

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΕ ΕΓΓΥΣ ΤΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΠΕΡΙΟΧΗ

Γ. Ν. Σταματόπουλος
Πολ. Μηχανικός, Διδάκτωρ Ε. Μ. Π.
Αθήνα - Ελλάδα
[e-mail: gstamatopoulos@ath.forthnet.gr](mailto:gstamatopoulos@ath.forthnet.gr)

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μελετάται η δυναμική απόκριση ανεμογεννήτριας που εγκαθίσταται στον Ελλαδικό χώρο, σε περιοχή με έντονες σεισμικές διεγέρσεις και σεισμικό ρήγμα. Γίνεται εκτενής διερεύνηση της σεισμικής της συμπεριφοράς με δυναμική ανάλυση αφενός μεν μέσω του φάσματος σχεδιασμού που προβλέπεται από τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ 2003) για την περιοχή του έργου, προσαυξημένο κατά 25 % λόγω γειννίας με σεισμικό ρήγμα, αφετέρου δε μέσω του φάσματος σχεδιασμού με βάση την εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου, για δύο χαρακτηριστικές περιπτώσεις σεισμών μεγέθους $M_s=5,8$ και $M_s=7,3$ με επικεντρικές αποστάσεις 1 km και 11 km αντιστοίχως από την εξεταζόμενη θέση.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η δημιουργία αιολικών πάρκων σε περιοχές με έντονη σεισμικότητα παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω των σημαντικών σεισμικών φορτίων που εισάγονται στις ανεμογεννήτριες. Όταν οι ανεμογεννήτριες εγκαθίστανται σε περιοχές χαμηλής σεισμικότητας, το επίπεδο σεισμικού κινδύνου δεν είναι αρκετά υψηλό και συνήθως οι κρίσιμες φορτίσεις προέρχονται από συνδυασμούς των φορτίων ανεμοπίεσης. Όμως, η εγκατάσταση των ανεμογεννητριών σε περιοχές με έντονη σεισμικότητα που μπορεί ακόμη να έχουν και ρήγματα που διασχίζουν το αιολικό πάρκο χρήζει ιδιαίτερης προσοχής και ενδιαφέροντος, αφού σε αυτή την περίπτωση μπορεί να είναι κρίσιμη για τον σχεδιασμό η σεισμική φόρτιση.

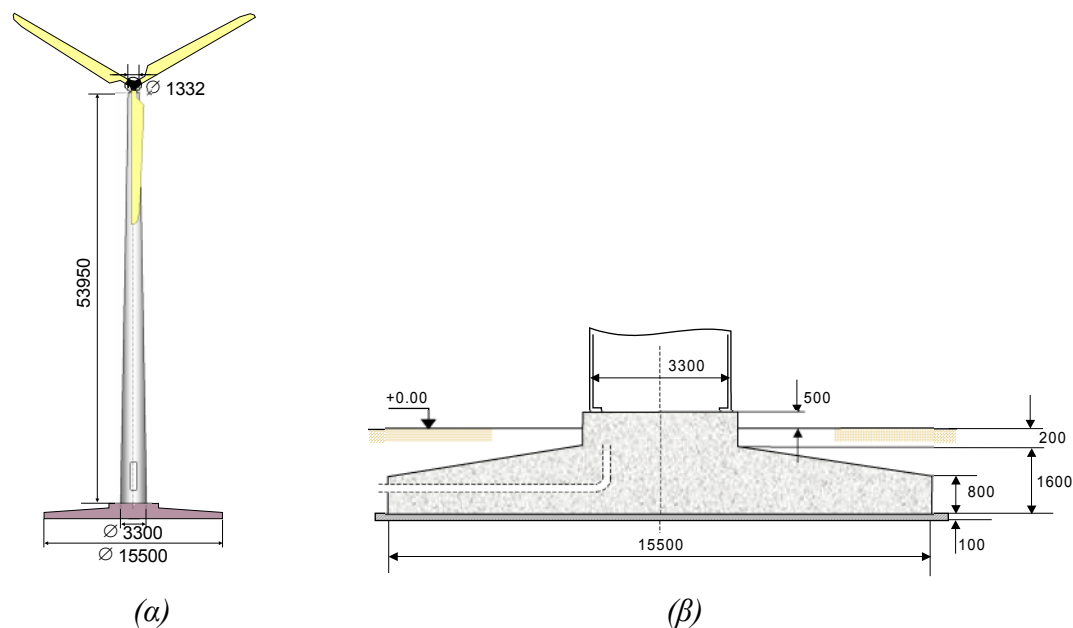
Ένας επιπλέον σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη σεισμική απόκριση των ανεμογεννητριών και πρέπει να συνεκτιμηθεί, είναι οι τοπικές ιδιότητες του εδάφους στις θέσεις θεμελιώσεων. Αιολικά πάρκα που εγκαθίστανται σε περιοχές με δύσκαμπτα εδάφη παρουσιάζουν λιγότερα προβλήματα σχεδιασμού από άλλα πάρκα που βρίσκονται σε παράκτιες περιοχές με μαλακά ή χαλαρά εδάφη που περιέχουν αλλουβιακές αποθέσεις. Οι περιπτώσεις αυτές απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή διότι μπορεί να επηρεάσουν την απόκριση της κατασκευής λόγω της τοπικής ενίσχυσης του εδάφους. Συνεπώς, οι παράγοντες των τοπικών ιδιοτήτων του εδάφους, της διαμορφούμενης λόγω αυτών ιδιοπεριόδου της ανεμογεννήτριας, και της απόσβεσης, καθορίζουν την απόκρισή της σε σεισμικά φορτία.

Στην παρούσα εργασία, εξετάζεται η απόκριση ανεμογεννήτριας που θεμελιώνεται σε περιοχή σεισμικού ρήγματος. Διερευνάται η επιρροή της αλληλεπίδρασης εδάφους – θεμελίου (SSI) επί των ιδιοπεριόδων της ανεμογεννήτριας και κατ'επέκταση επί των

εντατικών μεγεθών που προκύπτουν από τις σεισμικές δράσεις. Η διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς της ανεμογεννήτριας γίνεται με δυναμική ανάλυση αφενός μεν μέσω του φάσματος σχεδιασμού που προβλέπεται από τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ 2003) για την περιοχή του έργου, προσαυξημένο κατά 25 % λόγω γειννίασης με σεισμικό ρήγμα, αφετέρου δε μέσω του φάσματος σχεδιασμού με βάση την εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου, για δύο χαρακτηριστικές περιπτώσεις σεισμών μεγέθους $M_s=5,8$ και $M_s=7,3$ με επικεντρικές αποστάσεις 1 km και 11 km αντιστοίχως από την εξεταζόμενη θέση.

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Ο φορέας της ανεμογεννήτριας έχει κυλινδρική μορφή με μεταβλητή διατομή και πάχος τοιχώματος καθ' ύψος. Το συνολικό του ύψος είναι 53,95 m, η εξωτερική διάμετρος στη βάση είναι 3,30 m με πάχος τοιχώματος 24 mm, και στην κορυφή καταλήγει στα 1,332 m με πάχος τοιχώματος 16 mm (Σχ. 1α). Η συνολική μάζα του συστήματος "φορέας - ρότορας - πτερύγια" είναι 86,0 tn με εκκεντρότητα του ρότορα 0,85 m ως προς τον κατακόρυφο άξονα του φορέα. Το θεμέλιο έχει κυκλική διατομή με διάμετρο 15,50 m και μέγιστο πάχος 1,60 m (Σχ. 1β). Η αγκύρωση της ανεμογεννήτριας επί του θεμελίου εξασφαλίζεται με 60 ζεύγη προεντεταμένων αγκυριών M36, τα οποία διατάσσονται στην περιφέρεια δύο ομόκεντρων κύκλων με ακτίνες $R_a=1,705$ m και $R_i=1,571$ m αντιστοίχως.



Σχ. 1 Γεωμετρικά στοιχεία της ανεμογεννήτριας (α), και γεωμετρία του θεμελίου (β)

4. ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

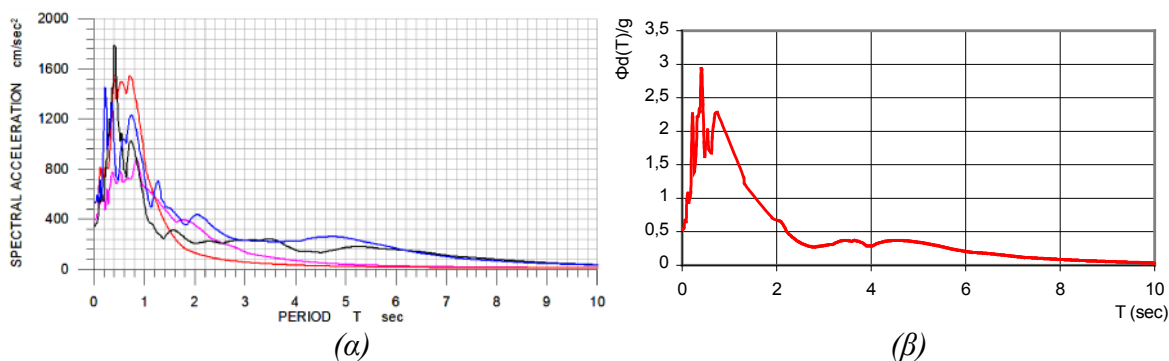
Η θέση θεμελίωσης της ανεμογεννήτριας εντοπίζεται σε ορεινό όγκο ο οποίος, από γεωλογικής πλευράς, εντάσσεται σε ασβεστολιθικό σχηματισμό ήπιας καρστικοποίησης. Σύμφωνα με τη γεωτεχνική μελέτη, ο δείκτης αντίστασης του εδάφους k_s (modulus of subgrade reaction) εκτιμήθηκε ίσος προς 50.000 kN/m^3 , η μέση γωνία τριβής δ_a του εδάφους θεμελίωσης ίση προς 40° και η αντοχή του εδάφους θεμελίωσης q_u εκτιμήθηκε ίση προς 250 kPa . Η θέση της θεμελίωσης βρίσκεται σε κοντινό σεισμικό ρήγμα.

5. ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Ο αντισεισμικός σχεδιασμός πραγματοποιείται με δυναμική φασματική ανάλυση του φορέα της ανεμογεννήτριας σύμφωνα με το φάσμα σχεδιασμού του ΕΑΚ 2003, προσαυξημένο κατά 25% λόγω γειννίας με σεισμικό ρήγμα (ΕΑΚ 2003, 5.1.2 [8]), με σεισμικά δεδομένα:

Σεισμική επιτάχυνση εδάφους (Ζώνη ΙΙΙ)	$A = 0,36g$	
Κατηγορία εδάφους	A	
Συντελεστής συμπεριφοράς	$q = 1,00$	
Ποσοστό απόσβεσης	$\zeta = 1\%$	
Συντελεστής σπουδαιότητας	$\gamma = 1,30$	
Τιμές χαρακτηριστικών περιόδων	$T_1 = 0,10$	
	$T_2 = 0,40$	
Διορθωτικός συντελεστής απόσβεσης	$\eta = 1,527$	
Συντελεστής θεμελίωσης	$\theta = 1,00$	
Συντελεστής φασματικής ενίσχυσης	$\beta_0 = 2,50$	

Επίσης, γίνεται δυναμική ανάλυση με το φάσμα σχεδιασμού (περιβάλλουσα), που προέκυψε με βάση την εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου στην εξεταζόμενη θέση (Local), για δύο χαρακτηριστικές περιπτώσεις σεισμών μεγέθους $M_s=5,8$ και $M_s=7,3$ με επικεντρικές αποστάσεις 1 km και 11 km αντιστοίχως από την εξεταζόμενη θέση. Αρχικά, εκτιμήθηκαν τα φάσματα επιταχύνσεων για απόσβεση 5% από πραγματικές καταγραφές που προσεγγίζουν τα χαρακτηριστικά του μηχανισμού γένεσης των σεισμών και της εδαφικής απόθεσης (έδαφος A σύμφωνα με ΕΑΚ 2003) στην εξεταζόμενη θέση (Σχ. 2α), και σαν φάσμα σχεδιασμού για την περιοχή του έργου ελήφθη η περιβάλλουσα των φασμάτων αυτών για απόσβεση 1% (Σχ. 2β).



Σχ. 2 Τοπικά φάσματα επιταχύνσεων της εξεταζόμενης θέσης για απόσβεση 5% (α) και περιβάλλουσα τοπικών φασμάτων σχεδιασμού για απόσβεση 1% (β)

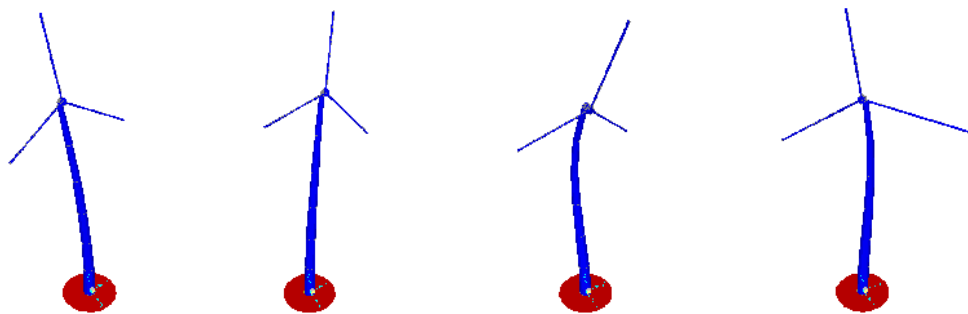
6. ΑΝΑΛΥΣΗ

Η πραγματική σεισμική φόρτιση του φορέα δεν μπορεί να είναι πλήρως γνωστή, ακόμη και όταν η σεισμική ένταση έχει προκαθοριστεί. Στην πραγματικότητα, η επιβαλλόμενη σεισμική φόρτιση στον φορέα εξαρτάται από την απόκριση του ίδιου του φορέα. Η

αλληλεπίδραση αυτή οφείλεται στην επαφή μεταξύ θεμελίου και εδάφους (Soil-Structure Interaction, SSI), και είναι σημαντική σε περιπτώσεις μαλακών εδαφών που παρουσιάζουν έντονη παραμόρφωση. Η αύξηση της ιδιοπεριόδου του φορέα (μείωση της ιδιοσυχνότητας), λόγω της παραμόρφωσης του εδάφους, σε συνδυασμό με τα συμβατικά φάσματα επιτάχυνσης, οδηγεί σχεδόν πάντα σε μικρότερες επιταχύνσεις του φορέα και του θεμελίου. Έτσι, η σημασία της αλληλεπίδρασης παραβλέπεται, συνήθως, υπέρ της ασφαλείας. Όμως, η αύξηση της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου λόγω της SSI μπορεί να οδηγήσει και σε αύξηση της απόκρισης (παρά την ενδεχόμενη αύξηση της απόσβεσης), η οποία έρχεται σε αντίθεση με την αναμενόμενη απόκριση που προκύπτει από την ανάλυση με το συμβατικό φάσμα σχεδιασμού [1, 3, 5, 6, 7]. Σαν παράδειγμα παρατίθεται, ο σεισμός στο Μεξικό που ήταν ιδιαίτερα καταστρεπτικός για 12-όροφα κτίρια θεμελιωμένα σε μαλακό έδαφος, στα οποία παρατηρήθηκε, λόγω της SSI, αύξηση ιδιοπεριόδου κατά 1 έως 2 δευτερόλεπτα, από την αντίστοιχη με θεώρηση πλήρους πάκτωσης.

Ως εκ τούτου, συνάγεται το συμπέρασμα ότι η επίδραση της SSI επί της σεισμικής συμπεριφοράς των κατασκευών απαιτεί προσεκτική αξιολόγηση του εισαγόμενου σεισμικού κραδασμού και των εδαφολογικών συνθηκών. Η χρήση συμβατικών φασμάτων σχεδιασμού και απλοποιητικών παραδοχών για το εδαφικό προφίλ μπορεί, σε πολλές περιπτώσεις, να οδηγήσει σε αύξηση της απόκρισης και των δυναμικών χαρακτηριστικών των κατασκευών. Η σημασία του γεγονότος αυτού έχει αναγνωριστεί από τους ερευνητές και για τις περιπτώσεις των ανεμογεννητριών και έχει χαρακτηριστεί ως πολύ σημαντική [1, 2, 4].

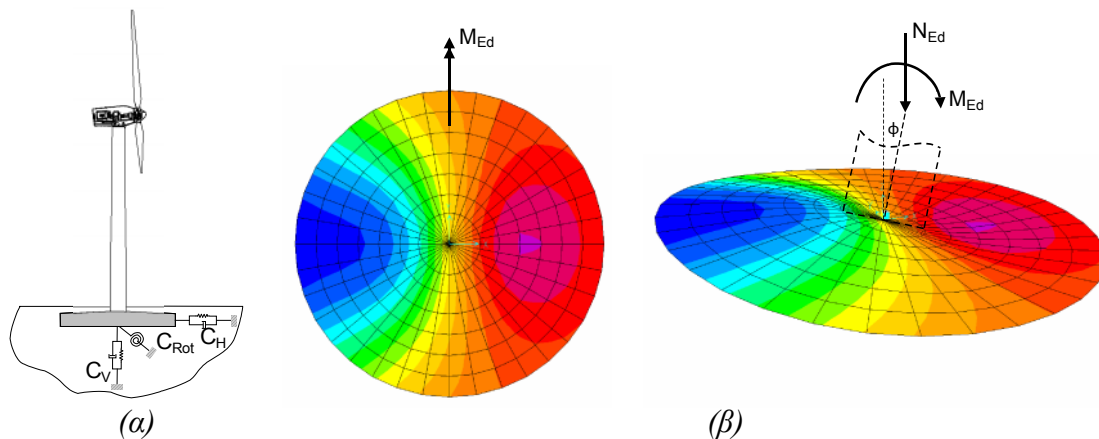
Προκειμένου να εξετασθεί η αλληλεπίδραση εδάφους - θεμελίωσης επί της απόκρισης της εξεταζόμενης ανεμογεννήτριας, γίνεται αρχικά ιδιομορφική επίλυσή της, θεωρώντας ότι είναι πλήρως πακτωμένη στη βάση της (Σχ. 4). Από την επίλυση προκύπτουν και τα εντατικά μεγέθη σεισμού N_{Ed} και M_{Ed} στη βάση.



Σχ. 4 1^η Ιδιομορφή 2^η Ιδιομορφή 3^η Ιδιομορφή 4^η Ιδιομορφή

Ακολούθως, γίνεται προσομοίωση της επαφής του θεμελίου με το έδαφος μέσω μη γραμμικών ελατηρίων μονόπλευρης επαφής (Link – gap elements) με δείκτη αντίστασης εδάφους k_s ίσο προς 50.000 kN/m^3 (Σχ. 5α). Στην περιφέρεια του θεμελίου η τιμή αυτή προσαυξάνεται κατά 100 % ($2 \cdot k_s$) [9]. Οι επιλύσεις γίνονται με μη γραμμικές μεθόδους ώστε να ληφθεί υπόψη η διαφορετική δυσκαμψία που παρουσιάζουν τα στοιχεία μονόπλευρης επαφής σε θλιπτικά και εφελκυστικά φορτία.

Η διαδικασία της ανάλυσης είναι επαναληπτική. Αρχικά, εισάγονται στο θεμέλιο (Σχ. 5β) τα εντατικά μεγέθη N_{Ed} και M_{Ed} που προέκυψαν από την ανάλυση της ανεμογεννήτριας με θεώρηση πλήρους πάκτωσης της βάσης της. Από την επίλυση του θεμελίου υπολογίζεται η στροφή φ και η στροφική του δυσκαμψία $C_{rot} = M_{Ed} / \varphi$. Η τιμή αυτή εισάγεται στη βάση της ανεμογεννήτριας και γίνεται νέα επίλυσή της με το φάσμα σχεδιασμού, όπου πλέον λαμβάνεται υπόψη η στροφική ικανότητα του θεμελίου της.



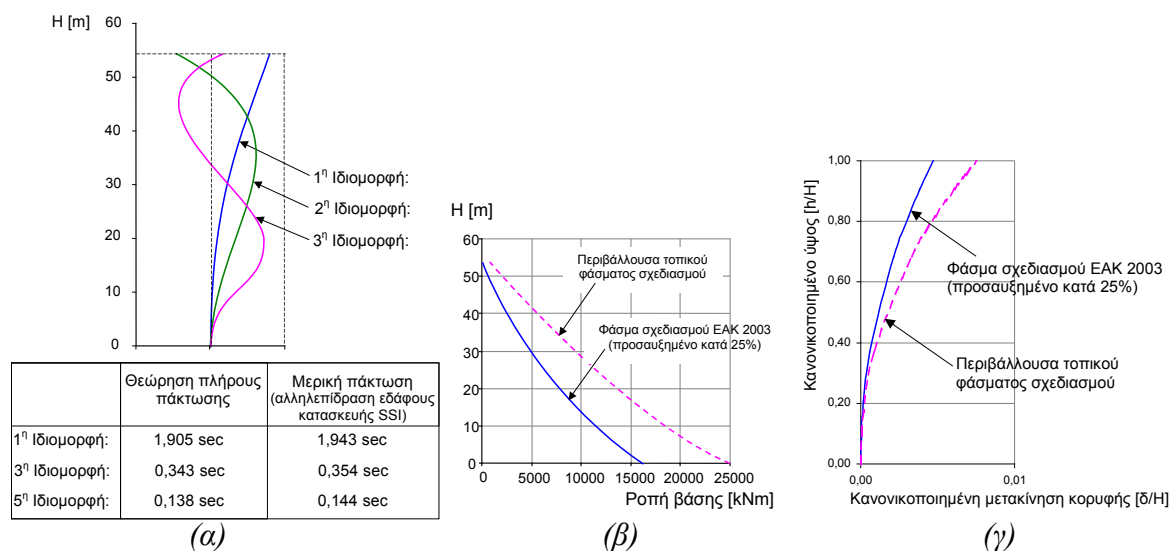
Σχ. 5 Προσομοίωση της διεπιφάνειας θεμελίου – εδάφους με χρήση μη γραμμικών ελατηρίων (α) και κατακόρυφες μετακινήσεις και στροφή του θεμελίου για τη φόρτιση με σεισμικά φορτία (β)

Από την ανάλυση προκύπτουν νέες τιμές ιδιομορφών και εντατικών μεγεθών $N_{Ed,new}$ και $M_{Ed,new}$. Οι τιμές αυτές εισάγονται πάλι στο θεμέλιο και επανυπολογίζεται η νέα στροφή φ_{new} και η νέα στροφική δυσκαμψία $C_{rot,new} = M_{Ed,new} / \varphi_{new}$.

Η επαναληπτική αυτή διαδικασία ολοκληρώνεται όταν επιτευχθεί σύγκλιση μεταξύ της τιμής στροφικής δυσκαμψίας του τρέχοντος βήματος $C_{rot,j}$ και της αντίστοιχης του προηγούμενου βήματος $C_{rot,j-1}$.

Οι ιδιομορφές και τα εντατικά μεγέθη σεισμού που προκύπτουν μετά το πέρας της σύγκλισης έχουν τροποποιηθεί (Σχ. 6α) ως προς τα αντίστοιχα που υπολογίστηκαν αρχικά με θεώρηση πλήρους πάκτωσης της βάσης της ανεμογεννήτριας, αφού έχει ήδη ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση εδάφους-θεμελίου μέσω της στροφικής του ενδοσιμότητας C_{rot} .

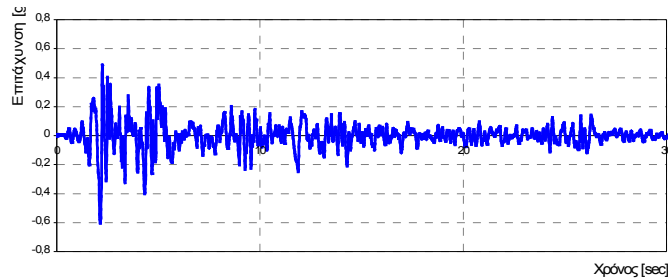
Από τις αναλύσεις προκύπτουν τα εντατικά μεγέθη στη βάση της ανεμογεννήτριας και οι οριζόντιες μετακινήσεις της κορυφής της. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται στα Σχ. 6β και 6γ.



Σχ. 6 Μεταβολή των ιδιοπεριόδων της ανεμογεννήτριας λόγω της αλληλεπίδρασης εδάφους-θεμελίου (α), διαγράμματα μεταβολής της ροπής καθ' ύψος της ανεμογεννήτριας (β) και κανονικοποιημένη μετακίνηση της κορυφής της (γ) (H απόσβεση είναι 1%)

Από τα αποτελέσματα, καθίσταται σαφές ότι η ανάλυση της ανεμογεννήτριας με το φάσμα που προέκυψε με βάση την εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου στην εξεταζόμενη θέση είναι κατά 55% δυσμενέστερη, ως προς τη ροπή της βάσης, από την αντίστοιχη ανάλυση με το, επαυξημένο κατά 25% λόγω παρακείμενου ρήγματος, φάσμα σχεδιασμού του ΕΑΚ 2003.

Ακολούθως, γίνεται και μη γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας της ανεμογεννήτριας με επιταχυνσιογράφημα το οποίο μορφώθηκε με το πρόγραμμα SeismoMatch. Με την εισαγωγή σε αυτό, ως φάσματος-στόχου, του φάσματος που προέκυψε με βάση την εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου στην εξεταζόμενη θέση, προέκυψε μέσω επαναληπτικής διαδικασίας στο πεδίο του χρόνου η χρονοϊστορία του Σχ. 7.

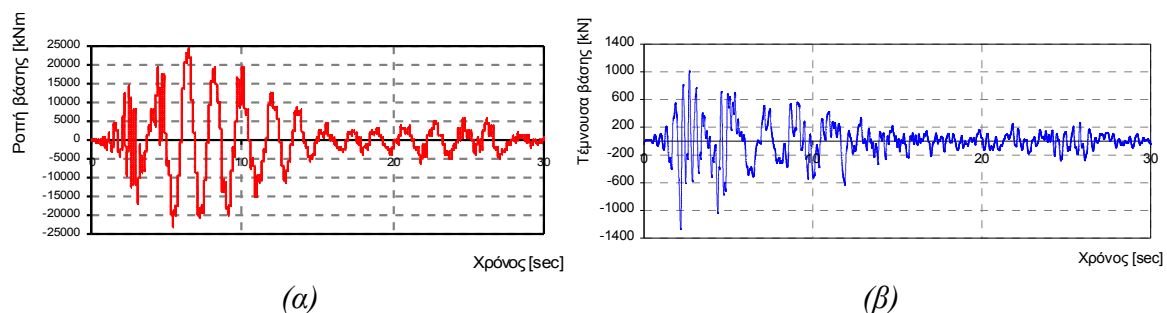


Σχ. 7 Χρονοϊστορία που αντιστοιχεί στο φάσμα σχεδιασμού που προέκυψε με βάση την εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου στην εξεταζόμενη θέση

Τα χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης που περιγράφεται με τη χρονοϊστορία είναι τα ακόλουθα:

- Η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση είναι 0,604g.
- Η μέγιστη φασματική ταχύτητα είναι 2,239 m/s.
- Η ένταση κατά Αγίας ισούται με 3,644 m/s και είναι από τις ισχυρότερες που έχουν καταγραφεί στον Ελλαδικό χώρο.

Από την ανάλυση της χρονοϊστορίας με απευθείας ολοκλήρωση στο πεδίο του χρόνου, προκύπτουν τα εντατικά μεγέθη στη βάση της ανεμογεννήτριας και οι οριζόντιες μετακινήσεις της κορυφής της. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται στο Σχ. 8.



Σχ. 8 Χρονική μεταβολή της ροπής (α) και της τέμνουσας (β) στη βάση της ανεμογεννήτριας (απόσβεση 1%)

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης με χρονοϊστορία, προκύπτουν τιμές εντατικών και παραμορφωσιακών μεγεθών που είναι κατά πολύ δυσμενέστερες από τις αντίστοιχες της ανάλυσης με βάση τον ΕΑΚ 2003.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την ανάλυση που προηγήθηκε προκύπτει με σαφήνεια ότι η εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου στη θέση που πρόκειται να θεμελιωθεί μια ανεμογεννήτρια, και ιδιαίτερα όταν πρόκειται για σεισμικά ενεργή ζώνη σε περιοχή ρήγματος, δεν πρέπει να αγνοείται. Τα φάσματα σχεδιασμού και οι συστάσεις που παρέχουν οι Κανονισμοί αποδεικνύονται ανεπαρκείς σε αυτές τις περιπτώσεις.

Επίσης, η αλληλεπίδραση εδάφους-φορέα ανεμογεννήτριας πρέπει πάντοτε να συνεκτιμάται διότι, σε πολλές περιπτώσεις, επηρεάζει σημαντικά τη δυναμική απόκριση του φορέα και συνεπώς και τα εντατικά μεγέθη σχεδιασμού. Προς τούτο, η κατασκευή θα πρέπει να αντιμετωπίζεται σαν ολοκληρωμένο σύστημα "έδαφος-θεμέλιο-φορέας" ώστε στη συνολική απόκρισή της να έχουν συμπεριληφθεί όλες οι επιδράσεις των επιμέρους στοιχείων που την απαρτίζουν.

8. ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ

- [1] 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", *Engineering Structures*, Vol. 24, No. 8, pp. 1015–1025.
- [2] Germanischer Lloyd (GL), WindEnergie, (2003), *IV–Industrial Services, Part 1–Guideline for the Certification of Wind Turbines*, GL WindEnergie GmbH, Hamburg, Germany.
- [3] 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", *Engineering Structures*, Vol. 25, No. 8, pp. 1097–1106.
- [4] 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: Journal of Multi-body Dynamics*, Vol. 220, No. 1, pp. 53-61.
- [5] Mavroeidis, G.P., Papageorgiou, A., (2000), "Analysis and Simulation of the Near – Source Motion Recorded at Aigion during the Ms = 6.2, June 15, 1995 Aigion Earthquake (Greece)", *Sixth International Conference on Seismic Zonation: Managing Earthquake Risk in the 21st Century*, Proc., EERI, Oakland.
- [6] Gazetas, G., (2004), "Geotechnical Aspects of the Ms 6.4 Lefkada Island, Greece, 2003 Earthquake: Preliminary Assessment", *Proceedings: Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, New York, April 13-17, 2004.
- [7] Gazetas G., Apostolou M., & Anastasopoulos I., (2003), "Seismic Uplifting of Foundations on Soft Soil, with Examples from Adapazari", *Foundations: Innovations, Observations, Design and Practice*, British Geotechnical Association, Thomas Telford, 37–50.
- [8] Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ 2003).
- [9] Bowles J., (1988), "Foundation Analysis and Design", *McGraw-Hill, 4th Edition, ISBN 0-07-006776-7*.

DYNAMIC RESPONSE OF WIND TURBINE SUBJECTED TO NEAR FAULT EXITATIONS

G. N. Stamatopoulos

Civil Engineer, PhD NTUA

Athens - Greece

[e-mail: gstamatopoulos@ath.forthnet.gr](mailto:gstamatopoulos@ath.forthnet.gr)

ABSTRACT

The paper deals with the study of the dynamic response of wind turbine installed in Greece, in area of intense seismic and earthquake fault. Extensive investigation of the seismic behaviour is performed with dynamic analysis through the design spectrum provided by the Greek National Seismic Regulations (EAK 2003) for the project area, increased by 25% due to proximity to seismic fault, as well as through the design spectrum based on seismic risk assessment for two typical cases of earthquakes of magnitude $M_s = 5,8$ and $M_s = 7,3$ with epicentre distances 1 km and 11 km respectively from the test position.