



Ακτομηχανική και λιμενικά έργα

Διάλεξη 16^η. Υδροδυναμικές Φορτίσεις
Παράκτιων Τεχνικών Έργων- Φορτίσεις κατακόρυφων
μετώπων

Εύα Λουκογεωργάκη
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.



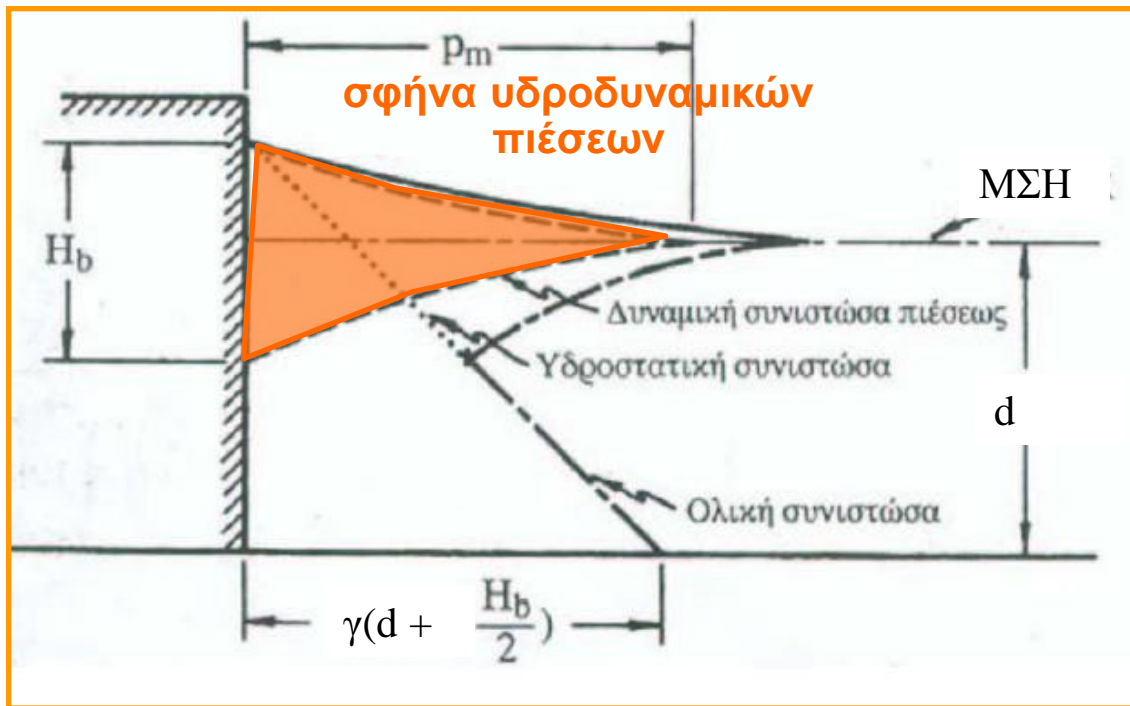
Φορτίσεις Κατακόρυφων Μετώπων (10)

(β) Φορτίσεις στην περίπτωση $d \approx d_b$ (ή $d \approx 1.3H$) (θραυόμενοι κυματισμοί στο μέτωπο)

- Υπολογισμός με εφαρμογή της μεθόδου *Minikin*:

(i) οι υδροστατικές πιέσεις ξεκινούν από ένα ύψος $H_b/2$ επάνω από τη ΜΣΗ

(ii) σφήνα υδροδυναμικών πιέσεων με βάση H_b (ασκούνται σε ζώνη $\pm H_b/2$) και μέγιστη τιμή στη ΜΣΗ ίση με p_m :



$$p_m = \frac{2\pi\rho g \cdot H_b \cdot d(d' + d)}{L \cdot d'}$$

όπου:

d' το βάθος σε απόσταση ενός μήκος κύματος L από το μέτωπο (L μήκος κύματος στο βάθος, $d =$ βάθος στον πόδα του έργου) και

L' το μήκος κύματος στο βάθος d'

- Η συνισταμένη των υδροδυναμικών πιέσεων δρα στη ΜΣΗ και έχει τιμή:

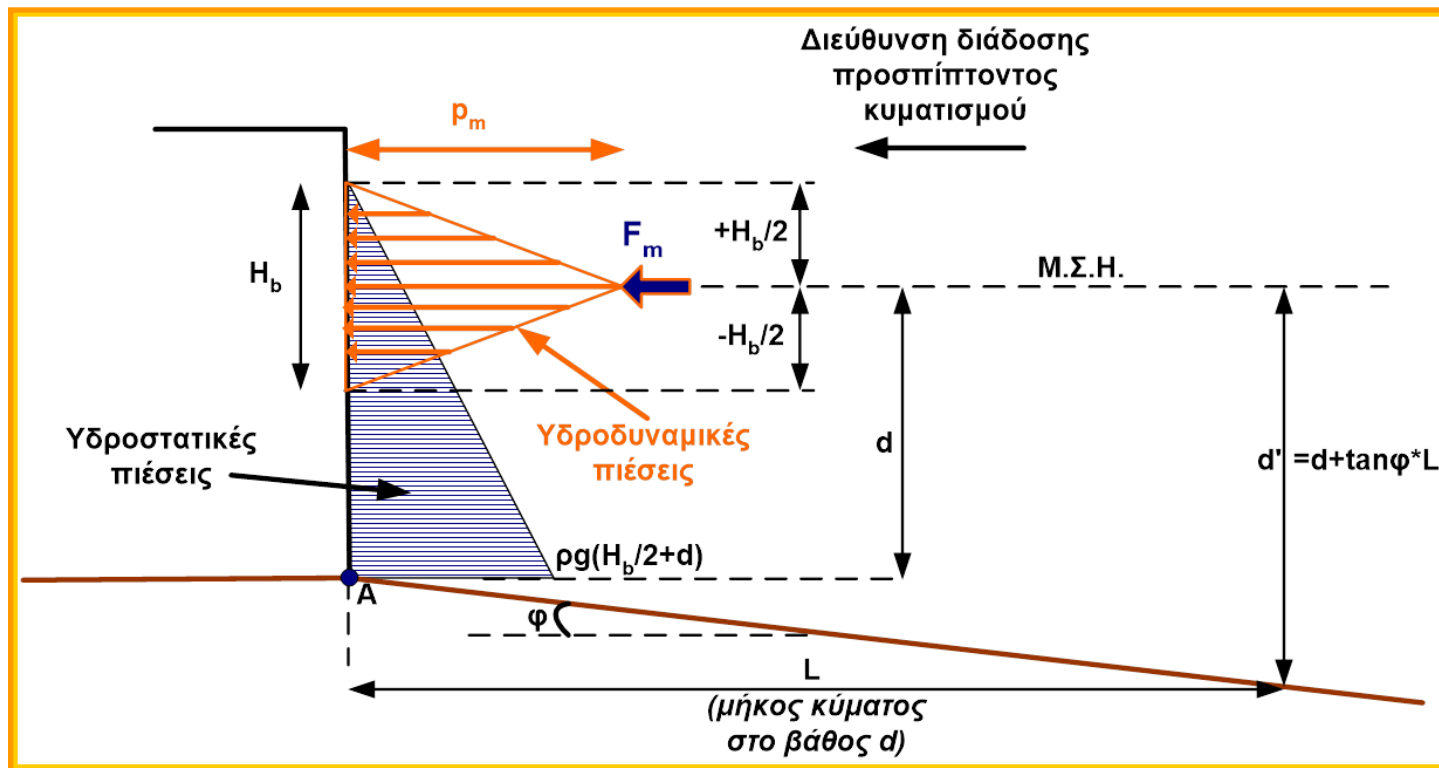
$$F_m = p_m \frac{H_b}{3}$$

Κατανομή υδροστατικών και υδροδυναμικών πιέσεων σε κατακόρυφο μέτωπο για $d \approx d_b$ (Σχήμα 9.18)



Φορτίσεις Κατακόρυφων Μετώπων (11)

(β) Φορτίσεις στην περίπτωση $d \approx d_b$ (ή $d \approx 1.3H$) (θραυόμενοι κυματισμοί στο μέτωπο)
(...συνέχεια)



Κατανομή υδροστατικών και υδροδυναμικών πιέσεων σε κατακόρυφο μέτωπο για $d \approx d_b$
(πτυθμένας με κλίση $\tan\phi$)

Δύναμη λόγω
υδροδυναμικών
πιέσεων (F_m)

$$F_m = p_m \frac{H_b}{3}$$

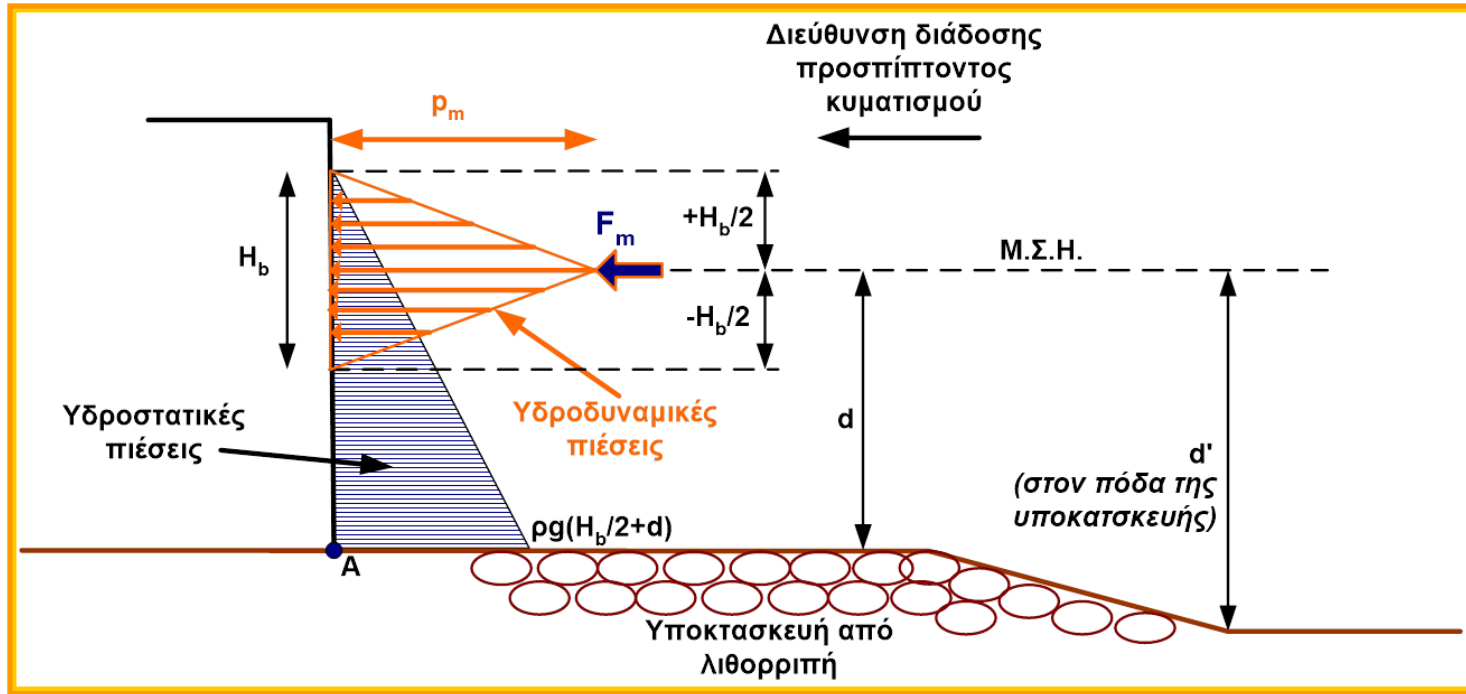
Ροπή δύναμης
 F_m ως προς A

$$M_m = F_m * d$$



Φορτίσεις Κατακόρυφων Μετώπων (12)

(β) Φορτίσεις στην περίπτωση $d \approx d_b$ (ή $d \approx 1.3H$) (θραυόμενοι κυματισμοί στο μέτωπο) (...συνέχεια)



Για την περίπτωση του σχήματος *το d' και το L' ορίζονται στον πόδα της υπο-κατασκευής από λιθορριπή (όχι σε απόσταση L)*

Κατανομή υδροστατικών και υδροδυναμικών πιέσεων σε κατακόρυφο μέτωπο για $d \approx d_b$

Δύναμη λόγω υδροδυναμικών πιέσεων (F_m)

$$F_m = p_m \frac{H_b}{3}$$

Ροπή δύναμης F_m ως προς A

$$M_m = F_m * d$$

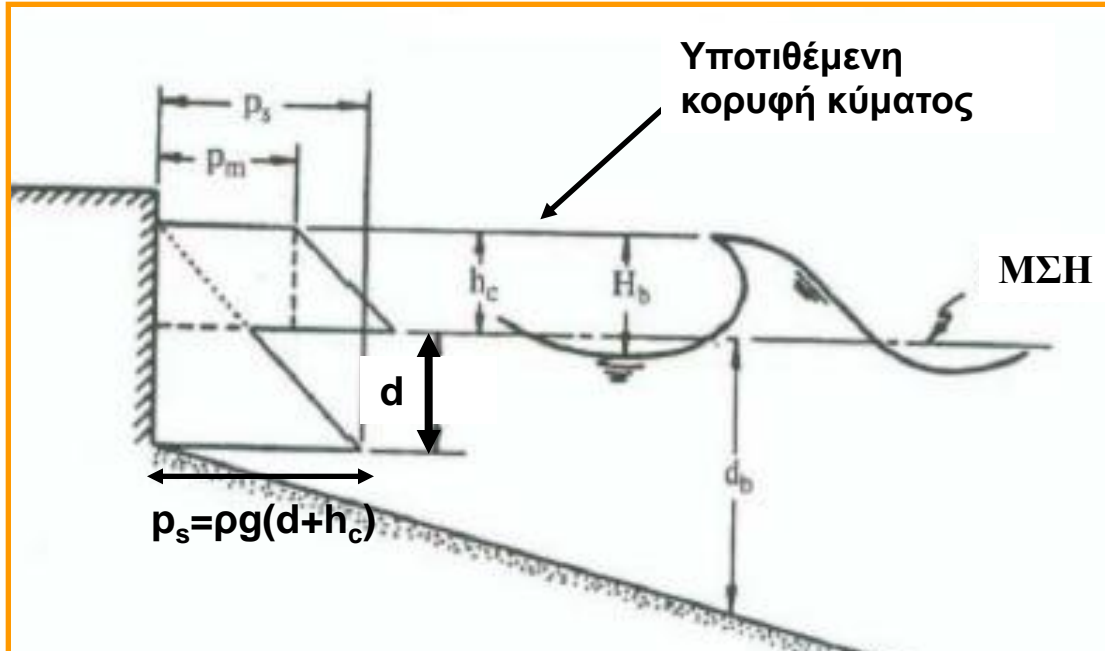


Φορτίσεις Κατακόρυφων Μετώπων (13)

(γ) Φορτίσεις στην περίπτωση $d < d_b$ (δράση κυματισμού στο μέτωπο μετά τη θραύση του)

• Στην περίπτωση αυτή το μέτωπο δέχεται τη δράση του κυματισμού μετά τη θραύση με τη μορφή κινούμενου υδραυλικού άλματος

• 1^η Περίπτωση: Μέτωπο σε επαφή με τη ΜΣΗ (τοίχος προς τα ανοικτά της θεωρητικής ακτογραμμής ηρεμίας): Υπόθεση σταθερότητας ύψους H_b στο διάστημα μεταξύ d_b και του σημείου τομής ΜΣΗ με μέτωπο



Κατανομή υδροστατικών/υδροδυναμικών πιέσεων σε κατ/φο μέτωπο για $d < d_b$ (ΜΣΗ σε επαφή με μέτωπο) (Σχήμα 9.20)

- **Υδροστατική πίεση** ξεκινά από ύψος $h_c = 0.78H_b$ μέχρι $z = -d$
- **Υδροδυναμική πίεση**: ομοιόμορφη κατανομή σε ύψος πάνω από τη ΜΣΗ $h_c = 0.78H_b$ με τιμή p_m :

$$p_m = \frac{\rho}{2} c^2 = \frac{\rho}{2} (\sqrt{gd_b})^2 \Rightarrow p_m = \frac{\rho g d_b}{2}$$

- **Συνισταμένη υδροδυναμικών πιέσεων F_m** δρα σε ύψος $0.5h_c$ από τη ΜΣΗ και έχει τιμή:

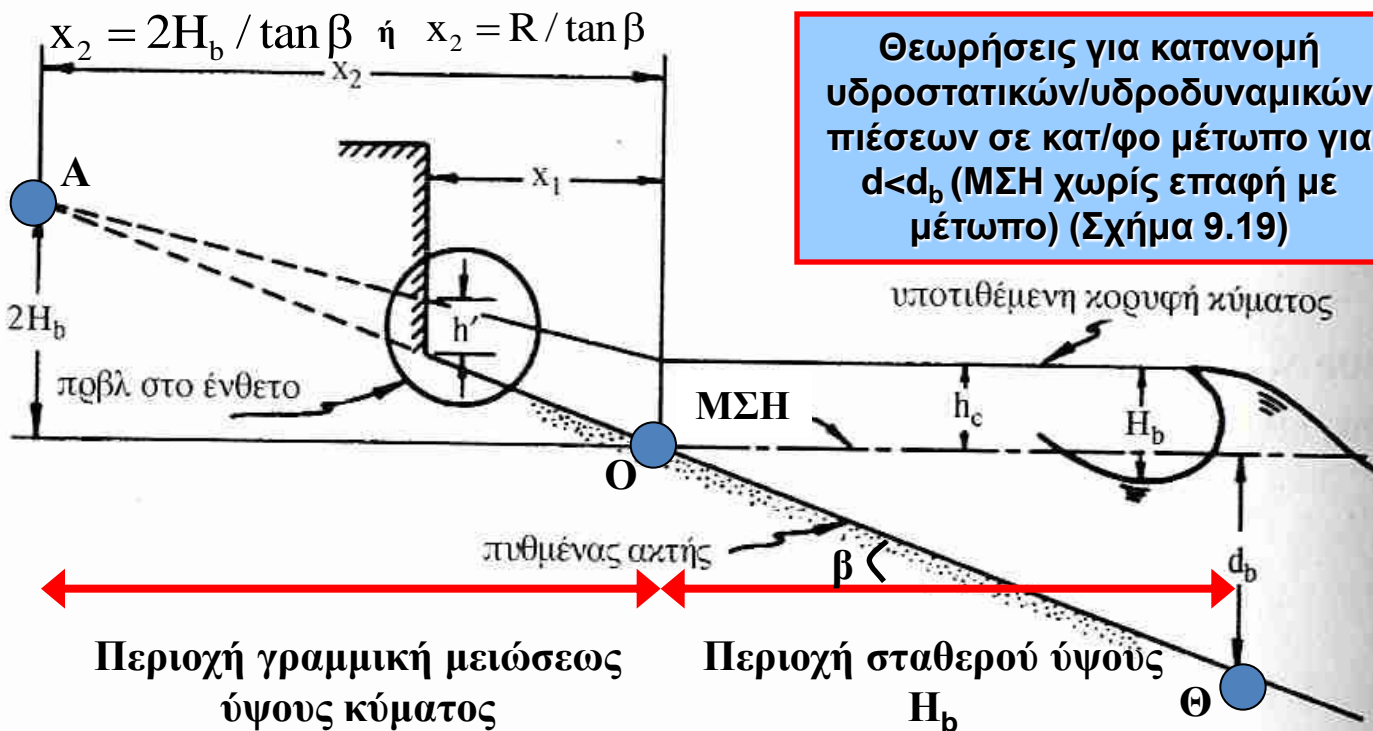
$$F_m = p_m h_c \Rightarrow F_m = \frac{\rho g d_b}{2} \cdot h_c$$



Φορτίσεις Κατακόρυφων Μετώπων (14)

(γ) Φορτίσεις στην περίπτωση $d < d_b$ (δράση κυματισμού στο μέτωπο μετά τη θραύση του)
(συνέχεια...)

2^η Περίπτωση: Μέτωπο χωρίς επαφή με τη ΜΣΗ (ΜΣΗ τέμνει ακτογραμμή, Τοίχος εσωτερικά της ακτογραμμής ηρεμίας): Υπόθεση σταθερότητας ύψους H_b στο διάστημα μεταξύ d_b και του σημείου τομής ΜΣΗ με την ακτογραμμή (π.χ. έστω σημείο O) και γραμμικής μειώσεώς του από το σημείο O έως το υποθετικό σημείο αναρριχήσεως του κυματισμού (π.χ. έστω σημείο A)



Θεωρήσεις για κατανομή υδροστατικών/υδροδυναμικών πιέσεων σε κατ/φο μέτωπο για $d < d_b$ (ΜΣΗ χωρίς επαφή με μέτωπο) (Σχήμα 9.19)

- Μεταξύ Θ και O ταχύτητα ροής:

$$v = c = \sqrt{gd_b}$$

- Μεταξύ O και A ταχύτητα ροής:

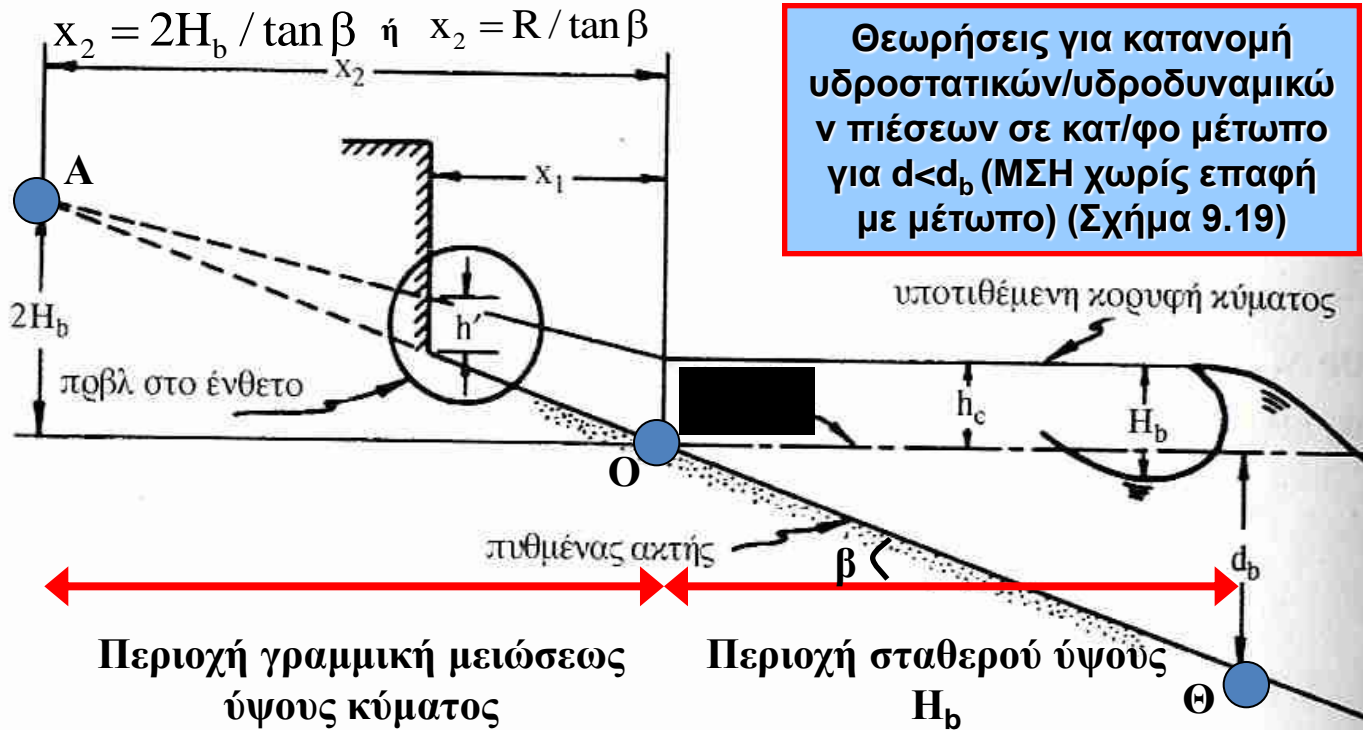
$$v' = \sqrt{gd_b} \left(1 - \frac{x_1}{x_2} \right)$$

- Μεταξύ O και A ύψος πάνω από ΜΣΗ:

$$h' = h_c \left(1 - \frac{x_1}{x_2} \right)$$

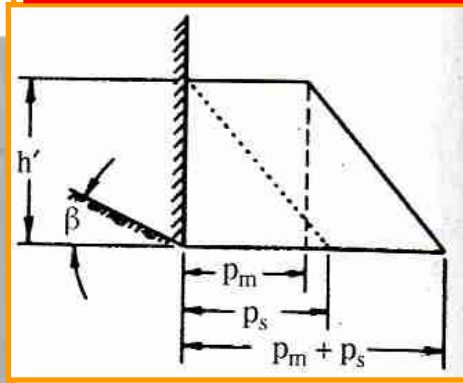
Φορτίσεις Κατακόρυφων Μετώπων (15)

(γ) Φορτίσεις στην περίπτωση $d < d_b$ (δράση κυματισμού στο μέτωπο μετά τη θραύση του) (συνέχεια...)



Θεωρήσεις για κατανομή υδροστατικών/υδροδυναμικών πιέσεων σε κατ/φο μέτωπο για $d < d_b$ (ΜΣΗ χωρίς επαφή με μέτωπο) (Σχήμα 9.19)

Ένθετο Σχήματος 9.19



- Υδροστατική πίεση κατανέμεται στο ύψος h'
- Συνισταμένη υδροστατικών πιέσεων:

$$F_s = 0.5p_s h' = 0.5(\rho g h') h' \Rightarrow$$

$$F_s = \frac{\rho g h_c^2}{2} \left(1 - \frac{x_1}{x_2}\right)^2$$

- Υδροδυναμική πίεση: ομοιόμορφη κατανομή σε ύψος h' πάνω από το h_c με τιμή p_m :

$$p_m = \frac{\rho g d_b}{2} \left(1 - \frac{x_1}{x_2}\right)^2$$

- Συνισταμένη υδροδυναμικών πιέσεων F_m δρα σε ύψος $0,5h'$ από h_c με τιμή:

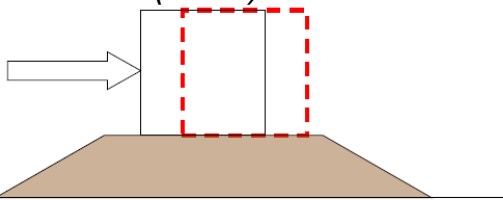
$$F_m = p_m h' \Rightarrow F_m = \frac{\rho g d_b}{2} \cdot h_c \left(1 - \frac{x_1}{x_2}\right)^3$$



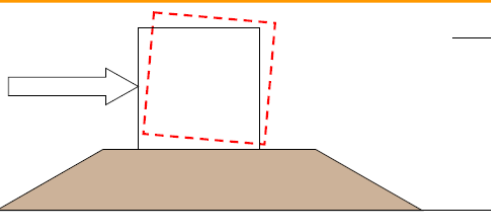
Φορτίσεις Κατακόρυφων Μετώπων (16)

Τύποι Ελέγχων σε Έργα με Κατακόρυφο Μέτωπο

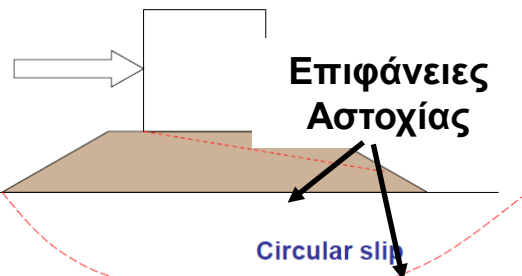
Abdelhamid (2013)



Έλεγχος σε ολίσθηση



Έλεγχος σε ανατροπή



Έλεγχος τάσεων έδρασης

- Έλεγχος συντελεστή ασφαλείας v_o^*

$$v_o = \frac{\mu \Sigma V}{\Sigma H} > 1.2$$

όπου: μ συντελεστής τριβής (= 0.5 και 0.7-1 για επιφάνεια τριβής σκυρόδεμα-σκυρόδεμα)

ΣV και ΣH άθροισμα κατακόρυφων και οριζόντιων δυνάμεων αντίστοιχα

- Έλεγχος συντελεστή ασφαλείας v_a^*

$$v_a = \frac{\Sigma M_{\text{ευστ}}}{\Sigma M_{\text{ανατρ}}} > 1.5$$

όπου: $\Sigma M_{\text{ευστ}}$ και $\Sigma M_{\text{ανατρ}}$ άθροισμα ροπών ευστάθειας και ανατροπής αντίστοιχα

- Έλεγχος ώστε οι αναπτυσσόμενες τάσεις να μην υπερβαίνουν τις επιτρεπόμενες τάσεις εδάφους στη στάθμη θεμελίωσης

*Τιμές συντελεστών v_o και v_a απουσία σεισμού

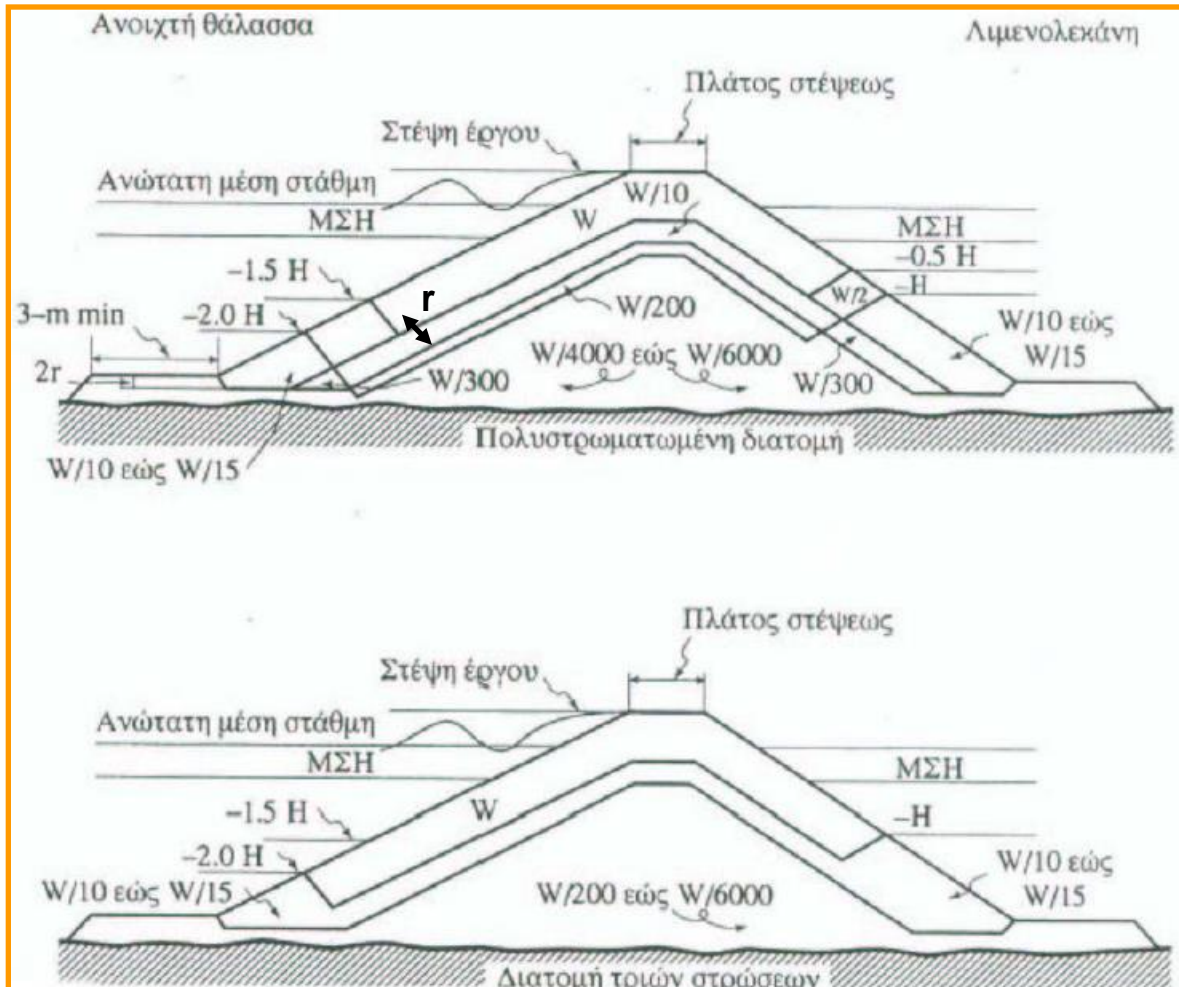


Ευστάθεια Πρανών (1)

- **Πρανή από λιθορριπή** (θωρακισμένα με ογκόλιθους θωράκισης) **απατώνται σε πολλά παράκτια έργα** ⇒ κυματοθραύστες και μώλοι (τραπεζοειδούς διατομής ή μικτής κατά πλάτος ή ύψος), βραχίονες προστασίας ακτών, επενδύσεις πρανών ακτών.
- Έργα που χαρακτηρίζονται από **ευκολία κατασκευής**.
- **Απορροφητική υδραυλική λειτουργία: Απόσβεση** προσπίπτουσας κυματικής ενέργειας μέσω **θραύσης** ή/και **τυρβωδών ροών** στο εσωτερικό της διατομής τους.
- Αποτελούνται από **στρώσεις διαβαθμισμένων λίθων** (λιθορριπή/αμμοχαλικά/ογκόλιθοι διαβαθμισμένης κοκκομετρίας): **εσωτερικές στρώσεις** (πυρήνας και υποστρώσεις) και την **εξωτερική στρώση** (εξωτερική θωράκιση, ογκόλιθοι θωράκισης).
- **Διαβάθμιση λίθων στρώσεων:**
(α) **κλιμακωτή αύξηση βάρους** (και κατ' επέκταση κοκκομετρικής διαβάθμισης) κατά τη **μετάβαση** από τον **πυρήνα** προς τις **υποστρώσεις** και τέλος προς την **εξωτερική θωράκιση**.
(β) **βάρη πυρήνα** και **διαφόρων υποστρώσεων** «κλιμακωτά» **υποπολλαπλάσια** του **βάρους** των **ογκολίθων θωράκισης**.



Ευστάθεια Πρανήν (2)



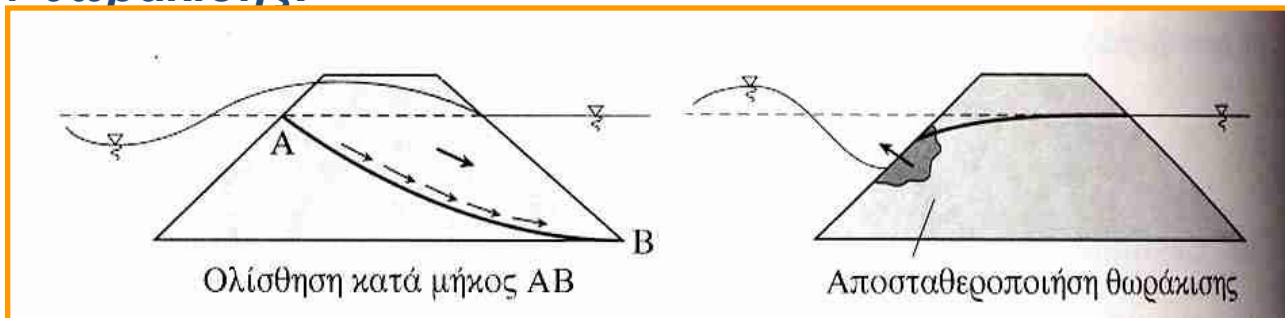
Τυπικές διατομές έργου με κεκλιμένα πρανή (Σχήμα 9.22)

- **Πυρήνας: Λεπτόκοκκο υλικό** για εξασφάλιση «αδιαφάνειας» έναντι των προσπιπτόντων κυματισμών.
- **Αποφυγή κινδύνου εκπλήσεως υλικού** μίας στρώσεως: **σωστή κοκκομετρική διαβάθμιση** (αρχές κατασκευής φίλτρων).
- **Σημαντικό κατασκευαστικό στοιχείο:** Εξασφάλιση του πόδα του έργου προς την ανοικτή κυρίως θάλασσα από **τοπικές υποσκαφές**.



Ευστάθεια Πραγών (3)

- **Εφαρμογή:** σε κακής ποιότητας εδάφη \Rightarrow μεγάλη επιφάνεια έδρασης και άρα μείωση τάσεων εδάφους στη στάθμη θεμελίωσης
- **Συνήθεις κίνδυνοι ευστάθειας/μορφές αστοχίας:**
 - (α) **Φάση Κορυφής:** Οι διηθούμενες μάζες νερού στο εσωτερικό του έργου μειώνουν τις ενεργές τάσεις, αυξάνοντας την πίεση του νερού των πόρων \Rightarrow κίνδυνος βαθιάς καταλισθήσεως.
 - (β) **Φάση Κοιλιάς:** Ο ξαφνικός υποβιβασμός της στάθμης της θάλασσας προκαλεί αύξηση των εσωτερικών βαθμίδων πίεσης, εκροή ανάμεσα στα κενά των λίθων \Rightarrow κίνδυνος λόγω υποπίεσεων αποσταθεροποίησης των ογκολίθων θωράκισης.



Συνήθεις μορφές αστοχίας (Σχήμα 9.21)

Ευστάθεια Πρανών (4)

- Η διαστασιολόγησή τους σε **ευστάθεια** γίνεται **συνήθως** για **ύψος κύματος H_{10}** (μέση τιμή του ανώτερου 10% των υψών κύματος): $H_{10}=1.28H_s$
- **Απαραίτητο βάρος ογκόλιθων θωράκισης** (εξωτερικής στρώσης), **W** υπολογίζεται από τον τύπο του Hudson:

$$W = \frac{\gamma_s H^3}{k_D \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right)^3 \cot \theta}$$

W ανάλογο με το H^3

όπου:

H το ύψος του προσπίπτοντος κυματισμού στο βάθος κατασκευής του έργου

γ_s και **γ_w** το ειδικό βάρος του εφαρμοζόμενου υλικού και του θαλασσινού νερού αντίστοιχα

θ η γωνία του πρανούς ως προς την οριζόντια και

k_D συντελεστής ευστάθειας υπολογισμένος πειραματικά



Ευστάθεια Πραγών (5)

• k_D εξαρτάται από:

$$W = \frac{\gamma_s H^3}{k_D \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right)^3 \cot \theta}$$

Τύπος Hudson

(α) εφαρμοζόμενο τύπο ογκολίθου (οι τεχνητοί ειδικής μορφής οδηγούν σε $\uparrow k_D$)

(β) ύπαρξη θραυόμενου ή μη κυματισμού στην περιοχή τοποθέτησης του έργου (θραύση $\Rightarrow \downarrow k_D \Rightarrow$ απαίτηση για μεγαλύτερο βάρος W)

(γ) θέση υπολογισμού (ακρομώλιο $\downarrow k_D \Rightarrow$ απαίτηση για μεγαλύτερο W) και

(δ) ποσοστό ζημιών (αύξηση ποσοστού ζημιών $\Rightarrow \uparrow k_D$)



Τύπο τεχνητών ογκολίθων (Σχήμα 9.23)

Τιμές k_D για πλήρη εξασφάλιση (0-5% αστοχία)

Τύπος ογκολίθου	Πάχος στρώσεως	Κορμός έργου		Ακρομώλιο		cotθ
		Θραυόμενο	Μη θραυόμενο	Θραυόμενο	Μη θραυόμενο	
1. Φυσικοί λίθοι Λεία επιφάνεια Αδρή γωνιώδης επιφάνεια Παραλληλεπίδα	>2 2 2	1.5 2.0 7.0 - 20.0	3.0 4.0 8.5 - 2.4	1.2 1.9 -	2.0 3.2 -	1.5 1.5 5
2. Τετράποδα	2	7.0	8.0	5.0	6.0	1.5
3. Τρίακθο	2	9.0	10.0	8.3	9.0	1.5
4. Δόλοι	2	15.8	31.8	8.0	16.0	2
5. Τροποποιημένοι κύβοι	2	6.5	7.5	5.0	7.0	5
6. Εξάποδα	2	8.0	9.5	5.0	7.0	5
7. Τουσκάνες	2	11.0	22.0	-	-	5

Τιμές k_D για πλήρη εξασφάλιση (ποσοστό ζημιών 0-5%)



Ευστάθεια Πρανών (6)

	D						
	0 - 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	20 - 30	30 - 40	40 - 50
Λιθορριπή λεία	1.0	1.08	1.14	1.20	1.29	1.41	1.54
Λιθορριπή γωνιώδης	1.0	1.08	1.19	1.27	1.37	1.47	1.56
Τετράποδα	1.0	1.09	1.17	1.24	1.32	1.41	1.50
Τρίραβδα	1.0	1.11	1.25	1.36	1.50	1.59	1.64
Δόλοι	1.0	1.10	1.14	1.17	1.20	1.24	1.27

$H_{D\%}/H_{0-5\%}$ για ποσοστό ζημιών D%

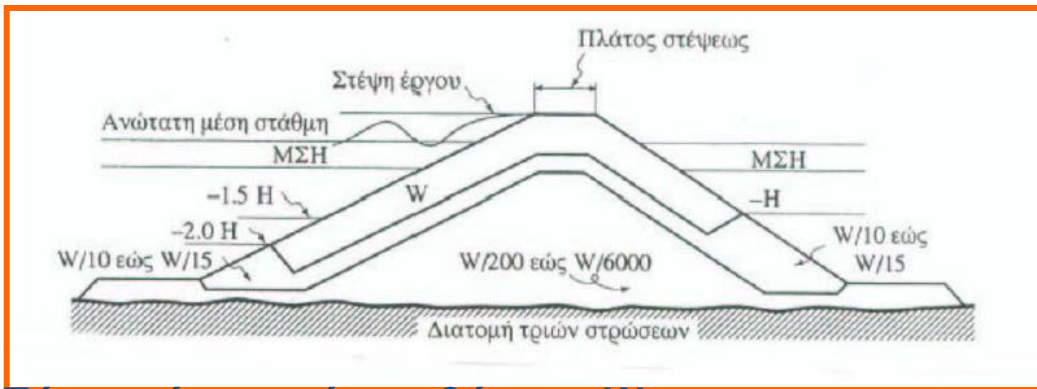
- Ο πίνακας περιλαμβάνει τους **λόγους $H_{D\%}/H_{0-5\%}$** όπου $H_{0-5\%}$ το ύψος κύματος για ποσοστό ζημιών 0-5% και $H_{D\%}$ το ύψος κύματος για ποσοστό ζημιών D%
- Προσεγγιστικός τρόπος υπολογισμού W για ποσοστό ζημιών **διαφορετικό από 0-5%** με χρήση k_D για ποσοστό ζημιών 0-5% και αντικατάσταση του H στον τύπο του Hudson θεωρώντας **μικρότερο ύψος κύματος** (με βάση πίνακα τελικά εφαρμοζόμενο ύψος κύματος = $H_{0-5\%}/\alpha$ όπου $\alpha = H_{D\%}/H_{0-5\%}$)



Ευστάθεια Πρανών (7)

- **Γενικές κατασκευαστικές αρχές**

1. **Πάχος θωράκισης:** 2 στρώσεις (δύο επάλληλες «σειρές» λίθων) τουλάχιστον
2. **1^η Υπόστρωση** με λίθους **βάρους** $W/15 \div W/10$
3. **2^η Υπόστρωση** (εάν υπάρχει) με λίθους **βάρους** $W/200$
3. **Πυρήνας** με λιθορριπή **βάρους** $W/4000 \div W/6000$ (ύπαρξη δύο υποστρώσεων) ή $W/200 \div W/6000$ (ύπαρξη μίας υποστρώσεως)
4. **Εξασφάλιση καλής λειτουργίας υδραυλικού φίλτρου** εφόσον μεταξύ δύο διαδοχικών στρώσεων ικανοποιείται εάν D_{15} άνω στρώσεως $< 5D_{85}$ κάτω στρώσεως



Κυματοθραύστης με θωρακισμένο πρανές τριών στρώσεων (θωράκιση, υπόστρωση, πυρήνας)

ΟΠΟΥ:

- **Πάχος μίας στρώσεως βάρους $W_{στρ}$:**

$$B = n \cdot k \cdot \left(\frac{W_{στρ}}{\gamma_s} \right)^{1/3}$$

n = αριθμός στρώσεων (επάλληλες «σειρές» λίθων),

k = 0.95-1.15 ανάλογα με γεωμετρική μορφή λίθων

- **Πλάτος στέψης:** από την παραπάνω σχέση με $n \geq 3$



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων

- Abdelhamid N. (2013). “Breakwaters Design: Wave Forces on Vertical Breakwater”, Department of Irrigation and Hydraulics, Faculty of Engineering, Cairo University



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Λουκογεωργάκη Εύα.
«Ακτομηχανική και λιμενικά έργα. Υδροδυναμικές Φορτίσεις Παράκτιων
Τεχνικών Έργων-Φορτίσεις κατακόρυφων μετώπων». 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



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.

