

Μη Γραμμική Δυναμική Ανάλυση Πυλώνα Ανεμογεννήτριας

Ευάγγελος Σαπουντζάκης^α, Ιωάννης Δίκαιος^α, Ανδρέας Καμπίτσας^α

^α Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Στατικής και Αντισεισμικών Ερευνών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, 15780 Αθήνα

Περίληψη

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται συνοπτικά εξελιγμένη μεθοδολογία βασισμένη στη θεωρία δοκού για τη μη γραμμική δυναμική ανάλυση πυλώνων ανεμογεννητριών, τυχαίας μεταβλητής διατομής, εδραζόμενων είτε επί επιφανειακού θεμελίου είτε επί μονοπασσάλου. Το σύστημα ανεμογεννήτριας-θεμελίωσης υποβάλλεται σε μετρίως μεγάλες μετακινήσεις και σε τυχούσες συνοριακές συνθήκες, ενώ λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα κινηματικής και αδρανειακής αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής. Η ανεμογεννήτρια υπόκειται στη συνδυασμένη δράση τυχούσας εγκάρσιας δυναμικής πίεσης ανέμου και φόρτισης λόγω σεισμικής διέγερσης, ενώ επίσης λαμβάνεται υπόψη η αξονική φόρτιση που προκύπτει από το ίδιο βάρος του πυλώνα και του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού.

Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η δυναμική φύση του ανέμου, κατασκευάστηκαν τεχνητές χρονοϊστορίες δυνάμεων με εφαρμογή της Θεωρίας Στοιχείου Πτερυγίου (Blade Element Momentum Theory), ενώ, προκειμένου να παραχθούν οι χρονοϊστορίες σεισμικής φόρτισης, χρησιμοποιήθηκε η θεωρία μονοδιάστατης διάδοσης διατμητικών κυμάτων (1-D shear wave propagation). Στην περίπτωση επιφανειακής θεμελίωσης, το σύστημα εδάφους-θεμελίωσης προσομοιώνεται από ισοδύναμα εγκάρσια και στροφικά ελατήρια, ενώ στην περίπτωση θεμελίωσης με μονοπάσσαλο, το σύστημα αντιμετωπίζεται ως δοκός-επί-εδάφους με αντίστοιχα εγκάρσια ελατήρια και αποσβεστήρες κατά μήκος της δοκού.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη μελέτη σε σύστημα πυλώνα-θεμελίωσης ανεμογεννήτριας, όπου ο πυλώνας υποβάλλεται στις παραχθείσες χρονοϊστορίες φόρτισης ανέμου και η θεμελίωση σε καταγεγραμμένα επιταχυνσιογραφήματα από σεισμικές διεγέρσεις. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προτεινόμενη μεθοδολογία συγκρίθηκαν με αυτά που προκύπτουν από εμπορικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, καταδεικνύοντας την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητα της μεθόδου, καθώς και τη σημαντική επιρροή των μη γραμμικών φαινομένων στη δυναμική απόκριση ανεμογεννητριών.

Λέξεις Κλειδιά: Ανεμογεννήτρια, Αλληλεπίδραση πυλώνα-θεμελίωσης, Γεωμετρική μη γραμμικότητα, Δυναμική ανάλυση, Μονοπάσσαλος, Επιφανειακή θεμελίωση, Μεταβλητή διατομή.

1. Εισαγωγή

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ειδικότερα η αιολική ενέργεια έχουν αποτελέσει αντικείμενο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος τα τελευταία χρόνια. Η αιολική ενέργεια θεωρείται μια από τις πιο ελκυστικές λύσεις στο πρόβλημα παραγωγής ενέργειας και, προκειμένου η εκμετάλλευση του ανέμου να γίνεται με τον αποδοτικότερο δυνατό τρόπο, σημαντική έρευνα διεξάγεται για τη βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών των ανεμογεννητριών.

Η σύγχρονη τεχνολογία παραγωγής ενέργειας από τον άνεμο βασίζεται κυρίως στην κατασκευή ανεμογεννητριών τριών πτερυγίων οριζοντίου άξονα (Horizontal Axis Wind Turbines – HAWT). Τα κύρια μέρη μιας ανεμογεννήτριας αυτού του τύπου χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: στα δομικά μέρη και στα ηλεκτρομηχανολογικά μέρη. Τα τελευταία περιλαμβάνουν κέλυφος που περικλείει τον άξονα περιστροφής και τη γεννήτρια και είναι συνδεδεμένα μαζί με τα πτερύγια στην κορυφή του πυλώνα. Ο πυλώνας, σε συνδυασμό με τη θεμελίωση, αποτελούν τα δομικά τμήματα της ανεμογεννήτριας. Διάφορες μορφές πυλώνα και θεμελίωσης έχουν προταθεί, ενώ η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη διαμόρφωση ανεμογεννήτριας περιλαμβάνει κελυφωτό πυλώνα κυκλικής μεταβλητής διατομής επί επιφανειακής θεμελίωσης ή θεμελίωσης μονοπασάλου.

Ο σύγχρονος σχεδιασμός ανεμογεννητριών απαιτεί την απόδοση ενέργειας περισσότερης από 5MW, γεγονός το οποίο μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση μεγαλύτερων πτερυγίων (διάμετρος δίσκου μεγαλύτερη των 120m). Το γεγονός αυτό οδηγεί σε αντίστοιχη αύξηση του ύψους του πυλώνα. Αυτή η αύξηση του ύψους έχει άμεσες συνέπειες στη δομική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας, λόγω της ανάπτυξης αυξημένων φορτίων ανέμων και λυγηρότητας του πυλώνα, σε συνδυασμό με το αυξημένο αξονικό φορτίο λόγω των ιδίων βαρών. Συνεπώς η ανάλυση και η διαστασιολόγηση των δομικών τμημάτων της ανεμογεννήτριας γίνονται πιο πολύπλοκες με την απαίτηση να λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα ανώτερης τάξης και η αλληλεπίδραση πυλώνα-θεμελίωσης-πτερυγίων στη δυναμική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας.

Εκτεταμένες ερευνητικές προσπάθειες έχουν παρουσιαστεί στη διεθνή βιβλιογραφία σχετικά με τη λεπτομερή προσομοίωση του πυλώνα με χρήση προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων κελύφους ή στερεών πεπερασμένων στοιχείων (Bazeos et al., 2002, Lavassas et al., 2003, Arasu et al., 2011, Al Hamaydeh and Hussain, 2011, Dimopoulos and Gantes, 2013). Τα εν λόγω προσομοιώματα προσφέρουν τη δυνατότητα να ληφθούν υπόψη στην ανάλυση φαινόμενα όπως μη γραμμικότητα υλικού, φαινόμενα τοπικού λυγισμού κ.λπ, ενώ δύναται να προσομοιωθούν και κατασκευαστικές λεπτομέρειες, όπως ενισχυτικοί δακτύλιοι, ανθρωποθυρίδα, κοχλιώσεις κ.λπ. Παρόλα αυτά είναι γεγονός ότι αυτού του είδους η προσομοίωση είναι ιδιαίτερος πολύπλοκη και απαιτεί σημαντικό υπολογιστικό κόστος. Συνεπώς, η προσομοίωση ανεμογεννητριών με χρήση στοιχείων δοκού παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω των

πλεονεκτημάτων της σε σχέση με πιο λεπτομερείς προσομοιώσεις, ειδικά σε στάδια προμελέτης (Lavassas et al., 2003, Al Hamaydeh and Hussain, 2011, Lee et al. 2002). Τα στοιχεία δοκού είναι εύκολα στη χρήση, παρουσιάζουν πολύ μικρό υπολογιστικό κόστος και προσφέρουν καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων. Επίσης, λόγω της εύκολης παραμετροποίησης των δεδομένων του προσομοιώματος, τα στοιχεία δοκού είναι κατάλληλα και για τη διεξαγωγή παραμετρικών αναλύσεων σε σχέση με τα κελυφωτά ή στερεά πεπερασμένα στοιχεία, τα οποία απαιτούν την κατάρτιση πολλαπλών προσομοιωμάτων.

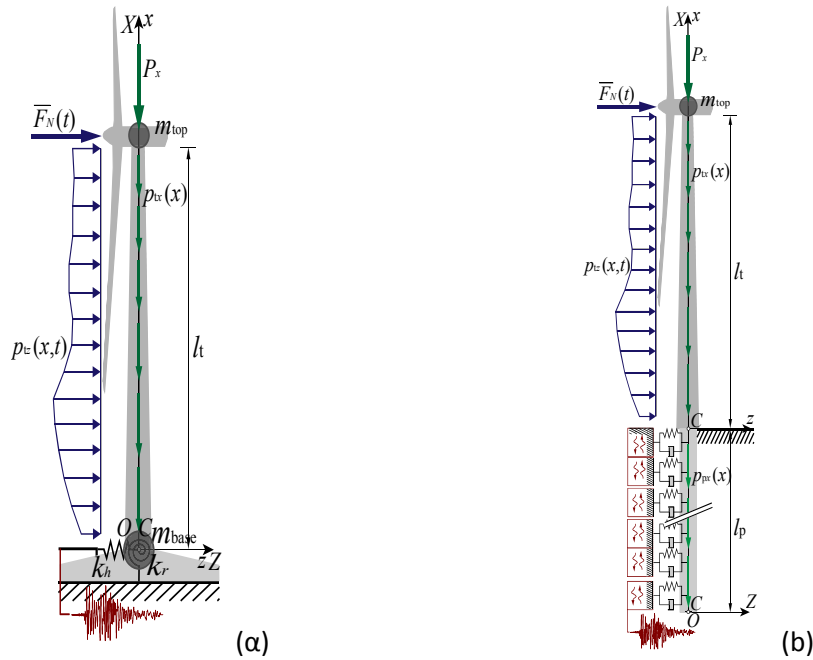
Ο σκοπός της παρούσας εργασίας, η οποία αποτελεί μέρος δημοσίευσης σε έγκριτο επιστημονικό περιοδικό (Sarountzakis et al., 2015), είναι να παρουσιάσει εξελιγμένη μεθοδολογία βασισμένη στη θεωρία δοκού για τη μη γραμμική δυναμική ανάλυση πυλώνων ανεμογεννητριών, τυχαίας μεταβλητής διατομής, εδραζόμενων είτε επί επιφανειακού θεμελίου είτε επί μονοπασσάλου. Το σύστημα ανεμογεννήτριας-θεμελίωσης υποβάλλεται σε μετρίως μεγάλες μετακινήσεις και σε τυχούσες συνοριακές συνθήκες, ενώ λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα κινηματικής και αδρανειακής αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής. Η ανεμογεννήτρια υπόκειται στη συνδυασμένη δράση τυχούσας εγκάρσιας δυναμικής πίεσης ανέμου και φόρτισης, λόγω σεισμικής διέγερσης, ενώ επίσης λαμβάνεται υπόψη η αξονική φόρτιση που προκύπτει από το ίδιο βάρος του πυλώνα και του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η δυναμική φύση του ανέμου, κατασκευάστηκαν τεχνητές χρονοϊστορίες δυνάμεων με εφαρμογή της Θεωρίας Στοιχείου Πτερυγίου (Blade Element Momentum Theory – BEM), ενώ, προκειμένου να παραχθούν οι χρονοϊστορίες σεισμικής φόρτισης, χρησιμοποιήθηκε η θεωρία μονοδιάστατης διάδοσης διατμητικών κυμάτων (1-D shear wave propagation). Στην περίπτωση επιφανειακής θεμελίωσης, το σύστημα εδάφους-θεμελίωσης προσομοιώνεται από ισοδύναμα εγκάρσια και στροφικά ελατήρια, ενώ στην περίπτωση θεμελίωσης με μονοπάσσαλο το σύστημα αντιμετωπίζεται ως δοκός-επί-εδάφους, με αντίστοιχα εγκάρσια ελατήρια και αποσβεστήρες κατά μήκος της δοκού. Βάσει της θεωρητικής ανάλυσης που παρουσιάζεται διατυπώνονται τρία προβλήματα συνοριακών τιμών ως προς τις εγκάρσιες συνιστώσες της μετακίνησης, καθώς και την αξονική μετακίνηση του πυλώνα και του πιθανού πάσσαλου θεμελίωσης. Τα εν λόγω προβλήματα επιλύονται με εφαρμογή της Μεθόδου Αναλογικής Εξίσωσης (MAE) (Katsikadelis, 2002), η οποία βασίζεται στη Μέθοδο Συνοριακών Στοιχείων (Boundary Element Method – BEM). Η εφαρμογή της μεθόδου οδηγεί στη μόρφωση συστήματος μη γραμμικών και πεπλεγμένων αλγεβρο-διαφορικών εξισώσεων κίνησης (Differential-Algebraic Equations (DAE)), το οποίο επιλύεται χρησιμοποιώντας την επαναληπτική μέθοδο Petzold-Gear (Petzold-Gear Backward Differentiation Formula –BDF) (Brenan et al. 1989), μια γραμμική πολυβηματική μέθοδο για αλγεβρο-διαφορικές εξισώσεις. Οι γεωμετρικές σταθερές της διατομής υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την αμιγή BEM, συνεπώς διακριτοποιείται μόνο το σύνορο της διατομής. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη μελέτη σε σύστημα πυλώνα-θεμελίωσης ανεμογεννήτριας, όπου ο πυλώνας υποβάλλεται στις παραχθείσες χρονοϊστορίες φόρτισης ανέμου και η θεμελίωση σε καταγεγραμμένα επιταχυνσιογραφήματα από σεισμικές διεγέρσεις.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προτεινόμενη μεθοδολογία συγκρίθηκαν με αυτά που προκύπτουν από εμπορικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, καταδεικνύοντας την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητα της μεθόδου, καθώς και τη σημαντική επιρροή των μη γραμμικών φαινομένων στη δυναμική απόκριση ανεμογεννητριών.

2. Διατύπωση του Προβλήματος

2.1 Ανάλυση Πυλώνα

Για την ανάλυση του πυλώνα, θεωρείται ευθύγραμμη δοκός μήκους l_i (Σχ.1), τυχούσας διπλά συμμετρικής μεταβλητής διατομής εμβαδού $A_i = A_i(x)$. Η διατομή περιλαμβάνει το διδιάστατο χωρίο Ω , το οποίο είναι απλά ή πολλαπλά συνεκτικό (υπάρχει η δυνατότητα να περιλαμβάνει οπές), ενώ το σύνορο της διατομής Γ_j ($j=1,2,\dots,K$), είναι τμηματικά λείο. Το υλικό από το οποίο αποτελείται ο πυλώνας είναι γραμμικά ελαστικό, ομογενές και ισότροπο με μέτρο ελαστικότητας E_i , μέτρο διάτμησης G_i , λόγο Poisson ν_i και πυκνότητα ρ_i ενώ θεωρείται ότι ισχύει η παραδοχή συνεχούς μέσου, δηλαδή δεν υπάρχουν ασυνέχειες και δεν αναπτύσσονται ρωγμές σε όλη την έκταση του πυλώνα. Στο Σχ.1, συμβολίζεται με $Cxyz$ το κύριο καμπτικό σύστημα αξόνων που διέρχεται από το κέντρο βάρους της διατομής C και έχει κέντρο τη βάση του πυλώνα. Η δοκός υποβάλλεται σε συνδυασμό φορτίσεων από τυχόν συγκεντρωμένο ή/και κατανεμημένο αξονικό φορτίο $p_{tx} = p_{tx}(x,t)$ κατά μήκος του άξονα x , εγκάρσιο φορτίο $p_{ty} = p_{ty}(x,t)$, $p_{tz} = p_{tz}(x,t)$ κατά μήκος των αξόνων y και z , αντίστοιχα, καθώς και καμπτική φόρτιση $m_{tx} = m_{tx}(x,t)$, $m_{ty} = m_{ty}(x,t)$ κατά μήκος των αξόνων y και z , αντίστοιχα (Σχ.1).



Σχ. 1. Πυλώνας ανεμογεννήτριας μεταβλητής διατομής, εδραζόμενη επί επιφανειακού θεμελίου (α) ή επί μονοπασσάλου (β).

Το πεδίο μετατοπίσεων τυχόντος σημείου της διατομής, προσδιορίζεται ως

$$\bar{u}_i(x, y, z, t) = u_i(x, t) - yv'_i(x, t) - zw'_i(x, t) \quad (1\alpha)$$

$$\bar{v}_i(x, y, z, t) = v_i(x, t) \quad \bar{w}_i(x, y, z, t) = w_i(x, t) \quad (1\beta, \gamma)$$

όπου (') συμβολίζει την παράγωγο ως προς τη χωρική μεταβλητή x , ενώ \bar{u}_i , \bar{v}_i , \bar{w}_i οι συνιστώσες της μετατόπισης του τυχαίου σημείου ως προς το σύστημα αξόνων $Cxyz$ και $u_i = u_i(x, t)$, $v_i = v_i(x, t)$, $w_i = w_i(x, t)$ είναι οι συνιστώσες μετατόπισης του κέντρου βάρους της διατομής C .

Θεωρώντας μικρές παραμορφώσεις και μετρίως μεγάλες μετακινήσεις, οι συνιστώσες του 2^{ου} τανυστή τάσης Piola-Kirchhoff δίνονται συναρτήσει των παραμορφώσεων Green από τον γενικευμένο νόμο του Hooke. Εν συνεχεία, εφαρμόζοντας την Αρχή Δυνατών Έργων σε ολική διατύπωση Lagrange προκύπτουν οι διαφορικές εξισώσεις καθολικής δυναμικής ισορροπίας του πυλώνα, οι οποίες εκφράζονται ως

$$-E_t(A_t u_t'' + A_t' u_t') - E_t \left[A_t (v_t' v_t'' + w_t' w_t'') + \frac{1}{2} A_t' (v_t'^2 + w_t'^2) \right] + \rho_t A_t \ddot{u}_t = p_{tx} \quad (2\alpha)$$

$$E_t (I_{tz} v_t'''' + 2I_{tz}' v_t'''' + I_{tz}'' v_t''') - N_t v_t'' - N_t' v_t' + \rho_t A_t \ddot{v}_t - \rho_t I_{tz} \ddot{v}_t'' - \rho_t I_{tz}' \dot{v}_t' = p_{ty} - m_{ty}' \quad (2\beta)$$

$$E_t (I_{ty} w_t'''' + 2I_{ty}' w_t'''' + I_{ty}'' w_t''') - N_t w_t'' - N_t' w_t' + \rho_t A_t \ddot{w}_t - \rho_t I_{ty} \ddot{w}_t'' - \rho_t I_{ty}' \dot{w}_t' = p_{tz} + m_{ty}' \quad (2\gamma)$$

όπου ($\dot{}$) συμβολίζει την παράγωγο ως προς τη χρονική μεταβλητή t . Επίσης, $A_t = A_t(x)$ είναι το εμβαδόν της διατομής, $I_{ty} = I_{ty}(x)$ και $I_{tz} = I_{tz}(x)$ είναι οι κύριες ροπές αδρανείας κατά μήκος του πυλώνα (Sapountzakis and Dikaros, 2013), ενώ η έκφραση της αξονικής δύναμης N_t προκύπτει ως

$$N_t = E_t A_t \left[u_t' + \frac{1}{2} (v_t'^2 + w_t'^2) \right] \quad (3)$$

Από την εφαρμογή της Αρχής Δυνατών Έργων προκύπτουν επίσης οι αντίστοιχες αρχικές συνθήκες ($x \in (0, l)$) στις οποίες υπόκειται ο πυλώνας

$$u_t(x, 0) = u_{t0}(x) \quad \dot{u}_t(x, 0) = \dot{u}_{t0}(x) \quad (4\alpha, \beta)$$

$$v_t(x, 0) = v_{t0}(x), \quad \dot{v}_t(x, 0) = \dot{v}_{t0}(x) \quad w_t(x, 0) = w_{t0}(x), \quad \dot{w}_t(x, 0) = \dot{w}_{t0}(x) \quad (5\alpha, \beta), (6\alpha, \beta)$$

καθώς και οι αντίστοιχες χρονικά μεταβαλλόμενες συνοριακές συνθήκες στα άκρα $x = 0, l$ του πυλώνα

$$a_{t1} u_t(x, t) + \alpha_{t2} N_{tb}(x, t) = \alpha_{t3} \quad (7)$$

$$\beta_{t1} v_t(x, t) + \beta_{t2} R_{tby}(x, t) = \beta_{t3} \quad \bar{\beta}_{t1} v_t'(x, t) + \bar{\beta}_{t2} M_{tby}(x, t) = \bar{\beta}_{t3} \quad (8\alpha, \beta)$$

$$\gamma_{t1} w_t(x, t) + \gamma_{t2} R_{tbz}(x, t) = \gamma_{t3} \quad \bar{\gamma}_{t1} w_t'(x, t) + \bar{\gamma}_{t2} M_{tby}(x, t) = \bar{\gamma}_{t3} \quad (9\alpha, \beta)$$

όπου R_{tby} , R_{tbz} και M_{tby} , M_{tbz} είναι οι αντιδράσεις και οι καμπτικές ροπές που αναπτύσσονται στη διατομή στην παραμορφωμένη κατάσταση κατά τους αξόνες y και z , αντίστοιχα, και εκφράζονται ως

$$R_{tby} = -E_t (I_{tz} v_t''' + I_{tz}' v_t'') + N_t v_t' + \rho_t I_{tz} \ddot{v}_t' - m_{tz} \quad (10\alpha)$$

$$R_{tbz} = -E_t (I_{ty} w_t''' + I_{ty}' w_t'') + N_t w_t' + \rho_t I_{ty} \ddot{w}_t' + m_{ty} \quad (10\beta)$$

$$M_{tby} = E_t I_{tz} v_t'' \quad M_{tbz} = -E_t I_{ty} w_t'' \quad (10\gamma, \delta)$$

Τέλος, α_{ty} , β_{ty} , $\bar{\beta}_{ty}$, γ_{ty} , $\bar{\gamma}_{ty}$ ($j=1, 2, 3$) είναι γνωστοί χρονικά μεταβαλλόμενοι συντελεστές που καθορίζουν τις συνοριακές συνθήκες ($x = 0, l$).

2.2 Ανάλυση Θεμελίωσης

2.2.1 Επιφανειακή Θεμελίωση

Στην περίπτωση όπου το έδαφος έχει ικανοποιητική αντοχή (φέρουσα ικανότητα), η ανεμογεννήτρια μπορεί να θεμελιωθεί σε επιφανειακή κυκλική βάση από οπλισμένο σκυρόδεμα. Σε αυτήν την περίπτωση, το τοπικό σύστημα αξόνων $Cxyz$ του πυλώνα ταυτίζεται με το καθολικό σύστημα $OXYZ$ και η προσομοίωση της θεμελίωσης επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας ισοδύναμα εγκάρσια και στροφικά

ελατήρια με συντελεστές k_h, k_r , αντίστοιχα. Η επιρροή των ελατηρίων λαμβάνεται άμεσα υπόψη αντικαθιστώντας τους συντελεστές $\alpha_j, \beta_j, \bar{\beta}_j, \gamma_j, \bar{\gamma}_j$ ($j=1,2,3$) των συνοριακών εξισώσεων με τις κατάλληλες τιμές. Συγκεκριμένα, για $x=0$ προκύπτει $\alpha_1=1, \beta_1=\gamma_1=k_h, \bar{\beta}_1=\bar{\gamma}_1=k_r, \alpha_2=0, \beta_2=\bar{\beta}_2=\gamma_2=\bar{\gamma}_2=-1, \alpha_3=0, \beta_3=k_h v_g, \gamma_3=k_h w_g, \bar{\beta}_3=\bar{\gamma}_3=0$, όπου $v_g=v_g(t), w_g=w_g(t)$ είναι οι εγκάρσιες συνιστώσες μετατόπισης λόγω σεισμικής διέγερσης. Επίσης, λαμβάνοντας υπόψη τη μάζα της θεμελίωσης m_{base} , οι συνοριακές συνθήκες τροποποιούνται ως

$$k_h v_t(0,t) - R_{tby}(0,t) - m_{base} \ddot{v}_t(0,t) = k_h v_g(t) \quad k_r v'_t(0,t) - M_{tbz}(0,t) = 0 \quad (11\alpha,\beta)$$

$$k_h w_t(0,t) - R_{tbz}(0,t) - m_{base} \ddot{w}_t(0,t) = k_h w_g(t) \quad k_r w'_t(0,t) - M_{tby}(0,t) = 0 \quad (11\gamma,\delta)$$

2.2.2 Θεμελίωση με Μονοπάσσαλο

Όταν το έδαφος δεν έχει ικανοποιητική αντοχή, η ανεμογεννήτρια μπορεί να θεμελιωθεί με τη χρήση μονοπασσάλου. Σε αυτήν την περίπτωση η ανάλυση του συστήματος πυλώνα-θεμελίωσης ανάγεται στην προσομοίωση του πυλώνα μέσω δοκού μεταβλητής διατομής (*Beam of Variable Cross Section*) και της θεμελίωσης μέσω δοκού επί ελατηριωτού εδάφους (*Beam on Winkler Foundation*). Για την ανάλυση του πασσάλου, θεωρούμε ευθύγραμμη κυκλική δοκό μήκους l_p , διαμέτρου d , πυκνότητα ρ_p , με μέτρο ελαστικότητας E_p , μέτρο διάτμησης G_p και λόγο Poisson ν_p (Σχ.1β). Το εδαφικό μέσο προσομοιώνεται με στοιχεία Kelvin–Voigt ($k_s - c$). Τα ελεύθερα άκρα αυτών των στοιχείων υπόκεινται στις χρονοϊστορίες μετατοπίσεων και ταχυτήτων του ελεύθερου πεδίου (u_{ff}, \dot{u}_{ff}) που προκύπτουν από τη μονοδιάστατη διάδοση διατμητικών κυμάτων της σεισμικής διέγερσης (Σχ.1β). Ακολουθώντας τη διαδικασία όπως παρουσιάζεται στην παράγραφο 2.1, προκύπτουν οι διαφορικές εξισώσεις καθολικής δυναμικής ισορροπίας του πασσάλου, οι οποίες εκφράζονται ως (Kampitsis et al. 2013)

$$-E_p A_p (u_p'' + w_p' w_p'' + v_p' v_p'') + \rho_p A_p \ddot{u}_p = p_{px} \quad (12\alpha)$$

$$E_p I_{pz} v_p'''' + \rho_p A_p \ddot{v}_p - N_p' v_p' - N_p v_p'' - \rho_p I_{pz} \dot{v}_p'' + k_s (v_p - u_{ff}) + c (\dot{v}_p - \dot{u}_{ff}) = p_{py} \quad (12\beta)$$

$$E_p I_{py} w_p'''' + \rho_p A_p \ddot{w}_p - N_p' w_p' - N_p w_p'' - \rho_p I_{py} \dot{w}_p'' + k_s (w_p - u_{ff}) + c (\dot{w}_p - \dot{u}_{ff}) = p_{pz} \quad (12\gamma)$$

όπου A_p είναι το εμβαδόν της διατομής, I_{py}, I_{pz} είναι οι κύριες ροπές αδρανείας κατά μήκος του πασσάλου, ενώ N_p είναι έκφραση της αξονικής δύναμης του πασσάλου, όπως ορίζεται στην εξ. (3) με κατάλληλη αλλαγή δεκτών. Οι διαφορικές εξισώσεις ισορροπίας υπόκεινται στις αντίστοιχες αρχικές συνθήκες $x \in (0, l_p)$

$$u_p(x, 0) = u_{p0}(x) \quad \dot{u}_p(x, 0) = \dot{u}_{p0}(x) \quad (13\alpha, \beta)$$

$$v_p(x, 0) = v_{p0}(x), \dot{v}_p(x, 0) = \dot{v}_{p0}(x), w_p(x, 0) = w_{p0}(x), \dot{w}_p(x, 0) = \dot{w}_{p0}(x) \quad (14\alpha, \beta) \quad (15\alpha, \beta)$$

και τις αντίστοιχες χρονικά μεταβαλλόμενες συνοριακές συνθήκες $x = 0, l_p$

$$\alpha_{p1} u_p(x, t) + \alpha_{p2} N_{pb}(x, t) = \alpha_{p3} \quad (16)$$

$$\beta_{p1} v_p(x, t) + \beta_{p2} R_{pby}(x, t) = \beta_{p3} \quad \bar{\beta}_{p1} v'_p(x, t) + \bar{\beta}_{p2} M_{pbz}(x, t) = \bar{\beta}_{p3} \quad (17\alpha, \beta)$$

$$\gamma_{p1} w_p(x, t) + \gamma_{p2} R_{pbz}(x, t) = \gamma_{p3} \quad \bar{\gamma}_{p1} w'_p(x, t) + \bar{\gamma}_{p2} M_{pby}(x, t) = \bar{\gamma}_{p3} \quad (18\alpha, \beta)$$

Τέλος, για να αποκατασταθεί η συνέχεια μεταξύ πυλώνα και πασσάλου εισάγονται οι ακόλουθες συνθήκες συμβιβαστού

$$u_t(l_p, t) = u_p(l_p, t) \quad N_{tb}(l_p, t) = N_{pb}(l_p, t) \quad (19\alpha)$$

$$v_t(l_p, t) = v_p(l_p, t), v'_t(l_p, t) = v'_p(l_p, t), R_{tby}(l_p, t) = R_{pby}(l_p, t), M_{tbz}(l_p, t) = M_{pbz}(l_p, t) \quad (19\beta)$$

$$w_t(l_p, t) = w_p(l_p, t), w'_t(l_p, t) = w'_p(l_p, t), R_{tbz}(l_p, t) = R_{pbz}(l_p, t), M_{tby}(l_p, t) = M_{pby}(l_p, t) \quad (19\gamma)$$

3. Αριθμητική Επίλυση

Η επίλυση του προβλήματος της μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης συστήματος πυλώνα-θεμελίωσης ανεμογεννητριών έγκειται στον προσδιορισμό της διαμήκουσ και των εγκάρσιων μετατοπίσεων και επιτυγχάνεται με τη βοήθεια της Μεθόδου Αναλογικής Εξίσωσης όπως περιγράφεται στις εργασίες Katsikadelis (2002), Sapountzakis and Dikaros (2013), Kampitsis et al. (2013). Το πρόβλημα αρχικών τιμών που περιγράφεται από ένα σύστημα μη γραμμικών διαφορικών - αλγεβρικών εξισώσεων (Differential-Algebraic Equations DAE) επιλύεται με τη χρήση της αποδοτικής μεθόδου επίλυσης Petzold-Gear Backward Differentiation Formula (BDF) (Brenan et al., 1989).

4. Αριθμητικά Αποτελέσματα

Με βάση την αναλυτική και αριθμητική διαδικασία που παρουσιάστηκε παραπάνω, συντάχθηκε πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή και πραγματοποιήθηκε εκτενής μελέτη ανεμογεννήτριας 5-MW με μήκος πτερυγίων $r_{bl} = 61.5 \text{ m}$ (Quiligan et al., 2012). Ο πυλώνας θεωρείται μεταλλικός μεταβλητής κοίλης κυκλικής διατομής ($E_t = 2.1 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$, $\rho_t = 8.5 \text{ tn/m}^3$, $\nu_t = 0.3$, $G_t = 8.0769 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$, $l_t = 120 \text{ m}$). Η διάμετρος και το πάχος του μεταβάλλονται γραμμικά με το ύψος και δίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Διάμετρος και το πάχος πυλώνα ανεμογεννήτριας.

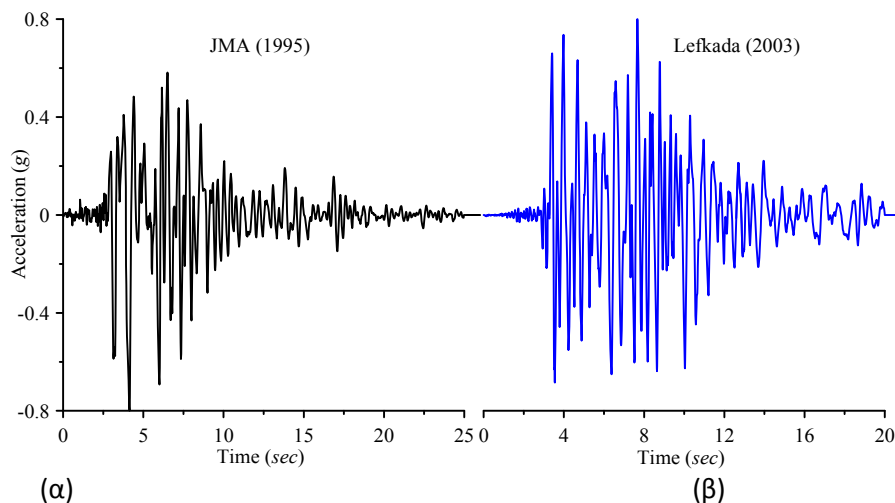
$D_{base} (m)$	$t_{base} (m)$	$D_{top} (m)$	$t_{top} (m)$
8.43	0.048	3.87	0.025

Οι αδρανειακές δυνάμεις που προκύπτουν από τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό λαμβάνονται υπόψη μέσω επιπρόσθετης συγκεντρωμένης μάζας $m_{top} = 403.22 \text{ tn}$ στην κορυφή της ανεμογεννήτριας. Στην παρούσα μελέτη εξετάζονται τρεις τρόποι θεμελίωσης, η πλήρης πάκτωση, το επιφανειακό θεμέλιο ($m_{base} = 1351.029 \text{ tn}$, $k_h = 1100 \text{ MN/m}$, $k_r = 250000 \text{ MNm/rad}$) και ο μονοπάσσαλος ($E_p = 2.1 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$, $\rho_p = 7.8 \text{ tn/m}^3$, $\nu_p = 0.3$, $G_p = 8.0769 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$, $l_p = 30.0 \text{ m}$, $D_p = 5.0 \text{ m}$, $t_p = 0.08 \text{ m}$).

4.1 Επιβαλλόμενη Φόρτιση

4.1.1 Σεισμική Φόρτιση

Η επιρροή της σεισμικής φόρτισης στην απόκριση του συστήματος πυλώνα-θεμελίωσης εξετάζεται μέσω των επιταχυνσιογραφήματων του σεισμού της Λευκάδας (2003) και του Kobe, Ιαπωνία (1995) όπως παρουσιάζονται στο Σχ.2.



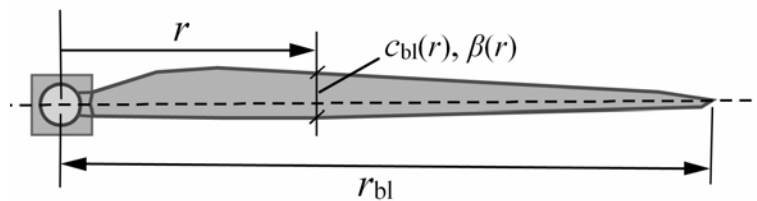
Σχ. 2. Επιταχυνσιογραφήματα JMA (α) και Λευκάδας (β).

Η ανάλυση του συστήματος επιτυγχάνεται σε δύο διαδοχικά στάδια. Αρχικά πραγματοποιείται ανελαστική μη γραμμική ανάλυση της απόκρισης του εδαφικού σχηματισμού αμελώντας την παρουσία της θεμελίωσης

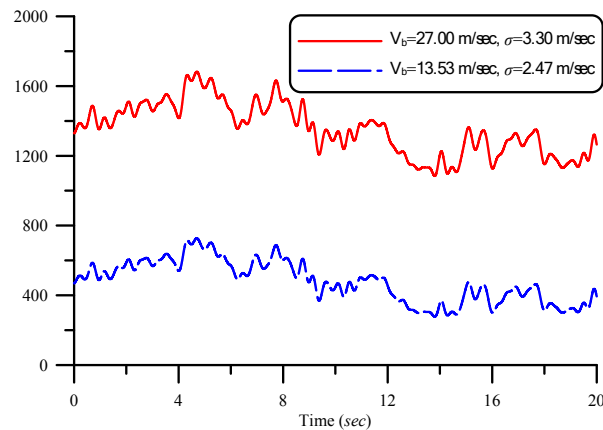
και στη συνέχεια δυναμική ανάλυση του συστήματος πυλώνα-θεμελίωσης, λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρική μη γραμμικότητα και την κινηματική και αδρανειακή αλληλεπίδραση.

4.1.2 Φόρτιση Ανέμου

Η επιρροή της φόρτισης του ανέμου εξετάζεται μέσω της χρονικά μεταβαλλόμενης οριζόντιας δύναμης, η οποία προκύπτει εφαρμόζοντας τη θεωρία Blade Element Momentum, όπου λαμβάνονται υπόψη μεταξύ άλλων, η μορφή και ο αριθμός των πτερυγίων (Σχ.3) καθώς και η πυκνότητα, η ροή και η γωνία πρόσπτωσης του αέρα (Hansen, 2008). Στην παρούσα εργασία, παράγονται δύο τεχνητές χρονοϊστορίες ταχύτητας ανέμου, εφαρμόζοντας τη διαδικασία που περιγράφεται στις εργασίες (Koulatsou et al. 2013, Di Paola, 1998, DNV, 2002) με τυπικές αποκλίσεις $V_b = 13.53 \text{ m/s}$ και $V_b = 27.0 \text{ m/s}$, οι οποίες μετατρέπονται σε χρονοϊστορίες δύναμης στην κορυφή του πυλώνα, όπως παρουσιάζονται στο Σχ.4.



Σχ. 3. Μορφή του πτερυγίου ανεμογεννήτριας



Σχ. 4. Χρονοϊστορίες δύναμης στην κορυφή του πυλώνα.

4.2 Αριθμητικά Αποτελέσματα

Προκειμένου να διαπιστωθεί η ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου, πραγματοποιήθηκε ιδιομορφική ανάλυση και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά που προέκυψαν από το εμπορικό λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων SOFiSTiK (2011). Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι έξι πρώτες ιδιοπερίοδοι του συστήματος πυλώνα-θεμελίωσης για τις τρεις περιπτώσεις θεμελίωσης, όπως ελήφθησαν από την

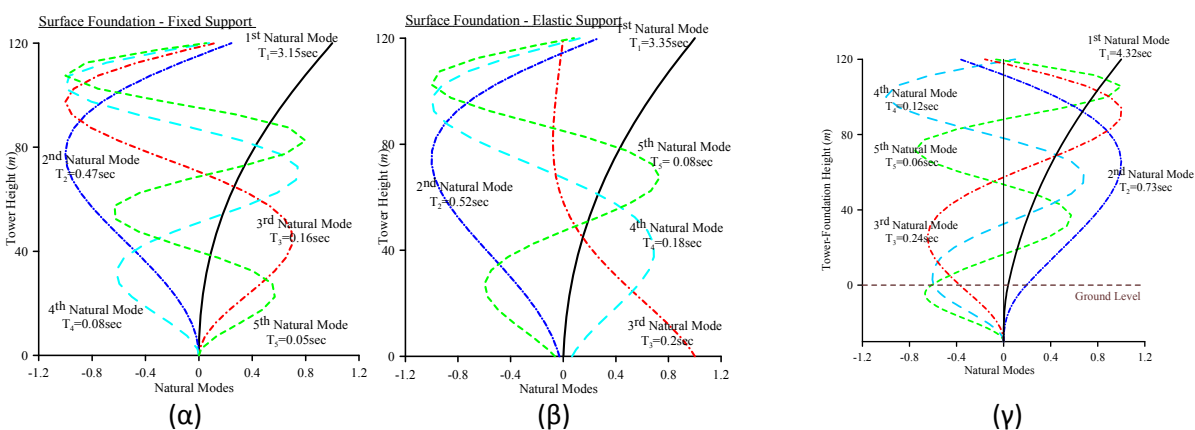
εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου, καθώς και από την προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία, ενώ στο Σχ. 5 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες ιδιομορφές.

Εν συνεχεία, μελετήθηκε η στατική απόκριση της ανεμογεννήτριας υπό εγκάρσιο συγκεντρωμένο φορτίο στην κορυφή του πυλώνα $\bar{F}_N = 1353.3kN$. Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα, λαμβάνοντας υπόψη ή αγνοώντας την επιρροή της γεωμετρικής μη γραμμικότητας, όπως ελήφθησαν από την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου, καθώς και από την προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία. Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα παρουσιάζουν άριστη σύγκλιση.

Πίνακας 2: Έξι πρώτες ιδιοπερίοδοι του συστήματος πυλώνα-θεμελίωσης ανεμογεννητριών.

Περίοδος T (sec)	Επιφανειακή Θεμελίωση				Μονοπάσσαλος	
	Πάκτωση		Ελαστική Στήριξη		Παρούσα Έρευνα	Sofistik
	Παρούσα Έρευνα	Sofistik	Παρούσα Έρευνα	Sofistik	Παρούσα Έρευνα	Sofistik
T1	3.150	3.164	3.345	3.356	4.316	4.310
T2	0.468	0.474	0.523	0.531	0.730	0.726
T3	0.164	0.172	0.200	0.245	0.243	0.246
T4	0.137*	0.137*	0.183	0.175	0.151*	0.150*
T5	0.081	0.089	0.137*	0.137*	0.123	0.128
T6	0.048	0.056	0.089	0.093	0.056	0.081

* Αξονική ιδιοπερίοδος



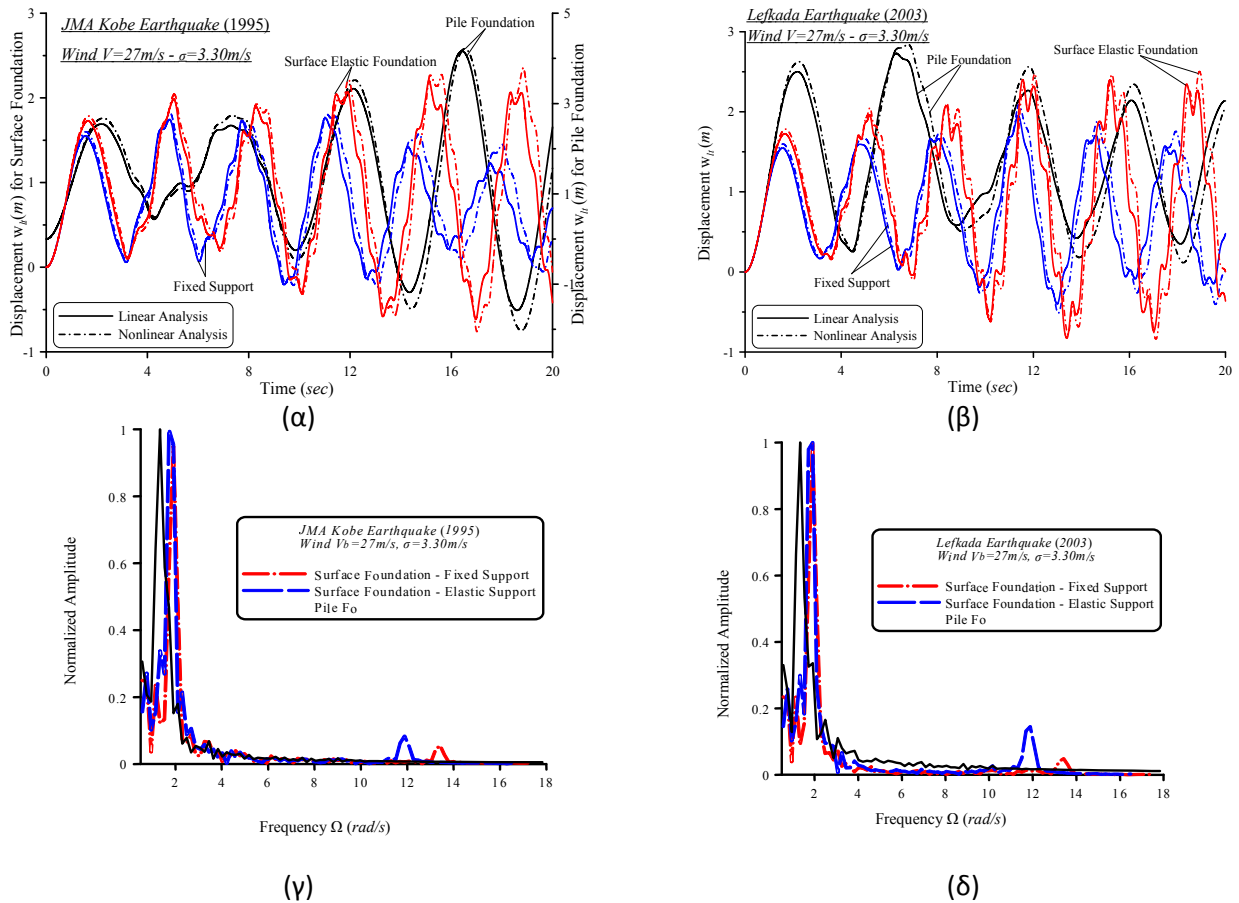
Σχ. 5 Ιδιομορφές ανεμογεννήτριας με πακτωμένη βάση (α), επιφανειακό θεμέλιο (β) και μονοπάσσαλο (γ).

Πίνακας 3: Μετατόπιση κορυφής $w_i(l_i)(m)$ υπό στατική φόρτιση

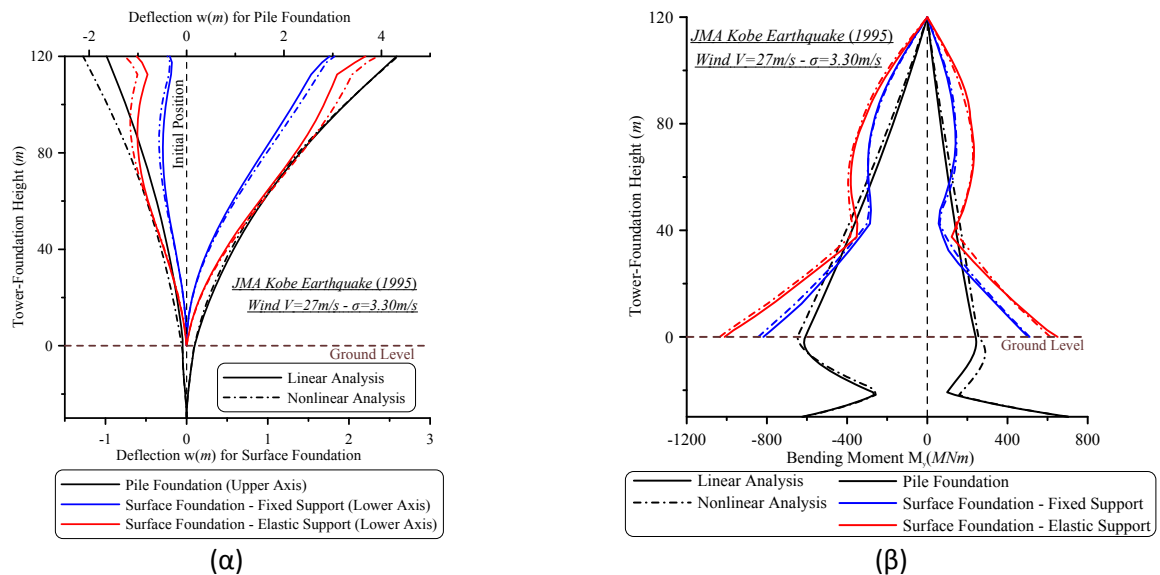
$w_i(l_i)(m)$	Επιφανειακή Θεμελίωση				Μονοπάσσαλος	
	Πάκτωση		Ελαστική Στήριξη			
Ανάλυση	Παρούσα Έρευνα	Sofistik	Παρούσα Έρευνα	Sofistik	Παρούσα Έρευνα	Sofistik
Γραμμική	0.703	0.711	0.782	0.791	1.232	1.233
Μη Γραμμική	0.726	0.734	0.808	0.817	1.287	1.291

Αναφορικά με τις δυναμικές διεγέρσεις, στην παρούσα εργασία κάθε διαμόρφωση πυλώνα εξετάζεται υπό την ταυτόχρονη δράση φορτίου ανέμου, όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 4 με βασική ταχύτητα $V_b = 27.0 \text{ m/sec}$ και τυπική απόκλιση $\sigma = 3.30 \text{ m/sec}$ και σεισμικής διέγερσης στη θεμελίωση που βασίζεται στο επιταχυνσιογράφημα του σεισμού της Λευκάδας (Σχ. 2α) και του Kobe (Σχ. 2β). Στο Σχ. 6 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες της σχετικής μετακίνησης $|w_i(l_i) - w_i(0)|$ για τα δύο επιταχυνσιογραφήματα, μαζί με τα σχετικά φάσματα Fourier. Επίσης, στα Σχ. 5, 6 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες περιβάλλουσες μετακίνησης w_i και καμπτικής ροπής M_{iy} ($i=t,p$). Στα εν λόγω σχήματα μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί η σημαντική διαφοροποίηση της απόκρισης για κάθε τύπο θεμελίωσης. Παρατηρείται ότι το σύστημα μονοπασσάλου οδηγεί σε πιο εύκαμπτη κατασκευή και συνεπώς, η σεισμική διέγερση ενεργοποιεί λιγότερες ιδιομορφές, ενώ αναπτύσσει σημαντικά μικρότερες τιμές εντατικών μεγεθών. Τέλος, στα παραπάνω σχήματα παρατηρείται και η μεταβολή των μετακινήσεων της κορυφής, λόγω της ύπαρξης του θλιπτικού αξονικού φορτίου κατά μήκος του πυλώνα, το οποίο μειώνει τη δυσκαμψία του φορέα και συνεπώς προκαλεί μεγαλύτερες τιμές μετακινήσεων και εντατικών μεγεθών. Η συμπεριφορά αυτή είναι ιδιαίτερης σημασίας, καθώς η νέα τάση στο σχεδιασμό ανεμογεννητριών οδηγεί στην κατασκευή υψηλότερων πυλώνων που στηρίζουν μεγαλύτερους και βαρύτερους ηλεκτρομηχανολογικούς εξοπλισμούς.

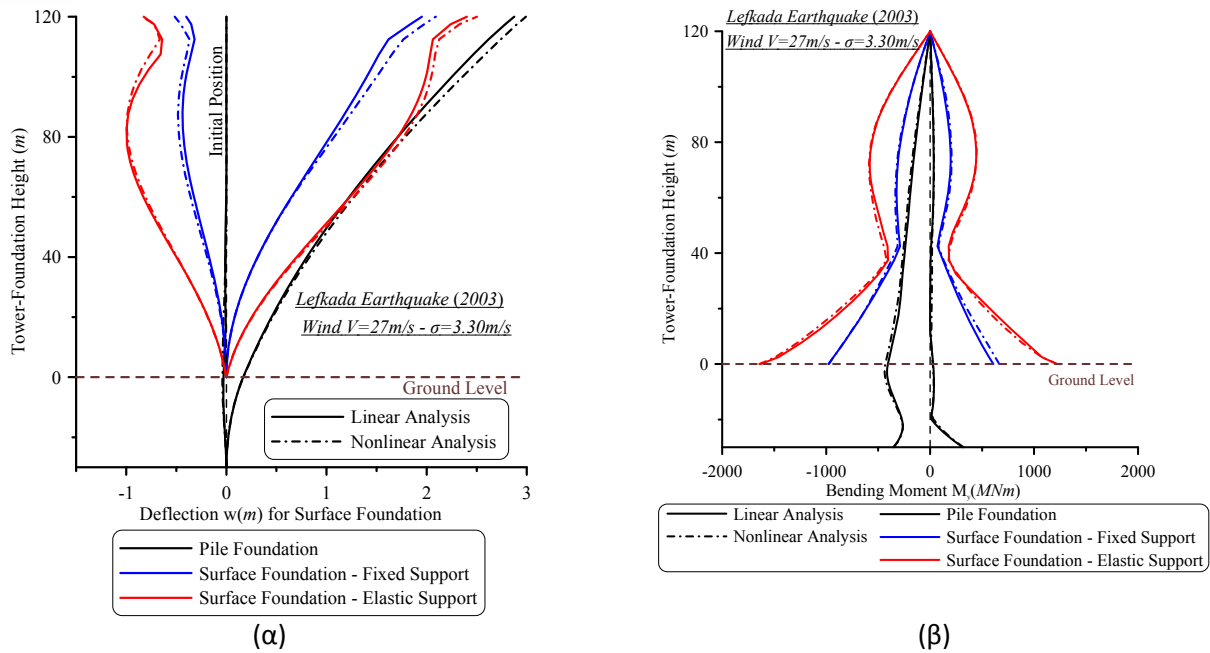
Γενικά, από την παρούσα διερεύνηση, σημειώνεται ότι η θεώρηση του πυλώνα ως πλήρως πακτωμένου, οδηγεί σε κάθε περίπτωση σε σημαντικά διαφορετική πρόβλεψη της συμπεριφοράς, γεγονός που καθιστά επιβεβλημένη την ανάλυση με αλληλεπίδραση πυλώνα-θεμελίωσης. Τέλος, η απόκλιση μεταξύ γραμμικής και μη γραμμικής συμπεριφοράς, η οποία φτάνει το 10% σε όρους μετακινήσεων και το 16% σε όρους εντατικών μεγεθών, καταδεικνύει την ανάγκη διεξαγωγής μη γραμμικών αναλύσεων, προκειμένου να γίνεται πιο ρεαλιστική πρόβλεψη της συμπεριφοράς του πυλώνα.



Σχ. 6. Χρονοϊστορία σχετικής μετατάκτισης για το επιταχυνσιογράφημα του Kobe (α) και της Λευκάδας (β) και φορτίο ανέμου με $V_b = 27.00 \text{ m/sec}$, $\sigma = 3.30 \text{ m/sec}$ και αντίστοιχες αναλύσεις FFT (γ,δ).



Σχ. 7. Περιβάλλουσα Μετατόπισης w_i ($i = t, p$) (α) και καμπτικής ροπής M_{iy} ($i = t, p$) (β) για το επιταχυνσιογράφημα του Kobe και φορτίου ανέμου με $V_b = 27.00 \text{ m/sec}$, $\sigma = 3.30 \text{ m/sec}$.



Σχ. 8. Περιβάλλουσα Μετατόπισης w_i ($i = t, p$) (α) και καμπτικής ροπής M_{iy} ($i = t, p$) (β) για το επιταχυνσιογράφημα της Λευκάδας και φορτίου ανέμου με $V_b = 27.00 \text{ m/sec}$, $\sigma = 3.30 \text{ m/sec}$.

5. Ευχαριστίες

Η παρούσα έρευνα υλοποιήθηκε ως μέρος του Προγράμματος «ΘΑΛΗΣ- 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.

6. Βιβλιογραφία

- Al Hamaydeh, M., and Hussain, S., 2011, “Optimized frequency-based foundation design for wind turbine towers utilizing soil–structure interaction”, *Journal of the Franklin Institute*, 348, 1470-1487.
- Arasu, P. V., Sagayaraj, D., and Gowrishankar, J., 2011, “Seismic Analysis of a Wind Turbine Steel Tower”, *Simulation Driven Innovation, L&T Integrated Engineering Services*, HTC.
- 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*, 24, 1015-1025.
- Brenan, K. E., Campbell, S. L., and Petzold, L. R., 1989, *Numerical Solution of Initial-value Problems in Differential-Algebraic Equations*, North-Holland, Amsterdam.

- Di Paola M., 1998, "Digital simulation of wind field velocity", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 74-76, 91-109.
- Dimopoulos, C. A., and Gantes, C. J., 2013, « Comparison of Stiffening Types of the Cutout in Tubular Wind Turbine Towers", *Journal of Constructional Steel Research*, 83, 62-74.
- DNV/Risø, 2002, *Guidelines for Design of Wind Turbines*, Denmark.
- Hansen, M. O. L, 2008, *Aerodynamics of Wind Turbines*, Earthscan, UK and USA.
- Kampitsis, A. E., Sapountzakis, E. J., Giannakos, S. K., and Gerolymos, N. A., 2013, "Seismic soil–pile–structure kinematic and inertial interaction—A new beam approach", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 55, 211-224.
- Katsikadelis, J. T., 2002, "The analog equation method. A boundary-only integral equation method for nonlinear static and dynamic problems in general bodies", *Theoretical and Applied Mechanics*, 27, 13-38.
- Koulatsou, K., Petrini, F., Vernardos, S., and Gantes, C. J., 2013, « Artificial time histories of wind actions for structural analysis of wind turbines", 2nd International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering, BCCCE, 23-25 May, EPOKA University, Tirana, Albania.
- 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*, 25, 1097-1106.
- Lee, D., Hodges, D. H., and Patil, M. J., 2002, "Multi-flexible-body Dynamic Analysis of Horizontal Axis Wind Turbines", *Wind Energy*, 5, 281-300.
- Quiligan, A., O'Connor, A., and Pakrashi, V., 2012, "Fragility analysis of steel and concrete wind turbine towers", *Engineering Structures*, 36, 270-282.
- Sapountzakis, E. J., and Dikaros, I. C., 2013, "Nonlinear flexural-torsional dynamic analysis of beams of variable doubly symmetric cross section – application to wind turbine towers", *Nonlinear Dynamics*, 73, 199-227.
- Sapountzakis, E. J., Dikaros, I. C., Kampitsis A.E., Koroneou A.D., 2015, "Nonlinear response of wind turbines under wind and seismic excitations with soil–structure interaction", *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics ASME*, Doi: 10.1115/1.4027697.
- SOFISTIK AG, 2011, *SOFISTIK Basics*, Oberschleißheim.