ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΡΟΛΟΥ ΤΟΥ ΥΠΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΠΥΛΩΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ»

ΤΣΙΠΙΑΝΙΤΗΣ Δ. ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

<u>Τριμελής Επιτροπή</u>

Ιωάννης Τσομπανάκης (Επιβλέπων) Κωνσταντίνος Προβιδάκης Θεοχάρης Τσούτσος

XANIA, 2013

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας συνεισέφεραν αρκετά άτομα. Κατ' αρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της εργασίας, Αναπληρωτή Καθηγητή, κ. **Ιωάννη Τσομπανάκη**, για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής, καθώς και για τις πολύτιμες γνώσεις που μου παρείχε ως διδάσκοντάς μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Επίσης, οφείλω να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής, τον Καθηγητή κ. **Κωνσταντίνο Προβιδάκη** και τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. **Θεοχάρη Τσούτσο** για τις εποικοδομητικές παρατηρήσεις τους. Τέλος, θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τον Δρ. Πολιτικό Μηχανικό, κ. **Πρόδρομο Ψαρρόπουλο**, για την αμέριστη βοήθεια που μου παρείχε.

> Τους ευχαριστώ όλους, Αλἑξανδρος Δ. Τσιπιανίτης Χανιά, Σεπτἑμβριος 2013

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξημένο ενδιαφέρον στην αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας και για αυτόν τον σκοπό έχουν κατασκευασθεί ή πρόκειται να κατασκευασθούν πολλά πάρκα ανεμογεννητριών σε όλο τον κόσμο, αλλά και στην χώρα μας όπου ο σεισμικός κίνδυνος είναι μια σημαντική παράμετρος του σχεδιασμού τους. Ο αντισεισμικός σχεδιασμός των ανεμογεννητριών έχει κάποιες ιδιαιτερότητες σε σύγκριση με τα συνήθη κτιριακά έργα. Σε κάθε περίπτωση, μία παράμετρος που χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή, καθώς δεν πρέπει να θεωρείται δεδομένος ο (συνήθως) ευεργετικός ρόλος του φαινομένου, είναι η επίδραση της δυναμικής αλληλεπίδρασης εδάφους– θεμελίωσης–ανωδομής (εξαιτίας φορτίσεων ανέμου ή/και σεισμού), η οποία αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Στο πλαίσιο αυτό μελετάται στην παρούσα εργασία η δυναμική απόκριση τυπικών ανεμογεννητριών, οι οποίες βρίσκονται θεμελιωμένες σε σχηματισμούς με ιδιαίτερες τοπικές εδαφικές συνθήκες και υποβάλλονται σε δυναμικές/σεισμικές διεγέρσεις στη βάση τους. Πιο συγκεκριμένα, μελετάται το πώς επηρεάζεται η απόκριση του πυλώνα εξαιτίας της δυναμικής αλληλεπίδρασης εδάφους–θεμελίωσης–ανωδομής και διερευνώνται οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του συστήματος.

εδράζονται Or εξεταζόμενες ανεμογεννήτριες, μέσω άκαμπτης επιφανειακής θεμελίωσης σε εδαφικές στρώσεις με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά (στρωματογραφίας, γεωμορφολογίας, τοπογραφίας, κλπ). Η παραμετρική διερεύνηση -μέσω κατάλληλων υπολογιστικών προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων- αναδεικνύει το γεγονός ότι η απόκριση του πυλώνα εξαρτάται από τα μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των εδαφικών σχηματισμών, τις δυναμικές ιδιότητες της ανωδομής και τα συχνοτικό περιεχόμενο της διέγερσης. Επίσης, επιβεβαιώνεται η υπόθεση ότι η δυναμική αλληλεπίδραση και οι τοπικές συνθήκες είναι σε πολλές περιπτώσεις αρκετά πιθανόν να επηρεάσουν δυσμενώς τη σεισμική καταπόνηση του πυλώνα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες	i
Περίληψη	ii
Περιεχόμενα	iii
1. Εισαγωγή	1
1.1 Εξέλιξη της αιολικής ενέργειας	1
1.2 Αντισεισμικός σχεδιασμός κατασκευών	2
1.3 Σεισμός & ανεμογεννήτριες	3
1.4 Αλληλεπίδραση πυλώνων-θεμελίωσης-εδάφους	4
2. Αιολικά πάρκα & ανεμογεννήτριες	6
2.1 Εισαγωγή	6
2.1.1 Ιστορικά στοιχεία	6
2.1.2 Αιολικά πάρκα	12
2.2 Δομή ανεμογεννήτριας	15
2.3 Τρόποι θεμελίωσης	
2.3.1 Μέθοδος θεμελίωσης δια πασσάλων σε βράχο με μη φέρουσ	α πλάκα
σύνδεσης κεφαλών	20
2.3.1.1 Αντίσταση αιχμής	20
2.3.1.2 Αντίσταση τριβής q_{SL}	21
2.3.1.3 Στατικός έλεγχος πασσάλου	21
2.3.1.4 Υπολογισμός καθίζησης	21
2.3.1.5 Ομάδα πασσάλων	22
2.3.1.6 Δείκτης εδάφους k _b	22
2.3.2 Μέθοδος θεμελίωσης με πασσαλωμένη γενική κοιτόστρωση.	23
2.3.3 Πέδιλο βαρύτητας με έκκεντρη φόρτιση	23
2.3.4 Μέθοδος θεμελίωσης Α/Γ με αγκυρωμένη γενική κοιτόστρωσ	η24
2.3.4.1 Υπολογισμός συνολικού μήκους αγκυρίου	26
2.3.4.2 Υπολογισμός μήκους αγκυρωσης	26
3. Σεισμικός κίνδυνος	28
3.1 Εισαγωγή	28
3.1.1 Κατηγοριοποίηση σεισμών ανάλογα με το βάθος	
3.1.2 Κλίμακες μέτρησης των σεισμών	
3.1.3 Σεισμικά κύματα	

3.1.3.1	1 Κύματα χώρου	32
3.1.3.2	2 Επιφανειακά κύματα	
3.2 Eδ	αφική σεισμική κίνηση	
3.2.1	Τοπικές εδαφικές συνθήκες	
3.2.2	Δυναμική εξίσωση κίνησης	
3.2.3	Πλάτος της εδαφικής κίνησης	
3.2.3.1	1 Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση	41
3.2.3.2	2 Μέγιστη εδαφική ταχύτητα	
3.2.3.3	3 Μέγιστη εδαφική μετακίνηση	43
3.2.4	Διάρκεια της ισχυρής εδαφικής κίνησης	43
3.3 Pe	υστοποίηση εδάφους	
3.3.1	Ρευστοποίηση και σεισμός	47
3.3.2	Μηχανισμός πρόκλησης ρευστοποίησης	
3.3.3	Διαδικασία ρευστοποίησης	50
3.4 Kα	ιθιζήσεις	52
3.4.1	Είδη καθιζήσεων	53
3.4.2	Εδάφη ευαίσθητα σε καθιζήσεις	53
3.4.3	Καθιζήσεις και σεισμός	54
3.5 Kα	ιτολισθήσεις	54
3.5.1	Χαρακτηριστικά των κατολισθήσεων	56
3.5.2	Κατολισθήσεις και σεισμός	
3.6 Ma	ετακινήσεις σεισμικών ρηγμάτων	59
3.6 Ma	ετακινήσεις σεισμικών ρηγμάτων	59
3.6 Ma4. Συ	ετακινήσεις σεισμικών ρηγμάτων μπεριφορά ανεμογεννητριών σε διάφορες φορτίσεις	59 6 2
 3.6 Ma 4. Συ 4.1 Etc 	ετακινήσεις σεισμικών ρηγμάτων μπεριφορά ανεμογεννητριών σε διάφορες φορτίσεις σαγωγή	59 62 62
 3.6 Ma 4. Συ 4.1 Εια 4.2 Φα 	ετακινήσεις σεισμικών ρηγμάτων μπεριφορά ανεμογεννητριών σε διάφορες φορτίσεις σαγωγή ορτίσεις λόγω ανέμου	59 62 62 62
 3.6 Με 4. Συ 4.1 Εισ 4.2 Φσ 4.2.1 	ετακινήσεις σεισμικών ρηγμάτων μπεριφορά ανεμογεννητριών σε διάφορες φορτίσεις σαγωγή ορτίσεις λόγω ανέμου Αδρανειακές και βαρυτικές δυνάμεις	59 62 62 64
 3.6 Με 4. Συ 4.1 Εια 4.2 Φα 4.2.1 4.2.2 	ετακινήσεις σεισμικών ρηγμάτων μπεριφορά ανεμογεννητριών σε διάφορες φορτίσεις σαγωγή ορτίσεις λόγω ανέμου Αδρανειακές και βαρυτικές δυνάμεις Αεροδυναμικά φορτία	59 62 62 62 64 65
 3.6 Μa 4. Συ 4.1 Εια 4.2 Φα 4.2.1 4.2.2 4.2.3 	ετακινήσεις σεισμικών ρηγμάτων μπεριφορά ανεμογεννητριών σε διάφορες φορτίσεις σαγωγή σαγωγή Αδρανειακές και βαρυτικές δυνάμεις Αεροδυναμικά φορτία Κόπωση	59 62 62 64 65 67
 3.6 Μa 4. Συ 4.1 Εια 4.2 Φα 4.2.1 4.2.2 4.2.3 4.3 Φα 	ετακινήσεις σεισμικών ρηγμάτων μπεριφορά ανεμογεννητριών σε διάφορες φορτίσεις σαγωγή ορτίσεις λόγω ανέμου Αδρανειακές και βαρυτικές δυνάμεις Αεροδυναμικά φορτία Κόπωση	59 62 62 64 65 67 67
 3.6 Με 4. Συ 4.1 Εια 4.2 Φα 4.2.1 4.2.2 4.2.3 4.3 Φα 4.3.1 	ετακινήσεις σεισμικών ρηγμάτων μπεριφορά ανεμογεννητριών σε διάφορες φορτίσεις σαγωγή ορτίσεις λόγω ανέμου Αδρανειακές και βαρυτικές δυνάμεις Αεροδυναμικά φορτία Κόπωση Ιδιομορφική ανάλυση	59 62 62 64 65 67 68
 3.6 Μa 4. Συ 4.1 Euc 4.2 Φc 4.2.1 4.2.2 4.2.3 4.3 Φc 4.3.1 4.3.2 	ετακινήσεις σεισμικών ρηγμάτων μπεριφορά ανεμογεννητριών σε διάφορες φορτίσεις σαγωγή ορτίσεις λόγω ανέμου Αδρανειακές και βαρυτικές δυνάμεις Αδρανειακές και βαρυτικές δυνάμεις Κόπωση Γόπωση Ιδιομορφική ανάλυση	59 62 62 64 65 67 67 68 70
 3.6 Μa 4. Συ 4.1 Euc 4.2 Φc 4.2.1 4.2.2 4.2.3 4.3 Φc 4.3.1 4.3.2 4.4 Kα 	ετακινήσεις σεισμικών ρηγμάτων μπεριφορά ανεμογεννητριών σε διάφορες φορτίσεις σαγωγή ορτίσεις λόγω ανέμου Αδρανειακές και βαρυτικές δυνάμεις Αδρανειακές και βαρυτικές δυνάμεις Αδροδυναμικά φορτία Κόπωση ορτίσεις λόγω σεισμού Ιδιομορφική ανάλυση Δυναμική ανάλυση	59 62 62 64 65 67 67 67 67
 3.6 Μa 4. Συ 4.1 Euc 4.2 Φc 4.2.1 4.2.2 4.2.3 4.3 Φc 4.3.1 4.3.2 4.4 Kα 5. Αρ 	ετακινήσεις σεισμικών ρηγμάτων μπεριφορά ανεμογεννητριών σε διάφορες φορτίσεις σαγωγή ορτίσεις λόγω ανέμου Αδρανειακές και βαρυτικές δυνάμεις Αδρανειακές και βαρυτικές δυνάμεις Αεροδυναμικά φορτία Αεροδυναμικά φορτία Γίσεις λόγω σεισμού Ιδιομορφική ανάλυση Δυναμική ανάλυση ταγραφή περιστατικών αστοχίας Α/Γ	
 3.6 Μa 4. Συ 4.1 Euc 4.2 Φc 4.2.1 4.2.2 4.2.3 4.3 Φc 4.3.1 4.3.2 4.4 Kα 5. Αρ 5.1 Fig 	ετακινήσεις σεισμικών ρηγμάτων μπεριφορά ανεμογεννητριών σε διάφορες φορτίσεις σαγωγή ορτίσεις λόγω ανέμου Αδρανειακές και βαρυτικές δυνάμεις Αεροδυναμικά φορτία Αεροδυναμικά φορτία Γόπωση Ιδιομορφική ανάλυση Δυναμική ανάλυση ταγραφή περιστατικών αστοχίας Α/Γ σανωνή	
 3.6 Μa 4. Συ 4.1 Euc 4.2 Φc 4.2.1 4.2.2 4.2.3 4.3 Φc 4.3.1 4.3.2 4.4 Kα 5. Αρ 5.1 Euc 5.2 Πε 	ετακινήσεις σεισμικών ρηγμάτων μπεριφορά ανεμογεννητριών σε διάφορες φορτίσεις σαγωγή ορτίσεις λόγω ανέμου Αδρανειακές και βαρυτικές δυνάμεις Αδρανειακές και βαρυτικές δυνάμεις Αδροδυναμικά φορτία Αεροδυναμικά φορτία Γοι μαροφική ανάλυση Δυναμική ανάλυση ταγραφή περιστατικών αστοχίας Α/Γ σαγωγή	
 3.6 Μa 4. Συ 4.1 Euc 4.2 Φc 4.2.1 4.2.2 4.2.3 4.3 Φc 4.3.1 4.3.2 4.4 Kα 5. Αρ 5.1 Euc 5.2 Πε 5.2 Πε 	ετακινήσεις σεισμικών ρηγμάτων μπεριφορά ανεμογεννητριών σε διάφορες φορτίσεις σαγωγή ορτίσεις λόγω ανέμου Αδρανειακές και βαρυτικές δυνάμεις Αδροδυναμικά φορτία Αεροδυναμικά φορτία Αεροδυναμικά φορτία Γίσεις λόγω σεισμού Ιδιομορφική ανάλυση Δυναμική ανάλυση αταγραφή περιστατικών αστοχίας Α/Γ 	
 3.6 Μa 4. Συ 4.1 Euc 4.2 Φc 4.2.1 4.2.2 4.2.3 4.3 Φc 4.3.1 4.3.2 4.4 Kα 5. Αρ 5.1 Euc 5.2 Πε 5.2.1 5.2.1 	ετακινήσεις σεισμικών ρηγμάτων μπεριφορά ανεμογεννητριών σε διάφορες φορτίσεις σαγωγή Ορτίσεις λόγω ανέμου Αδρανειακές και βαρυτικές δυνάμεις Αδρανειακές και βαρυτικές δυνάμεις Αδρανειακές και βαρυτικές δυνάμεις Αδρανειακές και βαρυτικές δυνάμεις Αδρανειακές και βαρυτικός δυνάμεις Ατοροδυναμικά φορτία Σομαμητική ανάλυση	
 3.6 Μa 4. Συ 4.1 Euc 4.2 Φc 4.2.1 4.2.2 4.2.3 4.3 Φc 4.3.1 4.3.2 4.4 Kα 5. Αρ 5.1 Euc 5.2 Πε 5.2.1 5.2.1.1 5.2.1.2 	ετακινήσεις σεισμικών ρηγμάτων μπεριφορά ανεμογεννητριών σε διάφορες φορτίσεις σαγωγή ορτίσεις λόγω ανέμου Αδρανειακές και βαρυτικές δυνάμεις Αεροδυναμικά φορτία Αεροδυναμικά φορτία Γάπωση	59 62 62 62 64 67 67 67 70 72 72 77 77 77 77

5.2.1.3 Μονάδες	79
5.2.1.4 Διαστάσεις σχεδιασμού	80
5.2.1.5 Γεωμετρία προσομοιώματος	80
5.2.1.6 Ιδιότητες υλικών	81
5.2.2 Δημιουργία καννάβου πεπερασμένων στοιχείων	85
5.2.2.1 Τοπική πυκνότητα δικτυώματος στοιχείων	86
5.2.3 Ανάλυση	86
5.2.3.1 Δημιουργία νέας φάσης υπολογισμών	87
5.2.3.2 Τύποι υπολογισμών	
5.2.3.3 Παράμετροι ελέγχου επαναληπτικής διαδικασίας	
5.2.3.4 Εισαγωγή δεδομένων φόρτισης	
5.2.4 Πρόγραμμα εξαγωγής αποτελεσμάτων	90
5.2.5 Πρόγραμμα σχεδιασμού καμπύλων	91
5.3 Επαλήθευση αριθμητικών αποτελεσμάτων με αναλυτικές λύσεις	92
5.3.1 Πακτωμένος μονοβάθμιος ταλαντωτής	92
5.3.2 Μονοδιάστατη εδαφική στρώση	95
5.4 Φάσματα χρονοϊστοριών επιταχύνσεων	97
6. Παραμετρική διερεύνηση	
6. Παραμετρική διερεύνηση6.1 Εισαγωγή	100 100
 6. Παραμετρική διερεύνηση 6.1 Εισαγωγή 6.2 Τριγωνική κοιλάδα 	100 100 102
 6. Παραμετρική διερεύνηση 6.1 Εισαγωγή 6.2 Τριγωνική κοιλάδα 6.3 Τραπεζοειδής κοιλάδα 	100 100 102 110
 6. Παραμετρική διερεύνηση 6.1 Εισαγωγή 6.2 Τριγωνική κοιλάδα 6.3 Τραπεζοειδής κοιλάδα 6.4 Μονόπλευρη τοπογραφία 	100 100 102 110 118
 6. Παραμετρική διερεύνηση 6.1 Εισαγωγή 6.2 Τριγωνική κοιλάδα 6.3 Τραπεζοειδής κοιλάδα 6.4 Μονόπλευρη τοπογραφία 6.5 Αμφίπλευρη τοπογραφία	100 102 110 110 118 123
 6. Παραμετρική διερεύνηση 6.1 Εισαγωγή 6.2 Τριγωνική κοιλάδα 6.3 Τραπεζοειδής κοιλάδα 6.4 Μονόπλευρη τοπογραφία	100 102 110 110 118 123 130
 6. Παραμετρική διερεύνηση 6.1 Εισαγωγή 6.2 Τριγωνική κοιλάδα 6.3 Τραπεζοειδής κοιλάδα 6.4 Μονόπλευρη τοπογραφία 6.5 Αμφίπλευρη τοπογραφία 6.6 Τοπογραφία με λοξό εδαφικό πρανές	100 102 110 110 118 123 130 138
 6. Παραμετρική διερεύνηση 6.1 Εισαγωγή 6.2 Τριγωνική κοιλάδα 6.3 Τραπεζοειδής κοιλάδα 6.4 Μονόπλευρη τοπογραφία	100 102 110 118 123 130 138 145
 6. Παραμετρική διερεύνηση 6.1 Εισαγωγή 6.2 Τριγωνική κοιλάδα 6.3 Τραπεζοειδής κοιλάδα 6.4 Μονόπλευρη τοπογραφία	100 102 110 118 123 130 138 145
 6. Παραμετρική διερεύνηση 6.1 Εισαγωγή 6.2 Τριγωνική κοιλάδα 6.3 Τραπεζοειδής κοιλάδα	100 102 110 118 123 130 138 145 153
 6. Παραμετρική διερεύνηση 6.1 Εισαγωγή 6.2 Τριγωνική κοιλάδα 6.3 Τραπεζοειδής κοιλάδα	100 102 110 110 118 123 130 138 145 153
 6. Παραμετρική διερεύνηση 6.1 Εισαγωγή 6.2 Τριγωνική κοιλάδα 6.3 Τραπεζοειδής κοιλάδα	100 102 110 118 123 130 138 145 153 154
 6. Παραμετρική διερεύνηση 6.1 Εισαγωγή 6.2 Τριγωνική κοιλάδα 6.3 Τραπεζοειδής κοιλάδα	100 102 110 110 123 130 138 145 153 153 154
 6. Παραμετρική διερεύνηση	100 100 110 110 118 123 130 138 145 153 153 154 154
 6. Παραμετρική διερεύνηση	100 102 102 110 118 123 130 138 145 153 153 154 156 156
 6. Παραμετρική διερεύνηση	100 102 102 110 118 123 130 138 145 153 154 154 156 158

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εξέλιξη της αιολικής ενέργειας

Η αιολική ενέργεια συνεχίζει να είναι η πιο γρήγορα αναπτυσσόμενη Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας (Α.Π.Ε.) σε όλο τον κόσμο. Ήδη σε μερικές χώρες είναι η δεύτερη πηγή ενέργειας στο εθνικό ηλεκτρικό δίκτυο. Ο λόγος της ανάπτυξης αυτής είναι η βελτίωση που παρατηρείται στον τομέα του σχεδιασμού και της κατασκευής των ανεμογεννητριών μεγάλων διαστάσεων και υψηλής απόδοσης (ήδη κατασκευάζονται ρότορες των οποίων η διάμετρος ξεπερνά τα 100 μέτρα). Επίσης, ένας ακόμη λόγος αυτής της ανάπτυξης, είναι ότι γενικότερα θεωρούνται αξιόπιστες κατασκευές, ανθεκτικές σε δυναμικά φορτία, συμπεριλαμβανομένων και των σεισμικών δράσεων. Για παράδειγμα, έχουν κατασκευαστεί στην Καλιφόρνια ανεμογεννήτριες με ισχύ 1GW, με συνολική ισχύ δικτύου 4GW, σε μια περιοχή με έντονη σεισμικότητα (Mensah et al., 2012).



Εικόνα 1.1: Σύγχρονο αιολικό πάρκο

1.2 Αντισεισμικός σχεδιασμός κατασκευών

Στις συνηθισμένες κατασκευές οι επιπτώσεις της σεισμικής δραστηριότητας δεν εξαρτώνται αποκλειστικά και μόνο από το μέγεθος της κίνησης του εδάφους, το οποίο απεικονίζεται στις χρονοϊστορίες επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης, αλλά και από το συχνοτικό περιεχόμενο της εδαφικής κίνησης, καθώς και από τα δυναμικά χαρακτηριστικά κάθε κατασκευής. Για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιούμε τα φάσματα απόκρισης (response spectra) στο πεδίο του χρόνου και των συχνοτήτων, τα οποία μας βοηθούν στην εκτίμηση της συμπεριφοράς των κατασκευών. Τα φάσματα στο πεδίο των συχνοτήτων είναι βασισμένα στην θεώρηση ότι ένα σεισμικό κύμα είναι ικανό να περιγραφεί (βάσει της ανάλυσης με μετασχηματισμό Fourier), ως ένα άθροισμα ἀπειρων απλών αρμονικών ταλαντώσεων, όπου καθένα από αυτά ἑχει μια συγκεκριμένη ιδιοπερίοδο ταλάντωσης (Προβιδάκης, 2004).

Στη χώρα μας, η πλειοψηφία των κτιρίων έχει χαμηλό ή και μεσαίο ύψος. Έτσι, οι θεμελιώδεις ιδιοσυχνότητες αυτών συχνά ταυτίζονται με το εύρος των συχνοτήτων που επικρατούν στις περισσότερες των σεισμικών διεγέρσεων που έχουν καταγραφεί στον ελλαδικό χώρο. Άρα με βάση τα προαναφερθέντα, υπάρχει ο κίνδυνος αυτές οι κατασκευές να συντονιστούν, γεγονός που θα επιφέρει την αύξηση των σεισμικών φορτίων και την εμφάνιση σοβαρών ζημιών. Γενικότερα, ο αντισεισμικός σχεδιασμός των συνηθισμένων κατασκευών είναι βασισμένος στην έννοια της πλαστιμότητας, δηλαδή της «ικανότητας των δομικών στοιχείων και δομημάτων να αναλώσουν τη σεισμική ενέργεια, αναπτύσσοντας ανελαστικές παραμορφώσεις». Στόχος αυτής της προσέγγισης είναι η κατασκευή να αντέξει σε διαδοχικούς κύκλους ανελαστικών

Γενικά, οι κώδικες αντισεισμικού σχεδιασμού αποσκοπούν στο σχεδιασμό κατασκευών που να έχουν τις ακόλουθες ιδιότητες:

- Να ανταπεξέρχονται σε ασθενείς σεισμικές δονήσεις, χωρίς να παρουσιάζουν βλάβες στο φέροντα οργανισμό.
- Σε μεσαίου μεγέθους σεισμικές δονήσεις, να εμφανίζουν έως μικρής έκτασης
 και επιδιορθώσιμες βλάβες σε φέροντα στοιχεία.
- Σε ισχυρές σεισμικές δονήσεις, να μην καταρρέουν, ακόμα και αν παρουσιαστούν εκτεταμένες δομικές βλάβες.

Πάντως, για διάφορους λόγους, είναι πρακτικά ανέφικτο να κατασκευαστούν πλήρως αντισεισμικά κτίρια (Κωμοδρόμος, 2012).

1.3 Σεισμός & Ανεμογεννήτριες

Γενικά, οι σεισμικές δράσεις ανήκουν σε δύο κατηγορίες, τις επιβαλλόμενες παραμορφώσεις, λόγω των μετακινήσεων ενεργών ρηγμάτων, εδαφικής αστοχίας, αστάθειας πρανών-κατολισθήσεις κ.α., καθώς και τις επιβαλλόμενες αδρανειακές δυνάμεις λόγω της εδαφικής κίνησης, η οποία επηρεάζεται από τις τοπικές εδαφικές συνθήκες στην περιοχή του έργου (βλ. Εικόνα 1.2).



Εικόνα 1.2: Κύριες σεισμικές δράσεις (Πηγή: Ψαρρόπουλος & Τσομπανάκης, 2011)

Μέχρι πρόσφατα, τα σεισμικά φορτία δεν είχαν τύχει ιδιαίτερης προσοχής, συγκρίνοντάς τα με τα άλλα φορτία, στον σχεδιασμό ανεμογεννητριών. Γενικά, περιορισμένα δεδομένα για την επίδραση υπήρχαν των σεισμών στις ανεμογεννήτριες, και οι μέθοδοι σχεδιασμού ήταν αντίστοιχες με αυτές των συμβατικών κατασκευών. Η πρακτική αυτή οδήγησε στην εξέταση των σεισμικών φορτίων ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες περιπτώσεις φορτίων. Ωστόσο, από τη στιγμή που οι ανεμογεννήτριες άρχισαν να κατασκευάζονται σε περιοχές όπου υπάρχει έντονη σεισμική δραστηριότητα, οι κατασκευαστικές εταιρίες άρχισαν να λαμβάνουν υπόψη τις περιπτώσεις λαμβάνοντας υπόψη ταυτόχρονα τα σεισμικά και τα υπόλοιπα φορτία.

Επίσης, οι μελετητές θα πρέπει να αξιολογήσουν τα αποτελέσματα από δύο ανεξάρτητες αναλύσεις που αφορούν τα δυναμικά φορτία (ανέμου και σεισμού),

εξαιτίας της έλλειψης των απαραίτητων εργαλείων και εξειδικευμένης γνώσης. Αυτή η διαδικασία δεν είναι αποτελεσματική, επειδή δεν μελετώνται θέματα δυναμικής αλληλεπίδρασης και έτσι, μπορεί να οδηγήσει σε αναξιόπιστα αποτελέσματα.

1.4 Αλληλεπίδραση πυλώνων-θεμελίωσης-εδάφους

Από μια γενική σκοπιά, η δυναμική αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής αποτελεί ένα ιδιαιτέρως πολύπλοκο πρόβλημα, επειδή η δυναμική απόκριση του εδάφους επηρεάζει την ταλάντωση της κατασκευής, και παράλληλα 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 να επηρεάζεται από το φαινόμενο της δυναμικής αλληλεπίδρασης ανωδομής-θεμελίωσης-εδάφους.

Το ἐδαφος στο οποίο θα κατασκευασθεί η θεμελίωση είναι ικανό να επηρεάσει με πολλούς τρόπους τη δυναμική απόκριση του πυλώνα. Αρχικά, λαμβάνει χώρα μια αύξηση της ιδιοπεριόδου του συστήματος, σε σχέση με την αντίστοιχη ιδιοπερίοδο της ανωδομής, η οποία είναι πακτωμένη σε βράχο. Επιπλέον, ένα σημαντικό ποσοστό της ενέργειας διαχέεται στο έδαφος μέσω της απόσβεσης ακτινοβολίας και της υστερητικής απόσβεσης του εδάφους (Jennings & Bielak, 1973; Veletsos & Nair, 1975). Επειδή όλοι οι αντισεισμικοί κανονισμοί χρησιμοποιούν εξιδανικευμένα φάσματα σχεδιασμού, η αύξηση της ιδιοπεριόδου και της ενεργής απόσβεσης του συστήματος έχει συνήθως ως αποτέλεσμα τη μείωση των φασματικών επιταχύνσεων (NEHRP, 1997).

Όμως, από τις καταγραφές διάφορων σεισμών φαίνεται ότι τα κανονιστικά φάσματα σχεδιασμού, που προκύπτουν από στατιστική επεξεργασία από προηγούμενες καταγραφές, δεν είναι ικανά να καλύψουν το σύνολο των σεισμικών διεγέρσεων και ειδικά τα επιταχυνσιογραφήματα με μεγάλες φασματικές επιταχύνσεις σε μεγαλύτερες περιόδους (Mylonakis & Gazetas, 2000). Στις περιπτώσεις αυτές,

όταν αυξάνεται η ιδιοπερίοδος, για παράδειγμα λόγω της ενδοσιμότητας της θεμελίωσης, είναι πιθανή η αύξηση των φασματικών επιταχύνσεων.

Με βάση τα προαναφερθέντα, στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται μέσω κατάλληλων αριθμητικών προσομοιωμάτων η δυναμική απόκριση ενός τυπικού πυλώνα ανεμογεννήτριας, εδραζόμενου μέσω άκαμπτης επιφανειακής θεμελίωσης σε εδαφική στρώση εντός κοιλάδας (βλ. Εικόνα 1.3), ή σε κορυφογραμμή με έντονη τοπογραφική ανωμαλία. Στόχος της διερεύνησης είναι να εξετασθεί το φαινόμενο της δυναμικής αλληλεπίδρασης και η επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών στην απόκριση του πυλώνα κατά τη διάρκεια μιας σεισμικής διέγερσης.



Εικόνα 1.3: Ανεμογεννήτρια εντός κοιλάδας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ & ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

2.1 Εισαγωγή

Γενικότερα, ως αιολική ενέργεια ορίζεται η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του πνέοντος ανέμου, αποτελεί ενέργεια ήπιας μορφής και ανάγεται στις καθαρές πηγές, επειδή οι ανεμογεννήτριες δεν εκπέμπουν ή προκαλούν ρύπους. Ανήκει στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.), οι οποίες ανανεώνονται μέσω του κύκλου της φύσης, δηλαδή είναι ανεξάντλητες.

Πιο συγκεκριμένα, η αιολική ενέργεια δημιουργείται από τη διαρκή κίνηση του αέρα εξαιτίας:

- i) της ηλιακής ακτινοβολίας,
- ii) της ανομοιογένειας του ανάγλυφου του εδάφους,
- iii) της περιστροφικής κίνησης της γης,
- iv) την ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας του πλανήτη μας από τον ήλιο, η οποία και προκαλεί τη μετακίνηση μεγάλων μαζών αέρα από τη μία περιοχή στην άλλη, δημιουργώντας ανέμους.

Εξετάζοντας αυτήν τη μορφή ενέργειας από θερμοδυναμική σκοπιά, είναι υψηλής ποιότητας ενέργεια, γι' αυτόν τον λόγο και χρησιμοποιείται ευρέως για τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

2.1.1 Ιστορικά στοιχεία

Η αιολική ενέργεια δεν είναι εντελώς σύγχρονη μορφή ενέργειας, αφού έχουν βρεθεί στοιχεία για τη χρήση της από παλαιότερες εποχές. Αρχικά, υπήρχε εκμετάλλευση του άνεμου με τους ανεμόμυλους (βλ. Εικόνα 2.1), οι οποίοι χρησιμοποιούνταν για περίπου 3000 χρόνια κυρίως για την άλεση των σιτηρών ή για την άντληση νερού.

Επίσης, μία άλλη κύρια χρήση του αέρα για πάρα πολλά χρόνια, που συναντάται μέχρι και σήμερα, ήταν στα ιστιοφόρα πλοία (βλ. Εικόνα 2.2) πριν την εφεύρεση των κινητήρων εσωτερικής καύσης.



Εικόνα 2.1: Ανεμόμυλος.

Από τις αρχές του 13^{ου} αιώνα, οι ανεμόμυλοι οριζοντίου άξονα ήταν ένα αρκετά σημαντικό στοιχείο για την αγροτική οικονομία εκείνης της εποχής και γνώρισε την παρακμή κατά την ανάπτυξη των φθηνών κινητήρων υγρών καυσίμων και του ηλεκτρισμού. Η χρήση των ανεμογεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να εντοπιστεί γύρω στα τέλη του 19^{ου} αιώνα με την ανεμογεννήτρια ισχύος 12 kW, η οποία κατασκευάστηκε από τον Brush στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Την έρευνα για την κατασκευή της ανέλαβε ο LaCour από τη Δανία. Ωστόσο, κατά το μεγαλύτερο μέρος του 20^{ου} αιώνα υπήρχε ελάχιστο ενδιαφέρον για την χρήση της αιολικής ενέργειας, εκτός από τη φόρτιση μπαταριών για απομακρυσμένες κατοικίες. Όμως, ακόμα και αυτά τα συστήματα χαμηλής ισχύος αντικαταστάθηκαν γρήγορα όταν αναπτύχθηκαν τα κοινά ηλεκτρικά δίκτυα. Μία αξιοσημείωτη εξαίρεση ήταν η ανεμοτουρμπίνα των Smith-Putnam που είχε ισχύ 1250 kW και κατασκευάστηκε στις Η.Π.Α. το 1941. Αυτή η ενδιαφέρουσα μηχανή είχε ρότορα διαμέτρου 53 μέτρων και ειδικά πτερύγια, τα οποία ήταν έτσι κατασκευασμένα ώστε να μειώνουν τα φορτία. Αν και υπήρξε μία αστοχία σε ένα πτερύγιο το 1945, παρόλα αυτά παρέμεινε για 40 χρόνια η μεγαλύτερη ανεμογεννήτρια που είχε κατασκευαστεί εκείνη την εποχή.



Εικόνα 2.2: Ιστιοφόρο

Οι Golding (1955), Shepherd και Divone (1994) παρουσίασαν στοιχεία σχετικά με την αρχή της ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας. Αναφέρουν την ανεμογεννήτρια Balaclava στην Σοβιετική Ένωση, η οποία είχε ισχύ 100 kW 30 μέτρα διάμετρο και την Andrea Enfield, ισχύος 100 kW διαμέτρου 24 μέτρων η οποία κατασκευάστηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο στις αρχές του 1950. Η τελευταία είχε σχεδιαστεί με ειδικά κοίλα πτερύγια με άνοιγμα στην άκρη, τα οποία τραβούσαν τον αέρα στον πύργο, όπου μία άλλη τουρμπίνα κινούσε τη γεννήτρια. Στη Δανία, κατασκευάστηκε το 1956 η μηχανή Gedser με ισχύ 200 kW και διάμετρο 24 μέτρα, ενώ το 1963 η Αρχή Ηλεκτρικής Ενέργειας της Γαλλίας έκανε δοκιμές για μία τουρμπίνα 1.1 MW και διάμετρο 35 μέτρων. Επίσης, κατά την περίοδο του 1950-1960 ο καθηγητής Hutter και ξεκίνησε την κατασκευή νέων καινοτόμων και ελαφριών μελέτησε ανεμογεννητριών στη Γερμανία. Όμως, παρόλα τα τεχνικά πλεονεκτήματα και τον γενικό ενθουσιασμό που επικρατούσε εκείνη την εποχή, δεν υπήρξε κάποιο σχετικό ενδιαφέρον στην παραγωγή ενέργειας από τον άνεμο μέχρι να φτάσουμε στην εποχή όπου η τιμή του πετρελαίου αυξήθηκε δραματικά, κατά την πετρελαϊκή κρίση το 1973.

Αυτή η ξαφνική αύξηση της τιμής του πετρελαίου ήταν η κύρια αιτία για να θεσπιστούν πολλά προγράμματα έρευνας, ανάπτυξης και εφαρμογής, επιδοτούμενα από τις κυβερνήσεις των κρατών. Στις Η.Π.Α. αυτό οδήγησε στην κατασκευή μίας σειράς από πρωτότυπες τουρμπίνες, ξεκινώντας από μία διαμέτρου 38 μέτρων, ισχύος 100 kW το έτος 1975 με αποκορύφωμα την ανεμογεννήτρια διαμέτρου 97.5 μέτρων, ισχύος 2.5 MW το 1987. Στη συνέχεια, παρόμοια επιδοτούμενα προγράμματα επιδιώχθηκαν στο Ηνωμένο Βασίλειο, τη Γερμανία και τη Σουηδία. Βέβαια, υπήρχε και μία σημαντική αβεβαιότητα σχετικά με το ποιο είδος ανεμογεννήτριας θα μπορούσε να δώσει μεγαλύτερη αποδοτικότητα και αυτό ερευνήθηκε σε ευρεία κλίμακα.

Στον Καναδά κατασκευάστηκε η κάθετου άξονα ανεμογεννήτρια Darrieus ισχύος 4 MW και μελετήθηκε και μία, επίσης καθέτου άξονα και διαμέτρου 34 μέτρων, στις εγκαταστάσεις Sandia Vertical Axis Test Facility στις Η.Π.Α. Στο Ηνωμένο Βασίλειο, ο καθηγητής W. Peter Musgrove πρότεινε ένα εναλλακτικό σχέδιο για τύπου καθέτου άξονα χρησιμοποιεί ευθεία πτερύγια, τα οποία σχηματίζουν έναν ρότορα τύπου "Η" και στη συνέχεια κατασκευάστηκε το πρωτότυπο ισχύος 500 kW. Το 1981, μία καινοτόμα ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα με ισχύ 3 MW κατασκευάστηκε στις Η.Π.Α., η οποία χρησιμοποιούσε υδραυλική μετάδοση με αποτέλεσμα όλη η κατασκευή να είχε προσανατολισμό στον άνεμο. Η καλύτερη επιλογή για τον αριθμό των πτερυγίων δεν ήταν ξεκάθαρη για πολλές αεροτουρμπίνες, τη στιγμή που κατασκευάζονταν μεγάλες ανεμογεννήτριες με ένα, δύο ή τρία πτερύγια.

Γενικότερα, παράχθηκε πολύ ενδιαφέρουσα και χρήσιμη επιστημονική πληροφορία από αυτά τα ερευνητικά προγράμματα και τα πρωτότυπα συστήματα που κατασκευάστηκαν, λειτούργησαν ακριβώς όπως σχεδιάστηκαν. Ωστόσο, τα προβλήματα πολύ μεγάλων αεροτουρμπίνων σε πολύ δύσκολες κλιματικές συνθήκες, ήταν αρκετά συχνά και η αξιοπιστία των πρωτότυπων δεν ήταν πάντα ικανοποιητική. Την ίδια στιγμή που κατασκευάζονταν πρωτότυπα για ανεμογεννήτριες μεγάλης ισχύος σε MW από ιδιωτικές εταιρείες, συχνά με κρατική υποστήριξη κατασκευάζονταν πιο μικρές και πιο απλές μηχανές συνήθως για εμπορική χρήση. Στην Καλιφόρνια, η υλοποίηση διάφορων προγραμμάτων οικονομικής ενίσχυσης στα μέσα της δεκαετίας του '80, είχε ως αποτέλεσμα την εγκατάσταση ενός μεγάλου αριθμού από αρκετά μικρές ανεμογεννήτριες, με ισχύ όχι μεγαλύτερη από 100 kW. Μερικές από αυτές είχαν συχνά διάφορα προβλήματα κατά τη λειτουργία τους, αλλά επειδή ήταν μικρές σε μέγεθος κατασκευάζονταν και επισκευάζονταν σχετικά εύκολα.

9

Η αιολική ενέργεια κατέστη ελκυστική για τις κυβερνήσεις το 1973, εξαιτίας της τιμής του πετρελαίου και της γενικής θεώρησης ότι πλέον οι πηγές για υγρά καύσιμα είναι πολύ περιορισμένες. Στις μέρες μας, η κύρια αιτία της χρήσης των ανεμογεννητριών είναι η παραγωγή «καθαρής» ηλεκτρικής ενέργειας για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και η γενικότερη αλλαγή πλεύσης στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Συγκεκριμένα, το 1997 το Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης προχώρησε στην έκδοση της «Λευκής Βίβλου» (CEU,1997), η οποία είχε θέσει ως στόχο το 12% της ενέργειας να προέρχεται από Α.Π.Ε. μέχρι το 2010. Η αιολική ενέργεια έχει πλέον ένα σημαντικό ρόλο στην ποσότητα της ενέργειας από Α.Π.Ε. και αυτό φαίνεται από την αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος σε πανευρωπαϊκή κλίμακα από 2.5 GW το 1995 στα 40 GW το 2010. Ανάλογος στόχος έχει τεθεί για το 2020, όπου το 20% θα πρέπει να προέρχεται από Α.Π.Ε.



Εικόνα 2.3: Μία από τις πρώτες Α/Γ.

Όσον αφορά στη χώρα μας, έγινε αρχικά μία προσπάθεια από την Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία, χωρίς όμως αποτέλεσμα. Τελικά, έπειτα από απόφαση της Δ.Ε.Η, ξεκίνησε η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα το 1994, με το Φ.Ε.Κ 168^A/94 (Γληνού κ.α., 2005). Αξίζει να παραθέσουμε μερικά σημαντικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της αιολικής ενέργειας:

- Είναι ανεξάντλητη μορφή ενέργειας.
- Είναι από τις λεγόμενες «καθαρές» μορφές ενέργειας, δεν εκλύονται αέρια
 του θερμοκηπίου και γενικότερα ρύποι.
- Είναι υψηλής απόδοσης.
- Οι επιπτώσεις στο περιβάλλον είναι πολύ μικρές σε σχέση με τα συμβατικά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας.
- Δημιουργούνται νέες θέσεις εργασίας.

Όσον αφορά στη δημιουργία θέσεων εργασίας, παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.4 το διάγραμμα που σχετίζεται με την εξέλιξη της απασχόλησης στον τομέα της αιολικής ενέργειας στις χώρες της Ε.Ε.





Τα κυριότερα μειονεκτήματα των ανεμογεννητριών είναι τα εξής:

 i) Πιθανοί τραυματισμοί και θανατώσεις των διερχόμενων πτηνών (αποδημητικών κυρίως, γιατί τα ενδημικά είναι συνηθισμένα στην παρουσία των μηχανών της περιοχής).

- ii) Υπάρχει μία γενικότερη επιβάρυνση του περιβάλλοντος, εξαιτίας της κοπής σημαντικού αριθμού δέντρων και της διαμόρφωσης του χώρου κατασκευής.
- iii) Θόρυβος από τη λειτουργία των μηχανών, ο οποίος όμως έχει μειωθεί κατά ένα μεγάλο ποσοστό λόγω της συνεχούς εξέλιξης της τεχνολογίας.



Εικόνα 2.5: Κατασκευή Α/Γ στο Λαύριο.

2.1.2 Αιολικά πάρκα

Γενικά, ως αιολικό πάρκο μπορούμε να ορίσουμε έναν χώρο, όπου έχουν κατασκευαστεί πολλές ανεμογεννήτριες στη στεριά ή στη θάλασσα. Είναι μία εγκατάσταση, η οποία μέσω του ανέμου και της κίνησης των πτερυγίων των ανεμογεννητριών παράγει ηλεκτρικό ρεύμα, μετατρέποντας τη μηχανική ενέργεια των πτερυγίων σε ηλεκτρική. Η μετατροπή αυτή, καθώς και η διαδικασία εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.6.

Συνήθως, στα κοινά αιολικά πάρκα χρησιμοποιούνται κυρίως ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα, οι οποίες διαθέτουν δύο ή τρία πτερύγια, με παραγόμενη ισχύ 200 έως και 400 kW. Για τη λειτουργία του αιολικού πάρκου, αρχικά εντοπίζεται μία περιοχή με έντονους ανέμους και κατάλληλη για αξιοποίηση. Στη συνέχεια, γίνονται οι απαραίτητες μετρήσεις, βάζοντας κατάλληλους ιστούς στα σημεία ενδιαφέροντος, και εκπονούνται οι μελέτες. Με την προϋπόθεση ότι η τοποθεσία αυτή πληροί τις απαραίτητες προδιαγραφές, ξεκινάει έπειτα η διαδικασία για την εγκατάσταση δεκάδων ανεμογεννητριών, οι οποίες και θα αποτελέσουν το αιολικό πάρκο.



Εικόνα 2.6: Σχηματική παράσταση εγκατάστασης εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας (Πηγή: Ηλεκτρολογία Τεχνολογικής Κατεύθυνσης, ΟΕΔΒ).

Για να εγκατασταθεί πλήρως η καθεμία ανεμογεννήτρια χρειάζεται περίπου 1 έως και 3 ημέρες. Τα στάδια συναρμολόγησης μίας τυπικής ανεμογεννήτριας σε ένα αιολικό πάρκο είναι τα ακόλουθα.

- Αρχικά, γίνεται η ανέγερση του πύργου και η τμηματική τοποθέτηση αυτού πάνω στα θεμέλια.
- Ακολούθως, λαμβάνει χώρα η τοποθέτηση της ατράκτου στην κορυφή του πύργου. Στην άτρακτο περιέχεται το σύστημα όπου γίνεται η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική.
- Στη βάση του πύργου συναρμολογείται ο ρότορας (οριζοντίου άξονα συνήθως, στο οποίο και είναι τοποθετημένα τα πτερύγια), που αποτελεί ουσιαστικά το κινητό μέρος της ανεμογεννήτριας.
- Ο ρότορας ανυψώνεται και συνδέεται στην άτρακτο.
- Τέλος, γίνονται οι απαραίτητες ηλεκτρικές συνδέσεις.

Ήδη υπάρχουν αρκετές εφαρμογές και δραστηριότητες σχετικά με την αιολική ενέργεια και τα αιολικά πάρκα στην Ελλάδα. Η χώρα μας έχει μεγάλη και συχνή δραστηριότητα ανέμων, ειδικότερα στα νησιά και στις παραλίες, ενώ έχουμε και πολύ μεγάλη ακτογραμμή. Οπότε, είναι προφανές ότι η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας αποτελεί σημαντικό τομέα για την οικονομία μας. Το υπάρχον αιολικό δυναμικό, το οποίο παρουσιάζεται στο σχετικό χάρτη της Εικόνας 2.7, είναι ικανό να καλύψει

περίπου το 13,6% των ηλεκτρικών αναγκών της χώρας. Γενικά, έχουν γίνει πολλές ενέργειες για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας σε όλη τη χώρα και σε αυτό βοηθάει η πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τις Α.Π.Ε., η οποία ενθαρρύνει με επιδοτήσεις για τις επενδύσεις σε ήπιες μορφές ενέργειας. Επίσης, η εθνική νομοθεσία, όπως ο αναπτυξιακός νόμος 3299/04, καθώς και ο νόμος για τις Α.Π.Ε. 3468/06, δίνουν στους έλληνες πολίτες περισσότερα κίνητρα για ανάλογες επενδύσεις.



Εικόνα 2.7: Χάρτης αιολικού δυναμικού Ελλάδας (Πηγή: Κ.Α.Π.Ε «Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας»).

Περιοχές με πλούσιο αιολικό δυναμικό στην Ελλάδα, είναι η Κρήτη, η Πελοπόννησος, η Εύβοια και τα νησιά του Αιγαίου. Υπάρχουν όμως και αιολικά πάρκα σε διάφορες άλλες περιοχές της χώρας. Συνολικά, το δίκτυο της χώρας μας τροφοδοτείται με 75,6 MW ηλεκτρικής ισχύος εξαιτίας των υφιστάμενων αιολικών πάρκων (βλ. Εικόνα 2.9), ενώ βρίσκονται σε διαδικασία αδειοδότησης ακόμα 5 μεγάλες μονάδες. Σε αυτό το σημείο, αξίζει να αναφερθούμε σε ένα μεγάλο αιολικό πάρκο, το πρώτο υπεράκτιο, το οποίο θα κατασκευαστεί στη Λήμνο. Πιο συγκεκριμένα, η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (Ρ.Α.Ε.) έχει χορηγήσει άδεια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από υπεράκτιο αιολικό πάρκο, ισχύος 498,15 MW, αποτελούμενο από 81 ανεμογεννήτριες με ισχύ 61,5 MW έκαστη. Η επένδυση αυτή θα κοστίσει 2 δις ευρώ και θα παράγει ενέργεια 1.692,3 GW ετησίως, ικανή να τροφοδοτήσει περίπου 500.000 νοικοκυριά.



Εικόνα 2.8: Α/Γ στο Τόπλου Κρήτης.



Εικόνα 2.9: Τα αιολικά πάρκα στην Ελλάδα με πράσινο χρώμα (Πηγή: Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας).

2.2 Δομή ανεμογεννήτριας

Μέχρι τώρα υπάρχουν δύο βασικοί τύποι ανεμογεννητριών, οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα και οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα. Στην παρούσα εργασία θα

μελετήσουμε αυτές με οριζόντιο άξονα. Μία τυπική ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα αποτελείται από τα εξής βασικά μέρη (βλ. Εικόνα 2.10):

- Το δρομέα, που αποτελείται από 2 ή 3 πτερύγια από ενισχυμένο πολυεστέρα.
 Τα πτερύγια προσδένονται πάνω σε μία πλίμνη είτε σταθερά, είτε με τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από τον διαμήκη άξονά τους, μεταβάλλοντας το βήμα.
- Το σύστημα μετάδοσης της κίνησης, το οποίο αποτελείται κυρίως από τον κύριο άξονα, τα έδρανά του και το κιβώτιο πολλαπλασιασμού των στροφών, που προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα της ανεμογεννήτριας. Η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή κατά την κανονική λειτουργία της ανεμογεννήτριας.
- Την ηλεκτρική γεννήτρια, η οποία είναι σύγχρονη ή επαγωγική με 4 ή 6 πόλους και συνδέεται με την έξοδο του πολλαπλασιαστή μέσω ενός ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου και μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και βρίσκεται συνήθως πάνω στον πύργο της ανεμογεννήτριας. Υπάρχει και το σύστημα πέδησης, το οποίο είναι ένα συνηθισμένο δισκόφρενο που τοποθετείται στον κύριο άξονα ή στον άξονα της ανεμογεννήτριας.
- Το σύστημα προσανατολισμού, που αναγκάζει συνεχώς τον άξονα περιστροφής να βρίσκεται παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου.
- Τον πυλώνα (ἡ πὑργο), ο οποίος στηρίζει ὀλη την ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση. Ο πυλώνας είναι συνήθως μεταλλικός και σπανίως από οπλισμένο σκυρόδεμα.
- Τον ηλεκτρονικό πίνακα και τον πίνακα ελέγχου, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στη βάση του πύργου. Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί, συντονίζει και ελέγχει όλες τις λειτουργίες της ανεμογεννήτριας, φροντίζοντας για την απρόσκοπτη λειτουργία της.

Στον Πίνακα 2.1, γίνεται πιο λεπτομερή αναφορά των τμημάτων μίας ανεμογεννήτριας, καθώς και της λειτουργίας καθενός από αυτά.

ΜΕΛΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ
Βάση πτερυγίων (Nacelle)	Περιλαμβάνει τα σημαντικότερα μέλη μιας ανεμογεννήτριας, όπως το κουτί πέδησης, το σύστημα περιστροφής-ευθυγράμμισης και την ηλεκτρική γεννήτρια
Πτερύγια ρότορα	Αιχμαλωτίζουν τον άνεμο και μεταφέρουν την ενέργειά του στο hub του ρότορα
Υποδοχή πτερυγίων (Hub)	Εφαρμόζει τον ρότορα στον άξονα χαμηλής ταχύτητας
Χαμηλής ταχύτητας ἁξονας	Ενώνει τον ρότορα με το κουτί περιστροφής
Κουτί περιστροφής	Συνδέεται με τον άξονα χαμηλής ταχύτητας και περιστρέφει τον άξονα υψηλής ταχύτητας με μια πολύ μεγαλύτερη αναλογία από τον χαμηλής ταχύτητας άξονα
Άξονας υψηλής ταχύτητας με μηχανολογικό σύστημα πέδησης	Οδηγεί την ηλεκτρική γεννήτρια περιστρέφοντας την με 1500 κύκλους ανά λεπτό (ενδεικτική τιμή)
Ηλεκτρική γεννήτρια	Γεννήτρια επαγωγής ηλεκτρισμού
Σὑστημα περιστροφἡς- ευθυγρἁμμισης	Στρίβει τη βάση πτερυγίων με τον ρότορα με κινητήρα προς την πνοή του ανέμου
Ηλεκτρονικός διαχειριστής	Παρακολουθεί συνεχώς την λειτουργία της γεννήτριας
Υδραυλικό σύστημα	Επαναφέρει τα αεροδυναμικά φρένα της γεννήτριας
Σύστημα ψύξης	Ψύχει την ηλεκτρική γεννήτρια
Πύργος ανεμογεννήτριας	Φέρει τη βάση των πτερυγίων και τον ρότορα
Ανεμόμετρο και ανεμοδείκτης	Καταγράφει ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου

Πίνακας 2.1-Περιγραφή βασικών τμημάτων ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 2.10: Δομή ανεμογεννήτριας.

2.3 Τρόποι θεμελίωσης

Στην παρούσα ενότητα θα αναφερθούμε στους τρόπους με τους οποίους θεμελιώνονται οι ανεμογεννήτριες. Αυτές συνήθως υφίστανται ροπές ανατροπής λόγω της πίεσης από τον αέρα και την ενδεχόμενη σεισμική δραστηριότητα. Οι τρόποι θεμελίωσης, οι οποίοι θα αναπτυχθούν συνοπτικά στη συνέχεια, είναι οι εξής (βλ. Εικόνα 2.11):

- Θεμελίωση δια βαρέων πέδιλων, έκκεντρα φορτιζόμενων υποκείμενων σε δυνάμεις θλίψεως και εφελκυσμού.
- Θεμελίωση δια πασσάλων ή μικροπασσάλων σε βράχο, με μη φέρουσα πλάκα σύνδεσης κεφαλών.
- Θεμελίωση δια πασσαλωμένων φέρουσων και άκαμπτων κοιτοστρώσεων.
- Θεμελίωση δια αγκυρωμένων γενικών κοιτοστρώσεων.



Εικόνα 2.11: Μέθοδοι θεμελίωσης Α/Γ (Πηγή: Μπαρούνης, 2009).

Κατασκευές οι οποίες έχουν ως στόχο να στηρίξουν ανεμογεννήτριες, υψηλές κολώνες ενέργειας ή τηλεπικοινωνιών (π.χ, κολώνες Δ.Ε.Η, Ο.Τ.Ε) θα πρέπει να έχουν αρκετά μεγάλη αντοχή στις ισχυρές ροπές ανατροπής, στις οποίες υπόκεινται. Για αυτόν τον λόγο, θα πρέπει να κατασκευαστούν θεμελιώσεις με αρκετή αντοχή σε θλιπτικές δυνάμεις και δυνάμεις εφελκυσμού. Σε τέτοιου τύπου κατασκευές, ένα ή και περισσότερα στοιχεία της θεμελίωσης δέχονται οριζόντια φορτία και άλλα δέχονται σε βάθος χρόνου επαναληπτικές και συνεχείς δυνάμεις, των οποίων το μέγεθος παρουσιάζει μεταβολές του χρόνου. Βέβαια, συνήθως οι μεταβολές των καταπονήσεων θλίψης και εφελκυσμού εξαρτώνται από την πίεση του ανέμου, αλλά και από τις οριζόντιες σεισμικές δυνάμεις.

Η θεμελίωση για την κατασκευή μίας ανεμογεννήτριας θα πρέπει να λαμβάνει χώρα σε έδαφος χωρίς επιχώματα, το οποίο δεν έχει υποστεί αρκετή παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της εκσκαφής. Άρα, καλό είναι να μην γίνονται εκσκαφές σε μεγάλο βάθος για να μην μεταβληθούν αρκετά οι εδαφικές συνθήκες και αυτό αποφεύγεται χρησιμοποιώντας παθητικά αγκύρια και μικροπασσάλους.

Στην περίπτωση που υπάρχουν ασβεστολιθικά καρστικοποιημένα πετρώματα, των οποίων η γεωμετρία δεν είναι σαφής και προσδιορίζεται με δυσκολία, μία καλή λύση θα μπορούσε να είναι η μέθοδος της πασσαλομένης άκαμπτης γενικής κοιτόστρωσης, η οποία θα είναι κατασκευασμένη σε επαφή με την επιφάνεια του εδάφους ώστε να είναι φέρουσα. Χρησιμοποιώντας αυτόν τον τρόπο θεμελίωσης, αποφεύγεται μία πιθανή καθίζηση της θεμελίωσης στην περίπτωση που υπάρξει κενό περιορισμένων διαστάσεων. Εάν ο βράχος δεν περιέχει κενά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η λύση των παθητικών αγκυρίων κάτω από τη στάθμη της θεμελίωσης για να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά οι εφελκυστικές δυνάμεις ανύψωσης των στοιχείων του συστήματος.

2.3.1 Μέθοδος θεμελίωσης δια πασσάλων σε βράχο με μη φέρουσα πλάκα σύνδεσης κεφαλών

Αυτός ο τύπος θεμελίωσης λειτουργεί με ένα κλείδωμα σφήνωμα της αιχμής του πασσάλου στο βράχο με μήκος μία έως δύο φορές τη διάμετρο του πασσάλου D. Οι πάσσαλοι που εφαρμόζονται στον βράχο είναι κατά κύριο λόγο μικροπάσσαλοι, οι οποίοι έχουν διάμετρο 100-300mm. Αυτοί παραλαμβάνουν το φορτίο σχεδιασμού, συνήθως με αντίσταση τριβής και αιχμής.

2.3.1.1 Αντίσταση αιχμής

Η οριακή αντίσταση αιχμής του κλειδώματος q_b έναντι της ολίσθησης στις σφήνες Α και Β της Εικόνας 2.12 δίνεται από την παρακάτω εξίσωση των Hoek-Brown (1980).

$$\mathbf{q}_{bL} = \mathbf{q}_{o} + \mathbf{q}_{u} \left\{ \sqrt{m \frac{\mathbf{q}_{o}}{\mathbf{q}_{u}} + S} + \sqrt{m \frac{\mathbf{q}_{o} + \mathbf{q}_{u} \sqrt{m \frac{\mathbf{q}_{o}}{\mathbf{q}_{u}}}}{\mathbf{q}_{u}} + S} \right\}$$
(2.1)

όπου:

m, s: οι παράμετροι της βραχομάζας, υπολογισμένοι από γράφημα του δείκτη RMR (Beniawsky, 1989),

qu: η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη,

q₀: η γεωστατική τάση σε βάθος έδρασης μετά την εκσκαφή.





2.3.1.2 Αντίσταση τριβής q_{sL}

Η αντίσταση τριβής q_s είναι συνάρτηση της αντοχής σε θλίψη του πετρώματος, υπό τον περιορισμό ότι δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη της διατμητικής αντοχής της κατασκευής του σκυροδέματος που κλειδώνει την αιχμή του πασσάλου, ορίζεται ως εξής:

$$q_{SL} = \min \frac{1}{2} C_w q_u$$
 (2.2)

όπου:

qu: η αντοχή σε θλίψη,

C_w: ο συντελεστής εξασθένισης, που εξαρτάται από την πυκνότητα των ρωγμών, κι έχει τιμή 0.04-0.08 για μέτρια διάρρηξη.

2.3.1.3 Στατικός έλεγχος πασσάλου

Το αξονικό φορτίο δεν πρέπει να υπερβαίνει τη δομική αντοχή του υλικού Q₀, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$Q_o = 0.85 f_c'(A_g - A_{St}) + f_y(A_{St})$$
 (2.3)

Όπου:

fc: η αντοχή του σκυροδέματος,

Ag: η διατομή του πασσάλου στο κλείδωμα,

Α_{st}: η διατομή του πασσάλου,

fy: η αντοχή υλικού του πασσάλου.

2.3.1.4 Υπολογισμός καθίζησης

Εάν w είναι η καθίζηση του πασσάλου διαμέτρου B σε βράχο, η σχετική καθίζηση που εκφράζεται από το λόγο $\frac{W}{B} \leq 0.10$ για πασσάλους που τοποθετούνται με τη βοήθεια γεωτρήσεων και άλλους τύπους πασσάλων. Κατά το κριτήριο Salgado (2008), η ολική καθίζηση του πασσάλου σε βράχο δίνεται μέσω του παρακάτω τύπου:

$$W_{ult} = 0.004L_f + \frac{B}{120} + \frac{Q_{ult} + L}{A_p E_p}$$
(2.4)

όπου:

- Quit: το ολικό φορτίο του πασσάλου,
- Lf: το μήκος αναφοράς σε m,
- B: η διάμετρος του πασσάλου σε m,
- Wult: η καθίζηση του πασσάλου σε m,
- Α_p: η διατομή του πασσάλου,
- Ε_p: το μέτρο ελαστικότητας.

2.3.1.5 Ομάδα πασσάλων

Σε μία πασαλοομάδα, n_p υποκείμενη σε κατακόρυφο φορτίο Q και ροπή, η οποία αναλύεται στις κατευθύνσεις x, ψ, M_x και M_ψ, το φορτίο Q_d που ενεργεί στον i πάσσαλο της ομάδας θα είναι (Salgado, 2008):

$$Q_{d} = \frac{Q}{n_{p}} + \frac{M_{\psi}x_{i}}{\sum_{j=i}^{np} x_{i}^{2}} + \frac{M_{x}\psi_{i}}{\sum_{j=i}^{np} y_{i}^{2}}$$
(2.5)

Για τον έλεγχο της φέρουσας ικανότητας της ομάδας πασσάλων, εφαρμόζεται ο τύπος (Salgado, 2008):

$$q_{bL} = 5S_u \left(1 + 0.2 \frac{Bg}{Lg} \right) \left(1 + \frac{1}{12Bg} \right)$$
 (2.6)

για την αντίσταση βάσης:

$$Q_L = B_g L_g q_{bL} + 2(B_g + L_g) L q_{SL}$$
 (2.7)

για την φέρουσα ικανότητα πλευρών. Συντελεστής ομάδας για S≥3D δεν χρειάζεται.

2.3.1.6 Δείκτης εδάφους k_b

Ως προς την αιχμή των πασσάλων ο Salgado (2008) προτείνει τη σχέση:

$$k_{\rm b} = \frac{2G_{\rm b}B}{1-v} = \frac{4G_{\rm b}r}{1-v}$$
(2.8)

ο οποίος υπολογίζει τον δείκτη εδάφους.

2.3.2 Μέθοδος θεμελίωσης με πασσαλωμένη γενική κοιτόστρωση

Η πασσαλωμένη γενική κοιτόστρωση είναι ένα τύπος μικτής θεμελίωσης, η οποία αποτελείται από ένα μεγάλο πέδιλο και μία ομάδα συνεργαζόμενων πασσάλων. Κύρια διαφορά ανάμεσα στην πασσαλωμένη κοιτόστρωση και την γενική κοιτόστρωση που εδράζεται σε πασσάλους, είναι ότι στην πρώτη περίπτωση η πλάκα σύνδεσης των κεφαλών των πασσάλων εφάπτεται το έδαφος και είναι φέρουσα, ενώ στη δεύτερη περίπτωση η πλάκα σύνδεσης των κεφαλών των πασσάλων δεν είναι ούτε σε επαφή με το έδαφος ούτε φέρουσα. Εφαρμόζοντας τη συγκεκριμένη μέθοδο, οι πάσσαλοι εξασφαλίζουν τη θεμελίωση έναντι της οριακής φέρουσας ικανότητας, μειώνουν την καθίζηση και λόγω της ακαμψίας που προσφέρει μία μεγάλου πάχους και ισχυρώς οπλισμένη πασσαλωμένη πλάκα, μπορεί να εξουδετερώσουν ακόμα και μεγάλες καθιζήσεις που οφείλονται σε κενά περιορισμένη έκτασης. Επιπροσθέτως, οι πάσσαλοι βοηθούν στην παραλαβή των καμπτικών ροπών.

2.3.3 Πέδιλο βαρύτητας με έκκεντρη φόρτιση

Για την Α/Γ που παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.12, με ύψος h, βάρους Q και υποκείμενη σε ανεμοπίεση A, η εκκεντρότητα δίδεται από τη σχέση:

όπου Μ είναι η ροπή = Ah. Εάν οι διαστάσεις του πεδίλου είναι BxL, τότε η μέγιστη και ελάχιστη τάση έδρασης δίδονται από τον εξής τύπο:

$$q_{b \max \min} = \frac{Q}{BL} \left(1 \pm 6 \frac{e_B}{B} \pm 6 \frac{e_L}{L} \right)$$
(2.10)

για q_{min}=0 η εξίσωση γίνεται:

$$\pm \frac{e_{Bo}}{B} \pm \frac{e_{Lo}}{L} = 1/6$$
 (2.11)



Εικόνα 2.13: Εκκεντρότητα Α/Γ λόγω ανεμοπίεσης (Πηγή: Μπαρούνης, 2009).

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.14, η εξίσωση (2.11) απεικονίζει 4 ευθείες γραμμές στα σημεία $\pm \frac{1}{6B}$, $\pm \frac{1}{6L}$ τα οποία ορίζουν ένα ρόμβο εντός του οποίου πρέπει να ενεργεί η φόρτιση για να είναι οι τάσεις σε όλα τα σημεία θλιπτικές. Αν η εκκεντρότητα είναι προς μία διεύθυνση, η εξίσωση γίνεται (Salgado, 2008):



Εικόνα 2.14: Ρόμβος θετικών τάσεων σε έκκεντρη φόρτιση (Πηγή: Μπαρούνης Α., 2009).

2.3.4 Μέθοδος θεμελίωσης Α/Γ με αγκυρωμένη γενική κοιτόστρωση

Σε αυτήν τη μέθοδο, ένα πέδιλο μεγάλων διαστάσεων θεωρείται ως μία μικρή γενική κοιτόστρωση, έκκεντρα φορτιζόμενη λόγω καμπτικών ροπών που αναπτύσσονται από οριζόντιες δυνάμεις προκαλούμενες από τον άνεμο και τη σεισμική δραστηριότητα. Στην περίπτωση που η θεμελίωση είναι ενισχυμένη με ένα δίκτυο παθητικών αγκυρίων, εξασφαλίζεται αντοχή σε εφελκυστικές δυνάμεις (Littlejohn, 1997). Στην περίπτωση του σχήματος της Εικόνας 2.15, η δύναμη ανύψωσης που ενεργεί στο σύστημα θα πρέπει να είναι μικρότερη από το άθροισμα των κώνου εδάφους γωνίας 30° συν τη διατμητική αντίσταση των πλευρών του κώνου με δεδομένη ελάχιστη τιμή. Ο σχεδιασμός ενός συστήματος αγκύρωσης αυτού του τύπου περιλαμβάνει ελέγχους για πέντε είδη αστοχίας.



Εικόνα 2.15: Κώνος αντίστασης σε εξόλκευση θεμελίωσης (Πηγή: Μπαρούνης, 2009).

Πίνακας 2.2 - Ενδεικνυόμενα βάθη	αγκύρωσης	αναγκαία	για σταθερότητ	а тои
	κώνου.			

Theor	Τύπος για βάθος κώνου	
πετρώματος	Ένα αγκύριο	Ομάδα αγκυρίων
Συμπαγές	FP	FP
ομογενες	$\sqrt{4.44T}$	2.83St
πέτρωμα		
Ανωμάλως	3F(P)	FP
διερρηγμένο	$\sqrt{\frac{1}{\sqrt{\pi}}}$	$\sqrt{v_{stano}}$
πἑτρωμα	γγnταπφ	γ γotanφ
Ανωμάλως	3F(P)	FP
διαρρηγμένο	$\sqrt{(v-1)\pi tanon}$	$\sqrt{(v - 1)}$ stan ω
υδροφόρο	γ(γ i)πtanφ	1(1)====+
 πἑτρωμα		

2.3.4.1 Υπολογισμός συνολικού μήκους αγκυρίου

Το συνολικό μήκος d για διάφορες κατηγορίες πετρωμάτων, δίνεται από τις σχέσεις του Πίνακα 2.2, όπου:

- τ: η διατμητική αντοχή (tn/m²),
- F: ο συντελεστής ασφαλείας (συνήθως έχει τιμές 2-3),
- S: η απόσταση των αγκυρίων (m),
- φ: η γωνία τριβής, κάθετα στις ρωγμές της βραχομάζας,
- γ: το ειδικό βάρος πετρώματος,
- Ρ: το φορτίο των αγκυρίων.

2.3.4.2 Υπολογισμός μήκους αγκύρωσης

Το μήκος αγκύρωσης προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$T_{u} = \Pi D L T_{u}$$
 (2.13)

όπου:

D: η ενεργός διάμετρος τσιμεντέματος,

τ_u: η τάση συνάφειας βολβού τσιμέντεσης,

L: το μήκος του συγκολλημένου τμήματος.



Εικόνα 2.16: Εκσκαφή θεμελίων για βάση Α/Γ (Πηγή: NOWAY).



Εικόνα 2.17: Κατασκευή βάσης Α/Γ (Πηγή: NOWAY).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΚΙΝΔΥΝΟΣ

3.1 Εισαγωγή

Ο σεισμός θεωρείται ότι είναι η αισθητή ανατάραξη της επιφάνειας της γης, που συνοδεύεται από σεισμικά κύματα τα οποία μεταφέρουν την ενέργεια του σεισμού. Συνήθως, οι σεισμοί προκαλούν την ανατάραξή του ανώτερου φλοιού, με αποτέλεσμα να γίνονται αισθητοί από τον άνθρωπο, ιδιαίτερα οι σεισμοί με μεγάλο μέγεθος. Επίσης, ένα σεισμικό φαινόμενο μπορεί να εκδηλωθεί και με τη δημιουργία τσουνάμι (θαλάσσια κύματα βαρύτητας), στην περίπτωση ο σεισμός είναι υποθαλάσσιος και έχει προκαλέσει κατακόρυφη μετακίνηση του βυθού. Στη συνέχεια, θα γίνει μία αναφορά στους τύπους σεισμών που γεννώνται στο φλοιό του πλανήτης μας. Οι σεισμοί διακρίνονται σε τεκτονικοί, ηφαιστειακοί, εγκατακρημνισιγενείς, κρυογενείς και τεχνητοί.



Εικόνα 3.1: Τεκτονικές πλάκες.

Τεκτονικοί: Η λιθόσφαιρα αποτελείται από πολλές λιθοσφαιρικές ή τεκτονικές πλάκες (βλ. Εικόνα 3.1), οι οποίες βρίσκονται σε διαρκή κίνηση «επιπλέοντας» πάνω στο ρευστό υπόστρωμα της ασθενόσφαιρας. Αυτές οι πλάκες ασκούν πιέσεις μεταξύ τους, κυρίως λόγω των κινήσεων του μάγματος κάτω από αυτές που τις παρασύρει και λιγότερο από τις παλιρροϊκές δυνάμεις που παραμορφώνουν τη Γη συμπιέζοντας ή εφελκύοντάς την, και τη βαρύτητα που τείνει να βυθίσει τις βαρύτερες από αυτές. Το μάγμα κινείται μέσω ανοδικών και καθοδικών ρευμάτων επειδή θερμαίνεται κοντά στον πυρήνα του πλανήτη μας, κυρίως από τις ραδιενεργές μεταπτώσεις της βαρύτερης ύλης που είναι συγκεντρωμένη εκεί και από την τριβή εξαιτίας της γρηγορότερης περιστροφής του πυρήνα σε σχέση με τα εξωτερικά στρώματα.

Στα σημεία όπου ο στερεός φλοιός προεξέχει προς τα κάτω, συνήθως κάτω από τα βουνά, αναπτύσσονται ροπές από τις δυνάμεις τριβής με το ρευστό μάγμα ανάλογα με τη θέση της προεξοχής σε σχέση με τη ροή του μάγματος, το οποίο επανακάμπτει προς τον πυρήνα. Κατά συνέπεια, το αποτέλεσμα της συνισταμένης των ροπών είναι η κίνηση των πλακών που μπορούν ακόμη και να τείνουν να περιστρέφονται. Στα όρια των πλακών δημιουργούνται εφελκυστικές ή συμπιεστικές ζώνες διάρρηξης. Πιο συγκεκριμένα, είναι εφελκυστικές στα σημεία που οι πλάκες απομακρύνονται μεταξύ τους και συμπιεστικές στα σημεία που πλησιάζουν μεταξύ τους.

Κοντά στις ζώνες διάρρηξης, στα όρια δηλαδή των τεκτονικών πλακών, συσσωρεύεται ενέργεια από τους μηχανισμούς εφελκυσμού και συμπίεσης. Εκεί σχηματίζονται ρωγμές στο φλοιό, τα λεγόμενα και ρήγματα (faults), τις πλευρές των οποίων συγκρατεί η τριβή που δεν επιτρέπει την ολίσθηση μεταξύ τους. Όταν οι τεκτονικές τάσεις ξεπεράσουν την κρίσιμη τιμή του ορίου θραύσης του πετρώματος στον εστιακό χώρο, έχει ως συνέπεια την ολίσθηση του ρήγματος. Η ολίσθηση οδηγεί στη βίαιη ταλάντωση των πετρωμάτων και η απελευθερωμένη ενέργεια μεταφέρεται με τα σεισμικά κύματα ώσπου να απορροφηθεί τελείως. Οι σεισμοί που προκαλούνται με αυτόν τον τρόπο αποτελούν τη συντριπτική πλειοψηφία των γήινων σεισμών (σε ποσοστό 90% περίπου) και ονομάζονται *τεκτονικοί σεισμοί*.


Εικόνα 3.2: Συγκλίνουσες πλάκες.

Ηφαιστειακοί: Ηφαιστειακός ονομάζεται ο σεισμός που είναι αποτέλεσμα της αλλαγής της πίεσης στο εσωτερικό της Γης, λόγω της εισροής ή εκροής του μάγματος. Υπολογίζεται ότι το υπόλοιπο 10% των παγκόσμιων σεισμών σχετίζονται με την ηφαιστειακή δραστηριότητα και συνήθως είναι λιγότερο ισχυροί από τους τεκτονικούς. Παρόλα αυτά, μπορεί να είναι ιδιαίτερα καταστροφικοί, προκαλώντας έντονη παραμόρφωση του εδάφους και πολλές ζημιές στις κατασκευές.

Εγκατακρημνισιγενείς: Εκτός από τα δύο προαναφερθέντα αίτια, υπάρχει και ένα ελάχιστο ποσοστό σεισμών που ονομάζονται *εγκατακρημνισιγενείς σεισμοί*, επειδή οφείλονται στην εγκατακρήμνιση ορόφων υπόγειων κοιλωμάτων (π.χ., σπηλαίων) εξαιτίας της διάβρωσης. Συνήθως, είναι σεισμοί μικρού μεγέθους και τοπικής εμβέλειας, ενώ ορισμένες φορές έχουν παρατηρηθεί ως μετασεισμική ακολουθία ως συνεπακόλουθο άλλου τύπου σεισμών.

Κρυογενείς: Υπάρχουν περιπτώσεις σεισμών που λαμβάνουν χώρα κατά την απότομη πτώση της θερμοκρασίας. Είναι γνωστό ότι το έδαφος συγκρατεί νερό σε υγρή μορφή και όταν η θερμοκρασία του πέσει κάτω από το κρίσιμο σημείο όπου το υγρό νερό γίνεται πάγος, τότε η διαστολή που προκαλεί η αλλαγή φάσης του νερού συμπιέζει τα πετρώματα και υπάρχει η πιθανότητα να προκληθεί διάρρηξη σε αυτά. Οι επιπτώσεις ενός *κρυογενούς σεισμού* δεν είναι σοβαρές, καθώς γίνονται αισθητοί από τον άνθρωπο σε ακτίνα ελάχιστων χιλιομέτρων. Συμβαίνουν συνήθως τις πρώτες πρωινές ώρες κατά τις κρύες περιόδους του χειμώνα. **Τεχνητοί:** Οι *τεχνητοί σεισμοί* προκαλούνται με εκρήξεις ή κάποιο χτύπημα της επιφάνειας του φλοιού. Συνήθως, χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση δυναμικών ιδιοτήτων του εδάφους, ενώ σε μεγάλη κλίμακα είναι δυνατή και πρόκληση μικροσεισμών.

3.1.1 Κατηγοριοποίηση σεισμών ανάλογα με το βάθος

Η ακριβής θέση στην οποία συμβαίνει ένας σεισμός ονομάζεται *εστία του σεισμού*. Αν η εστία θεωρηθεί ως σημείο, τότε αυτό ονομάζεται υπόκεντρο και η προβολή του υπόκεντρου στην επιφάνεια της Γης ονομάζεται επίκεντρο. Ανάλογα με την απόσταση του υπόκεντρου από την επιφάνεια της Γης, οι σεισμοί χαρακτηρίζονται ως εξής:

- επιφανειακοί σεισμοί μικρού βάθους (0-30 km),
- σεισμοί ενδιάμεσου βάθους (30-70 km),
- σεισμοί μεγάλου βάθους (άνω των 70 km).

Το εστιακό βάθος είναι σημαντικό χαρακτηριστικό ενός σεισμού, ως προς τις καταστροφές που μπορεί να επιφέρει στις κατασκευές. Για παράδειγμα, ένας επιφανειακός σεισμός μεγέθους 6,5 Ρίχτερ είναι συνήθως πιο καταστρεπτικός από ένα σεισμό ενδιάμεσου βάθους, μεγέθους 6,9 Ρίχτερ. Αυτό συμβαίνει επειδή όσο αυξάνεται το βάθος, αυξάνεται και η απόσταση μεταξύ της εστίας και της επιφάνειας της Γης, προκαλώντας έτσι εξασθένηση στα σεισμικά κύματα. Επιπροσθέτως, η διασπορά των σεισμικών κυμάτων είναι μεγαλύτερη, όμως, γενικά, η επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών παίζει πάντα σημαντικό ρόλο.

3.1.2 Κλίμακες μέτρησης των σεισμών

Κλίμακα Ρίχτερ (Richter): Στην κλίμακα αυτή (λογαριθμική κλίμακα) μετράται το μέγεθος ενός σεισμού στην εστία του. Στην κλίμακα Ρίχτερ μετράται η ενέργεια που εκλύεται στον εστιακό χώρο από τη θραύση και την ολίσθηση των πετρωμάτων. Παρότι η κλίμακα αυτή δεν έχει ανώτατο όριο, δεν έχουν παρατηρηθεί σεισμοί μεγαλύτεροι από 9,5 Ρίχτερ.

Κλίμακα Μερκάλι (Mercalli): Στην κλίμακα αυτή μετράται η ένταση ενός σεισμού σε μία περιοχή στην επιφάνεια του φλοιού της Γης. Η κλίμακα αυτή (όπως και άλλες παραμφερείς) είναι εμπειρική και προσπαθεί να εκτιμήσει τις επιπτώσεις του σεισμού,

σε κτίρια και διάφορες υποδομές. Είναι δωδεκαβάθμια και προσμετρά κυρίως τις καταστροφές που προκαλούνται σε ανθρώπινες κατασκευές, οπότε στην περίπτωση που ένας σεισμός έχει πλήξει μία ακατοίκητη περιοχή δεν είναι δυνατό να αξιολογηθεί επαρκώς με αυτήν την κλίμακα.

3.1.3 Σεισμικά κύματα

Τα σεισμικά κύματα μεταφέρουν την ενέργεια μακριά από τον εστιακό χώρο του σεισμού, μέχρι αυτή σταδιακά να εξασθενήσει. Τα σεισμικά κύματα διακρίνονται σύμφωνα με τον τρόπο με τον οποίο διαδίδονται, που εξαρτάται από το μέσο διέλευσης, ανάλογα με το μήκος κύματος και το είδος της ταλάντωσης που προκαλούν. Στον εστιακό χώρο ενός τεκτονικού σεισμού, με τη θραύση των πετρωμάτων παράγονται διαφόρων ειδών ταλαντώσεις. Από την έναρξη κιόλας της διάδοσης των κυμάτων, οι συχνότητες τους φιλτράρονται και στα πρώτα χιλιόμετρα έχει ήδη γίνει ο διαχωρισμός των κυμάτων που διαδίδονται με διαφορετικό τρόπο ταλάντωσης.

3.1.3.1 Κύματα χώρου

P-Κύματα: Ονομάζονται πρωτεύοντα κύματα (primary waves) και είναι διαμήκη κύματα πίεσης. Τα κύματα αυτά ταλαντώνουν το μέσο από το οποίο διέρχονται παράλληλα στη διεύθυνση διάδοσής τους. Προκαλούν πυκνώματα και αραιώματα της ύλης σε επίπεδα, κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης και μάλιστα διαδίδονται σε οποιοδήποτε συμπιέσιμο (σε μεγέθη μήκος κύματος) μέσο μπορεί να διατηρήσει τον όγκο του, τουλάχιστον στο χρόνο που το διαμήκες κύμα τον οδεύει. Τα *P-Κύματα* μπορούν να ταξιδέψουν και σε διαφορετικά μέσα διάδοσης και συνεχίζουν να διαδίδονται διαθλώμενα σε αυτά, τουλάχιστον στο εύρος των συχνοτήτων που δεν φιλτράρονται από την πιθανή μείωση της χωρικής πυκνότητας της ταλάντωσης στο νέο μέσο. Όταν φθάσουν στην επιφάνεια του φλοιού συνεχίζουν και δεν μπορούν να καταγραφούν εκεί με τα συμβατικά αδρανειακά σεισμόμετρα. Τα *P-Κύματα* διαδίδονται σε όλα τα στρώματα της Γης, από το φλοιό έως και τον πυρήνα, και έχουν τη μεγαλύτερη ταχύτητα από τα υπόλοιπα είδη σεισμικών κυμάτων.

S-Κύματα: Ονομάζονται και δευτερεύοντα κύματα (secondary waves) και είναι εγκάρσια κύματα. Διαδίδονται με ταλαντώσεις των υλικών κάθετα στη κατεύθυνση του κύματος, δηλαδή διαδίδονται πολωμένα και αλλάζουν προς στιγμήν το σχήμα του μέσου που διατρέχουν. Επίσης, αυτά διαδίδονται σε μέσα που μπορούν να ταλαντωθούν ελαστικά, δηλαδή διατηρούν το σχήμα τους και για χρόνο τουλάχιστον όσο το άθροισμα των περιόδων μερικών ταλαντώσεων. Τα στερεά έχουν αυτή τη δυνατότητα και έτσι τα *S-Κύματα* διαδίδονται στη λιθόσφαιρα, όχι όμως στα ρευστά και στα αέρια (στους ωκεανούς και την ατμόσφαιρα) που δεν πληρούν την παραπάνω συνθήκη ελαστικότητας σε σχέση με τις παραμέτρους διάδοσης των συγκεκριμένων σεισμικών κυμάτων. Η κατάσταση ρευστότητας στο μανδύα φαίνεται πως δίνει το υλικό του ικανή ελαστικότητα ώστε τα *S-Κύματα* να διαδίδονται εκεί. Οπότε τα κύματα αυτά διαδίδονται από τη λιθόσφαιρα ως το κάτω μέρος του μανδύα, αλλά σταματούν φθάνοντας στον εξωτερικό πυρήνα της Γης, ο οποίος είναι πιο ρευστός ή και υγρός.



Εικόνα 3.3: Ρ και S χωρικά σεισμικά κύματα.

3.1.3.2 Επιφανειακά κύματα

Κύματα Rayleigh: τα κύματα αυτά είναι το αποτέλεσμα της συμβολής των P και S κυμάτων που συνεχίζουν να διαδίδονται επιφανειακά. Είναι κύματα πίεσης και ελαστικής παραμόρφωσης ταυτόχρονα, όπου το μέσον ταλάντωσης εκτελεί ελλειπτικές κινήσεις με μεγαλύτερους άξονες κοντά στην επιφάνεια, όπου υπάρχει παραμόρφωση και καθ' ύψος, και εκεί παρατηρούμε το μέγιστο των ταλαντώσεων. Αν ο σεισμός είναι μεγάλος, τότε τα κύματα αυτά μπορεί να διανύσουν ολόκληρη την επιφάνεια της Γης αρκετές φορές, ώσπου να εξασθενήσουν τελείως. Ταξιδεύουν με

ταχύτητα περίπου 3 χιλιομέτρων ανά δευτερόλεπτο, η οποία είναι χαμηλότερη από αυτήν της διάδοσης των P και S κυμάτων.



Εικόνα 3.4: Κύματα Rayleigh.

Κύματα Love: αυτά είναι επιφανειακά εγκάρσια κύματα που είναι πολωμένα οριζόντια, δηλαδή διαδίδονται παραμορφώνοντας ελαστικά το φλοιό σε οριζόντιο επίπεδο, κάθετα στη διεύθυνση που ταξιδεύουν. Ο τρόπος που κυματίζουν την επιφάνεια, είναι αυτός που δίνει τη χαρακτηριστική αίσθηση του σεισμού στον άνθρωπο με την κίνηση του εδάφους πέρα-δώθε. Το πλάτος της ταλάντωσης των κυμάτων αυτών μεγιστοποιείται επίσης κοντά στην επιφάνεια. Ταξιδεύουν πιο αργά από τα P και S κύματα, αλλά λίγο πιο γρήγορα από τα Rayleigh. Ως επιφανειακά κύματα είναι εξίσου καταστροφικά και η έντασή τους τοπικά, εξαρτάται σε γενικές γραμμές από τους ίδιους παράγοντες με τα Rayleigh. Σε περίπτωση που ο σεισμός είναι μεγάλος, τότε τα κύματα αυτά μπορούν να διανύσουν ολόκληρη την επιφάνεια της Γης αρκετές φορές, ώσπου να αποσβεσθούν εντελώς.



Εικόνα 3.5: Κύματα Love

3.2 Εδαφική σεισμική κίνηση

Όταν λαμβάνει χώρα ένα σεισμικό φαινόμενο, που εξαρτάται από το μέγεθός του, απελευθερώνεται σεισμική ενέργεια κατά τη διάρρηξη των πετρωμάτων η οποία και

διαχέεται με τη μορφή σεισμικών κυμάτων. Η καταγεγραμμένη εδαφική κίνηση σε μία συγκεκριμένη θέση δεν εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από το μέγεθος και τη διαδικασία της διάρρηξης του σεισμικού ρήγματος, αλλά και από τη διαδρομή των σεισμικών κυμάτων διαμέσου των πετρωμάτων και τις τοπικές εδαφικές συνθήκες. Θεωρώντας ως (Ε) την επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών, (Δ) την επιρροή της διαδρομής των σεισμικών κυμάτων από την πηγή έως τη θέση παρατήρησης και (Π) την επιρροή της πηγής, η τελική εδαφική κίνηση (ΕΚ) περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$(EK) = (E)^*(\Delta)^*(\Pi)$$
 (3.1)

Όταν εξετάσουμε μία διαφορετική θέση, ακόμη και εάν αυτή βρίσκεται σε μικρή απόσταση, η εδαφική κίνηση μπορεί να διαφέρει σημαντικά, είτε λόγω των διαφορετικών εδαφικών συνθηκών, είτε εξαιτίας της διαφορετικής ακτινοβολίας της σεισμικής ενέργειας (που εξαρτάται από το μηχανισμό διάρρηξης), είτε λόγω του συνδυασμού των δύο προαναφερθέντων παραγόντων. Η πλήρως αποτυπωμένη κίνηση ενός εδαφικού υλικού σημείου περιγράφεται με τις τρείς (3) μεταθετικές συνιστώσες της κίνησης στο πεδίο του χρόνου, δύο οριζόντιες και μία κατακόρυφη.

Μία τυπική χρονοϊστορία επιταχύνσεων μιας εκ των τριών συνιστωσών (βλ. Εικόνα 3.6) μας δίνει μεγάλο όγκο πληροφοριών. Οι σύγχρονοι ψηφιακοί επιταχυνσιογράφοι μπορούν να καταγράψουν χιλιάδες τιμές για επιταχύνσεις, σε χρονικά διαστήματα δεκάτων ή και εκατοστών του δευτερολέπτου. Το τυπικό επιταχυνσιογράφημα ισχυρής διάρκειας 20 δευτερολέπτων, μας δίνει 1000 τιμές επιτάχυνσης με χρονικό βήμα 0.02 δευτερολέπτων. Για παράδειγμα, ένας σεισμός όπως αυτό που συνέβη στο Μεξικό το 1985, διήρκησε περίπου 2 λεπτά και περιείχε 6000 τιμές για σταθερό χρονικό βήμα. Αυτές οι (μεγάλου όγκου) πληροφορίες, δεν έχουν συνήθως εφαρμογή στα συνήθη έργα, όπου δεν πραγματοποιείται δυναμική ανάλυση με εν χρόνω ολοκλήρωση. Ο μηχανικός δίνει συνήθως περισσότερη έμφαση στις παρακάτω βασικές παραμέτρους μιας ισχυρής εδαφικής κίνησης:

- το μέγιστο πλάτος της εδαφικής κίνησης,
- το συχνοτικό περιεχόμενό της (που επηρεάζει τη μορφή των φασμάτων απόκρισης),
- τη διάρκεια της δόνησης, κλπ.

Για την πλήρη και σωστή περιγραφή της ισχυρής εδαφικής κίνησης, ο μηχανικός θα πρέπει να εξετάζει τις προαναφερθείσες παραμέτρους.



Εικόνα 3.6: Χρονοϊστορίες και φάσματα μετακινήσεων ταχυτήτων και επιταχύνσεων σεισμικής καταγραφής (Πηγή: TEE).

3.2.1 Τοπικές εδαφικές συνθήκες

Οι τοπικές εδαφικές συνθήκες (local site conditions) μπορούν να μεταβάλλουν σημαντικά την επιφανειακή κίνηση του εδάφους, με τους ακόλουθους τρόπους:

- της ενίσχυσης (ή ακόμα και της απομείωσης της για μαλακά εδάφη και μεγάλες σεισμούς) της εδαφικής κίνησης (αναφορικά με τις μέγιστες τιμές των χρονοϊστοριών της),
- της επιμήκυνσης της διάρκειάς της,
- της αλλαγής του συχνοτικού της περιεχομένου,
- της χωρικής μεταβλητότητας της εδαφικής απόκρισης (κρίσιμη για έργα που εκτείνονται σε μεγάλες αποστάσεις, όπως οι αγωγοί, οδικά δίκτυα, κλπ).

Γενικά, οι τοπογραφικές εδαφικές συνθήκες διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

1. Στρωματογραφικές συνθήκες

Οι εδαφικές στρώσεις είναι σχεδόν οριζόντιες και εκτείνονται απεριόριστα στην οριζόντια διεύθυνση (βλ. Εικόνα 3.7). Τα σεισμικά κύματα διαδίδονται μεταξύ των εδαφικών στρώσεων, θεωρώντας ότι η (οριζόντια) μορφή του επιφανειακού ανάγλυφου, ή του ανάγλυφου του βραχώδους υπόβαθρου δεν δημιουργεί ανακλάσεις. Συνεπώς, σεισμική απόκριση εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των εδαφικών στρώσεων. Αυτή η κατηγορία λαμβάνεται υπόψη από τους κανονισμούς στα κανονιστικά φάσματα σχεδιασμού με την κατηγοριοποίηση των εδαφών, π.χ. ο Ευρωκώδικας 8 διακρίνει πέντε βασικές κατηγορίες στρωματογραφικών συνθηκών. Επίσης, η απόκριση των επιφανειακών εδαφικών σχηματισμών υπολογίζεται σχετικά εύκολα με μονοδιάστατες αναλύσεις.



Εικόνα 3.7: Οριζόντιες εδαφικές στρώσεις (Πηγή: Ψαρρόπουλος & Τσομπανάκης, 2005).

2. Γεωμορφολογικές συνθήκες

Οι γεωμορφολογικές συνθήκες του βραχώδους υπόβαθρου είναι ένας κύριος παράγοντας τοπικών συνθηκών. Η επιρροή αυτών των συνθηκών είναι κυρίως αισθητή σε σημεία που εμφανίζονται κοιλάδες (βλ. Εικόνα 3.8), γι'αυτό και ονομάζονται και «valley effects". Η καμπυλότητα του βραχώδους υπόβαθρου πάνω στο οποίο βρίσκονται οι πιο εύκαμπτες εδαφικές στρώσεις, είναι δυνατόν να οδηγήσει σε «παγίδευση» των διατμητικών κυμάτων και, συνεπακόλουθα, στην παραγωγή επιφανειακών κυμάτων (Kramer, 1996). Τα επιφανειακά κύματα μπορούν να προκαλέσουν ενίσχυση της εδαφικής κίνησης, η οποία δεν θα ήταν εφικτό να προβλεφθεί με μονοδιάστατες αναλύσεις οριζόντιας στρωματογραφίας. Σε πολλούς σεισμούς οι συνθήκες αυτές έχουν αποβεί καταστρεπτικές, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τον σεισμό που προκάλεσε πολλές απώλειες στην πόλη του Μεξικού (1985). Επειδή οι επιπτώσεις τους δεν μπορούν να ποσοτικοποιηθούν και να προκύψουν γενικευμένοι κανόνες αντιμετώπισης τους, οι συνθήκες αυτές δεν καλύπτονται από τους κανονισμούς και πρέπει να εξετάζονται ανά περίπτωση όπου είναι απαραίτητο.



Εικόνα 3.8: Ανάγλυφο βραχώδους υπόβαθρου (Πηγή: Ψαρρόπουλος & Τσομπανάκης, 2005).



Εικόνα 3.9: Επιφανειακό ανάγλυφο (Πηγή: Ψαρρόπουλος & Τσομπανάκης, 2005).

3. Τοπογραφικές συνθήκες

Αυτές οι συνθήκες καθορίζονται από τη μορφή του επιφανειακού ανάγλυφου και οδηγούν στην ενίσχυση της εδαφικής κίνησης, τόσο των οριζόντιων συνιστωσών όσο και της κατακόρυφης, συνήθως στην περιοχή κοντά στην κορυφή του λόφου ή του πρανούς, ανάλογα με τις ιδιαίτερες συνθήκες της εξεταζόμενης περιοχής (βλ. Εικόνα 3.9). Έχουν υπάρξει πολλές περιπτώσεις με σημαντικές ζημιές λόγω της τοπογραφίας, όπως, π.χ., στην περιοχή του Κηφισού ποταμού στον σεισμό της Αθήνας (1999). Οι σύγχρονοι κανονισμοί, όπως ο Ευρωκώδικας 8, λαμβάνουν, έστω και απλοποιητικά υπόψη, την επίδραση της τοπογραφίας με χρήση επαυξητικών συντελεστών.

3.2.2 Δυναμική εξίσωση κίνησης

Όπως προαναφέρθηκε, σε έναν σεισμό προκύπτουν χρονικά μεταβαλλόμενα δεδομένα για την επιτάχυνση, την ταχύτητα, καθώς και τη μετακίνηση του εδάφους. Η συνηθέστερη σεισμική καταπόνηση (δηλαδή η αδρανειακή) που δέχεται ένα κτίριο είναι συνάρτηση της εδαφικής επιτάχυνσης και της μάζας του κτιρίου. Εξετάζοντας τη δυναμική ισορροπία ενός απλού μονοβάθμιου ταλαντωτή, το οποίο είναι ένα αναλυτικό προσομοίωμα που χρησιμοποιείται ευρέως στη σεισμική μηχανική, στον οποίον επιβάλλεται μία φόρτιση F(t) που είναι χρονικά μεταβαλλόμενη, η εξίσωση της δυναμικής ισορροπίας του διαμορφώνεται ως εξής:

$$F_I + F_D + F_S = F(t)$$
 (3.2)

όπου:

 $F_I = m \cdot \ddot{u}$ $F_D = c \cdot \dot{u}$ $F_S = k \cdot u$

εκφράζουν αντίστοιχα τις δυνάμεις αδράνειας, απόσβεσης και δυσκαμψίας. Οπότε η σχέση (3.2) γράφεται και ως εξής:

$$m \cdot \ddot{u} + c \cdot \ddot{u} + k \cdot u = F(t) \quad (3.3)$$

Για την περίπτωση της σεισμικής φόρτισης, όπου η πραγματική φόρτιση είναι ο καταναγκασμός που επιβάλλει στο σύστημα η κίνηση του εδάφους ug. Οπότε, η συνολική αδρανειακή δύναμη θα ισούται με:

$$F_I = m \cdot \ddot{u}_t = m \cdot \left(\ddot{u} + \ddot{u}_g\right) \quad (3.4)$$

και η εξίσωση (3.3) θεωρώντας ότι *F(t)=0*, παίρνει την εξής μορφή:

$$m \cdot \ddot{u} + m \cdot \ddot{u_g} + k \cdot u + c \cdot \dot{u} = 0 \qquad \Rightarrow \qquad \qquad$$

ή

$$m \cdot \ddot{u} + c \cdot \ddot{u} + k \cdot u = -m \cdot \ddot{u_q} = F_q(t) \quad (3.5)$$

Με άλλα λόγια, η δυναμική φόρτιση αυτού του απλού συστήματος είναι η επιτάχυνση του εδάφους. Γνωρίζοντας την $\ddot{u}_g(t)$, η επίλυση της εξίσωσης (3.5) θα μας δώσει την απόκριση της κατασκευής, καθώς και όλα τα απαιτούμενα εντατικά μεγέθη για τον αντισεισμικό σχεδιασμό.



Εικόνα 3.10: Μονοβάθμιος ταλαντωτής υποβαλλόμενος σε σεισμική μετακίνηση στη βάση του.

3.2.3 Πλάτος της εδαφικής κίνησης

Συνήθως η ισχυρή εδαφική κίνηση αποτυπώνεται με μία χρονοϊστορία μιας μεταβλητής, όπως είναι η επιτάχυνση, η ταχύτητα και η μετακίνηση. Αν ξέρουμε μία από τις τρεις, τότε θα είναι εύκολο να υπολογίσουμε τις υπόλοιπες δύο κάνοντας ολοκλήρωση ή παραγώγιση. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον, βασίζονται στη μέθοδο του Newmark. Το πλάτος της εδαφικής κίνησης μεταβάλλεται χρονικά και ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$u(\omega) = u(\dot{\omega})/\omega = \frac{u(\dot{\omega})}{\omega^2}$$
 (3.6)

όπου ω η συχνότητα. Συνήθως, η μετακίνηση είναι μία κίνηση χαμηλής συχνότητας, ενώ στην επιτάχυνση επικρατούν υψηλές συχνότητες.

3.2.3.1 Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση

Η μέγιστη οριζόντια εδαφική επιτάχυνση (PHA ή a_{max}) αποτελεί την πλέον χρησιμοποιούμενη παράμετρο περιγραφής του σεισμικού κραδασμού. Συνήθως, αναφέρεται η μέγιστη τιμή των δύο οριζόντιων συνιστωσών και σε μερικές περιπτώσεις και το διανυσματικό τους άθροισμα. Η οριζόντια συνιστώσα χρησιμοποιείται ευρέως και αυτό οφείλεται στην άμεση σύνδεσή της με τις αδρανειακές δυνάμεις, οι οποίες και φορτίζουν μία συνηθισμένη κτιριακή κατασκευή. Η μέγιστη οριζόντια εδαφική επιτάχυνση συχνά συσχετίζεται με την ένταση του σεισμού (Trifunac & Brady, 1975) και παρόλο που η συσχέτιση αυτή δεν είναι δυνατόν να είναι ακριβής και αξιόπιστη, μπορεί να μας δώσει μία ποιοτική εικόνα των αναμενόμενων ζημιών.

Η κατακόρυφη εδαφική επιτάχυνση (PVA) δεν έχει τύχει της ανάλογης προσοχής των σεισμολόγων και των μηχανικών, για το λόγο ότι ίσως θεωρείται ότι η κατακόρυφη ταλάντωση των κατασκευών είναι λιγότερη επικίνδυνη, επειδή οι περισσότερες κατασκευές είναι σχεδιασμένες με μεγάλους συντελεστές ασφαλείας για τα κατακόρυφα στατικά φορτία. Βέβαια, αρκετές σύγχρονες κατασκευές είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στη συνδυασμένη δράση των οριζόντιων και ισχυρών κατακόρυφων ταλαντώσεων (μεγάλοι πρόβολοι, βάθρα κρεμαστών γεφυρών, τοίχοι βαρύτητας). Οι μεγάλες οριζόντιες μετακινήσεις, μέχρι και 5 μέτρων των κρηπιδότοιχων του Port Island στο Kobe, κατά το σεισμό Ηyogoken-Nambu (17/1/95) οφείλονται στον συνδυασμό της ρευστοποίησης του εδάφους θεμελίωσης, καθώς και της στιγμιαίας μείωσης του κατακόρυφου φορτίου που αυξάνει την αντίσταση σε ολίσθηση, λόγω της ισχυρής κατακόρυφης επιτάχυνσης.

Επομένως, η κατακόρυφη εδαφική επιτάχυνση έχει δύο γνωρίσματα με σημαντικό ενδιαφέρον:

- Συνήθως, είναι μία ταλάντωση υψηλών συχνοτήτων οπότε ενδιαφέρει κυρίως
 τις κατασκευές ή τα τμήματα κατασκευών με μικρή περίοδο.
- Δεν είναι εύκολο να αποτιμηθεί η επίδραση μη-γραμμικής συμπεριφοράς των εδαφών για μεγάλες σεισμικές εντάσεις, με συνέπεια ακόμη και όταν είναι σημαντικές οι διατμητικές παραμορφώσεις του εδάφους, η μεγέθυνση της κατακόρυφης εδαφικής κίνησης από το βραχώδες υπόβαθρο έως την

επιφάνεια, να εκφράζεται από τις ελαστικές ιδιότητες του εδαφικού υλικού και του υποβάθρου.

Σεισμοί με υψηλές τιμές εδαφικών επιταχύνσεων δεν είναι πάντα καταστροφικοί, καθώς τα χαρακτηριστικά και συνεπακόλουθα οι επιπτώσεις τους επηρεάζονται από ένα πλήθος παραμέτρων. Για παράδειγμα, ισχυρές εδαφικές κινήσεις που είναι πολύ υψίσυχνες και έχουν μικρή διάρκεια ισχυρής κίνησης, δεν προκαλούν ζημιές σε νέες αντισεισμικές κτιριακές κατασκευές.

3.2.3.2 Μέγιστη εδαφική ταχύτητα

Η μέγιστη οριζόντια εδαφική ταχύτητα (PHV ή v_{max}) είναι και αυτή μία παράμετρος περιγραφής της ισχυρής εδαφικής κίνησης με αρκετό ενδιαφέρον, κυρίως γιατί είναι λιγότερο ευαίσθητη στις υψίσυχνες συνιστώσες της δόνησης. Θεωρείται μία πιο αξιόπιστη παράμετρος χαρακτηρισμού της σεισμικής κίνησης στις μεσαίες συχνότητες, οι οποίες είναι δυνατόν να προκαλέσουν βλάβες ή και αστοχίες των κατασκευών με σχετικά μεγάλες ιδιοπεριόδους (γέφυρες, εύκαμπτα πολυώροφα κτίρια, αγωγοί μεταφοράς).

Επειδή η μέγιστη ταχύτητα και επιτάχυνση αναφέρονται σε διαφορετικές συχνότητες, ο λόγος ν_{max}/a_{max} αποτελεί έναν δείκτη του συχνοτικού περιεχομένου της εδαφικής κίνησης. Αυτό ισχύει, εφόσον για μια απλή αρμονική κίνηση με περίοδο Τ ισχύει ν_{max}/a_{max} = T/2π, η ποσότητα 2π* ν_{max}/a_{max} μπορεί να θεωρηθεί ότι εκφράζει κατά ένα μέρος την περίοδο της ταλάντωσης ενός ισοδύναμου αρμονικού κύματος και κατ' επέκταση αποτελεί έναν δείκτη της δεσπόζουσας περιόδου της δόνησης. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές τιμές για τρεις κατηγορίες εδαφών, σύμφωνα με τη μελέτη των Seed & Idriss (1982).

Τύπος Εδάφους	v _{max} /a _{max}
Βράχος	55cm/sec/g=0.056 sec
Σκληρά Εδάφη	
Πάχος Στρώσης <30m	110cm/sec/g=0.112 sec
Σκληρά Εδάφη	
Πάχος Στρώσης >30m	135cm/sec/g=0.138 sec

Πίνακας 3.1: Λόγος v_{max}/a_{max} για διάφορες κατηγορίες εδαφών (Seed & Idriss, 1982).

Οι Newmark & Hall (1982) πρότειναν για βράχο και σκληρά εδάφη, τις τιμές 91cm/sec/g και 122 cm/sec/g, αντίστοιχα. Η απουσία τιμών για μαλακά ή χαλαρά εδάφη είναι δικαιολογημένη, γιατί σε αυτές τις περιπτώσεις η επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών (μη-γραμμικά φαινόμενα, ρευστοποίηση, μεγάλες παραμορφώσεις) διαφοροποιεί δραστικά την εδαφική επιτάχυνση και επομένως το λόγο v_{max}/a_{max}.

3.2.3.3 Μέγιστη εδαφική μετακίνηση

Οι μέγιστες εδαφικές μετακινήσεις (PGD ή d_{max}) σχετίζονται με τις χαμηλές συχνότητες του σεισμικού κραδασμού. Η ακριβής εκτίμησή τους γίνεται με διπλή ολοκλήρωση του επιταχυνσιογραφήματος, αλλά είναι αρκετά δύσκολη εξαιτίας των αναπόφευκτων αριθμητικών λαθών στην επεξεργασία του σήματος και στην ολοκλήρωση, όπως επίσης και στην ύπαρξη θορύβων χαμηλών συχνοτήτων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την σχετικά περιορισμένη χρήση της μέγιστης εδαφικής μετακίνησης, αλλά και των χρονοϊστοριών μετακίνησης u(t) γενικότερα.

Οι μέγιστες εδαφικές μετακινήσεις εξαρτώνται προφανώς από όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν τη σεισμική κίνηση (Εξίσωση 3.1). Ανάλογα με το μέγεθος, την επικεντρική απόσταση και τη δυσκαμψία του εδάφους, η d_{max} μπορεί να πάρει τιμές από μερικά εκατοστά έως και αρκετές δεκάδες εκατοστών. Για παράδειγμα, τιμές d_{max} από 20-30 εκατοστά για ισχυρούς σεισμούς (M=6.5) σε εδάφη με μέση δυσκαμψία και επικεντρικές αποστάσεις της τάξης των 20 χιλιομέτρων είναι πολύ συνηθισμένες.

3.2.4 Διάρκεια της ισχυρής εδαφικής κίνησης

Η διάρκεια της ισχυρής εδαφικής κίνησης επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το μέγεθος και την έκταση των ζημιών που προκαλούν οι σεισμοί. Η βαθμιαία μείωση της δυσκαμψίας και της αντοχής των υλικών και των δομικών μελών, η προοδευτική θραύση επιμέρους τμημάτων των κατασκευών, η αύξηση της πίεσης των πόρων σε χαλαρές και κορεσμένες άμμους, η οποία μειώνει την ενεργό τάση και τη διατμητική αντοχή, αποτελούν μερικά από τα φαινόμενα που έχουν άμεση εξάρτηση με τη διάρκεια της ισχυρής εδαφικής κίνησης. Σεισμικές δονήσεις με μικρό πλάτος, οι οποίες όμως διαρκούν για αρκετό χρονικό διάστημα, είναι σε θέση να προκαλέσουν σημαντικές αστοχίες.

Η διάρκεια της ισχυρής εδαφικής κίνησης, που καταγράφεται σε μία θέση, είναι άμεσα εξαρτώμενη από το μέγεθος του σεισμού, δηλαδή από το ποσό της ενέργειας παραμόρφωσης που έχει συσσωρευτεί πριν τη θραύση του ρήγματος. Επίσης, εξαρτάται από την εστιακή απόσταση και τις τοπικές εδαφικές συνθήκες στο σημείο που είναι εγκατεστημένο το καταγραφικό όργανο. Για παράδειγμα, ένας εδαφικός σχηματισμός, όπως η άργιλος της Πόλης του Μεξικού, με σχεδόν ελαστική συμπεριφορά, που χαρακτηρίζεται από πολύ μικρό αρχικό μέτρο διατμητικής αντοχής G₀ και μικρή απόσβεση, ταλαντώνεται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα απ' ότι μία στιφρή αργιλική στρώση για τον ίδιο σεισμικό κραδασμό στο βραχώδες υπόβαθρο. Επιπλέον, η γένεση των επιφανειακών κυμάτων στις διάφορες γεωλογικές και τοπογραφικές διεπιφάνειες και ανωμαλίες, καθώς και στα όρια ιζηματογενών λεκανών και κοιλάδων, αυξάνει τη διάρκεια και το μέγεθος της ισχυρής εδαφικής κίνησης.

Ακριβής ορισμός για τη διάρκεια ενός σεισμικού συμβάντος δεν υπάρχει και ίσως δεν έχει και κάποια φυσική σημασία, όμως έχουν προταθεί διάφοροι σχετικοί όροι στη διεθνή βιβλιογραφία. Ο Bolt (1974) θεωρεί, ότι η διάρκεια της ισχυρής κίνησης είναι ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ της πρώτης και της τελευταίας υπέρβασης του πλάτους της καταγραφής ενός καθορισμένου επιπέδου εδαφικής επιτάχυνσης, το οποίο συνήθως ισούται με 0.05g (bracketed duration, TBD). Οι Husid (1969) & Arias (1970) πρότειναν ότι η διάρκεια της ισχυρής εδαφικής διάρκειας είναι ο χρόνος που απαιτείται για να αυξηθεί η ένταση κατά Arias από 5% σε 95%, και την όρισαν ως σημαντική διάρκεια, T_{SD}.

Οι Hanks & Kanamori (1979) και McGuire & Hanks (1980) θεώρησαν ότι η διάρκεια της ισχυρής κίνησης Τ_d είναι ίση με τη διάρκεια της διάρρηξης του σεισμικού ρήγματος, η οποία και ισούται με το αντίστροφο της γωνιακής συχνότητας f_c:

$$T_d = f_c^{-1}$$
 (3.7)

Ο Hermann (1985) εισήγαγε στην προηγούμενη σχέση (3.7) και την επιρροή της επικεντρικής απόστασης R(km).

$$T_d = f_c^{-1} + 0.05R \qquad (3.8)$$

Οι Margaris et al. (1990) έχοντας ως βάση τις Ελληνικές καταγραφές, προτείνουν την εκτίμηση της σημαντικής διάρκειας T_{SD} ως εξής:

$$\log T_{SD} = 0.24M_s - 0.59$$
$$\ln T_{SD} = 0.71 + 0.11M_s + 0.32\ln R - 0.69S$$
(3.9)

όπου M_s είναι το επιφανειακό μέγεθος, R είναι η επικεντρική απόσταση και S είναι η παράμετρος περιγραφής των εδαφικών συνθηκών (0 για αλλουβιακές αποθέσεις και 1 για σκληρά πετρώματα).

Οι Papazachos et al. (1992), έχοντας ως βάση τις καταγραφές της ισχυρής εδαφικής κίνησης στον Ελληνικό χώρο, παρουσίασαν την παρακάτω σχέση για την ισχυρή εδαφική διάρκεια:

$$\ln TBD = 1.84 + 0.8124M_s - 1.04\ln(R + 15) - 0.19S - 2.27L + 0.76P \quad (3.10)$$

όπου M_s είναι το επιφανειακό μέγεθος, R είναι η επικεντρική απόσταση (σε km), S είναι η παράμετρος περιγραφής των εδαφικών συνθηκών, L είναι η παράμετρος που συνδέει την εκτιμώμενη ισχυρή διάρκεια με το επίπεδο καθορισμού της και P είναι στατιστική παράμετρος (P=0 για τη μέση τιμή, P=1 για τη μέση τιμή ± την τυπική απόκλιση. Οι Chang & Krinitzsky (1977) για την ισχυρή εδαφική διάρκεια T_{BD} σε συνθήκες κοντινού πεδίου (R<10km) πρότειναν τις τιμές του Πίνακα 3.2:

	Διάρκεια (sec)	
		Εδαφικές
Μέγεθος	Πετρώματα	Αποθέσεις
5.0	4	8
5.5	6	12
6.0	8	16
6.5	11	23
7.0	16	32
7.5	22	45
8.0	31	62
8.5	43	86

Πίνακας 3.2: Τυπικές τιμές της ισχυρής εδαφικής διάρκειας Τ_{BD}.

3.3 Ρευστοποίηση εδάφους

Οι μη συνεκτικοί κορεσμένοι εδαφικοί σχηματισμοί, στην περίπτωση που υπόκεινται σε φόρτιση υπό αστράγγιστες συνθήκες, παρουσιάζουν την τάση να συμπυκνωθούν. Όμως, εξαιτίας της αδυναμίας τους να μεταβάλλουν τον όγκο τους, αυξάνεται η πίεση του νερού, ενώ ταυτόχρονα μηδενίζεται η διατμητική τους αντοχή. Από την παραπάνω διαδικασία προκύπτει ότι αλλάζει η κατάσταση αυτών των εδαφών από στερεά σε υγρή φάση, δηλαδή υπόκεινται σε ρευστοποίηση. Στην εμφάνιση της ρευστοποίησης βασικό ρόλο παίζουν οι τοπικές συνθήκες των εδαφικών σχηματισμών. Η ρευστοποίηση εμφανίζεται συνήθως σε χαλαρά και κορεσμένα εδάφη, ενώ έχει παρατηρηθεί και σε χάλικες και ιλύες. Αστοχίες ρευστοποίησης έχουν παρατηρηθεί σε λασπώδεις αργίλους, χαμηλής πλαστιμότητας.

Ρευστοποίηση έχει συμβεί σε πολλούς σεισμούς, και έχει αφήσει το στίγμα της σε γεωλογικές και ιστορικές καταγραφές. Στοιχεία από ρευστοποίηση του παρελθόντος, η οποία ονομάζεται «παλαιό-ρευστοποίηση», χρησιμοποιούνται για να αξιολογηθούν σεισμικές καταγραφές σε περιοχές όπου τα στοιχεία είναι λίγα. Το αντικείμενο της ρευστοποίησης ήρθε στο προσκήνιο της γεωτεχνικής σεισμικής μηχανικής με τους σεισμούς του 1964 στη Ναγκάτα της Ιαπωνίας, και στην Αλάσκα. Στη Ναγκάτα (βλ. Εικόνα 3.11), η ρευστοποίηση προκάλεσε πλευρική διάδοση και απώλεια της φέρουσας ικανότητας. Πιο πρόσφατα, ισχυροί σεισμοί στην Καλιφόρνια, όπως στο Loma Prieta (1989) και στο Northridge (1994), στην Ιαπωνία (1995), στην Τουρκία (1999) (βλ. Εικόνα 3.12) και στην Ταϊβάν, έχουν δώσει πρόσθετα στοιχεία για τις σοβαρές επιπτώσεις της ρευστοποίησης σε κατασκευές (Kramer & Stewart, 2001).



Εικόνα 3.11: Αστοχία στις θεμελιώσεις των διαμερισμάτων Kawagishi-cho, στον σεισμό της Ναγκάτα (1964) (Πηγή: Kramer & Stewart, 2001).



Εικόνα 3.12: Ρευστοποίηση σε παραθαλάσσια περιοχή στην Τουρκία, 1999 (Πηγή: Kramer & Stewart, 2001).

3.3.1 Ρευστοποίηση και σεισμός

Πολλοί σεισμοί έχουν δώσει θεαματικά παραδείγματα ρευστοποίησης που προκαλούν ζημίες σε όλους τους τύπους κατασκευών, τόσο υπέργειων όσο και υπόγειων. Ο όρος της ρευστοποίησης έχει χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει έναν αριθμό από διαφορετικά, εν τούτοις, σχετικά φαινόμενα. Στο πεδίο της γεωτεχνικής σεισμικής μηχανικής, ο Kramer (1996) διαιρεί τα φαινόμενα ρευστοποίησης σε δύο κατηγορίες: ρευστοποίηση και ανακυκλιζόμενη κινητικότητα.



Εικόνα 3.13: Πλευρική εξάπλωση που προκαλείται από τη ρευστοποίηση του επιφανειακού στρώματος: (α) πριν από και (β) μετά από έναν σεισμό (Πηγή: Kramer, 1996).

Πριν από έναν σεισμό (βλ. Εικόνα 3.13-α), η πίεση του νερού είναι σχετικά χαμηλή. Ωστόσο, η σεισμική δόνηση μπορεί να προκαλέσει αύξηση της πίεσης του νερού στο σημείο όπου οι κόκκοι του εδάφους μπορούν να μετακινηθούν ευκολότερα, σε σχέση με τους άλλους. Δεδομένου ότι η ρευστοποίηση είναι πιθανόν να συμβεί σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία, είναι πολύ σημαντικό για τον μηχανικό, να προβλεφθεί το μέγεθος της οριζόντιας και κατακόρυφης εδαφικής παραμόρφωσης, που σχετίζεται άμεσα με τη ρευστοποίηση.

Οι αστοχίες από τη ροή ρευστοποιημένου υλικού χαρακτηρίζονται από την ξαφνική, καταστροφική φύση τους και την ταχύτητα και την έκταση της μετακίνησης των ρευστοποιημένων υλικών. Το περιστατικό της ροής ρευστοποίησης θεωρεί ότι μια αστράγγιστη διαταραχή θα φέρει το έδαφος σε μια ασταθή κατάσταση. Μόλις αρχίσει το φαινόμενο, οι στατικές διατμητικές τάσεις οδηγούν στην αστοχία και συχνά μπορούν να παρατηρηθούν μεγάλες παραμορφώσεις.

Η ανακυκλιζόμενη κινητικότητα σε αντίθεση με τη ροή ρευστοποίησης εμφανίζεται κάτω από την ευρύτερη εμβέλεια των χωρικών και εδαφικών συνθηκών. Κατά συνέπεια, παρατηρείται πολύ πιο συχνά, όμως τα αποτελέσματά της είναι γενικά λιγότερα σοβαρά. Η ανακυκλιζόμενη κινητικότητα εμφανίζεται όταν η στατική διατμητική τάση είναι μικρότερη από τη διατμητική αντοχή του ρευστοποιημένου εδάφους.

Οι παραμορφώσεις δεν προκύπτουν ξαφνικά, όπως στην περίπτωση της ροής ρευστοποίησης, αλλά αναπτύσσονται αυξητικά και μετά το τέλος της σεισμικής κίνησης. Οι προκύπτουσες παραμορφώσεις καθορίζονται από τη μετατόπιση της πλευρικής εξάπλωσης και μπορούν να είναι μέχρι και αρκετά μέτρα, εάν ο σεισμός είναι αρκετά μεγάλος ή ικανοποιητικής διάρκειας. Η πλευρική εξάπλωση μπορεί να εμφανιστεί σε πολύ ήπια κλίση εδάφους ή ακόμα και στο επίπεδο έδαφος, όπως διευκρινίζεται στην Εικόνα 3.15. Σε αυτήν την περίπτωση, η πλευρική μετακίνηση του ρευστοποιημένου κάτω από την επιφάνεια χώματος έχει διαρρήξει το στρώμα επιφάνειας στις ευδιάκριτες θέσεις που κινούνται διαφορικά, οριζόντια και κατακόρυφα.

3.3.2 Μηχανισμός πρόκλησης ρευστοποίησης

Όταν αυξάνεται η πίεση των πόρων στα μη συνεκτικά κορεσμένα εδάφη, (η οποία προκαλείται από δυναμικές δονήσεις, σεισμικές ταλαντώσεις, υπό αστράγγιστες συνθήκες) είναι πιθανό να επέλθει μείωση ή ακόμη και απώλεια της διατμητικής

αντοχής του υλικού, δημιουργώντας έτσι το φαινόμενο της ρευστοποίησης. Αυτή η διαδικασία της ρευστοποίησης εδαφικών σχηματισμών, παρατηρείται κυρίως σε ομοιόμορφα χαλαρά, λεπτά έως και μεσοκοκκώδη ιζήματα.

Όπως προαναφέρθηκε, τα φαινόμενα της ρευστοποίησης, ανάλογα με τον μηχανισμό γένεσής τους, διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: την *εδαφική ροή* ή *ροϊκή ρευστοποίηση* (flow failure) και την *ανακυκλιζόμενη κινητικότητα* (cyclic mobility).

Εδαφική ροή: Συχνά αναφέρεται και με τον όρο «αστοχία λασποροής» ή «ρευστοποίηση ροής» (Πιτιλάκης, 2010). Αυτός το τύπος λαμβάνει χώρα στην περίπτωση που η απαιτούμενη για την εξασφάλιση της στατικής ισορροπίας διατμητική τάση, είναι μεγαλύτερη από τη διατμητική αντοχή του εδάφους στην κατάσταση ρευστοποίησης. Οπότε, όταν το έδαφος ρευστοποιηθεί υπό την επίδραση των ανακυκλιζόμενων διατμητικών τάσεων τότε το μέγεθος των παραμορφώσεων καθορίζεται από τη στατική διατμητική αντοχή. Αυτό το φαινόμενο συνήθως εμφανίζεται απότομα με τη μορφή λασποροής, η οποία κινείται πολύ γρήγορα καλύπτοντας μεγάλη απόσταση.



Εικόνα 3.14: Αστοχία φράγματος San Fernando, παράδειγμα ροϊκής ρευστοποίησης (Πηγή: Olson, 2001).

Ανακυκλιζόμενη κινητικότητα: Λαμβάνει χώρα στην περίπτωση που η απαιτούμενη για την εξασφάλιση της στατικής ισορροπίας διατμητική τάση, είναι μικρότερη από τη διατμητική αντοχή σε κατάσταση ρευστοποίησης. Οι εδαφικές παραμορφώσεις εκδηλώνονται σταδιακά και εξαρτώνται από τη στατική αντοχή, καθώς και από το πλάτος των ανακυκλικών διατμητικών τάσεων. Όταν εξετάζεται η περίπτωση των πρανών που έχουν αρκετά ήπια κλίση, τότε το αποτέλεσμα της ανακυκλιζόμενης κινητικότητας είναι η εμφάνιση του φαινομένου της πλευρικής εξάπλωσης (lateral spreading), το οποίο είναι ικανό να δημιουργήσει σοβαρά προβλήματα σε βαθιές και επιφανειακές θεμελιώσεις. Στην περίπτωση όπου έχουμε οριζόντιο έδαφος, οπότε οι αρχικές διατμητικές τάσεις είναι μηδενικές, τότε η ανακυκλιζόμενη κινητικότητα δεν έχει ως συνέπεια διάφορες μετακινήσεις, αλλά μία έντονη ταλάντωση. Αυτή η ταλάντωση, σε συνδυασμό με τη μείωση της διατμητικής αντοχής εξαιτίας της αύξησης της πίεσης των πόρων, είναι ικανή να προκαλέσει αστοχία. Η αστοχία αυτή μπορεί να εμφανιστεί και μετά τον σεισμό, μέχρι να αποκατασταθεί η υδραυλική ισορροπία.



Εικόνα 3.15: Εμφάνιση κρατήρων άμμου σε ανακυκλιζόμενη δραστηριότητα.

3.3.3 Διαδικασία ρευστοποίησης

Όταν ένας χαλαρός κοκκώδης εδαφικός σχηματισμός υπόκειται σε ανακυκλιζόμενη δόνηση, όπως στην περίπτωση ενός σεισμού, τότε εμφανίζεται τάση συμπύκνωσης και μεταβολή του όγκου του. Ειδικότερα, πραγματοποιείται μετακίνηση των κόκκων που αποτελούν το εδαφικό υλικό με στόχο τη μείωση των μεταξύ τους κενών. Στην περίπτωση των κορεσμένων χαλαρών εδαφών σε αστράγγιστες συνθήκες, η παρουσία του νερού εντός των κενών εμποδίζει τη μετατόπιση αυτή. Επίσης, η πίεση που μεταφέρεται στο νερό των πόρων, εξαιτίας των αστράγγιστων συνθηκών, δεν είναι ικανή να εκτονωθεί με αποτέλεσμα να αυξάνεται απότομα η πίεση των πόρων u. Αυτή η συνεχής αύξηση της u αντιστοιχεί σε μείωση της διατμητικής αντοχής του εδάφους, μέχρι και την πλήρη απώλειά της σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση (νόμος Coulomb):

$$\tau = \sigma'_{\nu} \cdot \varepsilon \varphi \varphi' \quad (3.11)$$

όπου:

 $\sigma_{v}^{\prime}=\sigma-u,$

σ = τἁση,

σ' = ενεργή τάση,

φ'= ενεργός (δρώσα) γωνία τριβής,

u= η πίεση των πόρων.

Σημειώνεται ότι ο όρος της συνοχής c δεν υπάρχει, διότι αναφερόμαστε σε μη συνεκτικά εδάφη.



Εικόνα 3.16: Αναδιάταξη κόκκων εδαφικού σχηματισμού λόγω ρευστοποίησης (Πηγή: τροποποιημένο από Obermeier et al., 2005).

Αυτό το στάδιο ονομάζεται *ολική ρευστοποίηση* και η πίεση του νερού των πόρων, το οποίο δεν έχει απεγκλωβιστεί από το έδαφος, ανταποκρίνεται στην πίεση που ασκούν τα υπερκείμενα στρώματα διατηρώντας τον όγκο του σχηματισμού (Παπαθανασίου, 2010). Επίσης, οι δυνάμεις σύνδεσης μεταξύ των κόκκων παύουν να υφίστανται και ο δομικός ιστός του εδάφους αστοχεί, με αποτέλεσμα να συμπεριφέρεται ως ρευστό μέσο. Στη συνέχεια, η εκτόνωση της πίεσης του νερού έχει ως συνέπεια την αύξηση της πυκνότητας του εδάφους και ταυτόχρονα τη μείωση του όγκου του. Η ποσότητα του νερού, η οποία παρέμεινε στο εσωτερικό του ιζήματος, θα διοχετευθεί προς την επιφάνεια εξαιτίας της μεγάλης υδραυλικής κλίσης παρασέρνοντας και εδαφικό υλικό. Το πόσο χρονικό διάστημα θα διαρκέσει η ροή αυτή, εξαρτάται από το χρόνο που χρειάζεται για να αποκατασταθεί η υδραυλική ισορροπία στην εδαφική στήλη. Συνεπώς, αποτελεί ένα συνηθισμένο φαινόμενο να υπάρχει συνέχεια αυτής της ροής και μετά το πέρας της σεισμικής δόνησης.

3.4 Καθιζήσεις

Καθίζηση είναι η υποχώρηση ή παραμόρφωση του εδάφους, η οποία προκαλείται από το βάρος του υπερκείμενου εδάφους ή τεχνικού έργου, με άλλα λόγια, είναι η συμπίεση που προκαλείται στο έδαφος, όταν τα φορτία που του ασκούνται υπερβούν αντοχή του. Καθιζήσεις συμβαίνουν σε κορεσμένες αποθέσεις άμμου υποβάλλονται σε σεισμική δόνηση, οπότε έχουμε αύξηση της πίεσης των πόρων που οδηγεί σε ρευστοποίηση ή απώλεια της αντοχής τους. Η αυξημένη πίεση των πόρων αρχίζει να εκτονώνεται κυρίως προς την επιφάνεια του εδάφους συνοδευόμενη από τη μεταβολή του όγκου της αμμώδους απόθεσης, η οποία εκδηλώνεται με την εμφάνιση καθιζήσεων στην επιφάνεια. Επιπροσθέτως, όταν έχουμε μείωση της διατμητικής αντοχής, είναι πιθανό να προκληθεί απώλεια της εδαφικής ευστάθειας, ακόμη και κατολισθήσεις.



Εικόνα 3.17: Καθίζηση στο δρόμο Ροδινών-Αρήνης, Ηλείας. (Πηγή: <u>www.iliatora.gr</u>).

Το φαινόμενο της καθίζησης αποτελεί συνδυασμό διάφορων γεωλογικών, γεωτεχνικών, τοπογραφικών, μορφολογικών και μετεωρολογικών παραγόντων. Επίσης, είναι συνάρτηση της σεισμικότητας της περιοχής, του είδους της κατασκευής,

του τύπου της θεμελίωσης αυτής, της καταλληλότητας των κατασκευαστικών υλικών που την αποτελούν και της σωστής επίβλεψης κατά τη περίοδο κατασκευής του έργου.

3.4.1 Είδη καθιζήσεων

Από τη σκοπιά των γεωλογικών και γεωτεχνικών παραγόντων, οι καθιζήσεις χωρίζονται σε δύο είδη: τις καθολικές καθιζήσεις και τις διαφορικές καθιζήσεις.

Καθολικές καθιζήσεις: σε αυτή την κατηγορία έχουμε ομοιόμορφη υποχώρηση του εδάφους και το έργο συμπαρασύρεται κατά ομοιόμορφο τρόπο. Επίσης, εδώ υπάρχουσες ρωγμές είναι συνήθως λίγες και μικρού μεγέθους.

Διαφορικές καθιζήσεις: αντίθετα με την προηγούμενη κατηγορία, στην περίπτωση αυτή λαμβάνει χώρα ανομοιόμορφη υποχώρηση του εδάφους με συνέπεια την έντονη δημιουργία αρκετών και μεγάλων ρωγμών με διαφορετική κλίση και κατεύθυνση.

3.4.2 Εδάφη ευαίσθητα σε καθιζήσεις

Εδάφη στα οποία παρατηρούνται πιο συχνά φαινόμενα καθίζησης είναι τα μαλακά, συμπιεστά και τα διογκούμενα ή χημικά διαβρωμένα εδάφη. Εξετάζοντας τα μαλακάσυμπιεστά εδάφη, τα οποία είναι και χαμηλής αντοχής, συνήθως παρατηρούνται εδαφικές καθιζήσεις και βλάβες στα υπερκείμενα τεχνικά έργα, όταν αυτά είναι κατασκευασμένα πάνω σε χαλαρές ή μαλακές προσχώσεις (κορήματα) στις επιφάνειες των πλάγιων (πρανών) ορεινών περιοχών. Επειδή τα εδάφη αυτά είναι πολύ ευαίσθητα σε διάβρωση (βροχή, ανεμοθύελλες), οι καθιζήσεις είναι πολύ πιθανό να εξελιχθούν σε κατολισθήσεις.

Από την άλλη πλευρά, τα διογκωμένα εδάφη είναι ένα ακόμα είδος «προβληματικών» γεωλογικών σχηματισμών, που αποτελούνται από αργίλους με μεγάλη υδροαπορροφητικότητα, ιδιαίτερα κατά τη χειμερινή περίοδο, που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του όγκου τους και την ανύψωση των υπερκείμενων έργων. Όμως, κατά την καλοκαιρινή περίοδο τα εδάφη αυτά χάνουν τις υδάτινες ποσότητες που είχαν προηγουμένως συσσωρευτεί, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο όγκος τους και να προκαλείται αποσταθεροποίηση του εδάφους και τελικά καθίζηση των υπερκείμενων κατασκευών. Αυτή η εναλλαγή του φαινομένου για όλο το χρόνο, χειμώνα και καλοκαίρι, προκαλεί μία έντονη ρηγμάτωση στο έδαφος.

3.4.3 Καθιζήσεις και σεισμός

Η κίνηση του εδάφους που προκαλείται από τον σεισμό μπορεί να προκαλέσει αύξηση της πυκνότητας και των συνεκτικών, αλλά και των μη συνεκτικών εδαφών (O'Rourke & Liu, 1999). Αυτή η διαδικασία φανερώνεται ως καθίζηση (settlement) στην επίγεια επιφάνεια και είναι πολλές φορές καταστρεπτική, ειδικά για τα υπόγεια έργα υποδομής. Σε ισχυρούς σεισμούς οδηγεί σε αύξηση της πυκνότητας των αργίλων έχει παρατηρηθεί, αλλά μεγαλύτερη συνέπεια έχει η αύξηση της πυκνότητας των άμμων, είτε κορεσμένων, είτε ξηρών.

Η καθίζηση των ξηρών ἀμμων ἐχει ολοκληρωθεί μἐχρι το τέλος της ισχυρής σεισμικής δόνησης. Όμως, η διαδικασία αυτή ὀσον αφορά στις κορεσμένες ἀμμους, εμφανίζεται μόνον ὀταν αρχίσουν να μειώνονται οι προκληθείσες από το σεισμό σημαντικές πιέσεις των πὀρων. Αυτό εξαρτάται από τη διαπερατότητα και τη συμπιεστότητα του εδάφους, καθώς και από τις συνθήκες υγρασίας στο υπέδαφος, και επομένως μπορεί να μην έχει ολοκληρωθεί ακόμα μέχρι μερικές ὡρες μετά από το σεισμό. Μετά από το σεισμό του 1995 Hyogoken-Nanbu (Kobe), μετατοπίσεις μετα-ρευστοποίησης μεγέθους μέχρι ἐνα μἑτρο παρατηρήθηκαν στα χαλαρά τεχνητά υλικά στο ἑδαφος, στην περιοχή της Οζἀκα.

3.5 Κατολισθήσεις

Γενικά, για τις κατολισθήσεις έχουν διατυπωθεί διάφοροι ορισμοί και θεωρίες. Αρχικά, ο Terzaghi (1950) έδωσε έναν πρώτο ορισμό για την κατολίσθηση, λέγοντας ότι είναι μία γρήγορη κίνησης της μάζας του πετρώματος, ενός υπολειμματικού εδάφους ή ιζήματος ενός πρανούς, της οποίας το κέντρο βάρους μετακινείται προς τα κάτω και προς τα έξω. Στη συνέχεια, έχουμε έναν ορισμό και από τους Zaruba & Mencl (1969), ο οποίος αναφέρει ότι αποτελεί μία γρήγορα κίνηση των πετρωμάτων που οφείλεται στον ολίσθηση ενός τμήματος πρανούς, που διαχωρίζεται από το υπόλοιπο σταθερό τμήμα με μία καλά καθορισμένη επιφάνεια.



Εικόνα 3.18: Η μεγάλη κατολίσθηση της Τσάκωνας στην Ε.Ο. Τρίπολης-Καλαμάτας (Πηγή: ΤΕΕ, 2006).

Επιπροσθέτως, θα αναφερθούμε σε μερικές προϋποθέσεις για την ταξινόμηση της εδαφικής μάζας στις κατολισθήσεις, τις οποίες και διατύπωσε ο Coates (1977):

- Η βαρύτητα είναι η δύναμη που κατέχει πρωτεύοντα ρόλο.
- Η ταχύτητα της κίνησης θα πρέπει να είναι σχετικά μεγάλη.
- Η κίνηση είναι πιθανό να εκδηλώνεται με διάφορες μορφές, όπως: πτώση, ολίσθηση ή ροή.
- Η ζώνη, το επίπεδο της κίνησης δεν ταυτίζεται με το γεωλογικό ρήγμα.
- Η κίνηση θα πρέπει να γίνεται προς τα κάτω και προς τα έξω, με τη δημιουργία ελεύθερης επιφάνειας.
- Το υλικό που μετακινείται έχει καθορισμένα όρια και συνήθως αποτελεί ένα περιορισμένο τμήμα μίας ορεινής ή λοφώδους έκτασης.
- Το μετακινούμενο υλικό περιλαμβάνει μέρος του μανδύα αποσάθρωσης των πετρωμάτων ή μέρος του μητρικού πετρώματος ή και τα δύο.

Επίσης, η κατολίσθηση κατά τον Varnes (1978) είναι η μετακίνηση των μαζών, όπου περιλαμβάνεται κάθε μετακίνηση του τμήματος πρανούς που οφείλεται σε ολίσθηση, πτώση, ροή και ερπυσμό, ο οποίος έκανε και έναν διαχωρισμό της κατολίσθησης και της κατάρρευσης.

Συνοψίζοντας λοιπόν τους παραπάνω ορισμούς, μπορούμε να πούμε ότι η κατολίσθηση είναι η κάθε αλλαγή της επιφάνειας μιας κλιτύος, η οποία συνοδεύεται με μετακίνηση υλικού και αργή ή απότομη ρήξη της συνέχειάς της (Παυλόπουλος,

2008). Συνεπώς, αποτελεί ένα γεωλογικό φαινόμενο, το οποίο έχει έναν πλουραλισμό όσον αφορά τις μετακινήσεις της εδαφικής μάζας, διότι λαμβάνουν χώρα πτώσεις, ολισθήσεις, ανατροπές και ροές, οι οποίες μπορούν να εμφανιστούν σε ξηρά, παράκτια αλλά και υποθαλάσσια περιβάλλοντα. Στην περίπτωση που η εδαφική μάζα κινηθεί προς την κατακόρυφη διεύθυνση, τότε δεν έχουμε κατολίσθηση αλλά καθίζηση (βλ. προηγούμενη Ενότητα 3.4). Η έννοια της κατολίσθησης έχει νόημα μόνον όταν συμβαίνει κίνηση κατά την οριζόντια διεύθυνση.

3.5.1 Χαρακτηριστικά των κατολισθήσεων

Εκτός από τον ορισμό περί κατολισθήσεως, ο Varnes (1978) πρότεινε το παρακάτω διάγραμμα της Εικόνας 3.19 που απεικονίζει τα χαρακτηριστικά σε μία ιδεατή σύνθετη κίνηση. Οπότε παραθέτουμε τα εξής χαρακτηριστικά (Cruden & Varnes, 1996):

Κύρια τομή: η απότομη επιφάνεια, η οποία δημιουργείται στο αμετακίνητο έδαφος γύρω από την περιφέρεια της μετακίνησης. Αιτία πρόκλησης αποτελεί η απομάκρυνση του ολισθαίνοντος υλικού από το αδιατάρακτο υλικό.

Δευτερεύουσες τομές: οι απότομες επιφάνειες του μετατοπισμένου υλικού που προκύπτουν από τις διαφορικές κινήσεις, οι οποίες πραγματοποιούνται στο εσωτερικό του υλικού.

Κεφαλή: εντοπίζεται στο ανώτερο μέρος της κατολίσθησης και αποτελείται από τα ανώτερα τμήματα της ολισθαίνουσας μάζας και κατά μήκος της επαφής ανάμεσα στο υλικό που μετακινήθηκε και την κύρια τομή.

Κορυφή: το ψηλότερο σημείο της επαφής του μετακινούμενου υλικού και της κύριας τομής.

Στέψη: το αμετακίνητο υλικό που εντοπίζεται στα υψηλότερα σημείο της κύριας τομής.

Κύριο σώμα: η μάζα του υλικού που έχει μετακινηθεί. Σχηματίζεται από τη συσσώρευση του υλικού, το οποίο αφού έχει μετακινηθεί κατά μήκος μιας διαδρομής, σταματάει την πορεία του και συγκεντρώνεται στο κάτω μέρος του σώματος της κατολίσθησης.

Επιφάνεια θραύσης: η επιφάνεια όπου γίνεται η μετακίνηση της μάζας που κατολισθαίνει, η οποία προκύπτει από την αποκόλλησή της από το σταθερό υπόβαθρο.

Επιφάνεια αποκόλλησης: αποτελεί τμήμα της αρχικής επιφάνειας του εδάφους, η οποία καλύπτεται από το πόδι της κατολίσθησης.

Πόδι: το χαμηλότερο και ακραίο τμήμα του κύριου σώματος.

Δάκτυλο: το κατώτερο και πιο απομακρυσμένο από την κύρια τομή, περιθώριο του μετατοπισμένου υλικού της κατολίσθησης.

Δάκτυλο της επιφάνειας θραύσης: η διατομή ανάμεσα στο κατώτερο όριο της επιφάνειας θραύσης και στην αρχική επιφάνεια του εδάφους.

Αιχμή: το πιο απομακρυσμένο, από την κορυφή της κατολίσθησης, σημείο που βρίσκεται στο πόδι.

Ζώνη βυθίσεως: η περιοχή της κατολίσθησης, όπου το υλικό που έχει μετατοπιστεί βρίσκεται κάτω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους.

Ζώνη διογκώσεως: η περιοχή της κατολίσθησης, όπου το μετατοπισμένο υλικό βρίσκεται πάνω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους.

Πτερύγιο: το αμετακίνητο υλικό, το οποίο βρίσκεται δίπλα στις πλευρές της επιφάνειας θραύσης.

Μετατοπισμένα υλικά: τα υλικά που μετατοπίζονται από την αρχική, στην πλάγια θέση.

Αρχική επιφάνεια του εδάφους: η επιφάνεια της πλαγιάς, η οποία υπήρχε πριν την κατολίσθηση.



Εικόνα 3.19: Διάγραμμα με τα χαρακτηριστικά μιας ιδεατής σύνθετης μετακίνησης (Πηγή: Varnes, 1978).

3.5.2 Κατολισθήσεις και σεισμός

Η σπουδαιότητα των κατολισθήσεων που προκαλούνται από σεισμικές δονήσεις, είναι σαφώς αναγνωρισμένη. Σε αρκετά σεισμικά γεγονότα, ο οικονομικός και κοινωνικός αντίκτυπος της ζημιάς από κατολισθήσεις, έχει υπερβεί τον συνδυασμένο αντίκτυπο όλων των άλλων σεισμικών κινδύνων (Kramer, 1996). Οι εδαφικές κατολισθήσεις είναι μόνιμες παραμορφώσεις της μάζας του εδάφους, συνήθως μεγάλης έκτασης, που γενικά προκαλούν σοβαρές ζημιές. Οι περισσότερες εδαφικές κατολισθήσεις συμβαίνουν όταν ο σεισμός εμφανιστεί κατά τη διάρκεια του χειμώνα και ιδιαίτερα κατά την περίοδο των βροχών (βλ. Εικόνα 3.20). Ενώ μερικές κατολισθήσεις εδάφους μπορούν να προκαλέσουν μικρές μετακινήσεις του χώματος, δηλαδή μόνο μερικά εκατοστά, άλλες είναι ικανές να καταλάβουν μεγάλη έκταση σε αρκετή απόσταση. Το μέγεθος των εδαφικών κατολισθήσεων, εξαρτάται από το μέγεθος της μέγιστης εδαφικής μετατόπισης (PGD).

Ο όρος «κατολίσθηση εδάφους» καλύπτει μια ευρεία σειρά των φαινομένων, που περιλαμβάνει τη βαρύτητα, καθώς και τις καθοδηγούμενες κατηφορικές μετακινήσεις των εδαφικών υλικών. Διάφορα σχέδια ταξινόμησης της καθίζησης έχουν προταθεί βασισμένα στη μορφολογία, το υλικό, το μηχανισμό της έναρξης ή άλλα κριτήρια. Η ταξινόμηση που προαναφέρθηκε κατά Varnes, χρησιμοποιηείται ευρέως και έχει υιοθετηθεί για να ταξινομήσει τις προκληθείσες από σεισμό κατολισθήσεις εδάφους, σύμφωνα με τον τύπο του υλικού (χώμα, βράχος), το χαρακτήρα της μετακίνησης (διακεκομμένη ή συνεχής), και άλλες ιδιότητες (περιεκτικότητα σε νερό, ταχύτητα μετακίνησης και βάθος). Προσδιορίζονται τρεις κύριες κατηγορίες: οι διακεκομμένες κλίσεις και οι πτώσεις, οι συνεχόμενες κλίσεις, καθώς και η μετατόπιση πλευρικής εξάπλωσης και ροής (Ρούμπα, 2009).

Ένα πρανές που είναι σταθερό κάτω από τη στατική φόρτιση λόγω βαρύτητας, μπορεί να αστοχήσει κάτω από τη σεισμική φόρτιση λόγω των πρόσθετων δυναμικών καταπονήσεων. Οι αστάθειες που προκαλούν τη σεισμική αστοχία πρανών, μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο κατηγορίες: την αδρανειακή αστοχία και την αστοχία λόγω μείωσης της αντοχής (Kramer, 1996). Οι αδρανειακές αστοχίες προκαλούνται από την προσωρινή υπέρβαση της αντοχής του εδαφικού υλικού, από την επιβαλλόμενη σεισμική φόρτιση. Η διατμητική αντοχή του εδαφικού υλικού παραμένει σχεδόν σταθερή. Οι αστοχίες λόγω της απομείωσης της αντοχής, συσχετίζονται με τις αλλαγές στην διατμητική αντοχή του εδαφικού υλικού, που προκαλείται από έναν συνδυασμό αύξησης της πίεσης των πόρων και δομικής διαταραχής. Γενικά, οποιαδήποτε περίπτωση κατολίσθησης, θα έχει προκληθεί από συνδυασμό αυτών των δύο ασταθειών.



Εικόνα 3.20: Κατολίσθηση έπειτα από σεισμικό συμβάν (Πηγή: <u>www.altpressfthiotida.com</u>).

3.6 Μετακινήσεις σεισμικών ρηγμάτων

Σεισμική αστοχία μπορεί να επιβληθεί σε τεχνικά έργα και κατασκευές, ειδικά όταν καλύπτουν μεγάλες εκτάσεις, όπως οι αγωγοί δικτύων κοινής ωφέλειας, όχι μόνο λόγω της ισχυρής σεισμικής κίνησης, αλλά και λόγω της μετακίνησης ενός ρήγματος (fault movement). Η τρωτότητα των τεχνικών έργων σε μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις, που προκύπτουν από τις μετακινήσεις ρηγμάτων (βλ. Εικόνα 3.21), έχει παρατηρηθεί κατά τη διάρκεια αρκετών σεισμών στο παρελθόν.

Πιο συγκεκριμένα, η δυσμενής επίδραση του ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης, που ενεργοποιήθηκε κατά τον σεισμό του San Fransisco (1906, Καλιφόρνια) σε αγωγούς ύδρευσης, επιχώματα, φράγματα και κτιριακά έργα έχει αναλυθεί από τους Bray and Kelson (2006). Βάσει παρατηρήσεων πεδίου του προαναφερθέντος σεισμού αναφέρεται ότι, τα επιχώματα μικρότερου ύψους αναμένεται να παρουσιάσουν πιο έντονες μόνιμες παραμορφώσεις σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μεγαλύτερου ύψους. Εκτός από τα στοιχεία για την επιφανειακή εκδήλωση του ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης κατά τον σεισμό Landers (1992, Καλιφόρνια) (βλ. Εικόνα 3.22) που παρατίθενται από τον Bray (2001), αναφέρεται επιπροσθέτως η κατάρρευση πολλών κτιριακών έργων, αλλά και βλάβες σε γέφυρες λόγω των επιβαλλόμενων μετακινήσεων ρήγματος κατά τους σεισμούς Kocaeli και Duzce (1999, Τουρκία).



Εικόνα 3.21: Τύποι μετακίνησης σεισμικών ρηγμάτων (Πηγή: <u>www.scienceclarified.com</u>).



Εικόνα 3.22: Επιφανειακή εκδήλωση ρήγματος Landers (Πηγή: <u>activetectonics.asu.edu</u>).

Έπειτα από τον σεισμό του Kocaeli, ο οποίος προκλήθηκε από διάρρηξη ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης (Ανατολίας) (βλ. Εικόνα 3.23), παρατηρήθηκαν επίσης επιφανειακές παραμορφώσεις κανονικής διάρρηξης, οι οποίες αφενός προκάλεσαν αστοχίες σε κτιριακές κατασκευές, αφετέρου ανέδειξαν την ικανοποιητική συμπεριφορά τους σε άλλες περιπτώσεις (Anastasopoulos and Gazetas, 2007). Η αντικρουόμενη αυτή παρατήρηση αποδόθηκε από τους συγγραφείς κυρίως στον τύπο της θεμελίωσης και τη δυσκαμψία της κάθε κατασκευής, καθώς και τη σχετική θέση καθεμίας ως προς τη διάδοση της διάρρηξης.



Εικόνα 3.23: Σεισμός Kocaeli και ρήγμα Ανατολίας (Πηγή: peer.berkeley.edu).

Οι διαφορετικοί τύποι εδαφικής παραμόρφωσης που αναπτύχθηκαν κατά μήκος του ανάστροφου ρήγματος Chelungpu κατά τον σεισμό του Chi-Chi (1999, Ταϊβάν) εξετάστηκαν από τους Kelson et al. (2001). Στα γενικά χαρακτηριστικά της επιφανειακής εκδήλωσης του ρήγματος αναφέρονται η μικρή έως ανύπαρκτη παραμόρφωση του αμετακίνητου τεμάχους του ρήγματος, η οριζόντια εξάπλωση του εδάφους με τη συνεπαγόμενη κάλυψη της αιχμής του αμετακίνητου τεμάχους κατά τη συμπίεση του κινούμενου τεμάχους και η δημιουργία δευτερογενών κανονικών ή ανάστροφων ρηγμάτων και κατακρημνισμάτων. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι οι βλάβες σε κτιριακά έργα εντοπίζονταν κυρίως σε απόσταση 5-10 μέτρων από τη θέση του ίχνους του ρήγματος πριν τη διάρρηξη και συσχετίζονταν με την εδαφική παραμόρφωση (κλίση και κατακόρυφη μετακίνηση) που αναπτύχθηκε κατά την ανάδυση του ρήγματος (Ζανιά, 2009).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα εξετάσουμε το πώς συμπεριφέρονται οι ανεμογεννήτριες σε διαφόρων ειδών φορτίσεις ως σύνολο, αλλά και ως επιμέρους τμήματα. Αυτό είναι απαραίτητο κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού έτσι ώστε να προκύψει μια βέλτιστη λειτουργία της όλης εγκατάστασης. Αρχικά, θα αναφερθούμε στα συνηθέστερα είδη φορτίσεων σε ανεμογεννήτριες, δηλαδή τις στατικές φορτίσεις και τις δυναμικές φορτίσεις:

- Στατικές φορτίσεις: προκαλούνται συνήθως από φορτία λόγω βαρύτητας.
- Δυναμικές φορτίσεις: προέρχονται από τον άνεμο, τον σεισμό, τα κύματα και γενικότερα τα θαλάσσια ρεύματα.

Όσον αφορά στον άνεμο και τον σεισμό, και ειδικά στη δεύτερη περίπτωση είναι δυνατό να υπάρχει μια δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ του εδάφους και της κατασκευής, έχοντας ως αποτέλεσμα να αυξάνεται η ιδιοπερίοδος του συστήματος που είναι πιθανόν να οδηγήσει σε πρόσθετες καταπονήσεις της δομής της Α/Γ (Ψαρρόπουλος κ.α., 2006). Ειδική προσοχή πρέπει να δίνεται στον ενδεχόμενο συντονισμό του συστήματος με τη διέγερση, το οποίο είναι ένα φαινόμενο που πρέπει να αποφεύγεται, διότι οι επιπτώσεις του είναι εξαιρετικά επιβλαβείς.

4.2 Φορτίσεις λόγω ανέμου

Στις ανεμογεννήτριες δεν υπάρχει αμφιβολία ότι η κύρια και πιο συχνή καταπόνησή τους είναι ο άνεμος. Οι δράσεις βέβαια δεν θα οφείλονται αποκλειστικά και μόνο σε αυτόν, θα ενεργήσουν ταυτόχρονα και βαρυτικές και αδρανειακές δυνάμεις διότι η κατασκευή αυτή αποτελείται από μεγάλου μήκους και λεπτών τοιχωμάτων στοιχεία,

όπως για παράδειγμα τα πτερύγια και τον πύργο. Επίσης, αναπτύσσονται διάφορες δυνάμεις κατά τη λειτουργία της εγκατάστασης, όπως οι φυγόκεντρες δυνάμεις, δυνάμεις Coriolis και γυροσκοπικές δυνάμεις (Παναγιώτου, 2003).

Πιο συγκεκριμένα, τα φορτία τα οποία δέχεται μία τυπική ανεμογεννήτρια είναι τα παρακάτω (Παναγιώτου, 2003):

- Αεροδυναμικά φορτία στα πτερύγια.
- Βαρυτικές δυνάμεις στα πτερύγια.
- Φυγόκεντρες και δυνάμεις Coriolis, εξαιτίας της περιστροφής.
- Γυροσκοπικές δυνάμεις, εξαιτίας της λειτουργίας του συστήματος ευθυγράμμισης.
- Αεροδυναμικές δυνάμεις στον πύργο και στη βάση των πτερυγίων.
- Βαρυτικές δυνάμεις στον πύργο και στη βάση των πτερυγίων.



Εικόνα 4.1: Παράδειγμα Ανεμοφορτίων-Διάγραμμα μεταβολής ταχύτητας (Πηγή: <u>www.winddata.com</u>).

Όσον αφορά στις βαρυτικές δυνάμεις, αυτές δημιουργούν στα πτερύγια καμπτικές ροπές σε δυο επίπεδα. Επειδή οι λεπίδες περιστρέφονται συνεχώς, οι βαρυτικές δυνάμεις οι οποίες δρουν στα πτερύγια θα δώσουν μεταβαλλόμενες καμπτικές ροπές, οπότε προφανώς όσο μεγαλύτερος είναι ο ρότορας τόσο μεγαλύτερες θα είναι και οι βαρυτικές δυνάμεις που ασκούνται πάνω του.

Η απόκριση των λεπίδων συνδέεται άμεσα με την απόσβεση, η οποία είναι ένας συνδυασμός της αεροδυναμικής με την απόσβεση της κατασκευής. Η δυναμική απόσβεση εξαρτάται από:

- Το είδος των πτερυγίων σε συνάρτηση και με τον τρόπο περιστροφής.
- Τις συνθήκες λειτουργίας.
- Τη συχνότητα περιστροφής του ρότορα.
- Την ταχύτητα του ανέμου.
- Τη διεύθυνση της ταλάντωσης των λεπίδων.
- Την κίνηση των λεπίδων στον προσπίπτοντα άνεμο.

4.2.1 Αδρανειακές και βαρυτικές δυνάμεις

Οι δυνάμεις αυτές ασκούνται στον ρότορα και είναι άμεσα εξαρτώμενες από τη μάζα του. Η εγκάρσια φυγόκεντρη δύναμη στη διατομή της λεπίδας F_c εξαρτάται από την γωνιακή ταχύτητα του ρότορα στην ακτινική θέση, καθώς και στη μάζα της λεπίδας. Η δύναμη αυτή στη βάση της λεπίδας, παρουσιάζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$F_c = \sum m_i r_i \omega^2 \quad (4.1)$$

όπου:

m_i= η μάζα του στοιχειώδους στοιχείου,

ω= η γωνιακή/κυκλική ταχύτητα του ρότορα,

ri= η ακτινική απόσταση του υπό εξέταση στοιχείου.

Οι γυροσκοπικές δυνάμεις είναι μεγαλύτερες σε ελαστικά στηριζόμενους ρότορες, και αναπτύσσονται όταν ο ρότορας στρέφεται για να ευθυγραμμιστεί με τη διεύθυνση του πνέοντος ανέμου. Ο μηχανισμός αυτός θεωρώντας ανεμογεννήτρια τριών (3) λεπίδων μας δίνει μια ροπή M_G για οριζόντια άξονα στο επίπεδο του ρότορα που ισούται με:

$$M_G = \frac{3M_0}{2}$$
 (4.2)

όπου

$$M_0 = 2\omega_\kappa \omega \sum m_i r_i^2 \quad (4.3)$$

4.2.2 Αεροδυναμικά φορτία

Ξεκινώντας από τα πτερύγια, για την εκτίμηση των φορτίων του ρότορα θα χρησιμοποιήσουμε πιο απλά μοντέλα, για το λόγο ότι η πραγματική ροή του ανέμου σε αυτή την περιοχή είναι αρκετά πολύπλοκη επειδή η λειτουργία του ρότορα διαφοροποιεί τις ταχύτητες και το πεδίο του ανέμου. Στην Εικόνα 4.2 απεικονίζεται ο τρόπος φόρτισης μιας λεπίδας, καθώς και τις συνθήκες της ταχύτητας. Θεωρώντας ως ν₀ την ταχύτητα που προσπίπτει κάθετα στη λεπίδα, όταν ο άνεμος περάσει εντός του πεδίου του ρότορα, θα μειωθεί κατά ένα ποσοστό εξαιτίας της αλληλεπίδρασης με τη λεπίδα (Εικόνα 4.3).



Εικόνα 4.2: Φόρτιση λεπίδας, μεταβολή ταχύτητας ανέμου γύρω από το πτερύγιο.



Εικόνα 4.3: 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 ω·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 εφαπτομενική ταχύτητα $a \cdot \omega \cdot r$. Η τελική ταχύτητα πνοής του ανέμου, την οποία θα δεχτεί το πτερύγιο του ρότορα, θεωρείται ως W. Στη συνέχεια, η ταχύτητα αυτή δημιουργεί δυο ειδών αεροδυναμικές δυνάμεις, τη δύναμη ανύψωσης και τη δύναμη στο επίπεδο της λεπίδας που δίνονται, αντίστοιχα, από τις σχέσεις:

$$F_L = 0.5 \cdot C_L \cdot \rho \cdot c \cdot W^2 \qquad (4.4)$$

$$F_D = 0.5 \cdot C_D \cdot \rho \cdot c \cdot W^2 \qquad (4.5)$$

όπου:

CL= η παράμετρος ανασηκώσεως,

C_D= η αεροδυναμική παράμετρος,

ρ= η πυκνότητα του αέρα,

c= το μήκος της χορδής της λεπίδας.

Όσον αφορά στον πύργο και τη βάση των 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:

$$F_D = 0.5 \cdot C_T \cdot \rho \cdot V_0^2 \cdot A \qquad (4.6)$$

όπου:

C_T= η αεροδυναμική διάμετρος με βάση το διάγραμμα της Εικόνας 4.4,

ρ= η πυκνότητα του αέρα,

Α= η προβαλλόμενη επιφάνεια,

V₀= η ταχύτητα του ανέμου.

Το σχήμα της Εικόνας 4.4 είναι αρκετά χρήσιμο, διότι η αεροδυναμική παράμετρος C_T μας επιτρέπει να μετατρέψουμε τα φορτία από τη λειτουργία του ρότορα, σε φορτία στον πύργο της ανεμογεννήτριας (Παναγιώτου, 2003).



Εικόνα 4.4: Αεροδυναμική παράμετρος C_T για διάφορα συστήματα ελέγχου μιας Α/Γ.

4.2.3 Κὀπωση

Ο ἀνεμος ἐχει ἐντονα μεταβαλλόμενο μἐτρο και διεύθυνση, ενώ αποτελεί την κυρίαρχη πηγή φορτίσεως Α/Γ. Συνεπώς, η κόπωση δεν θα μπορούσε να παραληφθεί από τους διάφορους τρόπους καταπόνησης σε αρκετά μέλη της κατασκευής, αλλά και ειδικά στη θεμελίωση. Οπότε, είναι εύκολα αντιληπτό ότι είναι μεγάλος ο κίνδυνος να υπάρξει αστοχία σε μια Α/Γ λόγω κόπωσης, γι' αυτό και πρέπει να αποτελεί ἐνα 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.

4.3 Φορτίσεις λόγω σεισμού

Οι σεισμοί επιβάλλουν πρόσθετα δυναμικά φορτία στα συστήματα αιολικής ενέργειας. Η σεισμική καταπόνηση συνήθως είναι μικρής διάρκειας. Το σύστημα μιας ανεμογεννήτριας (συγκεκριμένα ο πύργος και η θεμελίωση), θα πρέπει να μπορεί να παραλάβει τις διάφορες σεισμικές καταπονήσεις, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν το σύστημα τόσο λόγω των αδρανειακών σεισμικών δυνάμεων, όσο και λόγω:

- Μείωσης της εδαφικής φέρουσας ικανότητας.
- Ρευστοποίησης και απώλειας αντοχής σε διάτμηση, που οφείλεται στην αύξηση της πίεσης των πόρων από το σεισμό.
- Διαφορικών μετακινήσεων λόγω εδαφικής αστοχίας.
- Πλευρική εξάπλωση του εδάφους ή κατολισθήσεις.

Αυτές οι πιθανές σεισμικές καταπονήσεις εξαρτώνται από:

- Τη σεισμικότητα της περιοχής του έργου.
- Το είδος των εδαφικών υλικών (ἑδαφος, βράχος) και τις ειδικές τοπογραφικές συνθήκες.
- Τον τύπο και το, τρόπο κατασκευής του συστήματος αιολικής ενέργειας.

Για έργα Α/Γ, που βρίσκονται σε σεισμικά ενεργές περιοχές, οι εκτιμήσεις για τις σεισμικές δυνάμεις συχνά χρησιμοποιούν διαδικασίες για τη κατασκευή κτιρίων.

4.3.1 Ιδιομορφική ανάλυση

Η ιδιομορφική ανάλυση (modal analysis) χρησιμοποιείται ευρέως στη δυναμική ανάλυση κατασκευών. Η ιδιομορφική ανάλυση βασίζεται στα φάσματα απόκρισης, από τα οποία προσδιορίζεται η φασματική επιτάχυνση της κατασκευής συναρτήσει της περιόδου κατασκευής. Εφαρμόζεται επίσης και η πιο απλοποιημένη μέθοδος της ισοδύναμης οριζόντιας δύναμης (equivalent lateral force, ELF), κατά την οποία η σεισμική φόρτιση θεωρείται ως μια ψευδοστατική ισοδύναμη οριζόντια τέμνουσα βάσης. Η τέμνουσα βάσης κατανέμεται καθ' ύψος στην κατασκευή. Η διαδικασία αυτή παρέχει μια καλή εκτίμηση του μεγέθους των σεισμικών φορτίων και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πρώτη φάση για την επιλογή περιπτώσεων που απαιτούν πιο λεπτομερείς δυναμικές αναλύσεις.

Αναφορικά με τα φάσματα απόκρισης, ορίζονται ως «ένα διάγραμμα, το οποίο δίνει τη μέγιστη απόκριση για το μέγεθος ενδιαφέροντός μας (π.χ. απόλυτη επιτάχυνση, σχετική μετακίνηση, κλπ.) για όλους τους μονοβάθμιους ταλαντωτές με συγκεκριμένη απόσβεση, για δεδομένη σεισμική διέγερση, ανάλογα με την ιδιοπερίοδό τους» (Ψυχάρης, 2008). Για τη δημιουργία ενός φάσματος απόκρισης σχετικών μετακινήσεων, ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

- Ορίζεται η απόσβεση ξ (σε ποσοστό επί τοις εκατό), για την οποία θα κατασκευαστεί το φάσμα.
- Επιλέγεται η ιδιοπερίοδος Τ (σε sec) ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή.
- Υπολογίζεται η χρονοϊστορία της απόκρισης, u(t), του παραπάνω ταλαντωτή για τη δεδομένη σεισμική διέγερση.
- Υπολογίζεται η απόλυτη μέγιστη τιμή της απόκρισης max|u(t)|.
- Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για πολλές τιμές περιόδων Τ και κατασκευάζεται το διάγραμμα max|u(t)| ως προς Τ.



Εικόνα 4.5: Φάσμα σχεδιασμού κατά Eurocode 8 (Πηγή: Eurocode 8, 2003).



Εικόνα 4.6: Κανονιστικά φάσματα απόκρισης, επίδραση στρωματογραφίας υπεδάφους (Πηγή: Ntambakwa & Rogers, 1999).

Από την καμπύλη που προκύπτει, είναι δυνατόν να βρεθεί η μέγιστη επιτάχυνση οποιασδήποτε κατασκευής με απόσβεση ίση με αυτή του φάσματος, για τη δεδομένη σεισμική διέγερση, προβάλλοντας το σημείο της καμπύλης που αντιστοιχεί στην ιδιοπερίοδο της κατασκευής στον άξονα των φασματικών επιταχύνσεων (βλ. Εικόνα 4.5). Η επίδραση των εδαφικών στρωματογραφικών συνθηκών σε τυπικά κανονιστικά φάσματα απόκρισης απεικονίζεται στην Εικόνα 4.6, όπου είναι εμφανής η δυσμενέστερη κατάσταση (μεγαλύτερες φασματικές επιταχύνσεις για μεγαλύτερο εύρος περιόδων) για μαλακά εδάφη (τύπος Ε).

4.3.2 Δυναμική ανάλυση

Η εκτίμηση της σεισμικής φόρτισης σε Α/Γ μπορεί να διεξαχθεί με δυναμική ανάλυση με εν χρόνω ολοκλήρωση, χρησιμοποιώντας τις χρονοϊστορίες επιταχύνσεων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί αναλύοντας διάφορες αντιπροσωπευτικές χρονοϊστορίες επιταχύνσεων (βλ. Εικόνα 4.7), επιλεγμένες από καταγραφές σεισμικών γεγονότων σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία, ή ακόμα και τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα, ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς της δυναμικής αλληλεπίδρασης των σεισμικών δυνάμεων για τη θεμελίωση, τον πύργο και την τουρμπίνα. Η ανάλυση με εν χρόνω ολοκλήρωση είναι μια πιο ακριβής, αλλά και πιο απαιτητική, διαδικασία αξιολόγησης, όπου η απόκριση εκτιμάται σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια ενός σεισμού (βλ. Εικόνα 4.8). Στην περίπτωση των ανεμογεννητριών, η σεισμική φόρτιση μπορεί να συνδυαστεί με άλλα δυναμικά φορτία, ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας της τουρμπίνας.



Εικόνα 4.7: Τυπικό επιταχυνσιογράφημα (Πηγή: Ritschel et al., 2003).

Η ιδιομορφική ανάλυση των σεισμικών φορτίων της ανεμογεννήτριας μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας λογισμικό, όπως το GH Bladed (Garrad Hassan

et al., 2002). Η ανάλυση επιτυγχάνεται μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας για τον υπολογισμό του φάσματος απόκρισης για έναν σεισμό αναφοράς, τη βαθμονόμηση του νέου φάσματος απόκρισης και την επανάληψη της διαδικασίας, όταν απαιτείται (Witcher, 2004). Στην Εικόνα 4.9 παρουσιάζεται το φάσμα απόκρισης, το οποίο παράγεται από το λογισμικό GH Bladed, χρησιμοποιώντας ένα συνθετικό επιταχυνσιογράφημα, που είναι συμβατό με τα κανονιστικά φάσματα σχεδιασμού (target response spectrum).



Εικόνα 4.8: Χρονοϊστορίες που δείχνουν τη συμπεριφορά Α/Γ σε σεισμό (Πηγή: Ritschel et al., 2003).



Εικόνα 4.9: Φάσμα συνθετικού επιταχυνσιογραφήματος (Πηγή: Witcher, 2004).

4.4 Καταγραφή περιστατικών αστοχίας Α/Γ

Έχουν καταγραφεί αρκετές περιπτώσεις αστοχιών σε ανεμογεννήτριες, από τα πρώτα χρόνια χρησιμοποίησής τους μέχρι και σήμερα. Ορισμένες αστοχίες οφείλονται σε αστοχία του συστήματος πέδησης, με συνέπεια την καταστροφή των πτερυγίων και, στη συνέχεια, της όλης κατασκευής. Επίσης, μια άλλη μορφή αστοχίας είναι η αστοχία της βάσης της κατασκευής λόγω της μη καλής θεμελίωσης, κατολίσθησης του εδάφους ή αδυναμίας της θεμελίωσης να υποστηρίξει τις δυνάμεις της ανωδομής. Τα πιο σημαντικά περιστατικά αστοχιών Α/Γ, παρουσιάζονται στη συνέχεια.

 Το 2002, στο Ellenstedt της Γερμανίας, υπήρξε αστοχία στη θεμελίωση μιας ανεμογεννήτριας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.10.



Εικόνα 4.10: Αστοχία θεμελίωσης, Ellenstedt (Germany), 2002.

- Το 2003, στο Gerbach της Γερμανίας καταγράφηκε αστοχία στην ανεμογεννήτρια τύπου Schneebergerhof Vestas V80.
- Το 2007, στο Sherman County του Oregon (Η.Π.Α) (βλ. Εικόνα 4.11) καταγράφηκε το πρώτο θανατηφόρο ατύχημα σε κατασκευή ανεμογεννήτριας, καθώς κατά τη αστοχία της Α/Γ σκοτώθηκε ένας εργαζόμενος που βρισκόταν στην κορυφή της κατασκευής και τραυματίστηκε άλλος ένας που επόπτευε τη διαδικασία.



Εικόνα 4.11: Αστοχία Α/Γ στο Sherman County, Oregon, USA, 2007. (Πηγή: <u>www.nowpublic.com</u>).

 Επίσης το 2007, στο Stobart του Ηνωμένου Βασιλείου (βλ. Εικόνα 4.12), καταγράφηκε ένα περιστατικό αστοχίας σε ανεμογεννήτρια ηλικίας 25 ετών εξαιτίας ανεμοφορτίων (βλ. ενότητα 4.2).



Εικόνα 4.12: Αστοχία Α/Γ, Stobart, UK, 2007 (Πηγή: bbc.co.uk).

- Το 2008, στο Hornslet της Δανίας, είχαμε την ολική καταστροφή της ανεμογεννήτριας τύπου Vestas, εξαιτίας της μη λειτουργίας του συστήματος των φρένων. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την ανεξέλεγκτη περιστροφή των πτερυγίων μέχρι να αστοχήσει το σύστημα.
- Επίσης το 2008 στο Searsburg των Η.Π.Α (βλ. Εικόνα 4.13), μια ανεμογεννήτρια αστόχησε λόγω αρκετά δυνατών ανέμων. Πιο συγκεκριμένα, ένα από τα πτερύγια της κατασκευής ήρθε σε επαφή με τον πύργο, με συνέπεια να διαλυθεί το σύστημα.



Εικόνα 4.13: Αστοχία Α/Γ, Searsburg, New Hampshire, U.S.A, 2008 Πηγή: <u>www.windaction.org</u>).

 Το 2009, ξανά στις Η.Π.Α στην περιοχή της Alona (New York) καταγράφηκε ένα περιστατικό αστοχίας (όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.14), όπου προκλήθηκε πυρκαγιά στον ρότορα της ανεμογεννήτριας κάτω από αδιευκρίνιστες συνθήκες.



Εικόνα 4.14: Πυρκαγιά σε Α/Γ.

 Το 2009 στην περιοχή Fenner των Η.Π.Α συνέβη αστοχία σε μια ανεμογεννήτρια (βλ. Εικόνα 4.15) χωρίς να προκληθούν ζημιές σε σπίτια ή άλλες κατασκευές. Το γεγονός όμως αυτό, ανησύχησε τους υπεύθυνους του αιολικού πάρκου, οι οποίοι προέβησαν σε επιπρόσθετη ενίσχυση των θεμελίων των υπόλοιπων Α/Γ.



Εικόνα 4.15: Αστοχία Α/Γ, Fenner, USA, 2009 (Πηγή: <u>www.windaction.org</u>).

 Το 2011 στη Γερμανία και ειδικότερα στο Kirtorf, σε ένα αιολικό πάρκο που αποτελείται από 7 ανεμογεννήτριες, μια εξ αυτών αστόχησε στο άνω μέρος του πύργου και καταστράφηκε ολοσχερώς (βλ. Εικόνα 4.15).



Εικόνα 4.16: Αστοχία Α/Γ, Kirtorf, Germany, 2011 (Πηγή: <u>www.osthessen-news.de</u>)

 Το ίδιο έτος (2011) στο Ayrshire της Σκωτίας, παρατηρήθηκε αστοχία σε ανεμογεννήτρια, όπου εξαιτίας τη μη λειτουργίας του συστήματος των φρένων, προκλήθηκε πυρκαγιά στο μέρος του ρότορα.



Εικόνα 4.17: Φωτιά στον ρότορα Α/Γ, Ayrshire, Scotland, 2011.

 Ένα περιστατικό που σχετίζεται με σεισμική αστοχία στη βάση μιας ανεμογεννήτριας, έλαβε χώρα το 2011 στη Kashima City της Ιαπωνίας. Το αιολικό πάρκο της Kashima αποτελείται από 10 ανεμογεννήτριες με ισχύ 2 MW (Butt & Ishihara, 2012). Σε αυτήν την περίπτωση, το έδαφος στη θεμελίωση μιας ανεμογεννήτριας αστόχησε λόγω του μεγάλου σεισμού του 2011.



Εικόνα 4.18: Καταστροφή Α/Γ και της περιοχής του αιολικού πάρκου στην Kashima City (Πηγή: Butt & Ishihara, 2012).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

5.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η δυναμική ανάλυση και προσομοίωση της σεισμικής απόκρισης πυλώνων ανεμογεννητριών έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού Plaxis (Version 7.2). Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, και χρησιμοποιείται στην επίλυση διαφόρων ειδών εφαρμογών της γεωτεχνικής μηχανικής. Όταν ενεργοποιούμε το πρόγραμμα βλέπουμε ότι αποτελείται από τέσσερα υποπρογράμματα, τα οποία και αναφέρονται παρακάτω:

- υποπρόγραμμα για την εισαγωγή των δεδομένων (input),
- υποπρόγραμμα για τους υπολογισμούς (calculations),
- υποπρόγραμμα για τα αποτελέσματα (output),
- υποπρόγραμμα για το σχεδιασμό των γραφημάτων (curves).

Παράλληλα με τη συνοπτική περιγραφή τους, θα περιγράψουμε εκτενώς και τα προσομοιώματα που χρησιμοποιήθηκαν στο λογισμικό. Στη συνέχεια, θα παρουσιάσουμε βήμα-βήμα τα στάδια της διαδικασίας προσομοίωσης, και ακολούθως θα παρατεθούν αποτελέσματα και επαλήθευση της διεξαχθείσας παραμετρικής διερεύνησης. Επιπλέον, στην τελευταία ενότητα του κεφαλαίου, παρατίθενται λεπτομέρειες για τη διαδικασία παραγωγής φασμάτων με χρήση του λογισμικού Seismospect, από τις χρονοϊστορίες επιταχύνσεων που προέκυψαν από το Plaxis.

5.2 Περιγραφή διαδικασίας προσομοίωσης

5.2.1 Εισαγωγή δεδομένων

Στην ενότητα αυτή του Plaxis, περιλαμβάνονται τα απαραίτητα εργαλεία για το σχεδιασμό της γεωμετρίας ενός μοντέλου, τη δημιουργία ενός δικτυώματος

πεπερασμένων στοιχείων και τη δημιουργία των αρχικών συνθηκών στήριξης και φόρτισης. Προκειμένου να προχωρήσουμε στην επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος, θα πρέπει να έχουμε σχεδιάσει τον κάναβο των πεπερασμένων στοιχείων, να έχουμε καθορίσει το ποιες θα είναι οι ιδιότητες των υλικών, καθώς και οι συνοριακές συνθήκες και τα φορτία του εξεταζόμενου προβλήματος. Στο λογισμικό Plaxis όλα αυτά επιτυγχάνονται μέσω του προγράμματος εισαγωγής των δεδομένων (input), στο οποίο σχεδιάζουμε το προσομοίωμα σε κλειστό γεωμετρικό σχήμα, δύο διαστάσεων.

5.2.1.1 Γενικές ρυθμίσεις

Αρχικά, όταν ανοίγουμε το πρόγραμμα εμφανίζεται ένα παράθυρο διαλόγου στο οποίο θα πρέπει να επιλεγεί το αν θα δημιουργήσουμε ένα καινούριο προσομοίωμα, ή θα προχωρήσουμε στην επεξεργασία ενός ήδη υπάρχοντος. Όταν ξεκινάμε τη δημιουργία ενός νέου σχεδίου, εμφανίζεται ένα παράθυρο που μας ζητάει να ρυθμίσουμε σημαντικές παραμέτρους του προβλήματος, όπως η ονομασία, ο τύπος και το είδος των πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν. Επιπροσθέτως, καθορίζουμε τις μονάδες μήκους, μονάδες δύναμης και χρόνου, καθώς και τις διαστάσεις για την περιοχή σχεδίασης (βλ. Εικόνες 5.1 και 5.2).

General settings				
Project Dimensions Project Filename Directory (Title] Test_Koilada.plx C:\Documents and Settings\aless\D <u>Test_Koilade</u>	General Model Elements	Plane strain 15-Node	x
		Accelerati Gravity an x-accelera y-accelera Earth grav	on gle : - 90 'l tion : 0,000 tion : 0,000 ity : 9,800	1.0 G ➡ G ➡ G ➡ m/s ²
	<u>N</u> ext	<u>0</u> K	<u>C</u> ancel	Help

Εικόνα 5.1: Παράθυρο διαλόγου για τις γενικές ρυθμίσεις του μοντέλου.

Όσον αφορά τους τύπους των πεπερασμένων στοιχείων, για ανάλυση υπό συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης (plain strain analysis), υπάρχουν δύο επιλογές για το χρήστη. Η πρώτη αναφέρεται σε εξακομβικά στοιχεία, ενώ η δεύτερη σε

δεκαπεντακομβικά στοιχεία. Στα εξακομβικά στοιχεία χρησιμοποιούνται δευτεροβάθμιες συναρτήσεις σχήματος. Στην παρούσα διερεύνηση, θα κάνουμε χρήση των δεκαπεντακομβικών τριγωνικών στοιχείων, διότι παρότι απαιτείται αυξημένο υπολογιστικό κόστος (συναρτήσεις τέταρτης τάξης), μας δίνουν αρκετά μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων.

General settings		X
Project Dimensions	Geometry dimensions Left : 0,000	
Stress kN/m ² Weights kN/m ³	Grid Spacing 1,000 Im Number of intervals 1 Im	
	Next <u>O</u> K <u>C</u> ancel <u>H</u> elp	

Εικόνα 5.2: Παράθυρο διαλόγου για τις γενικές ρυθμίσεις του μοντέλου.

5.2.1.2 Φορτία βαρύτητας

Η διεύθυνση της βαρύτητας είναι ορισμένη στις -90°, δηλαδή αντιστοιχεί στο αρνητικό τμήμα του άξονα y. Από την άλλη πλευρά, η επιτάχυνση της βαρύτητας δεν είναι υποχρεωτικό να είναι ορισμένη από τον χρήστη για τους υπολογισμούς αναφορικά με το ίδιο βάρος υλικών, επειδή στα επιμέρους χαρακτηριστικά του καθενός δίνεται και το ειδικό βάρος του.

5.2.1.3 Μονάδες

Οι μονάδες για το μήκος, τη δύναμη και το χρόνο ορίζονται στην αρχή του προβλήματος, συνήθως στην εισαγωγή των δεδομένων του εξεταζόμενου προβλήματος. Στην προκειμένη περίπτωση (Εικόνα 5.2), επιλέξαμε τις συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες μονάδες, δηλαδή το μήκος σε μέτρα (m), τη δύναμη σε kN και το χρόνο σε δευτερόλεπτα (sec).

5.2.1.4 Διαστάσεις σχεδιασμού

Στην Εικόνα 5.2 έχουμε καθορίσει το ποιες θα είναι οι διαστάσεις για την περιοχή σχεδίασης, με βάση τις διαστάσεις του υπό ανάλυση μοντέλου. Η γεωμετρία δεν επηρεάζεται από τις διαστάσεις της περιοχής σχεδίασης που μπορούν να αλλάξουν κατά την εισαγωγή ή τροποποίηση ενός προσομοιώματος.

5.2.1.5 Γεωμετρία προσομοιώματος

Για να δημιουργήσουμε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, θα πρέπει να σχεδιάσουμε ένα γεωμετρικό πρότυπο, που ουσιαστικά θα απεικονίζει το προς επίλυση πρόβλημα. Αυτό αποτελείται από σημεία, γραμμές και επιφάνειες. Ο χρήστης εισάγει τα σημεία και τις γραμμές, ενώ οι επιφάνειες δημιουργούνται ως κλειστά σχήματα αυτόματα από το πρόγραμμα (Εικόνα 5.3).

Επιπροσθέτως, στη φάση της προεπεξεργασίας ορίζονται τα εδαφικά στρώματα, τα φορτία, οι συνοριακές συνθήκες και τα χαρακτηριστικά της εξεταζόμενης ανεμογεννήτριας. Στο γεωμετρικό πρότυπο δεν περιλαμβάνεται μόνον η αρχική κατάσταση, αλλά και η γεωμετρία των κατασκευαστικών σταδίων που αποτελούν την τελική του φάση. Στη συνέχεια, δημιουργείται μια βάση δεδομένων που αφορά τις παραμέτρους των υλικών που περιλαμβάνονται στο μοντέλο (έδαφος και πυλώνας ανεμογεννήτριας).



Εικόνα 5.3: Ορισμός γεωμετρίας & εδαφικών σχηματισμών.

5.2.1.6 Ιδιότητες υλικών

Σε αυτήν την ενότητα, οι ιδιότητες των εδαφών και των υλικών του εξεταζόμενου μοντέλου αποθηκεύονται σε μια βάση δεδομένων. Από αυτήν τη βάση δεδομένων, αντιστοιχίζονται οι ιδιότητες στα εδαφικά στρώματα που σχεδιάσαμε προηγουμένως ως κλειστά γεωμετρικά σχήματα του γεωμετρικού προτύπου (Εικόνα 5.3). Σε ξεχωριστό παράθυρο διαλόγου βρίσκονται οι ιδιότητες των υλικών και οι παράμετροι των εδαφικών στρωμάτων. Για καθένα από τα υλικά του προβλήματος εισάγονται ιδιότητες, οι οποίες και αντιστοιχίζονται σε κάποιο από τα εξεταζόμενα εδαφικά στρώματα. Τα χαρακτηριστικά στη βάση των δεδομένων αναλύονται στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες: τα γενικά χαρακτηριστικά, τις παραμέτρους του υλικού και τις παραμέτρους των διεπιφανειών. Τα γενικά χαρακτηριστικά σχετίζονται με τον τύπο του εδαφικού προτύπου, τον τύπο της συμπεριφοράς του εδάφους και τις γενικές ιδιότητες αυτού, όπως τα φαινόμενα βάρη και η διαπερατότητα.

Αναφορικά με το μοντέλο του υλικού, στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το γραμμικά ελαστικό μοντέλο. Το μοντέλο αυτό αναφέρεται στο νόμο του Hooke, για ισότροπη γραμμική ελαστικότητα. Χαρακτηρίζεται από δύο ελαστικές παραμέτρους, το μέτρο ελαστικότητας Young (Ε) και ο λόγος Poisson (ν). Όπως φαίνεται και στις Εικόνες 5.4 έως 5.7, για ένα από τα προσομοιώματα κοιλάδας σχεδιάστηκαν δύο εδαφικοί σχηματισμοί, ένας βράχος με v_s=2000 m/s, ύψος H=40m και απόσβεσης υλικού ξ=5% και μια μέτριας πυκνότητας άμμος (στην κοιλάδα τριγωνικού σχήματος), με ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων V_s=200 m/s και απόσβεση. Για την επιλογή των τιμών V_s, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές του Πίνακα 5.1.

Εδαφικό Μέσο	Vs (m/s)
Πολύ Μαλακή Άργιλος	<100
	περίπου
Πολύ Χαλαρή Άμμος	150
Μαλακή-Στιφρή Άργιλος	100-200
Μέτριας Πυκνότητας Άμμος	200-300
Σκληρή Άργιλος	250-350
	περίπου
Πυκνή Άμμος	400
Ημίβραχος	550-800
Βράχος	>1200

Π ίνακας 5.1: Χαρακτηριστικές τιμές	V₅ (Πηγή: Πα	απαδημητρίου & Ι	Μπουκουβάλας, 2009)
--	--------------	------------------	---------------------

Linear elastic - Rock	X
General Parameters Interfaces	,
Material Set Identification: Rock Material model: Linear elastic Material type: Drained	General properties Υ dry 17,000 kN/m ³ Υ _{wet} 17,000 kN/m ³
Comments	Permeability k _x : 0,000 m/s k _y : 0,000 m/s <u>A</u> dvanced
<u>N</u> ext <u>O</u> k	<u>Cancel</u> <u>H</u> elp

Εικόνα 5.4: Παράθυρο εισαγωγής γενικών παραμέτρου υλικού (Βράχος-Rock).

Linear elastic - Rock				×
General Parameters	Interfaces			
Stiffness E _{ref} : <u>1.66</u> v (nu): 0.200	1 <u>E+07</u> kN/m ²			
Alternatives		Velocities		
G _{ref} : 6,938	3E+06 kN/m ²	V _s :	2000,000	≑ m/s
E _{oed} : 1,850)E+07 kN/m ²	V _p :	0,000	≑ m/s
				<u>A</u> dvanced
	Next	<u>0</u> k	<u>C</u> ancel	<u>H</u> elp

Εικόνα 5.5: Παράθυρο εισαγωγής μηχανικών ιδιοτήτων (Bράχος-Rock).

Linear elastic - Soft Soil	×
General Parameters Interfaces	
Material Set	General properties
Identification: Soft Soil	γ _{dry} 17,000 _{kN/m} ³
Material model: Linear elastic	γ _{wet} 17,000 kN/m ³
Material type: Drained	
Comments	Permeability
	k _x : 0,000 m/s
	k _y : 0,000 m/s
	<u>A</u> dvanced
<u>N</u> ext	<u>C</u> ancel <u>H</u> elp

Εικόνα 5.6: Παράθυρο εισαγωγής γενικών παραμέτρου υλικού (Βράχος-Soft Soil).

Linear elastic - S	oft Soil			X
General Paramet	ters Interfaces			
Stiffness E _{ref} : v (nu) : [0	1, <u>665E +05</u> kN/m ²),200			
Alternatives		Velocities		
G _{ref} : [6	5,939E+04 kN/m ²	V _s :	200,000	\$ m∕s
E _{oed} :	1,850E+05 kN/m ²	V _p :	0,000	¢ m/s
				<u>A</u> dvanced
	Next	<u>0</u> k	<u>C</u> ancel	Help

Εικόνα 5.7: Παράθυρο εισαγωγής μηχανικών ιδιοτήτων (Βράχος-Soft Soil).

Αναφορικά με την προσομοίωση της ανεμογεννήτριας, γενικά, λόγω και του σχήματός της θα τη θεωρήσουμε ως ένα μονοβάθμιο ταλαντωτή, μορφής κλειστού πλαισίου (βλ. Εικόνα 5.8), ο οποίος πακτώνεται στην υποκειμενική εδαφική στρώση. Η απόσβεση στο έδαφος και στον ταλαντωτή ορίζεται ως 5%. Επίσης, θεωρούμε ότι το ύψος της είναι Η_{αν.}=52,5m, η μάζα της m=32tn ή w=320kN και η περίοδος του ταλαντωτή T=0,5 sec. Επειδή η συχνότητα είναι αντίστροφη της περιόδου, αρχικά θεωρούμε ότι η στρώση διεγείρεται στη βάση της από αρμονική ταλάντωση συντονισμού με συχνότητα ίση με αυτήν του ταλαντωτή, δηλαδή θα έχει τιμή f₁=2Hz. Με τις αρμονικές ταλαντώσεις επιτυγχάνεται η πιστοποίηση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με αυτά που προκύπτουν από αναλυτικές λύσεις, ενώ είναι πιο εύκολη και η κατανόηση και επεξήγησή τους, πριν περάσουμε στη συνέχεια και σε πιο σύνθετες σεισμικές διεγέρσεις (βλ. Ενότητα 5.3).

Πρέπει να σημειωθεί, ότι στο Plaxis δεν μπορεί να προσομοιωθεί ο μονοβάθμιος ταλαντωτής με μια πακτωμένη δοκό με μάζα στην κορυφή, δηλαδή ένα ανεστραμμένο εκκρεμές, οπότε μπορεί να προσομοιωθεί μόνον ως ένα κλειστό ορθογώνιο, από το οποίο αφαιρείται το εσωτερικό «εδαφικό υλικό» (βλ. Εικόνα 5.8). Η μάζα του ταλαντωτή δίνεται στη δοκό της κορυφής και η ακαμψία στους δύο στύλους. Συνεπώς, θα χρειαστεί να γίνει διάκριση στα οριζόντια και κατακόρυφα μέλη του μονοβάθμιου ταλαντωτή (column & beam elements), ενώ για την επίτευξη της προσομοίωσης πακτωμένου μονοβάθμιου ταλαντωτή τα οριζόντια μέλη, η δοκός, καθώς και η δοκός θεμελίωσης θεωρούνται δύσκαμπτα.



Εικόνα 5.8: Διαχωρισμός οριζόντιων & κατακόρυφων στοιχείων του μονοβάθμιου ταλαντωτή.

Material s	ets		
			Global >>>
Project D	atabase	,	
Set type	c	Beams	-
Group o	rder:	None	T
Be Co	am Iumn		
New	E dit.	Сору.	Del
<u>0</u> K		Apply	Help

Εικόνα 5.9: Παράθυρο εισαγωγής γενικών παραμέτρου υλικού (Ανεμογεννήτρια).

Beam properties				D
Material set		Properties		
Identification: Beam		EA :	1,000E+10	kN/m
Material type: Elastic		EI :	1,000E+10	kNm ² /m
		d:	3,464	m
	-	w :	32,000	kN/m/m
		ν:	0,200	
		M _p :	1,000E+15	kNm/m
		N _p :	1,000E+15	kN/m
	 Ok	Car	ncel	Help

Εικόνα 5.10: Παράθυρο εισαγωγής γενικών παραμέτρου υλικού (Ανεμογεννήτρια-Beam).

Beam properties			
Material set	Properties		
Identification: Column	EA :	5,000E+06	kN/m
Material type: Elastic	EI :	4213,000	kNm ² /m
Comments	d:	0,101	m
	w :	0,000	kN/m/m
	ν:	0,200	
	M _p :	1,000E+15	kNm/m
	N _p :	3,445E+16	kN/m
<u>0</u> k	<u> </u>	ncel	<u>H</u> elp

Εικόνα 5.11: Παράθυρο εισαγωγής γενικών παραμέτρου υλικού (Ανεμογεννήτρια-Column).

Για τον υπολογισμό της ιδιοπεριόδου του μονοβάθμιου ταλαντωτή εφαρμόσθηκε η γνωστή σχέση:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}} \Rightarrow \qquad (5.1)$$

όπου

m: η μάζα,

k: η συνολική δυσκαμψία των δύο υποστυλωμάτων του ταλαντωτή μορφής πλασίου

$$k = 2 \cdot \frac{12 \cdot EI}{h^3} \tag{5.2}$$

όπου: Ε, Ι, h είναι το μέτρο ελαστικότητας, η ροπή αδράνειας και το ύψος των υποστυλωμάτων. Η μάζα και η δυσκαμψία του συστήματος είναι αυτές μιας τυπικής ανεμογεννήτριας (Παναγιώτου, 2003).

5.2.2 Δημιουργία κάνναβου πεπερασμένων στοιχείων

Για την επιτυχή πραγματοποίηση των υπολογισμών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, είναι απαραίτητη η διακριτοποίηση του γεωμετρικού σχήματος σε πεπερασμένα στοιχεία (mesh generation). Στο Plaxis η δημιουργία του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αυτοματοποιημένη διαδικασία, που βασίζεται στην «τριγωνοποίηση» της επιφάνειας του προσομοιώματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.12.

5.2.2.1 Τοπική πυκνότητα δικτυώματος στοιχείων

Γενικά, απαιτείται ένα πιο πυκνό δίκτυο στοιχείων σε περιοχές που υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση τάσεων. Επίσης, όταν (όπως στην παρούσα εργασία) επιλύεται πρόβλημα εδαφοδυναμικής, θα πρέπει το δίκτυο να είναι αρκετά πυκνό για να μπορέσει να προσομοιωθεί επιτυχώς η κυματική διάδοση. Πρακτικά, αυτό επιτυγχάνεται έχοντας διάσταση των πεπερασμένων στοιχείων περίπου ίση με το 1/10 του μήκους κύματος (ανεξάρτητα από το ν_s του υλικού.

Μπορούμε να πυκνώσουμε το δίκτυο με τη βοήθεια ενός υπό-μενού της καρτέλας mesh. Πρέπει να σημειωθεί ότι και το κλειστό πλαίσιο θεωρείται στο Plaxis ως «εδαφικό υλικό», γι' αυτό και διακριτοποιείται και αυτό με τριγωνικά στοιχεία, όπως και η υποκείμενη στρώση. Στη συνέχεια, το υλικό από το εσωτερικό του πλαισίου αφαιρείται κι έτσι επιτυγχάνεται το ζητούμενο, δηλαδή η δυναμική ανάλυση του μονοβάθμιου ταλαντωτή της ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 5.12: Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων (mesh).

5.2.3 **Α**νἀλυση

Αφού έχουμε προχωρήσει στη δημιουργία του προσομοιώματος των πεπερασμένων στοιχείων, είμαστε σε θέση να ξεκινήσουμε τους υπολογισμούς (calculations) της ανάλυσης του μοντέλου. Οπότε θα πρέπει να οριστεί ο τύπος της ανάλυσης και οι τύποι των φορτίσεων, οι οποίοι θα ληφθούν υπόψη. Οι δυνατότητες ανάλυσης που παρέχει το λογισμικό Plaxis, είναι οι εξής:

στατική μη-γραμμική ανάλυση,

- ανάλυση στερεοποίησης,
- ανάλυση «ανανεωμένου καννάβου» (updated mesh analysis),
- δυναμική ανάλυση.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν δυναμικές αναλύσεις για τη μελέτη της αλληλεπίδρασης εδάφους-ανεμογεννήτριας, αφού πρώτα γίνεται μέσω της επιλογής staged construction η αφαίρεση του εδάφους εντός του πλαισίου, που αντιστοιχεί στο μονοβάθμιο ταλαντωτή που προσεγγίζει τη συμπεριφορά μιας τυπικής Α/Γ.

🚰 Plaxis 7.2 Ca	lculations	- Test_Koil	ada. plx			-	
<u>File E</u> dit ⊻iew ⊆	alculate <u>H</u> e	elp					
Input Output Curve				ut			
<u>G</u> eneral <u>P</u> aramet	ers <u>M</u> ultipli	ers					
Calculation t	ype		Phase				_ [
Dynamic a	analysis	•	Number / ID.:	2 <phase 2=""></phase>			
Automatia	time stampin		Start from phase:	1 (Phase 1)		_	
Automatic	ume steppini	y <u> </u>	Start nom phase.	11 • KFridse 12		•	
Comments			Log info				_
			ОК			~	1
						~	
· · · · · ·							
					_	Paramete	rs
				🗸 Next	Insert	🖳 🛱 De	elete
Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	First	Last	Water
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0	0	0
✓ <phase 1=""></phase>	1	0	Plastic	Staged construction	1	1	0
✓ <phase 2=""></phase>	2	1	Dynamic analysis	Total multipliers	2	201	0
<							>

Εικόνα 5.13: Παράθυρο παραμέτρων ανάλυσης.

5.2.3.1 Δημιουργία νέας φάσης υπολογισμών

Ας υποθέσουμε ένα νέο πρόβλημα που δεν έχουν ακόμα οριστεί οι φάσεις υπολογισμών. Σε αυτήν την περίπτωση, η λίστα του παραθύρου διαλόγου της Εικόνας 5.13 περιλαμβάνει μόνο την πρώτη γραμμή της αρχικής φάσης (initial phase). Η αρχική φάση αναφέρεται στην κατάσταση του προβλήματος, όπως ορίστηκε στον προσδιορισμό των αρχικών συνθηκών του προγράμματος κατά την εισαγωγή δεδομένων και αποτελεί το σημείο έναρξης των διάφορων υπολογισμών. Όταν θέλουμε να εισάγουμε την πρώτη φάση των υπολογισμών, δίνεται η επιλογή Next.

5.2.3.2 Τύποι υπολογισμών

Σε μία νέα φάση υπολογισμών, οι τύποι υπολογισμών αποτελούν την πρώτη παράμετρο. Στην παρούσα διερεύνηση γίνεται σε δύο φάσεις: τη στατική ανάλυση πλαστικής συμπεριφοράς του προτύπου και τη δυναμική ανάλυση.

<u>Μη-γραμμική ανάλυση (Plastic Analysis)</u>

Έχει ως σκοπό την πραγματοποίηση ελαστοπλαστικής ανάλυσης παραμόρφωσης του προσομοιώματος. Η ανάλυση αυτού του είδους βρίσκει εφαρμογή σε πολλές εφαρμογές γεωτεχνικής φύσεως, ενώ δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση του χρόνου (δηλαδή θεωρούνται στατικές συνθήκες φόρτισης), εκτός από την περίπτωση που γίνεται χρήση του μοντέλου ερπυσμού μαλακού εδάφους (soft soil creep model).

Δυναμική ανάλυση (Dynamic Analysis)

Η διαδικασία αυτή έχει ως σκοπό την πραγματοποίηση δυναμικής ανάλυσης σε γεωτεχνικές κατασκευές που υπόκεινται σε σεισμική καταπόνηση. Οι αναλύσεις αυτές είναι χρήσιμες για τον προσδιορισμό των επιταχύνσεων και κατ' επέκταση των αδρανειακών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην εξεταζόμενη κατασκευή. Στόχος της παρούσας διερεύνησης, είναι να γίνει μια ρεαλιστική προσομοίωση της σεισμικής συμπεριφοράς του συστήματος εδάφους-θεμελίωσης-ανωδομής.

Plaxis 7.2 Calculations - Test_Koilada.plx									
Eile Edit View Calculate Help									
Input Curput Curres Contract Curres									
<u>G</u> eneral <u>P</u> aramet	ers <u>M</u> ultiplie	ers							
Control para Additional S	meters iteps: 20	l j	Reset dis Ignore un	placements to zero idrained behaviour rermediate steps					
Iterative proc	cedure		Loading input				_		
C Standa	rd setting		 Total multip 	oliers					
Manual	setting		C Staged cor	nstruction	A	dvanced	L		
	Time interval : 10,0000 全 \$ Realised end time : 10,0000 全 \$								
				Rext R	Insert	🖳 De	elete		
Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	First	Last	Water		
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0	0	0		
✓ <phase 1=""></phase>	✓ <phase 1=""> 1 0 Plastic Staged construction 1 1 0</phase>								
✓ <phase 2=""></phase>	2	1	Dynamic analysis	Total multipliers	2	201	0		
<									
							//		

Εικόνα 5.14: Παράθυρο καθορισμού διάφορων παραμέτρων της δυναμικής ανάλυσης.

5.2.3.3 Παράμετροι ελέγχου επαναληπτικής διαδικασίας

Στο Plaxis έχουμε δύο δυνατότητες επιλογής για την επαναληπτική διαδικασία, οι οποίες και παρουσιάζονται παρακάτω:

- Των καθορισμένων από το ίδιο το πρόγραμμα ρυθμίσεων (standard settings),
 οι οποίες γενικά λειτουργούν καλά στις περισσότερες των περιπτώσεων
- Των τροποποιημένων ρυθμίσεων που κάνει ο χρήστης (manual settings), όπου
 ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τις παραμέτρους που επιθυμεί να αλλάξει.
 Συνήθως, αυτές που αλλάζουν σε μια δυναμική ανάλυση είναι οι παράμετροι
 της απόσβεσης κατά Rayleigh (alpha, beta), για να επιτευχθεί το επιθυμητό
 ποσοστό απόσβεσης για το υπό μελέτη προσομοίωμα.

Ma	nual Setting	- -		×
F	Parameters		Damping	
	Tolerated error:	0,0300 🚖	Rayleigh alpha	0,6280 🚖
	Over relaxation:	1,2000 🚖	Rayleigh beta	0,0040 🚖
	Maximum iterations:	50 🔶	Time integration	
	Desired minimum:	4	Newmark alpha	0,2500 🚖
	Desired maximum:	10 🚖	Newmark beta	0,5000 ᅌ
			Absorbent boundary	
	Dynamic sub steps :	1	Boundary C1	1,0000 🚖
			Boundary C2	0,2500 🚖
			<u></u> K	<u>C</u> ancel

Εικόνα 5.15: Παράθυρο καθορισμού παραμέτρων ανάλυσης.

5.2.3.4 Εισαγωγή δεδομένων φόρτισης

Στην ενότητα αυτή καθορίζεται ο τύπος φόρτισης, ο οποίος θεωρείται ότι εφαρμόζεται στη δεδομένη φάση υπολογισμών. Στην περίπτωση όπου λαμβάνει χώρα δυναμική ανάλυση, το λογισμικό δέχεται τη φόρτιση με τη μορφή της αύξησης ή μείωσης των εξωτερικών δυνάμεων, η οποία ενεργοποιείται με την εφαρμογή των αντίστοιχων «πολλαπλασιαστών», δηλαδή της επιβαλλόμενης χρονοϊστορίας της διέγερσης στη βάση του προσομοιώματος.

Plaxis 7.2 Calculations - Test_Koilada. plx									
File Edit Yiew Calculate Help									
Input Output Curves Carves									
<u>G</u> eneral <u>P</u> aramete	General Parameters Multipliers								
Show		F	Incremental m	ultipliers		Total multiplier	s		
Input value	les		Mdisp:	N/A	+	Σ -Mdisp:	0,0000	\$	+ 1
C <u>R</u> eached	values		McontrA:	N/A	•	Σ -McontrA:	0,0000	\$	
			McontrB:	N/A	•	Σ -McontrB:	0,0000	\$	
			MloadA:	N/A	\$	Σ -MloadA:	0,0000	\$	+ 🗤
			MloadB:	N/A	\$	Σ -MloadB:	0,0000	\$	+ 🔨
			Mweight:	N/A	÷	Σ -Mweight:	1,0000	\$	
			Maccel:	N/A	\$	Σ -Maccel:	0,0000	\$	
			Msf:	0,0000	\$	Σ-Msf:	1,0000	\$	
					- E -	lext 🔤 🕮 I	nsert	🖳 De	elete
Identification	Phase no.	Start from	1 Calculatio	n	Loading	input	First	Last	Water
Initial phase	0	0	N/A		N/A		0	0	0
✓ <phase 1=""></phase>	1	0	Plastic		Staged o	construction	1	1	0
✓ <phase 2=""></phase>	2	1	Dynamic	analysis	Total mu	ltipliers	2	201	0
<									>

Εικόνα 5.16: Πολλαπλασιαστές-Παράμετροι φορτίσεων.

5.2.4 Πρόγραμμα εξαγωγής αποτελεσμάτων

Οι παραμορφώσεις στους κόμβους των στοιχείων και ο καθορισμός των μέγιστων οριζόντιων επιταχύνσεων αποτελούν τα κύρια ζητούμενα, τα οποία υπολογίζονται από τη δυναμική ανάλυση ενός προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων. Το λογισμικό Plaxis παρέχει πολλούς τρόπους για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν.



Εικόνα 5.17: Παράθυρο διαλόγου για την επιλογή αρχείου και υπολογιστικής φάσης για την εμφάνιση αποτελεσμάτων.

Στο σχετικό παράθυρο διαλόγου γίνεται η επιλογή του αρχείου, από το οποίο ζητάμε να πάρουμε τα αποτελέσματα. Επιπροσθέτως, ο χρήστης μπορεί να δει τα αποτελέσματα και σε διαφορετικό υπολογιστικό βήμα. Σε αυτή την υπο-κατηγορία (output), μπορούν να απεικονιστούν με μορφή διαγραμμάτων μετακινήσεις, ταχύτητες, επιταχύνσεις, παραμορφώσεις, τάσεις, πίνακες αποτελεσμάτων, διαγράμματα σε τομές του μοντέλου (cross sections), κλπ.

5.2.5 Πρόγραμμα σχεδιασμού καμπυλών

Κύρια λειτουργία αυτού του υποπρογράμματος είναι ο σχεδιασμός διαφόρων τύπων διαγραμμάτων (χρόνου-επιταχύνσεων, χρόνου-συντελεστή ασφαλείας, κτλ). Οι καμπύλες που προκύπτουν μας δείχνουν τη μεταβολή των συγκεκριμένων παραμέτρων κατά τη διάρκεια των διάφορων φάσεων, και μας δίνουν μια συνολική εικόνα για τη συμπεριφορά του εξεταζόμενου προβλήματος.



Εικόνα 5.18: Παράθυρο διαλόγου για τη δημιουργία καμπύλης αποτελεσμάτων.

Όταν επιλέγουμε την εντολή του Plaxis «Curves», ζητείται από τον χρήστη να κάνει την επιλογή του αρχείου από το οποίο θα προκύψουν τα δεδομένα έτσι ώστε να παραχθεί το επιθυμητό διάγραμμα. Ύστερα από την επιλογή του επιθυμητού αρχείου, μας εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου της Εικόνας 5.18, όπου δίνονται διάφορες παράμετροι για την παραγωγή του γραφήματος. Πιο συγκεκριμένα, έχουμε επιλογές για τις τιμές στον άξονα x και στον άξονα y. Για κάθε άξονα ξεχωριστά, γίνεται συνδυασμός των επιλογών με σκοπό των καθορισμό των παραμέτρων που πρόκειται να απεικονιστούν στο διάγραμμα. Επίσης, ο αριθμός των σημείων της κάθε καμπύλης είναι ανάλογος του αριθμού των βημάτων που δόθηκαν προηγουμένως κατά την επιλογή των παραμέτρων της ανάλυσης από το χρήστη.

Στη παρούσα εργασία, στον άξονα x απεικονίζεται ο χρόνος, ενώ στον άξονα y απεικονίζεται η οριζόντια επιτάχυνση. Τα σημεία ενδιαφέροντος απεικονίζονται ενδεικτικά στην Εικόνα 5.19, και τοποθετούνται στη βάση και στην κορυφή της ανεμογεννήτριας, στις γωνίες της κοιλάδας, ή της τοπογραφικής ανωμαλίας.



Εικόνα 5.19: Επιλογή σημείων για παρουσίαση αποτελεσμάτων.

5.3 Επαλήθευση αριθμητικών αποτελεσμάτων με αναλυτικές λύσεις

5.3.1 Πακτωμένος μονοβάθμιος ταλαντωτής

Σε αυτό το προσομοίωμα εξετάζεται πακτωμένος μονοβάθμιος ταλαντωτής (single degree of freedom ή SDOF) σε άκαμπτη εδαφική στρώση (rock) (βλ. Εικόνα 5.20), και ο οποίος διεγείρεται στη βάση του με ημιτονοειδή ταλάντωση. Η απόσβεση του συστήματος και σε αυτήν την περίπτωση είναι 5%. Η δυσκαμψία του ταλαντωτή δίνεται από τη σχέση:

$$k = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot m}{T^2} \quad \Rightarrow \quad k = 1893 \ kN/m \ (5.3)$$

όπου:

m=12 tn, T=0,5 sec.

Το προσομοίωμα διεγείρεται στη βάση του από αρμονική ταλάντωση, συχνότητας f₁=2Hz, δηλαδή με περίοδο ίση με αυτή του μονοβάθμιου ταλαντωτή, έτσι ώστε να επιτευχθεί κατάσταση συντονισμού. Η διέγερση της βάσης του βραχώδους υποβάθρου μεταφέρεται, σχεδόν αυτούσια, και στη βάση του μονοβάθμιου ταλαντωτή. Ο συντελεστής δυναμικής ενίσχυσης (amplification factor) στον ταλαντωτή σε αυτήν την περίπτωση δίνεται ως γνωστόν από τη σχέση (βλ. Εικόνα 5.20):

$$AF = \frac{1}{2\cdot\xi} \stackrel{\xi=5\%}{\Longrightarrow} AF = 10$$
 (5.4)

οπότε για ξ=0.05 η επιτάχυνση στην κορυφή αναμένεται να είναι 10 φορές μεγαλύτερη από την επιτάχυνση στη βάση.



Εικόνα 5.20: Δυναμικός συντελεστής ενίσχυσης μονοβάθμιου ταλαντωτή υπό αρμονική ταλάντωση.

Αυτό φαίνεται και από την επαλήθευση της αναλυτικής λύσης με το αριθμητικό προσομοίωμα της Εικόνα 5.21. Το σημείο Α βρίσκεται στη βάση του μονοβάθμιου ταλαντωτή, ενώ το σημείο Β στην κορυφή του. Παρατηρούμε στις χρονοϊστορίες της Εικόνας 5.22, ότι η οριζόντια επιτάχυνση στην κορυφή έχει, όπως άλλωστε αναμενόταν, σχεδόν δεκαπλασιαστεί, γεγονός που πιστοποιεί την αξιοπιστία της αριθμητικής προσομοίωσης.



Εικόνα 5.21: Γεωμετρία προσομοιώματος πακτωμένου ταλαντωτή.



Εικόνα 5.22: Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση και την κορυφή του ταλαντωτή.

5.3.2 Μονοδιάστατη εδαφική στρώση

Εξετάζεται οριζόντια εδαφική στρώση με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: α) ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος, V_s=200m/s, β) ύψος=25m, και γ) απόσβεση υλικού ξ=5%. Στα δύο άκρα του προσομοιώματος, χρησιμοποιούνται ειδικά συνοριακά στοιχεία, για να υπάρχει ισοδυναμία με την επέκταση της στρώσης σε άπειρο μήκος. Η εδαφική στρώση διεγείρεται από αρμονική ταλάντωση, συχνότητας f₁=2Hz, δηλαδή πάλι επιτυγχάνεται συντονισμός, αφού ως γνωστόν για μονοδιάστατη εδαφική στρώση, η περίοδος της προκύπτει με βάση τη σχέση: T=4*H/ V_s, δηλαδή T=0,5s για τις συγκεκριμένες τιμές.



Εικόνα 5.23: Αναλυτική λύση για ενίσχυση εδαφικής στρώσης.

Σύμφωνα με την αναλυτική λύση (βλ. Εικόνα 5.23), η εδαφική στρώση πρόκειται να συντονισθεί, ενισχύοντας την αρμονική ταλάντωση κατά 2/π · ξ φορές. Έχουμε λάβει ότι η απόσβεση του υλικού είναι 5%, οπότε ο συντελεστής ενίσχυσης είναι σε αυτήν την περίπτωση ίσος με:

$$AF = \frac{2}{\pi \cdot \xi} \stackrel{\xi=5\%}{\Longrightarrow} AF = 12,7$$
 (5.5)

Συνεπώς, εάν η ημιτονοειδής διέγερση στη βάση έχει μέγιστο πλάτος ταλάντωσης ίσο με τη μονάδα, τότε η μέγιστη απόκριση στην επιφάνεια αναμένεται να είναι ίση περίπου με 12,7. Στην Εικόνα 5.24 παρουσιάζεται το προσομοίωμα (γεωμετρία και

συνοριακές συνθήκες), ενώ στην Εικόνα 5.25 δίνονται οι χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης, στη βάση (Σημείο Α) και στην εδαφική επιφάνεια (Σημείο Β), από τις οποίες εύκολα προκύπτει το συμπερασμα ότι η αριθμητική λύση ταυτίζεται με την αναλυτική.



Εικόνα 5.24: Γεωμετρία και συνοριακές συνθήκες προσομοιώματος μονοδιάστατης εδαφικής στρώσης.



Εικόνα 5.25: Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης στα σημεία Α και Β.

5.4 Φάσματα χρονοϊστοριών επιταχύνσεων

Όπως έχει αναφερθεί και στο τρίτο κεφάλαιο, συνήθως στον αντισεισμικό σχεδιασμό χρησιμοποιούνται φάσματα επιταχύνσεων, είτε κανονιστικά, είτε από χρονοϊστορίες. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το εύχρηστο λογισμικό Seismospect, το οποίο κατασκευάζει φάσματα απόκρισης από δεδομένα χρονοϊστοριών επιτάχυνσης (μεταβολή επιτάχυνσης συναρτήσει του χρόνου). Τα δεδομένα αυτά, θα πρέπει να είναι σε μορφή αρχείων την οποία να δέχεται το Seismospect, δηλαδή σε μορφή απλών αριθμητικών χαρακτήρων κειμένου σε μία ή περισσότερες στήλες. Τα αρχεία με τις τιμές των χρονοϊστοριών προκύπτουν από το σχετικό υποπρόγραμμα Curves του Plaxis.

Το πρώτο περιβάλλον που εμφανίζεται, είναι η Εικόνα 5.26, όπου μέσω της εντολής «Load», εισάγουμε τα δεδομένα από τις χρονοϊστορίες (βλ. Εικόνα 5.27). Στη συνέχεια, στην Εικόνα 5.28 καθορίζουμε διάφορες παραμέτρους για το αρχείο εισαγωγής και στη συνέχεια απεικονίζονται οι τιμές που επιλέξαμε, και καθορίζουμε τις παραμέτρους για το φάσμα απόκρισης που επιθυμούμε. Τέλος, μεταβαίνοντας στην καρτέλα «Elastic/Inelastic Spectra» και επιλέγοντας την εντολή «Refresh», προκύπτει το ζητούμενο φάσμα απόκρισης (βλ. Εικόνα 5.29).

SeismoSpect [Untitled.ss	p]			
File Edit View Tools H	Help			
P 📔 🏳 🧼 Input Motion		à Q	🔒 🌼	0 2 3
	File Name	Description	Values	
Load				
Load Multiple				
View				
Remove				
▲				
Insert description				
Search				
	•	III		Þ
	Acceleration: g	Velocity:	cm/sec D	isplacement: cm

Εικόνα 5.26: Αρχικό περιβάλλον του Seismospect.

Ν Άνοιγμα			×
C→ ↓ SDOF	•	👻 🍫 Αναζήτηση SD	OF 👂
Οργάνωση 🔻 Νέα	ος φάκελος	-	= • 🔳 🔞
📑 Βίντεο	^ Όνομα	Ημερομηνία τροπ	Τύπος
📑 Έγγραφα	SDOF.DTA	20/9/2013 7:23 μμ	Φάκελος αρχείων
🔛 Εικόνες	sdof-koryfi	20/9/2013 5:02 μμ	Έγγραφο κειμένου
Μουσικη	🗋 sdof-vasi	20/9/2013 5:01 μμ	Έγγραφο κειμένου
 Οικιακή ομασα Υπολογιστής Τοπικός δίσκος (RECOVERY (D:) Δίκτυο 	E .	117	
o	νομα αρχείου: sdof-vasi	 ▼ Text Files (*.bxt) Άνοιγμα ▼ 	

Εικόνα 5.27: Επιλογή επιταχυνσιογραφηματος.

	le Paramete	13					
First	Line	6) Sir	ngle Acceleration value	e per line	🗸 ок	
Last	Line	10000	💿 Tir 💿 Mu	me & Acceleration valu ultiple Acceleration valu	ies per line ues per line	🗙 Cancel	
Time	e Step dt	0,04				Help	
Seal	ling Eactor		Acce	eleration Column	2 🚍		
Juan	ing racior	1,0	Time	Column	1 🚍		
			- mile	Column		Set As Defau	alt
Freq	juency	1 📑	Initial	l Values Skipped	1 🚖		
Desc	cription						
Deso	cription f-vasi.txt						
Desc sdol	cription f-vasi.txt						
Deso sdol Accele	cription If-vasi.txt eration File		-				
Desc sdol Accele Point	cription f-vasi.txt aration File t Dynamic	c time [s] ax	[m/s2]			
Desc sdol Accele Point	cription f-vasi.txt rration File t Dynamic 0,00000	c time [s]] ax 0E+0	[m/s2] 0,00000000	000000E+0		
Desc sdol Accele Point 1 2	cription f-vasi.txt ration File t Dynamic 0,00000 0,00000	c time [s]] ax 0E+0 0E+0	[m/s2] 0,0000000 0,0000000	0000000E+0		
Desc sdol Accele Point 1 2 3	cription f-vasi.txt ration File t Dynamic 0,00000 5,00000	c time [s] ax 0E+0 0E+0 0E-2 0E-1	[m/s2] 0,0000000 0,0000000 4,43173000	0000000E+0 0000000E+0 0000000E-3		
Desc sdol Accele Point 1 2 3 4	cription f-vasi.txt ration File t Dynamic 0,00000 5,00000 1,000000 1,000000	c time [s] 000000000 0000000000 0000000000 000000] ax 0E+0 0E+0 0E-2 0E-1 0F-1	[m/s2] 0,0000000 4,43173000 1,00555000 9,34875000	0000000E+0 0000000E+0 0000000E-3 0000000E-3		
Desc sdol Accele Point 1 2 3 4 5 5	cription f-vasi.txt ration File t Dynamic 0,00000 5,00000 1,00000 1,00000 1,00000	c time [s] 2000000000 2000000000 200000000 2000000] ax 0E+0 0E-2 0E-1 0E-1	[m/s2] 0,0000000 4,43173000 1,00555000 9,34875000	0000000E+0 0000000E+0 0000000E-3 0000000E-2 0000000E-3		
Desc sdol Accele Point 1 2 3 4 5 6 7	cription f-vasi.txt ration File t Dynamic 0,00000 5,00000 1,00000 1,50000 2,00000 2,00000	c time [s]] ax 0E+0 0E-2 0E-1 0E-1 0E-1	[m/s2] 0,0000000 4,43173000 1,00555000 9,34875000 6,85175000	0000000E+0 000000E+0 000000E-3 000000E-3 000000E-3		
Desc sdol Accele Point 1 2 3 4 5 6 7 8	cription f-vasi.txt ration File t Dynamic 0,00000 5,00000 1,00000 1,50000 2,00000 2,50000 3,00000	c time [s 000000000 000000000 000000000 00000000] ax 0E+0 0E-2 0E-1 0E-1 0E-1 0E-1	[m/s2] 0,0000000 4,43173000 1,00555000 6,85175000 1,12807000 -55437400	0000000E+0 0000000E-3 0000000E-3 0000000E-3 0000000E-3 0000000E-3	2	
Desc sdol Accele Point 1 2 3 4 5 6 7 8 9	cription f-vasi.txt ration File t Dynamic 0,00000 5,00000 1,00000 1,50000 2,00000 2,50000 3,00000 3,50000	c time [s 000000000 000000000 000000000 00000000] ax 0E+0 0E-2 0E-1 0E-1 0E-1 0E-1 0E-1	[m/s2] 0,0000000 4,43173000 9,34875000 6,85175000 1,12807000 -5,5437400 -8,8485000	0000000E+0 000000E+0 000000E-3 0000000E-3 000000E-3 0000000E-3	3	
Desc sdol Accele Point 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	cription f-vasi.txt ration File t Dynamic 0,0000 5,0000 1,0000 2,0000 2,0000 3,0000 3,0000 4,0000	c time [s 000000000 000000000 000000000 00000000] ax 0E+0 0E-2 0E-1 0E-1 0E-1 0E-1 0E-1 0E-1	[m/s2] 0,0000000 4,43173000 9,34875000 6,85175000 1,12807000 -5,5437400 -8,8486000 -1,0212000	0000000E+0 000000E-3 000000E-3 000000E-3 000000E-3 0000000E-3 0000000E-3 0000000E-3	3	

Εικόνα 5.28: Καθορισμός παραμέτρων για το φάσμα απόκρισης.

Με βάση την παραπάνω μεθοδολογία, το φάσμα απόκρισης για τον μονοβάθμιο ταλαντωτή στη βάση και στην κορυφή του, παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.30. Αντίστοιχα, για την μονοδιάστατη εδαφική στρώση, στην βάση και την επιφάνεια, το φάσμα απόκρισης που προκύπτει από το λογισμικό Seismospect, είναι αυτό που φαίνεται στην Εικόνα 5.31.

SeismoSpect * [Untitled.ssp]			
File Edit View Tools Help			
1) 🗟 📋 🗟	🛃 🔅 📀	2 🖓 🍳
Input Motion Time Series Elastic/I	nelastic Spectra Spectra Comparisons	Ground Motion Parameter	ers
View Graph Values	View Options		
Type of Spectrum	Show individual spectra	Show Mean Spectrum	n Show Mean Spec
Parameters	900		
Ductility Factor: 1,5	800		
Type of Spectra	600		
Acceleration Velocity	500		
Displacement	300		
Select All	200		
Refresh	100		
sdof-vasi.txt	0 0,5 1 1,	5 2 2,5	3 3,5 4
	sdof	-vasi.txt — Mean Sp	ectrum
	Acceleration: g	Velocity: cm/sec	Displacement: cm

Εικόνα 5.29: Φάσμα απόκρισης.



Εικόνα 5.30: Φάσμα απόκρισης για τον μονοβάθμιο ταλαντωτή.



Εικόνα 5.31: Φάσμα απόκρισης για τη μονοδιάστατη εδαφική στρώση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

6.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από την παραμετρική διερεύνηση για την εξέταση της αλληλεπίδρασης πυλώνων Α/Γ και εδάφους, μέσω διάφορων ειδών τοπογραφιών. Οι ανεμογεννήτριες, ύψους 20 μέτρων και θεμελίωσης πλάτους 10 μέτρων, τοποθετούνται σε διάφορες χαρακτηριστικές θέσεις, δύο ή τρεις, σε κάθε προσομοίωμα. Κατά την αριθμητική διερεύνηση, εξετάζονται παράμετροι όπως:

- η τοπολογία και η γεωμορφολογία,
- οι δυναμικές ιδιότητες του εδάφους,
- τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης.

Οι διεγέρσεις που εξετάστηκαν είναι: α) ημιτονοειδής διέγερση συχνότητας 2Hz, με σκοπό τη μελέτη της απόκρισης Α/Γ σε συνθήκες συντονισμού, β) πραγματική καταγραφή από τον σεισμό του Αιγίου (1995), και γ) πραγματική καταγραφή από τον σεισμό του Αιγίου (1995), και γ) πραγματική καταγραφή από τον σεισμό του Κobe (1995). Στην πρώτη περίπτωση πρόκειται για μία διέγερση που έχει καταγραφεί κοντά στο ρήγμα (near fault) και έχει τη μορφή παλμού (βλ. φάσμα στην Εικόνα 6.1) με δεσπόζουσα περίοδο περίπου 0,5s. Η δεύτερη καταγραφή έχει μεγαλύτερη διάρκεια και πιο πολλούς κύκλους όπως φαίνεται και στο φάσμα της Εικόνα 6.2.

Στη συνέχεια, για καθένα από τα εξετασθέντα προσομοιώματα θα παρουσιαστούν διαγράμματα των χρονοϊστοριών των επιταχύνσεων με δεδομένα από τη βάση της Α/Γ, την κορυφή της Α/Γ, ένα σημείο στη βάση του εδαφικού σχηματισμού. Επίσης, παρουσιάζονται και τα φάσματα απόκρισης των προαναφερθεισών χρονοϊστοριών.



Εικόνα 6.1: Χρονοϊστορία και φάσμα απόκρισης για τον σεισμό του Αιγίου.



Εικόνα 6.2: Χρονοϊστορία και φάσμα απόκρισης για τον σεισμό του Kobe.
6.2 Τριγωνική κοιλάδα

Στο παρόν προσομοίωμα σχεδιάστηκαν τρεις ανεμογεννήτριες σε διάφορες θέσεις εντός κοιλάδας τριγωνικού σχήματος, στην οποία η εδαφική στρώση, σχετικά μικρού πάχους, βρίσκεται πάνω σε βράχο (βλ. Εικόνα 6.3). Το έδαφος της κοιλάδας έχει ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων V_s=200m/s, ενώ στον βράχο αντίστοιχα ισούται με V_s=2000m/s.

Ο πρώτος πυλώνας (AB: με βάση A και κορυφή B) βρίσκεται στην άκρη της κοιλάδας, ο δεύτερος πυλώνας (CD: με βάση C και κορυφή D) σε μια ενδιάμεση θέση, και ο τρίτος πυλώνας (EF: με βάση E και κορυφή F) στο μέσον της κοιλάδας, τέλος το σημείο G είναι στο κατώτερο σημείο της κοιλάδας, στο οποίο μεταδίδεται η διέγερση, σχεδόν αμετάβλητη λόγω της μεγάλης δυσκαμψίας του βραχώδους υπόβαθρου. Υπενθυμίζεται ότι η κάθε διέγερση (η ημιτονοειδής και οι δύο σεισμικές καταγραφές) επιβάλλεται κατά την οριζόντια διεύθυνση στους κόμβους της βάσης του προσομοιώματος.



Εικόνα 6.3: Γεωμετρία τριγωνικής κοιλάδας.







Εικόνα 6.5: Φάσμα απόκρισης πυλώνα Α-Β.



Εικόνα 6.6: Χρονοϊστορία πυλώνα C-D.



Εικόνα 6.7: Φάσμα απόκρισης πυλώνα C-D.







Εικόνα 6.9: Φάσμα απόκρισης πυλώνα Ε-F.

Εξετάζοντας τις χρονοϊστορίες και τα φάσματα (Εικόνες 6.4 έως 6.9) προκύπτει ότι επειδή ο πυλώνας Α-Β εδράζεται ουσιαστικά πάνω στο βράχο, επιτυγχάνεται η τιμή εδαφικής ενίσχυσης AF=10, που είχε υπολογιστεί στην Ενότητα 5.3.1 για τον πακτωμένο σε βράχο μονοβάθμιο ταλαντωτή. Στις άλλες δύο Α/Γ που βρίσκονται στην κοιλάδα, η κατάσταση διαφοροποιείται, τόσο στη βάση όσο και στην κορυφή των Α/Γ, ειδικά στην Α/Γ C-D όπου παρατηρείται μείωση του συντελεστή ενίσχυσης, περίπου 40%. Επίσης, παρατηρώντας τα φάσματα απόκρισης των δύο πρώτων Α/Γ παρατηρείται ότι οι κορυφές τους βρίσκονται σχεδόν πάνω στην τιμή περιόδου 0,5, ενώ στην τρίτη, την Α/Γ Ε-F, η περίοδος έχει διαφοροποιηθεί το σχήμα του φάσματος λόγω της εδαφικής στρώσης, όπως συνήθως συμβαίνει σε αυτές τις περιπτώσεις.

Σεισμός Αιγίου



Εικόνα 6.10: Χρονοϊστορία πυλώνα Α-Β.



Εικόνα 6.11: Φάσμα απόκρισης πυλώνα Α-Β.



Εικόνα 6.12: Χρονοϊστορία πυλώνα C-D.



Εικόνα 6.13: Φάσμα απόκρισης πυλώνα C-D.



Εικόνα 6.14: Χρονοϊστορία πυλώνα Ε-F.



Εικόνα 6.15: Φάσμα απόκρισης πυλώνα Ε-F.

Εξετάζοντας τις χρονοϊστορίες και τα φάσματα για τον σεισμό του Αιγίου (Εικόνες 6.10 έως 6.15) φαίνεται ότι ανάλογα με τη θέση της Α/Γ υπάρχει διαφοροποίηση τόσο στη βάση όσο και στην κορυφή των Α/Γ, που επηρεάζει και τις τιμές του συντελεστή ενίσχυσης. Σε σχέση με τον πυλώνα Α-Β, ο οποίος εδράζεται πάνω στο βράχο, επιτυγχάνεται διπλάσια και τριπλάσια εδαφική ενίσχυση στις άλλες δύο Α/Γ που βρίσκονται στην κοιλάδα. Επίσης, παρατηρώντας τα φάσματα απόκρισης των δύο πρώτων Α/Γ παρατηρείται ότι οι κορυφές τους βρίσκονται περίπου στην τιμή της δεσπόζουσας περιόδου του σεισμού, περίπου στο 0,5, ενώ στην τρίτη Α/Γ την Ε-F, η περίοδος έχει μετατοπιστεί λόγω της εδαφικής στρώσης προς τα δεξιά, όπως συνήθως συμβαίνει σε αυτές τις περιπτώσεις.



Σεισμός Kobe

Εικόνα 6.16: Χρονοϊστορία πυλώνα Α-Β.



Εικόνα 6.17: Φάσμα απόκρισης πυλώνα Α-Β.



Εικόνα 6.18: Χρονοϊστορία πυλώνα C-D.



Εικόνα 6.19: Φάσμα απόκρισης πυλώνα C-D.



Εικόνα 6.20: Χρονοϊστορία πυλώνα Ε-F.



Εικόνα 6.21: Φάσμα απόκρισης πυλώνα Ε-F.

Για τον σεισμό του Kobe (Εικόνες 6.16 έως 6.21), με το πιο πλούσιο συχνοτικό περιεχόμενο, φαίνεται ότι υπάρχει και πάλι διαφοροποίηση του συντελεστή ενίσχυσης, ανάλογα με τη θέση της Α/Γ. Σε σύγκριση με τον πυλώνα Α-Β, ο οποίος εδράζεται πάνω στο βράχο, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη εδαφική ενίσχυση στην Α/Γ που βρίσκεται στο μέσον της κοιλάδας. Επίσης, παρατηρώντας τα φάσματα απόκρισης των Α/Γ παρατηρείται ότι οι κορυφές τους έχουν μετατοπιστεί (ακόμα περισσότερο σε σχέση με τις άλλες δύο δυναμικές διεγέρσεις) λόγω της εδαφικής στρώσης προς τα δεξιά, ενώ εντονότερη είναι και η διαφοροποίηση στη βάση των τριών ανεμογεννητριών λόγω της έντονης επίδρασης της γεωμορφολογίας της κοιλάδας.

6.3 Τραπεζοειδής κοιλάδα

Κατ' αντιστοιχία με την προηγούμενη περίπτωση της τριγωνικής κοιλάδας, εξετάστηκαν τρεις ανεμογεννήτριες πάνω σε κοιλάδα σχήματος τραπέζιου, η οποία αποτελείται από έδαφος που βρίσκεται πάνω σε βράχο (βλ. Εικόνα 6.22). Το έδαφος της κοιλάδας έχει ταχύτητα διατμητικών κυμάτων V_s=200m/s, ενώ ο βράχος αντίστοιχα V_s=2000m/s.



Εικόνα 6.22: Γεωμετρία τραπεζοειδούς κοιλάδας.



Εικόνα 6.23: Χρονοϊστορία πυλώνα Α-Β.



Εικόνα 6.24: Φάσμα απόκρισης πυλώνα Α-Β.



Εικόνα 6.25: Χρονοϊστορία πυλώνα C-D.



Εικόνα 6.26: Φάσμα απόκρισης πυλώνα C-D.



Εικόνα 6.27: Χρονοϊστορία πυλώνα Ε-F.



Εικόνα 6.28: Φάσμα απόκρισης πυλώνα Ε-F.

Εξετάζοντας τις χρονοϊστορίες και τα φάσματα (Εικόνες 6.23 έως 6.28) προκύπτει ότι επειδή ο πυλώνας Α-Β εδράζεται σχεδόν πάνω στο βράχο, επιτυγχάνεται τιμή εδαφικής ενίσχυσης 20% μικρότερη από την τιμή (AF=10) που είχε υπολογιστεί στην Ενότητα 5.3.1 για τον πακτωμένο σε βράχο μονοβάθμιο ταλαντωτή. Στις άλλες δύο Α/Γ που βρίσκονται στην κοιλάδα, η κατάσταση διαφοροποιείται, τόσο στη βάση όσο και στην κορυφή των Α/Γ, ειδικά στην Α/Γ Ε-F, όπου παρατηρείται ενίσχυση του συντελεστή ενίσχυσης, περίπου 50% έναντι της Α-Β.

Επίσης, στη βάση της Α/Γ Ε-F η τιμή της ενίσχυσης είναι περίπου ίση με το 25% συγκριτικά με αυτήν της μονοδιάστατης στρώσης (AF=12,7), που είχε υπολογιστεί

στην Ενότητα 5.3.2. Δηλαδή, παρόλο που πρόκειται για μια αρκετά πλατιά κοιλάδα, δεν παρατηρούνται ούτε κατά προσέγγιση συνθήκες ελευθέρου πεδίου στο μέσον της, λόγω της δυναμικής αλληλεπίδρασης με την υπερκείμενη Α/Γ. Τέλος, παρατηρώντας τα φάσματα απόκρισης των δύο πρώτων Α/Γ παρατηρείται ότι οι κορυφές τους βρίσκονται σχεδόν πάνω στην τιμή περιόδου 0,5, ενώ στην τρίτη, την Α/Γ Ε-F, η περίοδος έχει μετατοπιστεί λόγω της εδαφικής στρώσης προς τα δεξιά, όπως ήταν αναμενόμενο.

Σεισμός Αιγίου



Εικόνα 6.29: Χρονοϊστορία πυλώνα Α-Β.



Εικόνα 6.30: Φάσμα απόκρισης πυλώνα Α-Β.







Εικόνα 6.32: Φάσμα απόκρισης πυλώνα C-D.



Εικόνα 6.33: Χρονοϊστορία πυλώνα Ε-F.



Εικόνα 6.34: Φάσμα απόκρισης πυλώνα Ε-F.

Εξετάζοντας τις χρονοϊστορίες και τα φάσματα για τον σεισμό του Αιγίου (Εικόνες 6.29 έως 6.34) φαίνεται ότι ανάλογα με τη θέση της Α/Γ υπάρχει διαφοροποίηση τόσο στη βάση όσο και στην κορυφή των Α/Γ, που επηρεάζει και τις τιμές του συντελεστή ενίσχυσης. Σε σχέση με τον πυλώνα Α-Β, ο οποίος εδράζεται πάνω στο βράχο, επιτυγχάνεται περίπου διπλάσια και τριπλάσια εδαφική ενίσχυση στις άλλες δύο Α/Γ που βρίσκονται στην κοιλάδα. Επίσης, παρατηρώντας τα φάσματα απόκρισης των δύο πρώτων Α/Γ παρατηρείται ότι οι κορυφές τους βρίσκονται σχεδόν στην τιμή της δεσπόζουσας περιόδου του σεισμού, περίπου στο 0,5, ενώ στην τρίτη Α/Γ την Ε-F, αλλά και στην ενδιάμεση Α/Γ την C-D, η περίοδος έχει μετατοπιστεί λόγω της εδαφικής στρώσης προς τα δεξιά, ακόμα περισσότερο σε σύγκριση με την ημιτονοειδή διέγερση.

<u>Σεισμός Kobe</u>



Εικόνα 6.35: Χρονοϊστορία πυλώνα Α-Β.



Εικόνα 6.36: Φάσμα απόκρισης πυλώνα Α-Β.



Εικόνα 6.37: Χρονοϊστορία πυλώνα C-D.



Εικόνα 6.38: Φάσμα απόκρισης πυλώνα C-D.



Εικόνα 6.39: Χρονοϊστορία πυλώνα Ε-F.



Εικόνα 6.40: Φάσμα απόκρισης πυλώνα Ε-F.

Για τον σεισμό του Kobe (Εικόνες 6.35 έως 6.40), με το πιο πλούσιο συχνοτικό περιεχόμενο, φαίνεται ότι υπάρχει και πάλι διαφοροποίηση του συντελεστή ενίσχυσης, ανάλογα με τη θέση της Α/Γ. Σε σύγκριση με τον πυλώνα Α-Β, ο οποίος εδράζεται πάνω στο βράχο, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη εδαφική ενίσχυση στην Α/Γ που βρίσκεται στο μέσον της κοιλάδας. Επίσης, παρατηρώντας τα φάσματα απόκρισης των Α/Γ παρατηρείται ότι οι κορυφές τους έχουν μετατοπιστεί (ακόμα περισσότερο σε σχέση με τις άλλες δύο δυναμικές διεγέρσεις) λόγω της εδαφικής στρώσης προς τα δεξιά, ενώ εντονότερη είναι και η διαφοροποίηση στη βάση των τριών ανεμογεννητριών λόγω της έντονης επίδρασης της γεωμορφολογίας της κοιλάδας.

6.4 Μονόπλευρη τοπογραφία

Στο προσομοίωμα αυτό μελετήθηκε η δυναμική απόκριση δύο Α/Γ, εδραζόμενες κοντά σε πρανές βράχου με V_s=2000m/s, σε τοπογραφία πρανούς με μεγάλο ύψος (βλ. Εικόνα 6.41). Η πρώτη Α/Γ (Α-Β) τοποθετήθηκε σε σχετικά μεγαλύτερη απόσταση από το πρανές, ενώ η δεύτερη (C-D) σε αρκετά κοντινή ώστε να διερευνήσουμε τις διαφορές στην απόκριση τους. Και σε αυτήν την περίπτωση, μελετήθηκε η ημιτονοειδής διέγερση και οι καταγραφές από τον σεισμό του Αιγίου και τον σεισμό του Κοbe.



Εικόνα 6.41: Γεωμετρία μονόπλευρης τοπογραφίας.



Εικόνα 6.42: Χρονοϊστορία πυλώνα Α-Β.



Εικόνα 6.43: Φάσμα απόκρισης πυλώνα Α-Β.







Εικόνα 6.45: Φάσμα απόκρισης πυλώνα C-D.

Εξετάζοντας τις χρονοϊστορίες και τα φάσματα (Εικόνες 6.42 έως 6.45) προκύπτει ότι ο επειδή πυλώνας Α-Β εδράζεται μακρύτερα από την άκρη του πρανούς, επιτυγχάνεται τιμή εδαφικής ενίσχυσης (περίπου 8,0) πιο κοντά στην AF=10, που είχε υπολογιστεί στην Ενότητα 5.3.1 για τον πακτωμένο σε βράχο μονοβάθμιο ταλαντωτή. Στην άλλη Α/Γ, την C-D, που βρίσκεται κοντά στο πρανές, η κατάσταση διαφοροποιείται θετικά αφού λόγω της τοπογραφίας επιτυγχάνεται 25% χαμηλότερη ενίσχυση στην κορυφή της έναντι της A-B. Αυτό επιβεβαιώνεται παρατηρώντας και τα φάσματα απόκρισης των Α/Γ, όπου παρατηρείται ότι οι κορυφές τους βρίσκονται για τιμή περιόδου 0,5.

Σεισμός Αιγίου



Εικόνα 6.46: Χρονοϊστορία πυλώνα Α-Β.



Εικόνα 6.47: Φάσμα απόκρισης πυλώνα Α-Β.



Εικόνα 6.48: Χρονοϊστορία πυλώνα C-D.



Εικόνα 6.49: Φάσμα απόκρισης πυλώνα C-D.

Εξετάζοντας τις χρονοϊστορίες και τα φάσματα για τον σεισμό του Αιγίου (Εικόνες 6.46 έως 6.49) φαίνεται ότι ανάλογα με τη θέση της Α/Γ υπάρχει μια μικρή διαφοροποίηση τόσο στη βάση όσο και στην κορυφή των Α/Γ, που επηρεάζει και τις τιμές του συντελεστή ενίσχυσης, ο οποίος όμως δεν διαφοροποιείται έντονα στις δύο Α/Γ. Επίσης, παρατηρώντας τα φάσματα απόκρισης των δύο Α/Γ παρατηρείται ότι υπάρχουν μικρές διαφοροποιήσεις στα φάσματα στη βάση τους, ενώ οι κορυφές τους βρίσκονται σχεδόν περίπου στην τιμή της δεσπόζουσας περιόδου του σεισμού, περίπου στο 0,5.

<u>Σεισμός Kobe</u>







Εικόνα 6.51: Φάσμα απόκρισης πυλώνα Α-Β.



Εικόνα 6.52: Χρονοϊστορία πυλώνα C-D.



Εικόνα 6.53: Φάσμα απόκρισης πυλώνα C-D.

Για τον σεισμό του Kobe (Εικόνες 6.50 έως 6.53), με το πιο πλούσιο συχνοτικό περιεχόμενο, φαίνεται ότι υπάρχει και πάλι μικροδιαφοροποίηση του συντελεστή ενίσχυσης, ανάλογα με τη θέση της Α/Γ. Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει παρατηρώντας και τα φάσματα απόκρισης των δύο Α/Γ.

6.5 Αμφίπλευρη τοπογραφία

Μελετήθηκε η δυναμική αλληλεπίδραση τριών Α/Γ, εδραζόμενων σε βράχο με V_s=2000m/s, σε τοπογραφία πρανούς με μεγάλο ύψος, με πρανή και στις δύο πλευρές του προσομοιώματος (βλ. Εικόνα 6.54). Η πρώτη Α/Γ (Α-Β) τοποθετήθηκε κοντά στο πρανές, η δεύτερη (C-D) και η τρίτη (E-F) σε σχετικά μεγαλύτερες αποστάσεις ώστε να διερευνήσουμε τις διαφορές στην απόκριση τους. Και σε αυτήν την περίπτωση, μελετήθηκε η ημιτονοειδής διέγερση και οι καταγραφές από τον σεισμό του Κοbe.



Εικόνα 6.54: Γεωμετρία αμφίπλευρης τοπογραφίας.







Εικόνα 6.56: Φάσμα απόκρισης πυλώνα Α-Β.



Εικόνα 6.57: Χρονοϊστορία πυλώνα C-D.



Εικόνα 6.58: Φάσμα απόκρισης πυλώνα C-D.



Εικόνα 6.59: Χρονοϊστορία πυλώνα Ε-F.



Εικόνα 6.60: Φάσμα απόκρισης πυλώνα Ε-F.

Εξετάζοντας τις χρονοϊστορίες και τα φάσματα (Εικόνες 6.55 έως 6.60) προκύπτει ότι λόγω της μεγάλης ταχύτητας του βράχου δεν εμφανίζεται ιδιαίτερη επίδραση της τοπογραφίας, αφού παρατηρούμε ότι εμφανίζονται μόνο μικροδιαφοροποιήσεις του συντελεστή ενίσχυσης, ανάλογα με την απόσταση της κάθε Α/Γ από το πρανές. Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει παρατηρώντας και τα φάσματα απόκρισης των τριών Α/Γ.

Σεισμός Αιγίου



Εικόνα 6.61: Χρονοϊστορία πυλώνα Α-Β.



Εικόνα 6.62: Φάσμα απόκρισης πυλώνα Α-Β.



Εικόνα 6.63: Χρονοϊστορία πυλώνα C-D.



Εικόνα 6.64: Φάσμα απόκρισης πυλώνα C-D.



Εικόνα 6.65: Χρονοϊστορία πυλώνα Ε-F.



Εικόνα 6.66: Φάσμα απόκρισης πυλώνα Ε-F.

Εξετάζοντας τις χρονοϊστορίες και τα φάσματα για τον σεισμό του Αιγίου (Εικόνες 6.61 έως 6.66) φαίνεται ότι ανάλογα με τη θέση της Α/Γ υπάρχει διαφοροποίηση στην απόκριση στις κορυφές των Α/Γ, που επηρεάζει και τις τιμές του συντελεστή ενίσχυσης, οι οποίες είναι μεγαλύτερες στην Α/Γ Α-Β που βρίσκεται πιο κοντά στο πρανές και επηρεάζεται από την τοπογραφική ανωμαλία. Επίσης, παρατηρώντας τα φάσματα απόκρισης των δύο Α/Γ παρατηρείται ότι οι κορυφές τους βρίσκονται σχεδόν περίπου στην τιμή της δεσπόζουσας περιόδου του σεισμού, περίπου στο 0,5.

Σεισμός Kobe







Εικόνα 6.68: Φάσμα απόκρισης πυλώνα Α-Β.



Εικόνα 6.69: Χρονοϊστορία πυλώνα C-D.



Εικόνα 6.70: Φάσμα απόκρισης πυλώνα C-D.



Εικόνα 6.71: Χρονοϊστορία πυλώνα Ε-F.



Εικόνα 6.72: Φάσμα απόκρισης πυλώνα C-D.

Για τον σεισμό του Kobe (Εικόνες 6.67 έως 6.72), με το πιο πλούσιο συχνοτικό περιεχόμενο, φαίνεται ότι υπάρχει και πάλι μια σχετική διαφοροποίηση (μικρότερη από ότι στο σεισμό του Αιγίου) του συντελεστή ενίσχυσης, ανάλογα με τη θέση της Α/Γ. Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει παρατηρώντας και τα φάσματα απόκρισης των τριών Α/Γ.

6.6 Τοπογραφία με λοξό εδαφικό πρανές

Μελετήθηκε η δυναμική απόκριση τριών Α/Γ, εδραζόμενων σε βράχο με V_s=2000m/s και σε λοξό εδαφικό πρανές με V_s=200m/s. Η βραχώδης τοπογραφία έχει μεγάλο ύψος, όπως στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις, ενώ το πλάγιο εδαφικό πρανές είναι

σφηνοειδούς σχήματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.73. Η πρώτη Α/Γ (Α-Β) τοποθετήθηκε σε σχετικά μακρινή απόσταση από το πρανές, η δεύτερη (C-D) σε κοντινή απόσταση από το εδαφικό πρανές, ενώ η τρίτη (E-F) εδράζεται πάνω στο εδαφικό πρανές, κοντά στην άκρη της πλαγιάς, έτσι ώστε να διερευνήσουμε τις διαφορές στην απόκριση τους. Και σε αυτήν την περίπτωση, μελετήθηκε η ημιτονοειδής διέγερση και οι καταγραφές από τον σεισμό του Αιγίου και τον σεισμό του Kobe.



Εικόνα 6.73: Γεωμετρία μονόπλευρης τοπογραφίας με λοξό έδαφος «κατολίσθησης».



Εικόνα 6.74: Χρονοϊστορία πυλώνα Α-Β.



Εικόνα 6.75: Φάσμα απόκρισης πυλώνα Α-Β.



Εικόνα 6.76: Χρονοϊστορία πυλώνα C-D.



Εικόνα 6.77: Φάσμα απόκρισης πυλώνα C-D.



Εικόνα 6.78: Χρονοϊστορία πυλώνα Ε-F.



Εικόνα 6.79: Φάσμα απόκρισης πυλώνα Ε-F.

Εξετάζοντας τις χρονοϊστορίες και τα φάσματα (Εικόνες 6.74 έως 6.79) προκύπτει ότι ο επειδή πυλώνας Α-Β εδράζεται ουσιαστικά πάνω στο βράχο, επιτυγχάνεται η τιμή εδαφικής ενίσχυσης AF=10, που είχε υπολογιστεί στην Ενότητα 5.3.1 για τον πακτωμένο σε βράχο μονοβάθμιο ταλαντωτή. Στις άλλες δύο Α/Γ που βρίσκονται πιο κοντά στην άκρη, η κατάσταση διαφοροποιείται, στη δεύτερη Α/Γ (C-D) παρατηρείται μείωση του συντελεστή ενίσχυσης, περίπου 20%, ενώ στην Τρίτη Α/Γ (E-F) παρατηρείται ακόμα μεγαλύτερη μείωση του συντελεστή ενίσχυσης, περίπου 40%. Επίσης, παρατηρώντας τα φάσματα απόκρισης των δύο πρώτων Α/Γ παρατηρείται ότι οι κορυφές τους βρίσκονται σχεδόν πάνω στην τιμή περιόδου 0,5, ενώ στην τρίτη, την Α/Γ Ε-F, η περίοδος έχει μετατοπιστεί λόγω της εδαφικής στρώσης προς τα δεξιά.

<u>Σεισμός Αιγίου</u>







Εικόνα 6.81: Φάσμα απόκρισης πυλώνα Α-Β.



Εικόνα 6.82: Χρονοϊστορία πυλώνα C-D.



Εικόνα 6.83: Φάσμα απόκρισης πυλώνα C-D.



Εικόνα 6.84: Χρονοϊστορία πυλώνα Ε-F.



Εικόνα 6.85: Φάσμα απόκρισης πυλώνα Ε-F.

Εξετάζοντας τις χρονοϊστορίες και τα φάσματα για τον σεισμό του Αιγίου (Εικόνες 6.80 έως 6.85) φαίνεται ότι για την τρίτη Α/Γ (Ε-F), που βρίσκεται στην εδαφική στρώση και κοντά στην άκρη του πρανούς, υπάρχει διαφοροποίηση τόσο στη βάση όσο και στην κορυφή της σε σύγκριση με τις άλλες δύο Α/Γ, και αυτό επηρεάζει και τις τιμές του συντελεστή ενίσχυσης. Επίσης, παρατηρώντας τα φάσματα απόκρισης των δύο πρώτων Α/Γ παρατηρείται ότι οι κορυφές τους βρίσκονται σχεδόν περίπου στην τιμή της δεσπόζουσας περιόδου του σεισμού, περίπου στο 0,5, ενώ στην τρίτη Α/Γ, την Ε-F, η περίοδος έχει μετατοπιστεί λόγω της εδαφικής στρώσης λίγο προς τα δεξιά και έχει αλλάξει λίγο και το σχήμα του φάσματος.

Σεισμός Kobe



Εικόνα 6.86: Χρονοϊστορία πυλώνα Α-Β.



Εικόνα 6.87: Φάσμα απόκρισης πυλώνα Α-Β.







Εικόνα 6.89: Φάσμα απόκρισης πυλώνα C-D.






Εικόνα 6.91: Φάσμα απόκρισης πυλώνα Ε-F.

Για τον σεισμό του Kobe (Εικόνες 6.86 ἑως 6.91), με το πιο πλούσιο συχνοτικό περιεχόμενο, φαίνεται ότι υπάρχει και πάλι διαφοροποίηση του συντελεστή ενίσχυσης, ανάλογα με τη θέση της Α/Γ. Σε σχέση με τον πυλώνα Α-Β, ο οποίος εδράζεται πάνω στο βράχο, επιτυγχάνεται διπλάσια και τριπλάσια εδαφική ενίσχυση στις άλλες δύο Α/Γ που βρίσκονται κοντά και πάνω στο λοξό πρανές. Επίσης, παρατηρώντας τα φάσματα απόκρισης των δύο πρώτων Α/Γ παρατηρείται ότι οι κορυφές τους βρίσκονται σχεδόν στην τιμή της δεσπόζουσας περιόδου του σεισμού, περίπου στο 0,5, ενώ στην τρίτη Α/Γ την Ε-F, η περίοδος έχει μετατοπιστεί λόγω της εδαφικής στρώσης προς τα δεξιά, ενώ έχει αλλάξει και η μορφή του φάσματος, τόσο στην κορυφή όσο και στη βάση της Α/Γ.

6.7 Μονόπλευρη τοπογραφία σε ημίβραχο

Μελετήθηκε η δυναμική απόκριση τεσσάρων Α/Γ, εδραζόμενων κοντά σε πρανές σε ημίβραχο με ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων V_s=500m/s, σε τοπογραφία με σχετικά μεγάλο ύψος, όπως στις προηγούμενες ενότητες (βλ. Εικόνα 6.92). Στόχος της μείωσης της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων σε σχέση με τα προηγούμενα προσομοιώματα, είναι να δώσει μια ρεαλιστική εικόνα για τον ελλαδικό χώρο, αλλά κυρίως για να μπορέσει να γίνει πιο έντονη η επίδραση της τοπογραφικής ανωμαλίας στην κυματική διάδοση. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την ημιτονοειδή διέγερση και την καταγραφή από τον σεισμό του Αιγίου.



Εικόνα 6.92: Γεωμετρία μονόπλευρης τοπογραφίας ημίβραχου.

Πυλώνας Α-Β 0,040 0,030 Acceleration (m/sec^2) 0,020 0,010 Base 0,000 Тор -0,010,00 10,000 3000 -Input -0,020 -0,030 -0,040 Time (sec)

<u>Ημιτονοειδής διέγερση</u>

Εικόνα 6.93: Χρονοϊστορία πυλώνα Α-Β.



Εικόνα 6.94: Φάσμα απόκρισης πυλώνα Α-Β.







Εικόνα 6.96: Φάσμα απόκρισης πυλώνα C-D.



Εικόνα 6.97: Χρονοϊστορία πυλώνα Ε-F.



Εικόνα 6.98: Φάσμα απόκρισης πυλώνα Ε-F.



Εικόνα 6.99: Χρονοϊστορία πυλώνα G-H.



Εικόνα 6.100: Φάσμα απόκρισης πυλώνα G-H.

Εξετάζοντας τις χρονοϊστορίες και τα φάσματα (Εικόνες 6.93 έως 6.100) προκύπτει ότι υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση στην απόκριση μεταξύ των τεσσάρων Α/Γ. Είναι προφανές ότι η κατάσταση διαφοροποιείται, τόσο στη βάση όσο και στην κορυφή των Α/Γ, όπως προκύπτει παρατηρώντας τα φάσματα απόκρισης των Α/Γ, όπου ενώ οι κορυφές τους βρίσκονται σχεδόν πάνω στην τιμή περιόδου 0,5 παρατηρούνται διαφοροποιήσεις στο σχήμα τους.

Σεισμός Αιγίου



Εικόνα 6.101: Χρονοϊστορία πυλώνα Α-Β.



Εικόνα 6.102: Φάσμα απόκρισης πυλώνα Α-Β.



Εικόνα 6.103: Χρονοϊστορία πυλώνα C-D.



Εικόνα 6.104: Φάσμα απόκρισης πυλώνα C-D.



Εικόνα 6.105: Χρονοϊστορία πυλώνα Ε-F.



Εικόνα 6.106: Φάσμα απόκρισης πυλώνα Ε-F.



Εικόνα 6.107: Χρονοϊστορία πυλώνα Ε-F.



Εικόνα 6.108: Φάσμα απόκρισης πυλώνα G-H.

Εξετάζοντας τις χρονοϊστορίες και τα φάσματα για τον σεισμό του Αιγίου (Εικόνες 6.101 έως 6.108) φαίνεται ότι ανάλογα με τη θέση της Α/Γ υπάρχει διαφοροποίηση τόσο στη βάση όσο και στην κορυφή των Α/Γ, γεγονός που επηρεάζει και τις τιμές του συντελεστή ενίσχυσης. Επίσης, παρατηρώντας τα φάσματα απόκρισης των τεσσάρων Α/Γ παρατηρείται ότι οι κορυφές τους βρίσκονται σχεδόν περίπου στην τιμή της δεσπόζουσας περιόδου του σεισμού, περίπου στο 0,5, αλλά παρατηρούνται και μετατοπίσεις ανάλογα με τη θέση τους.

6.8 Αμφίπλευρη τοπογραφία σε ημίβραχο

Μελετήθηκε η δυναμική απόκριση τεσσάρων Α/Γ, εδραζόμενων κοντά σε πρανές σε μοντέλο με πλαγιές και στις δύο πλευρές του προσομοιώματος (βλ. Εικόνα 6.109) σε ημίβραχο με ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων V_s=500m/s, σε τοπογραφία με μεγάλο ύψος, όπως στις προηγούμενες ενότητες. Στόχος της μείωσης της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων σε σχέση με τα προηγούμενα προσομοιώματα, είναι να δώσει μια ρεαλιστική εικόνα για τον ελλαδικό χώρο, αλλά κυρίως για να μπορέσει να γίνει πιο έντονη η επίδραση της τοπογραφικής ανωμαλίας στην κυματική διάδοση. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την ημιτονοειδή διέγερση και την καταγραφή από τον σεισμό του Αιγίου.



Εικόνα 6.109: Γεωμετρία αμφίπλευρης τοπογραφίας.

<u>Ημιτονοειδής διέγερση</u>



Εικόνα 6.110: Χρονοϊστορία πυλώνα Α-Β.



Εικόνα 6.111: Φάσμα απόκρισης πυλώνα Α-Β.







Εικόνα 6.113: Φάσμα απόκρισης πυλώνα C-D.



Εικόνα 6.114: Χρονοϊστορία πυλώνα Ε-F.



Εικόνα 6.115: Φάσμα απόκρισης Ε-F.



Εικόνα 6.116: Χρονοϊστορία πυλώνα G-H.



Εικόνα 6.117: Φάσμα απόκρισης G-H.

Εξετάζοντας τις χρονοϊστορίες και τα φάσματα (Εικόνες 6.110 έως 6.117) προκύπτει ότι υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση στην απόκριση μεταξύ των τεσσάρων Α/Γ. Η ενίσχυση στην γωνία είναι πολύ μεγαλύτερη (περίπου 2,5 φορές) από ότι τις υπόλοιπες θέσεις, αφού είναι προφανές ότι η απόκριση της Α/Γ Α-Β επηρεάζεται από τις ανακλάσεις των κυμάτων, περισσότερο από τις υπόλοιπες Α/Γ. Είναι προφανές ότι η κατάσταση διαφοροποιείται, τόσο στη βάση όσο και στην κορυφή των Α/Γ, όπως προκύπτει παρατηρώντας τα φάσματα απόκρισης των Α/Γ, όπου ενώ οι κορυφές τους βρίσκονται σχεδόν πάνω στην τιμή περιόδου 0,5 παρατηρούνται διαφοροποιήσεις στο σχήμα τους. Αυτή η διαφοροποίηση στο φάσμα είναι πιο έντονη για την Α/Γ στο μέσον του λόφου (G-H).

<u>Σεισμός Αιγίου</u>



Εικόνα 6.118: Χρονοϊστορία πυλώνα Α-Β.



Εικόνα 6.119: Φάσμα απόκρισης Α-Β.



Εικόνα 6.120: Χρονοϊστορία πυλώνα C-D.



Εικόνα 6.121: Φάσμα απόκρισης C-D.



Εικόνα 6.122: Χρονοϊστορία πυλώνα Ε-F.



Εικόνα 6.123: Φάσμα απόκρισης Ε-F.



Εικόνα 6.124: Χρονοϊστορία πυλώνα G-H.



Εικόνα 6.125: Φάσμα απόκρισης G-H.

Εξετάζοντας τις χρονοϊστορίες και τα φάσματα για τον σεισμό του Αιγίου (Εικόνες 6.118 έως 6.125) φαίνεται ότι ανάλογα με τη θέση της Α/Γ υπάρχει διαφοροποίηση τόσο στη βάση όσο και στην κορυφή των Α/Γ, γεγονός που επηρεάζει και τις τιμές του συντελεστή ενίσχυσης. Η ενίσχυση στην γωνία είναι πολύ μεγαλύτερη (πάνω από διπλάσια) από ότι τις υπόλοιπες θέσεις, αφού είναι προφανές ότι η απόκριση της Α/Γ Α-Β επηρεάζεται από τις ανακλάσεις των κυμάτων, περισσότερο από τις υπόλοιπες Α/Γ. Είναι προφανές ότι η κατάσταση διαφοροποιείται, τόσο στη βάση όσο και στην κορυφή των Α/Γ, όπως προκύπτει παρατηρώντας τα φάσματα απόκρισης των Α/Γ. Στις σχετικές καμπύλες των φασματικών επιταχύνσεων είναι εύκολο να παρατηρήσουμε ότι ενώ οι κορυφές τους βρίσκονται κοντά στην τιμή περιόδου 0,5 με μετατοπίσεις προς τα δεξιά, αλλά ακομα και προς τα αριστερά (για την Α/Γ Ε-F), ενώ παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις και στο σχήμα των φασμάτων. Αυτή η διαφοροποίηση στη μορφή του φάσματος είναι, όπως και στην ημιτονοειδή διέγερση, πιο έντονη για την Α/Γ στο μέσον του λόφου (G-H).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 Συμπεράσματα

Στόχος των δυναμικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η διερεύνηση της ευαισθησίας της δυναμικής απόκρισης των πυλώνων Α/Γ σε διάφορες σεισμικές φορτίσεις και διάφορες τοπικές εδαφικές συνθήκες. Τα προσομοιώματα εξετάστηκαν με κατάλληλες δυναμικές ελαστικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων και αποκάλυψαν διάφορες σημαντικές πτυχές αυτού του πολύπλοκου θέματος της σεισμικής μηχανικής. Από τη μελέτη του θέματος τόσο σε θεωρητικό επίπεδο από την υπάρχουσα σχετική διεθνή βιβλιογραφία, όσο και από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την επίλυση χαρακτηριστικών προσομοιωμάτων Α/Γ και παρατέθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο της παραμετρικής διερεύνησης, προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Από κατασκευαστικής άποψης, οι Α/Γ είναι σχετικά απλές κατασκευές, αλλά απαιτούν ειδική προσοχή λόγω των δυναμικών φορτίων.
- Η δυναμική αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής μπορεί να μεταβάλλει τα συχνοτικά χαρακτηριστικά της διέγερσης στη βάση και της απόκρισης στην κορυφή μιας Α/Γ. Οπότε, σε πολλές περιπτώσεις τα φάσματα απόκρισης που προκύπτουν, παρουσιάζουν μετακινήσεις στις κορυφές και αλλαγή στο σχήμα τους εξαιτίας τη διαφοροποίησης του συχνοτικού περιεχομένου.
- Η αύξηση της ιδιοπεριόδου του συστήματος, λόγω της ενδοσιμότητας του εδάφους θεμελίωσης της Α/Γ, δεν συνεπάγεται πάντα τη μείωση των

φασματικών επιταχύνσεων. Η μεταβολή των φασματικών επιταχύνσεων εξαρτάται από το συχνοτικό περιεχόμενο της σεισμικής διέγερσης, το οποίο καθορίζεται από την τοπογραφική και γεωμορφική ενίσχυση, αλλά και από σεισμολογικούς παράγοντες.

- Η επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών στη σεισμική διέγερση είναι αρκετά έντονη, και είναι πιθανό να οδηγήσει σε προβλήματα και αστοχίες στη θεμελίωση ή/και στην ανωδομή.
- Η μεταβολή των δυναμικών χαρακτηριστικών της κίνησης, λόγω της αλληλεπίδρασης της Α/Γ με το έδαφος, μπορεί να είναι πολύ σημαντική στα μαλακά εδάφη. Αντίστοιχα, οι τοπογραφικές ανωμαλίες παίζουν μεγαλύτερο ρόλο στην περίπτωση ημίβραχου, ενώ δεν γίνονται ιδιαίτερα αισθητές σε βραχώδη ανάγλυφα, ειδικά όταν είναι χαμηλού ύψους.
- Γενικά, οι τιμές του συντελεστή δυναμικής ενίσχυσης (amplification factor) παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές ανάλογα με τη θέση της κάθε Α/Γ, το είδος της εξεταζόμενης τοπογραφίας και γεωμορφολογίας (αμφίπλευρη, μονόπλευρη, κοιλάδα, κλπ), καθώς και από τις τιμές των δυναμικών ιδιοτήτων του εδάφους που χρησιμοποιούνται στο κάθε προσομοίωμα.
- Τέλος, η δυναμική αλληλεπίδραση εδάφους-ανωδομής επηρεάζει την καταπόνηση του πυλώνα, είτε θετικά, είτε επιβαρυντικά, ανάλογα με τις τοπικές εδαφικές συνθήκες και την εκάστοτε σεισμική διέγερση.

Συμπερασματικά λοιπόν, διαπιστώνεται ότι οι τοπικές εδαφικές συνθήκες καθορίζουν τη σεισμική διέγερση και τη δυναμικη απόκριση των Α/Γ, και για τον λόγο αυτό επιβάλλεται να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό τους, εξετάζοντας κάθε περίπτωση ξεχωριστά.

7.2 Προτάσεις

Οι αναλύσεις που έγιναν στην παρούσα διπλωματική εργασία μπορούν να αποτελέσουν μια πρώτη εκτίμηση των εδαφικών παραμέτρων που επηρεάζουν τις Α/Γ σε ενδεχόμενη σεισμική καταπόνηση τους. Η ποσοτική αλλά και η ποιοτική επίδραση των παραμέτρων αυτών μπορεί να οδηγήσει στη λήψη μέτρων τέτοιων ώστε να διασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία των Α/Γ ακόμα και σε σεισμογενείς περιοχές. Σε συνέχιση της παρούσας διερεύνησης οι κινήσεις που προτείνονται είναι οι ακόλουθες:

- Υπάρχει ανάγκη για την περαιτέρω έρευνα του εξεταζόμενου θέματος (σε υπολογιστικό και πειραματικό στάδιο), προκειμένου να εξαχθούν βελτιωμένα και ακριβέστερα αποτελέσματα.
- Θα πρέπει να γίνονται πιο ρεαλιστικές προσομοιώσεις, πάντα ανά περίπτωση, που να σχετίζονται με την πολύπλοκη γεωμετρία και τις μηχανικές ιδιότητες των εδαφικών υλικών, λαμβάνοντας υπόψη τη μη-γραμμική συμπεριφορά τους, η οποία αναμένεται να παίξει σημαντικό ρόλο για αυξημένα επίπεδα σεισμικής έντασης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

8.1 Ελληνική βιβλιογραφία

- Γλαμπεδάκης Ε. Ο ρόλος των εδαφικών συνθηκών στον αντισεισμικό σχεδιασμό χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων. Διπλωματική Εργασία. Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος. Πολυτεχνείο Κρήτης, 2005.
- Γληνού Γ., Παπαχρήστου Δ., Παπαδόπουλος Α. Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας στην ελλάδα: αναδρομή, παρούσα κατάσταση και προοπτικές.
- 3. Ε.Α.Κ. 2000. Ελληνικός αντισεισμικός κανονισμός Ο.Α.Σ., Σ.Π.Μ.Ε.
- Ηλεκτρολογία τεχνολογικής κατεύθυνσης Γ' Τάξης Ενιαίου Λυκείου. Ο.Ε.Δ.Β., Αθήνα.
- Καραμπάτσος Ι. Ανάλυση σεισμικής απόκρισης χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων. Μεταπτυχιακή Εργασία, Γενικό Τμήμα, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2006.
- Ζανιά Β., Σεισμική καταπόνηση χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (XYTA): Μηχανισμοί αστοχίας και μέθοδοι ενίσχυσης, Διδακτορική Διατριβή, Γενικό Τμήμα, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2009.
- Κίρτας Ε. Εδαφομηχανική. Πανεπιστημιακές σημειώσεις. Τμήμα Πολιτικών
 Δομικών Έργων, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών. Τ.Ε.Ι. Σερρών, 2010.
- Κωμοδρόμος Π. Σημειώσεις μαθήματος: Προχωρημένη ανάλυση κατασκευών με Η/Υ. Πανεπιστήμιο Κύπρου. Λευκωσία, 2012.
- Λουλουργάς Ζ. Χαμηλού κόστους σεισμική μόνωση κατασκευών με χρήση ανακυκλωμένων ελαστικών. Διπλωματική Εργασία. Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος. Πολυτεχνείο Κρήτης, 2013.

- Μανδελενάκη Α. Δυναμική καταπόνηση κτιρίων λόγω ανατινάξεων για τη διάνοιξη υπόγειων έργων. Διπλωματική Εργασία. Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Ε.Μ.Π., 2008.
- 11. Μπακογιάννης Ν. Μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς ανεμογεννητριών μέσω της συνδυασμένης καταγραφής & επεξεργασίας δεδομένων από ρομποτικό γεωδαιτικό σταθμό, 3Δ επίγειο σαρωτή λέιζερ & σύστημα βιντεομετρίας. Διπλωματική Εργασία. Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών. Ε.Μ.Π., 2010.
- 12. Μπαρούνης Α. Γεωτεχνική γεωσεισμική σχεδίαση θεμελίωσης ανεμογεννητριών σε καρστικό κρητιδικό ασβεστόλιθο. 6° Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Τ.Ε.Ε. Βόλος, 2010.
- Ντούνιας Γ., Μπελόκας Γ., Μαρίνος Π., Καββαδάς Μ. Η μεγάλη κατολίσθηση της Τσάκωνας στην Ε.Ο. Τρίπολης-Καλαμάτας. 5° Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής Τ.Ε.Ε. Ξάνθη, 2006.
- Παναγιώτου Μ. Ανάλυση ανωδομής και δυναμική αλληλεπίδραση εδάφους κατασκευής σε πύργους ανεμογεννητριών. Διπλωματική Εργασία. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π., 2003.
- Παπαδημητρίου Α., Μπουκουβάλας Γ. Ευρωκώδικας ΕΝ 1998: Αντισεισμικός
 Σχεδιασμός Φέρουσων Κατασκευών, 2009.
- Παπαθανασίου Γ. Χρόνια φαινόμενα ρευστοποίησης εδαφών στον ελληνικό χώρο. Διατριβή. Α.Π.Θ.
- 17. Πιτιλάκης Κ. Γεωτεχνική σεισμική μηχανική. Εκδόσεις Ζήτη, 2010.
- Πολυκρέτης Χ. Εφαρμογές Σ.Γ.Π. (κατολισθήσεις): Εφαρμογή για την περιοχή της πελοποννήσου. Πτυχιακή Εργασία. Τμήμα Γεωγραφίας. Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, 2010.
- Προβιδάκης Κ. Σεισμολογία και αντισεισμικός κώδικας. Πανεπιστημιακές
 Σημειώσεις. Γενικό Τμήμα. Πολυτεχνείο Κρήτης.
- 20. Ρήγας Ι. Κατολισθητικά φαινόμενα στην πελοπόννησο. Πτυχιακή Εργασία.
 Τμήμα Γεωτεχνολογίας & Γεωπεριβάλλοντος. Τ.Ε.Ι Δυτικής Μακεδονίας, 2010.
- Χασικίδη Ε-Φ. Αιολική ενέργεια σε ελλάδα και ευρώπη. Διπλωματική Εργασία.
 Σχολή Διοίκησης & Οικονομίας, Τμήμα Διοίκησης Επιχειρήσεων. Πανεπιστήμιο Πατρών, 2010.

- 22. Ψαρρόπουλος Π., Τσομπανάκης Ι. Δυσχέρειες στην αντιμετώπιση σύνθετων προβλημάτων της γεωτεχνικής σεισμικής μηχανικής με τον ΕC8 σε αστικό περιβάλλον. Ημερίδα Ε.Τ.Α.Μ. Αθήνα, 2011.
- 23. Ψαρρόπουλος Π., Τσομπανάκης Ι. Εδαφικές συνθήκες & αντισεισμικός σχεδιασμός χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων. Αθήνα, 2005.
- Ψυχάρης Γ. Βοηθητικές σημειώσεις αντισεισμικής τεχνολογίας. Ε.Μ.Π. Αθήνα,
 2008.

8.2 Ξένη βιβλιογραφία

- 1. Brinkgreve R.B.J. (ed.) (2002) Plaxis manual, Balkema, Netherlands.
- Cruden, D.M., Varnes, D.J., (1996). Landslide types & processes. In: Turner, A.K. & Shuster, R.L., (ed) Landslides & mitigation, Transp Res Board, Spec Rep.247.
- Eurocode 8 (EC8) (2004) "Design provisions for earthquake resistance of structures, Part 1: General rules", ENV 1993-2, European Committee for Standardization, Brussels.
- Goodman, R.E., & Brady, J.W., (1976). Toppling of rock slopes. In: Proceedings Specialty Conference On Rock Engineering for Foundations & Slopes. American Society Of Civil Engineers, Boulder, CO.
- 5. Jennings, P.C. & Bielak, J. (1973). Dynamics of building-soil interaction, Bulletin Of Seismological Society Of America, 63(1), 9-48.
- Kramer, S.L., Geotechnical earthquake engineering, Prentice-Hall, New Jersey, 1996.
- Littlejohn, G.S., (1997). Anchorages and anchored structures, Thomas Telford, London, p.46, 84.
- Mensah, A.F., Duenas-Osorio, Prowell I., Asakeh M. Probabilistic combination of earthquake and operational loads for wind turbines. 15 W.C.E.E. Losboa, 2012.
- Myers, A.T., Gupta, A., Ramirez, C.M., Chiocarelli E. (2012). Evaluation of the seismic vulnerability of tubular wind turbine towres. 15 W.C.E.E. Congress, Lisbon, September, 2012.

- 10. Mylonakis G. & Gazetas G. (2000). Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental?, Journal Of Earthquake Engineering, 4(3), 277-301.
- 11. N.E.H.R.P. (1997). Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, Parts 1 & 2, Building Seismic Safety Council.
- 12. Ntambakwa E., Rogers M., (2009). Seismic forces for wind turbine foundations. Wind Turbine Structures, Dynamics, Loads And Control.
- O' Rourke, J.M., Lifeline earthquake engineering, Proceeding of the Fourth U.S. Conference Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering. Monograph No. 6, August, 1999.
- 14. Paida M. (2012). Life cost analysis of a wind park. Master Thesis, School Of Civil Engineering, N.T.U.A., Greece.
- 15. Psarropoulos P., Drosos V., Tsompanakis Y. (2010). Soil-foundation interaction of wind turbine tower on monopiles. The Seventh International Conference On Engineering Computational Technology, Valencia, Spain.
- 16.SeismoSpect (2013). SeismoSpect program documentation, Seismosoft, http://www.seismosoft.com/Public/EditorUpload/Documents/SeismoSpect.ch.
- 17. United State Geological Survey (U.S.G.S.), (2004). Landslide types & processes. Fact Sheet 2004-3072, Version 1.0.
- Varnes, D.J., (1984). Slope movements types & processes. In: Schuster, R.L.,
 & Krizek, R.J., (eds.) Landslides, analysis and control, Transportation Research
 Board Sp. Rep. No. 176, Nat. Acad. Of Sciences, Washington.
- 19. Zerva A. (2000). Earthquakes: origins and predictions. Department Of Civil & Architectural Engineering, Drexel University, USA.