



Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος

ΜΠ535 – Παράκτια Μηχανική

Διάβρωση ακτών - Μέτρα αντιμετώπισης
Σχεδιασμός κυματοθραύστη

Διάβρωση ακτών

Μη αναστρέψιμη
οπισθοχώρηση της
ακτογραμμής

Οφείλεται σε φυσικές
διεργασίες αλλά και
ανθρωπογενείς επεμβάσεις



Morris Island, S. Carolina, USA
ΜΠ535 - Παράκτια Μηχανική

Φυσικές Διεργασίες

Δράση των κυματισμών

Παράκτια ρεύματα

Άνοδος στάθμης θάλασσας

Τεκτονικές κινήσεις

Έλλειμα στο ισοζύγιο ιζημάτων κ.α.

Επηρεάζονται από ανθρωπογενείς επεμβάσεις

Ανθρωπογενείς επεμβάσεις

Έργα διαχείρισης
λεκανών απορροής

Φράγματα

Λιμενοδεξαμενές

Εξαγωγή ιζημάτων

από ποταμούς και παραλίες

Παράκτια οικιστική
ανάπτυξη

Δρόμοι

Κτήρια

Κατασκευή

Λιμένων

Άστοχων έργων προστασίας

Κύριες αρνητικές επιπτώσεις

Απώλεια γης οικολογικής αξίας

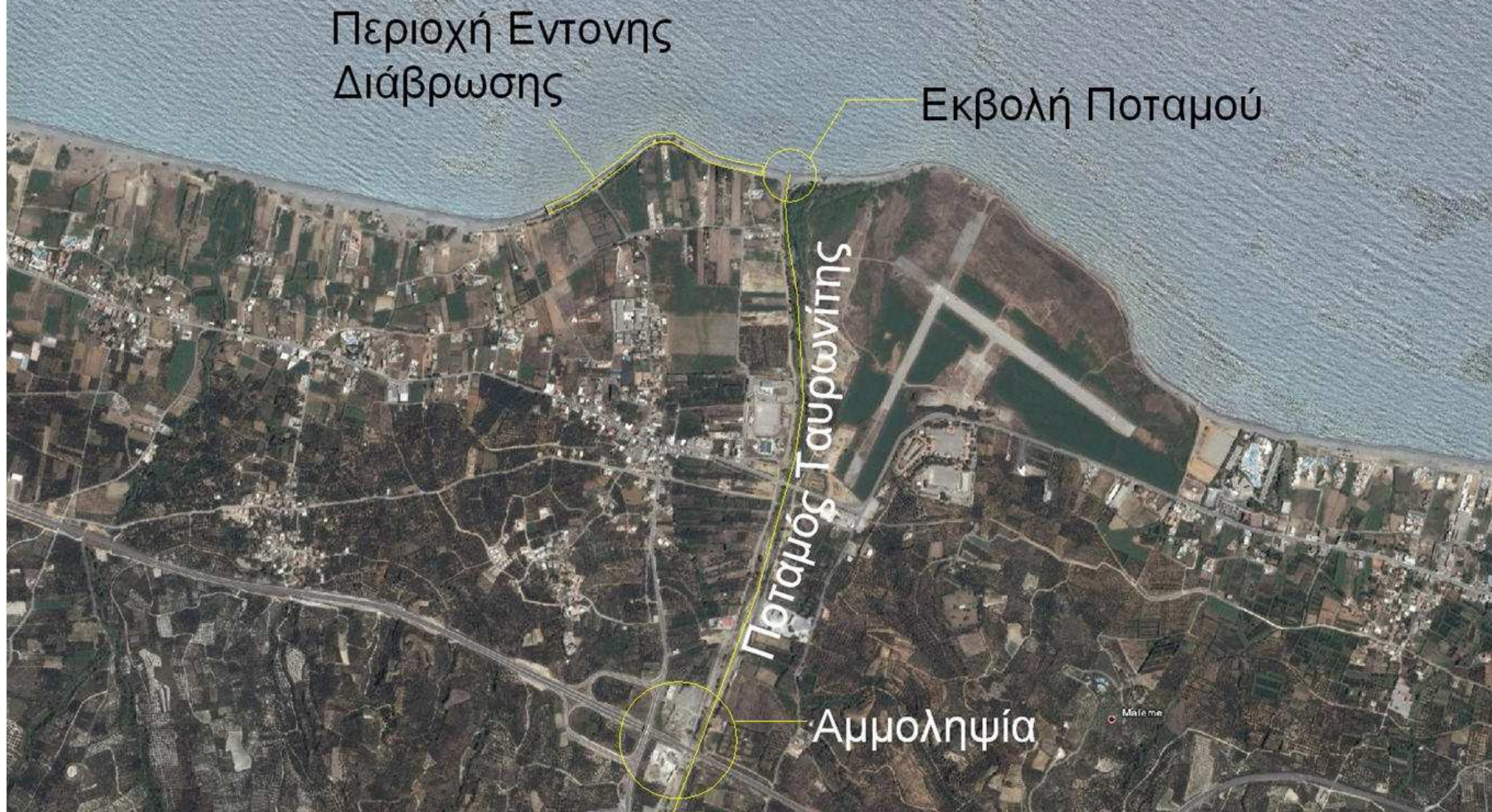
- Υφάλμυρα οικοσυστήματα
- Λιμνοθάλασσες
- Παράκτια έλη
- Αμμοθίνες

Αρνητικές συνέπειες στην οικονομία

- Οικιστική
- Τουριστική
- Δαπανηρές επενδύσεις
- Απώλειες περιουσιών



Ταυρωνίτης, Χανιά





Ταυρωνίτης, Χανιά

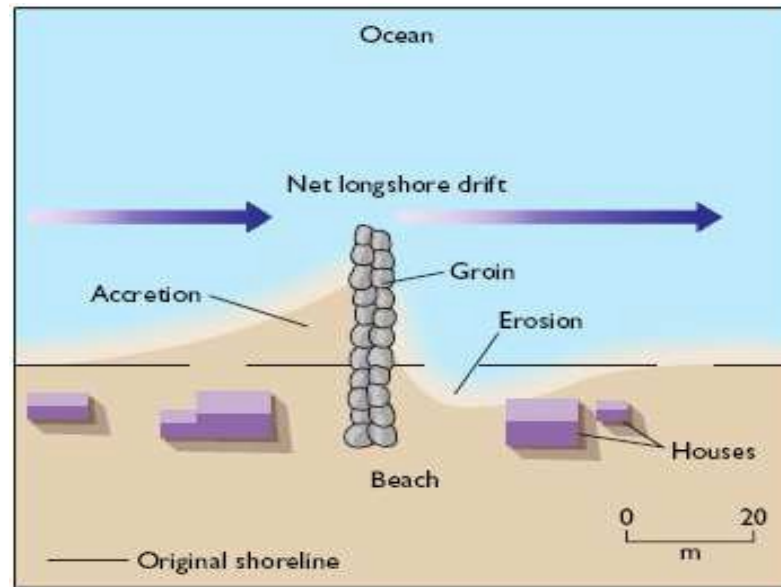


Αμμοληψία στην κοίτη του
ποταμού Ταυρωνίτη

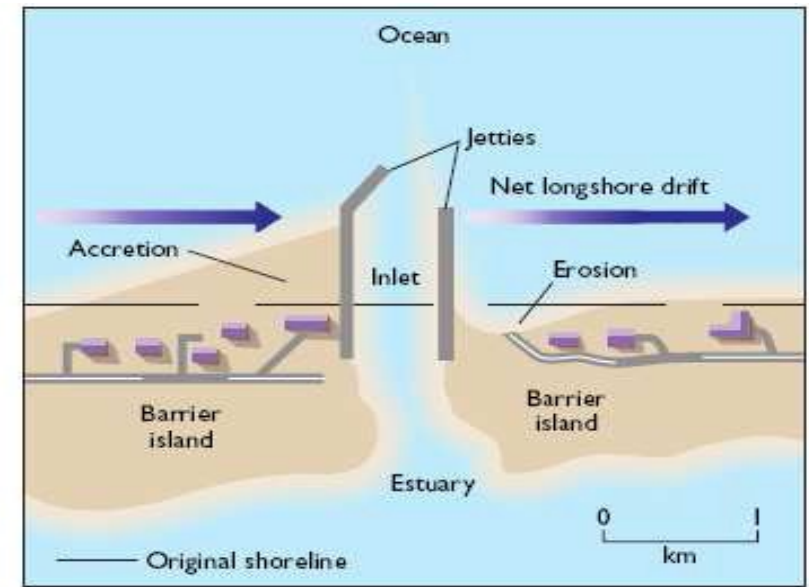
Επίδραση παράκτιων κατασκευών



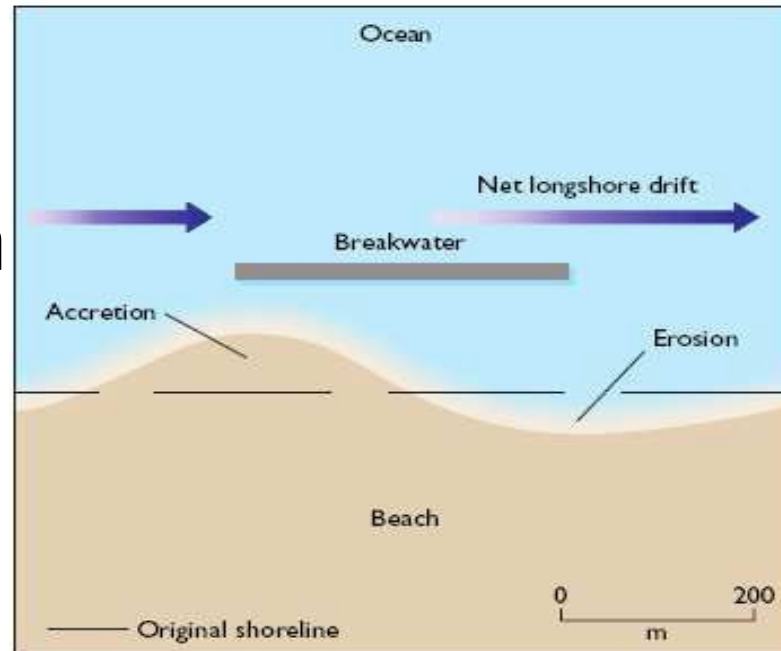
Επίδραση κοντών και μακριών προβόλων



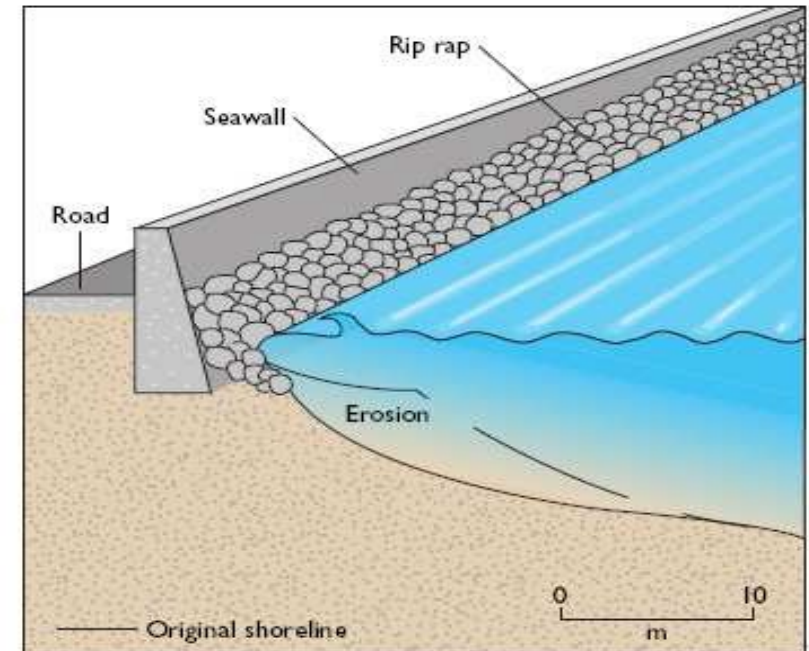
(a) GROIN



(b) JETTIES



(c) BREAKWATER

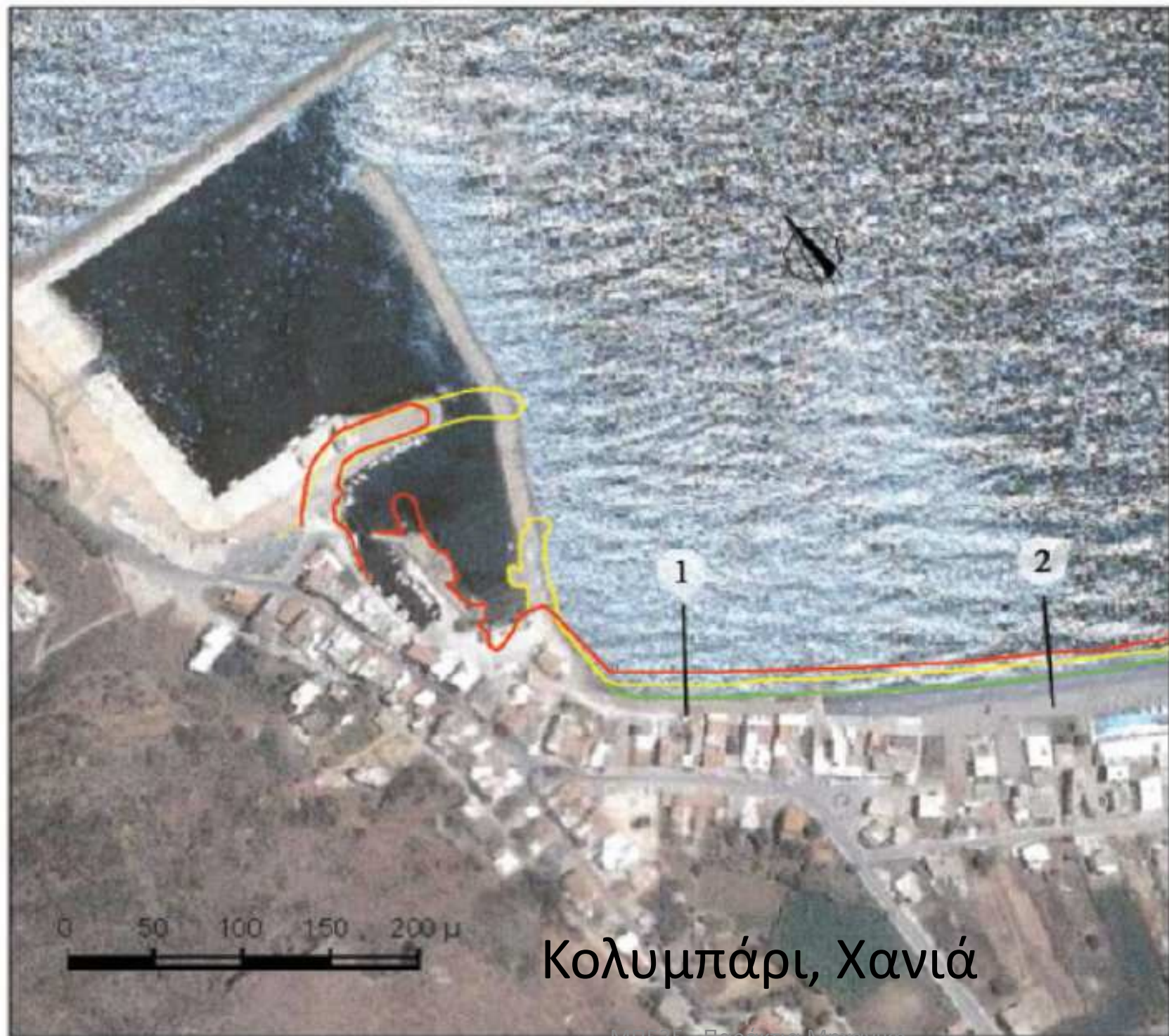


(d) SEAWALL

- Επίδραση
κυματοθραύστη
- Επίδραση
θαλάσσιου
τοίχους

Κολυμπάρι, Χανιά





— έτος 1973
— έτος 1983
— έτος 2005

τομή 1

— 7,3 m
— 8,0 m

τομή 2

— 5,5 m
— 8,5 m

Κολυμπάρι, Χανιά



Κολυμπάρι, Χανιά

ΜΠ535 - Παράκτια Μηχανική



Κολυμπάρι, Χανιά

ΜΠ535 - Παράκτια Μηχανική



Κολυμπάρι, Χανιά

ΜΠ535 - Παράκτια Μηχανική



Κολυμπάρι, Χανιά

ΜΠ535 - Παράκτια Μηχανική



Κολυμπάρι, Χανιά

ΜΠ535 - Παράκτια Μηχανική

Άνοδος Στάθμης Θάλασσας

Τεκτονικές Κάθετες Γήινες Κινήσεις

Αύξηση της Μέσης Παγκόσμιας Θερμοκρασίας

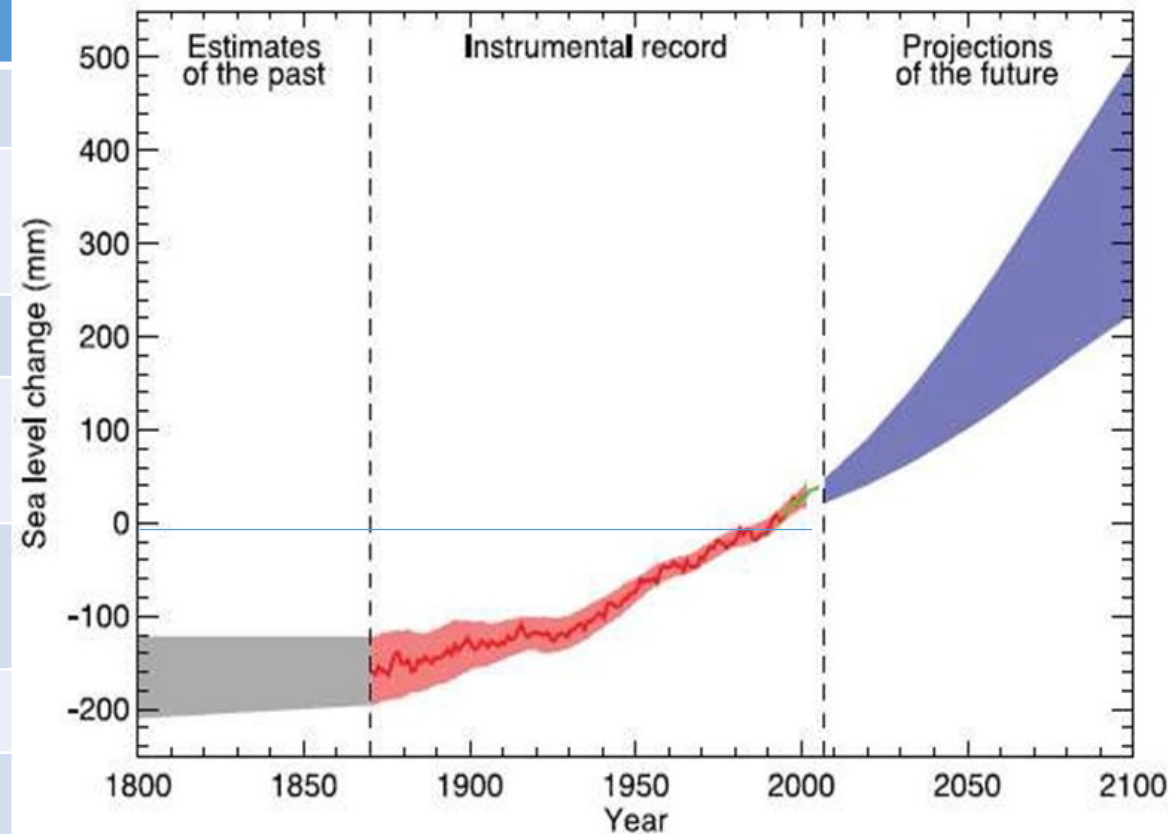
Παλιρροιακά Φαινόμενα και Εποχιακές Κλιματικές διακυμάνσεις

Φουσκοθαλασιές

Παρατηρημένη Αύξηση Στάθμης IPCC, 2007

Αιτία	Ρυθμός Αύξησης [mm/year]	
	1961-2003	1993-2003
Θερμική Διόγκωση	$0,42 \pm 0,12$	$1,6 \pm 0,5$
Παγετώνες	$0,50 \pm 0,18$	$0,77 \pm 0,22$
Πάγοι Γροιλανδίας	$0,05 \pm 0,12$	$0,21 \pm 0,07$
Πάγοι Ανταρκτικής	$0,14 \pm 0,41$	$0,21 \pm 0,35$
Άθροισμα	$1,1 \pm 0,5$	$2,8 \pm 0,7$
Παρατηρημένη	$1,8 \pm 0,5^a$	$3,1 \pm 0,7^a$
Διαφορά	$0,7 \pm 0,7$	$0,3 \pm 1,0$

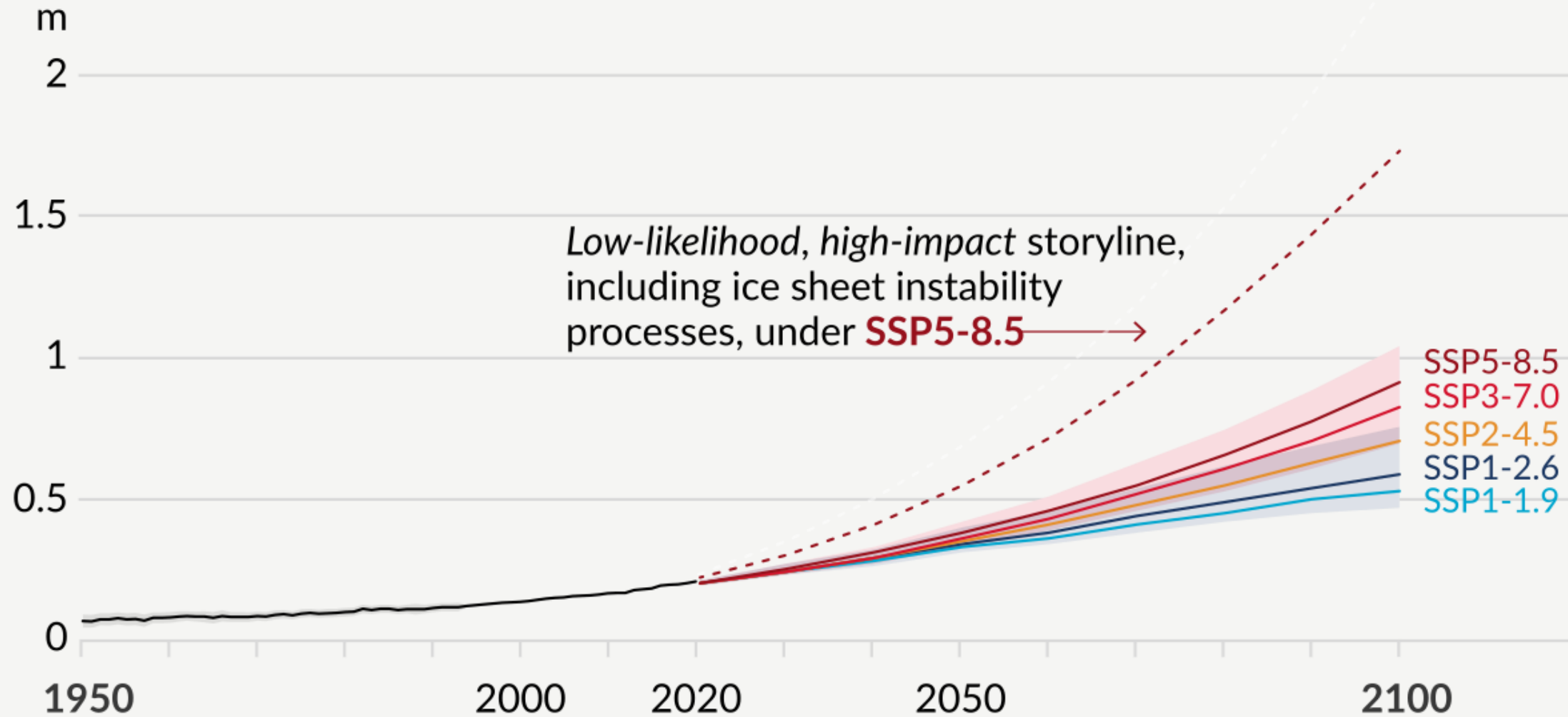
^a Μετρήσεις πριν το 1993 από σταθμούς παλίρροιας, ενώ μετά το 1993 από δορυφόρους



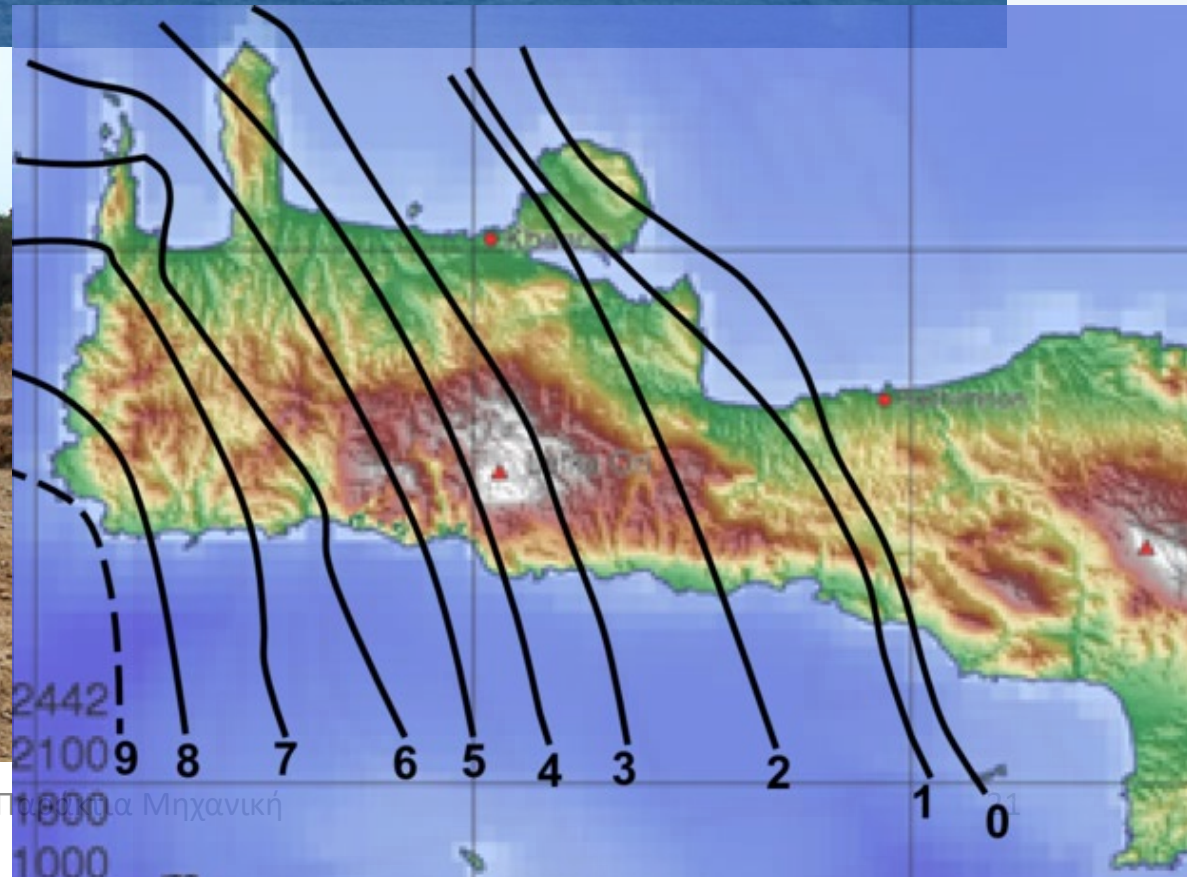
Παρατηρημένες τιμές και εκτιμήσεις

Αύξηση Στάθμης – σενάρια - IPCC, 2021

d) Global mean sea level change relative to 1900



Κάθετες τεκτονικές κινήσεις



Μείωση παροχής ιζημάτων



Η παροχή ιζημάτων στις παραλίες γίνεται από:

Ποταμούς / χείμαρρους

- προϊόντα διάβρωσης γεωλογικών σχηματισμών

Διάβρωση παρακτίων βραχωδών ακτών

- άμμο και ιζήματα σε γειτονικές παραλίες

Γειτονικές παραλίες

- κατά μήκος ακτής ιζηματομεταφορά

Μεταφορά υποθαλασσίων παρακτίων ιζημάτων

- constructive swells

Ανθρώπινες παρεμβάσεις

- εμπλουτισμός

Ιζηήματα χάνονται από τις παραλίες λόγω

Δράσης θυελλωδών κυμάτων

- Απομάκρυνση προς την ανοικτή θάλασσα

Αιολικής απομάκρυνσης τους προς την ενδοχώρα

Κατά μήκος ακτής μεταφορά προς γειτονικές παραλίες

Ανθρώπινων παρεμβάσεων

- Κατασκευή άστοχων παράκτιων έργων
- Εξόρυξη ποταμίων και παραλιακών ιζημάτων
- Παγίδευσης ιζημάτων ανάντη σε ποτάμια

Παγίδευση ιζημάτων σε φράγμα

WESTERN WATER

How a useless dam nearly destroyed an iconic beach

Jeremy P. Jacobs, E&E News reporter • Published: Wednesday, August 23, 2017



Local groups, including outdoor gear maker Patagonia, have been pushing to remove Matilija Dam in Ventura County for decades. Built in the 1940s, the dam no longer serves any purpose other than blocking sand that would otherwise reach the beach downstream. Anti-dam activists painted the scissors and dashes. Jeremy P. Jacobs/E&E News

Παγίδευση ιζήματος σε φράγμα

Ventura, CA, USA, 1994



2019



Μέτρα αντιμετώπισης της διάβρωσης

Μη δράση

Υποχώρηση και επανεγκατάσταση

Σκληρά μέτρα προστασίας

Ήπια μέτρα προστασίας (αναπλήρωση ακτών)

Μη δράση

Απλή επιλογή

- κανένα μέτρο προστασίας από διάβρωση

Ενώ η ακτογραμμή θα οπισθοχωρήσει

- η παραλία παραμένει περίπου η ίδια
- απλή μετατόπιση παραλίας και ιζημάτων

Όπου δεν υπάρχουν οικονομικά συμφέροντα

Όμως λόγω συνήθους οικοδομικής ανάπτυξης

- αδύνατη η εφαρμογή της μη δράσης

Υποχώρηση και επανεγκατάσταση

Οπισθοχώρηση πληθυσμών στα ενδότερα

- σε περιοχές μακριά από την ακτή

Υποδομές εγκαταλείπονται, άλλες (μεγάλης πολιτιστικής ή/και συναισθηματικής αξίας) μεταφέρονται

Μερικές φορές είναι η καλύτερη δυνατή στρατηγική

- από οικονομική και αισθητική άποψη
- δεν είναι πάντα εφικτή λόγω κυρίως κοινωνικών και οικονομικών λόγων

Σκληρά μέτρα προστασίας

Αδιαπέρατο όριο θάλασσας - ξηράς

Αντιστέκονται στην ενέργεια των κυματισμών

Προτιμώνται συχνά ως η μόνη εφικτή λύση

Ο τύπος εξαρτάται από

- τοπικές συνθήκες
- ικανότητα μελετητών και κατασκευαστών
- οικονομικές και πολιτικές πιέσεις

Πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα

Τύποι παράκτιων έργων προστασίας

Παράκτιοι τοίχοι (seawalls and revetments)

Πρόβολοι

- (κάθετα έργα στην ακτογραμμή) (groynes/jetties)

Σταθεροποίηση κρημνών

- (cliff stabilisation)

Κυματοθραύστες

- (απομακρυσμένοι από την ακτή – παράλληλα στην ακτογραμμή έργα) (offshore breakwaters)

Παράκτιοι τοίχοι

Κατασκευές παράλληλες και πάνω στην παραλία

Προστατεύουν ενδοχώρα & υποδομές από διάβρωση

Τείνουν να εξαφανίζουν την παραλία

- λόγω θραύσης και αναρρίχησης κυμάτων

Συνήθως μειώνει το πλάτος της παραλίας

- ή συνεισφέρει σε περαιτέρω διάβρωση

Παράκτιοι τοίχοι

Περιορίζουν την πρόσβαση στην παραλία

Αισθητικά ασύμβατοι με το περιβάλλον

Αλλάζουν τα παράκτια ενδιαιτήματα

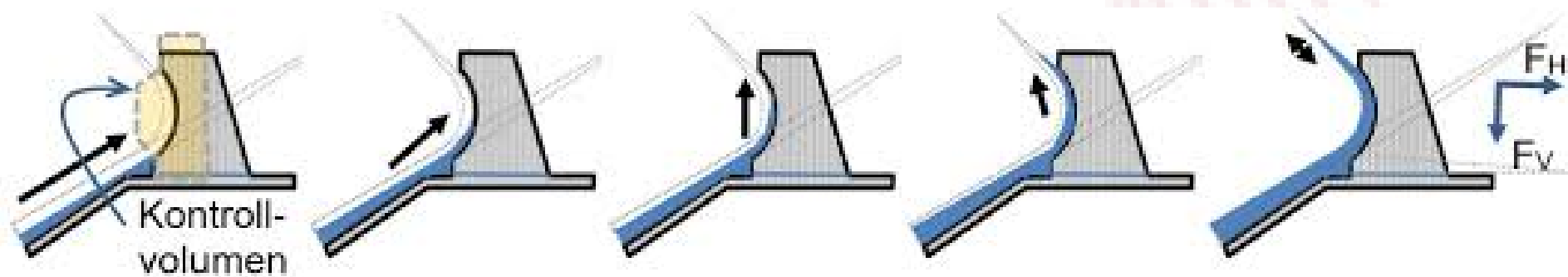
Αλλάζουν το τοπικό κυματικό καθεστώς

Περιορίζουν την παροχή ιζήματος προς την παραλία





Εκτροπείας κυμάτων



Πρόβολοι

Κάθετοι στην ακτή

Συγκρατούν ιζήματα και εμποδίζουν διάβρωση

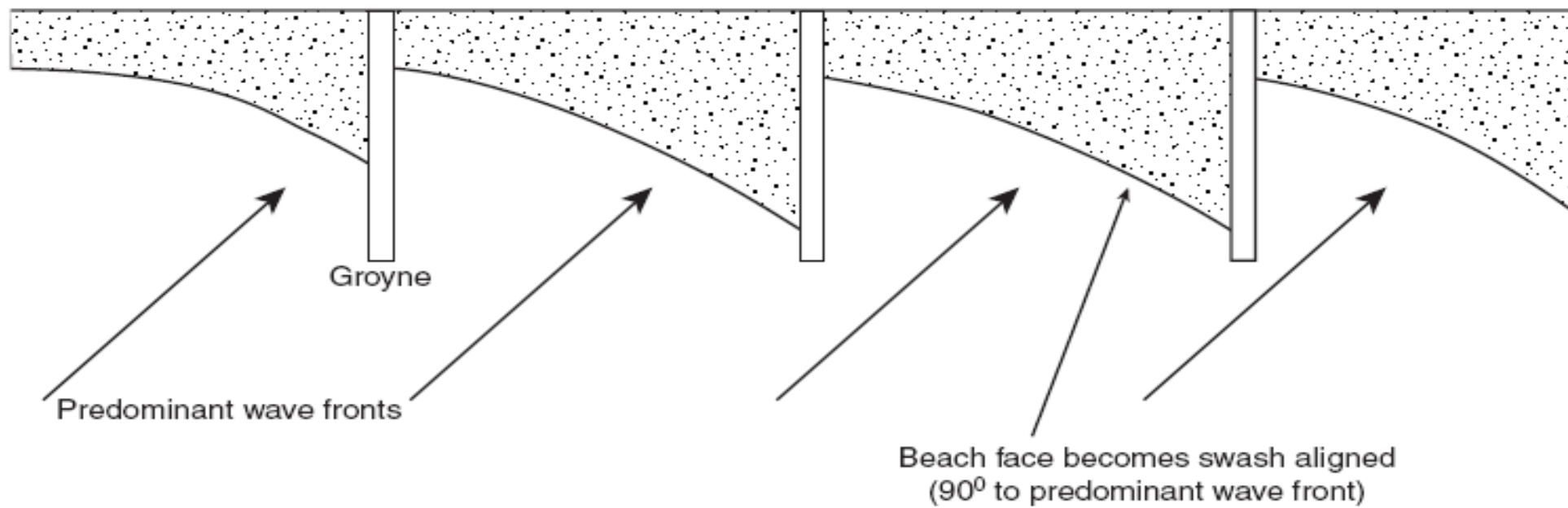
Αποσβένουν κυματική ενέργεια λόγω πρόσχωσης

Επιτυγχάνουν μόνο τοπικά αποτελέσματα

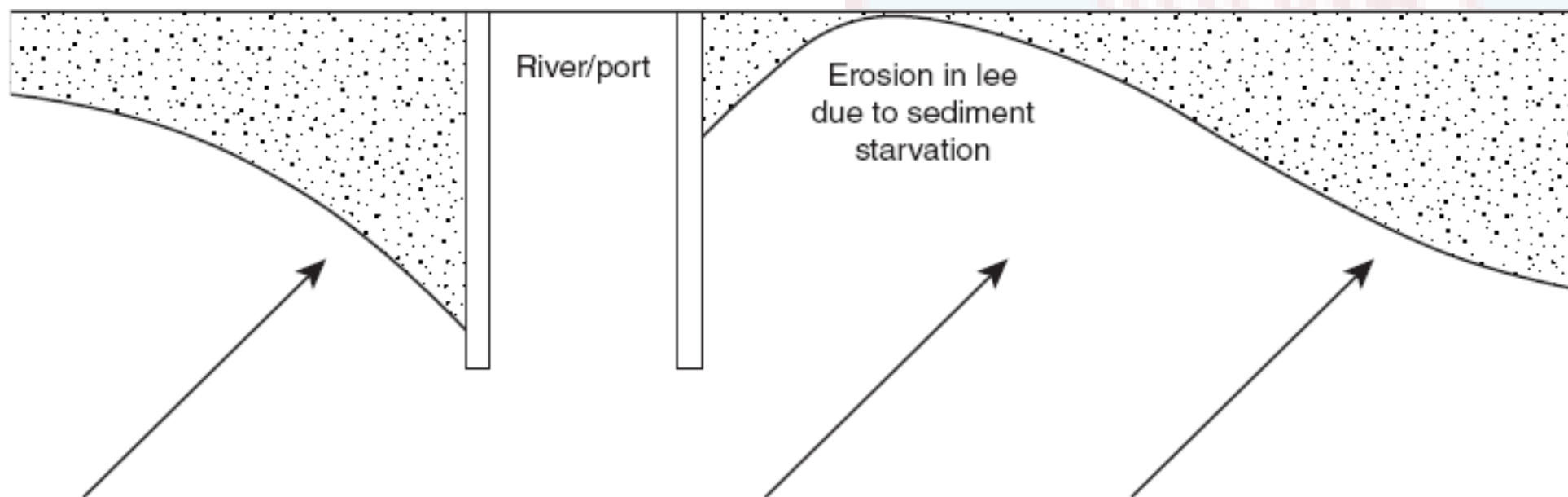
- Απόθεση Ανάντη - Διάβρωση Κατάντη

Πολύπλοκη μελέτη κατασκευής

- Μήκος
- Ύψος
- Απόσταση από ακτή
- Διαστήματος μεταξύ τους



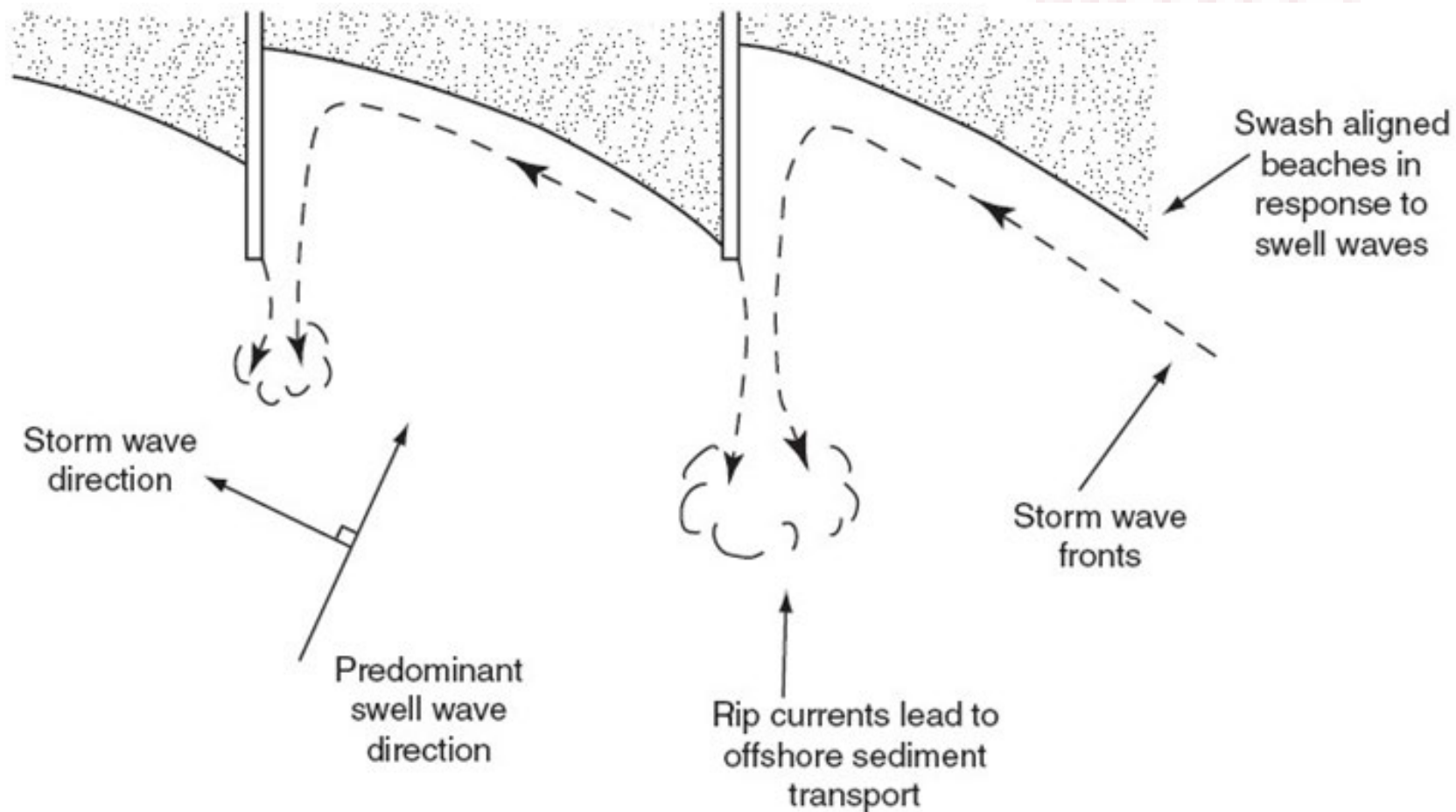
French P., 2001

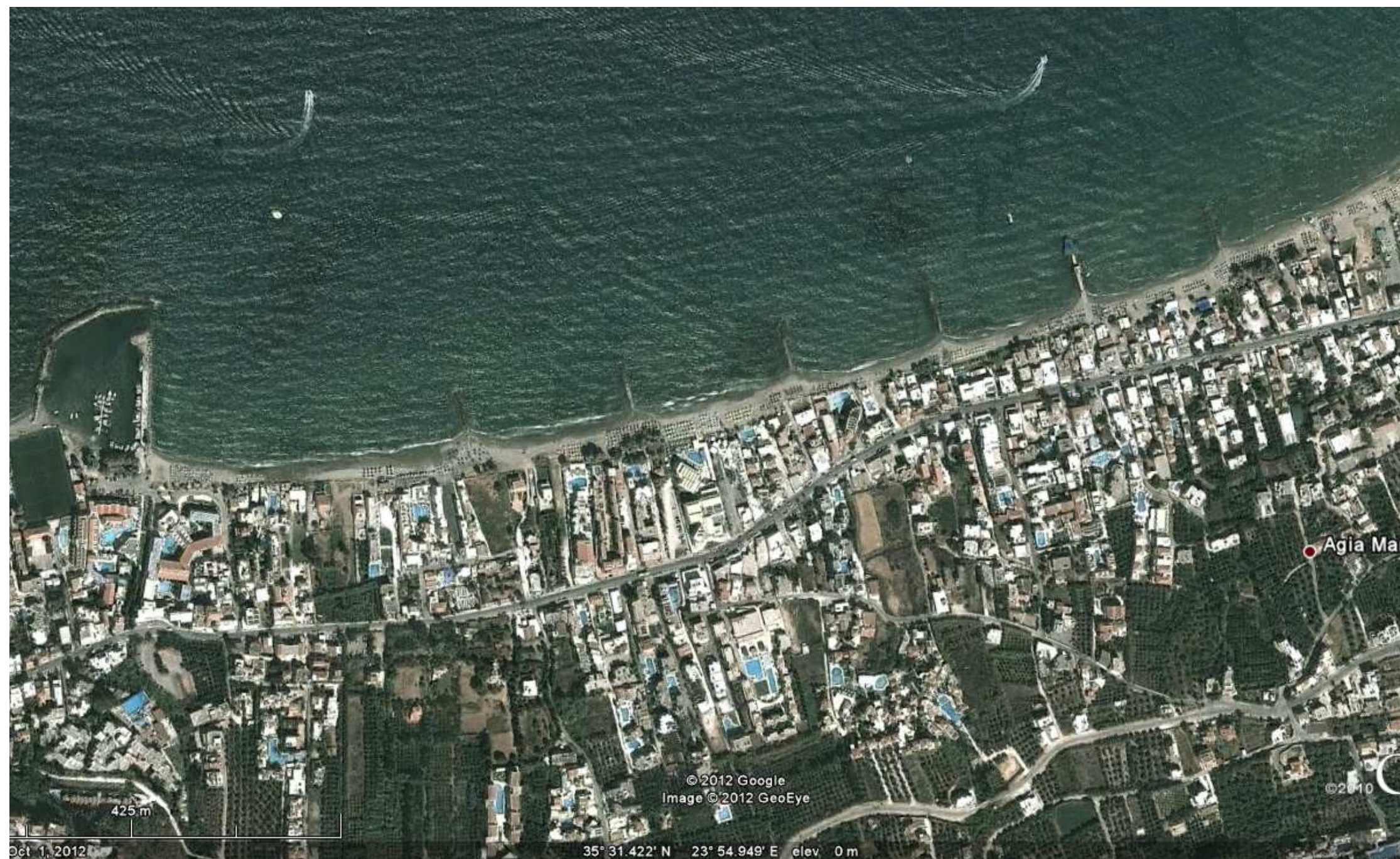


Απώλειες λόγω Προβόλου

Παρεμπόδιση παράλληλης προς την ακτή στερεομεταφοράς

Απώλεια ιζημάτων προς τα ανοιχτά λόγω ρευμάτων





Πλατανιάς, Χανιά

ΜΠ535 - Παράκτια Μηχανική



Κυματοθραύστες

Κυματοθραύστες (απομακρυσμένοι από την ακτή – παράλληλα στην ακτογραμμή έργα)

Πιο συνηθισμένες κατασκευές

Σκοπός: κυματική θραύση μακριά από παραλία

- Μείωση προσπίπτουσας κυματική ενέργεια

Λόγω κυματικής περίθλασης

- Σύγκλιση ιζηματομεταφοράς στην 'σκιά' της κατασκευής
- Πιθανή διάβρωση στα κατάντη.

Περίπλοκη μελέτη κατασκευής

- σχεδιασμός μήκους, ύψους απόστασης από ακτογραμμή και διαστήματος μεταξύ διαδοχικών

Wave direction

Wave refraction

Wave attack and direction

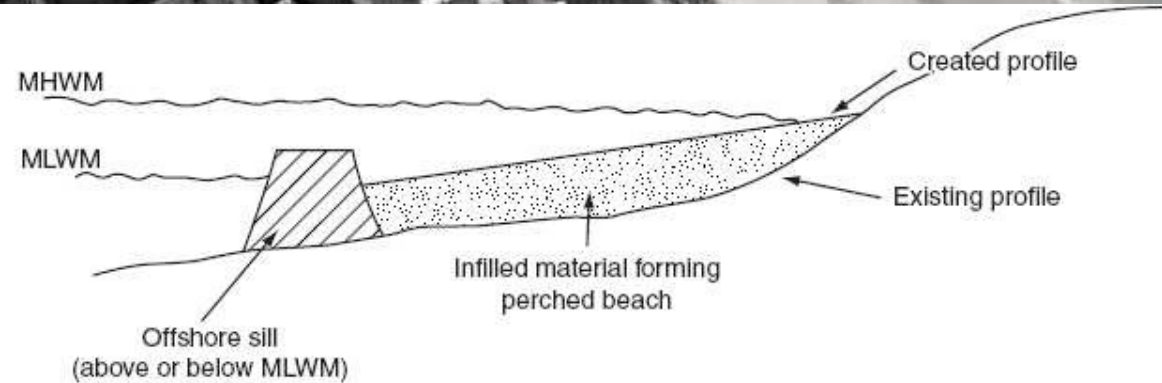
Gradual infilling with sediment

Wave direction and recreation through gaps

Tombolo formation

The diagram shows a plan view of a coastline. Three arrows from the top left represent incoming waves. The middle wave is being refracted by a small bay. A dashed line indicates the 'Channelled ebb flow' moving from the bay towards the right. On the right side, a larger area of sand accumulation is labeled 'Salient and cusped beach formation'. The beach is shown as a series of small mounds (cusps) along the shoreline. The area between the waves and the beach is labeled 'Wave refraction'.

An aerial photograph of a coastal area. On the left, there is a sandy beach and some buildings. In the water, there is a large, dark, rectangular structure, possibly a shipwreck or an artificial structure. The water is calm, and the sky is overcast.



Ύφαλος κυματοθραυστης -> Η κατασκευή και η στέψη της βρίσκονται μέσα στη θάλασσα

Ίσαλος κυματοθραυστης ->
Η κατασκευή βρίσκεται μέσα στη θάλασσα και η στέψη της βρίσκεται στην επιφάνεια.



Έξαλλος κυματοθραυστης ->
Η στέψη εξέχει της επιφάνειας της θάλασσας.



Κυματοθραύστης – Μόλος

Παρόμοιες έννοιες – παρόμοιος αντικειμενικός σκοπός

- **Μόλοι**
 - Έργα προστασίας από κυματισμούς και δημιουργία λιμενολεκανών.
 - Επιμήκη έργα, με αφετηρία εγκάρσια στην ακτή.
- **Κυματοθραύστες:**
 - Έργα παράλληλα στην ακτή.
 - Προστασία από κυματισμούς των θαλασσίων εκτάσεων πίσω τους
 - προστασία ακτών από διάβρωση.
 - Διατομές όμοιες με αυτές των μόλων

Κυματοθραύστης – Μώλος



Ήπια μέτρα προστασίας

Εμπλουτισμός
παραλίας

- Καλύτερη ψυχαγωγική ακτή
- Προστασία ενδοχώρας

Βασικό
πλεονέκτημα

- Αισθητική

Ακριβή

- Μεγάλη προσοχή στον σχεδιασμό

Επανεμπλουτισμός

- Ακριβή λύση και μακροπρόθεσμα

Απαιτείται προσεκτική επιλογή υλικών

Καλύτερη επιλογή

- Θαλάσσια ιζήματα μακριά από την ακτή

Διάμεση διάμετρος και εύρος ιζημάτων

- Μεγαλύτερα των ιζημάτων της παραλίας

Απαιτούνται εμπεριστατωμένες μελέτες

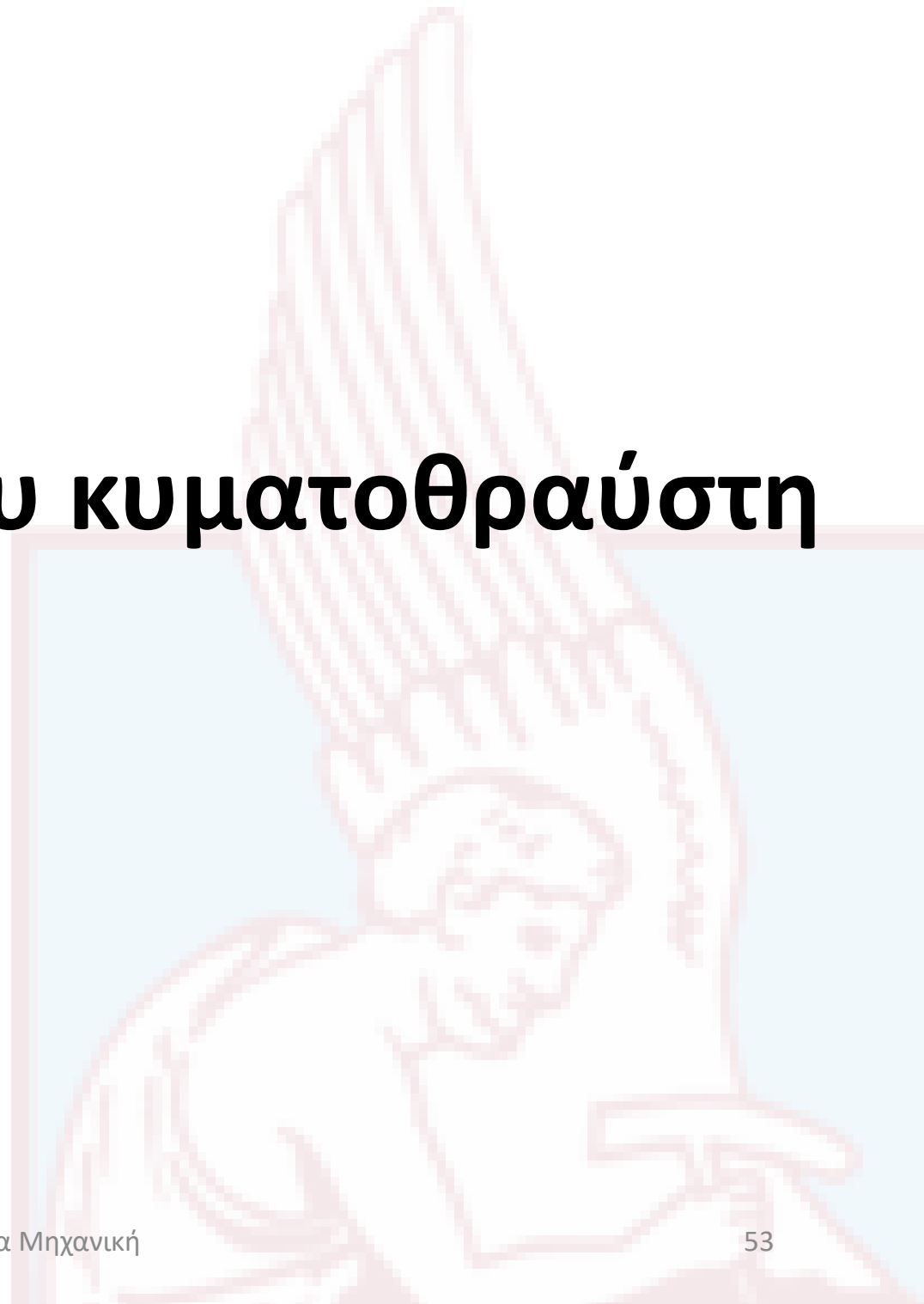
- Κύματος
- Ιζήματος
- Προφίλ παραλίας
- Ρεύματα
- Χρήση αξιόπιστων αριθμητικών μοντέλων





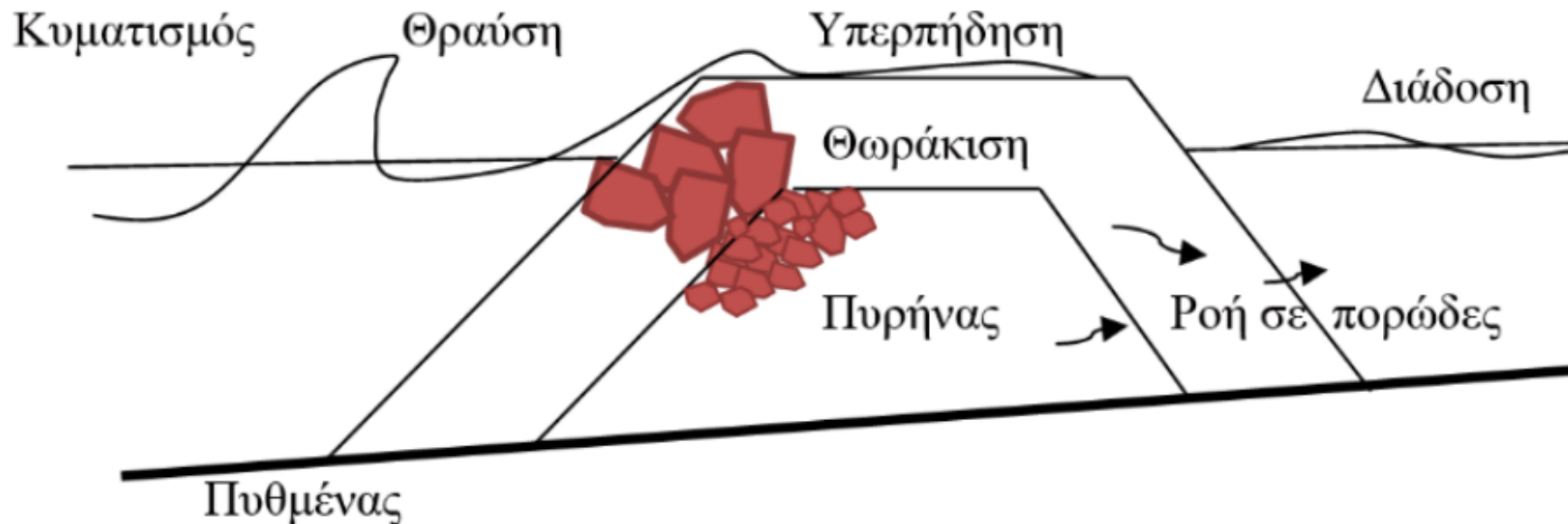


Σχεδιασμός έξαλλου κυματοθραύστη



Σχεδιασμός κυματοθραύστη

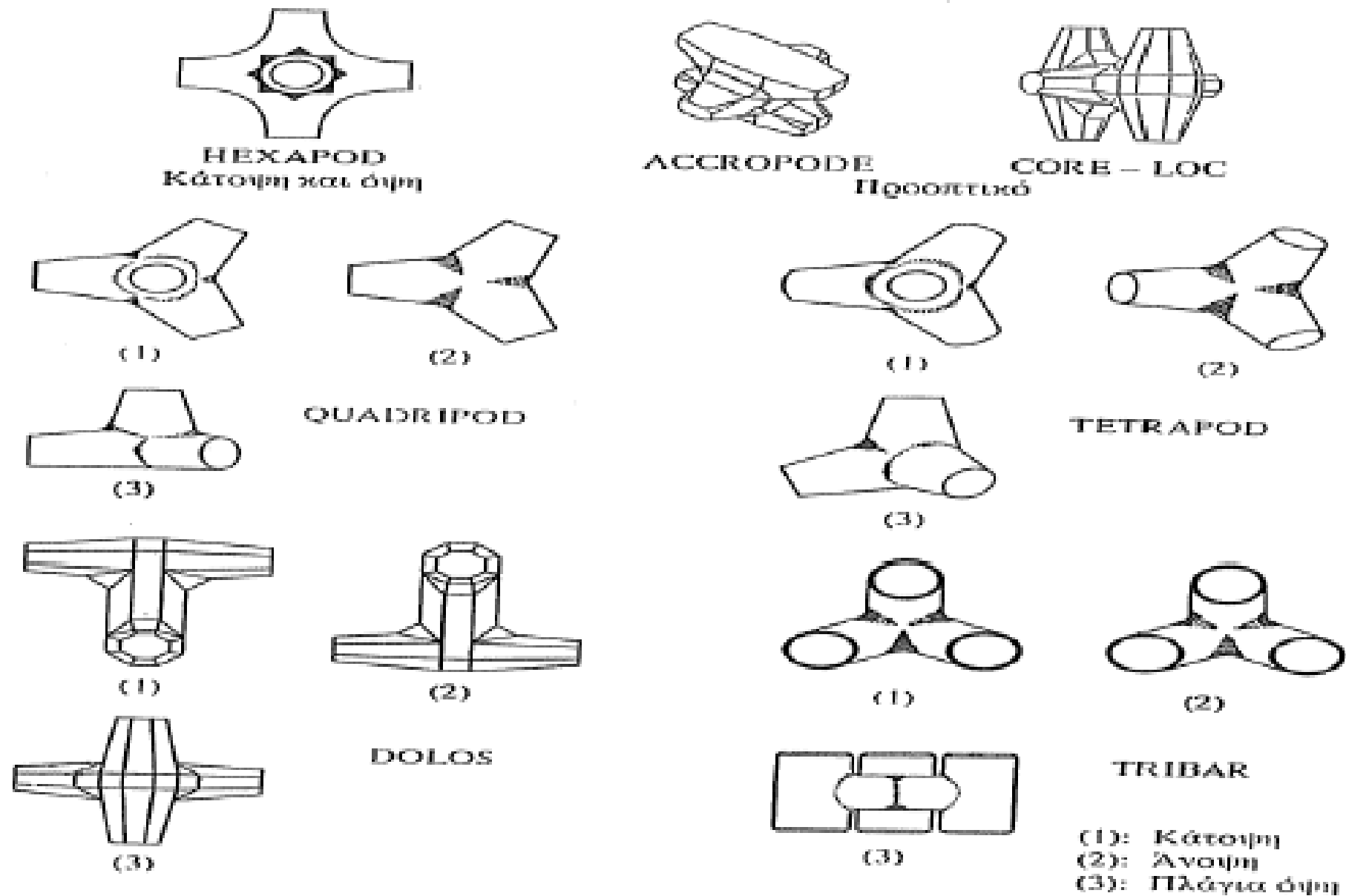
- Οι έξαλλοι κυματοθραύστες κατασκευάζονται με ύψος στέψης πάνω από τη μέση στάθμη της θάλασσας (Μ.Σ.Θ.) μεγαλύτερο των 2 m περίπου.
- Σχεδιάζονται ώστε, κάτω από συνήθεις κυματικές συνθήκες, να τους διαπερνά ένα μικρό μέρος της κυματικής ενέργειας
 - είτε με την υπερπήδηση κυματισμών είτε με τη μετάδοσή τους μέσα από το πορώδες της κατασκευής



Σχεδιασμός κυματοθραύστη

- Οι κυματοθραύστες με κεκλιμένες παρειές διαμορφώνονται από λιθορριπές και ογκολίθους
 - (φυσικούς ή τεχνητούς ή συνδυασμό και των δύο)
- Οι τεχνητοί ογκόλιθοι κατασκευάζονται με κοινό άοπλο σκυρόδεμα και μπορούν να έχουν διάφορα σχήματα
- Επίσης, χρησιμοποιούνται τεχνητοί ογκόλιθοι ειδικής μορφής από σκυρόδεμα υψηλής αντοχής.
 - δίποδο (STABIT)
 - το τρίποδο (TRIBAR)
 - Γαλλικό τετράποδο (TETRAPOD)
 - Αμερικανικό τετράποδο (QUADRIPOD)
 - Άγκυρα (DOLOS),
 - εξάποδο κ.α.

Σχεδιασμός κυματοθραύστη

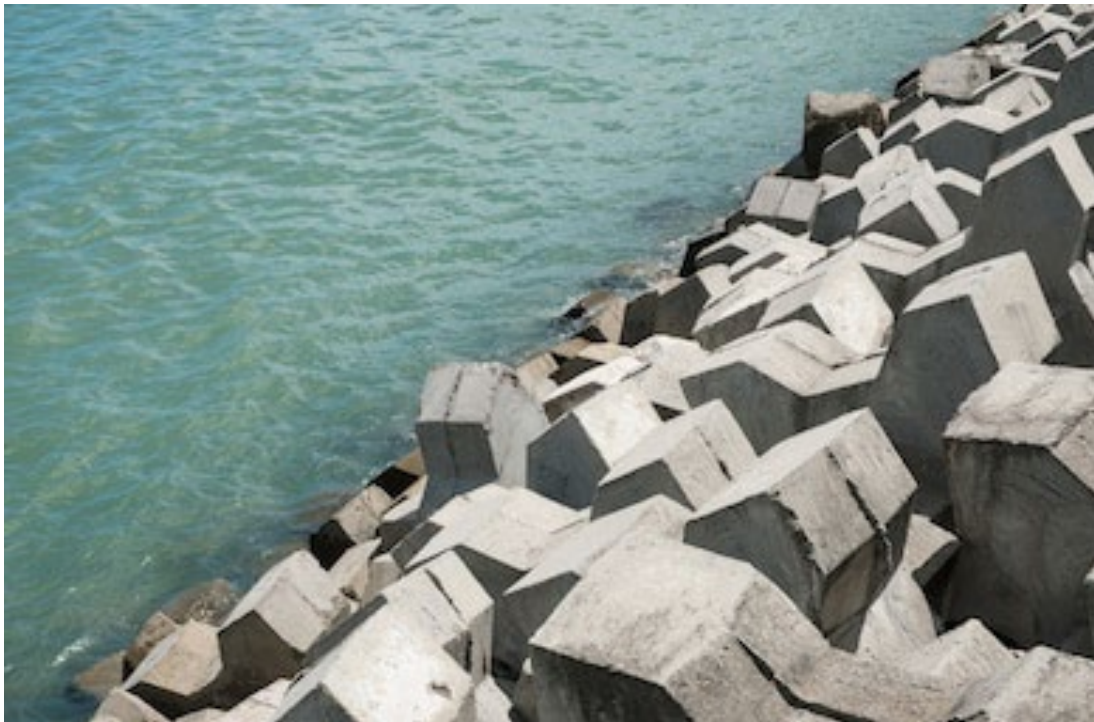


Σχήμα 11. Μερικοί τύποι τεχνητών ογκολίθων (Μέμος, 2008)

Σχεδιασμός κυματοθραύστη

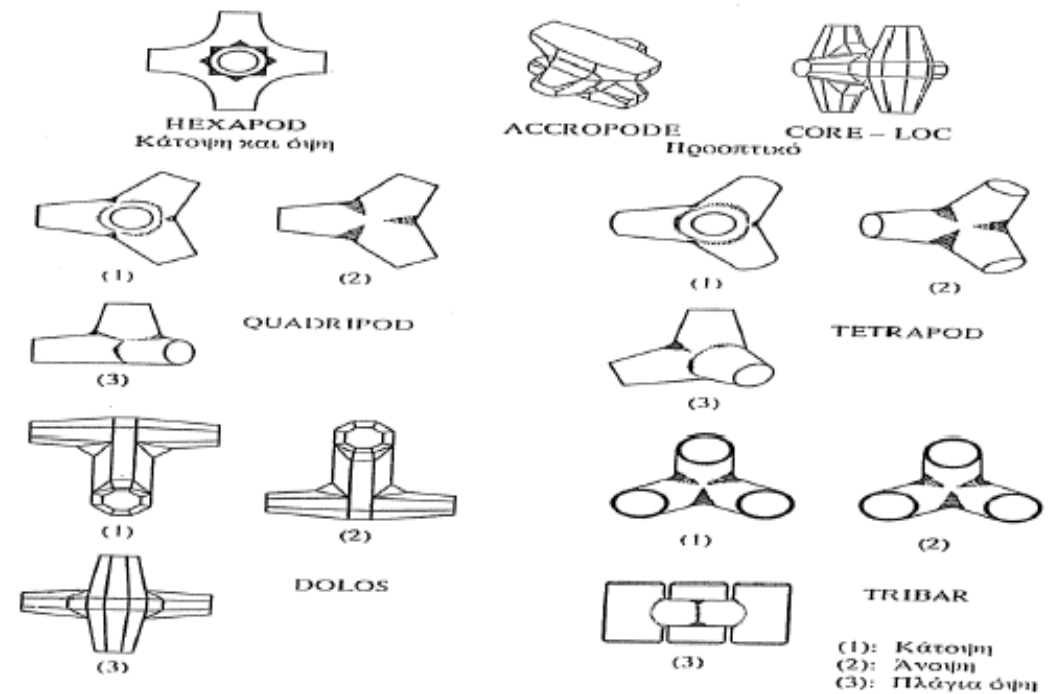


Σχεδιασμός κυματοθραύστη



Σχεδιασμός κυματοθραύστη

- Οι τεχνητοί ογκόλιθοι της στρώσης θωράκισης παρουσιάζουν καλύτερη αλληλοεμπλοκή:
 - Συντελεστής ευστάθειας είναι μεγαλύτερος από των φυσικών ογκολίθων.
- **Όμως είναι πιο ευαίσθητοι σε θραύση**
- Η κύρια αιτία επιλογής τεχνητών ογκολίθων θωράκισης: η απαίτηση βάρους λίθων πάνω από τις δυνατότητες των τοπικών λατομείων.

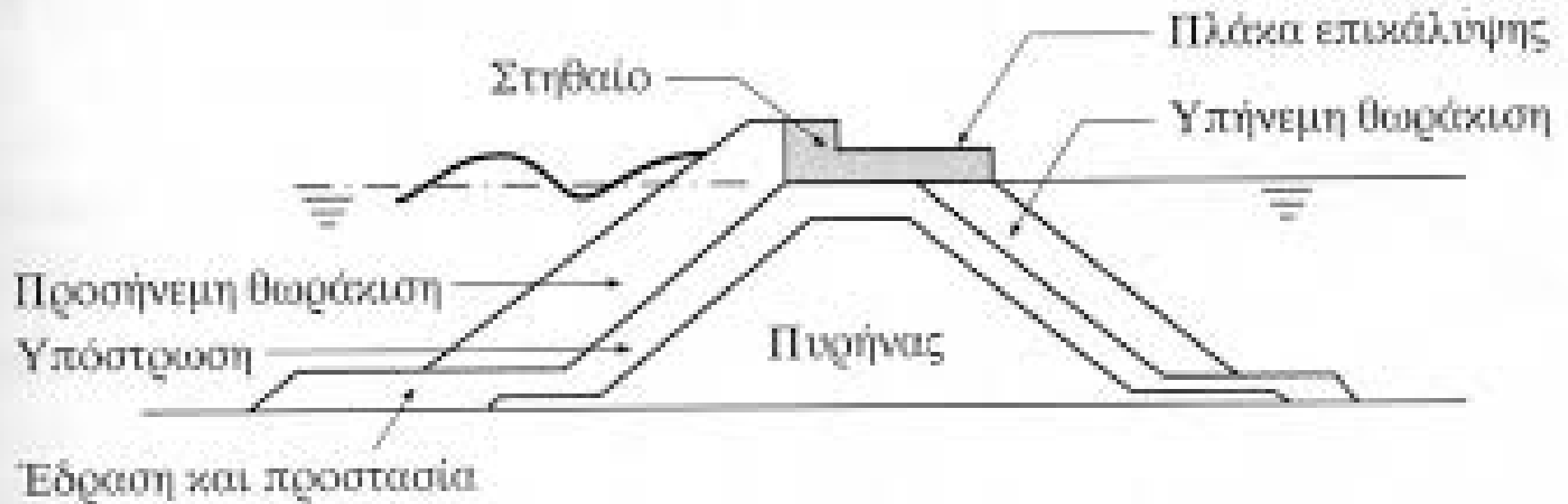


Σχήμα 11. Μερικοί τύποι τεχνητών ογκολίθων (Μέμος, 2008)

Σχεδιασμός κυματοθραύστη

- Η κατασκευή της διατομής των κυματοθραυστών με **κεκλιμένα μέτωπα** γίνεται κατά **καπελωτά στρώματα** με υλικά κατά κανόνα **διαφορετικής διαβάθμισης σε βάρος**.
 - Το πιο εσωτερικό στρώμα λέγεται πυρήνας.
 - Τα επόμενα στρώματα ονομάζονται ενδιάμεσα ή δευτερεύοντα στρώματα,
 - Το ανώτατο πάνω λέγεται εξωτερικό στρώμα ή μανδύας.
- Οι δυνάμεις του κύματος διασκορπίζονται και καταστρέφονται πάνω στον προσήνεμο μανδύα (θώρακα).

Σχεδιασμός κυματοθραύστη

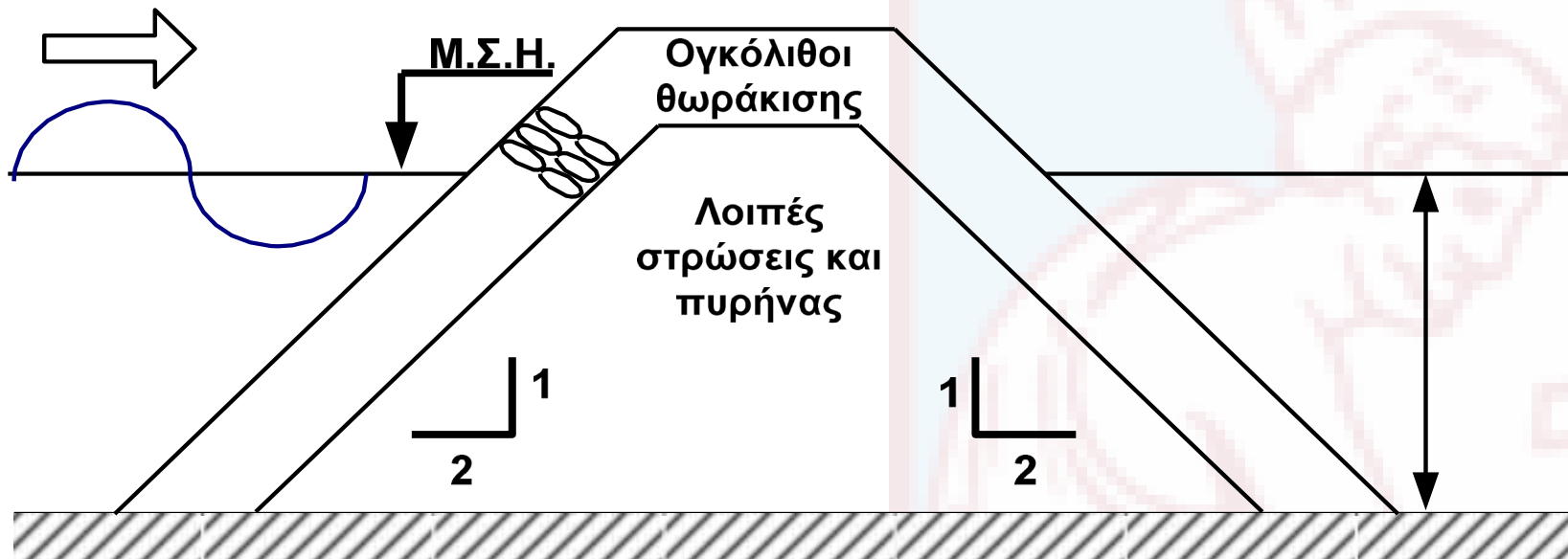


(β) Εξωτερικό έργο με πράνη και πλάκα επικάλυψης

Σχεδιασμός κυματοθραύστη

- Για τον σχεδιασμό ενός έξαλλου κυματοθραύστη με πρηνή είναι απαραίτητος ο καθορισμός μερικών βασικών παραμέτρων όπως:
 - Η αναρρίχηση του κύματος
 - Η γεωμετρία της διατομής
 - Υπολογισμός βάρους ογκολίθων

Διεύθυνση πρόσπτωσης
κυματισμών



Σχεδιασμός κυματοθραύστη

- Τύποι υπολογισμού:
 - Υπολογισμός απαιτούμενου βάρους ογκολίθων θωράκισης, Τύπος Hudson

$$W_r = \frac{\gamma_s H i^3 \tan \theta}{k_D \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right)^3}$$

W_r = το απαιτούμενο μέσο βάρος του ογκολίθου στη στρώση θωράκισης,

γ_s = ειδικό βάρος του πετρώματος των ογκολίθων

$H i$ = ύψος κύματος σχεδιασμού (μαζί με την αναρρίχηση στο πρανές)

$\tan \theta$ = κλίση πρανών κυματοθραύστη, (οπωσδήποτε πάνω από 1.5, καλύτερα 2 ή μεγαλύτερη)

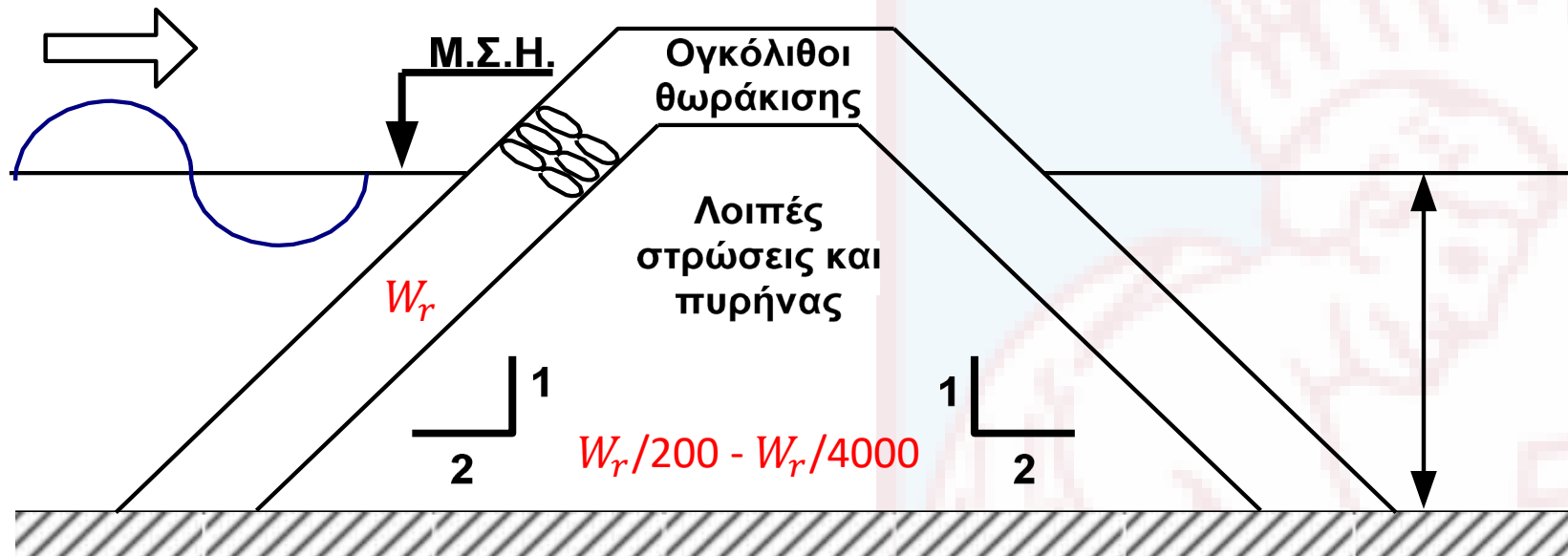
K_D = συντελεστής ευστάθειας, εξαρτάται από το σχήμα των ογκολίθων και την δυνατότητα αλληλοεμπλοκής των μονάδων θωράκισης (δίνεται από Πίνακα)

Σχεδιασμός κυματοθραύστη

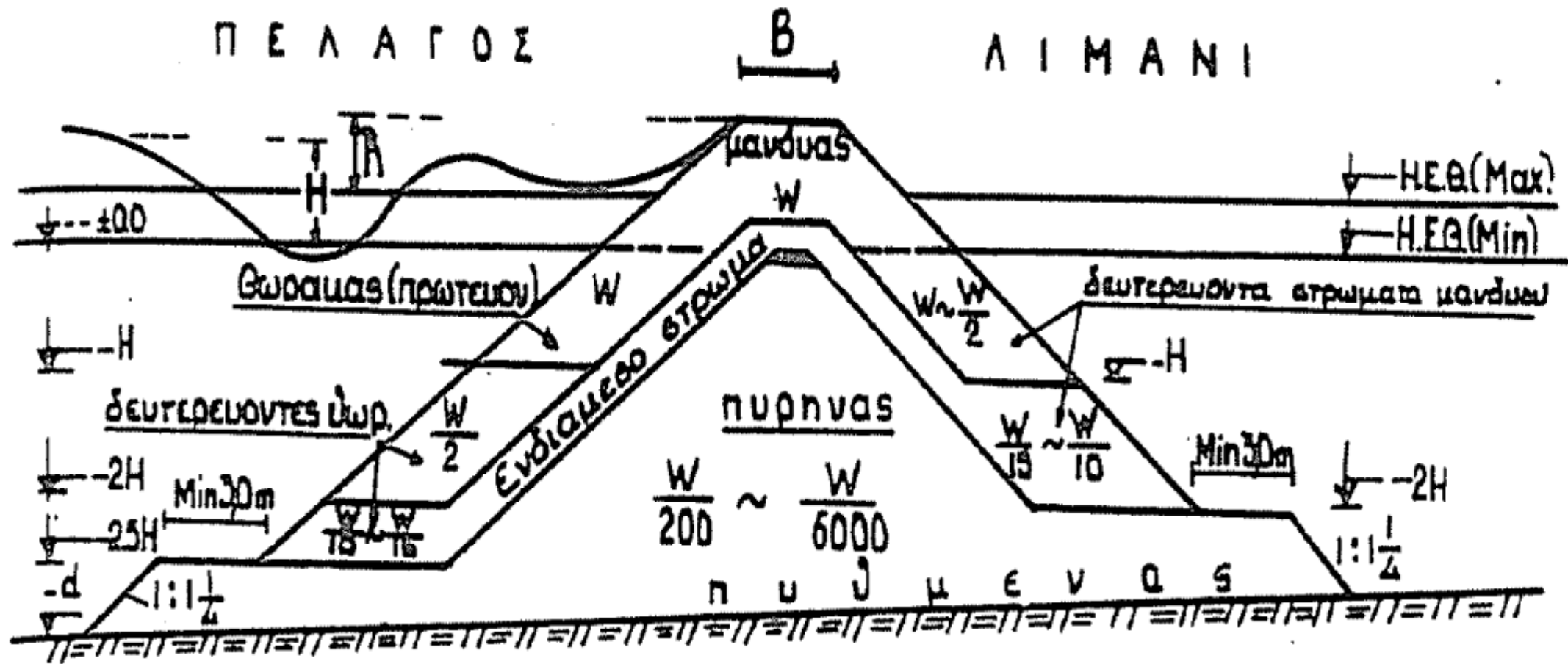
- Τύποι υπολογισμού:
 - Υπολογισμός απαιτούμενου βάρους ογκολίθων θωράκισης, Τύπος Hudson

$$W_r = \frac{\gamma_s H i^3 \tan \theta}{k_D \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right)^3}$$

Διεύθυνση πρόσπτωσης
κυματισμών



Σχεδιασμός κυματοθραύστη



Σχεδιασμός κυματοθραύστη

• K_D

$$\text{Cot}\theta = 1/\tan\theta = 1/\kappa\lambda\acute{\iota}\sigma\eta$$

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

πλήθος λίθων κατά το πάχος της θωράκιση

Σχεδιασμός κυματοθραύστη

- Τύποι υπολογισμού:
 - Αναρρίχηση κυματισμού στο πρανές

$$\frac{R}{H} = \frac{2,3 * \tan \theta}{\frac{8}{T} \sqrt{\frac{H}{2g}}} * r$$

R αναρρίχηση κυματισμού

H ύψος κύματος σχεδιασμού

θ κλίση πρανούς (συνήθως 0.5 ή μεγαλύτερη)

T περίοδος κυματισμού

r μείωσης αναρρίχησης (για λιθορριπή r= 0.5)

Σχεδιασμός κυματοθραύστη

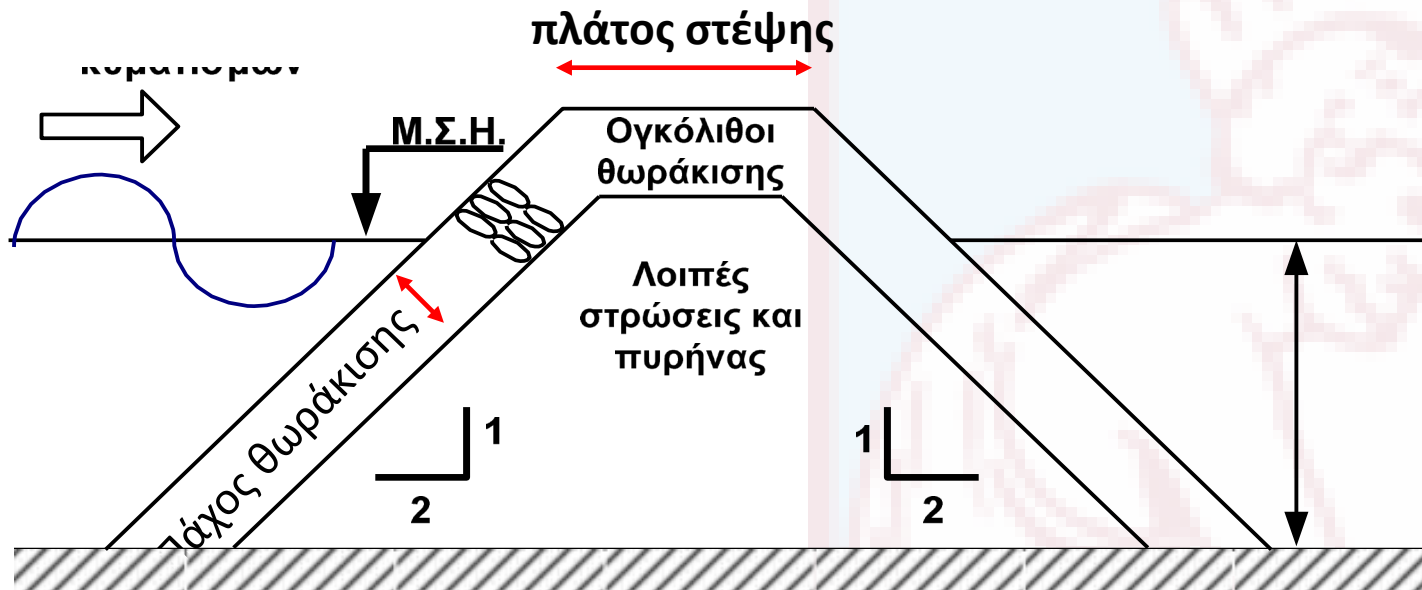
- Τύποι υπολογισμού:
 - Πάχος θωράκισης:

$$D = n \cdot k \cdot \left(\frac{W_r}{\gamma_s} \right)^{\frac{1}{3}} \Rightarrow$$

n από προηγούμενο πίνακα (συνήθως $n = 2$)

k συντελεστής μεταξύ **0,95** και **1,15** (ανάλογα τον τύπο ογκολίθου, συνήθως λαμβάνεται = 1)

Ο ίδιος τύπος υπολογίζει και το πλάτος στέψης θέτοντας $n \geq 3$.



Βιβλιογραφία

- Bindoff, N.L., J. Willebrand, V. Artale, A. Cazenave, J. Gregory, S. Gulev, K. Hanawa, C. Le Quéré, S. Levitus, Y. Nojiri, C.K. Shum, L.D. Talley and A. Unnikrishnan, 2007: Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Dean R.G., 2002, Beach nourishment: Theory and Practice, Advanced series on Ocean Engineering Vol.18, World Scientific Publishing
- French P.W., 2001, Coastal Defences: Processes, problems and solutions, Routledge, London
- U.S.A.C.E., 2002, Coastal Engineering Manual
- Κουτίτας Χ., 1998, Εισαγωγή στην Παράκτια Τεχνική και τα Λιμενικά Έργα, Εκδόσεις Ζήτη
- Schwartz M.L., 2005, Encyclopedia of Coastal Science, Springer