

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑ ΑΝΟΙΧΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΗΣ
Σημειώσεις για το μάθημα του 9^{ου} εξαμήνου

Σ. Αζοράκος, Λέκτορας ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2015

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

α/α	Περιεχόμενα	Σελ.
1	ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΛΕΠΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ – ΤΥΠΟΣ ΤΟΥ MORISON.	5
2	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΣΤΑ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΒΑΘΡΟΥ.	9
3	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΤΟ ΧΩΡΟ.	20
4	ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΠΑΣΣΑΛΟΥ.	20
5	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.	22
6	ΣΧΗΜΑΤΑ.	23
7	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.	31

I. ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΛΕΠΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ – ΤΥΠΟΣ ΤΟΥ MORISON

Η παρουσία ενός στερεού σώματος στο πεδίο ροής των κυματισμών επηρεάζει τα χαρακτηριστικά του. Σαν λεπτές υδροδυναμικά χαρακτηρίζονται εκείνες οι διατάξεις των οποίων η επίδραση στα χαρακτηριστικά του πεδίου ροής του κυματισμού είναι αμελητέα, μπορεί ν' αγνοηθεί. Στις κατασκευές αυτές οι δράσεις από το κύμα σχεδιασμού υπολογίζονται με τον τύπο του Morison. Τα χαρακτηριστικά του πεδίου ροής που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό τους, ταχύτητες και επιταχύνσεις, είναι αυτά του "αδιατάρακτου" πεδίου ροής, του πεδίου ροής του κυματισμού χωρίς την παρουσία της κατασκευής.

Η παραδοχή για "υδροδυναμικά λεπτή κατασκευή" μπορεί να γίνει όταν ισχύει η σχέση

$$D / \lambda < 1 / 5$$

όπου D η χαρακτηριστική διάσταση, διάμετρος της διατομής π.χ., των στοιχείων, της κατασκευής και λ το μήκος κύματος στην θέση του έργου.

Στο σχήμα 1 δίδονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά βάθρου έδρασης ανεμογεννήτριας θαλάσσιου αιολικού πάρκου σε περιοχή με βάθος $d = 23.0$ m. Τα χαρακτηριστικά του κύματος σχεδιασμού στη θέση του έργου είναι:

Ύψος κύματος $H = 5.94$ m

Περίοδος $T = 10.0$ sec

Μήκος κύματος $\lambda = 127.0$ m

Η διάμετρος των τεσσάρων στοιχείων δυσκαμψίας στην στάθμη $z = -5.0$ m είναι $D = 1.0$ m,

$$D / \lambda = 1.0 / 127.0 < 1 / 5$$

Η διάμετρος των τεσσάρων κατακόρυφων πασσάλων είναι $D_1 = 1.50$ m,

$$D_1 / \lambda = 1.50 / 127.0 = 1 / 84.70 < 1 / 5$$

Η διάμετρος του θεμελίου της κατασκευής είναι $D_2 = 12.0$ m,

$$D_2 / \lambda = 12.0 / 127.0 = 1 / 10.58 < 1 / 5$$

Σύμφωνα με το κριτήριο που αναφέρθηκε προηγουμένως όλα τα στοιχεία της κατασκευής είναι υδροδυναμικά λεπτά για το κύμα σχεδιασμού, η παρουσία της δεν επηρεάζει πρακτικά τα χαρακτηριστικά του πεδίου ροής. Άρα οι δράσεις από το κύμα σχεδιασμού που αναπτύσσονται στην κατασκευή θα προκύψουν από την επαλληλία των δράσεων, δυνάμεις και ροπές, που ασκούνται στα επιμέρους στοιχεία της κατασκευής. Οι δυνάμεις αυτές υπολογίζονται με τον τύπο του Morison. Η ταχύτητα και η επιτάχυνση που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των δράσεων με τον τύπο του Morison υπολογίζονται στην θέση του άξονα των στοιχείων.

Για την περίπτωση κύματος με χαρακτηριστικά στη θέση του έργου

$H = 2.60$ m, $T = 6.0$ sec και $\lambda = 56.0$ m προκύπτει

$$D_1 / \lambda = 1 / 37.3 < 1 / 5 \text{ και}$$

$$D_2 / \lambda = 1 / 4.67 > 1.50$$

Άρα η κατασκευή δεν είναι υδροδυναμικά λεπτή για το συγκεκριμένο κύμα. Για τον υπολογισμό των δράσεων που αναπτύσσονται στην κατασκευή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο τύπος του Morison. Πρέπει να λυθεί το πρόβλημα της περίθλασης γιατί η επίδραση του θεμελίου στα χαρακτηριστικά του πεδίου ροής του κυματισμού δεν μπορεί να αγνοηθεί.

Στο σκαρίφημα του σχήματος 2 δίδονται οι βασικές αρχές της διαδικασίας υπολογισμού των δράσεων από το κύμα σχεδιασμού σε υδροδυναμικά λεπτές κατασκευές. Στην περίπτωση αυτή υπολογίζονται οι δράσεις από το κύμα σχεδιασμού στα μεμονωμένα στοιχεία της και από την επαλληλία τους προκύπτει η συνισταμένη που ασκείται στην κατασκευή.

ΤΥΠΟΣ ΤΟΥ MORISON

Σύμφωνα με τον τύπο του Morison οι δυνάμεις που ασκούνται από ένα απλό αρμονικό κύμα σε λεπτά κυλινδρικά στοιχεία κυκλικής διατομής δίδονται από την σχέση

$$f_n(x,z,t) = f_{ni}(x,z,t) + f_{nd}(x,z,t) = C_m * \rho * \frac{\pi D^2}{4} * \dot{u}_n(x,z,t) + \frac{1}{2} C_D * \rho * D * |u_n(x,z,t)| u_n(x,z,t)$$

$$f_t(x,z,t) = 0$$

όπου $f_n(x,z,t)$ είναι η δύναμη η κάθετη στον άξονα του στοιχείου που αναπτύσσεται στην θέση (x, z) την χρονική στιγμή t , $f_{ni}(x,z,t)$ είναι η αδρανειακή συνιστώσα της δύναμης και $f_{nd}(x,z,t)$ η συνιστώσα αντίστασης. Η δύναμη $f_t(x,z,t)$ η παράλληλη στον άξονα του στοιχείου μπορεί να αγνοηθεί, είναι πρακτικά μηδέν. Τα επιμέρους μεγέθη που αναφέρονται στον τύπο του Morison είναι:

C_m : συντελεστής υδροδυναμικής μάζας.

ρ : η πυκνότητα του νερού, $\rho = 1.025 \text{ t/m}^3$.

D : η διάμετρος του στοιχείου.

$\dot{u}_n(x,z,t)$: η συνιστώσα της επιτάχυνσης του πεδίου ροής του απλού αρμονικού κύματος η κάθετη στον άξονα του στοιχείου.

$u_n(x,z,t)$: η συνιστώσα της ταχύτητας του πεδίου ροής του απλού αρμονικού κύματος η κάθετη στον άξονα του στοιχείου.

$$\dot{u}_n(x,z,t) = \frac{\partial}{\partial t} u_n(x,z,t)$$

C_D : συντελεστής αντίστασης.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η θέση (x,y) που υπολογίζονται τα μεγέθη του πεδίου ροής είναι σημείο του άξονα του στοιχείου.

Οι συντελεστές C_m και C_D είναι συναρτήσεις των αριθμών Reynolds (Re), Kenlegan – Carpenter (N_{kc}) και της σχετικής τραχύτητας k / D και δίδονται στους πίνακες A4.4.2, A4.4.3 και A4.4.4 του παραρτήματος.

$$C_m \sim f_m (R_e, N_{kc}, k/D)$$

$$C_D \sim f_b (R_e, N_{kc}, k/D)$$

$$R_e = \frac{\max \bar{u}(z) * D}{\nu}, \nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec} \text{ η κινηματική συνεκτικότητα του νερού για θερμοκρασία νερού } 20^\circ\text{C}.$$

$$N_{kc} = \frac{\max \bar{u}(z) * T}{D}$$

Για τον κατακόρυφο πάσσαλο 1 π.χ. του βάθρου έδρασης της ανεμογεννήτριας ο τύπος του Morison έχει την μορφή

$$\begin{aligned} f_x(x_1, z, t) &= f_{ix}(x_1, z, t) + f_{dx}(x_1, z, t) = \\ &= C_m * \rho * \frac{\pi D^2}{4} * \dot{u}_n(x_1, z, t) + \frac{1}{2} C_D * \rho * D * |u_n(x_1, z, t)| u_n(x_1, z, t) \end{aligned}$$

όπου

$$u_n(x_1, z, t) = \omega \frac{H}{2} \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh(kd)} \cos(kx_1 - \omega t) = \bar{u}(z) * \cos(kx_1 - \omega t)$$

Η οριζόντια ταχύτητα

$\bar{u}(z)$ το εύρος ταλάντωσης της στην θέση (x_1, z) και

$$\dot{u}_n(x_1, z, t) = \frac{\partial}{\partial t} u_n(x_1, z, t) = \omega * \bar{u}(z) * \sin(kx_1 - \omega t) = \bar{\dot{u}}(z) * \sin(kx_1 - \omega t)$$

$d = 23.0 \text{ m}$, το βάθος στην θέση του βάθρου

Η συνολική δύναμη που ασκείται στον πάσσαλο προκύπτει από την ολοκλήρωση της δύναμης $f_x(x_1, z, t)$ στο ύψος του βρεχόμενου τμήματος του πασσάλου.

$$\begin{aligned} F_x(x_1, t) &= F_{ix}(x_1, t) + F_{dx}(x_1, t) = \int_{z_u}^{z_o} f_{ix}(x_1, z, t) dz + \int_{z_u}^{z_o} f_{dx}(x_1, z, t) dz = \\ &= \bar{F}_{ix}(t) * \sin(kx_1 - \omega t) + \bar{F}_{dx}(t) * |\cos(kx_1 - \omega t)| \cos(kx_1 - \omega t) \end{aligned}$$

όπου

$$\bar{F}_{ix}(t) = C_m * \rho * \frac{\pi D^2}{4} \int_{z_u}^{z_o} \dot{\bar{u}}(z) dz \text{ και}$$

$$\bar{F}_{dx}(t) = \frac{1}{2} C_D * \rho * D \int_{z_u}^{z_o} (\dot{\bar{u}}(z))^2 dz$$

Το άνω όριο ολοκλήρωσης z_o είναι η στάθμη h της στέψης του πασσάλου εάν $h \leq -H/2$.

Διαφορετικά

$z_o = \min(h, \zeta(x_1, t))$ όπου $\zeta(x_1, t) = \frac{H}{2} \cos(kx_1 - \omega t)$ η στάθμη της επιφάνειας του νερού στην θέση του πασσάλου.

Εάν ο πάσσαλος τέμνει την στάθμη ηρεμίας του νερού το άνω όριο ολοκλήρωσης, συνήθως, ταυτίζεται με την στάθμη αυτή. Στην περίπτωση αυτή

$$z_0 = \pm 0.0$$

$z_u = -20.0$ m την στάθμη του κάτω άκρου του πασσάλου και

Αντίστοιχα η ροπή ως προς την στάθμη z_u του κάτω άκρου του πασσάλου δίδεται από το ολοκλήρωμα

$$\begin{aligned} M_y(t) &= M_{iy}(t) + M_{dy}(t) = \int_{z_u}^{z_0} (|z_u| + z) * f_{ix}(x_1, z, t) dz + \int_{z_u}^{z_0} (|z_u| + z) * f_{dx}(x_1, z, t) dz = \\ &= \bar{M}_{iy}(t) * \sin(kx_1 - \omega t) + \bar{M}_{dy}(t) * |\cos(kx_1 - \omega t)| \cos(kx_1 - \omega t) \end{aligned}$$

όπου

$$\bar{M}_{iy}(t) = C_m * \rho * \frac{\pi D^2}{4} \int_{z_u}^{z_0} (|z_u| + z) \bar{u}(z) dz \quad \text{και}$$

$$\bar{M}_{dy}(t) = \frac{1}{2} C_D * \rho * D \int_{z_u}^{z_0} (|z_u| + z) (u(z))^2 dz$$

Για $x_1 = 0$, ο κατακόρυφος άξονας του συστήματος συντεταγμένων ταυτίζεται με τον άξονα του πασσάλου, προκύπτει

$$t = 0 \quad z_0 = \frac{H}{2} \cos(0) = \frac{H}{2} \quad \cos(0) = 1 \quad \sin(0) = 0$$

$$t = T/4 \quad z_0 = \frac{H}{2} \cos(\pi/2) = 0 \quad \cos(\pi/2) = 0 \quad \sin(\pi/2) = 1$$

$$t = T/2 \quad z_0 = \frac{H}{2} \cos(\pi) = 0 \quad \cos(\pi) = -1 \quad \sin(\pi) = 0$$

$$t = 3T/4 \quad z_0 = \frac{H}{2} \cos(3\pi/4) = 0 \quad \cos(3\pi/4) = 0 \quad \sin(3\pi/4) = -1$$

Στην περίπτωση αυτή

$$F_x(0) = \bar{F}_{dx}(t), \quad M_y(0) = \bar{M}_{dy}(t)$$

$$F_x(T/4) = -\bar{F}_{ix}(t), \quad M_y(T/4) = -\bar{M}_{iy}(t)$$

$$F_x(T/2) = -\bar{F}_{dx}(t), \quad M_y(T/2) = -\bar{M}_{dy}(t) \quad \text{και}$$

$$F_x(3T/4) = \bar{F}_{ix}(t), \quad M_y(3T/4) = \bar{M}_{iy}(t)$$

Όπως διαπιστώνεται από τις παραπάνω σχέσεις οι δράσεις από το κύμα σχεδιασμού είναι περιοδικές με περίοδο ίση με αυτήν του απλού αρμονικού κύματος. Οι συνιστώσες αντίστασης έχουν μέγιστο την χρονική στιγμή $t = 0$ ενώ οι αδρανειακές την χρονική στιγμή $t = 3T/4$. Το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ότι η φορά της δύναμης είναι αντίθετη με την φορά του κύματος απολογισμού.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΣΤΑ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΒΑΘΡΟΥ

Φορτία στους κατακόρυφους πάσσάλους

Οι τέσσερις κατακόρυφοι πάσσαλοι που διαμορφώνουν το βάθρο τέμνουν την στάθμη ηρεμίας και η στέψη τους βρίσκεται πάνω από την μέγιστη στιγμιαία στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας.

$$-H/2 \leq z_0 \leq H/2$$

Στην περίπτωση αυτή τα ολοκληρώματα για τον υπολογισμό της συνολικής δύναμης και ροπής που ασκείται στον πάσσαλο 1 π.χ. από το κύμα σχεδιασμού μπορούν να γραφούν ως εξής

$$F_x(x_1, t) = \int_{z_u}^0 f_{ix}(x_1, z, t) dz + \int_0^{\zeta(x_1, t)} f_{ix}(x_1, z, t) dz + \int_{z_u}^0 f_{dx}(x_1, z, t) dz + \int_0^{\zeta(x_1, t)} f_{dx}(x_1, z, t) dz$$

όπου

$$\begin{aligned} f_{ix}(x_1, z, t) &= C_m * \rho * \frac{\pi D^2}{4} * \ddot{u}(z) * \sin(kx_1 - \omega t) \\ &= \bar{f}_{ix}(z) * \sin(kx_1 - \omega t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{dx}(x_1, z, t) &= \frac{1}{2} C_D * \rho * D * (u(z))^2 * |\cos(kx_1 - \omega t)| \cos(kx_1 - \omega t) \\ &= \bar{f}_{dx}(z) * |\cos(kx_1 - \omega t)| \cos(kx_1 - \omega t) \end{aligned}$$

Με

$$\bar{F}_{ix} = \int_{z_u}^0 \bar{f}_{ix}(z) dz$$

$$\bar{F}_{dx} = \int_{z_u}^0 \bar{f}_{dx}(z) dz$$

$$F_{ix}(\zeta(x_1, t)) = \int_0^{\zeta(x_1, t)} \bar{f}_{ix}(z) \sin(kx_1 - \omega t) dz$$

και

$$F_{dx}(\zeta(x_1, t)) = \int_0^{\zeta(x_1, t)} \bar{f}_{dx}(z) |\cos(kx_1 - \omega t)| \cos(kx_1 - \omega t) dz$$

Η τιμή της συνολικής δύναμης δίδεται από την σχέση

$$\begin{aligned} F_x(x_1, t) &= \bar{F}_{ix} * \sin(kx_1 - \omega t) + F_{ix}(\zeta(x_1, t)) + \\ &\quad + \bar{F}_{dx} * |\cos(kx_1 - \omega t)| \cos(kx_1 - \omega t) + F_{dx}(\zeta(x_1, t)) \end{aligned}$$

Για ολοκλήρωση μέχρι την στάθμη ηρεμίας, $z_0 = 0$

$F_{ix}(\zeta(x_1, t)) = F_{Dx}(\zeta(x_1, t)) = 0$ και η τιμή της συνολικής δύναμης υπολογίζεται από την σχέση

$$F_x(x_1, t) = \bar{F}_{ix} * \sin(kx_1 - \omega t) + \bar{F}_{Dx} * |\cos(kx_1 - \omega t)| \cos(kx_1 - \omega t)$$

Αντίστοιχα για την ροπή του πασσάλου ως προς την στάθμη $z_u = -20.0$ m προκύπτει

$$M_y(x_1, t) = \bar{M}_{iy} * \sin(kx_1 - \omega t) + M_{iy}(\zeta(x_1, t)) + \\ + \bar{M}_{Dy} * |\cos(kx - \omega t)| \cos(kx - \omega t) + M_{Dy}(\zeta(x_1, t))$$

όπου

$$\bar{M}_{iy} = \int_{z_u}^0 (h+z) * \bar{f}_{ix}(z) dz$$

$$M_{iy}(\zeta(x_1, t)) = \int_0^{\zeta(x_1, t)} (h+z) * \bar{f}_{ix}(z) \sin(kx_1 - \omega t) dz$$

$$\bar{M}_{Dy} = \int_{z_u}^0 (h+z) * \bar{f}_{Dx}(z) dz \quad \text{και}$$

$$M_{Dy}(\zeta(x_1, t)) = \int_0^{\zeta(x_1, t)} (h+z) * \bar{f}_{Dx}(z) |\cos(kx_1 - \omega t)| \cos(kx_1 - \omega t) dz \quad \text{με}$$

$h = |z_u|$ την απόλυτη τιμή της στάθμης του κάτω άκρου του πασσάλου.

Και στην περίπτωση αυτή για ολοκλήρωση μέχρι την στάθμη ηρεμίας, $z_0 = 0$, η τιμή των συναρτήσεων $M_{iy}(\zeta(x_1, t))$ και $M_{Dy}(\zeta(x_1, t))$ είναι μηδέν και η συνολική ροπή που ασκείται στον πάσσαλο 1 δίδεται από την σχέση

$$M_y(t) = \bar{M}_{iy} * \sin(kx_1 - \omega t) + \bar{M}_{Dy} * |\cos(kx - \omega t)| \cos(kx - \omega t)$$

Η αποτίμηση των ολοκληρωμάτων που αναφέρθηκαν προηγουμένως μπορεί να γίνει και αριθμητικά. Στον πίνακα 1 που ακολουθεί υπολογίζονται η δύναμη και η ροπή που ασκούνται στον πάσσαλο 1 με αριθμητική ολοκλήρωση. Στις γραμμές 1 έως και 9 υπολογίζονται οι τιμές των δυνάμεων $\bar{f}_D(z)$, $\bar{f}_i(z)$ και των ροπών $(z + d_1) * \bar{f}_D(z)$ και $(z + d_1) * \bar{f}_i(z)$, στήλες 4, 5, 6 και 7 αντίστοιχα, στις στάθμες που σημειώνονται στην στήλη (1) για $0.0 \geq z \geq -20.0$ m. Από τις τιμές του πίνακα 1 προκύπτει

$$\bar{F}_{ix} = \int_{-20}^0 \bar{f}_{ix}(z) dz = 2.50(2.82 + 2 * 2.56 + 2 * 2.33 + 2 * 2.14 + 2 * 1.99 + 2 * 1.86 + 2 * \\ * 1.77 + 2 * 1.70 + 1.66) / 2 = 2.50 * 16.59 = 41.48 \text{ kN}$$

$$\bar{F}_{Dx} = \int_{-20}^0 \bar{f}_{Dx}(z) dz = 2.50 * 20.24 = 50.60 \text{ kN}$$

$$\bar{M}_{iy} = \int_{-20}^0 (z+20) * \bar{f}_{ix}(z) dz = 2.50 * 181.68 = 454.15 \text{ kNm}$$

$$\bar{M}_{Dy} = \int_{-20}^0 (z+20) * \bar{f}_{Dx}(z) dz = 2.50 * 240.21 = 600.53 \text{ kNm}$$

Τα φορτία από το κύμα σχεδιασμού στον μεμονωμένο πάσσαλο για ολοκλήρωση μέχρι την στάθμη ηρεμίας είναι

$$x = 0$$

$$F_x(t) = -41.48 * \sin(\omega t) + 50.60 * |\cos(\omega t)| \cos(\omega t)$$

$$M_y(t) = -454.15 * \sin(\omega t) + 600.53 * |\cos(\omega t)| \cos(\omega t)$$

Για την συνισταμένη των φορτίων στους τέσσερις πασσάλους προκύπτει

$$\alpha = 0^\circ$$

$$\begin{aligned} F_x(t) = & 41.48 * [\sin(-k * 4.75 - \omega t) - 2 * \sin(\omega t) + \sin(k * 4.75 - \omega t)] + \\ & + 50.60 * [|\cos(-k * 4.75 - \omega t)| \cos(-k * 4.75 - \omega t) + 2 * |\cos(\omega t)| \cos(\omega t) + \\ & + |\cos(k * 4.75 - \omega t)| \cos(k * 4.75 - \omega t)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_y(t) = & 454.15 * [\sin(-k * 4.75 - \omega t) - 2 * \sin(\omega t) + \sin(k * 4.75 - \omega t)] + \\ & + 600.53 * [|\cos(-k * 4.75 - \omega t)| \cos(-k * 4.75 - \omega t) + 2 * |\cos(\omega t)| \cos(\omega t) + \\ & + |\cos(k * 4.75 - \omega t)| \cos(k * 4.75 - \omega t)] \end{aligned}$$

$$\alpha = 45^\circ$$

$$\begin{aligned} F_x'(t) = & 41.48 * 2 [\sin(-k * 3.35 - \omega t) + \sin(k * 3.35 - \omega t)] + \\ & + 50.60 * 2 [|\cos(-k * 3.35 - \omega t)| \cos(-k * 3.35 - \omega t) + \\ & + |\cos(k * 3.35 - \omega t)| \cos(k * 3.35 - \omega t)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_y'(t) = & 454.15 * 2 [\sin(-k * 3.35 - \omega t) + \sin(k * 3.35 - \omega t)] + \\ & + 600.53 * 2 [|\cos(-k * 3.35 - \omega t)| \cos(-k * 3.35 - \omega t) + \\ & + |\cos(k * 3.35 - \omega t)| \cos(k * 3.35 - \omega t)] \end{aligned}$$

Πίνακας 1 : Δράσεις από το κύμα σχεδιασμού στον πάσσαλο 1. Αριθμητική ολοκλήρωση μέχρι την στάθμη ηρεμίας $z_0 = \pm 0.0$

Δεδομένα:							
Χαρακτηριστικά κύματος στα ανοιχτά		Στη θέση του έργου			D=	1500	mm ,
$H_0=$	6,5 m	$d_1=$	20,0 m		Re=	$D * \bar{u}(0)/\nu$	$= 3,44 * 10^6$
T=	10,0 sec	d=	23,0 m		$N_{kc}=$	$\bar{u}(0) * T/D$	$= 15,28$
$\lambda_0=$	156,13 m	$\lambda=$	127,0 m		τραχύτητα k=	50 mm	
$k_0=$	0,04024 rad/sec	k=	0,0495 rad/m		k/D=	1/30	
$c_0=$	15,61 m/sec	$\omega=$	0,6283 rad/m		$C_m=$	$0,60 \times 1,80=$	1,08
$D_{\text{πασ}}=$	1,50 m	H=	5,94 m		$C_D=$	$1,50 \times 0,75=$	1,125
		$C_m=$	1,08		$\nu=$	$10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$	
		$C_D=$	1,125				

	z	$\bar{u}(z)$	$\bar{u}'(z)$	$\bar{f}_D(z)$	$\bar{f}_i(z)$	$(z + d_1) * \bar{f}_D(z)$	$(z + d_1) * \bar{f}_i(z)$
(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	0,00	2,293	1,441	4,55	2,82	90,97	56,38
2	-2,50	2,080	1,307	3,74	2,56	65,45	44,73
3	-5,00	1,898	1,192	3,11	2,33	46,71	34,98
4	-7,50	1,745	1,096	2,63	2,14	32,90	26,80
5	-10,00	1,618	1,017	2,27	1,99	22,65	19,89
6	-12,50	1,517	0,953	1,99	1,86	14,93	13,98
7	-15,00	1,439	0,904	1,79	1,77	8,95	8,84
8	-17,50	1,383	0,869	1,65	1,70	4,13	4,25
9	-20,00	1,348	0,847	1,57	1,66	-	-
				20,24	16,59	240,21	181,66

Στο σχήμα 3 δίδεται η χρονική μεταβολή της ελεύθερης επιφάνειας της δύναμης και της ροπής που ασκείται στον απλό πάσσαλο.

Στα σχήματα 4 και 5 δίδεται η χρονική μεταβολή της δύναμης και της ροπής που ασκείται στην ομάδα των τεσσάρων πασσάλων για γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού $\alpha = 0^\circ$ και $\alpha = 45^\circ$ αντίστοιχα.

Στον πίνακα 2 δίδονται τα μεγέθη για τον υπολογισμό των δράσεων από το κύμα σχεδιασμού στον πάσσαλο 1 με αριθμητική ολοκλήρωση από την στάθμη ηρεμίας μέχρι την στιγμιαία στάθμη για $t = 0$, γραμμές 1, 2 και 3 και $t = T/2$, γραμμές 3, 4 και 5.

Πίνακας 2 : Δράσεις από το κύμα σχεδιασμού στον πάσσαλο 1. Αριθμητική ολοκλήρωση από την στάθμη ηρεμίας μέχρι την στιγμιαία στάθμη για $t = 0$ και $t = T/2$.

	z	$\bar{u}(z)$	$\bar{\ddot{u}}$	$\bar{f}_D(z)$	$\bar{f}_i(z)$	$(z+d_1) \bar{f}_D(z)$	$(z+d_1) \bar{f}_i(z)$
(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	2.97	2.593	1.629	5.816	3.188	133.59	73.23
2	1.485	2.437	1.531	5.135	2.995	110.33	64.35
3	0	2.293	1.441	4.549	2.819	90.98	56.38
4	-1.485	2.162	1.359	4.044	2.658	74.87	49.21
5	-2.97	2.043	1.284	3.61	2.511	61.47	42.76

$$F_{ix}(\zeta(0,0)) = \int_0^{H/2} \bar{f}_{ix}(z) dz = 1.485 * (3.188 + 2 * 2.995 + 2.819) / 2 = 8.91 \text{ kN}$$

$$F_{Dx}(\zeta(0,0)) = \int_0^{H/2} \bar{f}_{Dx}(z) dz = 1.485 * (5.816 + 2 * 5.135 + 4.549) / 2 = 15.32 \text{ kN}$$

$$M_{ix}(\zeta(0,0)) = \int_0^{H/2} (z+d_1) \bar{f}_i(z) dz = 1.485 * (73.23 + 2 * 64.35 + 56.38) / 2 = 191.80 \text{ kNm}$$

$$M_{Dx}(\zeta(0,0)) = \int_0^{H/2} (z+d_1) \bar{f}_D(z) dz = 1.485 * (133.59 + 2 * 110.33 + 90.97) / 2 = 330.58 \text{ kNm}$$

$$F_{ix}(\zeta(T/2,0)) = \int_{-H/2}^0 \bar{f}_{ix}(z) dz = 1.485 * (2.511 + 2 * 2.658 + 2.819) / 2 = 7.90 \text{ kN}$$

$$F_{Dx}(\zeta(T/2,0)) = \int_{-H/2}^0 \bar{f}_{Dx}(z) dz = 1.485 * (3.61 + 2 * 4.044 + 4.549) / 2 = 12.06 \text{ kN}$$

$$M_{ix}(\zeta(T/2,0)) = \int_{-H/2}^0 (z+d_1) \bar{f}_{ix}(z) dz = 1.485 * (42.76 + 2 * 49.21 + 56.38) / 2 = 146.69 \text{ kNm}$$

$$M_{Dx}(\zeta(T/2,0)) = \int_{-H/2}^0 (z+d_1) \bar{f}_{Dx}(z) dz = 1.485 * (61.47 + 2 * 74.87 + 90.98) / 2 = 224.38 \text{ kNm}$$

Για τις χρονικές στιγμές $t = 0$ και $t = T/2$ και ολοκλήρωση μέχρι την στιγμιαία στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας οι τιμές που προκύπτουν για την δύναμη και ροπή που ασκείται στον πάσσαλο 1 από το κύμα σχεδιασμού είναι

$$F_x(0,0) = \int_{-20}^0 \bar{f}_{Dx}(z) dz + \int_0^{H/2} \bar{f}_{Dx}(z) dz = 50.60 + 15.32 = 65.92 \text{ kN}$$

$$M_y(0,0) = \int_{-20}^0 (z+d_1) \bar{f}_{Dx}(z) dz + \int_0^{H/2} (h+z) * \bar{f}_{Dx}(z) dz = 600.53 + 330.58 = 931.11 \text{ kNm}$$

$$F_x(T/2,0) = \int_{-20}^{H/2} \bar{f}_{Dx}(z) dz - \int_{-H/2}^0 \bar{f}_{Dx}(z) dz = 50.60 - 12.06 = 38.54 \text{ kN}$$

$$M_y(T/2,0) = \int_{-20}^{H/2} (z+d_1) \bar{f}_{Dx}(z) dz - \int_{-H/2}^0 (h+z) * \bar{f}_{Dx}(z) dz = 600.53 + 224.38 = 376.15 \text{ kNm}$$

Δεδομένου ότι $\sin(0) = \sin(\pi) = 0$ η αδρανειακή συνιστώσα των δράσεων μηδενίζεται τις χρονικές στιγμές $t = 0$ και $t = T/2$.

Αντίστοιχα για τις χρονικές στιγμές $t = T/4$ και $t = 3T/4$ η αδρανειακή συνιστώσα των δράσεων έχει ελάχιστο και μέγιστο αντίστοιχα ενώ η συνιστώσα αντίστασης μηδενίζεται,

$$\cos(\pi/2) = \cos(3\pi/2) = 0$$

$$F_x(0, T/4) = -\bar{F}_{ix} = -41.48 \text{ kN}$$

$$M_y(0, T/4) = -\bar{M}_{iy} = -454.15 \text{ kNm}$$

$$F_x(0, 3T/4) = F_{ix} = 41.48 \text{ kN}$$

$$M_y(0, 3T/4) = M_{iy} = 454.15 \text{ kNm}$$

Φορτία στο θεμέλιο του βάθρου

$$D = 12.0 \text{ m}, \lambda = 127.0 \text{ m}$$

$$12.0 / 127.0 = 1 / 10.6 < 1 / 5$$

$$\max \bar{u}(z) = \bar{u}(-20) = 1.348 \text{ m/sec}$$

$$R_e = \frac{u(-20) * 12.0}{10^{-6}} = 16.18 * 10^6$$

$$N_{kc} = \frac{\bar{u}(-20) * 10.0}{12.0} = 1.12$$

$$\text{Σχετική τραχύτητα } k / D = 70.0 / 12.000 = 1 / 170$$

$$1500 < 1 / 170 < 1 / 20$$

$$C_D = 1.0 \quad C_{D_{\text{μπ}}} = 1.50 * 1.0 = 1.50$$

$$C_m = 2.0 \quad C_{m_{\text{μπ}}} = 0.60 * 2.0 = 1.20$$

$$z = -20.0 \text{ m} \quad \bar{u}(z) = 1.348 \text{ m/sec}, \bar{\ddot{u}}(z) = 0.847 \text{ m/sec}^2$$

$$\bar{f}_i(z) = 1.20 * 1.025 * 0.25 * \pi * 12.0^2 * 0.847 = 117.83 \text{ kN/m}$$

$$\bar{f}_D(z) = 0.50 * 1.50 * 1.025 * 12.0 * 1.348^2 = 16.76 \text{ kN/m}$$

$$z = -23.0 \text{ m} \quad \bar{u}(z) = 1.333 \text{ m/sec}, \bar{\ddot{u}}(z) = 0.838 \text{ m/sec}^2$$

$$\bar{f}_i(z) = 116.52 \text{ kN/m}$$

$$\bar{f}_D(z) = 16.39 \text{ kN/m}$$

	z	$\bar{u}(z)$	$\bar{\ddot{u}}(z)$	$\bar{f}_D(z)$	$\bar{f}_i(z)$	$(z+d) * \bar{f}_D(z) dz$	$(z+d) * \bar{f}_i(z) dz$
(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	-20.0	1.348	0.847	16.76	117.83	353.49	50.20
2	-23.0	1.333	0.838	16.39	116.52	-	-

Το εύρος ταλάντωσης των υδροδυναμικών φορτίων είναι:

$$\bar{F}_{ix} = 3.0 * (117.83 + 116.52) / 2 = 351.5 \text{ kN}$$

$$\bar{F}_{Dx} = 3.0 * (16.76 + 16.39) / 2 = 49.7 \text{ kN}$$

$$\bar{M}_{iy} = 3.0 * 3.0 + 117.83 / 2 = 530.2 \text{ kNm}$$

$$\bar{M}_{by} = 3.0 * 3.0 + 16.76 / 2 = 75.4 \text{ kNm}$$

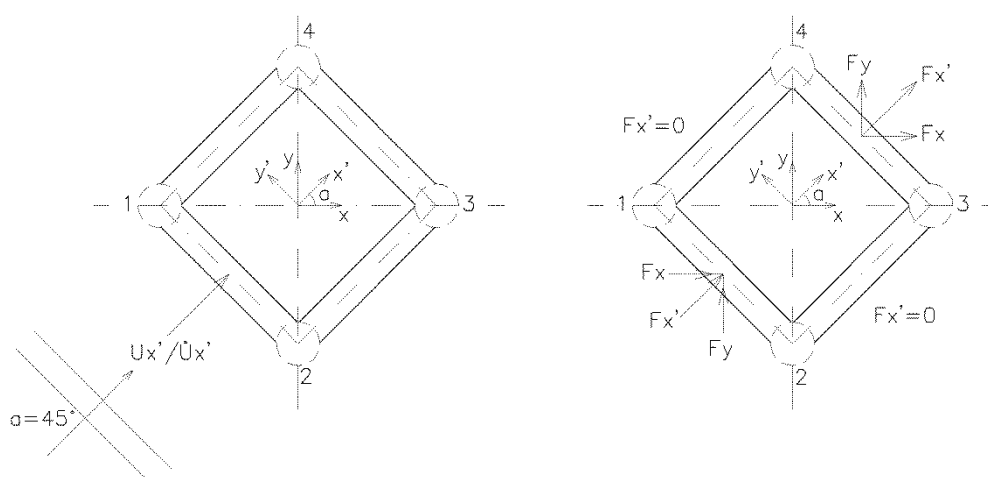
Τα συνολικά υδροδυναμικά φορτία που ασκούνται στο θεμέλιο του βάθρου δίδονται από τις σχέσεις

$$F_x(0,t) = -351.5 \sin(\omega t) + 49.7 |\cos(\omega t)| \cos(\omega t), \text{ kN}$$

$$M_y(0,t) = -530.2 \sin(\omega t) + 75.4 |\cos(\omega t)| \cos(\omega t), \text{ kNm}$$

Φορτία στα οριζόντια στοιχεία του βάθρου

Γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\alpha_0 = 45^\circ$ (Σχήμα 6)



Σχήμα 6: Οριζόντια στοιχεία δυσκαμψίας. Γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\alpha = 45^\circ$.

Σύστημα συντεταγμένων $x'y'z$

ΣΤΟΙΧΕΙΟ 12

$$u(x_1', -5.0, t) = 1.90 * \cos(kx_1' - \omega t), \quad x_1' = -3.35 \text{ m}$$

$$\dot{u}(x_1', -5.0, t) = 1.19 * \sin(kx_1' - \omega t)$$

$$W(x_1', -5.0, t) = \omega \frac{H}{2} \frac{\sinh k(z+d)}{\sinh(kd)} \sin(kx_1' - \omega t) = 1.35 * (\sin(kx_1' - \omega t))$$

$$\hat{W}(x_1', -5.0, t) = -0.848 * \cos(kx_1' - \omega t)$$

$$\max U = 1.90 \text{ m/sec}, \quad D = 1.0 \text{ m}$$

$$R_e = 1.90 * 10^6$$

$$N_{kc} = 19.0$$

$$k / D = 50 / 1000 \approx 1 / 20$$

$$C_m = 0.60 * 1.80 = 1.08$$

$$C_D = 1.50 * 0.75 = 1.125$$

$$\begin{aligned} f_x'(t) &= C_m * \rho * \frac{\pi D^2}{2} * \dot{u}(t) + \frac{1}{2} C_D * \rho * D |u| u = \\ &= 0.96 * \sin(-k * 3.75 - \omega t) + 2.08 * |\cos(-k * 3.75 - \omega t)| * \cos(-k * 3.75 - \omega t) = \\ &= 0.96 * TIX(t) + 2.08 * TDX(t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_z(t) &= C_m * \rho * \frac{\pi D^2}{2} * \dot{W}(t) + \frac{1}{2} C_D * \rho * D |W(t)| W(t) = \\ &= -0.74 * \cos(-k * 3.75 - \omega t) + 1.05 * |\sin(-k * 3.75 - \omega t)| * \sin(-k * 3.75 - \omega t) = \\ &= -0.74 * TIZ(t) + 1.05 * TDZ(t) \end{aligned}$$

$$F_x'(t) = \int_{-3.75}^{3.75} f_x'(t) dy = 6.70 * f_x'(t) = 6.43 * TIX(t) + 13.94 * TDX(t)$$

$$F_z(t) = \int_{-3.75}^{3.75} f_z(t) dy = 6.40 * f_z(t) = -4.96 * TIX(t) + 7.04 * TDZ(t)$$

ΣΤΟΙΧΕΙΟ 34

Αντίστοιχα προκύπτει

$$F_x'(t) = 6.43 * \sin(k * 3.35 - \omega t) + 13.94 * |\cos(-k * 3.35 - \omega t)| * \cos(-k * 3.35 - \omega t)$$

Και

$$F_z(t) = -4.96 * \cos(-k * 3.35 - \omega t) + 7.04 * |\sin(-k * 3.35 - \omega t)| * \sin(-k * 3.35 - \omega t)$$

$$F_x(t) = \cos(\alpha_0) * F_x'(t) \quad F_y(t) = \sin(\alpha_0) * F_y'(t)$$

ΣΤΟΙΧΕΙΟ 14

$$f_x'(t) = 0$$

$$f_z(x_1, -5.0, t) = -0.74 * \cos(kx' - \omega t) + 1.05 * |\sin(kx' - \omega t)| * \sin(kx' - \omega t)$$

$$F_z(t) = -0.74 \int_{-3.35}^{3.35} \cos(kx' - \omega t) dx' + 1.05 \int_{-3.35}^{3.35} |\sin(kx' - \omega t)| * \sin(kx' - \omega t) dx'$$

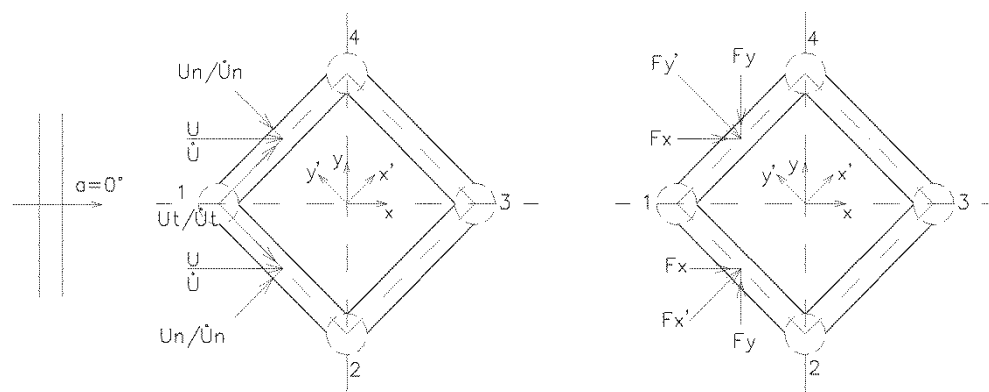
$$\int \cos(kx' - \omega t) dx' = -\frac{1}{\omega} \sin(kx' - \omega t)$$

$$\int \sin^2(kx' - \omega t) dx' = \frac{1}{2} x' - \frac{1}{4k} * \sin 2(kx' - \omega t)$$

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ

Στην περίπτωση αυτή για χαρακτηριστικές χρονικές στιγμές στο διάστημα $0 \leq t \leq T$ υπολογίζονται τα μεγέθη του πεδίου ροής στις καθορισμένες θέσεις του άξονα του στοιχείου και γίνεται η αριθμητική ολοκλήρωση της $F_z(t)$ ως προς x' στο διάστημα $-3.35 \leq x' \leq 3.35$

Γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\alpha_0 = 0^\circ$ (Σχήμα 7)



Σχήμα 7: Οριζόντια στοιχεία δυσκαμψίας. Γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\alpha = 0^\circ$
Σύστημα συντεταγμένων xyz

ΣΤΟΙΧΕΙΟ 12

$$u(x, -5.0, t) = 1.90 * \cos(kx - \omega t), -4.75 \leq x \leq 0$$

$$\dot{u}(x, -5.0, t) = 1.19 * \sin(kx - \omega t)$$

$$W(x, -5.0, t) = 1.35 * (\sin(kx - \omega t))$$

$$\hat{W}(x, -5.0, t) = -0.848 * \cos(kx - \omega t)$$

Η κάθετη στον άξονα των στοιχείων συνιστώσα της οριζόντιας ταχύτητας και της επιτάχυνσης είναι παράλληλη με τον άξονα x' :

$$u_n(x_1, -5.0, t) = u(x_1, -5.0, t) * \cos(45^\circ) = 1.344 * \cos(kx - \omega t) \text{ και αντίστοιχα}$$

$$\dot{u}_n(x_1, -5.0, t) = \dot{u}(x_1, -5.0, t) * \cos(45^\circ) = 0.841 * (\sin(kx - \omega t))$$

Η παράλληλη συνιστώσα στον άξονα των στοιχείων της ταχύτητας και της επιτάχυνσης δε δίδει φορτία.

Η κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας και επιτάχυνσης του πεδίου ροής είναι κάθετη στον άξονα των στοιχείων και δίδει φορτία.

Οι υδροδυναμικοί συντελεστές C_m και C_D είναι αυτοί που υπολογίσθηκαν για το στοιχείο 12 για γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού $\alpha = 45^\circ$ (Σχήμα 6).

Οριζόντια φορτία

$$\begin{aligned}
 f_{nx'}(x, -5.0, t) &= C_m * \rho * \frac{\pi D^2}{2} * \dot{u}_n(x, -5.0, t) + \frac{1}{2} C_D * \rho * D |u_n(x, -5.0, t)| u_n(x, -5.0, t) = \\
 &= C_m * \rho * \frac{\pi D^2}{2} * 0.841 * \sin(kx - \omega t) + \frac{1}{2} C_D * \rho * D * 1.344^2 * \\
 &\quad * |\cos(kx - \omega t)| \cos(kx - \omega t) = f_{Inx'} * \sin(kx - \omega t) + \\
 &\quad + f_{Dnx'} * |\cos(kx - \omega t)| \cos(kx - \omega t) \\
 f_{Inx'} &= 0.732 \text{ kN/m}, \quad f_{Dnx'} = 1.04 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

$$F_{12x'}(t) = \int_{-4.75}^0 f_{nx'}(x, -5.0, t) dy'$$

$$x = -y' * \cos(45^\circ), \quad dy' = -x / \cos(45^\circ)$$

$$\text{για } x = 4.75 \text{ m}, \quad y' = 4.75 / \cos(45^\circ) = 6.70$$

$$\begin{aligned}
 F_{12x'}(t) &= \int_{-4.75}^0 f_{nx'}(x, -5.0, t) dy' = \frac{1}{\cos(45^\circ)} \int_{-4.75}^0 f_{nx'}(x, -5.0, t) dx \\
 &= f_{Inx'} * \frac{1}{\cos(45^\circ)} \int_{-4.75}^0 \sin(kx - \omega t) dx + \\
 &\quad + f_{Dnx'} * \frac{1}{\cos(45^\circ)} \int_{-4.75}^0 |\cos(kx - \omega t)| \cos(kx - \omega t) dx
 \end{aligned}$$

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ

Η ολοκλήρωση θα γίνει ως προς την μεταβλητή y' , $-3.35 \leq y' \leq 3.35 \text{ m}$, $x = y' * \cos(45^\circ)$. Το μήκος του στοιχείου 12, $S_{12} = 6.70 \text{ m}$, χωρίζεται σε N ίσα τμήματα. Στα άκρα κάθε στοιχείου υπολογίζονται η τιμή της μεταβλητής y' , της ταχύτητας $u(x, -5.0, t)$ και της επιτάχυνσης $\dot{u}(x, -5.0, t)$, $x = x_0 + y' * \cos(45^\circ)$. Οι τιμές της κάθετης συνιστώσας των μεγεθών του πεδίου ροής υπολογίζονται από τις σχέσεις

$$u_n(x, -5.0, t) = \cos(45^\circ) * u(x, -5.0, t)$$

$$\dot{u}_n(x, -5.0, t) = \cos(45^\circ) * \dot{u}(x, -5.0, t)$$

Από τις παραπάνω τιμές με τον τύπο του Morison υπολογίζεται η οριζόντια συνιστώσα της δύναμης

$$f_{x'}(x, -5.0, t) = C_m * \rho * \frac{\pi D^2}{2} * \dot{u}_n(x, -5.0, t) + \frac{1}{2} C_D * \rho * D |u_n(x, -5.0, t)| u_n(x, -5.0, t) \text{ [kN/m]}$$

και με αριθμητική ολοκλήρωση η συνολική δύναμη $F_{12x'}(t)$.

Στο όρισμα των αρμονικών συναρτήσεων $\cos(kx - \omega t)$ ή $\sin(kx - \omega t)$ που θα ολοκληρωθούν αριθμητικά ως προς x υπάρχει και ο χρόνος t .

Για τον λόγο αυτό η ολοκλήρωση θα γίνει ως προς την μεταβλητή x για χαρακτηριστικές χρονικές στιγμές

$$t = T/n \text{ στο διάστημα } 0 \leq t \leq T$$

όπου T η περίοδος του απλού αρμονικού κύματος

Οι συνιστώσες της $F_{12x'}(t)$ ως προς το σύστημα συντεταγμένων x, y, z δίδονται από τις σχέσεις:

$$F_{12x'}(t) = \cos(45^\circ) * F_{12x}(t) \text{ και}$$

$$F_{12y}(t) = -\sin(45^\circ) * F_{12x}(t)$$

Αντίστοιχα υπολογίζεται και η $F_{23x'}(t)$

$$F_{14x'}(t) = F_{12x'}(t) \text{ και}$$

$$F_{34x'}(t) = F_{23x'}(t)$$

Κατακόρυφα φορτία

$$\begin{aligned} f_z(x, -5.0, t) = & -C_m * \rho * \frac{\pi D^2}{2} * 0.848 * \cos(kx - \omega t) + \frac{1}{2} C_D * \rho * D * 1.35^2 * \\ & * |\sin(kx - \omega t)| \sin(kx - \omega t) = -0.74 * \cos(kx - \omega t) + \\ & + 1.05 * |\sin(kx - \omega t)| \sin(kx - \omega t) \end{aligned}$$

$$F_{12z}(t) = \int_{x=-4.75}^{x=0} f_z(x, -5.0, t) dy' \quad , \quad x = y' * \cos(45^\circ) \rightarrow dy' = dx / \cos(45^\circ)$$

$$\begin{aligned} F_{12z}(t) = & \int_{-4.75}^0 f_z(x, -5.0, t) \frac{1}{\cos(45^\circ)} dx = \\ = & -\frac{0.74}{\cos(45^\circ)} \int_{-4.75}^0 \cos(kx - \omega t) dx + \frac{1.05}{\cos(45^\circ)} \int_{-4.75}^0 |\sin(kx - \omega t)| \sin(kx - \omega t) dx \\ = & -\frac{0.74}{\cos(45^\circ)} \frac{1}{k} \sin(kx - \omega t) \Big|_{-4.75}^0 + \text{sign}(\sin(kx - \omega t)) \frac{1.05}{\cos(45^\circ)} \int_{-4.75}^0 \sin^2(kx - \omega t) dx \end{aligned}$$

Η συνάρτηση $\text{sign}(x)$ δηλώνει, είναι το πρόσημο του x .

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ

Η διαδικασία υπολογισμού είναι η ίδια με αυτήν που αναφέρεται για τον υπολογισμό της $F_{12x'}(t)$.

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΤΟ ΧΩΡΟ

Αντίστοιχα γίνεται η αριθμητική ολοκλήρωση και στην περίπτωση που το στοιχείο της κατασκευής βρίσκεται στο χώρο, στα σημεία του άξονά του μεταβάλλονται και οι τρεις χωρικές μεταβολές (x, y, z). Το μήκος του στοιχείου χωρίζεται σε N ίσα τμήματα. Υπολογίζονται οι συντεταγμένες των άκρων από τα στοιχεία, τα μεγέθη του πεδίου ροής, ταχύτητες και επιταχύνσεις στα σημεία αυτά καθώς και η κάθετη στον άξονα του στοιχείου συνιστώσα των μεγεθών αυτών στις συγκεκριμένες θέσεις.

Με τον τύπο του Morison υπολογίζεται η δύναμη $f_n(x, y, z)$ [kN/m] και γίνεται η αριθμητική ολοκλήρωση. Με δεδομένη την δύναμη $f_n(x, y, z)$ μπορούν να υπολογισθούν και οι ροπές που αναπτύσσονται σε οποιοδήποτε στοιχείο της κατασκευής.

Συνισταμένη φορτίων

Τα συνολικά οριζόντια φορτία που ασκούνται υπολογίζονται από το άθροισμα των αντίστοιχων φορτίων που ασκούνται στους τέσσερις κατακόρυφους πάσσάλους, στο θεμέλιο του βάθρου και στα τέσσερα στοιχεία δυσκαμψίας στην στάθμη $z = -5.0$ m.

Τα συνολικά κατακόρυφα φορτία που ασκούνται στο βάθρο είναι τα κατακόρυφα φορτία που ασκούνται στα οριζόντια στοιχεία δυσκαμψίας στην στάθμη $z = -5.0$ m.

Για τον υπολογισμό των μέγιστων υδροδυναμικών φορτίων που ασκούνται τόσο στο βάθρο όσο και στα επιμέρους στοιχεία του είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της χρονικής μεταβολής τους στην διάρκεια μιας περιόδου, βλ. σχήματα 3, 4 και 5.

ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΠΑΣΣΑΛΟΥ

Η μέγιστη συνιστώσα αντίστασης των υδροδυναμικών φορτίων που ασκούνται στον κατακόρυφο πάσσαλο, $x = 0$, εμφανίζεται την χρονική στιγμή $t = 0$ και προκύπτει από την ολοκλήρωση των κατανεμημένων φορτίων μέχρι την στιγμιαία στάθμη

$$z_0 = \zeta(0,0) = \frac{H}{2} \cos(0) = 2.97 \text{ m}$$

$$f_{ix}(x, z, t) = \bar{f}_{ix}(z) * \sin(kx - \omega t) = 0 \text{ για } x = t = 0$$

$$f_{dx}(x, z, t) = \bar{f}_{dx}(z) * |\cos(kx - \omega t)| \cos(kx - \omega t) = \bar{f}_{dx}(z) \text{ για } x = t = 0$$

$$F_x(x,t) = \int_{-d1}^{\zeta} \bar{f}_{dx}(z) dz = \int_{-d1}^0 \bar{f}_{dx}(z) dz + \int_0^{H/2} \bar{f}_{dx}(z) dz = 40.48 + \int_0^{H/2} \bar{f}_{dx}(z) dz$$

$$\text{για } x = t = 0$$

$$\int_0^{H/2} \bar{f}_{dx}(z) dz \approx 1.485 (5.82 + 2 * 5.14 + 4.55) / 2 = 15.33 \text{ kN}$$

$$F_x(0) = 40.48 + 15.33 = 55.81 \text{ kN}$$

$$M_y(0) = \int_{-d_1}^0 (d_1 + 2) * \bar{f}_{Dx}(z) dz + \int_0^{H/2} (d_1 + 2) \bar{f}_{Dx}(z) dz = 480.42 + 1.485 * (133.60 + 2 * \\ * 110.33 + 90.97) = 480.42 + 330.58 = 811.00 \text{ kNm}$$

Η μέγιστη αδρανειακή συνιστώσα των υδροδυναμικών φορτίων αναπτύσσεται την χρονική στιγμή $t = T/4$.

Για $x = 0$ και $t = T/4$

$\zeta(x,t) = 0$ και

$F_x(0) = F_{Ix}(0) = 33.18 \text{ kN}$ και

$M_y(0) = M_{Iy}(0) = 363.32 \text{ kNm}$

Στην ομάδα των πασσάλων η μέγιστη τιμή των αδρανειακών φορτίων αναπτύσσεται στην χρονική στιγμή $t = T/4$, ολοκλήρωση μέχρι την στάθμη ηρεμίας, ενώ η μέγιστη τιμή των δυνάμεων αντίστασης την χρονική στιγμή $t = 2\kappa\pi$, ολοκλήρωση μέχρι την μέγιστη στιγμιαία στάθμη.

Για γωνία πρόπτωσης $\alpha = 0^\circ$ π.χ. το άνω όριο του ολοκληρώματος για τους πασσάλους 1 και 3 είναι :

$$\zeta(\pm 4.75, 0) = \frac{H}{2} \cos(\pm k * 4.75) = 2.89 \text{ m}$$

ενώ για τους πασσάλους 2 και 4

$$\zeta(0, 0) = H / 2 = 2.97 \text{ m}$$

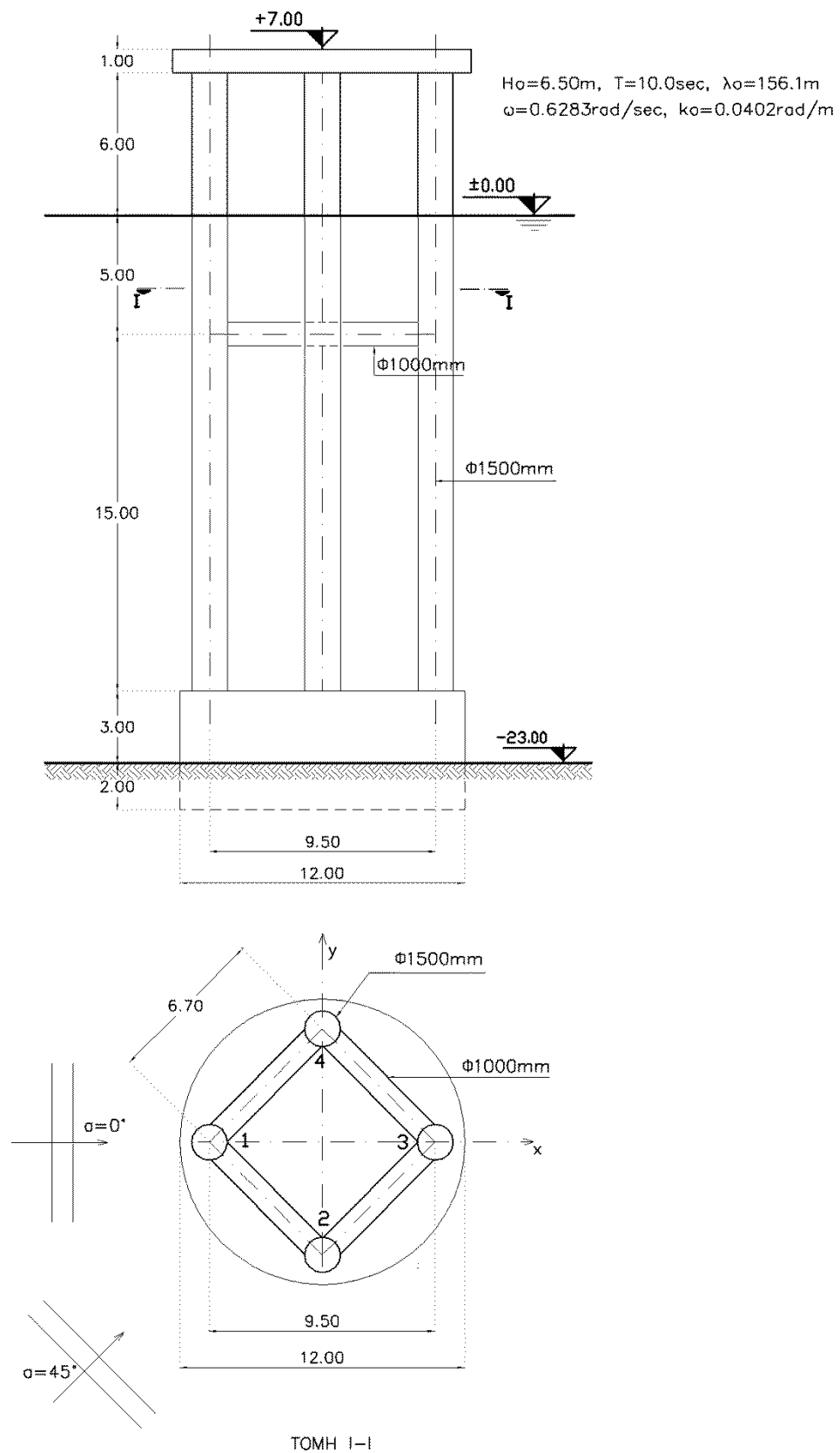
Αντίστοιχα για γωνία πρόπτωσης $\alpha = 45^\circ$ το αντίστοιχο όριο του ολοκληρώματος είναι

$$\zeta(\pm 3.35, 0) = \frac{H}{2} \cos(\pm k * 3.35) = 2.93 \text{ m}$$

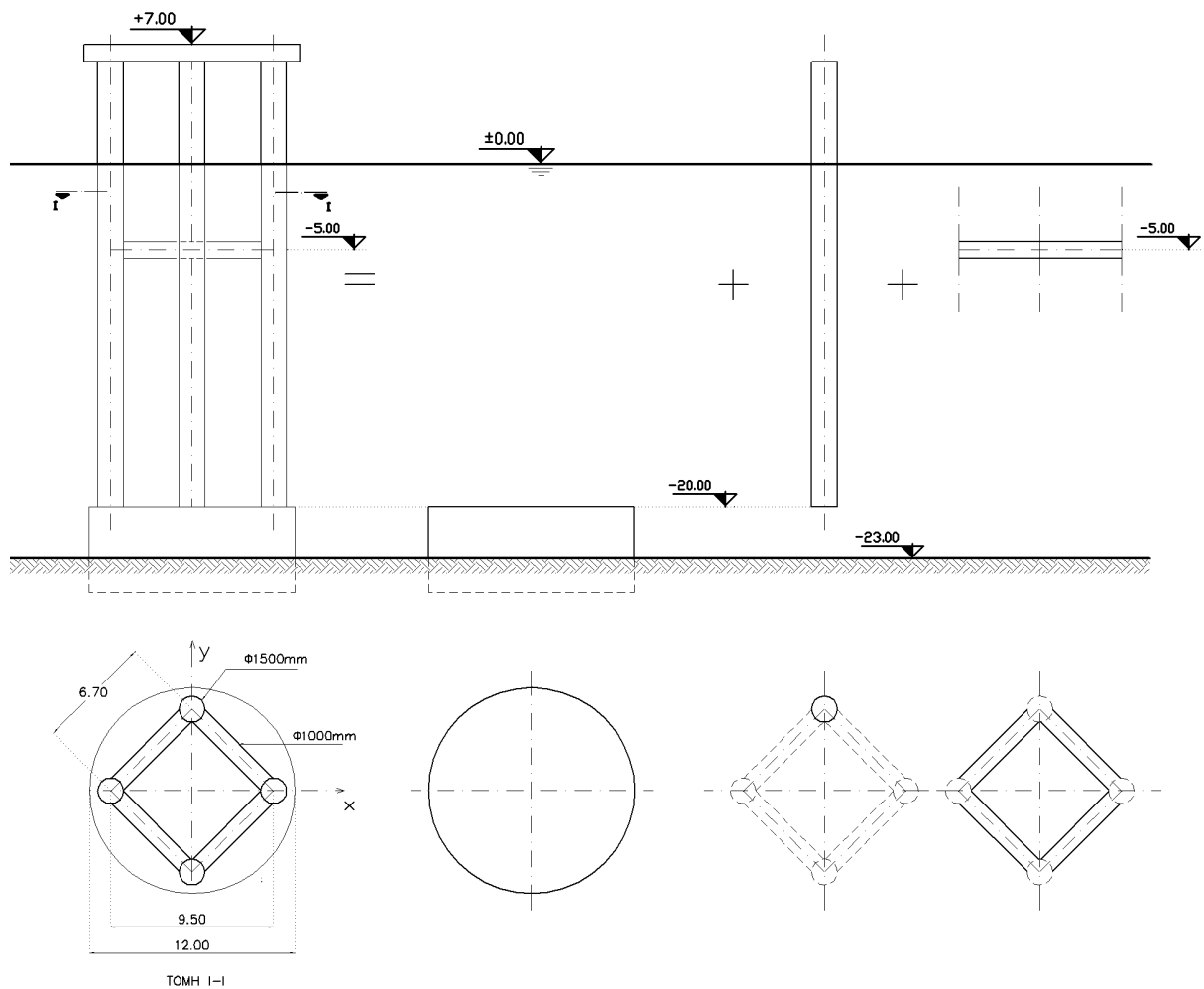
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ENVIRONMENTAL CONDITIONS AND ENVIRONMENTAL LOADS
Recommended practice DNV – RP – C205, October 2010.
- ΕΑΚ 2002. Die Küste, Heft 65, 2002
Korrigierte Ausgabe 2007.

ΣΧΗΜΑΤΑ

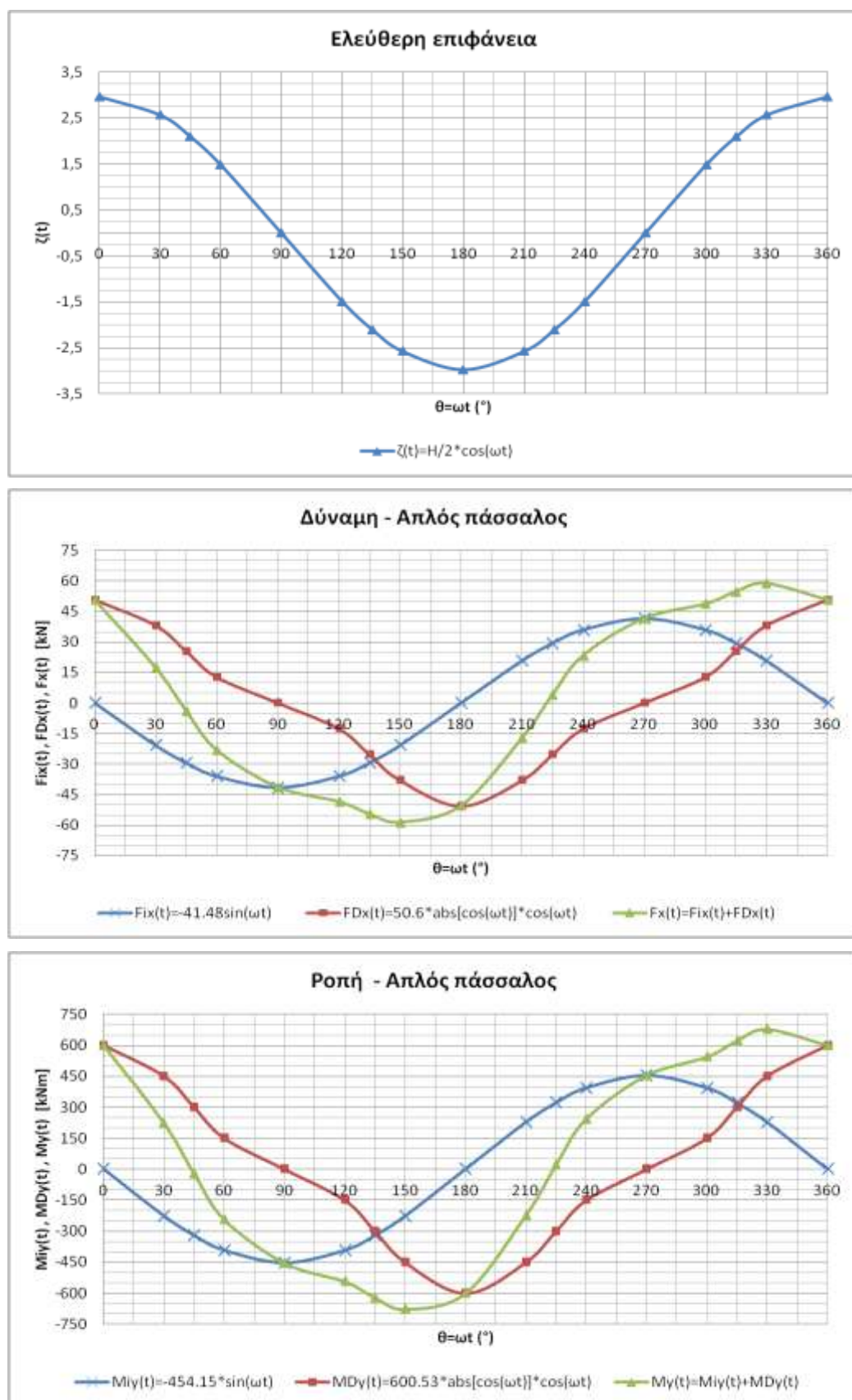


Σχήμα 1: Βάθρο έδρασης ανεμογεννήτριας θαλάσσιου αιολικού πάρκου

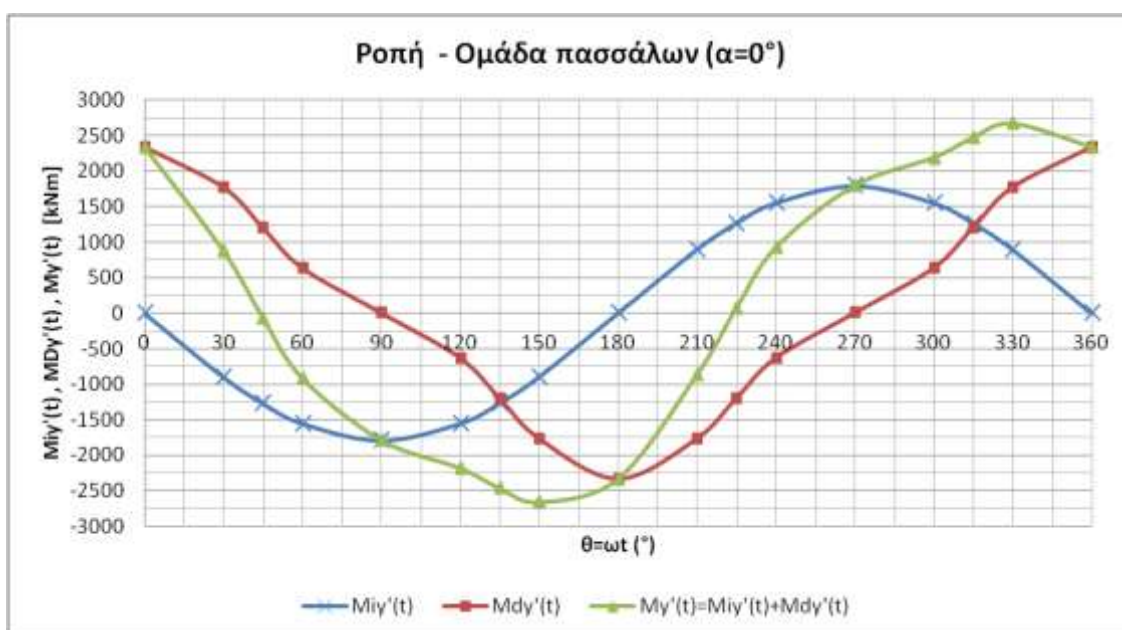
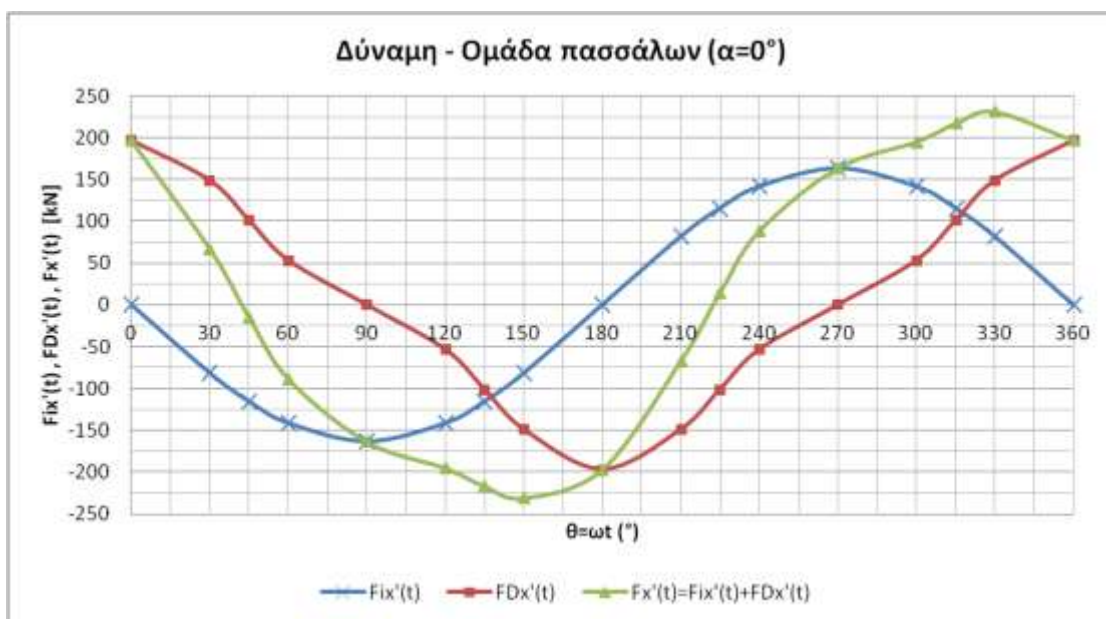


Σχήμα 2: Υδροδυναμικά λεπτή κατασκευή.

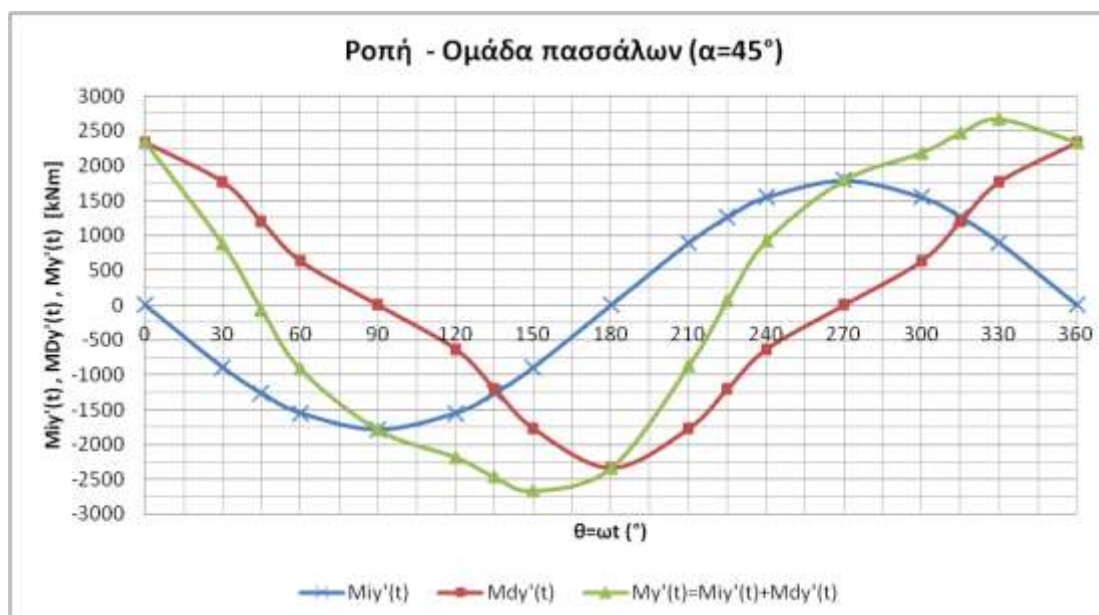
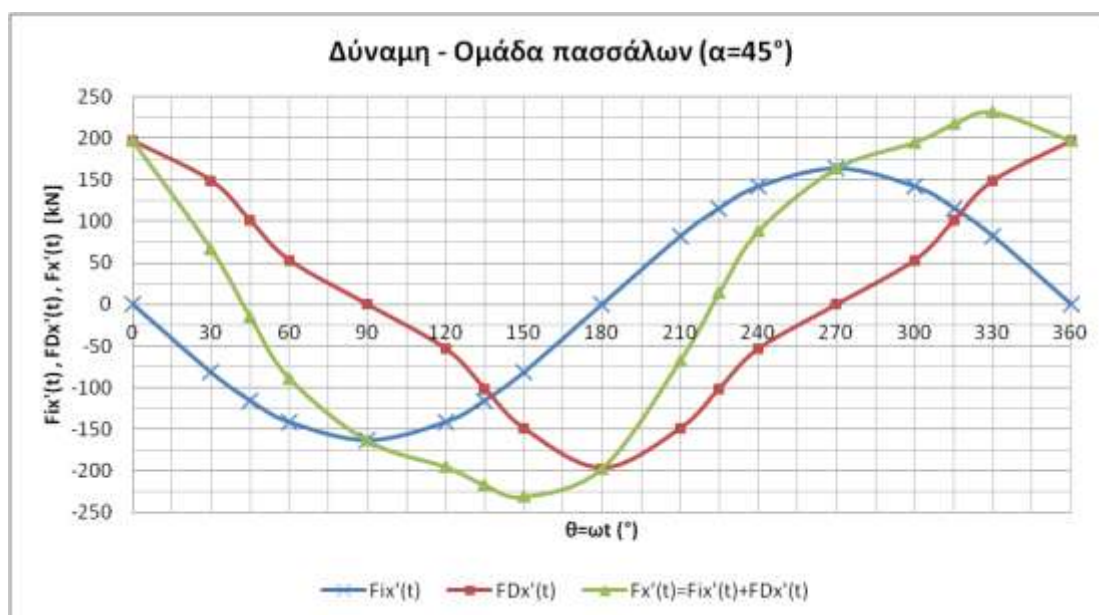
Βασικές αρχές υπολογισμού των δράσεων από το κύμα σχεδιασμού.



Σχήμα 3 : Χρονική μεταβολή της ελεύθερης επιφάνειας, της δύναμης και της ροπής που ασκείται στον απλό πάσσαλο στην διάρκεια μίας περιόδου. Ολοκλήρωση μέχρι την στάθμη ηρεμίας.



Σχήμα 4 : Χρονική μεταβολή της δύναμης και της ροπής που ασκείται στην ομάδα των τεσσάρων πασσάλων στην διάρκεια μίας περιόδου. Γωνία πρόσπτωσης $\alpha=0^\circ$. Ολοκλήρωση μέχρι την στάθμη ηρεμίας.



Σχήμα 5 : Χρονική μεταβολή της δύναμης και της ροπής που ασκείται στην ομάδα των τεσσάρων πασσάλων στην διάρκεια μίας περιόδου. Γωνία πρόσπτωσης $\alpha=45^\circ$. Ολοκλήρωση μέχρι την στάθμη ηρεμίας.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Τύπος του Morison. Συντελεστές αδράνειας και αντίστασης.

Για τα παραδείγματα που δίδονται στο τεύχος αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι υδροδυναμικοί συντελεστές του ΕΑΚ 2002.

$$Re = \frac{u_{\max} \cdot D}{\nu} \quad (4.4.2)$$

$$KC = \frac{u_{\max} \cdot T}{D} \quad (4.4.3)$$

Tab. A 4.4.1: Strömungswiderstandsbeiwerte für verschiedene Bereiche der REYNOLDS-Zahl

Re	C _D
Re ≤ 2 · 10 ⁵ (unterkritisch)	1,2
2 · 10 ⁵ < Re ≤ 5 · 10 ⁵ (kritisch)	1,2 bis 0,7
Re > 5 · 10 ⁵ (überkritisch)	0,7

Tab. A 4.4.2: Strömungswiderstandsbeiwerte für verschiedene Bereiche der KEULEGAN-CARPENTER-Zahl

KC	C _D
KC ≤ 10	1,0
10 < KC < 20	~ 0,75
20 < KC < 40	~ 0,65

Tab. A 4.4.3: Trägheitswiderstandsbeiwerte für verschiedene Bereiche der KEULEGAN-CARPENTER-Zahl

KC	C _M
0 < KC ≤ 10	2,0 bis 1,8
10 < KC < 40	1,8

Tab. A 4.4.4: Veränderung der MOJS-Kraftkoeffizienten für verschiedene relative Rauheiten

Relative Rauheit	Vergrößerung C _D	Abminderung C _M
k/D < 1/10 000 (glatt)	—	—
k/D < 1/500	+25 %	-20 %
k/D < 1/20	+50 %	-40 %

Πίνακας 3: Τύπος του Morison. Συντελεστές αδράνειας και αντίστασης.

(Απόσπασμα από ΕΑΚ 2002, Die Küste Heft 65)

Table 6-1. Surface roughness – Τραχύτητα επιφάνειας. (Απόσπασμα από /2/)

Material - Υλικό	k (meters)
Steel, new uncoated - Χάλυβας, νέος χωρίς βαφή	5×10^{-5}
Steel, painted - Χάλυβας, με βαφή	5×10^{-6}
Steel, highly corroded - Χάλυβας, μεγάλος βαθμός οξείδωσης	3×10^{-3}
Concrete - Σκυρόδεμα	3×10^{-3}
Marine growth - Θαλάσσιοι οργανισμοί	$5 \times 10^{-3} - 5 \times 10^{-2}$

Table 12. Συντελεστές υδροδυναμικής μάζας. (Απόσπασμα από /1/)

C_M	Surface roughness - Τραχύτητα επιφάνειας	
$N_{KC} (z=0)$	Smooth - Λεία	Rough - Τραχεία
$2 \leq N_{KC} \leq 6$	2.0	2.0
$6 < N_{KC} < 30$	Linear interpolation - Γραμμική παρεμβολή	
$N_{KC} \geq 30$	1.65	1.05

Table 13. Συντελεστές αντίστασης. (Απόσπασμα από /1/)

C_D	Surface roughness - Τραχύτητα επιφάνειας	
$N_{KC} (z=0)^{(*)}$	Smooth - Λεία	Rough - Τραχεία
$2 \leq N_{KC} \leq 6$	0.65	1.05
$6 < N_{KC} < 13$	Linear interpolation - Γραμμική παρεμβολή	
$N_{KC} = 13$	0.85	1.50
$13 < N_{KC} < 30$	Linear interpolation - Γραμμική παρεμβολή	
$N_{KC} \geq 30$	0.65	1.05

(*) Για $N_{KC} < 2$ οι δυνάμεις αντίστασης μπορούν να αγνοηθούν.

1. Design of Offshore Wind Turbine Structures DNV – OS – J101, June 2004
2. Environmental Conditions and Environmental Loads. DNV – RP – C205, October 2010