



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών
Τομέας Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Επίδραση των Τοπικών Εδαφικών Συνθηκών στη Δυναμική
Συμπεριφορά Ανεμογεννητριών**



Καραγιαννάκη Βασιλική

Επιβλέποντες: Μ. Καττής, Αναπληρωτής Καθηγητής, Σ.Α.Τ.Μ. / Ε.Μ.Π.

Π. Ψαρρόπουλος, Ε.Δι.Π., Σ.Α.Τ.Μ. / Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2020

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ τους καθηγητές μου κ. Μαρίνο Καττή, Αναπληρωτή Καθηγητή Σ.Α.Τ.Μ./ Ε.Μ.Π και κ. Πρόδρομο Ψαρρόπουλο, Ε.Δι.Π. Σ.Α.Τ.Μ./ Ε.Μ.Π., για τις πολύτιμες γνώσεις και την υποστήριξη που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια των συνολικών σπουδών μου στη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον κ. Ψαρρόπουλο που με βοήθησε, με καθοδήγησε και με συμβούλεψε για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ευχαριστώ, επίσης την οικογένεια και τους φίλους μου, που με στήριξαν όσο διήρκεσε η εκπόνηση της παρούσας εργασίας, αλλά και σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξημένο ενδιαφέρον για την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η ανάγκη για την αντιμετώπιση του παγκόσμιου περιβαλλοντικού προβλήματος της κλιματικής αλλαγής, καθώς και άλλες οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές προκλήσεις του μέλλοντος είναι αυτές που καθιστούν την αιολική αλλά και τις υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ζωτικής σημασίας, για το μετασχηματισμό των ενεργειακών δικτύων, σε όλο τον κόσμο. Συνεπώς, η κατασκευή ανεμογεννητριών και αιολικών πάρκων αποτελεί ένα ζήτημα που απασχολεί και θα απασχολήσει αρκετά, τόσο την Ελλάδα όσο και τον υπόλοιπο κόσμο. Αντικείμενο, λοιπόν, της παρούσας εργασίας είναι η επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών στη δυναμική συμπεριφορά ανεμογεννητριών, αλλά και γενικότερα η αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευής, εξαιτίας διεγέρσεων που ασκούνται στη βάση της κατασκευής. Στο πλαίσιο αυτό και λαμβάνοντας υπόψη την θεώρηση της αξιοσημείωτης επίδρασης των τοπογραφικών και γεωμορφολογικών συνθηκών στην σεισμική απόκριση του εδάφους, εξετάζεται μέσω κατάλληλων και σχετικών αριθμητικών προσομοιωμάτων η δυναμική απόκριση ενός τυπικού αιολικού πάρκου, εδραιωμένου μέσω άκαμπτης επιφανειακής θεμελίωσης σε κοιλάδα εδαφικών αποθέσεων.

Abstract

In recent years there has been a growing interest in the use of renewable energy sources. The need to tackle the global environmental problem of climate change, as well as other economic, social and environmental challenges of the future, are what make wind and other renewable energy sources vital to the transformation of energy networks throughout the world. Therefore, the construction of wind turbines and wind farms is an issue that concerns and will concern a lot, not only Greece, but also the rest of the world. The subject of the present work, therefore, is the effect of local soil conditions on the dynamic behavior of wind turbines, but also in general the interaction between the soil and the construction, due to the excitations applied at the base of the construction. In this context, and taking into account the considerable effect of topographic and geomorphological conditions on the seismic response of the soil, the dynamic response of a typical wind farm, established through rigid surface foundations, is examined through appropriate and relevant numerical simulations.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1.1 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας	8
1.2 Δομή της διπλωματικής εργασίας	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	13
2.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	13
2.2 Αιολική ενέργεια – Ανεμογεννήτριες	15
2.3 Ιστορική Αναδρομή	18
2.4 Κατηγορίες ανεμογεννητριών.....	19
2.4.1 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα	20
2.4.2 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα	21
2.5 Τα μέρη μιας τυπικής ανεμογεννήτριας	23
2.6 Θέματα ελέγχου της παραγόμενης ενέργειας	24
2.6.1 Stall control.....	25
2.6.2 Pitch control.....	25
2.6.3 Active stall control	26
2.7 Καμπύλη ταχύτητας ανέμου – παραγόμενης ισχύος	26
2.8 Οχλήσεις και Παρασιτικά Φαινόμενα	27
2.9 Βασικές παράμετροι ανέμου	28
2.10 Φορτίσεις ανεμογεννητριών	32
2.10.1 Αδρανειακές και βαρυτικές φορτίσεις.....	34
2.10.2 Αεροδυναμικές φορτίσεις.....	35
2.11 Θεμελίωση ανεμογεννητριών.....	37
2.11.1. Θεμελίωση χερσαίων ανεμογεννητριών	37
2.11.2 Θεμελίωση Παράκτιων Ανεμογεννητριών	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΤΟΠΙΚΕΣ ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ - ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	43
3.1 Εισαγωγή.....	43
3.2 Αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευής	44
3.3 Επίδραση της γεωμορφολογίας στη σεισμική διέγερση	47
3.3.1 Τοποθέτηση του προβλήματος.....	49

3.3.2 Μη-γραμμική συμπεριφορά των εδαφικών υλικών και τοπικές συνθήκες	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ	58
4.1 Εισαγωγή.....	58
4.2 Σύνομη περιγραφή των Λογισμικών.....	58
4.3 Προκαταρκτικές αναλύσεις	60
4.3.1 Έλεγχος αξιοπιστίας PLAXIS	60
4.3.2 Έλεγχος αξιοπιστίας SeismoSignal.....	68
4.4 Παραμετρική ανάλυση	71
4.4.1 Μελέτη περίπτωσης ανεμογεννήτριας επί άκαμπτης εδαφικής στρώσης.....	71
4.4.2 Μελέτη εδαφικής στρώσης	77
4.4.3 Μελέτη περίπτωσης ανεμογεννήτριας επί εδαφικής στρώσης.....	86
4.4.4 Μελέτη κοιλάδας χωρίς ανεμογεννήτρια - ταλαντωτή.....	91
4.4.5 Μελέτη αιολικού πάρκου επί κοιλάδας	100
4.5 Σύνοψη	147
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	149
5.1 Συμπεράσματα	149
5.2 Προτάσεις μελλοντικών προεκτάσεων.....	150
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	152

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

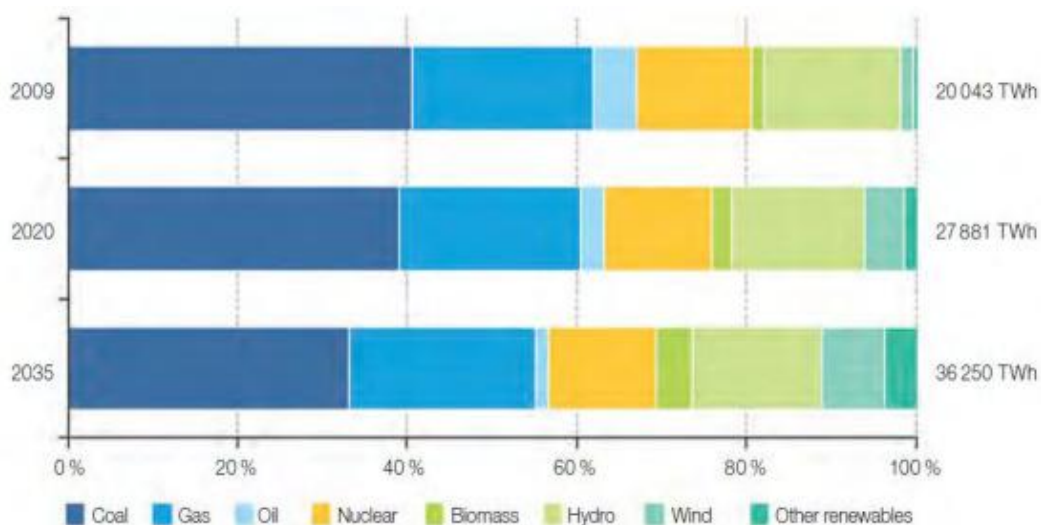
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Η αιολική ενέργεια μέχρι και σήμερα αποτελεί την πιο γρήγορα αναπτυσσόμενη Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας (Α.Π.Ε.) παγκοσμίως, ενώ υπάρχουν χώρες για τις οποίες είναι η δεύτερη πηγή ενέργειας στο εθνικό ηλεκτρικό δίκτυο. Τα βασικά στοιχεία που καθορίζουν τους στόχους της χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι τα ακόλουθα:

- η σταθεροποίηση του κλίματος και η προστασία του περιβάλλοντος
- η κάλυψη της ζήτησης σε ενέργεια του αυξανόμενου πληθυσμού
- η εξασφάλιση σταθερής πρόσβασης στην ενέργεια για όλα τα έθνη
- η παροχή ηλεκτρισμού σε 1,6 δισεκατομμύρια νέους καταναλωτές
- η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε μακρινές αποστάσεις

Στο διάγραμμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται η συνεισφορά διαφορετικών πηγών ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρισμού μέχρι το 2035. Είναι εμφανής η αύξηση του ποσοστού συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών και η μείωση του ποσοστού των συμβατικών πηγών.



Διάγραμμα 1.1

Ποσοστά παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρισμού ανά καύσιμο

Ο λόγος αυτής της ανάπτυξης, σε διεθνές επίπεδο είναι η βελτίωση που παρατηρείται στον τομέα του σχεδιασμού και της κατασκευής των ανεμογεννητριών μεγάλων διαστάσεων και υψηλής απόδοσης. Ένας ακόμη λόγος αυτής της ανάπτυξης, είναι ότι γενικότερα θεωρούνται αξιόπιστες

κατασκευές, ανθεκτικές σε δυναμικά φορτία, συμπεριλαμβανομένων και των σεισμικών δράσεων.

Πιο συγκεκριμένα, η ανεμογεννήτρια αποτελεί μία κατασκευή, στην οποία συνυπάρχουν το μηχανολογικό και το δομοστατικό στοιχείο, γεγονός που την καθιστά ένα ενδιαφέρον αντικείμενο μελέτης και σχεδιασμού και αποτέλεσε υποκίνηση για την παρούσα εργασία. Βασική, λοιπόν, προτεραιότητα κατά το σχεδιασμό της είναι η κατά το δυνατόν αποδοτικότερη συνύπαρξη του μηχανολογικού και του δομοστατικού μέρους της, έτσι ώστε η κατασκευή να έχει μεγάλη παραγωγική ικανότητα ενέργειας με όσο το δυνατόν μικρότερο κόστος.

Γενικά, η δυναμική αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής αποτελεί ένα ιδιαίτερος πολύπλοκο πρόβλημα, επειδή η δυναμική απόκριση του εδάφους επηρεάζει την ταλάντωση της κατασκευής, ενώ ταυτόχρονα η δυναμική απόκριση αυτής μεταβάλλει με τη σειρά της τη δόνηση του εδάφους (Ψαρρόπουλος & Τσομπανάκης, 2011). Οι κοινοί, μεταλλικής κατασκευής πυλώνες ανεμογεννητριών με σχήμα λεπτότοιχου κωλουροκωνικού κελύφους, δεν αποτελούν τόσο απλές κατασκευές, αλλά διαφοροποιούνται εξαιτίας συγκεκριμένων χαρακτηριστικών, για αυτό και είναι ιδιαίτερη η διαδικασία του σχεδιασμού τους. Η βασική τους ιδιαιτερότητα είναι ότι υπόκεινται σε συνεχείς δυναμικές διεγέρσεις, όπως ο άνεμος αλλά και ο σεισμός. Συνεπώς, η απόκρισή τους επηρεάζεται από το φαινόμενο της δυναμικής αλληλεπίδρασης ανωδομής-θεμελίωσης-εδάφους.

Όσον αφορά, γενικότερα, μια σεισμική διέγερση είναι, πλέον, γνωστή και γενικώς αποδεκτή η καθοριστική επίδραση του εδάφους στην ένταση και το φασματικό περιεχόμενο της δόνησης. Μέχρι στιγμής, έντονα φαινόμενα σε πολλούς καταστρεπτικούς σεισμούς έχουν αποδοθεί κατά ένα μεγάλο ποσοστό στις στρωματογραφικές συνθήκες, ωστόσο πλήθος ενόργανων καταγραφών και αναλύσεων αποδεικνύουν διαρκώς την σημαντικότητά, επιπρόσθετη επίδραση των τοπογραφικών και γεωμορφολογικών συνθηκών στην σεισμική απόκριση του εδάφους.

Με τον όρο τοπικές εδαφικές συνθήκες αναφέρεται κανείς τόσο στην τοπογραφική διάταξη του ανάγλυφου, όσο και στην επιφανειακή στρωματογραφία. Σύμφωνα με την πάγια υπολογιστική πρακτική, το έδαφος λαμβάνεται υπόψη ως οριζόντιες στρώσεις που εκτείνονται θεωρητικώς στο άπειρο, ενώ αγνοούνται οι τοπογραφικές και γεωμορφολογικές συνθήκες, με κίνδυνο να οδηγηθεί ο μηχανικός σε λανθασμένες εκτιμήσεις και προβλέψεις.

Με βάση την σημασία της επίδρασης των τοπογραφικών και γεωμορφολογικών συνθηκών στην σεισμική απόκριση του εδάφους, καθώς και όλων των προαναφερθέντων, στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται μέσω κατάλληλων αριθμητικών προσομοιωμάτων η δυναμική

απόκριση ενός τυπικού αιολικού πάρκου, εδραιωμένου μέσω άκαμπτης επιφανειακής θεμελίωσης σε κοιλάδα εδαφικών αποθέσεων. Παράδειγμα ανεμογεννήτριας θεμελιωμένης επί εδαφικής κοιλάδας αποτελεί η Εικόνα 1.1.



Εικόνα 1.1

Τυπική ανεμογεννήτρια σε κοιλάδα

Στόχος της διερεύνησης είναι να εξετασθεί το φαινόμενο της δυναμικής αλληλεπίδρασης και η επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών στην απόκριση του πυλώνα τυπικής ανεμογεννήτριας, κατά τη διάρκεια μιας σεισμικής ή δυναμικής διέγερσης.

1.2 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Στο εδάφιο αυτό γίνεται μια σύντομη περιγραφή του περιεχομένου όλων των κεφαλαίων της παρούσας εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 2, παρουσιάζεται εκτενώς το θέμα των ανεμογεννητριών ως κατασκευές. Το κεφάλαιο ξεκινά με μια γενική αναφορά στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, με έμφαση στην αιολική ενέργεια και τη σημασία αυτής αλλά και των υπολοίπων στον μετασχηματισμό των ενεργειακών δικτύων, ώστε να μπορούν να αντιμετωπίσουν τις οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές προκλήσεις του μέλλοντος, καθιστώντας σαφή την προβλεπόμενη παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση. Στη συνέχεια, γίνεται μια πιο στοχευμένη αναφορά στις ανεμογεννήτριες, την προέλευσή τους, τις κατηγορίες τους και τα μέρη μιας τυπικής ανεμογεννήτριας. Σημασία έχουν, ακόμα, τα θέματα ελέγχου της παραγόμενης ενέργειας, αφού οι ανεμογεννήτριες σχεδιάζονται, ώστε να παράγουν την μέγιστη ενέργεια με όσο το δυνατόν μικρότερο κόστος, καθώς και τα θέματα που σχετίζονται με τον άνεμο. Κάποια από αυτά είναι η καμπύλη ταχύτητας ανέμου – παραγόμενης ισχύος και οι βασικές παράμετροι

του ανέμου. Το κεφάλαιο κλείνει με το μέρος της διαδικασίας του σχεδιασμού μιας ανεμογεννήτριας που έχει να κάνει με την ανάλυση των πιθανών φορτίσεων, που θα υποστεί κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της, αλλά και με μια σύντομη περιγραφή στους τρόπους θεμελίωσής της.

Το Κεφάλαιο 3 ασχολείται με την επίδραση που ενδέχεται να έχουν σε κάποια σεισμική διέγερση οι τοπικές τοπογραφικές και γεωμορφολογικές συνθήκες, καθώς και με την αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής. Οι πρώτες σχετίζονται με την τοπογραφική διάταξη του επιφανειακού ανάγλυφου, ενώ οι δεύτερες με την μη-επίπεδη εδαφική στρωματογραφία και τις γεωμετρικές ανωμαλίες του σεισμικού υποβάθρου. Σε συνδυασμό με την επισκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας, στην οποία καταγράφεται πλήθος φαινομένων και γεγονότων συνδεδεμένων με τις τοπικές εδαφικές συνθήκες, γίνεται περιγραφή των φυσικών φαινομένων που καθορίζουν την επιφανειακή σεισμική δόνηση. Στο πρώτο μέρος του κεφαλαίου, εξετάζεται το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης μεταξύ εδάφους, θεμελίου και ανωδομής, καθώς αναφέρονται οι παράγοντες που επηρεάζουν αυτή την αλληλεπίδραση. Εκτενής είναι, ωστόσο και η περιγραφή του προβλήματος της επίδρασης της γεωμορφολογίας στη σεισμική διέγερση, στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου, το οποίο περιλαμβάνει το διαχωρισμό και την μελέτη των τριών κατηγοριών που συναντώνται, δηλαδή τις εδαφικές στρωματογραφικές συνθήκες, τις γεωμορφολογικές συνθήκες και το επιφανειακό ανάγλυφο ή την τοπογραφική διάταξη.

Στο Κεφάλαιο 4, πραγματοποιούνται αριθμητικές προσομοιώσεις προς εξαγωγή συμπερασμάτων, σχετικά με την επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών στην συμπεριφορά τυπικής ανεμογεννήτριας, μέσα από συγκρίσεις διαφορετικών προσομοιωμάτων εδάφους – ταλαντωτή. Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί το σημαντικότερο της παρούσας εργασίας, καθώς αποδεικνύεται έμπρακτα ο ρόλος των συνθηκών του εδάφους σε περίπτωση διέγερσης στη βάση μιας κατασκευής, που εδώ θα είναι μια ανεμογεννήτρια, που προσομοιώνεται ως μονοβάθμιος ταλαντωτής. Για την προσομοίωση των παραπάνω προβλημάτων, έγινε χρήση δύο λογισμικών, για τα οποία υπάρχει σύντομη περιγραφή των χαρακτηριστικών, των δυνατοτήτων και της αξιοπιστίας τους, το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS και το λογισμικό SeismoSignal της εταιρίας SeismoSoft. Οι παραμετρικές αναλύσεις που εκτελέστηκαν και παρουσιάζονται στο συγκεκριμένο κεφάλαιο επιλέχθηκαν, ώστε να ικανοποιούν όσο το δυνατόν περισσότερους συνδυασμούς συστήματος εδάφους – ταλαντωτή και να εξετάζουν περιπτώσεις μονοδιάστατης αλλά και διδιάστατης ανάλυσης. Οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν είναι η μελέτη περίπτωσης ανεμογεννήτριας επί άκαμπτης εδαφικής στρώσης, η μελέτη εδαφικής στρώσης, η μελέτη περίπτωσης ανεμογεννήτριας επί εδαφικής στρώσης, η μελέτη εδαφικής κοιλάδας και η μελέτη αιολικού πάρκου επί κοιλάδας.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 παρατίθενται τα γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τις παραπάνω μελέτες και γίνεται προσπάθεια προτροπής για ενασχόληση με αντίστοιχα θέματα στο μέλλον. Η προσπάθεια αυτή πραγματοποιείται με σχετικές μελλοντικές προεκτάσεις της παρούσας μελέτης για περαιτέρω έρευνα και ανάλυση αντίστοιχων θεμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΗΤΡΙΩΝ

2.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Η κρίση του πετρελαίου, η επικείμενη εξάντληση των ορυκτών καυσίμων, η αυξανόμενη μόλυνση του περιβάλλοντος σε συνδυασμό με την κλιματική αλλαγή, το φαινόμενο του θερμοκηπίου και η βούληση των κρατών για εθνική και ανεξάρτητη ενεργειακή πολιτική με την αξιοποίηση των εγχώριων πηγών ενέργειας οδηγούν όλο και περισσότερο στην επιτακτική ανάγκη για χρήση εναλλακτικών μορφών ενέργειας, πιο φιλικών προς το περιβάλλον, συγκριτικά με τις υπόλοιπες συμβατικές πηγές ενέργειας, που χρησιμοποιούνταν ευρέως. Αποτέλεσμα όλων των παραπάνω είναι η ώθηση του πληθυσμού στη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Με τον όρο ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε.) ή ήπιες μορφές ενέργειας ή νέες πηγές ενέργειας ή πράσινη ενέργεια εννοεί κανείς μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες.

Ο όρος «ήπιες» αναφέρεται σε δυο βασικά χαρακτηριστικά τους. Καταρχάς, για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση, όπως με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας, αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Δεύτερον, πρόκειται για καθαρές μορφές ενέργειας, πολύ φιλικές στο περιβάλλον, που δεν αποδεδμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα. Έτσι, θεωρούνται από πολλούς μία αφετηρία για την επίλυση των οικολογικών προβλημάτων που αντιμετωπίζει ο πλανήτης, σήμερα, τα οποία τον καθιστούν σε κατάσταση ανάγκης.

Τα κυριότερα είδη των Α.Π.Ε. είναι:

- Αιολική ενέργεια. Χρησιμοποιήθηκε παλιότερα για την άντληση νερού από πηγάδια, καθώς και για μηχανικές εφαρμογές, ενώ σήμερα χρησιμοποιείται ευρέως για ηλεκτροπαραγωγή.
- Ηλιακή ενέργεια. Χρησιμοποιείται περισσότερο για θερμικές εφαρμογές, ενώ η χρήση της για την παραγωγή ηλεκτρισμού έχει αρχίσει να κερδίζει έδαφος, σήμερα.
- Υδραυλική ενέργεια. Αποτελείται από τα υδροηλεκτρικά έργα, που στο πεδίο των ήπιων μορφών ενέργειας εξειδικεύονται περισσότερο στα μικρά υδροηλεκτρικά. Είναι η πιο διαδεδομένη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας.
- Βιομάζα. Χρησιμοποιεί τους υδατάνθρακες των φυτών, με σκοπό την αποδέσμευση της ενέργειας που δεσμεύτηκε από το φυτό με τη φωτοσύνθεση. Ακόμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αστικά απόβλητα

και απορρίμματα. Μπορεί να δώσει βιοαιθανόλη και βιοαέριο, που είναι καύσιμα πιο φιλικά προς το περιβάλλον από τα παραδοσιακά. Είναι μια πηγή ενέργειας με πολλές δυνατότητες και εφαρμογές, που θα χρησιμοποιηθεί πλατιά στο μέλλον.

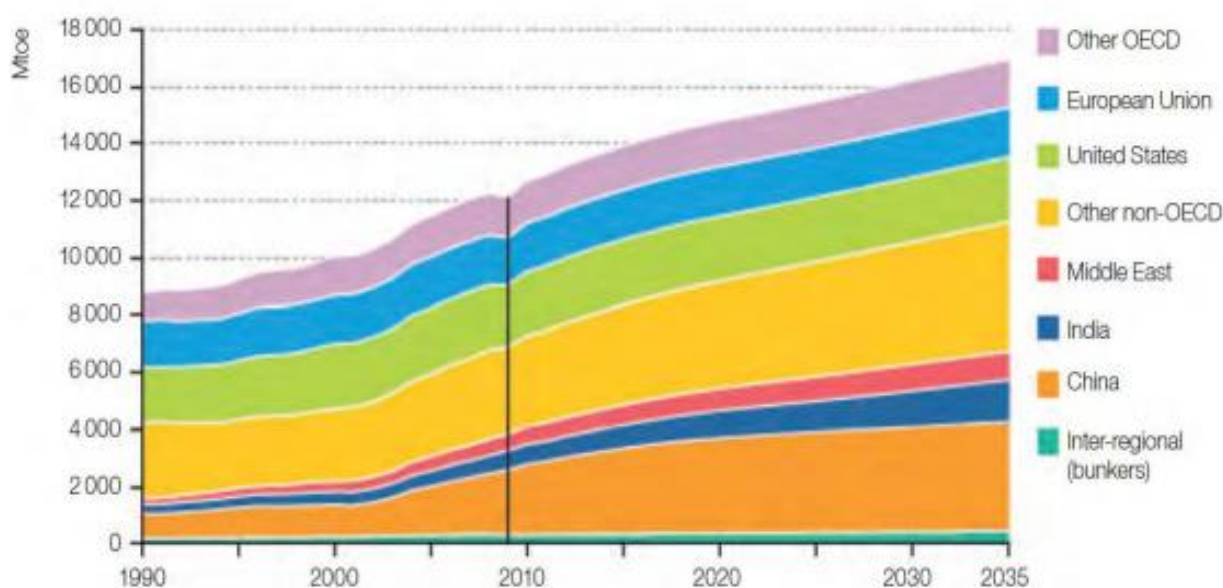
- Γεωθερμική ενέργεια. Προέρχεται από τη θερμότητα που παράγεται από τη ραδιενεργό αποσύνθεση των πετρωμάτων της γης. Είναι εκμεταλλεύσιμη εκεί όπου η θερμότητα αυτή ανεβαίνει με φυσικό τρόπο στην επιφάνεια.
- Ενέργεια από τη θάλασσα. Χωρίζεται σε ενέργεια από παλίρροιες, ενέργεια από κύματα και ενέργεια από τους ωκεανούς.
- Ωσμωτική ενέργεια. Η ανάμειξη γλυκού και θαλασσινού νερού απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες ενέργειας, που ονομάζεται ωσμωτική ενέργεια (ή γαλάζια ενέργεια) και ανακτάται όταν το νερό του ποταμού και το θαλασσινό νερό είναι διαχωρισμένα από μια ημιδιαπερατή μεμβράνη και το γλυκό νερό περνάει μέσω αυτής.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι ζωτικής σημασίας για τον μετασχηματισμό των ενεργειακών δικτύων, ώστε να μπορούν να αντιμετωπίσουν τις οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές προκλήσεις του μέλλοντος. Όλο και περισσότερες μελέτες μιλάνε για την αύξηση που θα σημειώσει η συμμετοχή όλων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή ενέργειας τις επόμενες δεκαετίες, πράγμα που αποδεικνύεται από την υιοθέτηση των ανάλογων κυβερνητικών πολιτικών, που αφορούν τα ενεργειακά θέματα.

Συγκεκριμένες νομοθετικές και ρυθμιστικές διατάξεις έχουν δημιουργηθεί από τα διάφορα κράτη, με στόχο να συμβάλλουν στην προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η ανάγκη για την αντιμετώπιση της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής, που είναι ένα παγκόσμιο περιβαλλοντικό φαινόμενο και θα επηρεάσει τους πάντες στον πλανήτη, είναι η μεγαλύτερη κινητήριος δύναμη για την ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή, που είναι ο πρωτοπόρος οργανισμός σε όλο τον κόσμο στην έρευνα για τις κλιματικές αλλαγές, αναφέρει σε έκθεσή της ότι η υπερθέρμανση του κλίματος του πλανήτη είναι αδιαμφισβήτητη. Αυτό είναι εμφανές από τις παρατηρήσεις της Επιτροπής για αύξηση της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας στην ατμόσφαιρα της γης και στους ωκεανούς, για εκτεταμένη τήξη του χιονιού και των πάγων και για άνοδο της παγκόσμιας μέσης στάθμης των ωκεανών. Επιπλέον, η Επιτροπή αναφέρει ότι αυτή η παγκόσμια υπερθέρμανση τα τελευταία 50 χρόνια είναι πολύ πιθανό να οφείλεται σε ανθρωπογενείς παράγοντες, όπως ο εμπλουτισμός της ατμόσφαιρας με καυσαέρια σαν το διοξείδιο του άνθρακα και το μεθάνιο που συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Σύμφωνα με εκτιμήσεις του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας, στις χώρες που δεν ανήκουν στον Οργανισμό Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (OECD), η ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια θα μεγαλώσει με ένα μέσο ετήσιο ρυθμό αύξησης της τάξης του 3.5% μέχρι το 2035. Η συνολική ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια για τις συγκεκριμένες χώρες θα τριπλασιαστεί από 8.000 TWh το 2009 σε σχεδόν 20.000 TWh το 2035. Στην Ασία, η ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια θα μεγαλώνει γρηγορότερα με ένα μέσο ετήσιο ρυθμό αύξησης της τάξης του 4.2% κατά την ίδια περίοδο. Συνεπώς, εκτός από τις ανάγκες για καθαρότερη ενέργεια και διασφάλιση του μέλλοντος της, ο κόσμος θα χρειάζεται περισσότερα ποσά ενέργειας, καθώς περισσότεροι άνθρωποι στον αναπτυσσόμενο κόσμο προβαίνουν σε κατανάλωση ενέργειας.

Στο παρακάτω διάγραμμα εμφανίζεται η καταγεγραμμένη και προβλεπόμενη παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση με συγκεκριμένα ποσά ανά χώρα ή ομάδα χωρών:



Διάγραμμα 2.1

Καταγεγραμμένα και προβλεπόμενα ποσά ζήτησης ενέργειας ανά κράτος ή περιοχή (1900-2035)

2.2 Αιολική ενέργεια – Ανεμογεννήτριες

Όπως ήδη αναφέρθηκε, αιολική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του ανέμου. Η αιολική ενέργεια αποτελεί,

σήμερα, μια ελκυστική λύση στο πρόβλημα της ηλεκτροπαραγωγής, αφού ο άνεμος είναι ένα καύσιμο που είναι άφθονο, αποκεντρωμένο και δωρεάν, ενώ ταυτόχρονα δεν εκλύονται αέρια και άλλοι ρύποι, και οι επιπτώσεις στο περιβάλλον είναι μικρές σε σύγκριση με τα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής από συμβατικά καύσιμα. Επιπλέον, τα οικονομικά οφέλη μιας περιοχής από την ανάπτυξη της αιολικής βιομηχανίας είναι αξιοσημείωτα.

Όσον αφορά την κατάσταση στην Ελλάδα, ισχύει πως είναι μια χώρα με μεγάλη ακτογραμμή και τεράστιο πλήθος νησιών. Ως εκ τούτου, οι ισχυροί άνεμοι, που πνέουν κυρίως στις νησιωτικές και παράλιες περιοχές προσδίδουν ιδιαίτερη σημασία στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στη χώρα, με το εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό να εκτιμάται ότι αντιπροσωπεύει το 13,6% του συνόλου των ηλεκτρικών αναγκών της χώρας.

Ωστόσο, θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη ότι η πυκνότητα της αιολικής ενέργειας είναι μικρή, με αποτέλεσμα, για να παραχθεί μία αξιόλογη ποσότητα ενέργειας, συγκρίσιμη με αυτή συμβατικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, να απαιτείται μεγάλος αριθμός αιολικών μηχανών. Λόγω προβλημάτων διαθεσιμότητας γης, σε συνδυασμό με την ύπαρξη καλού αιολικού δυναμικού, καθώς και την επιδίωξη της ελαχιστοποίησης του κόστους εγκατάστασης, η μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας από ανεμογεννήτριες γίνεται σε αιολικά πάρκα, δηλαδή σε περιοχές χερσαίας ή θαλάσσιας μικρής έκτασης στην οποία έχει τοποθετηθεί ένας αριθμός ανεμογεννητριών, με σκοπό τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική.

Η ανεμογεννήτρια αποτελεί μία κατασκευή, στην οποία συνυπάρχουν το μηχανολογικό και το δομοστατικό στοιχείο, και το γεγονός αυτό την καθιστά ένα ενδιαφέρον αντικείμενο μελέτης και σχεδιασμού. Βασική, λοιπόν, προτεραιότητα κατά το σχεδιασμό της είναι η κατά το δυνατόν αποδοτικότερη συνύπαρξη του μηχανολογικού και του δομοστατικού μέρους της, έτσι ώστε η κατασκευή να έχει μεγάλη παραγωγική ικανότητα ενέργειας με όσο το δυνατόν μικρότερο κόστος.



Εικόνα 2.1

Μία τυπική μορφή ανεμογεννήτριας



Εικόνα 2.2

Αιολικό πάρκο στην Τήγο

2.3 Ιστορική Αναδρομή

Η πρώτη χρήση της αιολικής ενέργειας πιθανολογείται στην Περσία μεταξύ 900-500 μ.Χ. με την αιολόσφαιρα του Ήρωνα να αποτελεί μία από τις πρώτες κατασκευές που αξιοποιούσαν την αιολική ενέργεια. Ωστόσο, η πρώτη γνωστή κατασκευή κατασκευάστηκε στο Σιστάν, στην ανατολική επαρχία του Ιράν, τον 7ο αιώνα, με τα πανεμόνια, που ήταν μηχανές κατακόρυφου άξονα, που διαθέτανε 6-12 ημικυλινδρικά πτερύγια και χρησιμοποιήθηκαν για το άλεσμα του σιταριού ή για την μεταφορά νερού, καθώς και στην παραγωγή ζαχαροκάλαμου. Ενώ, στην Ευρώπη η αιολική ενέργεια εμφανίστηκε για πρώτη φορά στη διάρκεια του Μεσαίωνα.

Η αιολική ενέργεια χρησιμοποιήθηκε από τον άνθρωπο, αρχικά, για τη κίνηση των πλοίων, ενώ στη συνέχεια, κατασκευάστηκαν ανεμόμυλοι, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για την άλεση των δημητριακών, αλλά και για πολλούς άλλους σκοπούς, με σπουδαιότερο την άντληση υδάτων. Η ανεμογεννήτρια μπορεί να θεωρηθεί μία πιο εξελιγμένη μορφή του ανεμόμυλου, με τον όρο ανεμογεννήτρια να αποτελεί τον γεννεσιουργό όρο για τις μηχανές με περιστρεφόμενα πτερύγια που μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε αξιοποιήσιμη μορφή ενέργειας πρώτου βαθμού.



Εικόνα 2.3

Τυπικός ανεμόμυλος στη Λευκάδα



Εικόνα 2.4

Το πρώτο αιολικό πάρκο της Ευρώπης εγκαταστάθηκε το 1982 στην νήσο Κύθνο

Στην Ελλάδα, είναι γνωστό ότι αναπτύχθηκε ένας τύπος ανεμόμυλου οριζόντιου άξονα, διαφορετικός από εκείνους των άλλων χωρών, πολύ χαρακτηριστικός και σύμφωνος με τις κλιματολογικές συνθήκες της χώρας. Όλα τα νησιά της διέθεταν, τότε, και διατηρούν ακόμα και σήμερα πολλούς ανεμόμυλους, οι οποίοι αποτελούν σήμα κατατεθέν για τα ελληνικά νησιά που κρατούν μέχρι σήμερα αυτή την παράδοση.

Σήμερα, η ενεργειακή και παγκόσμια περιβαλλοντική κρίση, καθώς και η τεχνολογική πρόοδος που έχει σημειωθεί, έδρασαν ευνοϊκά, ώστε όχι μόνο να δικαιολογείται αλλά και να επιδιώκεται η προσπάθεια κατασκευής μεγαλύτερων μονάδων για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, αλλά και της τυποποίησης στη κατασκευή των μικρότερων, για ορισμένες χρήσεις.

2.4 Κατηγορίες ανεμογεννητριών

Οι μοντέρνες ανεμογεννήτριες κατασκευάζονται από σύγχρονα υλικά και μπορούν να διαχωριστούν σε αυτές με δύο ή τρία πτερύγια, με οριζόντιο ή κατακόρυφο άξονα και ανάλογα με το μέγεθος και την ισχύ που παράγουν, σε μικρές, μεσαίες και μεγάλες ανεμογεννήτριες.

Η επιλογή μεταξύ δύο ή τριών πτερυγίων εξαρτάται από την αεροδυναμική και την απόδοση που επιθυμείται κατά τον σχεδιασμό, ενώ άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν αυτή την επιλογή είναι το κόστος, ο θόρυβος και η αισθητική της κατασκευής. Από την στιγμή που τα πτερύγια αποτελούν ίσως το πιο ακριβό συγκριτικά μέρος της κατασκευής επιλέγεται μικρός αριθμός

πτερυγίων (2 ή 3). Ταυτόχρονα, για να μην χαθεί απόδοση σχεδιάζονται ρότορες, ώστε να περιστρέφονται με μεγαλύτερες ταχύτητες και να παράγεται το ίδιο αποτέλεσμα με μικρότερο αριθμό πτερυγίων και προτιμώνται όσο γίνεται λιγότερα, πιο λεπτά, και πιο μακριά πτερύγια με ρότορες που στρέφονται ταχύτερα.

2.4.1 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες αυτές έχουν συνήθως πτερύγια Σχήματος C και είναι κατασκευαστικά απλούστερες από αυτές με οριζόντιο άξονα. Το γεγονός αυτό τους προσδίδει ένα πλεονέκτημα έναντι των ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα. Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα δεν απαιτούν πτερύγιο ή σύστημα αυτοματισμού για τον προσανατολισμό του δρομέα στη διεύθυνση πνοής του ανέμου, ενώ το σύστημα μετατροπής της μηχανικής ενέργειας του δρομέα σε άλλη μορφή ενέργειας βρίσκεται στο έδαφος, στη βάση της ανεμογεννήτριας. Επομένως, τα έξοδα αυτοματισμού, συντήρησης και επισκευών είναι, σαφώς, μικρότερα και τις καθιστούν εύκολα επισκευάσιμες. Ωστόσο, το μειονέκτημα τους είναι ότι, εφόσον ο ρότορας είναι τοποθετημένος κοντά στο έδαφος, όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι πιο μικρή, το σύστημά τους να είναι λιγότερο αποτελεσματικό. Αυτού του είδους οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται κυρίως για γεωργικούς και κτηνοτροφικούς σκοπούς (αυτόματο σύστημα ποτίσματος, γεωτρήσεις, αφαλατώσεις, ψύξη γάλακτος), ενώ οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα προτιμώνται στην ηλεκτροπαραγωγή.

Οι γνωστότεροι τύποι ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα είναι οι ανεμογεννήτριες Darrieus και Savonius, οι οποίες εφευρέθηκαν τις δεκαετίες του 1920 και 1930 και πήραν το όνομά τους από τον Γάλλο μηχανικό George Darrieus και τον Φιλανδό μηχανικό Sigard Savonius, αντίστοιχα.



Εικόνα 2.5

Ανεμογεννήτρια Darrieus μεγάλου μεγέθους

2.4.2 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες τέτοιου τύπου αποτελούν τον συνηθέστερο τύπο ανεμογεννητριών, σήμερα, περίπου το 90% του συνόλου των εγκατεστημένων παγκοσμίως μηχανών. Απαιτούν ευθυγράμμιση με τη πνοή του ανέμου γι' αυτό και διαθέτουν σύστημα περιστροφής και ευθυγράμμισης του ρότορα, το οποίο και αποτελεί μια απαίτηση κατά την κατασκευή, που χαρακτηρίζεται και ως το βασικό μειονέκτημα αυτού του τύπου ανεμογεννήτριας.

Σημαντικό πλεονέκτημα, ωστόσο, αποτελεί το γεγονός πως οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα δεν απαιτούν ιδιαίτερα ισχυρούς ανέμους για να ξεκινήσει η λειτουργία τους, σε αντίθεση με εκείνες του κατακόρυφου τύπου, καθώς ο ρότορας τους είναι τοποθετημένος σε μακρινή απόσταση από το έδαφος, όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι υψηλή με αποτέλεσμα το σύστημα τους να έχει μεγαλύτερη απόδοση.

Επιπλέον, ένας διαχωρισμός στις ανεμογεννήτριες αυτές γίνεται σύμφωνα με τον προσανατολισμό του ρότορα ως προς τη πνοή του ανέμου. Οι ανεμογεννήτριες αυτές, συγκεκριμένα, χωρίζονται σε προσήνεμες ή υπήνεμες

ανάλογα με το αν ο άνεμος που πνέει, συναντά πρώτα το δρομέα ή το θάλαμο με τη γεννήτρια.

Οι πρώτες έχουν τον άνεμο μπροστά από το ρότορα με αποτέλεσμα να διαταράσσουν το πεδίο του ανέμου λιγότερο κατά τη λειτουργία τους, ωστόσο, τη δυναμική συμπεριφορά τους επιβαρύνει ο ρότορας, που πρέπει να σχεδιάζεται δυσκαμπτος. Οι δεύτερες, από την άλλη, πλεονεκτούν αφού μπορούν να κατασκευαστούν χωρίς σύστημα περιστροφής-ευθυγράμμισης του ρότορα, με την προϋπόθεση ότι αυτός έχει σχεδιαστεί κατάλληλα ώστε να ακολουθεί παθητικά τον άνεμο. Μειονεκτούν, όμως, διότι δημιουργούν διαταραχή στο πεδίο του ανέμου, με αποτέλεσμα τη μείωση της παραγωγικής ικανότητας και τη δημιουργία αυξημένων φορτίων κόπωσης, γι'αυτό και δεν είναι τόσο διαδεδομένες.



Εικόνα 2.6

Αιολικό πάρκο με ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα



Προσήνεμη



Υπήνεμη

Εικόνα 2.7

Διάταξη ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα

2.5 Τα μέρη μιας τυπικής ανεμογεννήτριας

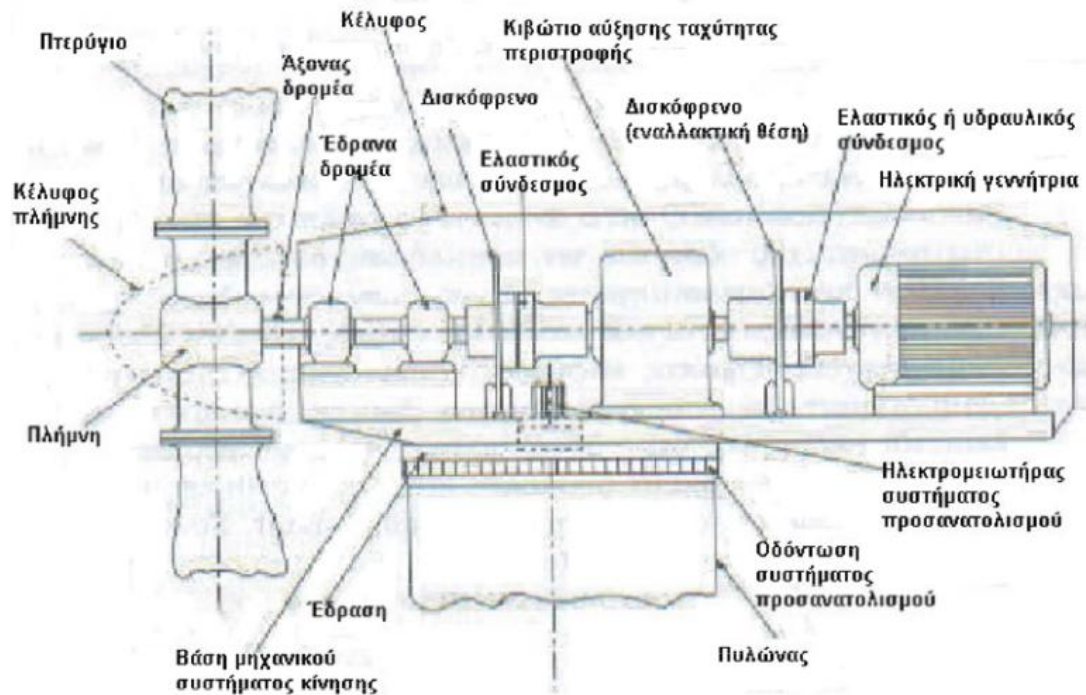
Σε μία τυπική ανεμογεννήτρια διακρίνονται δύο βασικές κατηγορίες μελών, τα δομοστατικά και τα μηχανολογικά μέλη, γεγονός που την καθιστά μια ιδιαίτερη κατασκευή, καθώς χρειάζεται να εξασφαλίζεται η ομαλή συνεργασία του μηχανολογικού και κατασκευαστικού μέρους της κατά την λειτουργία της.

Τα σπουδαιότερα στοιχεία μιας τυπικής ανεμογεννήτριας, μαζί με συνοπτική περιγραφή της λειτουργίας τους αναφέρονται παρακάτω και παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.8:

- Δρομέας ή ροτορας: αποτελείται από δύο ή τρία πτερύγια και είναι το σύστημα μετάδοσης της κίνησης, επομένως είναι ίσως το σημαντικότερο μέρος για τη σχεδίαση ολόκληρου του συστήματος της ανεμογεννήτριας. Απαρτίζεται από τον κύριο άξονα, τα έδρανα και το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών, το οποίο προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα της ηλεκτρογεννήτριας.
- Ηλεκτρική γεννήτρια: συνδέεται με την έξοδο του πολλαπλασιαστή και μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική.
- Σύστημα προσανατολισμού: αναγκάζει τον άξονα περιστροφής του δρομέα να βρίσκεται παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου
- Πύργος: στηρίζει όλη την ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση και εξασφαλίζει την ανύψωση του ρότορα στο ιδανικό ύψος από το έδαφος για την αξιοποίηση των αιολικών δυνάμεων. Υπάρχουν δύο τύποι πύργων που χρησιμοποιούνται συνηθέστερα σήμερα, ο σωληνωτός κι ο δικτυωτός, ενώ για αισθητικούς κυρίως λόγους, προτιμάται η χρήση

πύργων ανεμογεννητριών σωληνωτού τύπου έναντι τύπου δικτυώματος.

- Σύστημα ελέγχου: συντονίζει και ελέγχει όλες τις λειτουργίες της ανεμογεννήτριας, φροντίζοντας για την απρόσκοπτη λειτουργία της.
- Βάση πτερυγίων: περιλαμβάνει το σύνολο των μηχανολογικών μελών και συστημάτων της ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 2.8

Κάτοψη ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα

2.6 Θέματα ελέγχου της παραγόμενης ενέργειας

Οι ανεμογεννήτριες σχεδιάζονται, ώστε να παράγουν ενέργεια με όσο το δυνατόν μικρότερο κόστος. Η απόδοση τους μεγιστοποιείται για ταχύτητες ανέμου περί τα 15m/sec, ενώ διακόπτουν τη λειτουργία τους για ανέμους περί τα 25 m/sec, για την αποφυγή κάποιας βλάβης λόγω των ιδιαίτερα αυξημένων φορτίων από τις ταχύτητες αυτές. Σε ανέμους που κυμαίνονται από 15 έως 25 m/sec, είναι αναγκαίο να αξιοποιείται σε μικρότερο ποσοστό η ενέργεια του

ανέμου, για να αποφεύγονται αστοχίες στη κατασκευή από την αύξηση των φορτίων.

Επομένως, είναι φανερό ότι μία ανεμογεννήτρια χρειάζεται ένα σύστημα ελέγχου λειτουργίας και παραγωγής ενέργειας, το οποίο βελτιστοποιεί την παραγόμενη ενέργεια για μικρές ταχύτητες ανέμου και περιορίζει τη παραγόμενη ενέργεια για μεγάλες ταχύτητες, με όριο μεταξύ μεγάλων και μικρών ταχυτήτων να θεωρούνται τα 15m/sec.

Με τη διεθνή ορολογία, που είναι ευρέως γνωστά γίνεται διάκριση αυτών των συστημάτων ελέγχου ως εξής:

- stall control
- pitch control
- active stall control

2.6.1 Stall control

Η λογική αυτού του συστήματος ελέγχου είναι να περιοριστεί η εξαγόμενη ενέργεια για μεγάλες ταχύτητες, όσο είναι δυνατόν. Αυτό επιτυγχάνεται με τον σχεδιασμό των πτερυγίων, με τέτοιο τρόπο ώστε ο διαχωρισμός της πνοής του ανέμου να πραγματοποιείται στο κάτω μέρος της λεπίδας, όταν γίνεται υπέρβαση της κρίσιμης ταχύτητας ανέμου. Ο διαχωρισμός, δηλαδή, της ροής του ανέμου να πραγματοποιείται στην υπήνεμη πλευρά της λεπίδας, όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει την κρίσιμη τιμή. Μειονέκτημα του stall control αποτελεί το γεγονός ότι προσπαθεί να επιλύσει ένα περίπλοκο αεροδυναμικό σχεδιαστικό πρόβλημα καθώς και παραγόμενα προβλήματα σχεδιασμού ολόκληρης της ανεμογεννήτριας. Ωστόσο, τα 2/3 των ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούνται παγκοσμίως χρησιμοποιούν το συγκεκριμένο σύστημα ελέγχου.

2.6.2 Pitch control

Η λογική του συστήματος αυτού είναι παρόμοια με αυτή του συστήματος stall control. Μέσω κατάλληλου μηχανισμού τα πτερύγια αλλάζουν τον προσανατολισμό τους, σε περίπτωση που υπάρχουν μεγάλες ταχύτητες ανέμου, ώστε η χορδή της έλικας να γίνει παράλληλη στη διεύθυνση του ανέμου. Μειονέκτημα και εδώ αποτελεί η πολυπλοκότητα του συστήματος παρά το γεγονός ότι διατηρεί τη παραγόμενη ισχύ της ανεμογεννήτριας κοντά στην ονομαστική τιμή της γεννήτριας, ακόμα και σε υψηλές ταχύτητες ανέμων.

2.6.3 Active stall control

Το σύστημα αυτό αποτελεί τον συνδυασμό των δύο παραπάνω συστημάτων ελέγχου, καθώς για μικρές ταχύτητες ανέμου λειτουργεί σαν pitch-control σύστημα ελέγχου και για μεγάλες σαν stall-control σύστημα ελέγχου. Με το σύστημα αυτό είναι εφικτός ένας πιο ακριβής έλεγχος της εξαγόμενης ενέργειας, ενώ ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι πως η ανεμογεννήτρια μπορεί να λειτουργήσει στην ονομαστική ισχύ της ακόμα και για υψηλές ταχύτητες ανέμου.

2.7 Καμπύλη ταχύτητας ανέμου – παραγόμενης ισχύος

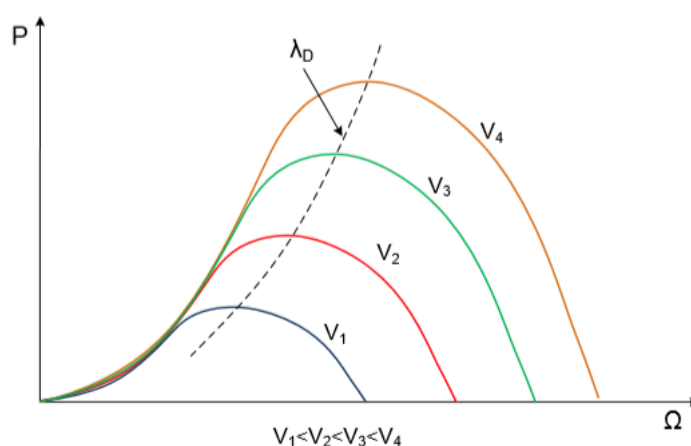
Όλες οι ανεμογεννήτριες έχουν μια χαρακτηριστική καμπύλη ταχύτητας - ισχύος (power curve), που φανερώνει τη σχέση μεταξύ της παραγόμενης ενέργειας και της ταχύτητας του ανέμου και για κάθε τύπο ανεμογεννήτριας, δίνεται από τους κατασκευαστές.

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

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p V_0^3 A \quad (2.1)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα, V_0 η ταχύτητα του ανέμου, A η επιφάνεια του δρομέα και C_p ο συντελεστής αποδοτικότητας.

Ενώ, για να παράγει μια ανεμογεννήτρια τη μέγιστη ισχύ για κάθε τιμή της ταχύτητας ανέμου, πρέπει να λειτουργεί στο σημείο λ_D και συνεπώς η γωνιακή ταχύτητα Ω πρέπει να μεταβάλλεται με την V , όπως γίνεται καλύτερα αντιληπτό με μια παρατήρηση στο Διάγραμμα. 2.2.



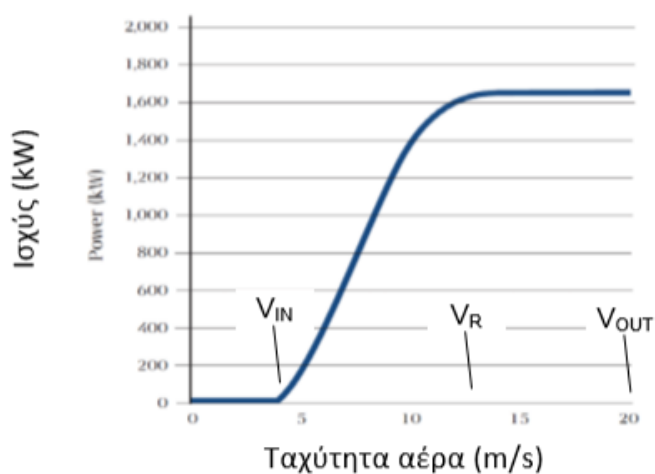
Διάγραμμα 2.2

Μεταβολή γωνιακής ταχύτητας Ω με την ταχύτητα V

Υπάρχουν τρεις τιμές της ταχύτητας ανέμου που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας:

- Η ταχύτητα εισόδου (cut-in) V_{IN} στην οποία αρχίζει να παράγεται ηλεκτρική ισχύς.
- Η ονομαστική (rated) ταχύτητα V_R στην οποία παράγεται η ονομαστική ισχύς P_R και
- Η ταχύτητα εξόδου (cut-out) V_{OUT} στην οποία σταματάει η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος.

Στο Διάγραμμα 2.3 αναπαριστάται η καμπύλη ισχύος.



Διάγραμμα 2.3
Καμπύλη ισχύος

Η καμπύλη ισχύος αποτελεί ένα πολύ σημαντικό στοιχείο για κάθε ανεμογεννήτρια, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο για την σύγκριση μεταξύ διαφορετικών ανεμογεννητριών και ως κριτήριο καταλληλότητας μίας ανεμογεννήτριας δεδομένης τεχνολογίας για μία συγκεκριμένη τοποθεσία.

2.8 Οχλήσεις και Παρασιτικά Φαινόμενα

Οι κύριες οχλήσεις από τη λειτουργία των ανεμογεννητριών αφορούν στο περιβάλλον, και έχουν άμεση σχέση με τους παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή τοποθέτησής τους. Οι κύριες αυτές περιβαλλοντικές οχλήσεις παραθέτονται παρακάτω, καθώς είναι γνωστό πως στην βιβλιογραφία έχουν γίνει απλές αναφορές για πιθανά προβλήματα, χωρίς κάποια συγκεκριμένη περίπτωση αστοχίας ή εκτεταμένης βλάβης από την λειτουργία ανεμογεννητριών να είναι γνωστή.

- ο υπερβολικός θόρυβος
- η διαταραχή του πεδίου του ανέμου
- η μεταβολή της θερμοκρασίας και των περιβαλλοντικών συνθηκών
- οι επιπτώσεις στην πανίδα του γύρω οικοσυστήματος (θάνατοι πτηνών)
- η διαταραχή της ορατότητας από ανακλάσεις
- η ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση με το ηλεκτρικό δίκτυο και άλλες εγκαταστάσεις
- η καταστροφή παρακείμενων καλλιεργειών
- ρωγμές σε παρακείμενες κατασκευές λόγω ταλαντώσεων
- οχλήσεις στους κατοίκους παρακείμενων σπιτιών λόγω ταλαντώσεων
- παραμορφώσεις παρακείμενου εδάφους από τις συντονισμένες ταλαντώσεις πολλών ανεμογεννητριών σε αιολικά πάρκα

Επιπλέον, θα ήταν χρήσιμο να τονιστεί ότι, με τη χρήση νέων και πιο εξελιγμένων υλικών τα τελευταία χρόνια, πολλές από τις παραπάνω επιπτώσεις έχουν περιοριστεί σε μεγάλο βαθμό.

Ενώ, μια άλλη κατηγορία διαταραχών από τη λειτουργία των ανεμογεννητριών αποτελούν τα πιθανά παρασιτικά φαινόμενα σε γύρω κατασκευές, καθώς και στο έδαφος από τη λειτουργία των ανεμογεννητριών. Κάποια από αυτά είναι τα παρακάτω:

- Ρωγμές σε παρακείμενες κατασκευές λόγω ταλαντώσεων
- Οχλήσεις στους κατοίκους παρακείμενων σπιτιών λόγω ταλαντώσεων
- Παραμορφώσεις παρακείμενου εδάφους από τις συντονισμένες ταλαντώσεις πολλών ανεμογεννητριών σε αιολικά πάρκα (ανεμογεννήτριες κοντά σε πρηνή, ανεμογεννήτριες σε τεχνητά επιχώματα, κ.λ.π)

2.9 Βασικές παράμετροι ανέμου

Η κυρίαρχη φόρτιση σε πύργους ανεμογεννητριών είναι ο άνεμος. Ο άνεμος είναι αποτέλεσμα των θερμοκρασιακών διαφορών που δημιουργούνται στη ατμόσφαιρα, είτε λόγω γεωγραφικού πλάτους, είτε λόγω διαφορετικής θερμοκρασίας της επιφάνειας της γης. Οι διαφορετικές γεωγραφικές θερμοκρασίες οφείλονται κυρίως στην υψομετρική διαφορά δύο σημείων και στη διαφορετική φύση της επιφάνειας.

Στην Ελλάδα, λόγω της μορφολογίας της Βαλκανικής Χερσονήσου, τη χειμερινή περίοδο επικρατούν τοπικοί Βόρειο-Βορειοανατολικοί άνεμοι με ένταση μέση έως ισχυρή, την άνοιξη γίνονται νοτίων διευθύνσεων ισχυρής επίσης έντασης, ενώ το καλοκαίρι η ένταση τους μειώνεται με συνέπεια την

εμφάνιση πολλών ημερών με νηνεμία. Ενώ, από τόπο σε τόπο η ταχύτητα του ανέμου είναι διαφορετική και ποικίλλει κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Κύρια μεταβλητή του ανέμου σύμφωνα με τους Ευρωπαϊκούς και Αμερικάνικους κανονισμούς αποτελεί η μέση ταχύτητα του ανέμου U_{10} σε χρονικό διάστημα δέκα λεπτών, η οποία σε συνδυασμό με την τυπική απόκλιση σ_U της μέσης της τιμής αποδίδει τη μεταβολή του ανέμου με τον χρόνο. Αυτή η εκτίμηση της διακύμανσης του ανέμου είναι πολύ σημαντική, ώστε να μπορεί να υπολογιστεί ποσοτικά η παραγόμενη ισχύς του. Κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος των δέκα λεπτών θεωρείται ότι οι U_{10} και σ_U παραμένουν σταθερές. Σε περιπτώσεις καιρικών φαινομένων με απότομες μεταβολές και ακραίες τιμές ή σε 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 ενός άλλου διαστήματος δέκα λεπτών και για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα μπορεί, για τις πιο πολλές τοποθεσίες, να αποδοθεί από την κατανομή Weibull:

$$F_{U_{10}}(u) = 1 - \exp\left(-\frac{u}{A}\right)^k \quad (2.2)$$

Η παράμετρος $k=0.4$ είναι η σταθερά του von Karman και η μεγεθυντική παράμετρος A σε ύψος z μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση:

$$A = \frac{A_H \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{H}{z_0}\right)} \quad (2.3)$$

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 και A_H είναι η βαθμιδωτή παράμετρος στο ύψος αναφοράς H .

Η έκφραση του A βασίζεται στο λογαριθμικό προφίλ της ταχύτητας του ανέμου πάνω από το έδαφος το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$u(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2.4)$$

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.

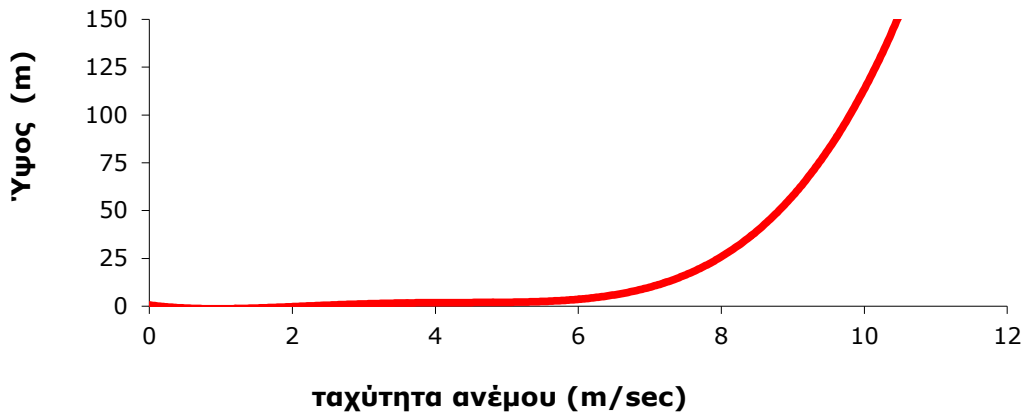
Στον Πίνακα 2.1 δίνονται κάποιες ενδεικτικές τιμές του z_0 για διάφορα είδη εδάφους και στο Διάγραμμα 2.4 το κατακόρυφο προφίλ του ανέμου $Z_0=0,01$. Οι ενδεικτικές αυτές τιμές μεταβάλλονται, όταν οι τοποθεσίες είναι παραθαλάσσιες. Σύμφωνα με τους κανονισμούς, η περίοδος επαναφοράς για τη U_{10} είναι πενήντα χρόνια σε ύψος 10m από το έδαφος, θεωρώντας τραχύτητα εδάφους $z_0=0,05$.

Πίνακας 2.1

Τιμές παραμέτρου τραχύτητας z_0

Είδος εδάφους	z_0 (m)
Επίπεδος πάγος	0,00001
Ανοικτή θάλασσα	0,001
Ανοικτή θάλασσα χωρίς κύματα	0.0001 έως 0.003
Παραθαλάσσια μέρη	0,001
Ύψαιθρος χωρίς σημαντικά εμπόδια	0,01
Καλλιεργημένη γη	0,05
Δάση και προάστια	0,3
Αστικά κέντρα	1 έως 10

Κατακόρυφο προφίλ ανέμου
 $z_0=0.01$



Διάγραμμα 2.4

Κατακόρυφο προφίλ ανέμου

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 (διαταραχή). Μετρήσεις σε πλήθος περιοχών δείχνουν ότι η κατανομή της σ_U σε συσχέτιση με την U_{10} αποδίδεται από την κατανομή lognormal:

$$F_{\sigma_U/U_{10}}(\sigma) = \frac{\Phi(\ln \sigma - b_0)}{b_1} \quad (2.5)$$

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).

Ωστόσο, πέρα από την θεωρητική προσέγγιση για το σ_U για πρακτικούς λόγους ο δανέζικος κανονισμός DS472 [D2] προτείνει μια συντηρητική τιμή για την παράμετρο σ_U με βάση την σχέση:

$$\sigma_{U,c} = \frac{U_{10}}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (2.6)$$

Ενώ, με βάση τον κανονισμό IEC61400-1 η παράμετρος σ_U προσδιορίζεται με βάση την σχέση:

$$\sigma_{U,c} = I_{T,15}(U_{10,15} + \alpha U_{10}) / (\alpha + 1) \quad (2.7)$$

όπου $U_{10,15} = 15$ m/sec η ταχύτητα αναφοράς του ανέμου

$I_{T,15}$ = η ένταση της τύρβης για ταχύτητα ανέμου 15 m/sec

α = παράμετρος κλίσης

Με συνηθέστερες τιμές $I_{T,15} = 0.18$, $\alpha = 2$ για επίπεδα υψηλής τύρβης και $I_{T,15} = 0.16$, $\alpha = 3$ για χαμηλότερα επίπεδα τύρβης.

Ως ένταση τύρβης I_t ορίζεται ο λόγος της μέσης εκτροπής της ταχύτητας των 10 λεπτών σ_U προς τη ταχύτητα των δέκα λεπτών U_{10} . Η παρουσία μιας ανεμογεννήτριας επηρεάζει τη ροή του ανέμου τοπικά, και η τύρβη πίσω από την ανεμογεννήτρια θα είναι διαφορετική απ' ό,τι στο μπροστινό μέρος. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως «*wake effect*» και παίζει σημαντικό ρόλο όταν υπάρχει ομάδα ανεμογεννητριών που είναι τοποθετημένες η μία πίσω από την άλλη σε απόσταση μικρότερη από 30 μέτρα μεταξύ τους.

Σε γενικότερο επίπεδο, η παρουσία εμποδίων, φυσικών ή τεχνητών, η ανομοιογένεια του εδάφους και της γενικότερης τοπογραφίας, οξύνουν τη τύρβη και δημιουργούν ένα έντονα ανομοιογενές και έντονα μεταβαλλόμενο πεδίο ανέμου, το οποίο προσομοιώνεται δύσκολα.

Κάθε αναφορά που έγινε μέχρι τώρα στις U_{10} , σ_U και I_t , θεωρούσε ότι ο άνεμος έχει σταθερή διεύθυνση κατά τη διάρκεια των δέκα λεπτών, με αποτέλεσμα οι παραπάνω παράμετροι να θεωρούνται σταθερές. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια των δέκα λεπτών, εκτός από τη τύρβη στη διεύθυνση του ανέμου αναμένεται να υπάρχει και τύρβη κάθετα και κατακόρυφα στη διεύθυνση του ανέμου. Θα ήταν, επίσης, χρήσιμο να σημειωθεί ότι 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.

2.10 Φορτίσεις ανεμογεννητριών

Μέρος της διαδικασίας σχεδιασμού μιας ανεμογεννήτριας είναι και η ανάλυση πιθανών φορτίσεων, που θα υποστεί κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της. Βασικός στόχος, σ' αυτή τη διαδικασία, είναι να εξασφαλιστεί ότι η κατασκευή θα είναι ικανή να ανταπεξέλθει σε αυτές τις φορτίσεις με ένα επαρκές

περιθώριο ασφαλείας. Για το λόγο αυτό, απαιτείται κατά την ανάλυση συστηματική αντιμετώπιση, πληθώρας σεναρίων φόρτισης.

Οι περιπτώσεις σχεδιασμού συνίστανται στις πιο σημαντικές συνθήκες που ενδέχεται να υποβληθεί η κατασκευή, οι οποίες διακρίνονται σε Συνθήκες Λειτουργίας και Προσωρινές Συνθήκες και διαχωρίζονται σύμφωνα με τα παρακάτω:

Συνθήκες Λειτουργίας

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

Προσωρινές Συνθήκες

- μεταφορά
- εγκατάσταση, συνδεσμολογία
- έλεγχος, δοκιμή μελών
- βλάβες (π.χ. του συστήματος ελέγχου)
- συντήρηση και επισκευή

Ταυτόχρονα, ο άνεμος αποτελεί την κυρίαρχη πηγή φόρτισης μιας ανεμογεννήτριας. Σύμφωνα με το κανονισμό IEC-61400-1, γίνεται ο επιπλέον διαχωρισμός, που ακολουθεί:

- κανονικό προφίλ ανέμου
- κανονικό επίπεδο τύρβης
- ακραία συνεχής (κάποιας διάρκειας) ριπή ανέμου
- ακραία μεταβολή της διεύθυνσης του ανέμου
- ακραία ριπή ανέμου με συγκεκριμένη διεύθυνση
- ακραίες ταχύτητες ανέμου
- ακραία μεταβολή των ταχυτήτων καθ' ύψος.

Οι φορτίσεις αυτές που λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό μιας ανεμογεννήτριας είναι αποτέλεσμα συνδυασμού καταστάσεων σχεδιασμού και εξωτερικών συνθηκών. Οι συνδυασμοί αυτοί παράγουν έναν ελάχιστο αριθμό φορτίσεων σχεδιασμού όπως:

- κανονική λειτουργία και κανονικές εξωτερικές συνθήκες
- κανονική λειτουργία και ακραίες εξωτερικές συνθήκες

- περιπτώσεις βλαβών και κατάλληλες εξωτερικές συνθήκες οι οποίες πιθανόν να περιλαμβάνουν ακραίες εξωτερικές συνθήκες. Περιπτώσεις βλαβών στο δίκτυο και βλάβη στο σύστημα διακοπής της λειτουργίας
- μεταφορά, εγκατάσταση, συντήρηση-επισκευή και δυσμενείς εξωτερικές συνθήκες

Παρακάτω ακολουθεί μια σύντομη αναφορά στις δυνάμεις που δρουν σε μία ανεμογεννήτρια, οι οποίες ονομαστικά είναι:

- α) βαρυτικές δυνάμεις στα πτερύγια
- β) βαρυτικές δυνάμεις στο πύργο και στη βάση των πτερυγίων
- γ) αεροδυναμικά φορτία στα πτερύγια
- δ) αεροδυναμικές δυνάμεις στο πύργο και στη βάση των πτερυγίων
- ε) γυροσκοπικές δυνάμεις εξαιτίας της λειτουργίας του συστήματος ευθυγράμμισης
- στ) φυγόκεντρες και Coriolis δυνάμεις εξαιτίας της περιστροφής

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι σημαντικότερες φορτίσεις, που συναντώνται σε μια ανεμογεννήτρια, με στόχο την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο ανάγονται αυτές από τα διάφορα μέρη της ανεμογεννήτριας στον πύργο, που αποτελεί και το κύριο αντικείμενο μελέτης της.

2.10.1 Αδρανειακές και βαρυτικές φορτίσεις

Οι αδρανειακές και βαρυτικές δυνάμεις στον ρότορα εξαρτώνται από τη μάζα. Η εγκάρσια φυγόκεντρη δύναμη στη διατομή της λεπίδας F_c εξαρτάται από τη γωνιακή ταχύτητα του ρότορα και στην ακτινική θέση καθώς και στη μάζα του στοιχείου της λεπίδας. Στην ρίζα της λεπίδας η δύναμη δίνεται από την σχέση:

$$F_c = \sum m_i r_i \omega^2 \quad (2.8)$$

όπου m_i είναι η μάζα του στοιχειώδους στοιχείου, ω η κυκλική ταχύτητα του ρότορα και r_i είναι η ακτινική απόσταση του εξεταζόμενου στοιχείου.

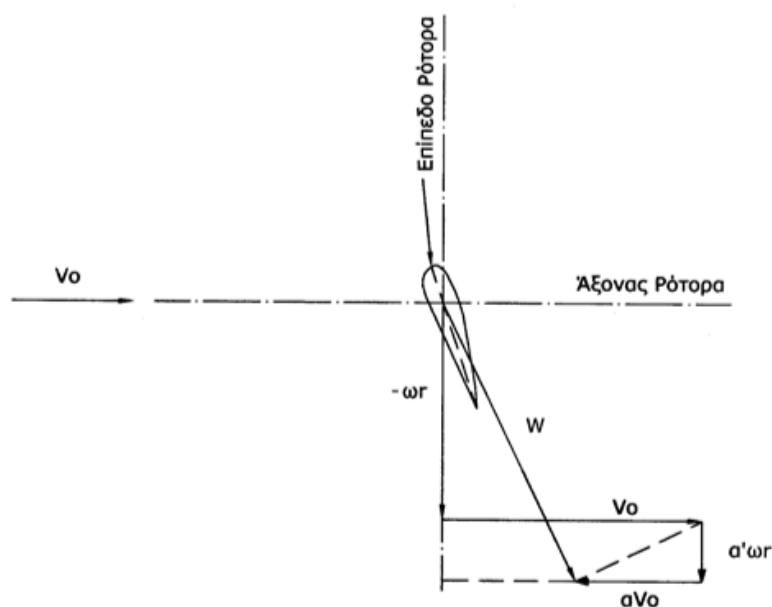
Όσον αφορά τις γυροσκοπικές δυνάμεις, αυτές προκύπτουν σε κάθε ελαστική στήριξη του ρότορα. Ανεξάρτητα από την ελαστικότητα της στήριξης, τέτοιες δυνάμεις αναπτύσσονται όταν ο ρότορας στρέφεται και ευθυγραμμίζεται στη διεύθυνση του ανέμου. Σημειώνεται, ότι τέτοιου είδους δυνάμεις δε λαμβάνονται υπόψη,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

2.10.2 Αεροδυναμικές φορτίσεις

2.10.2.1 Πτερύγια

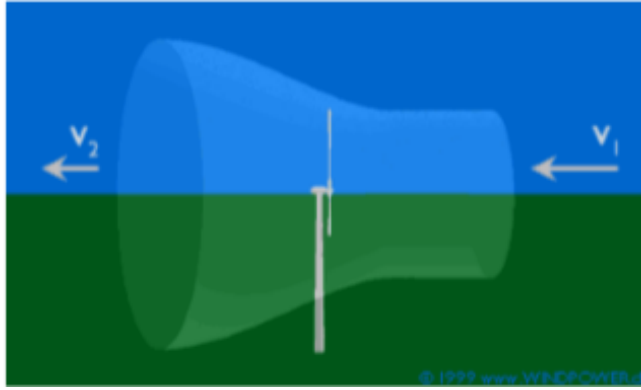
Η πραγματική ροή του ανέμου σε αυτή την περιοχή είναι αρκετά πολύπλοκη, διότι η λειτουργία του ρότορα διαφοροποιεί τις ταχύτητες και το πεδίο του ανέμου. Συνεπώς, για την εκτίμηση των φορτίων του ρότορα χρησιμοποιούνται πιο απλά μοντέλα, προς διευκόλυνση των υπολογισμών.

Στην Εικόνα 2.9 απεικονίζεται ο τρόπος φόρτισης μιας λεπίδας, καθώς και οι συνιστώσες της ταχύτητας. Αν θεωρηθεί v_0 η ταχύτητα που προσπίπτει κάθετα στη λεπίδα, όταν ο άνεμος περάσει εντός του πεδίου του ρότορα, φαίνεται πως αυτή θα μειωθεί κατά ένα ποσοστό εξαιτίας της αλληλεπίδρασης με τη λεπίδα (Εικόνα 2.10).



Εικόνα 2.9

Συνιστώσες ταχύτητας ανέμου σε πτερύγιο ανεμογεννήτριας



Εικόνα 2.10

Μεταβολή πεδίου ταχυτήτων ανέμου από λειτουργία του ρότορα

Ένα στοιχείο του πτερυγίου, το οποίο βρίσκεται σε απόσταση r από τον άξονα του ρότορα, κινείται με ταχύτητα $\omega * r$ στο επίπεδο του ρότορα. Όταν ο άνεμος διέρχεται από το επίπεδο του ρότορα, τότε υφίσταται μια αλληλεπίδραση με τον κινούμενο ρότορα και εμφανίζεται επίσης μια επαπτομενική ταχύτητα $a*\omega*r$. Η τελική ταχύτητα πνοής του ανέμου, την οποία θα δεχτεί το πτερύγιο του ρότορα, είναι η W . Στη συνέχεια, η ταχύτητα αυτή δημιουργεί δυο ειδών αεροδυναμικές δυνάμεις, τη δύναμη ανύψωσης (lift) και τη δύναμη στο επίπεδο της λεπίδας (drag) που δίνονται, αντίστοιχα, από τις σχέσεις:

$$F_L = 0,5C_L \rho c W^2 \quad (2.9)$$

$$F_D = 0,5C_D \rho c W^2 \quad (2.10)$$

όπου C_L είναι η παράμετρος ανασηκώσεως, C_D η αεροδυναμική παράμετρος, ρ η πυκνότητα του αέρα και c το μήκος της χορδής της λεπίδας.

2.10.2.2. Πύργος και βάση πτερυγίων

Σε αυτή την περίπτωση, η αεροδυναμική δύναμη F_D στον πύργο και τη βάση των πτερυγίων μιας ανεμογεννήτριας μπορεί να εκτιμηθεί, με βάση την προβαλλόμενη επιφάνεια κάθετα στη ροή του ανέμου, μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$F_D = 0,5C_T \rho A V_0^2 \quad (2.11)$$

όπου C_T ο αεροδυναμικός συντελεστής αντίστασης, ρ η πυκνότητα του αέρα, A η προβαλλόμενη επιφάνεια και V_0 η ταχύτητα του ανέμου.

2.10.2.3 Κόπωση

Ο άνεμος έχει έντονα μεταβαλλόμενο μέτρο και διεύθυνση, ενώ αποτελεί την κυρίαρχη πηγή φορτίσεως σε μια ανεμογεννήτρια. Συνεπώς, η κόπωση δεν θα μπορούσε να παραληφθεί από τους διάφορους τρόπους καταπόνησης σε αρκετά μέλη της κατασκευής, αλλά και ειδικά στη θεμελίωση. Γίνεται, λοιπόν, εύκολα αντιληπτό ότι είναι μεγάλος ο κίνδυνος να υπάρξει αστοχία στο σχεδιασμό μιας ανεμογεννήτριας, λόγω κόπωσης, γι' αυτό και πρέπει να αποτελεί ένα κρίσιμο θέμα κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού. Επιπλέον, οι ανεμογεννήτριες είναι κατασκευασμένες, με τέτοιο τρόπο, ώστε το υλικό τους να βρίσκεται πάντοτε κάτω από το όριο διαρροής του, ενώ λόγω κόπωσης το υλικό συμπεριφέρεται μη-γραμμικά, με συνέπεια την πρόκληση βλαβών στην κατασκευή. Συμπερασματικά, η κόπωση μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ασφαλή λειτουργία της ανεμογεννήτριας για όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής της.

2.11 Θεμελίωση ανεμογεννητριών

Οι ανεμογεννήτριες και τα αιολικά πάρκα συναντώνται στην ξηρά αλλά και στην θάλασσα. Ο διαχωρισμός αυτός της χωροθέτησής τους είναι μία από τις αιτίες, που οδηγούν στο σχεδιασμό και την κατασκευή ανεμογεννητριών με διαφορετικά χαρακτηριστικά, όπως είναι ο τρόπος της θεμελίωσής τους.

2.11.1. Θεμελίωση χερσαίων ανεμογεννητριών

Οι χερσαίες ανεμογεννήτριες τοποθετούνται στο 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 ο τύπος 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. Ο έλεγχος αυτός έναντι ολίσθησης και ανατροπής εκφράζεται μέσω της φέρουσας ικανότητας, η οποία, συχνότερα, υπολογίζεται με βάση τον κανονισμό DIN4017 για τετραγωνικό ή ορθογώνιο θεμέλιο, ανάλογα το εδαφικό προφίλ και τον τύπο θεμελίωσης που θα επιλεγεί.

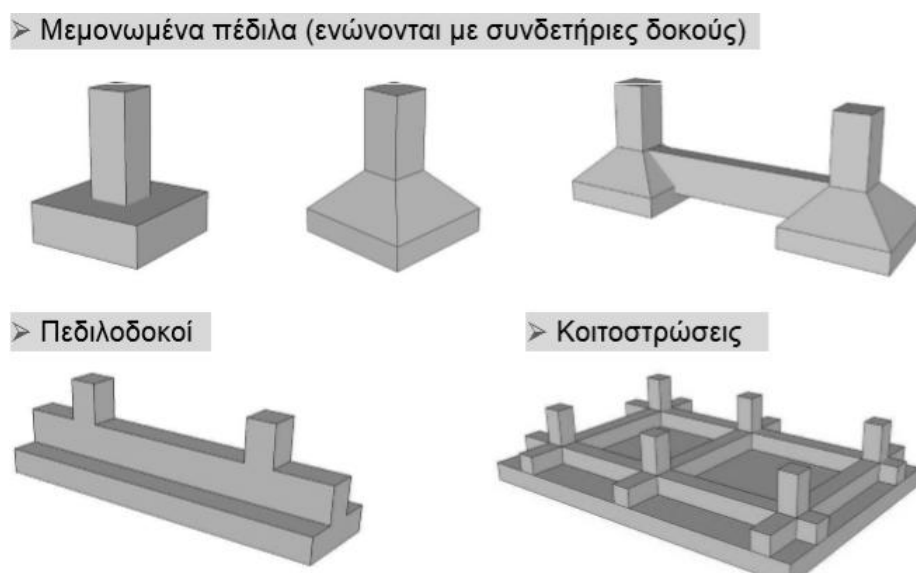
Στόχος, σε κάθε περίπτωση είναι η επάρκεια της φέρουσας ικανότητας του εδάφους προκειμένου να μην υπάρχει αστοχία λόγω των φορτίων που μεταφέρονται, αλλά και η ανάπτυξη μικρών μόνο μετακινήσεων της θεμελίωσης (εδαφικές καθιζήσεις, στροφές) που δεν θέτουν σε κίνδυνο την στατικότητα και τη λειτουργικότητα της κατασκευής.

Από την άλλη μεριά, η εκκεντρότητα της φόρτισης έχει αποδειχθεί πως είναι ένα ακόμα κρίσιμο μέγεθος σχεδιασμού της θεμελίωσης, κυρίως επιφανειακών θεμελιώσεων, με αποτέλεσμα να θέτεται ως στόχος στον

σχεδιασμό ο περιορισμός της εκκεντρότητας της φόρτισης και όχι τόσο η φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης.

Η επιφανειακή θεμελίωση είναι ο πιο συνηθής τρόπος θεμελίωσης πύργων ανεμογεννητριών, αλλά και άλλων κατασκευών, καθώς μπορεί να έχει ευρεία εφαρμογή. Συχνότερα, χρησιμοποιούνται θεμελιώσεις βαρύτητας από οπλισμένο σκυρόδεμα, με τη διατομή των θεμελίων αυτών να είναι κυκλική ή ορθογωνική.

Υπάρχουν τρεις γενικές κατηγορίες επιφανειακών θεμελιώσεων κτιρίων, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, τα μεμονωμένα πέδιλα, τα οποία ενώνονται με συνδετήριες δοκούς, οι πεδιλοδοκοί και οι κοιτοστρώσεις.



Εικόνα 2.11

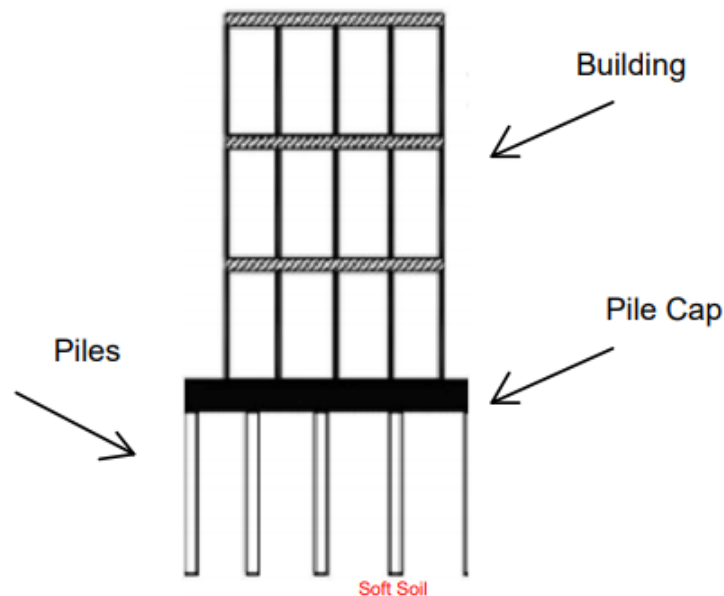
Κατηγορίες επιφανειακών θεμελιώσεων κτιρίων

Αυτό που πρέπει να σημειωθεί είναι, πως η επιφανειακή θεμελίωση επιλέγεται όταν το έδαφος είναι αρκετά σκληρό, ώστε να παραλάβει απευθείας τις διάφορες φορτίσεις από την ανεμογεννήτρια με ασφάλεια. Σε εδάφη, επομένως, που διακρίνεται από μεγάλη δυσκαμψία, όπως είναι τα βραχώδη, προτιμάται αυτός ο τρόπος θεμελίωσης. Ενώ, οι έλεγχοι που πρέπει, γενικά, να γίνονται, στις επιφανειακές θεμελιώσεις είναι έναντι ανατροπής, ολίσθησης, αστοχίας φέρουσας ικανότητας, άνωσης και καθιζήσεων.

Η βαθιά θεμελίωση μέσα στο έδαφος δύναται να αποτελείται από έναν ή περισσότερους πασσάλους, σε περίπτωση που οι ιδιότητες του εδάφους δεν επαρκούν για να εδρασθεί η θεμελίωση επιφανειακά. Σε πιο μαλακές και εύκαμπτες περιπτώσεις εδαφικών υλικών, γίνεται η συγκεκριμένη επιλογή

θεμελίωσης, διότι οι φορτίσεις που προκαλούνται εξ αιτίας της ανεμογεννήτριας, χρειάζεται να μεταφερθούν σε μεγαλύτερα βάθη από την επιφάνεια, ώστε να απορροφηθούν από τα σκληρότερα εδαφικά υλικά που βρίσκονται συνήθως σε αυτά.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, δεν τίθεται η απαίτηση για περιορισμό της εκκεντρότητας της φόρτισης, όπως γίνεται σε περίπτωση επιφανειακής θεμελίωσης, που προαναφέρθηκε, αφού η θεμελίωση με πασσάλους μπορεί να παραλάβει ροπή, χωρίς την απαίτηση μεγάλου κατακόρυφου φορτίου. Βασικό μειονέκτημα αυτού του τρόπου θεμελίωσης είναι το αυξημένο κόστος, παρά το γεγονός ότι εξοικονομείται σκυρόδεμα. Η επιλογή της θεμελίωσης με πασσάλους, ωστόσο είναι μια καλή λύση με περίπτωση κατασκευής πάρκων ανεμογεννητριών, που απαιτείται η παράλληλη θεμελίωση μεγάλου αριθμού ανεμογεννητριών, καθώς προτιμάται και όταν ο χώρος για θεμελίωση είναι περιορισμένος.



Εικόνα 2.12

Βαθιά θεμελίωση με πασσάλους

2.11.2 Θεμελίωση Παράκτιων Ανεμογεννητριών

Η συγκεκριμένη θεμελίωση είναι προφανώς πιο πολύπλοκη από τις αντίστοιχες της στεριάς, με την έννοια πως απαιτείται μια δύσκολη προσαρμογή, δηλαδή η έδραση της διάταξης και η θεμελίωση του πύργου της ή των ανεμογεννητριών στον πυθμένα της θάλασσας. Η βασική στατική αρχή της θεμελίωσης των ανεμογεννητριών εντός της θάλασσας βασίζεται στο κατά πόσον μπορεί να διασφαλιστεί η σταθερότητα λόγω του μεγέθους και του βάθους των θεμελίων ή αν θα χρειαστεί να τοποθετηθούν επιπλέον ενισχύσεις ή και αντιστηρίξεις στον πυθμένα, ενώ σε μεγαλύτερα βάθη υδάτων, οι απαιτούμενες εργασίες σχεδιασμού και κατασκευής ενδεχομένως να οδηγήσουν σε οικονομικές αποκλίσεις της συνολικής επένδυσης.

Η θεμελίωση μιάς ανεμογεννήτριας ή ενός αιολικού πάρκου εξαρτάται από το βάθος του πυθμένα, το είδος του διαθέσιμου υπεδάφους αλλά και τη διαθεσιμότητα ειδικού εξοπλισμού για την κατασκευή μεταφορά αλλά και τοποθέτηση των διαφόρων τύπων θεμελιώσεων. Το βάρος της κάθε θεμελίωσης εξαρτάται κυρίως από το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή της (σκυρόδεσμα ή χάλυβας) αλλά και τον τρόπο που θα στηριχθεί στον πυθμένα. Το τελευταίο κριτήριο για κάθε λύση είναι το κόστος. Μεταξύ των κριτηρίων που έχουν τεθεί για την προκαταρκτική χωροθέτηση αιολικών υπεράκτιων πάρκων στην Ελλάδα, είναι και το μέγιστο επιτρεπόμενο βάθος των 50 μέτρων το οποίο αποκλείει πλωτές ανεμογεννήτριες και μεγάλα θαλάσσια βάθη.

Είναι φανερό, λοιπόν, πως η πάκτωση των ανεμογεννητριών στον πυθμένα των θαλάσσιων περιοχών, που πρόκειται να εγκατασταθούν, απαιτεί ιδιαίτερη μελέτη από πολλές πλευρές.

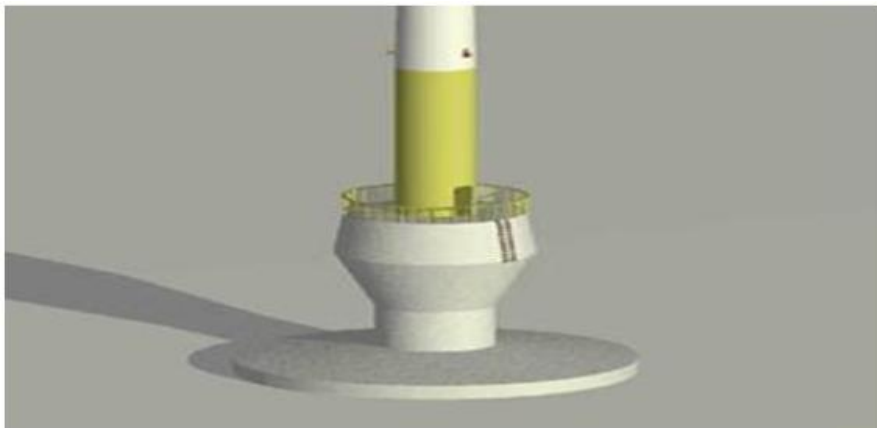
Τα είδη θεμελίωσης των υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι τα εξής τρία βασικά:

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

Η θεμελίωση βαρύτητας (gravity based) χρησιμοποιήθηκε στα αιολικά πάρκα της Δανίας και συγκεκριμένα στις περιοχές Videby και Tunoe. Τυπικά, αυτό το είδος θεμελίωσης αποτελείται από κέλυφος οπλισμένου σκυροδέματος, το οποίο κατασκευάζεται στην στεριά και εν συνεχεία ρυμουλκείται στην τοποθεσία, όπου και βυθίζεται με το εσωτερικό του να γεμίζεται από διάφορα βαριά υλικά, όπως άμμος, χαλίκια και σίδερα. Μετά την τοποθέτηση του στο νερό, στηρίζονται πάνω του τα υπόλοιπα τμήματα της ανεμογεννήτριας, ο πυλώνας, ο μηχανισμός περιστροφής, οι λεπίδες και το ηλεκτρομηχανολογικό υλικό.

Ένα τέτοιο θεμέλιο μπορεί να έχει ανοικτή ή κλειστή κορυφή, είναι κωνικό ή πυραμιδοειδές και κυκλικής ή πολυγωνικής κάτοψης. Η κωνική διατομή προτιμάται για περιοχές με χιονοπτώσεις και παγετό, ενώ η κλειστή οροφή προτιμάται για οικονομικούς λόγους, αφού μπορεί να γεμίσει με άμμο, που είναι φθηνότερη από την γέμιση με πέτρες ή βράχο. Είναι, επίσης, σημαντικό να τονιστεί, πως για την προστασία της κατασκευής από διάβρωση, χρησιμοποιούνται περιμετρικοί μανδύες που υπεισέρχονται στον πυθμένα, σε συνδυασμό με περιμετρική διάστρωση πετρωμάτων, η οποία εξασφαλίζει την αποφυγή της απομάκρυνσης του εδάφους στήριξης.

Παρόλο που η λύση μιας τέτοιας θεμελίωσης αποτελεί μια απλή κατασκευή, υπάρχει το μειονέκτημα πως υστερεί σε περιοχές με υψηλή διαβρωσιμότητα λόγω του υψηλού κόστους των μέτρων προστασίας.



Εικόνα 2.13

Θεμέλια βαρύτητας από οπλισμένο σκυρόδεμα

Η θεμελίωση με μεμονωμένο πάσσαλο - πυλώνα (monopile) έχει χρησιμοποιηθεί, ευραίως, σε αιολικά πάρκα στην Βαλτική και τη Βόρεια θάλασσα, καθώς και σε άλλες περιοχές της Βρετανίας. Αυτή η περίπτωση θεμελίωσης είναι εφικτή οικονομικά για βάθη μέχρι 30 μέτρα, ενώ αποτελείται από μια απλή κατασκευή ενός μεταλλικού χαλύβδινου σωλήνα, ο οποίος αφού κατασκευαστεί μεταφέρεται με φορητή γίδα ή ρυμουλκείται στον τόπο της εναπόθεσής του. Σημειώνεται, πως το θεμέλιο αυτό βυθίζεται 10 με 20 μέτρα από την επιφάνεια του πυθμένα ανάλογα με τον τύπο του υπεδάφους.

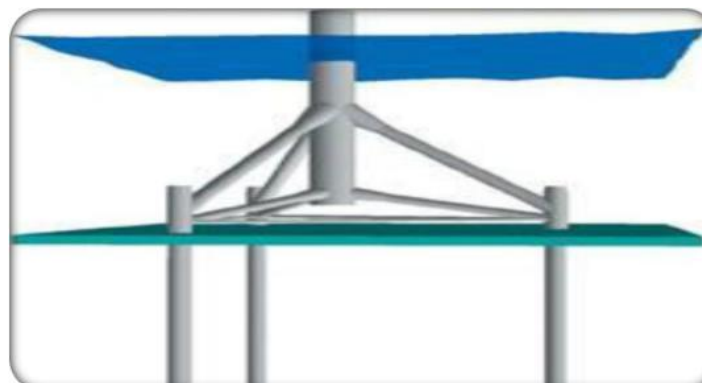
Η συγκεκριμένη λύση θεμελίωσης πλεονεκτεί σε αρκετούς τομείς, μεταξύ αυτών, το μικρό βάρος της, που διευκολύνει την μεταφορά αλλά και την τοποθέτηση, καθώς και το γεγονός ότι δεν χρειάζονται ειδικές προετοιμασίες του πυθμένα, επομένως η τοποθέτηση γίνεται πολύ πιο γρήγορα και εύκολα απ' ό,τι αυτή των θεμελίων βαρύτητας.



Εικόνα 2.14

Μεμονωμένος πάσσαλος – πυλώνας

Η θεμελίωση με τρίποδα (tripod) αποτελεί μια εξέλιξη της προηγούμενης, που αναφέρθηκε και έχει τις ρίζες της στις κατασκευές που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία της άντλησης πετρελαίου. Γενικά, αυτή η κατασκευή αποτελείται από ένα ελαφρύ σωληνωτό χωρικό δίκτυωμα, το οποίο αγκυρώνεται στον πυθμένα, με χρήση τριών μεταλλικών πασσάλων, ενώ αυτού του είδους η θεμελίωση προτιμάται για πιο μεγάλα βάθη νερού και σε περιοχές με πιο άγριο κλίμα. Το βάρος της κατασκευής αυτής είναι ακόμα ελαφρύτερο από αυτό του μονού σωληνωτού πασσάλου, το οποίο δημιουργεί το πλεονέκτημα πως, συνήθως, η επιλογή αυτής της λύσης θα οδηγήσει σε χαμηλότερο κόστος.



Εικόνα 2.15

Θεμελίωση μεταλλικού τριπόδου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΤΟΠΙΚΕΣ ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ – ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

3.1 Εισαγωγή

Το πρωί της 19ης Σεπτεμβρίου του 1985 η πόλη του Μεξικού ήρθε αντιμέτωπη με μια ισχυρή δόνηση μεγέθους 8,1 Ρίχτερ. Το επίκεντρό της ήταν στον Ειρηνικό Ωκεανό, 320 χιλιόμετρα δυτικά της. Η πόλη είναι χτισμένη στα ερείπια της αρχαίας πόλης Τενοτσιπιλάν και βρίσκεται πάνω ένα παλαιό πλέγμα διασυνδεδεμένων λιμνών που αποστραγγίστηκαν αρχικά από τους Ισπανούς. Ουσιαστικά, είναι χτισμένη πάνω σε μαλακό χώμα και άμμο, ένα υπέδαφος εξαιρετικά ασταθές, κάτι που έκανε ακόμη πιο έντονη τη δόνηση. Οι καταστροφές που καταγράφηκαν, ωστόσο, φάνηκαν να είναι επιλεκτικές ως προς τον τύπο των κατασκευών και την χωρική κατανομή τους, αφού επλήγησαν μόνον υψηλά κτίρια θεμελιωμένα σε μία σχετικώς περιορισμένη ζώνη εδαφικών αποθέσεων. Στην υπόλοιπη πόλη, οι βλάβες ήταν περιορισμένες.

Το παραπάνω τραγικό γεγονός είναι ένα από τα πλέον χαρακτηριστικά παραδείγματα δραματικής επίπτωσης των τοπικών εδαφικών συνθηκών, δηλαδή βλαβών που καταγράφονται μεταξύ διαφορετικών θέσεων, κατά το ίδιο σεισμικό γεγονός. Η παραπάνω πρόταση δείχνει την χωρική μεταβλητότητα ενός σεισμικού γεγονότος, ενώ κάνει φανερό ότι η δόνηση που παρατηρείται κατά την διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος σε μία συγκεκριμένη θέση αποτελεί συνάρτηση, της σεισμικής πηγής και του τρόπου διαδόσεως των σεισμικών κυμάτων αλλά και των τοπικών συνθηκών.

Το παράδειγμα του σεισμού στο Μεξικό δεν είναι το μοναδικό, καθώς παγκοσμίως καταγράφονται σεισμοί που καταδεικνύουν την έντονη επίδραση των τοπικών συνθηκών, όπως ο σεισμός στο Spitak της Αρμενίας το 1988 (Yegian et al 1994(a, b, e, d)), στη Lorna Prieta το 1989 (Housner et al 1990), στο Northridge το 1994 (EERI 1995), στο Kobe το 1995 (EERC 1995), αλλά και στην Αθήνα το 1999.

Συνεπώς, η σεισμική διέγερση που επιβάλλεται στις κατασκευές είναι συνάρτηση του μηχανισμού δημιουργίας του σεισμικού ρήγματος, της γεωλογίας της σεισμογενούς ζώνης και ταυτόχρονα της επίδρασης των τοπικών εδαφικών συνθηκών, δηλαδή της γεωμετρίας του εδαφικού ανάγλυφου και της εδαφικής ενίσχυσης ή απομείωσης των εδαφικών στρωμάτων. Το κατά πόσο, ωστόσο η εδαφική κίνηση σε περιοχές κοντά στην κατασκευή επηρεάζεται από την παρουσία της κατασκευής και το πώς η απόκριση της κατασκευής τροποποιείται, λόγω της ενδοσιμότητας του

εδάφους θεμελίωσης είναι αυτό που ονομάζεται δυναμική εξάρτηση μεταξύ της κατασκευής και του εδάφους ή αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευής (SoilStructure Interaction, SSI).

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται προσπάθεια να περιγραφούν τα φυσικά φαινόμενα που διέπουν την επίδραση των τοπικών συνθηκών στην σεισμική δόνηση, ενώ υπάρχει και μια σύντομη αναφορά στην αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευής.

3.2 Αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευής

Η ανάλυση της ταλάντωσης μιας κατασκευής υποκείμενης σε δυναμική διέγερση αποτελεί ένα πρόβλημα, το οποίο απλουστεύεται στη περίπτωση που οι θεμελιώσεις είναι υπερδιαστασιολογημένες (μέχρι ενός ορίου) και το έδαφος θεμελίωσης είναι σκληρό. Στη περίπτωση αυτή, μπορεί να γίνει η παραδοχή πάκτωσης στη βάση της κατασκευής, γεγονός που απλοποιεί τις αναλύσεις. Σε κάθε άλλη περίπτωση, όταν, δηλαδή, το έδαφος κάτω και γύρω από τη κατασκευή είναι μαλακό έδαφος, με υψηλές συχνότητες, η παραπάνω παραδοχή μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικό σφάλμα και κάτω από δυναμικές συνθήκες φόρτισης, το σύστημα πλέον εδάφους-θεμελίου-ανωδομής να αλληλεπιδρά με αποτέλεσμα τη μεταβολή της απόκρισης της κατασκευής.

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την αλληλεπίδραση μεταξύ εδάφους, θεμελίου και ανωδομής είναι:

- Η στρωματογραφία του εδάφους
- Το μέγεθος και η δυσκαμψία της θεμελίωσης.
- Το βάθος και ο βαθμός εγκιβωτισμού της θεμελίωσης, καθώς επίσης και οι ιδιότητες των υποκειμένων εδαφικών στρώσεων (πάχος, λόγος Poisson ν , τέμνον μέτρο διάτμησης G).
- Τα αδρανειακά χαρακτηριστικά, η λυγηρότητα και οι πρώτες ιδιοπερίοδοι της κατασκευής.

Ενώ, στην περίπτωση που η δυναμική διέγερση είναι ο σεισμός, ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας που προστίθεται είναι η ένταση, τα δεσπόζοντα μήκη κύματος και οι γωνίες προσπτώσεως των σεισμικών κυμάτων. Είναι σημαντικό σε περίπτωση που πρέπει να μελετηθεί η αλληλεπίδραση ενός τέτοιου συστήματος, να θεωρηθεί το έδαφος, το θεμέλιο και η κατασκευή σαν ένα αναπόσπαστο σύνολο, που αποτελείται από υλικά διαφορετικών ιδιοτήτων, τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.

Τα παραπάνω μπορούν να γίνουν εύκολα αντιληπτά με ένα παράδειγμα, το οποίο εξηγεί καλύτερα το πρόβλημα της ταλάντωσης μιας κατασκευής υποκειμένης σε δυναμική διέγερση. Αν 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. Επομένως, δεν χρειάζεται να ληφθεί υπόψη στην περίπτωση αυτή, η επίδραση του υποκειμένου 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 υποκειμένου εδάφους στην υπόλοιπη κατασκευή και να μη θεωρηθούν συνθήκες πάκτωσης στη βάση της, διότι μία τέτοια υπόθεση είναι πιθανό να οδηγήσει σε σημαντικό σφάλμα, όπως ειπώθηκε και αρχικά.

Ως συνέπεια, η απόκριση μιας κατασκευής σε σεισμική διέγερση επηρεάζεται 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, γενικά, την επίδραση των τριών αυτών συστημάτων σε μια δεδομένη κίνηση ελευθέρου πεδίου, δηλαδή στην εδαφική κίνηση που θα συνέβαινε στο σημείο που βρίσκεται η κατασκευή, αν αυτή δεν υπήρχε.

Για άκαμπτη θεμελίωση, η επιρροή της αλληλεπίδρασης εδάφους - θεμελίου - κατασκευής είναι μηδενική και στην ουσία αποτελεί την αιτία της διαφοράς μεταξύ της πραγματικής απόκρισης της κατασκευής και της απόκρισης της κατασκευής με την υπόθεση άκαμπτης θεμελίωσης.

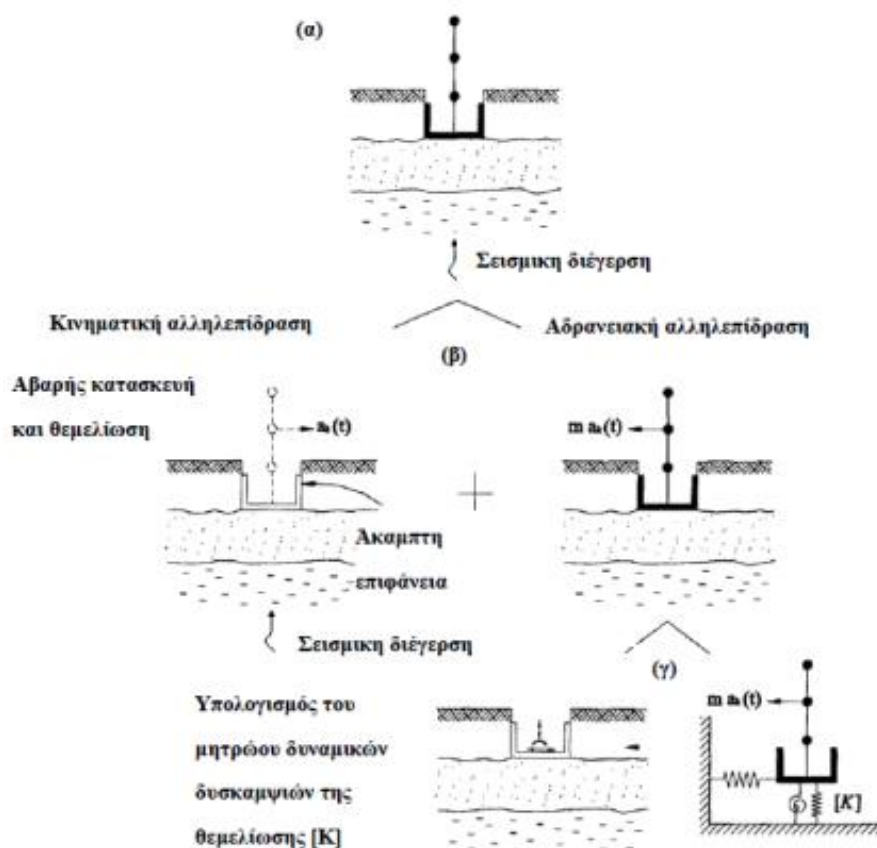
Το αποτέλεσμα των παραγόντων που καθορίζουν την σεισμική διέγερση που επιβάλλεται σε μια κατασκευή είναι η διαμόρφωση της κίνησης ελευθέρου πεδίου (free field conditions). Η απόκριση, όμως, της κατασκευής στην κίνηση ελευθέρου πεδίου επηρεάζεται και από την αλληλεπίδραση εδάφους - κατασκευής. Οι επιταχύνσεις και οι αδρανειακές δυνάμεις των κατασκευών επηρεάζονται, δηλαδή από την ευκαμψία των θεμελίων τους και από τις μεταβολές μεταξύ της κίνησης ελευθέρου πεδίου και της κίνησης της θεμελίωσης. Έτσι, ο ακριβής υπολογισμός των αδρανειακών δυνάμεων και μετακινήσεων στις κατασκευές προϋποθέτει τη ρεαλιστική εκτίμηση του ρόλου της αλληλεπίδρασης εδάφους κατασκευής.

Οι αδρανειακές δυνάμεις που αναπτύσσονται σε μια ταλαντευόμενη 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. Η σχετική, επίσης, 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.

Οι δυνατές 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.

Η ανάλυση του γενικού προβλήματος της αλληλεπίδρασης σε επιμέρους τμήματα παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.1.



Εικόνα 3.1

(α) Γεωμετρία του προβλήματος αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής, (β) Χωρισμός σε κινηματική και αδρανειακή αλληλεπίδραση, (γ) Ανάλυση της αδρανειακής αλληλεπίδρασης σε δύο βήματα- διακριτό προσομοίωμα. (Mylonakis et al, 2006)

3.3 Επίδραση της γεωμορφολογίας στη σεισμική διέγερση

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου, πολλοί ερευνητές έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα πως ιδιαίτερα σημαντικές διακυμάνσεις σημειώνονται μεταξύ διαφορετικών θέσεων, κατά το ίδιο σεισμικό γεγονός (χωρική μεταβλητότητα). Δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις, κατά τις οποίες, οι διαφοροποιήσεις στην έκταση και στην ένταση των σεισμικών βλαβών αποδίδονται στις τοπικές συνθήκες, καθώς αυτές δύναται να επηρεάσουν καθοριστικώς την επιφανειακή σεισμική δόνηση.

Ο όρος τοπικές συνθήκες αφορά ένα ευρύτατο φάσμα γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών τόσο του εδάφους, όσο και του βραχώδους υποβάθρου του και 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

Ο όρος εδαφικές στρωματογραφικές συνθήκες χρησιμοποιείται για να περιγράψει την απλουστευμένη θεώρηση της αποκλειστικής ύπαρξης οριζοντίων στρώσεων εδαφικών σχηματισμών, συμπεριλαμβανομένου του υποβάθρου, οι οποίες εκτείνονται σε άπειρο θεωρητικά μήκος (μονοδιάστατες εδαφικές συνθήκες).

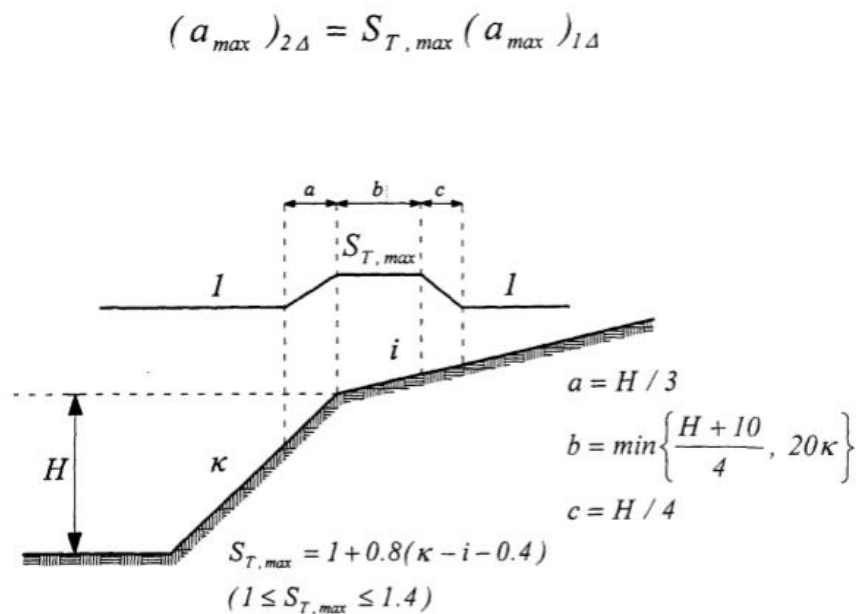
Από την άλλη, ο όρος γεωμορφολογικές συνθήκες λαμβάνει υπόψη την παρουσία γεωμετρικών ανωμαλιών, τόσο των ίδιων των εδαφικών στρωμάτων, όσο και του, κατά σύμβαση σκληρού, υποβάθρου, υποθέτοντας ταυτοχρόνως οριζόντια εδαφική επιφάνεια (διδιάστατες ή πολυδιάστατες εδαφικές συνθήκες).

Τελευταία συνιστώσα των τοπικών συνθηκών αποτελεί η τοπογραφία, η οποία περιορίζεται στην γεωμετρική διάταξη της μη επίπεδης επιφάνειας του εδάφους.

Είναι σαφές, λοιπόν, ότι αυτή η 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 ιδιαίτερος σύνθετο πρόβλημα. Στην πραγματικότητα, η διάκριση των τοπικών συνθηκών στα επιμέρους χαρακτηριστικά τους είναι συνήθως δύσκολη ή και αδύνατη και τα φαινόμενα που παρατηρούνται αποτελούν αποτελέσματα επαλληλίας και αλληλεπιδράσεως των χαρακτηριστικών αυτών.

Σε παγκόσμιο επίπεδο, έχει αναγνωριστεί η σημασία του ρόλου των τοπικών συνθηκών, υπάρχει όμως αδυναμία στο να ληφθούν υπόψη και οι τρεις επιμέρους συνιστώσες τού προβλήματος. Συνήθως, στους κανονισμούς

ενσωματώνεται ένας αυξητικός διορθωτικός συντελεστής στις φασματικές επιταχύνσεις, αγνοώντας τις τοπογραφικές και γεωμορφικές ιδιαιτερότητες της υπό εξέταση περιοχής. Ο συντελεστής αυτός έχει προκύψει κυρίως από στατιστική επεξεργασία καταγραφών (ATC-3 1978, EC8 1994) και από μονοδιάστατες αναλύσεις (NEHRP 1997). Με εξαίρεση τον γαλλικό κανονισμό (French Association for Earthquake Engineering 1990, 1995), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1 και μερικές συμβουλευτικές διατάξεις του EC8 (2000), όπου λαμβάνεται, έστω και απλοποιητικώς, υπόψη η επίδραση τού τοπογραφικού ανάγλυφου.



Σχήμα 3.1

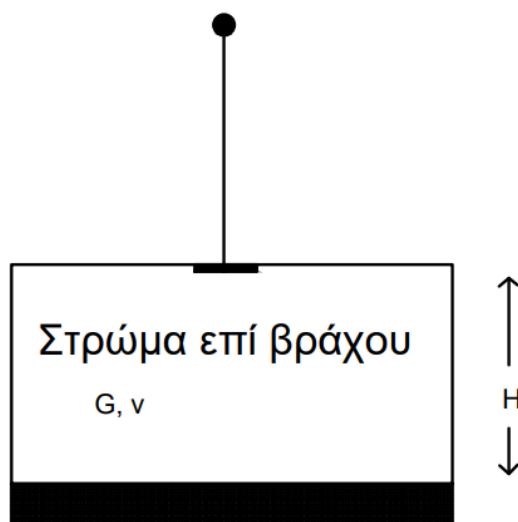
Προβλέψεις τούς γαλλικού κανονισμού AFPS (1995) για την τοπογραφική ενίσχυση

Η σημαντικότητα των τοπογραφικών και γεωμορφικών συνθηκών αποδεικνύεται διαρκώς μέσα από αναλύσεις και καταγραφές, γεγονός που φανερώνει την διδιάστατη και τριδιάστατη φύση τού προβλήματος. Αυτό καθιστά τούς κανονισμούς, αλλά και τις μονοδιάστατες αναλύσεις, ανεπαρκείς σε πολλές περιπτώσεις, επιβάλλοντας εμμέσως την χρήση πολυδιάστατων αναλύσεων σεισμικής απόκρισης.

3.3.1 Τοποθέτηση του προβλήματος

3.3.1.1 Οριζόντια εδαφική στρωματογραφία

Η περίπτωση αυτή αποτελεί την απλούστερη δυνατή πραγματική κατάσταση και συνήθως πρόκειται για μια απλοποίηση της πραγματικότητας. Σε αυτή την περίπτωση αναφέρεται κανείς όταν μιλά για την παρουσία ενός ή περισσότερων οριζοντίων εδαφικών στρωμάτων τα οποία εκτείνονται θεωρητικώς στο άπειρο (Εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2

Οριζόντιο εδαφικό στρώμα επί βραχώδους υποβάθρου

Κατ' αυτήν την έννοια το πρόβλημα υποτίθεται ότι έχει μία μόνο διάσταση, αυτή του πάχους H των εδαφικών στρωμάτων, με αποτέλεσμα η ανάλυση να καλείται μονοδιάστατη. Σύμφωνα με την ανάλυση αυτή, η σεισμική συμπεριφορά των εδαφικών στρωμάτων οφείλεται αποκλειστικά στην κατακόρυφη διάδοση των οριζοντίων διατμητικών κυμάτων με ταχύτητα V_s , 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.

Η διδιάστατη και τριδιάστατη θεώρηση της σεισμικής απόκρισης, στις περιπτώσεις που οι εδαφικές και γεωμορφολογικές συνθήκες εμφανίζουν χωρική ποικιλομορφία, αρκετά συχνά, παρουσιάζει δυσχέρεια, για τον λόγο αυτό εκτελούνται απλοποιητικά περισσότερες μονοδιάστατες αναλύσεις σε διάφορες θέσεις. Για την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης μεθόδου, χρησιμοποιείται σε κάθε θέση μία εδαφική στήλη δεδομένου εύρους, η οποία περιγράφει τις συνθήκες στη θέση αυτή. Η θεώρηση αυτή, αποτελεί πάγια τακτική που εφαρμόζεται ως η απλούστερη δυνατή λύση, παρά το γεγονός πως αποτελεί μια χονδροειδή μέθοδο.

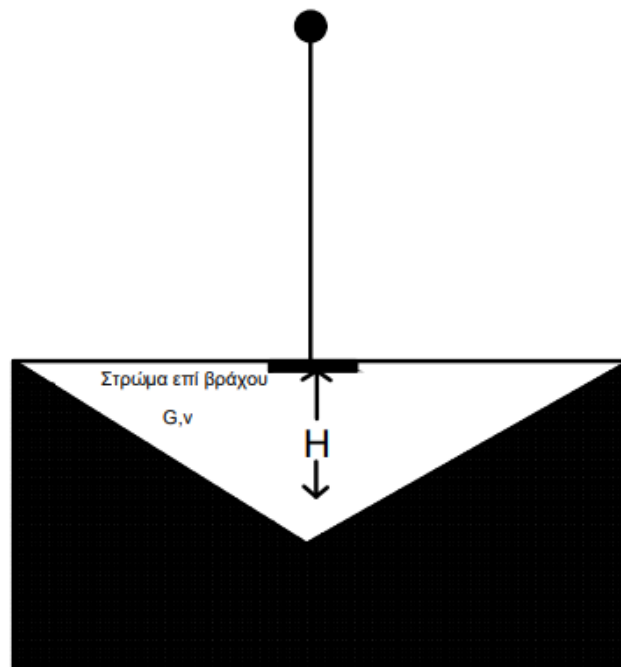
Στην περίπτωση, όμως που η υπόθεση οριζόντιας στρωματογραφίας είναι αρκετά κοντά στη πραγματικότητα και μόνο τότε, παρατηρείται ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ μονοδιάστατων αναλύσεων και καταγραφών.

Συμπεραίνει, λοιπόν, κανείς πως σε συνθήκες περιοχών μελέτης με έντονες γεωμορφολογικές ιδιαιτερότητες και τοπογραφικές διακυμάνσεις, 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.

3.3.1.2 Γεωμορφολογικές συνθήκες

Με την εντατικοποίηση των γεωτεχνικών – γεωφυσικών ερευνών και την ραγδαία ανάπτυξη των αριθμητικών – υπολογιστικών εργαλείων που χρησιμοποιούνται, πλέον έχει επικρατήσει η πεποίθηση ότι η ενίσχυση του 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. Ταυτόχρονα, το γεγονός πως σε πολλούς σεισμούς οι μονοδιάστατες αναλύσεις έχουν αποδειχθεί ανεπαρκείς στο να ερμηνεύσουν τις ανομοιόμορφες καταγραφές επιταχύνσεων, αλλά και τις συγκεντρώσεις βλαβών σε περιοχές που δεν χαρακτηρίζονται από τοπογραφικές ανωμαλίες αποτελεί ένδειξη ότι η βασική υπόθεση περί οριζόντιας στρωματογραφίας των μονοδιάστατων αναλύσεων ευθύνεται για την αδυναμία αυτή και εντείνει την πεποίθηση και την σημαντικότητα των γεωμορφολογικών συνθηκών στην ενίσχυση του σεισμικού κραδασμού.

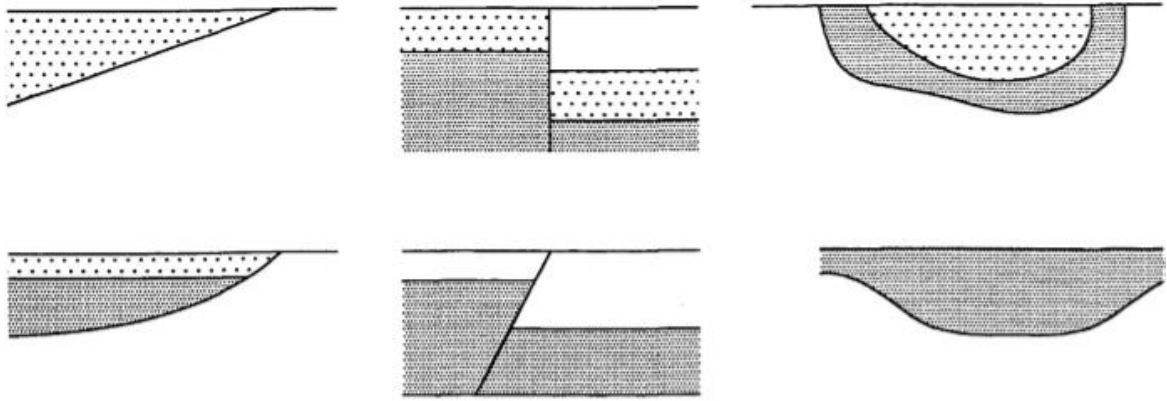
Χαρακτηριστική περίπτωση γεωμορφολογικής ανωμαλίας αποτελούν οι κοιλάδες εδαφικών αποθέσεων (Εικόνα 3.3), με τις οποίες ασχολείται ιδιαίτερα η παρούσα διπλωματική εργασία.



Εικόνα 3.3

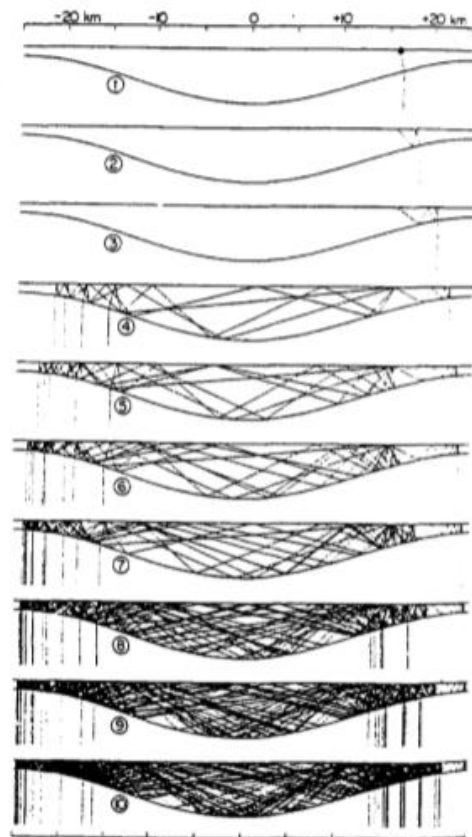
Κοιλάδα εδαφικών αποθέσεων

Πολλές μελέτες αλλά και διάφορα διδιάστατα προσομοιώματα έχουν αναπτυχθεί και προταθεί 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. 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. Τα σχήματα που παρατίθενται είναι ενδεικτικά των φαινομένων αυτών.



Σχήμα 3.2

Τυπικές περιπτώσεις γεωμορφικών ανωμαλιών



Σχήμα 3.3

Διαδρομές κυμάτων που διέρχονται από ένα συγκεκριμένο σημείο (16 km από το μέσον) μιας εδαφικής κοιλάδας (Hong & Helmberger, 1978)

Τα φαινόμενα αυτά ευθύνονται για τις ιδιαίτερες υψηλές ενισχύσεις που παρατηρούνται συγκριτικά με τη μονοδιάστατη θεώρηση του προβλήματος. Η

σεισμική συμπεριφορά μίας κοιλάδας, είναι γνωστό, πως εξαρτάται από τις συχνότητες της σεισμικής διέγερσης, και ιδιαίτερος από την σχέση που αυτές έχουν με τα μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των εδαφικών σχηματισμών.

Επιπλέον, πέρα από τις σημαντικές ενισχύσεις και τις κύριες συνέπειες τους στις κατασκευές, η γεωμορφολογία ευθύνεται και για δύο ακόμα δευτερεύοντα φαινόμενα, τα οποία μπορούν να αποβούν καθοριστικής σημασίας σε περιπτώσεις ισχυρών σεισμών και ευαίσθητων κατασκευών. Αυτά είναι:

- Η αύξηση της διάρκειας της σημαντικής δόνησης, ιδιαίτερος σε μεγάλες περιόδους, συνεπώς μικρές συχνότητες, η οποία συνεπάγεται την αύξηση των κύκλων φόρτισης και την επιπρόσθετη καταπόνηση των κατασκευών.
- Και οι σημαντικές σε μέγεθος διαφορικές κινήσεις μεταξύ κοντινών επιφανειακών θέσεων που μπορούν να οδηγήσουν σε βλάβες και καταστροφές μεγάλων σε μήκος κατασκευών, όπως γέφυρες, αγωγοί και δίκτυα πάσης φύσεως.

Η μονοδιάστατη ανάλυση, έχει ήδη τονιστεί, πως 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.

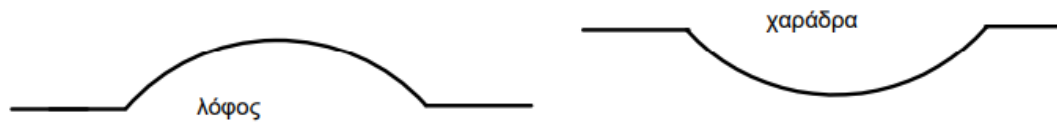
Σε περιπτώσεις απλής γεωμετρίας και ομοιογενών εδαφικών υλικών έχουν προταθεί διάφορες αναλυτικές λύσεις και τεχνικές. Ωστόσο, για την προσομοίωση ρεαλιστικών κοιλάδων που συνδυάζουν ακανόνιστο σχήμα και ετερογενή εδαφικά υλικά απαιτούνται αριθμητικές μέθοδοι, οι οποίες έχουν γίνει δημοφιλείς, κυρίως λόγω της ανάπτυξης των σημερινών υπολογιστικών συστημάτων. Η ευχρηστία αυτών των αριθμητικών μεθόδων, σε συνδυασμό με την εγκατάσταση πειραματικών δικτύων και την συστηματική συλλογή και επεξεργασία καταγραφών σε όλο τον κόσμο, έχει δώσει την ευχέρεια σε ερευνητές και μελετητές να εκτιμούν τουλάχιστον ποιοτικά την επίδραση των γεωμορφικών συνθηκών στην αναμενόμενη σεισμική δόνηση.

Γενικά, οι γεωμορφικές συνθήκες, σε συνδυασμό με την στρωματογραφία, μπορεί να αποδειχθούν καθοριστικός παράγοντας για την σεισμική απόκριση μίας περιοχής και των κατασκευών που βρίσκονται θεμελιωμένες σε αυτή.

Οι αντικειμενικές δυσκολίες κατηγοριοποίησης, όμως των γεωμορφικών συνθηκών, σε συνδυασμό με την αδυναμία εκτέλεσης των απαιτούμενων γεωτεχνικών - γεωφυσικών ερευνών αποτελούν, πιθανότατα, την βασική αιτία που οι αντισεισμικοί κανονισμοί περιορίζονται, στην επίδραση των στρωματογραφικών συνθηκών και των μονοδιάστατων αναλύσεων.

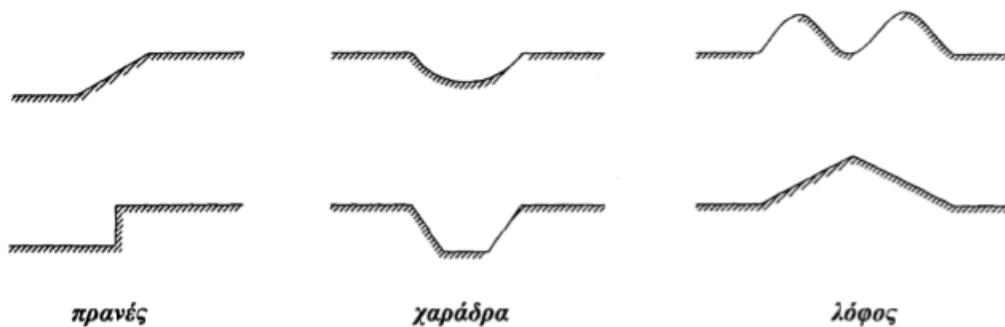
3.3.1.3 Τοπογραφικές Συνθήκες

Σε περίπτωση που η επιφάνεια του εδάφους δεν είναι επίπεδη, για παράδειγμα όταν πρόκειται για χαράδρες, λόφους ή πρηνή, τότε αναφέρεται κανείς σε αυτή την τρίτη περίπτωση γεωμορφολογίας ή μορφολογίας του εδάφους και κάνει λόγο για ιδιόμορφες τοπογραφικές συνθήκες. Στα σχήματα Σχήμα 3.4 και Σχήμα 3.5 παρουσιάζονται παραδείγματα τέτοιων συνθηκών.



Σχήμα 3.4

Ιδιόμορφες τοπογραφικές συνθήκες



Σχήμα 3.5

Τυπικές περιπτώσεις τοπογραφικών ανωμαλιών

Οι ιδιόμορφες αυτές τοπογραφικές συνθήκες φέρουν σημαντική επίδραση στον σεισμικό κραδασμό και έχει επανειλημμένως αποδειχθεί πως μπορεί να αποβεί καταστρεπτική για τις κατασκευές, που είναι θεμελιωμένες σε τέτοιο έδαφος. Σε πολλούς σεισμούς, έχει παρατηρηθεί επιλεκτική συγκέντρωση έντονων βλαβών κοντά σε παρειές πρηνών και χαραδρών, ή κοντά σε κορυφές λόφων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα επιλεκτικών καταστρεπτικών

συνεπειών αποτελούν οι σεισμοί: Miyagikenoki 1978, Chile 1985, Southern Germany 1978, Whittier Narrows 1987, Irpinia 1980, και Eje Cafetero-Colombia 1999.

Ωστόσο, μόνο σε ασθενή σεισμικά περιβάλλοντα υπάρχουν ενόργανες αποδείξεις τοπογραφικής ενίσχυσης, τα οποία περιορίζονται και αδυνατούν να εφαρμοστούν σε ισχυρές ή και καταστρεπτικές σεισμικές δονήσεις. Το γεγονός αυτό είναι κάτι δυστυχές για την επιστημονική κοινότητα. Μερικά παραδείγματα καταγραφών αποτελούν η καταγραφή στο φράγμα Pacoima κατά τον σεισμό του San Fernando (1971), δύο καταγραφές στον σεισμό Nahanni (1985), καθώς και οι εκπληκτικές καταγραφές της Tarzana Hill Nursery κατά τους σεισμούς Whittier Narrows (1987) και Northridge (1994).

Σύμφωνα με τους Geli et al (1988), η ταυτόχρονη επίδραση των αυξομειώσεων στις ταχύτητες διαδόσεως διατμητικού κύματος Vs του υπεδάφους μπορεί να είναι εξίσου σημαντικές με τις τοπογραφικές επιδράσεις, πρόταση που δεν είναι ακόμα τόσο καλά τεκμηριωμένη. Παρόλα αυτά, πλήθος αναλυτικών και αριθμητικών αναλύσεων και μελετών έχει αποδείξει την ιδιαίτερη σημασία των τοπογραφικών επιδράσεων, με μεθόδους αναλύσεως και κριτικές επισκοπήσεις να βρίσκονται σε διάφορα σχετικά άρθρα.

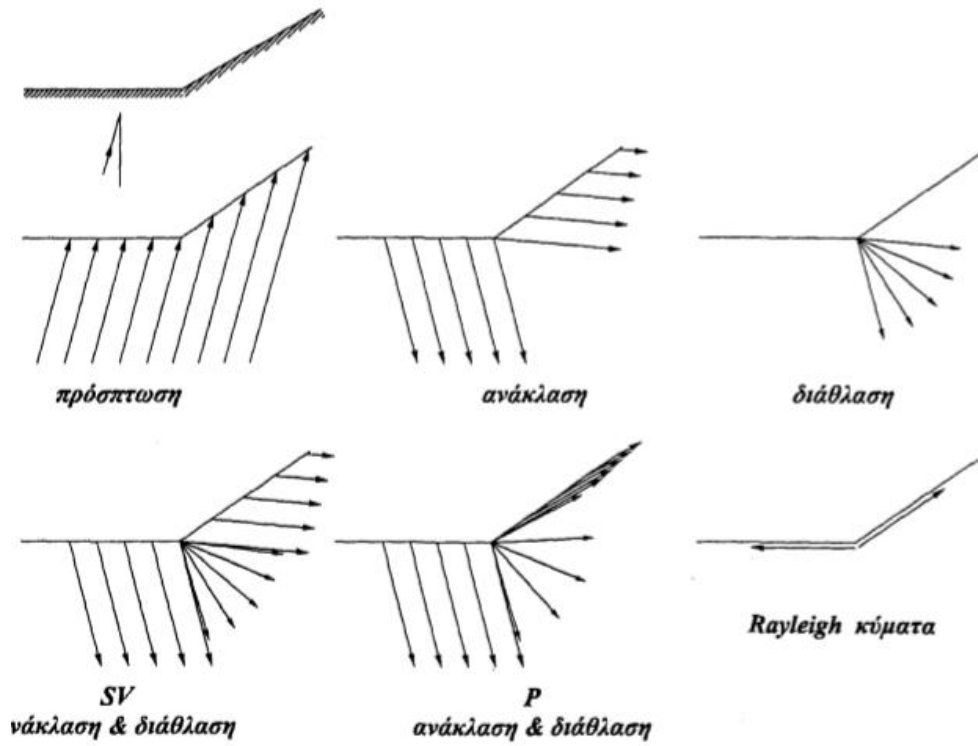
Είναι, λοιπόν, εμφανές πως δεν είναι σωστό να παραβλέπεται η σημαντικότητα της επίδρασης της επιφανειακής τοπογραφίας, διότι πέρα από την ενίσχυση του σεισμικού κραδασμού, και ό,τι αυτό συνεπάγεται, μπορεί κάλλιστα να οδηγήσει δευτερογενώς σε ενεργοποίηση μεγάλων κατολισθήσεων και πρόκληση εκτεταμένων καταστροφών (π.χ. Sassa 1995). Ωστόσο, στη πράξη, η προσομοίωση της σεισμικής συμπεριφοράς ενός γεωμετρικώς μή-κανονικού λόφου αποτελεί επίπονη εργασία και αυτό συχνά οδηγεί τον μελετητή να αγνοήσει, τελικά, την επίδραση της επιφανειακής τοπογραφίας. Μέσα από μελέτες, έχει παρατηρηθεί η δεινότητα της ενίσχυσης στις κορυφογραμμές και γενικότερα σε κυρτές τοπογραφικές διατάξεις, η οποία φαίνεται να είναι ιδιαίτερος ευαίσθητη στα χαρακτηριστικά του προσπίπτοντος κυματισμού, δηλαδή τον τύπο του κύματος, την προσπίπτουσα κλίση και το αζιμούθιο.

Φαίνεται, λοιπόν, πως η επίδραση της τοπογραφίας σχετίζεται με τα εξής τρία φυσικά φαινόμενα:

- την ευαισθησία της επιφανειακής κίνησης στην γωνία πρόσπτωσης, η οποία είναι ιδιαίτερος μεγάλη στην περίπτωση SV κυμάτων και οδηγεί σε μεγάλες διαφοροποιήσεις της επιφανειακής κίνησης, συναρτήσει της γωνίας του πρηνούς
- την εστίαση των σεισμικών κυμάτων, καθώς αυξάνεται η κλίση της επιφανειακής ανωμαλίας

- τη διάθλαση των κυμάτων, καθώς αυτά ανακλώνται και διαδίδονται προς όλες τις διευθύνσεις

Στο Σχήμα 3.8, γίνονται ακόμα πιο κατανοητά τα παραπάνω.



Σχήμα 3.6

Διάδοση κυμάτων SH και SV σε κεκλιμένο πρηνές

Καταλήγει, επομένως, κανείς στο συμπέρασμα πως υπάρχει ποιοτικώς, τουλάχιστον, συμφωνία μεταξύ παρατηρήσεων και θεωρίας για την ενίσχυση του σεισμικού κραδασμού σε κορυφές λόφων ή βουνών. Η ενίσχυση είναι γενικώς μεγαλύτερη για τις οριζόντιες συνιστώσες, που αντιστοιχούν χονδροειδώς σε διατμητική κίνηση S, σε σχέση με την κατακόρυφη συνιστώσα, κίνηση P και μάλιστα μεταξύ των δύο οριζοντίων συνιστωσών μεγαλύτερη είναι αυτή που αντιστοιχεί σε κίνηση κάθετη στον άξονα της κορυφογραμμής. Από την άλλη, ποσοτικώς, έχουν παρατηρηθεί σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των λιγοστών καταγραφών που υπάρχουν πάνω σε τοπογραφικές ανωμαλίες και των αντίστοιχων αναλύσεων. Τα φαινόμενα εστίασεως και διαθλάσεως των κυμάτων κάτω από μία τοπογραφική ανωμαλία φαίνεται να είναι σημαντικά, αλλά μάλλον δεν είναι τα μόνα.

Όσον αφορά την ενίσχυση, αυτή είναι άμεσα συνδεδεμένη με την αιχμηρότητα της τοπογραφίας, καθώς, όσο πιο απότομη είναι η μέση κλίση, τόσο μεγαλύτερη είναι η μέγιστη ενίσχυση. Δεν είναι, βέβαια, πάντοτε σαφής η ακριβής συσχέτιση μεταξύ τους. Το φαινόμενο της ενίσχυσης είναι σαφώς εξαρτώμενο από την συχνότητα. Παρόλα αυτά ιδιαίτερη σημασία φαίνεται να

έχει η σχέση μεταξύ των γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών της τοπογραφικής ανωμαλίας και των μηκών κύματος που χαρακτηρίζουν την διέγερση.

3.3.2 Μη-γραμμική συμπεριφορά των εδαφικών υλικών και τοπικές συνθήκες

Δεν είναι λίγες οι φορές, ακόμα και σε περιπτώσεις που η αξιοπιστία των προσομοιωμάτων εκτενών σχηματισμών είναι μεγάλη, που παρατηρούνται σημαντικές υπερεκτιμήσεις των αναλυτικών ή των αριθμητικών προσομοιωμάτων. Το γεγονός αυτό αποτέλεσε σαφέστατη ένδειξη, ότι η πραγματική μηχανική συμπεριφορά των εδαφικών σχηματισμών, που υπόκεινται σε δυναμική καταπόνηση, λόγω σεισμού, απέχει πολύ από την θεώρηση ελαστικής συμπεριφοράς. Η παραπάνω πρόταση καθιστά εμφανές, πως, παρά την ύπαρξη σχετικής ευκολίας στην προσομοίωση της σεισμικής συμπεριφοράς εκτενών σχηματισμών που συνδυάζουν στρωματογραφικές, γεωμορφολογικές ή και τοπογραφικές ανωμαλίες, δεν είναι πάντοτε εφικτό να αναπαραχθούν με ακρίβεια όλες οι καταγραφές.

Σημαντικές καταγραφές και αναλύσεις δείχνουν ότι τα μαλακά εδάφη όταν υπόκεινται σε έντονη δυναμική φόρτιση παρουσιάζουν μη-γραμμική ανελαστική συμπεριφορά, η οποία εκδηλώνεται μέσω μείωσης του μέτρου διατμήσεως και ταυτόχρονης αύξησης της υστερητικής απόσβεσης αυξανόμενης της διατμητικής παραμόρφωσης. Η επίδραση της εδαφικής επιτάχυνσης είναι έμμεση, καθώς μεγάλες τιμές της οδηγούν σε μη-γραμμική συμπεριφορά του υλικού, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων και της υστερητικής απόσβεσης. Έχει παρατηρηθεί ωστόσο, ότι η έντονη μη-γραμμική συμπεριφορά, συνήθως, τείνει να μετριάσει την δυσμενή επίδραση της αντίστοιχης γραμμικώς ελαστικής εδαφικής ενίσχυσης. Για τον λόγο αυτό, τα φαινόμενα εδαφικής ενίσχυσης είναι σχετικά εντονότερα σε μακρινούς σεισμούς και ασθενείς δονήσεις.

Βασική διαπίστωση αποτελεί το γεγονός, πως ο συντελεστής γεωμορφικής επιδείνωσης AF, δηλαδή ο λόγος της διδιάστατης φασματικής ενίσχυσης προς την αντίστοιχη μονοδιάστατη, τείνει στην μονάδα για τιμές της υστερητικής απόσβεσης που υπερβαίνουν το 10%. Το γεγονός αυτό τείνει από την μία να μετριάσει τις επιδράσεις των τοπικών εδαφικών συνθηκών, αυξάνει, όμως υπερβολικά την ανάγκη κριτικού πνεύματος του γεωτεχνικού σεισμικού μηχανικού, ο οποίος καλείται, πλέον, να εκτιμήσει τα επίπεδα εδαφικής ενίσχυσης σε ένα πρόβλημα που συνδυάζει την γεωμετρική πολυπλοκότητα με τη μη-γραμμικότητα της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφικών υλικών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

4.1 Εισαγωγή

Στη φύση υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί εδαφικοί σχηματισμοί, επί των οποίων είναι δυνατόν, τις περισσότερες φορές, να θεμελιωθεί είτε επιφανειακά είτε με βαθιά θεμελίωση, κάποιο είδος ταλαντωτή. Στόχο του συγκεκριμένου κεφαλαίου αποτελεί η εξαγωγή συμπερασμάτων μέσα από συγκρίσεις διαφορετικών μοντέλων εδάφους – ταλαντωτή. Οι ταλαντωτές που θα επιλεγθούν είναι μονοβάθμιοι και αποτελούν το απλούστερο δυναμικό σύστημα με ένα βαθμό ελευθερίας. Συχνά, στα πλαίσια του κεφαλαίου, οι μονοβάθμιοι ταλαντωτές θα χρησιμοποιούνται με σκοπό την αναπαράσταση ανεμογεννήτριας, παρά το γεγονός πως, στην πραγματικότητα, οι ανεμογεννήτριες αποτελούν πολυβάθμιους ταλαντωτές και αυτό είναι μια παραδοχή.

Για την προσομοίωση των παραπάνω προβλημάτων, γίνεται χρήση δύο λογισμικών, για τα οποία ακολουθεί σύντομη περιγραφή των χαρακτηριστικών και των δυνατοτήτων τους. Ταυτόχρονα, ελέγχεται και η αξιοπιστία τους με προκαταρκτικές αναλύσεις που θα προηγηθούν των παραμετρικών και θα παραταθούν παρακάτω.

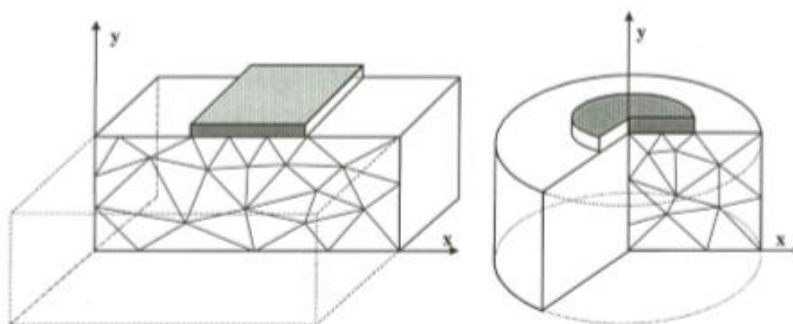
Οι παραμετρικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν, επιλέχθηκαν, ώστε να ικανοποιούν όσο το δυνατόν περισσότερους συνδυασμούς συστήματος εδάφους – ταλαντωτή και να εξετάζουν περιπτώσεις μονοδιάστατης αλλά και διδιάστατης ανάλυσης ως εξής:

- Μελέτη περίπτωσης ανεμογεννήτριας επί άκαμπτης εδαφικής στρώσης
- Μελέτη εδαφικής στρώσης
- Μελέτη περίπτωσης ανεμογεννήτριας επί εδαφικής στρώσης
- Μελέτη εδαφικής κοιλάδας
- Μελέτη αιολικού πάρκου επί κοιλάδας

4.2 Σύντομη περιγραφή των Λογισμικών

Το πρόγραμμα PLAXIS είναι ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο χρησιμοποιείται για τη διδιάστατη δυναμική ανάλυση της απόκρισης και της ευστάθειας ενός ευρέος φάσματος θεμάτων της γεωτεχνικής μηχανικής. Το δυναμικό μέρος του παρέχει τη δυνατότητα ανάλυσης της συμπεριφοράς του εδάφους κάτω από τη δράση των δυναμικών φορτίσεων και της επίδρασης των εδαφικών ταλαντώσεων σε γειτονικές κατασκευές. Το Dynamic Module του PLAXIS επιτρέπει επίσης την ανάλυση της εδαφικής συμπεριφοράς κάτω από τη δράση σεισμικών φορτίσεων.

Η προσομοίωση φυσικών προβλημάτων στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS βασίζεται στη μόρφωση είτε δισδιάστατων αξονοσυμμετρικών προσομοιωμάτων (axisymmetric model) είτε δισδιάστατων προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων με επίπεδη παραμόρφωση (plane strain model) με δύο βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο (x και y διεύθυνση). Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα και των δύο μορφών προσομοιωμάτων φαίνονται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1 Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα διδιάστατου προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων με επίπεδη παραμόρφωση και δισδιάστατου αξονοσυμμετρικού προσομοιώματος.

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.

Τα εξαγόμενα αποτελέσματα του προγράμματος αφορούν τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις, τάσεις, παραμορφώσεις, επιταχύνσεις, ταχύτητες και μετατοπίσεις σε διάφορα σημεία του μοντέλου.

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 προβλημάτων της σεισμικής μηχανικής. Το λογισμικό αυτό, επίσης, είναι ικανό να φιλτράρει τα δεδομένα συχνότητας, ώστε να ξεχωρίσει αυτή που δεν είναι χρήσιμη στους υπολογισμούς, ενώ μπορεί να υπολογίσει πληθώρα πραγμάτων όπως διαγράμματα ελαστικής και ανελαστικής πλαστιμότητας, φάσματα Fourier, διαγράμματα αθροιστικής απόλυτης ταχύτητας (CAV) και ειδικής ενεργειακής πυκνότητας (SED), μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) επιταχύνσεων, ταχυτήτων και μετατοπίσεων κ.α.

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, θα χρησιμοποιηθεί η ικανότητα του προγράμματος να εξάγει φάσματα Fourier και θα πραγματοποιηθεί η γραφική αναπαράστασή τους.

Τα φάσματα Fourier υπολογίζονται μέσω του μετασχηματισμού Fourier (Fast Fourier Transformation - FFT) των αντιστοιχών φασμάτων χρονοϊστορίας, σε διάφορα σημεία του μοντέλου. Έτσι, είναι δυνατός ο υπολογισμός του συντελεστή ενίσχυσης AF στο σύστημα, δηλαδή του λόγου του φάσματος Fourier στην κορυφή της εδαφικής στρώσης προς το φάσμα Fourier στη βάση της, καθώς και ο υπολογισμός της ιδιοσυχνότητας του. Ταυτόχρονα, ισχύει πως το σημείο στο οποίο μεγιστοποιείται ο συντελεστής ενίσχυσης AF, αντιστοιχεί στη συχνότητα συντονισμού του συστήματος.

Είναι σημαντικό να τονιστεί, ότι στα πλαίσια της εργασίας, οι μετασχηματισμοί Fourier χρησιμοποιήθηκαν για τη μετατροπή των φασμάτων χρονοϊστορίας της οριζόντιας επιτάχυνσης, ή αλλιώς επιταχυνσιογραφημάτων, που παράχθηκαν από το πρόγραμμα PLAXIS, στα αντίστοιχα φάσματα Fourier.

4.3 Προκαταρκτικές αναλύσεις

4.3.1 Έλεγχος αξιοπιστίας PLAXIS

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

Θα ήταν χρήσιμο 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. Παρόλα αυτά, για πρακτικούς λόγους χρειάζεται να προσομοιωθεί με ένα μοντέλο πεπερασμένων διαστάσεων. Ένα

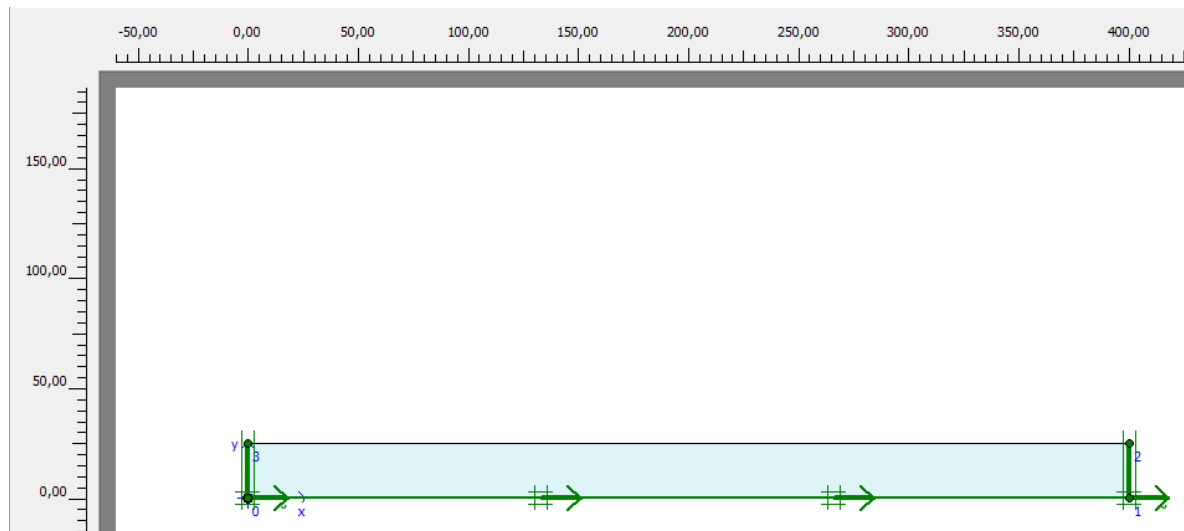
τέτοιο μοντέλο πεπερασμένων διαστάσεων δημιουργεί ένα πλασματικό φαινόμενο γνωστό ως “box effect”, κατά το οποίο η ενέργεια του συστήματος παγιδεύεται εντός των συνόρων και διαστρεβλώνει τα δυναμικά του χαρακτηριστικά. Για να αποφευχθεί το φαινόμενο αυτό, τοποθετούνται απορροφητικά σύνορα ακτινοβολίας στο μοντέλο, όπως θα περιγραφεί και παρακάτω, τα οποία απορροφούν την ενέργεια ακτινοβολίας του συστήματος και δεν την παγιδεύουν εντός του μοντέλου.

Το πρώτο προσομοίωμα περιλαμβάνει μία οριζόντια εδαφική στρώση με πεπερασμένο πάχος H , η οποία βρίσκεται πάνω από άκαμπτη εδαφική στρώση ή αλλιώς βράχο, ενώ 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 με τις αναλυτικές λύσεις.

4.3.1.1 Πρώτο προκαταρκτικό προσομοίωμα

Το προσομοίωμα αυτό, αφορά 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 επέκταση 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 Εικόνα 4.1, παρουσιάζεται η γεωμετρία και οι συνοριακές συνθήκες του προσομοιώματος αυτού κατά τη μοντελοποίηση του στο πρόγραμμα PLAXIS.



Εικόνα 4.1

Γεωμετρία και συνοριακές συνθήκες του πρώτου προσομοιώματος

Είναι γνωστό πως η ιδιοσυχνότητα ενός εδαφικού στρώματος σε μονοδιάστατη ανάλυση δίνεται από τη σχέση:

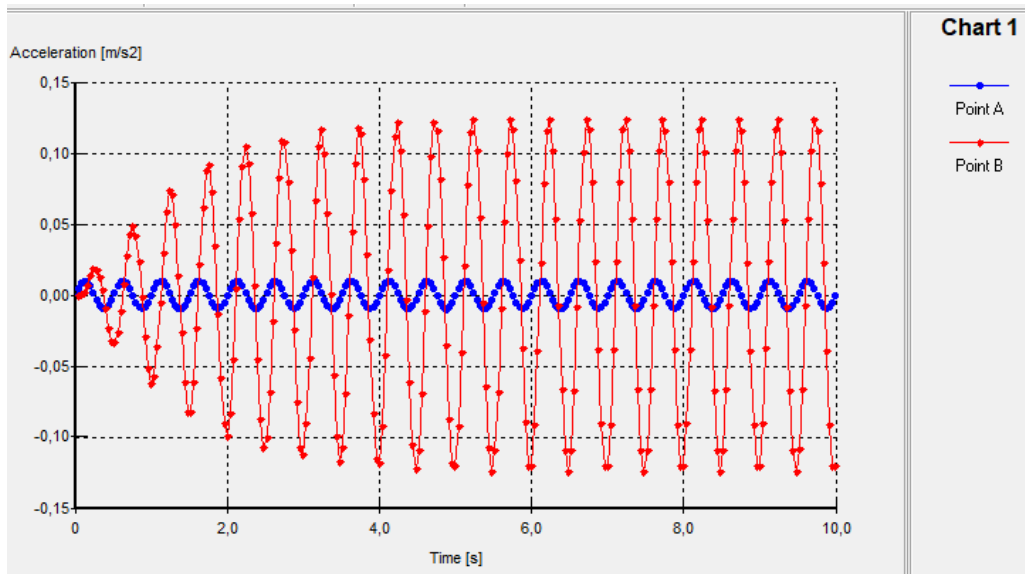
$$f_s = \frac{V_s}{4 \times H} \quad (4.1)$$

,η οποία έχει προταθεί, όπως και οι υπόλοιπες σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν, κατά το παρελθόν και υπάρχουν στη βιβλιογραφία (Gazetas 1983, Mylonakis et al. 2006).

Στην προκειμένη περίπτωση προκύπτει ότι η ιδιοσυχνότητα εδαφικού στρώματος f_s είναι ίση με 2Hz.

Ενώ, 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 0,419 και 0,005 αντίστοιχα. Έτσι, ο συντελεστής ενίσχυσης που δίνεται από τον τύπο $2/(\pi \cdot \xi)$ είναι 12,7.

Επομένως, 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 Διάγραμμα 4.1, φαίνεται η αριθμητική λύση του προβλήματος, με τις χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης στα σημεία A και B, που αποτελούν την βάση της εδαφικής στρώσης και την επιφάνεια του εδάφους, αντίστοιχα.



Διάγραμμα 4.1

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

Τελικά, μπορεί να ειπωθεί ότι η αναλυτική λύση επαληθεύεται από την αριθμητική προσομοίωση μέσω του PLAXIS, καθώς 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.

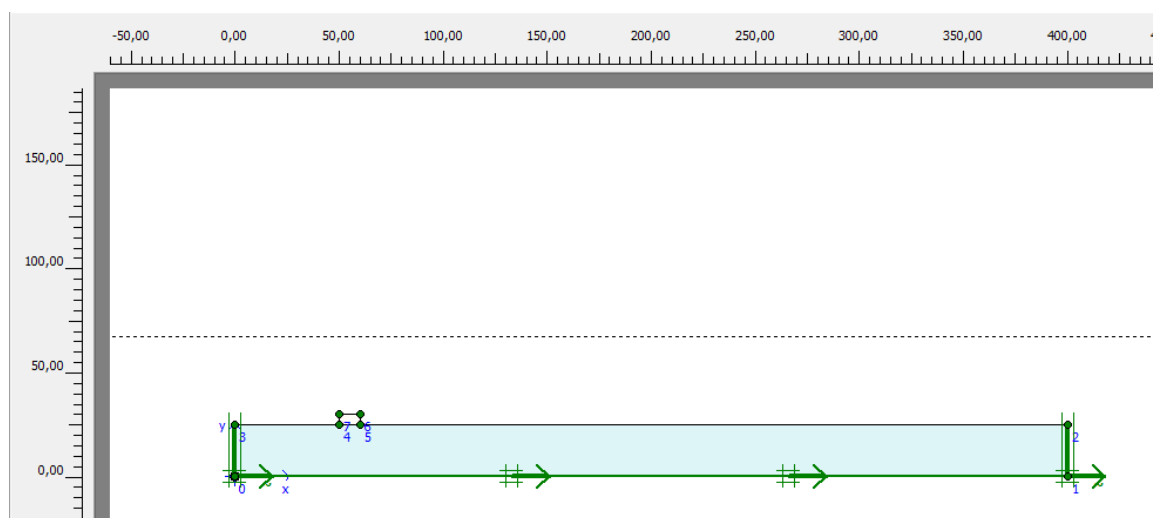
4.3.1.2 Δεύτερο προκαταρκτικό προσομοίωμα

Το προσομοίωμα αυτό πρόκειται για έναν μονοβάθμιο ταλαντωτή μάζας, ο οποίος εδράζεται επί άκαμπτης εδαφικής στρώσης, όπως είναι ένα βραχώδες υπόβαθρο. Ο μονοβάθμιος ταλαντωτής έχει μάζα ίση με $m = 10 \text{ tn}$ (ή βάρος $W = 100 \text{ kN}$), ιδιοσυχνότητα $f_c = 2,05 \text{ Hz}$ και προσομοιώνεται ως ένας πλαισιακός φορέας ύψους 5 m και μήκους 10 m . 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:

$$k = 4 \times \pi^2 \times \frac{m}{T_c^2} = 1664,57 \text{ kN/m} \quad (4.2)$$

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). Όπως και στο πρώτο προκαταρκτικό προσομοίωμα, η απόσβεση του υλικού λαμβάνεται υπόψη μέσω των σταθερών α και β του Rayleigh, οι οποίες ισούνται και πάλι με $0,419$ και $0,005$ αντίστοιχα, τόσο για την εδαφική στρώση όσο και για τον ταλαντωτή. Στην Εικόνα 4.2 που

ακολουθεί, παρουσιάζεται η γεωμετρία και οι συνοριακές συνθήκες του προσομοιώματος αυτού κατά τη μοντελοποίηση του στο πρόγραμμα PLAXIS.



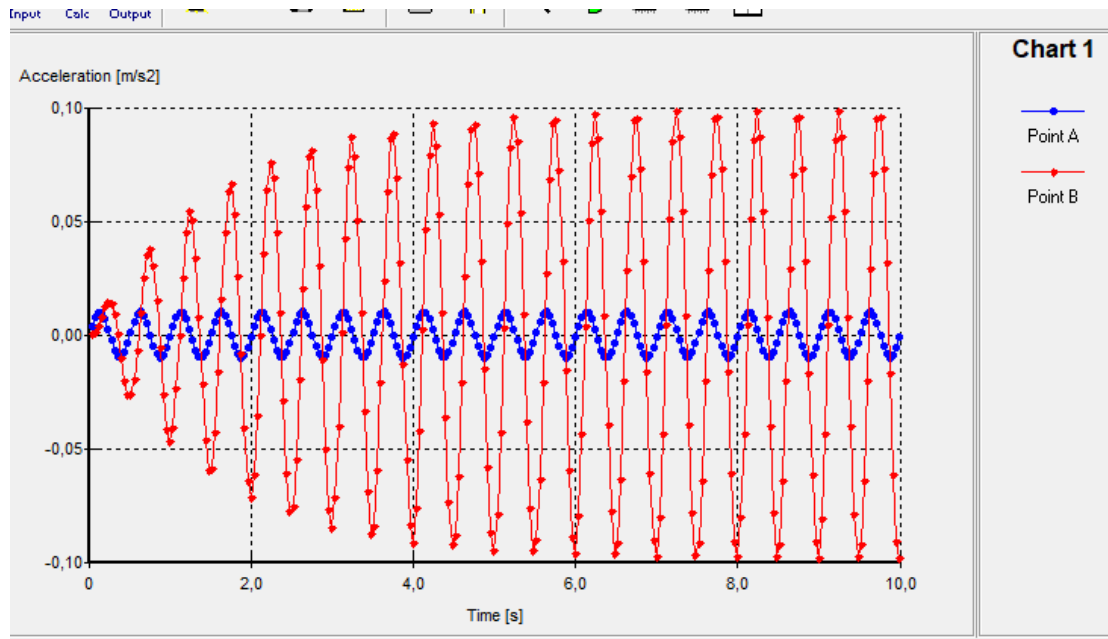
Εικόνα 4.2.

Γεωμετρία και συνοριακές συνθήκες του δεύτερου προσομοιώματος

Η αναλυτική λύση δίνει συντελεστή ενίσχυσης στον ταλαντωτή ίσο με :

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

Συνεπώς, αν η αρμονική διέγερση στη βάση του ταλαντωτή έχει μοναδιαίο πλάτος, τότε η απόκριση στην κορυφή του θα πρέπει να είναι περίπου 10πλάσια για να επαληθευθεί η αριθμητική προσομοίωση μέσω του PLAXIS. Στο Διάγραμμα 4.2 που ακολουθεί, φαίνονται οι χρονοϊστορίες της οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση του ταλαντωτή (Σημείο A) και στην κορυφή του (Σημείο B).



Διάγραμμα 4.2

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

Τελικά, μπορεί να ειπωθεί ότι η αναλυτική λύση επαληθεύεται απόλυτα από την αριθμητική προσομοίωση μέσω του PLAXIS, καθώς 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.

Συμπερασματικά, τα παραπάνω αποτελέσματα των αναλύσεων των δύο αυτών προκαταρκτικών προσομοιωμάτων εξασφαλίζουν ότι η αριθμητική επίλυση δεν έχει αξιοσημείωτη απόκλιση από την αντίστοιχη αναλυτική λύση σε προβλήματα δυναμικής φόρτισης. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι το πρόγραμμα PLAXIS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δυναμική ανάλυση προσομοιώματος εδάφους και ταλαντωτή, στο οποίο εμφανίζεται συντελεστής ενίσχυσης λόγω των φαινομένων συντονισμού.

4.3.1.3 Διέγερση με παλμό Ricker

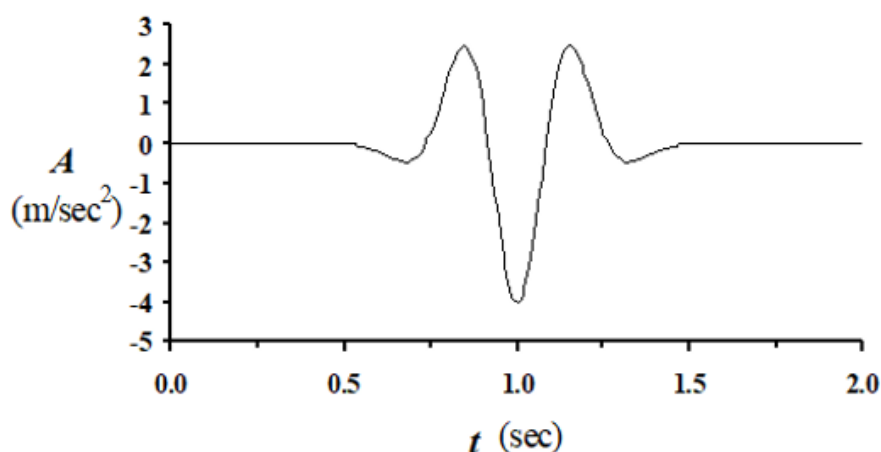
Στο προηγούμενο εδάφιο, αναλύθηκε η απλοποιημένη περίπτωση διέγερσης των προκαταρκτικών προσομοιωμάτων με μία αρμονική ταλάντωση με συχνότητα $f=2\text{Hz}$. Σε αυτή τη φάση, κρίνεται σκόπιμη η φόρτιση του παραπάνω μοντέλου με ένα σύνολο αρμονικών διεγέρσεων διαφόρων μορφών, ευρών, συχνοτήτων και αριθμών κύκλων, προκειμένου να προκύψει μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα της απόκρισης του. Αυτός ο συνδυασμός περιπτώσεων μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ενός χαρακτηριστικού παλμού, ο οποίος είναι ο παλμός Ricker.

Ο παλμός Ricker δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$A(t) = [-6b + 24b^2(t - t_0)^2 - 8b^3(t - t_0)^4] * e^{-b(t-t_0)^2} \quad (4.3)$$

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

Στο Διάγραμμα 4.3 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 $t= 1\text{sec}$.



Διάγραμμα 4.3

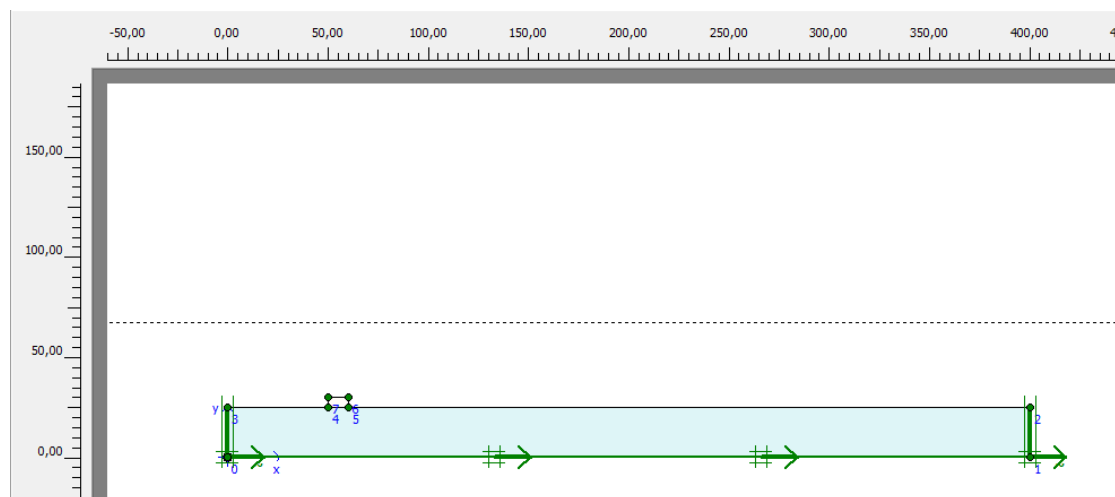
Χρονοϊστορία σεισμικής επιτάχυνσης του παλμού Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα $f=2\text{Hz}$

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και μέσω του προγράμματος PLAXIS, πραγματοποιήθηκε ξανά η ανάλυση του δεύτερου προκαταρκτικού προσομοιώματος με τον μονοβάθμιο ταλαντωτή, αλλά αυτή τη φορά η άκαμπτη εδαφική στρώση (βράχος) του μοντέλου διεγείρεται στη βάση της από έναν παλμό Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα $f=2\text{Hz}$.

Για το παρακάτω προσομοίωμα, θεωρείται ο ίδιος μονοβάθμιος ταλαντωτής μάζας, ο οποίος έχει μάζα $m= 10\text{tn}$ (ή βάρος $W= 100\text{kN}$), ύψος $h= 5\text{m}$, ιδιοσυχνότητα $f_c= 2,05\text{Hz}$, ενώ ο συντελεστής ακαμψίας του ισούται με $k= 1664,57\text{kN/m}$. 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 0,419 και 0,005 αντίστοιχα.

Στην Εικόνα 4.3 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η γεωμετρία και οι συνοριακές συνθήκες του προσομοιώματος, κατά τη μοντελοποίηση του στο πρόγραμμα PLAXIS.

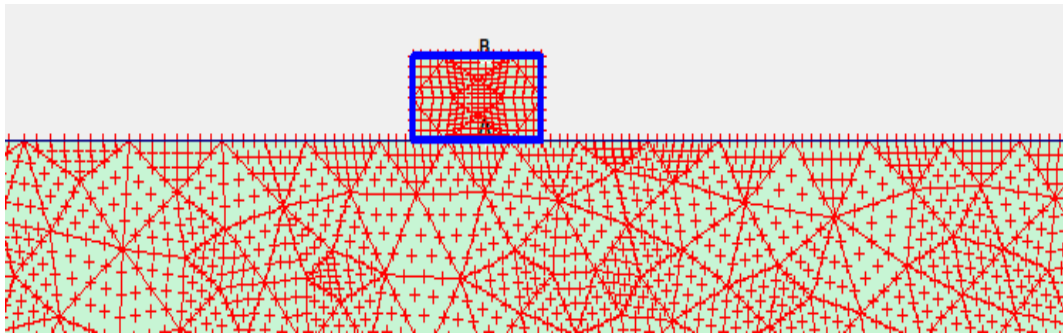


Εικόνα 4.3

Γεωμετρία και συνοριακές συνθήκες προσομοιώματος με παλμό Ricker ($f=2\text{Hz}$)

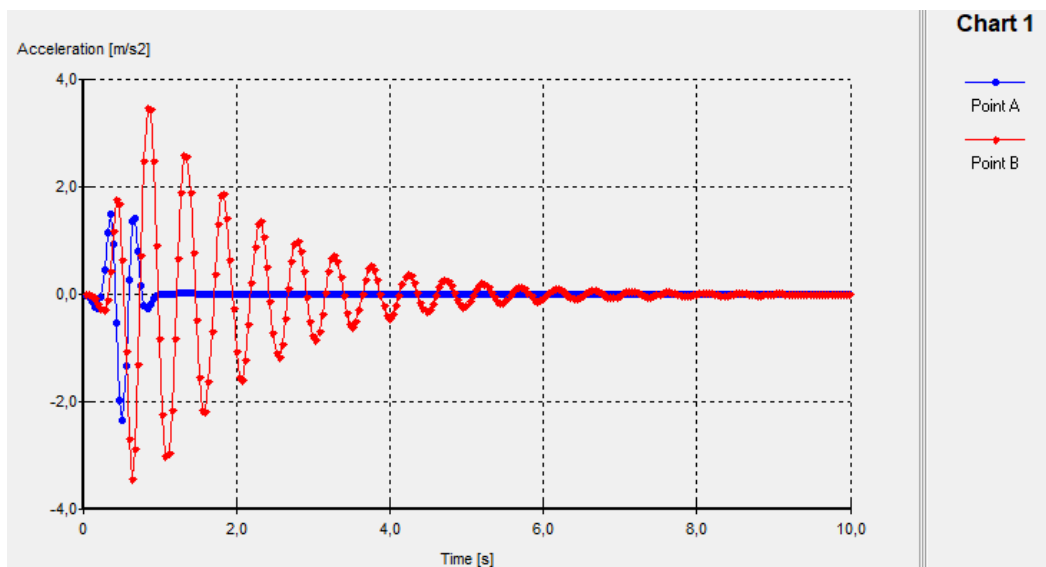
Για την προσομοίωση της άκαμπτης εδαφικής στρώσης, όπως είναι ένα βραχώδους υποβάθρου, η ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος στην εδαφική στρώση λαμβάνεται ίση με $V_S= 2000\text{m/s}$. Η εδαφική στρώση διεγείρεται στη βάση της από έναν παλμό Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα $f= 2\text{Hz}$, ο οποίος μεταφέρεται σχεδόν αυτούσιος στην επιφάνεια της, άρα και στη βάση του ταλαντωτή.

Στην Εικόνα 4.4 που ακολουθεί, φαίνεται 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. Επιπλέον, στο Διάγραμμα 4.4 φαίνονται οι χρονοϊστορίες της οριζόντιας επιτάχυνσης στα σημεία αυτά, λόγω του επιβαλλόμενου παλμού Ricker στη βάση της στρώσης.



Εικόνα 4.4

Προσομοίωμα εδαφικής στρώσης και μονοβάθμιου ταλαντωτή – Σημεία A, B



Διάγραμμα 4.4

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 A). Στην κορυφή του ταλαντωτή (Σημείο B), ο παλμός αυτός έχει μετατραπεί σε μια αρμονική διέγερση αποσβενύμενου πλάτους.

4.3.2 Έλεγχος αξιοπιστίας SeismoSignal

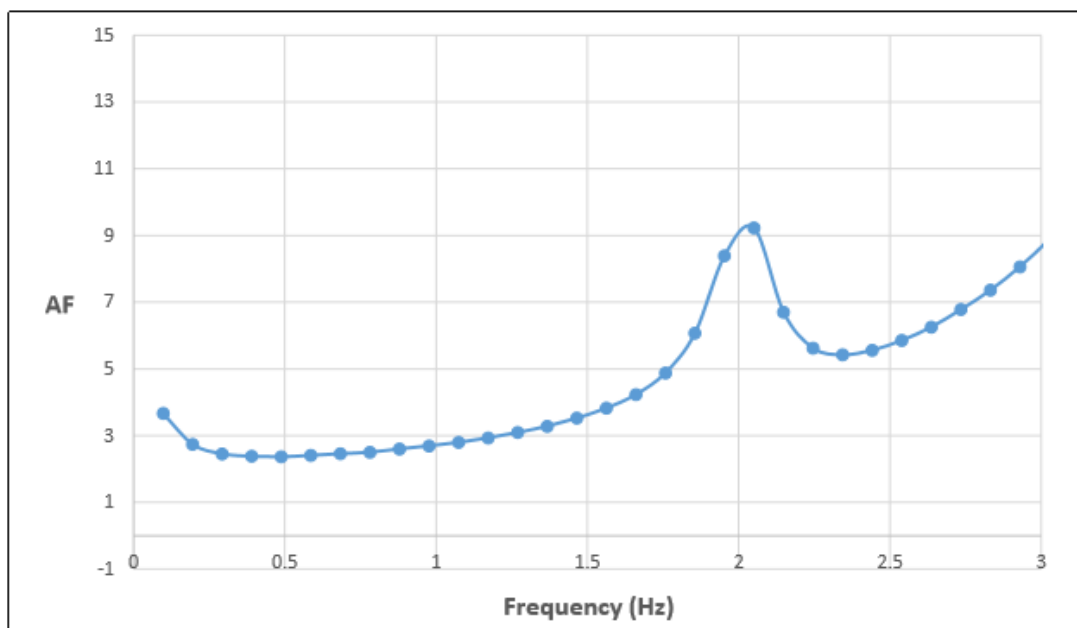
Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων και τον έλεγχο της αξιοπιστίας των αναλύσεων με τη χρήση του λογισμικού SeismoSignal, όπως και προηγουμένως πραγματοποιήθηκε για το πρόγραμμα PLAXIS, στόχος είναι να γίνει σύγκριση της αναλυτικής λύσης με την αριθμητική προσομοίωση και να εξαχθούν αντίστοιχα αποτελέσματα.

Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε το δεύτερο προκαταρκτικό προσομοίωμα, το οποίο κατασκευάστηκε προηγουμένως.

Οι χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση (Point A) και στην κορυφή (Point B) του μονοβάθμιου ταλαντωτή μετατρέπονται στα αντίστοιχα φάσματα Fourier. Διαιρούνται οι τιμές του μετασχηματισμού Fourier στην κορυφή προς τις αντίστοιχες τιμές του μετασχηματισμού Fourier στη βάση και προκύπτει ο συντελεστής ενίσχυσης AF συναρτήσει της συχνότητας f , όπως φαίνεται από τον παρακάτω λόγο:

$$AF(f) = \frac{\text{Fourier Amplitude}(f), \text{ Point B}}{\text{Fourier Amplitude}(f), \text{ Point A}} \quad (4.4)$$

Για την ορθή λειτουργία του λογισμικού, πρέπει το σημείο στο οποίο η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης παρουσιάζει τοπικό μέγιστο, να αντιστοιχεί στην ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή f_c . Από το Διάγραμμα 4.5 φαίνεται πως η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης για το μονοβάθμιο ταλαντωτή παρουσιάζει τοπικό μέγιστο περίπου ίσο με 9,0 για συχνότητα 2,05Hz, η οποία είναι ίση με την ιδιοσυχνότητα f_c του μονοβάθμιου ταλαντωτή.



Διάγραμμα 4.5

Συντελεστής ενίσχυσης AF του μονοβάθμιου ταλαντωτή συναρτήσει της συχνότητας f

Στη συνέχεια, εξετάστηκε ξανά το δεύτερο προκαταρκτικό προσομοίωμα με τη διαφορά ότι αυτή τη φορά η άκαμπτη εδαφική στρώση (βράχος) του μοντέλου διεγείρεται στη βάση της από έναν παλμό Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα $f=2\text{Hz}$, όπως προηγουμένως, προκειμένου να αξιολογηθεί καλύτερα η λειτουργία του λογισμικού SeismoSignal.

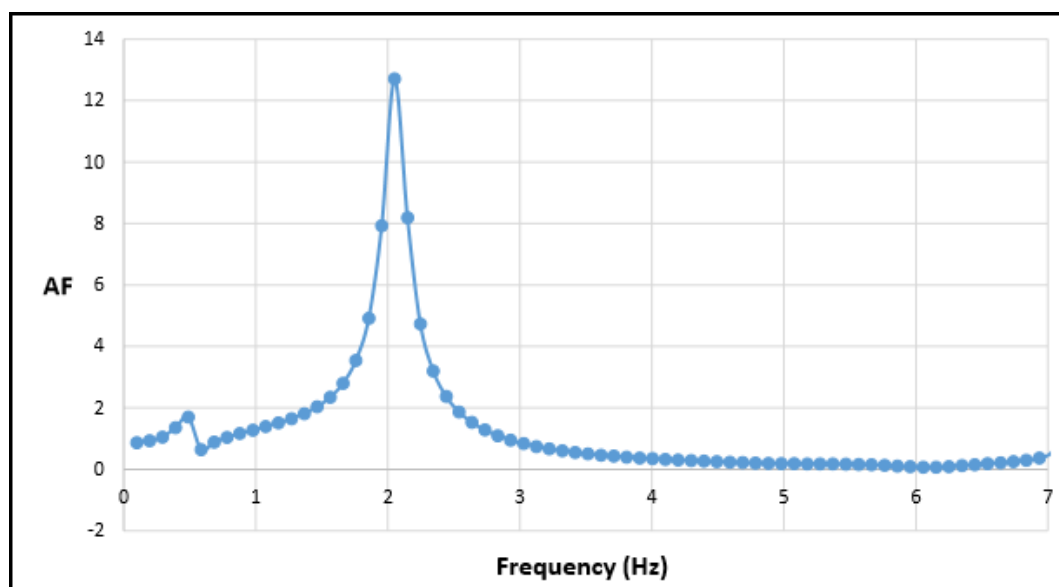
Έτσι, εξετάστηκε η παράμετρος της ενίσχυσης της διέγερσης, λόγω των συντονιστικών φαινομένων μεταξύ κατασκευής (ταλαντωτή) και διέγερσης, το οποίο επιτυγχάνεται μέσω του προσδιορισμού του συντελεστή ενίσχυσης AF στο μονοβάθμιο ταλαντωτή, από τον τύπο 4.4:

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

που ήδη χρησιμοποιήθηκε και παραπάνω για την άκαμπτη εδαφική στρώση που διεγείρεται από αρμονική ταλάντωση στη βάση της με συχνότητα $f = 2\text{Hz}$.

Το αποτέλεσμα του λογισμικού για τον συντελεστή ενίσχυσης, που προσδιορίζεται μέσω του μετασχηματισμού Fourier των χρονοϊστοριών της οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση και στην κορυφή του ταλαντώτη (Σημεία A και B αντίστοιχα), συναρτήσει της συχνότητας, φαίνεται στο Διάγραμμα 4.6.

Όμοια με προηγουμένως, ζητούμενο για την ορθή λειτουργία του λογισμικού είναι η συχνότητα που μεγιστοποιείται η καμπύλη να αποτελεί την ιδιοσυχνότητα f_c του συστήματος του μονοβάθμιου ταλαντωτή, γεγονός που συμβαίνει εδώ στην τιμή 9,7 για συχνότητα 2,05Hz, ίση με την ιδιοσυχνότητα του μονοβάθμιου ταλαντωτή.



Διάγραμμα 4.6

Συντελεστής ενίσχυσης AF του μονοβάθμιου ταλαντωτή συναρτήσει της συχνότητας f

Τελικά, μπορεί 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. Μπορούν, επομένως να χρησιμοποιηθούν και τα δύο λογισμικά για τη δυναμική ανάλυση προσομοιωμάτων εδάφους και ταλαντωτή, στα οποία εμφανίζεται συντελεστής ενίσχυσης λόγω των φαινομένων συντονισμού.

4.4 Παραμετρική ανάλυση

4.4.1 Μελέτη περίπτωσης ανεμογεννήτριας επί άκαμπτης εδαφικής στρώσης
Σε αυτό το έδαφιο, εξετάστηκε η περίπτωση θεμελίωσης ανεμογεννήτριας επί άκαμπτης εδαφικής στρώσης, όπως είναι για παράδειγμα ένα βραχώδες υπόβαθρο. Για την προσομοίωση βραχώδους υποβάθρου, η ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος στην εδαφική στρώση λαμβάνεται ίση με $V_s = 2000 \text{ m/s}$, το ειδικό βάρος γ ίσο με 17 kN/m^3 και ο λόγος Poisson $\nu = 0,3$.

Η ανεμογεννήτρια που εξετάστηκε έχει ισχύ ίση με 800 kW . Το ύψος του πυλώνα, ή αλλιώς η απόσταση του άξονα του ρότορα από την επιφάνεια του εδάφους, ορίζεται στα 50 m . Η διάμετρος του ρότορα είναι και αυτή 50 m , ενώ η μάζα του ισούται με 32 tn . 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 τη μελέτη της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας και την πραγματοποίηση των επιμέρους αναλύσεων, μελετάται ως ένας μονοβάθμιος ταλαντωτής μάζας, ο οποίος θεμελιώνεται επιφανειακά στο έδαφος.

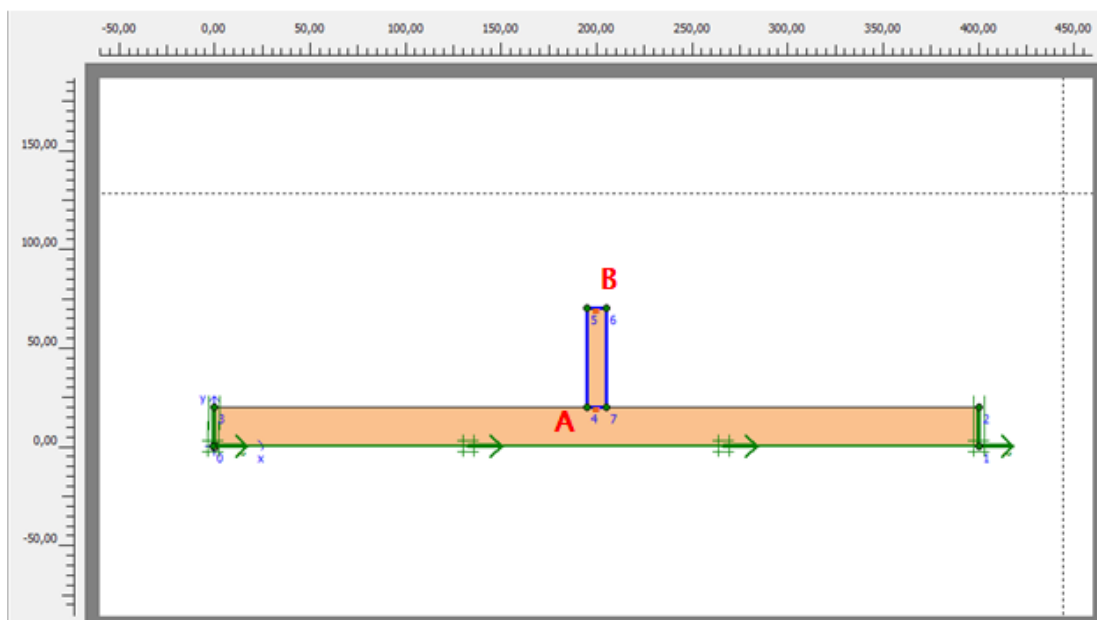
Ο θεωρούμενος μονοβάθμιος ταλαντωτής έχει μάζα ίση με $m = 32 \text{ tn}$ (ή αλλιώς βάρος $W = 320 \text{ kN}$), ύψος $h = 50 \text{ m}$ και ιδιοσυχνότητα $f_c = 0,8 \text{ Hz}$, ενώ η απόσβεση στο έδαφος και στον ταλαντωτή θεωρείται ίση με 2% . Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια, η απόσβεση 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.

Είναι γνωστό πως ο συντελεστής ακαμψίας του πακτωμένου μονοβάθμιου ταλαντωτή υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

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

Προκειμένου να προκύψει πιο ολοκληρωμένη και πιο αντιπροσωπευτική εικόνα της απόκρισης οποιουδήποτε 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 του συγκεκριμένου μοντέλου στη βάση του από δύο παλμούς Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα $f=1\text{Hz}$ και $f=2\text{Hz}$ και συνεπώς, η μελέτη δύο περιπτώσεων διέγερσης.



Εικόνα 4.5

Προσομοίωμα ανεμογεννήτριας επί άκαμπτης εδαφικής στρώσης

Στα πλαίσια της μοντελοποίησης της ανεμογεννήτριας στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS, ο μονοβάθμιος ταλαντωτής προσομοιώνεται ως ένας πλαισιακός φορέας ύψους 50m και μήκους 10m (Εικόνα 4.5), που εδράζεται επί άκαμπτης εδαφικής στρώσης, η οποία στην πραγματικότητα θεωρείται ως 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.

Ορίζονται δύο σημεία, ένα στην κορυφή B και ένα στη βάση A του μονοβάθμιου ταλαντωτή και εξετάζεται 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:

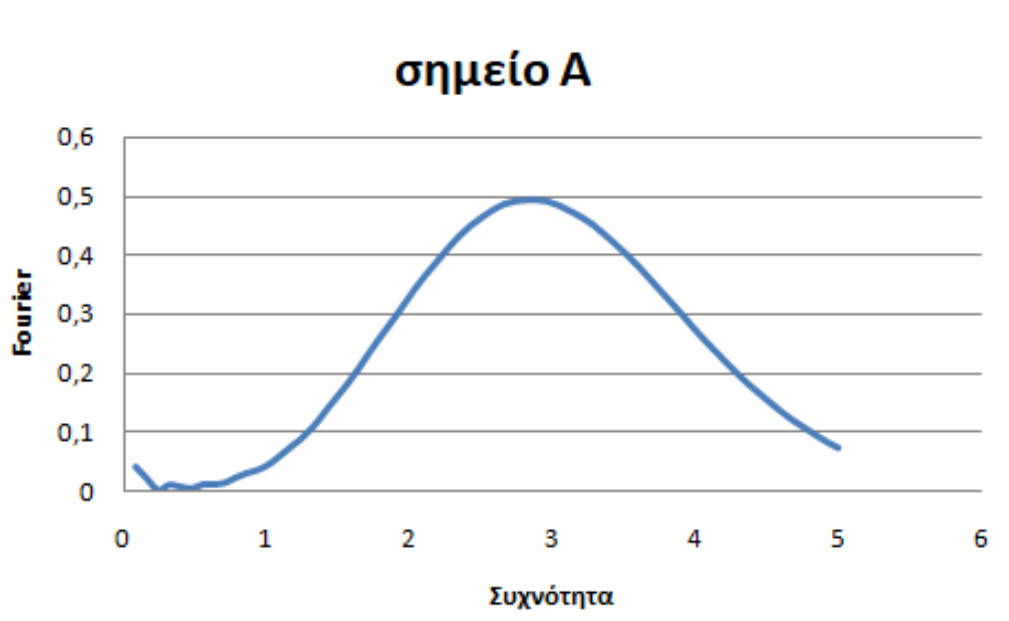
$$AF(f) = \frac{\text{Fourier Amplitude } (f), \text{ Point B}}{\text{Fourier Amplitude } (f), \text{ Point A}}$$

Ο συντελεστής ενίσχυσης, επομένως, προσδιορίζεται μέσω του μετασχηματισμού Fourier των χρονοϊστοριών της οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση και στην κορυφή του ταλαντωτή, σημεία A και B αντίστοιχα.

4.4.1.1 Διέγερση με παλμό Ricker $f=2\text{Hz}$

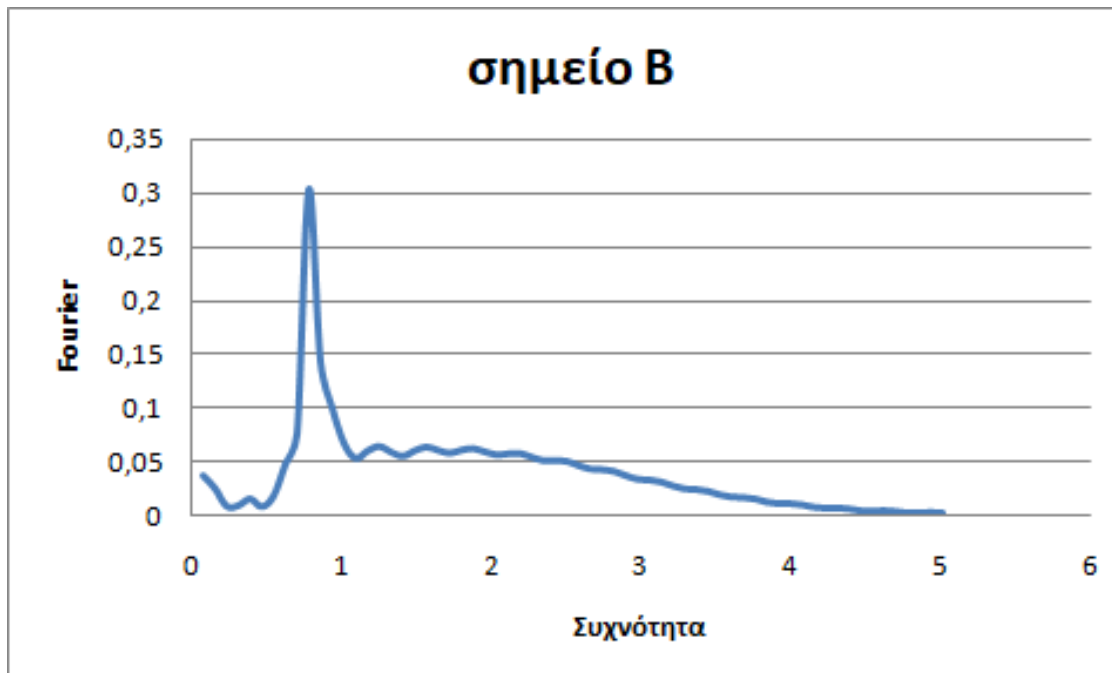
Οι χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση και στην κορυφή του μονοβάθμιου ταλαντωτή χρησιμοποιήθηκαν, ώστε να παραχθούν τα φάσματα Fourier, στο λογισμικό SeismoSignal, και μέσω του μετασχηματισμού Fourier να κατασκευαστούν τα διαγράμματα αυτά συναρτήσει της συχνότητας (σε Hz), για κάθε σημείο αλλά και για τον λόγο τους.

Έτσι, για διέγερση του μοντέλου στη βάση του με παλμό Ricker $f=2\text{Hz}$ εξάχθηκαν τα εξής διαγράμματα:



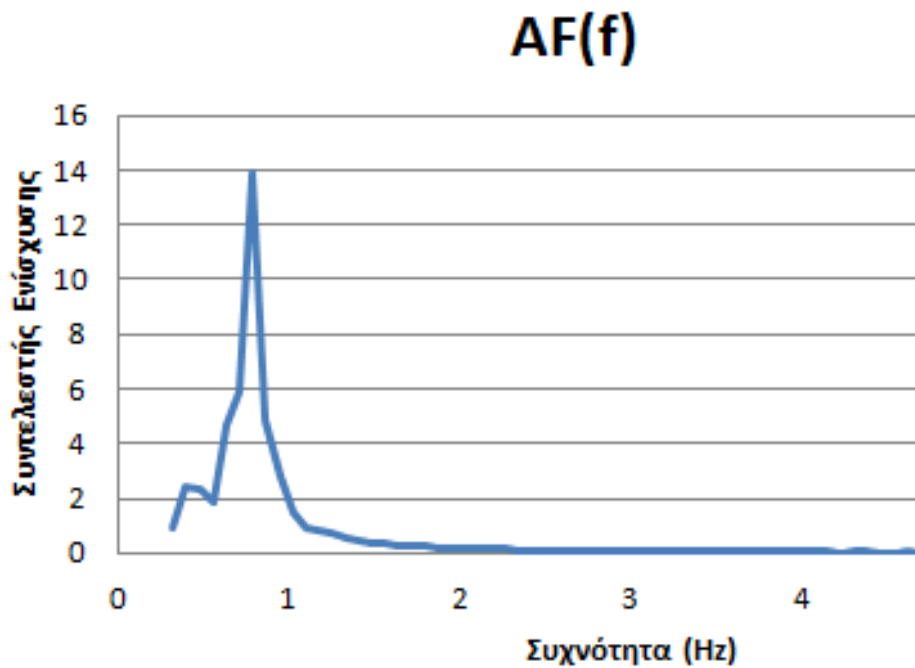
Διάγραμμα 4.7

Φάσμα Fourier στη βάση του ταλαντωτή συναρτήσει της συχνότητας f



Διάγραμμα 4.8

Φάσμα Fourier στην κορυφή του ταλαντωτή συναρτήσει της συχνότητας f



Διάγραμμα 4.9

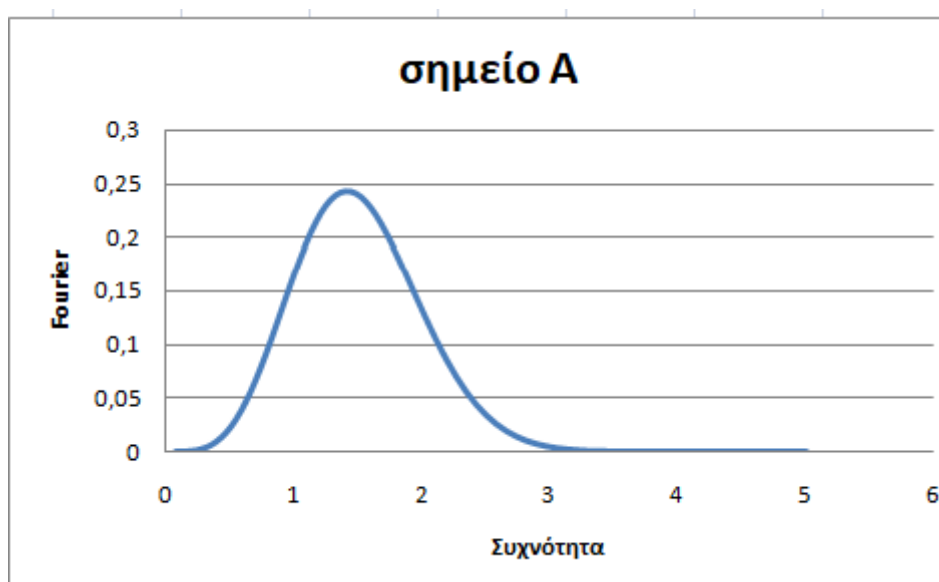
Συντελεστής ενίσχυσης AF του μονοβάθμιου ταλαντωτή συναρτήσει της συχνότητας f

Παρατηρείται πως η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης για το μονοβάθμιο ταλαντωτή μεγιστοποιείται στην τιμή 13,9 για συχνότητα 0,78Hz. Η συχνότητα αυτή είναι σχεδόν ίση με την ιδιοσυχνότητα f_c του συστήματος του μονοβάθμιου ταλαντωτή, γεγονός που οφείλεται στην άκαμπτη εδαφική στρώση. Ταυτόχρονα, παρατηρείται μέγιστο του φάσματος Fourier στο σημείο A για συχνότητα περίπου 3Hz, μιάμιση, δηλαδή φορά ίση με την διέγερση που του ασκείται.

4.4.1.2 Διέγερση με παλμό Ricker $f=1\text{Hz}$

Όμοια με προηγουμένως, οι χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση και στην κορυφή του μονοβάθμιου ταλαντωτή χρησιμοποιήθηκαν, ώστε να παραχθούν τα φάσματα Fourier, στο λογισμικό SeismoSignal, και μέσω του μετασχηματισμού Fourier να κατασκευαστούν τα διαγράμματα αυτά συναρτήσει της συχνότητας, για κάθε σημείο αλλά και για τον λόγο τους.

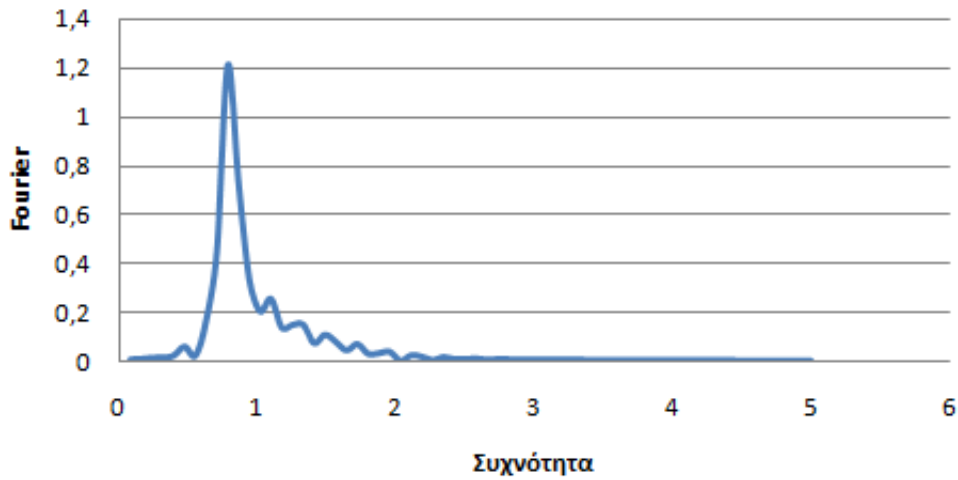
Έτσι, για διέγερση του μοντέλου στη βάση του με παλμό Ricker $f=2\text{Hz}$ εξάχθηκαν τα εξής διαγράμματα:



Διάγραμμα 4.10

Φάσμα Fourier στη βάση του ταλαντωτή συναρτήσει της συχνότητας f

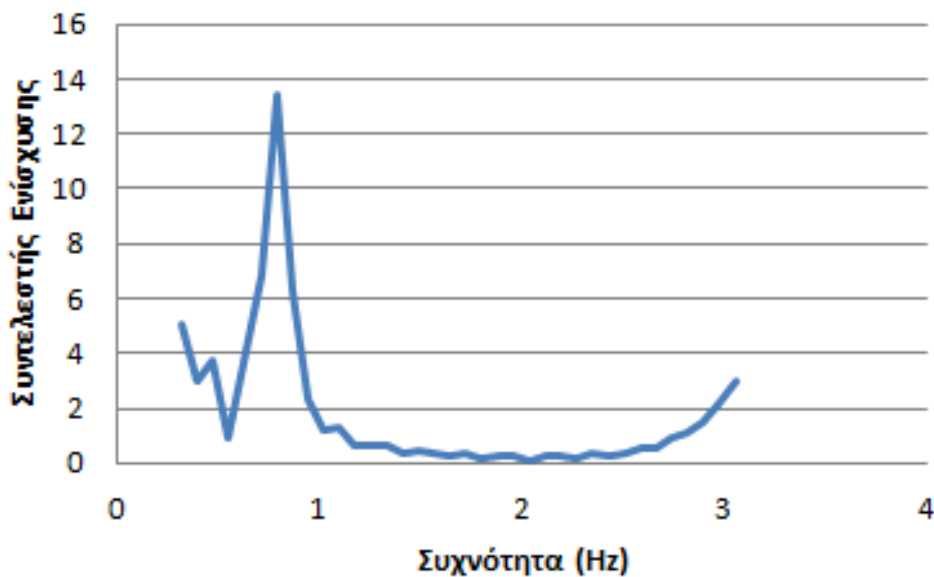
σημείο B



Διάγραμμα 4.11

Φάσμα Fourier στην κορυφή του ταλαντωτή συναρτήσει της συχνότητας f

AF(f)



Διάγραμμα 4.12

Συντελεστής ενίσχυσης AF του μονοβάθμιου ταλαντωτή συναρτήσει της συχνότητας f

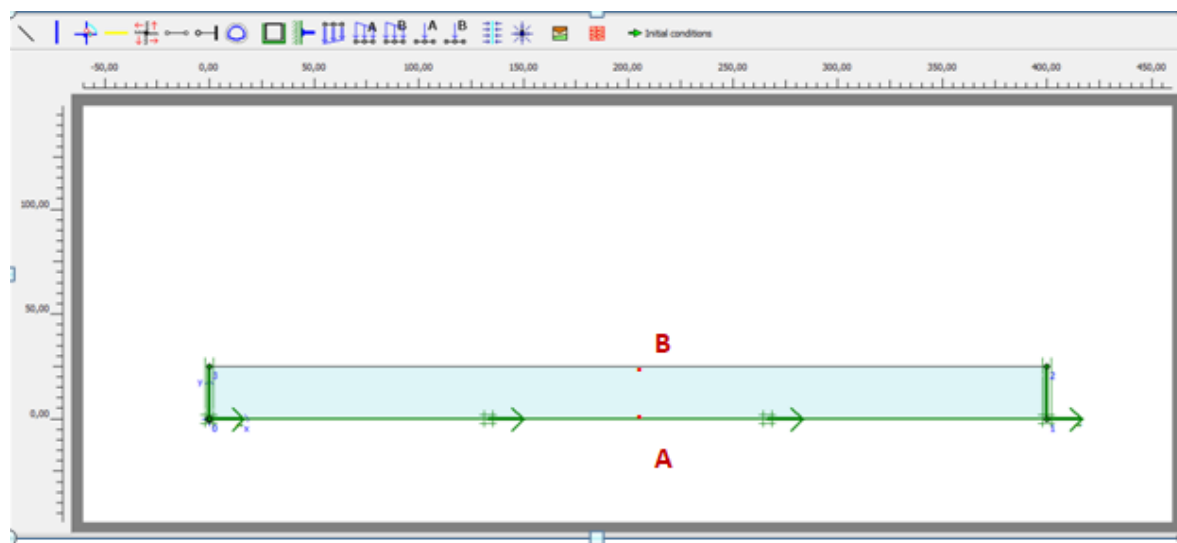
Παρατηρείται πως η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης για το μονοβάθμιο ταλαντωτή μεγιστοποιείται στην τιμή 13,4 για συχνότητα 0,78Hz. Η συχνότητα αυτή είναι σχεδόν ίση με την ιδιοσυχνότητα f_c του συστήματος του μονοβάθμιου ταλαντωτή, γεγονός που οφείλεται στην άκαμπτη εδαφική

στρώση. Ταυτόχρονα, παρατηρείται μέγιστο του φάσματος Fourier στο σημείο A για συχνότητα περίπου 1,5Hz, μιάμιση, δηλαδή φορά ίση με την διέγερση που του ασκείται.

4.4.2 Μελέτη εδαφικής στρώσης

Σε αυτό το εδάφιο, εξετάστηκαν τέσσερις περιπτώσεις - συνδυασμοί εδαφικής στρώσης και διέγερσης. Με αυτό τον τρόπο, είναι δυνατόν να εξαχθούν ορθότερα αποτελέσματα και συμπεράσματα που σε αντίθετη περίπτωση θα είχαν αμεληθεί. Η μελέτη σε αυτή την περίπτωση δε περιλαμβάνει την ύπαρξη κάποιου μονοβάθμιου ταλαντωτή - ανεμογεννήτριας.

Στα πλαίσια της μοντελοποίησης της εδαφικής στρώσης στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS, πρόκειται για αναπαράσταση ενός οριζόντιου εδαφικού στρώματος, το οποίο έχει ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος $V_s = 240\text{m/s}$ ή $V_s = 110\text{m/s}$, ειδικό βάρος $\gamma = 17\text{ kN/m}^3$, λόγο Poisson $\nu = 0,3$, πάχος $H = 20\text{m}$ και απόσβεση υλικού $\xi = 2\%$. Οι σταθερές α και β του Rayleigh 0,101 και 0,004 αντίστοιχα.



Εικόνα 4.6

Προσομοίωμα εδαφικής στρώσης

Στη βάση του εδαφικού στρώματος επιβάλλονται δύο παλμοί Ricker, κατά περίπτωση, με δεσπόζουσα συχνότητα $f = 2\text{Hz}$ ή $f = 1\text{Hz}$.

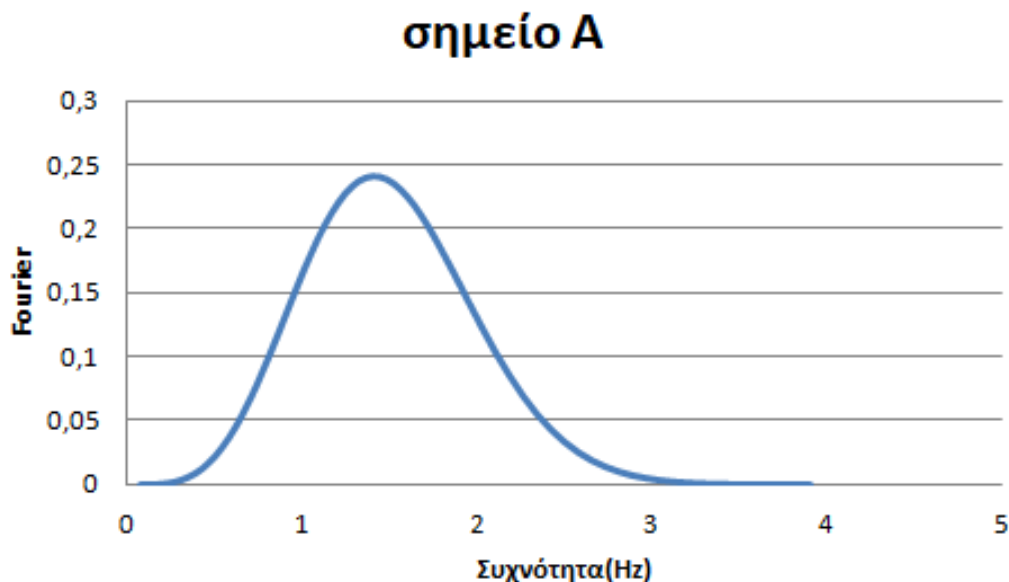
Τα δύο σημεία A και B, στη βάση και την κορυφή της εδαφικής στρώσης αντίστοιχα, όπως φαίνονται στην Εικόνα 4.6, τοποθετήθηκαν ώστε να εξαχθούν για κάθε περίπτωση – συνδυασμό ταχύτητας διάδοσης διατμητικού κύματος και διέγερσης Ricker οι χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης και στη συνέχεια οι συντελεστές ενίσχυσης AF συναρτήσεως της συχνότητας, όπως προηγουμένως.

4.4.2.1 Ταχύτητας διάδοσης διατμητικού κύματος $V_s=240\text{m/s}$ και διέγερση Ricker 1Hz

Στην περίπτωση αυτή, στη βάση του εδαφικού στρώματος επιβάλλεται παλμός Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα $f= 1\text{Hz}$ καθώς $V_s=240\text{m/s}$ είναι η ταχύτητα του διατμητικού κύματος στο στρώμα αυτό. Με χρήση των χρονοϊστοριών οριζόντιας επιτάχυνσης έγινε ο ζητούμενος προσδιορισμός του συντελεστή ενίσχυσης της διέγερσης μεταξύ των σημείων A και B, δηλαδή μεταξύ του κατώτερου σημείου της εδαφικής στρώσης και της επιφάνειας του εδάφους, μέσω της σχέσης:

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

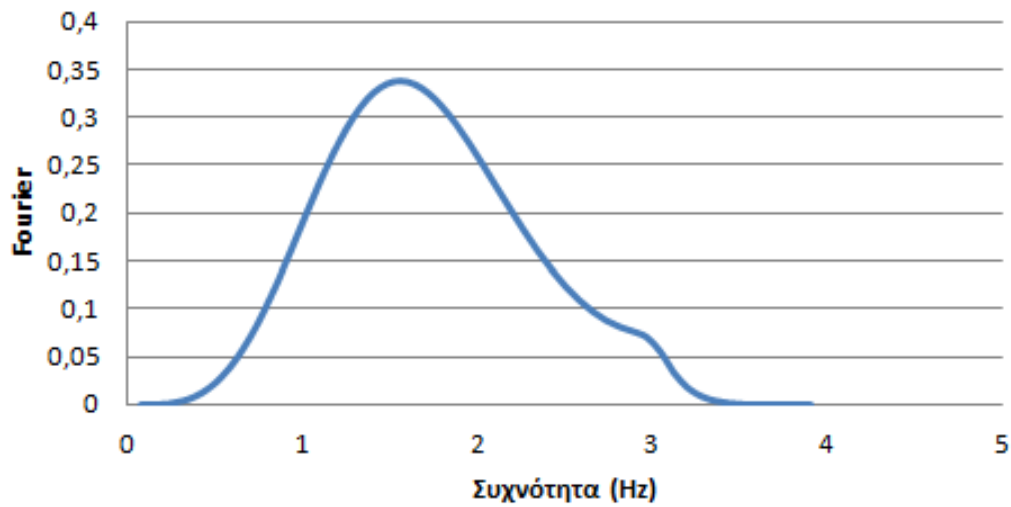
Έτσι παρατίθενται τα εξής διαγράμματα:



Διάγραμμα 4.13

Φάσμα Fourier στη βάση της εδαφικής στρώσης συναρτήσει της συχνότητας f

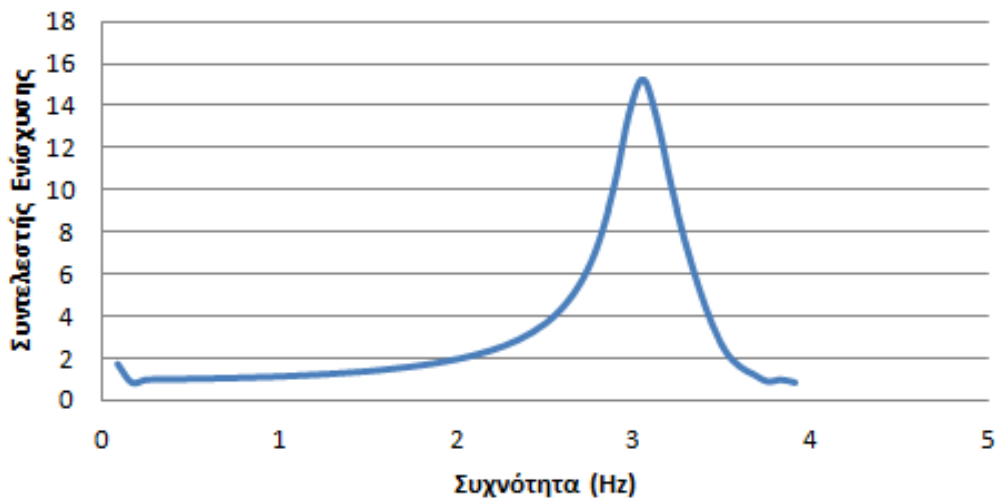
σημείο B



Διάγραμμα 4.14

Φάσμα Fourier στην κορυφή της εδαφικής στρώσης συναρτήσει της συχνότητας f

AF(f)



Διάγραμμα 4.15

Συντελεστής ενίσχυσης AF της εδαφικής στρώσης συναρτήσει της συχνότητας f

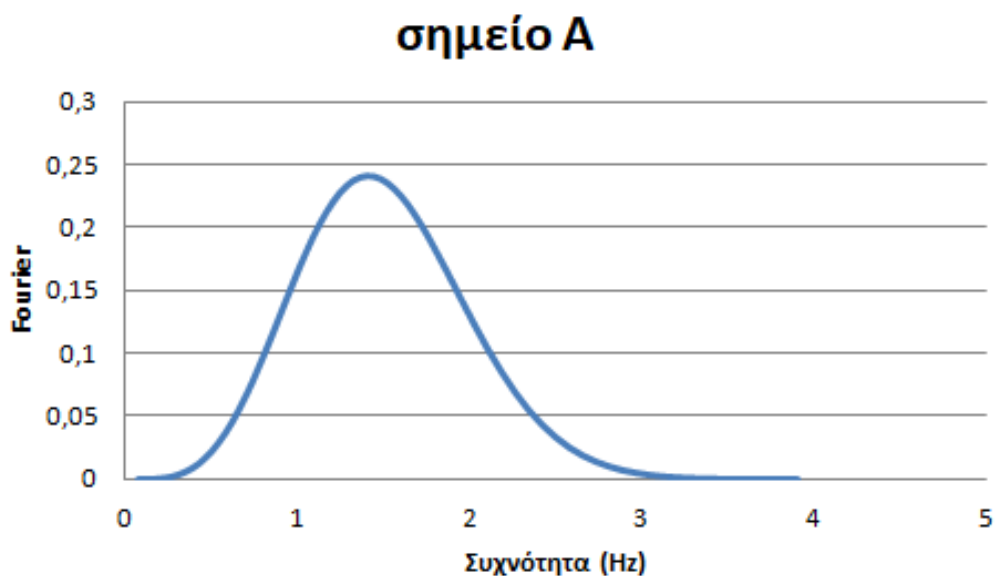
Παρατηρείται πως η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης για την εδαφική στρώση μεγιστοποιείται στην τιμή 15,2 για συχνότητα περίπου 3Hz, ενώ το

μέγιστο του φάσματος Fourier στο σημείο A για συχνότητα περίπου 1,5Hz, μιάμιση, δηλαδή φορά ίση με την διέγερση που του ασκείται.

4.4.2.2 Ταχύτητας διάδοσης διατμητικού κύματος $V_s=110\text{m/s}$ και διέγερση Ricker 1Hz

Στην περίπτωση αυτή, στη βάση του εδαφικού στρώματος επιβάλλεται παλμός Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα $f=1\text{Hz}$ καθώς $V_s=110\text{m/s}$ είναι η ταχύτητα του διατμητικού κύματος στο στρώμα αυτό. Όμοια με πριν, με χρήση των χρονοϊστοριών οριζόντιας επιτάχυνσης έγινε ο ζητούμενος προσδιορισμός του συντελεστή ενίσχυσης της διέγερσης μεταξύ των σημείων A και B, δηλαδή μεταξύ του κατώτερου σημείου της εδαφικής στρώσης και της επιφάνειας του εδάφους.

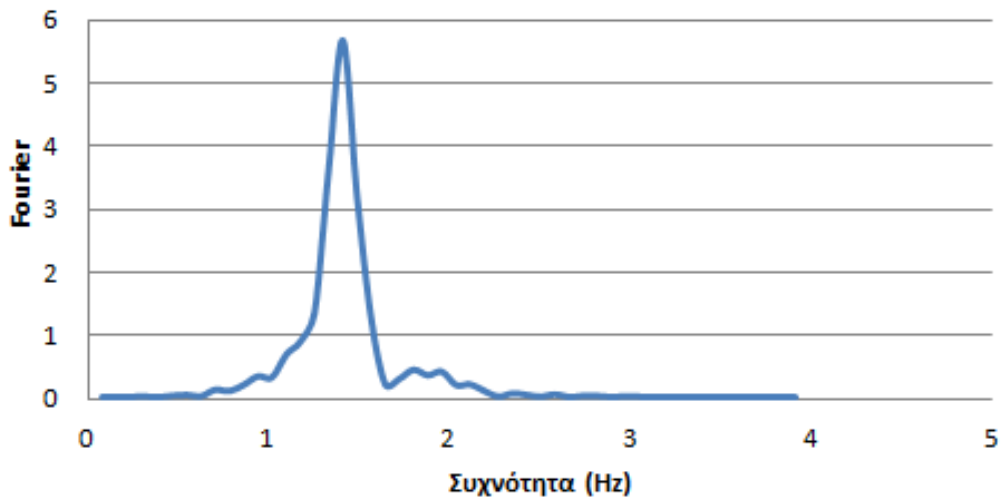
Έτσι παρατίθενται τα εξής διαγράμματα:



Διάγραμμα 4.16

Φάσμα Fourier στη βάση της εδαφικής στρώσης συναρτήσει της συχνότητας f

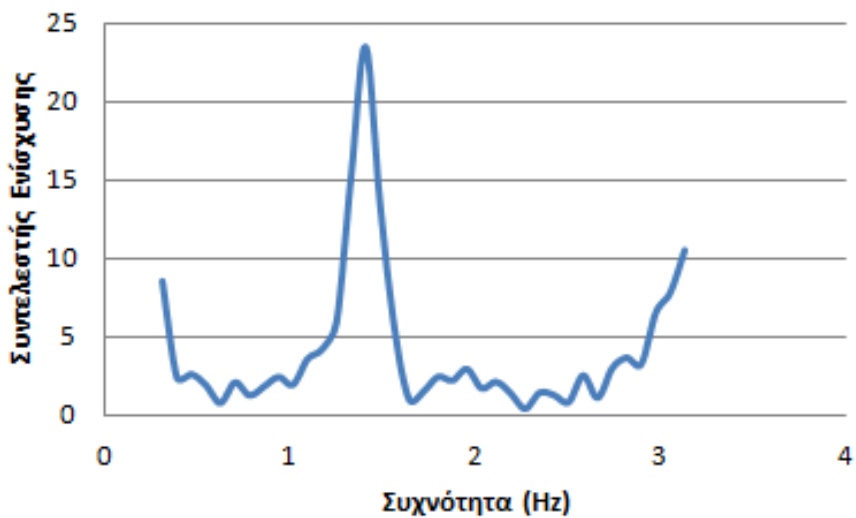
σημείο B



Διάγραμμα 4.17

Φάσμα Fourier στην κορυφή της εδαφικής στρώσης συναρτήσει της συχνότητας f

AF(f)



Διάγραμμα 4.18

Συντελεστής ενίσχυσης AF της εδαφικής στρώσης συναρτήσει της συχνότητας f

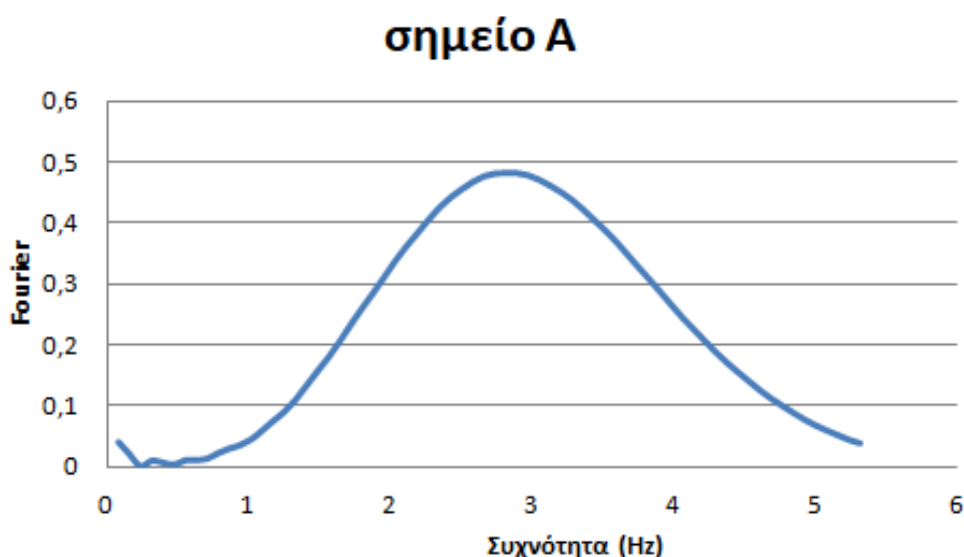
Παρατηρείται πως η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης για την εδαφική στρώση μεγιστοποιείται στην τιμή 23,5 για συχνότητα ίση με 1,4Hz, ενώ το

μέγιστο του φάσματος Fourier στο σημείο A για συχνότητα περίπου 1,5Hz, μιάμιση, δηλαδή φορά ίση με την διέγερση που του ασκείται.

4.4.2.3 Ταχύτητας διάδοσης διατμητικού κύματος $V_s=240\text{m/s}$ και διέγερση Ricker 2Hz

Στην περίπτωση αυτή, στη βάση του εδαφικού στρώματος επιβάλλεται παλμός Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα $f=2\text{Hz}$ καθώς $V_s=240\text{m/s}$ είναι η ταχύτητα του διατμητικού κύματος στο στρώμα αυτό. Όμοια με πριν, με χρήση των χρονοϊστοριών οριζόντιας επιτάχυνσης έγινε ο ζητούμενος προσδιορισμός του συντελεστή ενίσχυσης της διέγερσης μεταξύ των σημείων A και B, δηλαδή μεταξύ του κατώτερου σημείου της εδαφικής στρώσης και της επιφάνειας του εδάφους.

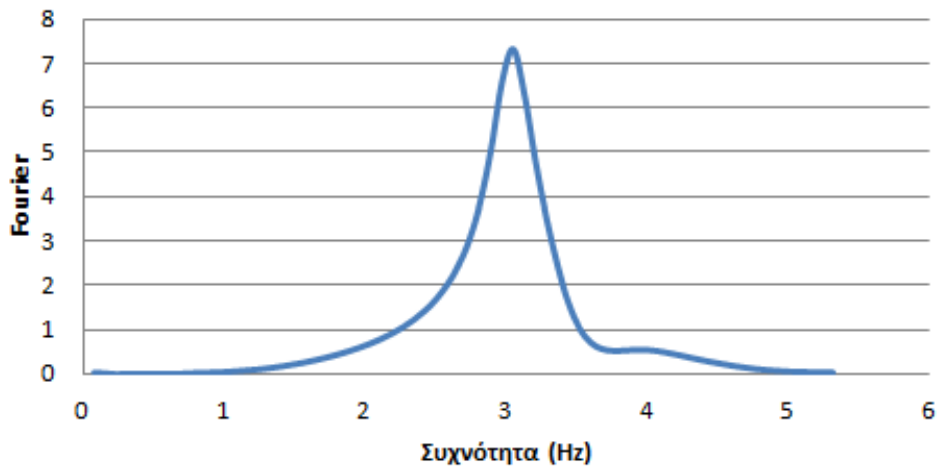
Έτσι παρατίθενται τα εξής διαγράμματα:



Διάγραμμα 4.19

Φάσμα Fourier στη βάση της εδαφικής στρώσης συναρτήσει της συχνότητας f

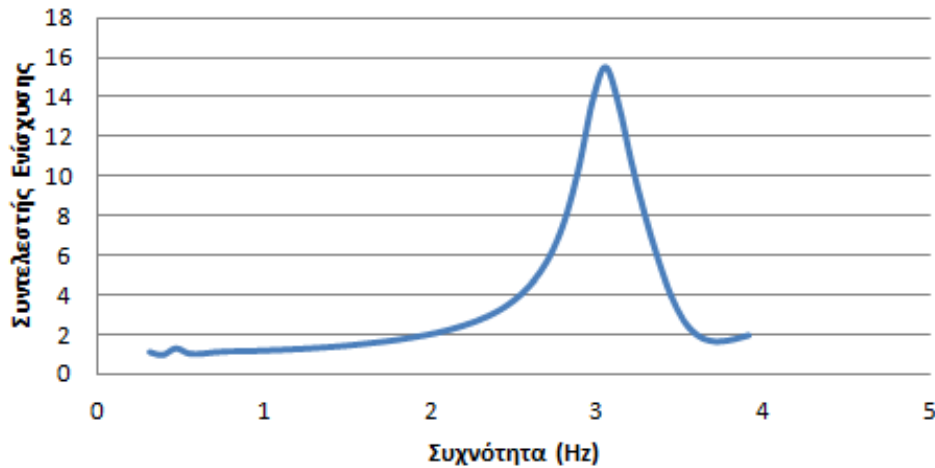
σημείο B



Διάγραμμα 4.20

Φάσμα Fourier στην κορυφή της εδαφικής στρώσης συναρτήσει της συχνότητας f

AF(f)



Διάγραμμα 4.21

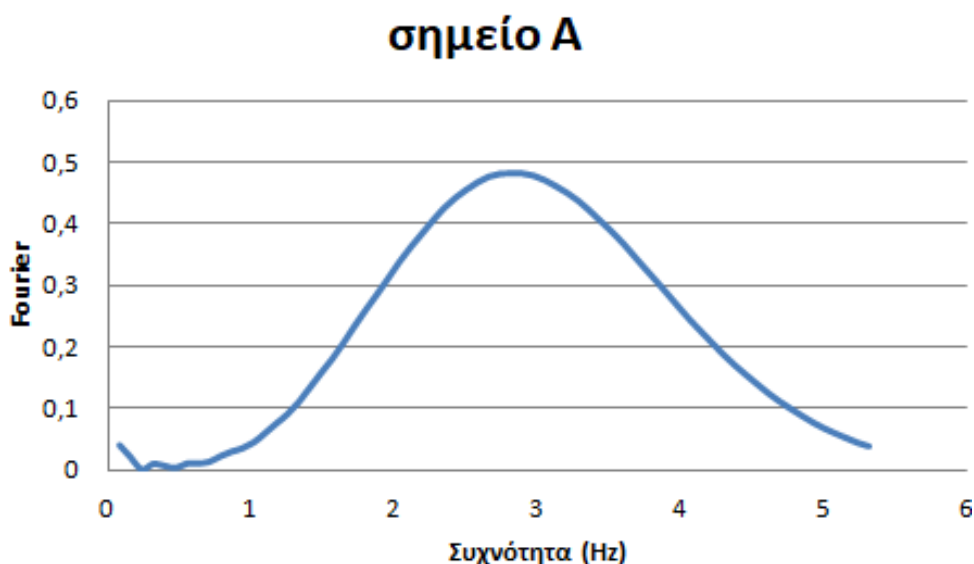
Συντελεστής ενίσχυσης AF της εδαφικής στρώσης συναρτήσει της συχνότητας f

Παρατηρείται πως η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης για την εδαφική στρώση μεγιστοποιείται στην τιμή 15,5 για συχνότητα ίση με περίπου 3Hz, ενώ το μέγιστο του φάσματος Fourier στο σημείο A για συχνότητα περίπου 3Hz, μιάμιση, δηλαδή φορά ίση με την διέγερση που του ασκείται.

4.4.2.4 Ταχύτητας διάδοσης διατμητικού κύματος $V_s=110\text{m/s}$ και διέγερση Ricker 2Hz

Στην περίπτωση αυτή, στη βάση του εδαφικού στρώματος επιβάλλεται παλμός Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα $f= 2\text{Hz}$ καθώς $V_s=110\text{m/s}$ είναι η ταχύτητα του διατμητικού κύματος στο στρώμα αυτό. Όμοια με πριν, με χρήση των χρονοϊστοριών οριζόντιας επιτάχυνσης έγινε ο ζητούμενος προσδιορισμός του συντελεστή ενίσχυσης της διέγερσης μεταξύ των σημείων A και B, δηλαδή μεταξύ του κατώτερου σημείου της εδαφικής στρώσης και της επιφάνειας του εδάφους.

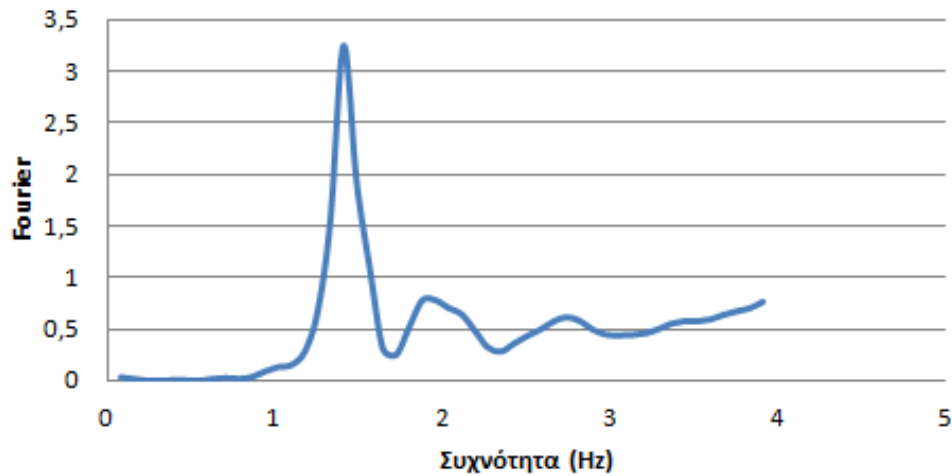
Έτσι παρατίθενται τα εξής διαγράμματα:



Διάγραμμα 4.22

Φάσμα Fourier στη βάση της εδαφικής στρώσης συναρτήσει της συχνότητας f

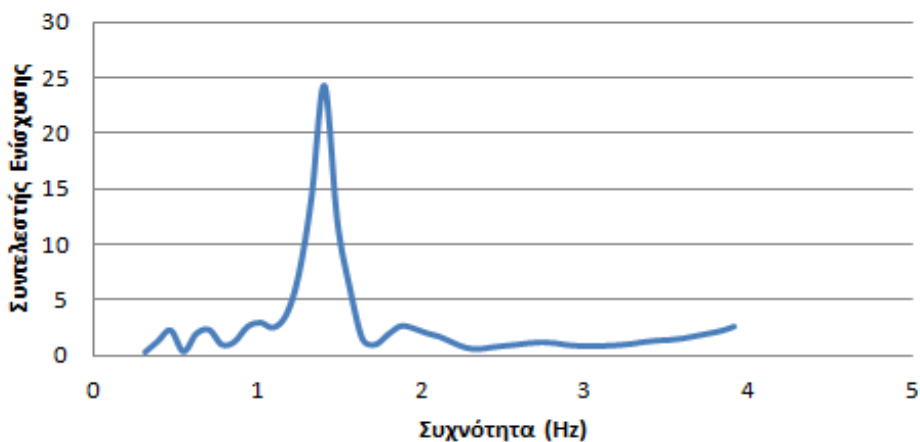
σημείο B



Διάγραμμα 4.23

Φάσμα Fourier στην κορυφή της εδαφικής στρώσης συναρτήσει της συχνότητας f

AF(f)



Διάγραμμα 4.24

Συντελεστής ενίσχυσης AF της εδαφικής στρώσης συναρτήσει της συχνότητας f

Παρατηρείται πως η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης για την εδαφική στρώση μεγιστοποιείται στην τιμή 24,3 για συχνότητα ίση με 1,4Hz, ενώ το μέγιστο του φάσματος Fourier στο σημείο A για συχνότητα περίπου 3Hz, μιάμιση, δηλαδή φορά ίση με την διέγερση που του ασκείται.

Μπορεί να συμπεράνει κανείς, επομένως, πως ενώ το μέγιστο του φάσματος Fourier στο σημείο A εξαρτάται από τη διέγερση που ασκείται στην εδαφική στρώση, καθώς παρατηρείται τιμή 3Hz για διέγερση Ricker 2Hz και 1,5Hz για διέγερση Ricker 1Hz, το μέγιστο της καμπύλης του συντελεστή ενίσχυσης

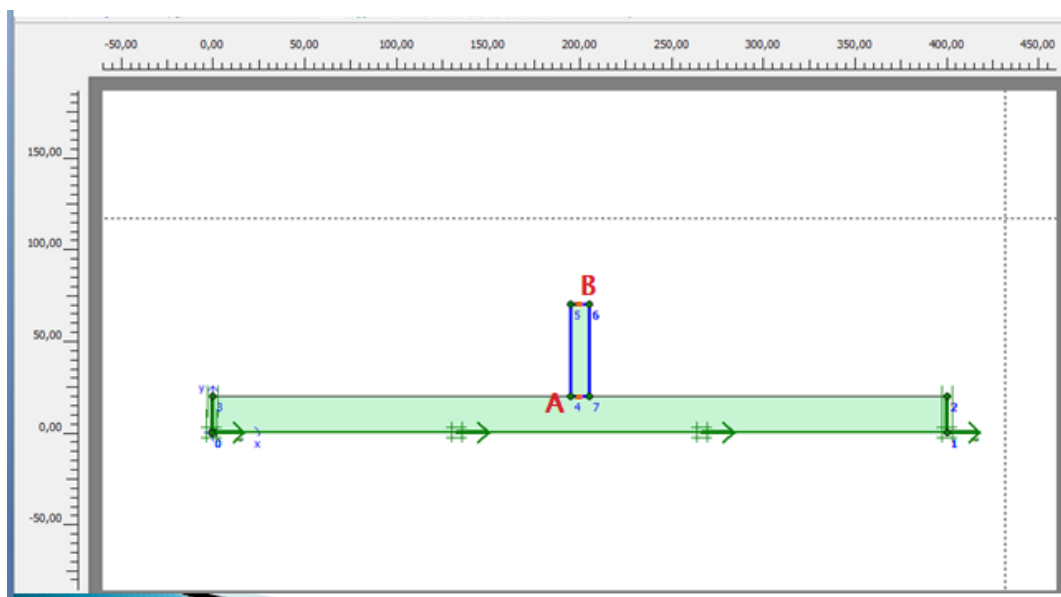
εξαρτάται από τη ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος και μόνο, χωρίς να αλλάζει για διαφοροποίηση της διέγερσης.

4.4.3 Μελέτη περίπτωσης ανεμογεννήτριας επί εδαφικής στρώσης

Σε αυτό το εδάφιο, μελετάται ο συνδυασμός των δύο προηγούμενων περιπτώσεων που μελετήθηκαν, οι οποίες αφορούν την θεμελίωση ανεμογεννήτριας επί άκαμπτου εδαφικής στρώσης και την μελέτη μιας εδαφικής στρώσης χωρίς την ύπαρξη ταλαντωτή – ανεμογεννήτριας.

Η διαφορά της συγκεκριμένης περίπτωσης έγκειται στην διαφοροποίηση των συνθηκών του εδάφους που θεμελιώνεται η ανεμογεννήτρια, καθώς δεν είναι πια ένα άκαμπτο στρώμα, όπως προηγουμένως. Εδώ διαφοροποιείται η ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος, η οποία έστω ότι είναι $V_s=240\text{m/s}$, το ειδικό βάρος πάρθηκε $\gamma=17\text{kN/m}^3$ και ο λόγος Poisson $\nu=0,3$.

Τα στοιχεία της ανεμογεννήτριας πάρθηκαν ίδια με προηγουμένως, συνεπώς θεωρήθηκε μονοβάθμιος ταλαντωτής με 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%. 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.



Εικόνα 4.7

Προσομοίωμα ανεμογεννήτριας επί εδαφικής στρώσης

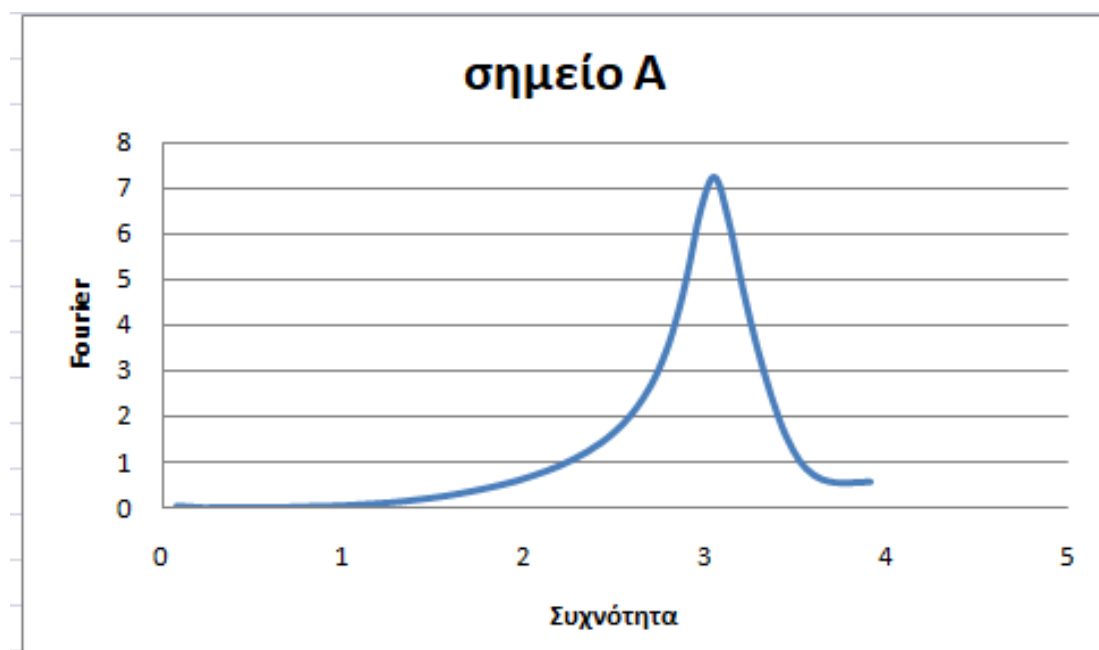
Στα πλαίσια της μοντελοποίησης της ανεμογεννήτριας στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS, ο μονοβάθμιος ταλαντωτής προσομοιώνεται ως ένας πλαισιακός φορέας ύψους 50m και μήκους 10m (Εικόνα 4.7).

Ορίζονται δύο σημεία, ένα στην κορυφή B και ένα στη βάση A του μονοβάθμιου ταλαντωτή και εξετάζεται 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, από την εξαγωγή των χρονοϊστοριών των δύο σημείων, ενώ επιλέγεται η διέγερση του συγκεκριμένου μοντέλου στη βάση του από δύο παλμούς Ricker με δεσπόμενη συχνότητα $f=1\text{Hz}$ και $f=2\text{Hz}$ και συνεπώς, η μελέτη δύο περιπτώσεων διέγερσης.

4.4.3.1 Διέγερση με παλμό Ricker $f=2\text{Hz}$

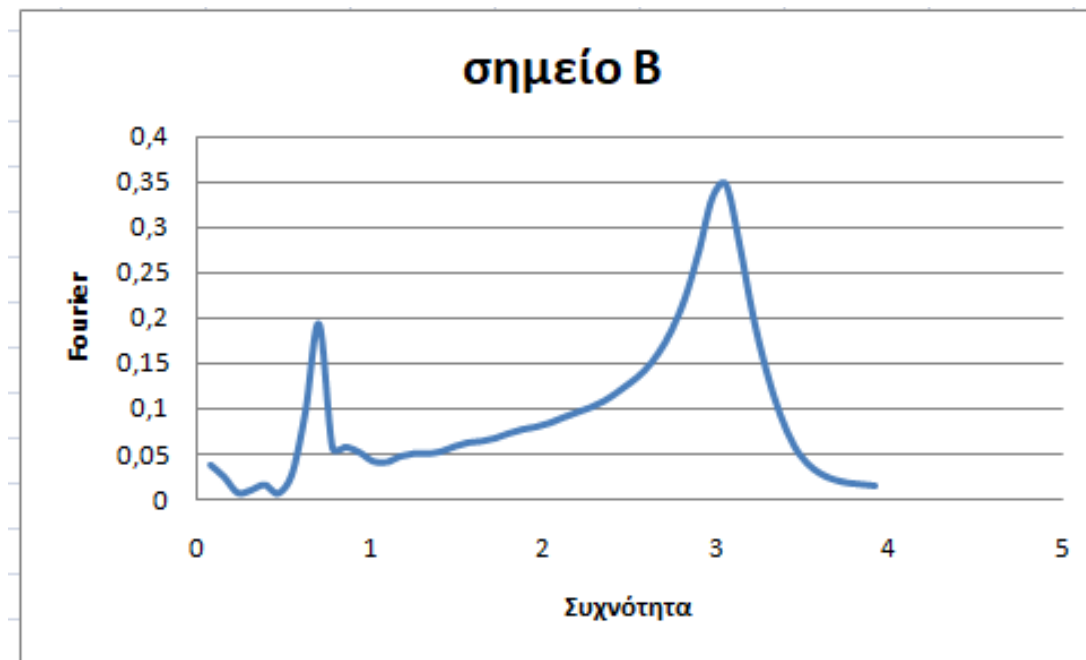
Οι χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση και στην κορυφή του μονοβάθμιου ταλαντωτή χρησιμοποιήθηκαν, ώστε να παραχθούν τα φάσματα Fourier, στο λογισμικό SeismoSignal, και μέσω του μετασχηματισμού Fourier να κατασκευαστούν τα διαγράμματα αυτά συναρτήσει της συχνότητας (σε Hz), για κάθε σημείο αλλά και για τον λόγο τους.

Έτσι, για διέγερση του μοντέλου στη βάση του με παλμό Ricker $f=2\text{Hz}$ εξάχθηκαν τα εξής διαγράμματα:



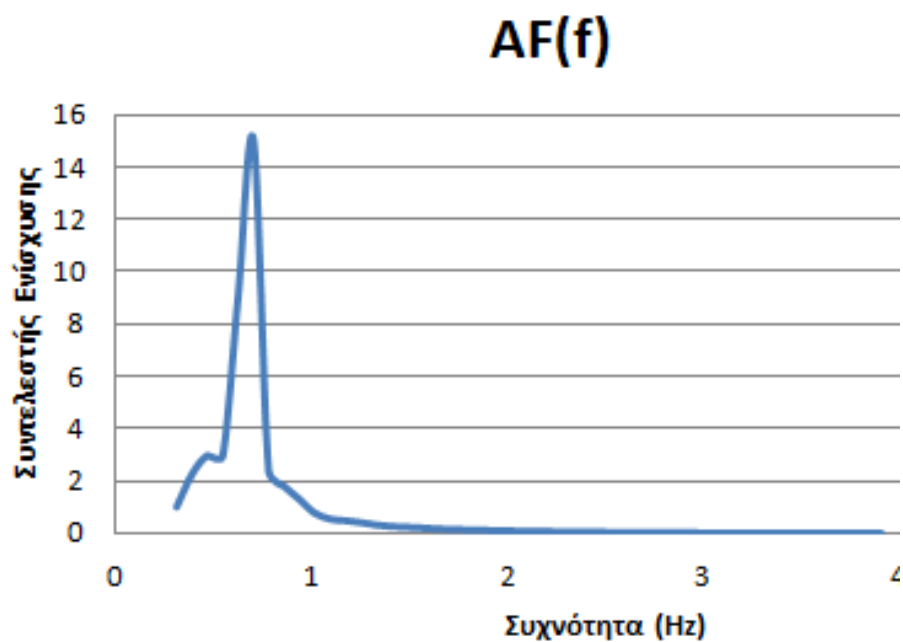
Διάγραμμα 4.25

Φάσμα Fourier στη βάση του ταλαντωτή συναρτήσει της συχνότητας f



Διάγραμμα 4.26

Φάσμα Fourier στην κορυφή του ταλαντωτή συναρτήσει της συχνότητας f



Διάγραμμα 4.27

Συντελεστής ενίσχυσης AF του μονοβάθμιου ταλαντωτή συναρτήσει της συχνότητας f

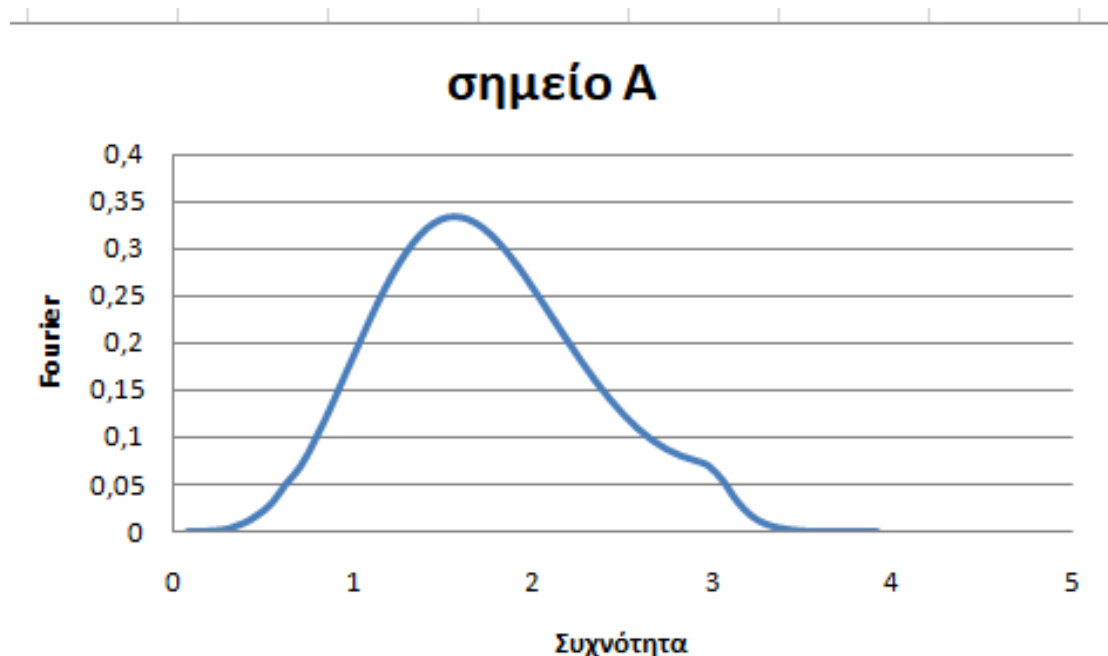
Παρατηρείται πως η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης για το μονοβάθμιο ταλαντωτή μεγιστοποιείται περίπου στην τιμή 15 για συχνότητα 0,7Hz. Η συχνότητα αυτή είναι μικρότερη από την ιδιοσυχνότητα f_c του συστήματος του

μονοβάθμιου ταλαντωτή, γεγονός που οφείλεται στην εδαφική στρώση του μοντέλου. Ταυτόχρονα, παρατηρείται μέγιστο του φάσματος Fourier στο σημείο A για συχνότητα περίπου 3Hz, μιάμιση, δηλαδή φορά ίση με την διέγερση που του ασκείται.

4.4.3.2 Διέγερση με παλμό Ricker $f=1\text{Hz}$

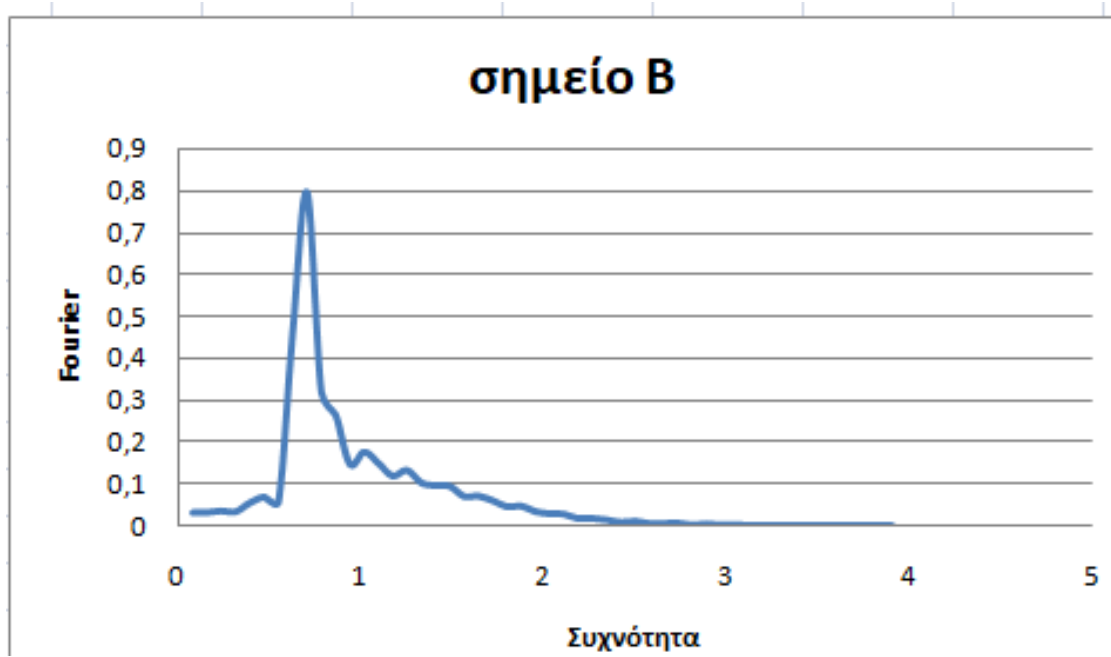
Οι χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση και στην κορυφή του μονοβάθμιου ταλαντωτή χρησιμοποιήθηκαν, ώστε να παραχθούν τα φάσματα Fourier, στο λογισμικό SeismoSignal, και μέσω του μετασχηματισμού Fourier να κατασκευαστούν τα διαγράμματα αυτά συναρτήσει της συχνότητας (σε Hz), για κάθε σημείο αλλά και για τον λόγο τους.

Έτσι, για διέγερση του μοντέλου στη βάση του με παλμό Ricker $f=1\text{Hz}$ εξάχθηκαν τα εξής διαγράμματα:



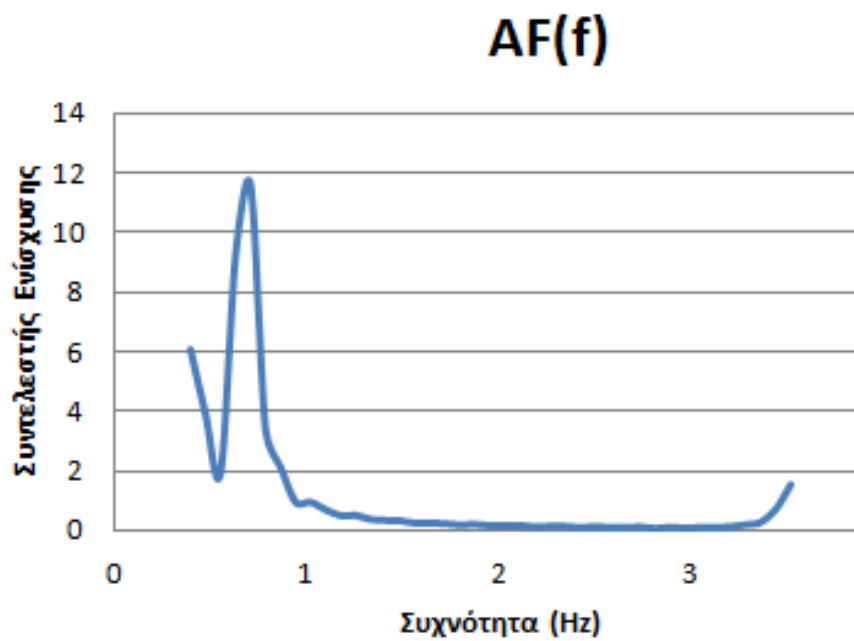
Διάγραμμα 4.28

Φάσμα Fourier στη βάση του ταλαντωτή συναρτήσει της συχνότητας f



Διάγραμμα 4.29

Φάσμα Fourier στην κορυφή του ταλαντωτή συναρτήσει της συχνότητας f



Διάγραμμα 4.30

Συντελεστής ενίσχυσης AF του μονοβάθμιου ταλαντωτή συναρτήσει της συχνότητας f

Παρατηρείται πως η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης για το μονοβάθμιο ταλαντωτή μεγιστοποιείται περίπου στην τιμή 11,6 για συχνότητα 0,7Hz. Η συχνότητα αυτή είναι μικρότερη από την ιδιοσυχνότητα f_c του συστήματος του μονοβάθμιου ταλαντωτή, γεγονός που οφείλεται στην εδαφική στρώση του μοντέλου. Ταυτόχρονα, παρατηρείται μέγιστο του φάσματος Fourier στο σημείο A για συχνότητα περίπου 1,5Hz, μιάμιση, δηλαδή φορά ίση με την διέγερση που του ασκείται.

Συμπεραίνεται, λοιπόν, πως χωρίς να παίζει ρόλο το είδος του εδάφους, από την στιγμή που δεν είναι άκαμπτο, αν ασκείται σε αυτό συγκεκριμένη διέγερση, το αποτέλεσμα θα είναι ίδιο για τον συντελεστή ενίσχυσης AF του μονοβάθμιου ταλαντωτή. Ταυτόχρονα, η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης AF μεγιστοποιείται για συχνότητα μικρότερη από την ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή και όχι ίση όπως συμβαίνει σε περίπτωση άκαμπτης εδαφικής στρώσης.

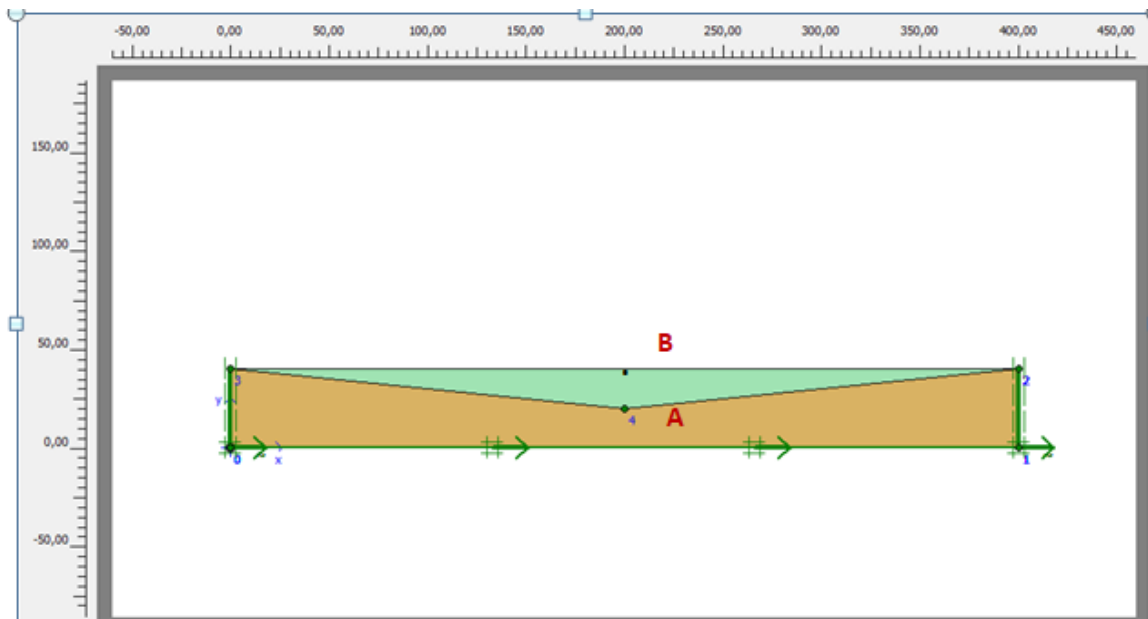
4.4.4 Μελέτη κοιλάδας χωρίς ανεμογεννήτρια - ταλαντωτή

Έως τώρα, οι περιπτώσεις που έχουν μελετηθεί αναφέρονται σε μονοδιάστατη ανάλυση ή μονοδιάστατες εδαφικές συνθήκες, δηλαδή στην απλουστευμένη θεώρηση της αποκλειστικής ύπαρξης οριζοντίων στρώσεων εδαφικών σχηματισμών. Συχνά, οι μονοδιάστατες αυτές αναλύσεις, ακριβώς επειδή αποτελούν παραδοχές, κρίνονται ανεπαρκείς, κάνοντας απαραίτητη τη χρήση πολυδιάστατων αναλύσεων σεισμικής απόκρισης.

Στο εδάφιο αυτό, εξετάζεται μια τέτοια περίπτωση διδιάστατης ανάλυσης, καθώς γίνεται μια προσπάθεια περιγραφής των φυσικών φαινομένων που διέπουν την επίδραση των τοπικών, και πιο συγκεκριμένα των γεωμορφολογικών, συνθηκών στην σεισμική δόνηση. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται περίπτωση εδαφικής κοιλάδας με έντονα διδιάστατα χαρακτηριστικά, για την εκτίμηση των επιπτώσεων των γεωμορφολογικών ανωμαλιών στο σεισμικό κραδασμό.

Για την εδαφική απόθεση της κοιλάδας λαμβάνονται ειδικό βάρος $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ λόγος Poisson $\nu = 0,3$. Το μέγιστο βάθος της κοιλάδας επιλέχθηκε $H = 20 \text{ m}$ και εξετάστηκαν τέσσερις δυνατοί συνδυασμοί διέγερσης και ταχύτητας διάδοσης διατμητικού κύματος V_s .

Στα πλαίσια της μοντελοποίησης της εδαφικής απόθεσης κοιλάδας με το λογισμικό PLAXIS, επιλέχθηκε απόσβεση υλικού $\xi = 2\%$, συνεπώς οι σταθερές α και β του Rayleigh είναι 0,101 και 0,004 αντίστοιχα.



Εικόνα 4.8

Προσομοίωμα αναπαράστασης εδαφικής κοιλάδας

Στα πλαίσια της μελέτης, ορίστηκαν δύο σημεία σε κομβικές θέσεις του μοντέλου. Το σημείο A ορίζεται στο κατώτερο σημείο της κοιλάδας, ενώ το σημείο B στην επιφάνεια του εδάφους (Εικόνα 4.8).

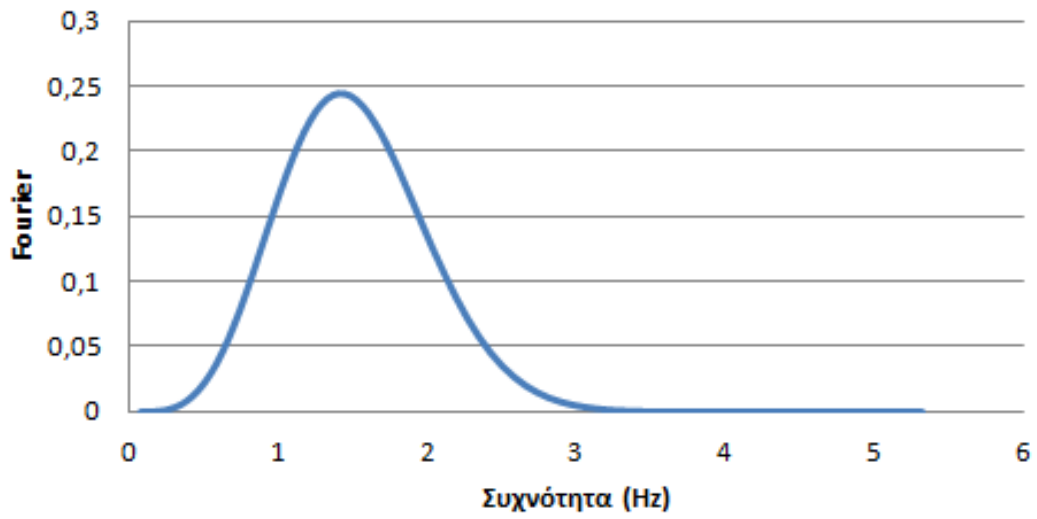
4.4.4.1 Ταχύτητας διάδοσης διατμητικού κύματος $V_s=240\text{m/s}$ και διέγερση Ricker 1Hz

Σε αυτή την περίπτωση, 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 $f=1\text{Hz}$, ενώ η ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος είναι ίση με $V_s=240\text{m/s}$. Με χρήση των χρονοϊστοριών οριζόντιας επιτάχυνσης έγινε ο ζητούμενος προσδιορισμός του συντελεστή ενίσχυσης της διέγερσης μεταξύ των σημείων A και B, δηλαδή μεταξύ του κατώτερου σημείου της κοιλάδας και της επιφάνειας του εδάφους, μέσω της σχέσης:

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

Έτσι, παρατίθενται τα εξής διαγράμματα:

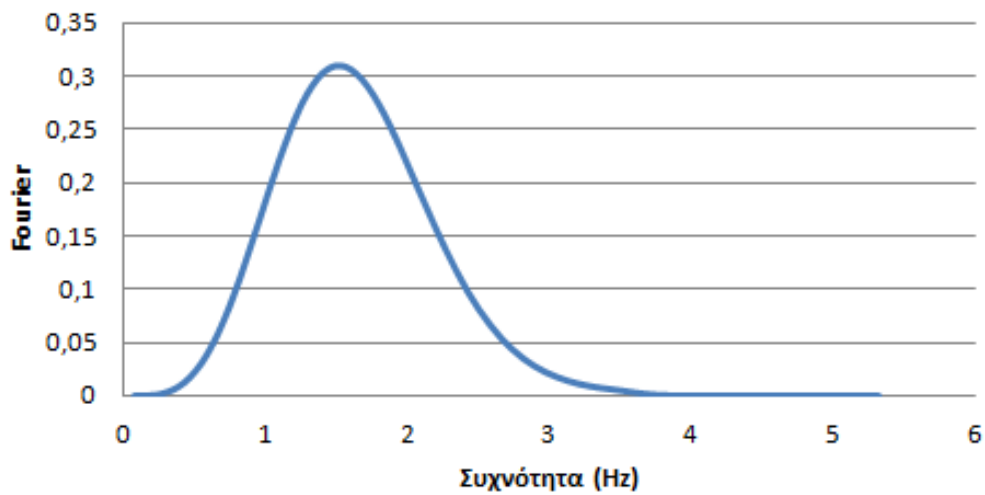
σημείο A



Διάγραμμα 4.31

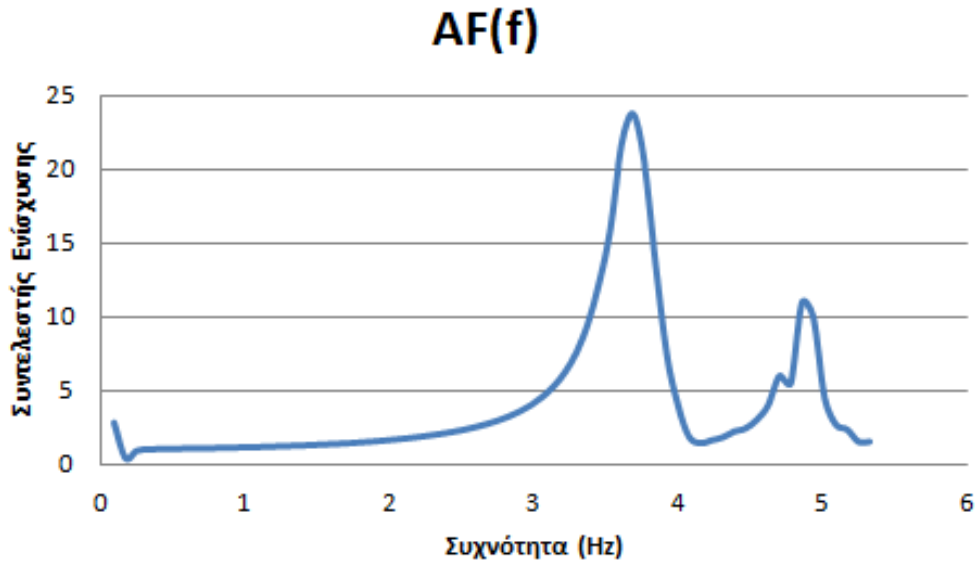
Φάσμα Fourier στο κατώτερο σημείο της κοιλάδας συναρτήσει της συχνότητας f

σημείο B



Διάγραμμα 4.32

Φάσμα Fourier στην επιφάνεια του εδάφους συναρτήσει της συχνότητας f



Διάγραμμα 4.33

Συντελεστής ενίσχυσης AF συναρτήσει της συχνότητας f

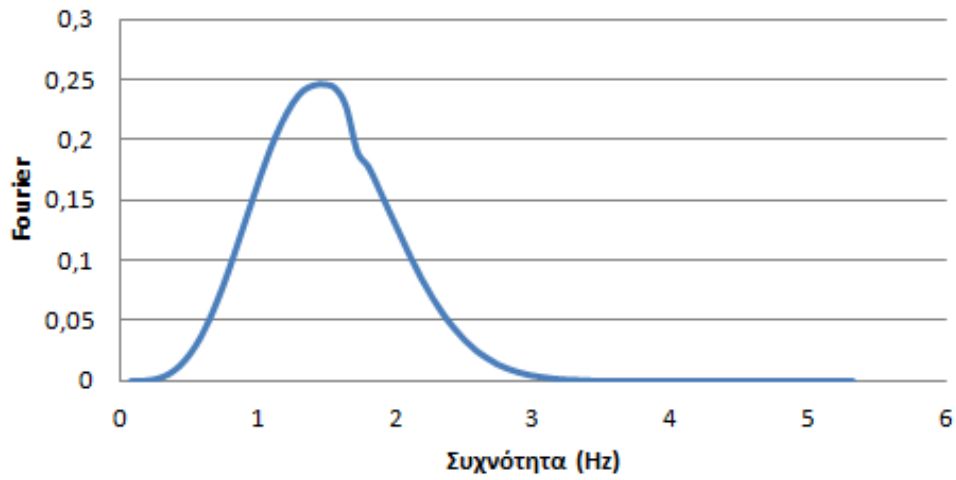
Παρατηρείται πως η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης για τα δύο κομβικά σημεία της κοιλάδας μεγιστοποιείται στην τιμή 23,7 για συχνότητα περίπου 3,7Hz, ενώ το μέγιστο του φάσματος Fourier στο σημείο A για συχνότητα περίπου 1,5Hz, μιάμιση, δηλαδή φορά ίση με την διέγερση που του ασκείται.

4.4.4.2 Ταχύτητας διάδοσης διατμητικού κύματος $V_s=110\text{m/s}$ και διέγερση Ricker 1Hz

Σε αυτή την περίπτωση, η διέγερση η οποία επιβάλλεται στη βάση του βραχύδους υποβάθρου και διαδίδεται προς τα πάνω στο υπόλοιπο μοντέλο, είναι ένα παλμός Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα $f=1\text{Hz}$, ενώ η ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος είναι ίση με $V_s=110\text{m/s}$. Με χρήση των χρονοϊστοριών οριζόντιας επιτάχυνσης έγινε ο ζητούμενος προσδιορισμός του συντελεστή ενίσχυσης της διέγερσης μεταξύ των σημείων A και B, δηλαδή μεταξύ του κατώτερου σημείου της κοιλάδας και της επιφάνειας του εδάφους.

Έτσι, παρατίθενται τα εξής διαγράμματα:

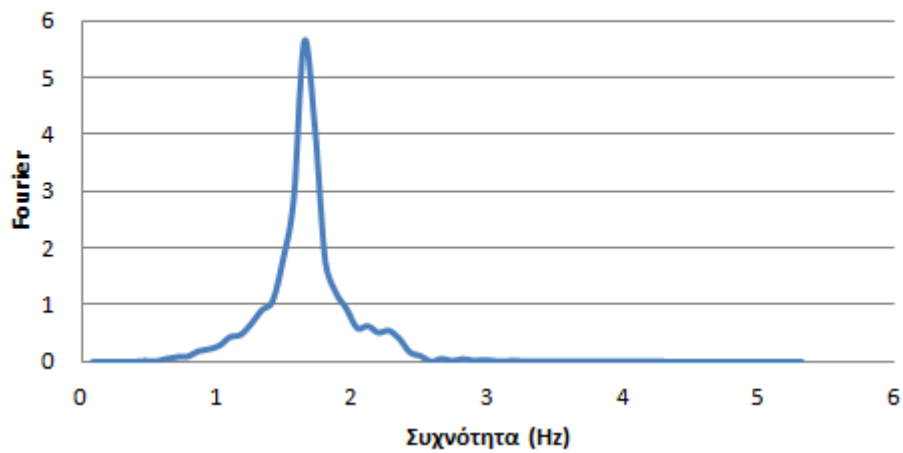
σημείο Α



Διάγραμμα 4.34

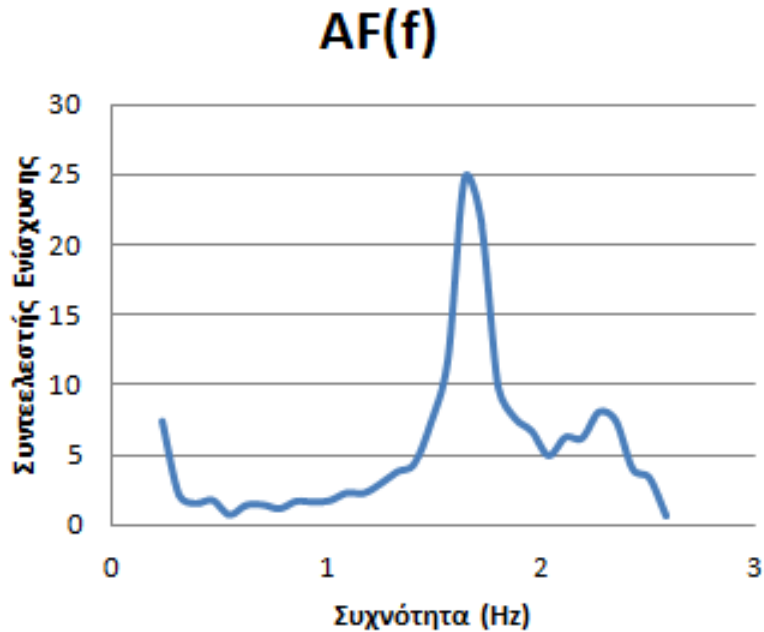
Φάσμα Fourier στο κατώτερο σημείο της κοιλάδας συναρτήσεως της συχνότητας f

σημείο Β



Διάγραμμα 4.35

Φάσμα Fourier στην επιφάνεια του εδάφους συναρτήσεως της συχνότητας f



Διάγραμμα 4.36

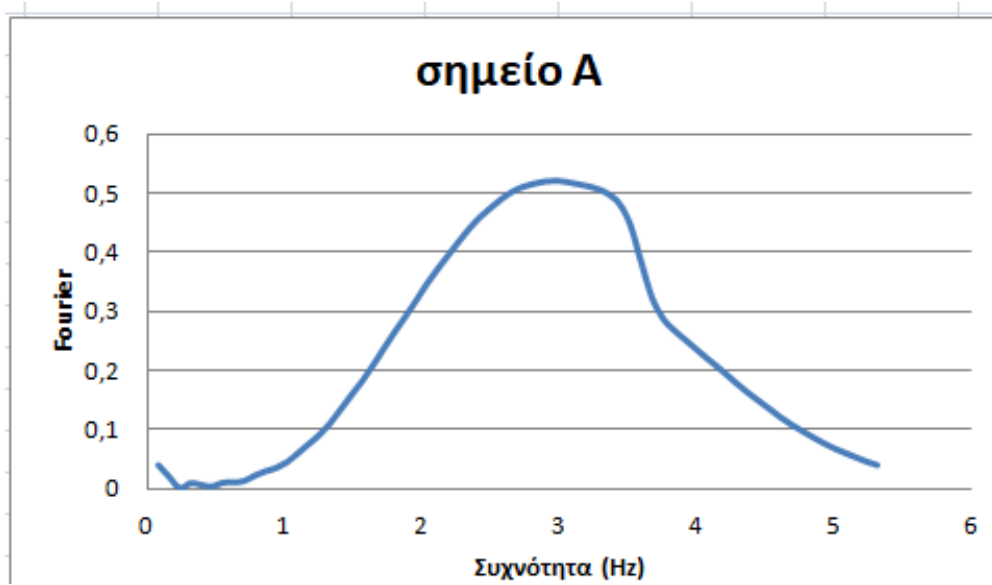
Συντελεστής ενίσχυσης AF συναρτήσει της συχνότητας f

Παρατηρείται πως η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης για τα δύο κομβικά σημεία της κοιλάδας μεγιστοποιείται στην τιμή 24,7 για συχνότητα περίπου 1,6Hz, ενώ το μέγιστο του φάσματος Fourier στο σημείο A για συχνότητα περίπου 1,5Hz, μιάμιση, δηλαδή φορά ίση με την διέγερση που του ασκείται.

4.4.4.3 Ταχύτητας διάδοσης διατμητικού κύματος $V_s=240\text{m/s}$ και διέγερση Ricker 2Hz

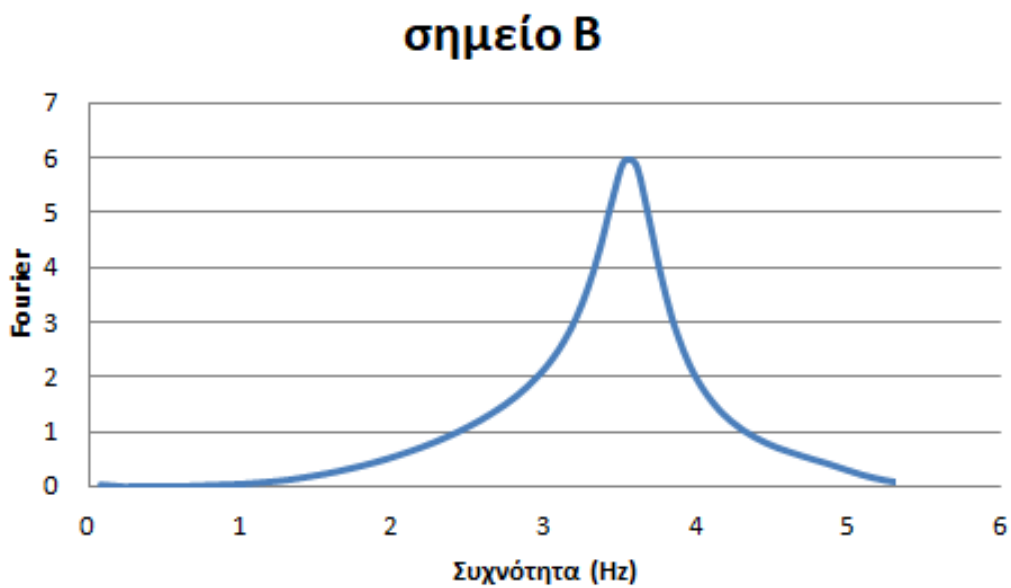
Σε αυτή την περίπτωση, η διέγερση η οποία επιβάλλεται στη βάση του βραχώδους υποβάθρου και διαδίδεται προς τα πάνω στο υπόλοιπο μοντέλο, είναι ένα παλμός Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα $f=2\text{Hz}$, ενώ η ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος είναι ίση με $V_s=240\text{m/s}$. Με χρήση των χρονοϊστοριών οριζόντιας επιτάχυνσης έγινε ο ζητούμενος προσδιορισμός του συντελεστή ενίσχυσης της διέγερσης μεταξύ των σημείων A και B, δηλαδή μεταξύ του κατώτερου σημείου της κοιλάδας και της επιφάνειας του εδάφους.

Έτσι, παρατίθενται τα εξής διαγράμματα:



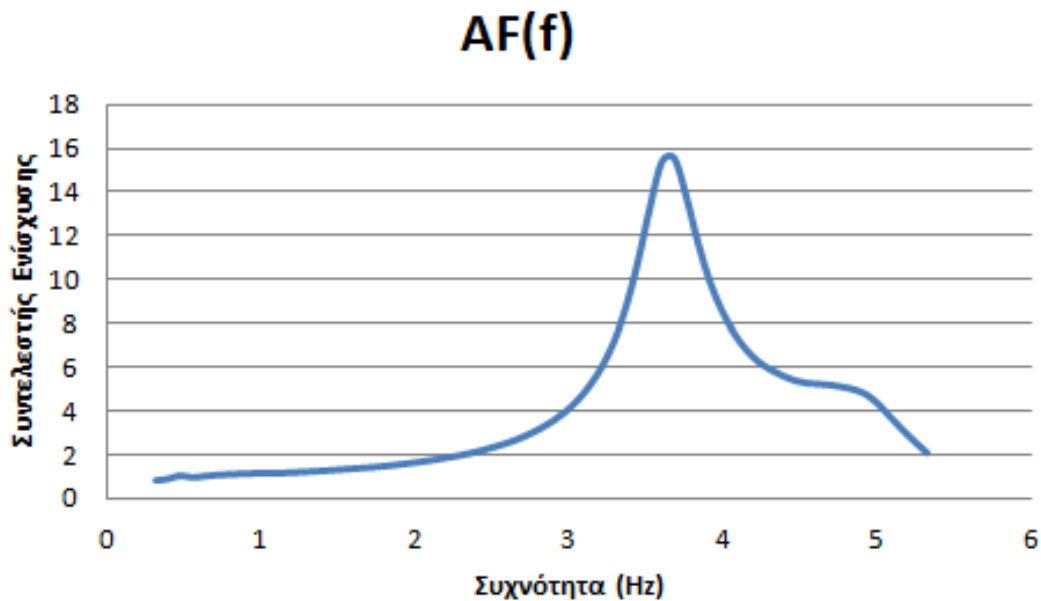
Διάγραμμα 4.37

Φάσμα Fourier στο κατώτερο σημείο της κοιλάδας συναρτήσει της συχνότητας f



Διάγραμμα 4.38

Φάσμα Fourier στην επιφάνεια του εδάφους συναρτήσει της συχνότητας f



Διάγραμμα 4.39

Συντελεστής ενίσχυσης AF συναρτήσει της συχνότητας f

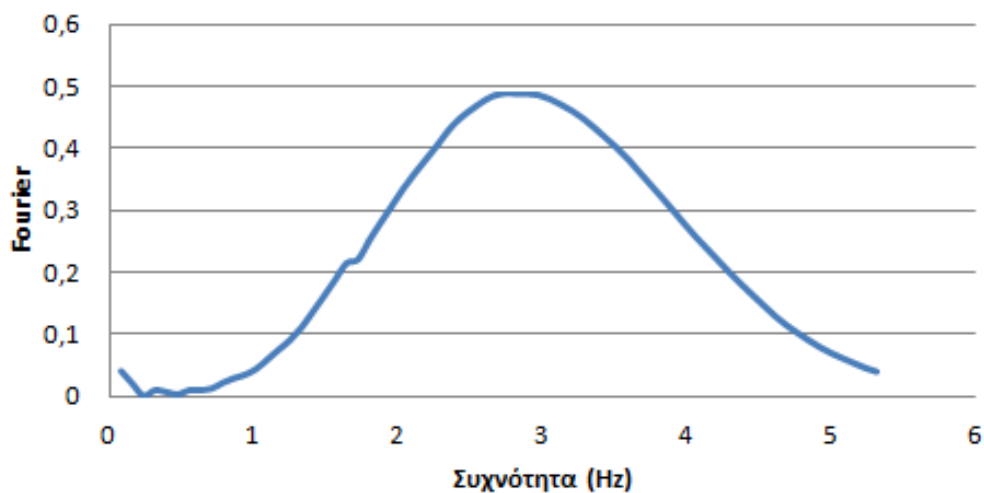
Παρατηρείται πως η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης για τα δύο κομβικά σημεία της κοιλάδας μεγιστοποιείται στην τιμή 15,5 για συχνότητα περίπου 3,7Hz, ενώ το μέγιστο του φάσματος Fourier στο σημείο A για συχνότητα περίπου 3Hz, μιάμιση, δηλαδή φορά ίση με την διέγερση που του ασκείται.

4.4.4.4 Ταχύτητας διάδοσης διατμητικού κύματος $V_s=110\text{m/s}$ και διέγερση Ricker 2Hz

Σε αυτή την περίπτωση, 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 $f=2\text{Hz}$, ενώ η ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος είναι ίση με $V_s=110\text{m/s}$. Με χρήση των χρονοϊστοριών οριζόντιας επιτάχυνσης έγινε ο ζητούμενος προσδιορισμός του συντελεστή ενίσχυσης της διέγερσης μεταξύ των σημείων A και B, δηλαδή μεταξύ του κατώτερου σημείου της κοιλάδας και της επιφάνειας του εδάφους.

Έτσι, παρατίθενται τα εξής διαγράμματα:

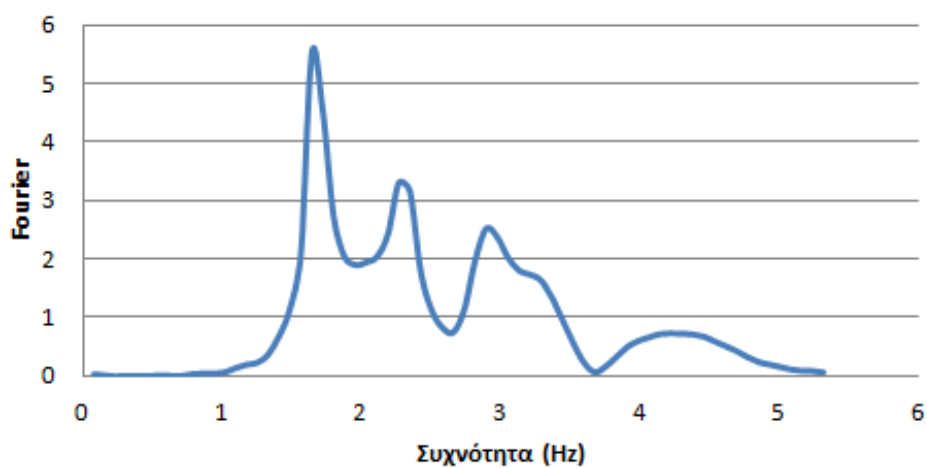
σημείο Α



Διάγραμμα 4.40

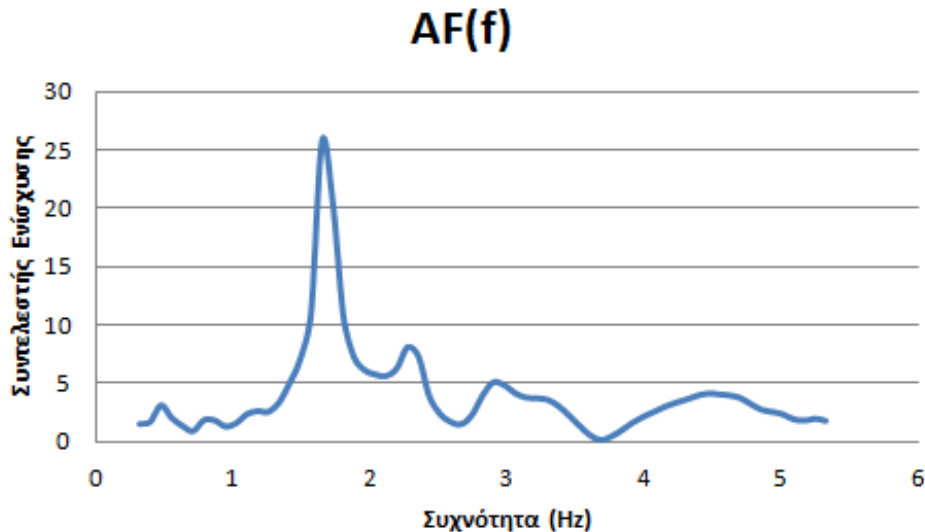
Φάσμα Fourier στο κατώτερο σημείο της κοιλάδας συναρτήσεως της συχνότητας f

σημείο Β



Διάγραμμα 4.41

Φάσμα Fourier στην επιφάνεια του εδάφους συναρτήσεως της συχνότητας f



Διάγραμμα 4.42

Συντελεστής ενίσχυσης AF συναρτήσει της συχνότητας f

Παρατηρείται πως η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης για τα δύο κομβικά σημεία της κοιλάδας μεγιστοποιείται στην τιμή 25,6 για συχνότητα περίπου 1,6Hz, ενώ το μέγιστο του φάσματος Fourier στο σημείο A για συχνότητα περίπου 3Hz, μιάμιση, δηλαδή φορά ίση με την διέγερση που του ασκείται.

Συμπερασματικά, ενώ το μέγιστο του φάσματος Fourier στο σημείο A εξαρτάται, σε κάθε περίπτωση – συνδυασμό, από τη διέγερση που ασκείται στο μοντέλο, καθώς παρατηρείται τιμή 3Hz για διέγερση Ricker 2Hz και 1,5Hz για διέγερση Ricker 1Hz, το μέγιστο της καμπύλης του συντελεστή ενίσχυσης εξαρτάται από τη ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος και μόνο, χωρίς να αλλάζει για διαφοροποίηση της διέγερσης, ακριβώς όπως και στη περίπτωση μονοδιάστατης ανάλυσης εδαφικής στρώσης που εξετάστηκε προηγουμένως.

4.4.5 Μελέτη αιολικού πάρκου επί κοιλάδας

Μετά την μελέτη της προηγούμενης περίπτωσης που αντιστοιχεί σε εδαφική κοιλάδα με έντονα διδιάστατα χαρακτηριστικά και εξετάστηκε για τέσσερις διαφορετικούς συνδυασμούς διέγερσης και ταχύτητας διατμητικού κύματος, θα προστεθεί, σε αυτό το εδάφιο, μια ακόμα παράμετρος και θα γίνει αριθμητική διερεύνηση για την περίπτωση ενός αιολικού πάρκου τεσσάρων ανεμογεννητριών, που υποβάλλονται σε σεισμική διέγερση.

Για τις τέσσερις ανεμογεννήτριες, έγινε θεώρηση θεμελίωσης τους σε περιοχή με γεωμορφολογική ανωμαλία, δηλαδή σε κοιλάδα εδαφικών αποθέσεων, με σκοπό την εκτίμηση της επίδρασης των τοπικών και πιο συγκεκριμένα των γεωμορφολογικών συνθηκών, πέραν των εδαφικών και στρωματογραφικών, στην καταπόνηση και κατ' επέκταση την απόκριση των συγκεκριμένων ανεμογεννητριών. Η διδιάστατη αυτή ανάλυση στοχεύει στην εξαγωγή

αποτελεσμάτων, τα οποία βρίσκονται πιο κοντά στις πραγματικές συνθήκες, γεγονός που δε θα ήταν εύκολα εφικτό σε περίπτωση μονοδιάστατης ανάλυσης του συγκεκριμένου μοντέλου.

Οι ανεμογεννήτριες που εξετάστηκαν, θεωρήθηκαν ίδιου τύπου. Η ισχύ τους είναι ίση με 800kW, το ύψος του πυλώνα, ή αλλιώς η απόσταση του άξονα του ρότορα από την επιφάνεια του εδάφους, ορίζεται στα 50m και 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. Η ιδιοσυχνότητα του πυλώνα 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 και για τις τέσσερις.

Για να μελετηθούν οι ανεμογεννήτριες και να πραγματοποιηθούν οι επιμέρους αναλύσεις, λαμβάνονται ως τέσσερις μονοβάθμιοι ταλαντωτές μάζας, οι οποίοι θεμελιώνονται επιφανειακά στο έδαφος. Οι θεωρούμενοι μονοβάθμιοι ταλαντωτές, είναι ίδιου τύπου με 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%. Έχει ήδη αναφερθεί πως 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, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις που εξετάστηκαν.

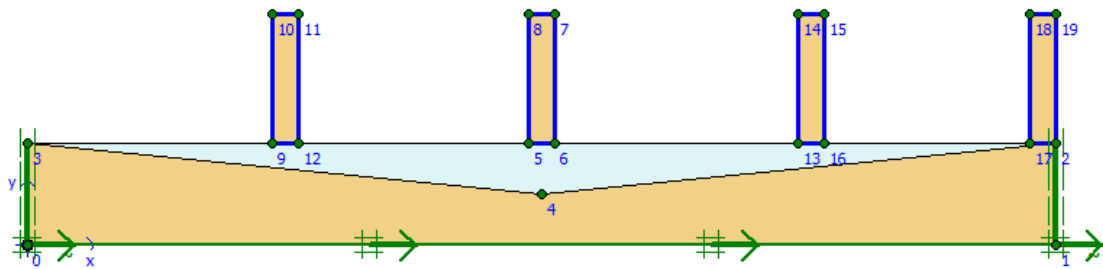
Ο συντελεστής ακαμψίας των πακτωμένων μονοβάθμιων ταλαντωτών υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

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

Τόσο το βραχώδες υπόβαθρο, όσο και το εδαφικό υλικό επί αυτού, δεν παρουσιάζουν σταθερό πάχος H . Με άλλα λόγια, η θεώρηση που έγινε είναι πως η στρωματογραφία παύει να είναι οριζόντια. Η επιφάνεια του εδάφους, ωστόσο διατηρείται οριζόντια και το πάχος της εδαφικής απόθεσης πάνω από το σκληρό υπόβαθρο λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του $H = 20\text{m}$. Το πάχος αυτό μειώνεται γραμμικά, εκατέρωθεν από το κέντρο της εδαφικής απόθεσης, ώσπου τελικά μηδενίζεται και στην επιφάνεια του εδάφους συναντάται πλέον το βραχώδες υλικό του υποβάθρου. Για την εδαφική αυτή απόθεση της κοιλάδας λαμβάνονται το ειδικό βάρος $\gamma = 17\text{kN/m}^3$ και ο λόγος Poisson $\nu = 0,3$.

Στα πλαίσια της προσομοίωσης της ανεμογεννήτριας στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS, οι μονοβάθμιοι ταλαντωτές

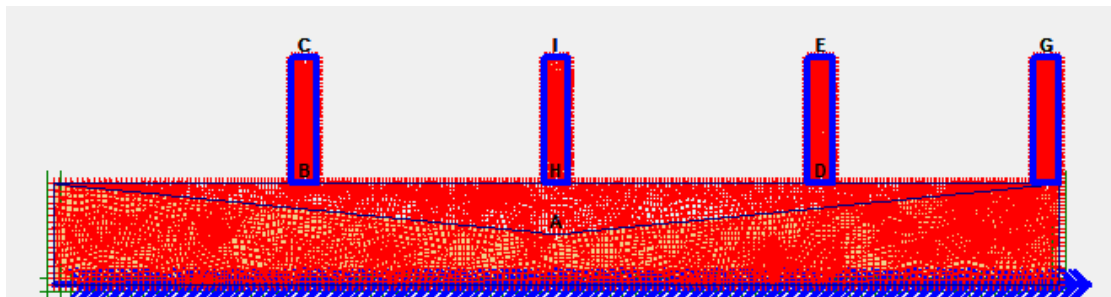
προσομοιώνονται ως πλαισιακοί φορείς ίδιου τύπου, ύψους 50m και μήκους 10m. Οι θέσεις θεμελίωσης των ταλαντωτών επιλέχθηκαν στρατηγικά, ώστε να αντιπροσωπεύουν κάθε σημείο της εδαφικής απόθεσης της κοιλάδας. Έτσι, επιλέχθηκε ο πρώτος ταλαντωτής σε απόσταση 100m από την αρχή της εδαφικής απόθεσης, ο δεύτερος στο κέντρο της εδαφικής απόθεσης, ο τρίτος σε απόσταση 300m από την αρχή της εδαφικής στρώσης, αντιδιαμετρικά με τον πρώτο και ο τέταρτος στο τέλος της (Εικόνα 4.9).



Εικόνα 4.9

Προσομοίωμα αναπαράστασης αιολικού πάρκου σε εδαφική κοιλάδα

Προκειμένου να εξεταστεί το μοντέλο ορίστηκαν 9 σημεία σε κομβικές θέσεις (Εικόνα 4.10). Το σημείο A ορίζεται στο κατώτερο σημείο της κοιλάδας, τα σημεία B, H, D, F στις βάσεις των ταλαντωτών ή αλλιώς στην επιφάνεια του εδάφους και τα σημεία C, I, E, G στις κορυφές τους, όπως φαίνεται στην εικόνα.



Εικόνα 4.10

Προσομοίωμα αναπαράστασης αιολικού πάρκου σε εδαφική κοιλάδα (PLAXIS)

Μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS υπολογίστηκαν οι χρονοϊστορίες της οριζόντιας επιτάχυνσης a_x στα παραπάνω σημεία, που οφείλονται στον επιβαλλόμενο παλμό Ricker στη βάση του εδαφικού στρώματος. Στη συνέχεια, με τη χρήση του λογισμικού SeismoSignal της SeismoSoft εξάχθηκαν τα φάσματα Fourier για τα σημεία αυτά μέσω του μετασχηματισμού Fourier (Fast Fourier Transformation - FFT) των αντιστοίχων φασμάτων χρονοϊστορίας της οριζόντιας επιτάχυνσης

Σε συνέχεια της προηγούμενης μελέτης, που αφορά σε εδαφική κοιλάδα χωρίς ανεμογεννήτρια – ταλαντωτή, εξετάστηκαν εξίσου τέσσερις συνδυασμοί διέγερσης και ταχύτητας διατμητικού κύματος V_s .

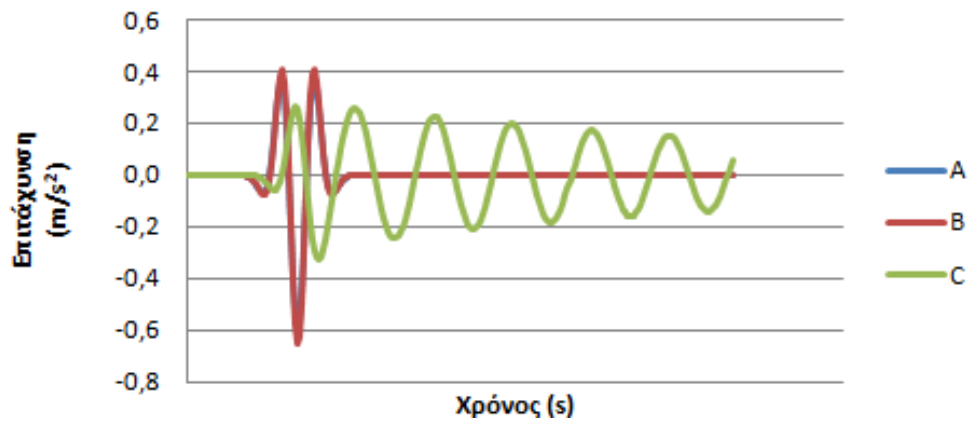
4.4.5.1 Ταχύτητας διάδοσης διατμητικού κύματος $V_s=240\text{m/s}$ και διέγερση Ricker 1Hz

Σε αυτή την περίπτωση, 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 $f=1\text{Hz}$, ενώ η ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος είναι ίση με $V_s=240\text{m/s}$. Μετά τον υπολογισμό χρονοϊστοριών οριζόντιας επιτάχυνσης στα κομβικά σημεία, 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 συναρτήσκει της συχνότητας f προκύπτει με διαίρεση των τιμών του μετασχηματισμού Fourier στην κορυφή προς τις αντίστοιχες τιμές του μετασχηματισμού Fourier στη βάση, είτε του ταλαντωτή είτε της εδαφικής κοιλάδας.

Ενδιαφέρον, λόγω της γεωμετρίας της κοιλάδας, 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 του κατώτερου σημείου της εδαφικής κοιλάδας και της επιφάνειας του εδάφους για κάθε ταλαντωτή. Ταυτόχρονα, είναι ενδιαφέρον και η παρατήρηση του συντελεστή ενίσχυσης AF μεταξύ της βάσης κάθε ταλαντωτή και της κορυφής του.

Έτσι, προκύπτουν τα εξής διαγράμματα:

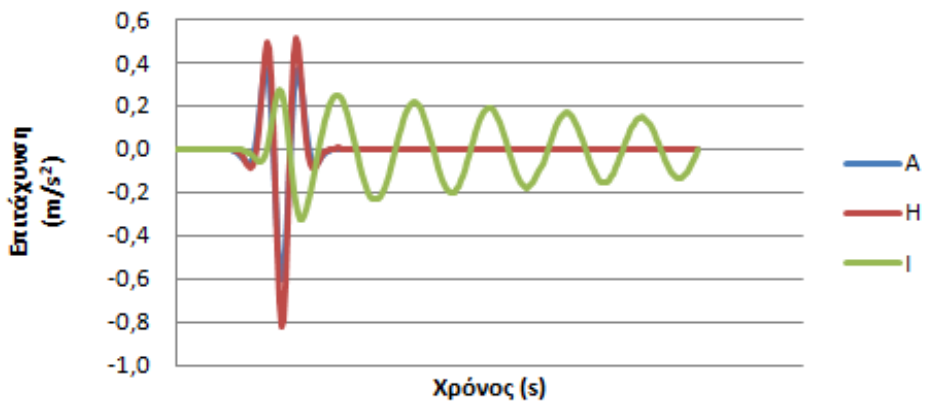
Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης



Διάγραμμα 4.43

Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης πρώτης ανεμογεννήτριας

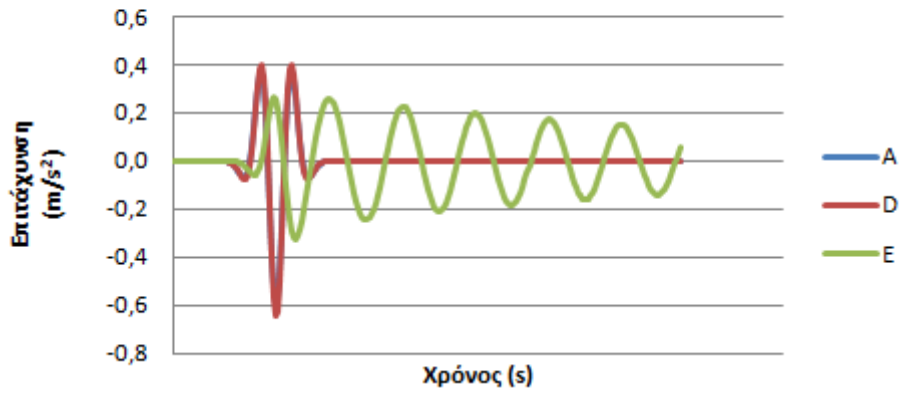
Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης



Διάγραμμα 4.44

Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης δεύτερης ανεμογεννήτριας

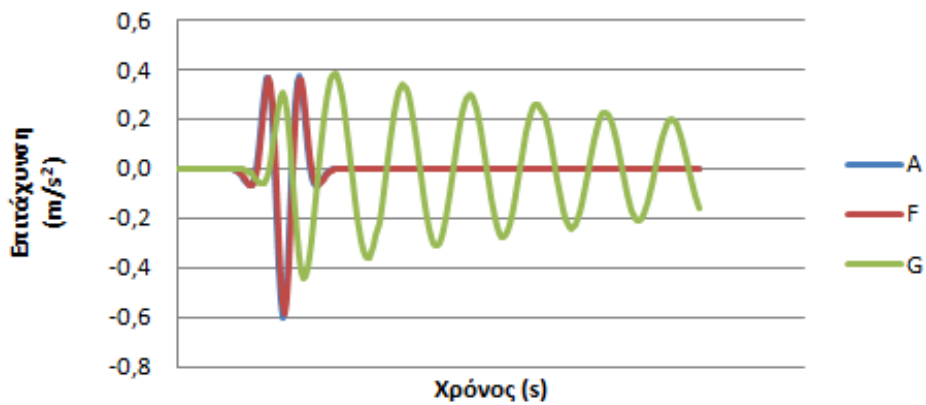
Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης



Διάγραμμα 4.45

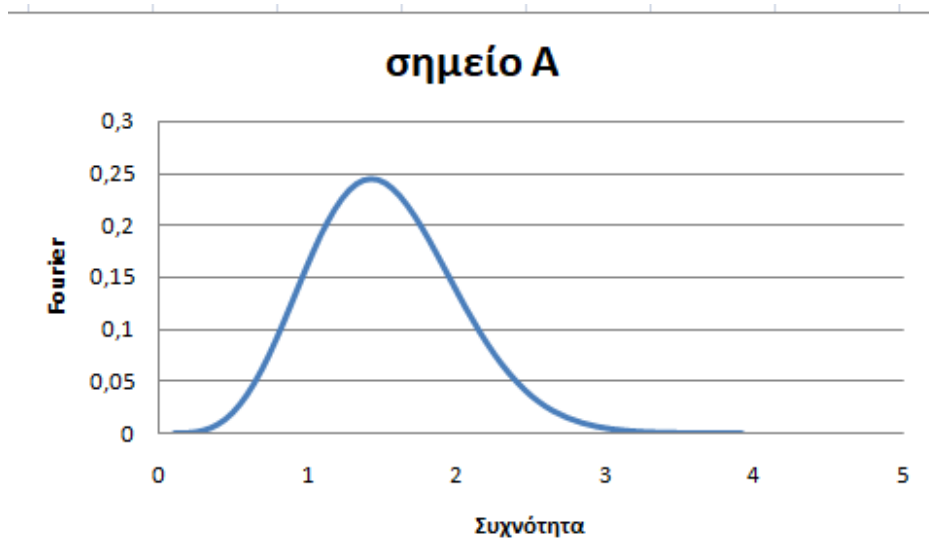
Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης τρίτης ανεμογεννήτριας

Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης



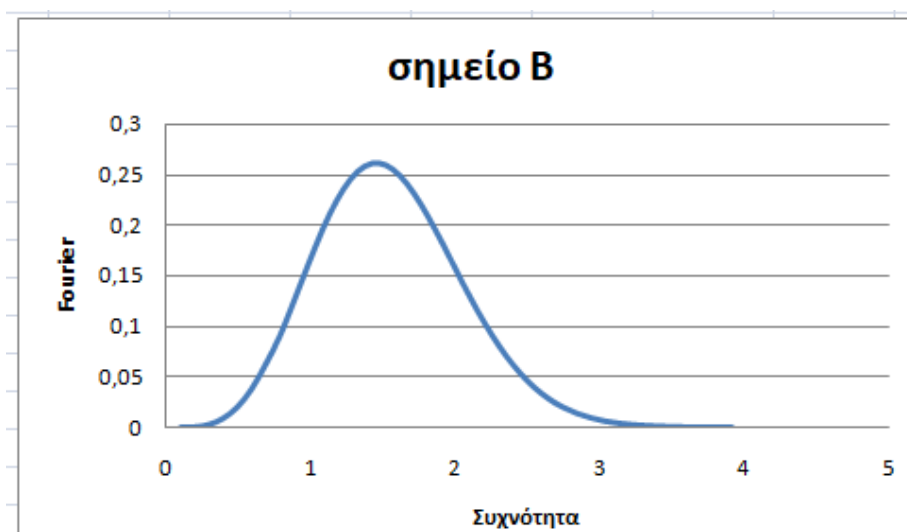
Διάγραμμα 4.46

Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης τέταρτης ανεμογεννήτριας



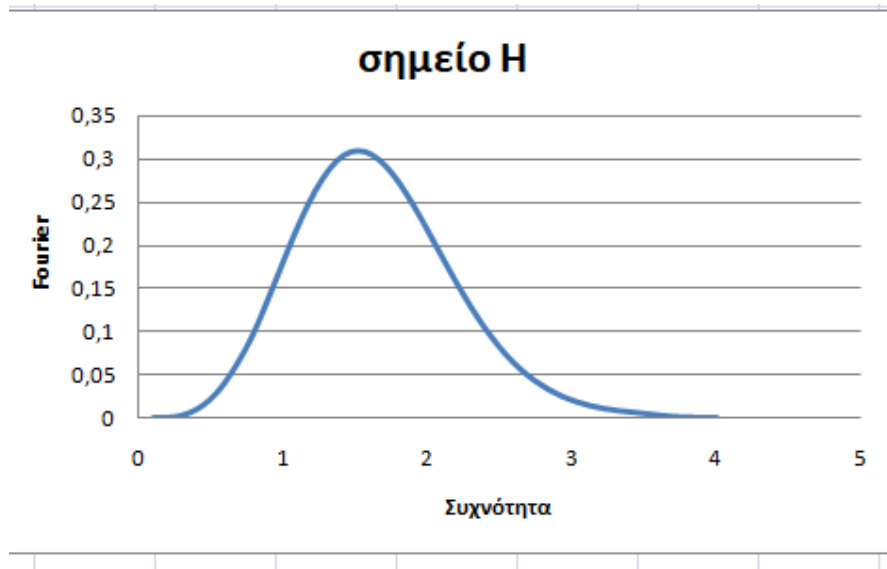
Διάγραμμα 4.47

Φάσμα Fourier του σημείου A στο κατώτερο σημείο της κοιλάδας συναρτήσεως της συχνότητας f (Hz)



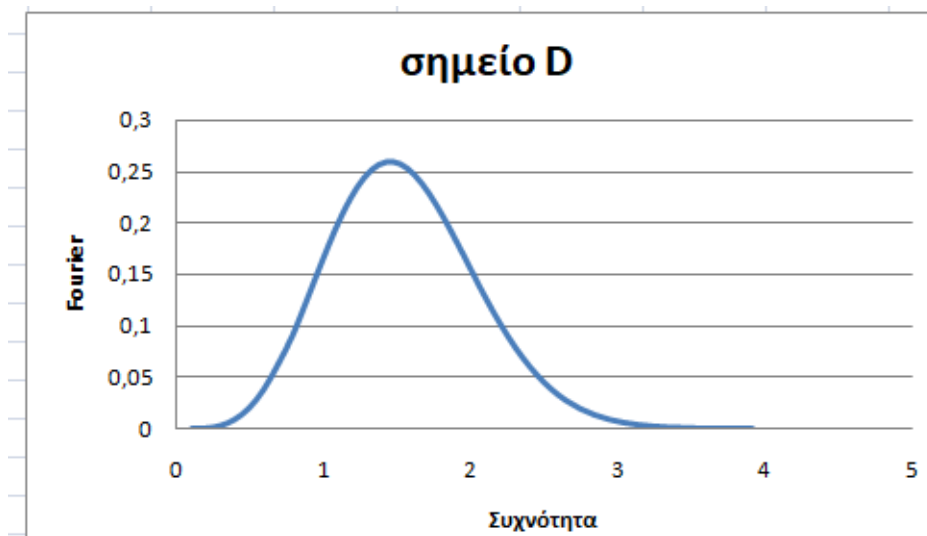
Διάγραμμα 4.48

Φάσμα Fourier του σημείου B στην επιφάνεια του εδάφους της πρώτης ανεμογεννήτριας συναρτήσεως της συχνότητας f (Hz)



Διάγραμμα 4.49

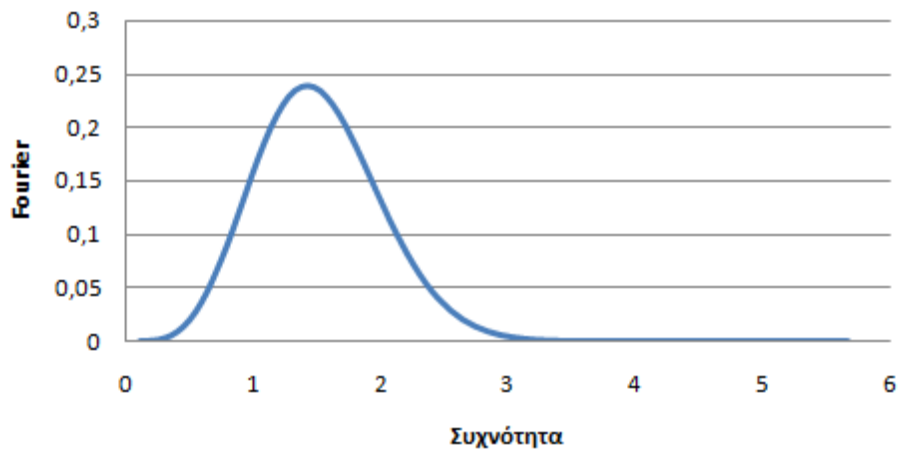
Φάσμα Fourier του σημείου H στην επιφάνεια του εδάφους της δεύτερης ανεμογεννήτριας συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)



Διάγραμμα 4.50

Φάσμα Fourier του σημείου D στην επιφάνεια του εδάφους της τρίτης ανεμογεννήτριας συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)

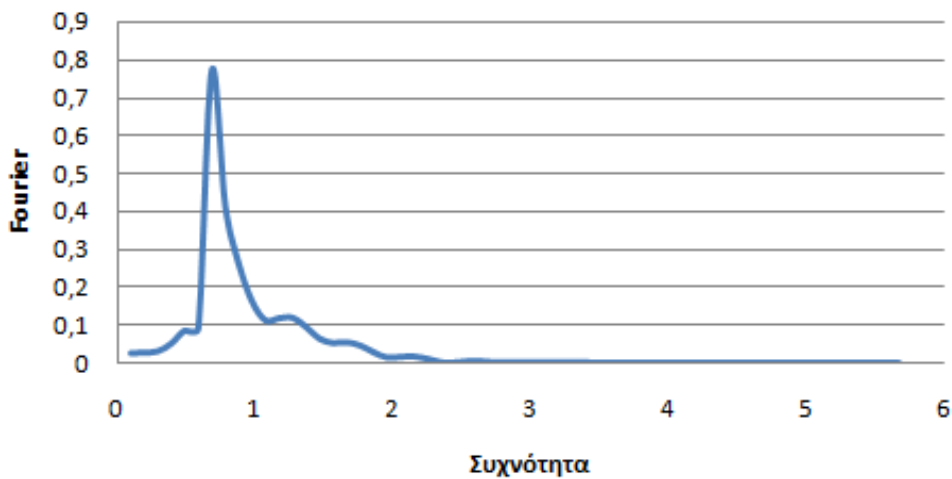
σημείο F



Διάγραμμα 4.51

Φάσμα Fourier του σημείου F στην επιφάνεια του εδάφους της τέταρτης ανεμογεννήτριας συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)

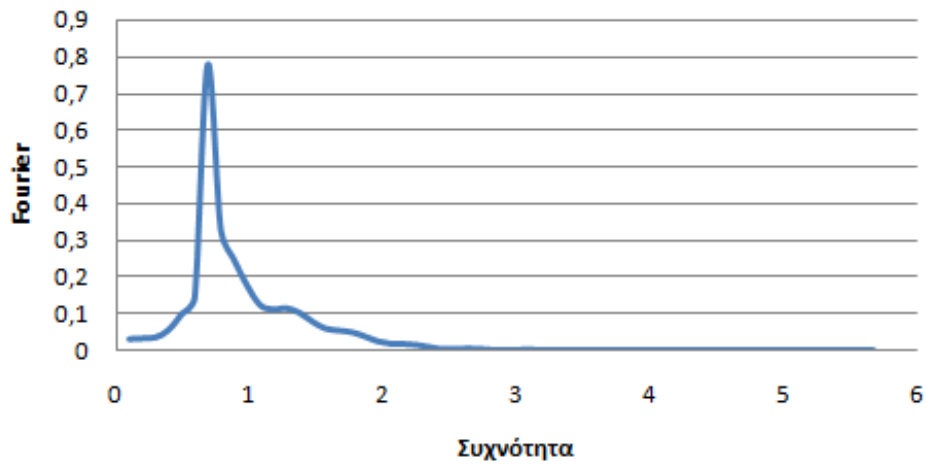
σημείο C



Διάγραμμα 4.52

Φάσμα Fourier του σημείου C στην κορυφή του ταλαντωτή της πρώτης ανεμογεννήτριας συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)

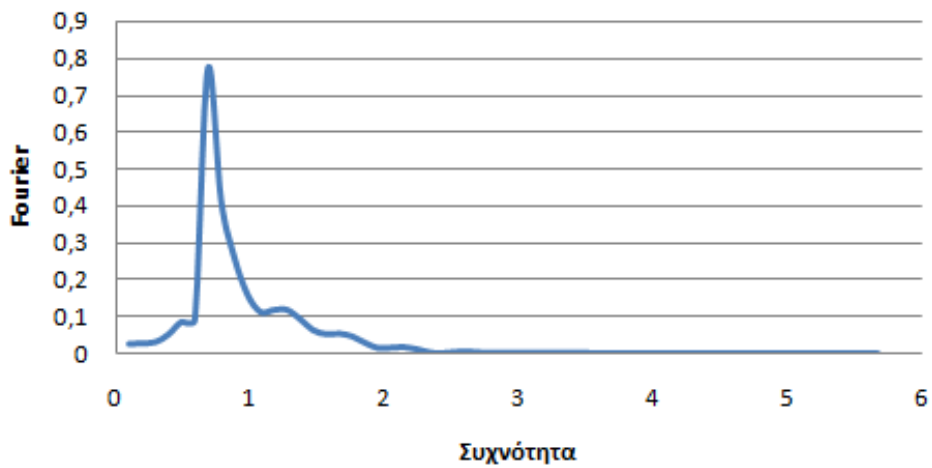
σημείο Ι



Διάγραμμα 4.53

Φάσμα Fourier του σημείου Ι στην κορυφή του ταλαντωτή της δεύτερης ανεμογεννήτριας συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)

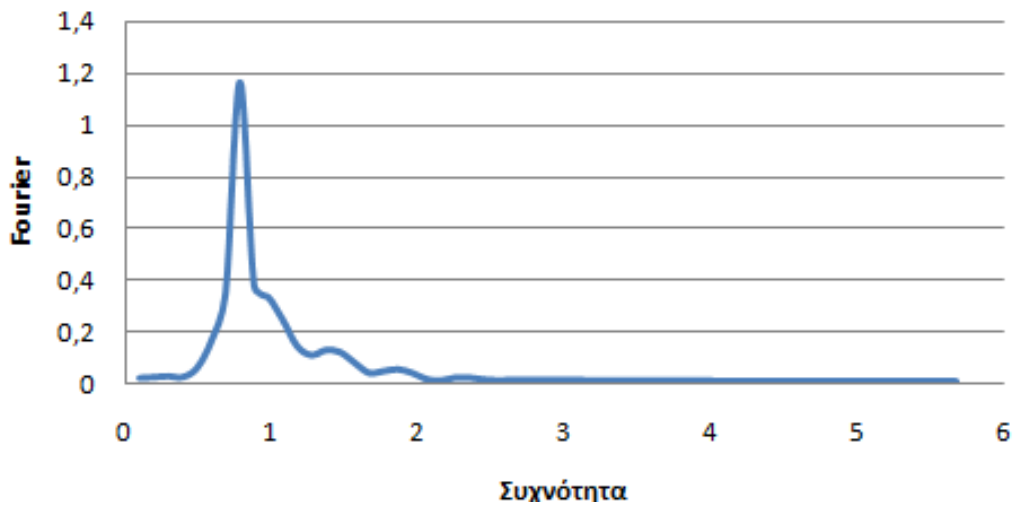
σημείο Ε



Διάγραμμα 4.54

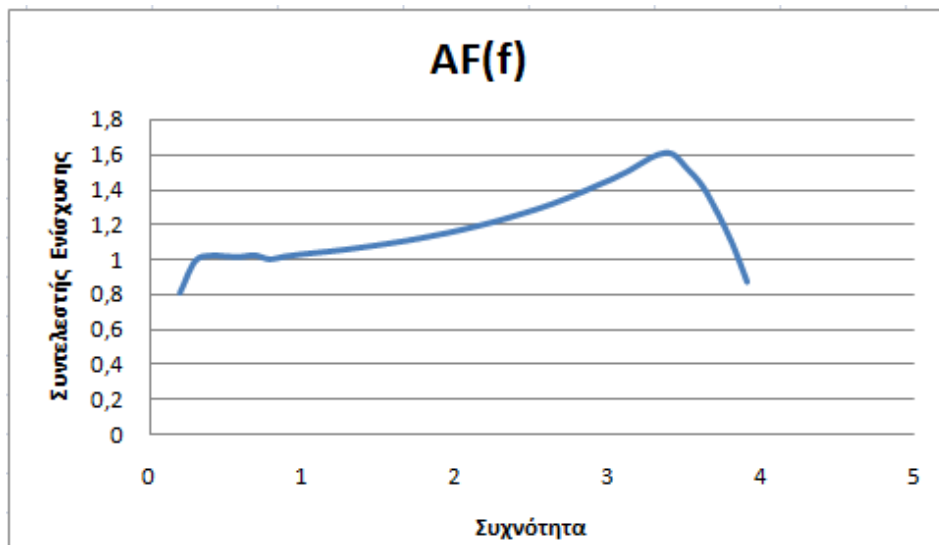
Φάσμα Fourier του σημείου Ε στην κορυφή του ταλαντωτή της τρίτης ανεμογεννήτριας συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)

σημείο G



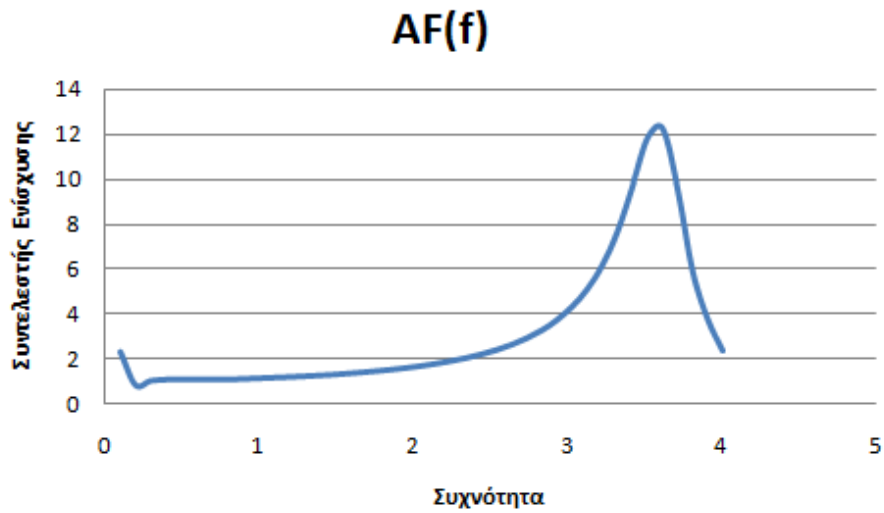
Διάγραμμα 4.55

Φάσμα Fourier του σημείου G στην κορυφή του ταλαντωτή της τέταρτης ανεμογεννήτριας συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)



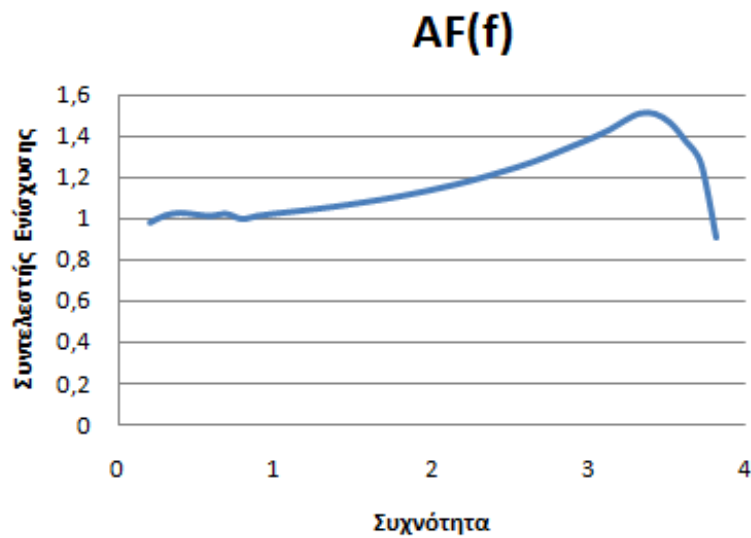
Διάγραμμα 4.56

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος B/A) συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)



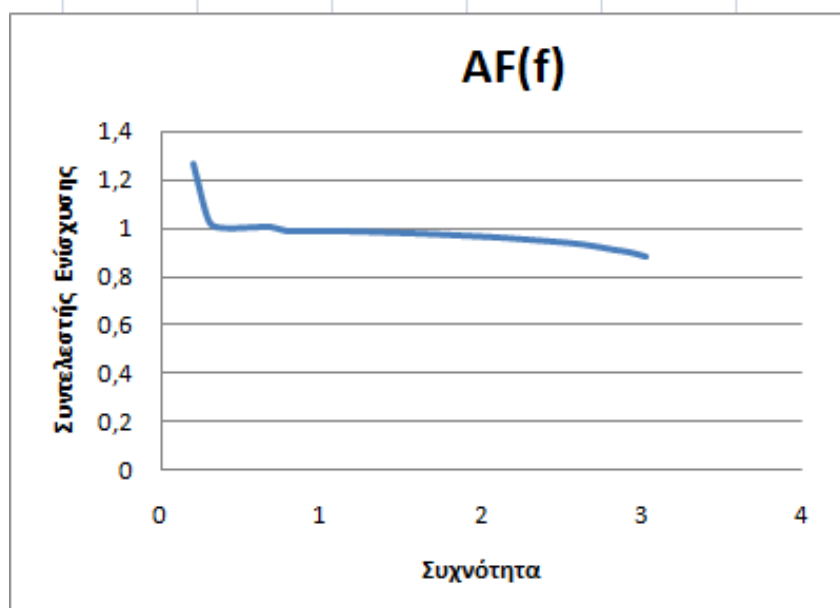
Διάγραμμα 4.57

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος H/A) συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)



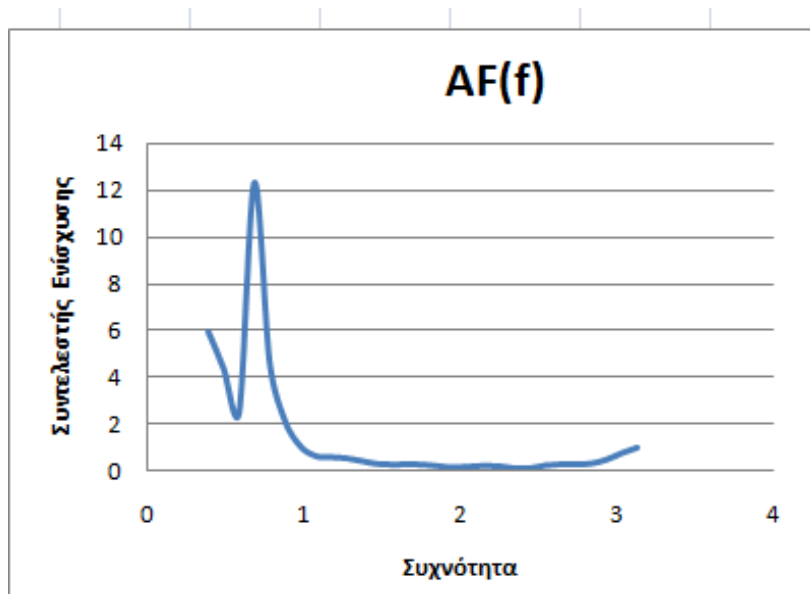
Διάγραμμα 4.58

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος D/A) συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)



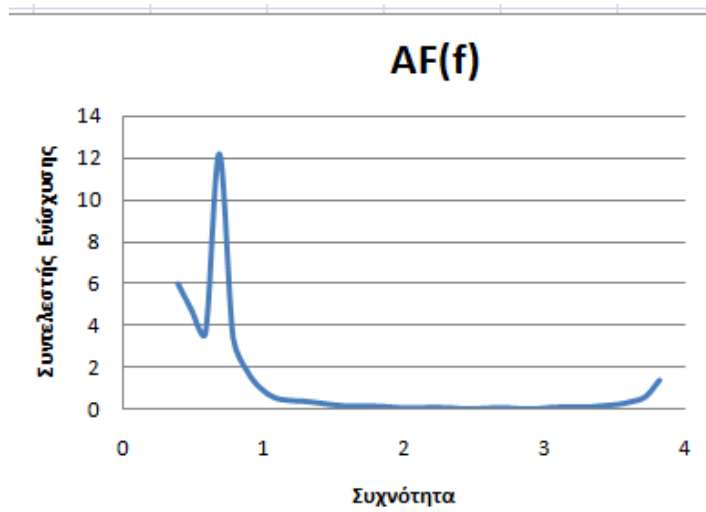
Διάγραμμα 4.59

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος F/A) συναρτήσει της συχνότητας f(Hz)



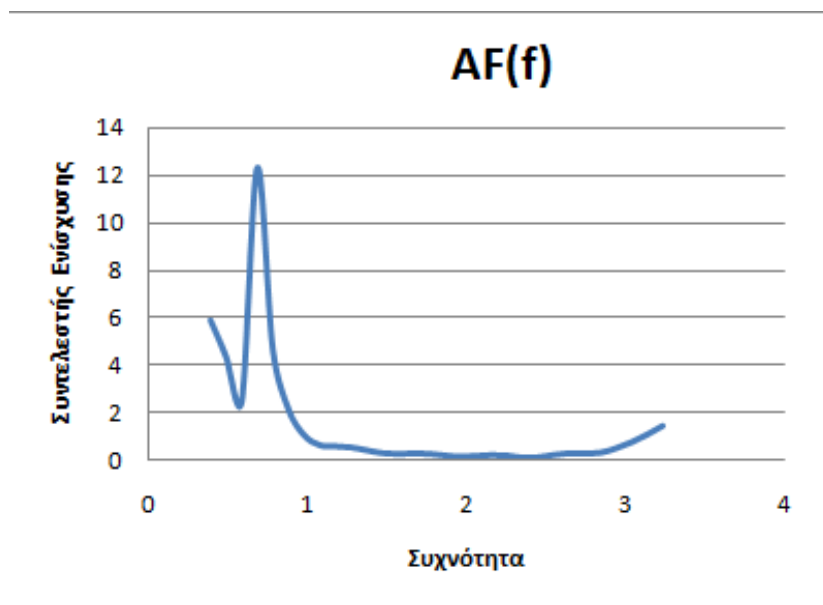
Διάγραμμα 4.60

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος C/B) συναρτήσει της συχνότητας f(Hz)



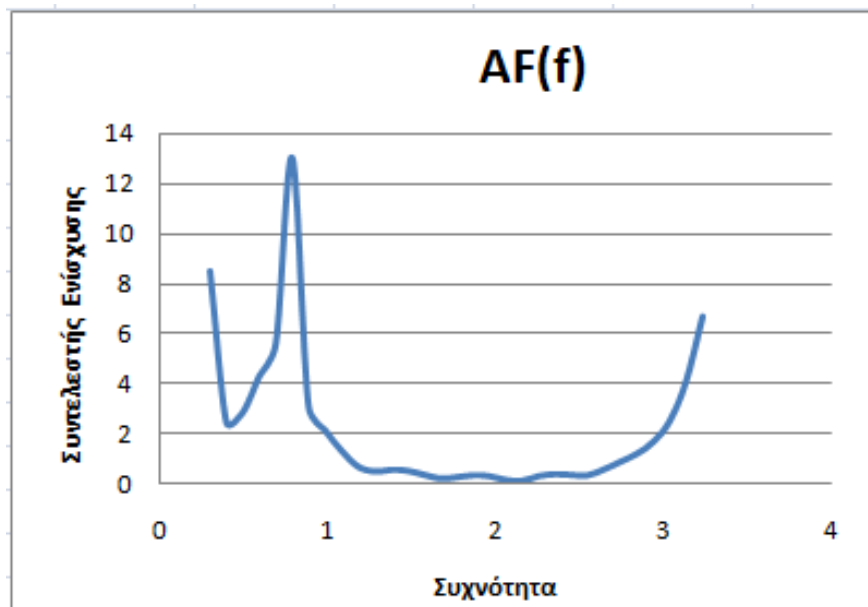
Διάγραμμα 4.61

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος I/H) συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)



Διάγραμμα 4.62

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος E/D) συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)



Διάγραμμα 4.63

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος G/F) συναρτήσεως της συχνότητας f(Hz)

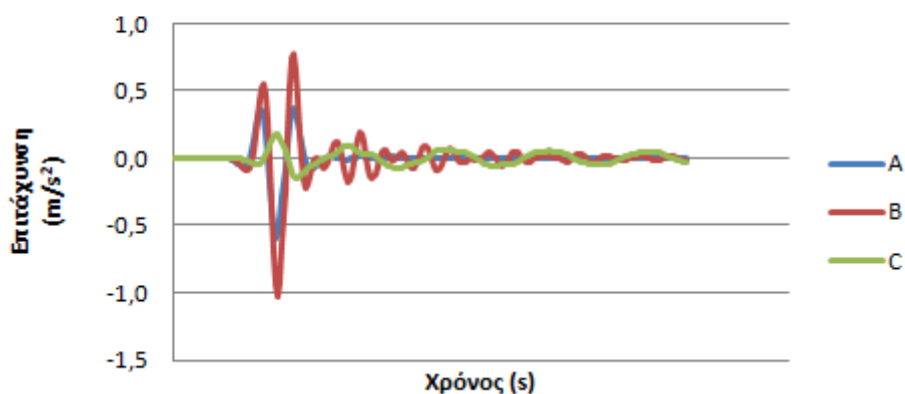
Για τον ταλαντωτή στο τέλος της κοιλάδας, παρατηρείται πως το σημείο F σχεδόν ταυτίζεται με το A και ο λόγος τους είναι κοντά στη μονάδα, με αποτέλεσμα η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης να αναπαριστά μια σχεδόν ευθεία γραμμή κοντά στο 1. Επιπλέον, η πρώτη και τρίτη ανεμογεννήτρια έχουν όμοια συμπεριφορά μεταξύ τους σε κάθε φάση της μελέτης. Όσον αφορά τους συντελεστές ενίσχυσης των ταλαντωτών, σε όλες τις ανεμογεννήτριες, εκτός της τελευταίας που η καμπύλη παρουσιάζει μέγιστο για συχνότητα ίση με 0,8Hz ίση με την ιδιοσυχνότητα των ταλαντωτών, το έδαφος είναι σχετικά μαλακό για αυτό αυξάνεται η ιδιοπερίοδος και μειώνεται η ιδιοσυχνότητα, με αποτέλεσμα το μέγιστο να πραγματοποιείται για συχνότητα κοντά στα 0,7Hz.

4.4.5.2 Ταχύτητας διάδοσης διατμητικού κύματος $V_s=110\text{m/s}$ και διέγερση Ricker 1Hz

Σε αυτή την περίπτωση, 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 $f=1\text{Hz}$, ενώ η ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος είναι ίση με $V_s=110\text{m/s}$. Μετά τον υπολογισμό χρονοϊστοριών οριζόντιας επιτάχυνσης στα κομβικά σημεία, καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός του συντελεστή ενίσχυσης AF του ταλαντωτή αλλά και λόγω της εδαφικής απόθεσης, όπως προηγουμένως.

Έτσι, προκύπτουν τα εξής διαγράμματα:

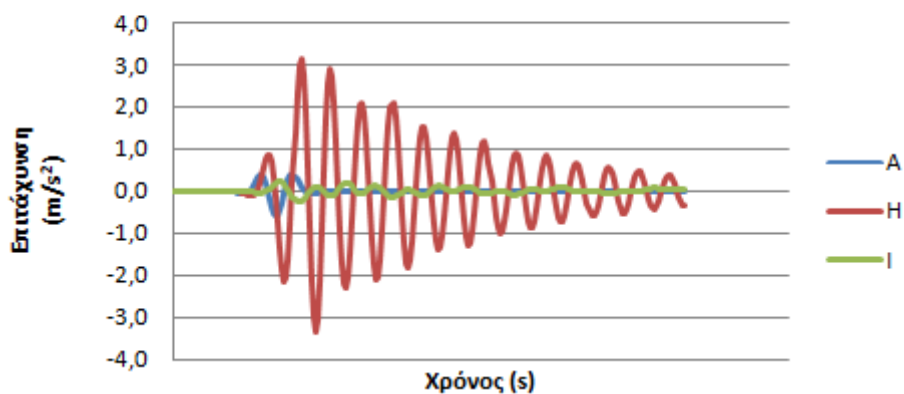
Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης



Διάγραμμα 4.64

Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης πρώτης ανεμογεννήτριας

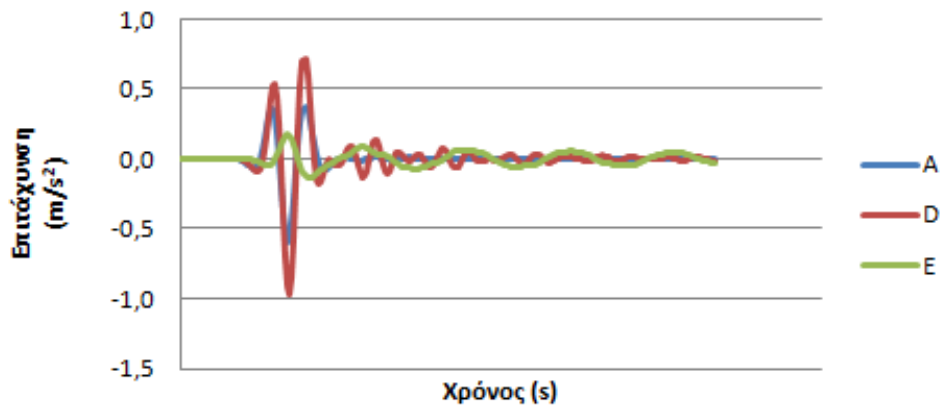
Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης



Διάγραμμα 4.65

Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης δεύτερης ανεμογεννήτριας

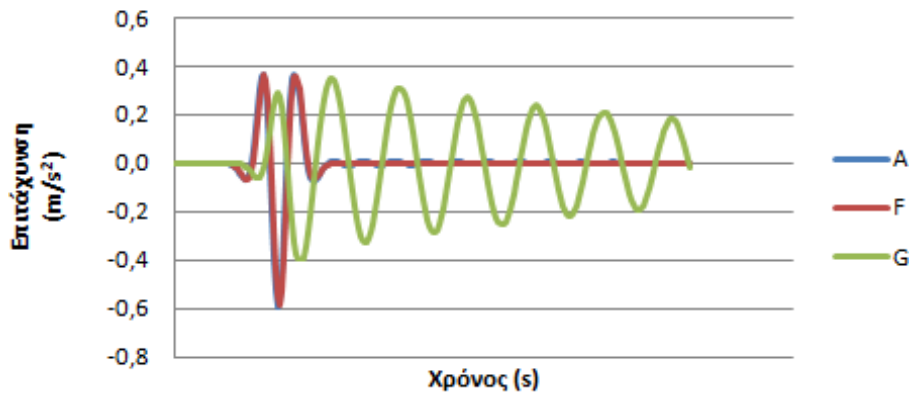
Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης



Διάγραμμα 4.66

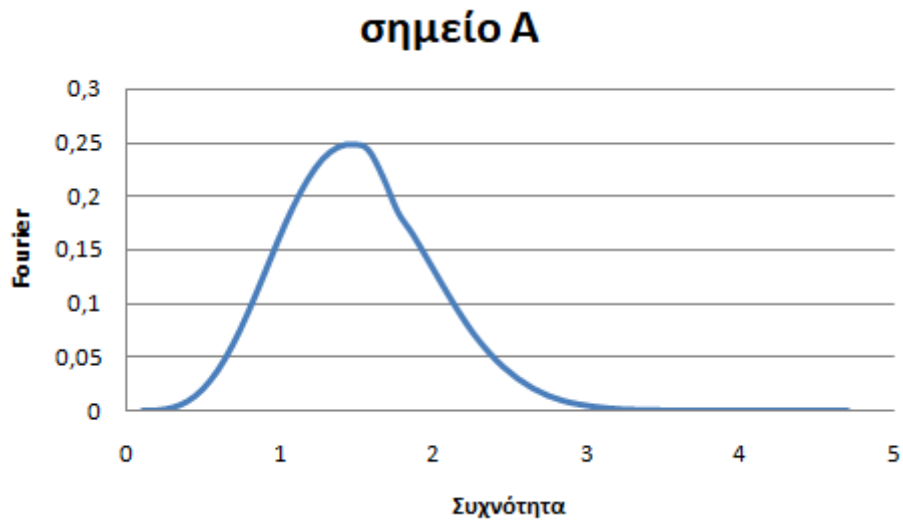
Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης τρίτης ανεμογεννήτριας

Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης



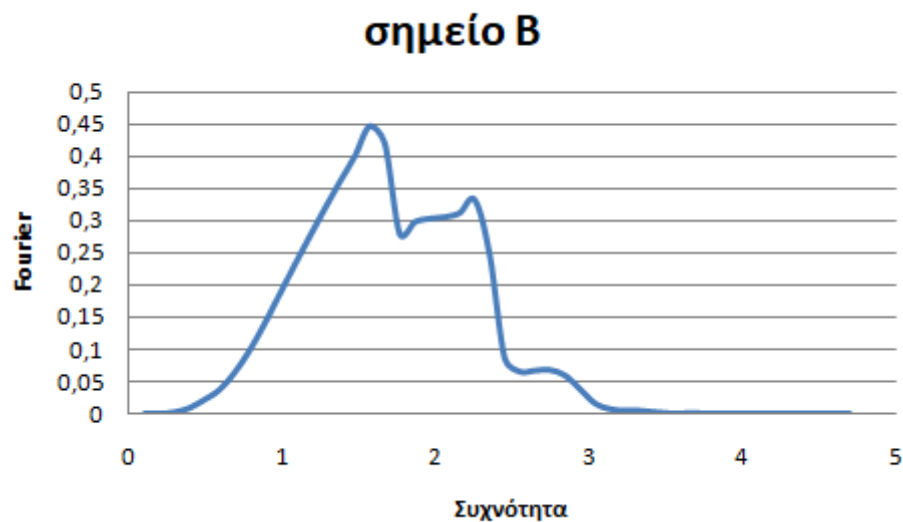
Διάγραμμα 4.67

Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης τέταρτης ανεμογεννήτριας



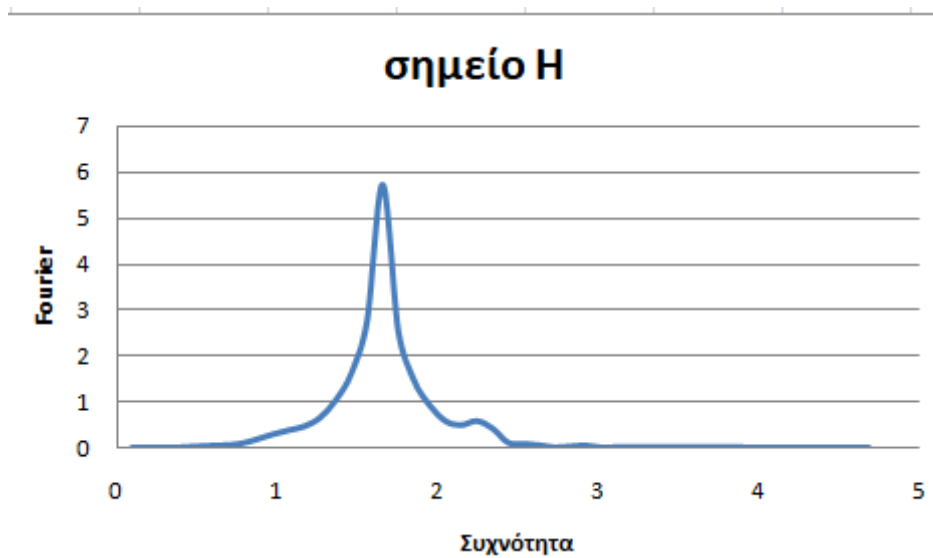
Διάγραμμα 4.68

Φάσμα Fourier του σημείου A στο κατώτερο σημείο της κοιλάδας συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)



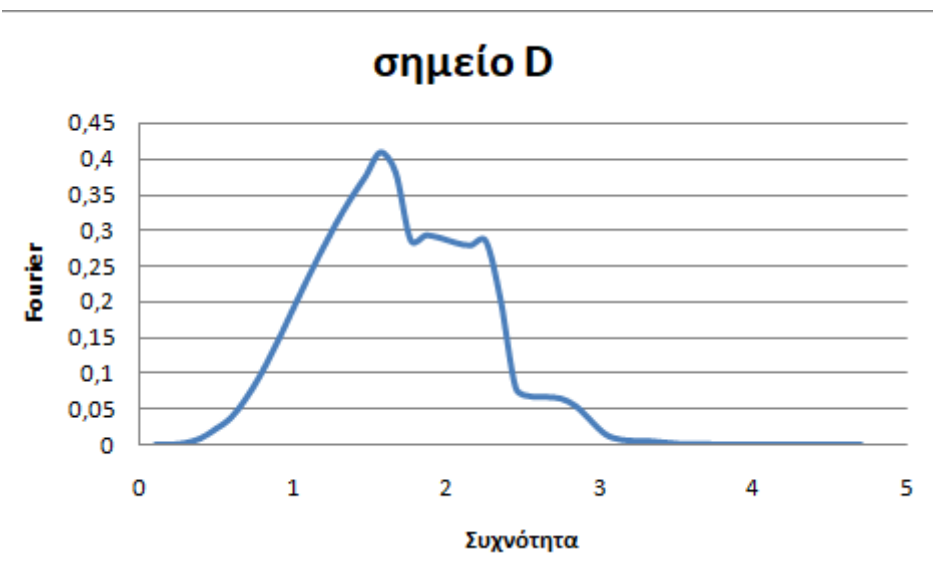
Διάγραμμα 4.69

Φάσμα Fourier του σημείου B στην επιφάνεια του εδάφους της πρώτης ανεμογεννήτριας συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)



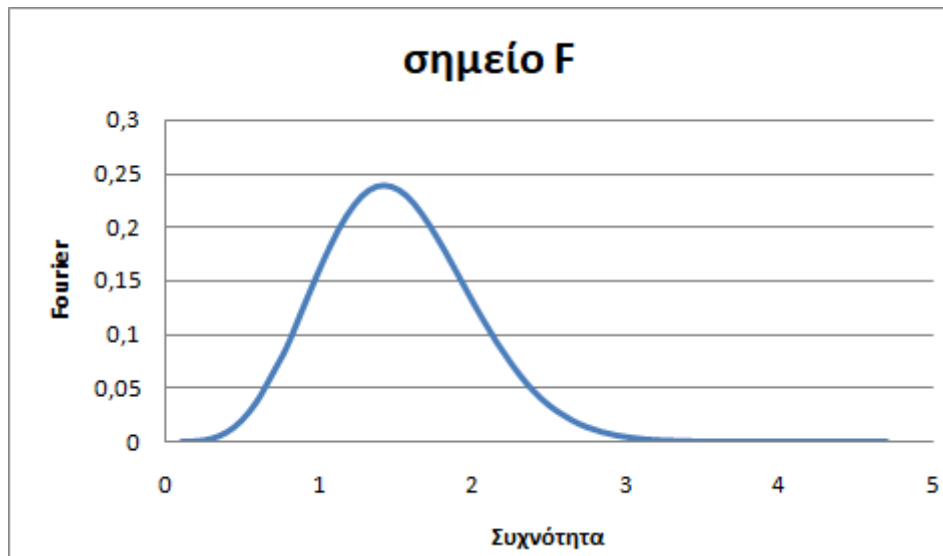
Διάγραμμα 4.70

Φάσμα Fourier του σημείου H στην επιφάνεια του εδάφους της δεύτερης ανεμογεννήτριας συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)



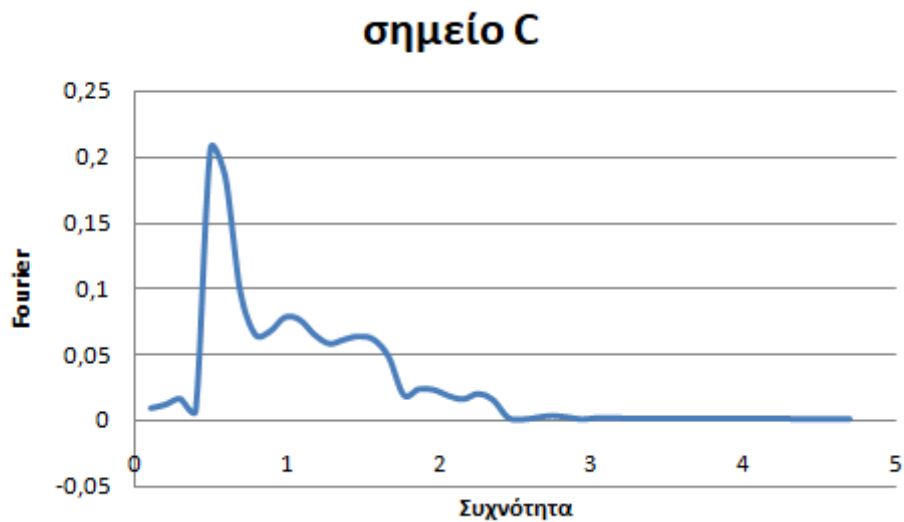
Διάγραμμα 4.71

Φάσμα Fourier του σημείου D στην επιφάνεια του εδάφους της τρίτης ανεμογεννήτριας συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)



Διάγραμμα 4.72

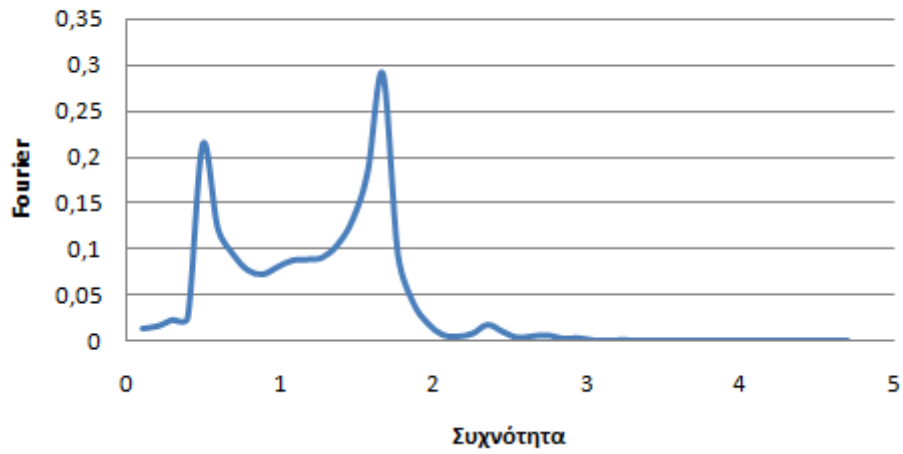
Φάσμα Fourier του σημείου F στην επιφάνεια του εδάφους της τέταρτης ανεμογεννήτριας συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)



Διάγραμμα 4.73

Φάσμα Fourier του σημείου C στην κορυφή του ταλαντωτή της πρώτης ανεμογεννήτριας συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)

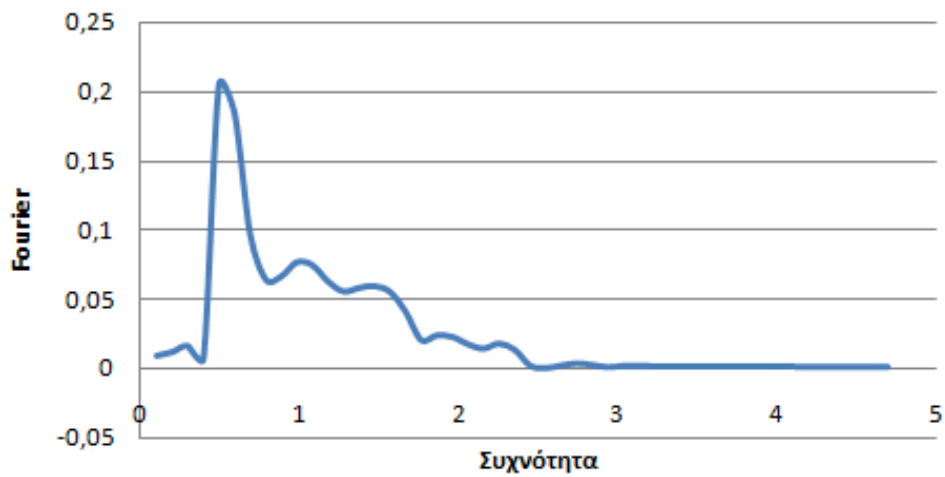
σημείο Ι



Διάγραμμα 4.74

Φάσμα Fourier του σημείου Ι στην κορυφή του ταλαντωτή της δεύτερης ανεμογεννήτριας συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)

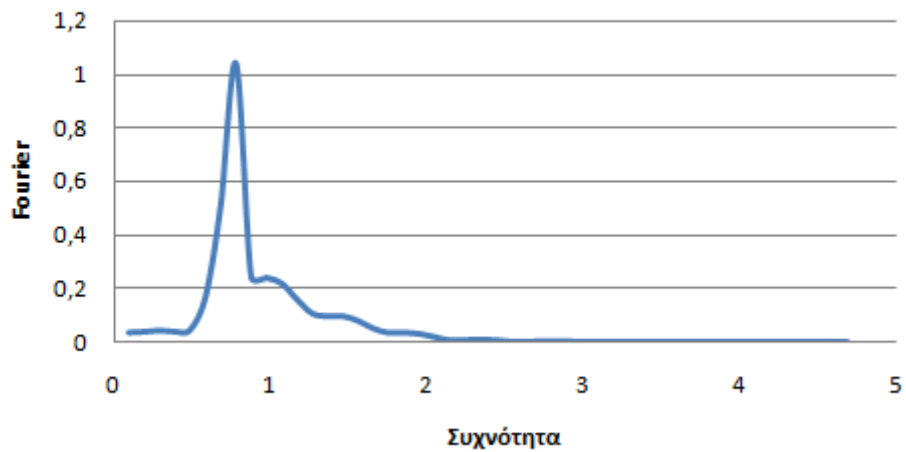
σημείο Ε



Διάγραμμα 4.75

Φάσμα Fourier του σημείου Ε στην κορυφή του ταλαντωτή της τρίτης ανεμογεννήτριας συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)

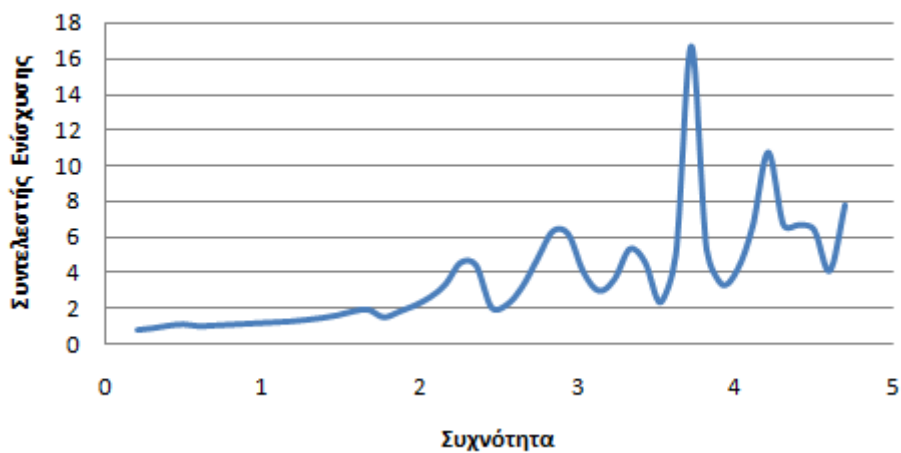
σημείο G



Διάγραμμα 4.76

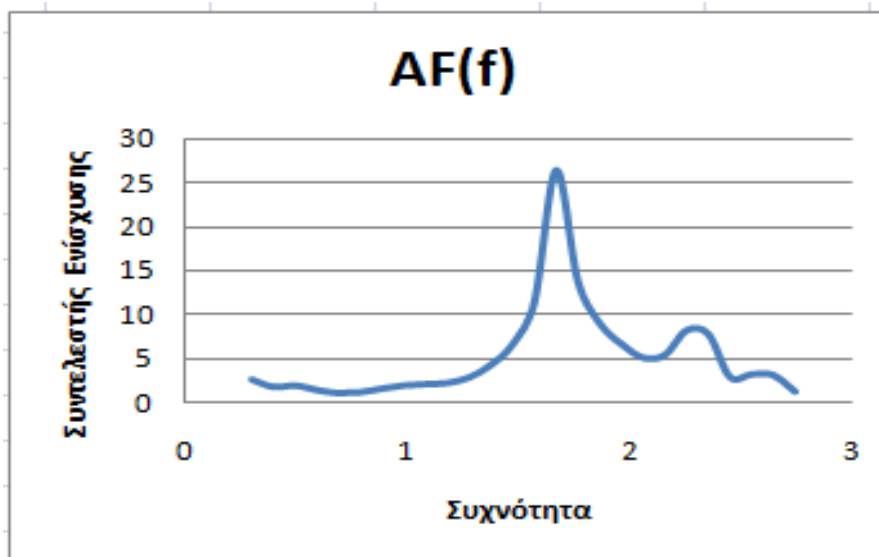
Φάσμα Fourier του σημείου G στην κορυφή του ταλαντωτή της τέταρτης ανεμογεννήτριας συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)

AF(f)



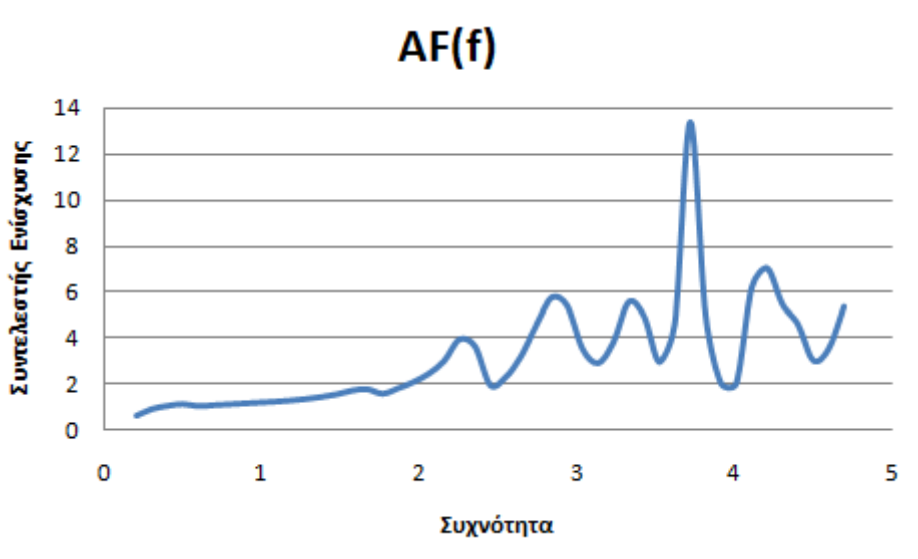
Διάγραμμα 4.77

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος B/A) συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)



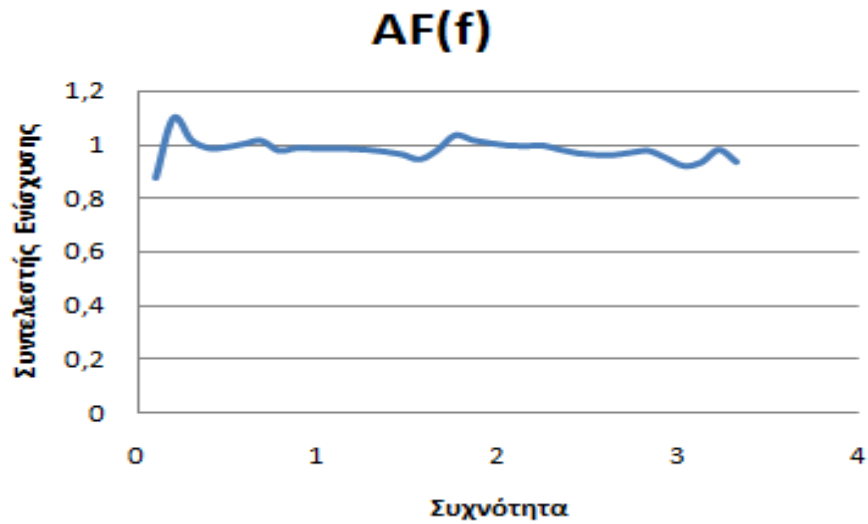
Διάγραμμα 4.78

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος H/A) συναρτήσει της συχνότητας f(Hz)



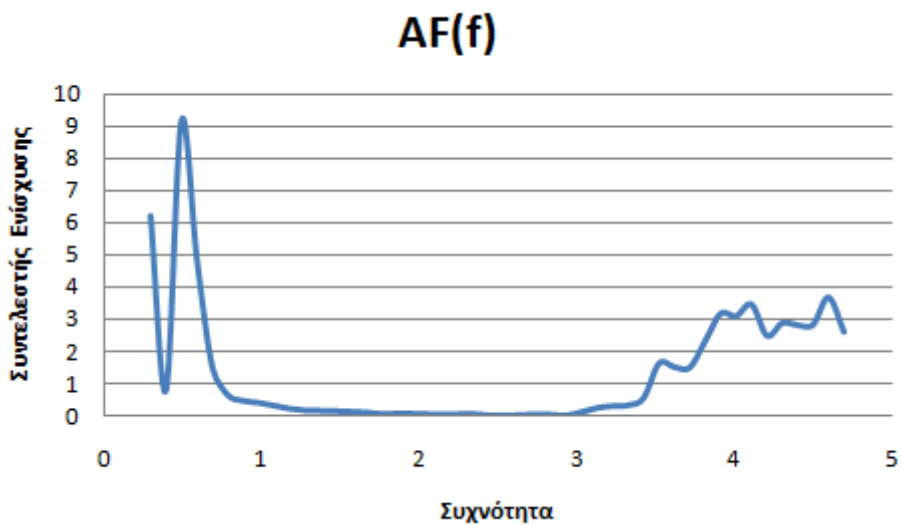
Διάγραμμα 4.79

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος D/A) συναρτήσει της συχνότητας f(Hz)



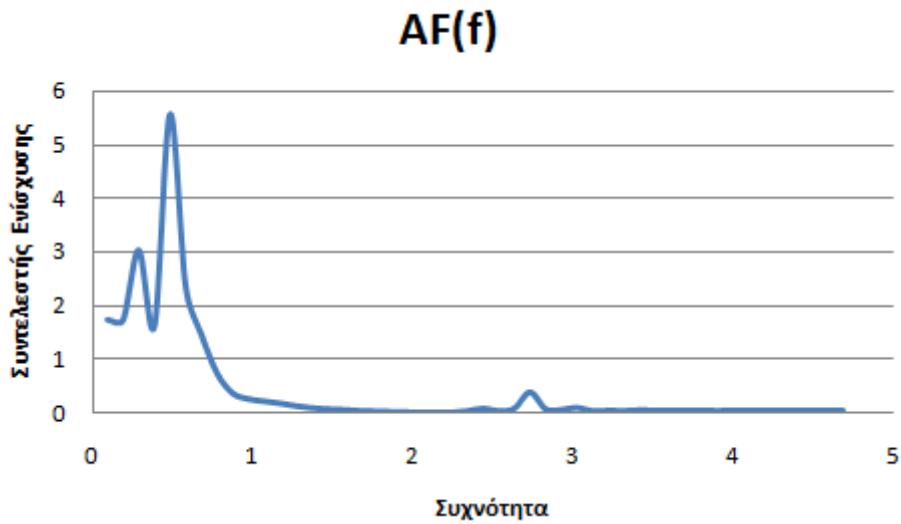
Διάγραμμα 4.80

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος F/A) συναρτήσει της συχνότητας f(Hz)



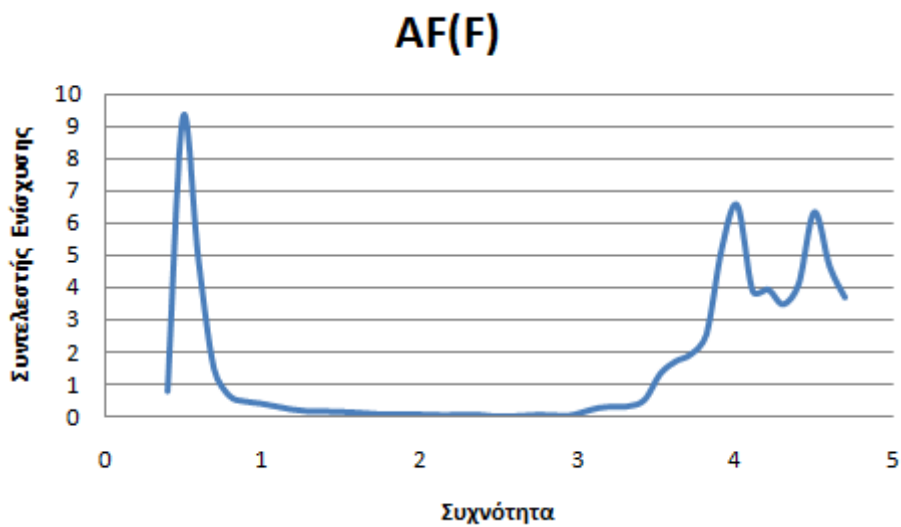
Διάγραμμα 4.81

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος C/B) συναρτήσει της συχνότητας f(Hz)



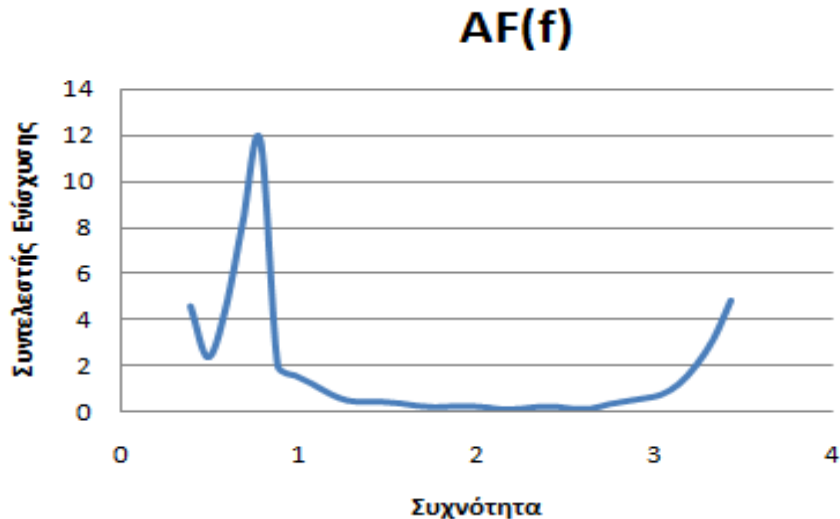
Διάγραμμα 4.82

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος I/H) συναρτήσει της συχνότητας f(Hz)



Διάγραμμα 4.83

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος E/D) συναρτήσει της συχνότητας f(Hz)



Διάγραμμα 4.84

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος G/F) συναρτήσεως της συχνότητας f(Hz)

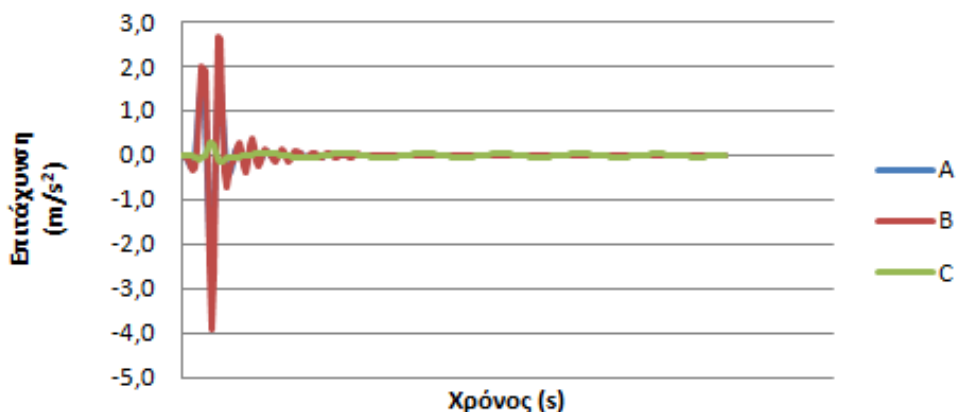
Για τον ταλαντωτή στο τέλος της κοιλάδας, παρατηρείται πως το σημείο F σχεδόν ταυτίζεται με το A και ο λόγος τους είναι κοντά στη μονάδα, με αποτέλεσμα η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης να αναπαριστά και εδώ μια σχεδόν ευθεία γραμμή κοντά στο 1. Επιπλέον, η πρώτη και τρίτη ανεμογεννήτρια έχουν όμοια συμπεριφορά μεταξύ τους σε κάθε φάση της μελέτης. Όσον αφορά τους συντελεστές ενίσχυσης των ταλαντωτών, σε όλες τις ανεμογεννήτριες, εκτός της τελευταίας που η καμπύλη παρουσιάζει μέγιστο για συχνότητα ίση με 0,8Hz ίση με την ιδιοσυχνότητα των ταλαντωτών, το έδαφος είναι ακόμα πιο μαλακό για αυτό αυξάνεται κι άλλο η ιδιοπερίοδος και μειώνεται η ιδιοσυχνότητα, με αποτέλεσμα το μέγιστο να πραγματοποιείται για συχνότητα κοντά στα 0,5Hz.

4.4.5.3 Ταχύτητας διάδοσης διατμητικού κύματος $V_s=240\text{m/s}$ και διέγερση Ricker 2Hz

Σε αυτή την περίπτωση, 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 $f=2\text{Hz}$, ενώ η ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος είναι ίση με $V_s=240\text{m/s}$. Μετά τον υπολογισμό χρονοϊστοριών οριζόντιας επιτάχυνσης στα κομβικά σημεία, καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός του συντελεστή ενίσχυσης AF του ταλαντωτή αλλά και λόγω της εδαφικής απόθεσης, όπως προηγουμένως.

Έτσι, προκύπτουν τα εξής διαγράμματα:

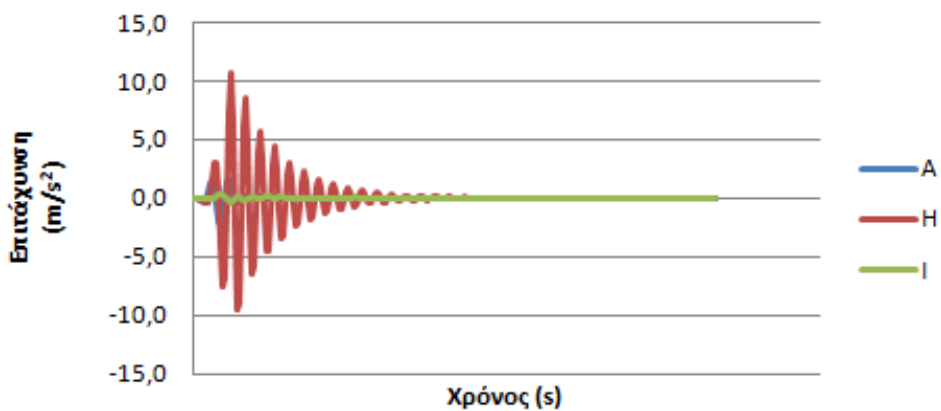
Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης



Διάγραμμα 4.85

Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης πρώτης ανεμογεννήτριας

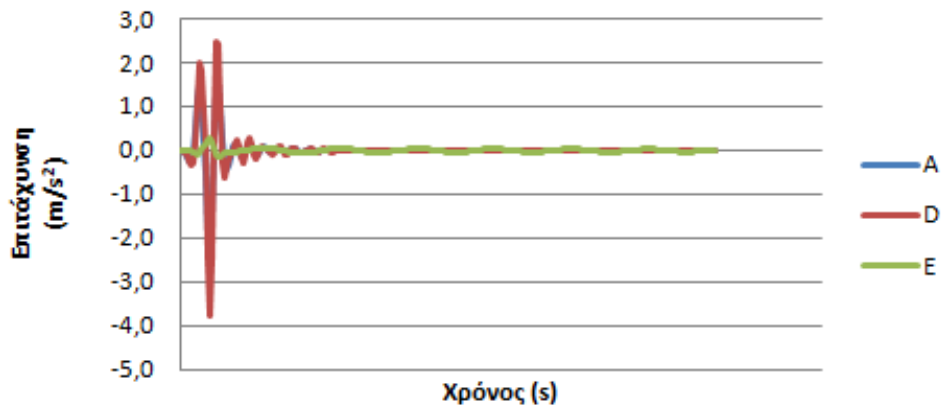
Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης



Διάγραμμα 4.86

Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης δεύτερης ανεμογεννήτριας

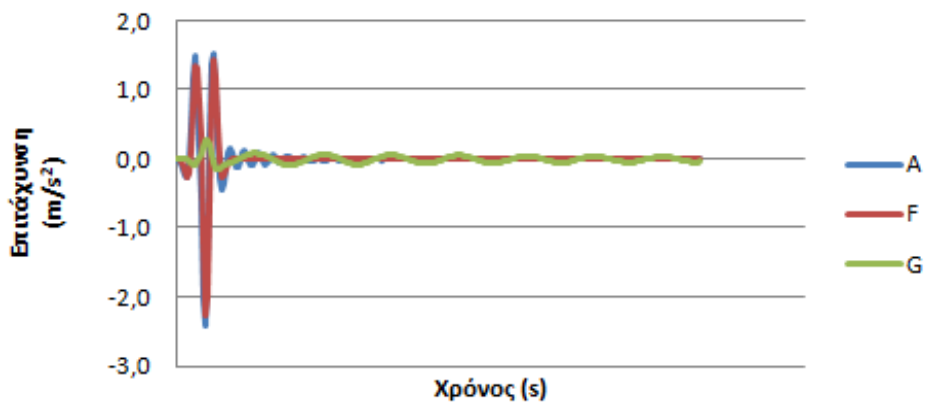
Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης



Διάγραμμα 4.87

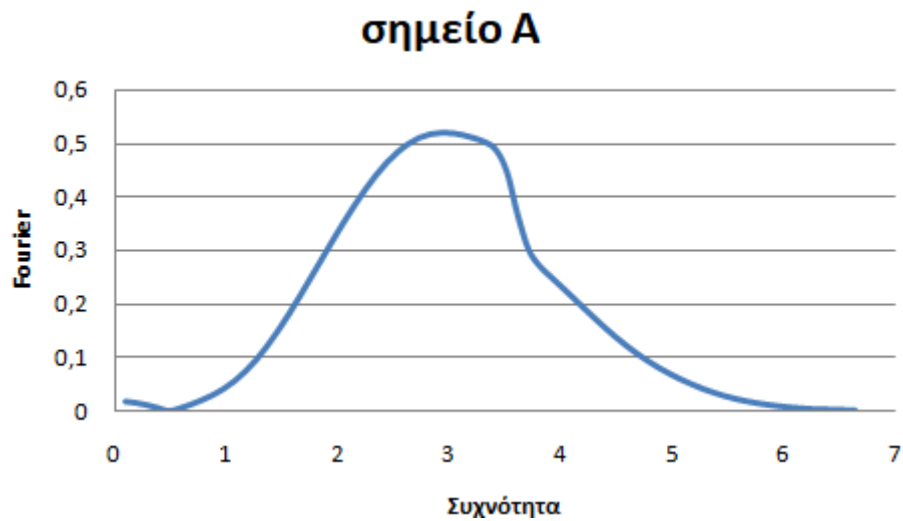
Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης τρίτης ανεμογεννήτριας

Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης



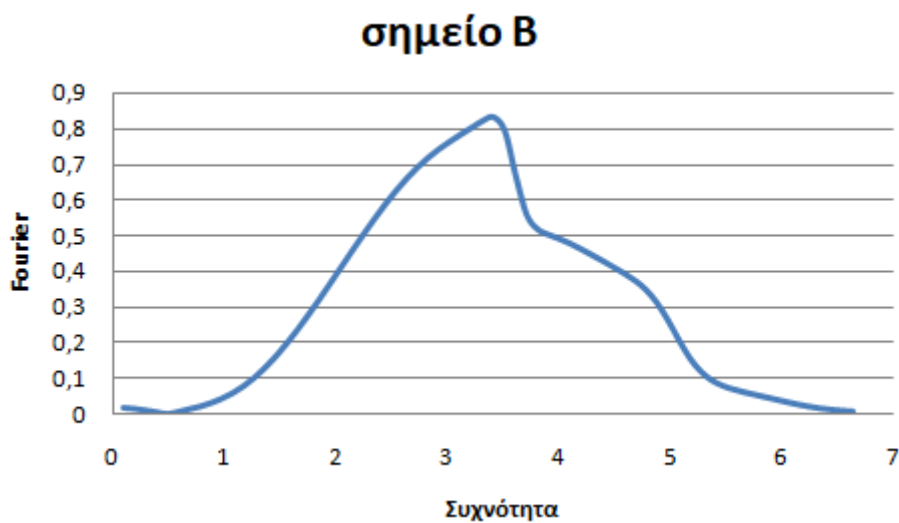
Διάγραμμα 4.88

Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης τέταρτης ανεμογεννήτριας



Διάγραμμα 4.89

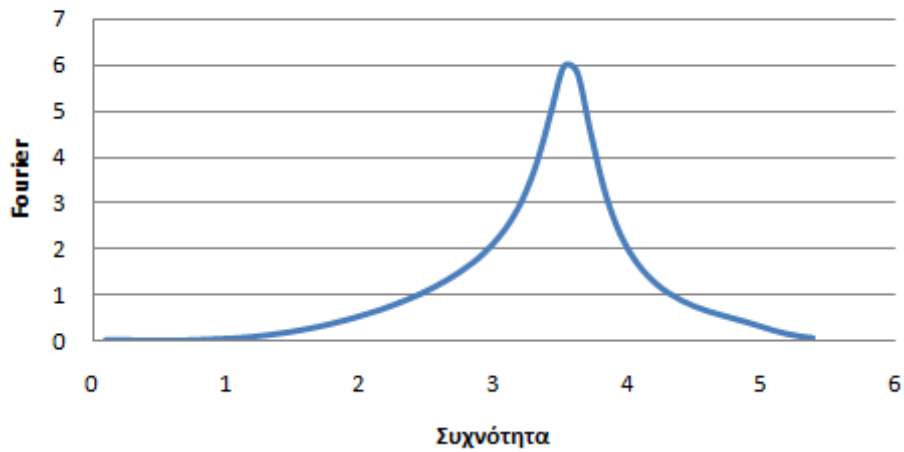
Φάσμα Fourier του σημείου A στο κατώτερο σημείο της κοιλάδας συναρτήσεως της συχνότητας f (Hz)



Διάγραμμα 4.90

Φάσμα Fourier του σημείου B στην επιφάνεια του εδάφους της πρώτης ανεμογεννήτριας συναρτήσεως της συχνότητας f (Hz)

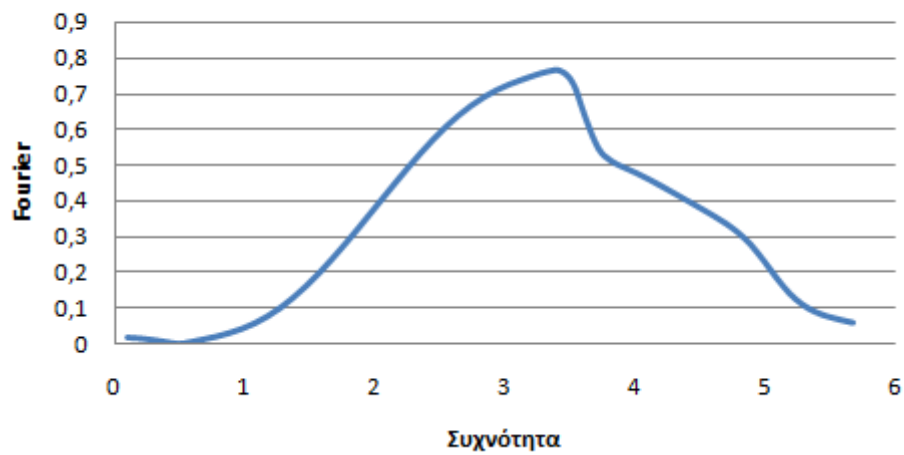
σημείο Η



Διάγραμμα 4.91

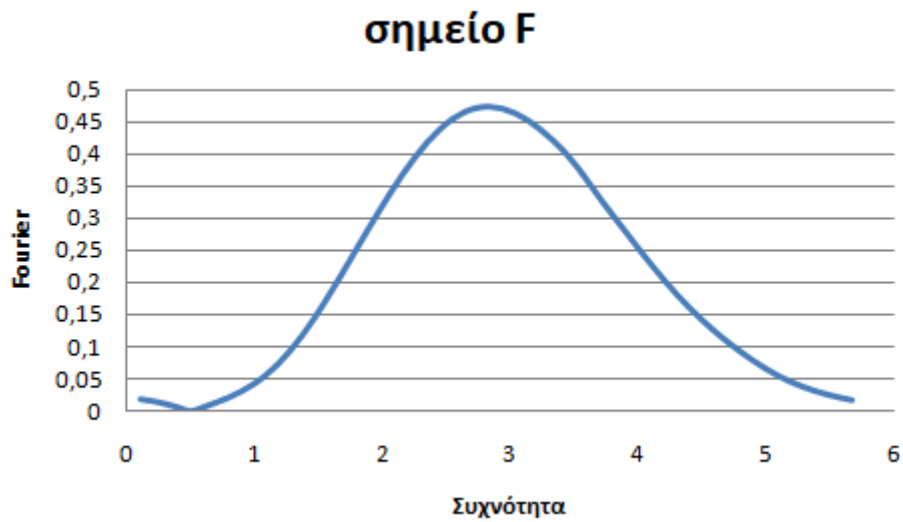
Φάσμα Fourier του σημείου Η στην επιφάνεια του εδάφους της δεύτερης ανεμογεννήτριας συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)

σημείο D



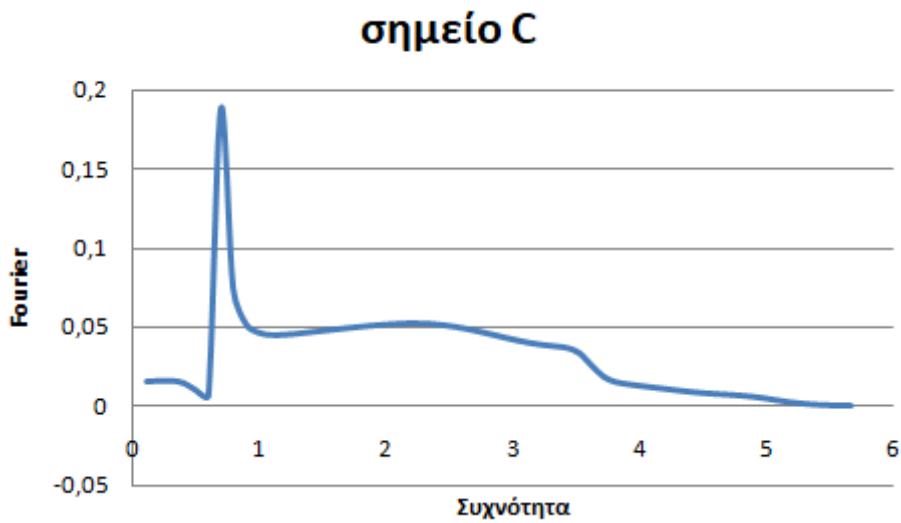
Διάγραμμα 4.92

Φάσμα Fourier του σημείου D στην επιφάνεια του εδάφους της τρίτης ανεμογεννήτριας συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)



Διάγραμμα 4.93

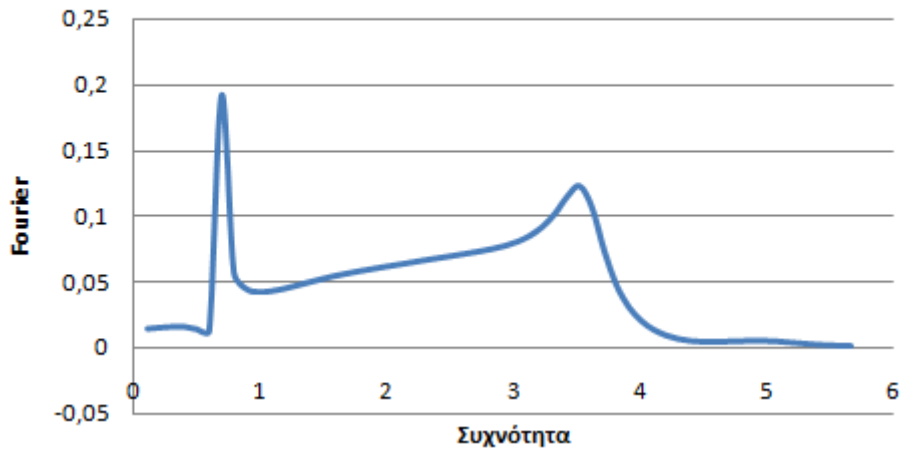
Φάσμα Fourier του σημείου F στην επιφάνεια του εδάφους της τέταρτης ανεμογεννήτριας συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)



Διάγραμμα 4.94

Φάσμα Fourier του σημείου C στην κορυφή του ταλαντωτή της πρώτης ανεμογεννήτριας συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)

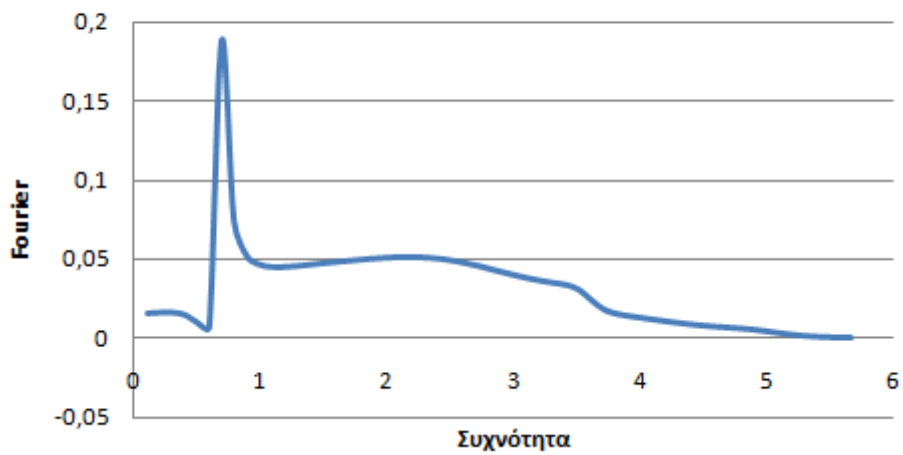
σημείο Ι



Διάγραμμα 4.95

Φάσμα Fourier του σημείου Ι στην κορυφή του ταλαντωτή της δεύτερης ανεμογεννήτριας συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)

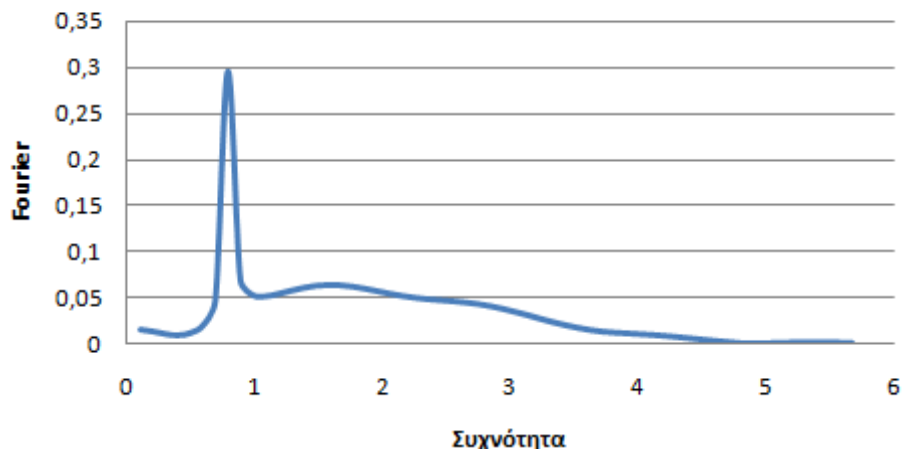
σημείο Ε



Διάγραμμα 4.96

Φάσμα Fourier του σημείου Ε στην κορυφή του ταλαντωτή της τρίτης ανεμογεννήτριας συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)

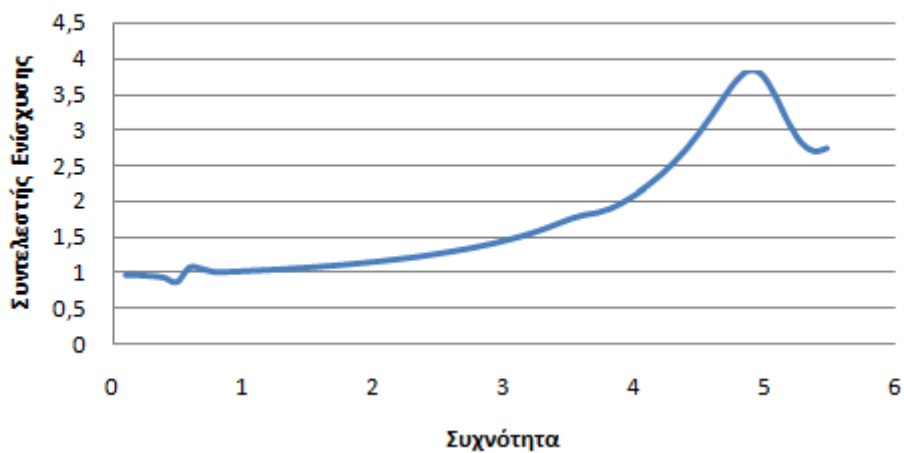
σημείο G



Διάγραμμα 4.97

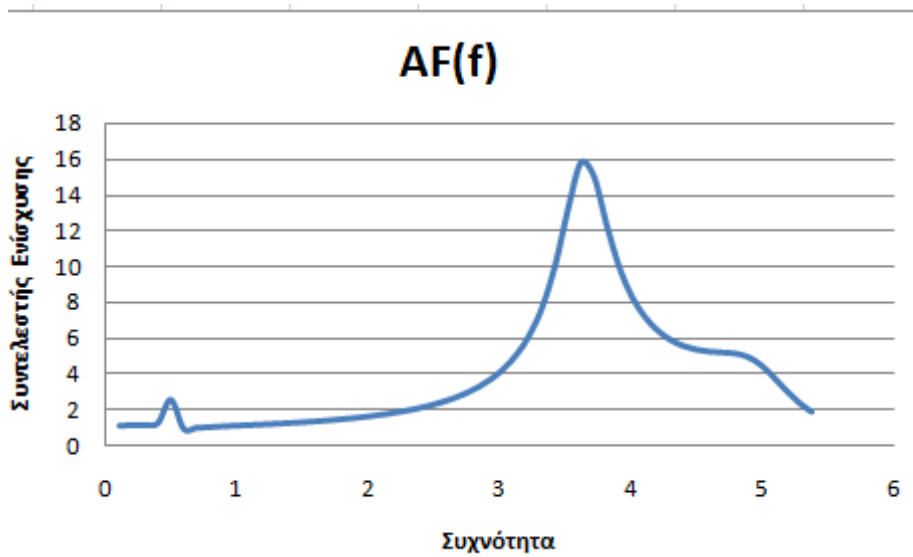
Φάσμα Fourier του σημείου G στην κορυφή του ταλαντωτή της τέταρτης ανεμογεννήτριας συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)

AF(f)



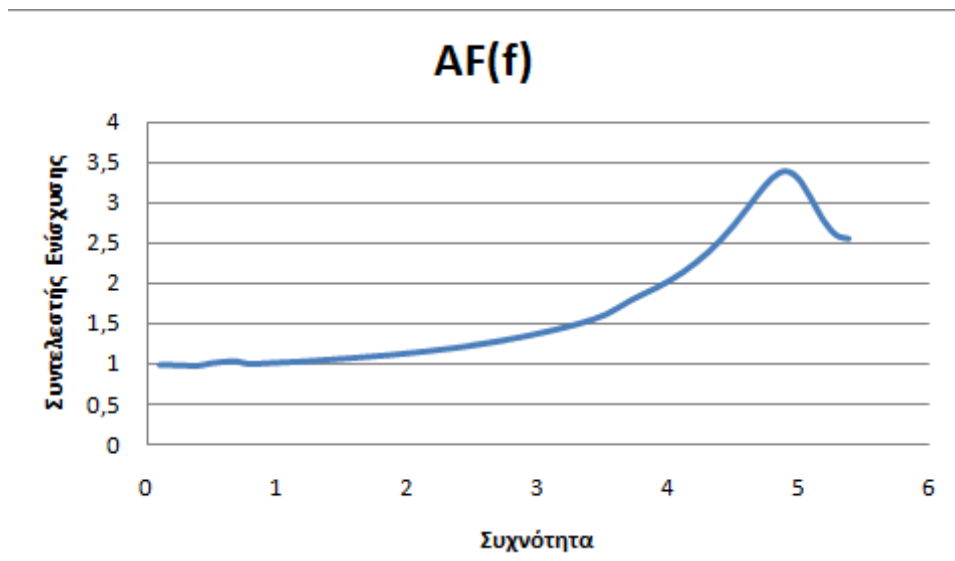
Διάγραμμα 4.98

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος B/A) συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)



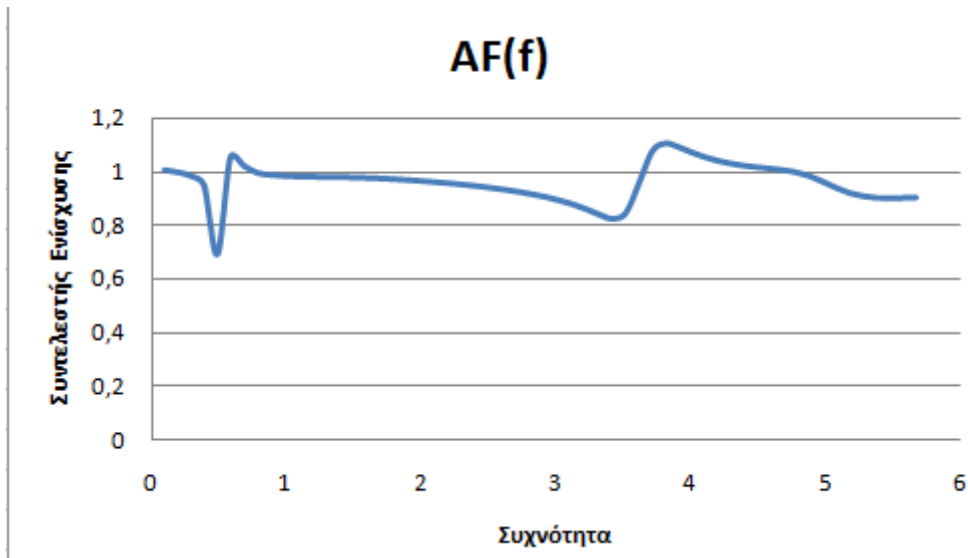
Διάγραμμα 4.99

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος H/A) συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)



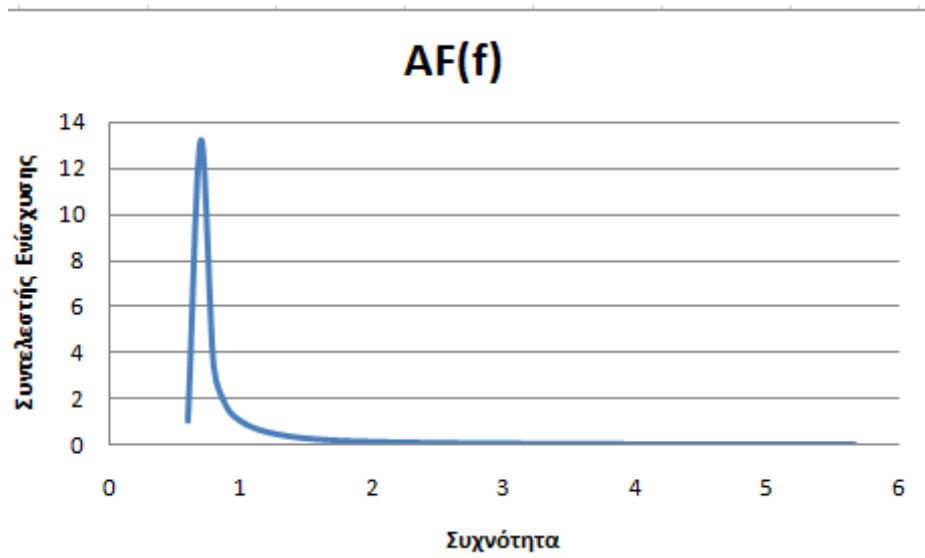
Διάγραμμα 4.100

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος D/A) συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)



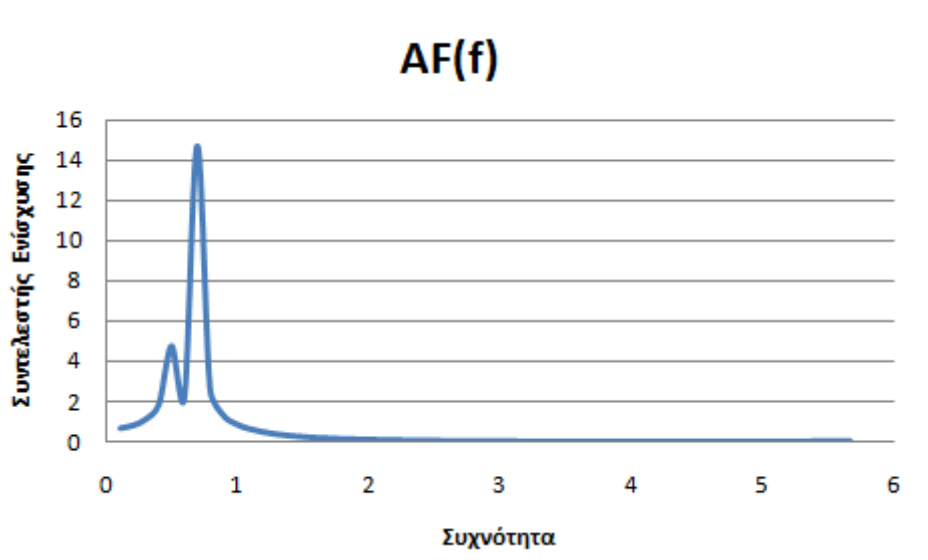
Διάγραμμα 4.101

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος F/A) συναρτήσει της συχνότητας f(Hz)



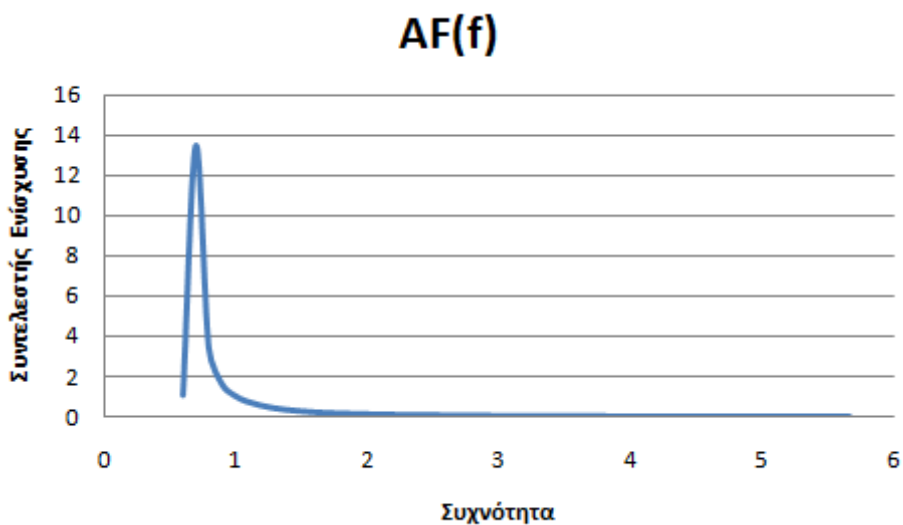
Διάγραμμα 4.102

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος C/B) συναρτήσει της συχνότητας f(Hz)



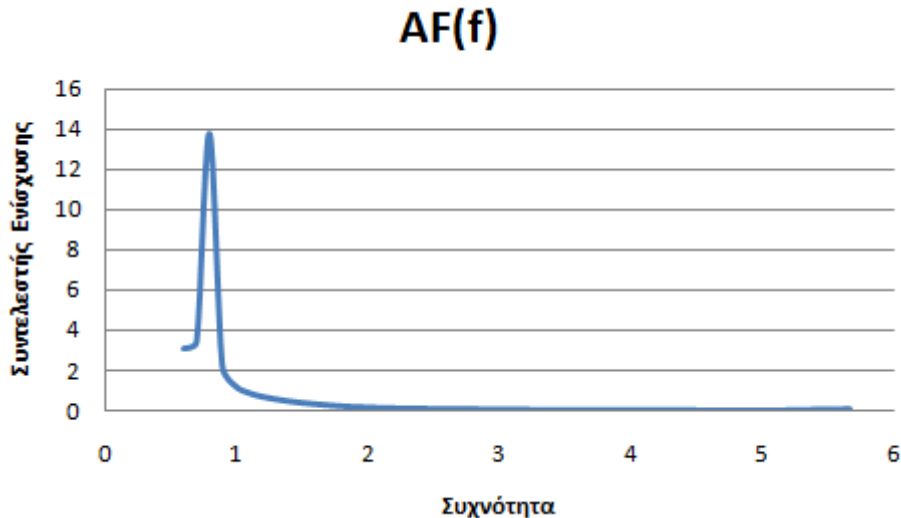
Διάγραμμα 4.103

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος I/H) συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)



Διάγραμμα 4.104

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος E/D) συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)



Διάγραμμα 4.105

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος G/F) συναρτήσει της συχνότητας f(Hz)

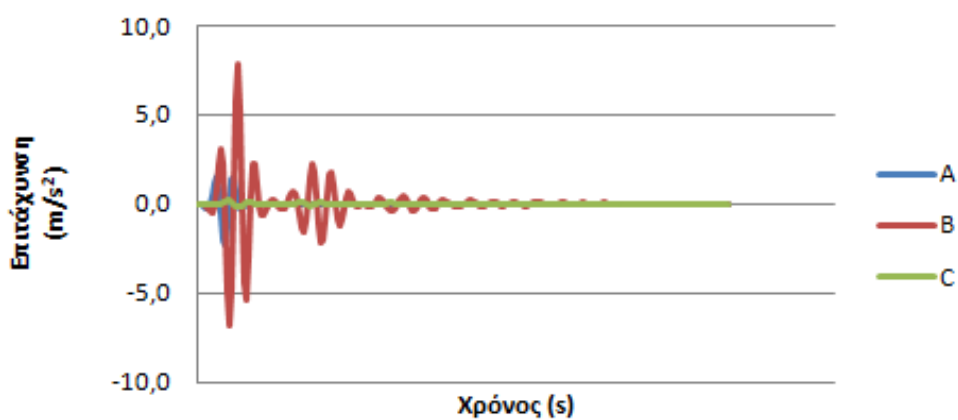
Για τον ταλαντωτή στο τέλος της κοιλάδας, παρατηρείται πως το σημείο F σχεδόν ταυτίζεται με το A και ο λόγος τους είναι κοντά στη μονάδα, με αποτέλεσμα η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης να αναπαριστά και εδώ μια σχεδόν ευθεία γραμμή κοντά στο 1. Επιπλέον, η πρώτη και τρίτη ανεμογεννήτρια έχουν όμοια συμπεριφορά μεταξύ τους σε κάθε φάση της μελέτης. Όσον αφορά τους συντελεστές ενίσχυσης των ταλαντωτών, σε όλες τις ανεμογεννήτριες, εκτός της τελευταίας που η καμπύλη παρουσιάζει μέγιστο για συχνότητα ίση με 0,8Hz ίση με την ιδιοσυχνότητα των ταλαντωτών, το έδαφος είναι σχετικά μαλακό για αυτό αυξάνεται η ιδιοπερίοδος και μειώνεται η ιδιοσυχνότητα, με αποτέλεσμα το μέγιστο να πραγματοποιείται για συχνότητα κοντά στα 0,7Hz, μικρότερη της ιδιοσυχνότητας των ταλαντωτών.

4.4.5.4 Ταχύτητας διάδοσης διατμητικού κύματος $V_s=110\text{m/s}$ και διέγερση Ricker 2Hz

Σε αυτή την περίπτωση, 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 $f=2\text{Hz}$, ενώ η ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος είναι ίση με $V_s=110\text{m/s}$. Μετά τον υπολογισμό χρονοϊστοριών οριζόντιας επιτάχυνσης στα κομβικά σημεία, καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός του συντελεστή ενίσχυσης AF του ταλαντωτή αλλά και λόγω της εδαφικής απόθεσης, όπως προηγουμένως.

Έτσι, προκύπτουν τα εξής διαγράμματα:

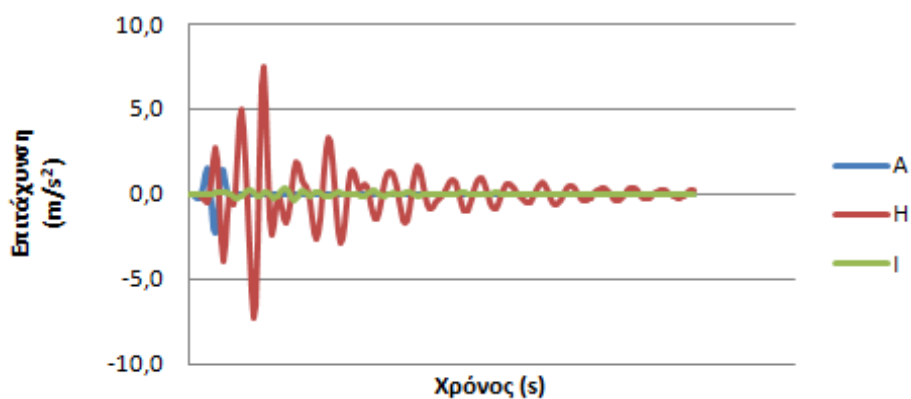
Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης



Διάγραμμα 4.106

Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης πρώτης ανεμογεννήτριας

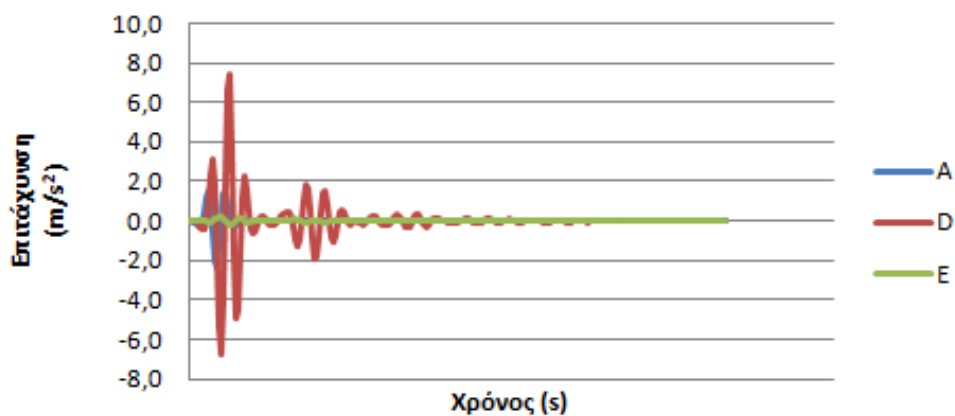
Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης



Διάγραμμα 4.107

Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης δεύτερης ανεμογεννήτριας

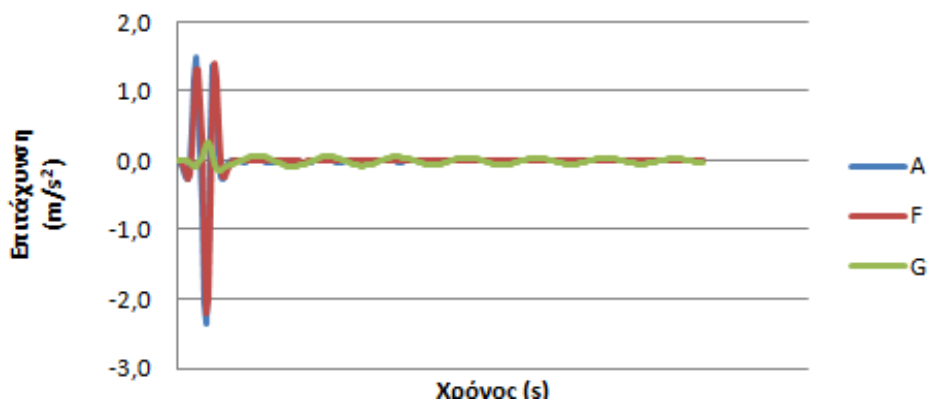
Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης



Διάγραμμα 4.108

Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης τρίτης ανεμογεννήτριας

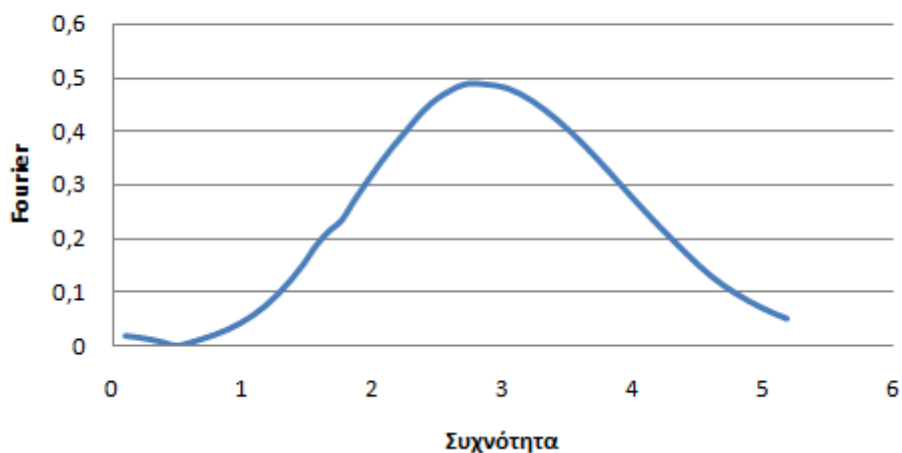
Χρονοϊστορία οριζόντιας επιτάχυνσης



Διάγραμμα 4.109

Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης τέταρτης ανεμογεννήτριας

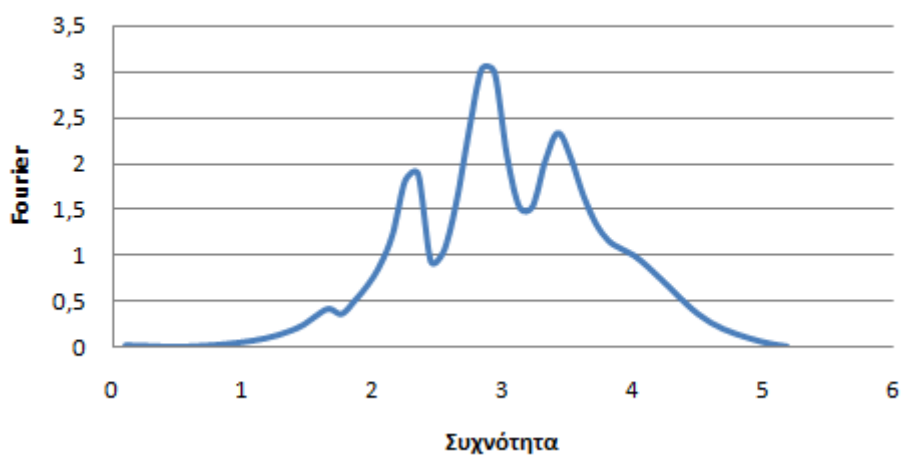
σημείο A



Διάγραμμα 4.110

Φάσμα Fourier του σημείου A στο κατώτερο σημείο της κοιλάδας συναρτήσεως της συχνότητας f (Hz)

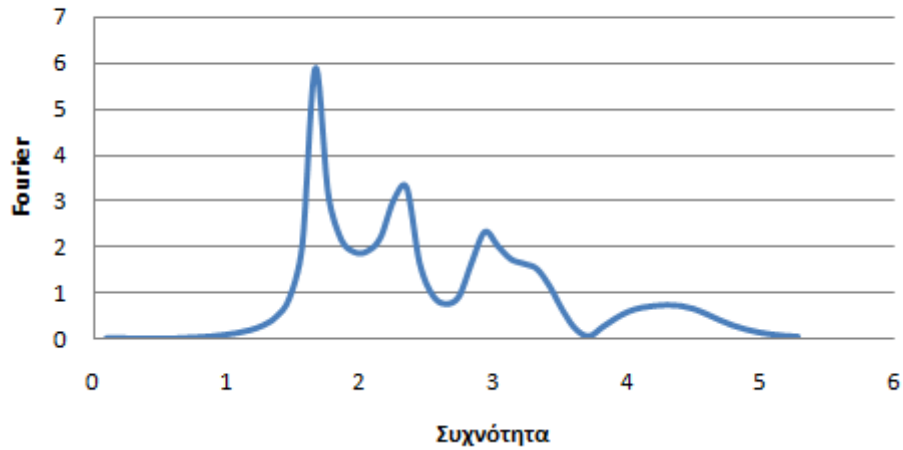
σημείο B



Διάγραμμα 4.111

Φάσμα Fourier του σημείου B στην επιφάνεια του εδάφους της πρώτης ανεμογεννήτριας συναρτήσεως της συχνότητας f (Hz)

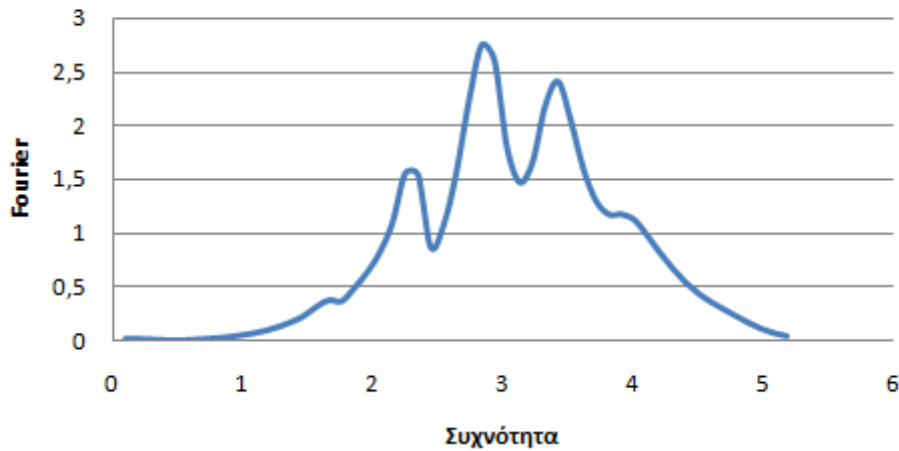
σημείο Η



Διάγραμμα 4.112

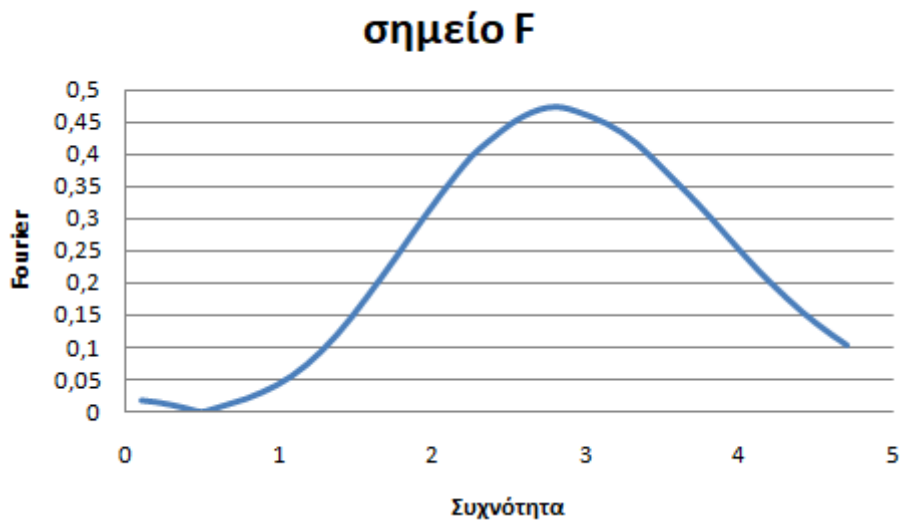
Φάσμα Fourier του σημείου Η στην επιφάνεια του εδάφους της δεύτερης ανεμογεννήτριας συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)

σημείο D



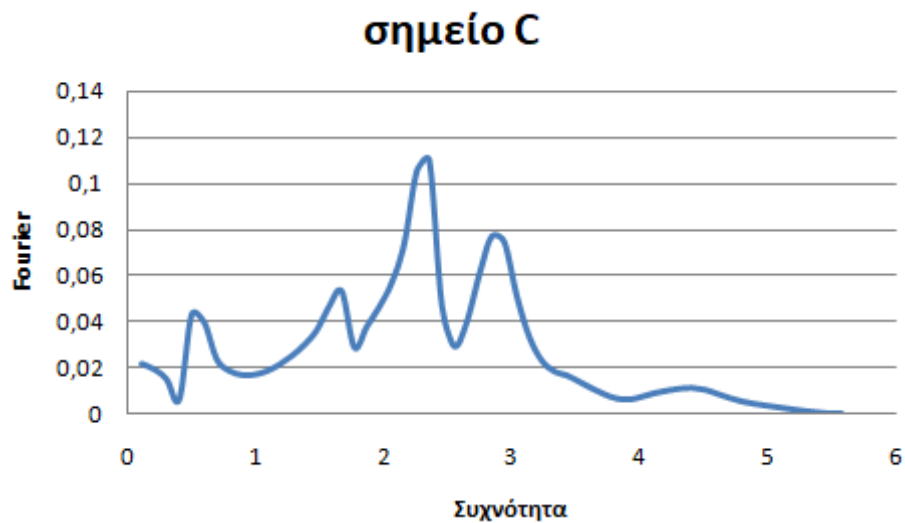
Διάγραμμα 4.113

Φάσμα Fourier του σημείου D στην επιφάνεια του εδάφους της τρίτης ανεμογεννήτριας συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)



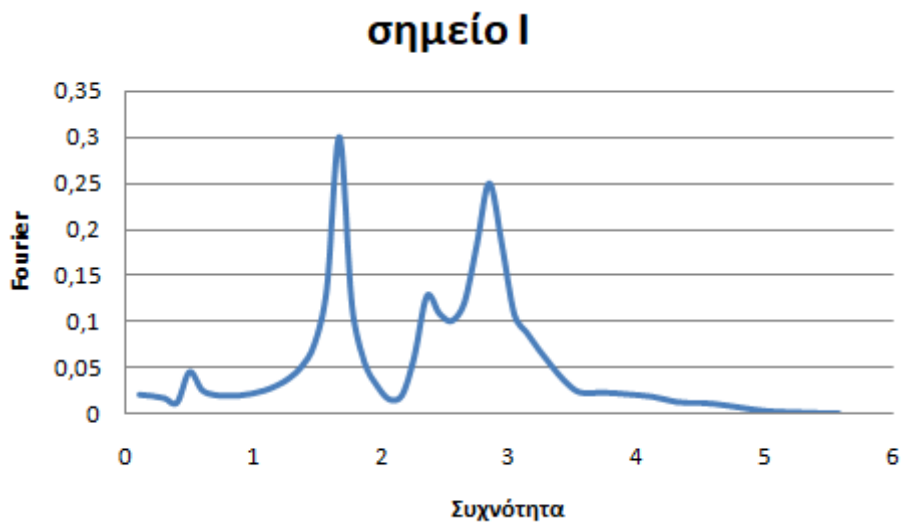
Διάγραμμα 4.114

Φάσμα Fourier του σημείου F στην επιφάνεια του εδάφους της τέταρτης ανεμογεννήτριας συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)



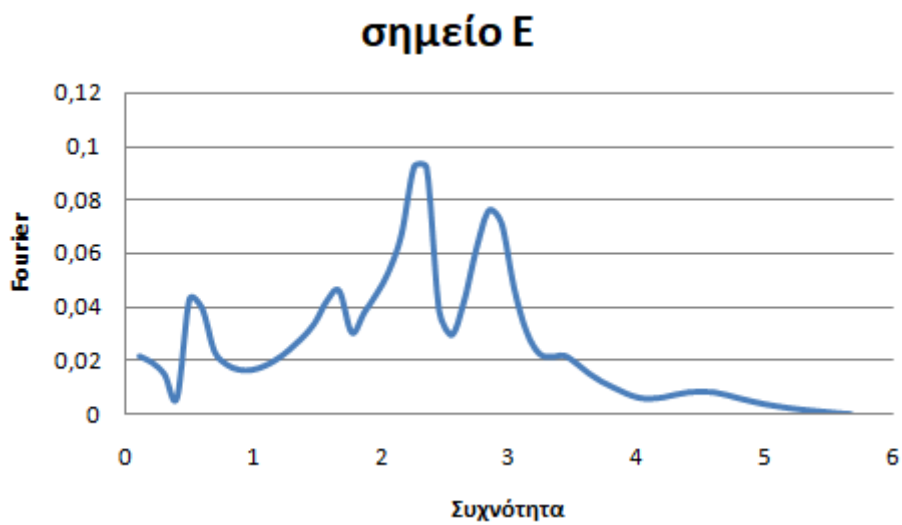
Διάγραμμα 4.115

Φάσμα Fourier του σημείου C στην κορυφή του ταλαντωτή της πρώτης ανεμογεννήτριας συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)



Διάγραμμα 4.116

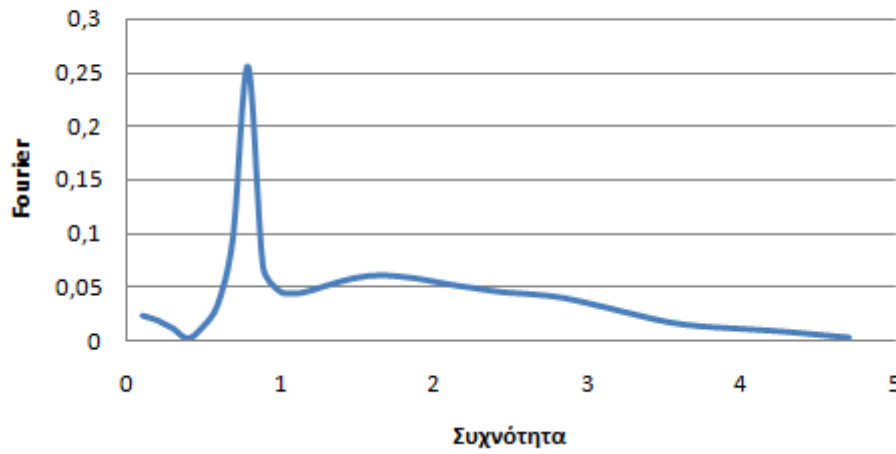
Φάσμα Fourier του σημείου Ι στην κορυφή του ταλαντωτή της δεύτερης ανεμογεννήτριας συναρτήσει της συχνότητας $f(\text{Hz})$



Διάγραμμα 4.117

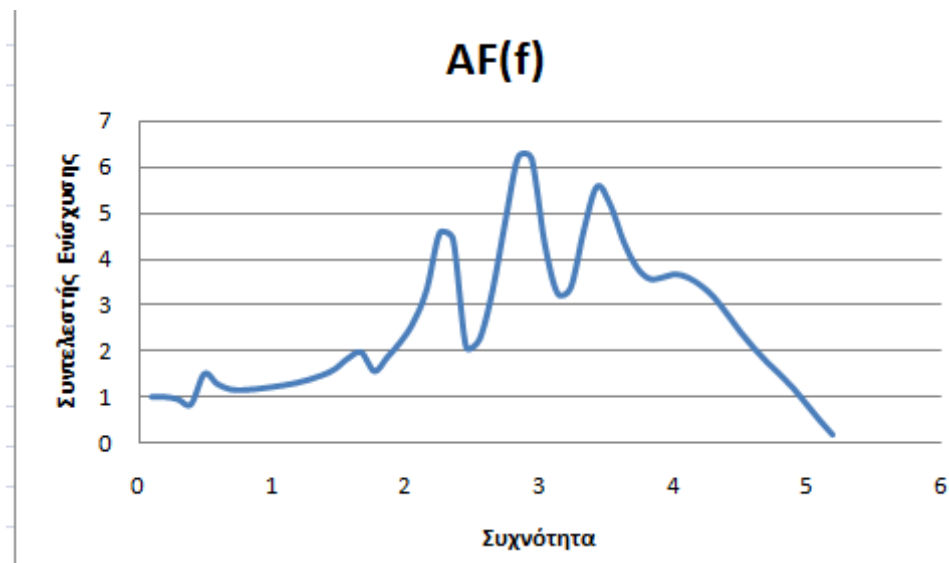
Φάσμα Fourier του σημείου Ε στην κορυφή του ταλαντωτή της τρίτης ανεμογεννήτριας συναρτήσει της συχνότητας $f(\text{Hz})$

σημείο G



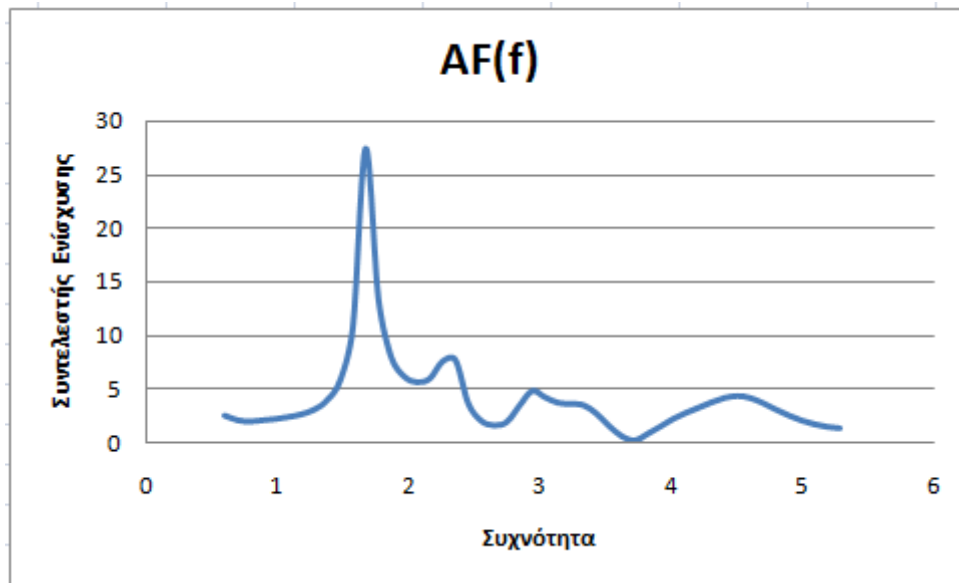
Διάγραμμα 4.118

Φάσμα Fourier του σημείου G στην κορυφή του ταλαντωτή της τέταρτης ανεμογεννήτριας συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)



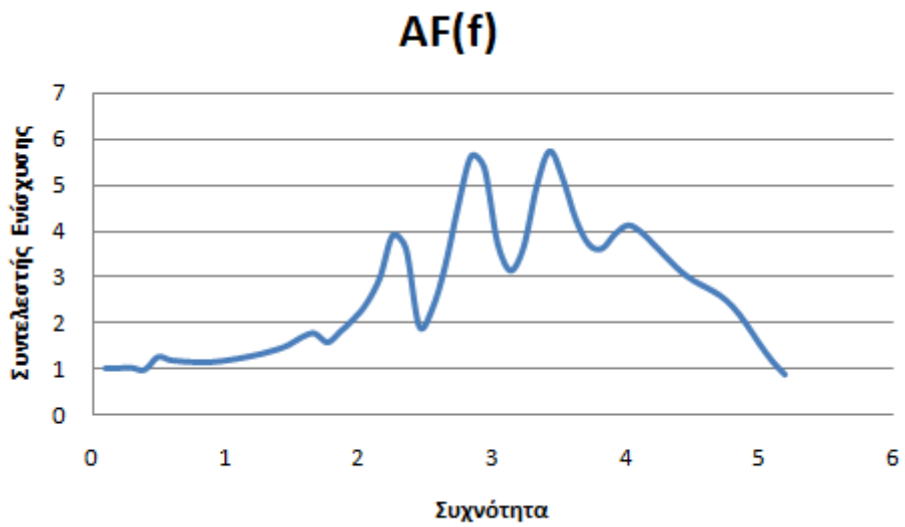
Διάγραμμα 4.119

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος B/A) συναρτήσει της συχνότητας f (Hz)



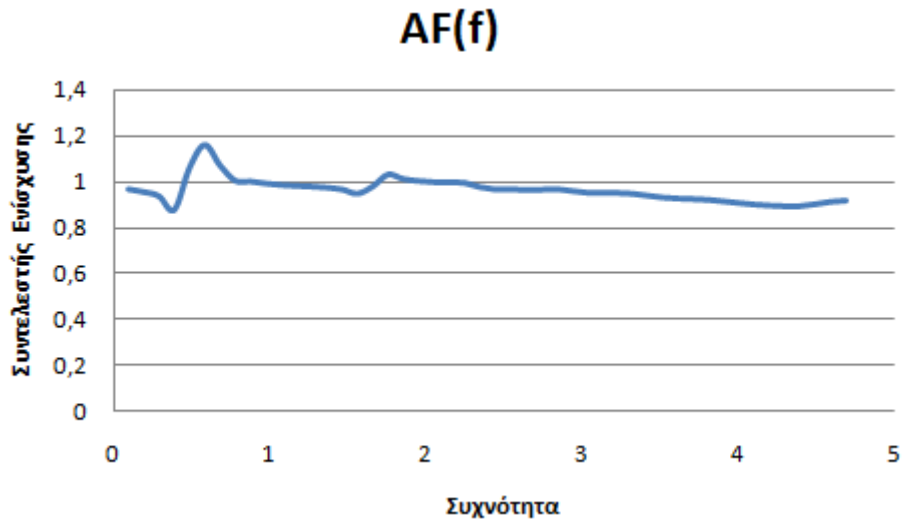
Διάγραμμα 4.120

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος H/A) συναρτήσει της συχνότητας f(Hz)



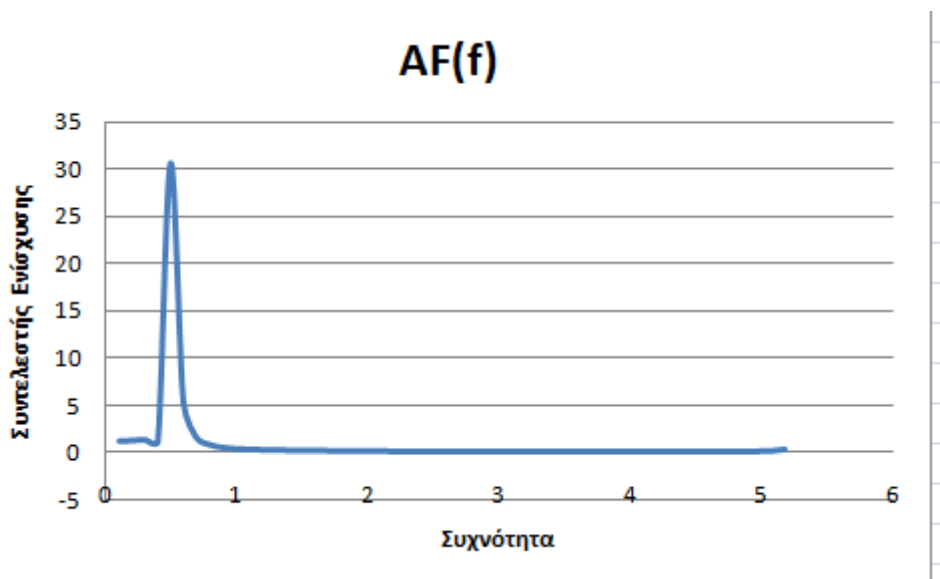
Διάγραμμα 4.121

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος D/A) συναρτήσει της συχνότητας f(Hz)



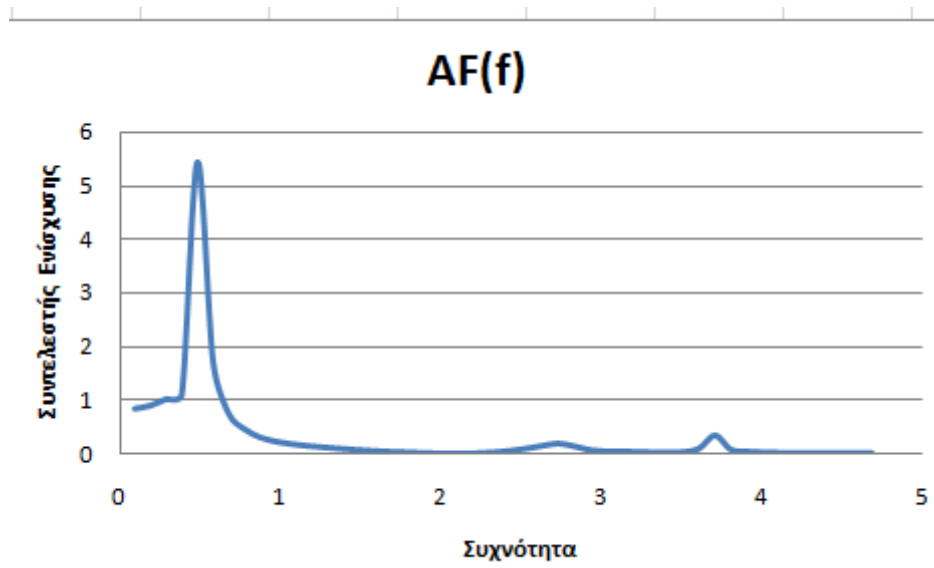
Διάγραμμα 4.122

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος F/A) συναρτήσει της συχνότητας f(Hz)



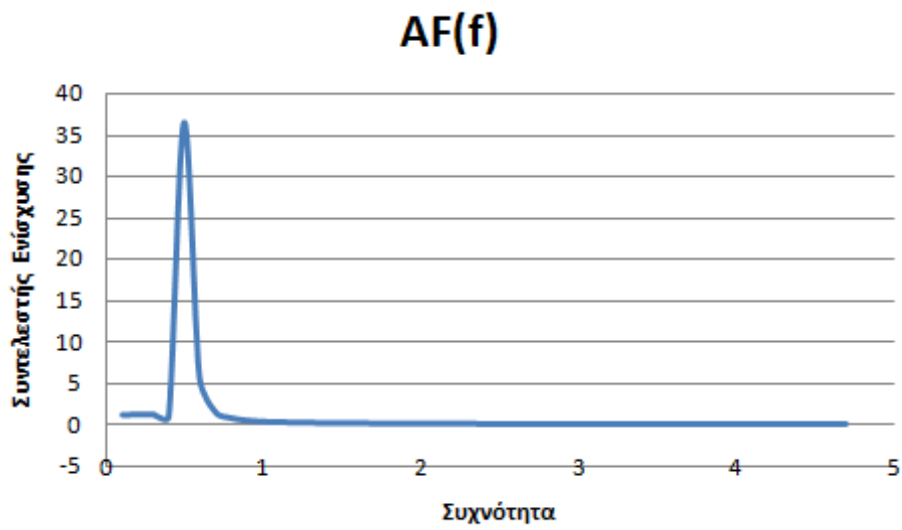
Διάγραμμα 4.123

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος C/B) συναρτήσει της συχνότητας f(Hz)



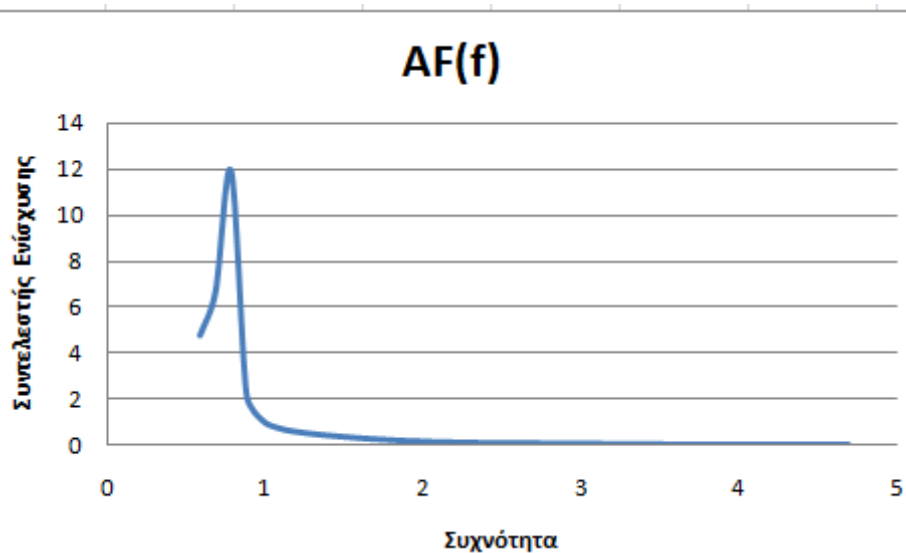
Διάγραμμα 4.124

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος I/H) συναρτήσει της συχνότητας f(Hz)



Διάγραμμα 4.125

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος E/D) συναρτήσει της συχνότητας f(Hz)



Διάγραμμα 4.126

Συντελεστής ενίσχυσης AF (λόγος G/F) συναρτήσει της συχνότητας f(Hz)

Για τον ταλαντωτή στο τέλος της κοιλάδας, παρατηρείται πως το σημείο F σχεδόν ταυτίζεται με το A και ο λόγος τους είναι κοντά στη μονάδα, με αποτέλεσμα η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης να αναπαριστά και εδώ μια σχεδόν ευθεία γραμμή κοντά στο 1. Επιπλέον, η πρώτη και τρίτη ανεμογεννήτρια έχουν όμοια συμπεριφορά μεταξύ τους σε κάθε φάση της μελέτης. Όσον αφορά τους συντελεστές ενίσχυσης των ταλαντωτών, σε όλες τις ανεμογεννήτριες, εκτός της τελευταίας που η καμπύλη παρουσιάζει μέγιστο για συχνότητα ίση με 0,8Hz ίση με την ιδιοσυχνότητα των ταλαντωτών, το έδαφος είναι αρκετά μαλακό για αυτό αυξάνεται κι άλλο η ιδιοπερίοδος και μειώνεται η ιδιοσυχνότητα, με αποτέλεσμα το μέγιστο να πραγματοποιείται για συχνότητα κοντά στα 0,5Hz, μικρότερη της ιδιοσυχνότητας των ταλαντωτών.

4.5 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό, μέσα από παραμετρικές αναλύσεις και υπολογισμούς με χρήση των λογισμικών PLAXIS και SeismoSignal, παρουσιάστηκαν μερικές ενδιαφέρουσες μελέτες από τις οποίες εξήχθησαν σημαντικά συμπεράσματα στο τέλος κάθε εδαφίου. Τα προκαταρκτικά προσομοιώματα των μοντέλων που παρουσιάστηκαν στην αρχή του κεφαλαίου στόχευσαν στην παροχή της αξιοπιστίας των εν λόγω λογισμικών, καθώς οι αριθμητικές λύσεις τους συμφώνησαν απόλυτα με τις αναλυτικές. Τα μοντέλα που ακολούθησαν επιλέχθηκαν, ώστε να ικανοποιούν αρκετούς συνδυασμούς συστήματος εδαφικής κατάστασης και ταλαντωτών, με σκοπό την εξαγωγή όσο το δυνατόν ακριβέστερων και πιο αξιόπιστων συμπερασμάτων.

Στην περίπτωση της θεμελίωσης ταλαντωτή επί άκαμπτης εδαφικής στρώσης, η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης για το μονοβάθμιο ταλαντωτή

μεγιστοποιείται για συχνότητα 0,78Hz. Η συχνότητα αυτή είναι σχεδόν ίση με την ιδιοσυχνότητα $f_c = 0,8\text{Hz}$ του συστήματος του μονοβάθμιου ταλαντωτή, γεγονός που οφείλεται στην άκαμπτη εδαφική στρώση. Σε περίπτωση που η εδαφική στρώση δεν είναι άκαμπτη, αλλά υπάρχει εδαφικό υλικό συγκεκριμένων χαρακτηριστικών (V_s , ν , ξ , γ) και ασκείται διέγερση όπως και προηγουμένως, η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης AF μεγιστοποιείται για συχνότητα μικρότερη από την ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή, διότι αυξάνεται η ιδιοπερίοδος και μειώνεται η ιδιοσυχνότητα.

Στην περίπτωση που υπάρχει εδαφική στρώση χωρίς ταλαντωτή, ενώ το μέγιστο του φάσματος Fourier στο κατώτερο σημείο της εδαφικής στρώσης εξαρτάται από τη διέγερση που ασκείται στην εδαφική στρώση, το μέγιστο της καμπύλης του συντελεστή ενίσχυσης εξαρτάται από τη ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος και μόνο, χωρίς να αλλάζει για διαφοροποίηση της διέγερσης.

Τέλος, στην περίπτωση θεμελίωσης ταλαντωτή σε εδαφική κοιλάδα, παρατηρείται πως αν αυτός βρίσκεται στο τέλος της κοιλάδας συμπεριφέρεται σαν να έχει θεμελιωθεί σε άκαμπτη εδαφική στρώση, ενώ αν έχει τοποθετηθεί σε συμμετρική θέση ως προς το κέντρο, συμπεριφέρεται το ίδιο, εκατέρωθεν. Μικροδιαφορές, επίσης, εμφανίζονται και ανάμεσα στις τέσσερις περιπτώσεις – συνδυασμούς διέγερσης και ταχύτητας διάδοσης διατμητικού κύματος, οι οποίες, όμως, συμφωνούν με τις μονοδιάστατες αναλύσεις που προηγήθηκαν. Παρατηρείται, συνεπώς, κυρίως διαφοροποίηση της συμπεριφοράς της ανεμογεννήτριας, ανάλογα με τη θέση θεμελίωσής της. Η παραπάνω πρόταση κάνει εμφανή την επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών στην δυναμική συμπεριφορά κάθε ανεμογεννήτριας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία ασχολήθηκε με τη δυναμική απόκριση τυπικών ανεμογεννητριών, οι οποίες βρίσκονται θεμελιωμένες σε σχηματισμούς με ιδιαίτερες τοπικές εδαφικές συνθήκες και υποβάλλονται σε δυναμικές/σεισμικές διεγέρσεις στη βάση τους. Οι ιδιαίτερες αυτές τοπικές συνθήκες που κυρίως μελετήθηκαν είναι οι κοιλάδες εδαφικών αποθέσεων, οι οποίες αποτελούν χαρακτηριστική περίπτωση γεωμορφολογικής ανωμαλίας.

Υποκίνηση για την παρούσα εργασία αποτέλεσε ο ιδιαίτερος χαρακτήρας των ανεμογεννητριών, λόγω της συνύπαρξης του μηχανολογικού και του δομικού μέρους τους, που τις καθιστούν σύνθετες ως κατασκευές. Ταυτόχρονα, ένας ακόμα λόγος που διαφοροποιεί τις ανεμογεννήτριες από τις άλλες κατασκευές και δημιουργεί ενδιαφέρον ως προς την μελέτη της παρούσας κατασκευής είναι η δίσημη συμπεριφορά της ως προς το περιβάλλον. Εξ ορισμού, σκοπός της ανεμογεννήτριας είναι η παραγωγή αιολικής ενέργειας, καθώς αποτελεί μια εναλλακτική, ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Το θέμα, ωστόσο, των αιολικών πάρκων, σχετικά με το χωροταξικό και την εγκατάσταση βιομηχανικής κλίμακας αιολικών σταθμών ακόμη και σε περιοχές NATURA, έχει βρεθεί στο επίκεντρο και από περιβαλλοντικές οργανώσεις, οι οποίες εκφράζουν επιφυλάξεις ή αντιρρήσεις. Τα ζητήματα αυτά βρίσκονται ακόμα υπό συζήτηση και ως προς αναζήτηση λύσης, καθώς αποτελούν σύνθετα προβλήματα, των οποίων η λύση δεν επιζητείται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Στα πλαίσια της μελέτης, πραγματοποιήθηκε παραμετρική διερεύνηση, μέσω κατάλληλων υπολογιστικών προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων, με σκοπό την αναζήτηση της επίδρασης των τοπικών συνθηκών στη δυναμική συμπεριφορά ανεμογεννητριών.

Από τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν αναδεικνύεται το γεγονός ότι η απόκριση του πυλώνα εξαρτάται από τα μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των εδαφικών σχηματισμών, τις δυναμικές ιδιότητες της ανωδομής και τα συχνотικό περιεχόμενο της διέγερσης. Επιβεβαιώνεται, επίσης, η υπόθεση ότι η δυναμική αλληλεπίδραση και οι τοπικές συνθήκες είναι σε πολλές περιπτώσεις αρκετά πιθανόν να επηρεάσουν δυσμενώς τη σεισμική καταπόνηση του πυλώνα.

Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκε η περίπτωση της θεμελίωσης ταλαντωτή επί άκαμπτης εδαφικής στρώσης, για την οποία παρατηρήθηκε πως η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης για το μονοβάθμιο ταλαντωτή μεγιστοποιείται για συχνότητα 0,78Hz. Η συχνότητα αυτή είναι σχεδόν ίση με την ιδιοσυχνότητα f_c

$=0,8\text{Hz}$ του συστήματος του μονοβάθμιου ταλαντωτή, γεγονός που οφείλεται στην άκαμπτη εδαφική στρώση. Στην επόμενη περίπτωση, που εξετάστηκε, για εδαφική στρώση που δεν είναι άκαμπτη, αλλά υπάρχει εδαφικό υλικό συγκεκριμένων χαρακτηριστικών (V_s , ν , ξ , γ) και ασκείται διέγερση όπως και προηγουμένως, παρατηρήθηκε πως η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης AF μεγιστοποιείται για συχνότητα μικρότερη από την ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή, διότι αυξάνεται η ιδιοπερίοδος και μειώνεται η ιδιοσυχνότητα.

Στη συνέχεια της μελέτης, εξετάστηκε η περίπτωση εδαφικής στρώσης χωρίς ταλαντωτή, για την οποία παρατηρήθηκε πως, ενώ το μέγιστο του φάσματος Fourier στο κατώτερο σημείο της εδαφικής στρώσης εξαρτάται από τη διέγερση που ασκείται στην εδαφική στρώση, το μέγιστο της καμπύλης του συντελεστή ενίσχυσης εξαρτάται από τη ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος και μόνο, χωρίς να αλλάζει για διαφοροποίηση της διέγερσης.

Τέλος, για την ολοκλήρωση των αναλύσεων εξετάστηκε η περίπτωση θεμελίωσης ταλαντωτή σε εδαφική κοιλάδα. Στην περίπτωση αυτή, έγινε θεώρηση θεμελίωσης τεσσάρων ανεμογεννητριών σε κοιλάδας εδαφικής απόθεσης. Οι ανεμογεννήτριες ορίστηκαν να έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά με μόνη διαφοροποίηση τους ως προς την θέση θεμελίωσής τους στην κοιλάδα. Από την συγκεκριμένη μελέτη, βγήκε ένα σημαντικό συμπέρασμα, το οποίο υπογραμμίζει και αποδεικνύει την ήδη υπάρχουσα θεώρηση επίδρασης των τοπικών εδαφικών συνθηκών στην συμπεριφορά ανεμογεννητριών. Το συμπέρασμα που προέκυψε είναι πως αν ένας ταλαντωτής – ανεμογεννήτρια βρίσκεται στο τέλος της κοιλάδας συμπεριφέρεται σαν να έχει θεμελιωθεί σε άκαμπτη εδαφική στρώση, ενώ αν έχει τοποθετηθεί σε συμμετρική θέση ως προς το κέντρο, συμπεριφέρεται το ίδιο, εκατέρωθεν. Επιπλέον, η συμπεριφορά ανεμογεννήτριας θεμελιωμένη στο κέντρο της επιφάνειας της εδαφικής κοιλάδας φαίνεται να διαφέρει από κάθε άλλη θέση που είναι δυνατόν να τοποθετηθεί. Παρατηρείται, συνεπώς, διαφοροποίηση της συμπεριφοράς της ανεμογεννήτριας, ανάλογα με τη θέση θεμελίωσής της, η οποία αποδεικνύεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, μέσω της μελέτης που πραγματώθηκε. Η παραπάνω πρόταση κάνει εμφανή την επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών στην δυναμική συμπεριφορά μιας ανεμογεννήτριας.

5.2 Προτάσεις μελλοντικών προεκτάσεων

Από την παρούσα έρευνα προέκυψαν συμπεράσματα και τεκμηριώθηκαν θεωρήσεις, για τα οποία ήδη έχουν γίνει εκτενείς αναφορές παραπάνω. Τα εξαγόμενα συμπεράσματα και η γενικότερη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, μπορούν να οδηγήσουν σε περαιτέρω έρευνα και ανάλυση, όσον αφορά τα θέματα των ανεμογεννητριών, είτε αυτά αφορούν την θεμελίωση και την θέση που μπορεί να τοποθετηθεί μια

ανεμογεννήτρια, είτε πρόκειται, γενικότερα, για θέματα που αφορούν τον συγκεκριμένο τύπο κατασκευής.

Ένα παράδειγμα μελλοντικής μελέτης, το οποίο άμεσα σχετίζεται με την συγκεκριμένη, είναι η έρευνα για τη δυναμική συμπεριφορά ανεμογεννητριών, οι οποίες είναι θεμελιωμένες σε μη-επίπεδη επιφάνεια του εδάφους, όπως είναι η περίπτωση χαραδρών, λόφων ή πρανών. Όπως ήδη έχει αναφερθεί, οι συγκεκριμένες συνθήκες αποτελούν τις ιδιόμορφες τοπογραφικές συνθήκες, που πολύ συχνά συναντά κανείς στη φύση. Η επίδραση των ιδιόμορφων τοπογραφικών συνθηκών στον σεισμικό κραδασμό έχει επανειλημμένως αποδειχθεί καταστρεπτική για τις κατασκευές, μέσα από παραδείγματα σεισμών σε όλο τον κόσμο και η σημασία εκτίμησής της είναι μεγάλη. Στη πράξη, ωστόσο, δύσκολα γίνεται εκτενής μελέτη, αφού η προσομοίωση της σεισμικής συμπεριφοράς ενός γεωμετρικώς μη-κανονικού λόφου αποτελεί επίπονη εργασία για ένα μελετητή. Έτσι, κρίνεται σκόπιμη η προτροπή για ενασχόληση με το συγκεκριμένο θέμα.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, έγινε 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 προσομοίωμα. Μια μελλοντική αλλά 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.

Ένας συνδυασμός, ακόμα, των δύο αυτών προτάσεων θα είναι ικανός να φέρει εξαιρετικά χρήσιμα συμπεράσματα, καθώς η πραγμάτωση της προσομοίωσης της σεισμικής συμπεριφοράς ενός γεωμετρικώς μη-κανονικού λόφου, με μεγάλη ακρίβεια, λόγω της μείωσης των παραδοχών που προσφέρει ένα τρισδιάστατο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, αποτελεί αρκετά δυσεύρετη περίπτωση μελέτης, λόγω της πολυπλοκότητας της διαδικασίας.

Θα ήταν χρήσιμη, επίσης, η πραγματοποίηση αναλύσεων που επεκτείνονται και σε άλλους τύπους εδαφικού προφίλ, πάνω στο οποίο θεμελιώνεται η ανεμογεννήτρια ή το αιολικό πάρκο, πέραν της εδαφικής κοιλάδας, της άκαμπτης εδαφικής στρώσης και του εδαφικού υλικού με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που μελετήθηκαν. Άλλοι συνδυασμοί Vs, ν, ξ, γ ή ακόμα και άλλου τύπου διέγερση, να ασκείται στη βάση του εδαφικού υλικού, είναι ικανά να παράγουν μοντέλα διαφορετικά από τα υπό εξέταση στη συγκεκριμένη εργασία.

Μία ακόμα 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.

Μία μελλοντική και παρόμοια με την συγκεκριμένη μελέτη μπορεί να πραγματοποιηθεί και για την εξέταση περιπτώσεων υπεράκτιων (offshore) ανεμογεννητριών, οι οποίες θεμελιώνονται μέσα στη θάλασσα. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, οι διάφορες αναλυτικές και αριθμητικές διερευνήσεις που πραγματοποιήθηκαν, περιορίζονται στην εξέταση περιπτώσεων χερσαίων (onshore) ανεμογεννητριών, δηλαδή ανεμογεννητριών, οι οποίες βρίσκονται στη στεριά. Η εκπόνηση μελέτης υπεράκτιων ανεμογεννητριών ή αιολικών πάρκων είναι σημαντική, ώστε να 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.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ψαρρόπουλος Π., Παναγιώτου Μ., Γαντές Χ., Γκαζέτας Γ., (2006), “Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους και Πυλώνων Ανεμογεννητριών”, 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Ξάνθη, Ελλάδα
- Μυλωνάκης Γ., Καράμπαλης 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
- Kirtas E., Trevopoulos 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
- 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
- Mylonakis G., Gazetas G., (2000), “Seismic Soil-Structure Interaction: Beneficial or Detrimental?”, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 4, No. 3, pp. 277-301
- 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

- Wolf J. P. (1985), Dynamic Soil - Structure Interaction, Prentice Hall
- Σακελλαρίου Μ., (2008), “Γεωτεχνική Μηχανική”, Ε.Μ.Π., Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Αθήνα
- Καββαδάς Μ. Ι., (2009), “Στοιχεία Εδαφομηχανικής”, Ε.Μ.Π., Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Αθήνα
- Αθανασόπουλος Γ. Α., (2013), “Μαθήματα Θεμελιώσεων”, Παν. Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πάτρα
- Risø, “Guidelines for design of wind turbines”, (2002), 2nd Edition, Det Norske Veritas Copenhagen and Wind Energy Department, Risø National Laboratory
- A.K. Chopra, “Dynamics of Structures – Theory and Applications to Earthquake Engineering”, (2007), 3rd Edition, Berkeley, California
- Plaxis, “Finite element code for soil and Rock analyses”, (2002)
- Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi: Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons, 2η έκδοση (2011), (ISBN 978-0-470-69975-1)
- Darrell, Dodge, Early History Through 1875, TeloNet Web Development, Copyright 1996–2001
- Ersen Erdem, Wind Turbine Industrial Applications
- Robert Gasch, Jochen Twele (ed.), Wind power plants. Fundamentals, design, construction and operation, Springer 2012 (ISBN 978-3-642-22937-4).
- Erich Hau, Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics Springer, 2013 (ISBN 978-3-642-27150-2) (preview on Google Books)
- Siegfried Heier, Grid integration of wind energy conversion systems John Wiley & Sons, 3η έκδοση (2014), (ISBN 978-1-119-96294-6)
- Peter Jamieson, Innovation in Wind Turbine Design. Wiley & Sons 2011, (ISBN 978-0-470-69981-2)
- J. F. Manwell, J. G. McGowan, A. L. Roberts, Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, John Wiley & Sons, 2η έκδοση (2012), (ISBN 978-0-47001-500-1)
- David Spera (ed.) Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts in Wind Turbine Engineering, 2η έκδοση (2009), ASME Press, (ISBN 9780791802601)
- Alois Schaffarczyk (ed.), Understanding wind power technology, John Wiley & Sons, (2014), (ISBN 978-1-118-64751-6)
- Hermann-Josef Wagner, Jyotirmay Mathur, Introduction to wind energy systems. Basics, technology and operation. Springer (2013), (ISBN 978-3-642-32975-3)

- GA Mansoori, N Enayati, LB Agyarko (2016), Energy: Sources, Utilization, Legislation, Sustainability, Illinois as Model State
- Hau, Erich: Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics, Springer 2013, ISBN 978-3-642-27150-2 (δείγμα στα Google Books)
- Ξηρός, Νικόλαος: «Ανεμογεννήτριες για τον 21ο αιώνα», Περισκόπιο της Επιστήμης, τεύχος 206 (Μάιος 1997), σελ. 50
- International Electrotechnical Commission (IEC), Grid Integration of large-capacity Renewable Energy sources and use of large-capacity Electrical Energy Storage, October 2012
- European Wind Energy Association (EWEA), Powering Europe: wind energy and the electricity grid, November 2010
- European Wind Energy Association (EWEA), Wind in power 2013 European statistics, February 2014

