



Διπλωματική Εργασία  
**ΟΛΓΑΣ-ΛΗΔΑΣ ΧΡΗΣΤΟΥ**

Diploma thesis by  
**OLGA-LIDA CHRISTOU**

Επιβλέποντες:  
**Καθηγητής Γ.Γκαζέτας**  
**Επίκ. Καθηγητής Ι.Αναστασόπουλος**

Supervised by:  
**Professor G.Gazetas**  
**As. Professor. I.Anastasopoulos**

Αριθμητική ανάλυση της θεμελίωσης θαλάσσιων  
ανεμογεννητριών με **ΜΟΝΟΠΑΣΣΑΛΟΥΣ**



Finite element analysis of **MONOPILE** for  
Offshore Wind Turbines







## Ευχαριστίες

Στο τέλος κάθε μεγάλης προσπάθειας νιώθω την ανάγκη να εκφράσω τον θαυμασμό και την ευγνωμοσύνη για όλους αυτούς που ήταν δίπλα μου και με βοήθησαν να φτάσω στον στόχο μου.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω εκ βαθέων τον κ. Γ.Γκαζέτα, ο οποίος μέσα από τα μαθήματά του, με τις γνώσεις του και την καθοδήγηση του αποτέλεσε πηγή έμπνευσης για το πολύ όμορφο ταξίδι της διπλωματικής μου εργασίας.

Ιδιαίτερη μνεία και θερμά «ευχαριστώ» θα ήθελα να αφιερώσω στον επίκουρο καθηγητή κ. Ι. Αναστασόπουλο για την καθημερινή καθοδήγηση, υποστήριξη και συμπαράσταση.

Επίσης, ευχαριστώ πολύ τον Ρ.Κουρκουλή και την Φ.Γελαγώτη για τις πολύτιμες συμβουλές αλλά και όλα τα μέλη του εργαστηρίου που με βοήθησαν άμεσα ή έμμεσα.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, τους φίλους μου και συμφοιτητές μου που ήταν πάντα δίπλα μου σε κάθε βήμα όλα αυτά τα χρόνια.



## Περίληψη

Ο σκοπός της εργασίας είναι η αριθμητική ανάλυση και ο σχεδιασμός θεμελιώσεων υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Πιο συγκεκριμένα, η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην μελέτη και πλήρη κατανόηση της απόκρισης του μονοπασσάλου υπό στατική και ανακυκλική φόρτιση.

Τα τελευταία είκοσι χρόνια ο κλάδος της αιολικής ενέργειας έχει γνωρίσει ιδιαίτερη άνθιση μέσω των υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Οι κατασκευές αυτές αποτελούν μια ιδιαίτερη κατηγορία καθώς είναι ένα σύστημα ελαφριά φορτισμένο με εξαιρετικά υψίκορμη ανωδομή που καλείται να αντέξει εκατομμύρια κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης λόγω των συνθηκών του φυσικού τους περιβάλλοντος.

Το ερευνητικό ενδιαφέρον της εργασίας αφορά τους εμπηγνυόμενους μονοπασάλλους με λόγους έμπηξης  $L/D=4, 5, 6, 7$ . Στο πρώτο στάδιο της εργασίας καταγράφεται η φέρουσα ικανότητα του μονοπασσάλου υπό στατική και συνδυασμένη φόρτιση. Το σύνολο των αναλύσεων έγιναν για ομοιογενές αργιλικό έδαφος υπό αστράγγιστες συνθήκες και με θεώρηση μη-γραμμικοτήτων στην διεπιφάνεια εδάφους-θεμελίου. Ωστόσο, μελετήθηκε συγκριτικά και η επιρροή της ανομοιογένειας του εδάφους και της θεώρησης της πλήρους επαφής μεταξύ εδαφικών στοιχείων και μονοπασσάλου.

Στην συνέχεια, αναλύθηκαν και καταγράφηκαν η οριζόντια μετακινησιακή και στροφική δυσκαμψία του μονοπασσάλου, καθώς και η επίδραση της ενδοσιμότητας του εδάφους στην ιδιοπερίοδο της κατασκευής.

Ιδιαίτερης σημασίας ήταν η ανάλυση της ανακυκλικής φόρτισης της κατασκευής. Μελετήθηκαν τρεις συνδυασμοί φόρτισης δυνάμεων ανέμου και κυμάτων για τις τρεις πιο χαρακτηριστικές περιπτώσεις ανεμογεννητριών 2MW (μικρή), 3.5 MW (μέση), 5 MW (μεγάλη ανεμογεννήτρια). Επικεντρωθήκαμε κυρίως στην απόκριση της θεμελίωσης σε όρους ροπής, παραμένουσας στροφής και καθιζήσεων, καθώς και στην απομείωση της στροφικής δυσκαμψίας με την πάροδο των κύκλων. Προτάθηκε στην συνέχεια μια πρόβλεψη της παραμένουσας στροφής ύστερα από εκατομμύρια κύκλους φόρτισης.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

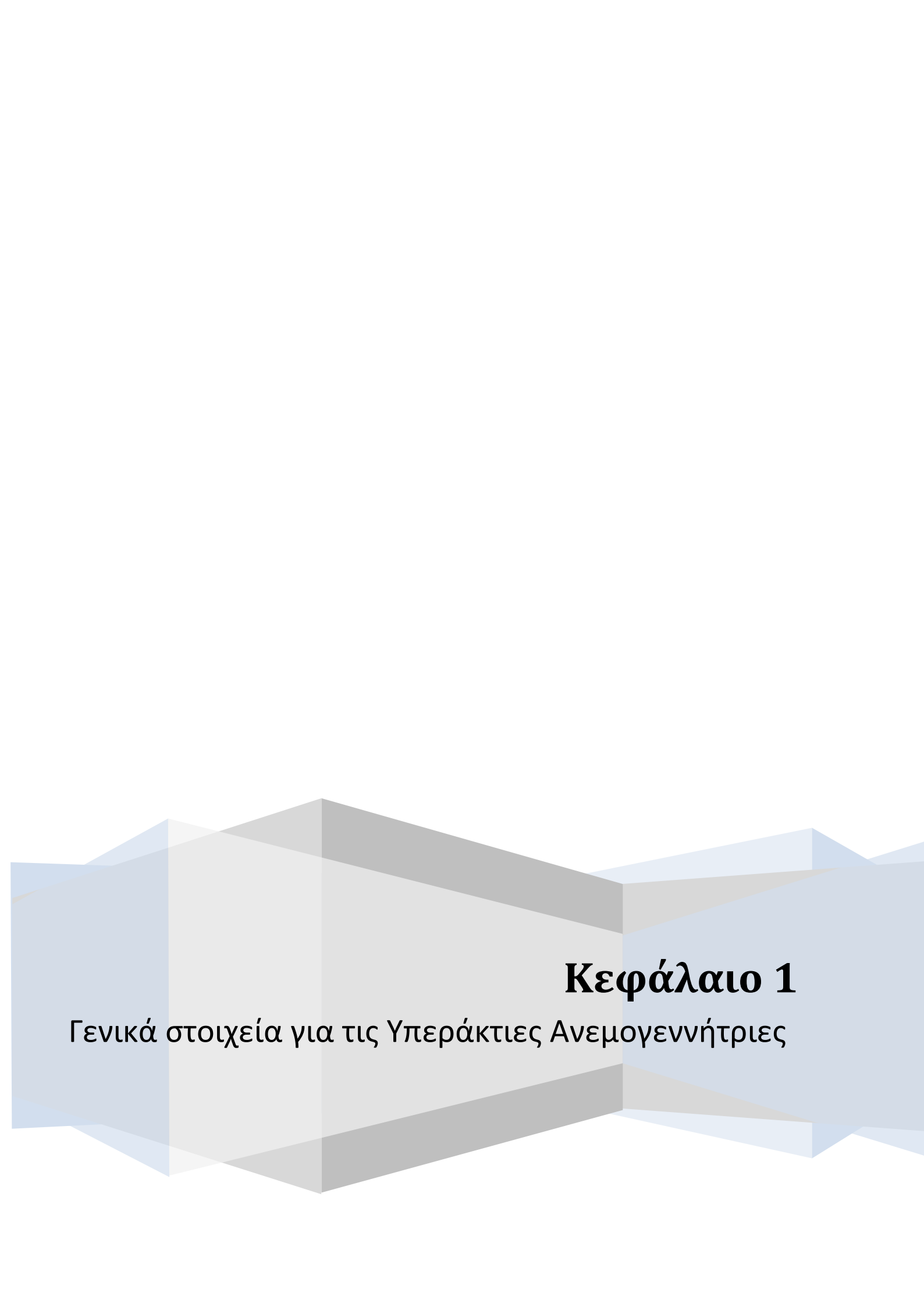
<b>Κεφάλαιο 1 – Γενικά στοιχεία για τις Υπεράκτιες Ανεμογεννήτριες</b>	<b>11</b>
1.1 Εισαγωγή	11
1.2 Offshore Vs Onshore Ανεμογεννητριών	12
1.3 Υφιστάμενα και μελλοντικά Αιολικά Πάρκα –Συγκεντρωτικά στοιχεία	13
1.4 Χαρακτηριστική offshore ανεμογεννήτρια και τρόπος λειτουργίας της	18
1.5 Είδη θεμελιώσεων ανεμογεννητριών	20
<b>Κεφάλαιο 2 – Βιβλιογραφική Ανασκόπηση</b>	<b>25</b>
2.1 Εισαγωγή	25
2.2 Κατηγορίες Πασσάλων και Τρόποι Εγκατάστασης	27
2.3 Φέρουσα Ικανότητα	29
2.3.1 Αντοχή σε κατακόρυφη φόρτιση	29
2.3.2 Αντοχή σε πλευρική φόρτιση	32
2.3.3 Περιβάλλουσα αστοχίας υπό συνδυασμένη φόρτιση M-H-V	35
2.4 Ελαστικές Δυσκαμψίες	39
2.5 Ανακυκλική Φόρτιση	41
2.6 Φορτίσεις Ανεμογεννήτριας	43
2.6.1 Εισαγωγή	43
2.6.2 Δύναμη του ανέμου ως συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου	44
2.6.3 Δυνάμεις λόγω θαλάσσιων κυματισμών	44
2.6.4 Δυνάμεις λόγω θαλάσσιων ρευμάτων	45
<b>Κεφάλαιο 3 – Τεχνική Προσέγγιση του Προβλήματος</b>	<b>49</b>
3.1 Σκοπός της εργασίας	49
3.2 Τεχνική προσέγγιση του προβλήματος	50
3.2.1 Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων	50
3.2.2 Καταστατικό μοντέλο εδάφους	52
3.2.3 Σύμβαση πρόσημου και σύμβαση συμβόλων	55
3.2.4 Στατική φόρτιση	56
3.2.5 Διαγράμματα αλληλεπίδρασης	56

3.2.6 Μονοτονική φόρτιση –Δυσκαμψίες	56
3.2.7 Ανακυκλική Φόρτιση	57
<b>Κεφάλαιο 4 – Φέρουσα Ικανότητα Μονοπασσάλου</b>	<b>61</b>
4.1 Εισαγωγή	61
4.2 Παραμετρική Διερεύνηση	62
4.2.1 Παραμετρική διερεύνηση συντελεστή συνάφειας	63
4.2.2 Παραμετρική διερεύνηση πάχους τοιχωμάτων μονοπασσάλου	65
4.3 Φέρουσα ικανότητα	67
4.3.1 Αξονική δύναμη	67
4.3.2 Τέμνουσα δύναμη	70
4.3.3 Ροπή ανατροπής	73
4.3.4 Συνδυασμένη φόρτιση	75
4.3.4.1 Αλληλεπίδραση τέμνουσας δύναμης-ροπής ανατροπής	75
4.3.4.2 Αλληλεπίδραση αξονικής δύναμης-ροπής ανατροπής	83
4.3.4.3 Αλληλεπίδραση αξονικής δύναμης-τέμνουσας δύναμης	85
4.4 Επιρροή θεώρησης πλήρους επαφής εδάφους-θεμελίου	87
4.4.1 Απλή φόρτιση θεμελίου	87
4.4.2 Συνδυασμένη φόρτιση	90
4.5 Επιρροή ανομοιογένειας εδάφους	93
<b>Κεφάλαιο 5 –Δυσκαμψίες Θεμελίωσης</b>	<b>103</b>
5. 1 Εισαγωγή	103
5.2 Μητρώο Δυσκαμψίας	103
5.3 Ιδιοπερίοδος και Ιδιομορφές της κατασκευής	110
<b>Κεφάλαιο 6 – Ανακυκλική Φόρτιση</b>	<b>121</b>
6.1. Εισαγωγή	121
6.2 Χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών και υπολογισμός φορτίων	122
6.3 Μονοτονική Φόρτιση	127
6.4 Ανακυκλική φόρτιση	132
6.4.1 Φόρτιση ανέμου μιας κατεύθυνσης	132
6.4.2 Φόρτιση ανέμου και κυματισμών διπλής κατεύθυνσης	141

6.4.3 Φόρτιση ανέμου μιας κατεύθυνσης και φόρτισης θαλάσσιων κυματισμών διπλής κατεύθυνσης	149
6.5. Συμπεράσματα	177
<b>Κεφάλαιο 7 – Συμπεράσματα</b>	<b>181</b>







# **Κεφάλαιο 1**

Γενικά στοιχεία για τις Υπεράκτιες Ανεμογεννήτριες



## Κεφάλαιο 1 – Γενικά στοιχεία για τις Υπεράκτιες Ανεμογεννήτριες

### 1.1 Εισαγωγή

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που απασχολεί τους μηχανικούς σήμερα είναι η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών κάθε χώρας. Καθώς προσανατολιζόμαστε προς μια περιβαλλοντικά ευαίσθητοποιημένη πολιτική, οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας αρχίζουν να παίζουν κυρίαρχο ρόλο. Ήδη, η Ευρωπαϊκή Ένωση απαιτεί τουλάχιστον το 20% της ενέργειας του κάθε κράτους-μέλους να προέρχεται από τις Α.Π.Ε. (ηλιακή ενέργεια, αιολική, υδραυλική, από βιομάζα, γεωθερμική και από την θάλασσα). Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και την δημιουργία καινοτόμων λύσεων, η αιολική ενέργεια φαίνεται να είναι πλέον η πιο υποσχόμενη από τις ήπιες μορφές ενέργειας.

Η αιολική ενέργεια είναι γνωστή από την αρχαιότητα (ιστιοφόρα πλοία, ανεμόμυλοι, αντλίες νερού), ωστόσο η ουσιαστική άνθιση αυτού του κλάδου ήρθε με την κατασκευή των πρώτων ανεμογεννητριών κατά τον 20<sup>ο</sup> αιώνα. Οι ανεμογεννήτριες εκμεταλλεύονται την κίνηση του ανέμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και χωρίζονται σε onshore (ανεμογεννήτριες ξηράς) και offshore (υπεράκτιες ή θαλάσσης).

Η offshore αιολική ενέργεια, δηλαδή η ενέργεια που παράγεται από ανεμογεννήτριες τοποθετημένες μέσα στην θάλασσα μακριά από την ακτή, μετρά ήδη 20 χρόνια. Η πρώτη εγκατάσταση έγινε στο Vindeby της Δανίας το 1991, όμως η πραγματική ανάπτυξη ήρθε 10 χρόνια αργότερα, με την εγκατάσταση στο Middelgrunden και κατόπιν στο Horns Rev όπου δημιουργήθηκε το πρώτο offshore αιολικό πάρκο σε απόσταση 20 km από την ακτή συνολικής ισχύς 160 MW. Σήμερα, το μεγαλύτερο θαλάσσιο αιολικό πάρκο είναι το Thanet (συνολική ισχύς 300 MW) στην Μεγάλη Βρετανία και ακολουθούν το Horns Rev II (209 MW) και Nysted (207 MW) στην Δανία.

Την τελευταία δεκαετία, εκτός από τη Δανία και την Μεγάλη Βρετανία έχουν κατασκευάσει αιολικά πάρκα στην Ιρλανδία, Σουηδία, Βέλγιο, Γερμανία, Ολλανδία, Ιαπωνία και Κίνα. Η Γαλλία, ο Καναδάς, η Ελλάδα, η Ινδία, οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και άλλες χώρες σχεδιάζουν τώρα να εκμεταλλευτούν αυτό το είδος ενέργειας.

Ο τομέας των offshore ανεμογεννητριών αναπτύσσεται συνεχώς, με τις νέες εγκαταστάσεις να είναι μεγαλύτερες, μακρύτερα από την ακτή, σε μεγαλύτερα βάθη και να αποδίδουν μεγαλύτερη ισχύ. Όσο αυξάνουν αυτά τα μεγέθη, αυξάνουν παράλληλα και οι κατασκευαστικές δυσκολίες και απαιτήσεις για ακριβέστερη πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους. Τα μηχανολογικά μέρη της ανεμογεννήτριας είναι συγκεντρωμένα στην κορυφή της, με αποτέλεσμα να είναι πολύ ευαίσθητη στις επιτρεπόμενες μετακινήσεις και στροφές. Ιδιαίτερη πρόκληση αποτελεί για τους γεωτεχνικούς μηχανικούς η θεμελίωση, καθώς οι συνθήκες είναι δυσμενείς (μεγάλο βάθος θάλασσας, χαμηλές εδαφικές ιδιότητες) και οι απαιτήσεις αυξημένες (μεγάλη ροπή ανατροπής, ανακυκλικός χαρακτήρας φόρτισης για χρόνο ζωής 20 έτη). Αξίζει να σημειωθεί ότι κάθε ανεμογεννήτρια έχει κόστος της τάξης των 10-15 εκατομμυρίων ευρώ, η δε τοποθέτηση και

συντήρηση της θεμελίωση μιας offshore ανεμογεννήτριας είναι περίπου το 35% της συνολικής της αξίας.

Παρά τις δυσκολίες, όπως όλα δείχνουν η offshore αιολική ενέργεια θα παίξει σημαντικό ρόλο στις ανανεώσιμες πηγές τα επόμενα χρόνια. Χώρες όπως η Ελλάδα, με υψηλό αιολικό δυναμικό στις θαλάσσιες περιοχές, θα μπορούσαν να την χρησιμοποιήσουν ευρέως για να καλύψουν σημαντικό ποσοστό των ετήσιων ενεργειακών αναγκών της χώρας.

## 1.2 Offshore Vs Onshore Ανεμογεννητριών

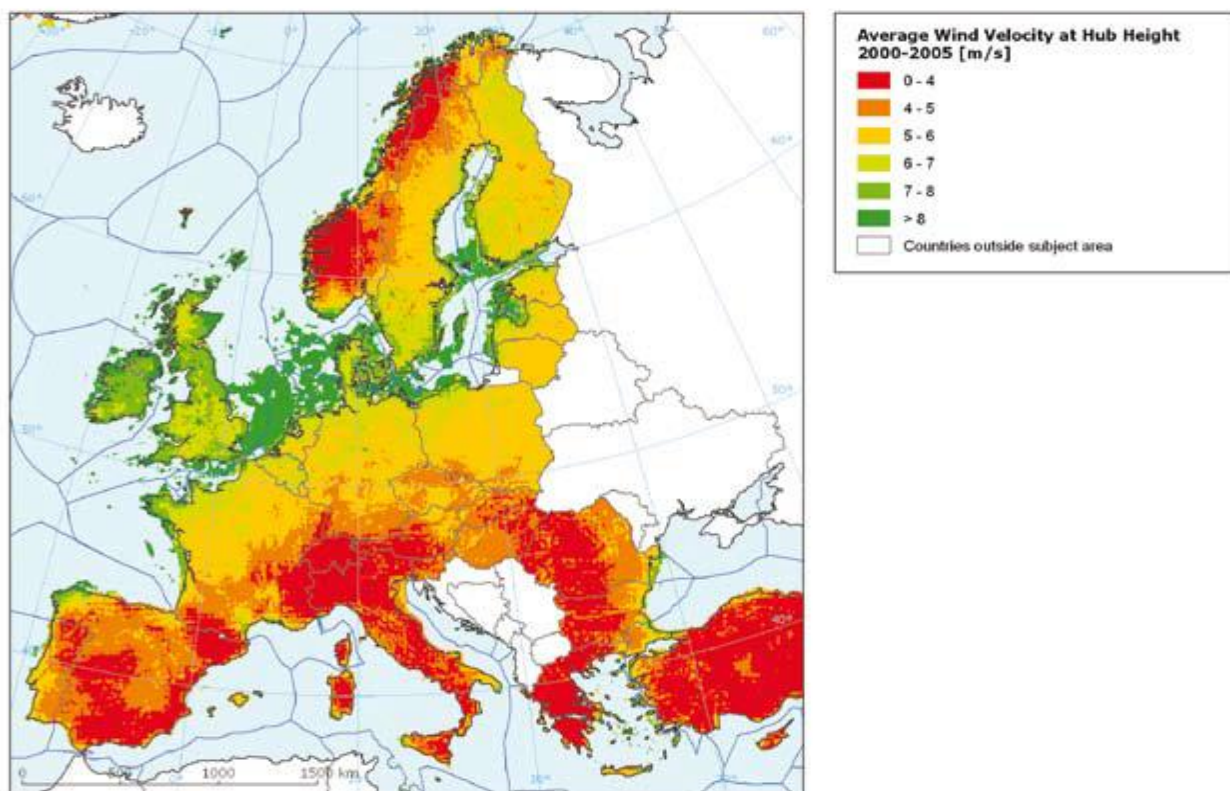
Οι offshore (θαλάσσιες) ανεμογεννήτριες κερδίζουν όλο και περισσότερο έδαφος έναντι των onshore ανεμογεννητριών, καθώς υπερτερούν σε βασικά σημεία.

Πρώτον, οι ελεύθερες χερσαίες εκτάσεις είναι αισθητά πιο περιορισμένες σε σχέση με θαλάσσιες εκτάσεις. Ιδίως σε πυκνοκατοικημένες χώρες όπως είναι η πλειοψηφία των ευρωπαϊκών χωρών, η εύρεση εκτάσεων κατάλληλων για τοποθέτηση αιολικών πάρκων αποτελεί ένα ισχυρό τροχοπέδη δημιουργία νέων αιολικών πάρκων.

Το δεύτερο σημαντικό πλεονέκτημα των offshore ανεμογεννητριών είναι η σταθερή ροή του ανέμου με χαμηλά επίπεδα τύρβης στην ανοικτή θάλασσα. Η συνεχής ροή του ανέμου με σταθερή ταχύτητα βελτιστοποιεί την απόδοση της ανεμογεννήτριας και περιορίζει το οικονομικό ρίσκο. Η ροή του ανέμου επηρεάζεται ιδιαίτερα από την γεωμορφολογία της περιοχής (βουνά, κοιλάδες κτλ.) και από το μέσο ύψος των κτηρίων κοντά σε κατοικημένες περιοχές. Στην **εικόνα 1.1**, απεικονίζεται η μέση ταχύτητα ανέμου στο ύψος του ρότορα (80m για onshore και 120m για offshore ανεμογεννήτριες) για το σύνολο των χωρών της Ευρώπης για το διάστημα 2000-2005. Όπως είναι εμφανές, στην ηπειρωτική Ευρώπη η μέση ταχύτητα του ανέμου είναι σχετικά μικρή (0-5 m/s), ενώ το μεγάλο μέρος των παράκτιων περιοχών βρίσκεται στην πράσινη περιοχή (>8m/s). Την πρώτη θέση σε αεροδυναμικότητα κατέχουν το Ηνωμένο Βασίλειο και η Δανία, ενώ πολύ υψηλά βρίσκεται και η Ελλάδα, λόγω του Αιγαίου Πελάγους (βλέπε και εικόνα 1.6).

Επίσης, αρκετές είναι οι περιπτώσεις κατοίκων που έχουν αναφέρει την οπτική και ακουστική όχληση που δημιουργείται από την λειτουργία ανεμογεννητριών. Αν και η αισθητική ενός τοπίου είναι κάτι υποκειμενικό, οι offshore ανεμογεννήτριες αποτελούν την καλύτερη λύση αυτού του προβλήματος, αφού εκ των πραγμάτων είναι τοποθετημένες αρκετά χιλιόμετρα από την ακτή και μακριά από κατοικημένες περιοχές.

Τέλος, περιβαλλοντικές οργανώσεις αναφέρουν έντονα ότι οι onshore ανεμογεννήτριες έχουν αρνητικές επιπτώσεις στις παρακείμενες καλλιέργειες και στην πανίδα του εγγύς οικοσυστήματος (θάνατοι πτηνών).



**Εικόνα 1. 1:** Χάρτης απεικόνισης της μέσης ταχύτητα του ανέμου στο ύψος του ρότορα ( 80m για onshore και 120m για offshore) στην Ευρώπη το χρονικό διάστημα 2000-2005.

Το μειονέκτημα των offshore ανεμογεννητριών είναι το πολύ μεγαλύτερο κόστος κατασκευής και συντήρησης τους (2 με 3.5 φορές περισσότερα από τις onshore). Επίσης στην στεριά υπάρχει ήδη διαθέσιμο δίκτυο για την παροχή της παραγόμενης ενέργειας, ενώ στην θάλασσα συνήθως θα πρέπει να κατασκευαστεί, γεγονός που συντελεί ακόμα περισσότερο στην αύξηση του κόστους των υπεράκτιων αιολικών πάρκων.

### 1.3 Υφιστάμενα και μελλοντικά Αιολικά Πάρκα –Συγκεντρωτικά στοιχεία

Σύμφωνα με στοιχεία του Ευρωπαϊκού Συλλόγου Αιολικής Ενέργειας (European Wind Energy Association - EWEA) μέχρι και το τέλος του 2011 έχουν εγκατασταθεί συνολικά 1371 offshore ανεμογεννήτριες σε Ευρωπαϊκά νερά με συνολική ισχύ 3812.6 MW (**εικόνα 1.3**) , ενώ είναι ήδη υπό κατασκευή άλλα 9 θαλάσσια αιολικά πάρκα που θα αυξήσουν την συνολική εγκατεστημένη ισχύ κατά 2375MW, φτάνοντάς την στα 6188MW.

Πιο συγκεκριμένα, το 2011 εγκαταστάθηκαν 235 ανεμογεννήτριες με μέση ισχύ 3.6 MW και κόστισαν 2.4 δισεκατομμύρια ευρώ. Το μέσο μέγεθος των offshore αιολικών πάρκων για το έτος 2011 ανέρχεται περίπου στα 200MW και παρουσιάζει αύξηση 29% (45 MW) ως προς το προηγούμενο έτος.

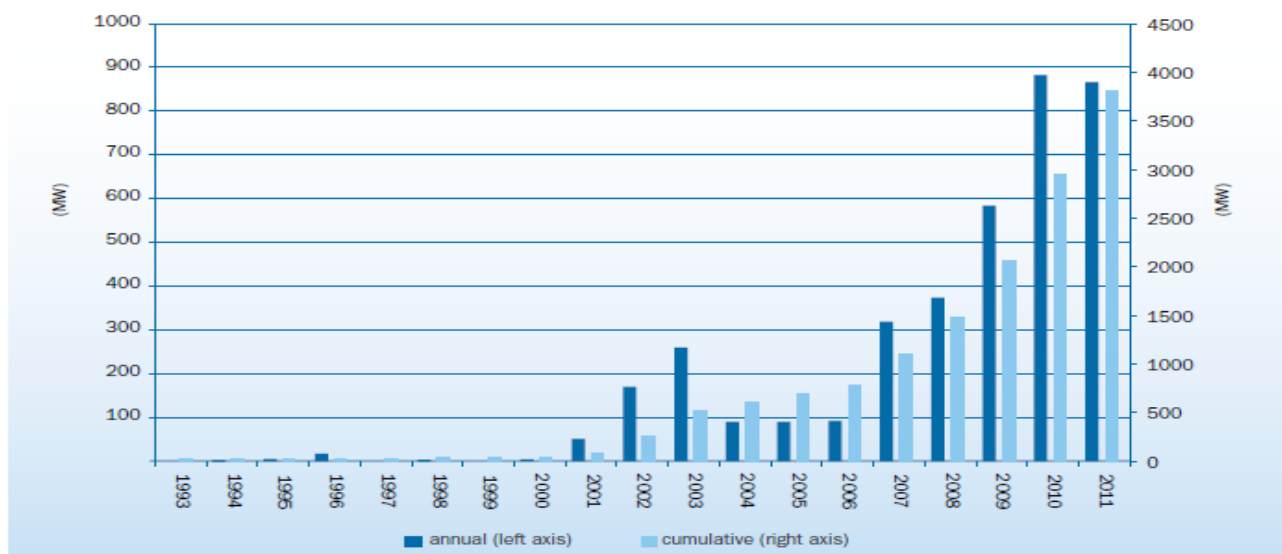
Αυξητική τάση παρουσιάζουν επίσης η απόσταση από την ακτή και το βάθος της θάλασσας όπου τοποθετούνται οι αιολικές φάρμες. Σε ανάλυση που έγινε από τα δεδομένα των υφιστάμενων και μελλοντικών offshore αιολικών πάρκων η τάση αυτή επιβεβαιώθηκε (**εικόνα 1.4**). Το μέσο βάθος της θάλασσας είναι 22.9m για το 2011 και αναμένεται να υπερβεί τα 25.0 m της επόμενες χρονιές. Η μέση απόσταση από την ακτή παρουσίασε μια ελαφριά πτώση (23.4 km) σε σύγκριση με την προηγούμενη χρονιά (27.1 km), αλλά θα αυξηθεί αισθητά στο μέλλον καθώς ο μέσος όρος τοποθέτησης των υπό κατασκευή αιολικών πάρκων είναι στα 33.2 km.

Οι βασικοί κατασκευαστές offshore ανεμογεννητριών είναι: Siemens Wind Power, Vestas, REpower, BARD, Sinovel, Gamesa, Enercon και General Electric Wind Energy.

Η συντριπτική πλειοψηφία των υπεράκτιων αιολικών πάρκων σήμερα είναι εγκατεστημένες στην Βόρεια Θάλασσα (**εικόνα 1.2**), όμως αρκετές είναι οι χώρες (Ιαπωνία, Η.Π.Α., Ινδία) σε όλο τον κόσμο που έχουν εκδηλώσει ενδιαφέρον για κατασκευή offshore αιολικών πάρκων άμεσα.

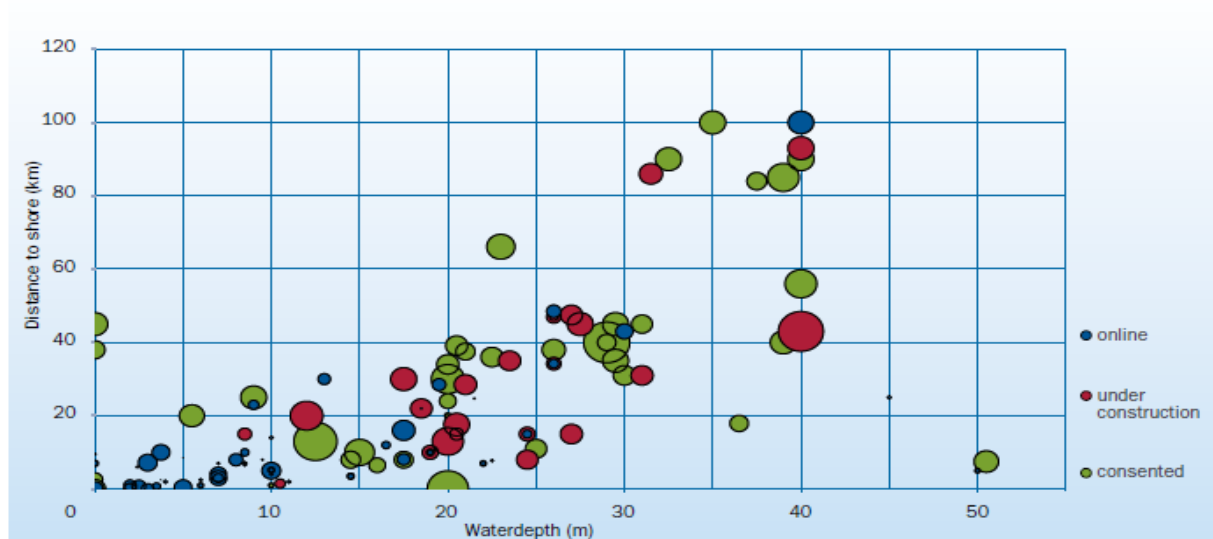


**Εικόνα 1.2:** Υφιστάμενα και υπό κατασκευή υπεράκτια αιολικά πάρκα στην Βόρεια Θάλασσα



Country	UK	DK	NL	DE	BE	SE	FI	IE	NO	PT	Total
No. of farms	18	13	4	6	2	5	2	1	1	1	53
No. of turbines	636	401	128	52	61	75	9	7	1	1	1,371
Capacity installed (MW)	2,093.7	857.3	246.8	200.3	195	163.7	26.3	25.2	2.3	2	3,812.6

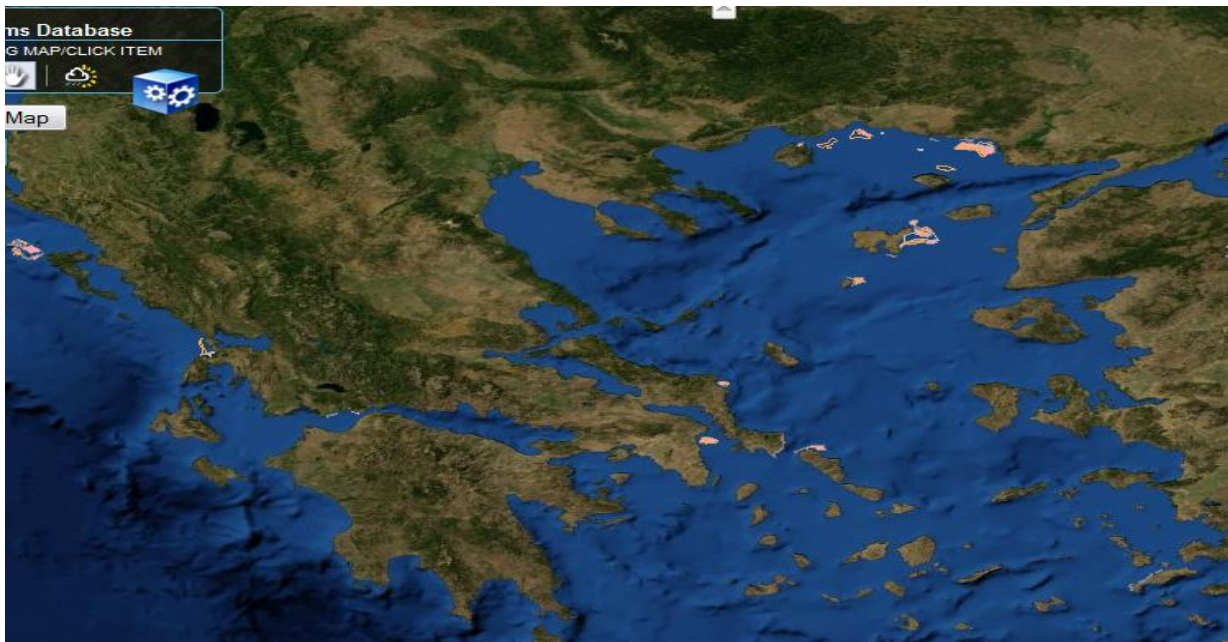
**Εικόνα 1.3:** Στο αριστερό άξονα (στήλες με μπλε χρώμα) απεικονίζεται η ετήσια εγκατεστημένη ισχύς (MW) των offshore ανεμογεννητριών και στον δεξιό άξονα (στήλες με γαλάζιο χρώμα) η συνολική εγκατεστημένη ισχύς (MW) μέχρι και το 2011. Από κάτω φαίνεται ο αριθμός των offshore αιολικών πάρκων, ο αριθμός των offshore ανεμογεννητριών και η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ανά χώρα (με την σειρά Μ. Βρετανία, Δανία, Ολλανδία, Γερμανία, Βέλγιο, Σουηδία, Φιλανδία, Ιρλανδία, Νορβηγία και Πορτογαλία).



**Εικόνα 1.4:** Στον κάθετο άξονα απεικονίζεται η απόσταση από την ακτή (km) και στον οριζόντιο το βάθος της θάλασσας (m). Με μπλε χρώμα φαίνονται τα υφιστάμενα (σε λειτουργία) αιολικά πάρκα, με κόκκινο τα υπό κατασκευή και με πράσινα τα μελλοντικά (προσχεδιασμένα) offshore αιολικά πάρκα.



Μια από τις χώρες που έχει εκδηλώσει ενδιαφέρον για την μελλοντική κατασκευή θαλάσσιων αιολικών πάρκων είναι και η Ελλάδα. Αν και δεν έχουν ακόμα εγκατασταθεί υπεράκτιες αιολικές φάρμες, έχουν υποβληθεί αρκετές προτάσεις. Πρόσφατα το Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικών Αλλαγών επέλεξε 12 θαλάσσιες περιοχές ανά την επικράτεια για εγκατάσταση ανεμογεννητριών με χρονικό ορίζοντα ολοκλήρωσης το 2017. Οι περιοχές αυτές είναι: Άγιος Ευστράτιος, Αλεξανδρούπολη, Κάρπαθος, Κέρκυρα, Θάσος, Κρουονέρι, Κύμη, Λήμνος, Λευκάδα, Πεταλιόι, Σαμοθράκη και Φανάρι Ροδόπης **(εικόνα 1.5)**.

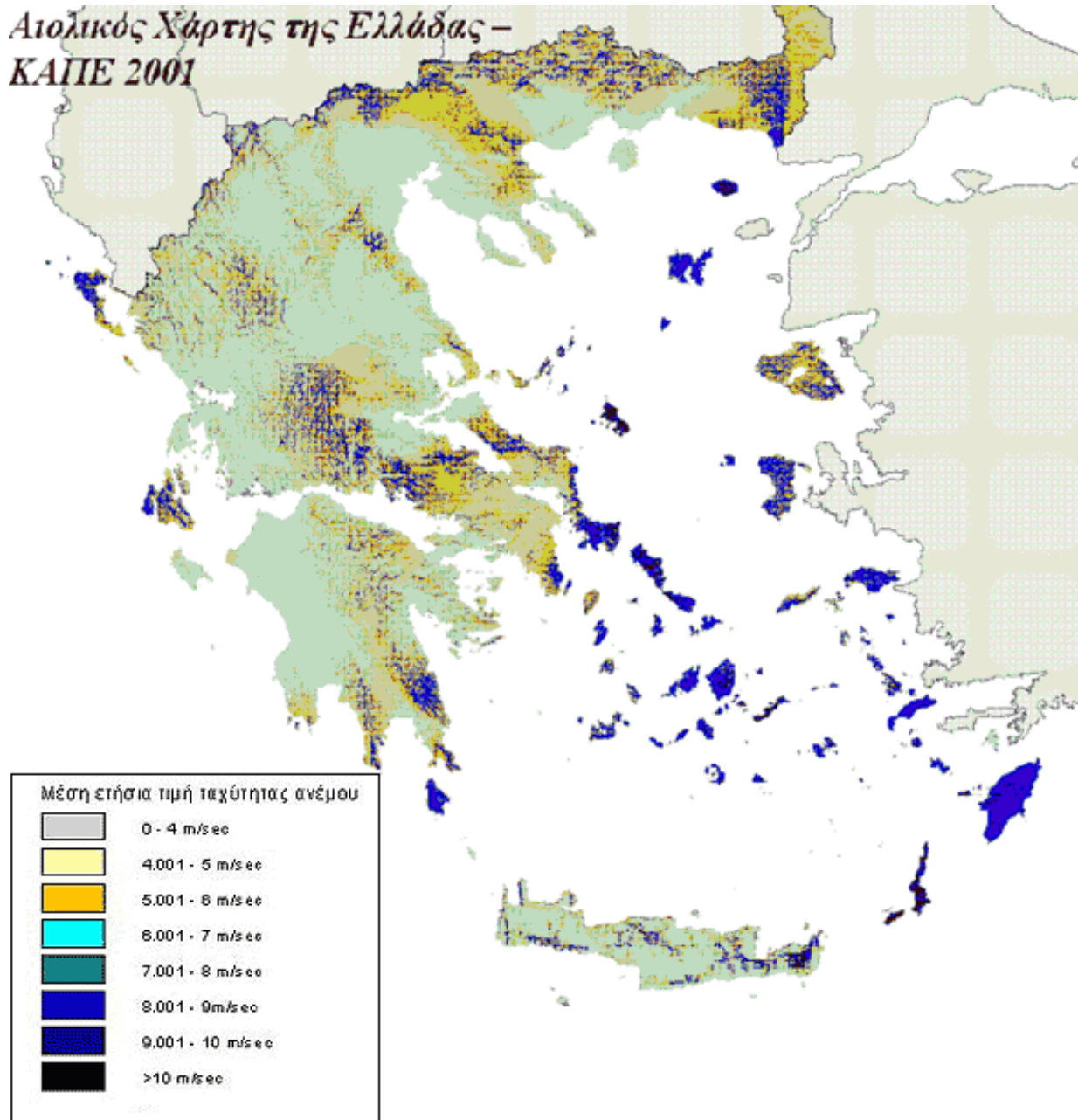


*Εικόνα 1.5: Υποβληθείσες αιτήσεις για υπεράκτια αιολικά πάρκα στην Ελλάδα*

Η συνολική παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια υπολογίζεται να φτάσει τα 1.2 GW. Το μεγαλύτερο αιολικό πάρκο που έχει προταθεί είναι αυτό της Αλεξανδρούπολης συνολικής ισχύος 585 MW, με το βάθος της θάλασσας να κυμαίνεται από 14 έως 50 m.

Η δυσκολία εγκατάστασης υπεράκτιων αιολικών πάρκων τόσο στο Αιγαίο όσο και στο Ιόνιο Πέλαγος έγκειται κυρίως στην απότομη αλλαγή του βάθους της θάλασσας. Οι θεμελιώσεις offshore ανεμογεννητριών είναι εφικτές σε βάθος έως και 50m, ενώ για βαθύτερα νερά είναι καταλληλότερες οι πλωτές ανεμογεννήτριες. Οι τελευταίες ωστόσο βρίσκονται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο και κατά το 2012 εγκαταστάθηκαν πειραματικά οι πρώτες τρεις.

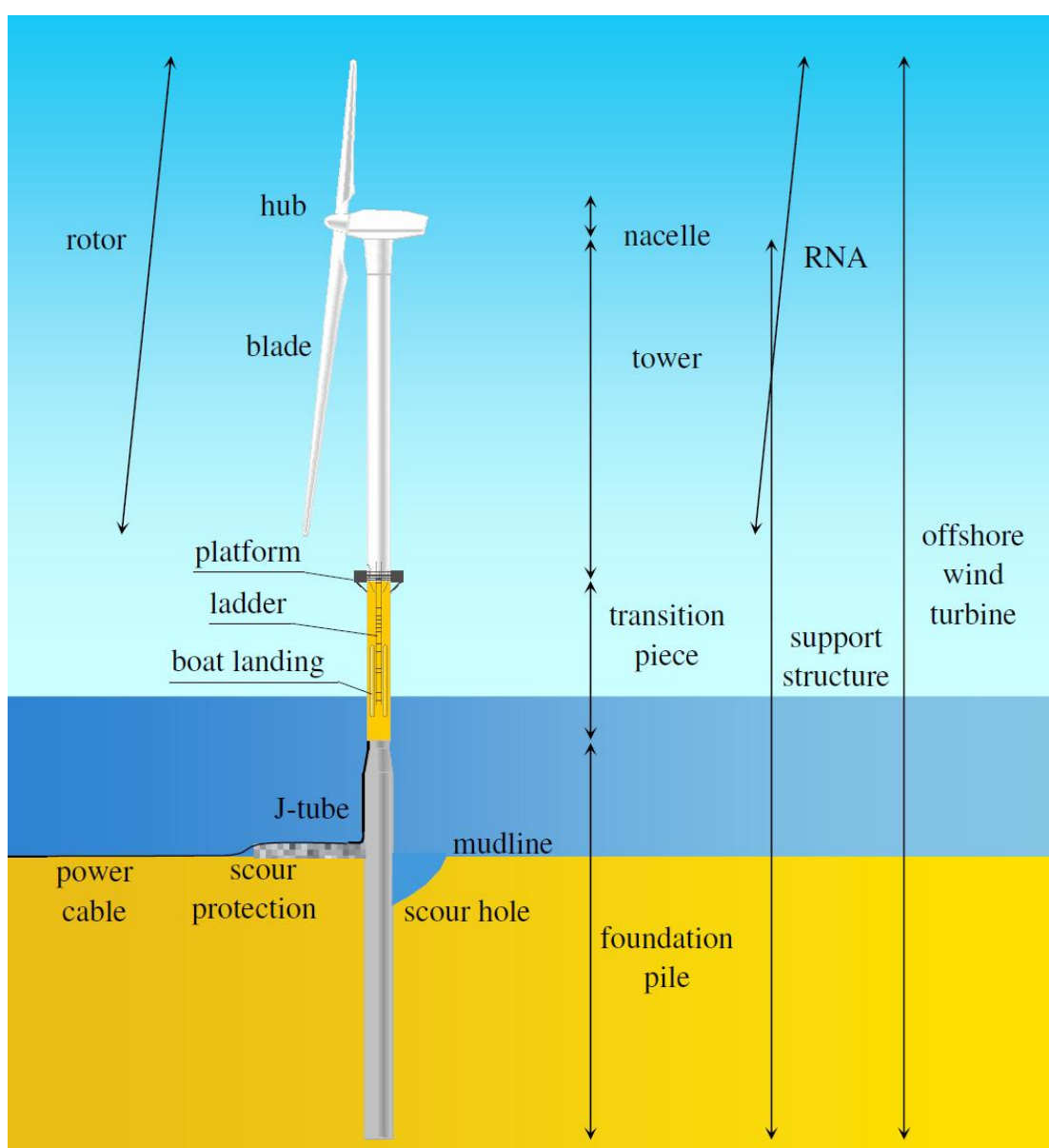
Ως αντίβαρο της προαναφερθείσας δυσκολίας έρχεται το υψηλό αιολικό δυναμικό των θαλάσσιων περιοχών της Ελλάδας. Η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου στις περιοχές που έχουν προταθεί τα αιολικά πάρκα είναι 9 m/s και άνω, γεγονός που αποτελεί εχέγγυο για την απόδοση των ανεμογεννητριών.



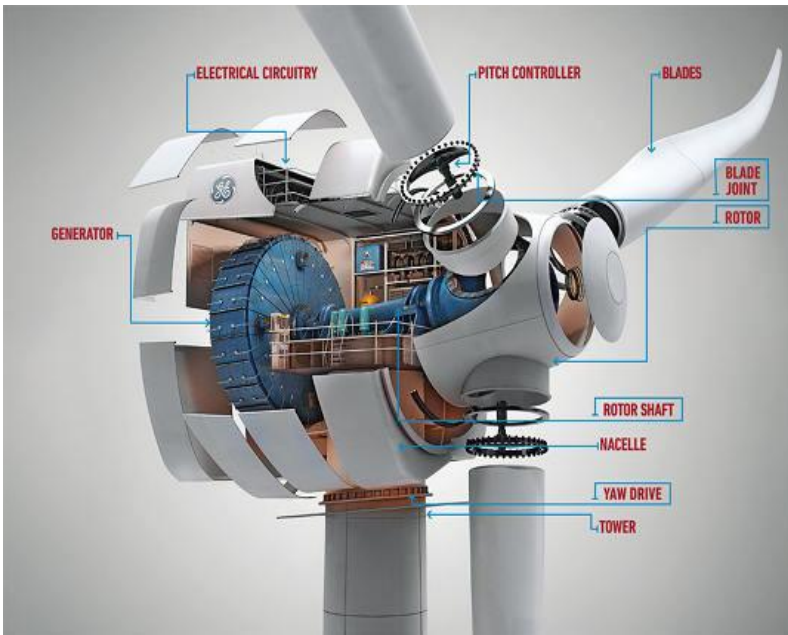
**Εικόνα 1.6:** Αιολικό δυναμικό Ελλάδας από καταγραφές του έτους 2001. Η διαβάθμιση των χρωμάτων απεικονίζει την μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου με τα πιο σκούρα χρώματα (μπλε και μαύρο) να δείχνουν τις μεγαλύτερες ταχύτητες.

### 1.4 Χαρακτηριστική offshore ανεμογεννήτρια και τρόπος λειτουργίας της

Οι offshore ανεμογεννήτριες είναι αποκλειστικά οριζοντίου άξονα περιστροφής και έχουν κυρίως 3 πτερύγια. Τα κύρια μέρη μιας τυπικής offshore ανεμογεννήτριας μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες: στα κατασκευαστικά και στα μηχανολογικά. Τα κατασκευαστικά μέρη της ανεμογεννήτριας είναι: ο ρότορας, τα πτερύγια, το nacelle, το hub, ο πύργος και η θεμελίωση (**εικόνα 1.7**). Τα μηχανολογικά μέρη της ανεμογεννήτριας (**εικόνα 1.8**) είναι συγκεντρωμένα κυρίως στο nacelle και περιλαμβάνουν το σύστημα περιστροφής-ευθυγράμμισης (pitch controller), την ηλεκτρική γεννήτρια (generator), το σύστημα πέδησης, ηλεκτρικό κύκλωμα (electrical circuitry) και το κουτί ταχυτήτων (gear box).



**Εικόνα 1.7** Κατασκευαστικά τμήματα τυπικής υπεράκτιας ανεμογεννήτριας

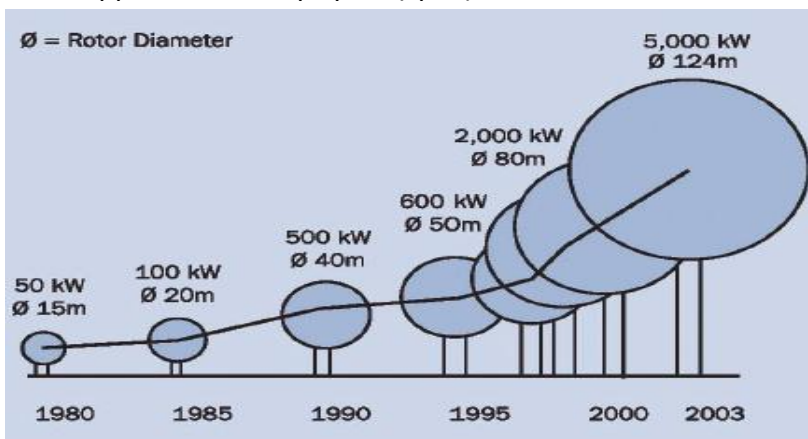


**Εικόνα 1.8:** Μηχανολογικά μέρη τυπικής ανεμογεννήτριας - Εσωτερικό nacelle

Ο βασικός τρόπος λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την εκμετάλλευση του ανέμου. Πρόκειται για μια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας ιδιαίτερα φιλική προς το περιβάλλον. Τα πτερύγια (blades) της ανεμογεννήτριας περιστρέφονται γύρω από έναν οριζόντιο άξονα στο ύψος του hub. Η περιστροφική κίνηση των πτερυγίων θέτει σε λειτουργία ένα στέλεχος καταλήγει στο κιβώτιο ταχυτήτων μέσα στο nacelle. Το κιβώτιο των ταχυτήτων αυξάνει την στροφική ταχύτητα της ηλεκτρικής γεννήτριας που μετατρέπει την κινητική (στροφική) ενέργεια σε ηλεκτρική με την

βοήθεια μαγνητικού πεδίου. Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες αρχίζουν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια για μέση ταχύτητα ανέμου 3-4m/s, μεγιστοποιούν την απόδοσή τους για ταχύτητα ανέμου 15 m/s, ενώ σταματάνε την λειτουργία τους για ταχύτητες 25 m/s και άνω.

Τόσο η ισχύς όσο και το μέγεθος των ανεμογεννητριών παρουσιάζουν αυξητική τάση (**εικόνα 1.9**). Οι offshore ανεμογεννήτριες που παράγονται σήμερα κατηγοριοποιούνται με βάση την απόδοσή τους: 2MW, 3 MW, 3.5 MW, 5 MW, 6 MW. Το ύψος του πύργου (H) αυξάνει σχεδόν αναλογικά με την ονομαστική ισχύ και κυμαίνεται μεταξύ 60-154 m. Η διάμετρος του ρότορα (D) είναι σχεδόν ίση με το ύψος του πύργου  $D = 0.9 \div 1.1 H$ . Όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί, ήδη από το 2003 έχουν κατασκευαστεί ανεμογεννήτριες με ονομαστική ισχύ 5MW, ενώ πλέον τοποθετούνται offshore κυρίως ανεμογεννήτριες της τάξης των 5-6MW. Σε ερευνητικό στάδιο βρίσκονται ανεμογεννήτριες των 7.5 MW.

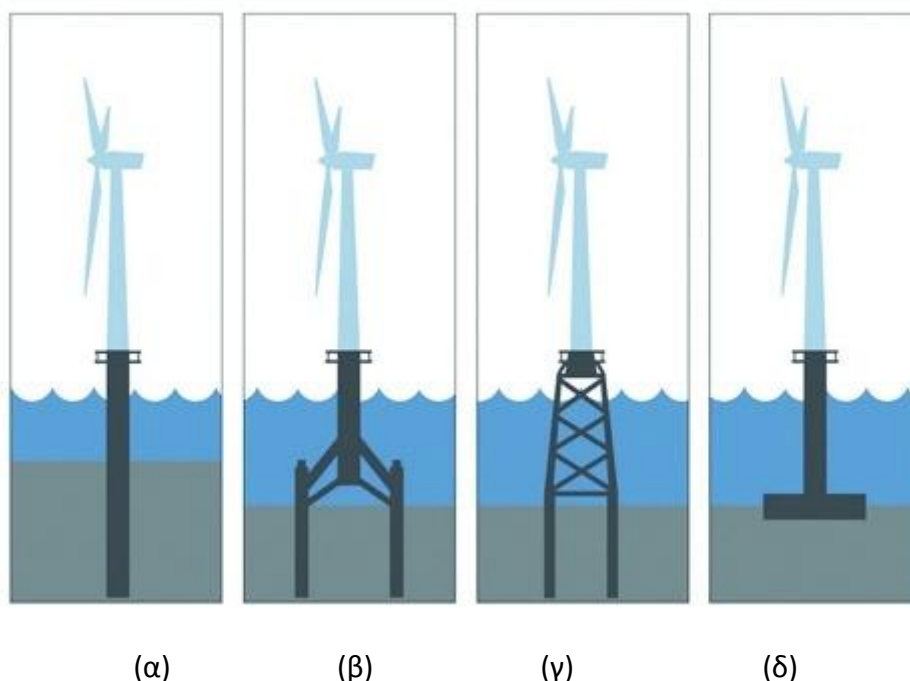


**Εικόνα 1.9:** Χρονολογική εξέλιξη μεγέθους και απόδοσης offshore ανεμογεννητριών



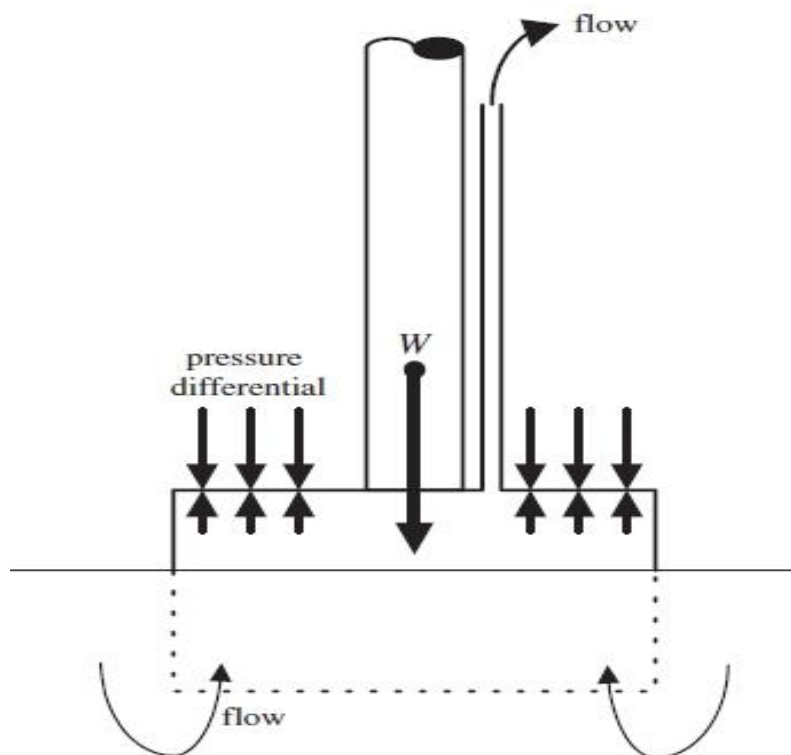
## 1.5 Είδη θεμελιώσεων ανεμογεννητριών

Τα είδη των θεμελιώσεων (**εικόνα 1.10**) που χρησιμοποιούνται για τις offshore ανεμογεννήτριες διαφοροποιούνται ανάλογα με το βάθος της θάλασσας. Για ρηχά νερά (0-15m) προτιμούνται οι θεμελιώσεις βαρύτητας (**δ**) (gravity foundation), που αποτελούνται κυρίως από σκυρόδεμα. Για μεσαία βάθη θάλασσας (15-50 m) χρησιμοποιούνται κυρίως οι εξής θεμελιώσεις : μονο-πάσσαλος (**α**) (monopile), δικτυωτός πύργος (**γ**) (jacket foundation) , τρίποδο (**β**) (tripod) ή ομάδα τριών ή τεσσάρων πασσάλων. Για μεγαλύτερα βάθη οι διαστάσεις και το κόστος των συμβατικών θεμελιώσεων γίνεται αντικοινομικό, γι' αυτό και έχουν προταθεί πλωτές ανεμογεννήτριες.



**Εικόνα 1.10:** Είδη θεμελιώσεων για offshore ανεμογεννήτριες: (α) monopile, (β) tripod, (γ) jacket foundation και (δ) gravity foundation

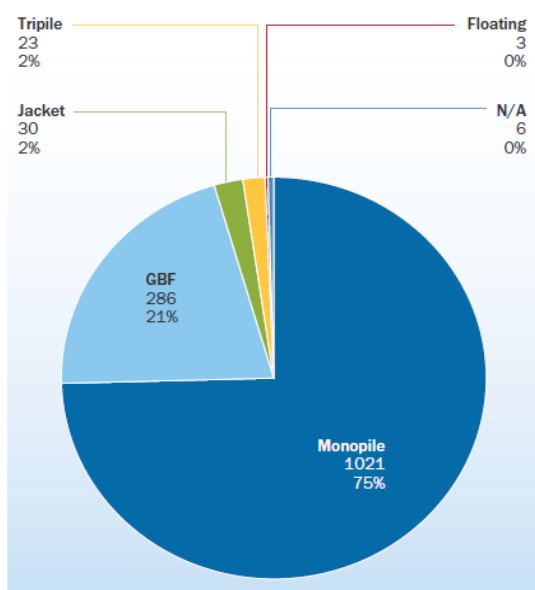
Μια εναλλακτική θεμελίωση αποτελεί το suction caisson. Βρίσκεται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο και πρόκειται για μια θεμελίωση που μοιάζει με αναποδογυρισμένο κουβά. Ιδιαίτερο πλεονέκτημά της είναι η ευκολία και το μικρότερο (σε σχέση με τις συμβατικές θεμελιώσεις) κόστος εγκατάστασης. Το suction caisson ρυμουλκείται μέχρι το σημείο τοποθέτησής του και στην συνέχεια κατεβαίνει στο πυθμένα της θάλασσας με σταδιακή αφαίρεση νερού με την χρήση αντλίας (**εικόνα 1.11**). Η διαφορά πίεσης συμβάλει στην τελική βύθιση του θεμελίου μέσα στο έδαφος. Αν και αυτή η πρόταση θα μπορούσε να αποτελέσει μια σοβαρή εναλλακτική πρόταση, δεν είναι ακόμα πλήρως γνωστή η συμπεριφορά του κάτω από δυσμενείς συνθήκες φόρτισης για μεγάλο χρονικό διάστημα.



Εικόνα 1.11: Μέθοδος εγκατάστασης suction caisson

Το μεγαλύτερο κατασκευαστικό ενδιαφέρον έχει συγκεντρώσει το monopile, που πρόκειται

### Substructures



ουσιαστικά για έναν μεταλλικό πάσσαλο με χαρακτηριστικές διαστάσεις διαμέτρου  $D \geq 4 m$  και βάθους έμπηξης  $L = 20 \div 40 m$ . Η μέθοδος εγκατάστασης μπορεί να είναι η έμπηξη με ειδική σφύρα (driving piles), με εκσκαφή και ενίσχυση (drilling and grouting) ή με συνδυασμό των παραπάνω μεθόδων.

Σύμφωνα με στοιχεία της E.W.E.A. (εικόνα 1.12), το 75% του συνόλου των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών μέχρι το 2011 θεμελιώθηκαν με monopile. Το ερευνητικό ενδιαφέρον της παρούσης διπλωματικής εργασίας θα επικεντρωθεί στο monopile, με σκοπό την πλήρη κατανόηση της απόκρισης του θεμελίου υπό στατική και ανακυκλική φόρτιση και την πρόταση βελτιωμένων ιδεών.

Εικόνα 1.12: Διάγραμμα ποσοστών θεμελιώσεων των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών έως το 2011





# **Κεφάλαιο 2**

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση



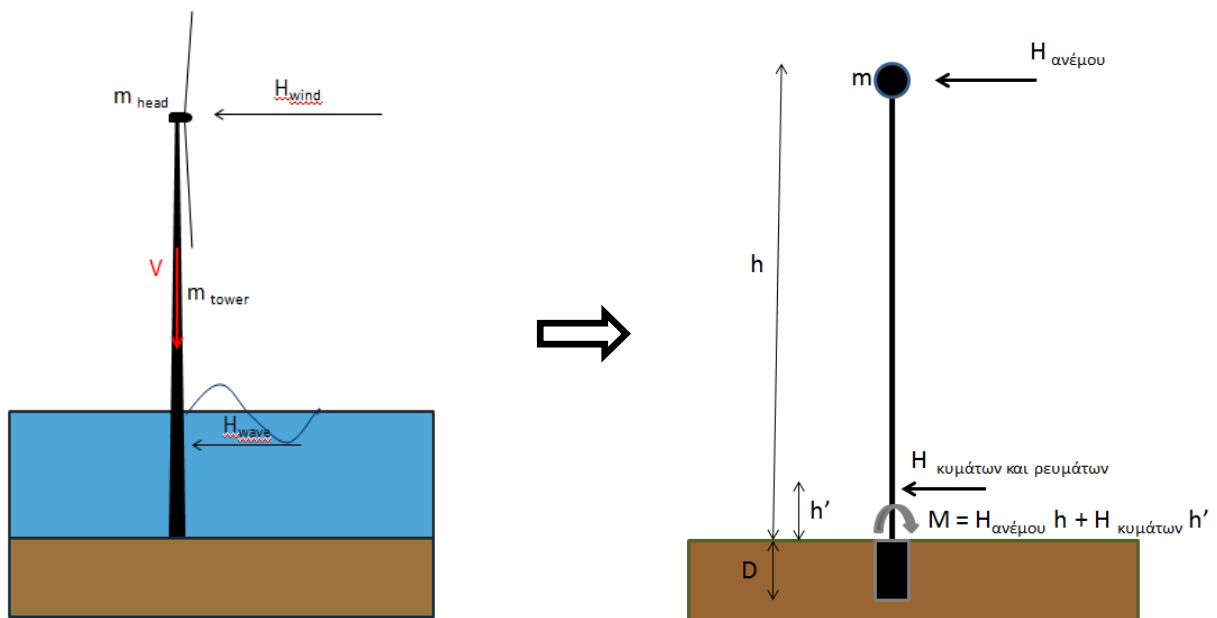


## Κεφάλαιο 2 – Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

### 2.1 Εισαγωγή

Οι offshore ανεμογεννήτριες αποτελούν μια ιδιαίτερη κατηγορία κατασκευών, καθώς είναι ιδιαίτερα υψίκορμες και το μεγαλύτερο ποσοστό της μάζας είναι συγκεντρωμένο στην κορυφή τους (**σχήμα 2.1**). Οι βασικές αρχές σχεδιασμού των offshore ανεμογεννητριών σύμφωνα με τον κανονισμό IEC 61400-3 είναι οι εξής:

- Αντοχή των στατικών και δυναμικών φορτίων της κατασκευής (ίδιον βάρος, κατανεμημένη ανεμοπίεση, συγκεντρωμένα φορτία λόγω ανέμου, κυμάτων ή θαλάσσιων ρευμάτων, πιθανή σεισμική διέγερση)
- Αποδοτική συνύπαρξη των μηχανολογικών και κατασκευαστικών μερών της ανεμογεννήτριας (μικρές επιτρεπόμενες μετατοπίσεις στην κορυφή)
- Αποφυγή αστοχίας λόγω κόπωσης κάποιου κατασκευαστικού μέλους (μεγάλος αριθμός κύκλων φόρτισης, άνω των 100.000)
- Πολύ μικρές επιτρεπόμενες στροφές για αποφυγή των φαινομένων P- $\delta$  (σύνηθες σχεδιασμός με επιτρεπόμενη στροφή 0.087 rad για διάρκεια ζωής 20 ετών)

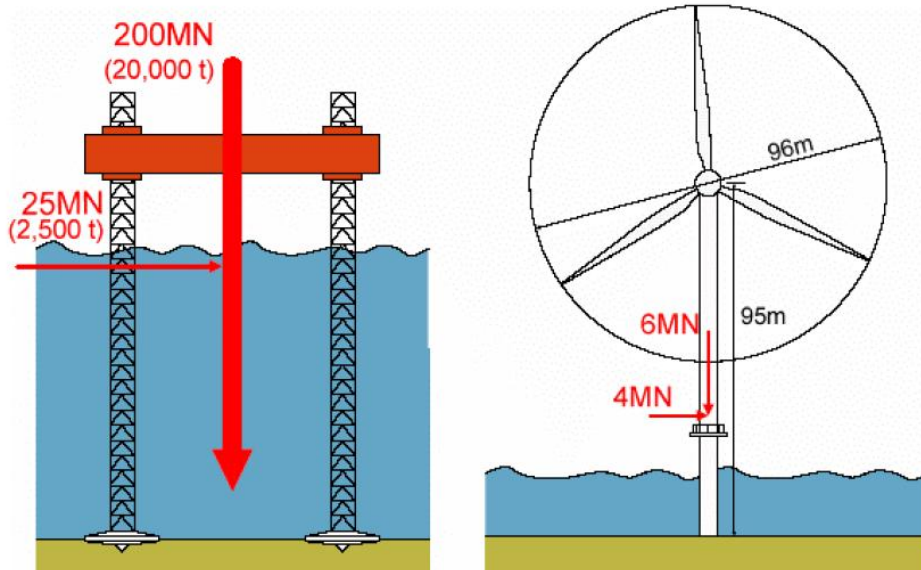


**Σχήμα 2.1 :** Τυπικές φορτίσεις offshore ανεμογεννήτριας και στατικό προσομοίωμα της.

Οι απαιτήσεις της θεμελίωσης είναι αυξημένες ως απόρροια των προαναφερθέντων βασικών σημείων. Οι βασικοί άξονες σχεδιασμού για την θεμελίωση είναι η μεγάλη ροπή αντοχής και ταυτόχρονα η μικρή επιτρεπόμενη στροφή και οριζόντια μετατόπιση.

Υπάρχει ήδη μεγάλη εμπειρία από την βιομηχανία εξόρυξης πετρελαίου και φυσικού αερίου όσον αφορά τις θαλάσσιες (offshore) θεμελιώσεις που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και στην βιομηχανία των ανεμογεννητριών. Θα πρέπει, όμως να τονιστεί ότι οι δύο αυτές περιπτώσεις παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές τόσο στις φορτίσεις όσο και σε κάποιες οικονομικές συνιστώσες (**σχήμα 2.2**). Πιο συγκεκριμένα, για τις θεμελιώσεις θαλάσσιων ανεμογεννητριών ισχύουν τα εξής:

- τα κατακόρυφα φορτία είναι πολύ μικρότερα, ενώ η ροπή ανατροπής και η οριζόντια φόρτιση αναλογικά με την κατακόρυφη φόρτιση είναι πολύ μεγαλύτερη ( $\frac{M}{V} \geq 30$ ),
- απαιτείται μια θεμελίωση σχετικά οικονομική αφού θα τοποθετείται επαναλαμβανόμενα στην πλειοψηφία των ανεμογεννητριών του θαλάσσιου αιολικού πάρκου σε αντίθεση με την μία και μοναδική κατασκευή υπέρ-θεμελίωσης της εξέδρας εξόρυξης υγρών ή στερεών ορυκτών,
- η διαστασιολόγηση της θεμελίωσης κυριαρχείται από τον ανακυκλικό χαρακτήρα της φόρτισης και το φαινόμενο της κόπωσης, παρά από τις ακραίες συνθήκες φόρτισης.



**Σχήμα 2.2 :** Σύγκριση φορτίσεων offshore πλατφόρμας και offshore ανεμογεννήτριας, σχεδιασμένα στην ίδια κλίμακα (Schneider 2004)

Ο μονο-πάσσαλος (monopile) είναι μέχρι σήμερα η πιο εμπορική θεμελίωση (αφού το 75% των ήδη εγκατεστημένων θαλάσσιων ανεμογεννητριών εδράζονται σε monopiles) και φαίνεται να καλύπτει ικανοποιητικά τις αυξημένες απαιτήσεις σχεδιασμού. Εφόσον η τοποθέτηση και

συντήρηση της θεμελίωσης αποτελεί το 35-40% του συνολικού κόστους της ανεμογεννήτριας, η ακριβής κατανόηση της απόκρισης του monopile θα συντέινε στον οικονομικότερο σχεδιασμό του. Αρκετοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με την συμπεριφορά του μονοπασσάλου υπό στατική και ανακυκλική φόρτιση, (Welch & Reese, 1972; Matlock et al., 1978; Wang, 1982; Long, 1984; O'Neil & Dunnavant, 1984; Long & Vanneste, 1994; Moss et al., 1998; Verdure, 2003; Kellezi & Hansen, 2003; Haigh & Bolton, 2007; Wichtman et al., 2009; Petrini, Li & Bontempi, 2010). Σκοπός της εργασίας είναι η κατανόηση της πλήρους συμπεριφοράς του μονο-πασσάλου (αντοχή, ελαστικές δυσκαμψίες, παραμένουσα στροφή και μετακίνηση υπό στατική και ανακυκλική φόρτιση) και η πρόταση και μελέτη πιθανής βελτίωσης της θεμελίωσης.

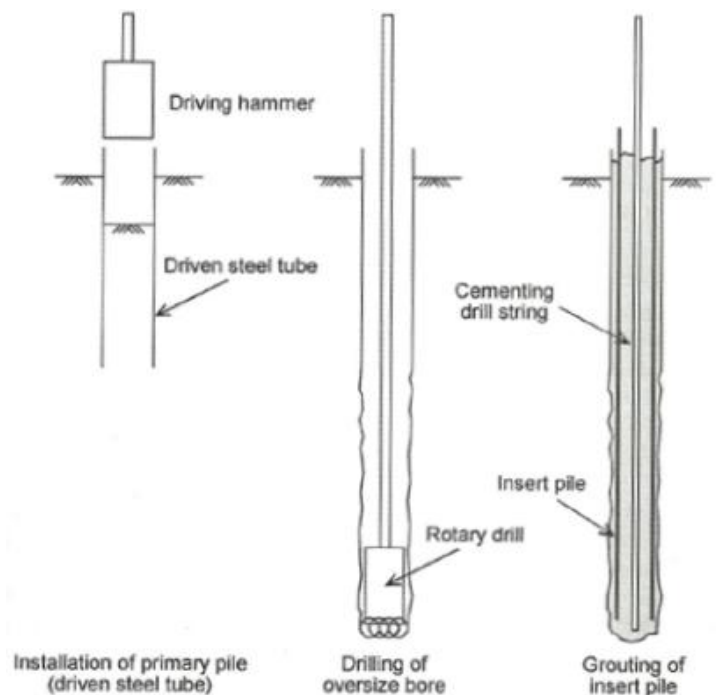
## 2.2 Κατηγορίες Πασσάλων και Τρόποι Εγκατάστασης

Οι πάσσαλοι ανήκουν στην κατηγορία των βαθιών θεμελιώσεων. Προτιμούνται έναντι των επιφανειακών θεμελιώσεων σε υπεράκτιες (offshore) κατασκευές, γιατί το τυπικό εδαφικό προφίλ του πυθμένα της θάλασσας αποτελείται από μια στρώση πολύ μαλακού εδάφους στην επιφάνεια (συνεπώς δίνει μικρή εδαφική πλευρική αντίσταση) και η πλευρική φόρτιση είναι πολύ έντονη λόγω των κυμάτων και θαλάσσιων ρευμάτων.

Οι offshore πάσσαλοι έχουν διαστάσεις διαμέτρου από 0.80m και άνω. Μια ιδιαίτερη κατηγορία αυτών των πασσάλων είναι οι μονο-πάσσαλοι (monopiles), που πρόκειται για έναν πολύ μεγάλο μεταλλικό σωλήνα με χαρακτηριστικές διαστάσεις διαμέτρου  $D \geq 4 \text{ m}$ , βάθους  $L = 20 \div 40 \text{ m}$  και πάχους τοιχώματος με λόγο  $D/t = 25 \div 100$ .

Η μέθοδος εγκατάστασης του μονοπασσάλου διαφοροποιείται ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες και είναι μπορεί να είναι οι εξής (σχήμα 2.3):

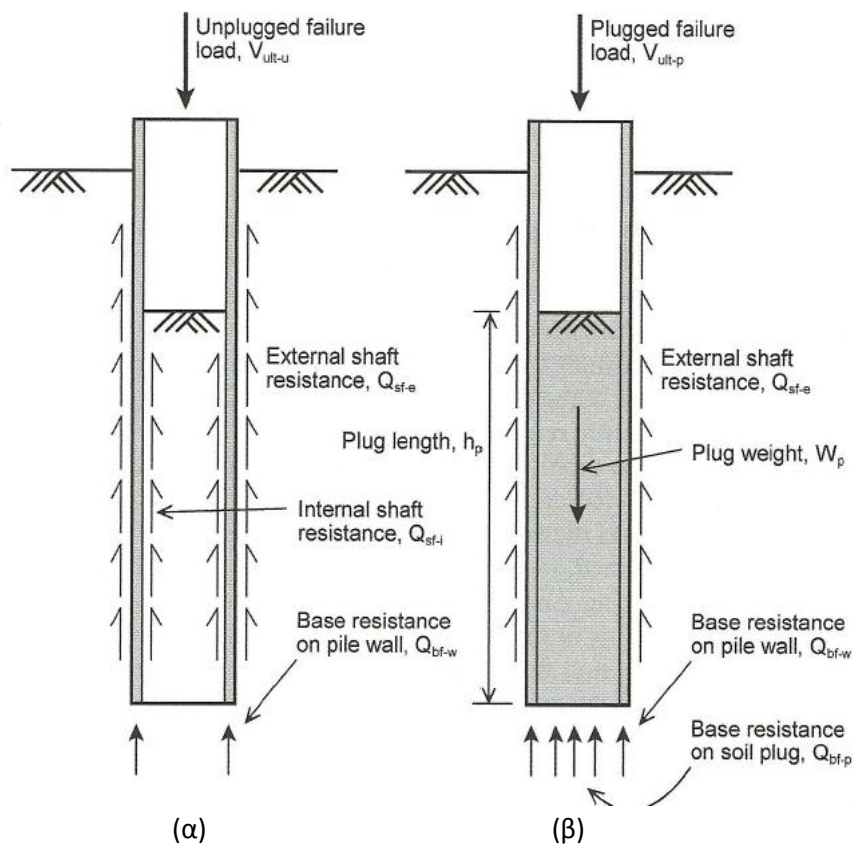
- με **έμπηξη** με ειδική σφύρα (driven piles),
- με **εκσκαφή** και **ενίσχυση** (drilling and grouting),
- ή με **συνδυασμό** των παραπάνω μεθόδων.



**Σχήμα 2.3:** Τρόποι εγκατάστασης πασσάλων, (από δεξιά προς τα αριστερά) με έμπηξη, με εκσκαφή και ενίσχυση (offshore geotechnical engineering).

Για την θεμελίωση των θαλάσσιων ανεμογεννητριών προτιμάται η πρώτη μέθοδος τοποθέτησης (driven steel piles) στην πλειοψηφία των περιπτώσεων. Ο μεταλλικός αυτός σωλήνας είναι ανοικτός στη βάση του και γεμίζει με έδαφος κατά την εμπύξη του. Η σύνδεση του πασσάλου με το έδαφος εσωτερικά αναπτύσσεται με διάφορους μηχανισμούς (**σχήμα 2.4**):

- Ασύνδετη διείσδυση (unplugged penetration), όπου η εδαφική στήλη εσωτερικά του πασσάλου παραμένει ακίνητη κατά την διάρκεια της έμπυξης ,
- Διείσδυση με πλήρη επαφή (plugged penetration), όπου η εδαφική στήλη εσωτερικά του πασσάλου κινείται προς τα κάτω μαζί με τον πάσσαλο κατά την διάρκεια της έμπυξης,
- Διείσδυση με μερική επαφή (partial plugging), όπου η εδαφική στήλη εσωτερικά του πασσάλου κινείται προς τα κάτω με μικρότερο ρυθμό σε σχέση με τον πάσσαλο.



**Σχήμα 2.4:** (α) Ασύνδετη διείσδυση πασσάλου (β) διείσδυση πασσάλου με πλήρη επαφή (τα βελόνια απεικονίζουν την αντίδραση στην διεπιφάνεια εδάφους-πασσάλου) (offshore geotechnical engineering).

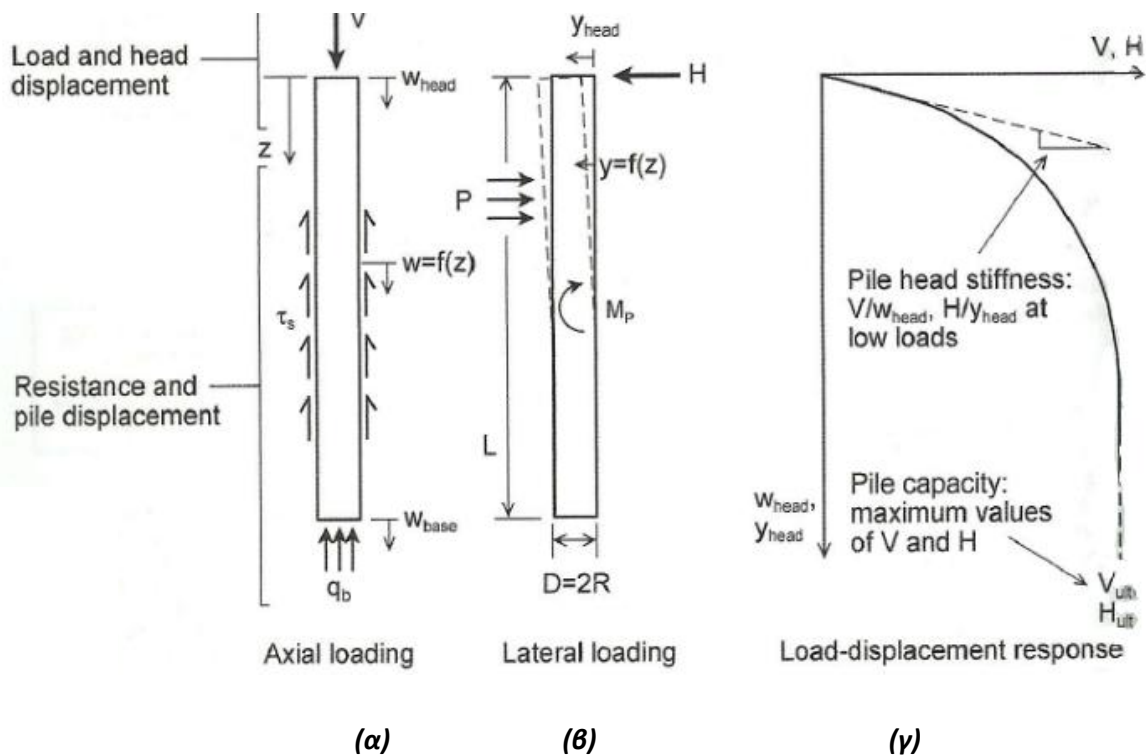
Στην παρούσα εργασία ο μονοπάσσαλος που επιλέχθηκε ως πιο αντιπροσωπευτικός για διερεύνηση είναι ο μεταλλικός εμπύξιμος πάσσαλος με θεώρηση πλήρους επαφής κατά την διείσδυση.

## 2.3 Φέρουσα Ικανότητα

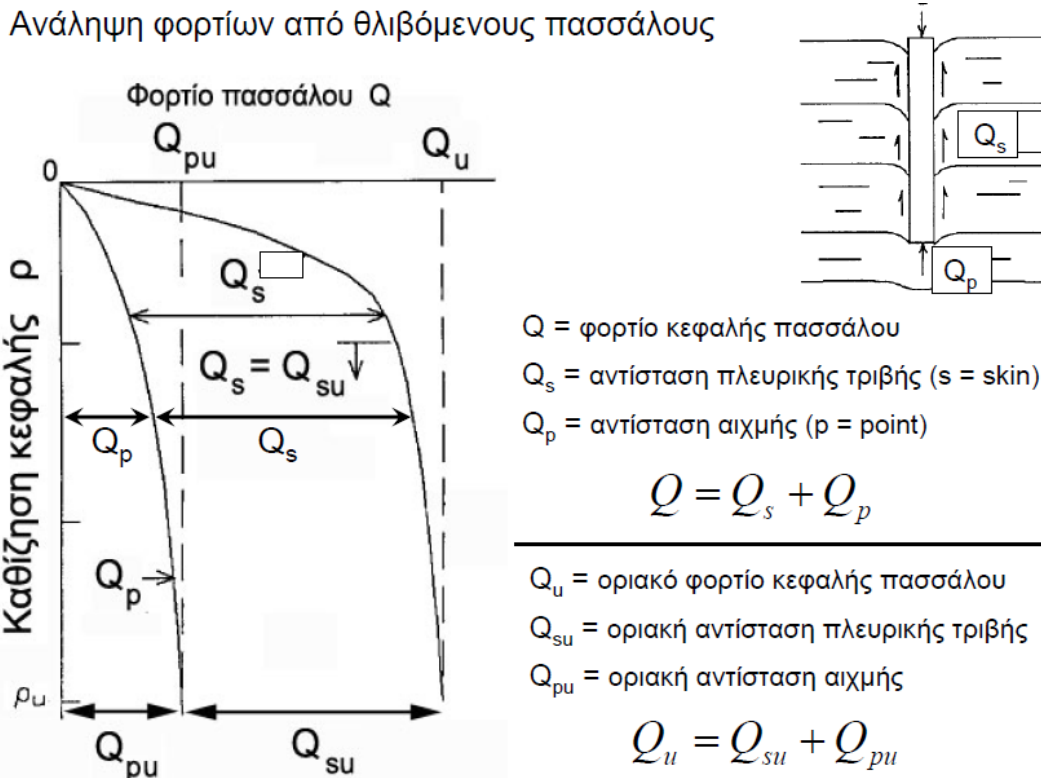
### 2.3.1 Αντοχή σε κατακόρυφη φόρτιση

Η φέρουσα ικανότητα του πασσάλου υπό κατακόρυφη φόρτιση έχει συγκεντρώσει διαχρονικά το μεγαλύτερο ερευνητικό ενδιαφέρον, καθώς χρησιμοποιούνται κυρίως σε κατασκευές με μεγάλο ίδιον βάρος (π.χ. βάθρα γέφυρα). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε μεμονωμένα ή είτε σε ομάδα και λειτουργούν αξιοποιώντας την πλευρική αντίσταση (μέσω τριβής) και την αντίσταση αιχμής (**σχήμα 2.5**). Ο μηχανισμός ανάληψης φορτίσεων είναι διαφορετικός για αξονική και πλευρική φόρτιση, ωστόσο οι καμπύλες “P-y” είναι της ίδιας μορφής.

Στην περίπτωση της θαλάσσιας ανεμογεννήτριας, όμως, η κατακόρυφη φόρτιση δεν έχει κυρίαρχο ρόλο, καθώς πρόκειται για μια κατασκευή ελαφρά φορτισμένη στην κατακόρυφη διεύθυνση. Οι αναλυτικές σχέσεις της βιβλιογραφίας και οι μηχανισμοί λειτουργίας και αστοχίας του πασσάλου θα χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση του μοντέλου και την ορθότητα των αποτελεσμάτων.



**Σχήμα 2.5:** Μηχανισμός ανάληψης κατακόρυφων (α) και οριζόντιων (β) φορτίων από πασσάλους και καμπύλες φορτίσεων-μετατοπίσεων με θεώρηση μη-γραμμικοτήτων (γ). (*offshore geotechnical engineering, piled foundations*)



**Σχήμα 2.6:** Μορφή καμπύλης αξονικής δύναμης-μετατόπισης στην κορυφή του πασσάλου και ονοματολογία συμβόλων (Θεμελιώσεις, Καββαδάς)

Η αξονική αντοχή του πασσάλου καθώς και η μέγιστη καθίζηση που μπορεί να αναλάβει στην κεφαλή του, όπως απεικονίζεται στο **σχήμα 2.6** είναι το άθροισμα ολικής πλευρικής αντίστασης  $Q_{su}$  και της αντίστασης στην βάση του πασσάλου  $Q_{pu}$  αφαιρώντας όμως το ίδιο βάρος του.

$$V_{ult} = Q_{pu} + Q_{su} - W'_{pile} \tag{2.1}$$

όπου η πλευρική αντίσταση τριβής είναι:  $Q_{su} = \pi D \int_0^l \tau_{su} dz = \pi D \sum_i \tau_{sui} \Delta z_i$  (2.2)

η αντίσταση στην βάση είναι:  $Q_{pu} = A_p q_{pu}$  (2.3)

και το ίδιο βάρος του πασσάλου είναι:  $W'_{pile} = A_p L \gamma$ . (2.4)

Σύμφωνα με τον DIN4017 οι συντελεστές αντίστασης αιχμής και πλευρικής τριβής δίνονται στους παρακάτω πίνακες (**πίνακας 1, 2**) συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $S_u$  για αργιλικά εδάφη.

$S_u$ (αστράγγιστη διατμητική αντοχή)	$q_{pu}$ (συντελεστές αντίστασης αιχμής) (MPa)
25	0
100	0.8
>200	1.5

**Πίνακας 1:** Συντελεστής αντίστασης αιχμής  $q_{pu}$  κατά DIN 4017

$S_u$ (αστράγγιστη διατμητική αντοχή)	$\tau_{su}$ (συντελεστές αντίστασης πλευρικής τριβής) (kPa)
25	25
100	40
>200	60

**Πίνακας 2:** Συντελεστής αντίστασης πλευρικής τριβής  $\tau_{su}$  κατά DIN 4017

Όπως θα συζητηθεί και σε επόμενο εδάφιο, η αξονική αντοχή του πασσάλου υποεκτιμάται σύμφωνα με τους συντελεστές που δίνονται από τους πίνακες του DIN, καθώς υπάρχουν κρυμμένες υπεραντοχές που δεν μπορούν να φανούν στην συντηρητική ελαστική ανάλυση, από την οποία προέκυψαν οι παραπάνω συντελεστές. Μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση είναι οι κανονισμοί API (2000).

Σύμφωνα με τους κανονισμούς από την Αμερικανική Ένωση Πετρελαίου API (2000), ο συντελεστής πλευρικής αντίστασης  $\tau_{su}$  συνδέεται γραμμικά με την αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $S_u$  μέσω ενός συντελεστή πλευρικής συνάφειας  $\alpha$  και ομοίως συμβαίνει και για τον συντελεστή αντίστασης αιχμής  $q_{pu}$ .



$$\bullet \tau_{su} = \alpha S_u \quad (2.5)$$

με τον συντελεστή συνάφειας  $\alpha$  να παίρνει τιμές :

$$\alpha = 1 - [0.5(Su - 24)/48] , \text{ για } 24 < Su < 72 \text{ kPa} \quad (2.6)$$

$$\bullet q_{pu} = N_c S_u \quad (2.7)$$

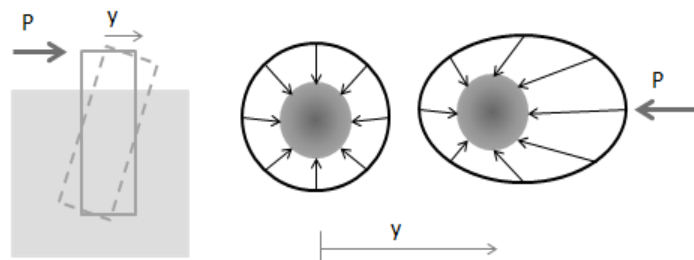
συνηθέστερα χρησιμοποιείται ο εμπειρικός συντελεστής φέρουσας ικανότητας του Skempton (1951),  $N_c=9$ . Θα ήταν πολύ συντηρητικό να θεωρήσουμε πως η αντίσταση στην αιχμή του πασσάλου είναι η τοπική τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, καθώς το έδαφος στρερεοποιείται και αυξάνει την αντοχή του με την επιβολή του κατακόρυφου φορτίου.

Γενικά οι offshore πάσσαλοι δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στις καθιζήσεις. Ωστόσο, θα πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη ότι η αντοχή σε κατακόρυφη φόρτιση μπορεί να είναι μειωμένη σε σχέση με την ιδανική φέρουσα ικανότητα που δίνουν οι αναλυτικές σχέσεις. Λόγω της ανακυκλικής φόρτισης, οι μετατοπίσεις στην κορυφή του πασσάλου μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση της αντοχής και της δυσκαμψίας του πασσάλου.

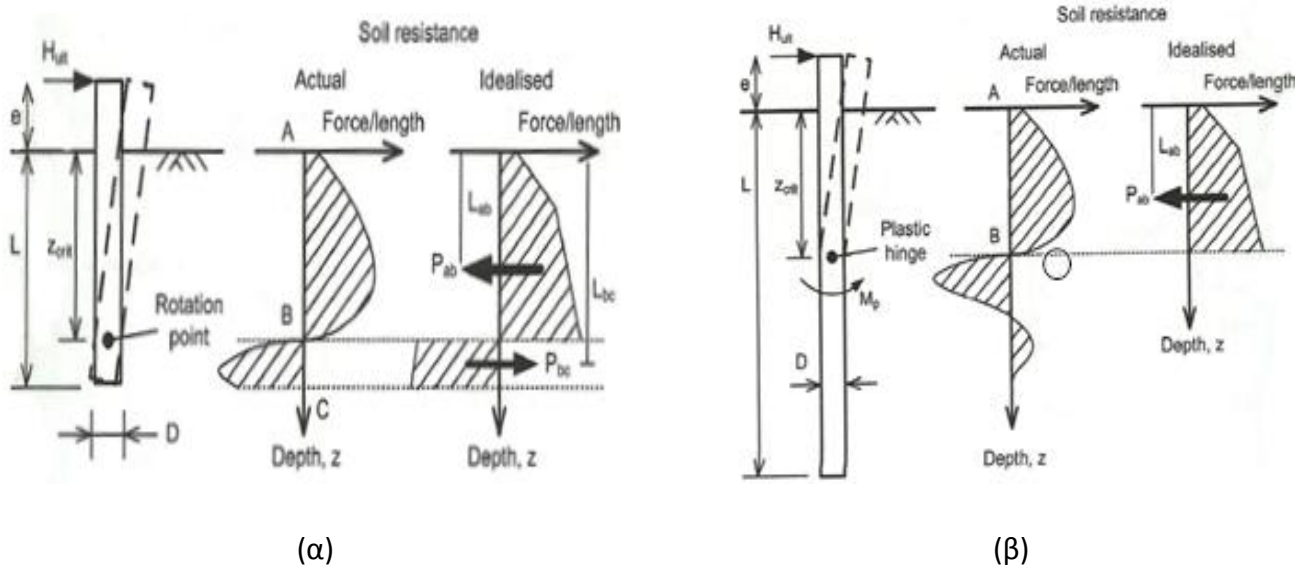
### 2.3.2 Αντοχή σε πλευρική φόρτιση

Σε αρκετές περιπτώσεις, όπως αυτή των θαλάσσιων ανεμογεννητριών, οι offshore πάσσαλοι πρέπει να αντέξουν σημαντική πλευρική φόρτιση (οριζόντια δύναμη και ροπή ανατροπής). Η πιο σημαντική διαφορά στον τρόπο ανάληψης των πλευρικών φορτίσεων σε σύγκριση με την κατακόρυφη φόρτιση είναι ότι ενεργοποιείται μόνο τα επάνω μέρος του πασσάλου σε μήκος 5-15 D (διαμέτρων). Στο **σχήμα 2.7** φαίνονται οι πλευρικές τάσεις αρχικά σε κατάσταση ισορροπίας και στη συνέχεια μετά την οριζόντια μετατόπιση του πασσάλου.

Η φέρουσα ικανότητα των πασσάλων εκφράζεται συνήθως με μη γραμμική ανάλυση σε όρους "P-y". Ο μηχανισμός αστοχίας διαφέρει ανάλογα με το αν ο πάσσαλος θεωρείται κοντός (άκαμπτος) ή μακρύς (εύκαμπτος). Η διαφοροποίηση αυτή γίνεται με βάση το ενεργό μήκος  $l_c$  (ή  $z_{crit}$  όπως φαίνεται στο **σχήμα 2.8**), όπου εμπειρικά ισχύει ότι  $l_c = 5 \div 10 D$ . Αν το μήκος του πασσάλου είναι μεγαλύτερο από το  $l_c$  τότε θεωρείται μακρύς, σε αντίθετη περίπτωση είναι κοντός.



**Σχήμα 2.7:** Διατάραξη των τάσεων πριν και μετά την πλευρική μετατόπιση του πασσάλου.



**Σχήμα 2.8 :** Μηχανισμός αστοχίας και εδαφικές αντιδράσεις για (α) κοντό πάσσαλο, (β) μακρύ πάσσαλο (offshore geotechnical engineering, piled foundations).

Όπως φαίνεται στο **σχήμα 2.8 (α)** για τον κοντό πάσσαλο υπό πλευρική φόρτιση δημιουργείται ένα σημείο περιστροφής. Πάνω από αυτό το σημείο οι εδαφικές αντιδράσεις είναι θετικές, ενώ από κάτω είναι αρνητικές. Η οριακή οριζόντια αντοχή υπολογίζεται από την επίλυση των εξισώσεων:

$$H_{ult} = P_{ab} - P_{bc} \tag{2.8}$$

$$H_{ult} e = -P_{ab}L_{ab} + P_{bc}L_{bc} \tag{2.9}$$

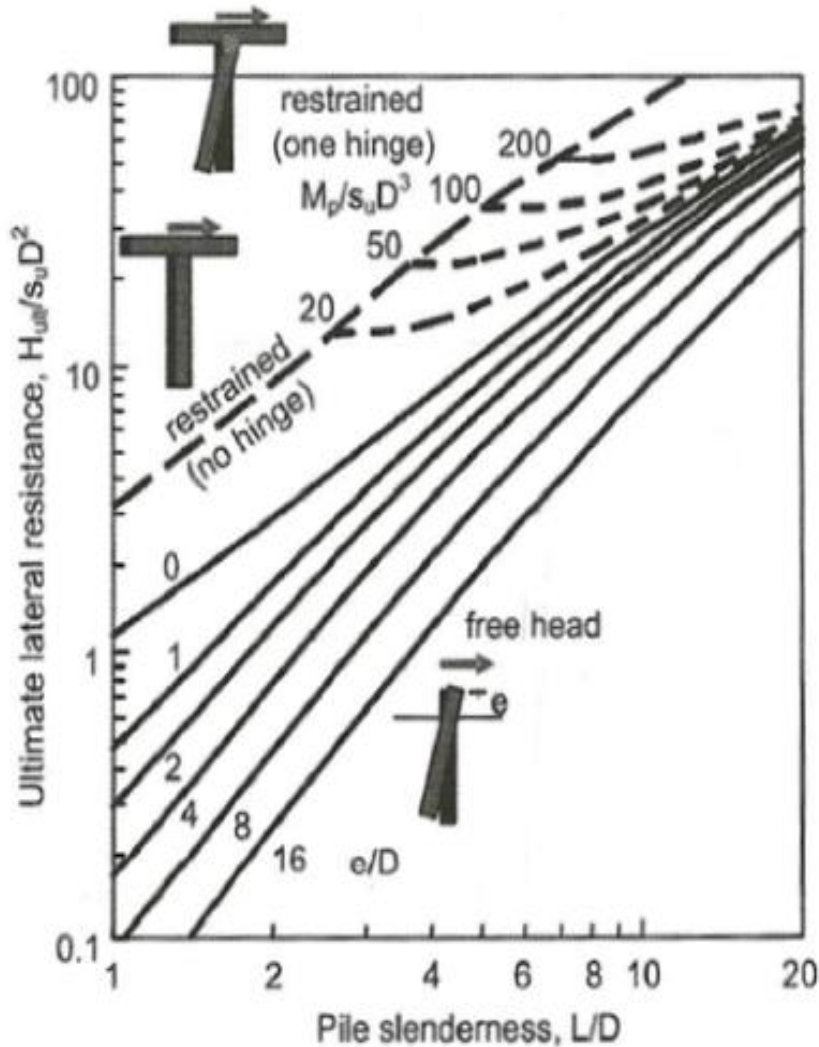
Στην περίπτωση του μακρύ πασσάλου **σχήμα 2.8 (β)**, έχουμε την δημιουργία πλαστικής άρθρωσης σε βάθος  $l_c$  από την επιφάνεια και εδαφικές αντιδράσεις σε μορφή τελικού σίγμα. Οι εδαφικές αντιδράσεις που είναι κάτω από το σημείο δημιουργίας πλαστικής άρθρωσης αλληλοαναιρούνται. Η οριακή οριζόντια αντοχή σε αυτή την περίπτωση υπολογίζεται ως εξής:

$$H_{ult} = P_{ab} \tag{2.10}$$

$$M_p = P_{ab}(L_{ab} + e) \tag{2.11}$$

Συμφώνα με τους μηχανισμούς αστοχίας που περιγράφηκαν παραπάνω προέκυψαν διαγράμματα σχεδιασμού για την αντοχή του πασσάλου υπό πλευρική φόρτιση (Fleming et al. 2009). Από το διάγραμμα (**σχήμα 2.9**) προκύπτει η οριακή οριζόντια αντοχή  $H_{ult}$  συναρτήσεως του λόγου εγκιβωτισμού  $L/D$ , της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $S_u$  και της εκκεντρότητας  $e=$

M/H. Το διάγραμμα παρουσιάζεται σε αδιάστατους όρους και περιλαμβάνει και τις τρεις πιθανές περιπτώσεις στήριξης του πασσάλου.

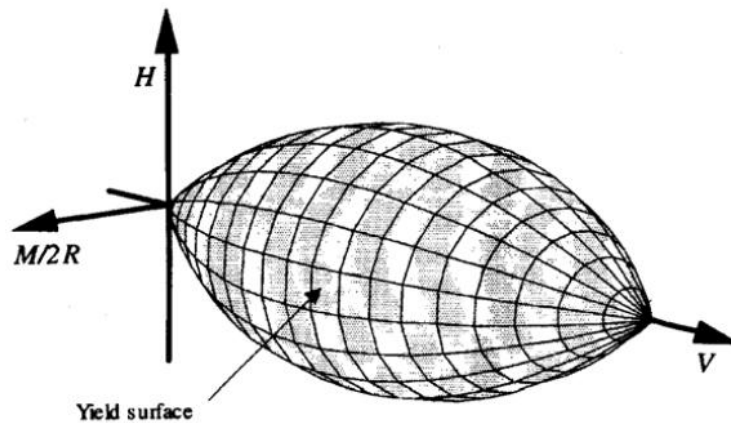


**Σχήμα 2.9:** Οριακή αντοχή σε οριζόντια δύναμη συναρτήσκει το λόγο εγκιβωτισμού του πασσάλου και των συνθηκών στήριξης. Το διάγραμμα απεικονίζεται σε αδιάστατους όρους και ισχύει για κοντούς πασσάλους.

Ο μονοπάσσαλος λόγω της μεγάλης διάστασης της διαμέτρου  $D \geq 4 \text{ m}$  του έχει μικρούς λόγους  $L/D$  και ανήκει στην κατηγορία του κοντού πασσάλου. Στην παρούσα εργασία θα επικεντρωθούμε σε λόγους εγκιβωτισμού  $L/D = 4 \div 7$ .

### 2.3.3 Περιβάλλουσα αστοχίας υπό συνδυασμένη φόρτιση M-H-V

Στην πραγματικότητα σπάνια μια κατασκευή θα είναι φορτισμένη μόνο προς μια διεύθυνση. Συνήθως συνυπάρχουν ταυτόχρονα και η κατακόρυφη και η πλευρική φόρτιση και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Οι προαναφερθείσες εξισώσεις δεν μπορούν να περιγράψουν πλήρως την οριακή κατάσταση αστοχίας υπό συνδυασμένη φόρτιση. Η νέα προσέγγιση είναι η απεικόνιση της φέρουσας ικανότητας της θεμελίωσης με διαγράμματα αλληλεπίδρασης στον M-Q-N (ή M-H-V) χώρο (**σχήμα 2.10**). Αρκετοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με αυτό το πρόβλημα για διάφορες συνθήκες εδάφους και διεπιφάνειες θεμελίου-εδάφους (Butterfield & Gottardi 1994, Martin 1994, Bransby & Randolph 1998, 1999, Taiebat & Carter 2000, Yun & Bransby 2007, Gourvenec 2007, 2008, Apostolou & Gazetas 2007).



**Σχήμα 2.10** : Περιβάλλουσα αστοχίας υπό συνδυασμένη φόρτιση M-Q-N (Byrne & Houlsby 2002)

Η γενική εξίσωση περιβάλλουσας αστοχίας υπό αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης δίνεται συνήθως σε αδιάστατους όρους και είναι της μορφής:

$$f\left(\frac{N}{AS_u}, \frac{Q}{AS_u}, \frac{M}{ABS_u}\right) \quad (2.12)$$

όπου N είναι η αξονική δύναμη, Q η κατακόρυφη δύναμη, M η ροπή ανατροπής, A το εμβαδόν της κάτοψης του θεμελίου, B το πλάτος του θεμελίου και  $S_u$  η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους.

Οι περισσότερες από αυτές τις έρευνες, όμως, αφορούν τις επιφανειακές θεμελιώσεις, ενώ οι πιο πρόσφατες από αυτές επεκτείνονται στα εγκιβωτισμένα θεμέλια για βαθμό εγκιβωτισμού  $L/D=0 \div 1$ . Μέχρι πρόσφατα υπήρχε η αντίληψη ότι το σχήμα των διαγραμμάτων

αλληλεπίδρασης παραμένει ίδιο, ενώ το μέγεθός τους αυξάνει όσο αυξάνεται και ο βαθμός εγκιβωτισμού. Η ιδέα αυτή δείχνει να καταρρίπτεται σύμφωνα με έρευνες από τους Yun & Bransby 2007, Gourvenec 2008, καθώς το σχήμα της περιβάλλουσας αστοχίας επηρεάζεται σημαντικά από τον βαθμό εγκιβωτισμού λόγω της σύζευξης του στροφικού και οριζόντιου μετακινισιακού βαθμού ελευθερίας του θεμελίου.

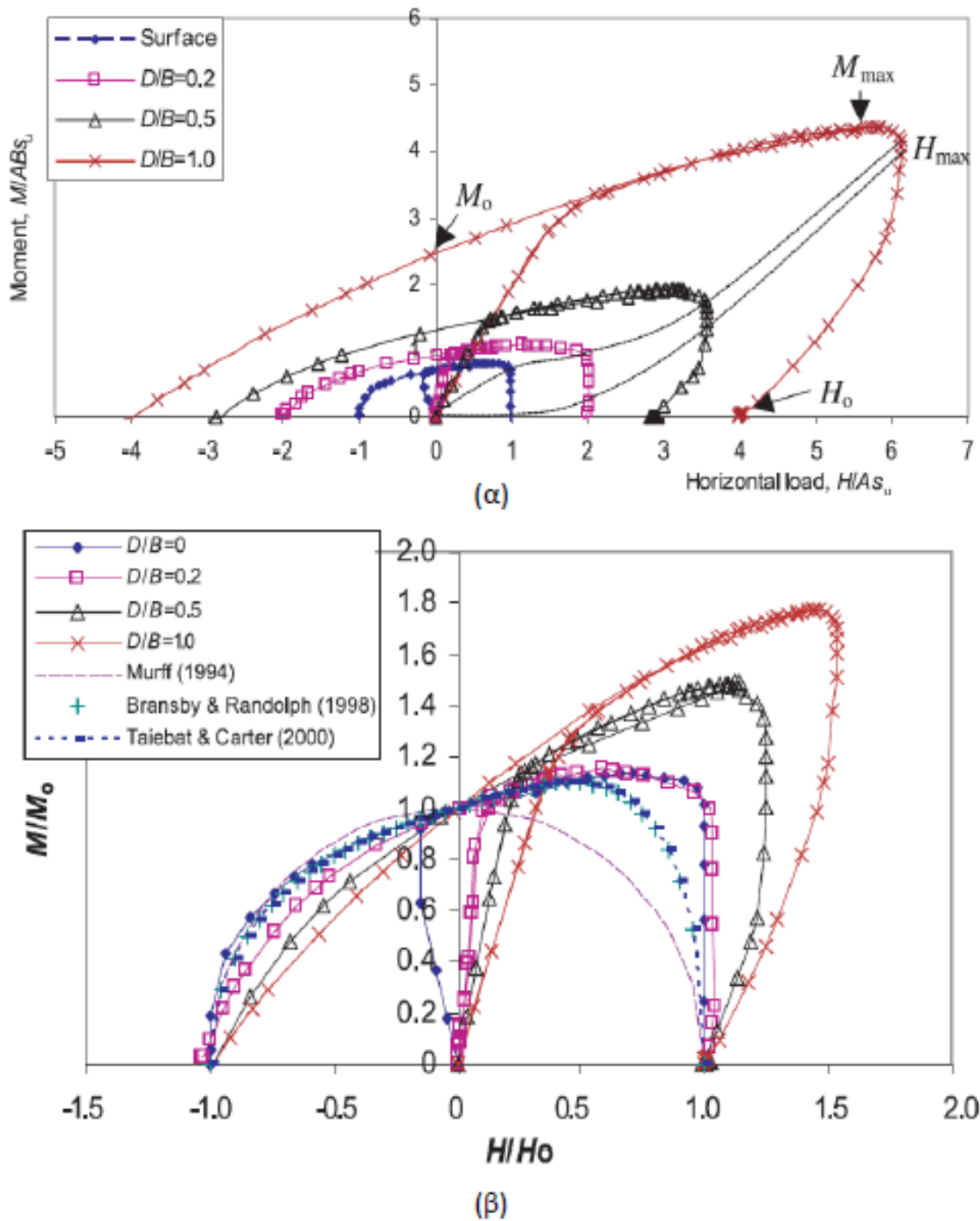
Πιο συγκεκριμένα, οι Yun & Bransby (2007) παρουσίασαν το διάγραμμα αλληλεπίδρασης M-H σε αδιάστατη και κανονικοποιημένη μορφή για διάφορους βαθμούς εγκιβωτισμού (**σχήμα 2.11**). Οι δισδιάστατες αναλύσεις έγιναν με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων για συνθήκη πλήρους επαφής εδάφους θεμελίου και απουσία κατακόρυφου φορτίου ( $V=0$ ). Είναι εμφανές ότι αυξάνει η εκκεντρότητα της περιβάλλουσας αστοχίας όσο αυξάνει και ο βαθμός εγκιβωτισμού, αφού πλέον υπάρχει εντονότερη σύζευξη του στροφικού και μετακινισιακού βαθμού ελευθερίας. Για την περιγραφή της εξίσωσης της περιβάλλουσας αστοχίας προτάθηκε η εξής μορφή:

$$\left(\frac{H}{H_{max}}\right)^2 + \left(\frac{M^*}{M_0}\right)^2 = 1 \quad (2.13)$$

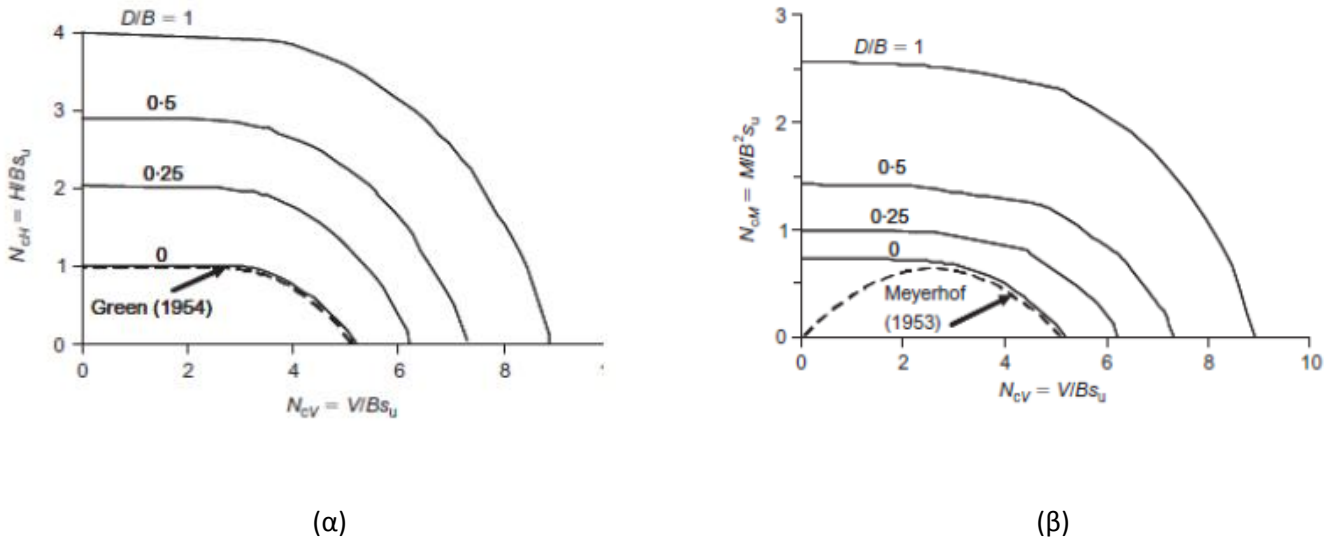
όπου  $H_{max}$  είναι η μέγιστη οριζόντια δύναμη,  $M^*=M-zH$  η ροπή στο σημείο αναφοράς του θεμελίου (εδώ είναι το μέσο),  $z=L/2$  η απόσταση του νέου σημείου αναφοράς από την στάθμη της θεμελίωσης.

Στη συνέχεια η Gourvenec (2008) παρουσίασε τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης M-H, M-V, V-H για τις ίδιες συνθήκες στην διεπιφάνεια εδάφους-θεμελίου. Στο **σχήμα 2.12** φαίνονται οι περιβάλλουσες αστοχίας V-H και M-V για διάφορους βαθμούς εγκιβωτισμού. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ενώ μεταβάλλεται το μέγεθος των καμπύλων, το σχήμα τους δείχνει να είναι ανεξάρτητο από τον βαθμό εγκιβωτισμού. Όσον αφορά το διάγραμμα αλληλεπίδρασης H-M και η Gourvenec κατέληξε στο ίδιο συμπέρασμα με τους Yun & Bransby, δηλαδή ότι αυξάνει η εκκεντρότητα και το μέγεθος των καμπύλων με την αύξηση του βαθμού εγκιβωτισμού (**σχήμα 2.13**). Επίσης έδειξε και την επίδραση της συνύπαρξης του κατακόρυφου φορτίου στην περιβάλλουσα αστοχίας σε όρους M-H (**σχήμα 2.14**).

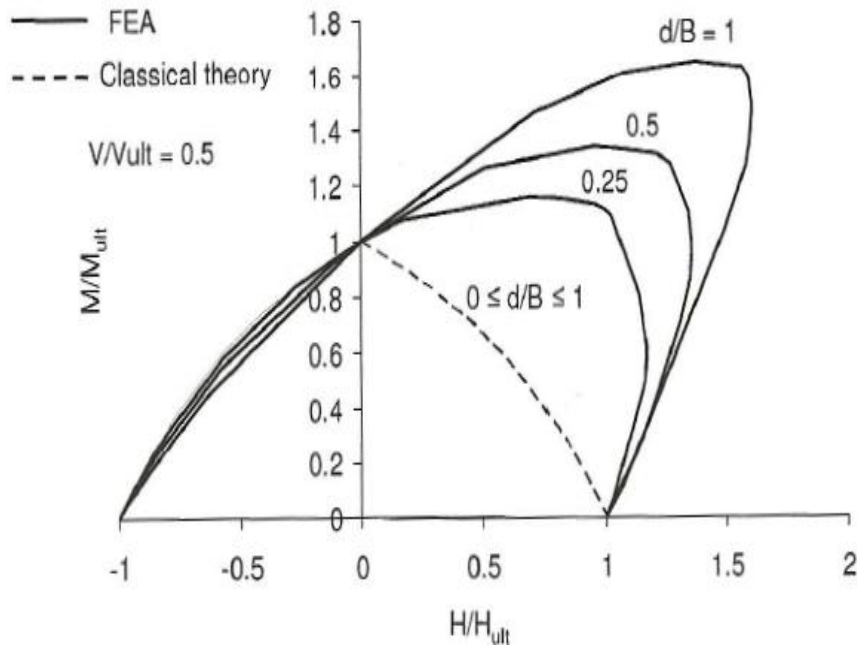
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει να απεικονιστούν οι καμπύλες αλληλεπίδρασης M-H, M-V, V-H για μεγαλύτερους βαθμούς εγκιβωτισμού, δηλαδή για την περίπτωση του κοντού πασσάλου (όπως είναι και ο μονοπάσσαλος). Ο στροφικός και ο οριζόντιος μετακινισιακός βαθμός ελευθερίας είναι απόλυτα συζευγμένοι στην περίπτωση του monopile, με αποτέλεσμα να έχει επίδραση στην μορφή της περιβάλλουσας αστοχίας.



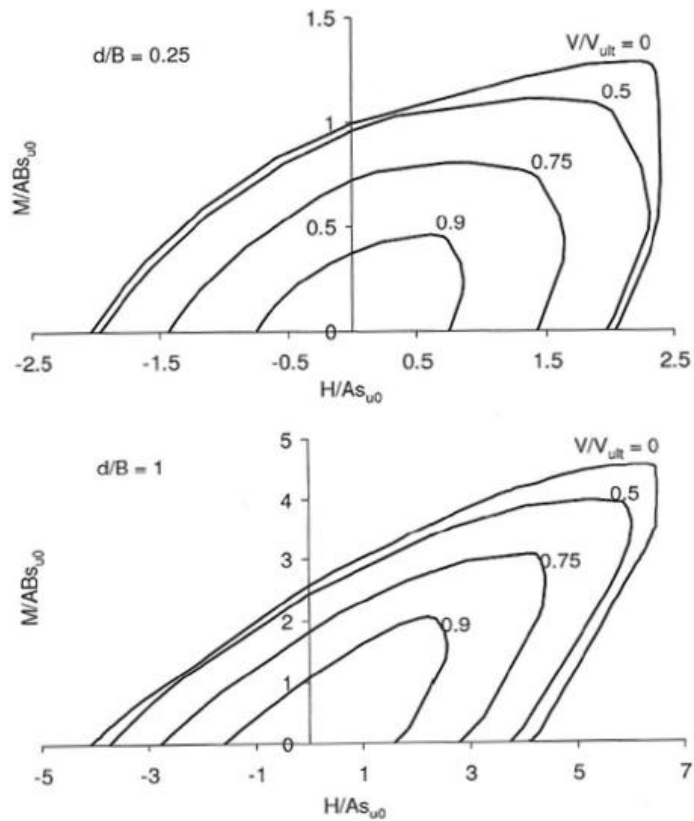
**Σχήμα 2.11:** Περιβάλλουσες αστοχίας  $M-H$  για βαθμούς εγκιβωτισμού  $D/B= 0, 0.2, 0.5, 1$  για πλήρη επαφή εδάφους-θεμελίου. Τα διαγράμματα παρουσιάζονται (α) σε αδιάστατους όρους και (β) κανονικοποιημένα ως προς  $M_0$  και  $H_0$  αντίστοιχα. (Yun & Bransby 2007)



**Σχήμα 2. 12 :** Περιβάλλουσες αστοχίας V-H (α) και M-V (β) για διάφορους βαθμούς εγκιβωτισμού (Gourvenec 2008).



**Σχήμα 2.13:** Επιρροή του βαθμού εγκιβωτισμού στο σχήμα και το μέγεθος του κανονικοποιημένου διαγράμματος αλληλεπίδρασης M-H και σύγκριση αποτελεσμάτων με την κλασική θεωρία (Gourvenec 2008).



**Σχήμα 2.14:** Επίδραση του κατακορύφου φορτίου στην περιβάουσα αστοχίας σε όρους  $M-H$  για λόγο εγκλιβωτισμού  $d/B=0.25$  (πάνω),  $d/B=1$  (κάτω), Gourvenec, 2008

## 2. 4 Ελαστικές Δυσκαμψίες

Εξίσου σημαντικό με την αντοχή του πασσάλου είναι και η απόκρισή του στην ελαστική περιοχή. Υπάρχουν ήδη αναλυτικές σχέσεις για τις πλευρικές δυσκαμψίες του εύκαμπτου πασσάλου που θα χρησιμοποιηθούν για να την αξιολόγηση των δυσκαμψιών που θα προκύψουν από τις αναλύσεις με την χρήση υπολογιστικού προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων.

Για κάθε δομικό στοιχείο ισχύει η εξής σχέση:

$$[F] = [K][y]$$

όπου  $[F]$  είναι το μητρώο δυνάμεων,  $[K]$  το μητρώο δυσκαμψίας και  $[y]$  το μητρώο μετακινήσεων. Στους πασσάλους το μητρώο δυσκαμψίας έχει την εξής μορφή:

$$[K] = \begin{bmatrix} K_V & 0 & 0 \\ 0 & K_{HH} & K_{HM} \\ 0 & K_{MH} & K_{MM} \end{bmatrix}$$



Οι αναλυτικές σχέσεις για την στρωτική και οριζόντια δυσκαμψία ισχύουν για εύκαμπτους πασσάλους. Ο χαρακτηρισμός για την ευκαμψία του πασσάλου γίνεται με γνώμονα το ενεργό μήκος  $l_c$ , όπου ισχύει:

$$l_c \approx 1.5 d (E_p/E_s)^{0.25} \quad \text{για ομοιογενή ημίχωρο}$$

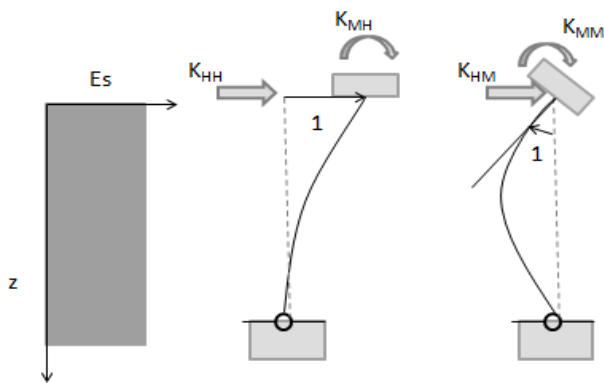
$$l_c \approx 1.5 d (E_p/E'_s)^{0.22} \quad \text{για γραμμικώς αυξανόμενο μέτρο ελαστικότητας εδάφους}$$

Σύμφωνα με το ενεργό μήκος οι πάσσαλοι χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

$$L \geq l_c \quad : \text{ εύκαμπτος} \qquad l_c/2 < L < l_c \quad : \text{ δύσκαμπτος}$$

$$L \leq l_c/2 \quad : \text{ άκαμπτος}$$

Για ομοιογενές στρώμα:



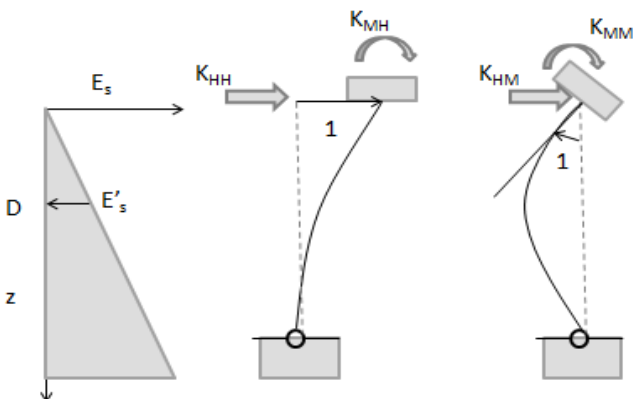
$$K_{HH} = E_s d (E_p/E_s)^{0.21}$$

$$K_{MM} = 0.15 E_s d^3 (E_p/E_s)^{0.75}$$

$$K_{HM} = -0.22 E_s d^2 (E_p/E_s)^{0.50}$$

**Σχήμα 2.15.** Οριζόντια και στρωτική δυσκαμψία εύκαμπτου πασσάλου για ομοιογενές έδαφος (Gazetas 1991)

Για έδαφος "Gibson":



$$K_{HH} = 0.6 E'_s d (E_p/E'_s)^{0.35}$$

$$K_{MM} = 0.15 E'_s d^3 (E_p/E'_s)^{0.80}$$

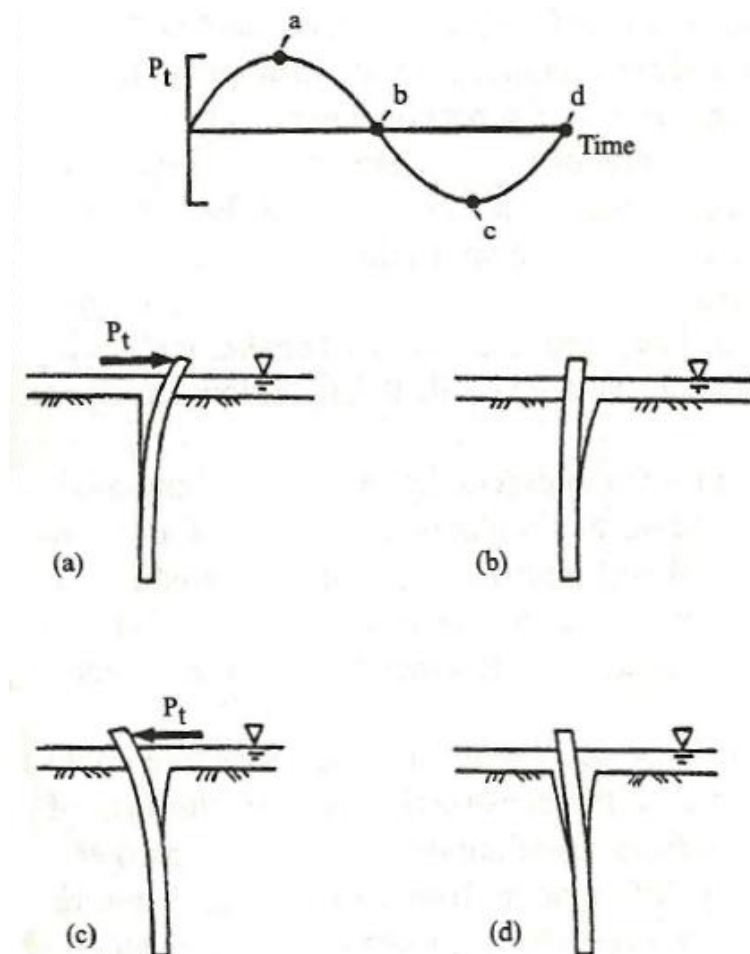
$$K_{HM} = -0.17 E'_s d^2 (E_p/E'_s)^{0.60}$$

**Σχήμα 2.16.** Οριζόντια και στρωτική δυσκαμψία εύκαμπτου πασσάλου για ανομοιογενές έδαφος τύπου Gibson (Gazetas 1991)

## 2.5 Ανακυκλική Φόρτιση

Στις offshore κατασκευές η ανακυκλική φόρτιση είναι αναπόφευκτη, καθώς οι φόρτιση που δίνουν τα κύματα αλλά και ο άνεμος είναι από την φύση τους ανακυκλικές. Η ανεμογεννήτρια στην διάρκεια ζωής της υποβάλλεται σε εκατομμύρια κύκλους φόρτισης- αποφόρτισης- επαναφόρτισης. Πολύ λίγοι από αυτούς τους κύκλους είναι μεγάλου πλάτους (κυρίως λόγω ακραίων καιρικών συνθηκών, π.χ. κατά την διάρκεια ισχυρής καταιγίδας), ενώ οι περισσότεροι κύκλοι είναι μικρού πλάτους (φορτία λειτουργίας της ανεμογεννήτριας).

Η ανακυκλική φόρτιση είτε πρόκειται για κύκλους μικρού πλάτους είτε για μεγάλου, έχει σημαντικές επιπτώσεις στην απόκριση του θεμελίου, καθώς οι παραμένουσες παραμορφώσεις μειώνουν (ή και εκμηδενίζουν) την πλευρική αντίσταση του πασσάλου. Για αργιλικά εδάφη είναι πολύ πιθανή η δημιουργία κενού (scour) γύρω από τον πάσσαλο κοντά στην επιφάνεια (**σχήμα 2.17**). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της αξονική αντοχής, της οριζόντιας αντοχής και της δυσκαμψίας του πασσάλου. Επίσης η συσσώρευση παραμορφώσεων και στροφών (ιδίως αν συμβαίνει προς μια διεύθυνση) έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της κλίσης της ανεμογεννήτριας και την δημιουργία επιπρόσθετων ροπών (φαινόμενα “P-δ”). Η χρόνια συσσώρευση αυτής της συμπεριφοράς μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια λειτουργικότητας της ανωδομής ή ακόμα και σε αστοχία.



**Σχήμα 2.17 :** Δημιουργία κενού (scour) γύρω από τον πάσσαλο λόγω ανακυκλικής φόρτισης

Έχει παρατηρηθεί ότι σε αμμώδη εδάφη ότι το φαινόμενο της δημιουργίας κενού γύρω από τον πάσσαλο δεν είναι τόσο έντονο και μάλιστα έχουν καταγραφεί περιπτώσεις που το κενό ξαναγεμίζει από το ίδιο το έδαφος (self-healing). Ωστόσο, τα αμμώδη εδάφη είναι επιρρεπή στο φαινόμενο της ρευστοποίησης. Υπό συγκεκριμένες συνθήκες (πλήρως κορεσμένο εδαφικό υλικό, χαμηλή διαπερατότητα) η ανακυκλική φόρτιση μπορεί να συντείνει στην αύξηση των υδατικών πιέσεων πόρων μετά από την ολοκλήρωση κάθε κύκλου. Όταν οι υδατικές πιέσεις εξισωθούν με τις ενεργές τάσεις του εδάφους, το εδαφικό υλικό χάνει την διατμητική του αντοχή και η θεμελίωση την φέρουσα ικανότητά της. Το φαινόμενο αυτό, όμως είναι αρκετά σπάνιο γιατί η ανακυκλική φόρτιση λόγω κυμάτων και ανέμου είναι μεγάλων περιόδων ( $T \approx 10 \text{ sec}$ ). Στην παρούσα εργασία θα εξεταστούν μόνο αργιλικά εδάφη και η αναφορά των προαναφερθέντων φαινομένων είναι καθαρά βιβλιογραφική.

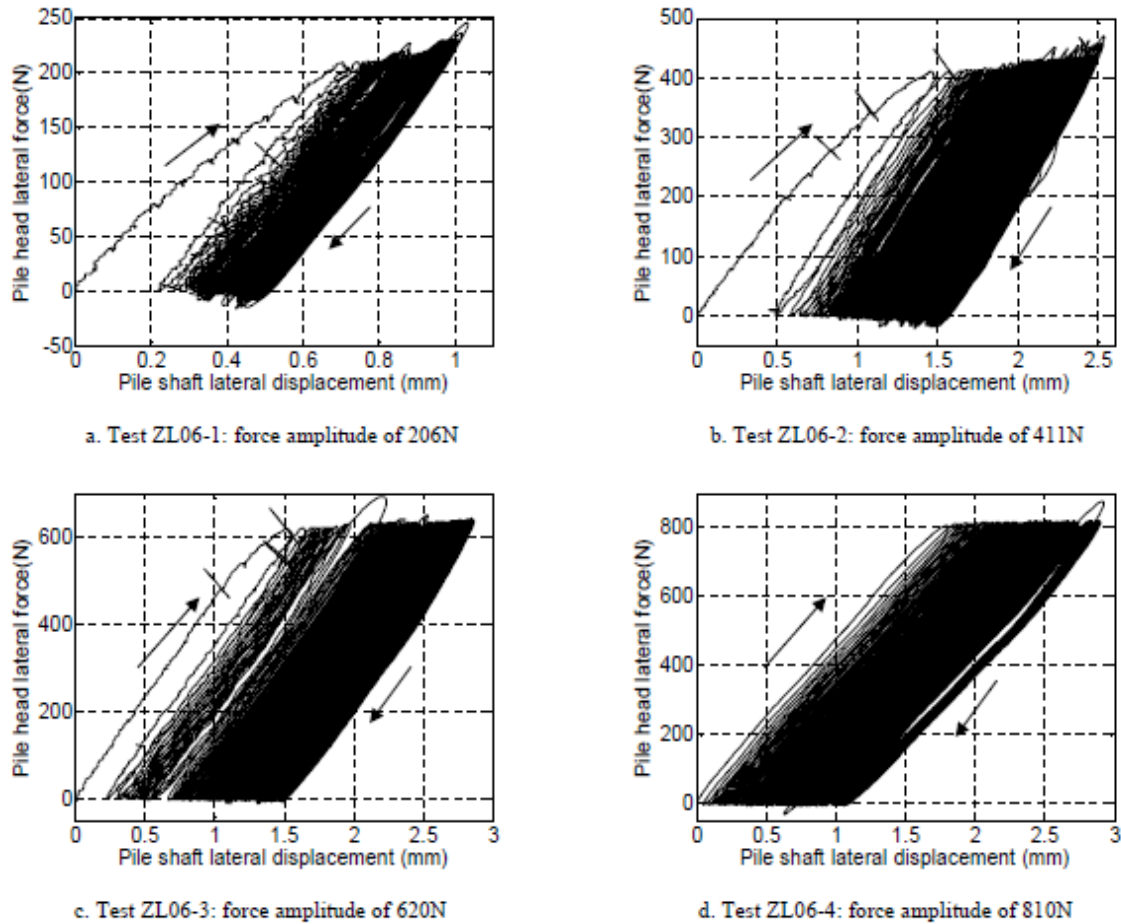
Αρκετοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με την ανακυκλική φόρτιση των πασσάλων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από πείραμα μεγάλης κλίμακας, οι Reese et al (1974) πρότειναν μια ημι-εμπειρική μη-γραμμική προσέγγιση στην οποία χρησιμοποιούν εμπειρικούς μειωτικούς συντελεστές για την απομείωση της στατικής καμπύλης P-γ. Η μέθοδος αυτή όμως είναι ανεξάρτητη από τον αριθμό των κύκλων και την επίδρασή τους. Στη συνέχεια οι Matlock et al. (1978) και Long & Vanneste (1994) με την χρήση μεθόδων διακριτών στοιχείων βελτίωσαν την προσέγγιση P-γ λαμβάνοντας υπόψη τον αριθμό των κύκλων.

Η πιο πρόσφατη προσέγγιση είναι αυτή των Li, Haigh & Bolton (2010) που πραγματοποίησαν μια σειρά πειραμάτων μικρής κλίμακας σε φυγοκεντριστή. Επέβαλαν αξονική ή οριζόντια δύναμη σε διάφορα πλάτη και κατέγραψαν την συσσώρευση των κατακόρυφων ή οριζόντιων μετακινήσεων συναρτήσει των κύκλων (**σχήμα 2.18**). Στο σχήμα απεικονίζονται τα διαγράμματα οριζόντιας δύναμης-μετατόπισης για επιβολή μονόπλευρης ανακυκλικής οριζόντιας δύναμης μεγέθους  $H = 206, 411, 620$  και  $810 \text{ N}$  για 100 έως 1000 κύκλους. Και στις τέσσερις περιπτώσεις παρατηρείται συσσώρευση οριζόντιων μετατοπίσεων. Η τάση αυτή περιγράφεται από την εξίσωση (Verdure et al. 2003):

$$y_N = y_1 (1 + C_N \ln N)$$

όπου  $y_1$  είναι η αρχική οριζόντια μετακίνηση στο τέλος του πρώτου κύκλου,  $C_N$  συντελεστής του ρυθμού αύξησης της μετατόπισης,  $N$  ο αριθμός των κύκλων,  $y_N$  η οριζόντια μετακίνηση στο τέλος του Νιοστού κύκλου.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να αναλύσει την πραγματική ανακυκλική φόρτιση σε υφιστάμενες τυπικές θαλάσσιες ανεμογεννήτριες με την χρήση υπολογιστικών προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση σταθερής φοράς ανέμου και ανακυκλική φόρτιση λόγω θαλάσσιων κυματισμών. Η περίπτωση αυτή θεωρείται δυσμενής ως προς την θεμελίωση της ανεμογεννήτριας καθώς η συσσώρευση στροφών και παραμορφώσεων θα είναι εντονότερη προς την φορά άσκησης της δύναμης του ανέμου.



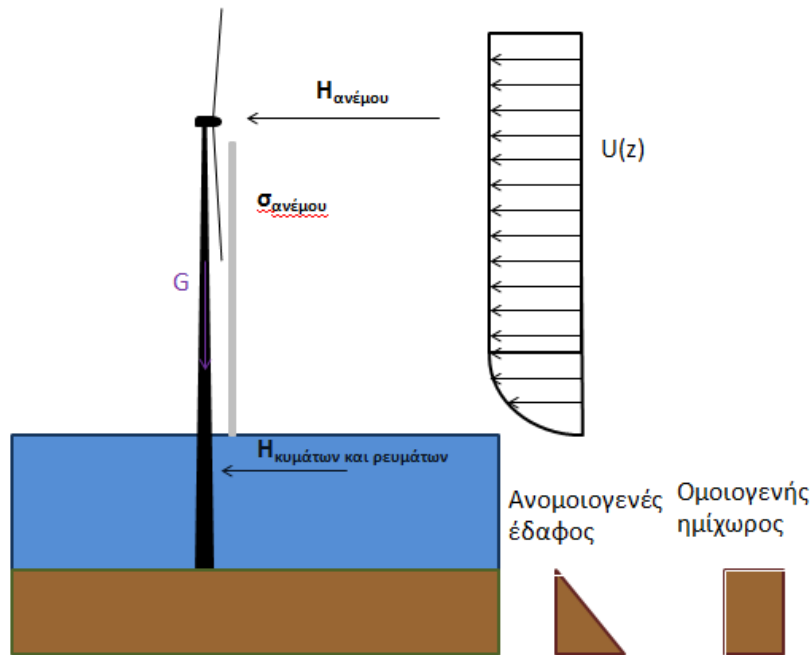
**Σχήμα 2.18:** Διαγράμματα οριζόντιας δύναμης- μετατόπισης για ανακυκλική φόρτιση με εμφανή σταδιακή συσσώρευση μετατοπίσεων. Τα αποτελέσματα έχουν προκύψει από εργαστηριακό πείραμα για 100-1000 κύκλους φόρτισης (Li, Haigh & Bolton, 2010).

## 2.6 Φορτίσεις Ανεμογεννήτριας

### 2.6.1 Εισαγωγή

Οι θαλάσσιες ανεμογεννήτριες υποβάλλονται συνεχώς σε συνδυασμένη φόρτιση, λόγω της ανεμοπίεσης και των υδροδυναμικών φορτίσεων. Συγκεκριμένα, ο πύργος της ανεμογεννήτριας και κατά συνέπεια η θεμελίωση υπόκεινται στις εξής μορφές φόρτισης (**σχήμα 2.19**):

- Στατικές (ίδιον βάρος της κατασκευής G)
- Ανακυκλικές (δύναμη λόγω του ανέμου και των κυμάτων  $H_{\text{ανέμου}}$ ,  $H_{\text{κυμάτων}}$  και ρευμάτων )
- Δυναμικές (σεισμική φόρτιση)



Σχήμα 2.19: Τυπικές φορτίσεις ανεμογεννήτριας

### 2.6.2 Δύναμη του ανέμου ως συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου

Οι πιέσεις που ασκεί ο άνεμος πάνω στην ανεμογεννήτρια μπορούν να μεταφραστούν σε μία συγκεντρωμένη δύναμη στο ύψος του ρότορα σύμφωνα με τους κανονισμούς API 1993:

$$F = \frac{w}{2g} V^2 C_g A$$

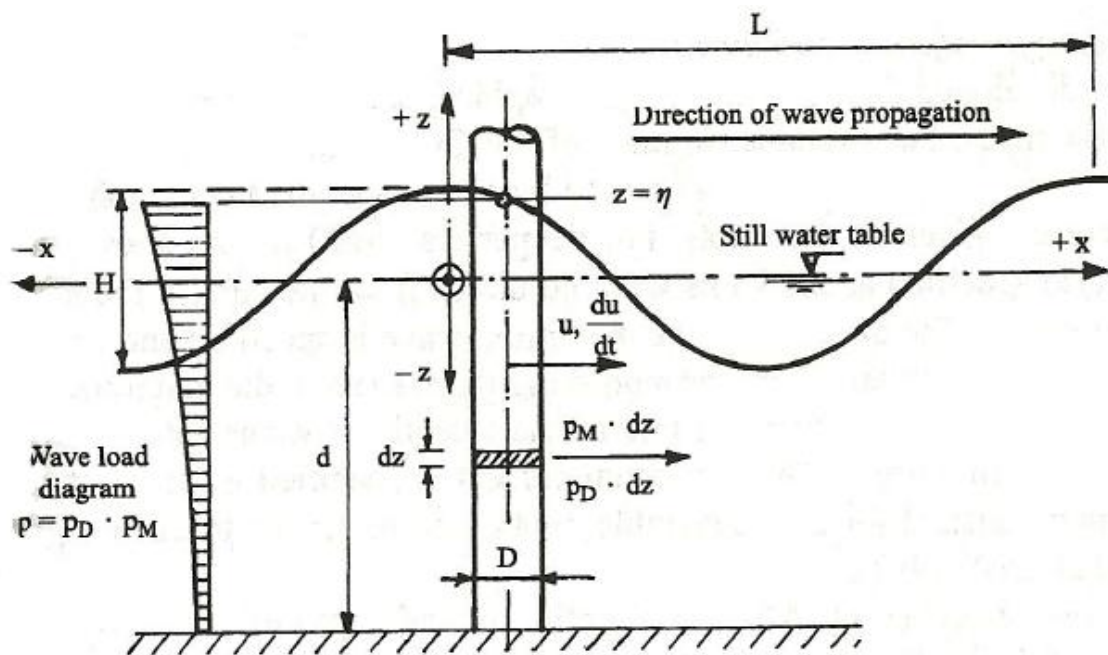
όπου  $F$  = η συγκεντρωμένη δύναμη του ανέμου,  $w$  το ειδικό βάρος του ανέμου,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $V$  η ταχύτητα του ανέμου,  $C_g$  συντελεστής σχήματος,  $A$  το εμβαδόν του ρότορα. Για ανεμογεννήτριες ο συντελεστής σχήματος λαμβάνεται ίσος με  $C_g = \frac{7}{V_{hub}} \approx 0.3$ ,  $V_{hub}$  όπου είναι η ταχύτητα του ανέμου στο κέντρο του ρότορα.

### 2.6.3 Δυνάμεις λόγω θαλάσσιων κυματισμών

Η δύναμη που ασκείται στον πύργο της ανεμογεννήτριας (κυλινδρική διατομή, **σχήμα 2.20**) προκύπτει από το άθροισμα των συρτικών δυνάμεων και των αδρανειακών δυνάμεων (Morison 1950):

$$p = p_D + p_M = C_D \frac{1}{2} \frac{\gamma_w}{g} D u |u| + C_M \frac{\gamma_w}{g} \frac{D^2 \pi}{4} \frac{\partial u}{\partial t}$$

όπου  $\mathbf{p}$  είναι το διάνυσμα της υδροδυναμικής δύναμης ανά μονάδα μήκους εφαρμοζόμενο στον άξονα του μέλους (εδώ κατακόρυφος),  $\mathbf{p}_D$  ο διάνυσμα της συρτικής δύναμης ανά μονάδα μήκους εφαρμοζόμενο στον άξονα του μέλους στο επίπεδο του άξονα (εδώ κατακόρυφος),  $\mathbf{p}_M$  ο διάνυσμα της αδρανειακής δύναμης ανά μονάδα μήκους εφαρμοζόμενο στον άξονα του μέλους στο επίπεδο του άξονα (εδώ κατακόρυφος),  $C_D$  συντελεστής συρτικής δύναμης,  $\gamma_w$  το ειδικό βάρος νερού,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $D$  η ενεργός διάμετρος κυλινδρικού σωλήνα,  $\mathbf{u}$  το διάνυσμα της συνιστώσας της ταχύτητας ως προς τον άξονα του μέλους,  $|\mathbf{u}|$  η απόλυτη τιμή του  $u$ ,  $C_M$  ο αδρανειακός συντελεστής,  $A$  η εκτεθειμένη επιφάνεια,  $\frac{\partial u}{\partial t}$  το διάνυσμα της οριζόντιας συνιστώσας της τοπικής επιτάχυνσης του κύματος ως προς τον άξονα του μέλους.



**Σχήμα 2.20:** Δράσεις θαλάσσιων κυματισμών σε κατακόρυφη σωληνοειδής διατομή (τύπου πασσάλου).

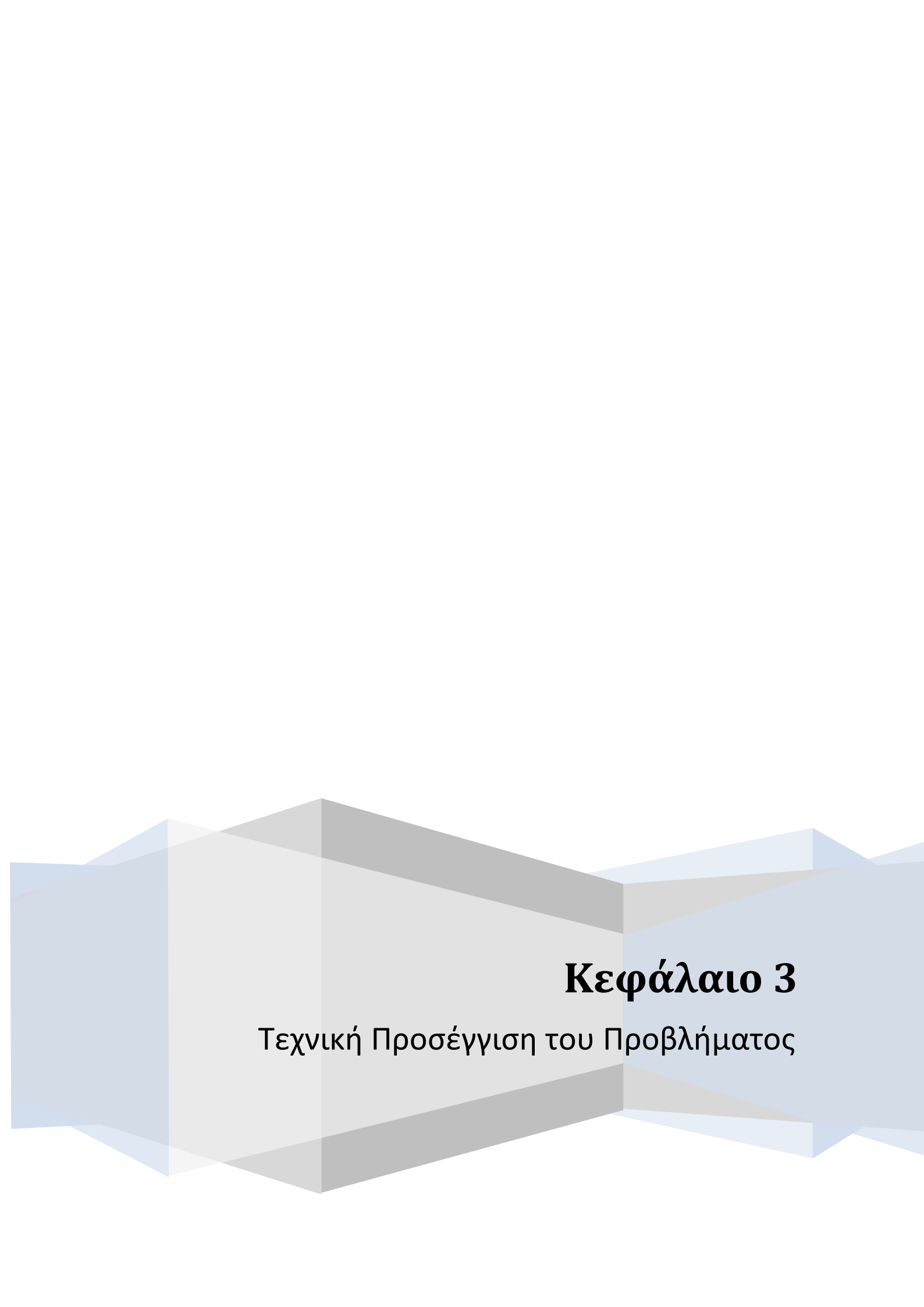
#### 2.6.4 Δυνάμεις λόγω θαλάσσιων ρευμάτων

Σύμφωνα με τους κανονισμούς του AASHTO 1992 μια απλοποιημένη προσέγγιση για την εύρεση της δύναμης των θαλάσσιων ρευμάτων σε κατασκευές είναι:

$$P = K V^2$$

όπου  $V$  είναι η ταχύτητα ροής του ρεύματος και  $K$  μια σταθερά που εξαρτάται από το σχήμα του κατασκευαστικού στοιχείου. Για κυλινδρικές διατομές ισχύει  $K=0.34$ .





# **Κεφάλαιο 3**

Τεχνική Προσέγγιση του Προβλήματος





## Κεφάλαιο 3 – Τεχνική Προσέγγιση του Προβλήματος

### 3.1 Σκοπός της εργασίας

Ο σκοπός της εργασίας είναι η αριθμητική ανάλυση και ο σχεδιασμός θεμελιώσεων υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Πιο συγκεκριμένα, η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην μελέτη και πλήρη κατανόηση της απόκρισης του μονοπασσάλου υπό στατική και ανακυκλική φόρτιση.

Τα τελευταία είκοσι χρόνια ο κλάδος της αιολικής ενέργειας μέσω των υπεράκτιων ανεμογεννητριών έχει γνωρίσει ιδιαίτερη άνθιση. Πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με την απόκριση τόσο του πύργου όσο και της θεμελίωσης της ανεμογεννήτριας [Long & Vanneste, 1994; Moss et al., 1998; Byrne, 2000, 2003; Verdure, 2003; Kellezi & Hansen, 2003; Haigh & Bolton, 2007; Yun & Bransby 2007; Randolph 2007, Gourvenec 2008; Wichtman et al., 2009; Petrini, Li & Bontempi, 2010]. Οι κατασκευές αυτές αποτελούν μια ιδιαίτερη κατηγορία καθώς είναι ένα σύστημα ελαφριά φορτισμένο με εξαιρετικά υψίκορμη ανωδομή που καλείται να αντέξει εκατομμύρια κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης λόγω των συνθηκών του φυσικού τους περιβάλλοντος.

Το ερευνητικό ενδιαφέρον της εργασίας αφορά τους εμπηγνυόμενους μονοπασσάλους με λόγους έμπηξης  $L/D=4, 5, 6, 7$ . Στο πρώτο στάδιο της εργασίας καταγράφεται η φέρουσα ικανότητα του μονοπασσάλου υπό στατική και συνδυασμένη φόρτιση. Το σύνολο των αναλύσεων έγιναν για ομοιογενές αργιλικό έδαφος υπό αστράγγιστες συνθήκες και με θεώρηση μη-γραμμικοτήτων στην διεπιφάνεια εδάφους-θεμελίου. Ωστόσο, μελετήθηκε επιγραμματικά και η επιρροή της ανομοιογένειας του εδάφους και της θεώρησης της πλήρους επαφής μεταξύ εδαφικών στοιχείων και μονοπασσάλου.

Στην συνέχεια, αναλύθηκαν και καταγράφηκαν η οριζόντια μετακινησιακή και στροφική δυσκαμψία του μονοπασσάλου, καθώς και η επίδραση της ενδοσιμότητας του εδάφους στην ιδιοπερίοδο της κατασκευής.

Ιδιαίτερης σημασίας ήταν η ανάλυση της ανακυκλικής φόρτισης της κατασκευής. Μελετήθηκαν τρεις συνδυασμοί φόρτισης δυνάμεων ανέμου και κυμάτων για τις τρεις πιο χαρακτηριστικές περιπτώσεις ανεμογεννητριών 2MW (μικρή), 3.5 MW (μέση), 5 MW (μεγάλη ανεμογεννήτρια). Επικεντρωθήκαμε κυρίως στην απόκριση της θεμελίωσης σε όρους ροπής, παραμένουσας στροφής και καθιζήσεων, καθώς και στην απομείωση της στροφικής δυσκαμψίας με την πάροδο των κύκλων. Προτάθηκε στην συνέχεια μια πρόβλεψη της παραμένουσας στροφής ύστερα από εκατομμύρια κύκλους φόρτισης.

### 3.2 Τεχνική προσέγγιση του προβλήματος

#### 3.2.1 Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων

Η ανάλυση του προβλήματος έγινε με την χρήση τρισδιάστατων μοντέλων στο προγραμματιστικό περιβάλλον πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS . Αρχικά ο μονοπάσσαλος και στην συνέχεια ο πύργος της ανεμογεννήτριας που εξετάζουμε στην παρούσα εργασία έχουν απόλυτη συμμετρία (κυλινδρικές διατομές). Επαρκεί, λοιπόν, να προσομοιώσουμε την μισή γεωμετρία του μοντέλου (**σχήμα 3.1** )

Οι διαστάσεις του μοντέλου όπως φαίνονται και στο **σχήμα 3.1** είναι 20D κατά την οριζόντια διεύθυνση x, 5D κατά την διεύθυνση y και 10D στην κατακόρυφη διεύθυνση z (όπου D είναι η διάμετρος του πασσάλου). Το πλήθος των πεπερασμένων στοιχείων είναι της τάξης των 30.000. Για την διακριτοποίηση των στοιχείων επιλέχθηκε πύκνωση στις περιοχές γύρω από την θεμελίωση και σταδιακή αραίωση προς τα άκρα και στους τρεις άξονες. Με χρήση κατάλληλης εντολής έχει επιβληθεί κινηματικός περιορισμός στους κόμβους της βάσης κατά z και σε όλους τους ακραίους κόμβους κατά x και κατά y.

Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του εδάφους είναι οκτακομβικά, εξαεδρικά τύπου “brick-type” (C3D8) και υπακούουν σε κατάλληλο ελαστοπλαστικό νόμο συμπεριφοράς που περιγράφεται στο επόμενο υποκεφάλαιο. Επειδή η κατασκευή μας είναι υπεράκτια, η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους για το ομοιογενές προφίλ είναι  $S_u = 60$  kPa , το ειδικό βάρος  $\gamma = 10$  kN/m<sup>3</sup> και το μέτρο ελαστικότητας Young  $E = 1800S_u$ . Στις αναλύσεις που έγιναν για το ανομοιογενές προφίλ εδάφους θεωρήθηκε γραμμικά αυξανόμενο με το βάθος  $S_u$ , που υπακούει στην εξίσωση  $S_u = 30 + 3z$  (kPa). Το έδαφος χωρίστηκε σε στρώσεις των δυο μέτρων, όπου κάθε στρώση θεωρείται πως έχει διαφορετικό  $S_u$ .

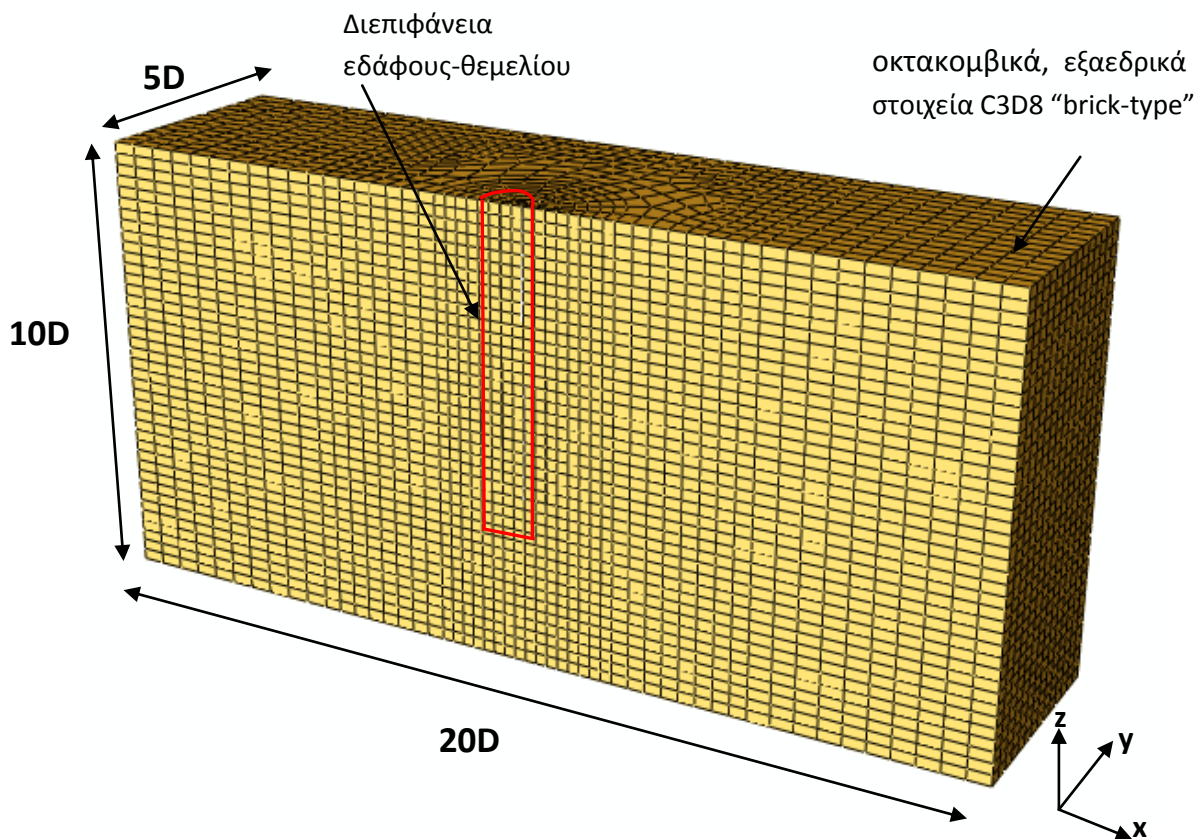
Ο μονοπάσσαλος που εξετάζουμε είναι εμπηγνυόμενος με πλήρη επαφή εδάφους-θεμελίου κατά την διείδυση. Για τα στοιχεία του εδάφους εσωτερικά του πασσάλου χρησιμοποιήσαμε τα ίδια στοιχεία με αυτά του υπόλοιπου εδάφους, ενώ ο μονοπάσσαλος προσομοιώθηκε με γραμμικά ελαστικά στοιχεία δοκού κυλινδρικής διατομής (B13) με μέτρο ελαστικότητας ίσο με αυτό του χάλυβα  $E_{steel} = 210000000$  kPa. Όλοι οι ακραίοι κόμβοι της θεμελίωσης ενώθηκαν με τον κεντρικό κόμβο με νοητά άκαμπτα στοιχεία τύπου MPC, ούτως ώστε όλα τα στοιχεία του μονοπασσάλου (ελαστική δοκός και έδαφος) να έχουν ενιαία απόκριση.

Για την υποβολή του συστήματος ανεμογεννήτριας-θεμελίου σε ανακυκλική φόρτιση χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα με την ανωδομή (**σχήμα 3.2**). Η μάζα θεωρήθηκε συγκεντρωμένη στην κορυφή της ανωδομής και ο πύργος προσομοιώθηκε επίσης με γραμμικά ελαστικά στοιχεία δοκού κυλινδρικής διατομής (B13) με μέτρο ελαστικότητας  $E_{steel} = 210000000$  kPa. Στις αναλύσεις αυτές λαμβάνονται υπόψη τα φαινόμενα P-δ. Ωστόσο στις αναλύσεις για την εύρεση της ακαμψίας της θεμελίωσης χρησιμοποιήθηκε πολύ υψηλό μέτρο ελαστικότητας, ώστε ο πύργος να θεωρείται πρακτικά άκαμπτος.

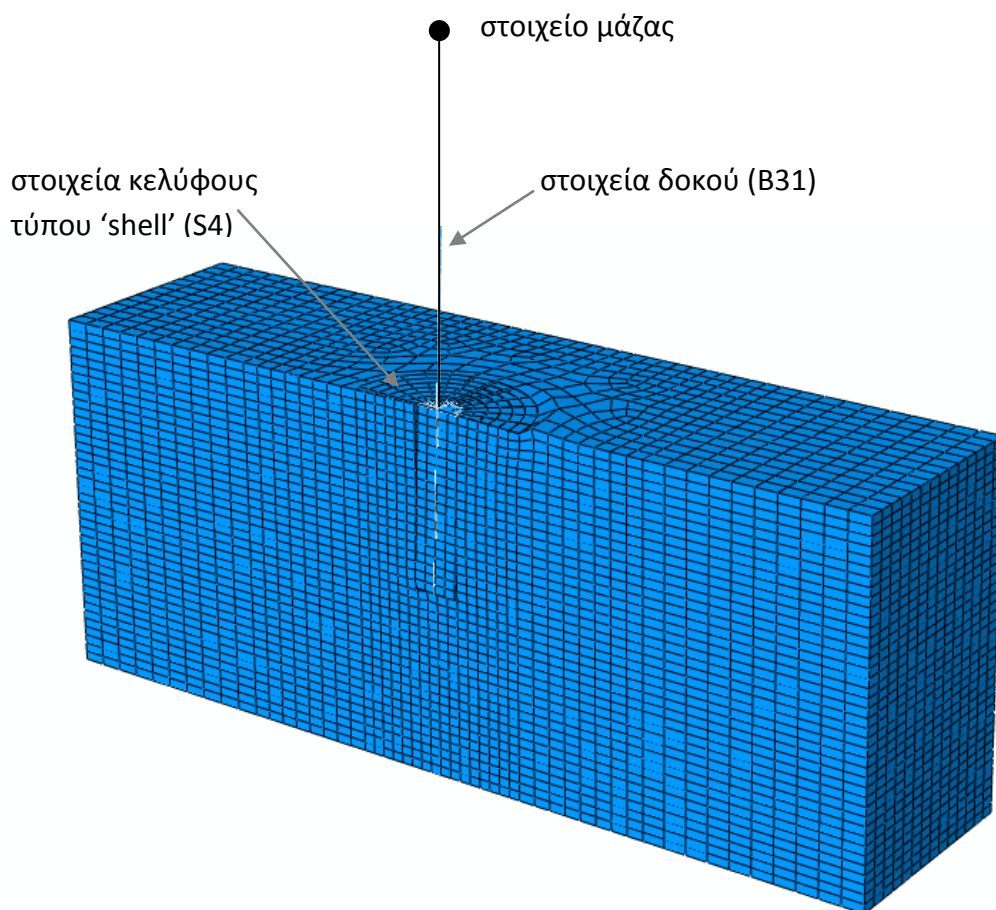
Στο τέλος της εργασίας προτάθηκε μια εναλλακτική λύση για την βελτίωση της απόκρισης του μονοπασσάλου υπό ανακυκλική φόρτιση. Η βελτίωση του μονοπασσάλου γίνεται μέσω ενός επιπλέον κυκλικού κομματιού γύρω από τον μονοπάσσαλο στην ένωσή του με το έδαφος. Για την προσομοίωση των στοιχείων του επιπλέον κομματιού χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία τύπου shell.

Για την προσομοίωση της διεπιφάνειας εδάφους-θεμελίου θεωρήθηκε ως πιο αντιπροσωπευτική η χρήση στοιχείων διεπιφάνειας. Τα στοιχεία αυτά ενώνουν τους κόμβους του εδάφους με τους αντίστοιχους κόμβους του μονοπασσάλου και ενώ αρχικά είναι σε πλήρη επαφή μεταξύ τους, στην συνέχεια επιτρέπεται η ολίσθηση και η αποκόλληση υπό προϋποθέσεις. Όσον αφορά την ολίσθηση, η συμπεριφορά αυτή επιτυγχάνεται με την χρήση συντελεστή συνάφειας  $\alpha$ . Όταν η διατμητική τάση (περιμετρικά του μονοπασσάλου) ξεπεράσει ένα ποσοστό της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής ( $\alpha S_u$ ), έχουμε ολίσθηση του θεμελίου κατά μήκος της διεπιφάνειας. Η εφελκυστική αντοχή της διεπιφάνειας εδάφους θεμελίου είναι μηδενική, με αποτέλεσμα όταν τείνουν να αναπτυχθούν εφελκυστικές τάσεις να έχουμε αποκόλληση του θεμελίου από το έδαφος.

Τέλος εξετάστηκε και η συμπεριφορά του θεμελίου με συνθήκες πλήρους επαφής εδάφους-θεμελίου. Η θεώρηση αυτή είναι ιδιαίτερα συντηρητική όπως θα συζητήσουμε και σε επόμενο κεφάλαιο, καθώς επιτρέπει την ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων στο έδαφος και αποτρέπει την ολίσθηση μεταξύ των δυο στοιχείων.



**Σχήμα 3.1:** Τρισδιάστατο προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων εδάφους-μονοπασσάλου



**Σχήμα 3.2:** Τρισδιάστατο προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων εναλλακτικής θεμελίωσης-ανωδομής

### 3.2.2 Καταστατικό μοντέλο εδάφους

Η ελαστοπλαστική συμπεριφορά του εδάφους ακολουθεί το κριτήριο διαρροής Von Mises με μη-γραμμικό κινηματικό νόμο κράτυνσης και συσχετισμένο νόμο πλαστικής ροής. Επιλέχθηκε το συγκεκριμένο καταστατικό προσομοίωμα καθώς θεωρείται το καταλληλότερο για να αποδώσει την πλαστική συμπεριφορά της αργίλου υπό αστράγγιστες συνθήκες, η οποία είναι ανεξάρτητη από την μέση ενεργό τάση.

Η εξέλιξη των τάσεων σύμφωνα με το κριτήριο διαρροής Von Mises είναι η εξής:

$$\sigma = \sigma_0 + \alpha$$

όπου  $\sigma_0$  είναι η σταθερή τιμή της τάσης σε μηδενική πλαστική παραμόρφωση και  $\alpha$  η συνιστώσα της κινηματικής κράτυνσης που ορίζει την εξέλιξη της επιφάνειας διαρροής στον χώρο των τάσεων.

Η επιφάνεια διαρροής, που είναι ανεξάρτητη των τάσεων, ορίζεται από την ακόλουθη συνάρτηση F:

$$F = f(\sigma - \alpha) - \sigma_0$$

Με δεδομένη τη συσχετισμένη πλαστική ροή, ο ρυθμός πλαστικής ροής δίνεται από την σχέση:

$$\dot{\varepsilon}^{pl} = \dot{\varepsilon}^{pl} \frac{\partial F}{\partial \sigma}$$

όπου  $\dot{\varepsilon}^{pl}$  είναι ο ισοδύναμος ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης.

Ο νόμος εξέλιξης των τάσεων αποτελείται από δύο συνιστώσες:

i) από τον ιστροπικό νόμο κράτυνσης, ο οποίος περιγράφει την μεταβολή της ισοδύναμης τάσης που ορίζει το μέγεθος της επιφάνειας διαρροής  $\sigma_0$ , ως μία συνάρτηση της πλαστικής παραμόρφωσης:

$$\sigma_0 = \sigma_0 + Q_\infty (1 - e^{-b\bar{\varepsilon}^{pl}})$$

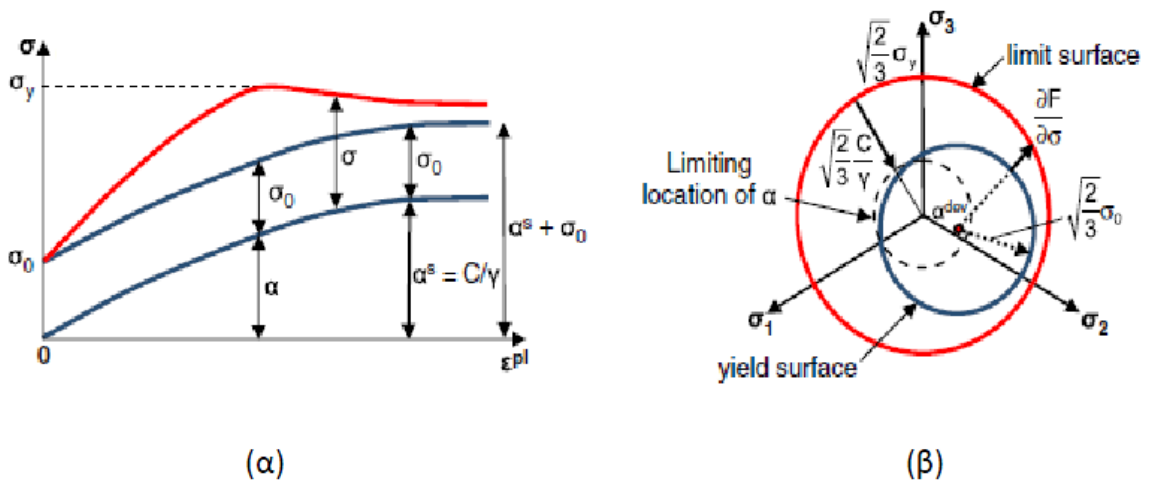
όπου η παράμετρος  $Q_\infty$  ορίζει την μέγιστη μεταβολή του μεγέθους της επιφάνειας διαρροής, ενώ η παράμετρος  $b$  ορίζει το ρυθμό αυτής της μεταβολής με την  $\dot{\varepsilon}^{pl}$ . Για  $Q_\infty = 0$ , το μέγεθος της επιφάνειας διαρροής παραμένει σταθερό και το προσομοίωμα εκφυλίζεται σε μη γραμμικό μοντέλο κινηματικής κράτυνσης.

ii) από έναν μη γραμμικό κινηματικό νόμο κράτυνσης, που περιγράφει την εξέλιξη της επιφάνειας διαρροής στο τασικό πεδίο όπως αυτή ορίζεται μέσω της παραμέτρου  $\alpha$ . Ο κινηματικός νόμος κράτυνσης ορίζεται ως υπέρθεση ενός καθαρά κινηματικού όρου (γραμμικός νόμος κράτυνσης Ziegler) και ενός όρου χαλάρωσης, ο οποίος εισάγει την μη-γραμμική συμπεριφορά. Η εξέλιξη της κινηματικής συνιστώσας της τάσης διαρροής περιγράφεται από:

$$\dot{\alpha} = C \frac{1}{\sigma_0} (\sigma - \alpha) \dot{\varepsilon}^{pl} - \gamma \alpha \dot{\varepsilon}^{pl}$$

όπου  $C$  είναι το αρχικό μέτρο της κινηματικής κράτυνσης ( $C = \frac{\sigma_y}{\varepsilon_y} = E$ ), και η παράμετρος  $\gamma$  καθορίζει τον ρυθμό μείωσης της κινηματικής κράτυνσης με την αύξηση της πλαστικής παραμόρφωσης.

Η εξέλιξη των συνιστωσών της κινηματικής και της ιστροπικής κράτυνσης απεικονίζεται στα παρακάτω **σχήματα 3.3** για μονοαξονική και πολυαξονική φόρτιση αντίστοιχα.



**Σχήμα 3.3:** Καταστατικό προσομοίωμα εδάφους: εξέλιξη των συνιστωσών της κράτνυσης (ισοτροπικής και κινηματικής) (α) απλοποιημένη μονοδιάστατη απεικόνιση (β) τρισδιάστατη απεικόνιση (Anastasopoulos et al. 2010)

Ο νόμος της εξέλιξης για την συνιστώσα της κινηματικής κράτνυσης δείχνει ότι η παράμετρος  $\alpha$  εμπεριέχεται σε κύλινδρο ακτίνας:

$$\sqrt{\frac{2}{3}}\alpha^s = \sqrt{\frac{2}{3}}\frac{c}{\gamma}$$

όπου  $\alpha^s$  είναι το μέγεθος της παραμέτρου  $\alpha$  στον κορεσμό. Εφόσον η επιφάνεια διαρροής παραμένει φραγμένη, συμπεραίνεται πως οποιοδήποτε τασικό σημείο πρέπει να βρίσκεται εντός κυλίνδρου ακτίνας  $\sqrt{\frac{2}{3}}\sigma_y$ , όπου  $\sigma_y$  η τάση διαρροής. Ομοίως σε μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις, οποιοδήποτε τασικό σημείο περιέχεται εντός κυλίνδρου ακτίνας  $\sqrt{\frac{2}{3}}(\sigma^s + \alpha^s)$ , όπου  $\sigma^s$  είναι η ισοδύναμη τάση που ορίζει το μέγεθος της επιφάνειας διαρροής στις μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις.

Η μέγιστη τάση διαρροής για κορεσμένο έδαφος είναι:

$$\sigma_y = \frac{c}{\gamma} + \sigma_0$$

Συγχρόνως, η μέγιστη τάση διαρροής σύμφωνα με το κριτήριο διαρροής Von Mises είναι:

$$\sigma_y = \sqrt{3}S_u$$

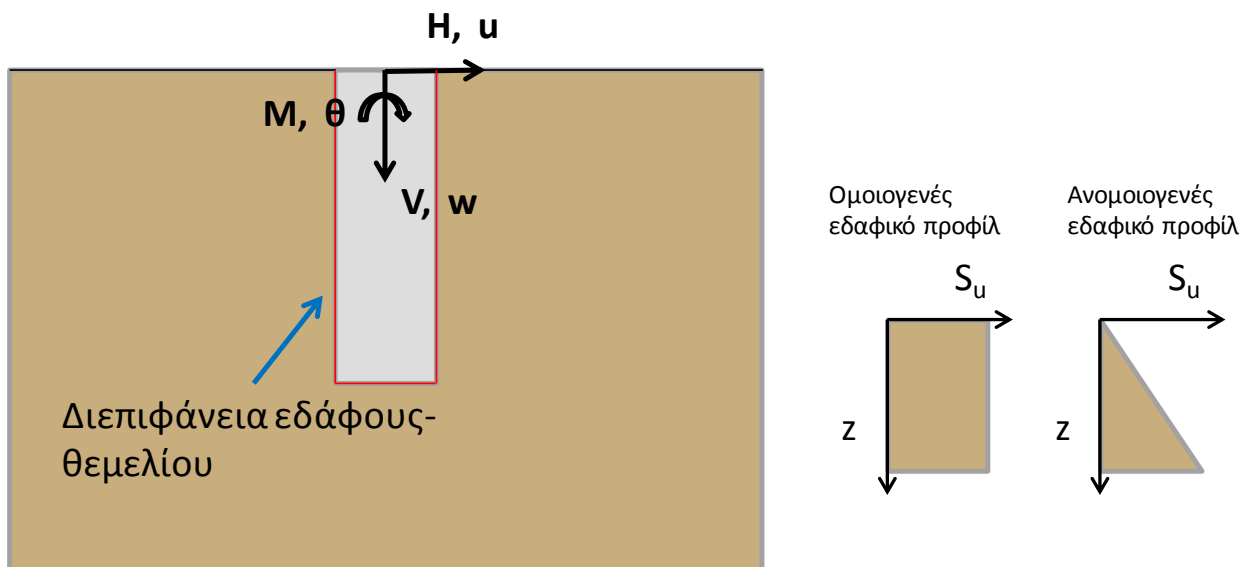
Άρα, από τις δυο τελευταίες εξισώσεις προκύπτει:

$$\gamma = \frac{C}{\sqrt{3} S_u - \sigma_0}$$

Οι παράμετροι  $\sigma_y$ ,  $\sigma_0$ ,  $\gamma$  και  $C$  βαθμονομήθηκαν αρχικά με την θεώρηση ομοιογενούς εδαφικού προφίλ με σταθερό  $S_u$  και στην συνέχεια για ανομοιογενές εδαφικό προφίλ με γραμμικώς αυξανόμενο  $S_u$ .

### 3.2.3 Σύμβαση πρόσημου και σύμβαση συμβόλων

Η θετική φορά κάθε άξονα είναι αυτή που φαίνεται στο **σχήμα 3.4**. Η αξονική δύναμη συμβολίζεται με  $V$ , η τέμνουσα δύναμη με  $H$  και η ροπή με  $M$ . Αντίστοιχα τα σύμβολα που χρησιμοποιούνται για την καθίζηση είναι  $w$ , για την οριζόντια μετακίνηση είναι  $u$  και για την στροφή  $\theta$ .



**Σχήμα 3.4:** Θετική φορά αξόνων και σύμβαση συμβόλων εντατικών μεγεθών.



### 3.2.4 Στατική φόρτιση

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό της οριακής φέρουσας ικανότητας του μονοπασσάλου είναι η επιβολή ελεγχόμενης μετακίνησης ή στροφής ( $w$ ,  $u$ ,  $\theta$ ) στο μέσο της κορυφής του θεμελίου μέχρι την αστοχία.

### 3.2.5 Διαγράμματα αλληλεπίδρασης

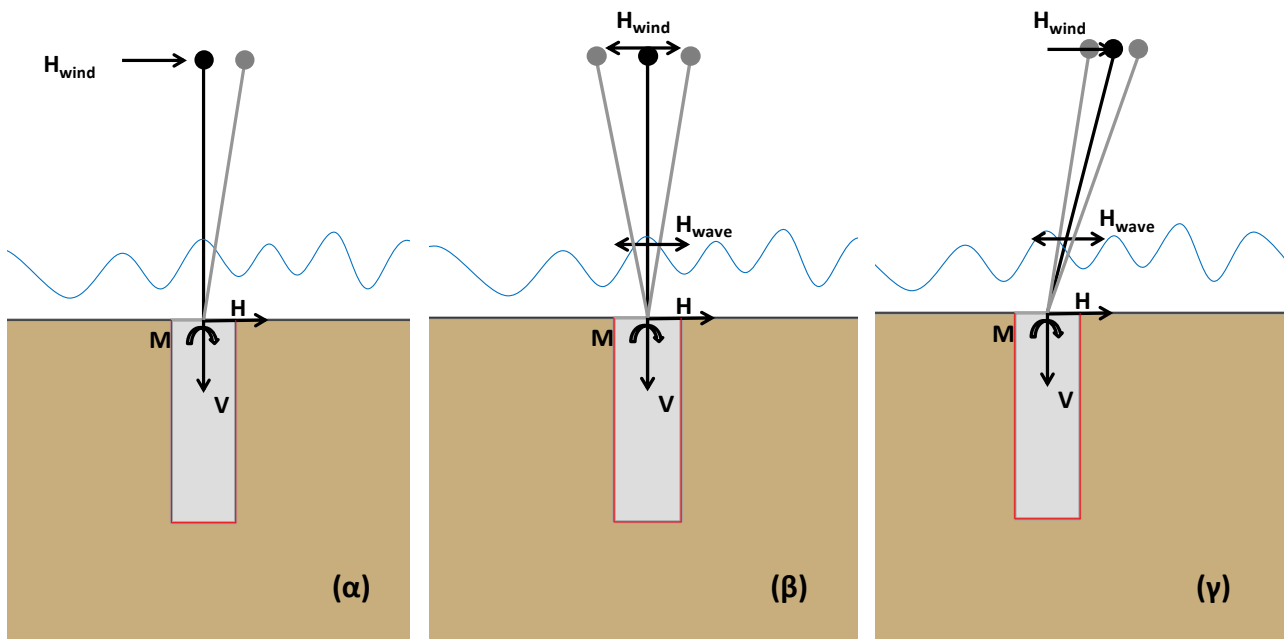
Για τον προσδιορισμό των διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης και της περιβάλλουσας αστοχίας ακολουθήθηκε η μέθοδος των ανιχνευτικών τασικών οδεύσεων. Η μέθοδος αυτή προτάθηκε αρχικά από τους Bransby & Randolph (1997) και μέχρι σήμερα χρησιμοποιήθηκε εκτεταμένα για τον προσδιορισμό της περιβάλλουσας αστοχίας υπό συνδυασμένη φόρτιση. Στο πρώτο βήμα επιβάλλουμε ένα κατακόρυφο φορτίο  $N$ , ως ποσοστό  $\chi$  της οριακής φέρουσας ικανότητας σε αξονική φόρτιση  $V_{ult}$ . Στο δεύτερο βήμα επιβάλλεται ένας σταθερός αδιάστατος λόγος οριζόντιας μετακίνησης προς στροφή  $u/D\theta$  (για την περίπτωση του συνδυασμού M-H) μέχρι της αστοχία. Ακολουθείται στη συνέχεια μια επαναληπτική διαδικασία για διάφορες τιμές του λόγου  $u/D\theta$ . Κάθε μια από αυτές τις οδεύσεις όταν φτάσουν στην περιβάλλουσα αστοχίας κινούνται κατά μήκος της τροχιάς της. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στον συσχετισμένο νόμο πλαστικής ροής που υποθέσαμε στο καταστατικό προσομοίωμα. Με βάση αυτό τον νόμο η περιβάλλουσα καμπύλη αστοχίας υποδεικνύει την αλληλεπίδραση των εντατικών μεγεθών τη στιγμή της αστοχίας και αποτελεί ένα πλαστικό δυναμικό που καταδεικνύει την κατεύθυνση των επαυξητικών πλαστικών παραμορφώσεων σε κάθε σημείο της. Το σημείο επιβολής των φορτίων και το σημείο αναφοράς των μεγεθών είναι το μέσον της κορυφής του μονοπασσάλου.

### 3.2.6 Μονοτονική φόρτιση –Δυσκαμψίες

Η στατική μονοτονική φόρτιση επιβάλλεται σε πολλά βήματα μέσω ελεγχόμενης οριζόντιας μετατόπισης στην συγκεντρωμένη μάζα της ανωδομής. Η διαδικασία αυτή έγινε για τις τρεις χαρακτηριστικές ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος 2, 3.5, 5 MW (διαφορετικού λόγου λυγηρότητας  $H/D$ ) και για όλους τους λόγους έμπηξης της θεμελίωσης. Να σημειώσουμε ότι σε αυτό το στάδιο το ύψος της ανωδομής του μοντέλου είναι ίσο με το κέντρο άσκησης των φορτίων του ανέμου και των θαλάσσιων κυμάτων της ανεμογεννήτριας. Για την εύρεση των οριζόντιων και στροφικών δυσκαμψιών του μονοπασσάλου χρησιμοποιήθηκε και πάλι το μοντέλο μόνο με την θεμελίωση. Οι αναλύσεις έγιναν σε δύο στάδια, στο ένα επιβλήθηκε οριζόντια μετακίνηση με δέσμευση της στροφής στο κέντρο της κορυφής του μονοπασσάλου και στο δεύτερο επιβλήθηκε στροφή με δέσμευση της οριζόντιας μετακίνησης.

## 3.2.7 Ανακυκλική Φόρτιση

Για την ανακυκλική φόρτιση χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα με το πραγματικό ύψος της ανωδομής. Στο πρώτο στάδιο μελετήθηκε η συμπεριφορά του συστήματος ανεμογεννήτριας-μονοπασσάλου υπό ανακυκλική φόρτιση μιας κατεύθυνσης (**σχήμα 3.5 (α)**). Η ανακυκλική φόρτιση επιβλήθηκε σε πολλά εναλλασσόμενου μεγέθους βήματα μέσω συγκεντρωμένης δύναμης του ανέμου στο ύψος του ρότορα. Στο δεύτερο στάδιο μελετήθηκε η συμπεριφορά του συστήματος ανεμογεννήτριας-μονοπασσάλου υπό ανακυκλική φόρτιση διπλής κατεύθυνσης (**σχήμα 3.5 (β)**). Και σε αυτή την περίπτωση επιβλήθηκαν ταυτόχρονα σε πολλά βήματα (α)συγκεντρωμένη δύναμη εναλλασσόμενου πρόσημου προερχόμενη από τον άνεμο και (β) συγκεντρωμένη δύναμη εναλλασσόμενου πρόσημου προερχόμενη από τα κύματα. Στο τρίτο στάδιο μελετήθηκε η συμπεριφορά του συστήματος υπό ανακυκλική φόρτιση κυμάτων και σταθερής κατεύθυνσης άνεμο (**σχήμα 3.5 (γ)**). Στο πρώτο βήμα επιβάλλαμε την φόρτιση του ανέμου και στο δεύτερο κρατώντας της σταθερή επιβάλλαμε ανακυκλική φόρτιση στο ύψος άσκησης των φορτίων των κυματισμών μέσω συγκεντρωμένης δύναμης εναλλασσόμενου πρόσημου.



**Σχήμα 3.5:** Ανακυκλική φόρτιση (α) μιας κατευθύνσεως ανέμου , (β) διπλής κατευθύνσεως ανέμου και κυμάτων (γ) διπλής κατεύθυνσης κυμάτων και σταθερής φοράς ανέμου.





# **Κεφάλαιο 4**

Φέρουσα Ικανότητα Μονοπασσάλου



## Κεφάλαιο 4 – Φέρουσα Ικανότητα Μονοπασσάλου

### 4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται η πλήρης ανάλυση της φέρουσας ικανότητας του μονοπασσάλου τόσο υπό μεμονωμένη όσο και υπό συνδυασμένη φόρτιση. Η γνώση της φέρουσας ικανότητας της θεμελίωσης είναι πρωταρχικό ζήτημα για τους γεωτεχνικούς μηχανικούς. Η μεταφορά των φορτίων της ανωδομής γίνεται με φορά από πάνω προς τα κάτω με αποτέλεσμα η θεμελίωση να καλείται να αντέξει το σύνολο των στατικών φορτίων της κατασκευής. Η γνώση της οριακής αντοχής της θεμελίωσης οδηγεί στον σχεδιασμό με γνώμονα την ασφάλεια και την οικονομία.

Τόσο οι εξωτερικές συνθήκες όσο και ο ίδιος ο φορέας της κατασκευής καθορίζουν το είδος της φόρτισης που θα μεταφερθεί στην θεμελίωση. Οι ανεμογεννήτριες είναι ένα ιδιαίτερο είδος κατασκευών, καθώς είναι ελαφρά φορτισμένες κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (σε αναλογία πάντα με την ροπή) και η δεσπόζουσα φόρτιση του μεταφέρεται στην θεμελίωση είναι ο συνδυασμός τέμνουσας και ροπής ανατροπής μεγάλων μεγεθών.

Η φέρουσα ικανότητα των πασσάλων υπό αξονική ή τέμνουσα δύναμη έχει μελετηθεί διεξοδικά κατά το παρελθόν από πολλούς ερευνητές [Terzaghi ; Mayerhof; Welch & Reese, 1972; Matlock et al., 1978; Wang, 1982; Long, 1984; O'Neil & Dunnavant, 1984; Long & Vanneste, 1994; Moss et al., 1998; Verdure, 2003;]. Ωστόσο, πρόσφατα στράφηκε το ερευνητικό ενδιαφέρον στα διαγράμματα αλληλεπίδρασης υπό συνδυασμένη φόρτιση στον τρισδιάστατο χώρο MQN. Ήδη έχουν μελετηθεί οι περιβάλλουσες αστοχίας για επιφανειακά και εγκιβωτισμένα θεμέλια για μια πληθώρα περιπτώσεων [Yun & Branby 2007; Gourvenec 2008].

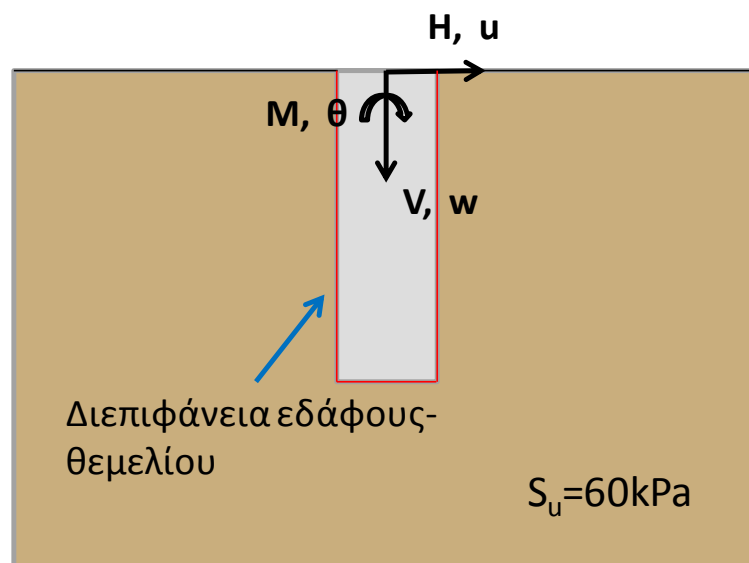
Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν οι μονοπάσσαλοι με λόγους έμπηξης  $L/D=4, 5, 6, 7$ , όπου  $L$  είναι το βάθος του μονοπασσάλου και  $D$  η διάμετρος του. Θυμίζουμε ότι έχουμε επιλέξει τον εμπηγνύομενο πάσσαλο με διείσδυση με πλήρη επαφή (plugged penetration). Το πάχος των τοιχωμάτων καθώς και ο συντελεστής συνάφειας της διεπιφάνειας εδάφους θεμελίου αποφασίστηκαν ύστερα από παραμετρική διερεύνηση. Για την εξωτερική διεπιφάνεια του μονοπασσάλου με το έδαφος έγινε η θεώρηση των μη-γραμμικοτήτων, όπου επιτρέπονται η ολίσθηση και η αποκόλληση του θεμελίου. Το εδαφικό προφίλ που χρησιμοποιήθηκε αρχικά είναι ομοιογενές με αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $S_u=60\text{kPa}$ .

Αρχικά μελετήθηκε η φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης για τις τρεις βασικές περιπτώσεις φόρτισης (αξονική, τέμνουσα δύναμη, ροπή ανατροπής) και συνέχεια για συνδυασμένη φόρτιση M-H-V. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα διαγράμματα κυρίως σε αδιάστατους όρους. Η αδιαστατοποίηση που επιλέχθηκε είναι αυτή που συναντάται συνηθέστερα στην βιβλιογραφία. Πιο συγκεκριμένα η αξονική και τέμνουσα δύναμη διαιρείται με το εμβαδόν του πασσάλου ( $A$ ) και την αστράγγιστη διατμητική αντοχή ( $S_u$ ) ενώ η ροπή ανατροπής διαιρείται με το εμβαδόν ( $A$ ), την διάμετρο του πασσάλου ( $D$ ) και την αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους ( $S_u$ ). Οι μετακινήσεις (κατακόρυφες ή οριζόντιες) διαιρούνται με την διάμετρο του μονοπασσάλου ( $D$ ).

Στην συνέχεια μελετήθηκε η θεώρηση της πλήρους επαφής εδάφους-θεμελίου. Η θεώρηση αυτή μπορεί να οδηγήσει σε μη συντηρητικό σχεδιασμό καθώς δίνει υπεραντοχές στην απόκριση της κατασκευής χωρίς να υφίσταται στην πραγματικότητα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με την θεώρηση της πλήρους επαφής επιτρέπεται η ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων στο έδαφος και αποτρέπεται η ολίσθηση των δύο στοιχείων. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα της θεώρησης μη-γραμμικότητας στην διεπιφάνεια ενισχύουν αυτό το συμπέρασμα.

Τέλος, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο με ανομοιογενές εδαφικό προφίλ με γραμμική αυξανόμενη αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $S_u$ . Για εδαφικούς σχηματισμούς στην θάλασσα το ανομοιογενές εδαφικό προφίλ είναι πιο ρεαλιστικό καθώς τα ανώτερα στρώματα συνήθως έχουν μειωμένες εδαφικές αντοχές που σταδιακά αυξάνονται. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων του ομοιογενούς και ανομοιογενούς εδαφικού σχηματισμού, ωστόσο θα δείξει ότι η θεώρηση της σταθερής αστράγγιστης διατμητικής αντοχής στα 60kPa είναι αρκετά ρεαλιστική και δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Στο **σχήμα 4.1** απεικονίζεται η θετική φορά των αξόνων. Οι συμβολισμοί που επιλέχθηκαν είναι η εξής: αξονική δύναμη ( $V$ ), τέμνουσα ( $H$ ), ροπή ανατροπής ( $M$ ), καθίζηση ( $w$ ), οριζόντια μετακίνηση ( $u$ ) και στροφή ( $\theta$ ).



**Σχήμα 4.1:** Σχηματική απεικόνιση εδάφους-μονοπασσάλου. Απεικόνιση συμβόλων και θετική φορά πρόσημων.

## 4.2 Παραμετρική Διερεύνηση

Αρχικά έγινε διερεύνηση της επιρροής δυο παραμέτρων του προβλήματος: του συντελεστή συνάφειας ( $\alpha$ ) στην διεπιφάνεια εδάφους-θεμελίου και του πάχους των τοιχωμάτων του μονοπασσάλου ( $t$ ). Σκοπός αυτής της διενέργειας ήταν να δείξουμε πόσο επηρεάζει η παράμετρος, ποιο μέγεθος και να καταλήξουμε στην πιο αντιπροσωπευτική για την περαιτέρω επίλυση του προβλήματος.

#### 4.2.1 Παραμετρική διερεύνηση συντελεστή συνάφειας

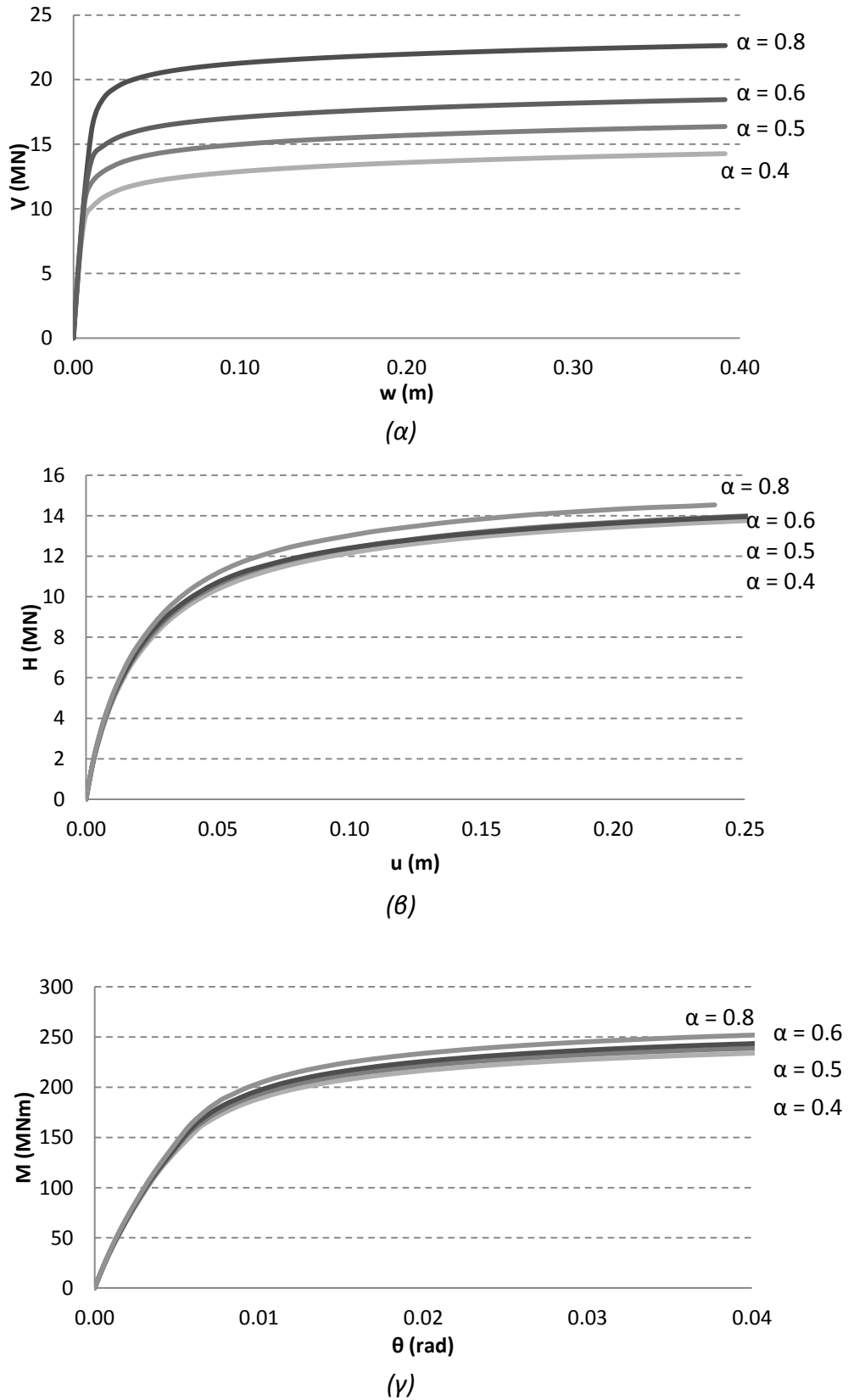
Αρχικά έγινε μια σειρά από αναλύσεις με σκοπό την ανάδειξη της επιρροής του συντελεστή συνάφειας στην διεπιφάνεια εδάφους θεμελίου και την επιλογή του καταλληλότερου για μια τυπική θαλάσσια θεμελίωση σε αργιλικό έδαφος υπό αστράγγιστες συνθήκες.

Στο **σχήμα 4.2** απεικονίζονται οι τρεις καμπύλες σε όρους κατακόρυφης δύναμης-καθίζησης (**σχήμα 4.2 α**), τέμνουσας δύναμης-μετακίνησης (**σχήμα 4.2 β**) και ροπής-στροφής (**σχήμα 4.2 γ**) για τέσσερις χαρακτηριστικούς συντελεστές συνάφειας ( $\alpha = 0.4, 0.5, 0.6, 0.8$ ). Θυμίζουμε ότι για την ολίσθηση έχουμε επιλέξει κατάλληλο κριτήριο με το οποίο συσχετίζεται η πλευρική τριβή με την αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $S_u$  μέσω του συντελεστή συνάφειας  $\alpha$ . Όταν η διατμητική τάση (περιμετρικά του μονοπασσάλου) ξεπεράσει ένα ποσοστό της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής ( $\alpha S_u$ ), έχουμε ολίσθηση του θεμελίου κατά μήκος της διεπιφάνειας. Ο συντελεστής συνάφειας παίρνει τιμές από 0.4 έως 1.0, όπου η τιμή 1.0 συμβολίζει τις συνθήκες πλήρους επαφής στην διεπιφάνεια εδάφους θεμελίου ενώ οι μικρότερες τιμές υποδεικνύουν μικρότερη συνάφεια του μονοπασσάλου με το έδαφος και να επιτρέπουν την ευκολότερη ολίσθηση του.

Σύμφωνα με τα διαγράμματα, ο συντελεστής συνάφειας παίζει κυρίαρχο ρόλο κατά την αξονική φόρτιση του πασσάλου, ενώ έχει πολύ μικρότερη βαρύτητα για την εγκάρσια φόρτιση (τέμνουσα ή ροπή) του μονοπασσάλου. Αυτό οφείλεται στο διαφορετικό μηχανισμό ανάληψης των φορτίων κατά την κατακόρυφη ή την εγκάρσια φόρτιση. Στην περίπτωση της κατακόρυφης φόρτισης, ο μονοπάσσαλος ενεργοποιεί την αντίσταση αιχμής στην βάση του και αντίσταση πλευρικής τριβής περιμετρικά, με αποτέλεσμα η συνάφεια του με το έδαφος να καθορίζει σε σημαντικό βαθμό και την τελική φέρουσα ικανότητα του. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα στο διάγραμμα 4.1 (α), όπου όσο αυξάνει ο συντελεστής συνάφειας αυξάνει αναλογικά και η φέρουσα αξονική ικανότητα. Η διαφορά τους είναι της τάξης των 10MN. Στην περίπτωση της εγκάρσιας φόρτισης, ενεργοποιούνται μόνο τα ανώτερα στρώματα του εδάφους και από την πλευρά της καταπόνησης έχουμε κυρίως θλιπτικές ορθές τάσεις ενώ από την αντίθετη πλευρά παρουσιάζονται εφελκυστικές τάσεις και αποκόλληση του θεμελίου από το έδαφος. Φυσικά, υπάρχουν και διατμητικές τάσεις στα τοιχώματα του μονοπασσάλου αλλά όχι σε πολύ έντονο βαθμό. Αυτό εξηγεί και το γεγονός ότι σε όρους τέμνουσας ή ροπής η αντοχή του μονοπασσάλου δεν εξαρτάται από την συνάφειά του με το έδαφος στην μεταξύ τους διεπιφάνεια (**σχήμα 4.2 (α), (β)**).

Τελικά, θεωρήσαμε ότι η πιο αντιπροσωπευτική τιμή του συντελεστή συνάφειας είναι  $\alpha=0.6$ , καθώς καλύπτει πλήρως τις απαιτήσεις μιας τυπικής ανεμογεννήτριας σε όρους V-H-M και είναι πιο κοντά στις τιμές που προτείνουν οι αναλυτικές σχέσεις της βιβλιογραφίας.





**Σχήμα 4.2:** Επιρροή του συντελεστή συνάφειας  $\alpha$  για τρεις περιπτώσεις φόρτισης. Καμπύλη (α) Αξονικής δύναμης-καθίζησης, (β) τέμνουσας δύναμης-οριζόντιας μετακίνησης και (γ) ροπής-στροφής.

#### 4.2.2 Παραμετρική διερεύνηση πάχους τοιχωμάτων μονοπασσάλου

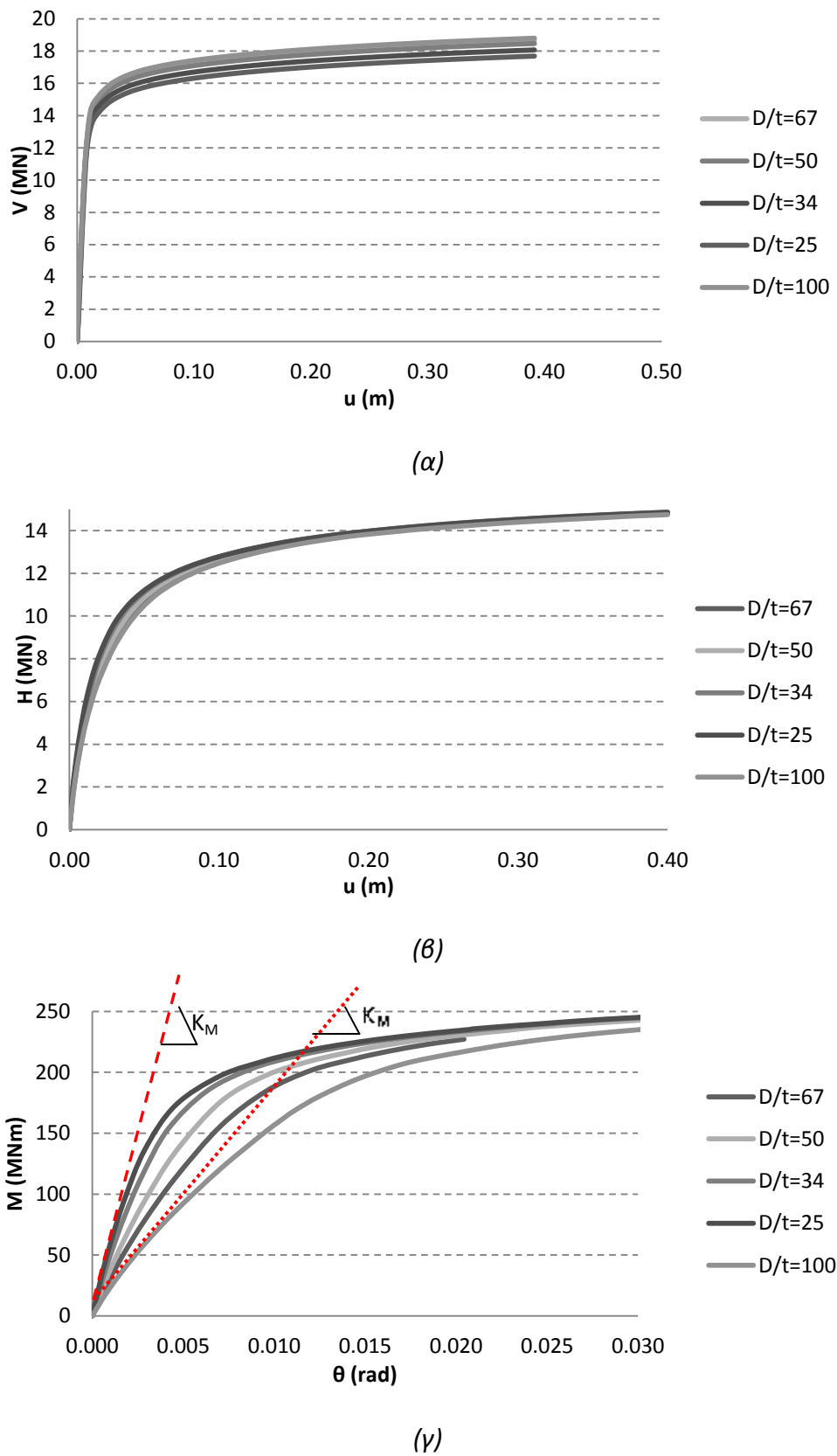
Η δεύτερη διερεύνηση αφορά το πάχος των τοιχωμάτων του μονοπασσάλου με σκοπό την ανάδειξη της επιρροής του στην ευκαμψία του μονοπασσάλου και την επιλογή του πιο αντιπροσωπευτικού λόγου  $D/t$ .

Το εύρος του λόγου  $D/t$  (διάμετρος προς πάχος τοιχωμάτων) είναι 25-100 σύμφωνα με τους διεθνείς κανονισμούς (API) και 50-90 σύμφωνα με τους ελληνικούς κανονισμούς μεταλλικών κατασκευών. Στην διερεύνηση μας επιλέξαμε να καλύψουμε όλο το εύρος, κρατώντας σταθερή την διάμετρο του θεμελίου  $D=4\text{m}$  και μεταβάλλοντας το πάχος του τοιχώματος  $t= 4, 6, 8, 12, 16$  cm.

Στο **σχήμα 4.3** απεικονίζονται οι τρεις καμπύλες σε όρους κατακόρυφης δύναμης-καθίζησης (**σχήμα 4.3 α**), τέμνουσας δύναμης-μετακίνησης (**σχήμα 4.3 β**) και ροπής-στροφής (**σχήμα 4.3 γ**) για τους πέντε λόγους που επιλέξαμε  $D/t= 25, 34, 50, 67, 100$ . Όσο μικρότερος είναι ο λόγος  $D/t$  τόσο μεγαλύτερη είναι η δυσκαμψία του πασσάλου. Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τις αναλύσεις έχουμε θεωρήσει ότι ο μονοπάσσαλος συμπεριφέρεται ελαστικά και η αστοχία του συστήματος προέρχεται ουσιαστικά από αστοχία του εδάφους. Αυτό είναι μια ρεαλιστική θεώρηση αν λάβουμε υπόψη ότι ο μονοπάσσαλος είναι πλήρης με έδαφος στο εσωτερικό του, υπάρχει πλήρης επαφή στην εσωτερική διεπιφάνεια μονοπασσάλου-εδάφους και η ροπή αντοχής του μονοπασσάλου ως μεμονωμένου δομικού στοιχείου υπολογίζεται από την σχέση  $M = Dt^2\sigma_y$ .

Σύμφωνα με τα διαγράμματα του **σχήματος 4.3**, το πάχος του τοιχώματος του μονοπασσάλου δεν επηρεάζει σημαντικά την αξονική και τέμνουσα αντοχή της θεμελίωσης, παίζει όμως σημαντικό ρόλο στην απόκριση της θεμελίωσης υποβαλλόμενη σε ροπή ανατροπής. Πιο συγκεκριμένα στο **σχήμα 4.3. (γ)** παρατηρούμε ότι ο ελαστικός κλάδος είναι διαφορετικός για κάθε καμπύλη, γεγονός που υποδηλώνει την επιρροή του πάχους  $t$  στην στροφική δυσκαμψία του μονοπασσάλου. Ο μονοπάσσαλος με λόγο  $D/t=25$  είναι πιο δύσκαμπτος σε σχέση με αυτόν με λόγο  $D/t= 100$ . Η κλίση της εφαπτομένης της καμπύλης  $D/t=25$  (γραμμή με διακεκομμένες παύλες) δείχνει την στροφική δυσκαμψία του μονοπασσάλου και είναι πολύ πιο απότομη σε σύγκριση με την κλίση της εφαπτομένης για  $D/t= 100$  (γραμμή με διακεκομμένες τελείες). Τέλος, παρατηρούμε ότι οι καμπύλες συγκλίνουν όταν εισέρχονται στην πλαστική περιοχή και φτάνουν στο ίδιο σημείο αντοχής σε ροπή  $M_{ult}$ , γεγονός που οφείλεται στην αστοχία του εδάφους όπως προαναφέραμε.

Τελικά, επιλέξαμε μια μέση τιμή του λόγου  $D/t\approx 67$  ως βέλτιστος συνδυασμός αντοχής, δυσκαμψίας και οικονομίας χάλυβα στην κατασκευή. Να σημειώσουμε ότι η τελική διάμετρος του μονοπασσάλου για την οποία διεξήχθησαν το σύνολο των αναλύσεων είναι  $D=5\text{m}$  και το πάχος των τοιχωμάτων  $8\text{cm}$ .



**Σχήμα 4.3:** Επιρροή του λόγου  $D/t$  για τρεις περιπτώσεις φόρτισης. Καμπύλη (α) Αξονικής δύναμης-καθίζησης, (β) τέμνουσας δύναμης-οριζόντιας μετακίνησης και (γ) ροπής-στροφής.

### 4.3 Φέρουσα ικανότητα

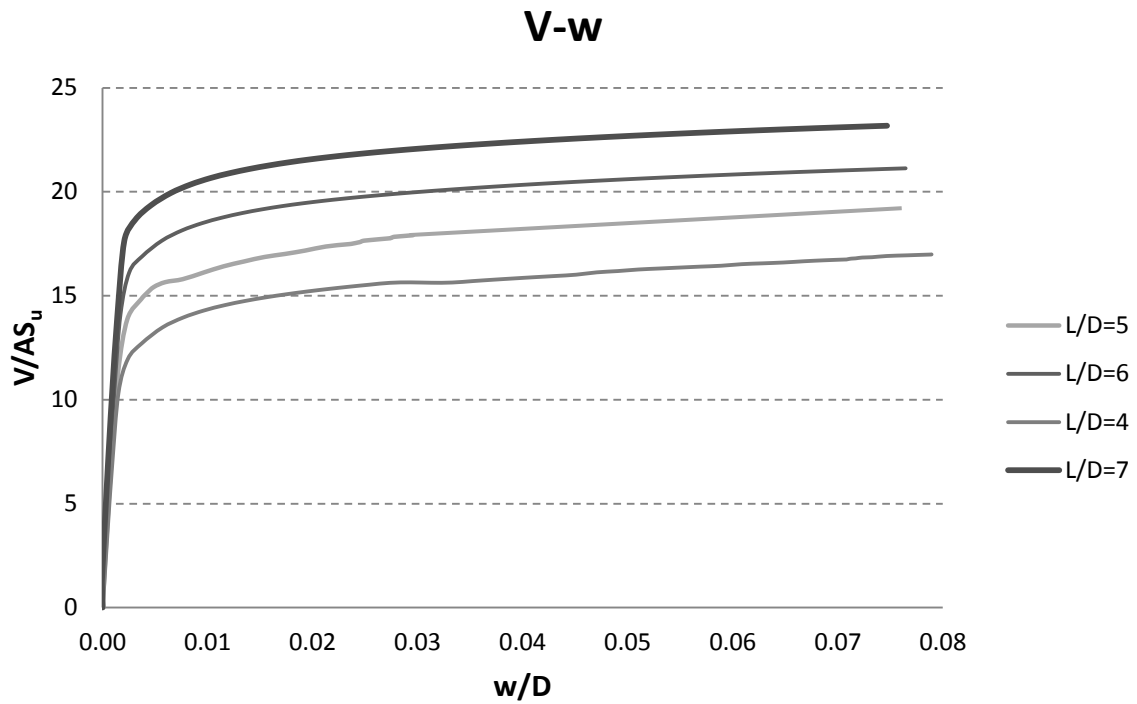
#### 4.3.1 Αξονική δύναμη

Η φέρουσα ικανότητα των πασσάλων υπό κατακόρυφη φόρτιση έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας πολλές φορές κατά το παρελθόν. Για τις ανεμογεννήτριες όμως, η κατακόρυφη δεν είναι η κυρίαρχη φόρτιση, καθώς ο λόγος της κατακόρυφης δύναμης προς την ροπή ( $V/M < 0.1$ ) στην βάση της θεμελίωσης είναι πολύ μικρός. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι ανεμογεννήτριες είναι εξαιρετικά υψίκορμες κατασκευές και η οριζόντια δύναμη που προέρχεται από τον άνεμο ασκείται στο ύψος του ρότορα (60-100m) με αποτέλεσμα η βάση να καλείται να αναλάβει ροπές μεγάλου μεγέθους.

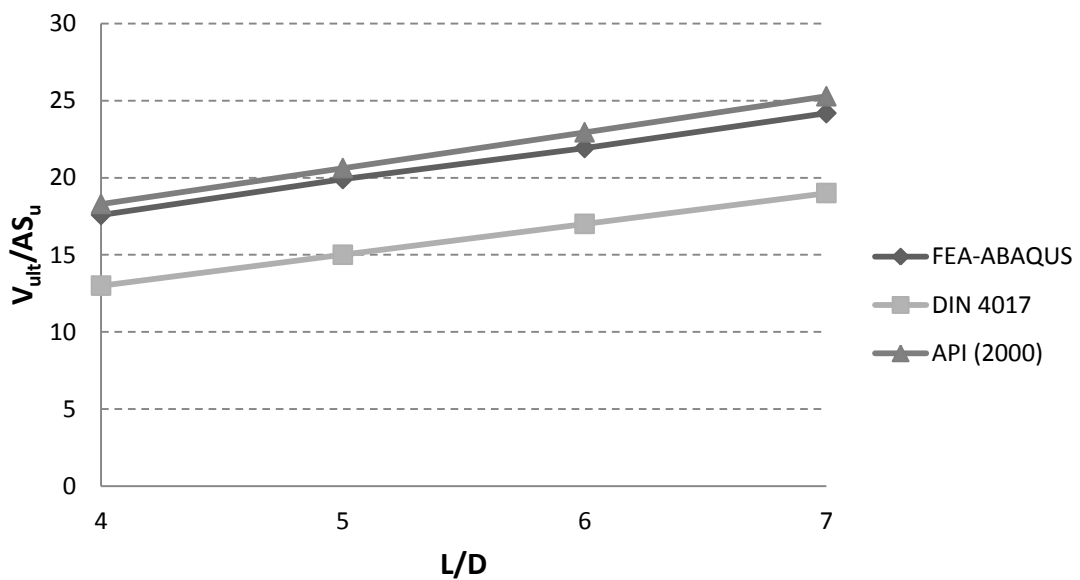
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας σε αξονική δύναμη  $V_{ult}$  είναι η εξής: επιβολή κατακόρυφης μετακίνησης στην κορυφή του θεμέλιου μέχρι την αστοχία. Στο **σχήμα 4.4** που ακολουθεί απεικονίζεται σε αδιάστατους όρους η καμπύλη δύναμης-καθίζησης για τους τέσσερις λόγους έμπηξης που εξετάζουμε. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το βάθος της θεμελίωσης (άρα και ο λόγος έμπηξης, αφού έχει κρατηθεί σταθερή η διάμετρος της θεμελίωσης) αυξάνεται και η φέρουσα ικανότητα υπό αξονική φόρτιση, ενώ η 'ελαστική' (αρχική) κατακόρυφη δυσκαμψία δεν φαίνεται να επηρεάζεται, καθώς οι καμπύλες ταυτίζονται στην ελαστική περιοχή του διαγράμματος. Η αύξηση της αξονικής αντοχής συναρτήσει του λόγου έμπηξης οφείλεται στην αύξηση της οριακής αντίστασης πλευρικής τριβής ( $Q_{su} = \pi D \tau_{su} L$ ), ενώ η οριακή αντίσταση αιχμής είναι ίδια και για τις τέσσερις περιπτώσεις και ίση με  $Q_{pu} = 9S_u A_p$ . Η ελαστική δυσκαμψία επηρεάζεται κυρίως από την διάμετρο του πασσάλου και το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους και του πασσάλου.

Στη συνέχεια ακολουθεί σύγκριση της φέρουσας ικανότητας που προέκυψε από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και των αναλυτικών σχέσεων της βιβλιογραφίας (**σχήμα 4.5**). Το διάγραμμα είναι σε όρους αδιάστατης οριακής αξονικής αντοχής – λόγου έμπηξης πασσάλου. Όπως ήταν αναμενόμενο, η φέρουσα ικανότητα υποεκτιμάται σύμφωνα με τον DIN 4017, καθώς υπάρχουν κρυμμένες υπεραντοχές που δεν φαίνονται στην ελαστική ανάλυση από την οποία προέκυψαν οι συντελεστές αντίστασης αιχμής  $q_{pu}$  και αντίστασης πλευρικής τριβής  $\tau_{su}$  που προτείνει ο DIN 4017. Αντίθετα, οι σχέσεις της API 2000 είναι σε πλήρη συμφωνία με τα αποτελέσματα της τρισδιάστατης ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων. Αξίζει να σημειωθεί ότι μια ελάχιστη απόκλιση οφείλεται στον διαφορετικό συντελεστή πλευρικής συνάφειας  $\alpha$  ( $\tau = \alpha S_u$ ), καθώς στις αναλύσεις έχουμε χρησιμοποιήσει  $\alpha=0.6$  ενώ οι σχέσεις API 2000 υποδεικνύουν  $\alpha=0.63$ .

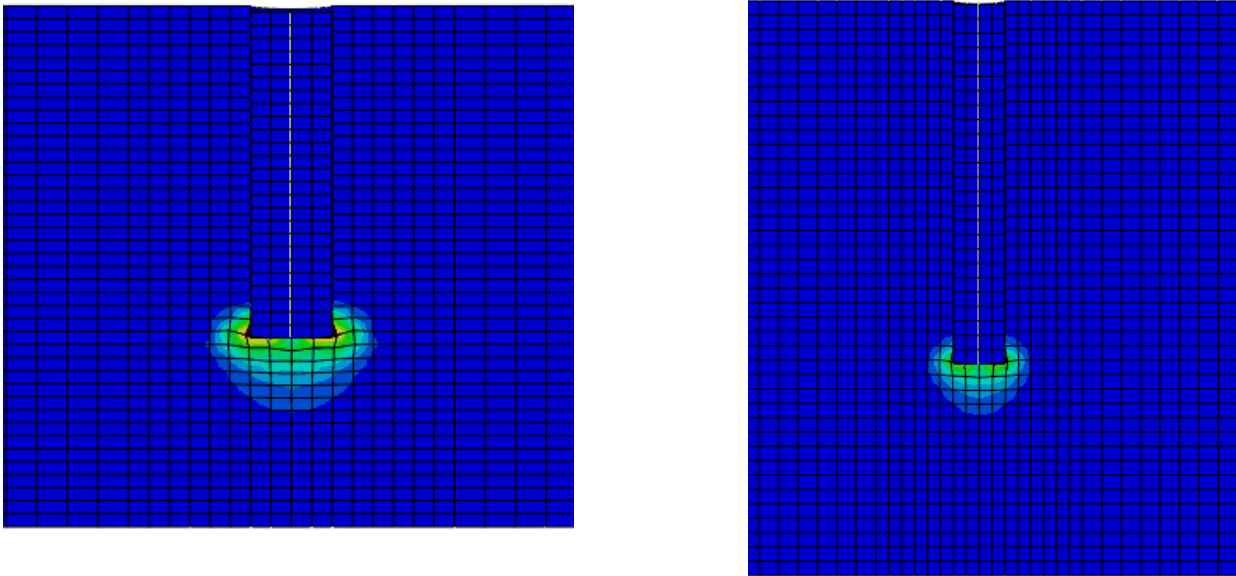
Τέλος στο **σχήμα 4.6** φαίνονται οι πλαστικές παραμορφώσεις του εδάφους για τους δύο ακραίους λόγους έμπηξης  $L/D=4$  και  $L/D=7$ . Ο μηχανισμός αστοχίας υπό κατακόρυφη φόρτιση είναι ίδιος για τις δυο περιπτώσεις και μοιάζει με αυτόν που έχει προτείνει ο Prandl. Οι πλαστικοποίηση του εδάφους περιορίζεται στην βάση του πασσάλου λόγω της θεώρησης μη γραμμικοτήτων στην διεπιφάνεια των δυο στοιχείων. Στο **σχήμα 4.7** φαίνονται οι διατμητικές τάσεις στην διεπιφάνεια εδάφους – θεμέλιου καθώς και η ολίσθησή του. Οι διατμητικές τάσεις δεν ξεπερνούν την τιμή  $\tau = 0.6 \cdot 60 = 36 \text{ kPa}$ .



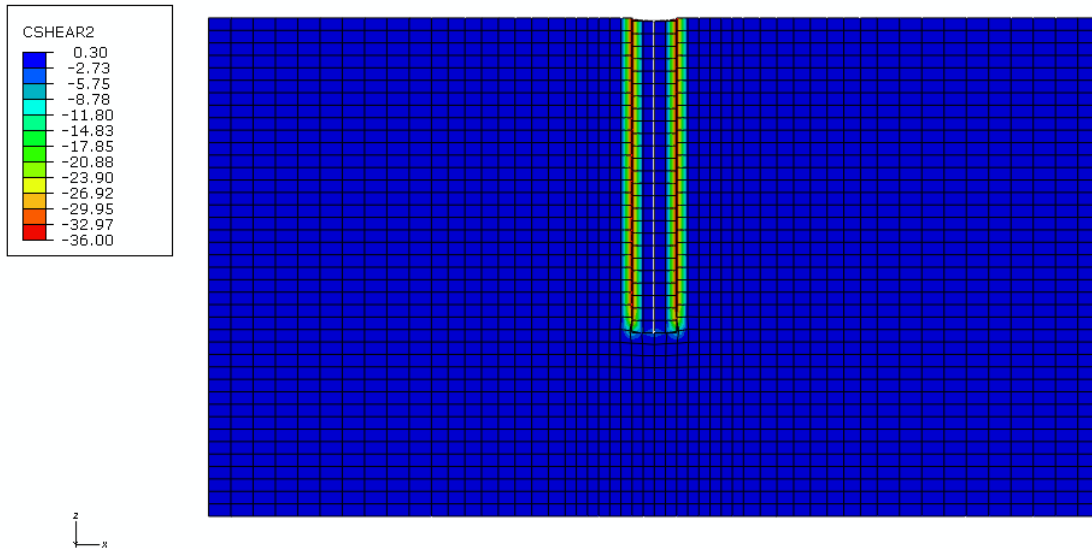
**Σχήμα 4.4 :** Αδιάστατο διάγραμμα κατακόρυφης δύναμης – καθίζησης για λόγους έμπτυξης πασσάλου  $L/D=4, 5, 6, 7$ .



**Σχήμα 4.5 :** Οριακή αξονική αντοχή πασσάλου ως συνάρτηση του λόγου έμπτυξης. Σύγκριση αποτελεσμάτων ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA-ABAQUS) με αναλυτικές σχέσεις βιβλιογραφίας (DIN 4017) και αμερικανικής ένωσης πετρελαίου (API 2000).



**Σχήμα 4.6:** Πλαστικές παραμορφώσεις εδάφους για λόγο έμπτυξης (α)  $L/D=4$  και (β)  $L/D=7$ .



**Σχήμα 4.7:** Διατμητική αστοχία και ολίσθηση πασσάλου ( $L/D=7$ ).

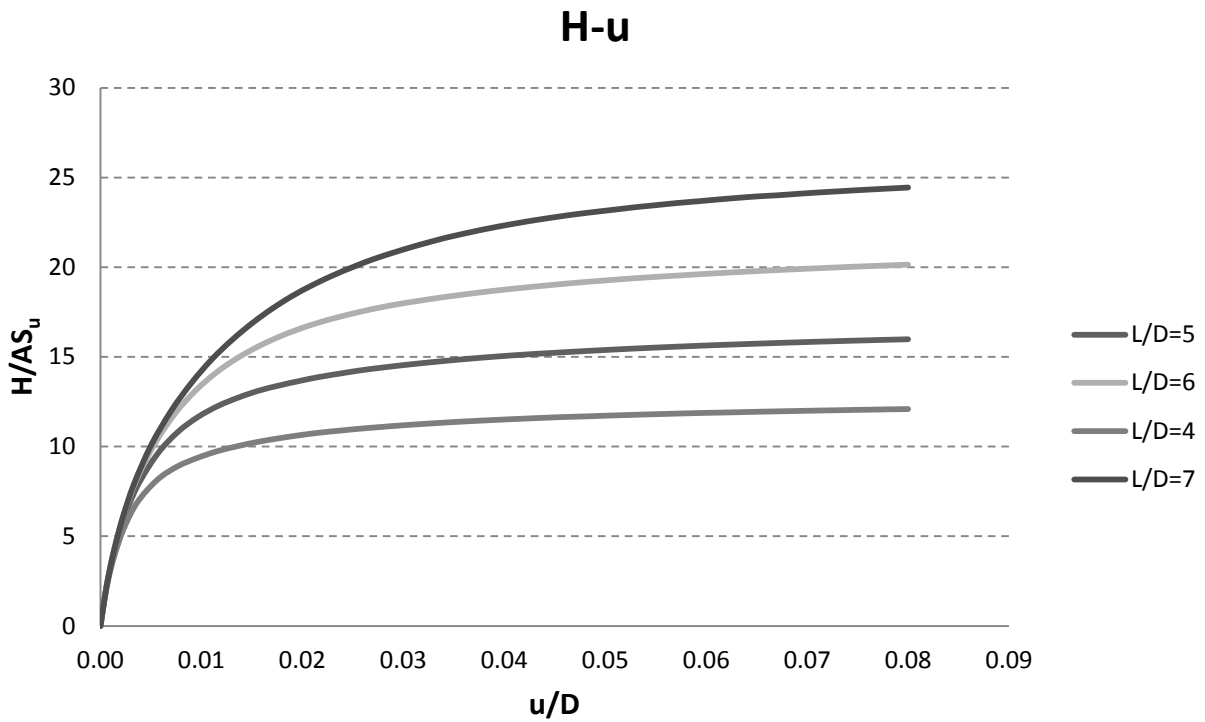
#### 4.3.2 Τέμνουσα δύναμη

Η αντοχή σε τέμνουσα δύναμη είναι ιδιαίτερα σημαντική για την θεμελίωση της θαλάσσιας ανεμογεννήτριας καθώς υποβάλλεται μόνιμα σε αυτού του είδους την φόρτιση λόγω των κυματισμών και του ανέμου. Ο μηχανισμός ανάληψης των φορτίσεων διαφέρει από αυτόν της κατακόρυφης φόρτισης, καθώς μόνο το ενεργό μήκος του πασσάλου συμβάλει στην ανάληψη των πλευρικών φορτίσεων σε σύγκριση με το σύνολο του πασσάλου που κινητοποιείται κατά την αξονική καταπόνηση. Επίσης, αναφέρουμε ότι η επιβολή οριζόντιας μετακίνησης προκαλεί την ταυτόχρονη στροφή του μονοπασσάλου, λόγω της έντονης σύζευξης των δυο βαθμών.

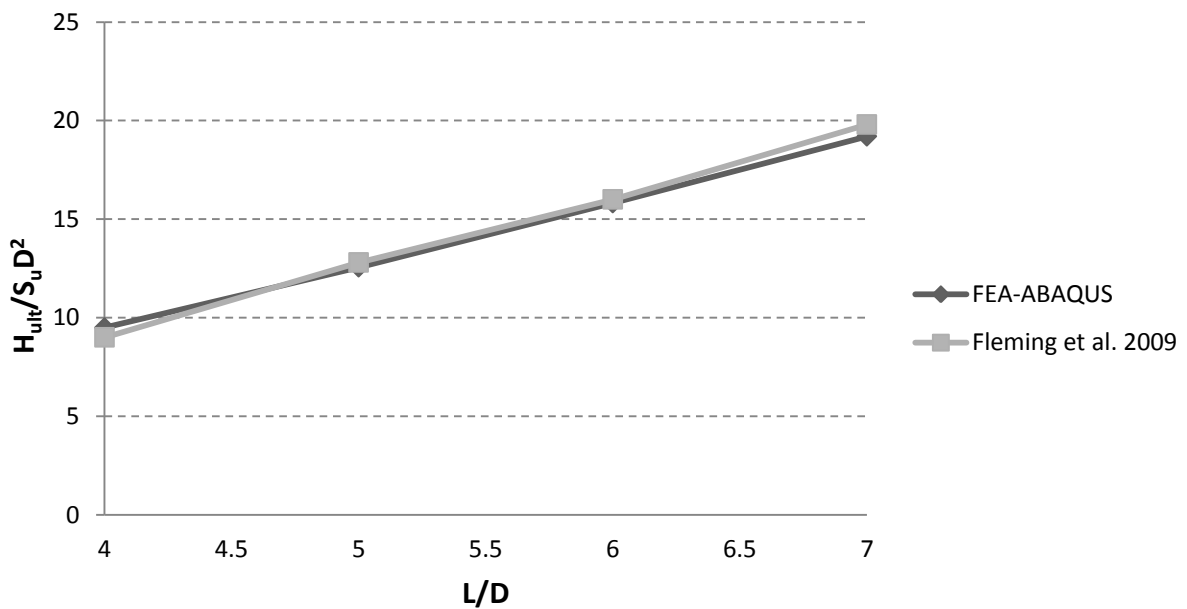
Για την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας σε τέμνουσα  $H_{ult}$  επιβάλλαμε οριζόντια μετακίνηση στην κορυφή του θεμελίου χωρίς δέσμευση της στροφής (πάσσαλος ελεύθερης κεφαλής) μέχρι την αστοχία ή την εμφάνιση της πλαστικής περιοχής του διγραμμικού διαγράμματος P-γ. Το διάγραμμα (**σχήμα 4.8**) απεικονίζει την καμπύλη τέμνουσας δύναμης-μετατόπισης σε αδιάστατους όρους για τους τέσσερις λόγους έμπηξης που εξετάζουμε. Όσο αυξάνει ο λόγος έμπηξης αυξάνει αναλογικά και η φέρουσα ικανότητα του πασσάλου υπό τέμνουσα δύναμη. Αυτό συμβαίνει γιατί το ενεργό μήκος του πασσάλου είναι μικρότερο από το συνολικό του μήκος για τους πρώτους δύο λόγους, περίπου ίσο για τον τρίτο και λίγο μεγαλύτερο μόνο για τον τέταρτο. Ενεργοποιείται, δηλαδή, μεγαλύτερο μήκος του πασσάλου για την ανάληψη της τέμνουσας δύναμης με αποτέλεσμα να μεγαλώνει και η οριακή τέμνουσα αντοχή του πασσάλου.

Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων με αυτά που προέκυψαν από το διάγραμμα οριακής αντοχής σε οριζόντια δύναμη συναρτήσει το λόγου εγκιβωτισμού του πασσάλου και των συνθηκών στήριξης (Fleming et al. 2009). Από το διάγραμμα χρησιμοποιήθηκε η καμπύλη για κοντό πάσσαλο ελεύθερης κεφαλής και εκκεντρότητα φόρτισης  $e=0$ . Τονίζεται ότι η αδιαστατοποίηση αυτού του διαγράμματος (για λόγους σύγκρισης) διαφέρει από την συνήθη αδιαστατοποίηση της εργασίας και είναι αυτή που φαίνεται στο **σχήμα 4.9**. Οι δύο καμπύλες συγκλίνουν απόλυτα και οι μικρές αποκλίσεις που μπορεί να παρουσιάζουν κάποια σημεία είναι λόγω σφάλματος ανάγνωσης του λογαριθμικού διαγράμματος.

Τέλος, στο **σχήμα 4.10** απεικονίζονται οι πλαστικές παραμορφώσεις του εδάφους υπό τέμνουσα δύναμη, μηχανισμός αστοχίας σε όρους οριζόντιας μετακίνησης και οι στροφές καθ ύψος του μονοπασσάλου. Στην αριστερή στήλη τα σχήματα δείχνουν τον μονοπάσσαλο με λόγο έμπηξης  $L/D=4$  (κοντός πάσσαλος) και στην δεξιά στήλη τον  $L/D=7$  (πάσσαλος). Ο μηχανισμός αστοχίας και οι εδαφικές αντιδράσεις του λόγου  $L/D=4$  είναι αυτός του κοντού πασσάλου όπως περιγράφηκε και στο κεφάλαιο 2. Ο μονοπάσσαλος είναι άκαμπτος (δηλαδή κοινή στροφή καθ ύψος) **σχήμα 4.10(ε)**, περιστρέφεται γύρω από το σημείο εντός του μήκους του πασσάλου (**γ**) και οι εδαφικές είναι θετικές πάνω από το σημείο περιστροφής και αρνητικές κάτω από αυτό (**α**). Σε αυτή την περίπτωση ο μηχανισμός αστοχίας παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με αυτόν του εγκιβωτισμένου θεμελίου. Στην δεύτερη περίπτωση ο μονοπάσσαλος είναι εύκαμπτος, έχει διαφορετική στροφή καθ ύψος του πασσάλου (**ζ**) και οι πλαστικές παραμορφώσεις συγκεντρώνονται στο ανώτερο τμήμα του πασσάλου (**β**).

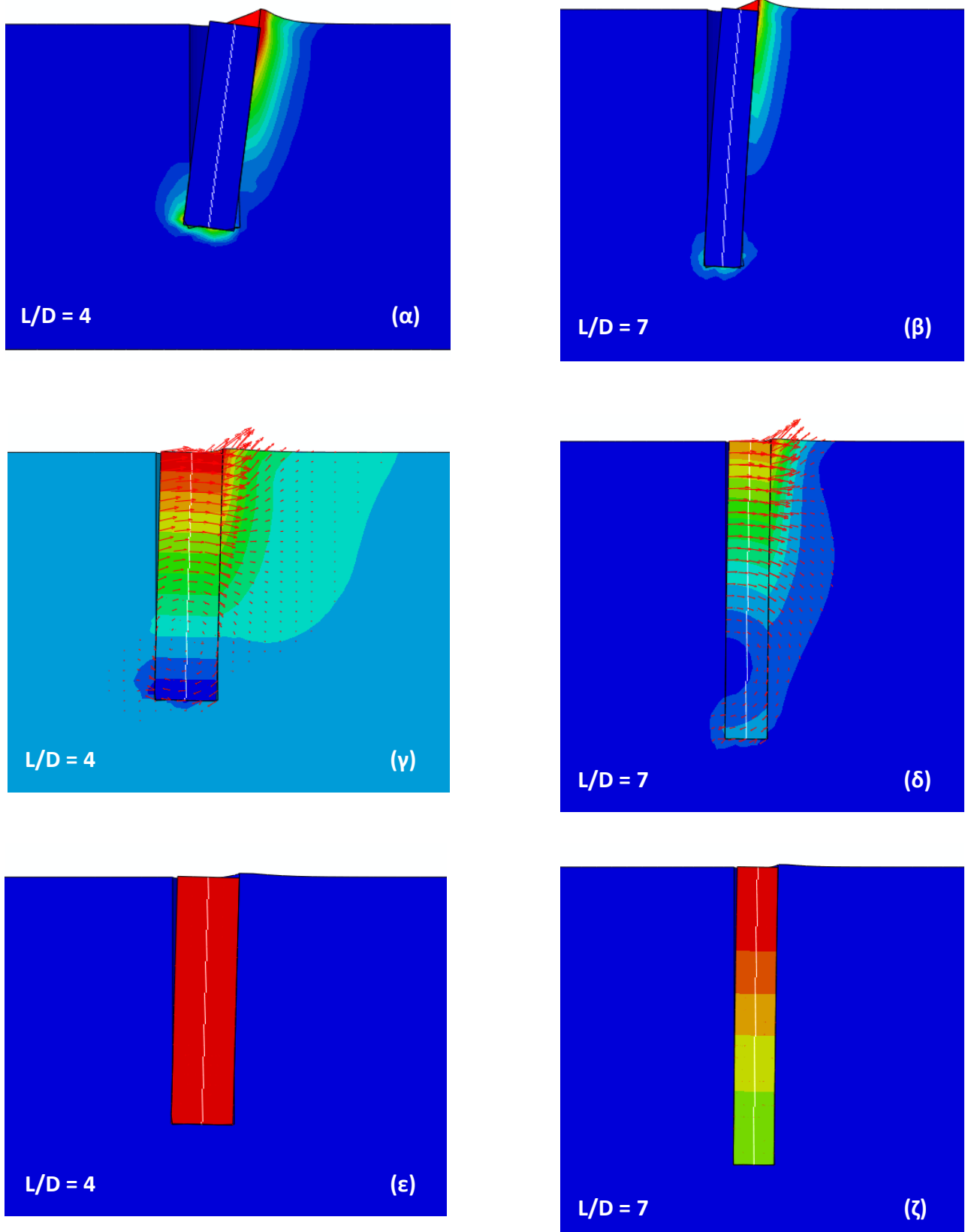


**Σχήμα 4.8.** : Αδιάστατο διάγραμμα τέμνουσας δύναμης – οριζόντιας μετακίνησης για λόγους έμπτυξης πασσάλου  $L/D= 4, 5, 6, 7$ .



**Σχήμα 4.9** : Οριακή τέμνουσα αντοχή πασσάλου ως συνάρτηση του λόγου έμπτυξης. Σύγκριση αποτελεσμάτων ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA-ABAQUS) με αποτελέσματα διαγράμματος Fleming et al. 2009.





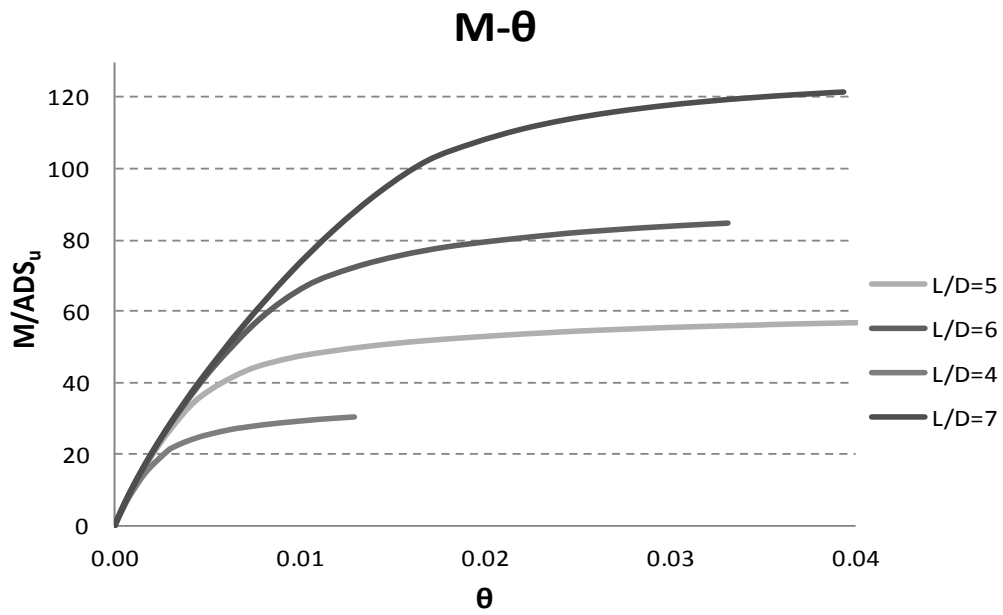
**Σχήμα 4.10:** Πλαστικές παραμορφώσεις εδάφους υπό τέμνουσα δύναμη – επιβολή οριζόντιας μετατόπισης χωρίς δέσμευση της στροφής (α)+(β), μηχανισμός αστοχίας σε όρους οριζόντιας μετακίνησης (γ)+(δ), στροφές καθ' ύψος του μονοπασσάλου (ε) + (ζ). Στην αριστερή στήλη τα σχήματα απεικονίζουν τον μονοπάσσαλο με λόγο  $L/D=4$  και στην δεξιά στήλη τον μονοπάσσαλο με  $L/D=7$ .

### 4.3.3 Ροπή ανατροπής

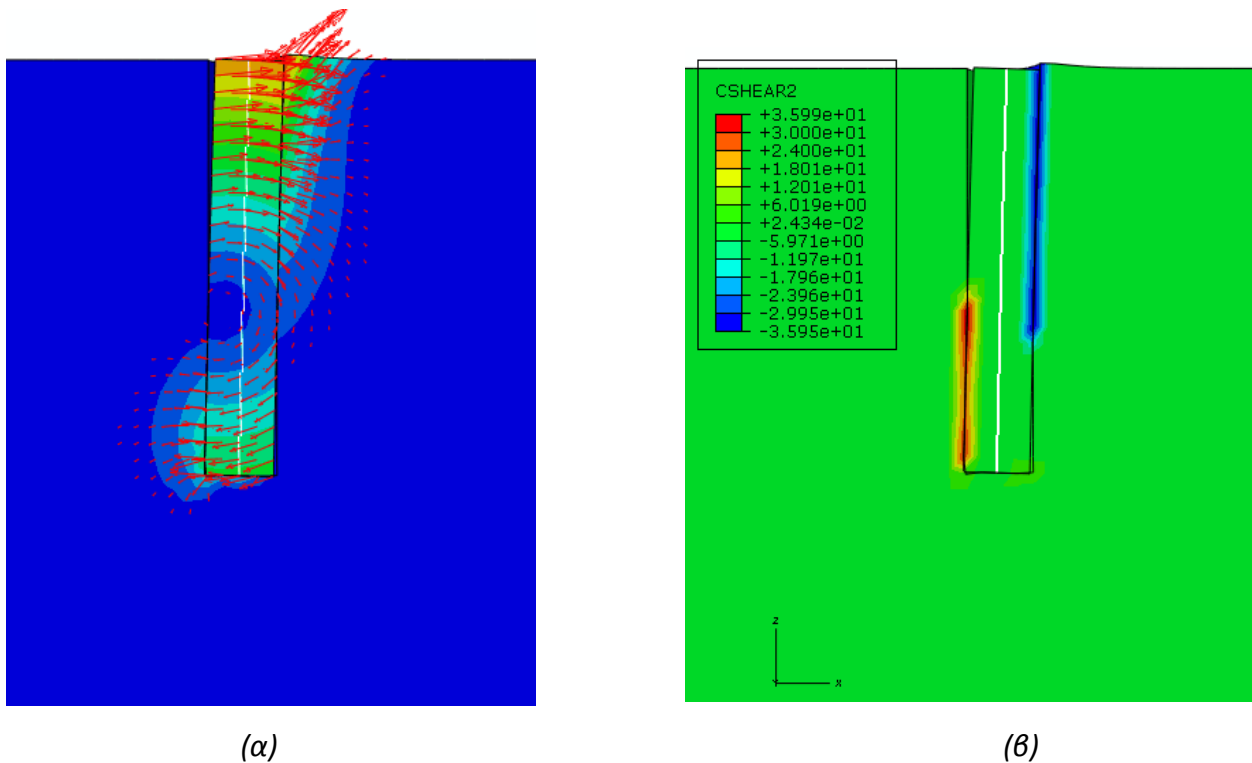
Η ροπή ανατροπής είναι η κυρίαρχη φόρτιση της θεμελίωσης της ανεμογεννήτριας και συνήθως καθορίζει το μέγεθος του μονοπασσάλου λαμβάνοντας υπ' όψιν τους συντελεστές ασφαλείας. Η δύναμη του ανέμου ασκείται στο ύψος του ρότορα (60-120m) με αποτέλεσμα ο μοχλοβραχίονας και η ροπή ανατροπής στην βάση της θεμελίωσης να είναι πολύ μεγάλου μεγέθους. Ο μηχανισμός ανάληψης των φορτίων είναι ο ίδιος με αυτόν την τέμνουσας δύναμης. Και σε αυτή την περίπτωση υπάρχει έντονη σύζευξη του οριζόντιου μετακινισιακού και στροφικού βαθμού ελευθερίας και η επιβολή στροφής προκαλεί την ταυτόχρονη οριζόντια μετακίνηση του μονοπασσάλου.

Για την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας σε ροπή ανατροπής  $M_{ult}$  επιβάλλαμε στροφή (κατά την διεύθυνση  $\gamma$ ) στην κορυφή του θεμελίου χωρίς δέσμευση της οριζόντιας μετακίνησης (πάσσαλος ελεύθερης κεφαλής) μέχρι την αστοχία ή την εμφάνιση της πλαστικής περιοχής της καμπύλης  $P-\gamma$ . Στο διάγραμμα (**σχήμα 4.11**) φαίνεται η καμπύλη ροπής-στροφής για τους τέσσερις λόγους έμπτυξης αδιαστατοποιημένη ως προς το εμβαδόν, την διάμετρο και την αστράγγιστη διατμητική αντοχή. Και σε αυτή την περίπτωση όσο αυξάνει ο λόγος έμπτυξης αυξάνει αναλογικά και η αντοχή σε ροπή, καθώς ο μηχανισμός ανάληψης της ροπής είναι ο παρόμοιος με αυτόν της τέμνουσας δύναμης. Άλλωστε, η ροπή ανατροπής είναι ουσιαστικά μια οριζόντια δύναμη με εκκεντρότητα. Θυμίζουμε ότι το ενεργό μήκος του πασσάλου είναι μικρότερο από το συνολικό του μήκος για τους πρώτους δύο λόγους, περίπου ίσο για τον τρίτο και μεγαλύτερο μόνο για τον τέταρτο.

Τέλος, στο **σχήμα 4.12(α)** φαίνεται ο μηχανισμός αστοχίας υπό μορφή διανυσμάτων μετατόπισης για την επιβολή στροφής στην κορυφή του μονοπασσάλου χωρίς δέσμευση της οριζόντιας μετατόπισης. Ο μονοπάσσαλος περιστρέφεται γύρω από ένα σταθερό σημείο και οι πλαστικές παραμορφώσεις του εδάφους βρίσκονται εκατέρωθεν αυτού του σημείου, άνω και κάτω αντίστοιχα. Τα διανύσματα των μετατοπίσεων δείχνουν ότι εντονότερη είναι η παρουσία της στροφής, ωστόσο υπάρχει και οριζόντια μετακίνηση του πασσάλου. Στο σχήμα 4.12(β) απεικονίζονται οι διατμητικές τάσεις στην διεπιφάνεια εδάφους-μονοπασσάλου. Στην δεξιά πλευρά αναπτύσσονται αρνητικές διατμητικές τάσεις, δηλαδή το θεμέλιο έχει την τάση για καθίζηση και κίνηση προς τα κάτω, ενώ από την αριστερή πλευρά του οι τάσεις είναι θετικές, δηλαδή ο μονοπάσσαλος τείνει να ανασηκωθεί.



Σχήμα 4.11: Αδιάστατο διάγραμμα ροπής – στροφής για λόγους έμπτυξης πασσάλου  $L/D=4, 5, 6, 7$ .



Σχήμα 4.12: (α) μηχανισμός αστοχίας υπό μορφή διανυσμάτων μετατόπισης για την επιβολή στροφής στην κορυφή του μονοπασάλου χωρίς δέσμευση της οριζόντιας μετατόπισης (β) διατμητικές τάσεις στην διεπιφάνεια εδάφους θεμελίου.

#### 4.3.4 Συνδυασμένη φόρτιση

Η φέρουσα ικανότητα υπό μεμονωμένη φόρτιση είναι σημαντική για να γνωρίζουμε τα όρια σχεδιασμού σε κάθε περίπτωση, όμως στην πραγματικότητα η συνδυασμένη φόρτιση είναι αυτή που καταπονεί την θεμελίωση μιας θαλάσσιας ανεμογεννήτριας. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πολύ σημαντικά βήματα για την καταγραφή της περιβάλλουσας αστοχίας στον τρισδιάστατο χώρο φόρτισης M-H-V. Όπως ήταν φυσικό αρχικό αντικείμενο μελέτης αποτέλεσε το επιφανειακό θεμέλιο και στην συνέχεια το εγκιβωτισμένο για μικρούς βαθμούς εγκιβωτισμού {Yun & Bransby, 2007, Gourvenec 2008}. Το ερευνητικό ενδιαφέρον της παρούσης εργασίας επικεντρώνεται σε μεγαλύτερους λόγους έμπηξης ( $L/D= 4-6$ ) που είναι και πιο αντιπροσωπευτικοί του συνόλου των μονοπασσάλων.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την περιγραφή της περιβάλλουσας αστοχίας είναι αυτή των ανιχνευτικών οδεύσεων. Σε κάθε περίπτωση διεξήχθησαν σειρές από αναλύσεις κατά τις οποίες επιβάλαμε έναν σταθερό αδιάστατο λόγο των μεγεθών που μας ενδιέφεραν στην εκάστοτε περίπτωση. Για παράδειγμα για τον προσδιορισμό την περιβάλλουσας αστοχίας υπό τέμνουσα και ροπή, επιβάλλαμε ταυτόχρονα οριζόντια μετακίνηση και στροφή για διάφορους λόγους  $u/D\theta$  στο κέντρο της θεμελίωσης. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι να προκύψουν πολλές τασικές οδεύσεις που καταλήγουν στην περιβάλλουσα αστοχίας υπό συνδυασμένη φόρτιση.

Ακολουθούν τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης για τους τρεις συνδυασμούς φόρτισης (ροπής-τέμνουσας M-H, ροπής-αξονικής δύναμης M-V, αξονικής δύναμης-τέμνουσας V-H).

##### 4.3.4.1 Αλληλεπίδραση τέμνουσας δύναμης-ροπής ανατροπής

Ο σημαντικότερος συνδυασμός για την θεμελίωση της θαλάσσιας ανεμογεννήτριας είναι η συνύπαρξη της τέμνουσας και της ροπής ανατροπής, καθώς η παρουσία της κατακόρυφης δύναμης είναι μικρής σημασίας για το σύστημα ( $V/M < 0.1$ ). Αρκετοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί πρόσφατα με την αλληλεπίδραση τέμνουσας-ροπής για επιφανειακά ή εγκιβωτισμένα θεμέλια για μικρούς όμως λόγους  $D/B \leq 1$  (όπου, D είναι το μήκος εγκιβωτισμού και B το πλάτος ή η διάμετρος του θεμελίου) {Yun & Bransby, 2007, Gourvenec 2008}. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση των μεγαλύτερων λόγων εγκιβωτισμού (ή καλύτερα λόγων εμπήξεων αφού πλέον η θεμελίωση συμπεριφέρεται ως κοντός πάσσαλος). Ήδη από τον λόγο  $L/D=1$  έχει φανεί ότι η σύζευξη του οριζόντιου μετακινησιακού και στροφικού βαθμού ελευθερίας είναι πολύ έντονη και επηρεάζει αυξητικά τόσο το μέγεθος όσο και την μορφή του διαγράμματος.

Θυμίζουμε ότι η πλαστική συμπεριφορά του εδάφους ακολουθεί ένα συσχετισμένο νόμο πλαστικής ροής, όπως περιγράψαμε στο κεφάλαιο 3. Το κάθετο προς τα έξω διάνυσμα σε οποιοδήποτε σημείο της καμπύλης υποδεικνύει την κατεύθυνση των επαυξητικών πλαστικών παραμορφώσεων κατά την αστοχία. Στην περίπτωση που οι δύο βαθμοί ελευθερίας (στροφικός

και μετακινησιακός) είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους το διάνυσμα είναι παράλληλο προς τον έναν ή τον άλλο άξονα του διαγράμματος.

Στην παρούσα εργασία επικεντρωθήκαμε στους λόγους έμπτυξης  $L/D=4, 5, 6$  για την μορφοποίηση του διαγράμματος αλληλεπίδρασης τέμνουσας-ροπής (H-M) και της περιβάλλουσας αστοχίας για κάθε περίπτωση. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η μέθοδος των 'ανιχνευτικών οδύσεων', όπως περιγράφηκε και στο κεφάλαιο 3. Επιβάλλαμε ταυτόχρονα στροφή και οριζόντια μετακίνηση στο κέντρο της κορυφής του μονοπασσάλου κρατώντας σταθερή την αναλογία μεταξύ τους σε κάθε περίπτωση. Στα **σχήματα 4.13, 15** απεικονίζονται τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης τέμνουσας-ροπής σε αδιάστατους όρους για τους εξής λόγους έμπτυξης: (α)  $L/D=6$ , (β)  $L/D=5$  και (γ)  $L/D=4$  απουσία αξονικής δύναμης ( $V=0$ , ή  $\chi=V/V_{ult}=0$ ).

Πιο συγκεκριμένα για το **σχήμα 4.13**, η περιβάλλουσα αστοχίας υπό συνδυασμένη φόρτιση ροπής-τέμνουσας (M-H) είναι ουσιαστικά μια έλλειψη με τους κύριους άξονες της να σχηματίζουν γωνία με τους άξονες του διαγράμματος M-H. Αυτό συμβαίνει γιατί υπάρχει πολύ έντονη σύζευξη του οριζόντιου μετακινησιακού και στροφικού βαθμού ελευθερίας για τον πάσσαλο (λόγος έμπτυξης  $L/D=6$ ). Το συμπέρασμα αυτό είναι πιο ξεκάθαρο αν σταθούμε σε 4 σημεία αυτού του διαγράμματος.

Το πρώτο σημείο είναι το σημείο τομής της περιβάλλουσας αστοχίας με τον οριζόντιο άξονα. Εκεί φαίνεται η μέγιστη τέμνουσα που μπορεί να αναπτυχθεί χωρίς περιορισμό στροφής ( $M=0$ ) και είναι ουσιαστικά η οριακή τέμνουσα  $H_{ult}$  που περιγράψαμε στο εδάφιο 4.3.3. Το κάθετο προς το έξω διάνυσμα σχηματίζει γωνία με τον οριζόντιο άξονα και υποδεικνύει ότι για μεγάλους λόγους έμπτυξης κατά την επιβολή οριζόντιας μετακίνησης παρουσιάζεται και στροφή.

Ομοίως, το δεύτερο σημείο είναι το σημείο τομής με τον κατακόρυφο άξονα, όπου βρίσκεται η μέγιστη ροπή που μπορεί να αναπτυχθεί χωρίς να δεσμεύουμε την οριζόντια μετακίνηση  $M_{ult}$ . Και πάλι το κάθετο προς τα έξω διάνυσμα δεν συμπίπτει με τον άξονα, γεγονός που υποδηλώνει την παρουσία οριζόντιας μετακίνησης με την επιβολή στροφής.

Στην συνέχεια ενδιαφέρον παρουσιάζει η μέγιστη τιμή του διαγράμματος σε όρους τέμνουσας. Πρόκειται για το σημείο  $H_{max}$  και είναι η μέγιστη τέμνουσα που μπορεί να παραλάβει ο μονοπάσσαλος με δέσμευση της στροφής ( $M \neq 0$ ). Το διάνυσμα είναι παράλληλο προς τον οριζόντιο άξονα, δηλαδή  $\theta=0$ . Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα ο συνδυασμός ( $H_{max}, M$ ) είναι σχεδόν μοναδικός, καθώς η περιβάλλουσα αστοχίας έχει γίνει μισητή στην άκρη και μόνο μια πολύ μικρή περιοχή μπορεί να ικανοποιήσει τις συνθήκες αυτές.

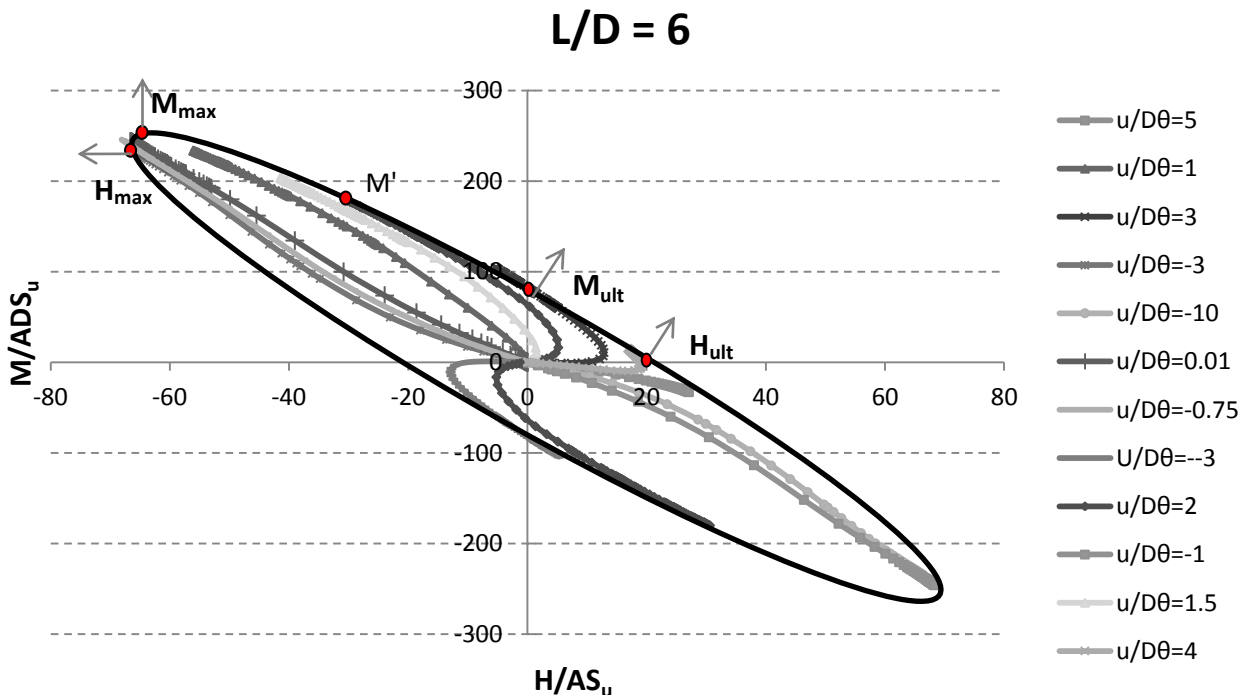
Τέλος, το σημείο  $M_{max}$  είναι αντίστοιχα η μέγιστη ροπή που μπορεί να αναπτυχθεί με δέσμευση της οριζόντιας μετακίνησης ( $H \neq 0$ ). Το κάθετο προς τα έξω διάνυσμα είναι παράλληλο με τον άξονα των ροπών και δηλώνει την απουσία της οριζόντιας μετακίνησης. Και σε αυτή την περίπτωση το εύρος που ισχύουν οι προαναφερθείσες συνθήκες είναι πολύ μικρό.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τόσο η  $H_{max}$  όσο και η  $M_{max}$  είναι τρεις φορές μεγαλύτερη από την  $H_{ult}$  και  $M_{ult}$  αντίστοιχα. Ένα ακόμα στοιχείο που υποδεικνύει την έντονη συνύπαρξη της οριζόντιας μετακίνησης και στροφής υπό εγκάρσια φόρτιση.

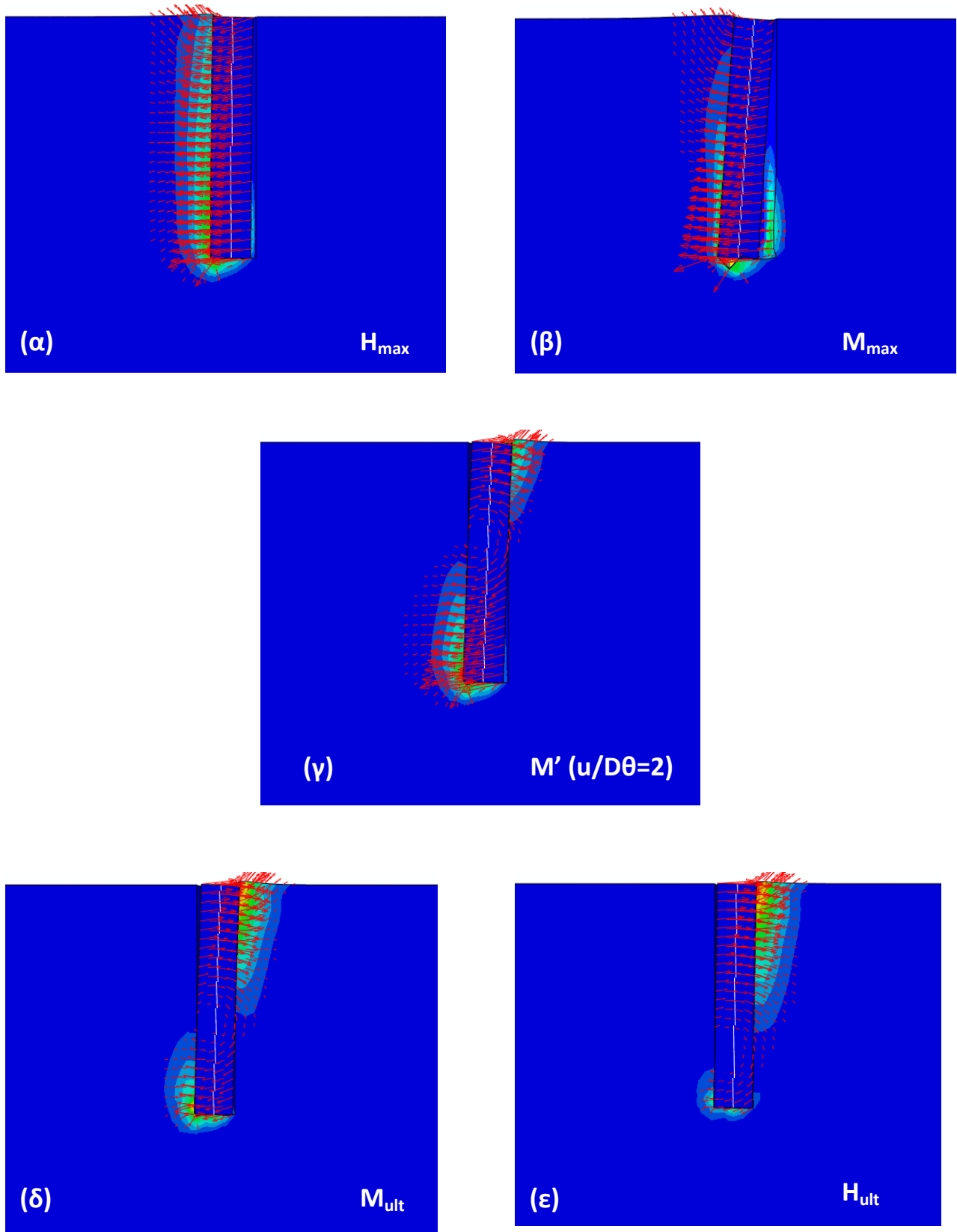
Τα **σχήματα 4.14** δείχνουν τους μηχανισμούς αστοχίας σε μορφή ισοΨών πλαστικών παραμορφώσεων και διανυσμάτων μετατόπισης για τα τέσσερα χαρακτηριστικά σημεία που περιγράψαμε πιο πάνω. Επίσης απεικονίζεται και ένα πέμπτο σημείο ανάμεσα στα σημεία  $M_{ult}$  και  $M_{max}$  για την καλύτερη εξέλιξη του μηχανισμού αστοχίας καθώς κινούμαστε πάνω στην εξωτερική καμπύλη αστοχίας. Ξεκινώντας από το σημείο  $H_{ult}$  ( $\epsilon$ ) βλέπουμε ότι ο πόλος περιστροφής του πασσάλου σταδιακά ανεβαίνει ( $\delta+\gamma$ ) μέχρι που καταλήγει στην επιφάνεια (σημείο  $M_{max}$ ) ( $\beta$ ). Στο σημείο  $H_{max}$  πλέον έχοντας δεσμεύσει την στροφή, παρατηρούμε μόνο οριζόντιες μετακινήσεις ( $\alpha$ ).

Όμοια συμπεριφορά και συμπεράσματα ισχύουν και για τους υπόλοιπους λόγους έμπτυξης που ακολουθούν στην συνέχεια (**σχήμα 4.15**). Η διαφορά τους έγκειται κυρίως στο μέγεθος των περιβαλλουσών αστοχίας. Τα τρία διαγράμματα συνοψίζονται στο **σχήμα 4.16** (επίσης σε αδιάστατους όρους) για την καλύτερη σύγκριση μεταξύ τους.

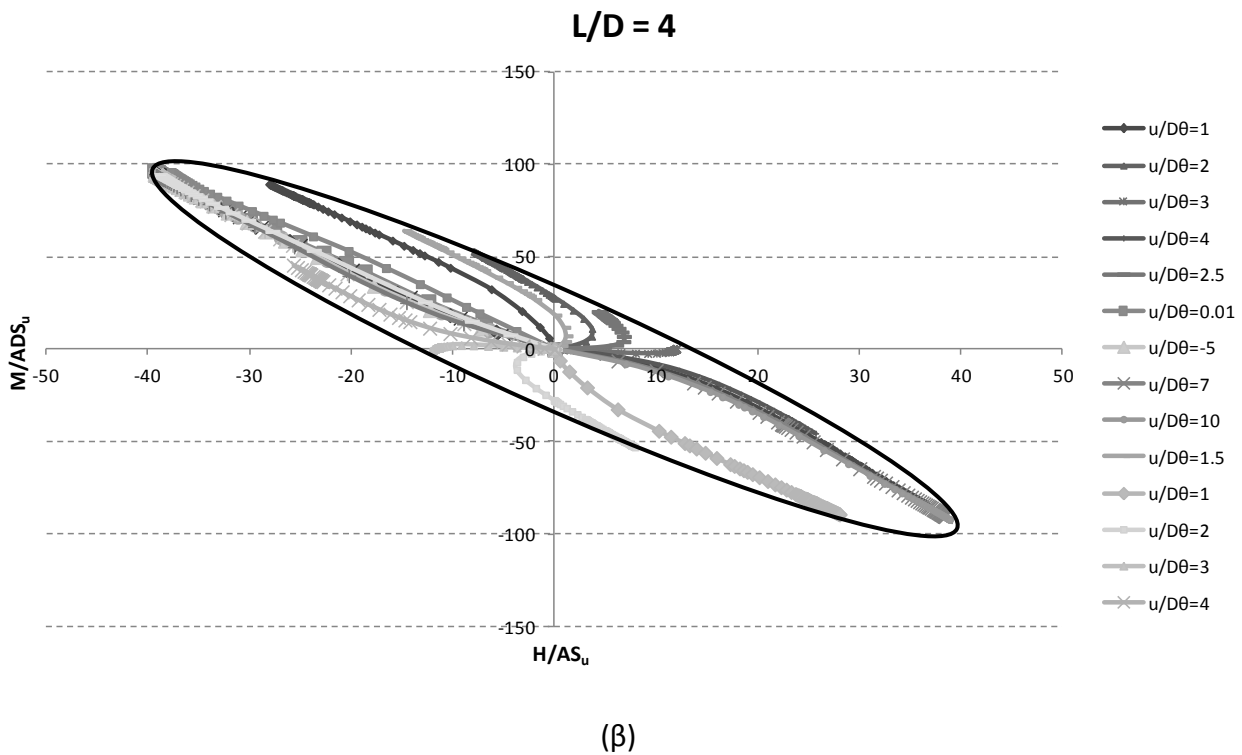
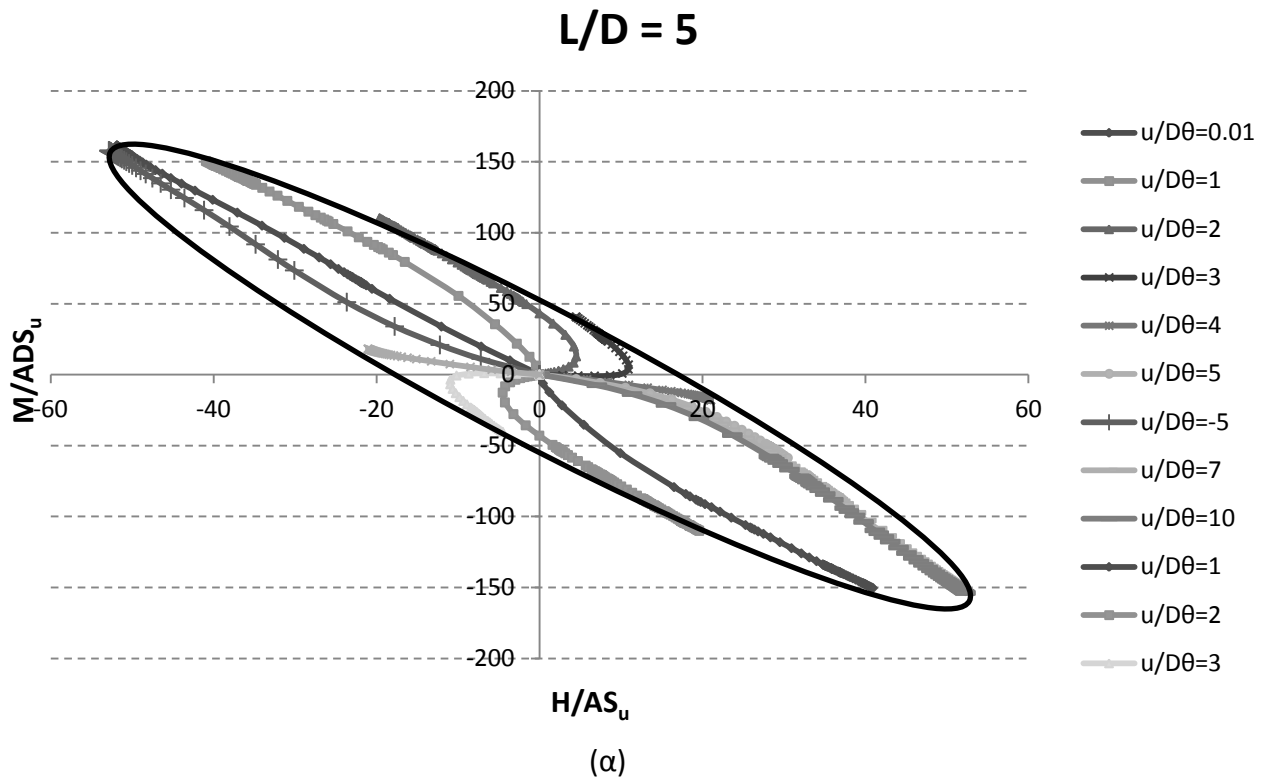
Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνει ο λόγος έμπτυξης παρουσιάζει αυξητική τάση το μέγεθος της περιβάλλουσας αστοχίας και η εκκεντρότητα της (**σχήμα 4.16**). Το σχήμα της περιβάλλουσας αστοχίας δεν αλλάζει ιδιαίτερα, καθώς και στις τρεις περιπτώσεις πρόκειται για ελλειψοειδές, αλλάζει όμως η μορφή του, η οποία φαίνεται να περιστρέφεται ελαφρά και να γίνεται πιο μυτερή στην άκρη της. Αυτή η τάση οφείλεται, όπως περιγράψαμε αναλυτικά και παραπάνω, στην σύζευξη του στροφικού με τον μετακινησιακό βαθμό ελευθερίας. Στο **σχήμα 4.17** απεικονίζονται οι περιβάλλουσες αστοχίας και σε κανονικοποιημένη μορφή.



**Σχήμα 4.13 :** Διάγραμμα αλληλεπίδρασης στο επίπεδο τέμνουσας-ροπής στην στάθμη  $V=0$  για λόγο έμπτυξης μονοπασάλου  $L/D=6$ .

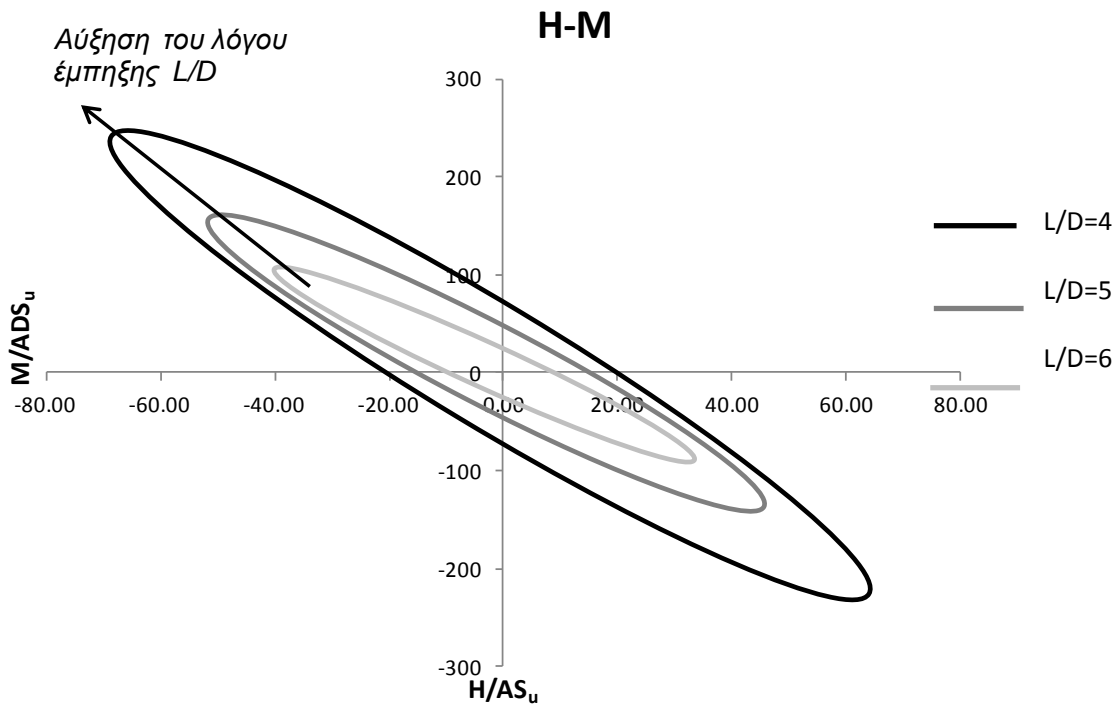


**Σχήμα 4.14:** Μηχανισμοί αστοχίας σε μορφή ισοϋψών πλαστικών παραμορφώσεων και διανυσμάτων μετατόπισης του λόγου έμπτυξης  $L/D=6$  για τα χαρακτηριστικά σημεία της περιβάλλουσας αστοχίας (α)  $H_{max}$ , (β)  $M_{max}$ , (γ)  $u/D\theta=2$ , (δ)  $M_{ult}$  και (ε)  $H_{ult}$ .

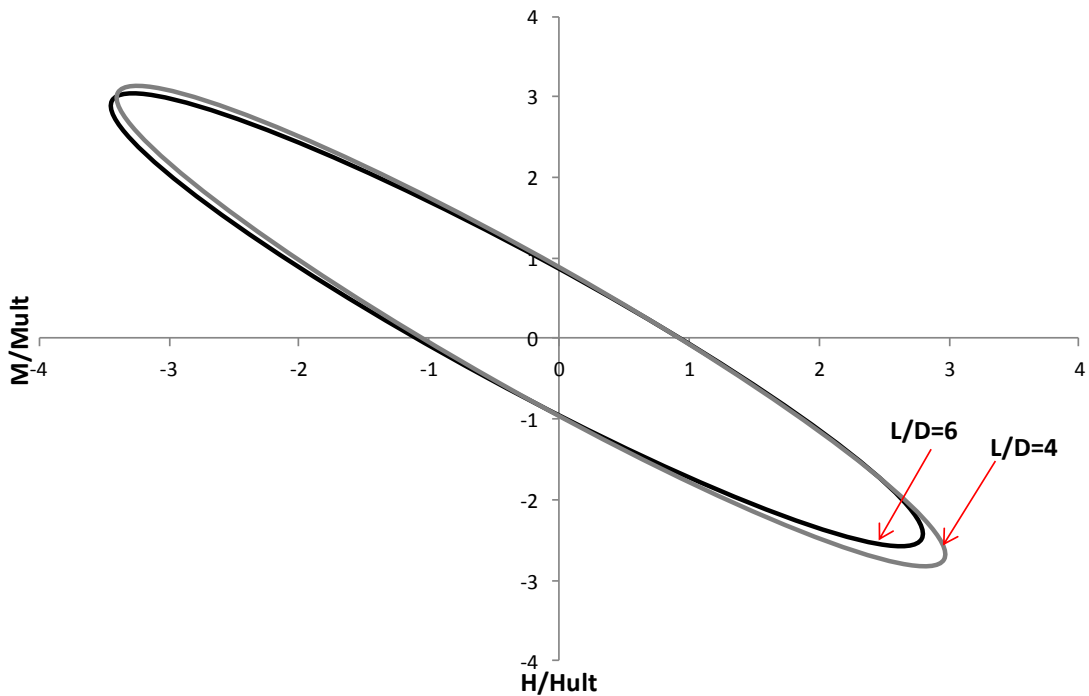


**Σχήμα 4.15 :** Διάγραμμα αλληλεπίδρασης στο επίπεδο τέμνουσας-ροπής στην στάθμη  $V=0$  για λόγο έμπτυξης μονοπασσάλου (α)  $L/D=5$  και (β)  $L/D=4$ .





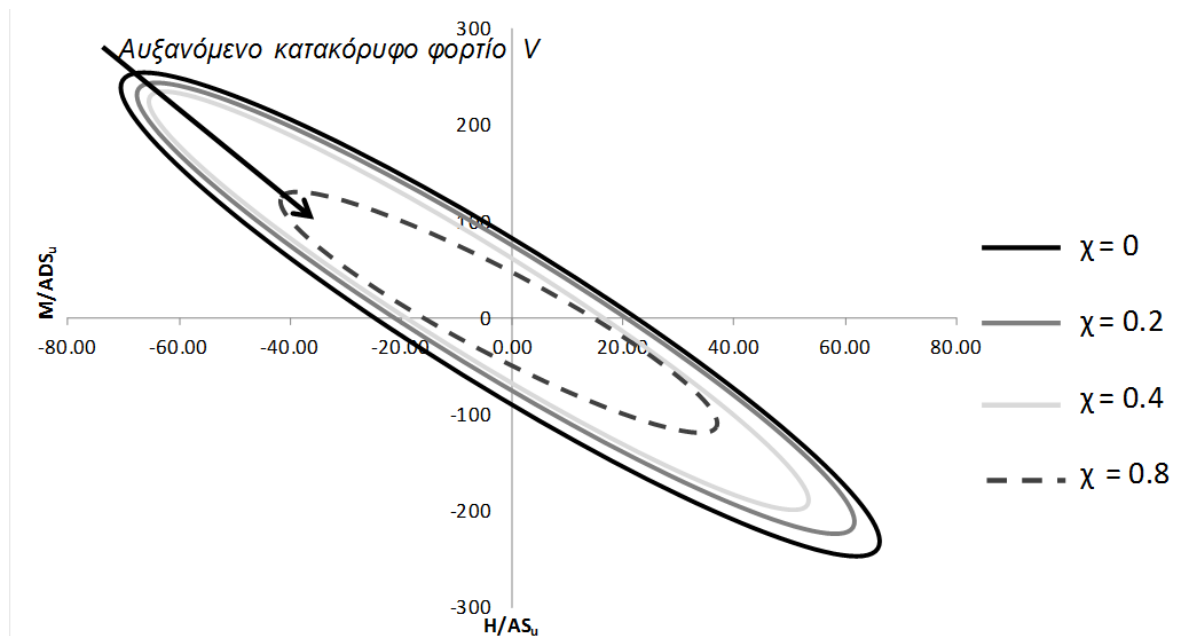
**Σχήμα 4.16 :** Περιβάλλουσες αστοχίας υπό συνδυασμό τέμνουσας δύναμης και ροπής σε αδιάστατους όρους. Σύγκριση των λόγων έμπτυξης  $L/D=4, 5, 6$ .



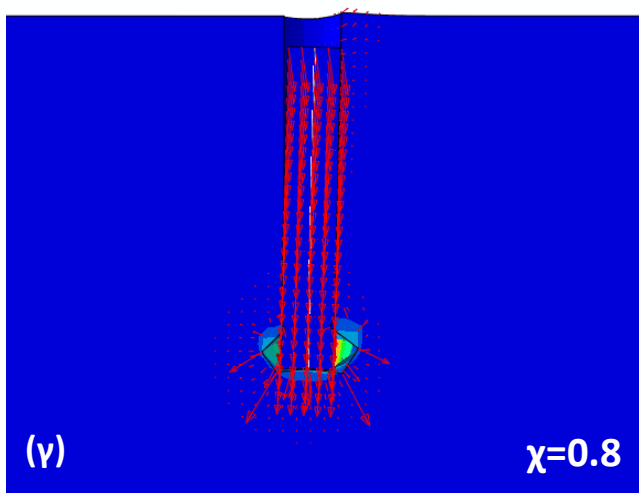
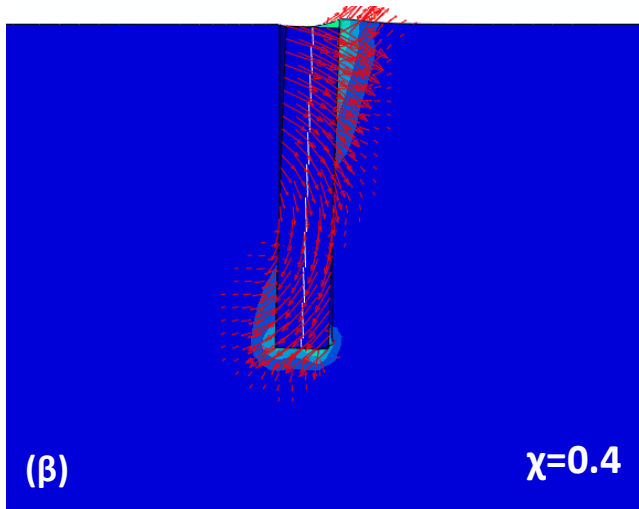
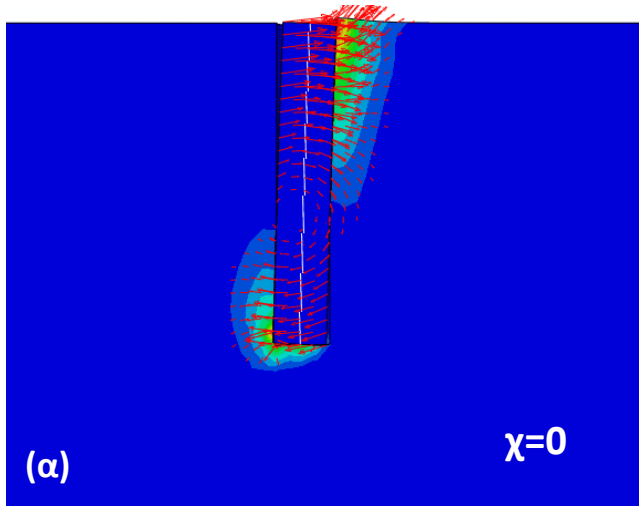
**Σχήμα 4.17 :** Περιβάλλουσες αστοχίας υπό συνδυασμό τέμνουσας δύναμης και ροπής σε κανονικοποιημένη μορφή. Σύγκριση των λόγων έμπτυξης  $L/D=4, 5, 6$ .

Ένα ακόμα σημείο που μας απασχόλησε ήταν η επίδραση της αξονικής δύναμης στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης τέμνουσας-ροπής. Επιλέξαμε τον λόγο  $L/D=6$  ο οποίος συναντάται συχνότερα στον μονοπάσσαλο και επιβάλλαμε διάφορες τιμές αξονικής δύναμης μέσω ενός συντελεστή  $\chi = V/V_{ult}$ , όπου  $V$  είναι η επιβληθείσα κατακόρυφη δύναμη και  $V_{ult}$  είναι η οριακή αντοχή του μονοπάσσалу υπό κατακόρυφη δύναμη. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής: στο πρώτο βήμα επιβάλλαμε την κατακόρυφη δύναμη και στο δεύτερο βήμα κρατώντας σταθερή την τιμή της επιβάλλαμε συνδυασμούς οριζόντιας μετακίνησης-στροφής για τις διάφορες ανιχνευτικές οδεύσεις.

Στο **σχήμα 4.18** παρατηρούμε ότι η επιρροή της αξονικής δύναμης είναι μικρή για τιμές συντελεστή  $\chi = 0 - 0.4$ . Αυτό συμβαίνει γιατί σύμφωνα με το διάγραμμα  $V-w$  (σχήμα 4.4) η αξονική που προκύπτει για αυτό το εύρος συντελεστών είναι στην ελαστική περιοχή του διαγράμματος με αποτέλεσμα να μην έχουν γίνει έντονες πλαστικοποιήσεις στο έδαφος και να μην έχουν συμβεί αποκόλληση ή η ολίσθηση του θεμελίου. Εντελώς διαφορετική είναι η κατάσταση για τον συντελεστή  $\chi=0.8$  όπου η επιρροή του είναι ιδιαίτερα σημαντική στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης  $H-M$ . Ήδη πριν την επιβολή των 'ανιχνευτικών οδεύσεων' έχουν συμβεί έντονες πλαστικοποιήσεις στο έδαφος και ολίσθηση στην διεπιφάνεια εδάφους-θεμελίου με αποτέλεσμα να έχει μειωμένη οριακή αντοχή σε συνδυασμένη ροπή και τέμνουσα. Η συμπεριφορά αυτή διαφαίνεται καλύτερα στα **σχήματα 4.19 (α), (β), (γ)**, όπου απεικονίζονται οι μηχανισμοί αστοχίας για τον μονοπάσσαλο  $L/D=6$  για την ίδια όδευση με λόγο  $u/D\theta=3$  για τρεις διαδοχικούς συντελεστές  $\chi = 0, 0.4, 0.8$ .



**Σχήμα 4.18** : Επιρροή αξονικής δύναμης στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης  $M-H$  για μονοπάσσαλο λόγου έμπτυξης  $L/D=6$ . Περιβάλλουσα αστοχίας σε όρους τέμνουσας-ροπής για τους συντελεστές κατακόρυφου φορτίου  $\chi=0, 0.2, 0.4, 0.8$ .



**Σχήμα 4.19:** Μηχανισμός αστοχίας σε μορφή ισοϋψών πλαστικών παραμορφώσεων και διανυσμάτων μετατόπισης για τον λόγο έμπηξης  $L/D=6$ . Και οι τρεις εικόνες αναφέρονται στην ανιχνευτική όδευση  $u/D\vartheta=3$  για διαφορετικούς συντελεστές κατακόρυφου φορτίου (α)  $\chi=0$ , (β)  $\chi=0.4$  και (γ)  $\chi=0.8$

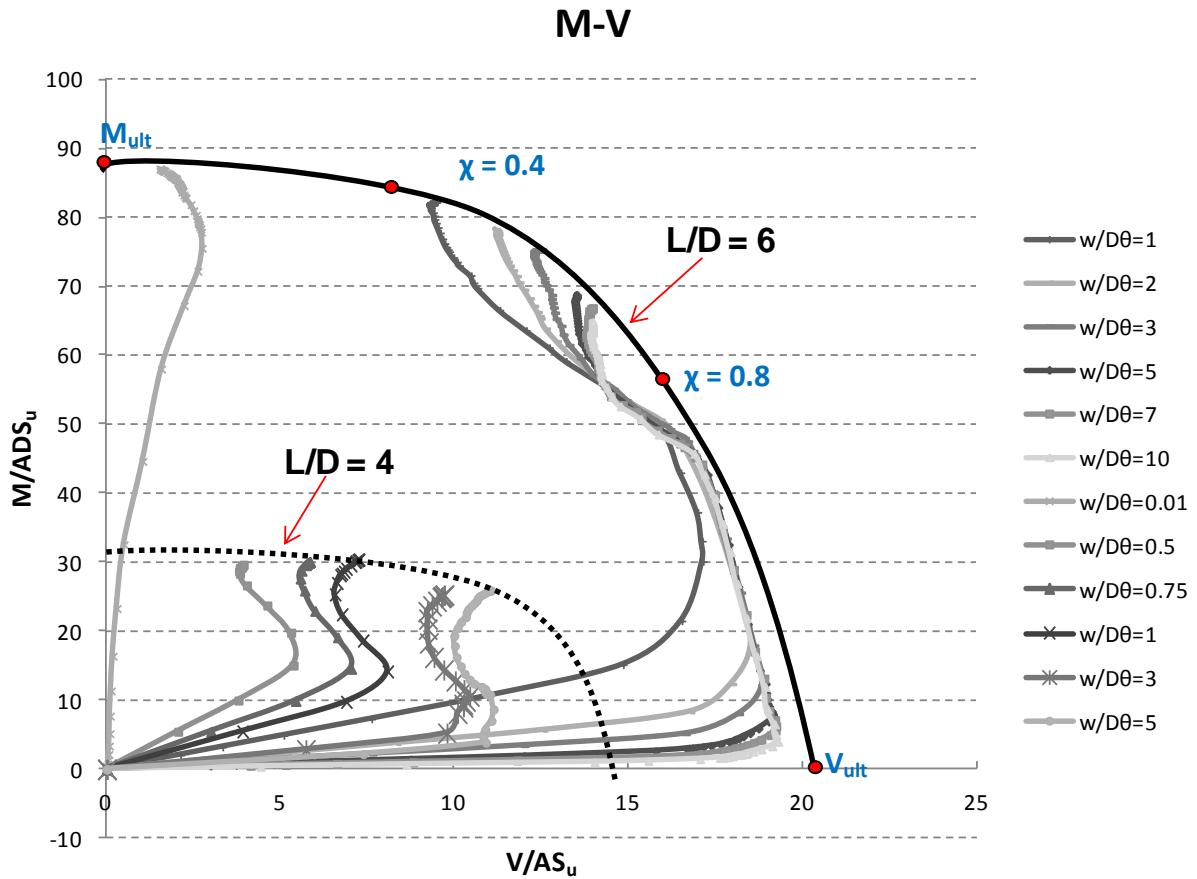
#### 4.3.4.2 Αλληλεπίδραση αξονικής δύναμης-ροπής ανατροπής

Το επόμενο βήμα ήταν η μόρφωση των διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης ροπής- αξονικής δύναμης. Στο **σχήμα 4.20** φαίνονται οι περιβάλλουσες αστοχίες υπό συνδυασμένη φόρτιση ροπής-αξονικής δύναμης απουσία τέμνουσας ( $H=0$ ) για τους λόγους έμπηξης  $L/D=6$  (συμπαγής γραμμή) και  $L/D=4$  (διακεκομμένη). Το διάγραμμα είναι σε αδιάστατους όρους και ο προσδιορισμός της περιβάλλουσας αστοχίας έγινε με τις ανιχνευτικές τασικές οδεύσεις.

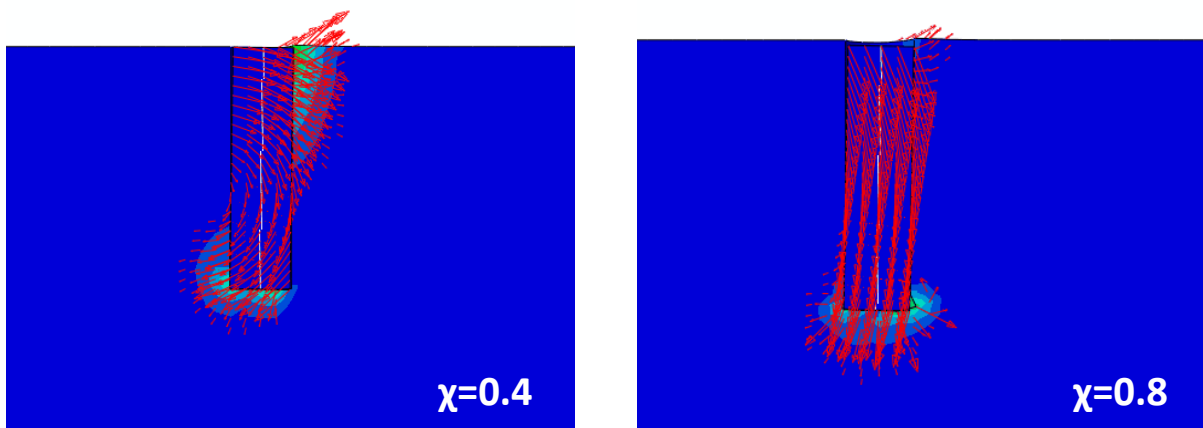
Όπως παρατηρούμε στο **σχήμα 4.20** η μορφή της περιβάλλουσας αστοχίας δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από τον λόγο έμπηξης, το μέγεθός της όμως αλλάζει αισθητά. Η μορφή της καμπύλης  $M-V$  υποδηλώνει ότι δεν υπάρχει έντονη σύζευξη του στροφικού και κατακόρυφου μετακινησιακού βαθμού ελευθερίας. Η μέγιστη ροπή  $M_{ult}$  είναι το σημείο τομής της περιβάλλουσας αστοχίας με τον κατακόρυφο άξονα και αρκετοί συνδυασμοί είναι αυτοί που ικανοποιούν την συνθήκη  $M \approx M_{ult}$ , αφού η περιβάλλουσα αστοχίας είναι σχεδόν ευθεία και παράλληλη με τον οριζόντιο άξονα για το πρώτο κομμάτι της. Ομοίως, η μέγιστη τιμή της αξονικής δύναμης είναι το σημείο τομής της καμπύλης με τον οριζόντιο άξονα. Η αντοχή του μονοπασσάλου σε αξονική δύναμη παραμένει σχεδόν ίση με την οριακή για ένα εύρος τιμών του συντελεστή  $\chi_1 = M/M_{ult} = 0 - 0.3$ .

Το **σχήμα 4.20** είναι η κατακόρυφη προβολή του **σχήματος 4.18** κατά μήκος του άξονα των ροπών (για όλα τα σημεία ισχύει  $H=0$ ). Και εδώ φαίνεται ότι για τιμές συντελεστή  $\chi=0-0.5$  (δηλαδή για αξονικό φορτίο  $V=0-0.5V_{ult}$ ) η επιρροή της αξονικής φόρτισης είναι σχεδόν αμελητέα, ενώ για μεγάλους συντελεστές ( $\chi=0.8$ ) η παρουσία της αξονικής δύναμης επηρεάζει σημαντικά την αντοχή της θεμελίωσης τόσο σε όρους ροπής όσο και σε όρους τέμνουσας.

Στο **σχήμα 4.21** φαίνονται δύο χαρακτηριστικοί μηχανισμοί αστοχίας του μονοπασσάλου με  $L/D=4$  για τους συντελεστές  $\chi=0.4$  (αριστερά) και  $\chi=0.8$  αντίστοιχα (δεξιά). Στην πρώτη περίπτωση κυριαρχεί η ροπή ανατροπής, καθώς υπάρχουν μικρές καθιζήσεις και σαφώς τάση για στροφή του μονοπασσάλου. Οι πλαστικές παραμορφώσεις του εδάφους υποδηλώνουν περιορισμένη ολίσθηση του θεμελίου, αποκόλληση από την αριστερή πλευρά του μονοπασσάλου και αστοχία του εδάφους κατά μήκος της δεξιάς πλευράς του μονοπασσάλου. Η εικόνα αυτή αλλάζει για τον κατακόρυφο συντελεστή  $\chi=0.8$ . Ο μηχανισμός αστοχίας του πασσάλου παρουσιάζει έντονη καθίζηση και ολίσθηση και αισθητά μικρότερη στροφή. Οι πλαστικές παραμορφώσεις του εδάφους έχουν συγκεντρωθεί στην αιχμή του μονοπασσάλου και μόλις έχουν αρχίσει να εμφανίζονται στην δεξιά πλευρά της κορυφής του, παραμορφώσεις που ωστόσο δεν είναι ικανές να οδηγήσουν το σύστημα στην αστοχία.



**Σχήμα 4.20:** Διάγραμμα αλληλεπίδρασης ροπής- αξονικής δύναμης σε αδιάστατους όρους. Με συμπαγή γραμμή απεικονίζεται η περιβάλλουσα αστοχίας για λόγο έμπηξης  $L/D=6$  και με διακεκομμένη για  $L/D=4$ .



**Σχήμα 4.21:** Μηχανισμοί αστοχίας σε μορφή ισοϋψών πλαστικών παραμορφώσεων και διανυσμάτων μετατόπισης του λόγου έμπηξης  $L/D=4$  για τα χαρακτηριστικά σημεία της περιβάλλουσας αστοχίας ροπής-αξονικής δύναμης με συντελεστή κατακόρυφης δύναμης  $\chi=0.4$  (αριστερά) και  $\chi=0.8$  (δεξιά).

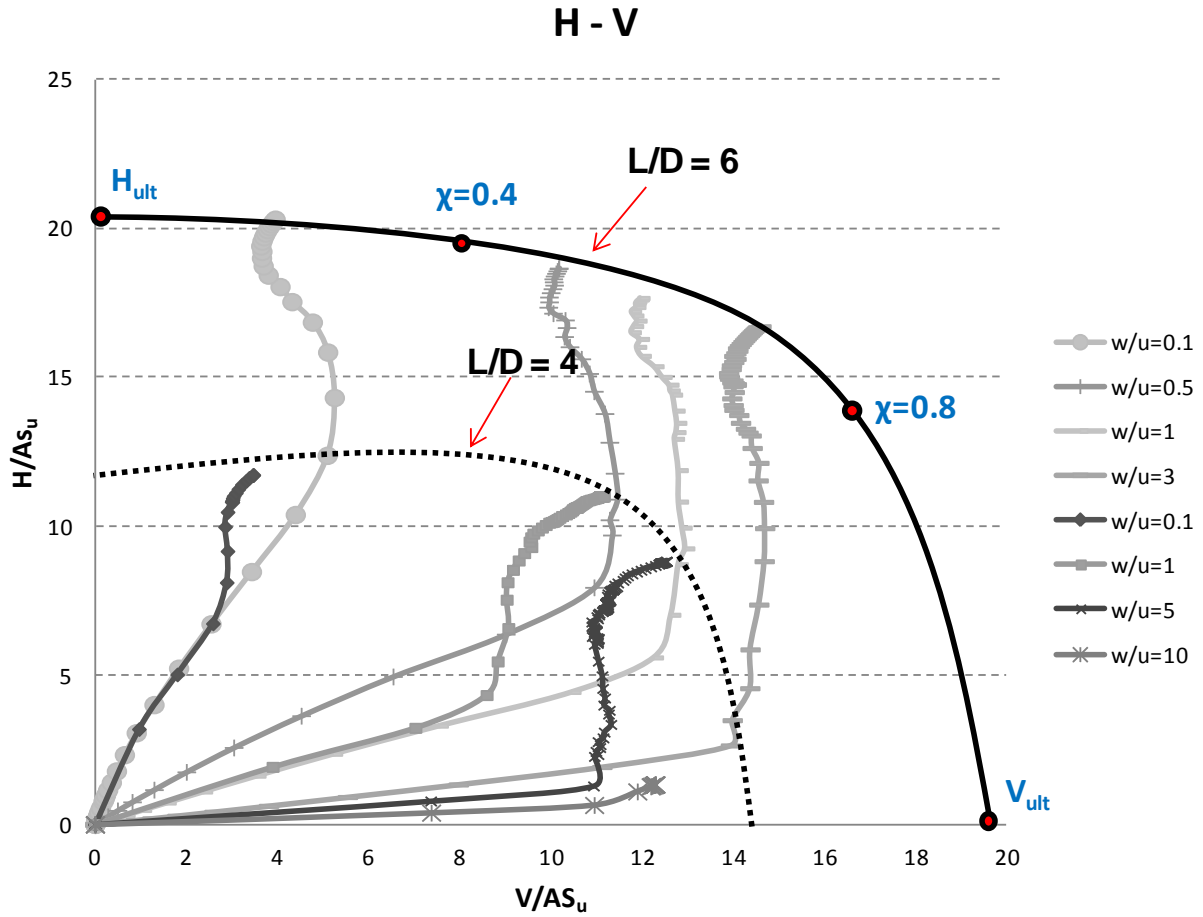
#### 4.3.4.3 Αλληλεπίδραση αξονικής δύναμης-τέμνουσας δύναμης

Τέλος για να περιγραφεί πλήρως η περιβάλλουσα αστοχίας στον τρισδιάστατο χώρο φόρτισης, δημιουργήσαμε το διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικής-τέμνουσας δύναμης. Στο **σχήμα 4.22** φαίνονται οι περιβάλλουσες αστοχίες υπό συνδυασμένη φόρτιση αξονικής-τέμνουσας δύναμης για μηδενική ροπή ( $M=0$ ) για τους λόγους έμπηξης  $L/D=6$  (συμπαγής γραμμή) και  $L/D=4$  (διακεκομμένη). Το διάγραμμα είναι σε αδιάστατους όρους και ο προσδιορισμός της περιβάλλουσας αστοχίας έγινε και πάλι με τις ανιχνευτικές τασικές οδεύσεις.

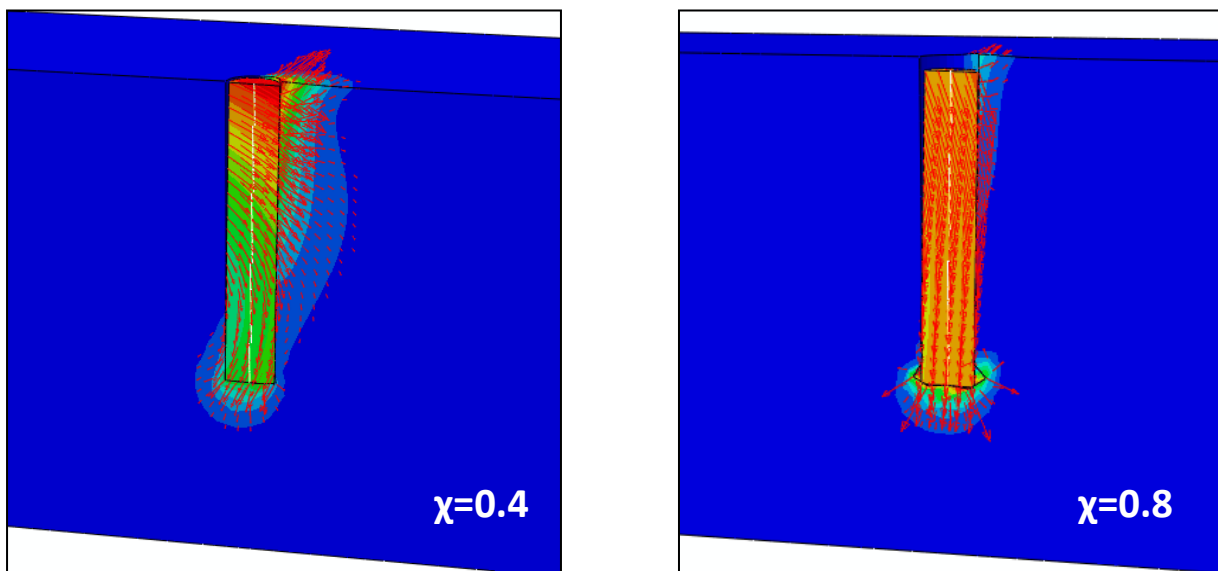
Στο **σχήμα 4.22** φαίνεται ότι η μορφή της περιβάλλουσας αστοχίας δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από τον λόγο έμπηξης, το μέγεθός της όμως αυξάνεται με το βάθος έμπηξης. Όπως ήταν αναμενόμενο δεν υπάρχει έντονη συσχέτιση του οριζόντιου και κατακόρυφου μετακινησιακού βαθμού ελευθερίας. Στα σημεία τομής με τους άξονες βρίσκονται αντίστοιχα η μέγιστη αξονική  $V_{ult}$  και τέμνουσα  $H_{ult}$  που μπορεί να αντέξει ο μονοπάσσαλος. Αρκετοί συνδυασμοί είναι αυτοί που ικανοποιούν την συνθήκη  $H \approx H_{ult}$ , αφού η περιβάλλουσα αστοχίας είναι σχεδόν ευθεία και παράλληλη με τον οριζόντιο άξονα για το πρώτο κομμάτι της. Επίσης η αντοχή του μονοπασσάλου σε αξονική δύναμη παραμένει σχεδόν ίση με την οριακή για ένα εύρος τιμών του συντελεστή  $\chi_2 = H/H_{ult} = 0 - 0.15$ .

Το **σχήμα 4.22** είναι η κατακόρυφη προβολή του **σχήματος 4.18** κατά μήκος του άξονα των τεμνουσών αφού για όλα τα σημεία ισχύει  $M=0$ . Και εδώ φαίνεται ότι για τιμές συντελεστή  $\chi=0-0.5$  (δηλαδή για αξονικό φορτίο  $V=0-0.5V_{ult}$ ) η επιρροή της αξονικής φόρτισης είναι σχεδόν αμελητέα, ενώ για μεγάλους συντελεστές ( $\chi=0.8$ ) η παρουσία της αξονικής δύναμης επηρεάζει σημαντικά την αντοχή της θεμελίωσης τόσο σε όρους ροπής όσο και σε όρους τέμνουσας.

Τέλος τα **σχήματα 4.23** δείχνουν τον μηχανισμό αστοχίας του μονοπασσάλου σε μορφή διανυσμάτων μετατόπισης για τον λόγο έμπηξης  $L/D=6$  για τους συντελεστές  $\chi=0.4$  (αριστερά) και  $\chi=0.8$  αντίστοιχα (δεξιά). Στην πρώτη περίπτωση κυριαρχεί η τέμνουσα δύναμη, καθώς υπάρχουν μικρές καθιζήσεις και σαφώς μεγαλύτερες οριζόντιες μετακινήσεις. Οι πλαστικές παραμορφώσεις του εδάφους υποδηλώνουν περιορισμένη ολίσθηση του θεμελίου, αποκόλληση από την αριστερή πλευρά του μονοπασσάλου και αστοχία του εδάφους κατά μήκος της δεξιάς πλευράς του μονοπασσάλου. Η εικόνα αυτή είναι τελείως διαφορετική καθώς κινούμαστε δεξιότερα στην περιβάλλουσα αστοχίας  $H-V$ . Συγκεκριμένα για  $\chi=0.8$  ο μηχανισμός αστοχίας του πασσάλου παρουσιάζει έντονη καθίζηση και ολίσθηση και αισθητά μικρότερη οριζόντια μετατόπιση. Οι πλαστικές παραμορφώσεις του εδάφους έχουν συγκεντρωθεί στην αιχμή του μονοπασσάλου και μόλις έχουν αρχίσει να εμφανίζονται στην δεξιά πλευρά της κορυφής του, παραμορφώσεις που ωστόσο δεν είναι ικανές να οδηγήσουν το σύστημα στην αστοχία.



**Σχήμα 4.20 :** Διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικής-τέμνουσας δύναμης σε αδιάστατους όρους. Με συμπαγή γραμμή απεικονίζεται η περιβάλλουσα αστοχίας για λόγο έμπτυξης  $L/D=6$  και με διακεκομμένη για  $L/D=4$ .



**Σχήμα 4.23:** Μηχανισμοί αστοχίας σε μορφή διανυσμάτων μετατόπισης του λόγου έμπτυξης  $L/D=6$  για τα χαρακτηριστικά σημεία της περιβάλλουσας αστοχίας αξονικής-τέμνουσας δύναμης με συντελεστή κατακόρυφης δύναμης  $\chi=0.4$  (αριστερά) και  $\chi=0.8$  (δεξιά).

#### 4.4 Επιρροή θεώρησης πλήρους επαφής εδάφους-θεμελίου

##### 4.4.1 Απλή φόρτιση θεμελίου

Μια πιο συντηρητική θεώρηση ωστόσο όχι τόσο ρεαλιστική είναι η θεώρηση συνθηκών πλήρους επαφής και στην εξωτερική διεπιφάνεια εδάφους-μονοπασσάλου. Σύμφωνα με αυτή την θεώρηση υπάρχει απεριόριστη εφελκυστική αντοχή στην διεπιφάνεια και η μέγιστη διατμητική τάση που μπορεί να αναπτυχθεί είναι ίση με την αστράγγιστη διατμητική αντοχή, δηλαδή δεν μπορεί να συμβεί ολίσθηση μεταξύ των δύο στοιχείων (εδάφους, μονοπασσάλου). Αυτά τα δύο χαρακτηριστικά προσδίδουν στον πάσσαλο μια υπεραντοχή που στην πραγματικότητα δεν μπορεί να αναπτυχθεί. Πρόκειται ουσιαστικά για το άνω όριο της φέρουσας ικανότητας της θεμελίωσης.

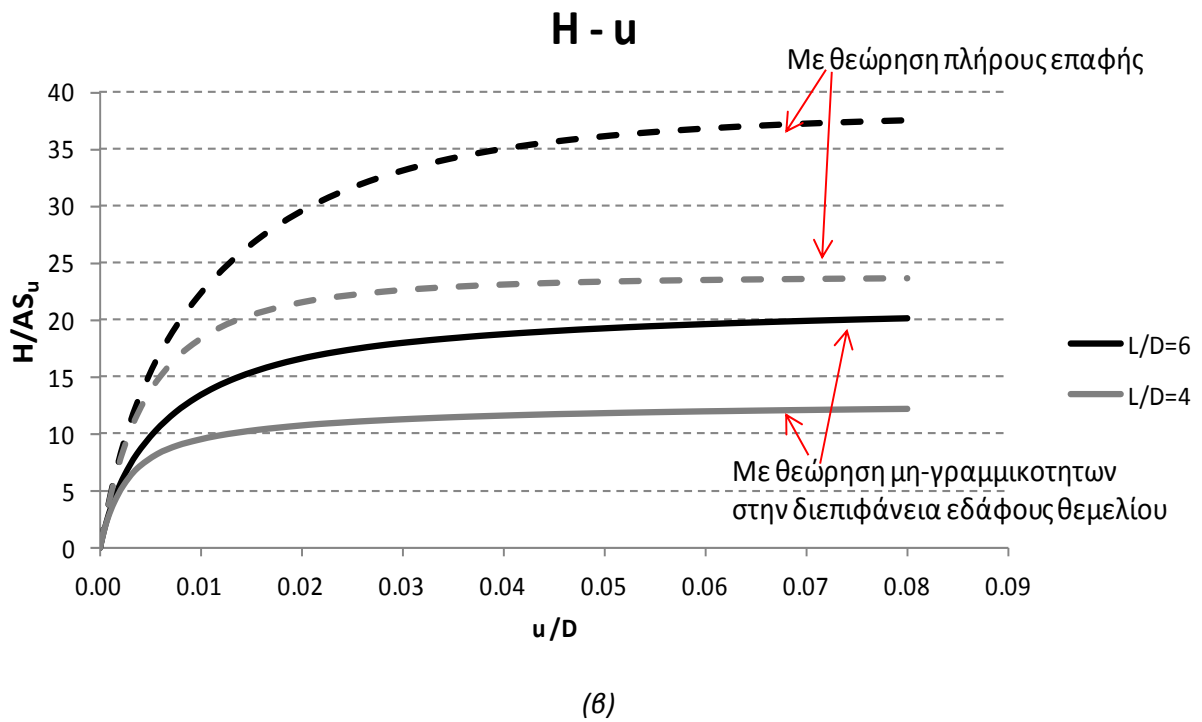
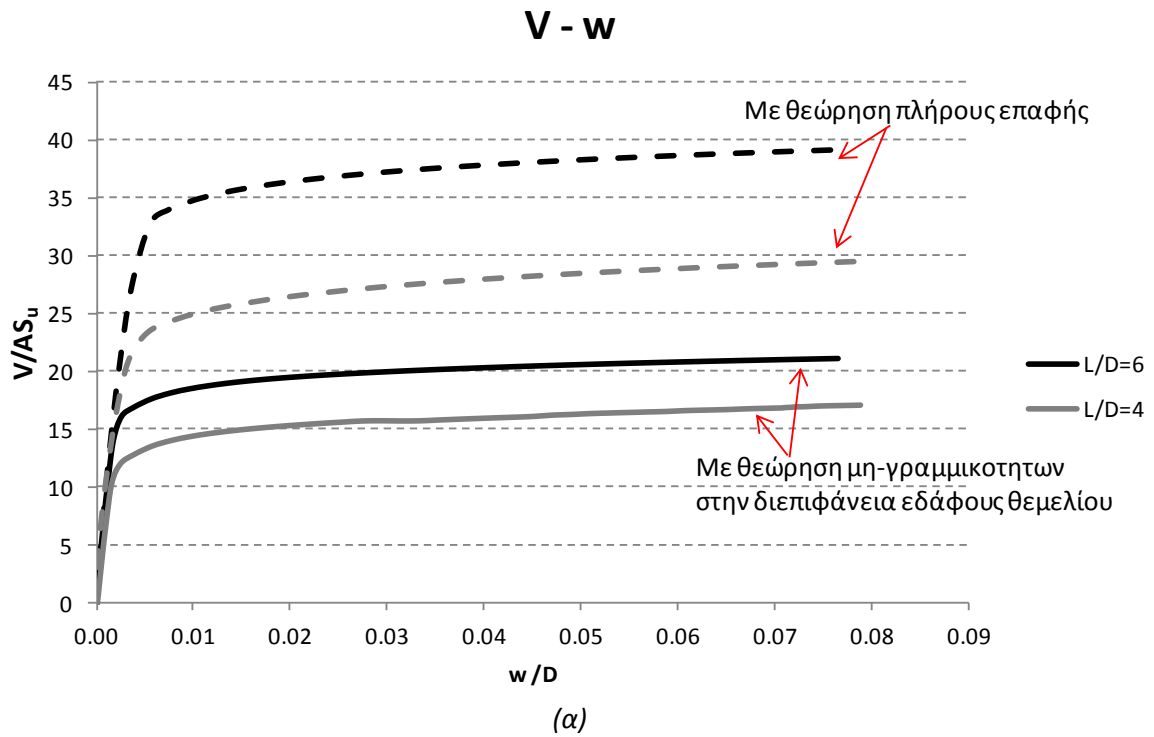
Ακολουθούν στη συνέχεια μια σειρά από διαγράμματα που απεικονίζουν αυτή την συμπεριφορά για διάφορα είδη φόρτισης. Τα διαγράμματα αναφέρονται στους λόγους έμπηξης  $L/D=4$  και 6, είναι αδιαστατοποιημένα και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα μεγέθη που προέκυψαν από αναλύσεις με θεώρηση μη-γραμμικότητας στην διεπιφάνεια εδάφους-μονοπασσάλου. Με διακεκομμένες γραμμές συμβολίζονται οι καμπύλες όπως προέκυψαν από τις αναλύσεις με θεώρηση πλήρους επαφής, ενώ με συμπαγείς γραμμές απεικονίζονται τα αποτελέσματα της θεώρησης μη γραμμικότητας.

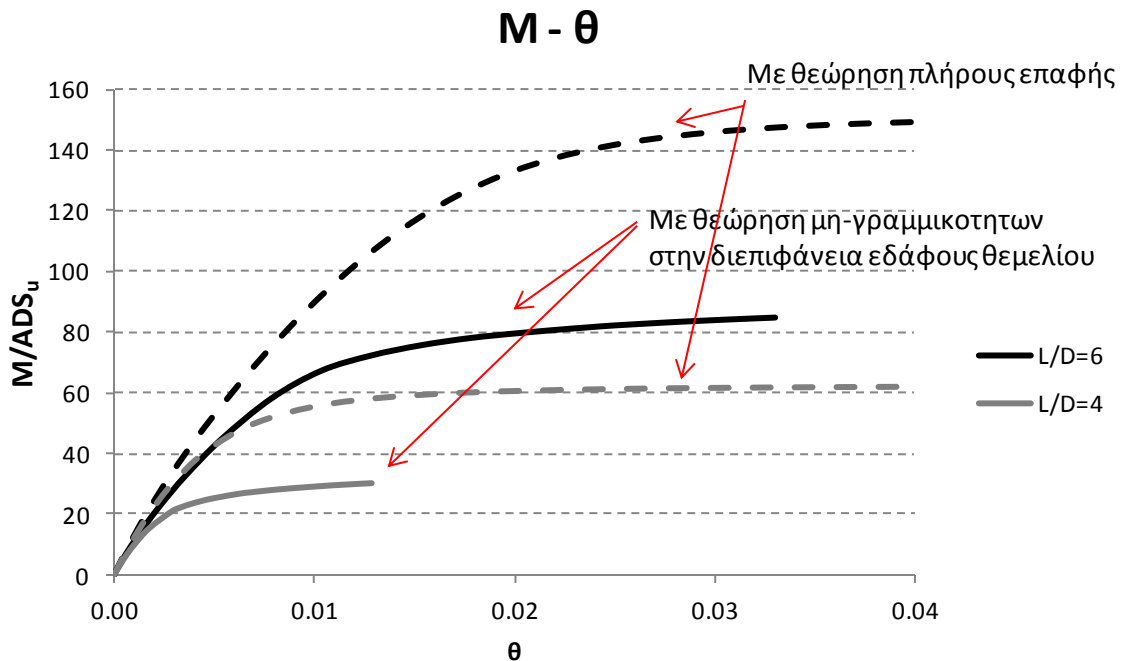
Στο **σχήμα 4.24** γίνεται σύγκριση των δύο θεωρήσεων σε όρους (α) αξονικής-καθίζησης, (β) τέμνουσας δύναμης-οριζόντιας μετακίνησης και (γ) ροπής-στροφής. Και στα τρία διαγράμματα η «θεώρηση της πλήρους επαφής» δίνει περίπου την διπλάσια αντοχή σε σύγκριση με την «θεώρηση μη-γραμμικότητας». Θυμίζουμε ότι ο συντελεστής πλευρικής συνάφειας είναι  $\alpha=0.6$  για την δεύτερη θεώρηση και ουσιαστικά  $\alpha=1$  για την πρώτη. Αντίστοιχα, στο **σχήμα 4.25** απεικονίζονται οι μηχανισμοί αστοχίας σε όρους ισοϋψών πλαστικών παραμορφώσεων και διανυσμάτων μετατόπισης αντίστοιχα για τις τρεις φορτίσεις.

Πιο συγκεκριμένα, για την αξονική φόρτιση η μεγαλύτερη αντοχή προέρχεται από την αντίσταση τριβής των πλευρικών τοιχωμάτων. Όπως παρατηρούμε στο **σχήμα 4.25 (α)**, οι πλαστικές παραμορφώσεις του εδάφους δεν περιορίζονται μόνο στην βάση του μονοπασσάλου (όπως συνέβαινε στην προηγούμενη θεώρηση) αλλά εμφανίζονται και σε όλο το μήκος του.

Τέλος, στην περίπτωση της εγκάρσιας φόρτισης (τέμνουσας δύναμη ή ροπής ανατροπής) παρατηρούμε ότι για την ανάληψη των φορτίων συμμετέχει το σύνολο της εδαφικής μάζας εκατέρωθεν του μονοπασσάλου με την μορφή ενεργητικών και παθητικών ωθήσεων (**σχήμα 4.25 (β) και (γ)**). Οι εφελκυστικές τάσεις που μπορούν να αναπτυχθούν καθώς και η αποτροπή της ολίσθησης συντείνουν στην ενίσχυση της φέρουσας ικανότητας του μονοπασσάλου υπό εγκάρσια δύναμη. Ο μηχανισμός αστοχίας και εδώ καταδεικνύει την έντονη σύζευξη του οριζόντιου μετακινήσιου και στροφικού βαθμού ελευθερίας, φυσικά με την οριζόντια μετακίνηση να δεσπόζει κατά την επιβολή τέμνουσας και την στροφή κατά την επιβολή ροπής. Ο πόλος περιστροφής της θεμελίωσης είναι εμφανής στα δύο σχήματα.

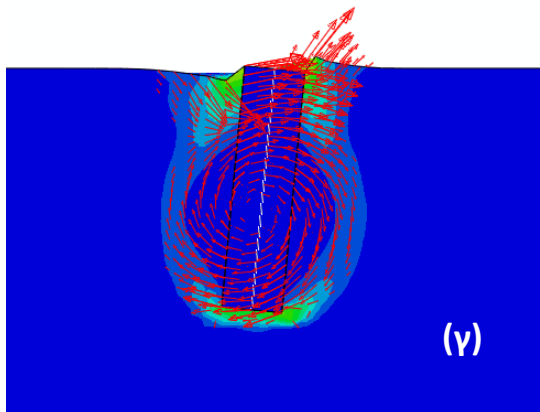
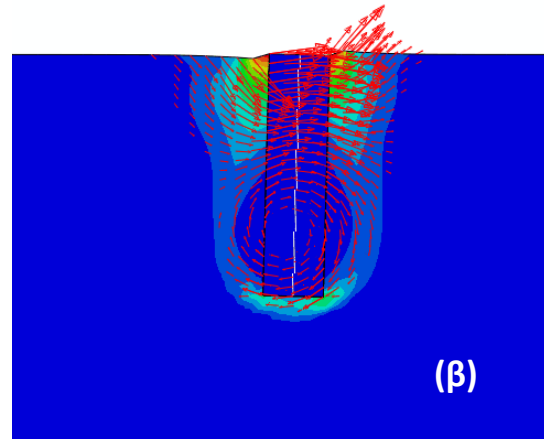
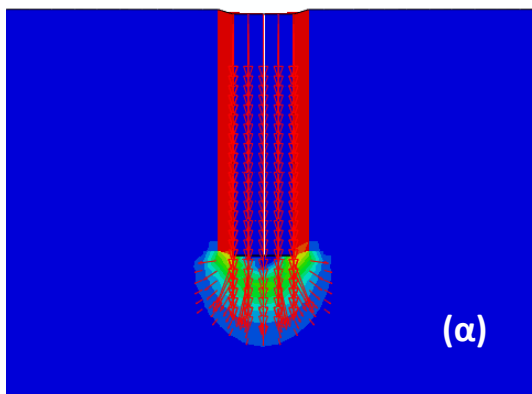






(γ)

**Σχήμα 4.24:** Αδιάστατο διάγραμμα σε όρους (α) αξονικής-καθίζησης, (β) τέμνουσας δύναμης-οριζόντιας μετακίνησης (γ) ροπής-στροφής για τους λόγους έμπηξης  $L/D=4, 6$ . Σύγκριση αποτελεσμάτων για (i) θεώρηση πλήρους επαφής (διακεκομμένη γραμμή) (ii) θεώρηση μη-γραμμικότητας στην εξωτερική διεπιφάνεια εδάφους-μονοπασάλου.



**Σχήμα 4.25:** Μηχανισμός αστοχίας υπό μορφή ισούψων πλαστικών παραμορφώσεων και διανυσμάτων μετατόπισης για: (α) αξονική, (β) τέμνουσα δύναμη και (γ) ροπή ανατροπής.

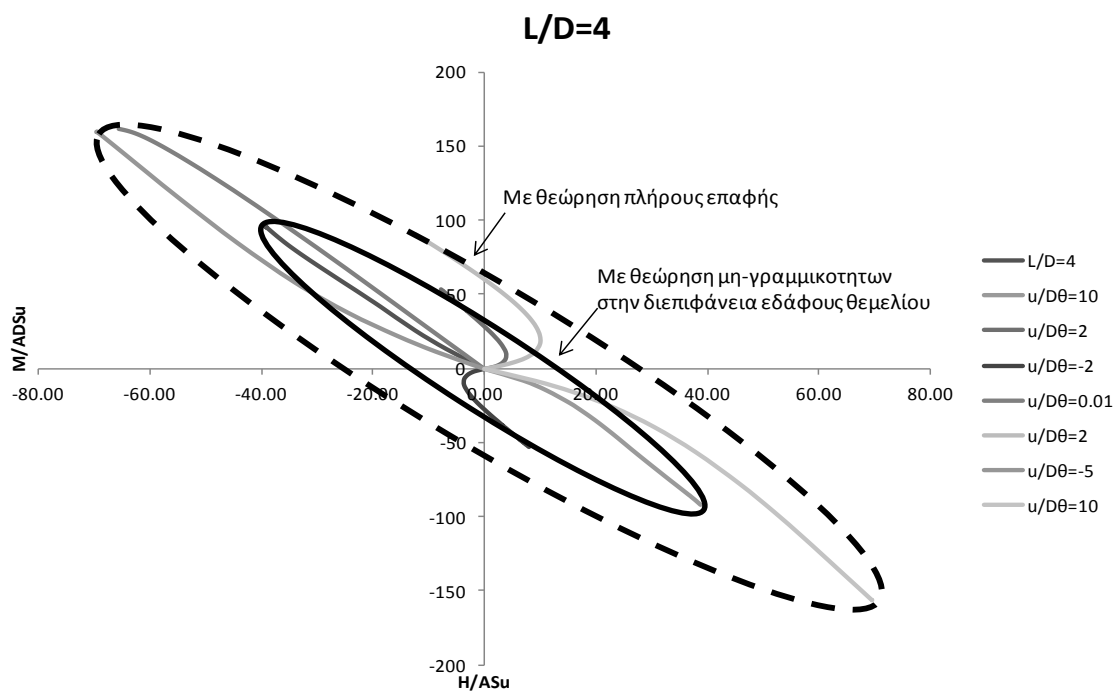
Στην διεπιφάνεια εδάφους θεμελίου έγινε θεώρηση πλήρους επαφής. Ο λόγος έμπηξης που απεικονίζεται είναι  $L/D=4$ .

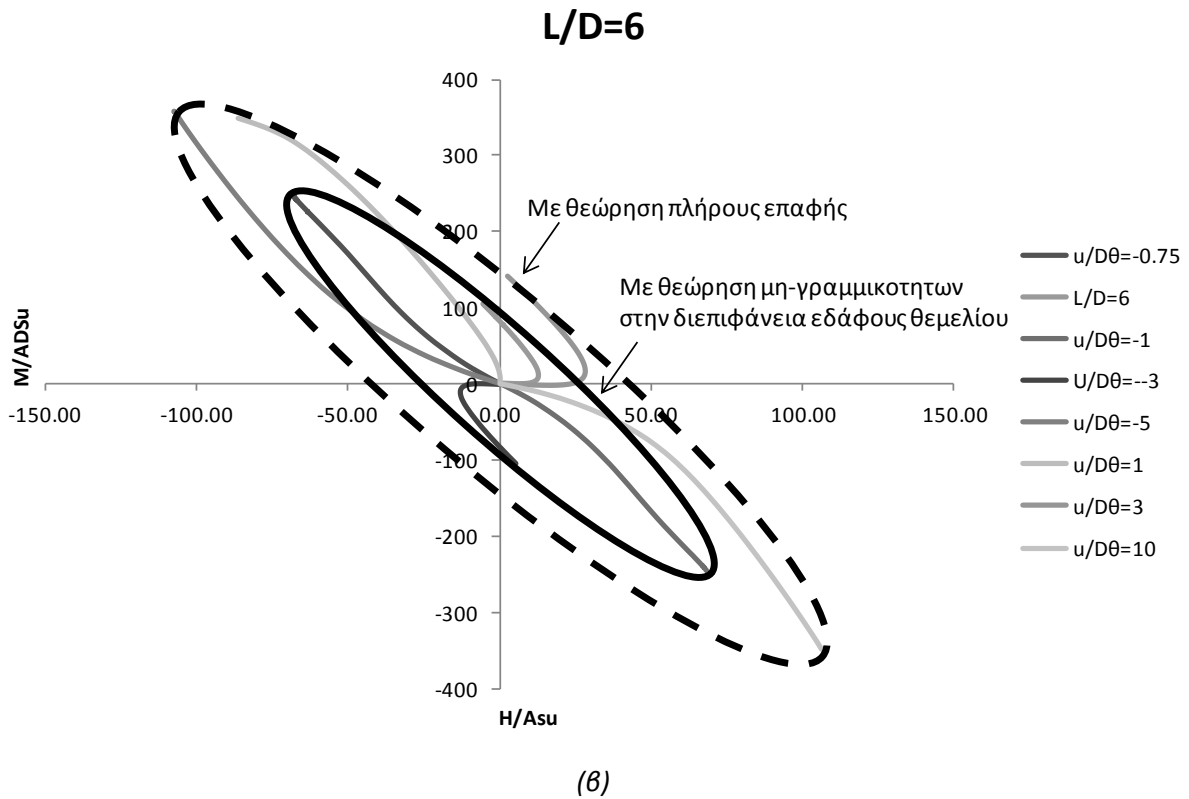
## 4.4.2 Συνδυασμένη φόρτιση

Στην συνέχεια έγιναν τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης ροπής-τέμνουσας για τους λόγους θεμελίωσης  $L/D=4$  και 6 με θεώρηση πλήρους επαφής στην διεπιφάνεια εδάφους-θεμελίου. Ακολουθήθηκε και εδώ η διαδικασία των τασικών ανιχνευτικών οδεύσεων. Στο **σχήμα 4.26** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων σε αδιάστατους όρους και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα για την θεώρηση μη-γραμμικότητας στην διεπιφάνεια εδάφους θεμελίου. Όπως παρατηρούμε η μορφή και η εκκεντρότητα της περιβάλλουσας αστοχίας είναι όμοια για τις δύο θεωρήσεις, διαφέρει όμως κατά πολύ στο μέγεθος. Το γεγονός αυτό οφείλεται, όπως περιγράψαμε και πριν, στην παραδοχή ότι στο έδαφος μπορούν να αναπτυχθούν εφελκυστικές τάσεις με αποτέλεσμα να δημιουργείται και ο μηχανισμός ενεργητικών ωθήσεων που συμβάλει στην μέγιστη αντοχή του μονοπασσάλου.

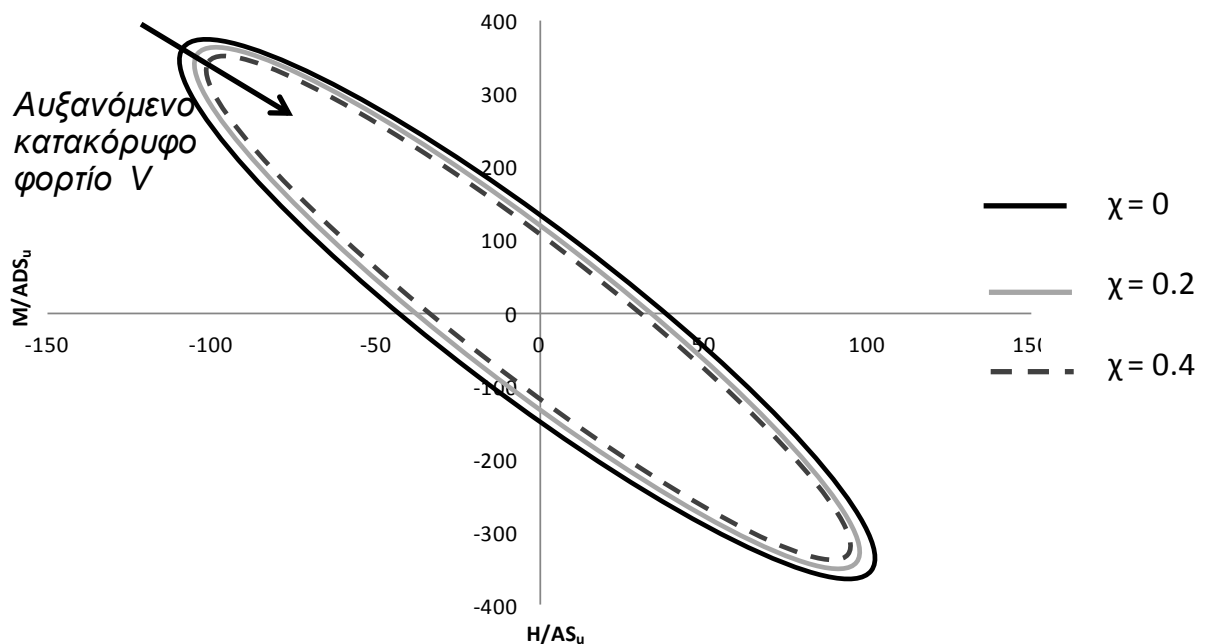
Στην συνέχεια διερευνήθηκε η επιρροή της αξονικής δύναμης στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης ροπής-τέμνουσας δύναμης για τρεις συντελεστές κατακόρυφου φορτίου  $\chi=0, 0.2, 0.4$ . Διαπιστώθηκε ότι και στην θεώρηση της πλήρους επαφής στην εξωτερική διεπιφάνεια η παρουσία της αξονικής δύναμης τείνει να μειώσει το μέγεθος της περιβάλλουσας αστοχίας, όχι όμως να αλλοιώσει το σχήμα της.

Τέλος στο σχήμα 4.28 απεικονίζονται οι μηχανισμοί αστοχίας υπό μορφή ισοϋψών πλαστικών παραμορφώσεων και διανυσμάτων μετατόπισης πέντε χαρακτηριστικών σημείων της περιβάλλουσας αστοχίας: της μέγιστης δύναμης  $H_{max}$ , της μέγιστης ροπής  $M_{max}$ , καθώς και των οδεύσεων  $u/D\theta=4$  και 3. Ο λόγος  $u/D\theta=3$  συγκρίνεται μεταξύ των συντελεστών κατακόρυφων φορτίων  $\chi=0$  και 0.4. Σε όλους τους μηχανισμούς είναι έκδηλη η παρουσία ενεργητικών και παθητικών ωθήσεων στο έδαφος.

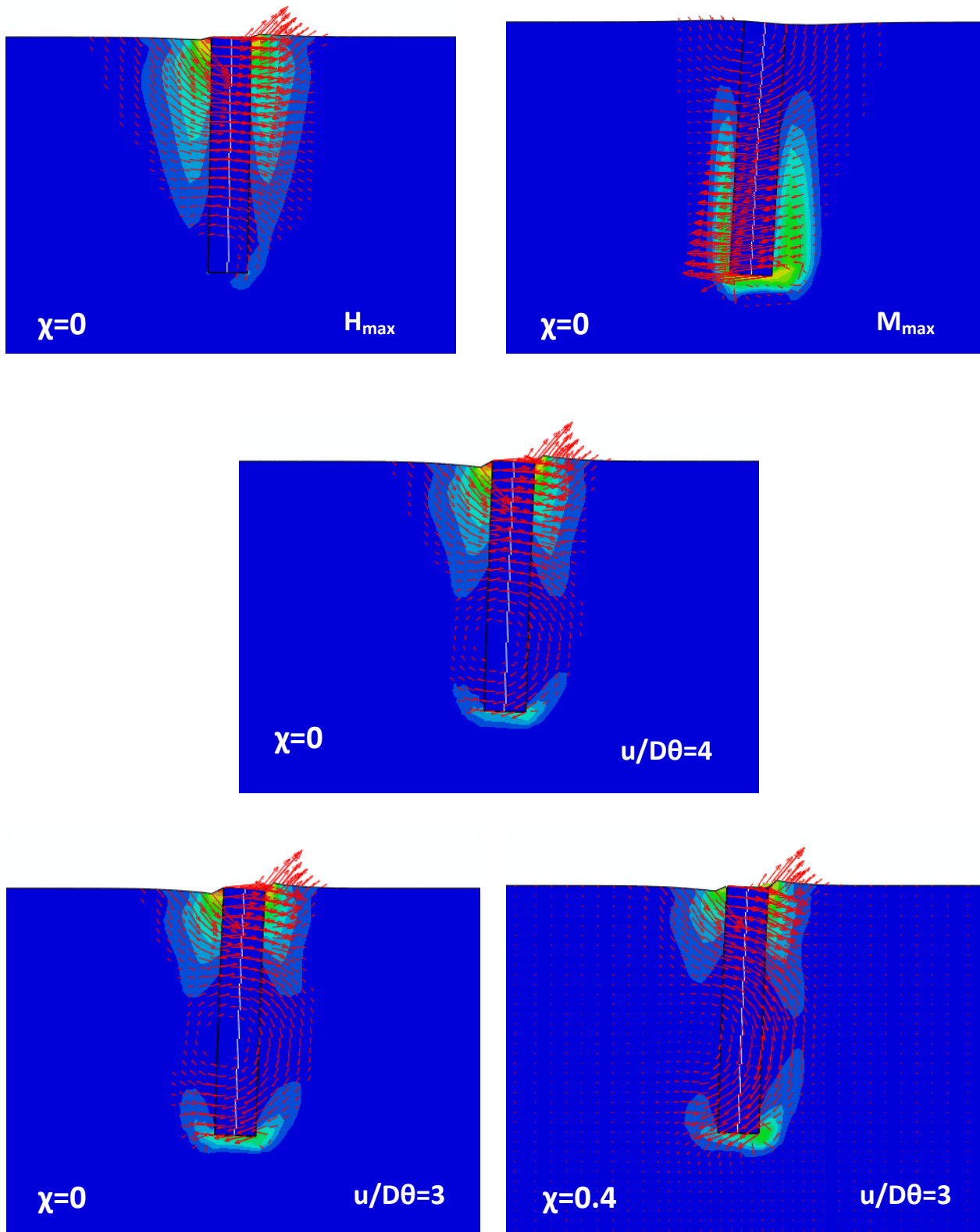




**Σχήμα 4.26:** Διάγραμμα αλληλεπίδρασης στο επίπεδο τέμνουσας-ροπής στην στάθμη  $V=0$  για λόγο έμπτυξης μονοπασάλου (α)  $L/D=4$  και (β)  $L/D=6$ . Σύγκριση αποτελεσμάτων για θεώρηση πλήρους επαφής (διακεκομμένη γραμμή) και μη-γραμμικότητας στην διεπιφάνεια εδάφους-θεμελίου (συμπαγής γραμμή).



**Σχήμα 4.27 :** Επιρροή αξονικής δύναμης στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης  $M-H$  για μονοπάσσαλο λόγου έμπτυξης  $L/D=6$ . Περιβάλλουσα αστοχίας σε όρους τέμνουσας-ροπής για τους συντελεστές κατακόρυφου φορτίου  $\chi=0, 0.2, 0.4$  και θεώρηση πλήρους επαφής στην διεπιφάνεια εδάφους θεμελίου.



**Σχήμα 4.28:** Μηχανισμοί αστοχίας σε μορφή ισοϋψών πλαστικών παραμορφώσεων και διανυσμάτων μετατόπισης του λόγου έμπτυξης  $L/D=6$  για τα χαρακτηριστικά σημεία της περιβάλλουσας αστοχίας (α)  $H_{\max}$ , (β)  $M_{\max}$ , (γ)  $u/D\theta=4$ , (δ)  $u/D\theta=4$  και (ε)  $u/D\theta=4$ ,  $\chi=0.4$ . Στην διεπιφάνεια εδάφους θεμελίου έχει θεωρηθεί πλήρης επαφή.

#### 4.5 Επιρροή ανομοιογένειας εδάφους

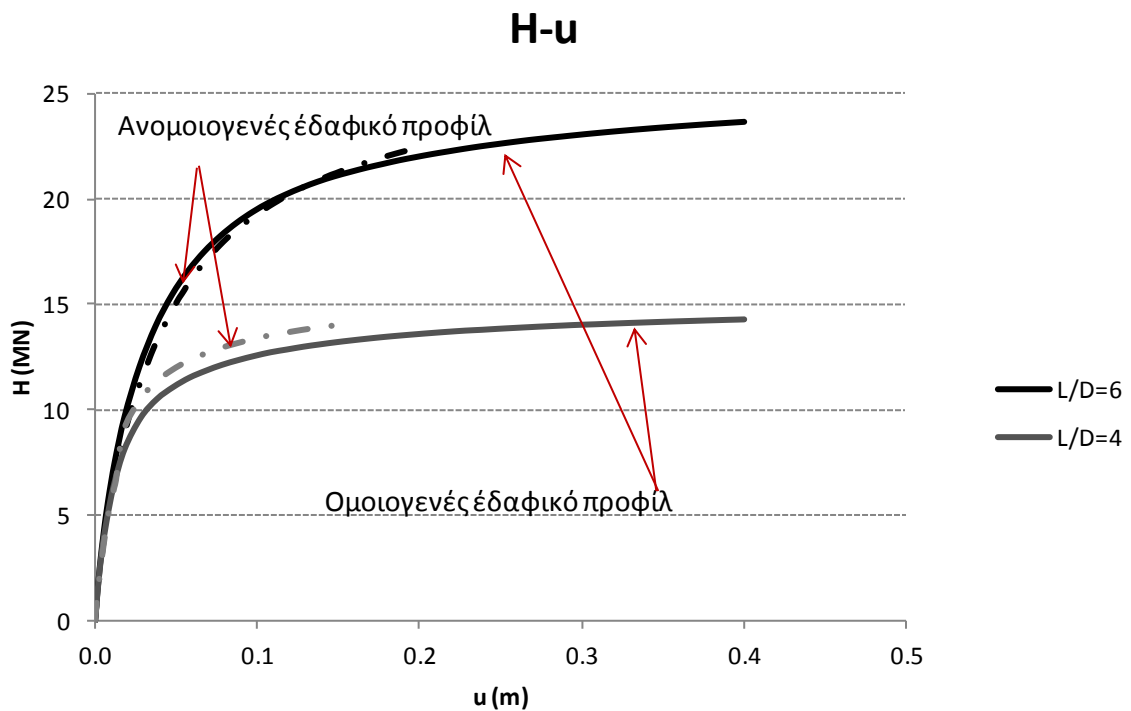
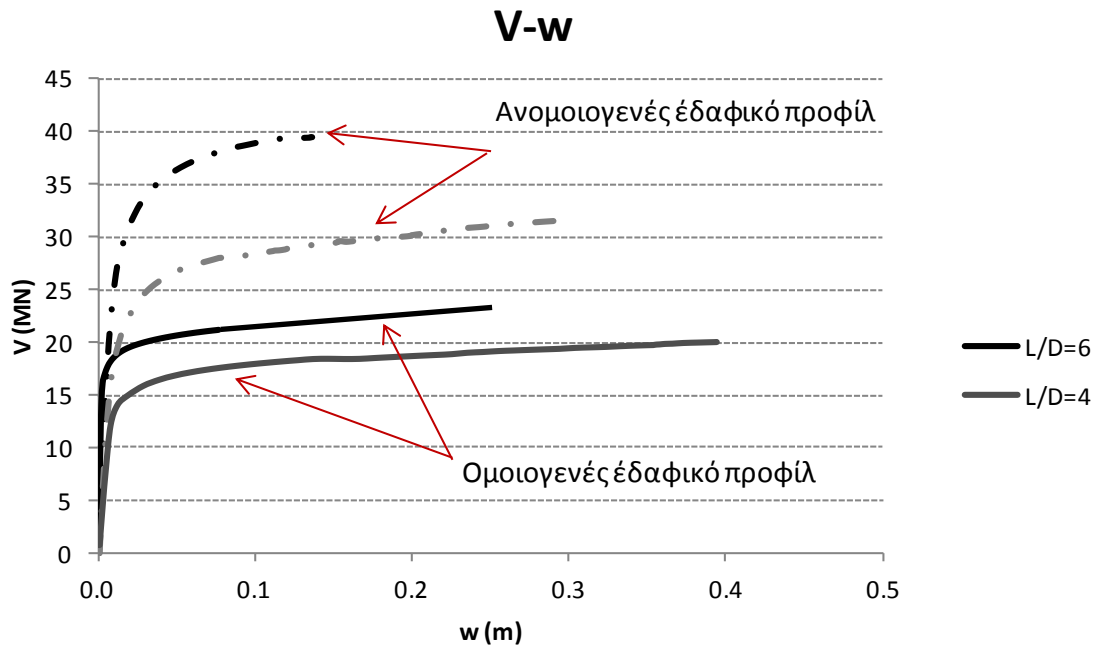
Το ομοιογενές εδαφικό προφίλ αν και είναι ένα ιδεατό προφίλ, αποτελεί μια καλή πρώτη προσέγγιση για την μέση κατάσταση των ιδιοτήτων του εδάφους. Στην πραγματικότητα όμως σε υπεράκτιες τοποθεσίες πιο συχνά συναντάμε εδάφη με χαμηλές αντοχές στην επιφάνεια και σταδιακή αύξηση της ανθεκτικότητάς τους. Πιο ρεαλιστική λοιπόν είναι η θεώρηση του ανομοιογενούς εδαφικού προφίλ με γραμμικώς αυξανόμενη αστράγγιστη διατμητική αντοχή.

Για τις αναλύσεις επιλέξαμε το εδαφικό προφίλ να έχει στην επιφάνεια αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $S_u=30\text{kPa}$  και στην συνέχεια να υπακούει στην σχέση  $S_u= 30 +3z$  (1). Χωρίσαμε το μοντέλο σε στρώσεις πάχους 2m και σε κάθε μία από αυτές δώσαμε τις κατάλληλες εδαφικές ιδιότητες σύμφωνα με την σχέση (1) που προαναφέραμε. Οι αναλύσεις έγιναν για τους λόγους έμπηξης  $L/D=4, 6$ .

Αρχικά μελετήθηκε η συμπεριφορά της θεμελίωσης υπό στατική (μεμονωμένη) φόρτιση. Επιβάλλαμε στο κέντρο της κορυφής της θεμελίωσης κατακόρυφη ή οριζόντια μετακίνηση μέχρι την αστοχία, ανάλογα με την περίπτωση (βλέπε σχήμα 4.29 (α) και (β) αντίστοιχα). Στο **σχήμα 4.29 (α)** απεικονίζονται οι καμπύλες αξονικής δύναμης-καθίζησης για τους λόγους έμπηξης  $L/D=4, 6$  και συγκρίνονται τα αποτελέσματα για το ομοιογενές (συμπαγής γραμμή) και ανομοιογενές (διακεκομμένη γραμμή) εδαφικό προφίλ. Παρατηρούμε ότι το ανομοιογενές προφίλ έχει αισθητά μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα σε σύγκριση με την θεώρηση που κάναμε για το ομοιογενές προφίλ ( $S_u=60\text{kPa}$ ). Η διαφορά αυτή οφείλεται κυρίως στην αντίσταση αιχμής στην βάση του μονοπασάλλου και δευτερευόντως στην αντίσταση τριβής στα πλευρικά τοιχώματα του. Για το ανομοιογενές προφίλ, η αστράγγιστη διατμητική αντοχή στην βάση είναι  $S_u=120\text{kPa}$ , διπλάσια από αυτήν του ομοιογενούς, ενώ η μέση τιμή της καθ ύψος του μονοπασάλλου είναι  $S_u=75\text{kPa}$ .

Ομοίως στο σχήμα 4.29 (β) απεικονίζονται οι καμπύλες τέμνουσας δύναμης-οριζόντιας μετακίνησης για τους λόγους έμπηξης  $L/D=4, 6$  και συγκρίνονται τα αποτελέσματα για το ομοιογενές (συμπαγής γραμμή) και ανομοιογενές (διακεκομμένη γραμμή) εδαφικό προφίλ. Ο μηχανισμός ανάληψης των εγκάρσιων φορτίων διαφέρει όπως έχουμε εξηγήσει και σε προηγούμενα εδάφια της εργασίας. Τα ανώτερα εδαφικά στρώματα είναι αυτά που κινητοποιούνται κατά την επιβολή τέμνουσας δύναμης μέχρι το ενεργό μήκος του πασσάλου. Η αισθητά μικρότερη διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο εδαφικών προφίλ οφείλεται στο γεγονός ότι κατά μέσο όρο η αστράγγιστη διατμητική αντοχή είναι σχεδόν ίδια για το τμήμα που ενεργοποιείται. Για το ανομοιογενές εδαφικό προφίλ η μέση τιμή της είναι  $S_u=62\text{kPa}$  κατά μήκος του ενεργού μήκους  $l_c$ , ενώ για το ομοιογενές  $S_u=60\text{kPa}$ .

Με βάση τα προαναφερθέντα αποτελέσματα, συμπεραίνουμε ότι η θεώρηση του ομοιογενούς προφίλ με χαμηλή αστράγγιστη διατμητική αντοχή είναι αρκετά ρεαλιστική, δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε σύγκριση με το ανομοιογενές εδαφικό προφίλ και περιορίζει σημαντικά τον υπολογιστικό χρόνο και τις δυσκολίες προσομοίωσης κατά την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.



**Σχήμα 4.29:** Σύγκριση αποτελεσμάτων ομοιογενούς (συμπαγής γραμμή) και ανομοιογενούς (διακεκομμένη γραμμή) εδαφικού προφίλ για λόγους έμπτυξης πασσάλου  $L/D= 4, 6$  υπό: (α) αξονική δύναμη, (β) τέμνουσα δύναμη.

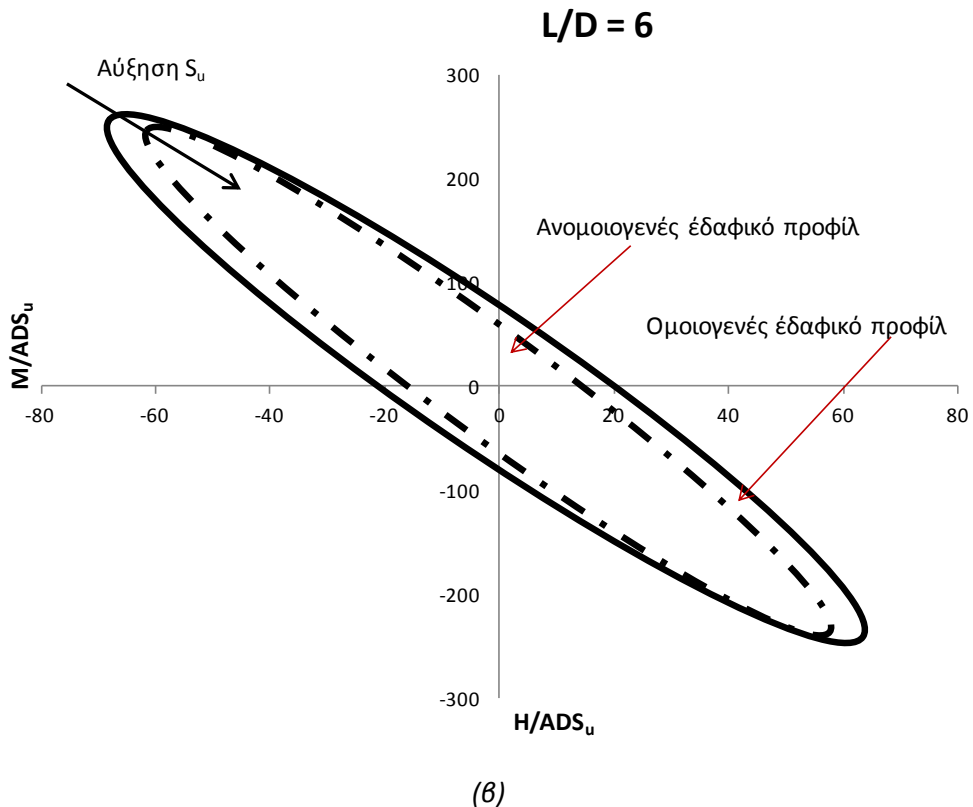
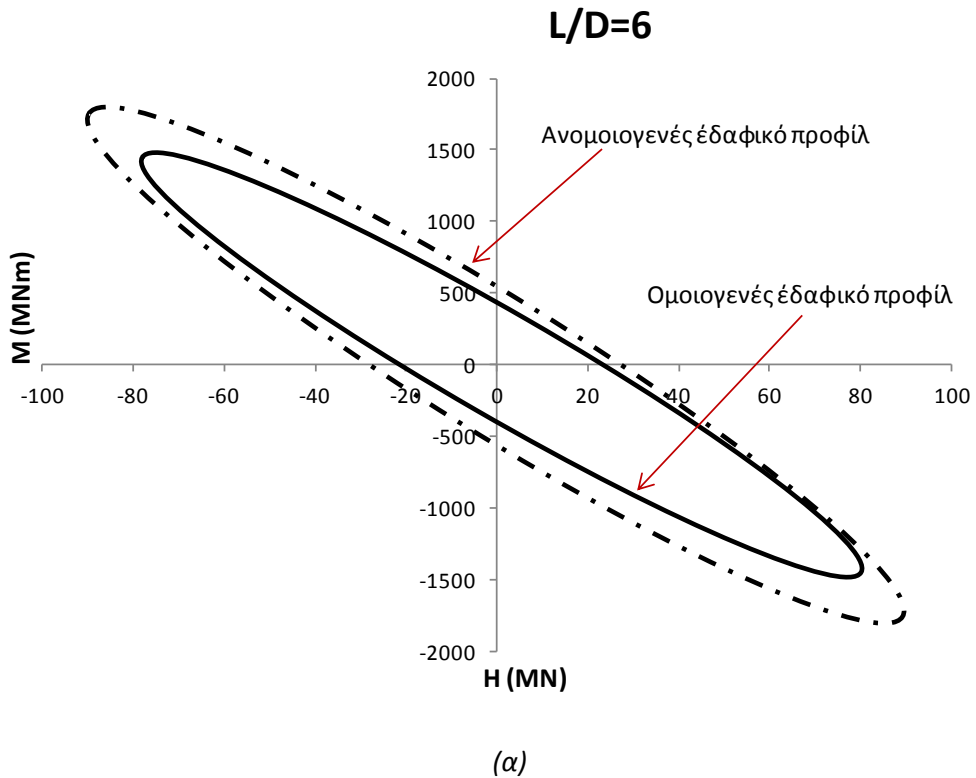
Για την ενίσχυση των ανώτερων συμπερασμάτων διαμορφώσαμε τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης για συνδυασμένη φόρτιση ροπής-τέμνουσας. Επικεντρωθήκαμε μόνο σε αυτό τον συνδυασμό φόρτισης, καθώς αυτός αποτελεί την κυρίαρχη φόρτιση των θεμελιώσεων ανεμογεννητριών. Ακολουθήθηκε και εδώ η διαδικασία των ανιχνευτικών τασικών οδεύσεων, όπως έχει περιγραφεί σε προηγούμενα κεφάλαια.

Στο **σχήμα 4.31** απεικονίζονται οι περιβάλλουσες αστοχίας υπό συνδυασμένη φόρτιση ροπής-τέμνουσας απουσία αξονικής δύναμης για τον λόγο έμπηξης  $L/D=6$  (α) σε απόλυτα μεγέθη και (β) αδιαστατοποιημένες ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και την μέση αστράγγιστη διατμητική αντοχή κατά μήκος του μονοπασσάλου. Ενώ σε απόλυτα μεγέθη η περιβάλλουσα αστοχίας του ανομοιογενούς εδάφους είναι μεγαλύτερη από αυτή του ομοιογενούς εδάφους, σε αδιάστατους όρους είναι μικρότερη και εμφανίζει μεγαλύτερη εκκεντρότητα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μέση αστράγγιστη διατμητική αντοχή για το ανομοιογενές έδαφος βάση της οποίας έγινε η αδιαστατοποίηση είναι μεγαλύτερη από αυτή του ομοιογενούς εδάφους. Είναι ήδη γνωστό από την βιβλιογραφία ότι όσο αυξάνει η αστράγγιστη διατμητική αντοχή τόσο τείνει να μειωθεί το μέγεθος της περιβάλλουσας αστοχίας, η τάση αυτή επιβεβαιώνεται και στο σχήμα 4.31.

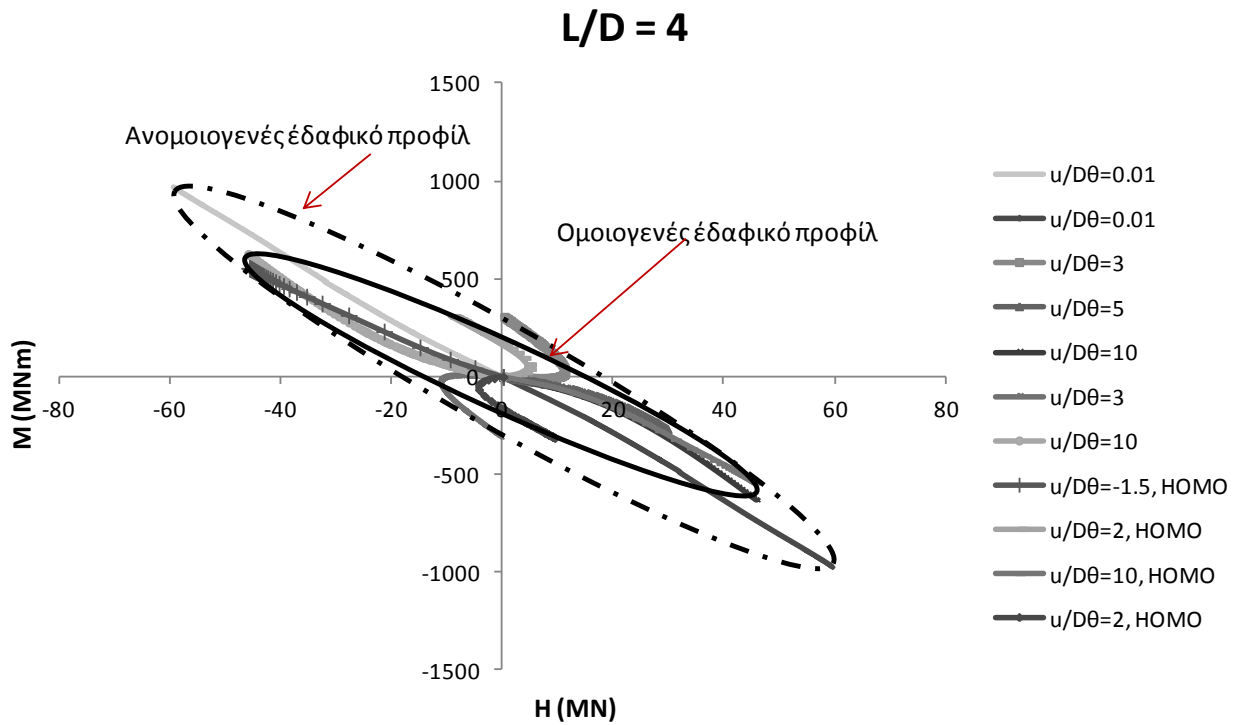
Στο **σχήμα 4.32** γίνεται σύγκριση των περιβαλλουσών αστοχίας για τους λόγους έμπηξης  $L/D=4$  και 6. Τα αποτελέσματα αφορούν μόνο το ανομοιογενές εδαφικό προφίλ και επιβεβαιώνουν την τάση των διαγραμμάτων να αυξάνουν το μέγεθός τους με την αύξηση του λόγου έμπηξης και να εμφανίζουν μεγαλύτερη εκκεντρότητα (δηλαδή η περιβάλλουσα αστοχίας στρίβει σε σύγκριση με τον οριζόντιο άξονα και άκρη της γίνεται πιο μυτερή). Η τάση αυτή δείχνει ότι η σύζευξη του οριζόντιου μετακινησιακού και στροφικού βαθμού ελευθερίας γίνεται πιο έντονη με τον λόγο έμπηξης του μονοπασσάλου.

Τέλος στο **σχήμα 4.33** απεικονίζονται οι μηχανισμοί αστοχίας σε μορφή ισοϋψών πλαστικών παραμορφώσεων και διανυσμάτων μετατόπισης για (α) κατακόρυφη φόρτιση, (β) οριζόντια φόρτιση χωρίς δέσμευση της στροφής, (γ) ροπή ανατροπής χωρίς δέσμευση της οριζόντιας μετακίνησης και (δ) ροπή ανατροπής με δέσμευση της οριζόντιας μετατόπισης. Οι μηχανισμοί αστοχίας δεν διαφέρουν από τους αντίστοιχους του ομοιογενούς εδάφους. Στην κατακόρυφη φόρτιση έχουμε πλαστικοποιήσεις κυρίως στην βάση ενώ στο πλευρικά τοιχώματα έχουμε ολίσθηση του μονοπασσάλου. Στην οριζόντια φόρτιση έχει αστοχήσει μόνο η ανώτερη εδαφική στρώση και ο μονοπάσσαλος έχει δημιουργήσει μια πλαστική άρθρωση σε βάθος ίσο με το ενεργό μήκος του και έχει περιστραφεί περί αυτό το σημείο. Στην ροπή ανατροπής ο μηχανισμός αστοχίας εξαρτάται έντονα από την δέσμευση ή μη της οριζόντιας μετακίνησης. Ο πόλος περιστροφής με δέσμευση της οριζόντιας μετακίνησης βρίσκεται στην επιφάνεια όπου και επιβάλλουμε την στροφή, ενώ σε αντίθετη περίπτωση ο πόλος περιστροφής είναι πολύ βαθύτερα.

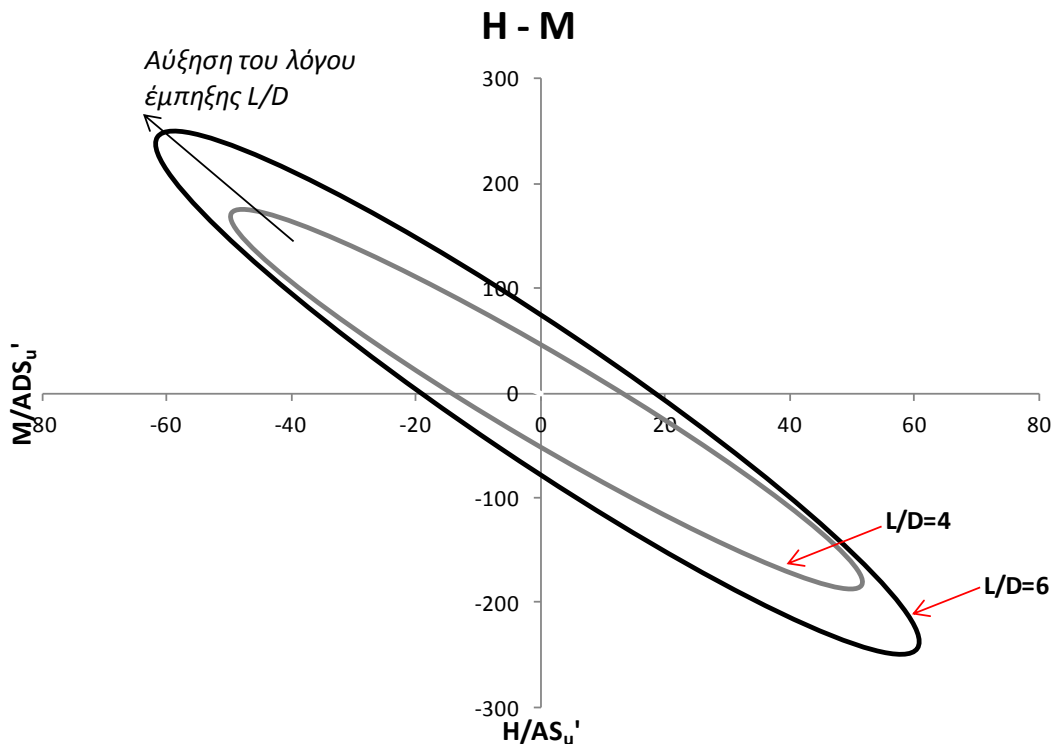




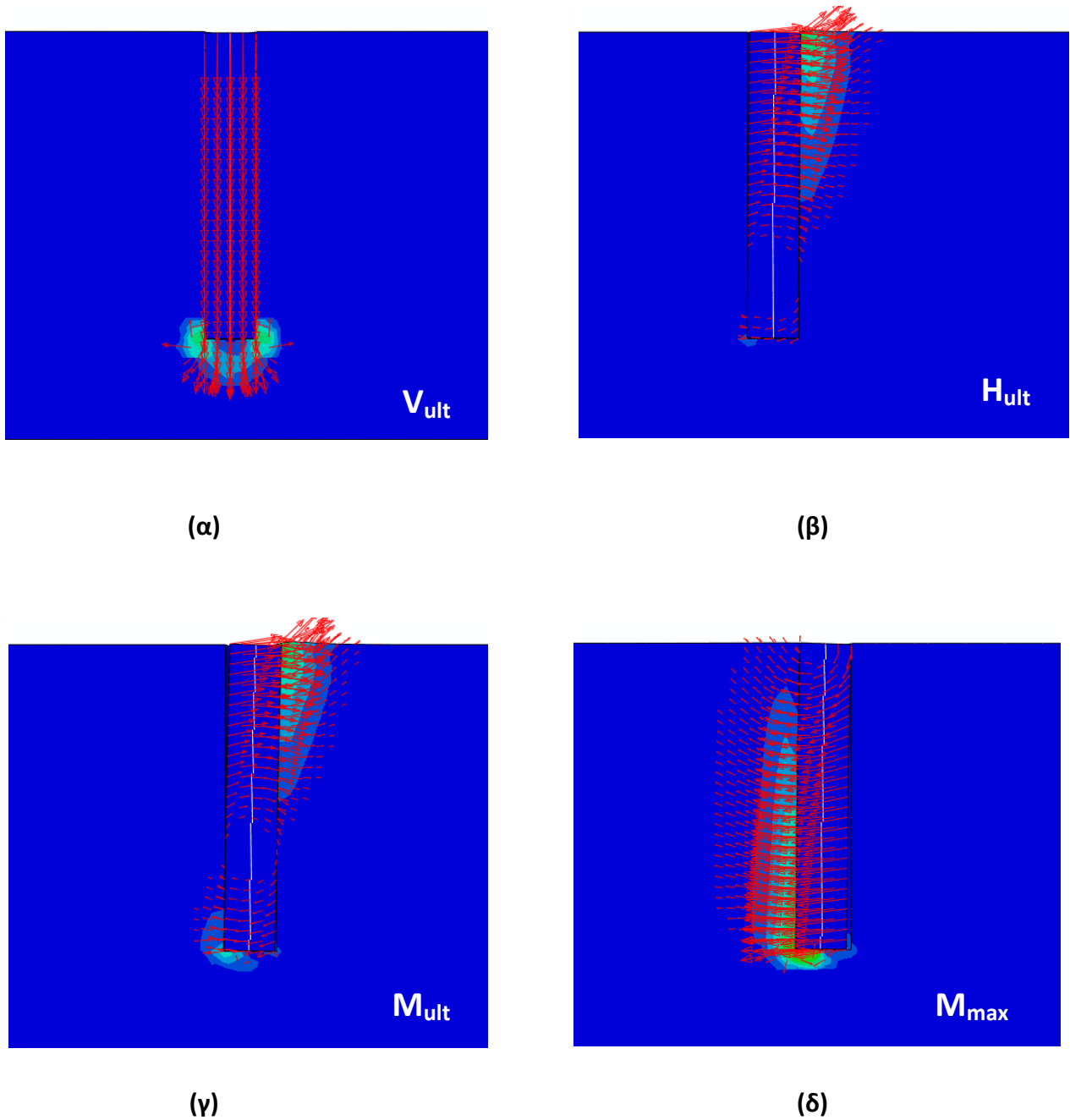
**Σχήμα 4.30:** Σύγκριση αποτελεσμάτων ομοιογενούς και ανομοιογενούς εδαφικού προφίλ για συνδυασμένη φόρτιση τέμνουσας δύναμης-ροπής ανατροπής (α) σε απόλυτα μεγέθη, (β) αδιαστατοποιημένα. Τα διαγράμματα αναφέρονται στο λόγο έμπτυξης  $L/D=6$ .



**Σχήμα 4.31:** Σύγκριση αποτελεσμάτων ομοιογενούς και ανομοιογενούς εδαφικού προφίλ για συνδυασμένη φόρτιση τέμνουσας δύναμης-ροπής ανατροπής σε απόλυτα μεγέθη για λόγο έμπτυξης  $L/D=4$ .



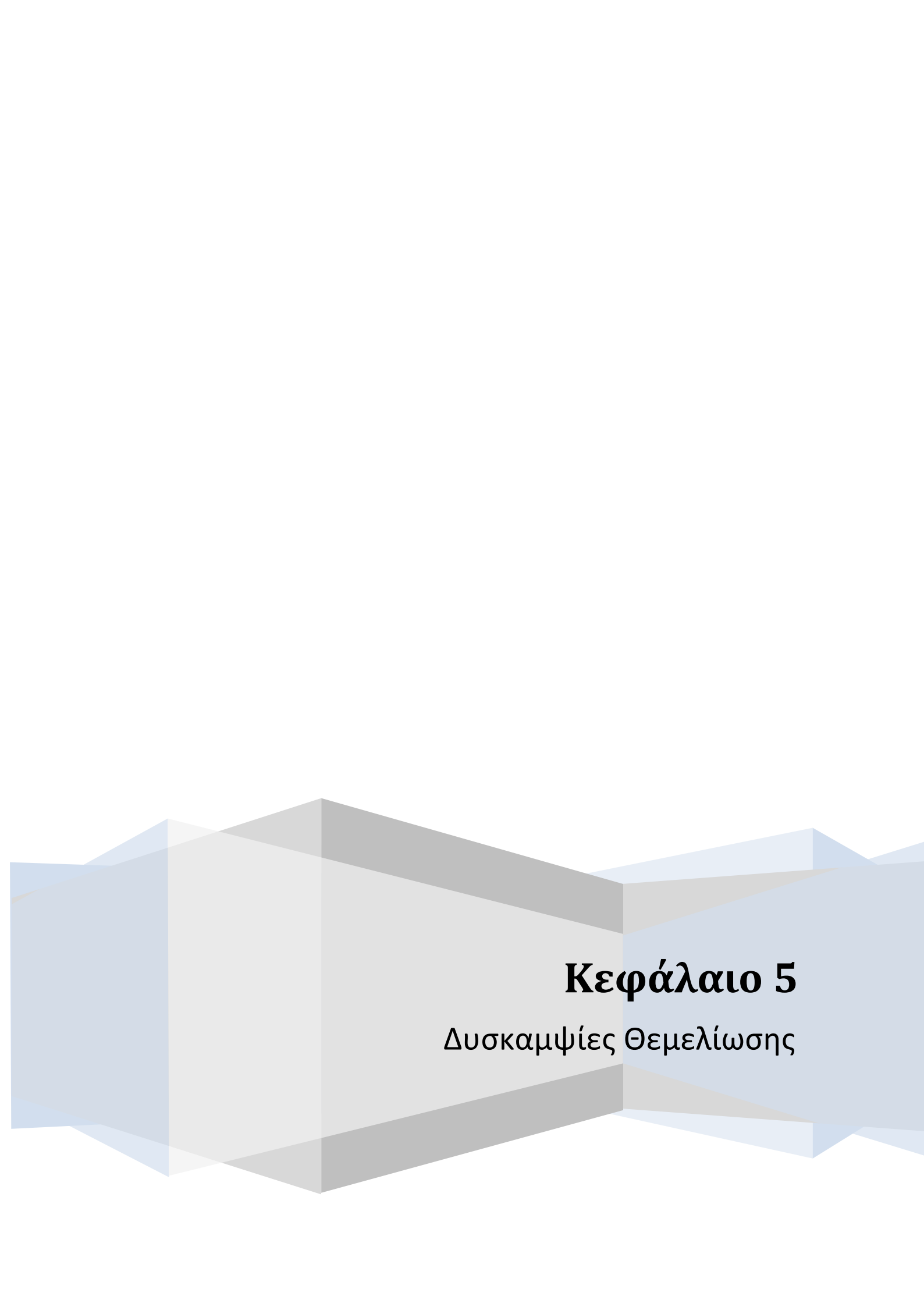
**Σχήμα 4.32 :** Περιβάλλουσες αστοχίας υπό συνδυασμό τέμνουσας δύναμης και ροπής σε αδιάστατους όρους. Σύγκριση των λόγων έμπτυξης  $L/D=4, 6$  για ανομοιογενές εδαφικό προφίλ.



**Σχήμα 4.33:** Μηχανισμοί αστοχίας υπό μορφή πλαστικών παραμορφώσεων και διανυσμάτων μετατόπισης για ανομοιογενές εδαφικό προφίλ υπό (α) κατακόρυφη φόρτιση, (β) οριζόντια φόρτιση χωρίς δέσμευση της στροφής, (γ) ροπή ανατροπής χωρίς δέσμευση της οριζόντιας μετακίνησης και (δ) ροπή ανατροπή με δέσμευση της στροφής για τον λόγο έμπτυξης  $L/D=6$ .







# **Κεφάλαιο 5**

Δυσκαμψίες Θεμελίωσης



## Κεφάλαιο 5 – Δυσκαμψίες Θεμελίωσης

### 5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, το ερευνητικό ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στην αρχική απόκριση της θεμελίωσης με σκοπό την εύρεση των ελαστικών δυσκαμψιών, αφού αναλύσαμε διεξοδικά την απόκριση του μονοπασσάλου στην οριακή κατάσταση αστοχία στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η γνώση των στροφικών και μετακινησιακών δυσκαμψιών του μονοπασσάλου είναι ιδιαίτερου ενδιαφέροντος, καθώς οι ελαστικές δυσκαμψίες χρησιμοποιήθηκαν για την:

- αξιολόγηση του μοντέλου (model validation) και σύγκριση του με τις αναλυτικές σχέσεις τις βιβλιογραφίας
- εύρεση της μεταβολής της ιδιοπεριόδου του συστήματος ανωδομής-θεμελίωσης με θεώρηση ενδοσιμότητας του εδάφους
- γενικότερη απόκριση του συστήματος.

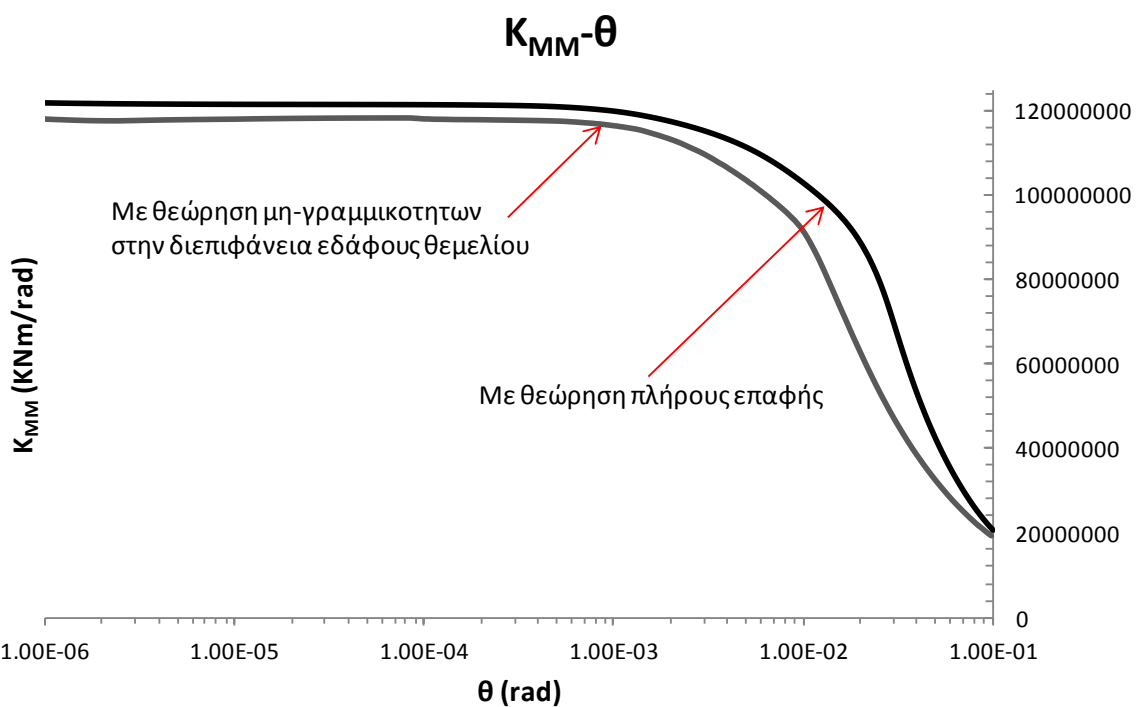
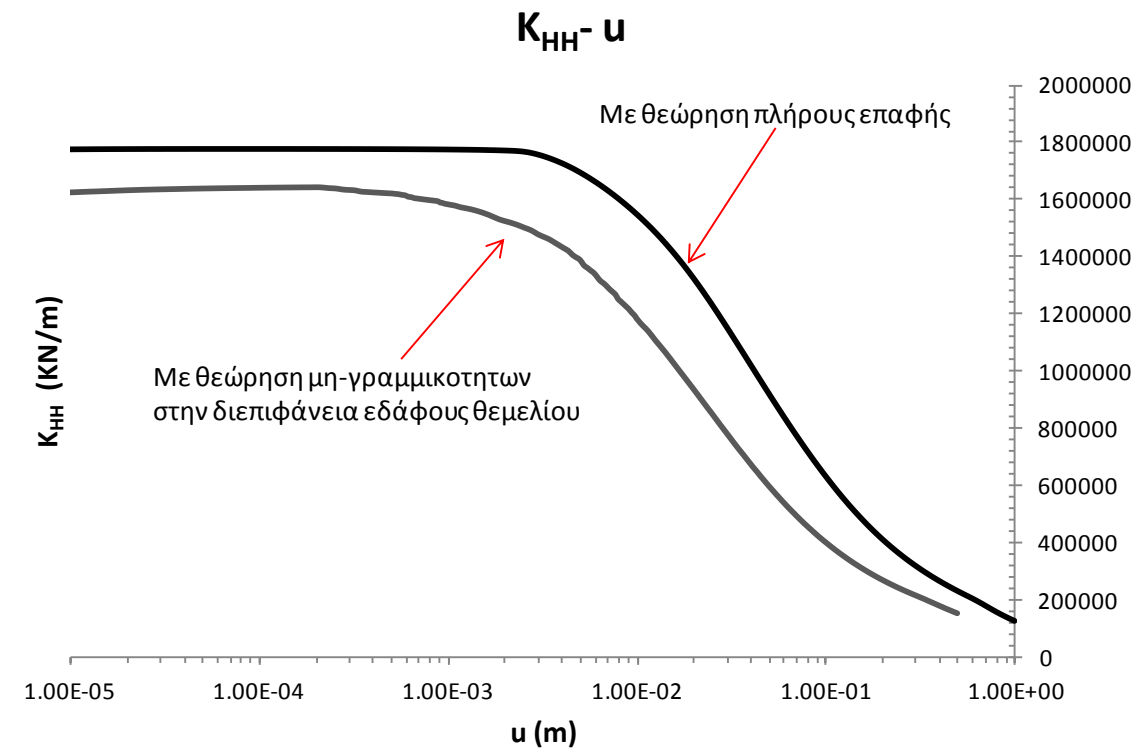
Οι αναλυτικές σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων είναι αυτές που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 2.4 [Gazetas; 1991]. Για την εύρεση των δυσκαμψιών χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα μόνο με την θεμελίωση. Στο δεύτερο κομμάτι του κεφαλαίου επιχειρείται η καταγραφή των ιδιομορφών και ιδιοσυχνοτήτων μια τυπικής ανεμογεννήτριας (μεσαίου μεγέθους), καθώς και η σύγκριση της ιδιοπεριόδου της κατασκευής με θεώρηση πακτωμένης βάσης και με θεώρηση ενδοσιμότητας του εδάφους. Η προσομοίωση της ανωδομής περιγράφεται αναλυτικά στο επόμενο εδάφιο.

### 5.2 Μητρώο Δυσκαμψίας

Αρχικά έγιναν μερικές αναλύσεις με διαφορετικές θεωρήσεις στην διεπιφάνεια εδάφους θεμελίου με σκοπό την ανάδειξη των διαφορών τους. Οι αναλύσεις αυτές έγιναν μόνο για τον λόγο έμπηξης  $L/D=6$  και οι θεωρήσεις είναι (α) συνθήκες πλήρους επαφής στην διεπιφάνεια εδάφους-θεμελίου και (β) θεώρηση μη-γραμμικοτήτων στην διεπιφάνεια. Στην δεύτερη περίπτωση ο συντελεστής συνάφειας λαμβάνει την τιμή  $\alpha=0.6$ .

Στο **σχήμα 5.1** απεικονίζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ των δύο θεωρήσεων σε όρους οριζόντιας δυσκαμψίας-μετακίνησης (**σχήμα 5.1.α**) και στροφικής δυσκαμψίας-στροφής (**σχήμα 5.1 β**). Η σύγκριση είναι ικανοποιητική, καθώς η διαφορά τους είναι μικρότερη από 10%. Για τις υπόλοιπες αναλύσεις επιλέχθηκε η θεώρηση της πλήρους επαφής εδάφους-θεμελίου, πρώτον για την άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις αναλυτικές σχέσεις (καθώς και αυτές ακολουθούν αυτή την θεώρηση) και δεύτερον για την μείωση του υπολογιστικού χρόνου.





**Σχήμα 5.1:** Σύγκριση αποτελεσμάτων για θεώρηση πλήρους επαφής και θεώρηση μη-γραμμικοτήτων στην διεπιφάνεια εδάφους-θεμελίου για τον λόγο έμπτυξης  $L/D=6$  σε όρους (α) οριζόντιας δυσκαμψίας-μετακίνησης και (β) στρωφικής δυσκαμψίας-στρωφής.

Στην συνέχεια έγιναν αναλύσεις για όλους τους λόγους έμπτυξης ( $L/D=4, 5, 6, 7$ ) με σκοπό την καταγραφή των δυσκαμψιών. Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο μόνο με την θεμελίωση. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την οριζόντια δυσκαμψία ήταν η επιβολή οριζόντιας μετακίνησης στην κορυφή της θεμελίωσης σε σταδιακά βήματα αυξανόμενου μεγέθους με ταυτόχρονη δέσμευση της στροφής. Αρχικά η μετακίνηση ήταν πολύ μικρή, ούτως ώστε το έδαφος να παραμένει στην ελαστική περιοχή και να βρούμε την ελαστική μετακινησιακή δυσκαμψία της θεμελίωσης. Η τελευταία είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς είναι αυτή που χρησιμοποιείται για την εύρεση της ιδιοπεριόδου του συστήματος και για την ελαστική απόκριση του μονοπασσάλου. Ύστερα η μετακίνηση αυξήθηκε σχεδόν μέχρι της αστοχία της θεμελίωσης με σκοπό την ανάδειξη της σταδιακής μείωσης της δυσκαμψίας του θεμελίου (stiffness degradation).

Ομοίως για την καταγραφή της στροφικής δυσκαμψίας επιβάλαμε στην κορυφή της θεμελίωσης στροφή σε σταδιακά βήματα αυξανόμενου μεγέθους με παράλληλη δέσμευση της οριζόντιας μετακίνησης.

Για τις συζευγμένες δυσκαμψίες  $K_{HM}$  και  $K_{MH}$  χρησιμοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα από τις δύο προηγούμενες διαδικασίες. Για την πρώτη ισχύει  $K_{HM} = M/u$  και για την δεύτερη  $K_{MH} = H/u$ . Οι δύο αυτές δυσκαμψίες είναι ίσες στην ελαστική περιοχή.

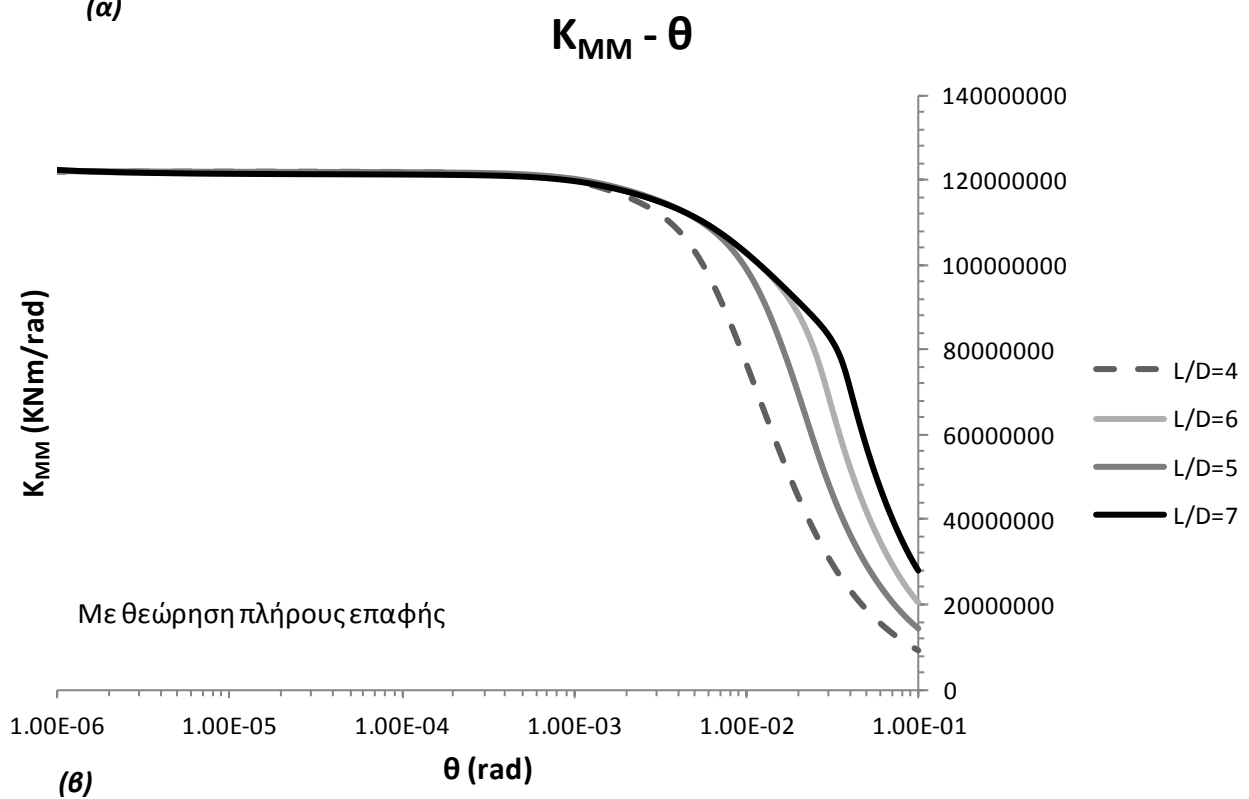
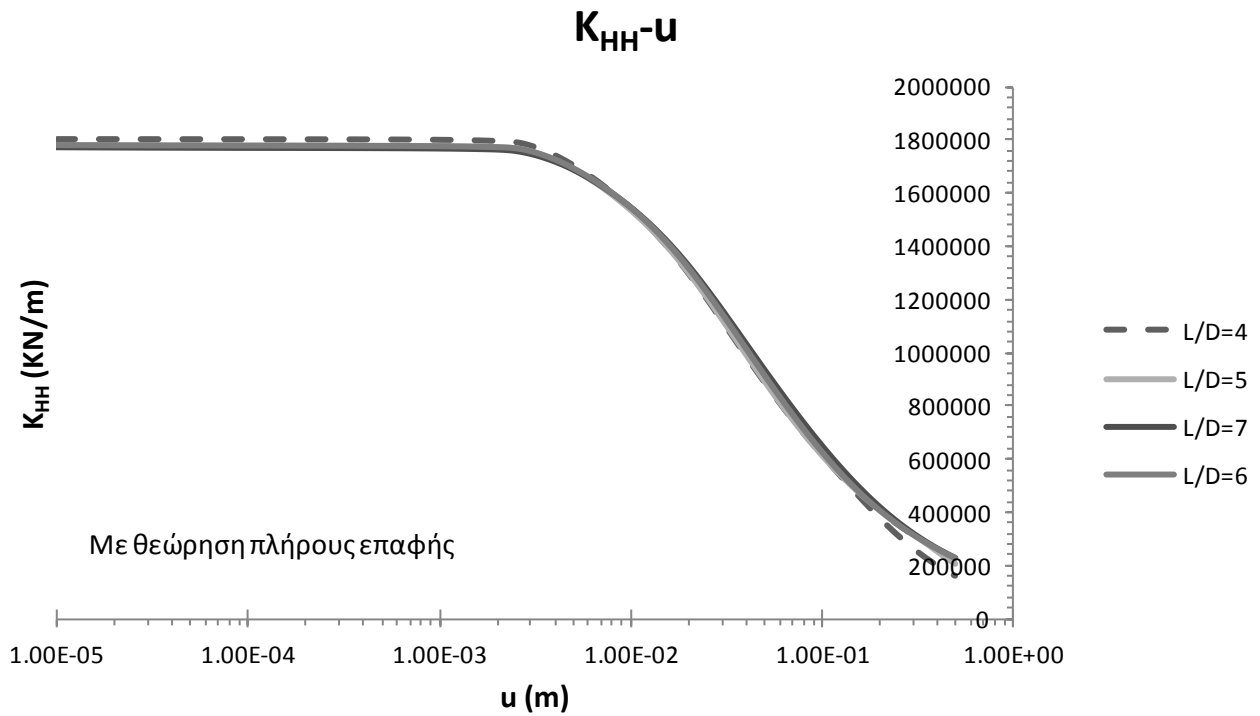
Υπενθυμίζουμε ότι το μητρώο δυσκαμψίας έχει την εξής μορφή:

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{HH} & K_{HM} \\ K_{MH} & K_{MM} \end{bmatrix}$$

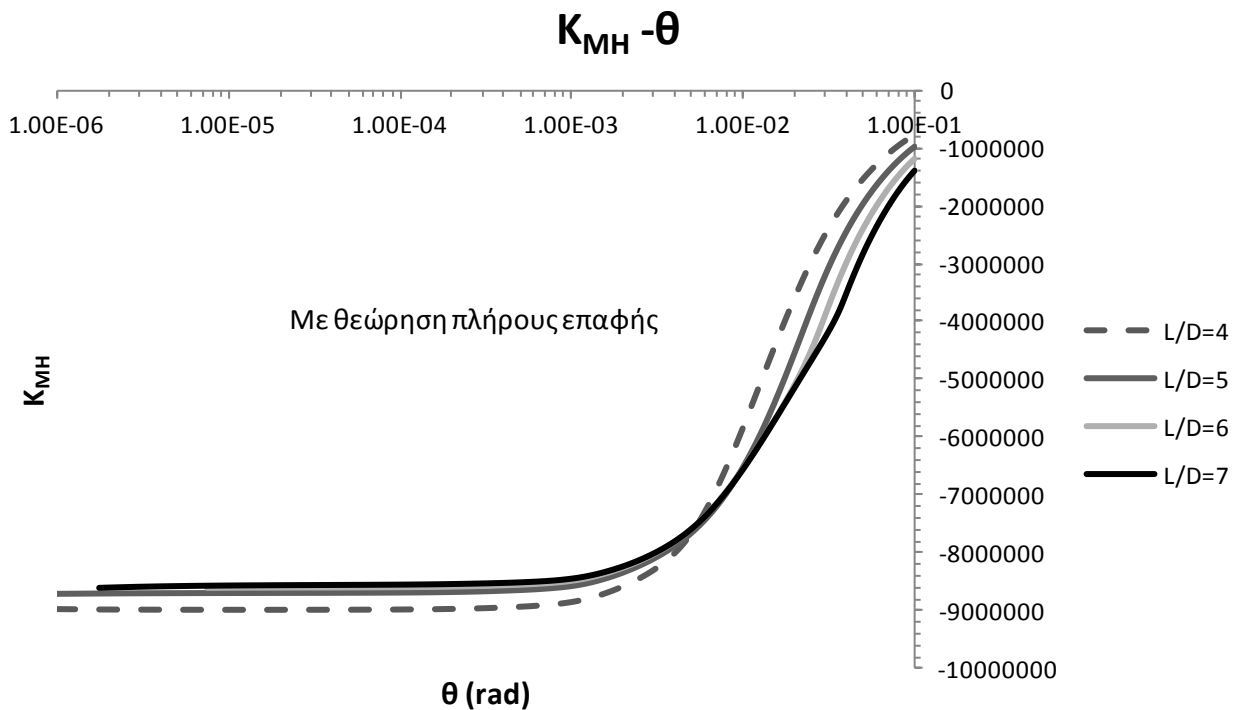
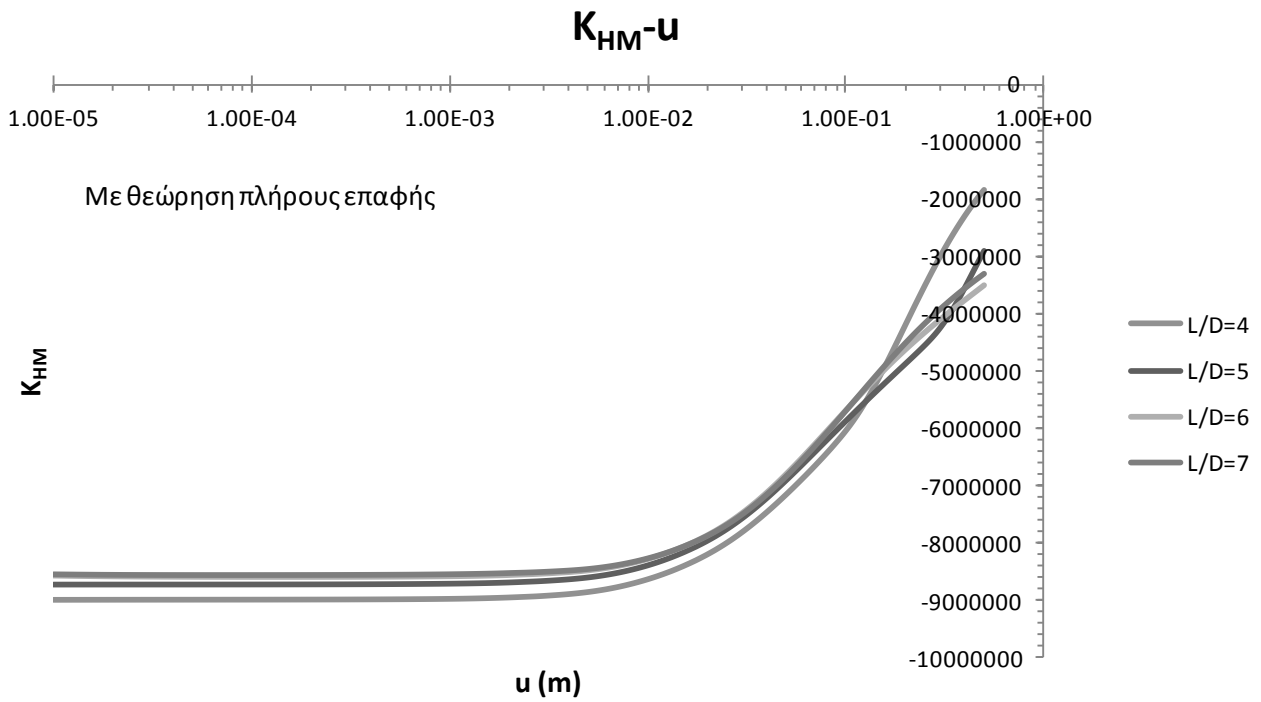
Στο **σχήμα 5.2 (α)** φαίνονται οι καμπύλες της οριζόντιας δυσκαμψίας συναρτήσει της οριζόντιας μετακίνησης για τους τέσσερις λόγους έμπτυξης. Το ευθύγραμμο τμήμα της καμπύλης δείχνει ότι τόσο ο μονοπάσσαλος όσο και το έδαφος βρίσκονται στην ελαστική περιοχή. Η πτώση της καμπύλης στην συνέχεια σηματοδοτεί την έναρξη των πλαστικών παραμορφώσεων του εδάφους. Με περαιτέρω αύξηση της μετακίνησης έχουμε εδαφικές πλαστικοποιήσεις σε όλο και μεγαλύτερο βάθος μέχρι της στιγμή της αστοχίας. Παρατηρούμε ότι και οι καμπύλες πρακτικά ταυτίζονται για τους τέσσερις λόγους έμπτυξης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η δυσκαμψία επηρεάζεται έντονα από την διάμετρο του μονοπασσάλου και στην ανάλυση μας έχουμε κρατήσει σταθερή την διάμετρο και έχουμε αυξήσει σταδιακά το βάθος έμπτυξης. Επίσης, η οριζόντια δυσκαμψία επηρεάζεται περισσότερο από την ευκαμψία του εδάφους παρά από την ευκαμψία του πασσάλου. Και στις τέσσερις περιπτώσεις το εδαφικό προφίλ είναι ίδιο.

Ομοίως στο σχήμα 5.2.(β) απεικονίζονται οι καμπύλες στροφικής δυσκαμψίας-στροφής για τους τέσσερις λόγους έμπτυξης. Και εδώ οι καμπύλες των τεσσάρων λόγων ταυτίζονται στην ελαστική περιοχή (ευθύγραμμο τμήμα) για τους ίδιους λόγους που αναφέραμε και παραπάνω. Όταν όμως αρχίζουν οι πλαστικοποιήσεις του εδάφους, η απόκριση κάθε λόγου έμπτυξης διαφοροποιείται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η στροφική δυσκαμψία επηρεάζεται περισσότερο από την ευκαμψία του μονοπασσάλου και λιγότερο από του εδάφους. Το ενεργό μήκος του μονοπασσάλου είναι  $l_c=29.00m$ , γεγονός που σημαίνει ότι ο μονοπάσσαλος με λόγο έμπτυξης  $L/D=4$  και  $5$  είναι δύσκαμπτοι και οι  $L/D=6$  και  $7$  είναι εύκαμπτοι πάσσαλοι.

Στο σχήμα 5.3 απεικονίζονται οι καμπύλες των συζευγμένων δυσκαμψιών όπου στην ελαστική περιοχή ταυτίζονται και έχουν αρνητικό πρόσημο όπως είναι αναμενόμενο.



**Σχήμα 5.2:** (α) Διάγραμμα οριζόντιας δυσκαμψίας-οριζόντιας μετακίνησης και (β) διάγραμμα στρωφικής δυσκαμψίας-στρωφής για τους τέσσερις λόγους έμπτυξης με θεώρηση πλήρους επαφής στην διεπιφάνεια εδάφους-θεμελίου.

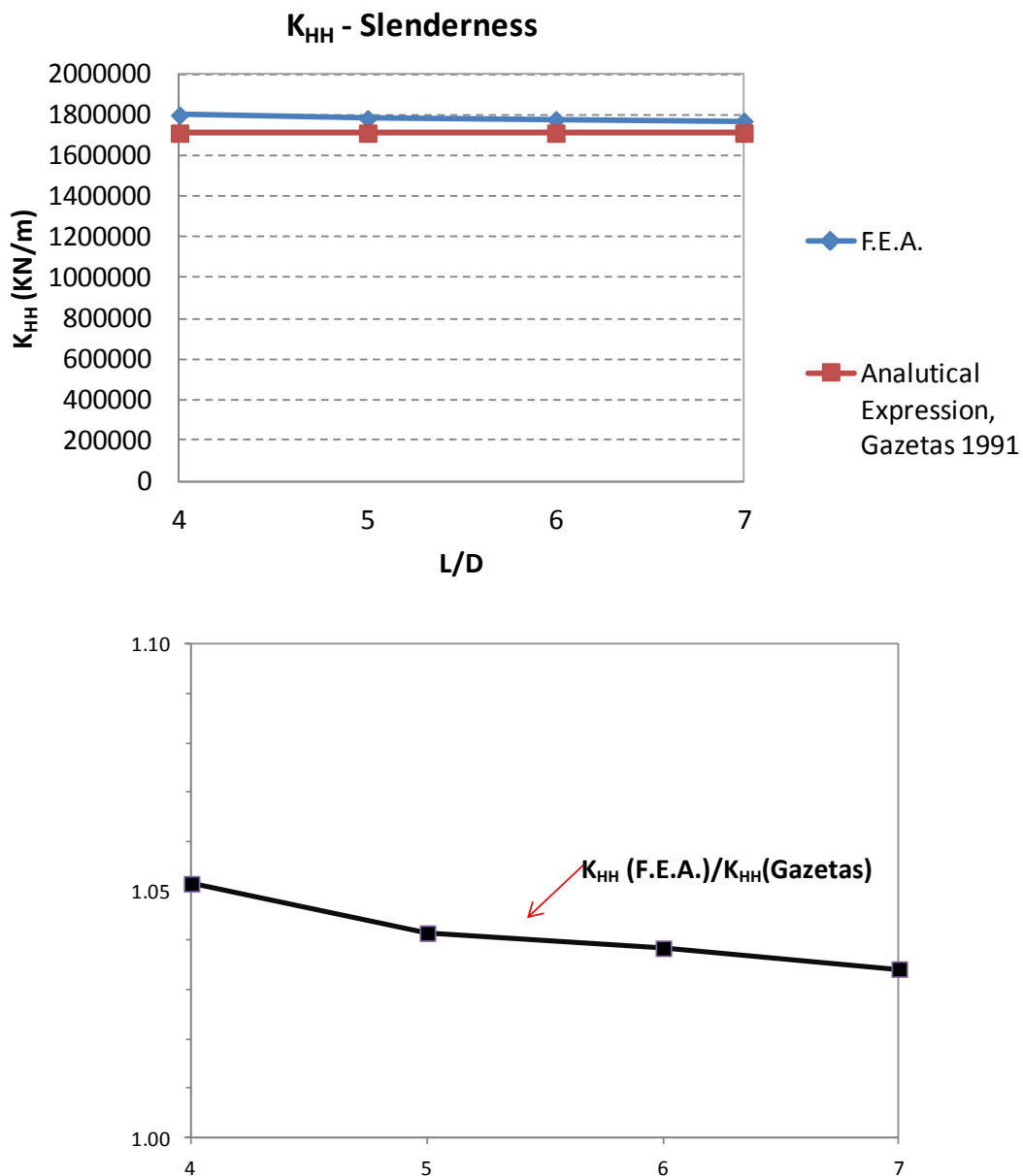


**Σχήμα 5.3:** (α) Διάγραμμα συζευγμένης δυσκαμψίας-οριζόντιας μετακίνησης και (β) διάγραμμα συζευγμένης δυσκαμψίας-στροφής για τους τέσσερις λόγους έμπτυξης με θεώρηση πλήρους επαφής στην διεπιφάνεια εδάφους-θεμελίου.

## Σύγκριση αποτελεσμάτων με αναλυτικές σχέσεις

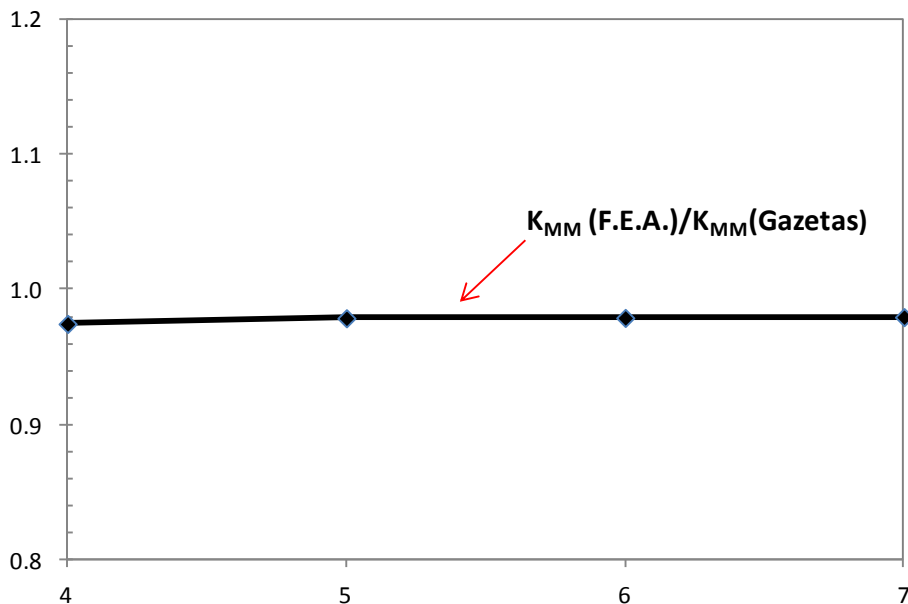
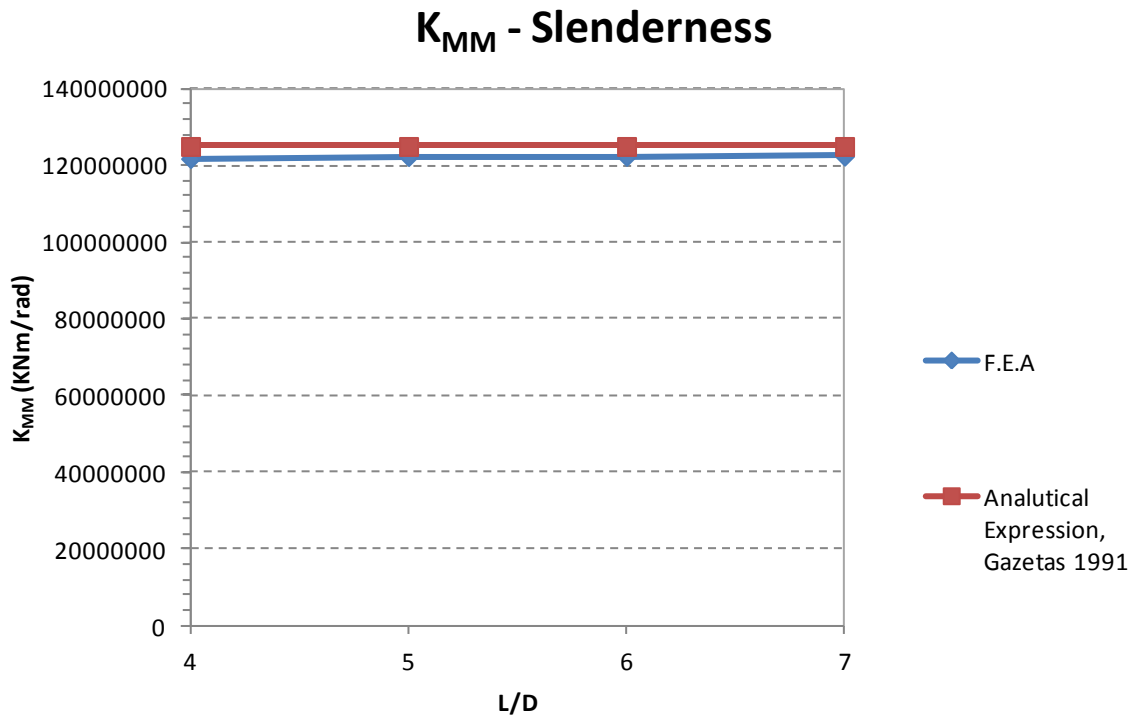
Τέλος έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων των ελαστικών δυσκαμψιών που προέκυψαν από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και τις σχέσεις της βιβλιογραφίας. Θα δούμε ότι οι δυο αυτές λύσεις έρχονται σε πλήρη συμφωνία, καθώς η απόκλιση είναι μικρότερη από 5%.

- Οριζόντια δυσκαμψία



**Σχήμα 5.4:** Σύγκριση αποτελεσμάτων οριζόντιας ελαστικής δυσκαμψίας συναρτήσει του λόγου έμπτυξης από αναλυτικές σχέσεις και από ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Πάνω αποτελέσματα σε πραγματικό μέγεθος και κάτω αποτελέσματα αδιαστατοποιημένα.

- Στροφική δυσκαμψία



**Σχήμα 5.5:** Σύγκριση αποτελεσμάτων στροφικής ελαστικής δυσκαμψίας συναρτήσει του λόγου έμπηξης από αναλυτικές σχέσεις και από ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Πάνω αποτελέσματα σε πραγματικό μέγεθος και κάτω αποτελέσματα αδιαστατοποιημένα.

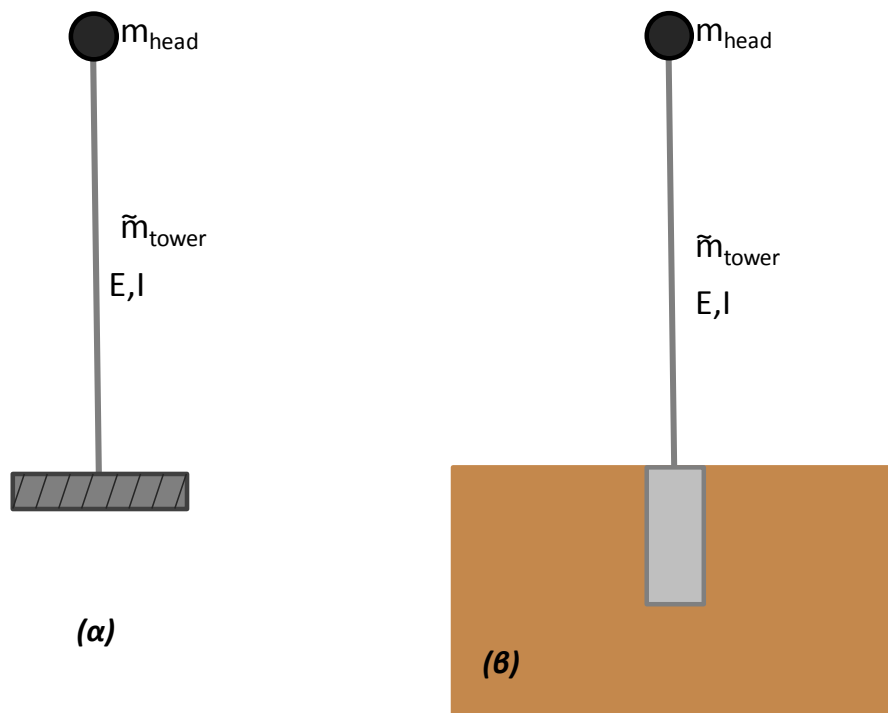
### 5.3 Ιδιοπερίοδος και Ιδιομορφές της κατασκευής

Όπως προαναφέραμε στην εισαγωγή, ένας από τους λόγους που μας ενδιαφέρει το μητρώο ελαστικής δυσκαμψίας της θεμελίωσης είναι για την εύρεση της πραγματικής ιδιοπεριόδου της κατασκευής. Επιλέξαμε να μελετήσουμε ως πιο αντιπροσωπευτική την μεσαία ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 3.5 MW. Κατά την ανάλυση έγιναν δύο θεωρήσεις:

- (α) πακτωμένης βάσης
- (β) ενδοσιμότητας εδάφους.

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την πρώτη θεώρηση είναι αυτό με το πλήρες ύψος της ανεμογεννήτριας, μια συγκεντρωμένη μάζα στο ύψος του ρότορα, κατανεμημένη μάζα στον πύργο και πεπερασμένη δυσκαμψία και μέτρο ελαστικότητας στον πύργο (**σχήμα 5.6 α**). Στην βάση δεσμεύτηκαν και οι τρεις βαθμοί ελευθερίας.

Για την δεύτερη θεώρηση χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο με την θεμελίωση όπως έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο 3, περιλαμβάνοντας όμως και την ανωδομή με τα ίδια χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν στην πρώτη θεώρηση (**σχήμα 5.6 β**).



**Σχήμα 5.6:** Προσομοίωμα ανεμογεννήτριας (α) με θεώρηση πλήρους επαφής στην βάση και (β) με θεώρηση ενδοσιμότητας του εδάφους.

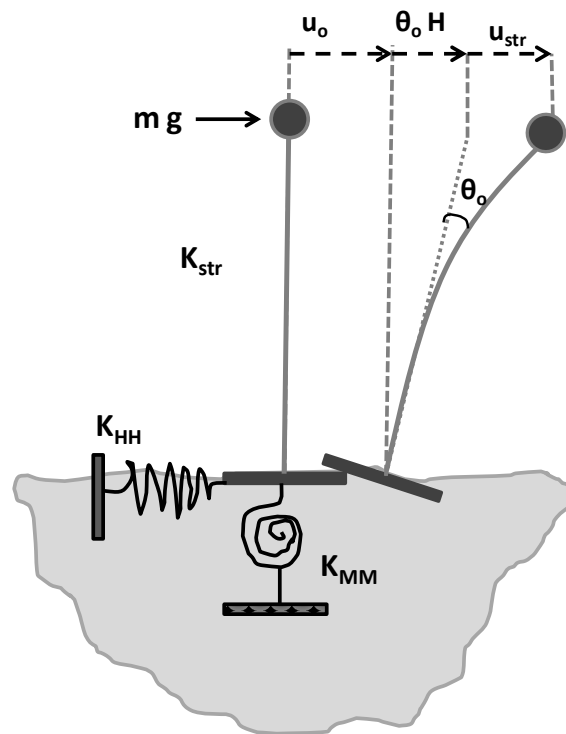
Αναλυτικά η ιδιοπερίοδος της κατασκευής με θεώρηση πακτωμένης βάσης υπολογίζεται:

$$T_{str} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K_{str}}}$$

Ενώ με θεώρηση ενδοσιμότητας του εδάφους:

$$\tilde{T} = T_{str} \sqrt{1 + \frac{K_{str}}{K_{HH}} + \frac{K_{str}}{K_{MM}} H^2}$$

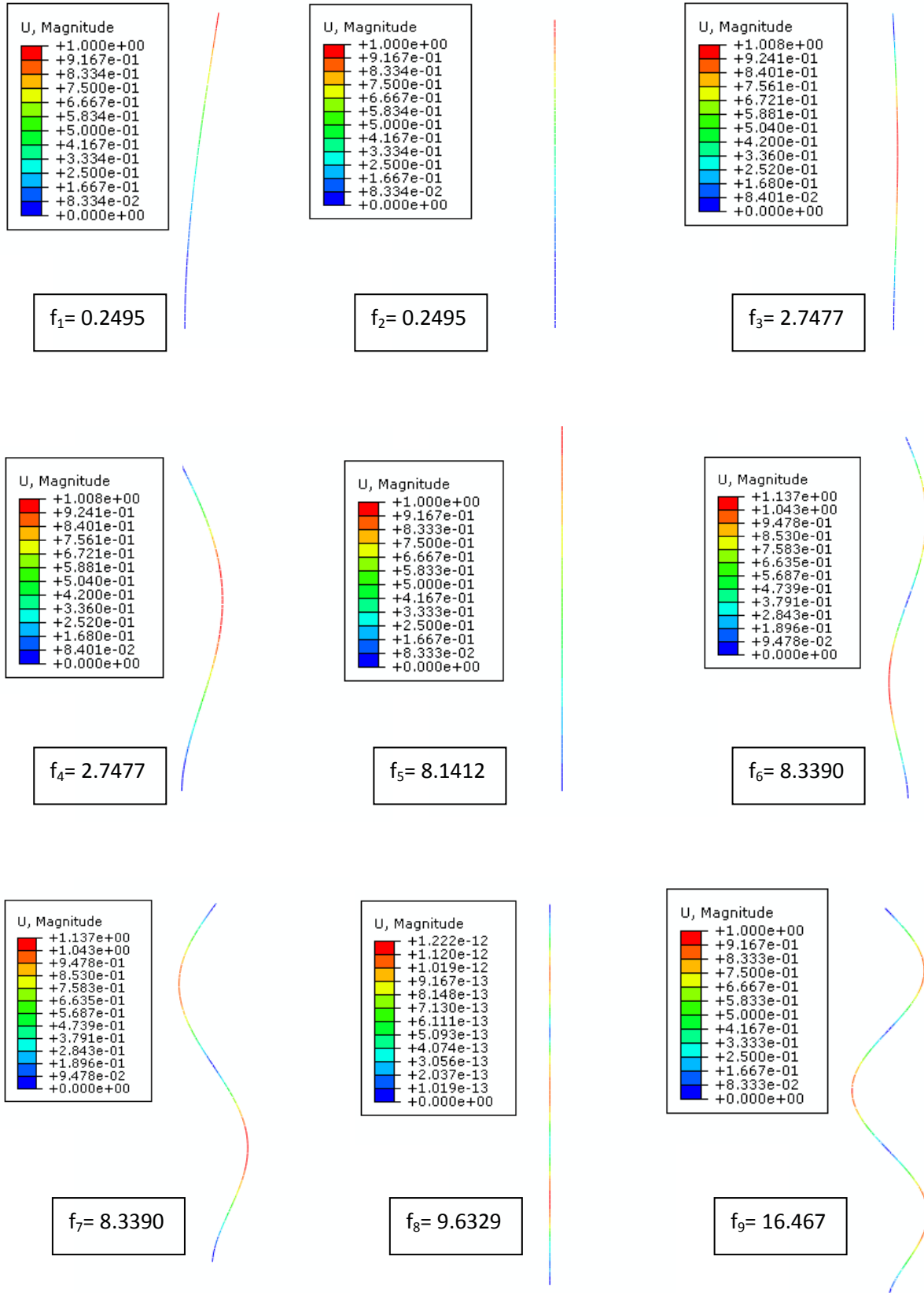
Ουσιαστικά, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.7, αντικαθιστάμε το έδαφος με δύο ελατήρια (στροφικό και μετακνησιακό), βαθμονομημένα ανάλογα με την δυσκαμψία του θεμελίου.



**Σχήμα 5.7:** Μεταβολή ιδιοπεριόδου με θεώρηση εδαφικής ενδοσιμότητας.

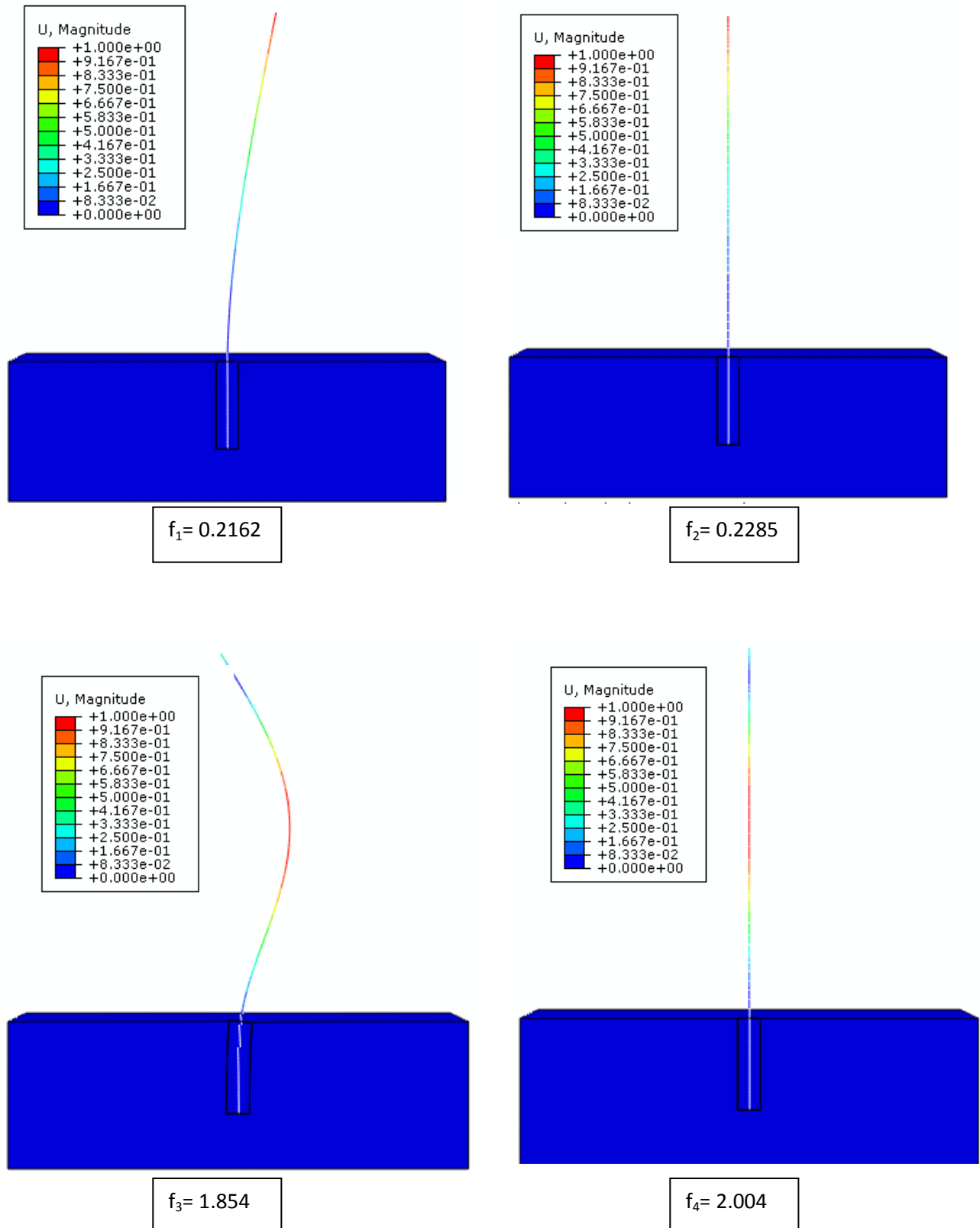
Στο σχήμα 5.8 απεικονίζονται οι πρώτες 9 ιδιομορφές και ιδιοσυχνότητες όπως προέκυψαν από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για την ανεμογεννήτρια των 3.5 MW με θεώρηση πλήρους επαφής στην βάση. Στην συνέχεια ακολουθούν οι ιδιομορφές και οι ιδιοπερίοδοι για τους λόγους έμπηξης  $L/D=4, 5, 6, 7$  (σχήμα 5.9, 5.10, 5.11, 5.12) με θεώρηση ενδοσιμότητας του εδάφους. Τέλος γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις αναλυτικές σχέσεις της βιβλιογραφίας και από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Η σύγκριση είναι ικανοποιητική, καθώς η απόκλιση είναι της τάξης 5%. Να σημειωθεί ότι με την θεώρηση ενδοσιμότητας του εδάφους μπορούμε να οδηγηθούμε σε πιο οικονομικό σχεδιασμό, καθώς η ιδιοπερίοδος αυξάνει γεγονός που καθιστά τον συντονισμό της κατασκευής ακόμα δυσκολότερο.





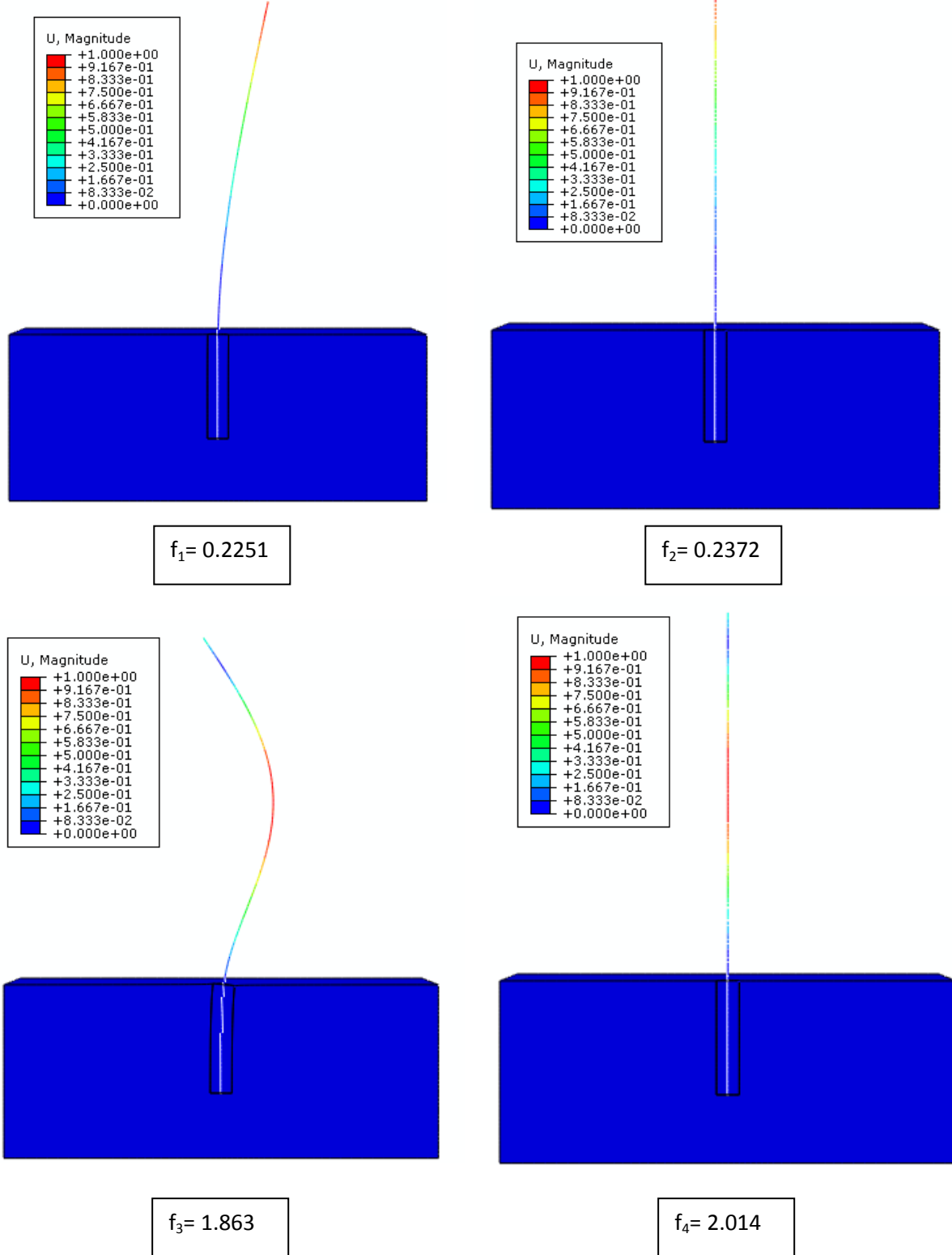
**Σχήμα 5.8.** : Ιδιοσυχνότητες ανεμογεννήτριας ονομαστικής ισχύος 3.5MW με θεωρήση πάκτωσης στην βάση.

$L/D=4$



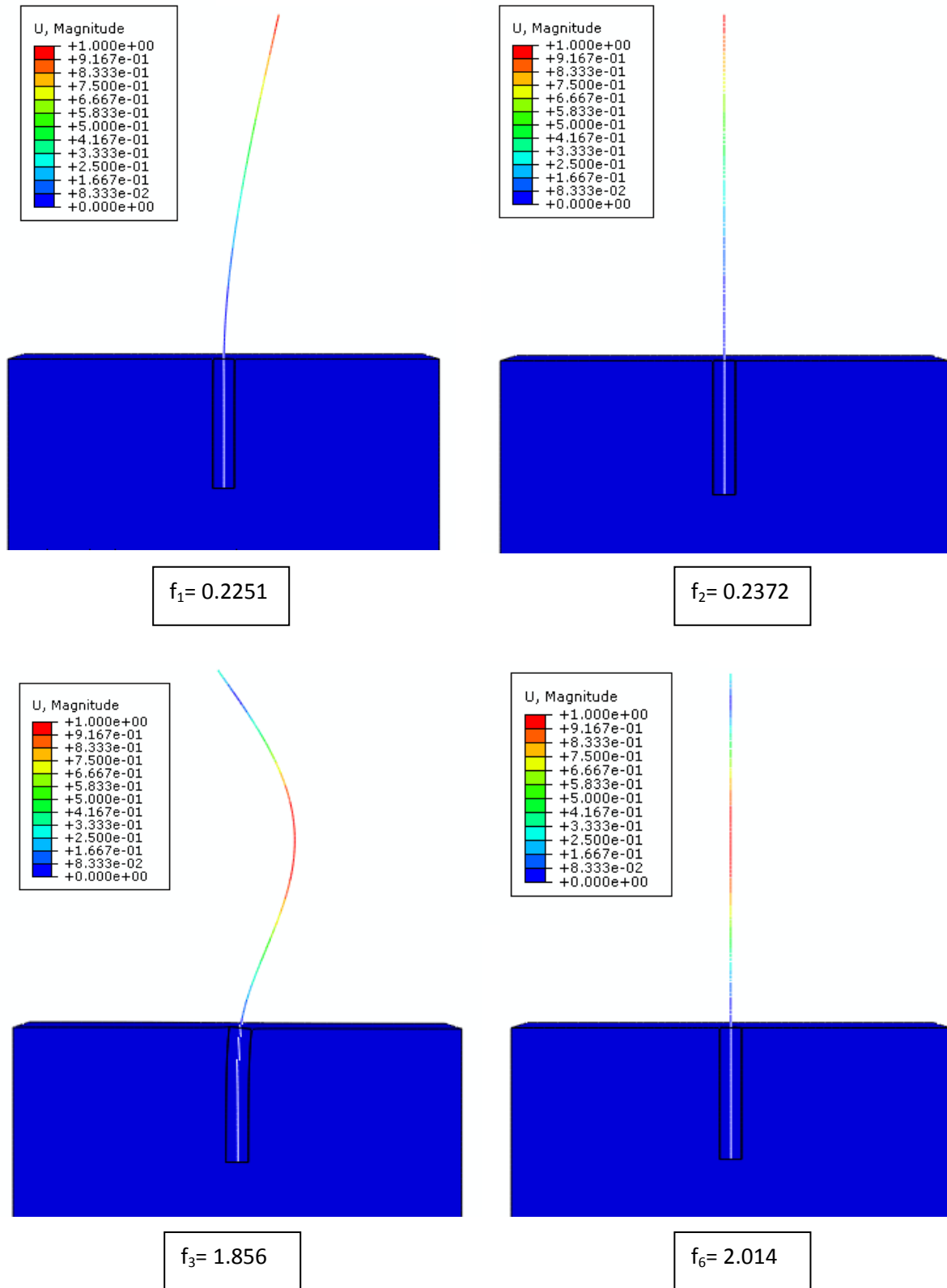
**Σχήμα 5.9 :** Ιδιοσυχνότητες ανεμογεννήτριας ονομαστικής ισχύος 3.5MW με θεώρηση ενδοσιμότητας εδάφους. Λόγος έμπτυξης  $L/D=4$ .

$L/D=5$



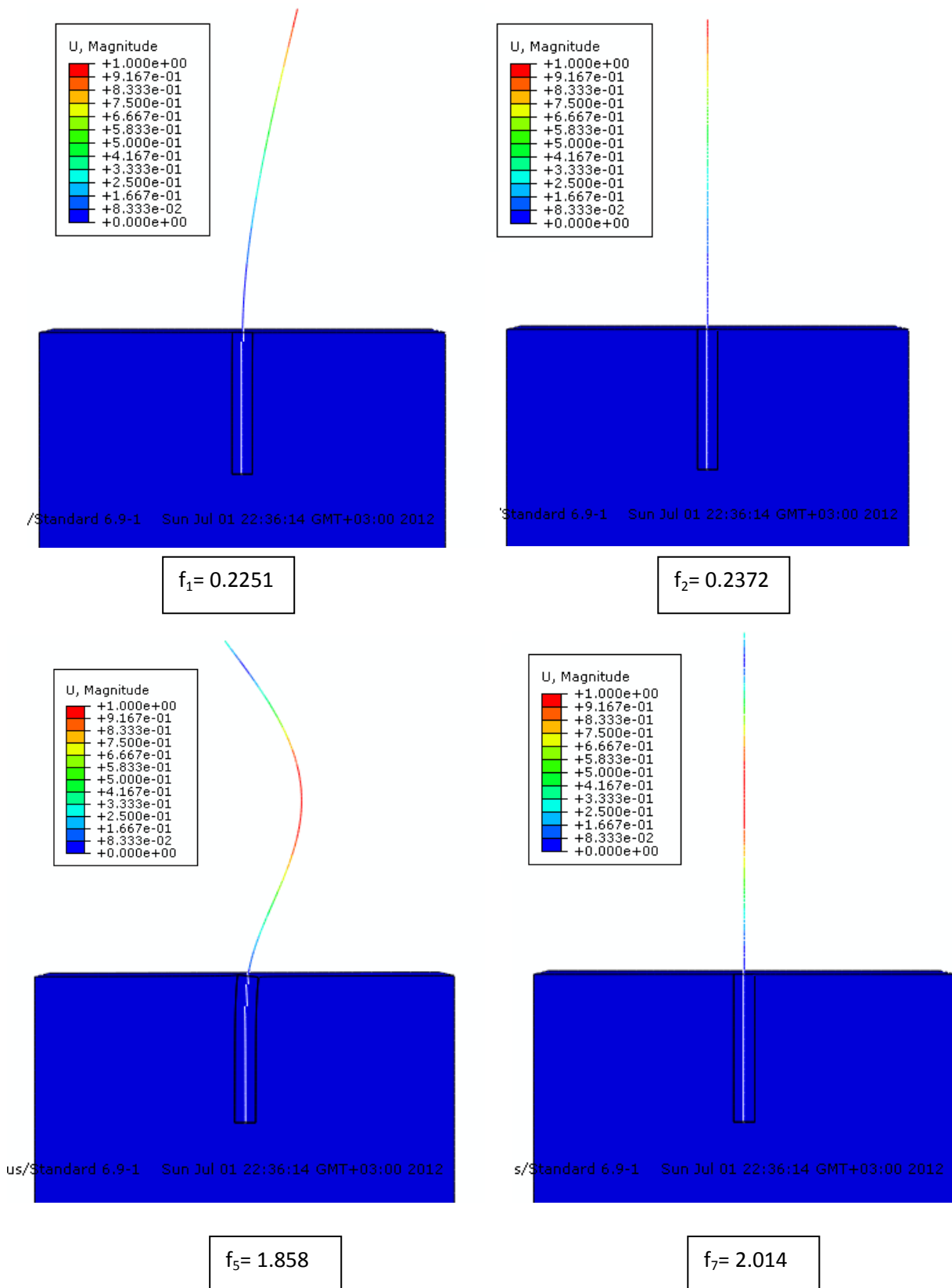
**Σχήμα 5.10.** : Ιδιοσυχνότητες ανεμογεννήτριας ονομαστικής ισχύος 3.5MW με θεώρηση ενδοσιμότητας εδάφους. Λόγος έμπτυξης  $L/D=5$ .

$L/D=6$



**Σχήμα 5.11.** : Ιδιοσυχνότητες ανεμογεννήτριας ονομαστικής ισχύος 3.5MW με θεωρήση ενδοσιμότητας εδάφους. Λόγος έμπηξης  $L/D=6$ .

$L/D=7$



**Σχήμα 5.12.** : Ιδιοσυχνότητες ανεμογεννήτριας ονομαστικής ισχύος 3.5MW με θεωρήση ενδοσιμότητας εδάφους. Λόγος έμπτυξης  $L/D=7$ .

## Σύγκριση αποτελεσμάτων αναλυτικών σχέσεων- ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων

T (sec)	Αναλυτικές Σχέσεις	F.E.A
Θεώρηση πακτωμένης βάσης	3.93	4.01
L/D=4	4.42	4.62
L/D=5	4.24	4.44
L/D=6	4.24	4.44
L/D=7	4.24	4.44

*Πίνακας 5.1: Σύγκριση αποτελεσμάτων αναλυτικών σχέσεων και ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για την πρώτη ιδοπεριόδο με θεώρηση πλήρους επαφής και με ενδοσιμότητα του εδάφους.*





# **Κεφάλαιο 6**

## Ανακυκλική Φόρτιση





## Κεφάλαιο 6 – Ανακυκλική Φόρτιση

### 6.1. Εισαγωγή

Στο πλαίσιο σχεδιασμού της θεμελίωσης μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας, δεν αρκεί η μόνο η γνώση της φέρουσας ικανότητας αλλά είναι απαραίτητη και η καταγραφή της συμπεριφοράς της κάτω από πραγματικές συνθήκες φόρτισης. Λόγω των φυσικών συνθηκών, οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες υποβάλλονται σε σύνθετες φορτίσεις.

Οι φορτίσεις που καταλήγουν στην θεμελίωση της ανεμογεννήτριας αποτελούνται από μια συνιστώσα αεροδυναμικού χαρακτήρα λόγω του ανέμου και από μια συνιστώσα υδροδυναμικού λόγω των θαλάσσιων κυματισμών και ρευμάτων. Τόσο ο άνεμος όσο και οι θαλάσσιοι κυματισμοί λόγω του δυναμικού τους χαρακτήρα, υποβάλλουν το σύστημα ανωδομής-θεμελίου-εδάφους σε εκατομμύρια κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης.

Στην διάρκεια ζωής της λοιπόν, η ανεμογεννήτρια υποβάλλεται σε εκατομμύρια κύκλους μικρού πλάτους λόγω των φορτίων λειτουργίας αλλά και σε μερικούς κύκλους μεγάλου πλάτους λόγω ακραίων καιρικών συνθηκών, (π.χ. ισχυρή καταιγίδα). Και οι δύο περιπτώσεις είναι ικανές να προκαλέσουν στο έδαφος μόνιμες παραμορφώσεις, καθώς σε μεγάλο αριθμό κύκλων ακόμα και μια ελάχιστη παραμόρφωση οδηγεί σε μεγάλη συσσώρευση μόνιμων παραμορφώσεων. Τα αποτελέσματα μπορεί να είναι καταστροφικά για την ανωδομή, καθώς η μεγάλη συσσώρευση μόνιμων στροφών μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια της λειτουργικότητάς ή ακόμα και σε ανατροπή της ανωδομής.

Καθώς ο κλάδος των υπεράκτιων ανεμογεννητριών μετρά μόλις 20 χρόνια, δεν υπάρχει ακόμα μεγάλη εμπειρία στην μακροχρόνια συμπεριφορά του συστήματος εδάφους-θεμελίου. Αρκετοί ερευνητές έχουν συμβάλει στην διερεύνηση και πρόβλεψη της συμπεριφοράς του μονοπασσάλου υποβαλλόμενου σε μεγάλο αριθμό κύκλων [Kellezi & Hansen; 2003, Byrne & Houlby; 2005, Niemunis et al.; 2007, Triantafyllidis & Wichtmann; 2008, Randolph & Gourvenec; 2010, Li Haigh & Bolton 2010]. Ωστόσο, οι περισσότερες αναφορές αφορούν ανεμογεννήτριες μικρού ή μεσαίου μεγέθους. Αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με ανακοινωθέντα μελλοντικά σχέδια, αυξητική τάση παρουσιάζουν το μέγεθος των υπεράκτιων ανεμογεννητριών, το βάθος της θάλασσας και η απόσταση τοποθέτησης από την ακτή, άρα και οι απαιτήσεις της θεμελίωσης.

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται η καταγραφή της απόκρισης της θεμελίωσης σε μικρό αριθμό κύκλων και η πρόβλεψη της συμπεριφοράς της σε βάθος 20 ετών. Για την ανάλυση επιλέχθηκαν χαρακτηριστικές ανεμογεννήτριες τριών διαστάσεων (μικρού-μεσαίου-μεγάλου μεγέθους) και υποβλήθηκαν σε τρία σενάρια φόρτισης. Η διερεύνηση έγινε παραμετρικά ως προς τους τέσσερις λόγους έμπηξης του μονοπασσάλου ( $L/D=4, 5, 6, 7$ ) με σκοπό την ανάδειξη του βέλτιστου για κάθε ανεμογεννήτρια. Καταγράφηκαν επίσης και οι καμπύλες ροπής-στροφής υπό μονοτονική φόρτιση με σκοπό την καταγραφή της μη-γραμμικής συμπεριφοράς της θεμελίωσης. Η τελευταία εξαρτάται έντονα από τον λόγο ροπής προς τέμνουσας  $M/HD$  που μεταφέρεται στο επίπεδο θεμελίωσης. Για οριζόντια φόρτιση σε ύψος  $h$  από την στάθμη της θεμελίωσης, ο προηγούμενος λόγος μετατρέπεται σε  $h/D$  και ονομάζεται λόγος λυγιρότητας.

### 6.2 Χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών και υπολογισμός φορτίων

Οι ανεμογεννήτριες που αποφασίστηκε να μελετηθούν είναι τριών διαστάσεων: η μικρή ονομαστικής ισχύος 2MW, η μεσαία 3.5MW και η μεγάλη 5MW. Σύμφωνα με στοιχεία της E.W.E.A η μέση ονομαστική ισχύς για τις ανεμογεννήτριες που τοποθετήθηκαν το 2011 ανέρχεται στα 3.6 MW. Η μεσαία ανεμογεννήτρια, λοιπόν, θεωρήθηκε και η πιο αντιπροσωπευτική για την οποία έγιναν αναλύσεις για τις τρεις περιπτώσεις φόρτισης που περιγράφονται παρακάτω. Οι άλλες δύο ανεμογεννήτριες μελετήθηκαν μόνο υπό τον δυσμενέστερο συνδυασμό φόρτισης. Στους πίνακες που ακολουθούν καταγράφονται τα κύρια κατασκευαστικά χαρακτηριστικά για κάθε ανεμογεννήτρια, όπου  $D$  είναι η διάμετρος του ρότορα,  $H$  το ύψος του πύργου,  $R_t$  η εξωτερική διάμετρος του πύργου,  $t$  το πάχος των τοιχωμάτων,  $M_t$  η συγκεντρωμένη μάζα του πύργου,  $M_h$  η συγκεντρωμένη του ρότορα-nacelle,  $I$  η ροπή αδρανείας του πύργου,  $E$  το μέτρο ελαστικότητας του υλικού (χάλυβας),  $K_{tower}$  η δυσκαμψία του πύργου,  $T$  η ιδιοπερίοδος της ανεμογεννήτριας,  $V$  η μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας και  $H'$  το κέντρο άσκησης των φορτίων του ανέμου και των κυμάτων.

Το στατικό προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση των δυσκαμψιών είναι αυτό της συγκεντρωμένης μάζας στο κέντρο άσκησης των φορτίων και της άπειρης δυσκαμψίας στον πύργο της ανεμογεννήτριας (**σχήμα 6.1 α**), ενώ στην συνέχεια για την υποβολή της ανεμογεννήτριας στα διάφορα σενάρια ανακυκλικής φόρτισης χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο με το πλήρες ύψος της ανωδομής, μία συγκεντρωμένη μάζα στο ύψος του ρότορα, μία κατανεμημένη μάζα στον πύργο και πραγματική δυσκαμψία στον πύργο.

2 MW			
$D$ (m)	65	$I$ (m <sup>4</sup> )	0.495
$H$ (m)	60	$E$ (GPa)	210
$R_t$ (m)	2	$K_{tower}$ (MN/m)	2765.33
$t$ (m)	0.02	$T$ (sec)	2.16
$M_t$ (t)	128	$V$ (m/s)	25
$M_h$ (t)	200	$H'_{loading}$ (m)	19

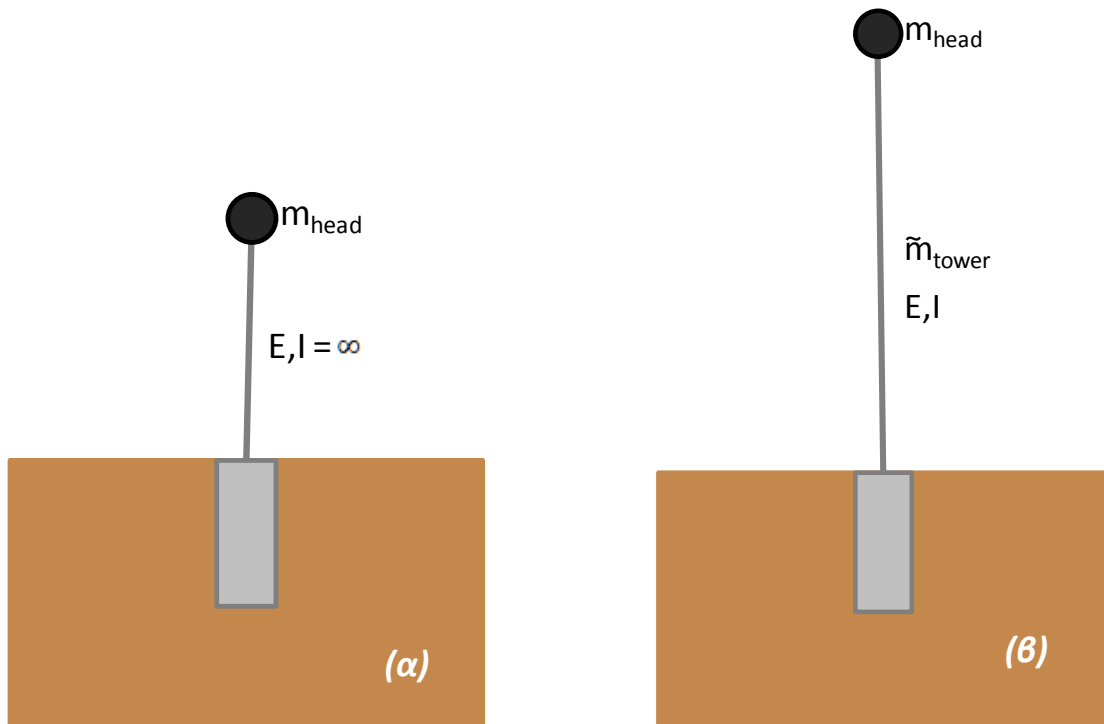
**Πίνακας 1:** Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας 2MW.

3.5 MW			
$D (m)$	90	$I (m^4)$	0.568
$H (m)$	80	$E (GPa)$	210
$R_t (m)$	2	$K_{tower} (MN/m)$	1562.77
$t (m)$	0.023	$T (sec)$	3.23
$M_t (t)$	195	$V (m/s)$	25
$M_h (t)$	220	$H'_{loading} (m)$	32

Πίνακας 2: Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας 3.5MW.

5 MW			
$D (m)$	110	$I (m^4)$	1.071
$H (m)$	90	$E (GPa)$	210
$R_t (m)$	2.46	$K_{tower} (MN/m)$	1937.68
$t (m)$	0.023	$T (sec)$	3.55
$M_t (t)$	271	$V (m/s)$	25
$M_h (t)$	350	$H'_{loading} (m)$	41

Πίνακας 3: Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας 5MW.



Σχήμα 6.1: (α) στατικό προσομοίωμα ανεμογεννήτριας για μονοτονική φόρτιση (β) στατικό προσομοίωμα για ανακυκλική φόρτιση

### Υπολογισμών Φορτίων Ανεμογεννήτριας

Οι φορτίσεις της ανεμογεννήτριας είναι δυναμικές, για την ανάλυση όμως της θεμελίωσης της ανεμογεννήτριας μπορούν προσεγγιστικά να θεωρηθούν ψευδοστατικές. Οι φορτίσεις είναι αυτές που προέρχονται από τον άνεμο στο ύψος του ρότορα και αυτές που από τους θαλάσσιους κυματισμούς και τα ρεύματα.

### Φορτία Ανέμου

Οι πιέσεις που ασκεί ο άνεμος πάνω στην ανεμογεννήτρια μπορούν να μεταφραστούν σε μία συγκεντρωμένη δύναμη στο ύψος του ρότορα σύμφωνα με τους κανονισμούς API 1993:

$$F = \frac{w}{2g} V^2 C_g A$$

Στην περίπτωση των δικών μας ανεμογεννητριών οι παράμετροι της σχέσης και τα αποτελέσματα παίρνουν τις εξής τιμές:

	2MW	3.5MW	5MW
<b>P=w/g</b>	1.25	1.25	1.25
<b>V (m/sec)</b>	25	25	25
<b>C<sub>g</sub></b>	0.3	0.3	0.3
<b>D (m)</b>	70	100	120
<b>H<sub>wind</sub> (ή F) (KN)</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>1500</b>

**Πίνακας 4:** Παράμετροι και αποτελέσματα φορτίσεων ανέμου για τις ανεμογεννήτριες 2, 3.5, 5MW

**Φορτία θαλάσσιων κυματισμών και ρευμάτων**

Για τις αναλύσεις μας θεωρήσαμε ένα μέσο βάθος θάλασσας  $d=15\text{m}$ . Οι δυνάμεις των θαλάσσιων κυματισμών υπολογίστηκαν με βάση την εξίσωση του Morison 1950, όπως περιγράφεται στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο της εργασίας. Υπενθυμίζουμε ότι η εξίσωση είναι:

$$p = p_D + p_M = C_D \frac{1}{2} \frac{\gamma_w}{g} D u |u| + C_M \frac{\gamma_w}{g} \frac{D^2 \pi}{4} \frac{\partial u}{\partial t}$$

Οι παράμετροι που θεωρήθηκαν για τα χαρακτηριστικά του κύματος αφορούν την ακραία κατάσταση υπέρ ασφαλείας του σχεδιασμού. Στον πίνακα 5, φαίνονται οι τιμές που επιλέχθηκαν:

<b>T (sec)</b>	15.4
<b>H (m)</b>	14.4
<b>λ (m)</b>	180
<b>f (Hz)</b>	0.0649
<b>d (m)</b>	15

**Πίνακας 5:** Χαρακτηριστικά κύματος

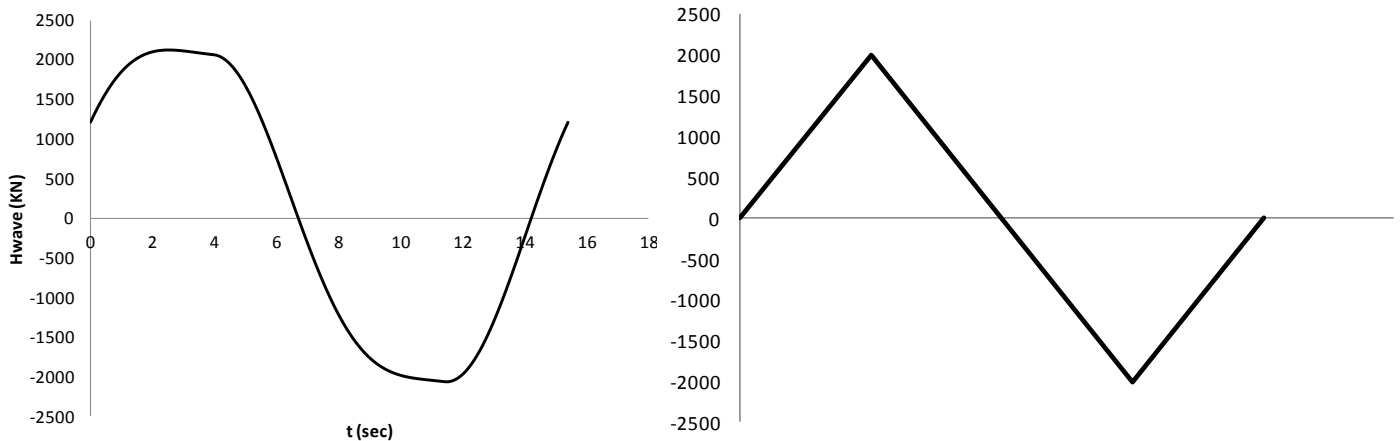
όπου T είναι η ιδιοπερίοδος του κύματος, H το μέγιστο ύψος, λ το μήκος κύματος, f η συχνότητα του κύματος και d το βάθος της θάλασσας.

Σύμφωνα με του υπολογισμούς η δύναμη των κυμάτων που ασκείται σε ύψος περίπου 8m από την βάση της θεμελίωσης για κάθε ανεμογεννήτρια είναι η εξής:

	<b>2MW</b>	<b>3.5MW</b>	<b>5MW</b>
<b>H<sub>wave and currents</sub> (KN)</b>	1800	2000	2200

**Πίνακας 6:** Αποτελέσματα φορτίσεων κυμάτων και ρευμάτων για τις ανεμογεννήτριες 2, 3.5, 5MW

Στην συνέχεια απεικονίζεται η χρονοϊστορία της φόρτισης των θαλάσσιων κυματισμών στον πύργο της ανεμογεννήτριας, όπως προέκυψε από τους υπολογισμούς (σχήμα 6.2 α) και η προσέγγιση της φόρτισης που θεωρήθηκε για τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων (σχήμα 6.2 β). Η θεώρηση αυτή είναι αρκετά ρεαλιστική και μειώνει κατά πολύ τον υπολογιστικό χρόνο.

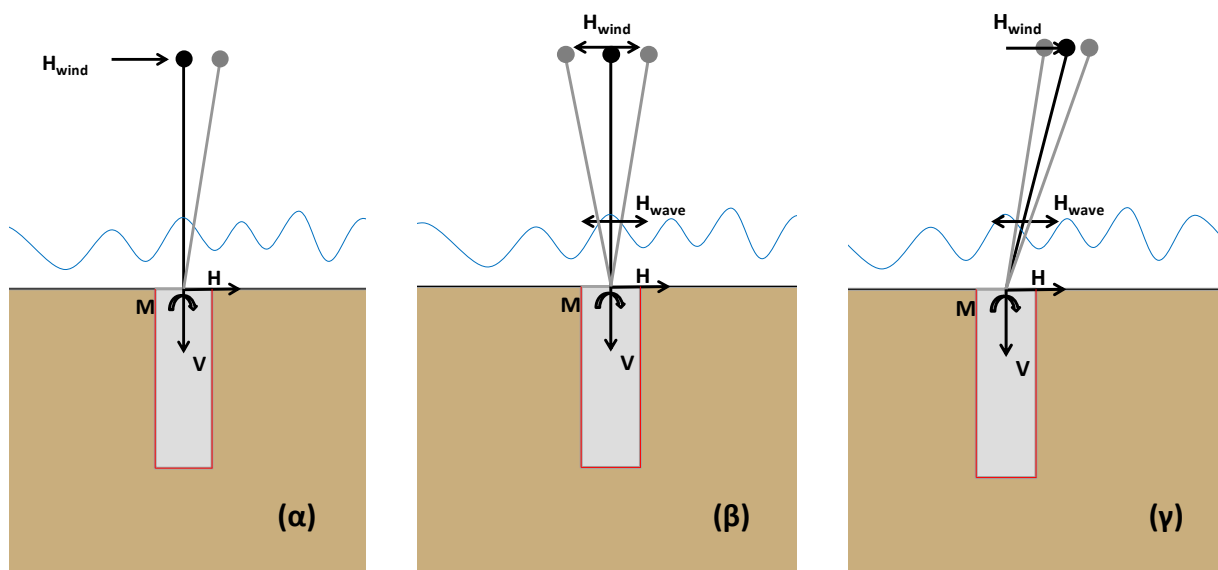


**Σχήμα 6.2:** (α) Πραγματική χρονοιστορία φόρτισης θαλάσσιων κυματισμών (β) προσεγγιστική θεώρηση φόρτισης στην παρούσα εργασία.

### Σενάρια Φόρτισης

Κατά την ανάλυση της ανεμογεννήτριας υπό ανακυκλική φόρτιση εξετάστηκαν τα εξής τρία σενάρια φόρτισης:

- (α) Φόρτιση ανέμου μιας κατεύθυνσεως
- (β) Φόρτιση ανέμου και κυματισμών διπλής κατεύθυνσης
- (γ) Φόρτιση ανέμου μιας κατεύθυνσης και φόρτιση θαλάσσιων κυματισμών διπλής κατεύθυνσης



**Σχήμα 6.3:** Ανακυκλική φόρτιση (α) μιας κατεύθυνσεως ανέμου, (β) διπλής κατεύθυνσεως ανέμου και κυμάτων (γ) διπλής κατεύθυνσης κυμάτων και σταθερής φοράς ανέμου.

### 6.3 Μονοτονική Φόρτιση

Η μη-γραμμική συμπεριφορά της θεμελίωσης εξαρτάται έντονα από τον αδιάστατο λόγο ροπής προς τέμνουσας δύναμης  $M/HD$  που μεταφέρεται στο επίπεδο θεμελίωσης. Στην περίπτωση της οριζόντιας φόρτισης σε ύψος  $h$  από την στάθμη θεμελίωσης, ο λόγος γίνεται  $h/D$  και ονομάζεται λόγος λυγηρότητας. Ανάλογα με την φόρτιση που έχουμε αλλάζει και ο λόγος λυγηρότητας. Στην πρώτη περίπτωση της φόρτισης μόνο από τα φορτία του ανέμου, ο λόγος είναι  $h/D= 12, 16$  και  $18$  για την μικρή, μεσαία και μεγάλη ανεμογεννήτρια αντίστοιχα. Ενώ στην περίπτωση της συνδυασμένης φόρτισης ανέμων και κυματισμών, θεωρούμε ένα ισοδύναμο ύψος πύργου στην κορυφή του οποίου ασκείται το άθροισμα των οριζόντιων δυνάμεων. Όπως θα δούμε και παρακάτω η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική. Σε αυτή την περίπτωση ο λόγος λυγηρότητας είναι  $h/D= 4, 6.4, 8.2$  για κάθε μια από τις ανεμογεννήτριες αντίστοιχα.

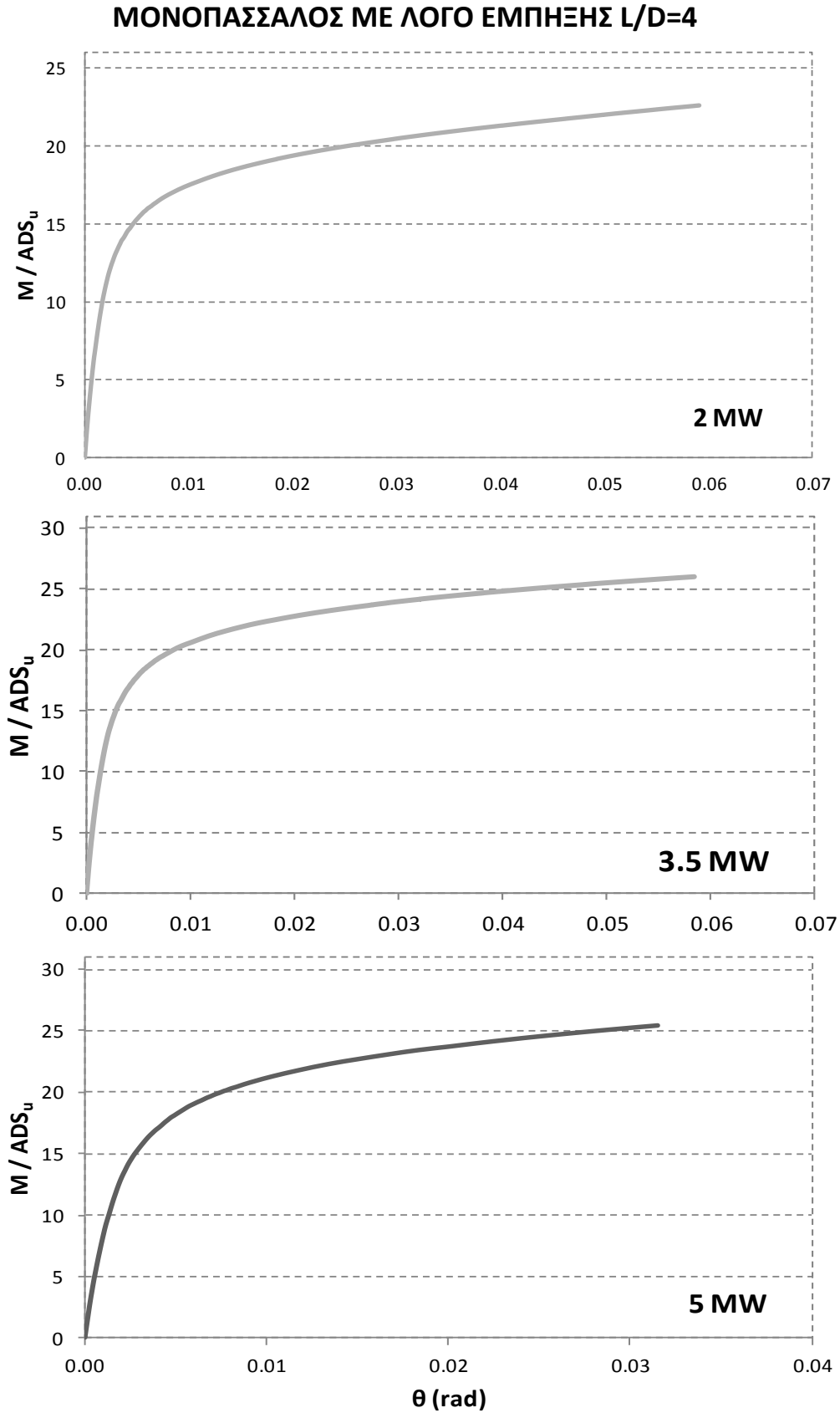
Στα **σχήματα 6.4- 6.7** απεικονίζονται οι καμπύλες ροπής-στροφής όπως αυτές προέκυψαν από μονοτονική ανάλυση για τις τρεις ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος  $2, 3.5$  και  $5$  MW (ανεμογεννήτρια μικρού, μεσαίου και μεγάλου μεγέθους αντίστοιχα). Τα τέσσερα σχήματα αναφέρονται στους τέσσερις λόγους έμπηξης της θεμελίωσης  $L/D=4, 5, 6, 7$ .

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η σταδιακή επιβολή μετατόπισης στο κέντρο άσκησης των φορτίων (άνεμου και κυματισμών) της ανωδομής. Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο με την ανωδομή. Κάθε ανεμογεννήτρια προσομοιώθηκε με έναν ισοδύναμο μονοβάθμιο ταλαντωτή με συγκεντρωμένη μάζα στην κορυφή της ανωδομής και άπειρη δυσκαμψία στον πύργο της ανεμογεννήτριας.

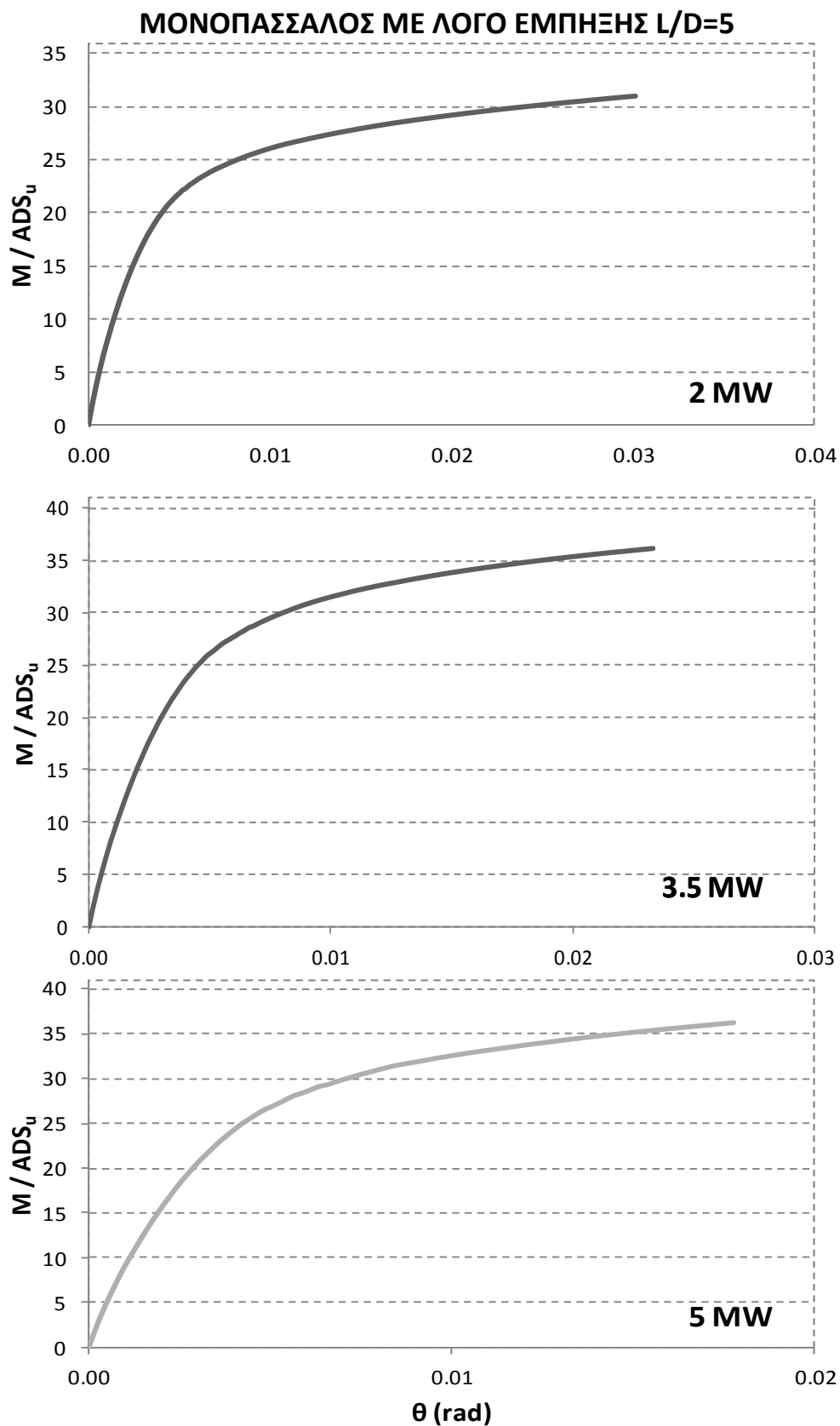
Οι μονοτονικές καμπύλες ροπής-στροφής κάνουν έκδηλη την παρουσία μη-γραμμικότητας στην απόκριση του θεμελίου και του εδάφους. Στον αρχικό ελαστικό κλάδο του διαγράμματος υπάρχει γραμμική αύξηση της ροπής με την γωνία στροφής. Το έδαφος συμπεριφέρεται ελαστικά και υπάρχει ακόμα πλήρης επαφή στην διεπιφάνεια εδάφους-θεμελίου. Στη συνέχεια το διάγραμμα εισέρχεται στην πλαστική περιοχή με αποτέλεσμα την συνεχόμενη μείωση της δυσκαμψίας του συστήματος μέχρι την τελική αστοχία του. Σε αυτή την φάση εμφανίζονται πλαστικοποιήσεις στο έδαφος και έχουμε αποκόλληση και ολίσθηση του θεμελίου από το έδαφος.

Ο κατακόρυφος συντελεστής ασφαλείας δεν παίζει μεγάλο ρόλο στην περίπτωση των ανεμογεννητριών καθώς και οι τρεις είναι συστήματα ελαφριά φορτισμένα κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Ακόμα και η ανεμογεννήτρια των  $5$  MW έχει  $FS_v=5$ . Καθοριστικό ρόλο για τις μονοτονικές καμπύλες έχει μόνο ο λόγος λυγηρότητας, δηλαδή σημείο επιβολής της οριζόντιας δύναμης ή μετατόπισης. Όπως παρατηρούμε και για τις τέσσερις θεμελιώσεις, η μικρή ανεμογεννήτρια έχει την μικρότερη αντοχή σε αδιάστατους όρους, ενώ οι άλλες δύο έχουν σχεδόν ίδια αντοχή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο λόγος λυγηρότητας των δύο τελευταίων διαφέρει σημαντικά, ωστόσο η μεγάλη ανεμογεννήτρια είναι σχεδόν  $2$  φορές πιο βαριά από την μεσαία ανεμογεννήτρια. Το ένα δρα αντίθετα του άλλου με αποτέλεσμα να εξισορροπούν στην ίδια τελική αντοχή.

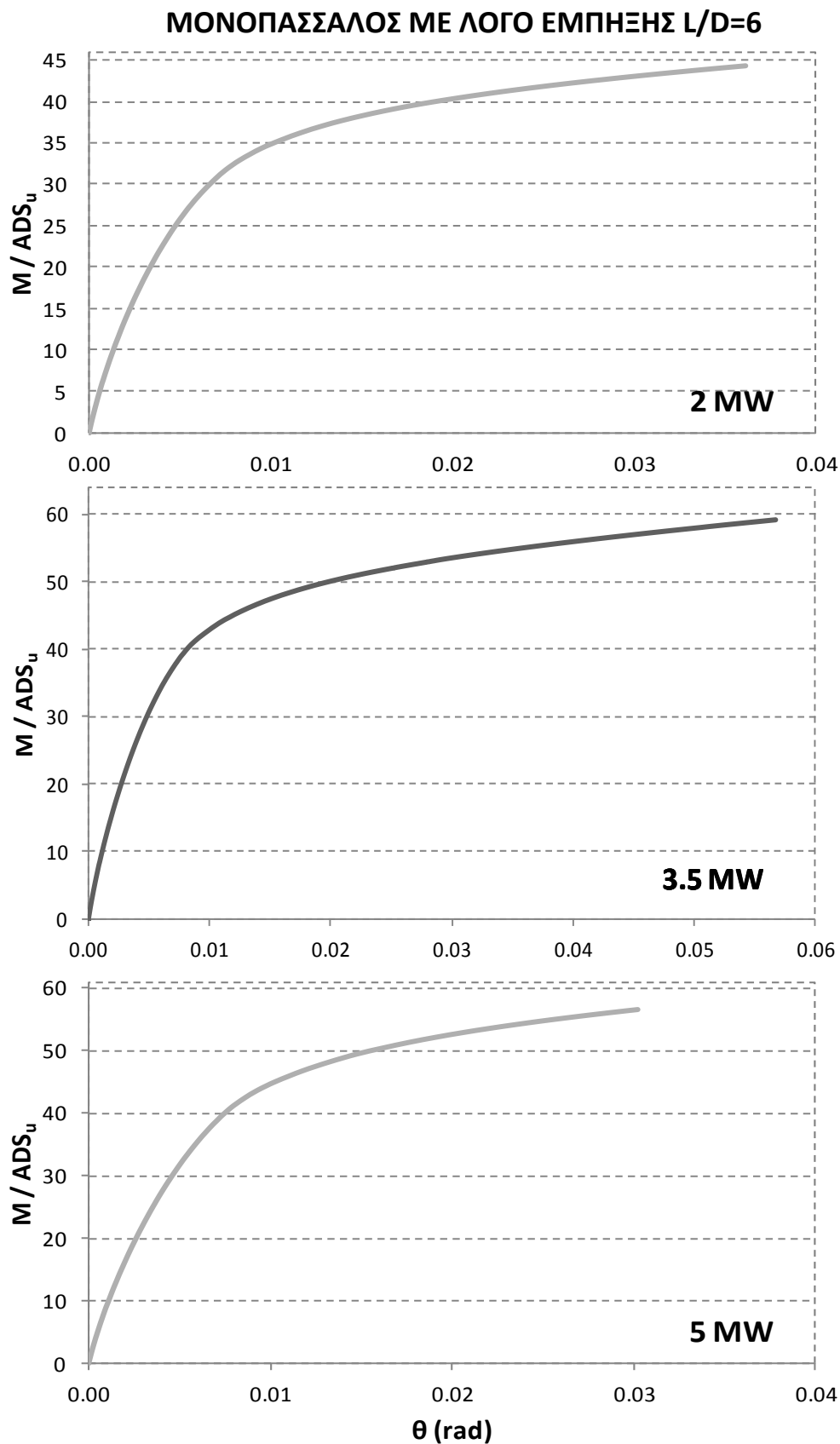




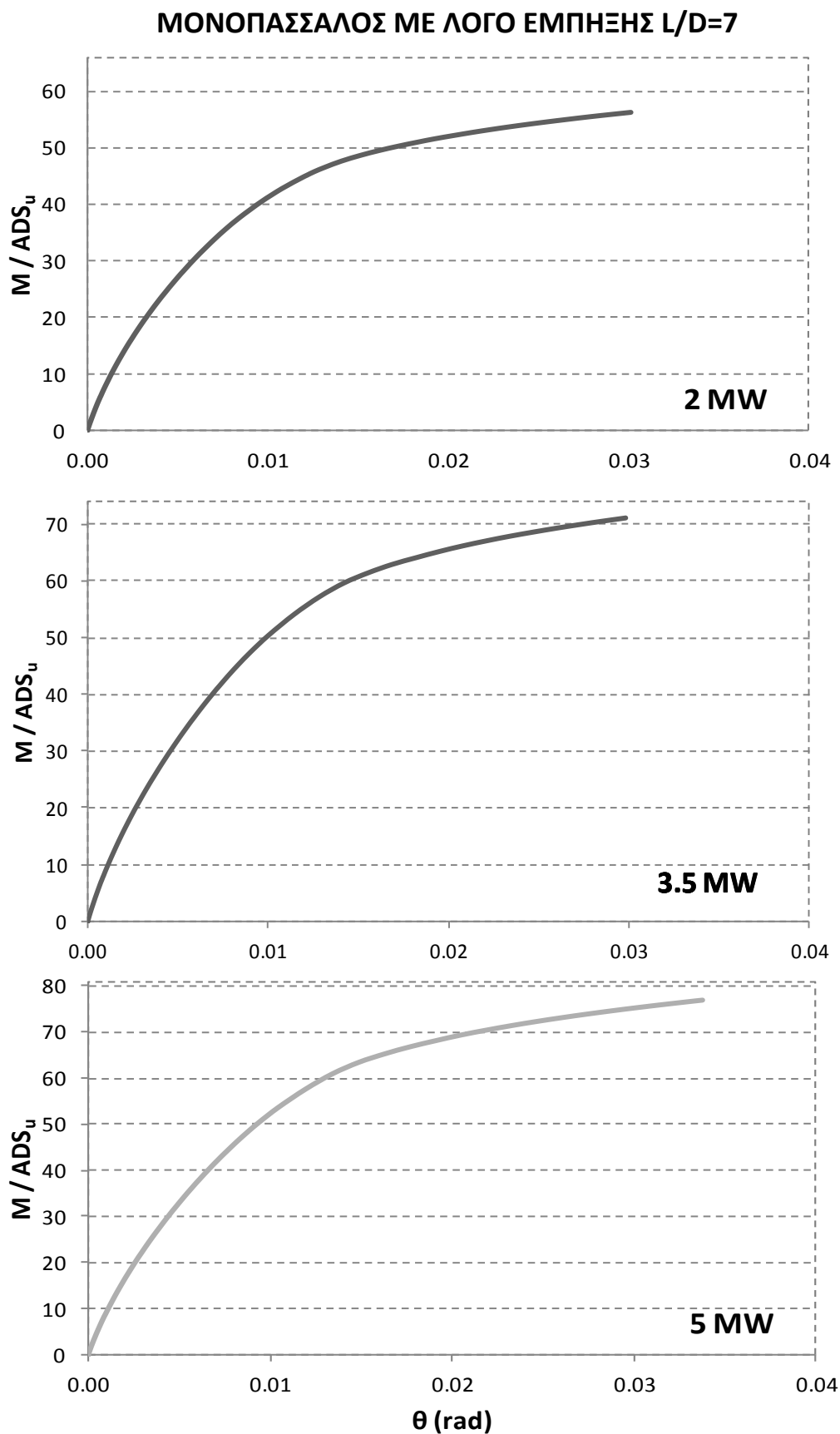
**Σχήμα 6.4** Αδιάστατες καμπύλες ροπής-στροφής μονοπασσάλου με λόγο έμπτυξης  $L/D=4$  υπό μονοτονική εγκάρσια φόρτιση για τρεις τυπικές ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος 2, 3.5, 5 MW (με σειρά από πάνω προς τα κάτω).



**Σχήμα 6.5** Αδιάστατες καμπύλες ροπής-στροφής μονοπασσάλου με λόγο έμπτυξης L/D=5 υπό μονοτονική εγκάρσια φόρτιση για τρεις τυπικές ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος 2, 3.5, 5 MW (με σειρά από πανω προς τα κάτω).



**Σχήμα 6.6** Αδιάστατες καμπύλες ροπής-στροφής μονοπασσάλου με λόγο έμψηξης  $L/D=6$  υπό μονοτονική εγκάρσια φόρτιση για τρεις τυπικές ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος 2, 3.5, 5 MW (με σειρά από πανω προς τα κάτω).



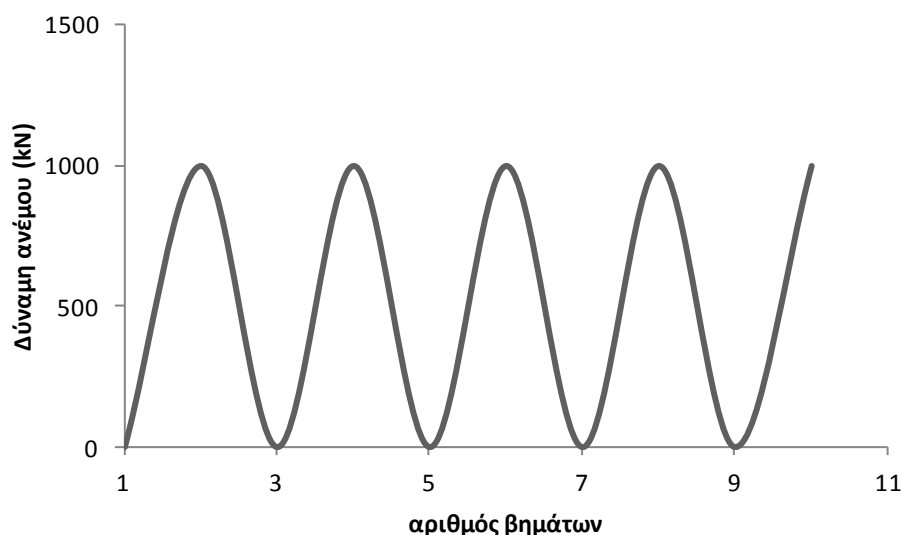
**Σχήμα 6.7** Αδιάστατες καμπύλες ροπής-στροφής μονοπασσάλου με λόγο έμπτυξης  $L/D=7$  υπό μονοτονική εγκάρσια φόρτιση για τρεις τυπικές ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος 2, 3.5, 5 MW (με σειρά από πάνω προς τα κάτω).

## 6.4 Ανακυκλική φόρτιση

### 6.4.1 Φόρτιση ανέμου μιας κατευθύνσεως

Το πρώτο σενάριο φόρτισης που μελετήθηκε είναι αυτό της φόρτισης ανέμου μιας κατευθύνσεως. Η κατάσταση αυτή αντιπροσωπεύει την έναρξη και παύση της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Επιλέχθηκε να αναλυθεί σε μια κατεύθυνση μόνο καθώς η φορά του ανέμου παραμένει σταθερή για πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα, ενώ το μέγεθος που μεταβάλλεται έντονα ανά δεκάλεπτο είναι η ταχύτητά του.

Για τις αναλύσεις επιλέχθηκε η μέση ανεμογεννήτρια των 3.5MW και χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο με το πλήρες ύψος της ανωδομής. Επιβλήθηκε στην κορυφή της ανωδομής (ύψος του ρότορα) η οριζόντια δύναμη του ανέμου, όπως αυτή προέκυψε από τους υπολογισμούς του κεφαλαίου 6.2, σε εναλλασσόμενα βήματα, η σειρά των οποίων φαίνονται στο **σχήμα 6.8**



**Σχήμα 6.8:** Επιβολή δύναμης ανέμου σε διαδοχικά βήματα.

Στα **σχήματα 6.9-6.12** που ακολουθούν απεικονίζονται ξεχωριστά για κάθε λόγο έμπηξης τα εξής διαγράμματα από αριστερά προς τα δεξιά: (α) ροπής-στροφής, (β) καθίζησης-στροφής, (γ) μεταβολής στροφικής δυσκαμψίας συναρτήσεων των κύκλων φόρτισης, (δ) μέγιστη στροφή συναρτήσεων του αριθμού των κύκλων φόρτισης, (ε) λογαριθμική πρόβλεψη μέγιστων στροφών σε μεγάλο αριθμό κύκλων.

Πιο συγκεκριμένα για τον λόγο  $L/D=4$  παρατηρούμε στο διάγραμμα ροπής-στροφής στην κορυφή του θεμελίου ότι σε κάθε κύκλο φόρτισης τείνει να συσσωρεύσει στροφές και δεν σταθεροποιείται σε μια συγκεκριμένη γραμμή φόρτισης. Η συμπεριφορά αυτή ενισχύεται και από τα επόμενα διαγράμματα καθώς βλέπουμε ότι η καθίζηση μεγαλώνει όσο και η στροφική δυσκαμψία του συστήματος παρουσιάζει απώλεια της τάξης του 20% από τους πρώτους πέντε κύκλους. Στην συνέχεια επιδιώξαμε την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του μονοπασσάλου σε όρους στροφής. Βασισόμενη στο διάγραμμα μέγιστης στροφής συναρτήσεων του αριθμού των κύκλων, αποτυπώσαμε την λογαριθμική τάση αύξησης της στροφής και στην συνέχεια την

προβάλαμε στους 10.000.000 κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης που αναμένεται να υποβληθεί μια ανεμογεννήτρια σε βάθος 20 χρόνων. Με βάση αυτό το κριτήριο δεν μπορούμε να απορρίψουμε ακόμα τον συγκεκριμένο λόγο θεμελίωσης καθώς το άνω όριο επιτρεπόμενης στροφής είναι  $\theta_{\max}=0.009\text{rad}$ . Να σημειωθεί ωστόσο ότι για τον λόγο  $L/D=4$  η είσοδος στον πλαστικό κλάδο του διαγράμματος γίνεται για  $\theta=0.004\text{rad}$ , γεγονός που δηλώνει ότι θα έχουν συμβεί στο έδαφος έντονες πλαστικοποιήσεις ύστερα από 20 χρόνια λειτουργίας της ανεμογεννήτριας.

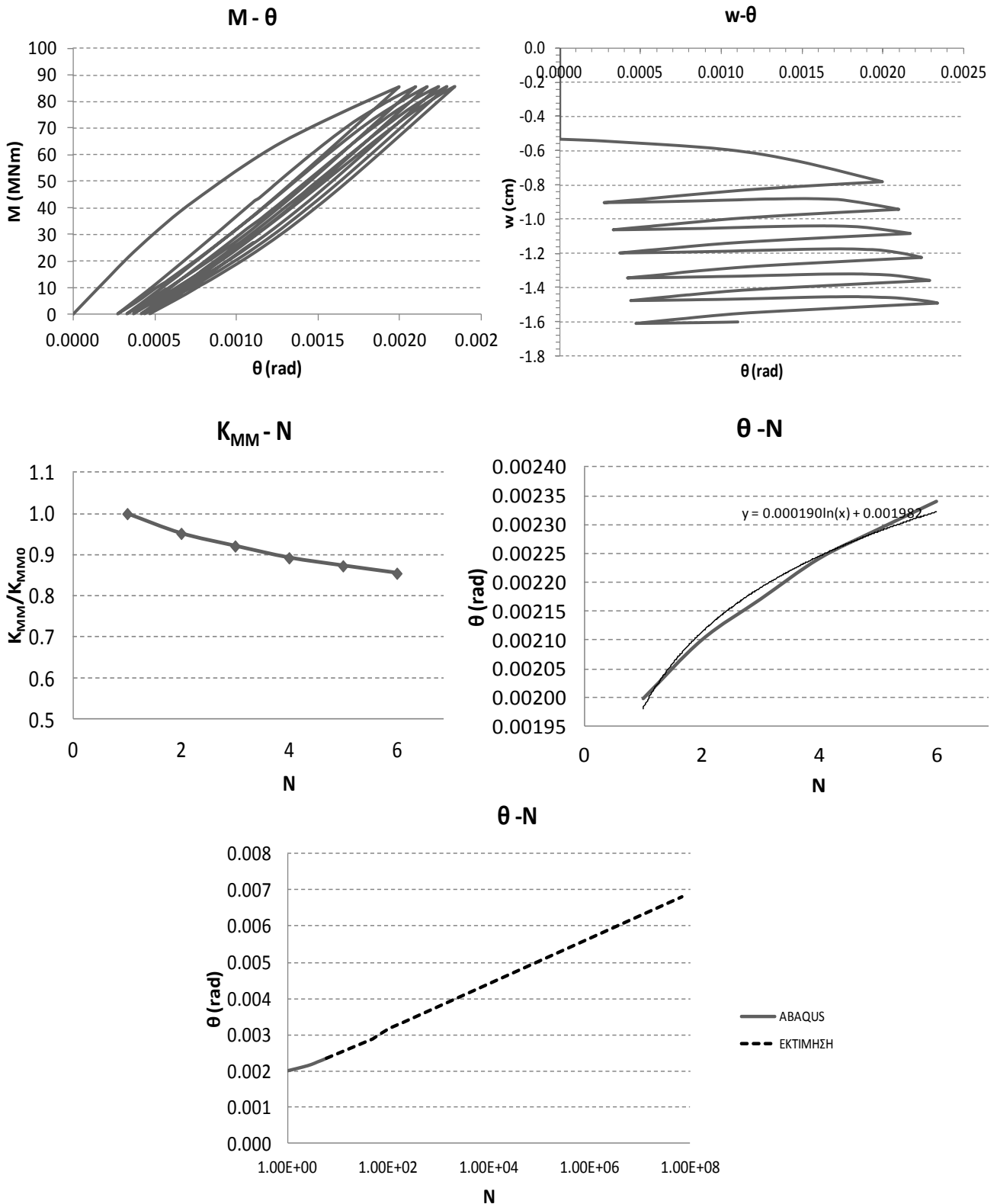
Η συμπεριφορά που περιγράψαμε παραπάνω είναι αισθητά καλύτερη για τον λόγο έμπτυξης  $L/D=5$ . Το διάγραμμα ροπής-στροφής δείχνει να σταθεροποιείται με την πάροδο των κύκλων και οι καθιζήσεις είναι ανεπαίσθητες. Η μείωση της στροφικής δυσκαμψίας είναι μόλις 5% και η πρόβλεψη της μελλοντικής συμπεριφοράς δείχνει ότι ύστερα από 10.000.000 κύκλους η παραμένουσα στροφή είναι μόλις  $\theta=0.0025\text{rad}$ , στροφή που απέχει αρκετά από την στροφή  $\theta_{\gamma}$ . Ωστόσο για να αποφανθούμε με σιγουριά αν ο λόγος  $L/D=5$  είναι κατάλληλος για αυτή την θεμελίωση, θα πρέπει να δούμε την συμπεριφορά του και στις επόμενες δυσμενέστερες φορτίσεις.

Οι λόγοι έμπτυξης  $L/D=6$  και  $L/D=7$  παρουσιάζουν ίδια συμπεριφορά. Ήδη από τους τρεις πρώτους κύκλους φόρτισης έχουν σταθεροποιηθεί πάνω σε μια γραμμή και η συσσώρευση στροφών και καθιζήσεων δείχνει να είναι αμελητέα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το σύστημα κινείται πάνω στον ελαστικό κλάδο φόρτισης, ακόμα και ύστερα από εκατομμύρια κύκλους φόρτισης και το περιβάλλον έδαφος έχει αμελητέες πλαστικές παραμορφώσεις. Και οι δύο θεμελιώσεις είναι κατάλληλες για την ανεμογεννήτρια των 3.5MW.

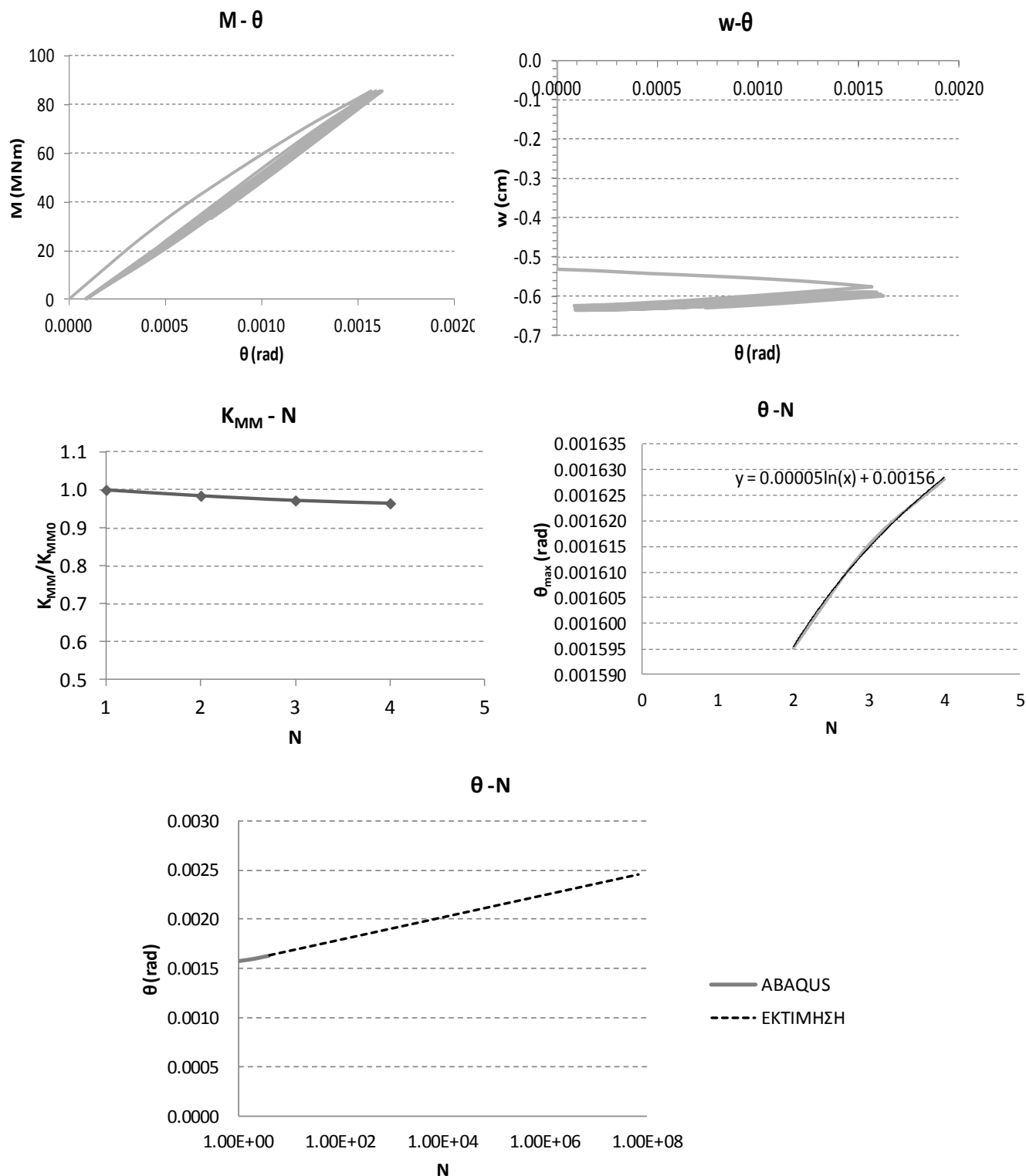
Στην συνέχεια ακολουθούν τρία διαγράμματα με συγκριτικά αποτελέσματα για τους τέσσερις λόγους έμπτυξης σε όρους ροπής-στροφής (στην κορυφή της θεμελίωσης), καθίζησης-στροφής και εκτίμησης μέγιστης στροφής σε μεγάλο αριθμό κύκλων. Σύμφωνα με αυτά τα διαγράμματα τα συμπεράσματα που προαναφέραμε για έναν από τους λόγους έμπτυξης μονοπασσάλου είναι πλέον έκδηλα. Ο λόγος  $L/D=4$  έχει σημαντική απόκλιση στην απόκρισή του σε σύγκριση με τους υπόλοιπους λόγους και τόσο σε όρους καθίζησης όσο και σε όρους στροφής. Να σημειώσουμε ότι και οι τέσσερις λόγοι φτάνουν σχεδόν στο ίδιο σημείο ροπής αφού η ανάλυση έγινε με επιβολή συγκεκριμένης δύναμης, ενώ μικροδιαφορές οφείλονται στα φαινόμενα P-δ που έχουμε λάβει υπόψη. Παρατηρώντας το διάγραμμα εκτίμησης μέγιστης στροφής-αριθμού κύκλων ο λόγο έμπτυξης  $L/D=5$  καταδεικνύει ότι χρήζει περισσότερης διερεύνησης, ενώ θα ήταν υπερβολή να επιλέξουμε τον λόγο  $L/D=7$ , αφού αυτός παρουσιάζει ολόιδια συμπεριφορά με τον  $L/D=6$ .

Τέλος στο **σχήμα 6.14** απεικονίζονται ταυτόχρονα οι μονοτονικές καμπύλες (διακεκομμένη γραμμή) και η ανακυκλική φόρτιση (συμπαγής γραμμή) για τους τέσσερις λόγους έμπτυξης. Οι μονοτονικές καμπύλες είναι αυτές που προέκυψαν για επιβολή οριζόντιας μετακίνησης μέχρι την αστοχία στην κορυφή του πραγματικού ύψους της ανεμογεννήτριας και όχι οι μονοτονικές καμπύλες που περιγράφηκαν στο εδάφιο 6.3. Όπως έχουμε τονίσει ο λόγος λυγιρότητας επιδρά στην μη-γραμμική απόκριση της θεμελίωσης. Για την περίπτωση φόρτισης προερχόμενης μόνο από τον άνεμο ο λόγος αυτός είναι 16 και όχι 6.4 όπως πριν. Στο σχήμα φαίνεται ότι οι λόγοι  $L/D=5,6,7$  βρίσκονται με ασφάλεια στην ελαστική περιοχή του διαγράμματος, ενώ ο λόγος  $L/D=4$  φτάσει πολύ κοντά στην πλαστική περιοχή για μόλις 5 κύκλους φόρτισης.

ΜΟΝΟΠΑΣΣΑΛΟΣ ΜΕ ΛΟΓΟ ΕΜΠΗΞΗΣ L/D=4



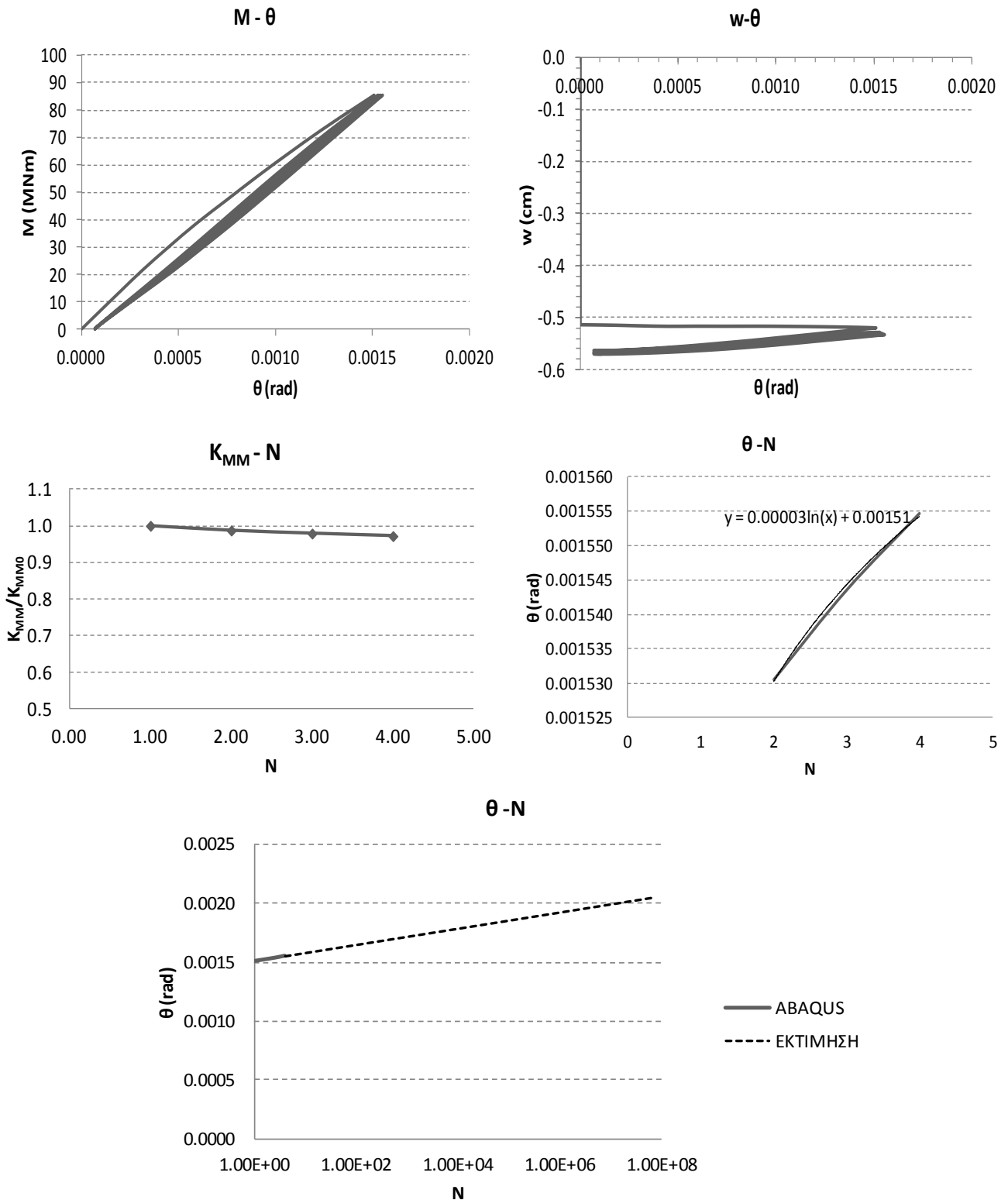
**Σχήμα 6.9:** Από αριστερά προς τα δεξιά απεικονίζονται διαγράμματα σε όρους (α) ροπής-στροφής στην κορυφή της θεμελίωσης, (β) καθίζησης-στροφής, (γ) μεταβολή στροφικής δυσκαμψίας-αριθμού κύκλων  $N$ , (δ) μέγιστη στροφή-αριθμός κύκλων, (ε) εκτίμηση μέγιστης στροφής –αριθμού κύκλων. Τα διαγράμματα αφορούν τον λόγο έμπτυξης  $L/D=4$  και την ανεμογεννήτρια των 3.5MW.

ΜΟΝΟΠΑΣΣΑΛΟΣ ΜΕ ΛΟΓΟ ΕΜΠΗΞΗΣ  $L/D=5$ 

**Σχήμα 6.10:** Από αριστερά προς τα δεξιά απεικονίζονται διαγράμματα σε όρους (α) ροπής-στροφής στην κορυφή της θεμελίωσης, (β) καθίζησης-στροφής, (γ) μεταβολή στροφικής δυσκαμψίας-αριθμού κύκλων  $N$ , (δ) μέγιστη στροφή-αριθμός κύκλων, (ε) εκτίμηση μέγιστης στροφής –αριθμού κύκλων. Τα διαγράμματα αφορούν τον λόγο έμπτυξης  $L/D=5$  και την ανεμογεννήτρια των 3.5MW.

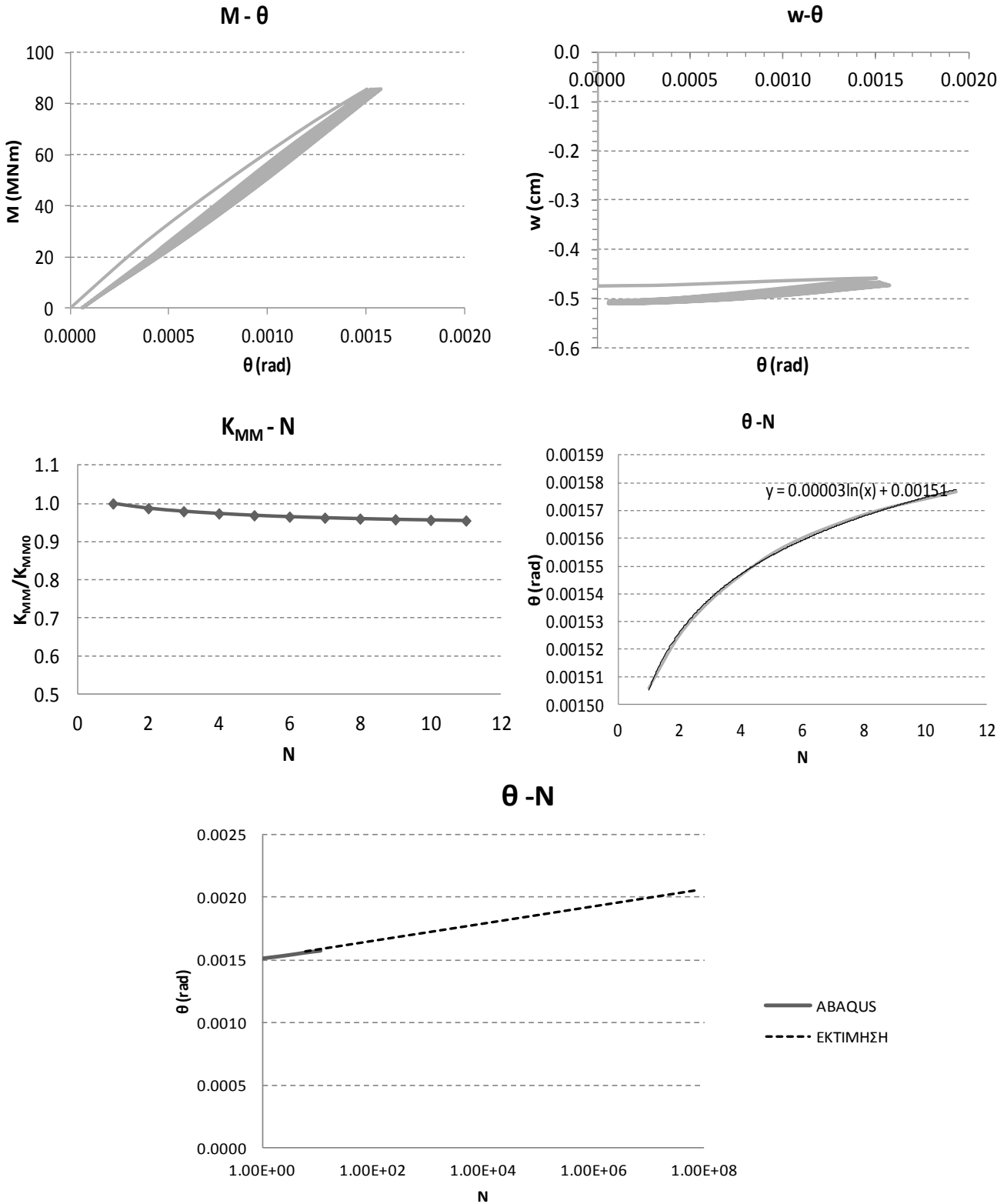


ΜΟΝΟΠΑΣΣΑΛΟΣ ΜΕ ΛΟΓΟ ΕΜΠΗΞΗΣ L/D=6



**Σχήμα 6.11:** Από αριστερά προς τα δεξιά απεικονίζονται διαγράμματα σε όρους (α) ροπής-στροφής στην κορυφή της θεμελίωσης, (β) καθίζησης-στροφής, (γ) μεταβολή στροφικής δυσκαμψίας-αριθμού κύκλων N, (δ) μέγιστη στροφή-αριθμός κύκλων, (ε) εκτίμηση μέγιστης στροφής –αριθμού κύκλων. Τα διαγράμματα αφορούν τον λόγο έμπτυξης L/D=6 και την ανεμογεννήτρια των 3.5MW.

ΜΟΝΟΠΑΣΣΑΛΟΣ ΜΕ ΛΟΓΟ ΕΜΠΗΞΗΣ L/D=7

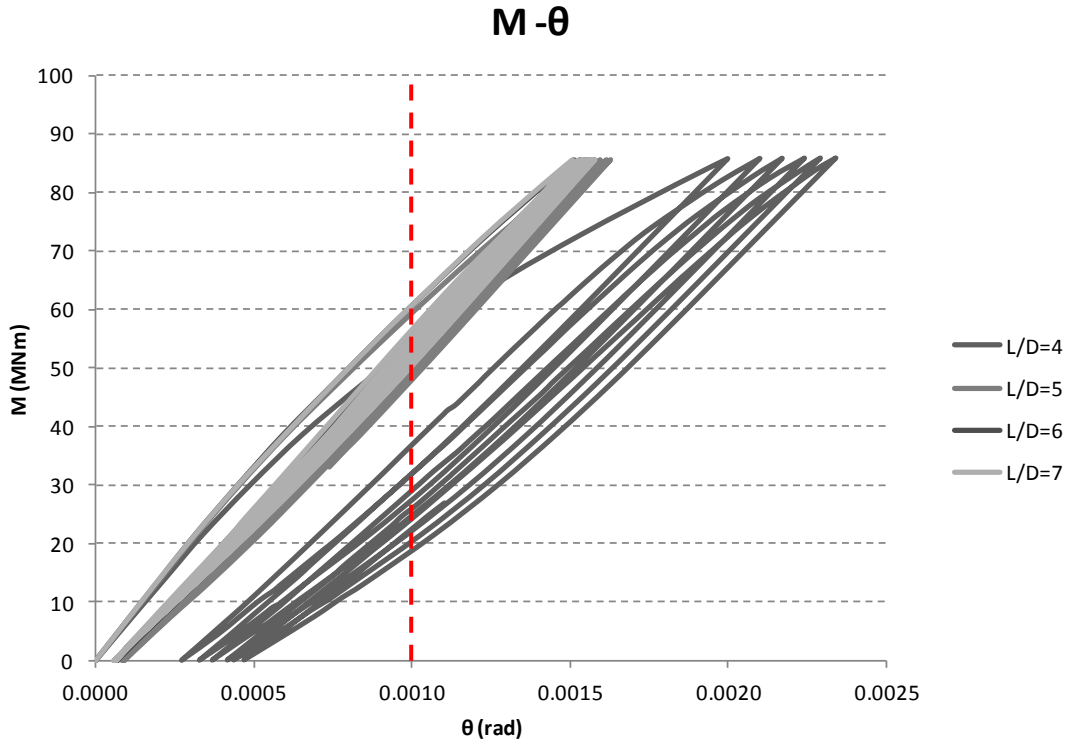


**Σχήμα 6.12:** Από αριστερά προς τα δεξιά απεικονίζονται διαγράμματα σε όρους (α) ροπής-στροφής στην κορυφή της θεμελίωσης, (β) καθίζησης-στροφής, (γ) μεταβολή στροφικής δυσκαμψίας-αριθμού κύκλων  $N$ , (δ) μέγιστη στροφή-αριθμός κύκλων, (ε) εκτίμηση μέγιστης στροφής –αριθμού κύκλων. Τα διαγράμματα αφορούν τον λόγο έμπτυξης  $L/D=7$  και την ανεμογεννήτρια των 3.5MW.

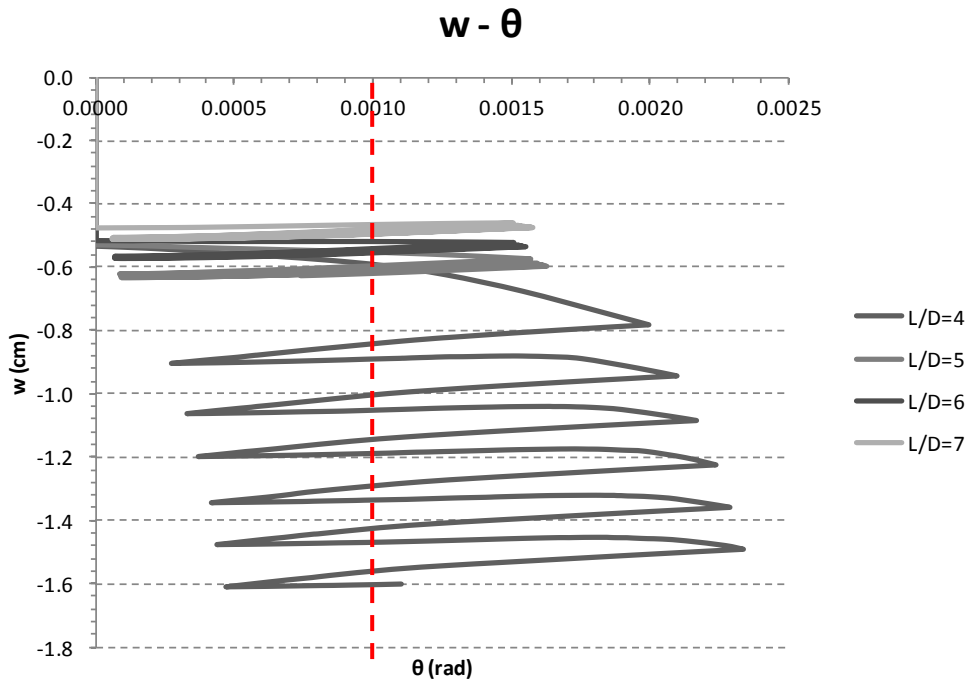
**Συγκεντρωτικά αποτελέσματα:**

Ανεμογεννήτρια: 3.5 MW

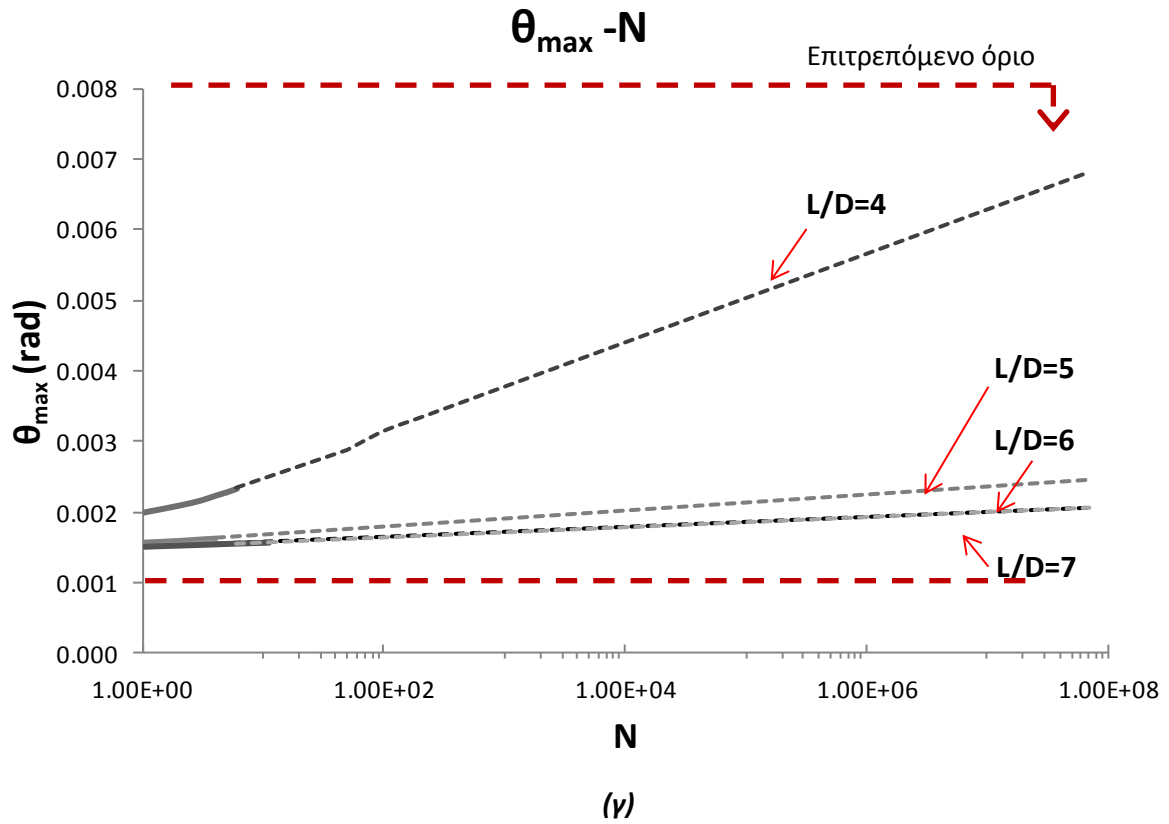
Τύπος φόρτισης: Άνεμος μιας κατεύθυνσης



(α)

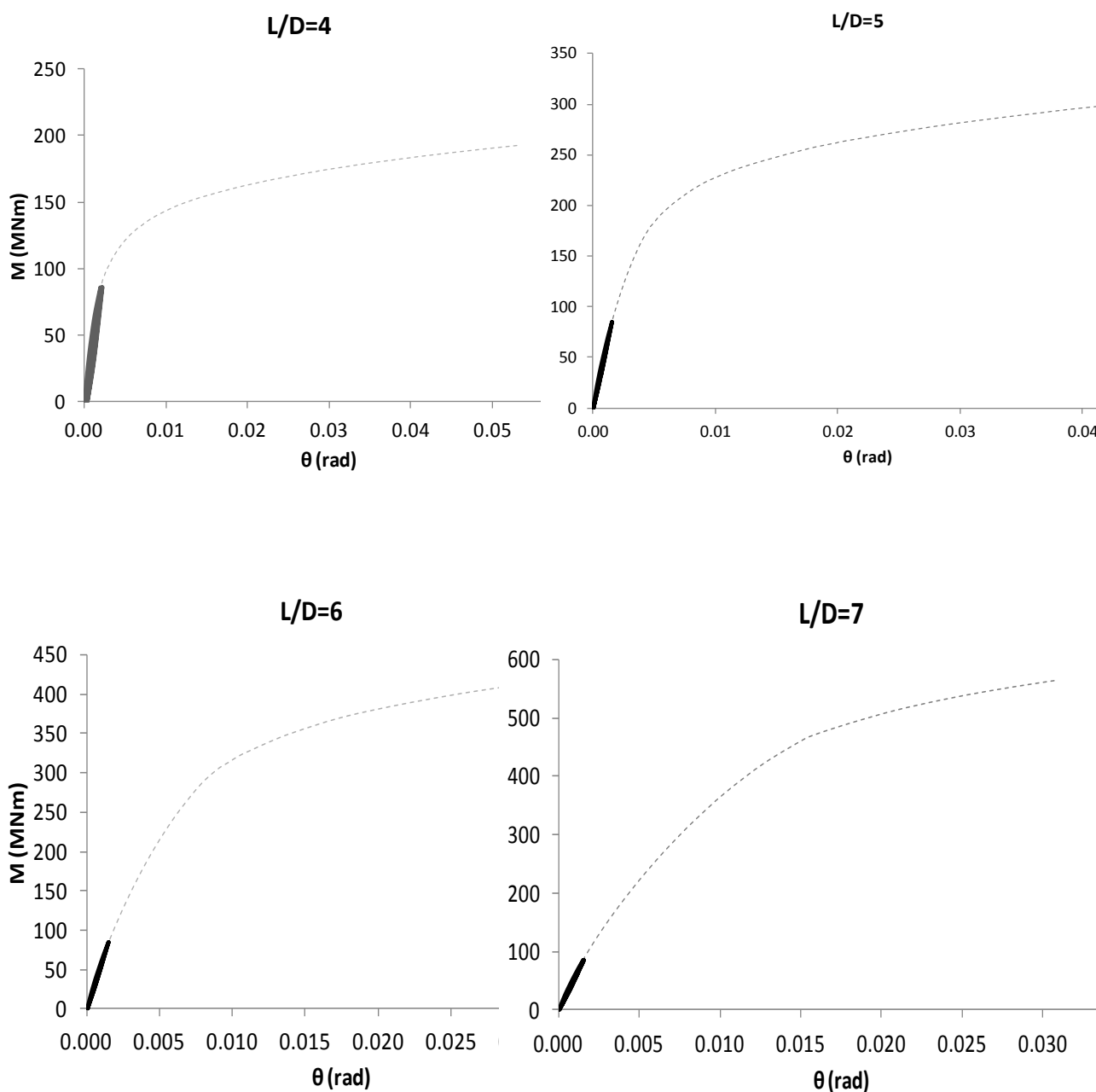


(β)



**Σχήμα 6.13:** Σύγκριση αποτελεσμάτων για τους τέσσερις λόγους έμπτυξης του μονοπασσάλου  $L/D=4,5,6,7$  σε όρους (α) ροπής-στροφής, (β)στροφής-καθίζησης και (γ) εκτίμησης μέγιστης στροφής-αριθμού κύκλων.

## Ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 3.5MW

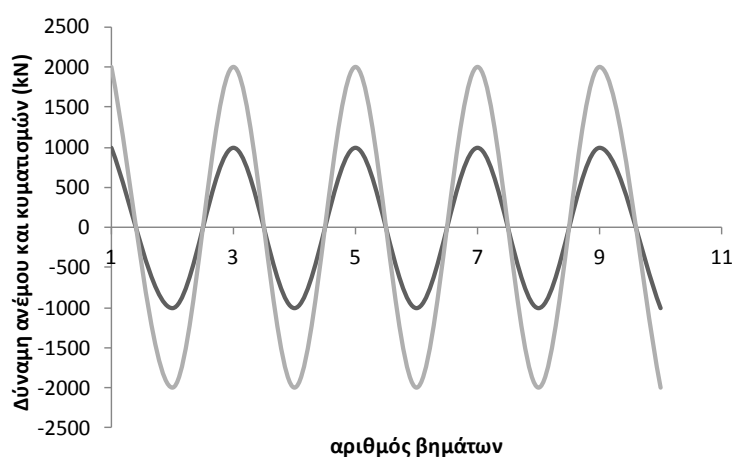


**Σχήμα 6.14:** Σύγκριση αποτελεσμάτων από αναλύσεις μονοτονικής φόρτισης (διακεκομμένη γραμμή και ανακυκλικής φόρτισης (συμπαγής γραμμή) για τους διάφορους λόγους έμπτυξης του μονοπασσάλου. Από δεξιά προς τα αριστερά  $L/D=4, 5, 6$  και  $7$ .

#### 6.4.2 Φόρτιση ανέμου και κυματισμών διπλής κατεύθυνσης

Το δεύτερο σενάριο φόρτισης που εξετάστηκε είναι αυτό της φόρτισης ανέμου και θαλάσσιων κυματισμών διπλής κατεύθυνσης. Η θεώρηση αυτή αποτελεί τον δυσμενή συνδυασμό της ταυτόχρονης δράσης προς την ίδια κατεύθυνση των δυνάμεων του ανέμου, των θαλάσσιων κυματισμών και ρευμάτων και αντιπροσωπεύει το άνω όριο των φορτίων λειτουργικότητας. Θυμίζουμε ότι σύμφωνα με τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης του κεφαλαίου 4, ο μονοπάσσαλος αντέχει μεγαλύτερη ροπή από την  $M_{ult}$  σε περίπτωση ταυτόχρονης αντίρροπης τέμνουσας, ενώ αισθητά μικρότερη σε περίπτωση ομόρροπης τέμνουσας.

Για τις αναλύσεις επιλέχθηκε και εδώ η μέση ανεμογεννήτρια των 3.5MW και χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο με το πλήρες ύψος της ανωδομής. Επιβλήθηκε στο ύψος του ρότορα η οριζόντια δύναμη του ανέμου και στο κέντρο άσκησης των κυματισμών η οριζόντια δύναμη των θαλάσσιων κυματισμών σύμφωνα με τους υπολογισμούς που αναφέρονται στο εδάφιο 6.2. Η επιβολή των δυνάμεων έγινε σε βήματα εναλλασσόμενου πρόσημου, όπως φαίνονται στο **σχήμα 6. 15**.



**Σχήμα 6.15:** Επιβολή δύναμης ανέμου και θαλάσσιων κυματισμών σε διαδοχικά βήματα.

Στα **σχήματα 6.16-6.19** που ακολουθούν απεικονίζονται ξεχωριστά για κάθε λόγο έμπηξης τα εξής διαγράμματα από πάνω προς τα κάτω: (α) ροπής-στροφής στην κορυφή της θεμελίωσης, (β) καθίζησης-στροφής, (γ) σύγκριση μονοτονικής (διακεκομμένη γραμμή) και ανακυκλικής (συμπαγής γραμμή) φόρτισης. Σημειώνεται ότι στο διάγραμμα (α) απεικονίζεται με διακεκομμένη γραμμή το διάγραμμα ροπής στροφής που προέκυψε από την φόρτιση ανέμου μίας κατεύθυνσης για λόγους σύγκρισης.

Πιο συγκεκριμένα, για τον λόγο έμπηξης  $L/D=4$  παρατηρούμε ότι με ταυτόχρονη δράση του ανέμου και των κυματισμών η θεμελίωση εισέρχεται στον πλαστικό κλάδο της μονοτονικής φόρτισης με αποτέλεσμα να εμφανίζονται στο έδαφος έντονες πλαστικοποιήσεις και δημιουργία μόνιμου κενού γύρω από τον μονοπάσσαλο (scour). Η συμπεριφορά αυτή θα επιδεινώνεται με την πάροδο των κύκλων μέχρι να οδηγηθεί το σύστημα εδάφους-θεμελίου σε αστοχία. Ακόμα και σε όρους καθίζησης, η απόκριση του μονοπασσάλου δεν είναι ικανοποιητική, καθώς έχει καθιζάνει 4.5cm έχοντας ολοκληρώσει ένα μόλις κύκλο. Συγκρίνοντας την απόκριση της

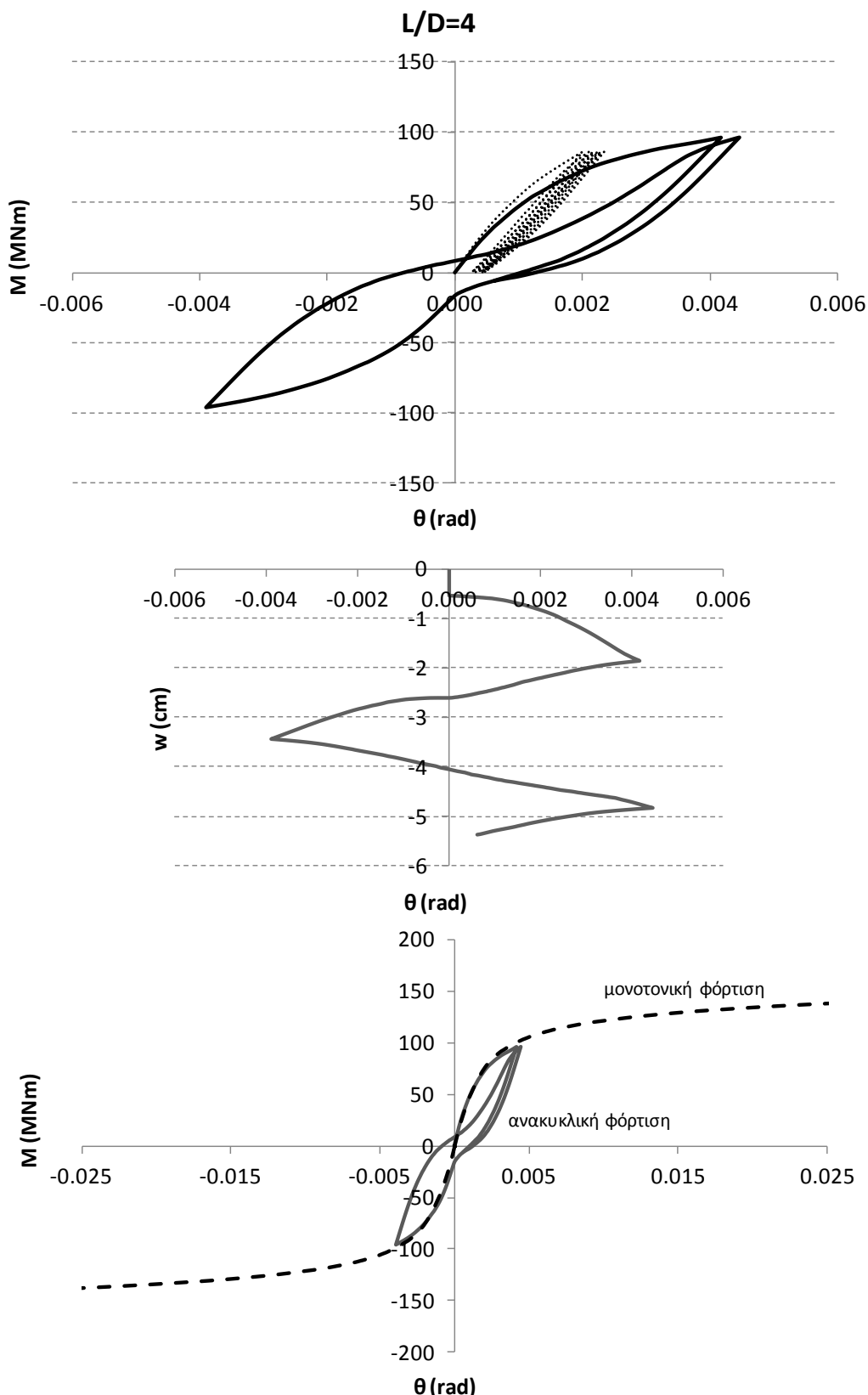
θεμελίωσης στα δύο διαφορετικά σενάρια φόρτισης, βλέπουμε ότι υπό την δράση μόνο του ανέμου δεν ήταν δυνατόν να απορρίψουμε αυτόν τον λόγο έμπηξης όπως εξηγήσαμε στο εδάφιο 6.4.1, όμως με το δυσμενέστερο δεύτερο σενάριο φόρτισης έγινε εξ αρχής φανερό ο λόγος έμπηξης  $L/D=4$  είναι ανεπαρκής.

Οι λόγοι έμπηξης  $L/D=5,6,7$  παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά. Σε όρους στροφής παραμένουν σε ανεκτά όρια ( $\theta < 0.009$  rad), η καθίζηση είναι αμελητέα και σε σύγκριση με την μονοτονική φόρτιση βρίσκονται στην ελαστική περιοχή του διαγράμματος. Φυσικά, όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος έμπηξης τόσο καλύτερη είναι η απόκριση του μονοπασσάλου. Για να αποφανθούμε ποιος από τους τρεις λόγους είναι καταλληλότερος για την μεσαία ανεμογεννήτριας, θα πρέπει να εξετάσουμε το σύστημα και στο τρίτο σενάριο φόρτισης και φυσικά να λάβουμε υπόψη ότι σε όρους ροπής ο συντελεστής ασφαλείας ( $FS_M$ ) λαμβάνεται τουλάχιστον ίσος με 2.

Στο **σχήμα 6.20** παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα σε όρους ροπής-στροφής και σε όρους στροφής-καθίζησης. Στα δύο αυτά σχήματα φαίνονται ξεκάθαρα τα συμπεράσματα που προαναφέρθηκαν. Ο μονοπάσσαλος με λόγο έμπηξης  $L/D=4$  αποκλίνει σημαντικά από τους υπόλοιπους τρεις λόγους τόσο σε όρους παραμένουσας στροφής, όσο και σε όρους καθίζησης.

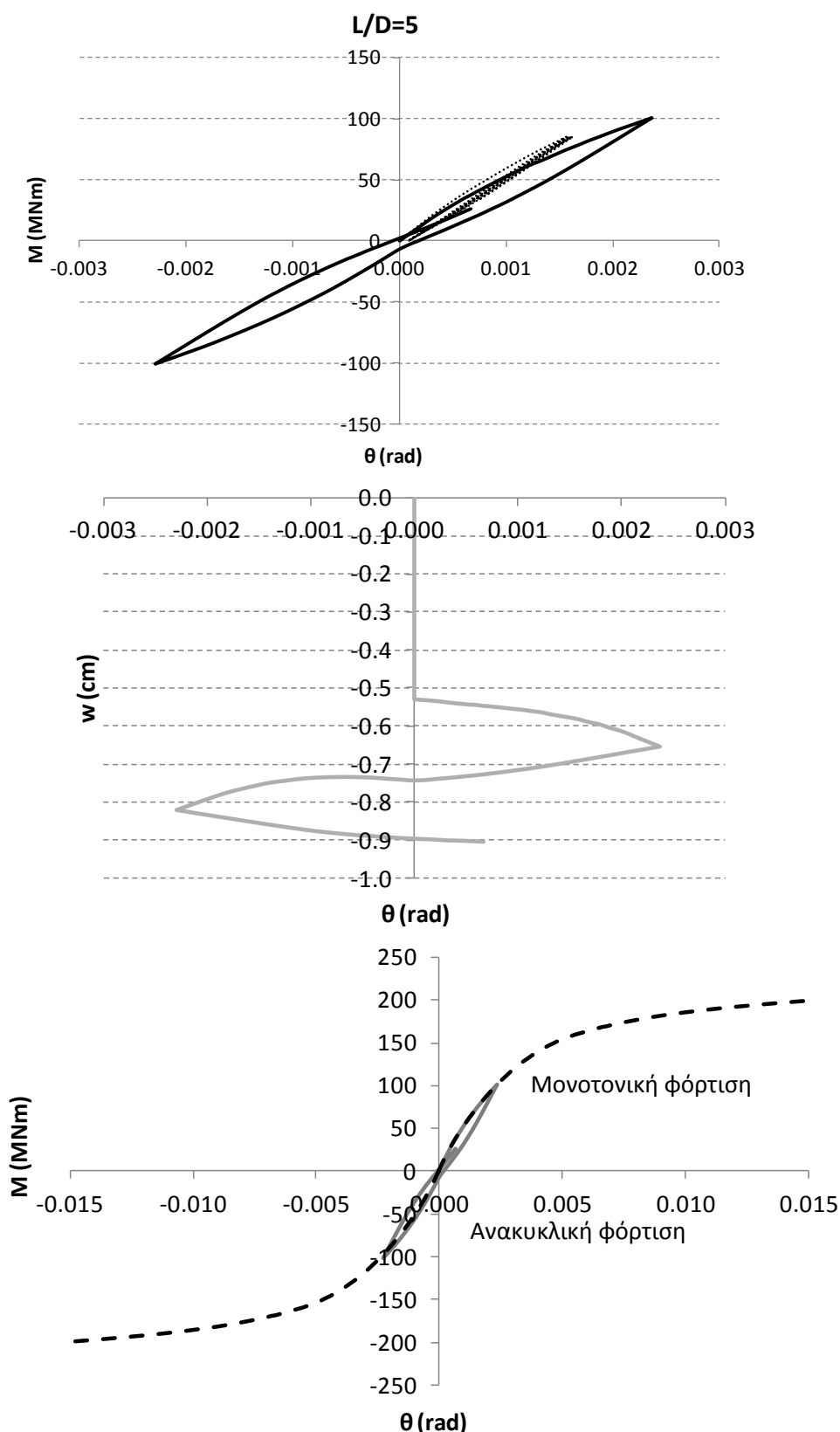
Τέλος, στο **σχήμα 6.21** απεικονίζονται οι πλαστικές παραμορφώσεις του εδάφους σε διαφορετικά στάδια. Παρατηρούμε έντονα την συμπεριφορά του μονοπασσάλου κατά την διάρκεια της φόρτισης-αποφόρτισης-επαναφόρτισης. Ανάλογα με την φορά άσκησης των φορτίων οι πλαστικές παραμορφώσεις του εδάφους εντείνονται από την μια ενώ από την άλλη πλευρά τείνουν να αποφορτιστούν, όχι όμως πλήρως.

Τέλος στο **σχήμα 6.21** φαίνεται η δημιουργία μόνιμου κενού γύρω από την κορυφή του μονοπασσάλου (scour). Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο σε συνεκτικά αργιλικά εδάφη, καθώς σε αμμώδης σχηματισμούς η απουσία συνεκτικών δυνάμεων ανάμεσα στους κόκκους του εδαφικού υλικού οδηγεί στην πλήρωση του κενού κατά την αποφόρτιση. Στην εικόνα 6. (γ) το σύστημα φορτίζεται προς τα αριστερά, στην συνέχεια επανέρχεται στην αρχική θέση ισορροπίας (δ) και στο τέλος φορτίζεται προς τα δεξιά (ε). Και στα τρία στάδια παρατηρούμε το κενό γύρω από την θεμελίωση και τις μόνιμες πλαστικές παραμορφώσεις. Ακόμα και η πιο μικρή μετακίνηση, σε μεγάλο αριθμό κύκλων οδηγεί στην συσσώρευση σημαντικών παραμορφώσεων.

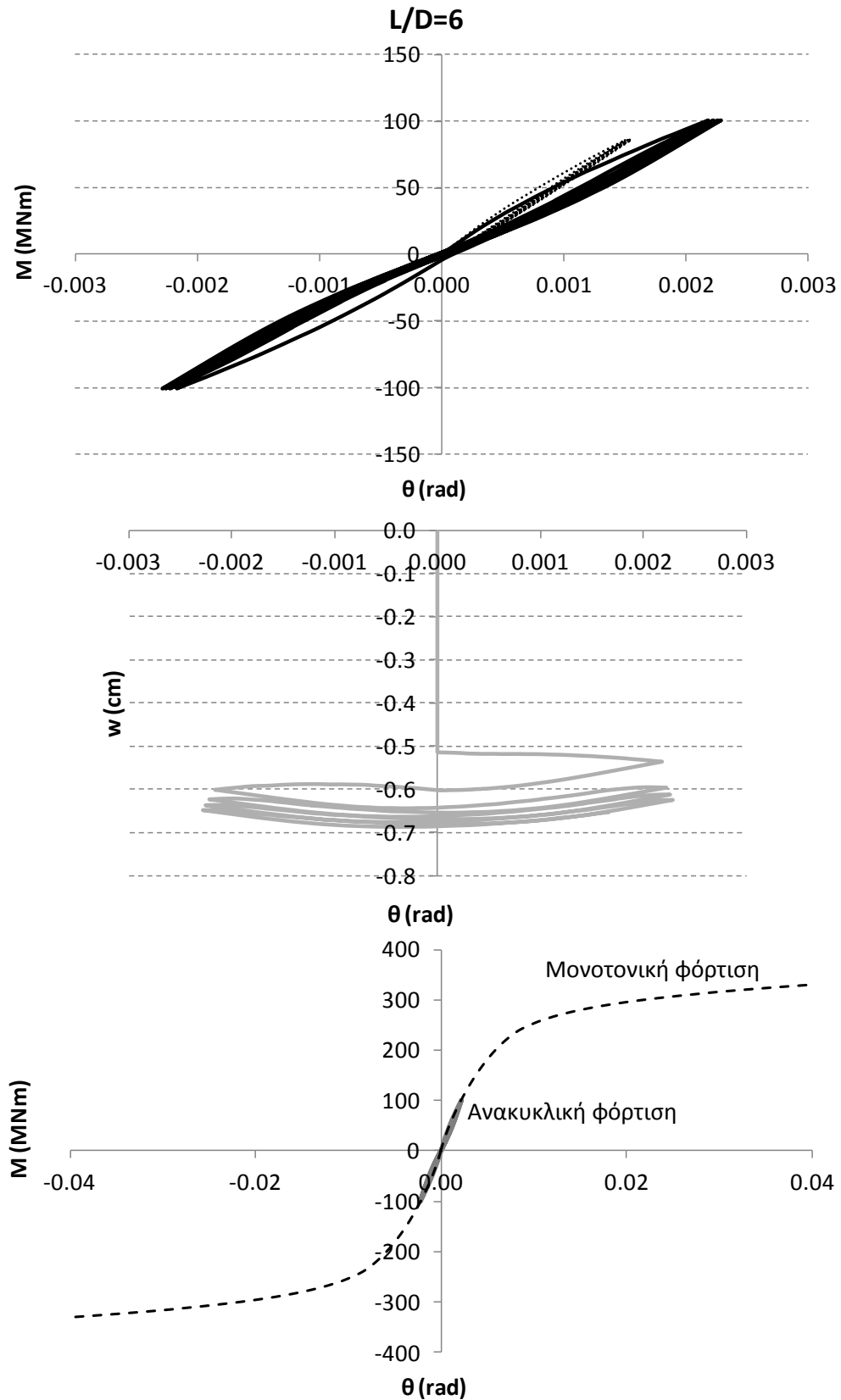


**Σχήμα 6.16:** Από πάνω προς τα κάτω απεικονίζονται διαγράμματα σε όρους (α) ροπής-στροφής στην κορυφή της θεμελίωσης (με διακεκομμένη γραμμή απεικονίζεται η φόρτιση ανέμου μιας κατεύθυνσης), (β) καθίζησης-στροφής, (γ) σύγκριση μονοτονικής φόρτισης (διακεκομμένη γραμμή) και ανακυκλικής φόρτισης (συμπαγής γραμμή). Τα διαγράμματα αφορούν τον λόγο έμπτυξης  $L/D=4$  και την ανεμογεννήτρια των 3.5MW.

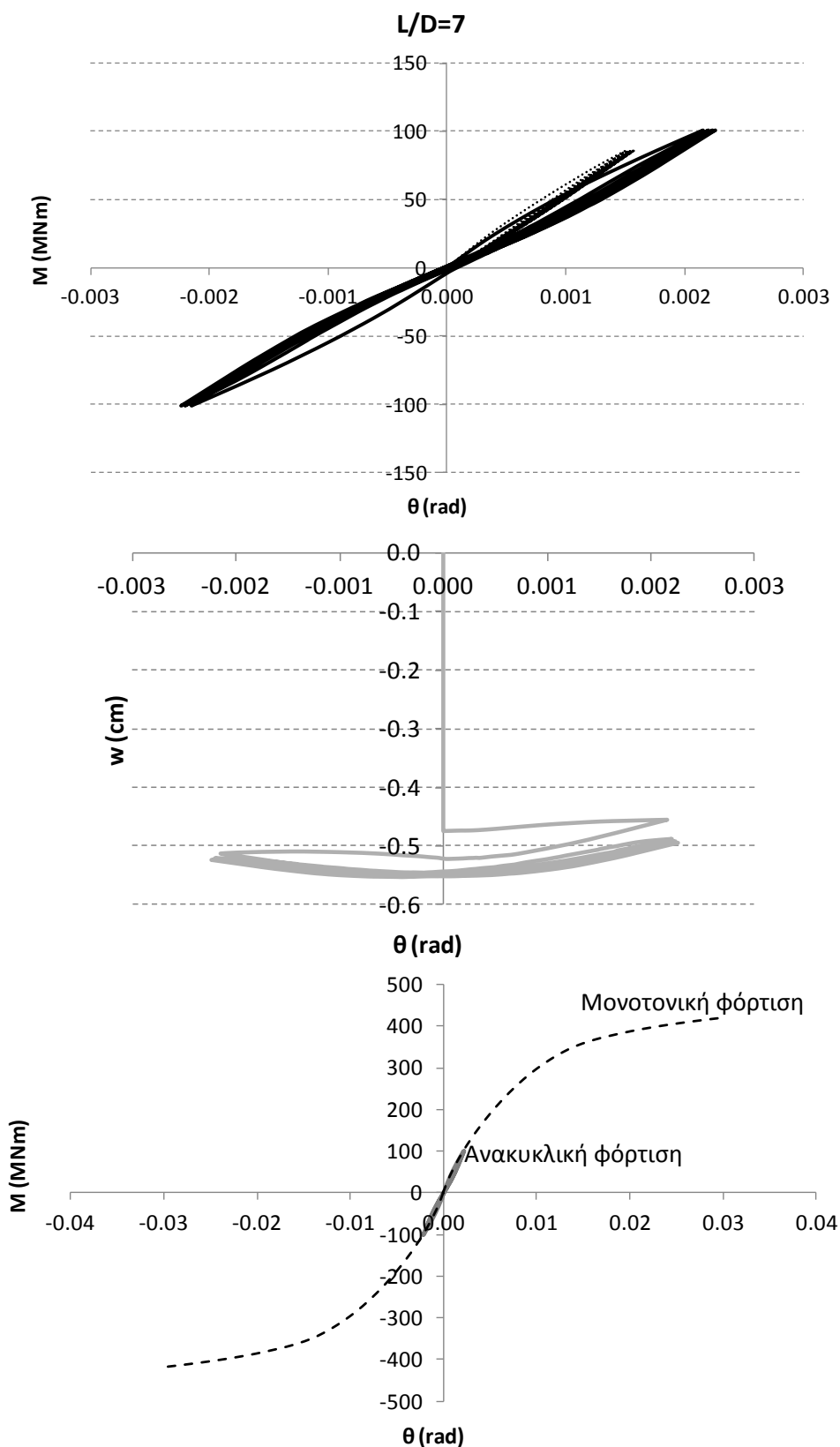




**Σχήμα 6.17:** Από πάνω προς τα κάτω απεικονίζονται διαγράμματα σε όρους (α) ροπής-στροφής στην κορυφή της θεμελίωσης (με διακεκομμένη γραμμή απεικονίζεται η φόρτιση ανέμου μιας κατεύθυνσης), (β) καθίζησης-στροφής, (γ) σύγκριση μονοτονικής φόρτισης (διακεκομμένη γραμμή) και ανακυκλικής φόρτισης (συμπαγής γραμμή). Τα διαγράμματα αφορούν τον λόγο έμπτυξης  $L/D=5$  και την ανεμογεννήτρια των 3.5MW.



**Σχήμα 6.18:** Από πάνω προς τα κάτω απεικονίζονται διαγράμματα σε όρους (α) ροπής-στροφής στην κορυφή της θεμελίωσης (με διακεκομμένη γραμμή απεικονίζεται η φόρτιση ανέμου μιας κατεύθυνσης), (β) καθίζησης-στροφής, (γ) σύγκριση μονοτονικής φόρτισης (διακεκομμένη γραμμή) και ανακυκλικής φόρτισης (συμπαγής γραμμή). Τα διαγράμματα αφορούν τον λόγο έμπηξης  $L/D=6$  και την ανεμογεννήτρια των 3.5MW.

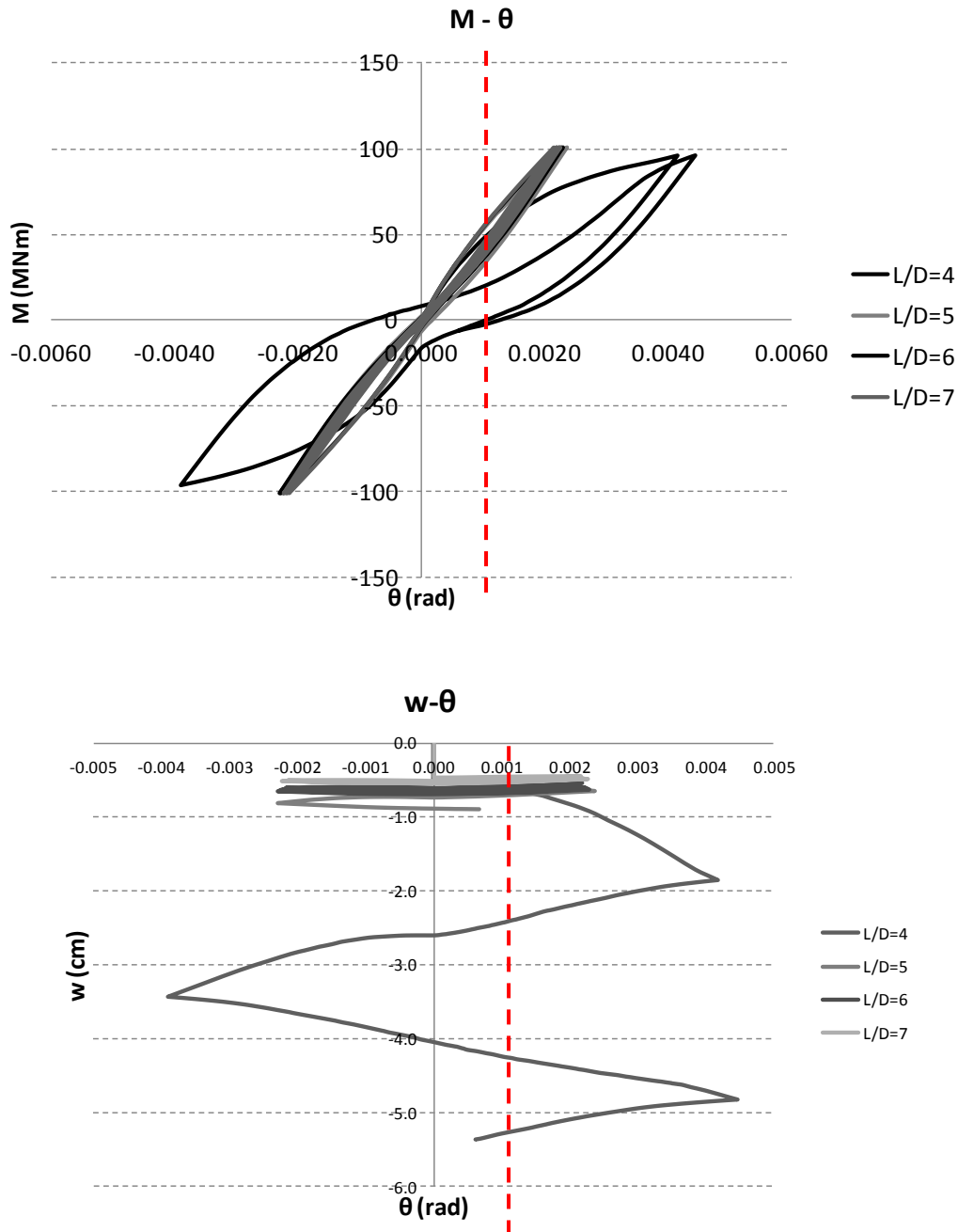


**Σχήμα 6.19:** Από πάνω προς τα κάτω απεικονίζονται διαγράμματα σε όρους (α) ροπής-στροφής στην κορυφή της θεμελίωσης (με διακεκομμένη γραμμή απεικονίζεται η φόρτιση ανέμου μιας κατεύθυνσης), (β) καθίζησης-στροφής, (γ) σύγκριση μονοτονικής φόρτισης (διακεκομμένη γραμμή) και ανακυκλικής φόρτισης (συμπαγής γραμμή). Τα διαγράμματα αφορούν τον λόγο έμπτυξης  $L/D=7$  και την ανεμογεννήτρια των 3.5MW.

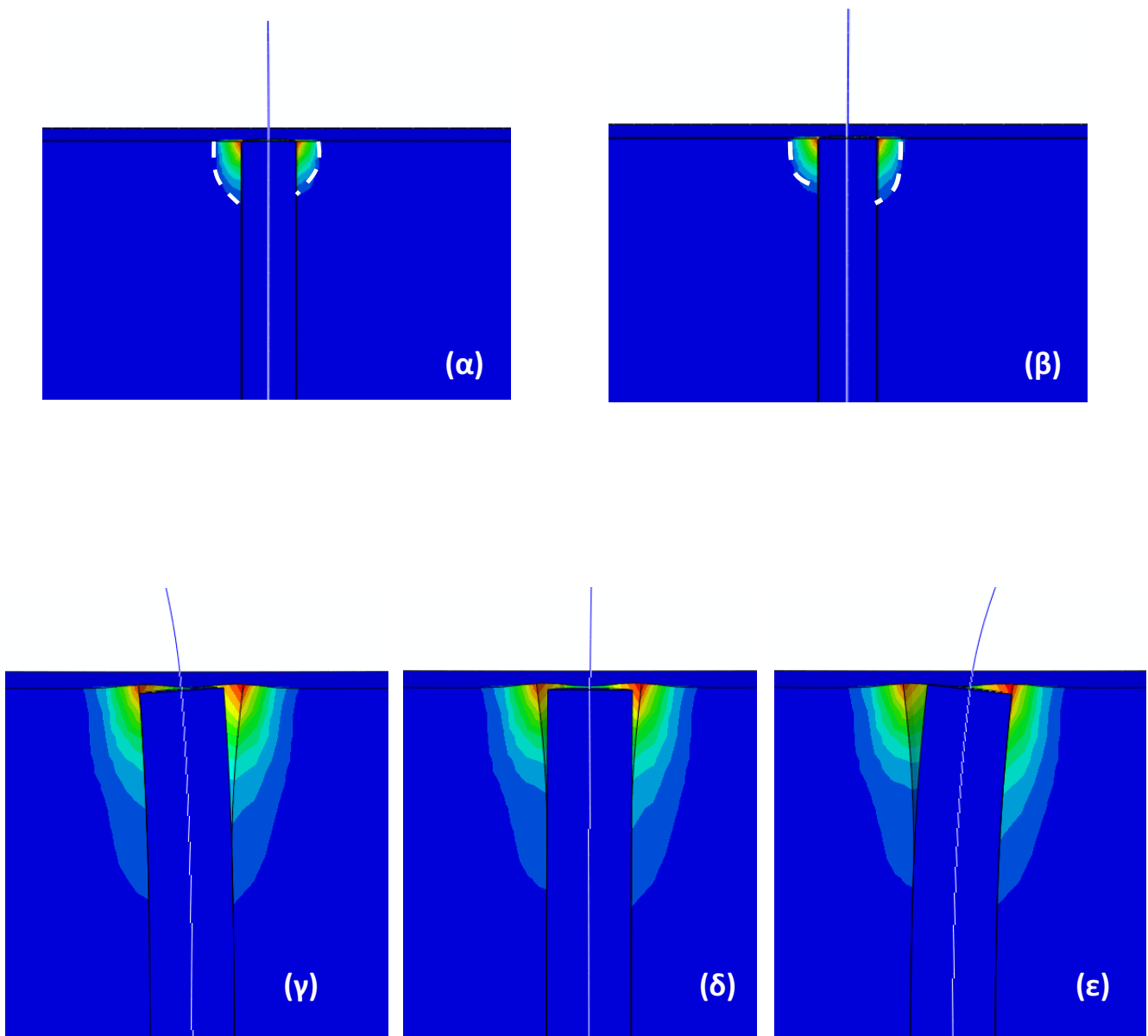
### Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα

Ανεμογεννήτρια: 3.5 MW

Τύπος φόρτισης: Άνεμος και θαλάσσιοι κυματισμοί και ρεύματα διπλής κατεύθυνσης



**Σχήμα 6.20:** Σύγκριση αποτελεσμάτων για τους τέσσερις λόγους έμπτυξης του μονοπασσάλου  $L/D=4,5,6,7$  σε όρους (α) ροπής-στροφής, και (β) στροφής-καθίζησης.

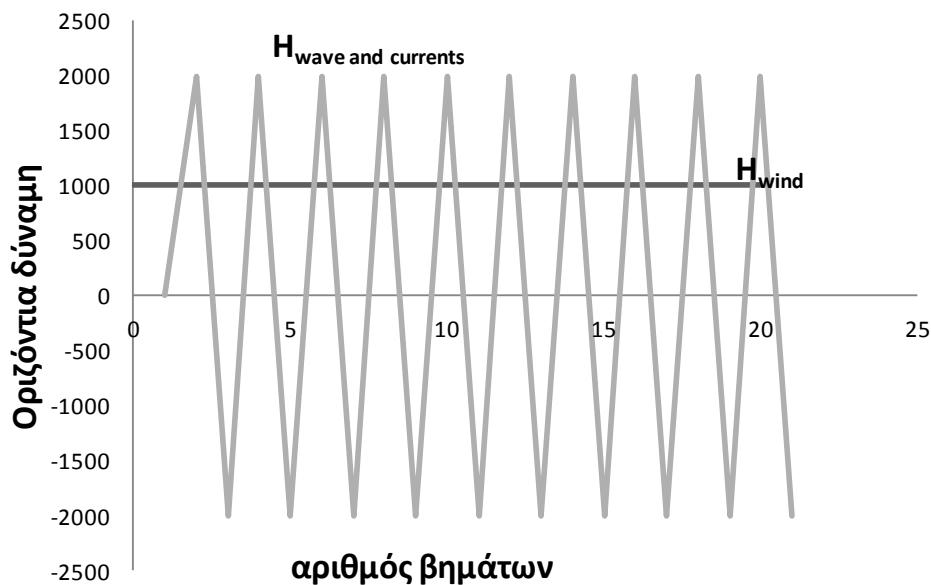


**Σχήμα 6.21 :** Πλαστικές παραμορφώσεις εδάφους για φόρτιση (α) προς τα αριστερά και (β) προς τα δεξιά. (γ)+(δ)-(ε) Σταδιακή δημιουργία κενού γύρω από την κορυφή του μονοπασάλου (scour).

### 6.4.3 Φόρτιση ανέμου μιας κατεύθυνσης και φόρτιση θαλάσσιων κυματισμών διπλής κατεύθυνσης

Στο τρίτο σενάριο φόρτισης θεωρήθηκε άνεμος μίας σταθερής κατεύθυνσης και κυματισμός διπλής κατεύθυνσης. Η περίπτωση αυτή είναι η δυσμενέστερη, καθώς η ανεμογεννήτρια υποβάλλεται σε έκκεντρη ταλάντωση λόγω των φορτίων των κυματισμών. Κατά την ανάλυση λάβαμε υπόψη τα φαινόμενα P-δ, καθώς η μάζα του ρότορα έχει εκτραπεί από την κατακόρυφη διεύθυνση με αποτέλεσμα να δημιουργεί στην βάση μια επιπλέον ροπή. Αυτή η περίπτωση της φόρτισης είναι και η συνηθέστερή κατά την διάρκεια ζωής του έργου, αφού οι θαλάσσιοι κυματισμοί έχουν περίοδο της τάξης των 10sec, ενώ ο άνεμος παραμένει σταθερός προς μια κατεύθυνση για πολύ μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (>10min).

Οι αναλύσεις έγιναν για το σύνολο των ανεμογεννητριών (2, 3.5, 5MW) με σκοπό την ανάδειξη του βέλτιστου λόγου έμπηξης για κάθε ανεμογεννήτρια. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η επιβολή της δύναμης του ανέμου στο ύψος της κορυφής και στην συνέχεια η επιβολή της δύναμης των κυματισμών με συνεχόμενα βήματα εναλλασσόμενου πρόσημου (σχήμα 6.22).



Σχήμα 6.22: Επιβολή δύναμης ανέμου και θαλάσσιων κυματισμών σε διαδοχικά βήματα.

Τα **σχήματα 6.23- 6.26** που ακολουθούν αφορούν την μικρή ανεμογεννήτρια των 2MW που είναι σχετικά ελαφρά φορτισμένη, ωστόσο χαμηλής απόδοσης. Για κάθε λόγο έμπηξης απεικονίζονται τα εξής διαγράμματα από αριστερά προς τα δεξιά: (α) ροπής-στροφής στην κορυφή της θεμελίωσης, (β) καθίζησης-στροφής, (γ) μεταβολής στροφικής δυσκαμψίας συναρτήσει των κύκλων φόρτισης, (δ) μέγιστη στροφή συναρτήσει του αριθμού των κύκλων φόρτισης, (ε) λογαριθμική πρόβλεψη μέγιστων στροφών σε μεγάλο αριθμό κύκλων.

Στην συνέχεια παρατίθενται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τους τέσσερις λόγους έμπηξης σε όρους ροπής-στροφής, καθίζησης-στροφής καθώς και η λογαριθμική πρόβλεψη των μέγιστων στροφών σε 100.000.000 κύκλους. Ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων και η επιλογή της καταλληλότερης θεμελίωσης θα γίνει κατευθείαν από τα συγκεντρωτικά διαγράμματα.

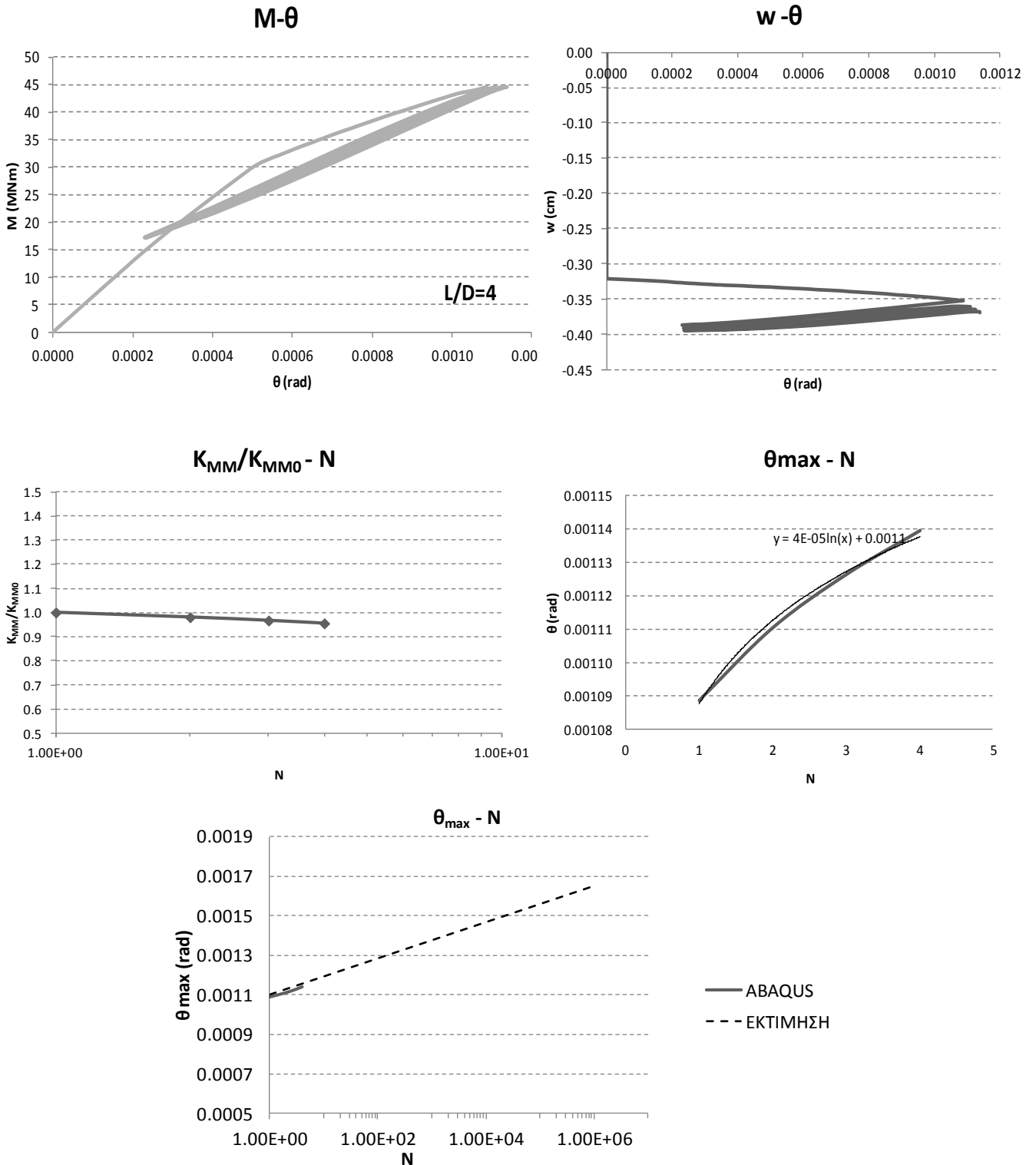
Όπως παρατηρούμε η συμπεριφορά και των τεσσάρων θεμελιώσεων είναι ικανοποιητική και κινείται μέσα στα προβλεπόμενα όρια σχεδιασμού. Σε μικρό αριθμό κύκλων (20 κύκλοι) η στροφή φτάνει μόλις το πρώτο όριο των 0.001rad, ενώ όπως προβλέπεται σε πολύ μεγάλο αριθμό κύκλων η μέγιστη στροφή για την μικρότερη θεμελίωσης ( $L/D=4$ ) είναι της τάξης των  $\theta=0.0017$ , στροφή που απέχει κατά πολύ από το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο των  $\theta_{max}=0.009rad$ .

Σε όρους καθίζησης, η συμπεριφορά είναι εξίσου ικανοποιητική καθώς καμία από τις τέσσερις θεμελιώσεις δεν υπερβαίνει καν το 1cm καθίζησης. Το άνω επιτρεπόμενο όριο είναι για την καθίζηση είναι  $w=0.05D$ , δηλαδή  $w=0.25m$ .

Για την τελική επιλογή, όμως της θεμελίωσης θα πρέπει να λάβουμε υπόψη και τον συντελεστή ασφαλείας έναντι ροπής. Συνήθως η τιμή του λαμβάνεται ίση με 2. Στο **σχήμα 6.27** γίνεται σύγκριση μονοτονικής και ανακυκλικής φόρτισης σε όρους ροπής-στροφής. Για τον μονοπάσσαλο με τον λόγο έμπηξης  $L/D=4$ , η ροπή με συντελεστή ασφαλείας 2 βρίσκεται στον πλαστικό κλάδο του μονοτονικού διαγράμματος, γεγονός που υποδηλώνει την έντονη πλαστικοποίηση του εδάφους και την συσσώρευση μεγάλων μόνιμων στροφών.

Για τους λόγους αυτούς η θεμελίωση αυτή απορρίπτεται και επιλέγεται τελικά ο μονοπάσσαλος με λόγο έμπηξης  $L/D=5$ . Ο τελευταίος ικανοποιεί όλα τα κριτήρια σχεδιασμού και η ροπή με συντελεστή ασφαλείας 2 βρίσκεται με ασφάλεια στον ελαστικό κλάδο του μονοτονικού διαγράμματος. Θα ήταν υπερβολή και αντιοικονομικό να θεμελιώσουμε την μικρή ανεμογεννήτρια σε μονοπάσσαλο με λόγο έμπηξης  $L/D=6$  ή 7.

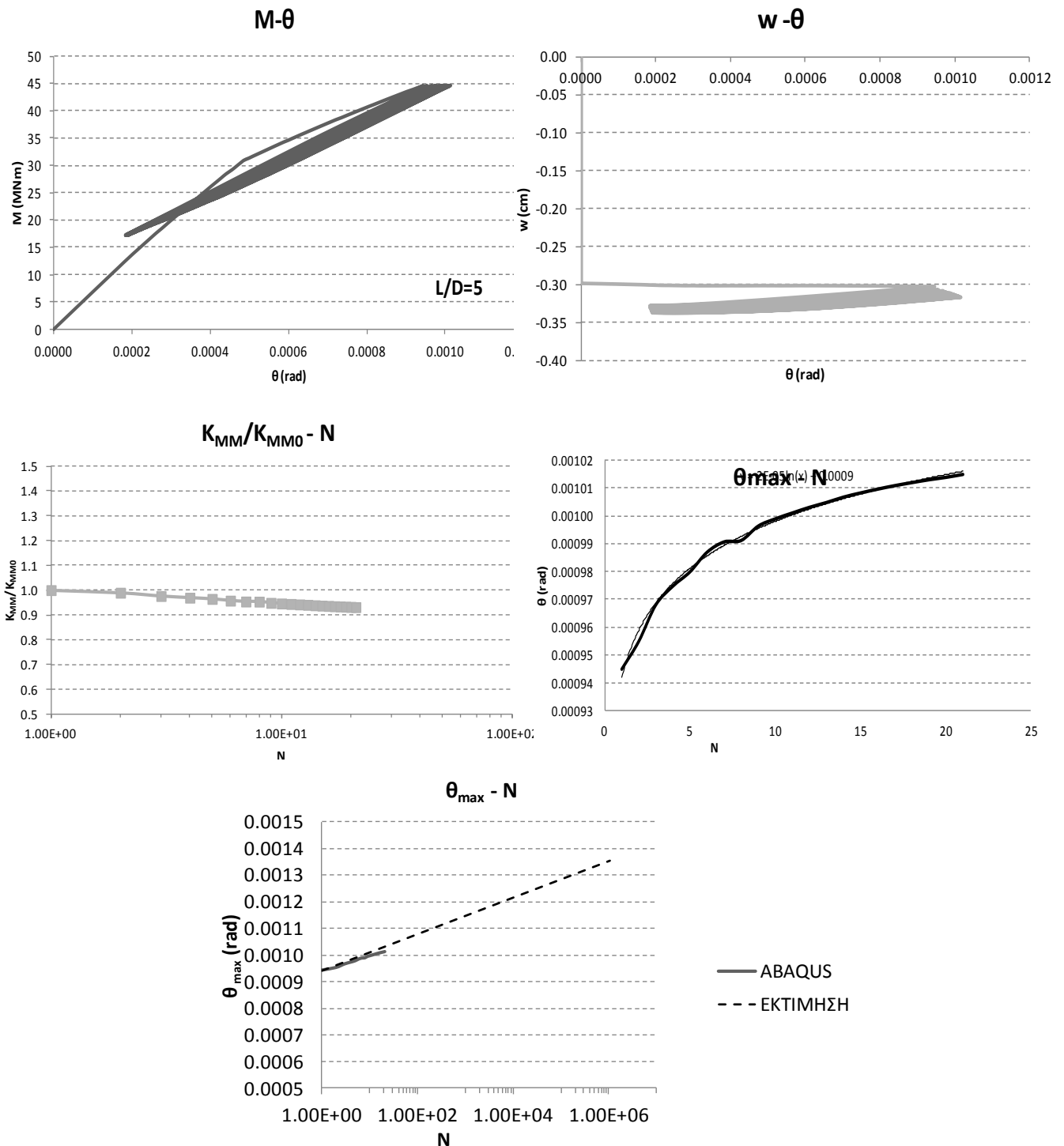
**Ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 2 MW  
Λόγος έμπτυξης μονοπασάλου L/D=4**



**Σχήμα 6.23:** Από αριστερά προς τα δεξιά απεικονίζονται διαγράμματα σε όρους (α) ροπής-στροφής στην κορυφή της θεμελίωσης, (β) καδίζησης-στροφής, (γ) μεταβολή στροφοκίνας-αριθμού κύκλων  $N$ , (δ) μέγιστη στροφή-αριθμός κύκλων, (ε) εκτίμηση μέγιστης στροφής –αριθμού κύκλων. Τα διαγράμματα αφορούν τον λόγο έμπτυξης  $L/D=4$  και την ανεμογεννήτρια των 2 MW.

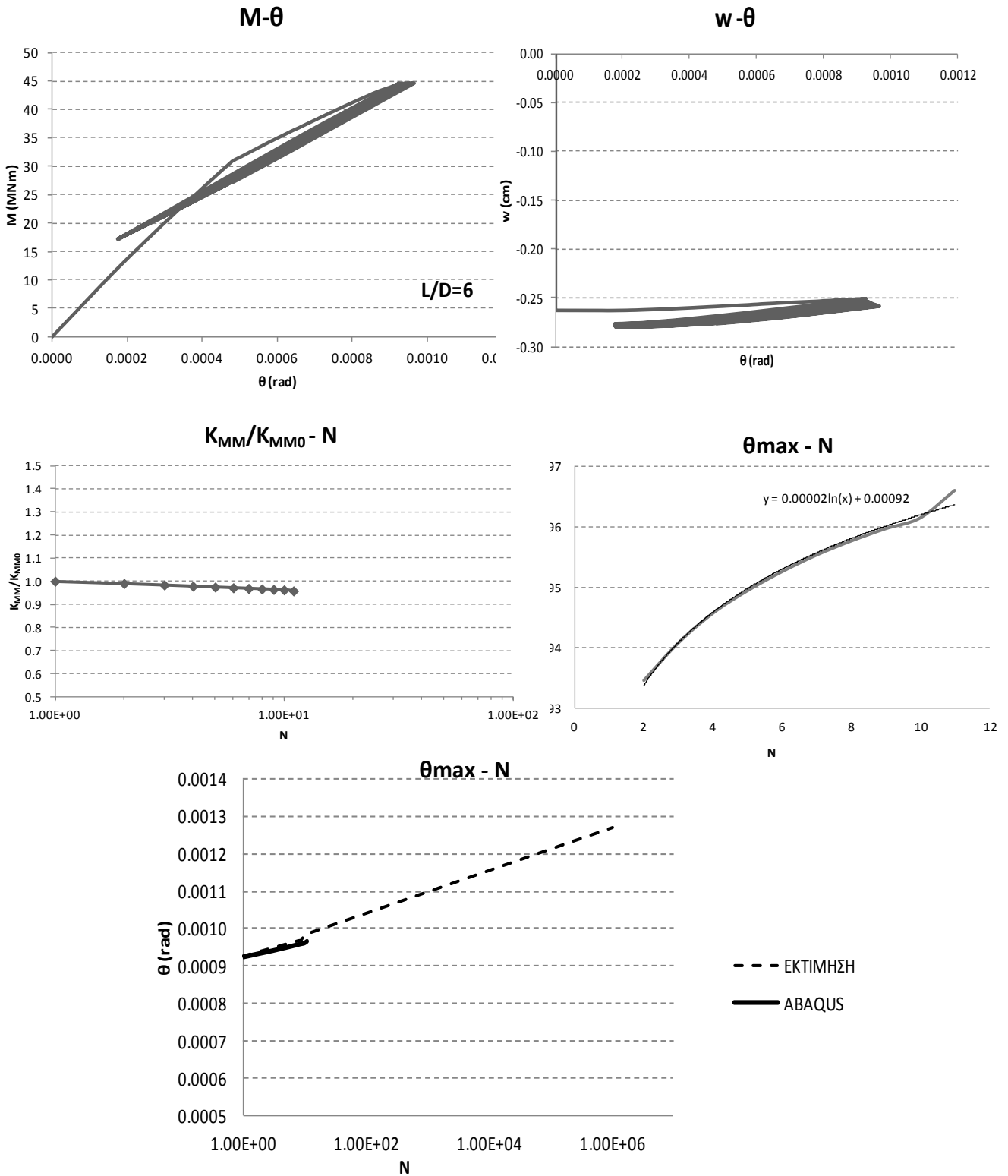


Ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 2 MW  
 Λόγος έμπτυξης μονοπασσάλου L/D=5



**Σχήμα 6.24:** Από αριστερά προς τα δεξιά απεικονίζονται διαγράμματα σε όρους (α) ροπής-στροφής στην κορυφή της θεμελίωσης, (β) καθίζησης-στροφής, (γ) μεταβολή στροφικής δυσκαμψίας-αριθμού κύκλων  $N$ , (δ) μέγιστη στροφή-αριθμός κύκλων, (ε) εκτίμηση μέγιστης στροφής –αριθμού κύκλων. Τα διαγράμματα αφορούν τον λόγο έμπτυξης  $L/D=5$  και την ανεμογεννήτρια των 2 MW.

**Ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 2 MW  
Λόγος έμπτυξης μονοπασσάλου L/D=6**

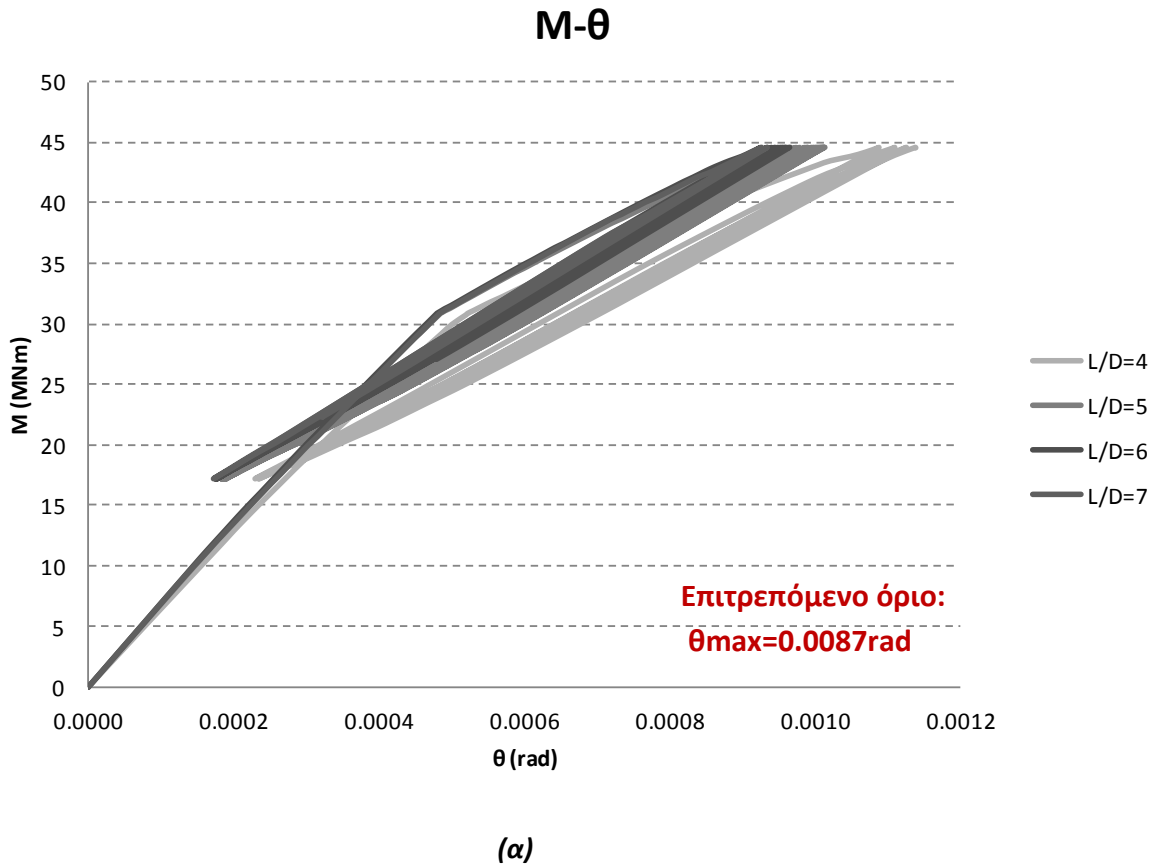


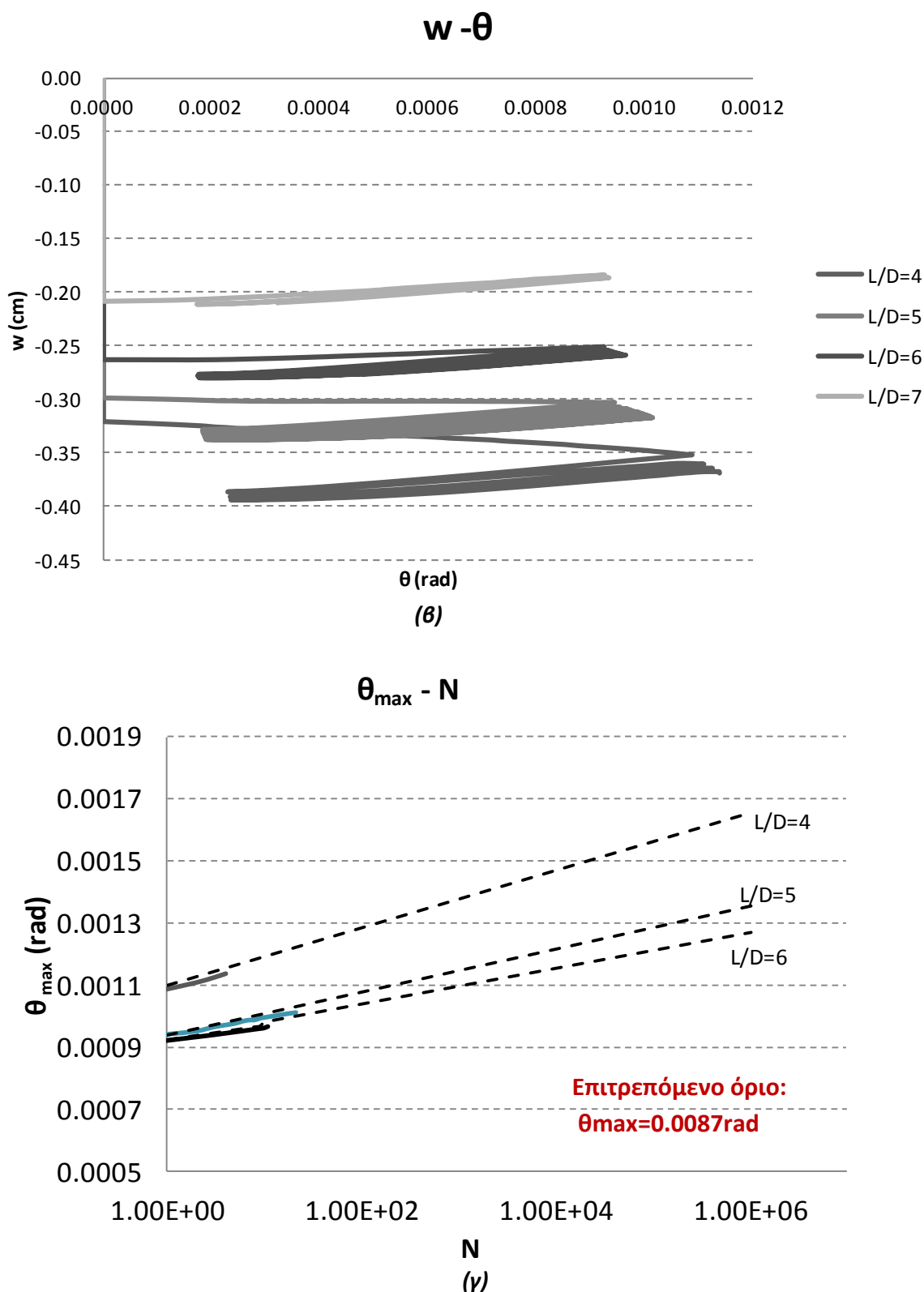
**Σχήμα 6.25:** Από αριστερά προς τα δεξιά απεικονίζονται διαγράμματα σε όρους (α) ροπής-στροφής στην κορυφή της θεμελίωσης, (β) καθίζησης-στροφής, (γ) μεταβολή στροφικής δυσκαμψίας-αριθμού κύκλων  $N$ , (δ) μέγιστη στροφή-αριθμός κύκλων, (ε) εκτίμηση μέγιστης στροφής –αριθμού κύκλων. Τα διαγράμματα αφορούν τον λόγο έμπτυξης  $L/D=6$  και την ανεμογεννήτρια των 2MW.

**Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα**

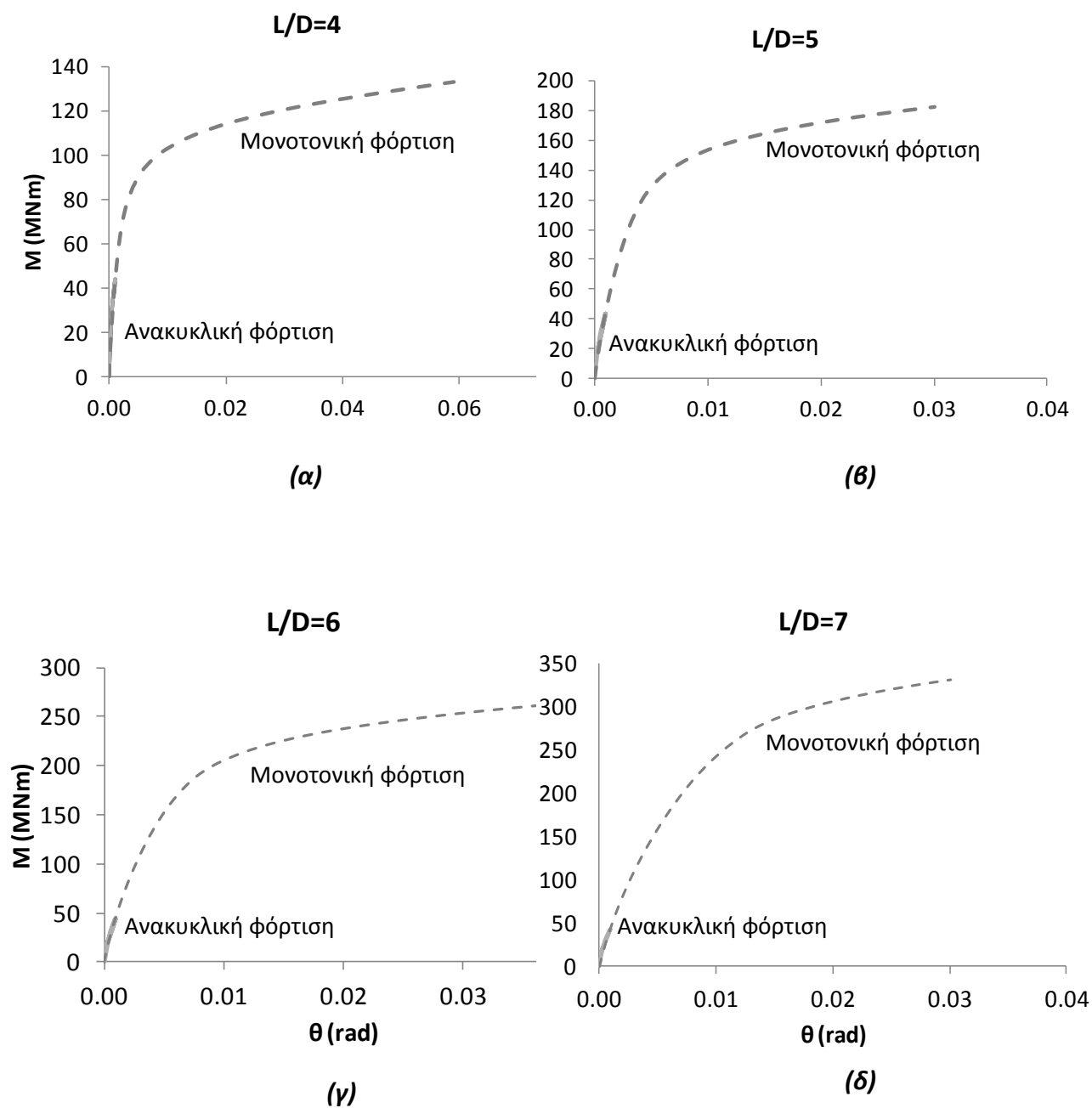
Ανεμογεννήτρια: 2 MW

Τύπος φόρτισης: Άνεμος μιας σταθερής κατεύθυνσης και θαλάσσιοι κυματισμοί διπλής κατεύθυνσης.





**Σχήμα 6.26:** Σύγκριση αποτελεσμάτων για τους τέσσερις λόγους έμπτυξης του μονοπασσάλου  $L/D=4,5,6,7$  σε όρους (α) ροπής-στροφής στην κορυφή της θεμελίωσης, (β) στροφής-καθίζησης και (γ) εκτίμησης μέγιστης στροφής-αριθμού κύκλων. Τα αποτελέσματα αφορούν την ανεμογεννήτρια των 2MW.



**Σχήμα 6.27:** Σύγκριση αποτελεσμάτων από αναλύσεις μονοτονικής φόρτισης (διακεκομμένη γραμμή) και ανακυκλικής φόρτισης (συμπαγής γραμμή) για τους διάφορους λόγους έμπτυξης του μονοπασιού. Από δεξιά προς τα αριστερά  $L/D=4, 5, 6$  και  $7$ .

Στην συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα για την μεσαία ανεμογεννήτρια των 3.5MW. Η ανεμογεννήτρια αυτή είναι και η πιο αντιπροσωπευτική καθώς η μέση ονομαστική ισχύς των ανεμογεννητριών που εγκαταστάθηκαν το 2011 είναι 3.6MW.

Τα **σχήματα 6.28- 6-31** δείχνουν για κάθε λόγο έμπηξης τα εξής διαγράμματα από πάνω προς τα κάτω: (α) ροπής-στροφής στην κορυφή της θεμελίωσης, (β) καθίζησης-στροφής, (γ) μεταβολής στροφικής δυσκαμψίας συναρτήσει των κύκλων φόρτισης, (δ) μεταβολή στροφής-αριθμού κύκλων (ε) μέγιστη στροφή συναρτήσει του αριθμού των κύκλων φόρτισης, (ζ) λογαριθμική πρόβλεψη μέγιστων στροφών σε μεγάλο αριθμό κύκλων.

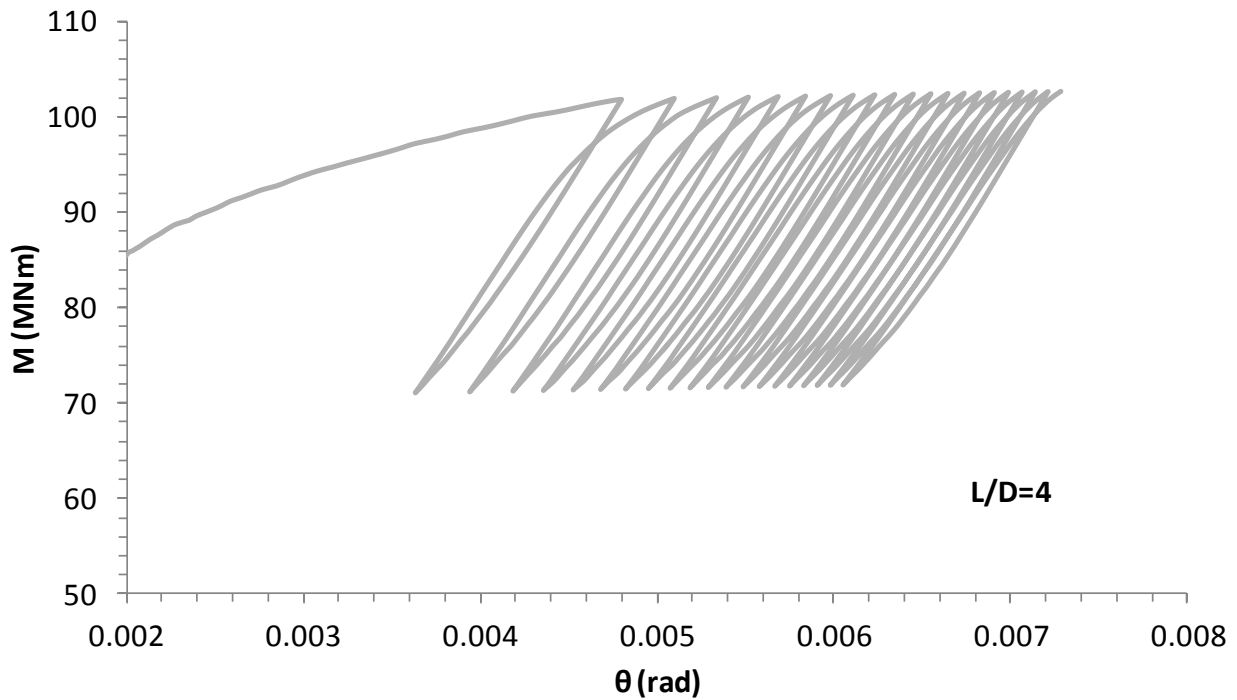
Στην συνέχεια παρατίθενται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τους τέσσερις λόγους έμπηξης σε όρους ροπής-στροφής, καθίζησης-στροφής καθώς και η λογαριθμική πρόβλεψη των μέγιστων στροφών σε 100.000.000 κύκλους. Ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων και η επιλογή της καταλληλότερης θεμελίωσης θα γίνει κατευθείαν από τα συγκεντρωτικά διαγράμματα.

Όπως έχουμε παρατηρήσει ήδη από το δεύτερο σενάριο φόρτισης, ο μονοπάσσαλος με λόγο έμπηξης  $L/D=4$  κρίνεται ανεπαρκής για την θεμελίωση της μεσαίας ανεμογεννήτριας. Ήδη από τους 20 πρώτους κύκλους η στροφή είναι πολύ κοντά στο άνω επιτρεπόμενο όριο, ενώ στην πρόβλεψη της απόκρισης κάτω από εκατομμύρια κύκλους η παραμένουσα στροφή έχει ξεπεράσει κατά πολύ το όριο  $\theta=0.025 \gg 0.009 \text{ rad}$ . Επίσης σε όρους καθίζησης, η απόκριση δεν είναι ικανοποιητική αφού με την πάροδο κάθε κύκλου τείνει να συσσωρεύσει όλο και μεγαλύτερη καθίζηση και δεν φαίνεται να έχει σταθεροποιητική τάση.

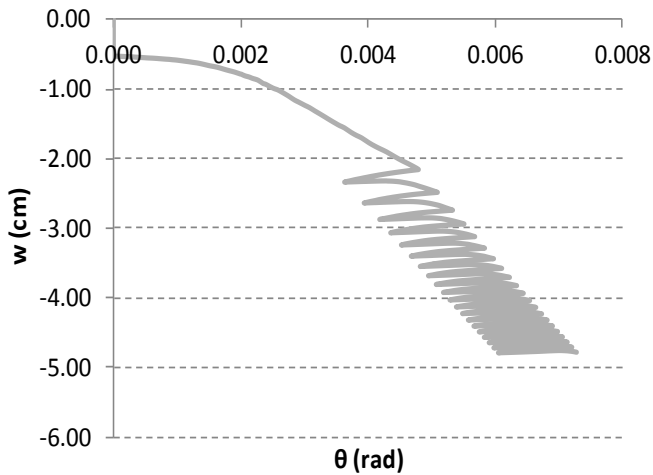
Ο λόγος έμπηξης  $L/D=5$  βρίσκεται εντός των ορίων σχεδιασμού τόσο σε όρους στροφής όσο και σε όρους καθίζησης, όμως δεν ικανοποιεί το κριτήριο του συντελεστή ασφαλείας  $FS_M=2$ . Για τον λόγο αυτό κρίνεται ότι η μεσαία ανεμογεννήτρια πρέπει να θεμελιωθεί σε μονοπάσσαλο με λόγο έμπηξης  $L/D=6$ .

Ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 3.5 MW  
 Λόγος έμπτυξης μονοπασάλου  $L/D=4$

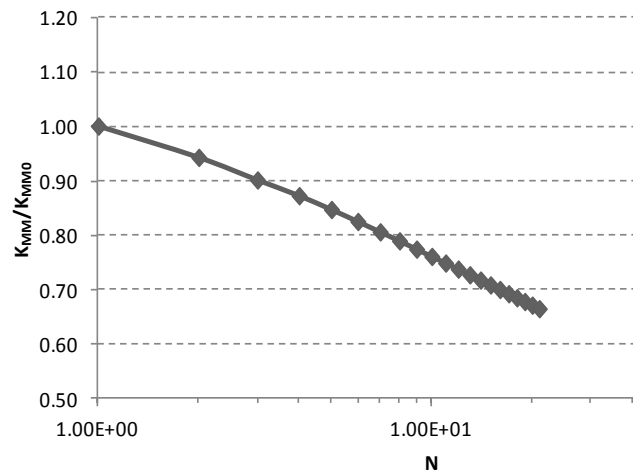
M- $\theta$



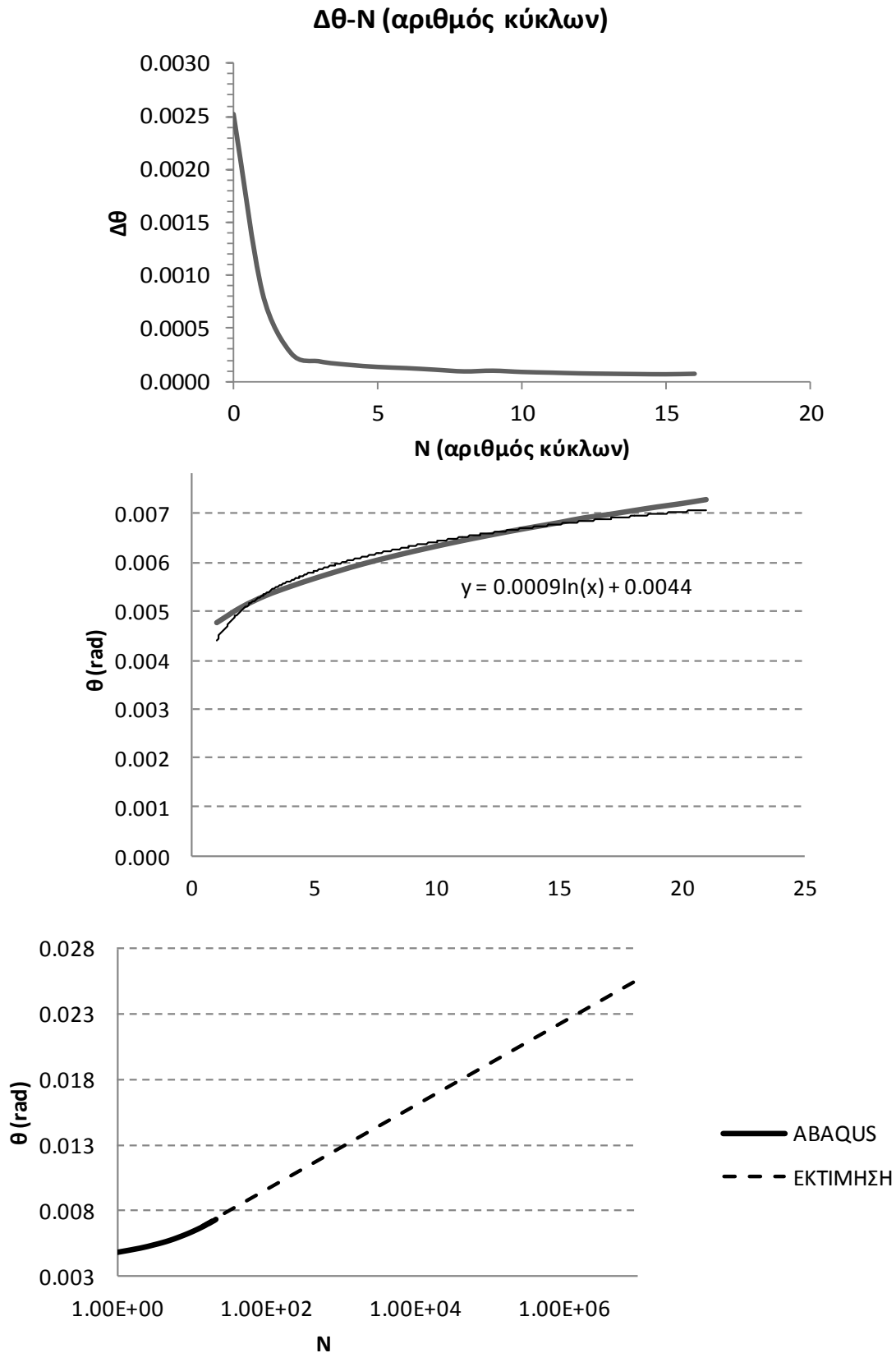
w -  $\theta$



$K_{MM}/K_{MM0}$



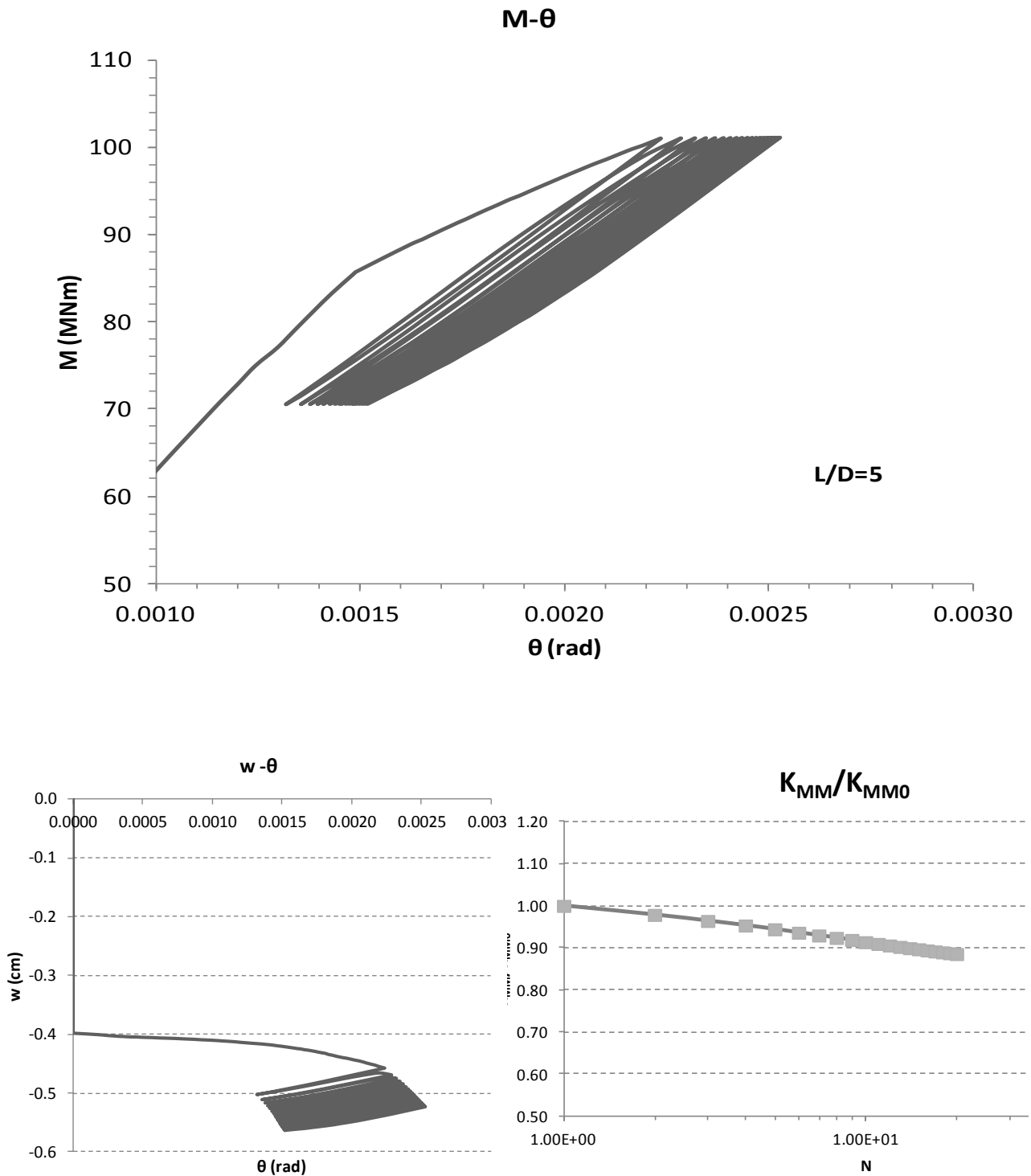
**Σχήμα 6.28:** Από αριστερά προς τα δεξιά απεικονίζονται διαγράμματα σε όρους (α) ροπής-στροφής στην κορυφή της θεμελίωσης, (β) καθίζησης-στροφής, (γ) μεταβολή στροφικής δυσκαμψίας-αριθμού κύκλων  $N$ . Τα διαγράμματα αφορούν τον λόγο έμπτυξης  $L/D=4$  και την ανεμογεννήτρια των 3.5MW.



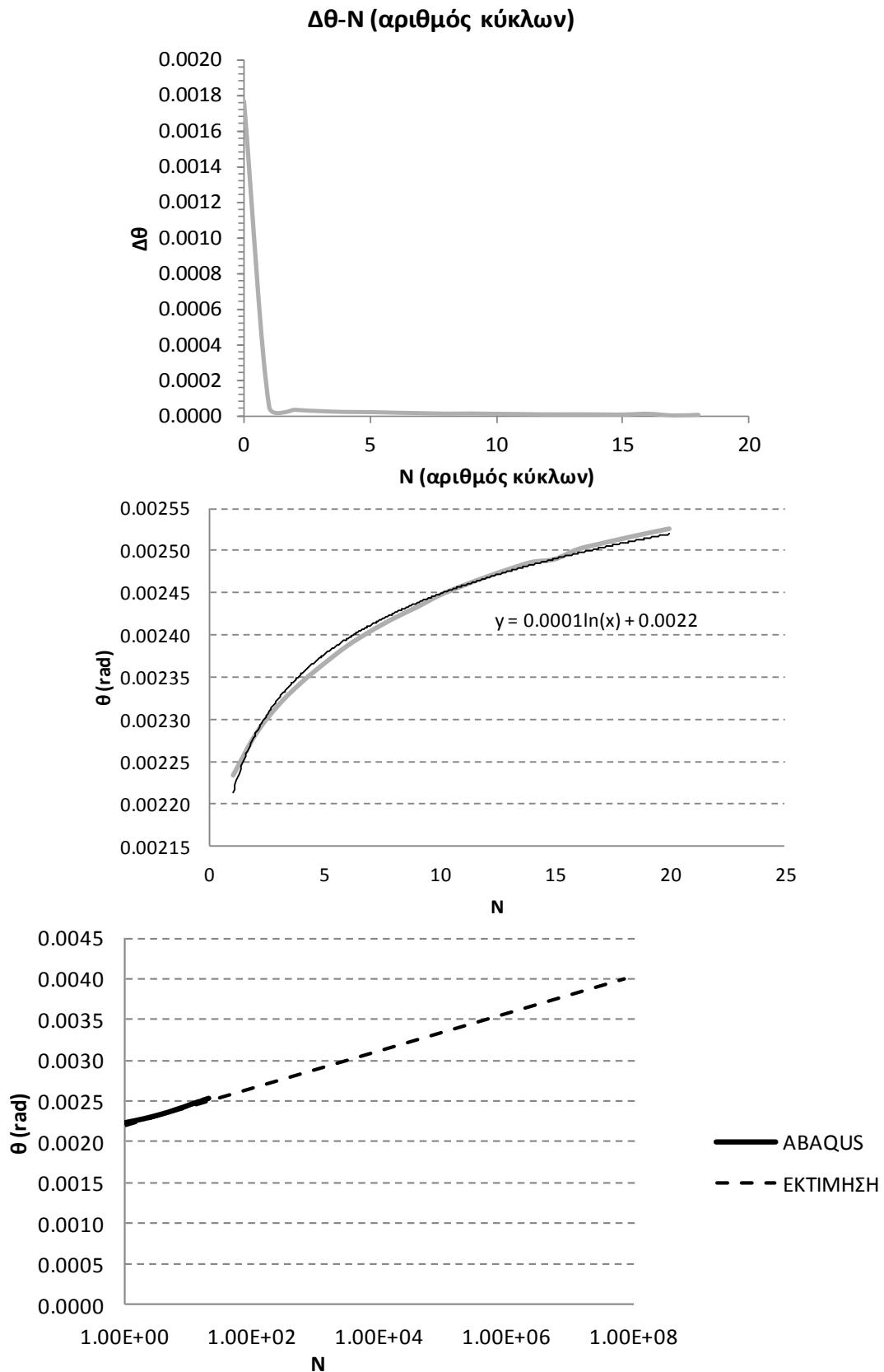
**Σχήμα 6.29:** Από πάνω προς τα κάτω απεικονίζονται διαγράμματα σε όρους (δ) μεταβολής στροφής στο τέλος κάθε κύκλου-αριθμού κύκλων (ε) μέγιστη στροφή-αριθμός κύκλων, (ζ) εκτίμηση μέγιστης στροφής-αριθμού κύκλων. Τα διαγράμματα αφορούν τον λόγο έμπτυξης  $L/D=4$  και την ανεμογεννήτρια των 3.5MW.



Ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 3.5 MW  
 Λόγος έμπτυξης μονοπασσάλου L/D=5

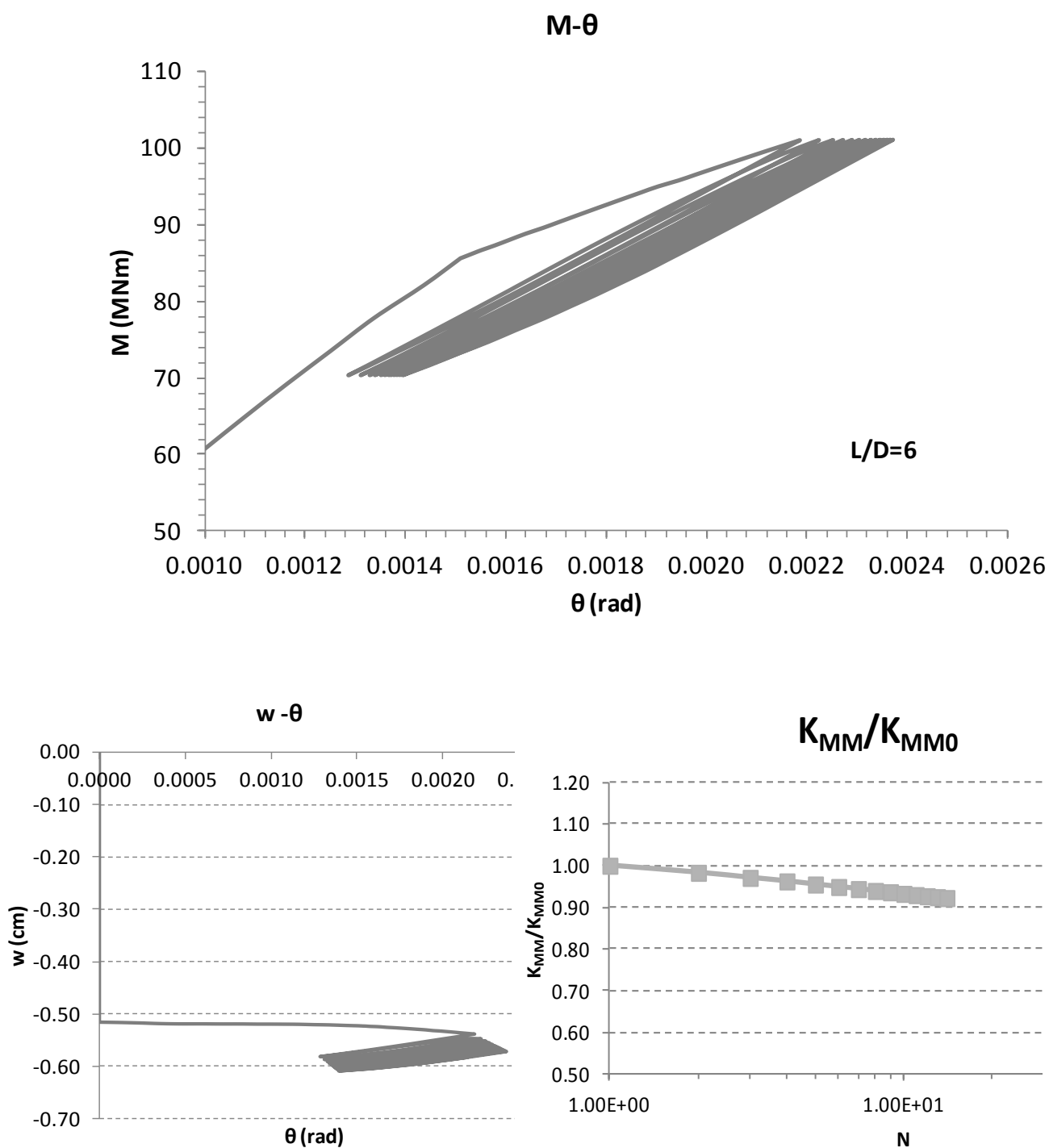


**Σχήμα 6.30:** Από αριστερά προς τα δεξιά απεικονίζονται διαγράμματα σε όρους (α) ροπής-στροφής στην κορυφή της θεμελίωσης, (β) καθίζησης-στροφής, (γ) μεταβολή στροφικής δυσκαμψίας-αριθμού κύκλων  $N$ . Τα διαγράμματα αφορούν τον λόγο έμπτυξης  $L/D=5$  και την ανεμογεννήτρια των 3.5MW.

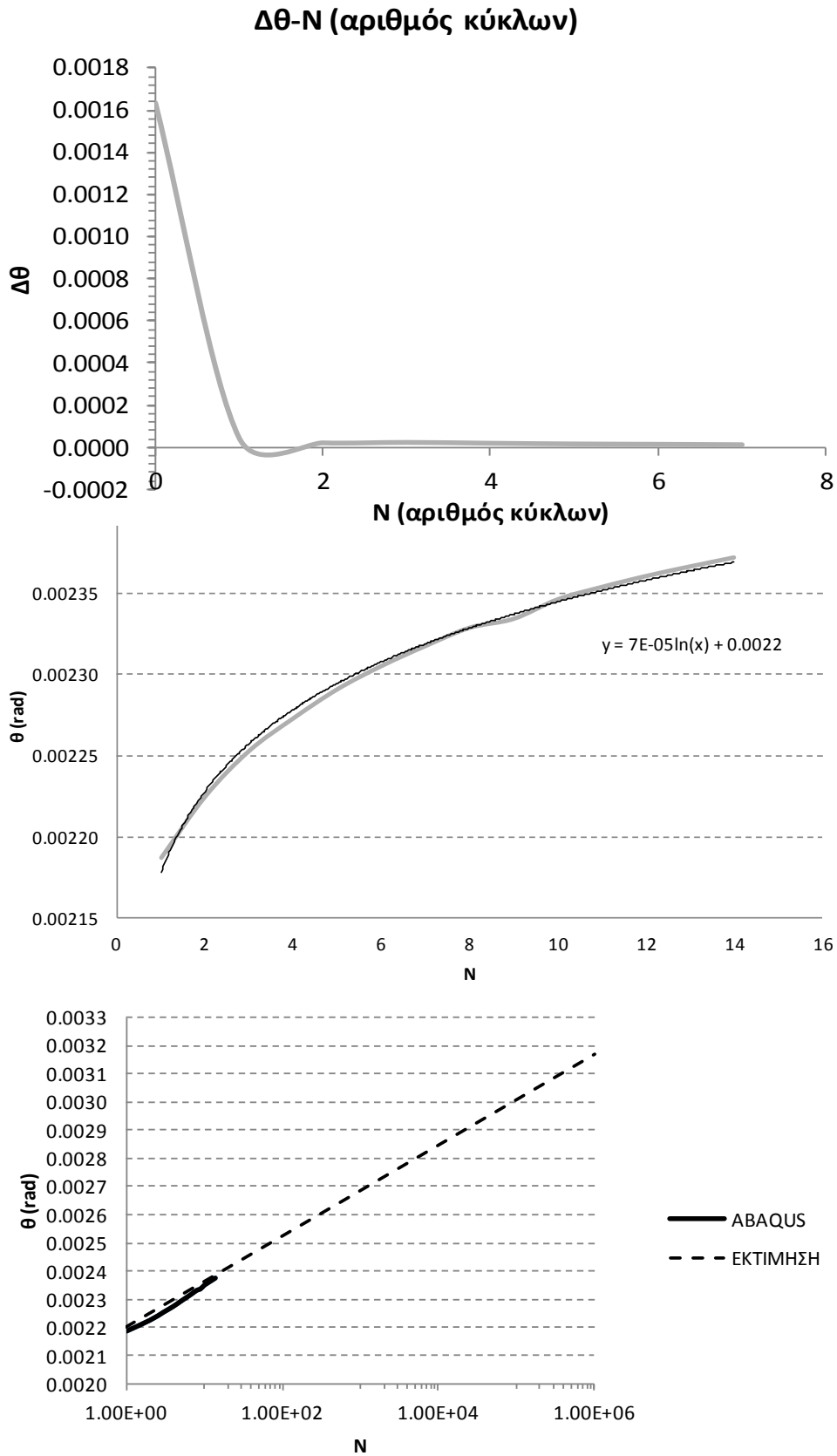


**Σχήμα 6.31:** Από πάνω προς τα κάτω απεικονίζονται διαγράμματα σε όρους (δ) μεταβολής στροφής στο τέλος κάθε κύκλου-αριθμού κύκλων (ε) μέγιστη στροφή-αριθμός κύκλων, (ζ) εκτίμηση μέγιστης στροφής –αριθμού κύκλων. Τα διαγράμματα αφορούν τον λόγο έμπτυξης  $L/D=5$  και την ανεμογεννήτρια των 3.5MW.

**Ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 3.5 MW  
Λόγος έμπτυξης μονοπασσάλου L/D=6**

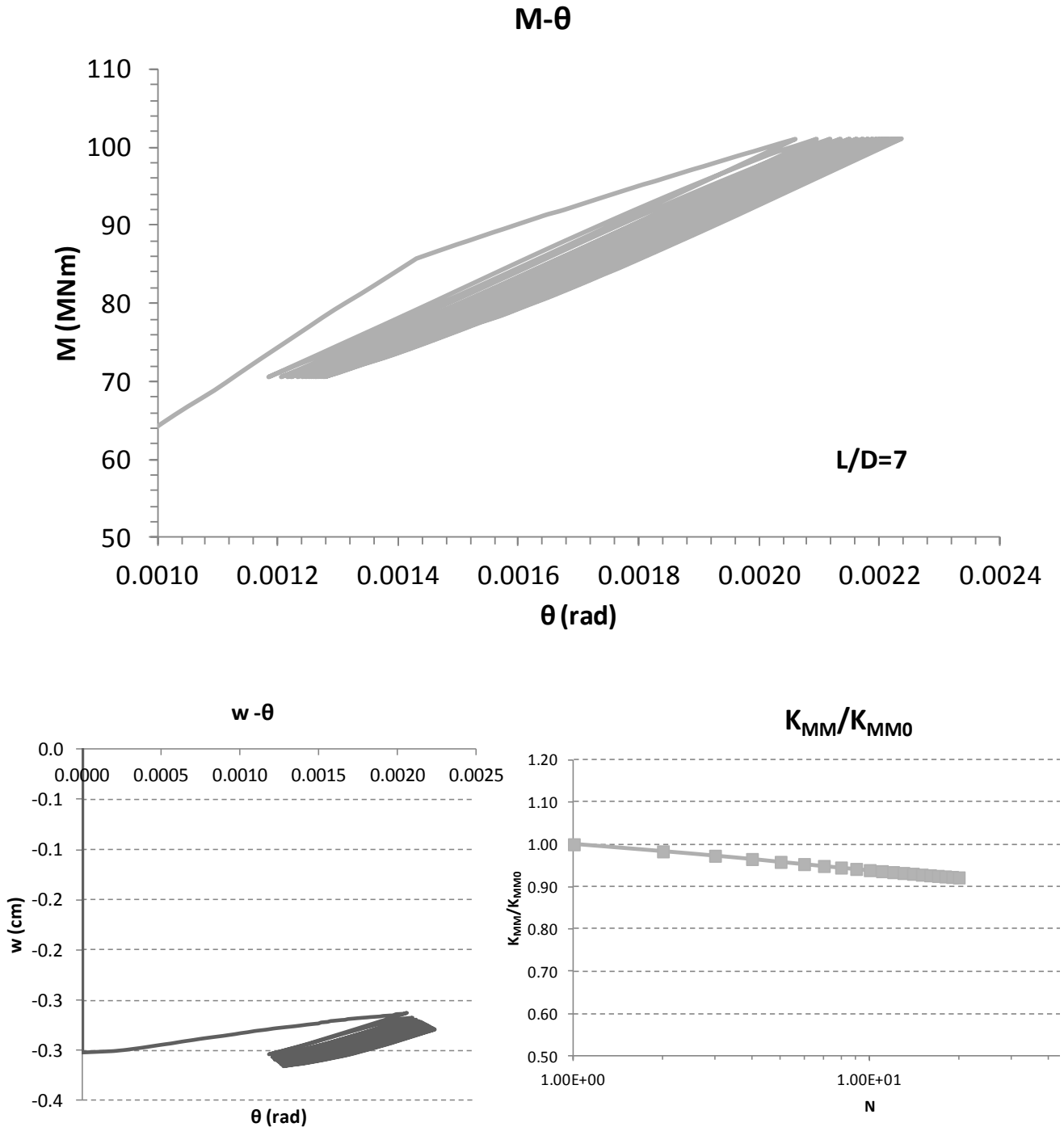


**Σχήμα 6.32:** Από αριστερά προς τα δεξιά απεικονίζονται διαγράμματα σε όρους (α) ροπής-στροφής στην κορυφή της θεμελίωσης, (β) καθίζησης-στροφής, (γ) μεταβολή στροφικής δυσκαμψίας-αριθμού κύκλων N. Τα διαγράμματα αφορούν τον λόγο έμπτυξης L/D=6 και την ανεμογεννήτρια των 3.5MW.

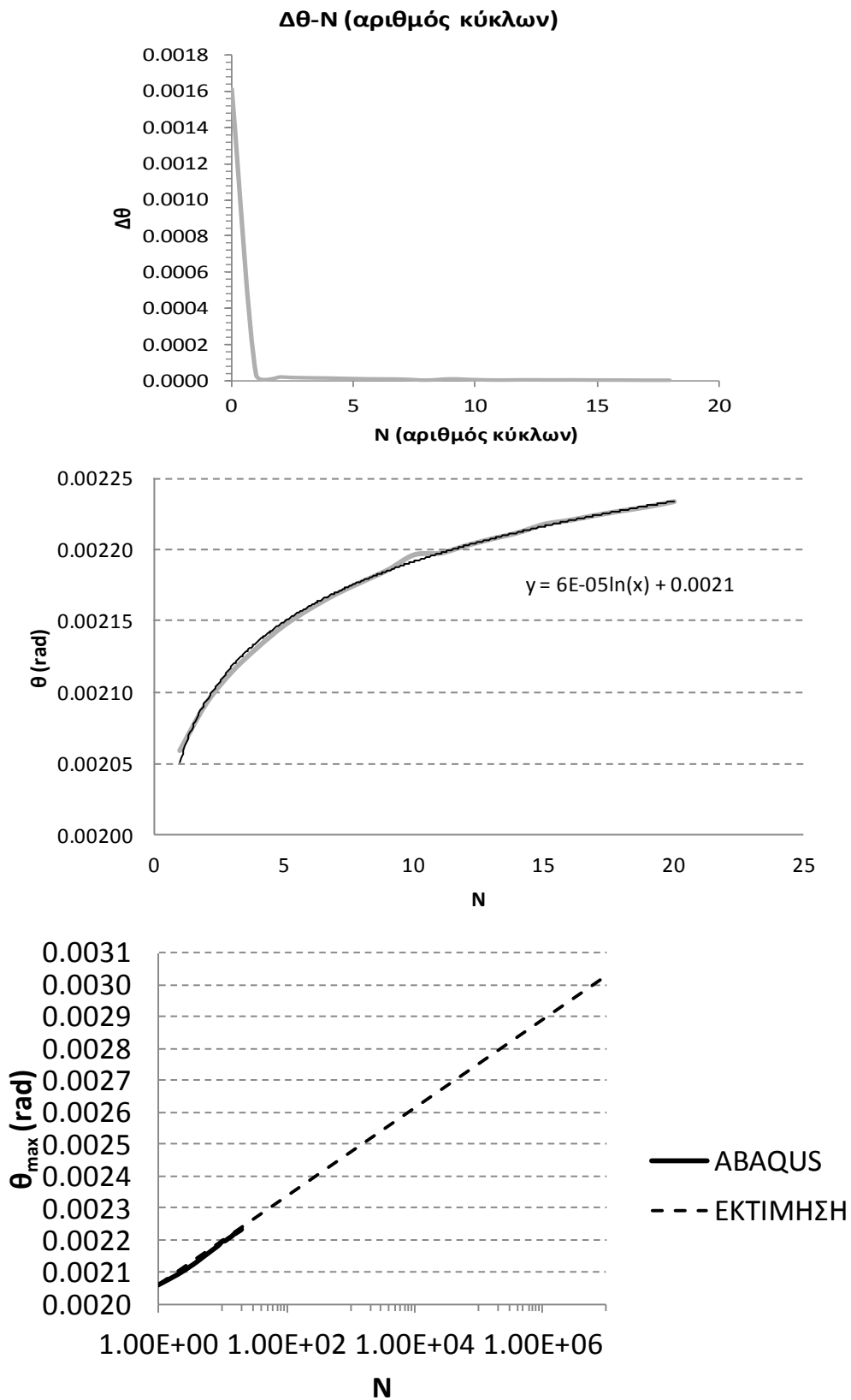


**Σχήμα 6.33:** Από πάνω προς τα κάτω απεικονίζονται διαγράμματα σε όρους (δ) μεταβολής στροφής στο τέλος κάθε κύκλου-αριθμού κύκλων (ε) μέγιστη στροφή-αριθμός κύκλων, (ζ) εκτίμηση μέγιστης στροφής –αριθμού κύκλων. Τα διαγράμματα αφορούν τον λόγο έμπτυξης  $L/D=6$  και την ανεμογεννήτρια των 3.5MW.

Ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 3.5 MW  
 Λόγος έμπτυξης μονοπασσάλου  $L/D=7$



**Σχήμα 6.34:** Από αριστερά προς τα δεξιά απεικονίζονται διαγράμματα σε όρους (α) ροπής-στροφής στην κορυφή της θεμελίωσης, (β) καθίζησης-στροφής, (γ) μεταβολή στροφικής δυσκαμψίας-αριθμού κύκλων  $N$ . Τα διαγράμματα αφορούν τον λόγο έμπτυξης  $L/D=7$  και την ανεμογεννήτρια των 3.5MW.

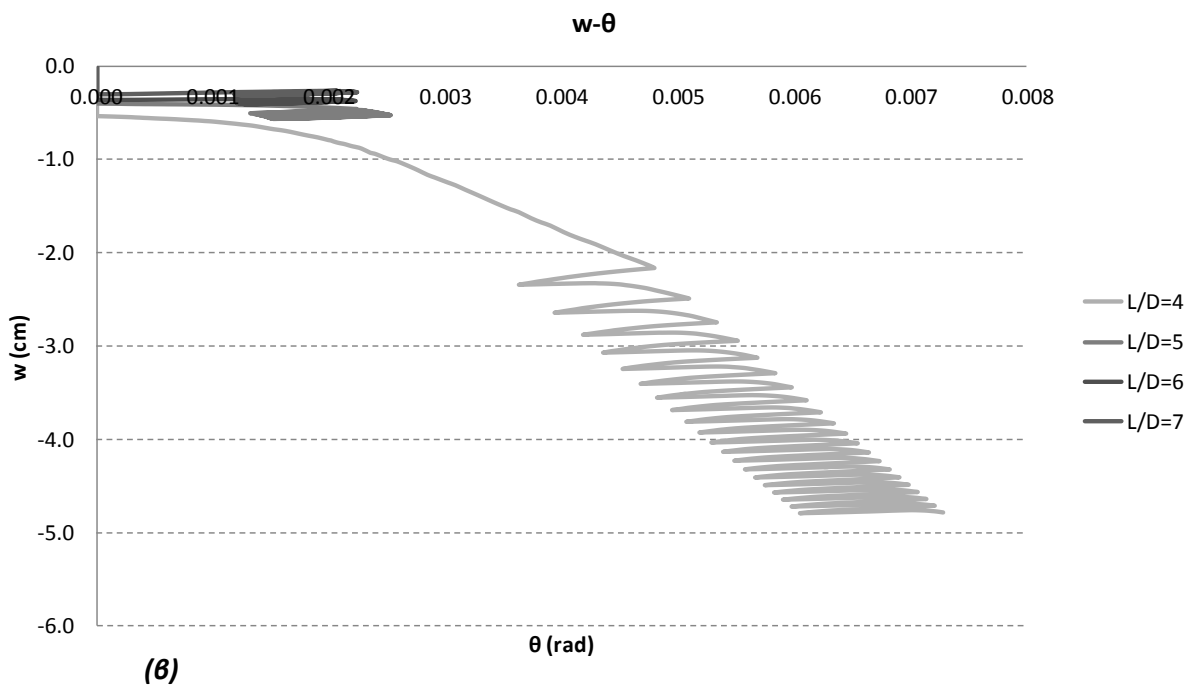
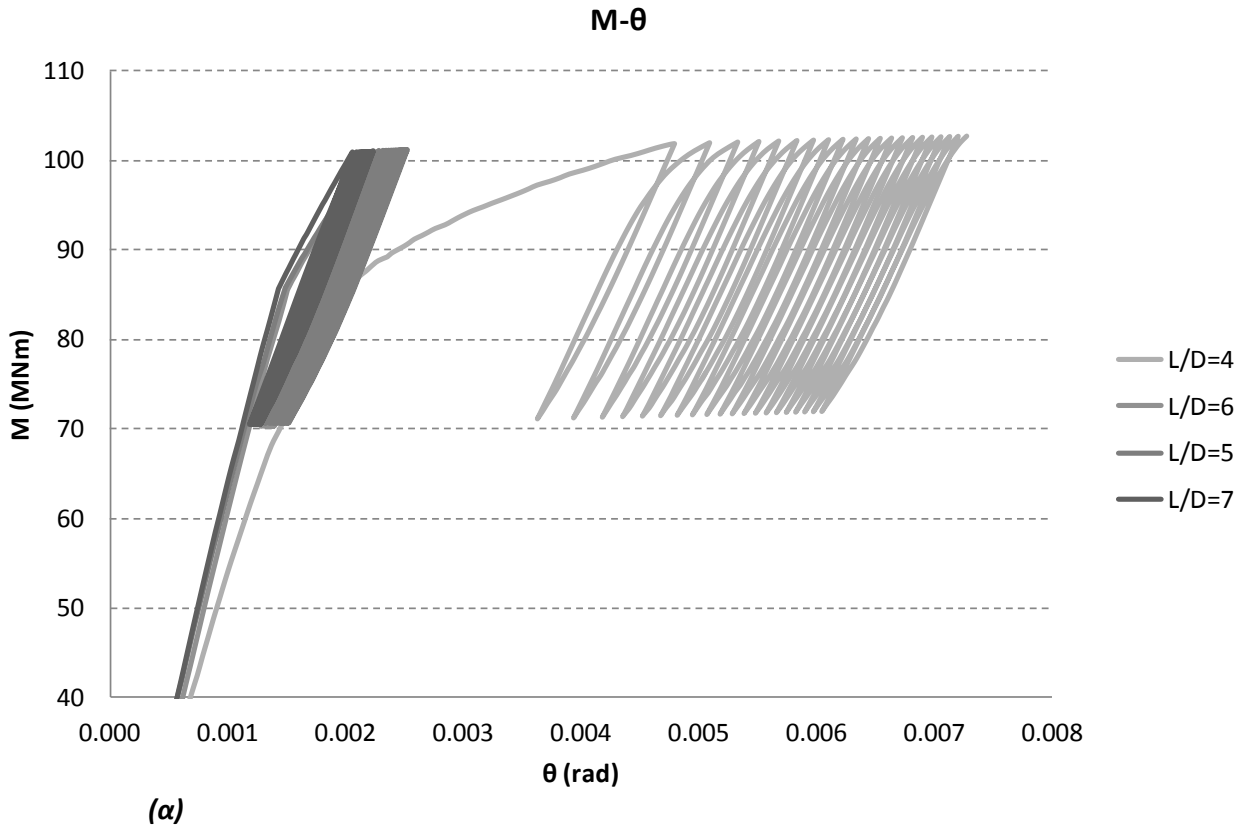


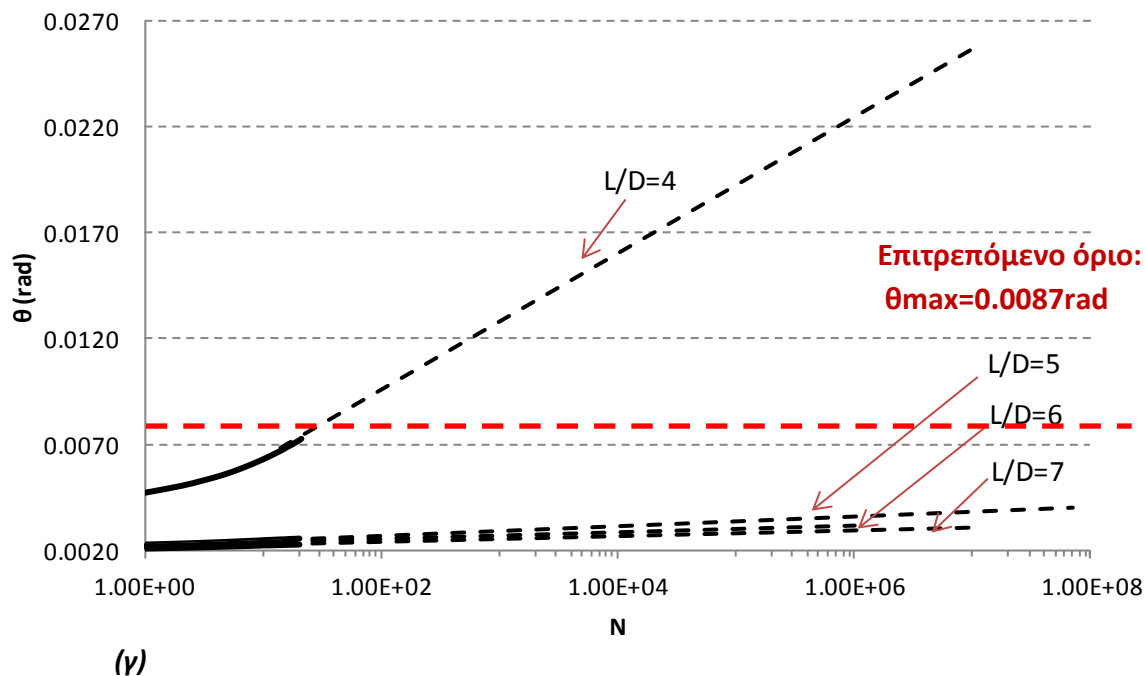
**Σχήμα 6.35:** Από πάνω προς τα κάτω απεικονίζονται διαγράμματα σε όρους (δ) μεταβολής στροφής στο τέλος κάθε κύκλου-αριθμού κύκλων (ε) μέγιστη στροφή-αριθμός κύκλων, (ζ) εκτίμηση μέγιστης στροφής –αριθμού κύκλων. Τα διαγράμματα αφορούν τον λόγο έμπτυξης  $L/D=7$  και την ανεμογεννήτρια των 3.5MW.

**Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα**

Ανεμογεννήτρια: 3.5 MW

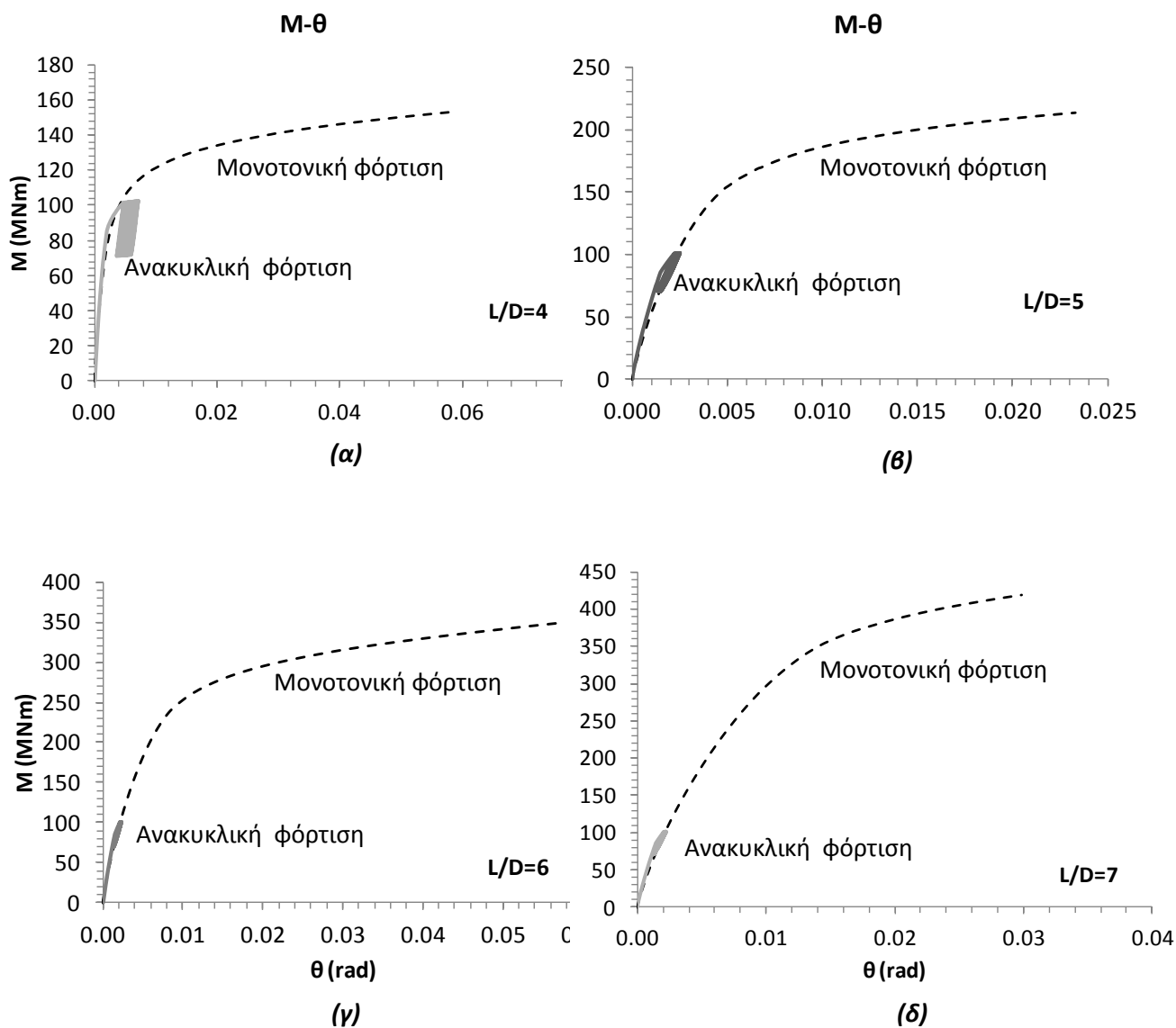
Τύπος φόρτισης: Άνεμος μιας σταθερής κατεύθυνσης και θαλάσσιοι κυματισμοί διπλής κατεύθυνσης.





**Σχήμα 6.36:** Σύγκριση αποτελεσμάτων για τους τέσσερις λόγους έμπτυξης του μονοπασσάλου  $L/D=4,5,6,7$  σε όρους (α) ροπής-στροφής στην κορυφή της θεμελίωσης, (β) στροφής-καθίζησης και (γ) εκτίμησης μέγιστης στροφής-αριθμού κύκλων. Τα αποτελέσματα αφορούν την ανεμογεννήτρια των 3.5 MW.





**Σχήμα 6.37:** Σύγκριση αποτελεσμάτων από αναλύσεις μονοτονικής φόρτισης (διακεκομμένη γραμμή) και ανακυκλικής φόρτισης (συμπαγής γραμμή) για τους διάφορους λόγους έμπτυξης του μονοπασάλου. Από δεξιά προς τα αριστερά  $L/D=4, 5, 6$  και  $7$ .

Τέλος ακολουθούν τα αποτελέσματα για την μεγάλη ανεμογεννήτρια των 5MW. Η ανεμογεννήτρια αυτή είναι νέας γενιάς και η απόδοσή της είναι η μέγιστη που υπάρχει στην αγορά μέχρι σήμερα. Φυσικά, όπως όλα δείχνουν

Τα **σχήματα 6.39- 6.41** δείχνουν για κάθε λόγο έμπτυξης τα εξής διαγράμματα από πάνω προς τα κάτω: (α) ροπής-στροφής στην κορυφή της θεμελίωσης, (β) καθίζησης-στροφής, (γ) μεταβολής στροφικής δυσκαμψίας συναρτήσει των κύκλων φόρτισης, (δ) μέγιστη στροφή συναρτήσει του αριθμού των κύκλων φόρτισης, (ε) λογαριθμική πρόβλεψη μέγιστων στροφών σε μεγάλο αριθμό κύκλων.

Στην συνέχεια παρατίθενται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τους τέσσερις λόγους έμπτυξης σε όρους ροπής-στροφής, καθίζησης-στροφής καθώς και η λογαριθμική πρόβλεψη των μέγιστων στροφών σε 100.000.000 κύκλους. Επίσης γίνεται σύγκριση των καμπύλων μονοτονικής και ανακυκλικής φόρτισης. Ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων και η επιλογή της καταλληλότερης θεμελίωσης θα γίνει κατευθείαν από τα συγκεντρωτικά διαγράμματα.

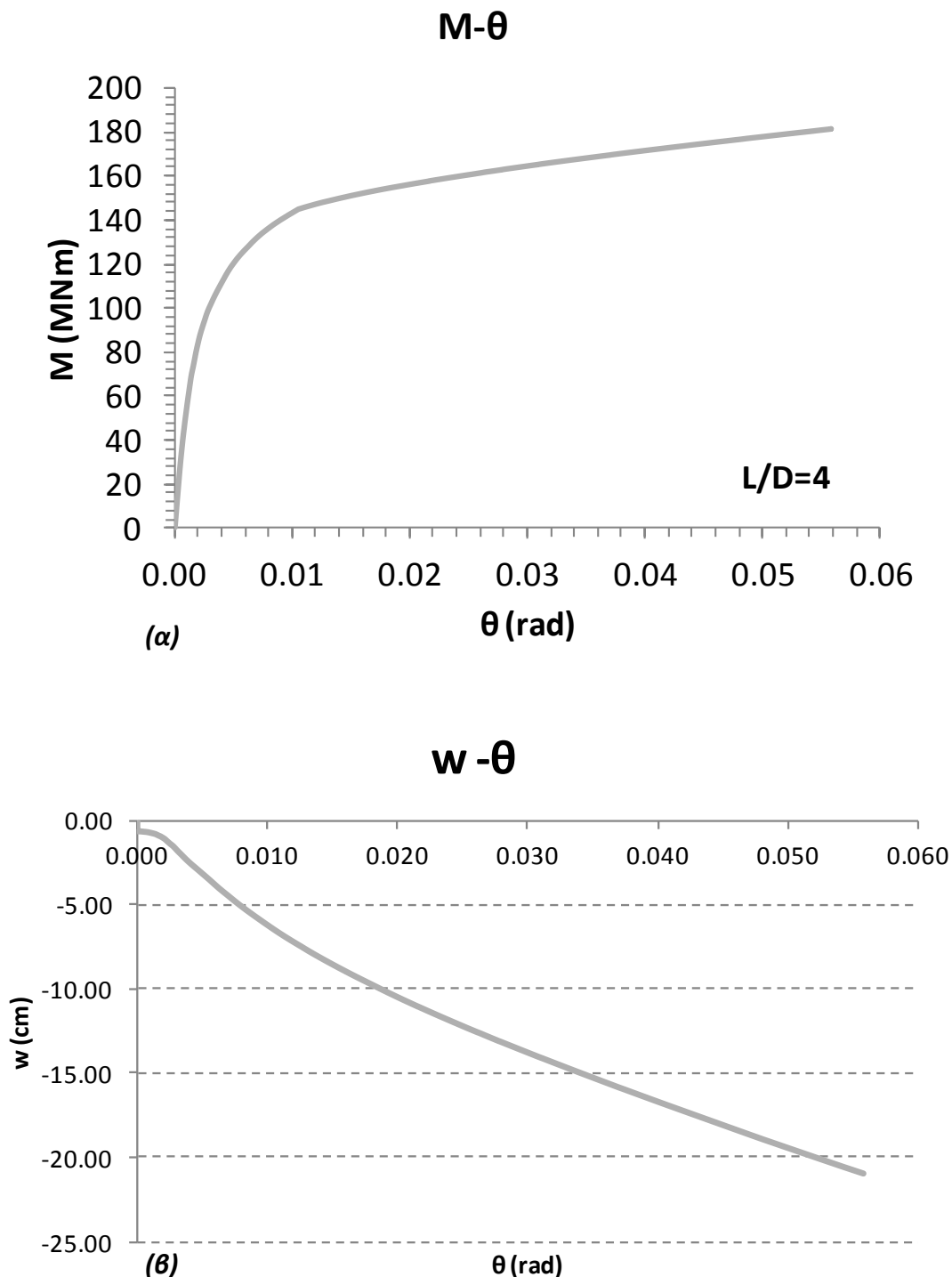
Αρχικά να σημειωθεί ότι η θεμελίωση με λόγο έμπτυξης  $L/D=4$  αστόχησε ήδη από το πρώτο βήμα, δηλαδή την επιβολή της φόρτισης του ανέμου στο ύψος του ρότορα. Στο σχήμα 6 (α), οι καμπύλες μονοτονικής και «ανακυκλικής» φόρτισης διαφέρουν μεταξύ τους γιατί διαφέρει και ο λόγος λυγηρότητας για τις δύο περιπτώσεις. Στην περίπτωση της μονοτονικής φόρτισης, σημείο εφαρμογής των δυνάμεων είναι το κέντρο άσκησης των φορτίσεων ( $h/D= 8.2$ ) ενώ για την «ανακυκλική φόρτιση» το σημείο εφαρμογής των δυνάμεων είναι ο ρότορας ( $h/D=18$ ).

Λαμβάνοντας υπόψη τα τρία βασικά κριτήρια σχεδιασμού:

- μέγιστο επιτρεπόμενο όριο παραμένουσας στροφής  $\theta_{max}=0.009rad$
- μέγιστη επιτρεπόμενη καθίζηση  $w=0.05D$
- συντελεστής ασφαλείας έναντι ροπής  $FSM=2$

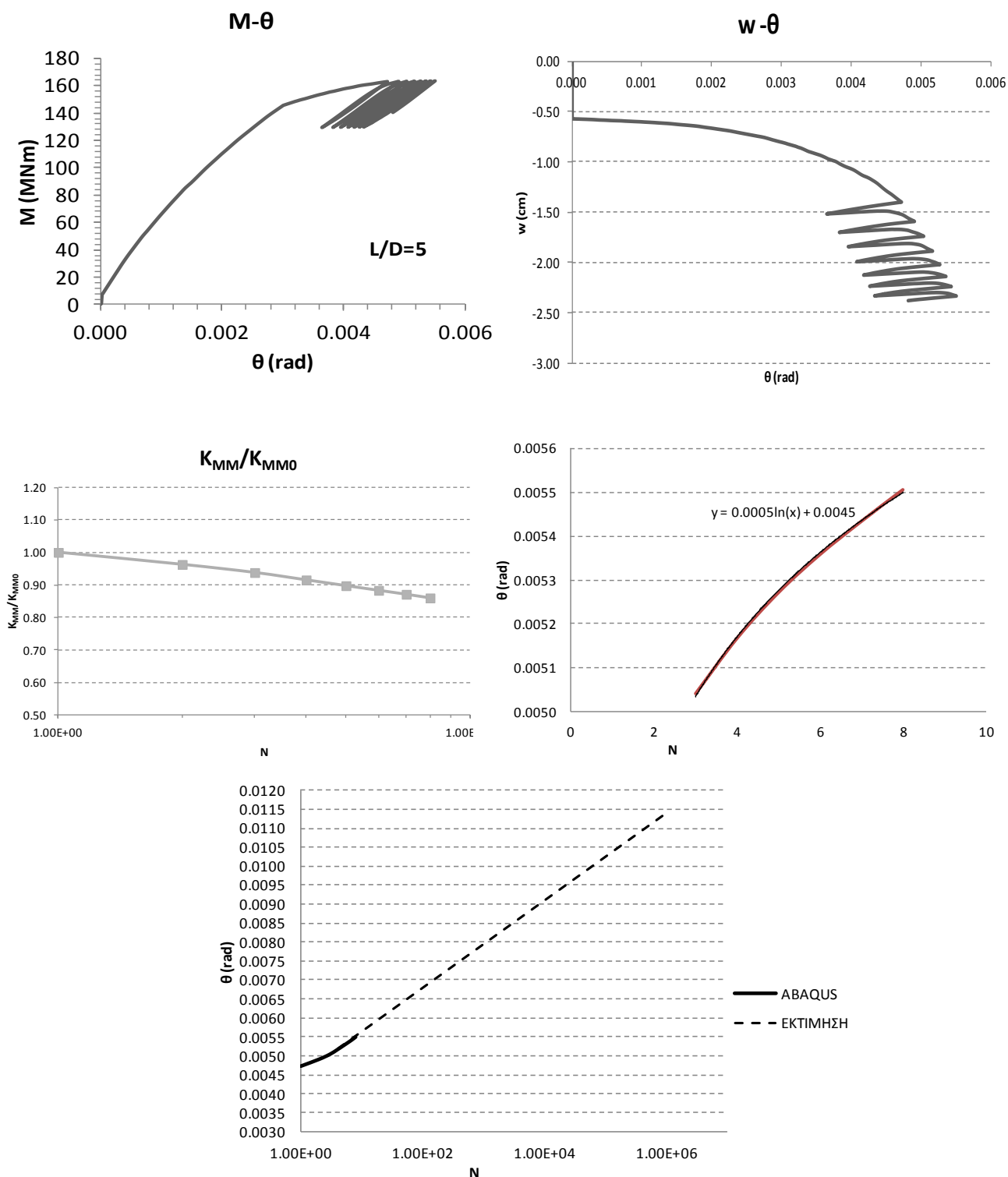
κρίνεται ως καταλληλότερη η θεμελίωση με λόγο έμπτυξης  $L/D=7$  για την μεγάλη ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 5MW.

Ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 5 MW  
 Λόγος έμπτυξης μονοπασσάλου  $L/D=4$



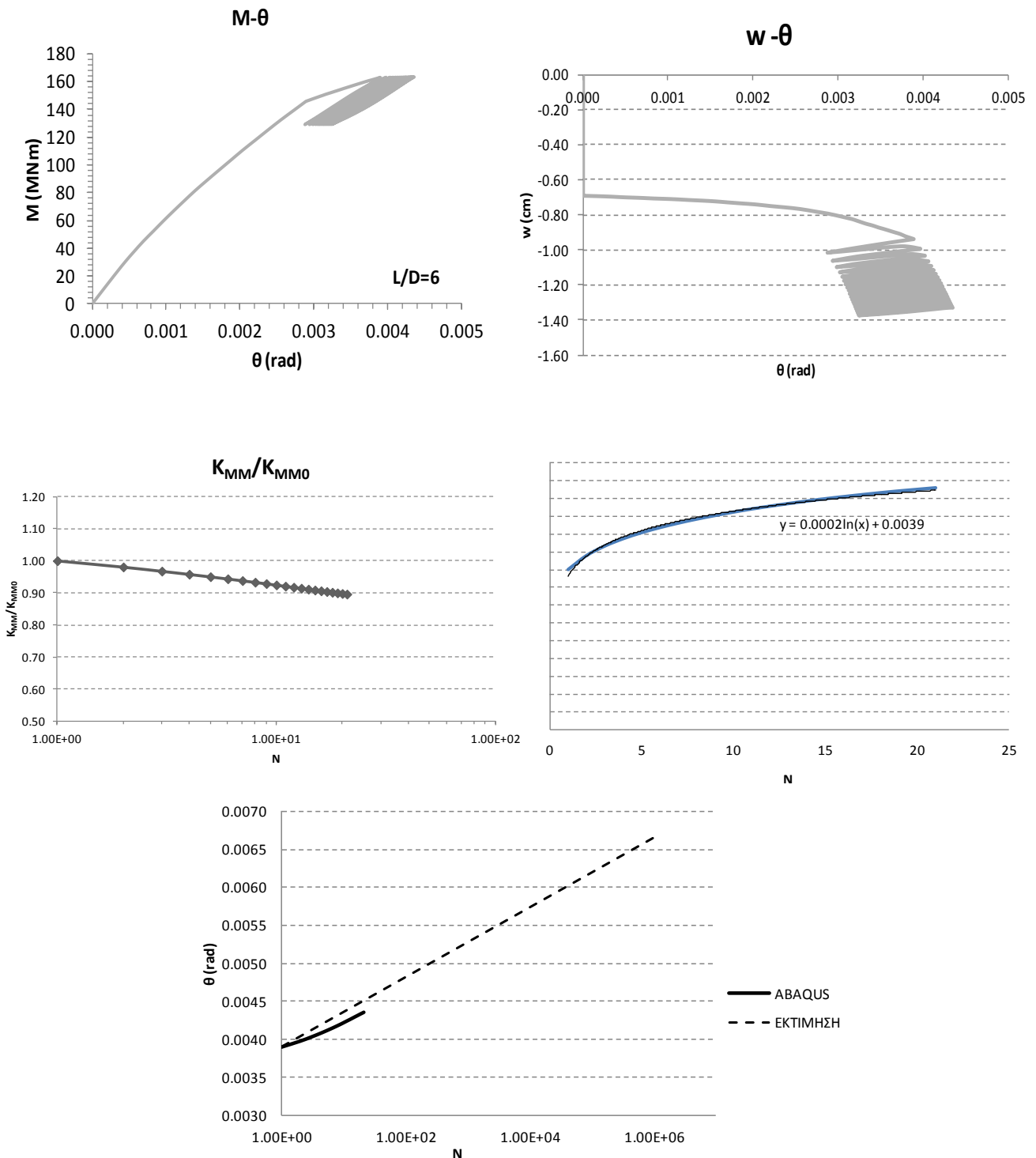
**Σχήμα 6.38:** Από πάνω προς τα κάτω απεικονίζονται διαγράμματα σε όρους (α) ροπής-στροφής στην κορυφή της θεμελίωσης, (β) καθίζησης-στροφής. Τα διαγράμματα αφορούν τον λόγο έμπτυξης  $L/D=5$  και την ανεμογεννήτρια των 5 MW.

### Ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 5 MW Λόγος έμπτυξης μονοπασάλου L/D=5



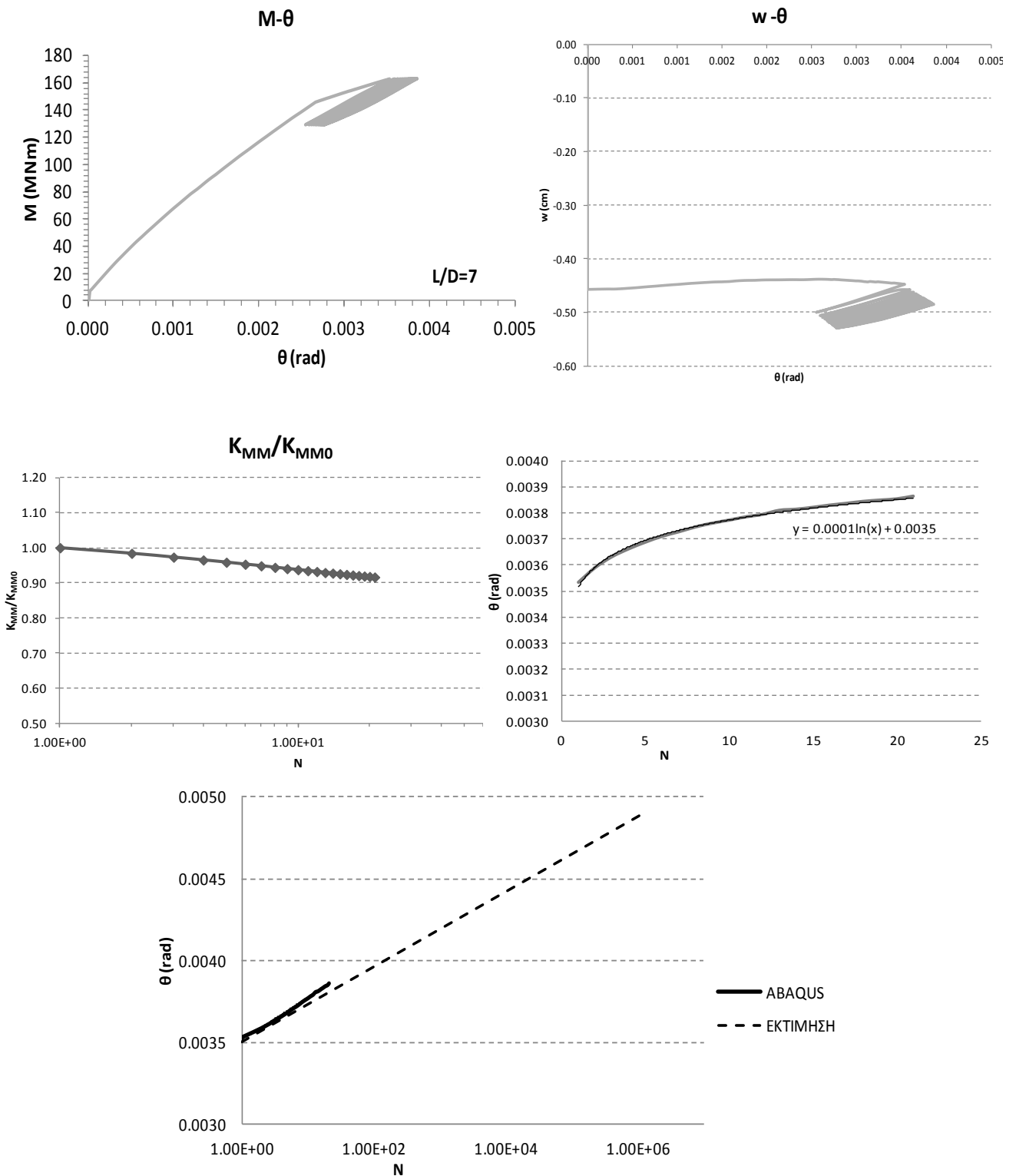
**Σχήμα 6.39:** Από αριστερά προς τα δεξιά απεικονίζονται διαγράμματα σε όρους (α) ροπής-στροφής στην κορυφή της θεμελίωσης, (β) καθίζησης-στροφής, (γ) μεταβολή στροφικής δυσκαμψίας-αριθμού κύκλων N, (δ) μέγιστη στροφή-αριθμός κύκλων, (ε) εκτίμηση μέγιστης στροφής –αριθμού κύκλων. Τα διαγράμματα αφορούν τον λόγο έμπτυξης L/D=5 και την ανεμογεννήτρια των 5 MW.

Ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 5 MW  
 Λόγος έμπτυξης μονοπασσάλου L/D=6



**Σχήμα 6.40:** Από αριστερά προς τα δεξιά απεικονίζονται διαγράμματα σε όρους (α) ροπής-στροφής στην κορυφή της θεμελίωσης, (β) καθίζησης-στροφής, (γ) μεταβολή στροφικής δυσκαμψίας-αριθμού κύκλων  $N$ , (δ) μέγιστη στροφή-αριθμός κύκλων, (ε) εκτίμηση μέγιστης στροφής –αριθμού κύκλων. Τα διαγράμματα αφορούν τον λόγο έμπτυξης  $L/D=6$  και την ανεμογεννήτρια των 5 MW.

**Ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 5 MW  
Λόγος έμπτυξης μονοπασσάλου L/D=7**

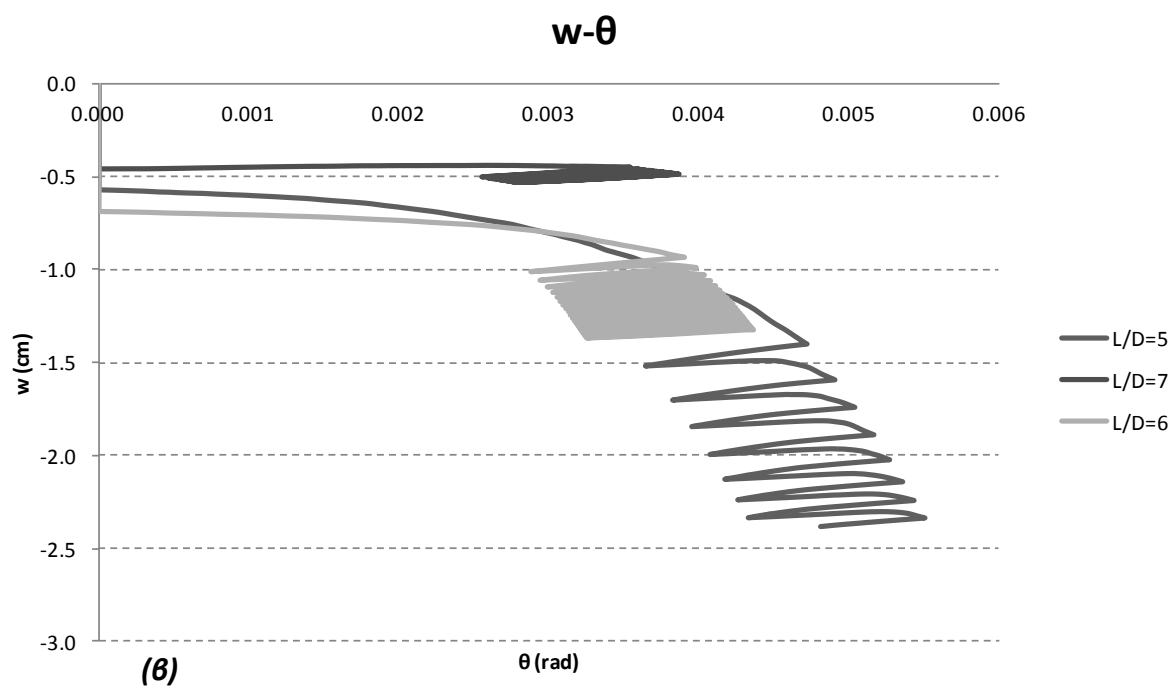
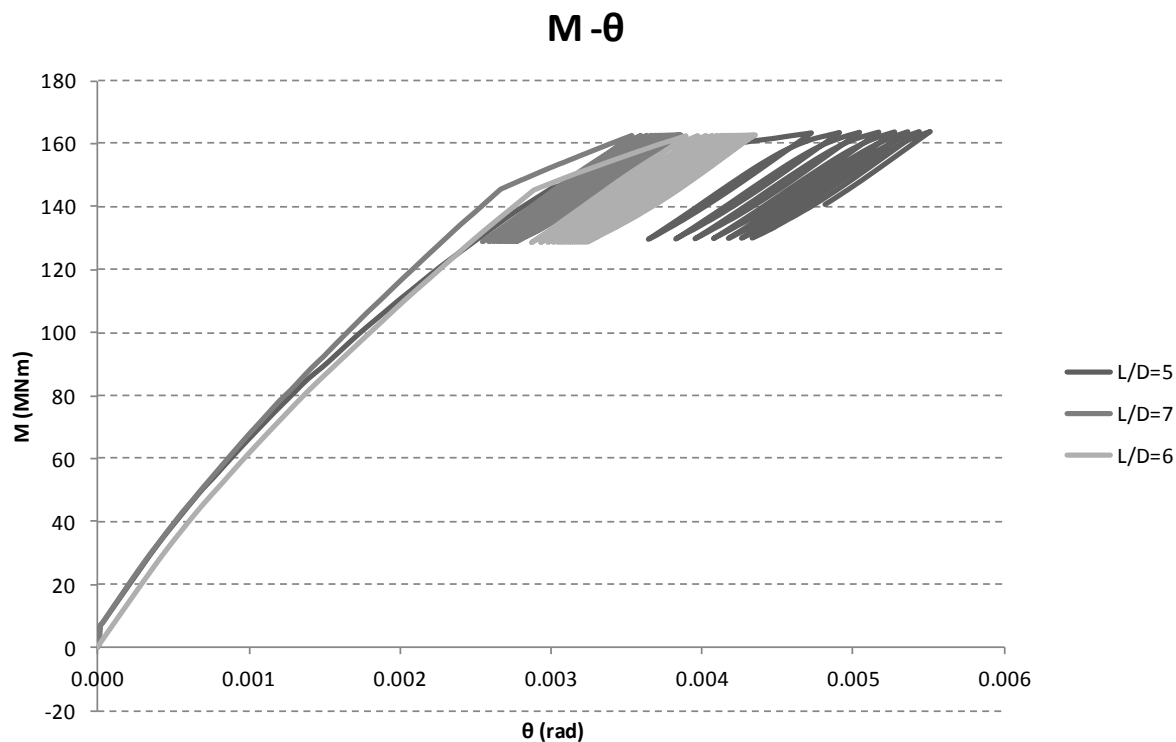


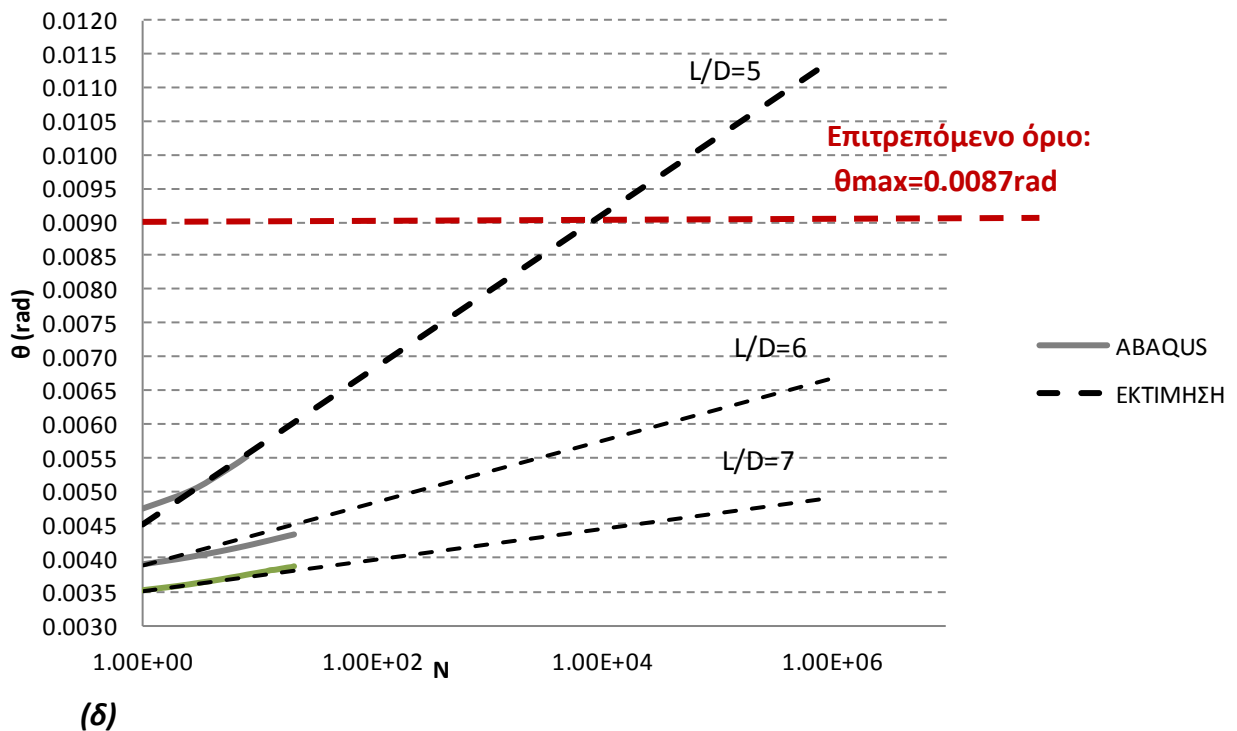
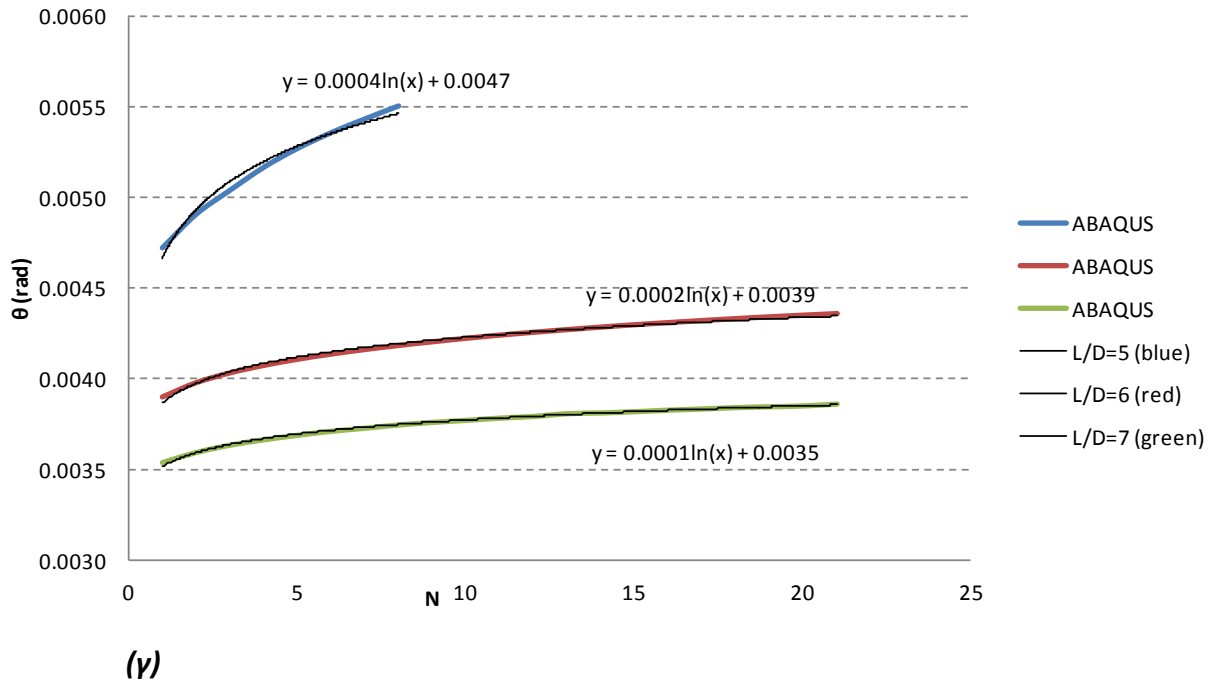
**Σχήμα 6.41:** Από αριστερά προς τα δεξιά απεικονίζονται διαγράμματα σε όρους (α) ροπής-στροφής στην κορυφή της θεμελίωσης, (β) καθίζησης-στροφής, (γ) μεταβολή στροφικής δυσκαμψίας-αριθμού κύκλων N, (δ) μέγιστη στροφή-αριθμός κύκλων, (ε) εκτίμηση μέγιστης στροφής –αριθμού κύκλων. Τα διαγράμματα αφορούν τον λόγο έμπτυξης L/D=7 και την ανεμογεννήτρια των 5 MW.

**Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα**

Ανεμογεννήτρια: 5 MW

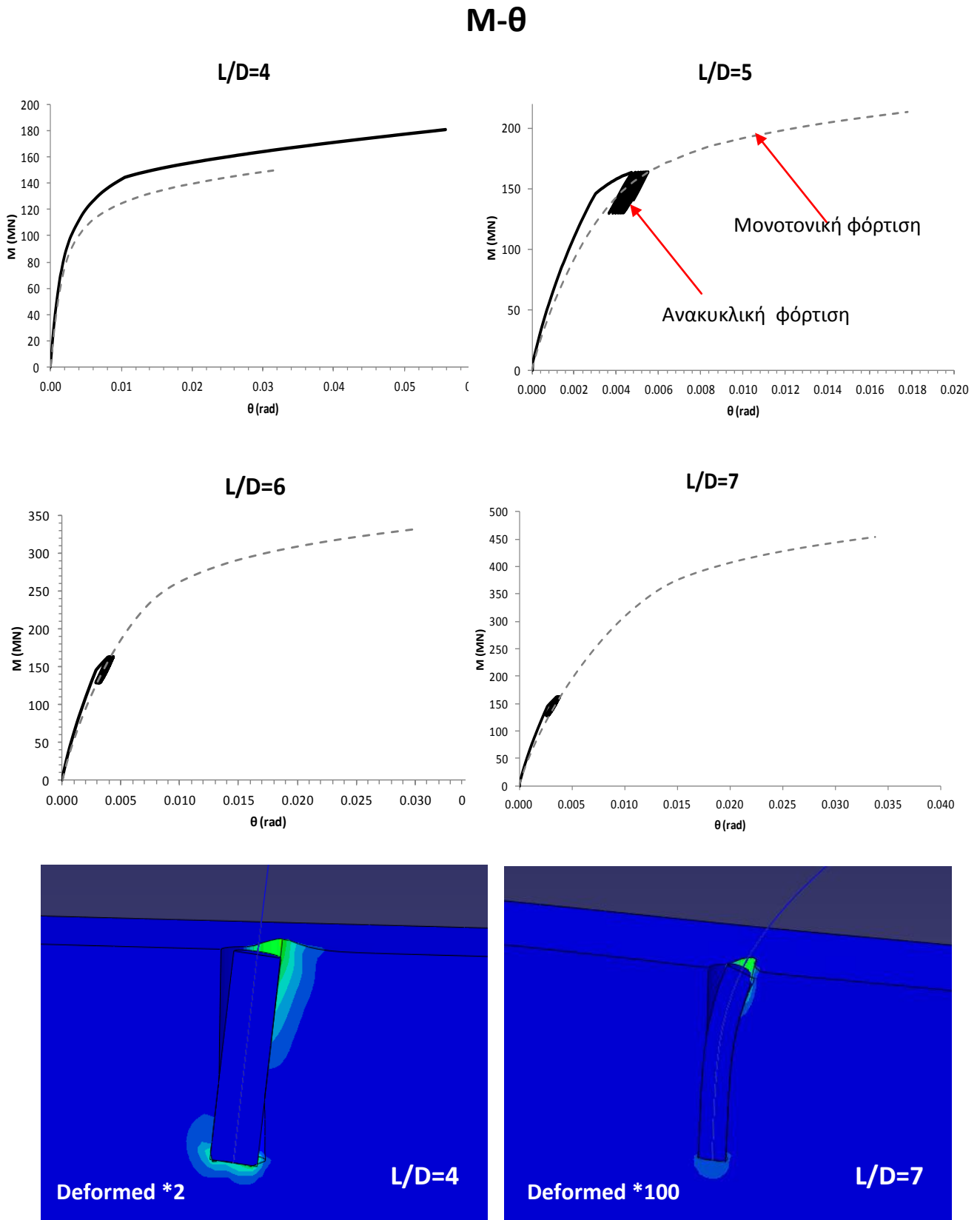
Τύπος φόρτισης: Άνεμος μιας σταθερής κατεύθυνσης και θαλάσσιοι κυματισμοί διπλής κατεύθυνσης.





**Σχήμα 6.42:** Σύγκριση αποτελεσμάτων για τους τέσσερις λόγους έμπτυξης του μονοπασσάλου  $L/D=4,5,6,7$  σε όρους (α) ροπής-στροφής στην κορυφή της θεμελίωσης, (β) στροφής-καθίζησης (γ) μέγιστης στροφής-αριθμού κύκλων και (δ) εκτίμησης μέγιστης στροφής-αριθμού κύκλων. Τα αποτελέσματα αφορούν την ανεμογεννήτρια των 5MW.






**Σχήμα 6.43:** Σύγκριση αποτελεσμάτων από αναλύσεις μονοτονικής φόρτισης (διακεκομμένη γραμμή) και ανακυκλικής φόρτισης (συμπαγής γραμμή) για τους διάφορους λόγους έμπτυξης του μονοπασσάλου. Από δεξιά προς τα αριστερά L/D=4, 5, 6 και 7. Πλαστικές παραμορφώσεις εδάφους και παραμόρφωση μονοπασσάλου για τους λόγους έμπτυξης L/D=4 (αριστερά) και L/D=7(δεξιά).

### 6.5. Συμπεράσματα

Συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα του κεφαλαίου:

- Οι ανεμογεννήτριες υποβάλλονται σε εκατομμύρια κύκλους φόρτισης μικρού πλάτους λόγω των φορτίων λειτουργίας αλλά και σε μερικούς κύκλους μεγάλου πλάτους λόγω ακραίων καιρικών συνθηκών. Και οι δύο περιπτώσεις είναι ικανές να προκαλέσουν στο έδαφος συσσώρευση μόνιμων παραμορφώσεων.
- Οι φορτίσεις που προέρχονται από τον άνεμο, τους κυματισμούς και τα θαλάσσια ρεύματα είναι δυναμικού χαρακτήρα, μπορούν όμως να προσομοιωθούν ψευδοστατικά για την ανάλυση της θεμελίωσης, αγνοώντας την κόπωση της ανωδομής.
- Η μη-γραμμική συμπεριφορά της θεμελίωσης εξαρτάται έντονα από τον αδιάστατο λόγο ροπής προς τέμνουσας δύναμης  $M/HD$  που μεταφέρεται στο επίπεδο θεμελίωσης. Στην περίπτωση της οριζόντιας φόρτισης σε ύψος  $h$  από την στάθμη θεμελίωσης, ο λόγος γίνεται  $h/D$  και ονομάζεται λόγος λυγηρότητας.
- Το δυσμενέστερο σενάριο φόρτισης για την θεμελίωση της ανεμογεννήτριας είναι αυτό της ταυτόχρονης δράσης προς την ίδια κατεύθυνση των δυνάμεων του ανέμου και των θαλάσσιων κυματισμών. Ωστόσο, κατά την διάρκεια ζωής του έργου συνήθως η ανεμογεννήτρια υποβάλετε σε φόρτιση ανέμου μιας κατεύθυνσης και κυματισμούς διπλής κατεύθυνσης. Αυτό οφείλεται στην μεγάλη διαφορά της ιδιοπεριόδου κάθε φόρτισης ( $T_{\text{ανέμου}} > 10 \text{ min}$ ,  $T_{\text{κυμάτων}} \approx 10 \text{ sec}$ ).
- Υπενθυμίζουμε ότι τα κριτήρια σχεδιασμού είναι:
  - $\theta_{\text{max}} = 0.0087 \text{ rad}$
  - $w = 0.05D$
  - $FS_M = 2$
- Ύστερα από μια σειρά αναλύσεων καταλήγουμε ότι ο βέλτιστος λόγος έμπτυξης της θεμελίωσης για την μικρή ανεμογεννήτρια (**2MW**) είναι ο μονοπάσσαλος με  $L/D=5$  (βάθος έμπτυξης 25m), για την μεσαία ανεμογεννήτρια (**3.5MW**) είναι ο μονοπάσσαλος με  $L/D=6$  (βάθος έμπτυξης 30m) και για την μεγάλη ανεμογεννήτρια (**5MW**) είναι ο λόγος έμπτυξης  $L/D=7$  (βάθος έμπτυξης 35m).
- Ο μονοπάσσαλος είναι μία αξιόπιστη θεμελίωση ωστόσο έχει κάποια σημεία που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής κατά τον σχεδιασμό και βελτίωσης στο μέλλον:
  - (1) για μικρά βάθη έμπτυξης έχουμε μεγάλη συσσώρευση στροφών και πλαστικών παραμορφώσεων
  - (2) όσο μεγαλώνει το βάθος έμπτυξης, αυξάνονται σχεδόν εκθετικά οι χρονικές και οικονομικές απαιτήσεις της διαδικασίας έμπτυξης του μονοπασσάλου
  - (3) με την πάροδο των κύκλων φόρτισης δημιουργείται μόνιμο κενό γύρω από τον μονοπάσσαλο (scour).





# Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα



## Κεφάλαιο 7

### 7.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία περιγράφει την συμπεριφορά του μονοπασσάλου υπό στατική και ανακυκλική φόρτιση μέσω μιας σειράς τρισδιάστατων αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα μελετάται ο μονοπάσσαλος με λόγο έμπτυξης προς διαμέτρου  $L/D=4, 5, 6, 7$  για μια τυπική μαλακή άργιλο υπό αστράγγιστες συνθήκες. Το εδαφικό προφίλ είναι ομοιογενές για το σύνολο των αναλύσεων και ανομοιογενές με γραμμικά αυξανόμενο  $S_u$  για μια σειρά αναλύσεων με σκοπό την ανάδειξη της επιρροής της ανομοιογένειας του εδάφους. Επίσης, θεωρείται ότι η διεπιφάνεια εδάφους-θεμελίου παρουσιάζει μη-γραμμική συμπεριφορά και συγκρίνονται τα αποτελέσματα για την μη ρεαλιστική θεώρηση της πλήρους επαφής. Ο πρώτος στόχος είναι η καταγραφή της φέρουσας ικανότητας του μονοπασσάλου τόσο υπό μεμονωμένη φόρτιση (αξονική, τέμνουσα δύναμη ή ροπή) όσο και υπό συνδυασμένη φόρτιση στον M-H-V χώρο φόρτισης. Στην συνέχεια μελετάται το μητρώο δυσκαμψίας του μονοπασσάλου και η συμπεριφορά του στην ελαστική περιοχή. Τέλος αναλύεται η συμπεριφορά τριών ανεμογεννητριών (μικρής ονομαστικής ισχύος 2MW, μεσαίας 3.5MW και μεγάλης 5MW) για τα κυριότερα σενάρια ανακυκλικής φόρτισης: (α) φόρτιση ανέμου μιας κατευθύνσεως, (β) φόρτιση ανέμου και κυματισμών διπλής κατεύθυνσης και (γ) φόρτιση ανέμου μιας κατεύθυνσης και φόρτιση θαλάσσιων κυματισμών διπλής κατεύθυνσης. Προτείνεται ο βέλτιστος λόγος έμπτυξης μονοπασσάλου για κάθε μια από τις ανεμογεννήτριες και τονίζονται τα σημεία που χρήζουν βελτίωσης και ιδιαίτερης προσοχής κατά τον σχεδιασμό. Τα κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας συνοψίζονται ως εξής:

- ✓ Από τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, η αιολική όπως όλα δείχνουν θα έχει κυρίαρχο ρόλο στα επόμενα χρόνια κυρίως μέσω των θαλάσσιων ανεμογεννητριών.
- ✓ Η πιο εμπορική θεμελίωση μέχρι σήμερα είναι ο μονοπάσσαλος, καθώς το 75% των ήδη εγκατεστημένων ανεμογεννητριών θεμελιώνονται σε αυτόν.
- ✓ Σε αντίθεση με την βιομηχανία φυσικού αερίου και πετρελαίου, οι ανεμογεννήτριες είναι ελαφριά φορτισμένες κατασκευές κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Λόγω του μεγάλου ύψους του πύργου και των φυσικών συνθηκών του προβλήματος, η θεμελίωση καλείται να αντέξει ροπές μεγάλου μεγέθους και εκατομμύρια κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης.

- ✓ Ο λόγος έμπηξης του μονοπασσάλου έχει σημαντική επίδραση στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης ροπής-τέμνουσας τόσο στο μέγεθος όσο και στην εκκεντρότητα της περιβάλλουσας αστοχίας. Αυτό οφείλεται στην έντονη σύζευξη του οριζόντιου μετακινησιακού και στροφικού βαθμού ελευθερίας.
- ✓ Η θεώρηση της πλήρους επαφής στην εξωτερική διεπιφάνεια του μονοπασσάλου οδηγεί σε μη-συντηρητικό σχεδιασμό καθώς η θεμελίωση αναπτύσσει υπεραντοχές που στην πραγματικότητα δεν μπορούν να αναπτυχθούν. Οι υπεραντοχή οφείλεται στην ανάπτυξη απεριόριστων εφελκυστικών τάσεων στο έδαφος και στην απαγόρευση της αποκόλλησης των δύο στοιχείων (εδάφους- θεμελίου).
- ✓ Οι ελαστικές δυσκαμψίες του μονοπασσάλου έρχονται σε πλήρη συμφωνία με τις αναλυτικές σχέσεις της βιβλιογραφίας. Ωστόσο, με την πάροδο των κύκλων φόρτισης παρατηρείται σταδιακή απομείωση της στροφικής δυσκαμψίας της τάξης του 5-20% (stiffness degradation), γεγονός που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό.
- ✓ Κατά την μονοτονική φόρτιση, η μη-γραμμική συμπεριφορά της θεμελίωσης εξαρτάται έντονα από τον αδιάστατο λόγο ροπής προς τέμνουσας δύναμης  $M/HD$  που μεταφέρεται στο επίπεδο θεμελίωσης. Στην περίπτωση της οριζόντιας φόρτισης σε ύψος  $h$  από την στάθμη θεμελίωσης, ο λόγος γίνεται  $h/D$  και ονομάζεται λόγος λυγηρότητας.
- ✓ Οι ανεμογεννήτριες υποβάλλονται σε εκατομμύρια κύκλους φόρτισης μικρού πλάτους λόγω των φορτίων λειτουργίας αλλά και σε μερικούς κύκλους μεγάλου πλάτους λόγω ακραίων καιρικών συνθηκών. Και οι δύο περιπτώσεις είναι ικανές να προκαλέσουν στο έδαφος συσσώρευση μόνιμων παραμορφώσεων.
- ✓ Οι φορτίσεις που προέρχονται από τον άνεμο, τους κυματισμούς και τα θαλάσσια ρεύματα είναι δυναμικού χαρακτήρα, μπορούν όμως να προσομοιωθούν ψευδοστατικά για την ανάλυση της θεμελίωσης, αγνοώντας την κόπωση της ανωδομής.
- ✓ Το δυσμενέστερο σενάριο φόρτισης για την θεμελίωση της ανεμογεννήτριας είναι αυτό της ταυτόχρονης δράσης προς την ίδια κατεύθυνση των δυνάμεων του ανέμου και των θαλάσσιων κυματισμών. Ωστόσο, κατά την διάρκεια ζωής του έργου συνήθως η ανεμογεννήτρια υποβάλετε σε φόρτιση ανέμου μιας κατεύθυνσης και κυματισμούς διπλής κατεύθυνσης. Αυτό οφείλεται στην μεγάλη διαφορά της ιδιοπεριόδου κάθε φόρτισης ( $T_{\text{ανέμου}} > 10\text{min}$ ,  $T_{\text{κυμάτων}} \approx 10\text{sec}$ ).
- ✓ Υπενθυμίζουμε ότι τα κριτήρια σχεδιασμού είναι:

$$\theta_{\max}=0.0087\text{rad}$$

$$w=0.05D$$

$$FS_M=2$$

- ✓ Ύστερα από μια σειρά αναλύσεων καταλήγουμε ότι ο βέλτιστος λόγος έμπτυξης της θεμελίωσης για την μικρή ανεμογεννήτρια (**2MW**) είναι ο μονοπάσσαλος με **L/D=5** (βάθος έμπτυξης 25m), για την μεσαία ανεμογεννήτρια (**3.5MW**) είναι ο μονοπάσσαλος με **L/D=6** (βάθος έμπτυξης 30m) και για την μεγάλη ανεμογεννήτρια (**5MW**) είναι ο λόγος έμπτυξης **L/D=7** (βάθος έμπτυξης 35m).
- ✓ Ο μονοπάσσαλος είναι μία αξιόπιστη θεμελίωση ωστόσο έχει κάποια σημεία που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής κατά τον σχεδιασμό και βελτίωσης στο μέλλον:
  - για μικρά βάθη έμπτυξης έχουμε μεγάλη συσσώρευση στροφών και πλαστικών παραμορφώσεων
  - όσο μεγαλώνει το βάθος έμπτυξης, αυξάνονται σχεδόν εκθετικά οι χρονικές και οικονομικές απαιτήσεις της διαδικασίας έμπτυξης του μονοπασσάλου
  - με την πάροδο των κύκλων φόρτισης δημιουργείται μόνιμο κενό γύρω από τον μονοπάσσαλο (scour).







# Βιβλιογραφία



## Βιβλιογραφία

- ABAQUS 6.10. [2010]. Standard user's manual. Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA.
- Abdel-Rahma, K. Achmus, M. [2006]. "Behaviour of Monopile and Suction Bucket Foundation Systems for Offshore Wind Energy Plants", *Foundation Engineering and Waterpower Engineering*, University of Hannover.
- Abdel-Rahman, K. & Achmus, M. [2005]. "*Finite Element Modelling of horizontally loaded Monopile Foundations for Offshore Wind Energy Converters in Germany*". International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG), Perth, Australia.
- Allotey, N., Naggar, MHE. [2003]. "Analytical moment–rotation curves for rigid foundations based on a winkler model", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23 (5), 367–381.
- Allotey N., Naggar, MHE. [2008]. "An investigation into the winkler modeling of the cyclic response of rigid footings", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28 (1), 44–57.
- Anastasopoulos, I., Gelagoti, F., Kourkoulis, R. and Gazetas, G. [2012]. "Simplified Constitutive Model for Simulation of Cyclic Response of Shallow Foundations: Validation against Laboratory Tests", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 137 (12), 1154-1168.
- Apostolou, M., Gazetas, G. [2007]. "Analytical modeling of footings under large overturning moment" In. Proc. 2nd Greece - Japan workshop: Seismic Design, Observation, and Retrofit of Foundations, Tokyo, 3-4 April, 165-184.
- Badoni, D. & Makris, N. [1996]. "Nonlinear response of single piles under lateral inertial and seismic loads", *Soil Dynamic and Earthquake Engineering* 15, 29-43.
- Banerje, P. K. [1978]. "Analysis of axially and laterally loaded pile groups", In *Development in Soil Mechanics*. ed. C. R. Scott. *Applied Science Publ. London. Ch. 9, 317-346*.
- Bazeos, N., Hatzigeorgiou, G. D., Hondros, I. D., Karamaneas, H., Karabalis, D. L. and Beskos, D. E. [2002]. "Static, Seismic and Stability Analyses of a Prototype Wind Turbine Steel Tower", *Eng. Struct.*; Vol. 24, 2002; 1015.
- Bell, R. W. [1991]. "The analysis of offshore foundations subjected to combined loading", MSc thesis, University of Oxford, Oxford, U.K.
- Bhattacharya, A. S. Adhikari, B. [2011]. "Experimental validation of soil–structure interaction of offshore wind turbines", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 31 805–816, Elsevier Ltd.

- Bontempi, F., Li, H., Petrini, F. and Manenti, S. [2008b]. "Numerical modeling for the analysis and design of offshore wind turbines", The 4th International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM'08), Jeju, May.
- Bransby, M. F., Randolph, M. F. [1997]. "Shallow foundations subject to combined loadings" Proc. 9th Int. Conf. on Comp. Methods and Advances in Geomechcs, Wuhan 3, 1947–1952.
- Bransby, M. F., Randolph, M. F. [1999]. "The effect of embedment depth on the undrained response of skirted foundations to combined loading", Soils Found. 39 (4), 19–33.
- Brinch Hansen, J. [1970]. "A revised and extended formula for bearing capacity." Bulletin No. 28, Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, 5-11.
- Byrne, B. W., Houlsby, G. [2005]. "Assessing Novel Foundation Options for Offshore Wind Turbines", University of Oxford, Oxford, U.K.
- Chakrabarti, S.K. [1987]. "Hydrodynamics of Offshore Structures", ISBN 0-905451-66-X Computational Mechanics Publications Southampton.
- Davis, E. H. and Booker, J. R. [1973]. "The effect of increasing strength with depth on the bearing capacity of clays", Geotechnique, 23 (4), 551-563.
- Davis, R. O. and Selvadurai, A. P. S. [2002]. "Plasticity and Geomechanics", Cambridge University Press.
- Det Norske Veritas (DNV) [2001]. "Guidelines for Design of Wind Turbines", Copenhagen: Det Norske Veritas.
- Doherty, J.P. and Deeks, A.J. [2005], "Adaptive coupling of the finite-element and scaled boundary finite-element methods for non-linear analysis of unbounded media", Computers and Geotechnics, 32, 6, pp. 436-444.
- Fuglsang, L. D. and Steensen-Bach, J. O. [1991]. "Breakout resistance of suction piles in clay", Proc. Int. Conf. On Centrifuge Modeling: Centrifuge 91, Boulder, Colorado, 163-159.
- Gazetas, G. [1983]. "Analysis of machine foundation vibrations: state of the art", Soil Dynamics and Earthquake Engng, 2 (1), 2-42.
- Gazetas, G. [1987]. "Simple physical methods for foundation impedances", Dynamics of Foundations and Buried Structures, Benerjee PK and Butterfield R., editors, Elsevier Applied Science, Chapter 2, 44-90.
- Gazetas, G. [1991]. "Formulas and charts for impedances of surface and embedded foundations", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 117 (9), 1129–1141.

- Gazetas, G., Anastasopoulos, I. and Apostolou, M. [2007]. "Shallow and Deep Foundations under Fault Rupture or Strong Seismic Shaking", *Earthquake Geotechnical Engineering*, Pitilakis K., Editor, Springer: Berlin, 185–210.
- Gazetas, G., Anastasopoulos, I., Adamidis, O. and Kontoroupi, T. [2012]. "Nonlinear rocking stiffness of foundations", submitted for publication.
- Gazetas, G., Apostolou, M. [2004]. "Nonlinear soil-structure interaction : foundation uplifting and soil yielding", *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> US–Japan Workshop on Soil-Structure Interaction*, Menlo Park, California.
- Gerolymos, N. and Gazetas, G. [2006]. "Static and Dynamic Response of Massive Caisson Foundations with Soil and Interface Nonlinearities-Validation and Results", *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 26 (5), 377-394.
- GL, Germanischer Lloyd Wind Energie GmbH [2002]. *Richtlinie zur Erstellung von technischen Risikoanalysen für Offshore-Windparks*, Germanischer Lloyd, Hamburg.
- Gottardi, G., Houlsby, G. T. & Butterfield, R. [1999]. "The plastic response of circular footings on sand under general planar loading", *Geotechnique*, 49 (4), 453–470.
- Gourvenec, S. [2007]. "Failure envelopes for offshore shallow foundations under general loading", *Geotechnique*, 57 (9), 715-728.
- Gourvenec, S. [2008]. "Effect of embedment on the undrained capacity of shallow foundations under general loading", *Geotechnique*, 58 (3), 177-185.
- Haenler, M., Ritschel, U. and Warnke, I. [2006]. "Systematic Modeling of Wind Turbine Dynamics and Earthquake Loads on Wind Turbines", *European Wind Energy Conference and Exhibition*, European Wind Energy Association, Athens, Greece, 2006; 1–6.
- Hasselmann et al., [1973]. "Measurements of wind wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project", *Deutsche Hydro. Zeitschr. Riehe*, A8.
- Houlsby, G. T. and Martin, C. M. [2003]. "Undrained bearing capacity factors for conical footings on clay" *Géotechnique*, 53 (5), 513-520.
- Kausel, E. and Ushijima, R. [1979]. "Vertical and torsional stiffness of cylindrical footings", *Research Rep. R76-6*, MIT.
- Kellezi, L. Hansen, P. B. [2003]. "Dynamic transient analysis of a mono-pile windmill foundation", *GEO - Danish Geotechnical Institute, Lyngby, Denmark*.

- Kourkoulis, R., Gelagoti, F. and Kaynia, A. [2012]. "Seismic response of offshore wind turbine foundations", 15th WCEE, Lisbon, 2012.
- Kuhlemeyer, R. L. 1979. Static and dynamic laterally loaded floating piles. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE 105(GT2)*, 325-330.
- Lavassas, I., Nikolaidis, G., Zervas, P., Efthimiou, E., Doudoumis, I. N. and Baniotopoulos, C. C. [2003]. "Analysis and Design of the Prototype of a Steel 1-MW Wind Turbine Tower", *Eng. Struct.*; Vol. 25(8), 2003; 1097–1106.
- Li, Z. Haigh, S. K. & Bolton, M. D., [2010] "Centrifuge modelling of mono-pile under cyclic lateral loads", *Department of Engineering, University of Cambridge, UK*, 7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, Zurich, Vol. 2, 965-970
- Long J. H. & Vanneste G. [1994]. "Effects of cyclic lateral loads on piles in sand". *Journal of Geotechnical Engineering*", *ASCE*, Vol. 120, No. 1, pp. 225-243.
- Martin, C. M. [1994]. "Physical and numerical modeling of offshore foundations under combined loads", D.Phil. thesis, Univ. of Oxford, UK.
- Martin, C. M. & Houlsby, G. T. [2000]. "Combined loading of spudcan foundations on clay: laboratory tests", *Geotechnique* 50, No. 4, 325–338.
- Meyerhof, G. G. [1951]. "The ultimate bearing capacity of foundations", *Geotechnique*, 2 (4), 301-332.
- Meyerhof, G. G. [1953]. "The bearing capacity of foundations under eccentric and inclined loads" *Proc. 3rd Int. Conf. Soil Mech. Fndn Engng*, Vol.1, Zurich, 440-445.
- Moss R. E. S., Caliendo J.A., and Anderson L.R. [1998]. "Investigation of a cyclic laterally loaded model pile group", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 17, pp. 519-523.
- Murff, J. D. [1994]. "Limit analysis of multi-footing foundation systems", *Proc. 8th Int. Conf. Comput. Methods, Adv. Geomech.*, Morgantown 1, 440-445.
- Ntritsos, N. [2011]. "Inelastic response of embedded foundations", Diploma thesis, NTUA.
- O'Neill M. W., Hawkins R. A., and Mahar L. J. [1982]. "Load transfer mechanisms in piles and pile groups", *Journal of Geo. And Found. ASCE*. Vol. 108, No. GT12, pp. 1605- 1623.
- Ooi P. S. K., Chang B. K. F. and Wang S. [2004]. "Simplified lateral load analyses of fixed-head piles and pile groups", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol. 130, No. 11, pp. 1140-1151.

- Petrini, F. Li, H. Bontempi, F. [2010]. "Basis of design and numerical modeling of offshore wind turbines", *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 36, No. 5 599-624 599.
- Pierson, W. J., Moskowitz, L. A. [1964]. "A proposed spectral form of fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodshii", *J. Geophys. Res.*, Vol. 69.
- Poulos, H. G. and Davis, E. H. [1974]. "Elastic solutions for soil and rock mechanics", published by John Wiley & Sons, Inc., New York, London, Sydney, Toronto.
- Prandtl, L. [1921]. "Über die Eindringungsfestigkeit (Harte) plastischer Baustoffe und die Festigkeit von Schneiden", *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik*, 1 (1), 15–20.
- Randolph, M. F. and Gourvenec, S. [2011]. "Offshore geotechnical engineering", published by Spon Press.
- Randolph, M. F. and Puzrin, A. M. [2003]. "Upper bound limit analysis of circular foundations on clay under general loading", *Geotechnique*, 53 (9), 785-796.
- Reese L. & Van Impe W.F., [2001]. "Single Piles and Pile Group Under Lateral Loading"
- Reese, L. C., and Matlock, H. [1956]. "Non-dimensional solutions for laterally loaded piles with soil modulus assumed proportional to depth." *8th Texas Conf. on Soil Mech. And Foundation Engrg.*, Sep. 14.
- Ritschel, U., Warnke, I., Kirchner, J. and Meussen, B. [2003]. "Wind Turbines and Earthquakes", Second World Wind Energy Conference, World Wind Energy Association, Cape Town, South Africa, 2003.
- Roesset, J. M. [1980]. "Stiffness and damping coefficients of foundations", *Dynamic Response of Foundations: Analytical Aspects*, M.W. O'Neil and R. Dobry (eds), ASCE, 1-30.
- Roesset J. M. [1980]. "The use of simple models in soil-structure interaction", *Civil Engineering and Nuclear Power*, ASCE, Vol. 1, 1-25.
- Salgado, R., Lyamin, A. V., Sloan, S. W. and Yu, H. S. [2004]. "Two and three-dimensional bearing capacity of foundations in clay", *Geotechnique*, 54 (5), 297–306.
- Skempton, A. W. [1951]. "The bearing capacity of clays." *Building Research Congress*, London, Vol. 1, 180-189.
- Steensen-Bach, J. O. [1992]. "Recent model tests with suction piles in clay and sand", *Proc. Annual Offshore Tech. Conf.*, Houston, Paper OTC 1882.



- Taiebat, H. A. and Carter, J. P. [2002]. "Bearing Capacity of Strip and Circular Foundations on Undrained Clay Subjected to Eccentric Loads", *Geotechnique*, 52 (1), 61-64.
- Tan, F. S. C. [1990]. "Centrifuge and numerical modelling of conical footings on sand", PhD thesis, University of Cambridge.
- Tempel, J. van der, Zaijjer, M.B. and Subroto, H.[2004]. "The effects of scour on the design of offshore wind turbines", *Proceedings of the 3rd International Conference on Marine Renewable Energy Marec*, 27-35. London, IMarec.
- Tempel, J. van der. [2006]. "Design of support structures for offshore wind turbines", Ph.D. Thesis, Technische Universiteit Delft, Delft, Netherlands.
- Terzaghi, K. [1943]. "Theoretical soil mechanics", John Willey, London and New York.
- Witcher, D. [2005]. "Seismic Analysis of Wind Turbines in the Time Domain", *Wind Energy*; Vol. 8; p. 81.
- Wichtmann, T. Niemunis, A. Triantafyllidis, T. [2009] "Prediction of long-term deformations for monopile foundations of offshore wind power plants", *Institute of Soil Mechanics and Rock Mechanics, University of Karlsruhe*.
- Zaijjer, .M.B. [2002]. "Foundation models for the dynamic response of offshore wind turbines" *Delft University of Technology, Marine Renewable Energy Conference (MAREC), Newcastle, UK*.
- Zhao, X. and Maisser, P. [2006]. "Seismic Response Analysis of Wind Turbine Towers Including Soil-Structure Interaction", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: J. Multi-Body Dynamics*; Vol. 220, 2006; p. 53.

## Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία

<http://www.energy.eu/publications/a07.pdf> - European Wind Energy Association – EWEA

[www.bwea.com](http://www.bwea.com) - British Wind Energy Association

<http://ec.europa.eu/dgs/jrc> - The European Commission – Joint Research Centre (Renewable Energy Snapshots 2010)

<http://ocsenergy.anl.gov/index.cfm> - OCS Alternative Energy and Alternate Use Programmatic EIS Information Center

<http://offshorewind.net>

[www.inhabitat.com](http://www.inhabitat.com)

<http://en.wikipedia.org>

<http://www.4coffshore.com/offshorewind>



