



Συμπεριφορά Θαλάσσιων Ανεμογεννητριών θεμελιωμένων επί κοίλων Ανεστραμμένων Φρεάτων σε Ανακυκλική και Σεισμική Φόρτιση

Κουρκουλής Ρ.^α, Γελαγώτη Φ.^α, Λεκκάκης Π.^β, Γεωργίου Ε.^γ, Γκαζέτας Γ.^δ

^α Δρ. Πολ. Μηχανικός, Μεταδιδάκτωρ Ερευνητής ΕΜΠ, ^β Πολ. Μηχανικός, MSc,

^γ Πολ. Μηχανικός, Υποψ. Διδάκτωρ ΕΜΠ, ^δ Πολ. Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της εν λόγω μελέτης είναι η ανάλυση της ανακυκλικής και σεισμικής απόκρισης Α/Γ θεμελιωμένης επί κοίλου ανεστραμμένου φρέατος. Για το σκοπό αυτόν, διενεργήθηκαν μη γραμμικές αριθμητικές αναλύσεις ΠΣ του πλήρους προσομοιώματος εδάφους-ανωδομής, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στο ρόλο των συνθηκών επαφής στη διεπιφάνεια θεμελίου εδάφους, οι οποίες να μεν μειώνουν την καμπτική καταπόνηση του πύργου, αυξάνουν ωστόσο τις παραμένουσες μετακινήσεις του συστήματος. Το προσομοίωμα υποβλήθηκε σε ανακυκλική και σεισμική φόρτιση σε μία και δύο διευθύνσεις. Αποδεικνύεται ότι η συσσώρευση στροφής στη θεμελίωση ενδέχεται να είναι αυξημένη, όταν ληφθεί υπόψιν η ενδεχόμενη αντιστροφή της φοράς της ανεμοπίεσης. Ως προς τη σεισμική φόρτιση, καταδεικνύεται ότι λόγω της μεγάλης της ιδιοπεριόδου η Α/Γ δεν είναι ευαίσθητη στην αδρανειακή σεισμική φόρτιση. Εάν όμως ληφθεί υπόψιν η ταυτόχρονη δράση των περιβαλλοντικών φορτίων, όπως τα κύματα και η ανεμοπίεση, τότε, αναλόγως της φύσης της σεισμικής διέγερσης, ενδέχεται να προκληθεί κινηματικού χαρακτήρα συσσώρευση στροφής προς τη φορά της ανεμοπίεσης η οποία ασφαλώς δεν αναιρείται μετά το πέρας της φόρτισης.

ABSTRACT

This paper investigates the response of wind turbines founded on suction caissons taking account of soil-structure interaction and the possibility of imperfect interface conditions. It is shown that interface failure may substantially reduce the capacity of such foundations. When subjected to earthquake shaking imperfect interface conditions may limit the tower bending but could produce irrecoverable displacement on the nacelle level as a result of the accumulated rotation at the foundation level. It is shown that, depending on the loading path, consideration of the possible change in the direction of loading could greatly modify the capacity of the foundation compared to its 1-directional counterpart. Regarding seismic loading, it is shown that the system kinematics may prove crucial for the response of large wind turbines subjected to



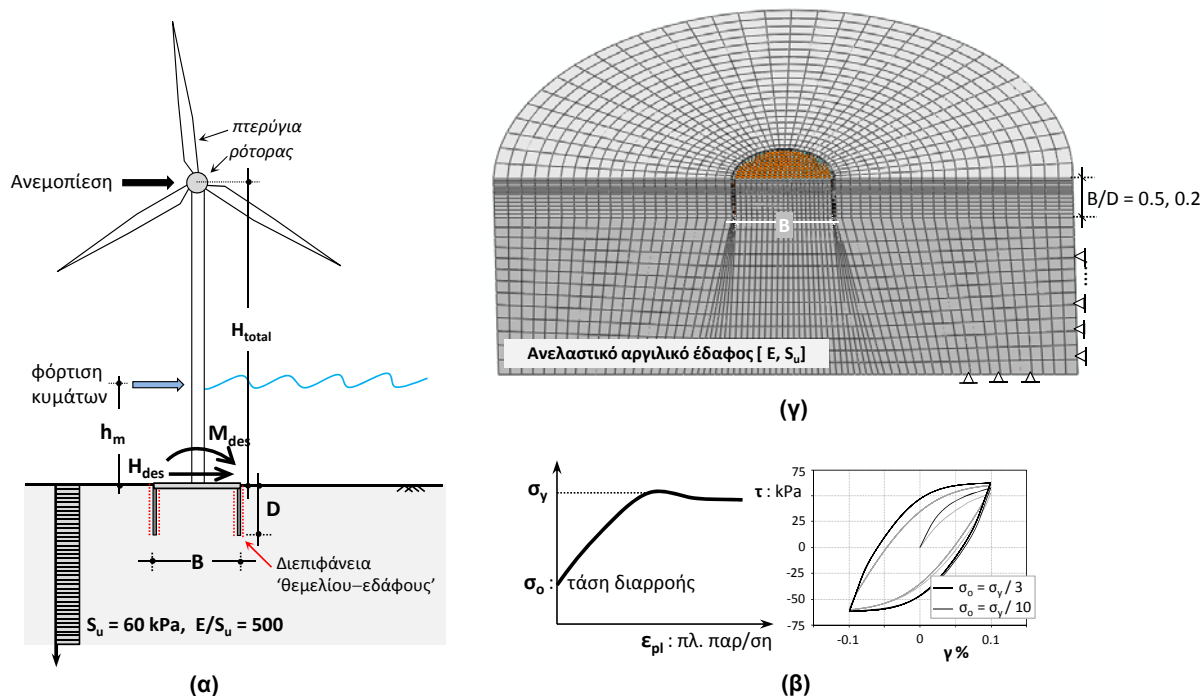
simultaneous environmental and seismic loads. Although not instantly catastrophic, the accumulation of foundation rotation could lead to the turbine reaching serviceability limits early during its operation.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες, η προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αποτελεί σημαντική προτεραιότητα των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Ο σχεδιασμός, η κατασκευή και η εγκατάσταση μιας θαλάσσιας ανεμογεννήτριας (Α/Γ) είναι ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον έργο μεγάλων απαιτήσεων και για τον γεωτεχνικό μελετητή: η θεμελίωση υποβάλλεται, καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του έργου, σε πολύ υψηλές ροπές (κυρίως εξαιτίας της δράσης του ανέμου) υπό σχετικώς χαμηλό κατακόρυφο φορτίο. Η πλέον δημοφιλής μέθοδος θεμελίωσης είναι η υιοθέτηση δύσκαμπτων μονοπασσάλων πολύ μεγάλης διαμέτρου και μήκους που υπερβαίνει τα 20 m. Αναπόφευκτα, όσο τα βάθη θεμελίωσης αυξάνουν και όσο οι εδαφικές συνθήκες γίνονται πιο δυσμενείς, το κόστος κατασκευής και εγκατάστασης τέτοιων γιγάντιων θεμελιώσεων αυξάνει εκθετικά και πολλές φορές γίνεται κρίσιμο, αν όχι απογορευτικό, για την απόδοση της επένδυσης. Μια εναλλακτική λύση θεμελίωσης, που στηρίζει την επιτυχία της στον περιορισμό του κόστους εγκατάστασης, είναι τα κοίλα ανεστραμμένα φρέατα, γνωστά στη διεθνή βιβλιογραφία με τον όρο «suction caissons». Το σημαντικότερό τους πλεονέκτημα είναι η ευκολία στην έμπηξη, η οποία επιτυγχάνεται μέσω άντλησης του νερού που εμπεριέχεται εντός του κοίλου φρέατος και την ανάπτυξη υποπίεσης η οποία «έλκει» το θεμέλιο στην τελική του θέση.

Αντικείμενο της παρούσας μελέτης είναι η ανάλυση της συμπεριφοράς Α/Γ θεμελιωμένων επί κοίλων φρεάτων υποβαλλομένων στη συνήθη φόρτιση (μονοτονική δράση ανέμου) και σε ισχυρής εντάσεως σεισμική εξαίτιση. Προς τούτο, διενεργήθηκαν μη γραμμικές αριθμητικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων (ΠΣ) του πλήρους συστήματος ανεμογεννήτρια-θεμέλιο-έδαφος, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στη ρεαλιστική προσομοίωση των συνθηκών επαφής εδάφους-θεμελίου.



Σχήμα 1. (α) Θαλάσσια ανεμογεννήτρια θεμελιωμένη επί ανεστραμμένου κοίλου φρέατος, και (β) καταστατικό προσομοίωμα εδάφους: 1-διάστατη απεικόνιση του νόμου σ-ε και αριθμητικό παράδειγμα βαθμονόμησης

2. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Το υπό μελέτη πρόβλημα αφορά μια τυπική θαλάσσια ανεμογεννήτρια θεμελιωμένη μέσω ενός κοίλου ανεστραμμένου φρέατος σε ομοιογενές αργιλικό έδαφος, αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $S_u = 60 \text{ kPa}$ και μέτρου ελαστικότητας $E_{stat} = 30 \text{ MPa}$ (Σχ. 1α). Η διάμετρος του φρέατος είναι ίση με $D=20 \text{ m}$ και θεωρείται μάλλον τυπική για τη θεμελίωση Α/Γ ισχύος 3.5 MW – σε αντίστοιχες εδαφικές συνθήκες–, ενώ είναι μάλλον συντηρητική για τη θεμελίωση Α/Γ ισχύος 2 MW . Δύο τύποι θεμελιώσεως αναλύονται: ένα φρέαρ με λόγο εγκιβωτισμού $D/B=0.2$ και μία βαθύτερη λύση με $D/B = 0.5$. Η γεωμετρία και τα φορτία σχεδιασμού των εν λόγω συστημάτων συνοψίζονται στον Πίνακα 1. Για την ανάλυση του προβλήματος διεξήχθησαν τρισδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων λαμβάνοντας υπόψιν την υστερητική ανελαστική απόκριση των εδαφικών υλικών (Σχ. 1β και γ) αλλά και τις γεωμετρικές μη-γραμμικότητες του προβλήματος. Το έδαφος προσομοιώθηκε με χρήση 8-κομβικών εξαεδρικών στοιχείων συνεχούς μέσου, η ανελαστική απόκριση των οποίων περιγράφεται μέσω καταστατικού νόμου κινηματικής κράτυνσης, με θεώρηση κριτηρίου αστοχίας Von Mises και συσχετισμένο νόμο πλαστικής ροής (Anastasopoulos et al, 2012).



Για την προσομοίωση των συνθηκών επαφής εδάφους-φρέατος χρησιμοποιήθηκαν ειδικά στοιχεία διεπιφάνειας, τα οποία επιτρέπουν την αναπαραγωγή φαινομένων αποκόλλησης ή ολίσθησης μεταξύ του φρέατος και του εσωτερικού ή εξωτερικού εδάφους. Η κατάλληλη βαθμονόμηση των παραμέτρων τους επιτρέπει την προσομοίωση:

(α) *ιδανικών συνθηκών επαφής* (όπου το έδαφος μπορεί να αναπτύξει εφελκυστική αντοχή και η διατμητική αντοχή αυτού ισούται με την ονομαστική αντοχή του εδάφους, ήτοι $\tau_{max} = S_u = 60 \text{ kPa}$) και

(β) *ατελών συνθηκών επαφής* (δηλ. μηδενική εφελκυστική αντοχή και μειωμένη διατμητική αντοχή στην διεπιφάνεια επαφής $\tau_{max} = \alpha S_u$, όπου α συντελεστής απομείωσης).

A/Γ	H _{total} : m	m _{total} : tn	M _{design} : MNm	H _{design} : MN
2 MW	60-70	250 - 350	70 - 90	2-3
3.5 MW	90-100	500 - 600	100 - 130	4-5

Πίνακας 1. Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά και τυπικά φορτία σχεδιασμού για A/Γ ισχύος 2.0 και 3.5 MW αντιστοίχως.

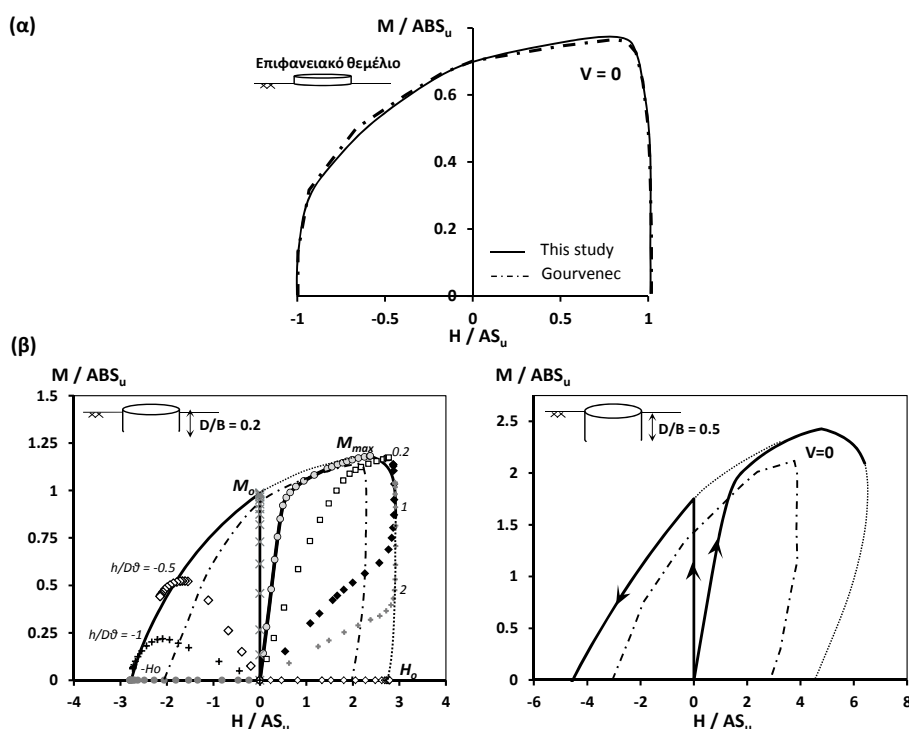
3. ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΥΠΟ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ : ΘΕΩΡΗΣΗ ΙΔΑΝΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΕΠΑΦΗΣ

Αρχικώς μελετήθηκε η απόκριση του συστήματος υπό θεώρηση ιδανικών συνθηκών επαφής, το οποίο και αποτελεί μια συχνά απαντώμενη υπόθεση στη διεθνή βιβλιογραφία (*Gourvenec 2007; Yun & Bransby, 2007*). Οι αναλύσεις της ενότητας αυτής θα υπηρετήσουν διπλό σκοπό. Αρχικώς θα αξιοποιηθούν ως μέσο επίδειξης της αξιοπιστίας της αριθμητικής μεθοδολογίας (μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας με αυτά άλλων μελετών) και, εν συνεχεία, μέσω μιας σύντομης παραμετρικής διερεύνησης, θα αναλυθεί ο καθοριστικός ρόλος του βαθμού εγκιβωτισμού στη μέγιστη αντοχή που δύνανται να αναπτύξουν τα κοίλα ανεστραμμένα φρέατα υπό συνδυασμένη δράση ροπής (M) και τέμνουσας (H). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται υπό τη μορφή αδιάστατων περιβαλλουσών αστοχίας (failure envelopes) στο πεδίο M-H με θεώρηση μηδενικού αξονικού φορτίου (*Tan, 1990.*)

Στο Σχήμα 2α τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης (συνεχής μαύρη γραμμή) συγκρίνονται με εκείνα της *Gourvenec (2007)* για την οριακή περίπτωση $D/B = 0$ (ήτοι για το αντίστοιχο επιφανειακό θεμέλιο). Οι δύο καμπύλες πρακτικώς συμπίπτουν σε κάθε πιθανό συνδυασμό ροπής και τέμνουσας, γεγονός που επιβεβαιώνει την αξιοπιστία της προσομοίωσής μας. Στο Σχήμα 2β οι εξαχθείσες από το πλήρες 3-διάστατο προσομοίωμα περιβάλλουσες αστοχίας (συνεχής γραμμή) συγκρίνονται με τα αποτελέσματα

απλοποιημένων 2-διάστατων προσομοιωμάτων επίπεδης παραμόρφωσης και για τους δύο λόγους εγκιβωτισμού. Τα κυριότερα συμπεράσματα συνοψίζονται ως ακολούθως :

- Όσο το βάθος της θεμελίωσης αυξάνει, αυξάνουν και οι διαφορές των δύο μελετών. Οι αναλύσεις επίπεδης παραμόρφωσης συστηματικά υποεκτιμούν την πραγματική αντοχή της θεμελίωσης, με τις διαφορές να αυξάνονται όσο ο λόγος M/H λαμβάνει χαμηλότερες τιμές. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι υπό αμιγώς οριζόντιο φορτίο (σημείο H_o επί της περιβάλλουσας αστοχίας) η αντοχή υπολογίζεται ίση με $H_o = 2AS_u$ για $D/B = 0.2$ και $H_o = 3AS_u$ για $D/B = 0.5$ υπό συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης, όταν οι αντίστοιχες τιμές των 3D αναλύσεων είναι κατ' ελάχιστον επαυξημένες κατά έναν συντελεστή 1.5. Η ερμηνεία της σημαντικής αυτής απόκλισης είναι σχεδόν αυτονόητη. Στις 3D αναλύσεις (οι οποίες προσομοιώνουν πιστότερα το πραγματικό πρόβλημα), κατά την πλευρική φόρτιση του θεμελίου πέραν των ενεργητικών και παθητικών ωθήσεων που αναπτύσσονται στις έμπροσθεν και όπισθεν (της φοράς φόρτισης) πλευρές του θεμελίου, κινητοποιείται διατμητική αντίσταση και στα παράπλευρα τοιχώματα. Όσο επομένως η επιφάνεια των περιφερειακών τοιχωμάτων αυξάνει (ήτοι όσο ο λόγος D/B λαμβάνει υψηλότερες τιμές) τόσο μεγαλύτερη αναμένεται να είναι η συμμετοχή της διατμητικής αυτής συνιστώσας στην μεγιστή αντοχή που μπορεί να αναπτύξει το θεμέλιο (άρα και μεγαλύτερη η απόκλιση σε σχέση με τις 2D θεωρήσεις).
- Ειδικά για την περίπτωση των A/G , όπου ο λόγος M/H λαμβάνει πολύ υψηλές τιμές ($M/H = 80 - 100$ m), η απόκριση της θεμελίωσης πρακτικώς συμπίπτει με αυτή υπό αμιγώς φορτίο ροπής (σημείο M_o επί της περιβάλλουσας αστοχίας). Γι' αυτόν το συνδυασμό φόρτισης τα αποτελέσματα των 2D αναλύσεων είναι σαφώς λιγότερο συντηρητικά.
- Μια μικρή επιμήκυνση των περιφερειακών τοιχωμάτων του φρέατος (από $D/B = 0.2$ σε $D/B = 0.5$), επιφέρει σημαντικότερη αύξηση στην αντοχή (από $M_{0.2} \approx ABS_u$ σε $M_{0.5} \approx 1.7ABS_u$).



Σχήμα 2. (α) Τεκμηρίωση της αριθμ. μεθοδολογίας μέσω σύγκρισης των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης με εκείνα των Gourvenec et al (2007) για την περίπτωση του κυκλικού επιφανειακού θεμελίου. (β) Σύγκριση αποτελεσμάτων 2D και 3D αναλύσεων σε όρους αδιαστατοποιημένων περιβαλλουσών αστοχίας στο πεδίο H-M ($V=0$). Θεώρηση συνθηκών πλήρους επαφής μεταξύ εδάφους-θεμελίου.

4. ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΥΠΟ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ: ΑΤΕΛΕΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΠΑΦΗΣ

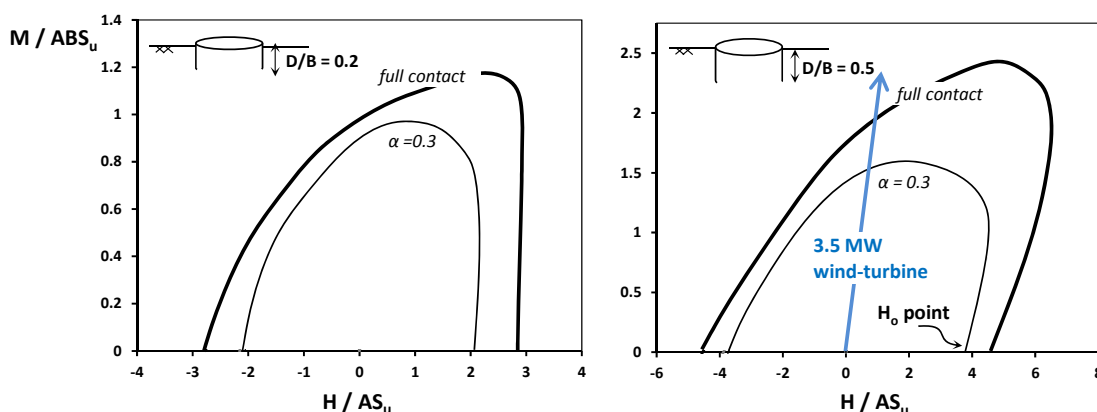
4.1 Μονοτονική Φόρτιση

Η πλειονότητα των ερευνών για ανεστραμμένα κοίλα φρέατα υιοθετεί ιδανικές συνθήκες επαφής μεταξύ του εδάφους και των πλευρικών τοιχωμάτων του θεμελίου, ως εάν το φρέαρ έχει τοποθετηθεί στην τελική του θέση αφήνοντας πρακτικώς αδιατάρακτο το περιβάλλον έδαφος. Στην παράγραφο αυτή, μελετώνται οι επιπτώσεις της υπόθεσης αυτής στην απόκριση της θεμελίωσης. Προς τούτο αναλύεται ένα επαρκώς συντηρητικό σενάριο στο οποίο υποθέτουμε ότι το περιβάλλον έδαφος κατά τη φάση έμπηξης του φρέατος, υπέστη σημαντική πλαστικοποίηση και ως εκ τούτου η μέγιστη προσφερόμενη διατμητική αντίσταση επί της παράπλευρης επιφάνειας του θεμελίου ισούται μόλις με το 0.3 της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής του εδάφους, δηλαδή $\tau_{\max} = \alpha S_u = 0.3S_u$. Αντίστοιχες τιμές του λόγου α μετρήθηκαν σε πειράματα φυγοκεντριστή των Gourvenec et al. (2009).

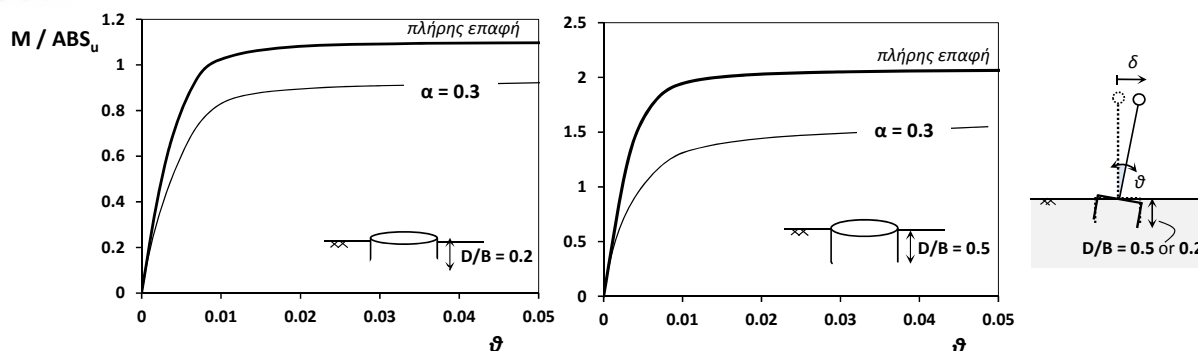
Η επιρροή των ιδιοτήτων της επιφάνειας επαφής εδάφους-θεμελίου συνοψίζεται στο Σχήμα 3. Όπως προηγουμένως, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε όρους αδιαστατοποιημένων περιβαλλουσών αστοχίας στο πεδίο M-H υπό μηδενικό κατακόρυφο φορτίο. Είναι φανερό πως η θεώρηση ατελών

διεπιφανειών προκαλεί σημαντική συρρίκνωση των περιβαλλουσών αστοχίας, ενώ και η έντονη ασυμμετρία που διαπιστώθηκε υπό συνθήκες πλήρους επαφής απομειώνεται εμφανώς. Περισσότερο πάντως επηρεάζεται η απόκριση του βαθιά εγκιβωτισμένου θεμελίου ($D/B=0.5$), όπου το εμβαδόν της παράπλευρης επιφάνειας είναι μεγαλύτερο, και, επόμενως, σημαντικότερη είναι η επιρροή της μειωμένης αντοχής επ' αυτής στη συνολική αντοχή του θεμελίου. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι υπό συνθήκες μέγιστης ροπής (σημείο M_{\max} επί της περιβάλλουσας) η αντοχή μειώνεται στο 60% της αρχικής της τιμής.

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται οι μονοτονικές καμπύλες ροπής (M)-στροφής (θ) στη βάση της θεμελίωσης όταν η υπό εξέταση ανεμογεννήτρια των 3.5 MW υποβάλλεται σε σταδιακά αυξανόμενη οριζόντια μετακίνηση στο ύψος του ρότορα. Τα βασικά συμπεράσματα εξακολουθούν να ισχύουν. Η μειωμένη αντοχή στη διεπιφάνεια εδάφους-θεμελίου προκαλεί μείωση τόσο στη δυσκαμψία όσο και στη μέγιστη αντοχή του συστήματος θεμελίωσης. Η μείωση αυτή μπορεί να υπερβεί το 35%, γεγονός που καθιστά τον συνήθη σχεδιασμό (με θεώρηση ιδεατών συνθηκών επαφής) μη συντηρητικό.



Σχήμα 3. Επιρροή των «ατελών» συνθηκών επαφής στην αντοχή των ανεστραμμένων κοίλων φρεάτων: αδιαστατοποιημένες περιβάλλουσες αστοχίας στο πεδίο H-M (υπό μηδενικό κατακόρυφο φορτίο) για φρέατα με λόγο έμπτυξης (α) $D/B = 0.2$ και (β) $D/B = 0.5$.

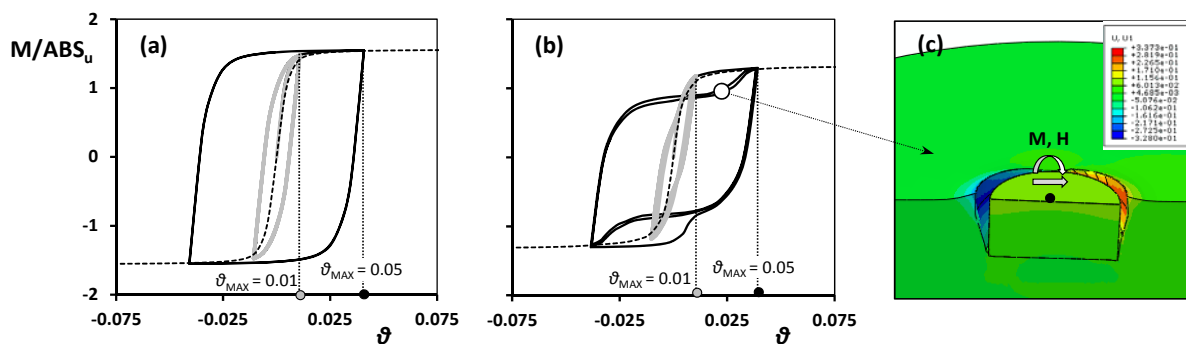


Σχήμα 4. Ανεμογεννήτρια ισχύος 3.5 MW υποβάλλεται σε μονοτονική οριζόντια φόρτιση (στο επίπεδο του ρότορα) ελεγχόμενης μετακίνησης: Καμπύλες ροπής (M)–στροφής (θ) στην άνω επιφάνεια του φρέατος

4.2 Ανακυκλική Φόρτιση

Στην παράγραφο αυτή η ανεμογεννήτρια υποβάλλεται σε ανακυκλική φόρτιση (ολίγων κύκλων) ελεγχόμενης μετακίνησης και μελετάται η απόκριση του συστήματος με και χωρίς τη θεώρηση ατελών διεπιφανειών υπό καθεστώς μικρών και μεγάλων παραμορφώσεων. Προς τούτο δύο αντιπροσωπευτικά πλάτη επιβαλλόμενης μετακίνησης επιλέχθηκαν: $\theta = 0.01$ rad (πρακτικώς ελαστική απόκριση θεμελίου) και $\theta = 0.05$ rad (εντόνως ανελαστική συμπεριφορά). Τα αποτελέσματα παρατίθενται στο Σχήμα 5 με τη μορφή βρόχων M-θ στη βάση του βαθιά εγκιβωτισμένου θεμελίου (D/B=0.5).

Παρατηρούμε ότι, εφόσον το πλάτος της επιβαλλόμενης μετακίνησης είναι σχετικώς μικρό (γκρι γραμμή στο διάγραμμα του Σχήματος 5), η μορφή των παραγόμενων βρόχων πρακτικώς παραμένει ανεπηρέαστη από τις συνθήκες επαφής. Εντούτοις, καθώς το πλάτος της διατμητικής παραμόρφωσης αυξάνει (μαύρη γραμμή), η υστερητική απόκριση του συστήματος θεμέλιο-έδαφος αποκλίνει από τη θεωρητική ρομβοειδή μορφή και λαμβάνει ένα χαρακτηριστικό γωνιώδες σχήμα. Πράγματι, καθώς το θεμέλιο συσσωρεύει στροφή προς μία κατεύθυνση (κατά τη διάρκεια του 1^{ου} κύκλου φόρτισης), προκαλεί έντονη πλαστικοποίηση και παραμένουσα παραμόρφωση στο αντιδρόν έδαφος, η οποία δεν ανακτάται ακόμα και όταν η φορά της επιβαλλόμενης μετακίνησης αντιστρέφεται. Το Σχήμα 5γ απεικονίζει ένα χαρακτηριστικό στιγμιότυπο μετά ακριβώς την ολοκλήρωση του 1^{ου} κύκλου φόρτισης, στο οποίο διακρίνεται καθαρά πως τη δεδομένη χρονική στιγμή το θεμέλιο έχει πρακτικώς χάσει επαφή με το περιβάλλον έδαφος. Επομένως, κατά την εκκίνηση του 2^{ου} κύκλου φόρτισης, η εδαφική αντίσταση είναι πλέον πολύ μικρή, το οποίο και αποτυπώνεται στην πρακτικώς οριζόντια κλίση του βρόχου. Φυσικά, καθώς η επιβαλλόμενη μετακίνηση αυξάνει, η επαφή με το αντιδρόν έδαφος ανακτάται εκ νέου και η κλίση του βρόχου αιφνιδίως αυξάνει.



Σχήμα 5. Ανελαστική υστερητική απόκριση κοίλου ανεστραμμένου φρέατος με λόγο έμπτυξης $D/B = 0.5$ υπό ανακυκλική φόρτιση επιβαλλομένης μετακίνησης μικρού (γκρι γραμμή) και μεγάλου πλάτους (μαύρη γραμμή): βρόχοι M- θ και χαρακτηριστικό στιγμιότυπο του παραμορφωμένου καννάβου κατά την έναρξη του 2^{ου} κύκλου φόρτισης.

5. Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Η επίδραση της αλλαγής του προσανατολισμού της φόρτισης στην απόκριση της Α/Γ διερευνάται συγκρίνοντας τη συσσώρευση της στροφικής παραμόρφωσης για διάφορες περιπτώσεις φόρτισης. Η γενική διάταξη των εν λόγω αναλύσεων αποτυπώνεται στο Σχ. 6α και αναφέρεται στην τυπική περίπτωση ενός φρέατος υποκειμένου στα τυπικά περιβαλλοντικά φορτία (ανεμοπίεση και κύματα). Παρότι και τα δύο φορτία είναι ανακυκλικής φύσεως, η δεσπόζουσα περίοδος του ανέμου είναι εξαιρετικά υψηλότερη αυτής του κυματισμού και, ως εκ τούτου, στις αναλύσεις που παρουσιάζονται στα επόμενα έχει προσομοιωθεί ως ένα σταθερό οριζόντιο φορτίο στο ύψος του ρότορα (Σχ. 6β).

Ο στόχος της ανάλυσης είναι η σύγκριση της συσσώρευσης παραμορφώσεων υπό το ίδιο πρωτόκολλο φόρτισης (βλ. Σενάριο 1 παρακάτω) θεωρώντας στη μεν πρώτη φορά ότι αυτό επιβάλλεται σε αφόρτιστη Α/Γ, στη δε δεύτερη ότι ακολουθεί την αντιστροφή της φοράς της ανεμοπίεσης. Υπό την έννοια αυτή, ορίστηκαν δύο σενάρια φόρτισης:

Σενάριο 1: Επιβολή του φορτίου του ανέμου στη «θετική» οριζόντια φορά και εν συνεχεία επιβολή 10 κύκλων φόρτισης λόγω κυμάτων.

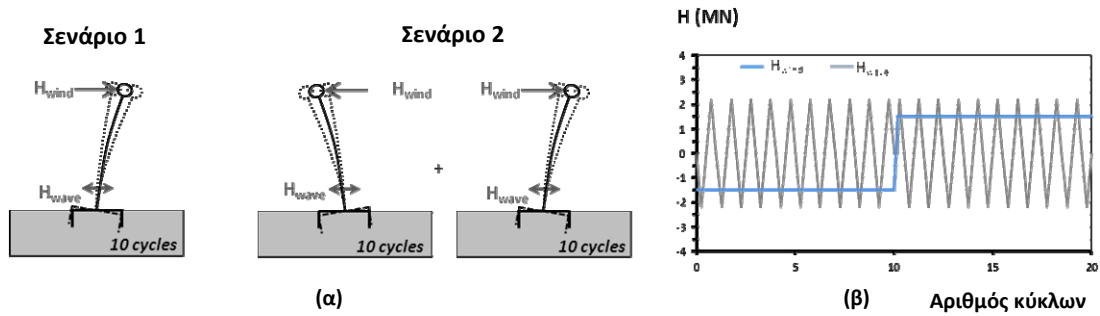
Σενάριο 2: Η φόρτιση του σεναρίου 1 αυτή τη φορά να έπεται μιας αρχικής επιβολής ανεμοπίεσης στην «αρνητική» (αντίθετη) οριζόντια διεύθυνση, ακολουθούμενης από 10 κύκλους φόρτισης κυμάτων.

Όπως και στα προηγούμενα, η εν λόγω διερεύνηση πραγματοποιήθηκε και για τους δύο λόγους εγκιβωτισμού και για αμφότερες τις συνθήκες επαφής στη διεπιφάνεια εδάφους-θεμελίωσης. Στο Σχήμα 7 απεικονίζονται τα αποτελέσματα για όλες τις αναλυθείσες περιπτώσεις. Η μέγιστη στροφή λόγω του Σεναρίου 1 ορίζεται ως θ_1 (Σχ. 7α), ενώ η προκύπτουσα μετά την αντιστροφή της φοράς της ανεμοπίεσης

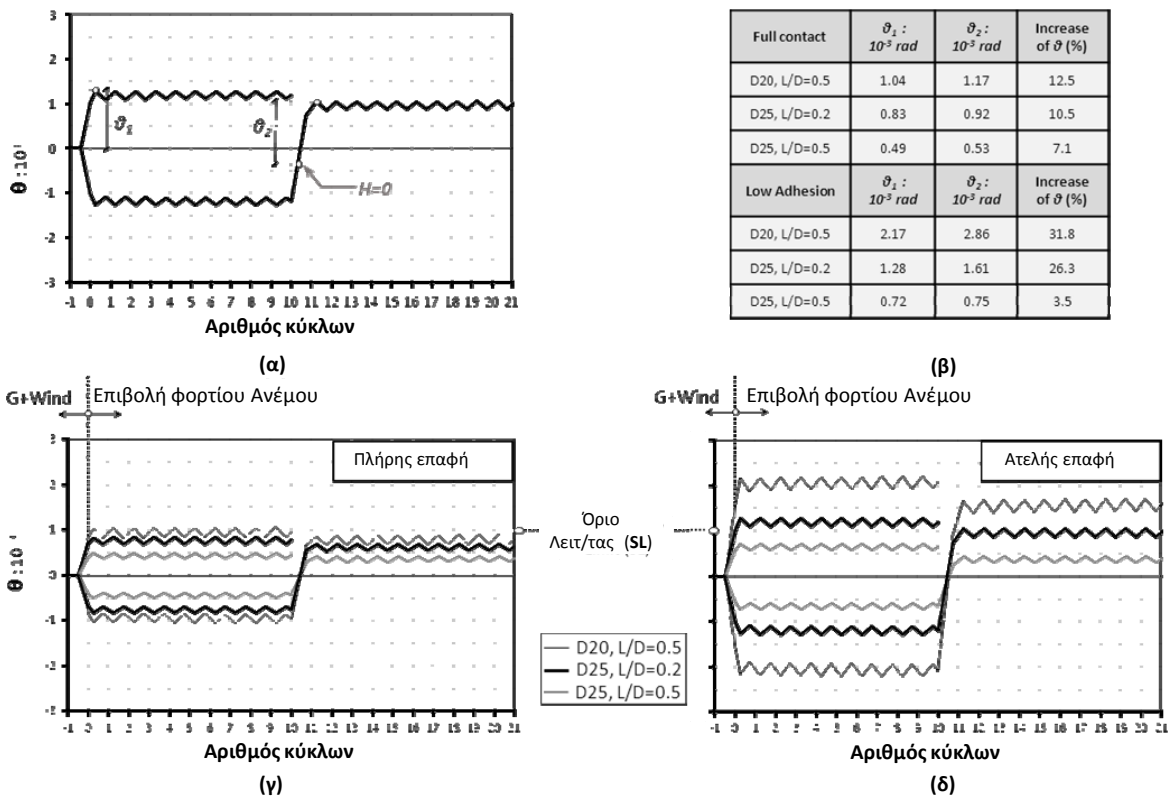
ως ϑ_2 . Σημειώνεται ότι και οι δύο τιμές αναφέρονται στη στροφή που συσσωρεύεται υπό το ίδιο πλάτος φορτίου. Εντούτοις, στο Σενάριο 1 (σε αρχικώς αφόρτιστη κατασκευή), η συσσώρευση ξεκινά από αρχικώς απαραμόρφωτη κατάσταση της θεμελίωσης, ενώ στη δεύτερη περίπτωση (Σενάριο 2), η στροφή αρχίζει να λαμβάνει χώρα, ενώ το θεμέλιο βρίσκεται ήδη στραμμένο προς την αντίθετη φορά από τη φορά της φόρτισης (Σχ. 7α). Επομένως, η παραμένουσα στροφή μετά το πέρας της φόρτισης είναι μικρότερη. Ωστόσο, η συνολική στροφή ϑ_2 της θεμελίωσης κατά τη διάρκεια της φόρτισης (σ.σ. μετά την αντιστροφή της φοράς) είναι προφανώς μεγαλύτερη της ϑ_1 . Ο λόγος είναι ότι η αύξηση της αρχικής στροφής οδηγεί προφανώς σε διαρροή του εδάφους, με αποτέλεσμα η διαθέσιμη φέρουσα ικανότητα του εδάφους θεμελίωσης μετά την αντιστροφή της φοράς φόρτισης να είναι μειωμένη, οδηγώντας έτσι σε υψηλότερες τιμές της συνολικής στροφής. Σημειώνεται ότι η τάση αύξησης της στροφής παρατηρήθηκε σε όλες τις εξετασθείσες περιπτώσεις, με το ποσοστό της να κυμαίνεται μεταξύ 3.5% και 31.8% (Σχ. 7β).

Η αύξηση είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση του φρέατος με $D=20\text{m}$ και $L/D=0.5$ τόσο υπό συνθήκες πλήρους επαφής όσο και υπό ατελείς συνθήκες: πράγματι στην περίπτωση αυτή του θεμελίου με μικρή διάμετρο η αναπτυσσόμενη αντίσταση εξαρτάται κυρίως από τη συμβολή της διάτμησης στα πλευρικά περιφερειακά τοιχώματα και, ως εκ τούτου, η αρχικής διάτμηση τους εδάφους κατά την πρώτη φάση της φόρτισης μειώνει δραστικά τη διαθέσιμη αντοχή μετά την αντιστροφή της φοράς φόρτισης. Η μείωση μάλιστα είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση της ατελούς διεπιφάνειας, λόγω μερικής αποκόλλησης του φρέατος κατά το πρώτο βήμα της φόρτισης.

Διαφορετική είναι η εικόνα στην περίπτωση θεμελίου μεγάλης διαμέτρου ($D = 25\text{m}$), όπου η συνολική αντοχή της θεμελίωσης με λόγο εγκιβωτισμού $L/D = 0.5$ είναι αρκετά μεγάλη, ώστε να επηρεάζεται σημαντικά λιγότερο από τα προαναφερθέντα φαινόμενα. Όντως, η αναπτυσσόμενη στροφή (ϑ_1 ή ϑ_2) είναι αρκετά μικρή, ενώ η αύξησή της, λόγω της αρχικής διάτμησης, είναι ασήμαντη. Αντιθέτως, εξετάζοντας το θεμέλιο χαμηλού λόγου εγκιβωτισμού ($D = 25\text{m}$, $L/D = 0.2$), φαίνεται ότι η διαθέσιμη αντοχή είναι αρκετά μικρότερη (λόγω του μικρότερου μήκους των πλευρικών τοιχωμάτων), γεγονός που το καθιστά πιο ευαίσθητο στην παραμόρφωση, ιδιαίτερα στην περίπτωση της ατελούς επαφής στη διεπιφάνεια.



Σχήμα 6. (α) Σχηματική απεικόνιση των δύο (2) σεναρίων φόρτισης, (β) χρονιοιστορία ανέμου-κυμάτων



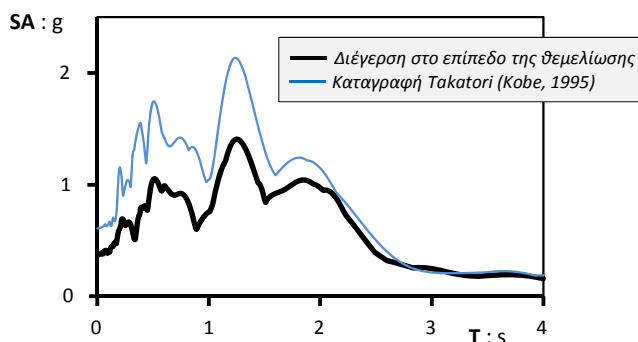
Σχήμα 7. (α) Ορισμοί γωνιών θ_1 , θ_2 (β) Πινακοποιημένα αποτελέσματα, (γ) Χρονιοιστορία στροφής θεμελίωσης συναρτήσει των κύκλων φόρτισης για τα δύο Σεναρία φόρτισης υπό θεωρήση (γ) συνθηκών πλήρων επαφής και (δ) ατελούς επαφής.

6. ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Στην ενότητα αυτήν, επιχειρείται μια προκαταρκτική μελέτη της σεισμικής απόκρισης της ανεμογεννήτριας λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις προαναφερθείσες μη γραμμικότητες. Προς τούτο, τοποθετήθηκαν κινηματικές δεσμεύσεις στα πλευρικά σύνορα του καννάβου, προκειμένου να αποδοθεί ρεαλιστικά η απόκριση του ελευθέρου πεδίου, καθώς και αποσβεστήρες στη βάση για την ορθή προσομοίωση της απόσβεσης ακτινοβολίας. Το επιλεγθέν σεισμικό σενάριο (το οποίο επιβάλλεται στη βάση του αριθμητικού προσομοιώματος) έχει προκύψει τροποποιώντας την καταγραφή Takatori από τον σεισμό του 1995 στο Kobe της Ιαπωνίας (Σχ. 8). Παρότι η χρησιμοποιηθείσα διέγερση είναι αρκετά απομειωμένη σε σχέση με την πραγματική καταγραφή, επιδεικνύει υψηλές φασματικές τιμές για $0.8 < T < 2.2$ s.

Παρουσιάζονται αποτελέσματα μόνον για την Α/Γ των 2 MW (η γεωμετρία και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της οποίας περιγράφονται στον Πίνακα 1), η οποία υποθέτουμε ότι εδράζεται σε ομοιογενές αργιλικό έδαφος με $S_u = 60$ kPa μέσω κοίλου ανεστραμμένου φρέατος διαμέτρου $B=16$ m και λόγο έμπηξης $D/B = 0.2$. Κατ' αντιστοιχία με τα προηγούμενα, η σεισμική απόκριση της Α/Γ μελετάται με και χωρίς τη θεώρηση ατελών διεπιφανειών (Σχ. 9). Πάρα τη σφοδρότητα της διέγερσης, υπό την προϋπόθεση ιδανικών συνθηκών επαφής, η επιλεγθείσα θεμελίωση και, επομένως και η Α/Γ αποκρίνονται άκρως ικανοποιητικά: η μέγιστη παραμόρφωση της Α/Γ αγγίζει το 1.8 %, ενώ και η παραμένουσα μετακίνηση του πυλώνα είναι αρκούντως μικρή (τάξη μεγέθους 0,6 %). Όπως χαρακτηριστικά αναλύεται στο διάγραμμα του Σχ. 9, η μέγιστη σεισμική καταπόνηση του πύργου είναι καμπτικής φύσεως, ενώ η παραμένουσα μετακίνηση μετά το πέρας του σεισμού αποδίδεται στη μόνιμη στροφική παραμόρφωση του φρέατος ($\theta_{ult} = 0.01$ rad).

Η θεώρηση ατελών διεπιφανειών επαφής τροποποιεί σημαντικά την απόκριση (Σχ. 10). Η εντόνως ανελαστική συμπεριφορά του συστήματος θεμελίωσης, ναί μεν μειώνει την καμπτική καταπόνηση του πύργου, αυξάνει ωστόσο τις παραμένουσες μετακινήσεις στο επίπεδο του ρότορα. Σε όλη τη διάρκεια του σεισμικού επεισοδίου, το φρέαρ συσσωρεύει παραμόρφωση, η οποία μεταφράζεται σε παραμένουσα στροφή (και μετακίνηση) στον πυλώνα. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα η θεώρηση ατελών διεπιφανειών επαυξάνει τα μετακινησιακά μεγέθη κατά 70%.



Σχήμα 8. Ελαστικό φάσμα σεισμικής διέγερσης: η καταγραφή Takatori από το σεισμό του Kobe (μπλε γραμμή) και η κίνηση στο επίπεδο της θεμελίωσης (μαύρη γραμμή).

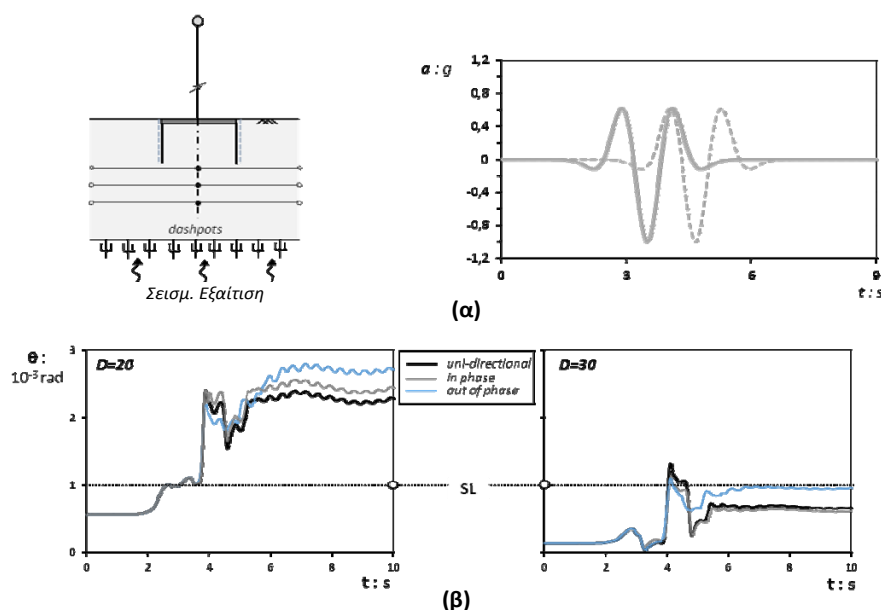


Σχήμα 9. Σεισμική απόκριση ανεμογεννήτριας ισχύος 2 MW θεμελιωμένης σε αργλικό σχηματισμό μέσω ανεστραμμένου κοίλου φρέατος διαμέτρου ($B=16\text{m}$, $D/B=0.2$): χρονοϊστορία οριζόντιας μετακίνησης στο επίπεδο του ρότορα και βρόχοι M- θ στην επιφάνεια του θεμελίου και για τους δύο τύπους διεπιφάνειας.

Για τη βελτίωση της σεισμικής απόκρισης της Α/Γ απαιτείται ενίσχυση του συστήματος θεμελίωσης. Δύο λύσεις προκρίνονται ως πρακτικώς ισοδύναμες: (α) διατηρείται η διάμετρος του φρέατος στα 16m και αυξάνεται το μήκος έμπτυξης ($D/B = 0.5$) ή (β) διατηρείται το μικρό μήκος εγκιβωτισμού, αλλά η διάμετρος αυξάνεται στα 20m. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης συνοψίζονται στο Σχ. 8. Όπως αναμέναμε η αύξηση του μήκους έμπτυξης βελτιώνει σημαντικά τη σεισμική απόκριση της θεμελίωσης (λεπτή μαύρη γραμμή). Πρακτικά, παρά τις μειωμένες ιδιότητες στην παράπλευρη επιφάνεια του θεμελίου, η απόκριση του συστήματος προσεγγίζει την απόκριση της Α/Γ (με φρέαρ διαστάσεων $B=16\text{m}$ και $D/B = 0.2$) με θεώρηση ιδεατών συνθηκών επαφής. Είναι όμως αυτή η λύση τεχνικο-οικονομικά η πλέον συμφέρουσα; Η απάντηση δίνεται μέσω των διαγραμμάτων του Σχ. 8 (μαύρη έντονη γραμμή). Παρόλο που οι δύο εναλλακτικές, σε όρους κόστους υλικού είναι πρακτικώς ισοδύναμες, το φρέαρ με τη μεγάλη διάμετρο επιτυγχάνει συνθήκες καλύτερης πάκτωσης στη θεμελίωση: ο πυλώνας κάμπτεται υπό τη σεισμική ισχυρή δόνηση, χωρίς ωστόσο να συσσωρεύει στρόφη, και παραμένει πλήρως λειτουργικός μετά το πέρας το σεισμού.

6.1. Σεισμική Διέγερση σε 2 διευθύνσεις

Σε συνέχεια των παραπάνω ευρυμάτων, στο παρόν κεφάλαιο η θαλάσσια ανεμογεννήτρια υποβάλλεται σε σεισμική φόρτιση 2 (δύο) διευθύνσεων και η απόκρισή της συγκρίνεται με την αναπαραχθείσα απόκριση υπό μονο-αξονική διέγερση. Παρουσιάζονται δύο (2) περιπτώσεις θεμελίωσης: κοίλο κυλινδρικό φρέαρ διαμέτρου $D = 20$ m και λόγου εγκιβωτισμού $L/D = 0.5$ και φρέαρ διαμέτρου $D = 30$ m με $L/D = 0.5$. Για χάρην απλούστευσης, ως σεισμική διέγερση επιλέχθηκε παλμός τύπου Ricker $T_0=2s$ και $a_{max}=1g$. Διευκρινίζεται ότι υπό το καθεστώς της 2-αξονικής φόρτισης, υιοθετήθηκαν δύο (ακραία) σενάρια ως προς το συγχρονισμό της εκτός επιπέδου κίνησης: (α) η διέγερση στην διεύθυνση y είναι πλήρως συγχρονισμένη με τη σεισμική διέγερση στην κύρια διεύθυνση (διεύθυνση x) και (β) η διέγερση της διεύθυνσης y είναι εκτός φάσης (Σχ. 10α).



Σχήμα 10. Α/Γ θεμελιωμένη επί κοίλων κυλινδρικών φρεάτων (2 εναλλακτικών γεωμετριών) υποβάλλεται σε σεισμική διέγερση τύπου Ricker [$f=0.5$ Hz, $a_{max}=1g$]: (α) Σχηματική απεικόνιση του υπό μελέτη προβλήματος και (β) χρονοϊστορίες στροφής στη βάση των φρεάτων. Σε όλες τις περιπτώσεις υιοθετήθηκαν ατελείς συνθήκες επαφής θεμελίου-εδάφους

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται υπό τη μορφή χρονοϊστοριών στροφής στη βάση της θεμελίωσης. Είναι φανερό ότι, σε πλήρη αρμονία με τα αποτελέσματα της προηγούμενης παραγράφου, η θεμελίωση τείνει να συσσωρεύει στροφή σε κάθε κύκλο φόρτισης. Η τάση αυτή είναι σαφώς πιο έντονη στο μικρής διαμέτρου (και επόμενως μικρότερης αντοχής) φρέαρ. Μάλιστα η τελικώς αναπτυχθείσα στροφή αυξάνει με τη θεώρηση ταυτόχρονης σεισμικής δράσης στη διεύθυνση y . Αξίζει να σημειωθεί ότι ο συγχρονισμός της εξαίτισης έχει μη αμελητέα επίδραση στην απόκριση: το άκαμπτο φρέαρ διαμέτρου $D=30$ m συσσωρεύει σαφώς αυξημένη στροφή όταν διεγείρεται από το εκτός-φάσης σενάριο. Στο Σχήμα 7β (δεξιά) παρουσιάζεται μια πιθανή εξήγηση της ενδιαφέρουσας αυτής απόκρισης. Περί τη χρονική στιγμή 4.8s, η



Θεμελίωση υπό τη δράση της x -συνιστώσας τείνει να επιστρέψει στην αρχική θέση ισορροπίας (θέση μηδενικής στροφής). Την ίδια στιγμή, στο εκτός-φάσης σενάριο, το φρέαρ δέχεται ενάν θετικής κατεύθυνσης παλμό (κατά την y -διεύθυνση) που πρακτικώς εμποδίζει την επαναφορά του στη θέση μηδενικής στροφής. Ως εκ τούτου, η θεμελίωση (ελλείψη επόμενων σημαντικών κύκλων φόρτισης) διατηρεί μια μη αναστρέψιμη στροφή στο πέρας του σεισμικού επεισοδίου.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μελέτη μελετήθηκε το σύστημα θεμέλιο - θαλάσσια Α/Γ υπό μονοτονική, ανακυκλική και σεισμική φόρτιση. Έμφαση δόθηκε στη μελέτη των συνθηκών επαφής θεμελίου-εδάφους. Τα βασικά συμπεράσματα συνοψίζονται ως ακολούθως :

- Υπό τη θεώρηση ατελών διεπιφανειών επαφής (δηλ. θεώρηση μειωμένης διατμητικής αντίστασης στην παράπλευρη επιφάνεια του φρέατος και μηδενική εφελκυστική αντοχή), η μέγιστη αντοχή της θεμελίωσης σε συνδυασμένη φόρτιση (ροπής, τέμνουσας) μειώνεται σημαντικά. Εμφανώς τροποποιούνται και οι υστερητικοί βρόχοι απόκρισης του συστήματος θεμέλιο-έδαφος υπό ανακυκλική φόρτιση. Οι διαφορές ωστόσο είναι εμφανείς μόνο σε πολύ μεγάλες παραμορφώσεις (που κατά πολύ ξεπερνούν το όριο λειτουργίας της Α/Γ).
- Εφόσον ληφθεί υπόψιν η ενδεχόμενη αντιστροφή της φοράς της ανεμοπίεσης, η συσσώρευση στροφής στη θεμελίωση παρουσιάζεται αυξημένη.
- Υπό σφοδρή σεισμική εξαίτιση, οι έντονες πλαστικοποιήσεις κατά μήκος των ατελών διεπιφανειών, ναι μεν μειώνουν την καμπτική καταπόνηση του πυλώνα, αυξάνουν ωστόσο τις παραμένουσες μετακινήσεις του συστήματος.
- Για τον περιορισμό της πλαστικής στροφής στη θεμελίωση είναι προτιμητέο και αποδοτικότερο να υιοθετηθεί φρέαρ μεγαλύτερης διαμέτρου και όχι μεγαλύτερου βάθους εγκιβωτισμού.
- Η ταυτόχρονη δράση σεισμικής εξαίτισης σε 2 διευθύνσεις προκαλεί αυξημένες παραμορφώσεις στη θεμελίωση.
- Ιδιαίτερως μη ευνοϊκή είναι η θεώρηση μη συχρονισμένη σεισμικής εξαίτισης στις 2-διευθύνσεις φόρτισης.

8. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα υλοποιήθηκε ως μέρος του Προγράμματος «ΘΑΛΗΣΣ-ΕΜΠ Επίλυση δυσχερών προβλημάτων ανάλυσης πυλώνων ανεμογεννητριών “Νέας Γενεάς”». Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.

9. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Anastasopoulos I., F. Gelagoti, R. Kourkoulis & G. Gazetas. (2011). "Simplified Constitutive Model for Simulation of Cyclic Response of Shallow Foundations : Validation against Laboratory Tests". *J. Geotech. Geoenviron. Engng ASCE* 137: 12, 1154–1168.

Byrne, B. W. (2000). "Investigations of suction caissons in dense sand". DPhil thesis. Univ. of Oxford, England.

Gourvenec, S. & Randolph, M. (2003). "Effect of strength non-homogeneity on the shape and failure envelopes for combined loading of strip and circular foundations on clay". *Geotechnique* 53: 6, 575–586.

Gourvenec, S. (2007). "Failure envelopes of offshore shallow foundations under general loading". *Geotechnique* 57.

Gourvenec, S., Acosta-Martinez, E., and M. F. Randolph . (2009). "Experimental study of uplift resistance of shallow skirted foundations in clay under transient and sustained concentric loading". *Geotechnique* 59: 6.

Houlsby, G.T. & Byrne, B.W. (2000). "Suction Caisson Foundations for Offshore Wind Turbines and Anemometer Masts". *Wind Engineering*, 24: 4, 249-255

Houlsby, G.T., Ibsen, L-B. & Byrne, B.W. (2005). "Suction caissons for wind turbines" International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, Perth, Proc. vol: 75-94.

Tan, F.S. (1990). "Centrifuge and Theoretical modeling of conical footings on sand". PhD Thesis, Univ. of Cambridge, UK.

Ukritchon, B., Whittle, A. J. & Sloan, S. W. (1998). "Undrained limit analysis for combined loading of strip footings on clay". *J. Geotech. Geoenv. Engng ASCE* 124: 3, 265–276.

Yun, G., & Bransby, M. (2007). "The horizontal-moment capacity of embedded foundations in undrained soil". *Can Geotech. J.* 44: 409-424