

**ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΑΝΕΜΟΥ
ΣΤΑ ΚΥΜΑΤΟΓΕΝΗ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ
ΕΠΙ ΠΥΛΩΝΩΝ 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

Νικόλαος Φουρνιώτης, Αθανάσιος Α. Δήμας

Εργαστήριο Υδραυλικής Μηχανικής

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Πανεπιστήμιο Πατρών

Πάτρα, Ελλάδα

e-mail: adimas@upatras.gr

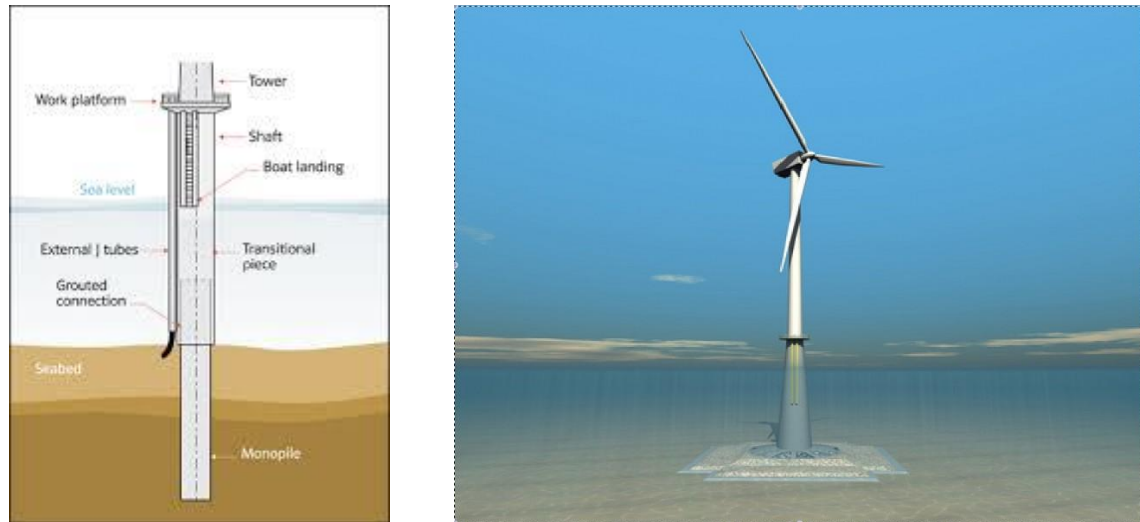
1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα φορτία που δέχεται μια θεμελιωμένη θαλάσσια ανεμογεννήτρια μεμονωμένου πασσάλου είναι ως επί το πλείστον περιβαλλοντικά, με κυρίαρχα το αεροδυναμικό φορτίο λόγω ανέμου και το υδροδυναμικό φορτίο λόγω κυμάτων και ρευμάτων. Το αντικείμενο του παρόντος άρθρου είναι τα υδροδυναμικά φορτία λόγω ανεμογενών κυματισμών και συγκεκριμένα η παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης των χαρακτηριστικών του ανέμου και τοπογραφικών χαρακτηριστικών της περιοχής στη δημιουργία των κυμάτων και συνεπώς στα υδροδυναμικά φορτία. Σκοπός είναι να αξιολογηθεί η σχετική σημασία των διαφόρων παραμέτρων σχεδιασμού για τον τύπο και το μέγεθος των υδροδυναμικών φορτίων. Η διαδικασία υπολογισμού των υδροδυναμικών φορτίων στην περίπτωση θεμελιωμένων θαλάσσιων ανεμογεννητριών μεμονωμένου πασσάλου γίνεται σύμφωνα με τη θεωρία ανάλυσης στοχαστικών κυματισμών που υιοθετείται και από τις σχετικές προδιαγραφές συναφών διεθνών κανονισμών και προτύπων σχεδιασμού. Τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης δείχνουν ότι η μεταβολή του υδροδυναμικού φορτίου είναι πιο ευαίσθητη στην ταχύτητα του ανέμου και τη διάμετρο του πυλώνα και λιγότερο στο μήκος αναπτύγματος, το βάθος του πυθμένα και τη διάρκεια πνοής του ανέμου.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση θαλασσιών ανεμογεννητριών κερδίζει συνεχώς έδαφος στο χώρο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ως μια λύση αποδοτική και ιδιαίτερα φιλική προς το περιβάλλον. Μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις που συναντά ο μηχανικός κατά τον

σχεδιασμό του συστήματος ανωδομής και θεμελίωσης τέτοιων ανεμογεννητριών είναι η κατανόηση και η επαρκής προσομοίωση των φορτίσεων στις οποίες αυτά υποβάλλονται. Το παρόν άρθρο αφορά την παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης των χαρακτηριστικών του ανέμου και της τοπογραφίας της περιοχής στη δημιουργία κυμάτων και συνεπώς στα υδροδυναμικά φορτία τα οποία ασκούνται σε θαλάσσιες ανεμογεννήτριες (Σχ. 1) μεμονωμένου πασσάλου (monopile).



Σχ. 1. Θαλάσσια ανεμογεννήτρια μεμονωμένου πασσάλου (monopile)

Η δημιουργία στοχαστικών (πραγματικών) κυματισμών λόγω της δράσης του ανέμου, η διάδοσή τους και η αλληλεπίδρασή τους με θαλάσσιες κατασκευές είναι πολύπλοκες φυσικές διεργασίες, οι οποίες είναι δύσκολο να αναπαραχθούν και να προβλεφθούν με θεωρητικές, αριθμητικές ή πειραματικές μεθόδους. Για τις ανάγκες σχεδιασμού θαλασσίων, παράκτιων και λιμενικών έργων, το ζητούμενο είναι ο καθορισμός του χαρακτηριστικού ύψους H_s και της χαρακτηριστικής περιόδου T_s ισοδύναμων αρμονικών «κυμάτων σχεδιασμού» μέσω στατιστικής ανάλυσης των στοχαστικών κυματισμών.

Το χαρακτηριστικό ύψος H_s και η χαρακτηριστική περίοδος T_s του κυματισμού εξαρτώνται από την δεκάλεπτη μέση ταχύτητα του ανέμου U_{10} σε ύψος 10m πάνω από τη μέση στάθμη θάλασσας, το μήκος αναπτύγματος θαλασσίου πεδίου F (fetch) και τη διάρκεια πνοής t_d του ανέμου. Εάν η διάρκεια πνοής είναι αρκετά μεγάλη, τα χαρακτηριστικά του κυματισμού εξαρτώνται από το μήκος αναπτύγματος F και την ταχύτητα του ανέμου U_{10} και ο κυματισμός καλείται περιορισμένος από το μήκος αναπτύγματος (fetch limited). Στην αντίθετη περίπτωση, τα χαρακτηριστικά του κυματισμού εξαρτώνται από τη διάρκεια πνοής t_d και την ταχύτητα του ανέμου U_{10} και ο κυματισμός καλείται περιορισμένος από τη διάρκεια πνοής (duration limited).

Στοιχεία για την ταχύτητα και τη διάρκεια πνοής των ανέμων ανά διεύθυνση εξαρτώνται από την περιοχή ενδιαφέροντος και προκύπτουν είτε από δεδομένα μετρήσεων, τα οποία καλύπτουν συνεχόμενα ένα χρονικό διάστημα τουλάχιστον 10 ετών, είτε από αποτελέσματα αριθμητικών μετεωρολογικών ομοιωμάτων, τα οποία έχουν υποβληθεί σε προσεκτική επαλήθευση των προβλέψεών τους. Ως προς την ένταση του ανέμου, συνήθως χρησιμοποιείται η κλίμακα Beaufort (Πίνακας 1). Το μήκος αναπτύγματος F υπολογίζεται, συνήθως για κάθε μία από τις οκτώ βασικές διευθύνσεις ανέμου, θεωρώντας τομέα γωνίας 90° γύρω από την εκάστοτε υπό εξέταση διεύθυνση του ανέμου σύμφωνα με την εξίσωση

$$F = \left(\sum_{i=-N}^N F_i \cos^2 a_i \right) / \left(\sum_{i=-N}^N \cos a_i \right) \quad (1)$$

όπου F_i είναι το μήκος θαλασσίου πεδίου στη διεύθυνση με γωνία $a_i = i \cdot \Delta a$ ως προς τη διεύθυνση του ανέμου. Συνήθως $\Delta a = 5^\circ$ και $N = 9$ έτσι ώστε $-45^\circ \leq a_i \leq +45^\circ$.

Αριθμός Beaufort	U_{10} (m/s)	Περιγραφή
0	< 0.2	Νηνεμία
1	0.3 – 1.5	Αύρα
2	1.6 – 3.3	Ασθενής άνεμος
3	3.4 -5.4	Λεπτός άνεμος
4	5.5 – 7.9	Μέτριος άνεμος
5	8.0 – 10.7	Λαμπρός άνεμος
6	10.8 -13.8	Ισχυρός άνεμος
7	13.9 – 17.1	Σφοδρός άνεμος
8	17.2 – 20.7	Θυελλώδης άνεμος
9	20.8 – 24.4	Θύελλα
10	24.5 - 28.4	Ισχυρή θύελλα
11	28.5 - 32.6	Σφοδρή θύελλα
12 - 17	32.7 <	Τυφώνας

Πίν. 1. Κλίμακα Beaufort έντασης ανέμου.

3. ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟΙ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΙ

3.1 Στατιστική ανάλυση

Σε στοχαστικό κυματισμό, ο οποίος αποτελείται από N συνιστώντα «κύματα», το χαρακτηριστικό ύψος H_S του κυματισμού προκύπτει από τον ορισμό

$$H_S = H_{33} = \frac{3}{N} \sum_{n=1}^{N/3} H_n \quad (2)$$

όπου τα «κύματα» κατατάσσονται σε φθίνουσα σειρά ανάλογα με τα ύψη τους (H_1 το μεγαλύτερο και H_N το μικρότερο). Το ύψος κύματος στοχαστικών κυμάτων ακολουθεί την κατανομή Rayleigh [1], από όπου προκύπτει

$$H_S = \sqrt{2} \cdot H_{rms} \quad (3)$$

όπου H_{rms} είναι η τετραγωνική ρίζα της μέσης τιμής των τετραγώνων των υψών H_n . Για το μέγιστο ύψος κύματος, σε στοχαστικό κυματισμό, προκύπτει:

$$H_{\max} = H_{rms} \sqrt{\ln N} = H_S \sqrt{\frac{1}{2} \ln N} \quad (4)$$

όπου N είναι ο αριθμός κυμάτων σε μια καταγραφή ή κατ' επέκταση σε μια καταιγίδα. Για τυπική καταιγίδα, προκύπτει:

$$H_{\max} \approx 2 \cdot H_S \quad (5)$$

Η χαρακτηριστική περίοδος T_s του κυματισμού ορίζεται ως:

$$T_s = T_{33} = \frac{3}{N} \sum_{n=1}^{N/3} T_n \quad (6)$$

όπου τα «κύματα» κατατάσσονται σε φθίνουσα σειρά ανάλογα με τα ύψη τους όπως και στην Εξ. (2). Σύμφωνα με τον Νορβηγικό Νηογνώμονα Det Norske Veritas [2], η κατάλληλη περίοδος για το κύμα με το μέγιστο ύψος σε μια καταιγίδα είναι

$$T_{\max} = 2.94 \sqrt{H_{\max}} \quad (7)$$

όπου η περίοδος είναι σε sec και το ύψος κύματος σε m.

3.2 Βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη

Η βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη των H_s και T_s αφορά τη συσχέτισή τους με τις παραμέτρους U_{10} , F και t_d . Οι επικρατέστερες μέθοδοι βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης είναι η JONSWAP και η SMB.

Εδώ χρησιμοποιείται η SMB, η οποία συνήθως δίδει δυσμενέστερες προβλέψεις για το ύψος κύματος. Για κυματισμό περιορισμένο από το μήκος αναπτύγματος, το χαρακτηριστικό ύψος και η χαρακτηριστική περίοδος υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = 0.283 \tanh \left(0.0125 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{0.42} \right) \quad (8)$$

και

$$\frac{gT_s}{2\pi U_{10}} = 1.2 \tanh \left(0.077 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{0.25} \right) \quad (9)$$

όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας. Ο έλεγχος για κυματισμό περιορισμένο από τη διάρκεια πνοής γίνεται με υπολογισμό του ισοδύναμου μήκους αναπτύγματος F_{eq} έτσι ώστε

$$\frac{gt_d}{U_{10}} = 6.5882 \exp \left(\left(0.016 \ln^2 \left(\frac{gF_{eq}}{U_{10}^2} \right) - 0.369 \ln \left(\frac{gF_{eq}}{U_{10}^2} \right) + 2.2024 \right)^{\frac{1}{2}} + 0.88 \ln \left(\frac{gF_{eq}}{U_{10}^2} \right) \right) \quad (10)$$

Εάν $F \leq F_{eq}$, ο κυματισμός είναι περιορισμένος από το μήκος αναπτύγματος, ενώ εάν $F > F_{eq}$, ο κυματισμός είναι περιορισμένος από τη διάρκεια πνοής και ο υπολογισμός των H_s και T_s γίνεται από τις Εξ. (8) και (9) αντικαθιστώντας το F με το F_{eq} .

3.3 Μακροπρόθεσμη πρόβλεψη

Το ακραίο ύψος κύματος, το οποίο έχει πιθανότητα εμφάνισης με μεγάλη περίοδο επαναφοράς 50 ή 100 ετών και καλείται το κύμα των 50 ή 100 ετών, δεν περιγράφεται από την κατανομή Rayleigh αλλά από την κατανομή Gumbel. Ως παράδειγμα, το χαρακτηριστικό ύψος κύματος των 100 ετών, $H_{s,100}$, ως προς το ετήσιο χαρακτηριστικό ύψος, $H_{s,1}$, υποθέτοντας διασπορά των δεδομένων του ύψους κύματος ίση με $0.2 \cdot H_{s,1}$, προκύπτει $H_{s,100} = 1.26 \cdot H_{s,1}$.

Για την μακροπρόθεσμη πρόβλεψη της χαρακτηριστικής περιόδου ο Goda [3] προτείνει:

$$T_s = 3.3 (H_s)^{0.63} \quad (11)$$

όπου η περίοδος είναι σε sec και το ύψος κύματος σε m.

4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ

Στη συνέχεια διερευνάται η επιρροή των διαφόρων παραγόντων, οι οποίοι επηρεάζουν τα υδροδυναμικά φορτία, στην τελική τιμή της δύναμης που ασκείται στον πάσσαλο πάνω στον οποίο στηρίζεται ο πυλώνας μίας τυπικής θαλάσσιας ανεμογεννήτριας θεμελιωμένης με μονοπάσσαλο σύστημα (Σχ. 1).

Για την παραμετρική ανάλυση έχουν επιλεγεί οι εξής πέντε παράμετροι ελέγχου που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά των υδροδυναμικών φορτίων:

- U_{10} (m/s) Η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10m από την επιφάνεια της θάλασσας
- F (m) Το μήκος αναπτύγματος του κυματισμού
- t_d (hr) Η διάρκεια πνοής του ανέμου
- d (m) Το βάθος του πυθμένα της θάλασσας
- D (m) Η διάμετρος του πασσάλου

Το εύρος της διακύμανσης των τιμών κάθε παραμέτρου είναι:

- U_{10} από 10m/s έως 35m/s με βήμα 5m/s
- F από 10.000m έως 100.000m με βήμα 10.000m
- t_d από 1hr έως 10hr με βήμα 1hr
- d από 10m έως 40m με βήμα 5m
- D από 4m έως 8m με βήμα 1m

Για κάθε παράμετρο, επιλέχθηκε μια τιμή αναφοράς, έτσι ώστε όταν μεταβάλλεται η μία από τις πέντε παραμέτρους οι άλλες τέσσερις να έχουν την τιμή αναφοράς τους. Οι τιμές των παραμέτρων, οι οποίες ορίζουν την κατάσταση αναφοράς, είναι:

- $U_{10} = 20\text{m/s}$
- $F = 50.000\text{m}$
- $t_d = 5\text{hr}$
- $d = 35\text{m}$
- $D = 5\text{m}$

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε με σκοπό την εύρεση του υδροδυναμικού φορτίου που ασκείται κατά μήκος του πασσάλου είναι η εξής:

1. Αρχικά επιλέγεται μια τιμή για κάθε μια από τις πέντε παραμέτρους. Καθώς μεταβάλλεται η τιμή κάθε μιας παραμέτρου οι άλλες τέσσερις παραμένουν σταθερές και ίσες με την τιμή αναφοράς τους.
2. Γίνεται πρόβλεψη των παραμέτρων του χαρακτηριστικού κύματος με τη μέθοδο SMB που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.2.
3. Προσδιορίζονται τα χαρακτηριστικά του κυματισμού λόγω ρήγωσης στη θέση του έργου. Ανάλογα με τη τιμή του σχετικού βάθους ύδατος d/L_o (όπου d το βάθος του πυθμένα και L_o το μήκος του κύματος στα βαθιά ύδατα) υπολογίζεται το μήκος του κύματος L και το ύψος του κύματος H στη θέση του έργου.
4. Χρησιμοποιώντας θεωρία κυμάτων Stokes 2^{ης} τάξης, υπολογίζεται η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας και της επιτάχυνσης του ύδατος κατά μήκος του πασσάλου από τον πυθμένα της θάλασσας μέχρι την κορυφή του κυματισμού.
5. Για τον υπολογισμό της υδροδυναμικής δύναμης που ασκείται ανά μονάδα μήκους κατά τον άξονα z του πασσάλου χρησιμοποιείται η εξίσωση Morison [4]

$$\frac{dF}{dz} = \frac{dF_I}{dz} + \frac{dF_D}{dz} = C_M \rho A \frac{du}{dt} + C_D \frac{1}{2} \rho D |u|u \quad (12)$$

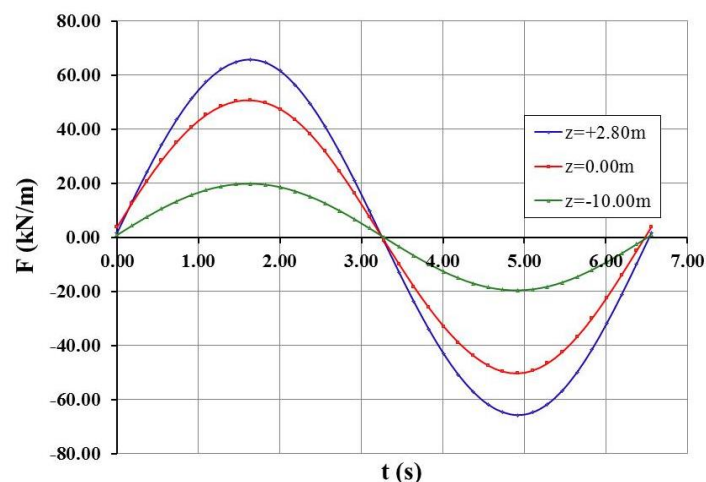
όπου F_I είναι η δύναμη αδράνειας, F_D είναι η δύναμη αντίστασης, $C_M = 1 + C_a$ είναι ο συντελεστής αδράνειας, C_a είναι ο συντελεστής πρόσθετης μάζας της διατομής του πυλώνα, C_D είναι ο συντελεστής αντίστασης της διατομής του πυλώνα, A είναι το εμβαδόν της διατομής του πυλώνα, D είναι η χαρακτηριστική διάμετρος της διατομής του πυλώνα, ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού και u είναι η ταχύτητα του πεδίου ροής στη θέση του πυλώνα. Οι τιμές των συντελεστών πρόσθετης μάζας και αντίστασης εξαρτώνται από τους αδιάστατους αριθμούς Reynolds, Re, και Keulegan-Carpenter, KC.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας (Πίν. 2) με τις κυριότερες τιμές των μεταβλητών, που προέκυψαν για την κατάσταση αναφοράς των παραμέτρων ελέγχου.

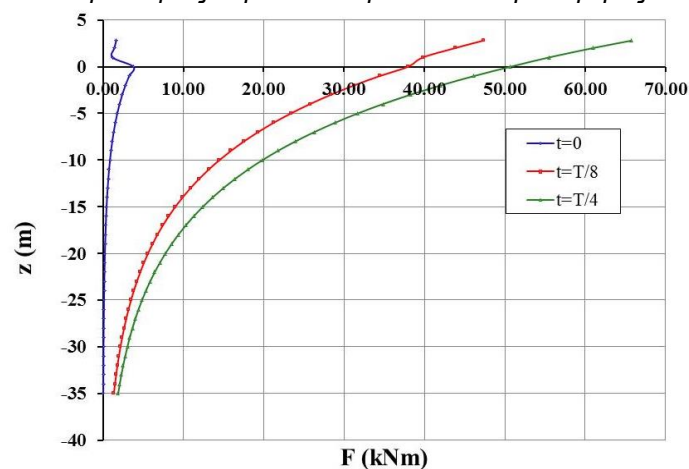
Τιμές αναφοράς των παραμέτρων ελέγχου		
U_{10} (m/s)	20	U_{10} - Ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10m από την επιφάνεια της θάλασσας
F (m)	50.000	F - Μήκος αναπτύγματος του κυματισμού
t_d (hours)	5	t_d - Διάρκεια πνοής του ανέμου
D (m)	5.0	D - Διάμετρος πασσάλου
d (m)	35.00	d - Βάθος πυθμένα
Πρόβλεψη χαρακτηριστικών κύματος στα βαθιά ύδατα με τη μέθοδο SMB		
Ο κυματισμός είναι περιορισμένος από το μήκος αναπτύγματος		
H_s (m)	2.80	H_s - Χαρακτηριστικό ύψος κυματισμού
T_s (s)	6.56	T_s - Χαρακτηριστική περίοδος κυματισμού
Προσδιορισμός χαρακτηριστικών κύματος στη θέση του έργου		
d (m)	35	d - Βάθος πυθμένα
$H_0 = H_s$ (m)	2.80	H_0 - Ύψος κύματος στα βαθιά
$T = T_s$ (s)	6.56	T - Περίοδος κύματος
L_0 (m)	67.1	L_0 - Μήκος κύματος στα βαθιά
d/L_0	0.521	d/L_0 - Σχετικό βάθος νερού
L/L_0	0.995	
H/H_0	1.046	
L (m)	66.78	L - Μήκος κύματος στη θέση του έργου
H (m)	2.80	H - Ύψος κύματος στη θέση του έργου
T (s)	6.56	T - Περίοδος κύματος
d/L	0.524	d/L - Σχετικό βάθος νερού
Χαρακτηριστικά εξίσωσης Morison		
D (m)	5.0	D - Διάμετρος πασσάλου
H (m)	2.80	H - Ύψος κύματος (που φτάνει στο έργο)
H/D	0.56	
u_{max} (m/s)	1.71	u_{max} - μέγιστη οριζόντια ταχύτητα ροής στην ελεύθερη επιφάνεια ($t = 0, z = 0m$)
ν (m ² /s)	$1.3 \cdot 10^{-6}$	ν - κινηματική συνεκτικότητα
T (s)	6.56	T - Περίοδος κύματος
Re	$6.6 \cdot 10^6$	Re - Αριθμός Reynolds
KC	2.24	KC - Αριθμός Keulegan-Carpenter
k (m)	0.05	k - τραχύτητα επιφάνειας ($z < 0m$)
k/D	$1.0 \cdot 10^{-2}$	($z < 0m$)
C_{DS}	1.05	C_{DS} - Συντελεστής αντίστασης ($z < 0m$)

KC/C_{DS}	2.14	($z < 0m$)
$\psi(C_{DS},KC)$	0.494	($z < 0m$)
$C_D=C_{DS}\cdot\psi$	0.518	C_D - Συντελεστής αντίστασης ($z<0m$)
C_M	2.0	C_M - Συντελεστής αδράνειας ($z<0m$)
$A (m^2)$	19.63	A - Εμβαδό διατομής πυλώνα
$\rho (Mgr/m^3)$	1.0	ρ - Πυκνότητα νερού
$k (m)$	$5.0 \cdot 10^{-6}$	k - τραχύτητα επιφάνειας ($z>0m$)
C_{DS}	0.65	C_{DS} - Συντελεστής αντίστασης ($z>0m$)
KC/C_{DS}	3.45	($z > 0$)
$\psi(C_{DS},KC)$	0.330	($z > 0$)
$C_D=C_{DS}\cdot\psi$	0.215	C_D - Συντελεστής αντίστασης ($z > 0$)
C_M	2.0	C_M - Συντελεστής αδράνειας ($z > 0$)
$z_{max} (m)$	2.80	z_{max} - Μέγιστο ύψος κύματος
$Fz_{max} (kN/m)$	65.74	Fz_{max} - Μέγιστη δύναμη στη κορυφή του κύματος

Στο Σχ. 2 παρουσιάζεται το υδροδυναμικό φορτίο που ασκείται στον πάσσαλο σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης, κατά τη διάρκεια μιας περιόδου στην κατάσταση αναφοράς. Στο Σχ. 3 παρουσιάζεται το υδροδυναμικό φορτίο καθ' ύψος του πασσάλου σε χαρακτηριστικές χρονικές στιγμές στην κατάσταση αναφοράς.

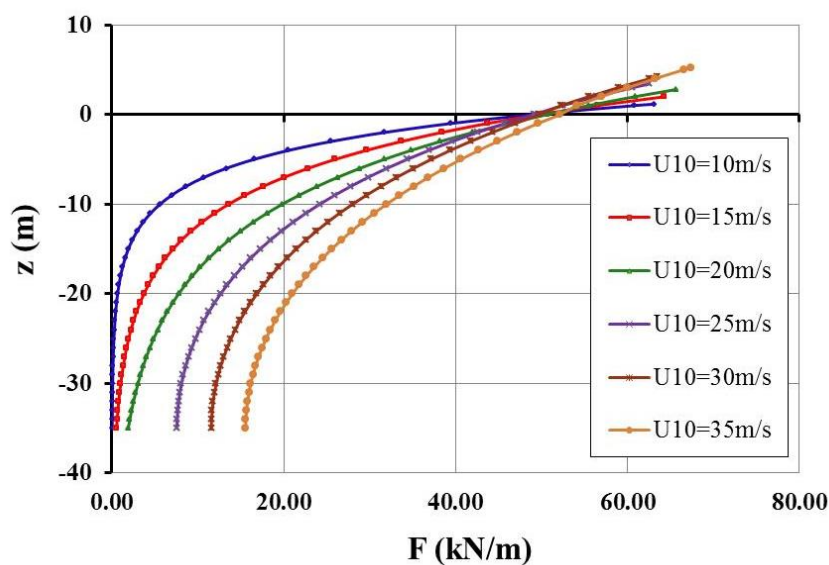


Σχήμα 2. Υδροδυναμικό φορτίο πασσάλου στα υψόμετρα $z=+2.80m$, $z=0.00$, $z=-10.00m$ κατά τη διάρκεια μιας περιόδου στην κατάσταση αναφοράς.

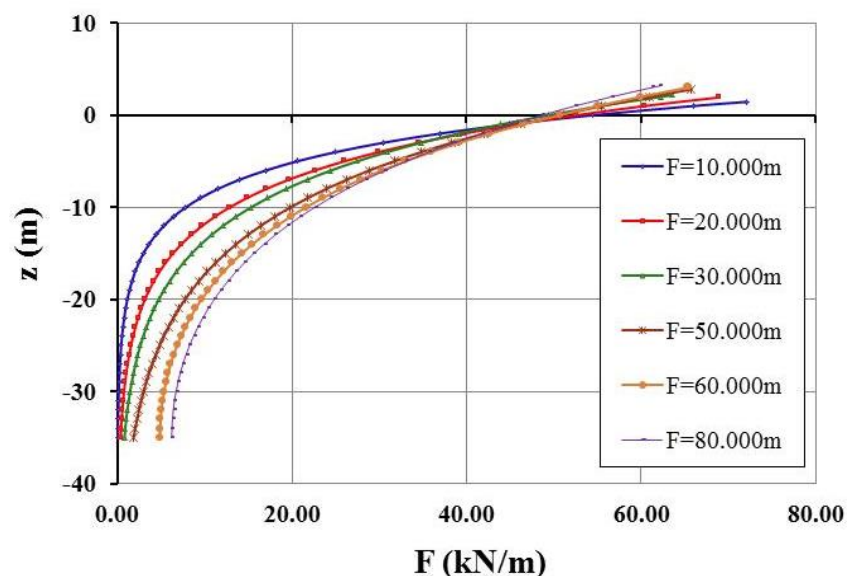


Σχ. 3. Υδροδυναμικό φορτίο κατά μήκος του πασσάλου τις χρονικές στιγμές $t=0$, $t=T/8$, $t=T/4$ στην κατάσταση αναφοράς.

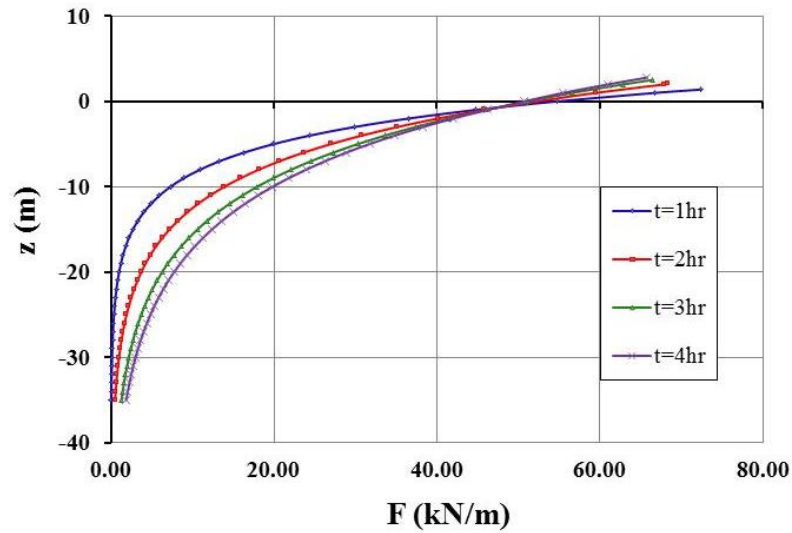
Ακολουθεί η συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων εύρεσης του υδροδυναμικού φορτίου. Το φορτίο υπολογίζεται για την χρονική στιγμή $t = T/4$ σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται. Στο Σχ. 4 παρουσιάζεται η σημαντική επίδραση της ταχύτητας του ανέμου στο μέγεθος του υδροδυναμικού φορτίου. Επίσης, από το Σχ. 5 φαίνεται ότι η αύξηση του μήκους αναπτύγματος του κυματισμού οδηγεί σε μια αύξηση του φορτίου που ασκείται στην κατασκευή αλλά λιγότερο έντονη. Για μήκος αναπτύγματος μεγαλύτερο των 80.000m το υδροδυναμικό φορτίο παραμένει σταθερό και ίσο με την περίπτωση όπου $F = 80.000m$ γιατί από εκεί και πέρα ο κυματισμός είναι περιορισμένος από τη διάρκεια πνοής του ανέμου. Από το Σχ. 6, προκύπτει ότι καθώς αυξάνει η διάρκεια πνοής του ανέμου (t_d), αυξάνει το υδροδυναμικό φορτίο που ασκείται κατά μήκος του πασσάλου. Για διάρκεια πνοής ανέμου μεγαλύτερη των τεσσάρων ωρών το υδροδυναμικό φορτίο παραμένει σταθερό και ίσο με την περίπτωση όπου $t_d = 4hr$ γιατί από εκεί και πέρα ο κυματισμός είναι περιορισμένος από το μήκος αναπτύγματος.



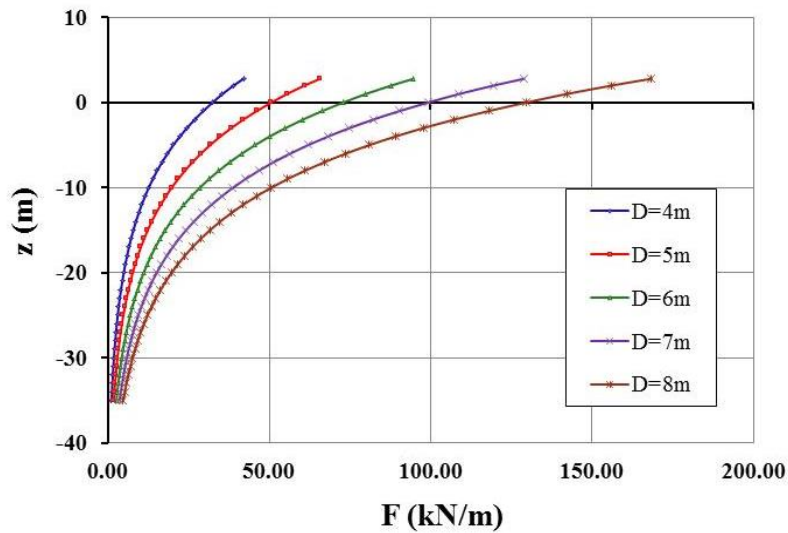
Σχ. 4. Υδροδυναμικό φορτίο καθ' ύψος του πασσάλου συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου U_{10} (m/s) για $F=50.000m$, $t_d=5hr$, $d=35m$, $D=5m$.



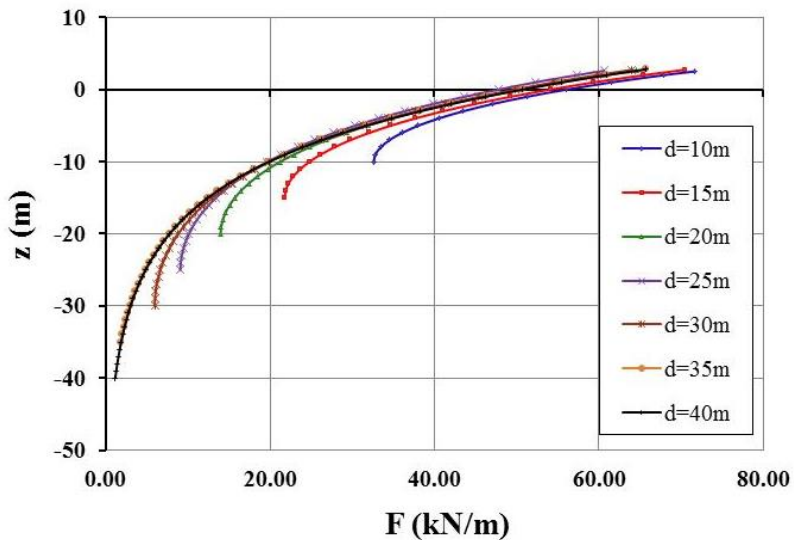
Σχ. 5. Υδροδυναμικό φορτίο καθ' ύψος του πασσάλου συναρτήσει του μήκους αναπτύγματος του κυματισμού F (m) για $U_{10}=20m/s$, $t_d=5hr$, $d=35m$, $D=5m$



Σχ. 6. Υδροδυναμικό φορτίο καθ' ύψος του πασσάλου συναρτήσει της διάρκειας πνοής του ανέμου t_d (hr), $U_{10}=20\text{m/s}$, $F=50000\text{m}$, $d=35\text{m}$, $D=5\text{m}$



Σχ. 7. Υδροδυναμικό φορτίο καθ' ύψος του πασσάλου συναρτήσει της διαμέτρου του πασσάλου D (m) για $t_d=5\text{hr}$, $U_{10}=20\text{m/s}$, $F=50000\text{m}$, $d=35\text{m}$.



Σχ. 8. Υδροδυναμικό φορτίο καθ' ύψος του πασσάλου συναρτήσει του βάθους του πυθμένα d (m) για $t_d=5\text{hr}$, $U_{10}=20\text{m/s}$, $F=50000\text{m}$, $D=5\text{m}$.

Στο Σχ. 7, φαίνεται η ισχυρή επίδραση της διαμέτρου του πυλώνα στο υδροδυναμικό φορτίο. Τέλος, από το Σχ. 8 προκύπτει ότι καθώς αυξάνει το βάθος του πυθμένα της θάλασσας, μειώνεται το υδροδυναμικό φορτίο που ασκείται στον πάσσαλο.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν άρθρο αξιολογείται η σχετική σημασία διαφόρων παραμέτρων σχεδιασμού για τον τύπο και το μέγεθος των υδροδυναμικών φορτίων λόγω ανεμογενών κυματισμών επί των πυλώνων θαλάσσιων ανεμογεννητριών. Για το σκοπό αυτό αρχικά παρουσιάζεται συνοπτικά το θεωρητικό υπόβαθρο των στοχαστικών κυματισμών και στη συνέχεια διατυπώνεται βάσει αυτού η διαδικασία αναλυτικής πρόβλεψης των χαρακτηριστικών τους και των οφειλόμενων σε αυτά υδροδυναμικών φορτίων. Στη συνέχεια επιλέγονται ως κύριες παράμετροι που επηρεάζουν τα ποσοτικά χαρακτηριστικά των υδροδυναμικών φορτίων η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10m από την επιφάνεια της θάλασσας, το μήκος αναπτύγματος του κυματισμού, η διάρκεια πνοής του ανέμου, το βάθος του πυθμένα της θάλασσας και η διάμετρος του πασσάλου. Τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης δείχνουν ότι η μεταβολή του υδροδυναμικού φορτίου είναι πιο ευαίσθητη στην ταχύτητα του ανέμου και τη διάμετρο του πυλώνα και λιγότερο στις τρεις άλλες παραμέτρους.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο – ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανταγωνιστικότητα και Επιχειρηματικότητα» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ 2007-2013) – Δράση Εθνικής Εμβέλειας «Διμερής Ε&Τ Συνεργασία Ελλάδας- Κίνας 2012-2014» με κωδικό έργου 12CHN184.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Holthuijsen L.H., *Waves in Oceanic and Coastal Waters*, Cambridge University Press, 2007.
- [2] DNV 2010, *Environmental Conditions and Environmental Loads*, DNV-RP-C205 (RECOMMENDED PRACTICE), DET NORSKE VERITAS AS.
- [3] Goda Y., *Random Seas and Design of Maritime Structures*, Advanced Series on Ocean Engineering, World Scientific, Singapore, 2000.
- [4] DNV 2011, *Design of Offshore Wind Turbine Structures*, DNV-OS-J101 (OFFSHORE STANDARD), DET NORSKE VERITAS AS.

PARAMETRIC STUDY OF WIND EFFECT ON WAVE HYDRODYNAMIC LOADING ACTING ON MONOPILE OFFSHORE WIND TURBINES

Georgia Margariti, Andreas Mpentas, Charis J. Gantes

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

Nikolaos Fourniotis, Athanasios A. Dimas

Hydraulic Engineering Laboratory
Department of Civil Engineering
University of Patras
Patras, Greece
e-mail: adimas@upatras.gr

Loads acting on fixed monopile offshore wind turbines are mostly environmental, including the dominant aerodynamic loads due to wind and the hydrodynamic loads due to waves and currents. The present article is concerned with hydrodynamic loads due to wind-induced waves, and specifically with the parametric investigation of the influence of wind and local topography characteristics on wave creation and, consequently, on hydrodynamic loads. Thus, the objective is to evaluate the relative importance of different design parameters on the type and magnitude of hydrodynamic loads. To that effect, calculation of hydrodynamic loads on fixed monopile offshore wind turbines is performed in accordance to the theoretical analysis of stochastic waves, which is also adopted by pertinent specifications of international codes and design guidelines. The results of the parametric analysis show that the hydrodynamic loads are more sensitive to wind velocity and monopile diameter, and less in fetch length, water depth and wind duration.