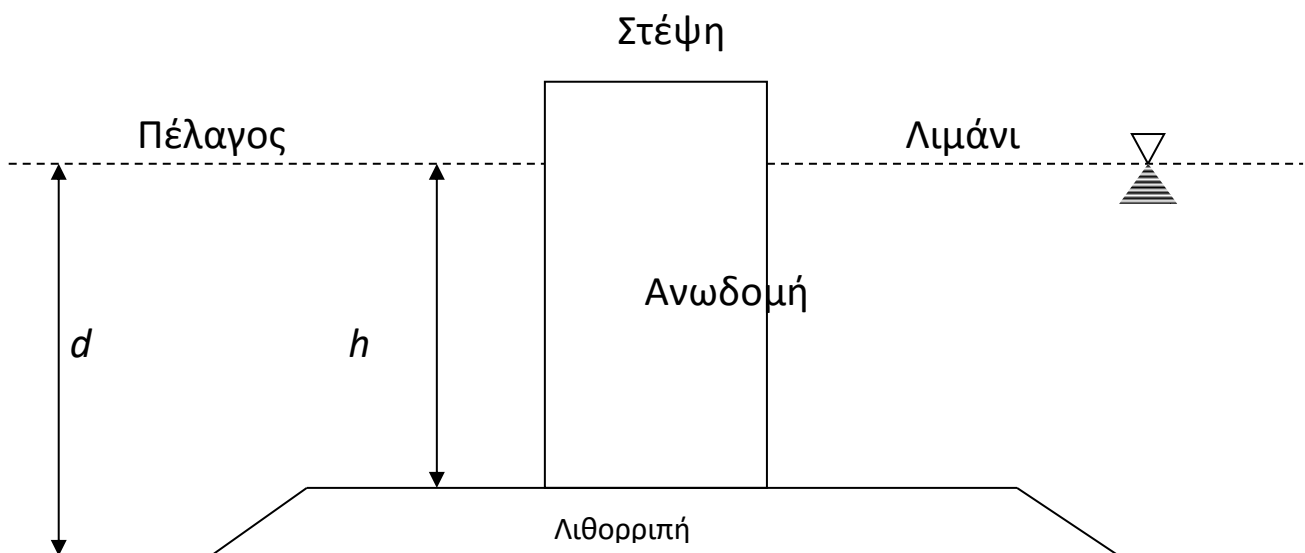


5. Εξωτερικά Λιμενικά Έργα

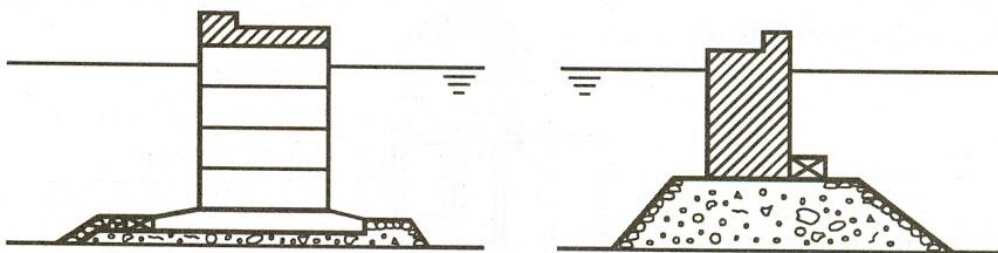
5.1 Έργα με κατακόρυφο μέτωπο

5.1.1 Γενικά

Η πρώτη μεγάλη κατηγορία λιμενικών έργων προστασίας είναι με κατακόρυφο μέτωπο στην προσήνεμη πλευρά. Το βασικό χαρακτηριστικό τους είναι το **ανακλώμενο κύμα** στο μέτωπο του έργου. Η ανάκλαση δημιουργεί το στάσιμο κύμα clarotis και **υψηλές ταχύτητες** εμπρός από το κατακόρυφο μέτωπο, με συνέπεια αυξημένο κίνδυνο υποσκαφής στον **πόδα** του έργου.

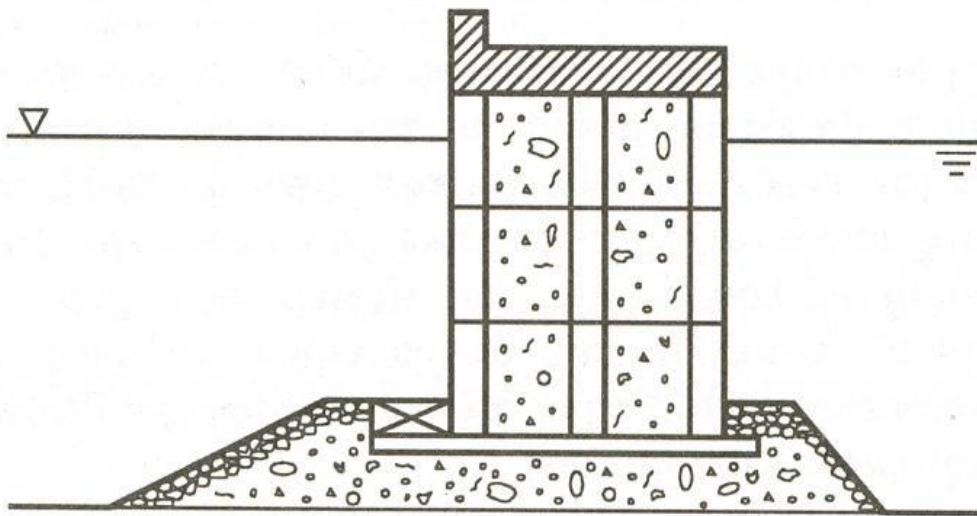


Σχ. 1: Τυπική διατομή κυματοθραύστη με κατακόρυφο μέτωπο

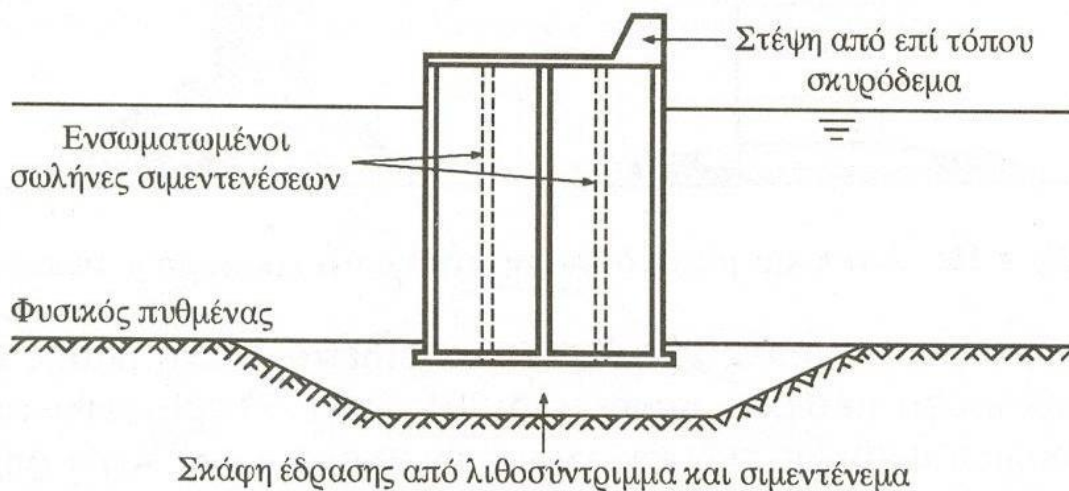


Σχ. 2 : Απλή και μικτή διατομή έργου κατακόρυφου μετώπου

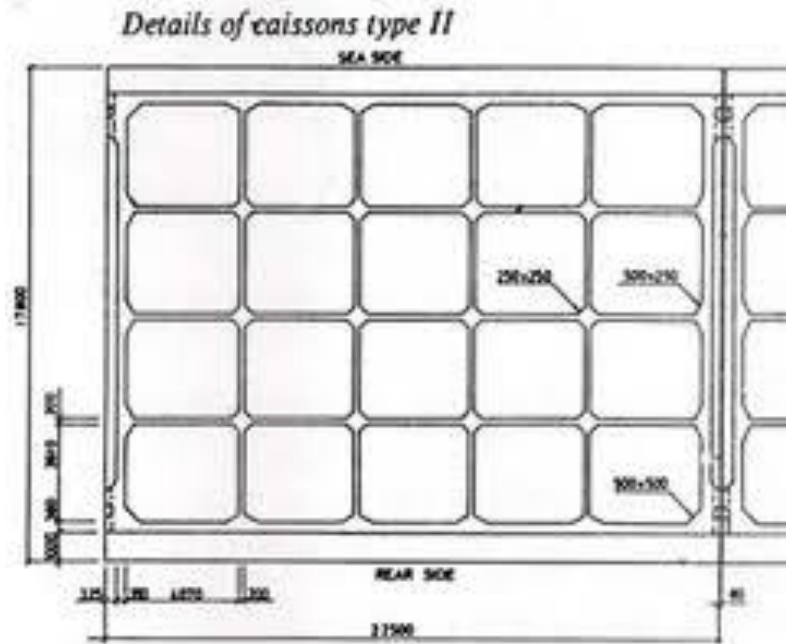
- Το κόστος του έργου αυξάνεται δυσανάλογα με το βάθος. Έτσι, πολλές φορές χρησιμοποιούμε τη λύση της μικτής διατομής, η οποία περιλαμβάνει πρίσμα λιθορριπών επάνω στο οποίο εδράζεται το έργο με κατακόρυφο μέτωπο.
- Στις μικτές διατομές χρειάζεται να δίνεται ικανό βάθος στο κατακόρυφο μέτωπο, πάνω από $2H$, όπου H το ύψος του κύματος σχεδιασμού, ώστε να αποφεύγεται η πρόκληση θραύσης κυματισμών λόγω ρήχωσης.



Σχ. 3 : Διατομή από κυψελωτούς ογκολίθους.



Σχ. 4 : Διατομή εξωτερικού έργου από πλωτά κιβώτια.



Σχ. 5: Παράδειγμα κάτοψης πλωτών κιβωτίων (caissons)



Σχ. 6: Φωτογραφία κάτοψης πλωτών κιβωτίων (caissons)

5.1.2 Υπερύψωση της μέσης στάθμης και μετάδοση του κυματισμού

Α. Εάν οι κυματισμοί δεν θραύονται τότε δημιουργείται σύνθετος κυματισμός, που για πλήρη ανάκλαση είναι στάσιμος με ύψος $2H$.

Η μέση στάθμη του στάσιμου κύματος μπροστά στο κατακόρυφο μέτωπο βρίσκεται από:

$$h_o = \frac{1+k_R}{2} \cdot \frac{\pi H^2}{\lambda} \frac{1}{\tanh(kd)} \quad \text{Εξ. (5.1)}$$

όπου k_R ο συντελεστής ανάκλασης του κυματισμού που για λόγους ασφαλείας απαγορεύεται να λαμβάνεται μικρότερος από 0.9 στους υπολογισμούς.

Παράδειγμα: Να υπολογιστεί η υπερύψωση της μέσης στάθμης μπροστά από το κατακόρυφο μέτωπο για $k=0.09234$, και $H_s=1.531\text{m}$, $d=9\text{m}$.

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = 68.04\text{m}$$

Θα λάβουμε $R=1$ για τέλεια ανάκλαση και θα έχουμε:

$$H_s = 4\sqrt{m_o},$$

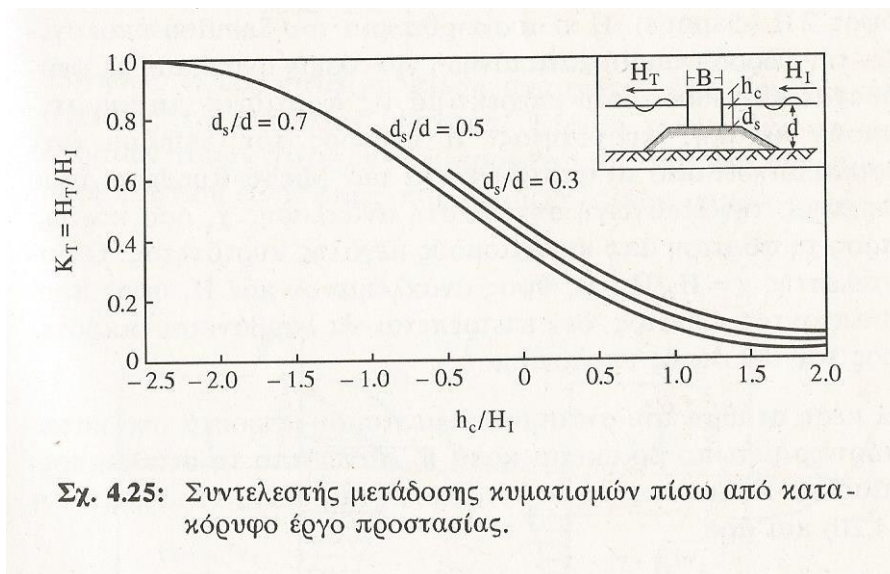
Όπου $m_o = \sigma^2$ με $\sigma = \sqrt{\frac{\sum \eta_i^2}{N}}$, μηδενική ροπή φάσματος

$$H_{1/10} = 1.27H_s$$

$H_{max} = 1.87H_s$ αλλά καλό είναι να λαμβάνεται $H_{max} = 2H_s$

$$h_o = \frac{1+R}{2} \cdot \frac{\pi(H_{max})^2}{\lambda} \frac{1}{\tanh(kd)} = \frac{1+1}{2} \cdot \frac{\pi 3.062^2}{68.04} \frac{1}{\tanh(0.092 \cdot 9)} = 0.636\text{m}$$

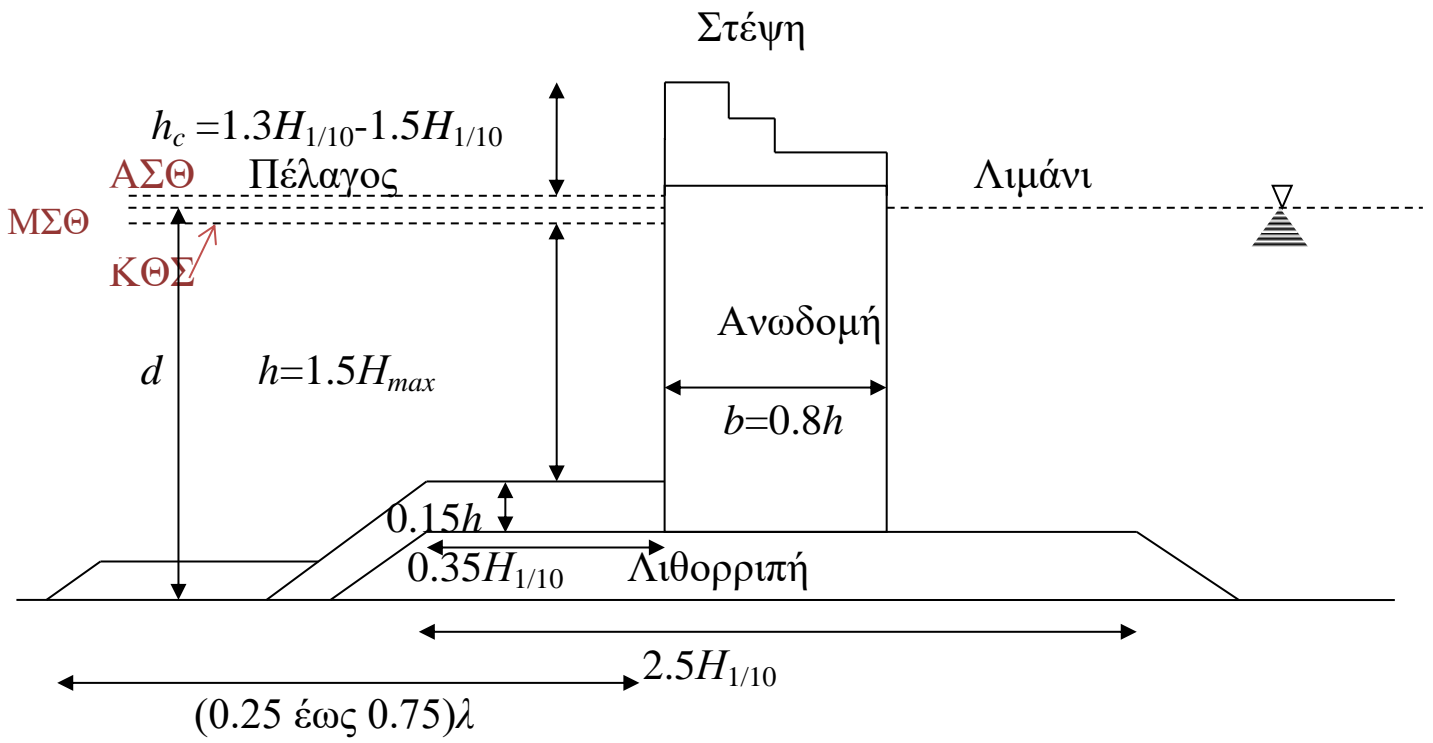
B. Για μικτές διατομές χρησιμοποιούμε το διάγραμμα 4.25 για τον υπολογισμό του συντελεστή μετάδοσης χωρίς ενδιάμεσο υπολογισμό της υπερύψωσης από την εξίσωση 5.1. (Εξ. 4.31 βιβλίου)



Σχ. 4.25: Συντελεστής μετάδοσης κυματισμών πίσω από κατακόρυφο έργο προστασίας.

5.1.3 Προσεγγιστική διαστασιολόγηση εξωτερικού έργου με κατακόρυφο μέτωπο

Λόγω των εξαιρετικά ισχυρών δυναμικών φορτίσεων που δέχονται τα εξωτερικά έργα από τους θραυόμενους κυματισμούς γίνεται πάντα προσπάθεια να τοποθετούνται σε περιοχές μη θραυόμενων κυματισμών. Σε τέτοιες περιοχές η International Navigation Association (PIANC) προτείνει την ακόλουθη τυπική διατομή σαν πρώτη, μη δεσμευτική, διαστασιολόγηση του έργου.



Σχ.7: Προσεγγιστική διαστασιολόγηση εξωτερικού έργου με κατακόρυφο μέτωπο

Παράδειγμα: Να υπολογιστούν προσεγγιστικά οι διαστάσεις του κυματοθραύστη με $k=0.09234$, $H_s=1.531\text{m}$.

$$H_s = 1.531\text{m}$$

$$H_{1/10} = 1.27H_s = 1.945\text{m}$$

$$H_{max} = 2H_s = 3.062\text{m}$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = 68.04\text{m}$$

Ύψος ανωδομής χωρίς τη στέψη:

$$h = 1.5H_{max} = 1.5 \cdot (3.062) = 4.59\text{m}$$

$$\text{Υπερύψωση: } 2h_o = 2 \cdot 0.636 = 1.271\text{m}$$

$$\text{Σύνολο: } h + \text{Υπερύψωση} = 4.59 + 1.271 = 5.87\text{m}$$

Ύψος στέψης:

$$h_c = 1.5H_{1/10} = 2.917\text{m}$$

Πλάτος Κυματοθραύστη

$$b = 0.8h = 0.8 \cdot 4.59 = 3.67\text{m}$$

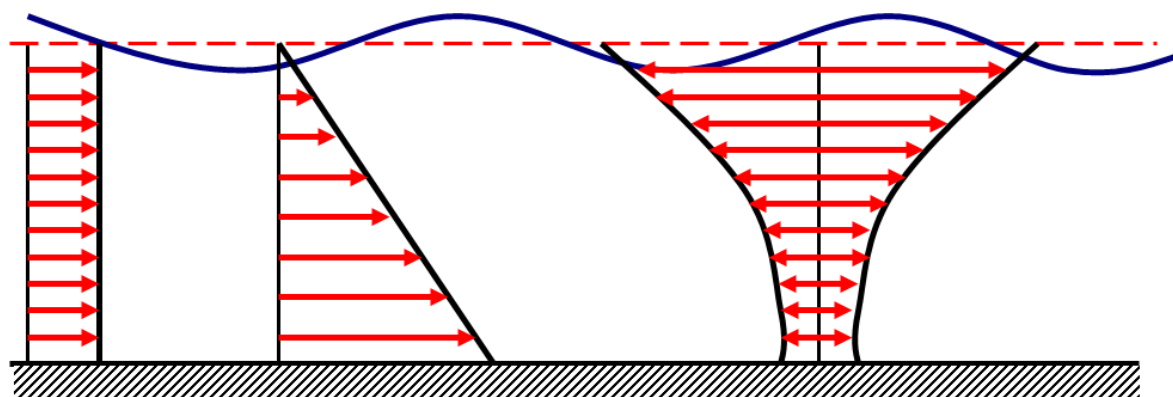
5.1.4 Φορτία

Θα εξεταστεί η ακόλουθη κρίσιμη συνθήκη σχεδιασμού: κυματική έξαρση στο μέτωπο του κυματοθραύστη προς την πλευρά του πελάγους σε συνδυασμό με ηρεμία στο εσωτερικό του λιμένα.

(α) Μη θραυόμενοι κυματισμοί

5.1.4.1 Δυνάμεις Πίεσης

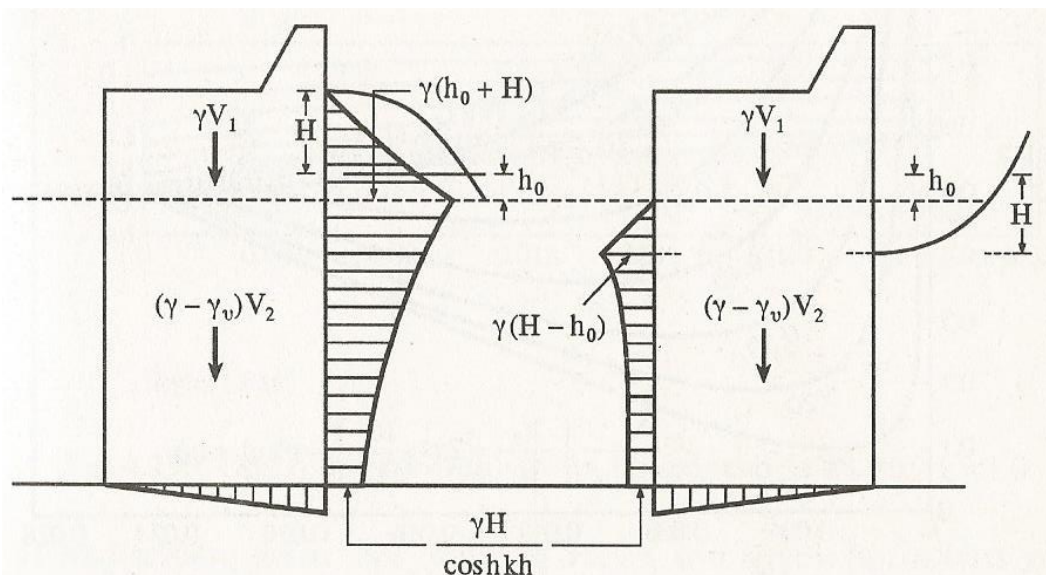
$$p = p_0 - \rho g z + \rho a g \frac{\cosh[k(z + d)]}{\cosh kd} \sin(\omega t - kx)$$



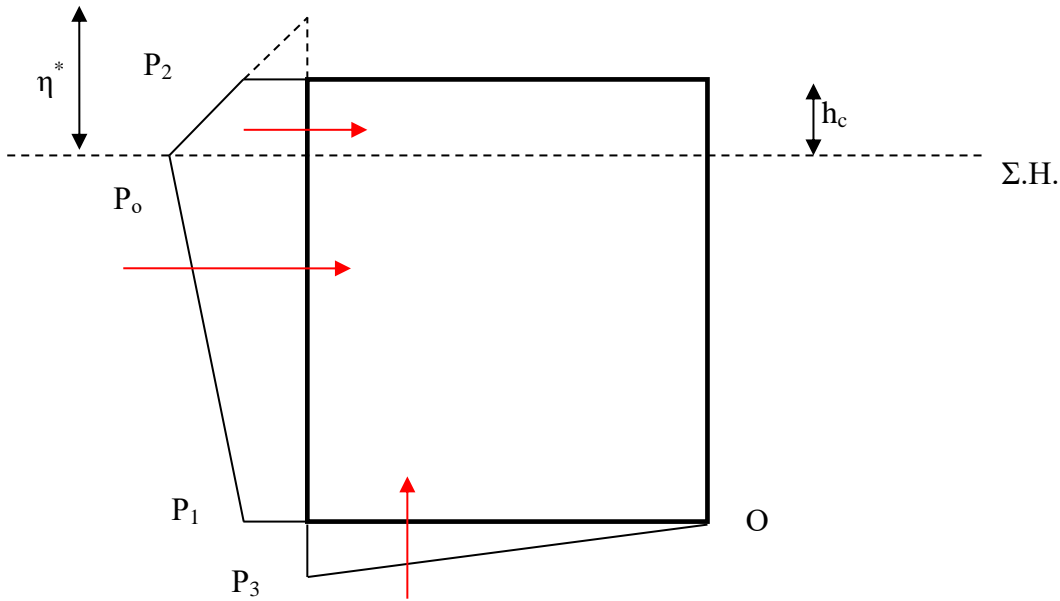
Σταθερή
πίεση p_0

Υδροστατική
πίεση $-\rho g z$

Δυναμική πίεση
 $\rho a g \frac{\cosh[k(z + d)]}{\cosh kd} \sin(\omega t - kx)$



Σχ. 4.27: Ακραίες τιμές υδροδυναμικής φόρτισης.



$$\eta^* = 0.75(1 + \cos\phi)H \quad \text{Εξ. (5.2)}$$

όπου ϕ η γωνία πρόσπτωσης με τον κυματοθραύστη

$$P_o = 0.5(1 + \cos\phi)(a_1 + a_2 \cos^2 \phi)\gamma H \quad \text{Εξ. (5.3)}$$

$\gamma = 1.026 \text{ t/m}^2$ το ειδικό βάρος θαλασσινού νερού

$$P_2 = 0 \quad \text{εάν } \eta^* \leq h_c$$

$$P_2 = \left(1 - \frac{h_c}{\eta^*}\right)P_o \quad \text{εάν } \eta^* \geq h_c \quad \text{Εξς. (5.4)}$$

$$P_1 = a_3 P_o \quad \text{Εξ. (5.5)}$$

$$P_3 = P_1 \quad \text{Εξ. (5.6)}$$

$$a_1 = 0.6 + 0.5 \left[\frac{2kd}{\sinh 2kd} \right]^2 \quad \text{Εξ. (5.7)}$$

$$a_2 = \frac{d-h}{3d} \left(\frac{H}{h} \right)^2 \quad \text{ή} \quad \frac{2h}{H} \quad \text{όποιο είναι μικρότερο} \quad \text{Εξ. (5.8)}$$

$$a_3 = 1 - \frac{h}{d} \left[1 - \frac{1}{\cosh 2kd} \right]^2 \quad \text{Εξ. (5.9)}$$

Παράδειγμα: Να υπολογιστούν οι δυνάμεις πίεσης του κυματοθραύστη με $\phi=26^\circ$ σε βάθος $d=9m$.

$$\eta^* = 0.75(1 + \cos\phi)H = 0.75(1 + \cos 26)3.062 = 4.36m$$

όπου $\phi=26^\circ$ η γωνία πρόσπτωσης με τον κυματοθραύστη

$$a_1 = 0.6 + 0.5 \left[\frac{2kd}{\sinh 2kd} \right]^2 = 0.6 + 0.5 \left[\frac{2 * 0.09234 * 9}{\sinh 2 * 0.09234 * 9} \right]^2 = 0.814$$

$$a_2 = \frac{d-h}{3d} \left(\frac{H}{h} \right)^2 = \frac{9-4.59}{3 \cdot 9} \left(\frac{3.062}{4.59} \right)^2 = 0.072 \quad \left. \vphantom{a_2} \right\} \alpha_2=0.072$$

$$\text{ή } a_2 = \frac{2h}{H} = \frac{2 \cdot 4.59}{3.062} = 3.0 \quad \text{όποιο είναι μικρότερο}$$

$$a_3 = 1 - \frac{h}{d} \left[1 - \frac{1}{\cosh 2kd} \right]^2 = 1 - \frac{4.59}{9} \left[1 - \frac{1}{\cosh 2 * 0.09234 * 9} \right]^2 = 0.795$$

$$P_o = 0.5(1 + \cos\phi)(a_1 + a_2 \cos^2 \phi)\gamma H =$$

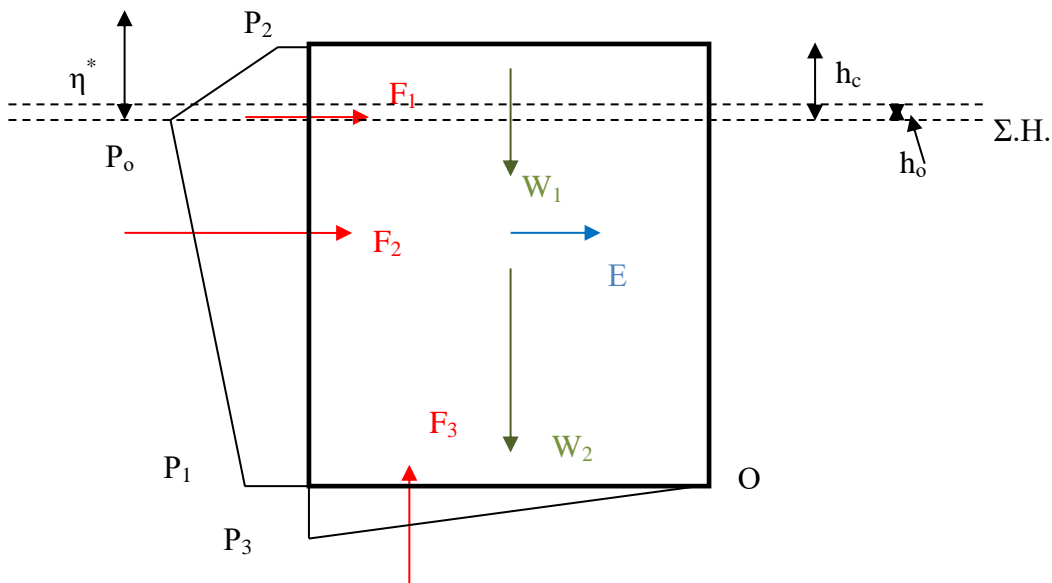
$$= 0.5(1 + \cos 26)(0.814 + 0.072 \cos^2 26)1.026 \cdot 3.062 = 2.6t / m^2$$

$$\eta^* \geq h_c \Leftrightarrow 4.36 \geq 2.92 \quad \text{οπότε } P_2 = \left(1 - \frac{h_c}{\eta^*} \right) P_o = \left(1 - \frac{2.92}{4.36} \right) 2.6 = 0.862t / m^2$$

$$P_1 = a_3 P_o = 0.795 \cdot 2.6 = 2.07t / m^2$$

$$P_3 = P_1 = 2.07t / m^2$$

Οι δυνάμεις λόγω πίεσης θα βρεθούν από το ολοκλήρωμα των πιέσεων ή αλλιώς από τα εμβαδά:



$$F_1 = 0.5(P_0 + P_2)h_c = 5.05t$$

$$F_2 = 0.5(P_0 + P_1)h = 10.73t$$

$$F_3 = 0.5P_3b = 3.8t$$

5.1.4.2 Ίδιο Βάρος

$$W_1 = (\text{ειδ.βάρ.σκυρ.})(h_c - h_0)b = 2.4(2.92 - 0.636)3.67 = 20.12t$$

$$W_2 = \text{Βάρος-Άνωση} =$$

$$(\text{ειδ.βάρ.σκυρ.})(h + 2h_0)b - (\text{ειδ.βάρ.θ.νερού.})(h + 2h_0)b =$$

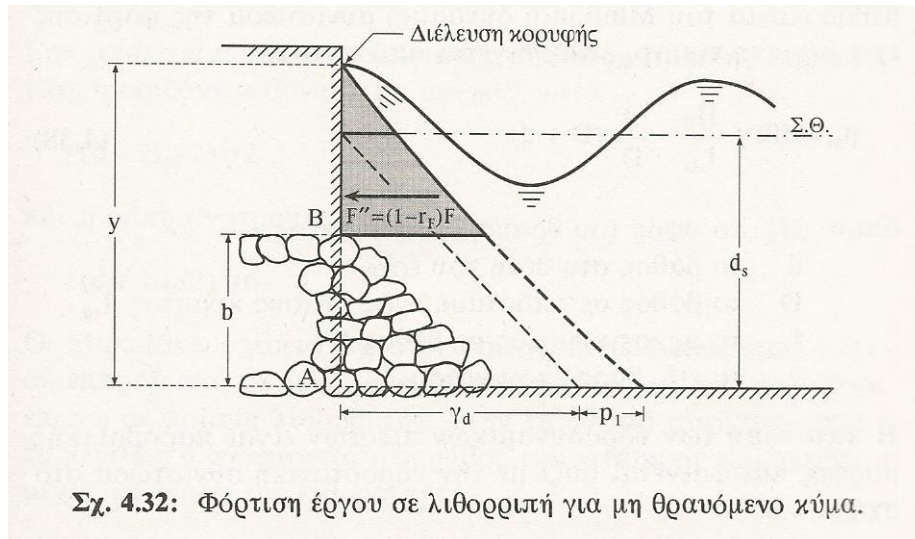
$$= 2.4(4.59 - 2 \cdot 0.635)3.67 - 1.026(4.59 - 2 \cdot 0.635)3.67 = 19.98t$$

5.1.4.2 Δυνάμεις σεισμού

$$E = \varepsilon^*(h_c + h + 2h_0)b$$

$$\text{Για } \varepsilon = 0.15, E = 0.15^*(h_c + h + 2h_0)b = 4.14t$$

Όταν το εξωτερικό λιμενικό έργο με κατακόρυφο μέτωπο εδράζεται σε λιθορριπή, τότε ο υπολογισμός της οριζόντιας δύναμης και της ροπής ανατροπής γίνεται με αφαίρεση του τμήματος του διαγράμματος πιέσεων που δεν αντιστοιχεί στο κατακόρυφο μέτωπο.



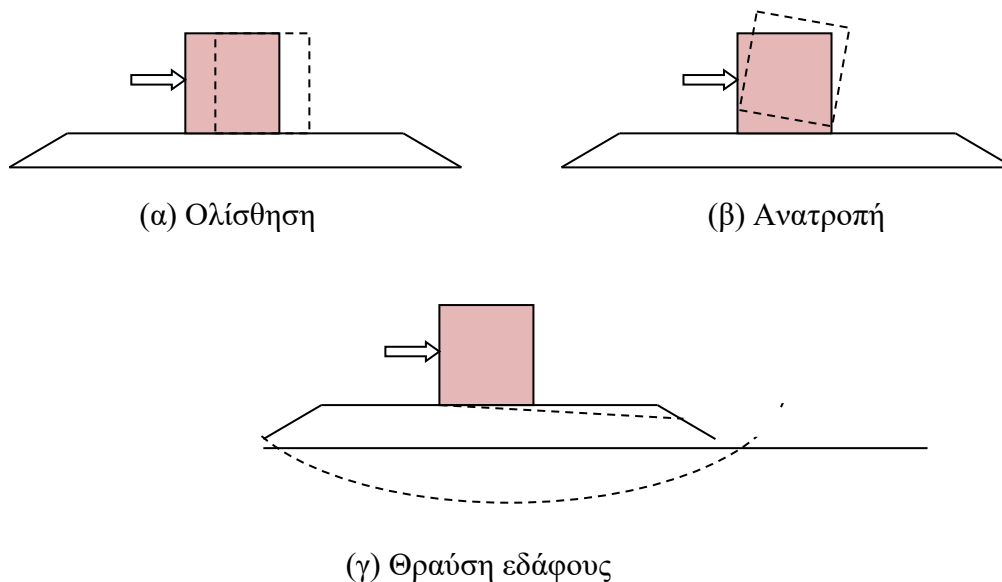
Σχ. 4.32: Φόρτιση έργου σε λιθορριπή για μη θραυόμενο κύμα.

(β) Θραυόμενοι κυματισμοί στο μέτωπο

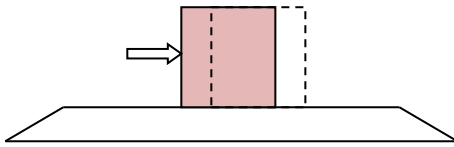
(γ) Θραυόμενοι κυματισμοί στη λιθορριπή έδρασης

5.1.5 Υπολογισμός των έργων

Ο έλεγχος των εξωτερικών λιμενικών έργων με κατακόρυφο μέτωπο περιλαμβάνει ελέγχους που αφορούν τις βασικές περιπτώσεις αστοχίας όπως εμφανίζονται στο παρακάτω σχήμα. Σημειώνεται ότι οι έλεγχοι αυτοί πρέπει να αφορούν τους συνδυασμούς φορτίσεως για όλα τα στάδια της κατασκευής. Επίσης, σε περίπτωση κατασκευής με προκατασκευασμένους ογκολίθους δεν θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η μονολιθικότητα του έργου αλλά να ελέγχεται η διατομή σε όλες τις στάθμες έδρασης των ογκολίθων. Αυτό δρα υπέρ της ασφάλειας αφού η μονολιθικότητα θα πρέπει να επιτυγχάνεται ούτως ή άλλως.



5.1.5.1 Έλεγχος σε ολίσθηση



Ο συντελεστής ασφαλείας v_o ορίζεται ως εξής

$$v_o = \frac{\mu F_V}{F_H} \quad \text{Εξ. (5.10)}$$

όπου F_V το άθροισμα των κατακόρυφων δυνάμεων

F_H το άθροισμα των οριζοντίων δυνάμεων

και μ ο συντελεστής τριβής στην υπό έλεγχο στάθμη:

$\mu=0.5-0.6$ για επιφάνειες σκυροδέματος-λιθορριπής

$\mu=0.7-1.0$ για επιφάνειες σκυροδέματος-σκυροδέματος

Ο συντελεστής με την παρουσία σεισμού πρέπει να είναι ≥ 1.2 και χωρίς σεισμό ≥ 1.5 .

Παράδειγμα: Να γίνει έλεγχος ολίσθησης χωρίς και με σεισμό του κυματοθραύστη.

Χωρίς σεισμό:

$$\text{Τριβή} = \mu(W_1 + W_2 - F_3) = 18.146t$$

$$F_H = F_1 + F_2 = 15.786$$

$$v_o = \text{Τριβή} / F_H = 1.15 < 1.5 \quad \text{FALSE!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!}$$

Εφόσον είναι έργο βαρύτητας. Πρέπει να αυξήσουμε την βαρύτητα του έργου για να μην ολισθαίνει. Ιδανικά αυξάνουμε το πλάτος b γιατί αυτό βοηθάει και στον έλεγχο ανατροπής. Έστω λοιπόν $b' = 6m > 3.67m$.

Επαναλαμβάνουμε τους παραπάνω υπολογισμούς για το νέο πλάτος από τους οποίους λαμβάνουμε:

$$F_3 = 0.5P_3 b' = 6.209t$$

$$W_1 = (\text{ειδ.βάρ.σκυρ.}) (h_c - h_o) b' = 2.4(2.92 - 0.636)6 = 32.85t$$

$$W_2 = (\text{ειδ.βάρ.σκυρ.}) (h + 2h_o) b' - (\text{ειδ.βάρ.θ.νερού.}) (h + 2h_o) b' = 32.63t$$

$$E = 0.15 * (h_c + h + 2h_o) b' = 6.76t$$

Επαναλαμβάνουμε τον έλεγχο ολίσθησης:

Χωρίς σεισμό:

$$\text{Τριβή} = \mu(W_1 + W_2 - F_3) = 29,93\text{t}$$

$$F_H = F_1 + F_2 = 15.786$$

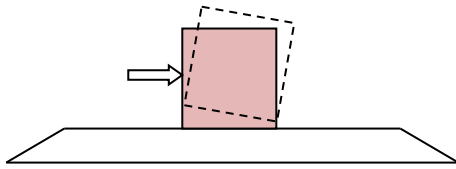
$$v_o = \text{Τριβή} / F_H = 1.88 > 1.5 \quad \text{OK!!}$$

Με σεισμό:

$$F_H = F_1 + F_2 + E = 22.54\text{t}$$

$$v_o = \text{Τριβή} / F_H = 1.31 > 1.2 \quad \text{OK!!}$$

5.1.5.2 Έλεγχος σε ανατροπή ως προς το σημείο O



Ο συντελεστής ασφαλείας v_a ορίζεται ως εξής

$$v_a = \frac{M_\varepsilon}{M_a} \quad \text{Εξ. (7.11)}$$

όπου M_ε το άθροισμα των ροπών ευσταθείας ως προς O

M_a το άθροισμα των ροπών ανατροπής ως προς O

M_ε : ροπές ευσταθείας.

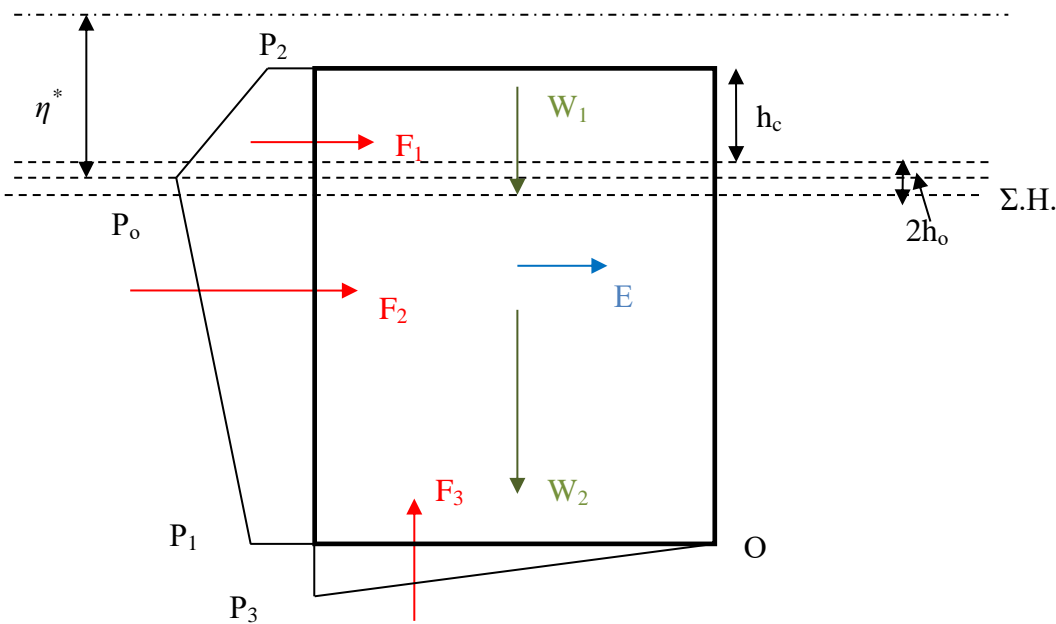
Ίδιο βάρος υπό άνωση για τα βυθισμένα τμήματα

M_a : ροπές ανατροπής.

F_1, F_2, F_3 και E.

Ο συντελεστής με την παρουσία σεισμού πρέπει να είναι ≥ 1.5 και χωρίς σεισμό ≥ 2.0 .

Παράδειγμα: Να γίνει έλεγχος ανατροπής χωρίς και με σεισμό του κυματοθραύστη.



Ροπές ανατροπής:

$F_1=5.05t$

Σημείο εφαρμογής $y_c = \frac{h_o + h_c}{3} \frac{P_o + 2P_2}{P_o + P_2} = 2.073m$

(κέντρο βάρους τραπεζίου από τη βάση του)

Μοχλοβραχίονας ως προς O: $h+h_o+y_c=7.3m$

Ροπή $M_1=F_1*7.3=36.9tm$

$F_2=10.73t$

Σημείο εφαρμογής $y_c = \frac{h + h_o}{3} \frac{P_o + 2P_1}{P_o + P_1}$

Μοχλοβραχίονας ως προς O: $y_c = 3.04m$

Ροπή $M_2=F_2*3.04=32.66tm$

$F_3=6.21t$

Μοχλοβραχίονας ως προς O: $2b/3 = 4m$

Ροπή $M_3=F_3*4=24.84tm$

$$E=6.76t$$

$$\text{Μοχλοβραχίονας ως προς Ο: } (2h_o+h+h_c)/2 =4.39m$$

$$\text{Ροπή } M_E=E*4.39=29.67m$$

Συνολική ροπή ανατροπής χωρίς σεισμό:

$$M_1 + M_2 + M_3 =94.41tm$$

Συνολική ροπή ανατροπής με σεισμό:

$$M_1 + M_2 + M_3 + M_E=124.08tm$$

Ροπές ευστάθειας:

$$W_1=32.85t$$

$$\text{Μοχλοβραχίονας ως προς Ο: } b/2 =3m$$

$$\text{Ροπή } M_{w1}=W_1*3=98.54tm$$

$$W_2=32.62t$$

$$\text{Ροπή } M_{w2}=W_2*3=97.87tm$$

Συνολική ροπή ευστάθειας:

$$M_{w1} + M_{w2} =196.41tm$$

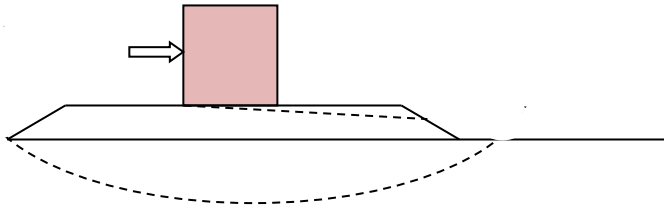
Συντελεστής ασφάλειας ως προς Ανατροπή χωρίς σεισμό

$$V_a = \frac{M_\varepsilon}{M_a} =196.41/94.41=2.08>2.0v$$

Συντελεστής ασφάλειας ως προς Ανατροπή με σεισμό

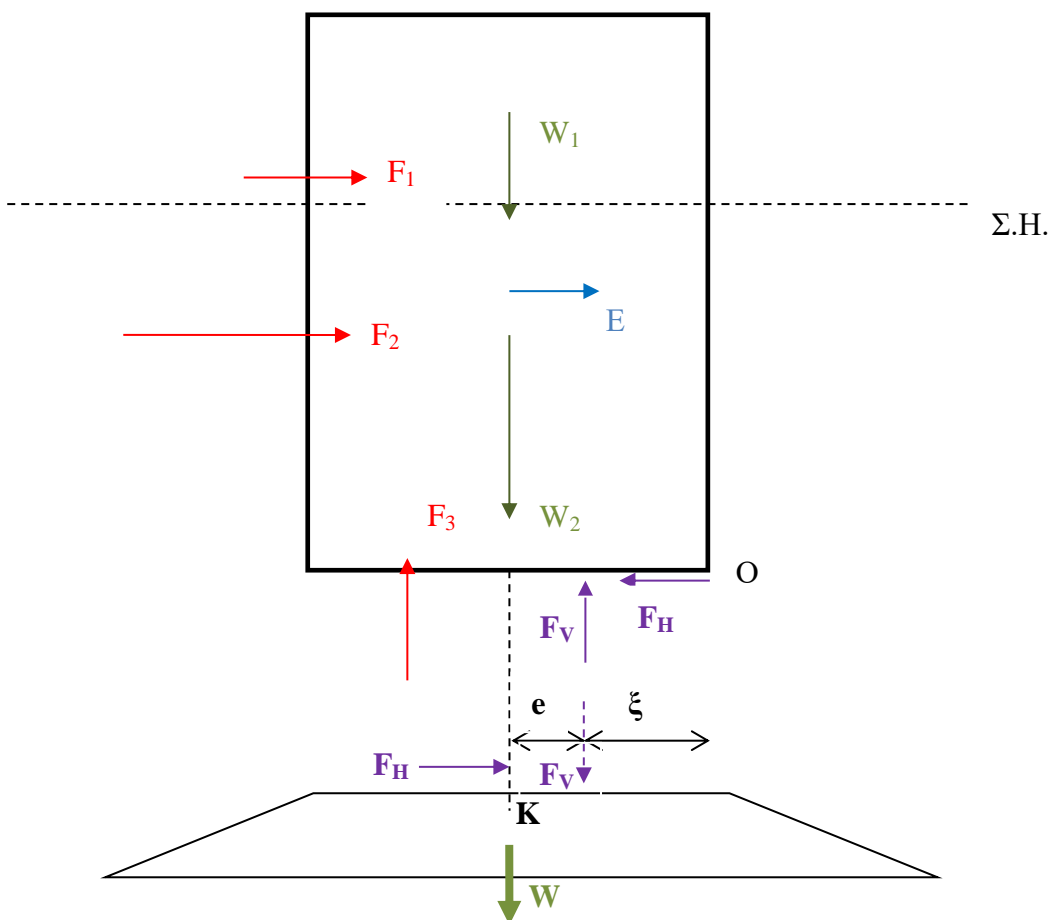
$$V_a = \frac{M_\varepsilon}{M_a} =196.41/124.08=1.58>1.5v$$

5.1.5.3 Έλεγχος θραύσης εδάφους



(α) Έλεγχος τάσεων έδρασης

Γίνεται έλεγχος εάν υπερβαίνουν οι επιτρεπόμενες τάσεις εδάφους στη στάθμη θεμελίωσης. Το έδαφος θεμελίωσης στα έργα με κατακόρυφο μέτωπο αποτελείται σχεδόν πάντα από κατάλληλες λιθορριπές έδρασης. Έτσι, η επιτρεπόμενη ορθή τάξη ορίζεται συνήθως περί τους 50t/m^2 .



Οι αναπτυσσόμενες τάσεις στην επιφάνεια της λιθορριπής λόγω των μεταβιβαζόμενων φορτίων είναι:

$$\sigma = \frac{F_V}{b} \left[1 \pm \frac{6e}{b} \right] \quad \text{Εξ. (7.12)}$$

όπου b = πλάτος έδρασης

e = εκκεντρότητα (δηλ. απόσταση του σημείου εφαρμογής από το κέντρο συμμετρίας της διατομής K).

Διακρίνουμε 2 περιπτώσεις:

(I) $e < b/6$ τότε

$$\sigma_A = \frac{F_V}{b} \left[1 - \frac{6e}{b} \right]$$

$$\sigma_B = \frac{F_V}{b} \left[1 + \frac{6e}{b} \right]$$

(II) $e > b/6$ τότε

$$\sigma_A = 0$$

$$\sigma_B = \frac{2F_V}{3\xi}$$

Παράδειγμα: Να γίνει έλεγχος φέρουσας ικανότητας της λιθορριπής του κυματοθραύστη.

Η συνισταμένη $F_V = (W_1 + W_2 - F_3) = 59.26t$

εφαρμόζεται σε απόσταση ξ από το σημείο Ο. Άρα θα πρέπει:

Χωρίς σεισμό:

$$F_V \cdot \xi = M_\varepsilon - M_\alpha \Rightarrow \xi = 1.72m$$
$$e = (b/2) - \xi = 1.27m > b/6 = 1m$$

Άρα

$$\sigma_A = 0$$

$$\sigma_B = \frac{2F_V}{3\xi} = 22.95t/m < 50t/m$$

Επομένως δεν υπάρχει κίνδυνος αστοχίας της λιθορριπής.

Με σεισμό:

$$F_V \cdot \xi = M_\varepsilon - M_\alpha \Rightarrow \xi = 1.22m$$
$$e = (b/2) - \xi = 1.78m > b/6 = 1m$$

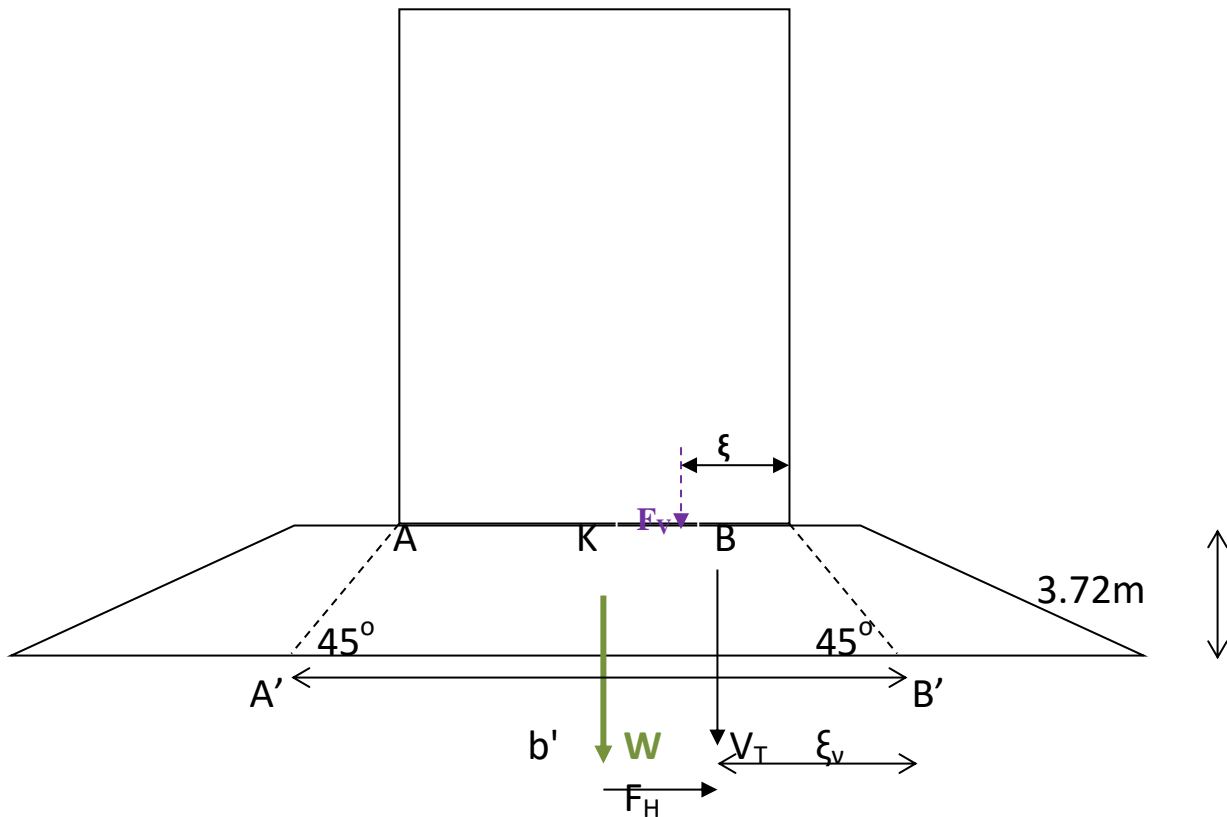
Άρα

$$\sigma_A = 0$$

$$\sigma_B = \frac{2F_V}{3\xi} = 32.37t/m < 50t/m$$

Επομένως δεν υπάρχει κίνδυνος αστοχίας της λιθορριπής.

(β) Έλεγχος τάσεων εδάφους- Απλοποιητική προσέγγιση



Τραπεζοειδής φόρτιση

Το ενεργό πλάτος έδρασης b' προσδιορίζεται από τις γραμμές θράυσης που προεκτείνονται από τα άκρα A και B κατά τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζουν γωνία 45° με την επιφάνεια έδρασης. Έτσι, $b' = b + 2 * 3.72 * \sin 45^\circ = 11.26\text{m}$

Στο έδαφος και στο εσωτερικό της ζώνης έδρασης, μεταβιβάζονται όχι μόνο τα φορτία ανωδομής, όπως υπολογίστηκαν στα προηγούμενα, αλλά και το βάρος της λιθορριπής W όπου ($n=0.35$ πορώδες λιθορριπής)

$$W = (1-n)(\gamma_s - \gamma_w) * \text{όγκο_λιθορριπής}$$

$$= (1-0.35)(2.8-1.026) * 0.5(11.26+6)3.72 = 29.85\text{t}$$

Συνολικό Κατακόρυφο Φορτίο $V_T = F_v + W = 89.11\text{t}$

Το σημείο εφαρμογής βρίσκεται σε απόσταση x_v από το άκρο B' . Οι ροπές του βάρους W ως προς το B' είναι

$$M_W = 33.42 \cdot (11.26/2) = 168.03 \text{tm}$$

Και του κατακόρυφου φορτίου

$$M_{FV} = F_V(\xi + 0.5(b' - b)) = 257.8 \text{tm}$$

Άρα συνολικά $M_{VT} = 425.83 \text{tm}$

Έτσι, η απόσταση $\xi_v = M_{VT} / V_T = 4.78 \text{m}$

$$\text{Εκκεντρότητα } e_v = (11.26/2) - 4.78 = 0.85 < b'/6 = 1.88 \text{m}$$

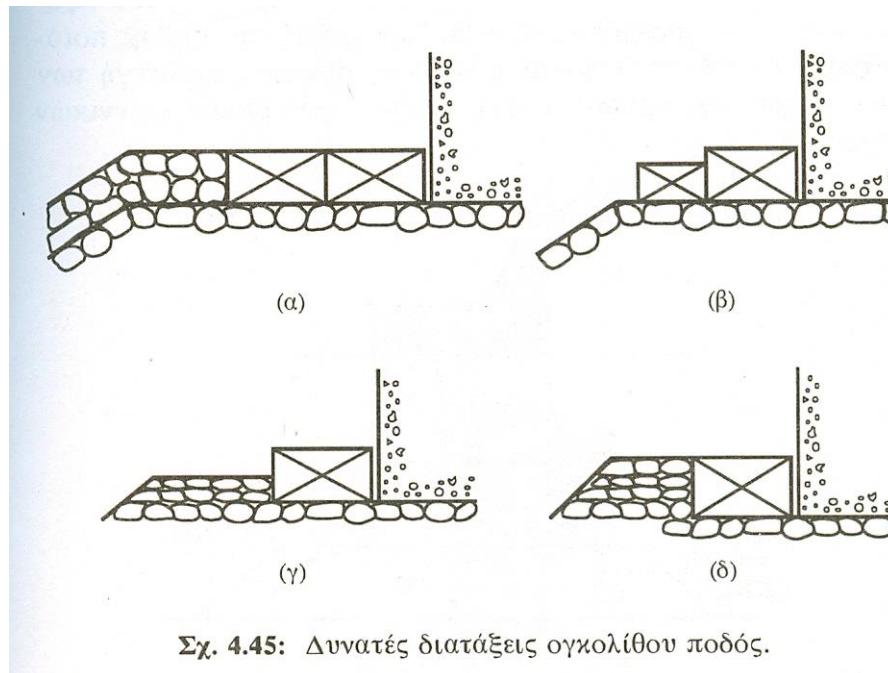
Η μέγιστη τάση είναι

$$\sigma_{B'} = \frac{F_V + W}{b'} \left[1 + \frac{6e}{b'} \right] = \frac{89.11}{11.26} \left[1 + \frac{6 \cdot 0.85}{11.26} \right] = 11.5 \text{ t/m}^2 < 20 \text{t/m}^2$$

Επομένως δεν υπάρχει κίνδυνος αστοχίας του εδάφους.

5.1.6 Προστασία του ποδιού

Τα έργα αυτής της μορφής υποφέρουν από την εκσκαφή του ποδιού τους προς την πλευρά του πελάγους, επομένως, στη θέση αυτή απαιτείται πρόσθετη προστασία θωράκισής της.



Τοποθετείται ογκόλιθος ή ογκόλιθοι από άοπλο σκυρόδεμα στην άνω παρειά της λιθορριπής εύρους τουλάχιστον $0.15h$ (στο παράδειγμα $0.15 \cdot 4.59 = 0.6885\text{m}$) και η λιθορριπή προστατεύεται περαιτέρω με εξωτερική θωράκιση αποτελούμενη από χονδρότερα λίθινα υλικά ή ακόμα και φυσικούς ογκόλιθους, εάν κρίνεται απαραίτητο σε μήκος περίπου $(0.25-0.75)\lambda$ (στο παράδειγμα $0.5 \cdot 68.044 = 34.022\text{m}$). Εάν ο κίνδυνος είναι μεγάλος η λιθορριπή μπορεί να εγκιβωτιστεί μέσα σε αύλακα του πυθμένα.

Βάρος ογκόλιθων από ημι-εμπειρικούς τύπους. Συνήθως χρησιμοποιείται ο τύπος του Hudson που αναπτύχθηκε το 1950 από εργαστηριακή έρευνα στις ΗΠΑ.

$$B = \frac{\gamma_s H^3}{N_s^3 (\delta - 1)^3}$$

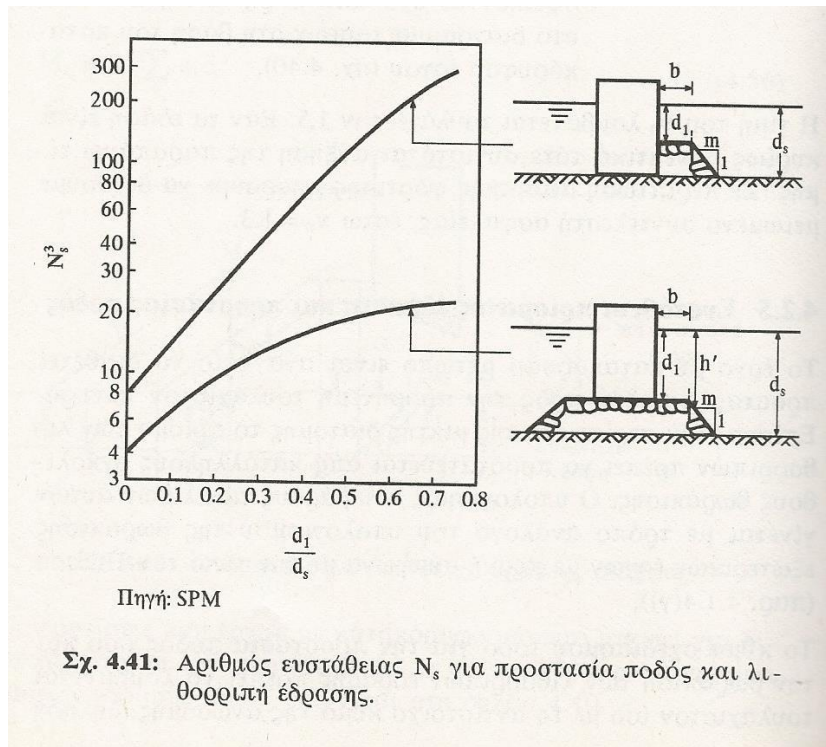
όπου

- B = το απαιτούμενο μέσο βάρος του ογκόλιθου στη στρώση θωράκισης, με περίπου 50% του πλήθους των ογκόλιθων να ζυγίζουν πάνω από το B .
- γ_s = ειδ. βάρος πετρώματος ογκόλιθων. Για σκυρόδεμα, $\gamma_s = 2.4\text{t/m}^3$ και για φυσικούς ογκόλιθους $\gamma_s = 2.8\text{t/m}^3$.
- δ = ο λόγος ειδ. βαρών γ_s/γ_w
- H = ύψος κύματος σχεδιασμού (H_s για πραγματικούς κυματισμούς)
- N_s = αριθμός ευστάθειας, που βρίσκεται από το διάγραμμα 4.41 για κανονικούς κυματισμούς και από τις παρακάτω εξισώσεις.

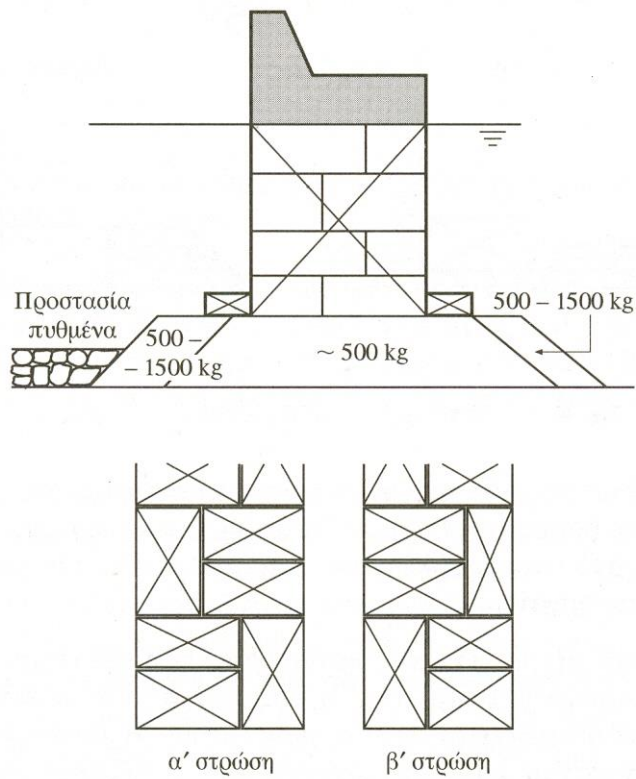
$$N_s = \max \left\{ 1.8, 1.3 \frac{1-k}{k^{1/3}} \frac{h'}{H_{1/3}} + 1.8 \exp \left[-1.5 \frac{(1-k)^2}{k^{1/3}} \frac{h'}{H_{1/3}} \right] \right\}$$

$$\text{με } k = \frac{4\pi h'/L'}{\sinh(4\pi h'/L')} \sin^2 \frac{2\pi B}{L'}$$

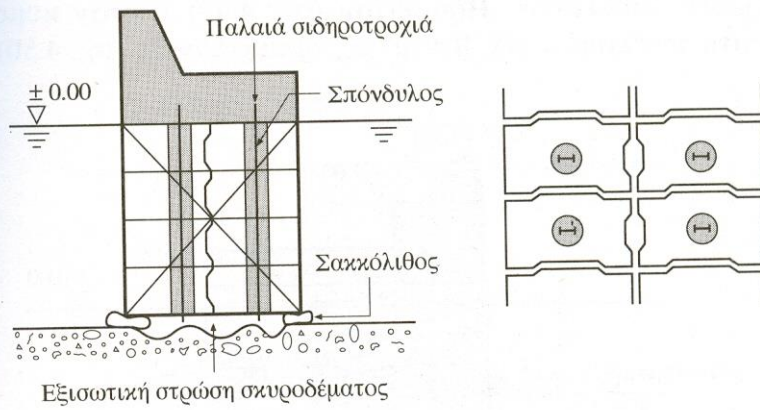
h' το βάθος νερού στην εξεταζόμενη θέση ($d_1 < h' < d_s$)
 L' το μήκος κύματος που αντιστοιχεί στο βάθος h'
 $\max\{a, b\}$ η μεγαλύτερη τιμή μεταξύ των a, b



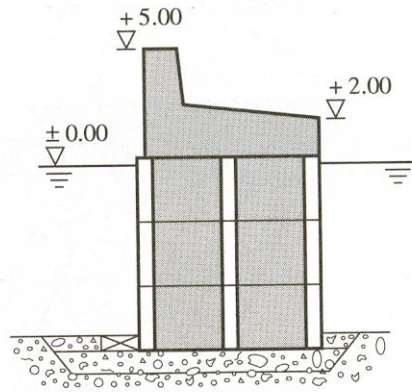
5.1.7 Μονολιθικότητα διατομής



Σχ. 4.46: Διάταξη συμπαγών ογκολίθων στο σώμα του έργου.



Σχ. 4.47: Διάταξη σπονδυλωτών ογκολίθων.



Σχ. 4.48: Εξωτερικό έργο λιμένος Αλεξανδρούπολης.