ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΔΟΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΟΝΟΠΑΣΣΑΛΩΝ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Γεωργία Μαργαρίτη, Ανδρέας Μπέντας, Χάρης Ι. Γαντές

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθήνα, Ελλάδα e-mail: chgantes@central.ntua.gr

1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι θαλάσσιες ανεμογεννήτριες διεκδικούν πλέον τη θέση τους στο χώρο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ως μια λύση αποδοτική και ιδιαίτερα φιλική προς το περιβάλλον. Από μηχανολογική και δομική άποψη συμπεριφέρονται διαφορετικά ανάλογα με τις διάφορες καταστάσεις λειτουργίας τους (αδρανής, σε κατάσταση παραγωγής ενέργειας κ.τ.λ.) και υποβάλλονται σε μεταβλητά φορτία τα οποία επηρεάζονται από τα περιβαλλοντικά δεδομένα της θαλάσσιας περιοχής, όπως οι καιρικές συνθήκες, η βυθομετρία, η ποιότητα του εδάφους, και η σεισμικότητα, επηρεάζοντας αρχικά την επιλογή του στατικού συστήματος της ανεμογεννήτριας και στη συνέχεια τόσο τη φόρτιση όσο και την απόκρισή της.

Στο παρόν άρθρο επιχειρείται μία συγκριτική αξιολόγηση των παραμέτρων που επηρεάζουν τη δομική συμπεριφορά μονοπάσσαλων θαλασσίων ανεμογεννητριών μέσα από μια σειρά παραμετρικών επιλύσεων. Για τον σκοπό αυτό δημιουργείται ένα αντιπροσωπευτικό προσομοίωμα ανεμογεννήτριας αυτού του τύπου σε λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων. Λαμβάνονται υπόψη κατάλληλα υπολογισμένες δράσεις λόγω ανέμου και λόγω κυμάτων και πραγματοποιούνται ισοδύναμες στατικές Μεταβάλλοντας παραμέτρους που αφορούν αναλύσεις. τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του φορέα, τα φορτία ανέμου και κυμάτων, και τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους θεμελιώσεως προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για τον μελετητή έργων αυτού του τύπου.

2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με κύριο κριτήριο επιλογής το βάθος του πυθμένα, η βασική διάκριση θαλάσσιων ανεμογεννητριών είναι σε σταθερές και σε πλωτές. Σταθερές είναι εκείνες που θεμελιώνονται απευθείας στον πυθμένα και προσφέρονται για βάθη ως περίπου 30m. Για μεγαλύτερα βάθη η λύση αυτή είναι αντιοικονομική ή και ανέφικτη, οπότε έχουν προταθεί διάφοροι τύποι πλωτών ανεμογεννητριών που αξιοποιούν την άνωση επί του πλωτήρα για την ισορροπία και ευστάθειά τους, ενώ αγκυρώνονται στον πυθμένα με καλώδια. Η συνηθέστερη μορφή σταθερών ανεμογεννητριών είναι τα λεγόμενα μονοπάσσαλα συστήματα, στα οποία ο πυλώνας συνεχίζεται ως τον πυθμένα, όπου και εμπήγνυται ως πάσσαλος, σε επαρκές βάθος ώστε να προσδώσει ευστάθεια στην κατασκευή. Ανάλογα με το βάθος της θάλασσας και τις εδαφικές συνθήκες, σε άλλες περιπτώσεις υιοθετούνται τρίποδα συστήματα, στα οποία ο πυλώνας στηρίζεται μέσα στη θάλασσα σε μεταλλική κατασκευή σχήματος ισοσκελούς τριγωνικής πυραμίδας, κάθε σκέλος της οποίας θεμελιώνεται με έναν ανεξάρτητο πάσσαλο, ή και συστήματα μορφής χωροδικτυώματος. Στο Σχήμα 1 φαίνονται οι βασικοί τύποι θεμελιωμένων και πλωτών ανεμογεννητριών.



Σχήμα 1. Θεμελιωμένα και πλωτά συστήματα ανεμογεννητριών

Η περίπτωση όπου επιλέγεται ένας κυλινδρικός πάσσαλος ως φορέας στήριξης της ανεμογεννήτριας είναι η συνηθέστερη, καθώς βασικά πλεονεκτήματα του είναι η απλότητα στο σχεδιασμό και την κατασκευή. Ωστόσο, η απλότητα του σχήματος καθιστά αναγκαία μια μεγάλη διάμετρο πασσάλου η οποία κυμαίνεται από 3.5m έως 6.0m και πάχος τοιχωμάτων μέχρι 150mm, με αποτέλεσμα στην κατασκευή να ασκούνται σημαντικά υδροδυναμικά φορτία. Η πίεση του νερού ωθεί τον κυλινδρικό πάσσαλο και επηρεάζει την κατασκευή πολύ περισσότερο από την περίπτωση που ο φορέας στήριξης είναι μορφής τριπόδου, ο οποίος κατασκευάζεται από σωλήνες μικρότερης διαμέτρου [1]. Η περίπτωση όπου ως φορέας στήριξης και θεμελίωσης επιλέγεται ένας κυλινδρικός πάσσαλος ενδείκνυται για βάθη έως περίπου 30m, αφού καθώς το βάθος του πυθμένα αυξάνεται απαιτούνται πιο δύσκαμπτες κατασκευές (μεγαλύτερη διάμετρος και πάχος πασσάλου), για να ανταποκριθούν στα μεγάλα επιβαλλόμενα φορτία, με αποτέλεσμα το κόστος της κατασκευής να αυξάνει σημαντικά.

3 ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΟΠΑΣΣΑΛΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

3.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΡΟΤΥΠΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Η ανεμογεννήτρια που αναλύεται είναι τύπου Vestas V-90, ονομαστικής ισχύος 3MW και είναι οριζοντίου άξονα και τριπτέρυγη, τα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά της οποίας συνοψίζονται στους Πιν. 1, 2. Ο μεταλλικός πυλώνας της ανεμογεννήτριας είναι χαλύβδινος, κοίλης κυκλικής διατομής, ελαφρά κωνικός με αρχική εξωτερική διάμετρο βάσης D=4m και πάχος τοιχωμάτων t=65mm και τελική διατομή στην κορυφή με D=2.8m και t=20mm. Έχει ύψος 90 m από την επιφάνεια της θάλασσας, ενώ το υψόμετρο του άξονα του δρομέα είναι στα 100m.

Η θεμελίωση της ανεμογεννήτριας γίνεται με σωληνωτό μεταλλικό πάσσαλο (monopile) σταθερής διαμέτρου D=4m και πάχους t=28mm. Για τη θεμελίωση θεωρείται αρχικά βάθος θάλασσας d=25m και μήκος έμπηξης του μονοπασσάλου στο έδαφος L=25m. Το έδαφος θεμελίωσης έχει χαρακτηριστικά μη συνεκτικού εδάφους με γωνία εσωτερικής τριβής φ=35°, ενώ θεωρείται ενιαίο εδαφικό προφίλ για όλο το βάθος έμπηξης του πασσάλου.

Διάμετρος δρομέα	90 m
Επιφάνεια σάρωσης	6362 m^2
Ταχύτητα περιστροφής	16.1 rpm
Μήκος πτερυγίων	44 m
Χορδή πτερυγίου	3.5 m
Βάρος ατράκτου	70 tn
Βάρος ρότορα	41 tn

Πίνακας 1. Τεχνικά χαρακτηριστικά Α/Γ

Πίνακας 2. Λειτουργικά χαρακτη	ριστικά Α/Γ
--------------------------------	-------------

Ταχύτητα εκκίνησης	3.5 m/s
Ταχύτητας ονομαστικής ισχύος	15 m/s
Ταχύτητα διακοπής	25 m/s

3.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΡΟΤΥΠΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Για την επίλυση της κατασκευής χρησιμοποιείται το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA 8.5.2. Στην προσομοίωση δεν συμπεριλαμβάνονται τα πτερύγια και η άτρακτος, τα οποία λαμβάνονται υπόψη μόνο ως φόρτιση, ενώ ο φορέας στήριξης της κατασκευής αποτελεί ταυτόχρονα και τη θεμελίωση καθώς δεν έχει ληφθεί υπόψη το ειδικό τεμάχιο σύνδεσης του πυλώνα με το θεμέλιο. Η διατομή του πασσάλου συνεχίζει για 10 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, ύψος στο οποίο σταματά και αρχίζει η διατομή του πυλώνα. Ο πυλώνας και ο πάσσαλος - θεμέλιο της ανεμογεννήτριας έχουν προσομοιωθεί με γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία δοκού μήκους 0.5 m (Σχ.2).

Η επιρροή του εδάφους στον πάσσαλο προσομοιώνεται με τη χρήση μη-γραμμικών ελατηρίων που τοποθετούνται κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Κατά τη διεύθυνση του άζονα του πασσάλου δεν τοποθετούνται ελατήρια καθώς γίνεται η παραδοχή ότι η πλευρική τριβή μπορεί να ενσωματωθεί στην αντίσταση αιχμής στη βάση του πασσάλου και ότι τελικά, λόγω και της σχετικά μικρης αναπτυσσόμενης θλιπτικής δύναμης, οι καθιζήσεις της κατασκευής θα είναι ελάχιστες. Η δυσκαμψία των ελατηρίων εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πασσάλου καθώς και από τις ιδιότητες των εδαφικών στρώσεων. Για μη συνεκτικά εδάφη, η μη γραμμική κατανομή της δυσκαμψίας έχει ληφθεί από την Εξ. (1) [3].

$$p = Ap_{u} \tanh\left(\frac{kz}{Ap_{u}}y\right)$$
(1)

όπου p το πλευρικό φορτίο που ασκείται ανά μέτρο μήκους του πασσάλου σε kN/m, y η πλευρική μετατόπιση του πασσάλου σε m, k η σταθερά του δείκτη εδάφους σε kN/m³, z το βάθος υπολογισμού του φορτίου σε m, p_u η οριακή τιμή της πλευρικής

αντίστασης ανά μονάδα μήκους σε kN/m, A = 0.9 για ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Η τιμή της οριακής πλευρικής αντίστασης p_u διαφέρει ανάλογα με την απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους. Για βάθος z κάτω από την επιφάνεια ορίζεται ως η μικρότερη τιμή από τις παρακάτω εξισώσεις [3]:

$$p_{us} = (C_1 z + C_2 D)\gamma' z$$

$$p_{ud} = C_3 D\gamma' z$$
(2)

όπου C1, C2, C3, είναι συντελεστές οι οποίοι εξαρτώνται από τη γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους, D είναι η μέση διάμετρος του πασσάλου και γ' η ενεργός πίεση των υπερκείμενων γαιών. Στο Σχ. 3 παρουσιάζεται η δυσκαμψία των ελατηρίων για τρεις διαφορετικές τιμές του βάθους z (m) κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας σε αμμώδες έδαφος με γωνία τριβής φ=35 ° και για διάμετρο πασσάλου 5 m.



Σχήμα 2. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και προσομοίωμα της Α/Γ στο ADINA.



Σχήμα 3. Καμπύλες p - y σε βάθη z = 5m, 10m, 15 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

3.3 ΦΟΡΤΙΑ

Κατά την προκαταρτική μελέτη, η ανάλυση πραγματοποιήθηκε θεωρώντας πως τα φορτία δρουν στατικά πάνω στην κατασκευή ενώ ο δυναμικός τους χαρακτήρας μπορεί γενικά να λαμβάνεται υπόψη μέσω κατάλληλων συντελεστών [4].

3.3.1 Φορτίο ανέμου

Αρχικά, για τον υπολογισμό του αεροδυναμικού φορτίου που δρα στον πυλώνα της ανεμογεννήτριας θεωρήθηκε ταχύτητα αναφοράς ανέμου στο ύψος του δρομέα ίση με την ταχύτητα διακοπής της ανεμογεννήτριας $V_{out} = 25$ m/s. Το προφίλ ανέμου, από το οποίο προέκυψε η κατανομή της ταχύτητας του ανέμου καθ' ύψος του πυλώνα, είναι το εκθετικό προφίλ και λήφθηκε από το [4] όπως φαίνεται στην Εξ. (2):

$$U_{z} = U_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^{\alpha}$$
(2)

όπου U_z είναι η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος z πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας (m/s), U_{hub} είναι η αντίστοιχη ταχύτητα στο ύψος z_{hub} του δρομέα (m/s), και α ένας εκθετικός συντελεστής εξαρτώμενος από την τραχύτητα και λαμβάνεται ίσος με 0.14 για την περίπτωση της ανοιχτής θάλασσας [4].

Για την κατάσταση λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, σε αντίθεση με την περίπτωση που η ανεμογεννήτρια είναι αδρανής, λαμβάνεται υπόψη η μείωση της ταχύτητας του ανέμου στην περιοχή του πυλώνα που βρίσκεται στη σκιά των πτερυγίων. Για το αεροδυναμικό φορτίο που οφείλεται στην πρόσπτωση του ανέμου πάνω στην επιφάνεια των πτερυγίων και στο θεωρητικό δίσκο που αυτά σχηματίζουν, ελήφθη η μέγιστη τιμή από τεχνητές χρονοϊστορίες που δημιουργήθηκαν γι' αυτό το σκοπό.

3.3.2 Φορτίο κυμάτων

Τα δεδομένα για τον υπολογισμό του υδροδυναμικού φορτίου που ασκήθηκε στην ανεμογεννήτρια συνοψίζονται στον επόμενο Πιν 3.

W (m/s)	18	W - Ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10m από την επιφάνεια της θάλασσας
F (m)	200.000	F - Μήκος αναπτύγματος του κυματισμού
t _d (hours)	100	t _d - Διάρκεια πνοής του ανέμου
D (m)	4	D - Διάμετρος πασσάλου
d (m)	25	d - Βάθος πυθμένα

Πίνακας 3. Δεδομένα υπολογισμού υδροδυναμικού φορτίου.

Στο επόμενο Σχ.4 παρουσιάζεται η εικόνα με τις φορτίσεις όπως ασκήθηκαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA.

4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

4.1 ΕΝΤΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ

Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται τα βασικά αποτελέσματα της ανάλυσης, τα εντατικά μεγέθη καθ' ύψος της ανεμογεννήτριας από τη στάθμη της θάλασσας και κάτω, οι αντιδράσεις που εμφανίζονται στα ελατήρια του πασσάλου και οι αντίστοιχες μετακινήσεις της κατασκευής.



Σχήμα 4.Φορτία ανέμου και φορτία κυμάτων

Από το Σχ. 5 προκύπτει πως στα πρώτα περίπου 4m θεμελίωσης του πασσάλου εξαντλείται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους καθώς οι αντιδράσεις των μη-γραμμικών ελατηρίων ταυτίζονται με την καμπύλη που αντιπροσωπεύει τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργείται σε αυτή τη περιοχή μια πλαστική ζώνη μέσα στο έδαφος. Επίσης, σε βάθος z=-14m κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας, η αντίδραση του ελατηρίου είναι μηδενική. Αυτό συμβαίνει λόγω της μηδενικής μετατόπισης του πασσάλου σε αυτό το σημείο από την αρχική απαραμόρφωτη κατάσταση. Κατ' επέκταση συμπεραίνεται πως 14m κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας είναι το σημείο περιστροφής του πασσάλου μέσα στο έδαφος. Τέλος, γίνεται αντιληπτό πως στο μέγιστο βάθος θεμελιώσεως του πασσάλου οι αντιδράσεις των ελατηρίων δεν είναι μηδενικές. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην μηδενίζεται πλήρως η τέμνουσα δύναμη του πασσάλου στο μέγιστο βάθος έμπηξης, πράγμα που σημαίνει ότι τα 25m μήκος θεμελιώσεως δεν είναι απολύτως επαρκή και επιλέγεται τελικά ως μήκος έμπηξης L=30m (Σχ. 7). Το άλμα που εμφανίζει το διάγραμμα των τεμνουσών δυνάμεων στα διάφορα υψόμετρα ισούται με τις αντιδράσεις των ελατηρίων.



Σχήμα 5. Φέρουσα ικανότητα εδάφους και αντιδράσεις στήριξης των ελατηρίων.



Σχήμα 6. Διάγραμμα ροπής καθ' ύψος του πασσάλου.



Σχήμα 7. Διάγραμμα τεμνουσών καθ' ύψος του πασσάλου και μετακίνηση.

Για την οριστικοποίηση του σχεδιασμού των δομικών μερών της κατασκευής πραγματοποιήθηκαν έλεγχοι που περιλαμβάνουν ελέγχους φέρουσας ικανότητας των διατομών του πυλώνα και του πασσάλου με τη μέγιστη εντατική καταπόνηση, καθώς και έλεγχοι μετατοπίσεων (μετακινήσεων και στροφών) στη στάθμη του πυθμένα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται διαγράμματα με σκοπό την αξιολόγηση της συνεισφοράς του κάθε φορτίου στην εντατική καταπόνηση της ανεμογεννήτριας. Από το Σχ. 9 γίνεται φανερό ότι το συγκεντρωμένο φορτίο στην κορυφή του πυλώνα, το οποίο προέρχεται από την πρόσπτωση και την αλληλεπίδραση του ανέμου με την περιοχή των πτερυγίων, είναι το κρισιμότερο φορτίο για την καμπτική καταπόνηση τόσο του πυλώνα όσο και του πασσάλου της ανεμογεννήτριας με ένα ποσοστό περί το 80% για τον πάσσαλο και περί το 90% για τον πυλώνα, όπου η φόρτιση των κυματισμών δεν προκαλεί ένταση. Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και για τις μετακινήσεις που καταγράφονται στο Σχ. 10, με τη διαφορά ότι η μετακίνηση στον πυθμένα λόγω του φορτίου κυματισμού αποτελεί ένα ποσοστό λίγο υψηλότερο, της τάξης του 18% όπως ήταν αναμενόμενο.



Σχήμα 8. Ποσοστά καμπτικής έντασης για τον πάσσαλο (a) και τον πυλώνα (b)



Σχήμα 9. Ποσοστά μετακίνησης στον πυθμένα (a) και στη βάση του πυλώνα (b)

4.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΕΠΙΛΥΣΕΙΣ

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές στατικές αναλύσεις με σκοπό να διερευνηθεί η επιρροή των διάφορων βασικών παραμέτρων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της κατασκευής, οι οποίες είναι οι εξής:

- Το μήκος θεμελιώσεως του πασσάλου
- ο Η διάμετρος του πασσάλου
- ο Η φέρουσα ικανότητα του εδάφους θεμελιώσεως
- ο Το υψόμετρο του άξονα του δρομέα της ανεμογεννήτριας

Μηκος θεμελίωσης:

Στο μήκος θεμελίωσης του πασσάλου δόθηκαν τιμές L=20m, 25m, 30m, 35m. Οι υπόλοιπες παράμετροι λαμβάνουν τιμές που φαίνονται στον Πιν 4.

Διάμετρος πασσάλου D (m)	4
Πάχος τοιχωμάτων t (m)	0.08
Υψόμετρο του άξονα του δρομέα (m)	100
Γωνία τριβής του εδάφους φ	35

Πίνακας 4. Δεδομένα ανάλυσης

Στα πρώτα μέτρα θεμελίωσης του πασσάλου, όπως φαίνεται στο Σχ.11, εξαντλείται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους το οποίο υποδεικνύει ότι στην περιοχή αυτή δημιουργείται πλαστική ζώνη. Επίσης, σε βάθος z=-14m η αντίδραση των ελατηρίων είναι μηδενική. Αυτό συμβαίνει λόγω της μηδενικής μετατόπισης του πασσάλου στο σημείο αυτό. Για την περίπτωση όπου το μήκος θεμελίωσης του πασσάλου είναι 35m υπάρχει και δεύτερο σημείο κατά μήκος του πασσάλου με μηδενική μετατόπιση στο υψόμετρο z=-33m. Αυτό συμβαίνει διότι στα μεγαλύτερα βάθη το έδαφος γίνεται ακόμη πιο δύσκαμπτο και περιορίζει πολύ την μετατόπιση του πασσάλου επιβάλλοντας ουσιαστικά συνθήκες πάκτωσης στη περιοχή αυτή. Τέλος, γίνεται αντιληπτό πως όσο μικρότερο είναι το μήκος έμπηξης του πασσάλου τόσο μεγαλύτερες είναι οι αντιδράσεις των ελατηρίων στα μέγιστα βάθη θεμελιώσεως.



Σχήμα 10. Αντιδράσεις ελατηρίων συναρτήσει του βάθους θεμελίωσης

Από το Σχ. 12 προκύπτει πως για μήκη έμπηξης από 20m έως 35m η διαφορά στη μέγιστη ροπή που αναπτύσσεται, σε κάθε περίπτωση, κατά μήκος του πασσάλου είναι ελάχιστη. Επιπλέον, από το Σχ. 13 διαπιστώνουμε ότι όσο πιο μικρό είναι το μήκος έμπηξης του πασσάλου, τόσο πιο μεγάλες είναι οι τέμνουσες δυνάμεις που αναπτύσσονται σε αυτόν. Στα μικρότερα μήκη έμπηξης οι αντιδράσεις των μηγραμμικών ελατηρίων είναι μεγαλύτερες με αποτέλεσμα το διάγραμμα των τεμνουσών δυνάμεων να σβήνει απότομα.



Σχήμα 11. Διάγραμμα ροπών συναρτήσει του βάθους θεμελίωσης



Σχήμα 12. Διάγραμμα τεμνουσών συναρτήσει του βάθους θεμελίωσης

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων για την απόκριση του πασσάλου που έγινε για μήκη έμπηξης 25m και 35m προέκυψε ότι τα ποσοστά συμβολής κάθε φόρτισης στην εντατική καταπόνηση και τις μετακινήσεις του πασσάλου είναι περίπου ίδια με κυρίαρχο το συγκεντρωμένο φορτίο του ανέμου στην κορυφή, ενώ το φορτίο του κυματισμού αποτελεί μόλις το 12% της συνολικής φόρτισης, στο σημείο του πασσάλου με τη μέγιστη εντατική καταπόνηση (Σχ. 14, 15). Ακόμη μικρότερη είναι η συμμετοχή του φορτίου του ανέμου στο πυλώνα της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 13. Ποσοστά καμπτικής έντασης για τον πάσσαλο (αριστερά) και τον πυλώνα (δεξιά) συναρτήσει του βάθους θεμελίωσης



Σχήμα 14. Ποσοστά μετακίνησης στον πυθμένα (αριστερά) και στη βάση του πυλώνα (δεξιά) συναρτήσει του βάθους θεμελίωσης

Διάμετρος πασσάλου:

Στη συνέχεια διερευνήθηκε η επιρροή της διαμέτρου του πασσάλου με τις υπόλοιπες παραμέτρους να λαμβάνουν τις τιμές του Πίν. 5.

Βάθος θεμελίωσης (m)	30
Πάχος τοιχωμάτων t (m)	0.08
Υψόμετρο του άξονα του δρομέα (m)	100
Γωνία τριβής του εδάφους φ	35

Πίνακας 5. Δεδομένα ανάλυσης

Πέραν του προφανούς γεγονότος ότι η φέρουσα ικανότητα του πασσάλου αυξάνεται με την αύξηση της διαμέτρου, από το Σχ.16 προκύπτει ότι καθώς αυξάνεται η διάμετρος του πασσάλου, το σημείο περιστροφής του μετατοπίζεται πιο βαθιά από τα 14 m στα 16 m κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας. Η μεγαλύτερη δυσκαμψία του πασσάλου με τη μεγαλύτερη διάμετρο προκαλεί επίσης και μεγαλύτερες αντιδράσεις ελατηρίων κοντά στην αιχμή του πασσάλου. Η επιρροή της διαμέτρου στη ροπή είναι σχετικά μικρή (Σχ. 17).



Σχήμα 15. Αντιδράσεις ελατηρίων συναρτήσει της διαμέτρου του πασσάλου



Σχήμα 16. Διάγραμμα ροπών συναρτήσει της διαμέτρου του πασσάλου

Στο Σχ.18 φαίνεται ότι η μεγαλύτερη τέμνουσα καθ' ύψος του πυλώνα εμφανίζεται στην περίπτωση του πασσάλου με τη μεγαλύτερη διάμετρο, με μικρή πάντως διαφορά. Παρόλα αυτά, για διάμετρο πασσάλου D=5m η τέμνουσα δύναμη που αναπτύσσεται κοντά στην αιχμή του πασσάλου είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τέμνουσα για D=4m. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις μεγαλύτερες αντιδράσεις ελατηρίων κοντά στην αιχμή του πασσάλου για D=5m, όπως προαναφέρθηκε.



Σχήμα 17. Διάγραμμα τεμνουσών συναρτήσει της διαμέτρου του πασσάλου

Η αλλαγή της διαμέτρου του πασσάλου προκαλεί όπως φαίνεται και στα Σχ. 19 και 20 σχετικά μικρή διαφορά στην απόκριση της κατασκευής και συγκεκριμένα στην καμπτική ένταση και στη μετακίνηση του πασσάλου στον πυθμένα. Όσον αφορά στα φορτία λόγω των κυματισμών φαίνεται ότι προκαλούν στην περίπτωση όπου D=5m μεγαλύτερη ροπή αλλά και μετακίνηση σε σχέση με την περίπτωση όπου D=4m. Αντίθετα, η μεγαλύτερη διάμετρος μειώνει τη συμβολή του φορτίου ανέμου στις ροπές και τις μετακινήσεις που εμφανίζονται στη βάση της κατασκευής, δηλαδή στον πυθμένα.



Σχήμα 18. Ποσοστά καμπτικής έντασης για τον πάσσαλο (αριστερά) και τον πυλώνα (δεξιά) συναρτήσει της διαμέτρου του πασσάλου



Σχήμα 19. Ποσοστά μετακίνησης στον πυθμένα (αριστερά) και στη βάση του πυλώνα (δεξιά) συναρτήσει της διαμέτρου του πασσάλου

Μεταβολή της φέρουσας ικανότητας του εδάφους:

Η φέρουσα ικανότητα του εδάφους τροποποιείται μέσω της γωνίας εσωτερικής τριβής που λαμβάνει τιμές φ=30° και φ=35° ενώ οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων παρουσιάζονται στον Πίν. 6.

Διάμετρος πασσάλου D (m)	4
Πάχος τοιχωμάτων t (m)	0.08
Υψόμετρο του άξονα του δρομέα (m)	100
Μήκος έμπηξης (m)	30

Πίνακας 6. Δεδομένα ανάλυσης

Από τα επόμενα διαγράμματα αποδεικνύεται ότι η αλλαγή της φέρουσα ικανότητας αλλάζει ελάχιστα τον τρόπο συμβολής του κάθε φορτίου στη συνολική καταπόνηση της κατασκευής. Παρόλα αυτά, η γωνία τριβής είναι προφανώς καθοριστική για την επιλογή διαμέτρου και βάθους έμπηξης, όπως φαίνεται στο Σχ. 23 όπου για φ=30°, όπου το βάθος έμπηξης ίσο με 30m δεν επαρκεί.



Σχήμα 20. Αντιδράσεις ελατηρίων συναρτήσει της φέρουσας ικανότητας εδάφους.



Σχήμα 21.Διάγραμμα ροπών συναρτήσει της φέρουσας ικανότητας του εδάφους.



Σχήμα 22. Διάγραμμα τεμνουσών συναρτήσει της φέρουσας ικανότητας του εδάφους.



Σχήμα 23. Ποσοστά καμπτικής έντασης για τον πάσσαλο (αριστερά) και τον πυλώνα (δεξιά) συναρτήσει της φέρουσας ικανότητας του εδάφους.



Σχήμα 24. Ποσοστά μετακίνησης στον πυθμένα (αριστερά) και στη βάση του πυλώνα (δεξιά) συναρτήσει της φέρουσας ικανότητας του εδάφους.

Μεταβολή στο υψόμετρο του άξονα του δρομέα:

Εξετάζονται τρία πιθανά ύψη ανεμογεννήτριας, 80m, 90m και 100m. Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων συνοψίζονται στον Πιν. 7.

Διάμετρος πασσάλου D (m)	4
Πάχος τοιχωμάτων t (m)	0.08
Γωνία τριβής	35
Μήκος έμπηξης (m)	25

Πίνακας 7.Δεδομένα ανάλυσης

Όπως ήταν αναμενόμενο, στην περίπτωση με μεγαλύτερο ύψος πυλώνα εμφανίζονται καθ' ύψος του πασσάλου μεγαλύτερα εντατικά μεγέθη (Σχ. 27 και 28). Όπως και στις προηγούμενες αναλύσεις φαίνεται και εδώ ότι κρισιμότερη φόρτιση για την κατασκευή αποτελεί το φορτίο ανέμου στην κορυφή της ανεμογεννήτριας που προέρχεται από το βάρος και από την αλληλεπίδραση των πτερυγίων με τον άνεμο.



Σχήμα 25. Αντιδράσεις ελατηρίων συναρτήσει της φέρουσας ικανότητας εδάφους.



Σχήμα 26. Διάγραμμα ροπών συναρτήσει του ύψους του δρομέα.



Σχήμα 27. Διάγραμμα τεμνουσών συναρτήσει του ύψους του δρομέα.



Σχήμα 28. Ποσοστά καμπτικής έντασης για τον πάσσαλο (αριστερά) και τον πυλώνα (δεξιά) συναρτήσει του ύψους του πυλώνα



Σχήμα 29. Ποσοστά μετακίνησης στον πυθμένα (αριστερά) και στη βάση του πυλώνα (δεξιά) συναρτήσει του ύψους του πυλώνα.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν άρθρο αξιολογείται η σχετική σημασία διαφόρων παραμέτρων σχεδιασμού, όπως είναι το βάθος έμπηξης του πασσάλου και η διάμετρος του, το έδαφος και το ύψος του πυλώνα στην απόκριση μιας θαλάσσιας ανεμογεννήτριας. Για το σκοπό αυτό μια τυπική ανεμογεννήτρια των 3MW προσομοιώνεται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA και πραγματοποιούνται αναλύσεις θεωρώντας πως τα φορτία ανέμου και των κυματισμών δρουν στην κατασκευή ως στατικά. Στη συνέχεια, μέσω παραμετρικών αναλύσεων αναδεικνύεται η συμβολή της κάθε παραμέτρου στη συμπεριφορά της κατασκευής. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι το κρισιμότερο φορτίο είναι το συγκεντρωμένο φορτίο ανέμου στην κορυφή του πυλώνα, ενώ πολύ μικρότερη συμβολή κυρίως στην ένταση αλλά και στις μετακινήσεις έχει το φορτίο λόγω των κυμάτων με το κατανεμημένο φορτίο στον πυλώνα να είναι σχεδόν αμελητέο. Για την επιλογή της διαμέτρου του πασσάλου και του επαρκούς βάθους έμπηξης, η φέρουσα ικανότητα του εδάφους παίζει, όπως ήταν αναμενόμενο, καθοριστικό ρόλο. Η παραπάνω διερεύνηση είναι ιδιαιτέρως χρήσιμη κατά το στάδιο της προμελέτης, όπου πρέπει να καθοριστούν βασικά στοιχεία του σγεδιασμού.

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Wybren de Vries, «Support Structure Concepts for Deep Water Sites» *Final report WP 4.2*, UpWind, Delf University of Technology.
- [2] DNV OFFSHORE STANDARD, « Design of Offshore Wind Turbine Structures», DNV-OS-J101, Sec. 3 B504.
- [3] API recommended practice 2A-WSD « Soil reaction for laterally loaded piles» Sec. 6.8, pp 68-70.
- [4] DNV OFFSHORE STANDARD, «Environmental Conditions and Environmental Loads», DNV-RP-C205 (RECOMMENDED PRACTICE), Sec. 2, pp 14-18.

COMPARATIVE EVALUATION OF STRUCTURAL DESIGN PARAMETERS OF MONOPILE OFFSHORE WIND TURBINES

Georgia Margariti, Andreas Mpentas, Charis J. Gantes

Institute of Steel Structures School of Civil Engineering National Technical University of Athens e-mail: chgantes@central.ntua.gr

Offshore wind is an essential component of the world's binding target to increase energy production from renewable resources. From mechanical and structural point of view offshore wind turbines perform differently depending on the different operational modes (idling, energy production etc.) and are subjected to variable loads. Wind and wave loads are strongly influenced by site- specific conditions such as meteorological, oceanographic, soil conditions and seismicity that determine the design of a wind turbine structure, initially affecting the choice of structural system and then both loading and response.

In this paper an investigation of the structural design parameters of monopile wind turbines is carried out. For this purpose, a simple finite element model of a monopile wind turbine is created. Taking into account properly calculated loads due to wind and waves, equivalent static analyses are performed in order to evaluate all critical design parameters concerning structure geometry, loading and load-bearing capacity of soil. The analyses finally lead to useful conclusions for the designers of this type of structures.