

5. Εξωτερικά Λιμενικά Έργα

5.2 Έργα με πρανή

5.2.1 Γενικά

Η **πλέον συνήθης** μέθοδος κατασκευής εξωτερικών λιμενικών έργων, ιδιαίτερα στη χώρα μας, είναι με λιθορριπές

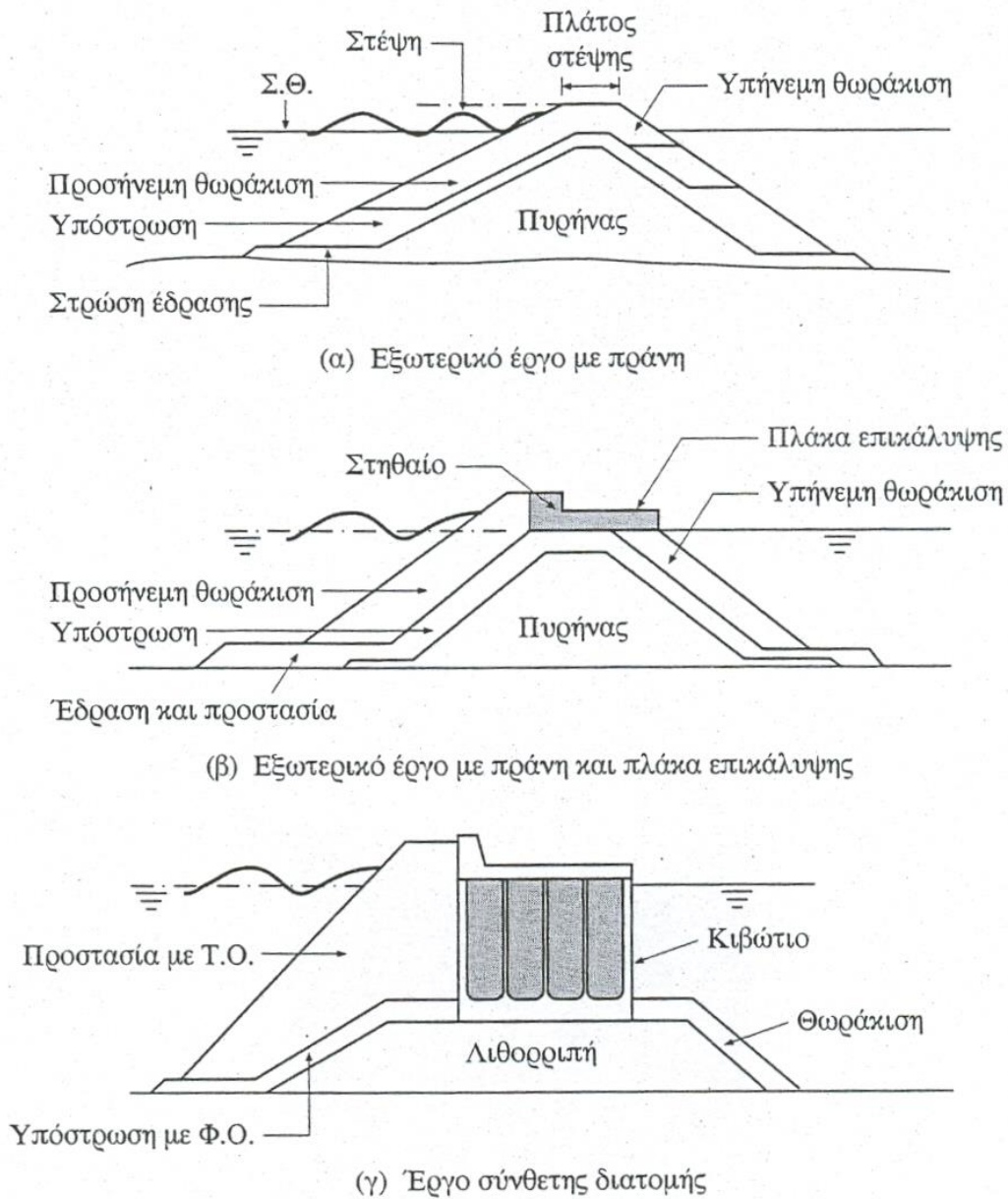
- διατάσσονται σε **τραπεζοειδή** πρισματική μορφή με πρανή.
- Η κεκλιμένη προς το πέλαγος παρειά συνιστά μηχανισμό **απορρόφησης** της ενέργειας των κυματισμών μέσω της **θραύσης** που προκαλεί,
- πλεονεκτώντας ως προς το κατακόρυφο μέτωπο που προκαλεί μόνιμο εξ ανακλάσεως κυματισμό (στάσιμο κύμα).
- Άλλο βασικό πλεονέκτημα των εξωτερικών έργων από λιθορριπές έναντι των έργων με κατακόρυφο μέτωπο είναι η **ευκαμψία μορφής** που παρουσιάζουν:
 - σε μερική αστοχία του έργου, η μορφή του μεταβάλλεται ομαλά από τις **δυνάμεις του περιβάλλοντος** και
 - η **επισκευή** της διατομής είναι σχετικά **εύκολη**.
- Τα έργα με λιθορριπές πλεονεκτούν επίσης ως προς τη σχετική ευκολία θεμελιώσεώς τους.
- Σαν βασικό μειονέκτημα θα μπορούσε να αναφερθεί ο **μεγάλος όγκος υλικών** που απαιτείται,
 - λόγω των μεγάλων διαστάσεων του έργου η **βάση** του οποίου μπορεί εύκολα να φθάσει τα **100m**.
- Η συνήθης διατομή με πρανή παρουσιάζει ύφαλο και έξαλλο τμήμα.
- Η στέψη του έργου καθορίζεται από το ποσοστό **υπερπήδησης** των κυματισμών που δέχεται προς την πλευρά της λιμενολεκάνης.

Από άποψη μορφής διατομών τα διακρίνουμε στα παρακάτω (δες και παρακάτω σχήμα):

1. συμβατικής μορφής, όπου οι λιθορριπές τοποθετούνται σε επάλληλες στρώσεις που διαμορφώνουν και τη στέψη του έργου
2. με στηθαίο και πλάκα επικάλυψης για διαμόρφωση στέψης
3. σύνθετης μορφής, όπου συνυπάρχουν πρανή στην προσήνεμη πλευρά και κατακόρυφο μέτωπο στην υπήνεμη. Το τελευταίο μπορεί να διαμορφωθεί από προκατασκευασμένο μονολιθικό κιβώτιο (caisson) για να εξυπηρετήσει ανάγκες πρόσδεσης σκαφών στην υπήνεμη πλευρά.

Επίσης, οι κυματοθραύστες με πρανές χωρίζονται σε αυτούς

- i. που επιτρέπουν την υπερπήδηση και
- ii. σε αυτούς που δεν επιτρέπουν την υπερπήδηση.



Σχ. 4.1: Τύποι έργων προστασίας με πρoνή.

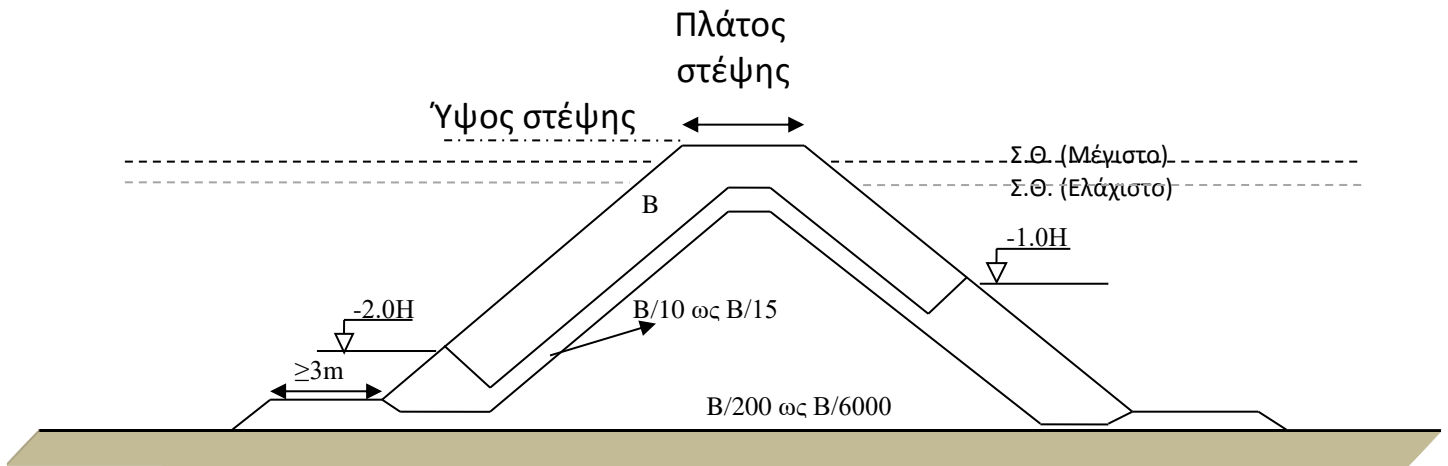
5.2.2 Σχεδιασμός Διατομής

Τα εξωτερικά λιμενικά έργα με πρηνή διαμορφώνονται από

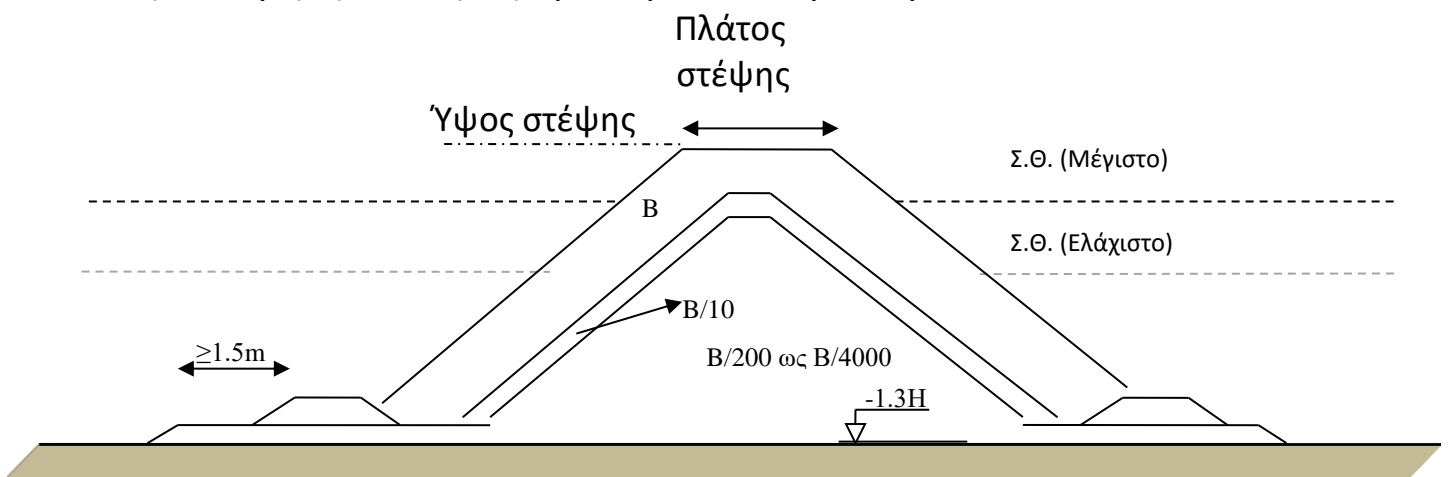
- στρώση έδρασης,
- κεντρικό πυρήνα από κοκκώδη υλικά που
- περιβάλλεται από στρώσεις ολοένα μεγαλύτερων λίθων κατάλληλης διαβάθμισης μέχρι την
- εξωτερική στρώση θωράκισης από φυσικούς ή τεχνητούς ογκολίθους.

Στη συνέχεια δίδονται δύο προτεινόμενες τυπικές διατομές που μπορούν να εφαρμοσθούν στην πράξη με κατάλληλη διαβάθμιση του βάρους των λίθων κάθε στρώσης ώστε **να αποφεύγεται ο κίνδυνος της απόπλυσης** του υποκείμενου υλικού μέσω των κενών της υπερκείμενης στρώσης.

(Διατομή I) Συνθήκες μη θραυόμενων κυματισμών



(Διατομή II) Συνθήκες θραυόμενων κυματισμών



Σχήμα 5.2

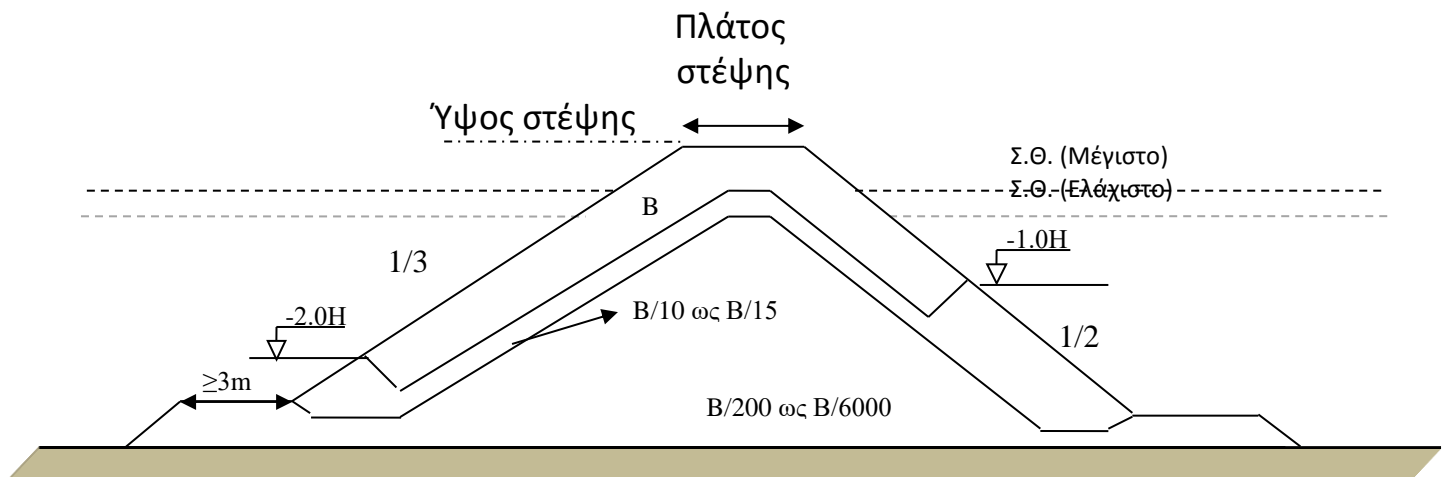
Παράδειγμα: Να διαμορφωθεί η βασική διατομή κυματοθραύστη με πρανές σε βάθος $d=10\text{m}$ για τις ακόλουθες σχεδιαστικές συνθήκες: ύψος $H=3\text{m}$, περίοδος $T=8\text{s}$ και δεν επιτρέπεται η υπερπήδηση. Να χρησιμοποιηθούν φυσικοί ογκόλιθοι με ποσοστό ζημιών 5%. Πορώδες λίθων 0.4. Επιτρεπόμενη τάση εδάφους $\sigma_{\epsilon\delta}=2\text{K/cm}^2$.

i. Ελεγχος θραύσης κυματισμών

$$\text{Κριτήριο θραύσης } \frac{H}{d} \leq 0.78 \Leftrightarrow \frac{3}{10} = 0.3 \leq 0.78.$$

Συνεπώς, δεν λαμβάνει χώρα θραύση κυματισμών άρα χρησιμοποιούμε την διατομή I.

Επιλέγουμε τύπο 3 στρώσεων με κλίση 1/3 εξωτερική και 1/2 εσωτερική.



Σχήμα 5.3

5.2.3 Κίνδυνος παράσυρσης (απόπλυσης) λίθων

Η θωράκιση, με

- φυσικούς ή
- τεχνητούς ογκόλιθους,

μπορεί να είναι

- τυχαίας ή
 - εξασφαλίζει μεγάλη διαπερατότητα και τραχύτητα, επομένως καταστρέφουν μεγάλα ποσά κυματικής ενέργειας. Υπάρχει, όμως, **κίνδυνος διαφυγής** των λίθων.
- μη τυχαίας τοποθέτησης.
 - εξασφαλίζει καλύτερη αλληλο-εμπλοκή των λίθων θωράκισης και αυξημένη αντίσταση σε μετακίνησή τους από την κυματική δράση.
 - Αυτό αποκτά ιδιαίτερη σημασία μετά τις νεότερες έρευνες για τη πληρέστερη κατανόηση του μηχανισμού αστοχίας της θωράκισης.
 - Πράγματι, έχει διαπιστωθεί πως σημαντικός παράγοντας στην ευστάθεια του έργου είναι η σχέση μεταξύ των **συχνοτήτων ταλάντωσης του νερού** στο πορώδες της διατομής και έξω από αυτήν.
 - Αυτό έχει βέβαια άμεση σχέση με την **καμπυλότητα** του επερχόμενου **κυματισμού**,
 - ως πλέον επικίνδυνη ζώνη περιγράφεται η θέση της ισάλου στο πρηνές
 - και συγκεκριμένα κατά τη φάση **καθόδου του κύματος**, οπότε **εξέρχεται η μάζα του νερού** από το εσωτερικό του έργου προς το πέλαγος. Έχει βρεθεί πως τότε εμφανίζονται οι **δυσμενέστερες υποπιέσεις**, που αυξάνουν τον κίνδυνο **παράσυρσης** των ογκολίθων.
 - Ο μεγαλύτερος κίνδυνος εμφανίζεται για τιμές $2 < \xi < 3$, όπου

$$\xi = \tan \theta / \sqrt{(H / \lambda_o)} \quad \text{Εξ.(5.13)}$$

όπου θ η εξωτερική κλίση των πρανών

ii. Έλεγχος συντονισμού (συνέχεια παραδείγματος)

$$\begin{aligned} \xi &= \tan \theta / \sqrt{(H / \lambda_o)} \\ \lambda_o &= gT^2 / (2\pi) = 9.81 * 8^2 / (2\pi) = 99.92m \\ \Rightarrow \xi &= (1/3) / \sqrt{3/99.92} = 1.9 \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \Rightarrow$$

Το ξ είναι εκτός των ορίων 2 και 3 άρα δεν υπάρχει κίνδυνος συντονισμού.

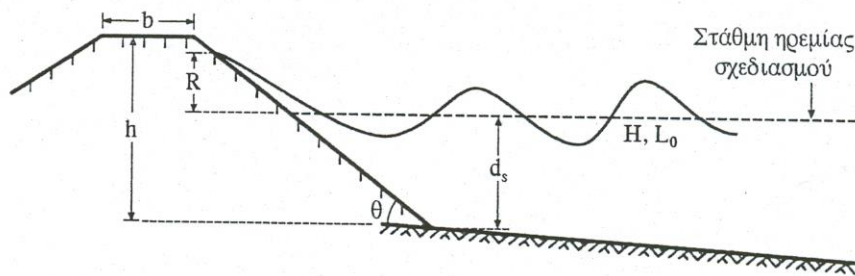
5.2.4 Αναρρίχηση και μετάδοση του κυματισμού

Η αναρρίχηση είναι απαραίτητο να είναι γνωστή προκειμένου να ορισθεί η **στέψη** του έργου σύμφωνα και με την υπερπήδηση που είναι αποδεκτή για την κάθε περίπτωση.

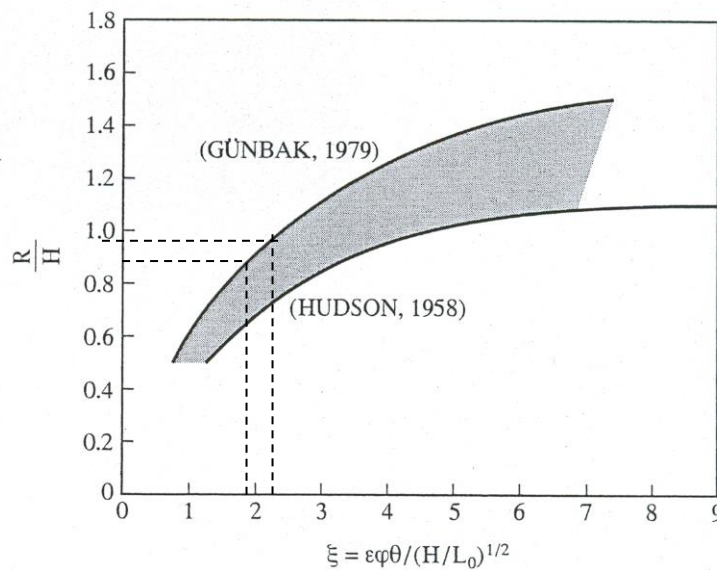
Η αναρρίχηση R , εξαρτάται κυρίως

- από την κλίση θ του πρανούς του έργου,
- το υλικό θωράκισης και
- τα χαρ/κά του κύματος.

Στο παρακάτω σχήμα δίδεται διάγραμμα (Σχ.4.3) υπολογισμού της αναρρίχησης σε πρανή διαπερατών εξωτερικών έργων από λιθορριπές.



Σχ. 4.2: Ορισμός μεγεθών για την αναρρίχηση.



Σχ. 4.3: Αναρρίχηση R σε διαπερατά πρηνή κυματοθραυστών.

iii. Στάθμη στέψης του κυματοθραύστη (συνέχεια παραδείγματος)

Υπολογισμός αναρρίχησης του κύματος R. Από το παραπάνω σχήμα και για $\xi=1.9 \Rightarrow R/H=0.85$. Άρα $R=0.85H=2.55\text{m}$.

Η στάθμη θα τοποθετηθεί 2.55m πάνω από τη στάθμη ηρεμίας.

5.2.5 Σχεδιασμός θωράκισης

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

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

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 $\gamma_s = 2.8 \text{ t/m}^3$.
- H = ύψος κύματος σχεδιασμού
- K_D = συντελεστής ευστάθειας, που εξαρτάται κυρίως
 - από το σχήμα των ογκόλιθων και
 - τη δυνατότητα αλληλοεμπλοκής των μονάδων θωράκισης,
 - το θραυόμενο ή μή των κυματισμών και
 - τη θέση της διατομής στο ακρομώλιο ή τον κορμό του έργου.
 - Χαρ/κες τιμές δίνονται στον πίνακα 4.1.
- δ = ο λόγος ειδ. βάρους γ_s/γ_w
- θ = η γωνία του πρηνούς ως προς την οριζόντιο. Τιμές της $\cot \theta$ μικρότερες του 1.5 δεν είναι επιτρεπτές, ενώ συστήνονται ελάχιστες τιμές γύρω στο 2.

Πίνακας 4.1. Τιμές Συντελεστή Ευστάθειας K_D

Θωράκιση	n*	Τοπο- θέτηση	Κορμός έργου**		Ακρομόλιο		
			(1)	(2)	(1)	(2)	σφθ
Φυσικοί ογκόλιθοι							
Λείοι καμπύλης μορφής	2	Τυχαία	1.2	2.4	1.1	1.9	1.5-3.0
Λείοι καμπύλης μορφής	≥ 3	Τυχαία	1.6	3.2	1.4	2.3	1.5-3.0
Τραχείς γωνιώδεις	2	Τυχαία	2.0	4.0	1.9	3.2	1.5
					1.6	2.8	2.0
					1.3	2.3	3.0
Τραχείς γωνιώδεις	≥ 3	Τυχαία	2.2	4.5	2.1	4.2	1.5-3.0
Τραχείς γωνιώδεις	2	Ειδική #	5.8	7.0	5.3	6.4	1.5-3.0
Τραχ. διαβαθμ. (K_{RR})	##	Τυχαία	2.2	2.5			
Τεχνητοί ογκόλιθοι							
Τετράποδα							
(Tetrapod/Quadripod)	2	Τυχαία	7.0	8.0	5.0	6.0	1.5
					4.5	5.5	2.0
					3.5	4.0	3.0
Τρίραβδα (Tribar)	2	Τυχαία	9.0	10.0	8.3	9.0	1.5
					7.8	8.5	2.0
Τρίραβδα (Tribar)	1	Ομοιόμ.	12.0	15.0	7.5	9.5	1.5-3.0
Δόλοι (Dolos)	2	Τυχαία	15.8 [§]	31.8 [§]	8.0	16.0	2.0
Εξάποδα (Hexapod)	2	Τυχαία	8.0	9.5	5.0	7.0	1.5-3.0

Σημειώσεις

Ο παραπάνω πίνακας ισχύει για περιορισμένη υπερπήδηση και μετακίνηση έως 5% των ογκολίθων (κριτήριο αμελητέων ζημιών)

(1) Θραυόμενοι κυματισμοί

(2) Μη θραυόμενοι κυματισμοί

n*: πλήθος λίθων κατά το πάχος της θωράκισης

** Οι τιμές K_D για τον κορμό ισχύουν για σφθ = 1.5 ÷ 5.0

ο διαμήκης άξονας του ογκολίθου κάθετος στο πρηνές

το ελάχιστο πάχος ορίζεται στη συνέχεια, εδαφ. (ε)

§ για αποφυγή μικροκινήσεων (rocking) μείωση του K_D κατά 50%.

iv. Βάρος Ογκολίθων (συνέχεια παραδείγματος)

γ_s = για φυσικούς ογκόλιθους $\gamma_s = 2.8t/m^3$.

$H = 3m$

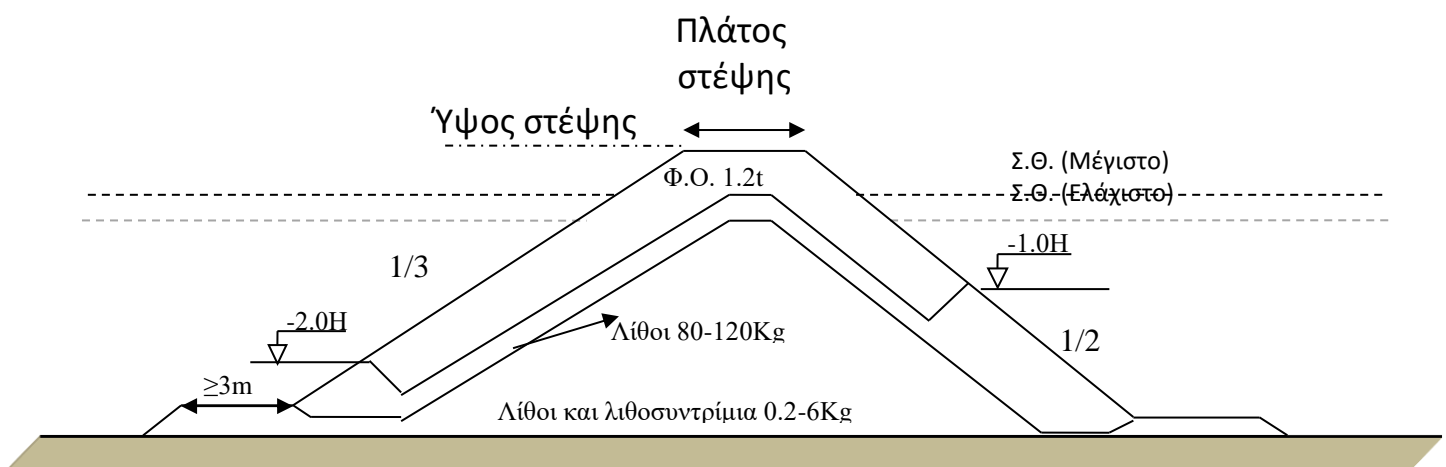
$K_D = 4$. Από τον πίνακα 4.1 για ζημιές έως 5% και για τραχείς και γωνιώδεις ογκόλιθους.

$\delta = \gamma_s/\gamma_w = 2.8/1.026 = 2.73$

$\cot\theta = 1/\tan\theta = 1/(1/3) = 3$

$$B = \frac{\gamma_s H^3}{K_D (\delta - 1)^3 \cot\theta} = 1.2t .$$

Από το σχήμα 7.3 το βάρος της υποκείμενης στρώσης πρέπει να είναι μεταξύ $B/10 - B/15$ δηλ. $\approx 120-80Kg$ και ο πυρήνας $B/200 - B/6000$ δηλ. $\approx 6-0.2Kg$. Η τελική διαμόρφωση θα είναι



Σχήμα 5.3

5.2.6 Διαστασιολόγηση

Για μετατροπή του βάρους των λίθων σε διάσταση κόσκινου, ή τυπική διάσταση του υλικού, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη σχέση

$$d_{\kappa} = 1.15 \left(\frac{B}{\gamma_s} \right)^{1/3} \quad \text{Εξ. (5.15)}$$

Το πλάτος της στέψης μπορεί να εκτιμηθεί γενικά από τη σχέση

$$b = nk_{\Delta} \left(\frac{B}{\gamma_s} \right)^{1/3} \quad \text{Εξ. (5.16)}$$

για συνθήκες έως μικρής υπερπήδησης.

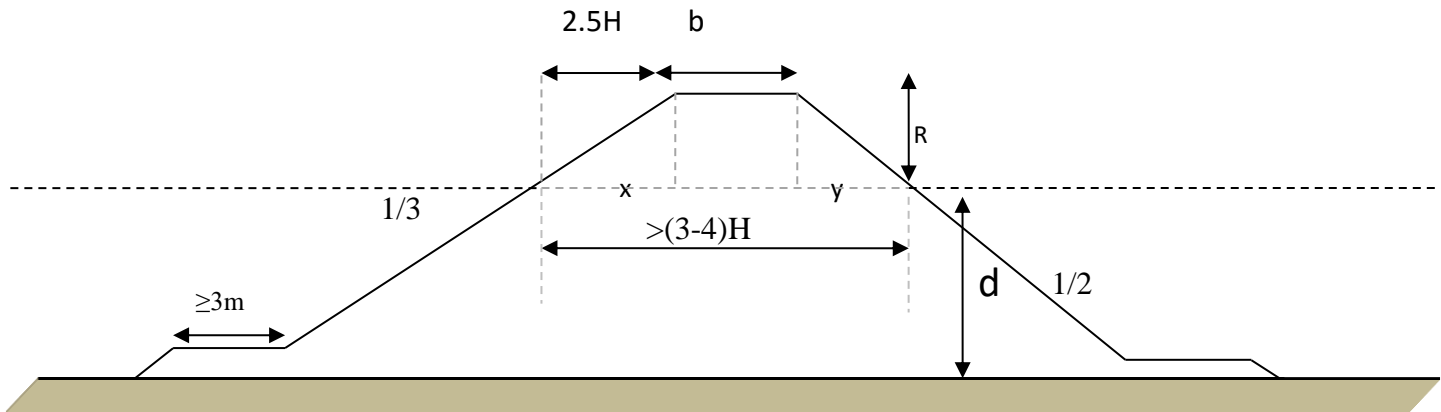
Πίνακας 4.4. Συντελεστής Στρώσης και Πορώδες για Διάφορους Ογκολίθους

Τύπος ογκολίθου	n	Τοποθέτηση	k_{Δ}	P(%)
Φυσικοί ογκολίθους				
Λείοι	2	Τυχαία	1.02	38
Τραχείς	2	Τυχαία	1.00	37
Τραχείς	≥ 3	Τυχαία	1.00	40
Τεχνητοί ογκολίθους				
Τετράποδα (Tetrapod)	2	Τυχαία	1.04	50
(Quadripod)	2	Τυχαία	0.95	49
Τρίραβδα (Tribar)	2	Τυχαία	1.02	54
Δόλοι (Dolos)	2	Τυχαία	0.94	56
Κύβοι (τροποπ.)	2	Τυχαία	1.10	47
Ακρόποδα (Accropode)	1	Τυχαία	1.51	57 - 62*
Core-Loc	1	Τυχαία	1.51	60 - 64*

* Εξαρτάται από το μέγεθος της μονάδας.

ν. Διαστασιολόγηση

Από τον πίνακα 4.4 βλέπουμε ότι για $n=2$, πορώδες 40% και για τραχείς φυσικούς ογκόλιθους $k_{\Delta}=1.0$. Άρα $b=1.52\text{m}$.



Σχήμα 7.4

Υπόλοιπα γεωμετρικά στοιχεία

$$x=R \cdot \text{κλίση}_1=2.55 \cdot 3=7.65\text{m}$$

$$y=R \cdot \text{κλίση}_2=2.55 \cdot 2=5.10\text{m}$$

Εύρος κυματοθραύστη στην στάθμη ηρεμίας

$$x+y+b=7.65+5.1+1.52=14.27\text{m} > (3-4)H \text{ VOK}$$

Εύρος κυματοθραύστη στον πυθμένα

$$d \cdot \text{κλίση}_1 + d \cdot \text{κλίση}_2 + 14.27 = 10 \cdot 3 + 10 \cdot 2 + 14.27 = 64.27\text{m}$$

$$\text{Σύνολο: } 64.27 + 2 \cdot 3 = 70.27\text{m}$$

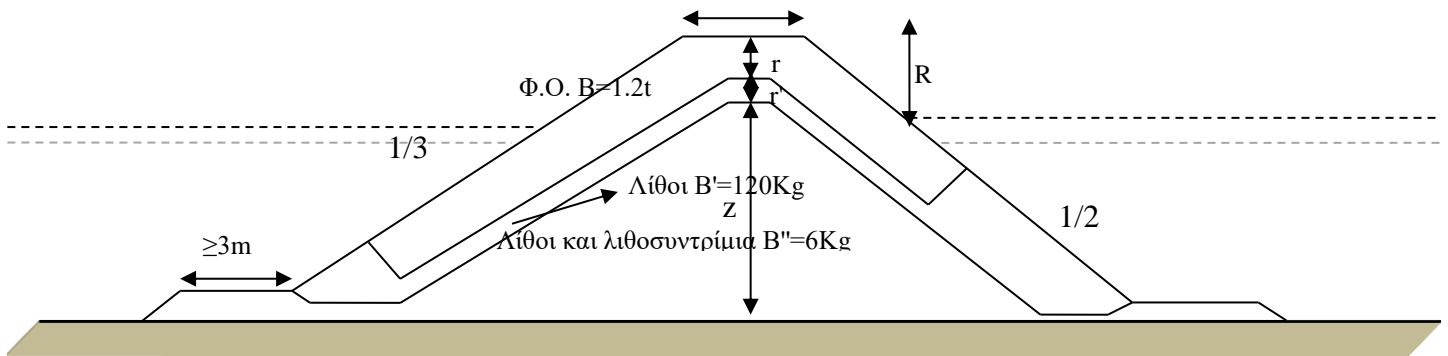
5.2.7 Πάχος στρώσεων

Το πάχος της κάθε στρώσης προσδιορίζεται επίσης από τη σχέση

$$r = nk_{\Delta} \left(\frac{B}{\gamma_s} \right)^{1/3} \quad \text{Εξ. (5.16)}$$

όπου B το βάρος των ογκόλιθων της κάθε στρώσης. Για τη δευτερεύουσα στρώση πρέπει $r' \geq 0.25\text{m}$

vi. Πάχος στρώσεων και πυρήνα (συνέχεια παραδείγματος)



Σχήμα 5.5

Η πρώτη στρώση έχει πάχος

$$r = nk_{\Delta} \left(\frac{B}{\gamma_s} \right)^{1/3} = 1.5\text{m}$$

Η δεύτερη

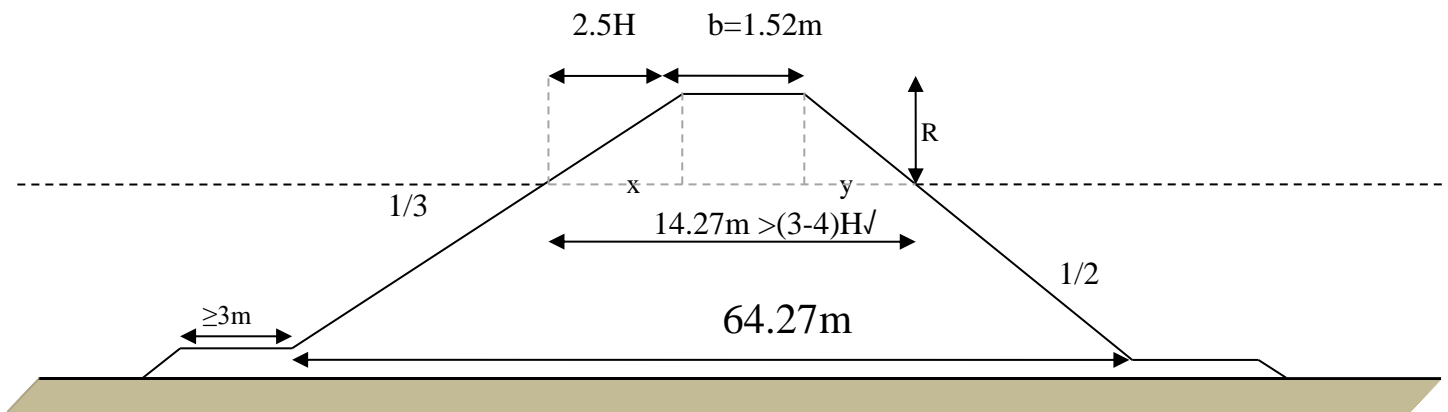
$$r' = nk_{\Delta} \left(\frac{B'}{\gamma_s} \right)^{1/3} = 2 \cdot 1 \left(\frac{0.120}{2.8} \right)^{1/3} = 0.70\text{m}$$

Άρα το πάχος του πυρήνα είναι

$$z = d + R - r - r' = 10 + 2.55 - 1.5 - 0.7 = 10.35\text{m}$$

vii. Έλεγχος τάσης εδάφους (συνέχεια παραδείγματος)

Βάρος κυματοθραύστη ανά μονάδα εγκάρσιου πλάτους κατά προσέγγιση.



Σχήμα 7.6

Υφαλο τμήμα

$$\text{Εμβαδόν: } 0.5(14.27+64.27)10=392.7\text{m}^2$$

$$\text{Βάρος υπό άνωση: } 392.7(1-0.4)(2.8-1.026)=417.94\text{t}$$

Έξαλο τμήμα

$$\text{Εμβαδόν: } 0.5(14.27+1.52)2.55=20.12\text{m}^2$$

$$\text{Βάρος: } 20.12(1-0.4)2.8=33.80\text{t}$$

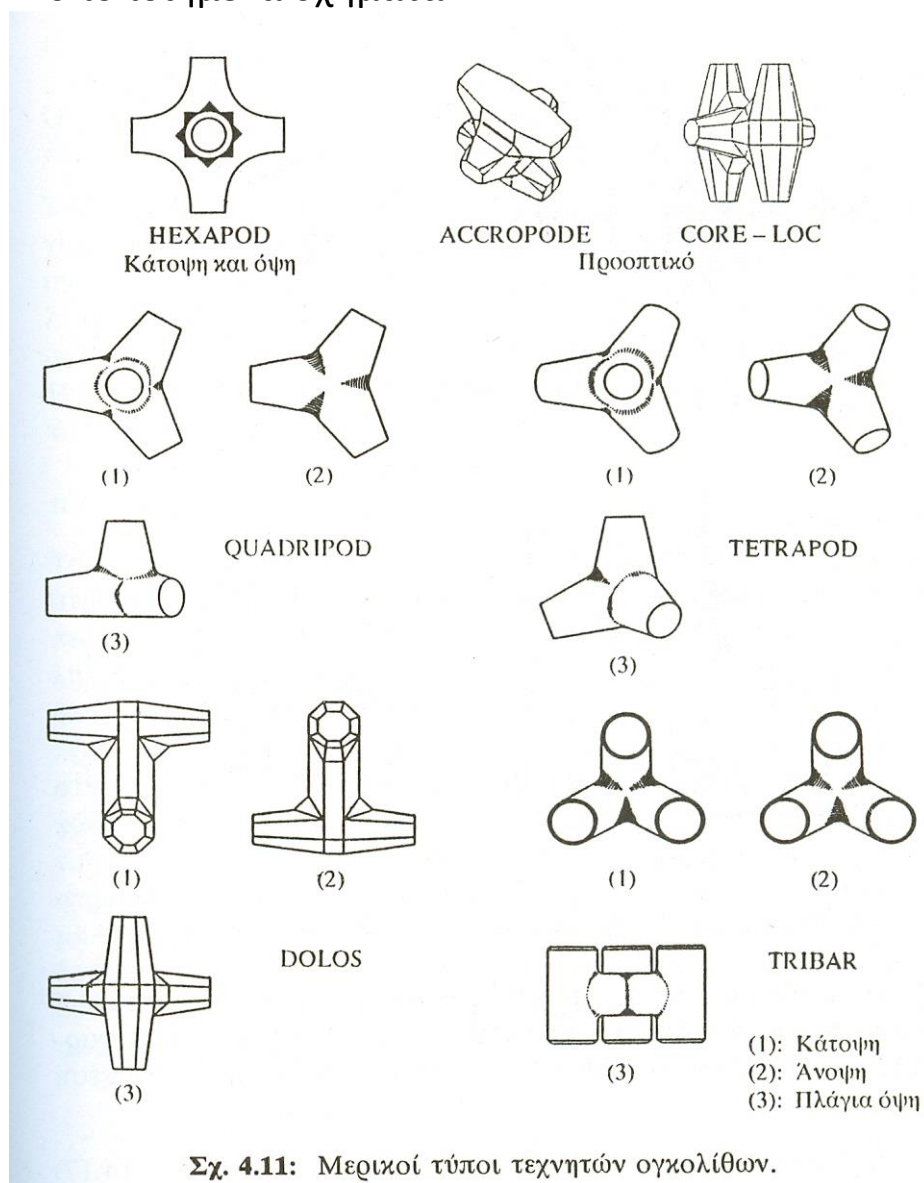
$$\text{Τάση } \sigma=(417.94+33.80)/64.27=7.03\text{t/m}^2 < 20 \text{ t/m}^2.$$

Στο παραπάνω παράδειγμα το πλάτος στέψης να ληφθεί ίσο με 4m και να αντιμετωπιστεί η υπερπήδηση με την τοποθέτηση στέψης από μπετόν των διαστάσεων του σχήματος. Να διαμορφωθεί και να ελεγχθεί πάλι η διατομή.

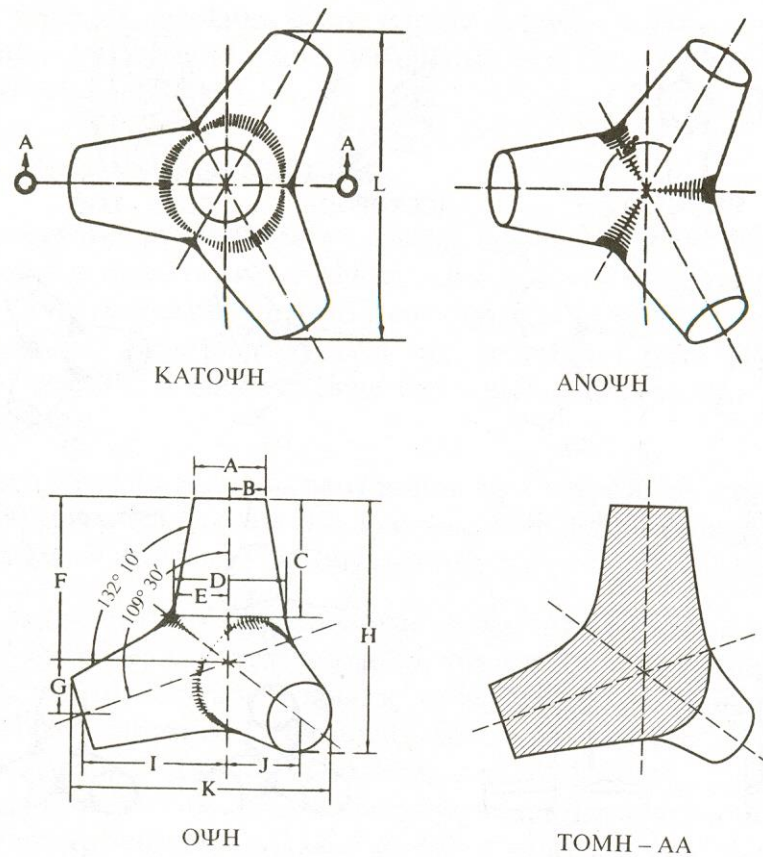
5.2.8 Τύποι τεχνητών ογκολίθων

Οι τεχνητοί ογκολίθοι

- Παρουσιάζουν καλύτερη αλληλο-εμπλοκή
 - Άρα μεγαλύτερος συντελεστής ευστάθειας σε σχέση με τους φυσικούς
- Πιο ευαίσθητοι στον κίνδυνο θραύσης
 - Λόγω εναλλασσόμενης κυματικής φόρτισης
- Κατασκευή από άοπλο σκυρόδεμα
- Τυποποιημένα σχήματα



- Τεχνικά χαρ/κα τετραπόδου



Σχ. 4.12: Τεχνικά χαρακτηριστικά ογκολίθου τύπου τετραπόδου.

- Όγκος μονάδας: $V = 0.28H^3$
 - Συνήθεις τιμές 0.2, 0.4, 0.8,... 20m³
- Πάχος θωράκισης (για n=2, 2 στρώσεις) $r = 1.361H$
- Αριθμός τετραπόδων / μονάδα επιφάνειας $\frac{N_r}{A} = \frac{2.383}{H^2}$
- Τα ακρόποδα τοποθετούνται συνήθως
 - σε μία στρώση
 - με γωνία πρανούς $\tan \theta = 0.75$