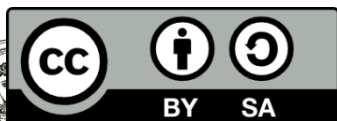




Ακτομηχανική και λιμενικά έργα

Διάλεξη 11^η. Πρόγνωση κυματισμών, κλιματική αλλαγή

Θεοφάνης Καραμπάς
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- 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.



ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ

Η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας μπορεί να προσεγγιστεί με σειρά ημιτονοειδών κυμάτων

$$\eta = \sum a_i \cos(k_i x - \omega_i t + \varphi_i)$$

Για κάθε αρμονική συνιστώσα η πυκνότητα ενέργειας υπολογίζεται από τη σχέση

$$\bar{E}_i = \frac{1}{2} g \rho a_i^2$$

Μπορεί να οριστεί η συνάρτηση $E(\omega)$ της πυκνότητας ενέργειας των αρμονικών συχνοτήτων μεταξύ ω και $\delta\omega$

$$E(\omega) d\omega = \frac{1}{2} g \rho \sum_{\omega}^{\omega+\delta\omega} a_i^2$$

Ορίζεται ως **φασματική πυκνότητα** η κατανομή της συνάρτησης $E(\omega)$ για όλες τις τιμές του ω

$$\bar{E} = \int_0^{+\infty} E(\omega) d\omega = \frac{1}{2} g \rho \sum_{i=1}^{\infty} a_i^2$$



ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ

Ενεργειακά φάσματα, ορίζονται ως οι αναλυτικές σχέσεις που περιγράφουν την κατανομή της $E(\omega)$, δηλαδή πως είναι κατανεμημένη η περιεχόμενη μηχανική ενέργεια στις διάφορες συχνότητες που περιέχονται σε ένα σύνθετο κυματισμό.

ΦΑΣΜΑΤΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

- Φάσμα JONSWAP

Από εκτεταμένες μετρήσεις και αναλύσεις στη Β. Θάλασσα

Αφορά **ανάπτυξη κυματισμών με περιορισμό μήκους** (συνηθέστερη περίπτωση για παράκτιες λεκάνες

- Φάσμα P-M (Pierson-Moskowitz)

Αφορά πλήρως ανεπτυγμένους κυματισμούς, όπου ουσιαστικά η διάρκεια πνοής του ανέμου t_D και το μήκος αναπτύγματος F είναι απεριόριστα



ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ

JONSWAP

$$E(f) = ag^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp \left[-1.25 \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-4} \right] \gamma \exp \left(-\frac{(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right)$$

$$a = \frac{0.076}{\left(g \frac{F}{U_{10}^2} \right)^{0.22}}$$



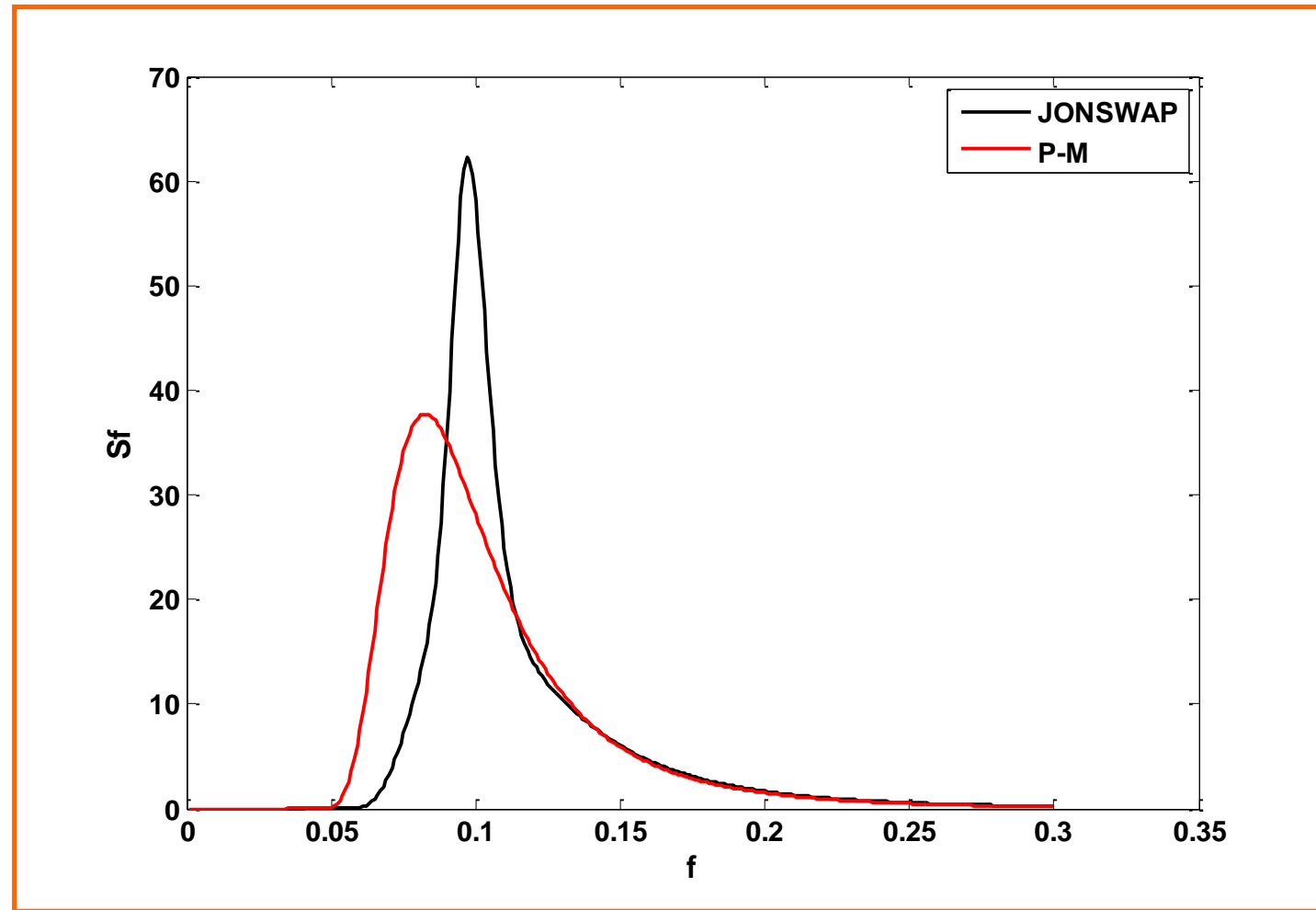
Pierson Moskowitz (PM)

$$E(f) = \frac{a g^2}{(2\pi)^4 f^5} e^{-\frac{5\left(\frac{f_p}{f}\right)^4}{4}}$$

$$f_p = \frac{0.7916g}{2\pi U_{10}}$$



ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ

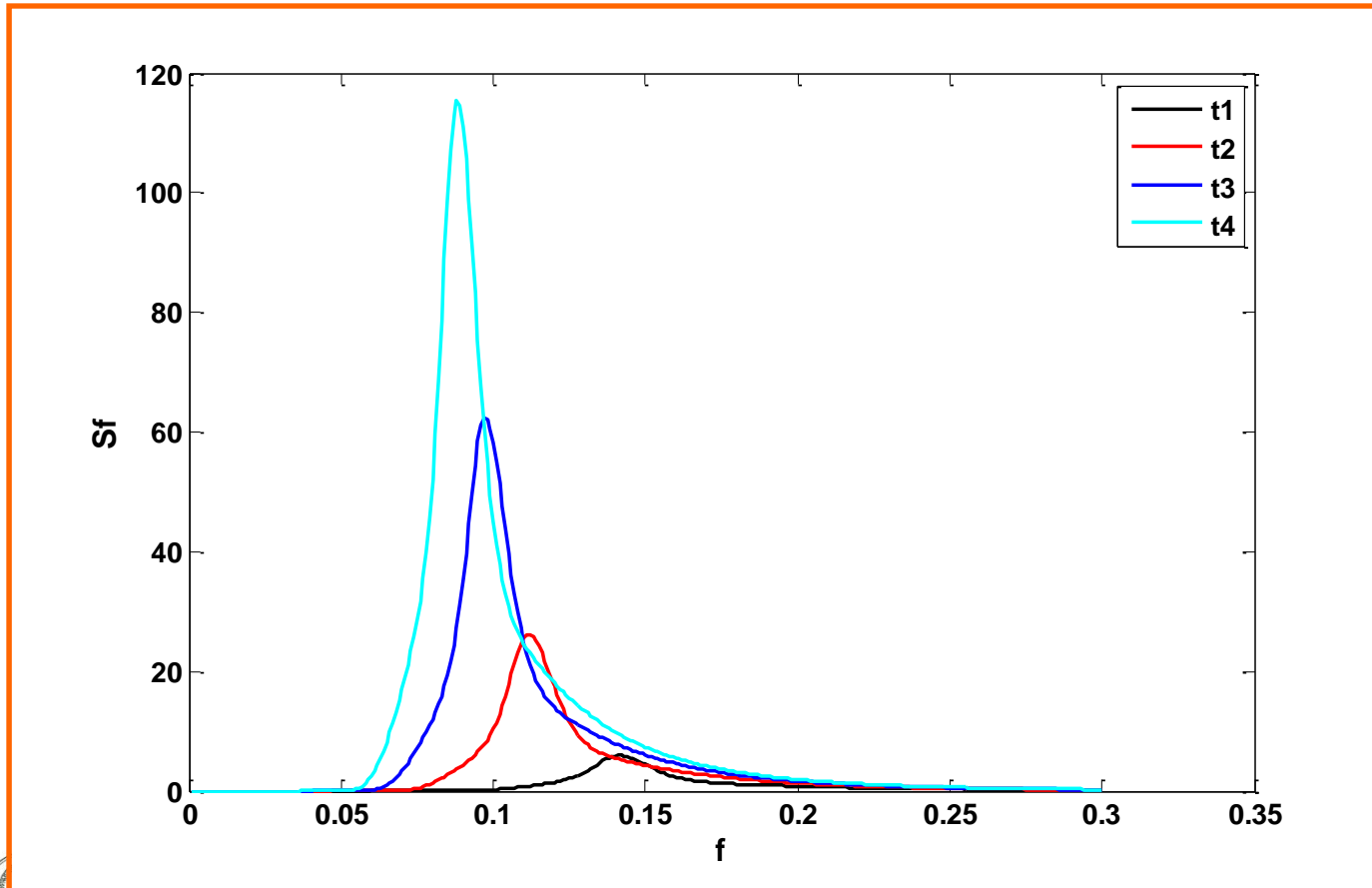


Μορφολογία ενεργειακών φασμάτων JONSWAP και P-M



ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ

Η εξέλιξη ενός ενεργειακού φάσματος με την συνεχιζόμενη πνοή ανέμου μορφολογικά περιγράφεται στο σχήμα όπου φαίνεται η μεταφορά ενέργειας από τις ψηλότερες συχνότητες στις χαμηλότερες με τον χρόνο (αύξηση του ύψους κύματος και της περιόδου)



$$t_1 < t_2 < t_3 < t_4$$

ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ (wave forecasting)



- εμπειρικά μοντέλα
- δυναμικά-υπολογιστικά μοντέλα

ΕΜΠΕΙΡΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ

- SMB (Svedrup-Munk-Bretschneider)
- JONSWAP-PM (ενεργειακά φάσματα)



ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ (wave forecasting)



- εμπειρικά μοντέλα
- δυναμικά-υπολογιστικά μοντέλα

ΕΜΠΕΙΡΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ

- SMB (Svedrup-Munk-Bretschneider)
- JONSWAP-PM (ενεργειακά φάσματα)





ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ

1. Με τη χρήση ενεργειακών φασμάτων (1/3)

$$\text{ΕΛΕΓΧΟΣ: } \frac{gF}{U_A^2} \geq 22.8 \cdot 10^3$$

Α. Ισχύει η ανισότητα → οι κυματισμοί έχουν πλήρη ανάπτυξη
Άρα ισχύει το ενεργειακό φάσμα PM (Pierson - Moskowitz)

$$(5.32) : g \frac{Hs}{U_A^2} = 0.243 \quad \text{και} \quad (5.33) : g \frac{T_p}{U_A} = 8.13$$

$$U_A = 0.71 U_{10}^{1.23} \quad (m / sec) \quad \text{και} \quad T_p = \frac{2\pi}{\omega_p} = \frac{1}{f_p} \cong 0,8 T_{\text{μέση}}$$



ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ

1. Με τη χρήση ενεργειακών φασμάτων (2/3)

B. Δεν ισχύει η ανισότητα $\frac{gF}{U_A^2} \geq 22.8 \cdot 10^3$

ΤΟΤΕ γίνεται εφαρμογή του ενεργειακού φάσματος JONSWAP

$$(5.29): g \frac{H_s}{U_A^2} = 0.0016 \left(\frac{gx}{U_A^2} \right)^{0.5} \quad \text{και} \quad (5.30): g \frac{T_p}{U_A} = 0.286 \left(\frac{gx}{U_A^2} \right)^{0.33}$$

$$\text{ΕΛΕΓΧΟΣ: } \frac{gt_D}{U_A} > 68.8 \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{0.66} \quad (5.31)$$

ΝΑΙ → ανάπτυξη κυματισμών σε συνθήκες περιορισμένου μήκους

Επίλυση των εξισώσεων (5.29) και (5.30) για τον υπολογισμό των

H_s και T_p με $x=F$



ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ

1. Με τη χρήση ενεργειακών φασμάτων (3/3)

Δεν ισχύει η (5.31), ότι: $\frac{gt_D}{U_A} > 68.8 \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{0.66}$

ΤΟΤΕ: ανάπτυξη κυματισμών σε συνθήκες περιορισμένης διάρκειας
Οπότε η (5.31) ως ισότητα επιλύεται για τον υπολογισμό του x , δηλαδή:

$$\frac{gt_D}{U_A} = 68.8 \left(\frac{gx}{U_A^2} \right)^{0.66}$$

Που αντικαθίσταται στις (5.29) και (5.30) για τον υπολογισμό των H_s και T_p

$$g \frac{H_s}{U_A^2} = 0.0016 \left(\frac{gx}{U_A^2} \right)^{0.5} \quad \text{και} \quad g \frac{T_p}{U_A} = 0.286 \left(\frac{gx}{U_A^2} \right)^{0.33}$$



ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ

2. Με τη μέθοδο SMB

$$(5.34): g \frac{H_s}{U^2} = 0.283 \tanh (0.0125 x^{0.42})$$

$$(5.35): g \frac{T_s}{U} = 7.540 \tanh (0.077 x^{0.25})$$

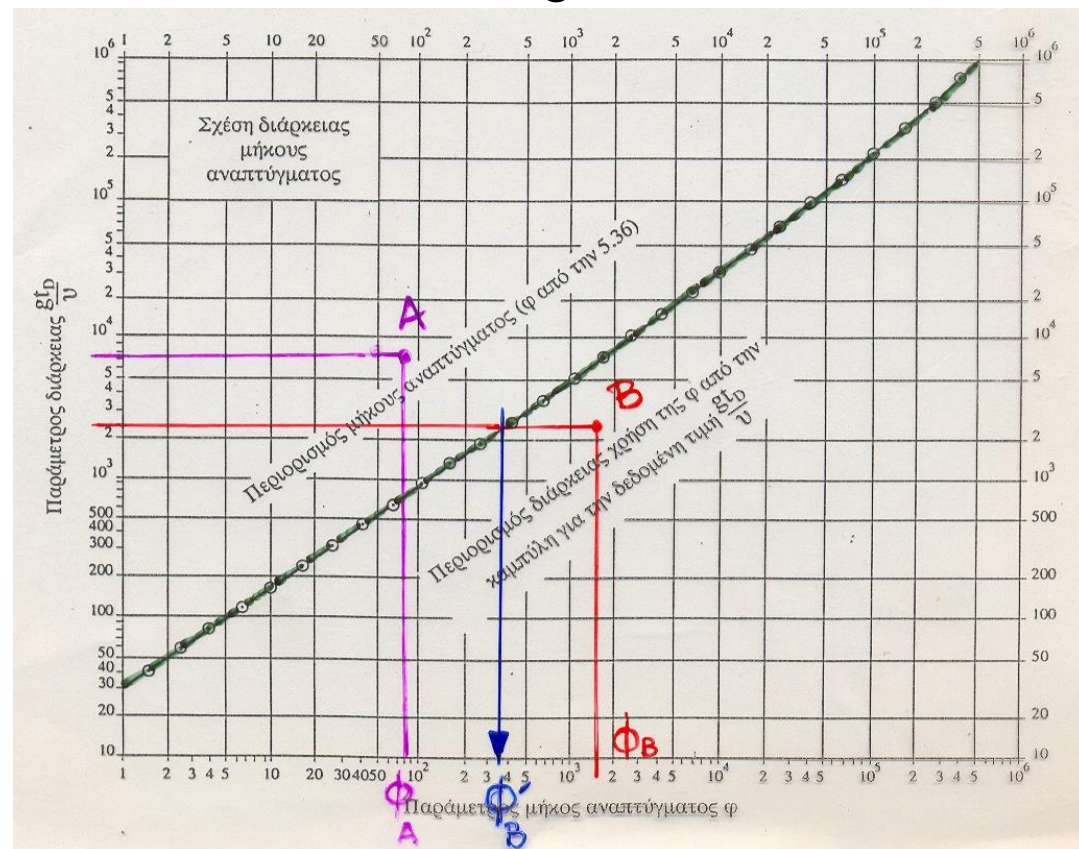
$$(5.36): \Phi = \frac{gF}{U^2}$$

1^η περίπτωση, το σημείο M στην περιοχή A, πάνω από τη γραμμή, τότε οι εξισώσεις (5.34) και (5.35) επιλύονται για $x = \Phi$

2^η περίπτωση, το σημείο M στην περιοχή B, κάτω από τη γραμμή, τότε βρίσκεται, γραφικά, η Φ' (από την τομή της κάθετης στη θέση gt_D/U με την καμπύλη του διαγράμματος) και οι εξισώσεις (5.34) και (5.35) επιλύονται για $x = \Phi'$

Εύρεση στο γράφημα του σημείου

$$M = (\Phi, \frac{gt_D}{U})$$



Δυναμικά (υπολογιστικά) μοντέλα πρόγνωσης κυματισμών

Διατήρηση της κατευθυντικής φασματικής πυκνότητας ενέργειας

$$\frac{\partial F}{\partial t} + C_g \cos \vartheta \frac{\partial F}{\partial x} + C_g \cos \vartheta \frac{\partial F}{\partial y} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds}$$

$F(x, y, f, \vartheta, t)$ η φασματική πυκνότητα ενέργειας

S_{in} όρος ανάπτυξης κυματισμών

S_{nl} όρος ανακατανομής ενέργειας

S_{ds} όρος απωλειών ενέργειας (θραύση)

Το κυματικό μοντέλο ΠΟΣΕΙΔΩΝ



ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ

Με τη χρήση ενεργειακών φασμάτων

Άσκηση 1:

Ανάπτυγμα $F=10\ 000\ m$

Ταχύτητα Ανέμου $U_A=35\ m/s$

Διάρκεια πνοής ανέμου $t_D=3\ hr$

ΕΛΕΓΧΟΣ εαν: $\frac{gF}{U_A^2} \geq 22.8 \cdot 10^3$

$$\frac{gF}{U_A^2} = \frac{9.81 \cdot 10000}{35^2} \approx 80 < 22.8 \cdot 10^3$$

Δεν ισχύει η ανισότητα $\frac{gF}{U_A^2} \geq 22.8 \cdot 10^3$

Συνεπώς οι κυματισμοί ΔΕΝ έχουν πλήρη ανάπτυξη



Εφαρμογή του ενεργειακού φάσματος JONSWAP

$$\text{ΕΛΕΓΧΟΣ } \varepsilon\alpha\nu: \frac{gt_D}{U_A} > 68.8 \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{0.66} \quad (5.31)$$

$$\frac{gt_D}{U_A} = \frac{9.81 \cdot 10800}{35} = 3027 \quad (3 \text{ hr} = 10800 \text{ sec})$$

$$68.8 \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{0.66} = 68.8 \left(\frac{9.81 \cdot 10000}{U_A^2} \right)^{0.66} = 1278$$

$$3027 > 1278$$

**Ισχύει η ανισότητα (5.31) →
ανάπτυξη κυματισμών σε συνθήκες περιορισμένου μήκους
Θέτουμε $x=F=10000 \text{ m}$**

$$(5.29): g \frac{H_s}{U_A^2} = 0.0016 \left(\frac{gx}{U_A^2} \right)^{0.5} \quad \text{και} \quad (5.30): g \frac{T_p}{U_A} = 0.286 \left(\frac{gx}{U_A^2} \right)^{0.33}$$



$$g \frac{H_s}{U_A^2} = 0.0016 \left(\frac{gx}{U_A^2} \right)^{0.5} \Rightarrow 9.81 \frac{H_s}{35^2} = 0.0016 \left(\frac{9.81 \cdot 10000}{35^2} \right)^{0.5}$$

$$\Rightarrow H_s = 1.79 \text{ m}$$

$$g \frac{T_p}{U_A} = 0.286 \left(\frac{gx}{U_A^2} \right)^{0.33} \Rightarrow 9.81 \frac{T_p}{35} = 0.286 \left(\frac{9.81 \cdot 10000}{35^2} \right)^{0.33}$$

$$\Rightarrow T_p = 4.4 \text{ sec}$$



ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ

Με τη χρήση ενεργειακών φασμάτων

Άσκηση 2:

Ανάπτυγμα $F=100\ 000\ m$

Ταχύτητα Ανέμου $U_A=35\ m/s$

Διάρκεια πνοής ανέμου $t_D=3\ hr$

$$\text{ΕΛΕΓΧΟΣ} \quad \text{εαν: } \frac{gF}{U_A^2} \geq 22.8 \cdot 10^3$$

$$\frac{gF}{U_A^2} = \frac{9.81 \cdot 100000}{35^2} \approx 800 < 22.8 \cdot 10^3$$

$$\text{Δεν ισχύει η ανισότητα } \frac{gF}{U_A^2} \geq 22.8 \cdot 10^3$$

Συνεπώς οι κυματισμοί ΔΕΝ έχουν πλήρη ανάπτυξη



Εφαρμογή του ενεργειακού φάσματος JONSWAP

$$\text{ΕΛΕΓΧΟΣ εαν: } \frac{gt_D}{U_A} > 68.8 \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{0.66} \quad (5.31)$$

$$\frac{gt_D}{U_A} = \frac{9.81 \cdot 10800}{35} = 3027 \quad (3 \text{ hr} = 10800 \text{ sec})$$

$$68.8 \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{0.66} = 68.8 \left(\frac{9.81 \cdot 100000}{U_A^2} \right)^{0.66} = 5933$$

$$3027 < 5933$$

**ΔΕΝ ισχύει η ανισότητα (5.31) →
ανάπτυξη κυματισμών σε συνθήκες περιορισμού διάρκειας
Επιλύεται η 5.31. σαν ισότητα**

$$\frac{gt_D}{U_A} = 68.8 \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{0.66} \Rightarrow$$

$$F = \left(\frac{gt_D}{68.8 U_A} \right)^{1.5} \frac{U_A^2}{g} = \left(\frac{9.81 \cdot 10800}{68.8 \cdot 35} \right)^{1.5} \frac{35^2}{9.81} = 36443 \text{ m}$$



Θέτουμε $x = F$

$$(5.29): g \frac{H_s}{U_A^2} = 0.0016 \left(\frac{gx}{U_A^2} \right)^{0.5} \quad \text{και} \quad (5.30): g \frac{T_p}{U_A} = 0.286 \left(\frac{gx}{U_A^2} \right)^{0.33}$$

$$g \frac{H_s}{U_A^2} = 0.0016 \left(\frac{gx}{U_A^2} \right)^{0.5} \Rightarrow 9.81 \frac{H_s}{35^2} = 0.0016 \left(\frac{9.81 \cdot 36443}{35^2} \right)^{0.5}$$

$$\Rightarrow H_s = 3.4 \text{ m}$$

$$g \frac{T_p}{U_A} = 0.286 \left(\frac{gx}{U_A^2} \right)^{0.33} \Rightarrow 9.81 \frac{T_p}{35} = 0.286 \left(\frac{9.81 \cdot 36443}{35^2} \right)^{0.33}$$

$$\Rightarrow T_p = 6.8 \text{ sec}$$



ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ & ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΑΚΤΩΝ

- Ακραία φαινόμενα (ταχύτητα πνοής ανέμου, ύψος κύματος)
- Μεταβολή συχνότητας εμφάνισης διάρκειας πνοής-κατεύθυνσης ανέμων
- Ανύψωση στάθμης θάλασσας (φαινόμενο του θερμοκηπίου)
- Μετεωρολογική παλίρροια



ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ & ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΑΚΤΩΝ

- Αύξηση της κυματικής διαταραχής στις λιμενολεκάνες, Αναρρίχηση και υπερπήδηση κυματισμών στους κυματοθραύστες.
 - Αστοχία θαλάσσιων τοίχων
 - Διάβρωση ακτών
- ↓
- Επανασχεδιασμός λιμενικών έργων και έργων προστασίας ακτών

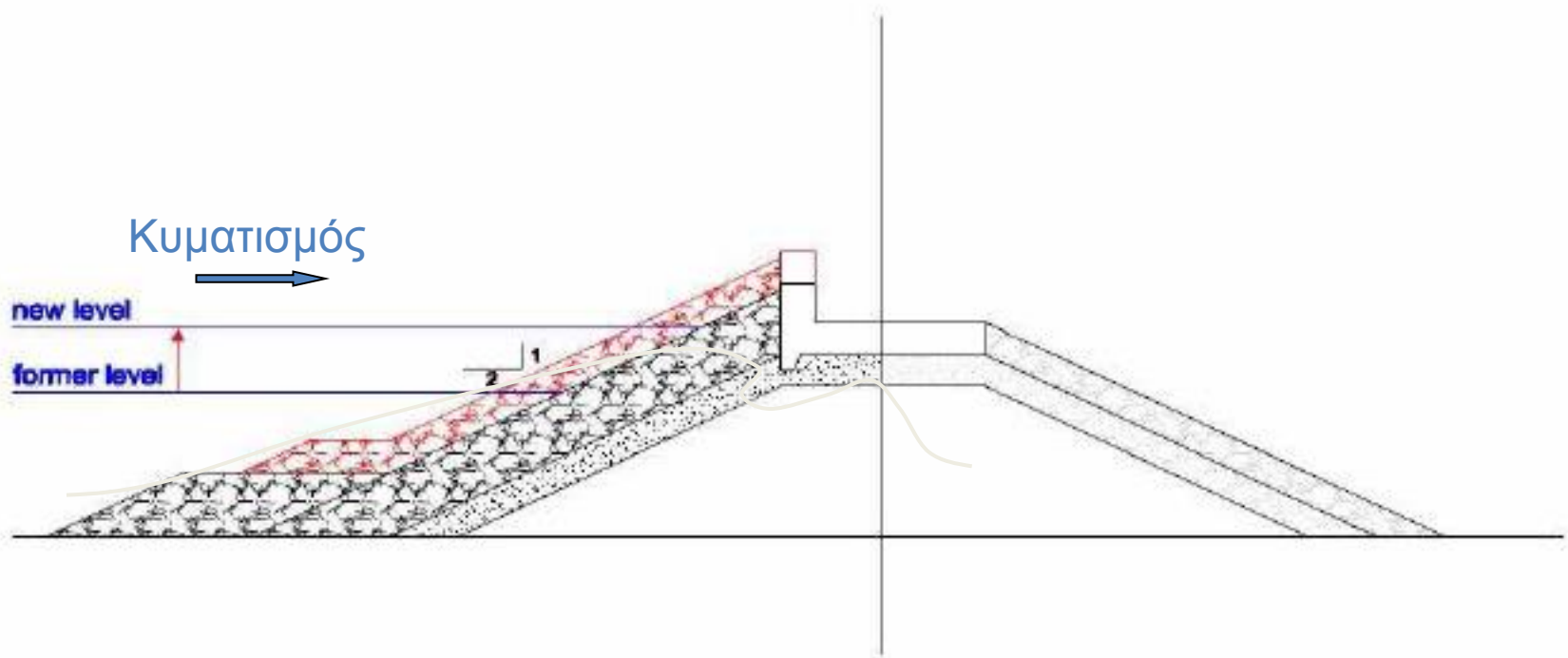


Επανασχεδιασμός λιμενικών έργων

- Αναρρίχηση και υπερπήδηση κυματισμών στους κυματοθραύστες
- Κυματική διαταραχή στο εσωτερικό των λιμένων
- Ανύψωση της Μέσης Στάθμης Θάλασσας



Αναρρίχηση και υπερπήδηση κυματισμών στους κυματοθραύστες



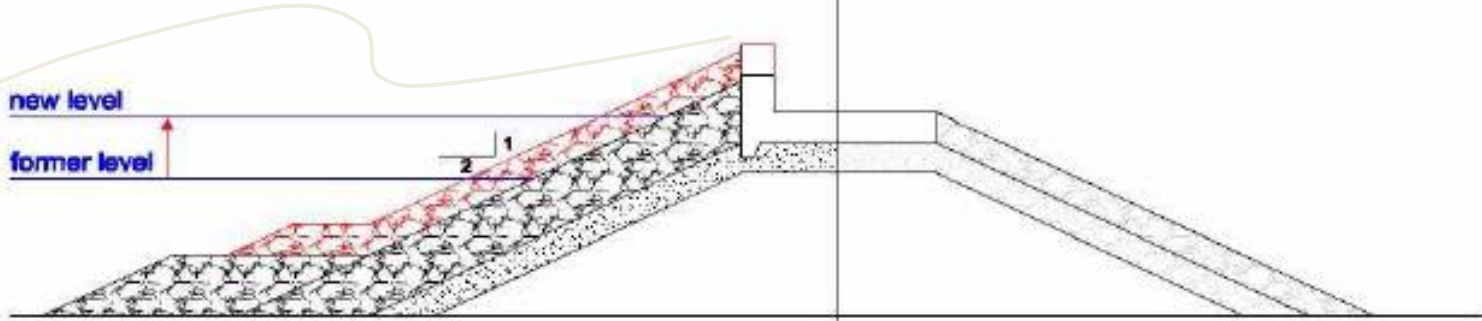
Κυματισμός



Αύξηση ύψους στέψης,

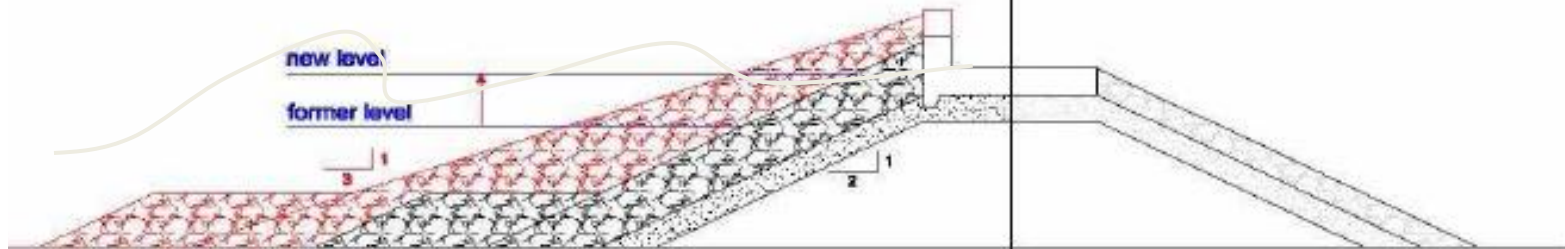
new level

former level



new level

former level

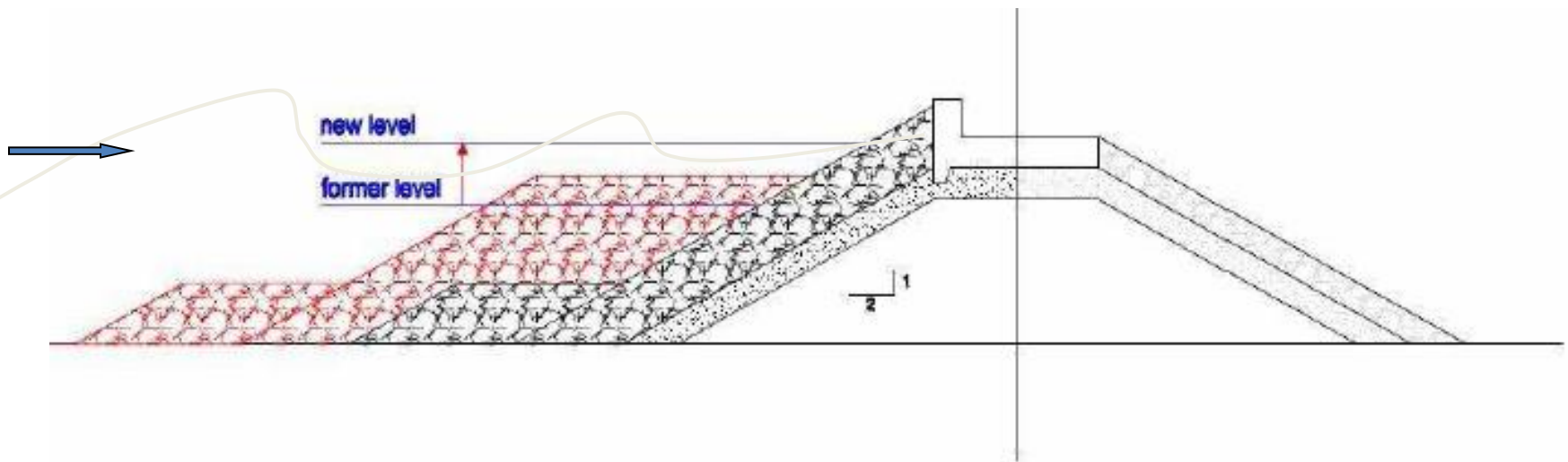
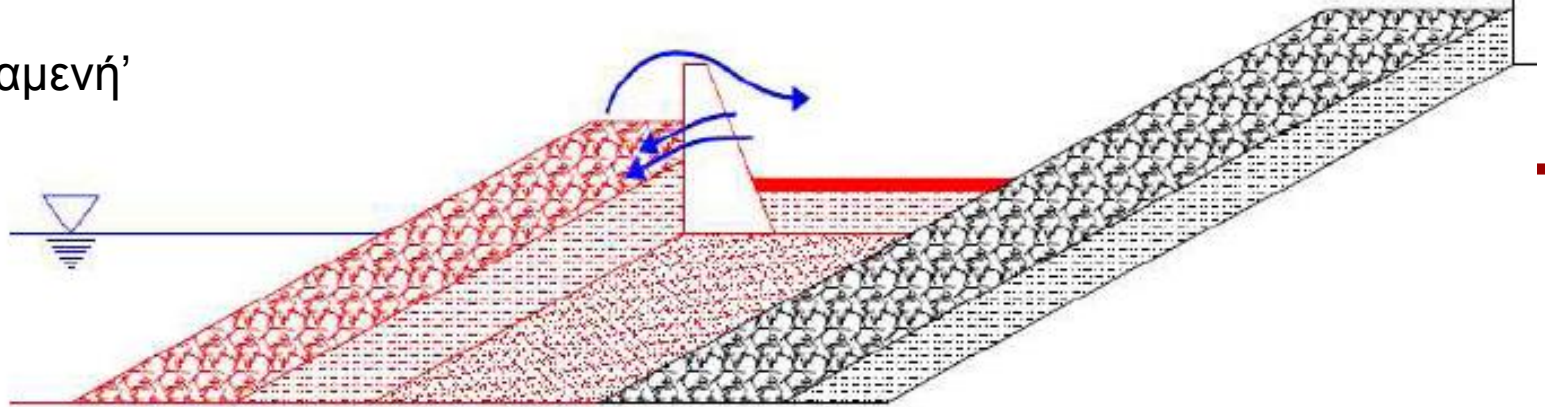


Ηπιότερη κλίση πρανούς- Επέκταση - αναβαθμός

Ακτομηχανική και λιμενικά έργα

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

‘Δεξαμενή’



Επέκταση - αναβαθμός

Αστοχία Θαλάσσιων Τοίχων

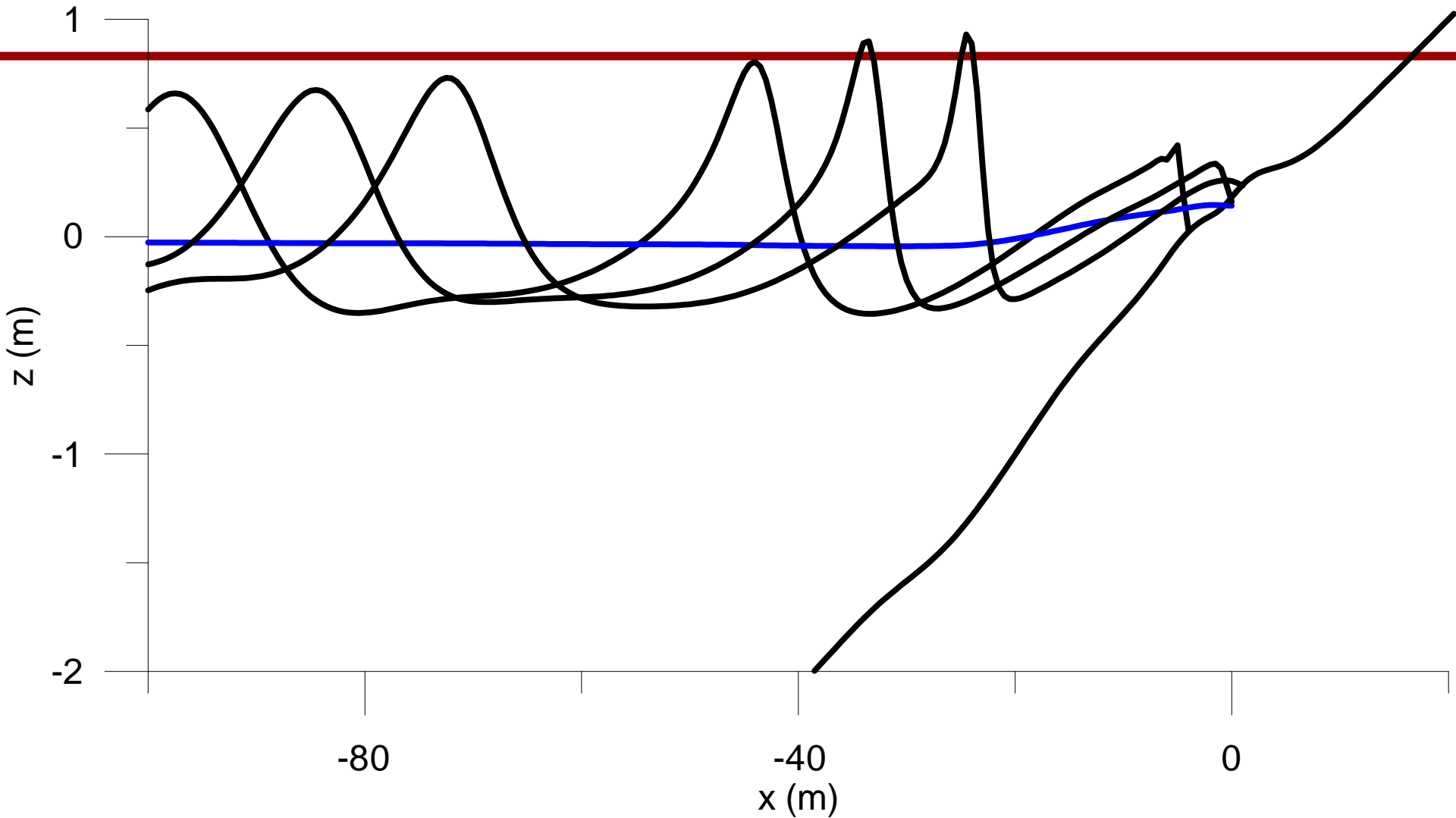
ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΚΤΩΝ





Samos 2009-2010

Αναρρίχση κυματισμών - setup



Αστοχία Θαλάσσιου τοίχου (Εφταλού – Λέσβος)



Αστοχία τοίχου αντιστήριξης



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Καραμπάς Θεοφάνης.
«Ακτομηχανική και λιμενικά έργα. Πρόγνωση κυματισμών, κλιματική
αλλαγή». Έκδοση: 1.0. Θεσσαλονίκη 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή
διεύθυνση: <https://opencourses.auth.gr/courses/OCRS425/>



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά - Παρόμοια Διανομή [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

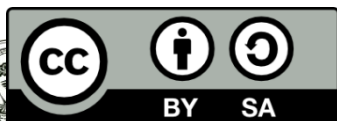
[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>





Τέλος ενότητας

Επεξεργασία: <Μαυρίδου Σοφία>
Θεσσαλονίκη, <Χειμερινό Εξάμηνο 2013-2014>



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ
2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Σημειώματα



Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

