμπεράσματα και επιλογή μεθόδου προσομοίωσης

Τα ευρήματα της βιβλιογραφικής αναδρομής σχετικά με την προσομοίωση πασσάλων θεμελίωσης με τη μέθοδο της «δοκού επί ελατηριωτού εδάφους» οδήγησαν στην κατανόηση της έως τώρα γνώσης πάνω στο εξεταζόμενο ζήτημα. Οι Gazetas & Dobry (1984) πρότειναν για τον ορισμό της στιβαρότητας των ελατηρίων τη χρήση κατάλληλων καμπύλων $p - y$ για στατική φόρτιση και διατύπωσαν αναλυτικές σχέσεις για την υστερητική απόσβεση και την απόσβεση ακτινοβολίας. Σε δύο άλλες προσεγγίσεις, οι El Naggar & Novak (1996) και οι Karatzia & Mylonakis (2017) πρότειναν αναλυτικές σχέσεις για τον υπολογισμό της στιβαρότητας των εδαφικών ελατηρίων και της απόσβεσης ακτινοβολίας, χωρίς όμως να διατυπώσουν σχέση εκτίμησης της υστερητικής απόσβεσης του εδάφους. Οι Wang et al. (1998) κατέληξαν ότι η διάταξη των αποσβεστήρων ακτινοβολίας σε σειρά με τους υστερητικούς αποσβεστήρες είναι πιο κατάλληλη από την διάταξη τους εν παραλλήλω.

Επιπλέον, από την βιβλιογραφική έρευνα προέκυψε ότι η συνήθης πρακτική για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης εδάφους - κατασκευής είναι η χρήση των στατικών καμπυλών που προτείνονται από το API (2002). Σύμφωνα με τους Page et al. (2019) η

βαθμονόμηση των καμπυλών p - γ με χρήση πεπερασμένων στοιχείων οδηγεί σε αποτελέσματα πιο κοντά στην πραγματικότητα σε σχέση με τη χρήση των καμπυλών p - γ του API (2002). Τέλος, οι Markou & Kaynia (2018) πρότειναν ένα δικό τους προσομοίωμα, με διάταξη και μηχανικά χαρακτηριστικά ελατηρίων και αποσβεστήρων διαφορετικά από τους υπόλοιπους ερευνητές, καταλήγοντας ότι το προτεινόμενο προσομοίωμα αποδίδει καλύτερα την απόσβεση του εδάφους.

Έπειτα από σύγκριση των προσφερόμενων μεθόδων, για τον ορισμό των συντελεστών των κατανεμημένων αποσβεστήρων ακτινοβολίας επιλέγεται η μέθοδος των Gazetas & Dobry (1984). Όσον αφορά τη βαθμονόμηση των ελατηρίων θα χρησιμοποιήθουν οι καμπύλες που προτείνονται από το API (2002). Αν και παρουσιάζουν απόκλιση με αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών, οι καμπύλες p - γ του API θεωρούνται οι πλέον αξιόπιστες ανάμεσα στην παρούσα γνώση και αποτελούν την πλέον εφαρμοζόμενη μέθοδο. Οι μέθοδοι των El Naggar & Novak (1996) και των Karatzia & Mylonakis (2017) στερούνται πληρότητας, καθώς δεν περιλαμβάνουν τον υπολογισμό της υστερητικής απόσβεσης του εδάφους. Επιπλέον το προσομοίωμα των Markou & Kaynia (2018) κρίθηκε ιδιαίτερα περίπλοκο ως προς την διάταξη και τους χρησιμοποιούμενους τύπους ελατηρίων.

Κεφάλαιο 3

Βιβλιογραφική Αναδρομή: Προσομοίωση πασσάλων θεμελίωσης με μακρο-ελατήρια και μακρο-αποσβεστήρες

3.1 Γενικά

Μια εναλλακτική μέθοδος για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής είναι η προσομοίωση των πασσάλων θεμελίωσης με διατάξεις ισοδύναμων ελατηρίων και αποσβεστήρων στην κεφαλή τους, τα οποία ονομάζονται μακρο-στοιχεία (macro-elements) ή μακρο-ελατήρια και μακρο-αποσβεστήρες. Τα μακρο-ελατήρια και οι μακρο-αποσβεστήρες προσομοιώνουν τη θεμελίωση και το περιβάλλον έδαφος με μια σχέση φορτίου – μετατόπισης σε ένα σημείο στη διεπιφάνεια που διαχωρίζει τη θεμελίωση από την υπόλοιπη κατασκευή. Τα προσομοιώματα αυτά γενικώς μορφοποιούνται μέσω ελαστοπλαστικής θεωρίας και μπορούν να υπολογίσουν διαφορετική στιβαρότητα θεμελίωσης κατά τη φόρτιση και την αποφόρτιση, παράγοντας έτσι υστερητική απόσβεση ενέργειας λόγω ταλάντωσης της θεμελίωσης, πέραν της απόσβεσης ενέργειας ακτινοβολίας η οποία προσομοιώνεται ανεξάρτητα. Παρά το γεγονός ότι τα εν λόγω προσομοιώματα έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για επιφανειακές θεμελιώσεις, έχουν χρησιμοποιηθεί ελάχιστα για την προσομοίωση της απόκρισης θεμελίωσης ανεμογεννητριών με μονο-πάσσαλο. Τα περισσότερα από τα υπάρχοντα προσομοιώματα μακρο-ελατηρίων και μακρο-αποσβεστήρων για πασσάλους έχουν αναπτυχθεί για πασσάλους μεγάλου μήκους υποβαλλόμενους σε σεισμικά φορτία.

Η προσομοίωση θεμελιώσεων με πασσάλους μέσω διατάξεων μακρο-ελατηρίων και μακρο-αποσβεστήρων (macro-elements) έχει κάποια πλεονεκτήματα συγκρινόμενη με την προσομοίωση με κατανεμημένα ελατήρια στα οποία εισάγονται καμπύλες φορτίου – μετατόπισης (καμπύλες $p-y$). Καταρχάς η συνεισφορά κάποιων συνιστωσών της αντίστασης του εδάφους όπως η διάτμηση παρειών και βάσης, η οποία ίσως παίζει σημαντικό ρόλο στις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες που θεμελιώνονται σε μονο-πάσσαλο, δεν λαμβάνονται

υπόψη στην προσομοίωση με κατανεμημένα ελατήρια και αποσβεστήρες, ενώ λαμβάνονται υπόψη στη μέθοδο των μακρο-ελατηρίων και μακρο-αποσβεστήρων. Επιπλέον, η απόκριση της θεμελίωσης υπολογίζεται μόνο σε έναν κόμβο, γεγονός που σημαίνει ότι λιγότεροι βαθμοί ελευθερίας απαιτούνται στην ανάλυση σε σύγκριση με τα κατανεμημένα ελατήρια. Αυτό είναι ταυτόχρονα πλεονέκτημα και μειονέκτημα. Αφενός, δίνεται η δυνατότητα χρήσης περισσότερο πολύπλοκων προσομοιωμάτων χωρίς να αυξάνεται το συνολικό υπολογιστικό κόστος. Αφετέρου όμως, τα προσομοιώματα μακρο-ελατηρίων και μακρο-αποσβεστήρων δεν υπολογίζουν άμεσα τις δυνάμεις και μετακινήσεις κατά μήκος του πασσάλου θεμελίωσης.

3.2 Αναλυτικές μεθοδολογίες υπολογισμού των δυναμικών συντελεστών ισοδύναμων ελατηρίων και αποσβεστήρων στην κεφαλή του πασσάλου

3.2.1 Gazetas & Dobry (1984)

Οι Gazetas & Dobry (1984) ανέπτυξαν μια μεθοδολογία εκτίμησης της οριζόντιας δυναμικής απόκρισης εύκαμπτου πασσάλου εγκατεστημένου σε πολύστρωτους εδαφικούς σχηματισμούς υπό αρμονική φόρτιση στην κεφαλή του. Σε συνέχεια της αναλυτικής μεθόδου που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο, η συνολική ισοδύναμη απόσβεση στην κεφαλή του πασσάλου μπορεί να υπολογιστεί με ολοκλήρωση των αποσβεστήρων καθ' ύψος του πασσάλου ως εξής:

$$C = \int_0^L (c_r + c_m) \cdot Y_s^2(z) dz \quad (3.1)$$

όπου:

c_r : συντελεστής απόσβεσης ακτινοβολίας

c_m : συντελεστής υστερητικής απόσβεσης

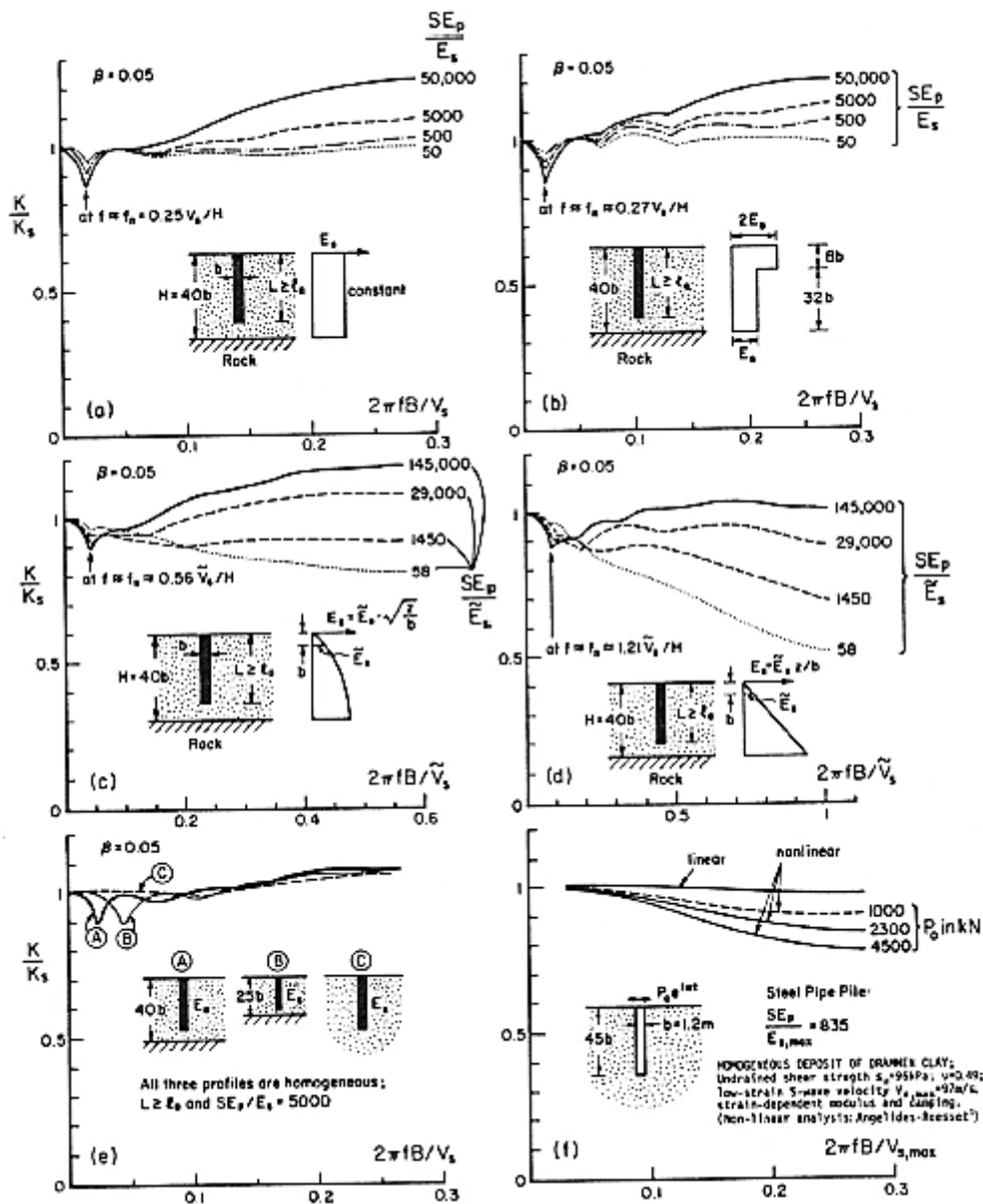
$Y_s(z) = y_s(z)/y_s(0)$: η κανονικοποιημένη στατική απόκριση του πασσάλου $y_s(z)$ σε κάθε βάθος z ως προς την αντίστοιχη στατική απόκριση της κορυφής $y_s(0)$.

Η Εξίσωση (3.1) περιλαμβάνει τις στατικές μετακινήσεις του πασσάλου και όχι τις δυναμικές, μιας και όπως έχει φανεί (Κεφάλαιο 2) η συχνότητα της ταλάντωσης επηρεάζει το μέγεθος και όχι το σχήμα της απόκρισης του πασσάλου.

Η συνολική στιβαρότητα K στην κεφαλή του πασσάλου προκύπτει από τα διαγράμματα στο **Σχήμα 3.1** συναρτήσει της στατικής στιβαρότητας K_s , της αδιαστατοποιημένης συχνότητας $\alpha_0 = 2\pi f/V_s$ και της μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους με το βάθος, τα οποία

έχουν προκύψει από αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων και λαμβάνουν υπόψη φαινόμενα συντονισμού και την επιρροή των υψηλών συχνοτήτων. Η τιμή της στατικής στιβαρότητας K_s προκύπτει ως ο λόγος της στατικής φόρτισης P_o στην κεφαλή του πασσάλου προς την αντίστοιχη μετατόπιση: [$K_s = P_o/\gamma_s(0)$].

Ύστερα από εφαρμογή της μεθόδου τους σε τρία διαφορετικά εδαφικά προφίλ και σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με τα αντίστοιχα της δυναμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, οι Gazetas & Dobry (1984) κατέληξαν ότι η μέθοδος που προτείνουν είναι αξιόπιστη και πολλά υποσχόμενη λόγω της απλότητάς της.

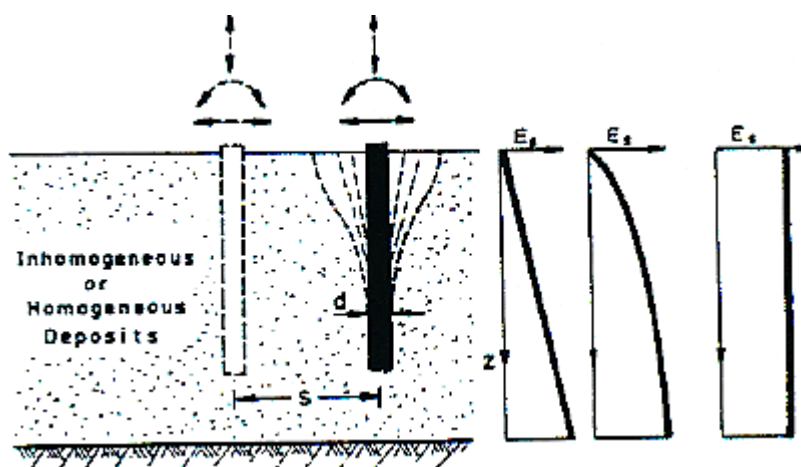


Σχήμα 3.1: Οριζόντια δυναμική στιβαρότητα βάσει αδιαστατοποιημένης συχνότητας (Gazetas & Dobry 1984).

3.2.2 Gazetas (1991)

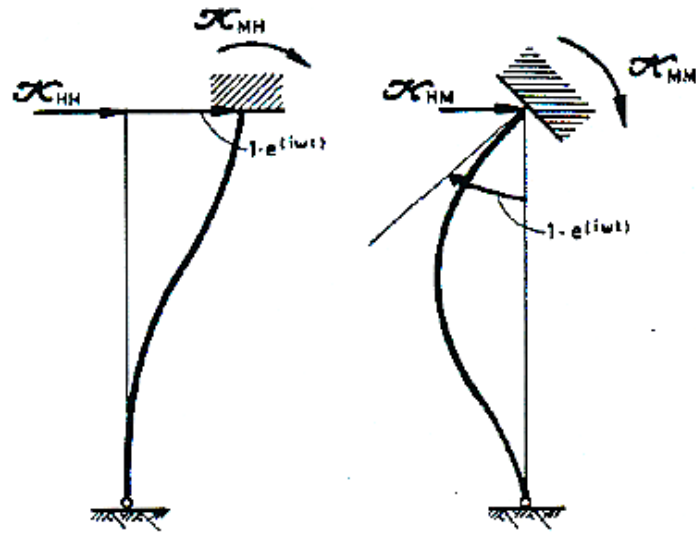
Ο Gazetas (1991) ανέπτυξε αλγεβρικές σχέσεις για την εκτίμηση των δυναμικών συντελεστών ελατηρίων και αποσβεστήρων στην κεφαλή του πασσάλου, οι οποίοι περιγράφουν την αλληλεπίδραση εδάφους-θεμελίωσης-κατασκευής κατά τη διάρκεια σεισμικής (ή οποιασδήποτε άλλης εδαφικής) κίνησης. Οι αλγεβρικές αυτές σχέσεις εφαρμόζονται βάσει πινάκων και αφορούν εύκαμπτες θεμελιώσεις.

Όσον αφορά τους πασσάλους, οι αλγεβρικές σχέσεις αφορούν κυρίως οριζόντια ταλαντούμενους πασσάλους σε ομοιογενή ημίχωρο ή με αυξανόμενο (με γραμμικό ή παραβολικό τρόπο) μέτρο ελαστικότητας με το βάθος, όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.2**.



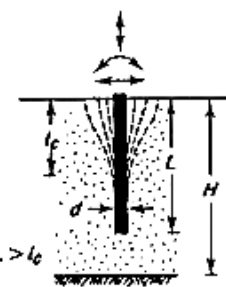
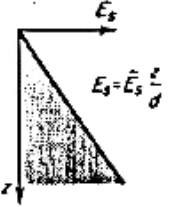

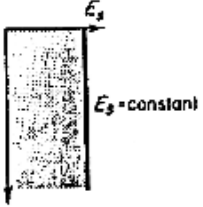
Σχήμα 3.2: Το υπό εξέταση σύστημα εδάφους-θεμελίωσης (Gazetas 1991)

Η απόκριση πασσάλων οριζόντια φορτιζομένων (από οριζόντιες δυνάμεις και ροπές) είναι ανεξάρτητη από το μήκος τους στις περισσότερες πρακτικές περιπτώσεις. Μόνο το ανώτερο μέρος του πασσάλου, μήκους l_c , αποκτά αξιοσημείωτες μετακινήσεις. Κατά μήκος αυτού του ενεργού μήκους l_c τα επιβαλλόμενα φορτία μεταφέρονται στο έδαφος. Το ενεργό μήκος l_c είναι τυπικά της τάξης των 5 έως 10 διαμέτρων του πασσάλου. Οι τρεις οριζόντιες στιβαρότητες K_{HH} , K_{HM} και K_{MM} που περιγράφουν την αλληλεπίδραση πασσάλου-κατασκευής παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.3**. Αυτές καθώς και οι σταθερές των αποσβεστήρων C_{ij} που περιγράφουν συνολικά την αλληλεπίδραση πασσάλου-κατασκευής υπολογίζονται βάσει του συγκεντρωτικού Πίνακα που ακολουθεί (**Πίνακας 3.1**). Οι σχέσεις που περιλαμβάνει ο Πίνακας αφορούν εύκαμπτους πασσάλους, δηλαδή πασσάλους με ενεργό μήκος μικρότερο από το συνολικό μήκος τους ($l_c < L$). Οι τιμές των παραμέτρων του Πίνακα υπολογίστηκαν βάσει προηγούμενης δουλειάς του ίδιου συγγραφέα (Gazetas & Dobry 1984) καθώς και άλλων ερευνητών (Roesset 1980a; b; Sanchez-Saliner 1982; Velez et al. 1983).



Σχήμα 3.3: Ορισμός των στιβαροτήτων κεφαλής (Gazetas 1991)

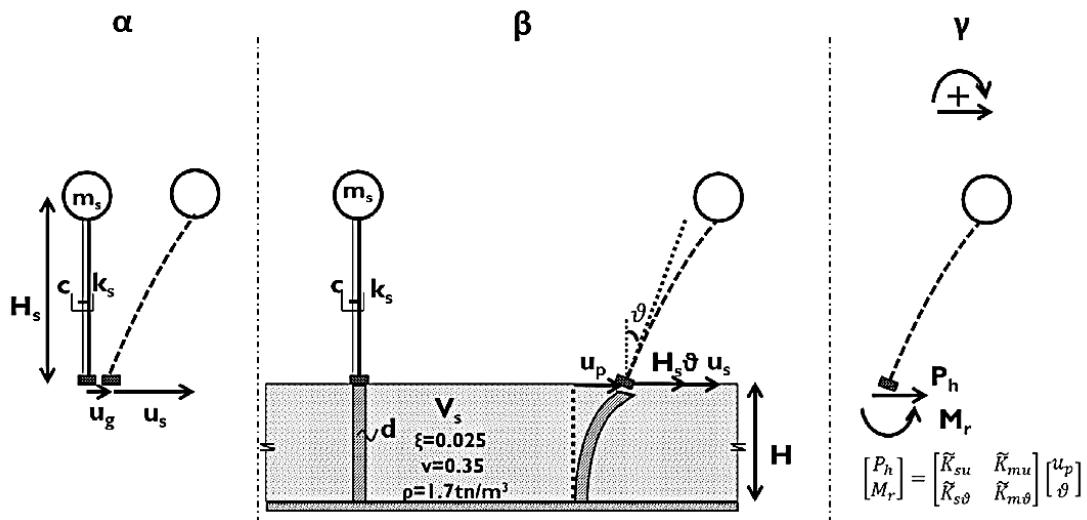
Πίνακας 3.1: Δυναμικές σιβαρότητες και συντελεστές απόσβεσης για εύκαμπους πασσάλους (Gazetas 1991)

	<p><i>Linear Increase of Soil Modulus with Depth*</i></p>  $\bar{v}_s = [\bar{E}_s / 2\rho(1+\nu)]^{1/2}$	<p><i>Parabolic Increase of Soil Modulus with Depth*</i></p>  $\bar{v}_s = [\bar{E}_s / 2\rho(1+\nu)]^{1/2}$	<p><i>Constant Soil Modulus at All Depths</i></p>  $\bar{v}_s = [\bar{E}_s / 2\rho(1+\nu)]^{1/2}$
"Active length"	$l_c \approx 2d(E_p/E_s)^{0.20}$	$l_c \approx 2d(E_p/E_s)^{0.22}$	$l_c \approx 2d(E_p/E_s)^{0.25}$
Natural shear frequency of deposit	$f_s = 0.19V_{sH}/H$ where V_{sH} = the S-wave velocity at depth $z = H$ (bottom of stratum)	$f_s = 0.223V_{sH}/H$ where V_{sH} = the S-wave velocity at depth $z = H$ (bottom of stratum)	$f_s = 0.25V_s/H$
Static lateral (swaying) stiffness Lateral (swaying) stiffness coefficient Lateral (swaying) coefficient: $C_{HH} = 2K_{HH}D_{HH}/\omega$	$K_{HH} = 0.6d\bar{E}_s(E_p/E_s)^{0.35}$ $k_{HH} \approx 1$ $\begin{cases} D_{HH} \approx 0.60\beta + 1.80/dV_s^{-1}, & \text{for } t > t_s \\ D_{HH} \approx 0.60\beta, & \text{for } t \leq t_s \end{cases}$	$K_{HH} = 0.8d\bar{E}_s(E_p/E_s)^{0.28}$ $k_{HH} \approx 1$ $\begin{cases} D_{HH} \approx 0.70\beta + 1.20/d(E_p/E_s)^{0.08}V_s^{-1}, & \text{for } t > t_s \\ D_{HH} \approx 0.70\beta, & \text{for } t \leq t_s \end{cases}$	$K_{HH} = d\bar{E}_s(E_p/E_s)^{0.21}$ $k_{HH} \approx 1$ $\begin{cases} D_{HH} \approx 0.80\beta + 1.10/d(E_p/E_s)^{0.12}V_s^{-1}, & \text{for } t > t_s \\ D_{HH} \approx 0.80\beta, & \text{for } t \leq t_s \end{cases}$
Static rocking stiffness Rocking stiffness coefficient Rocking dashpot coefficient: $C_{MM} = 2K_{MM}D_{MM}/\omega$	$K_{MM} = 0.15d^3\bar{E}_s(E_p/E_s)^{0.60}$ $k_{MM} \approx 1$ $\begin{cases} D_{MM} \approx 0.20\beta + 0.40/dV_s^{-1}, & \text{for } t > t_s \\ D_{MM} \approx 0.20\beta, & \text{for } t \leq t_s \end{cases}$	$K_{MM} = 0.15d^3\bar{E}_s(E_p/E_s)^{0.77}$ $k_{MM} \approx 1$ $\begin{cases} D_{MM} \approx 0.22\beta + 0.35/d(E_p/E_s)^{0.10}V_s^{-1}, & \text{for } t > t_s \\ D_{MM} \approx 0.22\beta, & \text{for } t \leq t_s \end{cases}$	$K_{MM} = 0.15d^3\bar{E}_s(E_p/E_s)^{0.75}$ $k_{MM} \approx 1$ $\begin{cases} D_{MM} \approx 0.35\beta + 0.35/d(E_p/E_s)^{0.20}V_s^{-1}, & \text{for } t > t_s \\ D_{MM} \approx 0.25\beta, & \text{for } t \leq t_s \end{cases}$
Static swaying-rocking cross-stiffness Swaying-rocking cross-stiffness coefficient Swaying-rocking dashpot coefficient: $C_{HM} = 2K_{HM}D_{HM}/\omega$	$K_{HM} = K_{MH} = -0.17d^2\bar{E}_s(E_p/E_s)^{0.60}$ $k_{HM} = k_{MH} \approx 1$ $\begin{cases} D_{HM} \approx 0.30\beta + 1/dV_s^{-1}, & \text{for } t > t_s \\ D_{HM} \approx 0.30\beta, & \text{for } t \leq t_s \end{cases}$	$K_{HM} = K_{MH} = -0.24d^2\bar{E}_s(E_p/E_s)^{0.63}$ $k_{HM} = k_{MH} \approx 1$ $\begin{cases} D_{HM} \approx 0.60\beta + 0.70/d(E_p/E_s)^{0.05}V_s^{-1}, & \text{for } t > t_s \\ D_{HM} \approx 0.35\beta, & \text{for } t \leq t_s \end{cases}$	$K_{HM} = K_{MH} = -0.22d^2\bar{E}_s(E_p/E_s)^{0.60}$ $k_{HM} = k_{MH} \approx 1$ $\begin{cases} D_{HM} \approx 0.80\beta + 0.85/d(E_p/E_s)^{0.18}V_s^{-1}, & \text{for } t > t_s \\ D_{HM} \approx 0.50\beta, & \text{for } t \leq t_s \end{cases}$

3.2.3 Zania (2014)

Η Zania (2014) ερεύνησε τα φυσικά χαρακτηριστικά ταλάντωσης λεπτόκορμων κατασκευών οι οποίες θεμελιώνονται σε πασσάλους μεγάλης διαμέτρου και παρήγαγε ακριβείς αναλυτικές λύσεις για τον υπολογισμό της τροποποιημένης ιδιοσυχνότητας και της απόσβεσης του συστήματος λόγω της αλληλεπίδρασης εδάφους - κατασκευής.

Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το προσομοίωμα που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.4**. Πιο συγκεκριμένα, η απλή διάταξη ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή σε ακλόνητη βάση με ιδιοσυχνότητα κατασκευής ω_s , (**Σχήμα 3.4α**), επεκτάθηκε ώστε να περιλαμβάνει 2 επιπλέον βαθμούς ελευθερίας που αντιπροσωπεύουν την μετατόπιση-στροφή της κεφαλής του πασσάλου (**Σχήμα 3.4β**).



Σχήμα 3.4: Προσομοίωση του συστήματος έδαφος-πάσσαλος-κατασκευή (Zania 2014).

Η οριζόντια δύναμη αντίδρασης P_h και η ροπή αντίδρασης M_r που εμφανίζονται στην βάση της εύκαμπτα θεμελιωμένης κατασκευής συνδέονται με τον μετακινησιακό βαθμό ελευθερίας στην κορυφή του πασσάλου u_p και τον στροφικό βαθμό ελευθερίας θ ως εξής:

$$\begin{bmatrix} P_h \\ M_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{su} & K_{mu} \\ K_{s\theta} & K_{m\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_p \\ \theta \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

όπου οι δυναμικές παράμετροι του εδάφους που υπεισέρχονται στο μητρώο δυσκαμψίας εξαρτώνται από τη συχνότητα και συνδέονται με τις εξισώσεις:

$$\begin{aligned}
 \tilde{K}_{su} &= K_{su} \cdot (1 + 2 \cdot \zeta_{sut}) \\
 \tilde{K}_{mu} &= K_{mu} \cdot (1 + 2 \cdot \zeta_{mut}) \\
 \tilde{K}_{s\theta} &= K_{s\theta} \cdot (1 + 2 \cdot \zeta_{s\theta t}) \\
 \tilde{K}_{m\theta} &= K_{m\theta} \cdot (1 + 2 \cdot \zeta_{m\theta t})
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

όπου: K_{su} , K_{mu} , $K_{s\theta}$, $K_{m\theta}$ και ζ_{su} , ζ_{mu} , $\zeta_{s\theta}$ και $\zeta_{m\theta}$ οι τιμές των συντελεστών στιβαρότητας και απόσβεσης αντίστοιχα για κάθε συνδυασμό φόρτισης και βαθμού ελευθερίας. Συγκεκριμένα ο δείκτης s αντιστοιχεί σε δύναμη, ο δείκτης m σε ροπή, ο δείκτης u σε μοναδιαία μετατόπιση και ο δείκτης θ σε μοναδιαία στροφή. Οι παραπάνω δυναμικές παράμετροι στο πρώτο βήμα της επαναληπτικής μεθόδου, όπως θα περιγραφεί παρακάτω, υπολογίζονται βάσει της μεθόδου των Nogami & Novak (1977).

Από την ανάλυση του συστήματος προέκυψαν οι παρακάτω αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της τροποποιημένης ιδιοσυχνότητας και απόσβεσης του συστήματος λόγω της αλληλεπίδρασης εδάφους – κατασκευής:

$$1/\tilde{\omega}^2 = \frac{1}{\omega_s^2} \left\{ 1 + k_s \left[\frac{\langle (K_{m\theta}(1 - 4\zeta_s \zeta_{m\theta}) - 2H_s K_{s\theta}(1 - 4\zeta_s \zeta_{s\theta}) + H_s^2 K_{su}(1 - 4\zeta_s \zeta_{su})) (K_{su} K_{m\theta}(1 - 4\zeta_{su} \zeta_{m\theta}) - K_{s\theta}^2(1 - 4\zeta_{s\theta}^2)) \rangle}{(K_{su} K_{m\theta}(1 - 4\zeta_{su} \zeta_{m\theta}) - K_{s\theta}^2(1 - 4\zeta_{s\theta}^2))^2 + (2K_{su} K_{m\theta}(\zeta_{m\theta} + \zeta_{su}) - 4K_{s\theta}^2 \zeta_{s\theta})^2} + \frac{\langle (K_{m\theta}(2\zeta_s + 2\zeta_{m\theta}) - 2H_s K_{s\theta}(2\zeta_s + 2\zeta_{s\theta}) + H_s^2 K_{su}(2\zeta_s + 2\zeta_{su})) (2K_{su} K_{m\theta}(\zeta_{m\theta} + \zeta_{su}) - 4K_{s\theta}^2 \zeta_{s\theta}) \rangle}{(K_{su} K_{m\theta}(1 - 4\zeta_{su} \zeta_{m\theta}) - K_{s\theta}^2(1 - 4\zeta_{s\theta}^2))^2 + (2K_{su} K_{m\theta}(\zeta_{m\theta} + \zeta_{su}) - 4K_{s\theta}^2 \zeta_{s\theta})^2} \right] \right\} \tag{3.4}$$

$$\tilde{\zeta} = \zeta_s + \frac{\tilde{\omega}^2}{\omega_s^2} k_s \left[\frac{\langle (K_{m\theta}(-\zeta_s - \zeta_{m\theta}) - 2H_s K_{s\theta}(-\zeta_s - \zeta_{s\theta}) + H_s^2 K_{su}(-\zeta_s - \zeta_{su})) (K_{su} K_{m\theta}(1 - 4\zeta_{su} \zeta_{m\theta}) - K_{s\theta}^2(1 - 4\zeta_{s\theta}^2)) \rangle}{(K_{su} K_{m\theta}(1 - 4\zeta_{su} \zeta_{m\theta}) - K_{s\theta}^2(1 - 4\zeta_{s\theta}^2))^2 + (2K_{su} K_{m\theta}(\zeta_{m\theta} + \zeta_{su}) - 4K_{s\theta}^2 \zeta_{s\theta})^2} + \frac{\langle (K_{m\theta}(1 - 4\zeta_s \zeta_{m\theta}) - 2H_s K_{s\theta}(1 - 4\zeta_s \zeta_{s\theta}) + H_s^2 K_{su}(1 - 4\zeta_s \zeta_{su})) (K_{su} K_{m\theta}(\zeta_{m\theta} + \zeta_{su}) - 2K_{s\theta}^2 \zeta_{s\theta}) \rangle}{(K_{su} K_{m\theta}(1 - 4\zeta_{su} \zeta_{m\theta}) - K_{s\theta}^2(1 - 4\zeta_{s\theta}^2))^2 + (2K_{su} K_{m\theta}(\zeta_{m\theta} + \zeta_{su}) - 4K_{s\theta}^2 \zeta_{s\theta})^2} \right] \tag{3.5}$$

Επειδή οι δυναμικές παράμετροι του εδάφους εξαρτώνται από τη συχνότητα, προκειμένου να υπολογιστούν οι τροποποιημένες τιμές της ιδιοσυχνότητας και της απόσβεσης βάσει των Εξισώσεων (3.4) και (3.5) ακολουθείται μία επαναληπτική διαδικασία σύγκλισης. Αρχικά, υπολογίζονται οι δυναμικές παράμετροι των Εξισώσεων (3.3) βάσει της μεθόδου των Nogami & Novak (1977) όπως αναφέρθηκε παραπάνω και ακολούθως εισάγονται στις Εξισώσεις (3.4) και (3.5) από τις οποίες υπολογίζονται οι τροποποιημένες τιμές της ιδιοσυχνότητας και της απόσβεσης. Από αυτές τις τιμές υπολογίζονται εκ νέου οι δυναμικές παράμετροι και η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση.

Τονίζεται ότι στις σχέσεις υπολογισμού των τροποποιημένων τιμών της ιδιοσυχνότητας και της απόσβεσης λαμβάνεται υπόψη η συνεισφορά των μη διαγώνιων συζευγμένων όρων.

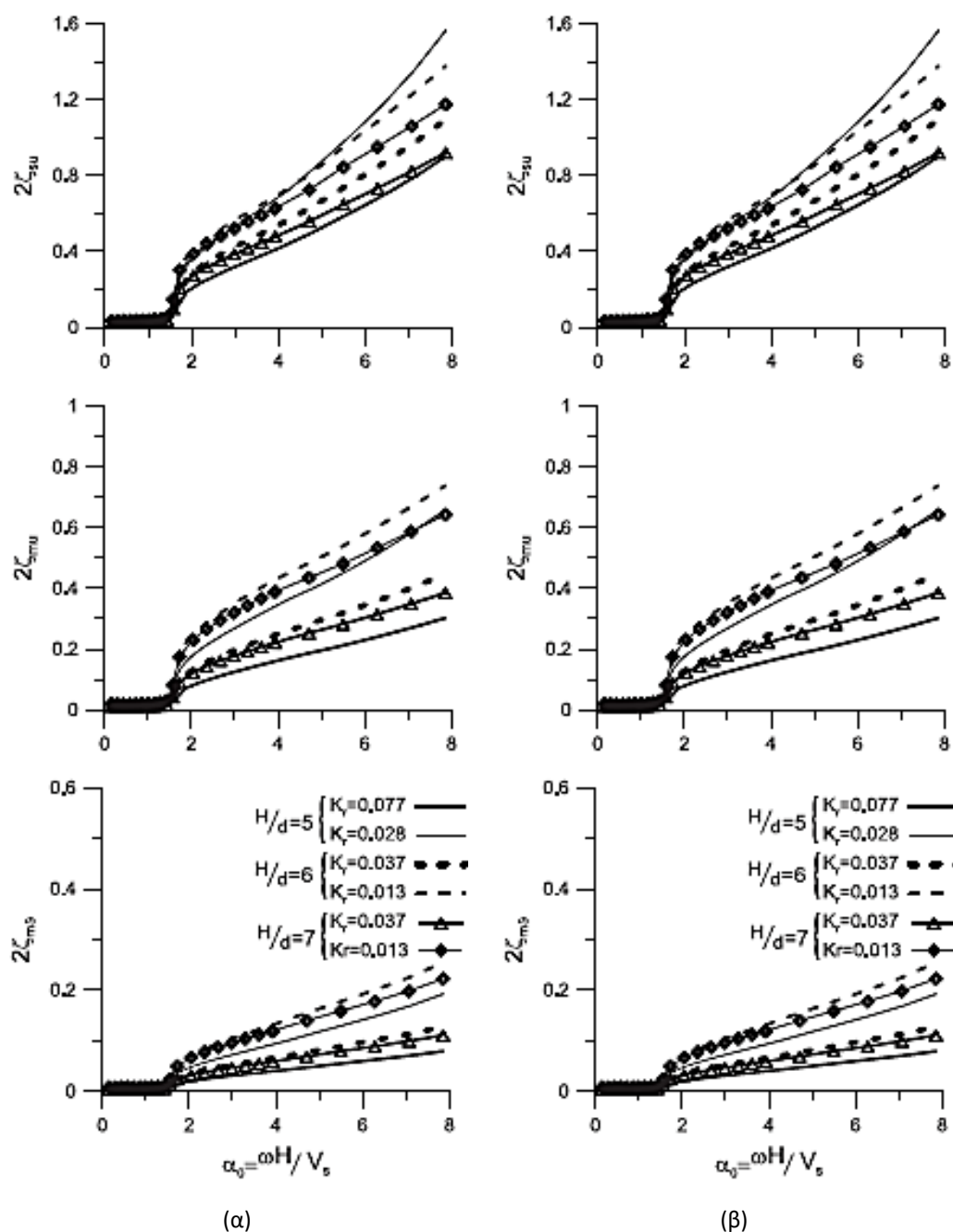
Σύμφωνα με τους Συγγραφείς, βάσει των αναλύσεων που παρουσιάζονται στο άρθρο η αγνόηση της συνεισφοράς των όρων αυτών οδηγεί σε υπερεκτίμηση της ιδιοσυχνότητας και υποεκτίμηση της απόσβεσης.

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση ώστε να προσδιοριστεί η επιρροή στις δυναμικές παραμέτρους του εδάφους: α) του συντελεστή λυγηρότητας του πασσάλου H/d , β) της σχετικής στιβαρότητας πασσάλου – εδάφους και γ) της διαμέτρου του πασσάλου d . Η παραμετρική ανάλυση πραγματοποιήθηκε για ομοιογενές έδαφος με υστερητική απόσβεση $\xi=2.5\%$ και για δύο συνοριακές συνθήκες: α) πακτωμένη αιχμή πασσάλου β) εύκαμπτα θεμελιωμένη αιχμή πασσάλου. Η ανάλυση αυτή οδήγησε στην δημιουργία συγκεντρωτικών διαγραμμάτων από τα οποία μπορεί να προσδιοριστούν οι δυναμικές παράμετροι του εδάφους βάσει της αδιαστατοποιημένης συχνότητας (α_0) για διάφορες τιμές του λόγου λυγηρότητας και του συντελεστή ευκαμψίας του πασσάλου (K_r) για τις δύο συνοριακές συνθήκες που μελετήθηκαν.

$$\alpha_0 = \frac{\omega \cdot H}{V_s} \quad (3.6)$$

όπου ω η κυκλική συχνότητα της αρμονικά επιβαλλόμενης μετατόπισης, H το ύψος της εδαφικής στρώσης και του πασσάλου και V_s η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων στο έδαφος.

Ενδεικτικά, στο **Σχήμα 3.5** παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά διαγράμματα για τον υπολογισμό των δυναμικών παραμέτρων απόσβεσης.

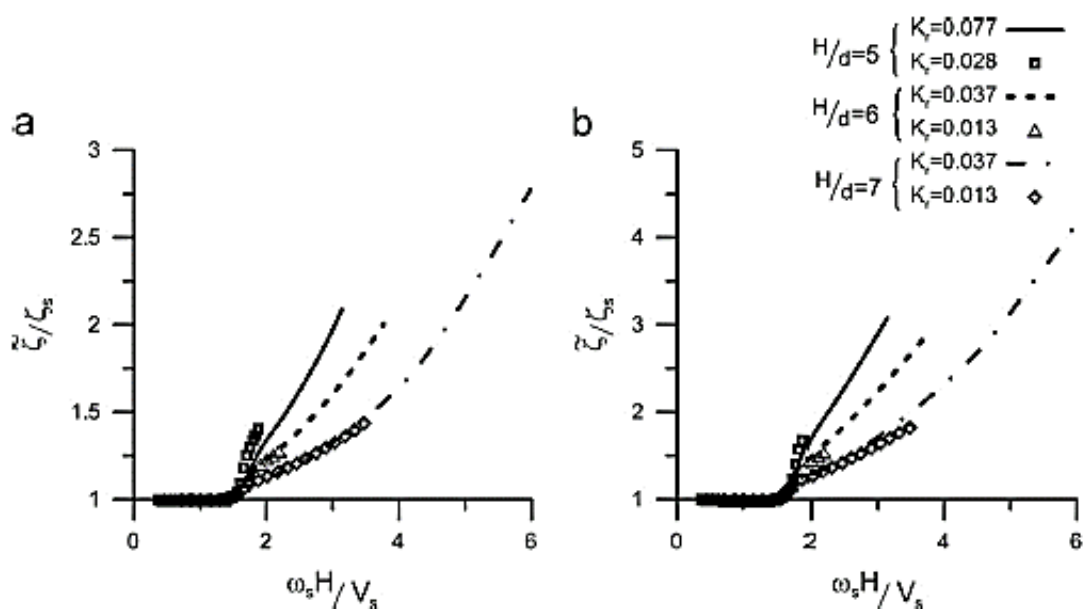


Σχήμα 3.5: Μεταβολή των δυναμικών παραμέτρων απόσβεσης βάσει της αδιαστατοποιημένης συχνότητας για (α) πακτωμένους και (β) εύκαμπτα θεμελιωμένους στην αιχμή τους πασσάλους (Zania 2014).

Το βασικότερο συμπέρασμα της ανάλυσης είναι ότι σύμφωνα με τους Συγγραφείς στους πακτωμένους πασσάλους η απόσβεση ακτινοβολίας είναι γραμμικά εξαρτημένη από τη συχνότητα. Επομένως, ένας ιξώδης αποσβεστήρας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση ώστε να προσδιοριστεί η επιρροή στις τροποποιημένες τιμές της ιδιοσυχνότητας και της απόσβεσης των παρακάτω ιδιοτήτων: α)

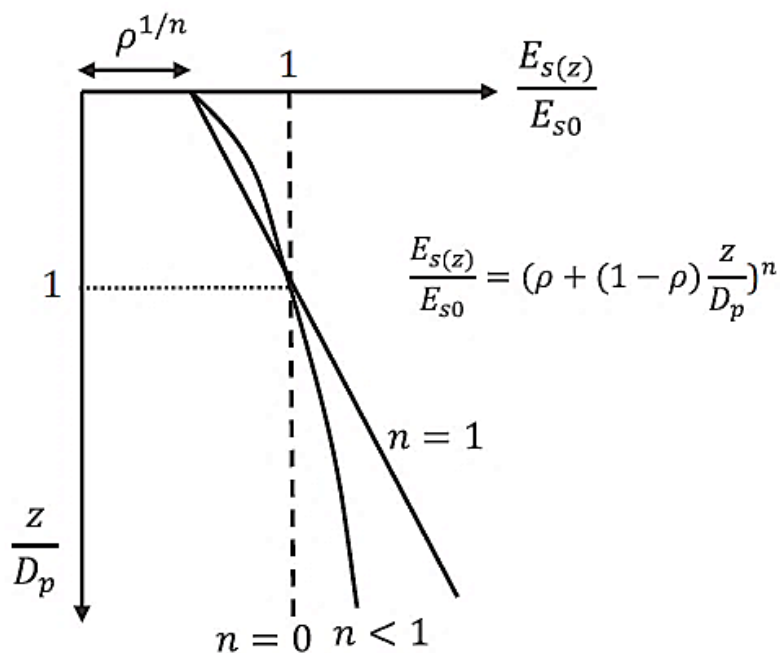
συντελεστής λυγηρότητας του πασσάλου (H/d), β) σχετική στιβαρότητα πασσάλου – εδάφους, γ) συννοριακές συνθήκες στην αιχμή του πασσάλου (πακτωμένη ή εύκαμπτα θεμελιωμένη). Η παραμετρική ανάλυση πραγματοποιήθηκε για ύψη κατασκευής 50m, 70m και 120m και για απόσβεση κατασκευής $\zeta_s = 1.2\%$. Η παραμετρική διερεύνηση οδήγησε στην δημιουργία συγκεντρωτικών διαγραμμάτων από τα οποία μπορεί να προσδιοριστεί η τροποποιημένη τιμή της απόσβεσης βάσει της αδιαστατοποιημένης ιδιοσυχνότητας της κατασκευής ($\omega_s H/V_s$) για διάφορες τιμές του λόγου λυγηρότητας πασσάλου, συντελεστή ευκαμψίας πασσάλου K_r και για τις δύο συννοριακές συνθήκες που μελετήθηκαν. Στο **Σχήμα 3.6** παρουσιάζονται ενδεικτικά τα συγκεντρωτικά διαγράμματα για τον υπολογισμό της τροποποιημένης τιμής της απόσβεσης, η οποία έχει αδιαστατοποιηθεί βάσει της απόσβεσης της κατασκευής.



Σχήμα 3.6: Μεταβολή της τροποποιημένης τιμής της απόσβεσης βάσει της αδιαστατοποιημένης ιδιοσυχνότητας της κατασκευής για πακτωμένους στην αιχμή τους πασσάλους για κατασκευές με ύψος (α) $H_s=50\text{m}$ και (β) $H_s=70\text{m}$ (Zania 2014).

3.2.4 Shadlou & Bhattacharya (2016)

Οι Shadlou & Bhattacharya (2016) υπολόγισαν συντελεστές στιβαρότητας για εύκαμπτους και άκαμπτους πασσάλους, υπό στατική και δυναμική φόρτιση. Εξετάστηκαν τρεις τρόποι μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους με το βάθος: (i) σταθερή τιμή με το βάθος, (ii) γραμμική και (iii) παραβολική αύξηση της τιμής με το βάθος, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.7**.



Σχήμα 3.7: Τα υπο εξέταση εδαφικά προφίλ (Shadlou & Bhattacharya 2016).

Ο υπολογισμός των συντελεστών, δυναμικών και στατικών, έγινε μέσω ελαστοδυναμικών μεθόδων. Οι δυναμικοί συντελεστές στιβαρότητας για δύσκαμπτους πασσάλους υπολογίζονται με χρήση των παρακάτω εξισώσεων:

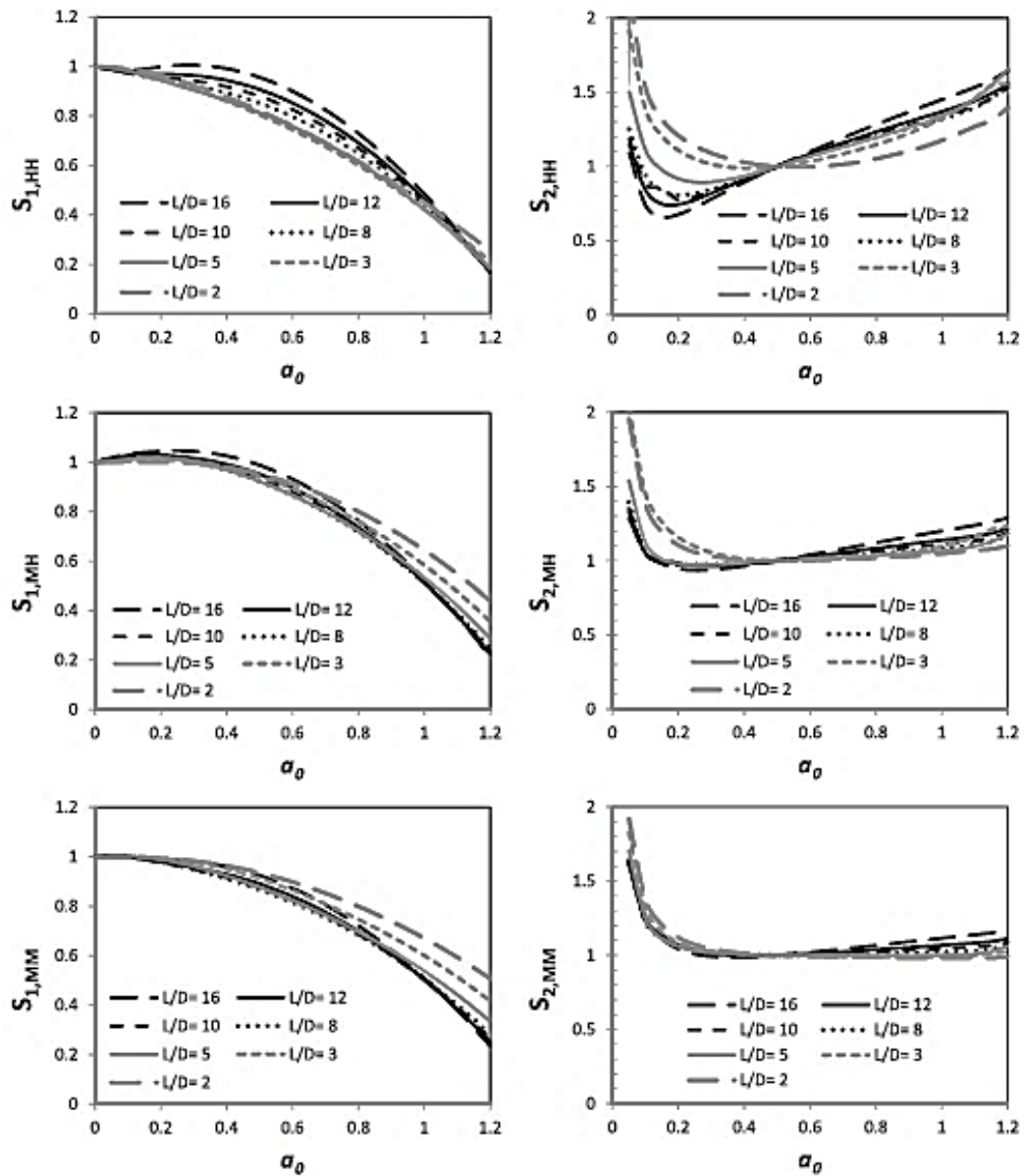
$$\frac{K_{ij}}{E_{s0} r^{a_{ij}}} = K_{static, ij}^{(vs)} \cdot (S_{1, ij(ao)} + i \cdot f^{(vs)} \cdot f_{ij(\delta s)} \cdot a_o \cdot S_{2, ij, (ao)}) \cdot (1 + 2 \cdot i \cdot \delta_s) \quad (3.7)$$

$$f_{ij(\delta s)} = \eta_1 \cdot \left(\frac{L}{D}\right)^{\xi_1} \cdot \delta_s + \eta_2 \cdot \left(\frac{L}{D}\right)^{\xi_2} \quad (3.8)$$

όπου ο συντελεστής δ_s εκφράζει τον συντελεστή απόσβεσης του υλικού, ενώ η τιμή των υπόλοιπων συντελεστών είναι σταθεροί για κάθε βαθμό ελευθερίας (Πίνακας 3.2) ή προκύπτουν (παράμετροι $S_{1,ij}$ και $S_{2,ij}$) από συγκεντρωτικά διαγράμματα (Σχήμα 3.8).

Πίνακας 3.2: Παράμετροι υπολογισμού των δυναμικών συντελεστών στιβαρότητας για δύσκαμπτους πασσάλους και ομογενές έδαφος (Shadlou & Bhattacharya 2016)

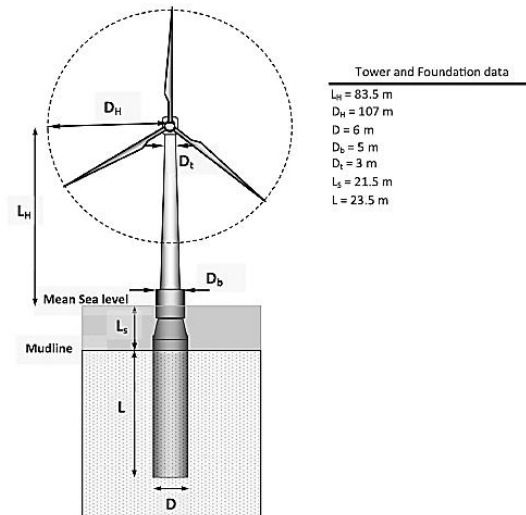
ij	ΗΗ	ΜΗ	ΜΜ
η_1	1.0	1.48	1.69
ξ_1	-0.194	-0.196	-0.194
η_2	0.055	0.1887	0.22
ξ_2	-0.214	-0.412	-0.36
K_{static}	$6.4 * \left(\frac{L}{D}\right)^{0.62}$	$7.1 * \left(\frac{L}{D}\right)^{1.56}$	$13.2 * \left(\frac{L}{D}\right)^{2.5}$



Σχήμα 3.8: Αδιάστατοι συντελεστές S_1 και S_2 για τον υπολογισμό των δυναμικών συντελεστών στιβαρότητας για ομοιογενές έδαφος (Shadlou & Bhattacharya 2016)

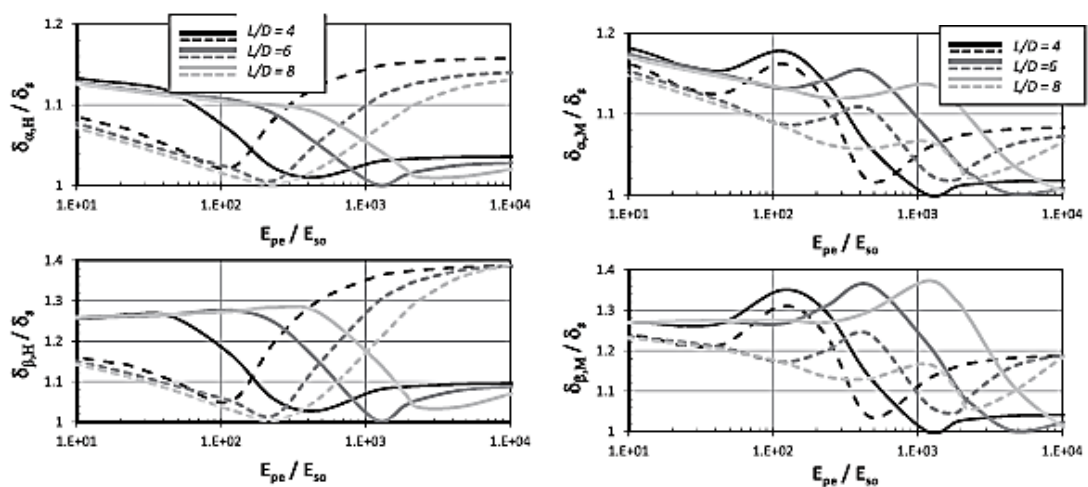
Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν τόσο με αναλύσεις αντίστοιχων συστημάτων με πεπερασμένα στοιχεία όσο και με άλλες υπάρχουσες λύσεις της βιβλιογραφίας και βρέθηκαν σε συμφωνία.

Επιπλέον εξετάζεται το σύστημα που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.9** για δυναμική φόρτιση με ιδιοσυχνότητα κοντά στη θεμελιώδη ιδιοσυχνότητα της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 3.9: Το υπο εξέταση σύστημα (Shadlou & Bhattacharya 2016).

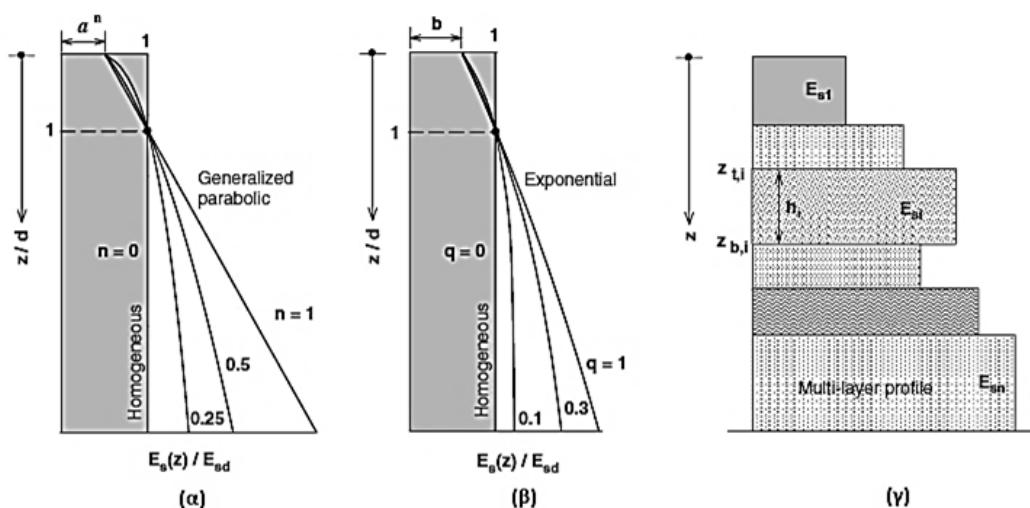
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης όσον αφορά το συντελεστή απόσβεσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.10. Σε αυτό ο όρος δ_s αντιπροσωπεύει την υστερητική απόσβεση του εδάφους ίση με 2% και οι όροι δ_{ij} αντιπροσωπεύουν την απόσβεση του εδάφους για τους δύο μηχανισμούς αντίστασης (αντιπροσωπεύεται από τον δείκτη i) και τους δύο τύπους φόρτισης (αντιπροσωπεύεται από τον δείκτη j). Συγκεκριμένα για $i=\alpha$ η απόσβεση προέρχεται από την αντίσταση του εδάφους σε συμπίεση ενώ για $i=\beta$ προέρχεται από την αντίσταση του εδάφους σε διάτμηση. Επιπλέον για $j=H$ περιγράφεται η απόσβεση για οριζόντια φόρτιση ενώ για $j=M$ για καμπτική ροπή. Τέλος οι όροι E_{pe} και E_{so} αντιπροσωπεύουν το μέτρο Young του πασσάλου και του εδάφους αντίστοιχα και ο λόγος τους (E_{pe}/E_{so}) ονομάζεται συντελεστής σχετικής στιβαρότητας εδάφους-πασσάλου και αποτελεί μέτρο της ακαμψίας του πασσάλου.



Σχήμα 3.10: Συντελεστές απόσβεσης για ψευδοστατική (συνεχής γραμμή) και δυναμική (διακεκομμένη γραμμή) φόρτιση (Shadlou & Bhattacharya 2016).

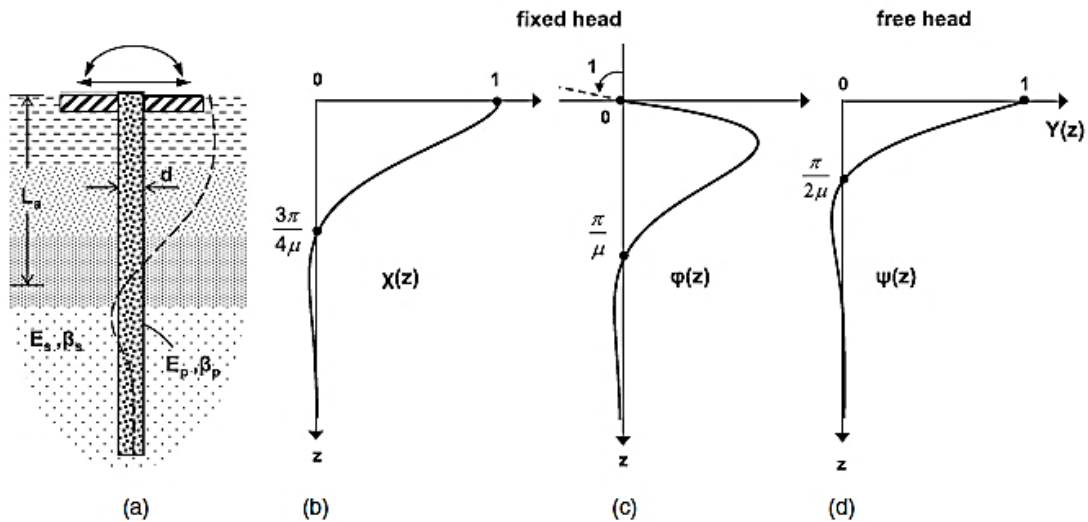
3.2.5 Karatzia & Mylonakis (2017)

Οι Karatzia & Mylonakis (2017) ανέπτυξαν αδιάστατες σχέσεις κλειστής μορφής για τον προσδιορισμό των δυναμικών συντελεστών στιβαρότητας και απόσβεσης στην κεφαλή του πασσάλου. Η ανάλυση έγινε για πάσσαλο ο οποίος φορτίζεται οριζόντια με συγκεντρωμένη δύναμη ή/και ροπή στην κεφαλή του και βρίσκεται σε 3 είδη εδάφους τα οποία επιδεικνύουν διαφορετική ανομοιογένεια με το βάθος, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.11**. Ο πάσσαλος θεωρείται ως γραμμική ιξωδοελαστική συμπαγής κυλινδρική δοκός διαμέτρου d , μέτρου ελαστικότητας E_p και με γραμμική υστερητική απόσβεση β_p . Επιπλέον θεωρείται ότι ο πάσσαλος είναι αρκετά μακρύς ώστε να παραμορφώνεται μόνο μέχρι συγκεκριμένο βάθος του L_a , το οποίο ονομάζεται ενεργό μήκος και είναι τυπικά της τάξεως των 10 διαμέτρων. Το έδαφος προσομοιώνεται ως γραμμικό ιξωδο-ελαστικό μέσο με μέτρο ελαστικότητας E_s και με γραμμική υστερητική απόσβεση β_s .



Σχήμα 3.11: Μεταβολή της στιβαρότητας του εδάφους με το βάθος: (α) παραβολική αύξηση, (β) εκθετική αύξηση στιβαρότητας και (γ) γενικό πολυστρωματικό προφίλ (Karatzia & Mylonakis 2017).

Για τον προσδιορισμό των κλειστών σχέσεων επιστρατεύτηκε μια ενεργειακή μέθοδος βασισμένη στο προσομοίωμα Winkler για την εδαφική αντίδραση σε συνδυασμό με κατάλληλες συναρτήσεις σχήματος για το παραμορφωμένο σχήμα του πασσάλου οι οποίες παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.12**.



Σχήμα 3.12: (α) Ενδεικτικό σκαρίφημα του πασσάλου και συναρτήσεις σχήματος για παραμόρφωση πασσάλου λόγω: (β) μοναδιαίας μετακίνησης στην κεφαλή του πασσάλου με μηδενική στροφή $\chi(z)$, (γ) μοναδιαίας στροφής στην κεφαλή του πασσάλου με μηδενική μετακίνηση $\phi(z)$ και (δ) μοναδιαίας δύναμης στην κεφαλή του πασσάλου με μηδενική στροφή $\psi(z)$ (Karatzia & Mylonakis 2017).

Οι συντελεστές στιβαρότητας και απόσβεσης στην κεφαλή του πασσάλου βάσει της παραπάνω ανάλυσης δίνονται από τις σχέσεις:

$$K_{ij} = E_p \cdot I_p \cdot \int_0^L \chi_i''(z) \cdot \chi_j''(z) dz + \int_0^L k(z) \cdot \chi_i(z) \cdot \chi_j(z) dz - m \cdot \omega^2 \cdot \int_0^L \chi_i(z) \cdot \chi_j(z) dz \quad (3.9)$$

$$C_{ij} = \frac{2\beta_p E_p I_p}{\omega} \int_0^L \chi_i''(z) \chi_j''(z) dz + \frac{2\beta_s}{\omega} \int_0^L k(z) \chi_i(z) \chi_j(z) dz + \int_0^L c_r(z) \chi_i(z) \chi_j(z) dz \quad (3.10)$$

Οι πρώτοι δύο όροι της Εξίσωσης (3.9) εκφράζουν την συμβολή της συνολικής στιβαρότητας του πασσάλου (καμπτικής) και του εδάφους αντίστοιχα. Η συμβολή της αδράνειας του πασσάλου (τρίτος όρος της εξίσωσης) είναι συνήθως μικρός και για αυτό το λόγο παραλείπεται. Οι πρώτοι δύο όροι της Εξίσωσης (3.10) εκφράζουν την συμβολή της συνολικής απόσβεσης του πασσάλου και του εδάφους αντίστοιχα ενώ ο τελευταίος όρος αντιστοιχεί στη συμβολή της απόσβεσης ακτινοβολίας.

Η Εξίσωση (3.9) μπορεί να πάρει τη μορφή:

$$K_{ij} = K_{ij}^p \cdot (1 + S_{ij}) \quad (3.11)$$

όπου K_{ij}^p η συμβολή της καμπτικής στιβαρότητας του πασσάλου [ο πρώτος όρος της Εξίσωσης (3.9)] και S_{ij} ένας αδιάστατος συντελεστής ο οποίος εκφράζει τη συμβολή της

περιοριστικής δράσης του εδάφους [ο δεύτερος όρος της Εξίσωσης (3.9) κανονικοποιημένος ως προς τον πρώτο].

Επιπλέον χρησιμοποιώντας τον κανονικοποιημένο συντελεστή απόσβεσης στην κεφαλή του πασσάλου $\beta_{ij} = \omega C_{ij}/2K_{ij}$, η Εξίσωση (3.10) παίρνει την αδιάστατη μορφή:

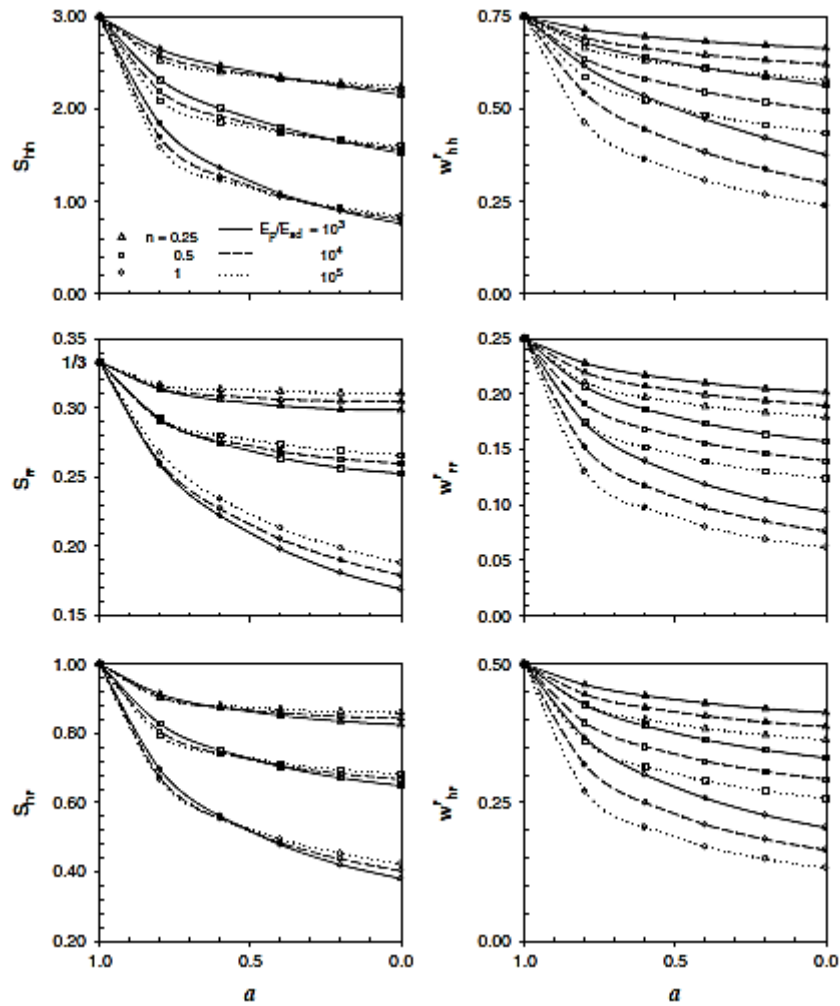
$$\beta_{ij} = w_{ij}^p \cdot \beta_p + (1 - w_{ij}^p) \cdot \beta_s + w_{ij}^r \cdot \beta_{rd} \quad (3.12)$$

όπου w_{ij}^p και w_{ij}^r είναι αδιάστατες σταθερές που εκφράζουν την συμβολή της συνολικής απόσβεσης του υλικού του πασσάλου και της απόσβεσης ακτινοβολίας αντίστοιχα. Οι κατανεμημένοι συντελεστές απόσβεσης ακτινοβολίας κατά μήκος του πασσάλου β_{rd} υπολογίζονται από τη σχέση:

$$\beta_{rd} = \frac{\omega \cdot c_{rd}}{2 \cdot k_d} \quad (3.13)$$

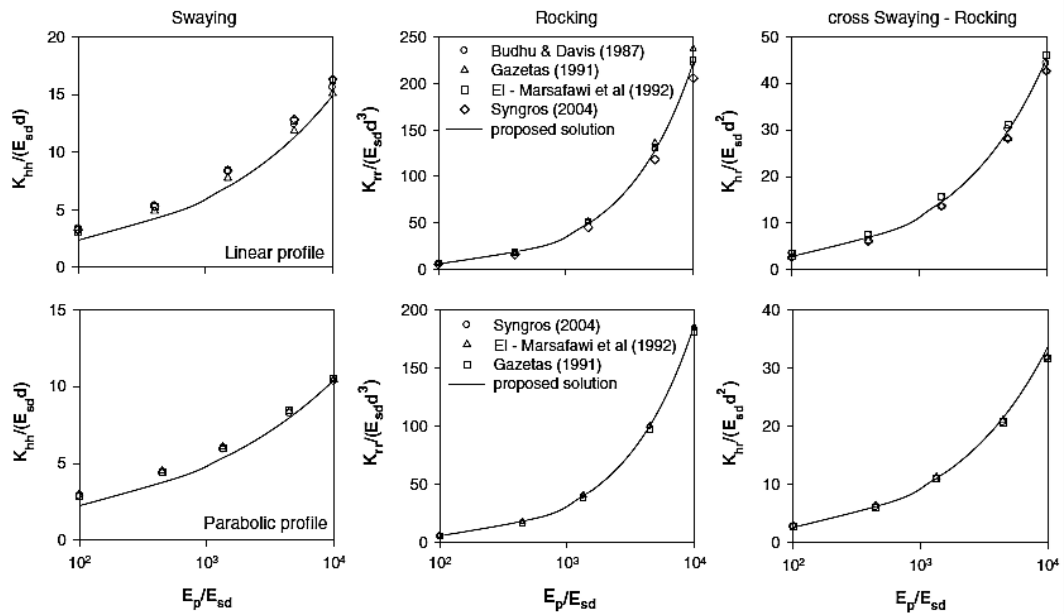
όπου c_{rd} η τιμή της του αποσβεστήρα ακτινοβολίας σε βάθος $z=d$, η οποία υπολογίζεται από το προσομοίωμα απειροστών τμημάτων, το οποίο αναπτύχθηκε από τους Karatzia & Mylonakis (2017) και περιγράφεται στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Για κάθε εδαφικό προφίλ αναπτύχθηκαν αναλυτικές εκφράσεις των συντελεστών S_{ij} και w_{ij}^r οι οποίες δίνονται και γραφικά για τον ευκολότερο υπολογισμό των τιμών. Ενδεικτικά, στο **Σχήμα 3.13** παρουσιάζονται ενδεικτικά οι τιμές των παραμέτρων για εδαφικό προφίλ με παραβολική αύξηση του μέτρου ελαστικότητας με το βάθος.

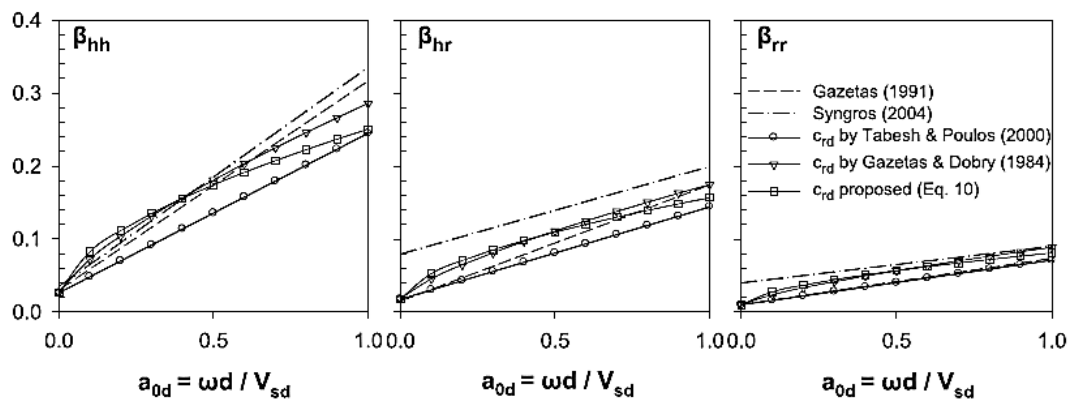


Σχήμα 3.13: Μεταβολή των συντελεστών S_{ij} και w_{ij} με τις παραμέτρους ανομοιογένειας a και n και τη σχέση σιβαρότητας εδάφους-πασσάλου E_p/E_{sd} για παραβολική αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του εδάφους με το βάθος (Karatzia & Mylonakis 2017).

Τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας συγκρίθηκαν με διαθέσιμες αριθμητικές λύσεις και αναλυτικές λύσεις για τους συντελεστές σιβαρότητας στο **Σχήμα 3.14** και για τους συντελεστές απόσβεσης στο **Σχήμα 3.15** και βρέθηκαν σε καλή συμφωνία με αυτές όπως φαίνεται στα Σχήματα.



Σχήμα 3.14: Σύγκριση των προβλέψεων για τους συντελεστές στιβαρότητας από την προτεινόμενη μεθοδολογία των Karatzia & Mylonakis (2017) με άλλες διαθέσιμες μεθοδολογίες.



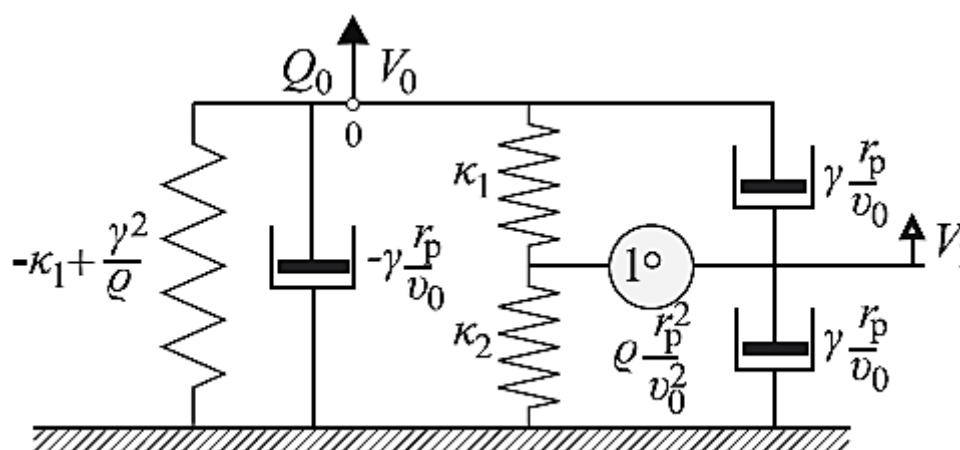
Σχήμα 3.15: Σύγκριση των προβλέψεων για τους συντελεστές απόσβεσης από την προτεινόμενη μεθοδολογία των Karatzia and Mylonakis (2017) με άλλες διαθέσιμες μεθοδολογίες για γραμμική αύξηση του μέτρου ελαστικότητας με το βάθος (Karatzia & Mylonakis 2017).

3.3 Αριθμητική προσομοίωση αλληλεπίδρασης ανεμογεννητριών με μακρο-ελατήρια και μακρο-αποσβεστήρες θεμελίωσης

3.3.1 Damgaard et al. (2014)

Οι Damgaard et al. (2014) προσέγγισαν την προσομοίωση της δυναμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής σε έναν αεροελαστικό κώδικα, εστιάζοντας στη θεμελίωση υπεράκτιας ανεμογεννήτριας με μονο-πάσσαλο. Για το σκοπό αυτό, η προσομοίωση περιλαμβάνει ένα αερο-ελαστικό προσομοίωμα για την ανωδομή και μια διάταξη συγκεντρωμένων παραμέτρων (Lumped Parameter Model - LPM) για τη θεμελίωση την ανεμογεννήτριας.

Η διάταξη LPM (Σχήμα 3.16) προσομοιώνει έναν ενιαίο γραμμικώς ελαστικό μονο-πάσσαλο πλήρως συνδεδεμένο με ένα γραμμικό ιξωδοελαστικό εδαφικό στρώμα υπερκείμενο άκαμπτου βραχώδους υποβάθρου. Για τον σκοπό αυτό, η προσομοίωση της διάταξης LPM περιλαμβάνει παράλληλα συνδεδεμένα μακρο-στοιχεία, με μερικούς βαθμούς ελευθερίας στη βάση της ανωδομής.

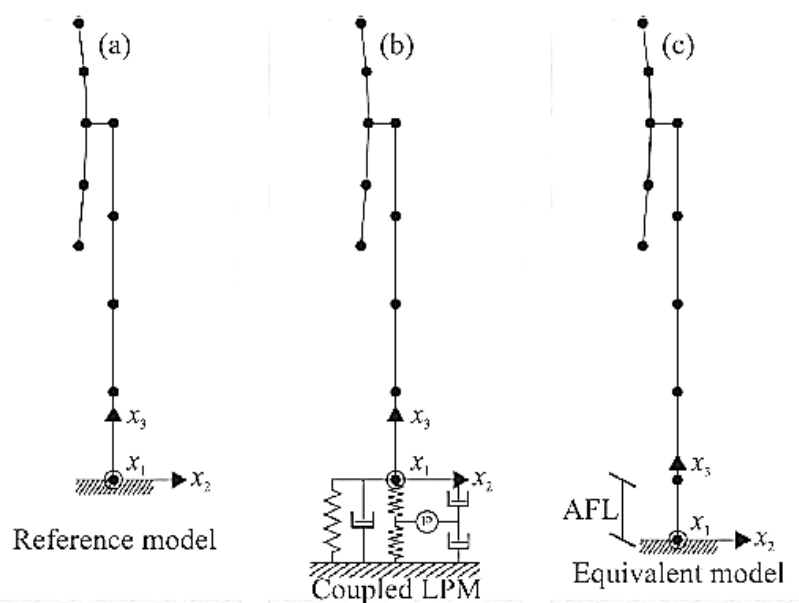


Σχήμα 3.16: Διάταξη συγκεντρωμένων παραμέτρων LPM (Damgaard et al. 2014)

Για τη βαθμονόμηση της διάταξης LPM οι Damgaard et al. (2014) χρησιμοποίησαν ημι-αναλυτικές σχέσεις για να προσδιορίσουν τις συναρτήσεις δυναμικής φόρτισης για το μονο-πάσσαλο, ώστε να εκτιμήσουν τη δυναμική αλληλεπίδραση εδάφους - πασσάλου. Όσον αφορά την οριζόντια ταλάντωση χρησιμοποιήθηκαν οι ημι-αναλυτικές σχέσεις των Nogami & Novak (1977). Αν και περιορίζονται σε εδάφη με σταθερό μέτρο ελαστικότητας και αγνοούν τη μη γραμμικότητα του εδάφους και την ολίσθηση – αποκόλληση μεταξύ του εδάφους και της επιφάνειας του πασσάλου, ύστερα από σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων προέκυψε πως αποτελούν

αξιόπιστη εκτίμηση. Παρόμοια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τις κατακόρυφες και στροφικές ταλαντώσεις χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες σχέσεις των Nogami & Novak (1976).

Έχοντας βαθμονομήσει τη διάταξη LPM πραγματοποιήθηκε μη-γραμμική ανάλυση της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας αναφοράς NREL (National Renewable Energy Laboratory) με ισχύ 5MW, όπως περιγράφεται από τους Jonkman et al. (2009), χρησιμοποιώντας το αεροελαστικό πρόγραμμα HAWC2. Τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της ανάλυσης α) με ένα προσομοίωμα πακτωμένης βάσης στον πυθμένα, στο οποίο δεν λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση εδάφους κατασκευής (ανάλυση αναφοράς) και β) με μία «ισοδύναμη» διάταξη πακτωμένης βάσης σε ορισμένο βάθος (apparent fixity length model), που προκύπτει από τη βαθμονόμηση στην ιδιοσυχνότητα και την απόσβεση της χαμηλότερης ιδιοσυχνότητας της ανωδομής της ανεμογεννήτριας. Στο **Σχήμα 3.17** παρουσιάζονται τα τρία προσομοιώματα που αναλύθηκαν.



Σχήμα 3.17: Παρουσίαση των τριών προσομοιωμάτων: α) πακτωμένη βάση, β) διάταξη LPM, και γ) ισοδύναμη διάταξη πακτωμένης βάσης (Damgaard et al. 2014).

Η ανάλυση στα τρία παραπάνω προσομοιώματα πραγματοποιήθηκε για τέσσερις περιπτώσεις φόρτισης διαφοροποιούμενες ως προς την ταχύτητα του ανέμου και τον προσανατολισμό της ανεμογεννήτριας σε σχέση με τη διεύθυνση του ανέμου. Τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις κάνουν ξεκάθαρη τη σημασία της αλληλεπίδρασης του εδάφους και της κατασκευής. Επιπλέον, η «ισοδύναμη» διάταξη (**Σχήμα 3.17γ**) φάνηκε να αποδίδει καλά την δυναμική απόκριση της ανεμογεννήτριας.

3.3.2 Carswell et al. (2015)

Οι Carswell et al. (2015) διερεύνησαν τη σημασία της απόσβεσης της θεμελίωσης μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας εδραζώμενης σε μονο-πάσσαλο, υποβάλλοντάς τη σε ακραία φορτία καταιγίδας, με χρήση γραμμικώς ελαστικού δισδιάστατου προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων. Στην ανάλυση λήφθηκαν υπόψη η υδροδυναμική μάζα για το τμήμα της ανωδομής εντός του νερού, η απόσβεση της ανωδομής και η απόσβεση της θεμελίωσης. Δεδομένου ότι ο υπολογισμός της συνολικής απόσβεσης μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας λαμβάνεται ως άθροισμα των επιμέρους αποσβέσεων, προσομοιώνοντας κάθε πηγή απόσβεσης ανεξάρτητα, στη διερεύνηση αγνοήθηκαν η αεροδυναμική και η υδροδυναμική απόσβεση, καθώς δεν επηρεάζουν το αποτέλεσμα της ζητούμενης απόσβεσης της θεμελίωσης.

Στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων η θεμελίωση αντικαθιστάται με μία διάταξη συγκεντρωμένων παραμέτρων (LPM). Η συγκεκριμένη διάταξη προσομοιώνει το σύστημα εδάφους – πασσάλου με μια άκαμπτη ράβδο υποστηριζόμενη από ελατήρια σε ένα ισοδύναμο βάθος L_{eq} κάτω από τον πυθμένα και έναν αποσβεστήρα στην κορυφή της. Για το σκοπό αυτό, υπολογίζονται η δυσκαμψία και η απόσβεση της θεμελίωσης (μόνο υστερητική) με χρήση του προγράμματος INFIDEL. Το πρόγραμμα INFIDEL αντιμετωπίζει αξιsymμετρικά τρισδιάστατα ημι-στατικά προβλήματα αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής, όπου τα ανακυκλικά φορτία εφαρμόζονται στην θεμελίωση για να υπολογιστούν οι μετακινήσεις και η στροφή της κατά τη φόρτιση. Στη παρούσα διερεύνηση, ο μονο-πάσσαλος προσομοιώνεται ως γραμμικώς ελαστικός και το έδαφος ως ιστροπικό μη-γραμμικώς ελαστικό υλικό. Για κάθε εφαρμογή φορτίου και αντίστοιχη απόκριση διατμητικής τάσης στο έδαφος υπολογίζεται η απώλεια υστερητικής ενέργειας E_h για έναν κύκλο φόρτισης.

Στο μητρώο στιβαρότητας που χρησιμοποιήθηκε για την ακαμψία των ελατηρίων αγνοήθηκαν η εκτός επιπέδου, η κατακόρυφη και η στρεπτική κίνηση και λήφθηκε υπόψη μόνο η οριζόντια και η στροφική κίνηση. Προκειμένου να απλοποιηθεί το μητρώο δυσκαμψίας, οι συζευγμένοι διαγώνιοι συντελεστές στιβαρότητας συμπύχθηκαν κινηματικά με τους ασύζευκτους συντελεστές στιβαρότητας λόγω οριζόντιας μετακίνησης k_{xx}' και λόγω στροφής $k_{\phi\phi}'$. Οι συντελεστές στιβαρότητας υπολογίζονται από το πρόγραμμα INFIDEL.

Όσον αφορά στην απόσβεση, θεωρήθηκε ότι ένας στροφικός αποσβεστήρας στον πυθμένα αποτελεί την καταλληλότερη προσομοίωση της συγκεντρωμένης απόσβεσης της

ανακυκλικής αλληλεπίδρασης εδάφους – πασσάλου σε σχέση με τον αντίστοιχο οριζόντιο λόγω της φύσης του μονο-πασσάλου. Ο συντελεστής ιξώδους απόσβεσης του αποσβεστήρα για έναν κύκλο φόρτισης υπολογίζεται από το πρόγραμμα INFIDEL και είναι ίσος με:

$$c_{\phi\phi} = \frac{E_h}{2 \cdot \theta^2 \cdot \pi^2 \cdot f} \quad (3.14)$$

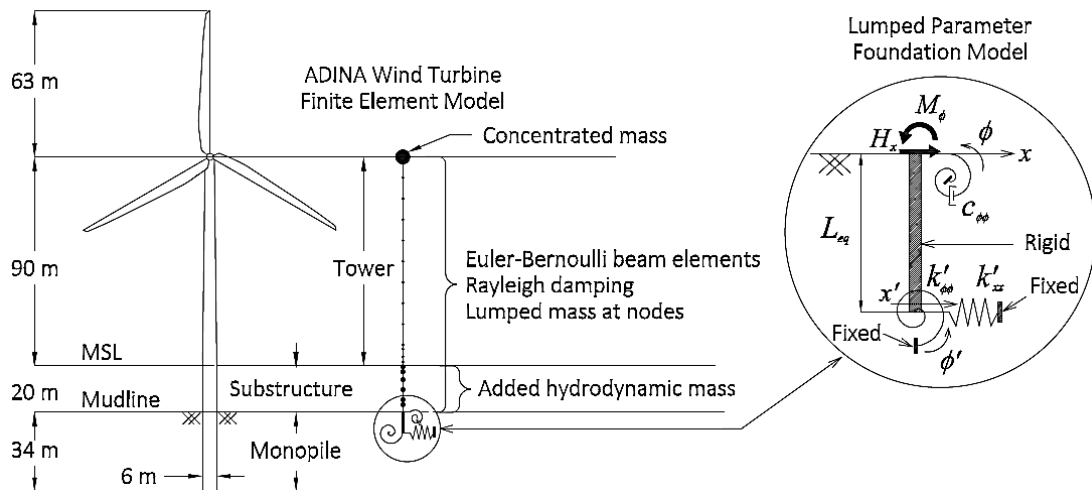
όπου:

E_h : η απώλεια ενέργειας λόγω υστερητικής δράσης του υλικού

θ : το εύρος της στροφής

f : η συχνότητα της διέγερσης

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ανάλυση του συστήματος της ανωδομής και της διάταξης συγκεντρωμένων παραμέτρων με το πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων ADINA, για την εύρεση της συνεισφοράς της απόσβεσης της θεμελίωσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι ήταν απαραίτητη η επαναληπτική διαδικασία των αναλύσεων μέχρι τα φορτία για τα οποία πραγματοποιήθηκαν οι υπολογισμοί στο INFIDEL για τις εισαγόμενες παραμέτρους του LPM να συμφωνήσουν με τα εξαγόμενα ανακυκλικά φορτία του ADINA. Για την ανωδομή χρησιμοποιήθηκε η υπεράκτια ανεμογεννήτρια αναφοράς NREL με ισχύ 5MW (Jonkman et al. 2009). Στο **Σχήμα 3.18** παρουσιάζεται το αριθμητικό προσομοίωμα.



Σχήμα 3.18: Παρουσίαση της διάταξης της προσομοίωσης (Carswell et al 2015)

Χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι για τον υπολογισμό της συνολικής απόσβεσης του συστήματος με τη μέθοδο της λογαριθμικής μείωσης. Η πρώτη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση ήταν της «ελεύθερης ταλάντωσης». Σε αυτή

εφαρμόστηκε μετακίνηση 0.1m στη συγκεντρωμένη μάζα της κορυφής, διατηρώντας την σε αυτή τη θέση για 10sec και ύστερα το σύστημα αφέθηκε ελεύθερο να ταλαντωθεί. Ο Πίνακας 3.3 συνοψίζει τα αποτελέσματα των συγκεντρωμένων παραμέτρων της θεμελίωσης που προέκυψαν από την ανάλυση με τη μέθοδο της ελεύθερης ταλάντωσης.

Πίνακας 3.3: Συγκεντρωμένες παράμετροι της θεμελίωσης με τη μέθοδο της ελεύθερης ταλάντωσης (Carswell et al 2015)

Διάταξη συγκεντρωμένων παραμέτρων	$u_{top} = 0.1m$
L_{eq}	7.60 m
$k_{\chi\chi'}$	3.89×10^9 N/m
$k_{\phi\phi'}$	1.14×10^{11} Nm/rad
$C_{\phi\phi}$	9.34×10^8 Nm-s/rad

Η συνολική απόσβεση υπολογίστηκε από τη χρονοϊστορία της κίνησης και βρέθηκε ίση με 1.17%. Ο στροφικός αποσβεστήρας θεωρήθηκε ότι λαμβάνει υπόψη του τη συνολική απόσβεση της θεμελίωσης, ενώ για την ανωδομή ελήφθη απόσβεση ίση με 1 %. Συνεπώς, η απόσβεση της θεμελίωσης προέκυψε ίση με 0.17 %. Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε και για μετακίνηση 0.16m της κορυφής, με την απόσβεση της θεμελίωσης να αυξάνεται στο 0.28 %. Τα παραπάνω αποτελέσματα συγκρινόμενα με τα αντίστοιχα αποτελέσματα άλλων ερευνητών όπως παρουσιάζονται στους παρακάτω Πίνακες (Πίνακας 3.4, Πίνακας 3.5) φαίνεται να είναι αρκετά μικρότερα.

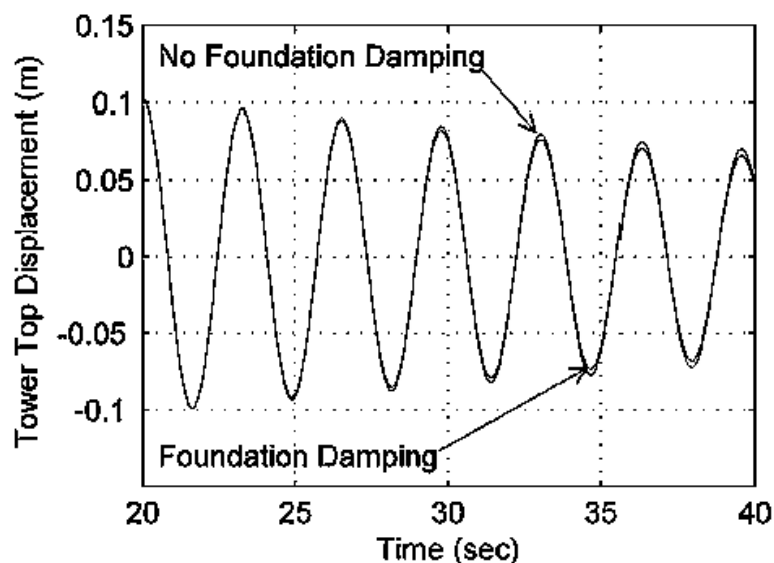
Πίνακας 3.4: Σύγκριση αποτελεσμάτων για την απόσβεση της θεμελίωσης (Carswell et al 2015)

	Tarp-Johansen et al. (2009)	Versteijlen et al. (2011)	Damgaard et al. (2012)
Μέθοδος εκτίμησης απόσβεσης θεμελίωσης	3D FEM	Τροποποιημένες p-γ	Υστερητικές p-γ
Ανεμογεννήτρια	3.5 MW (Προσαρμοσμένη NREL 5 MW)	Siemens 3.6 MW	-
Εδαφικό προφίλ	Γενικευμένη άμμος ή αργιλώδες από Βόρεια Θάλασσα	-	Άνω στρώση χαλαρή άμμος, πολύ στιφρή εως πολύ σκληρή άργιλος
ξθεμελίωσης	0.56% - 0.80%	1.5%	0.58%
ξανωδομής	0.19%	1.5%	0.19%
Σύνολο	0.75%-0.99%	3.0%	0.77%

Πίνακας 3.5: Σύγκριση αποτελεσμάτων για την απόσβεση της θεμελίωσης (Carswell et al 2015)

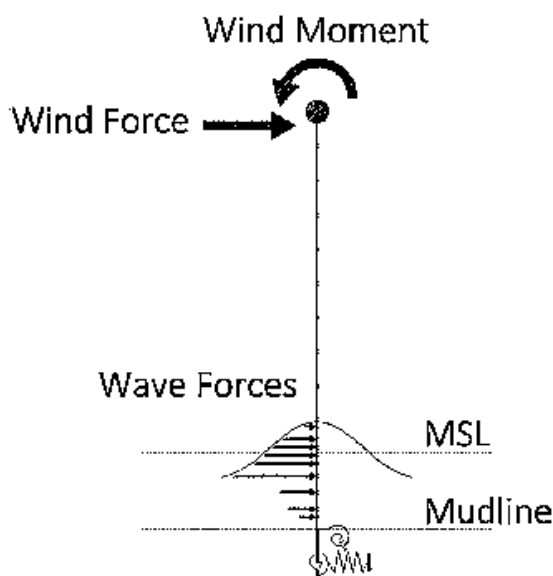
	Damgaard et al. (2013)	Shirzadeh et al. (2013)	Carswell et al. (2015)
Μέθοδος εκτίμησης απόσβεσης θεμελίωσης	Υστερητικές p-γ	HAWC2, Rayleigh	3D και 2D FEM
Ανεμογεννήτρια	Vestas V90 – 3 MW	Vestas V90 – 3 MW (Προσαρμοσμένη NREL 5 MW)	NREL 5 MW
Εδαφικό προφίλ	Άμμος μέσης πυκνότητας και μαλακή άργιλος	Πυκνή άμμος με στρώση στιφρής αργίλου	Μαλακή, στιφρή και σκληρή άργιλος
ξθεμελίωσης	0.8%-1.3%	0.25%	0.17%-0.28%
ξανωδομής	-	0.6%	1.0%
Σύνολο	0.8%-1.3%	0.85%	1.17%-1.28%

Στο **Σχήμα 3.19** φαίνεται η επιρροή της απόσβεσης στην κίνηση της ανεμογεννήτριας, καθώς τα εύρη της ταλάντωσης μειώνονται με ταχύτερο ρυθμό στην περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη στην ανάλυση.



Σχήμα 3.19: Ελεύθερη ταλάντωση λαμβάνοντας υπόψη την απόσβεση της θεμελίωσης και χωρίς αυτή (Carswell et al 2015).

Η δεύτερη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτή της στοχαστικής ανάλυσης χρονοϊστοριών. Σε αυτή την προσέγγιση, το σύστημα της ανεμογεννήτριας υποβλήθηκε σε έξι διαφορετικές στοχαστικές χρονοϊστορίες φόρτισης διάρκειας 1 ώρας (hr). Οι χρονοϊστορίες φόρτισης ανέμου και κυμάτων δημιουργήθηκαν από το πρόγραμμα FAST. Στο **Σχήμα 3.20** παρουσιάζεται ο τρόπος φόρτισης του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων.



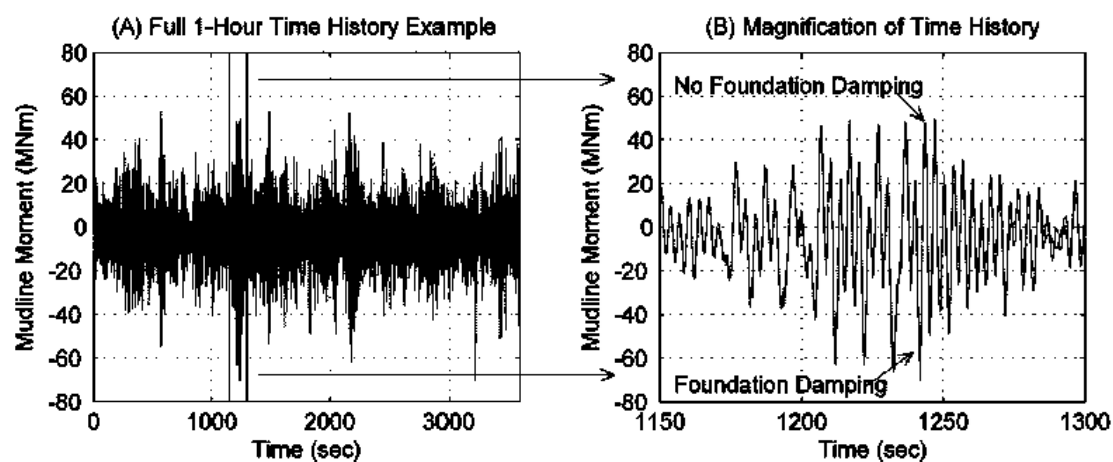
Σχήμα 3.20: Παρουσίαση του τρόπου φόρτισης της διάταξης της προσομοίωσης (Carswell et al 2015)

Προκειμένου να εξεταστεί η σημασία της απόσβεσης της θεμελίωσης εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις: α) λαμβάνοντας υπόψη μόνο την απόσβεση Rayleigh της ανωδομής και β) λαμβάνοντας υπόψη την απόσβεση Rayleigh της ανωδομής και επιπλέον την απόσβεση της θεμελίωσης. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης κατέληξαν σε απόσβεση της θεμελίωσης ίση με 0.72 %. Η υψηλότερη τιμή απόσβεσης σε σχέση με τη μέθοδο ανάλυσης της ελεύθερης ταλάντωσης ωφείλεται στην αύξηση της απώλειας ενέργειας εξαιτίας των μεγαλύτερων φορτίων που εφαρμόζονται σε αυτή την περίπτωση. Ο Πίνακας 3.6 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των συντελεστών στιβαρότητας και απόσβεσης με τη μεθοδο στοχαστικών χρονοϊστοριών.

Πίνακας 3.6: Παράμετροι της θεμελίωσης με τη μέθοδο στοχαστικών χρονοϊστοριων (Carswell et al 2015)

Διάταξη συγκεντρωμένων παραμέτρων	Τιμή
L_{eq}	9.12 m
$k_{xx'}$	3.38×10^9 N/m
$k_{\phi\phi'}$	1.04×10^{11} Nm/rad
$C_{\phi\phi}$	3.29×10^9 Nm/s

Επιπλέον, οι μέγιστες ροπές στον πυθμένα παρουσίασαν μείωση κατά 7-9 % και το εύρος της μετακίνησης και στροφής του πυθμένα μειώθηκε κατά 3-5 %. Στο Σχήμα 3.21 παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της μείωσης των ροπών στον πυθμένα λόγω της απόσβεσης της θεμελίωσης.

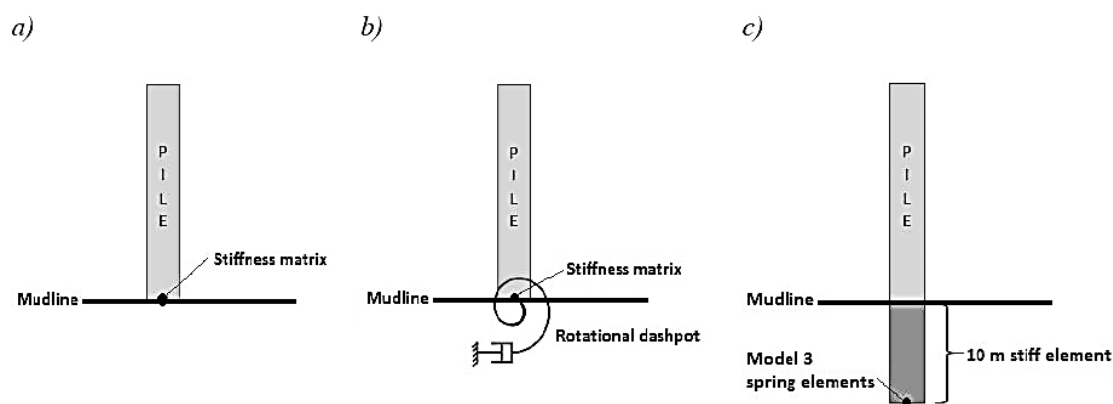


Σχήμα 3.21: Παράδειγμα της μείωσης των ροπών στον πυθμένα (Carswell et al 2015)

Συνολικά, οι Carswell et al. (2015) πρότειναν μια μέθοδο για μετατροπή της υστερητικής απώλειας ενέργειας σε έναν ιζώδη στροφικό αποσβεστήρα στον πυθμένα για μια υπεράκτια ανεμογεννήτρια. Στα αποτελέσματά τους παρουσιάζεται η επιρροή της απόσβεσης της θεμελίωσης και παροτρύνουν για επιπλέον έρευνα στο συγκεκριμένο τομέα.

3.3.3 Aasen (2016)

Ο Aasen (2016) εξέτασε την επιρροή διαφορετικών προσομοιωμάτων αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής στην κόπωση και στις αναπτυσσόμενες μέγιστες ροπές σε μια υπεράκτια ανεμογεννήτρια. Στο πλαίσιο της έρευνας του εξέτασε την επιρροή της εδαφικής απόσβεσης δοκιμάζοντας τρεις διαφορετικές διατάξεις για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής. Η πρώτη διάταξη (**Σχήμα 3.22α**) αποτέλεσε τη διάταξη αναφοράς και περιγράφει ένα γραμμικό προσομοίωμα θεμελίωσης σύμφωνα με το οποίο η θεμελίωση αντικαθίσταται από ένα μητρώο δυσκαμψίας στη βάση της ανεμογεννήτριας χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της απόσβεσης της θεμελίωσης. Για τον υπολογισμό των συντελεστών του μητρώου στιβαρότητας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα LPILE 4.0. Η δεύτερη διάταξη (**Σχήμα 3.22β**) περιελάμβανε το ίδιο μητρώο στιβαρότητας με το πρώτο με την προσθήκη όμως ενός στροφικού αποσβεστήρα στον πυθμένα για να προσομοιώνει την εδαφική απόσβεση. Συγκεκριμένα, θεωρήθηκε σταθερή στροφική απόσβεση με συντελεστή $c = 9.34 \times 10^8 \text{ Nms/rad}$, στηριζόμενος στα ευρήματα των Carswell et al. (2015) που έχουν περιγραφεί παραπάνω. Τέλος, στην τρίτη διάταξη (**Σχήμα 3.22γ**) η εδαφική απόκριση αναπαρίσταται από ελαστικά-τελειώς πλαστικά στροφικά ελατήρια με κινηματικό νόμο κράτυνσης τα οποία εφαρμόζονται σε έναν κοινό κόμβο σε βάθος 10 m από τον πυθμένα και προσομοιώνουν την υστερητική απόσβεση.



Σχήμα 3.22: Εξεταζόμενες διατάξεις αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής (Aasen 2016)

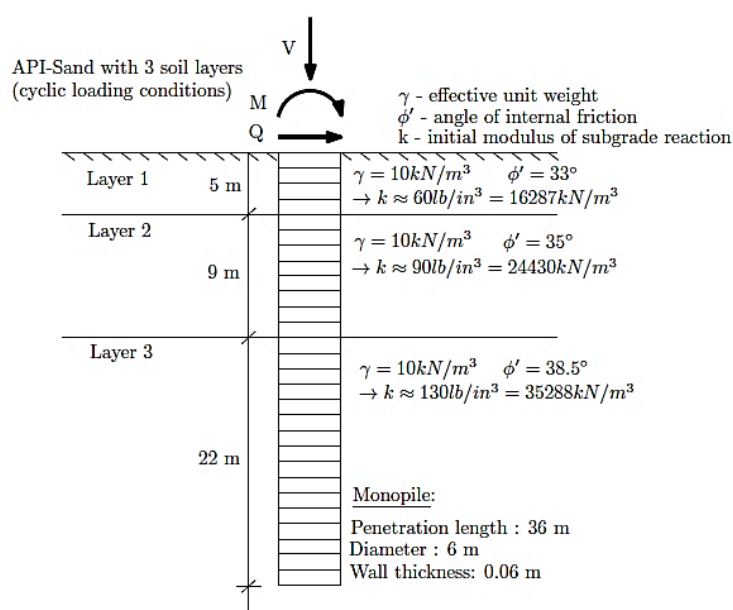
Στις δοκιμές χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα 3DFloat για την αναπαράσταση της δυναμικής συμπεριφοράς της υπεράκτιας αναμογεννήτριας. Το πρόγραμμα αυτό λαμβάνει υπόψη του τα φορτία από τον ωκεανό και τον άνεμο, τις αντιδράσεις από το σύστημα ελέγχου και την ελαστική συμπεριφορά του υλικού.

Σύμφωνα με τον Aasen (2016), η επίδραση της εδαφικής απόσβεσης είναι ιδιαίτερως σημαντική καθώς στη δεύτερη διάταξη η υπολογισθείσα κόπωση στην κατασκευή της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας μειώθηκε κατά 11% στον πυθμένα και στην κορυφή κατά 16%, σε σχέση με την πρώτη, ενώ οι αντίστοιχες τιμές για την τρίτη διάταξη ήταν 3% και 7% αντίστοιχα.

Συγκρίνοντας τα δύο προσομοιώματα ο Aasen (2016) κατέληξε ότι η χρήση αποσβεστήρα (διάταξη 2) τείνει να υπερεκτιμά την εδαφική απόκριση, καθιστώντας την 3^η διάταξη με τον κινηματικό νόμο κράτυνσης ένα πιο ρεαλιστικό τρόπο προσομοίωσης της εδαφικής απόσβεσης.

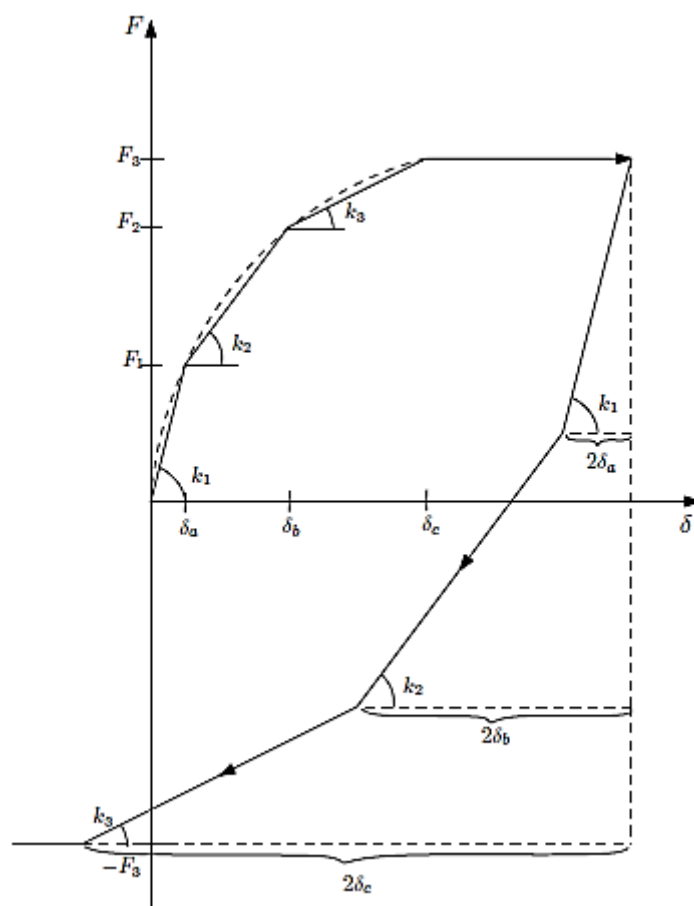
3.3.4 Krathe & Kaynia (2016)

Οι Krathe & Kaynia (2016) χρησιμοποίησαν ένα μη γραμμικό προσομοίωμα απόκρισης της θεμελίωσης και εξέτασαν την ορθότητα των αποτελεσμάτων του. Μελετήθηκε ανεμογεννήτρια η οποία θεμελιώνεται σε πάσσαλο σε εδαφικό προφίλ όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.23**. Η υπό εξέταση ανεμογεννήτρια επιλέχθηκε να αντιπροσωπεύει τα χαρακτηριστικά της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας αναφοράς NREL με ισχύ 5MW (Jonkman et al. 2009).



Σχήμα 3.23: Το υπό εξέταση σύστημα εδάφους-θεμελίωσης (Krathe & Kaynia 2016)

Το μη γραμμικό προσομοίωμα θεμελίωσης που εξετάστηκε περιγράφεται από μη-συζευγμένα, ελαστικά-απολύτως πλαστικά ελατήρια τοποθετημένα παράλληλα στην κορυφή του πασσάλου βάσει του προσομοιώματος που πρότεινε ο Iwan (1967), ενώ η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για φόρτιση και αποφόρτιση παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.24**. Τονίζεται ότι στο **Σχήμα 3.24** ο κατακόρυφος άξονας (“F”) μπορεί να αντιπροσωπεύει δύναμη ή ροπή ενώ ο οριζόντιος (“δ”) μετατόπιση ή στροφή αντίστοιχα. Με την περιγραφή της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης με μη-γραμμική σχέση (**Σχήμα 3.24**), λαμβάνεται υπόψη η υστερητική απόσβεση στην απόκριση. Επιπρόσθετα, επισημαίνεται ότι η απόσβεση ακτινοβολίας μπορεί να παραληφθεί για συχνότητες μικρότερες του 1Hz (Targ-Johansen et al. 2009). Δεδομένου ότι τόσο οι συχνότητες λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, η πρώτη ιδιοσυχνότητα του πύργου της όσο και οι συχνότητες των περιβαλλοντικών φορτίων είναι χαμηλότερες από 1Hz, οι Krathe & Kaynia (2016) παραλείπουν την επίδραση της απόσβεσης ακτινοβολίας και ενσωματώνουν μόνο την επίδραση της υστερητικής απόσβεσης.



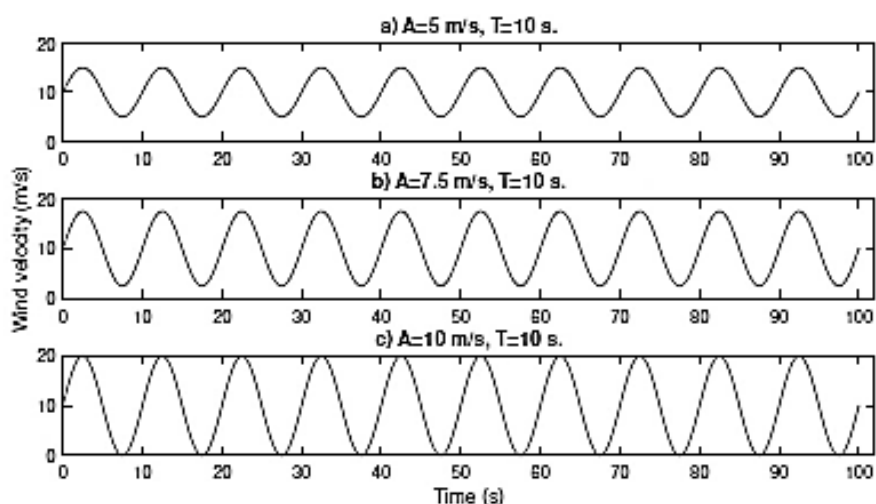
Σχήμα 3.24: Καμπύλη φορτίου-παραμόρφωσης για τη θεμελίωση (Krathe & Kaynia 2016).

Στη συγκεκριμένη μελέτη, η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης του κάθε επιμέρους ελατηρίου, που θα συνθέσει την καμπύλη στο **Σχήμα 3.24**, επιλέχθηκε να προσεγγιστεί σε όρους ροπής – στροφής με χρήση της υπερβολικής συνάρτησης:

$$F = \frac{k_{\max} \cdot \delta}{1 + \frac{k_{\max} \cdot \delta}{F_{\max}}} \quad (3.15)$$

όπου το k_{\max} προέρχεται από το μητρώο στιβαρότητας της θεμελίωσης το οποίο υπολογίζεται μέσω ενός προσομοιώματος Winkler από τους επιμέρους δείκτες εδάφους k των εδαφικών στρώσεων (**Σχήμα 3.23**).

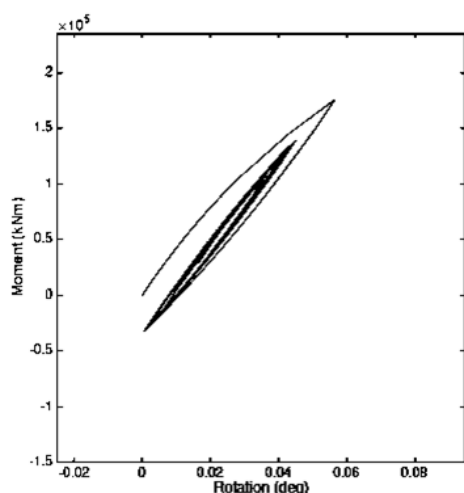
Η αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό FAST. Για πιο ομαλό σχήμα της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης η θεμελίωση προσομοιώθηκε με 20 παράλληλα μη-συζευγμένα ελαστικά-απολύτως πλαστικά ελατήρια. Η φόρτιση του συστήματος έγινε μόνο με αρμονικά φορτία ανέμου για διάφορες συχνότητες φόρτισης και για διάφορες ταχύτητες ανέμου. Στο **Σχήμα 3.25** παρουσιάζεται ενδεικτικά η φόρτιση με αρμονικό φορτίο ανέμου για μέση ταχύτητα ανέμου 10 m/s, πλάτος διακύμανσης 5, 7.5 και 10m/s και περίοδο φόρτισης $T=10$ sec, η οποία είναι κοντά στην ιδιοπερίοδο της ανεμογεννήτριας.



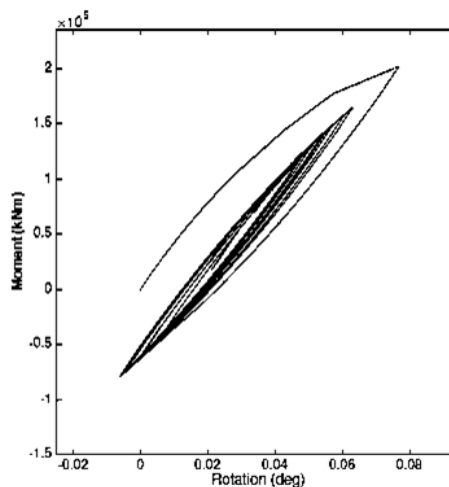
Σχήμα 3.25: Αρμονική φόρτιση ανέμου μέσης ταχύτητας 10 m/sec και περιόδου 10 sec (Krathe & Kaynia 2016)

Στο **Σχήμα 3.26** παρουσιάζονται οι καμπύλες ροπής – στροφής για τις τρεις αρμονικές φορτίσεις ανέμου στο **Σχήμα 3.25** όπως προέκυψαν από την ανάλυση στο λογισμικό FAST. Το σχήμα τους επιβεβαιώνει την ορθή αναπαράσταση της μη γραμμικής συμπεριφοράς

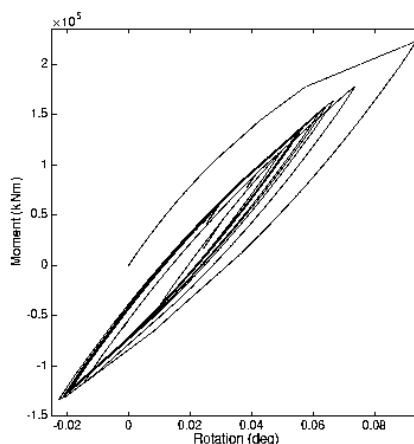
καθώς και την ύπαρξη απόσβεσης, η οποία αναπαρίσταται από το εμβαδό που περικλείεται στο βρόχο.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 3.26: Υστερητική απόκριση του μη γραμμικού προσομοιώματος για τις αρμονικές φορτίσεις ανέμου στο **Σχήμα 3.25** και με εύρος ταλάντωσης (α) 5m/s, (β) 7.5m/s και (γ) 10m/s (Krathe & Kaynia 2016)

3.3.5 Oh et al. (2018)

Οι Oh et al. (2018) διερεύνησαν την παρούσα βιβλιογραφία σχετικά με τους τρόπους προσομοίωσης της εδαφικής απόκρισης μέσω ισοδύναμων γραμμικών ελατηρίων. Σύμφωνα με τους Oh et al. (2018), η αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευής μπορεί να ληφθεί υπόψη με τη χρήση ισοδύναμης δυσκαμψίας του εδάφους. Όταν η κατασκευή αλληλεπιδρά με ένα ομοιογενές έδαφος η παραμόρφωση του εδάφους είναι τόσο μικρή ώστε το έδαφος να θεωρηθεί γραμμικώς ελαστικό. Μάλιστα, ο κανονισμός DnV (2014)

προτείνει τις παρακάτω σχέσεις για την ισοδύναμη στιβαρότητα του εδάφους για θεμελίωση με πασσάλους:

$$k_v = \frac{4 \cdot G \cdot R}{2 - \nu} \left(1 + 1.28 \cdot \frac{R}{2 \cdot H} \right) \left(1 + \frac{L}{2 \cdot R} \right) \left(1 + (0.85 - 0.28 \cdot \frac{L}{R}) \cdot \frac{\frac{L}{H}}{1 - \frac{L}{H}} \right)$$

$$k_H = \frac{8 \cdot G \cdot R}{2 - \nu} \left(1 + \frac{R}{2 \cdot H} \right) \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{L}{R} \right) \left(1 + \frac{5}{4} \cdot \frac{L}{H} \right) \quad (3.16)$$

$$k_R = \frac{8 \cdot G \cdot R^3}{3 \cdot (1 - \nu)} \left(1 + \frac{R}{6 \cdot H} \right) \left(1 + 2 \cdot \frac{L}{R} \right) \left(1 + 0.7 \cdot \frac{L}{H} \right)$$

όπου το R και L αντιστοιχούν στην ακτίνα και στο μήκος του πασσάλου αντίστοιχα ενώ H είναι το πάχος της στρώσης του εδάφους πάνω από το βραχώδες υπόβαθρο. Παρόλο που η δυσκαμψία του εδάφους μπορεί να προσδιοριστεί με απλό τρόπο χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις, η προσέγγιση αυτή έχει πολλούς περιορισμούς. Συγκεκριμένα, ο DNV σημειώνει ότι αυτές οι εξισώσεις ισχύουν όταν το μήκος του πασσάλου είναι μικρότερο από τη διάμετρό του ($L < 2R$). Αυτός ο περιορισμός δεν μπορεί να ισχύει για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες καθώς οι περισσότεροι πάσσαλοι έχουν πολύ μεγάλο μήκος σε σχέση με την ακτίνα τους. Επιπλέον το βραχώδες υπόβαθρο θα έπρεπε να είναι δύο φορές βαθύτερα από το μήκος του πασσάλου ώστε να εφαρμοστεί η εξίσωση. Ως εκ τούτου, οι παραπάνω εξισώσεις δεν έχουν εφαρμογή όταν το βραχώδες υπόβαθρο είναι κοντά στον πάσσαλο. Οι παραπάνω περιορισμοί προέρχονται από το γεγονός ότι οι παραπάνω εξισώσεις προκύπτουν από μελέτες σε υπεράκτιες εξέδρες εξόρυξης πετρελαίου, οι οποίες αντιστοιχούν σε διαφορετικής τάξης μεγέθους φορτίσεις και διαστάσεις πασσάλων θεμελίωσης.

Για την περίπτωση ανεμογεννητριών, έχουν διεξαχθεί πολλές μελέτες οι οποίες χρησιμοποιούν διατάξεις συγκεντρωμένων μαζών εξαιτίας της απλότητας αυτής της προσέγγισης. Οι Adhikari et al. (2011) ανέπτυξαν ένα προσομοίωμα ανεμογεννήτριας το οποίο αποτελούνταν από δύο συγκεντρωμένες μάζες που αντιπροσώπευαν τον πύργο και το πτερύγιο. Η μάζα που αντιπροσώπευε τον πύργο συνδεόταν σε ένα ακλόνητο όριο (πχ έδαφος) με κατακόρυφο και στροφικό ελατήριο, ενώ οι ιδιοσυχνότητες υπολογίστηκαν από την επίλυση του αντίστοιχου προβλήματος ιδιοτιμών. Η εν λόγω μελέτη έδειξε ότι η πρώτη ιδιοσυχνότητα μεταβλήθηκε σημαντικά όταν η δυσστησία του εδάφους ήταν μικρή, επισημαίνοντας έτσι τους κινδύνους που μπορεί να προξενήσει η μείωση στη δυσστησία

του εδάφους στην ανωδομή ειδικά όταν το έδαφος είναι μαλακό. Το προσομοίωμα των Adhikari et al. (2011) αναβαθμίστηκε από τους Harte et al. (2012), συμπεριλαμβάνοντας την ιξώδη απόσβεση λόγω της αλληλεπίδρασης εδάφους και πύργου της ανεμογεννήτριας και της αλληλεπίδρασης πύργου και πτερυγίου. Οι Sarountzakis et al. (2015) συνέδεσαν ένα μακρο-ελατήριο στον πύργο της ανεμογεννήτριας, το οποίο προσομοιώθηκε με τη μέθοδο συνοριακών στοιχείων. Έδειξαν, ότι η κατασκευή με αυτή την ισοδύναμη στιβαρότητα είχε μια πρώτη ιδιοσυχνότητα 6% μικρότερη από την ιδιοσυχνότητα της με πακτωμένο άκρο. Επιπλέον, η σεισμική απόκριση της κατασκευής βελτιώθηκε σημαντικά με τη χρήση του μακρο-ελατηρίου.

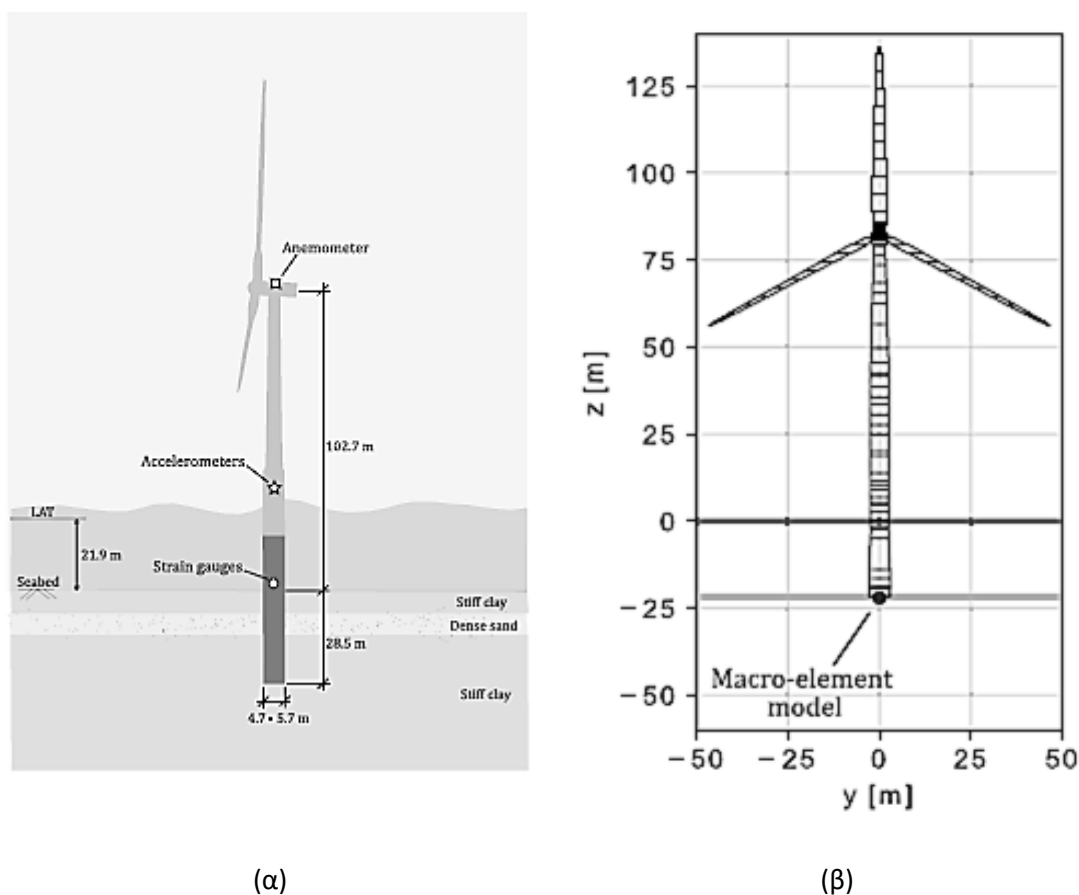
3.3.6 Kaynia (2018)

Ο Kaynia (2018) διερεύνησε τη βιβλιογραφία σχετικά με τις παραμέτρους αντισεισμικού σχεδιασμού των υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Σύμφωνα με την έρευνα, μια σειρά από αριθμητικές αναλύσεις της αλληλεπίδρασης του εδάφους-κατασκευής της ανεμογεννήτριας έχει δείξει ότι λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση αυτή στους υπολογισμούς μπορεί να μειώσει τα σεισμικά φορτία έως και 10%. Παράλληλα, επισημαίνεται ότι, παρά το γεγονός ότι η ανάλυση ανεμογεννητριών με εξελιγμένους κώδικες πεπερασμένων στοιχείων έχει αρχίσει να γίνεται δημοφιλής, η χρήση μη γραμμικών ελατηρίων ή μακροστοιχείων για την αναπαράσταση της απόκρισης της θεμελίωσης στη βάση της ανωδομής παραμένει ο κύριος τρόπος προσομοίωσης της αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής στην πράξη. Αυτό συμβαίνει γιατί τα υπάρχοντα υπολογιστικά εργαλεία βασίζονται σε υδρο-αερο-ελαστο-δυναμικούς κώδικες (π.χ. το FAST), που δεν μπορούν εύκολα να ενταχθούν στους υπάρχοντες κώδικες πεπερασμένων στοιχείων (π.χ. ABAQUS).

Επιπλέον ο Kaynia (2018) υπογραμμίζει την τρωτότητα των ανεμογεννητριών στην κατακόρυφη σεισμική διέγερση, σε αντίθεση με την οριζόντια διέγερση, εξαιτίας των υψηλών ιδιοσυχνοτήτων στη διεύθυνση αυτή. Συγκεκριμένα, παρουσιάζει τα αποτελέσματα των αναλύσεων σεισμικής απόκρισης με πεπερασμένα στοιχεία στον κώδικα SAP2000 των Kjørglaug and Kaynia 2015 για την ανεμογεννήτρια NREL 5MW και κατακόρυφη σεισμική διέγερση. Σύμφωνα με τις αναλύσεις, αν η απόσβεση ακτινοβολίας του εδάφους ληφθεί υπόψη στις αναλύσεις, μειώνονται σημαντικά οι αναπτυσσόμενες κατακόρυφες επιταχύνσεις, αποτελώντας το κλειδί για οικονομικότερο σχεδιασμό των υπεράκτιων ανεμογεννητριών.

3.3.7 Page et al. (2019)

Οι Page et al. (2019), όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2, μελέτησαν την επιρροή του τρόπου προσομοίωσης της θεμελίωσης και της μεθόδου βαθμονόμησής του στην απόκριση υπεράκτιων ανεμογεννητριών θεμελιωμένων σε μονο-πάσσαλο συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με δεδομένα πεδίου για μία υπεράκτια ανεμογεννήτρια θεμελιωμένη με μονο-πάσσαλο στη Βόρεια Θάλασσα.



Σχήμα 3.27: (α) Το υπό εξέταση σύστημα εδάφους-θεμελίωσης-ανεμογεννήτριας και (β) προσομοίωση με μακρο-ελατήρια και μακρο-αποσβεστήρες (Page et al. 2019).

Για την προσομοίωση της θεμελίωσης χρησιμοποιήθηκε σύστημα μακρο-ελατηρίων και μακρο-αποσβεστήρων στην κεφαλή του πασσάλου, τα οποία βαθμονομήθηκαν μέσω αποτελεσμάτων για την υπό εξέταση ανεμογεννήτρια σε κώδικα Πεπερασμένων Στοιχείων (FEA) και συγκεκριμένα στο λογισμικό Plaxis. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τα μακρο-ελατήρια και οι μακρο-αποσβεστήρες που αναπτύχθηκαν από τους Page et al. 2018.

Το προσομοίωμα της ανεμογεννήτριας, όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.27**, επιλύθηκε στο λογισμικό 3Dfloat (Nygaard et al. 2016) για περιβαλλοντικά φορτία

ανέμου και κυμάτων που έχουν μετρηθεί στην ανεμογεννήτρια. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τις μετρήσεις πεδίου σε όρους επιταχύνσεων στη βάση της ανεμογεννήτριας και ροπών στον πυθμένα. Ο Πίνακας 3.7 παραθέτει ενδεικτικά τα αποτελέσματα και τη σύγκριση για τις επιταχύνσεις στη βάση της ανεμογεννήτριας. Η σύγκριση των επιταχύνσεων επιβεβαιώνει το γεγονός ότι η εξεταζόμενη διάταξη προβλέπει αποτελέσματα σημαντικά κοντά στην πραγματικότητα. Παρόμοια αναλογία παρατηρείται και στη σύγκριση των αποτελεσμάτων για τις ροπές στη βάση του πυθμένα.

Πίνακας 3.7: Σύγκριση των μετρημένων και των υπολογισμένων επιταχύνσεων (RMS) με χρήση μακρο-ελατηρίων και μακρο-αποσβεστήρων (Page et al. 2019)

		Μέτρηση	Προσομοίωμα μακροστοιχείων	
		RMS (m/s ²)	RMS (m/s ²)	Διαφορά
Περίπτωση 1	FA	0.0174	0.0158	-9%
	SS	0.0175	0.0077	-56%
Περίπτωση 2	FA	0.0438	0.0380	-13%
	SS	0.0421	0.0389	-8%
Περίπτωση 3	FA	0.0193	0.0156	-19%
	SS	0.0171	0.0238	39%
Μέση τιμή				-11%

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο Κεφάλαιο, στο παρόν άρθρο εξετάζονται δύο πρόσθετες διατάξεις με κατανομημένα οριζόντια ελατήρια τα οποία ακολουθούν: α) τις καμπύλες p-γ κατά API και β) καμπύλες p-γ βαθμονομημένες από την ανάλυση με Πεπερασμένα Στοιχεία στο λογισμικό Plaxis. Από τη σύγκριση όλων των εξεταζόμενων προσομοιωμάτων προκύπτει ότι η χρήση μακρο-ελατηρίων και μακρο-αποσβεστήρων στη βάση της ανεμογεννήτριας δίνει τα πιο συμβατά αποτελέσματα με τις μετρήσεις πεδίου. Αμέσως επόμενο προσομοίωμα είναι αυτά με τις καμπύλες p-γ, που έχουν βαθμονομηθεί από τα Πεπερασμένα Στοιχεία, καθώς σύμφωνα με τους Page et al. (2019) δεν μπορεί να προσομοιώσει την υστερητική απόσβεση, κάτι που επιτυγχάνεται με το προσομοίωμα μακρο-ελατηρίων και μακρο-αποσβεστήρων. Τέλος σημαντική απόκλιση από τις μετρήσεις παρουσιάζει η διάταξη με τα κατανομημένα ελατήρια p-γ κατά API, η οποία διαφοροποιεί έντονα εξ αρχής τη δυναμική απόκριση καθώς υποεκτιμά την πρώτη και τη δεύτερη ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης της κατασκευής.

3.4 Συμπεράσματα και επιλογή μεθόδου προσομοίωσης

Τα ευρήματα της βιβλιογραφικής αναδρομής σχετικά με την προσομοίωση πασσάλων θεμελίωσης με μακρο-ελατήρια και μακρο-αποσβεστήρες στην κεφαλή τους οδήγησαν στην κατανόηση της έως τώρα γνώσης πάνω στο εξεταζόμενο ζήτημα. Οι Gazetas & Dobry (1984) αξιοποιώντας τη μέθοδο της «δοκού επί ελατηριωτού εδάφους» πρότειναν μια μεθοδολογία και διαγράμματα υπολογισμού των μακροστοιχείων. Ο Gazetas (1991) βασιζόμενος στα αποτελέσματα των Gazetas & Dobry (1984) και σε συνδυασμό με αποτελέσματα άλλων ερευνητών (Roesset 1980a; b; Sanchez-Saliner 1982; Velez et al. 1983) διατύπωσε αναλυτικές εκφράσεις υπολογισμού των μακροστοιχείων. Η Zania (2014) στην έρευνά της κατέληξε σε αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της τροποποιημένης ιδιοσυχνότητας και απόσβεσης του συστήματος του μονοβάθμιου ταλαντωτή επί θεμελίωσης με μονο-πάσσαλο λόγω της αλληλεπίδρασης εδάφους – κατασκευής. Οι Shadlou & Bhattacharya (2016) και οι Karatzia and Mylonakis (2017), υπολόγισαν συντελεστές στιβαρότητας και απόσβεσης για την προσομοίωση των πασσάλων υπό δυναμική φόρτιση με αντίστοιχα μακρο-ελατήρια και μακρο-αποσβεστήρες. Για τη βαθμονόμηση των μακροστοιχείων προσομοίωσης πασσάλων θεμελίωσης οι Krathe & Kaynia (2016) διατύπωσαν μια πολύ-γραμμική σχέση φορτίου – παραμόρφωσης υπό περιβαλλοντικές φορτίσεις (ανέμων και κυματισμών), οι Damgaard et al (2014) χρησιμοποίησαν τις σχέσεις των Nogami & Novak (1977) ενώ οι Page et al. (2019) αποτελέσματα αναλύσεων με Πεπερασμένα Στοιχεία. Μια διαφορετική προσέγγιση για τη βαθμονόμηση των μακροστοιχείων είναι με τη χρήση προγραμμάτων προσομοίωσης της αλληλεπίδρασης εδάφους – κατασκευής, την οποία ακολούθησαν οι Carswell et al. (2015), Aasen (2016) και Ghaemmaghami et al. (2017). Τελος οι Oh et al. (2018) και ο Kaynia (2018) πραγματοποίησαν βιβλιογραφική διερεύνηση σχετικά με τη χρήση μακροστοιχείων για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης.

Έπειτα από σύγκριση των προσφερόμενων μεθόδων για τον υπολογισμό των δυναμικών συντελεστών ελατηρίων και αποσβεστήρων στην κεφαλή του πασσάλου επιλέγεται ως μέθοδος υπολογισμού για την παρούσα Διπλωματική Εργασία εκείνη του Gazetas (1991). Η μέθοδος αυτή επιλέγεται λόγω του συνδυασμού ακρίβειας και ευκολίας στην εφαρμογή της. Σημειώνεται τέλος ότι οι υπόλοιπες μέθοδοι δεν επιλέγονται για τον υπολογισμό των συντελεστών των μακροστοιχείων, καθώς παρά τη σημαντική ακρίβειά τους εμφανίζουν ιδιαίτερη πολυπλοκότητα στην εφαρμογή τους ή/και απαιτούν πρόσθετα δεδομένα (πχ αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων) ώστε να η εφαρμογή τους να γενικευθεί πέρα από τα εξεταζόμενα προβλήματα.

Κεφάλαιο 4

Διαστασιολόγηση θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών

4.1 Γενικά

Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες αποτελούν μια εξέλιξη των ανεμογεννητριών της στεριάς, των οποίων η κατασκευή είναι αρκετά διαδεδομένη. Προκειμένου να καταστεί η αιολική ενέργεια που παράγεται περισσότερο ανταγωνιστική σε σχέση με τις υπόλοιπες συμβατικές, εξαντλήσιμες και υψηλών περιβαλλοντικών επιπτώσεων πηγές ενέργειας, η προσοχή έχει στραφεί προς την εκμετάλλευση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας. Κύρια οφέλη των υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι ότι μπορούν να επωφεληθούν από τον πιο ισχυρό και πιο σταθερό αέρα που πνέει στις υπεράκτιες περιοχές καθώς επίσης και το μειωμένο οπτικό αντίκτυπο. Συνεπώς, η εγκατάσταση υπεράκτιων ανεμογεννητριών μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της παραγωγικότητας και της απόδοσης, όσον αφορά την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, με παράλληλη μείωση της «περιβαλλοντικής όχλησης». Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται δύο υπό εξέταση ανεμογεννήτριες και ο σχεδιασμός της θεμελίωσης τους για διάφορους τύπους εδαφών.

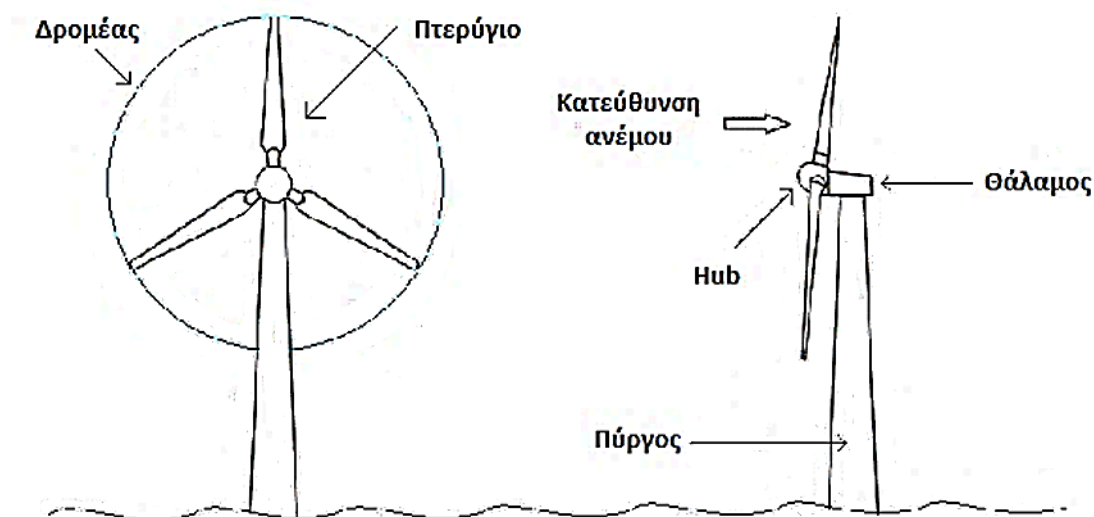
4.2 Χαρακτηριστικά υπεράκτιων ανεμογεννητριών

4.2.1 Τυποποιημένες υπεράκτιες ανεμογεννήτριες

Τα κυριότερα μέρη μιας ανεμογεννήτριας, τα οποία ενδεικτικά παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.1**, είναι:

- Τα Πτερύγια (Blades). Τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας κατασκευάζονται από αλουμίνιο και σύνθετα υλικά. Λόγω του ειδικού σχήματος των πτερυγίων ο άνεμος δημιουργεί ένα θύλακα πίεσης προς τα πάνω καθώς διέρχεται πίσω από το πτερύγιο. Αυτή η πίεση «σπρώχνει» τα πτερύγια προς τα πάνω προκαλώντας έτσι τη περιστροφή του δρομέα.

- Ο Δρομέας (Rotor). Ο δρομέας περιλαμβάνει τα πτερύγια που μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε χαμηλής ταχύτητας περιστροφική ενέργεια και ένα σφαιρικό εξάρτημα (Hub) πάνω στο οποίο στηρίζονται τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας. Από το σφαιρικό αυτό εξάρτημα ξεκινάει ο άξονας ο οποίος μεταδίδει τη περιστροφή στο εσωτερικό του θαλάμου.
- Ο Πύργος (Tower). Ο πύργος είναι το μέρος της κατασκευής που στηρίζει τα πτερύγια και τον δρομέα. Έχει όμως και λειτουργικό ρόλο αφού στο εσωτερικό του γίνεται η στέγαση κάποιων οργάνων της ανεμογεννήτριας και υπάρχει μια εσωτερική σκάλα που επιτρέπει τη πρόσβαση στο θάλαμο που υπάρχει στη κορυφή της κατασκευής.



Σχήμα 4.1: Κύρια μέρη υπεράκτιας ανεμογεννήτριας

Στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 4.1) παρουσιάζονται μερικές τυποποιημένες υπεράκτιες ανεμογεννήτριες, τα χαρακτηριστικά των οποίων είναι διαθέσιμα στην βιβλιογραφία. Από αυτές, στην παρούσα εργασία θα εξεταστούν ενδεικτικά μια τυπική ανεμογεννήτρια 5-MW» (μεγάλου μεγέθους) και η «Vestas V90-3MW» (μεσαίου μεγέθους).

Πίνακας 4.1: Τυποποιημένες υπεράκτιες ανεμογεννήτριες

Ανεμογεννήτρια	Ισχύς (MW)	Διάμετρος ρότορα (m)	Υψος πυλώνα (m)
Vestas V80-1.8 MW	2	80	70
Vestas V39-500 KW	0.5	41	41.5
Nordtank NTK 600 KW	0.6	43	51
Vestas V90-3.0 MW	3	90	80-105
Vestas V66-2.0 MW	1.75	66	60/67/78
Siemens SWT-3.6-130	3.6	107	83.5
Nordtank NTK 65 KW	0.065	16	22.6
Vestas V82-1.65 MW	1.65	82	59-108
REpower 5M	5	126	120
Vestas V120-2.2 MW	4.5	120	90
Multibrid M5000	5	116	102
Enercon E-112/45.114	4.5	114	124
General Electric GE 3.6s	3.6	104	76.5
NREL offshore- 5MW	5.0	126	90

Σύμφωνα με το Νορβηγικό κανονισμό DNV-OS-B101 (2009), ο οποίος ασχολείται με τις ιδιότητες και την πιστοποίηση των μεταλλικών μελών των θαλάσσιων ανεμογεννητριών, οι ποιότητες χάλυβα που χρησιμοποιούνται σε αυτό τον τύπο των κατασκευών χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- Χάλυβες συνηθισμένης αντοχής (NS)
- Χάλυβες υψηλής αντοχής (HS)
- Χάλυβες πολύ υψηλής αντοχής (EXS)

Ο Πίνακας 4.2 παρουσιάζει τις παραμέτρους που ορίζουν κάθε μία από τις παραπάνω κατηγορίες.

Πίνακας 4.2: Πίνακας ορισμού κατηγοριών χάλυβα υπεράκτιων ανεμογεννητριών (DNV 2009)

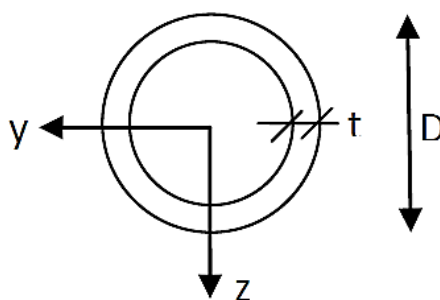
Κατηγορία Αντοχής	Έλεγχος κρούσης			Εφελκυστικές ιδιότητες	
	Σύμβολο χ		Θερμοκρασία ελέγχου ($^{\circ}\text{C}$)	Σύμβολο γ	Ελάχιστη τάση διαρροής (MPa)
	Κανονική συγκολ/τα	Βελτιωμένη συγκολ/τα			
NS	A	-	-	Παραλείπεται	235
	B	BW	0		
	D	DW	-20		
	E	EW	-40		
HS	A	AW	0	27	265
	D	DW	-20	32	315
	E	EW	-40	36	355
	F	-	-60	40	390
EHS	A	-	0	420	420
	D	DW	-20	460	460
	E	EW	-40	500	500
	F	-	-60	550	550
				620	620
				690	690

Κάθε μια από τις παραπάνω κατηγορίες χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες χάλυβα:

- Χάλυβες συνηθισμένης συγκολλησιμότητας
- Χάλυβες βελτιωμένης συγκολλησιμότητας

Το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα για όλες τις κατηγορίες ισούται με $E=210.000$ MPa.

Η διατομή του πύργου της ανεμογεννήτριας είναι κοίλη κυκλική με εξωτερική διάμετρο D και πάχος τοιχωμάτων t , όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα (Σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2: Διατομή πύργου ανεμογεννήτριας (Μπέντας 2014)

Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες κοίλης κυκλικής διατομής προκύπτουν από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\text{Εμβαδό διατομής: } A = \frac{\pi}{4} \cdot [D^2 - (D - 2 \cdot t)^2] \quad (4.1)$$

$$\text{Ροπή αδράνειας διατομής: } I = I_y = I_z = \frac{\pi}{4} \cdot \left[\left(\frac{D}{2} \right)^4 - \left(\frac{D}{2} - t \right)^4 \right] \quad (4.2)$$

$$\text{Ελαστική ροπή αντίστασης διατομής: } W_{el} = W_{el, y} = W_{el, z} = \pi \cdot \frac{\left(\frac{D}{2} \right)^4 - \left(\frac{D}{2} - t \right)^4}{4 \cdot \left(\frac{D}{2} \right)} \quad (4.3)$$

$$\text{Ελαστική ροπή σχεδιασμού διατομής: } M_{el, y} = M_{el, z} = \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} \quad (4.4)$$

όπου:

f_y : όριο διαρροής του χάλυβα

γ_{Mo} : συντελεστής ασφαλείας της διατομής του χάλυβα ($\gamma_{Mo}=1.00$)

4.2.2 «Τυπική ανεμογεννήτρια 5-MW»

Στα πλαίσια της παρούσας διερεύνησης θα εξεταστεί μια τυπική ανεμογεννήτρια 5-MW, με χαρακτηριστικά που είναι κοινά στις συνήθεις ανεμογεννήτριες παρόμοιας ισχύος. Στόχος είναι να εξεταστεί ένα προσομοίωμα το οποίο να αντικατοπτρίζει μια τυπική ανεμογεννήτρια 5-MW και στο οποίο θα μπορούσαν να βασιστούν περαιτέρω έρευνες σχετικές με τις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες μεγάλου μεγέθους. Τα χαρακτηριστικά της εξεταζόμενης τυπικής ανεμογεννήτριας 5-MW παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 4.3).

Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά τυπικής ανεμογεννήτριας 5-MW

Ανεμογεννήτρια	Τυπική ανεμογεννήτρια 5-MW
Υψος ρότορα (m)	90.00
Διάμετρος ρότορα (m)	126.00
Διάμετρος βάσης πύργου (m)	6.00
Πάχος τοιχώματων πύργου (m)	0.07
Συνολική μάζα (tonnes)	697.46

4.2.3 Ανεμογεννήτρια «Vestas V90-3MW»

Η ανεμογεννήτρια Vestas V90-3MW επιλέχθηκε ως μια τυπική ανεμογεννήτρια μέσης ισχύος. Τα χαρακτηριστικά της παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα (**Πίνακας 4.4**).

Πίνακας 4.4: Χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας Vestas V90-3MW

Ανεμογεννήτρια	Vestas V90-3 MW
Ύψος ρότορα (m)	105.00
Διάμετρος ρότορα (m)	90.00
Διάμετρος βάσης πύργου (m)	4.00
Πάχος τοιχώματων πύργου (m)	0.08
Συνολική μάζα (tonnes)	396.00

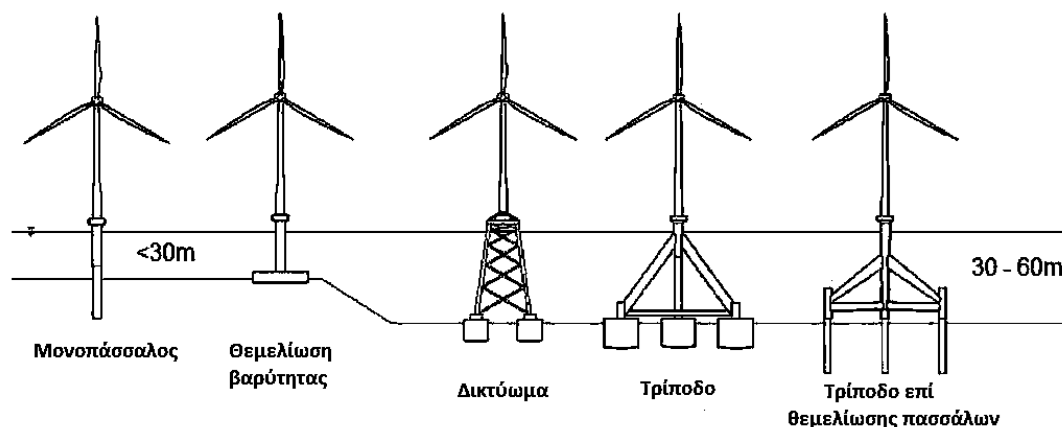
4.3 Μεθοδολογία σχεδιασμού θεμελίωσης

4.3.1 Μέθοδοι θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών

Βασική παράμετρος επιλογής του τρόπου θεμελίωσης μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας είναι το βάθος της θάλασσας. Έτσι διακρίνονται οι παρακάτω μέθοδοι θεμελίωσης:

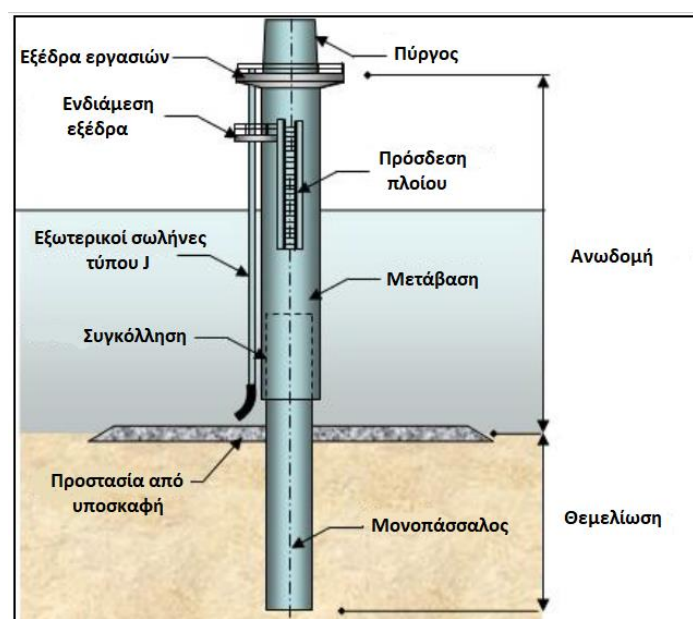
- Φορέας στηριξης μορφής απλού κυλινδρικού πύργου επί μονο-πασσάλου, θεμελίων βαρύτητας ή φρεάτων αναρρόφησης, για βάθη έως 30m.
- Φορέας στήριξης μορφής τριπόδου (tripod) ή μορφής δικτυώματος (jacket), επί θεμελίωσης ομάδας πασσάλων, θεμελίων βαρύτητας ή φρεάτων αναρρόφησης, για βάθη από 30m έως 60m.
- Πλωτές πλατφόρμες που αγκυρώνονται στο πυθμένα της θάλασσας μέσω προεντεταμένων καλωδίων, με θεμελίωση ομάδας πασσάλων ή φρεάτων αναρρόφησης, για βάθη μεγαλύτερα από 60m.

Στο **Σχήμα 4.3** παρουσιάζονται οι βασικές μέθοδοι θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών για βάθη έως 60m.



Σχήμα 4.3: Βασικές μέθοδοι θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών (Aasen 2016)

Η πλέον διαδεδομένη μέθοδος θεμελίωσης υπεράκτιας ανεμογεννήτριας, σε βάθη μικρότερα των 30m, είναι μέσω εγκατάστασης χαλύβδινου μονο-πασσάλου κοίλης διατομής. Πρόκειται για κατασκευές απλές στο σχεδιασμό τους, στις οποίες ο πύργος της ανεμογεννήτριας στηρίζεται είτε απευθείας, είτε μέσω ενός μεταβατικού τμήματος στον πάσσαλο, ο οποίος εισχωρεί στον πυθμένα της θάλασσας. Ο χαλύβδινος σωλήνας μεταφέρει με τη βοήθεια της κάθετης και παράπλευρης αντίστασης του εδαφικού υλικού όλα τα φορτία στο έδαφος. Έτσι, λόγω της ευκολίας στην εγκατάσταση και το σχετικά χαμηλό κόστος οι μονο-πασσαλοι έχουν κυριαρχήσει ως μέθοδος θεμελίωσης ανεμογεννητριών σε μικρά σχετικά βάθη θάλασσας. Στο **Σχήμα 4.4** παρουσιάζεται μια χαρακτηριστική διάταξη της θεμελίωσης με μονο-πάσσαλο.



Σχήμα 4.4: Χαρακτηριστικό παράδειγμα θεμελίωσης με μονο-πάσσαλο (Μπέντας 2014)

4.3.2 Περιβαλλοντικές φορτίσεις

Οι φορτίσεις της ανωδομής της ανεμογεννήτριας οι οποίες λαμβάνονται υπόψη στη διαστασιολόγηση της θεμελίωσης της είναι οι παρακάτω:

- i. Το ίδιο βάρος της ανωδομής της ανεμογεννήτριας
- ii. Υδροδυναμική φόρτιση λόγω θαλάσσιων κυματισμών
- iii. Αεροδυναμική φόρτιση λόγω ανέμου

Υδροδυναμική φόρτιση. Η ανάπτυξη θαλάσσιων κυματισμών προκαλεί ανακυκλική φόρτιση στην ανεμογεννήτρια. Χαρακτηριστικό κύμα ονομάζεται το κύμα, που κατά κάποιο τρόπο αντιπροσωπεύει τη διαταραχή της θαλάσσιας επιφάνειας. Το μέγεθος της φόρτισης εξαρτάται από το ύψος του χαρακτηριστικού κύματος (H_s) καθώς και τη χρονική περίοδο επανεμφάνισης του χαρακτηριστικού κυματισμού (T_p). Η πρόβλεψη των παραμέτρων του χαρακτηριστικού κύματος πραγματοποιείται με τη μέθοδο SMB, διακρίνοντας τους κυματισμούς σε περιορισμένους από το μήκος αναπτύγματος και σε περιορισμένους από τη διάρκεια πνοής του ανέμου. Συγκεκριμένα, τα κύματα που δημιουργούνται από την μακρά πνοή ανέμου κατά μήκος περιορισμένου αναπτύγματος πελάγους είναι περιορισμένα από το μήκος αναπτύγματος. Αντιθέτως, τα κύματα που δημιουργούνται από την πνοή ανέμου σύντομης διάρκειας κατά μήκος μεγάλου αναπτύγματος πελάγους είναι περιορισμένα από τη διάρκεια πνοής του ανέμου.

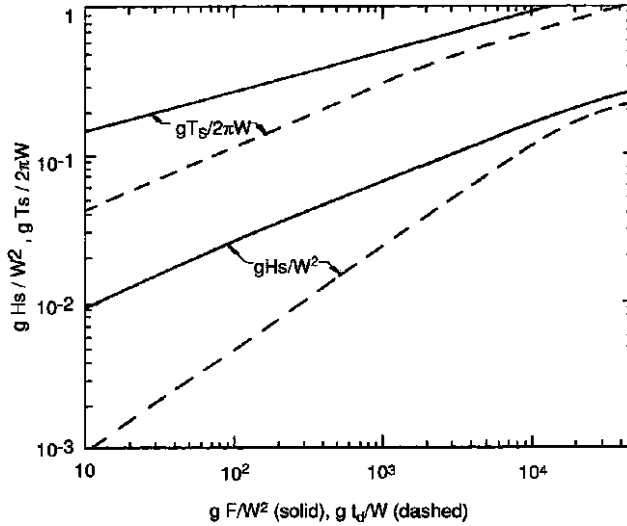
Στη μέθοδο SMB προβλέπονται οι παράμετροι του χαρακτηριστικού κύματος από σχετικό νομογράφημα (**Σχήμα 4.5**) για δεδομένες τιμές των λόγων gF/W^2 και gt_d/W , όπου:

W : ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10m από την επιφάνεια της θάλασσας

F : μήκος αναπτύγματος του κυματισμού

t_d : διάρκεια πνοής του ανέμου

g : επιτάχυνση της βαρύτητας (10 m/s^2)



Σχήμα 4.5: Αδιάστατες παράμετροι μεθοδολογίας SMB πρόβλεψης χαρακτηριστικού ύψους και χαρακτηριστικής περιόδου ανεμογενών κυματισμών (Μπέντας 2014)

Το μήκος αναπτύγματος F υπολογίζεται, για κάθε μια από τις οκτώ διευθύνσεις ανέμου, θεωρώντας τομέα γωνίας 90° γύρω από τη διεύθυνση του ανέμου σύμφωνα με την εξίσωση:

$$F = \frac{\sum_{i=-N}^N F_i \cdot \cos^2 a_i}{\sum_{i=-N}^N \cos a_i} \quad (4.5)$$

όπου F_i είναι το μήκος αναπτύγματος στη διεύθυνση με γωνία $\alpha_i = i\Delta$ ως προς τη διεύθυνση του ανέμου. Συνήθως $\Delta = 5^\circ$ και $N = 9$ έτσι ώστε $-45^\circ \leq \alpha_i \leq +45^\circ$.

Ακολούθως εκτιμώνται τα χαρακτηριστικά του κύματος στη θέση της ανεμογεννήτριας. Για τον υπολογισμό των υδροδυναμικών φορτίων μιας ανεμογεννήτριας, σύμφωνα με τον κανονισμό API (2002), μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση του Morison, η οποία αποτελεί μία εμπειρική σχέση υπολογισμού των υδροδυναμικών φορτίων ανά μέτρο μήκους σε κατακόρυφα και υψίκορμα μέλη:

$$f_{Morison}(x,z,t) = f_d(x,z,t) + f_i(x,z,t) \quad (4.6)$$

$$f_d(x,z,t) = C_d 0.50 \rho_w D |u(x,z,t)| u(x,z,t) \quad (4.7)$$

$$f_i(x,z,t) = C_m \rho_w (\pi D^2 / 4) \dot{u}(x,z,t) \quad (4.8)$$

όπου:

$f_{Morison}$: διάνυσμα της υδροδυναμικής δύναμης ανά μονάδα μήκους που ασκείται στον άξονα του μέλους [N/m]

f_d : διάνυσμα της συρτικής δύναμης ανά μονάδα μήκους [N/m]

f_i : διάνυσμα της αδρανειακής δύναμης ανά μονάδα μήκους [N/m]

C_d : συντελεστής drag force (αδιάστατος), συνήθως λαμβάνεται 0.7 για υπολογισμούς σε κόπωση κατασκευών επί μονο-πασσάλων

ρ_w : πυκνότητα του νερού [kg/m³], για θαλασσινό νερό περίπου ίση με 1025 kg/m³

D : ενεργός διάμετρος κυλινδρικού σωλήνα [m]

u : διάνυσμα της ταχύτητας των υγρών σωματιδίων [m/s]

C_m : αδρανειακός συντελεστής (αδιάστατος), συνήθως λαμβάνεται ίσος με 2 για υπολογισμούς σε κόπωση κατασκευών επί μονο-πασσάλων

\dot{u} : διάνυσμα της επιτάχυνσης των υγρών σωματιδίων [m/sec²]

Αεροδυναμικά φορτία. Οι πιέσεις του ανέμου στην ανεμογεννήτρια αποτελούν ανακυκλικές φορτίσεις μεγάλης περιόδου. Τα αεροδυναμικά φορτία μπορούν να διαχωριστούν σε: α) μια συγκεντρωμένη δύναμη που δρά στο ύψος του ρότορα, και β) ένα κατανεμημένο φορτίο εφαρμοζόμενο σε όλο το μήκος του πύργου της ανεμογεννήτριας.

Σύμφωνα με το API (2002), η συγκεντρωμένη δύναμη στον ρότορα μπορεί να υπολογισθεί μέσω της ακόλουθης έκφρασης:

$$T = 0.50 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot C_T \cdot (\pi \cdot R^2) \quad (4.9)$$

όπου T [N] είναι η συγκεντρωμένη δύναμη του ανέμου, ρ η πυκνότητα του ανέμου (περίπου 1.25 kg/m³), V η ταχύτητα του ανέμου (συνήθως λαμβάνεται 25 m/sec), C_T ο συντελεστής σχήματος (περίπου ίσος με $C_T \approx 7 / V_{hub}$, ή 0.30 ως εύλογη τιμή σχεδιασμού) και R [m] είναι η διάμετρος του ρότορα.

Συγχρόνως, η ομοιομόρφως κατανεμημένη στον πύργο δύναμη του ανέμου δίνεται από την σχέση:

$$F_d = 0.50 \cdot \rho \cdot V^2(z) \cdot C_d \cdot D(z) \quad (4.10)$$

όπου F_d [N/m], C_d συντελεστής σχήματος μιας κυκλικής διατομής που σχετίζεται με τον αριθμό Reynolds και D [m] η εξωτερική διάμετρος στο ύψος z , καθώς ο πύργος είναι κωνικός.

4.3.3 Μεθοδολογία σχεδιασμού έναντι κατακόρυφης φόρτισης

Ο πάσσαλος θεμελίωσης της ανεμογεννήτριας αρχικά θεωρείται ότι έχει διάμετρο (B) και πάχος τοιχωμάτων (τ) ίσα με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του πύργου της ανεμογεννήτριας. Για αυτά τα χαρακτηριστικά, πραγματοποιείται στατική ανάλυση σε κατακόρυφα φορτία, ώστε να υπολογιστεί το απαιτούμενο μήκος (L) του πασσάλου με στόχο να ικανοποιείται η ακόλουθη σχέση για τον συντελεστή ασφαλείας:

$$FS = \frac{Q_{ult}}{Q_{st}} \quad (4.11)$$

όπου:

FS: απαιτούμενος συντελεστής ασφαλείας

Q_{ult} : αξονική Φέρουσα Ικανότητα του πασσάλου

Q_{st} : επιβαλλόμενο κατακόρυφο στατικό φορτίο

Σύμφωνα με τον κανονισμό API (2002), ο σχεδιασμός του πασσάλου πρέπει να είναι τέτοιος, ώστε να είναι ικανός να αναπτύξει την απαραίτητη αντοχή για την ανάληψη των κατακόρυφων φορτίων, λαμβάνοντας υπόψη τον κατάλληλο συντελεστή ασφαλείας. Για σχεδιασμό ανεμογεννήτριας εν λειτουργία, υποβαλλόμενη στα περιβαλλοντικά φορτία κατά τον API (2002), προτείνεται συντελεστής ασφαλείας ίσος με 2.00.

Για το επιβαλλόμενο κατακόρυφο στατικό φορτίο Q_{st} ακολουθείται η παρακάτω σχέση:

$$Q_{st} = W - A_{wt} + W' \quad (4.12)$$

όπου:

W : βάρος της ανεμογεννήτριας

W' : βάρος του πασσάλου υπό άνωση, σύμφωνα με τη σχέση:

$$W' = (\gamma_{\text{χαλ}} - \gamma_w) \cdot L \cdot A_p \quad (4.13)$$

στην οποία λαμβάνεται:

$\gamma_{\text{χαλ}}$: ειδικό βάρος του χάλυβα ίσο με 78.5 KN/m³

γ_w : ειδικό βάρος του νερού ίσο με 10 KN/m³

A_p : εμβαδόν της αιχμής του πασσάλου (m²) με βάση τη σχέση:

$$A_p = \frac{\pi}{4} \cdot [B^2 - (B - 2 \cdot \tau)^2] \quad (4.14)$$

L: μήκος του πασσάλου

A_{WT} : άνωση της ανεμογεννήτριας στο τμήμα που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας σύμφωνα με τη σχέση:

$$A_{WT} = \gamma_w \cdot h_{\pi\upsilon\theta} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left[D^2 - (D - 2 \cdot t)^2 \right] \quad (4.15)$$

όπου:

$h_{\pi\upsilon\theta}$: βάθος του πυθμένα

D : διάμετρος του πύργου της ανεμογεννήτριας

t : πάχος των τοιχωμάτων της ανεμογεννήτριας

Στον παραπάνω υπολογισμό της A_{WT} γίνεται η παραδοχή ότι ο πύργος της ανεμογεννήτριας έχει κοίλη διατομή η οποία γεμίζει με νερό μέχρι τη στάθμη της θάλασσας.

Για την εκτίμηση της Φέρουσας Ικανότητας του πασσάλου Q_{ult} ακολουθούνται οι εξής οδηγίες:

- DNV (2013) - Design of Floating Wind Turbine Structures (*DNV-OS-J103*)
- API (2002) - Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design (*API RP 2A-WSD*)

Η Φ.Ι. του πασσάλου για κάθε τύπο εδάφους περιγράφεται από τη σχέση:

$$Q_{ult} = Q_f + Q_p = f_s \cdot A_s + q \cdot A_p \quad (4.16)$$

όπου:

Q_f : αντίσταση τριβής του πασσάλου (kN)

Q_p : αντίσταση αιχμής του πασσάλου (kN)

f_s : αντίσταση τριβής του πασσάλου ανα μονάδα επιφάνειας (kPa)

q : αντίσταση αιχμής του πασσάλου ανα μονάδα επιφάνειας (kPa)

A_s : εμβαδόν της πλευρικής επιφάνειας του πασσάλου (m^2), όπου:

$$A_s = \pi \cdot B \cdot L \quad (4.17)$$

A_p : εμβαδόν της αιχμής του πασσάλου (m^2). Το εμβαδόν αιχμής του πασσάλου (A_p) υπολογίζεται συντηρητικά με τη θεώρηση ανοιχτής κοίλης διατομής σύμφωνα με τη σχέση (4.14).

Σύμφωνα με τον κώδικά API (2002) η συνολική αντίσταση της αιχμής του πασσάλου δεν πρέπει να υπερβαίνει την αντοχή του εδάφους που εισχωρεί μέσα στον πάσσαλο κατά την έμπηξη (plug). Επιπλέον στους υπολογισμούς πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το βάρος του εδάφους αυτού μέσα στον πάσσαλο καθώς και οι δυνάμεις της άνωσης.

Το πάχος των τοιχωμάτων της κοίλης διατομής του πασσάλου επιλέγεται ως η μέγιστη τιμή ανάμεσα στο πάχος του πύργου της ανεμογεννήτριας και στο ελάχιστο πάχος πασσάλου, όπως ορίζεται από τις οδηγίες του API (2002) σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\tau_{\min}(mm) = 6.35 + \frac{B}{100} \quad (4.18)$$

Φ.Ι. πασσάλου σε αργιλικό έδαφος. Η αντίσταση τριβής του πασσάλου ανα μονάδα επιφάνειας (f_s) υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$f_s = E \cdot a_p \cdot F \cdot c_u \leq 200 \text{ KPa} \quad (4.19)$$

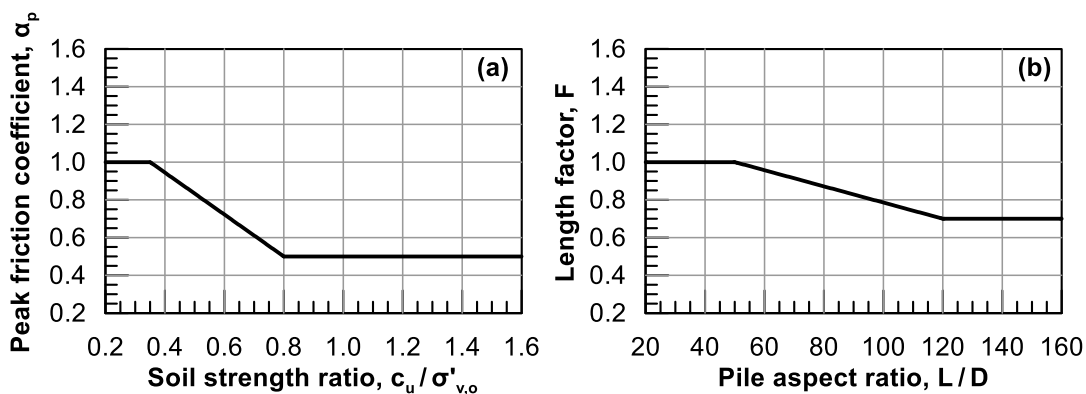
όπου:

a_p : συντελεστής συνάφειας μεταξύ πασσάλου και εδάφους που εξαρτάται από το λόγο της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής ως προς την ενεργό κατακόρυφη τάση (c_u/σ'_{v0}) (Σχήμα 4.6α)

F : συντελεστής που εξαρτάται από το λόγο του μήκους του πασσάλου ως προς τη διάμετρο (L/B) (Σχήμα 4.6β)

E : συντελεστής αποδοτικότητας που ισούται με 1.0 για μεμονωμένο πάσσαλο και 0.8 για ομάδα πασσάλων

Σύμφωνα με τον κανονισμό DNV (2013), ορίζεται ένα άνω όριο πλευρικής τριβής $f_{s,lim}=200\text{kPa}$, υπέρβαση του οποίου απαιτεί ειδική τεκμηρίωση.



Σχήμα 4.6: Υπολογισμός συντελεστών α_p και F για την εκτίμηση της οριακής πλευρικής τριβής στην διεπιφάνεια εδάφους-πασσάλου

Η αντίσταση αιχμής του πασσάλου (q) υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$q = 9 \cdot c_u \quad (4.20)$$

όπου c_u είναι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους στο βάθος της αιχμής (KPa)

Φ.Ι. πασσάλου σε αμμώδες έδαφος. Η αντίσταση τριβής του πασσάλου ανα μονάδα επιφάνειας (f_s) υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$f_s = E \cdot K \cdot \sigma'_{vo} \cdot \tan \delta \leq f_{s,lim} \quad (4.21)$$

όπου:

K : συντελεστής οριζόντιων ωθήσεων

σ'_{vo} : κατακόρυφη ενεργός γεωστατική τάση

δ : γωνία τριβής στην διεπιφάνεια εδάφους-πασσάλου

$f_{s,lim}$: οριακή τιμή πλευρικής τριβής

Η αντίσταση αιχμής, q_p , υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$q_p = N_q \cdot \sigma'_{vo} \leq q_1 \quad (4.22)$$

όπου:

N_q : συντελεστής αντοχής

σ'_{vo} : κατακόρυφη ενεργός τάση (KPa)

q_1 : οριακή τιμή αντίστασης τριβής (KPa)

Στον παρακάτω Πίνακα (**Πίνακας 4.5**) παρουσιάζονται οι προτεινόμενες παράμετροι σχεδιασμού πασσάλων έναντι αξονικής καταπόνησης σε αμμώδες έδαφος σύμφωνα με τον κανονισμό DNV (2013).

Πίνακας 4.5: Παράμετροι σχεδιασμού πασσάλων έναντι αξονικής καταπόνησης σε αμμώδες έδαφος (DNV 2013)

Πυκνότητα	Περιγραφή εδάφους	δ (°)	f (KPa)	N_q	q (MPa)
Πολύ χαλαρή	Άμμος	15	48	8	1.9
Χαλαρή	Άμμος-ιλύς				
Μέση	ιλύς				
Χαλαρή	Άμμος	20	67	12	2.9
Μέση	Άμμος-ιλύς				
Πυκνή	ιλύς				
Μέση	Άμμος	25	81	20	4.8
Πυκνή	Άμμος-ιλύς				
Πυκνή	Άμμος	30	96	40	9.6
Πολύ πυκνή	Άμμος-ιλύς				
Πυκνή	Χαλίκι	35	115	50	12.0
Πολύ πυκνή	Άμμος				

Βάσει του κανονισμού DNV (2013), ο συντελεστής K για πάσσαλο ανοιχτής διατομής λαμβάνεται ίσος με 0.80, ενώ για πασσάλους κλειστής διατομής λαμβάνει την τιμή 1.00.

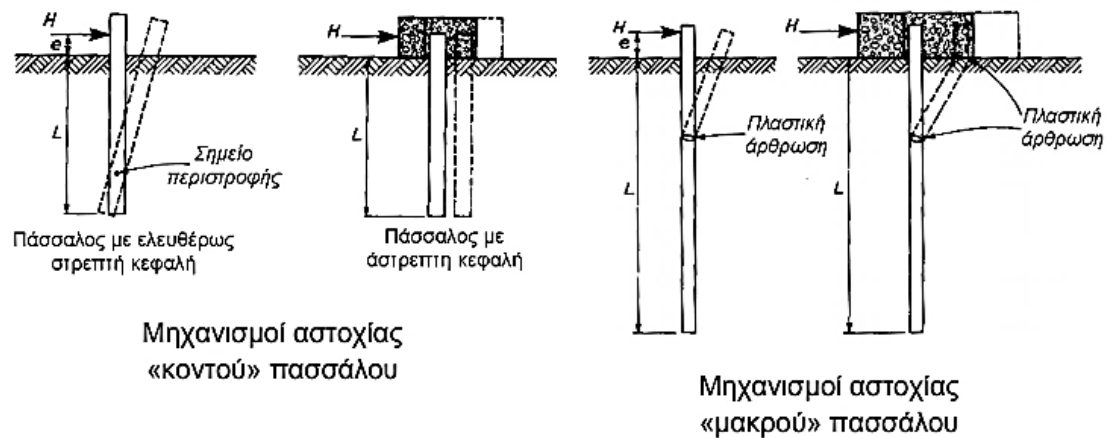
Τέλος, σύμφωνα με τις οδηγίες του DNV (2013), λόγω απώλειας εδαφικού υλικού στην επιφάνεια του πυθμένα (scour), θεωρείται ότι ο πάσσαλος λειτουργεί ύστερα από βάθος μεγαλύτερο του $z=1.3B$, όπου B η διάμετρος του.

4.3.4 Μεθοδολογία σχεδιασμού έναντι οριζόντιας φόρτισης

Οι κατακόρυφοι πάσσαλοι αναλαμβάνουν τις οριζόντιες δυνάμεις με σύγχρονη κάμψη και πλευρική μετατόπιση, ενεργοποιώντας έτσι τόσο την καμπτική αντοχή τους όσο και την αντοχή του εδάφους που τους περιβάλλει. Συνεπώς, ο σχεδιασμός έναντι οριζόντιας φόρτισης θα πρέπει να περιλαμβάνει τους ελέγχους: α) της αντοχής του πασσάλου ως φέροντος στοιχείου σε κάμψη λόγω των πλευρικών μετατοπίσεων και β) της φέρουσας ικανότητας του περιβάλλοντος εδάφους. Για το σχεδιασμό έναντι οριζόντιας φόρτισης χρησιμοποιείται ευρέως η μέθοδος Broms (Broms 1964a; b).

Σύμφωνα με τη μέθοδο Broms στο σχεδιασμό πασσάλου έναντι οριζόντιας φόρτισης υπάρχει η διάκριση της λειτουργίας του ως «κοντού» ή «μακρού» αναλόγως το μηχανισμό αστοχίας του. Ως προς τον τρόπο αστοχίας του συστήματος πάσσαλος-έδαφος οι «κοντοί» πάσσαλοι θεωρούνται άκαμπτοι, ενώ οι «μακροί» εύκαμπτοι. Πιο συγκεκριμένα η αστοχία των «κοντών» πασσάλων συμβαίνει λόγω θραύσεως του εδάφους, με τη μέγιστη καταπόνηση του πασσάλου σε ροπή M_{max} να παραμένει μικρότερη της αντοχής του πασσάλου σε κάμψη M_y . Αντιθέτως, η αστοχία των «μακρών» πασσάλων συμβαίνει λόγω

«υπερβάσεως» της αντοχής του πασσάλου M_y έναντι καμπτικών ροπών M_{max} . Στο **Σχήμα 4.7** παρουσιάζονται οι τρόποι αστοχίας κάθε περίπτωσης.



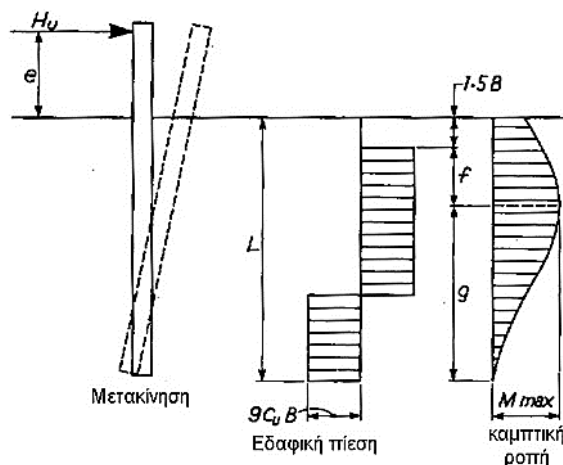
Σχήμα 4.7: Μηχανισμοί αστοχίας α) κοντού και β) «μακρού» πασσάλου (Παπαδόπουλος & Αναγνωστόπουλος 2016).

Απαραίτητη είναι επιπλέον η διάκριση του πασσάλου ως «πακτωμένης» ή «ελεύθερης» κεφαλής, σε σχέση με τη δυνατότητα στροφής της κεφαλής του. Για την περίπτωση της θεμελίωσης ανεμογεννητριών θεωρείται πιο συμβατή η περίπτωση της «ελεύθερης» κεφαλής.

Ο Broms εξέτασε την οριακή ισορροπία κατά τη φάση πλήρους ανάπτυξης της διατμητικής αντοχής. Σύμφωνα με τη μέθοδο, ο πάσσαλος περιστρέφεται γύρω από ένα κέντρο, επάνω στον πάσσαλο, χωρίς να παρουσιάζει μεταβολές κατά μήκος των αξόνων του. Η αντίσταση του εδάφους ισούται με το αλγεβρικό άθροισμα των εδαφικών πιέσεων και η αντίσταση αιχμής αγνοείται. Αναλόγως το μηχανισμό αστοχίας του πασσάλου, πραγματοποιείται στατική ανάλυση, ώστε να υπάρξει η ζητούμενη πλευρική αντίσταση στο ασκούμενο οριζόντιο φορτίο.

Πάσσαλος σε συνεκτικό έδαφος . _ Στα συνεκτικά εδάφη η μέθοδος Broms λαμβάνει την πίεση θραύσεως του εδάφους ίση με $9c_u$, όπου c_u η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους. Σημειώνεται ότι οι παθητικές ωθήσεις στα πρώτα $1.5B$, όπου B η διάμετρος του πασσάλου, μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους αγνοούνται, όπως επίσης και οι ενεργές τάσεις που δέχεται ο πάσσαλος.

Οι μηχανισμοί θραύσεως για «κοντούς» πασσάλους ελεύθερης κεφαλής, σε συνεκτικό έδαφος, παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.8**.



Σχήμα 4.8: Μηχανισμοί θραύσεως κοντών πασσάλων με ελεύθερη κεφαλή σε συνεκτικό έδαφος (Παπαδόπουλος & Αναγνωστόπουλος 2016)

Το οριζόντιο φορτίο θραύσεως στην κεφαλή του πασσάλου καθορίζεται από τη σχέση:

$$H_u = f \cdot 9 \cdot c_u \cdot B \quad (4.23)$$

όπου:

f : θέση εφαρμογής της μέσης ροπής κάμψης του πασσάλου

c_u : αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους

B : διάμετρος του πασσάλου

Η τιμή της μέγιστης ροπής κάμψης του πασσάλου είναι:

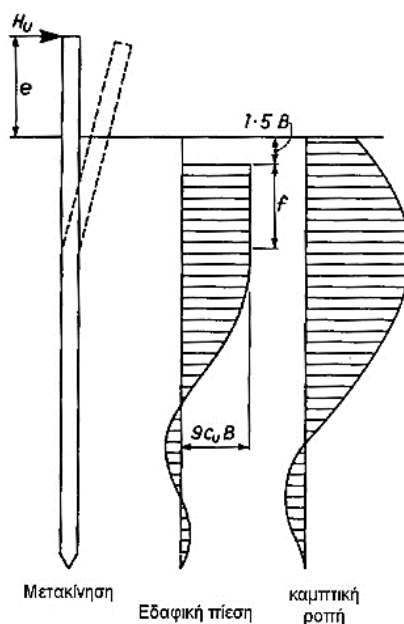
$$M_{max} = H_u \cdot (e + 1.50 \cdot B + 0.5 \cdot f) \quad (4.24)$$

όπου e είναι η εκκεντρότητα του οριζόντιου φορτίου θραύσεως H_u .

Επειδή ισχύει $L=1.5B+f+g$ είναι δυνατή η λύση του συστήματος των ανωτέρων εξισώσεων και υπολογίζεται τελικά το οριζόντιο φορτίο θραύσεως H_u .

Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να ισχύει $M_y > M_{max}$, διότι διαφορετικά ο πάσσαλος θεωρείται εύκαμπτος, δηλαδή «μακρύς».

Οι μηχανισμοί θραύσεως για «μακρούς» πασσάλους ελεύθερης κεφαλής, σε συνεκτικό έδαφος, παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.9**.



Σχήμα 4.9: Μηχανισμοί θραύσεως μακρών πασσάλων με ελεύθερη κεφαλή σε συνεκτικό έδαφος (Παπαδόπουλος & Αναγνωστόπουλος 2016)

Στην περίπτωση των «μακρών» πασσάλων ισχύουν οι παραπάνω εξισώσεις. Παρόλα αυτά ο υπολογισμός του φορτίου θραύσεως H_u , γίνεται θέτοντας τη μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή M_{max} ίση με την καμπτική αντοχή του πασσάλου M_y . Αυτό συμβαίνει, καθώς στους «μακρούς» πασσάλους κρίσιμος παράγοντας αστοχίας θεωρείται η καμπτική τους επάρκεια.

Πάσσαλος σε μη συνεκτικό έδαφος. Σύμφωνα με τη μέθοδο Broms ισχύει η απλοποιητική παραδοχή ότι η οριακή αντοχή του εδάφους ισούται με το τριπλάσιο της παθητικής ωθήσεως κατά Rankine. Η παραδοχή αυτή θεωρείται ως μάλλον συντηρητική. Η κατανομή των οριακών εδαφικών αντιδράσεων στον πάσσαλο δίνεται ακολούθως από τη σχέση:

$$p_u = 3 \cdot \sigma'_v \cdot K_p \quad (4.25)$$

όπου:

σ'_v : ενεργός τάση λόγω των υπερεκείμενων γαιών

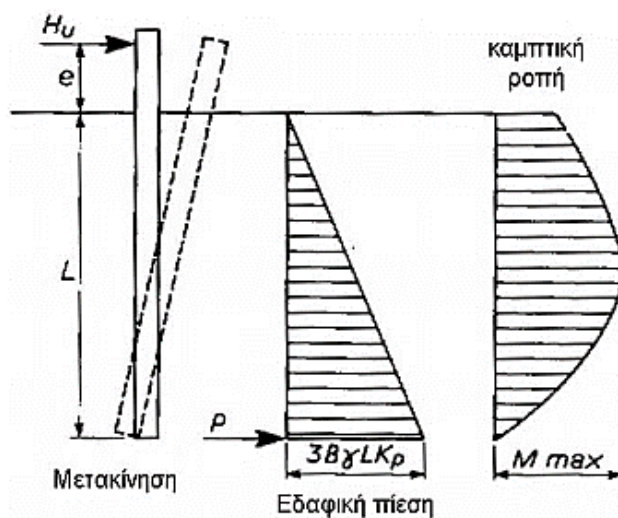
K_p : συντελεστής παθητικής ωθήσεως σύμφωνα με τη σχέση:

$$K_p = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (4.26)$$

όπου:

ϕ' : ενεργός γωνία εσωτερικής τριβής

Στο **Σχήμα 4.10** παρουσιάζονται οι μηχανισμοί θραύσεως για «κοντούς» πασσάλους ελεύθερης κεφαλής σε μη συνεκτικό έδαφος.



Σχήμα 4.10: Μηχανισμοί θραύσεως κοντών πασσάλων με ελεύθερη κεφαλή σε μη συνεκτικό έδαφος (Β. Π. Παπαδόπουλος 2016)

Το οριακό φορτίο «κοντού» πασσάλου ελεύθερης κεφαλής δίνεται από τη σχέση:

$$H_u = \frac{0.5 \cdot \gamma' \cdot B \cdot L^3 \cdot K_p}{e + L} \quad (4.27)$$

όπου:

γ' : ενεργό βάρος του εδάφους ίσο με 10 KN/m^3

B : διάμετρος του πασσάλου

L : μήκος του πασσάλου

e : εκκεντρότητα του σημείου εφαρμογής του οριζόντιου φορτίου στον πύργο της ανεμογεννήτριας

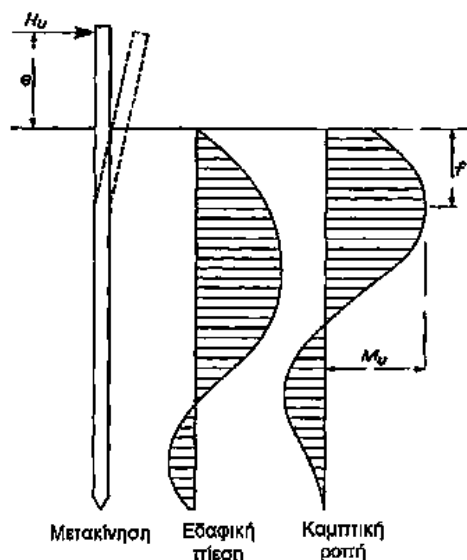
Η μέγιστη ροπή κάμψεως αντιστοιχεί στη διατομή σε βάθος f όπου:

$$f = 0.82 \cdot \sqrt{\frac{H_u}{B \cdot K_p \cdot \gamma'}} \quad (4.28)$$

$$M_{\max} = H_u \cdot \left(e + \frac{2}{3} \cdot f \right) \quad (4.29)$$

Εφόσον η M_{\max} δεν υπερβάνει τη ροπή θραύσεως του πασσάλου M_y ο πάσσαλος είναι κοντός, όπως εξ'αρχής έχει υποτεθεί. Σε αντίθετη περίπτωση ισχύει ο μηχανισμός

«μακρού» πασσάλου και η τιμή του οριακού φορτίου H_u προκύπτει αν τεθεί $M_{max} = M_y$. Για «μακρείς» πασσάλους ελεύθερης κεφαλής παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.11** οι μηχανισμοί θραύσεως σε μη συνεκτικό έδαφος.



Σχήμα 4.11: Μηχανισμοί θραύσεως μακρών πασσάλων με ελεύθερη κεφαλή σε συνεκτικό έδαφος (Παπαδόπουλος & Αναγνωστόπουλος 2016)

4.4 Διαστασιολόγηση θεμελίωσης

Η διαστασιολόγηση της θεμελίωσης πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιήθηκε στατική ανάλυση του πασσάλου για κατακόρυφα φορτία, μέσω της οποίας εκτιμήθηκε μια αρχική διάμετρος και ένα μήκος έμπηξης του πασσάλου. Κατόπιν, ακολούθησε ο έλεγχος πλευρικής αντοχής του πασσάλου, καταλήγοντας στα τελικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του.

4.4.1 Εδαφικές συνθήκες

Ο σχεδιασμός της θεμελίωσης πραγματοποιήθηκε τόσο για αργιλικό όσο και για αμμώδες εδαφικό πυθμένα. Σε όλα τα εδαφικά προφίλ θεωρήθηκε ότι το βάθος του θαλάσσιου πυθμένα ($h_{\text{πυθ}}$) είναι ίσο με 30 m.

Για την περίπτωση του αργιλικού πυθμένα θεωρήθηκαν οι ακόλουθες δύο περιπτώσεις:

(α) Μαλακή άργιλος: Σε αυτή την περίπτωση θεωρήθηκε ότι το έδαφος αποτελείται από κανονικά στερεοποιημένη άργιλο (NC) σε όλο το βάθος, με εξαίρεση τα πρώτα 15 m από την επιφάνεια για τα οποία θεωρήθηκε ελαφρά προ-φόρτιση. Για την θέση αυτή, η

κατανομή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής (c_u σε KPa) με το βάθος (z), προκύπτει ως εξής:

$$c_u(z) = \max(37.5, 0.25 \cdot \sigma'_{vo}) \quad (4.30)$$

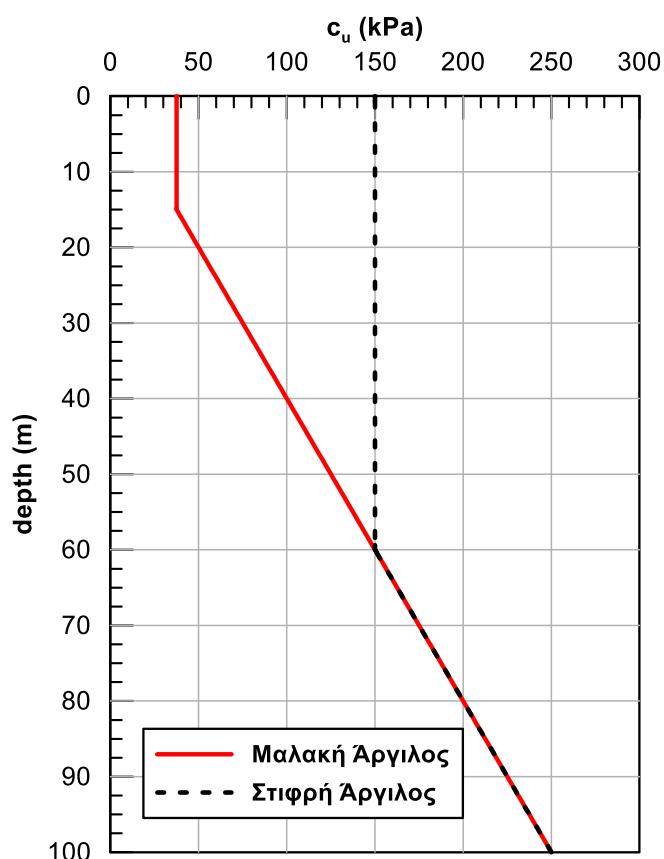
όπου σ'_{vo} (σε KPa) είναι η κατακόρυφη ενεργός τάση.

(β) Στιφρή άργιλος: Σε αυτή την περίπτωση θεωρήθηκε ότι το έδαφος αποτελείται από προ-φορτισμένη άργιλο βάθους 60 m. Σε μεγαλύτερα βάθη θεωρήθηκε βαθμός προ-φόρτισης OCR=1. Αντίστοιχα, η κατανομή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής (c_u σε KPa) δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$c_u(z) = \max(150, 0.25 \cdot \sigma'_{vo}) \quad (4.31)$$

όπου σ'_{vo} (σε KPa) είναι η κατακόρυφη ενεργός γεωστατική τάση.

Η κατανομή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με το βάθος τόσο για την περίπτωση μαλακής όσο και για την περίπτωση στιφρής αργίλου φαίνεται στο **Σχήμα 4.12**. Επισημαίνεται ότι με τη θεώρηση των ανωτέρω εδαφικών τομών καλύπτεται ενδεικτικά ένα σημαντικό εύρος συνθηκών θεμελίωσης σε αργιλικό πυθμένα.



Σχήμα 4.12: Κατανομή αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με το βάθος [$c_u(z)$] για την περίπτωση μαλακής και στιφρής αργίλου

Για την περίπτωση του αμμώδους πυθμένα θεωρήθηκαν οι ακόλουθες δύο περιπτώσεις:

(α) Μέσης πυκνότητας άμμος: Σε αυτή την περίπτωση θεωρήθηκε ότι το έδαφος αποτελείται από άμμο μέσης πυκνότητας με σχετική πυκνότητα $D_r=50\%$ και γωνία τριβής $\phi=33^\circ$.

(β) Πυκνή άμμος: Σε αυτή την περίπτωση θεωρήθηκε ότι το έδαφος αποτελείται από πυκνή άμμο με σχετική πυκνότητα $D_r=75\%$ και γωνία τριβής $\phi=40^\circ$.

Επισημαίνεται ότι και στην περίπτωση της άμμου, οι ανωτέρω εδαφικές τομές είναι ενδεικτικές των οριακών συνθηκών θεμελίωσης σε ιλυο-αμμώδη πυθμένα.

4.4.2 Επιβαλλόμενα φορτία

Η διαστασιολόγηση της θεμελίωσης πραγματοποιήθηκε για τα βαρυτικά φορτία της ανεμογεννήτριας και για τυπικές τιμές οριζόντιων φορτίων. Συγκεκριμένα όσον αφορά την ανεμογεννήτρια Vestas V90-3MW, όπως περιγράφεται από τους Byrne and Houlsby (2003), για μια τυπική ανεμογεννήτρια ισχύος 3.5 MW με ύψος πύργου 90m από το επίπεδο της θάλασσας και διάμετρο ρότορα 100m το μέγιστο οριζόντιο φορτίο (H) ανέρχεται περίπου στα 4 MN. Το οριζόντιο φορτίο αυτό αποτελείται από φορτία ανέμου και κυμάτων τα οποία είναι ανακυκλικά. Η δυσμενέστερη κατάσταση φόρτισης είναι συνήθως όταν η ανεμογεννήτρια βρίσκεται σε λειτουργία και λαμβάνουν χώρα μέσης έντασης άνεμοι ενώ ταυτόχρονα στη θάλασσα επικρατούν οι δυσμενέστερες συνθήκες κυματισμού. Ο συνδυασμός των δυσμενέστερων εντάσεων και για τους κυματισμούς και για τον αέρα δεν είναι γενικά κρίσιμος, καθώς τότε η ανεμογεννήτρια είναι ανενεργή και τα πτερύγια τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να μειωθεί το φορτίο και να αποφευχθεί η ζημιά στην ανεμογεννήτρια. Τυπικά το μέγιστο φορτίο λόγω ανέμου (F_{wind}) είναι της τάξης του 1 MN, εφαρμόζεται στο ύψος του ρότορα (h_r) και μπορεί να θεωρηθεί σχετικά σταθερό για μια μεγάλη χρονική περίοδο. Το φορτίο λόγω κυματισμών (F_{waves}) είναι περίπου $1 \text{ MN} \pm 2 \text{ MN}$. Το \pm στην παραπάνω σχέση εκφράζει τον αρμονικό χαρακτήρα της φόρτισης. Το φορτίο αυτό ασκείται σε χαμηλότερο σημείο σε σχέση με το φορτίο του ανέμου και συγκεκριμένα σε ύψος $3/4 \cdot h_{\pi\upsilon\theta}$ από τον πυθμένα της θάλασσας σύμφωνα με τους (Bhattacharya et al. 2017). Επιπλέον εξαρτάται από το βάθος του νερού και έχει ανακυκλικό χαρακτήρα με περιόδους περίπου 10 sec. Αυτός ο συνδυασμός φορτίων οδηγεί σε συνολικό οριζόντιο φορτίο της τάξης των $2 \text{ MN} \pm 2 \text{ MN}$. Επιπλέον όσον αφορά την τυπική ανεμογεννήτρια 5-MW, όπως περιγράφεται από τους Bhattacharya et al. (2017), για μια τυπική ανεμογεννήτρια ισχύος 5-MW με ύψος πύργου 85m από το επίπεδο της θάλασσας και διάμετρο ρότορα 126m το μέγιστο συνολικό οριζόντιο φορτίο (H) ανέρχεται περίπου στα

6.01 MN. Το μέγιστο φορτίο λόγω ανέμου είναι της τάξης του 1.2 MN και εφαρμόζεται στο ύψος του ρότορα, ενώ το φορτίο λόγω κυματισμών είναι της τάξης των 4.81 MN και ασκείται σε ύψος $\frac{3}{4} \cdot h_{\pi\omega\theta}$ από τον πυθμένα της θάλασσας.

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία για τη διαστασιολόγηση της θεμελίωσης έναντι οριζόντιας φόρτισης επιλέχθηκε να ασκηθεί το συνολικό φορτίο με μια «σταθμισμένη» εκκεντρότητα ώστε να λαμβάνονται πιο ρεαλιστικά υπόψη οι επιμέρους συνιστώσες του, δηλαδή η δύναμη λόγω αέρα και η δύναμη λόγω κυματισμών. Συγκεκριμένα για κάθε ανεμογεννήτρια η εκκεντρότητα δίνεται ως εξής:

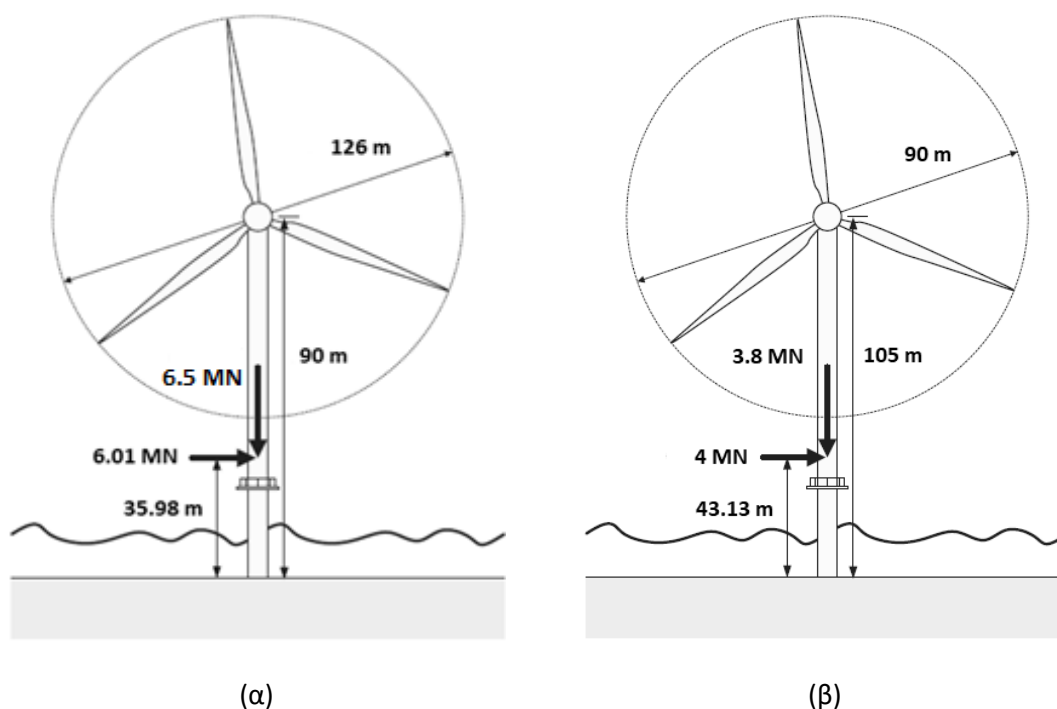
- i. «Τυπική ανεμογεννήτρια 5-MW»:

$$e = \frac{F_{wind} \cdot h_r + F_{waves} \cdot \frac{3}{4} \cdot h_{\pi\omega\theta}}{6.01 MN} = \frac{1.2 \cdot 90 + 4.81 \cdot \frac{3}{4} \cdot 30}{6.01} = 35.98 m$$

- ii. «Vestas V90-3MW»

$$e = \frac{F_{wind} \cdot h_r + F_{waves} \cdot \frac{3}{4} \cdot h_{\pi\omega\theta}}{4 MN} = \frac{1 \cdot 105 + 3 \cdot \frac{3}{4} \cdot 30}{4} = 43.13 m$$

Στο **Σχήμα 4.13** παρουσιάζονται η τυπική διάταξη και οι τυπικές φορτίσεις όπως θα ασκηθούν στην εκάστοτε ανεμογεννήτρια στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.



Σχήμα 4.13: Υπεράκτια ανεμογεννήτρια και τυπικές φορτίσεις (α) Τυπική ανεμογεννήτρια 5-MW (β) Vestas V90-3MW

4.4.3 Σχεδιασμός θεμελιώσεων ανεμογεννητριών έναντι κατακόρυφης φόρτισης

Διαστασιολόγηση θεμελίωσης «Τυπικής ανεμογεννήτριας 5-MW»

Ο πάσσαλος θεμελίωσης της τυπικής ανεμογεννήτριας 5-MW αρχικά θεωρήθηκε ότι έχει διάμετρο $B = 6\text{ m}$, ίση με τη διάμετρο του πύργου της ανεμογεννήτριας. Το πάχος των τοιχωμάτων του λήφθηκε ίσο με $\tau = 70\text{ mm}$, όπως περιγράφηκε στην ενότητα 4.3.3. Για αυτήν τη διάμετρο, πραγματοποιήθηκε στατική ανάλυση σε κατακόρυφα φορτία για τον υπολογισμό του απαιτούμενου μήκους (L) του πασσάλου.

Στον παρακάτω Πίνακα (**Πίνακας 4.6**) παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά ανάλυσης της τυπικής ανεμογεννήτριας 5-MW.

Πίνακας 4.6: Χαρακτηριστικά τυπικής ανεμογεννήτριας 5-MW

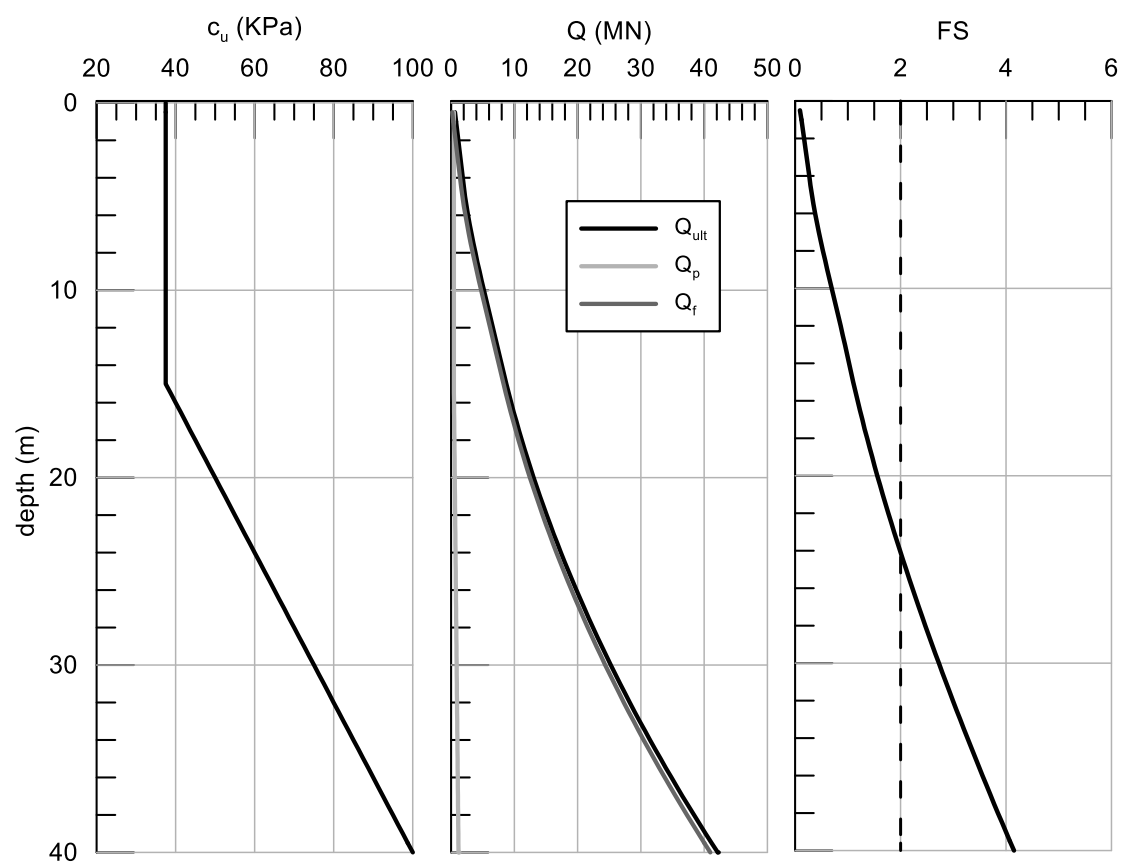
Τύπος ανεμογεννήτριας	Τυπική ανεμογεννήτρια 5MW
Εξωτερική διάμετρος D (m)	6.00
Πάχος τοιχωμάτων τ (m)	0.07
Μάζα m (tonnes)	697.46

Στην στατική ανάλυση του πασσάλου θεμελίωσης της ανεμογεννήτριας λήφθηκε κατακόρυφο φορτίο Q_{st} σύμφωνα με τη σχέση (4.12). Η άνωση της ανεμογεννήτριας στο κομμάτι της που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας υπολογίσθηκε σε $A_{WT} = 391.223 \text{ KN}$, σύμφωνα με τη σχέση (4.15)

Ο υπολογισμός της φέρουσας ικανότητας του πασσάλου έγινε σύμφωνα με τη σχέση (4.16). Το εμβαδόν της αιχμής του πασσάλου λήφθηκε $A_p = 1.30 \text{ m}^2$, με την παραδοχή κοίλης ανοιχτής διατομής ακολουθώντας τη σχέση (4.14).

Η ανάλυση της αξονικής καταπόνησης του πασσάλου πραγματοποιήθηκε υπολογίζοντας τον συντελεστή ασφαλείας για κάθε μήκος έμπηξης πασσάλου. Σε κάθε ανάλυση το μήκος έμπηξης αυξανόταν κατά 0.5 m σε σχέση με την προηγούμενη ανάλυση, έως την ύπερβαση της οριακής τιμής του συντελεστή ασφαλείας $FS = 2.00$.

Μαλακή άργιλος. Για την περίπτωση της μαλακής άργιλου και για κάθε μήκος έμπηξης πασσάλου παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.14** τα αποτελέσματα των υπολογισμών του c_u , Q , και FS .



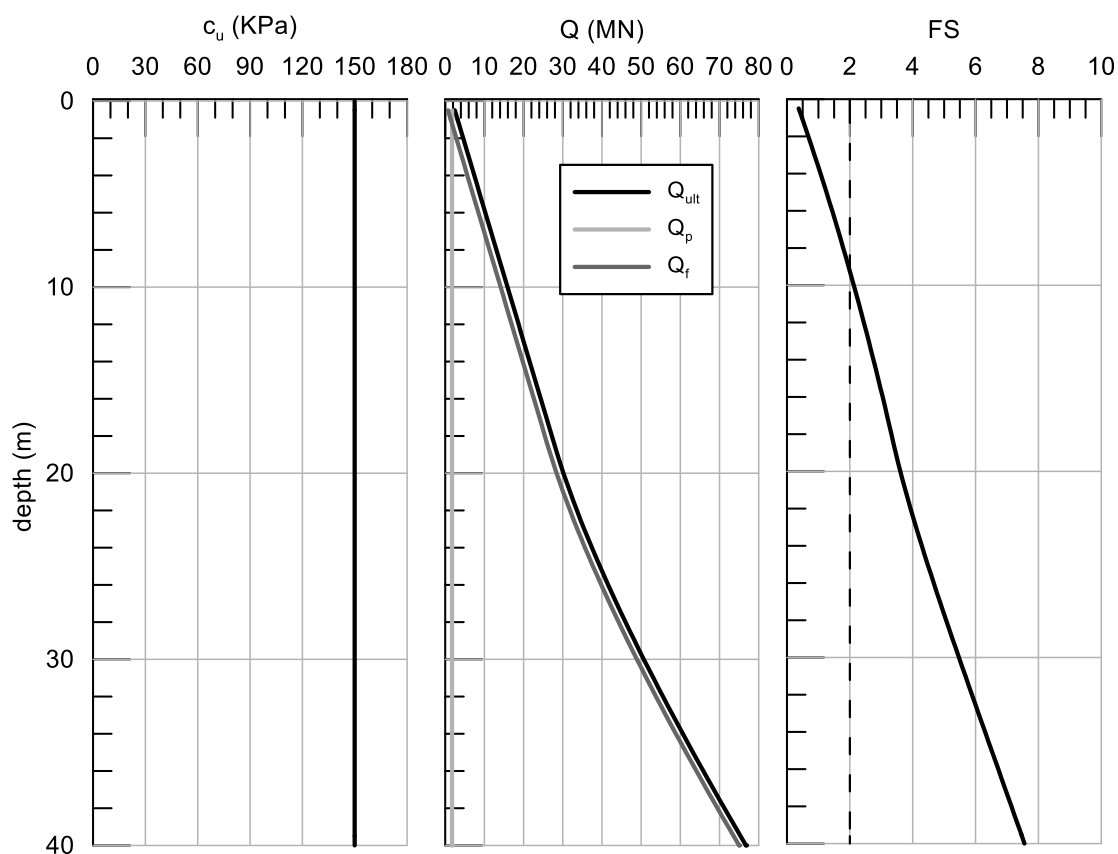
Σχήμα 4.14: Αποτελέσματα υπολογισμών στατικής ανάλυσης μονο-πάσσαλου σε μαλακή άργιλο

Τα τελικά αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης σε κατακόρυφο φορτίο παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 4.7).

Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα αξονικής καταπόνησης σε μαλακή άργιλο

Διάμετρος B (m)	6.00
Απαιτούμενο μήκος έμπτυξης L (m)	24.50
Πάχος τοιχωμάτων τ (m)	0.07
Λόγος L/B	4.08
Συντελεστής ασφάλειας FS	2.05

Στιφρή άργιλος. Στο Σχήμα 4.15 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών του c_u , Q και FS για κάθε μήκος έμπτυξης πασσάλου.



Σχήμα 4.15: Αποτελέσματα υπολογισμών στατικής ανάλυσης μονο-πασάλου σε στιφρή άργιλο

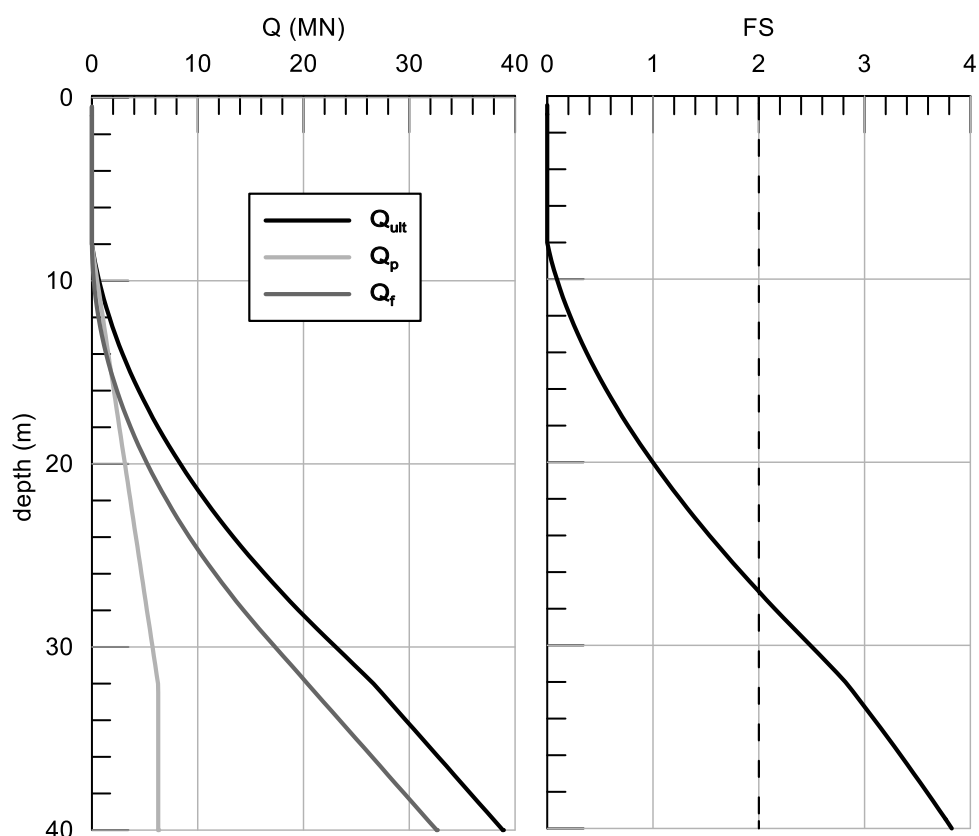
Τα τελικά αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης του μονο-πασάλου για κατακόρυφο φορτίο σε στιφρή άργιλο παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 4.8).

Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα αξονικής καταπόνησης σε στιφρή άργιλο

Διάμετρος B (m)	6.00
Απαιτούμενο μήκος έμπτυξης L (m)	9.50
Πάχος τοιχωμάτων τ (m)	0.07
Λόγος L/B	1.58
Συντελεστής ασφάλειας FS	2.04

Άμμος μέσης πυκνότητας. Όπως αναγράφει ο Πίνακας 4.5 για την άμμο μέσης πυκνότητας η γωνία δ θεωρήθηκε ίση με 25° , η οριακή πλευρική τριβή 81 kPa, η οριακή αντίσταση αιχμής ίση με 4800kPa και ο συντελεστής K ίσος με 0.80 για πασσάλους ανοιχτής διατομής.

Στο Σχήμα 4.16 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών του Q και FS για κάθε μήκος έμπτυξης πασσάλου.



Σχήμα 4.16: Αποτελέσματα υπολογισμών στατικής ανάλυσης μονο-πασσάλου σε άμμο μέσης πυκνότητας.

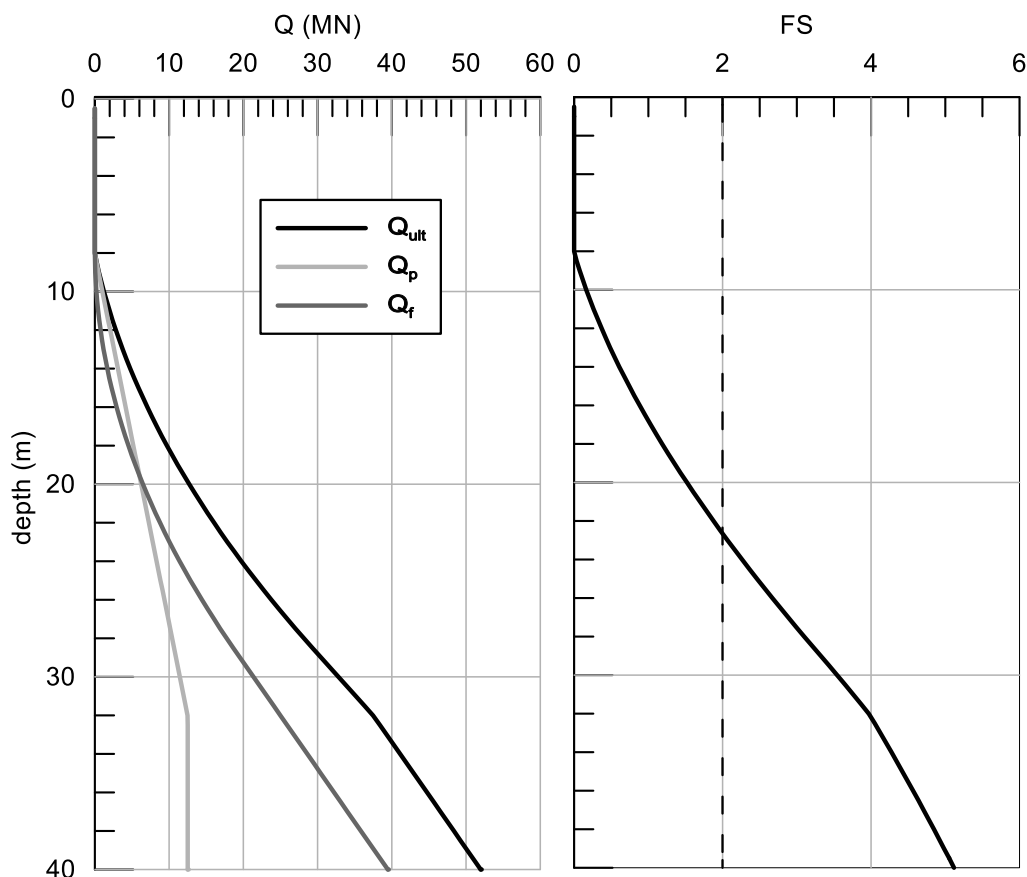
Τα τελικά αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης του μονο-πασσάλου σε κατακόρυφο φορτίο παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 4.9).

Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα αξονικής καταπόνησης σε άμμο μέσης πυκνότητα

Διάμετρος B (m)	6.00
Απαιτούμενο μήκος έμπηξης L (m)	27.50
Πάχος τοιχωμάτων τ (m)	0.07
Λόγος L/B	4.58
Συντελεστής ασφάλειας FS	2.07

Πυκνή άμμος. Όπως αναγράφει ο Πίνακας 4.5 για πυκνή άμμο, η γωνία δ θεωρήθηκε ίση με 30° , η οριακή πλευρική τριβή 96 kPa, η οριακή αντίσταση αιχμής ίση με 9600 kPa και ο συντελεστής K ίσος με 0.80 για πασσάλους ανοιχτής διατομής.

Στο Σχήμα 4.17 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών του Q και του FS για κάθε μήκος έμπηξης πασσάλου.



Σχήμα 4.17: Αποτελέσματα υπολογισμών στατικής ανάλυσης πυκνής άμμου

Ο Πίνακας 4.10 παρουσιάζει τα τελικά αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης του μονο-πασσάλου σε κατακόρυφο φορτίο.

Πίνακας 4.10: Αποτελέσματα αξονικής καταπόνησης σε πυκνή άμμο

Διάμετρος B (m)	6.00
Απαιτούμενο μήκος έμπηξης L (m)	23.00
Πάχος τοιχωμάτων τ (m)	0.07
Λόγος L/B	3.83
Συντελεστής ασφάλειας FS	2.07

Διαστασιολόγηση θεμελίωσης «Vestas V90-3MW»

Ο πάσσαλος θεμελίωσης της ανεμογεννήτριας Vestas V90-3MW αρχικά θεωρήθηκε ότι έχει διάμετρο $B = 4 \text{ m}$, ίση με τη διάμετρο του πύργου της ανεμογεννήτριας. Το πάχος των τοιχωμάτων του λήφθηκε ίσο με $\tau = 80 \text{ mm}$, όπως περιγράφηκε στην ενότητα 4.3.3. Για αυτήν τη διάμετρο, πραγματοποιήθηκε στατική ανάλυση σε κατακόρυφα φορτία για τον υπολογισμό του απαιτούμενου μήκους (L) του πασσάλου.

Στον παρακάτω Πίνακα (**Πίνακας 4.11**) παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά ανάλυσης της ανεμογεννήτριας Vestas V90-3MW.

Πίνακας 4.11: Χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας Vestas V90-3MW

Τύπος ανεμογεννήτριας	Vestas V90-3MW
Εξωτερική διάμετρος – D (m)	4.00
Πάχος τοιχωμάτων τ (m)	0.08
Μάζα m (tonnes)	396.00

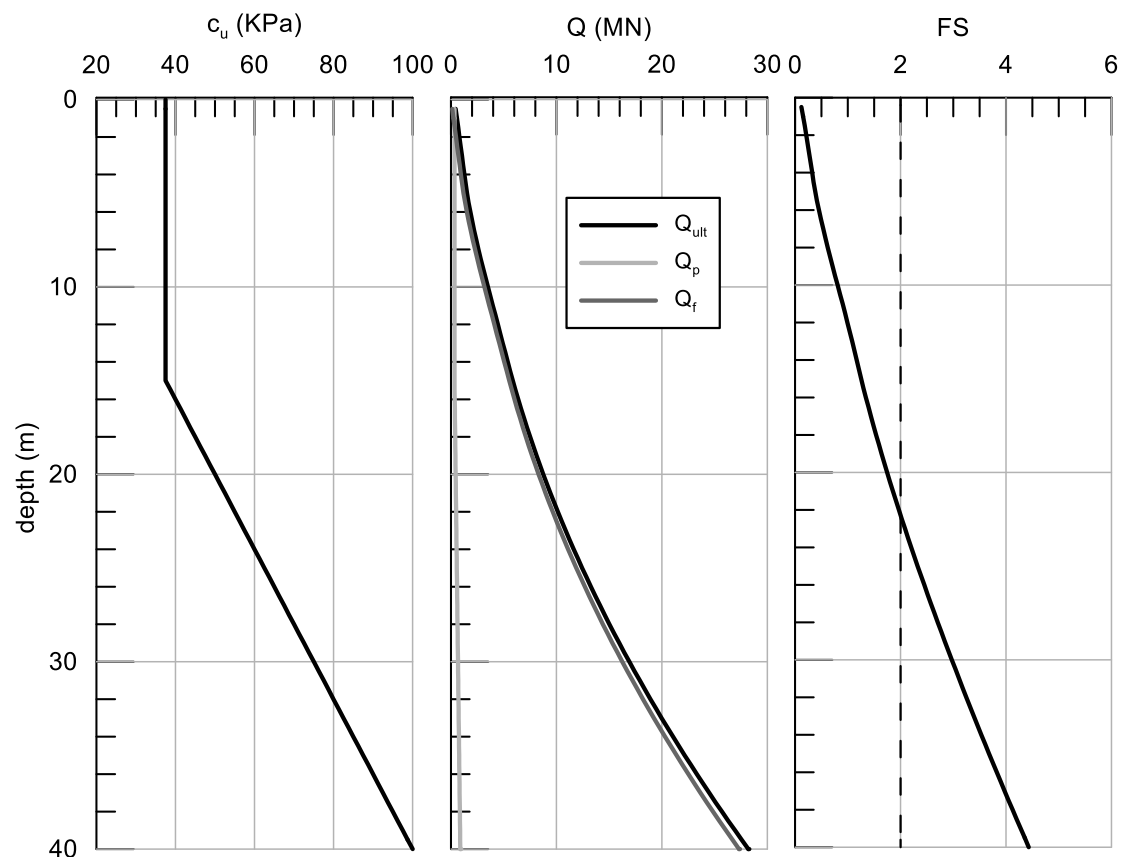
Στην στατική ανάλυση του πασσάλου θεμελίωσης της ανεμογεννήτριας λήφθηκε κατακόρυφο φορτίο Q_{st} σύμφωνα με τη σχέση (4.12). Η άνωση της ανεμογεννήτριας για στο κομμάτι της που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας υπολογίσθηκε σε $A_{WT} = 295.561 \text{ KN}$ σύμφωνα με τη σχέση (4.15).

Ο υπολογισμός της φέρουσας ικανότητας του πασσάλου έγινε σύμφωνα με τη σχέση (4.16). Το εμβαδόν της αιχμής του πασσάλου λήφθηκε $A_p = 0.98 \text{ m}^2$, με την παραδοχή κοίλης ανοιχτής διατομής ακολουθώντας τη σχέση (4.14).

Η ανάλυση της αξονικής καταπόνησης του πασσάλου πραγματοποιήθηκε υπολογίζοντας τον συντελεστή ασφαλείας για κάθε μήκος έμπηξης πασσάλου. Σε κάθε ανάλυση το μήκος

έμπηξης αυξανόταν κατά 0.5 m σε σχέση με την προηγούμενη ανάλυση, έως την ύπερβαση της οριακής τιμής του συντελεστή ασφαλείας $FS = 2.00$.

Μαλακή άργιλος. Στο Σχήμα 4.18 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών του c_u , Q και FS για κάθε μήκος έμπηξης πασσάλου.



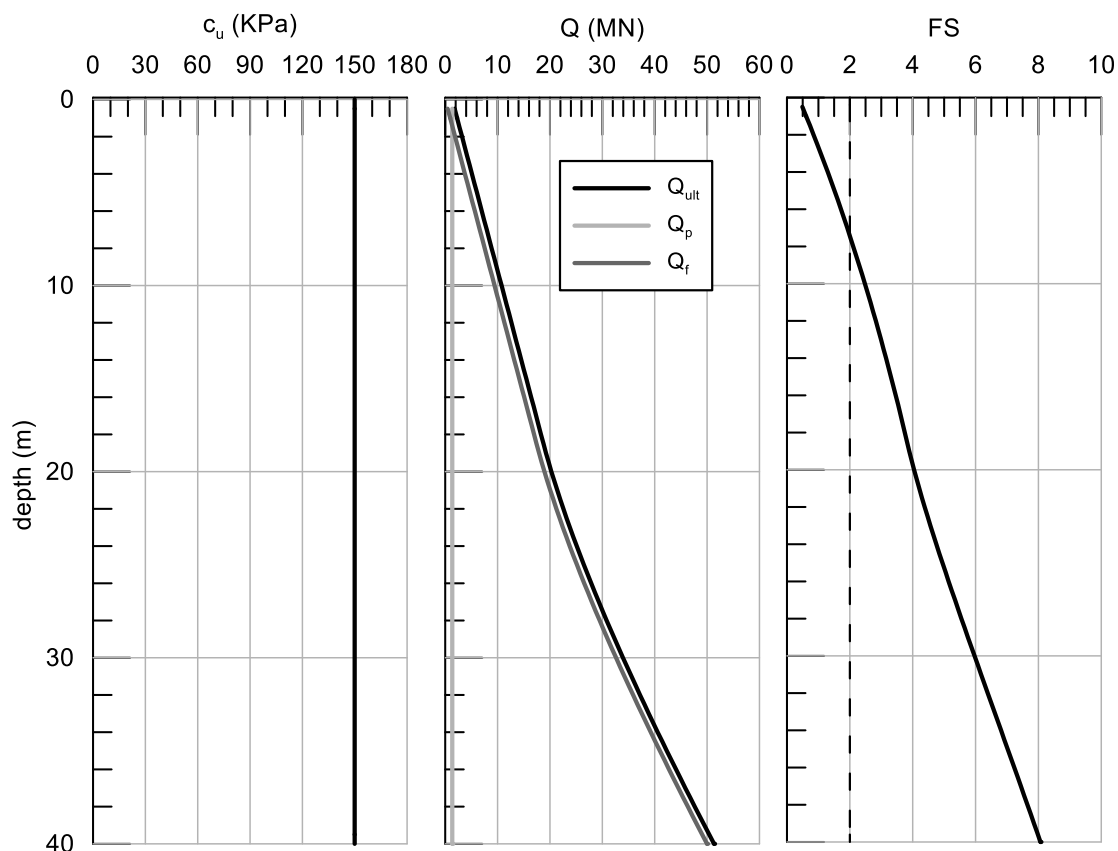
Σχήμα 4.18: Αποτελέσματα υπολογισμών στατικής ανάλυσης μαλακής άργιλου

Ο Πίνακας 4.12 παρουσιάζει τα τελικά αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης σε κατακόρυφο φορτίο.

Πίνακας 4.12: Αποτελέσματα αξονικής καταπόνησης σε μαλακή άργιλο

Διάμετρος D (m)	4.00
Απαιτούμενο μήκος έμπηξης L (m)	22.50
Πάχος τοιχωμάτων τ (m)	0.08
Λόγος L/B	5.625
Συντελεστής ασφαλείας FS	2.03

Στιφρή άργιλος._ Στο **Σχήμα 4.19** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών του c_u , Q και FS για κάθε μήκος έμπηξης πασσάλου.



Σχήμα 4.19: Αποτελέσματα υπολογισμών στατικής ανάλυσης στιφρής αργίλου

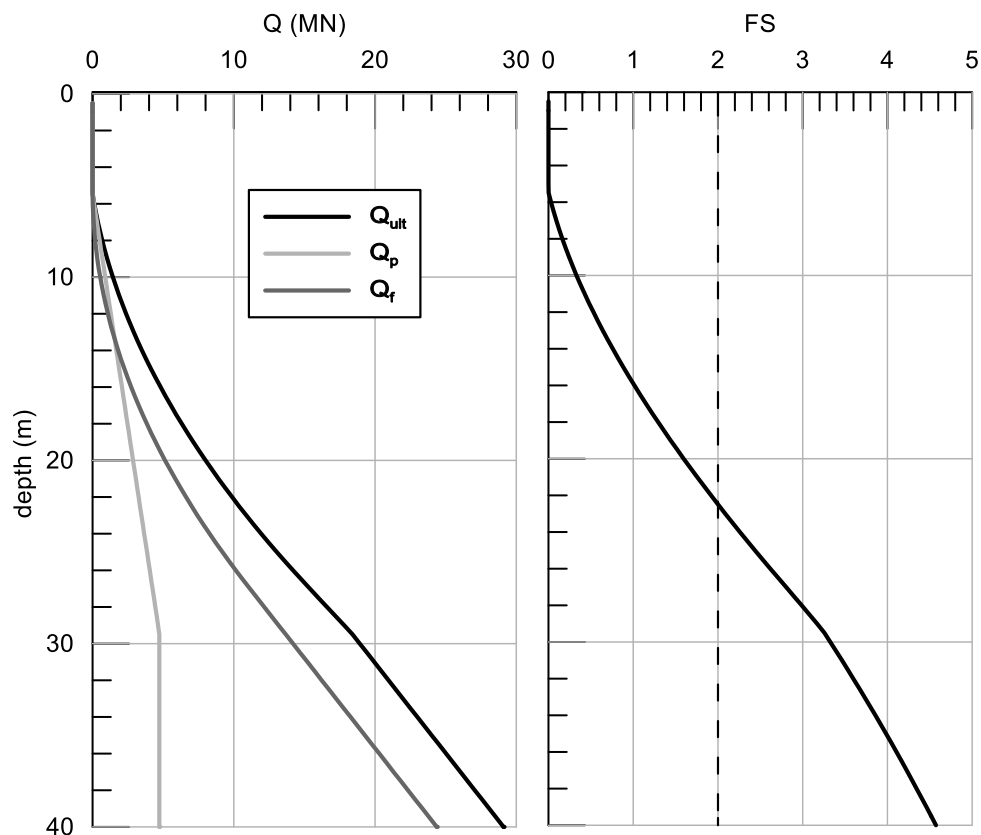
Ο **Πίνακας 4.13** παρουσιάζει τα τελικά αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης σε κατακόρυφο φορτίο.

Πίνακας 4.13: Αποτελέσματα αξονικής καταπόνησης σε στιφρή άργιλο

Διάμετρος B (m)	4.00
Απαιτούμενο μήκος έμπηξης L (m)	7.50
Πάχος τοιχωμάτων τ (m)	0.08
Λόγος L/B	1.875
Συντελεστής ασφάλειας FS	2.01

Άμμος μέσης πυκνότητας._ Όπως αναγράφει ο **Πίνακας 4.5** για την άμμο μέσης πυκνότητας η γωνία δ θεωρήθηκε ίση με 25° , η οριακή πλευρική τριβή 81 kPa, η οριακή αντίσταση αιχμής ίση με 4800kPa και ο συντελεστής K ίσος με 0.80 για πασσάλους ανοιχτής διατομής.

Στο **Σχήμα 4.20** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών του Q και του FS για κάθε μήκος έμπτυξης πασσάλου.



Σχήμα 4.20: Αποτελέσματα υπολογισμών στατικής ανάλυσης άμμου μέσης πυκνότητας

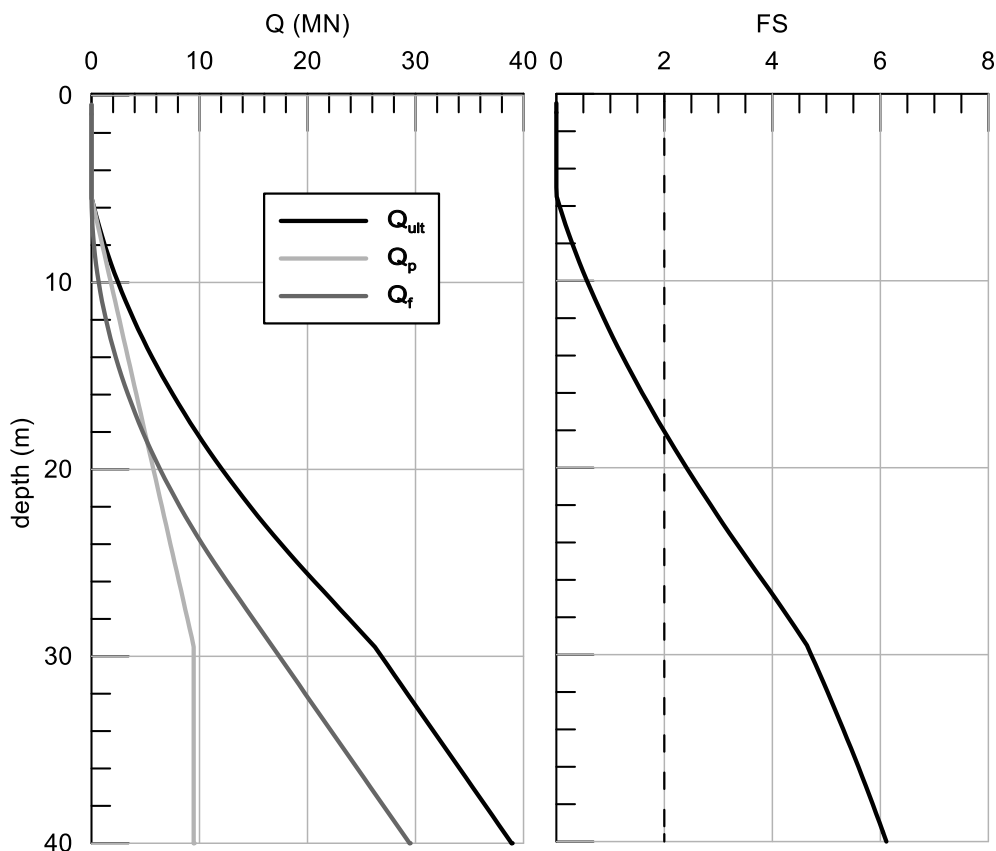
Ο **Πίνακας 4.14** παρουσιάζει τα τελικά αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης σε κατακόρυφο φορτίο.

Πίνακας 4.14: Αποτελέσματα αξονικής καταπόνησης σε άμμο μέσης πυκνότητας.

Διάμετρος D (m)	4.00
Απαιτούμενο μήκος έμπτυξης L (m)	22.50
Πάχος τοιχωμάτων τ (m)	0.08
Λόγος L/B	5.625
Συντελεστής ασφάλειας FS	2.00

Πυκνή άμμος. Όπως αναγράφει ο **Πίνακας 4.5** για πυκνή άμμο η γωνία δ θεωρήθηκε ίση με 30° , η οριακή πλευρική τριβή 96 kPa, η οριακή αντίσταση αιχμής ίση με 9600 kPa και ο συντελεστής K ίσος με 0.80 για πασσάλους ανοιχτής διατομής.

Στο **Σχήμα 4.21** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών του Q και του FS για κάθε μήκος έμπτυξης πασσάλου.



Σχήμα 4.21: Αποτελέσματα υπολογισμών στατικής ανάλυσης πυκνής άμμο

Τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης σε κατακόρυφο φορτίο παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα (**Πίνακας 4.15**).

Πίνακας 4.15: Αποτελέσματα αξονικής καταπόνησης σε πυκνή άμμο

Διάμετρος D (m)	4.00
Απαιτούμενο μήκος έμπτυξης L (m)	18.50
Πάχος τοιχωμάτων τ (m)	0.08
Λόγος L/B	4.625
Συντελεστής ασφάλειας FS	2.09

4.4.4 Σχεδιασμός θεμελίωσης ανεμογεννητριών έναντι οριζόντιας φόρτισης

Διαστασιολόγηση θεμελίωσης «Τυπικής ανεμογεννήτριας 5-MW»

Όπως προαναφέρθηκε, ο πάσσαλος θεμελίωσης της τυπικής ανεμογεννήτριας 5-MW είναι μεταλλικός ανοιχτής κοίλης διατομής. Το πάχος των τοιχωμάτων του πασσάλου λαμβάνεται ίσο με 0.07 m. Ο σχεδιασμός της θεμελίωσης πραγματοποιήθηκε όπως αναφέρεται και στο Κεφ. 4.4.2 έναντι οριζόντιας φόρτισης ίσης με 6010 KN, η οποία ασκείται με εκκεντρότητα 35.98 m από την κεφαλή του πασσάλου θεμελίωσης.

Στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας επιλέγεται χάλυβας υψηλής αντοχής (HS) του οποίου η χαρακτηριστική τάση διαρροής κυμαίνεται από 265 MPa έως 390 MPa, (Πίνακας 4.2). Συγκεκριμένα η χαρακτηριστική τάση διαρροής ($f_{y,k}$) του χάλυβα αυτής της κατηγορίας συνοψίζεται στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 4.16) ανάλογα με το πάχος των ελασμάτων.

Πίνακας 4.16: Χαρακτηριστικές τάσεις διαρροής χάλυβα ανάλογα με το πάχος των ελασμάτων (DNV 2009)

Ποιότητα χάλυβα	<i>VL AW27</i> <i>VL DW27</i> <i>VL EW27</i>	<i>VL AW32</i> <i>VL DW32</i> <i>VL EW32</i>	<i>VL AW36</i> <i>VL DW36</i> <i>VL EW36</i>
Εφελκυστική αντοχή (MPa)	400 έως 530	440 έως 590	490 έως 630
t(mm)	$f_{y,k}$ (MPa)	$f_{y,k}$ (MPa)	$f_{y,k}$ (MPa)
$t \leq 25\text{mm}$	265	315	355
$25\text{mm} < t \leq 50\text{mm}$	245	295	335
$50\text{mm} < t \leq 75\text{mm}$	230	280	320
$75\text{mm} < t \leq 100\text{mm}$	220	270	310

Συνεπώς βάσει όσων περιγράφονται στον παραπάνω Πίνακα (Πίνακας 4.16) επιλέγοντας χάλυβα υψηλής αντοχής με ελάχιστο όριο διαρροής 320 MPa, για το συγκεκριμένο πάχος τοιχωμάτων πασσάλου επιλέγεται χάλυβας χαρακτηριστικού ορίου διαρροής $f_{y,k} = 280$ MPa.

Για την εκτίμηση των απαιτούμενων χαρακτηριστικών του πασσάλου έναντι πλευρικής καταπόνησης πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικές αναλύσεις για διάφορους συνδυασμούς διαμέτρου (B) και μήκους (L) πασσάλου, με σκοπό το εκτιμώμενο οριζόντιο φορτίο θραύσεως του συνδυασμού να υπερβεί το επιβαλλόμενο φορτίο.

Μαλακή άργιλος._ Στην περίπτωση της μαλακής άργιλου η αστράγγιστη διατμητική αντοχή παραμένη σταθερά ίση με 37.5 KPa μέχρι το βάθος των 15m από τον πυθμένα της

θάλασσας και ύστερα αυξάνεται γραμμικά. Για κάθε εξεταζόμενο συνδυασμό υπολογίστηκε η θέση της πλαστικής άρθρωσης, καθώς η κύρια κινητοποίηση του πασσάλου συμβαίνει μέχρι αυτή τη θέση και οι ιδιότητες του εδάφους σε μεγαλύτερα βάθη δεν επηρεάζουν την απόκριση του πασσάλου. Στην περίπτωση που η πλαστική άρθρωση βρισκόταν άνω των 15 m, στους υπολογισμούς της ροπής κάμψης του πασσάλου θεωρήθηκε αστράγγιστη διατμητική αντοχή ίση με 37.5 KPa. Σε αντίθετη περίπτωση, ήταν απαραίτητη μια επαλληλία των ροπών κάμψης του πασσάλου, η οποία προκύπτει από το εδαφικό προφίλ με αστράγγιστη διατμητική αντοχή 37.5 KPa και από το εδαφικό προφίλ με αστράγγιστη διατμητική αντοχή ίση με την υπολογιζόμενη από τη σχέση (4.30) για το αντίστοιχο βάθος πασσάλου.

Ύστερα από επαναλήψεις trial-and-error, η τελική διαστασιολόγηση του μονο-πασσάλου που προέκυψε παρουσιάζεται στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 4.17).

Πίνακας 4.17: Αποτελέσματα διαστασιολόγησης έναντι πλευρικής καταπόνησης σε μαλακή άργιλο

Διάμετρος B (m)	6.00
Μήκος έμπτυξης L (m)	36.00
Πάχος τοιχωμάτων τ (m)	0.07
Λόγος L/B	6.00
Μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή M_{max} (KN*m)	283860.30
Ροπή αντοχής πασσάλου σε κάμψη M_y (KN*m)	535080.71
Διάκριση πασσάλου	Κοντός πάσσαλος
Οριζόντιο φορτίο θραύσης H_u (KN)	6310.80
Συντελεστής ασφαλείας FS	1.05

Στιφρή άργιλος. Στην περίπτωση στιφρής αργίλου η αστράγγιστη διατμητική αντοχή παραμένει σταθερά ίση με 150 KPa μέχρι το βάθος των 60 m από τον πυθμένα της θάλασσας και ύστερα μεταβάλλεται γραμμικά. Για κάθε εξεταζόμενο συνδυασμό με μήκος πασσάλου μεγαλύτερο των 60 m, η αστράγγιστη διατμητική αντοχή λήφθηκε ως ο μέσος όρος του μεγέθους έως αυτό το βάθος.

Ύστερα από επαναλήψεις trial-and-error, η τελική διαστασιολόγηση του μονο-πασσάλου που προέκυψε παρουσιάζεται στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 4.18).

Πίνακας 4.18: Αποτελέσματα πλευρικής καταπόνησης σε στιφρή άργιλο

Διάμετρος B (m)	6.00
Μήκος έμπηξης L (m)	22.00
Πάχος τοιχωμάτων τ (m)	0.07
Λόγος L/B	3.67
Μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή M_{max} (KN*m)	304470.61
Ροπή αντοχής πασσάλου σε κάμψη M_y (KN*m)	535080.71
Διάκριση πασσάλου	Κοντός πάσσαλος
Οριζόντιο φορτίο θραύσης H_u (KN)	6647.70
Συντελεστής ασφαλείας FS	1.11

Άμμος μέσης πυκνότητας. Στην περίπτωση της άμμου μέσης πυκνότητας εξετάστηκε αρχικά ο συνδυασμός των χαρακτηριστικών πασσάλου που προέκυψε από τη στατική ανάλυση για κατακόρυφη φόρτιση. Σύμφωνα με τις αναλύσεις ο πάσσαλος ήταν επαρκής. Τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 4.19).

Πίνακας 4.19: Αποτελέσματα πλευρικής καταπόνησης σε άμμο μέσης πυκνότητας

Διάμετρος B (m)	6.00
Μήκος έμπηξης L (m)	27.50
Πάχος τοιχωμάτων τ (m)	0.07
Λόγος L/B	4.58
Μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή M_{max} (KN*m)	1432801.00
Ροπή αντοχής πασσάλου σε κάμψη M_y (KN*m)	535080.71
Διάκριση πασσάλου	Μακρύς πάσσαλος
Οριζόντιο φορτίο θραύσης H_u (KN)	12450.51
Συντελεστής ασφαλείας FS	2.07

Πυκνή άμμος. Και στην περίπτωση της πυκνής άμμου ελέγχθηκαν αρχικά οι διαστάσεις του πασσάλου που προέκυψαν από τη στατική ανάλυση και διαπιστώθηκε ότι ήταν επαρκείς και για οριζόντια φορτιση.

Τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 4.20).

Πίνακας 4.20: Αποτελέσματα πλευρικής καταπόνησης σε πυκνή άμμο

Διάμετρος B (m)	6.00
Μήκος έμπηξης L (m)	23.00
Πάχος τοιχωμάτων τ (m)	0.07
Λόγος L/B	3.83
Μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή M_{max} (KN*m)	1182054.26
Ροπή αντοχής πασσάλου σε κάμψη M_y (KN*m)	535080.71
Διάκριση πασσάλου	Μακρύς πάσσαλος
Οριζόντιο φορτίο θραύσης H_u (KN)	12883.60
Συντελεστής ασφαλείας FS	2.14

Διαστασιολόγηση θεμελίωσης «Vestas V90-3MW»

Ο πάσσαλος θεμελίωσης της ανεμογεννήτριας Vestas V90-3MW επιλέγεται να είναι μεταλλικός κοίλης διατομής. Το πάχος των τοιχωμάτων του πασσάλου λαμβάνεται ίσο με 0.08 m. Ο σχεδιασμός της θεμελίωσης πραγματοποιήθηκε όπως αναφέρεται και στο Κεφ. 4.4.2 έναντι οριζόντιας φόρτισης ίσης με 4000 KN, η οποία ασκείται με εκκεντρότητα 43.13 m από την κεφαλή του πασσάλου θεμελίωσης.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας επιλέγεται χάλυβας υψηλής αντοχής (HS) του οποίου η χαρακτηριστική τάση διαρροής κυμαίνεται από 265 MPa έως 390 MPa. Συγκεκριμένα η χαρακτηριστική τάση διαρροής ($f_{y,k}$) του χάλυβα αυτής της κατηγορίας ανάλογα με των πάχος των ελασμάτων συνοψίζεται στον παρακάτω Πίνακα (**Πίνακας 4.21**).

Πίνακας 4.21: Χαρακτηριστικές τάσεις διαρροής χάλυβα ανάλογα με το πάχος των ελασμάτων (DnV 2019)

Ποιότητα χάλυβα	<i>VL AW27</i> <i>VL DW27</i> <i>VL EW27</i>	<i>VL AW32</i> <i>VL DW32</i> <i>VL EW32</i>	<i>VL AW36</i> <i>VL DW36</i> <i>VL EW36</i>
Εφελκυστική αντοχή (MPa)	400 έως 530	440 έως 590	490 έως 630
t(mm)	$f_{y,k}$ (MPa)	$f_{y,k}$ (MPa)	$f_{y,k}$ (MPa)
$t \leq 25\text{mm}$	265	315	355
$25\text{mm} < t \leq 50\text{mm}$	245	295	335
$50\text{mm} < t \leq 75\text{mm}$	230	280	320
$75\text{mm} < t \leq 100\text{mm}$	220	270	310

Συνεπώς με βάση όσα περιγράφονται στον παραπάνω Πίνακα (**Πίνακας 4.21**) επιλέγοντας χάλυβα υψηλής αντοχής με ελάχιστο όριο διαρροής 320 MPa, για το συγκεκριμένο πάχος τοιχωμάτων πασσάλου επιλέγεται χάλυβας χαρακτηριστικού ορίου διαρροής $f_{yk} = 270$ MPa.

Στην ανάλυση πλευρικής αντοχής του πασσάλου θεμελίωσης λήφθηκαν τα επιβαλλόμενα φορτία και η εκκεντρότητα που περιγράφονται στην παράγραφο 4.4.2.

Για την εκτίμηση των απαιτούμενων χαρακτηριστικών του πασσάλου έναντι πλευρικής καταπόνησης πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικές αναλύσεις για διάφορους συνδυασμούς διαμέτρου (D) και μήκους (L) πασσάλου, με σκοπό το εκτιμώμενο οριζόντιο φορτίο θραύσεως του συνδυασμού να υπερβεί το επιβαλλόμενο φορτίο.

Μαλακή άργιλος . _ Στην περίπτωση της μαλακής άργιλου η αστράγγιστη διατμητική αντοχή παραμένει σταθερά ίση με 37.5 KPa μέχρι το βάθος των 15m από τον πυθμένα της θάλασσας και ύστερα μεταβάλλεται γραμμικά. Για κάθε εξεταζόμενο συνδυασμό υπολογίστηκε η θέση της πλαστικής άρθρωσης, καθώς η κύρια κινητοποίηση του πασσάλου συμβαίνει μέχρι αυτή τη θέση και οι ιδιότητες του εδάφους σε μεγαλύτερα βάθη δεν επηρεάζουν την απόκριση του πασσάλου. Στην περίπτωση που η πλαστική άρθρωση βρισκόταν άνω των 15 m, στους υπολογισμούς της ροπής κάμψης του πασσάλου θεωρήθηκε αστράγγιστη διατμητική αντοχή ίση με 37.5 KPa. Σε αντίθετη περίπτωση, ήταν απαραίτητη μια επαλληλία των ροπών κάμψης του πασσάλου που προκύπτει από το εδαφικό προφίλ με αστράγγιστη διατμητική αντοχή 37.5 KPa και από το εδαφικό προφίλ με αστράγγιστη διατμητική αντοχή ίση με την υπολογιζόμενη από τη σχέση (4.30) για το αντίστοιχο βάθος πασσάλου.

Ύστερα από επαναλήψεις trial-and-error, η τελική διαστασιολόγηση του μονο-πασσάλου που προέκυψε παρουσιάζεται στον παρακάτω Πίνακα (**Πίνακας 4.22**).

Πίνακας 4.22: Αποτελέσματα πλευρικής καταπόνησης σε μαλακή άργιλο

Διάμετρος B (m)	4.00
Μήκος έμπηξης L (m)	34.00
Πάχος τοιχωμάτων τ (m)	0.08
Λόγος L/B	8.50
Μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή M_{max} (KN*m)	205921.08
Ροπή αντοχής πασσάλου σε κάμψη M_y (KN*m)	255577.54
Διάκριση πασσάλου	Κοντός πάσσαλος
Οριζόντιο φορτίο θραύσης H_u (KN)	4191.40
Συντελεστής ασφαλείας FS	1.05

Στιφρή άργιλος._ Στην περίπτωση στιφρής αργίλου η αστράγγιστη διατμητική αντοχή παραμένει σταθερά ίση με 150 KPa μέχρι το βάθος των 60 m από τον πυθμένα της θάλασσας και ύστερα μεταβάλλεται γραμμικά. Για κάθε εξεταζόμενο συνδυασμό με μήκος πασσάλου μεγαλύτερο των 60 m, η αστράγγιστη διατμητική αντοχή λήφθηκε ως ο μέσος όρος του μεγέθους έως αυτό το βάθος.

Ύστερα από επαναλήψεις trial-and-error, η τελική διαστασιολόγηση του μονο-πασσάλου που προέκυψε παρουσιάζεται στον παρακάτω Πίνακα (**Πίνακας 4.23**).

Πίνακας 4.23: Αποτελέσματα πλευρικής καταπόνησης σε στιφρή άργιλο

Διάμετρος B (m)	4.00
Μήκος έμπηξης L (m)	19.00
Πάχος τοιχωμάτων τ (m)	0.08
Λόγος L/B	4.75
Μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή M_{max} (KN*m)	204606.96
Ροπή αντοχής πασσάλου σε κάμψη M_y (KN*m)	255577.54
Διάκριση πασσάλου	Κοντός πάσσαλος
Οριζόντιο φορτίο θραύσης H_u (KN)	4101.20
Συντελεστής ασφαλείας FS	1.03

Άμμος μέσης πυκνότητας. Στην περίπτωση της άμμου μέσης πυκνότητας αρχικά εξετάστηκε ο συνδυασμός των χαρακτηριστικών πασσάλου που προέκυπτε από τη στατική ανάλυση. Σύμφωνα με τις αναλύσεις ο πάσσαλος ήταν επαρκής. Τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα (**Πίνακας 4.24**).

Πίνακας 4.24: Αποτελέσματα πλευρικής καταπόνησης σε άμμο μέσης πυκνότητας

Διάμετρος B (m)	4.00
Μήκος έμπτυξης L (m)	22.50
Πάχος τοιχωμάτων τ (m)	0.08
Λόγος L/B	5.63
Μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή M_{max} (KN*m)	567800.78
Ροπή αντοχής πασσάλου σε κάμψη M_y (KN*m)	255577.54
Διάκριση πασσάλου	Μακρύς πάσσαλος
Οριζόντιο φορτίο θραύσης H_u (KN)	5299.97
Συντελεστής ασφαλείας FS	1.32

Πυκνή άμμος. Στην περίπτωση της πυκνής άμμου, αρχικά εξετάστηκε ο συνδυασμός των χαρακτηριστικών πασσάλου που προέκυπτε από τη στατική ανάλυση. Σύμφωνα με τις αναλύσεις ο πάσσαλος ήταν επαρκής. Τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα (**Πίνακας 4.25**).

Πίνακας 4.25: Αποτελέσματα πλευρικής καταπόνησης σε πυκνή άμμο

Διάμετρος B (m)	4.00
Μήκος έμπτυξης L (m)	18.50
Πάχος τοιχωμάτων τ (m)	0.08
Λόγος L/B	4.63
Μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή M_{max} (KN*m)	444579.54
Ροπή αντοχής πασσάλου σε κάμψη M_y (KN*m)	255577.54
Διάκριση πασσάλου	Μακρύς πάσσαλος
Οριζόντιο φορτίο θραύσης H_u (KN)	5432.27
Συντελεστής ασφαλείας FS	1.36

4.5 Σύνοψη αναλύσεων διαστασιολόγησης θεμελιώσεων

Στο παρόν κεφάλαιο της Διπλωματικής Εργασίας πραγματοποιήθηκε διαστασιολόγηση της θεμελίωσης των παρακάτω ανεμογεννητριών: της «τυπικής ανεμογεννήτριας 5-MW» και της «Vestas V90-3MW». Οι δύο ανεμογεννήτριες ελέγχθηκαν έναντι κατακόρυφων και οριζόντιων φορτίων για θεμελίωση με μονο-πάσσαλο, τόσο σε αργιλώδη όσο και σε αμμώδη πυθμένα. Ο αργιλώδης πυθμένας διακρίθηκε περαιτέρω σε πυθμένα μαλακής και στιφρής αργίλου, ενώ ο αμμώδης πυθμένας διακρίθηκε σε πυθμένα άμμου μέσης πυκνότητας και πυκνής άμμου. Τα αποτελέσματα της διαστασιολόγησης συνοψίζονται ακολούθως.

4.5.1 «Τυπική ανεμογεννήτρια 5-MW»

Ο Πίνακας 4.26 παρουσιάζει τα συγκριτικά αποτελέσματα της ανάλυσης της τυπικής ανεμογεννήτριας 5-MW σε αργιλώδη πυθμένα.

Πίνακας 4.26: Αποτελέσματα διαστασιολόγησης σε αργιλώδη πυθμένα

Τυπική ανεμογεννήτρια 5-MW						
Άργιλος	Μαλακή			Στιφρή		
Ανάλυση	Αξονική Φέρουσα Ικανότητα	Οριζόντια φέρουσα ικανότητα	Τελικά	Αξονική Φέρουσα ικανότητα	Οριζόντια φέρουσα ικανότητα	Τελικά
B (m)	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
L (m)	24.50	36.00	36.00	9.50	22.00	22.00
L/B	4.08	6.00	6.00	1.58	3.67	3.67
τ (m)	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
FS	2.05	1.05		2.04	1.11	

Συνεπώς, η τυπική ανεμογεννήτρια 5-MW για τον πυθμένα μαλακής αργίλου θα σχεδιαστεί με μονο-πάσσαλο θεμελίωσης διαμέτρου 6 m και μήκους έμπηξης 36.00 m. Αντίστοιχα, για την περίπτωση του πυθμένα στιφρής αργίλου θα σχεδιαστεί με μονο-πάσσαλο θεμελίωσης διαμέτρου 6 m και μήκους έμπηξης 22.00 m. Και στις δύο περιπτώσεις το πάχος του τοιχώματος του μονο-πασσάλου θα είναι ίσο με 7cm.

Ο Πίνακας 4.27 παρουσιάζει τα συγκριτικά αποτελέσματα της ανάλυσης της ίδιας ανεμογεννήτριας σε αμμώδη πυθμένα.

Πίνακας 4.27: Αποτελέσματα διαστασιολόγησης σε αμμώδη πυθμένα

Τυπική ανεμογεννήτρια 5-MW						
Άμμος	Μέσης πυκνότητας			Πυκνή		
Ανάλυση	Αξονική Φέρουσα Ικανότητα	Οριζόντια φέρουσα ικανότητα	Τελικά	Αξονική Φέρουσα ικανότητα	Οριζόντια φέρουσα ικανότητα	Τελικά
B (m)	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
L (m)	27.50	27.50	28.00	23.00	23.00	23.00
L/B	4.58	4.58	4.58	3.83	3.83	3.83
τ (m)	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
FS	2.02	2.07		2.02	2.14	

Συνεπώς, η τυπική ανεμογεννήτρια 5-MW για τον πυθμένα άμμου μέσης πυκνότητας θα σχεδιαστεί με μονο-πάσσαλο θεμελίωσης διαμέτρου 6 m και μήκους έμπηξης 28.00 m. Αντίστοιχα, για την περίπτωση του πυθμένα πυκνής άμμου θα σχεδιαστεί με μονο-πάσσαλο θεμελίωσης διαμέτρου 6 m και μήκους έμπηξης 23.00 m. Και στις δύο περιπτώσεις το πάχος του τοιχώματος του μονο-πασσάλου θα είναι ίσο με 7cm.

4.5.2 Ανεμογεννήτρια «Vestas V90-3MW»

Ο Πίνακας 4.28 παρουσιάζει τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της ανάλυσης της ανεμογεννήτριας Vestas V90-3MW σε αργιλώδη πυθμένα.

Πίνακας 4.28: Αποτελέσματα διαστασιολόγησης σε αργιλώδη πυθμένα

VESTAS V90-3MW						
Άργιλος	Μαλακή			Στιφρή		
Ανάλυση	Αξονική Φέρουσα Ικανότητα	Οριζόντια φέρουσα ικανότητα	Τελικά	Αξονική Φέρουσα ικανότητα	Οριζόντια φέρουσα ικανότητα	Τελικά
B (m)	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
L (m)	22.50	34.00	34.00	7.50	19.00	19.00
L/B	5.63	8.50	8.50	1.88	4.75	4.75
τ (m)	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
FS	2.03	1.05		2.01	1.02	

Συνεπώς, η ανεμογεννήτρια Vestas V90-3MW για τον πυθμένα μαλακής αργίλου θα σχεδιαστεί με μονο-πάσσαλο θεμελίωσης διαμέτρου 4 m και μήκους έμπηξης 34.00 m. Αντίστοιχα, για την περίπτωση του πυθμένα στιφρής αργίλου θα σχεδιαστεί με μονο-πάσσαλο θεμελίωσης διαμέτρου 4 m και μήκους έμπηξης 19.00 m. Και στις δύο περιπτώσεις το πάχος τοιχώματος του μονο-πασσάλου θα είναι ίσο με 8cm.

Ο Πίνακας 4.29 παρουσιάζει τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της ανάλυσης της ανεμογεννήτριας Vestas V90-3MW σε αμμώδη πυθμένα.

Πίνακας 4.29: Αποτελέσματα διαστασιολόγησης σε αμμώδη πυθμένα

VESTAS V90-3MW						
Άμμος	Μέσης πυκνότητας			Πυκνή		
Ανάλυση	Φέρουσα ικανότητα	Οριζόντια φέρουσα ικανότητα	Τελικά	Φέρουσα ικανότητα	Οριζόντια φέρουσα ικανότητα	Τελικά
B (m)	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
L (m)	22.50	22.50	22.50	18.50	18.50	18.50
L/B	5.63	5.63	5.63	4.63	4.63	4.63
τ (m)	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
FS	2.05	1.32		2.03	1.36	

Συνεπώς, η ανεμογεννήτρια Vestas V90-3MW για τον πυθμένα άμμου μέσης πυκνότητας θα σχεδιαστεί με μονο-πάσσαλο θεμελίωσης διαμέτρου 4 m και μήκους έμπηξης 22.50 m. Αντίστοιχα, για την περίπτωση του πυθμένα πυκνής άμμου θα σχεδιαστεί με μονο-πάσσαλο θεμελίωσης διαμέτρου 4 m και μήκους έμπηξης 18.50 m. Και στις δύο περιπτώσεις το πάχος τοιχώματος του μονο-πασσάλου θα είναι ίσο με 8cm.

4.5.3 Παρατηρήσεις

Από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν προέκυψαν οι παρακάτω παρατηρήσεις πρακτικού ενδιαφέροντος:

- Στην περίπτωση αμμώδους πυθμένα, οι διαστάσεις των πασσάλων θεμελίωσης ορίσθηκαν κατά τον αρχικό έλεγχο της κατακόρυφης φόρτισης και αποδείχθηκαν επαρκείς και για τον ακόλουθο έλεγχο της οριζόντιας.

- Αντίθετα στην περίπτωση του αργιλικού πυθμένα, οι τελικές διαστάσεις του πασσάλου προέκυψαν από την έλεγχο της οριζόντιας φόρτισης η οποία αποδείχθηκε έτσι αρκετά έως πολύ δυσμενέστερη της κατακόρυφης.

Οι δύο παραπάνω παρατηρήσεις κρίθηκε ότι οφείλονται στην υψηλή αντίσταση αιχμής της θεμελίωσης σε αργιλώδη πυθμένα, που οδηγεί σε μικρότερα μήκη έμπηξης στην ανάλυση κατακόρυφων φορτίων. Στην πλευρική καταπόνηση η άργιλος δεν παρουσιάζει τόσο έντονη αντίσταση όσο στην αντίστοιχη αξονική δεδομένου ότι καταπονούνται τα επιφανειακά στρώματα μειωμένης αστράγγιστης διατμητικής αντοχής. Αντιθέτως, η άμμος έχει έντονη διατμητική αντοχή και παρουσιάζει σημαντική πλευρική αντίσταση σε ολόκληρο το μήκος του, οδηγώντας σε επάρκεια του υπολογιζόμενου από τη στατική ανάλυση μήκους έμπηξης.

Κεφάλαιο 5

Αριθμητική προσομοίωση υπεράκτιας ανεμογεννήτριας

5.1 Γενικά

Στα προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας πραγματοποιήθηκε μια εκτενής παρουσίαση της βιβλιογραφικής έρευνας σχετικά με την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης του συστήματος πασσάλου – εδάφους, και την σημασία της στις αναλύσεις υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Αντικείμενο λοιπόν του Κεφαλαίου 5 αποτελεί η υπολογιστική (αριθμητική) εκτίμηση της επίδρασης της θεμελίωσης κατά τη σεισμική διέγερση υπεράκτιας ανεμογεννήτριας. Για αυτό το σκοπό εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις ανάλυσης: α) προσομοίωση υπεράκτιας ανεμογεννήτριας με πακτωμένη βάση και β) προσομοίωση υπεράκτιας ανεμογεννήτριας λαμβάνοντας υπόψη τη θεμελίωση πασσάλου σύμφωνα με τη μέθοδο της «δοκού επί ελατηριωτού εδάφους». Σε κάθε περίπτωση υπολογίστηκε η απόσβεση και η ιδιοπερίοδος του συστήματος, ώστε να γίνει δυνατή η εκτίμηση της επίδρασης της θεμελίωσης κατά τη σεισμική απόκριση υπεράκτιας ανεμογεννήτριας.

Στο παρόν Κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι αναλύσεις για μια τυπική ανεμογεννήτρια 5-MW εδραζόμενη σε αμμώδες έδαφος μέσης πυκνότητας, χρησιμοποιώντας για τον πύργο και τη θεμελίωση της τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4 για την αντίστοιχη ανεμογεννήτρια. Η επίδραση των χαρακτηριστικών του εδάφους και της ανωδομής στη αλληλεπίδραση εδάφους-πασσάλου-ανωδομής εξετάζεται μέσω παραμετρικών αναλύσεων στο επόμενο Κεφάλαιο 6 της Διπλωματικής.

5.2 Μεθοδολογία αριθμητικής προσομοίωσης

5.2.1 Κώδικας πεπερασμένων στοιχείων Ansys

Οι αναλύσεις εκτελούνται με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Ansys 17.2 (Ansys 2016). Το λογισμικό Ansys είναι ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με ευρεία εφαρμογή

στην ανάλυση κατασκευών Πολιτικού Μηχανικού. Παρέχει τη δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων που σχετίζονται κυρίως με συνεχή μέσα σε δύο ή τρεις διαστάσεις. Το συνεχές μέσο διακριτοποιείται σε στοιχεία πεπερασμένων διαστάσεων, ενώ οι εξισώσεις ισορροπίας επιλύονται στα σημεία που ορίζουν το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων, δηλαδή στους κόμβους. Κάθε στοιχείο ακολουθεί κάποιο γραμμικό ή μη-γραμμικό καταστατικό νόμο συμπεριφοράς, σύμφωνα με τον οποίο υπολογίζονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις κάτω από τις επιβαλλόμενες δυνάμεις/μετατοπίσεις και συνοριακές συνθήκες.

Αλγόριθμος μη γραμμικής επίλυσης. Η μετατόπιση της κεφαλής, σύμφωνα με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, προκύπτει από το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων, μητρικής μορφής:

$$[K] \cdot \{u\} = \{F^a\} \quad (5.1)$$

όπου:

$[K]$: μητρώο δυσκαμψίας

$\{u\}$: διάνυσμα των άγνωστων τιμών των βαθμών ελευθερίας

$\{F^a\}$: διάνυσμα των επιβαλλόμενων φορτίων

Στην περίπτωση που το μητρώο δυσκαμψίας $[K]$ αποτελεί συνάρτηση των αγνώστων τιμών των βαθμών ελευθερίας, ή των παραγώγων αυτών, τότε η εξίσωση (5. 1) είναι μη γραμμική. Η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την επίλυση τέτοιων μη γραμμικών εξισώσεων είναι η επαναληπτική μέθοδος Newton-Raphson, η οποία περιγράφεται στο **Σχήμα 5.1** και συνοψίζεται στις παρακάτω εξισώσεις:

$$[K_i^T] \cdot \{\Delta u_i\} = \{F^a\} - \{F^{nr}\} \quad (5.2)$$

$$\{u_{i+1}\} = u_i - \{\Delta u_i\} \quad (5.3)$$

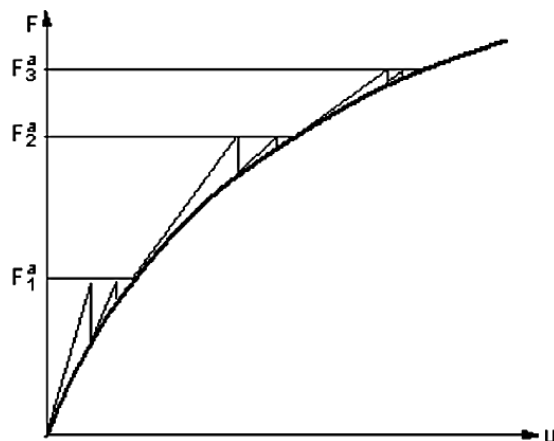
όπου:

$[K_i^T]$: εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας

i : δείκτης που υποδηλώνει την τρέχουσα επανάληψη

$\{F^{nr}\}$: διάνυσμα επικόμβιων δράσεων που απαιτούνται για την εξισορρόπηση των εσωτερικών τάσεων των στοιχείων

Σε κάθε επανάληψη, τα $[K_i^T]$ και $\{F^{nr}\}$ υπολογίζονται συναρτήσει των τιμών του $\{u_i\}$. Έτσι, το δεξί τμήμα της εξίσωσης (5.2) είναι ουσιαστικά το διάνυσμα των απομενόντων (εκτός-ισορροπίας) φορτίων. Αποτελεί, δηλαδή, μέτρο της «απόκλισης» από την τελική λύση.

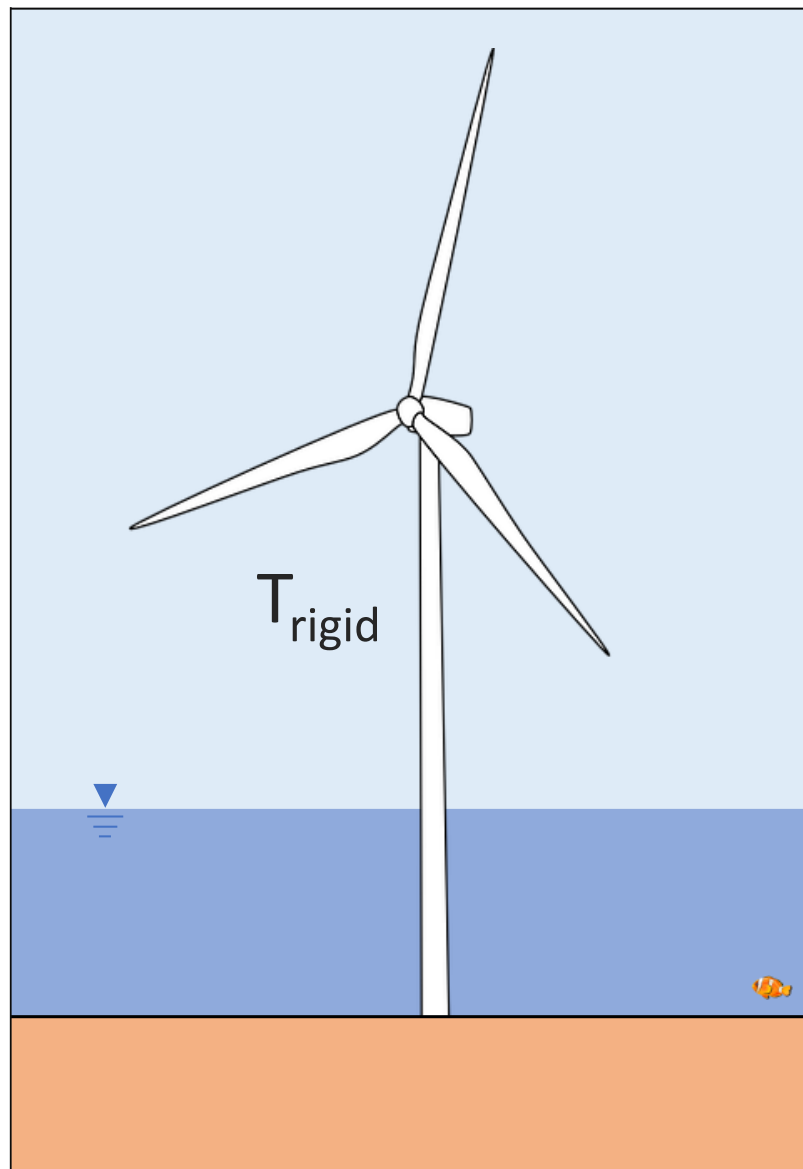


Σχήμα 5.1: Επαυξητική μέθοδος Newton-Raphson

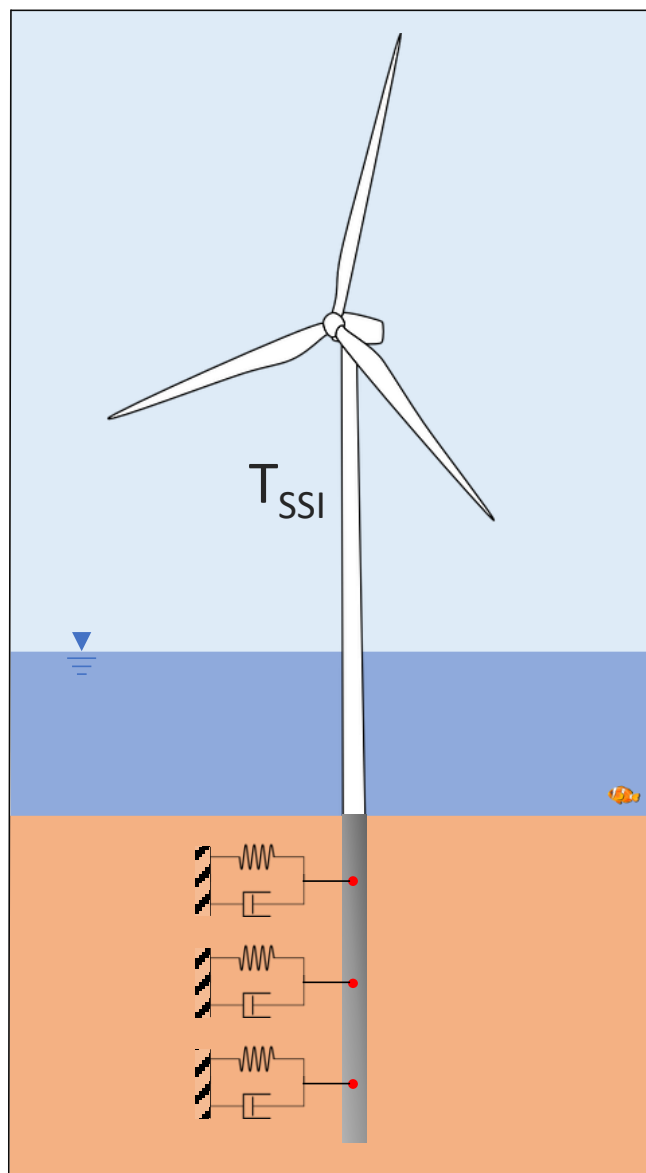
5.2.2 Υπολογιστικό προσομοίωμα

Το υπολογιστικό προσομοίωμα της πακτωμένης ανεμογεννήτριας περιλαμβάνει τον πύργο της ανεμογεννήτριας και τη μάζα του ρότορα συγκεντρωμένη στην κορυφή του πύργου. Η μάζα του πύργου λαμβάνεται υπόψη στην ανάλυση μέσω της πυκνότητας του υλικού. Στο **Σχήμα 5.2** παρουσιάζεται το υπολογιστικό προσομοίωμα στην περίπτωση της πακτωμένης ανεμογεννήτριας.

Στη περίπτωση ανάλυσης του συστήματος αλληλεπίδρασης ανωδομής – θεμελίωσης της ανεμογεννήτριας, το προσομοίωμα περιλαμβάνει τον πύργο της ανεμογεννήτριας, την συγκεντρωμένη μάζα του ρότορα στην κορυφή του πύργου και επιπλέον το μονο-πάσσαλο της θεμελίωσης. Στο **Σχήμα 5.3** παρουσιάζεται το υπολογιστικό προσομοίωμα του συστήματος αλληλεπίδρασης της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 5.2: Υπολογιστικό προσομοίωμα πακτωμένης υπεράκτιας ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 5.3: Υπολογιστικό προσομοίωμα συστήματος αλληλεπίδρασης υπεράκτιας ανεμογεννήτριας

Ο πάσσαλος θεμελίωσης και ο πύργος της ανεμογεννήτριας διακριτοποιούνται σε 2-κομβικά ισοπαραμετρικά, 3-διάστατα γραμμικώς ελαστικά στοιχεία δοκού, μήκους 2m το καθένα, με τα αδρανειακά χαρακτηριστικά μιας κοίλης κυλινδρικής διατομής (pipe – section) όπως έχει αυτή υπολογιστεί και παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 4. Ο **Πίνακας 5.1** συνοψίζει τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του πασσάλου θεμελίωσης και του πύργου της ανεμογεννήτριας για τα 4 εδαφικά προφίλ όπως αυτά υπολογίστηκαν στο Κεφάλαιο 4.

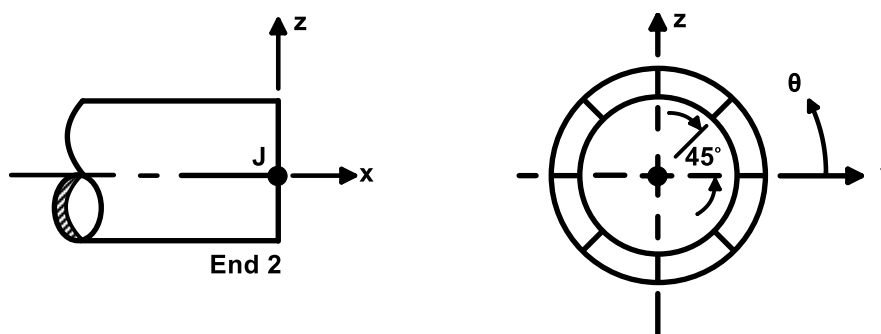
Όπως παρουσιάζεται στον παρακάτω Πίνακα (**Πίνακας 5.1**) το μήκος των πασσάλων θεμελίωσης για τις 4 περιπτώσεις εδαφικών προφίλ κυμαίνεται από 22 έως 36 m. Όπως προαναφέρθηκε, στο παρόν Κεφάλαιο, η ανάλυση πραγματοποιείται για το εδαφικό

στρώμα άμμου μέσης πυκνότητας με σχετική πυκνότητα $D_r = 50\%$, γωνία τριβής $\phi=33^\circ$ και πυκνότητα μάζας $\rho = 2 \text{ Mg/m}^3$. Σε αυτή την περίπτωση, το απαιτούμενο μήκος πασσάλου θεμελίωσης υπολογίστηκε ίσο με 28.00 m.

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά πασσάλου και πύργου Α/Γ

Χαρακτηριστικά	Πάσσαλος θεμελίωσης	Πύργος Α/Γ
Εξωτερική διάμετρος, B (m)	6.00	6.00
Μήκος L (m)	22.00 – 36.00	90.00
Πάχος τοιχώματος, τ (m)	0.07	0.07
Εμβαδό διατομής, A (m ²)	1.30	1.30
Ροπή αδράνειας, I (m ⁴)	5.73	5.73

Οκτώ (8) σημεία ολοκλήρωσης ορίζονται κατά μήκος της περιμέτρου κάθε διατομής, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.4** (ο τοπικός z-άξονας είναι πάντοτε κατακόρυφος). Οι τάσεις και οι παραμορφώσεις του αγωγού υπολογίζονται στα ανωτέρω οκτώ σημεία, λαμβάνοντας υπόψη τη δράση αξονικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών. Τέλος, ο χάλυβας των διατομών θεωρείται γραμμικώς ελαστικός με μέτρο ελαστικότητας $E=210 \text{ GPa}$, λόγο του Poisson $\nu=0.30$ και απόσβεση $\zeta=3\%$.



Σχήμα 5.4: Σημεία ολοκλήρωσης στη διατομή στοιχείων δοκού (Ansys 2009)

Οι αναλύσεις πακτωμένης ανεμογεννήτριας πραγματοποιούνται λαμβάνοντας μάζα ανωδομής ίση με 360 Mgr συγκεντρωμένη στην κορυφή του πύργου της ανεμογεννήτριας. Επιπλέον λαμβάνεται υπόψη η μάζα του πύργου της ανεμογεννήτριας, λαμβάνοντας το υλικό του πύργου με πυκνότητα ίση με αυτή του χάλυβα (7.85 Mgr/m^3). Σχετικά με τους βαθμούς ελευθερίας του προσομοιώματος, στο ελεύθερο μήκος του πύργου και του πασσάλου θεμελίωσης δεσμεύονται οι εκτός επιπέδου μετακινήσεις.

Στην προσομοίωση της ανεμογεννήτριας απαιτείται να προσδιοριστεί το κλασικό μητρώο απόσβεσης της κατασκευής Rayleigh. Συγκεκριμένα, η απόσβεση Rayleigh [c] αποτελεί συνολική έκφραση της απόσβεσης και προκύπτει ως άθροισμα ανάλογο τόσο του μητρώου μάζας [M] όσο και του μητρώου δυσκαμψίας [K] της κατασκευής, σύμφωνα με τη σχέση:

$$[c] = a \cdot [M] + \beta \cdot [K] \quad (5.4)$$

όπου:

a : συντελεστής αναλογίας με το μητρώο μάζας [M] (sec^{-1})

β : συντελεστής αναλογίας με το μήτρωο δυσκαμψίας [K] (sec)

Ο λόγος απόσβεσης ζ_n για τη n-οστή ιδιομορφή ενός τέτοιου συστήματος είναι:

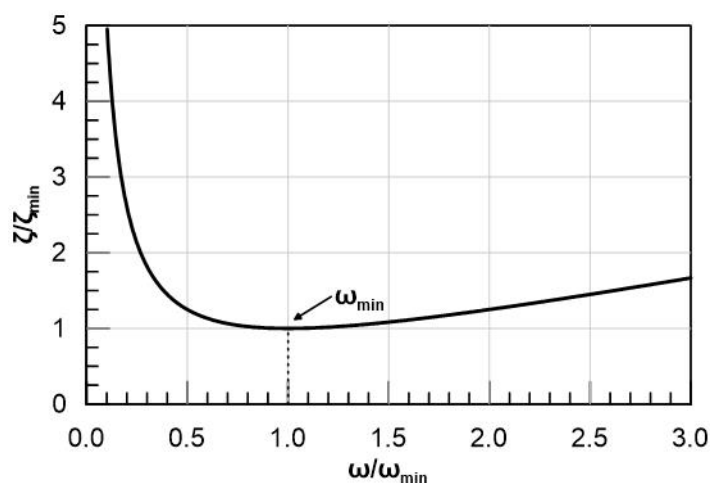
$$\zeta_n = \frac{a}{2} \cdot \frac{1}{\omega_n} + \frac{\beta}{2} \cdot \omega_n \quad (5.5)$$

όπου ω_n η ιδιοσυχνότητα της n-οστής ιδιομορφής του συστήματος (rad/sec).

Επομένως, ο λόγος απόσβεσης δεν είναι σταθερός αλλά μεταβάλλεται με την ιδιοσυχνότητα (**Σχήμα 5.5**). Οι τιμές των συντελεστών a και β ορίζονται σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις συναρτήσει της ελάχιστης τιμής της απόσβεσης ζ_{\min} και της ιδιοσυχνότητας ω_{\min} για την οποία αυτή συναντάται, ως ακολούθως:

$$a = \zeta_{\min} \cdot \omega_{\min} \quad (5.6)$$

$$\beta = \frac{\zeta_{\min}}{\omega_{\min}} \quad (5.7)$$



Σχήμα 5.5: Μεταβολή των ιδιομορφικών λόγων απόσβεσης με την ιδιοσυχνότητα (Chopra 2007)

Εναλλακτικά, οι τιμές των συντελεστών α και β μπορούν να προσδιοριστούν έτσι ώστε η τιμή του λόγου απόσβεσης ($\zeta \approx \zeta_i \approx \zeta_j$) να είναι περίπου σταθεροί σε ένα εύρος ιδιοσυχνοτήτων ($\omega_i - \omega_j$). Ο υπολογισμός των συντελεστών α και β γίνεται μέσω της επίλυσης του συστήματος (5.8).

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1/\omega_i & \omega_i \\ 1/\omega_j & \omega_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \zeta_i \\ \zeta_j \end{Bmatrix} \quad (5.8)$$

Από όπου προκύπτει ότι:

$$\alpha = \zeta \frac{2\omega_i \cdot \omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad (5.9)$$

$$\beta = \zeta \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (5.10)$$

Στην περίπτωση της δυναμικής ανάλυσης του συστήματος αλληλεπίδρασης εδάφους – κατασκευής η αντίδραση του εδάφους κατά τη (σχετική προς αυτό) μετακίνηση του πασσάλου θεμελίωσης προέρχεται από δύο διαφορετικά αίτια:

(α) Τη δυσμησία του εδάφους, η οποία προσομοιώνεται από μια σειρά μη γραμμικών, υστερητικών (κατά την αποφόρτιση-επαναφόρτιση) ελατηρίων Winkler.

(β) Την απόσβεση ενέργειας λόγω ακτινοβολίας σεισμικών κυμάτων, από τον πάσσαλο προς το ελεύθερο πεδίο, η οποία προσομοιώνεται από μια σειρά κατάλληλα βαθμονομημένων αποσβεστήρων ενέργειας (dampers).

Η αντίδραση που προέρχεται από τα ελατήρια Winkler είναι συνάρτηση της σχετικής μετατόπισης μεταξύ πασσάλου και εδάφους και περιγράφεται από καμπύλες $p - \gamma$. Η αντίδραση των αποσβεστήρων ακτινοβολίας είναι ανάλογη προς τη σχετική ταχύτητα μεταξύ πασσάλου και εδάφους.

5.2.3 Σεισμική διέγερση

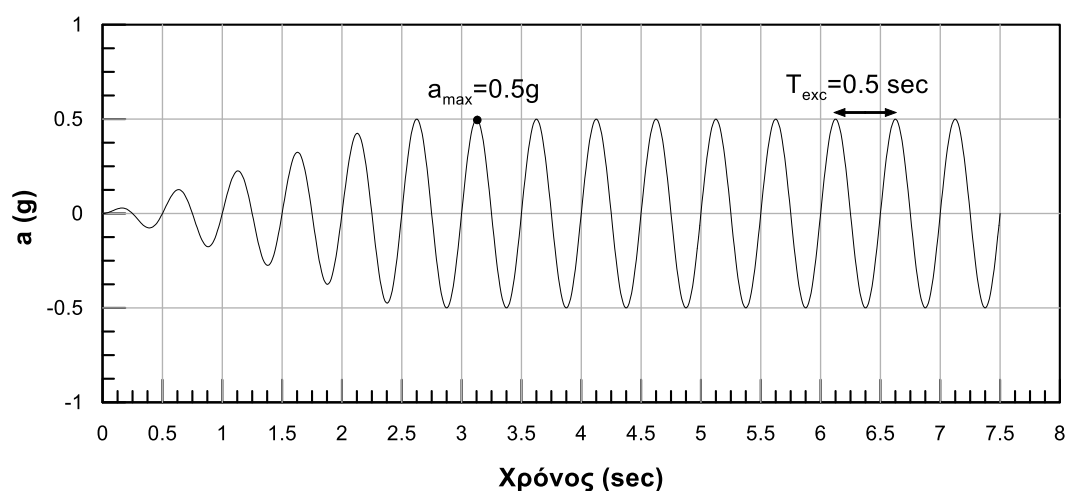
Στις αναλύσεις σεισμικής απόκρισης εφαρμόζεται στο προσομοίωμα της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας αρμονική σεισμική δόνηση περιόδου $T=0.50$ sec και μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης $PGA=0.50g$. Η ταλάντωση της ανεμογεννήτριας περιλαμβάνει δύο στάδια:

- Φόρτιση με αρμονική διέγερση της ανεμογεννήτριας (Στάδιο I): Η σεισμική διέγερση περιλαμβάνει 5 κύκλους προσαρμογής της Α/Γ με σταδιακή αύξηση του

πλάτους μετατόπισης και εν συνεχεία 10 κύριους κύκλους μέγιστου εύρους ταλάντωσης.

- Ελεύθερη ταλάντωση: Το σύστημα της ανεμογεννήτριας αφήνεται να εκτελέσει ελεύθερη αποσβενύμενη ταλάντωση με αρχικές συνθήκες λόγω της φόρτισης του Σταδίου Ι.

Στο **Σχήμα 5.6** παρουσιάζεται η γενική μορφή της χρονοϊστορίας της επιτάχυνσης (a) της διέγερσης.



Σχήμα 5.6: Χρονοϊστορία επιτάχυνσης της επιβαλλόμενης σεισμικής διέγερσης.

Η αρμονική σεισμική διέγερση εφαρμόζεται στο προσομοίωμα του Ansys ως επιβαλλόμενη μετατόπιση. Συγκεκριμένα, στο προσομοίωμα πακτωμένης βάσης η μετατόπιση επιβάλλεται στη βάση του πύργου της ανεμογεννήτριας, ενώ στο προσομοίωμα αλληλεπίδρασης εδάφους – κατασκευής πραγματοποιούνται ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις σεισμικής απόκρισης του εδαφικού στρώματος και υπολογίζονται οι χρονοϊστορίες των εδαφικών μετατοπίσεων οι οποίες επιβάλλονται ακολούθως στο ελεύθερο άκρο των εδαφικών ελατηρίων-αποσβεστήρων.

5.2.4 Υπολογισμός καμπυλών οριζόντιας δύναμης-μετατόπισης (p - y)

Για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης εδάφους – πασσάλου τοποθετούνται ελατήρια κατά μήκος του πασσάλου. Όπως παρουσιάστηκε και αιτιολογήθηκε στο Κεφάλαιο 2 για τη βαθμονόμηση των ελατηρίων, δηλαδή για τον υπολογισμό της στιβαρότητας και της υστερητικής απόσβεσης, χρησιμοποιούνται οι καμπύλες οριζόντιας δύναμης-μετατόπισης (p - y) που προτείνονται από το (API 2002) σε συνδυασμό με τον νόμο του Masing, ο οποίος αναλύεται παρακάτω. Οι καμπύλες p - y του API, είναι οι πλέον διαδεδομένες για την

ανάλυση της σεισμικής απόκρισης πασσάλων θεμελίωσης, παρά το γεγονός ότι έχουν πρόσφατα αμφισβητηθεί μετά από σύγκριση με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα.

Σύμφωνα με τις ανωτέρω προδιαγραφές, ο βασικός κλάδος (backbone curve) των καμπυλών δύναμης-μετατόπισης ($p - y$) των ελατηρίων διαφέρει για μονοτονική και για ανακυκλική φόρτιση. Για το λόγο αυτό, διευκρινίζεται εκ των προτέρων ότι στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιούνται οι καμπύλες για μονοτονική φόρτιση, παρά το γεγονός ότι η σεισμική δόνηση έχει ανακυκλικό χαρακτήρα. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι η επίδραση της ανακυκλικής φόρτισης που προβλέπεται στις προδιαγραφές API (2002) αφορά σε μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης ($n > 1000$ προκειμένου για αργίλους) και σε φαινόμενα ρευστοποίησης (προκειμένου για άμμους). Οι συνθήκες αυτές δεν συντρέχουν στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, καθώς η σεισμική διέγερση που εξετάζεται περιλαμβάνει λίγους κύκλους φόρτισης. Για λόγους πληρότητας όμως, μόνο για την περίπτωση αμμώδους πυθμένα, θεωρήθηκε ότι θα λάβει χώρα ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων $\Delta u = 0.50 \sigma'_{vo}$ για την άμμο μέσης πυκνότητας και $\Delta u = 0.25 \sigma'_{vo}$ για την πυκνή άμμο.

Για αμμώδη εδάφη οι καμπύλες $p - y$ του κώδικα API (2002) για μονοτονική φόρτιση περιγράφονται από τις σχέσεις:

$$p = \Delta L \cdot C \cdot p_L \cdot \tanh\left(\frac{y}{y_o}\right) \quad (5.11)$$

όπου:

$$y_o = \frac{C \cdot p_L}{k_s \cdot z} \quad (5.12)$$

$$C = 3.00 - 0.80 \cdot \left\{ \frac{z}{B} \right\} \geq 0.90 \quad (5.13)$$

$$p_L = \min\left[(C_1 \cdot z + C_2 \cdot B) \sigma'_v, C_3 \cdot B \cdot \sigma'_v \right] \quad (5.14)$$

$$\sigma'_v = (1 - r_u) \cdot \sigma'_{vo}$$

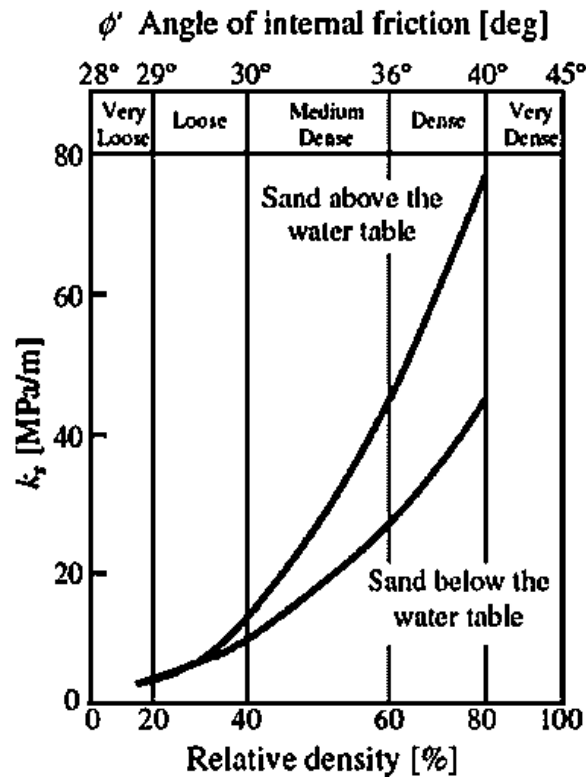
όπου:

$$r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_{vo}} \quad (5.15)$$

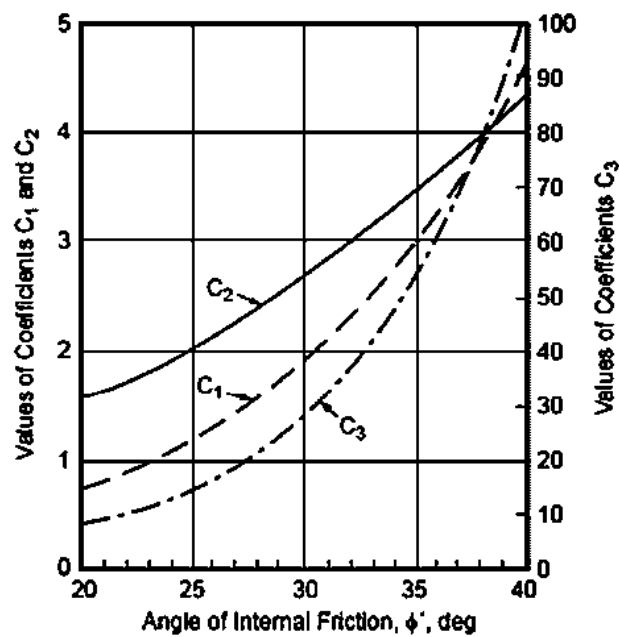
και Δu : μεταβολή της υπερπίεσης πόρων

σ'_{vo} : αρχική ενεργός τάση

Οι συντελεστές C_1 , C_2 , C_3 και k_s λαμβάνονται από τα διαγράμματα του κώδικα API (2002) βάσει γωνίας τριβής (ϕ) και σχετικής πυκνότητας της άμμου (D_r) όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.7 και στο Σχήμα 5.8



Σχήμα 5.7: Διάγραμμα υπολογισμού του δείκτη αρχικής δυσκαμψίας (k_s) (API 2002)



Σχήμα 5.8: Διάγραμμα υπολογισμού των εμπειρικών συντελεστών C_1 , C_2 και C_3

Οι συντελεστές αυτοί μπορούν να προσεγγιστούν επίσης από τις παρακάτω αναλυτικές σχέσεις:

$$C_1 = 0.115 \cdot 10^{0.0405\varphi} \quad (5.16)$$

$$C_2 = 0.571 \cdot 10^{0.0220*\varphi} \quad (5.17)$$

$$C_3 = 0.646 \cdot 10^{0.0555*\varphi} \quad (5.18)$$

$$k_s = 2289.20 - 47.44 \cdot D_r + 6.497 \cdot D_r^2 \quad (5.19)$$

όπου:

φ_p : γωνία τριβής (deg)

ΔL : μήκος επιρροής του κάθε ελατηρίου (m) = 2 m

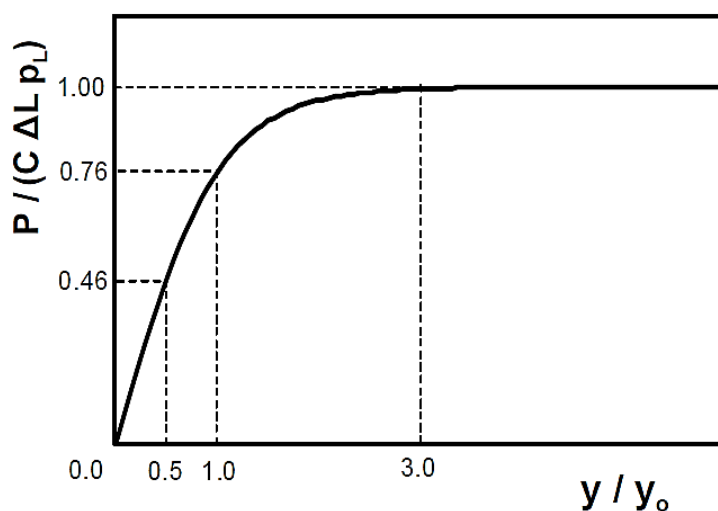
z : βάθος από την επιφάνεια του εδάφους (m)

B : διάμετρος πασσάλου (m)

σ'_v : ενεργός τάση του εδάφους (kPa)

Στις ανωτέρω σχέσεις το k_s εκφράζεται σε kPa/m, το φορτίο p σε kN, το οριακό φορτίο p_L σε kN/m και η σχετική πυκνότητα D_r σε ποσοστό επί τοις 100 (%).

Οι καμπύλες p - γ που προκύπτουν από τη σχέση (5.11) παρουσιάζονται σε αδιαστατοποιημένη μορφή στο **Σχήμα 5.9**.



Σχήμα 5.9: Αδιαστατοποιημένες μονοτονικές καμπύλες $p - \gamma$ για άμμους

Για λόγους πληρότητας, αναφέρεται ότι οι ανακυκλικές καμπύλες του API (2002) προκύπτουν ομοίως από τις σχέσεις (5.11) έως (5.19) με τη μόνη διαφορά ότι για τον

υπολογισμό του συντελεστή C της σχέσης (5.11) δεν χρησιμοποιείται πλέον η σχέση (5.13) αλλά ορίζεται τιμή του συντελεστή ίση με $C = 0.9$.

Για μαλακά αργιλικά εδάφη υπό τον υδροφόρο ορίζοντα οι καμπύλες $p - \gamma$ του API (2002) για μονοτονική φόρτιση περιγράφονται αναλυτικά από τις σχέσεις:

$$p = 0.50 \cdot \Delta L \cdot p_L \cdot \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{\frac{1}{3}} \leq \Delta L \cdot p_L \quad (5.20)$$

όπου:

$$y_{50} = 2.5 \cdot \varepsilon_{50} \cdot B \quad (5.21)$$

$$p_L = 9 \cdot B \cdot c_u \cdot \left[\frac{1}{3} + \frac{\sigma'_v}{9 \cdot c_u} + \frac{J \cdot z}{9 \cdot B} \right], \text{ για } z < z_R \quad (5.22)$$

$$p_L = 9B \cdot c_u, \text{ για } z \geq z_R \quad (5.23)$$

ε_{50} : η ανηγμένη παραμόρφωση που αντιστοιχεί στο 50% της θλιπτικής αντοχής της αργίλου, όπως αυτή προσδιορίζεται εργαστηριακά σε αδιατάρακτα δοκίμια.

Ενδεικτικές τιμές της παραμόρφωσης ε_{50} φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα (**Πίνακας 5.2**) (Reese et al. 2005), ενώ για τις ανάγκες της παρούσας έκθεσης τέθηκε $\varepsilon_{50}=10\%$ και 0.5% για την περίπτωση της μαλακής και της στιφρής αργίλου αντίστοιχα.

Πίνακας 5.2: Ενδεικτικές τιμές της ανηγμένης παραμόρφωσης, ε_{50} (Reese et al. 2005)

Άργιλος	Αστράγγιστη διατμητική αντοχή (kPa)	ε_{50}
Πολύ μαλακή	>12	0.020
Μαλακή	12-24	0.020
Μέση	24-48	0.010
Στιφρή	48-96	0.006
Πολύ στιφρή	96-192	0.005
Σκληρή	>192	0.004

J : αδιάστατος εμπειρικός συντελεστής που λαμβάνει τιμές από 0.25 έως 0.50. (Στους υπολογισμούς τέθηκε $J=0.37$ για τη μαλακή άργιλο και 0.25 συντηρητικά για τη στιφρή άργιλο).

z_R : χαρακτηριστικό βάθος που εμφανίζεται η μέγιστη πλευρική αντίσταση. Για αργιλικά εδάφη με σταθερή αστράγγιστη διατμητική αντοχή c_u , το βάθος z_R υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$z_R = \frac{6 \cdot B}{\gamma' \cdot \frac{B}{c_u} + J} \quad (5.24)$$

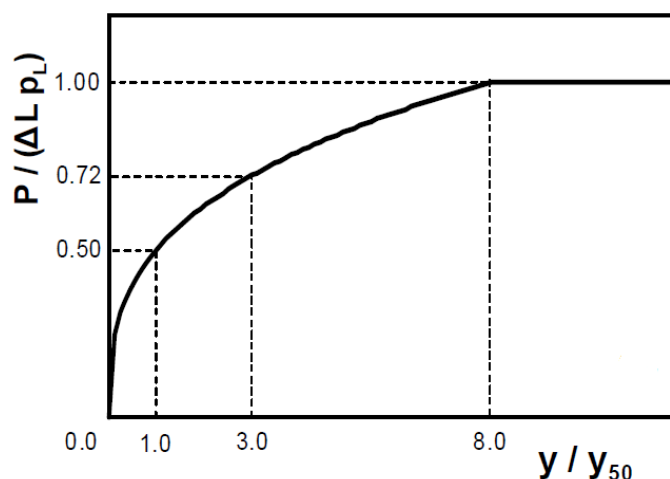
B : διάμετρος πασσάλου (m)

γ' : ενεργό βάρος εδάφους (kN/m³)

c_u : αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους στο υπό εξέταση βάθος (kPa)

Στις ανωτέρω σχέσεις το φορτίο p εκφράζεται σε kN, το οριακό φορτίο p_L σε kN/m και η μετακίνηση y_{50} σε m.

Οι καμπύλες p - γ που προκύπτουν από τη σχέση (5.20) παρουσιάζονται σε αδιαστατοποιημένη μορφή στο **Σχήμα 5.10**.



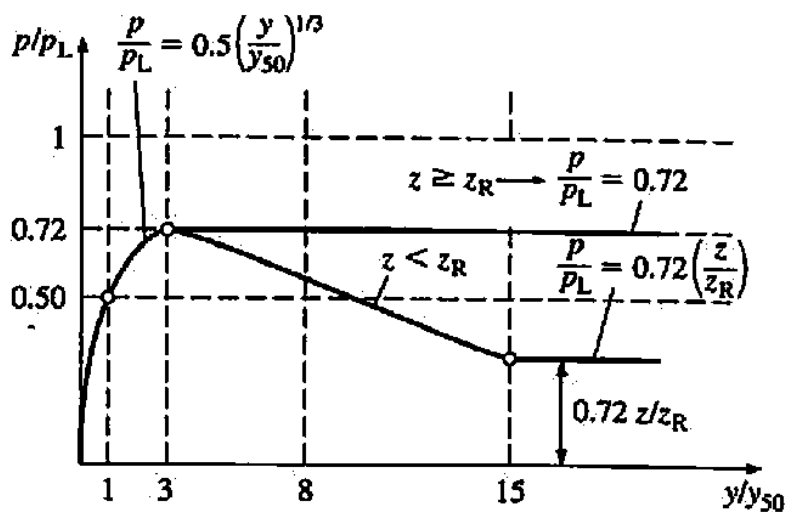
Σχήμα 5.10: Αδιαστατοποιημένες μονοτονικές καμπύλες p – γ για αργίλους

Για λόγους πληρότητας αναφέρεται ότι οι ανακυκλικές καμπύλες p - γ του API (2002) περιγράφονται υπό τη μορφή Πίνακα (**Πίνακας 5.3**).

Πίνακας 5.3: Ανακυκλικές καμπύλες p – γ του API για μαλακή άργυλο

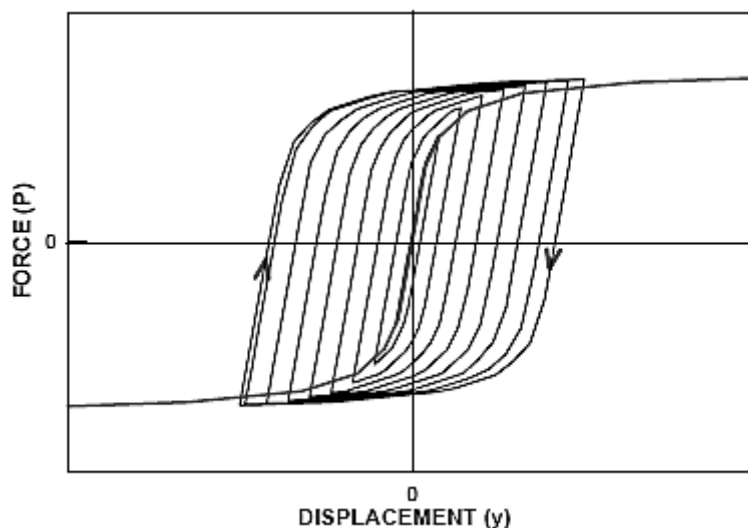
$z < z_R$		$z \geq z_R$	
p/p_L	γ/γ_0	p/p_L	γ/γ_0
0	0	0	0
0.5	1	0.5	1
0.72	3	0.72	3
0.72 (z/z_R)	15	0.72	∞
0.72 (z/z_R)	∞	-	-

Οι ανακυκλικές καμπύλες $p - \gamma$ που προκύπτουν από τον παραπάνω Πίνακα (Πίνακας 5.3) παρουσιάζονται σε αδιαστατοποιημένη μορφή στο Σχήμα 5.11



Σχήμα 5.11: Αδιαστατοποιημένες ανακυκλικές καμπύλες $p - \gamma$ για αργίλους

Επισημαίνεται ότι οι παραπάνω καμπύλες ισχύουν για πρωτογενή φόρτιση (backbone curves). Για αποφόρτιση – επαναφόρτιση ισχύει το κριτήριο Masing (1926), το οποίο προσδίδει υστερητικό χαρακτήρα στις καμπύλες $p - \gamma$ όπως παρουσιάζεται ενδεικτικά στο Σχήμα 5.12.



Σχήμα 5.12: Καμπύλες $p - \gamma$ για φόρτιση, αποφόρτιση και επαναφόρτιση

5.2.5 Υπολογισμός αποσβεστήρων

Παράλληλα με τα κατανεμημένα ελατήρια, στις αναλύσεις αλληλεπίδρασης κατά μήκος του πασσάλου (στους αντίστοιχους κόμβους) τοποθετούνται και αποσβεστήρες ακτινοβολίας.

Οι τιμές της σταθεράς των αποσβεστήρων c_r ακολουθούν τις σχέσεις που προτείνονται από τους Gazetas & Dobry (1984):

Για βάθος $z > 2.5b$, όπου $b = B/2$ είναι η ακτίνα του πασσάλου, ισχύει:

$$c_r = \left[1 + \left[\frac{3.4}{\pi \cdot (1-\nu)} \right]^{\frac{5}{4}} \right] \alpha_o^{-\frac{1}{4}} \cdot 4 \cdot B \cdot \rho_s \cdot V_s \cdot \left(\frac{\pi}{4} \right)^{\frac{3}{4}} \cdot \Delta L \quad (5.25)$$

ενώ για βάθος $z < 2.5b$ ισχύει:

$$c_r = 2 \cdot \left(\frac{\pi}{4} \right)^{\frac{3}{4}} \cdot \alpha_o^{-\frac{1}{4}} \cdot 4 \cdot b \cdot \rho_s \cdot V_s \cdot \Delta L \quad (5.26)$$

όπου:

$$\alpha_o = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot B}{V_s} \quad (5.27)$$

ν : λόγος του Poisson του εδάφους = 0.3

B : διάμετρος του πασσάλου (m)

ρ_s : πυκνότητα του εδάφους = 2 Mg/m³

V_s : ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων στο έδαφος στο υπό εξέταση βάθος (m/sec)

f : συχνότητα διέγερσης (Hz)

Στις ανωτέρω σχέσεις η σταθερά του αποσβεστήρα c_r εκφράζεται σε kN/(m/sec)

5.3 Ερμηνεία αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων

Στις παρούσες αναλύσεις δυναμικής απόκρισης εξετάζεται το πακτωμένο σύστημα μιας τυπικής ανεμογεννήτριας 5-MW, τα χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάζονται στην υποενότητα 5.2.2 (Πίνακας 5.1). Το προσομοίωμα περιλαμβάνει μόνο τον πύργο και τη μάζα του ρότορα, συγκεντρωμένη στην κορυφή του. Προκειμένου να επιβεβαιωθεί η ορθότητα του παραπάνω προσομοιώματος, σε πρώτη φάση πραγματοποιήθηκε δυναμική ανάλυση πακτωμένου μονοβάθμιου ταλαντωτή, αγνοώντας την πυκνότητα του υλικού του πύργου. Η διέγερση εφαρμόζεται στη βάση της ανωδομής και δεσμεύονται οι εκτός επιπέδου βαθμοί ελευθερίας της. Στην παρούσα ανάλυση η απόσβεση της ανωδομής της ανεμογεννήτριας εισάγεται στο προσομοίωμα ως απόσβεση τύπου Rayleigh με ελάχιστο

λόγο υστερητικής απόσβεσης 3% για περίοδο ίση με την ιδιοπερίοδο του μονοβάθμιου ταλαντωτή.

Στόχος των αναλύσεων αποτελεί ο υπολογισμός της ιδιοπεριόδου και της απόσβεσης του πακτωμένου συστήματος, προκειμένου να συγκριθούν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του προσομοιώματος αλληλεπίδρασης εδάφους – κατασκευής. Για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών αυτών χρησιμοποιείται η μεθοδολογία που παρουσιάζεται στο βιβλίο του Chorgha (2007) όπως παρουσιάζεται στις επόμενες παραγράφους.

5.3.1 Μεθοδολογία υπολογισμού της ιδιοπεριόδου

Ο υπολογισμός της ιδιοπεριόδου της ανεμογεννήτριας πραγματοποιείται στο Στάδιο Φόρτισης II, όπου η ανεμογεννήτρια εκτελεί έλευθερη αποσβενύμενη ταλάντωση με αρχικές συνθήκες λόγω του Στάδιου Φόρτισης I (βλ. παράγραφο 5.3.1). Σε αυτό το στάδιο της ταλάντωσης η απόκριση της ανεμογεννήτριας περιγράφεται από την εξίσωση:

$$v(t) = e^{-\zeta \cdot \omega_n \cdot t} \cdot \left[v(0) \cdot \cos(\omega_D \cdot t) + \frac{\dot{v}(0) + \zeta \cdot \omega_n \cdot v(0)}{\omega_D} \sin(\omega_D \cdot t) \right] \quad (5.28)$$

όπου

$$\omega_D = \omega_n \cdot \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (5.29)$$

Η ελεύθερη ταλάντωση στο Στάδιο Φόρτισης II αρχίζει έχοντας αρχική ταχύτητα (αρχικές συνθήκες λόγω Στάδιου Φόρτισης I). Η εξίσωση (5.28) υποδεικνύει ότι η ιδιοσυχνότητα της αποσβενύμενης ταλάντωσης είναι ω_D και ότι συνδέεται με την ιδιοσυχνότητα ω του συστήματος μέσω της εξίσωσης (5.29). Για έναν μονοβάθμιο ταλαντωτή μάζας M και δυσκαμψίας K , χωρίς απόσβεση, η ιδιοπερίοδος T_n υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$T_n = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{M}{K}} \quad (5.30)$$

Υπενθυμίζεται ότι η δυσκαμψία K μονοβάθμιου μονόπακτου ταλαντωτή δίνεται από τη σχέση:

$$K = \frac{3 \cdot E \cdot I}{h^3} \quad (5.31)$$

όπου:

E : μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα = 210 GPa

I : ροπή αδράνειας της διατομής του ταλαντωτή (m^4)

h : ύψος ταλαντωτή (m)

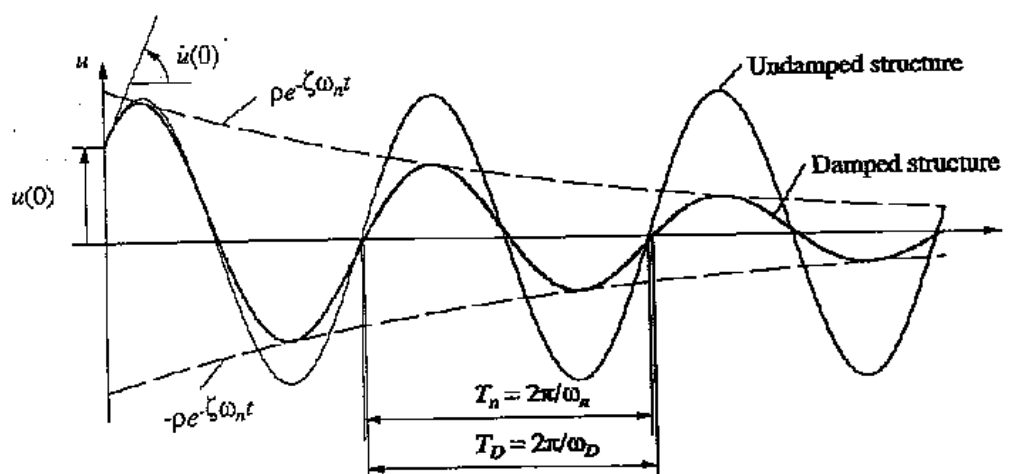
Η ιδιοπερίοδος της αποσβενύμενης ταλάντωσης $T_D=2\pi/\omega_D$ συνδέεται με την ιδιοπερίοδο T_n (χωρίς απόσβεση) με τη σχέση:

$$T_D = \frac{T_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (5.32)$$

Σε κάθε περίπτωση, η ιδιοπερίοδος T_D του συστήματος μπορεί να προσδιοριστεί από τις καταγραφές της ελεύθερης ταλάντωσης μετρώντας το χρόνο που απαιτείται για να συμπληρωθεί ένας πλήρης κύκλος ταλάντωσης.

5.3.2 Μεθοδολογία υπολογισμού της απόσβεσης

Το εύρος της ελεύθερης ταλάντωσης ενός συστήματος χωρίς απόσβεση είναι ίδιο σε όλους τους κύκλους της ταλάντωσης, ενώ αντίθετα μειώνεται σε κάθε επόμενο κύκλο όταν το σύστημα έχει απόσβεση. Στο **Σχήμα 5.13** παρουσιάζεται η επίδραση που έχει η απόσβεση στην ελεύθερη ταλάντωση.



Σχήμα 5.13: Επίδραση της απόσβεσης στην ελεύθερη ταλάντωση (Chopra 2007)

Από την εξίσωση (5.28) υποδεικνύεται ότι το εύρος ταλάντωσης μειώνεται εκθετικά με το χρόνο και οι περιβάλλουσες καμπύλες εκφράζονται μέσω της συνάρτησης:

$$y(t) = \pm \rho \cdot e^{-\zeta \cdot \omega_n \cdot t} \quad (5.33)$$

όπου

$$\rho = \sqrt{[v(0)]^2 + \left[\frac{\dot{v}(0) + \zeta \cdot \omega_n \cdot v(0)}{\omega_D} \right]^2} \quad (5.34)$$

Ο λόγος της μετατόπισης σε χρόνο t προς την τιμή της μετατόπισης σε χρόνο $t + T_D$, που αντιστοιχεί σε μία περίοδο T_D είναι ανεξάρτητος του t . Έτσι, με χρήση της σχέσης (5.28), ο λόγος δύο διαδοχικών μεγίστων της αποσβενύμενης ελεύθερης ταλάντωσης δίνεται από την παρακάτω ισότητα:

$$\frac{v(t)}{v(t+T_D)} = \exp(\zeta \cdot \omega_n \cdot T_D) = \exp\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right) \quad (5.35)$$

Αυτός είναι ο λόγος v_i/v_{i+1} δύο διαδοχικών κορυφών (μεγίστων) και η εξίσωση (5.35) μπορεί να γραφεί και με την παρακάτω μορφή:

$$\frac{v_i}{v_{i+1}} = \exp\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right) \quad (5.36)$$

Έτσι από την εξίσωση (5.36) προκύπτει ότι από το λόγο δύο διαδοχικών κορυφών η απόσβεση ζ υπολογίζεται από την σχέση:

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{2 \cdot \pi}{\ln(v_i/v_{i+1})} \right]^2}} \quad (5.37)$$

5.4 Τυπικά αποτελέσματα αναλύσεων πακτωμένης ανεμογεννήτριας

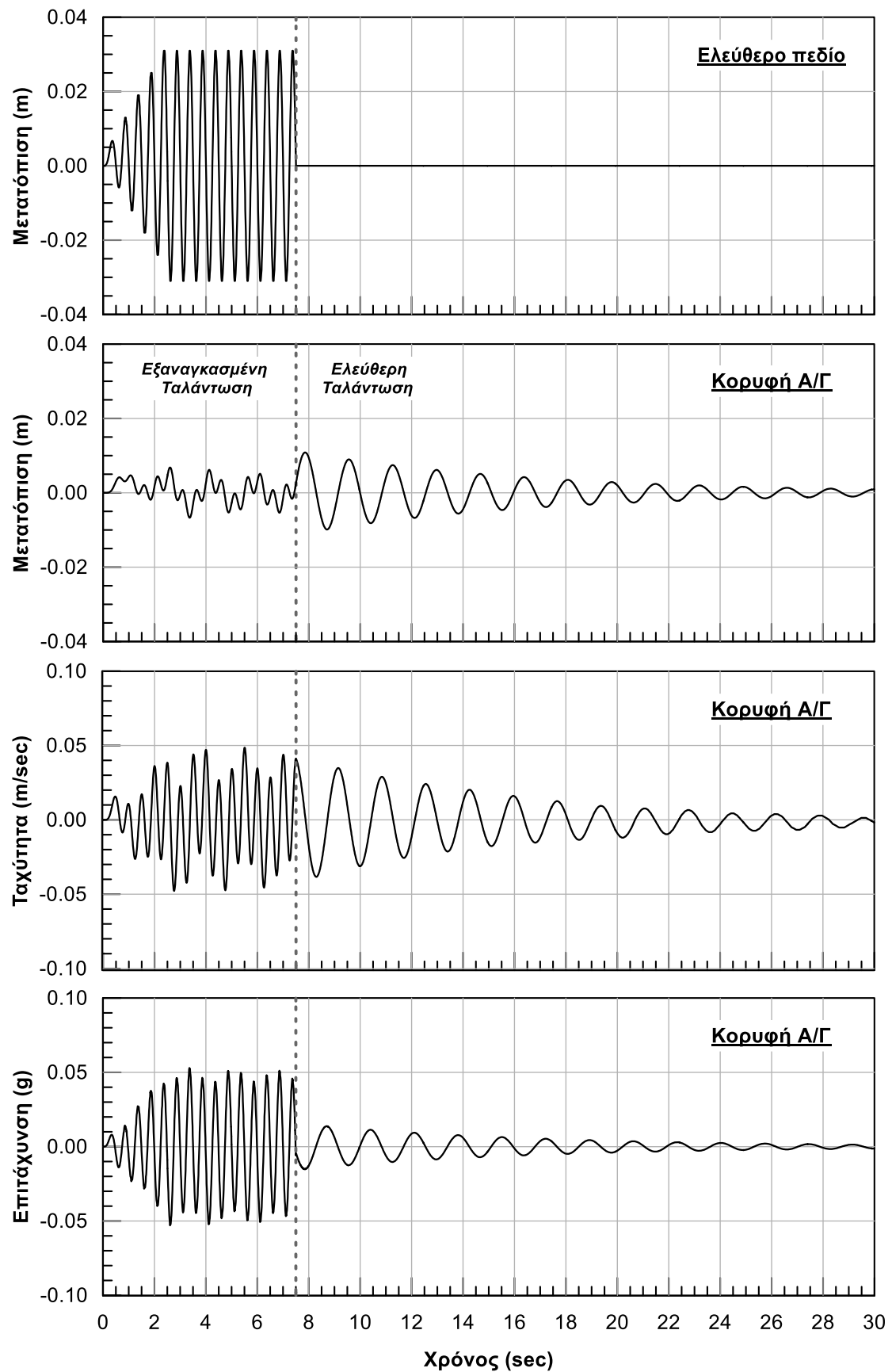
5.4.1 Αναλύσεις χωρίς μάζα πύργου

Στις παρούσες αναλύσεις πραγματοποιείται ο υπολογισμός της ιδιοπεριόδου και της απόσβεσης του πακτωμένου συστήματος, αγνοώντας τη μάζα του πύργου της ανεμογεννήτριας. Στη συνέχεια, ακολουθεί σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αναμενόμενα των σχέσεων της βιβλιογραφίας για μονοβάθμιο ταλαντώτη. Στόχος της διερεύνησης αυτής είναι η επιβεβαίωση του τρόπου προσομοίωσης της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων δυναμικής απόκρισης πακτωμένου μονοβάθμιου ταλαντωτή παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5.14**. Σε αυτό περιλαμβάνονται α) η χρονοϊστορία των επιβαλλόμενων μετατοπίσεων στη βάση της ανωδομής κατά τη διέγερση του συστήματος και β) η χρονοϊστορία της απόκρισης της ανεμογεννήτριας στην κορυφή της σε όρους μετατόπισης. Για την καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων απόκρισης της ανεμογεννήτριας, παρουσιάζεται επιπλέον γ) η αναπτυσσόμενη ταχύτητα στην κορυφή του

μονοβάθμιου ταλαντωτή και δ) η αναπτυσσόμενη επιτάχυνση στην κορυφή του μονοβάθμιου ταλαντωτή.

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα των δυναμικών αναλύσεων η απόκριση της ανεμογεννήτριας χωρίζεται σε δυο φάσεις, όπως ήταν αναμενόμενο. Κατά την πρώτη φάση η ανεμογεννήτρια υφίσταται μια εξαναγκασμένη ταλάντωση στην οποία συνυπάρχουν δύο τμήματα ταλαντώσεων α) μια μόνιμη ταλάντωση με τη διεγείρουσα συχνότητα και β) μια παροδική ταλάντωση με την ιδιοσυχνότητα του συστήματος. Σύμφωνα με τις καταγραφές φαίνεται ότι η επιρροή της παροδικής ταλάντωσης είναι σημαντική δημιουργώντας μια ακαθόριστης μορφής ταλάντωση στην ανεμογεννήτρια. Κατά τη δεύτερη φάση, η ανεμογεννήτρια εκτελεί ελεύθερη αποσβενύμενη ταλάντωση με αυξημένο πλάτος ταλάντωσης σε σχέση με την πρώτη φάση, το οποίο σταδιακά μειώνεται λόγω της απόσβεσης του συστήματος.



Σχήμα 5.14: Αποτελέσματα δυναμικής ανάλυσης πακτωμένης ανεμογεννήτριας αγνοώντας τη συνεισφορά της μάζας του πύργου

Χαρακτηριστικά ταλάντωσης του συστήματος πακτωμένης ανεμογεννήτριας. Τα χαρακτηριστικά ταλάντωσης ενός συστήματος είναι η περίοδος, η απόσβεση και το πλάτος ταλάντωσης. Μέσω των αναλύσεων δυναμικής απόκρισης υπολογίστηκαν οι μετακινήσεις του συστήματος για κάθε χρονική στιγμή ταλάντωσης. Ο **Πίνακας 5.4** παρουσιάζει ενδεικτικά τις πρώτες 9 διαδοχικές στιγμές εμφάνισης θετικής μέγιστης απομάκρυνσης, την αντίστοιχη απομάκρυνση και την υπολογιζόμενη ιδιοπερίοδο και απόσβεση για τον κάθε κύκλο ταλάντωσης. Οι όροι T_{rigid} και ζ_{total} εκφράζουν την ιδιοπερίοδο και την απόσβεση του συστήματος της πακτωμένης ανεμογεννήτριας, αντίστοιχα.

Πίνακας 5.4: Ενδεικτικές καταγραφές της ελεύθερης ταλάντωσης

t_{peak} (sec)	$u_{x,peak}$ (m)	T_{rigid} (sec)	ζ_{total} (%)
7.86	0.010854		
9.56	0.008984	1.70	3.01
11.26	0.007435	1.70	3.01
12.97	0.006155	1.71	3.01
14.67	0.005094	1.70	3.01
16.37	0.004216	1.70	3.01
18.08	0.003490	1.71	3.01
19.78	0.002889	1.70	3.01
21.48	0.002390	1.70	3.01

Υπολογισμός ιδιοπεριόδου ταλάντωσης

Η ιδιοπερίοδος T_{rigid} του συστήματος προσδιορίστηκε από τις καταγραφές ελεύθερης αποσβενύμενης ταλάντωσης, μετρώντας το χρόνο που απαιτείται για τη συμπλήρωση ενός κύκλου ταλάντωσης όπως φαίνονται και στον παραπάνω Πίνακα (**Πίνακας 5.4**). Ο προσδιορισμός της τελικής τιμής προέκυψε ως η μέση τιμή των αποτελεσμάτων κάθε κύκλου ταλάντωσης. Συνεπώς, η ιδιοπερίοδος T_{rigid} του συστήματος της πακτωμένης ανεμογεννήτριας, αγνοώντας τη μάζα του πύργου, υπολογίστηκε ίση με 1.70sec.

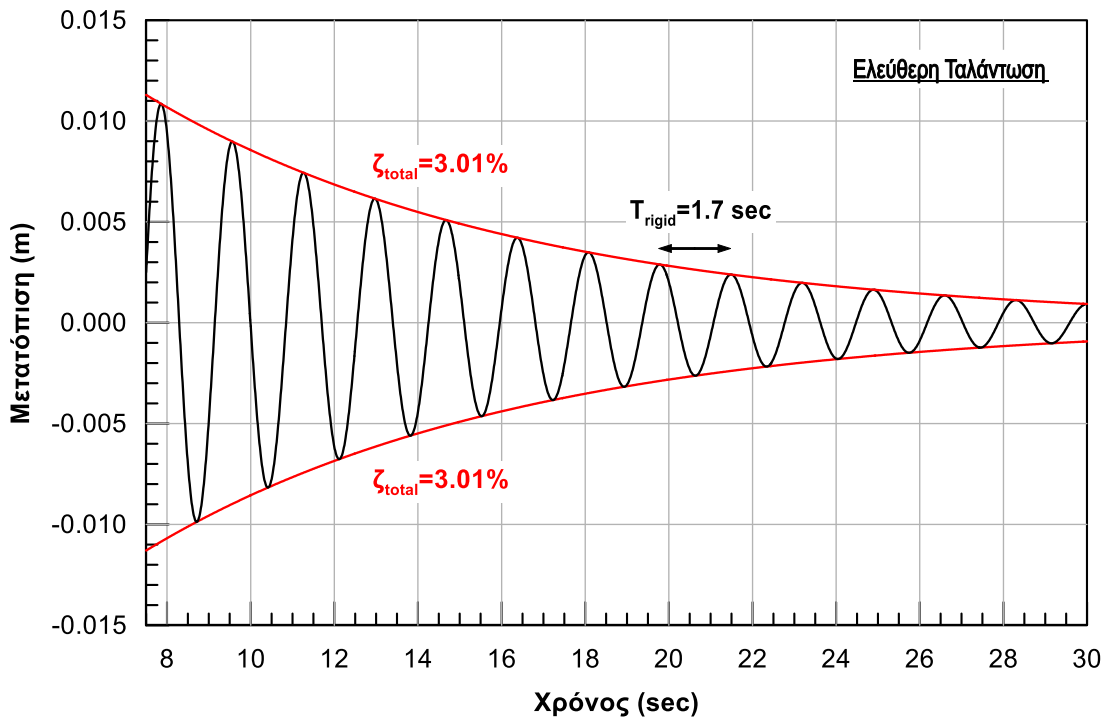
Η ιδιοπερίοδος του εξιδανικευμένου πακτωμένου μονοβάθμιου συστήματος υπολογίζεται γνωρίζοντας τη δυσκαμψία και τη μαζα της ανεμογεννήτριας μέσω της σχέσης (5.30) ίση με $T_n=1.694$ sec.

Συγκρίνοντας με την ιδιοπερίοδο που υπολογίστηκε μέσω της παρούσας δυναμικής ανάλυσης συμπεραίνεται ότι οι δύο τιμές ιδιοπεριόδου βρίσκονται σε καλή συμφωνία

μεταξύ τους. Επομένως η προσομοίωση προσεγγίζει με επιτυχία την εξιδανίκευση του μονοβάθμιου ταλαντωτή.

Υπολογισμός απόσβεσης ανεμογεννήτριας

Η απόσβεση ζ_{total} του συστήματος προσδιορίστηκε σύμφωνα με τη σχέση (5.37) μέσω των καταγραφών ελεύθερης αποσβενύμενης ταλάντωσης, οι οποίες παρουσιάζονται στον παραπάνω Πίνακα (**Πίνακας 5.4**). Ο προσδιορισμός της τελικής τιμής προέκυψε ως η μέση τιμή των αποτελέσμάτων κάθε κύκλου ταλάντωσης. Συνεπώς, η απόσβεση ζ_{total} του συστήματος της πακτωμένης ανεμογεννήτριας, αγνοώντας τη μάζα του πύργου, υπολογίστηκε ίση με 3.01%. Στο **Σχήμα 5.15** παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της ελεύθερης ταλάντωσης.



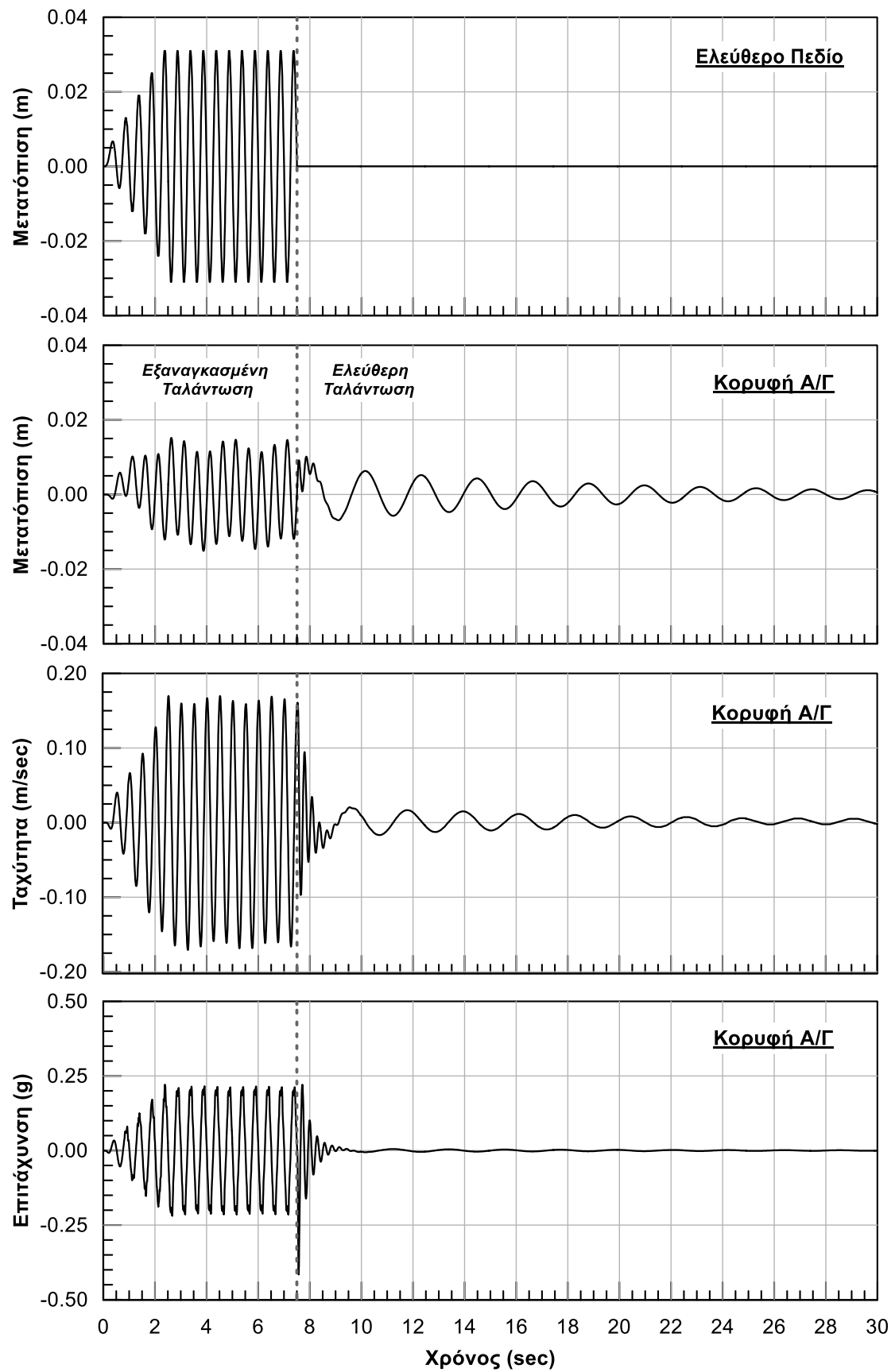
Σχήμα 5.15: Χαρακτηριστικά της ελεύθερης ταλάντωσης αγνοώντας την συνεισφορά της μάζας του πύργου

5.4.2 Αναλύσεις με μάζα πύργου

Στις παρούσες αναλύσεις πραγματοποιείται ο υπολογισμός της ιδιοπεριόδου και της απόσβεσης του πακτωμένου συστήματος λαμβάνοντας υπόψη τη μάζα του πύργου. Στόχος είναι να εκτιμηθούν τα χαρακτηριστικά της ταλάντωσης προκειμένου να συγκριθούν με τα αντίστοιχα της απόκρισης του συστήματος αλληλεπίδρασης εδάφους κατασκευής. Με αυτό τον τρόπο θα είναι δυνατή η εκτίμηση της επίδρασης της θεμελίωσης στην απόκριση της ανεμογεννήτριας.

Τα αποτελέσματα των δυναμικών αναλύσεων απόκρισης του πύργου της ανεμογεννήτριας παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5.16**. Σε αυτό περιλαμβάνονται α) η ιστορία των επιβαλλόμενων μετατοπίσεων στη βάση της ανωδομής κατά τη διέγερση του συστήματος και β) η ιστορία της απόκρισης της ανεμογεννήτριας στην κορυφή της σε όρους μετατόπισης. Για την καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων απόκρισης της ανεμογεννήτριας, παρουσιάζεται επιπλέον γ) η αναπτυσσόμενη ταχύτητα στην κορυφή του μονοβάθμιου ταλαντωτή και δ) η αναπτυσσόμενη επιτάχυνση στην κορυφή του μονοβάθμιου ταλαντωτή.

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα των δυναμικών αναλύσεων η απόκριση της ανεμογεννήτριας χωρίζεται σε δυο φάσεις, όπως ήταν αναμενόμενο. Κατά την πρώτη φάση, η ανεμογεννήτρια υφίσταται μια εξαναγκασμένη ταλάντωση στην οποία συνυπάρχουν δύο τμήματα ταλαντώσεων α) μια μόνιμη ταλάντωση με τη διεγείρουσα συχνότητα και β) μια παροδική ταλάντωση με την ιδιοσυχνότητα του συστήματος. Σύμφωνα με τις καταγραφές, η επιρροή της παροδικής ταλάντωσης είναι περιορισμένη, με την ανεμογεννήτρια να ταλαντώνεται σχεδόν υπό τη διεγείρουσα συχνότητα. Κατά τη δεύτερη φάση, η ανεμογεννήτρια εκτελεί ελεύθερη αποσβενύμενη ταλάντωση με αρχικό πλάτος ταλάντωσης ίδιας τάξης μεγέθους με αυτό της πρώτης φάσης, το οποίο σταδιακά μειώνεται λόγω της απόσβεσης του συστήματος.



Σχήμα 5.16: Αποτελέσματα δυναμικής ανάλυσης πακτωμένης ανεμογεννήτριας λαμβάνοντας υπόψη τη συνεισφορά της μάζας του πύργου.

Χαρακτηριστικά ταλάντωσης του συστήματος πακτωμένης ανεμογεννήτριας. Τα χαρακτηριστικά ταλάντωσης ενός συστήματος είναι η περίοδος, η απόσβεση και το πλάτος ταλάντωσης. Μέσω των αναλύσεων δυναμικής απόκρισης υπολογίστηκαν οι μετακινήσεις του συστήματος για κάθε χρονική στιγμή ταλάντωσης. Ο **Πίνακας 5.5** παρουσιάζει ενδεικτικά 9 διαδοχικές στιγμές εμφάνισης θετικής μέγιστης απομάκρυνσης, την αντίστοιχη απομάκρυνση και την υπολογιζόμενη ιδιοπερίοδο και απόσβεση για τον κάθε κύκλο ταλάντωσης. Οι όροι T_{rigid} και ζ_{total} εκφράζουν την ιδιοπερίοδο και την απόσβεση του συστήματος της πακτωμένης ανεμογεννήτριας, αντίστοιχα.

Πίνακας 5.5: Ενδεικτικές καταγραφές της ελεύθερης ταλάντωσης

t_{peak} (sec)	$u_{x,peak}$ (m)	T_{rigid} (sec)	ζ_{total} (%)
10.15	0.006287		
12.31	0.005197	2.16	3.03
14.48	0.004302	2.17	3.01
16.64	0.003561	2.16	3.01
18.8	0.002947	2.16	3.01
20.97	0.002440	2.17	3.01
23.13	0.002020	2.16	3.01
25.3	0.001672	2.17	3.01
27.46	0.001384	2.16	3.01

Υπολογισμός ιδιοπεριόδου ταλάντωσης

Η ιδιοπερίοδος T_{rigid} του συστήματος προσδιορίστηκε από τις καταγραφές ελεύθερης αποσβενύμενης ταλάντωσης, μετρώντας το χρόνο που απαιτείται για τη συμπλήρωση ενός κύκλου ταλάντωσης όπως φαίνονται και στον παραπάνω Πίνακα (**Πίνακας 5.5**). Ο προσδιορισμός της τελικής τιμής προέκυψε ως η μέση τιμή των αποτελεσμάτων κάθε κύκλου ταλάντωσης. Συνεπώς, η ιδιοπερίοδος T_{rigid} του συστήματος της πακτωμένης ανεμογεννήτριας λαμβάνοντας υπόψη τη συνεισφορά της μάζας του πύργου υπολογίστηκε ίση με 2.16sec.

Για αυτή την περίπτωση, η προσέγγιση του εξιδανικευμένου πακτωμένου μονοβάθμιου ταλαντωτή γίνεται προσθέτοντας την κατανεμημένη μάζα του πύργου ως συγκεντρωμένη στην κορυφή ($M_{total}=697.46$ Mg). Έτσι η ιδιοπερίοδος του αντίστοιχου μονοβάθμιου συστήματος υπολογίζεται μέσω της σχέσης (5.30) ίση με $T_n=2.63$ sec.

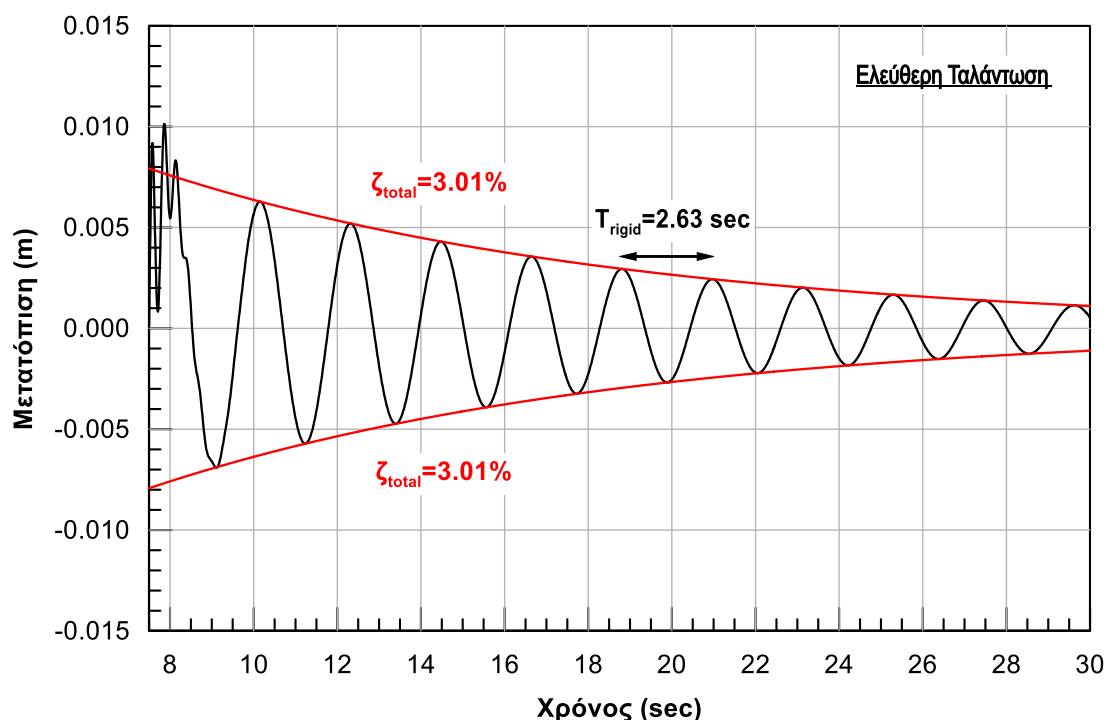
Συγκρίνοντας με την ιδιοπερίοδο που υπολογίστηκε μέσω της δυναμικής ανάλυσης συμπεραίνεται ότι οι δύο τιμές ιδιοπεριόδου βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ τους.

Όσον αφορά στη σύγκριση με την υπολογιζόμενη ιδιοπερίοδο στις αναλύσεις του μονοβάθμιου ταλαντωτή, χωρίς δηλαδή τη συνεισφορά της μάζας του πύργου, παρατηρείται μια αύξηση στα αποτελέσματα (2.16 sec έναντι 1.70 sec). Βέβαια κάτι τέτοιο θεωρείται λογικό, μιας και ήδη από τη σχέση ορισμού της ιδιοπεριόδου (5.30) γίνεται εμφανές ότι η αύξηση της μάζας του συστήματος οδηγεί σε αύξηση της υπολογιζόμενης ιδιοπεριόδου.

Υπολογισμός απόσβεσης ανεμογεννήτριας

Η απόσβεση ζ_{total} του συστήματος προσδιορίστηκε σύμφωνα με τη σχέση (5.37) μέσω των καταγραφών ελεύθερης αποσβενύμενης ταλάντωσης, οι οποίες παρουσιάζονται στον παραπάνω Πίνακα (**Πίνακας 5.5**). Ο προσδιορισμός της τελικής τιμής προέκυψε ως η μέση τιμή των αποτελέσμων κάθε κύκλου ταλάντωσης. Συνεπώς, η απόσβεση ζ_{total} του πύργου της πακτωμένης ανεμογεννήτριας υπολογίστηκε ίση με 3.01%.

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ακολουθήθηκε διαδικασία βελτιστοποίησης για την επίτευξη εισαγωγής στο πρόγραμμα ανάλυσης Ansys απόσβεσης Rayleigh ίση με 3%. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκε αρχικά η ανάλυση και υπολογίστηκε η ιδιοπερίοδος του συστήματος. Με αυτόν τον τρόπο υπολογίστηκαν οι κατάλληλοι συντελεστές α και β , σύμφωνα με τις σχέσεις (5.6) και (5.7), ώστε να εισαχθεί στην ανάλυση ελάχιστος λόγος υστερητικής απόσβεσης 3% για περίοδο ίση με την ιδιοπερίοδο του ταλαντωτή. Στο **Σχήμα 5.17** παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της ελεύθερης ταλάντωσης.



Σχήμα 5.17: Χαρακτηριστικά της ελεύθερης ταλάντωσης λαμβάνοντας υπόψη τη συνεισφορά της μάζας του πύργου

Υπολογισμός απόκρισης εξαναγκασμένης ταλάντωσης ανεμογεννήτριας

Η απόκριση της ανεμογεννήτριας μπορεί να ποσοτικοποιηθεί ενδεικτικά με το εύρος της επιτάχυνσης στην κορυφή του πύργου της ανεμογεννήτριας. Λαμβάνοντας την ημι-διαφορά των μέγιστων θετικών και αρνητικών τιμών στο αντίστοιχο διάγραμμα του Σχήματος των αποτελεσμάτων της δυναμικής ανάλυσης (Σχήμα 5.16), προκύπτει ότι η μέση τιμή του εύρους της επιτάχυνσης είναι $\overline{PGA}_{rigid} = 0.22g$.

5.5 Τυπικά αποτελέσματα αναλύσεων αλληλεπίδρασης εδάφους - ανεμογεννήτριας

Στις παρούσες αναλύσεις δυναμικής απόκρισης εξετάζεται το σύστημα ανωδομής - θεμελίωσης μιας τυπικής ανεμογεννήτριας 5-MW, τα χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάζονται στην υποενότητα 5.2.2 (Πίνακας 5.1). Η ανεμογεννήτρια εδράζεται σε εδαφικό στρώμα άμμου μέσης πυκνότητας με σχετική πυκνότητα $D_r = 50\%$, γωνία τριβής $\phi = 33^\circ$ και πυκνότητα μάζας $\rho = 2 \text{ Mg/m}^3$. Σε αυτή την περίπτωση, όπως υπολογίστηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4, το απαιτούμενο μήκος πασσάλου θεμελίωσης είναι ίσο με 28m.

Στις αναλύσεις δυναμικής απόκρισης του συστήματος ανωδομής - θεμελίωσης της ανεμογεννήτριας η αλληλεπίδρασης εδάφους - θεμελίωσης προσομοιώνεται κατανέμοντας μη γραμμικά ελατήρια και αποσβεστήρες ακτινοβολίας κατά μήκος του πασσάλου. Για τον

ορισμό των ελατηρίων χρησιμοποιούνται οι καμπύλες δύναμης – μετατοπίσης ($p - y$) που προτείνονται από το API (2002) για μονοτονική φόρτιση. Στις αναλύσεις είναι απαραίτητος ο καθορισμός της μετακίνησης του εδάφους σε κάθε βάθος λόγω της σεισμικής διέγερσης και για αυτό το σκοπό πραγματοποιείται μονοδιάστατη ανάλυση απόκρισης εδάφους. Για την εκτίμηση των συντελεστών των αποσβεστήρων ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται οι σχέσεις που προτείνονται από τους Gazetas & Dobry (1984). Στις παραπάνω βαθμονομήσεις είναι αναγκαίος ο υπολογισμός της ταχύτητας των σεισμικών διατμητικών κυμάτων V_s , καθώς απαιτείται ως δεδομένο τόσο στη μονοδιάστατη ανάλυση απόκρισης εδάφους, όσο και στις σχέσεις των Gazetas & Dobry (1984) για τον ορισμό των αποσβεστήρων.

5.5.1 Ταχύτητα διάδοσης σεισμικών (διατμητικών) κυμάτων V_s

Για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων στο αμμώδες έδαφος (V_s) χρησιμοποιούνται δύο εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού από τις οποίες τελικά η ταχύτητα προκύπτει ως μέσος όρος. Η γενική μορφή των εμπειρικών σχέσεων είναι η εξής:

$$V_s = A \cdot (N_{1,60})^B \cdot z^C \quad (5.38)$$

όπου:

$$C_N = \text{διόρθωση βάθους} = \left(\frac{\sigma'_{vo}}{P_a} \right)^{-0.50} \leq 1.70 \quad (5.39)$$

σ'_{vo} : ενεργός τάση στο υπό εξέταση βάθος z (kPa)

p_a : ατμοσφαιρική πίεση = 100 kPa

C_E : διόρθωση ενέργειας κρούσης (εξαρτάται από τον τρόπο εκτέλεσης της δοκιμής)

z : βάθος μέτρησης (m)

A,B,C : σταθερές που εξαρτώνται από τον τύπο του εδάφους

Οι σταθερές A, B, C καθώς και η σταθερά C_E δίνονται από τους Ohta & Goto (1978) και Imai & Tonouchi (1982). Συγκεκριμένα για το υπό εξέταση αμμώδες έδαφος σύμφωνα με τους Ohta & Goto (1978) οι σταθερές ορίζονται ως $A=86$, $B=0.17$ και $C=0.25$. Αντίστοιχα σύμφωνα με τους Imai & Tonouchi (1982) οι σταθερές ορίζονται ως $A=99$ και $B=0.284$. Ο υπολογισμός της ταχύτητας πραγματοποιήθηκε και με τις δύο μεθόδους και ως τελικό αποτέλεσμα λήφθηκε ο μέσος όρος των υπολογισμένων τιμών.

Για τον προσδιορισμό των τιμών του $N_{1,60}$ χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση των Idriss & Boulanger (2008) η οποία υπολογίζει την τιμή $N_{1,60}$ μέσω της σχετικής πυκνότητας της άμμου D_r :

$$N_{1,60} = D_r^2 \cdot 46 \quad (5.40)$$

Επομένως σύμφωνα με τους Ohta and Goto (1978) η ταχύτητα υπολογίζεται ως:

$$V_s = 86 \cdot (N_{1,60})^{0.17} \cdot z^{0.25} \quad (5.41)$$

ενώ σύμφωνα με τους Imai and Tonouchi (1982), οι οποίοι θεωρούν συντελεστή διόρθωσης βάθους ίσο με τη μονάδα ($C_N=1.00$), η ταχύτητα υπολογίζεται ως:

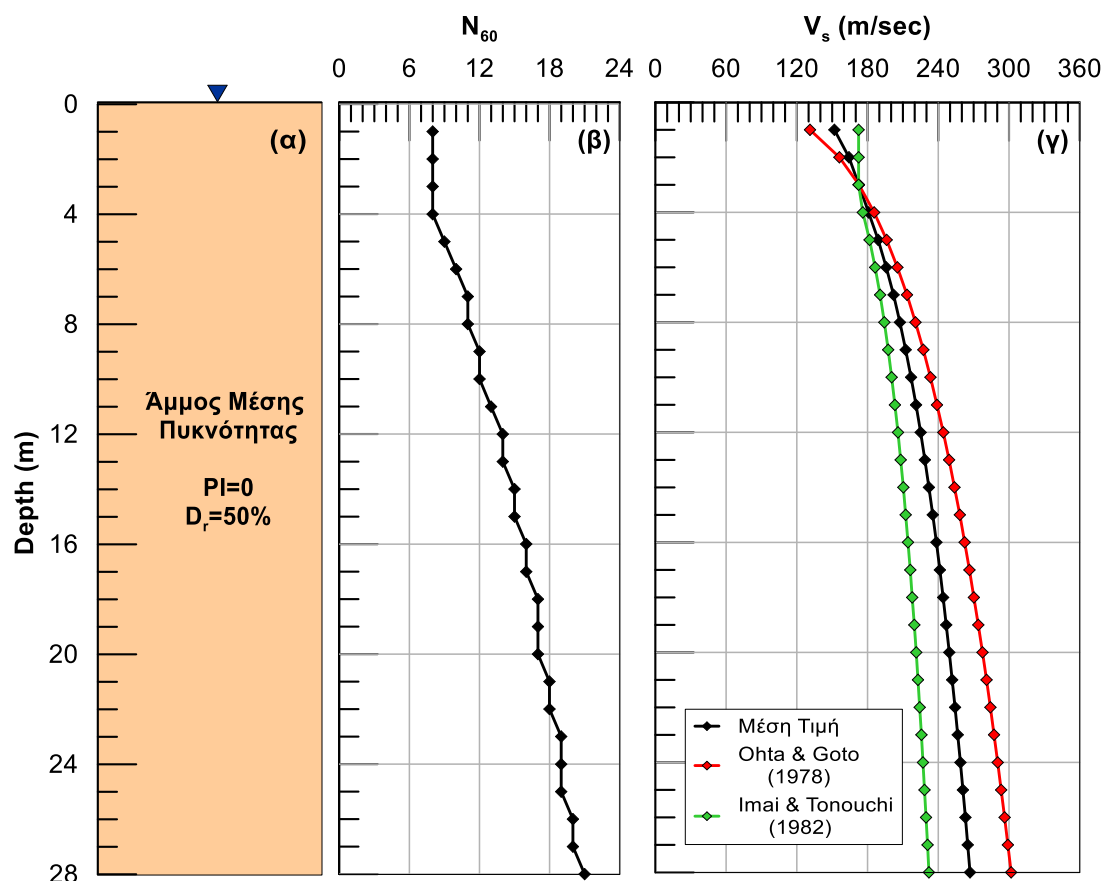
$$V_s = 99 \cdot (N_{60})^{0.284} \quad (5.42)$$

όπου:

$$N_{60} = \frac{N_{1,60}}{C_N} \quad (5.43)$$

Στο **Σχήμα 5.18** παρουσιάζεται η κατανομή της ταχύτητας διάδοσης (V_s) με το βάθος για την άμμο μέσης πυκνότητας όπως προκύπτει από τις δύο επιμέρους εμπειρικές σχέσεις καθώς και ο τελικός μέσος όρος.

Τα αποτελέσματα της ταχύτητας των σεισμικών διατμητικών κυμάτων στα διάφορα βάθη χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς της μονοδιάστατης ανάλυσης της απόκρισης του εδάφους και των συντελεστών των αποσβεστήρων c_r για την προσομοίωση της απόσβεσης ακτινοβολίας της θεμελίωσης.



Σχήμα 5.18: (α) Εδαφικό προφίλ άμμου μέσης πυκνότητας (β) Κατανομή N_{60} με το βάθος (γ) Κατανομή ταχύτητας διάδοσης (V_s) με το βάθος.

5.5.2 Μονοδιάστατες αναλύσεις εδαφικής σεισμικής απόκρισης

Οι μονοδιάστατες (1-Δ) αναλύσεις σεισμικής απόκρισης του εδάφους που περιγράφονται ακολούθως πραγματοποιούνται με την ευρέως γνωστή ισοδύναμη γραμμική μέθοδο των (Schnabel et al. 1972) χρησιμοποιώντας το ελεύθερο λογισμικό ανοικτού κώδικα Strata (Kottke & Rathje 2008). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή για τυχούσα σεισμική διέγερση οι διαφορικές εξισώσεις της μετάδοσης σεισμικών κυμάτων επιλύονται με χρήση της ανάλυσης Fourier (frequency domain analysis). Συγκεκριμένα:

- η τυχούσα σεισμική διέγερση αναλύεται σε πεπερασμένο αριθμό αρμονικών διεγέρσεων,
- η απόκριση της εδαφικής στήλης υπολογίζεται αναλυτικά για κάθε μια αρμονική συνιστώσα της διέγερσης και
- όλες οι επιμέρους συνιστώσες που υπολογίσθηκαν κατ' αυτόν τον τρόπο επαλληλίζονται με αντίστροφη μεθοδολογία Fourier, προκειμένου να δώσουν την τελική απόκριση στην επιφάνεια του εδάφους.

Η ακριβής εφαρμογή της ανωτέρω μεθοδολογίας προϋποθέτει ένα γραμμικώς ιξωδο-ελαστικό μέσο, με σταθερό μέτρο διατμητικής παραμόρφωσης (G) και σταθερό λόγο υστερητικής απόσβεσης (ζ). Η πραγματική μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους υπό δυναμική-επαναλαμβανόμενη φόρτιση, όπου τόσο το G όσο και το ζ αποτελούν συναρτήσεις της επιβαλλόμενης διατμητικής παραμόρφωσης (γ), λαμβάνεται υπόψη με επαναληπτική εφαρμογή της ανωτέρω μεθοδολογίας. Κατ' αυτή, οι χρησιμοποιούμενες τιμές των παραμέτρων G και ζ τροποποιούνται διαδοχικά μέχρι να γίνουν τελικώς συμβατές με τις αντίστοιχες τιμές της διατμητικής παραμόρφωσης (γ) που προκύπτουν από την ανάλυση.

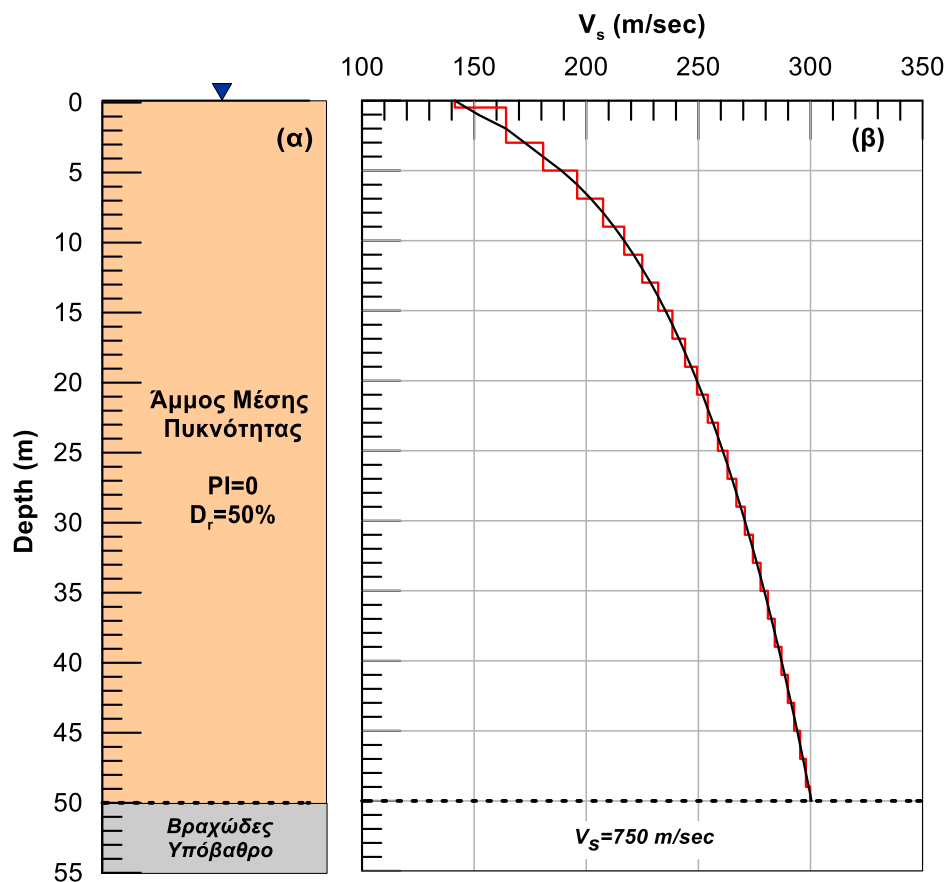
Τα βασικά δεδομένα τα οποία απαιτούνται για την εφαρμογή της ανωτέρω μεθοδολογίας περιλαμβάνουν:

- Το βάθος και το πάχος των διάφορων εδαφικών στρώσεων.
- Την πυκνότητα μάζας (ρ) της κάθε στρώσης.
- Την ταχύτητα μετάδοσης σεισμικών (διατμητικών) κυμάτων (V_s) της κάθε στρώσης, ή το αντίστοιχο ελαστικό μέτρο διάτμησης ($G_{\max} = \rho \cdot V_s^2$).
- Το βάθος και τις ιδιότητες (V_s και ρ) του «σεισμικού υποβάθρου».
- Τις καμπύλες (G/G_{\max} - γ) και (ζ - γ) που περιγράφουν τη μη - γραμμική ιξωδο-ελαστική συμπεριφορά της κάθε στρώσης.
- Τη σεισμική διέγερση, υπό μορφή επιταχυνσιογραφήματος, και την εδαφική στρώση στην οποία επιβάλλεται.

Διαστρωμάτωση. Η ανάλυση επιλέγεται να πραγματοποιηθεί στο εδαφικό προφίλ άμμου μέσης πυκνότητας, όπως αυτό περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4. Σε αυτή την περίπτωση θεωρείται ότι το έδαφος αποτελείται από άμμο μέσης πυκνότητας με σχετική πυκνότητα $D_r=50\%$, γωνία τριβής $\phi=33^\circ$ και πυκνότητα μάζας $\rho = 2 \text{ Mg/m}^3$. Το πάχος της εδαφικής στρώσης λαμβάνεται ίσο με 50 m ενώ το πάχος των επιμέρους στρώσεων λαμβάνεται ίσο με 2m.

Ταχύτητα μετάδοσης σεισμικών (διατμητικών) κυμάτων V_s . Στους υπολογισμούς της μονοδιάστατης ανάλυσης εδαφικής απόκρισης, ως δεδομένο για την ταχύτητα μετάδοσης των διατμητικών κυμάτων V_s χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα των υπολογισμών που περιγράφονται στην παράγραφο 5.4.2. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζεται η ταχύτητα V_s μέσω των σχέσεων που προτείνουν οι Ohta and Goto (1978) και Imai and Tonouchi (1982) και στην ανάλυση χρησιμοποιείται ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων.

Στο **Σχήμα 5.19** παρουσιάζεται η ταχύτητα μετάδοσης σεισμικών (διατμητικών) κυμάτων (V_s) της κάθε στρώσης.

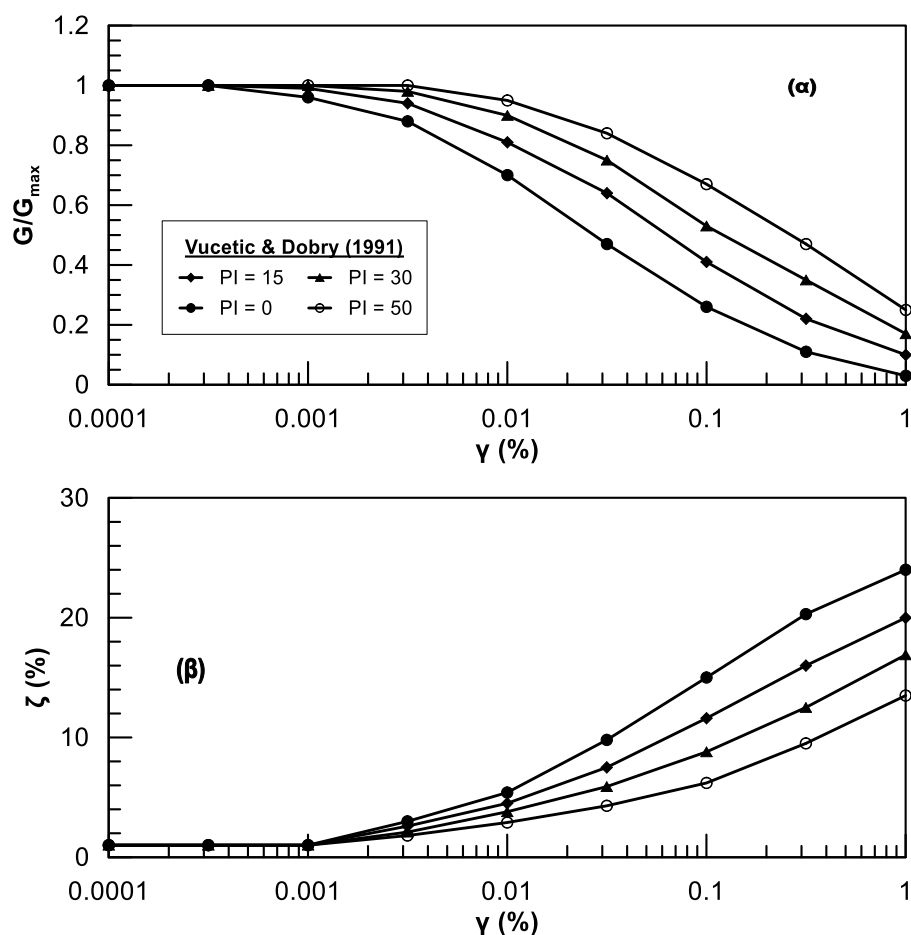


Σχήμα 5.19: (α) Εδαφικό προφίλ άμμου μέσης πυκνότητας (β) Κατανομή ταχύτητας διάδοσης (V_s) με το βάθος.

Σεισμικό υπόβαθρο. Ως σεισμικό υπόβαθρο μιας περιοχής ορίζεται το δύσκαμπτο ελαστικό μέσο επί του οποίου επικάθονται οι σχετικά μαλακές - χαλαρές επιφανειακές αποθέσεις του εδάφους και μέσω του οποίου μεταδίδονται τα σεισμικά κύματα πριν από την άφιξη τους στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους. Στις αναλύσεις της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας λαμβάνεται βραχώδες σεισμικό υπόβαθρο σε βάθος 50 m. Τα σεισμικά διατμητικά κύματα θεωρείται ότι διαδίδονται με ταχύτητα 750 m/sec στο βραχώδες υπόβαθρο, το οποίο παρουσιάζει απόσβεση $\zeta = 2\%$.

Ανελαστική συμπεριφορά εδαφικών στρώσεων. Κατά την ισοδύναμη γραμμική ανάλυση της σεισμικής απόκρισης του εδάφους η ανελαστική συμπεριφορά της κάθε εδαφικής στρώσης (ή εδαφικού στοιχείου) περιγράφεται με βάση τις καμπύλες μεταβολής του λόγου των μέτρων διάτμησης (G/G_{max}) και του λόγου κρίσιμης υστερητικής απόσβεσης (ζ), συναρτήσει του εύρους της επιβαλλόμενης διατμητικής παραμόρφωσης (γ). Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία τα στοιχεία αυτά λαμβάνονται από πειραματικά δεδομένα της

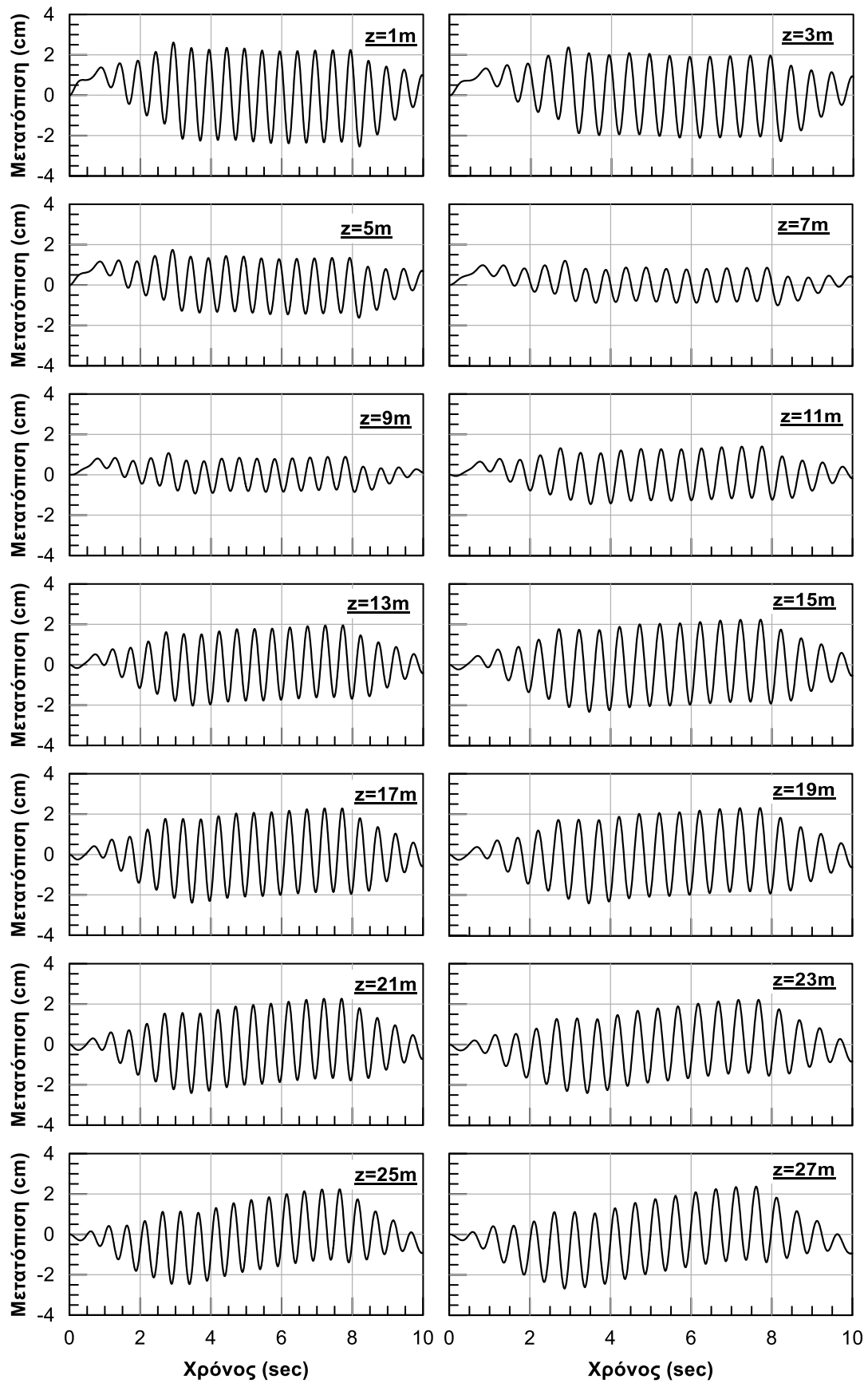
βιβλιογραφίας και συγκεκριμένα από τις καμπύλες των Vucetic & Dobry (1991), όπως παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5.20**, οι οποίες προέκυψαν βάσει πλήθους πειραματικών δεδομένων από δοκιμές συντονισμού εδαφικής στήλης (Resonant Column Tests). Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.20**, η ανελαστική συμπεριφορά του εδάφους εξαρτάται κυρίως από το δείκτη πλαστιμότητας (PI).



Σχήμα 5.20: Καμπύλες απομείωσης α) του μέτρου διάτμησης G/G_{max} και β) της υστερητικής απόσβεσης ζ συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης γ (Vucetic & Dobry 1991)

Σεισμική διέγερση μονοδιάστατης ανάλυσης. Η ανάλυση σεισμικής απόκρισης του εδάφους πραγματοποιείται για τη σεισμική διέγερση που περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 5.3.1, περιόδου $T=0.50$ sec και μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης $PGA=0.50g$. Για την ανάλυση σεισμικής απόκρισης, η σεισμική διέγερση επιβάλλεται στην ελεύθερη επιφάνεια του σεισμικού υποβάθρου.

Αποτελέσματα μονοδιάστατης ανάλυσης. Τα αποτελέσματα των μονοδιάστατων αναλύσεων σεισμικής απόκρισης του αμμόδου εδάφους συνοψίζονται στο **Σχήμα 5.21** με τη μορφή χρονοϊστοριών μετατόπισης στα υπό εξέταση βάθη.



Σχήμα 5.21: Αποτελέσματα μονοδιάστατων αναλύσεων με τη μορφή χρονοϊστορίας μετατόπισης στα υπό εξέταση βάθη

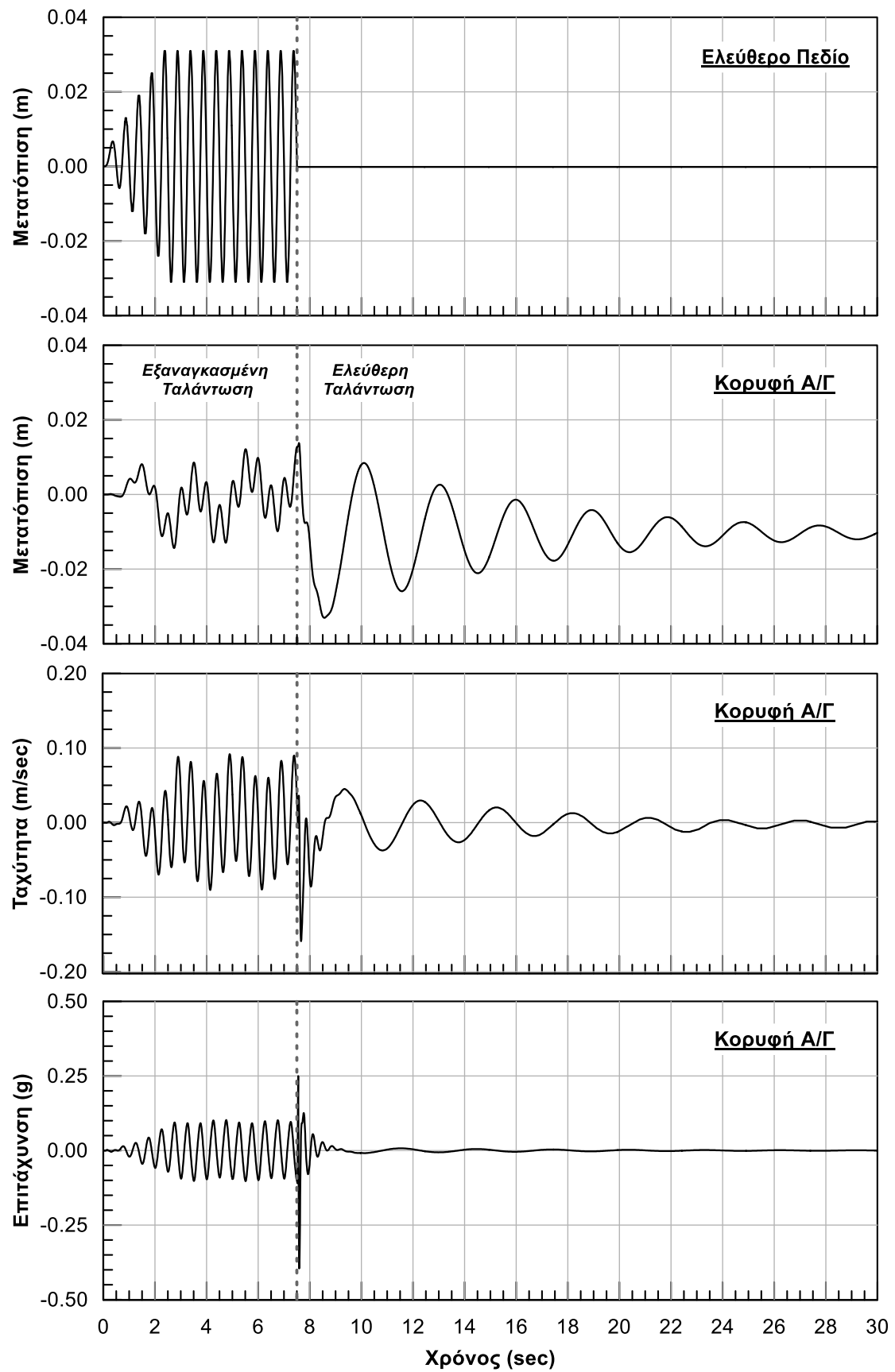
5.5.3 Δυναμικές αναλύσεις αλληλεπίδρασης εδάφους – ανεμογεννήτριας

Στις παρούσες αναλύσεις δυναμικής απόκρισης το προσομοίωμα περιλαμβάνει τόσο την ανωδομή με τη συνολική μάζα της (πύργος και ρότορας) όσο και τον πάσσαλο θεμελίωσης με τα ελατήρια και τους αποσβεστήρες στους αντίστοιχους κόμβους για την προσομοίωση του εδάφους. Η διέγερση εφαρμόζεται μέσω εδαφικών μετατοπίσεων στα βάθη που εφαρμόζονται τα ελατήρια και οι αποσβεστήρες και δεσμεύονται οι εκτός επιπέδου βαθμοί ελευθερίας της ανωδομής. Στην παρούσα ανάλυση η απόσβεση της ανωδομής της ανεμογεννήτριας εισάγεται στο προσομοίωμα ως απόσβεση τύπου Rayleigh με ελάχιστο λόγο υστερητικής απόσβεσης 3% για περίοδο ίση με την ιδιοπερίοδο του μονοβάθμιου ταλαντωτή.

Στόχος των αναλύσεων αποτελεί ο υπολογισμός της ιδιοπεριόδου και της απόσβεσης του συστήματος, προκειμένου να συγκριθούν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του προσομοιώματος πακτωμένης ανωδομής. Για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών αυτών χρησιμοποιείται η μεθοδολογία που παρουσιάζεται στο βιβλίο του Chopra (2007) όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 5.3.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων δυναμικής απόκρισης παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5.22**. Σε αυτό περιλαμβάνονται α) η χρονοϊστορία των επιβαλλόμενων μετατοπίσεων στη βάση της ανωδομής κατά τη διέγερση του συστήματος και β) η χρονοϊστορία της απόκρισης της ανεμογεννήτριας στην κορυφή της σε όρους μετατόπισης. Για την καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων απόκρισης της ανεμογεννήτριας, παρουσιάζεται επιπλέον γ) η αναπτυσσόμενη ταχύτητα στην κορυφή του μονοβάθμιου ταλαντωτή και δ) η αναπτυσσόμενη επιτάχυνση στην κορυφή του μονοβάθμιου ταλαντωτή.

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα των δυναμικών αναλύσεων η απόκριση της ανεμογεννήτριας χωρίζεται σε δυο φάσεις, όπως ήταν αναμενόμενο. Κατά την πρώτη φάση η ανεμογεννήτρια υφίσταται μια εξαναγκασμένη ταλάντωση στην οποία συνυπάρχουν δύο τμήματα ταλαντώσεων α) μια μόνιμη ταλάντωση με τη διεγείρουσα συχνότητα και β) μια παροδική ταλάντωση με την ιδιοσυχνότητα του συστήματος. Σύμφωνα με τις καταγραφές φαίνεται ότι η επιρροή της παροδικής ταλάντωσης είναι σημαντική δημιουργώντας μια ακαθόριστη μορφής ταλάντωση στην ανεμογεννήτρια. Κατά τη δεύτερη φάση, η ανεμογεννήτρια εκτελεί ελεύθερη αποσβενύμενη ταλάντωση με αυξημένο πλάτος ταλάντωσης σε σχέση με την πρώτη φάση, το οποίο σταδιακά μειώνεται λόγω της απόσβεσης του συστήματος.



Σχήμα 5.22: Αποτελέσματα δυναμικής ανάλυσης αλληλεπίδρασης εδάφους - ανεμογεννήτριας

Χαρακτηριστικά δυνάμικης ταλάντωσης του συστήματος της ανεμογεννήτριας. Τα χαρακτηριστικά ταλάντωσης ενός συστήματος είναι η περίοδος, η απόσβεση και το πλάτος ταλάντωσης. Μέσω των αναλύσεων δυναμικής απόκρισης υπολογίστηκαν οι μετατοπίσεις του συστήματος για κάθε χρονική στιγμή ταλάντωσης. Ο **Πίνακας 5.6** παρουσιάζει ενδεικτικά τις πρώτες 6 διαδοχικές στιγμές εμφάνισης θετικής μέγιστης απομάκρυνσης, την αντίστοιχη απομάκρυνση και την υπολογιζόμενη ιδιοπερίοδο, τις πρώτες 6 διαδοχικές στιγμές εμφάνισης αρνητικής μέγιστης απομάκρυνσης την αντίστοιχη απομάκρυνση και την υπολογιζόμενη ιδιοπερίοδο καθώς και την απόσβεση για τον κάθε κύκλο ταλάντωσης.

Στις δυναμικές αναλύσεις αλληλεπίδρασης εδάφους – ανεμογεννήτριας για τον υπολογισμό της απόσβεσης είναι απαραίτητη η χρήση και των αρνητικών μεγίστων λόγω της μορφής της χρονοϊστορίας των μετακινήσεων. Συγκεκριμένα όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.22** η χρονοϊστορία μετακίνησης της κορυφής παρουσιάζει παραμένουσα μετατόπιση, μετατοπίζοντας τον άξονα ισορροπίας της ταλάντωσης. Για το λόγο αυτό στη σχέση (5.37) τα u_i και u_{i+1} δεν είναι πλέον δύο διαδοχικές μέγιστες ή ελάχιστες μετατοπίσεις. Αντίθετα θεωρείται ως u_i το ημίαθροισμα της μέγιστης θετικής και της ακόλουθης μέγιστης αρνητικής μετατόπισης. Με όμοιο τρόπο, ως u_{i+1} λαμβάνεται το ημίαθροισμα του αμέσως επόμενου «ζεύγους» θετικής και αρνητικής μέγιστης μετατόπισης. Με αυτή τη διαδικασία επιτυγχάνεται η άρση του υπολογιστικού προβλήματος που επιφέρει η ταλάντωση του συστήματος γύρω από μετατοπισμένο άξονα, καθώς ο υπολογισμός της μέγιστης μετατόπισης είναι ανεξάρτητος πλέον του συστήματος αναφοράς. Οι όροι T_{SSI} και ζ_{total} εκφράζουν την ιδιοπερίοδο και την απόσβεση του συστήματος της ανεμογεννήτριας, αντίστοιχα.

Πίνακας 5.6: Ενδεικτικές καταγραφές της ελεύθερης ταλάντωσης

t_{peak} (sec)	$u_{x,peak (+)}$ (m)	T_{SSI} (sec)	t_{peak} (sec)	$u_{x,peak (-)}$ (m)	T_{SSI} (sec)	ζ_{total} (%)
10.10	0.017434		8.56	-0.024073		
13.04	0.011618	2.94	11.57	-0.016940	3.01	5.94
15.98	0.007604	2.94	14.53	-0.012099	2.96	5.90
18.92	0.004833	2.94	17.45	-0.008774	2.92	5.88
21.87	0.002920	2.95	20.39	-0.006472	2.94	5.89
24.81	0.001600	2.94	23.34	-0.004883	2.95	5.89

Υπολογισμός ιδιοπεριόδου ανεμογεννήτριας._ Η ιδιοπερίοδος T_{SSI} του συστήματος προσδιορίστηκε από τις καταγραφές ελεύθερης αποσβενύμενης ταλάντωσης, μετρώντας το χρόνο που απαιτείται για τη συμπλήρωση ενός κύκλου ταλάντωσης όπως φαίνονται και στον παραπάνω Πίνακα (**Πίνακας 5.6**). Ο προσδιορισμός της τελικής τιμής προέκυψε ως η μέση τιμή των αποτελεσμάτων κάθε κύκλου ταλάντωσης. Συνεπώς, η ιδιοπερίοδος T_{SSI} του συστήματος της ανεμογεννήτριας με τη θεώρηση αλληλεπίδρασης μεταξύ αυτής και του εδάφους υπολογίστηκε ίση με **$T_{SSI}=2.95$ sec.**

Η αντίστοιχη ιδιοπερίοδος για τη θεώρηση πακτωμένης ανεμογεννήτριας ήταν ίση με 2.16 sec. Επομένως παρατηρείται αύξηση κατά **+ 37%**.

Υπολογισμός απόσβεσης ανεμογεννήτριας._ Η απόσβεση ζ_{total} του συστήματος προσδιορίστηκε σύμφωνα με τη σχέση (5.37) μέσω των καταγραφών ελεύθερης αποσβενύμενης ταλάντωσης με τη θεώρηση των ημιαθροισμάτων, οι οποίες παρουσιάζονται στον παραπάνω Πίνακα (**Πίνακας 5.4**). Ο προσδιορισμός της τελικής τιμής προέκυψε ως η μέση τιμή των αποτελεσμάτων κάθε κύκλου ταλάντωσης. Συνεπώς, η απόσβεση ζ_{total} του συστήματος της ανεμογεννήτριας με τη θεώρηση αλληλεπίδρασης μεταξύ αυτής και του εδάφους υπολογίστηκε ίση με **$\zeta_{total}=5.90\%$.**

Η αντίστοιχη απόσβεση για τη θεώρηση πακτωμένης ανεμογεννήτριας ήταν ίση με 3.01%, ίση δηλαδή με την απόσβεση Rayleigh της ανωδομής. Επομένως παρατηρείται αύξηση της απόσβεσης του συστήματος κατά 96%. Η αύξηση αυτή οφείλεται τόσο στην αύξηση της απόσβεσης Rayleigh της ανωδομής όσο και στην ύπαρξη απόσβεσης λόγω θεμελίωσης. Συγκεκριμένα όπως περιγράφηκε στην υποενότητα 5.2.2 και φαίνεται στο **Σχήμα 5.5** η απόσβεση Rayleigh της ανωδομής αυξάνεται όταν αυξάνεται η ιδιοπερίοδος. Για ιδιοπερίοδο $T_{SSI} = 2.95$ sec η απόσβεση Rayleigh της ανωδομής ισούται με 3.15 %. Επομένως η απόσβεση της θεμελίωσης ανέρχεται στο **$5.90-3.15=2.75$ %.**

Υπολογισμός απόκρισης εξαναγκασμένης ταλάντωσης ανεμογεννήτριας._ Η απόκριση της ανεμογεννήτριας μπορεί να ποσοτικοποιηθεί ενδεικτικά με το εύρος της επιτάχυνσης στην κορυφή του πύργου της ανεμογεννήτριας. Λαμβάνοντας την ημι-διαφορά των μέγιστων θετικών και αρνητικών τιμών στο αντίστοιχο διάγραμμα του Σχήματος των αποτελεσμάτων της δυναμικής ανάλυσης της αλληλεπίδρασης εδάφους – ανεμογεννήτριας (**Σχήμα 5.22**), προκύπτει ότι η μέση τιμή του εύρους της επιτάχυνσης είναι $\overline{PGA}_{SSI} = 0.103g$. Υπενθυμίζεται ότι η αντίστοιχη τιμή του εύρους επιτάχυνσης για την πακτωμένη ανεμογεννήτρια, όπως προκύπτει από το **Σχήμα 5.16**, ήταν $\overline{PGA}_{rigid} = 0.22g$, όπερ σημαίνει ότι η αλληλεπίδραση με τον πάσσαλο θεμελίωσης οδήγησε σε απομείωση της

τιμής κατά **46.81%**. Το αποτέλεσμα αυτό εκφράζει την συνδυασμένη επίδραση των δύο παραμέτρων δυναμικής απόκρισης που αναφέρθηκαν παραπάνω, δηλαδή:

1. Την αύξηση της περιόδου από 2.17 sec σε 2.95 sec και του λόγου $T_{\text{rigid}}/T_{\text{exc}}$ από $2.17 \text{ sec}/0.5 \text{ sec} = 4.34$ σε $2.95 \text{ sec}/0.5 \text{ sec} = 5.90$.
2. Την αύξηση του ισοδύναμου λόγου ιξώδους απόσβεσης από 3.01 % σε 5.89 %.

Με βάση τη θεωρία εξαναγκασμένης ταλάντωσης μονοβάθμιων συστημάτων με διέγερση στη βάση και οι δύο ανωτέρω παράμετροι συμβάλλουν στην απομείωση της ταλάντωσης στην κορυφή του πύργου σε σύγκριση με την παραδοχή άκαμπτης πάκτωσης της βάσης.

5.5.4 Επιρροή επιμέρους συνιστωσών απόσβεσης

Επιπλέον πραγματοποιήθηκαν 3 αναλύσεις δυναμικής απόκρισης για τον έλεγχο της συνεισφοράς κάθε συνιστώσας της εδαφικής απόσβεσης (υστερητική απόσβεση και απόσβεση ακτινοβολίας). Το προσομοίωμα περιλαμβάνει τα στοιχεία της βασικής ανάλυσης για την αλληλεπίδραση ανεμογεννήτριας - θεμελίωσης, όπως παρουσιάστηκαν στην υποενότητα 5.4.3. Η διαφοροποίηση έγκειται στον τρόπο με τον οποίο προσομοιώνεται η εδαφική αντίδραση. Στην πρώτη ανάλυση δεν λαμβάνεται υπόψη ούτε η υστερητική απόσβεση ούτε η απόσβεση ακτινοβολίας, αφαιρώντας δηλαδή τόσο τον κανόνα του Masing από τα ελατήρια όσο και τους αποσβεστήρες από τους αντίστοιχους κόμβους. Στη δεύτερη ανάλυση δεν λαμβάνεται υπόψη η υστερητική απόσβεση, δηλαδή η ανάλυση γίνεται χωρίς το νόμο του Masing στα ελατήρια. Τέλος στην τρίτη ανάλυση δεν λαμβάνεται υπόψη η απόσβεση ακτινοβολίας, δηλαδή η ανάλυση γίνεται χωρίς τους αποσβεστήρες στους αντίστοιχους κόμβους.

Η διέγερση εφαρμόζεται στη βάση της ανωδομής και δεσμεύονται οι εκτός επιπέδου βαθμοί ελευθερίας της. Στην παρούσα ανάλυση η απόσβεση της ανωδομής της ανεμογεννήτριας εισάγεται στο προσομοίωμα ως απόσβεση τύπου Rayleigh με ελάχιστο λόγο υστερητικής απόσβεσης 3% για περίοδο ίση με την ιδιοπερίοδο του μονοβάθμιου ταλαντωτή.

Στόχος των αναλύσεων αποτελεί ο υπολογισμός της ιδιοπεριόδου και της απόσβεσης του συστήματος, προκειμένου να συγκριθούν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του προσομοιώματος πακτωμένης ανωδομής. Για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών αυτών χρησιμοποιείται η μεθοδολογία που παρουσιάζεται στο βιβλίο του Chopra (2007) όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 5.3.

Ανάλυση χωρίς υστερητική απόσβεση και απόσβεση ακτινοβολίας. Ο Πίνακας 5.7 παρουσιάζει ενδεικτικά τις πρώτες 5 διαδοχικές στιγμές εμφάνισης θετικής μέγιστης απομάκρυνσης, την αντίστοιχη απομάκρυνση και την υπολογιζόμενη ιδιοπερίοδο. Επιπλέον παρουσιάζονται οι πρώτες 5 διαδοχικές στιγμές εμφάνισης αρνητικής μέγιστης απομάκρυνσης, η αντίστοιχη απομάκρυνση, η υπολογιζόμενη ιδιοπερίοδος καθώς και η απόσβεση για τον κάθε κύκλο ταλάντωσης. Ομοίως με τις προηγούμενες αναλύσεις, χρησιμοποιείται η λογική του ημιαθροίσματος δύο διαδοχικών ακραίων απομακρύνσεων, όπως περιγράφηκε στην υποενότητα 5.4.3, λόγω του μετατοπισμένου άξονα ταλάντωσης. Οι όροι T και ζ_{total} εκφράζουν την ιδιοπερίοδο και την απόσβεση του συστήματος της ανεμογεννήτριας, αντίστοιχα.

Πίνακας 5.7: Ενδεικτικές καταγραφές της ελεύθερης ταλάντωσης

t_{peak} (sec)	$u_{x,peak (+)}$ (m)	T (sec)	t_{peak} (sec)	$u_{x,peak (-)}$ (m)	T (sec)	ζ_{total} (%)
10.81	0.007615		12.32	-0.006921		
13.80	0.006276	2.99	15.28	-0.005684	2.96	3.10
16.76	0.005147	2.96	18.24	-0.004662	2.96	3.15
19.71	0.004222	2.95	21.19	-0.003823	2.95	3.15
22.67	0.003462	2.96	24.15	-0.003136	2.96	3.15
10.81	0.007615	2.99	12.32	-0.006921	2.96	3.10

Η ιδιοπερίοδος T του συστήματος προσδιορίστηκε από τις καταγραφές ελεύθερης αποσβενύμενης ταλάντωσης, μετρώντας το χρόνο που απαιτείται για τη συμπλήρωση ενός κύκλου ταλάντωσης όπως φαίνονται και στον παραπάνω Πίνακα (**Πίνακας 5.7**). Ο προσδιορισμός της τελικής τιμής προέκυψε ως η μέση τιμή των αποτελεσμάτων κάθε κύκλου ταλάντωσης. Συνεπώς, η ιδιοπερίοδος T του συστήματος της ανεμογεννήτριας χωρίς υστερητική απόσβεση και απόσβεση ακτινοβολίας υπολογίστηκε ίση με $T=2.96$ sec.

Η αντίστοιχη ιδιοπερίοδος λαμβάνοντας την αλληλεπίδραση μεταξύ ανεμογεννήτριας - εδάφους ήταν ίση με 2.95 sec. Επομένως παρατηρείται ότι η **ιδιοπερίοδος δεν μεταβλήθηκε**.

Η απόσβεση ζ_{total} του συστήματος προσδιορίστηκε σύμφωνα με τη σχέση (5.37) μέσω των καταγραφών ελεύθερης αποσβενύμενης ταλάντωσης με τη θεώρηση των ημιαθροισμάτων, οι οποίες παρουσιάζονται στον παραπάνω Πίνακα (**Πίνακας 5.7**). Ο προσδιορισμός της τελικής τιμής προέκυψε ως η μέση τιμή των αποτελεσμάτων κάθε κύκλου ταλάντωσης.

Συνεπώς, η απόσβεση ζ του συστήματος της ανεμογεννήτρια χωρίς υστερητική απόσβεση και απόσβεση ακτινοβολίας υπολογίστηκε ίση με $\zeta_{\text{total}}=3.14\%$.

Η αντίστοιχη απόσβεση για τη θεώρηση αλληλεπίδρασης μεταξύ της ανεμογεννήτριας και του εδάφους ήταν ίση με 5.90%. Επομένως παρατηρείται μείωση της απόσβεσης του συστήματος κατά 53%. Η μείωση είναι αναμενόμενη καθώς η μόνη πηγή απόσβεσης στο σύστημα είναι η απόσβεση Rayleigh της ανωδομής. Για ιδιοπερίοδο $T = 2.96 \text{ sec}$ η απόσβεση Rayleigh της ανωδομής ισούται με 3.15 %. Παρατηρείται λοιπόν ότι η απόσβεση του συστήματος έχει τιμή ίση με την απόσβεση Rayleigh της ανωδομής, όπως ήταν αναμενόμενο.

Ανάλυση χωρίς υστερητική απόσβεση. Ο Πίνακας 5.8 παρουσιάζει ενδεικτικά τις πρώτες 6 διαδοχικές στιγμές εμφάνισης θετικής μέγιστης απομάκρυνσης, την αντίστοιχη απομάκρυνση και την υπολογιζόμενη ιδιοπερίοδο. Επιπλέον παρουσιάζονται οι πρώτες 5 διαδοχικές στιγμές εμφάνισης αρνητικής μέγιστης απομάκρυνσης, η αντίστοιχη απομάκρυνση, η υπολογιζόμενη ιδιοπερίοδος καθώς και η απόσβεση για τον κάθε κύκλο ταλάντωσης. Και σε αυτές τις αναλύσεις χρησιμοποιείται η λογική του ημιαθροίσματος δύο διαδοχικών ακραίων μετακινήσεων, όπως περιγράφηκε στην υποενότητα 5.4.3 λόγω του μετατοπισμένου άξονα της ταλάντωσης του συστήματος. Οι όροι T_{rad} και ζ_{rad} εκφράζουν την ιδιοπερίοδο και την απόσβεση του συστήματος της ανεμογεννήτριας, αντίστοιχα.

Πίνακας 5.8: Ενδεικτικές καταγραφές της ελεύθερης ταλάντωσης

t_{peak} (sec)	$u_{x,\text{peak}}$ (+) (m)	T_{rad} (sec)	t_{peak} (sec)	$u_{x,\text{peak}}$ (-) (m)	T_{rad} (sec)	ζ_{rad} (%)
9.90	0.015628		11.37	-0.012983		
12.84	0.010787	2.94	14.31	-0.008962	2.94	5.89
15.78	0.007445	2.94	17.25	-0.006186	2.94	5.89
18.73	0.005139	2.95	20.2	-0.004270	2.95	5.89
21.67	0.003547	2.94	23.14	-0.002947	2.94	5.89
24.61	0.002449	2.94				

Η ιδιοπερίοδος T_{rad} του συστήματος προσδιορίστηκε από τις καταγραφές ελεύθερης αποσβενύμενης ταλάντωσης, μετρώντας το χρόνο που απαιτείται για τη συμπλήρωση ενός κύκλου ταλάντωσης όπως φαίνονται και στον παραπάνω Πίνακα (Πίνακας 5.8). Ο προσδιορισμός της τελικής τιμής προέκυψε ως η μέση τιμή των αποτελεσμάτων κάθε κύκλου ταλάντωσης. Συνεπώς, η ιδιοπερίοδος T_{rad} του συστήματος της ανεμογεννήτριας χωρίς υστερητική απόσβεση υπολογίστηκε ίση με $T_{\text{rad}}=2.94 \text{ sec}$. Η αντίστοιχη ιδιοπερίοδος

για τη θεώρηση αλληλεπίδρασης μεταξύ της ανεμογεννήτριας και του εδάφους ήταν ίση με 2.95 sec. Επομένως παρατηρείται ότι η **ιδιοπερίοδος δεν μεταβλήθηκε**.

Η απόσβεση ζ_{rad} του συστήματος προσδιορίστηκε σύμφωνα με τη σχέση (5.37) μέσω των καταγραφών ελεύθερης αποσβενύμενης ταλάντωσης με τη θεώρηση των ημιαθροισμάτων, οι οποίες παρουσιάζονται στον παραπάνω Πίνακα (**Πίνακας 5.8**). Ο προσδιορισμός της τελικής τιμής προέκυψε ως η μέση τιμή των αποτελέσματος κάθε κύκλου ταλάντωσης. Συνεπώς, η απόσβεση ζ του συστήματος της ανεμογεννήτρια χωρίς υστερητική απόσβεση υπολογίστηκε ίση με $\zeta_{rad}=5.89\%$.

Η αντίστοιχη απόσβεση για τη θεώρηση αλληλεπίδρασης μεταξύ της ανεμογεννήτριας και του εδάφους ήταν ίση με 5.90%. Επομένως παρατηρείται ότι η απόσβεση του συστήματος μειώθηκε ελάχιστα. Για ιδιοπερίοδο $T_{rad} = 2.94$ sec η απόσβεση Rayleigh της ανωδομής ισούται με 3.14%. Επομένως η απόσβεση της θεμελίωσης μόνο λόγω απόσβεσης ακτινοβολίας ανέρχεται στο **5.89-3.14=2.75 %**.

Η ελάχιστη μείωση της απόσβεσης του συστήματος με τη αφαίρεση της υστερητικής απόσβεσης από την ανάλυση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η υστερητική απόσβεση συνεισφέρει ελάχιστα στην συνολική απόσβεση του συστήματος λόγω θεμελίωσης.

Ανάλυση χωρίς απόσβεση ακτινοβολίας. Ο Πίνακας 5.9 παρουσιάζει ενδεικτικά τις πρώτες 5 διαδοχικές στιγμές εμφάνισης θετικής μέγιστης απομάκρυνσης, την αντίστοιχη απομάκρυνση και την υπολογιζόμενη ιδιοπερίοδο. Επιπλέον παρουσιάζονται οι πρώτες 5 διαδοχικές στιγμές εμφάνισης αρνητικής μέγιστης απομάκρυνσης, η αντίστοιχη απομάκρυνση, η υπολογιζόμενη ιδιοπερίοδος, καθώς και η απόσβεση για τον κάθε κύκλο ταλάντωσης. Και σε αυτές τις αναλύσεις χρησιμοποιείται η λογική του ημιαθροίσματος δύο διαδοχικών ακραίων μετατοπίσεων, όπως περιγράφηκε στην υποενότητα 5.4.3 λόγω του μετατοπισμένου άξονα της ταλάντωσης του συστήματος. Οι όροι T_{hyst} και ζ_{hyst} εκφράζουν την ιδιοπερίοδο και την απόσβεση του συστήματος της ανεμογεννήτριας, αντίστοιχα.

Πίνακας 5.9: Ενδεικτικές καταγραφές της ελεύθερης ταλάντωσης

t_{peak} (sec)	$u_{x,peak (+)}$ (m)	T_{hyst} (sec)	t_{peak} (sec)	$u_{x,peak (-)}$ (m)	T_{hyst} (sec)	ζ_{hyst} (%)
10.65	0.005416		12.12	-0.022007		
13.60	0.002771	2.95	15.08	-0.019659	2.96	3.20
16.56	0.000654	2.96	18.04	-0.017742	2.96	3.15
19.51	-0.001083	2.95	21.00	-0.016169	2.96	3.16
22.47	-0.002506	2.96	23.95	-0.014880	2.95	3.15

Η ιδιοπερίοδος T_{hyst} του συστήματος προσδιορίστηκε από τις καταγραφές ελεύθερης αποσβενύμενης ταλάντωσης, μετρώντας το χρόνο που απαιτείται για τη συμπλήρωση ενός κύκλου ταλάντωσης όπως φαίνονται και στον παραπάνω Πίνακα (**Πίνακας 5.9**). Ο προσδιορισμός της τελικής τιμής προέκυψε ως η μέση τιμή των αποτελεσμάτων κάθε κύκλου ταλάντωσης. Συνεπώς, η ιδιοπερίοδος T_{hyst} του συστήματος της ανεμογεννήτριας χωρίς απόσβεση ακτινοβολίας υπολογίστηκε ίση με **$T_{hyst}=2.96 \text{ sec}$** .

Η αντίστοιχη ιδιοπερίοδος για τη θεώρηση αλληλεπίδρασης μεταξύ της ανεμογεννήτριας και του εδάφους ήταν ίση με 2.95 sec. Επομένως παρατηρείται ότι η **ιδιοπερίοδος δεν μεταβλήθηκε**.

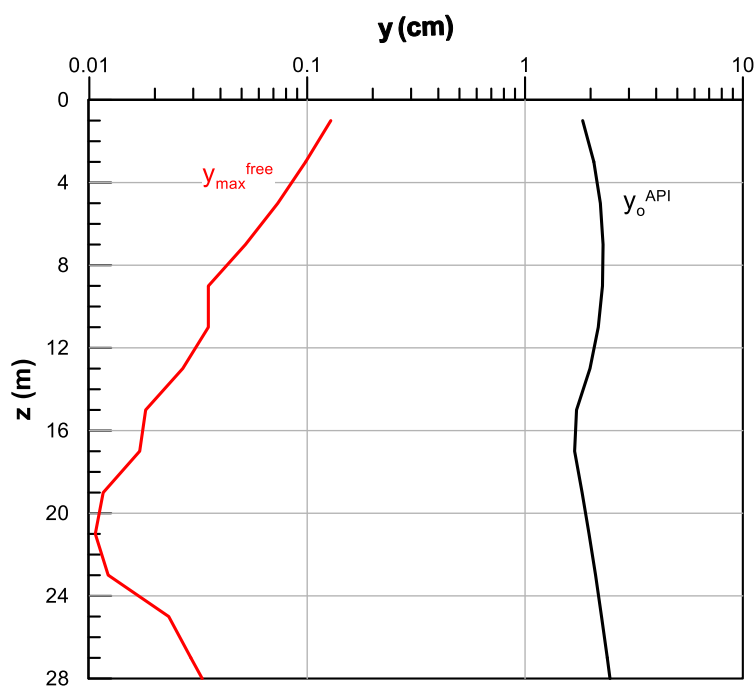
Η απόσβεση ζ_{hyst} του συστήματος προσδιορίστηκε σύμφωνα με τη σχέση (5.37) μέσω των καταγραφών ελεύθερης αποσβενύμενης ταλάντωσης με τη θεώρηση των ημιαθροισμάτων, οι οποίες παρουσιάζονται στον παραπάνω Πίνακα (**Πίνακας 5.9**). Ο προσδιορισμός της τελικής τιμής προέκυψε ως η μέση τιμή των αποτελεσμάτων κάθε κύκλου ταλάντωσης. Συνεπώς, η απόσβεση ζ_{hyst} του συστήματος της ανεμογεννήτριας χωρίς απόσβεση ακτινοβολίας υπολογίστηκε ίση με **$\zeta_{hyst}=3.17\%$** .

Η αντίστοιχη απόσβεση για τη θεώρηση αλληλεπίδρασης μεταξύ της ανεμογεννήτριας και του εδάφους ήταν ίση με 5.90. Επομένως παρατηρείται μείωση της απόσβεσης του συστήματος κατά 54 %. Για ιδιοπερίοδο $T_{hyst} = 2.96 \text{ sec}$ η απόσβεση Rayleigh της ανωδομής ισούται με 3.15 %. Επομένως η απόσβεση της θεμελίωσης μόνο λόγω υστερητικής απόσβεσης ανέρχεται στο **$3.17-3.15=0.02 \%$** .

Συμπεράσματα. Από τις ανωτέρω παραμετρικές αναλύσεις, με και χωρίς αλληλεπίδραση ανεμογεννήτριας και θεμελίωσης, προκύπτει αρχικά ότι η ιδιοπερίοδος του συστήματος αυξάνει κατά 37 % περίπου λόγω προσθήκης του πασσάλου στον πύργο της ανεμογεννήτριας, χωρίς περαιτέρω ουσιαστική επίδραση των ελατηρίων-αποβεστήρων του εδάφους.

Αντίθετα η επίδραση των εδαφικών ελατηρίων-αποβεστήρων συνεισφέρει σε σημαντική αύξηση της συνολικής απόσβεσης του συστήματος, κατά 87% περίπου. Η εν λόγω αύξηση οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στην απόσβεση ακτινοβολίας και μόνο οριακά στην υστερητική απόσβεση. Συγκεκριμένα η πρόσθετη απόσβεση λόγω ακτινοβολίας ανέρχεται στο 2.75 % σε αντίθεση με την πρόσθετη υστερητική απόσβεση η οποία ανέρχεται στο 0.02 %. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι οι σχετικές μετατοπίσεις πασσάλου εδάφους είναι μικρές συγκρινόμενες με τις μετατοπίσεις διαρροής των εδαφικών ελατηρίων και η αντίστοιχη συμπεριφορά $p-\gamma$ είναι περίπου γραμμική. Το παραπάνω επιβεβαιώνεται από το

Σχήμα 5.23 όπου παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις διαρροής των ελατηρίων με το βάθος όπως προκύπτουν από τον κανονισμό API (2002) (y_o) συγκριτικά με τις μέγιστες μετατοπίσεις του πασσάλου με το βάθος κατά την ελεύθερη ταλάντωση (y_{max}^{free}) όπως προέκυψαν από την αριθμητική ανάλυση για τη σεισμική διέγερση. Πράγματι οι μετατοπίσεις του πασσάλου είναι πολύ μικρές συγκρινόμενες με τις μετατοπίσεις διαρροής των ελατηρίων. Επομένως η συμπεριφορά των ελατηρίων είναι περίπου γραμμική.



Σχήμα 5.23: Σύγκριση μετατοπίσεων διαρροής των ελατηρίων βάσει API (2002) με τις μετατοπίσεις του πασσάλου από την αριθμητική ανάλυση

Σε αυτό το σημείο σημειώνεται ότι η εκτίμηση της απόσβεσης σε κάθε περίπτωση πραγματοποιήθηκε επιπλέον μέσω των χρονοϊστοριών ταχύτητας και επιτάχυνσης της κορυφής του πύργου της ανεμογεννήτριας στην ελεύθερη ταλάντωση. Τα αποτελέσματα της υπολογιζόμενης απόσβεσης ταυτίζονταν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των υπολογισμών μέσω των χρονοϊστοριών μετατόπισης της κορυφής του πύργου στην ελεύθερη ταλάντωση.

Κεφάλαιο 6

Παραμετρική διερεύνηση επίδρασης της θεμελίωσης

6.1 Γενικά

Κύριος στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αποτελεί η εκτίμηση της επίδρασης της θεμελίωσης κατά τη σεισμική διέγερση μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας. Στο Κεφάλαιο 5 ύστερα από μια σειρά δυναμικών αναλύσεων έγινε σαφής η συμβολή της θεμελίωσης στην συνολική απόσβεση του συστήματος, καθιστώντας τη βασικό παράγοντα σχεδιασμού των ανεμογεννητριών. Επιπλέον, μέσω ελέγχου της συνεισφοράς των συνιστωσών της εδαφικής απόσβεσης (υστερητική απόσβεση και απόσβεση ακτινοβολίας) φάνηκε ότι η απόσβεση ακτινοβολίας αποτελεί τον κύριο παράγοντα εδαφικής απόσβεσης.

Στο παρόν Κεφάλαιο 6 της Διπλωματικής Εργασίας εξετάζεται μέσω παραμετρικών αναλύσεων η επιρροή των χαρακτηριστικών της ανωδομής και των εδαφικών συνθηκών στην αλληλεπίδραση εδάφους-πασσάλου-ανωδομής. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για μια τυπική ανεμογεννήτρια 5-MW, χρησιμοποιώντας για τον πύργο και τη θεμελίωση της τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4 για την αντίστοιχη ανεμογεννήτρια και σύμφωνα με τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5.

6.2 Επίδραση δυσκαμψίας πύργου ανεμογεννήτριας

Σε αυτή την υποενότητα πραγματοποιείται έλεγχος της επίδρασης των χαρακτηριστικών της ανωδομής στην αλληλεπίδραση εδάφους-πασσάλου-ανωδομής της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας. Ως ενδεικτικό μέγεθος των χαρακτηριστικών της ανωδομής θεωρείται η δυσκαμψία του πύργου της ανεμογεννήτριας, η οποία υπενθυμίζεται ότι εκφράζεται μέσω της σχέσης:

$$K = \frac{3 \cdot E \cdot I}{h^3} \quad (6.1)$$

όπου

E : μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα (210 GPa)

h : ύψος πύργου ανεμογεννήτριας (m)

I : Ροπή αδράνειας κοίλης διατομής, που δίνεται από τη σχέση

$$I = I_y = I_z = \frac{\pi}{4} \cdot \left[\left(\frac{D}{2} \right)^4 - \left(\frac{D}{2} - t \right)^4 \right] \quad (6.2)$$

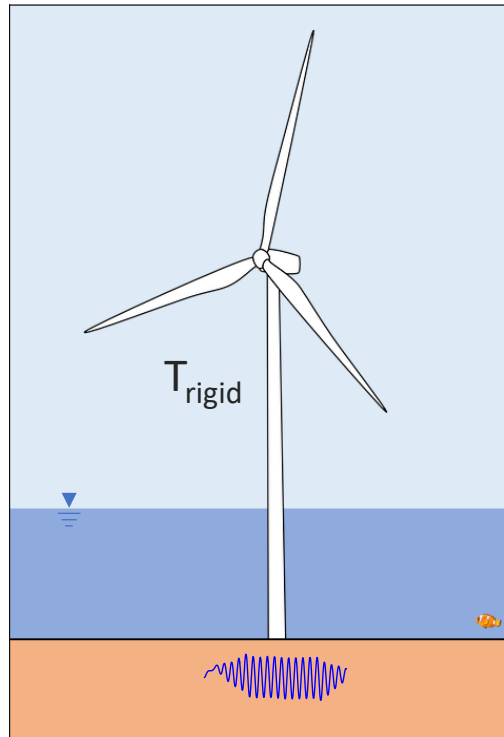
όπου

D : εξωτερική διάμετρος της κοίλης διατομής του πύργου

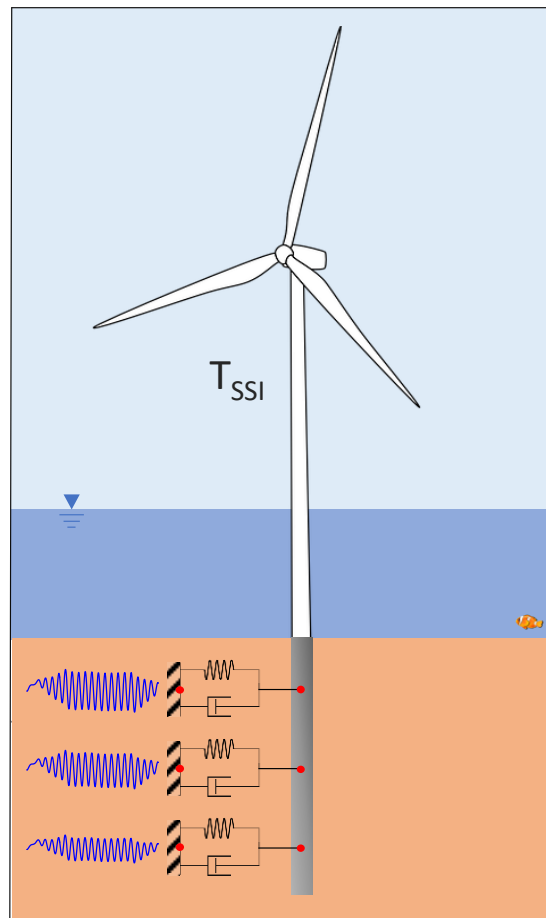
t : πάχος της κοίλης διατομής του πύργου

Η διερεύνηση πραγματοποιείται για την τυπική ανεμογεννήτρια 5-MW, όπως αυτή περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4. Σε αυτό το σημείο εξετάζονται περιπτώσεις που αντιστοιχούν περίπου στα 2/3, στο 1/2 και στο 1/3 του ύψους της ανεμογεννήτριας που ελέγχθηκε στο Κεφαλαίο 5, μεταβάλλοντας αντίστοιχα τη δυσκαμψία της. Συνεπώς, η διερεύνηση πραγματοποιείται με τη δυσκαμψία της ανωδομής σε κάθε περίπτωση να ισούται με 3K_o, 9K_o και 27K_o αντίστοιχα, όπου K_o η δυσκαμψία της ανωδομής που εξετάστηκε στο Κεφάλαιο 5.

Προκειμένου να εκτιμηθεί η επίδραση της δυσκαμψίας της ανωδομής, για κάθε ύψος ανεμογεννήτριας εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις ανάλυσης: α) προσομοίωση υπεράκτιας ανεμογεννήτριας με πακτωμένη βάση και β) προσομοίωση υπεράκτιας ανεμογεννήτριας λαμβάνοντας υπόψη τη θεμελίωση πασσάλου σύμφωνα με τη «μέθοδο της δοκού επί ελατηριωτού εδάφους». Σε κάθε περίπτωση υπολογίστηκε η απόσβεση και η ιδιοπερίοδος του συστήματος, ώστε να γίνει δυνατή η εκτίμηση της επίδρασης της θεμελίωσης κατά τη σεισμική απόκριση υπεράκτιας ανεμογεννήτριας. Το αριθμητικό προσομοίωμα που ακολουθείται σε κάθε περίπτωση ανάλυσης περιγράφεται λεπτομερώς στην υποενότητα 5.2.2 του Κεφαλαίου 5 και παρουσιάζεται απλοποιητικά στα Σχήματα που ακολουθούν. Συγκεκριμένα στο **Σχήμα 6.1** παρουσιάζεται το προσομοίωμα υπεράκτιας ανεμογεννήτριας με πακτωμένη βάση και στο **Σχήμα 6.2** παρουσιάζεται το προσομοίωμα υπεράκτιας ανεμογεννήτριας λαμβάνοντας υπόψη τη θεμελίωση πασσάλου σύμφωνα με τη «μέθοδο της δοκού επί ελατηριωτού εδάφους».



Σχήμα 6.1: Προσομοίωμα υπεράκτιας ανεμογεννήτριας με πακτωμένη βάση



Σχήμα 6.2: Προσομοίωμα υπεράκτιας ανεμογεννήτριας λαμβάνοντας υπόψη τη θεμελίωση πασσάλου

Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης εδάφους – πασσάλου χρησιμοποιούνται οι καμπύλες οριζόντιας δύναμης-μετατόπισης (p - y) που προτείνονται από το API (2002) σε συνδυασμό με τον νόμο του Masing για τον ορισμό των ελατηρίων κατά μήκος του πασσάλου. Για την απόσβεση ακτινοβολίας τοποθετούνται αποσβεστήρες, οι συντελεστές c_r των οποίων ορίζονται από τις σχέσεις των Gazetas & Dobry (1984). Ο ορισμός των κατανεμημένων ελατηρίων και αποσβεστήρων περιγράφεται λεπτομερώς στις υποενότητες 5.2.4 και 5.2.5 του Κεφαλαίου 5.

Η ανάλυση επιλέγεται να πραγματοποιηθεί στο έδαφος άμμου μέσης πυκνότητας, όπως αυτό περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4. Σε αυτή την περίπτωση θεωρείται ότι το έδαφος αποτελείται από άμμο μέσης πυκνότητας με σχετική πυκνότητα $D_r = 50\%$, γωνία τριβής $\phi = 33^\circ$ και πυκνότητα μάζας $\rho = 2 \text{ Mg/m}^3$. Το πάχος της εδαφικής στρώσης λαμβάνεται ίσο με 50 m.

Η σεισμική διέγερση για την οποία πραγματοποιούνται οι δυναμικές αναλύσεις είναι περιόδου $T = 0.50 \text{ sec}$ με μέγιστη εδαφική επιτάχυνση $PGA = 0.50g$ και περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 5.2.3 του Κεφαλαίου 5. Για την ανάλυση εδαφικής σεισμικής απόκρισης, η σεισμική διέγερση επιβάλλεται στην ελεύθερη επιφάνεια του σεισμικού υποβάθρου και τα αποτελέσματα της παρουσιάζονται στην υποενότητα 5.5.2 του Κεφαλαίου 5.

Αποτελέσματα δυναμικών αναλύσεων. Η απόκριση της ανεμογεννήτριας μπορεί να ποσοτικοποιηθεί ενδεικτικά με το εύρος της επιτάχυνσης στην κορυφή του πύργου κατά την εξαναγκασμένη ταλάντωση. Οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται για το προσομοίωμα πακτωμένης βάσης και αλληλεπίδρασης εδάφους – κατασκευής κάθε περίπτωσης. Λαμβάνοντας την ημιδιαφορά των μέγιστων θετικών και αρνητικών τιμών στα αντίστοιχα διαγράμματα των Σχημάτων του Παραρτήματος προκύπτει η μέση τιμή του εύρους της επιτάχυνσης \overline{PGA} για κάθε περίπτωση. Στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 6.1) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών. Οι όροι \overline{PGA}_{rigid} και \overline{PGA}_{SSI} εκφράζουν το μέσο εύρος της επιτάχυνσης του προσομοιώματος πακτωμένης βάσης και αλληλεπίδρασης εδάφους – κατασκευής αντίστοιχα.

Πίνακας 6.1: Επίδραση δυσκαμψίας πύργου στην επιτάχυνση της μάζας (Άμμος μέσης πυκνότητας)

Δυσκαμψία ανωδομής	\overline{PGA}_{rigid} (g)	\overline{PGA}_{SSI} (g)
K_0	0.22	0.10
$3K_0$	0.30	0.12
$9K_0$	0.95	0.30
$27K_0$	2.10	0.92

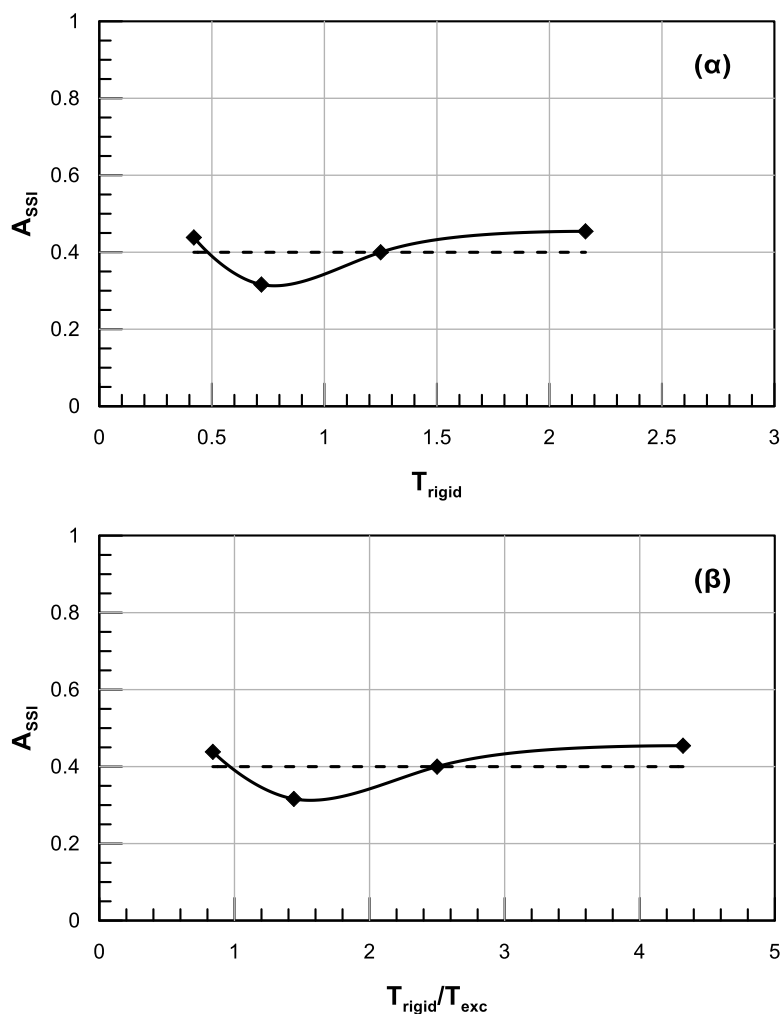
Επιπλέον για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων, υπολογίζεται η ιδιοπερίοδος και η απόσβεση του προσομοιώματος πακτωμένης βάσης και αλληλεπίδρασης εδάφους – κατασκευής κάθε περίπτωσης. Για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών αυτών χρησιμοποιείται η μεθοδολογία που παρουσιάζεται στο βιβλίο του Chorga (2007), όπως παρουσιάζεται στην παράγραφο 5.3 του Κεφαλαίου 5. Στις παρούσες αναλύσεις η απόσβεση της ανωδομής της ανεμογεννήτριας εισάγεται στο προσομοίωμα ως απόσβεση τύπου Rayleigh με ελάχιστο λόγο υστερητικής απόσβεσης 3% για περίοδο ίση με την ιδιοπερίοδο του μονοβάθμιου ταλαντωτή. Τα αποτελέσματα των δυναμικών αναλύσεων παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα (**Πίνακας 6.2**). Ο όρος T_{rigid} αντιστοιχεί στην ιδιοπερίοδο του πακτωμένου συστήματος, ο όρος T_{SSI} αντιστοιχεί στην ιδιοπερίοδο του συστήματος αλληλεπίδρασης, ο όρος ζ_{total} αντιστοιχεί στην συνολική απόσβεση του συστήματος, ο όρος ζ_f αντιστοιχεί στην απόσβεση του συστήματος λόγω θεμελίωσης και ο όρος ζ_R αντιστοιχεί στην απόσβεση Rayleigh του συστήματος.

Πίνακας 6.2: Επίδραση δυσκαμψίας πύργου στην ιδιοπερίοδο ταλάντωσης και στο λόγο απόσβεσης του συστήματος (Άμμος μέσης πυκνότητας)

Δυσκαμψία ανωδομής	Προσομοίωμα πακτωμένης βάσης			Προσομοίωμα αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής			
	T_{rigid} (sec)	ζ_R (%)	ζ_{total} (%)	T_{SSI} (sec)	ζ_R (%)	ζ_{total} (%)	ζ_f (%)
K_0	2.16	3.00	3.01	2.95	3.15	5.90	2.75
$3K_0$	1.25	3.00	3.01	1.91	3.27	11.03	7.76
$9K_0$	0.72	3.00	3.01	1.41	3.70	22.37	18.67
$27K_0$	0.42	3.00	3.03	1.26	5.00	35.55	30.55

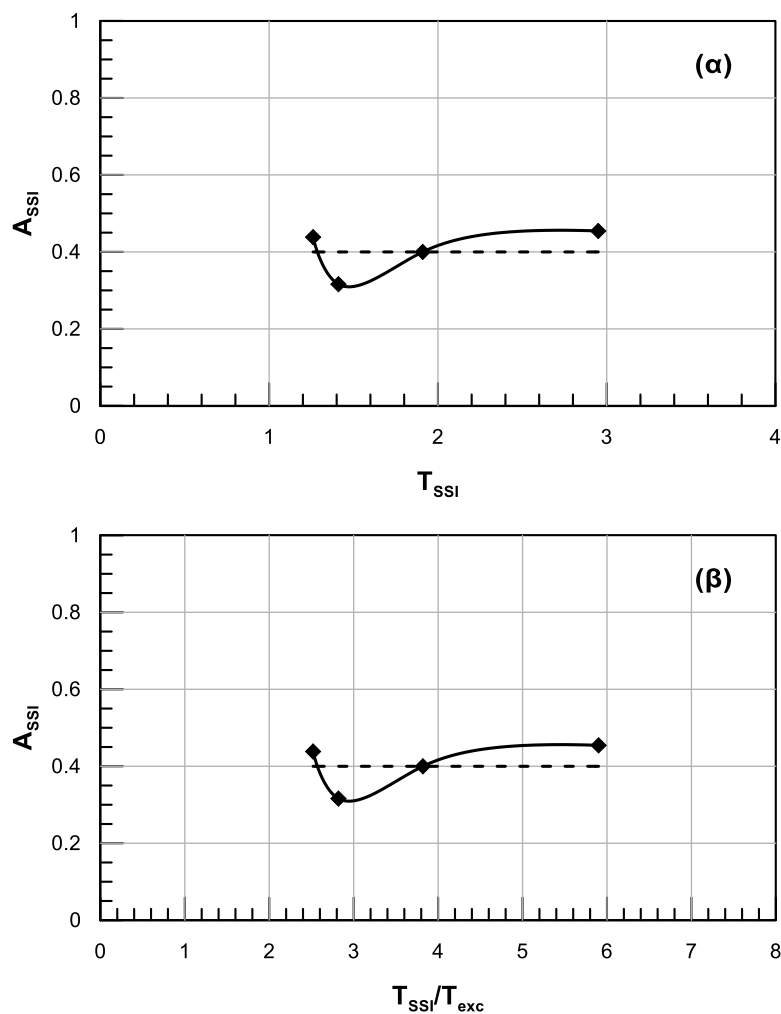
Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Για την καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του εύρους της επιτάχυνσης στην κορυφή του πύργου κατά την εξαναγκασμένη ταλάντωση ορίζεται ο λόγος $A_{SSI} = \overline{PGA}_{SSI} / \overline{PGA}_{rigid}$. Στο **Σχήμα 6.3** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του λόγου $A_{SSI} = \overline{PGA}_{SSI} / \overline{PGA}_{rigid}$ συναρτήσει της ιδιοπεριόδου του προσομοιώματος πακτωμένης βάσης T_{rigid} και του λόγου T_{rigid}/T_{exc} .



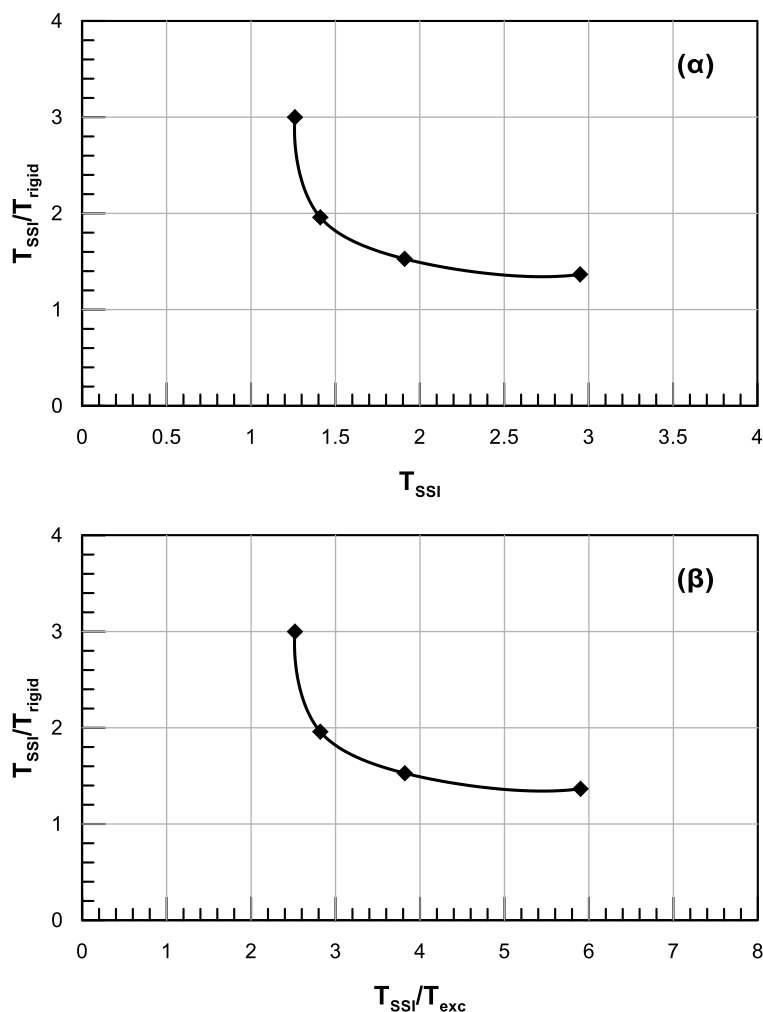
Σχήμα 6.3: Λόγος A_{SSI} συναρτήσει της ιδιοπεριόδου του προσομοιώματος πακτωμένης βάσης T_{rigid} και του λόγου T_{rigid}/T_{exc}

Επιπλέον στο **Σχήμα 6.4** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του λόγου $A_{SSI} = \overline{PGA}_{SSI} / \overline{PGA}_{rigid}$ συναρτήσει του T_{SSI} και του λόγου T_{SSI}/T_{exc} .



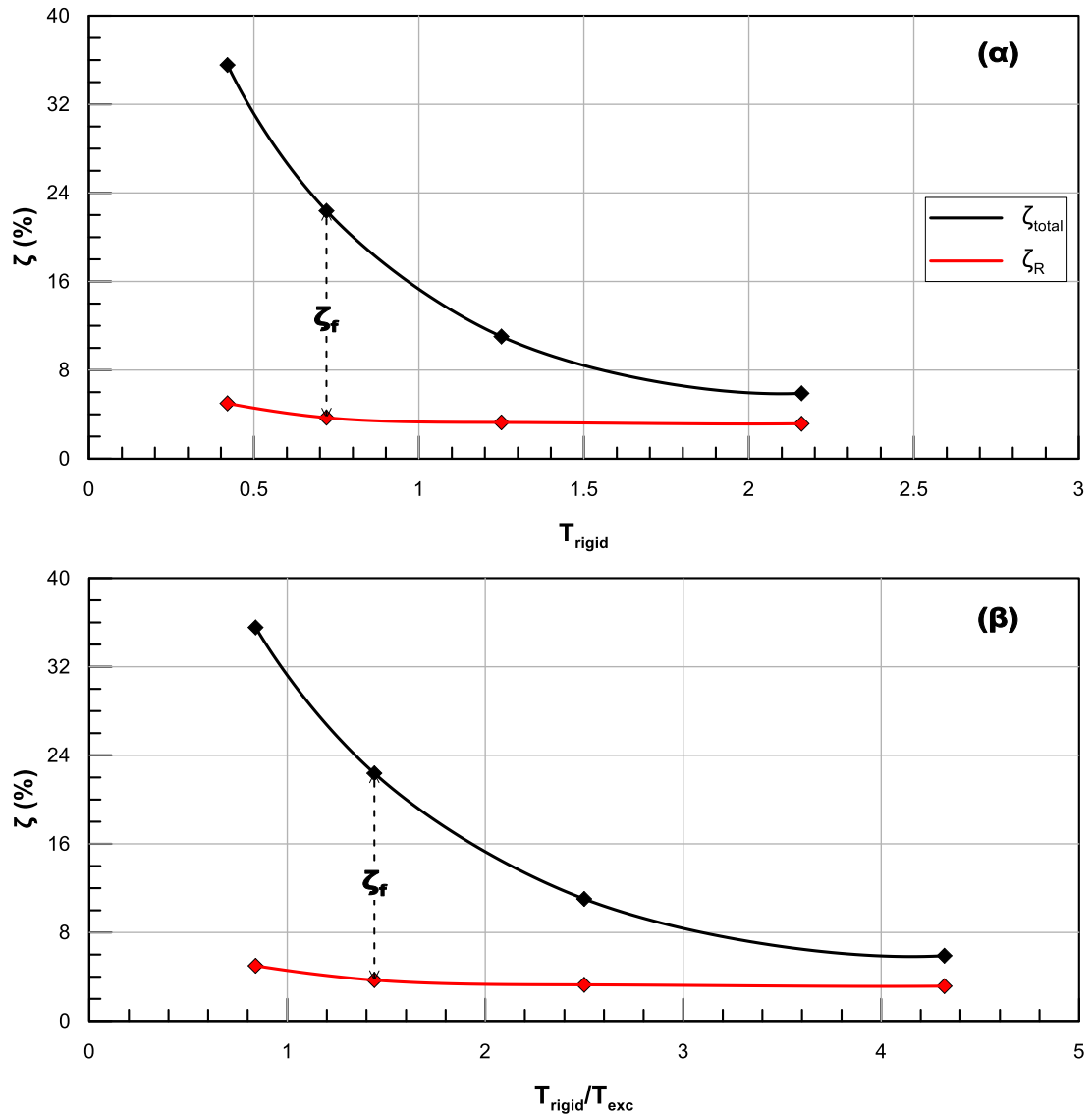
Σχήμα 6.4: Λόγος A_{SSI} συναρτήσει της ιδιοπερίοδου του προσομοιώματος αλληλεπίδρασης εδάφους θεμελίωσης-ανωδομής T_{SSI} και του λόγου T_{SSI}/T_{exc}

Όσον αφορά στην ιδιοπερίοδο, στο **Σχήμα 6.5** παρουσιάζεται ο λόγος T_{SSI}/T_{rigid} συναρτήσει της ιδιοπερίοδου T_{SSI} και του λόγου T_{SSI}/T_{exc} , όπου T_{exc} η ιδιοπερίοδος της διέγερσης. Μέσω των αναλύσεων επιβεβαιώνεται ότι αυξανόμενης της δυσκαμψίας της ανωδομής το σύστημα αλληλεπίδρασης που προκύπτει είναι περισσότερο εύκαμπο σε σχέση με το αντίστοιχο πακτωμένο συστήματα κάθε περίπτωσης.

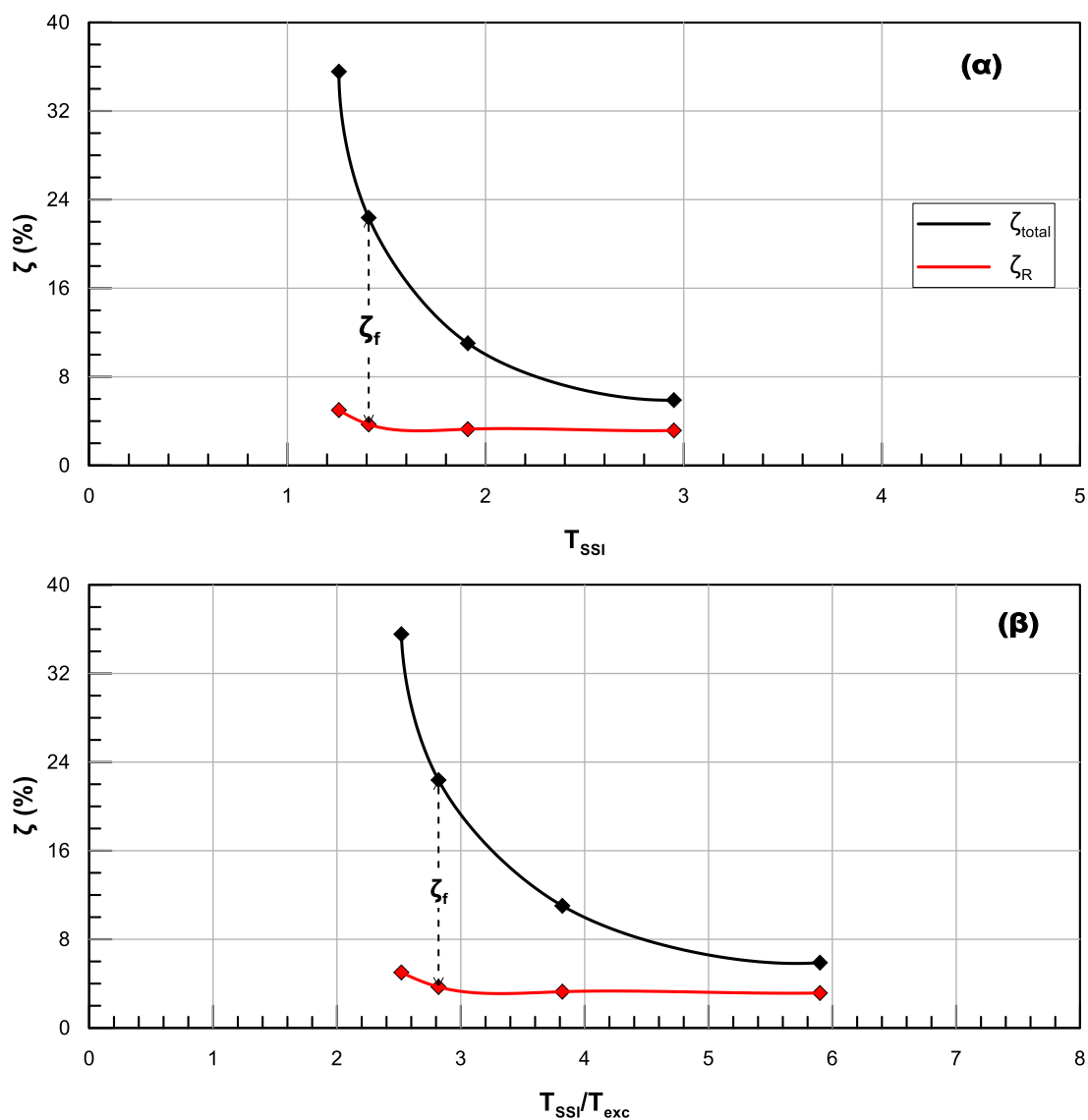


Σχήμα 6.5: Διάγραμμα του λόγου T_{SSI}/T_{rigid} συναρτήσει α) της ιδιοπεριόδου T_{SSI} και β) του λόγου T_{SSI}/T_{exc}

Σχετικά με την απόσβεση του συστήματος και τη συμβολή της θεμελίωσης σε αυτή, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων στα παρακάτω Σχήματα. Στο **Σχήμα 6.6** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των συνιστωσών της απόσβεσης συναρτήσει της ιδιοπεριόδου του προσομοιώματος πακτωμένης βάσης T_{rigid} και του λόγου T_{rigid}/T_{exc} . Στο **Σχήμα 6.7** παρουσιάζεται η απόσβεση συναρτήσει του T_{SSI} και του λόγου T_{SSI}/T_{exc} . Παρατηρείται ότι πλησιάζοντας στο συντονισμό η συνεισφορά της θεμελίωσης στην συνολική απόσβεση του συστήματος αυξάνεται.



Σχήμα 6.6: Διάγραμμα της απόσβεσης ζ (%) συναρτήσει α) της ιδιοπεριόδου T_{rigid} και β) του λόγου T_{rigid}/T_{exc}



Σχήμα 6.7: Διάγραμμα της απόσβεσης ζ (%) συναρτήσει α) της ιδιοπεριόδου T_{SSI} και β) του λόγου T_{SSI}/T_{exc}

Επιρροή επιμέρους συνιστωσών απόσβεσης. Για τον έλεγχο της συνεισφοράς κάθε συνιστώσας της εδαφικής απόσβεσης (υστερητική απόσβεση και απόσβεση ακτινοβολίας), πραγματοποιούνται 3 επιπλέον αναλύσεις δυναμικής απόκρισης για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση δυσκαμψίας της ανωδομής. Το προσομοίωμα περιλαμβάνει τα στοιχεία της βασικής ανάλυσης για την αλληλεπίδραση ανεμογεννήτριας - θεμελίωσης, όπως παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Η διαφοροποίηση έγκειται στον τρόπο με τον οποίο προσομοιώνεται η εδαφική αντίδραση. Στην πρώτη ανάλυση δεν λαμβάνεται υπόψη η απόσβεση ακτινοβολίας, δηλαδή η ανάλυση γίνεται χωρίς τους αποσβεστήρες στους αντίστοιχους κόμβους. Στη δεύτερη ανάλυση δεν λαμβάνεται υπόψη η υστερητική απόσβεση, δηλαδή η ανάλυση γίνεται χωρίς να εφαρμόζεται ο κανόνας του Masing στα ελατήρια. Τέλος στην τρίτη περίπτωση δεν λαμβάνεται υπόψη ούτε η υστερητική απόσβεση

ούτε η απόσβεση ακτινοβολίας, δηλαδή η ανάλυση γίνεται χωρίς τον κανόνα του Masing στα ελατήρια και χωρίς τους αποσβεστήρες στους αντίστοιχους κόμβους.

Λαμβάνοντας την ημιδιαφορά των μέγιστων θετικών και αρνητικών τιμών στα αντίστοιχα διαγράμματα των Σχημάτων του Παραρτήματος προκύπτει η μέση τιμή του εύρους της επιτάχυνσης \overline{PGA} για τις αναλύσεις. Στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 6.3) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών. Οι όροι \overline{PGA}_{hyst} , \overline{PGA}_{rad} και \overline{PGA}_{none} εκφράζουν το μέσο εύρος της επιτάχυνσης του προσομοιώματος αλληλεπίδρασης εδάφους – κατασκευής για την ανάλυση χωρίς απόσβεση ακτινοβολίας, για ανάλυση χωρίς υστερητική απόσβεση και για ανάλυση χωρίς καμία μορφή απόσβεσης αντίστοιχα.

Πίνακας 6.3: Επίδραση εδαφικών ελατηρίων/αποσβεστήρων στην επιτάχυνση της μάζας (Άμμος μέσης πυκνότητας)

Δυσκαμψία ανωδομής	\overline{PGA}_{rigid} (g)	\overline{PGA}_{SSI} (g)	\overline{PGA}_{hyst} (g)	\overline{PGA}_{rad} (g)	\overline{PGA}_{none} (g)
K_o	0.22	0.10	0.10	0.10	0.09
3K_o	0.30	0.12	0.15	0.12	0.14
9K_o	0.95	0.30	0.31	0.30	0.32
27K_o	2.10	0.92	1.08	0.94	1.11

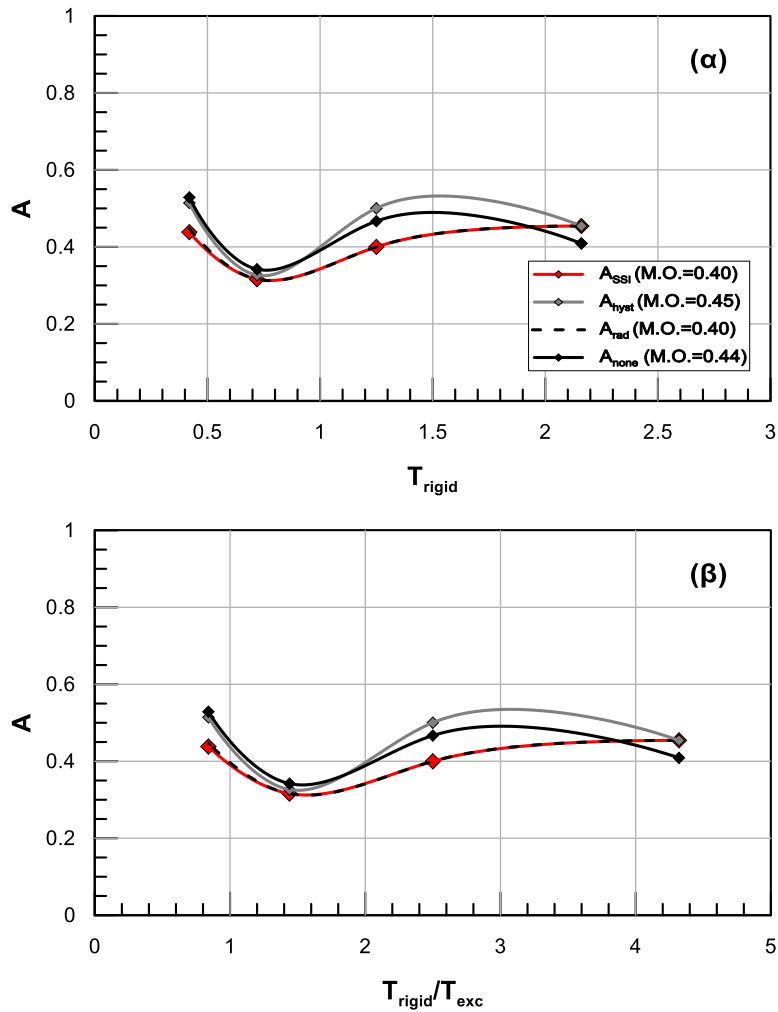
Τα αποτελέσματα των 2 πρώτων περιπτώσεων αναλύσης σχετικά με την ιδιοπερίοδο και την απόσβεση παρουσιάζονται στον Πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 6.4). Ο όρος T_{SSI} αντιπροσωπεύει την ιδιοπερίοδο του συστήματος αλληλεπίδρασης, ο όρος ζ_{hyst} αντιστοιχεί στην συνολική απόσβεση του συστήματος της ανάλυσης χωρίς απόσβεση ακτινοβολίας, ο όρος ζ_{rad} αντιστοιχεί στην συνολική απόσβεση του συστήματος της ανάλυσης χωρίς υστερητική απόσβεση, ο όρος Δz εκφράζει στην συνεισφορά στην απόσβεση της θεμελίωσης ζ_f (Πίνακας 6.2) και ο όρος ζ_R αφορά την απόσβεση Rayleigh του συστήματος.

Πίνακας 6.4: Επίδραση εδαφικών ελατηρίων/αποσβεστήρων στην ιδιοπερίοδο ταλάντωσης και στο λόγο απόσβεσης του συστήματος (Άμμος μέσης πυκνότητας)

Δυσκαμψία ανωδομής	Ανάλυση χωρίς απόσβεση ακτινοβολίας (ρ - γ)				Ανάλυση χωρίς υστερητική απόσβεση (c)			
	T_{SSI} (sec)	ζ_R (%)	ζ_{hyst} (%)	$\Delta\zeta$ (%)	T_{SSI} (sec)	ζ_R (%)	ζ_{rad} (%)	$\Delta\zeta$ (%)
K_0	2.96	3.15	3.17	0.02	2.94	3.14	5.89	2.75
$3K_0$	1.95	3.30	3.32	0.02	1.91	3.27	11	7.73
$9K_0$	1.45	3.77	3.78	0.01	1.41	3.70	22.36	18.66
$27K_0$	1.25	5.00	5.04	0.04	1.26	5.00	35.54	30.54

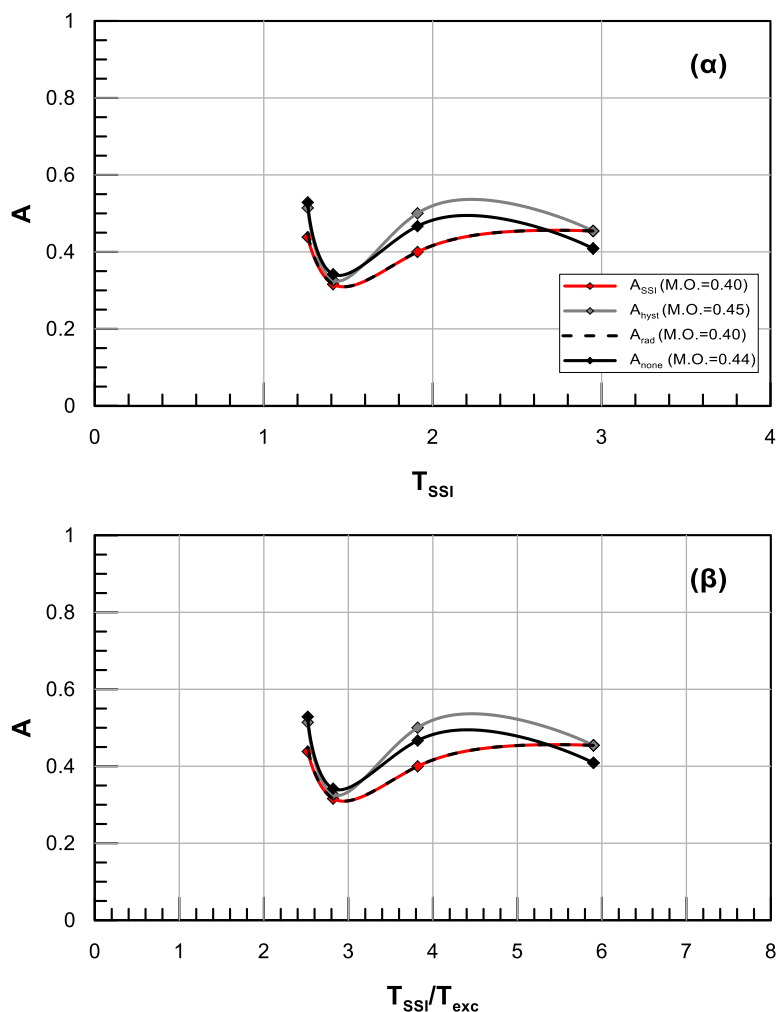
Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Για την καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του εύρους της επιτάχυνσης στην κορυφή του πύργου κατά την εξαναγκασμένη ταλάντωση ορίζονται οι λόγοι $A_{hyst} = \overline{PGA}_{hyst} / \overline{PGA}_{rigid}$, $A_{rad} = \overline{PGA}_{rad} / \overline{PGA}_{rigid}$ και $A_{none} = \overline{PGA}_{none} / \overline{PGA}_{rigid}$. Στο **Σχήμα 6.8** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των λόγων A_{SSI} , A_{hyst} , A_{rad} και A_{none} συναρτήσει της ιδιοπεριόδου του προσομοιώματος πακτωμένης βάσης T_{rigid} και του λόγου T_{rigid}/T_{exc} .



Σχήμα 6.8: Διάγραμμα του λόγου A συναρτήσει α) της ιδιοπεριόδου T_{rigid} και β) του λόγου T_{rigid}/T_{exc}

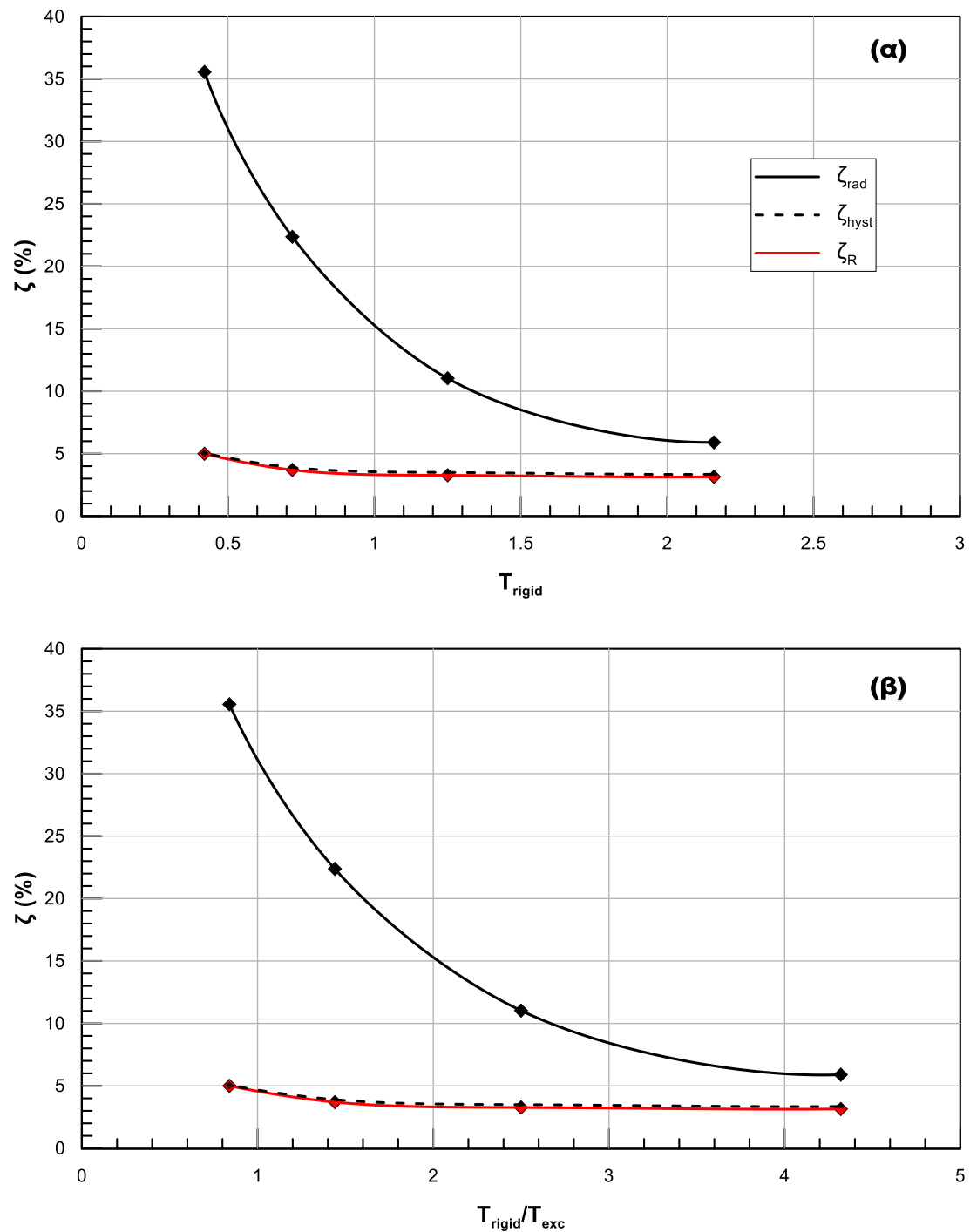
Στο Σχήμα 6.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των λόγων A_{SSI} , A_{hyst} , A_{rad} και A_{none} συναρτήσει της ιδιοπεριόδου του προσομοιώματος πακτωμένης βάσης T_{SSI} και του λόγου T_{SSI}/T_{exc} .



Σχήμα 6.9: Διάγραμμα του λόγου A συναρτήσει α) της ιδιοπεριόδου T_{SSI} και β) του λόγου T_{SSI}/T_{exc}

Όσον αφορά στην ιδιοπερίοδο, επισημαίνεται ότι, όπως παρουσιάζεται στους παραπάνω Πίνακες (**Πίνακας 6.2**, **Πίνακας 6.4**) η ιδιοπερίοδος ταλάντωσης του πλήρους συστήματος T_{SSI} είναι η ίδια ανεξάρτητα από τους διάφορους συνδυασμούς ελατηρίων και αποσβεστήρων που εξετάστηκαν ($p-\gamma$ & c , $p-\gamma$, c).

Προκειμένου να γίνει καλύτερα αισθητή η συμβολή κάθε συνιστώσας της εδαφικής απόσβεσης παρουσιάζονται τα αποτελέσματα στο **Σχήμα 6.10**. Σε αυτό παρουσιάζονται η απόσβεση της ανωδομής Rayleigh (**Πίνακας 6.4**) και οι αντίστοιχες τιμές των συνιστωσών της απόσβεσης του εδάφους ζ_{hyst} και ζ_{rad} (**Πίνακας 6.4**). Μέσω των δυναμικών αναλύσεων επιβεβαιώνεται η παρατήρηση του Κεφαλαίου 5 σχετικά με την κυρίαρχη συμβολή της απόσβεσης ακτινοβολίας (ζ_{rad}) στην επιρροή της θεμελίωσης στο σύστημα της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας. Μάλιστα, όπως φαίνεται από την παρούσα διερεύνηση, η συμβολή της απόσβεσης ακτινοβολίας γίνεται ακόμη πιο σημαντική καθώς αυξάνεται η δυσκαμψία της ανωδομής της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 6.10: Διάγραμμα της συνεισφοράς των συνιστωσών της εδαφικής απόσβεσης ζ (συναρτήσει α) της ιδιοπεριόδου T_{rigid} και β) του λόγου T_{rigid}/T_{exc}

6.3 Επίδραση εδάφους θεμελίωσης

Σε αυτό το σημείο πραγματοποιείται έλεγχος της επίδρασης των εδαφικών συνθηκών στην αλληλεπίδραση εδάφους-πασσάλου-ανωδομής της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας. Για την εκτίμηση της επίδρασης αυτής πραγματοποιούνται δυναμικές αναλύσεις απόκρισης του συστήματος στα 4 εδαφικά προφίλ που παρουσιάστηκαν στην υποενότητα 4.4.1 της

παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Συγκεκριμένα εξετάζονται τα εξής εδαφικά προφίλ: Πυκνή άμμος, Μαλακή άργιλος και Στιφρή άργιλος. Τα αποτελέσματα της δυναμικής ανάλυσης για το προφίλ της Μαλακής άμμου παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5 και θα παρατεθούν συγκριτικά με τα αποτελέσματα των υπόλοιπων αναλύσεων. Ως ενδεικτικό μέγεθος των εδαφικών χαρακτηριστικών επιλέγεται η ιδιοπερίοδος του εδάφους, τόσο η ελαστική $T_{s,el}$ όσο και η ανελαστική $T_{s,unel}$. Ο υπολογισμός των ιδιοπεριοδών αυτών γίνεται μέσω της σχέσης:

$$T_{s,i} = \frac{4 \cdot H}{V_{sm,i}} \quad (6.3)$$

όπου:

H: πάχος του εδαφικού στρώματος = 50 m

$V_{sm,i}$: μέση ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων στο στρώμα. Η ταχύτητα αυτή υπολογίζεται μέσω της κατανομής της αρχικής ταχύτητας διάδοσης διατμητικών κυμάτων ($V_{s,in}$) με το βάθος για τον υπολογισμό της ελαστικής ιδιοπεριόδου ($T_{s,el}$) ενώ για τον υπολογισμό της ανελαστικής ιδιοπεριόδου ($T_{s,unel}$) χρησιμοποιείται η κατανομή της τελικής ταχύτητας διάδοσης διατμητικών κυμάτων ($V_{s,f}$) με το βάθος.

Ο υπολογισμός της κατανομής της αρχικής ταχύτητας διάδοσης διατμητικών κυμάτων ($V_{s,in}$) με το βάθος περιγράφεται αναλυτικά στην υποενότητα 5.5.1 του προηγούμενου κεφαλαίου και βασίζεται στις εμπειρικές σχέσεις των Ohta & Goto (1978) και Imai & Tonouchi (1982). Για λόγους πληρότητας ο **Πίνακας 6.5** παρουσιάζει τις τιμές των σταθερών A,B και C για τον υπολογισμό των ταχυτήτων στα υπό εξέταση εδαφικά προφίλ. Η κατανομή της τελικής ταχύτητας διάδοσης διατμητικών κυμάτων ($V_{s,f}$) με το βάθος μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας το ελεύθερο λογισμικό ανοικτού κώδικα Strata (Kottke & Rathje 2008), όπως περιγράφηκε αναλυτικά στην υποενότητα 5.5.2.

Πίνακας 6.5: Προσδιορισμός σταθερών για κάθε είδος εδάφους

	A	B	C	Έδαφος
Ohta & Goto (1976)	79	0.17	0.25	Άργιλοι
	86	0.17	0.25	Άμμοι
	91	0.17	0.25	Χονδρόκοκκες Άμμοι και Αμμοχάλικα
	115	0.17	0.25	Χάλικες
Imai & Tonuchi (1981)	118	0.266	-	Άργιλοι και Μάργες
	99	0.284	-	Άμμοι και Αμμοχάλικα

Ο προσδιορισμός της μέσης ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων στο στρώμα γίνεται μέσω της σχέσης:

$$V_{sm,i} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (6.4)$$

όπου:

h_i : πάχος των επιμέρους στρώσεων που έχει χωριστεί το στρώμα και στις οποίες αντιστοιχεί μια συγκεκριμένη τιμή (V_{si}) από την κατανομή της ταχύτητας διάδοσης διατμητικών κυμάτων (V_s) με το βάθος = 2m

t_i : χρόνος που απαιτείται ώστε να «διανύσει» κάθε ταχύτητα V_{si} την κάθε στρώση h_i και προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$t_i = \frac{V_{si}}{h_i} \quad (6.5)$$

Η διερεύνηση πραγματοποιείται για τυπική ανεμογεννήτρια 5-MW, όπως αυτή περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4 με τη διαφοροποίηση ότι λαμβάνεται δυσκαμψία τριπλάσια από την αρχική ($3K_0$) σύμφωνα με όσα περιγράφηκαν στην παράγραφο 6.2. Η τυπική ανεμογεννήτρια 5-MW είναι θεμελιωμένη σε μονοπάσσαλο για κάθε ένα από τα 4 υπό εξέταση εδαφικά προφίλ και το αριθμητικό προσομοίωμα του συστήματος ανωδομής-θεμελίωσης περιγράφεται λεπτομερώς στην υποενότητα 5.2.2 του Κεφαλαίου 5 και παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6.2**. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης εδάφους – πασσάλου χρησιμοποιούνται οι καμπύλες οριζόντιας δύναμης-μετατόπισης ($p - \gamma$) που προτείνονται από το API (2002) σε συνδυασμό με τον

νόμο του Masing για τον ορισμό των ελατηρίων κατά μήκος του πασσάλου. Για την απόσβεση ακτινοβολίας τοποθετούνται αποσβεστήρες, οι συντελεστές c_r των οποίων ορίζονται από τις σχέσεις των Gazetas & Dobry (1984). Ο ορισμός των κατανεμημένων ελατηρίων και αποσβεστήρων περιγράφεται λεπτομερώς στις υποενότητες 5.2.4 και 5.2.5 του Κεφαλαίου 5.

Η σεισμική διέγερση για την οποία πραγματοποιούνται οι δυναμικές αναλύσεις είναι περιόδου $T=0.50$ sec με μέγιστη εδαφική επιτάχυνση $PGA=0.50g$ και περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 5.2.3 του Κεφαλαίου 5. Για την ανάλυση εδαφικής σεισμικής απόκρισης, η σεισμική διέγερση επιβάλλεται στην ελεύθερη επιφάνεια του σεισμικού υποβάθρου και τα αποτελέσματα της παρουσιάζονται στην υποενότητα 5.5.2 του Κεφαλαίου 5.

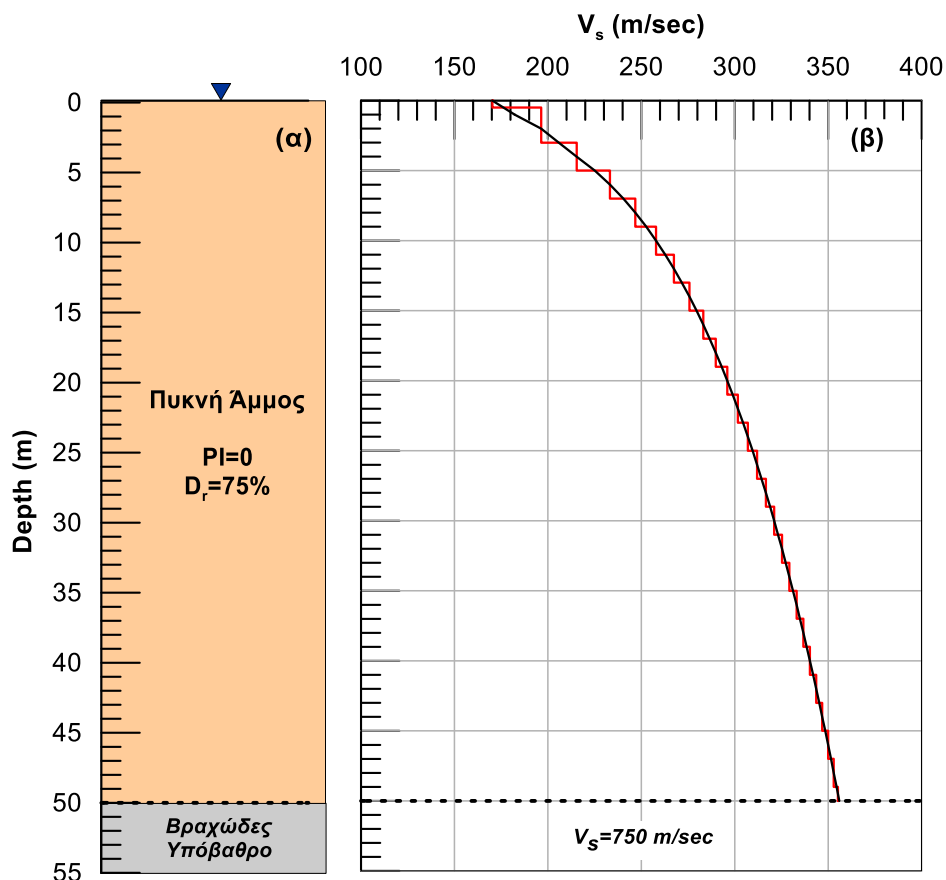
Για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων υπολογίζεται η ιδιοπερίοδος και η απόσβεση του προσομοιώματος αλληλεπίδρασης εδάφους – κατασκευής για τα 4 εδαφικά προφίλ. Για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών αυτών χρησιμοποιείται η μεθοδολογία που παρουσιάζεται στο βιβλίο του Chorga (2007) όπως παρουσιάζεται στην παράγραφο 5.3 του Κεφαλαίου 5. Στις παρούσες αναλύσεις η απόσβεση της ανωδομής της ανεμογεννήτριας εισάγεται στο προσομοίωμα ως απόσβεση τύπου Rayleigh με ελάχιστο λόγο υστερητικής απόσβεσης 3% για περίοδο ίση με την ιδιοπερίοδο του μονοβάθμιου ταλαντωτή.

Επιπλέον, πραγματοποιούνται 3 επιπλέον αναλύσεις δυναμικής απόκρισης για τον έλεγχο της συνεισφοράς κάθε συνιστώσας της εδαφικής απόσβεσης (υστερητική απόσβεση και απόσβεση ακτινοβολίας). Το προσομοίωμα περιλαμβάνει τα στοιχεία της βασικής ανάλυσης για την αλληλεπίδραση ανεμογεννήτριας - θεμελίωσης, όπως παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Η διαφοροποίηση έγκειται στον τρόπο με τον οποίο προσομοιώνεται η εδαφική αντίδραση. Στην πρώτη ανάλυση δεν λαμβάνεται υπόψη η απόσβεση ακτινοβολίας, στη δεύτερη ανάλυση δεν λαμβάνεται υπόψη η υστερητική απόσβεση, ενώ τέλος στην τρίτη δεν λαμβάνεται υπόψη ούτε η υστερητική απόσβεση ούτε η απόσβεση ακτινοβολίας.

6.3.1 Πυκνή άμμος

Σε αυτή την περίπτωση ανάλυσης θεωρείται ότι το έδαφος αποτελείται από πυκνή άμμο με σχετική πυκνότητα $D_r=75\%$ και γωνία τριβής $\phi=40^\circ$. Επιπλέον, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4, για τη θεμελίωση σε αυτό το εδαφικό προφίλ απαιτείται πάσσαλος με διάμετρο $B=6$ m και μήκος $L=28$ m. Η ελαστική ιδιοπερίοδος του στρώματος της πυκνής άμμου υπολογίστηκε σύμφωνα με τη σχέση (6.3) ίση με $T_{s,el}=0.69$ sec ενώ η ανελαστική

ιδιοπερίοδος σύμφωνα με τη σχέση (6.3) ίση με $T_{s,unel}=1.82$ sec. Το προφίλ της ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών (διατμητικών) κυμάτων V_s παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6.11**.



Σχήμα 6.11: (α) Εδαφικό προφίλ πυκνής άμμου (β) Κατανομή ταχύτητας διάδοσης (V_s) με το βάθος.

Αποτελέσματα δυναμικών αναλύσεων. Η απόκριση της ανεμογεννήτριας μπορεί να ποσοτικοποιηθεί ενδεικτικά με το εύρος της επιτάχυνσης στην κορυφή του πύργου κατά την εξαναγκασμένη ταλάντωση. Λαμβάνοντας την ημιδιαφορά των μέγιστων θετικών και αρνητικών τιμών στο αντίστοιχο διάγραμμα διαγράμματα των Σχημάτων του Παραρτήματος προκύπτει η μέση τιμή του εύρους της επιτάχυνσης \overline{PGA} για την περίπτωση της πυκνής άμμου, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζει ο **Πίνακας 6.6**.

Πίνακας 6.6: Αποτελέσματα \overline{PGA} των δυναμικών αναλύσεων για το προφίλ της πυκνής άμμου

Σύστημα	$\overline{PGA}(g)$
Πλήρες	0.13
Χωρίς υστερητική απόσβεση	0.13
Χωρίς απόσβεση ακτινοβολίας	0.17
Χωρίς απόσβεση	0.16

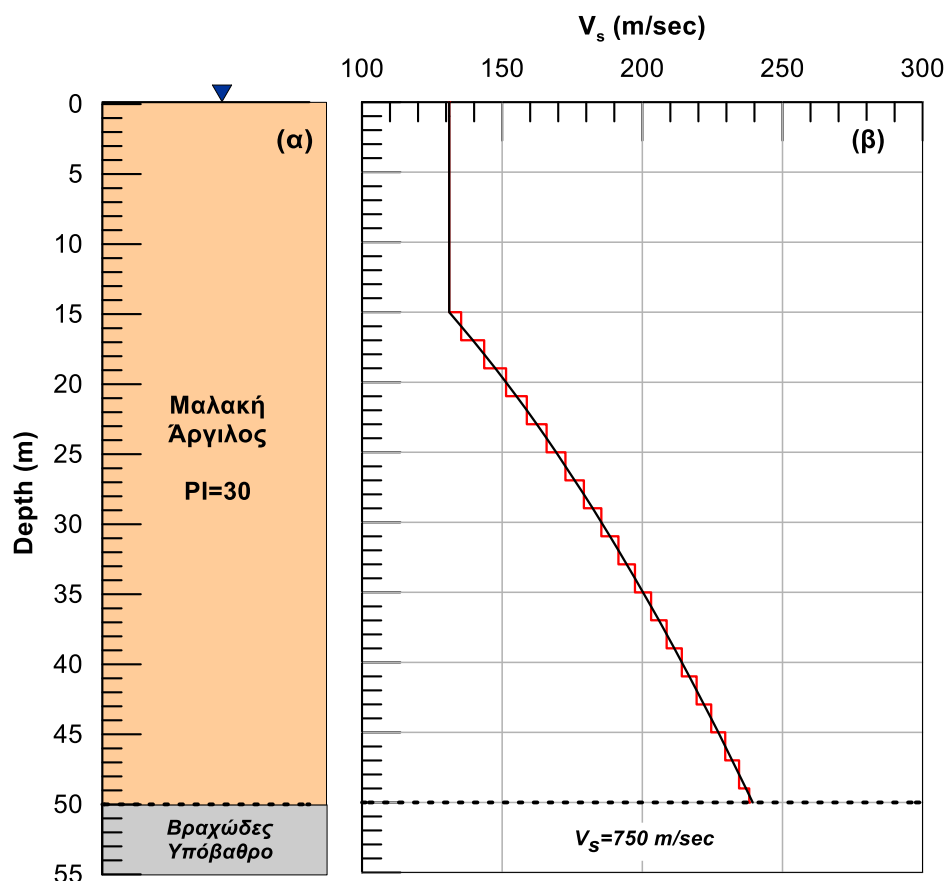
Ο **Πίνακας 6.7** παρουσιάζει τα αποτελέσματα των δυναμικών αναλύσεων, τόσο για το πλήρες σύστημα αλληλεπίδρασης ανωδομής-θεμελίωσης όσο και για τις 2 πρώτες αναλύσεις δυναμικής απόκρισης για τον έλεγχο της συνεισφοράς κάθε συνιστώσας της εδαφικής απόσβεσης. Υπενθυμίζεται ότι ο όρος T_{SSI} αντιστοιχεί στην ιδιοπερίοδο του συστήματος αλληλεπίδρασης, ο όρος ζ_{total} αντιστοιχεί στην συνολική απόσβεση του συστήματος, ο όρος ζ_f αντιστοιχεί στην απόσβεση θεμελίωσης, ο όρος ζ_R αντιστοιχεί στην απόσβεση Rayleigh του συστήματος, όρος ζ_{hyst} αντιστοιχεί στην υστερητική απόσβεση του συστήματος και ο όρος ζ_{rad} αντιστοιχεί στην απόσβεση ακτινοβολίας του συστήματος.

Πίνακας 6.7: Αποτελέσματα δυναμικών αναλύσεων για το προφίλ της πυκνής άμμου

Σύστημα	T_{SSI} (sec)	ζ_R (%)	ζ_{hyst} (%)	ζ_{rad} (%)	ζ_f (%)	ζ_{total} (%)
Πλήρες	1.83	3.22	-	-	4.30	7.52
Χωρίς υστερητική απόσβεση	1.83	3.22	-	4.30	4.30	7.52
Χωρίς απόσβεση ακτινοβολίας	1.84	3.23	0.01	-	0.01	3.24

6.3.2 Μαλακή άργιλος

Σε αυτή την περίπτωση θεωρήθηκε ότι το έδαφος αποτελείται από κανονικά στερεοποιημένη άργιλο (NC) σε όλο το βάθος, με εξαίρεση τα πρώτα 15 m από την επιφάνεια για τα οποία θεωρήθηκε ελαφρά προ-φόρτιση. Επιπλέον, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4, για τη θεμελίωση σε αυτό το εδαφικό προφίλ απαιτείται πάσσαλος με διάμετρο $B=6$ m και μήκος $L=36$ m. Η ελαστική ιδιοπερίοδος του στρώματος της μαλακής αργίλου υπολογίστηκε σύμφωνα με τη σχέση (6.3) ίση με $T_{s,el}=1.21$ sec ενώ η ανελαστική ιδιοπερίοδος σύμφωνα με τη σχέση (6.3) ίση με $T_{s,inel}=2.36$ sec. Το προφίλ της ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών (διατμητικών) κυμάτων V_s παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6.12**.



Σχήμα 6.12: (α) Εδαφικό προφίλ μαλακής αργίλου (β) Κατανομή ταχύτητας διάδοσης (V_s) με το βάθος.

Αποτελέσματα δυναμικών αναλύσεων. Η απόκριση της ανεμογεννήτριας μπορεί να ποσοτικοποιηθεί ενδεικτικά με το εύρος της επιτάχυνσης στην κορυφή του πύργου κατά την εξαναγκασμένη ταλάντωση. Λαμβάνοντας την ημιδιαφορά των μέγιστων θετικών και αρνητικών τιμών στο αντίστοιχο διάγραμμα των Σχημάτων του Παραρτήματος προκύπτει η μέση τιμή του εύρους της επιτάχυνσης \overline{PGA} για την περίπτωση της μαλακής αργίλου, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζει ο Πίνακας 6.8.

Πίνακας 6.8: Αποτελέσματα \overline{PGA} των δυναμικών αναλύσεων για το προφίλ της μαλακής αργίλου

Σύστημα	$\overline{PGA}(g)$
Πλήρες	0.16
Χωρίς υστερητική απόσβεση	0.15
Χωρίς απόσβεση ακτινοβολίας	0.22
Χωρίς απόσβεση	0.21

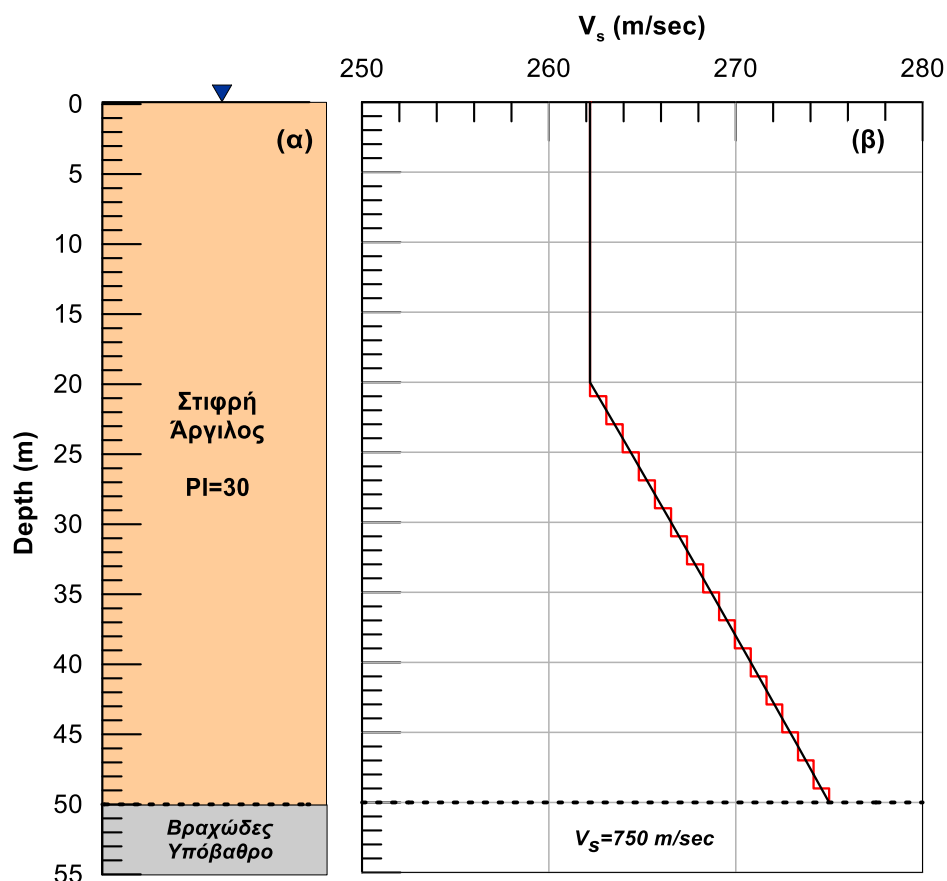
Ο **Πίνακας 6.9** παρουσιάζει τα αποτελέσματα των δυναμικών αναλύσεων, τόσο για το πλήρες σύστημα αλληλεπίδρασης ανωδομής-θεμελίωσης όσο και για τις 2 πρώτες αναλύσεις δυναμικής απόκρισης για τον έλεγχο της συνεισφοράς κάθε συνιστώσας της εδαφικής απόσβεσης.

Πίνακας 6.9: Αποτελέσματα δυναμικών αναλύσεων για το προφίλ της μαλακής αργίλου

Σύστημα	T_{SSI} (sec)	ζ_R (%)	ζ_{hyst} (%)	ζ_{rad} (%)	ζ_f (%)	ζ_{total} (%)
Πλήρες	1.97	3.32	-	-	10.45	13.77
Χωρίς υστερητική απόσβεση	1.97	3.32	-	10.48	10.48	13.80
Χωρίς απόσβεση ακτινοβολίας	2.05	3.37	0.01	-	0.01	3.38

6.3.3 Στιφρή άργιλος

Σε αυτή την περίπτωση θεωρήθηκε ότι το έδαφος αποτελείται από προ-φορτισμένη άργιλο βάθους 60 m. Σε μεγαλύτερα βάθη θεωρήθηκε βαθμός προ-φόρτισης $OCR=1$. Επιπλέον, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4, για τη θεμελίωση σε αυτό το εδαφικό προφίλ απαιτείται πάσσαλος με διάμετρο $B=6$ m και μήκος $L=22$ m. Η ελαστική ιδιοπερίοδος του στρώματος της στιφρής αργίλου υπολογίστηκε σύμφωνα με τη σχέση (6.3) ίση με $T_{s,el}=0.74$ sec ενώ η ανελαστική ιδιοπερίοδος σύμφωνα με τη σχέση (6.3) ίση με $T_{s,inel}=1.09$ sec. Το προφίλ της ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών (διατμητικών) κυμάτων V_s παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6.13**.



Σχήμα 6.13: (α) Εδαφικό προφίλ στιφρής αργίλου (β) Κατανομή ταχύτητας διάδοσης (V_s) με το βάθος.

Αποτελέσματα δυναμικών αναλύσεων. Η απόκριση της ανεμογεννήτριας μπορεί να ποσοτικοποιηθεί ενδεικτικά με το εύρος της επιτάχυνσης στην κορυφή του πύργου κατά την εξαναγκασμένη ταλάντωση. Λαμβάνοντας την ημιδιαφορά των μέγιστων θετικών και αρνητικών τιμών στο αντίστοιχο διάγραμμα των Σχημάτων του Παραρτήματος προκύπτει η μέση τιμή του εύρους της επιτάχυνσης \overline{PGA} για την περίπτωση της στιφρής αργίλου, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζει ο Πίνακας 6.10.

Πίνακας 6.10: Αποτελέσματα \overline{PGA} των δυναμικών αναλύσεων για το προφίλ της στιφρής αργίλου

Σύστημα	$\overline{PGA}(g)$
Πλήρες	0.19
Χωρίς υστερητική απόσβεση	0.20
Χωρίς απόσβεση ακτινοβολίας	0.23
Χωρίς απόσβεση	0.22

Ο **Πίνακας 6.11** παρουσιάζει τα αποτελέσματα των δυναμικών αναλύσεων, τόσο για το πλήρες σύστημα αλληλεπίδρασης ανωδομής-θεμελίωσης όσο και για τις 2 πρώτες αναλύσεις δυναμικής απόκρισης για τον έλεγχο της συνεισφοράς κάθε συνιστώσας της εδαφικής απόσβεσης.

Πίνακας 6.11: Αποτελέσματα δυναμικών αναλύσεων για το προφίλ της στιφρής αργίλου

Σύστημα	T_{SSI} (sec)	ζ_R (%)	ζ_{hyst} (%)	ζ_{rad} (%)	ζ_f (%)	ζ_{total} (%)
Πλήρες	2.05	3.37	-	-	11.14	14.51
Χωρίς υστερητική απόσβεση	2.05	3.37	-	11.14	11.14	14.51
Χωρίς απόσβεση ακτινοβολίας	2.10	3.41	0.01	-	0.01	3.42

6.3.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα των δυναμικών αναλύσεων για το πλήρες σύστημα θεμελίωσης σχετικά με το εύρος της επιτάχυνσης \overline{PGA}_{SSI} στην κορυφή του πύργου της ανεμογεννήτριας στην εξαναγκασμένη ταλάντωση παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα (**Πίνακας 6.12**).

Πίνακας 6.12: Αποτελέσματα \overline{PGA}_{SSI} δυναμικών αναλύσεων για τα επιμέρους εδαφικά προφίλ

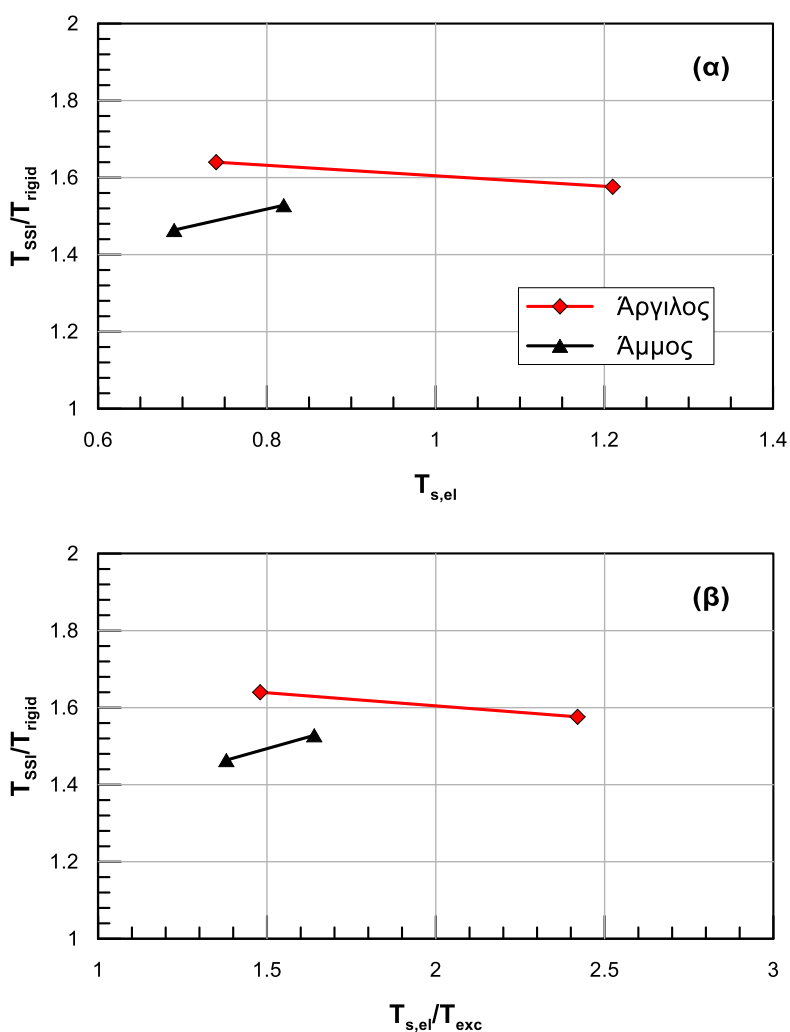
Σύστημα	\overline{PGA}_{SSI} (g)
Άμμος Μέσης Πυκνότητας	0.12
Πυκνή Άμμος	0.13
Μαλακή Άργιλος	0.16
Στιφρή Άργιλος	0.19

Ο **Πίνακας 6.13** παρουσιάζει τα αποτελέσματα των δυναμικών αναλύσεων για το πλήρες σύστημα θεμελίωσης, δηλαδή τόσο με υστερητική απόσβεση όσο και με απόσβεση θεμελίωσης, για τα 4 εδαφικά προφίλ. Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για το εδαφικό προφίλ της άμμου μέσης πυκνότητας παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5. Η ελαστική ιδιοπερίοδος του στρώματος άμμου μέσης πυκνότητας υπολογίστηκε σύμφωνα με τη σχέση (6.3) ίση με $T_{s,el}=0.82$ sec ενώ η ανελαστική ιδιοπερίοδος σύμφωνα με τη σχέση (6.3) ίση με $T_{s,inel}=2.27$ sec.

Πίνακας 6.13: Αποτελέσματα δυναμικών αναλύσεων ως προς την ιδιοπερίοδο και την απόσβεση του πλήρους συστήματος για τα διάφορα εδαφικά προφίλ

Σύστημα	T_{SSI} (sec)	ζ_R (%)	ζ_i (%)	ζ_{total} (%)
Άμμος Μέσης Πυκνότητας	1.91	3.30	7.73	11.03
Πυκνή Άμμος	1.83	3.22	4.30	7.52
Μαλακή Άργιλος	1.97	3.32	10.45	13.77
Στιφρή Άργιλος	2.05	3.37	11.14	14.51

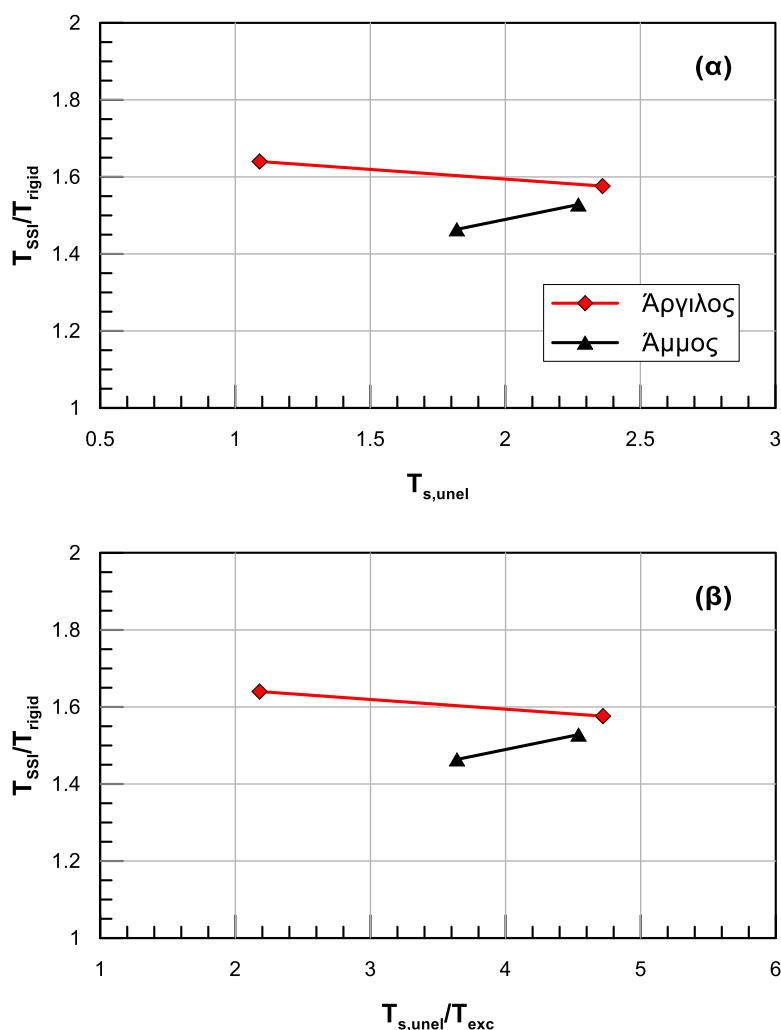
Για την καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της ιδιοπεριόδου στο **Σχήμα 6.14** παρουσιάζεται ο λόγος της ιδιοπεριόδου του συστήματος αλληλεπίδρασης θεμελίωσης-ανωδομής προς την ιδιοπερίοδο της ανωδομής (T_{SSI}/T_{rigid}) συναρτήσει της ελαστικής ιδιοπεριόδου του εδάφους ($T_{s,el}$) (**Σχήμα 6.14α**) και του λόγου $T_{s,el}/T_{exc}$ (**Σχήμα 6.14β**), όπου T_{exc} η ιδιοπερίοδος της διέγερσης.



Σχήμα 6.14: Λόγος T_{SSI}/T_{rigid} συναρτήσει α) της ελαστικής ιδιοπεριόδου του εδάφους $T_{s,el}$ και β) του λόγου $T_{s,el}/T_{exc}$

Στο παραπάνω Σχήμα φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η ελαστική ιδιοπερίοδος του εδάφους ($T_{s,el}$) αυξάνεται η ιδιοπερίοδος του συστήματος (T_{SSI}) για αμμώδες έδαφος ενώ μειώνεται για αργιλικό έδαφος.

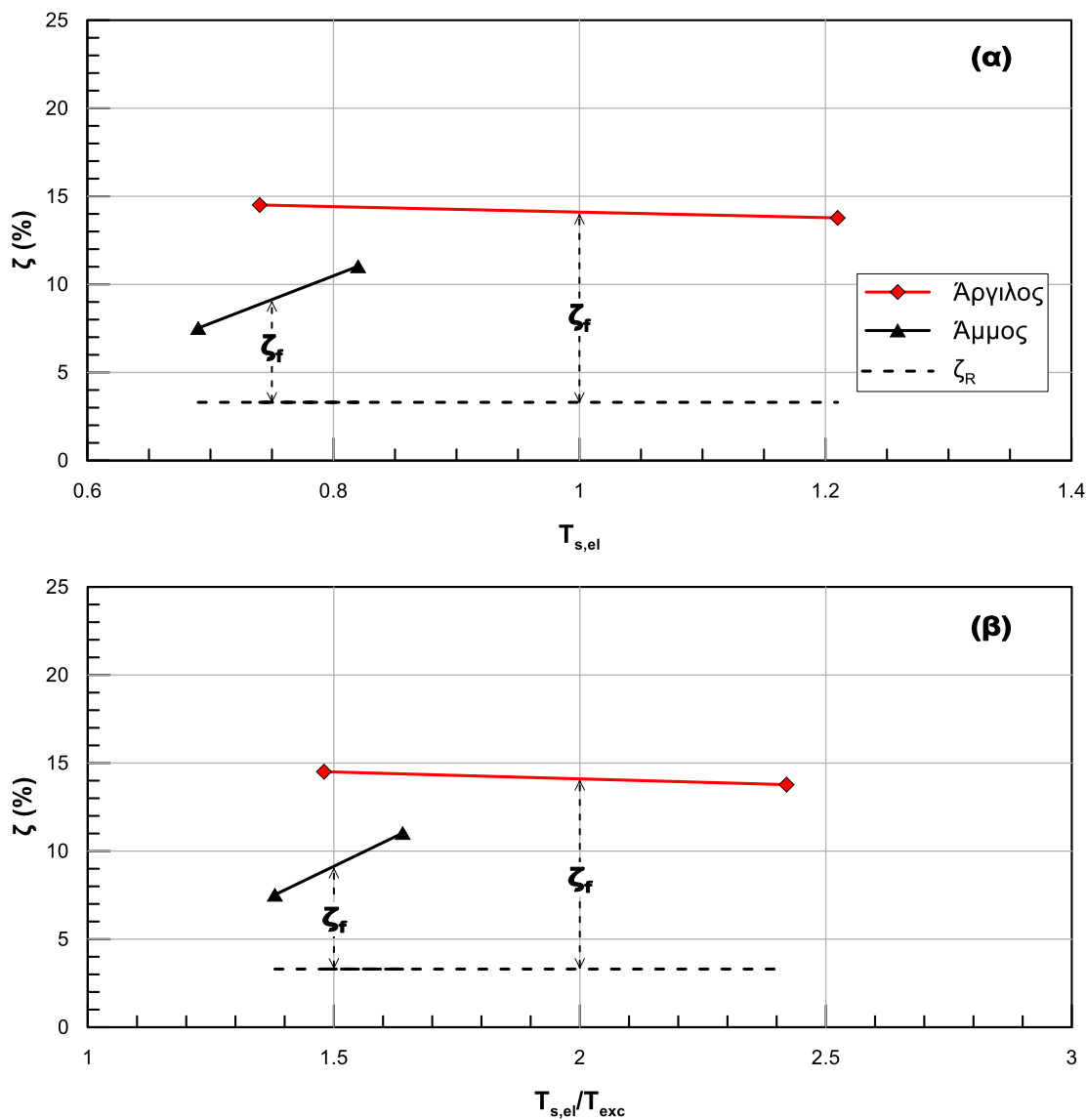
Για την καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της ιδιοπεριόδου στο **Σχήμα 6.15** παρουσιάζεται ο λόγος της ιδιοπεριόδου του συστήματος αλληλεπίδρασης θεμελίωσης-ανωδομής προς την ιδιοπερίοδο της ανωδομής (T_{SSI}/T_{rigid}) συναρτήσει της ανελαστικής ιδιοπεριόδου του εδάφους ($T_{s,unel}$) (**Σχήμα 6.15α**) και του λόγου $T_{s,unel}/T_{exc}$ (**Σχήμα 6.15β**), όπου T_{exc} η ιδιοπερίοδος της διέγερσης.



Σχήμα 6.15: Λόγος T_{SSI}/T_{rigid} συναρτήσει α) της ανελαστικής ιδιοπεριόδου του εδάφους $T_{s,unel}$ και β) του λόγου $T_{s,unel}/T_{exc}$

Στο παραπάνω Σχήμα φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η ανελαστική ιδιοπερίοδος του εδάφους ($T_{s,unel}$) αυξάνεται η ιδιοπερίοδος του συστήματος (T_{SSI}) για αμμώδες έδαφος ενώ μειώνεται για αργιλικό έδαφος.

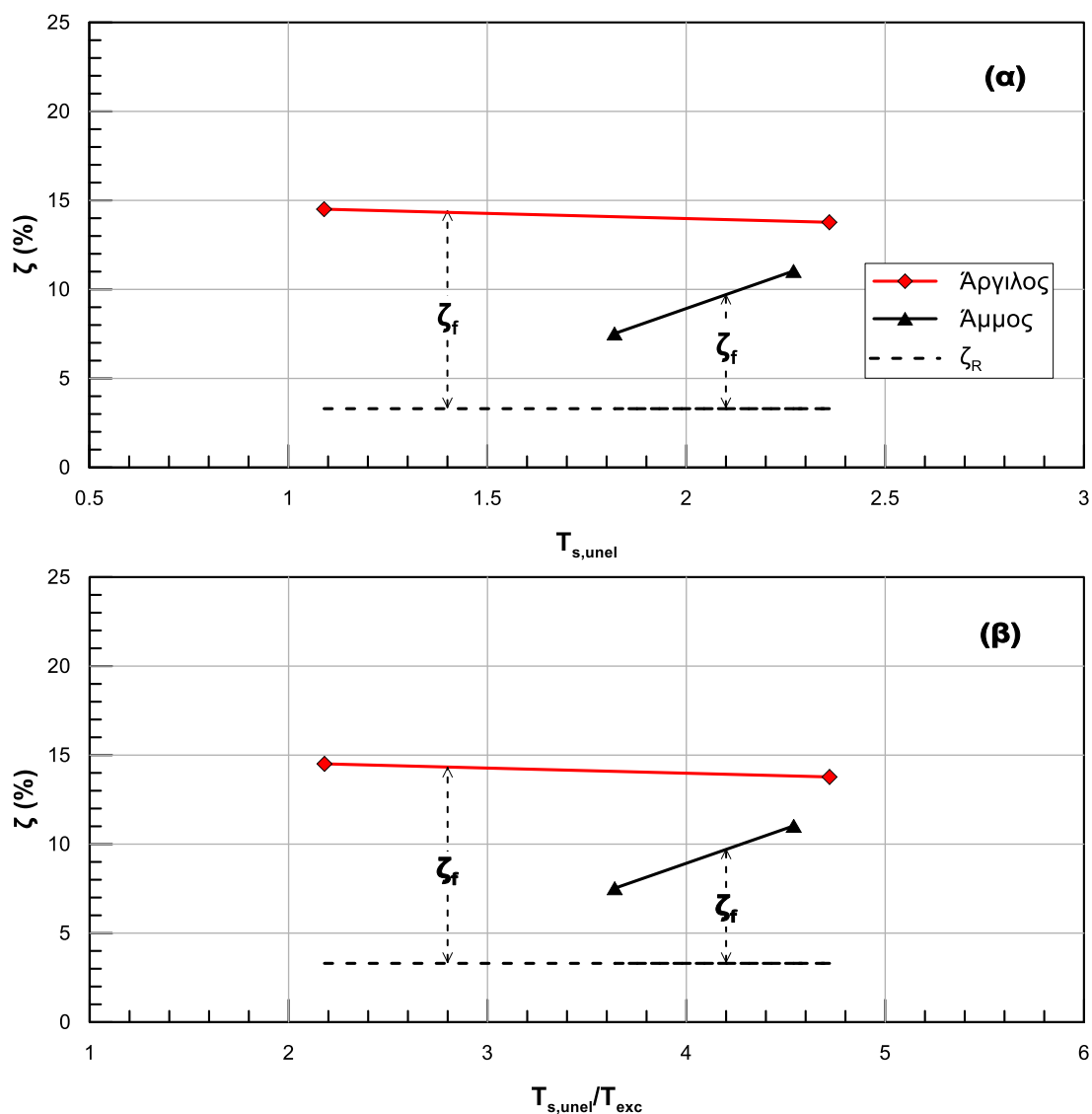
Για την καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων σχετικά με την απόσβεση του συστήματος και τη συμβολή της θεμελίωσης σε αυτή παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6.16** ο λόγος απόσβεσης του συστήματος αλληλεπίδρασης θεμελίωσης-ανωδομής (ζ) συναρτήσει της ελαστικής ιδιοπεριόδου του εδάφους ($T_{s,el}$) (**Σχήμα 6.16α**) και του λόγου $T_{s,el}/T_{exc}$ (**Σχήμα 6.16β**), όπου T_{exc} η ιδιοπερίοδος της διέγερσης.



Σχήμα 6.16: Λόγος απόσβεσης του συστήματος (ζ) συναρτήσει α) της ελαστικής ιδιοπεριόδου του εδάφους $T_{s,el}$ και β) του λόγου $T_{s,el}/T_{exc}$

Στο παραπάνω Σχήμα φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η ελαστική ιδιοπερίοδος του εδάφους ($T_{s,el}$) αυξάνεται ο λόγος απόσβεσης του συστήματος αλληλεπίδρασης θεμελίωσης-ανωδομής (ζ) για αμμώδες έδαφος ενώ μειώνεται για αργιλικό έδαφος. Επιπλέον παρατηρείται ότι ο λόγος απόσβεσης του συστήματος αλληλεπίδρασης θεμελίωσης-ανωδομής (ζ) είναι μεγαλύτερος στα αργιλικά από ότι στα αμμώδη εδάφη.

Για την καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων σχετικά με την απόσβεση του συστήματος και τη συμβολή της θεμελίωσης σε αυτή παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6.17** ο λόγος απόσβεσης του συστήματος αλληλεπίδρασης θεμελίωσης-ανωδομής (ζ) συναρτήσει της ανελαστικής ιδιοπεριόδου του εδάφους ($T_{s,unel}$) (**Σχήμα 6.17α**) και του λόγου $T_{s,unel}/T_{exc}$ (**Σχήμα 6.17β**), όπου T_{exc} η ιδιοπερίοδος της διέγερσης.



Σχήμα 6.17: Λόγος απόσβεσης του συστήματος (ζ) συναρτήσει α) της ανελαστικής ιδιοπεριόδου του εδάφους $T_{s,unel}$ και β) του λόγου $T_{s,unel}/T_{exc}$

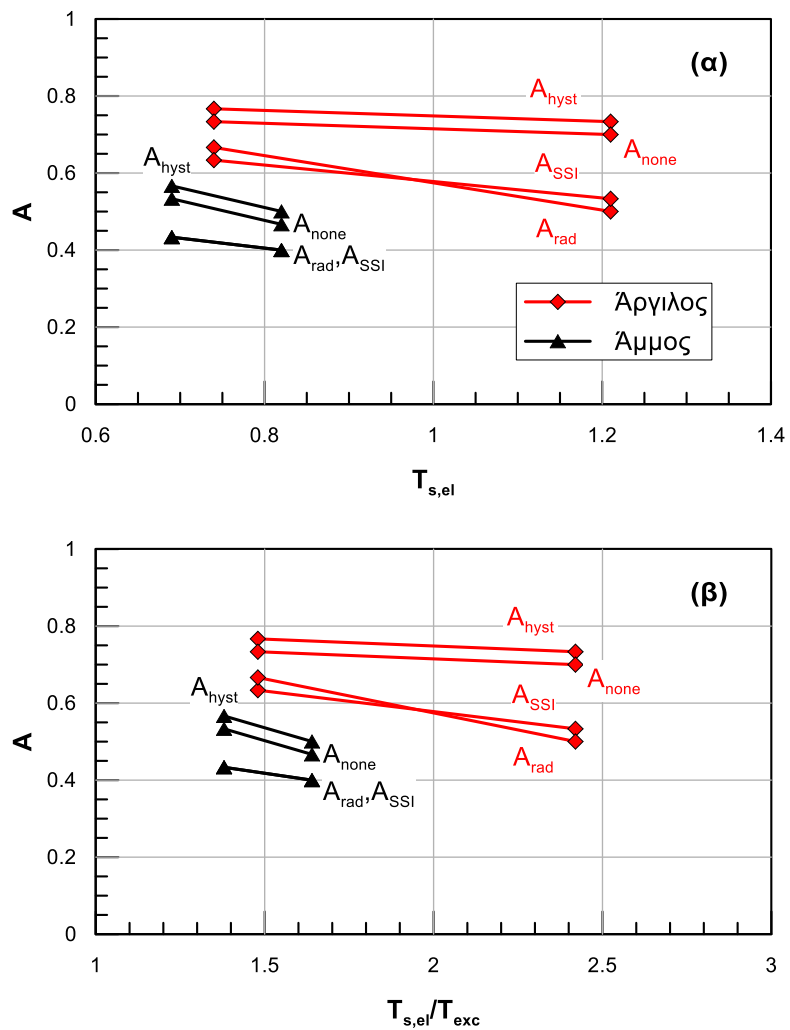
Στο παραπάνω Σχήμα φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η ανελαστική ιδιοπερίοδος του εδάφους ($T_{s,unel}$) αυξάνεται ο λόγος απόσβεσης του συστήματος αλληλεπίδρασης θεμελίωσης-ανωδομής (ζ) για αμμώδες έδαφος ενώ μειώνεται για αργιλικό έδαφος. Επιπλέον παρατηρείται ότι ο λόγος απόσβεσης του συστήματος αλληλεπίδρασης θεμελίωσης-ανωδομής (ζ) είναι μεγαλύτερος στα αργιλικά από ότι στα αμμώδη εδάφη.

Επιρροή επιμέρους συνιστωσών απόσβεσης. Για τον έλεγχο της συνεισφοράς κάθε συνιστώσας της εδαφικής απόσβεσης (υστερητική απόσβεση και απόσβεση ακτινοβολίας), πραγματοποιούνται 3 επιπλέον αναλύσεις δυναμικής απόκρισης για κάθε εξεταζόμενο τύπο εδάφους. Το προσομοίωμα περιλαμβάνει τα στοιχεία της βασικής ανάλυσης για την αλληλεπίδραση ανεμογεννήτριας - θεμελίωσης, όπως παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Η διαφοροποίηση έγκειται στον τρόπο με τον οποίο προσομοιώνεται η εδαφική αντίδραση. Στην πρώτη ανάλυση δεν λαμβάνεται υπόψη η απόσβεση ακτινοβολίας, δηλαδή η ανάλυση γίνεται χωρίς τους αποσβεστήρες στους αντίστοιχους κόμβους. Στη δεύτερη ανάλυση δεν λαμβάνεται υπόψη η υστερητική απόσβεση, δηλαδή η ανάλυση γίνεται χωρίς τα ελατήρια στους αντίστοιχους κόμβους. Τέλος στην τρίτη περίπτωση δεν λαμβάνεται υπόψη ούτε η υστερητική απόσβεση ούτε η απόσβεση ακτινοβολίας, δηλαδή η ανάλυση γίνεται χωρίς τα ελατήρια και τους αποσβεστήρες στους αντίστοιχους κόμβους. Ο Πίνακας 6.14 συνοψίζει τα αποτελέσματα των υπολογισμών. Οι όροι \overline{PGA}_{hyst} , \overline{PGA}_{rad} και \overline{PGA}_{none} εκφράζουν το μέσο εύρος της επιτάχυνσης του προσομοιώματος αλληλεπίδρασης εδάφους – κατασκευής για την ανάλυση χωρίς απόσβεση ακτινοβολίας, για ανάλυση χωρίς υστερητική απόσβεση και για ανάλυση χωρίς καμία μορφή απόσβεσης αντίστοιχα.

Πίνακας 6.14: Αποτελέσματα \overline{PGA} δυναμικών αναλύσεων συνιστωσών απόσβεσης

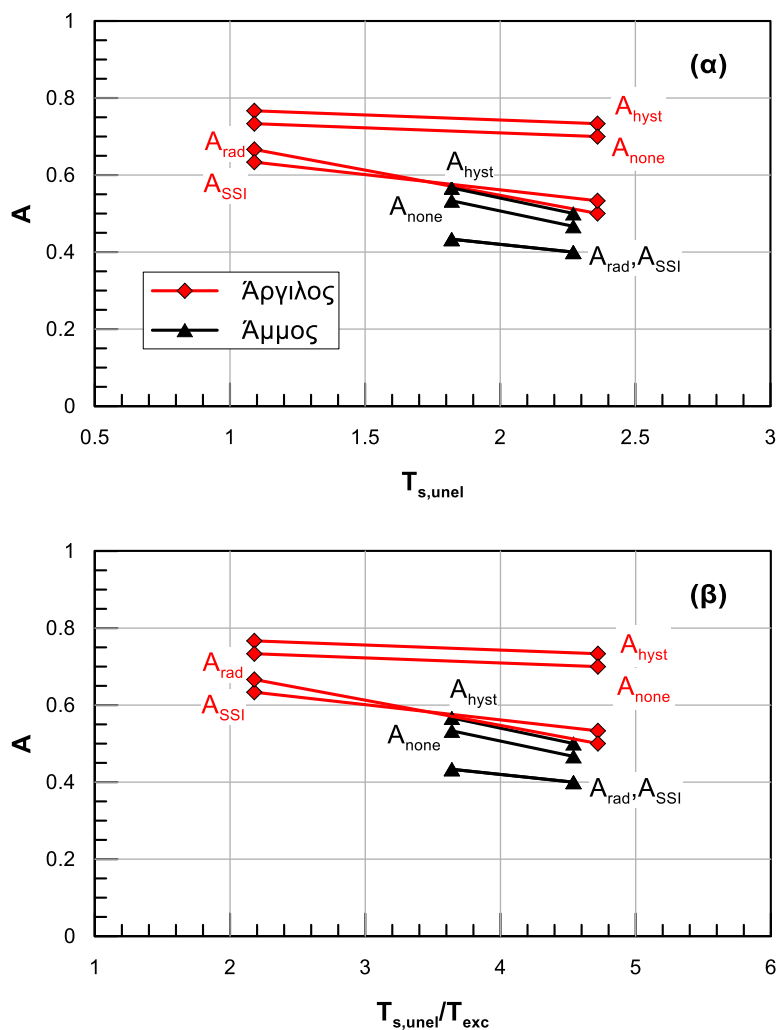
Εδαφικό προφίλ	$\overline{PGA}_{hyst} (g)$	$\overline{PGA}_{rad} (g)$	$\overline{PGA}_{none} (g)$
Άμμος Μέσης Πυκνότητας	0.15	0.12	0.14
Πυκνή Άμμος	0.17	0.13	0.16
Μαλακή Άργιλος	0.22	0.15	0.21
Στιφρή Άργιλος	0.23	0.20	0.22

Για την καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του εύρους της επιτάχυνσης στην κορυφή του πύργου κατά την εξαναγκασμένη ταλάντωση ορίζονται για κάθε τύπο εδάφους οι λόγοι $A_{hyst} = \overline{PGA}_{hyst} / \overline{PGA}_{rigid}$, $A_{rad} = \overline{PGA}_{rad} / \overline{PGA}_{rigid}$ και $A_{none} = \overline{PGA}_{none} / \overline{PGA}_{rigid}$. Στο Σχήμα 6.18 παρουσιάζεται ο λόγος A συναρτήσει της ελαστικής ιδιοπεριόδου του εδάφους $T_{s,el}$ και του λόγου $T_{s,el}/T_{exc}$.



Σχήμα 6.18: Λόγος A συναρτήσει α) της ελαστικής ιδιοπεριόδου του εδάφους $T_{s,el}$ και β) του λόγου $T_{s,el}/T_{exc}$

Στο **Σχήμα 6.19** παρουσιάζεται ο λόγος A συναρτήσει της ανελαστικής ιδιοπεριόδου του εδάφους $T_{s,inel}$ και του λόγου $T_{s,inel}/T_{exc}$.



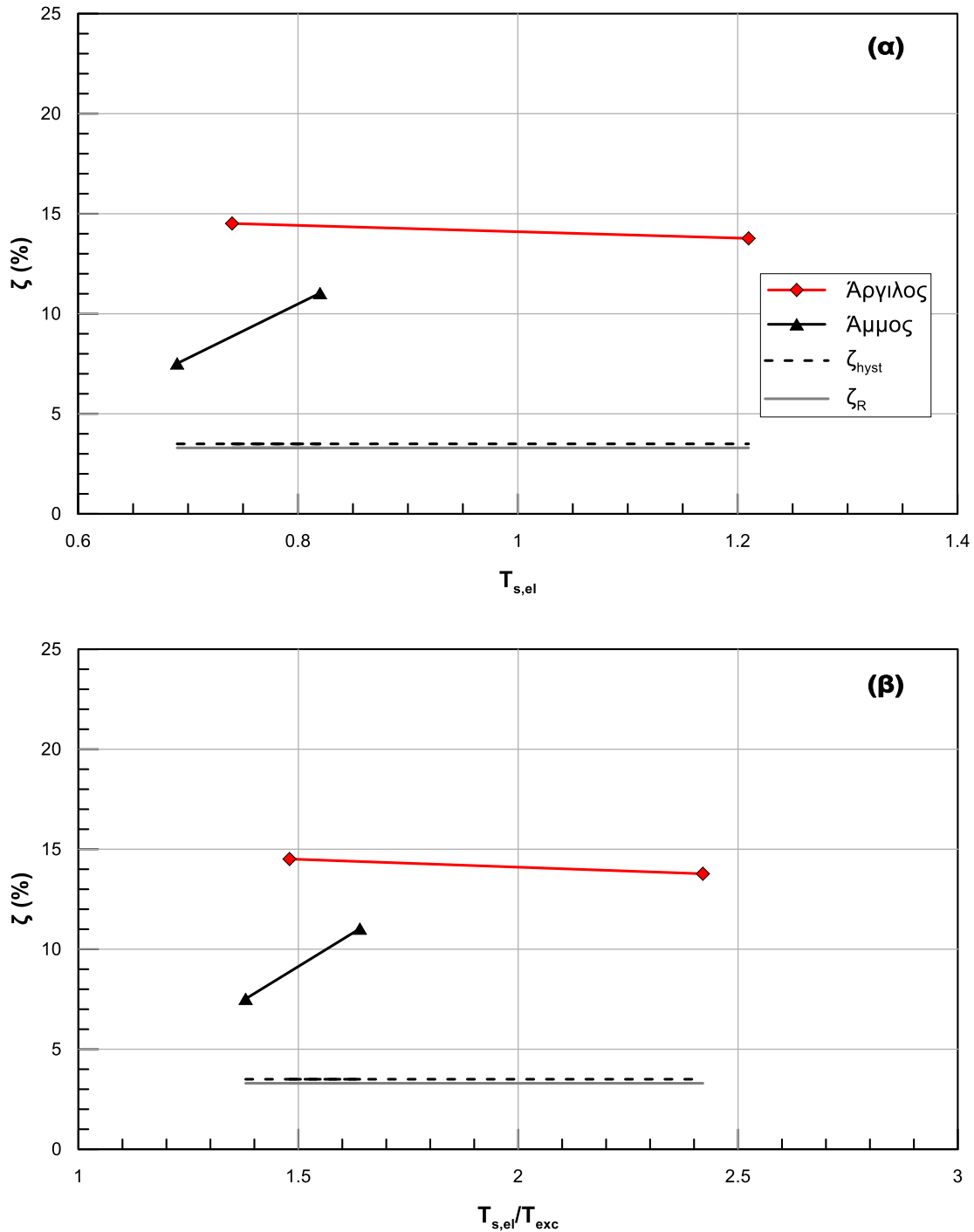
Σχήμα 6.19: Λόγος A συναρτήσει α) της ανελαστικής ιδιοπεριόδου του εδάφους $T_{s,unel}$ και β) του λόγου $T_{s,unel}/T_{exc}$

Ο Πίνακας 6.15 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των 2 πρώτων αναλύσεων δυναμικής απόκρισης για τον έλεγχο της συνεισφοράς κάθε συνιστώσας της εδαφικής απόσβεσης (υστερητική απόσβεση και απόσβεση ακτινοβολίας).

Πίνακας 6.15: Επίδραση των συνιστωσών απόσβεσης της θεμελίωσης στην ιδιοπερίοδο και το λόγο απόσβεσης του συστήματος για τα διάφορα εδαφικά προφίλ

Εδαφικό Προφίλ	Ανάλυση χωρίς απόσβεση ακτινοβολίας				Ανάλυση χωρίς υστερητική απόσβεση			
	T_{SSI} (sec)	ζ_R (%)	ζ_{hyst} (%)	ζ_{total} (%)	T_{SSI} (sec)	ζ_R (%)	ζ_{rad} (%)	ζ_{total} (%)
Άμμος Μέσης Πυκνότητας	1.95	3.30	0.01	3.23	1.91	3.27	7.73	11.00
Πυκνή Άμμος	1.84	3.23	0.01	3.24	1.83	3.22	4.30	7.52
Μαλακή Άργιλος	2.05	3.37	0.01	3.38	1.97	3.32	10.48	13.80
Στιφρή Άργιλος	2.10	3.41	0.01	3.42	2.05	3.37	11.14	14.51

Για να γίνει καλύτερα αισθητή η συμβολή κάθε συνιστώσας της εδαφικής απόσβεσης παρουσιάζονται στο **Σχήμα 6.20** ο λόγος απόσβεσης του συστήματος αλληλεπίδρασης θεμελίωσης-ανωδομής (ζ) τόσο συνολικά όσο και για κάθε συνιστώσα της απόσβεσης του εδάφους συναρτήσει της ελαστικής ιδιοπεριόδου του εδάφους ($T_{s,el}$) (**Σχήμα 6.20α**) και του λόγου $T_{s,el}/T_{exc}$ (**Σχήμα 6.20β**), όπου T_{exc} η ιδιοπερίοδος της διέγερσης.



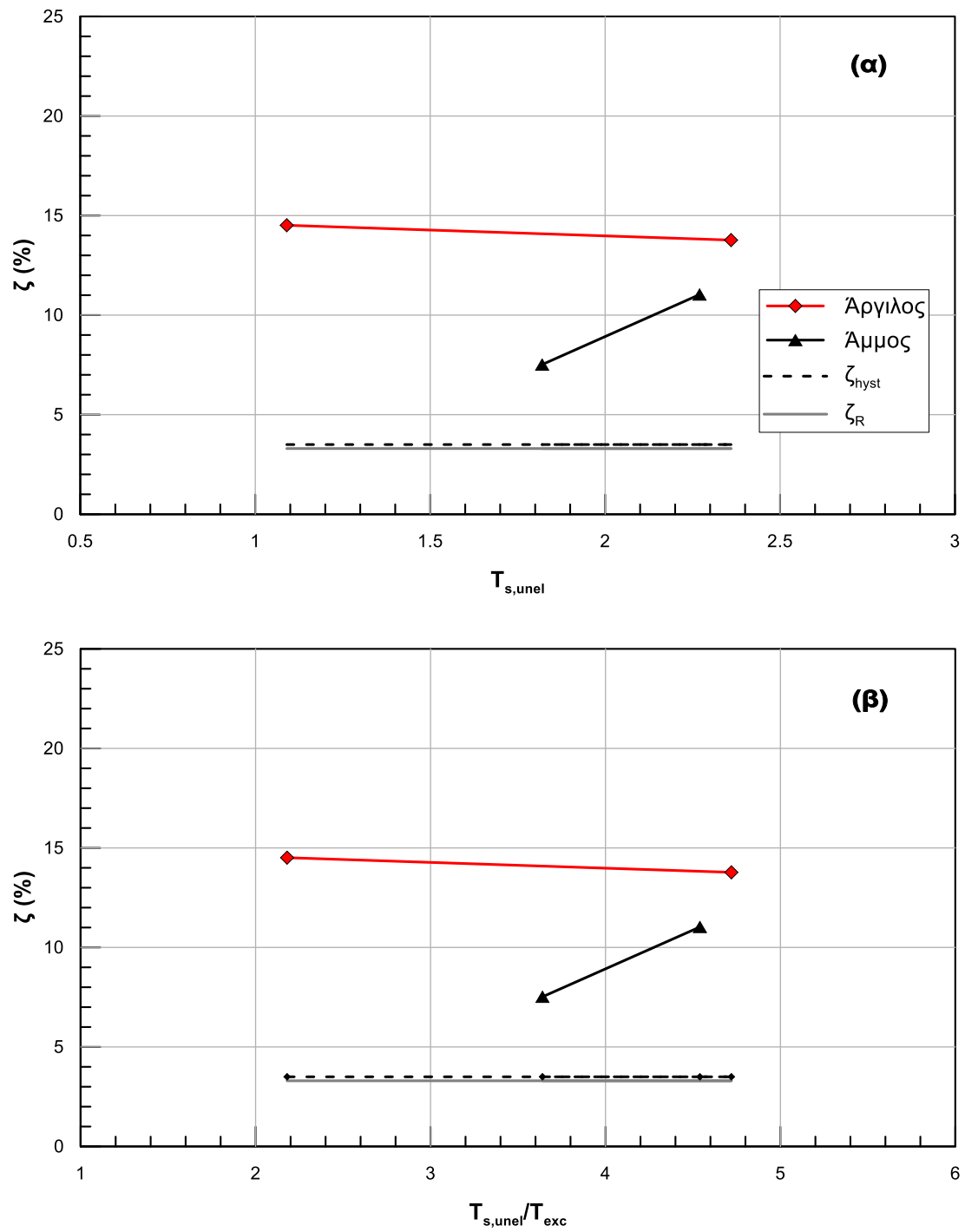
Σχήμα 6.20: Διάγραμμα του λόγου απόσβεσης (ζ) συναρτήσει α) της ελαστικής ιδιοπεριόδου του εδάφους $T_{s,el}$ και β) του λόγου $T_{s,el}/T_{exc}$

Στο παραπάνω Σχήμα φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η ελαστική ιδιοπερίοδος του εδάφους ($T_{s,ei}$) αυξάνεται ο λόγος απόσβεσης του συστήματος λόγω ακτινοβολίας (ζ_{rad}) για αμμώδες έδαφος ενώ μειώνεται για αργιλικό έδαφος. Επιπλέον παρατηρείται ότι ο λόγος απόσβεσης του συστήματος λόγω ακτινοβολίας (ζ_{rad}) είναι μεγαλύτερος στα αργιλικά από ότι στα αμμώδη εδάφη.

Για να γίνει καλύτερα αισθητή η συμβολή κάθε συνιστώσας της εδαφικής απόσβεσης παρουσιάζονται στο **Σχήμα 6.21** ο λόγος απόσβεσης του συστήματος αλληλεπίδρασης θεμελίωσης-ανωδομής (ζ) τόσο συνολικά όσο και για κάθε συνιστώσα της απόσβεσης του εδάφους συναρτήσει της ανελαστικής ιδιοπεριόδου του εδάφους ($T_{s,unel}$) (**Σχήμα 6.21α**) και του λόγου $T_{s,unel}/T_{exc}$ (**Σχήμα 6.21β**), όπου T_{exc} η ιδιοπερίοδος της διέγερσης.

Στο **Σχήμα 6.21** φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η ανελαστική ιδιοπερίοδος του εδάφους ($T_{s,unel}$) αυξάνεται ο λόγος απόσβεσης του συστήματος λόγω ακτινοβολίας (ζ_{rad}) για αμμώδες έδαφος ενώ μειώνεται για αργιλικό έδαφος. Επιπλέον παρατηρείται ότι ο λόγος απόσβεσης του συστήματος λόγω ακτινοβολίας (ζ_{rad}) είναι μεγαλύτερος στα αργιλικά από ότι στα αμμώδη εδάφη.

Τέλος, τόσο από τις τιμές της υστερητικής απόσβεσης (**Πίνακας 6.15**) όσο και από τα 4 παραπάνω Σχήματα (**Σχήμα 6.16** έως **Σχήμα 6.21**) είναι εμφανής η αμελητέα συμβολή της υστερητικής απόσβεσης στη συνολική απόσβεση του συστήματος αλληλεπίδρασης θεμελίωσης-ανωδομής λόγω θεμελίωσης. Επομένως επιβεβαιώνεται η παρατήρηση του Κεφαλαίου 5 σχετικά με την κυρίαρχη συμβολή της απόσβεσης ακτινοβολίας στην επιρροή της θεμελίωσης στο σύστημα της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 6.21: Διάγραμμα του λόγου απόσβεσης (ζ) συναρτήσει α) της ανελαστικής ιδιοπεριόδου του εδάφους $T_{s,unel}$ και β) του λόγου $T_{s,unel}/T_{exc}$

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα και προτάσεις

7.1 Συμπεράσματα από τη βιβλιογραφική αναδρομή

(α) Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής αναδρομής, όπως παρουσιάστηκε στα Κεφάλαια 2 και 3 της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, υπάρχουν δύο πρακτικές μέθοδοι προσομοίωσης της απόκρισης πασσάλων θεμελίωσης: η μέθοδος «**Δοκού επί ελατηριωτού εδάφους**», όπου τα εδαφικά ελατήρια και οι αποσβεστήρες είναι κατανεμημένα κατά μήκος του πασσάλου, και η μέθοδος των “**macro-elements**”, όπου η θεμελίωση του πασσάλου αντικαθίσταται με συγκεντρωμένα ελατήρια και αποσβεστήρες στην βάση του πυλώνα.

(β) Παρά το γεγονός ότι η ανάλυση ανεμογεννητριών με εξελιγμένους κώδικες πεπερασμένων στοιχείων έχει αρχίσει να γίνεται δημοφιλής, η χρήση των δύο ανωτέρω απλοποιημένων μεθόδων παραμένει ο κύριος τρόπος προσομοίωσης της αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής στην πράξη. Αυτό συμβαίνει γιατί τα υπάρχοντα υπολογιστικά εργαλεία βασίζονται σε υδρο-αερο-ελαστο-δυναμικούς κώδικες (π.χ. FAST), που δεν μπορούν εύκολα να ενταχθούν στους υπάρχοντες κώδικες πεπερασμένων στοιχείων (π.χ. Abaqus). (Καγνία 2018)

(γ) Οι κύριες παρατηρήσεις και συμπεράσματα σχετικά με την εφαρμογή της μεθόδου της «Δοκού επί ελατηριωτού εδάφους» είναι τα ακόλουθα:

- Για την εκτίμηση της στιβαρότητας των ελατηρίων η πλέον διαδεδομένη μέθοδος είναι η χρήση μη γραμμικών καμπύλων $p - \gamma$, με επικρατέστερες τις καμπύλες API (π.χ. Page et al. 2017). Διευκρινίζεται ότι οι εν λόγω καμπύλες $p-\gamma$ δεν ανταποκρίνονται πλήρως στα αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών, καθώς υποεκτιμούν την στιβαρότητα της θεμελίωσης και προτείνεται η βαθμονόμηση τους έναντι αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων. Οι καμπύλες αυτές ισχύουν για πρωτογενή φόρτιση (backbone curves). Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η

υστερητική απόσβεση κατά την αποφόρτιση – επαναφόρτιση απαιτείται η χρήση κατάλληλου κριτηρίου (π.χ. Masing), το οποίο να προσδίδει υστερητικό χαρακτήρα στις καμπύλες $p - \gamma$.

- Η χρήση των στατικών καμπύλων του API, με υστερητική αποφόρτιση - επαναφόρτιση, θεωρείται αξιόπιστη και σε αναλύσεις ανακυκλικών φορτίσεων.
- Η χρήση διάταξης ελατηρίων και αποσβεστήρων «εν σειρά» προσομοιώνει πιο ρεαλιστικά την απόκριση τόσο στην κορυφή του πασσάλου όσο και στην ανωδομή. Πιο συγκεκριμένα, αριθμητικές αναλύσεις με χρήση της «εν σειρά» διάταξης οδήγησαν σε αποτελέσματα λογικά εξαρτώμενα από τη στιβαρότητα και την αντοχή των καμπύλων $p - \gamma$, παρουσιάζοντας μάλιστα λογική συμφωνία με πειραματικές μετρήσεις δοκιμών φυγοκεντριστή. (Wang et al. 1998)
- Αντιθέτως, η χρήση της «εν παράλληλω» διάταξης ελατηρίων και αποσβεστήρων οδηγεί σε φάσματα απόκρισης της ανωδομής που υποεκτιμούν τόσο το μέγεθος των φασματικών επιταχύνσεων όσο και την ιδιοπερίοδο της κατασκευής. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι οι συντελεστές των αποσβεστήρων ακτινοβολίας προέρχονται από ελαστικές θεωρήσεις και δεν λαμβάνουν υπόψη της πλαστικές παραμορφώσεις του εδάφους. Έτσι, στις αναλύσεις αυτής της διάταξης αναπτύσσονται πολύ μεγάλες και μη-ρεαλιστικές δυνάμεις απόσβεσης ακτινοβολίας. Επιπλέον σε αναλύσεις με διπλάσια φέρουσα ικανότητα του εδάφους σε οριζόντια φόρτιση p_{ult} παρατηρήθηκε ότι τα αποτελέσματα με την διάταξη «εν παράλληλω» δεν διαφοροποιήθηκαν παρά την αλλαγή των καμπύλων $p-\gamma$, καταδεικνύοντας ένα πρόσθετο μειονέκτημα της «παράλληλης» διάταξης. (Wang et al. 1998)
- Για τον έλεγχο της σημασίας της απόσβεσης ακτινοβολίας σε μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις, προτείνεται η πραγματοποίηση τουλάχιστον μίας παραμετρικής μελέτης σχετικά με την επιρροή του γραμμικού ιξώδους συντελεστή απόσβεσης στις προβλεπόμενες τιμές μεγεθών. Επίσης, προτείνεται η πραγματοποίηση ανάλυσης θέτοντας τη γραμμική απόσβεση ακτινοβολίας ίση με το μηδέν για τον έλεγχο της υστερητικής απόσβεσης λόγω των μη-γραμμικών υστερητικών καμπυλών $p - \gamma$.

(δ) Οι κύριες παρατηρήσεις και συμπεράσματα σχετικά με την εφαρμογή της μεθόδου των «macro-elements» είναι τα ακόλουθα:

- Συγκρίνοντας δύο προσομοιώματα απόκρισης της θεμελίωσης, ο Aasen (2016) κατέληξε ότι η χρήση γραμμικού μητρώου δυσκαμψίας με αποσβεστήρα τείνει να υπερεκτιμά την εδαφική απόκριση, καθιστώντας τη διάταξη με τα στροφικά ελατήρια που υπακούν τον κινηματικό νόμο κράτυνσης ένα πιο ρεαλιστικό τρόπο προσομοίωσης της εδαφικής απόσβεσης.
- Εάν αγνοηθεί η συνεισφορά των μη διαγώνιων όρων σύζευξης του μητρώου στιβαρότητας των macro-elements, προκύπτει υπερεκτίμηση της ιδιοσυχνότητας και υποεκτίμηση της απόσβεσης του συστήματος. (Zaniá 2014)
- Σύμφωνα με τον κανονισμό DnV, οι εξισώσεις που προτείνονται για την ισοδύναμη στιβαρότητα του εδάφους για θεμελίωση με μονο-πάσσαλο (DnV 2014) ισχύουν για φρέατα και όχι πασσάλους θεμελίωσης, με μήκος μικρότερο από τη διάμετρό τους ($L < 2R$). Επομένως δεν μπορούν να εφαρμοστούν στην περίπτωση πασσάλων θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών, οι οποίοι κατά κανόνα έχουν πολύ μεγάλο μήκος συγκριτικά με την ακτίνα τους. Επιπλέον το βραχύδες υπόβαθρο θα έπρεπε να είναι δύο φορές βαθύτερα από το μήκος του φρέατος ώστε να εφαρμοστεί η εξίσωση. Οι παραπάνω περιορισμοί στην εφαρμογή των εξισώσεων του κανονισμού DnV στη μελέτη υπεράκτιων ανεμογεννητριών απορρέουν από το γεγονός ότι οι προτεινόμενες εξισώσεις προέρχονται από μελέτες σε υπεράκτιες εξέδρες εξόρυξης πετρελαίου, για τις οποίες η φύση των φορτίων αλλά και οι διαστάσεις της συνολικής κατασκευής διαφέρουν πολύ από τις αντίστοιχες για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες. (Oh et al. 2018)
- Οι Sarountzakis et al. (2015) για να προσομοιώσουν την αλληλεπίδραση εδάφους - κατασκευής συνέδεσαν ένα μακρο-ελατήριο στον πύργο της ανεμογεννήτριας, το οποίο προσομοιώθηκε με τη μέθοδο συνοριακών στοιχείων. Έδειξαν, ότι η κατασκευή με αυτή την προσομοίωση είχε μια πρώτη ιδιοσυχνότητα 6% μικρότερη από την αντίστοιχη με πακτωμένο άκρο. Επιπλέον, η σεισμική απόκριση της κατασκευής βελτιώθηκε σημαντικά με τη χρήση του μακρο-ελατηρίου. (Sarountzakis et al. 2015)

(ε) Η μέθοδος της προσομοίωσης με μακρο-ελατήρια και μακρο-αποσβεστήρες παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα συγκρινόμενη με την προσομοίωση με τη μέθοδο «Δοκού επί ελατηριωτού εδάφους». Καταρχάς η συνεισφορά κάποιων συνιστωσών της

αντίστασης του εδάφους όπως η διάτμηση παρειών και βάσης, η οποία ίσως παίζει σημαντικό ρόλο στις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες που θεμελιώνονται σε μονο-πάσσαλο λαμβάνεται υπόψη στην προσομοίωση με μακρο-ελατήρια και μακρο-αποσβεστήρες σε αντίθεση με την προσομοίωση με τη μέθοδο «Δοκού επί ελατηριωτού εδάφους». Επιπλέον, η απόκριση της θεμελίωσης υπολογίζεται μόνο σε έναν κόμβο, γεγονός που σημαίνει ότι λιγότεροι βαθμοί ελευθερίας απαιτούνται στην ανάλυση. Με αυτό τον τρόπο καθίσταται δυνατή η χρήση περισσότερο πολύπλοκων προσομοιωμάτων χωρίς να αυξάνεται το συνολικό υπολογιστικό κόστος.

(στ) Ανεξαρτήτως μεθόδου προσομοίωσης, προέκυψαν οι ακόλουθες παρατηρήσεις και συμπεράσματα πρακτικού ενδιαφέροντος:

- Μια σειρά από αριθμητικές αναλύσεις της αλληλεπίδρασης του εδάφους - κατασκευής της ανεμογεννήτριας έχει δείξει λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση αυτή στους υπολογισμούς μπορεί να μειώσει τα σεισμικά φορτία έως και 10%. (Καγνια 2018)
- Σύμφωνα με τον Aasen (2016) η επίδραση της εδαφικής απόσβεσης είναι σημαντική στην απόκριση υπεράκτιων ανεμογεννητριών υπό φορτία ανέμου και θαλάσσιων κυματισμών. Έπειτα από αναλύσεις που πραγματοποίησε λαμβάνοντας υπόψη την εδαφική απόσβεση, κατέληξε ότι η καταπόνηση στην ανωδομή της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας μειώθηκε κατά 11% στον πυθμένα και στην κορυφή κατά 16%, σε σχέση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα αναλύσεων στις οποίες αγνοήθηκε η συμβολή της στην συνολική απόσβεση του συστήματος.
- Από τη σύγκριση όλων των εξεταζόμενων προσομοιωμάτων στην έρευνα των Page et al. (2019) προκύπτει ότι η χρήση μακρο-ελατηρίων και μακρο-αποσβεστήρων στη βάση της ανεμογεννήτριας δίνει τα πιο συμβατά αποτελέσματα με τις μετρήσεις πεδίου. Σημαντική ακρίβεια παρατηρείται και με τις καμπύλες $p - \gamma$, που έχουν βαθμονομηθεί από τα Πεπερασμένα Στοιχεία. Αντίθετα, σημαντική απόκλιση από τις μετρήσεις παρουσιάζει η διάταξη με τα κατανεμημένα ελατήρια $p - \gamma$ κατά API.
- Η παρατηρούμενη εδαφική απόσβεση του συστήματος υπεράκτιας ανεμογεννήτριας υποβαλλόμενης σε φορτία ανέμου και θαλάσσιων κυματισμών είναι 0.2 % - 1.3 % και εξαρτάται από τη στιβαρότητα του εδάφους. (Chen and Duffour 2018)

(ζ) Πλήθος πειραματικών δοκιμών έχει πραγματοποιηθεί για την εκτίμηση της συνολικής απόσβεσης μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας. Οι πειραματικές δοκιμές εξετάζουν την

υπεράκτια ανεμογεννήτρια εν λειτουργία ή σε παύση και για διάφορους προσανατολισμούς ως προς την φορά του ανέμου. Παρακάτω παρουσιάζεται ο Πίνακας 7.1 με ενδεικτικά αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων σχετικά με τη συνολική απόσβεση υπεράκτιας ανεμογεννήτριας υπό φορτία ανέμου και θαλάσσιων κυματισμών, κάθετα (FA) ή παράλληλα (SS) με τη φορά του ανέμου.

Πίνακας 7.1: Τιμές συνολικής απόσβεσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών (Chen and Duffour 2018)

Πειραματικές μετρήσεις απόσβεσης για υπεράκτια ανεμογεννήτρια σε παύση			
Ερευνητές	Συνολική απόσβεση	Ανεμογεννήτρια	Προσανατολισμός ως προς τη φορά του ανέμου
Tarp-Johansen et al (2009)	1.91 %	3.5 MW OWT	-
Versteijlen et al (2011)	3 %	3.6 MW Siemens OWT	-
Damgaard et al (2012 – 2013)	2.39 % - 2.55 %	-	FA
Shirzadeh et al (2013 - 2014)	1.05 %	-	FA
	1.27 %		SS
Koukoura et al (2015)	1.8 %	-	FA
	1.9 %		SS
Πειραματικές μετρήσεις απόσβεσης για υπεράκτια ανεμογεννήτρια εν λειτουργία			
Hansen et al	8 % - 13.2 %	-	FA
	2.4 % - 8 %		SS
Koukoura et al	10.35 %	-	FA
	4.77 %		SS

(η) Οι βασικοί τύποι απόσβεσης σε μια υπεράκτια ανεμογεννήτρια είναι η αεροδυναμική, η υδροδυναμική, της ανωδομής και του εδάφους. Συνήθης πρακτική στην ανάλυση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών αποτελεί η θεώρηση ότι η συνολική απόσβεση της ανεμογεννήτριας ισούται με το άθροισμα των επιμέρους τιμών απόσβεσης κάθε πηγής που προαναφέρθηκε. Στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 7.2) παρουσιάζονται τα συνήθη εύρη τιμών απόσβεσης στα οποία κυμαίνεται κάθε πηγή.

Πίνακας 7.2: Συνήθη εύρη τιμών απόσβεσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών (Chen & Duffour 2018)

Κατάσταση Α/Γ	Προσαρμοστικός	Συνολική	Ανωδομής	Αεροδυναμική	Υδροδυναμική	Εδάφους
Εν λειτουργία	FA	1.0%-3.0%	0.2%-1.5%	0.08%-0.24%	0.11%-0.39%	0.17%-1.30%
Σε παύση	FA	5.0%-10.0%	0.2%-1.5%	4.0%-8.0%	0.11%-0.39%	0.17%-1.30%
Εν λειτουργία	SS	1.0%-3.0%	0.2%-1.5%	0.08%-0.24%	0.11%-0.39%	0.17%-1.30%
Σε παύση	SS	1.0%-4.77%	0.2%-1.5%	0.08%-1.43%	0.11%-0.39%	0.17%-1.30%

(θ) Πιο συγκεκριμένα σχετικά με την απόσβεση εδάφους, στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 7.3) παρουσιάζονται συγκεντρωμένα αποτελέσματα των τιμών της απόσβεσης θεμελίωσης έτσι όπως έχει υπολογιστεί από τις μελέτες ερευνητών με ταυτόχρονη παράθεση της απόσβεσης που έχει επιλεγεί για την ανωδομή.

Πίνακας 7.3: Τιμές απόσβεσης θεμελίωσης (Carswell et al 2015)

	Tarp-Johansen et al. (2009)	Versteijlen et al. (2011)	Damgaard et al. (2012)
Μέθοδος εκτίμησης απόσβεσης θεμελίωσης	3D FEM	Τροποποιημένες ρ - γ	Υστερητικές ρ - γ
Ανεμογεννήτρια	3.5 MW (Προσαρμοσμένη NREL 5 MW)	Siemens 3.6 MW	-
Εδαφικό προφίλ	Γενικευμένη άμμος ή αργιλώδες από Βόρεια Θάλασσα	-	Άνω στρώση χαλαρή άμμος, πολύ στιφρή έως πολύ σκληρή άργιλος
ξθεμελίωσης	0.56% - 0.80%	1.5%	0.58%
ξανωδομής	0.19%	1.5%	0.19%
Σύνολο	0.75%-0.99%	3.0%	0.77%

Πίνακας 7.3 (συνέχεια): Τιμές απόσβεσης θεμελίωσης (Carswell et al 2015)

	Damgaard et al. (2013)	Shirzadeh et al. (2013)	Carswell et al. (2015)
Μέθοδος εκτίμησης απόσβεσης θεμελίωσης	Υστερητικές $\rho - \gamma$	HAWC2, Rayleigh	3D και 2D FEM
Ανεμογεννήτρια	Vestas V90 – 3 MW	Vestas V90 – 3 MW (Προσαρμοσμένη NREL 5 MW)	NREL 5 MW
Εδαφικό προφίλ	Άμμος μέσης πυκνότητας και μαλακή άργιλος	Πυκνή άμμος με στρώση στιφρής αργίλου	Μαλακή, στιφρή και σκληρή άργιλος
ξθεμελίωσης	0.8%-1.3%	0.25%	0.17%-0.28%
ξανωδομής	-	0.6%	1.0%
Σύνολο	0.8%-1.3%	0.85%	1.17%-1.28%

(ι) Από τους παραπάνω Πίνακες γίνεται εμφανής η σημασία της απόσβεσης του εδάφους στη συνολική απόσβεση της ανεμογεννήτριας. Παρατηρείται ότι αν και η βασική πηγή απόσβεσης είναι η μεταφορά ανέμου λόγω της ταλάντωσης των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας (αεροδυναμική απόσβεση), το έδαφος συνεισφέρει αισθητά, ειδικά όταν η ανεμογεννήτρια είναι αδρανής ή παράλληλα με τη φορά του ανέμου, όπου μειώνεται η αεροδυναμική απόσβεση. Συνολικά η απόσβεση λόγω θεμελίωσης κυμαίνεται βάσει των αποτελεσμάτων των ερευνών μεταξύ 0.17-1.50 %. Οι τιμές αυτές συγκρινόμενες με τις τιμές της απόσβεσης της ανωδομής, οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 0.19-1.50 %, με τις τιμές της αεροδυναμικής απόσβεσης, οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 0.08-1.43 % και με τις τιμές της υδροδυναμικής απόσβεσης, οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 0.11-0.39 % επιβεβαιώνουν ότι η απόσβεση της θεμελίωσης είναι μικρή αλλά συγκρίσιμη με τις υπόλοιπες πηγές απόσβεσης και συνεισφέρει εξίσου στην απώλεια ενέργειας του συνολικού συστήματος.

7.2 Συμπεράσματα από τις αριθμητικές αναλύσεις

Για την αριθμητική ανάλυση της αλληλεπίδρασης πασσάλου θεμελίωσης - ανεμογεννήτριας ο μονοπάσσαλος προσομοιώθηκε ως «δοκός επί ελατηριωτού εδάφους Winkler» με προσάρτηση σε κάθε κόμβο του ενός ελατηρίου και ενός αποσβεστήρα εν παραλλήλω. Τα εδαφικά ελατήρια υπολογίσθηκαν κατά API (2002) ως προς την μονοτονική συμπεριφορά και κατά Masing (1926) κατά την ανακυκλική φόρτιση-αποφόρτιση-επαναφόρτιση, ενώ οι αποσβεστήρες προσομοιώθηκαν κατά Gazetas & Dobry (1984). Στο κοινό ελεύθερο άκρο των ελατηρίων και αποσβεστήρων επιβλήθηκε η σεισμική κίνηση του ελεύθερου πεδίου, η οποία υπολογίσθηκε από ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις μονοδιάστατης (1-Δ) κυματικής

διάδοσης για αρμονική σεισμική διέγερση στην επιφάνεια του εδάφους με μέγιστη επιτάχυνση ίση προς $PGA=0.50g$ και περίοδο $T_{exc}=0.50$ sec.

Η βασική αριθμητική ανάλυση πραγματοποιήθηκε για άμμο μέσης πυκνότητας, με μέσο λόγο υπερπίεσης πόρων $r_u=0.50$, και για την τυπική ανεμογεννήτρια 5 MW με ύψος πύργου ίσο με 90m και δυσκαμψία πύργου ίση με K_0 . Η ανεμογεννήτρια υπεβλήθη σε 15 κύκλους εξαναγκασμένης αρμονικής ταλάντωσης, κατά τους οποίους υπολογίσθηκε (μεταξύ άλλων) η επιτάχυνση της μάζας στην κορυφή του πύργου, και ακολούθως αφέθηκε να ταλαντωθεί ελεύθερα προκειμένου να εκτιμηθεί η ιδιοπερίοδος ταλάντωσης και η συνολική ιξώδης απόσβεση του συστήματος.

Πέραν της βασικής ανάλυσης, πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις: (α) για το ίδιο έδαφος αλλά πιο δύσκαμπτες ανεμογεννήτριες με δυσκαμψία πύργου $3K_0$, $9K_0$ και $27K_0$, και (β) για ανεμογεννήτρια δυσκαμψίας $3K_0$ αλλά σε πυκνή άμμο (με $r_u=0.25$) καθώς και σε μαλακή και στιφρή άργιλο. Τόσο η βασική όσο και οι παραμετρικές αναλύσεις επαναλήφθηκαν για άκαμπτο έδαφος (πακτωμένη ανεμογεννήτρια), για πλήρες σύστημα εδαφικών ελατηρίων και αποσβεστήρων, για υστερητικά εδαφικά ελατήρια μόνον, για εδαφικούς αποσβεστήρες μόνον και χωρίς κάποια εδαφική απόσβεση (υστερητική ή ακτινοβολία). Πραγματοποιήθηκαν δηλαδή 35 συνολικά αναλύσεις σεισμικής απόκρισης της ανεμογεννήτριας και του πασσάλου θεμελίωσης.

Η αποτίμηση της **Επίδρασης της Θεμελίωσης στη Σεισμική Απόκριση του Πύργου** βασίσθηκε στον υπολογισμό του λόγου A των επιταχύνσεων της μάζας στην κορυφή του πύργου για το σύστημα ανεμογεννήτρια-πάσσαλος και για την απόλυτα πακτωμένη ανεμογεννήτρια, από το στάδιο της εξαναγκασμένης ταλάντωσης του συστήματος (βλ. **Σχήματα 6.8, 6.18 και 6.19**). Τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα ακόλουθα:

(α) Για πλήρες σύστημα εδαφικών ελατηρίων και αποσβεστήρων, η συμμετοχή της θεμελίωσης οδηγεί σε μείωση της της επιτάχυνσης της μάζας με:

- $A_{SSI} = 0.40 - 0.43$ για μέσης πυκνότητας και πυκνή άμμο αντίστοιχα, και

- $A_{SSI} = 0.53 - 0.63$ για μαλακή και στιφρή άργιλο αντίστοιχα.

Πέραν του τύπου εδάφους, η δυσκαμψία του πύργου δεν έχει συστηματική επίδραση στην τιμή του A_{SSI} .

(β) Η συμβολή της απόσβεσης ενέργειας λόγω υστερητικής συμπεριφοράς των ελατηρίων (υστερητική απόσβεση) και λόγω ιξωδών αποσβεστήρων (απόσβεση ακτινοβολίας) είναι

συγκρίσιμες, με ελαφρώς μεγαλύτερη βαρύτητα της απόσβεσης ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, οι μέσες τιμές των αντίστοιχων συντελεστών A είναι:

$$- (A_{rad})_{av} = 0.41 \text{ και } (A_{hyst})_{av} = 0.53 \text{ για αμμώδη πυθμένα}$$

$$- (A_{rad})_{av} = 0.58 \text{ και } (A_{hyst})_{av} = 0.75 \text{ για αργιλικό πυθμένα}$$

(γ) Οι μέσες τιμές των συντελεστών A από τις αναλύσεις με απλή προσθήκη του πασσάλου, χωρίς προσθήκη εδαφικών ελατηρίων, είναι:

$$- (A_{pile})_{av} = 0.15 \text{ για αμμώδη πυθμένα}$$

$$- (A_{pile})_{av} = 0.22 \text{ για αργιλικό πυθμένα}$$

Από σύγκριση με τις ανωτέρω τιμές των A_{SSI} , A_{hyst} και A_{rad} προκύπτει ότι η συμβολή του πασσάλου και μόνον, ως δομικού στοιχείου, είναι περισσότερο σημαντική από την συμβολή του περιβάλλοντος εδάφους, και ελέγχει ουσιαστικά την απόκριση της ανεμογεννήτριας. Η παρατήρηση αυτή αποδίδεται στο γεγονός ότι το δομικό σύστημα που εξετάζεται είναι πολύ εύκαμπτο σε σχέση με την επιβαλλόμενη σεισμική διέγερση. Αναφέρεται χαρακτηριστικά ότι ο λόγος περιόδων T_{SSI}/T_{exc} κυμαίνεται από $2.95/0.50 = 5.90$, για χαλαρή άμμο και την πλέον εύκαμπτη ανεμογεννήτρια που εξετάστηκε (δυσκαμψία πύργου K_0), σε $1.26/0.50 = 2.52$ για την πλέον δύσκαμπτη ανεμογεννήτρια (δυσκαμψία πύργου $27K_0$). Οι ανωτέρω τιμές του λόγου περιόδων εμπίπτουν σε περιοχή μακράν των συνθηκών συντονισμού, όπου η τιμή της ιξώδους απόσβεσης έχει ελάχιστη επίδραση στην συμπεριφορά του συστήματος.

Η αποτίμηση της **Επίδρασης της Θεμελίωσης στην Ιδιοπερίοδο Ταλάντωσης** βασίσθηκε στην περίοδο της ελεύθερης ταλάντωσης που ακολούθησε την εξαναγκασμένη ταλάντωση της πακτωμένης ανεμογεννήτριας και του συστήματος ανεμογεννήτρια - πάσσαλος θεμελίωσης (βλ. **Σχήματα 6.5, 6.15 & 6.16**). Τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα ακόλουθα:

(δ) Σε όλες ανεξαιρέτως τις παραμετρικές αναλύσεις, η προσθήκη του πασσάλου θεμελίωσης οδήγησε σε αύξηση της ιδιοπεριόδου ταλάντωσης του συστήματος. Η σχετική αύξηση της ιδιοπεριόδου, αναλογικά με την ιδιοπερίοδο της πακτωμένης ανεμογεννήτριας, ήταν μεγαλύτερη κυρίως για περισσότερο δύσκαμπτο πύργο και δευτερευόντως για αργιλικό πυθμένα. Συγκεκριμένα, οι μέσες τιμές του λόγου T_{SSI}/T_{rigid} κυμάνθηκαν ως ακολούθως:

$$- T_{SSI}/T_{rigid} = 1.37 \text{ έως } 3.00 \text{ για αμμώδη πυθμένα και δυσκαμψία πύργου από } K_0 \text{ έως } 27K_0$$

$$- T_{SSI}/T_{rigid} = 1.50 \text{ για δυσκαμψία πύργου ίση προς } 3K_0 \text{ και αμμώδη πυθμένα}$$

- $T_{SSI}/T_{rigid} = 1.61$ για δυσκαμψία πύργου ίση προς $3K_0$ και αργιλικό πυθμένα

(ε) Η επίδραση της πυκνότητας της άμμου και της στιφρότητας της αργίλου δεν είχαν σημαντική και συστηματική επίδραση στην επιμήκυνση της ιδιοπεριόδου.

(στ) Είναι επίσης ενδιαφέρον το γεγονός ότι οι τιμές της ιδιοπεριόδου για πλήρες σύστημα εδαφικών αποσβεστήρων και ελατηρίων (T_{SSI}) ήταν πρακτικά οι ίδιες με τις τιμές που προέκυψαν για εδαφικούς αποσβεστήρες μόνο (T_{rad}), για εδαφικά ελατήρια μόνο (T_{hyst}) ή χωρίς κάποια εδαφική απόσβεση (υστερητική ή ακτινοβολίας). Η εν λόγω παρατήρηση είναι, εν πολλοίς αναμενόμενη, δεδομένου ότι η ιδιοπερίοδος ενός ταλαντωτή εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την συνολική δυσκαμψία και την μάζα του και ελάχιστα από την απόσβεση ενέργειας. Επιπλέον, υποδηλώνει ότι η πρόσθετη δυσκαμψία λόγω των εδαφικών ελατηρίων είναι πολύ μικρή σε σχέση με την δυσκαμψία των δομικών στοιχείων της ανεμογεννήτριας (δηλαδή του πύργου και του πασσάλου θεμελίωσης).

Η αποτίμηση της **Επίδρασης της Θεμελίωσης στην (ισοδύναμη) Ιξώδη Απόσβεση** βασίσθηκε στην απόσβεση της ελεύθερης ταλάντωσης που ακολούθησε την εξαναγκασμένη ταλάντωση της πακτωμένης ανεμογεννήτριας και του συστήματος ανεμογεννήτρια - πάσσαλος θεμελίωσης (βλ. **Σχήματα 6.10, 6.20 & 6.21**). Τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα ακόλουθα:

(ζ) Για πλήρες σύστημα εδαφικών ελατηρίων και αποσβεστήρων, η προσθήκη του πασσάλου θεμελίωσης οδήγησε σε αύξηση της απόσβεσης ενέργειας, όπως εκφράζεται από τον ισοδύναμο λόγο ιξώδους απόσβεσης ζ_{total} . Η αύξηση του ζ_{total} , πέραν της δομικής απώλειας ενέργειας Rayleigh, ήταν μεγαλύτερη κυρίως για περισσότερο δύσκαμπτο πύργο και δευτερευόντως για αργιλικό πυθμένα. Συγκεκριμένα, οι μέσες τιμές του λόγου απόσβεσης ζ_{total} κυμάνθηκαν ως ακολούθως:

- $\zeta_{total} = 5.90\%$ έως 35.55% για αμμώδη πυθμένα και δυσκαμψία πύργου από K_0 έως $27K_0$

- $\zeta_{total} = 9.27\%$ για δυσκαμψία πύργου ίση προς $3K_0$ και αμμώδη πυθμένα

- $\zeta_{total} = 14.14\%$ για δυσκαμψία πύργου ίση προς $3K_0$ και αργιλικό πυθμένα

Η επίδραση της πυκνότητας της άμμου και της στιφρότητας της αργίλου δεν είχαν σημαντική και συστηματική επίδραση στην τιμή του ζ_{SSI} .

(η) Οι ανωτέρω τιμές του ζ_{SSI} είναι σημαντικά μεγαλύτερες από τις τιμές της βιβλιογραφίας, εκτός ίσως από την τιμή για την εύκαμπτη ανεμογεννήτρια σε άμμο μέσης πυκνότητας. Είναι σημαντικό να αναφερθεί σε αυτό το σημείο ότι η πληθώρα των τιμών της

βιβλιογραφίας έχουν προκύψει για φόρτιση ανέμου και κυμάτων στην ανεμογεννήτρια, σε αντίθεση με τη σεισμική φόρτιση που εξετάζεται στην παρούσα Διπλωματική Εργασία.

(θ) Εντύπωση προκαλεί το γεγονός ότι η εν λόγω πρόσθετη απόσβεση ενέργειας λόγω τη θεμελίωσης οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στην απόσβεση ακτινοβολίας ζ_{rad} , αφού η υστερητική απόσβεση ζ_{hyst} είναι πρακτικά μηδενική. Η ανωτέρω παρατήρηση, έρχεται σε αντίθεση με τα συμπεράσματα σχετικά με την απομείωση της επιτάχυνσης στην κορυφή του πύργου, κατά την εξαναγκασμένη ταλάντωση, σύμφωνα με τα οποία η υστερητική απόσβεση και η απόσβεση ακτινοβολίας έχουν συγκρίσιμη συμβολή.

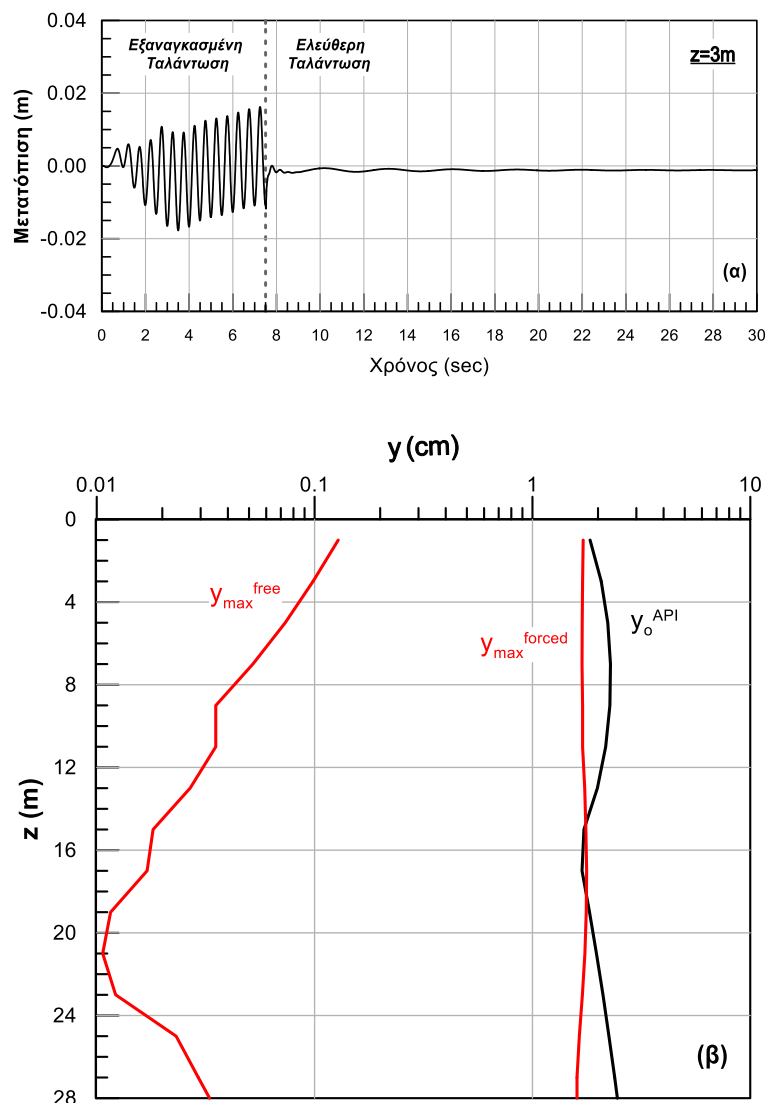
(ι) Για την ερμηνεία αυτής της αντίφασης, το **Σχήμα 7.1** παρουσιάζεται η κατανομή με το βάθος τριών χαρακτηριστικών τιμών της οριζόντιας μετατόπισης του πασσάλου για άμμο μέσης πυκνότητας και δυσκαμψία πύργου ίση προς $3K_0$:

- της μετατόπισης «διαρροής» γ_0 της καμπύλης $p - \gamma$ (που αντιστοιχεί σε $p=0.76p_{ult}$)

- του εύρους εξαναγκασμένης ταλάντωσης γ_{max}^{forced}

- του μέγιστου εύρους ελεύθερης ταλάντωσης γ_{max}^{free}

Από το Σχήμα αυτό γίνεται πλέον προφανές ότι το εύρος της ελεύθερης ταλάντωσης είναι πολύ μικρότερο τόσο από το εύρος της εξαναγκασμένης ταλάντωσης όσο και από τη μετατόπιση διαρροής των ελατηρίων. Αυτό εξηγεί τη μηδενική πρακτικά συμβολή της υστερητικής απόσβεσης στην ελεύθερη ταλάντωση του συστήματος, αλλά οδηγεί σε ένα επιπλέον σημαντικό συμπέρασμα: η μέθοδος εκτίμησης της απόσβεσης του συστήματος από την ελεύθερη ταλάντωση είναι λανθασμένη.

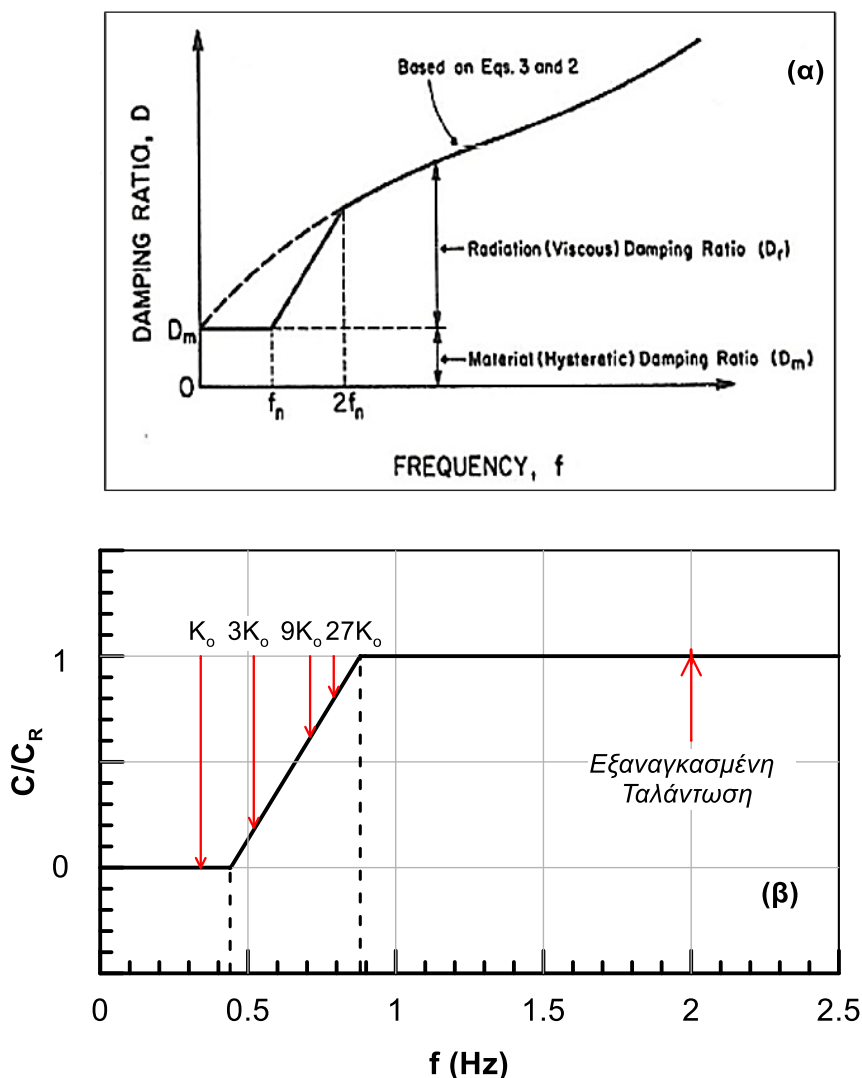


Σχήμα 7.1: (α) Χρονοϊστορία οριζόντιων μετακινήσεων σε βάθος $z=3\text{m}$ και (β) κατανομή οριζόντιων μετατοπίσεων κατά μήκος του πασσάλου για άμμο μέσης πυκνότητας και δυσκαμψία πύργου ίση προς $3K_0$

(κ) Όσον αφορά στην απόσβεση ακτινοβολίας υπενθυμίζεται ότι οφείλεται σε κύματα (SH) εγκλωβισμένα στο μαλακό έδαφος πάνω από το βραχώδες υπόβραθο (οιωνοί κύματα LOVE), για τα οποία είναι γνωστό ότι δεν υφίστανται (ή είναι σημαντικά εξασθενημένα) για συχνότητες ταλάντωσης μικρότερες από την ιδιοσυχνότητα του εδαφικού στρώματος. Μάλιστα οι Gazetas & Dobry (1984) προτείνουν τη διόρθωση όπως φαίνεται **Σχήμα 7.1α** για τη θεωρητικά υπολογιζόμενη τιμή της σταθεράς του αποσβεστήρα C . Στο **Σχήμα 7.1β** για στρώμα άμμου μέσης πυκνότητας με ανελαστική ιδιοπερίοδο ταλάντωσης $T_{s,unel}=2.27\text{ sec}$ και αντίστοιχη συχνότητα $f=1/T=0.44\text{ Hz}$ υποδεικνύονται με βέλη οι συχνότητες εξαναγκασμένης ταλάντωσης $T_{\text{forced}}=1/0.50=2\text{ Hz}$, καθώς και οι συχνότητες ταλάντωσης για όλες τις παραμετρικές αναλύσεις που εξετάστηκαν, δηλαδή $f_{\text{free}}=0.34-0.79\text{ Hz}$. Παρατηρείται

ότι η συχνότητα της εξαναγκασμένης ταλάντωσης είναι σαφώς μεγαλύτερη από τις συχνότητες για τις οποίες απαιτείται διόρθωση (απομείωση) της σταθεράς του ιξώδους αποσβεστήρα. Αντίθετα, η πλειονότητα των συχνοτήτων της ελεύθερης ταλάντωσης εμπίπτει στην περιοχή των συχνοτήτων αποκοπής για τις οποίες απαιτείται μείωση έως και μηδενισμός της θεωρητικής τιμής της σταθεράς του αποσβεστήρα.

(λ) Η ανωτέρω παρατήρηση επιβεβαιώνει ότι η μέθοδος της ελεύθερης ταλάντωσης δεν είναι ενδεδειγμένη για την εκτίμηση της συνεισφοράς της θεμελίωσης στη συνολική απόσβεση ενέργειας του συστήματος. Επιπλέον εξηγεί εν μέρει τουλάχιστον γιατί οι τιμές της απόσβεσης που λαμβάνονται με τη μέθοδο αυτή υπερβαίνουν σημαντικά τις τιμές εργαστηριακών μετρήσεων από τη βιβλιογραφία.



Σχήμα 7.2: Διόρθωση σταθεράς αποσβεστήρα για συχνότητες διέγερσης εντός της περιοχής των συχνοτήτων αποκοπής

7.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

(α) Ένα από τα κύρια συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας είναι ότι για πολύ εύκαμπτες κατασκευές, όπως είναι εν γένει οι ανεμογεννήτριες, η συμβολή της θεμελίωσης στη σεισμική απόκριση του συστήματος συνδέεται σχεδόν αποκλειστικά με την επιμήκυνση της ιδιοπεριόδου ταλάντωσης μακράν του συντονισμού και εξαρτάται ελάχιστα από την πρόσθετη απώλεια ενέργειας. Επομένως, η έρευνα όσον αφορά στην πρόσθετη απώλεια ενέργειας λόγω της θεμελίωσης θα πρέπει να στραφεί προς άλλες μακροπερίοδες πηγές δυναμικής φόρτισης, όπως πιθανόν η φόρτιση του ανέμου και των θαλάσσιων κυμάτων.

(β) Η μέθοδος της ελεύθερης ταλάντωσης είναι ικανοποιητική για την εκτίμηση της ιδιοπεριόδου ταλάντωσης του συστήματος ανεμογεννήτρια - πάσσαλος - έδαφος αλλά είναι λανθασμένη όσον αφορά την εκτίμηση της ιξώδους απόσβεσης. Για το λόγο αυτό η εν λόγω παράμετρος θα πρέπει να εκτιμηθεί με άλλες μεθοδολογίες, όπως για παράδειγμα η ανάστροφη ανάλυση της εξαναγκασμένης ταλάντωσης της ανεμογεννήτριας στην περίπτωση της θεμελίωσης με μονο-πάσσαλο.

(γ) Όπως έχει τονιστεί στη βιβλιογραφία, αλλά έχει επισημανθεί και στο πλαίσιο της Διπλωματικής Εργασίας, οι ιδιότητες των υστερητικών εδαφικών ελατηρίων (καμπύλες $p - \gamma$) και της σταθεράς του ιξώδους αποσβεστήρα θα πρέπει να βαθμονομηθούν έναντι καλά τεκμηριωμένων πειραμάτων υπό κλίμακα ή τρισδιάστατων συζευγμένων αριθμητικών αναλύσεων. Στο πλαίσιο της προτεινόμενης βαθμονόμησης της μεθοδολογίας «δοκού επί ελατηριωτού εδάφους Winkler» πρέπει να εξετασθούν και εναλλακτικές διατάξεις ελατηρίων και αποσβεστήρων, όπως για παράδειγμα η «εν σειρά» διάταξη τους.

Βιβλιογραφία

- Aasen. (2016). "Soil-structure interaction modelling for an offshore wind turbine with monopile foundation."
- Adhikari, S., Bhattacharya, S., Adhikari, S., and Bhattacharya, S. (2011). "Article in Wind and Structures An International Journal ." 14(2), 85–112.
- Anoyatis, G., and Mylonakis, G. (2012). "Dynamic Winkler modulus for axially loaded piles." *Géotechnique*, 62(6), 521–536.
- Ansys. (2016). "Ansys Multiphysics Release 17.2." *ANSYS, Inc and Ansys Europe, Ltd.*
- API. (2002). "Recommended Practice for Planning, Design, and Constructing Fixed Offshore Platforms, API RP 2A-WSD." *American Petroleum Institute*, Washington, D.C.
- Berger, E., Mahin, S. A., and Pyke, R. (1977). "Simplified method for evaluating soil-pile-structure interaction effects." *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*, 1977-May, 589–598.
- Bhattacharya, S., Nikitas, G., Arany, L., and Nikitas, N. (2017). "Soil-Structure Interactions (SSI) for Offshore Wind Turbines." 1–23.
- Broms, B. B. (1964a). "The Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils." *ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divisions* *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divisions*1, 90(3), 27–63.
- Broms, B. B. (1964b). "Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils." *ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divisions* *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divisions*, 90(3), 126–156.
- Byrne, B. W., and Houlsby, G. T. (2003). "Foundations for offshore wind turbines." *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 361(1813), 2909–2930.
- Carswell, W., Johansson, J., Løvholt, F., Arwade, S. R., Madshus, C., DeGroot, D. J., and Myers, A. T. (2015). "Foundation damping and the dynamics of offshore wind turbine monopiles." *Renewable Energy*, Elsevier Ltd, 80, 724–736.
- Chacko, M. J. (1994). "Analysis of Dynamic Soil-Pile-Structure Interaction." Master's Thesis, University of California, Davis.
- Chen, C., and Duffour, P. (2018). "Modelling damping sources in monopile - supported offshore wind turbines." (November 2017), 1–20.

- Chopra, A. K. (2007). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Pearson/Prentice Hall.
- Damgaard, M., Andersen, J. K. F., Ibsen, L. B., and Andersen, L. V. (2012). "Natural frequency and damping estimation of an offshore wind turbine structure." *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*, 300–307.
- Damgaard, M., Andersen, J. K. F., Ibsen, L. B., and Andersen, L. V. (2013a). "Time-varying dynamic properties of offshore wind turbines evaluated by modal testing." *18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Challenges and Innovations in Geotechnics, ICSMGE 2013*, 2343–2346.
- Damgaard, M., Ibsen, L. B., Andersen, L. V., and Andersen, J. K. F. (2013b). "Cross-wind modal properties of offshore wind turbines identified by full scale testing." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 116, 94–108.
- Damgaard, M., Zania, V., Andersen, L. V, and Ibsen, L. B. (2014). "Effects of soil – structure interaction on real time dynamic response of offshore wind turbines on monopiles." *Engineering Structures*, Elsevier Ltd, 75, 388–401.
- Darendeli, M. B. (2001). *Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves*.
- Det Norske Veritas. (2009). *Offshore Standard DNV-OS-B101 Metallic Materials*.
- DNV. (2013). "Design of Offshore Wind Turbine Structures; Offshore Standard." *Design of Offshore Wind Turbine Structures*, (January), 214.
- Dobry, R., O'Rourke, M. J., Roesset, J. M., and Vicente, E. (1982). "Horizontal stiffness and damping of single piles." *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 108(3), 439–459.
- Gazetas, G. (1991). "Foundation Vibrations." *Foundation Engineering Handbook*, Springer US, Boston, MA, 553–593.
- Gazetas, G., and Dobry, R. (1984a). "Simple Radiation Damping Model for Piles and Footings." *Journal of Engineering Mechanics*, 110(6), 937–956.
- Gazetas, G., and Dobry, R. (1984b). "Horizontal Response of Piles in Layered Soils." *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(1), 20–40.
- Ghaemmaghami, A. R., Mercan, O., and Kianoush, R. (2017). "Seismic soil-structure interaction analysis of wind turbines in frequency domain." *Wind Energy*.
- Guo, W. D., and Lee, F. H. (2001). "Load transfer approach for laterally loaded piles." *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 25(11), 1101–1129.
- Harte, M., Basu, B., and Nielsen, S. R. K. (2012). "Dynamic analysis of wind turbines including soil-structure interaction." *Engineering Structures*, 45, 509–518.
- Idriss, I. M., and Boulanger, R. W. (2008). *Soil Liquefaction During Earthquakes*. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California, USA.
- Imai, T., and Tonouchi, K. (1982). "Correlation of N value wit S-wave velocity and shear modulus." A. A. Balkema, 67–72.
- Iwan, W. . (1967). *On a Class of Models for the Yielding Behavior of Continuous and Composite Systems*.
- Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., and Scott, G. (2009). "Definition of a 5-MW reference

- wind turbine for offshore system development.” *Contract*, (February), 1–75.
- Jonkman, J. M., and Buhl, M. L. (2005). *FAST user’s guide. FAST User’s Guide*.
- Karatzia, X., and Mylonakis, G. (2017). “Horizontal stiffness and damping of piles in inhomogeneous soil.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(4), 1–19.
- Kaynia, A. M. (2018). “Seismic considerations in design of offshore wind turbines.” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Elsevier Ltd, (September 2017), 0–1.
- Kjørlaug, R. A., and Kaynia, A. M. (2015). “Vertical earthquake response of megawatt-sized wind turbine with soil-structure interaction effects.” *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(13), 2341–2358.
- Kottke, A., and Rathje, E. M. (2008). “A Semi-Automated Procedure for Selecting and Scaling Recorded Earthquake Motions for Dynamic Analysis.” *Earthquake Spectra*, 24(4), 911–932.
- Krathe, V. L., and Kaynia, A. M. (2016). “Implementation of a nonlinear foundation model for soil-structure interaction analysis of offshore wind turbines in FAST.”
- Kulhemeyer, R. L. (1979). “Static and dynamic laterally loaded floating piles.” *ASCE 14394*, ASCE, Reston, VA.
- Markou, A. A., and Kaynia, A. M. (2018). “Nonlinear soil-pile interaction for offshore wind turbines.” *Wind Energy*, John Wiley and Sons Ltd, 21(7), 558–574.
- Masing, G. (1926). “Eigenspannungen und Verfestigung beim Messing.” *2nd International Congress of Applied Mechanics*, 332–335.
- Matlock, H. (1970). “CORRELATIONS FOR DESIGN OF LATERALLY LOADED PILES IN SOFT CLAY.” 1970 offshore technol conf, Houston, TX, USA, 1, 577–594.
- El Naggar, M. H., and Novak, M. (1996). “Nonlinear analysis for dynamic lateral pile response.” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Elsevier BV, 15(4), 233–244.
- El Naggar, M. H., Shayanfar, M. A., and Kimiaei, M. (2005). “Simplified BNWF model for nonlinear seismic response analysis of offshore piles with nonlinear input ground motion analysis.” 380, 365–380.
- Nogami, T. (1980). “Dynamic Stiffness and Damping of Pile Groups in Inhomogeneous soil.” *ASCE Special Technical Publications on Dynamic Response of Pile Foundations: Analytical Aspects*, 31–52.
- Nogami, T., and Novak, M. (1976). “Soil-pile interaction in vertical vibration.” *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 4(3), 277–293.
- Nogami, T., and Novak, M. (1977). “Resistance of soil to a horizontally vibrating pile.” *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 5(3), 249–261.
- Novak, M., Aboul-Ella, F., and Nogami, T. (1978). “Dynamic soil reactions for plane strain case.” *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 104(4), 953–959.
- Novak, M., and Sheta, M. (1980). “Approximate approach to contact problems of piles.” *Proc. Geotechnical Engineering Division, ASCE, National Convention, Dynamic Response of Pile Foundations: Analytical Aspects*, Florida, 30 October, 53–79.
- Nygaard, T. A., De Vaal, J., Pierella, F., Oggiano, L., and Stenbro, R. (2016). “Development, Verification and Validation of 3DFloat; Aero-servo-hydro-elastic Computations of Offshore Structures.” *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 425–433.

- Oh, K. Y., Nam, W., Ryu, M. S., Kim, J. Y., and Epureanu, B. I. (2018). "A review of foundations of offshore wind energy convertors: Current status and future perspectives." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 88(February), 16–36.
- Ohta, Y., and Goto, N. (1978). "Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 6(2), 167–187.
- Page, A. M., Grimstad, G., Eiksund, G. R., and Jostad, H. P. (2018). "A macro-element pile foundation model for integrated analyses of monopile-based offshore wind turbines." *Ocean Engineering*, Elsevier Ltd, 167, 23–35.
- Page, A. M., Næss, V., De Vaal, J. B., Eiksund, G. R., and Nygaard, T. A. (2019). "Impact of foundation modelling in offshore wind turbines: Comparison between simulations and field data." *Marine Structures*, Elsevier Ltd, 64(April 2018), 379–400.
- Page, A. M., Skau, K. S., Jostad, H. P., and Eiksund, G. R. (2017). "A New Foundation Model for Integrated Analyses of Monopile-based Offshore Wind Turbines." *Energy Procedia*, Elsevier B.V., 137, 100–107.
- Randolph, M. F. (1981). "The response of flexible piles to lateral loading." *Géotechnique*, 31(2), 247–259.
- Reese, L. C., Cox, W. R., and Koop, F. D. (1974). "Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand." *Offshore Technology Conference, 6-8 May, Houston, Texas*, Offshore Technology Conference.
- Reese, L. C., Isenhower, W. M., and Wang, S.-T. (2005). *Analysis and Design of Shallow and Deep Foundations*. John Wiley.
- Roesset, J. M. (1980a). "Stiffness and damping coefficients of foundations." *ASCE Geotechnical Engineering Division National Convention*, 1–30.
- Roesset, J. M. (1980b). "The Use of Simple Models in Soil Structure Interaction." *2nd ASCE Conference on Civil Engineering and Nuclear Power*, Knoxville, TN, September 15-17.
- Sanchez-Salineró, I. (1982). *Static and Dynamic Stiffness of Single Piles*.
- Sapountzakis, E. J., Dikaros, I. C., Kampitsis, A. E., and Koroneou, A. D. (2015). "Nonlinear Response of Wind Turbines under Wind and Seismic Excitations with Soil-Structure Interaction." *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, American Society of Mechanical Engineers (ASME), 10(4).
- Schnabel, P. B., Lysmer, J., and Seed, H. B. (1972). *SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Rep. No. UCB/EERC-72/12*, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley.
- Shadlou, M., and Bhattacharya, S. (2016). "Dynamic stiffness of monopiles supporting offshore wind turbine generators." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Elsevier, 88, 15–32.
- Shirzadeh, R., Devriendt, C., Bidakhvidi, M. A., and Guillaume, P. (2013). "Experimental and computational damping estimation of an offshore wind turbine on a monopile foundation." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 120, 96–106.
- Syngros, K. (2004). *SEISMIC RESPONSE OF PILES AND PILE-SUPPORTED BRIDGE PIERS EVALUATED THROUGH CASE HISTORIES*.
- Tabesh, A., and Poulos, H. G. (2000). "A simple method for the seismic analysis of piles and its comparison with the results of centrifuge tests." *12th World Conf. on Earthquake*

- Engineering*, Auckland, New Zealand.
- Tarp-Johansen, N. J., Energy, D., Meyers, A., Andersen, L., and Damgaard Christensen, E. (2009). *Comparing Sources of Damping of Cross-Wind Motion*.
- Veletsos, A. S., and Younan, A. H. (1994). "Dynamic Modeling and Response of Soil-Wall Systems." *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(12), 2155–2179.
- Velez, A., Gazetas, G., and Krishnan, R. (1983). "Lateral dynamic response of constrained-head piles." *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(8), 1063–1081.
- Versteijlen, W. G., Metrikine, A. V., Hoving, J. S., Smid, E., and De Vries, W. E. (2011). "Estimation of the vibration decrement of an offshore wind turbine support structure caused by its interaction with soil." *Proceedings of the EWEA Offshore 2011 Conference*.
- Vucetic, M., and Dobry, R. (1991). "Effect of soil plasticity on cyclic response." *Journal of geotechnical engineering*, 117(1), 89–107.
- Wang, S., Kutter, B. L., Chacko, M. J., Wilson, D. W., Boulanger, R. W., and Abghari, A. (1998). "Nonlinear seismic soil-pile structure interaction." *Earthquake Spectra*.
- Wilson, D., Boulanger, R., and Kutter, B. (1997). *Soil-pile-superstructure interaction at soft or liquefiable soil sites: centrifuge data report for CSP1*. Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, Calif. Report No. UCD/ CGMDR-97/06, Davis, CA.
- Wind Europe. (2018). "Offshore wind in Europe 2017 Annual Report." *Refocus*, 3(2), 14–17.
- Zania, V. (2014). "Natural vibration frequency and damping of slender structures founded on monopiles." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Elsevier, 59, 8–20.
- Μπέντας, Α. (2014). "Φορτία, ανάλυση, συμπεριφορά και δομοστατικός σχεδιασμός θαλάσσιων ανεμογεννητριών." Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Παπαδόπουλος, Β., and Αναγνωστόπουλος, Α. (2016). *Σχεδιασμός Θεμελιώσεων*. Αθήνα.

Παράρτημα **A**

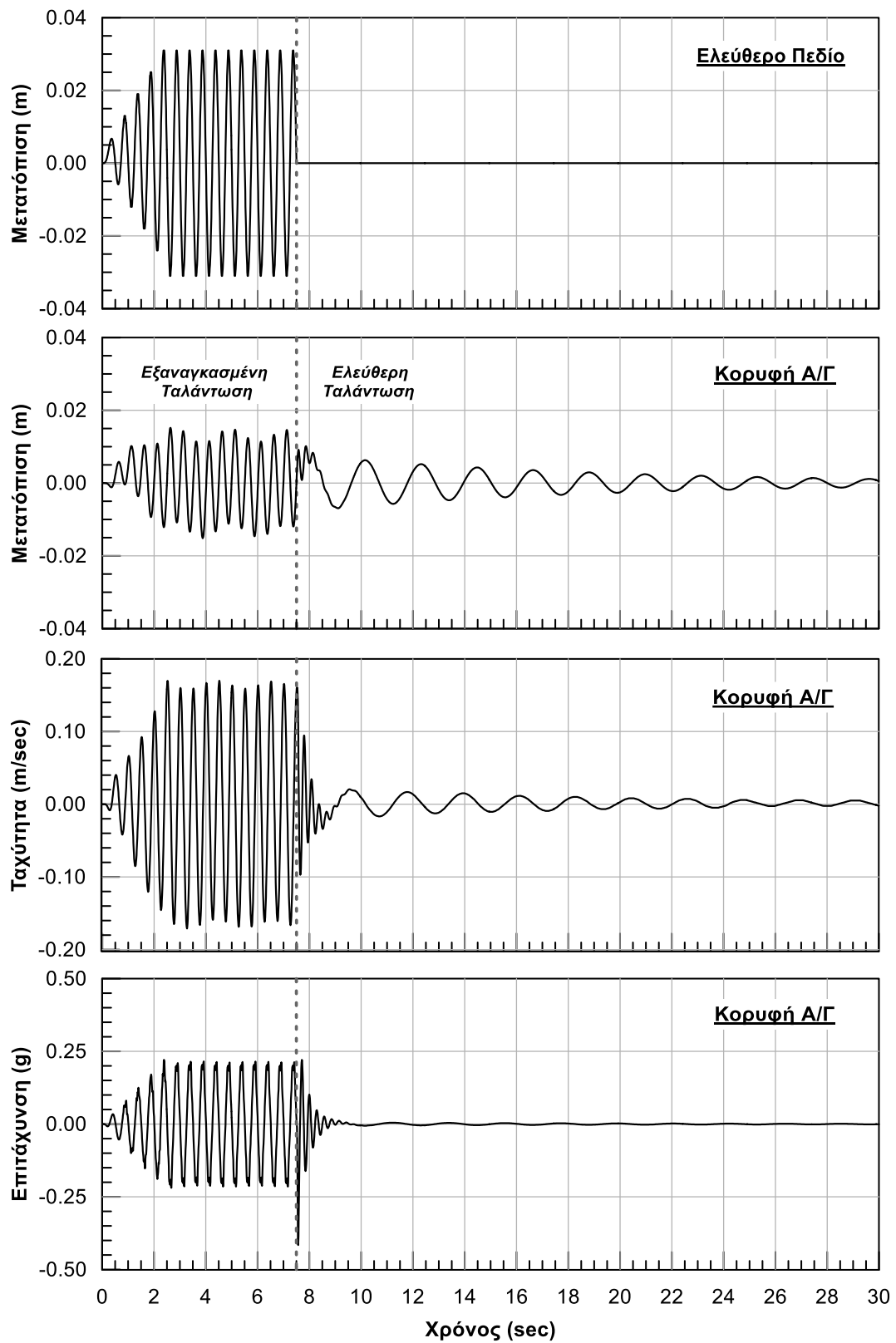
Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων

Στις παραγράφους του Παραρτήματος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του συνόλου των αριθμητικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Συγκεκριμένα η βασική αριθμητική ανάλυση πραγματοποιήθηκε για άμμο μέσης πυκνότητας, με μέσο λόγο υπερπίεσης πόρων $r_v=0.50$, και για την τυπική ανεμογεννήτρια 5-MW με δυσκαμψία πύργου ίση με K_0 . Πέραν της βασικής ανάλυσης, πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις: (α) για το ίδιο έδαφος αλλά πιο δύσκαμπτες ανεμογεννήτριες με δυσκαμψία πύργου $3K_0$, $9K_0$ και $27K_0$, και (β) για ανεμογεννήτρια δυσκαμψίας $3K_0$ αλλά σε πυκνή άμμο (με $r_v=0.25$) καθώς και σε μαλακή και σφιγρή άργιλο. Τόσο η βασική όσο και οι παραμετρικές αναλύσεις επαναλήφθηκαν για πλήρες σύστημα εδαφικών ελατηρίων και αποσβεστήρων, για υστερητικά εδαφικά ελατήρια μόνον και για εδαφικούς αποσβεστήρες μόνον. Πραγματοποιήθηκαν δηλαδή 35 συνολικά αναλύσεις σεισμικής απόκρισης της ανεμογεννήτριας και του πασσάλου θεμελίωσης.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ως α) χρονοϊστορία των επιβαλλόμενων μετακινήσεων στη βάση της ανωδομής κατά τη διέγερση του συστήματος β) χρονοϊστορία μετακινήσεων της ανεμογεννήτριας στην κορυφή της γ) αναπτυσσόμενη ταχύτητα στην κορυφή της ανεμογεννήτριας και δ) αναπτυσσόμενη επιτάχυνση στην κορυφή της ανεμογεννήτριας.

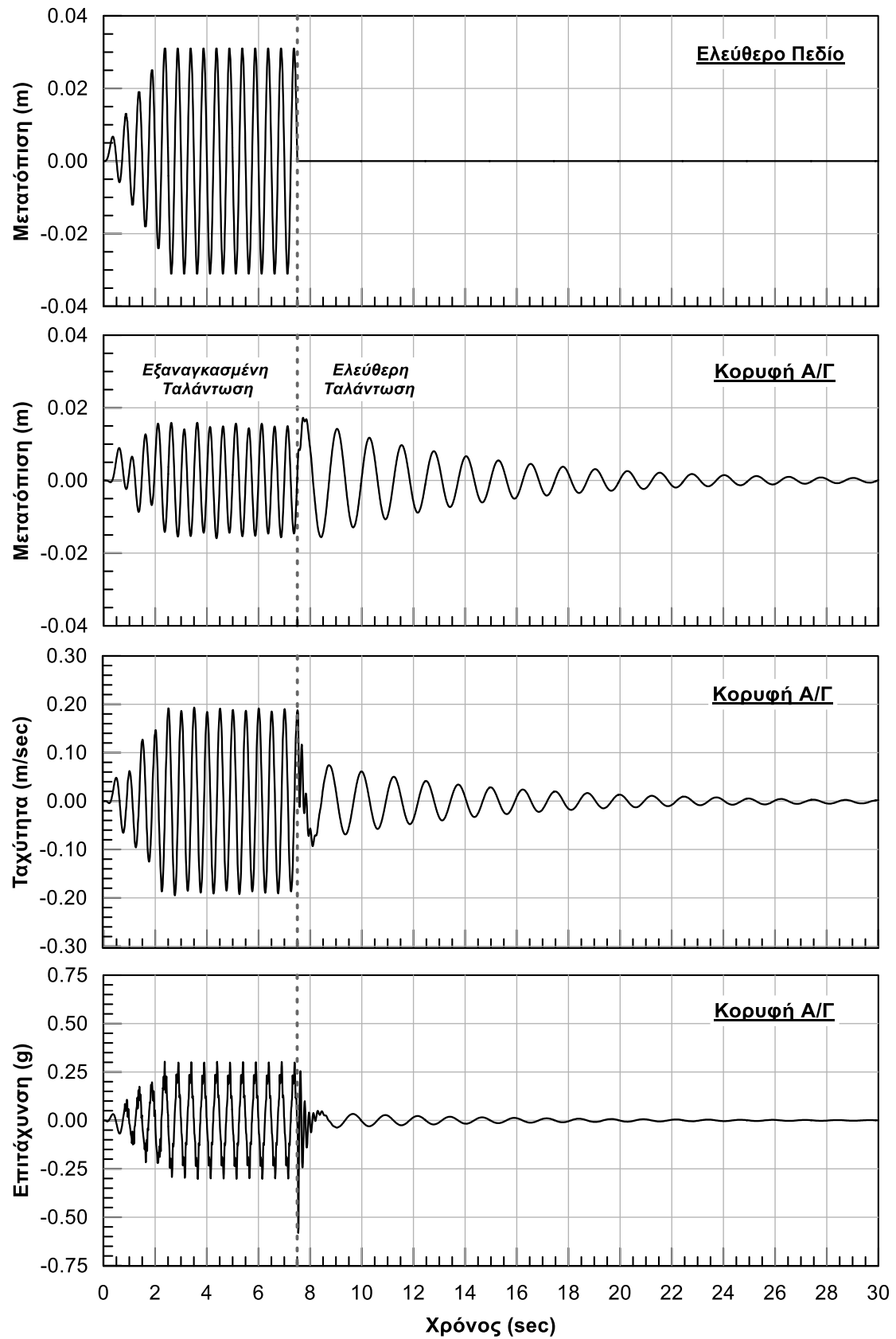
Πακτωμένη ανεμογεννήτρια

Δυσκαμψία πύργου K_0



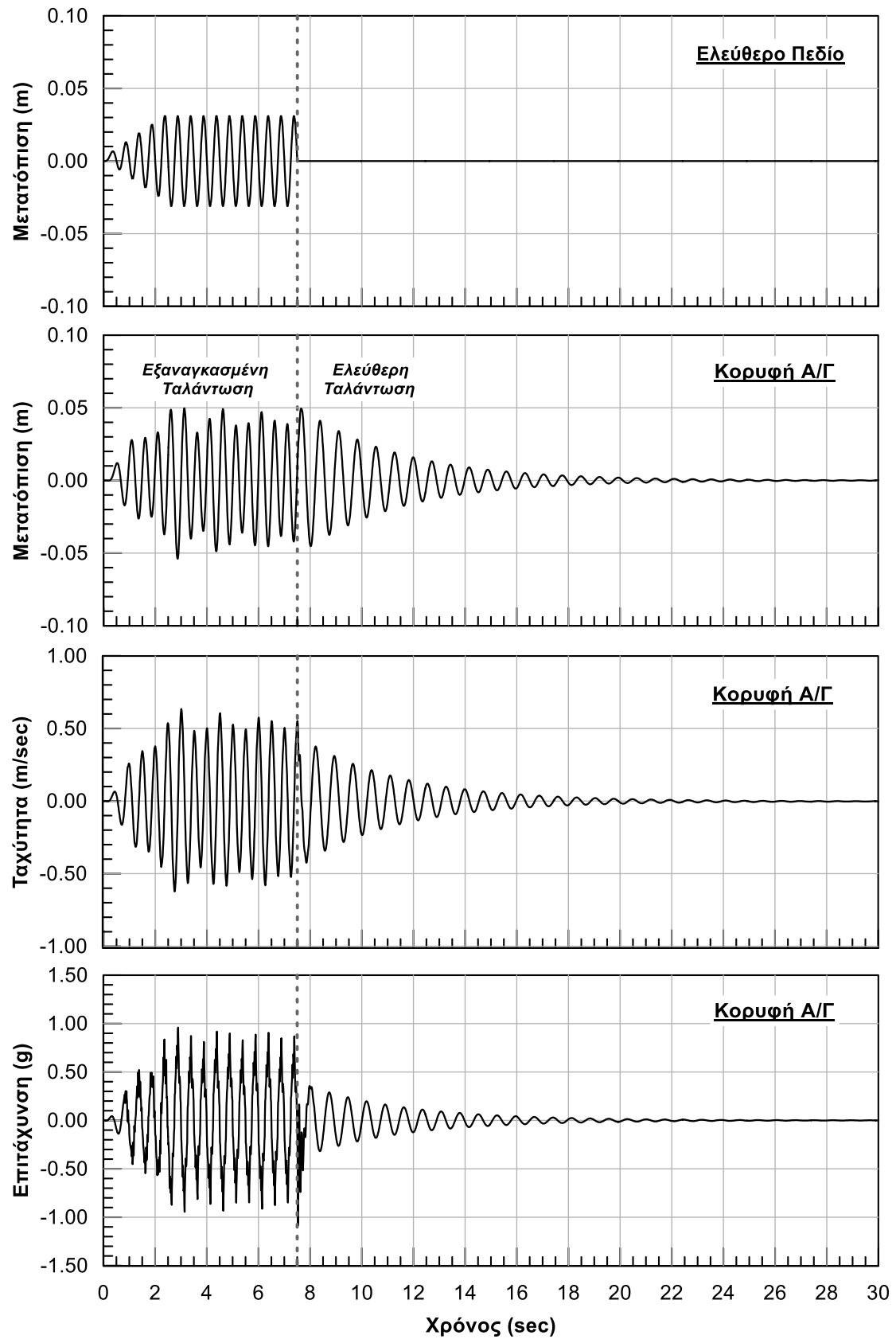
Πακτωμένη ανεμογεννήτρια

Δυσκαμψία πύργου 3Κ₀



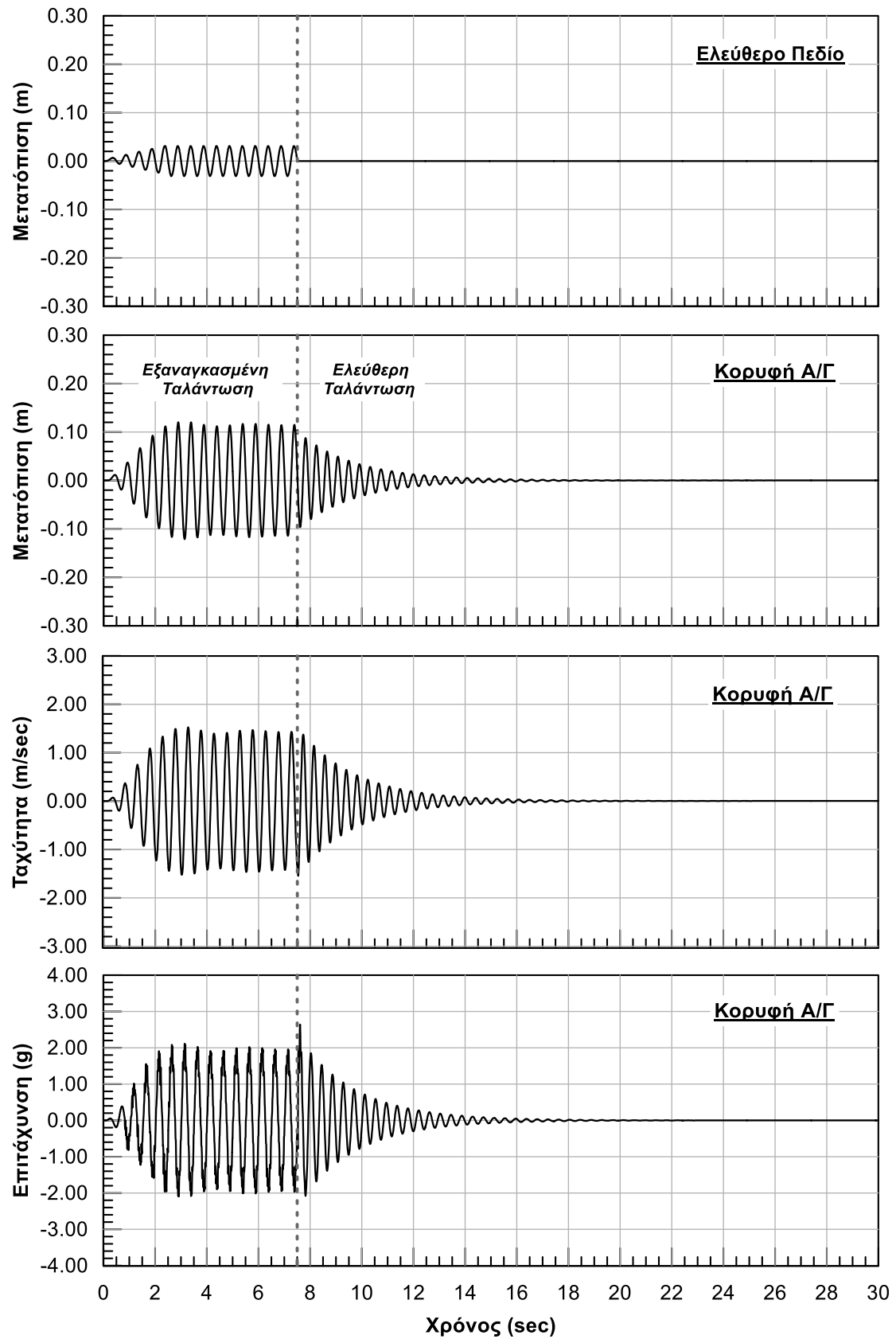
Πακτωμένη ανεμογεννήτρια

Δυσκαμψία πύργου 9Κ₀



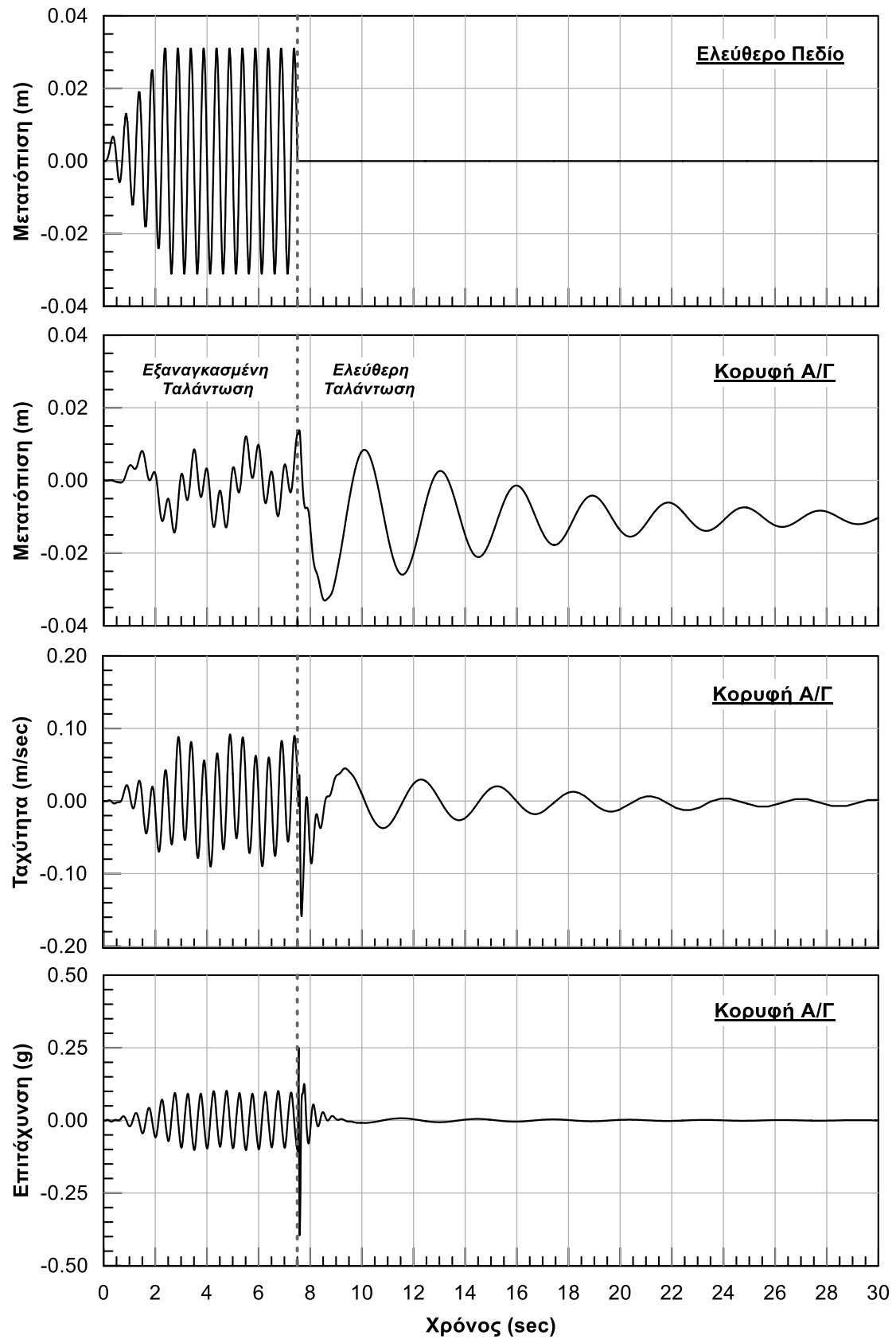
Πακτωμένη ανεμογεννήτρια

Δυσκαμψία πύργου 27Κ₀



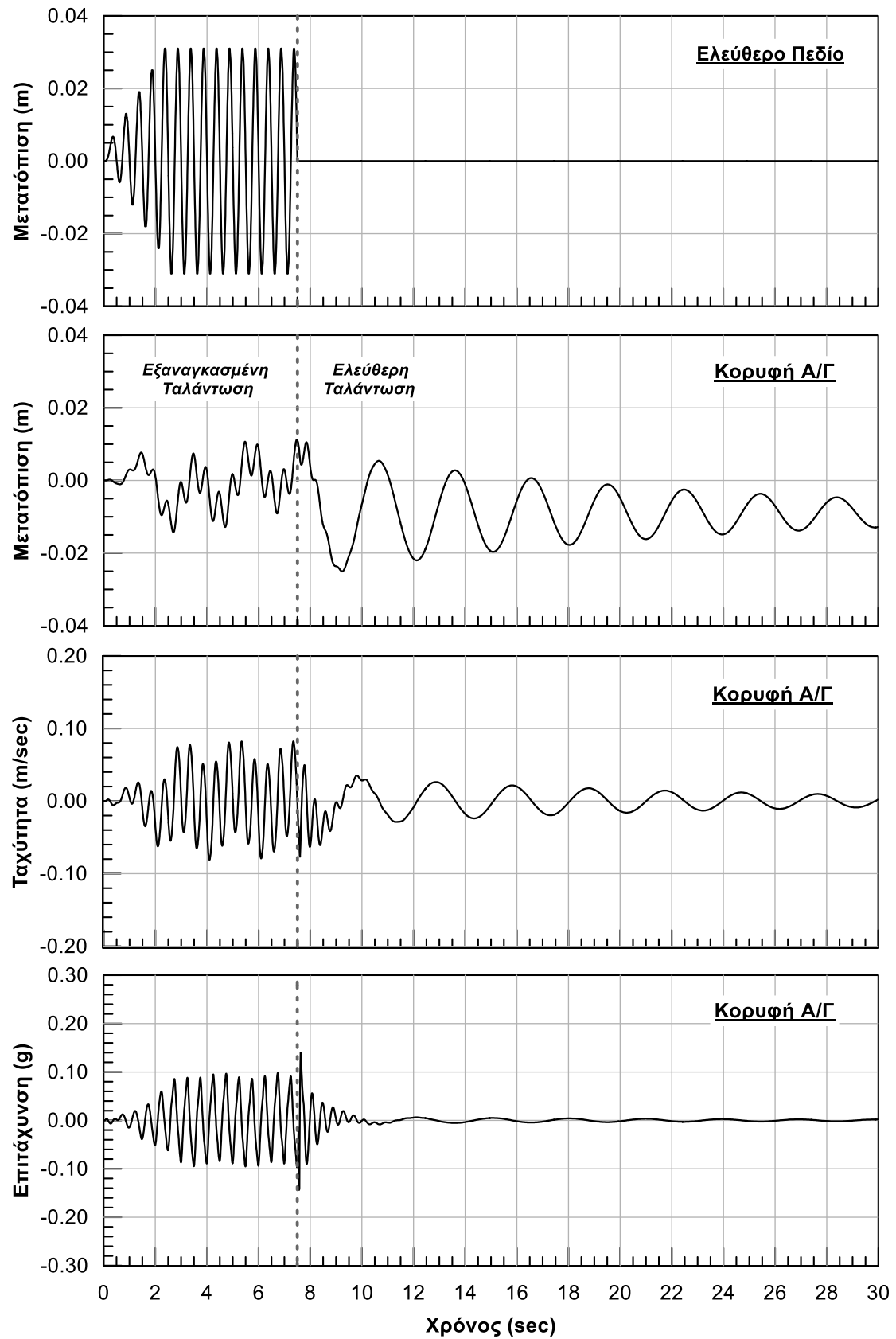
Άμμος μέσης πυκνότητας – Δυσκαμψία πύργου Κ₀

Πλήρες σύστημα εδαφικών ελατηρίων και αποσβεστήρων



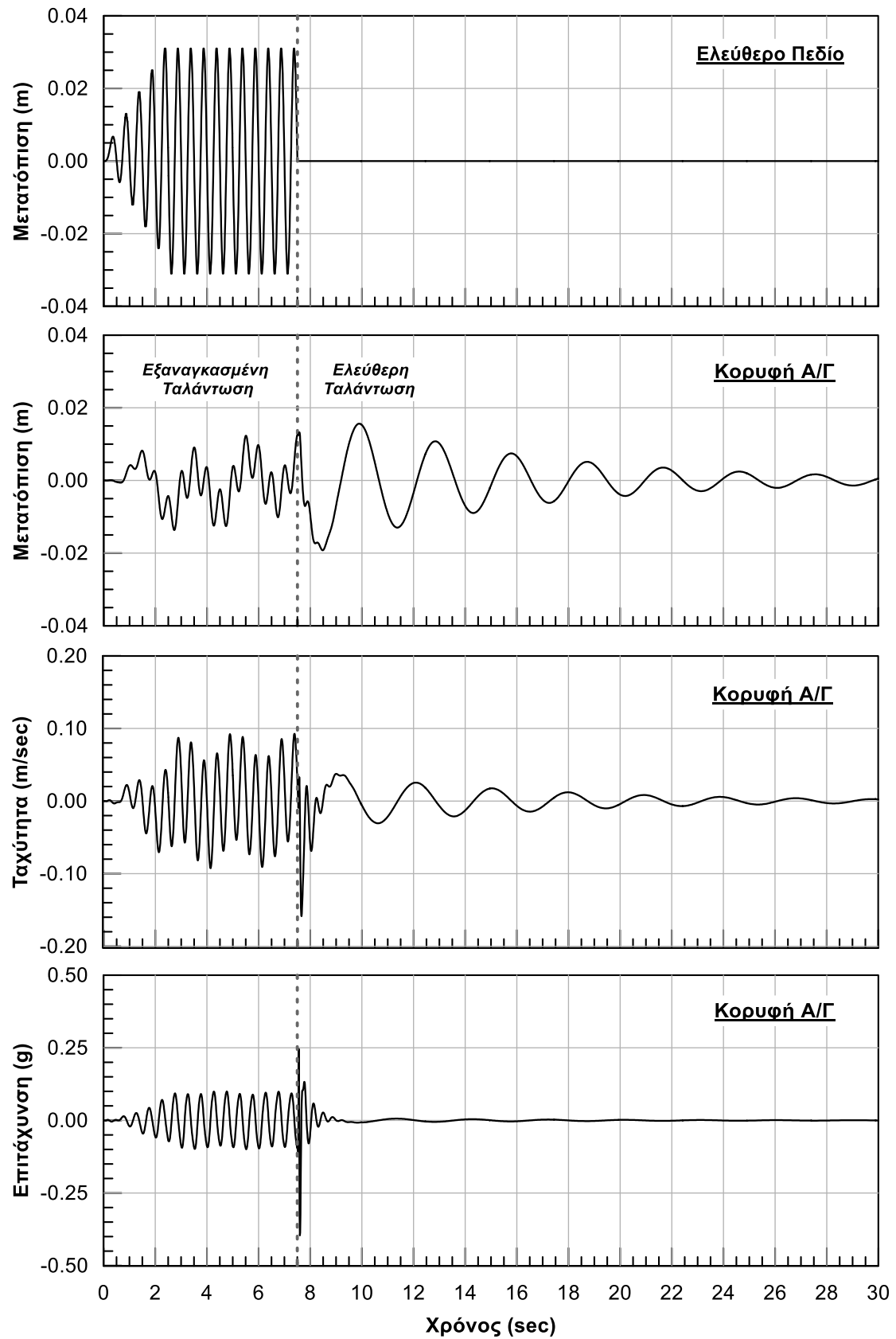
Άμμος μέσης πυκνότητας – Δυσκαμψία πύργου Κ_ο

Μόνο υστερητικά εδαφικά ελατήρια



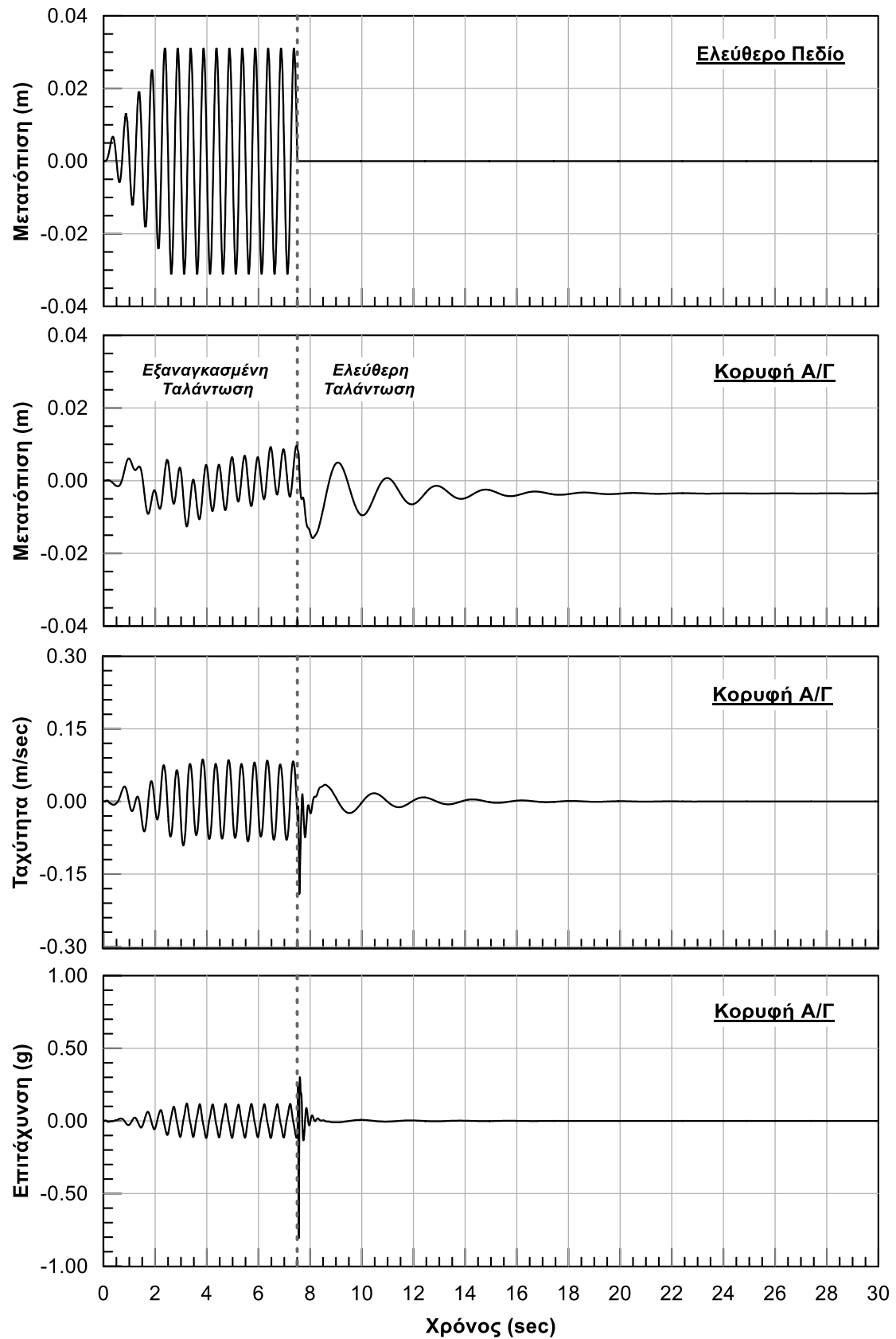
Άμμος μέσης πυκνότητας – Δυσκαμψία πύργου Κ_ο

Μόνο εδαφικοί αποσβεστήρες



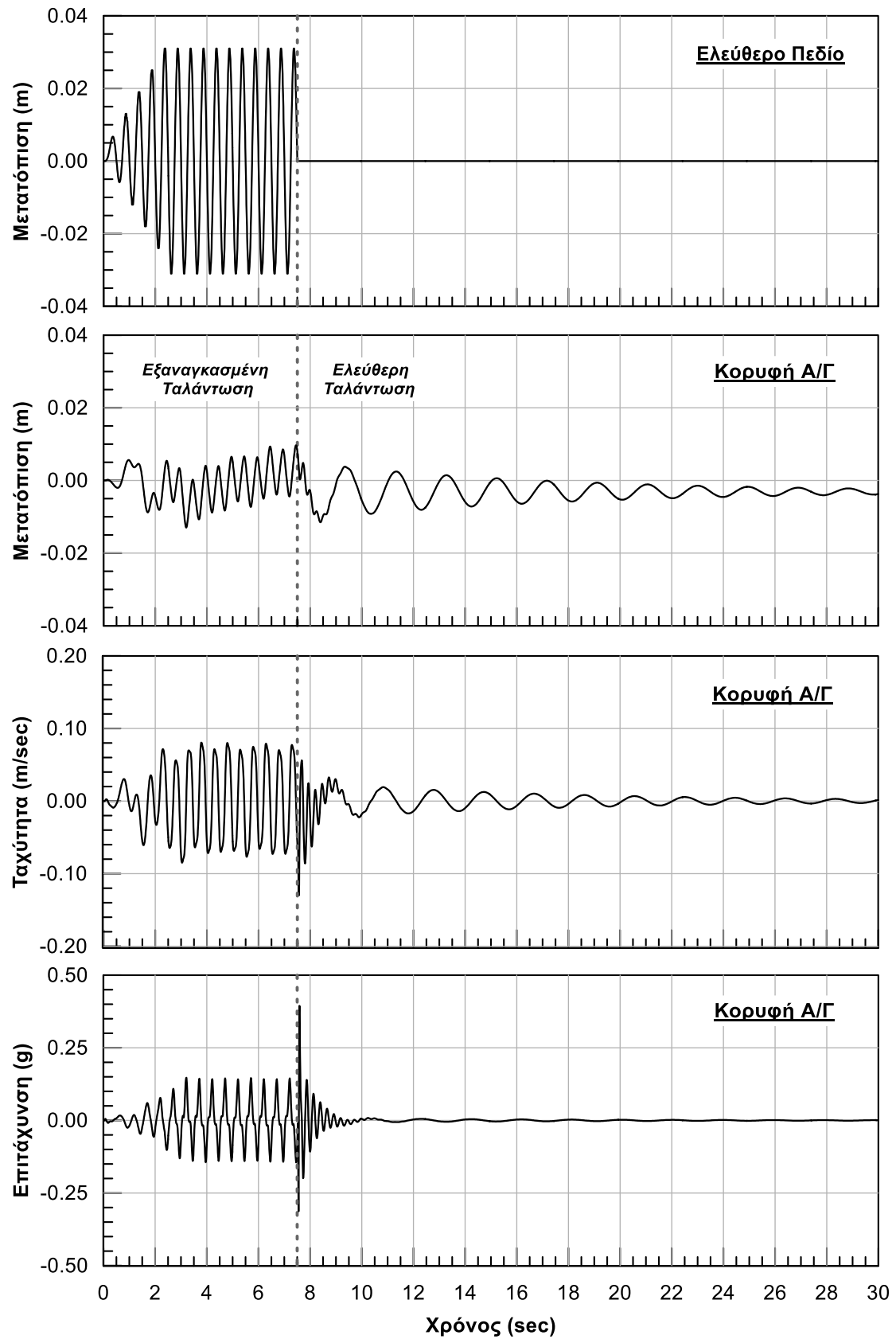
Άμμος μέσης πυκνότητας – Δυσκαμψία πύργου 3Κ₀

Πλήρες σύστημα εδαφικών ελατηρίων και αποσβεστήρων



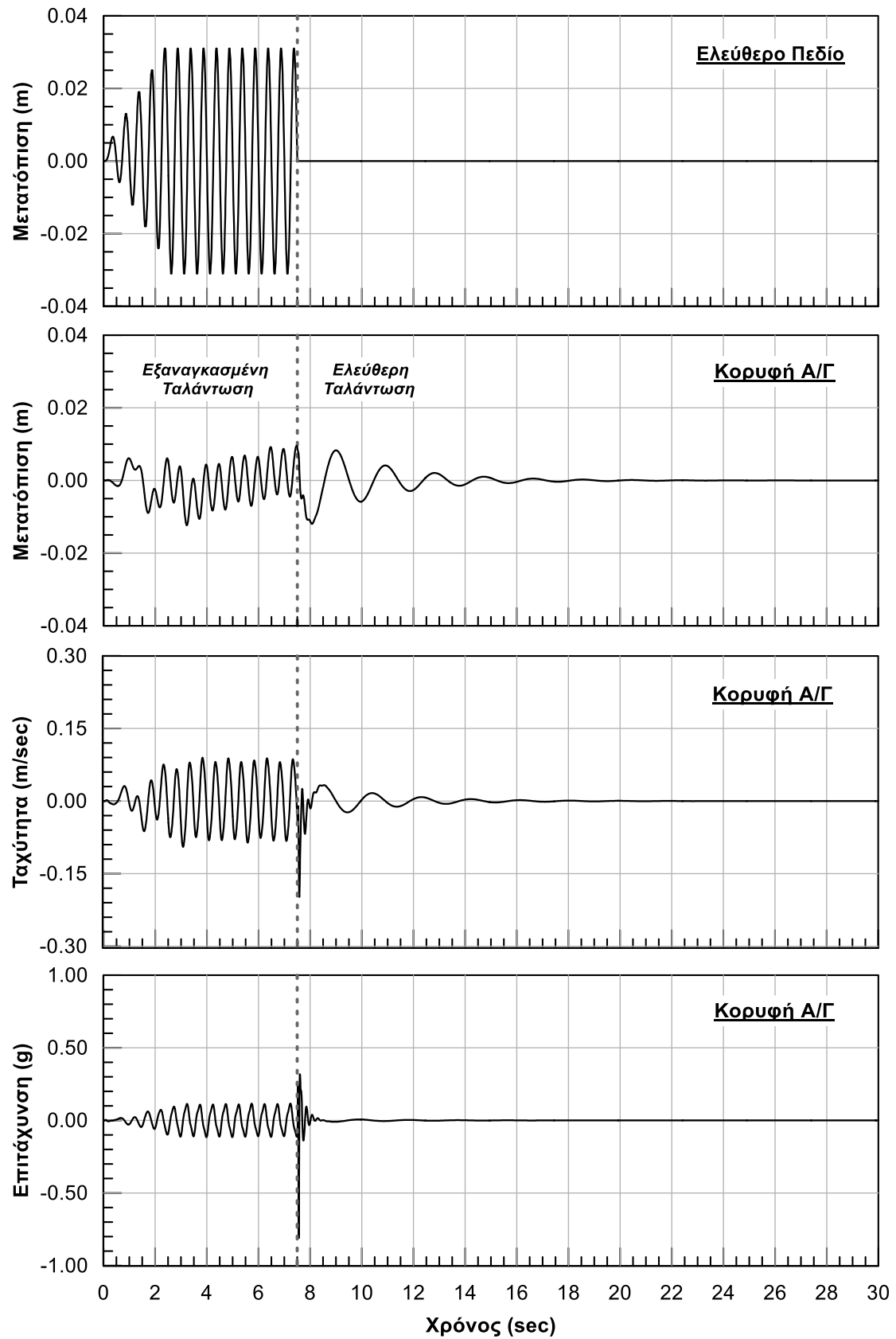
Άμμος μέσης πυκνότητας – Δυσκαμψία πύργου 3Κ₀

Μόνο υστερητικά εδαφικά ελατήρια



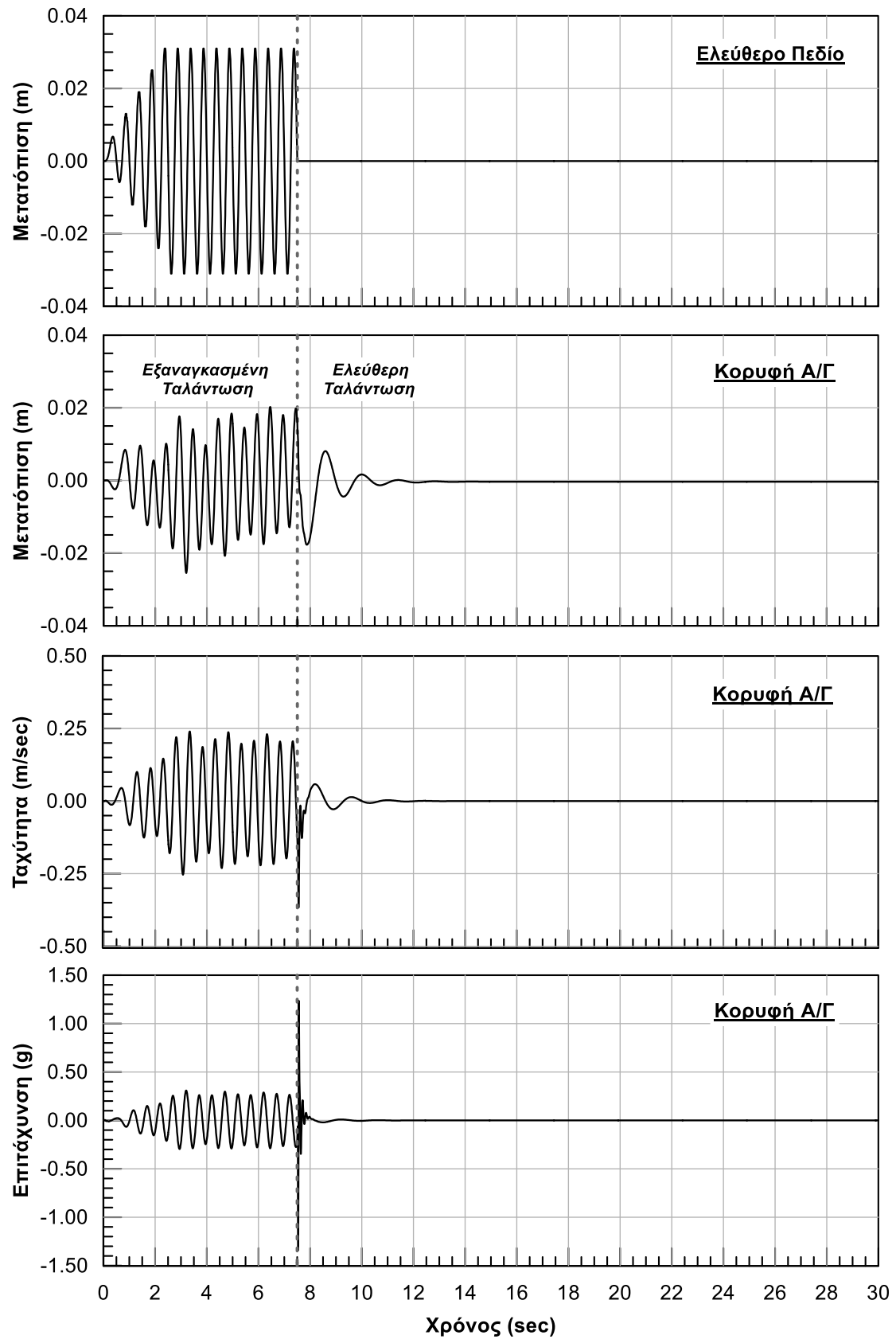
Άμμος μέσης πυκνότητας – Δυσκαμψία πύργου 3Κ₀

Μόνο εδαφικοί αποσβεστήρες



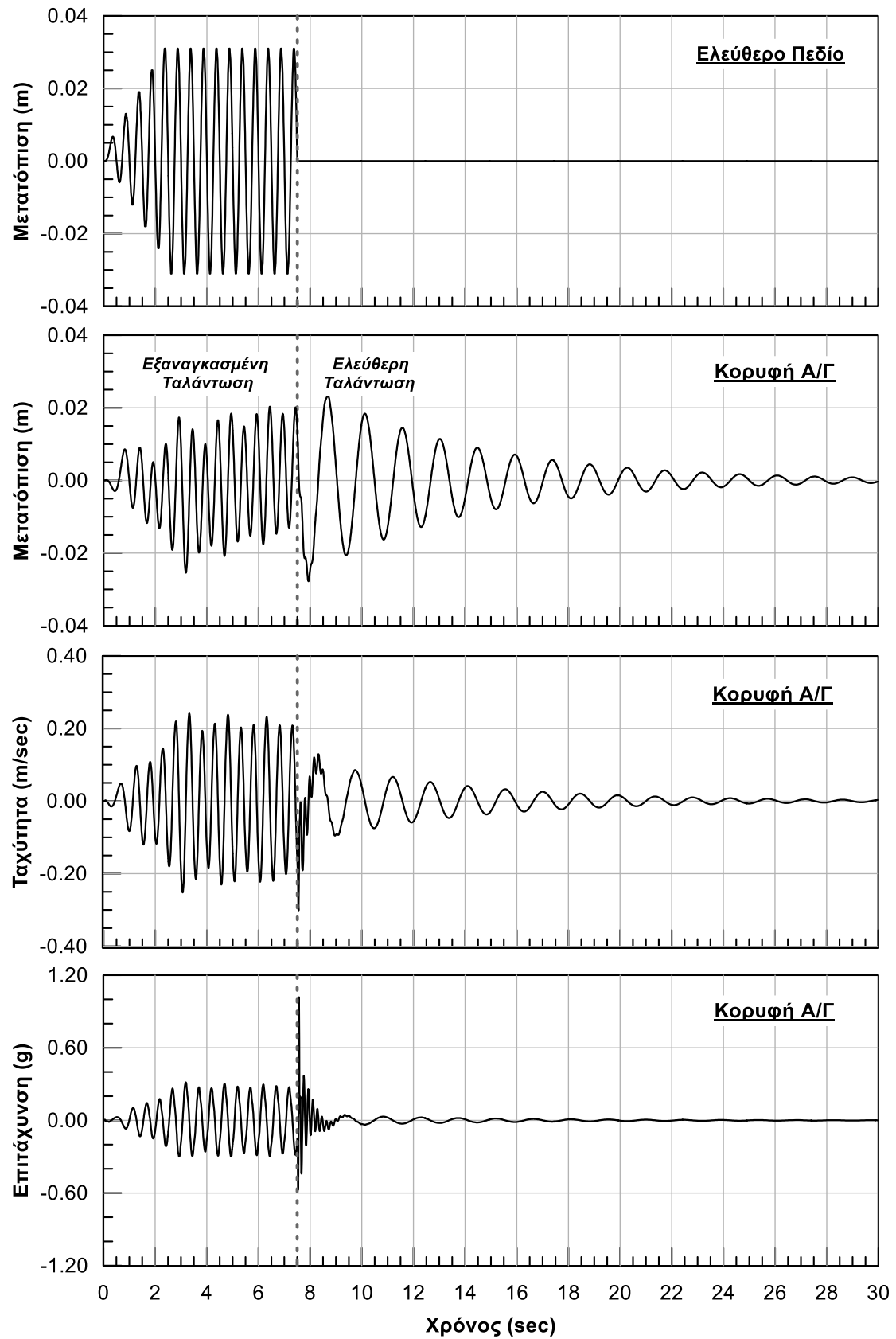
Άμμος μέσης πυκνότητας – Δυσκαμψία πύργου 9Κ₀

Πλήρες σύστημα εδαφικών ελατηρίων και αποσβεστήρων



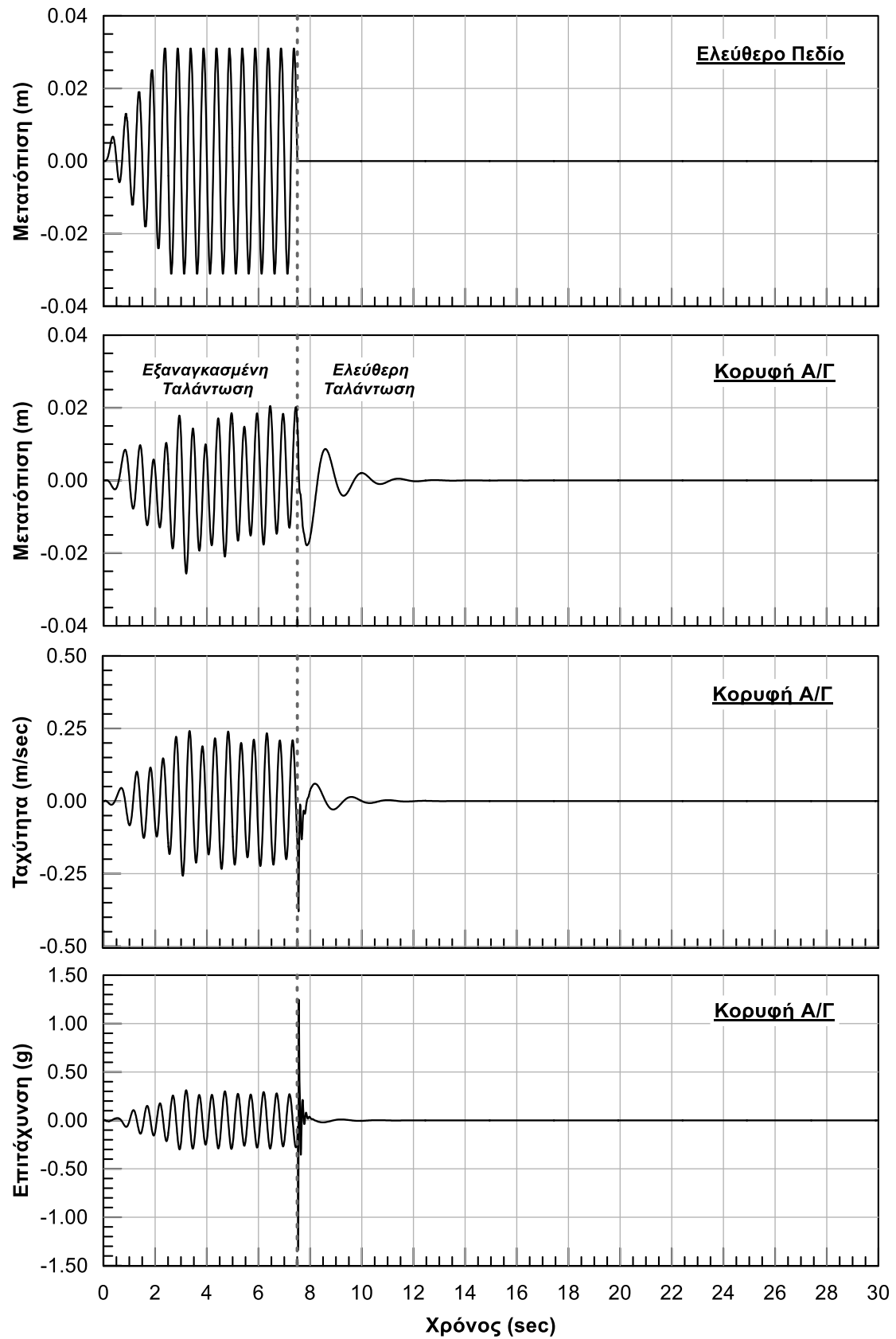
Άμμος μέσης πυκνότητας – Δυσκαμψία πύργου 9Κο

Μόνο υστερητικά εδαφικά ελατήρια



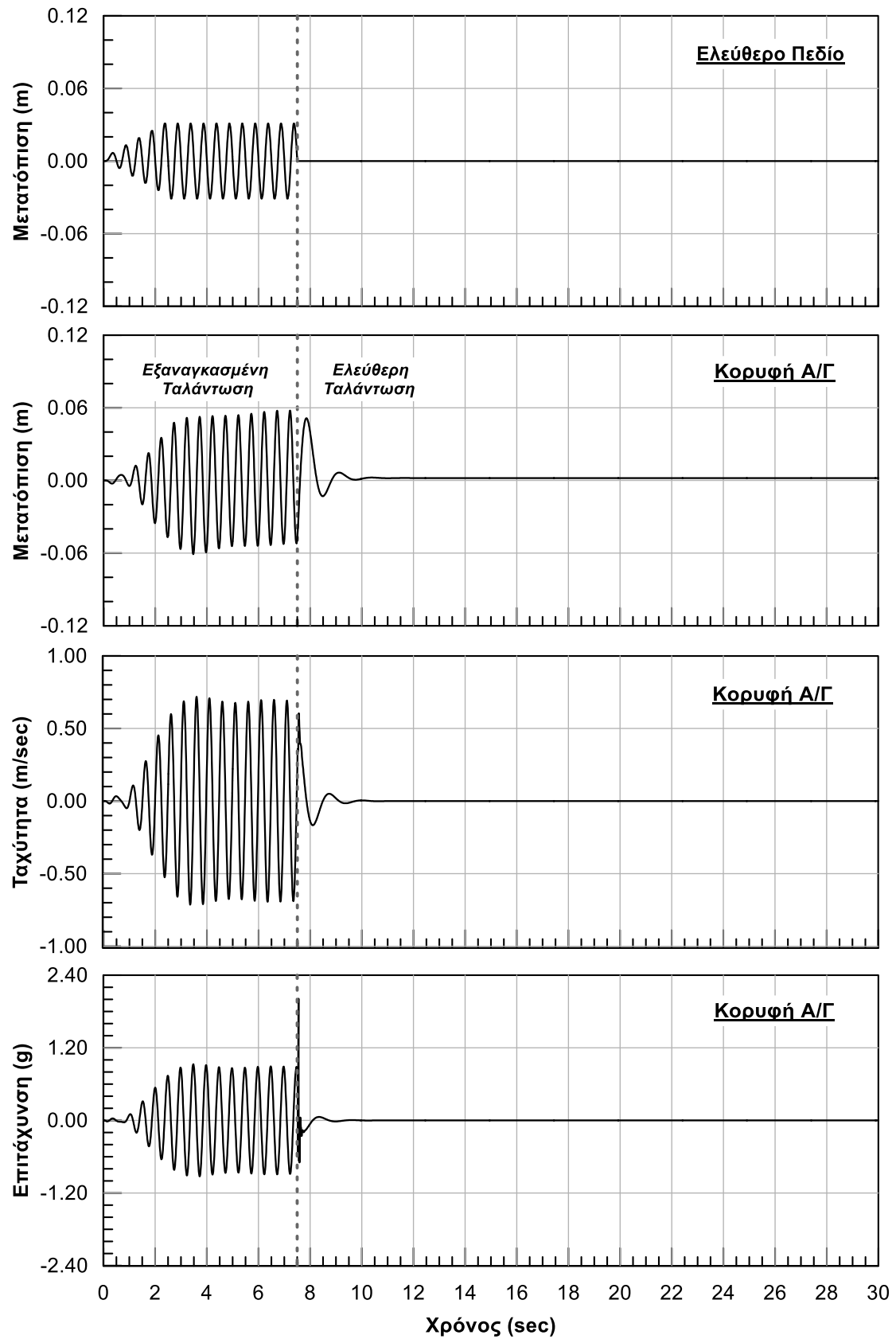
Άμμος μέσης πυκνότητας – Δυσκαμψία πύργου 9Κ₀

Μόνο εδαφικοί αποσβεστήρες



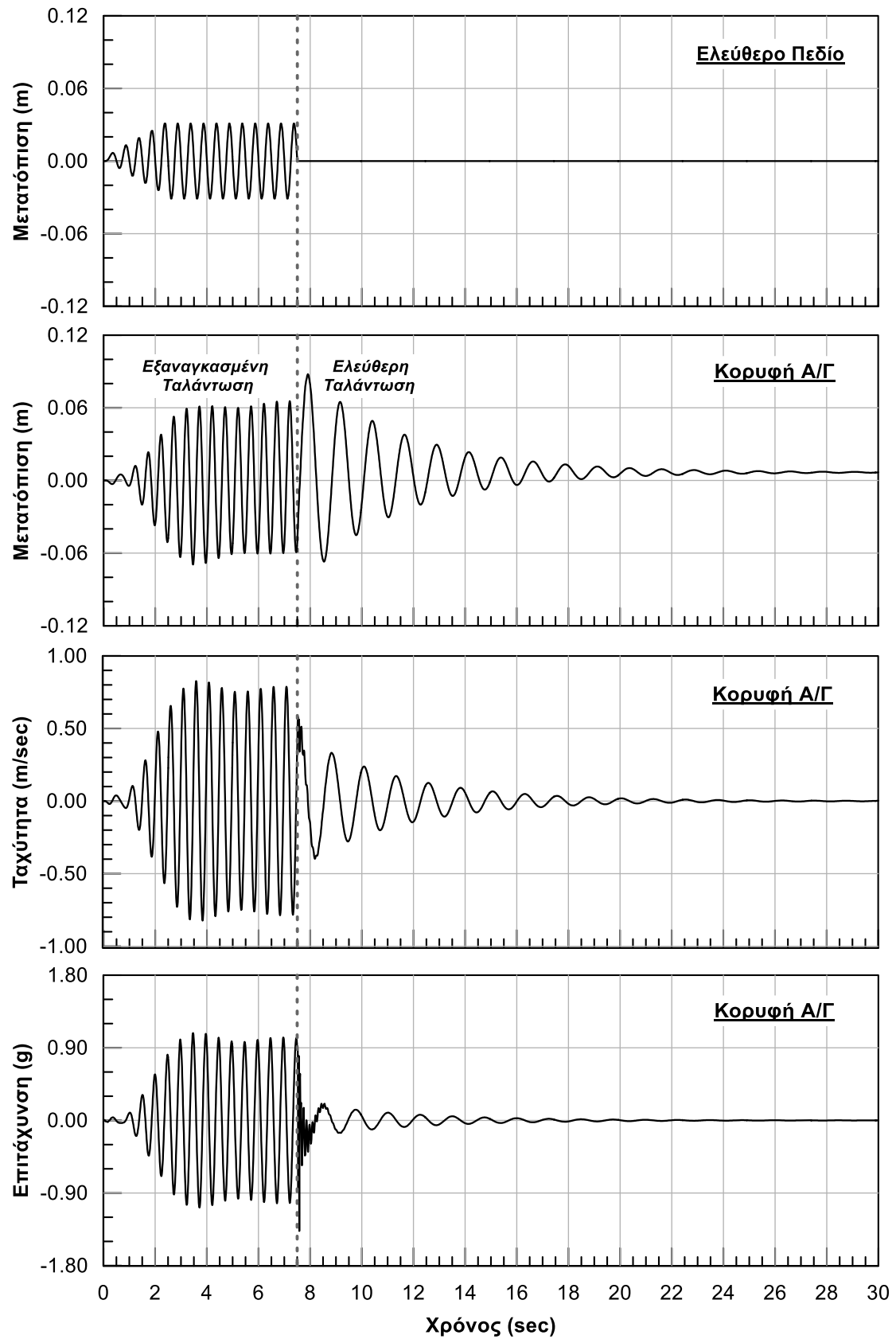
Άμμος μέσης πυκνότητας – Δυσκαμψία πύργου 27K₀

Πλήρες σύστημα εδαφικών ελατηρίων και αποσβεστήρων



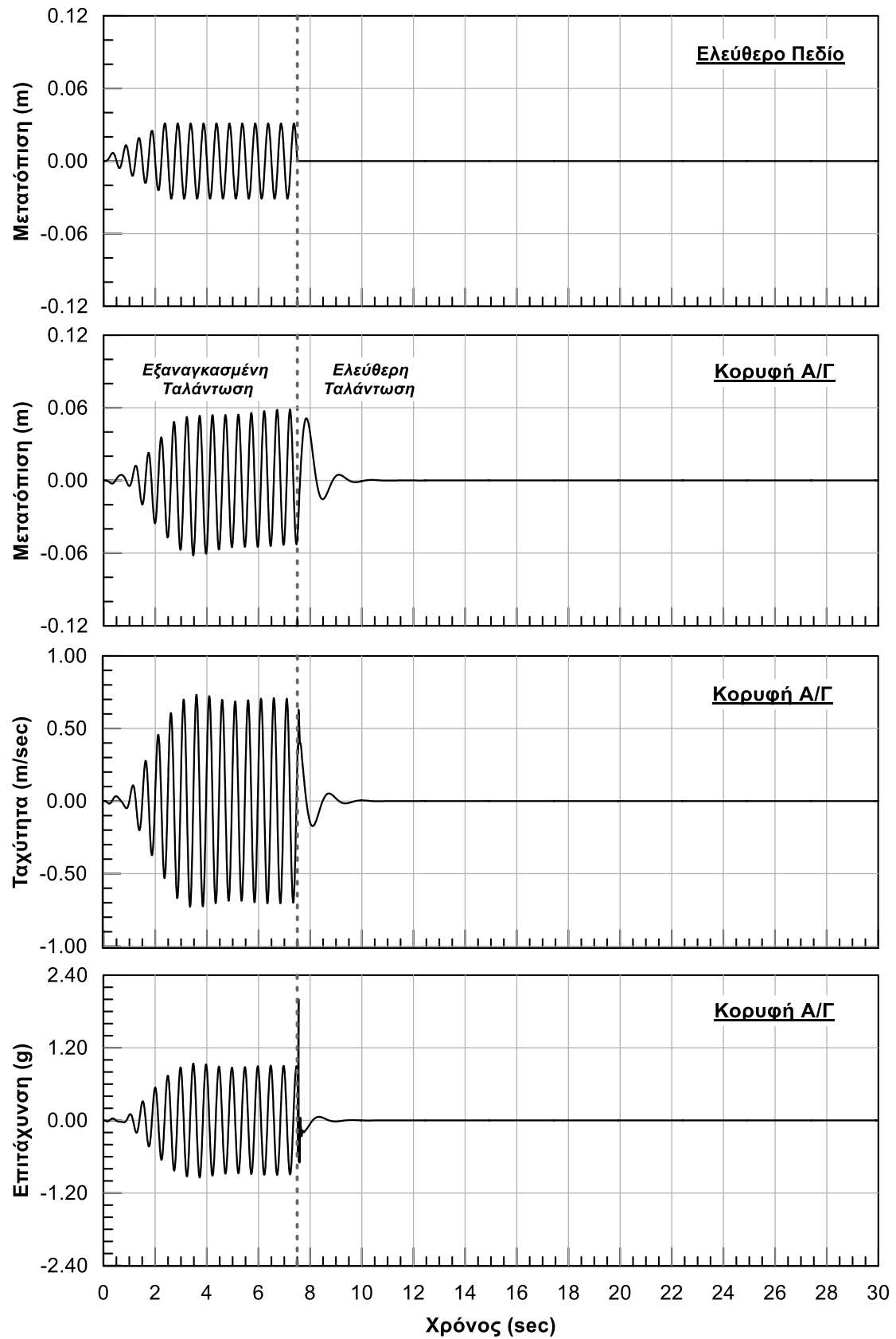
Άμμος μέσης πυκνότητας – Δυσκαμψία πύργου 27K₀

Μόνο υστερητικά εδαφικά ελατήρια



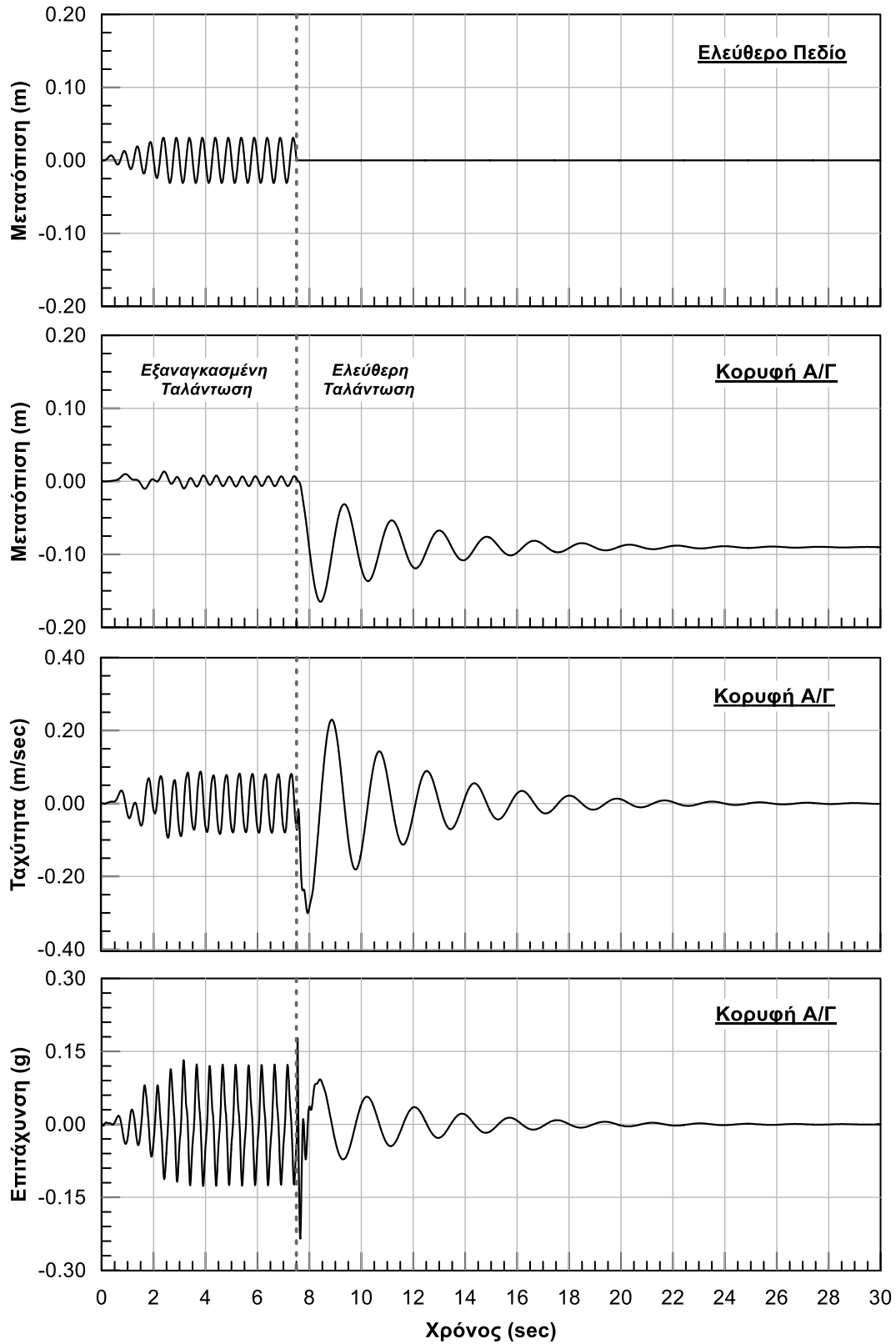
Άμμος μέσης πυκνότητας – Δυσκαμψία πύργου 27Κ₀

Μόνο εδαφικοί αποσβεστήρες



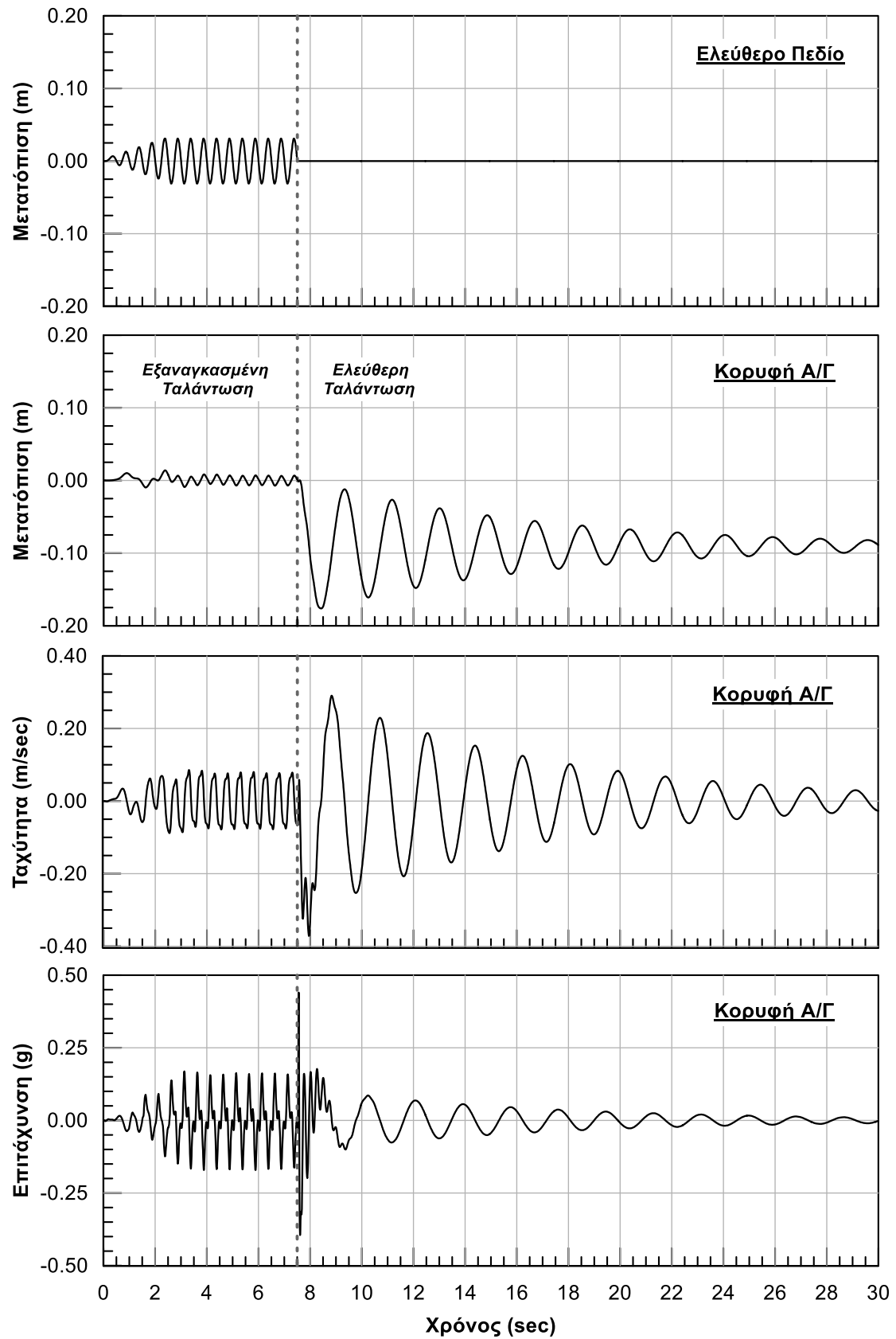
Πυκνή Άμμος – Δυσκαμψία πύργου 3Κ₀

Πλήρες σύστημα εδαφικών ελατηρίων και αποσβεστήρων



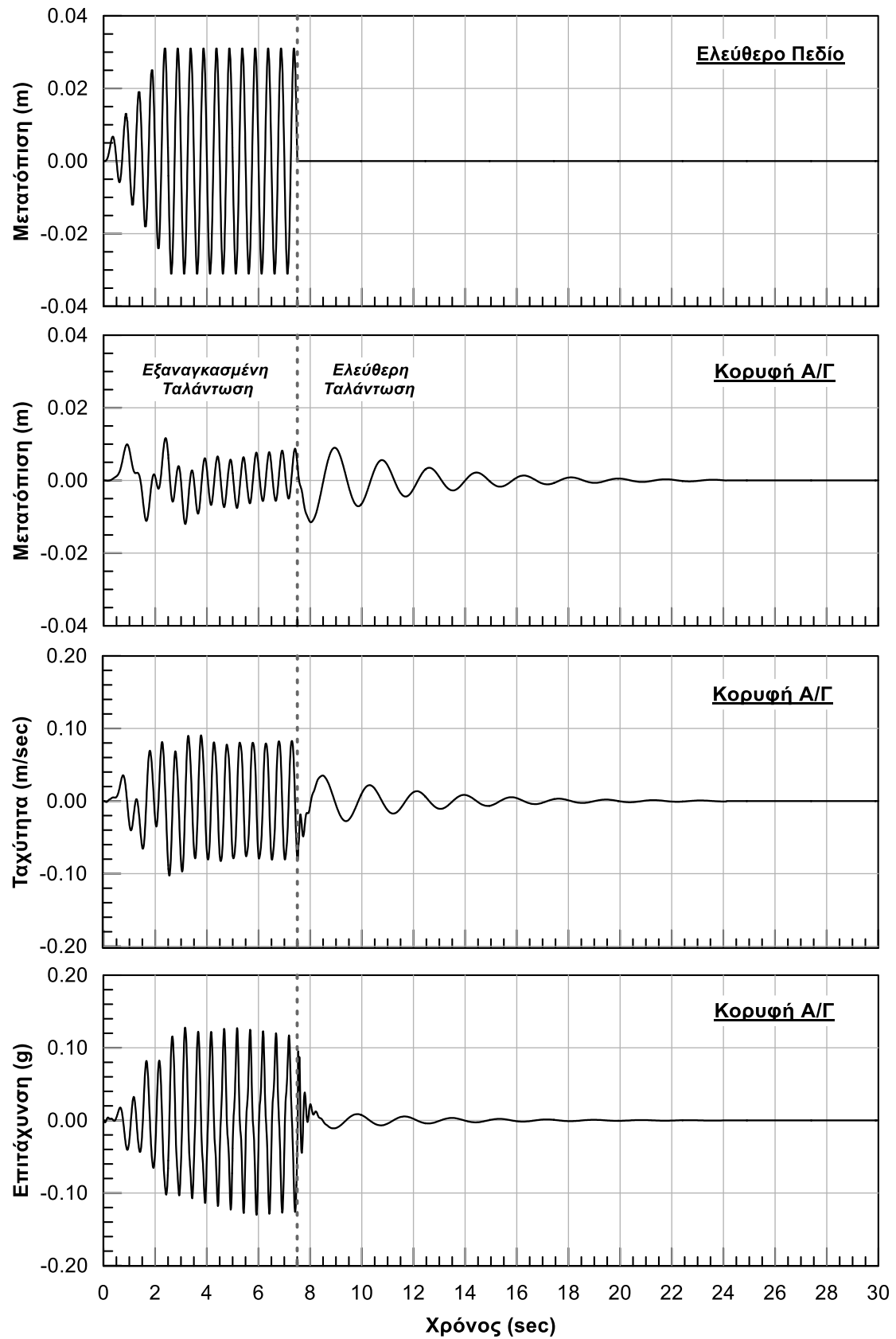
Πυκνή Άμμος – Δυσκαμψία πύργου 3Κ₀

Μόνο υστερητικά εδαφικά ελατήρια



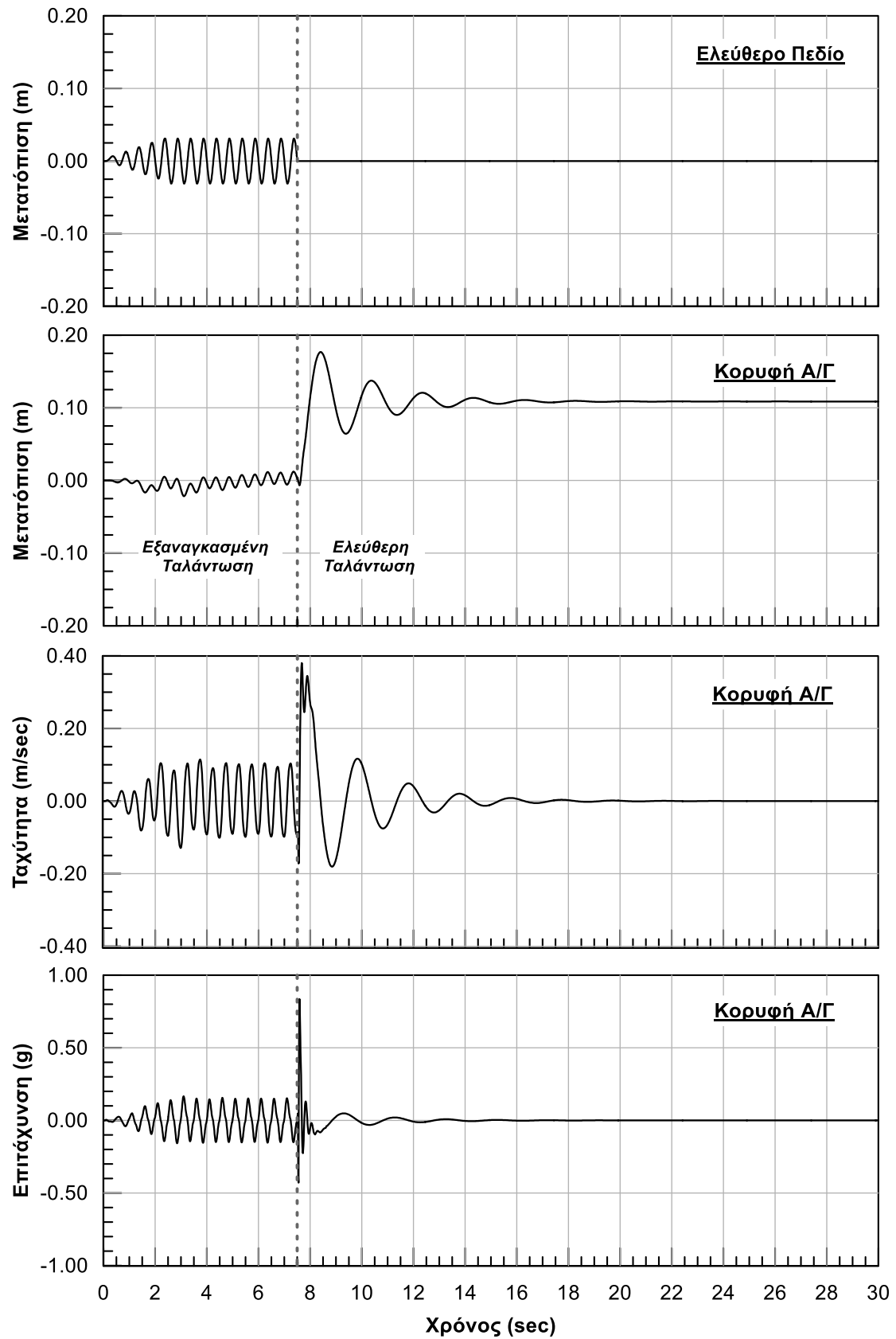
Πυκνή Άμμος – Δυσκαμψία πύργου 3Κ₀

Μόνο εδαφικοί αποσβεστήρες



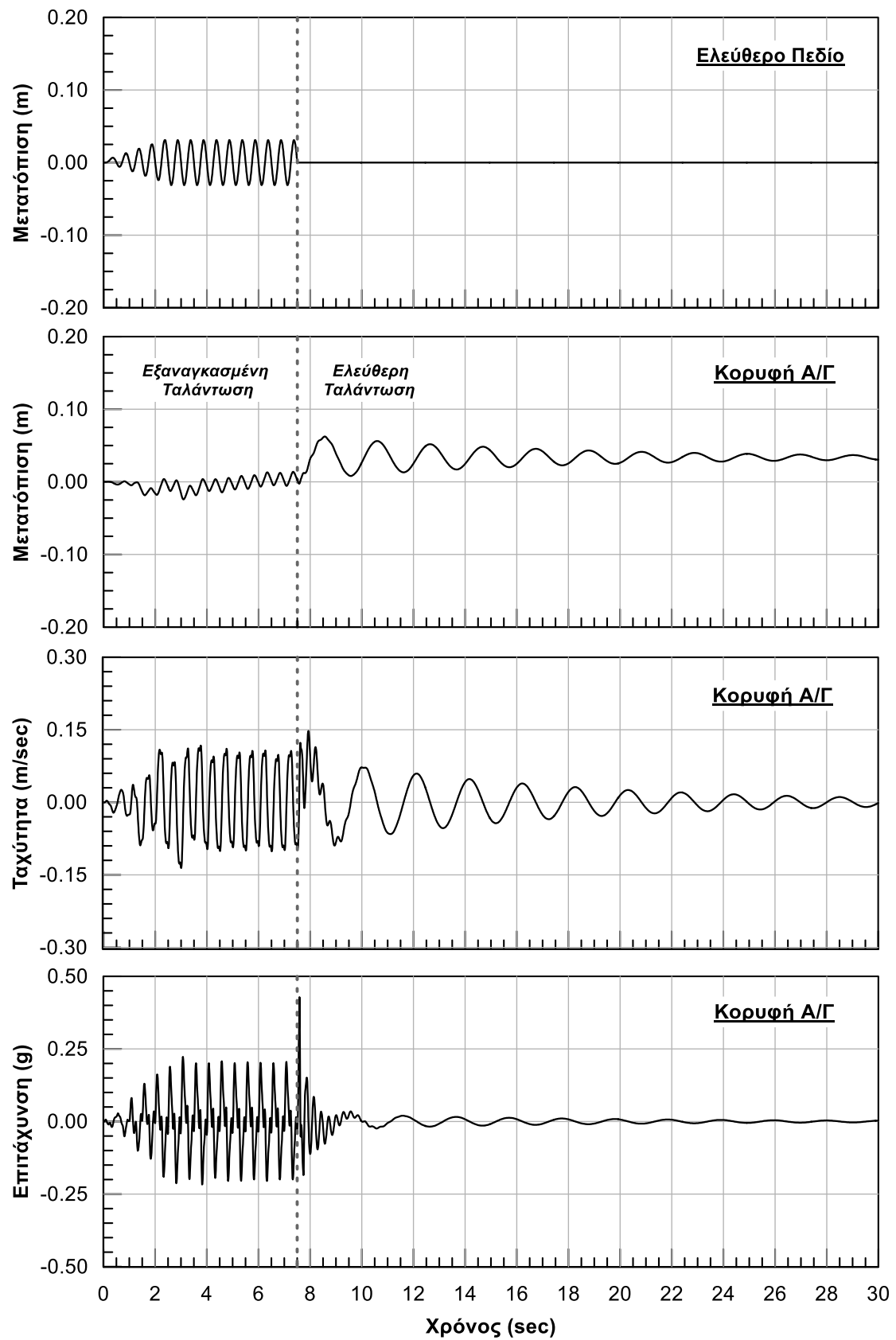
Μαλακή Άργιλος – Δυσκαμψία πύργου 3Κ₀

Πλήρες σύστημα εδαφικών ελατηρίων και αποσβεστήρων



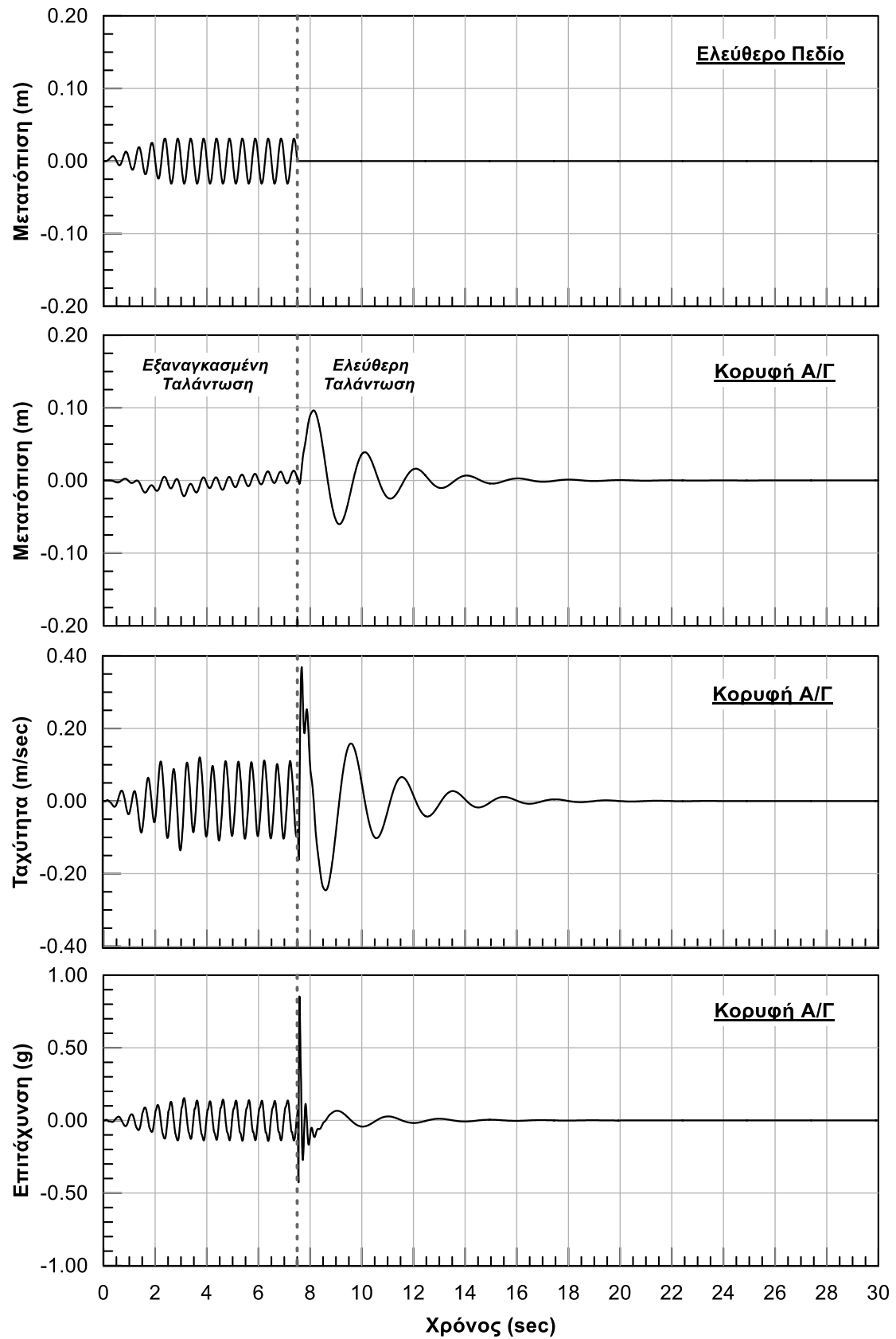
Μαλακή Άργιλος – Δυσκαμψία πύργου 3Κ₀

Μόνο υστερητικά εδαφικά ελατήρια



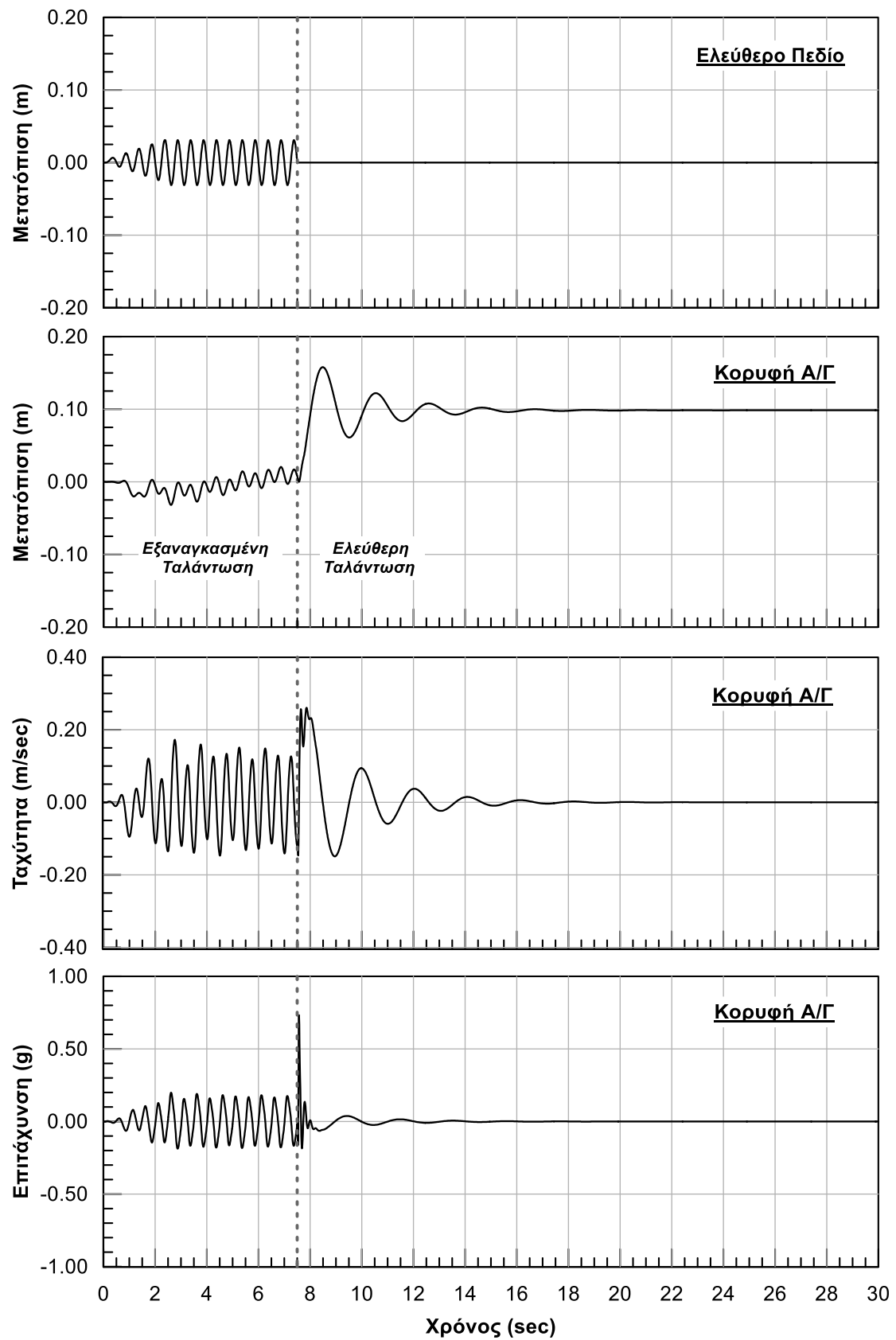
Μαλακή Άργιλος – Δυσκαμψία πύργου 3Κ₀

Μόνο εδαφικοί αποσβεστήρες



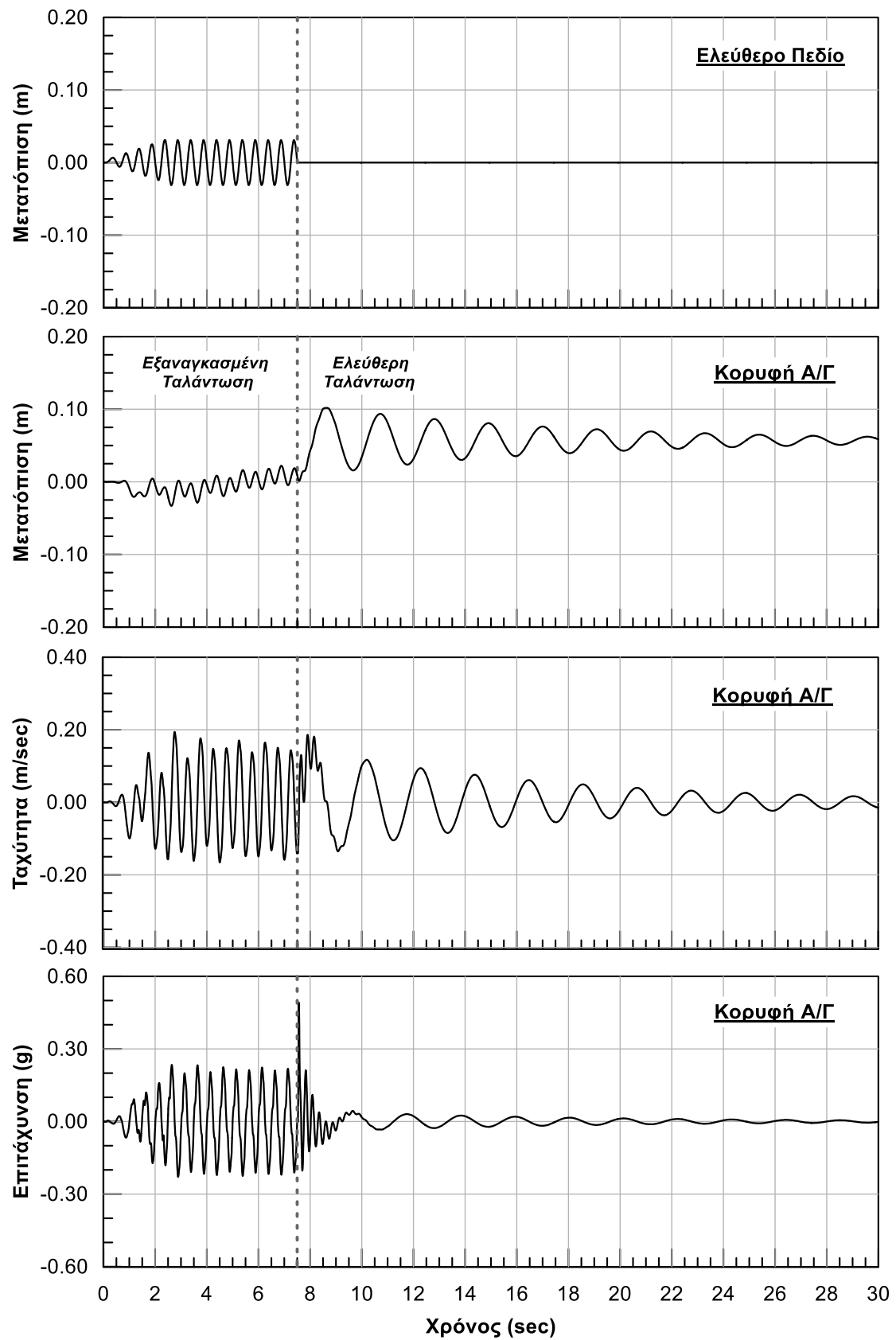
Στιφρή Άργιλος – Δυσκαμψία πύργου 3Κ₀

Πλήρες σύστημα εδαφικών ελατηρίων και αποσβεστήρων



Στιφρή Άργιλος – Δυσκαμψία πύργου 3Κ₀

Μόνο υστερητικά εδαφικά ελατήρια



Στιφρή Άργιλος – Δυσκαμψία πύργου 3Κ₀

Μόνο εδαφικοί αποσβεστήρες

