



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη»

Μεταπτυχιακή Εργασία με τίτλο:

**Θεμελίωση Ανεμογεννητριών και Δυναμική Αλληλεπίδραση
των Πυλώνων τους με το Έδαφος**



Μιχαήλ Α. Τσεβάς

Επιβλέπων: Μ. Σακελλαρίου, Ομότιμος Καθηγητής Σ.Α.Τ.Μ./ Ε.Μ.Π.
Συνεπιβλέπων: Π. Ψαρρόπουλος Ε.ΔΙ.Π. Σ.Α.Τ.Μ./ Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2018

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Μιχαήλ Σακελλαρίου, Ομότιμο Καθηγητή Σ.Α.Τ.Μ./ Ε.Μ.Π., για τις πολύτιμες γνώσεις και την υποστήριξη που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών, καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα ιδιαίτερος ενδιαφέρον τεχνολογικό αντικείμενο.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον συνεπιβλέποντα καθηγητή μου κ. Πρόδρομο Ψαρρόπουλο, Ε.ΔΙ.Π. Σ.Α.Τ.Μ./ Ε.Μ.Π., για την αμέριστη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε, αλλά και για την κατανόηση που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασία μας, προκειμένου να ολοκληρώσω την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία. Επίσης, τον ευχαριστώ για τη γενικότερη υποστήριξη που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, η αιολική ενέργεια έχει εξελιχθεί σε μία από τις σημαντικότερες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται, τόσο στη ξηρά, όσο και στη θάλασσα, για την εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού αποτελούν μεταλλικές κατασκευές, οι οποίες καταπονούνται από διάφορες δυναμικές φορτίσεις. Για το λόγο αυτό, ο σχεδιασμός τους στοχεύει πρωτίστως στην αποφυγή συντονιστικών φαινομένων, τα οποία ενδέχεται να προκαλέσουν κόπωση του χάλυβα. Καθώς, η δυναμική συμπεριφορά των ανεμογεννητριών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις εδαφικές συνθήκες και τον τρόπο θεμελίωσης των πυλώνων, η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, μετά από μία εκτεταμένη αναφορά στις εναλλακτικές μεθόδους θεμελίωσης ανεμογεννητριών, εξετάζει το θέμα της δυναμικής αλληλεπίδρασης των πυλώνων με το έδαφος. Μέσω αναλυτικών μεθόδων και αριθμητικών προσομοιώσεων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων προσπαθεί (α) να εκτιμήσει ποιοτικά και ποσοτικά τον ρόλο της αλληλεπίδρασης εδάφους - θεμελίου - κατασκευής στη δυναμική απόκριση και καταπόνηση της ανωδομής, και (β) να προτείνει πιθανούς τρόπους αντιμετώπισης των συντονιστικών φαινομένων.

Abstract

In recent years, wind energy has become one of the most important forms of renewable energy sources in the world. Modern wind turbines used both onshore and offshore for the exploitation of wind potential are steel structures that are strained by various dynamic loads. For this reason, their design is primarily aimed at avoiding phenomena of coordination that may cause steel fatigue. As the dynamic behavior of wind turbines greatly depends on the ground conditions and the type of tower's foundation, this postgraduate thesis, after an extensive reference to alternative methods of wind turbine foundations, it examines the issue of dynamic interaction of the tower with the ground. Through analytical methods and numerical simulations with the finite element method, this thesis attempts to (a) qualitatively and quantitatively assess the role of soil-foundation-structure interaction in the dynamic response and stress of the superstructure, and (b) suggest possible ways of addressing coordinating phenomena.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Ευχαριστίες.....	i
Περίληψη	ii
Abstract.....	ii
1. ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	1
1.1. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	1
1.2. Αιολική ενέργεια – Ανεμογεννήτριες.....	2
1.3.1. Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα	4
1.3.2. Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα	6
1.4. Τα μέρη μιας ανεμογεννήτριας	7
1.5. Θέματα ελέγχου της παραγόμενης ενέργειας.....	10
1.5.1. Έλεγχος απώλειας στήριξης (stall control)	10
1.5.2. Έλεγχος του βήματος πτερυγίου (pitch control).....	11
1.5.3. Έλεγχος ενεργητικής απώλειας στήριξης (active stall control)	11
1.6. Καμπύλη ταχύτητας ανέμου – παραγόμενης ισχύος	11
1.7. Εξέλιξη ανεμογεννητριών	14
1.8. Βασικές παράμετροι ανέμου.....	15
1.9. Φορτίσεις ανεμογεννητριών	19
1.9.1. Αδρανειακά και βαρυτικά φορτία.....	21
1.9.2. Αεροδυναμικά φορτία.....	23
1.10. Θεμελίωση ανεμογεννητριών	25
1.10.1. Θεμελίωση χερσαίων ανεμογεννητριών	25
1.10.2. Θεμελίωση υπεράκτιων ανεμογεννητριών.....	29
2. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΛΑΦΟΥΣ – ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ – ΑΝΩΔΟΜΗΣ	34
2.1. Εισαγωγή	34
2.2. Προέλευση και επίδραση στις κατασκευές.....	38
2.3. Αδρανειακή αλληλεπίδραση	41
2.3.1. Αναλυτικός υπολογισμός σύνθετων δυναμικών δυσκαμψιών για διάφορες περιπτώσεις επιφανειακών θεμελιώσεων και εδαφικών σχηματισμών.....	46
2.3.2. Άκαμπτη θεμελίωση επί ελαστικού ομοιογενή ημιχώρου	47
2.3.3. Άκαμπτη θεμελίωση σε εδαφικό στρώμα επί βράχου	57
2.3.4. Άκαμπτη θεμελίωση σε εδαφικό στρώμα επί ημιχώρου.....	68
2.3.5. Αναλυτικός υπολογισμός ιδιοπεριόδου T συστήματος.....	70

2.4.	Κινηματική αλληλεπίδραση	72
2.4.1.	Ισοστάθμιση διεπιφάνειας εδάφους και βάσης θεμελίου.....	73
2.4.2.	Εγκιβωτισμός της θεμελίωσης.....	74
2.4.3.	Σκέδαση σεισμικών κυμάτων	74
2.4.4.	Σύνοψη.....	74
3.	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	76
3.1.	Εισαγωγή	76
3.2.	Πρόγραμμα PLAXIS και λογισμικό SeismoSignal	77
3.3.	Προκαταρκτικά προσομοιώματα	79
3.3.1.	Πρώτο προκαταρκτικό προσομοίωμα.....	79
3.3.2.	Δεύτερο προκαταρκτικό προσομοίωμα	82
3.4.	Διέγερση με παλμό Ricker	85
3.4.1.	Άκαμπτη εδαφική στρώση - Παλμός Ricker με $f=2\text{Hz}$	87
3.4.2.	Εδαφικό στρώμα επί βράχου - Παλμός Ricker με $f= 2\text{Hz}$	90
3.5.	Αναλυτικοί τύποι υπολογισμού της ιδιοπεριόδου T για εδαφικό στρώμα επί βράχου	93
3.6.	Σύνοψη	98
4.	ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	99
4.1.	Εισαγωγή	99
4.2.	Χαρακτηριστικά μοντέλου ανεμογεννήτριας	100
4.3.	Διαδικασία αριθμητικών και αναλυτικών διερευνήσεων	102
4.4.	Αποτελέσματα διερευνήσεων	105
4.4.1.	Μοντέλο ταλαντωτή σε άκαμπτη εδαφική στρώση με πάχος $H=20\text{m}$	105
4.4.2.	Μοντέλο ταλαντωτή σε εδαφική στρώση με πάχος $H=20\text{m}$	108
4.4.3.	Μοντέλο ταλαντωτή σε εδαφική στρώση με πάχος $H=10\text{m}$	110
4.4.4.	Μοντέλο ταλαντωτή σε εδαφική στρώση με πάχος $H=40\text{m}$	112
4.4.5.	Μοντέλο ταλαντωτή σε εδαφική στρώση με πάχος $H=5\text{m}$	114
4.4.6.	Μοντέλο ταλαντωτή σε εδαφική στρώση με πάχος $H=2\text{m}$	116
4.5.	Σύνοψη	119
5.	ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ	122
5.1.	Εισαγωγή	122
5.2.	Προτεινόμενες μέθοδοι παρέμβασης	123
5.3.	Μείωση της μάζας της ανεμογεννήτριας	124
5.4.	Αύξηση της ακαμψίας της ανεμογεννήτριας	129

5.5.	Σύνοψη	133
6.	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ	136
6.1.	Εισαγωγή	136
6.2.	Τοποθέτηση του προβλήματος.....	137
6.2.1.	Οριζόντια εδαφική στρωματογραφία.....	137
6.2.2.	Γεωμορφικές συνθήκες	139
6.3.	Μελέτη περίπτωσης ανεμογεννήτριας επί κοιλάδας.....	141
6.3.1.	Μοντέλο ταλαντωτή σε κοιλάδα με $H=20m$	146
6.3.2.	Μοντέλο ταλαντωτή σε κοιλάδα με $H=40m$	148
6.3.3.	Μοντέλο ταλαντωτή σε κοιλάδα με $H=10m$	151
6.4.	Σύνοψη	152
7.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΙΘΑΝΕΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ	154
7.1.	Συμπεράσματα.....	154
7.2.	Πιθανές μελλοντικές προεκτάσεις	158
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	161

1. ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

1.1. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Η συνεχώς αυξανόμενη τεχνολογική και βιομηχανική ανάπτυξη των τελευταίων χρόνων έχει ως αποτέλεσμα την αμείωτη ρύπανση του περιβάλλοντος. Η ρύπανση αυτή οφείλεται κυρίως στην απελευθέρωση του διοξειδίου του άνθρακα CO₂ μέσω της καύσης ορυκτών καυσίμων, όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Το φαινόμενο αυτό έχει κάνει επιτακτική την ανάγκη για χρήση εναλλακτικών μορφών ενέργειας, πιο φιλικών προς το περιβάλλον, συγκριτικά με τις υπόλοιπες συμβατικές πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνταν ευρέως. Οι μορφές αυτές ενέργειας είναι γνωστές ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ).

Πρόκειται για "καθαρές" μορφές ενέργειας, που δεν αποδεδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα και για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση όπως εξόρυξη, άντληση, καύση αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Αυτό σημαίνει πως πρόκειται για ανεξάντλητες πηγές ενέργειας που βασίζονται σε διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως είναι ο ήλιος, ο άνεμος, οι υδατοπτώσεις, η ενέργεια των κυμάτων, των ρευμάτων, των ωκεανών, η βιομάζα και η γεωθερμία.

Τα κυριότερα είδη των ΑΠΕ είναι τα εξής:

- Αιολική ενέργεια: η κινητική ενέργεια που παράγεται από τον άνεμο μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια και στη συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια.
- Ηλιακή ενέργεια: αξιοποιείται μέσω συστημάτων που εκμεταλλεύονται το φάσμα ακτινοβολιών προερχόμενο από τον ήλιο. Πιο συγκεκριμένα, διακρίνονται στα ενεργητικά ηλιακά συστήματα, τα οποία μετατρέπουν την θερμική ενέργεια του ήλιου σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια και τα φωτοβολταϊκά ηλιακά συστήματα, τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια άμεσα σε ηλεκτρική.
- Υδραυλική ενέργεια: αξιοποιεί τις υδατοπτώσεις, με στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Γεωθερμική ενέργεια: η θερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης μετατρέπεται σε ηλεκτρική αφού προηγουμένως έχει μετατραπεί σε μηχανική.

- Ενέργεια από θαλάσσια κύματα: πραγματοποιείται εκμετάλλευση της δυναμικής ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων και μετατρέπεται σε μηχανική, η οποία στη συνέχεια μετασχηματίζεται σε ηλεκτρική.
- Βιομάζα: είναι αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας, που μετασχηματίζει την ηλιακή ενέργεια σε οργανική ύλη με μία σειρά διεργασιών των φυτικών οργανισμών χερσαίας ή υδρόβιας προέλευσης.

Η χρήση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας ξεκίνησε σε πειραματικές εφαρμογές, λόγω του υψηλού κόστους τους. Σήμερα όμως, αποτελούν στρατηγική επιλογή για τα κράτη και χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο, καθώς έχουν ωριμάσει και είναι ασφαλείς, ανταγωνιστικές και ελκυστικές σε ιδιώτες και επενδυτές και η εφαρμογή τους συμβάλλει στη βελτίωση των περιβαλλοντικών και οικονομικών δεικτών. Μπορούν, δηλαδή, να απαντήσουν αποτελεσματικά στο τρίπτυχο των προβλημάτων που απασχολούν τον τομέα της ενέργειας: α) επάρκεια αποθεμάτων, β) ασφάλεια ανεφοδιασμού και γ) προστασία του περιβάλλοντος.

1.2. Αιολική ενέργεια – Ανεμογεννήτριες

Η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας, και κατ' επέκταση και των υπόλοιπων μορφών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, παρουσιάζει ένα μεγάλο εύρος πλεονεκτημάτων, όπως τα ακόλουθα:

- Ο άνεμος είναι μία ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, η οποία παρέχεται δωρεάν.
- Μειώνεται η εξάρτηση από εξαντλήσιμους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους, όπως το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, ο άνθρακας, κλπ.
- Μειώνεται η επιβάρυνση του περιβάλλοντος με αέριους και υδάτινους ρύπους, όπως συμβαίνει με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Αποτελούν την πλέον φιλική επιλογή παραγωγής ενέργειας για τον άνθρωπο και το περιβάλλον.
- Πρόκειται για εγχώριες πηγές ενέργειας που συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας και της ασφάλειας της εκάστοτε περιοχής.
- Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος που δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και των τιμών των συμβατικών καυσίμων.

- Η αιολική ενέργεια δεν εμποδίζει πιθανές γεωργικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες σε μία περιοχή. Περίπου το 99% της γης που φιλοξενεί ένα αιολικό πάρκο είναι διαθέσιμο για άλλες χρήσεις.
- Η αιολική ενέργεια συμβάλλει στην τοπική και οικονομική ανάπτυξη.

Από την άλλη πλευρά, η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας δεν είναι πάντα απλή υπόθεση και πολλές φορές οδηγεί σε ορισμένα προβλήματα, όπως τα εξής:

- Ο άνεμος δεν έχει συνεχή ροή και κατεύθυνση, αλλά είναι περιοδικά διακοπτόμενος.
- Η αιολική ενέργεια δεν μπορεί να αποθηκευτεί εύκολα.
- Τα κατάλληλα σημεία για αιολικά πάρκα συχνά βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές, μέσα στη θάλασσα ή σε μεγάλα υψόμετρα, μακριά από κατοικημένες περιοχές.
- Η αιολική ενέργεια πρέπει να συναγωνιστεί τις συμβατικές πηγές ενέργειας σε επίπεδο κόστους.

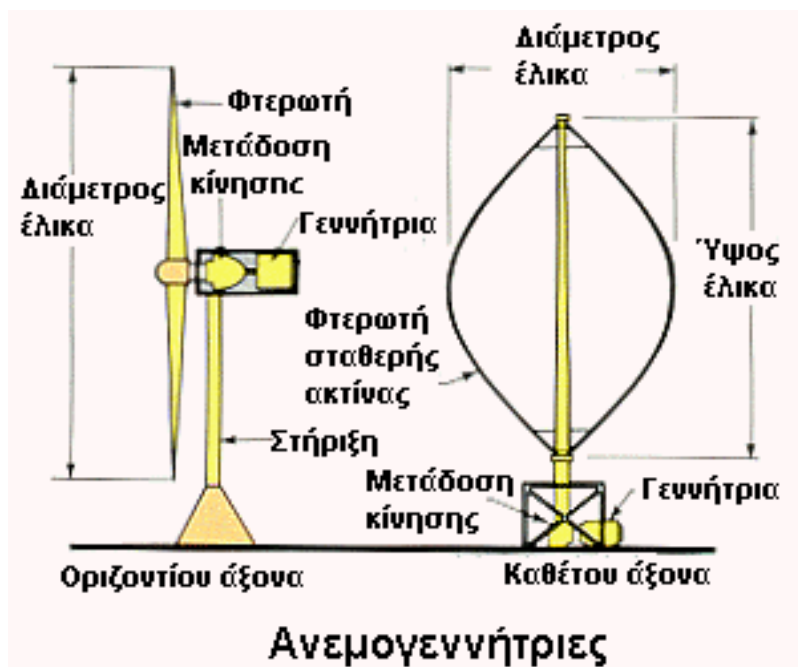
Η προσπάθεια για την εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου έχει ξεκινήσει από τα αρχαία κιόλας χρόνια. Τα πλοία, οι ανεμόμυλοι και οι αντλίες νερού είναι ορισμένα απλά παραδείγματα, στα οποία ξεκίνησε η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας. Τις τελευταίες δεκαετίες του 20ου αιώνα, όπου σημειώθηκε και συνεχίζει να σημειώνεται ραγδαία ανάπτυξη και πρόοδος στα διάφορα τεχνολογικά και μηχανολογικά μέσα, η παραγωγή ενέργειας με βάση τον άνεμο εφαρμόζεται όλο και περισσότερο.

Σήμερα, ένα από τα πλέον χαρακτηριστικά παραδείγματα που έχουν σχεδιαστεί με στόχο την εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου είναι οι ανεμογεννήτριες. Ο όρος ανεμογεννήτρια αποτελεί τον γενεσιουργό όρο για τις μηχανές με περιστρεφόμενα πτερύγια που μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική, δηλαδή μια αξιοποιήσιμη μορφή ενέργειας. Η ανεμογεννήτρια μπορεί να θεωρηθεί μία πιο εξελιγμένη μορφή του ανεμόμυλου.

1.3. Κατηγορίες ανεμογεννητριών

Λόγω του μεγάλου ενδιαφέροντος που επικρατεί στον τομέα των ανεμογεννητριών, αλλά και την απαίτηση κάλυψης πολλαπλών και διαφορετικών αναγκών, έχουν σχεδιαστεί διαφόρου τύπου ανεμογεννήτριες, οι οποίες κατατάσσονται σε διάφορες κατηγορίες. Ανάλογα με τον προσανατολισμό του άξονα περιστροφής, διακρίνονται σε ανεμογεννήτριες οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα (Εικ. 1.1). Ανάλογα με το μέγεθος και την ισχύ που παράγουν, διακρίνονται

σε μικρές, μεσαίες και μεγάλες ανεμογεννήτριες. Μία ακόμα διακριτοποίηση των ανεμογεννητριών μπορεί να γίνει ανάλογα τον αριθμό των πτερυγίων που διαθέτουν, ενώ διακρίνονται και τρία διαφορετικά συστήματα ελέγχου της παραγόμενης ενέργειας των ανεμογεννητριών.



Εικ 1.1. Ανεμογεννήτριες οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα

1.3.1. Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες αυτές έχουν συνήθως πτερύγια σχήματος C, ο άξονας περιστροφής τους είναι κάθετος στην επιφάνεια του εδάφους και κάθετος στη κατεύθυνση του ανέμου. Το κύριο πλεονέκτημά τους, είναι ότι ο κινητήρας και το κουτί πέδησης βρίσκονται στη βάση τους και συνεπώς είναι εύκολα προσβάσιμα και επισκευάσιμα. Επίσης, λόγω της γεωμετρίας τους, έχουν αυτόματη προσαρμογή στην κατεύθυνση του ανέμου σε κάθε χρονική στιγμή με αποτέλεσμα να μπορούν να εκμεταλλευτούν τον άνεμο από όλες τις διευθύνσεις. Το κύριο μειονέκτημα τους είναι ότι ο ρότορας είναι τοποθετημένος κοντά στο έδαφος, όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι πιο μικρή με αποτέλεσμα το σύστημά τους να είναι λιγότερο αποτελεσματικό. Πολλές φορές μάλιστα, για να ξεκινήσουν χρειάζονται υποβοήθηση, γεγονός που τις καθιστά εμπορικά μη ανταγωνιστικές. Δηλαδή, οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα χρειάζονται πιο ισχυρούς ανέμους για να

ξεκινήσουν την φόρτιση των συσσωρευτών συγκριτικά με τις ανεμογεννήτριες με οριζόντιο άξονα. Έτσι, η απόδοσή τους είναι κατά μέσο όρο μικρότερη συγκρινόμενη με εκείνη των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα, αφού σε κάθε περιστροφή του δρομέα, τα πτερύγια μπορεί να συναντούν αεροδυναμικά κενές περιοχές, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης του όλου συστήματος.

Οι πιο γνωστοί τύποι ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα είναι οι ανεμογεννήτριες Darrieus και Savonius, οι οποίες εφευρέθηκαν κατά τις δεκαετίες του 1920 και 1930 και πήραν το όνομά τους από τον Γάλλο μηχανικό George Darrieus και τον Φιλανδό μηχανικό Sigard Savonius, αντίστοιχα (Εικ. 1.2, Εικ. 1.3).



Εικ. 1.2. Ανεμογεννήτρια τύπου Darrieus



Εικ. 1.3. Ανεμογεννήτρια τύπου Savonius

1.3.2. Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα

Στο συγκεκριμένο τύπο ανεμογεννητριών, ο δρομέας είναι τύπου έλικα και βρίσκεται συνεχώς παράλληλος με την διεύθυνση του ανέμου και το έδαφος. Πρόκειται για τον συνηθέστερο τύπο ανεμογεννητριών σήμερα. Σε αντίθεση με τις ανεμογεννήτριες με κατακόρυφο άξονα, απαιτούν ευθυγράμμιση με την πνοή του ανέμου και γι' αυτό διαθέτουν ειδικό σύστημα περιστροφής ως προς τον κατακόρυφο άξονα και προσανατολισμού του ρότορα στη διεύθυνση του ανέμου (yaw system). Η απαίτηση αυτή είναι και το βασικό μειονέκτημα τους.

Το κύριο πλεονέκτημα τους είναι ότι ο ρότορας είναι τοποθετημένος ψηλά σε μακρινή απόσταση από το έδαφος, όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι υψηλή με αποτέλεσμα το σύστημα τους να έχει μεγαλύτερη απόδοση από εκείνη των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα. Επομένως, οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα δεν απαιτούν ιδιαίτερα ισχυρούς ανέμους για να ξεκινήσει η λειτουργία τους, σε αντίθεση με εκείνες του κατακόρυφου τύπου.

Ένας διαχωρισμός που μπορεί να γίνει στις ανεμογεννήτριες με οριζόντιο άξονα είναι με βάση τον προσανατολισμό του ρότορα σε σχέση με την πνοή του ανέμου. Δηλαδή, ανάλογα με το αν ο άνεμος που πνέει, συναντά πρώτα το δρομέα ή το θάλαμο με τη γεννήτρια διακρίνονται σε ανεμογεννήτριες ανάντη (upwind) και κατάντη (downwind) της ροής αντίστοιχα. Το πλεονέκτημα

των ανεμογεννητριών τύπου ανάντη (upwind) της ροής είναι ότι διαταράσσουν το πεδίο του ανέμου λιγότερο κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. Αντίθετα, το μεγάλο μειονέκτημα των ανεμογεννητριών τύπου κατάντη (downwind), είναι οι επαναλαμβανόμενες αναταραχές κυκλικών διακυμάνσεων που δημιουργούν στο πεδίο του ανέμου, με κύρια συνέπεια την πτώση της παραγωγικής τους ικανότητας και τη δημιουργία αυξημένων φορτίων κόπωσης, τα οποία ενδεχομένως να οδηγήσουν σε αστοχία του υλικού.

Μια επιπλέον ταξινόμηση των ανεμογεννητριών με οριζόντιο άξονα μπορεί να γίνει ανάλογα με τον αριθμό των πτερυγίων τους σε μονόπτερες, δίπτερες, τρίπτερες κλπ. Οι μονόπτερες έχουν το πλεονέκτημα του μειωμένου οικονομικού κόστους και βάρους, αλλά αντιμετωπίζουν προβλήματα ισορροπίας και οπτικής αποδοχής. Η χρήση μικρότερου αριθμού πτερυγίων συνεπάγεται υψηλότερη περιστροφική ταχύτητα και θόρυβο, καθώς και μεγαλύτερο μήκος χορδής του πτερυγίου, έτσι ώστε να επιτευχθεί η ίδια παραγόμενη ενέργεια με μια τρίπτερη ανεμογεννήτρια. Επίσης, η χρήση μονόπτερης ή δίπτερης ανεμογεννήτριας έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεταβλητών φορτίσεων, λόγω της ασύμμετρης κατανομής της αδρανειακής και της αιολικής δύναμης ανάλογα με τη θέση και τη διεύθυνση του πτερυγίου σε κάθε χρονική στιγμή. Για το λόγο αυτό, έχει επικρατήσει γενικά η χρήση έλικας με τρία πτερύγια στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες. Σήμερα, οι ανεμογεννήτριες κατασκευάζονται με τη χρήση λεπτών πτερυγίων με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενέργειας που παρατηρούνται λόγω του ιξώδους του αέρα. Η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ ενός πτερυγίου και του άξονα περιστροφής του, αποτελεί κατασκευαστικό χαρακτηριστικό για κάθε έλικα και καθορίζει την γωνία με την οποία ο άνεμος προσπίπτει πάνω σε αυτήν.

1.4. Τα μέρη μιας ανεμογεννήτριας

Τα βασικότερα μέρη μιας τυπικής ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα και η λειτουργία τους περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω, ενώ φαίνονται στην Εικ. 1.4 που ακολουθεί.



Εικ. 1.4. Τα βασικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα

- Δρομέας ή ρότορας (rotor): Πρόκειται ουσιαστικά για το συνδυασμό των πτερυγίων και της υποδοχής τους (hub) και αποτελεί ίσως το σημαντικότερο μέρος για τη σχεδίαση ολόκληρου του συστήματος της ανεμογεννήτριας. Στόχος είναι η εύρεση του βέλτιστου δυνατού συνδυασμού των διαφόρων παραμέτρων που συνθέτουν το δρομέα, όπως είναι η ταχύτητα περιστροφής του, η διάμετρος του, ο αριθμός των πτερυγίων, η κατανομή του πλάτους πτερυγίου και η κατάλληλη αεροτομή ή αεροτομές. Το κριτήριο επιλογής για το συνδυασμό αυτό είναι η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας. Συνήθως αποτελείται από δύο ή τρία πτερύγια από ενισχυμένο πολυεστέρα. Τα πτερύγια προσδένονται πάνω σε μια πλήμη (hub) είτε σταθερά, είτε με τη δυνατότητα περιστροφής γύρω από το διαμήκη άξονα τους μεταβάλλοντας το βήμα τους. Το μήκος τους εξαρτάται από την απαιτούμενη ονομαστική ισχύ της μηχανής και το αιολικό δυναμικό της περιοχής εγκατάστασης τους. Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα επιλέγεται έτσι ώστε ο λόγος ταχύτητας

ακροπτερυγίου προς την ονομαστική ταχύτητα του ανέμου να βρίσκεται στην περιοχή της βέλτιστης τιμής του αεροδυναμικού συντελεστή c_p .

- Βάση πτερυγίων ή νασέλα (nacelle): Περιλαμβάνει το σύνολο των μηχανολογικών μελών και συστημάτων της ανεμογεννήτριας. Ορισμένα από αυτά είναι οι άξονες υψηλής και χαμηλής ταχύτητας, το κιβώτιο ταχυτήτων (στις μεγάλες ανεμογεννήτριες), το σύστημα πέδησης για την ακινητοποίηση του ρότορα, η ηλεκτρική γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, το σύστημα προσανατολισμού (yaw control system) για την τοποθέτηση του δρομέα προς τη διεύθυνση της μέγιστης αιολικής δύναμης και το σύστημα ρύθμισης του βήματος πτερυγίου (pitch control system).
- Πύργος: Είναι το τμήμα της ανεμογεννήτριας, το οποίο στηρίζει όλη την υπόλοιπη ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση, δηλαδή το ρότορα και τη νασέλα. Εξασφαλίζει την απαιτούμενη ανύψωση του ρότορα από την επιφάνεια του εδάφους στο ιδανικό ύψος για την αξιοποίηση των αιολικών δυνάμεων. Οι πύργοι των ανεμογεννητριών είναι κυρίως χαλύβδινοι, ωστόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σκυρόδεμα. Δύο είναι οι κύριοι τύποι πύργων που έχουν επικρατήσει σήμερα, ο σωληνωτός κι ο δικτυωτός. Σε σπανιότερες περιπτώσεις και σε ανεμογεννήτριες μικρότερου μεγέθους γίνεται χρήση πυλώνων στηριζόμενων μέσω καλωδιώσεων. Οι δικτυωτοί πύργοι αποτελούνται από επιμέρους χαλύβδινα τμήματα, τα οποία συγκολλούνται μεταξύ τους. Τα κύρια πλεονεκτήματά τους είναι η ευκολία στη συναρμολόγηση και την τοποθέτηση, καθώς και το χαμηλό κόστος και βάρος τους, λόγω της μειωμένης ποσότητας υλικού που απαιτείται για την κατασκευή τους συγκριτικά με τους σωληνωτούς πύργους. Οι σωληνωτοί πύργοι αποτελούνται από λεπτότοιχα τμήματα μήκους συνήθως 20-30 m, τα οποία ενώνονται μεταξύ τους με τη χρήση φλαντζών. Το σχήμα τους είναι κωνικό, καθώς η διάμετρος τους αυξάνεται όσο κατευθυνόμαστε προς τη βάση τους. Είναι αισθητικά προτιμότεροι, ενώ από το εσωτερικό τους πραγματοποιείται η πρόσβαση στη βάση των πτερυγίων (νασέλα) στην κορυφή με τη χρήση σκάλας ή ανελκυστήρα. Τέλος, όταν πρόκειται για μεγάλες ανεμογεννήτριες, το εσωτερικό του πύργου είναι δυνατό να αποτελέσει και την περιοχή στέγασης των διαφόρων οργάνων της ανεμογεννήτριας. Σήμερα, για αισθητικούς κυρίως λόγους, έχει επικρατήσει η χρήση πύργων ανεμογεννητριών σωληνωτού τύπου έναντι τύπου δικτυώματος.

- Πίνακας ελέγχου: Βρίσκεται συνήθως τοποθετημένος στη βάση του πύργου της ανεμογεννήτριας για να είναι εύκολα και γρήγορα προσβάσιμος. Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί, συντονίζει κι ελέγχει όλες τις λειτουργίες της ανεμογεννήτριας, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη λειτουργία της.

1.5. Θέματα ελέγχου της παραγόμενης ενέργειας

Οι ανεμογεννήτριες σχεδιάζονται ώστε να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με όσο το δυνατόν μικρότερο κόστος. Η απόδοσή τους μεγιστοποιείται για ταχύτητες ανέμου περί τα 15 m/sec, ενώ η λειτουργία τους διακόπτεται για ταχύτητες ανέμου περί τα 25 m/sec για την αποφυγή πιθανής ζημιάς λόγω των αυξημένων φορτίων από τις ταχύτητες αυτές. Σε ενδιάμεσες ταχύτητες ανέμων, δηλαδή στο διάστημα μεταξύ 15 και 25 m/sec είναι αναγκαίο να αξιοποιούν σε μικρότερο ποσοστό την παραγόμενη ενέργεια, έτσι ώστε να αποφευχθούν πιθανές αστοχίες πάνω στην κατασκευή από την αύξηση των φορτίων. Γίνεται λοιπόν φανερό, ότι μια ανεμογεννήτρια χρειάζεται κάποιου είδους σύστημα ελέγχου της λειτουργίας των πτερυγίων και της διαδικασίας παραγωγής ενέργειας. Το σύστημα αυτό δύναται να διακριθεί σε δύο περιοχές με διαφορετικό περιεχόμενο, οι οποίες είναι οι εξής:

- α) η βελτιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας για μικρές ταχύτητες ανέμου
- β) ο περιορισμός της παραγόμενης ενέργειας για μεγάλες ταχύτητες ανέμου

Ως τιμή διαχωρισμού μεταξύ μεγάλων και μικρών ταχυτήτων θεωρείται η τιμή των 15 m/sec.

Βασικά διακρίνονται τρεις τύποι συστημάτων ελέγχου:

- ο έλεγχος απώλειας στήριξης (stall control)
- ο έλεγχος του βήματος πτερυγίου (pitch control)
- ο έλεγχος ενεργητικής απώλειας στήριξης (active stall control)

1.5.1. Έλεγχος απώλειας στήριξης (stall control)

Οι ανεμογεννήτριες με το συγκεκριμένο τύπο ελέγχου έχουν τα πτερύγια του ρότορα στερεωμένα στη βάση τους υπό σταθερή γωνία. Στόχος είναι ο περιορισμός της εξαγόμενης ενέργειας σε περιπτώσεις υψηλών ταχυτήτων ανέμου. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του σχεδιασμού των πτερυγίων με τέτοιο τρόπο, ώστε ο διαχωρισμός της ροής του ανέμου να πραγματοποιείται στην

υπήνεμη πλευρά της λεπίδας, όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει κάποια κρίσιμη τιμή. Τα κύρια μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η μικρότερη αποδοτικότητα σε χαμηλές ταχύτητες ανέμων, η μη υποβοηθούμενη εκκίνηση και οι μεταβολές της μέγιστης τιμής της ισχύος.

1.5.2. Έλεγχος του βήματος πτερυγίου (pitch control)

Οι ανεμογεννήτριες με το συγκεκριμένο τύπο ελέγχου διαθέτουν πτερύγια με τη δυνατότητα περιστροφής κατά το διαμήκη άξονα τους υπό κάποια γωνία, ώστε η χορδή της έλικας να γίνει παράλληλη στη διεύθυνση του ανέμου. Αυτό συμβαίνει για τη μείωση της παραγόμενης ενέργειας σε περιπτώσεις αυξημένης έντασης ανέμου. Σήμερα, ο τύπος αυτός ελέγχου χρησιμοποιείται μόνο σε συνδυασμό με δρομέα μεταβαλλόμενης ταχύτητας. Το βασικότερο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η διατήρηση της παραγόμενης ισχύος της ανεμογεννήτριας κοντά στην ονομαστική τιμή της γεννήτριας, ακόμα και σε υψηλές ταχύτητες ανέμων. Στα μειονεκτήματα συγκαταλέγεται η αυξημένη πολυπλοκότητα του συστήματος.

1.5.3. Έλεγχος ενεργητικής απώλειας στήριξης (active stall control)

Ο τύπος αυτός πρόκειται ουσιαστικά για συνδυασμό των δύο πρώτων ελέγχων. Βασίζεται στην ίδια αρχή με αυτή του pitch control, χρησιμοποιώντας όμως την ικανότητα της απώλειας της αεροδυναμικής στήριξης (stall) των πτερυγίων, ώστε να αποφευχθούν τα μεγάλα δυναμικά φορτία και οι διακυμάνσεις της ισχύος, τα οποία λαμβάνουν χώρα στον κλασικό έλεγχο του βήματος των πτερυγίων (pitch control). Πιο συγκεκριμένα, σε μικρές ταχύτητες ανέμου η ανεμογεννήτρια θα λειτουργήσει ως pitch controlled, ενώ σε μεγάλες ταχύτητες ως stall controlled. Με τον τρόπο αυτό είναι εφικτός ένας πιο ακριβής έλεγχος της εξαγόμενης ενέργειας, ενώ είναι δυνατή η λειτουργία της γεννήτριας στην ονομαστική ισχύ της για όλες τις υψηλές ταχύτητες του ανέμου. Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του τύπου ελέγχου είναι η αντιστάθμιση των μεταβολών της πυκνότητας του αέρα.

1.6. Καμπύλη ταχύτητας ανέμου – παραγόμενης ισχύος

Κάθε ανεμογεννήτρια έχει μια χαρακτηριστική καμπύλη ταχύτητας - ισχύος (power curve), η οποία φανερώνει τη σχέση μεταξύ της παραγόμενης ενέργειας και της ταχύτητας του ανέμου για

κάθε τύπο ανεμογεννήτριας. Η καμπύλη αυτή εξαρτάται από τις διάφορες ιδιότητες της ανεμογεννήτριας, όπως η επιφάνεια σάρωσης της έλικας, οι επικρατούσες συνθήκες ανέμου, η αεροδυναμική και οι αποδόσεις των κιβωτίων ταχυτήτων και της μηχανής. Συνήθως, η καμπύλη αυτή δίνεται από τους κατασκευαστές.

Η καμπύλη ισχύος αποτελεί χαρακτηριστικό στοιχείο της ανεμογεννήτριας, ενώ δύναται να χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο για την σύγκριση μεταξύ διαφορετικών ανεμογεννητριών. Επίσης, είναι το στοιχείο εκείνο που κρίνει την καταλληλότητα μίας ανεμογεννήτριας δεδομένης τεχνολογίας για μία συγκεκριμένη τοποθεσία. Κι αυτό διότι, διαφορετικές κατανομές ανέμου ασκούν διαφορετική επιρροή στις ανεμογεννήτριες, άρα και διαφορετική παραγωγή ενέργειας.

Η αεροδυναμική ποιότητα του δρομέα παρουσιάζεται μέσω του συντελεστή αποδοτικότητας c_p , ο οποίος εξαρτάται από τον αεροδυναμικό σχεδιασμό των πτερυγίων, μέσω των οποίων γίνεται ουσιαστικά η απορρόφηση της αιολικής ισχύος. Ο συντελεστής αποδοτικότητας c_p εξαρτάται από τη μηχανολογική αποδοτικότητα η_m , την ηλεκτρική αποδοτικότητα η_e και την αεροδυναμική αποδοτικότητα. Η μηχανολογική αποδοτικότητα η_m σχετίζεται με τις απώλειες στο κιβώτιο ταχυτήτων και η τυπική τιμή της είναι 0.95 - 0.97. Η ηλεκτρική αποδοτικότητα η_e έχει να κάνει με τις απώλειες της γεννήτριας και των ηλεκτρικών κυκλωμάτων και η τιμή της κυμαίνεται συνήθως στο 0.97 - 0.98. Η αεροδυναμική αποδοτικότητα μπορεί να φτάσει στη μέγιστη τιμή 0.592, η οποία αποτελεί το γνωστό όριο του Betz. Ο συντελεστής αποδοτικότητας c_p τυπικά φτάνει στη μέγιστη τιμή του (50%) για ταχύτητα ανέμου στο διάστημα 7 - 9 m/sec.

Η ενέργεια που παράγεται από οποιοδήποτε τύπο ανεμογεννήτριας δίνεται από την εξής σχέση:

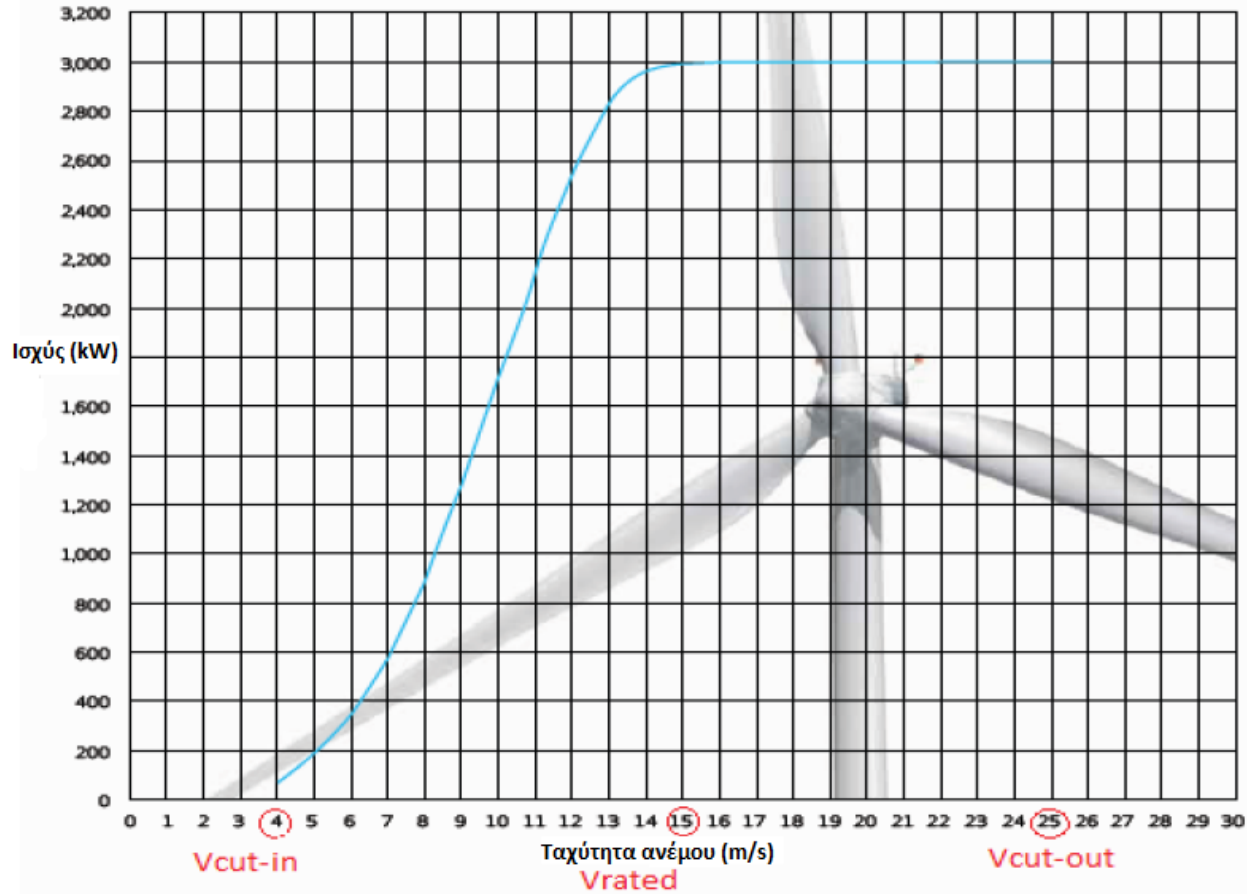
$$P = \frac{1}{2} * \rho * V^3 * A * c_p$$

όπου ρ η πυκνότητα του αέρα

V η ταχύτητα του ανέμου

A η επιφάνεια του δρομέα

c_p ο συντελεστής αποδοτικότητας



Εικ. 1.5. Παράδειγμα καμπύλης ισχύος - ταχύτητας ανέμου για μια ανεμογεννήτρια

Όπως απεικονίζεται στην Εικ. 1.5, τα χαρακτηριστικά σημεία της καμπύλης ισχύος - ταχύτητας ανέμου μιας ανεμογεννήτριας αντιστοιχούν σε τρεις ταχύτητες ανέμου, οι οποίες είναι οι εξής:

- η ταχύτητα ένταξης V_{cut-in} , η ταχύτητα του ανέμου κατά την οποία μία ανεμογεννήτρια αρχίζει να λειτουργεί και να παράγει ισχύ,
- η ονομαστική ταχύτητα V_{rated} , η ταχύτητα κατά την οποία η ανεμογεννήτρια ξεκινάει να λειτουργεί στα ονομαστικά της μεγέθη και να παράγει την ονομαστική της ισχύ (μέγιστο σημείο της καμπύλης), και
- η ταχύτητα αποκοπής $V_{cut-out}$, η ταχύτητα κατά την οποία η ανεμογεννήτρια σταματάει να λειτουργεί για λόγους ασφαλείας και για την αποφυγή μεγάλης καταπόνησης των μερών της και κυρίως των πτερυγίων της. Στο σημείο αυτό δρα το σύστημα πέδησης της ανεμογεννήτριας ή το σύστημα ελέγχου, με σκοπό την απομάκρυνση των πτερυγίων της από την κατεύθυνση του πνέοντος ανέμου.

1.7. Εξέλιξη ανεμογεννητριών

Μέχρι το 1980 το κύριο ενδιαφέρον στον τομέα των ανεμογεννητριών ήταν εντοπισμένο σε μεμονωμένες ανεμογεννήτριες με ονομαστική ικανότητα παραγωγής ενέργειας γύρω στα 55 kW και ύψος περίπου 20 m. Για να γίνει αντιληπτή η πρόοδος των τελευταίων ετών αρκεί να αναφερθεί ότι σήμερα κατασκευάζονται ανεμογεννήτριες με παραγωγική ικανότητα που φτάνει ακόμα και τα 5 MW, ενώ το ύψος τους ξεπερνάει ακόμα και τα 100 m. Στον Πίν. 1.1 που ακολουθεί, δίνεται μία τυπική αντιστοιχία μεταξύ της παραγωγικής ικανότητας και του μεγέθους ανεμογεννητριών. Πιο συγκεκριμένα, ως μέγεθος των ανεμογεννητριών λαμβάνεται το ύψος του πύργου ή η διάμετρος του ρότορα.

ΥΨΟΣ ΠΥΡΓΟΥ ή ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΡΟΤΟΡΑ (m)	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΤΙΜΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (kW)
20	55
30	225
35	450
40	500
43	600
48	750
54	1000
58	1500
75	2000
115	5000

Πίν. 1.1. Αντιστοιχία ύψους πύργου ή διαμέτρου ρότορα και ονομαστικής ισχύος ανεμογεννήτριας

Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να τοποθετηθούν είτε μεμονωμένα είτε σε ομάδες (σε συστοιχία), σχηματίζοντας με αυτόν τον τρόπο τα λεγόμενα αιολικά πάρκα. Τα αιολικά πάρκα, όπως και οι μεμονωμένες ανεμογεννήτριες, διακρίνονται σε χερσαία (onshore) και σε υπεράκτια (offshore). Πριν από 30 περίπου χρόνια ξεκίνησε η προσπάθεια για την εγκατάσταση αιολικών πάρκων μέσα στη θάλασσα. Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη κατασκευή θαλάσσιου αιολικού πάρκου ξεκίνησε το 1991. Οι κύριοι λόγοι που οδήγησαν στην απόφαση αυτή εστιάζονται στο σημαντικό ποσό ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να παραχθεί, καθώς η ένταση του ανέμου στην θάλασσα είναι

συνήθως μεγαλύτερη απ' ότι στη στεριά, ενώ δεν επηρεάζεται από την παρουσία πιθανών εμποδίων.

Ωστόσο, περιβαλλοντικοί και οικονομικοί κυρίως παράγοντες δρουν ανασταλτικά σε αυτή τη μεταφορά των αιολικών πάρκων εντός της θάλασσας. Ενδεικτικό στοιχείο του υψηλού κόστους είναι η αύξηση της απαιτούμενης δαπάνης κατά 50% ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου, συγκριτικά με ένα χερσαίο αιολικό πάρκο παρόμοιας ισχύος. Αυτό συμβαίνει διότι απαιτούνται μεγάλα κεφάλαια τόσο για την εγκατάσταση του, δηλαδή την τοποθέτηση του στο βυθό, όσο και για τη σύνδεση του αιολικού πάρκου με το ηπειρωτικό ηλεκτρικό σύστημα μέσω υποβρυχίων καλωδιώσεων.

Όσον αφορά το μέλλον και την εξέλιξη των ανεμογεννητριών, θα πραγματοποιηθεί η προσπάθεια για την κατασκευή τους με ακόμα πιο εύκαμπτα μέλη. Η τάση αυτή θα επεκταθεί τόσο στο δομικό μέρος της κατασκευής, όσο και στο μηχανολογικό. Επίσης, όλο και περισσότερες ανεμογεννήτριες θα κατασκευάζονται σε παραθαλάσσιες περιοχές, καθώς και μέσα στη θάλασσα. Βασική επιδίωξη αποτελεί η οικονομικότερη και αποδοτικότερη παραγωγή ενέργειας με την ταυτόχρονη μείωση των φορτίων λειτουργίας. Άλλωστε, γίνεται ολοένα και πιο επιτακτική η ανάγκη για την κατεύθυνση σε εναλλακτικούς τρόπους παραγωγής ενέργειας με σκοπό την προστασία του περιβάλλοντος, καθώς και την εξοικονόμηση άλλων πηγών ενέργειας.

1.8. Βασικές παράμετροι ανέμου

Η κύρια φόρτιση η οποία καταπονεί τους πύργους των ανεμογεννητριών δεν είναι άλλη από τον ίδιο τον άνεμο. Ο άνεμος προκαλείται από την κίνηση αερίων μαζών, η οποία παρατηρείται στα στρώματα της ατμόσφαιρας. Πιο συγκεκριμένα όταν μια μάζα αέρα θερμαίνεται, γίνεται πιο αραιή και πιο ελαφριά από τις άλλες μάζες που βρίσκονται γύρω της, και αποκτά την τάση να ανέβει ψηλότερα από εκείνες. Επομένως, άλλες, πιο ψυχρές και βαριές αέριες μάζες θα κινηθούν και θα πάρουν τη θέση της. Αντίθετα, όταν μία μάζα αέρα ψύχεται, γίνεται πιο πυκνή και πιο βαριά και αποκτά την τάση να μετακινηθεί σε χαμηλότερο ύψος. Για να το πετύχει αυτό, «σπρώχνει» τις θερμότερες και πιο αραιές μάζες του αέρα και παίρνει τη θέση τους. Η θέρμανση και η ψύξη των αερίων μαζών προκαλείται από την ακτινοβολία που εκπέμπει ο ήλιος, η οποία απορροφάται από την επιφάνεια της γης.

Η ταχύτητα του ανέμου είναι διαφορετική από τόπο σε τόπο και ποικίλλει κατά τη διάρκεια της ημέρας. Χαρακτηριστικό γνώρισμα του ανέμου αποτελεί η εντόνως τυχηματική συμπεριφορά του.

Ωστόσο, η διακύμανση του ανέμου είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την εκτίμηση της παραγόμενης ισχύος και ο ποσοτικός υπολογισμός της είναι αναγκαίος. Για το λόγο αυτό, σύμφωνα με τους Ευρωπαϊκούς και Αμερικάνικους κανονισμούς έχει οριστεί η μέση ταχύτητα του ανέμου U_{10} σε χρονικό διάστημα δέκα λεπτών, η οποία σε συνδυασμό με την τυπική της απόκλιση σ_u αποδίδει τη μεταβολή του ανέμου με την πάροδο του χρόνου. Κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος των δέκα λεπτών θεωρείται ότι οι μεταβλητές U_{10} και σ_u παραμένουν σταθερές. Σε περιπτώσεις καιρικών φαινομένων με απότομες μεταβολές και ακραίες τιμές, όπως οι περιπτώσεις τυφώνων και ανεμοστρόβιλων, η προσομοίωση του πεδίου του ανέμου από τις μεταβλητές U_{10} και σ_u κρίνεται ανεπαρκής.

Η μέση ταχύτητα U_{10} ενός διαστήματος δέκα λεπτών διαφέρει από την αντίστοιχη μέση ταχύτητα ενός άλλου διαστήματος δέκα λεπτών. Αυτή η μεταβλητότητα μπορεί να αποδοθεί με μια συνάρτηση κατανομής πιθανότητας. Για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα η κατανομή της U_{10} μπορεί να αποδοθεί από την κατανομή Weibull:

$$F_{U_{10}}(u) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{u}{A}\right)^k\right]$$

όπου $k=0.4$ είναι η σταθερά του von Karman, ενώ η παράμετρος A είναι συνάρτηση του ύψους z και δίνεται από τη σχέση

$$A = A_H * \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(H/z_0)}$$

όπου z_0 είναι η παράμετρος τραχύτητας του εδάφους που ορίζεται ως το ύψος στο οποίο η ταχύτητα του ανέμου είναι μηδέν, με την προϋπόθεση ότι το κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων του ανέμου είναι λογαριθμική συνάρτηση του ύψους. Τυπικές τιμές της παραμέτρου τραχύτητας z_0 δίνονται στον Πίν. 1.2 που ακολουθεί. Η παράμετρος A_H είναι η παράμετρος της κλίμακας στο ύψος αναφοράς H . Παρόλο που γενικά, μία συνηθισμένη επιλογή για το ύψος αναφοράς είναι η τιμή $H=10m$, για την περίπτωση των ανεμογεννητριών συνηθίζεται η επιλογή του ύψους του άξονα περιστροφής του ρότορα ως ύψος αναφοράς.

Είδος εδάφους	Παράμετρος τραχύτητας z_0
Πάγος	0.00001
Ανοικτή θάλασσα χωρίς κύματα	0.0001
Ανοικτή θάλασσα με κύματα	0.0001-0.003
Παραθαλάσσιες περιοχές	0.001
Ύπαιθρος χωρίς εμπόδια	0.01
Καλλιεργίσιμη γη	0.05
Δάση και προάστια	0.3
Αστικά κέντρα	1-10

Πίν. 1.2. Τυπικές τιμές παραμέτρου τραχύτητας z_0

Το προφίλ της ταχύτητας του ανέμου πάνω από το έδαφος είναι λογαριθμική συνάρτηση του ύψους z και δίνεται από τη σχέση

$$u(z) = \frac{u^*}{k} * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

όπου $u^*=(\tau/\rho)^{1/2}$ είναι η ταχύτητα τριβής, τ είναι η διατμητική τάση στην επιφάνεια του εδάφους και ρ είναι η πυκνότητα του αέρα.

Σύμφωνα με τους κανονισμούς η περίοδος επαναφοράς για την U_{10} είναι 50 χρόνια, σε ύψος 10m από την επιφάνεια του εδάφους και με τραχύτητα εδάφους $z_0=0.05$.

Για μια δεδομένη τιμή της U_{10} , η τυπική απόκλιση σ_u της ταχύτητας του ανέμου μεταβάλλεται από δεκάλεπτο σε δεκάλεπτο. Αυτή η μεταβολή της τυπικής απόκλισης είναι γνωστή ως τύρβη του ανέμου και αποτελεί την τυπική απόκλιση της σ_u . Μετρήσεις σε πλήθος περιοχών δείχνουν ότι η κατανομή της σ_u σε συσχέτιση με την U_{10} αποδίδεται ικανοποιητικά από την λογαριθμοκανονική κατανομή:

$$F_{\sigma_U|U_{10}}(\sigma) = \Phi\left(\frac{\ln(\sigma - b_0)}{b_1}\right)$$

όπου με $\Phi()$ αναπαρίσταται η τυπική κατανομή του Gauss. Οι όροι b_0 και b_1 εξαρτώνται από την περιοχή μελέτης και την U_{10} (Ronold and Larsen, 1999).

Πέρα από την θεωρητική προσέγγιση για τον υπολογισμό του σ_U , για πρακτικούς λόγους ο Δανέζικος κανονισμός DS472 προτείνει μια πιο συντηρητική (συνήθως) τιμή με βάση τη σχέση:

$$\sigma_{U,c} = U_{10} * \frac{1}{\ln(z/z_0)}$$

Ακόμα, σύμφωνα με τον κανονισμό IEC61400-1, η τυπική απόκλιση σ_U προσδιορίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\sigma_{U,c} = I_{T,15} * \frac{U_{10,15} + \alpha * U_{10}}{\alpha + 1}$$

όπου $U_{10,15} = 15$ m/sec είναι η ταχύτητα αναφοράς του ανέμου, $I_{T,15}$ είναι η ένταση της τύρβης για ταχύτητα ανέμου 15 m/sec και α είναι η παράμετρος κλίσης. Τυπικές τιμές για περιπτώσεις υψηλών επιπέδων τύρβης είναι οι $I_{T,15} = 0.18$ και $\alpha = 2$, ενώ για περιπτώσεις χαμηλών επιπέδων τύρβης είναι αντίστοιχα οι $I_{T,15} = 0.16$ και $\alpha = 3$.

Ως ένταση τύρβης I_t ορίζεται ο λόγος της τυπικής απόκλισης της ταχύτητας των δέκα λεπτών σ_u προς την ταχύτητα των δέκα λεπτών U_{10} . Σε αυτό το σημείο αξίζει να τονισθεί ότι η παρουσία μιας ανεμογεννήτριας επηρεάζει τη ροή του ανέμου τοπικά και η τύρβη πίσω από την ανεμογεννήτρια θα είναι διαφορετική απ' ότι στο μπροστινό μέρος της. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως "wake effect" και παίζει σημαντικό ρόλο κυρίως σε περιπτώσεις ομάδων ανεμογεννητριών ή αιολικών πάρκων, όπου οι ανεμογεννήτριες είναι τοποθετημένες σε κοντινή σχετικά απόσταση μεταξύ τους.

Γενικότερα γίνεται αντιληπτό ότι παράγοντες όπως η παρουσία εμποδίων, η ανομοιογένεια του εδάφους και η γενικότερη τοπογραφία της περιοχής, οξύνουν την τύρβη και δημιουργούν ένα αρκετά ανομοιογενές και μεταβαλλόμενο πεδίο ανέμου, το οποίο προσομοιώνεται με δυσκολία.

Μέχρι το σημείο αυτό οποιαδήποτε αναφορά στις μεταβλητές U_{10} , σ_u και I_t αντιστοιχεί σε ταχύτητα ανέμου με σταθερή διεύθυνση κατά τη διάρκεια των δέκα λεπτών, διατηρώντας έτσι σταθερές και τις τιμές των μεταβλητών αυτών.

Εκτός όμως από την τύρβη στην διεύθυνση του ανέμου, αναπτύσσεται τύρβη και κάθετα, αλλά και κατακόρυφα ως τη διεύθυνση αυτή. Σύμφωνα με τους κανονισμούς, παρόλο που η ταχύτητα του ανέμου παραμένει μηδενική στις άλλες δύο διευθύνσεις πέραν αυτής του ανέμου, η τυπική απόκλιση της ταχύτητας στην κάθετη και κατακόρυφη διεύθυνση δεν είναι μηδενικές. Πιο συγκεκριμένα, στην κάθετη διεύθυνση μπορεί να θεωρηθεί περίπου ίση με το 75% της τυπικής απόκλισης στη διεύθυνση του ανέμου, ενώ στην κατακόρυφη διεύθυνση μπορεί να ληφθεί περίπου ίση με το 50% αυτής.

Κλείνοντας, στον Πίν. 1.3 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η αντιστοιχία μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου με την ευρέως χρησιμοποιούμενη κλίμακα Beaufort.

Beaufort	Ταχύτητα ανέμου m/sec
0	0 - 0.5
1	0.5 - 1.7
2	1.7 - 3.3
3	3.3 - 5.6
4	5.6 - 8.4
5	8.4 - 11.2
6	11.2 - 13.9
7	13.9 - 17
8	17 - 20.6
9	20.6 - 24.8
10	24.8 - 28.7
11	28.7 - 33
12	33 -

Πιν. 1.3. Αντιστοιχία ταχύτητας του ανέμου και κλίμακας Beaufort

1.9. Φορτίσεις ανεμογεννητριών

Ως ένα μέρος της διαδικασίας σχεδιασμού, μια ανεμογεννήτρια πρέπει να αναλύεται για τις διάφορες φορτίσεις που είναι πιθανό να υποστεί κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της. Πρωταρχικός στόχος σε αυτήν τη διαδικασία είναι να εξασφαλιστεί πως η κατασκευή είναι ικανή

να ανταπεξέλθει σε αυτές τις φορτίσεις με ένα επαρκές περιθώριο ασφαλείας. Για το λόγο αυτό απαιτείται κατά την ανάλυση να ληφθεί υπόψη πληθώρα κρίσιμων σεναρίων φόρτισης.

Η μελέτη και η υλοποίηση του σχεδιασμού των ανεμογεννητριών εξαρτάται από ένα σύνολο καταστάσεων, φορτίσεων και φάσεων του ανέμου, τα οποία μπορούν να ληφθούν υπόψη είτε μεμονωμένα είτε με διάφορους συνδυασμούς.

Οι διάφορες καταστάσεις σχεδιασμού, υπό τις οποίες μπορεί να μελετηθεί μία ανεμογεννήτρια, διακρίνονται στις ακόλουθες δύο κατηγορίες.

A) Συνθήκες λειτουργίας, οι οποίες περιλαμβάνουν:

- την κανονική λειτουργία και την παραγωγή ενέργειας
- την εκκίνηση, τη διακοπή, τη βραδεία λειτουργία και την αναμονή

B) Προσωρινές συνθήκες, οι οποίες περιλαμβάνουν:

- τη μεταφορά
- την εγκατάσταση και τη συνδεσμολογία
- τις πιθανές βλάβες
- τη συντήρηση και την επισκευή
- τον έλεγχο και τη δοκιμή των διαφόρων μελών

Οι διάφορες φάσεις του ανέμου μπορούν να διαχωριστούν σε κανονικές και σε ακραίες. Σύμφωνα με τον κανονισμό IEC-61400-1 γίνεται ένας περαιτέρω διαχωρισμός αυτών και διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις ανέμου:

- κανονικό προφίλ ανέμου
- κανονικό επίπεδο τύρβης
- ακραία συνεχόμενη ριπή ανέμου
- ακραία μεταβολή της διεύθυνσης του ανέμου
- ακραία ριπή ανέμου με συγκεκριμένη κατεύθυνση
- ακραία ταχύτητα ανέμου
- ακραία μεταβολή των ταχυτήτων καθ' ύψος

Οι φορτίσεις σχεδιασμού είναι αποτέλεσμα συνδυασμού καταστάσεων σχεδιασμού και εξωτερικών συνθηκών. Ορισμένοι πιθανοί σχεδιασμοί φορτίσεων είναι οι ακόλουθοι:

- κανονική λειτουργία σε κανονικές εξωτερικές συνθήκες
- κανονική λειτουργία σε ακραίες εξωτερικές συνθήκες
- μεταφορά, εγκατάσταση, συντήρηση - επισκευή σε δυσμενείς εξωτερικές συνθήκες
- περιπτώσεις βλαβών σε κατάλληλες εξωτερικές συνθήκες, οι οποίες πιθανόν να περιλαμβάνουν ακραίες εξωτερικές συνθήκες

Όπως έχει ήδη αναφερθεί αρκετές φορές, η κύρια πηγή φόρτισης των ανεμογεννητριών είναι ο άνεμος. Η ανεμογεννήτρια αποτελείται από λεπτότοιχα στοιχεία μεγάλου μήκους, όπως είναι τα πτερύγια και ο πύργος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη αδρανειακών δυνάμεων σε συνδυασμό με τις ήδη υπάρχουσες βαρυτικές δυνάμεις που δρουν σε αυτά τα στοιχεία. Επιπλέον, χρειάζεται να ληφθούν υπόψη φορτίσεις όπως, οι φυγόκεντρες, οι Coriolis και οι γυροσκοπικές, οι οποίες αναπτύσσονται κατά τη λειτουργία των ανεμογεννητριών.

Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις, τα φορτία των ανεμογεννητριών μπορούν να καταταχθούν σε:

- αεροδυναμικά φορτία στα πτερύγια
- βαρυτικές δυνάμεις στα πτερύγια
- αεροδυναμικές δυνάμεις στον πύργο και στη βάση των πτερυγίων (νασέλα)
- βαρυτικές δυνάμεις στον πύργο και στη βάση των πτερυγίων (νασέλα)
- φυγόκεντρες και Coriolis δυνάμεις λόγω της περιστροφής
- γυροσκοπικές δυνάμεις εξαιτίας της λειτουργίας του συστήματος ευθυγράμμισης

Στη συνέχεια γίνεται μια σύντομη περιγραφή των πιο σημαντικών φορτίσεων που συναντώνται σε μια ανεμογεννήτρια και στο μηχανισμό που υπάρχει πίσω από αυτές.

1.9.1. Αδρανειακά και βαρυτικά φορτία

Οι αδρανειακές και βαρυτικές δυνάμεις στο ρότορα εξαρτώνται από τη μάζα. Η εγκάρσια φυγόκεντρη δύναμη στη διατομή της λεπίδας F_c εξαρτάται από τη γωνιακή ταχύτητα του ρότορα, την ακτινική απόσταση και τη μάζα της κάθε λεπίδας. Η δύναμη στη βάση της λεπίδας δίνεται από τη σχέση:

$$F_c = \sum (m_i * r_i * \omega^2)$$

όπου m_i η μάζα του επιμέρους στοιχείου, ω η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα και r_i η ακτινική απόσταση του επιμέρους στοιχείου.

Η δύναμη βαρύτητας δίνεται από την απλή σχέση:

$$F_g = \sum (m_i * g) = m_{blade} * g$$

όπου $g=9.81 \text{ m/s}^2$ η επιτάχυνση της βαρύτητας, m_i η μάζα του επιμέρους στοιχείου και m_{blade} η συνολική μάζα της λεπίδας.

Όσον αφορά τις γυροσκοπικές δυνάμεις, αυτές προκύπτουν σε κάθε ελαστική στήριξη του ρότορα. Ανεξάρτητα από την ελαστικότητα της στήριξης, τέτοιες δυνάμεις αναπτύσσονται όταν ο ρότορας στρέφεται και ευθυγραμμίζεται στη διεύθυνση του ανέμου. Σημειώνεται, ότι τέτοιου είδους δυνάμεις δε λαμβάνονται υπόψη σε αρκετές περιπτώσεις που η γωνιακή ταχύτητα του συστήματος περιστροφής του ρότορα είναι σχετικά μικρή.

Οι βαρυτικές δυνάμεις στα πτερύγια δημιουργούν καμπτικές ροπές και στα δύο επίπεδα. Λόγω της περιστροφής των λεπίδων, οι βαρυτικές δυνάμεις που δρουν στα πτερύγια δίνουν μεταβαλλόμενες καμπτικές ροπές. Όπως είναι λογικό, όσο μεγαλύτερος είναι ο ρότορας τόσο μεγαλύτερη είναι η δράση των βαρυτικών δυνάμεων. Τυπικά η καμπτική ροπή στην υποδοχή των πτερυγίων (νασέλα) αντιστοιχεί στη διάμετρο του ρότορα υψωμένη στην τέταρτη δύναμη. Τα παραπάνω φανερώνουν το λόγο για τον οποίο επιδιώκεται η κατασκευή όσο το δυνατόν μεγαλύτερων ανεμογεννητριών.

Η απόκριση των λεπίδων είναι άμεσα συνδεδεμένη με την απόσβεσή τους. Η συνολική απόσβεση είναι συνδυασμός της αεροδυναμικής απόσβεσης και της απόσβεσης της κατασκευής. Η αεροδυναμική απόσβεση εξαρτάται από:

- το είδος των πτερυγίων
- τις συνθήκες λειτουργίας
- την ταχύτητα του ανέμου
- τη συχνότητα περιστροφής του ρότορα
- τη διεύθυνση ταλάντωσης των λεπίδων
- την κίνηση των λεπίδων ως προς τη διεύθυνση του προσπίπτοντος ανέμου

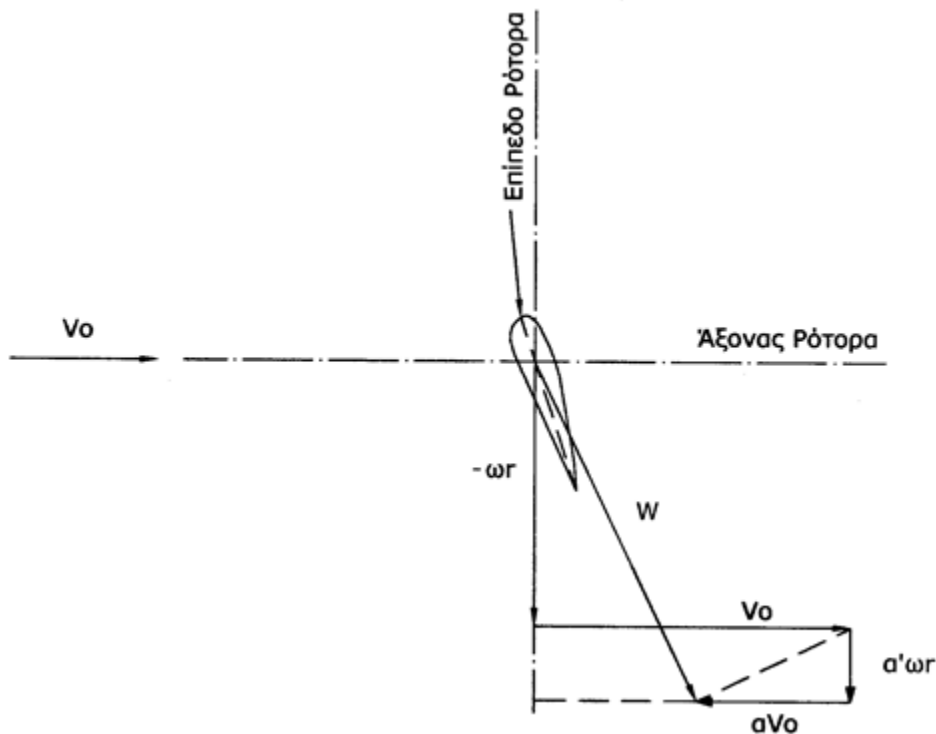
Η κατασκευαστική απόσβεση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το υλικό των λεπίδων. Πειράματα δείχνουν ότι η απόσβεση για τα πτερύγια είναι της τάξεως του 3%. Σήμερα, για την κατασκευή των λεπίδων χρησιμοποιούνται ευρύτατα τα γνωστά FRP.

1.9.2. Αεροδυναμικά φορτία

1.9.2.1. Πτερύγια

Ο υπολογισμός της πραγματικής ροής του ανέμου σε περιοχές κοντά στο ρότορα είναι αρκετά πολύπλοκος, κυρίως λόγω της λειτουργίας του ρότορα, η οποία διαφοροποιεί τις ταχύτητες και το πεδίο του ανέμου στις περιοχές αυτές. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται διάφορα απλοποιητικά μοντέλα για την εκτίμηση των φορτίων του ρότορα.

Η φόρτιση της διατομής ενός πτερυγίου και οι επιμέρους συνιστώσες της ταχύτητας του ανέμου φαίνονται στην Εικ. 1.6 που ακολουθεί.



Εικ. 1.6. Συνιστώσες ταχύτητας ανέμου σε πτερύγιο ανεμογεννήτριας

Η ταχύτητα του ανέμου που προσπίπτει κάθετα στο πτερύγιο είναι V_0 . Όταν ο άνεμος περάσει μέσα από το επίπεδο του ρότορα, και συνεπώς από το επίπεδο του πτερυγίου, μειώνεται κατά ένα ποσοστό α (δηλαδή κατά μία τιμή $\alpha \cdot V_0$), λόγω της αξονικής αλληλεπίδρασης με το πτερύγιο. Έτσι, ένα στοιχείο του πτερυγίου σε απόσταση r από τον άξονα του ρότορα κινείται με ταχύτητα ωr στο επίπεδο του ρότορα. Όταν ο άνεμος διέρχεται από το επίπεδο του ρότορα, αλληλεπιδρά με τον κινούμενο ρότορα και εισάγεται μια εφαπτομενική ταχύτητα $\alpha' \omega r$. Η τελική ταχύτητα του ανέμου που θα δεχτεί το πτερύγιο του ρότορα είναι W . Αυτή η ταχύτητα δημιουργεί αεροδυναμικές δυνάμεις στη λεπίδα, οι οποίες διακρίνονται σε μια δύναμη ανύψωσης (lift)

$$F_L = \frac{1}{2} * C_L * \rho * c * W^2$$

και σε μία δύναμη αντίστασης (drag)

$$F_D = \frac{1}{2} * C_D * \rho * c * W^2$$

όπου C_L ο συντελεστής ανύψωσης, C_D ο συντελεστής αντίστασης, ρ η πυκνότητα του αέρα και c το μήκος της χορδής του πτερυγίου.

1.9.2.2. Πύργος και βάση πτερυγίων (νασέλα)

Η αεροδυναμική δύναμη αντίστασης F_D στον πύργο και στη βάση των πτερυγίων, μπορεί να υπολογισθεί στη βάση της προβαλλόμενης επιφάνειας, κάθετα στη ροή του ανέμου, από τη σχέση:

$$F_D = \frac{1}{2} * C_T * \rho * A * V_0^2$$

όπου C_D ο αεροδυναμικός συντελεστής αντίστασης, ρ η πυκνότητα του αέρα, A η προβαλλόμενη επιφάνεια κάθετα στη ροή του ανέμου και V_0 η ταχύτητα του ανέμου.

1.9.2.3. Κόπωση

Ο άνεμος ως κυρίαρχη πηγή φόρτισης έχει έντονα μεταβαλλόμενο μέτρο και διεύθυνση. Για το λόγο αυτό η κόπωση σίγουρα αποτελεί βασική καταπόνηση της κατασκευής σε διάφορα μέλη. Το μέγεθος του κινδύνου αστοχίας των ανεμογεννητριών σε κόπωση γίνεται αντιληπτό, εάν αναλογιστεί κανείς το γεγονός πως η κόπωση αποτελεί το κρίσιμο μέγεθος σχεδιασμού για πολλά μέλη των κατασκευών αυτών. Επιπλέον, οι ανεμογεννήτριες σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε το υλικό τους να βρίσκεται πάντα κάτω από το όριο διαρροής του (ελαστική περιοχή). Διαφορετικά, η εισαγωγή στην ανελαστική περιοχή σε συνδυασμό με το εναλλασσόμενο πρόσημο της τιμής των εντατικών μεγεθών θα δημιουργούσε συσσωρευμένη ζημιά στην κατασκευή και θα έκανε αδύνατη την ασφαλή λειτουργία της καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής της.

1.10. Θεμελίωση ανεμογεννητριών

Σήμερα, όπως έχει ήδη τονισθεί, οι ανεμογεννήτριες και τα αιολικά πάρκα συναντώνται τόσο στην ξηρά (onshore) όσο και εντός της θάλασσα (offshore). Ο διαχωρισμός αυτός είναι μία από τις αιτίες, οι οποίες οδηγούν στο σχεδιασμό και την κατασκευή ανεμογεννητριών με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Ένα από τα χαρακτηριστικά αυτά που παρουσιάζουν μεταβολή από κατασκευή σε κατασκευή είναι ο τρόπος της θεμελίωσης της ανεμογεννήτριας.

1.10.1. Θεμελίωση χερσαίων ανεμογεννητριών

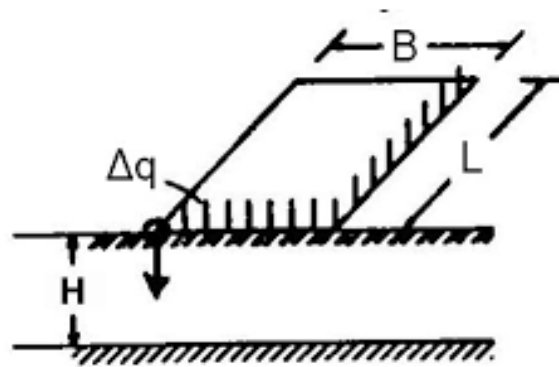
Οι χερσαίες ανεμογεννήτριες επικοινωνούν με το έδαφος, κατά κύριο λόγο, είτε μέσω επιφανειακών θεμελιώσεων είτε μέσω θεμελιώσεων με τη χρήση πασσάλων. Ο κύριος παράγοντας που καθορίζει την επιλογή μεταξύ των δύο αυτών τύπων θεμελίωσης είναι το εδαφικό προφίλ και οι συνθήκες του εδάφους, οι οποίες επικρατούν στην περιοχή που πρόκειται να πραγματοποιηθεί η θεμελίωση της ανεμογεννήτριας. Βασική απαίτηση για την επιλογή του είδους θεμελίωσης αποτελεί η ευστάθεια του θεμελίου έναντι ολίσθησης και ανατροπής, η οποία εκφράζεται μέσω της φέρουσας ικανότητας τους.

Η επιφανειακή θεμελίωση αποτελεί την πιο απλή μορφή θεμελίωσης και βρίσκει ευρεία εφαρμογή σε διάφορους τύπους κατασκευών. Πρόκειται στην ουσία για ένα πέδιλο βαρύτητας που

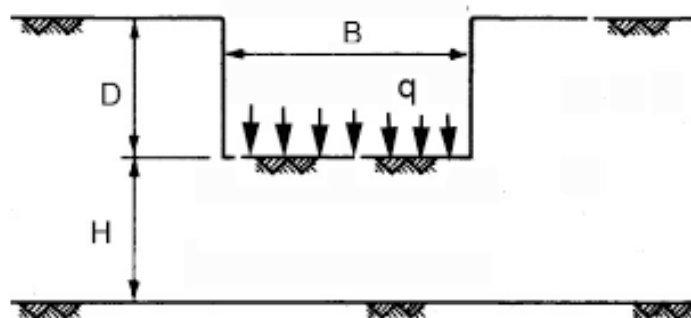
στηρίζεται στο υποκείμενο έδαφος και αποτελείται από οπλισμένο σκυρόδεμα, ώστε να έχει επαρκές βάρος. Η διατομή του είναι συνήθως κυκλική ή ορθογωνική.

Η επιφανειακή θεμελίωση διακρίνεται σε δύο είδη:

- Ρηχή θεμελίωση (Εικ. 1.7): Εδράζεται στην επιφάνεια του εδάφους ή ακριβώς από κάτω. Το πλεονέκτημα της ρηχής θεμελίωσης είναι η ευκολία στην κατασκευή και ο μικρός βαθμός απαίτησης για εκσκαφή και επαναχωμάτωση.
- Εγκιβωτισμένη θεμελίωση (Εικ. 1.8): Εδράζεται σε ορισμένο βάθος D από την επιφάνεια του εδάφους. Αυτό σημαίνει ότι κάποια ποσότητα εδάφους χρειάζεται να εκσκαφθεί και στη συνέχεια ένα υλικό πλήρωσης να χρησιμοποιηθεί πάνω από την θεμελίωση για την κάλυψη της. Η εφαρμογή του συγκεκριμένου είδους θεμελίωσης ενδείκνυται σε περιπτώσεις όπου υπάρχει μια στρώση μαλακού εδάφους στην επιφάνεια, η οποία με την εκσκαφή τελικά απομακρύνεται με αποτέλεσμα η θεμελίωση να εδραστεί σε κάποιο σκληρότερο εδαφικό υλικό.



Εικ. 1.7. Ρηχή θεμελίωση



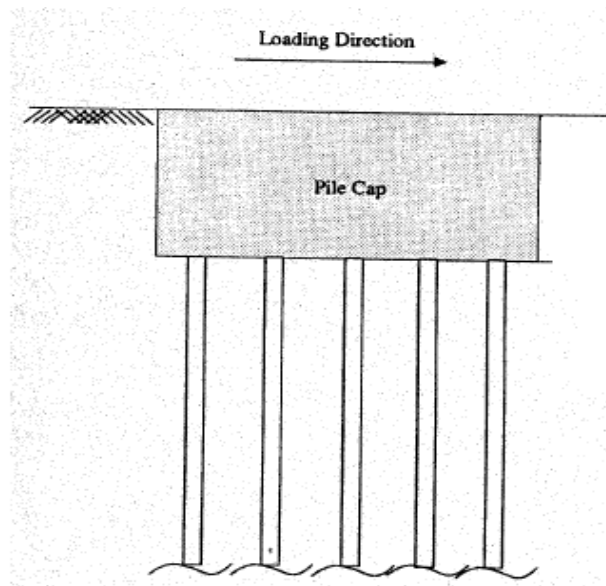
Εικ. 1.8. Εγκιβωτισμένη θεμελίωση

Σε γενικές γραμμές η επιφανειακή θεμελίωση επιλέγεται όταν το έδαφος είναι αρκετά σκληρό, όταν δηλαδή διακρίνεται από μεγάλη δυσκαμψία (βραχώδες), ώστε να παραλάβει απευθείας τις διάφορες φορτίσεις από την ανεμογεννήτρια με ασφάλεια. Βασική παράμετρος για την ευστάθεια του επιφανειακού θεμελίου αποτελεί η εκκεντρότητα της φόρτισης. Στο σημείο αυτό, τονίζεται ότι έκκεντρη φόρτιση θεμελίου ισοδυναμεί με κεντρικά φορτιζόμενο θεμέλιο, μειωμένης όμως επιφάνειας. Επιβεβαιώνεται ότι τελικά, το κρίσιμο μέγεθος σχεδιασμού της θεμελίωσης είναι ο περιορισμός της εκκεντρότητας της φόρτισης και όχι η φέρουσα ικανότητα της. Ωστόσο, μεγάλη εκκεντρότητα οδηγεί σε αύξηση των πιέσεων επαφής μεταξύ θεμελίου και εδάφους και κατ' επέκταση σε μείωση της φέρουσας ικανότητας.

Τέλος, οι επιφανειακές θεμελιώσεις θα πρέπει να ελέγχονται έναντι:

- Ανατροπής
- Ολίσθησης
- Αστοχίας φέρουσας ικανότητας
- Άνωσης
- Καθιζήσεων

Εάν οι ιδιότητες του εδάφους δεν επαρκούν για να εδρασθεί η θεμελίωση επιφανειακά, μία καλή λύση είναι η χρήση βαθιάς θεμελίωσης. Η βαθιά θεμελίωση μέσα στο έδαφος δύναται να αποτελείται από έναν ή περισσότερους πασσάλους (πασσαλομάδα) (Εικ. 1.9). Αυτό το είδος θεμελίωσης επιλέγεται σε πιο μαλακές (εύκαμπτες) περιπτώσεις εδαφικών υλικών, στις οποίες οι διάφορες φορτίσεις της ανεμογεννήτριας πρέπει να μεταφερθούν σε μεγαλύτερα βάθη από την επιφάνεια, ώστε να απορροφηθούν από τα σκληρότερα εδαφικά υλικά που βρίσκονται εκεί. Η μεταφορά των φορτίων πραγματοποιείται τόσο μέσω της βάσης έδρασης των πασσάλων, όσο και (κυρίως) μέσω της παράπλευρης επιφάνειας τους, γεγονός το οποίο αποτελεί και τη βασική διαφορά σε σχέση με τις επιφανειακές θεμελιώσεις.



Εικ. 1.9. Βαθιά θεμελίωση με πασσάλους

Η θεμελίωση με πασσάλους πλεονεκτεί έναντι της επιφανειακής θεμελίωσης, διότι μπορεί να παραλάβει ροπή, χωρίς την απαίτηση μεγάλου κατακόρυφου φορτίου. Συνεπώς, στην περίπτωση αυτή δεν τίθεται η απαίτηση για τον περιορισμό της εκκεντρότητας της φόρτισης. Παράλληλα, η θεμελίωση με πασσάλους μειώνει αισθητά τις καθιζήσεις συγκριτικά με την επιφανειακή θεμελίωση. Τέλος, η χρήση πασσάλων μπορεί να πραγματοποιηθεί ακόμα και σε περιπτώσεις περιορισμένου χώρου για την θεμελίωση.

Από την άλλη πλευρά, δεν πρέπει να αμεληθεί το αυξημένο κόστος μίας θεμελίωσης με πασσάλους συγκριτικά με μία επιφανειακή θεμελίωση. Ωστόσο, η χρήση πασσάλων για τη θεμελίωση εξοικονομεί σημαντική ποσότητα σκυροδέματος. Το στοιχείο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό κατά την κατασκευή μεμονωμένων ανεμογεννητριών, καθώς το κόστος κατασκευής της επιφανειακής θεμελίωσης είναι ένα μεγάλο ποσοστό του συνολικού κόστους της κατασκευής της ανεμογεννήτριας. Το κέρδος είναι ακόμα μεγαλύτερο στην περίπτωση κατασκευής πάρκων ανεμογεννητριών, όπου απαιτείται η παράλληλη θεμελίωση μεγάλου αριθμού ανεμογεννητριών. Κλείνοντας, αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τον έλεγχο της φέρουσας ικανότητας του εδάφους, ώστε να φέρει με ασφάλεια τα αναπτυσσόμενα φορτία, χρειάζεται να ληφθεί υπόψη και η στάθμη στην οποία βρίσκεται ο υδροφόρος ορίζοντας.

1.10.2. Θεμελίωση υπεράκτιων ανεμογεννητριών

Όσον αφορά τις θεμελιώσεις των υπεράκτιων ανεμογεννητριών εντός της θάλασσας, μπορεί να ειπωθεί ότι αποτελούν πιο σύνθετες κατασκευές συγκριτικά με τις αντίστοιχες των χερσαίων ανεμογεννητριών. Η άποψη αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι οι πρώτες περιλαμβάνουν στην ουσία μία ξεχωριστή κατασκευή, η οποία μεταφέρει τα φορτία από τη βάση του πύργου της ανεμογεννήτριας και μέσω του νερού, στην επιφάνεια (και εντός) του πυθμένα. Επίσης, εκτός από τις φορτίσεις της ανεμογεννήτριας, ένας τέτοιος τύπος θεμελίωσης θα παραλάβει και πρόσθετα φορτία από το θαλάσσιο περιβάλλον, όπως είναι οι κυματισμοί και τα ρεύματα του νερού. Τρία βασικά είδη θεμελίωσης διακρίνονται για τις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες:

- Θεμελίωση βαρύτητας (gravity based)
- Θεμελίωση με μεμονωμένο πάσσαλο – πυλώνα (monopile)
- Θεμελίωση με τρίποδα (tripod)

Η θεμελίωση βαρύτητας (gravity based) βασίζεται στο ίδιο βάρος της και συνήθως είναι κατασκευασμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα. Παραμένει σταθερή είτε στην επιφάνεια του θαλάσσιου πυθμένα, είτε σε κάποιο βάθος εγκιβωτισμού της κάτω από τον πυθμένα. Η θεμελίωση βαρύτητας μπορεί επίσης να αποτελείται από χαλύβδινη κατασκευή, εντός της οποίας ωστόσο τοποθετείται συνθλιμμένο έρμα (ballast), δηλαδή διάφορα βαριά υλικά, όπως άμμος, χαλίκια και σίδερα, έτσι ώστε να εξασφαλισθεί το απαιτούμενο βάρος της θεμελίωσης. Ο πύργος της ανεμογεννήτριας τοποθετείται στην κορυφή αυτής της κατασκευής θεμελίωσης. Στο σημείο αυτό, να σημειωθεί ότι η θεμελίωση βαρύτητας πολλές φορές φαίνεται να αποτελεί ιδανική λύση από τεχνικής άποψης, χωρίς ωστόσο αυτό να είναι πάντα εφικτό από άποψη οικονομίας.

Ο πυλώνας – πάσσαλος (monopile) αποτελεί στην ουσία έναν κατακόρυφο κυλινδρικό σωλήνα με διάμετρο που φτάνει έως και τα 4 m, ο οποίος εισχωρεί και θάβεται εν μέρει εντός του πυθμένα. Στην κορυφή του τοποθετείται ο πύργος της ανεμογεννήτριας. Ένα παράδειγμα τέτοιου πυλώνα φαίνεται στην Εικ. 1.10 που ακολουθεί. Ο πυλώνας αυτός αποτελείται κατά κύριο λόγο από τρία βασικά μέρη: α) τον κύριο κυλινδρικό πάσσαλο, β) την κωνική απόληξη στο άνω μέρος του και προς τον πύργο της ανεμογεννήτριας, και γ) την αποβάθρα για την πρόσδεση των σκαφών. Η κωνική απόληξη και η αποβάθρα συγκολλούνται στον πάσσαλο. Μέσω της μεταβολής της κωνικής απόληξης, είναι εφικτή η σύνδεση με πύργους ανεμογεννητριών διαφορετικών διαμέτρων.

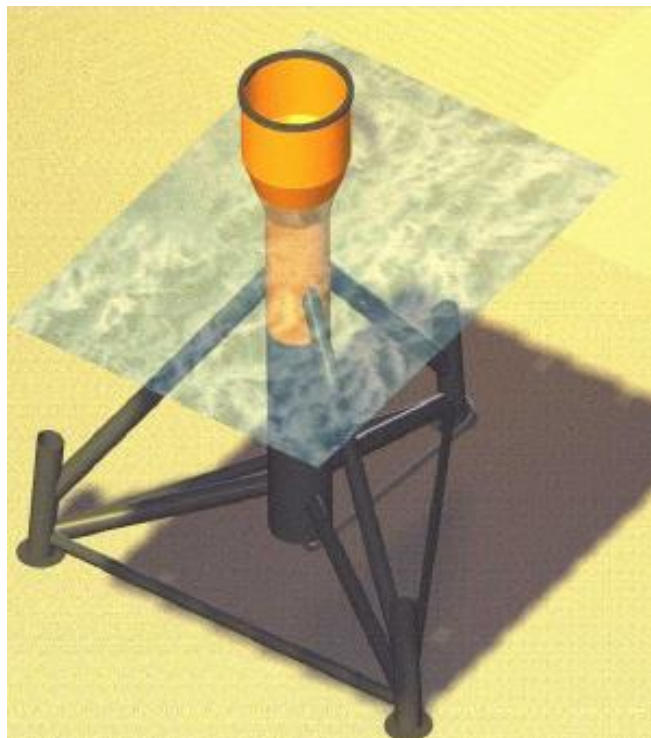
Ο μεμονωμένος πάσσαλος αποτελεί μία ελκυστική λύση για τη θεμελίωση της ανεμογεννήτριας για την περίπτωση τοποθέτησης σε ρηχά νερά, όπου δεν αναπτύσσονται κυματισμοί μεγάλης έντασης. Η γρήγορη και αρκετά αυτοματοποιημένη διαδικασία τοποθέτησης του, χωρίς την ιδιαίτερη ανάγκη για την προετοιμασία του πυθμένα, καθώς και η απλότητα στην παραγωγή του, είναι ορισμένα πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου τύπου θεμελίωσης.



Εικ. 1.10. Μεμονωμένος πάσσαλος - πυλώνας

Η θεμελίωση με τρίποδα (tripod) είναι μία χαλύβδινη πλαισιακή κατασκευή, η οποία αποτελείται από τρία “πόδια” – στηρίξεις. Το χαλύβδινο αυτό πλαίσιο λειτουργεί ως μέσο μεταφοράς των φορτίων που αναπτύσσονται στην ανεμογεννήτρια προς τις τρεις στηρίξεις. Ο πύργος της ανεμογεννήτριας τοποθετείται στην κορυφή του τρίποδα. Κάθε επιμέρους “πόδι” στηρίζεται είτε σε ένα μεμονωμένο πάσσαλο, ο οποίος εισχωρεί εντός του εδάφους, είτε σε ένα δοχείο αναρρόφησης (suction bucket) για τη μεταφορά των φορτίων στο υπέδαφος. Στον άξονα συμμετρίας των επιμέρους πασσάλων βρίσκεται ο κεντρικός πυλώνας, ο οποίος έχει μεγαλύτερη

διάμετρο (ιδανικά ίση με εκείνη του πύργου της ανεμογεννήτριας) και εκτείνεται προς τα κάτω, σχεδόν μέχρι το επίπεδο του πυθμένα (Εικ. 1.11).



Εικ. 1.11. Τρίποδας με πασσάλους



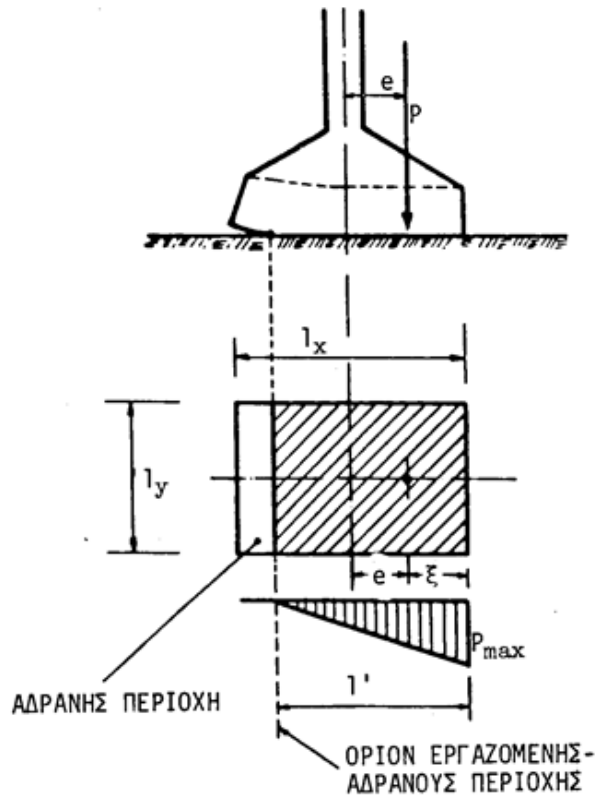
Εικ. 1.12. Τρίποδας με δοχεία αναρρόφησης

Όταν χρησιμοποιούνται τα δοχεία αναρρόφησης (suction buckets) για τη θεμελίωση, είναι εφικτή μία παραλλαγή της κατασκευής του τρίποδα. Κατά την παραλλαγή αυτή, ο κεντρικός πυλώνας εκτείνεται μέχρι τον πυθμένα, στον οποίο τελικά στηρίζεται με τη χρήση ενός επιπλέον δοχείου αναρρόφησης. Στην περίπτωση αυτή, απαιτούνται ακόμα δύο μόνο στηρίξεις με δοχεία αναρρόφησης. Αυτά τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο, ώστε δύο διαδοχικά πλαίσια να είναι κάθετα μεταξύ τους (Εικ. 1.12). Στην περίπτωση αυτή ο κεντρικός πυλώνας της κατασκευής έχει πιο ενεργό ρόλο στη διαδικασία της μεταφοράς των αναπτυσσόμενων φορτίσεων από την ανεμογεννήτρια στον πυθμένα της θάλασσας.

Η χρήση του τρίποδα προτιμάται για τη θεμελίωση σε πιο μεγάλα βάθη νερού και σε περιοχές με πιο άγριο κλίμα. Η λύση του τρίποδα με δοχεία αναρρόφησης (suction buckets) είναι εφικτή μόνο για περιπτώσεις μαλακών εδαφών (π.χ. άργιλος) και δεν αποδίδει σε σκληρότερα εδαφικά υλικά,

όπως η άμμος. Κύριο πλεονέκτημα του τρίποδα είναι ότι αποτελεί σχετικά ελαφριά κατασκευή, το οποίο συνήθως οδηγεί σε χαμηλότερο κόστος.

Η διαφοροποίηση μεταξύ αυτών των τριών ειδών θεμελίωσης έγκειται στον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν και μεταφέρουν τις διάφορες αναπτυσσόμενες φορτίσεις της ανωδομής στο έδαφος. Τόσο ο μεμονωμένος πάσσαλος, όσο και ο τρίποδας, μετατρέπουν τα κατακόρυφα φορτία σε αξονικές δυνάμεις διάτμησης στη διεπιφάνεια μεταξύ πασσάλου και εδάφους, ενώ η θεμελίωση βαρύτητας τα μετατρέπει σε κατακόρυφες τάσεις, λόγω της επαφής στη διεπιφάνεια μεταξύ θεμελίου και εδάφους. Όσον αφορά τα οριζόντια φορτία, ο μεμονωμένος πάσσαλος και ο τρίποδας τα μετατρέπουν σε οριζόντιες πιέσεις του εδάφους στους πασσάλους μέχρι ορισμένο βάθος. Από την άλλη πλευρά, η θεμελίωση βαρύτητας μετατρέπει τέτοιου είδους δυνάμεις σε οριζόντιες διατμητικές απευθείας στο έδαφος και πιο συγκεκριμένα στη διεπιφάνεια θεμελίου – εδάφους. Επίσης, ο μεμονωμένος πάσσαλος μετατρέπει τις καμπτικές ροπές της ανεμογεννήτριας σε οριζόντιες εδαφικές πιέσεις στον πάσσαλο. Ο τρίποδας αποσυνθέτει τέτοιου είδους ροπές με τη μορφή αξονικών φορτίων στα τρία επιμέρους πόδια και στη συνέχεια από εκεί μεταφέρονται στις διεπιφάνειες πασσάλων – εδάφους ως αξονικές δυνάμεις διάτμησης. Η θεμελίωση βαρύτητας μεταφέρει τις ροπές ανατροπής της ανεμογεννήτριας στον πυθμένα με τη μορφή κατακόρυφων πιέσεων επαφής στη διεπιφάνεια θεμελίου – εδάφους. Κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού, είναι ιδιαίτερως σημαντική η διατήρηση αυτής της πίεσης λόγω επαφής σε τιμές με θετικό πρόσημο, ακόμα και σε συνθήκες ακραίας φόρτισης. Οποιαδήποτε αρνητική τιμή τάσης υποδηλώνει την ανάπτυξη εφελκυστικών δυνάμεων στην κατασκευή, οι οποίες δύσκολα μπορούν να μεταφερθούν στο έδαφος και ίσως οδηγήσουν σε ανεπιθύμητη αποκόλληση του θεμελίου από την επιφάνεια του εδάφους. Παρόλα αυτά, ένα ανασήκωμα του θεμελίου περιορισμένου μεγέθους και για περιορισμένη χρονική διάρκεια είναι επιτρεπτό κατά τη διάρκεια ακραίων συνθηκών φόρτισης (Εικ. 1.13).



Εικ. 1.13. Αποκόλληση θεμελίου - εδάφους

Η τελική επιλογή του τύπου θεμελίωσης εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το εδαφικό προφίλ και τις συνθήκες που επικρατούν στην υπό μελέτη περιοχή. Πιο συγκεκριμένα, τα γεωτεχνικά θέματα, τα οποία χρειάζεται να καθοριστούν είναι τα εξής:

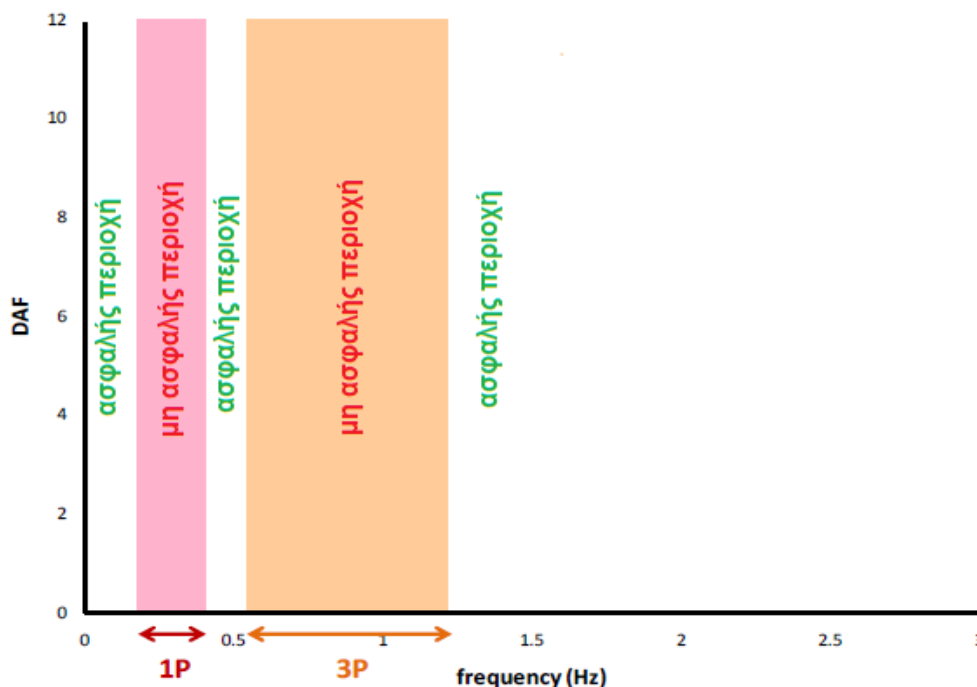
- Φέρουσα ικανότητα (ευστάθεια) του θεμελίου έναντι ολίσθησης και ανατροπής
- Απομείωση της αντοχής του εδάφους σε επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης
- Θέματα ρευστοποίησης του εδάφους
- Διάβρωση του υλικού

2. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΛΑΦΟΥΣ – ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ – ΑΝΩΔΟΜΗΣ

2.1. Εισαγωγή

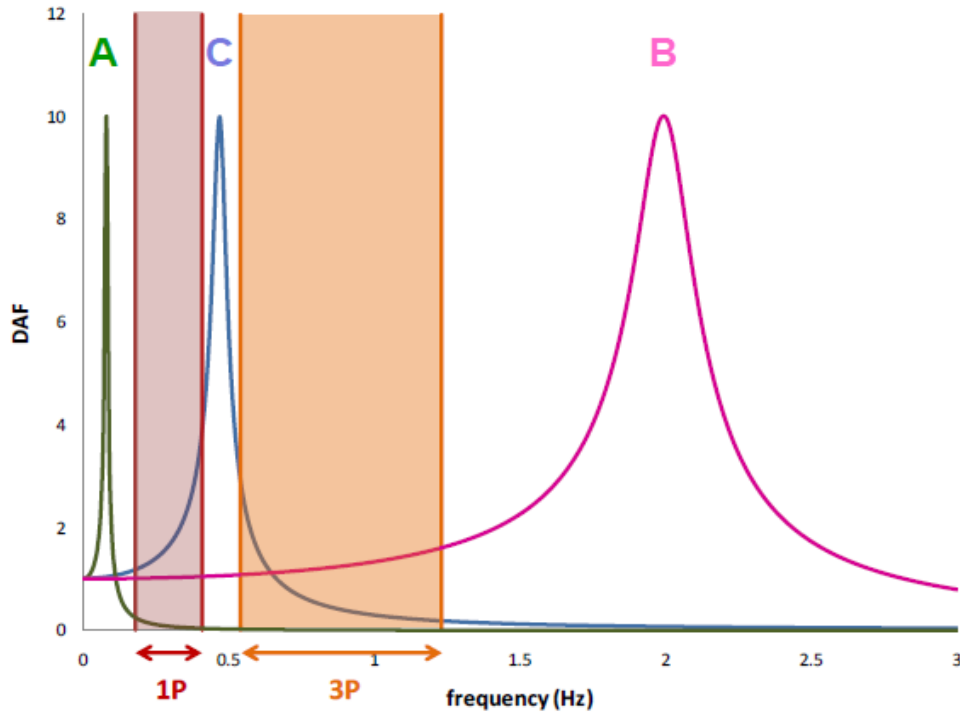
Η ανεμογεννήτρια αποτελεί μια ιδιαίτερη κατασκευή, καθώς σε αυτή συνυπάρχει το μηχανολογικό και δομοστατικό στοιχείο. Η ανεμογεννήτρια ως κατασκευή έχει το χαρακτηριστικό ότι αποτελείται από διάφορα μηχανολογικά και κατασκευαστικά μέρη, τα οποία είτε εισάγουν ταλαντώσεις σε άλλα μέρη, είτε ταλαντώνονται τα ίδια, το καθένα με το δικό του τρόπο και τη δική του συχνότητα. Τα τρία κύρια μέρη που εκτελούν ταλαντώσεις σε μία ανεμογεννήτρια είναι ο ρότορας που αποτελεί το κύριο μηχανολογικό τμήμα, τα περιστρεφόμενα πτερύγια και ο πύργος που αποτελεί το κύριο κατασκευαστικό τμήμα της ανεμογεννήτριας. Είναι επιτακτική η ανάγκη για την ομαλή και αποδοτική συνύπαρξη των διαφορετικών αυτών στοιχείων της ανεμογεννήτριας. Κύριος στόχος λοιπόν αποτελεί ο σχεδιασμός των μελών αυτών με τέτοιο τρόπο, ώστε να απαλειφθεί οποιαδήποτε πιθανότητα ανάπτυξης συντονιστικών φαινομένων.

Η Εικ. 2.1 που ακολουθεί, αφορά μία πιθανή περίπτωση ανεμογεννήτριας. Τα εύρη συχνοτήτων της περιστροφής του ρότορα (1P) και των περιστρεφόμενων πτερυγίων της (3P) είναι γνωστά και προκαθορισμένα, καθώς δίνονται από τους κατασκευαστές και τους αρμόδιους μηχανολόγους μηχανικούς. Επομένως, ο σχεδιασμός του πύργου της ανεμογεννήτριας πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο, ώστε η ιδιοσυχνότητα του να βρίσκεται εκτός των ευρών συχνοτήτων 1P και 3P για την αποφυγή φαινομένων συντονισμού μεταξύ πύργου – ρότορα και πύργου – πτερυγίων αντίστοιχα. Ο αδιάστατος όρος DAF (Dynamic Amplification Factor) αποτελεί τον δυναμικό συντελεστή ενίσχυσης και ορίζεται ως ο λόγος της απόκρισης μιας κατασκευής λόγω δυναμικής φόρτισης προς την αντίστοιχη απόκριση της λόγω στατικής φόρτισης συναρτήσει της συχνότητας f . Το σημείο μεγιστοποίησης του συντελεστή DAF αντιστοιχεί στη θεμελιώδη ιδιοσυχνότητα της κατασκευής.



Εικ. 2.1. Κρίσιμα εύρη συχνοτήτων

Στην Εικ. 2.2, εμφανίζονται οι τρεις ασφαλείς περιοχές A, B και C στις οποίες δύναται θεωρητικά να κυμανθεί η ιδιοσυχνότητα του πύργου της ανεμογεννήτριας, δίχως να υπάρχει ο κίνδυνος της εμφάνισης συντονισμού που επεξηγήθηκε ανωτέρω. Η περιοχή A αντιστοιχεί σε πολύ χαμηλές τιμές ιδιοσυχνοτήτων του πύργου (ή πολύ υψηλές τιμές ιδιοπεριόδων αντίστοιχα). Κάτι τέτοιο θα ήταν μη ρεαλιστικό στην πράξη, καθώς καθιστά την εν λόγω κατασκευή υπερβολικά εύκαμπτη. Από την άλλη πλευρά η περιοχή B αντιστοιχεί σε πολύ υψηλές τιμές ιδιοσυχνοτήτων του πύργου (ή πολύ χαμηλές τιμές ιδιοπεριόδων αντίστοιχα). Μία τέτοια κατασκευή θα ήταν εξασφαλισμένη από άποψη ασφάλειας, λόγω της πολύ μεγάλης δυσκαμψίας της. Ωστόσο, το υπερβολικό κόστος που πρέπει να δαπανηθεί για μία κατασκευή αυτού του είδους, καθιστά το συγκεκριμένο σενάριο εξίσου απαγορευτικό και μη ρεαλιστικό. Επομένως, μπορεί να ειπωθεί ότι η περιοχή ιδιοσυχνοτήτων C αποτελεί μονόδρομο για την κατασκευή του πύργου της ανεμογεννήτριας. Λόγω όμως της περιορισμένης έκτασης της συγκεκριμένης περιοχής μεταξύ των απαγορευμένων διαστημάτων συχνότητας 1P και 3P, το ρίσκο σχεδιασμού του πύργου είναι ιδιαίτερα αυξημένο και απαιτείται μεγάλη προσοχή. Για το λόγο αυτό, απαιτούνται λεπτομερείς δυναμικές αναλύσεις και ακριβής προσδιορισμός της θεμελιώδους ιδιοσυχνότητας του πύργου μιας ανεμογεννήτριας.

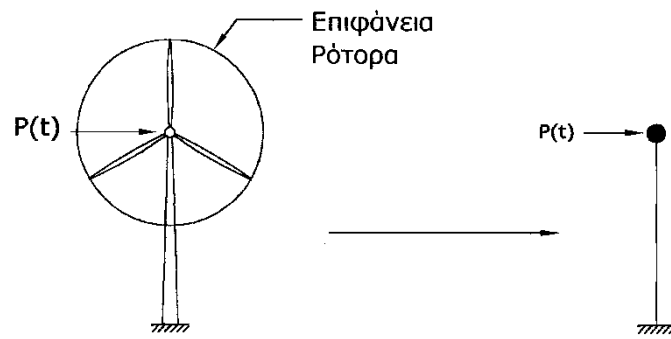


Εικ. 2.2. Κρίσιμα εύρη συχνοτήτων – Αποφυγή συντονισμού

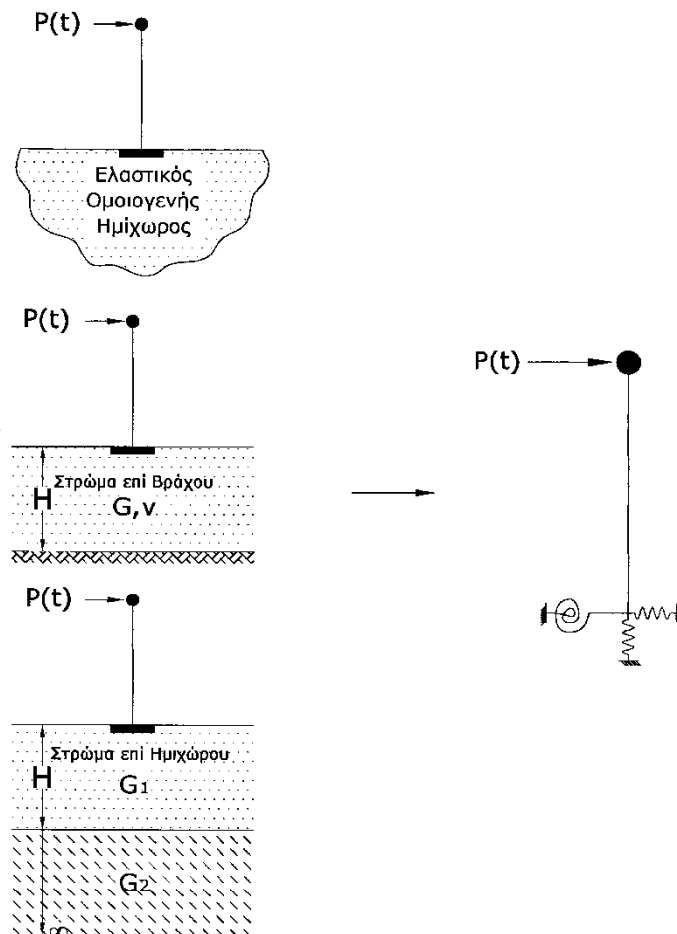
Κατά τη διάρκεια της ανάλυσης και του σχεδιασμού της, μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η λεπτομερής εξέταση όλων των επιμέρους τμημάτων του σύνθετου συστήματος της ανεμογεννήτριας, καθώς και η αλληλεπίδραση που εμφανίζεται μεταξύ αυτών. Λόγω της φύσης του ανέμου ως κυρίαρχης φόρτισης, καθώς και της λειτουργίας των μηχανολογικών τμημάτων, ο δυναμικός χαρακτήρας σε μία τέτοιου είδους κατασκευή είναι έντονος, όπως έχει ήδη επισημανθεί. Επομένως, απαιτείται η λεπτομερής εξέταση της απόκρισης της κατασκευής σε τυχηματικά δυναμικά φαινόμενα, όπως είναι ο άνεμος ή ο σεισμός, καθώς και η δυναμική αλληλεπίδραση της ανωδομής με τη θεμελίωση της και το υποκείμενο έδαφος.

Με βάση τα χαρακτηριστικά αυτά, η παρούσα εργασία επιχειρεί να προσεγγίσει τη λειτουργία των ανεμογεννητριών ως ένα ενιαίο σύστημα ανωδομής – θεμελίωσης – εδάφους, εστιάζοντας στη δυναμική αλληλεπίδραση αυτών, αλλά και στη διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων για την περίπτωση θεώρησης πάκτωσης στη βάση σε μία τέτοια κατασκευή. Η διαδικασία αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε μέσω αναλυτικών προσεγγιστικών λύσεων, είτε μέσω αριθμητικής - υπολογιστικής διερεύνησης με τη χρήση λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων.

Η αναλυτική επίλυση του ανωτέρω προβλήματος λαμβάνει χώρα στο παρόν κεφάλαιο, ενώ η αριθμητική επίλυση αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο.



Εικ. 2.3. Θεώρηση πάκτωσης στη βάση ανεμογεννήτριας



Εικ. 2.4. Πρόβλημα αλληλεπίδρασης εδάφους – θεμελίωσης – ανεμογεννήτριας για διάφορα εδαφικά προφίλ

2.2. Προέλευση και επίδραση στις κατασκευές

Γενικά, κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό των συνήθων κτιριακών έργων, η αλληλεπίδραση εδάφους - κατασκευής αγνοείται και η δυναμική απόκριση τους υπολογίζεται κάνοντας την υπόθεση ότι η θεμελίωση τους είναι άκαμπτη. Εντούτοις, κατά τη διάρκεια μιας σεισμικής διέγερσης, το έδαφος υφίσταται παραμορφώσεις, οι οποίες επιβάλλονται στη θεμελίωση. Προκύπτει το ερώτημα του κατά πόσο η εδαφική κίνηση σε περιοχές κοντά στην κατασκευή επηρεάζεται από την παρουσία της κατασκευής και πώς η απόκριση της κατασκευής τροποποιείται λόγω της ενδοσιμότητας του εδάφους θεμελίωσης. Αυτή η δυναμική εξάρτηση μεταξύ της κατασκευής και του εδάφους ονομάζεται αλληλεπίδραση εδάφους - κατασκευής (Soil-Structure Interaction, SSI).

Η σεισμική διέγερση που επιβάλλεται στις κατασκευές είναι συνάρτηση του μηχανισμού δημιουργίας του σεισμικού ρήγματος, της γεωλογίας της σεισμογενούς ζώνης και της επίδρασης των τοπικών εδαφικών συνθηκών, δηλαδή της γεωμετρίας του εδαφικού αναγλύφου και της εδαφικής ενίσχυσης ή απομείωσης των εδαφικών στρωμάτων. Το αποτέλεσμα των παραγόντων αυτών είναι η διαμόρφωση της κίνησης ελευθέρου πεδίου (free field conditions). Ωστόσο, η απόκριση της κατασκευής στην κίνηση ελευθέρου πεδίου επηρεάζεται και από την αλληλεπίδραση εδάφους - κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα, οι επιταχύνσεις (και κατά συνέπεια οι αδρανειακές δυνάμεις) των κατασκευών επηρεάζονται από την ευκαμψία των θεμελίων τους και από τις μεταβολές μεταξύ της κίνησης ελευθέρου πεδίου και της κίνησης της θεμελίωσης. Συμπεραίνεται λοιπόν, πως ο ακριβής υπολογισμός των αδρανειακών δυνάμεων και μετακινήσεων στις κατασκευές προϋποθέτει τη ρεαλιστική εκτίμηση του ρόλου της αλληλεπίδρασης εδάφους - κατασκευής.

Η εκτίμηση των σεισμικών επιταχύνσεων που θα δεχτεί μια κατασκευή είναι το πιο σημαντικό στάδιο του σχεδιασμού της. Λόγω της αβεβαιότητας και των πολλών και διαφορετικών εκτιμήσεων που γίνονται, σχετικά με την εδαφική απόκριση που αναμένεται σε μια θέση χωρίς την παρουσία της κατασκευής, υπό κάποια ενδεχόμενη σεισμική διέγερση, συνηθίζεται τελικά η χρήση διαφόρων συντηρητικών προσεγγίσεων κατά τη δυναμική ανάλυση των κατασκευών και της αλληλεπίδρασής τους με το υποκείμενο έδαφος. Για παράδειγμα, εάν μια σχετικά εύκαμπτη κατασκευή μικρής μάζας θεμελιωθεί σε ένα πολύ δύσκαμπτο βραχώδες έδαφος, είναι ορθό να υποτεθεί ότι η κίνηση που θα επιβληθεί στην κατασκευή είναι η ίδια με την κίνηση ελευθέρου

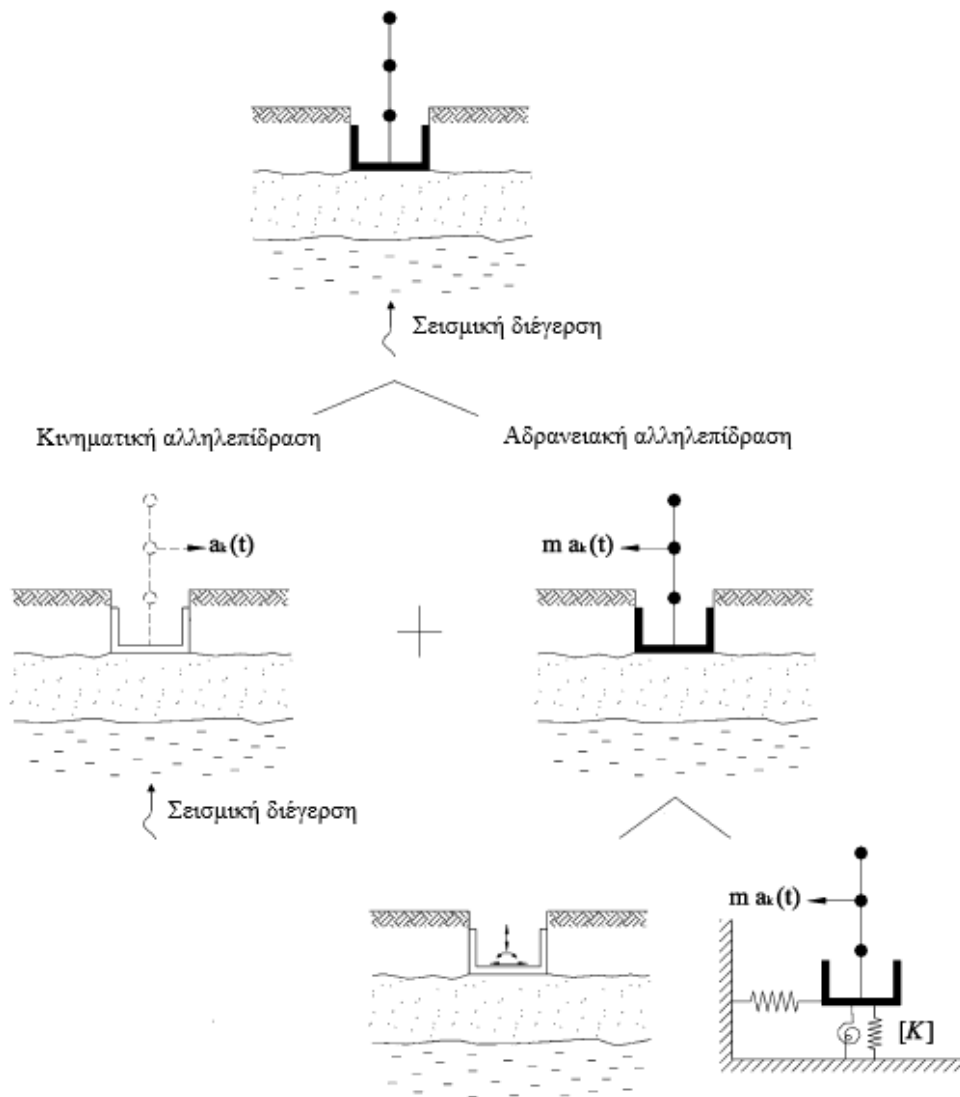
πεδίου. Δηλαδή δεν χρειάζεται να ληφθεί υπόψη στην περίπτωση αυτή, η επίδραση του υποκείμενου εδάφους στην υπόλοιπη κατασκευή και θεωρούνται συνθήκες πάκτωσης στη βάση. Από την άλλη πλευρά όμως, εάν η κατασκευή είναι συμπαγής, δύσκαμπτη και έχει μεγάλο βάρος, όπως μια μεγάλη κατασκευή βαρύτητας από σκυρόδεμα, και η θεμελίωσή της είναι σχετικά εύκαμπτη, τότε η κίνηση στη βάση της κατασκευής μπορεί να διαφοροποιηθεί σημαντικά από την κίνηση ελευθέρου πεδίου. Για την περίπτωση αυτή επομένως, χρειάζεται να ληφθεί υπόψη η επίδραση του υποκείμενου εδάφους στην υπόλοιπη κατασκευή και να μη θεωρηθούν συνθήκες πάκτωσης στη βάση της, διότι μία τέτοια υπόθεση είναι πιθανό να οδηγήσει σε σημαντικό σφάλμα. Η καταπόνηση και κατά συνέπεια απόκριση μιας κατασκευής σε σεισμική διέγερση επηρεάζεται τελικά από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τριών συστημάτων: της κατασκευής, της θεμελίωσης και του εδαφικού υλικού κάτω από τη θεμελίωση. Μια δυναμική ανάλυση αλληλεπίδρασης εδάφους - θεμελίωσης - κατασκευής (Soil - Foundation - Structure Interaction, SFSI) υπολογίζει την επίδραση των τριών αυτών συστημάτων σε μια δεδομένη κίνηση ελευθέρου πεδίου. Ο όρος κίνηση ελευθέρου πεδίου αναφέρεται στην εδαφική κίνηση που θα συνέβαινε στο σημείο που βρίσκεται η κατασκευή, αν αυτή δεν υπήρχε. Η επιρροή της αλληλεπίδρασης εδάφους - θεμελίου - κατασκευής (SFSI) είναι μηδενική για άκαμπτη θεμελίωση. Στην ουσία αποτελεί την αιτία της διαφοράς μεταξύ της πραγματικής απόκρισης της κατασκευής και της απόκρισης της κατασκευής με την υπόθεση άκαμπτης θεμελίωσης.

Η αλληλεπίδραση εδάφους - θεμελίου - ανωδομής έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς μεταβάλλει ουσιαστικά τα χαρακτηριστικά του ιδιοσυστήματος και συνεπώς την απόκριση της κατασκευής. Ωστόσο, ακόμα και για αυτήν την ειδική περίπτωση, είναι προφανές ότι η δυναμική αλληλεπίδραση θα γίνει αισθητή σε περιοχές κοντά στην κατασκευή, ενώ σε κάποια πεπερασμένη απόσταση από τη βάση της κατασκευής οι μετατοπίσεις θα συγκλίνουν σε αυτές της κίνησης ελευθέρου πεδίου.

Καθοριστικό ρόλο στην αλληλεπίδραση του συστήματος παίζει η δυσκαμψία και η απόσβεση της θεμελίωσης. Οι αδρανειακές δυνάμεις που αναπτύσσονται σε μια ταλαντούμενη κατασκευή προκαλούν στη θεμελίωση τέμνουσες δυνάμεις, καμπτικές και στρεπτικές ροπές. Οι δράσεις αυτές προκαλούν με τη σειρά τους μετακινήσεις και στροφές στη θεμελίωση σε σχέση με το ελεύθερο πεδίο. Αυτές οι μετακινήσεις και οι στροφές οφείλονται στην ενδοσιμότητα του συστήματος θεμελίου - εδάφους, η οποία μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στη συνολική δομική ευκαμψία της υπερκείμενης κατασκευής. Επίσης, η σχετική κίνηση θεμελίωσης - ελευθέρου πεδίου μπορεί να

επιφέρει απόσβεση της σεισμικής ενέργειας μέσω ακτινοβολίας και υστερητικής εδαφικής συμπεριφοράς. Αυτή η απόσβεση είναι δυνατόν να επηρεάσει σημαντικά τη συνολική απόσβεση του συστήματος εδάφους - κατασκευής.

Πιθανές διαφοροποιήσεις μεταξύ της κίνησης ελευθέρου πεδίου και της κίνησης της θεμελίωσης οφείλονται στην ύπαρξη της αδρανειακής και της κινηματικής αλληλεπίδρασης. Τα δύο αυτά φυσικά φαινόμενα απαρτίζουν τους βασικούς μηχανισμούς της δυναμικής αλληλεπίδρασης μεταξύ κατασκευής, θεμελίωσης και εδάφους και αναλύονται στη συνέχεια. Στην Εικ. 2.5 που ακολουθεί φαίνεται η ανάλυση του γενικού προβλήματος της αλληλεπίδρασης σε επιμέρους τμήματα.



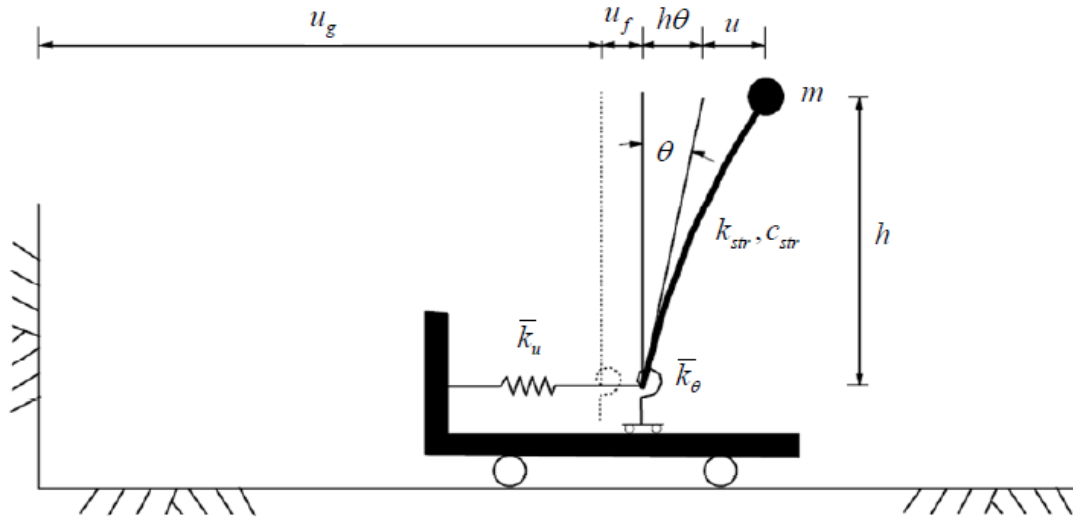
Εικ. 2.5. Διαδικασία ανάλυσης του προβλήματος της αλληλεπίδρασης (Mylonakis et al. 2006)

2.3. Αδρανειακή αλληλεπίδραση

Οι αδρανειακές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην κατασκευή λόγω της ταλάντωσης της προκαλούν διατμητικές δυνάμεις και ροπές, οι οποίες προκαλούν αντίστοιχες παραμορφώσεις στη θεμελίωση σε σχέση με την κίνηση ελεύθερου πεδίου. Η επιρροή της αδρανειακής αλληλεπίδρασης γίνεται αντιληπτή μέσω:

- Της αύξησης της ιδιοπεριόδου της κατασκευής, διότι η κατασκευή γίνεται πιο εύκαμπτη μέσω της ευκαμψίας της θεμελίωσης, σε σχέση με την περίπτωση όπου είναι θεμελιωμένη σε άκαμπτο βράχο.
- Της μεταβολής του κρίσιμου λόγου απόσβεσης, δεδομένου ότι η απόσβεση στο σύστημα εδάφους - κατασκευής οφείλεται σε απόσβεση ακτινοβολίας και απόσβεση υλικού και διαμορφώνεται από πολλούς παράγοντες, όπως η ευκαμψία της θεμελίωσης, ο λόγος ύψους κατασκευής προς πλάτος θεμελίου κλπ.

Ένα σύστημα που χρησιμοποιείται ευρέως για απλοποιημένες αναλύσεις αδρανειακής αλληλεπίδρασης είναι ένα σύστημα με μονοβάθμιο ταλαντωτή, όπως φαίνεται στην Εικ. 2.6 που ακολουθεί. Ο μονοβάθμιος αυτός ταλαντωτής είναι ύψους h , μάζας m , δυσκαμψίας k_{str} και συντελεστή απόσβεσης c_{str} . Η βάση του είναι ελεύθερη να μετακινείται οριζόντια κατά μια τιμή u_f και να στρίβει κατά μία γωνία θ . Όπως περιγράφεται αναλυτικότερα στη συνέχεια, ο ταλαντωτής εδράζεται σε ελατήρια και αποσβεστήρες εξαρτώμενα από τη συχνότητα διέγερσης. Τα ελατήρια αντιστοιχούν στη δυσκαμψία του εδαφικού υλικού, ενώ οι αποσβεστήρες αντιστοιχούν στην απόσβεση του και δίνονται από μία συνάρτηση εμπέδησης.



Εικ. 2.6. Προσομοίωμα μονοβάθμιου ταλαντωτή

Ο μονοβάθμιος ταλαντωτής της Εικ. 2.6 μπορεί να θεωρηθεί ότι παριστάνει είτε μια μονώροφη κατασκευή, είτε πιο γενικά, μια πολώροφη κατασκευή με πολλές ιδιομορφές, της οποίας η μάζα συγκεντρώνεται στο σημείο δράσης της συνισταμένης των αδρανειακών δυνάμεων. Αυτό το προσομοίωμα έχει υιοθετηθεί από πολλούς ερευνητές διεθνώς, όπως οι Parmelee (1967), Veletsos & Meek (1974); Veletsos & Nair (1975), Veletsos (1977), Jennings & Bielak (1973), Gazetas (1983), Wolf (1985); Aviles et al. (1996, 1998), Mylonakis et al. (2006).

Η συνάρτηση εμπέδησης περιγράφει τη δυναμική δυσκαμψία και απόσβεση που χαρακτηρίζει την αλληλεπίδραση άκαμπτου θεμελίου - εδάφους. Με μαθηματικούς όρους, η συνάρτηση εμπέδησης είναι ένα μητρώο που συσχετίζει τις δράσεις με τις μετακινήσεις της θεμελίωσης σε σχέση με την κίνηση στο ελεύθερο πεδίο. Τα στοιχεία των μητρώων των συναρτήσεων εμπέδησης είναι εν γένει μιγαδικοί αριθμοί και εξαρτώνται από τη συχνότητα.

Οι συναρτήσεις εμπέδησης μπορούν να προσδιοριστούν πειραματικά με δοκιμές ελεύθερων ή/και εξαναγκασμένων δονήσεων θεμελίων που εδράζονται στο έδαφος (Crouse et al. (1984), Crouse et al. (1990), Gazetas & Stokoe (1991), Kim et al. (2001), κ.α.). Από τα αποτελέσματα αυτά είναι δυνατός ο προσδιορισμός των φυσικών ιδιοτήτων του υποκείμενου εδάφους, με χρήση των σχέσεων που δίνουν τις συναρτήσεις εμπέδησης (Luco & Wong, 1992).

Η βασική λύση αναφέρεται στον υπολογισμό της εμπέδησης ενός άκαμπτου κυκλικού θεμελίου επί ελαστικού ημιχώρου. Ονομάζεται βασική, διότι αποτελεί λύση αναφοράς για τον υπολογισμό

των εμπεδήσεων θεμελίων διαφορετικής γεωμετρίας, τα οποία εδράζονται επί εδαφών με διάφορες φυσικές ιδιότητες και συνοριακές συνθήκες.

Για την περίπτωση του ταλαντωτή της Εικ. 2.6 μόνο δύο όροι εμπέδησης είναι απαραίτητοι. Οι μη διαγώνιοι όροι του μητρώου εμπέδησης αμελούνται για επιφανειακές θεμελιώσεις, αλλά η επιρροή τους αυξάνεται όσο μεγαλώνει το βάθος της θεμελίωσης. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι αμελούνται η κατακόρυφη και η στρεπτική συνιστώσα της απόκρισης και το μητρώο εμπέδησης παίρνει τελικά την παρακάτω μορφή:

$$\begin{bmatrix} V \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{k}_u & 0 \\ 0 & \bar{k}_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_f \\ \theta \end{bmatrix}$$

Οι όροι εμπέδησης του μητρώου αποτελούνται από τις μιγαδικές δυσκαμψίες \bar{k}_u και \bar{k}_θ για τη μεταφορική και περιστροφική κίνηση αντίστοιχα. Τα πραγματικά μέρη των συναρτήσεων αυτών αντιπροσωπεύουν τη δυσκαμψία της θεμελίωσης. Τα φανταστικά μέρη των συναρτήσεων αντιπροσωπεύουν την απόσβεση ενέργειας λόγω ακτινοβολίας των κυμάτων που δημιουργούνται στη διεπιφάνεια επαφής θεμελίου – εδάφους, καθώς και λόγω υστερητικής φύσης του εδαφικού υλικού.

Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη λύση είναι αυτή για το δύσκαμπτο κυκλικό θεμέλιο στην επιφάνεια ενός ιξωδοελαστικού ημιχώρου (Veletsos & Wei, 1971 και Veletsos & Verbic, 1973). Σύμφωνα με τη λύση αυτή, οι όροι των μιγαδικών δυσκαμψιών \bar{k}_u και \bar{k}_θ στη συνάρτηση εμπέδησης εκφράζονται στην παρακάτω γενική μορφή:

$$\bar{k}_j = k_j(a_{0,j}, \nu) + i\omega c_j(a_{0,j}, \nu)$$

όπου το j παίρνει τις τιμές u ή θ , ανάλογα με το βαθμό ελευθερίας που θεωρείται κάθε φορά (για μεταφορική ή περιστροφική κίνηση αντίστοιχα), ω είναι η κυκλική συχνότητα (rad/sec), $a_{0,j}$ είναι η αδιάστατη συχνότητα που ορίζεται από τη σχέση:

$$\alpha_{0,j} = \frac{\omega * \Gamma_j}{V_s}$$

όπου r_j είναι η ακτίνα του θεμελίου που αντιστοιχεί στο βαθμό ελευθερίας j , V_s είναι η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων στο έδαφος και ν είναι ο λόγος Poisson του εδάφους.

Ως αποτέλεσμα των ανωτέρω σχέσεων, για θεμέλια μη κυκλικού σχήματος, υπάρχει μία τιμή του $a_{0,j}$ για κάθε βαθμό ελευθερίας, για δεδομένη συχνότητα και εδαφικό υλικό. Η δυναμική δυσκαμψία και η απόσβεση των μετακινησιακών και στροφικών βαθμών ελευθερίας εκφράζονται αντιστοίχως, από τις εξής σχέσεις:

$$k_j = \alpha_j * K_{st,j}$$

και

$$c_j = \beta_j * \frac{K_{st,j} * r_j}{V_s}$$

Οι όροι α_j και β_j είναι αδιάστατοι συντελεστές που εξαρτώνται από το λόγο Poisson του εδαφικού υλικού και από την αδιάστατη συχνότητα a_0 . Οι όροι $K_{st,j}$ εκφράζουν τη στατική μεταφορική και περιστροφική δυσκαμψία του εδραζόμενου δίσκου στην επιφάνεια εδαφικού ημιχώρου (για $j=u$ και $j=\theta$, αντίστοιχα) και ορίζονται από τις σχέσεις:

$$K_{st,u} = \frac{8}{2 - \nu} * G * r_u$$

και

$$K_{st,\theta} = \frac{8}{3(1 - \nu)} * G * r_\theta^3$$

όπου G είναι το μέτρο διάτμησης του εδάφους.

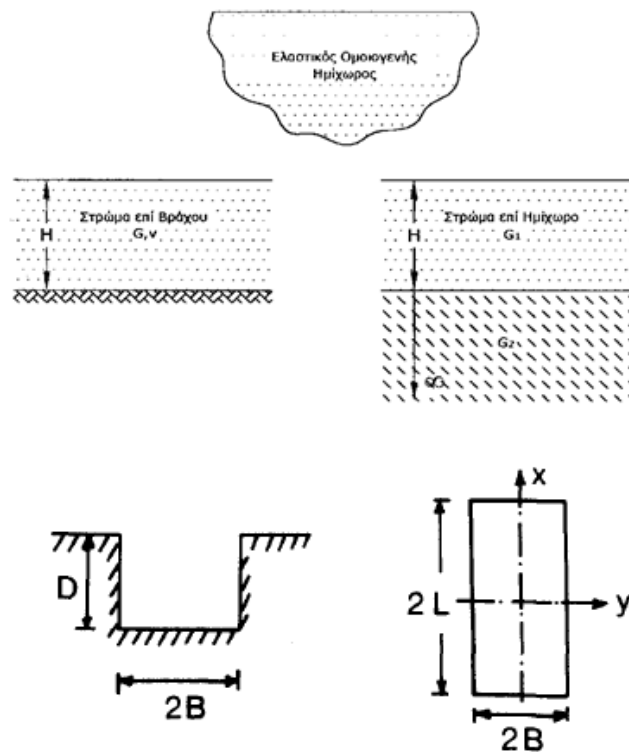
Όπως αναφέρθηκε ήδη, οι παραπάνω εξισώσεις των διαφόρων παραμέτρων συνθέτουν τη θεμελιώδη λύση του προβλήματος και αντιστοιχούν στην περίπτωση κατασκευής με άκαμπτο επιφανειακό κυκλικό θεμέλιο επί ελαστικού ημιχώρου.

Ωστόσο, υπάρχει πληθώρα παραγόντων γεωμετρίας και υλικού, οι οποίοι επηρεάζουν τη δυναμική συμπεριφορά της θεμελίωσης. Για το λόγο αυτό, απαιτείται και η ανάλογη προσαρμογή των παραπάνω εξισώσεων της βασικής λύσης σε κάθε επιμέρους περίπτωση, με σκοπό τον υπολογισμό των σύνθετων δυναμικών δυσκαμψιών. Οι κύριοι παράγοντες που χρειάζεται να ληφθούν υπόψη είναι:

- Το σχήμα της θεμελίωσης (κυκλικό, λωριδωτό, ορθογωνικό ή τυχαίου σχήματος)
- Ο τύπος του εδαφικού προφίλ (ομοιογενής ελαστικός ημίχωρος, εδαφικές στρώσεις επί ελαστικού ημιχώρου, εδαφικό στρώμα επί βράχου)
- Το βάθος της θεμελίωσης (επιφανειακή, εγκιβωτισμένη, βαθιά – με πασσάλους)

Για τις διάφορες περιπτώσεις εδάφους και θεμελίωσης που θα εξεταστούν στη συνέχεια, οι γεωμετρικές και εδαφικές παράμετροι που καθορίζουν τη δυναμική δυσκαμψία είναι οι ακόλουθες (Εικ. 2.7):

- το πάχος H του στρώματος του εδάφους
- οι χαρακτηριστικές διαστάσεις B, L και R του θεμελίου (για ορθογωνικό και κυκλικό θεμέλιο αντίστοιχα)
- το βάθος D της θεμελίωσης για την περίπτωση εγκιβωτισμένης θεμελίωσης
- η αδιάσταση συχνότητα $a_0 = \omega B/V_s$
- το μέτρο διάτμησης $G = \rho * V_s^2$ των εδαφικών στρωμάτων
- ο λόγος του Poisson ν των εδαφικών στρωμάτων
- ο κρίσιμος λόγος υστερητικής απόσβεσης ξ των εδαφικών στρώσεων



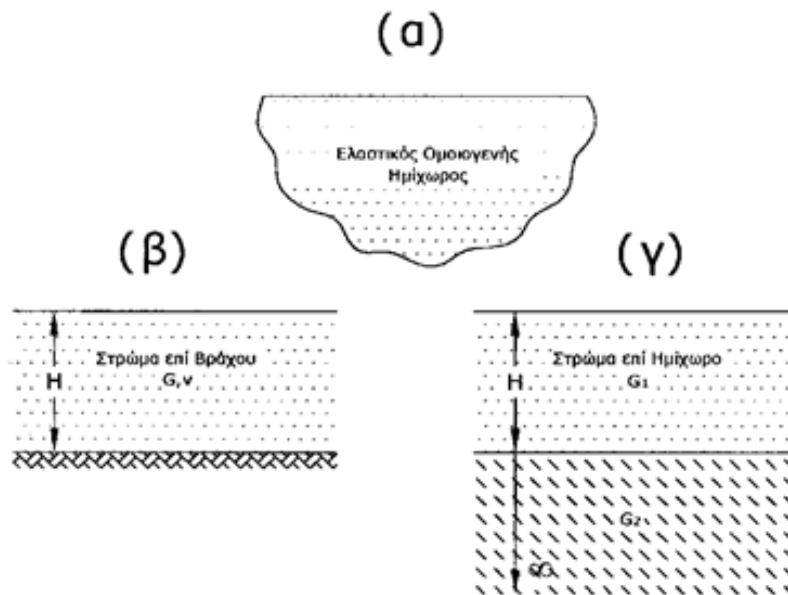
Εικ. 2.7. Εξεταζόμενα εδαφικά προφίλ – Γεωμετρικές και εδαφικές παράμετροι

2.3.1. Αναλυτικός υπολογισμός σύνθετων δυναμικών δυσκαμψιών για διάφορες περιπτώσεις επιφανειακών θεμελιώσεων και εδαφικών σχηματισμών

Τα τελευταία χρόνια, έχει αναπτυχθεί πλήθος προσεγγιστικών μεθόδων από πολλούς ερευνητές με στόχο τον υπολογισμό των σύνθετων δυναμικών δυσκαμψιών του συστήματος εδάφους - θεμελίωσης ανωδομής που περιγράφηκε παραπάνω. Οι αναλυτικές αυτές λύσεις βασίζονται στη χρήση διαφόρων θεωρητικών σχέσεων, διαγραμμάτων και πινάκων, ανάλογα με τον τύπο της θεμελίωσης και του υποκείμενου εδάφους. Ωστόσο, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και πιο συγκεκριμένα στο παρόν εδάφιο της, παρουσιάζονται ορισμένες από τις βασικότερες αναλυτικές λύσεις που έχουν αναπτυχθεί (Gazetas 1983, Mylonakis et al. 2006), στις οποίες βασίζεται και ο νορβηγικός νηογνώμονας Det Norske Veritas (DNV), καθώς και το δανέζικο Riso Nation Laboratory.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αντιστοιχούν σε τρεις κατηγορίες ιδεωδών εδαφικών σχηματισμών, όπως φαίνονται και στην Εικ. 2.8:

- α) τον ελαστικό ομοιογενή ημίχωρο,
- β) το ομοιόμορφο εδαφικό στρώμα επί βράχου και
- γ) το εδαφικό στρώμα επί ημιχώρου.

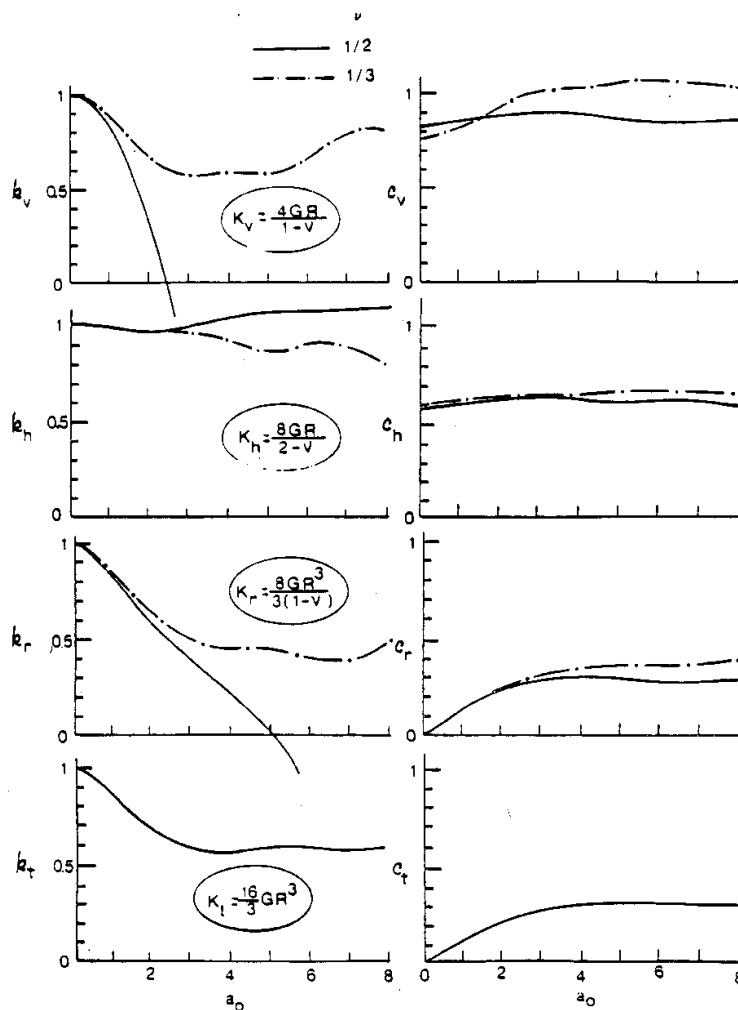


Εικ. 2.8. Κατηγορίες εξεταζόμενων εδαφικών σχηματισμών

2.3.2. Άκαμπτη θεμελίωση επί ελαστικού ομοιογενή ημχώρου

A) Περίπτωση κυκλική θεμελίωσης

Ως ομοιογενής ελαστικός ημίχωρος προσομοιώνεται ένας βαθύς και σχετικά ομοιόμορφος εδαφικός σχηματισμός. Σύμφωνα με τον Gazetas (1983), στο Σχ. 2.1 που ακολουθεί, δίνονται οι στατικές δυσκαμψίες και οι συντελεστές δυναμικής δυσκαμψίας για επιφανειακό άκαμπτο κυκλικό θεμέλιο επί ελαστικού ημχώρου σε συνάρτηση με το λόγο του Poisson ν . Επίσης, δίνονται σε αδιάστατη μορφή οι όροι απόσβεσης ακτινοβολίας.

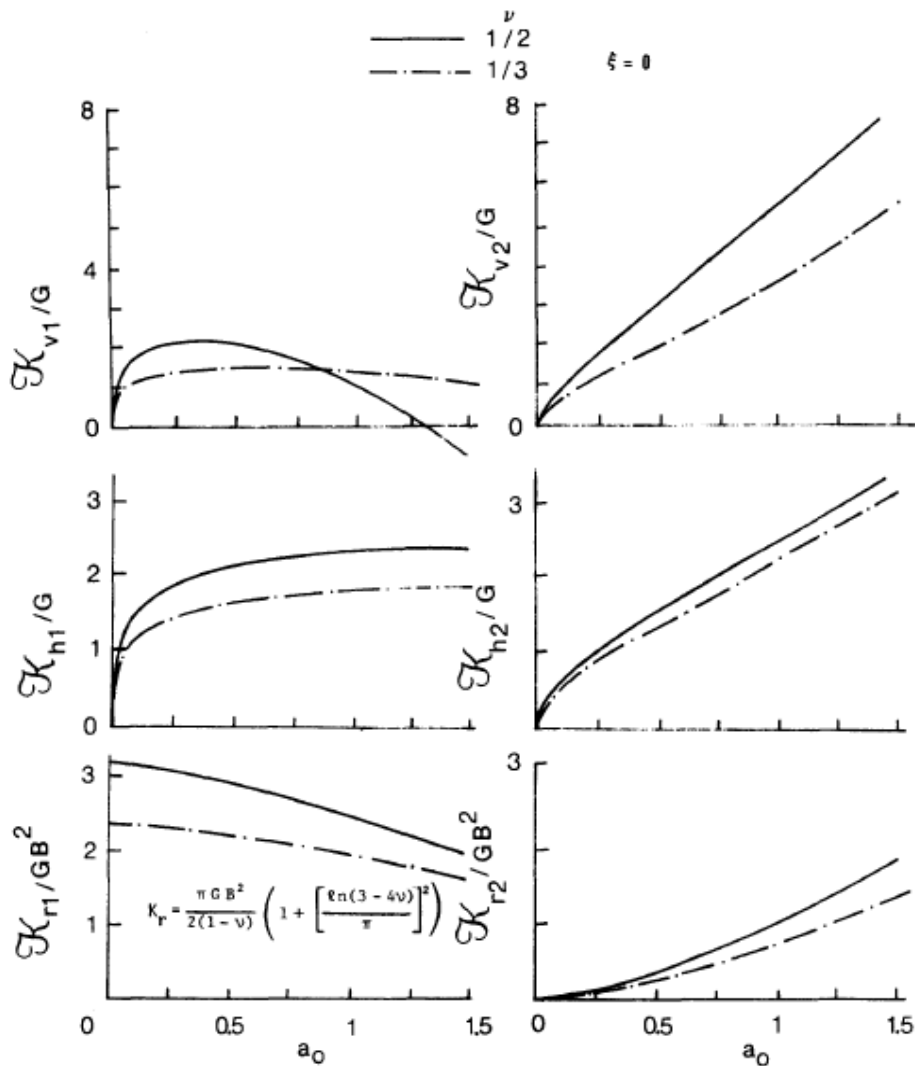


Σχ. 2.1. Δυναμικοί συντελεστές δυσκαμψίας και απόσβεσης άκαμπτου κυκλικού θεμελίου επί ελαστικού ημχώρου (Gazetas, 1983)

Οι επιμέρους δείκτες των συντελεστών αυτών αντιστοιχούν στους διάφορους τύπους φόρτισης. Πιο συγκεκριμένα ο δείκτης v (vertical) αντιστοιχεί σε κατακόρυφη φόρτιση, ο δείκτης h (horizontal) αντιστοιχεί σε οριζόντια φόρτιση, ο δείκτης r (rocking) σε περιστροφική φόρτιση, ενώ ο δείκτης t (torsion) σε στρεπτική.

B) Περίπτωση λωριδωτής θεμελίωσης

Αντίστοιχα, στο Σχ. 2.2 που ακολουθεί δίνονται οι στατικές δυσκαμψίες και οι αποσβέσεις ακτινοβολίας για την περίπτωση επιφανειακού άκαμπτου λωριδωτού θεμελίου επί ελαστικού ημχώρου σε συνάρτηση με το λόγο του Poisson ν , σύμφωνα με τον Gazetas (1983).



Σχ. 2.2. Στατικές δυσκαμψίες άκαμπτου λωριδωτού θεμελίου επί ελαστικού ημχώρου (Gazetas, 1983)

Σημειώνεται ότι, λωριδωτό θεωρείται ένα θεμέλιο όταν ο λόγος της μεγάλης προς τη μικρή πλευρά του είναι μεγαλύτερος του 5. Ακόμα εάν η δυναμική φόρτιση που ασκείται στο θεμέλιο είναι σχετικά ομοιόμορφη κατά τη διαμήκη διεύθυνση, τότε μπορούν να θεωρηθούν συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης (plain strain) και συνεπώς η δισδιάστατη ανάλυση να είναι επαρκής για τον υπολογισμό της απόκρισης του θεμελίου. Για το λόγο αυτό, από το Σχ. 2.2 απουσιάζει η στατική δυσκαμψία που αντιστοιχεί σε στρεπτική φόρτιση του θεμελίου, καθώς περιλαμβάνει κινήσεις εκτός του επιπέδου (out-of-plane) και θεωρείται μηδενική.

Γ) Περίπτωση ορθογωνικού θεμελίου

Επέκταση των αποτελεσμάτων για κυκλικά θεμέλια, οδήγησε σε αντίστοιχα αποτελέσματα για ορθογωνικά και τετραγωνικά θεμέλια. Στην περίπτωση του ορθογωνικού θεμελίου, ως χαρακτηριστική διάσταση του θεμελίου λαμβάνεται το ημιέυρος της μικρότερης πλευράς του. Η στατική δυσκαμψία ενός ορθογωνικού θεμελίου μπορεί να υπολογιστεί μέσω της στατικής δυσκαμψίας ενός ισοδύναμου κυκλικού θεμελίου.

Για μεταφορικές μορφές ταλάντωσης και στις τρεις διευθύνσεις x, y, z η ακτίνα R_0 του ισοδύναμου κυκλικού θεμελίου δίνεται από την σχέση:

$$R_0 = \sqrt{\frac{2B * 2L}{\pi}}$$

Όσον αφορά τις περιστροφικές μορφές ταλάντωσης, η ακτίνα του ισοδύναμου κυκλικού θεμελίου δίνεται από αντίστοιχους τύπους. Για περιστροφή περί τον άξονα x δίνεται από την σχέση:

$$R_{0x} = \sqrt[4]{\frac{16L * B^3}{3\pi}}$$

ενώ για περιστροφή γύρω από τον άξονα y, από τη σχέση:

$$R_{0y} = \sqrt[4]{\frac{16B * L^3}{3\pi}}$$

Τέλος, για στρεπτική μορφή ταλάντωσης γύρω από τον άξονα z δίνεται από τη σχέση:

$$R_{0z} = \sqrt[4]{\frac{16B * L * (B^2 + L^2)}{6\pi}}$$

Στον Πίν. 2.1 που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των στατικών δυσκαμψιών διαφόρων διερευνήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε ορθογωνικά θεμέλια με διάφορους λόγους πλευρών L/B (Gorbunov - Posadon 1961, Barkan 1962, Savidis 1977, Dominguez et al. 1978). Τα αποτελέσματα του πίνακα αυτού βασίζονται στη σχέση:

$$K = K_0(R_0) * J(L/B)$$

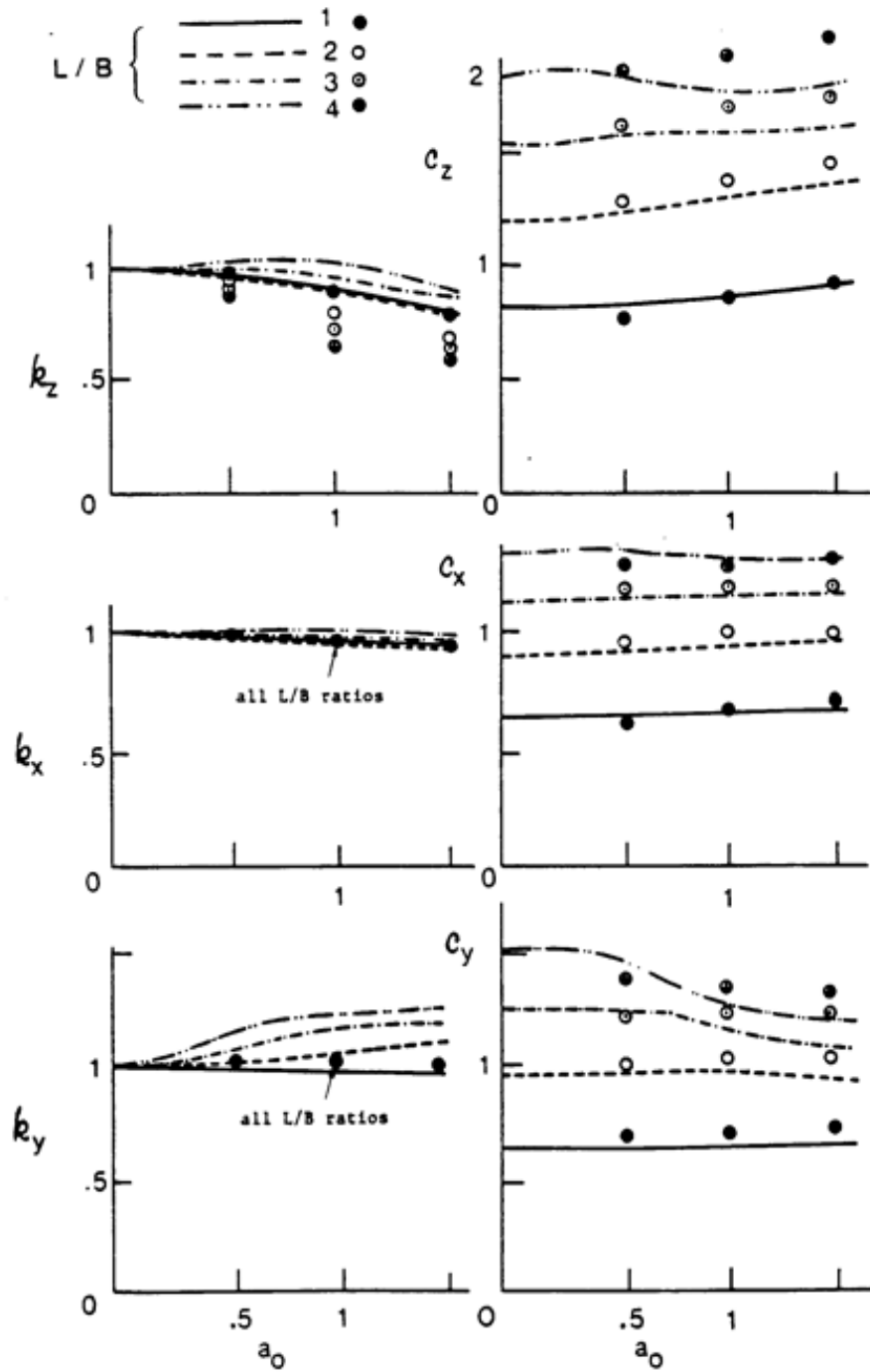
όπου K είναι η πραγματική στατική δυσκαμψία του συστήματος, $K_0(R_0)$ είναι η στατική δυσκαμψία του ισοδύναμου κυκλικού θεμελίου, R_0 είναι η ακτίνα του ισοδύναμου κυκλικού θεμελίου και $J(L/B)$ είναι ένας διορθωτικός συντελεστής συναρτήσει του λόγου L/B, ο οποίος δείχνει το κατά πόσο το ισοδύναμο κυκλικό θεμέλιο μπορεί να αποδώσει με επιτυχία το ορθογωνικό θεμέλιο. Δηλαδή, όσο περισσότερο απέχει ο διορθωτικός συντελεστής από τη μονάδα, τόσο πιο αναξιόπιστη είναι η αντικατάσταση του ορθογωνικού θεμελίου από το ισοδύναμο κυκλικό.

1. Vertical stiffness						3. Rocking stiffnesses				
$K_z \equiv K_v = \frac{4GR_0}{1-\nu} \cdot J_v(L/B)$						$K_{rx} = \frac{8GR_{ox}^3}{3(1-\nu)} \cdot J_{rx}(L/B) \quad K_{ry} = \frac{8GR_{oy}^3}{3(1-\nu)} \cdot J_{ry}(L/B)$				
'Correction' factor J_v						'Correction' factor J_{rx}			'Correction' factor J_{ry}	
$\frac{L}{B}$	Gorbunov- Posadov (1961)	Barkan (1962)	Savidis (1977)	Dominguez <i>et al.</i> (1978)		$\frac{L}{B}$	Gorbunov- Posadov <i>et al.</i> (1961)	Dominguez <i>et al.</i> (1978)	Gorbunov- Posadov <i>et al.</i> (1961)	Dominguez <i>et al.</i> (1978)
				'Adhesive'	'Smooth'					
1	1.023	0.953	0.944	1.052	1.081	1	0.991	0.965	0.991	0.965
2	1.025	0.975	0.973	1.063	1.130	2	1.034	1.039	1.035	1.031
4	1.108	1.077	1.072	1.107	1.196	4	1.0488	1.117	1.072	1.140
6	1.197	1.152	-	-	-	8	1.178	-	1.226	-
8	1.266	1.196	1.200	-	-	10	1.281	-	1.319	-
10	1.313	1.250	-	-	-					
20	1.572	-	-	-	-					

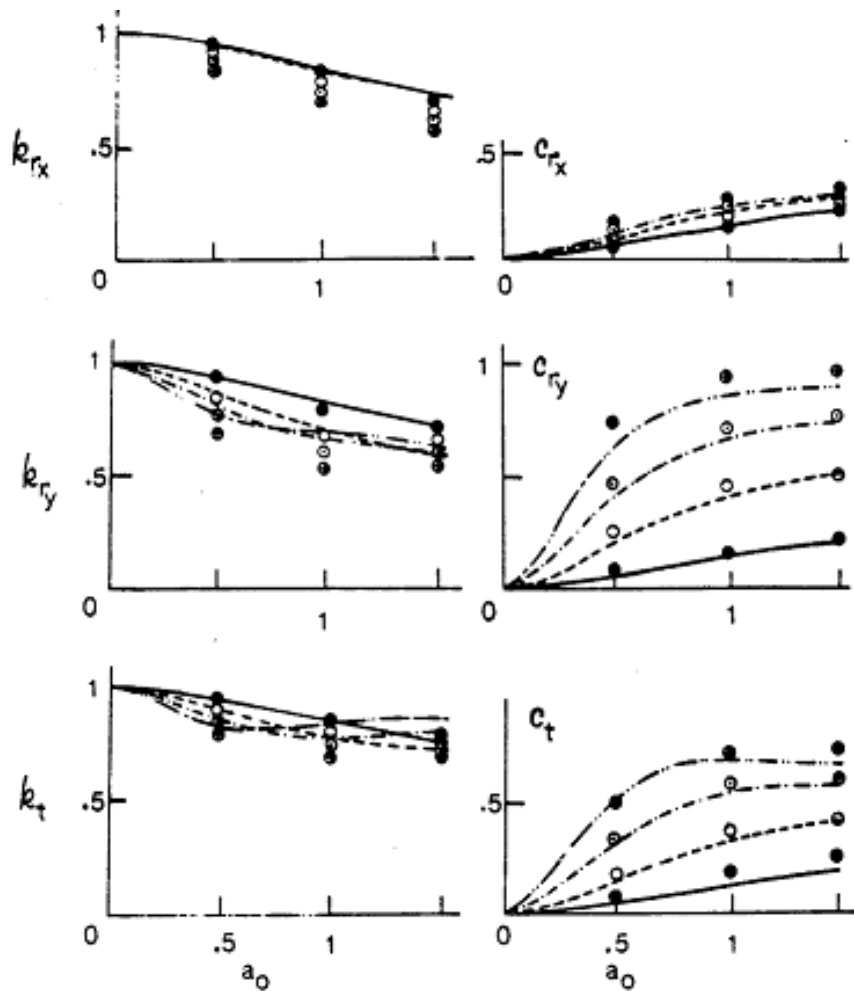
2. Horizontal stiffnesses					4. Torsional stiffness		
$K_x = \frac{8GR_0}{2-\nu} \cdot J_x(L/B) \quad K_y = \frac{8GR_0}{2-\nu} \cdot J_y(L/B)$					$K_{rz} \equiv K_t = \frac{16}{3} GR_{oz}^3 \cdot J_t(L/B)$		
'Correction' factor J_x			'Correction' factor J_y		'Correction' factor J_t		
$\frac{L}{B}$	Barkan (1962)	Dominguez <i>et al.</i> (1978)	Barkan (1962)	Dominguez <i>et al.</i> (1978)	$\frac{L}{B}$	Dominguez <i>et al.</i> (1978)	Roesset <i>et al.</i> (1977)
	1	0.993	1.035	0.993		1.035	1
2	0.983	1.044	1.008	1.105	2	1.000	-
4	1.000	1.085	-	1.221	3	1.016	-
6	1.055	-	-	-	4	1.166	-
8	1.132	-	-	-			
10	1.191	-	-	-			

Πιν. 2.1. Στατικές δυσκαμψίες για άκαμπτες ορθογωνικές θεμελιώσεις (Gazetas, 1983)

Στα Σχ. 2.3 και 2.4 που ακολουθούν, δίνονται οι συντελεστές δυναμικής δυσκαμψίας και απόσβεσης, σε συνάρτηση με την αδιάστατη συχνότητα ω_0 και τον αδιάστατο λόγο L/B , που οδηγούν στον υπολογισμό των σύνθετων δυναμικών παραμέτρων δυσκαμψίας και απόσβεσης του συστήματος.

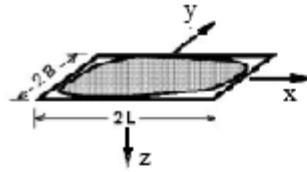


Σχ. 2.3. Δυναμικοί συντελεστές δυσκαμψίας και απόσβεσης άκαμπτου ορθογωνικού θεμελίου επί ελαστικού ημιχώρου (Gazetas, 1983)



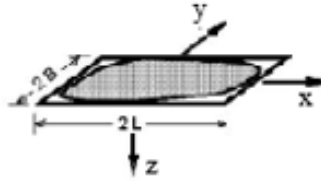
Σχ. 2.4. Δυναμικοί συντελεστές δυσκαμψίας και απόσβεσης άκαμπτου ορθογωνικού θεμελίου επί ελαστικού ημιχώρου (Gazetas, 1983)

Εκτός όμως από τον Gazetas (1983), με το συγκεκριμένο πρόβλημα υπολογισμού της σύνθετης δυναμικής δυσκαμψίας άκαμπτης θεμελίωσης επί ελαστικού ομοιογενή ημιχώρου, ασχολήθηκε και ο Mylonakis (2006). Εκείνος ανέπτυξε γενικότερους τύπους υπολογισμού των στατικών δυσκαμψιών και διαγράμματα των δυναμικών παραμέτρων, που αντιστοιχούν σε θεμελιώσεις τυχαίου σχήματος. Τα αποτελέσματα αυτά φαίνονται συγκεντρωμένα στους Πιν. 2.2 και 2.3, καθώς και στα Σχ. 2.5 που τους συνοδεύουν.



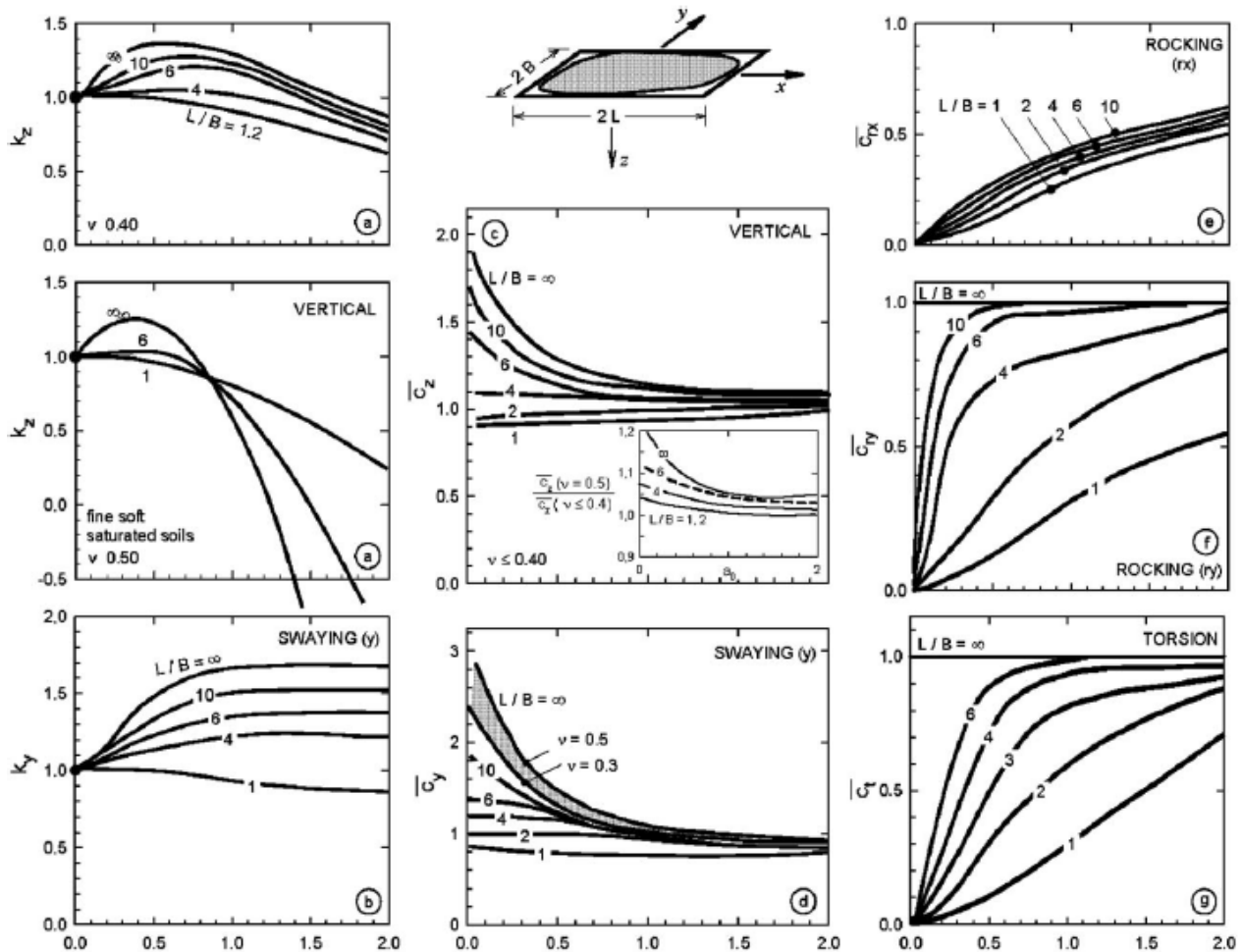
Στατική δυσκαμψία		
Τύπος φόρτισης	General shape (foundation-soil contact surface area = A_b with equivalent rectangle $2L \times 2B$; $L > B$) ^a	Τετράγωνο · $L=B$
Κατακόρυφη, z	$K_z = \frac{2GL}{1-\nu} (0.73 + 1.54\chi^{0.75})$ with $\chi = \frac{A_b}{4L^2}$	$K_z = \frac{4.54GB}{1-\nu}$
Οριζόντια, y (πλευρική διεύθυνση)	$K_y = \frac{2GL}{2-\nu} (2 + 2.5\chi^{0.85})$	$K_y = \frac{9GB}{2-\nu}$
Οριζόντια, x (διαμήκης διεύθυνση)	$K_x = K_y - \frac{0.2}{0.75-\nu} GL \left(1 - \frac{B}{L}\right)$	$K_x = K_y$
Περιστροφική, i_x (περί άξονα x)	$K_{ix} = \frac{G}{1-\nu} / 0.75 \left(\frac{I_{bx}}{B}\right)^{0.25} (2.4 + 0.5 \frac{B}{L})$ with I_{bx} = area moment of inertia of foundation-soil contact surface around x axis	$K_{ix} = \frac{0.45GB^3}{1-\nu}$
Περιστροφική, i_y (περί άξονα y)	$K_{iy} = \frac{G}{1-\nu} / 0.75 \left[3 \left(\frac{I_{by}}{B}\right)^{0.15}\right]$ with I_{by} = area moment of inertia of foundation-soil contact surface around y axis	$K_{iy} = K_{ix}$
Στρεπτική	$K_t = GJ_t^{0.75} \left[4 + 11 \left(1 - \frac{B}{L}\right)^{10}\right]$ with $J_t = I_{bx} + I_{by}$ polar moment of inertia of foundation-soil contact surface	$K_t = 8.3GB^3$

Πιν. 2.2. Στατικές δυσκαμψίες θεμελίου τυχαίου σχήματος επί ομοιογενή ελαστικού ημιχώρου (Mylonakis et al., 2006)



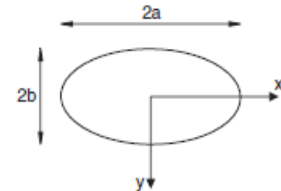
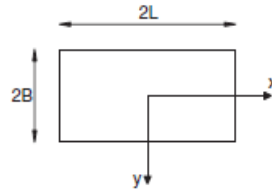
Τύπος φόρτισης	Δυναμικός συντελεστής δυσκαμψίας k (General shape; $0 \leq a_0 \leq 2$) ^b	Συντελεστής απόσβεσης ακτινοβολίας C (General shapes)
Κατακόρυφη, z	$k_z = k_z(\frac{L}{B}, \nu, a_0)$ plotted in Graph a	$C_z = (\rho V_{Lz} A_b) \bar{c}_z$ $\bar{c}_z = \bar{c}_z(\frac{L}{B}, a_0)$ plotted in Graph c
Οριζόντια, y (πλευρική διεύθυνση)	$k_y = k_y(\frac{L}{B}, a_0)$ plotted in Graph b	$C_y = (\rho V_s A_b) \bar{c}_y$ $\bar{c}_y = \bar{c}_y(\frac{L}{B}, a_0)$ plotted in Graph d
Οριζόντια, x (διαμήκης διεύθυνση)	$k_x \simeq 1$	$C_x \simeq \rho V_s A_b$
Περιστροφική, ix (περί άξονα x)	$k_{ix} = 1 - 0.20a_0$	$C_{ix} = (\rho V_{Lz} I_{bx}) \bar{c}_{ix}$ $\bar{c}_{ix} = \bar{c}_{ix}(\frac{L}{B}, a_0)$ plotted in Graph e
Περιστροφική, iy (περί άξονα y)	$\begin{cases} \nu < 0.45; \\ k_{iy} \simeq 1 - 0.30a_0 \\ \nu \simeq 0.5 : \\ k_{iy} \simeq 1 - 0.25a_0 (\frac{L}{B})^{0.30} \end{cases}$	$C_{iy} = (\rho V_{Lz} I_{by}) \bar{c}_{iy}$ $\bar{c}_{iy} = \bar{c}_{iy}(\frac{L}{B}, a_0)$ plotted in Graph f
Στρεπτική	$k_t \simeq 1 - 0.14a_0$	$C_t = (\rho V_s J_t) \bar{c}_t$ $\bar{c}_t = \bar{c}_t(\frac{L}{B}, a_0)$ plotted in Graph g

Πιν. 2.3. Δυναμικοί συντελεστές δυσκαμψίας και απόσβεσης θεμελίου τυχαίου σχήματος επί ομοιογενή ελαστικού ημιχώρου (Mylonakis et al., 2006)



Σχ. 2.5. Συνοδευτικά διαγράμματα για τον υπολογισμό των δυναμικών συντελεστών δυσκαμψίας και απόσβεσης θεμελίου τυχαίου σχήματος (Mylonakis et al., 2006)

Στην τρίτη στήλη του παραπάνω Πιν. 2.2 φαίνεται η τελική μορφή που παίρνουν οι τύποι υπολογισμού των στατικών δυσκαμψιών για την περίπτωση που το θεμέλιο είναι τετραγωνικό ($L=B$). Τέλος, οι αντίστοιχοι τύποι των στατικών δυσκαμψιών για ορισμένες περιπτώσεις ορθογωνικών ($B/L=2$, $B/L=4$) και ελλειπτικών ($a/b=2$, $a/b=4$) θεμελίων επί ελαστικού ομογενή ημιχώρου παρουσιάζονται στον Πιν. 2.4 που ακολουθεί.



Τύπος φόρτισης	Στατική δυσκαμψία			
	Ορθογώνιο ($B/L = 2$)	Ορθογώνιο ($B/L = 4$)	Έλλειψη ($a/b = 2$)	Έλλειψη ($a/b = 4$)
Κατακόρυφη, z	$K_z = \frac{3.3GL}{1-\nu}$	$\frac{2.55GL}{1-\nu}$	$\frac{2.9Ga}{1-\nu}$	$\frac{1.8Ga}{1-\nu}$
Οριζόντια, y (πλευρική διεύθυνση)	$K_y = \frac{6.8GL}{2-\nu}$	$\frac{5.54GL}{2-\nu}$	$\frac{6.5Ga}{2-\nu}$	$\frac{5.3Ga}{2-\nu}$
Οριζόντια, x (διαμήκης διεύθυνση)	$K_x = \frac{4.9(1-1.4\nu)}{(2-\nu)(0.75-\nu)}GL$	$\frac{3.9(1-1.4\nu)}{(2-\nu)(0.75-\nu)}GL$	$\frac{4.7(1-1.37\nu)}{(2-\nu)(0.75-\nu)}Ga$	$\frac{3.7(1-1.4\nu)}{(2-\nu)(0.75-\nu)}Ga$
Περιστροφική, τ_x (περί άξονα x)	$K_{\tau x} = \frac{0.82GL^3}{1-\nu}$	$\frac{0.2GL^3}{1-\nu}$	$\frac{0.55Ga^3}{1-\nu}$	$\frac{0.78Ga^3}{1-\nu}$
Περιστροφική, τ_y (περί άξονα y)	$K_{\tau y} = \frac{2.46GL^3}{1-\nu}$	$\frac{1.62GL^3}{1-\nu}$	$\frac{1.65Ga^3}{1-\nu}$	$\frac{1.1Ga^3}{1-\nu}$
Στρεπτική	$K_t = 3.5GL^3$	$2.1GL^3$	$2.35Ga^3$	$1.4Ga^3$

Πιν. 2.4. Στατικές δυσκαμψίες θεμελίου ορθογωνίου και ελλειπτικού σχήματος επί ομοιογενή ελαστικού ημιχώρου (Mylonakis et al., 2006)

2.3.3. Άκαμπτη θεμελίωση σε εδαφικό στρώμα επί βράχου

Στην πράξη σπάνια συναντώνται εδαφικοί σχηματισμοί με ομοιόμορφες ιδιότητες σε πολύ μεγάλα βάθη από την επιφάνεια φόρτισης. Πιο συχνά παρατηρείται η ύπαρξη μίας εδαφικής στρώσης πεπερασμένου πάχους H με ομοιόμορφες ιδιότητες, η οποία δεν εκτείνεται σε άπειρο βάθος, όπως ο ομοιογενής ημίχωρος. Σε μεγαλύτερο βάθος κάτω από την εδαφική αυτή στρώση υπάρχει πιο δύσκαμπτο εδαφικό υλικό, όπως είναι ο βράχος. Η απόκριση μιας θεμελίωσης που βρίσκεται σε εδαφικό στρώμα επί βράχου είναι διαφορετική από εκείνη της ίδιας θεμελίωσης επί ελαστικού ημιχώρου.

Α) Περίπτωση κυκλικής θεμελίωσης

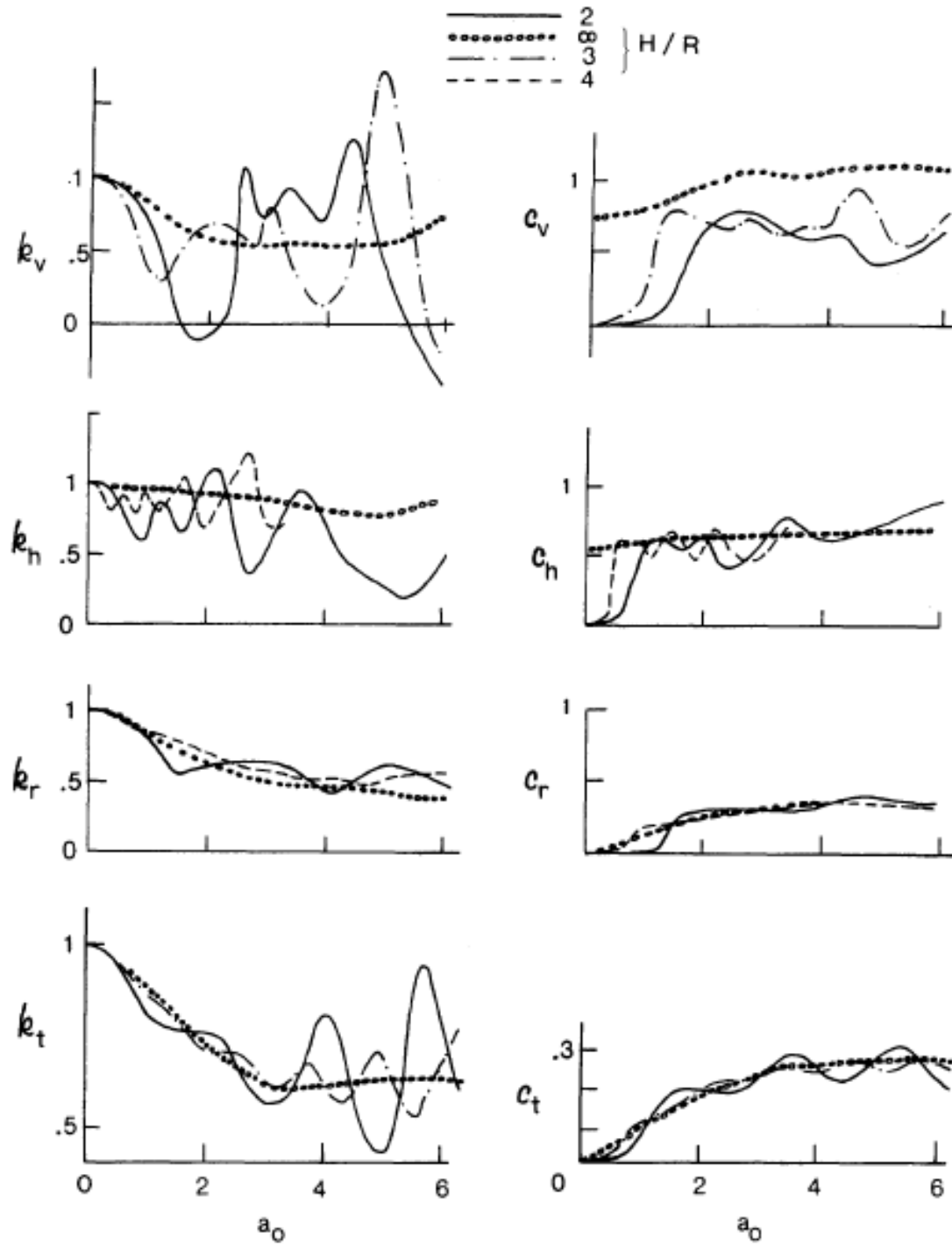
Η διαφοροποίηση σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση του θεμελίου επί ελαστικού ημιχώρου έγκειται στην εισαγωγή του πάχους H της εδαφικής στρώσης στους υπολογισμούς. Σύμφωνα με τον Πιν. 2.5 οι τύποι υπολογισμού των στατικών δυσκαμψιών άκαμπτου κυκλικού θεμελίου σε

εδαφική στρώση πάχους H επί βράχου παίρνουν την αντίστοιχη μορφή, για τα διάφορα είδη φορτίσεων (Gazetas, 1983).

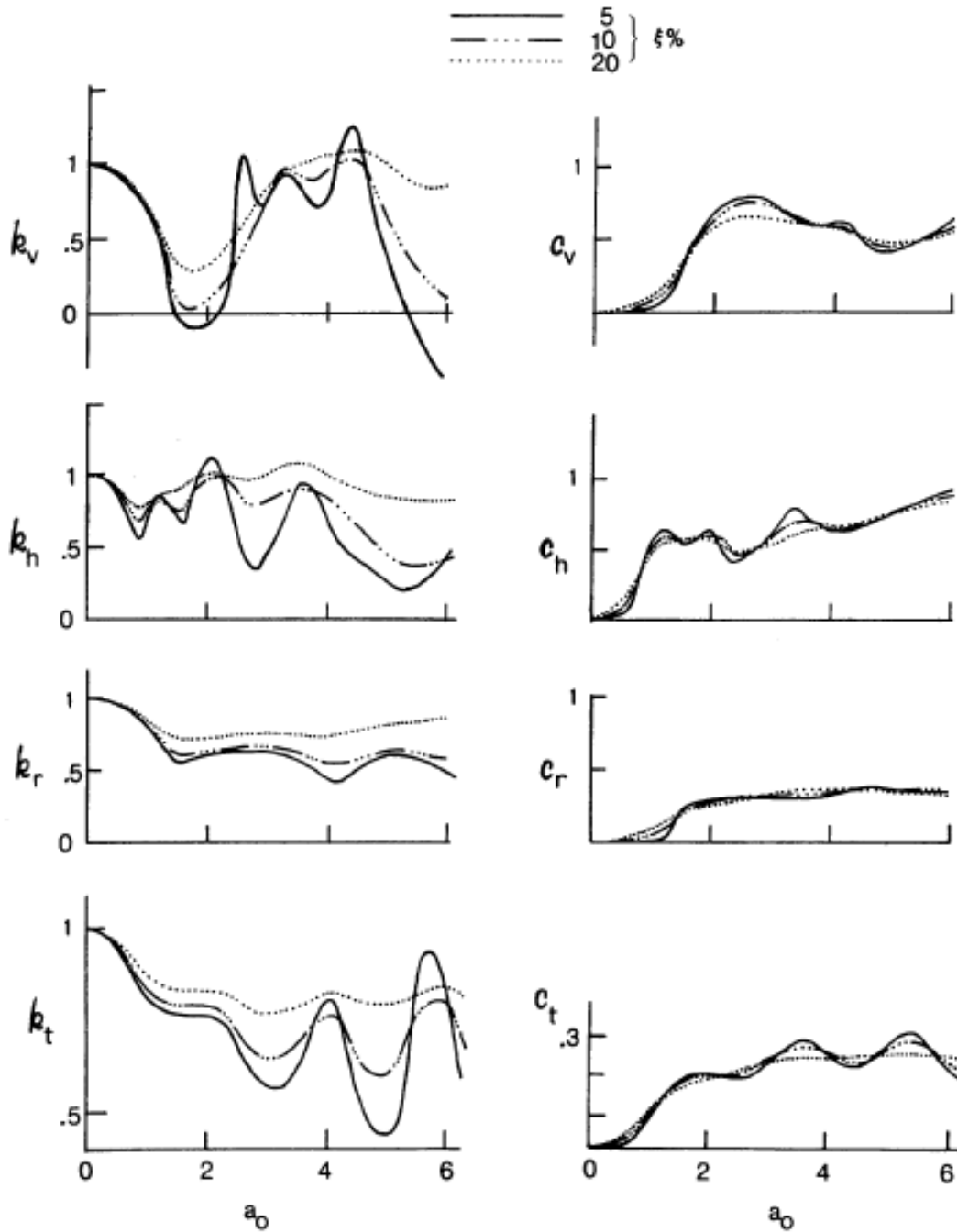
Είδος φόρτισης	Στατική Δυσκαμψία	Εύρος ακρίβειας	Εδαφικό προφίλ
Κατακόρυφη	$K_v = \frac{4GR}{1-\nu} \left(1 + 1.28 \frac{R}{H} \right)$	$H/R > 2$	
Οριζόντια	$K_h = \frac{8GR}{2-\nu} \left(1 + 0.5 \frac{R}{H} \right)$	$H/R > 1$	
Περιστροφική	$K_r = \frac{8GR^3}{3(1-\nu)} \left(1 + \frac{1}{6} \frac{R}{H} \right)$	$4 > H/R > 1$	
Στρεπτική	$K_t = \frac{16GR^3}{3}$	$H/R \geq 1.25$	

Πιν. 2.5. Στατικές δυσκαμψίες για άκαμπτη κυκλική θεμελίωση σε στρώμα επί εδάφους (Gazetas, 1983)

Ακόμα, στα Σχ. 2.6 και 2.7 που ακολουθούν, δίνονται οι συντελεστές δυναμικής δυσκαμψίας και απόσβεσης, σε συνάρτηση με την αδιάστατη συχνότητα a_0 , τον αδιάστατο λόγο H/R και την τιμή της υστερητικής απόσβεσης ξ του εδάφους. Με τη βοήθεια των δυναμικών αυτών συντελεστών πραγματοποιείται ο υπολογισμός των σύνθετων δυναμικών παραμέτρων δυσκαμψίας και απόσβεσης του συστήματος για την περίπτωση κυκλικού θεμελίου σε στρώμα επί βράχου.



Σχ. 2.6. Δυναμικοί συντελεστές δυσκαμψίας και απόσβεσης άκαμπτου κυκλικού θεμελίου σε στρώμα επί βράχου συναρτήσει του λόγου H/R (Gazetas, 1983)

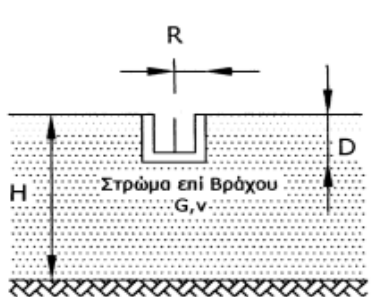


Σχ. 2.7. Δυναμικοί συντελεστές δυσκαμψίας και απόσβεσης άκαμπτου κυκλικού θεμελίου σε στρώμα επί βράχου συναρτήσει της απόσβεσης ξ (Gazetas, 1983)

Τα προηγούμενα αποτελέσματα μπορούν να επεκταθούν και για την περίπτωση εγκιβωτισμένων θεμελίων στο έδαφος. Πρόκειται για θεμελιώσεις που βρίσκονται σε ορισμένο βάθος D από την επιφάνεια του εδάφους, δηλαδή δεν είναι επιφανειακές. Η πρόσθετη παράμετρος που εισάγεται

στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι αυτό το βάθος D του εγκιβωτισμού. Καθοριστικό ρόλο στα αποτελέσματα παίζει η αλληλεπίδραση μεταξύ των κατακόρυφων τοιχωμάτων του θεμελίου και του εδάφους.

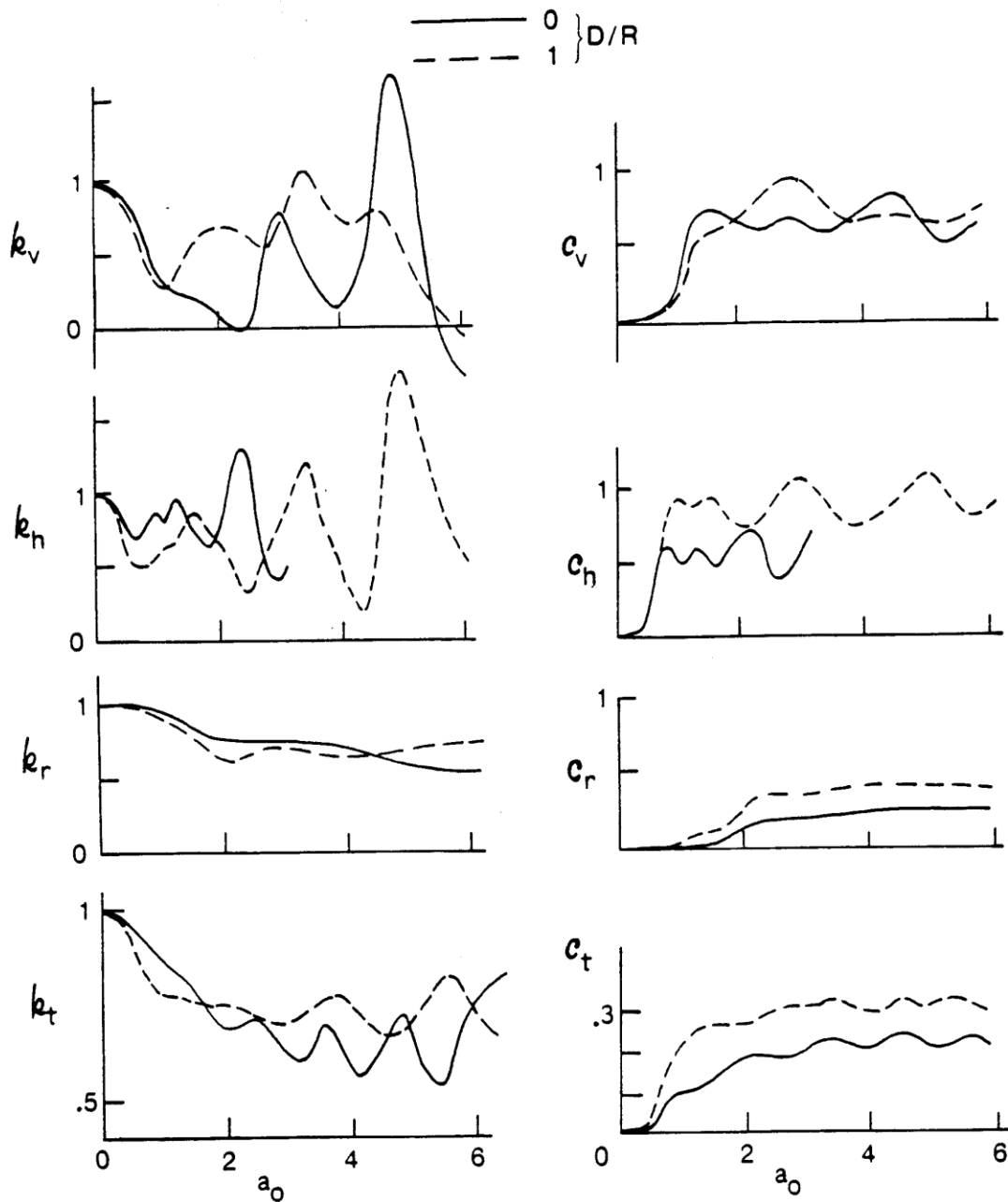
Στον Πίν. 2.6 δίνονται οι τύποι υπολογισμού των στατικών δυσκαμψιών εγκιβωτισμένου κυλινδρικού θεμελίου με άκαμπτα τοιχώματα σε στρώμα εδάφους επί βράχου σύμφωνα με τους Gazetas και Kausel. Όπως γίνεται φανερό, ο εγκιβωτισμός αυξάνει ουσιαστικά τις στατικές δυσκαμψίες σε όλους τους τύπους φόρτισης και κυρίως στις περιστροφικές μορφές ταλάντωσης. Σε αντίθεση η επιρροή του λόγου D/H είναι πιο έντονη για τις μετακινησιακές μορφές ταλάντωσης. Ακόμα, σημειώνεται ότι στην περίπτωση των εγκιβωτισμένων θεμελίων, λαμβάνεται υπόψη και ο συνδυασμός μεταφορικής - στροφικής μορφής ταλάντωσης.

Είδος φόρτισης	Στατική Δυσκαμψία	Εδαφικό προφίλ
Κατακόρυφη	$\frac{4GR}{1-\nu} \left(1 + 1.28 \frac{R}{H}\right) \left(1 + 0.5 \frac{D}{R}\right) \left(1 + \left[0.85 - 0.28 \frac{D}{R}\right] \frac{D}{H}\right)$	
Οριζόντια	$\frac{8GR}{2-\nu} \left(1 + 0.5 \frac{R}{H}\right) \left(1 + \frac{2D}{3R}\right) \left(1 + \frac{5D}{4H}\right)$	
Περιστροφική	$\frac{8GR^3}{3(1-\nu)} \left(1 + \frac{1R}{6H}\right) \left(1 + 2 \frac{D}{R}\right) \left(1 + 0.7 \frac{D}{H}\right)$	
Συζευγμένη Οριζόντια-Περιστροφική	$0.4K_n D$	
Στρεπτική	$\frac{16GR^3}{3} \left(1 + 2.67 \frac{D}{R}\right)$	

Εύρος Ακρίβειας $D/R < 2, D/H < 0.5$

Πιν. 2.6. Στατικές δυσκαμψίες για εγκιβωτισμένη κυκλική θεμελίωση σε στρώμα επί εδάφους (Gazetas, 1983)

Στο Σχ. 2.8 που ακολουθεί, δίνονται οι συντελεστές δυναμικής δυσκαμψίας και απόσβεσης σε συνάρτηση με την αδιάστατη συχνότητα a_0 , για τον τελικό υπολογισμό των σύνθετων δυναμικών παραμέτρων δυσκαμψίας και απόσβεσης του συστήματος για την περίπτωση εγκιβωτισμένου κυκλικού θεμελίου σε στρώμα επί βράχου. Οι καμπύλες του συγκεκριμένου Σχ. 2.8 έχουν ισχύ για αδιάστατους λόγους $D/R = 0$ και 1 , $H/R = 3$, λόγο Poisson $\nu = 1/3$ και απόσβεση $\xi = 0.05$.



Σχ. 2.8. Δυναμικοί συντελεστές δυσκαμψίας και απόσβεσης εγκιβωτισμένου κυκλικού θεμελίου σε στρώμα επί βράχου (Gazetas, 1983)

Στο σημείο αυτό τονίζεται ότι στους ανωτέρω αναλυτικούς τύπους υπολογισμού των στατικών δυσκαμψιών για την περίπτωση κυκλικής θεμελίωσης σε εδαφικό στρώμα επί βράχου, τόσο επιφανειακής όσο και εγκιβωτισμένης, βασίζεται και ο νορβηγικός νηογνώμονας Det Norske Veritas (DNV), καθώς και το δανέζικο Riso Nation Laboratory.

B) Περίπτωση λωριδωτής θεμελίωσης

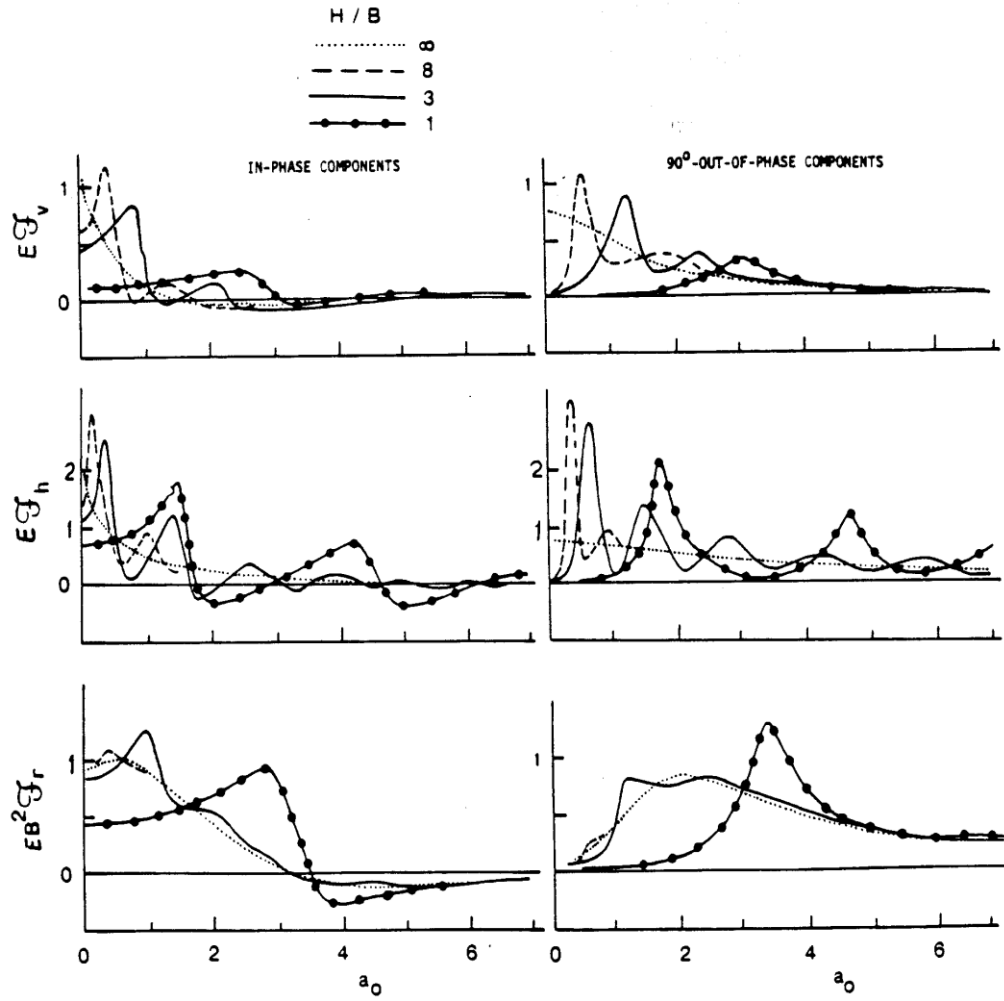
Όμοια με την περίπτωση θεμελίου επί ομοιόμορφου ελαστικού ημιχώρου, τα αποτελέσματα της κυκλικής θεμελίωσης μπορούν να επεκταθούν και για την περίπτωση λωριδωτής θεμελίωσης. Στον Πίν. 2.7 που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι τύποι υπολογισμού των στατικών δυσκαμψιών άκαμπτου λωριδωτού θεμελίου σε εδαφική στρώση πάχους H επί βράχου, για τα διάφορα είδη φορτίσεων (Gazetas, 1983).

Όπως και στην περίπτωση λωριδωτού θεμελίου επί ελαστικού ημιχώρου, η στρεπτική φόρτιση παραλείπεται, καθώς θεωρούνται συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης (plain strain) και συνεπώς η δισδιάστατη ανάλυση είναι επαρκής για τον υπολογισμό της απόκρισης του θεμελίου. Για το λόγο αυτό, από τον Πιν. 2.7 απουσιάζει η στατική δυσκαμψία που αντιστοιχεί σε στρεπτική φόρτιση του θεμελίου, καθώς περιλαμβάνει κινήσεις εκτός του επιπέδου (out - of - plane) και θεωρείται μηδενική.

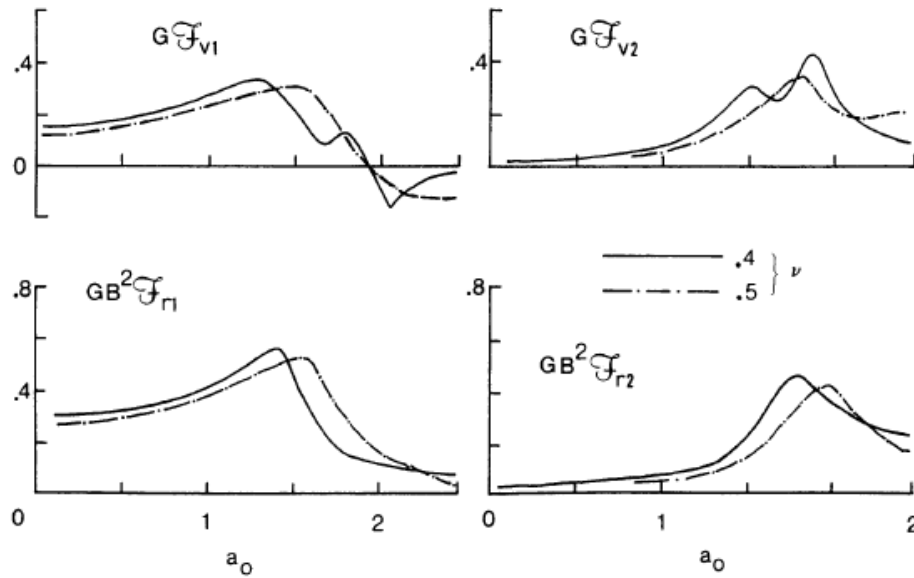
Είδος φόρτισης	Στατική Δυσκαμψία	Εύρος ακρίβειας	Εδαφικό προφίλ
Κατακόρυφη	$K_v = \frac{1.23G}{1-\nu} \left(1 + 3.5 \frac{B}{H} \right)$	$1 \leq H/B \leq 10$	
Οριζόντια	$K_h = \frac{2.1G}{2-\nu} \left(1 + 2 \frac{B}{H} \right)$	$1 \leq H/B \leq 8$	
Περιστροφική	$K_r = \frac{\pi G B^2}{2(1-\nu)} \left(1 + \frac{1}{5} \frac{B}{H} \right)$	$1 \leq H/B \leq 3$	

Πιν. 2.7. Στατικές δυσκαμψίες για άκαμπτη λωριδωτή θεμελίωση σε στρώμα επί εδάφους (Gazetas, 1983)

Στη συνέχεια, τα Σχ. 2.9 και 2.10 παρουσιάζουν την μεταβολή των αδιάστατων δυναμικών παραμέτρων με την συχνότητα για διάφορες τιμές του λόγου H/B . Πιο συγκεκριμένα το Σχ. 2.9 δείχνει την επιρροή του λόγου H/B για λόγο Poisson $\nu = 0.49$ και απόσβεση $\xi = 0.05$, ενώ το Σχ. 2.10 αποδίδει την επιρροή του ίδιου αδιάστατου λόγου στην κατακόρυφη και περιστροφική δυσκαμψία μόνο για την περίπτωση, όπου $H/B = 2$, $\xi = 0.05$ και $\nu = 0.4$ ή 0.5 (Gazetas, 1983).



Σχ. 2.9. Δυναμικές παράμετροι άκαμπτου λωριδωτού θεμελίου σε στρώμα επί βράχου ($\nu=0.49$, $\xi=0.05$)
 (Gazetas, 1983)



Σχ. 2.10. Δυναμικές παράμετροι άκαμπτου λωριδωτού θεμελίου σε στρώμα επί βράχου ($H/B=2, \xi=0.05$) (Gazetas, 1983)

Όμοια με την περίπτωση κυκλικής θεμελίωσης σε εδαφικό στρώμα επί βράχου, είναι δυνατό και για τη λωριδωτή θεμελίωση, να επεκταθούν τα αποτελέσματα και για το ενδεχόμενο εγκιβωτισμού της. Έτσι, έχουν αναπτυχθεί αναλυτικοί τύποι για τον υπολογισμό των στατικών δυσκαμψιών για οριζόντια και περιστροφική μορφή ταλάντωσης, όπως αποδεικνύει ο ακόλουθος Πίν 2.8.

Είδος φόρτισης	Στατική Δυσκαμψία	Εδαφικό προφίλ
Οριζόντια	$\frac{2.1G}{2-\nu} \left(1 + 2\frac{B}{H}\right) \left(1 + \frac{1L}{3B}\right) \left(1 + \frac{4D}{3H}\right)$	<p style="text-align: center;">$H/B \geq 2, D/B \leq 2/3$</p>
Περιστροφική	$\frac{\pi GB^2}{2(1-\nu)} \left(1 + \frac{1B}{5H}\right) \left(1 + \frac{D}{B}\right) \left(1 + \frac{2D}{3H}\right)$	

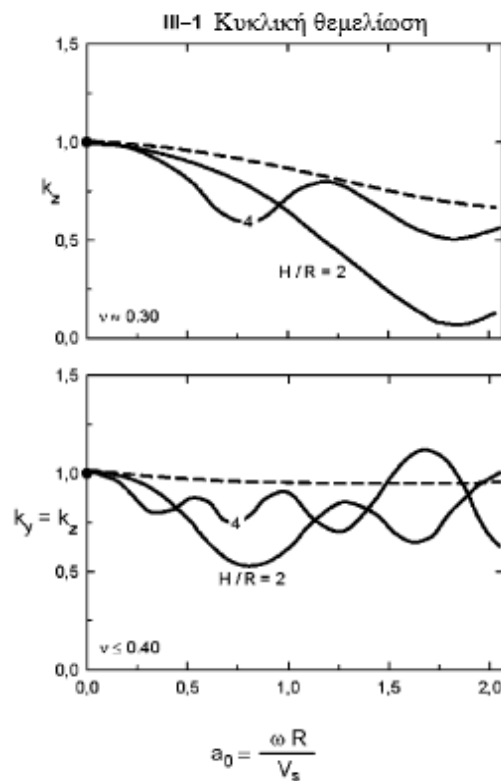
Πιν. 2.8. Στατικές δυσκαμψίες για εγκιβωτισμένη λωριδωτή θεμελίωση σε στρώμα επί βράχου (Gazetas, 1983)

Εκτός όμως από τον Gazetas (1983), με το συγκεκριμένο πρόβλημα υπολογισμού της σύνθετης δυναμικής δυσκαμψίας άκαμπτης θεμελίωσης επί εδαφικής στρώσης πάχους H πάνω από βράχο, ασχολήθηκε και ο Mylonakis (2006). Οι αναλυτικοί τύποι υπολογισμού των στατικών

δυσκαμψιών και οι δυναμικοί συντελεστές δυσκαμψίας που πρότεινε, συγκεντρώνονται στους ακόλουθους Πιν. 2.9 και 2.10 και στα Σχ. 2.11 και 2.12 που τους συνοδεύουν. Όπως φαίνεται παρακατω, γίνεται αναφορά στις περιπτώσεις κυκλικής, ορθογωνικής και λωριδωτής θεμελίωσης.

Σχήμα θεμελίου	Κυκλική θεμελίωση με B=R	
Στατική δυσκαμψία K	Κατακόρυφη, z	$K_z = \frac{4GR}{1-\nu} \left(1 + 1.3 \frac{R}{H}\right)$
	Οριζόντια, y	$K_y = \frac{8GR}{2-\nu} \left(1 + 0.5 \frac{R}{H}\right)$
	Οριζόντια, x	$K_x = K_y$
	Περιστροφική, rx	$K_{rx} = \frac{8GR^3}{3(1-\nu)} \left(1 + 0.17 \frac{R}{H}\right)$
	Περιστροφική, ry	$K_{rx} = K_{ry}$
	Στρεπτική t	$K_t = \frac{16GR^3}{3} \left(1 + 0.10 \frac{R}{H}\right)$
Δυναμικός συντελεστής δυσκαμψίας $k(\omega)$	Κατακόρυφη, z	$k_z = k_z(H/R, a_0)$ is obtained from Graph III-1
	Οριζόντια, y ή x	$k_y = k_y(H/R, a_0)$ is obtained from Graph III-1
	Περιστροφική, rx ή ry	$k_x(H/R) \approx k_x(\infty)$
	Στρεπτική t	$\alpha = rx, ry, t$

Πιν. 2.9. Στατικές δυσκαμψίες και δυναμικοί συντελεστές δυσκαμψίας για κυκλική θεμελίωση σε στρώμα επί βράχου (Mylonakis et al., 2006)

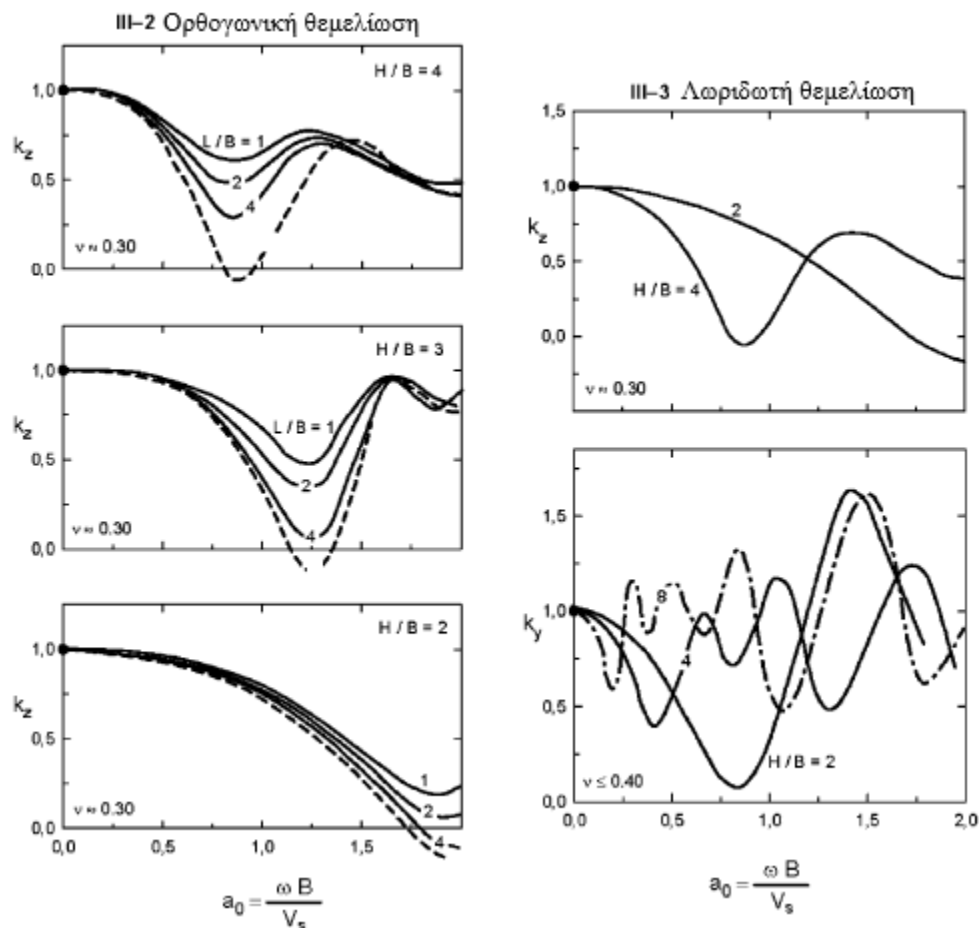


Σχ. 2.11. Συνοδευτικά γραφήματα για τον υπολογισμό των δυναμικών συντελεστών δυσκαμψίας κυκλικού θεμελίου (Mylonakis et al., 2006)

Σχήμα θεμελίου		Ορθογωνική θεμελίωση 2B επί 2L (L>B)	Λωριδοτή θεμελίωση 2L→∞
Στατική δυσκαμψία K	Κατακόρυφη, z	$K_z = \frac{2GL}{1-\nu} \left[0.73 + 1.54 \left(\frac{B}{L} \right)^{3/4} \right] \left(1 + \frac{B/H}{0.5+B/L} \right)$	$\frac{K_z}{2L} \approx \frac{0.73G}{1-\nu} \left(1 + 3.5 \frac{B}{H} \right)$
	Οριζόντια, y	*	$\frac{K_y}{2L} \approx \frac{2G}{2-\nu} \left(1 + 2 \frac{B}{H} \right)$
	Οριζόντια, x	*	-
	Περιστροφική, gx	*	$\frac{K_{gx}}{2L} = \frac{\pi GB^2}{2(1-\nu)} \left(1 + 0.2 \frac{B}{H} \right)$
	Περιστροφική, gy	*	-
	Στρεπτική t	*	-
Δυναμικός συντελεστής δυσκαμψίας k(ω)	Κατακόρυφη, z	$k_z = k_z(H/B, L/B, a_0)$ is plotted in Graph III-2 for rectangles and strip	$k_z = k_z(H/B, a_0)$ is obtained from Graph III-3
	Οριζόντια, y ή x	*	$k_y = k_y(H/B, a_0)$ is obtained from Graph III-3
	Περιστροφική, gx ή gy	*	$k_{gx} \approx k_{gx}(\infty)$
	Στρεπτική t	*	

*Not available.

Πιν. 2.10. Στατικές δυσκαμψίες και δυναμικοί συντελεστές δυσκαμψίας για ορθογωνική και λωριδοτή θεμελίωση σε στρώμα επί βράχου (Mylonakis et al., 2006)



Σχ. 2.12. Συνοδευτικά γραφήματα για τον υπολογισμό των δυναμικών συντελεστών δυσκαμψίας ορθογωνικού και λωριδοτού θεμελίου (Mylonakis et al., 2006)

Τέλος, στον Πιν. 2.11 των Mylonakis et al. (2006) δίνονται οι συντελεστές απόσβεσης ακτινοβολίας c . Οι συντελεστές αυτοί είναι ανεξάρτητοι του σχήματος της θεμελίωσης και ισχύουν για όλους τους τύπους θεμελίωσης που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Συντελεστής απόσβεσης ακτινοβολίας $C(\omega)$	Κατακόρυφη, z	$C_z(H/B) \approx 0$ at $f < f_c$; regardless of foundation shape $C_z(H/B) \approx 0.8 C_z(\infty)$ at $f \geq 1.5 f_c$ At intermediate frequencies: interpolate linearly. $f_c = \frac{V_{1a}}{4H}$, $V_{1a} = \frac{3AV_s}{\pi(1-\nu)}$
	Οριζόντια, y ή x	$C_y(H/B) \approx 0$ at $f < \frac{3}{4}f_s$; $C_y(H/B) \approx C_y(\infty)$ at $f > \frac{4}{3}f_s$ Similarly for C_x At intermediate frequencies: interpolate linearly. $f_s = \frac{V_s}{4H}$
	Περιστροφική, rx ή ry Στρεπτική t	$C_{rx}(H/B) \approx 0$ at $f < f_c$; $C_{rx}(H/B) \approx C_{rx}(\infty)$ at $f > f_c$ Similarly for C_r $C_t(H/B) \approx C_t(\infty)$

Πιν. 2.11. Συντελεστές απόσβεσης ακτινοβολίας για θεμελίωση οποιουδήποτε σχήματος σε στρώμα επί βράχου (Mylonakis et al., 2006)

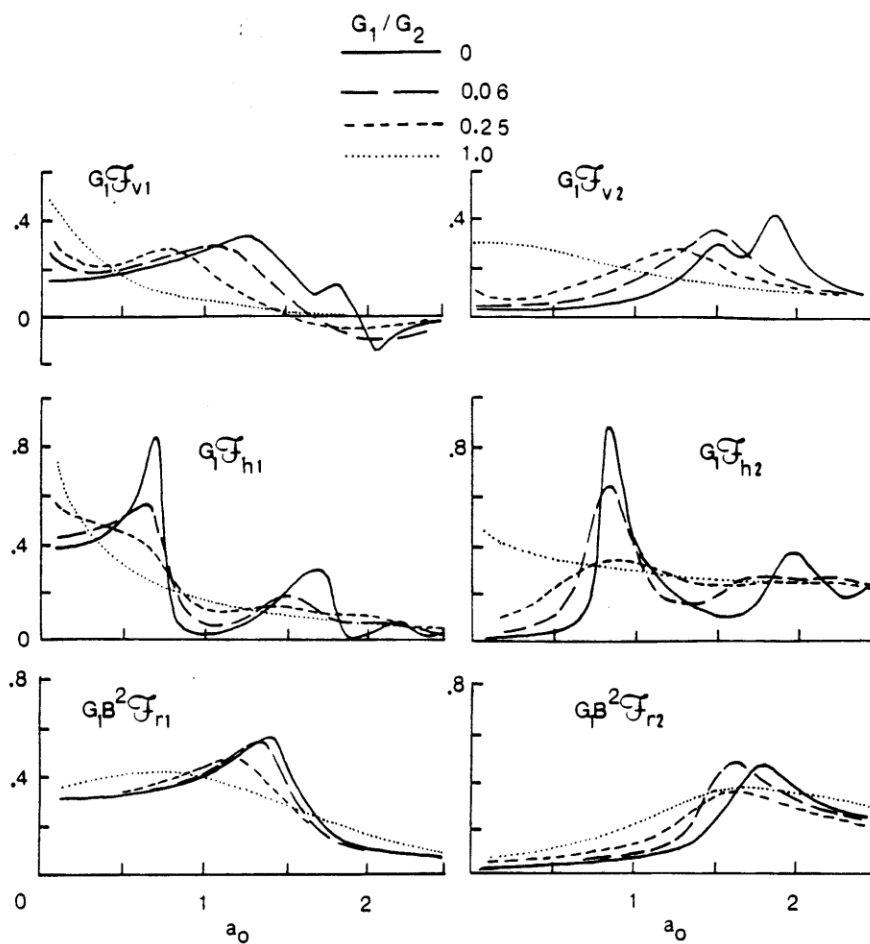
2.3.4. Άκαμπτη θεμελίωση σε εδαφικό στρώμα επί ημιχώρου

Η περίπτωση αυτή αποτελεί στην ουσία έναν συνδυασμό των δύο προηγούμενων περιπτώσεων που παρουσιάστηκαν. Δηλαδή, την περίπτωση του θεμελίου επί ελαστικού ημιχώρου και του θεμελίου σε στρώση πάνω σε βράχο. Πρόκειται για την περίπτωση που συναντάται πιο συχνά στην πράξη. Σύμφωνα με τον Gazetas (1983) για το εδαφικό μοντέλο αυτό, εκτός από τους αδιάστατους λόγους H/R και H/B εισάγεται και ο αδιάστατος λόγος του διατμητικού μέτρου του στρώματος προς το διατμητικό μέτρο του ημιχώρου G_1/G_2 . Για $G_1/G_2 \rightarrow 1$ προκύπτει η περίπτωση του ελαστικού ημιχώρου και για $G_1/G_2 \rightarrow 0$ προκύπτει η περίπτωση του στρώματος επί βράχου.

Ο Πιν. 2.12 και το Σχ. 2.13 (Gazetas, 1983) που ακολουθούν, δίνουν αντιστοίχως τους τύπους για τον αναλυτικό υπολογισμό των στατικών δυσκαμψιών και τις δυναμικές παραμέτρους για την περίπτωση άκαμπτης κυκλικής θεμελίωσης, ανάλογα με το είδος της φόρτισης που ασκείται και του αδιάστατου λόγου G_1/G_2 . Αναφέρεται ότι στο Σχ. 2.13 οι καμπύλες που απεικονίζονται, αντιστοιχούν στην περίπτωση στρώματος επί ημιχώρου και λόγο $H/R=2$, λόγο Poisson $\nu=0.4$ και απόσβεση $\xi=0.05$. Ουσιαστικά αποτελούν συνδυαστικό κρίκο των αντίστοιχων τύπων και παραμέτρων μεταξύ της περίπτωσης κυκλικού θεμελίου επί ελαστικού ημιχώρου και επί στρώματος πάνω από βράχο.

Είδος φόρτισης	Στατική Δυσκαμψία	Εύρος ακρίβειας	Εδαφικό προφίλ
Κατακόρυφη	$K_v = \frac{4G_1 R}{1 - \nu_1} \left(\frac{1 + 1.28 \frac{R}{H}}{1 + 1.28 \frac{R}{H} \frac{G_1}{G_2}} \right)$	$1 \leq H/R < 5$	
Οριζόντια	$K_h = \frac{8G_1 R}{2 - \nu_1} \left(\frac{1 + 0.5 \frac{R}{H}}{1 + 0.5 \frac{R}{H} \frac{G_1}{G_2}} \right)$	$1 \leq H/R < 4$	
Περιστροφική	$K_r = \frac{8G_1 R^3}{3(1 - \nu_1)} \left(\frac{1 + \frac{1}{6} \frac{R}{H}}{1 + \frac{1}{6} \frac{R}{H} \frac{G_1}{G_2}} \right)$	$0.75 \leq H/R < 2$	

Πιν. 2.12. Στατικές δυσκαμψίες για άκαμπτη κυκλική θεμελίωση σε στρώμα επί ημιχώρου (Gazetas, 1983)

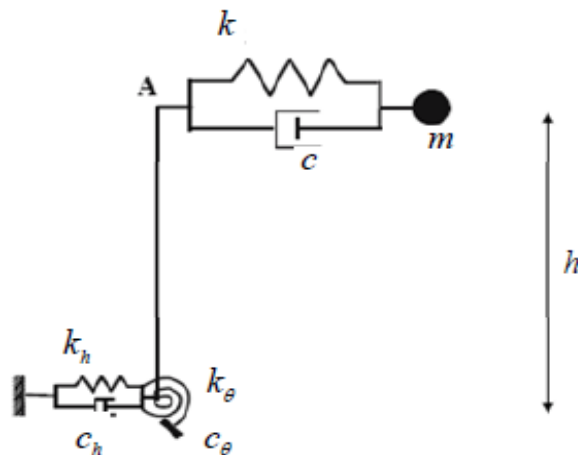


Σχ. 2.13. Δυναμικές παράμετροι άκαμπτου κυκλικού θεμελίου σε στρώμα επί ημιχώρου συναρτήσει του λόγου G_1/G_2 (Gazetas, 1983)

Στο σημείο αυτό τονίζεται ότι στους ανωτέρω αναλυτικούς τύπους υπολογισμού των στατικών δυσκαμψιών για την περίπτωση κυκλικής θεμελίωσης σε εδαφικό στρώμα επί ημιχώρου, βασίζεται και ο νορβηγικός νηογνώμονας Det Norske Veritas (DNV), καθώς και το δανέζικο Riso Nation Laboratory.

2.3.5. Αναλυτικός υπολογισμός ιδιοπεριόδου T συστήματος

Σύμφωνα με τους Veletsos & Meek (1974) οι μέγιστες παραμορφώσεις του ταλαντωτή της Εικ. 2.9 που προκαλούνται λόγω σεισμικής διέγερσης μπορούν να προβλεφθούν επακριβώς από έναν ισοδύναμο μονοβάθμιο ταλαντωτή πακτωμένο στη βάση του. Ο εν λόγω ταλαντωτής έχει ιδιοπερίοδο \bar{T} και λόγο απόσβεσης $\bar{\eta}$. Αυτές οι παράμετροι αναφέρονται ως παράμετροι «εύκαμπτης θεμελίωσης», επειδή παριστάνουν τις δυναμικές ιδιότητες ενός ταλαντωτή που είναι ελεύθερος να ολισθήσει και να περιστραφεί στη βάση του. Ο μονοβάθμιος ταλαντωτής προσομοιώνεται με μια μάζα m , ένα ελατήριο k και έναν αποσβεστήρα c σε ύψος h από τη βάση του. Επίσης, η εύκαμπτη θεμελίωση στη βάση του προσομοιώνεται με εμπεδήσεις \bar{k}_u και \bar{k}_θ με $\bar{k}_j = k_j(a_{0,j}, v) + i\omega c_j(a_{0,j}, v)$, όπου $j=u, \theta$ οι δύο βαθμοί ελευθερίας μεταφορικής και περιστροφικής κίνησης αντίστοιχα (Εικ. 2.9). Τα πραγματικά μέρη των συναρτήσεων εμπέδησης αντιπροσωπεύουν τη δυναμική δυσκαμψία της θεμελίωσης. Τα φανταστικά μέρη των συναρτήσεων αντιπροσωπεύουν την απόσβεση ενέργειας λόγω ακτινοβολίας των κυμάτων που δημιουργούνται στη διεπιφάνεια επαφής θεμελίου - εδάφους. Διάφοροι τρόποι υπολογισμού των μερών αυτών αναπτύχθηκαν παραπάνω.



Εικ. 2.9. Εξιδανικευμένο προσομοίωμα για τη μελέτη της αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής

Ο στόχος αυτής της μεθόδου είναι η σύνδεση των ιδιοτήτων του πλήρους συστήματος εδάφους - κατασκευής (\bar{T} , $\bar{\eta}$) με τις ιδιότητες της πακτωμένης κατασκευής (T , η), ώστε να γίνει δυνατός ο υπολογισμός της επίδρασης του φαινομένου στην δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής. Αυτή η σύνδεση εκφράζεται από το ακόλουθο ζεύγος εξισώσεων (Veletsos et al, 1974, 1975 1977):

$$\bar{T} = T * \sqrt{1 + \frac{k}{k_u} * \left(1 + \frac{k_u * h^2}{k_\theta}\right)} = T * \sqrt{1 + \frac{k}{k_u} + \frac{k * h^2}{k_\theta}}$$

και

$$\bar{\eta} = \bar{\eta}_0 + \left(\frac{\bar{T}}{T}\right)^{-3} * \eta$$

όπου $\bar{\eta}_0$ είναι η απόσβεση λόγω ακτινοβολίας του επιφανειακού θεμελίου. Η απόσβεση της κατασκευής ζ θεωρείται πως είναι αποκλειστικά ιξώδης. Ο λόγος απόσβεσης λόγω ακτινοβολίας του θεμελίου δίνεται από τη σχέση (Veletsos & Nair, 1975):

$$\bar{\eta}_0 = \frac{\pi^4}{2} * \frac{\gamma}{\sigma^3} * \left(\frac{\bar{T}}{T}\right)^{-3} * \left\| \left[\frac{(2 - V_s) * \beta_u}{\alpha_u * (\alpha_u + i * a_0 * \beta_u)} * \left(\frac{r}{h}\right)^2 + \frac{3 * (1 - V_s) * \beta_\theta}{\alpha_\theta * (\alpha_\theta + i * a_0 * \beta_\theta)} \right] \right\|$$

όπου $\sigma = V_s / (f_c * h)$ είναι η παράμετρος κύματος, f_c είναι η φυσική ιδιοσυχνότητα της πακτωμένης κατασκευής, $\gamma = m / (\pi * \rho * h * r^2)$ είναι η σχετική αδράνεια εδάφους - κατασκευής.

Η σχέση που συνδέει την ιδιοσυχνότητα του συστήματος εδάφους - κατασκευής με την ιδιοσυχνότητα της πακτωμένης κατασκευής τροποποιείται σε περιπτώσεις εγκιβωτισμένων θεμελίων (Gazetas, 1996) για να ληφθεί υπόψη και η σύζευξη μετακίνησης - στροφής του θεμελίου και είναι η ακόλουθη:

$$\bar{T} = T * \sqrt{1 + \frac{k}{k_{uu}} + \frac{k * h}{k_{u\theta}} + \frac{k * h^2}{k_{\theta\theta}}}$$

Μια απλούστερη επίλυση του προβλήματος δόθηκε από τον Wolf (1985). Το σύστημα που αναλύεται από τον Wolf είναι ταυτόσημο με αυτό που παρουσιάζεται στην παραπάνω Εικ. 2.5. Η βασική διαφορά αυτής της επίλυσης σε σχέση με την προηγούμενη προσέγγιση του Veletsos, είναι η χρήση δυναμικών συντελεστών ανεξάρτητων της συχνότητας διέγερσης για τις σταθερές ελατηρίων και αποσβεστήρων του θεμελίου. Πιο συγκεκριμένα, οι συντελεστές αυτοί έχουν σταθερές τιμές, οι οποίες είναι $\alpha_u = 1$, $\beta_u = 0.575$, $\alpha_\theta = 0.15$, $\beta_\theta = 0.15$. Επίσης, η μέθοδος αυτή διαφέρει και στον τρόπο υπολογισμού της απόκρισης του πλήρους συστήματος, καθώς αυτή προκύπτει από άμεση επίλυση του συστήματος των εξισώσεων κίνησης του πλήρους συστήματος εδάφους - κατασκευής.

Το ισοδύναμο ζεύγος εξισώσεων για το μονοβάθμιο ταλαντωτή είναι το εξής:

$$(\bar{\omega})^2 = \omega^2 * \left(1 + \frac{k}{k_u} + \frac{k * h^2}{k_\theta}\right)$$

και

$$\bar{\eta} = \left(\frac{\bar{\omega}}{\omega}\right)^2 * \eta + \left[1 - \left(\frac{\bar{\omega}}{\omega}\right)^2\right] * \eta_s + \left(\frac{\bar{\omega}}{\omega_u}\right)^2 * \eta_u + \left(\frac{\bar{\omega}}{\omega_\theta}\right)^2 * \eta_\theta$$

όπου η_s είναι ο λόγος υστερητικής απόσβεσης του εδαφικού υλικού,

$\omega_u = \sqrt{k_u/m}$ είναι η ασύζευκτη κυκλική συχνότητα του συστήματος για μεταφορική ταλάντωση του θεμελίου,

$\omega_\theta = \sqrt{k_\theta * r^2 / (m * h^2)}$ είναι η ασύζευκτη κυκλική συχνότητα του συστήματος για περιστροφική ταλάντωση του θεμελίου (υποθέτοντας άκαμπτη κατασκευή) και

$\omega_c = \sqrt{k/m}$ είναι η ασύζευκτη κυκλική συχνότητα του συστήματος για μεταφορική ταλάντωση της κατασκευής (υποθέτοντας άκαμπτο θεμέλιο).

2.4. Κινηματική αλληλεπίδραση

Συνήθως τα θεμέλια μιας κατασκευής είναι πιο δύσκαμπτα από το υποκείμενο έδαφος. Η παρουσία σχετικά δύσκαμπτων στοιχείων θεμελίωσης διαφοροποιεί την απόκριση της θεμελίωσης

συγκριτικά με την απόκριση του ελευθέρου πεδίου, ακόμα και αν θεωρηθεί ότι η κατασκευή και η θεμελίωση της έχουν μηδενική μάζα.

Η κινηματική αλληλεπίδραση εξαρτάται κυρίως από τρεις μηχανισμούς:

- Την ισοστάθμιση της διεπιφάνειας μεταξύ εδάφους και βάσης θεμελίου
- Τις επιρροές του εγκιβωτισμού της θεμελίωσης
- Τη σκέδαση των σεισμικών κυμάτων

2.4.1. Ισοστάθμιση διεπιφάνειας εδάφους και βάσης θεμελίου

Η κίνηση ενός άκαμπτου επιφανειακού θεμελίου είναι ακριβώς ίδια με την κίνηση ελευθέρου πεδίου για κυματικά πεδία που διαδίδονται ταυτόχρονα στην κατακόρυφη διεύθυνση. Για να πραγματοποιηθεί ισοστάθμιση βάσης θεμελίου πρέπει να προσπίπτουν σε αυτό:

- σεισμικά κύματα που σχηματίζουν γωνία ως προς την κατακόρυφο και
- κύματα τα οποία παρουσιάζουν ασυνέχεια ως προς το χώρο και το χρόνο.

Η ασυνέχεια των σεισμικών κυμάτων οφείλεται στις διαφορετικές τροχιές διάδοσης τους και στις τοπικές ανομοιογένειες του εδάφους, μέσα στο οποίο αυτά διαδίδονται. Εξαιτίας της παρουσίας ασύγχρονων κυματικών πεδίων, ή κυμάτων που δεν προσπίπτουν κατακόρυφα, οι οριζόντιες μετακινήσεις του θεμελίου μειώνονται σχετικά με αυτές του ελεύθερου πεδίου, και αναπτύσσεται στρέψη στην πλάκα του θεμελίου. Για υψηλότερες συχνότητες, τα ανωτέρω φαινόμενα γίνονται όλο και πιο καθοριστικά. Η εξάρτηση της μείωσης της οριζόντιας μετακίνησης, καθώς και της ανάπτυξης στρέψης και στροφής στη βάση του θεμελίου, από τη συχνότητα σχετίζεται κυρίως με το αυξημένο ενεργό μέγεθος του θεμελίου σε σύγκριση με τα μήκη των σεισμικών κυμάτων σε υψηλότερες συχνότητες.

Ένα θεμέλιο επιβάλλει στο υποκείμενο έδαφος μια συνοριακή συνθήκη, σύμφωνα με την οποία, απαιτείται η σχετική κίνηση των σημείων της διεπιφάνειας θεμελίου-εδάφους να ελέγχεται από τη δυσκαμψία του θεμελίου και όχι από τη δυσκαμψία του εδάφους, όπως θα γινόταν αν δεν υπήρχε το θεμέλιο. Οι κινήσεις ελευθέρου πεδίου που προέρχονται από κεκλιμένα ή ασυνεχή κυματικά πεδία εξομαλύνονται στην οριζόντια διεπιφάνεια θεμελίου-εδάφους λόγω αυτού του κινηματικού περιορισμού που επιβάλλεται στο έδαφος.

2.4.2. Εγκιβωτισμός της θεμελίωσης

Οι εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις εμφανίζουν μείωση στις οριζόντιες μετακινήσεις στη βάση τους σε σχέση με τις μετακινήσεις ελευθέρου πεδίου, οπότε δημιουργούνται στροφικές μετακινήσεις. Η στροφή στην προκειμένη περίπτωση δεν είναι αποτέλεσμα ροπής στη βάση που αναπτύσσεται λόγω της αδράνειας της κατασκευής, αφού οι μάζες της κατασκευής και του θεμελίου αμελούνται κατά την ανάλυση της κινηματικής αλληλεπίδρασης. Αντιθέτως, η στροφή προκαλείται από διατμητικές παραμορφώσεις κατά μήκος των πλευρών της εκσκαφής και του ελευθέρου πεδίου. Διάφορες αναλυτικές και εμπειρικές μελέτες έχουν διεξαχθεί κατά καιρούς, για να εξεταστούν οι επιδράσεις του εγκιβωτισμού στις διεγέρσεις των θεμελιώσεων. Το γενικότερο συμπέρασμα στο οποίο καταλήγουν οι μελέτες αυτές για τις εγκιβωτισμένες θεμελιώσεις είναι η μείωση της σεισμικής εδαφικής κίνησης όσο αυξάνεται το βάθος εγκιβωτισμού.

2.4.3. Σκέδαση σεισμικών κυμάτων

Αφορά τη σκέδαση των κυμάτων στις γωνίες και τις επιφανειακές ανωμαλίες των θεμελίων λόγω τραχύτητας. Ακόμα και σήμερα λίγα είναι γνωστά για την επίδραση της σκέδασης των κυμάτων στις κινήσεις του θεμελίου, αφού σχεδόν πάντα αυτή συνυπάρχει με τις πιο σημαντικές επιδράσεις της ισοστάθμισης βάσης θεμελίου και του εγκιβωτισμού του στο έδαφος.

2.4.4. Σύνοψη

Η εκτίμηση της κινηματικής αλληλεπίδρασης γίνεται μέσω μιγαδικών συναρτήσεων μεταφοράς που συνδέουν την κίνηση ελευθέρου πεδίου με την κίνηση της θεμελίωσης. Οι συναρτήσεις μεταφοράς εξαρτώνται από τη συχνότητα και λαμβάνουν εν γένει μιγαδικές τιμές διάφορες της μονάδας. Η επίδραση της κινηματικής αλληλεπίδρασης αμελείται στους αντισεισμικούς κανονισμούς, συνεπώς οι κινήσεις ελευθέρου πεδίου και η διέγερση θεμελίου θεωρούνται πανομοιότυπες και οι συναρτήσεις μεταφοράς ισούνται με τη μονάδα.

Στην πραγματικότητα όμως, οι συναρτήσεις μεταφοράς εξαρτώνται από τη δυσκαμψία και τα χαρακτηριστικά απόσβεσης του εδάφους. Στην εξιδανικευμένη περίπτωση ενός τελείως άκαμπτου εδαφικού στρώματος, το πλάτος των συναρτήσεων μεταφοράς για οριζόντια μετακίνηση είναι μονάδα, δηλαδή η διέγερση του θεμελίου και η κίνηση στο ελεύθερο πεδίο ταυτίζονται.

Μπορεί λοιπόν, εύκολα να διαπιστωθεί, το γεγονός ότι συνήθως δεν λαμβάνεται υπόψη καθόλου η αλληλεπίδραση εδάφους - κατασκευής, θεωρώντας ότι το έδαφος συμπεριφέρεται σαν άκαμπτος βράχος. Η παραδοχή αυτή κρύβει ενδεχόμενα σφάλματα σχετικά με την ορθότητα του σχεδιασμού των κατασκευών γενικότερα και δημιουργεί σοβαρούς κινδύνους.

3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

3.1. Εισαγωγή

Πολύ συχνά, κατά την ανάλυση μιας κατασκευής, γίνεται η παραδοχή ότι στη βάση της επιφανειακής θεμελίωσης της επικρατούν συνθήκες πάκτωσης. Μια τέτοια παραδοχή είναι συνήθως πολύ κοντά στην πραγματικότητα εάν πρόκειται για άκαμπτη θεμελίωση σε σκληρό έδαφος θεμελιώσεως υπό στατική φόρτιση.

Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις που η παραδοχή πάκτωσης στη βάση της κατασκευής ενέχει σημαντικά λάθη. Η περίπτωση αυτή συναντάται κυρίως σε μαλακές εδαφικές στρώσεις. Τα πράγματα περιπλέκονται περισσότερο υπό δυναμική φόρτιση, όπου υπάρχει μια επιπλέον βασική παράμετρος, η οποία παίζει καθοριστικό ρόλο, και δεν είναι άλλη από την ιδιοσυχνότητα του συστήματος εδάφους – θεμελίωσης – ανωδομής. Βασικό ζητούμενο του παρόντος προβλήματος αποτελεί ο προσδιορισμός της ιδιοσυχνότητας του σύνθετου συστήματος, καθώς και της πιθανής απόκλισης της από την αντίστοιχη τιμή για την περίπτωση θεώρησης συνθηκών πάκτωσης στη βάση της κατασκευής. Κι αυτό διότι, όπως έχει ήδη τονισθεί, σε μία ανεμογεννήτρια αποτελεί επιτακτική ανάγκη η αποφυγή ενδεχόμενου συντονισμού του πύργου με το ρότορα ή τα πτερύγια. Πρέπει επομένως να διερευνηθεί το κατά πόσο η δυναμική αλληλεπίδραση εδάφους - θεμελίου - ανωδομής δύναται να επηρεάσει ευεργετικά ή επιβαρυντικά τον παραπάνω στόχο που έχει τεθεί. Για σεισμικές φορτίσεις, οι οποίες έχουν μεγάλες σχετικά ιδιοπεριόδους (ή αντίστοιχα χαμηλές ιδιοσυχνότητες), παρατηρείται συνήθως έντονα το φαινόμενο της εδαφικής ενίσχυσης. Η ενίσχυση αυτή είναι ακόμα μεγαλύτερη όταν αυτές οι χαμηλές συχνότητες συναντούν μαλακά εδαφικά στρώματα με ιδιοπεριόδους κοντά στην ιδιοπερίοδο της διέγερσης. Αυτό συμβαίνει διότι, οι κυματισμοί που προέρχονται από το ταλαντούμενο θεμέλιο, αντανακλώνται στη διεπιφάνεια της εδαφικής στρώσης και του βράχου και επιστρέφουν στην επιφάνεια του θεμελίου. Κάτι τέτοιο έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία συντονιστικών φαινομένων μεταξύ της διέγερσης και της εδαφικής στρώσης με αποτέλεσμα την ενίσχυση της στρώσης.

Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση εδάφους - κατασκευής και να προσδιοριστεί η ενεργή ιδιοπερίοδος του σύνθετου συστήματος, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης χρονοϊστορίας. Μια σεισμική διέγερση επιβάλλεται στη βάση της υπερκατασκευής (εδάφους – θεμελίου – ανωδομής). Η διέγερση αυτή διαδίδεται μέσω

του εδάφους στη βάση της θεμελίωσης (επιφάνεια του εδάφους), και από εκεί μέσω της ανωδομής φτάνει τελικά στην κορυφή της υπερκατασκευής. Με τη χρήση του μετασχηματισμού Fourier των χρονοϊστοριών υπολογίζονται τα αντίστοιχα φάσματα απόκρισης σε διάφορα σημεία του μοντέλου. Ο λόγος του φάσματος απόκρισης στην κορυφή της εδαφικής στρώσης (ή της ανωδομής) προς το φάσμα απόκρισης στη βάση της δίνει τον συντελεστή ενίσχυσης AF της στρώσης (ή της ανωδομής) συναρτήσει της συχνότητας ή του χρόνου. Το σημείο στο οποίο μεγιστοποιείται αυτός ο συντελεστής ενίσχυσης, αντιστοιχεί στη συχνότητα συντονισμού του μοντέλου.

Η συχνότητα συντονισμού του συστήματος της υπερκατασκευής ποικίλει ανάλογα με τις ιδιότητες της εδαφικής στρώσης, ακόμα και για ανωδομές με τις ίδιες ιδιοπεριόδους. Οι ιδιότητες του εδάφους είναι εκείνες που κατά κύριο λόγο καθορίζουν το βαθμό της ανάπτυξης φαινομένων αλληλεπίδρασης στο σύστημα. Η χρήση του λόγου των μετασχηματισμών Fourier, αντί της απλής ιδιομορφικής ανάλυσης, για τον προσδιορισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών του συστήματος της υπερκατασκευής μπορεί να παραθέσει πρόσθετες πληροφορίες πέραν της εκτίμησης της ιδιοσυχνότητας του.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν ορισμένες αναλυτικές λύσεις για την επίλυση του προβλήματος της αλληλεπίδρασης, οι οποίες έχουν προταθεί κατά το παρελθόν και υπάρχουν στη βιβλιογραφία (Gazetas 1983, Mylonakis et al. 2006). Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται η προσπάθεια της αριθμητικής διερεύνησης του ανωτέρου προβλήματος με μια σειρά από δυναμικές αναλύσεις με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS v.8.2 και του λογισμικού SeismoSignal της εταιρείας SeismoSoft.

3.2. Πρόγραμμα PLAXIS και λογισμικό SeismoSignal

Το πρόγραμμα PLAXIS είναι ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο χρησιμοποιείται για τη δισδιάστατη δυναμική ανάλυση της απόκρισης και της ευστάθειας σε διάφορες εφαρμογές της γεωτεχνικής μηχανικής. Οι γεωτεχνικές εφαρμογές απαιτούν λεπτομερή μοντελοποίηση για την ακριβή και επιτυχημένη προσομοίωση της δυναμικής μη γραμμικής συμπεριφοράς των εδαφικών και βραχωδών σχηματισμών.

Στα πλαίσια της μοντελοποίησης ορίζεται η γεωμετρία της διατομής, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει εδαφικούς σχηματισμούς, καθώς και τμήματα της κατασκευής (θεμελίωσης και

ανωδομής) που βρίσκονται στη επιφάνεια ή εντός του εδάφους. Παράλληλα ορίζονται οι ιδιότητες των στοιχείων που χρησιμοποιούνται, οι συνοριακές συνθήκες, καθώς και πιθανές φορτίσεις (στατικές ή δυναμικές) που ασκούνται στο μοντέλο. Τα διάφορα μέρη της δομικής κατασκευής προσομοιώνονται με τη χρήση στοιχείων δοκών με τρεις ή πέντε κόμβους, ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια. Στους εδαφικούς σχηματισμούς γίνεται η ενεργοποίηση του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων. Το πλέγμα αποτελείται από τριγωνικά στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης με έξι ή δεκαπέντε κόμβους, ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια σε επίπεδο παραμορφώσεων και τάσεων στα διάφορα σημεία του εδάφους. Επίσης, είναι δυνατή η πύκνωση ή η αραιώση αυτού του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων (τόσο τοπικά, όσο και σε μεγαλύτερη έκταση) σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε ανάλυσης.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι η χρήση πεπερασμένων στοιχείων σε δυναμικά προβλήματα θεμελίων είναι διαφορετική από τις άλλες εφαρμογές πεπερασμένων στοιχείων στη στατική και τη δυναμική των κατασκευών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η έκταση του εδάφους στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση δεν είναι πεπερασμένη. Στην πραγματικότητα μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ημι-άπειρο μέσο. Ωστόσο, για πρακτικούς λόγους πρέπει να προσομοιωθεί με ένα μοντέλο πεπερασμένων διαστάσεων. Ένα τέτοιο μοντέλο πεπερασμένων διαστάσεων δημιουργεί ένα πλασματικό φαινόμενο γνωστό ως “box effect”, κατά το οποίο η ενέργεια του συστήματος παγιδεύεται εντός των συνόρων και διαστρεβλώνει τα δυναμικά του χαρακτηριστικά. Για να αποφευχθεί το φαινόμενο αυτό, τοποθετούνται απορροφητικά σύνορα ακτινοβολίας στο μοντέλο, τα οποία απορροφούν την ενέργεια ακτινοβολίας του συστήματος και δεν την παγιδεύουν εντός του μοντέλου. Μία επιπλέον τακτική που ακολουθείται για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, είναι η τοποθέτηση των συνόρων σε απόσταση αρκετά μακρινή από την περιοχή της θεμελίωσης και της πηγής της διέγερσης.

Τα εξαγόμενα αποτελέσματα του προγράμματος αυτού αφορούν τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις, τάσεις, παραμορφώσεις, επιταχύνσεις, ταχύτητες και μετατοπίσεις σε διάφορα σημεία του μοντέλου. Επίσης, είναι δυνατή η εξαγωγή διαγραμμάτων χρονοϊστορίας των παραπάνω μεγεθών για τα σημεία αυτά.

Το λογισμικό SeismoSignal της εταιρείας SeismoSoft αποτελεί έναν εύκολο και αποτελεσματικό τρόπο επεξεργασίας δεδομένων με δυναμικό χαρακτήρα με στόχο την παραγωγή μιας σειράς παραμέτρων που απαιτούνται συχνά για την αντιμετώπιση θεμάτων της σεισμικής μηχανικής. Μία από τις βασικές λειτουργίες του λογισμικού αυτού, η οποία θα χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια της

παρούσας εργασίας, είναι η εξαγωγή των φασμάτων Fourier. Τα φάσματα Fourier υπολογίζονται μέσω του μετασχηματισμού Fourier (Fast Fourier Transformation - FFT) των αντιστοίχων φασμάτων χρονοϊστορίας.

Όπως αναφέρθηκε ήδη παραπάνω, με τη χρήση του μετασχηματισμού Fourier των χρονοϊστοριών σε διάφορα σημεία του μοντέλου, είναι δυνατός ο υπολογισμός του συντελεστή ενίσχυσης στο σύστημα, καθώς και ο υπολογισμός της ιδιοσυχνότητας του. Πιο συγκεκριμένα, ο λόγος του φάσματος Fourier στην κορυφή της εδαφικής στρώσης (ή της ανωδομής) προς το φάσμα Fourier στη βάση της αναπαριστά τον συντελεστή ενίσχυσης AF της στρώσης (ή της ανωδομής) συναρτήσει της συχνότητας ή του χρόνου. Το σημείο στο οποίο μεγιστοποιείται ο συντελεστής ενίσχυσης AF, αντιστοιχεί στη συχνότητα συντονισμού του συστήματος.

Στο σημείο αυτό τονίζεται, ότι στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, οι μετασχηματισμοί Fourier χρησιμοποιήθηκαν για τη μετατροπή των φασμάτων χρονοϊστορίας της οριζόντιας επιτάχυνσης, ή αλλιώς επιταχυνσιογραφημάτων, στα αντίστοιχα φάσματα Fourier.

3.3. Προκαταρκτικά προσομοιώματα

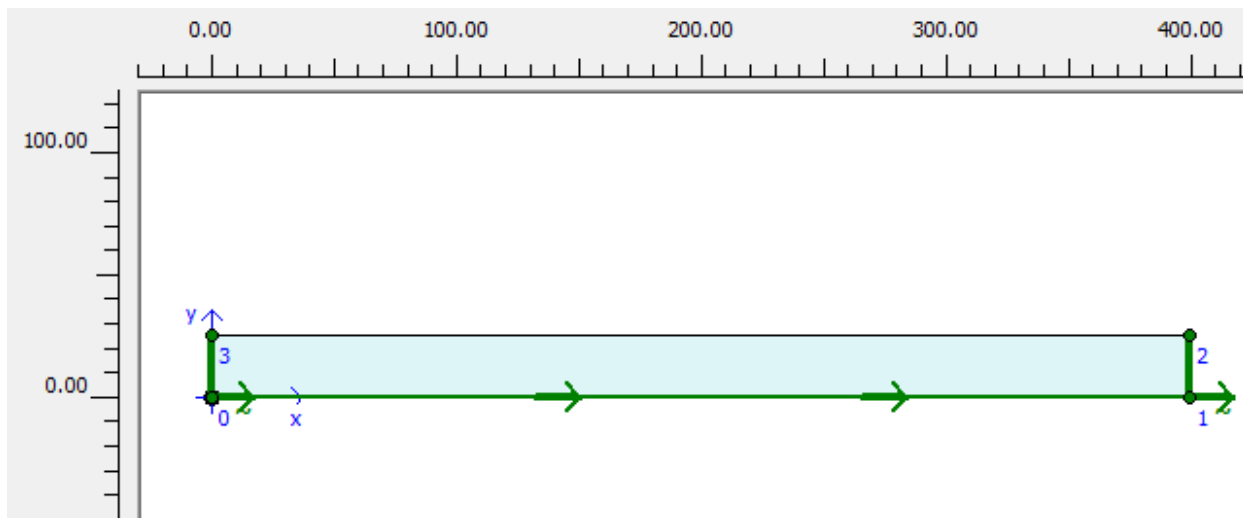
Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων και τον έλεγχο της αξιοπιστίας των αναλύσεων με τη χρήση του προγράμματος PLAXIS, αλλά και του λογισμικού SeismoSignal, αναπτύχθηκαν δύο προκαταρκτικά προσομοιώματα, προτού διεξαχθούν οι διάφορες αναλύσεις.

Το πρώτο προσομοίωμα περιλαμβάνει μία οριζόντια εδαφική στρώση με πεπερασμένο πάχος H, η οποία βρίσκεται πάνω από άκαμπτη εδαφική στρώση ή αλλιώς βράχο. Το δεύτερο προσομοίωμα αφορά έναν μονοβάθμιο ταλαντωτή, ο οποίος εδράζεται επί άκαμπτης οριζόντιας εδαφικής στρώσης. Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων των δύο αυτών μοντέλων συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης μέσω του PLAXIS και οι αναλυτικές λύσεις. Όσον αφορά το δεύτερο προσομοίωμα, πραγματοποιήθηκε ακόμα χρήση του Seimosignal για την εξαγωγή αντιστοίχων αποτελεσμάτων.

3.3.1. Πρώτο προκαταρκτικό προσομοίωμα

Όπως ήδη αναφέρθηκε, πρόκειται για μία οριζόντια εδαφική στρώση η οποία έχει τα εξής χαρακτηριστικά: (α) ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος $V_s = 200\text{m/s}$, (β) ειδικό βάρος $\gamma = 17\text{ kN/m}^3$, (γ) λόγος Poisson $\nu = 0.3$, (δ) πάχος $H = 25\text{m}$ και (ε) απόσβεση υλικού $\xi = 5\%$.

Εκατέρωθεν του προσομοιώματος της εδαφικής στρώσης χρησιμοποιούνται απορροφητικά συνοριακά στοιχεία, ώστε να προσομοιώνεται ικανοποιητικά η επέκτασή της σε άπειρο μήκος. Η επιφάνεια της στρώσης είναι ελεύθερη, ενώ στη βάση της ασκείται διέγερση με μία αρμονική ταλάντωση με συχνότητα $f = 2\text{Hz}$. Στην Εικ. 3.1 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η γεωμετρία και οι συνοριακές συνθήκες του προσομοιώματος αυτού κατά τη μοντελοποίηση του στο πρόγραμμα PLAXIS.



Εικ. 3.1. Γεωμετρία και συνοριακές συνθήκες του πρώτου προσομοιώματος

Υπενθυμίζεται ότι η ιδιοσυχνότητα ενός εδαφικού στρώματος σε μονοδιάστατη ανάλυση δίνεται από τη σχέση:

$$f_s = \frac{V_s}{4 * H}$$

όπου H το πάχος του εδαφικού στρώματος πάνω από το βράχο και V_s η ταχύτητα του διατμητικού κύματος στο στρώμα αυτό. Άρα στην προκειμένη περίπτωση προκύπτει ότι:

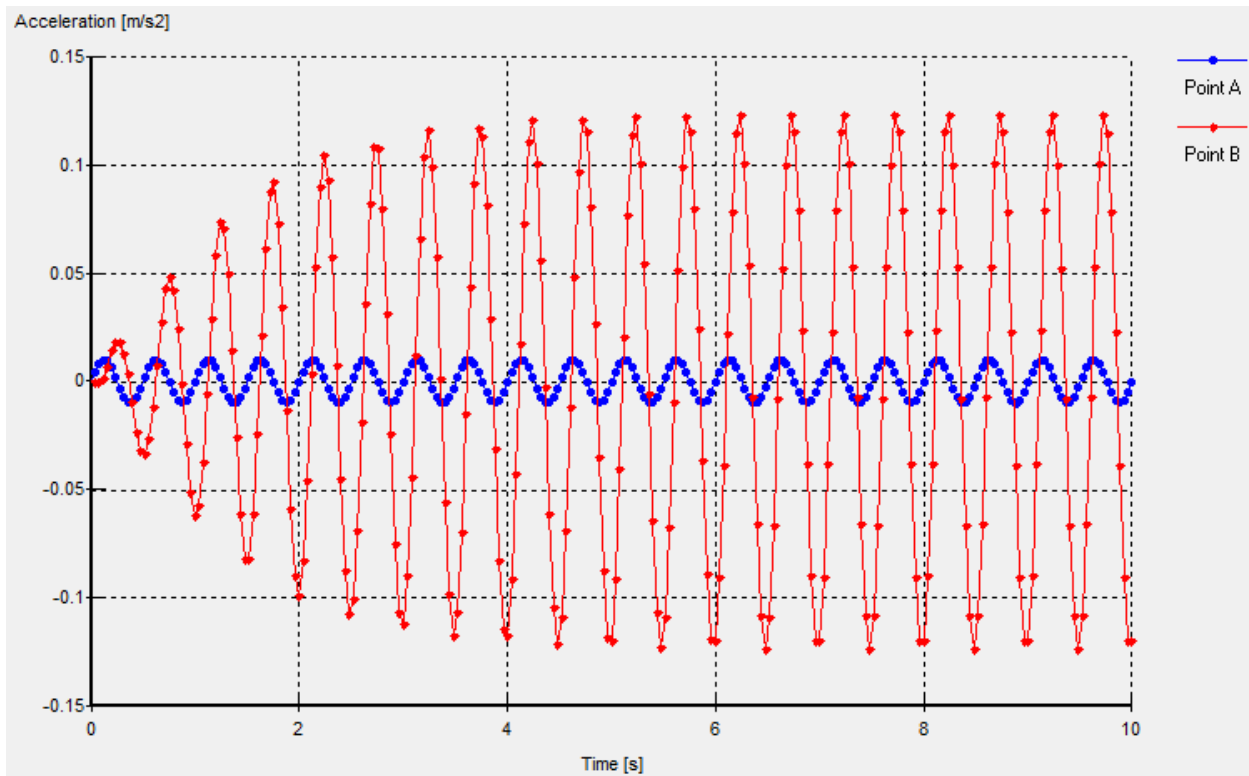
$$f_s = \frac{200}{4 * 25} = 2\text{Hz}$$

Η απόσβεση του υλικού λαμβάνεται υπόψη μέσω των σταθερών του Rayleigh. Για απόσβεση υλικού $\xi = 5\%$ και ιδιοπερίοδο $T = 0,5 \text{ sec}$, οι σταθερές α και β του Rayleigh προκύπτουν ίσες με 0,628 και 0,004 αντίστοιχα.

Σύμφωνα με την αναλυτική λύση, η στρώση πρόκειται να συντονισθεί με τη διέγερση, ενισχύοντας την αρμονική ταλάντωση κατά $2/(\pi \cdot \xi)$ φορές. Η απόσβεση του υλικού είναι 5%, επομένως ο συντελεστής ενίσχυσης τελικά θα είναι:

$$AF = \frac{2}{\pi \cdot 0,05} = 12,7$$

Έτσι αν θεωρηθεί ότι η αρμονική διέγερση στη βάση της στρώσης έχει μοναδιαίο πλάτος, τότε η απόκριση στην επιφάνεια της αναμένεται να είναι περίπου 12,7 για να επαληθευθεί η αριθμητική προσομοίωση μέσω του PLAXIS. Στο Διαγρ. 3.1 που ακολουθεί, δίδονται οι χρονοϊστορίες της οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση της εδαφικής στρώσης (Σημείο A) και στην επιφάνεια του εδάφους (Σημείο B). Παρατηρείται ότι το πλάτος ταλάντωσης της οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση ισούται με $0,01 \text{ m/s}^2$, ενώ στη κορυφή υπολογίστηκε ίση με $0,125 \text{ m/s}^2$ περίπου. Επομένως, μπορεί να ειπωθεί ότι η αναλυτική λύση επαληθεύεται απόλυτα από την αριθμητική προσομοίωση μέσω του PLAXIS.



Διαγρ. 3.1. Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση (Point A) και στην κορυφή (Point B) της εδαφικής στρώσης

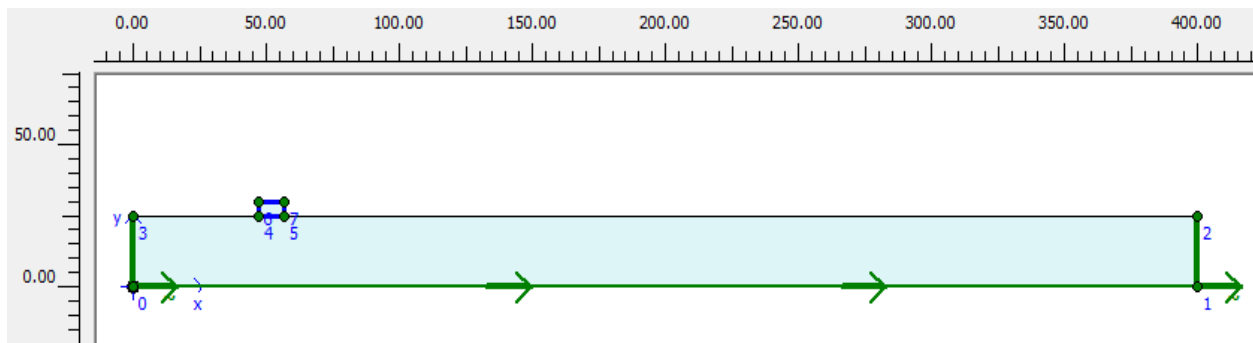
3.3.2. Δεύτερο προκαταρκτικό προσομοίωμα

Στο προσομοίωμα αυτό, θεωρείται ένας μονοβάθμιος ταλαντωτής μάζας, ο οποίος εδράζεται επί άκαμπτης εδαφικής στρώσης, όπως είναι για παράδειγμα ένα βραχώδες υπόβαθρο. Ο μονοβάθμιος ταλαντωτής έχει μάζα ίση με $m= 10\text{tn}$ (ή βάρος $W= 100\text{kN}$), ύψος $h= 5\text{m}$ και ιδιοσυχνότητα $f_c=2,05\text{Hz}$. Η απόσβεση στο έδαφος και στον ταλαντωτή λαμβάνεται ίση με $\xi= 5\%$, ενώ η στρώση έχει πάχος $H= 25\text{m}$. Ο συντελεστής ακαμψίας του ταλαντωτή υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$k = \frac{4 * \pi^2 * m}{T_c^2} = 1664,57 \text{ kN/m}$$

Η στρώση διεγείρεται από μία αρμονική ταλάντωση στη βάση της με συχνότητα $f= 2\text{Hz}$, η οποία μεταφέρεται σχεδόν αυτούσια στην επιφάνεια της, άρα και στη βάση του ταλαντωτή, καθώς πρόκειται για άκαμπτη εδαφική στρώση (βράχος). Όμοια με το πρώτο προκαταρκτικό

προσομοίωμα, η απόσβεση του υλικού λαμβάνεται υπόψη μέσω των σταθερών α και β του Rayleigh, οι οποίες ισούνται και πάλι με 0,628 και 0,004 αντίστοιχα, τόσο για την εδαφική στρώση όσο και για τον ταλαντωτή. Στην Εικ. 3.2 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η γεωμετρία και οι συνοριακές συνθήκες του προσομοιώματος αυτού κατά τη μοντελοποίηση του στο πρόγραμμα PLAXIS. Όπως απεικονίζεται, ο μονοβάθμιος ταλαντωτής προσομοιώνεται ως ένας πλαισιακός φορέας ύψους 5m και μήκους 10m.

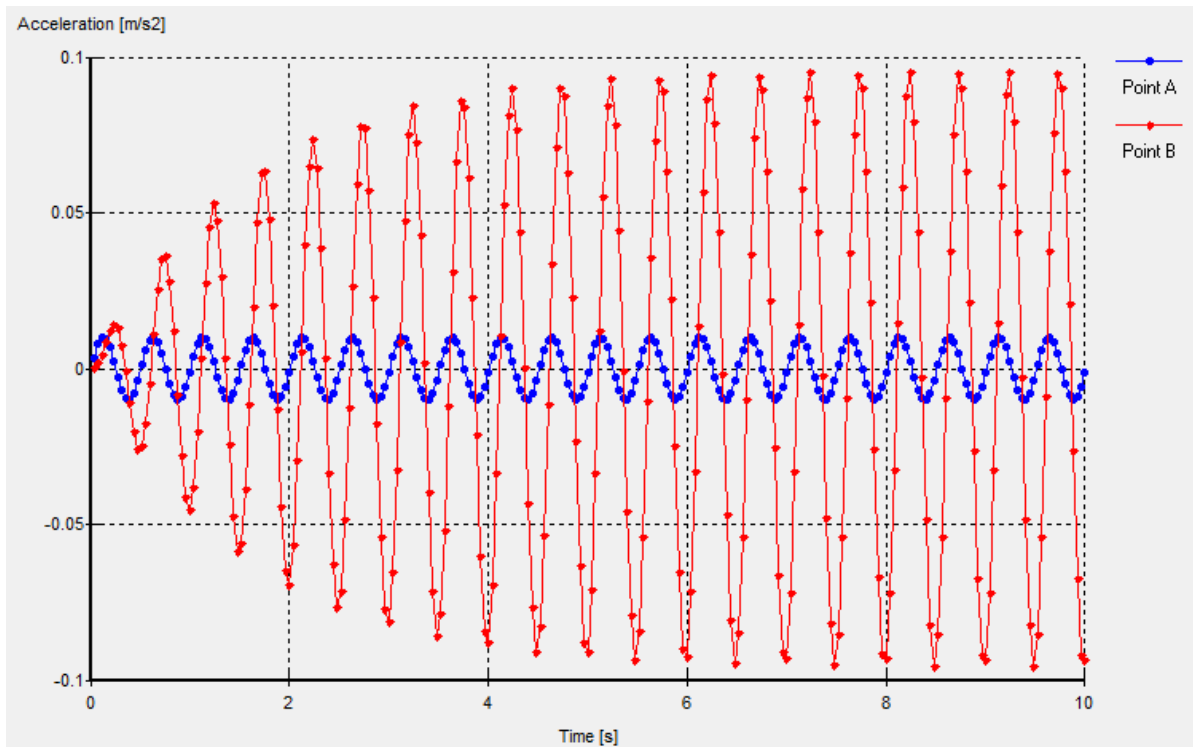


Εικ. 3.2. Γεωμετρία και συνοριακές συνθήκες του δεύτερου προσομοιώματος

Σύμφωνα με την αναλυτική λύση, ο συντελεστής ενίσχυσης στον ταλαντωτή ισούται με:

$$AF = \frac{1}{2 * \xi} = \frac{1}{2 * 0,05} = 10$$

Έτσι, αν θεωρηθεί ότι η αρμονική διέγερση στη βάση του ταλαντωτή έχει μοναδιαίο πλάτος, τότε η απόκριση στην κορυφή του θα πρέπει να είναι περίπου 10-πλάσια για να επαληθευθεί η αριθμητική προσομοίωση μέσω του PLAXIS. Στο Διαγρ. 3.2 που ακολουθεί, φαίνονται οι χρονοϊστορίες της οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση του ταλαντωτή (Σημείο A) και στην κορυφή του (Σημείο B). Παρατηρείται ότι το πλάτος ταλάντωσης της οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση ισούται με $0,01 \text{ m/s}^2$, ενώ στη κορυφή υπολογίστηκε ίση με $0,095 \text{ m/s}^2$ περίπου. Αυτό σημαίνει, ότι η τιμή του συντελεστή ενίσχυσης AF ισούται σχεδόν με 10. Μπορεί, λοιπόν, να ειπωθεί ότι η αναλυτική λύση επαληθεύεται απόλυτα από την αριθμητική προσομοίωση μέσω του PLAXIS.



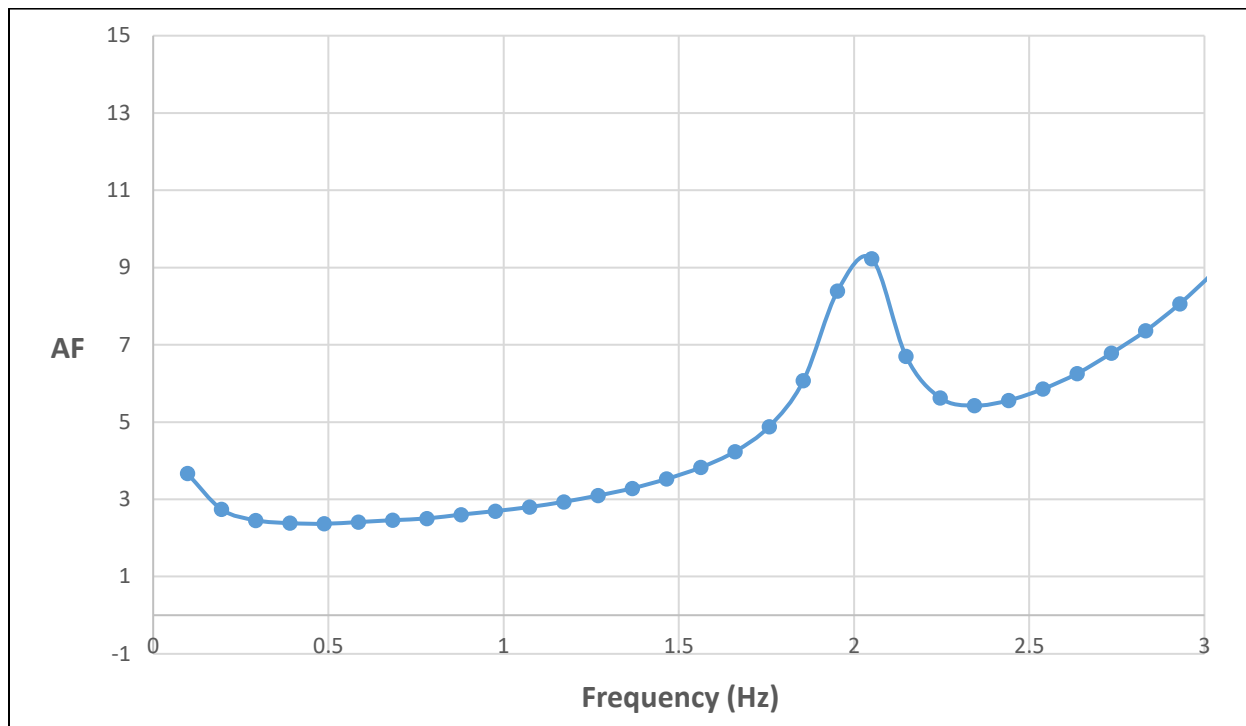
Διαγρ. 3.2. Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση (Σημείο A) και στην κορυφή (Σημείο B) του μονοβάθμιου ταλαντωτή

Επίσης, η τιμή του συντελεστή ενίσχυσης AF στο μονοβάθμιο ταλαντωτή προσδιορίζεται μέσω της χρήσης του λογισμικού SeismoSignal. Οι χρονοϊστορίες της οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση (Point A) και στην κορυφή (Point B) του μονοβάθμιου ταλαντωτή μετατρέπονται στα αντίστοιχα φάσματα Fourier. Με διαίρεση των τιμών του μετασχηματισμού Fourier στην κορυφή προς τις αντίστοιχες τιμές του μετασχηματισμού Fourier στη βάση προκύπτει ο συντελεστής ενίσχυσης συναρτήσει της συχνότητας f , δηλαδή:

$$AF(f) = \frac{\text{Fourier Amplitude}(f), \text{Point B}}{\text{Fourier Amplitude}(f), \text{Point A}}$$

Το σημείο στο οποίο η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης παρουσιάζει τοπικό μέγιστο, αντιστοιχεί στην ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή f_c . Όπως φαίνεται στο Διαγρ. 3.3 που ακολουθεί, η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης για το μονοβάθμιο ταλαντωτή παρουσιάζει τοπικό μέγιστο περίπου ίσο με 9,5 για συχνότητα 2,05Hz, η οποία δεν είναι άλλη από την ιδιοσυχνότητα f_c του μονοβάθμιου ταλαντωτή. Μπορεί, λοιπόν, να ειπωθεί ότι τα αποτελέσματα του μετασχηματισμού

Fourier μέσω του SeismoSignal, συμφωνούν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης μέσω του PLAXIS, αλλά και με την αναλυτική λύση.



Διαγρ. 3.3. Συντελεστής ενίσχυσης AF του μονοβάθμιου ταλαντωτή συναρτήσει της συχνότητας f

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων των δύο αυτών προκαταρκτικών προσομοιωμάτων διασφαλίζουν ότι η αριθμητική επίλυση δεν έχει ιδιαίτερη απόκλιση από την αντίστοιχη αναλυτική λύση σε προβλήματα δυναμικής φόρτισης. Συνεπώς, συμπεραίνεται ότι το πρόγραμμα PLAXIS και το λογισμικό SeismoSignal μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δυναμική ανάλυση προσομοιώματος εδάφους και ταλαντωτή, στο οποίο εμφανίζεται συντελεστής ενίσχυσης λόγω των φαινομένων συντονισμού.

3.4. Διέγερση με παλμό Ricker

Στο προηγούμενο εδάφιο 3.3, αναλύθηκε η μεμονωμένη περίπτωση διέγερσης των προκαταρκτικών προσομοιωμάτων με μία αρμονική ταλάντωση με συχνότητα $f=2\text{Hz}$. Προκειμένου να προκύψει μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα της απόκρισης ενός μοντέλου, κρίνεται σκόπιμη η φόρτιση του με ένα σύνολο αρμονικών διεγέρσεων διαφόρων μορφών, ευρών,

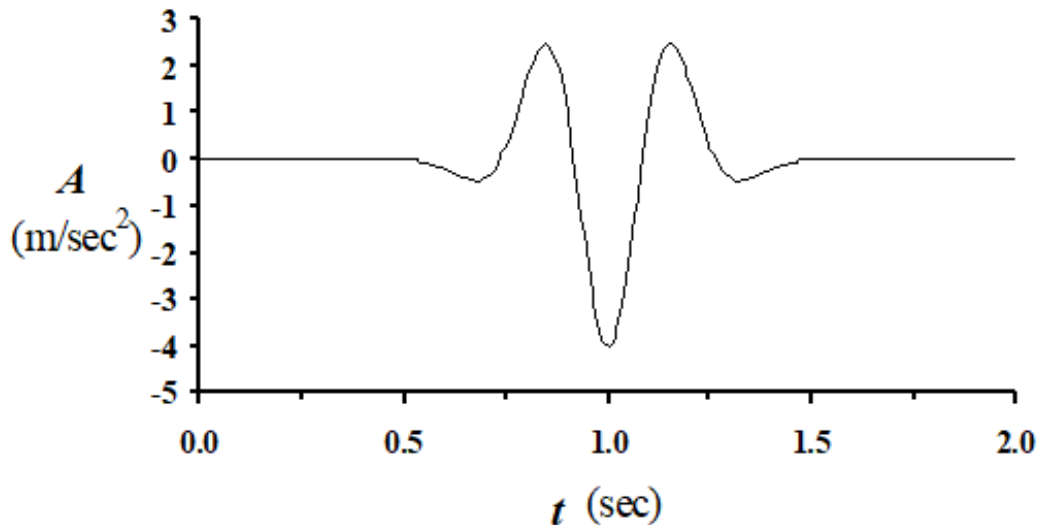
συχνοτήτων και αριθμών κύκλων. Αυτός ο συνδυασμός περιπτώσεων μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ενός χαρακτηριστικού παλμού, όπως είναι ο παλμός Ricker.

Ο παλμός Ricker δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$A(t) = [-6b + 24b^2(t - t_0)^2 - 8b^3(t - t_0)^4] * e^{-b(t-t_0)^2}$$

όπου $A(t)$ η σεισμική επιτάχυνση τη χρονική στιγμή t , t_0 παράμετρος που καθορίζει τη χρονική στιγμή που παρουσιάζει μέγιστο ο παλμός και b παράμετρος που καθορίζει τη δεσπόζουσα συχνότητα f του παλμού σύμφωνα με τη σχέση $b=(\pi*f)^2$.

Στο Διαγρ. 3.4 που ακολουθεί, φαίνεται η μορφή της χρονοϊστορίας της επιτάχυνσης ενός παλμού Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα $f=2\text{Hz}$ και μέγιστη σεισμική επιτάχυνση ίση με -4 m/s^2 τη χρονική στιγμή $t= 1\text{sec}$.



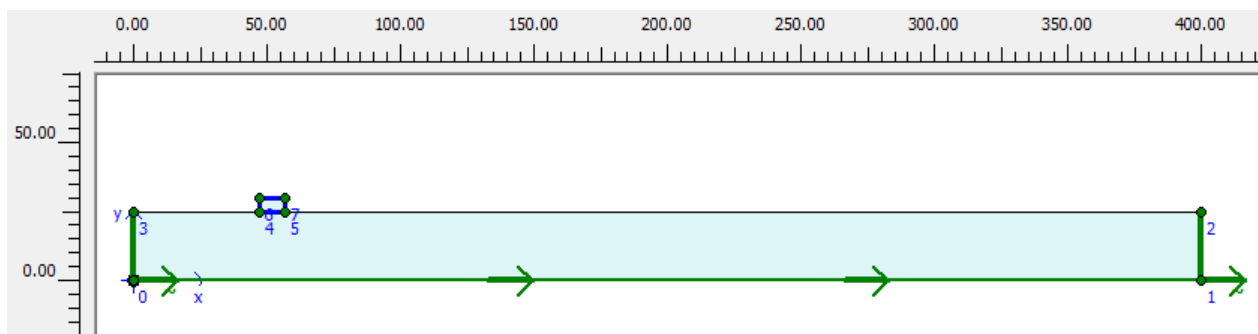
Διαγρ. 3.4. Χρονοϊστορία σεισμικής επιτάχυνσης του παλμού Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα $f=2\text{Hz}$

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ξανά, μέσω του προγράμματος PLAXIS, η ανάλυση του δεύτερου προκαταρκτικού προσομοιώματος με τον μονοβάθμιο ταλαντωτή, άλλα αυτή τη φορά η άκαμπτη εδαφική στρώση (βράχος) του μοντέλου διεγείρεται στη βάση της από έναν παλμό Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα $f=2\text{Hz}$. Επίσης, εξετάστηκε και η περίπτωση που ο μονοβάθμιος

ταλαντωτής είναι τοποθετημένος επί εδαφικής στρώσης πεπερασμένου πάχους H πάνω από βράχο, και όχι επί άκαμπτης εδαφικής στρώσης.

Στα προσομοιώματα αυτά, θεωρείται ο ίδιος μονοβάθμιος ταλαντωτής μάζας, ο οποίος έχει μάζα $m= 10tn$ (ή βάρος $W= 100kN$), ύψος $h= 5m$, ιδιοσυχνότητα $f_c= 2,05Hz$, ενώ ο συντελεστής ακαμψίας του ισούται με $k= 1664,57kN/m$. Το πάχος της εδαφικής στρώσης, επί της οποίας εδράζεται ο ταλαντωτής, λαμβάνεται ίσο με $25m$. Η απόσβεση στο έδαφος και στον ταλαντωτή θεωρείται ίση με 5% και λαμβάνεται υπόψη μέσω των σταθερών α και β του Rayleigh, οι οποίες ισούνται και πάλι με $0,628$ και $0,004$ αντίστοιχα.

Στην Εικ. 3.3 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η γεωμετρία και οι συνοριακές συνθήκες των ανωτέρω προσομοιωμάτων κατά τη μοντελοποίηση τους στο πρόγραμμα PLAXIS. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων των δύο αυτών περιπτώσεων διέγερσης του μοντέλου με τον παλμό Ricker παρουσιάζονται στη συνέχεια.



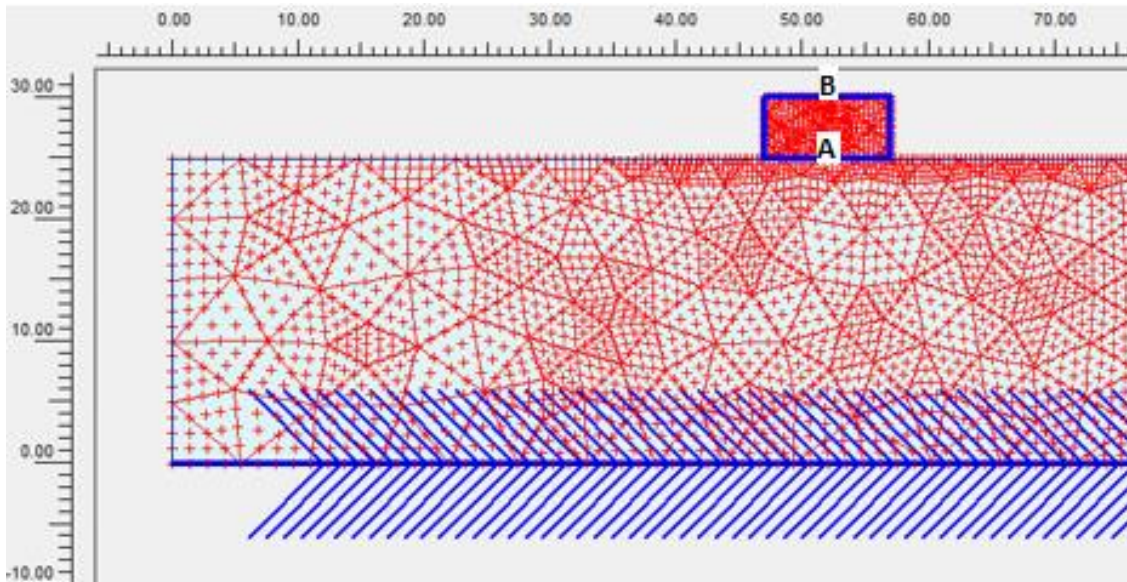
Εικ. 3.3. Γεωμετρία και συνοριακές συνθήκες προσομοιωμάτων με παλμό Ricker ($f=2Hz$)

3.4.1. Άκαμπτη εδαφική στρώση - Παλμός Ricker με $f=2Hz$

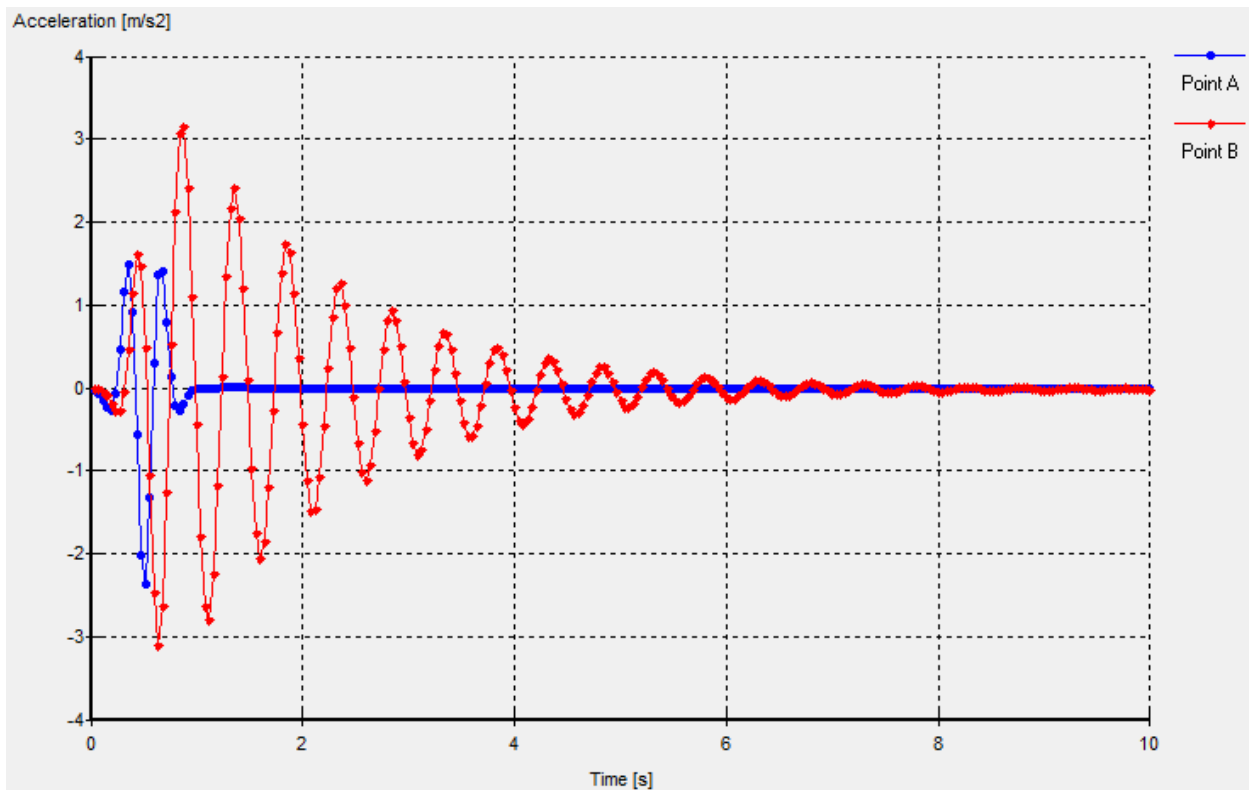
Στην περίπτωση αυτή, θεωρείται ότι ο μονοβάθμιος ταλαντωτής μάζας, εδράζεται σε άκαμπτη εδαφική στρώση, όπως είναι για παράδειγμα ένα βραχώδες υπόβαθρο. Για την προσομοίωση βραχώδους υποβάθρου, η ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος στην εδαφική στρώση λαμβάνεται ίση με $V_s= 2000m/s$. Η εδαφική στρώση διεγείρεται στη βάση της από έναν παλμό Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα $f= 2Hz$, ο οποίος μεταφέρεται σχεδόν αυτούσιος στην επιφάνεια της, άρα και στη βάση του ταλαντωτή, καθώς πρόκειται για άκαμπτη εδαφική στρώση.

Στην Εικ. 3.4 που ακολουθεί, απεικονίζεται τμήμα του μοντέλου της εδαφικής στρώσης με τον μονοβάθμιο ταλαντωτή στην επιφάνεια της. Το σημείο A ορίστηκε στη βάση του ταλαντωτή και

το σημείο B στην κορυφή του, ενώ στο Διαγρ. 3.5, φαίνονται οι χρονοϊστορίες της οριζόντιας επιτάχυνσης στα σημεία αυτά, λόγω του επιβαλλόμενου παλμού Ricker στη βάση της στρώσης.



Εικ. 3.4. Μοντέλο εδαφικής στρώσης και μονοβάθμιου ταλαντωτή – Σημεία A, B



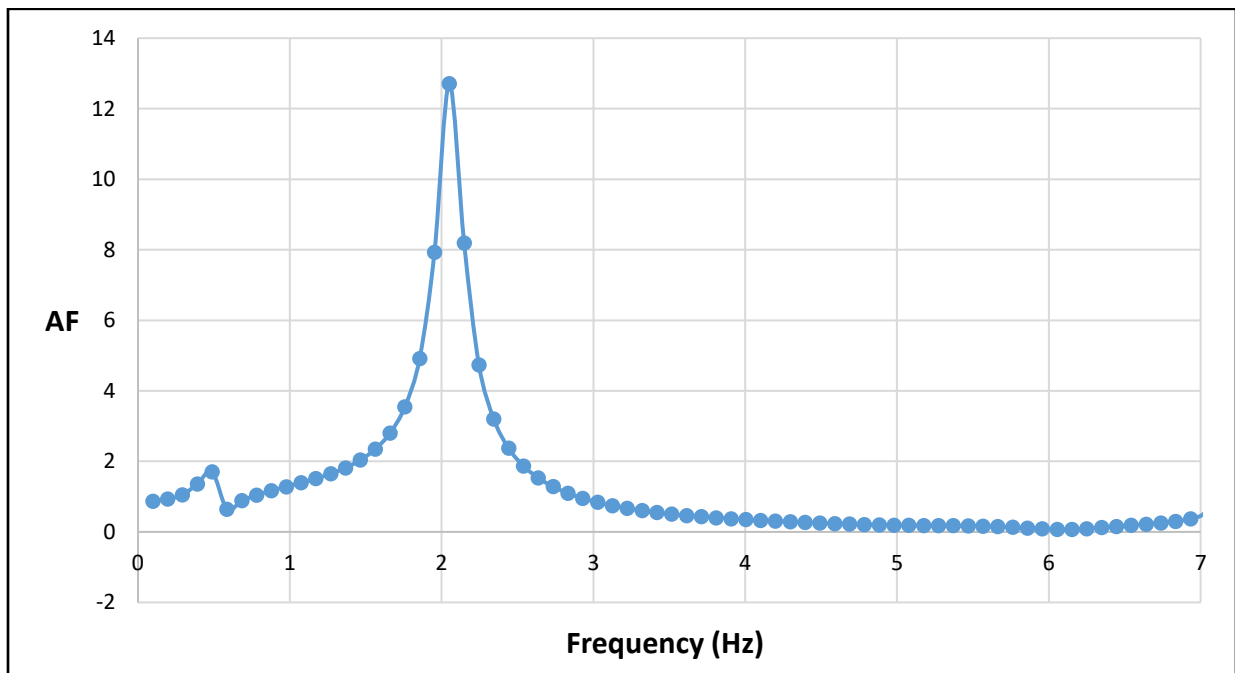
Διαγρ. 3.5. Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης στα σημεία A, B (Ricker, $f=2\text{Hz}$)

Παρατηρείται η αυτούσια μεταφορά του παλμού Ricker μέσω της άκαμπτης εδαφικής στρώσης στη βάση του ταλαντωτή (Σημείο Α). Στην κορυφή του ταλαντωτή (Σημείο Β), ο παλμός αυτός έχει μετατραπεί σε μια αρμονική διέγερση αποσβενύμενου πλάτους.

Στο σημείο αυτό θα εξεταστεί η παράμετρος της ενίσχυσης της διέγερσης, λόγω των συντονιστικών φαινομένων μεταξύ κατασκευής (ταλαντωτή) και διέγερσης. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του προσδιορισμού του συντελεστή ενίσχυσης AF στο μονοβάθμιο ταλαντωτή, για τον οποίο υπενθυμίζεται ότι:

$$AF(f) = \frac{\text{Fourier Amplitude}(f), \text{Point B}}{\text{Fourier Amplitude}(f), \text{Point A}}$$

Δηλαδή, ο συντελεστής ενίσχυσης προσδιορίζεται μέσω του μετασχηματισμού Fourier των χρονοϊστοριών της οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση και στην κορυφή του ταλαντωτή (Σημεία Α και Β αντίστοιχα). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Διαγρ. 3.6 συναρτήσεως της συχνότητας. Παρατηρείται ότι η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης για το μονοβάθμιο ταλαντωτή μεγιστοποιείται στην τιμή 12,7 για συχνότητα 2,05Hz. Η συχνότητα αυτή αποτελεί την ιδιοσυχνότητα f_c του συστήματος του μονοβάθμιου ταλαντωτή.

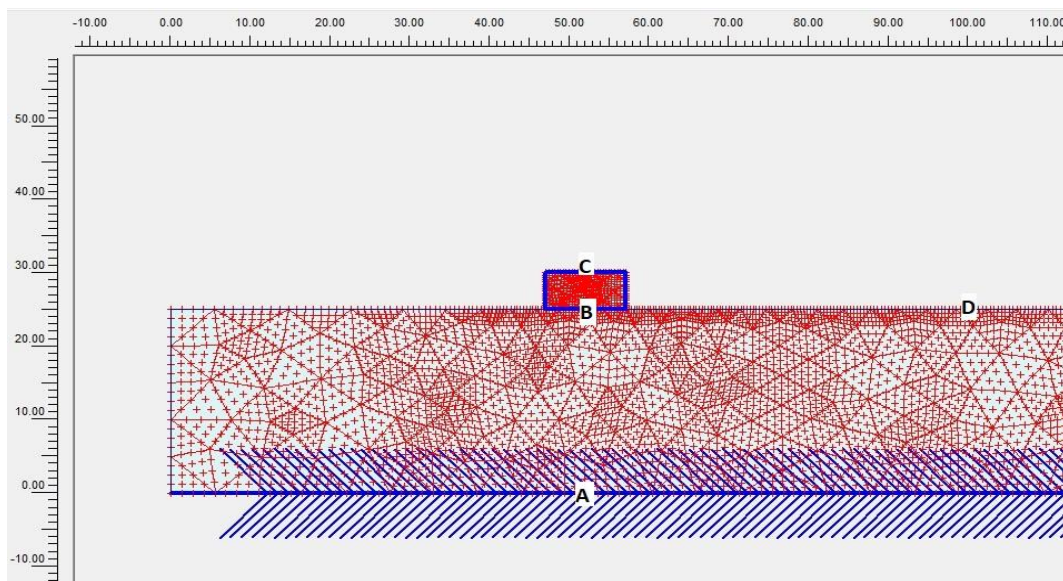


Διαγρ. 3.6. Συντελεστής ενίσχυσης AF του μονοβάθμιου ταλαντωτή συναρτήσεως της συχνότητας f

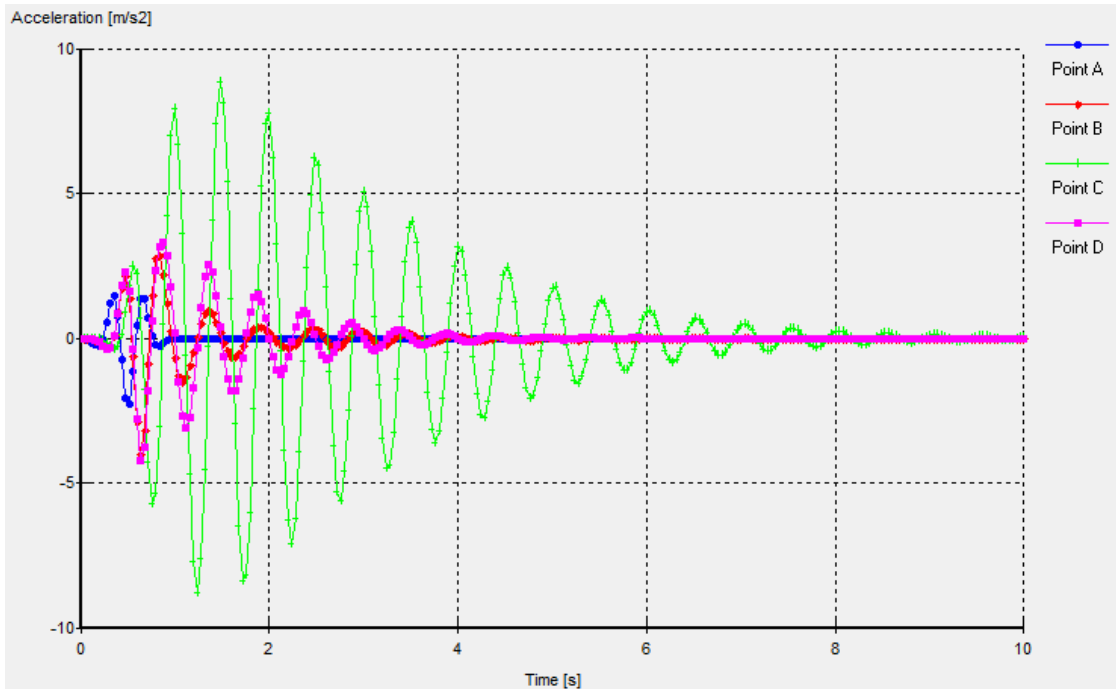
3.4.2. Εδαφικό στρώμα επί βράχου - Παλμός Ricker με $f=2\text{Hz}$

Στην περίπτωση αυτή, θεωρείται ότι ο ίδιος μονοβάθμιος ταλαντωτής εδράζεται επί εδαφικού στρώματος πάνω από βράχο και όχι επί άκαμπτης εδαφικής στρώσης, όπως στην προηγούμενη περίπτωση που εξετάστηκε. Πρόκειται για ένα οριζόντιο εδαφικό στρώμα, το οποίο έχει τα εξής χαρακτηριστικά: (α) ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος $V_s=200\text{m/s}$, (β) ειδικό βάρος $\gamma=17\text{ kN/m}^3$, (γ) λόγος Poisson $\nu=0,3$, (δ) πάχος $H=25\text{m}$ και (ε) απόσβεση υλικού $\xi=5\%$. Οι σταθερές α και β του Rayleigh παραμένουν 0,628 και 0,004 αντίστοιχα, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις.

Στη βάση του εδαφικού στρώματος επιβάλλεται ο ίδιος παλμός Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα $f=2\text{Hz}$. Στην Εικ. 3.5 που ακολουθεί, απεικονίζεται τμήμα του μοντέλου του εδαφικού στρώματος και ο μονοβάθμιος ταλαντωτής. Σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση της άκαμπτης εδαφικής στρώσης, ο επιβαλλόμενος παλμός δεν μεταφέρεται αυτούσιος στη βάση του ταλαντωτή (ή αλλιώς στην επιφάνεια του εδάφους). Η διέγερση τροποποιείται λόγω συντονιστικών φαινομένων εντός του εδαφικού στρώματος. Για το λόγο αυτό, εκτός από τα σημεία B και C στη βάση και στην κορυφή του ταλαντωτή αντίστοιχα, ορίζεται και το σημείο A στη βάση του εδαφικού στρώματος, καθώς και το σημείο D στην επιφάνεια του σε απόσταση 50m από τον ταλαντωτή. Τέλος, στο Διαγρ. 3.7 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες της οριζόντιας επιτάχυνσης στα σημεία αυτά, λόγω του επιβαλλόμενου παλμού Ricker στη βάση του εδαφικού στρώματος.

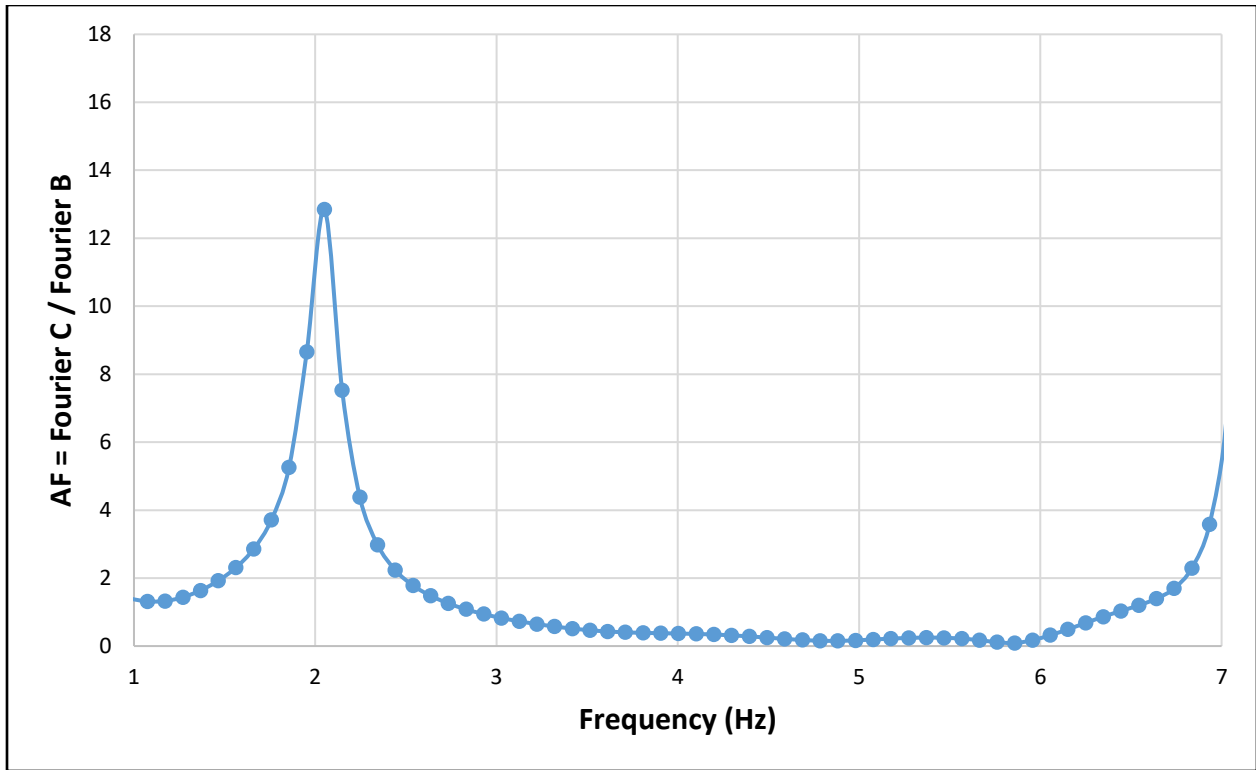


Εικ. 3.5. Μοντέλο εδαφικής στρώσης και μονοβάθμιου ταλαντωτή – Σημεία A, B, C, D

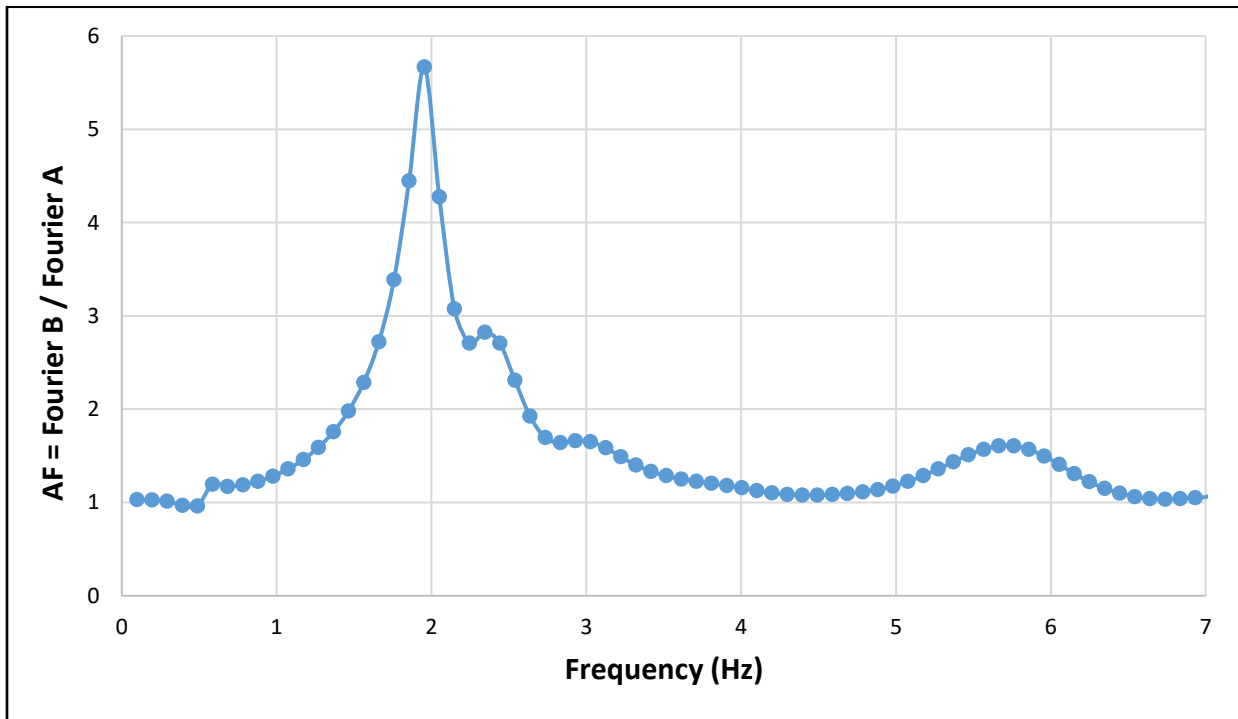


Διαγρ. 3.7. Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης στα σημεία A, B, C, D (Ricker, $f=2\text{Hz}$)

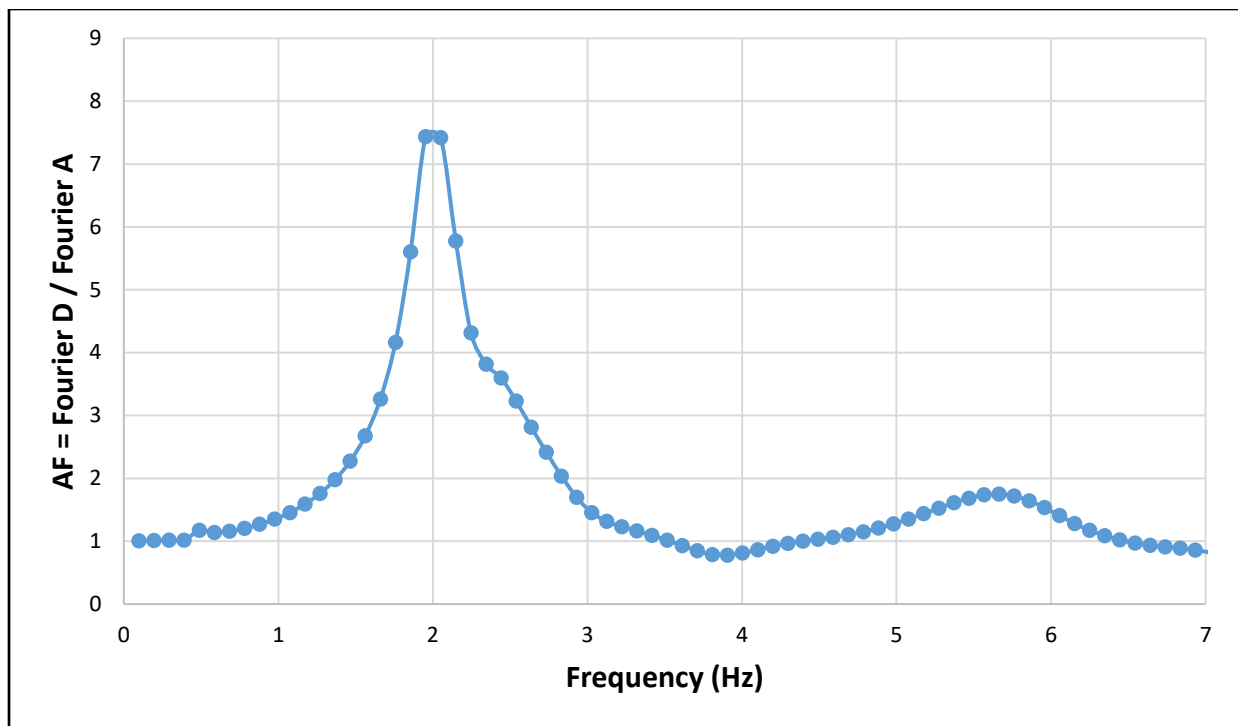
Στην περίπτωση αυτή, η παράμετρος της ενίσχυσης της διέγερσης λόγω των συντονιστικών φαινομένων εμφανίζεται τόσο στο εδαφικό στρώμα, όσο και στον ταλαντωτή. Για τον προσδιορισμό των αντίστοιχων συντελεστών ενίσχυσης AF απαιτείται ο μετασχηματισμός Fourier των φασμάτων των χρονοϊστοριών της οριζόντιας επιτάχυνσης στα σημεία A, B, C, D. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα ακόλουθα Διαγρ. 3.8, 3.9 και 3.10, στα οποία απεικονίζεται ο εκάστοτε συντελεστής ενίσχυσης AF συναρτήσει της συχνότητας.



Διαγρ. 3.8. Συντελεστής ενίσχυσης AF του μονοβάθμιου ταλαντωτή συναρτήσει της συχνότητας f



Διαγρ. 3.9. Συντελεστής ενίσχυσης AF του εδαφικού στρώματος συναρτήσει της συχνότητας f



Διαγρ. 3.10. Συντελεστής ενίσχυσης AF του εδαφικού στρώματος συναρτήσει της συχνότητας f

Σύμφωνα με το Διαγρ. 3.8, η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης για το μονοβάθμιο ταλαντωτή μεγιστοποιείται στην τιμή 12,8 για συχνότητα 2,05Hz, η οποία αποτελεί την ιδιοσυχνότητα f_c του μονοβάθμιου ταλαντωτή. Η αντίστοιχη καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης για το εδαφικό στρώμα κάτω από το μονοβάθμιο ταλαντωτή (Διαγρ. 3.9) μεγιστοποιείται στην τιμή 5,7 για συχνότητα 1,95Hz. Τέλος, η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης για το εδαφικό στρώμα σε οριζόντια απόσταση 50m από το μονοβάθμιο ταλαντωτή (Διαγρ. 3.10) μεγιστοποιείται στην τιμή 7,4 για συχνότητα 2Hz. Παρατηρείται ότι η ύπαρξη του ταλαντωτή στην επιφάνεια του εδαφικού στρώματος δρα ανασταλτικά, όσον αφορά την ενίσχυση της διέγερσης κατά τη διάδοση της εντός του στρώματος αυτού. Κλείνοντας, σημειώνεται ότι με παρόμοιο τρόπο δύναται να υπολογιστούν και τα υπόλοιπα φάσματα των συντελεστών ενίσχυσης για οποιοδήποτε συνδυασμό των σημείων A, B, C και D.

3.5. Αναλυτικοί τύποι υπολογισμού της ιδιοπεριόδου T για εδαφικό στρώμα επί βράχου

Στο σημείο αυτό υπολογίζεται η ιδιοπερίοδος του συστήματος εδάφους - θεμελίωσης - ανωδομής (ταλαντωτή) μέσω αναλυτικών λύσεων για την περίπτωση του μονοβάθμιου ταλαντωτή επί

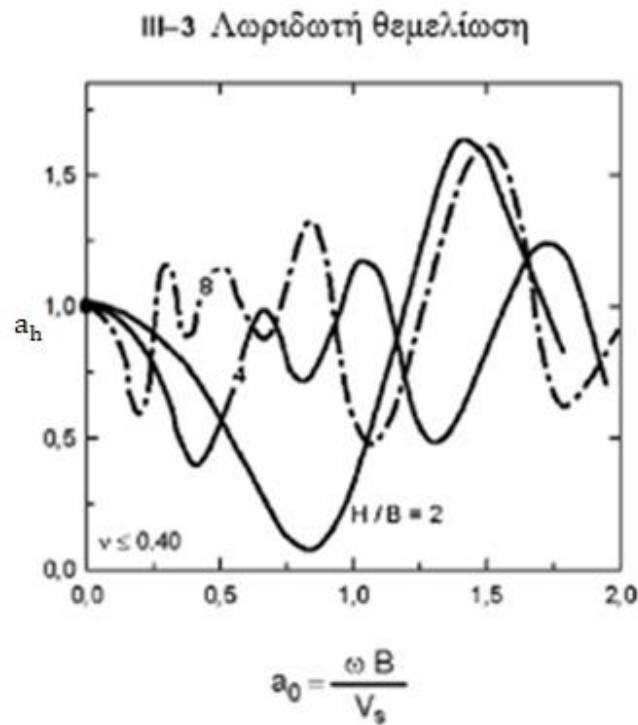
εδαφικού στρώματος πάνω από βραχώδες υπόβαθρο, η οποία εξετάστηκε με τη βοήθεια του προγράμματος PLAXIS στο προηγούμενο εδάφιο 3.4.2. . Σύμφωνα με τις αναλυτικές αυτές λύσεις το υποκείμενο έδαφος του ταλαντωτή προσομοιώνεται με τη χρήση των κατάλληλων ελατηρίων. Οι αναλυτικές λύσεις που χρησιμοποιούνται, παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας εργασίας. Υπενθυμίζεται ότι αναπτύχθηκαν από τους Gazetas (1983), Mylonakis et al. (2006) και Veletsos & Meek (1974) και βασίζονται στη χρήση διαφόρων θεωρητικών σχέσεων, διαγραμμάτων και πινάκων, ανάλογα με τον τύπο της θεμελίωσης και του εδάφους, με στόχο τον υπολογισμό των σύνθετων δυναμικών δυσκαμψιών του συστήματος εδάφους - θεμελίωσης - ανωδομής.

Υπενθυμίζονται τα χαρακτηριστικά του εδαφικού στρώματος της εξεταζόμενης περίπτωσης: (α) ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος $V_s=200\text{m/s}$, (β) ειδικό βάρος $\gamma=17\text{kN/m}^3$, (γ) λόγος Poisson $\nu=0,3$, (δ) μέτρο ελαστικότητας $E=180400\text{kN/m}^2$, (ε) πάχος $H=25\text{m}$, (στ) απόσβεση υλικού $\xi=5\%$, καθώς και τα χαρακτηριστικά του μονοβάθμιου ταλαντωτή: (α) μάζα $m=10\text{tn}$, (β) ύψος $h=5\text{m}$, (γ) ιδιοσυχνότητα $f_c=2,05\text{Hz}$, (δ) απόσβεση υλικού $\xi=5\%$, (ε) συντελεστής ακαμψίας $k=1664,57\text{ kN/m}$.

Όπως έχει ήδη τονισθεί, το PLAXIS αποτελεί ένα δισδιάστατο πρόγραμμα και η επεξεργασία και ανάλυση του μοντέλου πραγματοποιείται σε μία τομή του. Κάτι τέτοιο συνεπάγεται ότι το μήκος του μοντέλου κατά τον τρίτο άξονα, λαμβάνεται από το πρόγραμμα ίσο με 1m. Με άλλα λόγια, ο έλεγχος από το πρόγραμμα πραγματοποιείται ανά τρέχον μέτρο μήκους. Για το λόγο αυτό, θεωρείται ότι η θεμελίωση του μοντέλου που εξετάζεται, είναι λωριδωτή με πλευρά $2B=10\text{m}$. Επομένως, οι αναλυτικοί τύποι και παράμετροι υπολογισμού των σύνθετων δυναμικών δυσκαμψιών και της ιδιοπεριόδου του συστήματος που χρησιμοποιούνται, είναι εκείνοι που παρουσιάστηκαν στο εδάφιο 2.3.3B και αφορούν την περίπτωση άκαμπτης λωριδωτής θεμελίωσης σε εδαφικό στρώμα επί βράχου (Πιν. 3.1, Σχ. 3.1).

Είδος φόρτισης	Στατική Δυσκαμψία	Εύρος ακρίβειας	Εδαφικό προφίλ
Κατακόρυφη	$K_v = \frac{1.23G}{1-\nu} \left(1 + 3.5 \frac{B}{H} \right)$	$1 \leq H/B \leq 10$	
Οριζόντια	$K_h = \frac{2.1G}{2-\nu} \left(1 + 2 \frac{B}{H} \right)$	$1 \leq H/B \leq 8$	
Περιστροφική	$K_r = \frac{\pi G B^2}{2(1-\nu)} \left(1 + \frac{1}{5} \frac{B}{H} \right)$	$1 \leq H/B \leq 3$	

Πιν. 3.1. Στατικές δυσκαμψίες για άκαμπτη λωριδωτή θεμελίωση σε στρώμα επί εδάφους (Gazetas, 1983)



Σχ. 3.1. Γράφημα για τον υπολογισμό των δυναμικών συντελεστών δυσκαμψίας λωριδωτού θεμελίου (Mylonakis et al., 2006)

Στο συγκεκριμένο μοντέλο θεωρούνται συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης (plain strain) και συνεπώς η δισδιάστατη ανάλυση είναι επαρκής για τον υπολογισμό της απόκρισης του θεμελίου. Για το λόγο αυτό, κατά τους υπολογισμούς αμελείται η στατική δυσκαμψία που αντιστοιχεί σε στρεπτική φόρτιση, καθώς περιλαμβάνει κινήσεις εκτός του επιπέδου (out - of - plane). Επίσης, η επιβαλλόμενη διέγερση στο μοντέλο είναι οριζόντια. Για αυτό παραλείπεται και η στατική

δυσκαμψία που αντιστοιχεί σε κατακόρυφη φόρτιση. Επομένως, οι μοναδικές κινήσεις του σύνθετου συστήματος που εν τέλει λαμβάνονται υπόψη είναι η οριζόντια και η περιστροφική. Γενικά, η δυναμική δυσκαμψία των μετακινησιακών και στρωφικών βαθμών ελευθερίας εκφράζεται αντιστοίχως, από τις εξής σχέσεις:

$$k_j = \alpha_j * K_{st,j}$$

όπου $j=h$ ή r για οριζόντια και περιστροφική φόρτιση αντίστοιχα, α είναι ο αντίστοιχος αδιάστατος δυναμικός συντελεστής και K_{st} είναι η αντίστοιχη στατική δυσκαμψία από τον Πιν. 3.1.

Όσον αφορά την οριζόντια κίνηση, η στατική δυσκαμψία υπολογίζεται σύμφωνα με τον Πιν. 3.1 (Gazetas, 1983) μέσω της σχέσης:

$$K_{h,st} = \frac{2,1 * G}{2 - \nu} * \left(1 + 2 * \frac{B}{H}\right) = \frac{2,1 * 69320}{2 - 0,3} * \left(1 + 2 * \frac{5}{25}\right) = 119987 \text{ kN/m}^2$$

όπου G το μέτρο διάτμησης και υπολογίζεται από τη σχέση $G = \rho * V_s^2 = 1,773 * 200^2 = 69320 \text{ kN/m}^2$.

Ο δυναμικός συντελεστής της οριζόντιας κίνησης δίνεται από το Σχ. 3.1 (Mylonakis et al., 2006) συναρτήσει της αδιάστατης συχνότητας α_0 . Παρατηρείται ότι για αδιάστατη συχνότητα $\alpha_0 = \omega * B/V_s = 2 * \pi * 2,05/200 = 0,322$, προκύπτει συντελεστής ίσος με $\alpha_h \approx 0,8$.

Επομένως, η οριζόντια δυναμική δυσκαμψία του συστήματος ισούται με:

$$K_h = \alpha_h * K_{h,st} = 0,8 * 119987 = 95990 \text{ kN/m}^2$$

Αντίστοιχα, υπολογίζεται και η περιστροφική δυναμική δυσκαμψία του συστήματος. Αρχικά η περιστροφική στατική δυσκαμψία υπολογίζεται σύμφωνα με τον Πιν. 3.1 (Gazetas, 1983) μέσω της σχέσης:

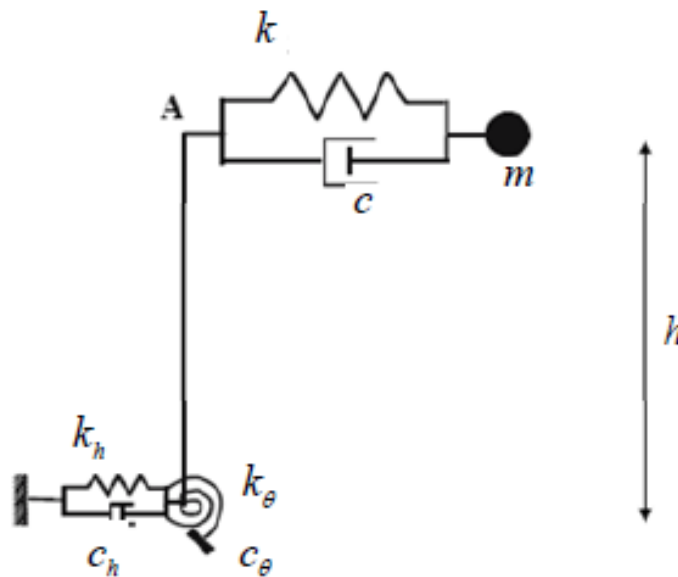
$$K_{r,st} = \frac{\pi * G * B^2}{2 * (1 - \nu)} * \left(1 + 0,2 * \frac{B}{H}\right) = \frac{\pi * 69320 * 5^2}{2 * (1 - 0,3)} * \left(1 + 0,2 * \frac{5}{25}\right) = 4044397 \text{ kN/m}^2$$

Ο δυναμικός συντελεστής της περιστροφικής κίνησης, σύμφωνα με τον Mylonakis et al. (2006) δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση $\alpha_r = 1 - 0,2 * \alpha_0 = 1 - 0,2 * 0,322 = 0,9356$.

Επομένως, η περιστροφική δυναμική δυσκαμψία του συστήματος ισούται με:

$$K_r = \alpha_r * K_{r,st} = 0,9356 * 4044397 = 3783938 \text{ kN/m}^2$$

Σύμφωνα με τους Veletsos & Meek (1974) το εξιδανικευμένο προσομοίωμα που χρησιμοποιείται για τη μελέτη της αλληλεπίδρασης εδάφους - κατασκευής είναι αυτό που φαίνεται στην Εικ. 3.6.



Εικ. 3.6. Εξιδανικευμένο προσομοίωμα για τη μελέτη της αλληλεπίδρασης εδάφους – κατασκευής (Veletsos & Meek, 1974)

Ο στόχος αυτής της προσομοίωσης είναι η σύνδεση των ιδιοτήτων, και πιο συγκεκριμένα της ιδιοπεριόδου, του πλήρους συστήματος εδάφους - κατασκευής \bar{T} με την ιδιοπερίοδο της πακτωμένης κατασκευής T , ώστε να γίνει δυνατός ο υπολογισμός της επίδρασης του φαινομένου στην δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής. Αυτή η σύνδεση εκφράζεται από την ακόλουθη εξίσωση (Veletsos et al, 1974, 1975 1977):

$$\bar{T} = T * \sqrt{1 + \frac{k}{k_h} + \frac{k * h^2}{k_r}} = \frac{1}{2,05} * \sqrt{1 + \frac{1664,57}{95990} + \frac{1664,57 * 5^2}{3783938}} \rightarrow \bar{T} = 0,494 \text{ sec}$$

$$\rightarrow \bar{f} = 2,024 \text{ sec}$$

3.6. Σύνοψη

Συμπεραίνεται λοιπόν, ότι αναπτύσσονται φαινόμενα δυναμικής αλληλεπίδρασης στο σύστημα εδάφους - θεμελίωσης - ανωδομής για την περίπτωση διέγερσης ταλαντωτή που βρίσκεται επί εδαφικής στρώσης πάνω από βραχώδες υπόβαθρο. Η παρουσία της εύκαμπτης εδαφικής στρώσης επηρεάζει σημαντικά τις ιδιότητες του συστήματος, καθώς παρατηρείται μία μεταβολή της ιδιοσυχνότητας της τάξης του 1,3% για τη συγκεκριμένη περίπτωση που εξετάστηκε. Μία τέτοια μεταβολή μπορεί να αποδειχθεί καθοριστικής σημασίας, για παράδειγμα σε μία ανεμογεννήτρια, όπου τα επιτρεπτά όρια διακύμανσης της ιδιοσυχνότητας του πύργου, του ρότορα και των πτερυγίων της είναι ιδιαίτερα χαμηλά για την αποφυγή συντονιστικών φαινομένων.

Πιθανή παράλειψη της εξέτασης των ιδιοτήτων του εδάφους και της θεμελίωσης της κατασκευής στην απόκριση του σύνθετου συστήματος δύναται να οδηγήσει σε σημαντικά σφάλματα και σε πιθανούς κινδύνους. Με άλλα λόγια, η συνηθισμένη παραδοχή συνθηκών πάκτωσης στη βάση της επιφανειακής θεμελίωσης μιας κατασκευής δεν είναι πάντοτε σωστή. Μια τέτοιου είδους παραδοχή είναι πολύ κοντά στην πραγματικότητα, μόνο για την περίπτωση άκαμπτης θεμελίωσης σε σκληρό έδαφος. Αντίθετα, στην περίπτωση εύκαμπτων μαλακών εδαφικών στρώσεων επιβάλλεται να ληφθεί υπόψη η δυναμική αλληλεπίδραση του συστήματος εδάφους - θεμελίωσης - ανωδομής για την εξαγωγή ορθότερων και ακριβέστερων αποτελεσμάτων.

4. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

4.1. Εισαγωγή

Στο προηγούμενο Κεφάλαιο απεδείχθη η ανάπτυξη φαινομένων δυναμικής αλληλεπίδρασης στο σύστημα εδάφους - θεμελίωσης - ανωδομής για την περίπτωση διέγερσης ταλαντωτή, ο οποίος θεμελιώνεται επιφανειακά σε εδαφική στρώση πάνω από βραχώδες υπόβαθρο. Η αλληλεπίδραση αυτή οδηγεί σε μεταβολή των ιδιοτήτων του συστήματος, και πιο συγκεκριμένα της ιδιοσυχνότητας του. Όπως αναφέρθηκε, μια τέτοια μεταβολή μπορεί να αποβεί καθοριστική για την ασφαλή λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας, λόγω του κινδύνου δημιουργίας συντονιστικών φαινομένων μεταξύ των μελών της, δηλαδή του πύργου, του ρότορα και των πτερυγίων της.

Πιθανή παράλειψη της εξέτασης των ιδιοτήτων του εδάφους και της θεμελίωσης ισοδυναμεί με τη θεώρηση συνθηκών πάκτωσης στη βάση της ανεμογεννήτριας. Ωστόσο, η θεώρηση αυτή είναι κοντά στην πραγματικότητα μόνο για την περίπτωση άκαμπτης θεμελίωσης σε σκληρό έδαφος. Για μαλακό έδαφος θεμελίωσης και υψίσυχνα συστήματα, η παραδοχή αυτή μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικό σφάλμα. Στις περιπτώσεις αυτές, και ιδιαίτερα κάτω από δυναμικές συνθήκες φόρτισης, η αλληλεπίδραση εδάφους - κατασκευής έχει ιδιαίτερη σημασία και μεταβάλλει ουσιαστικά τα χαρακτηριστικά του ιδιοσυστήματος της υπερκατασκευής και συνεπώς την απόκριση της.

Στο παρόν Κεφάλαιο πραγματοποιείται η αριθμητική διερεύνηση για την περίπτωση μιας τυπικής ανεμογεννήτριας με ισχύ 800kW που υποβάλλεται σε σεισμική διέγερση, με τη χρήση του προγράμματος PLAXIS, όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στα πλαίσια της διερεύνησης αυτής, εξετάστηκαν διάφορες περιπτώσεις επιφανειακής θεμελίωσης της ανεμογεννήτριας επί εδαφικού στρώματος πεπερασμένου πάχους πάνω από βράχο. Ελέχθησαν διάφορα πάχη του εδαφικού στρώματος, αλλά και διάφοροι τύποι εδαφικών υλικών, ανάλογα με την ταχύτητα του διατμητικού κύματος V_s .

Στόχος της προκείμενης μελέτης αποτελεί ο έλεγχος της επιρροής των παραμέτρων του πάχους H και της ταχύτητας του διατμητικού κύματος V_s του εδαφικού στρώματος στη μεταβολή της ιδιοσυχνότητας του συστήματος εδάφους – θεμελίωσης – ανωδομής και κατά πόσο τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζουν απόκλιση από την περίπτωση θεώρησης πάκτωσης στη βάση της ανεμογεννήτριας. Επίσης, συγκρίνονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης μέσω του

PLAXIS με αυτά που προκύπτουν από τους αναλυτικούς τύπους που πρότειναν οι Gazetas (1983), Mylonakis et al. (2006), Veletsos & Meek (1974), τα οποία παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας εργασίας.

4.2. Χαρακτηριστικά μοντέλου ανεμογεννήτριας

Η ανεμογεννήτρια που επιλέχθηκε να εξεταστεί, είναι μια ανεμογεννήτρια με ισχύ 800kW. Το ύψος του πυλώνα, ή αλλιώς η απόσταση του άξονα του ρότορα από την επιφάνεια του εδάφους, είναι 50m. Η διάμετρος του ρότορα είναι και αυτή 50m, ενώ η μάζα του ισούται με 32tn. Το βάρος του πύργου (εκτός του ρότορα) αμελείται και ο πύργος είναι κατασκευασμένος από χάλυβα. Τέλος, η ιδιοσυχνότητα του πυλώνα της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας θεωρείται ίση με $f_c=0,8\text{Hz}$ ή αντίστοιχα η ιδιοπερίοδος ίση με $T_c=1,25\text{sec}$.

Για να μελετηθεί η ανεμογεννήτρια αυτή και να πραγματοποιηθούν οι διάφορες αναλύσεις, προσομοιώνεται μέσω ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή μάζας, ο οποίος θεμελιώνεται επιφανειακά είτε σε άκαμπτη εδαφική στρώση (βράχο), είτε σε εδαφική στρώση επί βραχώδους υποβάθρου. Η περίπτωση της άκαμπτης (πολύ σκληρής) εδαφικής στρώσης ισοδυναμεί με την περίπτωση θεώρησης πάκτωσης στη βάση της ανεμογεννήτριας.

Ο θεωρούμενος μονοβάθμιος ταλαντωτής έχει μάζα ίση με $m=32\text{tn}$ (ή βάρος $W=320\text{kN}$), ύψος $h=50\text{m}$ και ιδιοσυχνότητα $f_c=0,8\text{Hz}$, ενώ η απόσβεση στο έδαφος και στον ταλαντωτή θεωρείται ίση με 2%. Όπως έχει ήδη τονισθεί, η απόσβεση του υλικού λαμβάνεται υπόψη στις αναλύσεις μέσω των σταθερών του Rayleigh. Για απόσβεση υλικού $\xi=2\%$ και ιδιοπερίοδο $T=1,25\text{ sec}$, οι σταθερές α και β του Rayleigh προκύπτουν ίσες με 0,101 και 0,004 αντίστοιχα, τόσο για την εδαφική στρώση όσο και για τον ταλαντωτή.

Ο συντελεστής ακαμψίας του πακτωμένου μονοβάθμιου ταλαντωτή υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$k = \frac{4 * \pi^2 * m}{T_c^2} = \frac{4 * \pi^2 * 32}{1,25^2} = 808,52 \text{ kN/m}$$

Όσον αφορά την υποκείμενη εδαφική στρώση, λαμβάνονται κάθε φορά οι εξής ιδιότητες: (α) ειδικό βάρος $\gamma=17\text{kN/m}^3$, (β) λόγος Poisson $\nu=0,3$, (γ) απόσβεση υλικού $\xi=2\%$ (σταθερές

Rayleigh $\alpha= 0,101$ και $\beta= 0,004$), ενώ εξετάζονται διάφορες περιπτώσεις για το πάχος H της στρώσης και την ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος V_s . Πιο συγκεκριμένα, εξετάζονται πέντε διαφορετικά πάχη H της εδαφικής στρώσης κατά τη διάρκεια των αναλύσεων, τα οποία είναι τα 2m, 5m, 10m, 20m και 40m. Αντίστοιχα, οι ταχύτητες διάδοσης του διατμητικού κύματος V_s στην εδαφική στρώση που ελέγχονται είναι οι 40m/sec, 60m/sec, 80m/sec, 110m/sec, 160m/sec, 240m/sec και 600m/sec. Με τον τρόπο αυτό καλύπτεται ένα μεγάλο εύρος περιπτώσεων εδαφικού υλικού στο μοντέλο της ανάλυσης, ξεκινώντας από την περίπτωση πολύ μαλακής και χαλαρής αργίλου, φτάνοντας μέχρι την περίπτωση πυκνής άμμου και ημι-βράχου. Από την ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος V_s , πραγματοποιείται ο υπολογισμός του μέτρου διάτμησης G του εδαφικού υλικού μέσω της σχέσης $G = \rho * V_s^2$, όπου ρ είναι η πυκνότητα του εδάφους. Στον Πιν. 4.1 που ακολουθεί, φαίνεται η κατηγοριοποίηση των εδαφικών υλικών ανάλογα την ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος V_s .

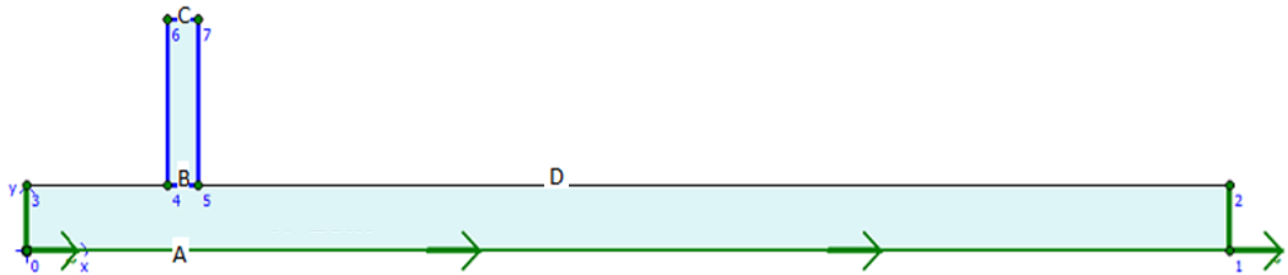
Υλικό	Ταχύτητα V_s
πολύ μαλακή άργιλος	<100
πολύ χαλαρή άργιλος	150
μαλακή άργιλος	100 - 200
μέτριας πυκνότητας πυκνή άργιλος	200 - 300
σκληρή άργιλος	250 - 350
πυκνή άμμος	400
ημί-βράχος	600 - 800
βράχος	>1200

Πιν. 4.1. Κατηγοριοποίηση εδαφικών υλικών ανάλογα την ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος V_s

Όπως έχει ήδη τονισθεί, προκειμένου να προκύψει μία πιο ολοκληρωμένη και πιο αντιπροσωπευτική εικόνα της απόκρισης ενός μοντέλου, κρίνεται σκόπιμη η φόρτιση του με ένα σύνολο αρμονικών διεγέρσεων διαφόρων μορφών, ευρών, συχνοτήτων και αριθμών κύκλων. Αυτός ο συνδυασμός περιπτώσεων μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ενός χαρακτηριστικού παλμού, όπως είναι ο παλμός Ricker. Για το λόγο αυτό, επιλέγεται η διέγερση της εδαφικής στρώσης κάθε μοντέλου στη βάση της από έναν παλμό Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα $f= 0,5\text{Hz}$ και μεγιστοποίηση της τιμής του τη χρονική στιγμή $t_0= 2,5\text{sec}$.

4.3. Διαδικασία αριθμητικών και αναλυτικών διερευνήσεων

Η διαδικασία της αριθμητικής διερεύνησης των διαφόρων μοντέλων που ακολουθείται στις διάφορες αναλύσεις που πραγματοποιούνται, είναι όμοια με εκείνη που παρουσιάστηκε κατά τη διάρκεια των προκαταρκτικών αναλύσεων του προηγούμενου Κεφαλαίου της παρούσας εργασίας. Όπως έχει ήδη γίνει γνωστό, στα πλαίσια της μοντελοποίησης της ανεμογεννήτριας στο πρόγραμμα PLAXIS, ο μονοβάθμιος ταλαντωτής προσομοιώνεται ως ένας πλαισιακός φορέας ύψους 50m και μήκους 10m. Το έδαφος στην πραγματικότητα θεωρείται ένα ημι-άπειρο μέσο, χωρίς πεπερασμένη έκταση στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση. Για να αποφευχθεί το φαινόμενο του “box effect”, κατά το οποίο η ενέργεια του συστήματος παγιδεύεται εντός των συνόρων και διαστρεβλώνει τα δυναμικά του χαρακτηριστικά, ορίζονται απορροφητικά σύνορα ακτινοβολίας στη βάση, το δεξί και το αριστερό σύνορο της εδαφικής στρώσης. Τα σύνορα αυτά απορροφούν την ενέργεια ακτινοβολίας του συστήματος και δεν την παγιδεύουν εντός του μοντέλου. Στην Εικ. 4.1 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η γεωμετρία και οι συνοριακές συνθήκες του μοντέλου του μονοβάθμιου ταλαντωτή που εξετάζεται.



Εικ. 4.1. Μοντέλο μονοβάθμιου ταλαντωτή

Ορίζονται τέσσερα σημεία σε κομβικές θέσεις του μοντέλου. Το σημείο A ορίζεται στη βάση της εδαφικής στρώσης, το σημείο B στη βάση του ταλαντωτή (ή αλλιώς στην επιφάνεια της εδαφικής στρώσης), το σημείο C στην κορυφή του ταλαντωτή και το σημείο D στην επιφάνεια του εδάφους και σε μακρινή απόσταση από τον ταλαντωτή (100m).

Μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS υπολογίζονται οι χρονοϊστορίες της οριζόντιας επιτάχυνσης a_x στα σημεία A, B, C και D, που οφείλονται στον επιβαλλόμενο παλμό Ricker στη βάση του εδαφικού στρώματος. Στη συνέχεια, με τη χρήση του λογισμικού SeismoSignal της SeismoSoft εξάγονται τα φάσματα Fourier για τα σημεία αυτά μέσω του

μετασχηματισμού Fourier (Fast Fourier Transformation - FFT) των αντιστοιχών φασμάτων χρονοϊστορίας της οριζόντιας επιτάχυνσης. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός του συντελεστή ενίσχυσης AF λόγω της δημιουργίας συντονιστικών φαινομένων στο σύστημα, καθώς και ο προσδιορισμός της ιδιοσυχνότητας του στο σημείο μεγιστοποίησης του συντελεστή αυτού. Υπενθυμίζεται ότι ο συντελεστής ενίσχυσης AF συναρτήσει της συχνότητας f προκύπτει με διαίρεση των τιμών του μετασχηματισμού Fourier στην κορυφή προς τις αντίστοιχες τιμές του μετασχηματισμού Fourier στη βάση. Στην προκειμένη περίπτωση αναλύσεων, η διαφοροποιούμενη ιδιοσυχνότητα του σύνθετου συστήματος, λόγω της θεμελίωσης σε εύκαμπτη εδαφική στρώση επί βράχου, καθορίζεται από τα σημεία στη βάση και την κορυφή του μονοβάθμιου ταλαντωτή (σημεία B και C αντίστοιχα). Δηλαδή:

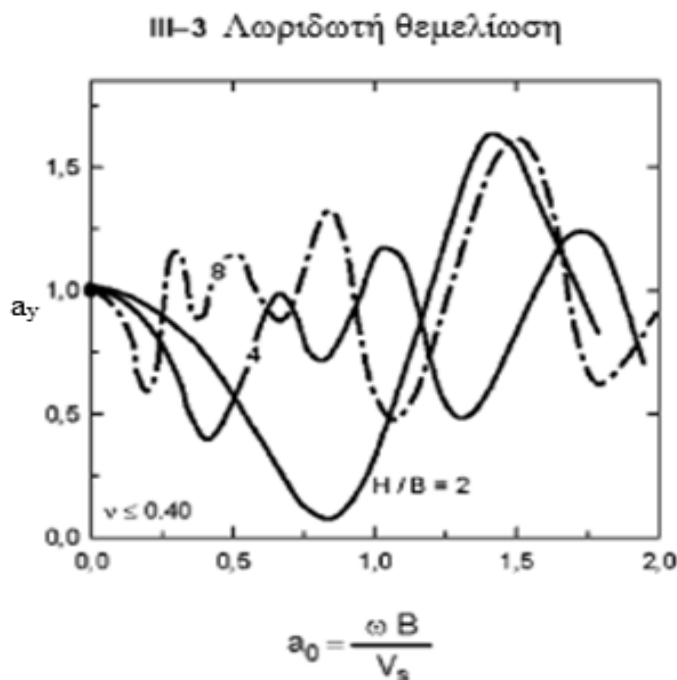
$$AF(f) = \frac{\text{Fourier Amplitude}(f), \text{Point C}}{\text{Fourier Amplitude}(f), \text{Point B}}$$

Τέλος, για κάθε περίπτωση μοντέλου που εξετάζεται, υπολογίζεται η τιμή της ιδιοσυχνότητας του συστήματος εδάφους - θεμελίωσης - ανωδομής μέσω αναλυτικών λύσεων και συγκρίνεται με την αντίστοιχη τιμή που προέκυψε κατά την αριθμητική επίλυση μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων. Σύμφωνα με τις αναλυτικές αυτές λύσεις το υποκείμενο έδαφος του ταλαντωτή προσομοιώνεται με τη χρήση κατάλληλων ελατηρίων. Οι αναλυτικές λύσεις που χρησιμοποιούνται, παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας εργασίας και αναπτύχθηκαν από τους Gazetas (1983), Mylonakis et al. (2006) και Veletsos & Meek (1974). Βασίζονται στη χρήση διαφόρων θεωρητικών σχέσεων, διαγραμμάτων και πινάκων, ανάλογα με τον τύπο της θεμελίωσης και του εδάφους, με στόχο τον υπολογισμό των σύνθετων δυναμικών δυσκαμψιών του συστήματος εδάφους - θεμελίωσης - ανωδομής.

Το PLAXIS αποτελεί ένα δισδιάστατο πρόγραμμα ανάλυσης. Επομένως, η έκταση του μοντέλου της ανεμογεννήτριας στην κάθετη διεύθυνση στο επίπεδο που μελετάται, δεν δύναται να προσδιοριστεί. Για το λόγο αυτό, θεωρείται ότι η θεμελίωση του μοντέλου είναι λωριδωτή με πλευρά $2B=10\text{m}$. Έτσι, επιλέγεται η χρήση των αναλυτικών τύπων και παραμέτρων υπολογισμού των σύνθετων δυναμικών δυσκαμψιών και της ιδιοπεριόδου του συστήματος, που αντιστοιχούν στην περίπτωση άκαμπτης λωριδωτής θεμελίωσης σε εδαφικό στρώμα επί βράχου (Πιν. 4.2, Σχ. 4.1) (εδάφιο 2.3.3B).

Είδος φόρτισης	Στατική Δυσκαμψία	Εύρος ακρίβειας	Εδαφικό προφίλ
Κατακόρυφη	$K_v = \frac{1.23G}{1-\nu} \left(1 + 3.5 \frac{B}{H}\right)$	$1 \leq H/B \leq 10$	
Οριζόντια	$K_h = \frac{2.1G}{2-\nu} \left(1 + 2 \frac{B}{H}\right)$	$1 \leq H/B \leq 8$	
Περιστροφική	$K_r = \frac{\pi G B^2}{2(1-\nu)} \left(1 + \frac{1}{5} \frac{B}{H}\right)$	$1 \leq H/B \leq 3$	

Πιν. 4.2. Στατικές δυσκαμψίες για άκαμπτη λωριδωτή θεμελίωση σε στρώμα επί εδάφους (Gazetas, 1983)



Σχ. 4.1. Γράφημα για τον υπολογισμό των δυναμικών συντελεστών δυσκαμψίας λωριδωτού θεμελίου (Mylonakis et al., 2006)

Λόγω της διδιάστατης ανάλυσης του μοντέλου, είναι επαρκής η θεώρηση συνθηκών επίπεδης παραμόρφωσης για τον υπολογισμό της απόκρισης του θεμελίου. Για το λόγο αυτό, κατά τους υπολογισμούς αμελείται η στατική δυσκαμψία που αντιστοιχεί σε στρεπτική φόρτιση, καθώς περιλαμβάνει κινήσεις εκτός του επιπέδου. Επίσης, η επιβαλλόμενη διέγερση στο μοντέλο είναι οριζόντια και έτσι μπορεί να αμεληθεί και η στατική δυσκαμψία που αντιστοιχεί σε κατακόρυφη

φόρτιση. Επομένως, οι μοναδικές κινήσεις του σύνθετου συστήματος που τελικά λαμβάνονται υπόψη από τον ανωτέρω Πιν. 4.2 είναι η οριζόντια και η περιστροφική.

Γενικά, η δυναμική δυσκαμψία των μετακινησιακών και στροφικών βαθμών ελευθερίας εκφράζεται από τη σχέση:

$$k_j = \alpha_j * K_{st,j}$$

όπου $j = h$ ή r για οριζόντια και περιστροφική κίνηση αντίστοιχα, α είναι ο αντίστοιχος αδιάστατος δυναμικός συντελεστής και K_{st} είναι η αντίστοιχη στατική δυσκαμψία που δίνεται από τον Πιν. 4.2.

Τέλος, σύμφωνα με τους Veletsos & Meek (1974) χρησιμοποιείται ένα εξιδανικευμένο προσομοίωμα μονοβάθμιου ταλαντωτή πακτωμένου στη βάση του, με στόχο τη σύνδεση της ιδιοπεριόδου του σύνθετου συστήματος εδάφους - κατασκευής \bar{T} , με την ιδιοπερίοδο της πακτωμένης κατασκευής T . Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατή η ποσοτικοποίηση της αλληλεπίδρασης εδάφους - κατασκευής στη δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής. Αυτή η σύνδεση εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση (Veletsos et al., 1974, 1975, 1977):

$$\bar{T} = T * \sqrt{1 + \frac{k}{k_h} + \frac{k * h^2}{k_r}}$$

όπου k ο συντελεστής ακαμψίας του μονοβάθμιου πακτωμένου ταλαντωτή, k_h η οριζόντια δυναμική δυσκαμψία του σύνθετου συστήματος και k_r η περιστροφική δυναμική δυσκαμψία του σύνθετου συστήματος.

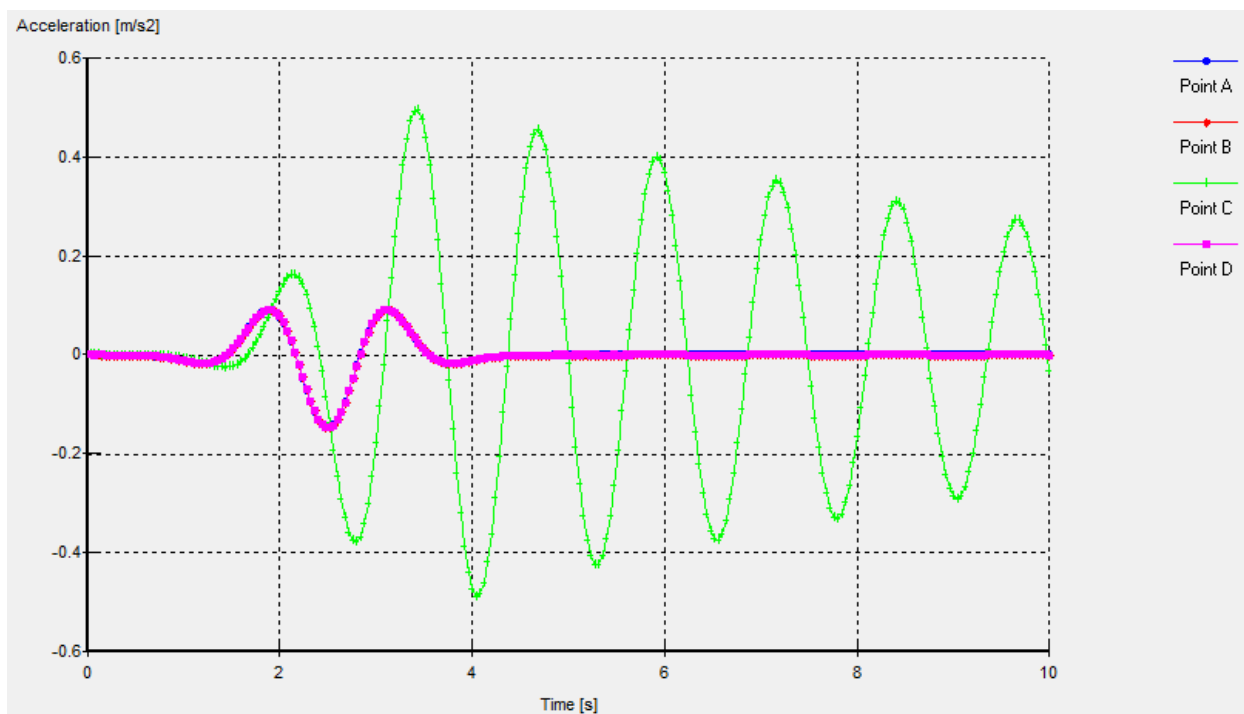
4.4. Αποτελέσματα διερευνήσεων

4.4.1. Μοντέλο ταλαντωτή σε άκαμπτη εδαφική στρώση με πάχος $H=20m$

Αρχικά εξετάζεται η περίπτωση έδρασης του μονοβάθμιου ταλαντωτή επί άκαμπτης εδαφικής στρώσης. Ένα τέτοιο είδος εδάφους είναι ο βράχος. Στην ουσία μελετάται η περίπτωση πάκτωσης στη βάση της ανεμογεννήτριας. Για την προσομοίωση βραχώδους υποβάθρου, η ταχύτητα

διάδοσης του διατμητικού κύματος στην εδαφική στρώση λαμβάνεται ίση με $V_S=2000\text{m/s}$, ενώ το πάχος της εδαφικής στρώσης επιλέγεται ίσο με $H=20\text{m}$, χωρίς ωστόσο αυτό να έχει ιδιαίτερη σημασία στα αποτελέσματα της συγκεκριμένης περίπτωσης μελέτης. Οι ιδιότητες του μονοβάθμιου ταλαντωτή είναι αυτές που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Υπενθυμίζεται ότι η ιδιοσυχνότητα του είναι $f_c=0,8\text{Hz}$.

Η εδαφική στρώση διεγείρεται στη βάση της από τον παλμό Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα $f=0,5\text{Hz}$, ο οποίος μεταφέρεται σχεδόν αυτούσιος στην επιφάνεια της, άρα και στη βάση του ταλαντωτή, καθώς πρόκειται για άκαμπτη εδαφική στρώση. Αυτό αποδεικνύεται και από το Διαγρ. 4.1, στο οποίο οι χρονοϊστορίες της οριζόντιας επιτάχυνσης a_x των σημείων στη βάση (σημείο A) και στην κορυφή (σημεία B και D) του εδάφους ταυτίζονται απόλυτα, με αποτέλεσμα να μην ξεχωρίζει η μία από την άλλη.

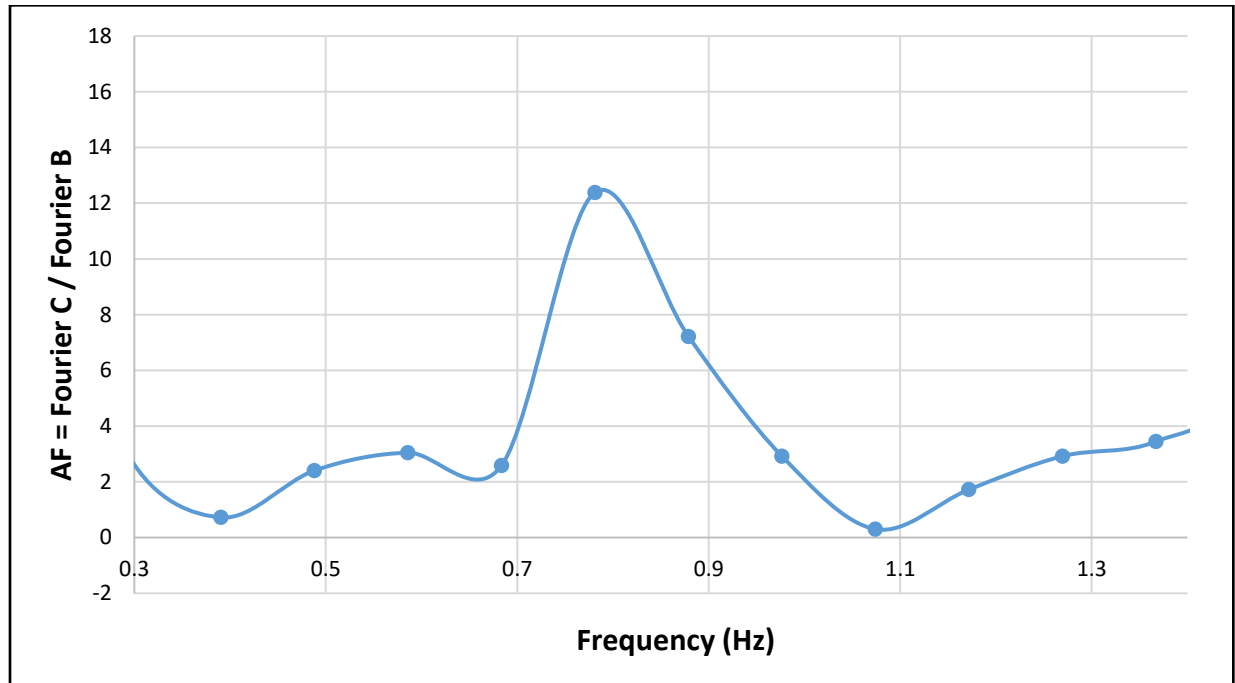


Διαγρ. 4.1. Χρονοϊστορίες της οριζόντιας επιτάχυνσης a_x – Σημεία A, B, C, D

Ο συντελεστής ενίσχυσης στο μοντέλο προσδιορίζεται μέσω του μετασχηματισμού Fourier των χρονοϊστοριών της οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση και στην κορυφή του ταλαντωτή (σημεία B και C αντίστοιχα) και πιο συγκεκριμένα μέσω της σχέσης:

$$AF(f) = \frac{\text{Fourier Amplitude}(f), \text{Point C}}{\text{Fourier Amplitude}(f), \text{Point B}}$$

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο ακόλουθο Διαγρ. 4.2 συναρτήσεως της συχνότητας f .



Διαγρ. 4.2. Συντελεστής ενίσχυσης AF του μονοβάθμιου ταλαντωτή συναρτήσεως της συχνότητας f

Παρατηρείται ότι η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης για το μονοβάθμιο ταλαντωτή μεγιστοποιείται τη στιγμή που η συχνότητα φτάνει στην τιμή 0,8Hz. Η συχνότητα αυτή αποτελεί την ιδιοσυχνότητα f_c του πακτωμένου μονοβάθμιου ταλαντωτή. Επομένως, η ύπαρξη βραχώδους εδάφους κάτω από τη θεμελίωση της ανεμογεννήτριας δεν αναπτύσσει φαινόμενα δυναμικής αλληλεπίδρασης στο σύστημα εδάφους - θεμελίωσης - ανωδομής, με αποτέλεσμα να μην επηρεάζει τις ιδιότητες και την απόκριση του σύνθετου αυτού συστήματος. Με τον τρόπο αυτό επαληθεύεται ότι η συγκεκριμένη επιλογή θεμελίωσης της ανεμογεννήτριας σε πολύ σκληρό (άκαμπτο) εδαφικό υλικό με $V_s = 2000 \text{ m/sec}$ ισοδυναμεί με πάκτωση στη βάση του πυλώνα της. Στη συνέχεια εξετάζονται περιπτώσεις ύπαρξης πιο εύκαμπτου εδαφικού στρώματος πάνω από βραχώδες υπόβαθρο. Τα πάχη των εδαφικών στρωμάτων που ελέγχονται είναι τα 20m, 40m, 10m, 5m και 2m. Τα αποτελέσματα των επιμέρους αναλύσεων παρουσιάζονται στα εδάφια που ακολουθούν.

4.4.2. Μοντέλο ταλαντωτή σε εδαφική στρώση με πάχος H=20m

Το πάχος του εδαφικού στρώματος πάνω από το βραχώδες υπόβαθρο θεωρείται ίσο με 20m. Εξετάζονται διάφορες περιπτώσεις εδαφικού υλικού, από πολύ μαλακή και χαλαρή άργιλο μέχρι πυκνή άμμο και ημι-βράχο. Αυτό γίνεται με την κατάλληλη επιλογή της ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος V_s , το οποίο λαμβάνει τις τιμές 40m/sec, 60m/sec, 80m/sec, 110m/sec, 160m/sec, 240m/sec και 600m/sec. Υπενθυμίζεται ότι, μέσω της ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος V_s , υπολογίζεται το μέτρο διάτμησης G του εδαφικού υλικού από τη σχέση $G = \rho * V_s^2$, όπου ρ είναι η πυκνότητα του εδάφους. Οι υπόλοιπες ιδιότητες του εδάφους, καθώς και εκείνες του μονοβάθμιου ταλαντωτή, ο οποίος προσομοιώνει την ανεμογεννήτρια, αναφέρονται παραπάνω στο εδάφιο 4.2. Υπενθυμίζεται η ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή $f_c=0,8\text{Hz}$. Η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον προσδιορισμό της ιδιοσυχνότητας του σύνθετου συστήματος εδάφους - θεμελίωσης - ανωδομής μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS και του λογισμικού SeismoSignal έχει ήδη παρουσιαστεί αναλυτικά στο εδάφιο 4.2. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά τις αριθμητικές διερευνήσεις για τις διάφορες περιπτώσεις ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος στο εδαφικό στρώμα, συγκεντρώνονται στον Πιν. 4.3 που ακολουθεί.

V_s (m/s)	f (Hz) - PLAXIS
40	0.195
60	0.293
80	0.391
110	0.488
160	0.586
240	0.684
600	0.781

Πιν. 4.3. Αποτελέσματα ιδιοσυχνοτήτων του σύνθετου συστήματος μέσω αριθμητικών λύσεων (PLAXIS) (H=20m)

Επίσης, για κάθε περίπτωση εδαφικού υλικού που εξετάζεται, υπολογίζεται η τιμή της ιδιοσυχνότητας του συστήματος εδάφους - θεμελίωσης - ανωδομής μέσω των αναλυτικών λύσεων που πρότειναν οι Gazetas (1983), Mylonakis et al. (2006) και Veletsos & Meek (1974), κατά τις

οποίες το υποκείμενο έδαφος του ταλαντωτή προσομοιώνεται με τη χρήση κατάλληλων ελατηρίων. Όπως τονίσθηκε, επιλέγεται η χρήση των αναλυτικών τύπων και παραμέτρων υπολογισμού των σύνθετων δυναμικών δυσκαμψιών και της ιδιοπεριόδου του συστήματος, που αντιστοιχούν στην περίπτωση άκαμπτης λωριδωτής θεμελίωσης σε εδαφικό στρώμα επί βράχου (Πιν. 4.2, Σχ. 4.1).

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλυτικές λύσεις για τις διάφορες περιπτώσεις ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος στο εδαφικό στρώμα, συγκεντρώνονται στον Πιν. 4.4 που ακολουθεί.

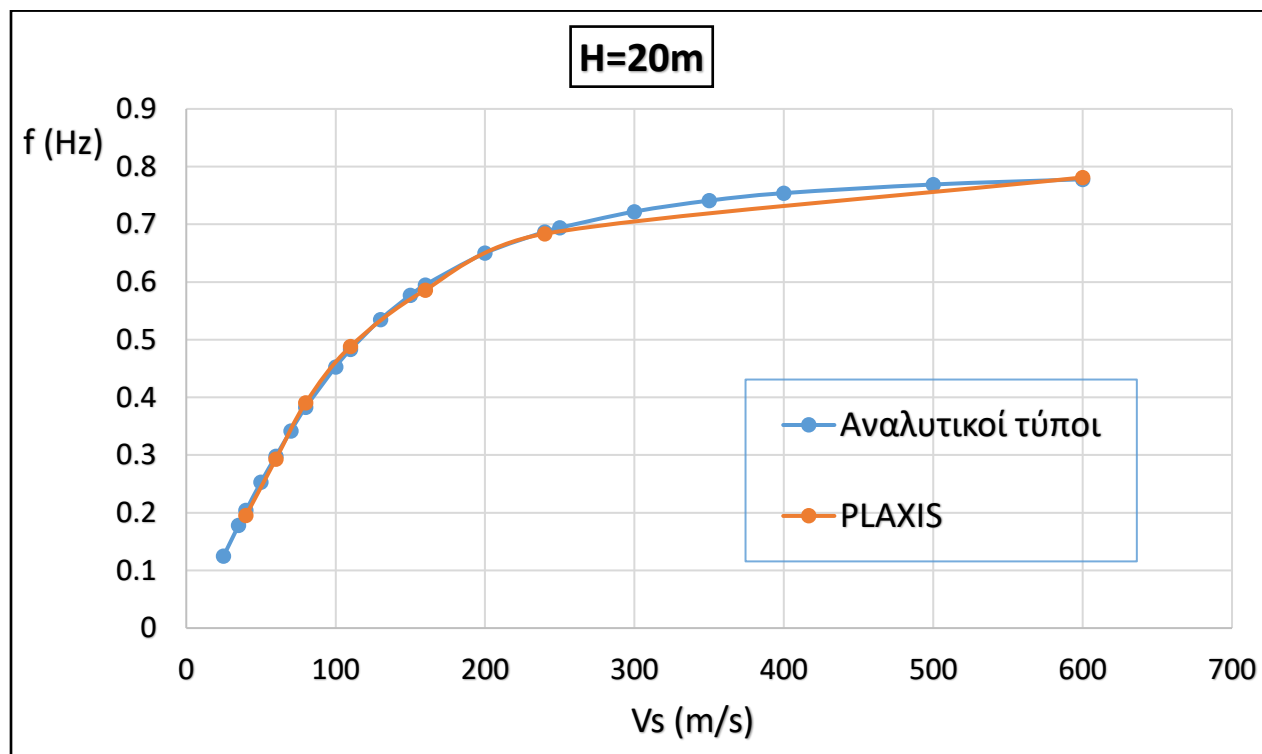
V_s (m/s)	f (Hz) - Αναλυτικοί τύποι
40	0.204
60	0.298
80	0.383
110	0.483
160	0.595
240	0.687
600	0.778

Πιν. 4.4. Αποτελέσματα ιδιοσυχνοτήτων του σύνθετου συστήματος μέσω αναλυτικών λύσεων (H=20m)

Στο ακόλουθο Διαγρ. 4.3 καταγράφεται η μεταβολή της ιδιοσυχνότητας f του συστήματος με την αύξηση της ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος εντός του εδαφικού στρώματος, τόσο για την περίπτωση των αναλυτικών λύσεων όσο και για την περίπτωση των αριθμητικών επιλύσεων μέσω του PLAXIS. Δηλαδή, απεικονίζεται η προκύπτουσα αύξηση της τιμής της ιδιοσυχνότητας του συστήματος εδάφους - θεμελίωσης - ανωδομής, κατά τη μετάβαση από πιο μαλακά και εύκαμπτα εδαφικά υλικά (μικρό V_s) σε πιο σκληρά και άκαμπτα (μεγάλο V_s). Η αύξηση αυτή καταγράφεται μέχρι την τιμή των 0,8Hz, η οποία αντιστοιχεί στην ιδιοσυχνότητα f_c εδραζόμενης ανεμογεννήτριας σε βράχο ή αλλιώς ανεμογεννήτριας με πάκτωση στη βάση της, όπως αποδείχθηκε στο προηγούμενο εδάφιο 4.3.1.

Όπως παρατηρείται, υπάρχει αρκετά καλή συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων της αναλυτικής και της αριθμητικής διερεύνησης για τη συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια. Η μικρή διαφοροποίηση μεταξύ των δύο καμπυλών, η οποία παρατηρείται μεταξύ των τιμών 240m/sec και 550m/sec της

ταχύτητας διάδοσης V_s , οφείλεται στην έλλειψη αποτελεσμάτων της διερεύνησης μέσω του προγράμματος PLAXIS για το συγκεκριμένο διάστημα.



Διαγρ. 4.3. Μεταβολή της ιδιοσυχνότητας του συστήματος συναρτήσει της ταχύτητας V_s ($H=20m$)

4.4.3. Μοντέλο ταλαντωτή σε εδαφική στρώση με πάχος $H=10m$

Στην περίπτωση αυτή, το πάχος του εδαφικού στρώματος πάνω από το βραχώδες υπόβαθρο μειώνεται στα 10m. Εξετάζονται οι ίδιες περιπτώσεις εδαφικού υλικού με την προηγούμενη περίπτωση, δηλαδή για ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος V_s ίση με 40m/sec, 60m/sec, 80m/sec, 110m/sec, 160m/sec, 240m/sec και 600m/sec. Οι υπόλοιπες ιδιότητες του εδάφους, και του μονοβάθμιου ταλαντωτή παραμένουν αμετάβλητες. Υπενθυμίζεται ότι η ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή λαμβάνεται ίση με $f_c=0,8Hz$.

Ως στόχος παραμένει ο προσδιορισμός της ιδιοσυχνότητας του σύνθετου συστήματος εδάφους - θεμελίωσης - ανωδομής μέσω των αριθμητικών λύσεων του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS, αλλά και των αναλυτικών λύσεων που έχουν προταθεί.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά τις αριθμητικές διερευνήσεις για τις διάφορες περιπτώσεις ταχύτητας V_s εντός του εδαφικού στρώματος, συγκεντρώνονται στον Πιν. 4.5 που ακολουθεί.

Vs (m/s)	f (Hz) - PLAXIS
40	0.195
60	0.293
80	0.391
110	0.488
160	0.586
240	0.684
600	0.781

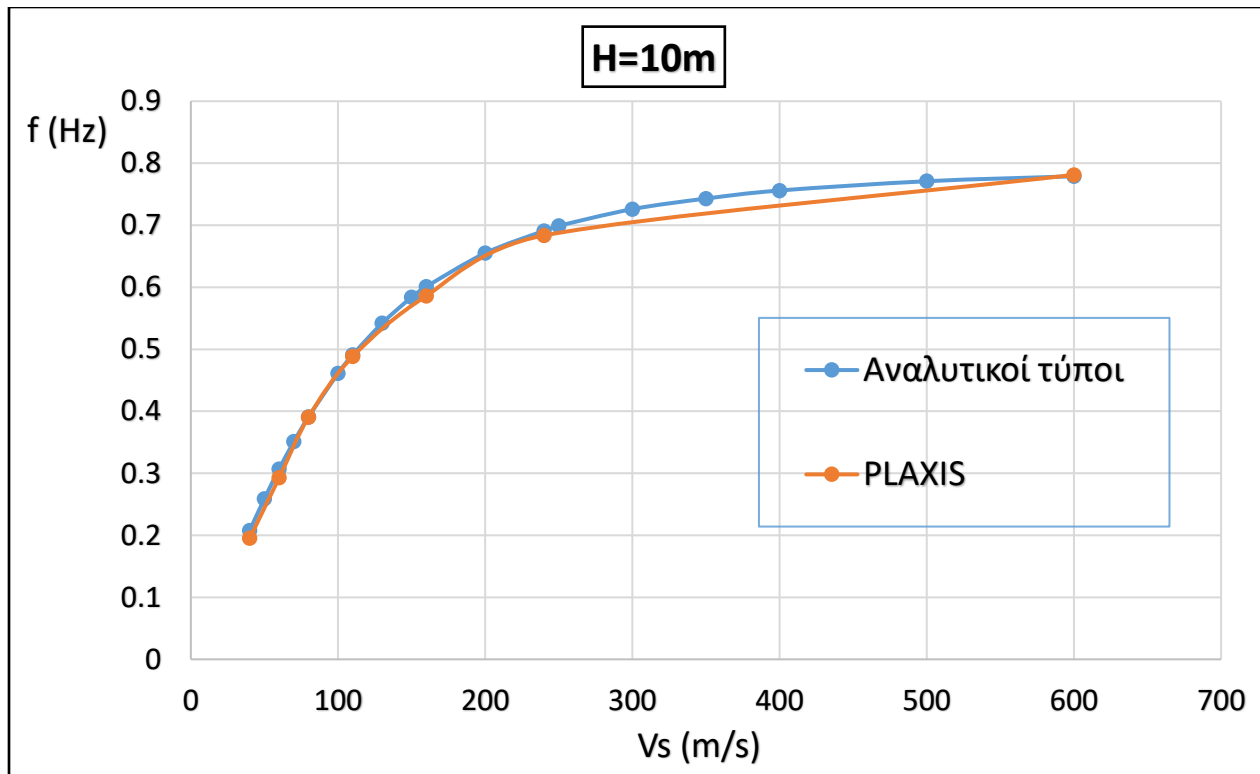
Πιν. 4.5. Αποτελέσματα ιδιοσυχνοτήτων του σύνθετου συστήματος μέσω αριθμητικών λύσεων (PLAXIS) (H=10m)

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλυτικές λύσεις για τις διάφορες περιπτώσεις ταχύτητας Vs, συγκεντρώνονται στον Πιν. 4.6 που ακολουθεί.

Vs (m/s)	f (Hz) - Αναλυτικοί τύποι
40	0.208
60	0.307
80	0.391
110	0.491
160	0.601
240	0.691
600	0.779

Πιν. 4.6. Αποτελέσματα ιδιοσυχνοτήτων του σύνθετου συστήματος μέσω αναλυτικών λύσεων (H=10m)

Στη συνέχεια, στο ακόλουθο Διαγρ. 4.4, καταγράφεται η αύξηση της ιδιοσυχνότητας f του συστήματος με την αύξηση της ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος, για τις περιπτώσεις των αναλυτικών και των αριθμητικών επιλύσεων. Η αύξηση αυτή καταγράφεται μέχρι την τιμή των 0,8Hz, δηλαδή την ιδιοσυχνότητα f_c της πακτωμένης ανεμογεννήτριας. Όπως παρατηρείται, υπάρχει αρκετά καλή συμφωνία σε γενικές γραμμές μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο τρόπων διερεύνησης του προβλήματος.



Διαγρ. 4.4. Μεταβολή της ιδιοσυχνότητας του συστήματος συναρτήσει της ταχύτητας Vs (H=10m)

4.4.4. Μοντέλο ταλαντωτή σε εδαφική στρώση με πάχος H=40m

Στην περίπτωση αυτή, το πάχος του εδαφικού στρώματος πάνω από το βραχώδες υπόβαθρο αυξάνεται στα 40m. Οι τιμές της ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος Vs εντός του εδαφικού υλικού που λαμβάνονται υπόψη είναι οι ίδιες με προηγουμένως, ενώ παραμένουν σταθερές οι υπόλοιπες ιδιότητες του εδάφους και του μονοβάθμιου ταλαντωτή. Υπενθυμίζεται ότι η ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή είναι ίση με $f_c=0,8\text{Hz}$. Ο παλμός Ricker που επιβάλλεται στη βάση του εδαφικού στρώματος κάθε μοντέλου έχει ομοίως δεσπόζουσα συχνότητα $f= 0,5\text{Hz}$ και μεγιστοποίηση της τιμής του τη χρονική στιγμή $t_0= 2,5\text{sec}$.

Οι τιμές της ιδιοσυχνότητας του σύνθετου συστήματος εδάφους - θεμελίωσης - ανωδομής που προέκυψαν κατά τις αριθμητικές και αναλυτικές διερευνήσεις για τις διάφορες περιπτώσεις ταχύτητας Vs εντός του εδαφικού στρώματος, συγκεντρώνονται στους ακόλουθους Πιν. 4.7 και 4.8 αντίστοιχα.

V_s (m/s)	f (Hz) - PLAXIS
40	0.195
60	0.293
80	0.391
110	0.488
160	0.586
240	0.684
600	0.781

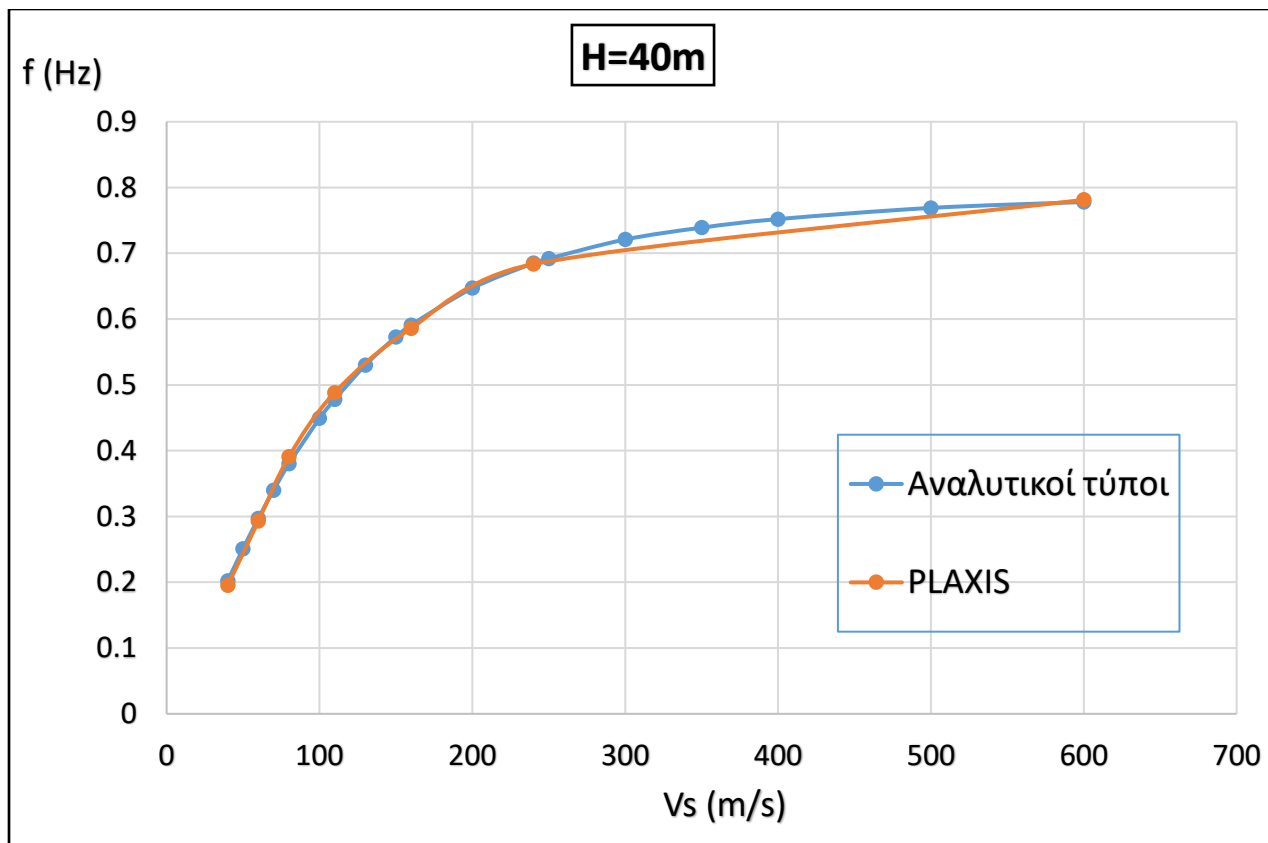
Πιν. 4.7. Αποτελέσματα ιδιοσυχνοτήτων του σύνθετου συστήματος μέσω αριθμητικών λύσεων (PLAXIS) (H=40m)

V_s (m/s)	f (Hz) - Αναλυτικοί τύποι
40	0.202
60	0.297
80	0.38
110	0.478
160	0.591
240	0.685
600	0.778

Πιν. 4.8. Αποτελέσματα ιδιοσυχνοτήτων του σύνθετου συστήματος μέσω αναλυτικών λύσεων (H=40m)

Όμοια με τις προηγούμενες περιπτώσεις παχών του εδαφικού στρώματος, προσδιορίζεται η μεταβολή της ιδιοσυχνότητας f του συστήματος συναρτήσει της ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος, για τις περιπτώσεις των αναλυτικών και των αριθμητικών επιλύσεων. (Διαγρ. 4.5).

Οι καμπύλες των δύο «πακέτων» αποτελεσμάτων (PLAXIS και αναλυτικών τύπων) τείνουν προς την τιμή των 0,8Hz για την ιδιοσυχνότητα όσο αυξάνεται η τιμή της ταχύτητας διάδοσης V_s , δηλαδή όσο το έδαφος γίνεται σκληρότερο και πλησιάζει προς τη βραχώδη κατάσταση. Η συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων της αναλυτικής και της αριθμητικής διερεύνησης διατηρείται και στη συγκεκριμένη περίπτωση πάχους εδαφικής στρώσης.



Διαγρ. 4.5. Μεταβολή της ιδιοσυχνότητας του συστήματος συναρτήσει της ταχύτητας Vs (H=40m)

4.4.5. Μοντέλο ταλαντωτή σε εδαφική στρώση με πάχος H=5m

Στην περίπτωση αυτή, το πάχος του εδαφικού στρώματος, επί του οποίου θεμελιώνεται η ανεμογεννήτρια μειώνεται σημαντικά στα 5m. Ο λόγος του πάχους της εδαφικής στρώσης προς το ημιέυρος της λωριδωτής θεμελίωσης ισούται πλέον με $H/B = 5/5 = 1$. Η τιμή αυτή αποτελεί την ελάχιστη ενδεικνύομενη τιμή για την ισχύ των αναλυτικών τύπων υπολογισμού των στατικών δυσκαμψιών για την περίπτωση άκαμπτης λωριδωτής θεμελίωσης σε εδαφικό στρώμα επί βράχου σύμφωνα με τον Gazetas (1983) (Πιν. 4.2).

Τα αποτελέσματα των αριθμητικών και αναλυτικών επιλύσεων για την ιδιοσυχνότητα του σύνθετου συστήματος εδάφους - θεμελίωσης - ανωδομής, ανάλογα με την ταχύτητα διάδοσης Vs του διατμητικού κύματος, παρουσιάζονται στους ακόλουθους Πιν. 4.9 και 4.10 αντίστοιχα.

Vs (m/s)	f (Hz) - PLAXIS
40	0.293
60	0.390
80	0.488
110	0.585
160	0.683
240	0.710
600	0.781

Πιν. 4.9. Αποτελέσματα ιδιοσυχνοτήτων του σύνθετου συστήματος μέσω αριθμητικών λύσεων (PLAXIS) (H=5m)

Vs (m/s)	f (Hz) - Αναλυτικοί τύποι
40	0.217
60	0.319
80	0.404
110	0.505
160	0.613
240	0.699
600	0.781

Πιν. 4.10. Αποτελέσματα ιδιοσυχνοτήτων του σύνθετου συστήματος μέσω αναλυτικών λύσεων (H=5m)

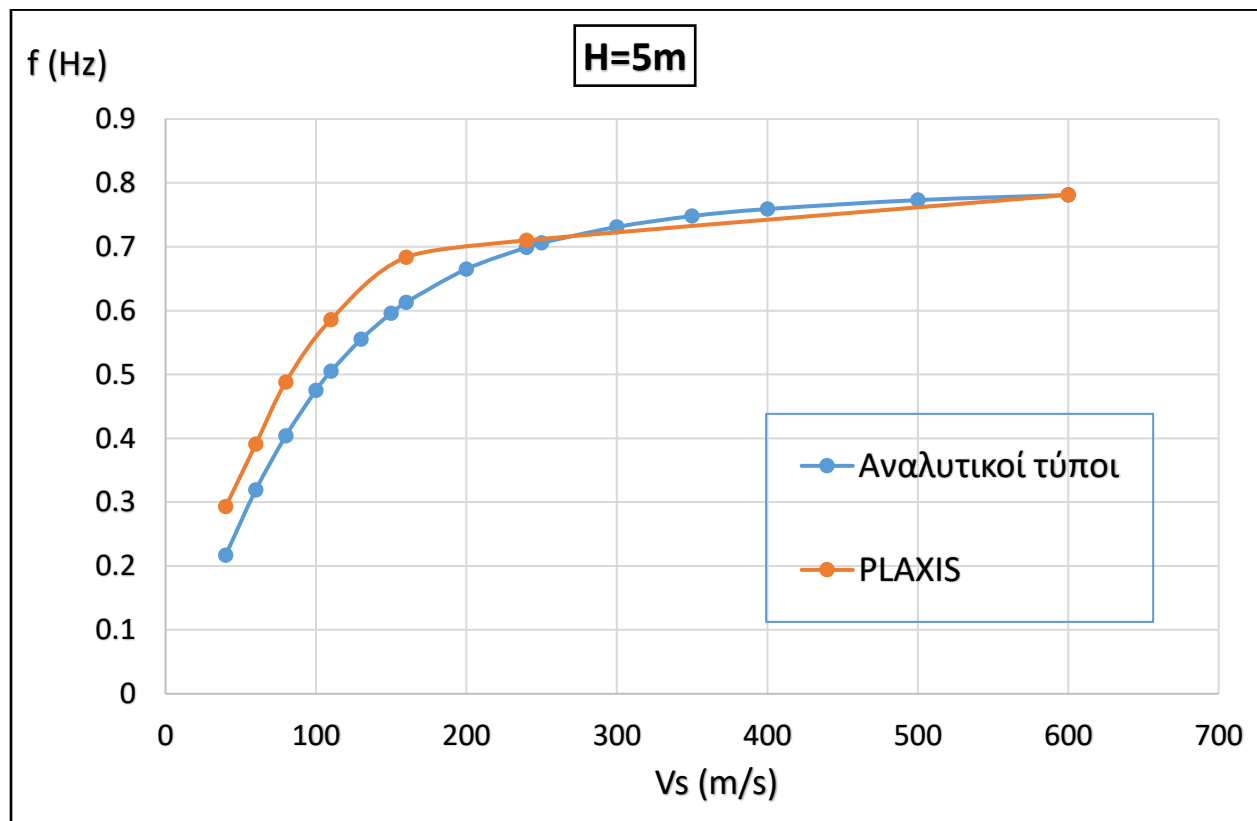
Στο Διαγρ. 4.6 καταγράφεται, και πάλι, η αύξηση της ιδιοσυχνότητας f του συστήματος συναρτήσει της ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος για τις αναλυτικές και αριθμητικές διερευνήσεις μέχρι την τιμή 0,8Hz, η οποία αντιστοιχεί στην περίπτωση πάκτωσης στη βάση της ανεμογεννήτριας.

Παρατηρείται ότι οι καμπύλες των δύο αυτών τρόπων ανάλυσης παρουσιάζουν διαφορές σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις, όπου τα πάχη H του εδαφικού στρώματος ήταν μεγαλύτερα. Αυτό συμβαίνει τουλάχιστον μέχρι την τιμή της ταχύτητας $V_s=240\text{m/sec}$. Πιο συγκεκριμένα, οι αριθμητικές διερευνήσεις μέσω του προγράμματος PLAXIS δίνουν ιδιοσυχνότητες με τιμές αυξημένες κατά 17% περίπου σε σχέση με τις διερευνήσεις μέσω των αναλυτικών τύπων.

Η αύξηση αυτή στη διαφορά των αποτελεσμάτων είναι πιθανό να οφείλεται στο γεγονός ότι ο λόγος του πάχους της εδαφικής στρώσης προς το ημιέυρος της λωριδωτής θεμελίωσης H/B γίνεται

ίσος με τη μονάδα στη συγκεκριμένη περίπτωση. Όπως τονίσθηκε παραπάνω, η τιμή αυτή αποτελεί την ελάχιστη τιμή, η οποία ενδείκνυται για την εγκυρότητα των αναλυτικών τύπων υπολογισμού των στατικών δυσκαμψιών.

Υπενθυμίζεται ότι, η διαφοροποίηση μεταξύ των δύο καμπυλών, η οποία παρατηρείται στο διάστημα 250m/sec με 550m/sec της ταχύτητας διάδοσης V_s , οφείλεται στην έλλειψη αποτελεσμάτων της διερεύνησης μέσω του προγράμματος PLAXIS για το διάστημα αυτό, και όχι απαραίτητα στην απόκλιση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων.



Διαγρ. 4.6. Μεταβολή της ιδιοσυχνότητας του συστήματος συναρτήσει της ταχύτητας V_s ($H=5m$)

4.4.6. Μοντέλο ταλαντωτή σε εδαφική στρώση με πάχος $H=2m$

Τέλος, μελετήθηκε και η περίπτωση μείωσης του πάχους του εδαφικού στρώματος ακόμα περισσότερο, μέχρι την τιμή των $H=2m$. Στην περίπτωση αυτή όμως, ο λόγος του πάχους της εδαφικής στρώσης προς το ημιέυρος της λωριδωτής θεμελίωσης H/B λαμβάνει τιμή μικρότερη της μονάδας, δηλαδή της ελάχιστης επιτρεπόμενης για την ισχύ των αναλυτικών τύπων

υπολογισμού των στατικών δυσκαμψιών για την περίπτωση άκαμπτης λωριδωτής θεμελίωσης σε εδαφικό στρώμα επί βράχου. Ωστόσο, σύμφωνα με τον Gazetas (1983), ακόμα και για τιμές του λόγου εκτός του αποδεκτού διαστήματος, οι προτεινόμενοι αναλυτικοί τύποι υπολογισμού της στατικής δυσκαμψίας του συστήματος αποδίδουν αποτελέσματα που βρίσκονται εντός λογικών πλαισίων. Για το λόγο αυτό, τα συγκεκριμένα αποτελέσματα των αναλυτικών τύπων μπορούν να ληφθούν υπόψη ως προς την ακρίβεια τους, αλλά με κάποιο βαθμό επιφύλαξης.

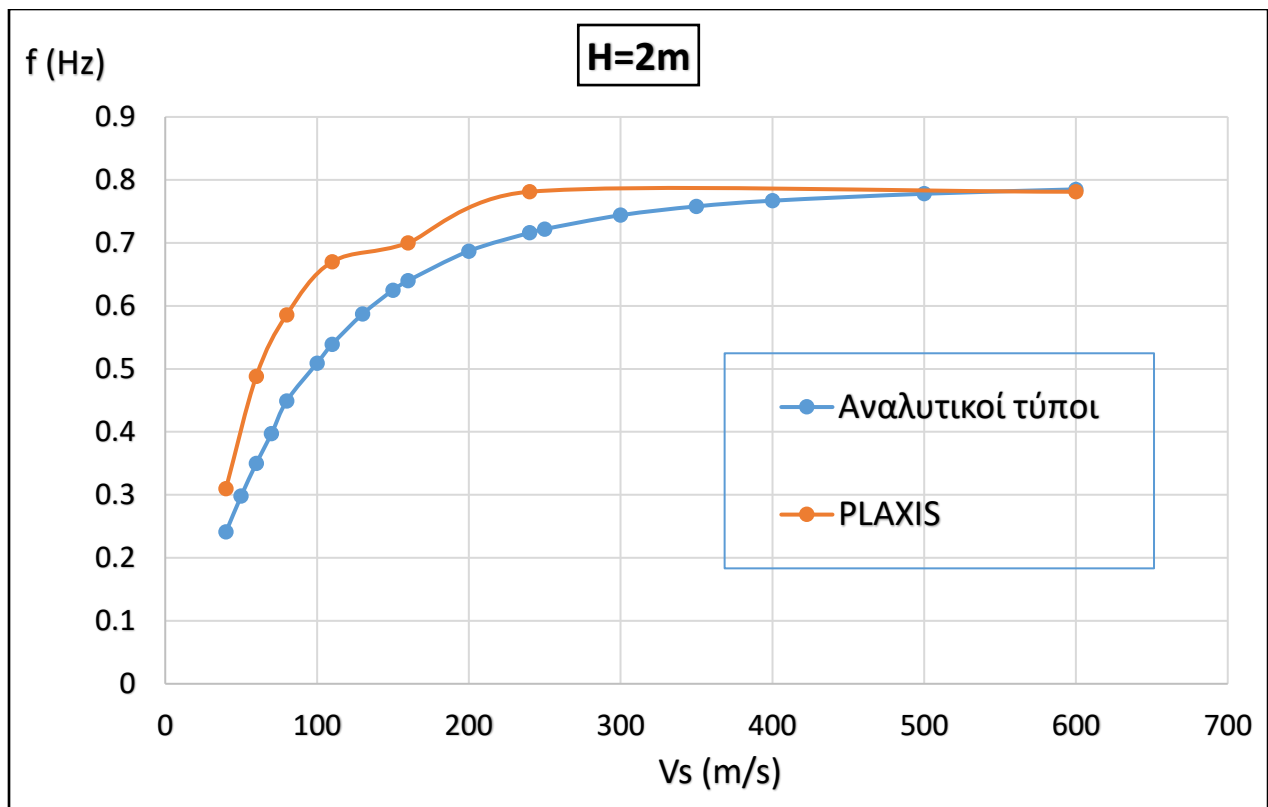
Τα αποτελέσματα των αριθμητικών και αναλυτικών επιλύσεων για την ιδιοσυχνότητα του σύνθετου συστήματος εδάφους - θεμελίωσης – ανωδομής, ανάλογα με την ταχύτητα διάδοσης V_s του διατμητικού κύματος, παρουσιάζονται στους ακόλουθους Πιν. 4.11 και 4.12 αντίστοιχα. Στο Διαγρ. 4.7 καταγράφεται η μεταβολή της ιδιοσυχνότητας f του συστήματος συναρτήσει της ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος V_s .

V_s (m/s)	f (Hz) - PLAXIS
40	0.310
60	0.488
80	0.586
110	0.670
160	0.700
240	0.781
600	0.781

Πιν. 4.11. Αποτελέσματα ιδιοσυχνοτήτων του σύνθετου συστήματος μέσω αριθμητικών λύσεων (PLAXIS) ($H=2m$)

V_s (m/s)	f (Hz) - Αναλυτικοί τύποι
40	0.241
60	0.350
80	0.449
110	0.539
160	0.640
240	0.716
600	0.785

Πιν. 4.12. Αποτελέσματα ιδιοσυχνοτήτων του σύνθετου συστήματος μέσω αναλυτικών λύσεων ($H=2m$)



Διαγρ. 4.7. Μεταβολή της ιδιοσυχνότητας του συστήματος συναρτήσει της ταχύτητας Vs (H=2m)

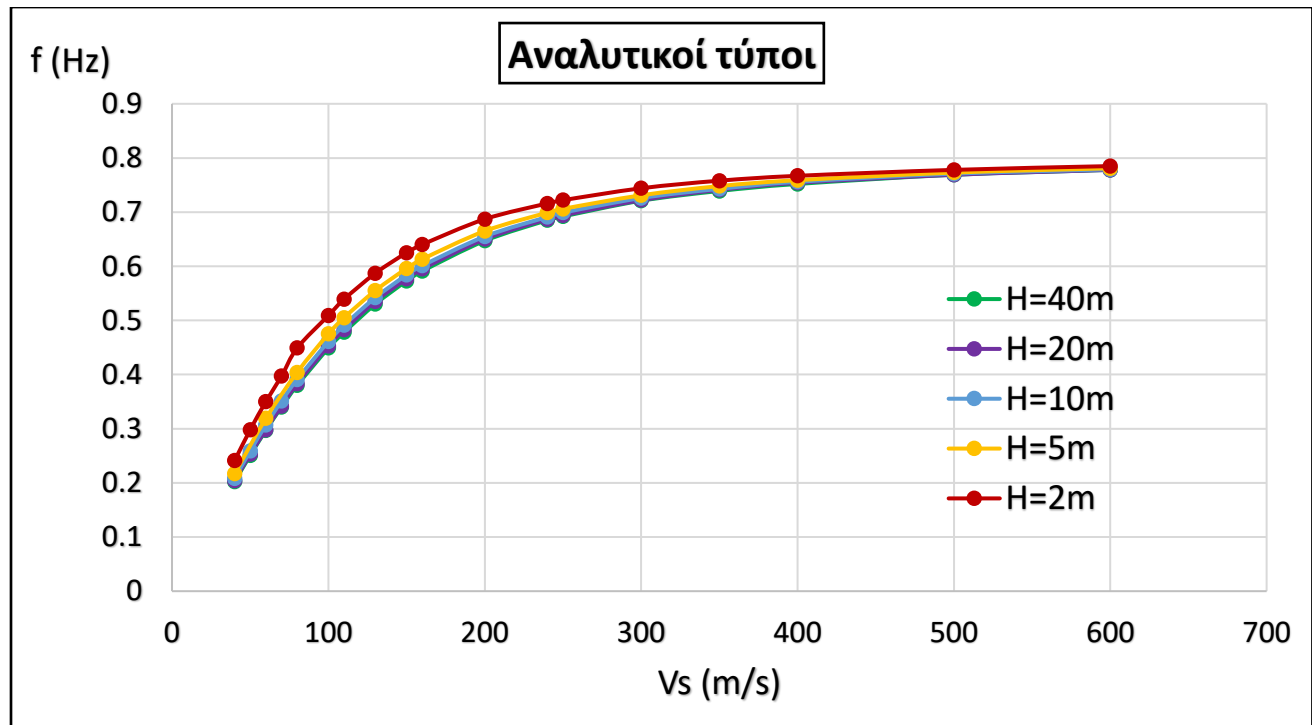
Παρατηρείται ότι η διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο μεθόδων ανάλυσης αυξάνεται ακόμα περισσότερο σε σύγκριση με την προηγούμενη εξεταζόμενη περίπτωση, όπου το πάχος H του εδαφικού στρώματος ήταν 5m. Στην προκειμένη περίπτωση, οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων μέσω της αναλυτικής διερεύνησης προκύπτουν έως και κατά 26% μειωμένες συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές μέσω της αριθμητικής διερεύνησης.

Η αύξηση αυτή στη διαφορά των αποτελεσμάτων είναι πιθανό να οφείλεται στο γεγονός ότι ο λόγος του πάχους της εδαφικής στρώσης προς το ημιέυρος της λωριδωτής θεμελίωσης H/B είναι μικρότερος της μονάδας στη συγκεκριμένη περίπτωση. Όπως τονίστηκε παραπάνω, η τιμή αυτή βρίσκεται εκτός του εύρους εγκυρότητας των αναλυτικών τύπων υπολογισμού των στατικών δυσκαμψιών για την περίπτωση άκαμπτης λωριδωτής θεμελίωσης σε εδαφικό στρώμα επί βράχου και τα αποτελέσματα πρέπει να ληφθούν υπόψη με κάποια επιφύλαξη.

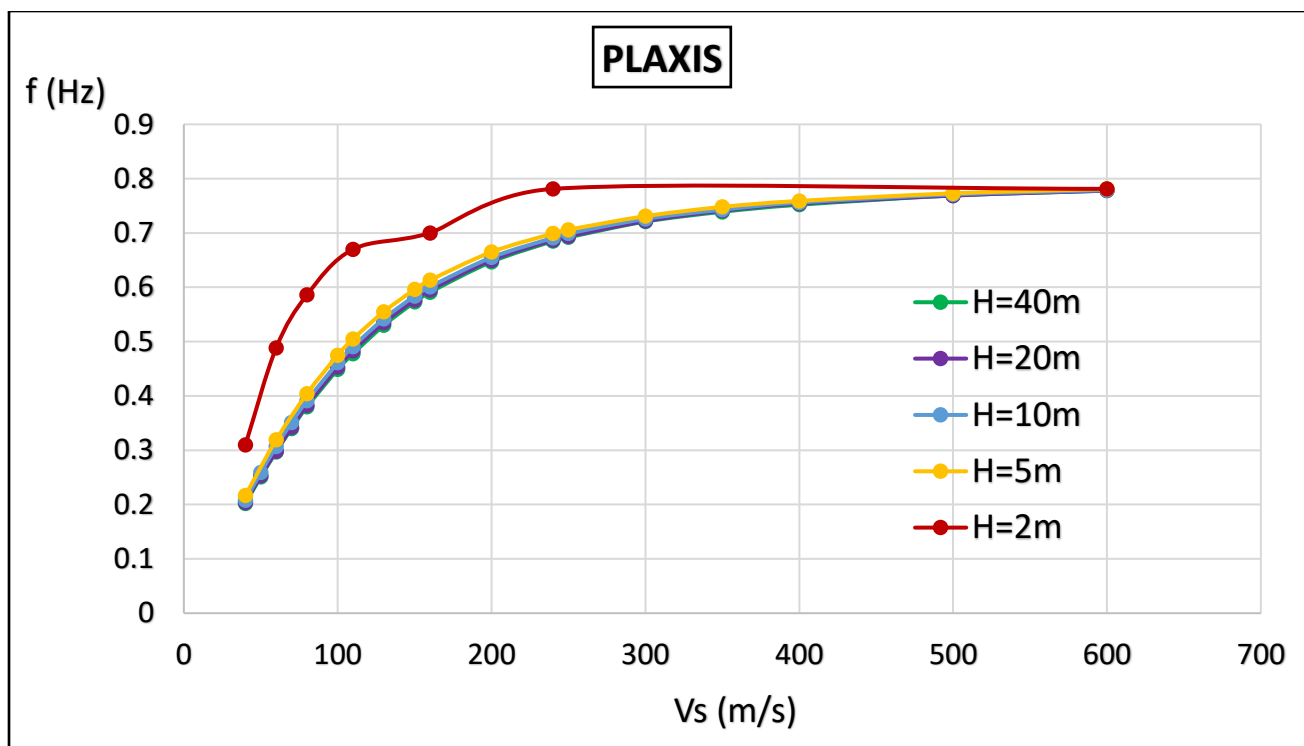
4.5. Σύνοψη

Στα Διαγρ. 4.8 και 4.9 που ακολουθούν, συγκεντρώνονται οι παραγόμενες καμπύλες μεταβολής της ιδιοσυχνότητας του σύνθετου συστήματος συναρτήσει της ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος V_s εντός της εδαφικής στρώσης, μέσω των αναλυτικών τύπων και του προγράμματος PLAXIS αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα αφορούν και τις πέντε περιπτώσεις του πάχους H του εδαφικού στρώματος που εξετάστηκαν.

Επίσης, στον Πιν. 4.13 που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα ποσοστά απόκλισης των ενεργών ιδιοσυχνοτήτων του σύνθετου συστήματος, όπως αυτές προέκυψαν από τις αναλυτικές διερευνήσεις, από την αντίστοιχη τιμή για την περίπτωση θεώρησης συνθηκών πάκτωσης στη βάση της κατασκευής (0,8Hz). Παρατηρείται ότι σε πολύ μαλακά εδαφικά υλικά, όπως είναι η μαλακή άργιλος, το ποσοστό αυτής της απόκλισης μπορεί να ξεπεράσει ακόμα και το 60%.



Διαγρ. 4.8. Μεταβολή της ιδιοσυχνότητας του συστήματος συναρτήσει της ταχύτητας V_s – Αναλυτικοί τύποι



Διαγρ. 4.9. Μεταβολή της ιδιοσυχνότητας του συστήματος συναρτήσει της ταχύτητας Vs - PLAXIS

Vs (m/s)	H= 40m	H= 20m	H= 10m	H= 5m	H= 2m
40	74.8%	74.5%	74.0%	72.9%	69.8%
60	62.9%	62.7%	61.5%	60.1%	56.3%
80	52.5%	52.1%	51.1%	49.5%	43.9%
110	40.3%	39.6%	38.6%	36.9%	32.6%
160	26.1%	25.6%	24.9%	23.4%	20.0%
240	14.3%	14.1%	13.6%	12.6%	10.5%
600	2.7%	2.7%	2.6%	2.4%	1.9%

Πιν. 4.13. Ποσοστά απόκλισης ενεργών ιδιοσυχνοτήτων από την τιμή 0,8Hz

Παρατηρείται ότι αύξηση του πάχους H του εδαφικού στρώματος πάνω από το βράχο συνεπάγεται μείωση της ιδιοσυχνότητας του συστήματος και αύξηση της απόκλισης της από την αντίστοιχη τιμή της ανεμογεννήτριας με πάκτωση στη βάση της. Ειδικότερα για μικρά πάχη εδαφικού στρώματος H και για λόγους πάχους στρώματος προς ημεύρος θεμελίωσης H/B μικρότερους της μονάδας, φαίνεται ότι μειώνεται ιδιαίτερα η απόκλιση των ενεργών ιδιοσυχνοτήτων από την τιμή 0,8Hz, ακόμα και στις περιπτώσεις μαλακών εδαφικών υλικών. Αυτό συμβαίνει διότι οι ιδιότητες

της λεπτής εδαφικής στρώσης τείνουν να απαλειφθούν εντελώς και υπερκαλύπτονται από τις βραχώδεις εδαφικές συνθήκες.

Όσο το εδαφικό υλικό γίνεται σκληρότερο, όσο δηλαδή αυξάνεται η τιμή της ταχύτητας V_s , όλες οι καμπύλες των ιδιοσυχνοτήτων τείνουν προς την τιμή 0,8Hz. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στην ιδιοσυχνότητα του μονοβάθμιου ταλαντωτή, ο οποίος είναι πακτωμένος στη βάση του. Η πάκτωση στη βάση του ταλαντωτή μπορεί να αναπαραστήσει την ύπαρξη βραχώδους υποβάθρου.

Όσον αφορά τη θεμελίωση μιας ανεμογεννήτριας επομένως, αποδεικνύεται ότι η θεώρηση συνθηκών πάκτωσης στη βάση της κατά τη διάρκεια των αναλύσεων είναι ορθή μόνο για την περίπτωση ύπαρξης βραχώδους υλικού ή σκληρού εδάφους γενικότερα. Αντίθετα, παρατηρείται ότι σε περίπτωση θεμελίωσης σε πιο εύκαμπτα εδαφικά στρώματα επί βράχου (δηλαδή μικρότερες τιμές ταχύτητας V_s), η ιδιοσυχνότητα του συστήματος μειώνεται αισθητά από την τιμή των 0,8Hz. Συμπεραίνεται λοιπόν, ότι απαραίτητη προϋπόθεση για τον ορθό σχεδιασμό και την ασφαλή λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας αποτελεί η μελέτη των ιδιοτήτων του εδάφους, καθώς και της δυναμικής αλληλεπίδρασης αυτού με το θεμέλιο και την ανωδομή, στην περιοχή την οποία πρόκειται να θεμελιωθεί.

Ο πύργος της ανεμογεννήτριας σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε η ιδιοσυχνότητα του να βρίσκεται εκτός των φασμάτων ιδιοσυχνότητας του ρότορα και των πτερυγίων, τα οποία είναι προκαθορισμένα και γνωστά. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται οποιοδήποτε ενδεχόμενο ανάπτυξης συντονιστικών φαινομένων μεταξύ των μελών της ανεμογεννήτριας υπό κάποια δυναμική διέγερση, τα οποία με τη σειρά τους μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία της ανεμογεννήτριας, λόγω κόπωσης του χάλυβα. Επομένως, πιθανή παράλειψη της ανωτέρω μελέτης της δυναμικής αλληλεπίδρασης του σύνθετου συστήματος εδάφους - θεμελίωσης - ανωδομής μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα και κατ' επέκταση στο συντονισμό των μελών, ο οποίος μπορεί να αποδειχθεί καταστροφικός για την ανεμογεννήτρια.

5. ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ

5.1. Εισαγωγή

Μέχρι στιγμής έχει αποδειχθεί η επίδραση που έχει το εδαφικό υλικό, αλλά και ο τύπος της θεμελίωσης μιας ανεμογεννήτριας επί αυτού, στην απόκριση της κάτω από συνθήκες δυναμικής διέγερσης. Στην περίπτωση της ανεμογεννήτριας, της θεμελίωσης και του εδαφικού στρώματος που μελετώνται στην παρούσα εργασία, η δυναμική αλληλεπίδραση του σύνθετου αυτού συστήματος προξενεί τη μείωση της ιδιοσυχνότητας της ανεμογεννήτριας. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να έχει αρνητικές συνέπειες για την ασφαλή λειτουργία της κατασκευής, καθώς δημιουργείται ο κίνδυνος μετάβασης της τιμής της ιδιοσυχνότητας σε περιοχές, στις οποίες βρίσκονται οι ιδιοσυχνότητες του ρότορα ή των πτερυγίων. Με τον τρόπο αυτό εμφανίζεται η πιθανότητα ανάπτυξης συντονιστικών φαινομένων στο σύστημα της ανεμογεννήτριας, τα οποία ενδέχεται να προκαλέσουν κόπωση του χάλυβα.

Φυσικό επακόλουθο της διαπίστωσης αυτής αποτελεί η αναζήτηση διαφόρων μεθόδων και μέτρων πρόληψης από μελετητές και κατασκευαστές με σκοπό την αντιμετώπιση της μείωσης, και γενικότερα της απόκλισης, της ιδιοσυχνότητας της ανεμογεννήτριας από την αντίστοιχη τιμή για την περίπτωση πάκτωσης στη βάση της, ανάλογα με τις εδαφικές συνθήκες και τις συνθήκες θεμελίωσης που επικρατούν.

Μια πιθανή λύση που θα μπορούσε να προταθεί, είναι ο σχεδιασμός κάθε ανεμογεννήτριας μεμονωμένα ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή που πρόκειται εκείνη να θεμελιωθεί. Δηλαδή, προηγείται η μελέτη των χαρακτηριστικών του εδάφους και της θεμελίωσης, και με βάση αυτά επιλέγεται η κατάλληλη ανεμογεννήτρια. Κάτι τέτοιο όμως, δεν εξυπηρετεί ιδιαίτερα από άποψη κόστους και χρόνου, αφού καθιστά ανέφικτη την αυτοματοποίηση της παραγωγής μεγάλου αριθμού μοντέλων ανεμογεννητριών με τυπικά γεωμετρικά και μηχανολογικά χαρακτηριστικά.

Ένας τρόπος επίλυσης του συγκεκριμένου προβλήματος προτάθηκε από τους Kirtas, Trevousoulas, Rovithis & Pitilakis (2007), χωρίς ωστόσο να επεμβαίνουν στη διαδικασία του σχεδιασμού της ανεμογεννήτριας. Αυτοί πρότειναν την παρέμβαση μέσω της σταθεροποίησης της εδαφικής περιοχής που βρίσκεται κάτω από τη θεμελίωση της κατασκευής. Η σταθεροποίηση αυτή μπορεί να επέλθει, εάν αυξηθεί κατά πολύ το μέτρο διάτμησης G του υποκείμενου εδάφους, ώστε να γίνει

πιο άκαμπτο. Κάτι τέτοιο συνεπάγεται αύξηση της ταχύτητας διάδοσης V_s του διατμητικού κύματος εντός της εδαφικής στρώσης. Μία πιθανή μέθοδος για την πραγματοποίηση του ανωτέρω θα μπορούσε να είναι η τοποθέτηση μεγάλου αριθμού μεταλλικών κυλίνδρων σε μεγάλο βάθος μέσα στο έδαφος στην περιοχή κάτω από το θεμέλιο της ανεμογεννήτριας.

Με τον τρόπο αυτό το εδαφικό τμήμα γίνεται πιο άκαμπτο και οι συνθήκες που επικρατούν στη βάση της ανεμογεννήτριας τείνουν προς εκείνες της πάκτωσης, μειώνοντας έτσι το ποσοστό απόκλισης της ενεργούς ιδιοσυχνότητας του συστήματος από την αντίστοιχη για την περίπτωση πάκτωσης στη βάση.

5.2. Προτεινόμενες μέθοδοι παρέμβασης

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας προτείνεται η ανάπτυξη ορισμένων μεθόδων που έχουν ως στόχο την παρέμβαση στην ήδη κατασκευασμένη ανεμογεννήτρια για την αντιμετώπιση του προβλήματος της απόκλισης της ενεργούς τιμής της ιδιοσυχνότητας, λόγω της δυναμικής αλληλεπίδρασης του σύνθετου συστήματος εδάφους - θεμελίωσης - ανωδομής. Ο βαθμός της παρέμβασης αυτής, εξαρτάται από τις γεωμετρικές και μηχανικές ιδιότητες του υποκείμενου εδάφους και της θεμελίωσης.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των αναλύσεων του Κεφαλαίου 4, παρατηρείται μείωση της ιδιοσυχνότητας f (ή αλλιώς αύξηση της ιδιοπεριόδου T) του σύνθετου συστήματος από την αντίστοιχη περίπτωση για πακτωμένο πυλώνα στην πλειονότητα των περιπτώσεων που εξετάστηκαν. Το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο σε πιο εύκαμπτα εδαφικά στρώματα με αυξημένο πάχος H . Επομένως, αναζητούνται πιθανοί τρόποι που οδηγούν τελικά στη μείωση της ιδιοπεριόδου του σύνθετου συστήματος.

Όπως φαίνεται στον τύπο υπολογισμού της ιδιοπεριόδου \bar{T} του σύνθετου συστήματος εδάφους - κατασκευής:

$$\bar{T} = T * \sqrt{1 + \frac{k}{k_h} + \frac{k * h^2}{k_r}}$$

που προτάθηκε από τους Veletsos & Meek (1974) και χρησιμοποιήθηκε εκτενώς κατά την αναλυτική διερεύνηση του προβλήματος, η ιδιοπερίοδος \bar{T} είναι ανάλογη της ιδιοπεριόδου της

πακτωμένης κατασκευής T. Υπενθυμίζεται ότι k_h και k_r είναι η οριζόντια και η περιστροφική δυναμική δυσκαμψία του σύνθετου συστήματος αντίστοιχα. Ωστόσο, η ιδιοπερίοδος T δίνεται από τη σχέση:

$$T = 2 * \pi * \sqrt{\frac{m}{k}}$$

όπου m και k είναι αντίστοιχα η μάζα και ο συντελεστής ακαμψίας του προσομοιώματος του μονοβάθμιου πακτωμένου ταλαντωτή.

Συμπεραίνεται λοιπόν, ότι η ζητούμενη μείωση της ιδιοπεριόδου \bar{T} του σύνθετου συστήματος της υπερκατασκευής, μπορεί να επέλθει μέσω της μείωσης της μάζας m της ανεμογεννήτριας ή μέσω της αύξησης του συντελεστή ακαμψίας k ή με συνδυασμό αυτών των δύο. Στη συνέχεια ελέγχεται η αποτελεσματικότητα των δύο αυτών μεθόδων παρέμβασης στην ανεμογεννήτρια.

5.3. Μείωση της μάζας της ανεμογεννήτριας

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη δυνατότητα της ανεμογεννήτριας να λαμβάνει ή να αποβάλλει (ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε περίπτωσης) κάποιο συγκεκριμένο βάρος. Ένα παράδειγμα εφαρμογής της ιδιότητας αυτής θα μπορούσε να είναι η τοποθέτηση δεξαμενής στην κορυφή της, η οποία είναι ικανή να αποθηκεύσει την απαραίτητη ποσότητα νερού. Μία άλλη εφαρμογή που μπορεί να αναπτυχθεί είναι το «ντύσιμο» του πυλώνα της ανεμογεννήτριας με έναν επιπλέον μεταλλικό μανδύα, επιβάλλοντας έτσι στην κατασκευή ένα πρόσθετο βάρος.

Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων μιας πιθανής μεταβολής της μάζας σε μία ανεμογεννήτρια, εξετάζεται η ίδια ανεμογεννήτρια που μελετήθηκε στο Κεφάλαιο 4. Υπενθυμίζεται ότι το ύψος του πύργου της, ή αλλιώς η απόσταση του άξονα του ρότορα από την επιφάνεια του εδάφους, είναι 50m. Η μάζα του ρότορα στην κορυφή του πύργου ισούται με 32tn, ενώ το βάρος του πύργου (εκτός του ρότορα) αμελείται. Ο συντελεστής ακαμψίας του ταλαντωτή λαμβάνεται ίσος με 808,52 kN/m. Τέλος, η ιδιοσυχνότητα του πύργου της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας για την περίπτωση πάκτωσης θεωρείται ίση με $f_c = 0,8\text{Hz}$ ή αντίστοιχα η ιδιοπερίοδος ίση με $T_c = 1,25\text{sec}$. Θεωρείται η περίπτωση, κατά την οποία η ανεμογεννήτρια θεμελιώνεται επιφανειακά σε εδαφικό στρώμα επί βράχου με πάχος H ίσο με 5m και ταχύτητα διάδοσης V_s του διατμητικού κύματος ίση με 400m/sec.

Σύμφωνα με την παράγραφο 4.4.5, στη συγκεκριμένη περίπτωση εδαφικού στρώματος επέρχεται τελικά μείωση της τιμής της ιδιοσυχνότητας του σύνθετου συστήματος κατά 5%, φτάνοντας τελικά στα 0,76Hz.

Στόχος της ανάλυσης αποτελεί η διατήρηση της ιδιοσυχνότητας του πύργου της ανεμογεννήτριας όσο το δυνατόν πιο κοντά στην τιμή 0,8Hz, για την αποφυγή της ανάπτυξης φαινομένων συντονισμού με τα υπόλοιπα μέρη της ανεμογεννήτριας, δηλαδή τον ρότορα και τα πτερύγια.

Εφόσον, η μείωση της ιδιοσυχνότητας της πακτωμένης κατασκευής είναι αναπόφευκτη, επιδιώκεται η αρχική διακύμανση της σε μεγαλύτερα επίπεδα, έτσι ώστε όταν ληφθεί υπόψη η επίδραση της θεμελίωσης και του υποκείμενου εδάφους, η τελική της τιμή να είναι η επιθυμητή (0,8Hz). Όπως διευκρινίστηκε ανωτέρω, κάτι τέτοιο είναι δυνατό να επιτευχθεί με τη μείωση της μάζας m της κατασκευής.

Έστω ότι η μάζα του ρότορα στην κορυφή του πύργου της ανεμογεννήτριας είναι 29tn, αντί για 32tn που ήταν αρχικά. Εμφανίζεται δηλαδή, μία απώλεια της μάζας της τάξης των 3tn, ενώ ο συντελεστής ακαμψίας του ταλαντωτή παραμένει 808,52 kN/m. Η ιδιοπερίοδος του πύργου για την περίπτωση πάκτωσης έχει γίνει πλέον ίση με $T_c=1,19\text{sec}$ (αντί για 1,25sec που ήταν αρχικά) και αντίστοιχα η ιδιοσυχνότητα ίση με $f_c=0,84\text{Hz}$ (αντί για 0,8Hz).

Η νέα ιδιοπερίοδος του σύνθετου συστήματος εδάφους - θεμελίωσης - ανωδομής (ταλαντωτή) υπολογίζεται μέσω των αναλυτικών λύσεων που αναπτύχθηκαν από τους Gazetas (1983), Mylonakis et al. (2006) και Veletsos & Meek (1974) και αφορούν την περίπτωση άκαμπτης λωριδωτής θεμελίωσης σε εδαφικό στρώμα επί βράχου (παράγραφος 2.3.3B, Πιν. 3.1, Σχ. 3.1).

Σύμφωνα με αυτούς, η στατική οριζόντια δυσκαμψία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$K_{h,st} = \frac{2,1 * G}{2 - \nu} * \left(1 + 2 * \frac{B}{H}\right) = \frac{2,1 * 277280}{2 - 0,3} * \left(1 + 2 * \frac{5}{5}\right) = 1027567 \text{ kN/m}^2$$

όπου G το μέτρο διάτμησης του εδαφικού στρώματος στο οποίο θεμελιώνεται η ανεμογεννήτρια και υπολογίζεται από τη σχέση $G = \rho * V_s^2 = 1,773 * 400^2 = 277280 \text{ kN/m}^2$.

Για αδιάστατη συχνότητα $\alpha_0 = \omega * B/V_s = 2 * \pi * 0,84/400 = 0,066$, ο δυναμικός συντελεστής της οριζόντιας κίνησης προκύπτει ίσος με $\alpha_h \approx 1$.

Επομένως, η οριζόντια δυναμική δυσκαμψία του συστήματος ισούται με:

$$K_h = a_h * K_{h,st} = 1 * 1027567 = 1027567 \text{ kN/m}^2$$

Αντίστοιχα υπολογίζεται η περιστροφική στατική δυσκαμψία του συστήματος από τη σχέση:

$$K_{r,st} = \frac{\pi * G * B^2}{2 * (1 - \nu)} * \left(1 + 0,2 * \frac{B}{H}\right) = \frac{\pi * 277280 * 5^2}{2 * (1 - 0,3)} * \left(1 + 0,2 * \frac{5}{5}\right) = 18665446 \text{ kN/m}^2$$

Ο δυναμικός συντελεστής της περιστροφικής κίνησης δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$\alpha_r = 1 - 0,2 * \alpha_0 = 1 - 0,2 * 0,066 = 0,9868$$

Επομένως, η περιστροφική δυναμική δυσκαμψία του συστήματος ισούται με:

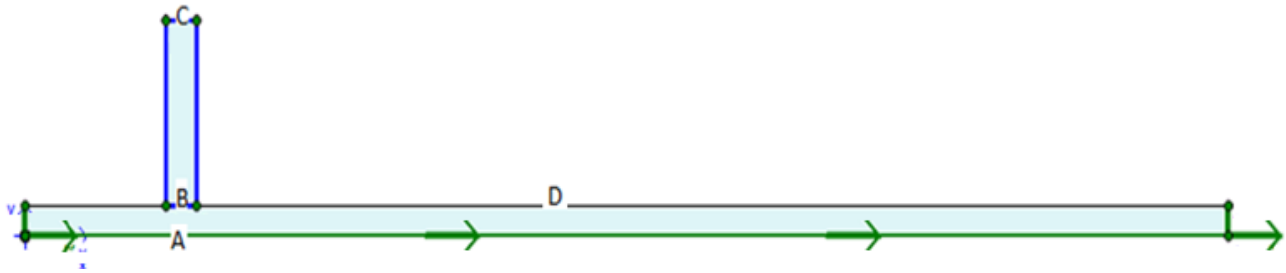
$$K_r = a_r * K_{r,st} = 0,9868 * 18665446 = 18420042 \text{ kN/m}^2$$

Έτσι τελικά, η ιδιοσυχνότητα του πλήρους συστήματος εδάφους - θεμελίωσης - ανεμογεννήτριας, μετά τη μείωση της μάζας της, είναι πλέον ίση με:

$$\bar{f} = \frac{1}{T} = \frac{1}{T * \sqrt{1 + \frac{k}{k_h} + \frac{k * h^2}{k_r}}} = \frac{1}{1,19 * \sqrt{1 + \frac{808,52}{1027567} + \frac{808,52 * 50^2}{18420042}}}$$

$$\rightarrow \bar{f} = 0,797 \text{ Hz} \approx 0,8 \text{ Hz}$$

Ακολουθεί η αριθμητική διερεύνηση του συγκεκριμένου μοντέλου μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις ανωτέρω αναλυτικές λύσεις. Στην Εικ. 5.1 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η γεωμετρία και οι συνοριακές συνθήκες του υπό εξέταση μοντέλου του μονοβάθμιου ταλαντωτή. Υπενθυμίζεται ότι το ύψος της ανεμογεννήτριας είναι 50m και η μάζα του ρότορα στην κορυφή της λαμβάνεται ίση με 29tn. Η ανεμογεννήτρια θεμελιώνεται επιφανειακά σε εδαφικό στρώμα επί βράχου με πάχος 5m και ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος 400m/sec.



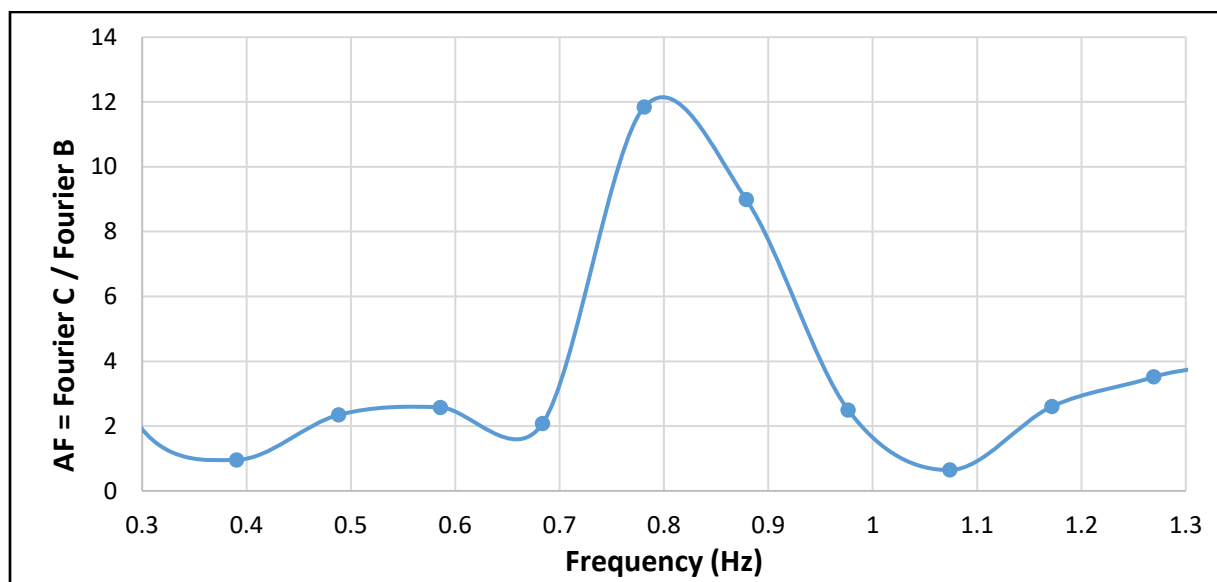
Εικ. 5.1. Μοντέλο μονοβάθμιου ταλαντωτή

Όπως παρατηρείται, ορίζονται τα σημεία A, B, C και D σε κομβικές θέσεις για τη μελέτη του μοντέλου. Το σημείο A ορίζεται στη βάση της εδαφικής στρώσης, το σημείο B στη βάση του ταλαντωτή, το σημείο C στην κορυφή του ταλαντωτή και το σημείο D στην επιφάνεια του εδάφους και σε μακρινή απόσταση από τον ταλαντωτή (150m).

Μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS υπολογίζονται οι χρονοϊστορίες της οριζόντιας επιτάχυνσης a_x στα σημεία αυτά, λόγω του επιβαλλόμενου παλμού Ricker στη βάση του εδαφικού στρώματος. Στη συνέχεια, μέσω του μετασχηματισμού Fourier (Fast Fourier Transformation - FFT) των φασμάτων χρονοϊστορίας εξάγονται τα αντίστοιχα φάσματα Fourier. Όπως έχει ήδη αναφερθεί κατά τη διάρκεια των προηγούμενων αναλύσεων (Κεφάλαιο 4 παρούσας εργασίας), με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός του συντελεστή ενίσχυσης AF λόγω της δημιουργίας συντονιστικών φαινομένων στο σύστημα, καθώς και ο προσδιορισμός της ιδιοσυχνότητας του στο σημείο μεγιστοποίησης του συντελεστή αυτού. Υπενθυμίζεται ότι ο συντελεστής ενίσχυσης AF συναρτήσει της συχνότητας f προκύπτει με διαίρεση των τιμών του μετασχηματισμού Fourier στην κορυφή προς τις αντίστοιχες τιμές του μετασχηματισμού Fourier στη βάση. Στην προκειμένη περίπτωση αναλύσεων, η διαφοροποιούμενη ιδιοσυχνότητα του σύνθετου συστήματος, λόγω της θεμελίωσης σε εύκαμπτη εδαφική στρώση επί βράχου, καθορίζεται από τα σημεία στη βάση και την κορυφή του μονοβάθμιου ταλαντωτή (σημεία B και C αντίστοιχα). Δηλαδή:

$$AF(f) = \frac{\text{Fourier Amplitude}(f), \text{Point C}}{\text{Fourier Amplitude}(f), \text{Point B}}$$

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Διαγρ. 5.1 που ακολουθεί συναρτήσει της συχνότητας f του συστήματος.



Διαγρ. 5.1. Συντελεστής ενίσχυσης AF του μονοβάθμιου ταλαντωτή συναρτήσει της συχνότητας f

Παρατηρείται ότι η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης για το μονοβάθμιο ταλαντωτή με τη μειωμένη μάζα (29tn), ο οποίος θεμελιώνεται επί εύκαμπτου εδαφικού στρώματος ($V_s=400\text{m/sec}$), παρουσιάζει μέγιστο τη στιγμή που η συχνότητα ισούται με 0,8Hz. Η τιμή αυτή της συχνότητας αποτελεί την ιδιοσυχνότητα f_c του πακτωμένου μονοβάθμιου ταλαντωτή με την αρχική μάζα (32tn). Στο σημείο αυτό αξίζει να επισημανθεί ότι, η ιδιοσυχνότητα του αντίστοιχου μοντέλου ανεμογεννήτριας με την αρχική μάζα $m=32\text{tn}$, το οποίο θεμελιώνεται στο ίδιο εδαφικό στρώμα ($H=5\text{m}$, $V_s=400\text{m/sec}$) επί βράχου, υπολογίστηκε ίση με 0,75Hz περίπου, όπως υποδεικνύει το Διαγρ. 4.6 της παραγράφου 4.4.5.

Τόσο μέσω της αναλυτικής όσο και της αριθμητικής διερεύνησης, αποδεικνύεται ότι με την προτεινόμενη αυτή μέθοδο επιτυγχάνεται τελικά η επιθυμητή ταύτιση της ιδιοσυχνότητας του συστήματος εδάφους – θεμελίου – ανωδομής με την ιδιοσυχνότητα της πακτωμένης ανεμογεννήτριας, την τιμή 0,8Hz. Δηλαδή, η μείωση της μάζας στην κορυφή της ανεμογεννήτριας κατά 3tn μπορεί να αποτελέσει τη λύση του προβλήματος απόκλισης της ιδιοσυχνότητας του σύνθετου συστήματος, λόγω της δυναμικής αλληλεπίδρασης. Με αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιείται η πιθανότητα εμφάνισης φαινομένων συντονισμού στην ανεμογεννήτρια, τα οποία ενδέχεται να προκαλέσουν την κόπωση του χάλυβα, άρα και την αστοχία του

5.4. Αύξηση της ακαμψίας της ανεμογεννήτριας

Η δεύτερη μέθοδος που προτείνεται για την αντιμετώπιση της μείωσης της ιδιοσυχνότητας f από την επιθυμητή τιμή 0,8Hz είναι η αύξηση της ακαμψίας του πύργου της ανεμογεννήτριας. Όπως αναφέρθηκε κατά την ανάλυση του εξεταζόμενου μοντέλου μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS, ο μονοβάθμιος ταλαντωτής της ανεμογεννήτριας αναπαρίσταται από έναν πλαισιακό φορέα με αμφίπακτα στοιχεία υποστυλωμάτων (columns). Αυτό σημαίνει ότι ο συντελεστής ακαμψίας k υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{k}{2} = \frac{12EI}{h^3}$$

όπου EI η καμπτική δυσκαμψία και h το ύψος του ταλαντωτή.

Συμπεραίνεται ότι η μεταβολή της ακαμψίας του πύργου της ανεμογεννήτριας μπορεί να επέλθει μέσω της μεταβολής του ύψους του. Έτσι, επιδιώκεται η εύρεση ενός μηχανισμού που να επιτρέπει την αυξομείωση του ύψους της ανεμογεννήτριας, ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες. Κάτι τέτοιο για παράδειγμα, θα μπορούσε να είναι η χρησιμοποίηση φλαντζών μεταβαλλόμενου πάχους για τη σύνδεση των επιμέρους τμημάτων του πύργου της. Η λειτουργία αυτή θα μπορούσε να μεταβάλλει συνολικά το ύψος της ανεμογεννήτριας κατά μερικά μέτρα.

Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων της παραπάνω μεταβολής του ύψους, εξετάζεται και πάλι η ίδια ανεμογεννήτρια. Υπενθυμίζεται ότι το ύψος του πύργου της είναι 50m, ενώ η μάζα του ρότορα στην κορυφή ισούται με 32tn. Ο συντελεστής ακαμψίας του ταλαντωτή λαμβάνεται ίσος με 808,52 kN/m. Τέλος, η ιδιοσυχνότητα του πύργου της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας για την περίπτωση πάκτωσης θεωρείται ίση με $f_c = 0,8\text{Hz}$.

Όπως τονίσθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο 5.3, για την περίπτωση θεμελίωσης της ανεμογεννήτριας σε εδαφικό στρώμα επί βράχου με πάχος 5m και ταχύτητα V_s ίση με 400m/sec, επέρχεται μείωση της τιμής της ιδιοσυχνότητας του σύνθετου συστήματος κατά 5%, φτάνοντας τελικά στα 0,76Hz.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ενεργή ιδιοσυχνότητα του σύνθετου συστήματος επιδιώκεται να προκύψει τελικά ίση με 0,8Hz, έτσι ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα συντονισμού στην ανεμογεννήτρια και εφόσον, η μείωση της αρχικής ιδιοσυχνότητας της πακτωμένης κατασκευής είναι αναπόφευκτη, ακολουθείται η ίδια διαδικασία με την προηγούμενη μέθοδο παρέμβασης.

Δηλαδή, μειώνεται το ύψος του πύργου της ανεμογεννήτριας με στόχο η αρχική ιδιοσυχνότητα (για την περίπτωση πάκτωσης στη βάση) να κυμαίνεται σε υψηλότερα επίπεδα. Έτσι, όταν ληφθεί υπόψη η επίδραση της θεμελίωσης και του υποκείμενου εδάφους, η τελική τιμή της ιδιοσυχνότητας θα είναι η επιθυμητή (0,8Hz).

Έστω ότι πραγματοποιείται μείωση του ύψους του πυλώνα από 50m σε 48,2m, ενώ η μάζα του ρότορα στην κορυφή του παραμένει ίση με 32tn. Στην περίπτωση αυτή, ο συντελεστής ακαμψίας του ταλαντωτή αυξάνεται στην τιμή 902,53 kN/m. Η ιδιοσυχνότητα του πύργου για την περίπτωση πάκτωσης έχει γίνει πλέον ίση με $f_c=0,845\text{Hz}$, αντί για 0,8Hz που ήταν πριν τη μείωση του ύψους και αντίστοιχα η ιδιοπερίοδος γίνεται $T_c=1,183\text{sec}$, αντί για 1,25sec.

Η νέα ιδιοσυχνότητα του σύνθετου συστήματος εδάφους - θεμελίωσης - ανωδομής υπολογίζεται και πάλι μέσω των αναλυτικών λύσεων των Gazetas (1983), Mylonakis et al. (2006) και Veletsos & Meek (1974) για την περίπτωση άκαμπτης λωριδωτής θεμελίωσης σε εδαφικό στρώμα επί βράχου. Σύμφωνα με αυτούς, η στατική οριζόντια δυσκαμψία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$K_{h,st} = \frac{2,1 * G}{2 - \nu} * \left(1 + 2 * \frac{B}{H}\right) = \frac{2,1 * 277280}{2 - 0,3} * \left(1 + 2 * \frac{5}{5}\right) = 1027567 \text{ kN/m}^2$$

όπου G το μέτρο διάτμησης του εδαφικού στρώματος, το οποίο υπολογίζεται από τη σχέση $G = \rho * V_s^2 = 1,773 * 400^2 = 277280 \text{ kN/m}^2$.

Η αδιάστατη συχνότητα του συστήματος βρέθηκε ίση με $\alpha_0 = \omega * B/V_s = 2 * \pi * 0,84/400 = 0,0664$, ο δυναμικός συντελεστής της οριζόντιας κίνησης προκύπτει ίσος με $a_h \approx 1$. Τελικά, η οριζόντια δυναμική δυσκαμψία του συστήματος ισούται με:

$$K_h = a_h * K_{h,st} = 1 * 1027567 = 1027567 \text{ kN/m}^2$$

Αντίστοιχα υπολογίζεται η περιστροφική στατική δυσκαμψία του συστήματος από τη σχέση:

$$K_{r,st} = \frac{\pi * G * B^2}{2 * (1 - \nu)} * \left(1 + 0,2 * \frac{B}{H}\right) = \frac{\pi * 277280 * 5^2}{2 * (1 - 0,3)} * \left(1 + 0,2 * \frac{5}{5}\right) = 18665446 \text{ kN/m}^2$$

Ο δυναμικός συντελεστής της περιστροφικής κίνησης δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$\alpha_r = 1 - 0,2 * \alpha_0 = 1 - 0,2 * 0,0664 = 0,9867$$

Τελικά, η περιστροφική δυναμική δυσκαμψία του συστήματος ισούται με:

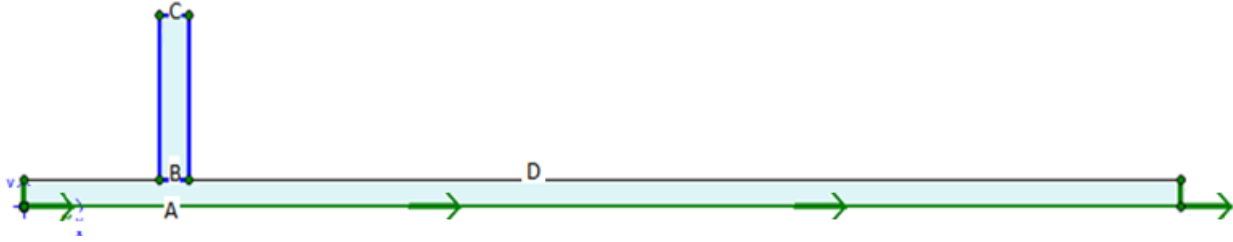
$$K_r = a_r * K_{r,st} = 0,9867 * 18665446 = 18418614 \text{ kN/m}^2$$

Έτσι, η ιδιοσυχνότητα του πλήρους συστήματος εδάφους - θεμελίωσης - ανεμογεννήτριας, μετά τη μείωση του ύψους της, μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση:

$$\bar{f} = \frac{1}{T} = \frac{1}{T * \sqrt{1 + \frac{k}{k_h} + \frac{k * h^2}{k_r}}} = \frac{1}{1,183 * \sqrt{1 + \frac{902,53}{1027567} + \frac{902,53 * 48,2^2}{18418614}}}$$

$$\rightarrow \bar{f} = 0,801 \text{ Hz} \approx 0,8 \text{ Hz}$$

Η ανάλυση δεν περιορίζεται μόνο στους αναλυτικούς θεωρητικούς τύπους, αλλά πραγματοποιείται και αριθμητική διερεύνηση του μοντέλου της μεθόδου αυτής μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS. Στην Εικ. 5.2 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η γεωμετρία και οι συνοριακές συνθήκες του μοντέλου του μονοβάθμιου ταλαντωτή που εξετάζεται στην προκειμένη περίπτωση. Υπενθυμίζεται ότι το ύψος της ανεμογεννήτριας μειώνεται στην τιμή 48,2m, ενώ η μάζα του ρότορα στην κορυφή της διατηρείται στην τιμή 32tn. Το εδαφικό στρώμα επί βράχου, στο οποίο θεμελιώνεται η ανεμογεννήτρια έχει πάχος 5m και ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος 400m/sec.

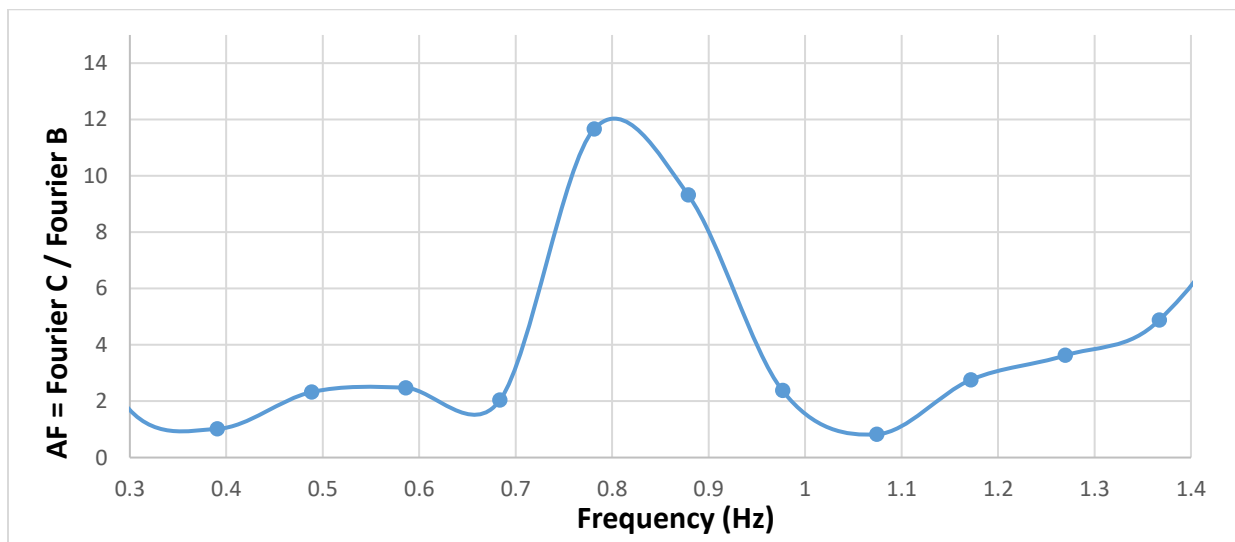


Εικ. 5.2. Μοντέλο μονοβάθμιου ταλαντωτή

Όμοια με την προηγούμενη περίπτωση, ορίζονται τα σημεία A, B, C και D στο μοντέλο για τον υπολογισμό των χρονοϊστοριών της οριζόντιας επιτάχυνσης a_x , λόγω της επιβαλλόμενης διέγερσης στη βάση του εδαφικού στρώματος. Μέσω του μετασχηματισμού Fourier των φασμάτων χρονοϊστορίας εξάγονται τα αντίστοιχα φάσματα Fourier για τα τέσσερα αυτά σημεία. Ο συντελεστής ενίσχυσης στον ταλαντωτή προσδιορίζεται μέσω του μετασχηματισμού Fourier των χρονοϊστοριών της οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση και στην κορυφή του (σημεία B και C αντίστοιχα) και πιο συγκεκριμένα μέσω της σχέσης:

$$AF(f) = \frac{\text{Fourier Amplitude}(f), \text{Point C}}{\text{Fourier Amplitude}(f), \text{Point B}}$$

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο ακόλουθο Διαγρ. 5.2 συναρτήσει της συχνότητας f του συστήματος.



Διαγρ. 5.2. Συντελεστής ενίσχυσης AF του μονοβάθμιου ταλαντωτή συναρτήσει της συχνότητας f

Σύμφωνα με το Διάγραμμα αυτό, η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης για το μονοβάθμιο ταλαντωτή με το μειωμένο ύψος (48,2m) εμφανίζει μέγιστο τη στιγμή που η συχνότητα ισούται με 0,8Hz. Ωστόσο, η τιμή αυτή της συχνότητας αποτελεί την ιδιοσυχνότητα f_c του πακτωμένου μονοβάθμιου ταλαντωτή με το αρχικό ύψος (50m). Τα αποτελέσματα του Διαγρ. 5.1 είναι παρόμοια με εκείνα του Διαγρ. 5.2. Δηλαδή, οι δύο αυτοί διαφορετικοί τρόποι παρέμβασης που προτείνονται, έχουν παρόμοια επιρροή στο σύνθετο σύστημα εδάφους - θεμελίωσης - ανωδομής ανεμογεννήτριας.

Τόσο μέσω της αναλυτικής όσο και της αριθμητικής διερεύνησης, αποδεικνύεται ότι με την προτεινόμενη αυτή μέθοδο επιτυγχάνεται τελικά η επιθυμητή ταύτιση της ιδιοσυχνότητας του συστήματος εδάφους – θεμελίου – ανωδομής με την ιδιοσυχνότητα της πακτωμένης ανεμογεννήτριας, δηλαδή την τιμή 0,8Hz. Η μείωση του ύψους της ανεμογεννήτριας κατά 1,8m αποτελεί λύση του προβλήματος απόκλισης της ιδιοσυχνότητας του σύνθετου συστήματος, λόγω της δυναμικής αλληλεπίδρασης. Η μέθοδος αυτή αποτελεί ένα μέσο αντιμετώπισης της ανάπτυξης φαινομένων συντονισμού του πύργου της ανεμογεννήτριας με τα υπόλοιπα μέρη της, δηλαδή το ρότορα και τα πτερύγια.

5.5. Σύνοψη

Έχει γίνει απολύτως σαφής η επίδραση των ιδιοτήτων του εδαφικού υλικού, αλλά και του τύπου της θεμελίωσης μιας ανεμογεννήτριας, στην καταπόνηση και την απόκριση της κάτω από συνθήκες δυναμικής διέγερσης. Συγκεκριμένα, είναι δεδομένη η μείωση της ιδιοσυχνότητας του σύνθετου συστήματος εδάφους - θεμελίωσης - ανωδομής της ανεμογεννήτριας από την αντίστοιχη για την περίπτωση ανεμογεννήτριας με πάκτωση στη βάση της. Το μέγεθος της μείωσης αυτής εξαρτάται από τις διάφορες ιδιότητες των επιμέρους μερών του σύνθετου αυτού συστήματος.

Το φαινόμενο της μείωσης της ιδιοσυχνότητας του συστήματος μπορεί να έχει αρνητικές συνέπειες για την αντοχή και την ασφαλή λειτουργία της κατασκευής, καθώς δημιουργείται ο κίνδυνος μετάβασης της τιμής της ιδιοσυχνότητας του πύργου της ανεμογεννήτριας σε απαγορευμένα διαστήματα τιμών. Απαγορευμένα διότι, στα διαστήματα αυτά είναι πιθανό να κυμαίνονται οι ιδιοσυχνότητες του ρότορα ή των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας. Δημιουργείται έτσι, ο κίνδυνος ανάπτυξης φαινομένων συντονισμού μεταξύ των επιμέρους τμημάτων της ανεμογεννήτριας, τα οποία ενδεχομένως οδηγούν σε κόπωση του χάλυβα.

Φυσικό επακόλουθο της διαπίστωσης αυτής αποτελεί η αναζήτηση πιθανών μεθόδων και μέτρων πρόληψης με σκοπό την αντιμετώπιση της μείωσης, και γενικότερα της απόκλισης, της ιδιοσυχνότητας της ανεμογεννήτριας από την αντίστοιχη τιμή της για την περίπτωση πάκτωσης στη βάση της.

Όπως αποδείχθηκε, η μείωση της ιδιοσυχνότητας της πακτωμένης κατασκευής είναι αναπόφευκτη. Για το λόγο αυτό επιδιώκεται η τιμή αυτή να κυμαίνεται αρχικά σε μεγαλύτερα επίπεδα, έτσι ώστε όταν ληφθεί υπόψη η επίδραση της θεμελίωσης και του υποκείμενου εδάφους, η τελική της τιμή να είναι η επιθυμητή (0,8Hz για τη συγκεκριμένη περίπτωση ανεμογεννήτριας που μελετάται). Προκειμένου να επιτευχθεί μια τέτοια διαφοροποίηση στο αρχικό μοντέλο της ανεμογεννήτριας, προτείνονται και αναλύονται δύο πιθανές λύσεις του προβλήματος.

Η πρώτη μέθοδος βασίζεται στη δυνατότητα της ανεμογεννήτριας να λαμβάνει ή να αποβάλλει (ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε περίπτωσης) κάποιο συγκεκριμένο βάρος. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας κύριο στόχο αποτελεί η αύξηση της τιμής της αρχικής ιδιοσυχνότητας. Για το λόγο αυτό επιλέγεται η μείωση της μάζας στην κορυφή της κατά 3tn. Όπως αποδείχθηκε στη συνέχεια, η μείωση αυτή της μάζας είναι αρκετή, έτσι ώστε να επιτευχθεί τελικά η επιθυμητή ταύτιση της ιδιοσυχνότητας του συστήματος εδάφους – θεμελίου – ανωδομής με την ιδιοσυχνότητα της αρχικής πακτωμένης ανεμογεννήτριας, δηλαδή την τιμή 0,8Hz.

Η δεύτερη μέθοδος που προτείνεται είναι η αύξηση της ακαμψίας του πύργου της ανεμογεννήτριας, η οποία μπορεί να επέλθει μέσω της μείωσης του ύψους του. Στην παρούσα ανεμογεννήτρια που μελετάται, επιλέγεται η μείωση του ύψους της κατά 1,8m. Όπως αποδείχθηκε από την αναλυτική και την αριθμητική διερεύνηση, η μείωση αυτή του ύψους είναι αρκετή, έτσι ώστε η ιδιοσυχνότητα του σύνθετου συστήματος να λάβει την τιμή της ιδιοσυχνότητας της αρχικής πακτωμένης ανεμογεννήτριας, δηλαδή την τιμή 0,8Hz.

Οι δύο αυτοί διαφορετικοί τρόποι παρέμβασης που προτείνονται, έχουν ουσιαστικά την ίδια επιρροή στο σύνθετο σύστημα εδάφους - θεμελίωσης - ανωδομής ανεμογεννήτριας. Τέλος, επισημαίνεται ότι, οι προτεινόμενοι μέθοδοι έχουν ως στόχο την παρέμβαση στην ήδη κατασκευασμένη ανεμογεννήτρια για την αντιμετώπιση του προβλήματος της απόκλισης της ενεργούς τιμής της ιδιοσυχνότητας, λόγω της δυναμικής αλληλεπίδρασης του σύνθετου συστήματος. Αντίστοιχα, θα μπορούσαν να προταθούν και διάφοροι μέθοδοι παρέμβασης στη θεμελίωση της ανεμογεννήτριας ή στο υποκείμενο έδαφος. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η αύξηση του μέτρου διάτμησης G του υποκείμενου εδάφους, μέσω της τοποθέτησης μεγάλου αριθμού

μεταλλικών κυλίνδρων με μεγάλο μήκος μέσα στο έδαφος στην περιοχή κάτω από το θεμέλιο της ανεμογεννήτριας. Με τον τρόπο αυτό, η εδαφική περιοχή που βρίσκεται κάτω από τη θεμελίωση της κατασκευής γίνεται πιο άκαμπτη και οι συνθήκες που επικρατούν σε αυτήν πλησιάζουν εκείνες της πάκτωσης.

6. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ

6.1. Εισαγωγή

Μετά από πληθώρα σεισμικών καταγραφών σε παγκόσμιο επίπεδο τα τελευταία κυρίως χρόνια, πολλοί ερευνητές έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι σημειώνονται ιδιαίτερα σημαντικές διακυμάνσεις μεταξύ διαφορετικών θέσεων, κατά το ίδιο σεισμικό γεγονός. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό και ως χωρική μεταβλητότητα.

Είναι πλέον γνωστό ότι η δόνηση που παρατηρείται κατά την διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος σε μία συγκεκριμένη θέση αποτελεί συνάρτηση, όχι μόνο της σεισμικής πηγής και του τρόπου διάδοσης του σεισμικού κύματος μέχρι το σεισμικό υποβάθρο, αλλά και των τοπικών συνθηκών της υπό εξέταση περιοχής. Η επιρροή των συνθηκών αυτών στην επιφανειακή σεισμική διέγερση είναι εμφανής τόσο στις χρονοϊστορίες της δόνησης, όσο και στο φασματικό (συχνοτικό) περιεχόμενο της, ενώ συχνά παρατηρείται σημαντική χρονική παράταση της δόνησης.

Ο όρος τοπικές συνθήκες αφορά ένα ευρύτατο φάσμα γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών τόσο του εδάφους, όσο και του βραχώδους υποβάθρου του. Πιο συγκεκριμένα περιλαμβάνει:

- τις εδαφικές στρωματογραφικές συνθήκες
- τις γεωμορφολογικές συνθήκες που περιλαμβάνουν τη γεωλογική δομή και τη χωρική διάταξη του υποβάθρου
- το επιφανειακό ανάγλυφο και την τοπογραφική διάταξη

Με τον όρο εδαφικές στρωματογραφικές συνθήκες εννοείται η απλουστευμένη θεώρηση της αποκλειστικής ύπαρξης οριζοντίων στρώσεων εδαφικών σχηματισμών, συμπεριλαμβανομένου του υποβάθρου, οι οποίες εκτείνονται σε άπειρο θεωρητικά μήκος (μονοδιάστατες εδαφικές συνθήκες). Αντιθέτως, ο όρος γεωμορφολογικές συνθήκες λαμβάνει υπόψη την παρουσία γεωμετρικών ανωμαλιών, τόσο των ίδιων των εδαφικών στρωμάτων, όσο και του (κατά σύμβαση σκληρού) υποβάθρου, υποθέτοντας ταυτοχρόνως οριζόντια εδαφική επιφάνεια (διδιάστατες ή πολυδιάστατες εδαφικές συνθήκες). Τελευταία συνιστώσα των τοπικών συνθηκών αποτελεί η τοπογραφία, η οποία περιορίζεται στην γεωμετρική διάταξη της μη επίπεδης επιφάνειας του εδάφους.

Είναι σαφές ότι η παραπάνω διάκριση των συνιστωσών των τοπικών συνθηκών είναι απολύτως πλασματική, και πραγματοποιείται για καθαρά πρακτικούς λόγους. Η μονοδιάστατη ή πολυδιάστατη διάδοση των σεισμικών κυματισμών διαμέσου πολύπλοκων εδαφικών σχηματισμών αποτελεί ιδιαιτέρως σύνθετο πρόβλημα. Στην πραγματικότητα, η διάκριση των τοπικών συνθηκών στα επιμέρους χαρακτηριστικά τους είναι συνήθως δύσκολη, αν όχι αδύνατη. Συνεπώς, τα φαινόμενα που παρατηρούνται αποτελούν αποτελέσματα επαλληλίας και αλληλεπιδράσεως των χαρακτηριστικών αυτών.

Οι διάφορες καταγραφές και αναλύσεις υποδεικνύουν την σημαντικότητα της επιρροής των τοπογραφικών και γεωμορφολογικών συνθηκών. Με αυτόν τον τρόπο τονίζεται έμμεσα η διδιάστατη και τριδιάστατη φύση του συγκεκριμένου προβλήματος. Το γεγονός αυτό καθιστά τις μονοδιάστατες αναλύσεις ανεπαρκείς σε πολλές περιπτώσεις, κάνοντας απαραίτητη τη χρήση πολυδιάστατων αναλύσεων σεισμικής απόκρισης.

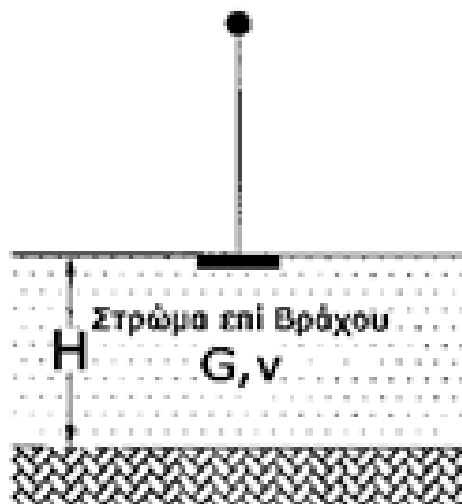
Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αρχικά η προσπάθεια της περιγραφής των φυσικών φαινομένων που διέπουν την επίδραση των τοπικών, και πιο συγκεκριμένα των γεωμορφολογικών, συνθηκών στην σεισμική δόνηση. Οι συνθήκες αυτές αφορούν κυρίως τη μη - κανονική εδαφική στρωματογραφία της υπό εξέταση περιοχής. Πραγματοποιείται προσπάθεια εκτίμησης των επιπτώσεων των γεωμορφολογικών ανωμαλιών στο σεισμικό κραδασμό τόσο ποιοτικά, όσο και ποσοτικά. Για την μελέτη των συνθηκών αυτών, εξετάζεται η περίπτωση επιφανειακής θεμελίωσης ανεμογεννήτριας σε εδαφική κοιλάδα με έντονα διδιάστατα χαρακτηριστικά. Μέσω αριθμητικών διδιάστατων αναλύσεων με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS και του λογισμικού Seismosignal εντοπίζεται η πιθανολογούμενη ενίσχυση της επιφανειακής δόνησης στην περιοχή που θεμελιώνεται η ανεμογεννήτρια, η οποία οφείλεται όχι μόνον στις εδαφικές συνθήκες, αλλά και στη γεωμορφολογία των εδαφικών στρωμάτων και του υποβάθρου.

6.2. Τοποθέτηση του προβλήματος

6.2.1. Οριζόντια εδαφική στρωματογραφία

Η απλούστερη δυνατή απεικόνιση της υφιστάμενης κατάστασης της γεωμορφολογίας του εδάφους είναι η παρουσία ενός ή περισσοτέρων οριζοντίων εδαφικών στρωμάτων επί του σκληρού υποβάθρου, τα οποία εκτείνονται θεωρητικώς στο άπειρο (Εικ. 6.1). Στην περίπτωση

αυτή η ανάλυση ονομάζεται μονοδιάστατη, διότι το πρόβλημα υποτίθεται ότι έχει μία μόνο διάσταση, αυτή του πάχους H των εδαφικών στρωμάτων. Υπενθυμίζεται ότι τέτοιου είδους αναλύσεις έχουν πραγματοποιηθεί στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μέχρι αυτή τη στιγμή. Σύμφωνα με την ανάλυση αυτή, η σεισμική συμπεριφορά των εδαφικών στρωμάτων οφείλεται αποκλειστικά στην κατακόρυφη διάδοση με ταχύτητα V_s των οριζοντίων διατμητικών κυμάτων από το υποκείμενο υπόβαθρο προς την επιφάνεια μέσω των εδαφικών στρωμάτων. Το φαινόμενο της εδαφικής ενίσχυσης (ή της εδαφικής απομείωσης σε ορισμένες περιπτώσεις) έγκειται στην παγίδευση των κυμάτων αυτών λόγω της σταδιακής απομείωσης τόσο της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων, όσο και της πυκνότητας των εδαφικών υλικών. Ουσιαστικά ενισχύονται οι αρμονικές συνιστώσες του προσπίπτοντος κυματισμού, των οποίων η συχνότητα πλησιάζει τις ιδιοσυχνότητες του εδάφους. Στην ειδική περίπτωση όπου αυτές οι συχνότητες ταυτιστούν, παρατηρείται το φαινόμενο του συντονισμού, και η εδαφική ενίσχυση λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της.



Εικ. 6.1. Οριζόντιο εδαφικό στρώμα επί βραχώδους υποβάθρου

Πολλές φορές, λόγω της δυσχέρειας που παρουσιάζει η διδιάστατη και τριδιάστατη θεώρηση της σεισμικής απόκρισης, στις περιπτώσεις που οι εδαφικές και γεωμορφολογικές συνθήκες παρουσιάζουν χωρική ποικιλομορφία, εκτελούνται απλοποιητικά περισσότερες μονοδιάστατες αναλύσεις σε διάφορες θέσεις. Για να γίνει αυτό, χρησιμοποιείται σε κάθε θέση μία εδαφική στήλη δεδομένου εύρους, η οποία περιγράφει τις συνθήκες στη θέση αυτή. Η θεώρηση αυτή, αν και χονδροειδής, αποτελεί πάγια τακτική που εφαρμόζεται ως η απλούστερη δυνατή λύση. Παρόλ' αυτά ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ μονοδιάστατων αναλύσεων και καταγραφών παρατηρείται μόνο στην περίπτωση που η υπόθεση οριζόντιας στρωματογραφίας είναι αρκετά κοντά στη πραγματικότητα.

Γίνεται εύκολα κατανοητό ότι σε περιπτώσεις κατά τις οποίες παρουσιάζονται έντονες γεωμορφολογικές ιδιαιτερότητες στην περιοχή μελέτης, οι μονοδιάστατες αναλύσεις του προβλήματος αδυνατούν να επαληθεύσουν τις διάφορες καταγραφές και να προβλέψουν με επιτυχία την αναμενόμενη σεισμική συμπεριφορά του μοντέλου. Στις περιπτώσεις αυτές, η πολυδιάστατη θεώρηση αποτελεί μονόδρομο για τον μελετητή, ώστε να ληφθούν υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της υπό εξέταση περιοχής.

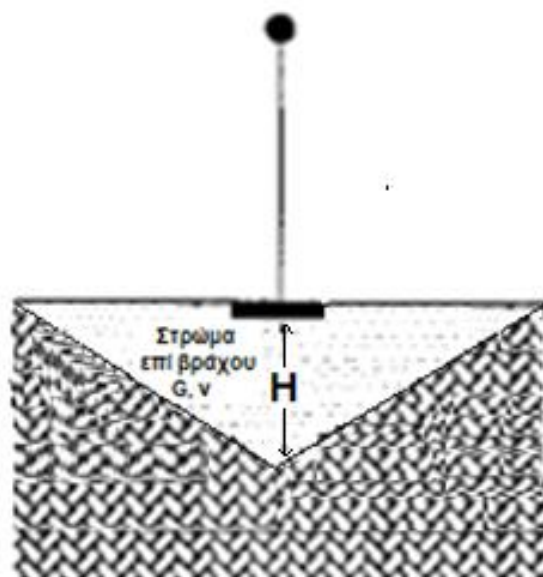
6.2.2. Γεωμορφολογικές συνθήκες

Τα τελευταία κυρίως χρόνια με την εντατικοποίηση των γεωτεχνικών – γεωφυσικών ερευνών και την ραγδαία ανάπτυξη των αριθμητικών – υπολογιστικών εργαλείων που χρησιμοποιούνται, έχει επικρατήσει η πεποίθηση ότι η ενίσχυση τού σεισμικού κραδασμού οφείλεται, όχι μόνο στην στρωματογραφία του εδάφους, αλλά και στις γεωμορφολογικές του συνθήκες. Οι συνθήκες αυτές αφορούν την γεωλογική δομή και την χωρική γεωμετρία τού εδαφικού υποβάθρου.

Στην πεποίθηση αυτή οδήγησε το γεγονός ότι σε αρκετές περιπτώσεις σεισμικών διεγέρσεων, οι μονοδιάστατες αναλύσεις έχουν αποδειχθεί ανεπαρκείς στο να αποδώσουν τις ανομοιόμορφες καταγραφές επιταχύνσεων, αλλά και τις συγκεντρώσεις βλαβών σε περιοχές που δεν χαρακτηρίζονται από οριζόντια στρωματογραφία.

Χαρακτηριστική περίπτωση γεωμορφολογικής ανωμαλίας αποτελούν οι κοιλάδες εδαφικών αποθέσεων (Εικ. 6.2.) Διάφορες μελέτες και διάφορα διδιάστατα προσομοιώματα έχουν αναπτυχθεί και προταθεί τα τελευταία χρόνια για τη διερεύνηση της επίδρασης των κοιλάδων στον επιφανειακό σεισμικό κραδασμό. Σύμφωνα με τις μελέτες αυτές, ένας σεισμικός κυματισμός, ο

οποίος εισχωρεί σε μία κοιλάδα μέσω του βραχώδους υποβάθρου της, δύναται να παγιδευτεί εντός αυτής εάν αναπτυχθούν υπερκρίσιμες γωνίες πρόσπτωσης. Επίσης, τα κύματα χώρου που εισέρχονται από τα άκρα της κοιλάδας, μετατρέπονται σε επιφανειακά κύματα, τα οποία κινούνται και συγκρούονται διαρκώς μεταξύ των δύο άκρων της κοιλάδας.



Εικ. 6.2. Κοιλιάδα εδαφικών αποθέσεων

Τα φαινόμενα αυτά ευθύνονται για τις ιδιαίτερες υψηλές ενισχύσεις που παρατηρούνται συγκριτικά με τη μονοδιάστατη θεώρηση του προβλήματος. Η σεισμική συμπεριφορά μίας κοιλάδας εξαρτάται από τις συχνότητες της σεισμικής διέγερσης, και ιδιαίτερες από την σχέση που αυτές έχουν με τα μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των εδαφικών σχηματισμών. Πέρα από τις σημαντικές ενισχύσεις και τις κύριες συνέπειες τους στις κατασκευές, η γεωμορφολογία ευθύνεται και για δύο επιπλέον δευτερεύοντα φαινόμενα, τα οποία μπορούν να αποβούν καθοριστικής σημασίας σε περιπτώσεις ισχυρών σεισμών και ευαίσθητων κατασκευών:

- Την αύξηση της διάρκειας της σημαντικής δόνησης, ιδιαίτερες σε μεγάλες περιόδους (μικρές συχνότητες), η οποία συνεπάγεται την αύξηση των κύκλων φόρτισης και την επιπρόσθετη καταπόνηση των κατασκευών.

- Οι σημαντικές σε μέγεθος διαφορικές κινήσεις μεταξύ κοντινών επιφανειακών θέσεων μπορούν να οδηγήσουν σε βλάβες και καταστροφές μεγάλων σε μήκος κατασκευών, όπως γέφυρες, αγωγοί και δίκτυα πάσης φύσεως.

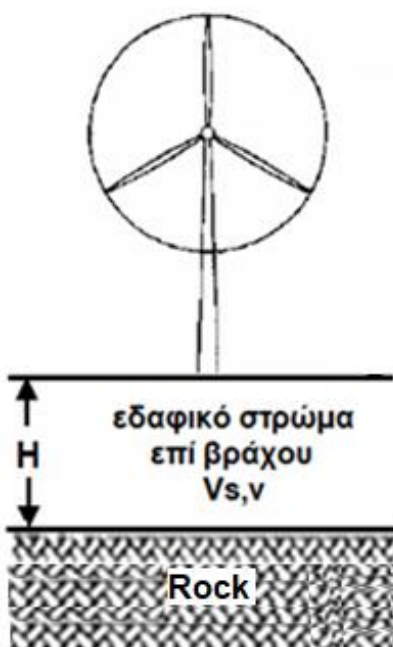
Όπως έχει ήδη τονισθεί, η μονοδιάστατη ανάλυση με τις απλοποιητικές παραδοχές της αμελεί τη γεωμορφολογία του εδάφους και περιορίζεται στην επίδραση της στρωματογραφίας του. Με τον τρόπο αυτό δεν λαμβάνεται υπόψη η εδαφική ενίσχυση, ενώ είναι αδύνατον να προβλεφθεί η χρονική παράταση της δόνησης και οι διαφορικές επιφανειακές δονήσεις.

Η συστηματική συλλογή και επεξεργασία καταγραφών και δεδομένων σε παγκόσμιο επίπεδο, σε συνδυασμό με την ευρεία ανάπτυξη των αριθμητικών μεθόδων και των υπολογιστικών εργαλείων, καθιστά εφικτή την ποιοτική και ποσοτική εκτίμηση της επίδρασης των γεωμορφολογικών συνθηκών στην αναμενόμενη σεισμική δόνηση. Γενικά, οι γεωμορφολογικές συνθήκες (σε συνδυασμό βεβαίως με την στρωματογραφία της περιοχής) μπορεί να αποδειχθούν καθοριστικός παράγοντας για την σεισμική απόκριση αυτής, αλλά και των κατασκευών που βρίσκονται θεμελιωμένες σε αυτήν.

Στο σημείο αυτό πραγματοποιείται μία τέτοιου είδους μελέτη για τον προσδιορισμό του βαθμού επιρροής της γεωμορφολογικής ανωμαλίας στη σεισμική απόκριση μίας τυπικής ανεμογεννήτριας, η οποία θεμελιώνεται άκαμπτα στην επιφάνεια κοιλάδας εδαφικών αποθέσεων.

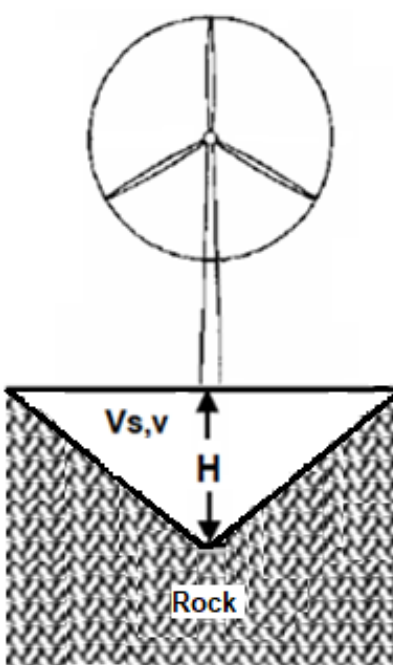
6.3. Μελέτη περίπτωσης ανεμογεννήτριας επί κοιλάδας

Στο Κεφάλαιο 4 της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε αριθμητική διερεύνηση για την περίπτωση μίας τυπικής ανεμογεννήτριας που υποβάλλεται σε σεισμική διέγερση. Η ανεμογεννήτρια αυτή, κατά τη διάρκεια των επιμέρους αναλύσεων, θεωρήθηκε επιφανειακά θεμελιωμένη σε οριζόντιο εδαφικό στρώμα πάχους H επί βραχώδους υποβάθρου, το οποίο εκτεινόταν θεωρητικώς στο άπειρο. Έγινε, δηλαδή, η παραδοχή μονοδιάστατης θεώρησης του προβλήματος, σύμφωνα με την οποία, η σεισμική συμπεριφορά των εδαφικών στρωμάτων οφείλεται αποκλειστικά στην κατακόρυφη διάδοση με ταχύτητα V_s των οριζοντίων διατμητικών κυμάτων από το υποκείμενο υπόβαθρο προς την επιφάνεια μέσω του εδαφικού στρώματος. Υπενθυμίζεται ότι εξετάστηκαν διάφορες περιπτώσεις εδαφικών σχηματισμών, όσον αφορά την ευκαμψία τους (ταχύτητα V_s ή μέτρο διάτμησης G) και την έκτασή τους (πάχος H). (Εικ. 6.3)



Εικ. 6.3. Ανεμογεννήτρια επί οριζοντίου εδαφικού στρώματος

Στο παρόν Κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί αριθμητική διερεύνηση για την ίδια ανεμογεννήτρια με τη διαφοροποίηση της θέωσης θεμελίωσης της σε περιοχή με γεωμορφολογική ανωμαλία, και πιο συγκεκριμένα σε κοιλάδα εδαφικών αποθέσεων (Εικ. 6.4).



Εικ. 6.4. Ανεμογεννήτρια επί κοιλάδας εδαφικών αποθέσεων

Στόχο στο σημείο αυτό, αποτελεί η εκτίμηση της επίδρασης των τοπικών (και πιο συγκεκριμένα των γεωμορφολογικών) συνθηκών, πέραν των εδαφικών και στρωματογραφικών, στην καταπόνηση και κατ' επέκταση την απόκριση της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας. Πρόκειται επί της ουσίας, για τη μετάβαση από τη μονοδιάστατη στη διδιάστατη ανάλυση του παρόντος προβλήματος με σκοπό την εξαγωγή αποτελεσμάτων, τα οποία βρίσκονται πιο κοντά στις πραγματικές συνθήκες.

Η ανεμογεννήτρια που εξετάζεται, έχει ισχύ ίση με 800kW. Το ύψος του πυλώνα, ή αλλιώς η απόσταση του άξονα του ρότορα από την επιφάνεια του εδάφους, ορίζεται στα 50m. Η διάμετρος του ρότορα είναι και αυτή 50m, ενώ η μάζα του ισούται με 32tn. Το βάρος του πύργου (εκτός του ρότορα) αμελείται και ο πύργος είναι κατασκευασμένος από χάλυβα. Τέλος, η ιδιοσυχνότητα του πυλώνα της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας θεωρείται ίση με $f_c = 0,8\text{Hz}$ ή αντίστοιχα η ιδιοπερίοδος ίση με $T_c = 1,25\text{sec}$, για την περίπτωση θεώρησης πάκτωσης στη βάση της.

Για να μελετηθεί η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια και να πραγματοποιηθούν οι επιμέρους αναλύσεις, λαμβάνεται και πάλι ως ένας μονοβάθμιος ταλαντωτής μάζας, ο οποίος θεμελιώνεται επιφανειακά στο έδαφος.

Ο θεωρούμενος μονοβάθμιος ταλαντωτής έχει μάζα ίση με $m = 32\text{tn}$ (ή αλλιώς βάρος $W = 320\text{kN}$), ύψος $h = 50\text{m}$ και ιδιοσυχνότητα $f_c = 0,8\text{Hz}$, ενώ η απόσβεση στο έδαφος και στον ταλαντωτή θεωρείται ίση με 2%. Όπως έχει ήδη τονισθεί, η απόσβεση του υλικού λαμβάνεται υπόψη στις αναλύσεις μέσω των σταθερών του Rayleigh. Για απόσβεση υλικού $\xi = 2\%$ και ιδιοπερίοδο $T = 1,25\text{sec}$, οι σταθερές α και β του Rayleigh λαμβάνουν τις τιμές 0,101 και 0,004 αντίστοιχα.

Ο συντελεστής ακαμψίας του πακτωμένου μονοβάθμιου ταλαντωτή υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$k = \frac{4 * \pi^2 * m}{T_c^2} = \frac{4 * \pi^2 * 32}{1,25^2} = 808,52 \text{ kN/m}$$

Όσον αφορά το υποκείμενο έδαφος, όπως ήδη τονίστηκε, στο σημείο αυτό θα εξεταστεί η περίπτωση κοιλάδας εδαφικών αποθέσεων. Κατά την περίπτωση αυτή θεωρείται ότι τόσο το βραχώδες υπόβαθρο, όσο και το εδαφικό υλικό επί αυτού, δεν παρουσιάζουν σταθερό πάχος H . Με άλλα λόγια η στρωματογραφία παύει να θεωρείται οριζόντια (Εικ. 6.4). Ωστόσο, η επιφάνεια του εδάφους διατηρείται οριζόντια. Το πάχος της εδαφικής απόθεσης πάνω από το σκληρό

υπόβαθρο λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του H στην οριζόντια θέση, στην οποία θεμελιώνεται η ανεμογεννήτρια. Το πάχος αυτό μειώνεται γραμμικά εκατέρωθεν της θέσης θεμελίωσης, όσο απομακρυνόμαστε από αυτήν, ώσπου τελικά μηδενίζεται και στην επιφάνεια του εδάφους συναντάται πλέον το βραχώδες υλικό του υποβάθρου.

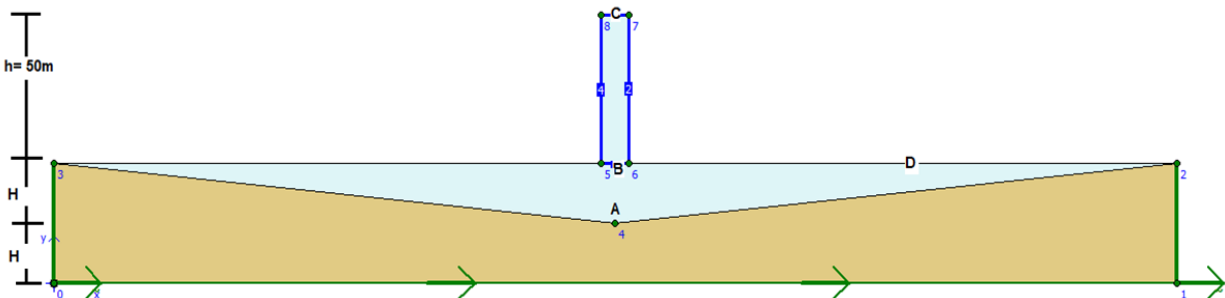
Για την εδαφική αυτή απόθεση της κοιλάδας λαμβάνονται οι εξής ιδιότητες: (α) ειδικό βάρος $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ και (β) λόγος Poisson $\nu = 0,3$. Εξετάζονται διάφορες περιπτώσεις για το μέγιστο βάθος H του κατώτερου σημείου της κοιλάδας και για την ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος V_s . Πιο συγκεκριμένα, εξετάζονται τρία διαφορετικά πάχη H κατά τη διάρκεια των αναλύσεων, τα οποία είναι τα 10m, 20m και 40m. Αντίστοιχα, οι ταχύτητες διάδοσης του διατμητικού κύματος V_s που ελέγχονται, είναι οι 110m/sec και 240m/sec, ώστε να ληφθεί υπόψη η διαφοροποίηση της ευκαμψίας (ή δυσκαμψίας) του εδάφους.

Όπως έχει ήδη τονισθεί, προκειμένου να προκύψει μία πιο ολοκληρωμένη και πιο αντιπροσωπευτική εικόνα της απόκρισης ενός μοντέλου, κρίνεται σκόπιμη η φόρτιση του με ένα σύνολο αρμονικών διεγέρσεων διαφόρων μορφών, ευρών, συχνοτήτων και αριθμών κύκλων. Αυτός ο συνδυασμός περιπτώσεων μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ενός χαρακτηριστικού παλμού, όπως είναι ο παλμός Ricker. Για το λόγο αυτό, επιλέγεται η διέγερση κάθε μοντέλου στη βάση του από έναν παλμό Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα $f = 0,5 \text{ Hz}$ ή $f = 2 \text{ Hz}$.

Η διαδικασία της αριθμητικής διερεύνησης των διαφόρων μοντέλων που ακολουθείται στις επιμέρους αναλύσεις, είναι η ίδια με εκείνη που έχει ήδη παρουσιαστεί και εφαρμοστεί στις προηγούμενες αναλύσεις της παρούσας εργασίας.

Στα πλαίσια της μοντελοποίησης της ανεμογεννήτριας στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS, ο μονοβάθμιος ταλαντωτής προσομοιώνεται ως ένας πλαισιακός φορέας ύψους 50m και μήκους 10m. Η θέση θεμελίωσης του ταλαντωτή βρίσκεται στο σημείο, όπου η κοιλάδα παρουσιάζει το μέγιστο βάθος της H . Το βραχώδες υπόβαθρο που υπόκειται της κοιλάδας, στην πραγματικότητα θεωρείται ένα ημι-άπειρο μέσο, χωρίς πεπερασμένη έκταση στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση. Για να αποφευχθεί το φαινόμενο του “box effect”, κατά το οποίο η ενέργεια του συστήματος παγιδεύεται εντός των συνόρων και διαστρεβλώνει τα δυναμικά του χαρακτηριστικά, ορίζονται απορροφητικά σύνορα ακτινοβολίας στη βάση, το δεξί και το αριστερό σύνορο της εδαφικής στρώσης. Τα σύνορα αυτά απορροφούν την ενέργεια ακτινοβολίας του συστήματος και δεν την παγιδεύουν εντός του μοντέλου. Στην Εικ. 6.5 που ακολουθεί,

παρουσιάζεται η γεωμετρία και οι συνοριακές συνθήκες του μοντέλου του μονοβάθμιου ταλαντωτή που εξετάζεται.



Εικ. 6.5. Μοντέλο μονοβάθμιου ταλαντωτή (PLAXIS)

Ορίζονται τέσσερα σημεία σε κομβικές θέσεις του μοντέλου. Το σημείο A ορίζεται στο κατώτερο σημείο της κοιλάδας, το σημείο B στη βάση του ταλαντωτή (ή αλλιώς στην επιφάνεια του εδάφους), το σημείο C στην κορυφή του ταλαντωτή και το σημείο D στην επιφάνεια του εδάφους και σε μακρινή απόσταση από τον ταλαντωτή (100m).

Μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS υπολογίζονται οι χρονοϊστορίες της οριζόντιας επιτάχυνσης a_x στα σημεία A, B, C και D, που οφείλονται στον επιβαλλόμενο παλμό Ricker στη βάση του εδαφικού στρώματος. Στη συνέχεια, με τη χρήση του λογισμικού SeismoSignal της SeismoSoft εξάγονται τα φάσματα Fourier για τα σημεία αυτά μέσω του μετασχηματισμού Fourier (Fast Fourier Transformation - FFT) των αντιστοίχων φασμάτων χρονοϊστορίας της οριζόντιας επιτάχυνσης. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός του συντελεστή ενίσχυσης AF λόγω της δημιουργίας συντονιστικών φαινομένων στο σύστημα, καθώς και ο προσδιορισμός της ιδιοσυχνότητας του στο σημείο μεγιστοποίησης του συντελεστή αυτού. Υπενθυμίζεται ότι ο συντελεστής ενίσχυσης AF συναρτήσει της συχνότητας f προκύπτει με διαίρεση των τιμών του μετασχηματισμού Fourier στην κορυφή προς τις αντίστοιχες τιμές του μετασχηματισμού Fourier στη βάση.

Στην προκειμένη περίπτωση αναλύσεων, ενδιαφέρον παρουσιάζει η διαφοροποιημένη ιδιοσυχνότητα και ο διαφοροποιημένος συντελεστής ενίσχυσης της εδαφικής απόθεσης, λόγω της ύπαρξης γεωμορφολογικής ανωμαλίας και της διδιάστατης διάδοσης των διατμητικών κυματισμών. Για το λόγο αυτό κρίνεται σκόπιμος ο προσδιορισμός του συντελεστή ενίσχυσης της

διέγερσης μεταξύ των σημείων A και B, δηλαδή μεταξύ του κατώτερου σημείου της εδαφικής κοιλάδας και της επιφάνειας του εδάφους, μέσω της σχέσης:

$$AF(f) = \frac{\text{Fourier Amplitude}(f), \text{Point B}}{\text{Fourier Amplitude}(f), \text{Point A}}$$

6.3.1. Μοντέλο ταλαντωτή σε κοιλάδα με H=20m

Αρχικά, το μέγιστο βάθος H του κατώτερου σημείου της κοιλάδας επί της οποίας θεμελιώνεται η ανεμογεννήτρια, λαμβάνεται ίσο με 20m. Εξετάζονται δύο περιπτώσεις εδαφικού υλικού, ως προς την ευκαμψία του. Πιο συγκεκριμένα, για την ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος V_s , λαμβάνονται οι τιμές 110 m/sec και 240 m/sec.

Στην πρώτη περίπτωση εδάφους, όπου $V_s=110$ m/sec, η διέγερση η οποία επιβάλλεται στη βάση του βραχώδους υποβάθρου και διαδίδεται προς τα πάνω στο υπόλοιπο μοντέλο, είναι ένα παλμός Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα $f=0,5$ Hz.

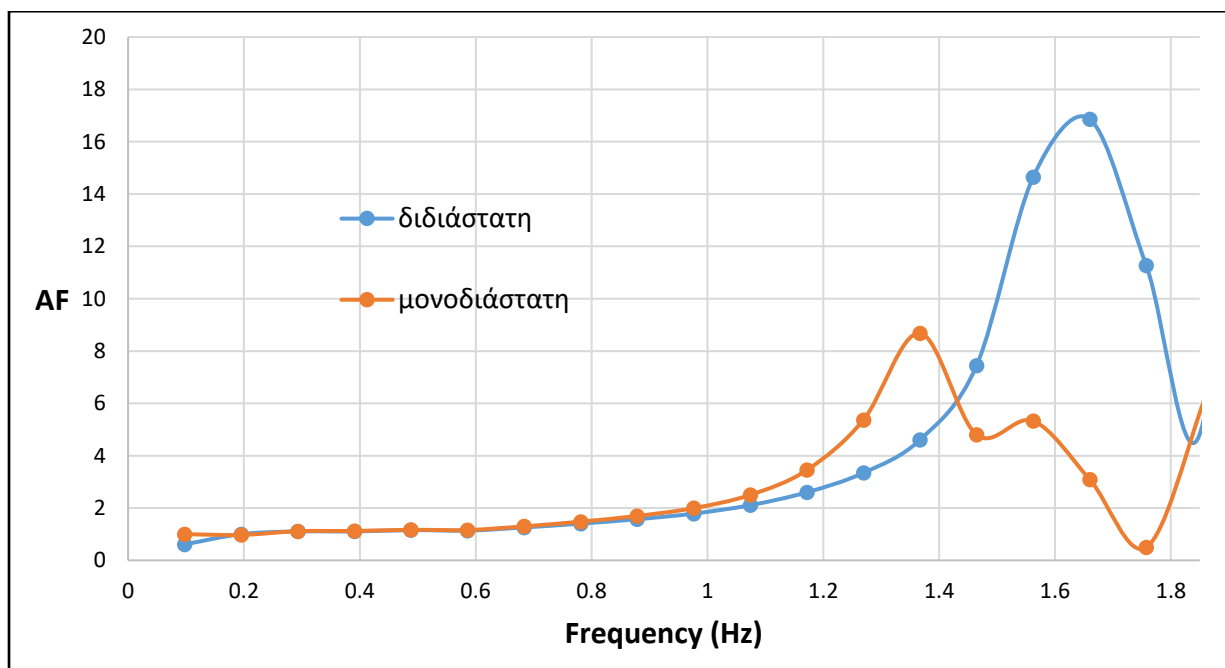
Υπενθυμίζεται ότι η ιδιοσυχνότητα ενός εδαφικού στρώματος σε μονοδιάστατη ανάλυση προκύπτει από την αναλυτική λύση:

$$f_s = \frac{V_s}{4 * H}$$

όπου H το πάχος του εδαφικού στρώματος πάνω από το βραχώδες υπόβαθρο και V_s η ταχύτητα του διατμητικού κύματος στο στρώμα αυτό. Άρα στην προκειμένη περίπτωση προκύπτει ότι:

$$f_s = \frac{110}{4 * 20} = 1,375\text{Hz}$$

Στο Διαγρ. 6.1 που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι μεταβολές των συντελεστών ενίσχυσης AF του εδάφους συναρτήσει της συχνότητας f, για τις περιπτώσεις απουσίας (μονοδιάστατη ανάλυση) και παρουσίας (διδιάστατη ανάλυση) γεωμορφικών συνθηκών. Το σημείο στο οποίο κάθε καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης παρουσιάζει μέγιστο, αποδίδει και την αντίστοιχη ιδιοσυχνότητα του εδάφους f_s .



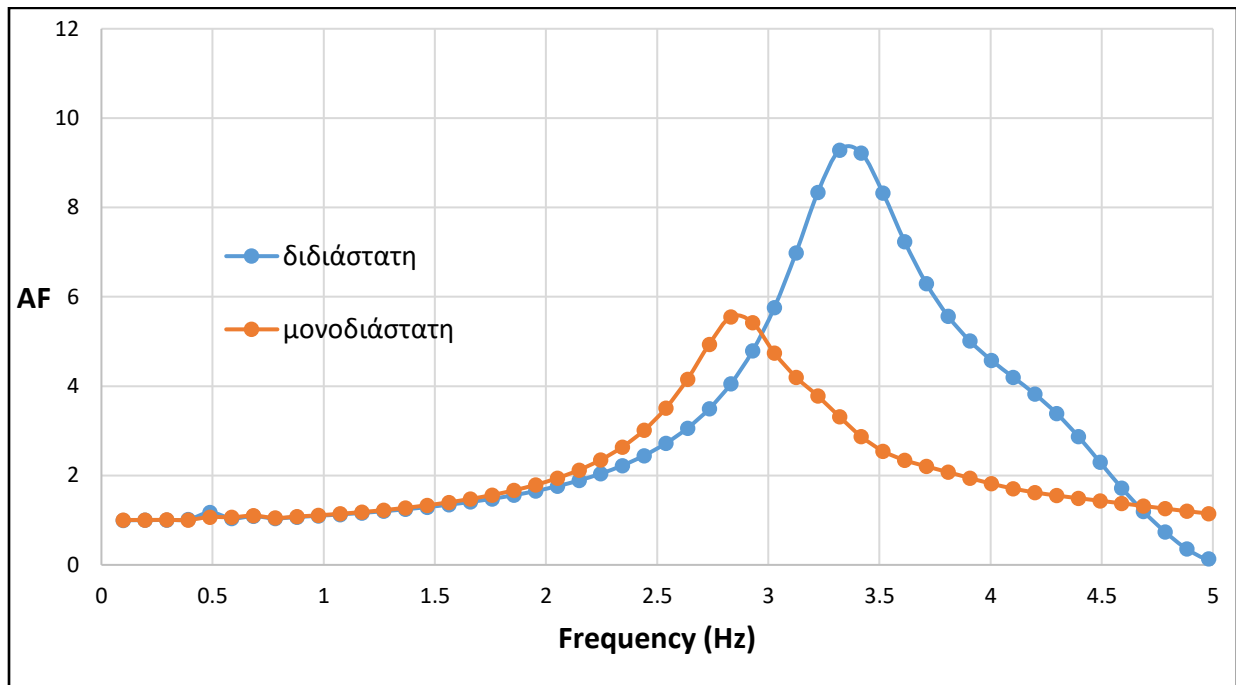
Διαγρ. 6.1. Συντελεστής ενίσχυσης AF συναρτήσει της συχνότητας f

Η καμπύλη με το πορτοκαλί χρώμα αντιστοιχεί στην περίπτωση μονοδιάστατης ανάλυσης, κατά την οποία το εδαφικό στρώμα πάνω από τον βράχο είναι οριζόντιο και διατηρεί σταθερό πάχος H . Από την άλλη, η καμπύλη με το μπλε χρώμα αντιστοιχεί στην περίπτωση διδιάστατης ανάλυσης, κατά την οποία θεωρείται ο σχηματισμός κοιλάδας εδαφικών αποθέσεων επί του βραχώδους υποβάθρου με μέγιστο πάχος H στο μέσο της έκτασης της. Όπως παρατηρείται στο Διάγραμμα αυτό, η ιδιοσυχνότητα του εδάφους στη μονοδιάστατη ανάλυση βρίσκεται περί τα 1,3Hz, τιμή η οποία επαληθεύεται και από την αναλυτική λύση. Αντίθετα, στην περίπτωση της διδιάστατης ανάλυσης, η ιδιοσυχνότητα του εδάφους σημειώνει αύξηση στην τιμή 1,65Hz. Αύξηση ωστόσο, σημειώνει και ο συντελεστής ενίσχυσης AF της σεισμικής διέγερσης στην περίπτωση της κοιλάδας, ο οποίος σχεδόν διπλασιάζεται.

Στη δεύτερη περίπτωση εδαφικού υλικού, όπου $V_s=240$ m/sec, η διέγερση η οποία επιβάλλεται στη βάση του βραχώδους υποβάθρου είναι ένα παλμός Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα $f=2$ Hz αυτή τη φορά. Στην προκειμένη περίπτωση η ιδιοσυχνότητα του εδαφικού στρώματος σε μονοδιάστατη ανάλυση προκύπτει από την αναλυτική λύση ίση με

$$f_s = \frac{240}{4 * 20} = 3\text{Hz}$$

Όμοια με την προηγούμενη περίπτωση, στο Διαγρ. 6.2 που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι μεταβολές των συντελεστών ενίσχυσης AF του εδάφους συναρτήσει της συχνότητας f , για τις περιπτώσεις μονοδιάστατης (πορτοκαλί χρώμα) και διδιάστατης (μπλε χρώμα) ανάλυσης.



Διαγρ. 6.2. Συντελεστής ενίσχυσης AF συναρτήσει της συχνότητας f

Όπως παρατηρείται, η ιδιοσυχνότητα του εδάφους στη μονοδιάστατη ανάλυση βρίσκεται περί τα 2,85Hz, δηλαδή λίγο κάτω από την αναλυτική λύση (3Hz). Στη διδιάστατη θεώρηση του προβλήματος, η ιδιοσυχνότητα του εδάφους σημειώνει αύξηση στην τιμή 3,4Hz, ενώ ο συντελεστής ενίσχυσης AF της σεισμικής διέγερσης στο έδαφος αυξάνεται περίπου κατά 66%.

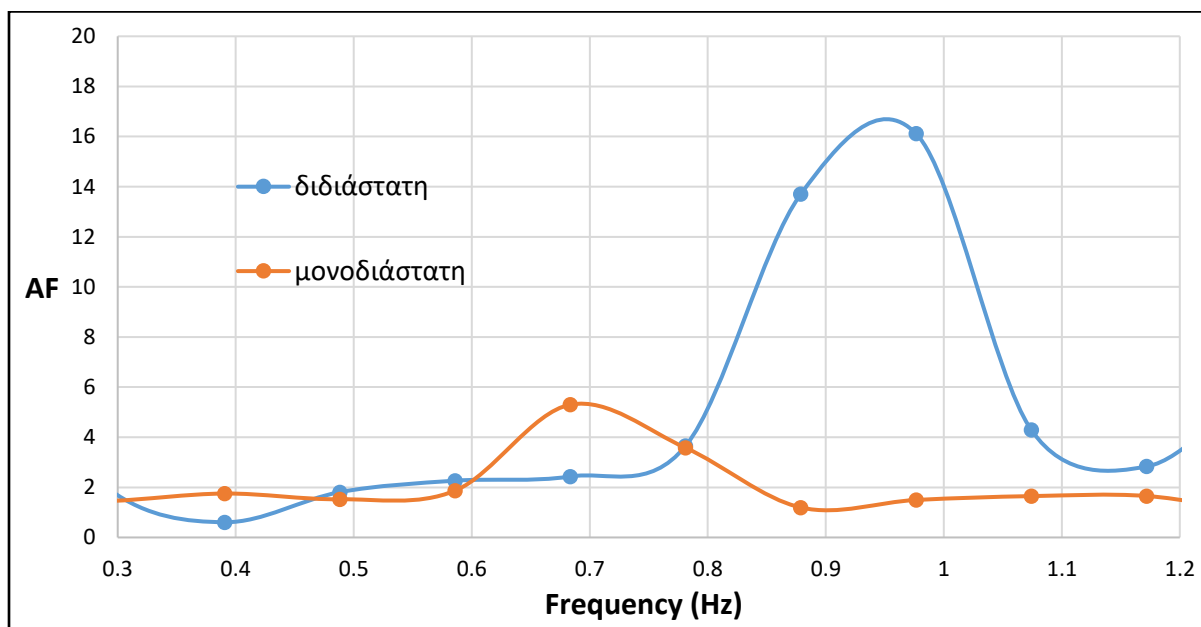
6.3.2. Μοντέλο ταλαντωτή σε κοιλάδα με $H=40\text{m}$

Στο σημείο αυτό, το μέγιστο βάθος H της κοιλάδας επί της οποίας θεμελιώνεται η ανεμογεννήτρια, αυξάνεται στα 40m, ενώ εξετάζονται και πάλι δύο περιπτώσεις εδαφικού υλικού.

Στην πρώτη περίπτωση εδάφους, η ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος V_s εντός του εδαφικού υλικού επιλέγεται ίση με 110 m/sec. Το εν λόγω μοντέλο διεγείρεται από παλμό Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα $f=0,5\text{Hz}$. Στην προκειμένη περίπτωση, η ιδιοσυχνότητα του εδαφικού στρώματος σε μονοδιάστατη ανάλυση προκύπτει μέσω της αναλυτικής λύσης:

$$f_s = \frac{110}{4 * 40} = 0,688\text{Hz}$$

Με τη γνωστή διαδικασία του μετασχηματισμού Fourier (Fast Fourier Transformation - FFT) των φασμάτων χρονοϊστορίας της οριζόντιας επιτάχυνσης στα σημεία A και B του μοντέλου στα αντίστοιχα φάσματα Fourier, πραγματοποιείται ο υπολογισμός του συντελεστή ενίσχυσης AF λόγω της δημιουργίας συντονιστικών φαινομένων στο σύστημα, καθώς και ο προσδιορισμός της ιδιοσυχνότητας του στο σημείο μεγιστοποίησης του συντελεστή αυτού, τόσο για μονοδιάστατη όσο και πολυδιάστατη θεώρηση του προβλήματος (Διαγρ. 6.3).

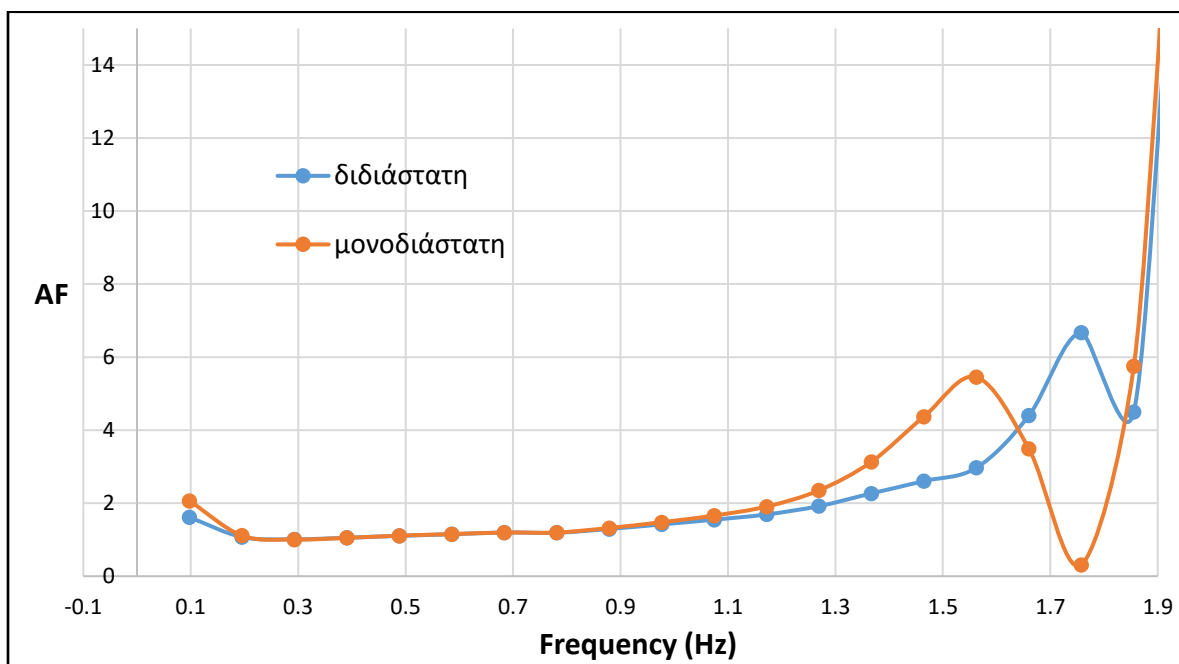


Διαγρ. 6.3. Συντελεστής ενίσχυσης AF συναρτήσει της συχνότητας f

Σύμφωνα με το Διάγραμμα αυτό, η ιδιοσυχνότητα του εδάφους για τη μονοδιάστατη θεώρηση βρίσκεται περί τα 0,683Hz, το οποίο επαληθεύεται και από την αναλυτική λύση, ενώ ο συντελεστής ενίσχυσης AF στο έδαφος ισούται με 5,3. Στη διδιάστατη θεώρηση του

προβλήματος, η ιδιοσυχνότητα του εδάφους σημειώνει αύξηση στην τιμή 0,95Hz, ενώ ο συντελεστής ενίσχυσης AF της σεισμικής διέγερσης στο έδαφος φτάνει στην τιμή 16,5 περίπου. Στη δεύτερη περίπτωση εδαφικού υλικού, η ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος V_s εντός του εδαφικού υλικού επιλέγεται ίση με 240 m/sec, ενώ η επιβαλλόμενη διέγερση παραμένει η ίδια (παλμός Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα $f=0,5\text{Hz}$).

Όμοια με την προηγούμενη περίπτωση, στο Διαγρ. 6.4 που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι καμπύλες μεταβολής των συντελεστών ενίσχυσης του εδάφους συναρτήσει της συχνότητας, για τις περιπτώσεις μονοδιάστατης και διδιάστατης ανάλυσης.



Διαγρ. 6.4. Συντελεστής ενίσχυσης AF συναρτήσει της συχνότητας f

Παρατηρείται ότι, η ιδιοσυχνότητα του εδάφους για τη μονοδιάστατη θεώρηση βρίσκεται λίγο πάνω από τα 1,5Hz. Σημειώνεται ότι, σύμφωνα με την αναλυτική λύση η ιδιοσυχνότητα του εδαφικού στρώματος για τη συγκεκριμένη περίπτωση υπολογίζεται ίση με

$$f_s = \frac{240}{4 * 40} = 1,5\text{Hz}$$

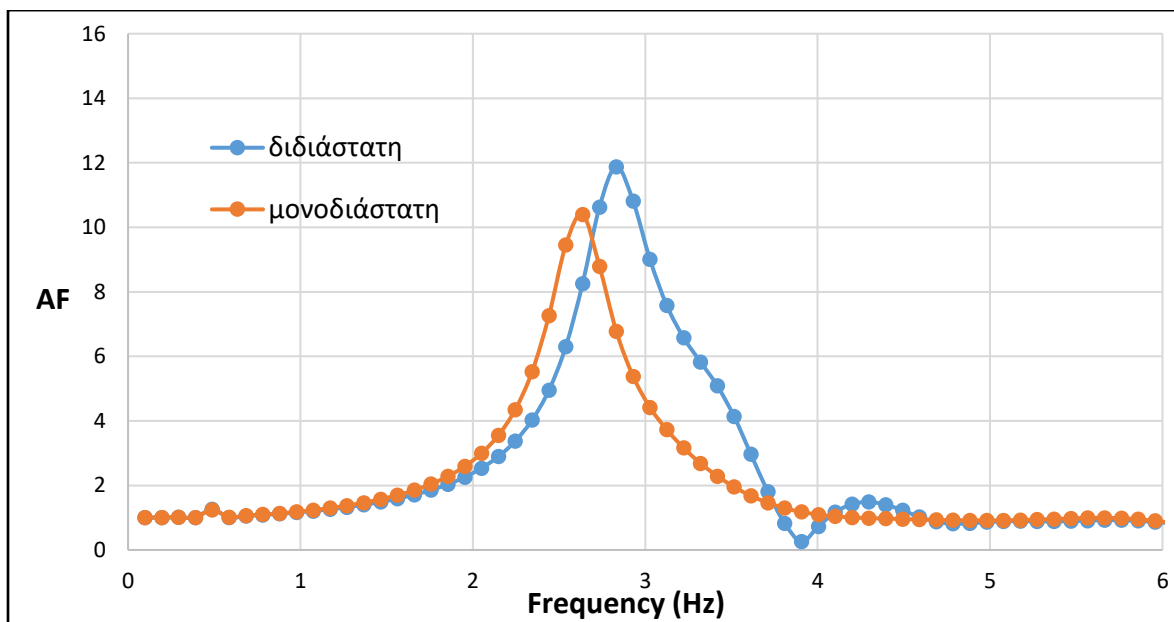
Για τη διδιάστατη θεώρηση του προβλήματος, η ιδιοσυχνότητα της εδαφικής απόθεσης σημειώνει αύξηση στην τιμή 1,76Hz. Όσον αφορά το συντελεστή ενίσχυσης AF εντός του εδάφους, σημειώνεται μία μικρή αύξηση κατά τη διδιάστατη θεώρηση, η οποία είναι της τάξης του 22% περίπου.

6.3.3. Μοντέλο ταλαντωτή σε κοιλάδα με H=10m

Τέλος, εξετάζεται και η περίπτωση μείωσης το μεγίστου βάθους H της κοιλάδας επί της οποίας θεμελιώνεται η ανεμογεννήτρια, στα 10m. Η ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος V_s εντός του εδαφικού υλικού λαμβάνεται ίση με 110 m/sec, ενώ το σύστημα διεγείρεται από παλμό Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα $f=2\text{Hz}$. Σύμφωνα με την αναλυτική λύση η ιδιοσυχνότητα του εδαφικού στρώματος για τη συγκεκριμένη περίπτωση υπολογίζεται ίση με

$$f_s = \frac{110}{4 * 10} = 2,75\text{Hz}$$

Στο Διαγρ. 6.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των επιμέρους αναλύσεων. Υπενθυμίζεται ότι η πορτοκαλί καμπύλη αντιστοιχεί στη μη θεώρηση γεωμορφολογικών συνθηκών στο σύστημα (μονοδιάστατη ανάλυση), ενώ η μπλε καμπύλη στη θεώρηση τους (διδιάστατη ανάλυση).



Διαγρ. 6.5. Συντελεστής ενίσχυσης AF συναρτήσει της συχνότητας f

Και πάλι εμφανίζεται αύξηση της ιδιοσυχνότητας και του συντελεστή ενίσχυσης κατά τη μετάβαση από μονοδιάστατη σε διδιάστατη ανάλυση του προβλήματος. Συγκεκριμένα, η ιδιοσυχνότητα αυξάνεται από τα 2,63Hz στα 2,83Hz, ενώ ο συντελεστής ενίσχυσης από την τιμή 10,4 στην τιμή 11,88.

6.4. Σύνοψη

Από τα ανωτέρω αποτελέσματα των αριθμητικών διερευνήσεων για τις διάφορες περιπτώσεις επιφανειακής θεμελίωσης ανεμογεννήτριας σε κοιλάδα εδαφικών αποθέσεων επί βραχώδους υποβάθρου, οι οποίες εξετάστηκαν, γίνεται πλέον ξεκάθαρο ότι η καταπόνηση και κατ' επέκταση η απόκριση της συγκεκριμένης κατασκευής δεν εξαρτάται μόνο από τις εδαφικές και στρωματογραφικές συνθήκες της περιοχής. Είναι έκδηλη και η σημαντική επίδραση των τοπικών (και πιο συγκεκριμένα των γεωμορφολογικών) συνθηκών.

Γίνεται απολύτως κατανοητό, ότι η θεώρηση οριζόντιας εδαφικής στρωματογραφίας (είτε από αμέλεια, είτε για λόγους απλούστευσης της ανάλυσης) στην υπό εξέταση περιοχή θεμελίωσης, δύναται να οδηγήσει σε σημαντικά σφάλματα και να θέσει σε κίνδυνο την ίδια την κατασκευή.

Όπως αποδείχθηκε, η μετάβαση από τη μονοδιάστατη στη διδιάστατη ανάλυση του παρόντος προβλήματος της ανεμογεννήτριας οδηγεί σε: α) αύξηση του συντελεστή ενίσχυσης AF της σεισμικής διέγερσης εντός του εδαφικού σχηματισμού και β) αύξηση της θεμελιώδους ιδιοσυχνότητας του εδάφους.

Η φυσική ερμηνεία της διαφοροποίησης αυτών των δύο δυναμικών παραμέτρων του συστήματος έχει να κάνει με τον τρόπο διάδοσης των σεισμικών κυματισμών στη μονοδιάστατη και στη διδιάστατη θεώρηση του εν λόγω προβλήματος. Σύμφωνα με τη μονοδιάστατη θεώρηση, η σεισμική συμπεριφορά των εδαφικών στρωμάτων οφείλεται αποκλειστικά στην κατακόρυφη διάδοση με ταχύτητα V_s των οριζοντίων διατμητικών κυμάτων από το υποκείμενο υπόβαθρο προς την επιφάνεια μέσω των εδαφικών στρωμάτων. Το φαινόμενο της εδαφικής ενίσχυσης (ή της εδαφικής απομείωσης σε ορισμένες περιπτώσεις) έγκειται στην παγίδευση των κυμάτων αυτών λόγω της σταδιακής απομείωσης τόσο της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων, όσο και της πυκνότητας των εδαφικών υλικών. Από την άλλη πλευρά, σύμφωνα με τη διδιάστατη θεώρηση, οι σεισμικοί κυματισμοί που εισχωρούν σε μία κοιλάδα μέσω του βραχώδους υποβάθρου της, δύναται να παγιδευτούν εντός αυτής, εάν αναπτυχθούν υπερκρίσιμες γωνίες

πρόσπτωσης. Τα κύματα χώρου που εισέρχονται από τα άκρα της κοιλάδας, μετατρέπονται σε επιφανειακά κύματα, τα οποία κινούνται και συγκρούονται διαρκώς μεταξύ των δύο άκρων της κοιλάδας.

Συμπερασματικά, με δύο λόγια μπορεί να ειπωθεί ότι οι γεωμορφολογικές συνθήκες (σε συνδυασμό βεβαίως με την στρωματογραφία της περιοχής) είναι δυνατόν να αποδειχθούν καθοριστικός παράγοντας για την σεισμική απόκριση αυτής, και κατ' επέκταση των κατασκευών που βρίσκονται θεμελιωμένες σε αυτήν. Για το λόγο αυτό δεν πρέπει να παραλείπεται η μελέτη της γεωμορφολογίας των εδαφικών σχηματισμών και του βραχώδους υποβάθρου.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΙΘΑΝΕΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ

7.1. Συμπεράσματα

Οι ανεμογεννήτριες αποτελούν μία ιδιαίτερη κατηγορία κατασκευών, λόγω της συνύπαρξης του μηχανολογικού και του δομικού μέρους τους. Το κύριο ενδιαφέρον εντοπίζεται στη δημιουργία ανεμογεννητριών μεγάλης παραγωγικής ικανότητας ενέργειας με όσο το δυνατόν μικρότερο οικονομικό κόστος.

Υπό δυναμικές συνθήκες φόρτισης, οι ανεμογεννήτριες εξετάζονται ως ένα σύνθετο σύστημα εδάφους - θεμελίου - ανωδομής, λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή της αλληλεπίδρασης στα αποτελέσματα της ανάλυσης της ανωδομής με τη θεώρηση πάκτωσης στη βάση. Η επιρροή αυτή επηρεάζει την απόκριση και την αντοχή της κατασκευής, καθώς οδηγεί στη μεταβολή της ιδιοπεριόδου του σύνθετου συστήματος. Μία τέτοια μεταβολή μπορεί να αποδειχθεί καθοριστικής σημασίας για μία ανεμογεννήτρια, όπου τα επιτρεπόμενα διαστήματα για τη διακύμανση της ιδιοσυχνότητας του πύργου, του ρότορα και των πτερυγίων της είναι ιδιαίτερα περιορισμένα, με στόχο την αποφυγή συντονιστικών φαινομένων, τα οποία ενδέχεται να οδηγήσουν σε κόπωση του χάλυβα.

Πιθανή παράλειψη της εξέτασης των ιδιοτήτων του εδάφους και της θεμελίωσης της κατασκευής στην απόκριση του σύνθετου συστήματος δύναται να οδηγήσει σε σημαντικά σφάλματα και πιθανούς κινδύνους όσον αφορά την αντοχή και τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Με άλλα λόγια, η συνηθισμένη παραδοχή συνθηκών πάκτωσης στη βάση της επιφανειακής θεμελίωσης μιας κατασκευής δεν είναι πάντοτε σωστή και δεν πρέπει να υιοθετείται σε όλες τις περιπτώσεις αναλύσεων.

Έχει αναπτυχθεί πληθώρα προσεγγιστικών μεθόδων από πολλούς ερευνητές με στόχο τον υπολογισμό των δυναμικών δυσκαμψιών και της ιδιοπεριόδου του σύνθετου συστήματος εδάφους – θεμελίωσης – ανωδομής. Ωστόσο, οι παράγοντες γεωμετρίας και υλικού επηρεάζουν τη δυναμική συμπεριφορά της θεμελίωσης και οδηγούν στην απαραίτητη αναπροσαρμογή των αναλυτικών εξισώσεων της βασικής λύσης για κάθε επιμέρους περίπτωση. Οι κύριοι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη είναι:

- Το σχήμα της θεμελίωσης (κυκλικό, λωριδωτό, ορθογωνικό ή τυχαίου σχήματος)
- Ο τύπος του εδαφικού προφίλ (ομοιογενής ελαστικός ημίχωρος, εδαφικές στρώσεις επί ελαστικού ημιχώρου, εδαφικό στρώμα επί βράχου)

- Το βάθος της θεμελίωσης (επιφανειακή, εγκιβωτισμένη, βαθιά – με πασσάλους)

Οι γεωμετρικές και εδαφικές παράμετροι που καθορίζουν τις προκύπτουσες δυναμικές ιδιότητες του συστήματος είναι οι ακόλουθες:

- το πάχος H του στρώματος του εδάφους
- οι χαρακτηριστικές διαστάσεις B, L και R του θεμελίου (για ορθογωνικό και κυκλικό θεμέλιο αντίστοιχα)
- το βάθος D της θεμελίωσης για την περίπτωση εγκιβωτισμένης θεμελίωσης
- η αδιάσταση συχνότητα $a_0 = \omega B / V_s$
- το μέτρο διάτμησης $G = \rho * V_s^2$ των εδαφικών στρωμάτων
- ο λόγος του Poisson ν των εδαφικών στρωμάτων
- ο κρίσιμος λόγος υστερητικής απόσβεσης ξ των εδαφικών στρώσεων

Μέσω των αριθμητικών διερευνήσεων με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS υπολογίζονται οι συντελεστές ενίσχυσης μεταξύ διαφόρων σημείων του συστήματος, καθώς και η τιμή της ιδιοσυχνότητας του, η οποία επαληθεύει τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αναλυτικών λύσεων.

Για την περίπτωση θεμελίωσης μονοβάθμιου ταλαντωτή ύψους 5m σε εδαφικό στρώμα με πάχος 25m επί βράχου και ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος V_s ίση με 200m/sec, στη βάση του οποίου διενεργεί παλμός Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα 2Hz, η ενεργή ιδιοσυχνότητα του σύνθετου συστήματος προκύπτει ίση με 2,024Hz. Δηλαδή, παρατηρείται μία μείωση κατά 1,3% από την αντίστοιχη τιμή του πακτωμένου στη βάση ταλαντωτή.

Για το πακέτο των αναλυτικών και αριθμητικών διερευνήσεων του σύνθετου συστήματος ανεμογεννήτριας ύψους 50m σε εδαφικό στρώμα επί βράχου, τα ποσοστά μείωσης των ενεργών ιδιοσυχνοτήτων από την αντίστοιχη τιμή για την περίπτωση θεώρησης συνθηκών πάκτωσης στη βάση της κατασκευής (δηλαδή από την τιμή 0,8Hz) εξαρτώνται από το πάχος H της εδαφικής στρώσης και την ταχύτητα V_s του διατμητικού κύματος. Όπως παρατηρείται στον Πιν. 6.1 που ακολουθεί, μείωση του πάχους H του εδαφικού στρώματος πάνω από το βράχο συνεπάγεται αύξηση της ιδιοσυχνότητας του συστήματος και επομένως, μείωση της απόκλισης της από την αντίστοιχη τιμή της ανεμογεννήτριας με πάκτωση στη βάση της. Αυτό συμβαίνει διότι οι ιδιότητες της λεπτής εδαφικής στρώσης τείνουν να απαλειφθούν εντελώς και υπερκαλύπτονται από τις βραχώδεις εδαφικές συνθήκες, κάνοντας έτσι το σύνθετο σύστημα πιο άκαμπτο.

Vs (m/s)	H= 40m	H= 20m	H= 10m	H= 5m	H= 2m
40	74.8%	74.5%	74.0%	72.9%	69.8%
60	62.9%	62.7%	61.5%	60.1%	56.3%
80	52.5%	52.1%	51.1%	49.5%	43.9%
110	40.3%	39.6%	38.6%	36.9%	32.6%
160	26.1%	25.6%	24.9%	23.4%	20.0%
240	14.3%	14.1%	13.6%	12.6%	10.5%
600	2.7%	2.7%	2.6%	2.4%	1.9%

Πιν. 6.1. Ποσοστά απόκλισης ενεργών ιδιοσυχνοτήτων από την τιμή 0,8Hz

Από την άλλη πλευρά, όσο το εδαφικό υλικό γίνεται σκληρότερο, όσο δηλαδή αυξάνεται η τιμή της ταχύτητας Vs, όλες οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων, ανεξαρτήτου πάχους H της εδαφικής στρώσης, τείνουν προς την τιμή 0,8Hz. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στην ιδιοσυχνότητα του μονοβάθμιου ταλαντωτή, ο οποίος είναι πακτωμένος στη βάση του. Η πάκτωση στη βάση του ταλαντωτή μπορεί να αναπαραστήσει την ύπαρξη βραχώδους υποβάθρου.

Παρατηρείται αρκετά καλή συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων της διερεύνησης μέσω των αναλυτικών τύπων και της αριθμητικής διερεύνησης μέσω του προγράμματος PLAXIS στην πλειοψηφία των περιπτώσεων του πάχους H της εδαφικής στρώσης και της ταχύτητας Vs του διατμητικού κύματος που εξετάστηκαν. Οι περιπτώσεις στις οποίες παρουσιάστηκαν σχετικές αποκλίσεις μεταξύ των αναλυτικών και αριθμητικών λύσεων αφορούν τα πιο μαλακά εδαφικά υλικά ($V_s \leq 240\text{m/sec}$) σε μικρότερα πάχη εδαφικού στρώματος που εξετάστηκαν ($H \leq 5\text{m}$). Οι αποκλίσεις αυτές είναι πιθανό να οφείλονται στο γεγονός ότι ο λόγος του πάχους της εδαφικής στρώσης προς το ημιέυρος της λωριδωτής θεμελίωσης H/B γίνεται μικρότερος ή ίσος με τη μονάδα, η οποία αποτελεί την ελάχιστη ενδεικνυόμενη τιμή για την εγκυρότητα και την ακρίβεια των αναλυτικών τύπων υπολογισμού των στατικών δυσκαμψιών.

Όσον αφορά τη θεμελίωση μιας ανεμογεννήτριας επομένως, συμπεραίνεται ότι η θεώρηση συνθηκών πάκτωσης στη βάση της κατά τη διάρκεια των αναλύσεων είναι ορθή μόνο για την περίπτωση άκαμπτης θεμελίωσης σε βραχώδες υλικό ή σκληρό έδαφος γενικότερα. Αντίθετα, παρατηρείται ότι σε περίπτωση θεμελίωσης σε πιο εύκαμπτα εδαφικά στρώματα επί βράχου (δηλαδή για μικρότερες τιμές ταχύτητας Vs), η ιδιοσυχνότητα του συστήματος μειώνεται αισθητά από την τιμή των 0,8Hz.

Η καταπόνηση και κατ' επέκταση η απόκριση της συγκεκριμένης κατασκευής δεν εξαρτάται μόνο από τις εδαφικές και στρωματογραφικές συνθήκες της περιοχής. Είναι ιδιαίτερος σημαντική και η επίδραση των τοπικών (και πιο συγκεκριμένα των γεωμορφολογικών) συνθηκών. Γίνεται απολύτως κατανοητό, ότι η θεώρηση οριζόντιας εδαφικής στρωματογραφίας (είτε από αμέλεια, είτε για λόγους απλούστευσης της ανάλυσης) στην υπό εξέταση περιοχή θεμελίωσης, δύναται να οδηγήσει σε σημαντικά σφάλματα και να θέσει σε κίνδυνο την ίδια την κατασκευή. Όπως αποδείχθηκε, η μετάβαση από τη μονοδιάστατη στη διδιάστατη ανάλυση του παρόντος προβλήματος της ανεμογεννήτριας οδηγεί σε: α) αύξηση του συντελεστή ενίσχυσης AF της σεισμικής διέγερσης εντός του εδαφικού σχηματισμού και β) αύξηση της θεμελιώδους ιδιοσυχνότητας του εδάφους.

Στόχο της μελέτης αποτελεί ο σχεδιασμός του πύργου της ανεμογεννήτριας με τέτοιο τρόπο, ώστε η ιδιοσυχνότητα του να βρίσκεται εκτός των φασμάτων ιδιοσυχνότητας του ρότορα και των πτερυγίων, τα οποία είναι προκαθορισμένα. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται οποιοδήποτε ενδεχόμενο ανάπτυξης συντονιστικών φαινομένων μεταξύ των μελών της ανεμογεννήτριας υπό κάποια δυναμική διέγερση, τα οποία με τη σειρά τους μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία της ανεμογεννήτριας λόγω κόπωσης του χάλυβα.

Συμπεραίνεται λοιπόν ότι, απαραίτητη προϋπόθεση για τον ορθό σχεδιασμό και την ασφαλή λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας αποτελεί η μελέτη των ιδιοτήτων του εδάφους, καθώς και της δυναμικής αλληλεπίδραση αυτού με το θεμέλιο και την ανωδομή, στην περιοχή την οποία πρόκειται να θεμελιωθεί. Πιθανή παράλειψη αυτής της μελέτης της δυναμικής αλληλεπίδρασης του σύνθετου συστήματος εδάφους - θεμελίωσης - ανωδομής μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα και κατ' επέκταση στο συντονισμό των μελών, ο οποίος μπορεί να αποδειχθεί καταστροφικός για την ανεμογεννήτρια.

Φυσικό επακόλουθο της ανωτέρω διαπίστωσης αποτελεί η αναζήτηση πιθανών μεθόδων και μέτρων πρόληψης με σκοπό την αντιμετώπιση της αναπόφευκτης μείωσης, και γενικότερα της απόκλισης, της ιδιοσυχνότητας της ανεμογεννήτριας από την αντίστοιχη τιμή της για την περίπτωση πάκτωσης στη βάση της. Βασική επιδίωξη αποτελεί η «μετακίνηση» της ιδιοσυχνότητας της πακτωμένης κατασκευής σε μεγαλύτερα επίπεδα, έτσι ώστε όταν ληφθεί υπόψη η επίδραση της θεμελίωσης και του υποκείμενου εδάφους, η τελική της τιμή να είναι η επιθυμητή (0,8Hz για τη συγκεκριμένη περίπτωση ανεμογεννήτριας που μελετάται).

Οι προτεινόμενοι μέθοδοι για την αντιμετώπιση του προβλήματος και την επίτευξη της ανωτέρω επιδίωξης είναι δύο:

- Η μεταβολή της μάζας m της ανεμογεννήτριας
- Η μεταβολή της ακαμψίας k της ανεμογεννήτριας

Η πρώτη μέθοδος βασίζεται στην ικανότητα της ανεμογεννήτριας να λαμβάνει ή να αποβάλλει (ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε περίπτωσης) ένα συγκεκριμένο μέρος του βάρους της μέσω κάποιου μηχανισμού. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας κύριο στόχο αποτελεί η αύξηση της τιμής της αρχικής ιδιοσυχνότητας από την τιμή 0,8Hz. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, απαιτείται η μείωση της μάζας της. Για την περίπτωση εδαφικής στρώσης πάχους 5m και ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος 400m/sec, παρατηρείται ότι μία μείωση της μάζας στην κορυφή της κατά 3tn (δηλαδή στο 91% περίπου της αρχικής), αρκεί για να επιτευχθεί τελικά η επιθυμητή ταύτιση της ιδιοσυχνότητας του συστήματος εδάφους – θεμελίου – ανωδομής με την τιμή 0,8Hz, η οποία αποτελεί την ιδιοσυχνότητα της αρχικής πακτωμένης ανεμογεννήτριας.

Η δεύτερη μέθοδος που αφορά τη μεταβολή της ακαμψίας του πύργου της ανεμογεννήτριας, δύναται να επέλθει μέσω της μεταβολής του ύψους του. Στην παρούσα ανεμογεννήτρια επιδιώκεται η αύξηση της αρχικής ιδιοσυχνότητας της πακτωμένης κατασκευής. Για το λόγο αυτό, για την περίπτωση εδαφικής στρώσης πάχους 5m και ταχύτητας διάδοσης του διατμητικού κύματος 400m/sec επιλέγεται τελικά η μείωση του ύψους της κατά 1,8m (δηλαδή στο 96,4% του αρχικού). Η μείωση αυτή είναι αρκετή, έτσι ώστε η ιδιοσυχνότητα του σύνθετου συστήματος να λάβει την τιμή της ιδιοσυχνότητας της αρχικής πακτωμένης ανεμογεννήτριας, δηλαδή την τιμή 0,8Hz.

7.2. Πιθανές μελλοντικές προεκτάσεις

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων, τα εξαγόμενα συμπεράσματα, καθώς και η γενικότερη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, μπορούν να οδηγήσουν σε περαιτέρω έρευνα και ανάλυση για την εκτίμηση της επιρροής της αλληλεπίδρασης εδάφους - θεμελίωσης - κατασκευής στη δυναμική απόκριση και καταπόνηση μιας ανωδομής.

Πρώτα απ' όλα, η συγκεκριμένη εργασία περιορίζεται στη χρήση του δισδιάστατου προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS για την πραγματοποίηση των διαφόρων αριθμητικών αναλύσεων, με όλες τις εξιδανικεύσεις και απλοποιήσεις που αυτό συνεπάγεται στο υπό εξέταση

σύνθετο μοντέλο. Μια αντίστοιχη μελέτη μπορεί να επαναληφθεί με τη βοήθεια ενός τρισδιάστατου προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων για την εξαγωγή αντίστοιχων αποτελεσμάτων με μεγαλύτερη ακρίβεια, καθώς μειώνονται οι παραδοχές κατά τη μοντελοποίηση και οι συνθήκες που προσομοιώνονται είναι πιο κοντά στις πραγματικές.

Επίσης, οι αναλύσεις που λαμβάνουν χώρα, μπορούν να επεκταθούν και σε άλλους τύπους εδαφικού προφίλ, πάνω στο οποίο θεμελιώνεται η ανεμογεννήτρια, πέραν του εδαφικού στρώματος επί βράχου. Το εδαφικό αυτό προφίλ ενδεχομένως να αποτελείται από ομοιογενή ελαστικό ημίχωρο ή από εδαφικές στρώσεις επί ελαστικού ημιχώρου.

Μία επιπρόσθετη επέκταση δύναται να αποτυπωθεί στον τύπο της θεμελίωσης της ανεμογεννήτριας. Στην παρούσα εργασία τα αριθμητικά μοντέλα περιλαμβάνουν μόνο επιφανειακή θεμελίωση, ενώ αντίστοιχα μπορούν να προσομοιωθούν και να εξεταστούν και οι περιπτώσεις εγκιβωτισμένης και βαθιάς θεμελίωσης με τη χρήση πασσάλων.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, οι διάφορες αναλυτικές και αριθμητικές διερευνήσεις που πραγματοποιήθηκαν, περιορίζονται στην εξέταση περιπτώσεων χερσαίων (onshore) ανεμογεννητριών, δηλαδή ανεμογεννητριών οι οποίες βρίσκονται στη στεριά. Μία αντίστοιχη μελλοντική μελέτη μπορεί να πραγματοποιηθεί για την εξέταση περιπτώσεων υπεράκτιων (offshore) ανεμογεννητριών, οι οποίες θεμελιώνονται μέσα στη θάλασσα. Με τον τρόπο αυτό θα διερευνηθεί η επιρροή που έχει η παρουσία του νερού στην αλληλεπίδραση του σύνθετου συστήματος εδάφους - θεμελίωσης - κατασκευής, αλλά και στη δυναμική απόκριση και καταπόνηση της ανωδομής.

Όσον αφορά τις προτεινόμενες μεθόδους πρόληψης της μεταβολής της τιμής της ιδιοσυχνότητας, λόγω της αλληλεπίδρασης του σύνθετου συστήματος εδάφους - θεμελίωσης - ανωδομής, ενδεχομένως να τεκμηριωθούν και να υλοποιηθούν μελλοντικά διάφοροι μηχανισμοί, οι οποίοι να παρέχουν στο σύστημα της ανεμογεννήτριας τη δυνατότητα μεταβολής της μάζας ή / και της ακαμψίας της ανάλογα με τις ανάγκες κάθε περίπτωσης. Όσον αφορά τη μεταβολή της μάζας της ανεμογεννήτριας, ένα παράδειγμα εφαρμογής που προτείνεται στην παρούσα μελέτη είναι η τοποθέτηση δεξαμενής στην κορυφή της, η οποία είναι ικανή να αποθηκεύσει ή να αποβάλλει αντίστοιχα την απαραίτητη ποσότητα νερού. Μία άλλη εφαρμογή που μπορεί να αναπτυχθεί για το συγκεκριμένο σκοπό είναι το «ντύσιμο» του πυλώνα της ανεμογεννήτριας με έναν επιπλέον μεταλλικό μανδύα, επιβάλλοντας έτσι στην κατασκευή ένα πρόσθετο βάρος. Αντίστοιχα, όσον αφορά τη μεταβολή της ακαμψίας και κατ' επέκταση του ύψους της, μία εφαρμογή που

προτείνεται είναι η κατασκευή και η χρησιμοποίηση φλαντζών μεταβαλλόμενου πάχους για τη σύνδεση των επιμέρους τμημάτων του πύργου της. Μία τέτοια λειτουργία θα μπορούσε να μεταβάλλει συνολικά το ύψος της ανεμογεννήτριας κατά μερικά μέτρα.

Τέλος, είναι δυνατή η αναζήτηση και η καταγραφή επιπρόσθετων πιθανών μεθόδων παρέμβασης στην ανωδομή της ανεμογεννήτριας για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος, πέρα από τις ανωτέρω αναφερόμενες, οι οποίες σχετίζονται με τη δυνατότητα μεταβολής της μάζας και της ακαμψίας της.

Άλλοι εναλλακτικοί τρόποι αντιμετώπισης του προβλήματος της ιδιοσυχνότητας, οι οποίοι ενδέχεται να μελετηθούν και να προταθούν στο μέλλον, αφορούν τα άλλα δύο μέρη του υπό εξέταση σύνθετου συστήματος, δηλαδή τη θεμελίωση της ανεμογεννήτριας και το υποκείμενο έδαφος, και όχι την ίδια την ανωδομή της ανεμογεννήτριας. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η αύξηση του μέτρου διάτμησης G του υποκείμενου εδάφους, μέσω της έμπτηξης μεγάλου αριθμού μεταλλικών κυλίνδρων με μεγάλο μήκος μέσα στο έδαφος στην περιοχή κάτω από το θεμέλιο της ανεμογεννήτριας. Με τον τρόπο αυτό, η εδαφική αυτή περιοχή γίνεται πιο άκαμπτη και οι συνθήκες που επικρατούν σε αυτήν πλησιάζουν εκείνες της πάκτωσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Ψαρρόπουλος Π., Παναγιώτου Μ., Γαντές Χ., Γκαζέτας Γ., (2006), “Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους και Πυλώνων Ανεμογεννητριών”, 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Ξάνθη, Ελλάδα
2. Μυλωνάκης Γ., Καραμπαλής Δ. Λ., Μαραβάς Α., (2008), “Ελαστοδυναμικές Λύσεις Αλληλεπίδρασης Εδάφους-Κατασκευής για Βάθρα Γεφυρών Εδραζόμενων σε Πασσάλους ή Θεμέλια», 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας
3. Kirtas E., Trevoropoulos K., Rovithis E., Pitilakis K., (2007), “Discussion on the Fundamental Period of SDOF Systems Including Soil-Structure Interaction”, 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Thessaloniki, Greece
4. Mylonakis G., Nikolaou S., Gazetas G., (2006), “Footings under seismic loading: Analysis and design issues with emphasis on bridge foundations”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 26, pp. 824–853
5. Mylonakis G., Gazetas G., (2000), “Seismic Soil-Structure Interaction: Beneficial or Detrimental?”, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 4, No. 3, pp. 277-301
6. Gazetas G., (1983), “Analysis of machine foundation vibrations: state of the art”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 2, No. 1, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, USA
7. Wolf J. P. (1985), Dynamic Soil - Structure Interaction, Prentice Hall
8. Σακελλαρίου Μ., (2008), “Γεωτεχνική Μηχανική”, Ε.Μ.Π., Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Αθήνα
9. Καββαδάς Μ. Ι., (2009), “Στοιχεία Εδαφομηχανικής”, Ε.Μ.Π., Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Αθήνα
10. Αθανασόπουλος Γ. Α., (2013), “Μαθήματα Θεμελιώσεων”, Παν. Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πάτρα
11. Risø, “Guidelines for design of wind turbines”, (2002), 2nd Edition, Det Norske Veritas Copenhagen and Wind Energy Department, Risø National Laboratory
12. A.K. Chopra, “Dynamics of Structures – Theory and Applications to Earthquake Engineering”, (2007), 3rd Edition, Berkeley, California
13. Plaxis, “Finite element code for soil and Rock analyses”, (2002)
14. www.seissoft.com/seissoftsignal, Earthquake Engineering Software Solutions