



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ
ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΕΙΣΜΟΥ, ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ
ΚΥΜΑΤΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΩΝ

ΔΑΣΚΑΛΑΚΗ ΝΙΚΟΛΑΟΥ

ΚΟΥΡΤΙΚΑΚΗ ΙΩΑΝΝΗ

Επιβλέπων : ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΝΤΑΚΟΥΛΑΣ

Καθηγητής Π.Θ.

Βόλος, Σεπτέμβριος 2015

ΔΑΣΚΑΛΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

(Υπογραφή)

.....

ΚΟΥΡΤΙΚΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

(Υπογραφή)

.....

Διπλωματούχοι Πολιτικοί Μηχανικοί Π.Θ.

© 2015 – All rights reserve



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 14346/1
Ημερ. Εισ.: 03-08-2017
Δωρεά: Συγγραφείς
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΠΜ
2015
ΔΑΣ

Ευχαριστίες

Πρώτα από όλα, θέλουμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μας, κ. Πάνο Ντακούλα, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του κατά την διάρκεια της δουλειάς μας. Με την συμβολή του καταφέραμε να ξεπεράσουμε όλα τα προβλήματα τα οποία προέκυψαν κατά την διάρκεια της διπλωματικής μας εργασίας. Παράλληλα με την υπομονή και την κατανόηση του καταφέραμε να εμβαθύνουμε τις γνώσεις μας σε πολλά γεωτεχνικά θέματα.

Θέλουμε επίσης να ευχαριστήσουμε τον συμφοιτητή και πάνω από όλα φίλο μας Κωνσταντίνο Χατζηιωάννου για την πολύτιμη βοήθεια του σε ένα κομμάτι της διπλωματικής.

Επιπλέον, οφείλουμε να ευχαριστήσουμε τους πολύ καλούς μας φίλους όχι μόνο για τις ωραίες στιγμές που περάσαμε στο Βόλο αλλά και για την ακατάπαυστη κατανόηση και ενθάρρυνση όλο αυτόν τον καιρό.

Πάνω από όλα είμαστε ευγνώμων στις οικογένειες μας για την ολόψυχη αγάπη, ηθική και υλική υποστήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια.

Δασκαλάκης Νικόλαος

Κουρτικάκης Ιωάννης

Περίληψη

Η εν λόγω διπλωματική εργασία αποσκοπούσε στην μελέτη ενός κοίλου ανεστραμμένου φρέατος επί του οποίου εδράζεται θαλάσσια ανεμογεννήτρια καταπονούμενη από σεισμικά, ανεμικά και κυματικά φορτία. Για τον σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν μη γραμμικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων με χρήση του προγράμματος FLAC3D μέσω του οποίου δημιουργήθηκε πλήρες προσομοίωμα του εδάφους, της θεμελίωσης καθώς και του σώματος της ανεμογεννήτριας.

Αρχικά, δημιουργήθηκε το έδαφος μέσα στο οποίο τοποθετήθηκε το κοίλο ανεστραμμένο φρέαρ γνωστό στην διεθνή βιβλιογραφία με τον όρο «Suction Caisson». Στην συνέχεια, πάνω σε αυτό εισήχθη μεταλλική βάση η οποία χρησιμοποιήθηκε για την έμπηξη των 2 πρώτων μέτρων του συνολικού ύψους του σώματος της ανεμογεννήτριας (74 m). Το μοντέλο ολοκληρώθηκε με την εισαγωγή νερού στην προαναφερθείσα γεωμετρία. Η συμπεριφορά του εν λόγω μοντέλου διερευνήθηκε υπό σεισμική, ανεμική, κυματική καταπόνηση.

Μέσω της παραπάνω διαδικασίας προσδιορίστηκε η συμπεριφορά του θεμελίου και του εδάφους για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις καταπόνησης. Συγκεκριμένα, εξήχθησαν οι μετατοπίσεις και οι τάσεις θεμελίου και εδάφους, παράμετροι οι οποίες υπήρξαν καθοριστικές στην κατανόηση του προβλήματος.

Μελετήθηκαν δύο περιπτώσεις διαστάσεων του θεμελίου, μια με μεγάλο και μια με μικρότερο λόγο έμπηξης. Διαπιστώθηκε από τις αναλύσεις που διεξήχθησαν, ότι ο μεγάλος λόγος είναι προτιμότερος καθώς σε αυτόν παρατηρούνται μικρότερες μετακινήσεις και τάσεις στροφής. Επίσης στο έδαφος παρατηρήθηκε μια τάση απομείωσης των επιταχύνσεων που επιβλήθηκαν στη βάση. Αντίθετα στη θεμελίωση σημειώθηκε επαυξητική τάση λόγω διαφορετικών δυναμικών ιδιοτήτων των υλικών.

Η μελέτη αυτή μπορεί να αποτελέσει αφετηρία για την περαιτέρω διερεύνηση της κατασκευής μεμονωμένης ή ομάδας ανεμογεννητριών στην περιοχή της Ελλάδας και Κύπρου καθώς ελήφθησαν από αυτήν ιδιότητες εδαφών, ανεμολογικά και κυματικά δεδομένα.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	1
1.1 Αιολική Ενέργεια	1
1.2 Ανεστραμμένο Φρέαρ «Suction Caisson»	2
1.2.1 Περιγραφή ανεστραμμένου φρέατος	2
1.2.2 Μέθοδος Εγκατάστασης	3
1.2.3 Ιστορία χρήσης ανεστραμμένων φρεάτων	4
1.3 Ασκούμενες Δυνάμεις στην Ανεμογεννήτρια	5
1.4 Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας	6
Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Επισκόπηση	8
2.1 Κουρκούλης - Γελαγώτη	8
2.2 Aligi Foglia-Guido Gottardi	13
Κεφάλαιο 3: Μέθοδοι Ανάλυσης	18
3.1 Μη γραμμική ανάλυση	18
3.2 Θεωρία Mohr-Coulomb	19
3.3 Πεπερασμένες διαφορές	22
3.3.1 Εισαγωγή	22
3.3.2 Flac-3D	22
Κεφάλαιο 4 : Αριθμητική Ανάλυση	24
4.1 Γεωμετρία του προβλήματος	24
4.2 Αριθμητική Προσομοίωση	26
4.3 Σεισμική διέγερση	29
4.3.1 Σεισμός Λευκάδας	29
4.3.2 Εφαρμογή σεισμικής διέγερσης στο μοντέλο	30
4.4 Ανεμική-Κυματική διέγερση	33
4.5 Αποτελέσματα ανάλυσης	38

4.5.1 Αποτελέσματα σεισμικής διέγερσης.....	38
4.5.2 Αποτελέσματα καταπόνησης λόγω ανέμου-κύματος.....	50
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα.....	55
Κεφάλαιο 6: Βιβλιογραφία.....	56

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Αιολική Ενέργεια

Στην σημερινή εποχή οι ενεργειακές ανάγκες έχουν αυξηθεί σημαντικά σε σχέση με το παρελθόν. Συνεπώς, η ανάγκη εύρεσης βιώσιμων εναλλακτικών πηγών ενέργειας έχει αυξηθεί σημαντικά καθώς είναι φιλικότερες προς το περιβάλλον από ότι οι συμβατικές πηγές (π.χ. πετρέλαιο, λιγνίτης) και περισσότερο βιώσιμες σε βάθος χρόνου. Η αιολική ενέργεια αποτελεί ιδανικό παράδειγμα των παραπάνω καθώς είναι από τις πλέον υποσχόμενες στον τομέα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και με σημαντικές προοπτικές ανάπτυξης. Η αξιοποίηση της γίνεται μέσω ανεμογεννητριών οι οποίες βρίσκονται είτε στην ξηρά είτε στην θάλασσα. Επειδή όμως στην θάλασσα παρατηρούνται άνεμοι μεγαλύτερης έντασης, η συνεισφορά του αέρα στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι σημαντικά μεγαλύτερη. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα ισχυρότερα ρεύματα αέρα παρατηρούνται τις απογευματινές ώρες οι οποίες συμπίπτουν με αυτές που παρατηρείται η υψηλότερη ηλεκτρική κατανάλωση.

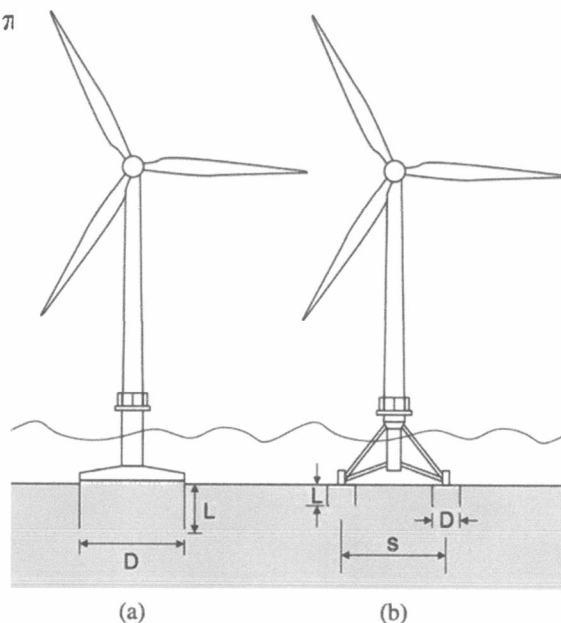
Ο συγκεκριμένος τρόπος παραγωγής ενέργειας επιφέρει μείωση στη χρήση καυσίμων και συνεπώς στην μόλυνση του αέρα. Επίσης, περιορίζει την εκπομπή αερίων τα οποία είναι υπεύθυνα για το φαινόμενο του θερμοκηπίου και μειώνει τις δαπάνες για τις ενεργειακές ανάγκες των κατοίκων.

Έτσι παρόλο που το κόστος κατασκευής ανεμογεννήτριας στην θάλασσα είναι μεγαλύτερο από αυτήν στην ξηρά η παραγωγή τους έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια κυρίως στην περιοχή της Βόρειας Θάλασσας και στις παράκτιες περιοχές της Μεγάλης Βρετανίας. Γενικώς η Ευρώπη κρατάει τα ηνία της παραγωγής υπεράκτιας αιολικής ενέργειας με την Δανία, το Βέλγιο και Γερμανία να σημειώνουν σημαντική πρόοδο στον τομέα αυτό έχοντας στην κατοχή τους τα μεγαλύτερης έκτασης αιολικά πάρκα στον πλανήτη.

1.2 Ανεστραμμένο Φρέαρ «Suction Caisson»

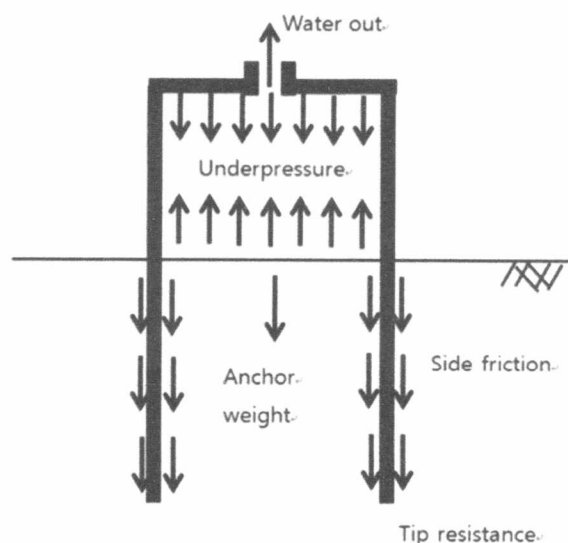
1.2.1 Περιγραφή ανεστραμμένου φρέατος

Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες είναι κατασκευές μεγάλου μεγέθους, μεγάλου βάρους και δέχονται ισχυρά φορτία από τον αέρα την θάλασσα και ενδεχόμενες σεισμικές δονήσεις. Συνεπώς, η θεμελίωση τους θα πρέπει να έχει επαρκείς διαστάσεις και να είναι κατασκευασμένη με κατάλληλα υλικά ώστε να αντέχει τις παραπάνω καταπονήσεις αποτελεσματικά, με το μικρότερο δυνατό κόστος. Για τους λόγους αυτούς επιλέχθηκε το ανεστραμμένο φρέαρ ή σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία «Suction Caisson». Ο όρος αυτός αναφέρεται σε ένα είδος θεμελίωσης το οποίο κατασκευάζεται με επικόλληση μιας κυκλικής 'ποδιάς' σε επίπεδο κυλινδρικό θεμέλιο. Τις περισσότερες φορές χρησιμοποιείται ως υλικό κατασκευής το ατσάλι λόγω της μεγάλης αντοχής του αλλά παρόλα αυτά σε αρκετές περιπτώσεις επιλέγεται οπλισμένο σκυρόδεμα το οποίο ανταποκρίνεται αποτελεσματικά έχοντας παράλληλα μικρότερο κόστος. Τα μεγέθη του ανεστραμμένου φρέατος διαφέρουν ανάλογα με το μήκος της διαμέτρου τους. Μικρής διαμέτρου φρέατα χρησιμοποιούνται συχνά ως αγκύρια διότι μπορούν να αντέξουν μεγάλες εντάσεις και μπορούν να αφαιρεθούν εύκολα και γρήγορα με το μικρότερο δυνατό κόστος. Μεγάλης διαμέτρου φρέατα προτιμούνται για κατασκευές όπως ανεμογεννήτριες ή ακόμα και εξέδρες π



1.2.2 Μέθοδος Εγκατάστασης

Η εγκατάσταση του φρέατος γίνεται κυρίως με την μέθοδο της αναρρόφησης. Συγκεκριμένα το φρέαρ κατασκευάζεται στην ξηρά, έπειτα μεταφέρεται στον πυθμένα με γερανό. Ενώ βρίσκεται μέσα στο νερό ανοίγονται βαλβίδες οι οποίες βρίσκονται στο πάνω κυλινδρικό μέρος του, επιτρέποντας έτσι την διαφυγή παγιδευμένου αέρα. Στην συνέχεια ο γερανός σταδιακά εμπηγνύει την ποδιά του φρέατος στον πυθμένα υπό την επίδραση του ίδιου βάρους του το οποίο όμως δεν είναι αρκετό για την πλήρη εισχώρησή της. Για αυτόν τον λόγο ένα σύστημα άντλησης συνδέεται στις βαλβίδες με σκοπό να αφαιρέσει νερό από το εσωτερικό του φρέατος με αποτέλεσμα την δημιουργία αρνητικής πίεσης ή υποπίεσης. Έτσι δημιουργείται μια δύναμη με φορά προς το έδαφος η οποία βοηθάει στην ολοκληρωτική εισχώρηση τη ποδιάς. Όταν έχει επιτευχθεί ο επιθυμητός βαθμός εισχώρησης οι αντλίες αφαιρούνται και οι βαλβίδες κλείνουν προκειμένου να αποτρέψουν την ροή ύδατος στο εσωτερικό.



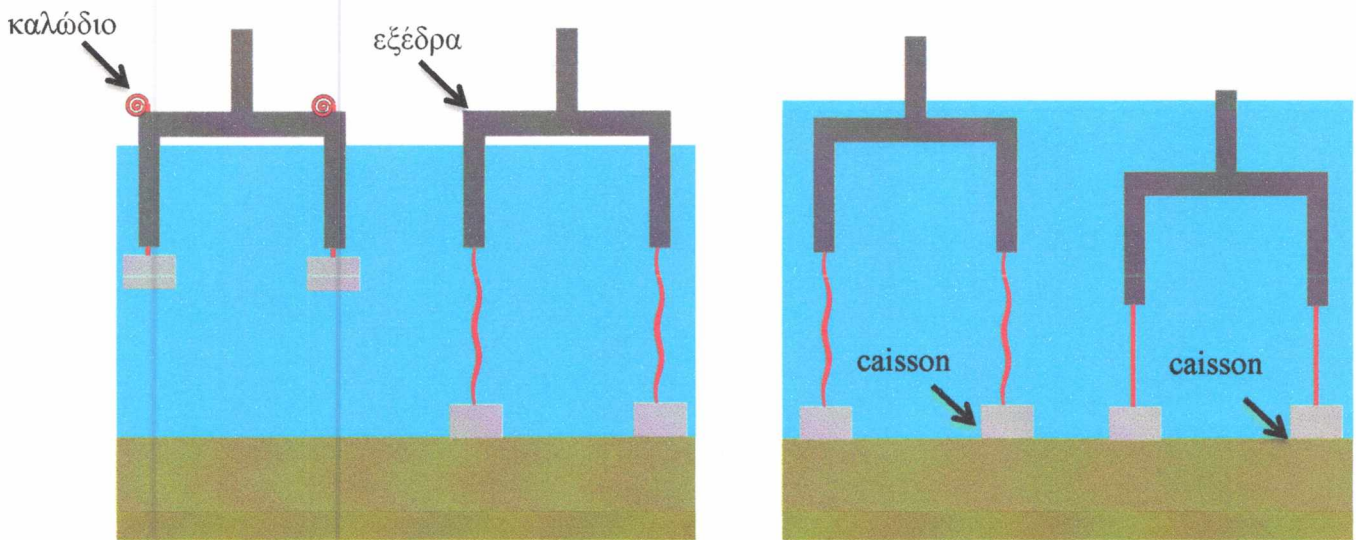
Σχ. 1.2 : Διαδικασία εισχώρησης φρέατος στον πυθμένα.

Η παραπάνω διαδικασία τοποθέτησης του φρέατος παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Το σημαντικότερο από αυτά είναι η ευκολία αφαίρεσης του καθώς μέσω της αντλίας που δημιουργήθηκε η υποπίεση υπάρχει δυνατότητα άσκησης

υπερπίεσης πράγμα που διευκολύνει σε μεγάλο βαθμό την εξαγωγή του από τον πυθμένα. Ο λόγος αυτός καθιστά τα συγκεκριμένα φρέατα εύκολα στην χρήση και φιλικά προς το περιβάλλον σε σχέση με θεμελίωση με πασσάλους.

1.2.3 Ιστορία χρήσης ανεστραμμένων φρεάτων

Η πρώτη καταγεγραμμένη χρήση ανεστραμμένου φρέατος ήταν το 1958 όπου το πρωτότυπο χρησιμοποιήθηκε για την υποστήριξη εξοπλισμού για την εξερεύνηση μιας υποθαλάσσιας τοποθεσίας. Μια από τις μεγαλύτερες σε κλίμακα χρήσης ανεστραμμένου φρέατος σημειώθηκε από τους Senpere και Auvergne (1982). Συγκεκριμένα, αφού εγκαταστάθηκαν με επιτυχία 12 φρέατα στον βυθό της θάλασσας σε βάθος 40 m χρησιμοποιήθηκαν ως αγκύρια για την ασφάλιση σημαντήρων στο Gorm Oil Field. Το παραπάνω εγχείρημα είναι μεγάλης αξίας καθώς αποτέλεσε την πρώτη επίσημη διαδικασία εγκατάστασης φρέατος με την μέθοδο της αναρρόφησης. Παρόλα αυτά τα φρέατα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν μικρών διαστάσεων και δεν συγκρίνονται με αυτά που εγκαταστάθηκαν για την υποστήριξη της πλατφόρμας Diana στον κόλπο του Μεξικού το 1999. Το ύψος των φρεάτων στην περίπτωση αυτή έφτανε τα 30 m, η διάμετρός του στα 6.5 m και τοποθετήθηκαν σε βάθος 1500 m σε μαλακή άργιλο. Το έργο αυτό αποτέλεσε αφετηρία για την περαιτέρω εγκατάσταση φρεάτων σε μεγάλα βάθη και ήταν μια από τις τεχνολογικές επαναστάσεις του 20^{ου} αιώνα. Ένα, επίσης, καθοριστικό βήμα για την εξέλιξη των ανεστραμμένων φρεάτων και της τεχνολογίας αναρρόφησης πραγματοποιήθηκε μέσω της συνεργασίας της εταιρίας Saga Petroleum AS και του Νορβηγικού Γεωτεχνικού Ινστιτούτου. Ειδικότερα, για τις ανάγκες της κατασκευής της πετρελαϊκής πλατφόρμας Snorre A. επιλέχθηκαν φρέατα τον σχεδιασμό των οποίων επιμελήθηκε το Νορβηγικό Γεωτεχνικό Ινστιτούτο. Συνήθως, θεμελιώσεις για το συγκεκριμένο είδος εξέδρας (tension leg platform) γίνονται υπό την μορφή πασσάλων έως και 90 m μήκους. Όμως, στην περιοχή αυτή (Snorre Oil Field) η τοποθέτηση πασσάλων ήταν αδύνατη λόγω της παρουσίας μεγάλων βότσαλων στα 60 m κάτω από το βυθό της θάλασσας. Ακόμα και τα φρέατα που χρησιμοποιήθηκαν μετά από μελέτες αποδείχθηκε ότι δεν μπορούσαν να υπερβούν τα 12 m μήκους ώστε η πλατφόρμα να ασφαλισθεί επαρκώς.



Σχ.1.3: Παραδείγματα tension leg platforms.

1.3 Ασκούμενες Δυνάμεις στην Ανεμογεννήτρια

Το σώμα οποιασδήποτε υπεράκτιας ανεμογεννήτριας δέχεται ποικίλα φορτία οι σημαντικότερες εκ των οποίων είναι οι εξής:

- Ενδεχόμενη σεισμική δόνηση
- Ανεμικά - Κυματικά φορτία

Ανεμικά φορτία

Οι ανεμογεννήτριες επηρεάζονται κυρίως από φορτία διάτμησης. Τα ανεμικά φορτία φέρουν ως αποτέλεσμα διαφορετικές ταχύτητες στα πτερύγια τα οποία βρίσκονται στο χαμηλότερο σημείο της κυκλικής τους τροχιάς σε σχέση με αυτές που βρίσκονται στο υψηλότερο και ως αποτέλεσμα επηρεάζεται η λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Η κλίση του αέρα μπορεί να δημιουργήσει μεγάλη ροπή κάμψης στον άξονα μιας ανεμογεννήτριας όταν τα πτερύγια είναι κατακόρυφα. Γενικά τα ανεμικά φορτία μπορούν να προκαλέσουν σημαντικά εντατικά μεγέθη καθώς και μετατοπίσεις στην κορυφή αλλά και στο σώμα για αυτό τον λόγο χρειάζεται διεξοδική μελέτη για την πρόβλεψη τους.

Κυματικά φορτία

Η αντοχή σε ενδεχόμενα κυματικά φορτία είναι εξίσου σημαντική καθώς σε πολλές κυματογενείς περιοχές όπως η Βόρεια Θάλασσα τα κύματα πολλές φορές υπερβαίνουν τα 2 m σχεδόν 60 % των περιπτώσεων καταπόνησης. Σε διάστημα 100 χρόνων το μεγαλύτερο κύμα μπορεί να ξεπεράσει τα 30 m. Επίσης σε έντονες καιρικές συνθήκες η περίοδος επαναφοράς κυμαίνεται από 15-20 sec και σπάνια πέφτει κάτω από 4 sec. Τα παραπάνω επιφέρουν ταχύτητες της τάξης των $1-2 \frac{m}{sec}$ οι οποίες μπορούν να φτάσουν μέχρι και $40-45 \frac{m}{sec}$. Όλα αυτά πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη κατά τον σχεδιασμό. Τέλος, τα υλικά θα πρέπει να είναι κατάλληλα για να αντέξουν σε βάθος χρόνου την διάβρωση που προκαλείται από το περιβάλλον (π.χ. λόγω υγρασίας).

Σεισμικά φορτία

Ο σεισμός αποτελεί μια επίσης σημαντική μορφή φόρτισης η οποία μπορεί να επιφέρει δυσάρεστα αποτελέσματα στις εν λόγω κατασκευές. Η περίπτωση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι ακόμα δυσμενέστερη καθώς το έδαφος στον βυθό είναι μικρότερης αντοχής. Επίσης, η ύπαρξη της θάλασσας εγείρει τον κίνδυνο σχηματισμού κυμάτων μεγάλου ύψους γνωστού και ως «τσουνάμι». Ακόμη, τα εντατικά μεγέθη και οι μετατοπίσεις που προκύπτουν μετά από πεπερασμένο κύκλο φορτίσεων ενδέχεται να προκαλέσουν βλάβες στον σώμα της ανεμογεννήτριας καθώς και στην θεμελίωσή της. Συνεπώς, αναγκαίος κρίνεται ο σχεδιασμός για την πρόβλεψη των παραπάνω φαινομένων καθώς και του ενδεχομένου ανατροπής του σώματος της ανεμογεννήτριας.

1.4 Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας

Στα πλαίσια της εν λόγω διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκε συγκεκριμένη υποθαλάσσια τοποθεσία στην Ελληνική επικράτεια σε βάθος 10 m (ρηχά νερά) το έδαφος της οποίας χαρακτηρίζεται ως μαλακή άργιλος. Με την προαναφερθείσα

μέθοδο της αναρρόφησης εγκαταστάθηκε ανεστραμμένο φρέαρ (suction caisson) πάνω στο οποίο τοποθετήθηκε μεταλλική βάση για την καλύτερη πάκτωση του σώματος της ανεμογεννήτριας. Η ανεμογεννήτρια, το έδαφος και η θεμελίωση προσομοιώθηκαν σε πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών (FLAC3D) και στην συνέχεια υποβλήθηκαν στις 3 παραπάνω φορτίσεις καθώς και στον συνδυασμό αυτών. Τα αποτελέσματα καταγράφηκαν και συγκρίθηκαν και ελήφθησαν οι δυσμενέστερες περιπτώσεις οι οποίες προκαλούσαν τις μεγαλύτερες μετατοπίσεις. Η συγκεκριμένη διπλωματική μπορεί να αποβεί ιδιαίτερα χρήσιμη στον μελλοντικό σχεδιασμό ανεμογεννητριών στις Ελληνικές θάλασσες καθώς καλύπτει όλες τις πιθανές περιπτώσεις καταπόνησης και λαμβάνει υπόψη την δυναμική φύση τους.

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική

Επισκόπηση

Η κατασκευή των θαλάσσιων ανεμογεννητριών θεμελιωμένων επί κοίλων ανεστραμμένων φρεάτων βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην τεχνογνωσία και την παρακολούθηση συμπεριφοράς προηγούμενων περιπτώσεων. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση ορισμένων σημαντικών περιστατικών κοίλων ανεστραμμένων φρεάτων στα οποία μελετάται η συμπεριφορά και η απόκριση τους σε ποικίλες συνθήκες φόρτισης.

2.1 Κουρκούλης - Γελαγώτη

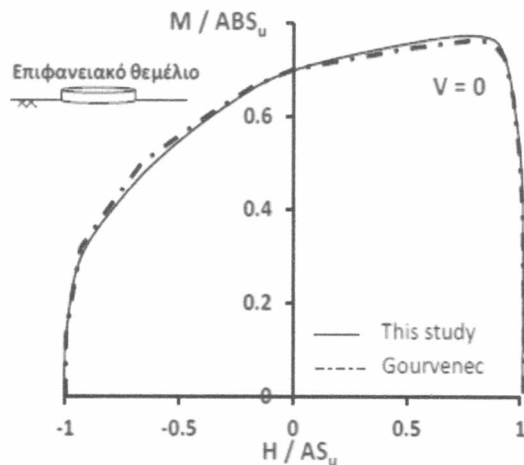
Το υπό μελέτη πρόβλημα αφορά μία τυπική θαλάσσια ανεμογεννήτρια θεμελιωμένη επί ενός κοίλου ανεστραμμένου φρέατος σε ομοιογενές αργιλικό έδαφος, αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u = 60$ KPa και μέτρου ελαστικότητας $E_{stat} = 30$ MPa. Η διάμετρος του φρέατος είναι ίση με $B = 20$ m, και θεωρείται μάλλον τυπική για την θεμελίωση ανεμογεννήτριας ισχύος 3.5 MW σε αντίστοιχες εδαφικές συνθήκες ενώ είναι μάλλον συντηρητική για την θεμελίωση ανεμογεννήτριας ισχύος 2 MW. Επιλέγονται 2 τύποι θεμελιώσεως: ένα φρέαρ με λόγο εγκιβωτισμού $\frac{D}{B} = 0.2$

και μία δεύτερη βαθύτερη λύση με $\frac{D}{B} = 0.5$. Για την προσομοίωση συνθηκών επαφής εδάφους φρέατος χρησιμοποιήθηκαν ειδικά στοιχεία διεπιφάνειας τα οποία επιτρέπουν την αναπαραγωγή φαινομένων αποκόλλησης ή ολίσθησης μεταξύ του φρέατος και του εσωτερικού ή εξωτερικού εδάφους. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα προσομοιώνονται δύο περιπτώσεις επαφής :

1. *Ιδανικών συνθηκών επαφής*: όπου το έδαφος μπορεί να αναπτύξει εφελκυστική αντοχή και η διατμητική αντοχή αυτού ισούται με την ονομαστική αντοχή του εδάφους δηλαδή $\tau_{max} = S_u = 60$ KPa.

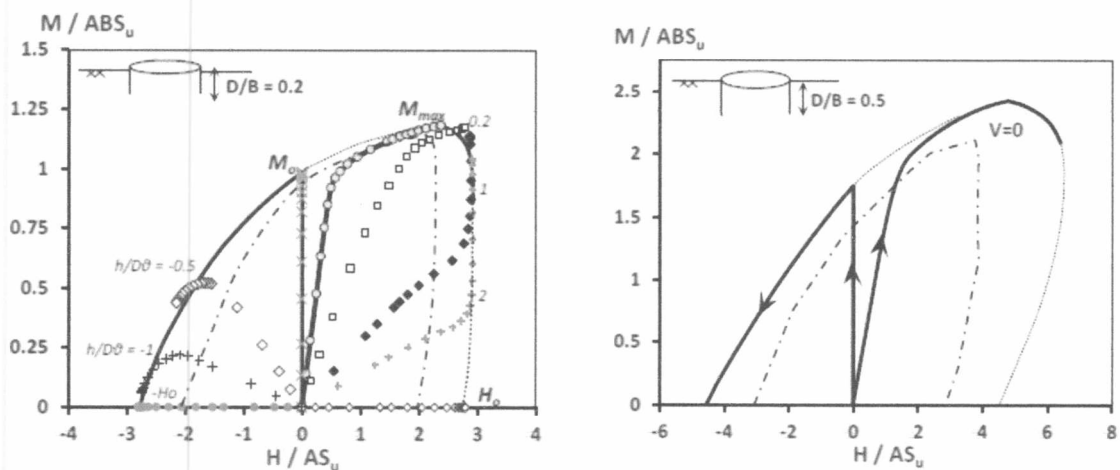
2. Ατελών συνθηκών επαφής: δηλαδή μηδενική εφελκυστική αντοχή και μειωμένη διατμητική αντοχή στην διεπιφάνεια επαφής $\tau_{\max} = a \cdot S_u$, όπου a ο συντελεστής απομείωσης).

Θεώρηση ιδανικών συνθηκών επαφής :



Σχ. 2.1: Σύγκριση των αποτελεσμάτων της μελέτης Κουρκουλή- Γελαγώτη με εκείνα της Gourvenec et al (2007) για κυκλικό επιφανειακό θεμέλιο

Στο σχήμα 2.1 τα αποτελέσματα της μελέτης Κουρκουλή-Γελαγώτη (συνεχής μαύρη γραμμή) συγκρίνονται με εκείνα της Gourvenec et al για την οριακή περίπτωση (δηλαδή το αντίστοιχο επιφανειακό θεμέλιο). Οι δύο καμπύλες σχεδόν συμπίπτουν σε κάθε πιθανό συνδυασμό ροπής και τέμνουσας.



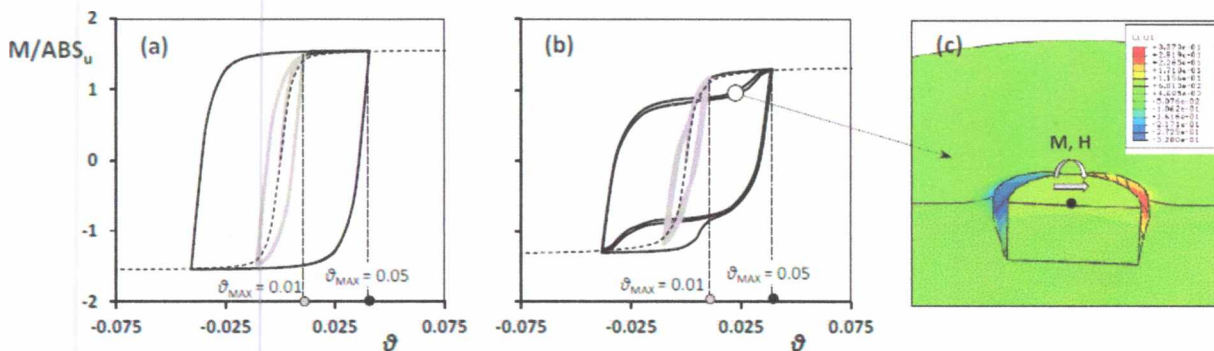
Σχ. 2.2: Σύγκριση αποτελεσμάτων 2D και 3D αναλύσεων σε όρους αδιαστατοποιημένων περιβαλλουσών αστοχίας στο πεδίο H-M (V=0)

Από την σύγκριση του 2-D και 3-D προσομοιώματος προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα :

- Στις 3-D αναλύσεις κατά την πλευρική φόρτιση του θεμελίου εκτός από τις ενεργητικές και παθητικές ωθήσεις που αναπτύσσονται στις έμπροσθεν και όπισθεν πλευρές του θεμελίου κινητοποιείται διατμητική αντίσταση και στα παράπλευρα τοιχώματα. Συνεπώς όσο η επιφάνεια των περιφερειακών τοιχωμάτων αυξάνει τόσο μεγαλύτερη είναι η συμμετοχή της διατμητικής αυτής συνιστώσας στην μέγιστη αντοχή που μπορεί να αναπτύξει το θεμέλιο (άρα και μεγαλύτερη απόκλιση σε σχέση με τις μελέτες 2-D).
- Για την περίπτωση των ανεμογεννητριών όπου ο λόγος $\frac{M}{H}$ λαμβάνει πολύ ψηλές τιμές (80 – 100 m) η απόκριση θεμελίωσης συμπίπτει με αυτή υπό αμιγώς φορτία ροπής. Για αυτόν τον συνδυασμό φόρτισης τα αποτελέσματα των 2-D αναλύσεων είναι λιγότερο συντηρητικά.
- Μια μικρή επιμήκυνση των περιφερειακών τοιχωμάτων του φρέατος επιφέρει σημαντική αύξηση στη αντοχή.

Θεώρηση ατελών συνθηκών επαφής :

Στην περίπτωση αυτή η ανεμογεννήτρια υποβάλλεται σε ανακυκλική φόρτιση ελεγχόμενης μετακίνησης και μελετάται η απόκριση του συστήματος με και χωρίς την θεώρηση ατελών διεπιφανειών υπό καθεστώς μικρών και μεγάλων παραμορφώσεων. Ελέγχθησαν δύο αντιπροσωπευτικά πλάτη επιβαλλόμενης μετακίνησης $\theta=0.01$ και $\theta=0.05$ rad για ελαστική και ανελαστική απόκριση αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στο σχήμα 2.3.



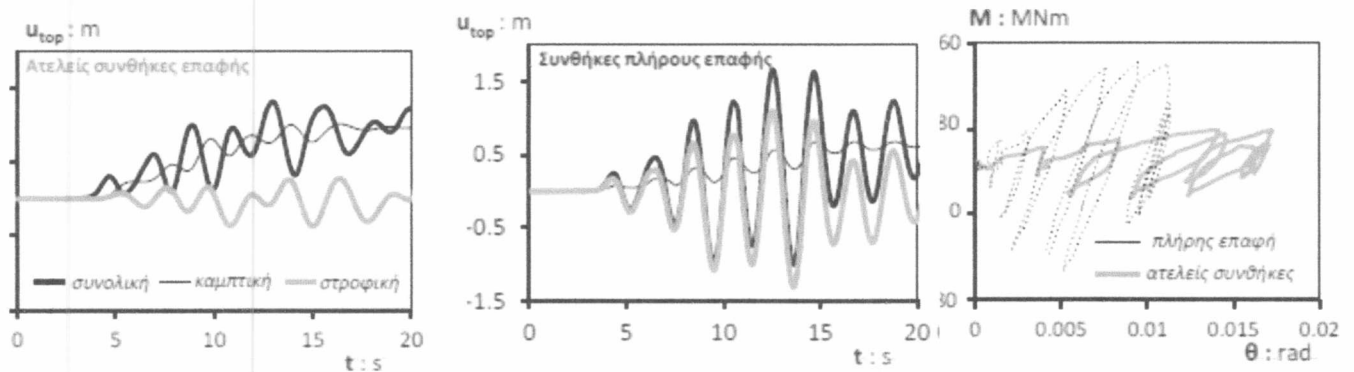
Σχ.2.3: Ανελαστική υστερητική απόκριση κοίλου ανεστραμμένου φρέατος με λόγο έμπτυξης $D/B=0.5$ υπό ανακυκλική φόρτισης επιβαλλόμενης μετακίνησης μικρού-μεγάλου πλάτους.

Από τα παραπάνω σχήματα παρατηρούμε ότι εφόσον το πλάτος της επιβαλλόμενης μετακίνησης είναι μικρό η μορφή των βρόγχων παραμένει ανεπηρέαστη από τις συνθήκες επαφής. Εφόσον το πλάτος της διατμητικής παραμόρφωσης αυξάνει η υστερητική απόκριση του συστήματος θεμέλιο-έδαφος αποκλίνει από την ρομβοειδή μορφή και λαμβάνει ένα γωνιώδες σχήμα. Στο 3^ο σχήμα του σχήματος 2.3 απεικονίζεται ένα στιγμιότυπο μετά την ολοκλήρωση του πρώτου κύκλου φόρτισης στο οποίο διακρίνεται ότι το θεμέλιο έχει χάσει την επαφή από το περιβάλλον έδαφος.

Σεισμική απόκριση ανεμογεννήτριας:

Στην ενότητα αυτή επιχειρείται μια προκαταρκτική μελέτη της σεισμικής απόκρισης της ανεμογεννήτριας λαμβάνοντας υπόψη όλες τις προαναφερθείσες μη γραμμικότητες. Παρουσιάζονται αποτελέσματα μόνο για την ανεμογεννήτρια των 2MW η οποία εδράζεται σε ομοιογενές αργιλικό έδαφος με $S_u = 60 \text{ KPa}$ μέσω κοίλου ανεστραμμένου φρέατος διαμέτρου $B=16 \text{ m}$ και λόγο έμπηξης $\frac{D}{B} = 0.2$. Η μελέτη γίνεται με και χωρίς την θεώρηση ατελών διεπιφανειών.

- Για ιδανικές συνθήκες επαφής: η επιλεχθείσα θεμελίωση και η ανεμογεννήτρια αποκρίνονται ικανοποιητικά δηλαδή η μέγιστη παραμόρφωση της ανεμογεννήτριας αγγίζει το 1.8% και η παραμένουσα μετακίνηση του πυλώνα είναι αρκετά μικρή (τάξη μεγέθους 0.6%). Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4 η μέγιστη σεισμική καταπόνηση του πύργου είναι καμπτικής φύσεως και η μόνιμη στροφική παραμόρφωση του φρέατος είναι 0.01 rad.

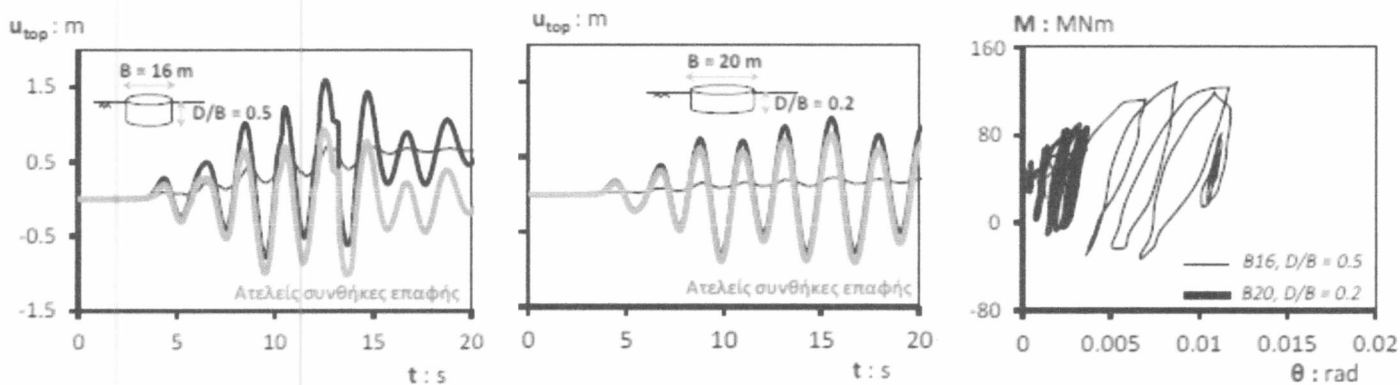


Σχ. 2.4: Χρονοϊστορία οριζόντιας μετακίνησης στο επίπεδο του ρότορα και βρόχοι M-θ στην επιφάνεια του θεμελίου για τους 2 τύπους διεπιφάνειας για ανεμογεννήτρια 2MW.

- Για ατελείς συνθήκες επαφής: τροποποιείται σημαντικά η απόκριση. Η ανελαστική συμπεριφορά του συστήματος μειώνει την καμπτική καταπόνηση του πύργου αυξάνει όμως τις παραμένουσες μετακινήσεις στο επίπεδο του ρότορα. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα η θεώρηση ατελών διεπιφανειών αυξάνει τα μετακινησιακά μεγέθη κατά 70%.

Για την βελτίωση της σεισμικής απόκρισης της ανεμογεννήτριας απαιτείται ενίσχυση του συστήματος θεμελίωσης με δύο πιθανούς τρόπους.

1. Διατήρηση της διαμέτρου του φρέατος στα 16 m με ταυτόχρονη αύξηση του μήκους έμπηξης ($\frac{D}{B}$).
2. Διατήρηση μήκος εγκιβωτισμού με ταυτόχρονη αύξηση της διαμέτρου στα 20 m.



Σχ. 2.5: Σεισμική απόκριση ανεμογεννήτριας 2MW με φρέαρ B=16 m και B=20 m με συνθήκες αντοχής στην διεπιφάνεια θεμελίου-εδάφους.

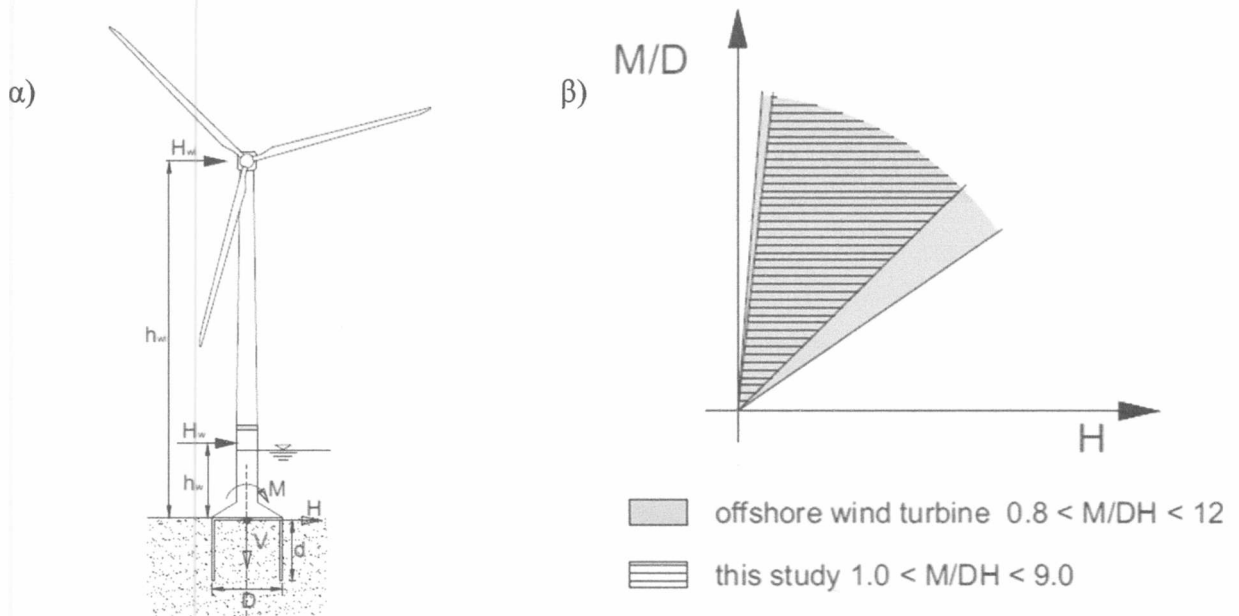
Από τα σχήμα 2.8 φαίνεται ότι το φρέαρ με την μεγάλη διάμετρο επιτυγχάνει συνθήκες καλύτερης πάκτωσης στην θεμελίωση. Τέλος ο πυλώνας κάμπτεται υπό την σεισμική ισχυρή δόνηση χωρίς ωστόσο να συσσωρεύει στροφή και να παραμένει πλήρως λειτουργικός μετά το πέρας του σεισμού.

2.2 Aligi Foglia-Guido Gottardi

Στην συγκεκριμένη δημοσίευση ερευνάται η απόκριση κοίλων ανεστραμμένων φρεάτων σε αμμώδες έδαφος καθώς υποβάλλονται σε επίπεδη κυκλική φόρτιση. Για τον σκοπό αυτό παρουσιάζονται δεκατρία πειράματα υπό καθεστώς κυκλικής φόρτισης σε μοντέλο με διάμετρο 0.3 m και λόγο έμψηξης $\frac{D}{B} = 1$.

Το καθεστώς φόρτισης αναπαριστά τις τυπικές συνθήκες για τις θαλάσσιες ανεμογεννήτριες : πολύ μεγάλη κυκλική ροπή ανατροπής, μεγάλη κυκλική οριζόντια φόρτιση και συγκριτικά μικρό κατακόρυφο φορτίο υπό την μορφή ιδίου βάρους. Τα αποτελέσματα από τα παραπάνω πειράματα συγκρίνονται με μια θεωρητική προσέγγιση χρησιμοποιώντας ένα προϋπάρχον αναλυτικό μοντέλο κατάλληλα τροποποιημένο ώστε να συμπεριλαμβάνει τον βαθμό έμψηξης της βάσης και την εφαρμογή της κυκλικής φόρτισης.

Οι περιβαλλοντικές δράσεις στις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες προκαλούν μια συνδυασμένη φόρτιση στην θεμελίωση η οποία χαρακτηρίζεται από μεγάλη ροπή ανατροπής και μικρά κατακόρυφα φορτία. Στο παρακάτω σχήμα παρατίθενται τα εντατικά μεγέθη που προκαλούνται στον σώμα της ανεμογεννήτριας λόγω των προαναφερθέντων δράσεων. Παρατηρείται επίσης και το τυπικό εύρος του λόγου της ροπής προς την διάμετρος του φρέατος σε σχέση με το οριζόντιο φορτίο.



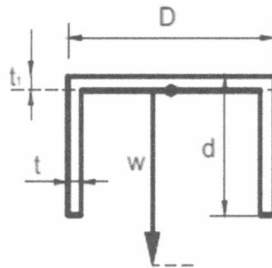
Σχ.2.6: Χαρακτηριστικά μια ανεμογεννήτριας: α) σχέδιο και τυπικές διαστάσεις ,

β) τυπικά καθεστώτα φόρτισης.

Η συμπεριφορά των ανεστραμμένων φρέατων για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες προσεγγίζεται μέσω μοντέλων (macro-element models). Τα μοντέλα αυτά βασίζονται στην θεωρία της πλαστικότητας (work hardening plasticity) και μπορούν να προσεγγίσουν την πειραματική συμπεριφορά φορτίου μετατόπισης υπό μονοτονική φόρτιση. Παρόλα αυτά, ένα πλήρες μοντέλο που περιγράφει επιτυχώς την συμπεριφορά ενός φρέατος υπό κυκλική φόρτιση δεν είναι διαθέσιμο.

Στη συγκεκριμένη έρευνα ο λόγος $\frac{M}{D \cdot H}$ κυμαίνεται μεταξύ 1–9 όπως μπορούμε να δούμε και στο Σχήμα 2.6.β.

Λεπτομέρειες φρέατος: εξωτερική διάμετρος (D) 300 mm, πάχος άνω επιφάνειας (t_1) 11.5 mm, μήκος ποδιάς (d) 300 mm, πάχος ποδιάς (t) 1.5 mm και τέλος ίδιο βάρος φρέατος (w) 125 N.



Σχ.2.7: Διαστάσεις φρέατος.

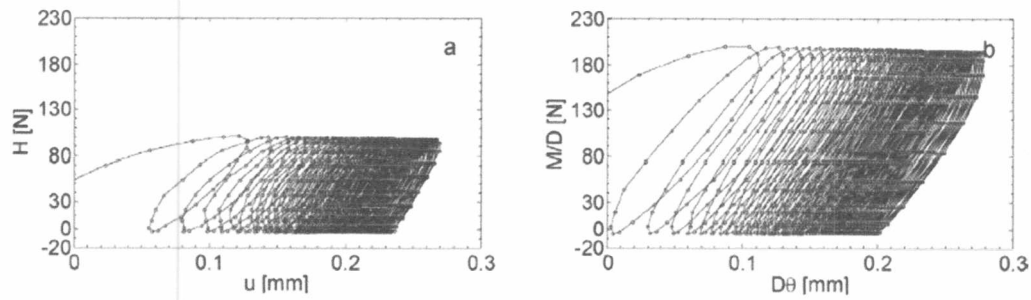
Λεπτομέρειες πειραματικών δοκιμών : στην συγκεκριμένη μελέτη για την περίπτωση της κυκλικής φόρτισης εκπονήθηκαν τέσσερις κυκλικές δοκιμές (C16, C18, C19, C33) υπό σταθερή κατακόρυφη φόρτιση ($V_{const} = 241\text{ N}$) και σταθερό λόγο

$\frac{M}{DH} = 1.987$. Οι λόγοι και $\frac{M_{min}}{M_{max}}$ όπου M_{max} , M_{min} η μέγιστη και η ελάχιστη

αντίστοιχα ροπή που εφαρμόζεται στην δοκιμή και M_R η φέρουσα ικανότητα του θεμελίου. Επιπλέον, η συχνότητα φόρτισης είναι $f_1 = 0.1\text{ Hz}$ και ο αριθμός κύκλων φόρτισης $N = 5 \times 10^4$. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα μεγέθη αυτά:

Cyclic, $V_{const} = 241\text{ N}$, constant $M/DH = 1.987$	
C18	$M_{max}/M_R = 0.299; M_{min}/M_{max} = -0.042$
C20	$M_{max}/M_R = 0.353; M_{min}/M_{max} = -0.595$
C33	$M_{max}/M_R = 0.377; M_{min}/M_{max} = -0.316$
C16	$M_{max}/M_R = 0.403; M_{min}/M_{max} = -0.047$

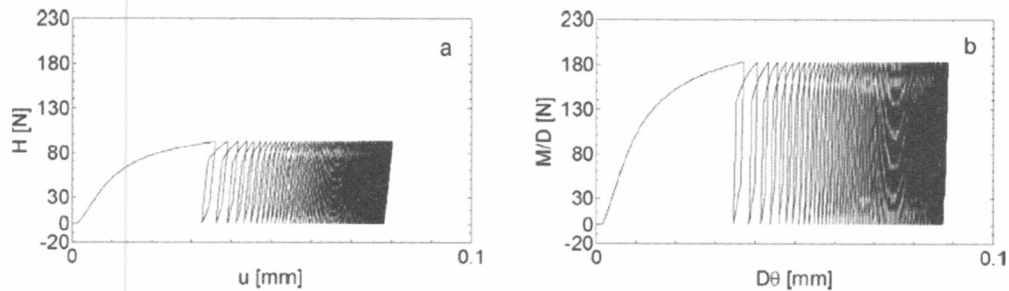
- Πειραματικά αποτελέσματα για την δοκιμή C18 σε 100 κύκλους φόρτισης.



Σχ.2.8: α) Οριζόντια μετατόπιση (u) σε σχέση με οριζόντιο φορτίο (H),

β) στρωφική μετατόπιση $d\theta$ σε σχέση με τον λόγο $\frac{M}{D}$.

- Πρόβλεψη μοντέλου για την δοκιμή C18 σε 100 κύκλους φόρτισης.



Σχ.2.9: α) Οριζόντια μετατόπιση (u) σε σχέση με οριζόντιο φορτίο (H),

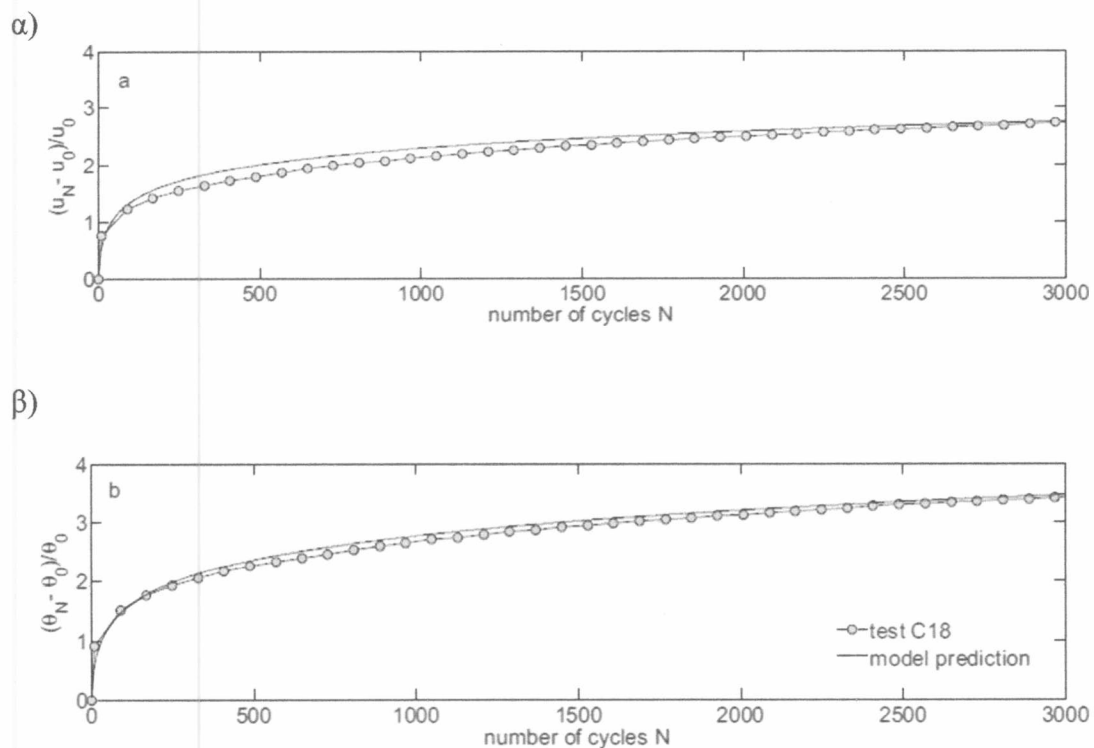
β) στρωφική μετατόπιση $d\theta$ σε σχέση με τον λόγο $\frac{M}{D}$.

Τα πειραματικά αποτελέσματα σε σχέση με τα παρακάτω πειραματικά παρουσιάζουν μεγαλύτερες μετατοπίσεις σε 100 κύκλους φόρτιση από ότι προβλέπει τον μοντέλο της δοκιμής C18 για τους ίδιους κύκλους φόρτισης.

- Πειραματικά αποτελέσματα- πρόβλεψη μοντέλου για u, θ σε N κύκλους φόρτισης.

Στα παρακάτω διαγράμματα οι μετακινήσεις και οι στροφές παρουσιάζονται σε κανονικοποιημένη μορφή σε 3000 κύκλους φόρτισης.

- Για τις μετακινήσεις: u_N η μετακίνηση μετά από N κύκλους φόρτισης και u_0 η μετακίνηση στον πρώτο κύκλο φόρτισης.
- Για τις στροφές: θ_N η στροφή μετά από N κύκλους φόρτισης και θ_0 η στροφή στον πρώτο κύκλο φόρτισης.

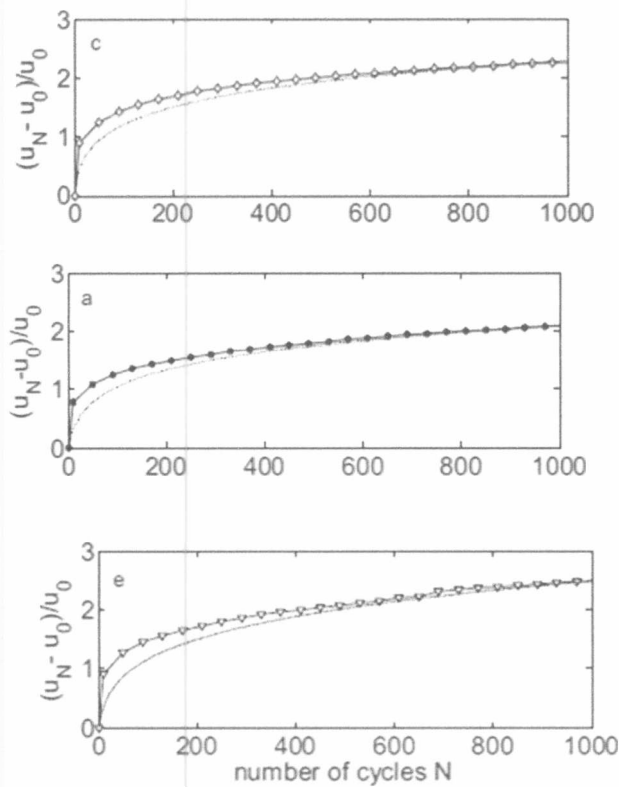


Σχ.2.10: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων για την δοκιμή C18:

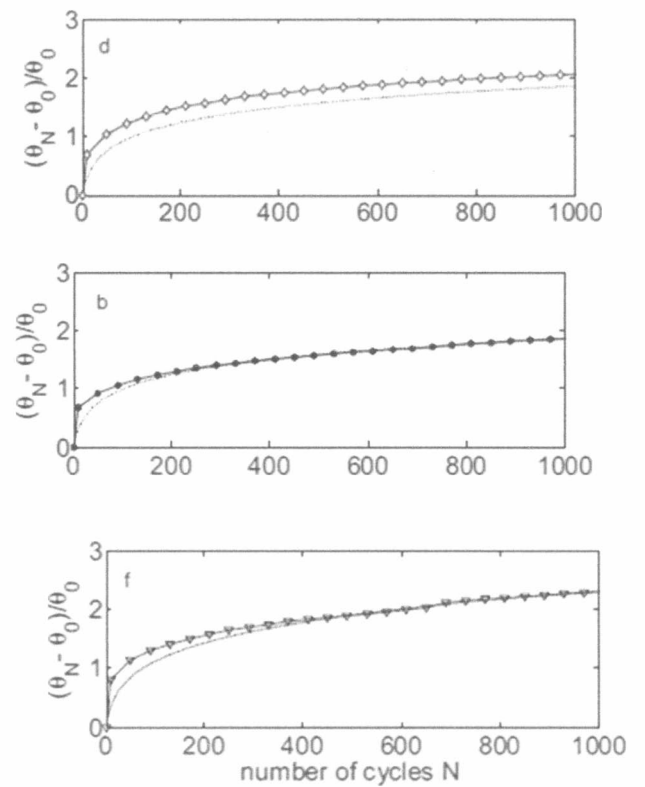
- α) σχέση κανονικοποιημένης οριζόντιας μετακίνησης με κύκλους φόρτισης,
- β) σχέση κανονικοποιημένης στροφής με κύκλους φόρτισης.

Ομοίως και για τις υπόλοιπες δοκιμές C16,C20,C33 παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα σε 1000 κύκλους φόρτισης.

α)



β)



Σχ.2.11: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων για την δοκιμή C16,C20,C33 α) σχέση κανονικοποιημένης οριζόντιας μετακίνησης με κύκλους φόρτισης, β) σχέση κανονικοποιημένης στροφής με κύκλους φόρτισης.

Εν κατακλείδι, παρατηρούμε ότι το μοντέλο προβλέπει επιτυχώς την συμπεριφορά του θεμελίου σε κυκλική φόρτιση. Ειδικότερα, αναπαριστά επιτυχώς την συρρίκνωση του βρόγχου υστέρησης καθώς και την ανάπτυξη μακροπρόθεσμων οριζόντιων μετατοπίσεων u καθώς και στροφικών μετατοπίσεων $d\theta$.

Κεφάλαιο 3: Μέθοδοι Ανάλυσης

3.1 Μη γραμμική ανάλυση

Το πιο βασικό και απλούστερο μοντέλο που χρησιμοποιείται στην Εδαφομηχανική είναι το γραμμικό ελαστικό μοντέλο. Στο μοντέλο αυτό εφαρμόζονται οι γενικευμένοι καταστατικοί νόμοι του Hooke και η συμπεριφορά του υλικού αποδίδεται με δύο παραμέτρους: το μέτρο ελαστικότητας και το λόγο Poisson ν .

Οι εξισώσεις τάσης-παραμόρφωσης είναι:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu \cdot \sigma_y}{E} - \frac{\nu \cdot \sigma_z}{E} \\ \varepsilon_y &= \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\nu \cdot \sigma_x}{E} - \frac{\nu \cdot \sigma_z}{E} \\ \varepsilon_z &= \frac{\sigma_z}{E} - \frac{\nu \cdot \sigma_y}{E} - \frac{\nu \cdot \sigma_x}{E}\end{aligned}$$

Όπου $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: η ορθή τάση στις διευθύνσεις x, y, z ,

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$: η παραμόρφωση στις διευθύνσεις x, y και z , αντίστοιχα.

γ_{yz} και τ_{yz} : η διατμητική παραμόρφωση και διατμητική τάση στο επίπεδο yz ,

γ_{xz} και τ_{xz} : η διατμητική παραμόρφωση και διατμητική τάση στο επίπεδο xz ,

γ_{yx} και τ_{yx} : η διατμητική παραμόρφωση και διατμητική τάση στο επίπεδο yx ,

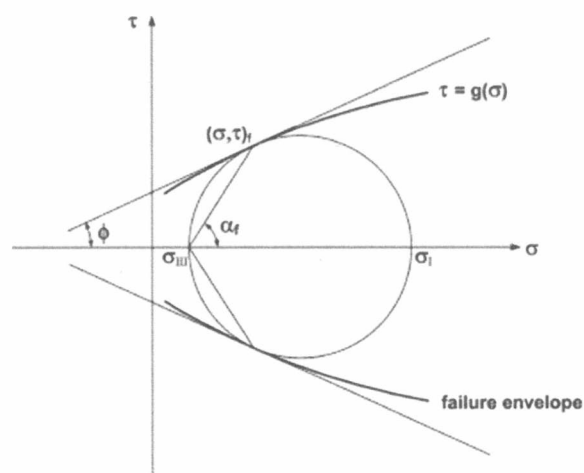
G : το μέτρο διάτμησης

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Στις παρακάτω εξισώσεις η σχέση τάσης- παραμόρφωσης είναι γραμμική, κατά την οποία το μέτρο ελαστικότητας παραμένει ίδιο με την αύξηση των τάσεων. Όμως στην πραγματικότητα τα υλικά μας δεν συμπεριφέρονται ως γραμμικά ελαστικά. Επομένως η γραμμική προσέγγιση της συμπεριφοράς της κατασκευής δεν είναι ρεαλιστική.

3.2 Θεωρία Mohr-Coulomb

Το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb είναι ένα σύνολο γραμμικών εξισώσεων σε χώρο κυρίων τάσεων και περιγράφει τις συνθήκες αποτυχίας ενός ισότροπου υλικού χωρίς επίδραση της κύριας τάσης σ_2 . Το κριτήριο αυτό μπορεί να διατυπωθεί ως συνάρτηση των κυρίων τάσεων σ_1, σ_3 ή ως συνάρτηση της κανονικής τάσης σ και της διατμητικής τάσης τ στο επίπεδο αστοχίας. Το κριτήριο αυτό βασίζεται στην προσφορά των Mohr και Coulomb. Η θεωρία του Mohr εξαρτάται κυρίως από την υπόθεση ότι η αστοχία εξαρτάται μόνο από τις σ_1 και σ_3 . Όσο για το Σχήμα 3.1 της επιφάνειας αστοχίας, δηλαδή η θέση των σ, τ οι οποίες δρουν σε επίπεδο αστοχίας μπορεί να είναι γραμμικό ή μη-γραμμικό. Η υπόθεση του Coulomb βασίζεται σε μια γραμμική επιφάνεια αστοχίας μέσω της οποίας προσδιορίζεται ένας κρίσιμος συνδυασμός σ και τ ο οποίος θα προκαλέσει αστοχία σε συγκεκριμένο επίπεδο.



Σχ.3.1: Διάγραμμα Mohr και επιφάνειες αστοχίας.

Ο Coulomb στα πλαίσια ερευνών για τοίχους αντιστήριξης πρότεινε την ακόλουθη σχέση:

$$|\tau| = c + \tan\varphi \quad (3.1)$$

Όπου c η συνοχή του εδάφους και φ είναι γωνία εσωτερικής τριβής με τον συντελεστή εσωτερικής τριβής $\mu = \tan\varphi$. Το κριτήριο περιέχει δύο σταθερές υλικών c, φ . Η αναπαράσταση της εξίσωσης στο διάγραμμα Mohr είναι μια ευθεία γραμμή με κλίση κατά γωνία φ στον άξονα σ όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1. Με την κατασκευή κύκλου του Mohr εφαπτόμενο στην γραμμή αυτή (ένα καθεστώς τάσεως που οδηγεί σε αστοχία) και με χρήση κατάλληλων τριγωνομετρικών σχέσεων η εξίσωση (1) σε όρους κυρίων τάσεων μετατρέπεται σε :

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (\sigma_1 + \sigma_3) \cdot \sin\varphi + 2 \cdot \cos\varphi \quad (3.2)$$

μια μορφή του κριτηρίου αστοχίας Mohr είναι :

$$\tau_m = f(\sigma_m) \quad (3.3)$$

$$\text{όπου } \tau_m = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \text{ και } \sigma_m = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2}.$$

Με γνωστή την εξίσωση (3.1) η περιβάλλουσα Mohr μπορεί να δημιουργηθεί στο επίπεδο του σ, τ (Σχήμα 3.1) και η αστοχία προκύπτει εάν στο καθεστώς τάσεων ο κύκλος με διάμετρο $\sigma_1 - \sigma_3$ είναι εφαπτόμενος στην επιφάνεια αστοχίας $\tau = g(\sigma)$. Συνεπώς από την εξίσωση (3.2) προκύπτει ότι το κριτήριο Mohr είναι ισοδύναμο με την υπόθεση της γραμμικής επιφάνειας αστοχίας.

Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb σε 3-διαστάσεις:

Το κριτήριο Mohr- Coulomb στον τρισδιάστατο χώρο εκφράζεται μέσω των ακόλουθων σχέσεων :

$$\begin{aligned} \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} &= \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \right) \cdot \sin \varphi + c \cdot \cos \varphi \\ \pm \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} &= \left(\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} \right) \cdot \sin \varphi + c \cdot \cos \varphi \\ \pm \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2} &= \left(\frac{\sigma_3 + \sigma_1}{2} \right) \cdot \sin \varphi + c \cdot \cos \varphi \end{aligned} \quad (3.4)$$

Η επιφάνεια αστοχίας Mohr Coulomb είναι ένας κώνος με εξαγωνική εγκάρσια τομή στον αποκλίνων χώρο τάσεων. Οι εκφράσεις για το τ και σ μπορούν να γενικευτούν στις 3 διαστάσεις μέσω της δημιουργίας σχέσεων για την κανονική τάση και την διατμητική σε ένα επίπεδο αυθαίρετου προσανατολισμού ως προς τους άξονες συντεταγμένων (διανύσματα βάσης). Αν ένα διάνυσμα ορθό ως προς το επίπεδο που μας ενδιαφέρει διατυπώνεται ως :

$$n = n_1 \cdot e_1 + n_2 \cdot e_2 + n_3 \cdot e_3$$

όπου e_i , $i=1,2,3$ είναι τα 3 ορθοκανονικά διανύσματα βάσης και αν οι κύριες τάσεις $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ είναι ευθυγραμμισμένες με τα διανύσματα βάσης e_1, e_2, e_3 τότε οι σχέσεις για τα σ, τ είναι :

$$\sigma = n_1^2 \cdot \sigma_1 + n_2^2 \cdot \sigma_2 + n_3^2 \cdot \sigma_3$$

$$\begin{aligned} \tau &= \sqrt{(n_1 \cdot \sigma_1)^2 + (n_2 \cdot \sigma_2)^2 + (n_3 \cdot \sigma_3)^2 - \sigma^2} \\ &= \sqrt{n_1^2 \cdot n_2^2 \cdot (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + n_2^2 \cdot n_3^2 \cdot (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + n_3^2 \cdot n_1^2 \cdot (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \end{aligned}$$

3.3 Πεπερασμένες διαφορές

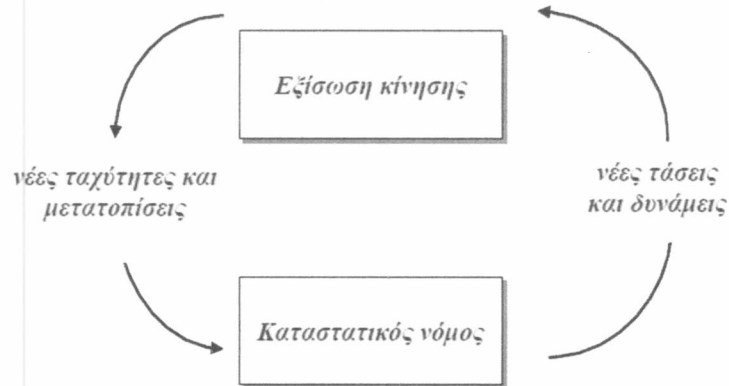
3.3.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών υπήρξε η πρώτη αριθμητική διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση προβλημάτων αντοχής κατασκευών. Η πρώτη εφαρμογή σε προβλήματα λεπτότοιχων ελασμάτων χρονολογείται από το 1921, όταν ο Hencky επέλυσε τις εξισώσεις ορθογωνίων ελασμάτων στο πεδίων των μεγάλων μετατοπίσεων. Η σημασία της μεθόδου είχε αναγνωρισθεί από τότε αλλά μόνο με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών κατά την μεταπολεμική περίοδο άρχισε να βρίσκει ευρεία εφαρμογή. Οι λύσεις που αποκτώνται δεν έχουν απόλυτη ακρίβεια των αναλυτικών λύσεων καθόλου σύμφωνα με την βασική παραδοχή της μεθόδου. Η κατασκευή που είναι ένα συνεχές μέσο αντικαθίσταται από ένα αντίστοιχο διακριτοποιημένο, στους κόμβους του οποίου επιλύονται οι εξισώσεις ισορροπίας. Η ακρίβεια της αριθμητικής λύσης εξαρτάται λοιπόν από το κατά πόσο η προσομοίωση προσεγγίζει τις αναλυτικές εξισώσεις ισορροπίας. Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια της μεθόδου είναι η συμπεριφορά του υλικού και η πυκνωση των κόμβων. Όταν χρησιμοποιούνται αριθμητικές μέθοδοι οι παράγωγοι εκφράζονται με σχέσεις διαφορών των συναρτήσεων σε καθορισμένα διαστήματα (στο χώρο ή και στον χρόνο). Σε κάθε κόμβο η εξίσωση ισορροπίας εκφράζεται σε μορφή πεπερασμένων διαφορών. Σε συνδυασμό με τις οριακές συνθήκες, ορίζεται σύστημα εξισώσεων για τις επί μέρους λύσεις της εξίσωσης ισορροπίας στους κόμβους.

3.3.2 Flac-3D

Στις *Πεπερασμένες Διαφορές*, όπως π.χ. στον κώδικα FLAC (Itasca 2005), δεν απαιτείται μόρφωση καθολικού μητρώου ακαμψίας αλλά ούτε και επαναληπτική διαδικασία. Η πλήρης εξίσωση κίνησης χρησιμοποιείται για να επιλυθούν οι εξισώσεις ισορροπίας σε συγκεκριμένα σημεία – κόμβους του συστήματος, ενώ οι υπολογισμοί γίνονται για μικρό χρονικό βήμα, έτσι ώστε η μεταβολή της εντατικής κατάστασης σε ένα στοιχείο να μην προλάβει να επηρεάσει το γειτονικό του. Αφού

επιλυθούν οι εξισώσεις σε αυτά τα σημεία και υπολογιστούν οι αντίστοιχες κομβικές ταχύτητες τότε καλείται ο καταστατικός νόμος για να υπολογιστούν οι τάσεις. Το καταστατικό προσομοίωμα δεν επεμβαίνει στον αλγόριθμο επίλυσης των εξισώσεων ισορροπίας παρά μόνο χρησιμοποιείται 'εξωτερικά' για να υπολογισθούν τα εντατικά μεγέθη αφού έχει επιτευχθεί ισορροπία. Η διαδικασία επίλυσης παρουσιάζεται γραφικά στο παρακάτω σχήμα



Σχ.4.7: Υπολογιστικός κύκλος κατά τη διάρκεια ενός χρονικού βήματος στο FLAC (Itasca 2005).

Ο χρήστης που θέλει να εισάγει ένα νέο καταστατικό προσομοίωμα, πρέπει μόνο να προμηθεύσει τον κώδικα με μία εξωτερική ρουτίνα η οποία καλείται κάθε φορά μετά από την επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας και όχι κατά την διάρκεια της. Για στατικά προβλήματα, η χρήση της εξίσωσης κίνησης στο FLAC εξασφαλίζει σταθερότητα στο σύστημα ακόμα και για περιπτώσεις όπου υπάρχει μεγάλη πιθανότητα αστάθειας (π.χ. σε μη-γραμμικά υλικά κοντά στην αστοχία). Συμπεριλαμβάνοντας κατά την επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας αδρανειακές δυνάμεις και μετατρέποντας μέρος της ενέργειας του συστήματος σε κινητική ενέργεια, επιτυγχάνεται πιο σωστή προσομοίωση των φυσικών διαδικασιών.

Κεφάλαιο 4 : Αριθμητική Ανάλυση

4.1 Γεωμετρία του προβλήματος

Το κοίλο ανεστραμμένο φρέαρ που εξετάζεται έχει τοποθετηθεί σε στιφρό αργιλικό έδαφος. Συγκεκριμένα, λήφθηκε κυλινδρικό τμήμα εδάφους με ακτίνα ίση με 50 m και βάθος ίσο με 24 m στο κέντρο του οποίου τοποθετήθηκε το υπό μελέτη κυλινδρικό φρέαρ. Εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις ως προς τις διαστάσεις του θεμελίου :

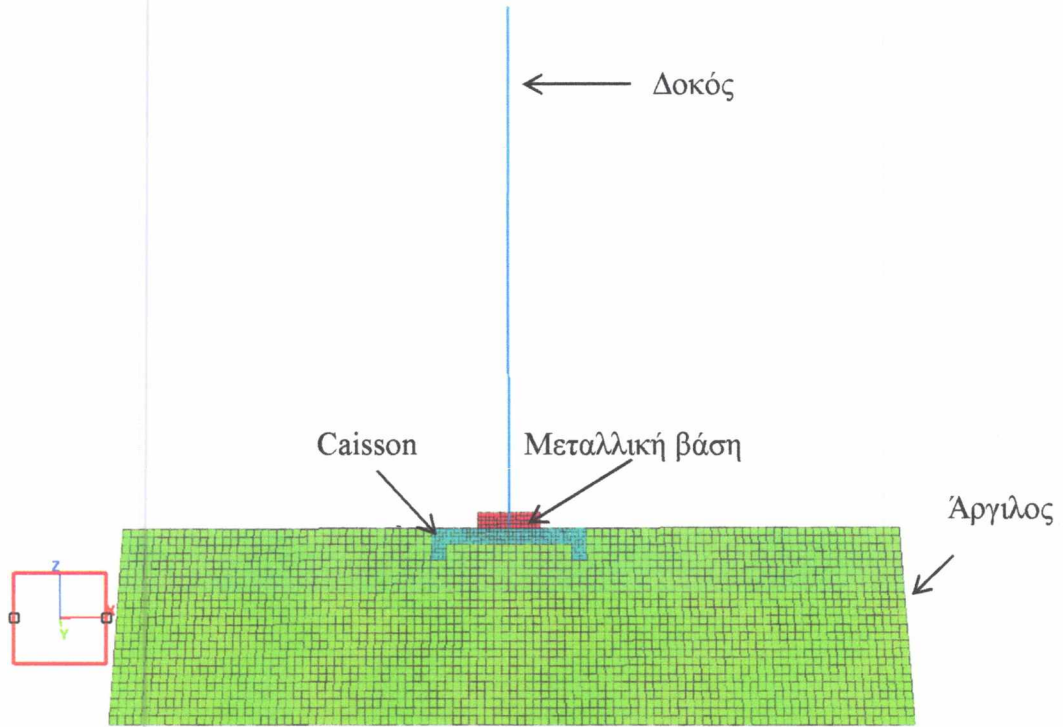
1. Με λόγο έμπτυξης $\frac{D}{B} = 0.2$ όπου $D = 20$ m (διάμετρος φρέατος) και $B = 4$ m (μήκος έμπτυξης)
2. Με λόγο έμπτυξης $\frac{D}{B} = 0.5$ όπου $D = 20$ m (διάμετρος φρέατος) και $B = 10$ m (μήκος έμπτυξης)

Πάνω από το φρέαρ τοποθετήθηκε μεταλλική κυλινδρική βάση διαμέτρου 8m και πάχους 2 m στην οποία πακτώνονται τα πρώτα 2 m του σώματος της ανεμογεννήτριας. Η βάση αυτή βοηθάει στην μείωση των στροφών και μετακινήσεων στην βάση και στο σώμα της ανεμογεννήτριας.

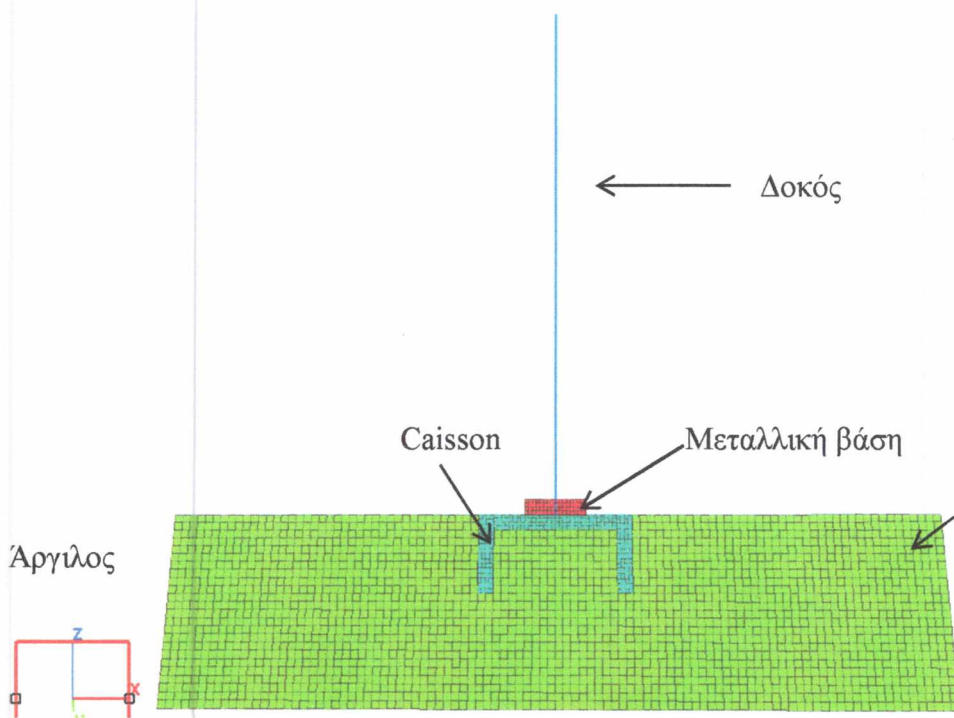
Η ανεμογεννήτρια έχει συνολικό ύψος 74 m και κυλινδρικό σχήμα με εσωτερική ακτίνα 1.96 m και εξωτερική ακτίνα 2 m. Ο ρότορας και ο μηχανισμός της καταλαμβάνουν 2 m στην κορυφή όπου εκεί το βάρος είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το υπόλοιπο σώμα.

Για την ανάλυση του προβλήματος έγινε διακριτοποίηση με χρήση κυβικών στοιχεία διαστάσεων $1 \times 1 \times 1$ m για το έδαφος, ενώ για το φρέαρ και την μεταλλική βάση χρησιμοποιήθηκαν κυβικά στοιχεία διαστάσεων $0.5 \times 0.5 \times 0.5$ m για καλύτερη απεικόνιση των μετατοπίσεων και των δυνάμεων που αναπτύσσονται σε αυτά.

Τέλος, λόγω συμμετρίας του προβλήματος μελετήθηκε ο μισός κάρναβος ως προς την κατεύθυνση y για εξοικονόμηση υπολογιστικού μεγέθους και χρόνου.



Σχ. 4.1: Προσομοίωση κατασκευής με λόγο έμπτυξης $\frac{D}{B} = 0.2$.



Σχ. 4.2: Προσομοίωση κατασκευής με λόγο έμπτυξης $\frac{D}{B} = 0.5$.

4.2 Αριθμητική Προσομοίωση

Βήμα 1^ο: Δημιουργήθηκε το έδαφος με ημικυλινδρικό σχήμα και διαστάσεις:

- Ακτίνα: 50 m
- Βάθος: 24 m

Βήμα 2^ο: Δημιουργήθηκαν διεπιφάνειες στα σημεία επαφής του ανεστραμμένου φρέατος και του εδάφους

Βήμα 3^ο: Δημιουργήθηκε το κοίλο ανεστραμμένο φρέαρ με ημικυλινδρικό σχήμα για δύο διαφορετικούς λόγους έμπηξης:

- $\frac{D}{B} = 0.2$
- $\frac{D}{B} = 0.5$

Βήμα 4^ο: Δόθηκαν ιδιότητες στο έδαφος, στις διεπιφάνειες και στο κοίλο ανεστραμμένο φρέαρ. Πιο συγκεκριμένα:

α) Έδαφος:

- Πυκνότητα: 1.9 kg/m³
- Μέτρο ελαστικότητας: 30 MPa
- Μέτρο διάτμησης: 10.067 MPa
- Συνοχή: 40 kN/m²
- Γωνία διαστολικότητας: 0

β) Κοίλο ανεστραμμένο φρέαρ με χρήση σκυροδέματος ως υλικό κατασκευής (με θεώρηση ελαστικότητας).

- Πυκνότητα: 7.5 kg/m³
- Μέτρο ελαστικότητας: 30 GPa
- Μέτρο διάτμησης: 10 GPa

γ) Διεπιφάνειες:

- Kn (Κανονική δυσκαμψία): 130 MPa
- Ks (Διατμητική δυσκαμψία): 130 MPa
- Συνοχή: 40 kN/m²
- Γωνία διαστολικότητας: 20°

Βήμα 5^ο: Δημιουργία μεταλλικής βάσης πάνω από το κοίλο ανεστραμμένο φρέαρ μέσα στην οποία εμπηγνύονται τα 2 πρώτα μέτρα της ανεμογεννήτριας (με θεώρηση ελαστικότητας). Το σχήμα της είναι ημικυλινδρικό με ακτίνα 4 m και πάχος 2 m. Στην συνέχεια αποδόθηκαν οι παρακάτω ιδιότητες:

- Πυκνότητα: 7.5 kg/m^3
- Μέτρο ελαστικότητας: 210 GPa
- Poisson ratio: 0.3

Βήμα 6^ο: Δόθηκαν:

- Αρχικές ολικές τάσεις στο έδαφος (γεωστατικές τάσεις) οι οποίες αυξάνονται ανάλογα με το βάθος τους σύμφωνα με την σχέση :

$$\sigma = \gamma \cdot z, \text{ όπου } \gamma \text{ το ειδικό βάρος του αργιλικού εδάφους}$$

z το ύψος από την στάθμη του εδάφους.

- Εφαρμόστηκε πίεση στην επιφάνεια του εδάφους η οποία προσομοιώνει την ύπαρξη υδροστατικών τάσεων.

$$\sigma = \gamma_w \cdot z, \text{ όπου } \gamma \text{ το ειδικό βάρος του νερού } (\gamma_w=10 \text{ KPa})$$

z το ύψος από την αρχική στάθμη της θάλασσας.

Βήμα 7^ο: Κατασκευάστηκε η ανεμογεννήτρια με μορφή δοκού όπου δόθηκαν οι παρακάτω ιδιότητες:

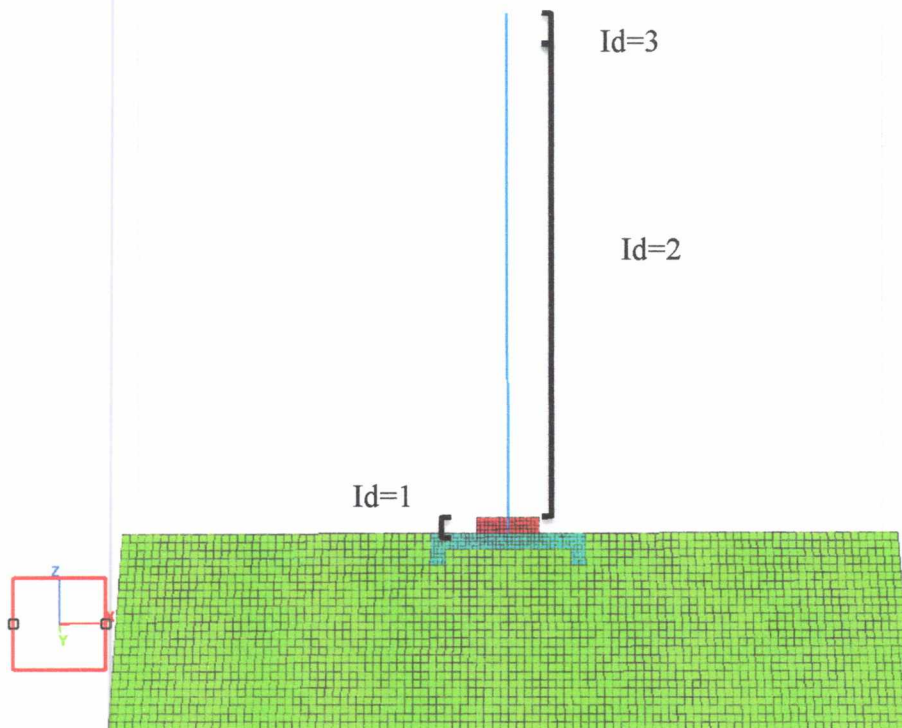
- Πυκνότητα: 7.75 kg/m^3
- Μέτρο ελαστικότητας: 210 GPa
- Λόγος Poisson: 0.27
- Εμβαδόν διατομής: 0.44 m^2
- Ροπή αδράνειας ως προς y, x : 0.97 m^4

Για την σωστή κατανομή των βαρυτικών δυνάμεων η δοκός χωρίστηκε σε 3 τμήματα:

1. Από 0 – 2 m
2. Από 2 – 72 m
3. Από 72 – 74 m

Το 1^ο και το 2^ο κομμάτι καταλαμβάνουν το 60% του συνολικού βάρους της ανεμογεννήτριας (250 tn) δηλαδή (150 tn). Το 3^ο κομμάτι έχει συνολικό βάρος ίσο με 100 tn δηλαδή το 40% του συνόλου. Η συσσώρευση αυτή μεγάλου βάρους στην

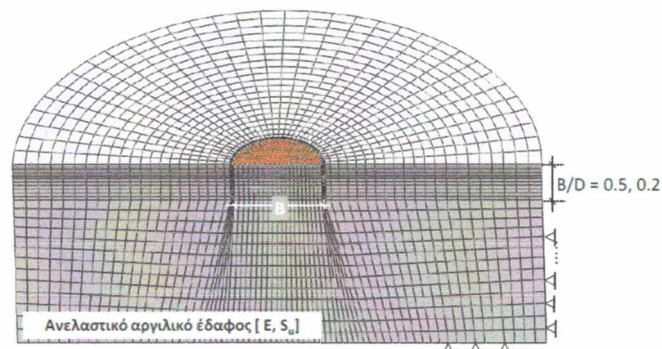
κορυφή της ανεμογεννήτριας εξηγείται από την ύπαρξη των μηχανισμών λειτουργίας της (ρότορας) καθώς και των πτερυγίων της.



Σχ. 4.3: Τμηματοποίηση ανεμογεννήτριας.

Βήμα 8^ο: Εφαρμόστηκαν συνοριακές συνθήκες σε όλο το μοντέλο μας, συγκεκριμένα:

- Απαγόρευση μετακίνησης z στην επιφάνεια $z = -24$ (κάτω επιφάνεια)
- Απαγόρευση μετακίνησης y στην επιφάνεια $y=0$ (επιφάνεια τομής λόγω συμμετρίας)
- Απαγόρευση μετακίνησης x,y στην εξωτερική κυλινδρική επιφάνεια



Σχ. 4.4 : Συνοριακές συνθήκες στη στατική ανάλυση.

Βήμα 9^ο: Εφαρμόστηκε βαρύτητα $g=10\text{m/sec}^2$ κατά τον άξονα z και επιλύθηκε στατικά. Ουσιαστικά προσομοιώθηκε μια αρχική στερεοποίηση στο έδαφος.

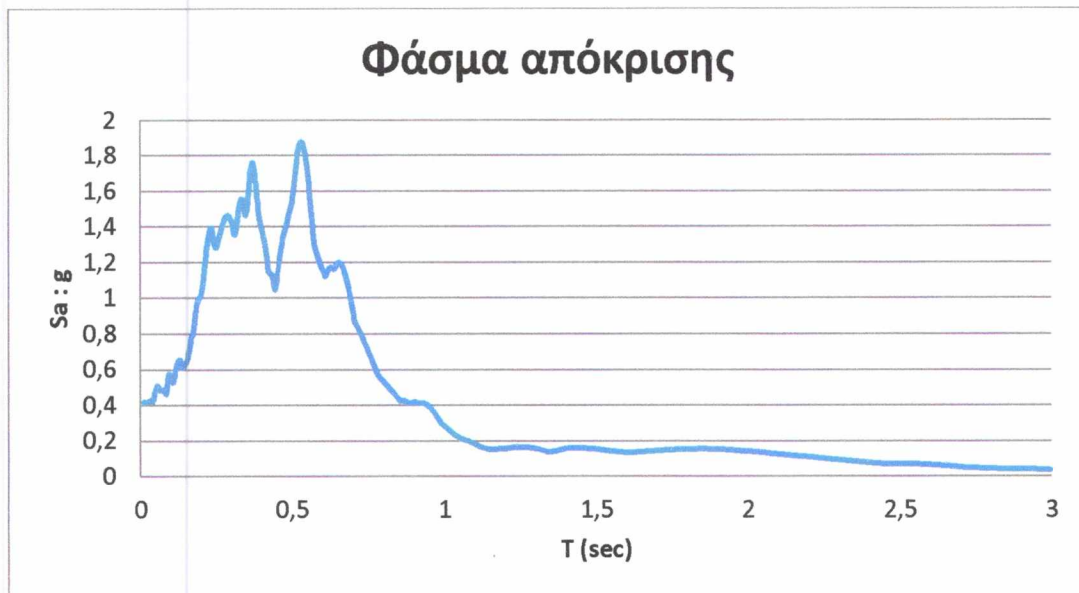
4.3 Σεισμική διέγερση

4.3.1 Σεισμός Λευκάδας

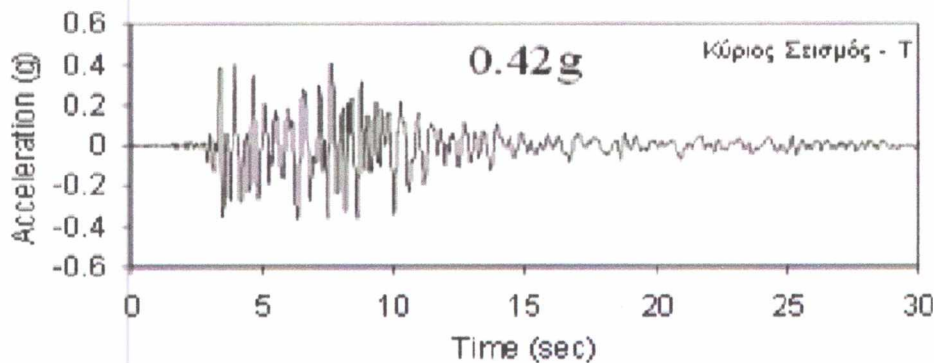
Ο σεισμός, μεγέθους $M_w = 6.4$ που σημειώθηκε στις 8:15 το πρωί της 14^{ης} Αυγούστου το 2003 στην Λευκάδα, δεν αποτέλεσε έκπληξη καθώς, η Λευκάδα, η Κεφαλονιά και η Ιθάκη έχουν την μεγαλύτερη σεισμικότητα σε όλη την Ευρώπη.

Η Λευκάδα, η οποία βρίσκεται κοντά στο ρήγμα οριζόντιας παραμόρφωσης στην Κεφαλονιά, έχει υποστεί τον 20^ο αιώνα τρεις σεισμούς μεγέθους 6.5 της κλίμακας Richter και αρκετούς μεγέθους 6.

Εξαιτίας αυτής της υψηλής σεισμικότητας της περιοχής λοιπόν, τα κτήρια και οι κατασκευές είναι έτσι σχεδιασμένα προκειμένου να αντέχουν σε μια ισχυρότατη σεισμική δόνηση. Συγκεκριμένα τα κτήρια που κατασκευάστηκαν μετά το 1995, κατασκευάστηκαν για ενεργό μέγιστη επιτάχυνση σχεδιασμού 0.36g ενώ πριν το 1995 ήταν περίπου 0.22g. Αυτή η υψηλή επιτάχυνση σχεδιασμού ίσως και να δικαιολογεί την ελάχιστη βλάβη των κατασκευών και την έλλειψη θυμάτων κατά τον σεισμό του 2003.



Σχ.4.5 :Φάσμα απόκρισης σεισμού Λευκάδας



Σχ.4.6: Χρονοϊστορία επιτάχυνσης σεισμού Λευκάδας

Το επιταχυνσιογράφημα που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία έχει ενεργό μέγιστη επιτάχυνση 0.42g και δεσπόζουσα περίοδο. Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται το φάσμα απόκρισης και στο Σχήμα 4.6 η χρονοϊστορία της οριζόντιας επιτάχυνσης.

4.3.2 Εφαρμογή σεισμικής διέγερσης στο μοντέλο

Βήμα 1^ο: Χρησιμοποιήθηκε τοπική απόσβεση (local damping) σε όλο το μοντέλο. Το είδος της απόσβεσης αυτής αρχικά χρησιμοποιήθηκε ως απόσβεση στην στατική ανάλυση. Παρόλα αυτά έχει ορισμένα χαρακτηριστικά που το κάνουν κατάλληλο για δυναμικές προσομοιώσεις. Λειτουργεί προσθέτοντας ή αφαιρώντας μάζα από

συγκεκριμένα στοιχεία ή κόμβους σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές κατά την διάρκεια ενός κύκλου ταλάντωσης. Όμως, υπάρχει συνολική διατήρηση της μάζας διότι η συνολική ποσότητα που προστίθεται είναι ίση με την ποσότητα που αφαιρείται. Πιο συγκεκριμένα, η μάζα προστίθεται όταν η ταχύτητα αλλάζει πρόσημο και αφαιρείται όταν ξεπερνάει μια μέγιστη ή μια ελάχιστη τιμή. Συνεπώς, οι προσαυξήσεις της κινητικής ενέργειας (λόγω αλλαγής προσήμου ταχύτητας) αφαιρούνται δύο φορές ανά κύκλο ταλάντωσης (όταν η ταχύτητα φτάσει την μέγιστη τιμή της). Το ποσό της ενέργειας που αφαιρείται ΔW είναι ανάλογο της μέγιστης παροδικής ενέργειας W καθώς και του λόγου $\frac{\Delta W}{W}$ και δεν εξαρτάται από την τιμή και την συχνότητα. Έτσι η εφαρμογή τοπικής απόσβεσης είναι απλούστερη από την απόσβεση (Rayleigh) διότι δεν χρειάζεται ο προσδιορισμός συχνότητας και δεν απαιτεί πολύ μικρό χρονικό βήμα ολοκλήρωσης. Εφόσον ο λόγος $\frac{\Delta W}{W}$ σχετίζεται με ένα τμήμα της κρίσιμης απόσβεσης D (Kolsky 1963), προκύπτει η έκφραση:

$$\alpha_L = \pi \cdot D, \text{ όπου } \alpha_L: \text{ ο συντελεστής τοπικής απόσβεσης}$$

Στην περίπτωση της συγκεκριμένης ανάλυσης χρησιμοποιήθηκε κρίσιμη απόσβεση $D = 2\%$ συνεπώς ο συντελεστής $\alpha_L = 0.0628$.

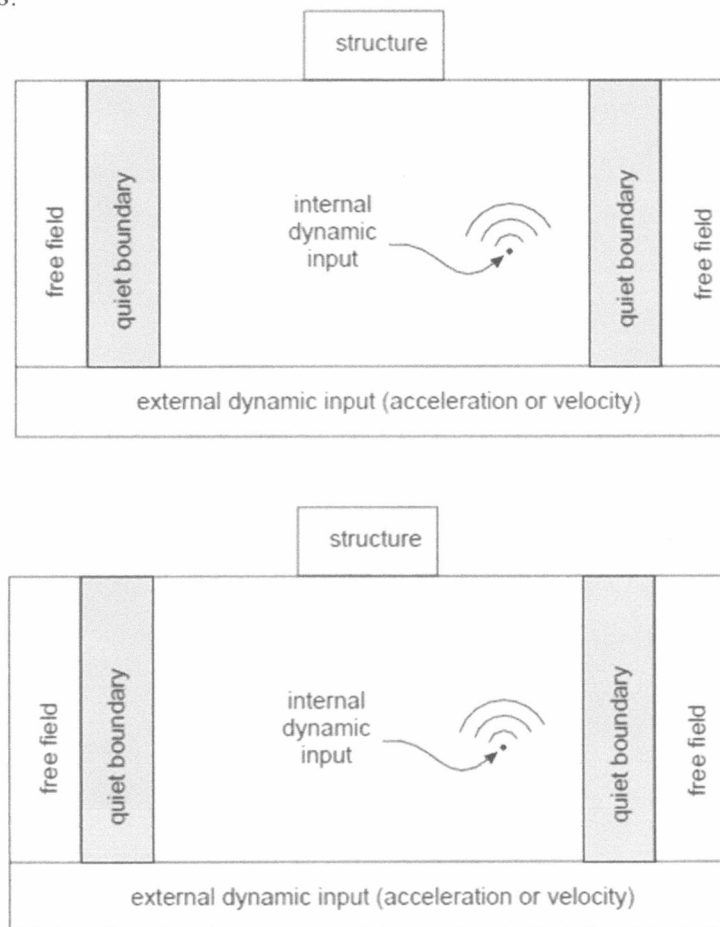
Βήμα 2^ο: Χρησιμοποιήθηκε το σιγμοειδές μοντέλο (sig3) για την περιγραφή των βρόγχων υστέρησης. Οι σιγμοειδείς καμπύλες είναι μονοτονικές μέσα στο καθορισμένο εύρος και έχουν την κατάλληλη ασυμπτωτική συμπεριφορά. Έτσι οι συναρτήσεις αυτές είναι κατάλληλες για την απεικόνιση των καμπυλών απομείωσης. Η εξίσωση του μοντέλου είναι η ακόλουθη :

$$M_s = \frac{a}{1 + e^{\frac{(-L-x_o)}{b}}}$$

Όπου 3 παράμετροι είναι αναγκαίες για τον προσδιορισμό του:

1. $\alpha = 1$
2. $b = -0.57$
3. $x_o = -0.57$

Βήμα 3^ο: Εφαρμόστηκαν *quiet boundaries* περιμετρικά του μοντέλου. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκαν σχετίζεται άμεσα με την δυναμική φύση της φόρτισης (σεισμική). Πολλές φορές οι συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται σε στατικά προβλήματα προκαλούν την ανάκλαση των κυμάτων που εκπέμπονται από την σεισμική δόνηση πίσω στην κατασκευή και δεν επιτρέπεται η αναγκαία ακτινοβολία ενέργειας. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να επιλυθεί με διεύρυνση των διαστάσεων του μοντέλου διότι η απόσβεση των υλικών θα απορροφήσει το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που ανακλάται λόγω των στατικών ορίων. Παρόλα αυτά η λύση αυτή οδηγεί σε μεγάλο υπολογιστικό φόρτο και για τον λόγο αυτό προτιμάται η χρήση *quiet boundaries*.



Σχ.4.7 : Εφαρμογή *quiet boundaries* στο υπέδαφος κατασκευής.

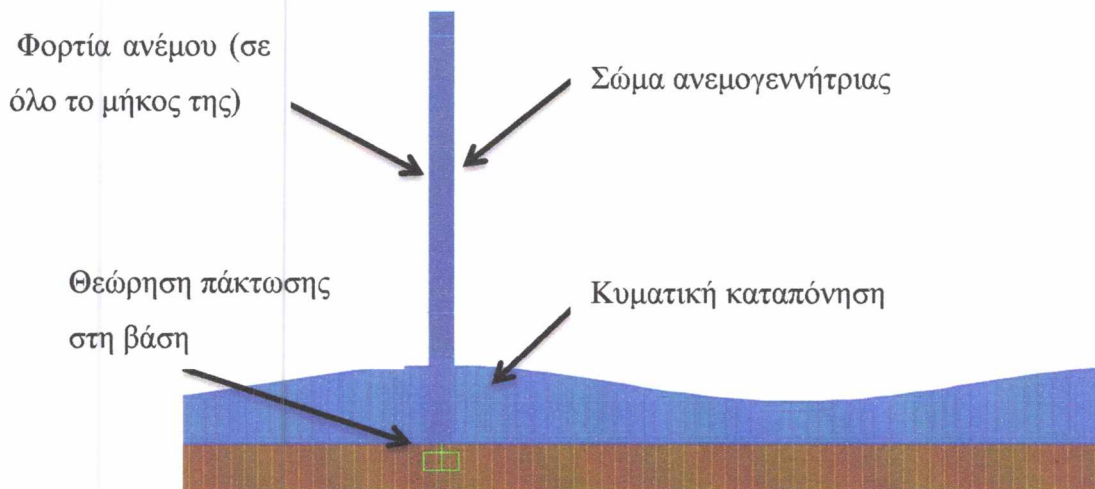
Βήμα 4^ο: Εφαρμόστηκαν οι ταχύτητες κατά την διεύθυνση x από τα δεδομένα του σεισμού της Λευκάδας και στην συνέχεια το μοντέλο επιλύθηκε για σεισμικό χρόνο $t=5$ sec αντί για 15 sec που ήταν το αναμενόμενο. Αυτό έγινε διότι για μόλις 5 sec σεισμικής διέγερσης απαιτούνταν 6-7 ημέρες υπολογιστικού χρόνου γεγονός που

καθιστούσε τα χρονικά περιθώρια αρκετά στενά. Περαιτέρω δυσκολίες δημιουργήθηκαν από την πτώση του ηλεκτρικού δικτύου κατά την μακρά διάρκεια των αναλύσεων. Για πρακτικούς λόγους που σχετίζονται με τα υπάρχοντα χρονικά περιθώρια, το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα θεωρήθηκε αποδεκτό για να αποκτήσουμε μια εικόνα της εντατικής κατάστασης και των μετατοπίσεων στο σύστημα έδαφος-θεμέλιο.

4.4 Ανεμική-Κυματική διεγερση

Η δύναμη του ανέμου και των κυμάτων είναι πολύ σημαντική για την μελέτη μια θαλάσσιας ανεμογεννήτριας. Για αυτόν τον λόγο θα πρέπει να λάβουμε σημαντικά υπόψη μας τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στην βάση της λόγω των παραπάνω δυνάμεων.

Αρχικά χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα SAAP προσομοιώσαμε το την ανεμογεννήτρια θεωρώντας πάκτωση στην βάση της.



Σχ.4.8: Προσομοίωση ανεμογεννήτριας στο SAAP

Η επίλυση πραγματοποιήθηκε με ταυτόχρονη επιβολή ανεμικής και σεισμικής καταπόνησης. Τα απαιτούμενα δεδομένα λύθηκαν από περιοχή κοντά στις ακτές της Κύπρου και είναι τα ακόλουθα :

- $V_{\text{wind}}=65.1 \frac{m}{\text{sec}}$ (ταχύτητα άνεμου)
- $H_{\text{wave}}=6 \text{ m}$ (ύψος κύματος)
- $T=12.5 \text{ sec}$ (περίοδος κύματος)

Για την κυματική επίλυση, το πρόγραμμα SAAP έκανε χρήση της εξίσωσης Morison η οποία χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις μη σταθερής ροής και παρέχει την δύναμη που ασκείται σε μια κατασκευή συναρτήσει του χρόνου καθώς και της ταχύτητας του κυματισμού. Ειδικότερα :

$$F = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u \cdot |u| \cdot D + C_M \cdot \rho \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad (4.1)$$

Στην εξίσωση Morison έχουμε :

1. F σε μονάδες Nm^{-1}
2. Πρώτος Όρος → οπισθέλκουσα δύναμη (drag force) ανά μονάδα μήκους (m)

$$C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u \cdot |u| \cdot D \quad (4.2)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι στον ορό αυτό, η ταχύτητα δηλώνεται με απολυτό πρόσημο για να διασφαλίσει την όμοια φορά της δύναμης με την κατεύθυνση της ροής.

3. Δεύτερος Όρος → αδρανειακή δύναμη (inertia force) ανά μονάδα μήκους (m)

$$F_M = C_M \cdot \rho \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad (4.3)$$

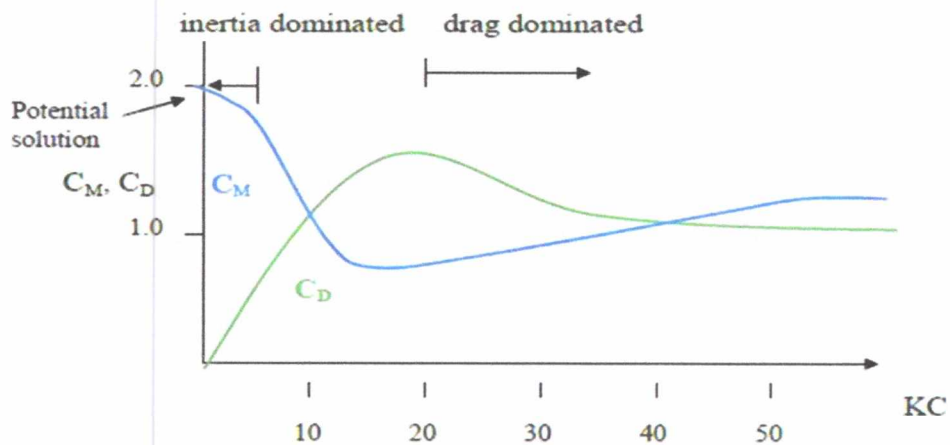
Όσον αφορά τις σταθερές C_M , C_D , πρόεκυψαν μέσω της εύρεσης του αριθμού Keulegan – Carpenter (KC) ο οποίος προκύπτει από την εξίσωση :

$$KC = \frac{UT}{D} \quad (4.4)$$

όπου :

- $U \rightarrow$ ταχύτητα κυματισμού
- $T \rightarrow$ περίοδος κυματισμού
- $D \rightarrow$ διάμετρος ανεμογεννήτριας

Με τα παραπάνω δεδομένα , ο αριθμός KC είναι ίσος προς 3.5



Από το διάγραμμα αυτό προέκυψε : $C_M=1.85$

$$C_D=0.35$$

Δηλαδή συμπεραίνουμε ότι στο φαινόμενο αυτό κυριαρχεί η αδρανειακή δύναμη καθώς ο συντελεστής της είναι σημαντικά μεγαλύτερος από αυτόν της δύναμης έλξης.

Από το πρόγραμμα SAP με χρήση της εξίσωσης Morison με δεδομένα τα παραπάνω πρόεκυψε ο ακόλουθος πίνακας :

StepNum	GlobalFX	GlobalFZ	GlobalMY
Unitless	KN	KN	KN-m
0	0	0	0
0,1	-10,334	150,822	-255,6794
0,2	-38,083	316,537	-798,7811
0,3	-47,415	454,352	-1364,9683
0,4	-77,118	629,553	-2415,6712
0,5	-111,998	762,569	-3831,4172
0,6	-136,685	937,343	-5450,3457
0,7	-189,102	1066,244	-7602,8071
0,8	-218,133	1217,522	-9682,9912
0,9	-267,147	1343,194	-12021,5237
1	-311,829	1496,401	-14252,0987
1,1	-339,068	1624,659	-16129,7902
1,2	-385,447	1771,166	-17934,0481
1,3	-401,29	1887,381	-19095,9554
1,4	-429,083	2011,922	-20017,3396
1,5	-442,649	2108,986	-20460,5338
1,6	-444,463	2231,331	-20504,7757
1,7	-461,456	2334,196	-20512,4773
1,8	-458,078	2447,775	-20240,2738
1,9	-469,627	2541,82	-20156,0824
2	-470,876	2625,718	-20108,1523
2,1	-472,468	2685,918	-20294,2451
2,2	-498,82	2764,932	-20999,0249
2,3	-504,805	2831,757	-21770,5592
2,4	-530,125	2903,245	-22977,4439
2,5	-561,873	2977,55	-24426,2806
2,6	-571,98	2997,089	-25702,0687
2,7	-601,749	3026,234	-27135,4893
2,8	-619,912	3047,208	-28284,725
2,9	-625,5	3073,483	-29035,3565
3	-645,295	3098,284	-29588,2124
3,1	-638,443	3120,388	-29506,0635
3,2	-638,156	3109,936	-29109,3186
3,3	-619,193	3083,083	-28211,846
3,4	-596,948	3065,121	-27049,2565
3,5	-587,895	3030,441	-25888,7968
3,6	-556,104	3018,789	-24485,9983
3,7	-542,61	2980,103	-23374,6135
3,8	-524,421	2939,468	-22405,0924
3,9	-506,564	2865,707	-21697,3288

4	-507,108	2802,454	-21457,4914
4,1	-490,123	2719,685	-21294,5651
4,2	-493,776	2662,315	-21532,1386
4,3	-496,485	2577,453	-21866,0078
4,4	-489,306	2509,182	-22102,3762
4,5	-491,307	2384,521	-22295,1197
4,6	-469,723	2290,023	-22030,1467
4,7	-463,979	2163,266	-21617,3164
4,8	-442,156	2065,855	-20686,6129
4,9	-407,362	1946,675	-19267,6238
5	-387,013	1838,014	-17681,6194
5,1	-339,737	1704,173	-15568,2414
5,2	-297,457	1550,879	-13371,7902
5,3	-265,63	1431,714	-11258,6698
5,4	-212,76	1267,613	-9025,3352
5,5	-184,404	1153,899	-7233,6903
5,6	-153,244	990,486	-5685,1458
5,7	-120,197	859,258	-4421,4567
5,8	-105,092	684,361	-3642,0799
5,9	-74,567	554,494	-2962,9909
6	-67,894	373,703	-2697,2539
6,1	-52,519	243,117	-2410,8202
6,2	-29,375	69,445	-1998,7647
6,3	-21,527	-69,429	-1590,3154
6,4	11,373	-242,108	-678,6948
6,5	27,364	-375,933	362,43
6,6	65,31	-551,04	1942,2983
6,7	106,822	-688,842	3851,2758
6,8	137,738	-854,127	5884,3143
6,9	194,839	-989,849	8322,7827
7	225,48	-1152,555	10503,7141
7,1	272,841	-1270,909	12753,8502
7,2	314,241	-1426,708	14732,6793
7,3	335,543	-1557,166	16213,339
7,4	374,74	-1697,169	17533,2609
7,5	389,578	-1845,106	18264,5931
7,6	399,913	-1940,109	18622,4424
7,7	418,231	-2071,367	18822,1039
7,8	414,454	-2159,184	18652,2349
7,9	425,787	2292,493	18599,3783
8	435,825	-2383,636	18613,7893
8,1	437,085	-2508,708	18725,2968
8,2	462,047	-2576,472	19314,8468
8,3	464,776	-2662,299	19965,6593
8,4	494,328	-2720,736	21158,3767
8,5	520,152	-2800,527	22528,9434

8,6	536,497	-2868,178	23935,5803
8,7	577,371	-2936,912	25620,5013
8,8	589,405	-2981,753	26926,2653
8,9	616,319	-3015,419	28166,6224
9	627,84	-3035,427	28959,3475
9,1	629,484	-3058,827	29293,0497
9,2	640,395	-3090,204	29340,4859
9,3	626,795	-3102,583	28789,8235
9,4	624,078	-3119,52	28056,8958
9,5	601,392	-3097,25	26918,0465
9,6	577,371	-3076,153	25688,8299
9,7	571,831	-3043,333	24676,5545
9,8	543,151	-3030,776	23564,6797
9,9	536,266	-2992,453	22892,6009
10	533,955	-2981,749	22544,0321

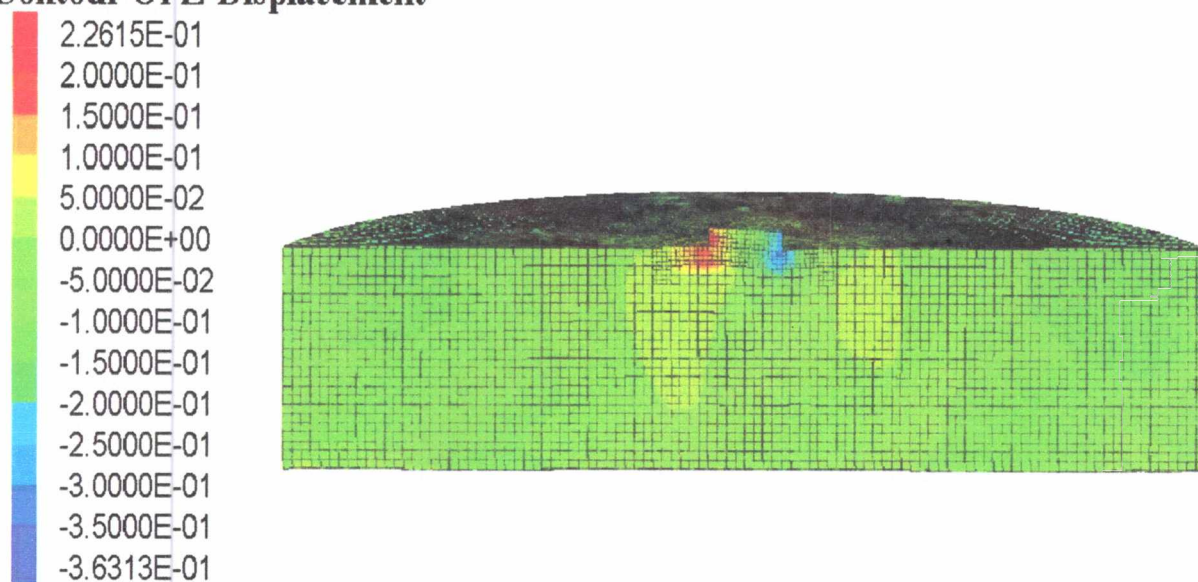
Το χρονικό βήμα είναι 0.1 sec και για κάθε ένα έχει υπολογιστεί η ροπή , η τέμνουσα καθώς και η αξονική δύναμη που ασκούνται στην βάση της ανεμογεννήτριας. Για λογούς εξοικονόμησης υπολογιστικού χρόνου και όγκου, στο FLAC3D εισήχθησαν τα δεδομένα που αφορούν τα χρονικά βήματα 2 – 7 sec. Η επιλογή του συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος έγινε διότι σε αυτό τα εντατικά μεγέθη λαμβάνουν μεγαλύτερες τιμές και συνεπώς είναι δυσμενεστέρα για την κατασκευή.

4.5 Αποτελέσματα ανάλυσης

4.5.1 Αποτελέσματα σεισμικής διέγερσης

Τα Σχήματα 4.9 έως 4.10 παρουσιάζουν την μετακίνηση της κατασκευής στην κατεύθυνση z, στο σύστημα συντεταγμένων XYZ. Αρχικά, παρατηρείται, θετική μετατόπιση αριστερά της μεταλλικής βάσης και του ανεστραμμένου φρέατος. Σε αντίθεση, το δεξί τμήμα της μεταλλικής βάσης και του ανεστραμμένου φρέατος μετατοπίζονται αρνητικά σε σχέση με το υπόλοιπο σύστημα.

Contour Of Z-Displacement

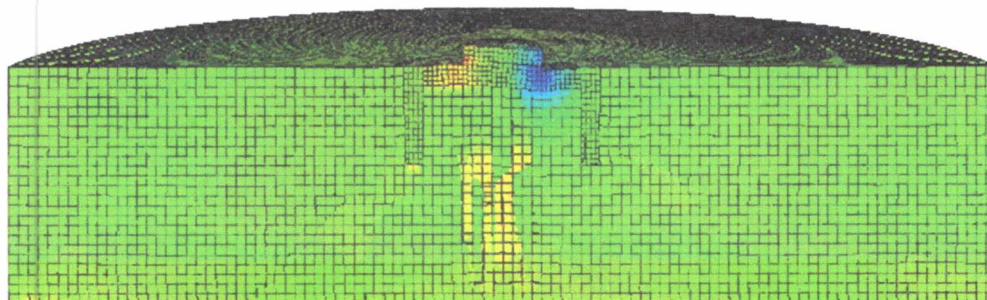
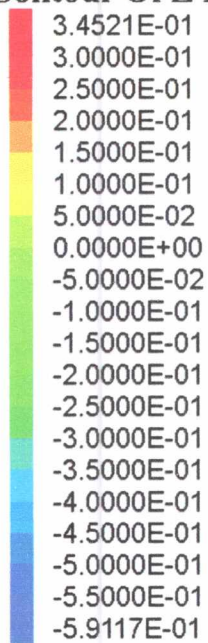


Σχ.4.9: Μετατοπίσεις κατά z κοίλου ανεστραμμένου φρέατος με λόγο έμπτυξης $\frac{D}{B} = 0.2$ λόγω σεισμικής καταπόνησης.

Όσον αφορά το κοίλο ανεστραμμένο φρέαρ με λόγο έμπτυξης $\frac{D}{B} = 0.2$ το δεξί τμήμα της μεταλλικής κατασκευής και το τμήμα του caisson που βρίσκεται ακριβώς από κάτω του μετατοπίζονται μέγιστα με τιμή 0.23m. Αντίθετα, η μέγιστη αρνητική μετατόπιση βρίσκεται στο δεξί τμήμα της μεταλλικής βάσης και του caisson με τιμή ίση με -0.36 m. Βλέπουμε δηλαδή ότι το θεμέλιο τείνει να στραφεί με ωρολογιακή φορά.

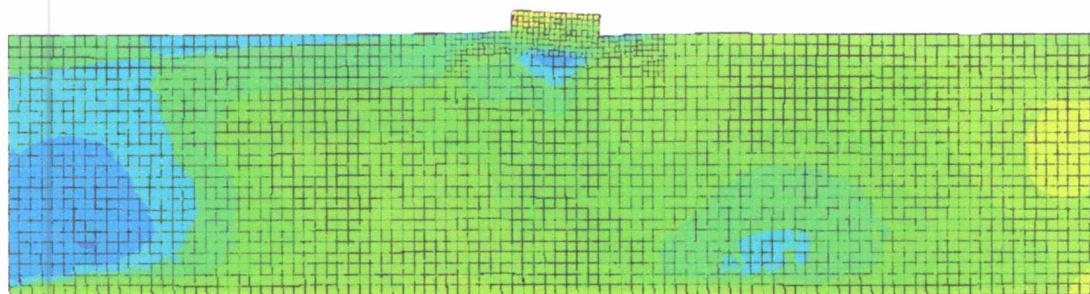
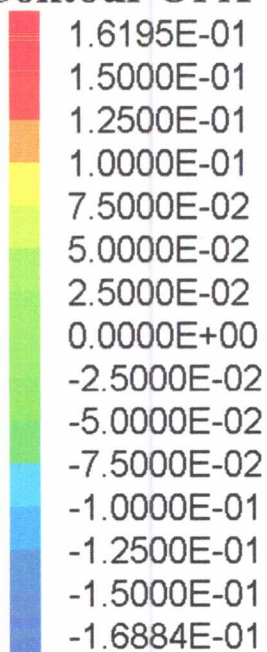
Επίσης, από το Σχήμα 4.10. φαίνεται ότι το κοίλο ανεστραμμένο φρέαρ με λόγο έμπτυξης $\frac{D}{B} = 0.5$ παρουσιάζει μετατόπιση 0.345m στο αριστερό τμήμα της μεταλλικής βάσης ενώ το caisson που βρίσκεται από κάτω του να έχει μετατοπισθεί περίπου 0.2m. Η μέγιστη μετατόπιση παρατηρείται στο δεξί τμήμα του caisson, που βρίσκεται ακριβώς από κάτω από την μεταλλική βάση, με μέγιστη τιμή 0.59m ενώ η μετατόπιση της μεταλλικής βάσης είναι 0.4m. Εδώ οι στροφικές μετατοπίσεις είναι μικρότερες από τον προηγούμενο λόγο έμπτυξης αν και παρατηρείται καθίζηση του συστήματος βάση – θεμέλιο και του εδάφους κάτω από αυτό.

Contour Of Z-Displacement



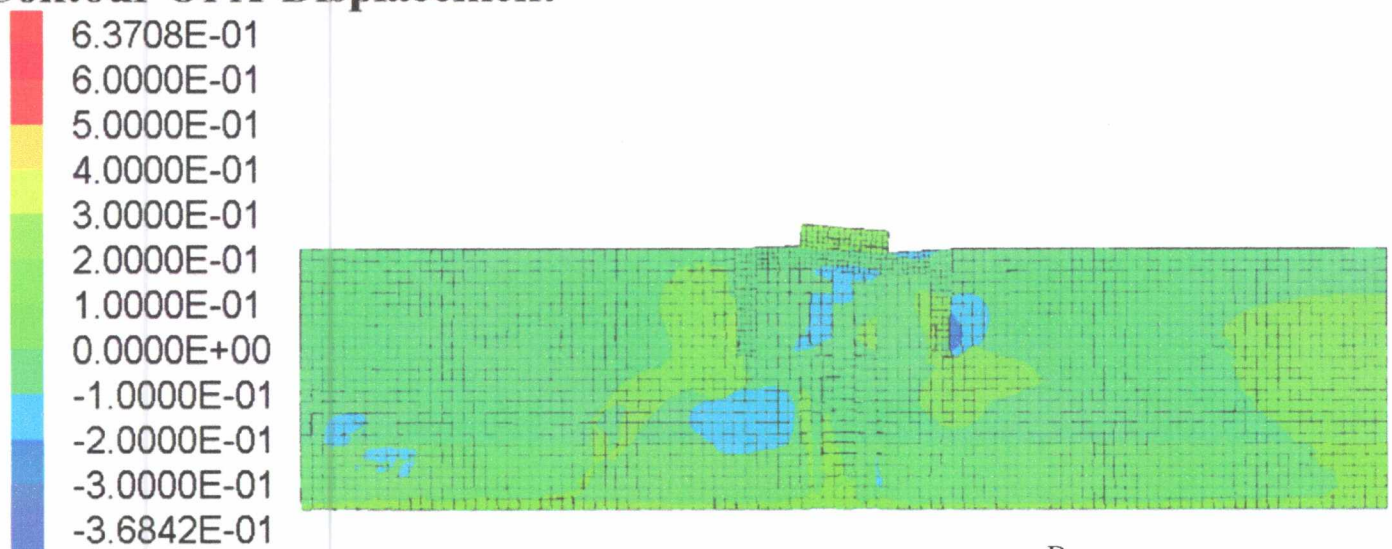
Σχ.4.10: Μετατοπίσεις κατά z κοίλου ανεστραμμένου φρέατος με λόγο έμπτυξης $\frac{D}{B} = 0.5$ λόγω σεισμικής καταπόνησης.

Contour Of X-Displacement



Σχ.4.11: Μετατοπίσεις κατά x κοίλου ανεστραμμένου φρέατος με λόγο έμπτυξης $\frac{D}{B} = 0.2$ λόγω σεισμικής καταπόνησης.

Contour Of X-Displacement

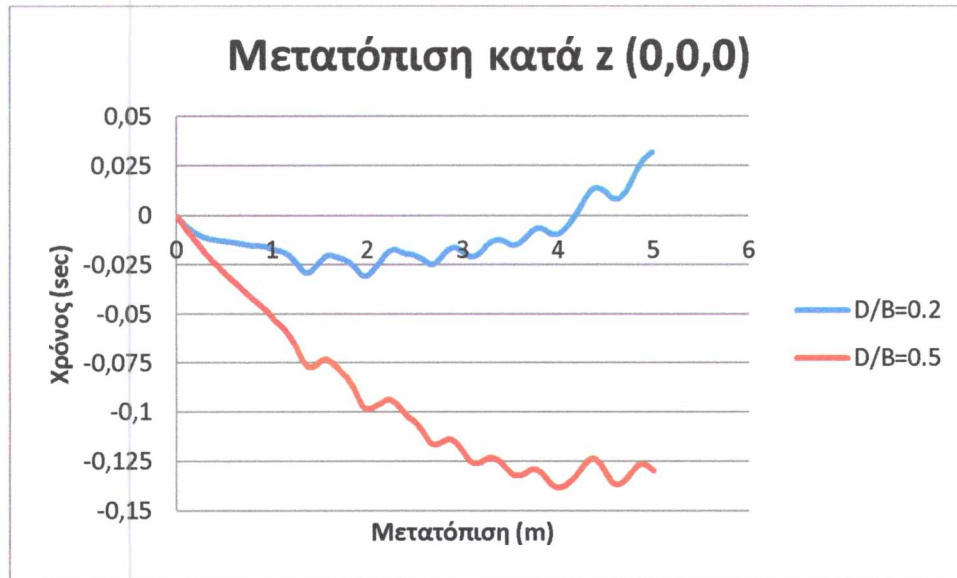


Σχ.4.12: Μετατοπίσεις κατά x κούλου ανεστραμμένου φρέατος με λόγο έμψηξης $\frac{D}{B} = 0.5$ λόγω σεισμικής καταπόνησης.

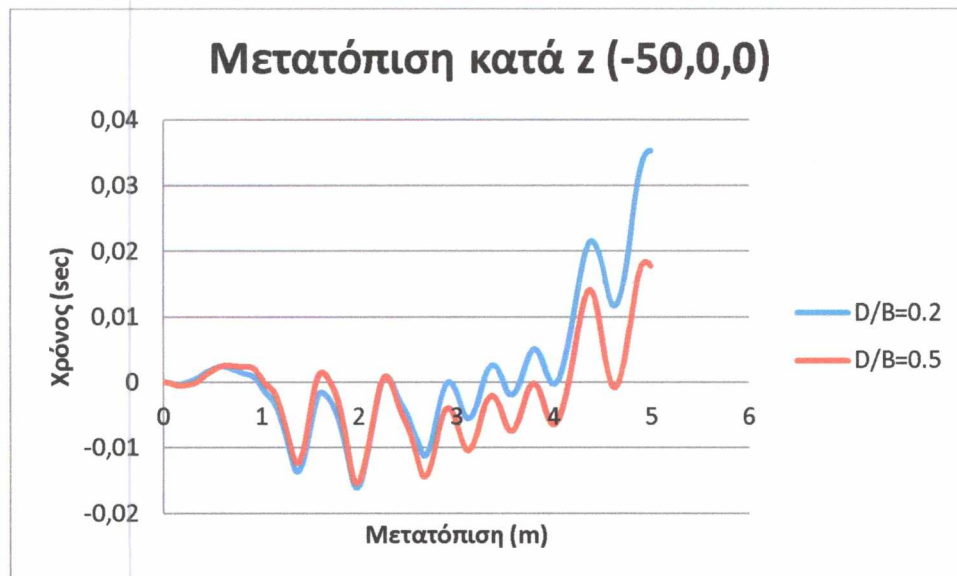
Στα 2 παραπάνω σχήματα παρουσιάζεται η μετατόπιση ως προς τον x άξονα του συστήματος και για τους 2 λόγους έμψηξης υπό σεισμική καταπόνηση. Μεγαλύτερες μετατοπίσεις στον μικρό λόγο έμψηξης παρουσιάζονται κυρίως κάτω από το φρέαρ και στα αριστερά του.

Από την άλλη πλευρά στο σχήμα 4.12 φαίνονται οι μετατοπίσεις ως προς x για τον μεγάλο λόγο έμψηξης. Τα σημεία που μετατοπίζονται περισσότερο είναι εκείνα που βρίσκονται στη εξωτερική πλευρά της δεξιάς 'ποδιάς' του φρέατος και είναι περίπου ίσες με -0,36 m. Επίσης, η μεταλλική βάση στην αριστερή της πλευρά υφίσταται σημαντικές μετατοπίσεις.

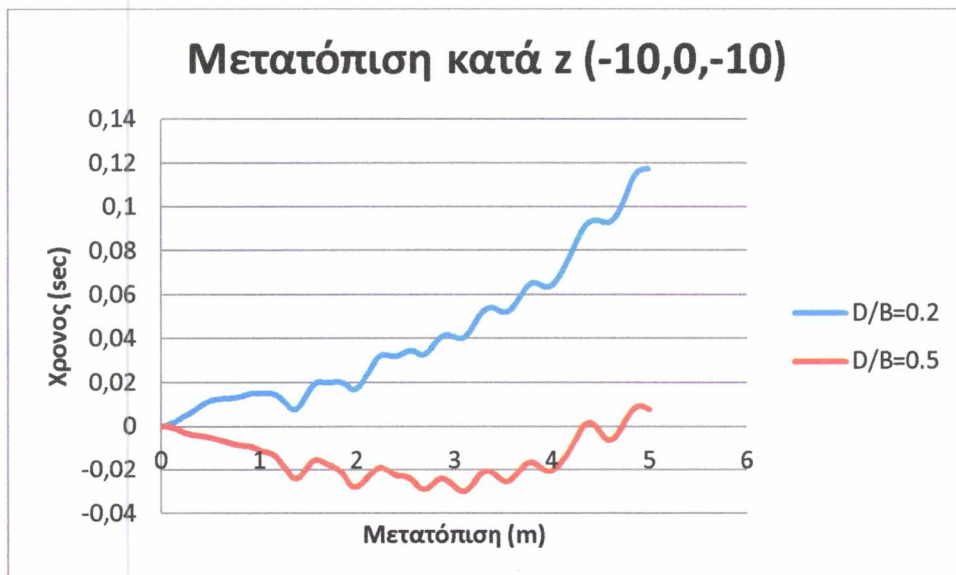
Μετατοπίσεις σημείων:



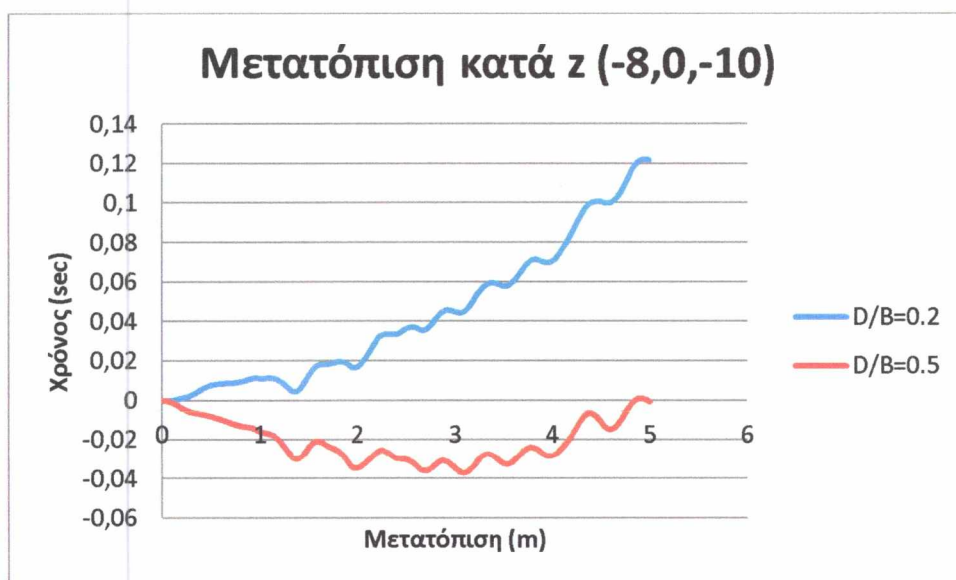
Σχ.4.13: Μετατόπιση σημείου 0,0,0 για λόγους έμπηξης $\frac{D}{B} = 0.2$, $\frac{D}{B} = 0.5$ υπό σεισμική διέγερση.



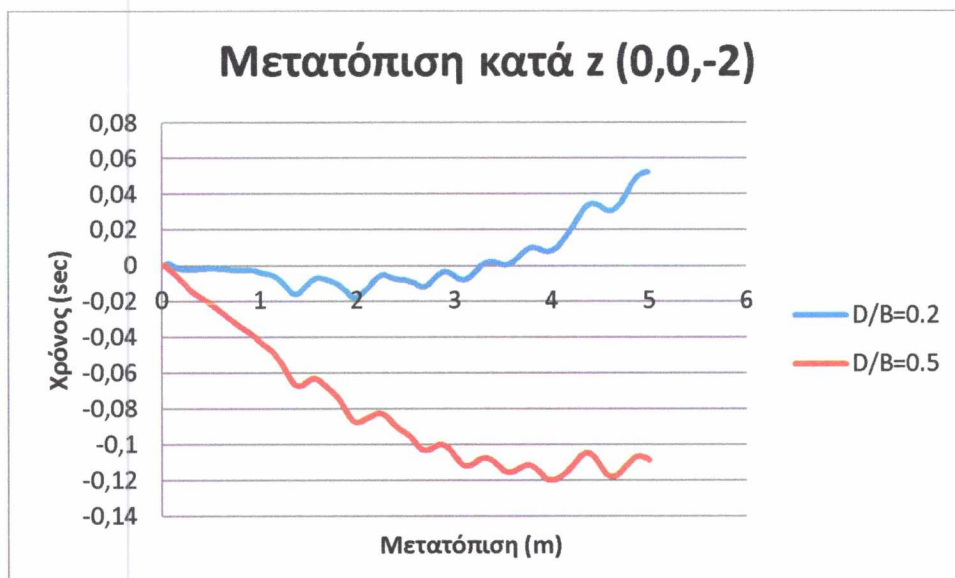
Σχ.4.14: Μετατόπιση σημείου -50,0,0 για λόγους έμπηξης $\frac{D}{B} = 0.2$, $\frac{D}{B} = 0.5$ υπό σεισμική διέγερση.



Σχ.4.15: Μετατόπιση σημείου -10,0,-10 για λόγους έμπτυξης $\frac{D}{B} = 0.2$, $\frac{D}{B} = 0.5$ υπό σεισμική διέγερση.



Σχ.4.16: Μετατόπιση σημείου -8,0,-10 για λόγους έμπτυξης $\frac{D}{B} = 0.2$, $\frac{D}{B} = 0.5$ υπό σεισμική διέγερση.



Σχ.4.17: Μετατόπιση σημείου 0,0,-2 για λόγους έμπτυξης $\frac{D}{B} = 0.2$, $\frac{D}{B} = 0.5$ υπό σεισμική διέγερση.

Στα σχήματα 4.13 έως 4.17 παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις κατά την διεύθυνση z μερικών από τα σημεία του συστήματος μας. Η αρχή των αξόνων βρίσκεται στην μέση του ανεστραμμένου φρέαρ στην επιφάνεια του εδάφους.

Αρχικά, στο σχήμα 4.13 παρουσιάζεται η μετατόπιση του σημείου (0,0,0) η οποία για λόγο έμπτυξης 0.2 είναι θετική δηλαδή το σημείο μετατοπίζεται προς τα πάνω 0.03 m. Ομοίως, το ίδιο σημείο με λόγο έμπτυξης 0.5 μετατοπίζεται αρνητικά προς τα κάτω κατά 0.13 m.

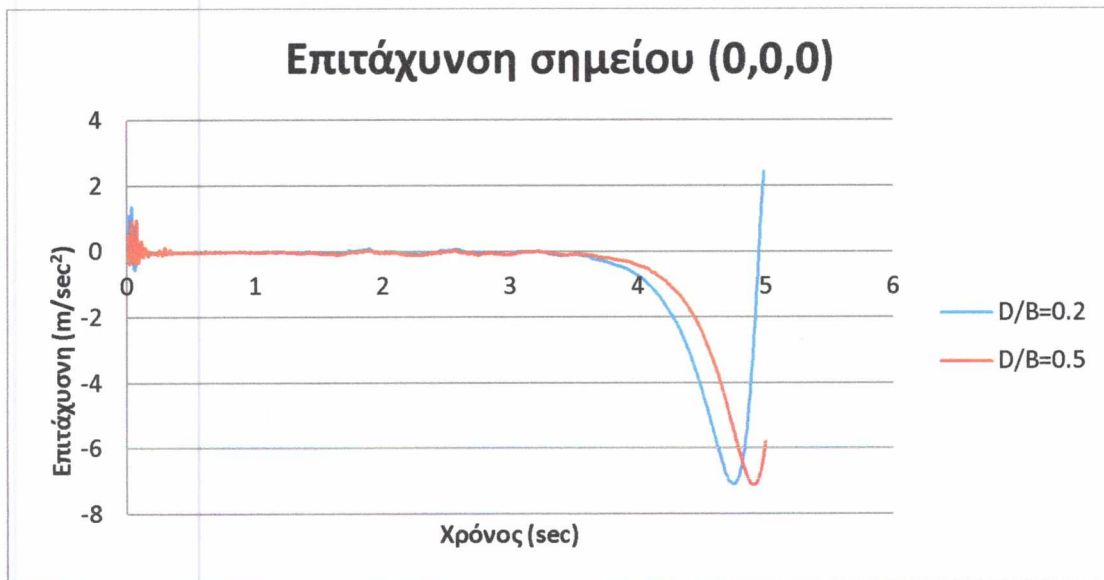
Εν συνεχεία, φαίνεται στο σχήμα 4.14 η μετατόπιση του σημείου που βρίσκεται στην δεξιά άκρη του εδάφους μας (-50,0,0). Οι καμπύλες παρουσιάζουν την ίδια μορφή για λόγο έμπτυξης 0.2 και 0.5 και πρακτικά παρόμοιες τιμές βύθισης.

Στα σχήματα 4.15, 4.16 τα σημεία με μικρότερο λόγο έμπτυξης μετατοπίζονται περισσότερο.

Επιπλέον, μέσω του σχήματος 4.17 προκύπτει ότι το σημείο με συντεταγμένες (0,0,-2) με μεγάλο λόγο έμπτυξης λαμβάνει μεγαλύτερες αρνητικές μετατοπίσεις σε σχέση με τον άλλο λόγο έμπτυξης.

Συμπερασματικά, παρατηρήθηκε σημαντική στροφική μετακίνηση στην περίπτωση του λόγου έμπτυξης 0.2 σε σχέση με τον λόγο 0.5. Τέλος, το έδαφος κάτω από την θεμελίωση παίρνει μεγαλύτερες κατακόρυφες μετακινήσεις στην περίπτωση του μεγάλου λόγου έμπτυξης. Αυτό εξηγείται με την αύξηση του βάρους και του βάθους έμπτυξης της ποδιάς του φρέατος.

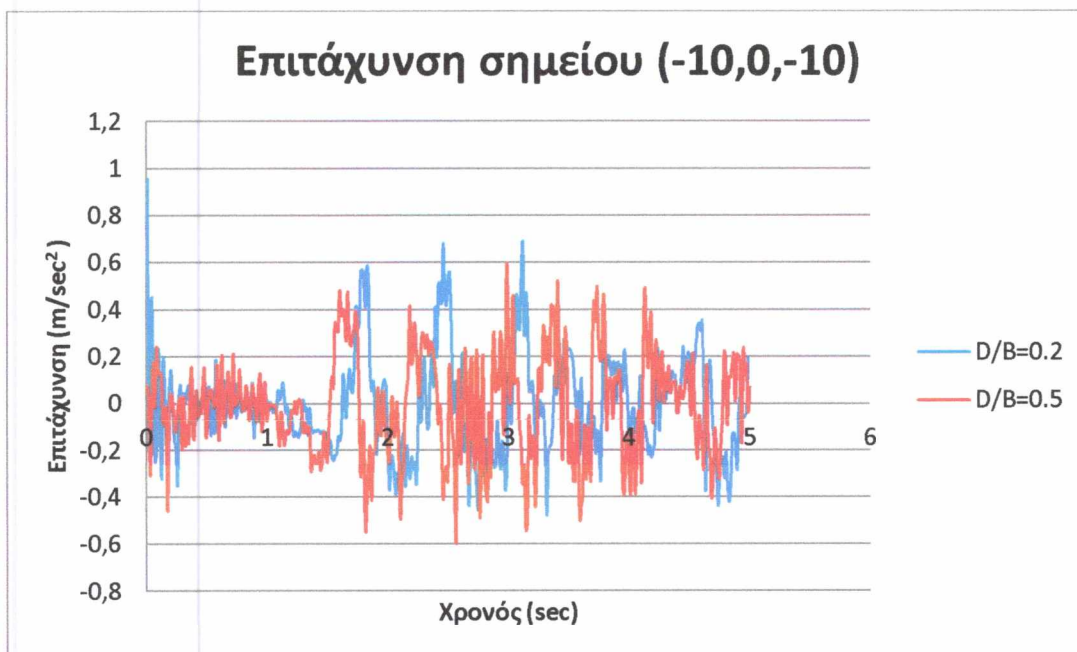
Επιταχύνσεις σημείων:



Σχ.4.18: Επιτάχυνση σημείου 0,0,0 για λόγους έμπτυξης $\frac{D}{B} = 0.2$, $\frac{D}{B} = 0.5$ υπό σεισμική διέγερση.



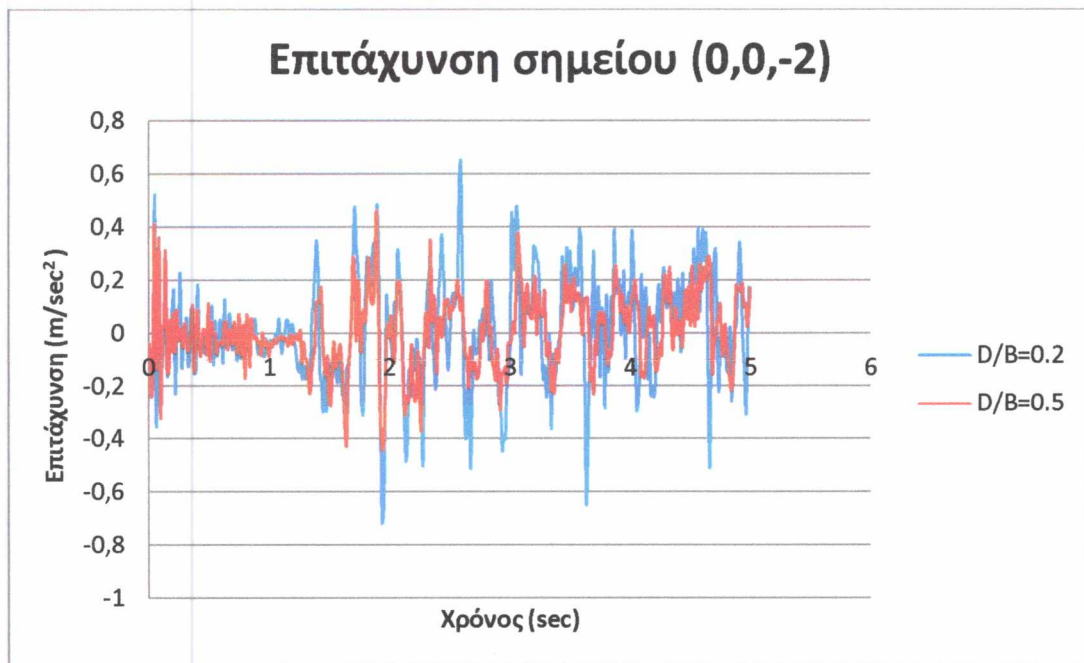
Σχ.4.19: Επιτάχυνση σημείου -24,0,0 για λόγους έμπτυξης $\frac{D}{B} = 0.2$, $\frac{D}{B} = 0.5$ υπό σεισμική διέγερση.



Σχ.4.20: Επιτάχυνση σημείου -10,0,-10 για λόγους έμπτυξης $\frac{D}{B} = 0.2$, $\frac{D}{B} = 0.5$ υπό σεισμική διέγερση.



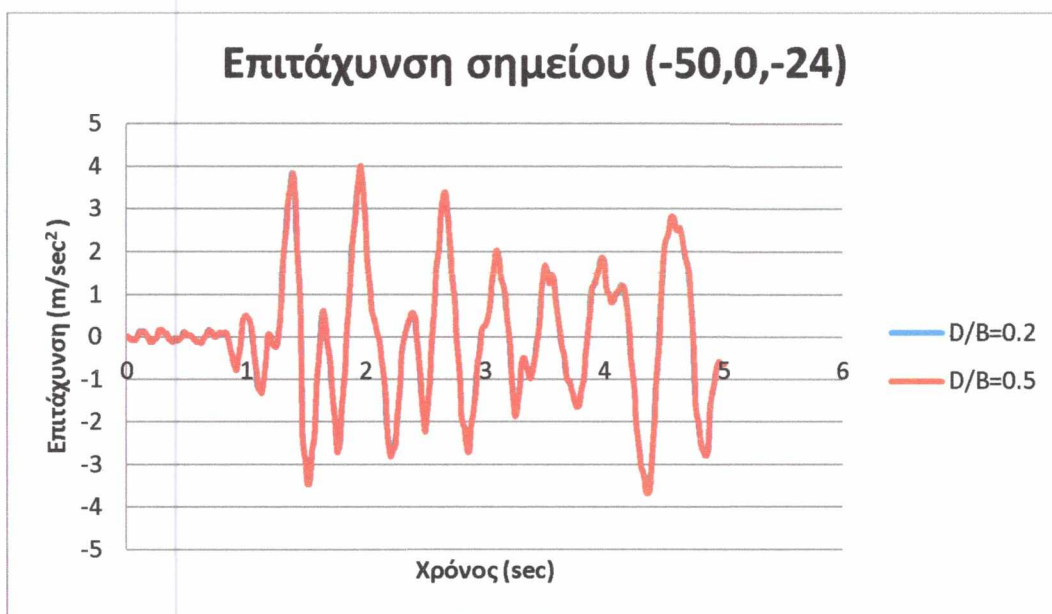
Σχ.4.21: Επιτάχυνση σημείου -8,0,-10 για λόγους έμπτυξης $\frac{D}{B} = 0.2$, $\frac{D}{B} = 0.5$ υπό σεισμική διέγερση.



Σχ.4.22: Επιτάχυνση σημείου 0,0,-2 για λόγους έμπτυξης $\frac{D}{B} = 0.2$, $\frac{D}{B} = 0.5$ υπό σεισμική διέγερση.



Σχ.4.23: Επιτάχυνση σημείου 0,0,-24 για λόγους έμπηξης $\frac{D}{B} = 0.2$, $\frac{D}{B} = 0.5$ υπό σεισμική διέγερση.



Σχ.4.24: Επιτάχυνση σημείου -50,0,-24 για λόγους έμπηξης $\frac{D}{B} = 0.2$, $\frac{D}{B} = 0.5$ υπό σεισμική διέγερση.

Στα σχήματα 4.18 έως 4.24 παραθέτονται τα διαγράμματα των επιταχύνσεων ορισμένων σημαντικών σημείων του συστήματος μας.

Στο σχήμα 4.18 παρουσιάζεται η επιτάχυνση του σημείου με συντεταγμένη (0,0,0). Για λόγο έμπηξης 0.2 η μέγιστη επιτάχυνση είναι $7 \frac{m}{sec^2}$ και εμφανίζεται στα 4.2 sec. Για τον μεγάλο λόγο έμπηξης η μέγιστη επιτάχυνση είναι περίπου η ίδια και εμφανίζεται 0.1 sec αργότερα.

Στο σημείο (-24,0,0) με τον μικρό λόγο έμπηξης έχει ακριβώς την ίδια επιτάχυνση με τον μεγάλο λόγο η οποία είναι $-0.9 \frac{m}{sec^2}$.

Στο διάγραμμα του σχήματος 4.20 εμφανίζεται η επιτάχυνση του σημείου (-10,0,-10). Το μέγιστο του λόγου έμπηξης 0.2 συμβαίνει στην αρχή του σεισμού και είναι $0.9 \frac{m}{sec^2}$. Στο ίδιο διάγραμμα στα 2.5 sec ο μεγάλος λόγος έμπηξης έχει μέγιστο $-0.6 \frac{m}{sec^2}$.

Παρατηρώντας το σχήμα 4.21 μπορεί να βγει το συμπέρασμα ότι το σημείο αυτό με λόγο έμπηξης 0.2 έχει μέγιστο $1.2 \frac{m}{sec^2}$ μετά από 0.1 sec από την αρχή του σεισμού. Ο λόγος έμπηξης 0.5 έχει μέγιστο $-1.47 \frac{m}{sec^2}$ στην αρχή του σεισμού.

Στο σχήμα 4.22 εμφανίζεται η επιτάχυνση του σημείου που είναι στο κέντρο του καννάβου κάτω από το φρέαρ. Ο μικρός λόγος έμπηξης έχει μέγιστο $0.65 \frac{m}{sec^2}$ στα 2.55 sec ενώ ο λόγος έμπηξης 0.5 έχει μέγιστο $0.47 \frac{m}{sec^2}$ στα 1.7 sec.

Στα σχήματα 4.23, 4.24 εμφανίζεται η επιτάχυνση (0,0,-24) και (-50,0,-24) στα οποία οι 2 λόγοι έμπηξης εμφανίζουν ακριβώς την ίδια μορφή. Η μέγιστη επιτάχυνση είναι $4 \frac{m}{sec^2}$ στα 2 sec.

Από τα επιταχυνσιογραφήματα που εξήχθησαν καταλαβαίνουμε ότι:

- Στο έδαφος γίνεται απομείωση των επιταχύνσεων περίπου στο 1/3 αυτών που επιβλήθηκαν στην βάση (0.4g).

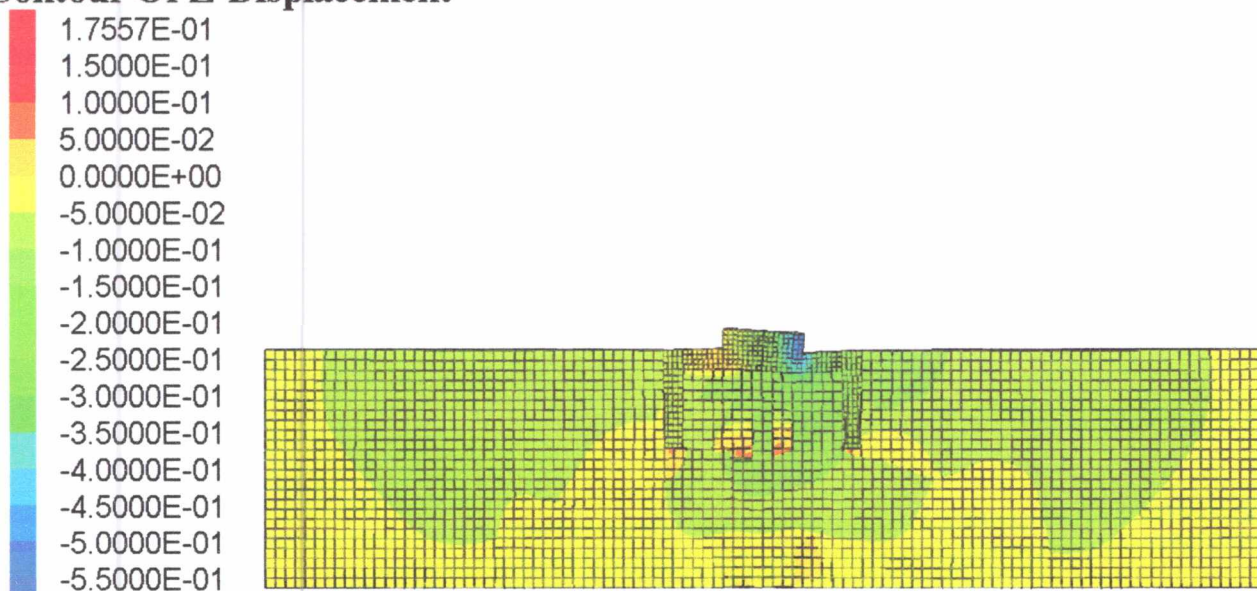
- Στην περιοχή του θεμελίου όπου εδράζεται ο πυλώνας παρατηρείται σημαντική μεγέθυνση περίπου 150 %. Αυτό οφείλεται στην σημαντική δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ εδάφους και κατασκευής.

4.5.2 Αποτελέσματα καταπόνησης λόγω ανέμου-κύματος

Στα σχήματα 4.25,4.26 παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις κατά z του συστήματος μας που οφείλονται στα φορτία ανέμου-κύματος. Στο 4.25 παρατηρείται, στο αριστερό τμήμα της μεταλλικής βάσης μία μετατόπιση 0.175 m. Από την άλλη, το δεξί τμήμα της βάσης παίρνει μια μετατόπιση περίπου 0.55 m προς τα κάτω. Στο κοίλο ανεστραμμένο φρέαρ δεν σημειώνονται μεγάλες μετατοπίσεις (της τάξης -0.1 m). Συνολικά η θεμελίωση επηρεάζεται από τις μετατοπίσεις της μεταλλικής βάσης.

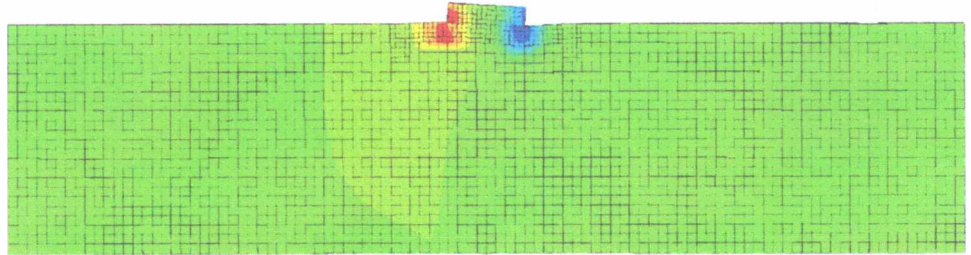
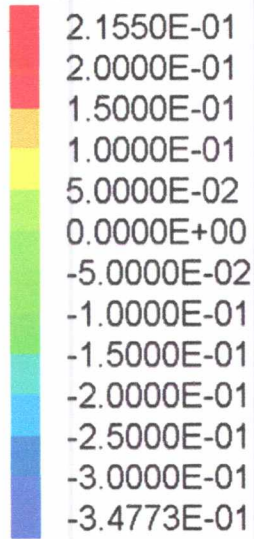
Το σχήμα 4.26 παρουσιάζει τις μετακινήσεις που υφίσταται το σύστημα θεμέλιο-βάση υπό ανεμική-κυματική διέγερση. Μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι, το φρέαρ και η μεταλλική βάση μετατοπίζονται θετικά κατά 0.2155 m από την αριστερή πλευρά τους. Αντίθετα, η άλλη πλευρά παίρνει αρνητική μετατόπιση περίπου ίση με 0.35 m.

Contour Of Z-Displacement



Σχ.4.25: Μετατοπίσεις κοίλου ανεστραμμένου φρέατος με λόγο έμπηξης $\frac{D}{B} = 0.5$ λόγω ανεμικής -
κυματικής καταπόνησης.

Contour Of Z-Displacement

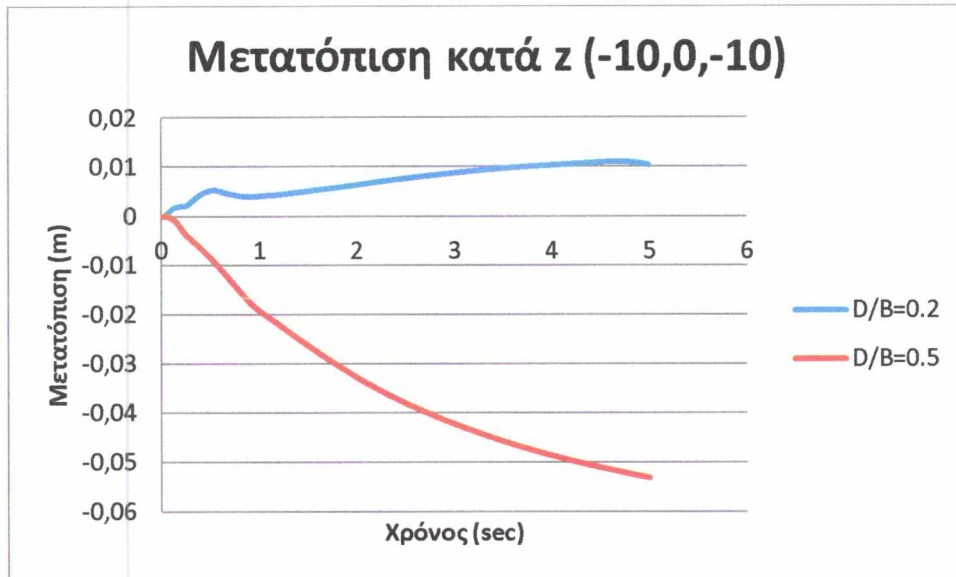


Σχ.4.26 : Μετατοπίσεις κοίλου ανεστραμμένου φρέατος με λόγο έμπηξης $\frac{D}{B} = 0.2$ λόγω ανεμικής - κυματικής καταπόνησης.

Μετατοπίσεις σημείων:



Σχ.4.27: Μετατόπιση σημείου 0,0,0 για λόγους έμπηξης $\frac{D}{B} = 0.2$, $\frac{D}{B} = 0.5$ υπό ανεμική-κυματική διέγερση.



Σχ.4.28: Μετατόπιση σημείου -10,0,-10 για λόγους έμπηξης $\frac{D}{B} = 0.2$, $\frac{D}{B} = 0.5$ υπό ανεμική-κυματική διέγερση.



Σχ.4.29: Μετατόπιση σημείου 0,0,-2 για λόγους έμπηξης $\frac{D}{B} = 0.2$, $\frac{D}{B} = 0.5$ υπό ανεμική-κυματική διέγερση.



Σχ.4.30: Μετατόπιση σημείου -8,0,-10 για λόγους έμπτυξης $\frac{D}{B} = 0.2$, $\frac{D}{B} = 0.5$ υπό ανεμική-
κυματική διέγερση.

Αρχικά, στο σχήμα 4.27 παρουσιάζεται η μετατόπιση του σημείου (0,0,0) η οποία για λόγο έμπτυξης 0.2 είναι αρνητική δηλαδή το σημείο μετατοπίζεται προς τα κάτω 0.062 m. Ομοίως, το ίδιο σημείο με λόγο έμπτυξης 0.5 μετατοπίζεται αρνητικά προς τα κάτω κατά 0.185 m.

Όσον αφορά το σχήμα 4.28 4.30 η μετατόπιση και για τους 2 λόγους έμπτυξης έχει όμοια μορφή. Με λόγο έμπτυξης 0.2 η μέγιστη τιμή είναι 0.01 m, ενώ για 0.5 λόγο έμπτυξης η μέγιστη τιμή φτάνει μέχρι -0.065 m και αυξάνεται ξανά.

Επιπλέον, μέσω του σχήματος 4.31 προκύπτει ότι το σημείο με συντεταγμένες (0,0,-2) με μεγάλο λόγο έμπτυξης λαμβάνει μεγαλύτερες αρνητικές μετατοπίσεις σε σχέση με τον άλλο λόγο έμπτυξης.

Το σχήμα 4.29 φαίνεται η μετατόπιση του σημείου 0,0,-2 το οποίο για το φρέαρ με μικρό λόγο έμπτυξης οι μετατοπίσεις είναι -0.04 m ενώ για τον μεγάλο λόγο φτάνουν μέχρι -0.017 m.

Συμπερασματικά, παρατηρούμε ότι για την περίπτωση της ανεμικής-κυματικής διέγερσης η εικόνα των αποτελεσμάτων είναι παρόμοια με αυτήν της σεισμικής διέγερσης. Δηλαδή το φρέαρ με λόγο έμπτυξης 0.2 τείνει να στραφεί

δεξιόστροφα ενώ το άλλο φρέαρ τείνει να βυθιστεί κατακόρυφα επιφέροντας ανάλογες μετακινήσεις στο υποκείμενο έδαφος.

Λόγω των περιορισμών της ανάλυσης μας τα σημεία που βρίσκονται στην κάτω επιφάνεια έχουν μετατόπιση ίση με μηδέν.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

Στην παρούσα μελέτη διερευνήθηκε η συμπεριφορά του συστήματος κοίλου ανεστραμμένου φρέατος-μεταλλικής βάσης υπό συνθήκες σεισμικής-ανεμικής-κυματικής καταπόνησης. Όσον αφορά τις 3 προαναφερθείσες φορτίσεις προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Για τους 2 λόγους έμπηξης παρατηρείται μετατόπιση-στροφή του συστήματος φρέατος-μεταλλικής βάσης.
- Για τον λόγο έμπηξης 0.5 παρατηρούνται πιο ήπιες μετακινήσεις και στροφές από τον λόγο 0.2, αν και οι μέγιστες μετακινήσεις κατά απόλυτη τιμή σημειώνονται στην πρώτη περίπτωση.
- Στο λόγο έμπηξης 0.5 τείνει το θεμέλιο να μετατοπιστεί προς τα κάτω, ενώ στο μικρότερο λόγο έμπηξης το παρουσιάζει εντονότερη στροφική μετακίνηση.

Όσον αφορά την σεισμική φόρτιση προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η απομείωση των επιταχύνσεων περίπου στο 1/3 αυτών που επιβλήθηκαν στην βάση (0.4g) οφείλεται στις ιδιότητες του εδάφους.
- Στην περιοχή του θεμελίου όπου εδράζεται ο πυλώνας παρατηρείται μεγέθυνση των επιταχύνσεων που επιβλήθηκαν (από 0.4g σε 0.6g). Αυτό οφείλεται στις διαφορετικές ιδιότητες και ιδιοσυχνότητες του θεμελίου της επιβληθείσας διέγερσης.

Παρατηρούμε ότι το θεμέλιο με τον λόγο έμπηξης 0.5 τείνει να μετατοπιστεί κατακόρυφα και όχι να στραφεί επιτυχάνοντας έτσι συνθήκες καλύτερης πάκτωσης στην θεμελίωση. Συνεπώς καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το θεμέλιο με μεγαλύτερο λόγο έμπηξης συμπεριφέρεται καλύτερα και κρίνεται ασφαλέστερη η επιλογή του.

Κεφάλαιο 6: Βιβλιογραφία

1. Aligi Foglia, Guido Gottardi, Laura Govoni, Lars Bo Ibsen (2014), Modelling the drained response of bucket foundations for offshore wind turbines under general monotonic and cyclic loading, *Engineering Structures* 57 (2013) 443–452.
2. Byrne, B. W. (2000). Investigations of suction caissons in dense sand. *DPhil Thesis*. University of Oxford.
3. Byrne, B. W. and Houlsby, G. T. (2003). Foundations for offshore wind turbines. *Phil Trans of the Royal Society London*, 361, pp 2909-2930.
4. Byrne, B.W., Houlsby, G.T., Martin, C.M. and Fish, P.M. (2002). Suction caisson foundations for offshore wind turbines. *Journal of Wind Engineering* 26, No 3, 145-155
5. Felipe A. Villalobos, Byron W. Byrne, Guy T.Houlsby (2010). Model testing of suction caissons in clay subjected to vertical loading, *Applied Ocean Research* 32 (2010) 414–424
6. FLAC^{3D} VERSION 5.01 Advanced Three Dimensional Continuum Modeling for Geotechnical Analysis of Rock, Soil and Structural Support.
7. Kourkoulis R., P. Lekakakis, F. Gelagoti, A. Kaynia (2014). “Suction caisson foundations for offshore wind turbines subjected to wave and earthquake loading: effect of soil–foundation interface”, *Géotechnique*, Vol. 63, pp.1-15.
8. Kun-TanChang, Dong-Sheng Jeng (2014). Numerical study for wave-induced seabed response around offshore wind turbine foundation in Donghai offshore wind farm, Shanghai, China, *Ocean Engineering* 85 (2014)32–43.
9. S. Madsen , L.V. Andersen, L.B. Ibsen (2013). Numerical buckling analysis of large suction caissons for wind turbines on deep water, *Engineering Structures* 57 (2013) 443–452.
10. Villalobos, F.A. (2004). An experimental study of cyclically loaded monopod suction caisson foundations for offshore wind turbines. Eighth Young Geotechnical Engineer’s Symposium, BGA, Birmingham



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000125566