



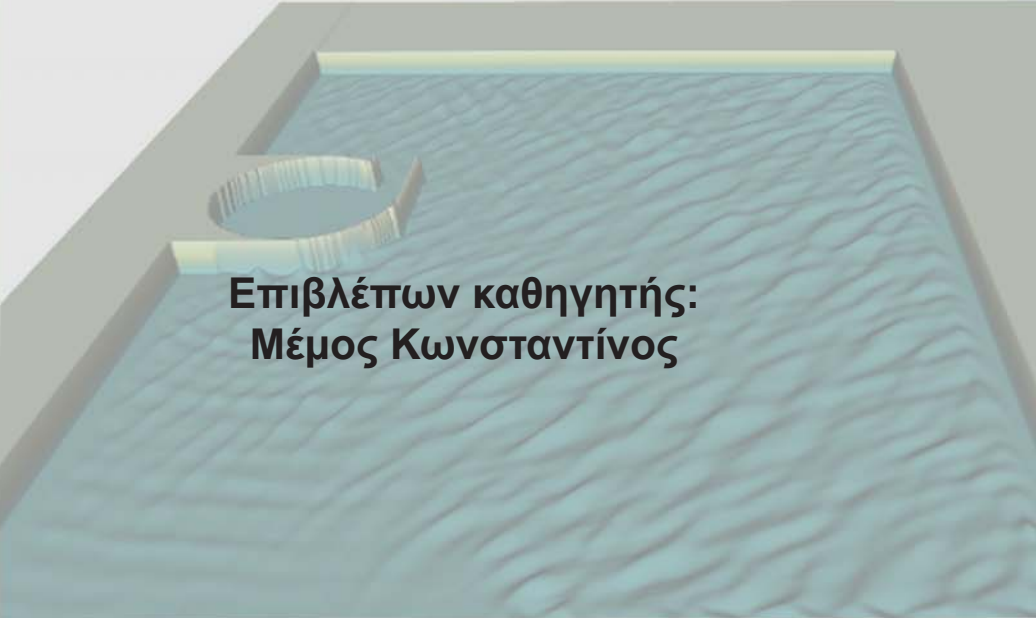
# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Διεπιστημονικό-Διατμηματικό Πρόγραμμα  
Μεταπτυχιακών Σπουδών  
“Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών  
Πόρων”

## Διερεύνηση συνθηκών στερεομεταφοράς και κυματικής διαταραχής στο εσωτερικό διατάξεων μαρινών

Σοφιαδέλη Κ.Δανάη

Αθήνα, Φεβρουάριος 2014



Επιβλέπων καθηγητής:  
Μέμος Κωνσταντίνος

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

## Ευχαριστίες

---

Φτάνοντας στο τέλος της μεταπτυχιακής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που με βοήθησαν στην προσπάθεια αυτή.

Κατ' αρχάς, οφείλω να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κωνσταντίνο Μέμο, ο οποίος με την καθοδήγηση και τις επιστημονικές παρατηρήσεις του συντέλεσε στην αποπεράτωση της εργασίας.

Θα ήθελα επίσης, να ευχαριστήσω τα αξιότιμα μέλη της Ε.Δ.Ε. του Δ.Π.Μ.Σ. και ιδίως την κα Β. Τσουκαλά και τους κ.κ. Γ. Χριστοδούλου, Αν. Στάμου.

Ένα μεγάλο τμήμα της ευγνωμοσύνης μου το οφείλω το συνάδελφο Κουτσοουρελάκη Ιάσωνα, που συντέλεσε ουσιαστικά στην ολοκλήρωση της παρούσας, με την καθοδήγηση και τις συμβουλές του, το συνάδελφο και φίλο Μαυραντωνάκη Αντώνη για την πολύτιμη βοήθεια και στήριξή του και το συνάδελφο Μιχάλη Χονδρό για τις χρήσιμες συμβουλές τους κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στους δικούς μου ανθρώπους, που με στήριξαν καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου.

Δανάη Σοφιαδέλη  
Αθήνα, Φεβρουάριος 2014

## Περίληψη

---

Θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση του σχεδιασμού μιας μαρίνας σε σχέση με την κυματική διαταραχή και τη στερεομεταφορά στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης της.

Το κυματικό καθεστώς στο εσωτερικό μικρών λιμένων και μαρινών είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την ομαλή και ασφαλή λειτουργία τους και είναι ένα θέμα που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής κατά τον σχεδιασμό τους. Ταυτόχρονα, η προωθούμενη ενέργεια στο εσωτερικό λιμενολεκανών επηρεάζει σημαντικά τις διαδικασίες στερεομεταφοράς στο εσωτερικό της. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι σε πρώτο στάδιο να διερευνηθούν οι κυματικές συνθήκες στο εσωτερικό διαφορετικών διατάξεων μαρινών και να εξεταστεί αν είναι ασφαλείς και λειτουργικές με βάση διεθνείς κανονισμούς. Σε δεύτερο στάδιο, και με βάση τα συμπεράσματα του πρώτου σταδίου και στοιχεία που αφορούν τη στερεομεταφορά κοντά στην είσοδο της κάθε διάταξης, θα διερευνηθεί αν υπάρχει ευκολία εγκλωβισμού και μετακίνηση ιζημάτων στο εσωτερικό των εξεταζόμενων διατάξεων.

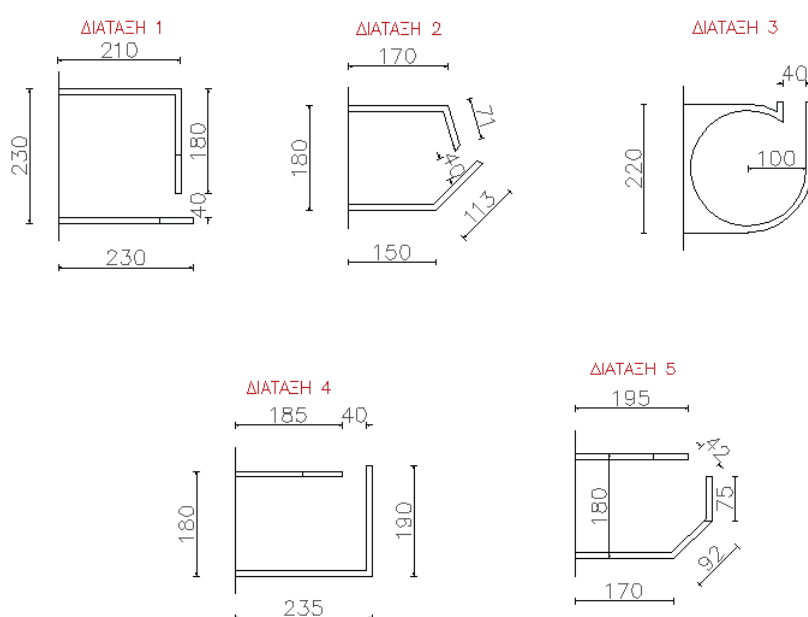
Αρχικά (ΜΑΡΙΝΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΖΩΝΗ), περιγράφονται οι διαδικασίες που διέπουν την παράκτια ζώνη και αφορούν τους κυματισμούς, δίνονται στοιχεία που αφορούν μαρίνες και τουριστικούς λιμένες γενικά και ειδικότερα στην Ελλάδα και τη Μεσόγειο και περιγράφεται η αλληλεπίδραση των παράκτιων έργων και κυρίως των μαρινών με το παράκτιο περιβάλλον.

Για την εκπόνηση της εργασίας χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πακέτο Mike DHI 2011 και συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το MIKE21 BW. Στο επόμενο μέρος (ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΙ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ MIKE 21BW) γίνεται μια εκτενής αναφορά στην διαχρονική εξέλιξη των μοντέλων Boussinesq και στις διάφορες προσεγγίσεις που πραγματοποιήθηκαν τα τελευταία χρόνια για την βελτίωση της ακρίβειας και τη διεύρυνση του πεδίου εφαρμογής τους. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο του εμπορικού μοντέλου MIKE21 BW το οποίο και εφαρμόζεται στο υπολογιστικό κομμάτι της παρούσας. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

οι εξισώσεις στις οποίες βασίζεται (Madsen et al. (1997) και παρατίθενται οι οριακές συνθήκες και το σχήμα επίλυσης του μοντέλου.

Στα επόμενα κεφάλαια (ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ MIKE 21 BW) , παρουσιάζονται τα αρχικά δεδομένα της εργασίας, δηλαδή τα δύο κυματικά σενάρια και τα στοιχεία της περιοχής μελέτης. Αρχικά, αναλύεται ο σχεδιασμός της βαθυμετρίας της παράκτιας περιοχής και στη συνέχεια παρουσιάζονται πέντε διατάξεις μαρίνων (βλ. σχήμα 1). Στη συνέχεια δίνονται τα δεδομένα εισόδου και περιγράφονται οι οριακές συνθήκες που εισάγονται στο μοντέλο.



**Σχήμα 1:** Εξεταζόμενες εναλλακτικές διατάξεις

Συνεχίζοντας, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης με χρήση πινάκων αλλά και με γραφική απεικόνιση για το πρώτο και δεύτερο στάδιο, ήτοι η κυματική διαταραχή για όλες τις διατάξεις και το πεδίο ταχυτήτων των κυματισμών για τις διατάξεις με τα δυσμενέστερα χαρακτηριστικά. Η επιλογή των διατάξεων που μελετήθηκαν στο δεύτερο στάδιο έγινε με βάση τα αποτελέσματα του πρώτου σταδίου και τις συνθήκες στερεομεταφοράς έμπροσθεν της εισόδου της κάθε διάταξης (Μαυραντωνάκης 2013).

Τέλος στο επόμενο μέρος, διερευνάται η δυνατότητα κίνησης των ιζημάτων στο εσωτερικό και στην είσοδο της λιμενολεκάνης. Πιο συγκεκριμένα, εκτιμάται η κρίσιμη διατμητική τάση του πυθμένα πάνω από την οποία είναι δυνατή η έναρξη της κίνησης των ιζημάτων (Καραμπάς 2004) που



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

βρίσκονται στην περιοχή μελέτης και συγκρίνεται με την διατμητική τάση πυθμένα (Memos et al.2005) η οποία υπολογίζεται στην είσοδο των διατάξεων 1 και 5, όπου εντοπίζονται και οι μεγαλύτερες ταχύτητες.

Γενικά, συμπεραίνεται κατ' αρχάς ότι η διάταξη, ο προσανατολισμός και η προστασία της εισόδου σε σχέση με τους επικρατούντες κυματισμούς παίζουν καθοριστικό ρόλο στην διαμόρφωση ήπιου και ασφαλούς κυματικού κλίματος στο εσωτερικό και στην είσοδο λιμενολεκανών μικρών σκαφών. Διατάξεις με την είσοδο με προσανατολισμό προς τα «ανοιχτά» όπως επίσης και διατάξεις με μη προστατευμένη είσοδο παρουσιάζουν, όπως αναμενόταν, έντονη κυματική διαταραχή στο εσωτερικό τους και μη ασφαλείς συνθήκες για τον ελλιμενισμό μικρών σκαφών. Εν αντιθέσει, λιμενολεκάνες με είσοδο προστατευμένη που τοποθετείται στο υπήνεμο τμήμα τους είναι σαφώς πιο προστατευμένες και παρουσιάζουν καλύτερες συνθήκες. Σε ότι αφορά την κίνηση των ιζημάτων, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η τοπική ταχύτητα των υδάτων κοντά στη είσοδο της μαρίνας, καθώς σε μεγάλες ταχύτητες το ίζημα κινείται και καθιζάνει σε μικρότερο βαθμό. Συνεπώς, πολύ μεγάλες ταχύτητες στην είσοδο του έργου μπορεί να διατηρήσουν τα ιζήματα σε κίνηση και να δράσουν αποτρεπτικά σε σχέση με την καθίζηση αυτών. Διατάξεις με μεγάλη διαφορά πεδίου ταχυτήτων στην είσοδο και στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης, όπως οι 1, 2 και 5 έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να εισέλθουν ιζήματα στο εσωτερικό τους και να εγκλωβιστούν εκεί. Από την άλλη πλευρά, σε λιμενολεκάνες που επικρατούν στην είσοδο και στο εσωτερικό τους έντονοι κυματισμοί (διατάξεις 1 ,2 και 5), δύναται να δημιουργηθούν συνθήκες μετακίνησης των ιζημάτων που θα αποτεθούν εντός της λιμενολεκάνης και για το λόγο αυτό διερευνήθηκαν στο δεύτερο στάδιο. Για το δεδομένο στην παρούσα κυματικό κλίμα και το μέγεθος του υφιστάμενου ιζήματος, δεν είναι δυνατή η έναρξη κίνησης του εγκλωβισμένου ιζήματος στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης των μαρινών που εξετάστηκαν στο δεύτερο στάδιο της παρούσας.

Λαμβάνοντας υπόψη το συνδυασμό κριτηρίων κυματικής διαταραχής, στερεομεταφοράς και εγκλωβισμού ιζημάτων στη λιμενολεκάνη, αξίζει να σημειωθεί ότι σε γενικές γραμμές, μικρές μαρίνες, προτείνεται να

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

σχεδιάζονται όπως η διάταξη 3. Η είσοδος τους θα πρέπει να βρίσκεται στην υπήνεμη πλευρά, να είναι προστατευμένη από τους προσπίπτοντες κυματισμούς και το έργο να σχεδιάζεται με καμπύλα στοιχεία ώστε να παρατηρείται μείωση στην ένταση των στροβίλων που δημιουργούνται στις ασυνέχειες της διαδρομής των προσπιπτόντων ρευμάτων και στη συνεπαγόμενη ένταση της στερεομεταφοράς εξωτερικά της μαρίνας (Μαυραντωνάκης 2013).

## Extended Abstract

---

### **Introduction**

The coastal zone is one of the most variable natural systems as destabilizing forces and mechanisms are in a dynamic balance between them. The sediment transport processes are related to the evolution of the coastline.

The subject of this study is to investigate how the geometry and the location of the entrance of a small harbor (marina), can affect the wave climate and sediment transport rates inside the harbor and the entrance.

### **Marinas and coastal zone**

Waves and wave action are the mechanisms that produce the most of the energy required for the physical processes in the coastal zone. The most important mechanism is the wave movement and the wave breaking. The zone where the waves break is called breaker zone. Breaker zone is considered as the most active and unstable area of the coastal environment. The basic features of the waves are the wave height  $H$ , the wave length  $L$  and the wave direction  $\theta$ . Due to wave action and wave breaking, wave generated currents occur in the breaker zone. Coastal currents are also generated by wind action, tides and density differences between water layers. These coastal currents are divided in three categories: longshore currents (these are the most important ones and have the greatest intensity in the breaker zone), cross-shore currents and rip currents.

A marina is a small harbor with moorings and supplies for yachts and small boats. In Greece, due to fact that the whole land is surrounded by sea, there are many marinas constructed. The number of berths is related to the needs of each case and can range from a few dozen boats, such as the marina Lakki, in Leros up to more than a thousand boats, such as the marina of Alimos, in Attiki. Beyond the number of the berths, other

EXTENDED ABSTRACT

aspects of great importance are the width of the entrance and the depth of the marina.

The port entrance demands careful consideration to ensure quick and safe entry of vessels in the harbor. The orientation and width of the entrance should reconcile two opposing criteria. For reasons of comfortable navigation, the harbor entrance should communicate directly with the open sea and should be as wide as possible. On the other hand, the narrower and more protected the entrance, the smaller the degree of wave energy and deposits that penetrate the harbor basin, resulting in more favorable conditions for attaining tranquility of the in-harbor sea surface. It is recommended that orientation of the entrance be such that vessels entering the harbor have the prevailing wind to the fore. Transverse winds and waves create difficult conditions for steering a vessel through the critical phase of entering the harbor basin, and a layout of port works that would permit frequent occurrences of such situations should be avoided.

To attain the calmest possible conditions at the harbor entrance area, it is recommended that the external works in its vicinity are to be formed with sloping mounds so that wave energy in the entrance area can be absorbed. Breakwaters with a vertical front near the entrance may cause difficult navigation conditions there, because of the reflected and semistationary wavetrains created in that region. Moreover, in designing the layout of the harbor arms that bound the entrance, care should be taken that any sedimentation of deposits in the area be reduced. For significant projects, study of the entrance usually culminates in a physical model in which optimization of the arrangement is effected by conjoining all the relative requirements.

The presence of structures, such as groynes, breakwaters, sea walls and harbors (or marinas) in the coastal environment are interventions that disturb the balance of the wave field. Consequently, the sediment transport is affected. Generally, there is deposition of sediment upstream of a coastal structure, due to the increase of flow velocity that takes place because of the presence of the structure. The aforementioned provokes

the reduction of the sediment transport rates. In contrast, erosion takes place downstream of the structure due to lack of sediment entrainment along the coast and a decrease in the flow velocity.

### Study area

The study area is not a real coastal area but it is a simplified one. The slope of the seabed is approximately 5%, while the maximum depth reaches at 10 m.. There are two wave scenarios that are illustrated in Table 1. As far as the sediment of the sea bed is concerned, a sandy shore considered, with median size of a particle  $D_{50}=1\text{mm}$  and gradation  $\sigma_g=1.25$ .

Wave Scenarios	$H_{rms}$ (m)	$T_p$ (s)	$\theta$ (°)
First	2	6	45
Second	2.5	6.5	10

**Table 1: Wave Scenarios**

There are five figures of marinas that are considered.

As discussed above, the first target of the study is to examine the impact of the marina geometry to the wave disturbance inside the marinas. The second target though, is to examine whether a motion of sediments is taking place inside the basin and the entrance of each figure.

In the present study, the computational model Mike 21 BW was used to calculate the wave heights and velocities.

### Limitation on wave the wave height in marinas

In the design of marinas for small craft, it is necessary to limit the height of the waves , which impringe on the marina and vessels berthed in the marina. This limitation is necessary to ensure that the marina is a safe haven for the birthing and protection of vessels. According to the following

tables, that give recommended wave height criteria in small craft harbor, the wave height inside a small craft harbor should not exceed 0.15-0.30m

Direction and peak period of design harbour wave	Significant wave Height ( $H_s$ )	
	Wave event exceeded once in 50years	Wave event exceeded once a year
Head seas less than 2sec	Conditions not likely to occur during this event	Less than 0.3m wave height
Head seas greater than 2sec	Less than 0.6m wave height	Less than 0.3m wave height
Oblique seas greater than 2sec	Less than 0.4m	Less than 0.3m wave height
Beam seas less than 2sec	Conditions not likely to occur during this event	Less than 0.3m wave height
Beam seas greater than 2sec	Less than 0.25m wave height	Less than 0.15m wave height

**Table 2: Recommended wave height criteria in small craft harbor. (Australian Standards AS 3962-2001)**

Ship length (m)	Beam/Quartering Seas		Head Seas	
	Period (s)	Height $H_s$ (m)	Period (s)	Height $H_s$ (m)
4-10	<2	0.2	<2.5	0.2
	2.0-4.0	0.1	2.5-4.0	0.15
	>4	0.15	>4.0	0.2
10-16	<3	0.25	<3.5	0.3
	3.0-5.0	0.15	3.5-5.5	0.2
	>5	0.2	>5.5	0.3
20	<4	0.3	<4.5	0.3
	4.0-6.0	0.15	4.5-7.0	0.25
	>6	0.25	>7.0	0.3

**Table 3: Recommended wave height criteria for small craft and pleasure boats (PIANC)**

### Threshold of motion of sediments (Karambas 2004)

The threshold of motion of sediments on the seabed is an important factor in most types of computation computations concerned with sediment response to waves and/or currents. A more precise measure of the threshold of motion can be given in terms of bed shear – stress. This approach was developed by Shields (1936) in terms of the ratio of the force exerted by the bed shear – stress acting to move in the bed, to the submerged weight of the wave counteracting this. The threshold Shields parameter  $\theta_{cr}$  is defined as:

$$\theta_c = \frac{\tau_{bcr}}{(\rho_s - \rho)gD_{50}}$$

It can be plotted against the dimensionless grain size  $D^*$  given by:

$$D^* = D_{50} \left( \frac{g\Delta}{v^2} \right)^{1/3}$$

$0.24 D_*^{-1}$	$1 < D_* < 4$
$0.14 D_*^{-0.64}$	$4 < D_* < 10$
$0.04 D_*^{-1}$	$10 < D_* < 20$
$0.013 D_*^{0.29}$	$20 < D_* < 150$
$0.055$	$D_* > 150$ (Karambas 2004)

The  $\tau_{cr}$  could also be calculated by the Shields curve.

The calculated threshold area for the study area, sand with median size of a particle  $D_{50}=1\text{mm}$  is the following:

$$\tau_{bcr} = \underline{\underline{0,496\text{N/m}^2}}$$

### Bottom friction (Memos et al. 2005)

The instantaneous bottom shear stresses can be approximated by using the following quadratic law:

$$\tau_{bx} = \frac{1}{2} f_{cw} u_0 |\mathbf{u}_0|, \tau_{by} = \frac{1}{2} f_{cw} v_0 |\mathbf{u}_0|$$

EXTENDED ABSTRACT

where  $|\mathbf{u}_0| = \sqrt{u_0^2 + v_0^2}$

For absence of currents

$$f_{CW} = f_w$$

$$f_w = \exp \left[ -5.977 + 5.213 \left( \frac{K_N}{A_b} \right)^{0.194} \right] \quad \text{for } \frac{K_N}{A_b} < 0,63$$

$$f_w = 0,3 \quad \text{for } \frac{K_N}{A_b} \geq 0,63$$

where  $K_N = 2,5D_{50} = 0,0025$  and  $A_b = u_{ow-max}/\omega$

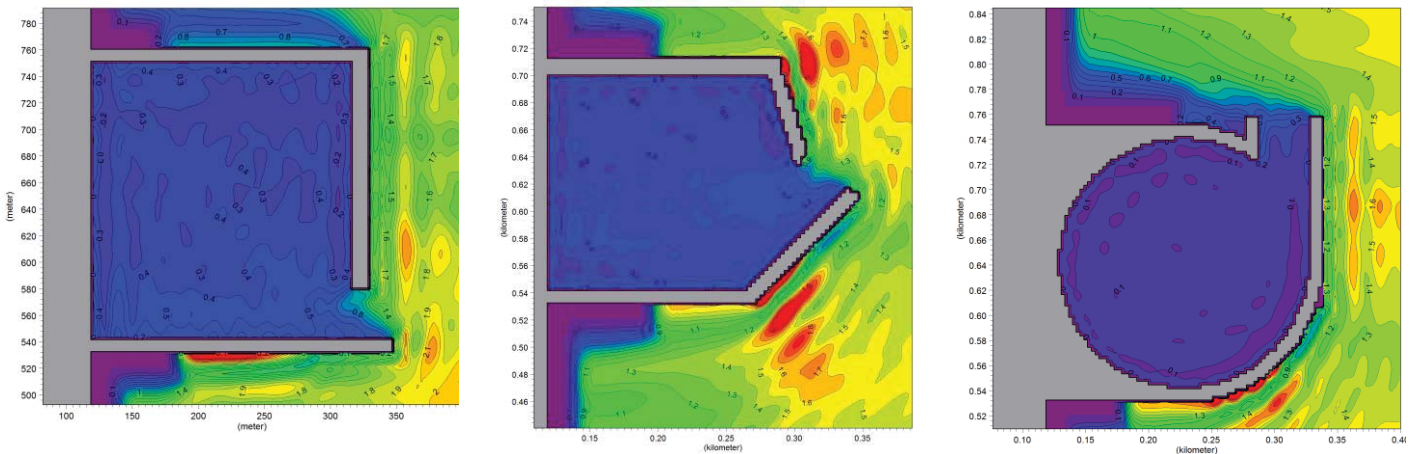
For non breaking waves the bottom velocity, outside the roller region the following equations can be used:

$$u_o = U + \left( \frac{d}{2} \right) \frac{\partial^2 (dU)}{\partial x^2} - \left( \frac{d^2}{3} \right) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}$$

$$v_o = V + \left( \frac{d}{2} \right) \frac{\partial^2 (dV)}{\partial y^2} - \left( \frac{d^2}{3} \right) \frac{\partial^2 V}{\partial y^2}$$

### Results of the simulations and analysis

As discussed above, the first aim of the study is to examine the impact of the marina geometry and the entrance location to the wave climate inside the given basins. The second aim though, is to examine the possibility of sedimentations movement inside the basin. The results of the two stages of the analysis are summarized in the following tables and figures:



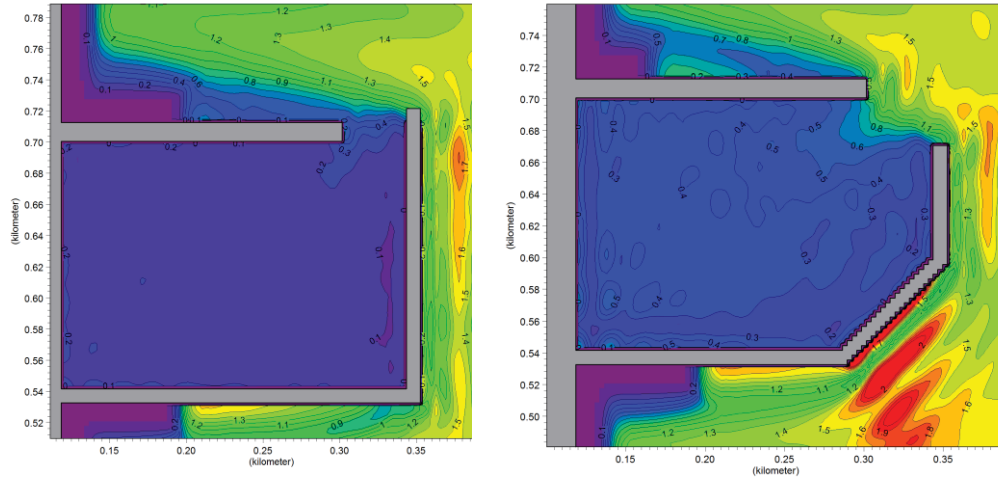
wave scenario 2



wave scenario 1

wave scenario 1

**Figure 1: Wave penetration – Figure 1, 2, 3 (less favorable scenarios)**



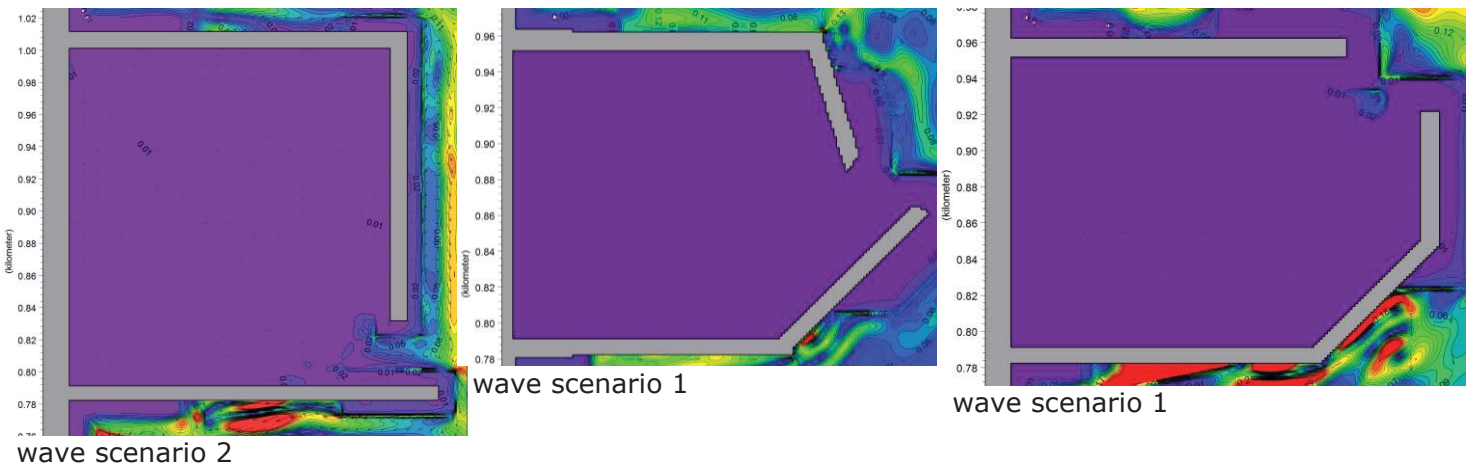
wave scenario 1

wave scenario 1

**Figure 2: Wave penetration – Figure 4, 5 (less favorable scenarios)**

	$H_{m0}$ (m) Layout	$H_s$ inside the basin (m)					Max $H_s$ maximum in the entrance (between the breakwaters)(m)				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Wave scenario 1	2,00	0,4-0,5	0,1-0,2	<0,1	0,2	0,4-0,5	0,7-1,0	0,4-0,9	0,3	0,4	Up to 1,2
Wave scenario 2	2,50	0,3-0,4	<0,1	<0,1	0,1	0,4	0,8-1,1	0,3-0,9	0,3	0,4	Up to 1,1

**Table 4:** Results of the first stage of analysis – Wave penetration inside the basins



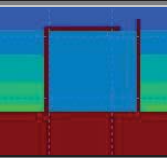

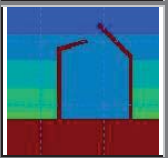
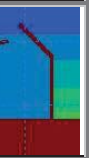
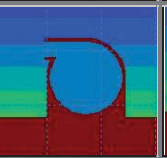
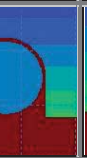
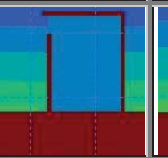
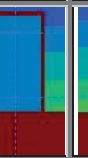
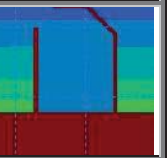

**Figure 3: Velocities – Figure 1, 2, 5 (less favorable scenarios)**

Layout	Wave scenario	Bed velocities (m/sec)		Bed shear – stress in the entrance $\tau_b$ (N/m <sup>2</sup> )
1	1	<i>u</i>	-0,1066	0,407
		<i>v</i>	0,0135	
	2	<i>u</i>	-0,11098	0,412
		<i>v</i>	0,00264	
2	1	<i>u</i>	0.00309	0,00021
		<i>v</i>	-0.00432	
	2	<i>u</i>	0.00856	0,00087
		<i>v</i>	-0.00015	
5	1	<i>u</i>	-0.1120	0,476
		<i>v</i>	0.0063	
	2	<i>u</i>	-0.1109	0,468
		<i>v</i>	0.0026	

**Table 5:** Results of the second stage of analysis – Bed shear – stress in the entrance

The results of the simulations and calculations are summarized in the following table:

## EXTENDED ABSTRACT

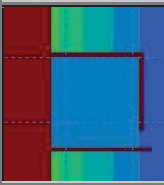
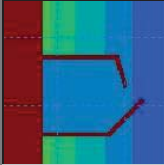
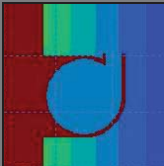
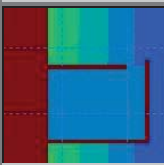
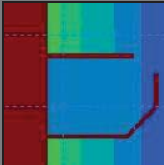
		Max sediment transport rate $TC_{max}$ ( $m^3/yr/m$ )*	Sediment transport rate near the entrance $TC$ ( $m^3/yr/m$ )*	Max wave height inside the basin $H_s$ (m)	Max wave height in the entrance $H_s$ (m)	Bed shear – stress in the entrance $\tau_b$ ( $N/m^2$ )
	Wave scenario 1	<b>6272,71</b>	<b>2000</b>	<b>0,5</b>	1,0	0,407
	Wave scenario 2	1490,6	900	0,4	1,1	0,412
	Wave scenario 1	2839,84	1500	0,2	0,9	0,00021
	Wave scenario 2	1054	600	<0,1	0,9	0,00087
	Wave scenario 1	2598,38	900	<0,1	0,3	<<
	Wave scenario 2	1100,9	450	<0,1	0,3	<<
	Wave scenario 1	6400	900	0,2	0,4	<<
	Wave scenario 2	1562,42	600	0,1	0,4	<<
	Wave scenario 1	2875	1200	<b>0,5</b>	<b>1,2</b>	<b>0,476</b>
	Wave scenario 2	1074	450	0,4	1,1	0,468

\*Mavrantoukakis 2013

**Table 6: Summarized results**

### Evaluation of the studied marinas layouts

For the evaluation of the 5 figures was used a multicriteria method.

Layout		Criteria I	Criteria II	Criteria III	Sum
1		1	1	1	3
2		3	2	2	7
3		4	4	4	<b>12</b>
4		3	3	3	9
5		1	1	2	4

**Table 7: Evaluation of the given layouts**

The criteria obtained and the respective graduation are the following:

Criteria I: wave disturbance inside the basin. Grades: 4= extremely low wave disturbance, 3= low wave disturbance, 2= moderate wave disturbance, 1= high wave disturbance (above the accepted limits)

Criteria II: sedimentation conditions inside the basin and near the entrance. Grades: 4 = extremely low sedimentation rate and slight variation between the velocities in the entrance and inside the basin, 3= moderate or low sedimentation rate and slight variation between the velocities in the entrance, 2= moderate or high sedimentation rate and small variation between the velocities in the entrance, 1=

EXTENDED ABSTRACT

high sedimentation rate and big variation between the velocities in the entrance

Criteria III: general sedimentation conditions. Grades: 4 = extremely low sedimentation rate, 3 = low sedimentation rate, 2 = moderate sedimentation rate, 1 = high sedimentation rate,

## Conclusions

Considering the results of the design of the different marina layouts the following specific conclusions can be extracted:

- The study shows also that the entrance of the marina should be designed as far as possible protected. It is proposed that the entrance should be constructed on the lee side of the structure, in order to avoid a strong wave climate inside the basin.
- Moreover, marinas layouts with entrances looking directly to the open sea, are more vulnerable to the waves, impinging inside the basin and effecting the docking conditions of the small crafts along the quays
- Even when, the entrance is located leeward should be properly protected from the prevailing waves. Marinas, such as layout 5, that have a windward breakwaters that does not protect the entrance adequately, are not a safe haven for the berthing and protection of vessels.
- Marinas located on the coast often have sediment deposited near the entrance from alongshore sediment transport. Sediment accumulation within the basin happens when outside the entrance occur high wave velocities, while inside the basin the velocity field is low. Therefore, layouts such as 1, 5 and 2, are more likely to cope sedimentation problems. Although, it is possible that the wave conditions inside the three above mentioned layouts, may cause velocities near the bed that could actuate the sediments on the seabed.

EXTENDED ABSTRACT

- Taking into account the above, it should be noted that as far as the wave climate inside the basin and the sediments are concerned, small marinas, proposed to be designed as the layout 3. The entrance is located on the lee side of the harbor, the wave height inside the basin is significantly low, the sedimentation rate is low both outside and near the entrance of the marina.

## Πίνακας Περιεχομένων

<b><u>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....</u></b>	<b><u>I</u></b>
<b><u>ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....</u></b>	<b><u>II</u></b>
<b><u>EXTENDED ABSTRACT.....</u></b>	<b><u>VI</u></b>
<b><u>ΜΕΡΟΣ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</u></b>	<b><u>6</u></b>
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>7</b>
1.1 ΓΕΝΙΚΑ – ΣΤΟΧΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	7
1.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	8
<b><u>ΜΕΡΟΣ 2: ΜΑΡΙΝΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΖΩΝΗ.....</u></b>	<b><u>10</u></b>
<b>2. ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΖΩΝΗ.....</b>	<b>11</b>
2.1 ΓΕΝΙΚΑ - ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΖΩΝΗ.....	11
2.2 ΑΡΧΕΣ ΣΤΕΡΕΟΜΕΤΑΦΟΡΑΣ.....	13
2.3 ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΙΖΗΜΑΤΑ.....	17
2.4 ΚΑΤΩΦΛΙ ΚΙΝΗΣΗΣ ΙΖΗΜΑΤΩΝ.....	19
2.5 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΚΤΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΕΡΓΩΝ.....	21
2.6 ΠΡΟΣΑΜΜΩΣΕΙΣ ΣΕ ΜΑΡΙΝΕΣ.....	24
2.6.1 Μηχανισμοί Στερεομεταφοράς.....	24
2.6.2 Εξισώσεις που περιγράφουν τις διαδικασίες στερεομεταφοράς σε μαρίνες.....	26
<b>3. ΜΑΡΙΝΕΣ - ΤΟΥΡΙΣΤΙΚΟΙ ΛΙΜΕΝΕΣ.....</b>	<b>29</b>
3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΑΡΙΝΩΝ – ΤΟΥΡΙΣΤΙΚΩΝ ΛΙΜΕΝΩΝ.....	29
3.1.1 Ορισμός - Ιστορικό Ανάπτυξης Τουριστικών Λιμένων.....	29
3.1.2 Τουριστικοί λιμένες Μεσογείου.....	30
3.1.3 Τουριστικοί λιμένες στον Ελλαδικό χώρο.....	31
3.2 ΕΙΣΟΔΟΣ ΤΟΥΡΙΣΤΙΚΟΥ ΛΙΜΕΝΑ.....	34
3.2.1 Σχεδιασμός εισόδου λιμένα.....	34
3.2.2 Επιτρεπόμενη κυματική διαταραχή στο εσωτερικό λιμένα τουριστικών σκαφών.....	36
<b><u>ΜΕΡΟΣ 3: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΙ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΜΙΚΕ21 BW.....</u></b>	<b><u>39</u></b>
<b>4. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΤΥΠΟΥ BOUSSINESQ.....</b>	<b>40</b>
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	40
4.2 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ BOUSSINESQ PEREGRINE (1967,1972).....	41
4.3 ΟΜΟΙΩΜΑΤΑ BOUSSINESQ ΜΕ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ.....	43
4.3.1 Εξισώσεις Boussinesq των Madsen et al. (1992).....	44
4.3.2 Εξισώσεις Boussinesq του Nwogu (1993).....	49
4.3.3 Εξισώσεις Boussinesq Zou (1999).....	52

4.4	ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ BOUSSINESQ ΠΛΗΡΟΥΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΞΕΩΣ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ .....	57
4.4.1	Πλήρως μη γραμμικές εξισώσεις Gobbi , Kirby& Wei (2000).....	58
4.4.2	Εξισώσεις πλήρους μη γραμμικότητας και διασποράς των Madsen et al. (2002 & 2003).....	61
4.4.3	Μέθοδος Fourier-Boussinesq για μη γραμμικούς κυματισμούς των Bingham & Agnon (2005) .....	64
4.5	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΤΡΙΒΗ ΠΥΘΜΕΝΑ .....	68
4.6	ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΣΤΟΝ ΠΥΘΜΕΝΑ - ΤΡΙΒΗ ΠΥΘΜΕΝΑ (MEMOS ET AL.2005)	72
<b>5.</b>	<b>Το ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΙΚΕ 21 BOUSSINESQ WAVES (BW) .....</b>	<b>76</b>
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	76
5.2	ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ .....	76
5.3	ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ .....	79
5.4	ΘΡΑΥΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ (MADSEN ET AL. 1997) .....	82
5.5	ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ .....	84
5.6	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΣΧΗΜΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ .....	85
<b>ΜΕΡΟΣ 4: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΜΙΚΕ 21 BW .....</b>		<b>88</b>
<b>6.</b>	<b>ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΔΕΔΟΜΕΝΑ .....</b>	<b>89</b>
6.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	89
6.2	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ .....	89
6.3	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑΣ .....	90
6.4	ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΜΑΡΙΝΩΝ –ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ .....	91
6.5	ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ .....	95
<b>7.</b>	<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ .....</b>	<b>99</b>
7.1	ΠΡΩΤΟ ΣΤΑΔΙΟ – ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΩΝ ΛΙΜΕΝΟΛΕΚΑΝΩΝ .....	99
7.2	ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΠΡΟΣΑΜΜΩΣΗΣ ΠΛΗΣΙΟΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΣ ΕΙΣΟΔΟΥ.....	104
7.3	ΔΕΥΤΕΡΟ ΣΤΑΔΙΟ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΕΔΙΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ .....	106
<b>ΜΕΡΟΣ 5: ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΙΖΗΜΑΤΩΝ .....</b>		<b>112</b>
<b>8.</b>	<b>ΈΛΕΓΧΟΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΙΖΗΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>113</b>
8.1	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ $T_{BCR}$ .....	113
8.2	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΠΥΘΜΕΝΑ $T_b$ .....	114
8.2.1	Υπολογισμός $\tau_b$ - Εναλλακτική διάταξη 1 .....	116
8.2.2	Υπολογισμός $\tau_b$ - Εναλλακτική διάταξη 2 .....	118
8.2.3	Υπολογισμός $\tau_b$ - Εναλλακτική διάταξη 5 .....	120
<b>ΜΕΡΟΣ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΥΝΟΨΗ .....</b>		<b>123</b>
<b>9.</b>	<b>ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ .....</b>	<b>124</b>
<b>10.</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΘΕΜΑΤΑ ΠΡΟΣ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ.....</b>	<b>128</b>
<b>ΜΕΡΟΣ 7: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>		<b>131</b>
<b>ΜΕΡΟΣ 8: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ - ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ .....</b>		<b>135</b>



## Πίνακες

Πίνακας 2-1:	Χαρακτηριστικές ιδιότητες άμμων και αργίλων .....	18
Πίνακας 3-1:	Μαρίνες στη Μεσόγειο θάλασσα (Πηγή: World Marine guide) .....	30
Πίνακας 3-2:	Μαρίνες και τουριστικοί λιμένες στον Ελλαδικό Χώρο – Χωρητικότητα (Πηγή: Ε.Ο.Τ., διαδικτυακοί τόποι μαρινών - λιμεναρχεία ).....	32
Πίνακας 3-3:	Διαστάσεις μαρίνες - τουριστικών λιμένων στον Ελλαδικό Χώρο(Πηγή: World Marine guide και Ε.Ο.Τ. 2010).....	34
Πίνακας 3-4:	Μέγιστα επιτρεπόμενα ύψη κύματος στο εσωτερικό λιμένων μικρών σκαφών (Πηγή: Australian Standards AS 3962-2001).....	37
Πίνακας 3-5:	Μέγιστα επιτρεπόμενα ύψη κύματος στο εσωτερικό λιμένων μικρών σκαφών (Πηγή: PIANC) .....	37
Πίνακας 4-1:	63	
Πίνακας 4-2:	64	
Πίνακας 6-1:	1 Κυματικά σενάρια .....	89
Πίνακας 6-2:	Κατασκευαστικά στοιχεία διατάξεων μαρινών .....	92
Πίνακας 6-3 :	Φασματικά χαρακτηριστικά χρησιμοποιηθέντων κυματισμών .....	96
Πίνακας 7-1:	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα τοπικού $H_{m0}$ στο χρονικό πέρασμα της προσομοίωσης .....	103
Πίνακας 7-2:	Αποτελέσματα μέγιστης στερεομεταφοράς $TC_{max}$ στην περιοχή κοντά στη μαρίνα και στερεομεταφοράς $TC$ στην περιοχή κοντά στην είσοδο αυτής για το 1ο κυματικό σενάριο(Πηγή : Μαυραντωνάκης 2013) .....	104
Πίνακας 7-3:	Αποτελέσματα μέγιστης στερεομεταφοράς $TC_{max}$ στην περιοχή κοντά στη μαρίνα και στερεομεταφοράς $TC$ στην περιοχή κοντά στην είσοδο αυτής για το 2ο κυματικό σενάριο (Πηγή : Μαυραντωνάκης 2013).....	105
Πίνακας 8-1:	Τιμές στιγμιαίων ταχυτήτων (μέσες ως προς z) στις θέσεις ελέγχου Διάταξη 1 .....	117
Πίνακας 8-2:	Υπολογισμός $\tau_{bx}$ και $\tau_{by}$ Διάταξη 1.....	118
Πίνακας 8-3:	Τιμές στιγμιαίων ταχυτήτων (μέσες ως προς z) στις θέσεις ελέγχου Διάταξη 2 .....	119
Πίνακας 8-4:	Υπολογισμός $\tau_{bx}$ και $\tau_{by}$ Διάταξη 2.....	120
Πίνακας 8-5:	Τιμές στιγμιαίων ταχυτήτων (μέσες ως προς z) στις θέσεις ελέγχου Διάταξη 5 .....	121
Πίνακας 8-6:	Υπολογισμός $\tau_{bx}$ και $\tau_{by}$ Διάταξη 5.....	122
Πίνακας 9-1:	Πολυκριτηριακή αξιολόγηση διατάξεων μαρινών 1 έως 5	125
Πίνακας 9-2:	Παρουσίαση συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων αναλύσεων διατάξεων μαρινών 1 έως 5.....	127

## Σχήματα

Εικόνα 7-1:	Εναλλακτική διάταξη 1 – Αποτελέσματα κυματικής διείσδυσης .....	99
-------------	---	----

Εικόνα 7-2:	Εναλλακτική διάταξη 2 – Αποτελέσματα κυματικής διείσδυσης .....	100
Εικόνα 7-3:	Εναλλακτική διάταξη 3 – Αποτελέσματα κυματικής διείσδυσης .....	101
Εικόνα 7-4:	Εναλλακτική διάταξη 4 – Αποτελέσματα κυματικής διείσδυσης .....	102
Εικόνα 7-5:	Εναλλακτική διάταξη 5 – Αποτελέσματα κυματικής διείσδυσης .....	102
Εικόνα 7-6:	Εναλλακτική διάταξη 1 – Αποτελέσματα πεδίου ταχυτήτων 1 <sup>ο</sup> κυματικό σενάριο ( $H_{mo} = 2.0m, \theta=10^\circ$ ).....	107
Εικόνα 7-7:	Εναλλακτική διάταξη 1 – Αποτελέσματα πεδίου ταχυτήτων 2 <sup>ο</sup> κυματικό σενάριο ( $H_{mo} = 2.5m, \theta=45^\circ$ ).....	108
Εικόνα 7-8:	Εναλλακτική διάταξη 2 – Αποτελέσματα πεδίου ταχυτήτων 1 <sup>ο</sup> κυματικό σενάριο ( $H_{mo} = 2.0m, \theta=10^\circ$ ).....	109
Εικόνα 7-9:	Εναλλακτική διάταξη 2 – Αποτελέσματα πεδίου ταχυτήτων 2 <sup>ο</sup> κυματικό σενάριο ( $H_{mo} = 2.5m, \theta=45^\circ$ ).....	109
Εικόνα 7-10:	Εναλλακτική διάταξη 5 – Αποτελέσματα πεδίου ταχυτήτων 1 <sup>ο</sup> κυματικό σενάριο ( $H_{mo} = 2.0m, \theta=10^\circ$ ).....	110
Εικόνα 7-11:	Εναλλακτική διάταξη 5 – Αποτελέσματα πεδίου ταχυτήτων 2 <sup>ο</sup> κυματικό σενάριο ( $H_{mo} = 2.5m, \theta=45^\circ$ ).....	110
Εικόνα 8-1:	Περιοχές ελέγχου εναλλακτική διάταξη 1 –κυμ. σενاريو 1 .....	116
Εικόνα 8-2:	Περιοχές ελέγχου εναλλακτική διάταξη 1–κυμ. σενاريو 2 .....	117
Εικόνα 8-3:	Περιοχές ελέγχου εναλλακτική διάταξη 2–κυμ. σενاريو 1 .....	118
Εικόνα 8-4:	Περιοχές ελέγχου εναλλακτική διάταξη 2–κυμ. σενاريو 2 .....	119
Εικόνα 8-5:	Περιοχές ελέγχου εναλλακτική διάταξη 5–κυμ. σενاريو 1 .....	120
Εικόνα 8-6:	Περιοχές ελέγχου εναλλακτική διάταξη 5–κυμ. σενاريو 2 .....	121

### ΕΙΚΟΝΕΣ

Σχήμα 2-1:	Καθορισμός ζωνών κατά πλάτος μιας ακτής (Μουτζούρης 2005).....	12
Σχήμα 2-2:	Υποδιαίρέσεις παράκτιας ζώνης (Μουτζούρης 2005) .....	13
Σχήμα 2-3:	Διάκριση χειμερινού και θερινού προφίλ ακτής ανάλογα με την καμπυλότητα του (Κόφτης 2010) .....	17
Σχήμα 2-4:	Έναρξη κινήσεως ιζήματος (Καραμπάς 2004) .....	19
Σχήμα 2-5:	Φορτίο πυθμένα(Καραμπάς 2004) .....	20
Σχήμα 2-6:	Φορτίο σε αιώρηση (Καραμπας 2004) .....	21
Σχήμα 2-7:	Αλληλεπίδραση τεχνικών έργων-παράκτιου περιβάλλοντος ως προς τη στερεομεταφορά (Μουτζούρης 2005) .....	23
Σχήμα 2-8:	Αλληλεπίδραση μαρίνας-παράκτιου περιβάλλοντος ως προς τη στερεομεταφορά (Memos, port planning) .....	24
Σχήμα 2-9:	Ανταλλαγή υδάτων μεταξύ μαρίνας και περιβάλλοντος διαμέσου της εισόδου .....	26
Σχήμα 3-1:	Είσοδος λιμένα με καλό προσανατολισμό (Μέμος 2002)...	35

Σχήμα 4-1:	Ποσοστό σφάλματος για την φασική ταχύτητα για διάφορες μορφές εξισώσεων Boussinesq σε σύγκριση με θεωρία Stokes 1 <sup>ης</sup> τάξης. ....	45
Σχήμα 4-2:	Σύγκριση σφάλματος σε σχέση με τη γραμμική θεωρία για διάφορες τιμές του B .....	46
Σχήμα 4-3:	Ποσοστιαίο λάθος ταχύτητας φάσης (100(c-cSTOKES)/cSTOKES) όπου η ταχύτητα c υπολογίζεται από την (2.7) (Madsen et al. 1991) .....	49
Σχήμα 4-4:	Σύγκριση της κανονικοποιημένης ταχύτητας φάσης για διάφορες τιμές του a (Nwogu 1993). ....	52
Σχήμα 4-5:	Σύγκριση ταχυτήτων φάσης. Stokes 1 <sup>st</sup> (συνεχής γραμμή), εξισώσεις Zou (διακεκομμένη-τελείες), κλασικές εξισώσεις Boussinesq (διακεκομμένη). ....	55
Σχήμα 4-6:	Σύγκριση κανονικοποιημένων ταχυτήτων ομάδας $c_g / \sqrt{gh}$ . Stokes 1 <sup>st</sup> (συνεχής γραμμή), εξισώσεις Zou (διακεκομμένη-τελείες), κλασικές εξισώσεις Boussinesq (διακεκομμένη). ....	56
Σχήμα 4-7:	Ποσοστό φασικής ταχύτητας μοντέλου προς ακριβή λύση θεωρίας Airy. Κλασικές εξισώσεις Boussinesq (παύλες, τελείες), Nwogu, $a = -0:39$ (τελείες), Gobbi&Kirby (4,4) Padé (παύλες). ( $\mu = \sigma$ ) .....	60
Σχήμα 4-8:	.Ποσοστό ταχύτητας ομάδας μοντέλου προς ακριβή λύση θεωρίας Airy. Nwogu, $a = -0:39$ (τελείες), Gobbi&Kirby (4,4) Padé (παύλες). ( $\mu = \sigma$ ) .....	61
Σχήμα 4-9:	Σχέση μεταξύ συντελεστή τριβής f και αριθμού Reynolds $R_b$ . ....	70
Σχήμα 4-10:	Απόσβεση ενέργειας κυματισμού με σχηματισμό τυρβώδους οριακής στοιβάδας. ....	72
Σχήμα 5-1:	Το MIKE21BW περιέχει 2 modules. Αριστερά: (2DH) εφαρμόζεται συνήθως για τον υπολογισμό της κυματικής διαταραχής σε λιμάνια. Δεξιά: (1DH) χρησιμοποιείται συνήθως για την προσομοίωση της κυματικής διάδοσης από τα βαθιά στα ρηχά (Πηγή: User Guide MIKE by DHI). ....	77
Σχήμα 5-2:	Εικόνα από ομοίωμα BW (2DH) με προσομοίωση της θραύσης. Οι επιφανειακοί κύλινδροι απεικονίζονται με τον λευκό αφρό. (Πηγή: User Guide MIKE by DHI) .....	79
Σχήμα 5-3:	Κάθετο προφίλ οριζόντιας ταχύτητας θραυόμενου κυματισμού (Madsen et al. 1997). ....	83
Σχήμα 5-4:	Παράδειγμα εφαρμογής οριακών συνθηκών(απορροφητικών ορίων- sponge layers) σε κάποια περιοχή προσομοίωσης. (Πηγή: User Guide MIKE by DHI) .....	85
Σχήμα 5-5:	Απεικόνιση κανάβου για το 2DH BW στο επίπεδο x, y. (Πηγή: User Guide MIKE by DHI) .....	86
Σχήμα 6-1:	Βαθυμετρία περιοχής μελέτης .....	91
Σχήμα 6-2:	Διατάξεις μαρινών .....	93
Σχήμα 6-3:	Διατάξεις μαρινών στο πρόγραμμα Mike 21 .....	94
Σχήμα 8-1:	Διάγραμμα του Shields .....	114

**ΜΕΡΟΣ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

---

## **1. Εισαγωγή**

### **1.1 Γενικά – Στόχος εργασίας**

Η συνεχώς αυξανόμενη τάση σε ζήτηση θέσεων ελλιμενισμού σκαφών αναψυχής στην περιοχή της Μεσογείου αλλά και στην χώρα μας δημιουργούν την ανάγκη για το σχεδιασμό και την κατασκευή ολοένα και περισσότερων λιμένων σκαφών αναψυχής. Σημαντικό στοιχείο για το σχεδιασμό τέτοιων έργων είναι η παροχή ασφάλειας προς τους χρήστες, η λειτουργικότητα και η πρόκληση της μικρότερης δυνατής όχλησης (περιβαλλοντικής και αισθητικής) στο παράκτιο περιβάλλον.

Οι λιμένες μικρών σκαφών πρέπει να συνδυάζουν υψηλή ποιότητα παρεχόμενων υπηρεσιών, με ασφαλείς θέσεις ελλιμενισμού και συνθήκες προσέγγισης σε αυτόν. Λόγω του μικρού μεγέθους των εξυπηρετούμενων σκαφών οι κυματικές συνθήκες στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης πρέπει να είναι ήπιες έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η εύρυθμη και ασφαλής λειτουργία των εγκαταστάσεων.

Επιπροσθέτως, η κατασκευή ενός παράκτιου έργου, όπως ένας λιμένας τουριστικών σκαφών μεταβάλλει την ισορροπία του παράκτιου περιβάλλοντος ως προς τις συνθήκες στερεομεταφοράς διαμορφώνοντας μια νέα σχέση αλληλεπίδρασης παράκτιου περιβάλλοντος-τεχνικού έργου. Ειδικότερα, στην περίπτωση λιμένα ή μαρίνας και σε συνθήκες έντονης στερεομεταφοράς στην περιοχή εισόδου του ενδέχεται να καταγραφούν συνθήκες προσαμμώσεων οι οποίες δημιουργούν προβλήματα στην είσοδο των σκαφών στο εσωτερικό του λιμένα και στο εσωτερικό του.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να διερευνηθεί κατά πόσο η γεωμετρία της μαρίνας και της εισόδου της μπορεί να επηρεάσει το ποσοστό της προωθούμενης στο εσωτερικό της κυματικής ενέργειας και τις συνθήκες στερεομεταφοράς στο εσωτερικό και στην είσοδό της. Για το σκοπό αυτό, μελετήθηκαν πέντε διατάξεις μαρίνων και δύο κυματικά σενάρια.

## 1.2 Μεθοδολογία και Περιεχόμενα εργασίας

Η παρούσα εργασία χωρίζεται σε δύο βασικά στάδια . Στο πρώτο στάδιο γίνεται διερεύνηση των συνθηκών κυματικής διαταραχής στο εσωτερικό πέντε διατάξεων μαρινών για δύο διαφορετικά κυματικά σενάρια. Η προσομοίωση του κυματικού πεδίου έγινε με τη χρήση του υπολογιστικού πακέτο MIKE της DHI και συγκεκριμένα του MIKE 21 BW.

Στο δεύτερο στάδιο, με βάση τα αποτελέσματα του πρώτου σταδίου και χρήση του ίδιου υπολογιστικού μοντέλου, έγινε υπολογισμός του πεδίου ταχυτήτων στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης και στην είσοδο του λιμένα και στη συνέχεια οι τάσεις στον πυθμένα προκειμένου να ελεγχθεί η δυνατότητα κίνησης των ιζημάτων στις δυσμενέστερες από τις παραπάνω διατάξεις.

Όσον αφορά τη διάρθρωση της εργασίας, αυτή διαμορφώνεται ως εξής: Μέρος 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ. Γενικά στοιχεία, στόχος εργασίας και μεθοδολογία (κεφάλαιο 1).

Στο Μέρος 2: ΜΑΡΙΝΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΖΩΝΗ, αναφέρονται κάποια βασικά στοιχεία για μαρίνες (κεφάλαιο 3), η αλληλεπίδρασή τους με το παράκτιο περιβάλλον, στοιχεία σχεδιασμού και κανονισμοί που αφορούν στη λειτουργία τους καθώς και στοιχεία που αφορούν στην κίνηση των ιζημάτων (κεφάλαιο 2).

Στο Μέρος 3:ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΙ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ MIKE 21BW, παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 4 το θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά στα ομοιώματα διάδοσης κυματισμών τύπου Boussinesq. Στη συνέχεια γίνεται παρουσίαση του πακέτου MIKE 21BW στο κεφάλαιο 5

Στο Μέρος 4:ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ MIKE 21 BW, στο κεφάλαιο 6, παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης και αναλύονται οι διατάξεις και τα στοιχεία εισόδου στο μοντέλο. Στο επόμενο κεφάλαιο 7, γίνεται παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων. Παρουσιάζονται επίσης στοιχεία που αφορούν το δυναμικό προσάμμωσης / λόγω της στερεομεταφοράς στο εξωτερικό των μαρινών (Μαυραντωνάκης 2013) και συναξιολογούνται με τα αποτελέσματα της παρούσας.

Στο Μέρος 5: ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΚΙΝΗΣΗ ΙΖΗΜΑΤΩΝ. Στο κεφάλαιο 8, παρουσιάζεται και διερευνάται η δυνατότητα κίνησης των ιζημάτων στο εσωτερικό και στην είσοδο της λιμενολεκάνης .

Στο Μέρος 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΣΥΝΟΨΗ, συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας και αξιολογούνται οι εξεταζόμενες διατάξεις.

Τέλος, στο Μέρος 7 και 8: παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε και παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα που αφορούν στο ύψος κύματος και την ταχύτητά του στις τυπικές διατάξεις που εξετάστηκαν από την ανάλυση με το πρόγραμμα MIKE 21 BW και οι υπολογισμοί.

## **ΜΕΡΟΣ 2: ΜΑΡΙΝΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΖΩΝΗ**

---



## **2. Διεργασίες στην παράκτια ζώνη**

### **2.1 Γενικά - Παράκτια ζώνη**

Παράκτια ζώνη είναι το τμήμα στο οποίο έρχεται σε δυναμική επαφή η θάλασσα με την ξηρά, περιλαμβάνει θαλάσσια και χερσαία τμήματα εκατέρωθεν της ισάλου γραμμής, στα οποία λαμβάνουν χώρα οικολογικές ή φυσικές διεργασίες ή ανθρώπινες δραστηριότητες οι οποίες επηρεάζουν ή δύνανται να επηρεάσουν την ακτή ή τους παράκτιους πόρους. Το χερσαίο τμήμα της παράκτιας ζώνης δύναται να εκτείνεται σημαντικά στο εσωτερικό της ενδοχώρας συμπεριλαμβάνοντας ακόμη και μια ολόκληρη λεκάνη απορροής επιφανειακών υδάτων, ενώ το θαλάσσιο τμήμα εκτείνεται κατ'ελάχιστον μέχρι την ισοβαθή στην οποία διαπιστώνεται η ύπαρξη μεγάλης βιοποικιλότητας, ή μέχρι την ισοβαθή που περιλαμβάνει την θαλάσσια εκείνη περιοχή που επηρεάζεται από τις χερσαίες ή θαλάσσιες δραστηριότητες. Χαρακτηριστικά επισημαίνεται ότι η θαλάσσια ζώνη μπορεί να περιλαμβάνει όλη την υφαλοκρηπίδα, να εκτείνεται, δηλαδή, μέχρι το βάθος των 200μ. Στις παράκτιες περιοχές των χωρών της Μεσόγειου, στις οποίες συμπεριλαμβάνεται και η Ελλάδα, οι πιέσεις που ασκούνται για επέκταση ή πολλαπλασιασμό των ανθρώπινων δραστηριοτήτων είναι ιδιαίτερα μεγάλες και τα προβλήματα σχετίζονται, ιδίως, με την υποβάθμιση των φυσικών πόρων και του περιβάλλοντος (ειδικά των υδροβιοτόπων), τη ρύπανση και τις αλληλοσυγκρουόμενες χρήσεις γης. Για το λόγο αυτό, οι παράκτιες περιοχές χρήζουν ιδιαίτερης διαχείρισης και προστασίας.

Η παράκτια ζώνη και η ακτή (παραθαλάσσια ζώνη της ξηράς) αποτελούν έκφραση της δυναμικής ισορροπίας μεταξύ προσφοράς ιζημάτων από τη λιθόσφαιρα και απομάκρυνσης ή συσσώρευσης τους από την υδρόσφαιρα, υπό τη δράση των κυματισμών και των ρευμάτων, τα οποία εξαρτώνται από την ατμόσφαιρα (Παναγιωτίδης & Χατζημήτρος, 2004).

Οι ζώνες που έχουν οριστεί κατά πλάτος μιας παραλίας (Μεμος, 2009) είναι οι εξής:

- ζώνη αλληλεπίδρασης (interactive zone), όπου οι ανθρώπινες δραστηριότητες επηρεάζονται ή μπορούν να επηρεαστούν από την παράκτια ζώνη
- δυναμική ζώνη (dynamic zone), η οποία επηρεάζεται άμεσα από φυσικές διεργασίες όπως η διάβρωση
- ζώνη κινδύνου (hazard zone)

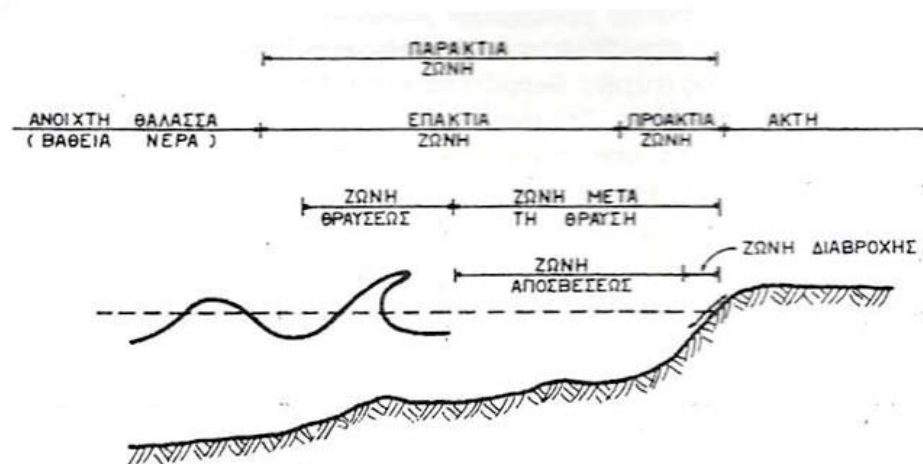


**Σχήμα 2-1: Καθορισμός ζωνών κατά πλάτος μιας ακτής (Μουτζούρης 2005)**

Η παράκτια ζώνη υποδιαιρείται στην επάκτια (inshore) και την παράκτια (foreshore) ζώνη ή μέτωπο ακτής, των οποίων το όριο είναι η γραμμή κατώτατης ρηχίας (mean low water line).

Επιπλέον περιλαμβάνει τις ακόλουθες ζώνες:

- ζώνη πριν από τη θραύση (before breaker zone), όπου εμφανίζονται οι παραμορφώσεις των κυματισμών που τελικά οδηγούν στη θραύση
- τη ζώνη θραύσης (breaker zone) η οποία αποτελεί το πιο δυναμικό τμήμα της παράκτιας ζώνης που είναι και ο γενεσιουργός μηχανισμός των περισσότερων διαδικασιών της ακτομηχανικής
- τη ζώνη μετά τη θραύση (after breaker zone). Η τελευταία υποδιαιρείται στη ζώνη απόσβεσης (surf zone), όπου αποσβήνεται το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας του θραυόμενου κύματος και αναπτύσσονται τα ρεύματα κατά μήκος της ακτής με το εύρος της να εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των κυμάτων και την κλίση του πυθμένα, και στη ζώνη διαβροχής (swash zone) με όρια την κατώτερη και την ανώτερη θέση της ακτογραμμής.



Σχήμα 2-2: Υποδιαιρέσεις παράκτιας ζώνης (Μουτζούρης 2005)

## 2.2 Αρχές στερεομεταφοράς

Η προώθηση των κυμάτων προς τις ακτές έχει σαν αποτέλεσμα την ενεργοποίηση των ιζημάτων του θαλάσσιου πυθμένα, εφόσον υπάρχει διαθεσιμότητα λεπτοκόκκων υλικών, και εν συνεχεία τη μετακίνησή τους ανάλογα προς την κατεύθυνση του προωθούμενου κατά περίπτωση κυματισμού. Οι μετακινήσεις αυτές έχουν συχνά ως αποτέλεσμα τη διαφοροποίηση των μορφολογικών χαρακτηριστικών μίας ακτής, φαινόμενο που μπορεί να έχει παροδικό ή μόνιμο χαρακτήρα.

Η ενεργοποίηση και η μεταφορά των ιζημάτων οφείλεται κυρίως στη θραύση των προωθούμενων κυματισμών. Το φαινόμενο της θραύσης έχει σαν αποτέλεσμα την διάχυση της προωθούμενης από τους κυματισμούς ενέργειας και παράλληλα την δημιουργία δύο παράκτιων ρευμάτων, ένα παράλληλα και ένα εγκάρσια προς την ακτογραμμή. Οι δύο αυτές συνιστώσες ενεργοποιούν και μεταφέρουν αντίστοιχα ιζήματα παράλληλα και εγκάρσια προς την ακτή.

Πιο αναλυτικά όταν οι κυματισμοί προωθούνται προς τα ρηχά αλλάζουν τα χαρακτηριστικά τους, λόγω των τριβών που αναπτύσσονται στον πυθμένα (όσο μικρότερο είναι το βάθος τόσο μεγαλύτερη είναι και η επιρροή). Οι τριβές έχουν ως αποτέλεσμα την απώλεια μέρους της κυματικής ενέργειας, η οποία οδηγεί στη μείωση του ύψους των προωθούμενων κυματισμών. Η διαδικασία αυτή είναι συνεχής και σταδιακή κατά την προώθηση των κυμάτων, καταλήγει όμως σε ένα οριακό σημείο, διαφορετικό για κάθε

κυματισμό, στο οποίο η κατακόρυφη κατανομή των οριζοντίων ταχυτήτων να μεταβάλλεται σημαντικά, με αποτέλεσμα το άνω τμήμα του κύματος να επιταχύνεται, ενώ το κάτω αντίστοιχα να επιβραδύνεται λόγω των τριβών του πυθμένα. Αποτέλεσμα τούτου είναι να αλλάζει σημαντικά το σχήμα του με συνέπεια να θραύεται διαχέοντας παράλληλα την ενέργεια του. Λόγω της έντασης του φαινομένου και της συγκέντρωσης κυματικής ενέργειας στην ευρύτερη περιοχή της θραύσης των κυμάτων παρατηρούνται και άλλα φαινόμενα όπως η ανύψωση της στάθμης της θάλασσας αλλά και της μεγιστοποίησης των ταχυτήτων προώθησης. Στα εν λόγω φαινόμενα της παράκτιας κυκλοφορίας συμμετέχουν τα φαινόμενα της διάθλασης και της ρήχωσης.

Η ενεργοποίηση των ιζημάτων στον πυθμένα λαμβάνει χώρα όταν η ταχύτητα του κατωφλίου κίνησης τους υπερβεί την οριακή τιμή ευσταθούς παραμονής τους στον πυθμένα. Η οριακή αυτή τιμή εξαρτάται από την τροχιακή ταχύτητα των σωματιδίων του νερού, τις διαστάσεις των κόκκων του πυθμένα αλλά και το βάθος προώθησης. Η μετακίνηση των ιζημάτων λαμβάνει χώρα στο μεγαλύτερο βαθμό εντός της ζώνης θραύσης των κυμάτων, η οποία για κάθε ακτή είναι διαφορετική και εξαρτάται από την ένταση των κυματισμών που προωθούνται προς αυτήν, τη μορφολογία του πυθμένα (μέση διεύθυνση ισοβαθών), την κλίση του αλλά και το είδος και την κοκκομετρία του υφιστάμενου θαλάσσιου ιζήματος. Εντός της ζώνης θραύσης ( surf zone) λαμβάνει χώρα το 80% περίπου της συνολικής μετακίνησης ιζημάτων μίας ακτής. Παρατηρήσιμες μετακινήσεις ιζημάτων λαμβάνουν χώρα και πέραν του μεγαλύτερου βάθους που ορίζει την ζώνη θραύσης και συγκεκριμένα μέχρι του βάθους που διεθνώς αναφέρεται ως «ενεργό» (closure depth).

Το βάθος αυτό θεωρείται ότι διαχωρίζει την ενεργό περιοχή στερεομεταφοράς σε μια εγκάρσια διατομή της παράκτιας ζώνης από την περιοχή στα ανοιχτά, όπου η μεταφορά του ιζήματος είναι ασήμαντη. Μέχρι το βάθος αυτό ( $d_c$ ) οι μεταβολές του παράκτιου πυθμένα αφορούν στο 90% περίπου της συνολικής μεταβολής που λαμβάνει χώρα.

Η διαδικασία αυτή (της ενεργοποίησης θαλάσσιων ιζημάτων και της μεταφοράς τους) λαμβάνει χώρα καθ' όλη την διάρκεια του έτους και εξαρτάται ποσοτικά από το μέγεθος των προωθούμενων κυμάτων και την

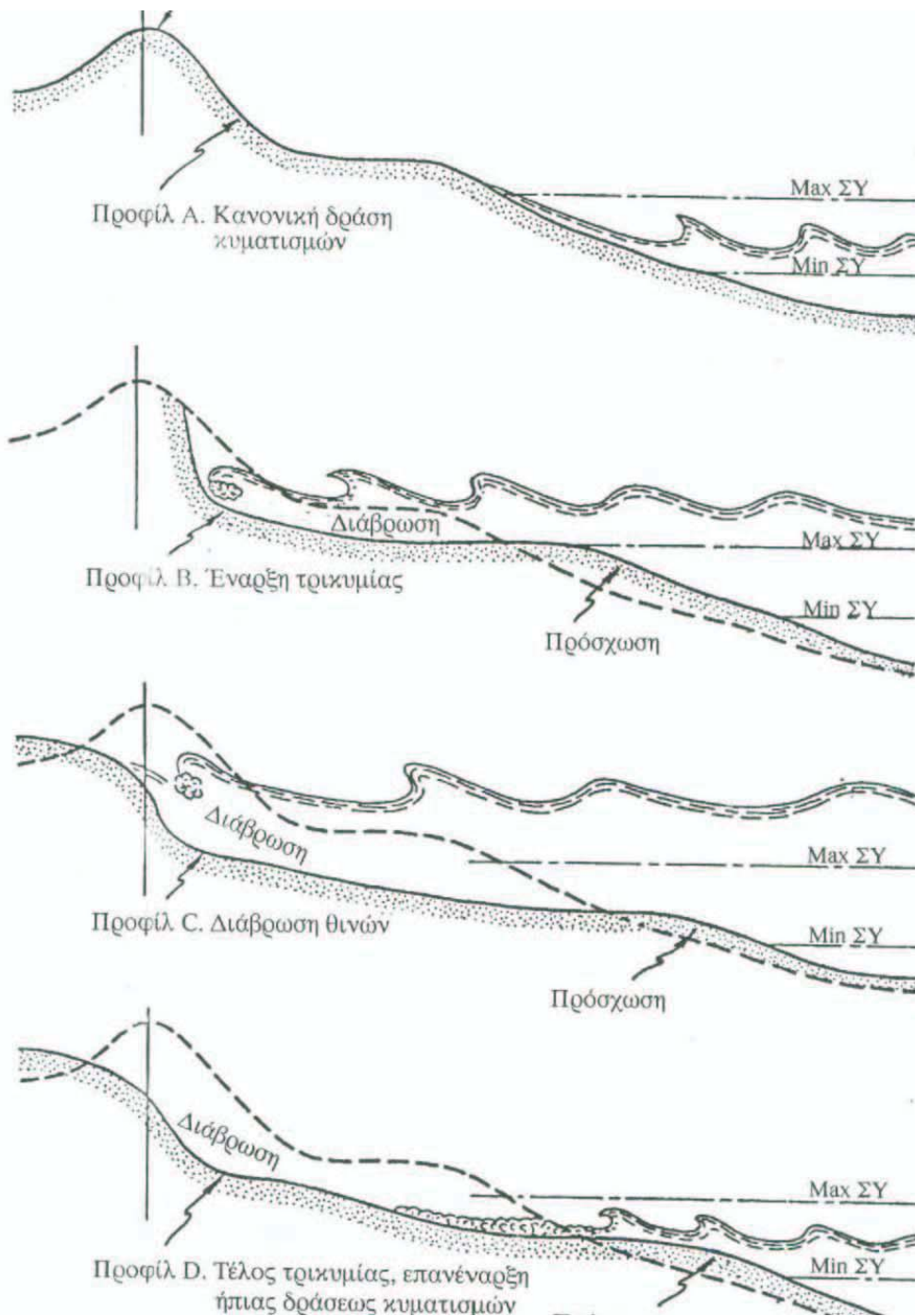
θύελλα που τα προκαλεί. Η διαρκής αυτή διεργασία όταν δεν υπεισέρχεται εξωγενής παράγοντας (σε μικροκλίμακα ανθρώπινη παρέμβαση) οδηγεί συνήθως σε σταθεροποίηση της ακτής, ήτοι σε σταθερά μορφολογικά χαρακτηριστικά την εκάστοτε παραλία. Οι συνήθειες ανθρωπογενείς παρεμβάσεις που αφορούν, είτε στην κατασκευή παράκτιων έργων είτε σε μπάζωμα ρεμάτων και ποταμών, που τροφοδοτούν με στερεοπαροχή το παράκτιο ιζηματολογικό δυναμικό της ακτής, είτε σε αμμοληψίες που εκτελούνται ανεξέλεγκτα οδηγώντας επίσης στη μείωση τόσο των στερεοπαροχών τροφοδοσίας των ακτών όσο και στην διαθεσιμότητα τους. Οι επεμβάσεις αυτές οδηγούν σε αλλαγή της παράκτιας διαίτας μίας ακτής, με τοπικές συγκεντρώσεις ιζημάτων και αντίστοιχα απώλειες από περιοχές που τροφοδοτούνταν παλαιότερα. Αποτέλεσμα των ανωτέρω είναι η προέκταση τοπικά του μετώπου των παραλιών και αντίστοιχα ισόποση (σε όγκο) υποχώρηση του σε διαφορετικά σημεία.

Η εγκάρσια συνιστώσα της θραύσης των κυμάτων οδηγεί σε ενεργοποίηση και μεταφορά υλικού κατά την διεύθυνση αυτή (εγκάρσια). Κάτω από εξαιρετικές κλιματολογικές συνθήκες οι μεταβολές στη διεύθυνση αυτή μπορούν να εξελιχθούν ραγδαία. Μία ακτή υπό την επίδραση μεγάλων κυματισμών (θύελλα) μπορεί να υποχωρήσει κατά δεκάδες μέτρα. Αντίθετα με την εμφάνιση κυματισμών μικρότερης καμπυλότητας (λόγος  $H_0/L_0$ ) και ενέργειας έχει ως αποτέλεσμα την πρόσχωση του μετώπου της ακτής. Η εμφάνιση κυματισμών υψηλής καμπυλότητας λαμβάνει χώρα συνήθως κατά τους χειμερινούς μήνες, ενώ αντίθετα οι μικρής καμπυλότητας κυματισμοί εμφανίζονται κατά τους εαρινούς και κυρίως κατά τους θερινούς μήνες.

Το φαινόμενο της εγκάρσιας στερεομεταφοράς έχει συνήθως εποχικό χαρακτήρα, ήτοι την χειμερινή περίοδο οι ακτές συνήθως υποχωρούν διαμορφώνοντας απότομες κλίσεις εγκάρσια προς το μέτωπο τους, ενώ κατά την θερινή περίοδο αντίστοιχα ενισχύονται (προώθηση προς την θάλασσα του μετώπου τους) με την κλίση τους να διαμορφώνεται αντίστοιχα εμφανώς πιο ήπια.

Αντίθετα με την εγκάρσια η παράλληλη στερεομεταφορά δεν είναι εποχικού χαρακτήρα. Η παράλληλη στερεομεταφορά εξαρτάται αποκλειστικά από τη διεύθυνση προώθησης των προωθούμενων κυματισμών και μέσα στο

χρόνο μπορεί να παρουσιάσει μικρές διαφοροποιήσεις, ανάλογα με την ένταση των φαινομένων θύελλας και την συχνότητα εμφάνισης των κυματισμών από συγκεκριμένες διευθύνσεις προώθησης. Παρ' όλα αυτά στη διάρκεια του χρόνου υπάρχει συνήθως «καθαρή» κατεύθυνση παράκτιων ιζημάτων που εξαρτάται από τη συχνότητα των επικρατούντων και των κυρίαρχων κυματισμών στην περιοχή μελέτης.



**Σχήμα 2-3: Διάκριση χειμερινού και θερινού προφίλ ακτής ανάλογα με την καμπυλότητα του (Κόφτης 2010)**

### 2.3 Παράκτια ιζήματα

Οι ακτές και ο θαλάσσιος πυθμένας από γεωλογική άποψη μπορεί να είναι βραχώδεις ή αμμώδεις/γαιώδεις. Οι βραχώδεις ακτές έχουν σταθερή μορφή και εξελίσσονται σε χρονικές κλίμακες γεωλογικών αιώνων. Οι ακτές της δεύτερης κατηγορίας συντίθενται από κοκκώδη υλικά (άργιλο, άμμο, κροκάλες) και υφίστανται έντονη επίδραση από τους κυματισμούς και τα ρεύματα με αποτέλεσμα



να μεταβάλλονται μορφολογικά σε όλες τις χρονικές κλίμακες (ακόμα και κατά τη διάρκεια θυελλών και τρικυμιών). Η γεωλογική σύσταση των ιζημάτων της παράκτιας ζώνης μπορεί να είναι χαλαζιακή, ασβεστολιθική, αργιλική ή οργανική. Η περιεκτικότητα εξαρτάται κυρίως από την πηγή τροφοδοσίας.

Τα ιζήματα των ακτών είναι τα προϊόντα αποσάθρωσης των πετρωμάτων της ξηράς και μεταφέρονται σε αυτές κυρίως με τα υδατορέματα, αλλά και με τον άνεμο και τους παγετώνες. Επίσης στο θαλάσσιο πυθμένα αποτίθενται ως ιζήματα κελύφη θαλάσσιων οργανισμών, διαλυμένες ουσίες στο νερό της θάλασσας και σωματίδια μετεωριτών. Με βάση την προέλευσή τους τα ιζήματα υποδιαιρούνται σε: (α) μηχανικά ή κλαστικά, (β) βιογενή ή οργανικά, (γ) χημικά ή υδρογενή, (δ) ηφαιστιογενή και (στ) κοσμογενή.

Επίσης, διαχωρίζονται με βάση το μηχανισμό μεταφοράς τους στον πυθμένα, ανάλογα δηλαδή αν προέρχονται από μεταφορά μετά από διάβρωση της ακτής, και ονομάζονται γαιογενή, ή αν προέρχονται από καθίζηση στον πυθμένα μετά από θαλάσσια ιζηματογέννεση, οπότε καλούνται πελαγογενή. Τα πρώτα είναι πιο χονδρόκοκα και έχουν την τάση να συσσωρεύονται σε φυσικά κοιλώματα στην παράκτια ζώνη ενώ τα πελαγογενή, που είναι ποσοτικά σαφώς λιγότερα, βρίσκονται σχεδόν ομοιόμορφα κατανομημένα στον πυθμένα, ακόμη και σε φυσικές εξάρσεις.

Οι κινήσεις του θαλάσσιου νερού μεταβάλλουν τη σύσταση και τη μορφή των ιζημάτων. Ανάλογα με το χρόνο επιδράσεως, το ίζημα διακρίνεται στις ακόλουθες κατηγορίες: (α) ανώριμο, το οποίο περιέχει αργιλικούς κόκκους σε ποσοστό μεγαλύτερο από 5% οι οποίοι έχουν γωνιακά σημεία, (β) υποώριμο, με χαμηλή έως και μηδενική περιεκτικότητα σε άργιλο και μέτρια διαβάθμιση, (γ) ώριμο, με καλή διαβάθμιση και κόκκους με λίγα γωνιακά σημεία και (δ) υπερώριμο, με καλή διαβάθμιση και στρογγυλεμένους κόκκους.

Η σημαντικότερη ταξινόμηση των γαιωδών ιζημάτων, τα οποία παρουσιάζουν τεράστιο ενδιαφέρον στην ακτομηχανική λόγω των έντονων μεταβολών στις οποίες υπόκεινται και μάλιστα σε μικρές χρονικά κλίμακες, είναι σε μη συνεκτικά (άμμοι) ή συνεκτικά (άργιλοι) ιζήματα. Τα βασικά χαρακτηριστικά των δύο κατηγοριών συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα.

**Πίνακας 2-1: Χαρακτηριστικές ιδιότητες άμμων και αργίλων**

Ίζημα	Σύνθεση	Μέγεθος κόκκου (mm)	Ιδιότητες
<b>Άργιλος</b>	φύλλα πυριτίου	<0.0039	Συνεκτικό, αδιαπέρατο, ολισθηρό
<b>Άμμος</b>	Χαλαζίας (μόρια	0.0625-2.00	Μη συνεκτικό, διαπερατό, τραχύ

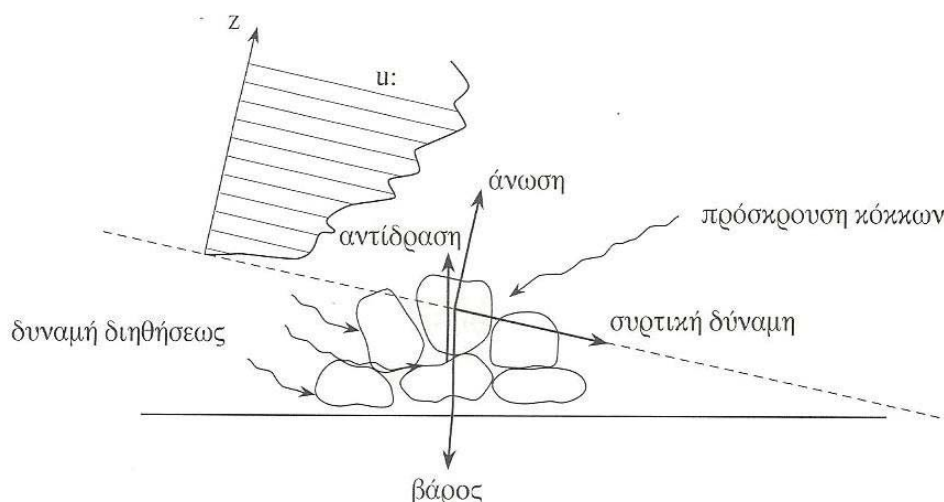


Ίζημα	Σύνθεση	Μέγεθος κόκκου (mm)	Ιδιότητες
	SiO <sub>2</sub> )		

Τα ιζήματα, περιγράφονται επίσης από διάφορα φυσικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τη μορφή, το μέγεθος και τη σύνθεσή τους.

## 2.4 Κατώφλι κίνησης ιζημάτων

Η υδροδυναμική κατάσταση κοντά στον πυθμένα της θάλασσας όπου υπάρχουν κυματισμοί και παράκτια ρεύματα αποτελεί τον ουσιαστικό παράγοντα αποσταθεροποίησης των κόκκων των ιζημάτων. Η αποκόλληση αυτή των κόκκων των ιζημάτων πραγματοποιείται όταν η διατμητική τάση του πυθμένα, λόγω κυματισμού και ρεύματος, υπερβεί μία οριακή κρίσιμη τιμή.



**Σχήμα 2-4: Έναρξη κίνησης ιζήματος (Καραμπάς 2004)**

Το κατώφλι της κίνησης υπολογίζεται χρησιμοποιώντας της παράμετρο  $\theta_c$  του Shields, η οποία είναι συνάρτηση του αδιάστατου μεγέθους των κόκκων  $D^*$ :

$$D^* = D_{50} \left( \frac{g\Delta}{\nu^2} \right)^{1/3} \quad (2.1)$$

όπου,  $D_{50}$  η μέση διάμετρος των κόκκων,  $\nu$  το κινηματικό ιξώδες,  $\Delta$  η σχετική πυκνότητα και  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας και

$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}, \text{ όπου } \rho \text{ και } \rho_s \text{ οι πυκνότητες του νερού και των κόκκων της άμμου}$$

αντίστοιχα.

Η τιμή της παραμέτρου  $\theta_c$  δίνεται από :

$$\theta_c = \frac{\tau_{bcr}}{(\rho_s - \rho)gD_{50}} \quad (2.2)$$

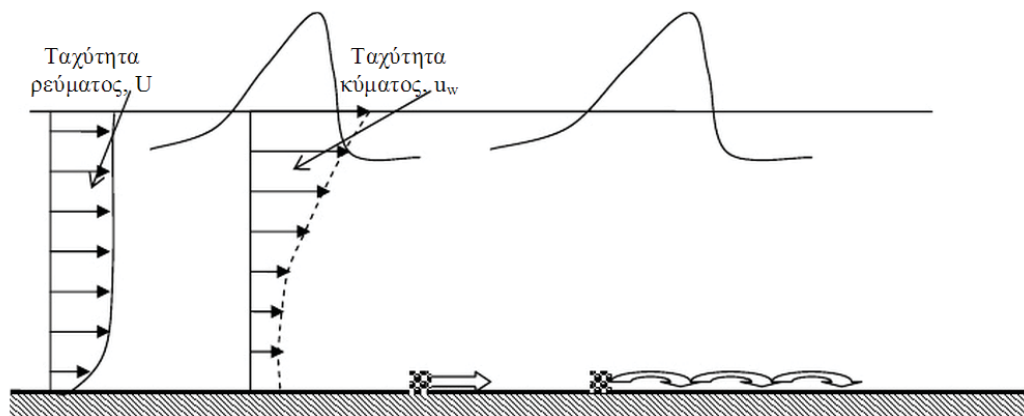
παίρνει τιμές :

$$\begin{aligned} 0.24D_*^{-1} & \quad 1 < D_* < 4 \\ 0.14D_*^{-0.64} & \quad 4 < D_* < 10 \\ 0.04D_*^{-1} & \quad 10 < D_* < 20 \\ 0.013D_*^{0.29} & \quad 20 < D_* < 150 \\ 0.055 & \quad D_* > 150 \end{aligned} \quad (2.3a)$$

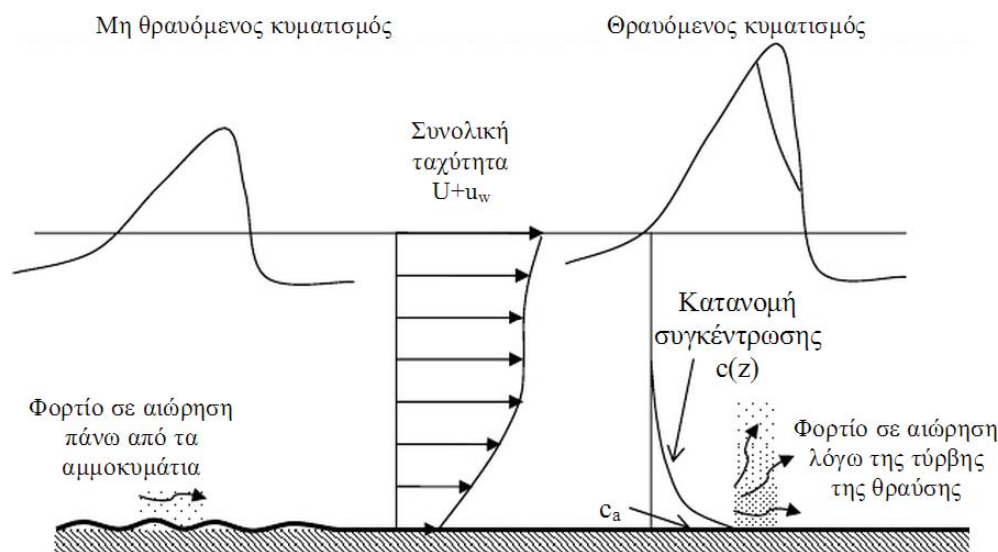
(Καραμπας 2004)

όπου  $\tau_{bcr}$  η κρίσιμη διατμητική τραχύτητα του πυθμένα.

Όταν η συνολική διατμητική τάση  $\tau_b$  στον πυθμένα ξεπεράσει την παραπάνω κρίσιμη τιμή  $\tau_{bcr}$  τότε πραγματοποιείται αποκόλληση των κόκκων του υλικού του πυθμένα οι οποίοι μεταφέρονται τόσο κοντά στον πυθμένα όσο και σε αιώρηση.



Σχήμα 2-5: Φορτίο πυθμένα(Καραμπάς 2004)



Σχήμα 2-6: Φορτίο σε αιώρηση (Καραμπας 2004)

## 2.5 Αλληλεπίδραση ακτών και παρακτίων έργων

Το παράκτιο περιβάλλον χαρακτηρίζεται από μια δυναμική ισορροπία, όσον αφορά το ισοζύγιο των φερτών υλών. Η παρουσία παρακτίων έργων στο φυσικό περιβάλλον διαταράσσει την προαναφερθείσα ισορροπία καθώς αναμορφώνει τα κυματολογικά δεδομένα με την προκαλούμενη ανάκλαση, περίθλαση και θραύση λόγω ρηχότητας σε περιοχές που δε συνέβαινε πριν, αλλά και καθώς παρεμβαίνουν μέσα στη ζώνη θραύσης στην παράκτια στερεομεταφορά. Τα τεχνικά έργα επηρεάζουν τις φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην ακτή, με το εύρος να είναι ανάλογο με το μέγεθος της παρέμβασης, ενώ κι αυτά με τη σειρά τους επηρεάζονται καθώς τοπικά καταγράφεται απόθεση ή διάβρωση ιζημάτων. Είναι λοιπόν ευνόητο ότι συντελείται μια αμφιμονοσήμαντη επιρροή μεταξύ παρακτίων έργων-παράκτιου περιβάλλοντος.

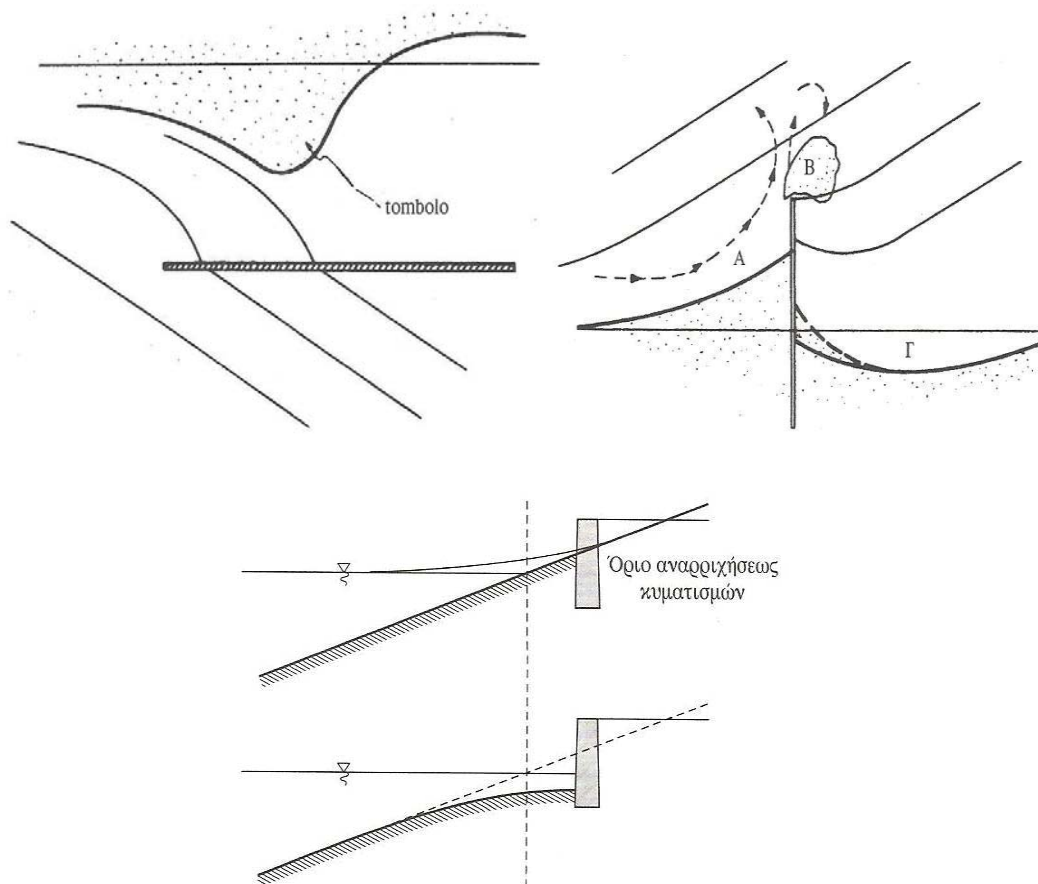
Γενικά, παρατηρείται απόθεση ιζημάτων ανάντη των τεχνικών έργων, η οποία οφείλεται στην αύξηση της ταχύτητας ροής κατά μήκος της ακτής λόγω της παρουσίας του έργου και κατά συνέπεια στην αύξηση της δυνατότητας μεταφοράς ιζημάτων. Στη ζώνη αμέσως στα κατάντη του έργου, υπάρχει απόθεση φερτών, η οποία λαμβάνει χώρα λόγω απουσίας δυνάμεων παράσυρσης. Η εμφανιζόμενη διάβρωση της ακτής στα κατάντη του έργου οφείλεται στην απουσία ιζημάτων για παράσυρση από το ρεύμα

κατά μήκος της ακτής και σε μείωση της ταχύτητας ροής. Σημειώνεται, ότι η μείωση της ταχύτητας ροής οφείλεται είτε σε ανάκλαση της ενέργειας και περιθλάση, όπως συμβαίνει στην περίπτωση ενός μώλου, είτε σε ανυπαρξία συνθηκών θραύσης λόγω αύξησης του βάθους πυθμένα, όπως συμβαίνει σε μια περίπτωση βυθοκορημένου διαύλου ναυσιπλοΐας. Οι προαναφερθείσες μεταβολές είναι μεγάλης χρονικής κλίμακας και περιγράφουν τις μέσες μεταβολές της ακτής. Σημειώνεται, ότι σε μικρότερη χρονική κλίμακα, δεν αποκλείονται μεταβολές αντίθετες των προαναφερθέντων.

Οι παραπάνω διαδικασίες αφορούν όλα τα παράκτια τεχνικά έργα. Στην περίπτωση κυματοθραυστών παράλληλων με την ακτή, καταγράφεται αλλαγή της κατεύθυνσης και του ύψους κύματος λόγω περιθλάσεως. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την παγίδευση ποσοτήτων φερτών στο τμήμα της ζώνης θραύσης πίσω από το έργο, προκαλώντας προσάμμωση και την εμφάνιση "tombolo" που τείνει να ενώσει το έργο με την ακτή. Έργα κάθετα στην ακτογραμμή, όπως πρόβολοι ή μώλοι, λειτουργούν ως παγίδες φερτών λόγω στρόβιλων αδρανειακής αποκολλήσεως από το άκρο τους που αναμορφώνουν το παράκτιο ρεύμα. Τοίχοι αντιστήριξης κατασκευασμένοι παράλληλα στην ακτογραμμή, οι οποίοι τοποθετούνται μέσα στη ζώνη αναρρίχησης, προκαλούν ανάκλαση του κύματος και διάβρωση της ακτής μπροστά τους, με κίνδυνο υποσκαφής αν η θεμελίωση τους δε γίνει σε επαρκές βάθος. Τα παραπάνω συνοψίζονται παρακάτω και στο Σχήμα 2-7:

- Έργα που εισέρχονται στη ζώνη θραύσης των κυματισμών και διακόπτουν την παράκτια στερεοπαροχή συνεπάγονται προσάμμωση ανάντη του έργου, διάβρωση της ακτής στα κατάντη.
- Μεταξύ ενός παράλληλου προς την ακτή έργου και της ακτής(στη σκιά των περιθλώμενων κυματισμών), δημιουργία προσάμμωσης (tombolo) • Στρόβιλοι αδρανειακής προέλευσης που αποκολλώνται από τα άκρα μώλων
- δημιουργούν στο κέντρο τους προσαμμώσεις (μειώσεις του βάθους)

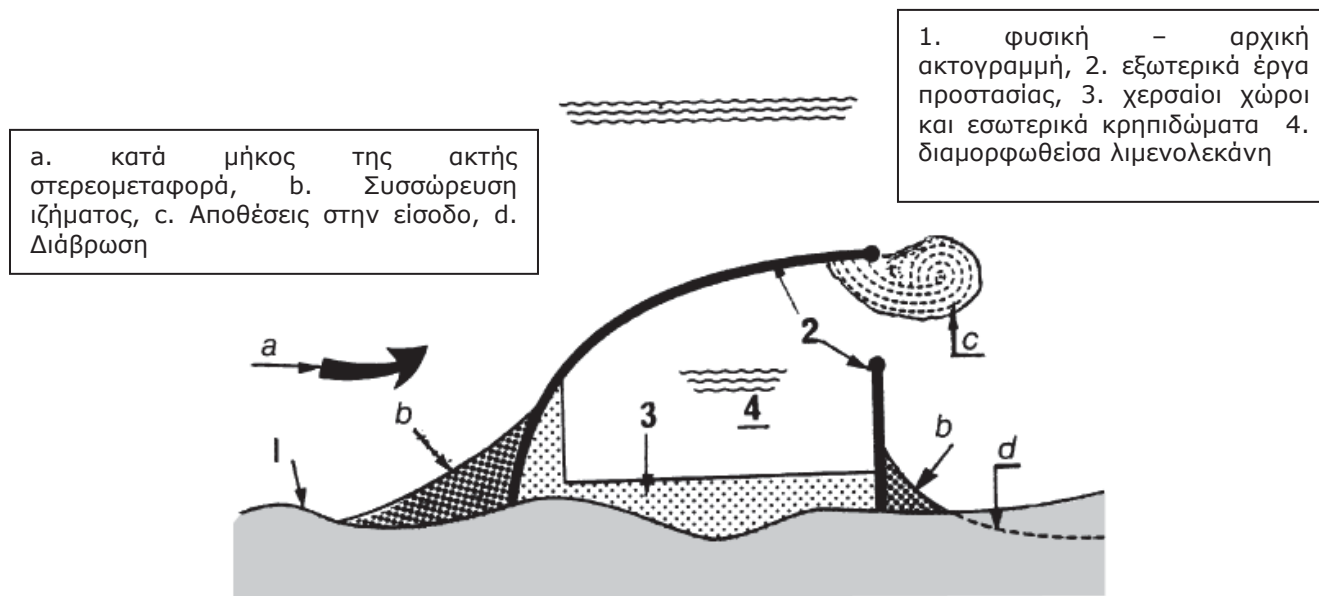
- Είσοδοι λιμένων που αντιμετωπίζουν κυματισμούς δέχονται και παγιδεύουν στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης φερτές ύλες (μείωση βαθών στην γειτονική περιοχή της λεκάνης)
- Παράκτιοι τοίχοι μέσα στη ζώνη αναρρίχησης των ισχυρών κυματισμών (χειμερινών) προκαλούν ανάκλαση της κυματικής ενέργειας και συνεπώς διαβρωση του ποδός τους και υποσκαφή τους (πρέπει να θεμελιώνονται σε βάθος μεγαλύτερο από την προβλεπόμενη διάβρωση).



**Σχήμα 2-7: Αλληλεπίδραση τεχνικών έργων-παράκτιου περιβάλλοντος ως προς τη στερεομεταφορά (Μουτζούρης 2005)**

Στην περίπτωση λιμένα ή μαρίνας, που είναι προσανατολισμένοι προς τους κυματισμούς, παγιδεύονται φερτές ύλες, οι οποίες εισέρχονται από το κυματικά διαταραγμένο περιβάλλον και αποθέτονται στο αδιατάρακτο χώρο της λιμενολεκάνης. Οι προσαμμώσεις λαμβάνουν χώρα με βάση τις διαδικασίες που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και

καταγράφονται κυρίως στην είσοδο αυτής, στη θαλάσσια ζώνη ανάντη του έργου ή στο διάυλο εισόδου, αν υπάρχει. Σε μια μαρίνα, πέραν των αλληλεπιδράσεων με την ακτή και της κατάντη διάβρωσης που θα λάβει χώρα, υπάρχει ο κίνδυνος, αν το βάθος κατασκευής ως προς την εξυπηρέτηση του βυθίσματος των σκαφών είναι οριακό, η παρουσία και καθίζηση των ιζημάτων να καταστήσει μη λειτουργική τη μαρίνα, εμποδίζοντας τα σκάφη να εισέλθουν σε αυτή.



**Σχήμα 2-8: Αλληλεπίδραση μαρίνας-παράκτιου περιβάλλοντος ως προς τη στερεομεταφορά (Memos, port planning)**

## 2.6 Προσαμμώσεις σε μαρίνες

### 2.6.1 Μηχανισμοί Στερεομεταφοράς

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το πρόβλημα σε μια μαρίνα ή ένα λιμάνι, έγκειται στο γεγονός, ότι πέρα από τα ζητήματα που συνεπάγεται μια τέτοιου μεγέθους παρέμβαση στο παράκτιο περιβάλλον και σχετίζεται με τη μεταφορά ιζημάτων (διάβρωση στα κατάντη του έργου), οι διαδικασίες στερεομεταφοράς επηρεάζουν το ίδιο το έργο το οποίο μπορεί να καταστήσουν ανενεργό και ακατάλληλο προς χρήση. Όσον αφορά τις μαρίνες, αυτό εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, πολλές φορές αλληλοεμπλεκόμενους μεταξύ τους. Κατ' αρχάς, βαρυσήμαντο ρόλο

διαδραματίζει το είδος του ιζήματος. Γενικά, όσο πιο λεπτόκοκκο είναι το ίζημα τόσο πιο εύκολα μεταφέρεται. Επίσης, αναφορικά με το ίζημα, συνεκτικά ιζήματα δημιουργούν ισχυρότερα προβλήματα σε σχέση με τα αμμώδη, καθώς εκτοπίζουν το νερό και δημιουργούν ένα αδιαπέρατο στρώμα ιζήματος. Μια πολύ σημαντική παράμετρος είναι το κυματικό και το ανεμολογικό καθεστώς, αφού η ένταση των δημιουργούμενων ρευμάτων είναι ανάλογη με την ποσότητα ιζήματος που θα μεταφερθεί και όσο εντονότερη είναι η θραύση, τόσο περισσότερη ποσότητα θα θέσει σε κίνηση απομακρύνοντας την από τον πυθμένα. Επίσης, η ύπαρξη παλιρροιών στην περιοχή ενισχύει την μεταφορά ιζημάτων, καθώς τα παλιρροιακά ρεύματα δρουν προς την κατεύθυνση αυτή. Ακόμη, αν υπάρχουν υδατορεύματα που εκβάλλουν κοντά στην περιοχή κατασκευής ενός έργου, αυτό συνιστά μια καθοριστική αιτία προσαμμώσεων στη μαρίνα. Σημαντικό ρόλο ακόμα διαδραματίζει η γεωμετρία της μαρίνας και κυρίως η είσοδος της, καθώς, όσο πιο ευρεία είναι, τόσο πιο εύκολα εισέρχονται στο εσωτερικό της φερτά υλικά.

Πέραν όμως της ποσότητας ιζήματος που θα μεταφερθεί στην περιοχή στην οποία έχει κατασκευαστεί το τεχνικό έργο, είναι μείζονος σημασίας σε ποιο βαθμό αυτό θα καθιζάνει στη λιμενολεκάνη. Σε αυτό, ένας σημαντικός παράγοντας, όπως έχει διαπιστωθεί, είναι η πυκνότητα των υδάτων, καθώς όσο πιο ισχυρή στρωμάτωση καταγράφεται, τόσο πιο εύκολα καθιζάνει το ίζημα. Το παραπάνω καταδεικνύεται από μετρήσεις στερεομεταφοράς που έδειξαν ότι οι προσαμμώσεις ήταν σημαντικά πιο έντονες σε αλμυρά και υφάλμυρα ύδατα σε σχέση με ύδατα χαμηλής αλατότητας (Nasner, 1992). Επίσης, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η τοπική ταχύτητα των υδάτων κοντά στη είσοδο της μαρίνας, καθώς σε μεγάλες ταχύτητες το ίζημα κινείται και καθιζάνει σε μικρότερο βαθμό. Συνεπώς, ένα πολύ ισχυρό ρεύμα στην είσοδο του έργου μπορεί να διατηρήσει τα ιζήματα σε κίνηση και να δράσει αποτρεπτικά σε σχέση με την καθίζηση αυτών. Εξάγεται λοιπόν το συμπέρασμα ότι πρέπει να εξετάζονται οι παραπάνω παράγοντες συνολικά, καθώς σχεδόν πάντα εμπλέκονται μεταξύ τους. Έντονη θραύση και μεγάλες ταχύτητες ρεύματος θα θέσουν σε κίνηση περισσότερη ποσότητα ιζήματος, αλλά τοπικά στη μαρίνα, ένα ισχυρό ρεύμα μπορεί να εμποδίσει τα ιζήματα να καθιζάνουν.

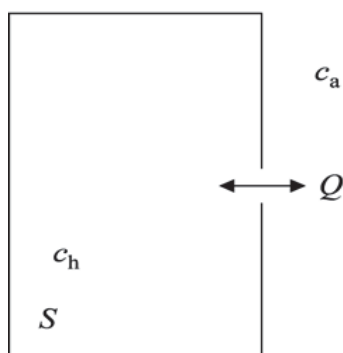
### 2.6.2 Εξισώσεις που περιγράφουν τις διαδικασίες στερεομεταφοράς σε μαρίνες

Εξαιτίας του γεγονότος ότι τα νερά στη λιμενολεκάνη μιας μαρίνας είναι σχετικά ήρεμα, το εσωτερικό αυτής είναι επιρρεπές σε προσαμμώσεις. Τα ύδατα της λεκάνης έρχονται σε επαφή με αυτά εκτός της λεκάνης, τα οποία εμπεριέχουν ιζήματα, διαμέσου της εισόδου αυτής. Μόλις τα ιζήματα εισέρχονται στη λεκάνη, τείνουν να καθιζάνουν λόγω των χαμηλών ταχυτήτων ροής. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια μέθοδος για τον υπολογισμό του ρυθμού προσάμμωσης στη λιμενολεκάνη.

Η διαφορική εξίσωση που διέπει το προαναφερθέν φαινόμενο και δίνει το ρυθμό μεταβολής της συγκέντρωσης ιζήματος στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης  $c_h$  ως προς το χρόνο  $dc_h/dt$  είναι η εξής :

$$\frac{dc_h}{dt} = \frac{Q}{V_e} (c_a - c_h) \left( \frac{Q}{V_e} + \frac{aW_f}{d} \right) \quad (2.1)$$

όπου  $Q$  ο ρυθμός ανταλλαγής ροής,  $V_e$  ο όγκος της λιμενολεκάνης,  $c_a$  η συγκέντρωση ιζήματος του περιβάλλοντος (εκτός λιμενολεκάνης),  $W_f$  η ταχύτητα καθίζησης,  $a$  συντελεστής που παίρνει τιμές (0.1,10) και  $d$  το βάθος του λιμένα.



**Σχήμα 2-9: Ανταλλαγή υδάτων μεταξύ μαρίνας και περιβάλλοντος διαμέσου της εισόδου**

Λαμβάνοντας υπόψη την αρχική συνθήκη, δηλαδή για  $t=0$  ισχύει ότι  $c_h=c_0$ , όπου  $c_0$  η αρχική συγκέντρωση της λιμενολεκάνης σε ιζήματα, πρώτου



δηλαδή έρθει σε επαφή με το περιβάλλον, η προαναφερθείσα εξίσωση γίνεται:

$$c_h = \frac{Q}{Q + aSW_f} c_a + \left( c_0 - \frac{Q}{Q + aSW_f} c_a \right) \exp \left\{ - \left( \frac{Q}{V_s} + \frac{aW_f}{d} \right) t \right\}$$

$$= c_s + (c_0 - c_s) \exp \left\{ - \left( \frac{Q}{V_s} + \frac{aW_f}{d} \right) t \right\} \quad (2.2)$$

όπου S η επιφάνεια της λιμενολεκάνης,  $c_s$  η συγκέντρωση ισορροπίας της λεκάνης που δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$c_s = \frac{Q c_a}{Q + aSW_f} \quad (2.3)$$

Ο χρόνος παραμονής των αιωρούμενων ιζημάτων στην οριζόντια και την κατακόρυφη διεύθυνση της λιμενολεκάνης είναι  $T_h = V_s/Q$  και  $T_v = d/aW_f$ , αντίστοιχα. Ο ρυθμός προσάμμωσης στο εσωτερικό της λεκάνης  $F_s$ , λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$F_s = \left[ \frac{T_v}{T_h + T_v} + \left( \frac{c_0}{c_a} - \frac{T_v}{T_h + T_v} \right) \exp \left\{ - \left( \frac{1}{T_h} + \frac{1}{T_v} \right) t \right\} \right] aSW_f c_a \quad (2.4)$$

Αν θεωρηθεί ότι ο χρόνος κατά την κατακόρυφο είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν κατά την οριζόντια, ήτοι  $T_v \gg T_h$  η προαναφερθείσα σχέση γίνεται:

$$F_s = \left[ 1 + \left( \frac{c_0}{c_a} - 1 \right) \exp \left\{ - \frac{t}{T_h} \right\} \right] aSW_f c_a = aSW_f c_a \quad (2.5)$$

Η παραπάνω εξίσωση δείχνει ότι η συγκέντρωση ιζημάτων στη λεκάνη  $c_h$  ακολουθεί τη συγκέντρωση περιβάλλοντος  $c_a$  κατά χρονική υστέρηση ανάλογη προς το χρόνο παραμονής στην οριζόντια διεύθυνση  $T_h$ . Αυτό σημαίνει ότι για  $T_v \gg T_h$ , ο ρυθμός προσάμμωσης στο εσωτερικό της λεκάνης  $F_s$  γίνεται σχεδόν ανεξάρτητος από το ρυθμό ανταλλαγής ροής Q. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η μείωση του Q με κάποιο τρόπο δε θα μειώσει ή θα επιδράσει μόνο οριακά στη μείωση του ρυθμού προσάμμωσης στο εσωτερικό της λεκάνης. Σε άλλες περιπτώσεις, η μείωση του Q επηρεάζει το  $F_s$  και μπορεί μάλιστα να επιτελέσει καθοριστικό ρόλο στην ελαχιστοποίησή του.

Για σημαντικά μικρές λεκάνες, ο ρυθμός προσάμμισης ημι-ισορροπίας στο εσωτερικό της λεκάνης  $F_{s,T^*}$  για μια χαρακτηριστική περίοδο  $T^*$  δίνεται από την εξής σχέση:

$$F_{s,T^*} = SW_f \frac{Q}{Q + SW_f} c_a T^* \quad (2.6)$$

### **3. Μαρίνες - Τουριστικοί λιμένες**

#### **3.1 Γενικά στοιχεία μαρινών – τουριστικών λιμένων**

##### *3.1.1 Ορισμός - Ιστορικό Ανάπτυξης Τουριστικών Λιμένων*

Τουριστικός λιμένας σκαφών αναψυχής (μαρίνα) είναι ο χερσαίος και θαλάσσιος χώρος που προορίζεται κατά κύριο λόγο, για την εξυπηρέτηση σκαφών αναψυχής, είτε για αγκυροβόλημα, είτε για μακροχρόνια ή παροδική χερσαία εναπόθεση, είτε για εξυπηρέτηση των διερχομένων σκαφών.

Διαφέρει από ένα λιμάνι κατά το γεγονός ότι δε δύναται να φιλοξενήσει μεγάλα επιβατηγά (Ε/Γ – Ο/Γ) ή φορτηγά πλοία. Ο όρος μαρίνα επίσης χρησιμοποιείται για να περιγράψει τις αποβάθρες σε ποταμούς και διώρυγες που χρησιμοποιούνται αποκλειστικά από μη-βιομηχανικά σκάφη αναψυχής.

Οι τουριστικοί λιμένες, με συγκεκριμένη μορφή και λειτουργικά ανεξάρτητοι από τους άλλους λιμένες, εμφανίζονται ουσιαστικά μετά το 1960. Μέχρι τότε τα σκάφη εξυπηρετούνταν στα υπάρχοντα λιμάνια (επιβατικά και εμπορικά) ή τις ιχθυόσκαλες στην ηπειρωτική χώρα και τα νησιά, όπου το σκάφος ελλιμενιζόταν σε ασφαλή λιμενολεκάνη χωρίς να παρέχονται εξυπηρετήσεις. Με την αύξηση του αγοραστικού δυναμικού στις οικονομικά ανεπτυγμένες χώρες ο αριθμός των σκαφών αναψυχής (ιστιοφόρων ή μηχανοκίνητων) αυξήθηκε εντυπωσιακά.

Την αύξηση της «βιομηχανίας» παραθαλάσσιων λιμένων αναψυχής της δεκαετίας του 1960, που οδήγησε στην κατασκευή μεγάλων μαρινών, ακολούθησε μια περίοδος κριτικής περισυλλογής και ανάλυσης των στατιστικών δεδομένων και των αποτελεσμάτων. Σήμερα η ανάπτυξη των λιμένων αναψυχής συμβαδίζει με την ανάπτυξη του θαλάσσιου τουρισμού και του τουρισμού γενικότερα, δεδομένου ότι οι μαρίνες δεν αντιμετωπίζονται πια ανεξάρτητα και μόνο για τον ελλιμενισμό των σκαφών αλλά σε συνδυασμό με άλλες μορφές αναψυχής (εστιατόρια,

καφέ, κινηματογράφους κλπ) αλλά και άλλες δραστηριότητες όπως διάφορες εκθέσεις, πολιτιστικά δρώμενα κλπ, που διεξάγονται συχνά στους χώρους τους.

### 3.1.2 Τουριστικοί λιμένες Μεσογείου

Οι μαρίνες είναι παράκτια έργα που σχετίζονται με την ανάπτυξη μιας χώρας. Σε παγκόσμιο επίπεδο λοιπόν, η κατασκευή και αξιοποίηση τους παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον. Πιο συγκεκριμένα στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου, η Τουρκία διαθέτει 25.000 θέσεις ελλιμενισμού σε 16 μαρίνες και προτίθεται να δημιουργήσει περισσότερες θέσεις. Η Ισπανία με 1.250.000 σκάφη αναψυχής, έχει 107.000 θέσεις σε 173 μαρίνες εκ των οποίων οι 166 στη Μεσόγειο. Η Γαλλία σήμερα διαθέτει 227.000 θέσεις σε 102 μαρίνες. Η Πρώην Γιουγκοσλαβία, με 1.500 σκάφη αναψυχής διαθέτει 9.500 θέσεις σε μαρίνες σύγχρονα εξοπλισμένες.

Στον παρακάτω πίνακα (βλ. Πίνακας 3-1) παρουσιάζονται η ικανότητα ελλιμενισμού και τα βασικά χαρακτηριστικά μαρίνων που έχουν κατασκευαστεί σε χώρες της Μεσογείου.

**Πίνακας 3-1: Μαρίνες στη Μεσόγειο θάλασσα (Πηγή: World Marine guide)**

Μαρίνα	Μέγιστο βάθος (m)	Πλάτος ανοίγματος (m)	Ικανότητα Ελλιμενισμού (Σκάφη)
<b>Finike (Τουρκία)</b>	5	90	350
<b>Kas (Τουρκία)</b>	15	150	472
<b>Limassol (Κύπρος)</b>	22	100	800
<b>Karpaz Gate (Κύπρος)</b>	5.5	55	300
<b>Mandalina (Κροατία)</b>	-	140	350
<b>Kornati (Κροατία)</b>	6.5	40	450
<b>Villa Igiea Palmero (Σικελία)</b>	9.5	65	380
<b>Brindisi (Ιταλία)</b>	11	35	638
<b>Rimini (Ιταλία)</b>	5	35	622
<b>St Elmo (Σαρδηνία)</b>	4.8	60	100
<b>Manoel Island (Μάλτα)</b>	9	110	245
<b>Estepona (Ισπανία)</b>	4	35	447
<b>Atunara (Ισπανία)</b>	3	16	323
<b>Villefranche (Γαλλία)</b>	4	30	560
<b>Napolean (Γαλλία)</b>	4.5	30	360
<b>Yasmine (Τυνησία)</b>	6	110	700

Μαρίνα	Μέγιστο βάθος (m)	Πλάτος ανοίγματος (m)	Ικανότητα Ελλιμενισμού (Σκάφη)
<b>Bizerte (Τυνησία)</b>	12	110	800
<b>Herzliya (Ισραήλ)</b>	6	35	680
<b>Tel Aviv (Ισραήλ)</b>	-	20	320
<b>Ocean Village (Γιβραλτάρ)</b>	4.5	100	323

Στον παραπάνω πίνακα, παρουσιάζονται μαρίνες σε διάφορες χώρες της Μεσογείου, προκειμένου να συγκριθούν η ικανότητα ελλιμενισμού αλλά και τα κατασκευαστικά στοιχεία που αφορούν το πλάτος ανοίγματος εισόδου και το μέγιστο κατασκευαστικό βάθος τους με τα αντίστοιχα στοιχεία που αφορούν τον ελληνικό χώρο. Το μέγιστο βάθος κυμαίνεται μεταξύ 3-22 m, ενώ το πλάτος ανοίγματος εισόδου από 15 έως 150 m ανάλογα με τη φυσιογραφία της περιοχής, το ανεμολογικό και κυματικό καθεστώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των σκαφών που πρόκειται να φιλοξενήσει η μαρίνα.

### 3.1.3 Τουριστικοί λιμένες στον Ελλαδικό χώρο

Η Ελλάδα αποτελεί έναν από τους δημοφιλέστερους τουριστικούς προορισμούς στον κόσμο. Με μήκος διαθέσιμων ακτών που ξεπερνά τα 16.000 χλμ και περισσότερα από 6.000 μεγάλα και μικρότερα νησιά, η Ελλάδα είναι ο ιδανικός προορισμός για κατόχους σκαφών αναψυχής.

Καθώς η ζήτηση για υπηρεσίες επαγγελματικών μαρινών αυξάνεται, ομοίως διευρύνονται και οι ευκαιρίες για επενδύσεις στον συγκεκριμένο τουριστικό κλάδο. Η τουριστική βιομηχανία της Ελλάδας αποτελεί το 18% του ΑΕΠ, απασχολεί περισσότερους από 700.000 εργαζόμενους και φιλοξενεί εκατομμύρια επισκέπτες κάθε χρόνο.

Το μέγεθος της αγοράς (σε αξία) των ελληνικών τουριστικών λιμένων ήταν 30 εκατομμύρια € το 2008 και παρουσίασε μέσο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης 4% κατά την περίοδο 2005-2008 (Πηγή: ICAP, Market Estimations).

Σήμερα, στην Ελλάδα υπάρχουν 19 μαρίνες με 6.661 θέσεις ελλιμενισμού, προσφέροντας υψηλής ποιότητας υπηρεσίες (στοιχεία 2010). Πολλές από αυτές έχουν βραβευτεί από το Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα Γαλάζιας Σημιαίας.

Το σύνολο των θέσεων ελλιμενισμού σκαφών όλων των κατηγοριών που έχουν χωροθετηθεί σε πανελλαδικό επίπεδο με εξαίρεση τα εμπορικά λιμάνια, αλιευτικά καταφύγια και λιμενίσκους ναυταθλητικών ομίλων, ανέρχεται σε 19.500 θέσεις περίπου και αντιστοιχούν σε 128 λιμένες. Οι εν λειτουργία τουριστικοί λιμένες, αγκυροβόλια και καταφύγια είναι 55 με το σύνολο των θέσεων ελλιμενισμού να ανέρχεται σε 10.015. Κατά κατηγορία, οι τουριστικοί λιμένες (μαρίνες) συγκεντρώνουν το 80,7% του συνόλου των εν λειτουργία θέσεων. (Πηγή: ICAP, Μελέτη για σκάφη αναψυχής, Ιούνιος 2009).

Η δυνατότητα ελλιμενισμού του εκάστοτε τουριστικού λιμένα διαφέρει ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε περίπτωσης και μπορεί να κυμαίνεται από λίγες δεκάδες σκάφη, όπως η μαρίνα Λακκί, στη Λέρο μέχρι και πάνω από χίλια σκάφη, όπως στις περιπτώσεις της μαρίνας του Αλίμου και της Γουβιάς στην Κέρκυρα. Αναλόγως των αναγκών ελλιμενισμού και των διαστάσεων των σκαφών που αναμένεται να φιλοξενήσει ένας τουριστικός λιμένας επιλέγονται τα βασικά στοιχεία σχεδιασμού του, που είναι το **πλάτος ανοίγματος εισόδου, το βάθος κατασκευής και η επιφάνεια που καλύπτει** η οποία συνεπάγεται τον αριθμό των σκαφών που θα φιλοξενηθούν .

**Πίνακας 3-2: Μαρίνες και τουριστικοί λιμένες στον Ελλαδικό Χώρο – Χωρητικότητα (Πηγή: Ε.Ο.Τ., διαδικτυακοί τόποι μαρινών - λιμεναρχεία )**

ΟΝΟΜΑ	ΠΕΡΙΟΧΗ	ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ
PORTO KARRAS	Porto Carras, Χαλκιδική	175
PORTO SANI	Σάνη, Χαλκιδική	100
ΖΕΑ	Πειραιάς, Αττική	650
ΑΓΙΑ ΓΑΛΗΝΗ	Ρέθυμνο, Κρήτη	112
ΑΓΙΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ	Λασιθι, Κρήτη	250
ΑΛΙΜΟΣ	Άλιμος, Αττική	1086
ΑΡΓΟΣΤΟΛΙ	Αργοστόλι, Κεφαλονιά	190
ΑΡΕΤΣΟΥ	Καλαμαριά, Θεσσαλονίκη	300
ΑΧΙΛΙ	Σκύρος	150
ΒΟΥΛΙΑΓΜΕΝΗ	Βουλιαγμένη, Αττική	115
ΒΟΥΝΑΚΙ	Βουνάκι, Αιτωλοκαρνανία	70
ΓΛΥΦΑΔΑ	Γλυφάδα, Αττική	780
ΓΟΥΒΙΑ	Κέρκυρα, Κέρκυρα	850
ΖΑΚΥΝΘΟΣ	Ζάκυνθος	150
ΘΑΣΟΣ	Λιμενάρια, Θάσος	280

ΟΝΟΜΑ	ΠΕΡΙΟΧΗ	ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΙΚΑΡΙΑ	Λευκάδα, Ικαρία	250
ΙΤΕΑ	Ιτέα, Φωκίδα	146
ΚΑΛΑΜΑΤΑ	Καλαμάτα, Μεσσηνία	300
ΚΑΜΕΝΑ ΒΟΥΡΛΑ	Φθιώτιδα	81
ΚΑΤΑΚΟΛΟ	Κατάκολο, Ηλεία	235
ΚΛΕΟΠΑΤΡΑ	Άκτιο, Αιτωλοακαρνανία	136
ΚΥΛΛΗΝΗ	Κυλλήνη, Ηλεία	150
ΚΩΣ	Κως, Δωδεκάνησα	250
ΛΕΥΚΑΔΑ	Λευκάδα, Ιον. Νήσων	482
ΜΑΛΙΑ	Μάλια, ΗΡΑΚΛΕΙΟ	300
ΜΑΝΔΡΑΚΙ	Μανδράκι, Δωδεκάνησα	115
ΜΕΘΑΝΑ	Μέθανα, Αττική	70
ΜΥΤΙΛΗΝΗ	Μυτιλήνη, Λέσβος	215
ΞΥΛΟΚΑΣΤΡΟ	Άγιος Ιωάννης, Κορινθία	220
ΟΛΥΜΠΙΑΚΗ ΜΑΡΙΝΑ	Ελληνικό, Αττική	685
ΠΑΛΑΙΟΧΩΡΑ	Παλαιοχώρα, Χανιά	140
ΠΑΤΡΑ	Πάτρα, Αχαΐα	450
ΠΙΔΑΛΙ	Πιδάλι, Σύρος	254
ΠΟΡΤΟ ΓΟΥΒΕΣ	Ηράκλειο	72
ΠΡΕΒΕΖΑ	Πρέβεζα	261
ΠΥΘΑΓΟΡΕΙΟ	Πυθαγόρειο Σάμος	260*
ΠΥΛΟΣ	Πύλος	
ΡΟΔΟΣ	Σφαγεία, Ρόδος	500
ΤΟΥΡΛΟΣ	Τούρλος, Μύκονος	
ΦΑΛΗΡΟ	Νέο Φάληρο, Πειραιάς	130
ΦΛΟΙΣΒΟΣ	Αττική	249
ΧΙΟΣ	Καστέλλο, Χίος	274

Όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (βλ. Πίνακας 3-3), όσον αφορά τον ελληνικό χώρο, το πλάτος ανοίγματος εισόδου κυμαίνεται μεταξύ 20-80 m, ενώ το βάθος κατασκευής μεταξύ 3-9 m, αντίστοιχα. Ένας τουριστικός λιμένας, λόγω του ότι σχετίζεται άμεσα με τον τουρισμό, πέραν της παροχής των θέσεων ελλιμενισμού των σκαφών είναι η παροχή υπηρεσιών διαμονής και ασφαλείας στους κατόχους των σκαφών για όσο διάστημα τη χρησιμοποιήσουν. Υπηρεσίες όπως φανοί επισήμανσης εισόδου για ασφαλή πλοήγηση, παροχή ηλεκτρικού ρεύματος και νερού, ανεφοδιασμού καυσίμων, αναψυχής, εξοπλισμός πρώτων βοηθειών, ασφάλειας κλπ είναι απαραίτητες για την εύρυθμη λειτουργία μιας μαρίνας.

Όσον αφορά τον ελληνικό χώρο, έχει παρατηρηθεί, ότι σε αντίθεση με το μέγεθος και την ποιότητα των φυσικών πόρων που διαθέτει η χώρα μας, οι οποίοι ενδείκνυνται για την ανάπτυξη του θαλάσσιου τουρισμού, η Ελλάδα

υστερεί ποσοτικά και ποιοτικά έναντι των άλλων Μεσογειακών χωρών στην ανάπτυξη δικτύων λιμένων σκαφών αναψυχής. Ιδιαίτερα έντονη γίνεται η αντίθεση με τις γειτονικές χώρες (Κροατία, Τουρκία βλ. Πίνακας 3-1) που έχουν μεγάλη δραστηριότητα στον τομέα αυτό (Καμαρινάκης, 1997).

**Πίνακας 3-3: Διαστάσεις μαρίνες - τουριστικών λιμένων στον Ελλαδικό Χώρο(Πηγή: World Marine guide και Ε.Ο.Τ. 2010)**

Μαρίνα	Μέγιστο βάθος (m)	Πλάτος ανοίγματος (m)	Ικανότητα Ελλιμενισμού (Σκάφη)
<b>Ιόνιο Πέλαγος</b>			
Αργοστόλι - Κεφαλονιά	3.5	30	190
Πρέβεζα	8	30	261
Γουβιά -Κέρκυρα	5.5	80	850
Καλαμάτα	3	25	300
Λευκάδα	4	40	482
Οδυσσεάς (Μεγανήσι)	8	60	68
Πάτρα	3	45	450
<b>Αιγαίο Πέλαγος</b>			
Άλιμος	6.5	40	1086
Φλοίσβος	-	70	249
Κως	-	40	250
Λακκί (Λέρος)	5	38	45
Μανδράκι (Ρόδος)	-	50	115
Μέθανα	3	25	70
Ολυμπία (Σούνιο)	-	65	685
Πόρτο Καρράς (Χαλκιδική)	5	35	175
Sani Resort (Χαλκιδική)	3	24	100
Αρετσού (Καλαμαριά)	-	30	300
Βουλιαγμένη	5.5	55	115
Ζέα (Πειραιάς)	9	80	650
<b>Κρήτη</b>			
Αγ. Νικόλαος	4.5	50	250
Γούβες (Ηράκλειο)	3	18	72
Ηράκλειο	-	40	130
Ρέθυμνο	3.5	40	174

### 3.2 Είσοδος Τουριστικού Λιμένα

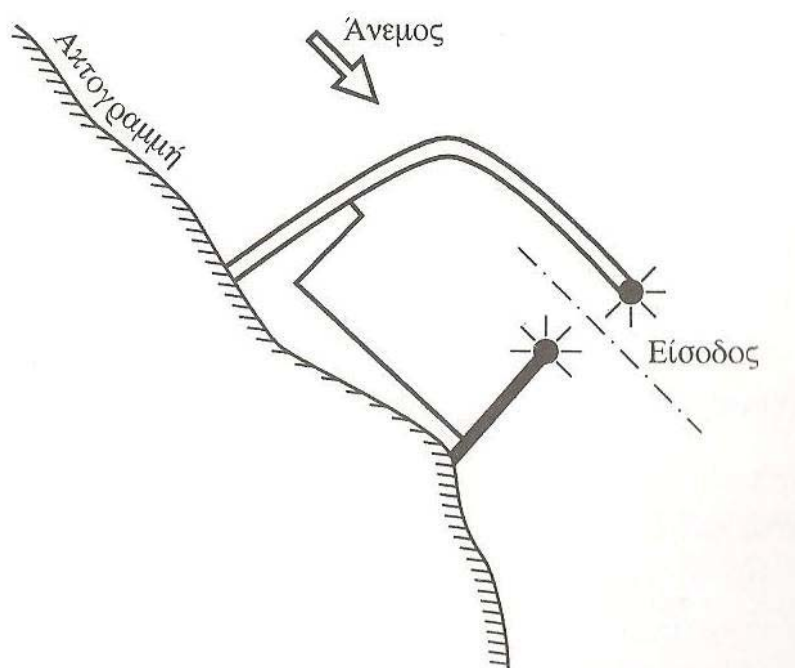
#### 3.2.1 Σχεδιασμός εισόδου λιμένα

Η είσοδος σε κάθε λιμένα αποτελεί ένα τμήμα του που χρήζει προσεκτικού σχεδιασμού, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η γρήγορη και ασφαλής προσέγγιση των σκαφών στο εσωτερικό του και να επιτυγχάνονται ήπιες κυματικές συνθήκες εντός της λιμενολεκάνης του.



Ο προσανατολισμός και το πλάτος της εισόδου του λιμένα πρέπει να συμβιβάσουν δύο αντικρουόμενα κριτήρια. Για λόγους ναυσιπλοΐας η είσοδος είναι καλό να βρίσκεται σε άμεση επικοινωνία με το ανοιχτό πέλαγος και να είναι όσο το δυνατόν ευρύτερη. Από την άλλη όσο πιο στενή και προφυλαγμένη είναι η είσοδος τόσο μικρότερο ποσοστό της κυματικής ενέργειας και των φερτών υλών εισδύει εντός της λιμενολεκάνης με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ευνοϊκότερες συνθήκες για επίτευξη ηρεμίας της ελεύθερης επιφάνειας.

Ο προσανατολισμός της εισόδου συνιστάται να είναι τέτοιος ώστε τα εισερχόμενα σκάφη να έχουν τους επικρατούντες ανέμους από μπροστά. Εγκάρσιοι άνεμοι και κυματισμοί δημιουργούν δύσκολες συνθήκες χειρισμού του σκάφους στην κρίσιμη φάση της εισόδου του στη λιμενολεκάνη. Στην πράξη όμως σε αρκετές περιπτώσεις, κατά το σχεδιασμό γίνονται κάποιοι συμβιβασμοί καθώς η διάταξη και χωροθέτηση των λιμενικών έργων καθορίζεται από τις τοπικές συνθήκες. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται είσοδος λιμένα με καλό προσανατολισμό.



**Σχήμα 3-1: Είσοδος λιμένα με καλό προσανατολισμό (Μέμος 2002)**

Είναι ευνόητο ότι αποφεύγεται η τοποθέτηση της εισόδου εντός της ζώνης θραύσεως των κυματισμών λόγω των δυσχερειών που προκύπτουν στο χειρισμό των σκαφών. Σε πολλές περιπτώσεις η είσοδος των λιμένων

διαμορφώνεται από τα εξωτερικά λιμενικά έργα προστασίας τα οποία διαθέτουν στα ακρομώλιά τους κατάλληλο εξοπλισμό φωτοσήμανσης (φάρους).

Στις περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η αποφυγή των εγκάρσιων ανέμων και κυματισμών, τότε συνιστάται η προέκταση του προσήνεμου μώλου σε ικανοποιητικό μήκος (τουλάχιστον ένα μήκος πλοίου σχεδιασμού). Επίσης συνιστάται, για την επίτευξη ήρεμων συνθηκών στην περιοχή της εισόδου, η κατασκευή των εξωτερικών έργων προστασίας από πρανή (απορροφητικές κατασκευές) και όχι από κατακόρυφα μέτωπα σε κατάλληλο μήκος.

Η διάταξη των εξωτερικών έργων στην περιοχή της εισόδου παίζουν σημαντικό ρόλο και στην απόθεση των ιζημάτων στην είσοδο, επομένως ο σχεδιασμός τους πρέπει να είναι ιδιαίτερα προσεκτικός.

Σε ότι αφορά το πλάτος της εισόδου συνήθως συνιστάται να είναι ίσο με το μήκος του μέγιστου σκάφους που εξυπηρετείται στο λιμένα. Έτσι για εγκαταστάσεις εξυπηρέτησης μικρών σκαφών, όπως οι μαρίνες, πλάτη της τάξεως 40-50m είναι συνήθως ικανοποιητικά.

### *3.2.2 Επιτρεπόμενη κυματική διαταραχή στο εσωτερικό λιμένα τουριστικών σκαφών*

Κατά το σχεδιασμό λιμένων μικρών σκαφών είναι σημαντικός ο περιορισμός του ύψους του κύματος που εισέρχεται στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης και στις θέσεις ελλιμενισμού των σκαφών ώστε να εξασφαλίζονται ασφαλείς συνθήκες. Από την άλλη πλευρά βέβαια απολύτως ήπιες συνθήκες εξασφαλίζουν την ασφάλεια των σκαφών, ευνοούν όμως αποθέσεις φερτών υλικών στο εσωτερικό αυτής εφόσον βέβαια αποδειχθεί ότι αυτά συσσωρεύονται στην είσοδο του λιμένα.

Επομένως κατά το σχεδιασμό του λιμένα είναι επιθυμητή η επίτευξη των κατάλληλων συνθηκών ώστε να εξασφαλίζεται η ασφάλεια και η λειτουργικότητα του έργου.

Σε ότι αφορά τις ελάχιστες τιμές του μεγέθους των κυματισμών έτσι ώστε να μη δημιουργούνται συνθήκες απόθεσης δεν υπάρχουν συγκεκριμένοι κανονισμοί που να τις ορίζουν και πρέπει κάθε περίπτωση να διερευνάται

Ξεχωριστά, όπως θα γίνει στη συνέχεια της παρούσας για δεδομένες διατάξεις μαρίνων. Οι μέγιστες όμως τιμές των κυματισμών που επιτρέπονται στο εσωτερικό μικρών λιμένων, δίνονται από διεθνείς κανονισμούς και παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

**Πίνακας 3-4: Μέγιστα επιτρεπόμενα ύψη κύματος στο εσωτερικό λιμένων μικρών σκαφών (Πηγή: Australian Standards AS 3962-2001)**

Direction and peak period of design harbour wave	Significant wave Height ( $H_s$ )	
	Wave event exceeded once in 50years	Wave event exceeded once a year
<b>Head seas less than 2sec</b>	Conditions not likely to occur during this event	Less than 0.3m wave height
<b>Head seas greater than 2sec</b>	Less than 0.6m wave height	Less than 0.3m wave height
<b>Oblique seas greater than 2sec</b>	Less than 0.4m	Less than 0.3m wave height
<b>Beam seas less than 2sec</b>	Conditions not likely to occur during this event	Less than 0.3m wave height
<b>Beam seas greater than 2sec</b>	Less than 0.25m wave height	Less than 0.15m wave height

**Πίνακας 3-5: Μέγιστα επιτρεπόμενα ύψη κύματος στο εσωτερικό λιμένων μικρών σκαφών (Πηγή: PIANC)**

Ship length (m)	Beam/Quartering Seas		Head Seas	
	Period (s)	Height $H_s$ (m)	Period (s)	Height $H_s$ (m)
4-10	<2	0.2	<2.5	0.2
	2.0-4.0	0.1	2.5-4.0	0.15
	>4	0.15	>4.0	0.2
10-16	<3	0.25	<3.5	0.3
	3.0-5.0	0.15	3.5-5.5	0.2
	>5	0.2	>5.5	0.3
20	<4	0.3	<4.5	0.3
	4.0-6.0	0.15	4.5-7.0	0.25
	>6	0.25	>7.0	0.3

Όπως φαίνεται στους παραπάνω πίνακες οι κυματικές συνθήκες στο εσωτερικό λιμενολεκανών μικρών λιμένων δεν πρέπει είναι έντονες και μάλιστα ο χαρακτηριστικός κυματισμός  $H_s$  πρέπει να κυμαίνεται από 0,15 έως 0,3 m ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες.

**ΜΕΡΟΣ 3: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΙ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΜΙΚΕ21  
B W**

---

#### 4. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΤΥΠΟΥ BOUSSINESQ

##### 4.1 Εισαγωγή

Η υδροδυναμική μελέτη της παράκτιας ζώνης και ιδιαίτερα τις υδροδυναμικές διεργασίες που συμβαίνουν στη ζώνη από το γραμμή έναρξης της θραύσης μέχρι την περιοχή αναρρίχησης των κυματισμών στις ακτές είναι αναμφίβολα ένας τομέας με ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τον άνθρωπο. Το ενδιαφέρον αυτό δεν είναι μόνο καθαρά επιστημονικό αλλά και πρακτικό αφού τα φαινόμενα αυτά επηρεάζουν σημαντικά τον σχεδιασμό των θαλάσσιων κατασκευών, την εξέλιξη της ακτογραμμής και κατ' επέκταση την ανθρώπινη δραστηριότητα στην παράκτια ζώνη.

Τα φαινόμενα που παρουσιάζονται στην παράκτια ζώνη επηρεάζονται κυρίως από την θραύση, η οποία αποτελεί τον κυριότερο μηχανισμό στη φύση για την διάχυση της κυματικής ενέργειας. Επιπροσθέτως διάφοροι άλλοι παράγοντες όπως η διάθλαση η ρήχωση, η τριβή στον πυθμένα κ.α. αλλά και η έκταση της ζώνης θραύσης παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των κυματισμών καθώς προωθούνται από τα βαθιά στα ρηχά.

Ένας από τους πιο αποδοτικούς τρόπους προσομοίωσης των φαινομένων αυτών έχει αποδειχτεί τα τελευταία χρόνια ότι είναι και τα μαθηματικά ομοιώματα τύπου Boussinesq, που βασίζονται δηλαδή στην επίλυση των διαφορικών εξισώσεων τύπου Boussinesq. Οι εξισώσεις αυτές προκύπτουν από την ολοκλήρωση των εξισώσεων Euler στο βάθος της ροής με την παραδοχή σχετικά μακρών κυματισμών.

Η ανάλυση των διασπειρόμενων κυματισμών χαρακτηρίζεται από δυο σημαντικές παραμέτρους κλίμακας. Η πρώτη είναι  $\epsilon=H/d$  (ύψος κύματος προς τοπικό βάθος) και εκφράζει τη μη γραμμικότητα, ενώ η δεύτερη η  $\sigma^2=(d/L)^2$  (τοπικό βάθος προς ένα χαρακτηριστικό μήκος, συνήθως το μήκος κύματος) και εκφράζει την διασπορά συχνοτήτων.

Από υπολογιστικής απόψεως τα ομοιώματα Boussinesq θεωρούνται αποδοτικότερα σε σύγκριση με τις πιο περίπλοκες εξισώσεις Navier-Stokes και πιο ακριβή από τις απλούστερες εξισώσεις ρηχών νερών. Τα

πλεονεκτήματα αυτά οδήγησαν τα τελευταία χρόνια σε αρκετές επιστημονικές προσπάθειες για την υπέρβαση των αρχικών μειονεκτημάτων των μοντέλων Boussinesq. Η προσπάθεια αυτή επικεντρώθηκε στην επέκταση του πεδίου εφαρμογής τους σε βαθύτερα νερά (Witting, 1984; Madsen et al., 1991; Nwogu, 1993; Gobbi and Kirby, 1999) βελτιώνοντας τα χαρακτηριστικά διασποράς τους. Εκτενής έρευνα έγινε επίσης στην υπέρβαση της αρχικής υπόθεσης των εξισώσεων Boussinesq για ήπια μη γραμμικότητα. Αυτό σημαίνει ότι τα στοιχεία μη γραμμικότητας ισορροπούν ακριβώς με τα στοιχεία διάχυσης ενέργειας με σκοπό την πρόβλεψη των χαρακτηριστικών υψηλής μη γραμμικότητας των κυματισμών καθώς πλησιάζουν στη θραύση και για την περαιτέρω εκμετάλλευση των βελτιωμένων χαρακτηριστικών διασποράς σε υψηλότερες συχνότητες όπως προτείνουν οι Wei et al. (1995). Ένα σημαντικό μειονέκτημα των μοντέλων αυτών είναι ο τρόπος με τον οποίον αναπαριστούν την διάχυση της ενέργειας λόγω θραύσης.

#### 4.2 Εξισώσεις Boussinesq Peregrine (1967,1972)

Η αρχική μορφή των εξισώσεων Boussinesq στις οποίες βασίζονται τα σημερινά μαθηματικά ομοιώματα, δόθηκε αρχικά από τον Peregrine (1967,1972). Οι εξισώσεις διατήρησης της μάζας και της ορμής προέκυψαν από τις εξισώσεις κίνησης Euler για ιδεατό ρευστό:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + w \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} + \nabla p = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) w + w \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial z} + 1 = 0 \quad (4.2)$$

και της εξίσωσης συνέχειας:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.3)$$

Βασιζόμενος στην παραδοχή ότι οι παράμετροι  $\varepsilon$  και  $\sigma^2$  είναι μικρές ( $O(\varepsilon) \ll 1$  και  $O(\sigma^2) \ll 1$ ) και της ίδιας τάξης ( $\varepsilon = O(\sigma^2)$ ) προκύπτουν οι:

$$\zeta_t + \nabla \cdot [(d + \zeta)\mathbf{u}] = 0 \quad (4.4)$$

$$\mathbf{u}_t + (\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} + g\nabla\zeta = \frac{d}{2}\nabla[\nabla(\mathbf{d}\mathbf{u}_t)] - \frac{d^2}{6}\nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}_t) \quad (4.5)$$

Όπου  $\mathbf{u}=(U,V)$  είναι το διάνυσμα της μέσης στο βάθος οριζόντιας ταχύτητας,  $d=d(x,y)$  είναι το μεταβαλλόμενο βάθος μετρούμενο από τη στάθμη ηρεμίας και  $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}\right)$  είναι ο οριζόντιος τελεστής βαθμίδας.

Η εξισώσεις αυτές εκφράζουν την εξίσωση συνέχειας (διατήρησης μάζας) και ορμής αντίστοιχα. Οι παραπάνω εξισώσεις σε μια διάσταση (1D) και στην περίπτωση ακτής κλίσης  $\alpha$  :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} = \alpha^2 \frac{d^2}{3} \frac{\partial^3 U}{\partial x^2 \partial t} + \alpha^2 d \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial t} \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(ad + \zeta)U] = 0 \quad (4.7)$$

Στα βαθιά νερά η παράμετρος  $\sigma^2$  γίνεται σημαντική και συνεπώς οι εξισώσεις Boussinesq δεν έχουν ισχύ. Στην περίπτωση γραμμικών κυματισμών ( $O(\varepsilon)=0$ ) η σχέση διασποράς που προκύπτει από τις παραπάνω εξισώσεις είναι:

$$\omega^2 = gdk^2 \frac{1}{1 + \frac{1}{3}(kd)^2} \quad (4.8)$$

Η εξίσωση (4.8) συμπίπτει με την ακριβή αναλυτική έκφραση της γραμμικής θεωρίας (Airy) ( $\omega^2=gk\tanh kd$ ) για μικρές τιμές του  $kd$ .



Μεγαλύτερες τιμές του  $kd$  δίνουν σημαντικές διαφοροποιήσεις από την ακριβή γραμμική λύση. Για τον λόγο αυτό οι κλασσικές εξισώσεις Boussinesq περιορίζονται στα ρηχά νερά, με ένα ποσοστό λάθους ταχύτητας φάσης περίπου 5%, για  $d/L_0=0,22$  ( $L_0$ , μήκος κύματος στα βαθιά νερά), το οποίο θεωρείται και το όριο «βαθιών» νερών για τις εξισώσεις αυτές. (Madsen & Sørensen. 1991).

### 4.3 Ομοιώματα Boussinesq με βελτιωμένα χαρακτηριστικά διασποράς

Το βασικότερο μειονέκτημα των αρχικών εξισώσεων Peregrine ήταν η δυνατότητα περιγραφής κυματισμών με ικανοποιητική ακρίβεια μόνο στα ρηχά νερά. Αρχικά ο Witting (1984) προχώρησε στην εισαγωγή πρόσθετων όρων στην εξίσωση ορμής, ανάλογων μίας παραμέτρου διασποράς και στην ταύτιση των σχέσεων διασποράς που προκύπτουν από τις προτεινόμενες εξισώσεις με το ανάπτυγμα  $[2/2]$  Padé της σχέσης διασποράς της γραμμικής θεωρίας (η σχέση διασποράς (4.8) αντιστοιχεί σε ανάπτυγμα Padé  $[0/2]$  της σχέσης γραμμικής διασποράς (Schäffer & Madsen 1995)), που έχει τη μορφή :

$$\omega^2 = gdk^2 \frac{1 + \frac{1}{15}(kd)^2}{1 + \frac{2}{5}(kd)^2} \quad (4.9)$$

Η παράμετρος διασποράς υπεισέρχεται στις σχέσεις διασποράς με τη μορφή πολλαπλασιαστικού συντελεστή των όρων  $kd$ . Η παράμετρος αυτή συναντάται σε πολλές μεταγενέστερες εργασίες.

Από τις εργασίες που εμπίπτουν σε αυτήν τη κατηγορία αυτή των Schäffer & Madsen (1995) έχει γενικότερο χαρακτήρα, αφού όπως διαπιστώνεται για διάφορους συνδυασμούς των παραμέτρων ( $B_1, B_2$ ) προκύπτουν οι σχέσεις διασποράς άλλων εργασιών. Μάλιστα, συνδυάζοντας τις προσεγγίσεις των Madsen & Sørensen (1992) και Nwogu (1993) κατέληξαν σε νέες εξισώσεις με χαρακτηριστικά διασποράς που αντιστοιχούν σε ανάπτυγμα  $[4,4]$  Padé της σχέσης γραμμικής διασποράς. Οι παράμετροι

που υπεισέρχονται στην περίπτωση αυτή είναι πέντε ( $\alpha$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  κατά τον συμβολισμό σε αυτήν την εργασία).

Συνοψίζοντας οι σημαντικότερες εργασίες που ανήκουν στην κατηγορία των μοντέλων με βελτιωμένα χαρακτηριστικά διασποράς είναι οι ακόλουθες (με χρονολογική σειρά):

- 1) Madsen et al. (1991)
- 2) Madsen & Sørensen (1992)
- 3) Nwogu (1993)
- 4) Beji & Battjes (1994)
- 5) Beji & Nadaoka (1996)
- 6) Madsen & Schäffer (1998)
- 7) Karambas (1999)
- 8) Zou (1999)

Στην ενότητα αυτή θα γίνει εκτενέστερη αναφορά στις εργασίες Madsen et al. (1992), Nwogu (1993) και Karambas (1999).

#### 4.3.1 Εξισώσεις Boussinesq των Madsen et al. (1992)

Στην εργασία τους αυτή οι Madsen et al. είχαν ως σκοπό την εξέλιξη ενός νέου ζεύγους εξισώσεων Boussinesq με σκοπό την επέκταση του πεδίου εφαρμογής τους σε βαθύτερα νερά βασιζόμενοι σε προηγούμενες προσπάθειες.

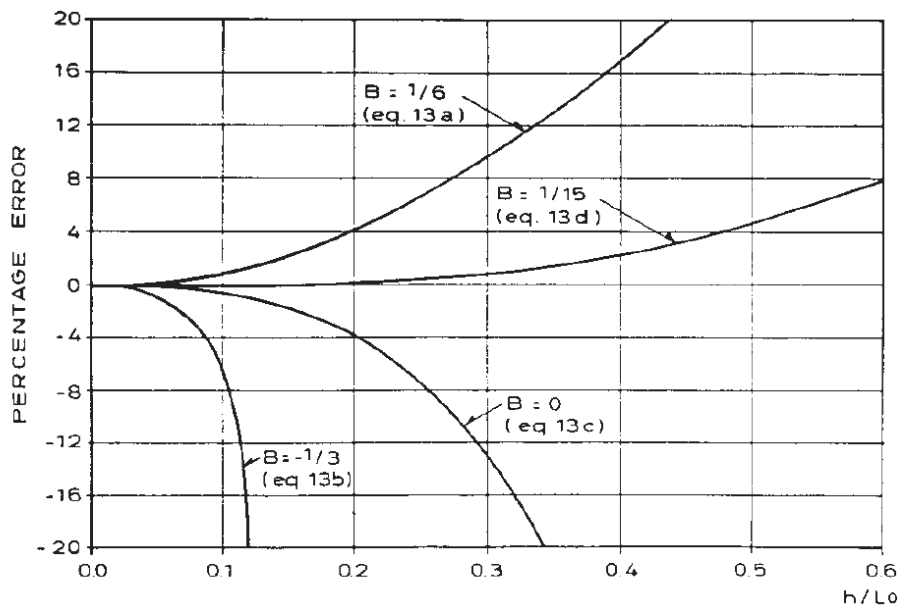
Αρχικά πρότειναν μια γενική μορφή της σχέσης της φασικής ταχύτητας με βελτιωμένα χαρακτηριστικά διασποράς:

$$\frac{c^2}{gh} = \frac{1 + Bk^2h^2}{1 + \left(B + \frac{1}{3}\right)k^2h^2} \quad (4.10)$$

όπου το  $B$  παίρνει διάφορες τιμές ανάλογα την έκφραση της κατακόρυφης κατανομής της οριζόντιας ταχύτητας. Οι τιμές αυτές είναι οι ακόλουθες

$$B = \begin{cases} 1/6 & \text{κάνοντας χρήση της } U_b \\ -1/3 & \text{κάνοντας χρήση της } U_s \\ 0 & \text{κάνοντας χρήση της } \bar{U} \\ 1/15 & \text{κάνοντας προσέγγιση Pade'} \end{cases}$$

όπου  $U_b$  είναι η ταχύτητα πυθμένα (Svedsen 1974, Witting 1984),  $U_s$  είναι η ταχύτητα της επιφάνειας (Svedsen 1974) και  $\bar{U}$  η μέση καθ' ύψος ταχύτητα. Τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται για την τιμή  $B=1/15$  (Witting 1984) όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα :



**Σχήμα 4-1: Ποσοστό σφάλματος για την φασική ταχύτητα για διάφορες μορφές εξισώσεων Boussinesq σε σύγκριση με θεωρία Stokes 1<sup>ης</sup> τάξης.**

Είναι φανερό ότι με την μορφή που προτάθηκε από τον Witting (1984) ( $B=1/15$ ) τα σφάλματα ταχύτητας φάσης περιορίζονται στο 5% και το όριο εφαρμογής της μεθόδου αυτής μετακινείται στο  $d/L_0=0,50$ .

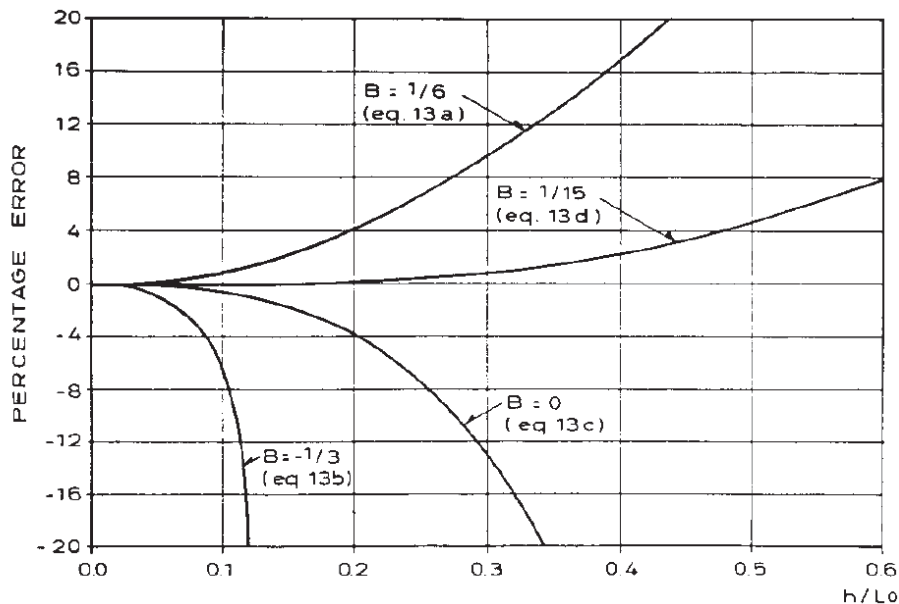
Αντίστοιχη διερεύνηση έγινε και για την ταχύτητα ομάδος. Η γενική μορφή της σχέσης γι' αυτήν την παράμετρο είναι:

$$C_g = c \left[ 1 + \frac{Bk^2d^2}{1+Bk^2d^2} - \frac{(B+1/3)k^2d^2}{1+(B+1/3)Bk^2d^2} \right] \quad (4.11)$$

όπου η παράμετρος B παίρνει τις ίδιες τιμές που αναφέρθηκαν προηγούμενα.

Η σύγκριση με την θεωρία Stokes 1<sup>ης</sup> τάξης  $(100(C_g - C_{g\text{STOKES}})/C_{g\text{STOKES}})$

φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



**Σχήμα 4-2: Σύγκριση σφάλματος σε σχέση με τη γραμμική θεωρία για διάφορες τιμές του B**

Περιορίζοντας το ποσοστό λάθους στο 6% τα όρια εφαρμογής για τις όλες τιμές του B είναι τα ακόλουθα:

$$d/L_0 = \begin{cases} 0,055 & (\text{για } B = -1/3) \\ 0,12 & (\text{για } B = 1/6) \\ 0,13 & (\text{για } B = 0) \\ 0,32 & (\text{για } B = 1/15) \end{cases}$$

Οι νέες εξισώσεις αναπτύχθηκαν έχοντας ως σκοπό τα εξής:

- Οι εξισώσεις να εκφραστούν σε δύο οριζόντιες διαστάσεις βάσει των όρων της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας και της μέσης στο βάθος ολοκληρωμένης ταχύτητας.
- Τα γραμμικά χαρακτηριστικά διασποράς θα πρέπει να ακολουθούν τη σχέση (4.10)

Ξεκινώντας από τις κλασικές εξισώσεις Boussinesq από Abbott et al. (1984) :

$$S_t + P_x + Q_y = 0 \quad (4.12\alpha)$$

$$P_t + \left(\frac{P^2}{d}\right)_x + \left(\frac{PQ}{d}\right)_y + gdS_x - \frac{1}{3}h^2(P_{xxt} + Q_{xyt}) = 0 \quad (4.12\beta)$$

$$Q_t + \left(\frac{Q^2}{d}\right)_y + \left(\frac{PQ}{d}\right)_x + gdS_y - \frac{1}{3}h^2(Q_{yyt} + P_{xyt}) = 0 \quad (4.12\gamma)$$

Όπου  $d$  συμβολίζεται στην περίπτωση αυτή το συνολικό βάθος νερού,  $h$  το βάθος στη Μ.Σ.Η.,  $S$  η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, και  $P, Q$  οι ταχύτητες ολοκληρωμένες στο βάθος στη διεύθυνση  $x$  και  $y$  αντίστοιχα. Η σχέση της γραμμικής διασποράς των εξισώσεων αυτών είναι η (4.10) θέτοντας  $B=0$ .

Χρησιμοποιώντας την διαδεδομένη μέθοδο της απλοποίησης των όρων υψηλότερης τάξης, εισάγοντας τις εξισώσεις μακρών κυματισμών σαν πρώτη προσέγγιση (Mei 1983) προκύπτει για ακτή ήπιας κλίσης, αμελώντας τις χωρικές παραγώγους του βάθους στη Μ.Σ.Η., σαν πρώτη προσέγγιση:

$$(P_{xxt} + Q_{xyt}) \approx -gh(S_{xxx} + S_{xyy}) \quad (4.13\alpha)$$

$$(Q_{yyt} + P_{xyt}) \approx -gh(S_{yyy} + S_{yxx}) \quad (4.13\beta)$$

Έτσι μια διαφορετική μορφή των εξισώσεων (4.12), α-γ, επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τις προσεγγίσεις (4.13α) και (4.13β). Στα ρηχά νερά αυτή η διαφορά δεν θα επέφερε αλλαγές στην αριθμητική λύση, αλλά στα βαθιά νερά τα χαρακτηριστικά διασποράς είναι πολύ πιο περιορισμένα , αντίστοιχα της χρήσης της τιμής του συντελεστή  $B=-1/3$  στη σχέση (4.10)

Στην εργασία αυτή αντιθέτως ελήφθησαν υπ' όψιν οι εξής ποσότητες:

$$\varepsilon_1 = -Bh^2 \left[ P_{xxt} + Q_{xyt} + gh(S_{xxx} + S_{xyy}) \right] \quad (4.14)$$

$$\varepsilon_2 = -Bh^2 \left[ Q_{yyt} + P_{xyt} + gh(S_{yyy} + S_{yxx}) \right] \quad (4.15)$$

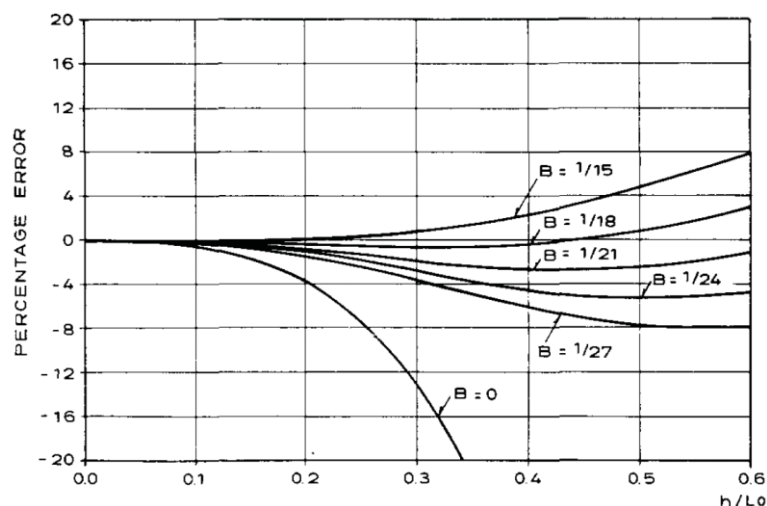
Σύμφωνα με τις εξισώσεις (4.13α) και (4.13β) αυτοί οι όροι είναι ασήμαντοι στα ρηχά νερά και συνεπώς μπορούν να προστεθούν στις προηγούμενες εξισώσεις Boussinesq χωρίς να επηρεάσουν την ακρίβεια του μοντέλου. Οπότε οι νέες εξισώσεις είναι της μορφής:

$$S_t + P_x + Q_y = 0 \quad (4.16α)$$

$$P_t + \left( \frac{P^2}{d} \right)_x + \left( \frac{PQ}{d} \right)_y + gdS_x - \left( B + \frac{1}{3} \right) h^2 (P_{xxt} + Q_{xyt}) - Bgh^3 (S_{xxx} + S_{xyy}) = 0 \quad (4.16β)$$

$$Q_t + \left( \frac{Q^2}{d} \right)_y + \left( \frac{PQ}{d} \right)_x + gdS_y - \left( B + \frac{1}{3} \right) h^2 (Q_{yyt} + P_{xyt}) - Bgh^3 (S_{yyy} + S_{yxx}) = 0 \quad (4.16γ)$$

Αυτές οι εξισώσεις ικανοποιούν τις απαιτήσεις που αναφέρθηκαν στην αρχή της παρούσας ενότητας ( που αφορούν τις απαιτήσεις για την φασική ταχύτητα και την ταχύτητα ομάδας). Ο συντελεστής B δεν περιορίζεται στις προαναφερθείσες τιμές και στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται ότι επιλέγοντας για παράδειγμα την τιμή  $B=1/21$  οδηγούμαστε σε ποσοστό σφάλματος ταχύτητας φάσης λιγότερο από 3%, στο πεδίο  $0 < h/L_0 < 0.75$ . Όσον αφορά την ταχύτητα ομάδας το σφάλμα είναι της τάξεως του 6% στο πεδίο  $0 < h/L_0 < 0.55$



**Σχήμα 4-3: Ποσοστιαίο λάθος ταχύτητας φάσης ( $100(c-c_{STOKES})/c_{STOKES}$ ) όπου η ταχύτητα  $c$  υπολογίζεται από την (2.7) (Madsen et al. 1991)**

Με την προσθήκη πρόσθετων όρων στις εξισώσεις (4.16) του τύπου  $S_{xxxx}$  και  $P_{xxxxt}$  γίνεται δυνατή η εισαγωγή της ταχύτητας 4ης τάξης που πρότεινε ο Witting.

$$\frac{c^2}{gh} = \frac{1 + \frac{1}{9}k^2h^2 + \frac{1}{945}k^4h^4}{1 + \frac{4}{9}k^2h^2 + \frac{1}{63}k^4h^4}$$

(4.17)

που δίνει ακόμα καλύτερα αποτελέσματα. Το σφάλμα για την ταχύτητα φάσης είναι λιγότερο από 0,05% στο όριο  $h/L_0=0.5$ . Ωστόσο η εισαγωγή των όρων αυτών κάνει το μαθηματικό αυτό ομοίωμα μη ελκυστικό από πρακτικής απόψεως.

#### 4.3.2 Εξισώσεις Boussinesq του Nwogu (1993)

Για την εξαγωγή εξισώσεων Boussinesq με βελτιωμένα χαρακτηριστικά ο Nwogu (1993) ακολούθησε μια διαφορετική προσέγγιση από αυτή των Madsen et al.(1991). Οι εξισώσεις του Nwogu προκύπτουν με συνεχή διαφορίση της εξίσωσης συνέχειας και των εξισώσεων κίνησης του Euler. Στην κατάστρωση των εξισώσεων χρησιμοποιείται σαν εξαρτημένη μεταβλητή η οριζόντια ταχύτητα σε ένα τυχαίο βάθος  $z_a$ . Το βάθος στο

οποίο λαμβάνεται η ταχύτητα, καθορίζεται στη συνέχεια από την προκύπτουσα σχέση διασποράς σε σύγκριση με τη σχέση διασποράς της γραμμικής θεωρίας. Με αυτό τον τρόπο, οι εξισώσεις περιγράφουν καλύτερα τη διάδοση των κυματισμών σε νερά μεγαλύτερου βάθους σε σχέση με τις κλασσικές εξισώσεις Boussinesq. Οι εξισώσεις του Nwogu (1993) γράφονται:

$$\zeta_t + \nabla \cdot [(d + \zeta) \mathbf{u}_a] + \nabla \cdot \left\{ \left( \frac{z_a^2}{2} - \frac{d^2}{6} \right) d \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}_a) + \left( z_a + \frac{d}{2} \right) d \nabla [\nabla \cdot (d \mathbf{u}_a)] \right\} = 0$$

(4.18a)

$$\mathbf{u}_{at} + (\mathbf{u}_a \cdot \nabla) \mathbf{u}_a + g \nabla \zeta + z_a \left\{ \frac{z_a}{2} \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}_{at}) + \nabla [\nabla \cdot (d \mathbf{u}_{at})] \right\} = 0$$

(4.18 β)

Όπου  $\mathbf{u}_a = (u_a, v_a)$  είναι το διάνυσμα της οριζόντιας ταχύτητας σε ένα τυχαίο βάθος  $z_a$ .

Οι παραπάνω εξισώσεις εκφράζουν την εξίσωση συνέχειας (διατήρησης μάζας) και ορμής αντίστοιχα. Σε σχέση με τις κλασσικές εξισώσεις Boussinesq του Peregrine (1967) υπάρχει στην εξίσωση συνεχείας ένας πρόσθετος όρος διασποράς που την καθιστά μη ακριβή, ενώ οι συντελεστές των όρων διασποράς στην εξίσωση ορμής είναι διαφορετικοί.

Οι εξισώσεις του Nwogu στην περίπτωση διάδοσης του κύματος σε μία διεύθυνση (1DH) με σταθερό βάθος, παίρνουν τη μορφή:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + d \frac{\partial u_a}{\partial x} + \frac{\partial (\zeta u_a)}{\partial x} + \left( a + \frac{1}{3} \right) d^3 \frac{\partial^3 u_a}{\partial x^3} = 0 \quad (4.19a)$$

$$\frac{\partial u_a}{\partial t} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + u_a \frac{\partial u_a}{\partial x} + a d^2 \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial^2 u_a}{\partial x^2} \right) = 0 \quad (4.19β)$$

Όπου ο συντελεστής  $a = \frac{1}{2} \left( \frac{z_a}{d} \right)^2 + \frac{z_a}{d}$

Γραμμικοποιώντας το σύστημα των παραπάνω εξισώσεων και αντικαθιστώντας μία δοκιμαστική λύση της μορφής



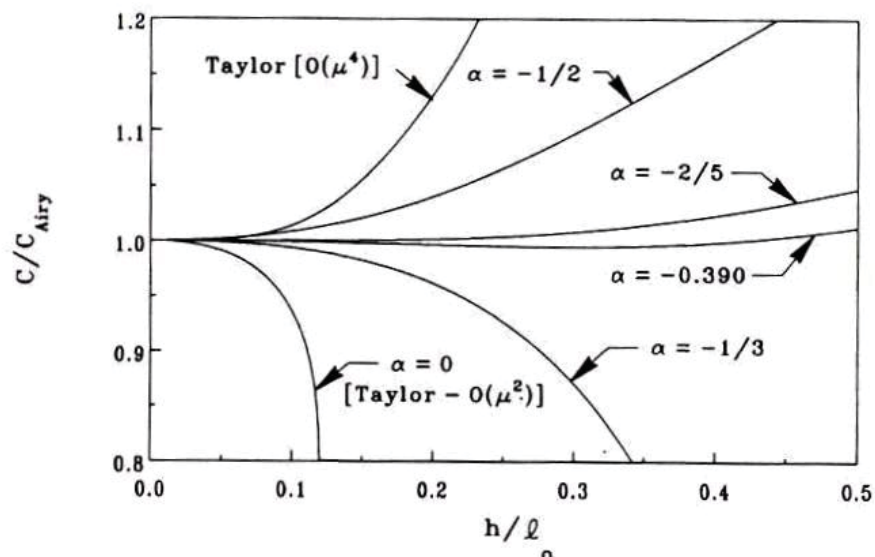
$\zeta = a \cdot e^{i(kx - \omega t)}$  και  $u = u_0 \cdot e^{i(kx - \omega t)}$  οδηγούμαστε στη σχέση γραμμικής διασποράς:

$$\omega^2 = gdk^2 \frac{1 - \left(a + \frac{1}{3}\right)(kd)^2}{1 - a(kd)^2} \quad (4.20)$$

Στο **Σχ. 2.4** γίνεται μια σύγκριση με τη σχέση διασποράς της γραμμικής θεωρίας  $\omega^2 = gk \tanh(kd)$ , για διάφορες τιμές του  $a$ .

Οι κλασικές εξισώσεις Boussinesq όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως αντιστοιχούν σε  $a = -1/3$ . Στα ρηχά νερά όπου  $kd \rightarrow 0$  όλες οι σχέσεις διασποράς συγκλίνουν ασυμπτωτικά. Ωστόσο σε πιο βαθιά νερά όπου το γινόμενο  $kd$  αυξάνει, η σχέση διασποράς για τυχαίες τιμές του  $a$ , αποκλίνει σημαντικά από τη γραμμική θεωρία.

Οι εξισώσεις του Nwogu έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι δυνατόν να προσδιοριστεί μία βέλτιστη τιμή για την παράμετρο  $a$ , τέτοια ώστε η σχέση διασποράς σε μια καθορισμένη περιοχή τιμών  $kd$  να προσεγγίζει αυτήν της γραμμικής θεωρίας. Μια τιμή για το  $a = -2/5$  μετατρέπει την (4.20) σε προσέγγιση Padé της διασποράς της γραμμικής θεωρίας όπως έδειξε ο Witting (1984). Χρησιμοποιώντας το κριτήριο της ελαχιστοποίησης του σφάλματος, όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, οι τιμές του  $a$  μπορούν να βαθμονομηθούν περαιτέρω. Ο Nwogu προσδιόρισε μία βέλτιστη τιμή για το  $a$  ίση με  $-0.39$  η οποία αντιστοιχεί σε βάθος  $z_a = -0,531d$  και δίνει μέγιστη διαφορά από τη γραμμική θεωρία 2%. Οι κλασικές εξισώσεις Boussinesq, που προκύπτουν για  $a = -1/3$ , έχουν ποσοστό λάθους 85% για μέγιστο λόγο  $h/L_0 < 0.48$ .



**Σχήμα 4-4: Σύγκριση της κανονικοποιημένης ταχύτητας φάσης για διάφορες τιμές του  $\alpha$  (Nwogu 1993).**

Ο Nwogu έλυσε αριθμητικά το καινούργιο ζεύγος εξισώσεων σε μια οριζόντια διάσταση χρησιμοποιώντας ένα προσεγγιστικό σχήμα Crank – Nickolson. Όροι σφαλμάτων αποκοπής τρίτης παραγώγου συμπεριλήφθησαν εσκεμμένα σαν διαταραχές με επανατοποθέτηση στο αριθμητικό σχήμα.

Οι Wei και Kirby (1995) παρατηρώντας ότι οι εξισώσεις του μοντέλου Boussinesq παρέχουν διόρθωση  $O(\sigma^2)$  στην θεωρία ρηχών νερών, οι ιδιότητες της προσέγγισης Padé είναι τέτοιες ώστε η σχέση διασποράς να είναι ακριβής για τάξη  $O(\sigma^4)$ . Έτσι χρησιμοποίησαν ένα σχήμα πρόγνωσης-διόρθωσης (predictor-corrector) για το χωρικό και το χρονικό βήμα. Η διακριτοποίηση αυτή αυτόματα απαλείφει σφάλματα που θα ήταν της ίδιας τάξης με τους όρους διάχυσης και θα έπρεπε να υπόκεινται σε διόρθωση αν χρησιμοποιείτο σχήμα χαμηλότερης τάξης. Με τον τρόπο αυτό προέκυψε ένα πολύ ακριβές αριθμητικό σχήμα.

#### 4.3.3 Εξισώσεις Boussinesq Zou (1999)

Στις εργασίες που παρουσιάστηκαν παραπάνω θεωρήθηκε αρχικά γραμμική κατανομή της κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας ενώ η

αντίστοιχη κατανομή της οριζόντιας ταχύτητας σαν πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> βαθμού.

Η νέα μορφή εξισώσεων Boussinesq που παρουσίασε ο Ζου (1999) είναι ακριβείς στον 3ο βαθμό  $O(\varepsilon^2, \varepsilon\sigma^2, \sigma^4)$  και οι χωρικές παράγωγοι 4<sup>ου</sup> βαθμού στους τριτοβάθμιους όρους εκφράζονται από με χωρικές παραγώγους 2<sup>ου</sup> βαθμού. Βάσει των εξισώσεων αυτών οι εκφράσεις της κατανομής των κατακόρυφων και των οριζόντιων ταχυτήτων είναι πολυώνυμα 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> βαθμού αντίστοιχα.

Στην περίπτωση οριζοντίου πυθμένα οι εξισώσεις συνέχειας και διατήρησης της ορμής στις οποίες καταλήγει είναι αντίστοιχα οι ακόλουθες:

$$\zeta_t + \nabla \cdot [(h + \zeta)\bar{\mathbf{u}}] = 0 \quad (2.21)$$

$$\bar{\mathbf{u}}_t + (\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla)\bar{\mathbf{u}} + g\nabla\zeta + G = \frac{1}{3}(h + \zeta)^2 \nabla(\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}}_t) + \frac{1}{15}h^2 \nabla[\nabla \cdot (\bar{\mathbf{u}}_t + g\nabla\zeta)] \quad (4.22a)$$

όπου:

$$G = \frac{1}{3} \nabla \left\{ h^2 \left[ (\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}})^2 - \bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla^2 \bar{\mathbf{u}} - \frac{1}{10} \nabla^2 (\bar{\mathbf{u}} \cdot \bar{\mathbf{u}}) \right] \right\} - h\nabla\zeta \nabla \cdot \bar{\mathbf{u}}_t \quad (4.22\beta)$$

και  $h$  το βάθος νερού ενώ  $\zeta$  η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας.

Για την περίπτωση μεταβλητού βάθους και με την υπόθεση ήπιας κλίσης πυθμένα ( $O(\nabla h) \leq O(\sigma)$ ) οι εξισώσεις Boussinesq που προκύπτουν είναι αντίστοιχα:

$$\zeta_t + \nabla \cdot [(h + \zeta)\bar{\mathbf{u}}] = 0 \quad (4.23)$$

$$\bar{\mathbf{u}}_t + (\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla)\bar{\mathbf{u}} + g\nabla\zeta + G = \frac{1}{2}(h + \zeta)\nabla(\nabla \cdot (h\bar{\mathbf{u}}_t)) - \frac{1}{6}(h + \zeta)^2 \nabla(\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}}_t) + \frac{1}{15}h^2 \nabla[\nabla \cdot (\bar{\mathbf{u}}_t + g\nabla\zeta)] \quad (4.24a)$$

όπου:

$$G = \frac{1}{3} \nabla \left\{ h^2 \left[ (\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}})^2 - \bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla^2 \bar{\mathbf{u}} - \frac{1}{10} \nabla^2 (\bar{\mathbf{u}} \cdot \bar{\mathbf{u}}) \right] \right\} - \frac{1}{2} \zeta \nabla \left[ \nabla \cdot (h \bar{\mathbf{u}}_t) \right] - h \nabla \zeta \nabla \cdot \bar{\mathbf{u}}_t \quad (4.24\beta)$$

Τέλος για την βελτίωση της προσομοίωσης της ρήχωσης από τα βαθειά στα ρηχά νερά, ένας επιπλέον όρος προστίθεται στην δευτεροβάθμια εξίσωση συνέχειας :

$$\zeta_t + \nabla \cdot \left[ (h + \zeta) \bar{\mathbf{u}} \right] = 0 \quad (4.25)$$

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{u}}_t + (\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla) \bar{\mathbf{u}} + g \nabla \zeta + G = & \frac{1}{2} (h + \zeta) \nabla \left( \nabla \cdot (h \bar{\mathbf{u}}_t) \right) - \frac{1}{6} (h + \zeta)^2 \nabla \left( \nabla \cdot \bar{\mathbf{u}}_t \right) \\ & + B_1 h^2 \nabla \left[ \nabla \cdot (\bar{\mathbf{u}}_t + g \nabla \zeta) \right] + B_2 \nabla \left[ \nabla \cdot (h^2 \bar{\mathbf{u}}_t + g h^2 \nabla \zeta) \right] \end{aligned} \quad (4.26\alpha)$$

όπου:

$$G = \frac{1}{3} \nabla \left\{ h^2 \left[ (\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}})^2 - \bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla^2 \bar{\mathbf{u}} - \frac{1}{10} \nabla^2 (\bar{\mathbf{u}} \cdot \bar{\mathbf{u}}) \right] \right\} - \frac{1}{2} \zeta \nabla \left[ \nabla \cdot (h \bar{\mathbf{u}}_t) \right] \quad (4.26\beta)$$

Οι εξισώσεις Boussinesq του Zou με τις 2 παραμέτρους  $B_1$  και  $B_2$  παραπέμπουν με τις εξισώσεις που παρουσιάστηκαν από τους Schäffer & Madsen (1995) απαλείφοντας τον όρο  $G$  και τις δευτεροβάθμιες παραγώγους του  $h$  και στις εξισώσεις των Madsen & Sørensen (1991) θέτοντας επιπλέον  $B_1 = B_2 = 1/30$ .

Η σχέση διασποράς δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση :

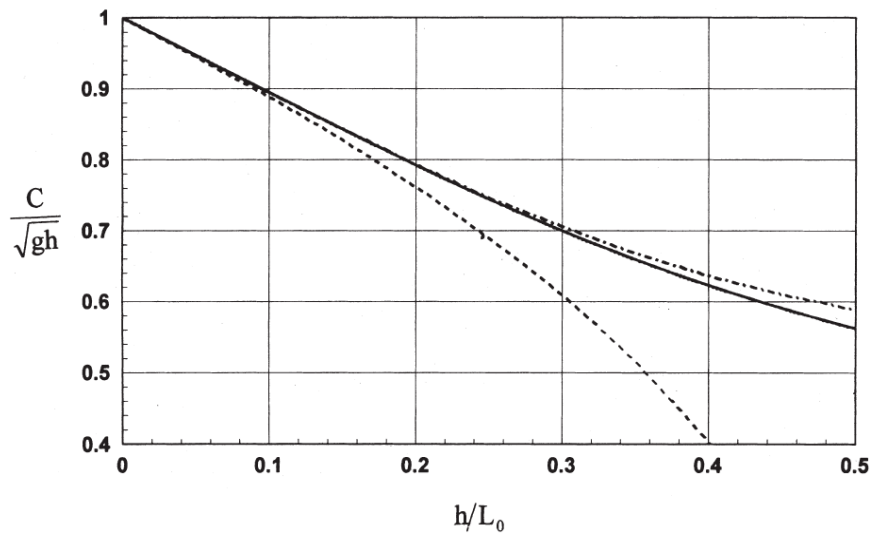
$$c^2 = \frac{\omega^2}{k^2} = gh \left[ 1 - \frac{1}{3} k^2 h^2 + \frac{2}{15} k^4 h^4 + O(k^6 h^6) \right] \quad (4.27)$$

ενώ αυτή της γραμμικής θεωρίας :

$$c^2 = gh \frac{\tanh(kh)}{kh} = gh \left[ 1 - \frac{1}{3} k^2 h^2 + \frac{2}{15} k^4 h^4 - \frac{17}{315} k^6 h^6 + O(k^8 h^8) \right] \quad (4.28)$$

Στο ακόλουθο **σχήμα** γίνεται σύγκριση των χαρακτηριστικών διασποράς (4.27) των εξισώσεων Zou με τη γραμμική θεωρία του Airy (4.28) και τις κλασικές εξισώσεις Boussinesq (Peregrine 1967). Όπως διαπιστώνεται οι

συγκεκριμένες εξισώσεις μπορούν να εφαρμοστούν και να δώσουν αποτελέσματα ταχύτητας φάσης λιγότερο από 5% σε βάθος  $h < 0.5L_0$  (συγκριτικά με τις κλασικές που όπως προαναφέραμε περιορίζονται στο  $h < 0.22L_0$ ).

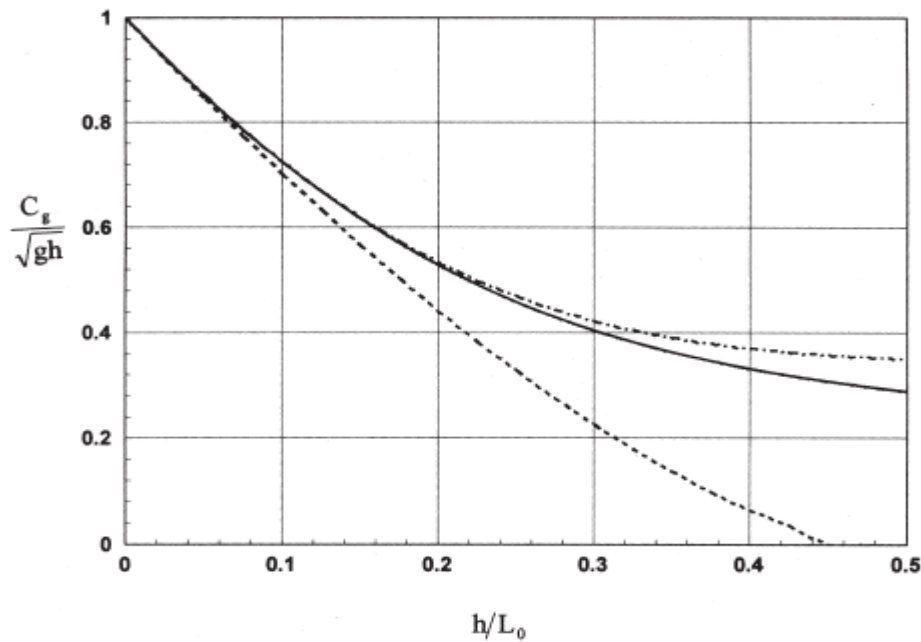


**Σχήμα 4-5: Σύγκριση ταχυτήτων φάσης. Stokes 1<sup>st</sup> (συνεχής γραμμή), εξισώσεις Zou (διακεκομμένη-τελείες), κλασικές εξισώσεις Boussinesq (διακεκομμένη).**

Η ταχύτητα ομάδος δίνεται από τον τύπο:

$$C_g = \frac{d\omega}{dk} = C \left[ 1 + \frac{k^2 h^2}{15 + k^2 h^2} \frac{2k^2 h^2}{5 + 2k^2 h^2} \right] \quad (2.29)$$

Τα αποτελέσματα της σύγκρισης με την θεωρία Stokes 1ης τάξης και τις κλασικές εξισώσεις Boussinesq παρουσιάζουν ότι οι εξισώσεις Zou μπορούν να εφαρμοστούν και σε βάθος  $h < 0.3 \cdot L_0$  σε σχέση με τις κλασικές εξισώσεις που ισχύουν για βάθη  $h < 0.13 \cdot L_0$ .



**Σχήμα 4-6: Σύγκριση κανονικοποιημένων ταχυτήτων ομάδας  $c_g / \sqrt{gh}$ . Stokes 1<sup>st</sup> (συνεχής γραμμή), εξισώσεις Zou (διακεκομμένη-τελείες), κλασικές εξισώσεις Boussinesq (διακεκομμένη).**

Η ακρίβεια στην φασική ταχύτητα και στην ταχύτητα ομάδας είναι πανομοιότυπη με αυτές των εργασιών των Madsen et al. (1991), Madsen and Sørensen (1992) and Nwogu (1993). Όμως οι τελευταίες είναι ακριβείς στον δεύτερο βαθμό ως προς τις κατανομές ταχύτητας και πίεσης και συνεπώς δεν παρουσιάζουν κάποια βελτίωση σε σχέση με τις κλασικές εξισώσεις Boussinesq που έχουν το ίδιο βαθμό ακρίβειας. Οι εξισώσεις του Zou είναι ακριβείς στον 3<sup>ο</sup> βαθμό ως προς τις κατανομές ταχύτητας και πίεσης .

Οι αντίστοιχες εξισώσεις είναι οι ακόλουθες:

$$\begin{aligned} \mathbf{u} = & \bar{\mathbf{u}} - \frac{1}{2} \sigma^2 \left[ (z+1)^2 - \frac{1}{3} (h+\zeta)^2 \right] \nabla^2 \bar{\mathbf{u}} \\ & + \frac{1}{4!} \sigma^4 \left[ (z+1)^4 - 2(h+\zeta)^4 \right] \nabla^2 \nabla^2 \bar{\mathbf{u}} + O(\sigma^6) \end{aligned} \quad (4.30)$$

$$w = -\sigma(z+1) \nabla \bar{u} + \frac{1}{6} \sigma^3 (z+1) \left[ (z+1)^2 - (h+\zeta)^2 \right] \nabla (\nabla \bar{\mathbf{u}}) + O(\sigma^5) \quad (4.31)$$

$$p = p_0 - (z - \zeta) + \frac{1}{2} \sigma^2 [(z+1)^2 - (h+\zeta)^2] \left[ \nabla \bar{\mathbf{u}}_t + \epsilon \bar{\mathbf{u}} \nabla^2 \bar{\mathbf{u}} - \epsilon (\nabla \bar{\mathbf{u}})^2 \right] - \frac{1}{4!} \sigma^4 [(z+1)^2 - (h+\zeta)^2]^2 \nabla^2 (\nabla \bar{\mathbf{u}}_t) + O(\sigma^6) \quad (4.32)$$

#### 4.4 Εξισώσεις Boussinesq πλήρους μη γραμμικότητας και υψηλής τάξεως διασποράς

Οι πιο πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα των ομοιωμάτων Boussinesq κινήθηκαν στην κατεύθυνση της αύξησης της τάξης ακρίβειας της μη γραμμικότητας και της διασποράς με σκοπό την επέκταση του εύρους εφαρμογής των μοντέλων αυτών.

Το όριο εφαρμογής των μοντέλων Boussinesq για τις εργασίες που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα ήταν πρακτικά το  $kd \leq 0.75$ . Πιο πρόσφατες μελέτες ανέπτυξαν εξισώσεις με όρους ανώτερων τάξεων μη-γραμμικότητας και διασποράς επεκτείνοντας το όριο στο  $kd \leq 40$  καταργώντας πρακτικά τον περιορισμό του βάθους, μέχρι το οποίο είχαν ικανοποιητική εφαρμογή τα ομοιώματα αυτά.

Η αρχή των μοντέλων πλήρους μη γραμμικότητας έγινε από τους Wei et al. (1995) οι οποίοι ακολουθώντας την προσέγγιση του Nwogu (1993) πρότειναν εξισώσεις πλήρως μη γραμμικές, δηλαδή διατηρήθηκαν όροι όλων των τάξεων της μη γραμμικής παραμέτρου  $\epsilon$ , αλλά οι όροι της διασποράς παρέμειναν της τάξης  $O(\sigma^2)$ .

Οι σημαντικότερες εργασίες είναι οι ακόλουθες (με χρονολογική σειρά):

- Wei et al. (1995)
- Madsen & Schäffer (1998)
- Agnon, Madsen & Schäffer (1999)
- Gobbi, Kirby & Wei (2000)
- Madsen et al. (2002,2003)
- Bingham and Agnon (2005)

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν εκτενέστερα οι εργασίες των Gobbi, Kirby & Wei (2000), Madsen et al.(2002,2003) και Bingham and Agnon (2005).

#### 4.4.1 Πλήρως μη γραμμικές εξισώσεις Gobbi , Kirby& Wei (2000)

Στην εργασία τους αυτή οι Gobbi , Kirby και Wei παρουσίασαν ένα μοντέλο Boussinesq 4<sup>ης</sup> τάξης στο οποίο η εξίσωση δυναμικού της ταχύτητας προσεγγίζεται από ένα πολυώνυμο 4<sup>ου</sup> βαθμού. Το ομοίωμα αυτό παρουσιάστηκε αρχικά για οριζόντιο πυθμένα. Ορίστηκε μια νέα εξαρτημένη μεταβλητή ως ο σταθμισμένος μέσος του δυναμικού της ταχύτητας σε δυο διαφορετικές στάθμες στη στήλη του νερού, των οποίων οι θέσεις και οι συντελεστές βαρύτητας υπολογίστηκαν από μια [4,4] προσέγγιση Padé της ακριβούς σχέσης διασποράς όπως αυτή παρουσιάστηκε από τον Witting (1984). Το συγκεκριμένο ομοίωμα δοκιμάστηκε για την ικανότητα του να αναπαραστήσει πιστά ασθενείς μη γραμμικές ιδιότητες σε νερά ενδιάμεσου βάθους χρησιμοποιώντας αναπτύγματα της θεωρίας Stokes σε δυνάμεις του  $\epsilon$  για τυχαίες τιμές του  $\sigma$ .

Η νέα εξαρτημένη μεταβλητή που ορίζεται είναι η :

$$\tilde{\Phi} = \beta\Phi_a + (1 - \beta)\Phi_b \quad (4.33)$$

όπου  $\Phi_a$  και  $\Phi_b$  είναι τα δυναμικά της ταχύτητας στις στάθμες  $z=z_a$  και  $z=z_b$  και  $\beta$  είναι μια παράμετρος βαρύτητας .

Η σχέση του δυναμικού της ταχύτητας που ορίζεται βάσει της (4.33) θα είναι:

$$\begin{aligned} \Phi = & \tilde{\Phi} + \frac{1}{2}\sigma^2 \{B - (1+z)^2\} \nabla^2 \tilde{\Phi} \\ & + \frac{1}{4}\sigma^4 \left\{ B - B(1+z)^2 - \frac{1}{6}D + \frac{1}{6}(1+z)^4 \right\} \nabla^2 \nabla^2 \tilde{\Phi} + O(\sigma^6) \end{aligned} \quad (4.34)$$

Ορίζοντας το συνολικό βάθος ως  $H=1+\epsilon \cdot \zeta$  η σχέση διατήρησης της μάζας γίνεται:



$$\begin{aligned} \zeta_t + \nabla \left\{ H \left[ \nabla \tilde{\Phi} + \frac{1}{2} \sigma^2 (B - \frac{1}{3} H^2) \nabla (\nabla^2 \tilde{\Phi}) \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{4} \sigma^4 (B^2 - B \frac{1}{3} H^2 - \frac{1}{6} D + \frac{1}{30} H^4) \nabla (\nabla^2 \nabla^2 \tilde{\Phi}) \right] \right\} = O(\sigma^6) \end{aligned} \quad (4.35)$$

Ενώ η εξίσωση Bernoulli :

$$\begin{aligned} \zeta + \tilde{\Phi}_t + \frac{1}{2} \sigma^2 \{ B - H^2 \} \nabla^2 \tilde{\Phi}_t + \frac{1}{4} \sigma^4 \left\{ B^2 - BH^2 - \frac{1}{6} D + \frac{1}{6} H^4 \right\} \nabla^2 \nabla^2 \tilde{\Phi}_t \\ + \frac{1}{2} \in \left[ (\nabla \tilde{\Phi})^2 + \sigma^2 \{ B - H^2 \} \nabla \tilde{\Phi} \cdot \nabla (\nabla^2 \tilde{\Phi}) + \sigma^2 H^2 (\nabla^2 \tilde{\Phi})^2 + \sigma^2 H^2 (\nabla^2 \tilde{\Phi})^2 \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \sigma^4 \left\{ B^2 - BH^2 - \frac{1}{6} D + \frac{1}{6} H^4 \right\} \nabla \tilde{\Phi} \cdot \nabla (\nabla^2 \nabla^2 \tilde{\Phi}) \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \sigma^4 \{ B^2 - 2BH^2 + H^4 \} \{ \nabla (\nabla^2 \tilde{\Phi}) \}^2 \right. \\ \left. + \sigma^4 \left\{ BH^2 - \frac{1}{3} H^4 \right\} (\nabla^2 \tilde{\Phi}) (\nabla^2 \nabla^2 \tilde{\Phi}) \right] = O(\sigma^6) \end{aligned} \quad (4.36)$$

Το ζεύγος εξισώσεων Boussinesq των Gobbi & Kirby (2000) προκύπτει θεωρώντας  $\varepsilon/\sigma^2 = O(1)$  και κρατώντας όρους της τάξεως  $O(\varepsilon^2, \sigma^4)$ :

$$\begin{aligned} \zeta_t + \nabla \left\{ \left[ H \nabla \tilde{\Phi} + \frac{1}{2} \sigma^2 (B - \frac{1}{3} (1 + 3 \in \zeta)) \nabla (\nabla^2 \tilde{\Phi}) \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{4} \sigma^4 (B^2 - \frac{1}{3} B - \frac{1}{6} D + \frac{1}{30}) \nabla (\nabla^2 \nabla^2 \tilde{\Phi}) \right] \right\} = O(\sigma^6) \end{aligned} \quad (4.37)$$

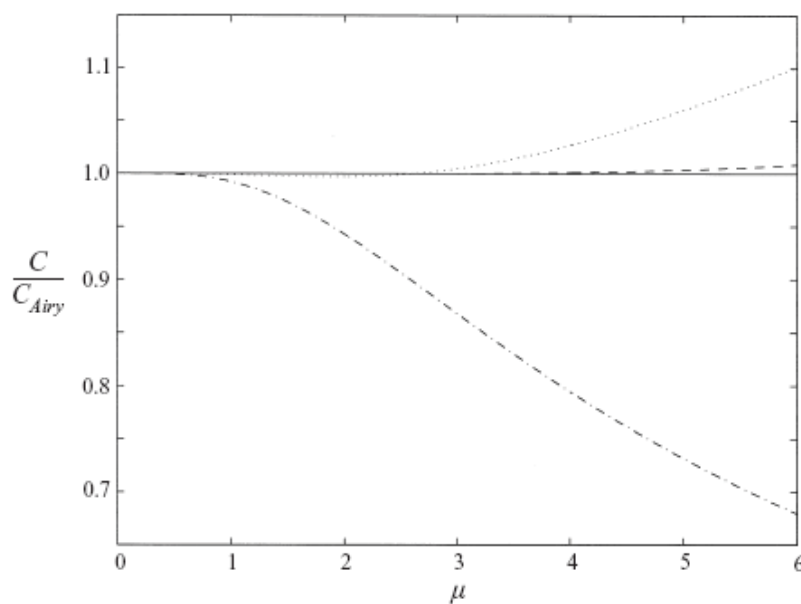
$$\begin{aligned} \zeta + \tilde{\Phi}_t + \frac{1}{2} \sigma^2 \{ B - (1 + 3 \in \zeta)^2 \} \nabla^2 \tilde{\Phi}_t + \frac{1}{4} \sigma^4 \left\{ B^2 - B - \frac{1}{6} D + \frac{1}{6} H^4 \right\} \nabla^2 \nabla^2 \tilde{\Phi}_t \\ + \frac{1}{2} \in \left[ (\nabla \tilde{\Phi})^2 + \sigma^2 (B - 1) \nabla \tilde{\Phi} \cdot \nabla (\nabla^2 \tilde{\Phi}) + \sigma^2 H^2 (\nabla^2 \tilde{\Phi})^2 + \sigma^2 H^2 (\nabla^2 \tilde{\Phi})^2 \right] = O(\sigma^6) \end{aligned} \quad (4.38)$$

Η σχέση μεταξύ των  $z_a$ ,  $z_b$  και  $\beta$  δίνεται από τις σχέσεις:

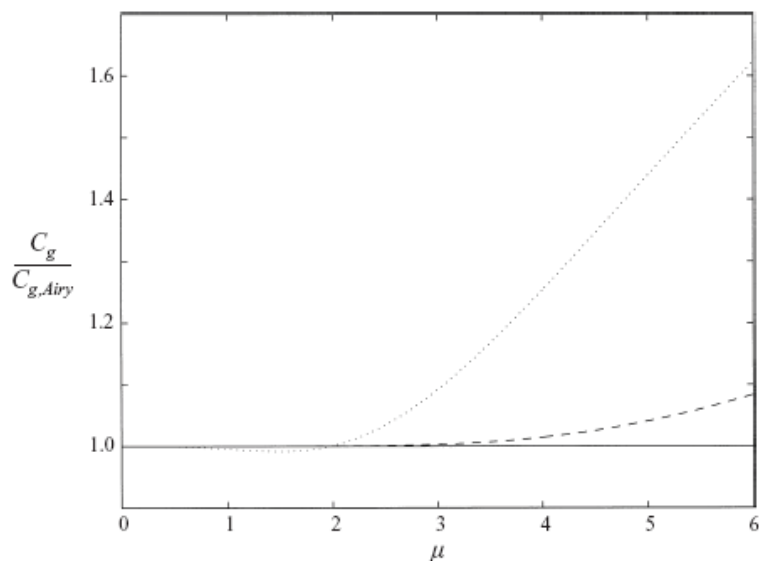
$$z_a = \left[ \frac{1}{9} - \left\{ \frac{8\beta}{567(1-\beta)} \right\}^{1/2} + \left\{ \frac{8}{567\beta(1-\beta)} \right\}^{1/2} \right]^{1/2} - 1 \quad (4.39)$$

$$z_b = \left[ \frac{1}{9} - \left\{ \frac{8\beta}{567(1-\beta)} \right\}^{1/2} \right]^{1/2} - 1 \quad (4.40)$$

Στο ακόλουθο **σχήμα 4.7** φαίνεται η σύγκριση μεταξύ του ποσοστού της φασικής ταχύτητας του μοντέλου με την ακριβή λύση της θεωρίας Airy για τις κλασικές εξισώσεις Boussinesq  $O(\sigma^2)$ , τις εξισώσεις Nwogu (1993) και το μοντέλο των Gobbi & Kirby (2000). Είναι φανερό ότι το τελευταίο έχει βελτιωμένες ιδιότητες διάχυσης από το προηγούμενα και αναπαράγει πιστά τις συνθήκες για νερά ενδιάμεσου και μεγάλου βάθους. Παρομοίως η αντίστοιχη σύγκριση για την ταχύτητα ομάδας,  $C_g = \partial\omega/\partial k$ , που παρουσιάζεται στο παρακάτω **σχήμα 4.8** παρουσιάζει ακόμα πιο πρόδηλο το πλεονέκτημα έναντι του μοντέλου Nwogu (1993).



**Σχήμα 4-7:** Ποσοστό φασικής ταχύτητας μοντέλου προς ακριβή λύση θεωρίας Airy. Κλασικές εξισώσεις Boussinesq (παύλες, τελείες), Nwogu,  $\alpha = -0:39$  (τελείες), Gobbi&Kirby (4,4) Radé (παύλες). ( $\mu = \sigma$ )



**Σχήμα 4-8: .Ποσοστό ταχύτητας ομάδας μοντέλου προς ακριβή λύση θεωρίας Airy. Nwogu,  $\alpha = -0.39$  (τελείες), Gobbi&Kirby (4,4) Padé (παύλες). ( $\mu = \sigma$ )**

#### 4.4.2 Εξισώσεις πλήρους μη γραμμικότητας και διασποράς των Madsen et al. (2002 & 2003)

Η συνήθης αντιμετώπιση του προβλήματος της αύξησης της ακρίβειας των ομοιωμάτων Boussinesq για νερά ενδιάμεσου βάθους και βαθιά ήταν η εξεύρεση της ακριβούς κατακόρυφης κατανομής του πεδίου ταχυτήτων . Οι πιο επιτυχημένες προσπάθειες ήταν αυτές του Nwogu (1993) και των Gobbi & Kirby (2000) οι οποίες είχαν πεδίο εφαρμογής, με ικανοποιητική ακρίβεια,  $kd \approx 1.5$  για το πρώτο μοντέλο και  $kh \approx 4$  για το δεύτερο μοντέλο όσον αφορά το γραμμικό προφίλ των ταχυτήτων και  $kh \approx 6$  όσον αφορά την σχέση διασποράς.

Μια σημαντική καινοτομία εισήχθη από τους Agnon et al . (1999) με την οποία κατέστησαν εφικτή την επίτευξη της ίδιας ακρίβειας για τις γραμμικές και τις μη - γραμμικές ιδιότητες. Η μέθοδός τους συνίσταται στην ακριβή έκφραση των οριακών συνθηκών στην ελεύθερη επιφάνεια και στον πυθμένα συνδυασμένων με μια προσεγγιστική λύση της εξίσωσης Laplace. Το πεδίο ταχυτήτων που προκύπτει δίνεται σε όρους των οριζόντιων και κατακόρυφων συνιστωσών στην ελεύθερη επιφάνεια του νερού. Η διατύπωση τους αυτή αποτελείται από έξι ζεύγη εξισώσεων με αγνώστους την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, την οριζόντια βαθμίδα του

δυναμικού της ταχύτητας στην ελεύθερη επιφάνεια και τις συνιστώσες (οριζόντιες και κατακόρυφες) της ταχύτητας στην ελεύθερη επιφάνεια και στην Σ.Η. Αυτή η διατύπωση έχει ως όριο ακρίβειας για την διάχυση μη γραμμικών κυματισμών μέχρι το  $kd \approx 6$ .

Στην εργασία που παρουσίασαν οι Madsen, Bingham και Schäffer(2003) γενίκευσαν την διαδικασία των Agnon et al . (1999) και επέκτειναν την λύση της εξίσωσης Laplace από την ελεύθερη επιφάνεια σε ένα τυχαίο επίπεδο  $z$ .

Αναλυτικότερα η διαδικασία που ακολούθησαν είναι η ακόλουθη:

Αρχικά η ακριβής λύση της εξίσωσης Laplace σχηματοποιήθηκε σε όρους πεπερασμένων σειρών από την Σ.Η. Η διαδικασία αυτή ορίζει το πεδίο ταχυτήτων από τον πυθμένα έως την ελεύθερη επιφάνεια . Οι δυναμικές και κινηματικές συνθήκες στην ελεύθερη επιφάνεια εκφράστηκαν σε όρους μεταβλητών των ταχυτήτων εκπεφρασμένες απευθείας στην ελεύθερη επιφάνεια. Σε συνδυασμό με τις κινηματικές συνθήκες στον πυθμένα καθορίστηκε έτσι το πρόβλημα κυματισμών πλήρους μη γραμμικότητας και διασποράς με 5 μεταβλητές (την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας και τις οριζόντιες και κατακόρυφες ταχύτητες στην ελεύθερη επιφάνεια και την Σ.Η.

Εν συνεχεία οι πεπερασμένες σειρές γενικοποιήθηκαν με την αντικατάσταση των μεταβλητών της ταχύτητας στην Σ.Η. με μεταβλητές σε τυχαία στάθμη  $\hat{z}$  που θεωρείται ότι είναι σταθερό ποσοστό του βάθους ηρεμίας ( $\hat{z} = sh$ ). Ενώ η επιλογή του επιπέδου  $\hat{z}$  δεν έχει αντίκτυπο όσο χρησιμοποιούνται άπειρες σειρές , παίζει σημαντικό ρόλο στους όρους αποκοπής. Επίσης η μέθοδος αποκοπής παίζει σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια των ενσωματωμένων γραμμικών και μη γραμμικών ιδιοτήτων των συστημάτων εξισώσεων που προκύπτουν.

Οι Madsen et al. δοκίμασαν τρεις μεθόδους αποκοπής( όπως τις συμβολίζουν στην εργασία τους):

- Μια απλή αποκοπή των όρων του αναπτύγματος σειράς Taylor.
- Η οριακή συνθήκη πυθμένα βελτιώνεται με την εισαγωγή προσέγγισης Padé σε συνδυασμό με βελτιστοποιημένους όρους κλίσης.

- Οι προσεγγίσεις Padé εισάγονται επιπρόσθετα και στην Σ.Η.

Σε όλες τις παραπάνω μεθόδους η θέση του  $\hat{z}$  καθορίζεται μετά από ελαχιστοποίηση του σφάλματος του γραμμικού προφίλ ταχυτήτων και σε όλες τις περιπτώσεις αυτό επιτυγχάνεται με επιλογή  $\hat{z} = -h$  ( $h$  το βάθος μέχρι τη Σ.Η.). Μια διαφορετική διαδικασία που πραγματοποιείται στη μέθοδο III είναι η επιλογή του  $\hat{z}$  με κριτήριο την βελτιστοποίηση της σχέσης γραμμικής διασποράς που οδηγεί σε τιμές  $\hat{z} = -0.2h$

Η σχέση της γραμμικής διασποράς (που προκύπτει όπως προαναφέρθηκε από μια ανάλυση Padé της λύσης πλήρους διασποράς) δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{\omega^2}{ghk^2} = \frac{1}{kh} \left( \frac{\sinh h(k(h+\hat{z})) \cosh(k\hat{z}) - \cosh(k(h+\hat{z})) \sinh(k\hat{z})}{\cosh(k(h+\hat{z})) \cosh(k\hat{z}) - \sinh(k(h+\hat{z})) \sinh(k\hat{z})} \right) \quad (4.41)$$

Η ακρίβεια που επιτυγχάνεται με τις τρεις μεθόδους αποκοπής που προαναφέρθηκαν συνοψίζεται στους ακόλουθους **πίνακες** όπως τους παρουσιάζουν οι Madsen et al. 2003. Στον πίνακα 4.1 η 3<sup>η</sup> και 4<sup>η</sup> στήλη βασίζονται στην γραμμική ανάλυση των ιδιοτήτων του μοντέλου η πέμπτη παρουσιάζει το σφάλμα στην 3<sup>η</sup> αρμονική της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας και η τελευταία περιέχει τα σφάλματα στην οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας στην ελεύθερη επιφάνεια για ένα μη γραμμικό κύμα με κλίση  $H/L=0.12$ . Είναι προφανές ότι η αντιμετώπιση των μεθόδων I, II, και III μπορεί να εφαρμοστεί σε συνάρτηση με πιο χαμηλόβαθμες εξισώσεις και έτσι στον **πίνακα 4.2** συνοψίζονται τα σφάλματα που προκύπτουν από αποκοπή που περιέχει μόνο μέχρι τους όρους των παραγώγων 3ης τάξης. Είναι φανερό ότι η μέθοδος III με  $\hat{z} = -0.2h$  και  $\hat{z} = -0.5h$  είναι με διαφορά η ακριβέστερη από τις 3.

#### Πίνακας 4-1:

method	formal accuracy	error < 2% in $c^2$	error < 1% in $\sqrt{F_1}$	error < 5% in $A_3$	error < 2% in $\bar{u}_c$
I ( $\sigma = -0.5$ )	$k^4 h^4$	$kh < 8.8$	$kh < 4.7$	—	—
II ( $\sigma = -0.5$ )	$k^4 h^4$	$kh < 17$	$kh < 5.2$	$kh < 14$	$kh < 16.5$
III ( $\sigma = -0.5$ )	$k^8 h^8$	$kh < 25$	$kh < 9.5$	$kh < 21$	$kh < 25$
III ( $\sigma = -0.2$ )	$k^8 h^8$	$kh < 40$	$kh < 10$	$kh < 32$	$kh < 39$

**Πίνακας 4-2:**

method	formal accuracy	error < 2% in $c^2$	error < 1% in $\sqrt{F_1}$	error < 5% in $A_3$	error < 2% in $\bar{u}_c$
II ( $\sigma = -0.5$ )	$k^2 h^2$	$kh < 7.5$	$kh < 2.2$	$kh < 6.5$	$kh < 7.5$
III ( $\sigma = -0.5$ )	$k^4 h^4$	$kh < 10$	$kh < 3.5$	$kh < 8.3$	$kh < 10$

Πρέπει να διευκρινιστεί ότι  $c^2$  είναι το τετράγωνο της φασικής ταχύτητας και  $F_1$  συμβολίζεται το σφάλμα της μέσης στο βάθος ταχύτητας σε σχέση με την ταχύτητα στόχο  $u_s$  για ένα πεδίο  $kh$ . Δίνεται από τον τύπο:

$$F_1(\sigma, kh) \equiv \frac{1}{h} \int_{-h}^0 \left( \frac{u(z) - u_s(z)}{u_s(0)} \right)^2 dz \quad (4.42)$$

$A_3$  είναι το σφάλμα στην 3<sup>η</sup> αρμονική της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας. Η σχέση του με το αθροιστικό εύρος της ρήχωσης:

$$\frac{A}{A_s} = \exp \left( - \int_0^{k^*} \frac{Y - Y_s}{\kappa^*} dk^* \right), \quad \kappa^* \equiv k_0 d \quad (4.43)$$

όπου  $k_0$  είναι ο αριθμός κύματος στα βαθιά.

#### 4.4.3 Μέθοδος Fourier-Boussinesq για μη γραμμικούς κυματισμούς των Bingham & Agnon (2005)

Μέχρι τώρα παρατέθηκε η μέθοδος των Madsen et al. (2002,2003) πολύ υψηλής ακρίβειας που περιλαμβάνει μέχρι και τις παραγώγους 5ης τάξεως και απαιτεί την επίλυση τριών εξισώσεων σε κάθε κόμβο που γίνεται υπολογισμών των ζητούμενων μεγεθών του κυματισμού. Με την μέθοδο τους αυτή επεκτάθηκε το όριο εφαρμογής των εξισώσεων Boussinesq μέχρι και το  $kd \approx 25$ , απαλείφοντας πρακτικά κάθε περιορισμό βάθους.

Η επόμενη εξέλιξη προήλθε από τους Bingham & Agnon (2005) οι οποίοι παρουσίασαν μια μέθοδο με πολύ μικρό σφάλμα για  $0 \leq kd < \infty$  και επομένως εξαλείφει και τυπικά κάθε περιορισμό βάθους.

Η μέθοδος που παρουσίασαν είναι ουσιαστικά Boussinesq αλλά περιλαμβάνει έναν γενικευμένο μετασχηματισμό Hilbert για να απομακρύνει κάθε περιορισμό βάθους. Το γεγονός ότι μετασχηματισμός Hilbert υπολογίζεται μέσω μετασχηματισμού Fourier (FFT) περιορίζει το πεδίο σε ορθογωνικό σχήμα. Η πολυπλοκότητα του σχήματος, για την τάξη ακρίβεια που επιλέχθηκε (κρατήθηκαν οι παράγωγοι μέχρι 6ου βαθμού) είναι αντίστοιχη με τα άλλα ομοιώματα Boussinesq πλήρους μη γραμμικότητας. Σε αντίθεση με άλλες πολυωνυμικές μεθόδους, η μέθοδος Fourier-Boussinesq προσεγγίζει τον όρο διάχυσης  $\tanh(kd)/(kd)$  συναρτήσει του  $kd$  αντί του  $k^2 d^2$  και έτσι μπορεί να προσεγγίσει ασυμπτωτικά και στα δύο όρια του  $kd$ . Ο γενικευμένος μετασχηματισμός Hilbert χρησιμοποιείται τότε για να μετατρέψει τις περιπτές δυνάμεις σε άρτιες καθιστώντας τις έτσι κατάλληλες για εκτίμηση με τοπικές μεθόδους πεπερασμένων διαφορών. Έτσι οδηγούμαστε σε μικρά σφάλματα διάχυσης για  $0 \leq kd < \infty$ .

Θεωρώντας σύστημα αναφοράς όπου  $z=0$  στην Σ.Η. και  $V(x,z,t)$  ο όγκος του ρευστού και περιορίζεται από την ελεύθερη επιφάνεια  $z=\zeta(x,t)$  και από τον πυθμένα  $z=-d(x)$  το δυναμικό της ταχύτητας  $\phi(x, z, t)$  το οποίο ικανοποιεί το ακόλουθο πρόβλημα οριακών τιμών:

$$\nabla^2 \phi + \phi_{zz} = 0 \text{ στον } V \quad (4.44)$$

$$\phi_z + \nabla \phi \cdot \nabla h = 0, z = -h \quad (4.45)$$

$$\zeta_t + \nabla \tilde{\phi} \cdot \nabla \zeta - (1 + \nabla \zeta \cdot \nabla \zeta) \tilde{\phi} = 0 \quad (4.46)$$

$$\tilde{\phi}_t + \frac{1}{2} \nabla \tilde{\phi} \cdot \nabla \tilde{\phi} - \frac{1}{2} (1 + \nabla \zeta \cdot \nabla \zeta) \tilde{\phi}_z^2 + g\zeta = 0 \quad (4.47)$$

Οι οριακές συνθήκες της ελεύθερης επιφάνειας εκφράζονται σε όρους του δυναμικού στην ελεύθερη επιφάνεια  $\tilde{\phi} = \phi(x, \zeta(x,t), t)$  και οι αρχικές συνθήκες των  $\zeta$  και  $\tilde{\phi}$  πρέπει να δίνονται.

Προτείνεται η χρήση της προσέγγισης με σειρές Taylor των Dommermuth & Yue (1987) για την ικανοποίηση των οριακών συνθηκών ελεύθερης επιφάνειας, αφού αυτή οδηγεί σε ένα χρονικά μόνιμο  $N \times N$  γραμμικό σύστημα εξισώσεων που μπορεί να λυθεί χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των άμεσων πινάκων (direct matrix method). Σε αυτή την περίπτωση η προσέγγιση του δυναμικού της ταχύτητας γίνεται με σειρές αποκοπής στη μη γραμμική παράμετρο  $\varepsilon = ka \ll 1$ . Συνεπώς  $\phi = \sum_{m=1}^M \phi^{(m)}$ , όπου

$\phi^{(m)} = O(\varepsilon^m)$ . Η τιμή του  $\phi^{(m)}$  στην ελεύθερη επιφάνεια υπολογίζεται μέσω της σειράς Taylor από  $z=0$  δίνοντας:

$$\tilde{\phi} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^{M-m} \frac{\zeta^n}{n!} \frac{\partial^n}{\partial z^n} \hat{\phi}^{(m)} \quad (4.48)$$

Όπου  $\hat{\phi} = \phi(x, 0, t)$ .

Συλλέγοντας τους όρους κάθε τάξης του  $\varepsilon$  προκύπτει μια ρητή ακολουθία για την εκτίμηση των δυναμικών:

$$\hat{\phi}^{(1)} = \tilde{\phi} \quad (4.49)$$

$$\hat{\phi}^{(m)} = - \sum_{n=1}^{m-1} \frac{\zeta^n}{n!} \frac{\partial^n}{\partial z^n} \hat{\phi}^{(m-n)}, \quad m=2, 3, \dots, M. \quad (2.50)$$

Εκφράζοντας τις εξισώσεις με αυτό τον τρόπο, το πρόβλημα μεταπίπτει στον υπολογισμό του  $\hat{\phi}_z^{(m)}$  από το  $\hat{\phi}^{(m)}$ , μετά τον οποίο οι πρόσθετες  $z$ -παράγωγοι υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την αρνητική οριζόντια Λαπλασιανή σε αυτές τις δύο ποσότητες. Τέλος η  $z$ -παράγωγος της (4.48) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του  $\hat{\phi}_z$ .

Η διαδικασία αυτή των μικρών διαταραχών (perturbations) υποθέτει ήπια μη γραμμικότητα αλλά κανένα περιορισμό στο  $kd$ . Το αριθμητικό σχήμα που προκύπτει φαίνεται να συγκλίνει μη γραμμικούς κυματισμούς σταθερού προφίλ έως και το 80% της οριακής κλίσης του κύματος, για κάθε  $kd$ .

Στην συνέχεια για την εξαγωγή ενός μοντέλου Boussinesq το οποίο τείνει ασυμπτωτικά και στα δύο όρια του  $kd$  απαιτείται ο υπολογισμός της



κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας στην Σ.Η. από την εξίσωση δυναμικού στο ίδιο επίπεδο. Όλες οι υπάρχουσες μέθοδοι Boussinesq ικανοποιούν τη σχέση γραμμικής διασποράς, σε όρους της αδιάστατης ταχύτητας κύματος  $c^2/(gd)$ , η οποία είναι συνάρτηση του  $(kd)^2$ . Αυτό τις κάνει εφαρμόσιμες σε προβλήματα ποικίλων βαθών  $d$ . Όμως η ακριβής σχέση της γραμμικής διασποράς είναι υπερβατική,  $c^2/(gd) = \tanh(kd)/(kd)$ , και τείνει στο  $1/kd$  (μια περιττή δύναμη του  $kd$ ) στα βαθιά νερά. Συνεπώς οι υπόλοιπες μέθοδοι Boussinesq αποκλίνουν σε αυτό το όριο. Έτσι για να διορθωθεί το ασυμπτωτικό όταν  $kd \rightarrow \infty$ , εισάγονται στην προσέγγιση περιττές δυνάμεις του  $kd$ , καθώς και ο γενικευμένος (2D) τελεστής μετασχηματισμού Hilbert  $H$ , ο οποίος είναι ένα μέσο για τον υπολογισμό αυτών στο φυσικό χώρο. Ο γενικευμένος αυτός τελεστής Hilbert εκφράζεται ως:

$$H\nabla\phi = F^{-1} \{kF\{\phi\}\} \quad (4.51)$$

όπου το  $F$  είναι ο σταθερός 2D  $(\mathbf{x};\mathbf{k})$  μετασχηματισμός Fourier και  $F^{-1}$  ο αντίστροφος.

Για την περίπτωση του σταθερού βάθους ένας συνηθισμένος έλεγχος που γίνεται σε όλα τα ομοιώματα Boussinesq όσον αφορά την ακρίβεια στη διασπορά ενέργειας είναι το κατά πόσον αποδίδεται ακριβώς η σχέση γραμμικής διασποράς:

$$\frac{C^2}{gd} = \frac{\tanh(\kappa)}{\kappa} \quad (4.52)$$

όπου  $\kappa = kd$  για συντομία.

Η σχέση (2.52) ορίζει την χαμηλότερης τάξης μέθοδο Fourier-Boussinesq . Για την έκφραση της μεθόδου στο χώρο  $\mathbf{x}$  συσχετίζεται το  $i\kappa$  με το  $d\nabla$  και το  $\kappa$  με το  $d'H\nabla$ . Έτσι προκύπτει :

$$\tanh(d\nabla) = i \tanh(\kappa) \approx \frac{i\kappa}{1+\kappa} = \frac{d\nabla}{1+d'H\nabla} \quad (4.53)$$

από την οποία προκύπτει

$$[1 + d'H\nabla] \hat{\omega} = -d\nabla \hat{\mathbf{u}} \quad (4.54)$$

η οποία πρέπει να λυθεί ως προς  $\hat{\omega}$  ( $\hat{\omega} = \Phi_z(x, 0, t)$ ). Η αριθμητική λύση έρχεται μέσω δοκιμών αφού ο μετασχηματισμός Hilbert λειτουργεί στο αριστερό μέλος των εξισώσεων μόνο.

Από την επίλυση αυτή έχουμε το σύστημα εξισώσεων :

$$\hat{\Phi} + \zeta \hat{\omega} = \tilde{\Phi} \quad (4.55)$$

$$d\nabla^2 \hat{\Phi} + [1 + d'H\nabla] \hat{\omega} = 0 \quad (4.56)$$

$$\text{Οπότε : } \tilde{\omega} = \hat{\omega} - \zeta \nabla^2 \hat{\Phi} \quad (4.57)$$

Η λύση αυτή αποτελεί την χαμηλότερης τάξης μέθοδο και παρουσιάζει ενδιαφέρον για πολύ μακρά ή πολύ βραχεία κύματα.

#### 4.5 Εισαγωγή στην τριβή πυθμένα

Όπως έγινε φανερό από τα προηγούμενα κεφάλαια η μαθηματική αντιμετώπιση των διάφορων κυματικών θεωριών έγινε με την υπόθεση ενός σταθερού, αδιαπέρατου και τοπικά οριζόντιου πυθμένα. Στη φύση υπάρχει ένα τεράστιο εύρος από είδη πυθμένων, από λασπώδεις πυθμένες όπου η ιλύς συμπεριφέρεται σαν παχύρρευστο υγρό μέχρι πολύ σκληρούς και τραχείς βραχώδεις πυθμένες. Η ακαμψία του πυθμένα, το πορώδες του και η τραχύτητα του είναι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν σε σημαντικό βαθμό τα χαρακτηριστικά των κυματισμών. Σε γενικές γραμμές η αλληλεπίδραση του κυματισμού και του πυθμένα οδηγεί σε απόσβεση ποσού της κυματικής ενέργειας και τοπική αλλαγή της κινηματικής των υγρών μορίων. οι σημαντικότερη απόσβεση ενέργειας εμφανίζεται όταν ο πυθμένας είναι πολύ μαλακός (εύκαμπτος) ή όταν τα κύματα προωθούνται για μεγάλες αποστάσεις.

Οι γραμμικοποιημένες εξισώσεις Navier – Stokes για κυματισμούς σε ένα ιξώδες ρευστό:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (4.58a)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + v \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4.58\beta)$$

όπου  $v$  είναι ο συντελεστής κινηματικού ιξώδους.

Στην περίπτωση οριακής στοιβάδας στρωτής ροής και πολύ κοντά στον πυθμένα η επίδραση του ιξώδους είναι σημαντική. Χωρίζοντας το πεδίο ροής σε αστρόβιλο ( $u_p$ ) και στροβιλό ( $u_r$ ) θα έχουμε :  $u = u_p + u_r$ .

$$\text{Η } u_r \text{ ικανοποιεί μια προσεγγιστική στροβιλή λύση: } \frac{\partial u_r}{\partial t} = v \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2}$$

$$(2.61)$$

ενώ από την γραμμική θεωρία έχουμε :

$$u_p = \frac{g a k \cosh k(d+z)}{\omega \cosh kd} \cos(kx - \omega t) \quad (4.59)$$

όπου  $a$  είναι το εύρος του κυματισμού.

Η συνολική οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας θα είναι τελικά:

$$u = e^{-\sqrt{\omega/2\nu}(z+d)} \cos \left( kx - \omega t + \sqrt{\frac{\omega}{2\nu}}(z+d) \right) \quad (4.60)$$

και η κατακόρυφη (όπως προκύπτει από την εξίσωση συνέχειας):

$$w = -\frac{g a k}{\omega \cosh(kd)} \left[ \sinh k(d+z) e^{i(\psi+\pi/2)} - k \sqrt{\frac{\nu}{\omega}} (e^{-(1+i)\sqrt{\omega/2\nu}(z+d)} - 1) e^{i(\psi+3\pi/4)} \right]$$

$$(4.61)$$

όπου  $\psi = kx - \omega t$ .

Η στιγμιαία διατμητική τάση που ασκείται στον πυθμένα λαμβάνεται από την σχέση:

$$\tau_{xz} = \rho v \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \Big|_{z=-d} \approx \rho v \left( \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) \Big|_{z=-d} \quad (4.62)$$

ή

$$\tau_{xz} = \rho \sqrt{\frac{\nu}{\omega}} \frac{g a k}{\omega \cosh kd} \cos \left( kx - \omega t - \frac{\pi}{4} \right) \quad (4.63)$$

Από τον (4.63) φαίνεται ότι η διατμητική τάση πυθμένα είναι αρμονική συνάρτηση με διαφορά φάσης  $45^\circ$  από την ελεύθερη επιφάνεια. Για παλμική ροή κυματισμού η διατμητική τάση πυθμένα είναι:

$$\tau_{xz} = \frac{\rho f}{8} u_b |u_b| \quad (4.64)$$

όπου  $u_b$  είναι η ταχύτητα πυθμένα και  $f$  είναι ένας συντελεστής τριβής. Η μέγιστη ταχύτητα στον πυθμένα είναι:

$$(u_b)_{\max} = \frac{g a k}{\omega \cosh kd} = \zeta_b \omega \quad (4.65)$$

όπου  $\zeta_b$  είναι η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση ενός υγρού μορίου στον πυθμένα.

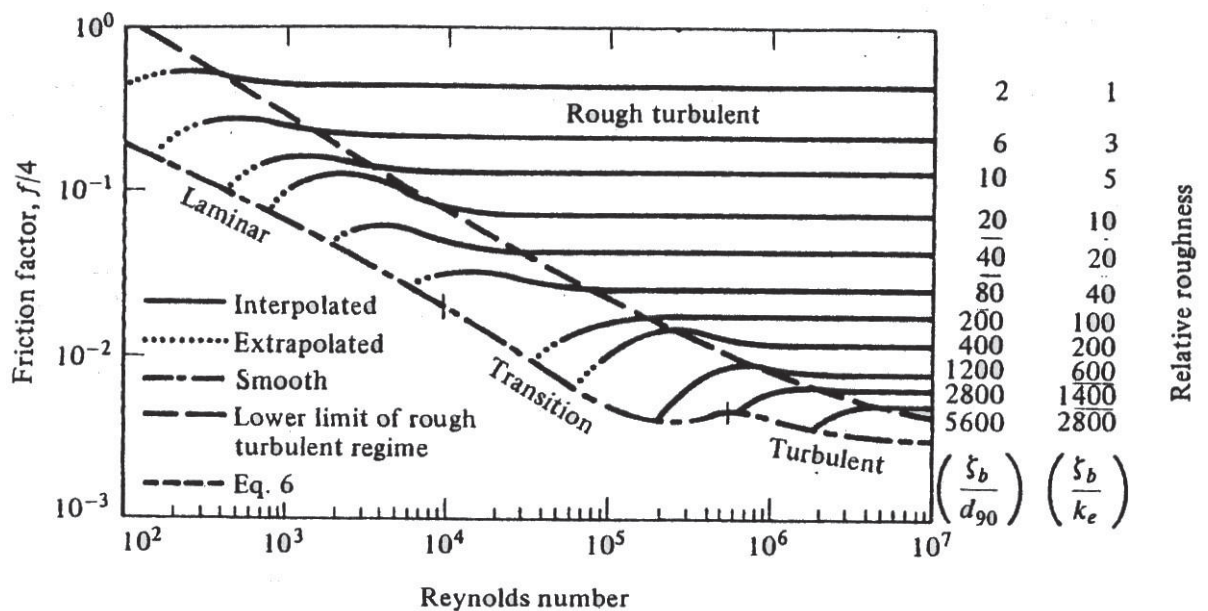
Από τις (4.63) και (4.64) λαμβάνουμε:

$$f = \frac{8}{R_b^{1/2}} \quad (4.66)$$

όπου  $R_b$  είναι ο αριθμός Reynolds που δίνεται από τη σχέση:

$$R_b = \frac{u_b \zeta_b}{\nu} \quad (4.67)$$

Η σχέση μεταξύ  $R_b$  και  $f$  δίνεται στο παρακάτω **σχήμα**



**Σχήμα 4-9: Σχέση μεταξύ συντελεστή τριβής  $f$  και αριθμού Reynolds  $R_b$ .**

Τις περισσότερες περιπτώσεις όμως όταν το ύψος του κύματος γίνεται σχετικά μεγάλο ή ο πυθμένας σχετικά τραχύς η ροή στην οριακή στοιβάδα γίνεται τυρβώδης και όχι στρωτή όπως εξετάστηκε στα προηγούμενα. Αυτή

η περίπτωση είναι και η πιο συνηθισμένη στη φύση. Πειραματικές εργασίες από τους Jonsson (1966), Kamphuis (1975) , Jonsson & Carlsen (1976) και οι θεωρητικές μελέτες από τον Kajjura (1968) επέδειξαν την εξάρτηση της οριακής αυτής στοιβάδας από τον αριθμό Reynolds και την σχετική τραχύτητα του πυθμένα που ορίζεται ως  $k_e/\zeta_b$  όπου  $k_e$  το ισοδύναμο μέγεθος κόκκου του πυθμένα.

Ο Kamphuis (1975) προτείνει (με κάποια επιφύλαξη) ότι  $k_e=2d_{90}$  όπου  $d_{90}$  είναι η διάμετρος του κόκκου της άμμου πυθμένα από την οποία το υπόλοιπο 90% είναι λεπτότερο. Όσον αφορά το συντελεστή τριβής  $f$  προτείνει:

$$f = 0.1 \left( \frac{k_e}{\zeta_b} \right)^{3/4} \quad \text{για} \quad \frac{k_e}{\zeta_b} > 0.02 \quad (4.68)$$

$$\frac{1}{2\sqrt{f}} + \ln \left( \frac{1}{2\sqrt{f}} \right) = -0.35 - \frac{4}{3} \ln \left( \frac{k_e}{\zeta_b} \right) \quad \text{για} \quad \frac{k_e}{\zeta_b} < 0.02 \quad (4.69)$$

Οι (4.68) και (4.69) ισχύουν όταν  $\frac{k_e}{\zeta_b} \geq \frac{2200}{R_b}$ .

Ενώ από η εξακολουθεί η 4.64 να ισχύει για τη για την διατμητική τάση στον πυθμένα και για τυρβώδη στοιβάδα.

Η απόσβεση ενέργειας λόγω τριβής δίνεται από τη σχέση:

$$\epsilon_D = \overline{T_{xy} u_b} \quad (4.70)$$

ή

$$\epsilon_D = \frac{\rho f}{g} (u_{bmax})^3 \cos^2(kx - \omega t) |\cos(kx - \omega t)| \quad (4.71)$$

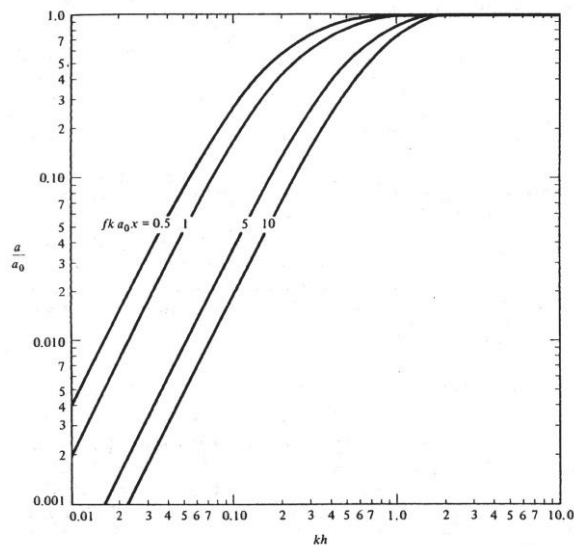
η οποία στην περίοδο του κύματος έχει μέση τιμή:

$$\epsilon_D = \frac{\rho f}{g} (u_{bmax})^3 = \frac{\rho f}{6\pi} \left( \frac{a\omega}{\sinh kd} \right)^3 \quad (4.72)$$

Κλείνοντας η μείωση του ύψους του κύματος συναρτήσει της απόστασης πάνω από έναν επίπεδο πυθμένα ισούται με

$$a(x) = \frac{a_0}{1 + \frac{2f}{3\pi} \frac{k^2 a_0 x}{(2kd + \sinh 2kd) \sinh kd}} \quad (4.73)$$

όπου  $a_0$  είναι ένας συντελεστής απόσβεσης. Η σχέση (4.73) σχηματοποιείται στο **παρακάτω σχήμα**.



**Σχήμα 4-10: Απόσβεση ενέργειας κυματισμού με σχηματισμό τυρβώδους οριακής στοιβάδας.**

Το ποσό της μείωσης ενέργειας αυξάνεται με την αύξηση του συντελεστή τριβής  $f$  και εξαρτάται από το βάθος. Σε βαθιά νερά η σχέση  $a/a_0$  γίνεται ίση με τη μονάδα και συνεπώς η τριβή γίνεται αμελητέα, ενώ στα ρηχά νερά η ασύμπτωτη ισούται με :

$$\frac{a}{a_0} = \frac{1}{1 + \frac{f}{6\pi} \frac{a_0 \chi}{d^2}} \quad (4.74)$$

#### **4.6 Διατμητική Τάση στον πυθμένα - Τριβή πυθμένα (Memos et al.2005)**

Ο κυριότερος τρόπος μαθηματικής αντιμετώπισης του προβλήματος της τριβής πυθμένα, βασίζεται στην θεώρηση της διατμητικής τάσης που ασκείται στον πυθμένα από το υπερκείμενο υγρό (bed-shear concept).

Στην εργασία τους οι Memos et al. (2005) θεωρούν ότι οι στιγμιαίες διατμητικές τάσεις στον πυθμένα δίνονται από τους ακόλουθους τύπους (για 2 διαστάσεις):

$$\tau_{bx} = \frac{1}{2} f_{cw} u_0 |\mathbf{u}_0|, \tau_{by} = \frac{1}{2} f_{cw} v_0 |\mathbf{u}_0| \quad (4.75)$$

όπου  $|\mathbf{u}_0| = \sqrt{u_0^2 + v_0^2}$  και  $f_{cw}$  είναι ο παράγοντας τριβής ρεύματος – κύματος.

Ο Ribberink (1998) προτείνει την τιμή:

$$f_{cw} = \left( \frac{|\mathbf{u}_{oc}|}{|\mathbf{u}_{oc}| - u_{ow-max}} \right) f_c + \left( 1 - \frac{|\mathbf{u}_{oc}|}{|\mathbf{u}_{oc}| - u_{ow-max}} \right) f_w \quad (4.76)$$

όπου  $f_c$ ,  $f_w$  είναι οι συντελεστές τριβής για ρεύμα και κύμα αντίστοιχα,  $u_{ow-max}$  είναι το εύρος του αυξομειούμενου τμήματος της ταχύτητας κοντά στον πυθμένα,  $\mathbf{u}_{ow} = (u_{ow}, v_{ow})$ ,  $|\mathbf{u}_{oc}| = \sqrt{\bar{u}_0^2 + \bar{v}_0^2}$ , με  $\bar{u}_0$  και  $\bar{v}_0$  τις συνιστώσες της ταχύτητας πυθμένα του μέσου στο χρόνο πεδίου των ρευμάτων, που λαμβάνεται βγάζοντας μέσο όρο στις στιγμιαίες ταχύτητες. Για περιοδικά κύματα τα  $\bar{u}_0$  και  $\bar{v}_0$  λαμβάνονται βγάζοντας μέσο όρο από τις στιγμιαίες ταχύτητες σε διάστημα τριών περιόδων κύματος.

Το εύρος του αυξομειούμενου τμήματος της ταχύτητας κοντά στον πυθμένα,  $u_{ow-max}$ , λαμβάνεται παίρνοντας τις μέσες τιμές του εύρους των αυξομειούμενων τιμών των ταχυτήτων πυθμένα των προηγούμενων κυματισμών. Για θραυόμενους κυματισμούς η ταχύτητα στον πυθμένα, κάτω από «επιφανειακούς κυλίνδρους», λαμβάνεται από την σχέση ορισμού της μέσης στο βάθος ταχύτητας  $U$ , ( $\mathbf{U} = \frac{1}{h} \int_d^z \mathbf{u} dz$ ):

$$\mathbf{u}_o = \mathbf{U} \frac{h}{h-\delta} - \mathbf{c} \frac{\delta}{h-\delta}, \quad (4.77)$$

ενώ για μη θραυόμενους κυματισμούς από τις σχέσεις της κατακόρυφης κατανομής της ταχύτητας  $u(z)$  που δίνει ο Dingemans (1997, p. 614) θέτοντας  $z=-d$ :

$$u_o = U + \left( \frac{d}{2} \right) \frac{\partial^2 (dU)}{\partial x^2} - \left( \frac{d^2}{3} \right) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad (4.78)$$

$$v_o = V + \left(\frac{d}{2}\right) \frac{\partial^2 (dV)}{\partial y^2} - \left(\frac{d^2}{3}\right) \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \quad (4.79)$$

Οι αυξομειούμενες συνιστώσες των ταχυτήτων (κοντά στον) πυθμένα  $u_{ow}$  και  $v_{ow}$  υπολογίζονται από τις ταχύτητες κοντά στον πυθμένα αφαιρώντας τις μέσες ταχύτητες ρεύματος:  $u_{ow} = u_o - \bar{u}_o$  και  $v_{ow} = v_o - \bar{v}_o$ .

Ο συντελεστής τριβής κυματισμού ( $f_w$ ) υπολογίζεται βάσει της πεπλεγμένης σχέσης του Johnsson (1966):

$$f_w = \exp \left[ -5.977 + 5.213 \left( \frac{K_N}{A_b} \right)^{0.194} \right] \quad \text{για } \frac{K_N}{A_b} < 0,63 \quad (4.80)$$

$$f_w = 0,3 \quad \text{για } \frac{K_N}{A_b} \geq 0,63$$

όπου  $A_b$  είναι το εύρος της διακύμανσης των υγρών μορίων ( $A_b = u_{ow-max}/\omega$ ) και  $K_N$  είναι η τραχύτητα του πυθμένα.

Η χαρακτηριστική αυτή τραχύτητα πυθμένα ( παράμετρος Nikuradse) συσχετίζεται με κάποια χαρακτηριστική διάμετρο των κόκκων του πυθμένα. Σε περίπτωση απουσίας γεωμορφών στον πυθμένα η παράμετρος τραχύτητας Nikuradse δίνεται από τον εξής απλό τύπο:  $K_N = 2.5 \cdot D_{50}$ , όπου  $D_{50}$  είναι η μέση διάμετρος κόκκου. Ο Ribberink (1998) προτείνει τις εξής τιμές για να ορίσει την παράμετρο  $K_N$ :  $K_N = 3 \cdot D_{90}$ ,  $K_N = 2.5 \cdot D_{50}$ . Σε περίπτωση ύπαρξης πτυχώσεων, ρυτιδώσεων (ripples) ή βλάστησης στον πυθμένα η τιμή πρέπει να είναι σημαντικά μεγαλύτερη.

Τέλος ο συντελεστής τριβής λόγω ρεύματος υπολογίζεται από τη σχέση (Ribberink, 1998):

$$f_c = \frac{2g}{C_c^2} \quad (4.81)$$

όπου  $C_c$  είναι ο συντελεστής τριβής Chezy που δίνεται από τη σχέση:

$$C_c = 18 \cdot \log_{10} \left( \frac{12(d + \bar{\zeta})}{K_N} \right) \quad (4.82)$$



με  $\bar{\zeta}$  να αντιπροσωπεύει την μέση τιμή της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας ζ.

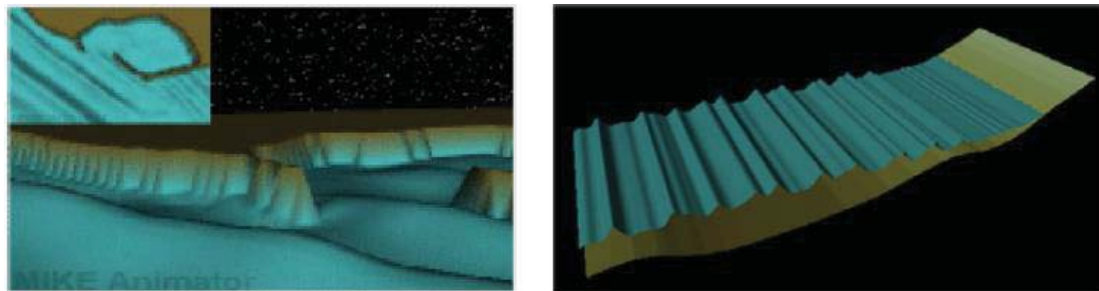
## **5. Το Πρόγραμμα Mike 21 Boussinesq Waves (Bw)**

### **5.1 Εισαγωγή**

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο καθώς και η μαθηματική εφαρμογή της μελέτης της διάδοσης των κυματισμών του προγράμματος MIKE21 Boussinesq Waves ή εν συντομία MIKE21 BW ( User Guide MIKE by DHI). Το MIKE21 BW είναι ένα προηγμένης τεχνολογίας πακέτο για αριθμητική προσομοίωση βραχέων και μακρών κυματισμών κοντά και εντός λιμενικών εγκαταστάσεων καθώς και σε παράκτιες ζώνες και ουσιαστικά αποτελεί μια από τις δημοφιλέστερες εμπορικές προτάσεις της αγοράς. Στα ακόλουθα υποκεφάλαια περιγράφονται οι εξισώσεις ορμής και συνέχειας που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα (Madsen et al. 1997a), το κριτήριο θραύσης στο οποίο βασίζεται καθώς και το αριθμητικό σχήμα επίλυσης του προγράμματος (Πηγή: User Guide MIKE by DHI).

### **5.2 Γενική περιγραφή**

Το MIKE21 BW αποτελεί ένα από τα κύρια υποπρογράμματα του «πακέτου» λογισμικού MIKE21 της DHI (Danish Hydraulic Institute) που αφορά στο σύνολό του την προσομοίωση των περισσότερων διεργασιών της παράκτιας ζώνης. Το MIKE21 BW διαιρείται με τη σειρά του σε δυο υποπρογράμματα, ένα μονοδιάστατο (1DH) και ένα δισδιάστατο (2DH)(Σχήμα 5-1), τα οποία βασίζονται στην επίλυση στον πεδίο του χρόνου των εξισώσεων τύπου Boussinesq . Αυτές περιλαμβάνουν μη γραμμικά χαρακτηριστικά καθώς και διασπορά συχνοτήτων. Ουσιαστικά η διασπορά των συχνοτήτων εισάγεται στις εξισώσεις ποσότητας κίνησης παίρνοντας υπόψη την επίδραση που έχουν οι κατακόρυφες επιταχύνσεις στην κατανομή των πιέσεων.



**Σχήμα 5-1:** Το ΜΙΚΕ21BW περιέχει 2 modules. Αριστερά: (2DH) εφαρμόζεται συνήθως για τον υπολογισμό της κυματικής διαταραχής σε λιμάνια. Δεξιά: (1DH) χρησιμοποιείται συνήθως για την προσομοίωση της κυματικής διάδοσης από τα βαθιά στα ρηχά (Πηγή: User Guide MIKE by DHI).

Τα δύο αυτά υποπρογράμματα επιλύουν τις κλασσικές εξισώσεις τύπου Boussinesq χρησιμοποιώντας μια έκφραση ροής (flux-formulation) με βελτιστοποιημένα τα χαρακτηριστικά της γραμμικής διασποράς. Η νέα βελτιωμένη μορφή των εξισώσεων (Madsen et al., 1991; Madsen & Sørensen, 1992) τα καθιστούν ικανά για προσομοίωση της κατευθυντικής διάδοσης μιας κυματοσειράς από τα βαθιά στα ρηχά νερά. Ο μέγιστος επιτρεπόμενος λόγος θαλάσσιου βάθους προς μήκος κύματος στα βαθιά:  $d/L_0 \approx 0.5$  (ή  $kd \approx 3.1$ , όπου  $kd$  είναι ο σχετικός αριθμός κύματος και αποτελεί δείκτη όρων διασποράς). Για την κλασσική μορφή των εξισώσεων τύπου Boussinesq (§2.2), ο μέγιστος επιτρεπόμενος λόγος θαλάσσιου βάθους προς μήκος κύματος στα βαθιά είναι:  $d/L_0 \approx 0.22$  (ή  $kd \approx 1.4$ ). Οι εξισώσεις του μοντέλου έχουν επεκταθεί (Madsen et al., 1997; Sørensen et al. 1998, 2004) για να συμπεριλάβουν τη θραύση των κυματισμών και την «κινούμενη» ακτογραμμή (για εφαρμογές που έχουν σχέση με την αναρρίχηση των κυματισμών).

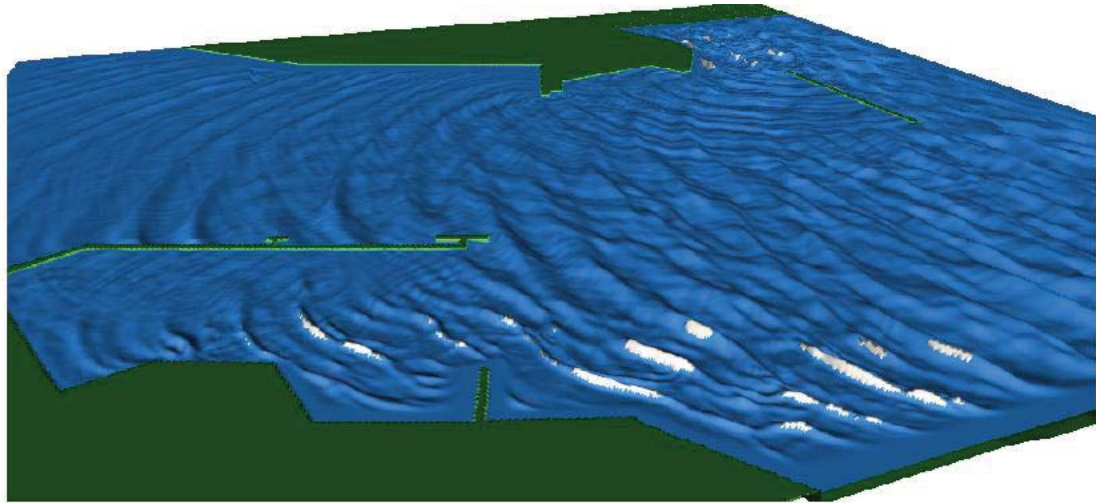
Το 2DH BW (δύο οριζόντιες διαστάσεις) επιλύει τις τροποποιημένες εξισώσεις τύπου Boussinesq μέσω ενός πεπλεγμένου αριθμητικού σχήματος πεπερασμένων διαφορών με τις μεταβλητές να ορίζονται πάνω σε έναν εναλλασσόμενο ορθογωνικό κάναβο. Το μοντέλο είναι ικανό να αναπαράγει τα περισσότερα συνδυαστικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε λιμενικές εγκαταστάσεις και παράκτιες ζώνες. Αυτά είναι:

- Διάθλαση (refraction)
- Ρήχωση (shoaling)
- Περίθλαση (diffraction)

- Μερική ανάκλαση (partial reflection)
- Μερική μετάδοση (partial transmission)
- Τριβή στον πυθμένα (bottom dissipation)
- Θραύση κυματισμών (wave breaking)
- Μεταβολή της ακτογραμμής (moving shoreline)
- Μη γραμμική αλληλεπίδραση κυμάτων (non-linear wave-wave interaction)
- Διασπορά συχνοτήτων (frequency spreading)
- Κατευθυντική διασπορά (directional spreading)

Επιπρόσθετα πρέπει να σημειωθεί ότι η διασπορά συχνοτήτων και κατευθύνσεων γίνεται με γραμμική υπέρθεση (Linear superposition). Συνεπώς προβλήματα όπως ομαδοποίηση κυμάτων (wave grouping), «surf beats», δημιουργία δεσμευμένων χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων (generation of sub- and super- harmonics) και τριαδικών αλληλεπιδράσεων συντονισμού (near-resonant triad interactions) μπορούν να εξεταστούν μέσω του ΜΙΚΕ21 BW. Ακόμα και λεπτομέρειες όπως η γένεση και η απελευθέρωση ταλαντώσεων χαμηλών συχνοτήτων λόγω μετασχηματισμού του αρχικού κύματος περιγράφονται αρκετά ικανοποιητικά από το μοντέλο.

Η θραύση των κυμάτων εφαρμόζεται βάσει της υπόθεσης «επιφανειακού κυλίνδρου» για κυματισμούς τύπου κυλίσεως (spilling), και περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 4.4 (Σχήμα 5-2). Η κινούμενη της ακτογραμμή (moving shoreline) βασίζεται στην παρακάτω προσέγγιση: η εξεταζόμενη περιοχή επεκτείνεται τεχνητά με την αντικατάσταση του στερεού ορίου της ακτής με μία διαπερατή ζώνη με πολύ μικρό πορώδες. Κοντά στην κινούμενη ακτογραμμή η θαλάσσια επιφάνεια εισχωρεί στον πορώδη πυθμένα. Συνακόλουθα η στιγμιαία θέση της ακτογραμμής καθορίζεται από αυτήν την αλληλεπίδραση.



**Σχήμα 5-2: Εικόνα από ομοίωμα BW (2DH) με προσομοίωση της θραύσης. Οι επιφανειακοί κύλινδροι απεικονίζονται με τον λευκό αφρό. (Πηγή: User Guide MIKE by DHI)**

Το 1DH BW επιλύει τις βελτιωμένες εξισώσεις τύπου Boussinesq (Madsen et al 1997) μέσω μίας μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων Galerkin με πεπλεγμένη παρεμβολή των μεταβλητών σε εναλλασσόμενο ή μη εναλλασσόμενο κানাβο. Μέσω αυτού του μοντέλου μπορούν να προσομοιωθούν η δυναμική της ζώνης θραύσης και οι μεταβολές στη ζώνη διαβροχής (swash zone) για οποιοδήποτε παράκτιο προφίλ. Επίσης αναπαράγει τα περισσότερα συνδυαστικά φαινόμενα στην παράκτια ζώνη όπως και η 2DH έκδοση. Οι εξισώσεις στις οποίες καταλήγουμε εμπεριέχουν όρους μόνο με δεύτερης τάξης διαφορικά όσο αφορά στις χωρικές συντεταγμένες (Sørensen et al., 2004).

### 5.3 Βασικές εξισώσεις

Το MIKE21 BW (User Guide MIKE by DHI) επιλύει τις τροποποιημένες εξισώσεις τύπου Boussinesq σε μία ή δύο διαστάσεις ως προς την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας  $\zeta$  και ως προς τις κατά το βάθος ολοκληρωμένων συνιστωσών ταχύτητας,  $P$  και  $Q$ .

Το σύστημα εξισώσεων για το 2DH BW είναι:

⇒ **Εξίσωση συνέχειας:**

$$n \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (5.1)$$

⇒ **Εξίσωση ποσότητας κίνησης (ορμής) κατά x:**

$$n \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial \left( \frac{P^2}{h} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left( \frac{PQ}{h} \right)}{\partial y} + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + F_x n^2 g h \frac{\partial \zeta}{\partial x} +$$

$$+ n^2 P \left[ \alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right] + \frac{g P \sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2 C^2} + n \Psi_1 = 0 \quad (5.2)$$

⇒ **Εξίσωση ποσότητας κίνησης κατά y:**

$$n \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left( \frac{Q^2}{h} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left( \frac{PQ}{h} \right)}{\partial x} + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + F_y n^2 g h \frac{\partial \zeta}{\partial y} +$$

$$+ n^2 P \left[ \alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right] + \frac{g Q \sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2 C^2} + n \Psi_2 = 0 \quad (5.3)$$

όπου οι όροι διασποράς  $\Psi_1$  και  $\Psi_2$  δίνονται από τις ακόλουθες εκφράσεις:

$$\Psi_1 \equiv - \left( B + \frac{1}{3} \right) d^2 (P_{xxt} + Q_{xyt}) - n B g d^3 (\zeta_{xxx} + \zeta_{xyy}) -$$

$$- d d_x \left( \frac{1}{3} P_{xt} + \frac{1}{6} Q_{yt} + n B g d (2\zeta_{xx} + \zeta_{yy}) \right) - d d_y \left( \frac{1}{6} Q_{xt} + n B g d \zeta_{xy} \right) \quad (5.4)$$

$$\Psi_2 \equiv - \left( B + \frac{1}{3} \right) d^2 (P_{xyt} + Q_{yyt}) - n B g d^3 (\zeta_{yyy} + \zeta_{xxy}) -$$

$$- d d_y \left( \frac{1}{3} Q_{yt} + \frac{1}{6} P_{xt} + n B g d (2\zeta_{yy} + \zeta_{xx}) \right) - d d_x \left( \frac{1}{6} P_{yt} + n B g d \zeta_{xy} \right) \quad (5.5)$$

Οι δείκτες  $x, y$  και  $t$  υποδηλώνουν μερική διαφορίση αναφορικά με το χώρο και το χρόνο αντίστοιχα.

Λίστα συμβόλων:

$P$ : πυκνότητα ροής κατά  $x$  σε  $m^3/(msec)$

$Q$ : πυκνότητα ροής κατά  $y$  σε  $m^3/(msec)$

$B$ : Boussinesq όρος διασποράς

$F_x$ : όρος οριζόντιας τάσης κατά  $x$

$F_y$ : όρος οριζόντιας τάσης κατά  $y$

$x, y$ : καρτεσιανές συντεταγμένες

$t$ : χρόνος σε  $sec$

$h$ : συνολικό βάθος ( $h=d+\zeta$ )

$d$ : βάθος μέσης στάθμης ηρεμίας

$g$ : επιτάχυνση βαρύτητας

$n$ : πορώδες

$C$ : αριθμός αντίστασης Chezy σε  $m^{1/2}/sec$

$a$ : συντελεστής αντίστασης για στρωτή ροή σε πορώδες μέσο

$\beta$ : συντελεστής αντίστασης για τυρβώδη ροή σε πορώδες μέσο

$\zeta$ : ανύψωση θαλάσσιας επιφάνειας πάνω από σημείο αναφοράς σε  $m$

Οι όροι οριζόντιας τάσης περιγράφονται με τη χρήση μιας σχέσης κλίσης της τάσης (gradient-stress) η οποία δίνει:

$$F_x = - \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( v_t \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_t \left( \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial Q}{\partial x} \right) \right) \right] \quad (5.6)$$

$$F_y = - \left[ \frac{\partial}{\partial y} \left( v_t \frac{\partial Q}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_t \left( \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial y} \right) \right) \right] \quad (5.7)$$

Όπου το  $v_t$  είναι η οριζόντια τυρβώδης συνεκτικότητα.

Οι όροι  $R_{xx}$ ,  $R_{xy}$ , και  $R_{yy}$  αναφέρονται στην επίδραση του «επιφανειακού κυλίνδρου» και για αυτό αναλύονται διεξοδικότερα στην επόμενη υποενότητα.

Αντίστοιχα το σύστημα εξισώσεων για το ΜΙΚΕ 21 BW 1DH είναι:

**Εξίσωση συνέχειας:**

$$n \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} = 0$$

(4.8)

**Εξίσωση ποσότητας κίνησης κατά x:**

$$n \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial \left( \frac{P^2}{h} \right)}{\partial x} + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + n^2 g h \frac{\partial \zeta}{\partial x} - n \left( B + \frac{1}{3} \right) d^2 \frac{\partial^3 P}{\partial x \partial x \partial x} - \frac{1}{3} d \frac{\partial d}{\partial x} \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t} - n^2 B g d^2 \frac{\partial w}{\partial x} + n^2 P \left( \alpha + \beta \frac{|P|}{h} \right) + \frac{g P |P|}{h^2 C^2} = 0$$

(4.9)

$$w = \frac{\partial}{\partial x} \left( d \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right)$$

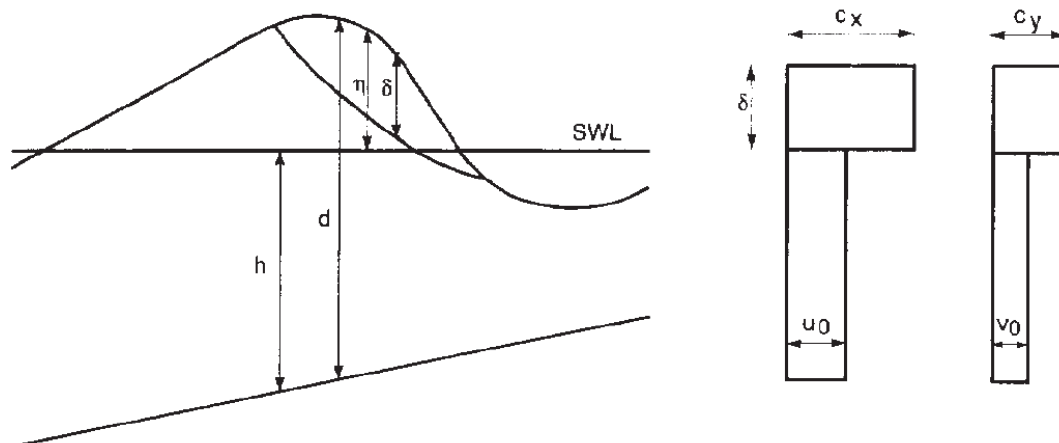
(4.10)

Είναι φανερό ότι οι παραπάνω εξισώσεις περιέχουν χωρικά διαφορικά μέχρι 2ης τάξης.

**5.4 Θραύση κυματισμών (Madsen et al. 1997)**

Μια μέθοδος για την προσομοίωση της απώλειας ενέργειας λόγω θραύσης, στα μοντέλα Boussinesq, είναι ο «επιφανειακός κύλινδρος» (surface roller). Η αρχή στην οποία βασίζεται η τεχνική του επιφανειακού κυλίνδρου είναι η αλλαγή στην κατακόρυφη κατανομή της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5-3. Θεωρώντας αυτό το προφίλ ταχύτητας να ισχύει κατά τη θραύση εξάγονται οι εξισώσεις (5.1), (5.2) και (5.3) (§5.3).





**Σχήμα 5-3: Κάθετο προφίλ οριζόντιας ταχύτητας θραυόμενου κυματισμού (Madsen et al. 1997).**

Οι όροι  $R_{xx}$ ,  $R_{xy}$ , και  $R_{yy}$  αντιστοιχούν στην επιπρόσθετη ορμή η οποία προκύπτει από την ανομοιόμορφη κατανομή της ταχύτητας λόγω της παρουσίας του επιφανειακού κυλίνδρου (surface roller) και ορίζονται ως:

$$R_{xx} = \frac{\delta}{1 - \delta/d} \left( c_x - \frac{P}{d} \right)^2 \quad (5.10)$$

$$R_{xy} = \frac{\delta}{1 - \delta/d} \left( c_x - \frac{P}{d} \right) \left( c_y - \frac{Q}{d} \right) \quad (5.11)$$

$$R_{yy} = \frac{\delta}{1 - \delta/d} \left( c_y - \frac{Q}{d} \right)^2 \quad (5.12)$$

Εδώ  $\delta = \delta(x, y, t)$  είναι το πάχος του επιφανειακού κυλίνδρου και  $c_x$ ,  $c_y$  οι συνιστώσες της ταχύτητας φάσης του.

Η επιλογή της ταχύτητας φάσης του επιφανειακού κυλίνδρου βασίζεται στην μεθοδολογία του Sørensen et al. (2004) και στην ακόλουθη μέθοδο εκτίμησης της ταχύτητας:

$(c_x, c_y) = (c \cdot \cos \theta, c \cdot \sin \theta)$  και  $c = \sqrt{v}$ . Χρησιμοποιώντας σαν συντελεστή  $f_v = 1.00$  παίρνουμε την σχέση για ρηχά νερά της γραμμικής θεωρίας. Η προσέγγιση είναι καλή μέχρι λίγο πριν τη ζώνη θραύσης, όπου το ΜΙΚΕ21 BW έχει προεπιλεγμένη τιμή  $f_v = 1.30$ . Η μετάβαση από 1.00 σε

1.30 γίνεται βάσει μιας εκθετικής συνάρτησης χρόνου (για περισσότερες λεπτομέρειες, Sørensen et al. , 2004).

Για την διεύθυνση  $\theta$  της ταχύτητας του επιφανειακού κυλίνδρου το ΜΙΚΕ21 BW παρέχει 2 επιλογές:

- Τύπος ταχύτητας 1, όπου η διεύθυνση της ταχύτητας επιλέγεται διαδραστικά από το κυματικό πεδίο.
- Τύπος ταχύτητας 3, όπου η διεύθυνση της ταχύτητας επιλέγεται βάσει της διεύθυνσης του κυματισμού.

## 5.5 Οριακές συνθήκες

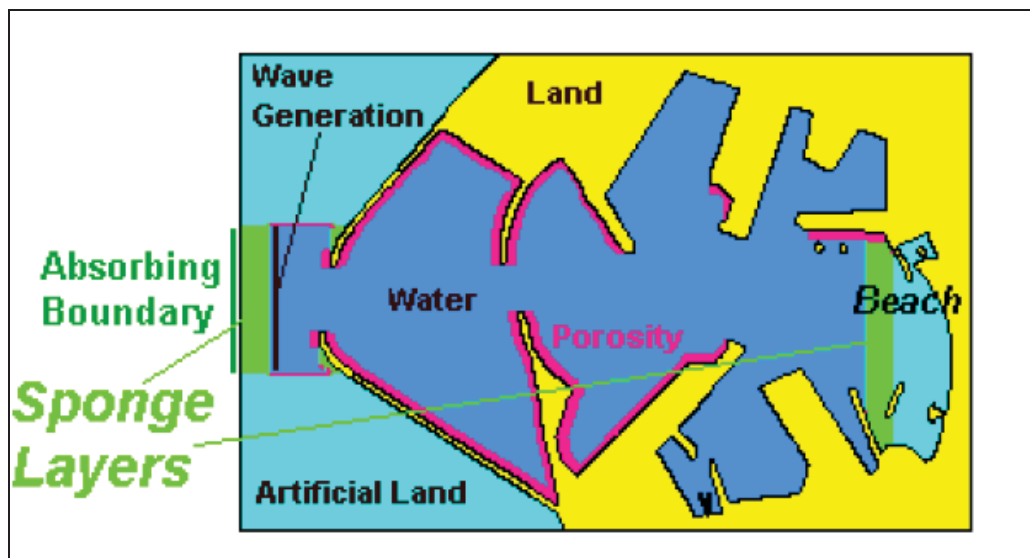
Στο ΜΙΚΕ21 BW οι συνθήκες στα όρια του πεδίου προσομοιώνονται με τη μέθοδο των στοιβάδων απορρόφησης ενέργειας ( sponge - absorbing layers), και με τα όρια γένεσης κυματισμών . Η διαδικασία προσθήκης απορροφητικών ορίων στο πεδίο συνίσταται στην ανάθεση σε έναν αριθμό κελιών του υπολογιστικού πεδίου, στις περιοχές ορίου, τις κατάλληλες συνθήκες ακτινοβολίας οι οποίες απομειώνουν σταδιακά μέρος ή όλη την ενέργεια του κυματικού πεδίου που διαδίδεται προς αυτές τις περιοχές από το χώρο προσομοίωσης, ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζουν μικρή ή μηδενική ανάκλαση.

Η επόμενη σχέση δίνει την τιμή του συντελεστή απομείωσης για πλήρως απορροφητικά όρια (sponge layers):

$$C_{\text{sponge}} = a^{(r-1)}, \quad i=1, N_{\text{sponge}} \quad (5.13)$$

Όπου  $a, r$  είναι σταθερές προς προσδιορισμό και  $N_{\text{sponge}}$  ο αριθμός των γραμμών απορρόφησης.

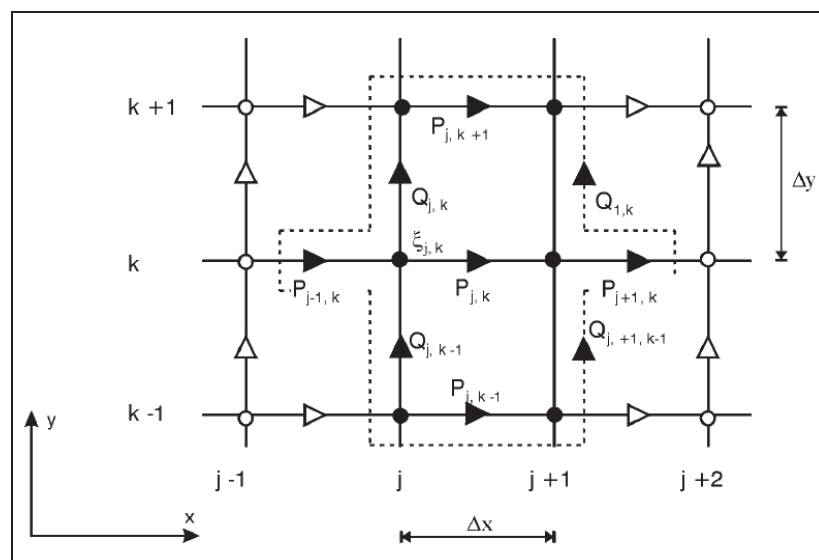
Η γραμμή γένεσης των κυματισμών τοποθετείται συνήθως μπροστά από απορροφητικές στοιβάδες στο όριο από το οποίο θεωρούμε ότι εισάγεται το κυματικό πεδίο σε οποιαδήποτε κατεύθυνση ως προς το χώρο προσομοίωσης, όπως φαίνεται σχηματικά στο παρακάτω



Σχήμα 5-4: Παράδειγμα εφαρμογής οριακών συνθηκών(απορροφητικών ορίων- sponge layers) σε κάποια περιοχή προσομοίωσης. (Πηγή: User Guide MIKE by DHI)

## 5.6 Αριθμητικό σχήμα επίλυσης

Η αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιείται στο 2DH BW βασίζεται στο αποκαλούμενο SYSTEM21 σχήμα, το οποίο προτάθηκε από τους Abbott et al. (1973) και επεκτάθηκε για προσομοίωση βραχέων κυμάτων από τους Abbott et al. (1978). Από τότε το εύρωστο αυτό σχήμα έχει υποστεί συνεχή βελτίωση (Madsen et al., 1991; Madsen and Sørensen, 1992). Οι διαφορετικές εξισώσεις διακριτοποιούνται χωρικά σε ορθογωνικό κανάβο σταθερού βήματος. Τα βαθμωτά μεγέθη, όπως η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, ορίζονται στους κόμβους του κανάβου, ενώ οι συνιστώσες της ροής ορίζονται στο μέσο γειτονικών κόμβων (επί των πλευρών βρόχων) όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-5.



**Σχήμα 5-5: Απεικόνιση κανάβου για το 2DH BW στο επίπεδο  $x, y$ . (Πηγή: User Guide MIKE by DHI)**

Η ολοκλήρωση στο χρόνο γίνεται χρησιμοποιώντας ένα πεπλεγμένο κεντρικό σχήμα. Ο αλγόριθμος είναι εναλλασσόμενης διεύθυνσης (Alternating Direction Implicit -ADI), με τις τεχνικές «fractional step» και «side-feeding». Το τελικό τρισδιαγώνιο σύστημα εξισώσεων λύνεται με τον διαδεδομένο αλγόριθμο διπλής σάρωσης (double-sweep).

Η χρήση στο 1DH BW module πρωτόλειας μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση των μονοδιάστατων εξισώσεων μπορούν να αποδώσει σοβαρά σφάλματα ειδικά όταν εφαρμόζονται ίσης τάξης συναρτήσεις παρεμβολής για τον υπολογισμό των παροχών και της ανύψωσης. Για την λήψη σταθερών λύσεων χωρίς διακυμάνσεις χρησιμοποιείται μικτή παρεμβολή. Στοιχεία με τετραγωνικές παροχές και γραμμική ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας καθώς και επιπρόσθετοι όροι εφαρμόζονται σε αυτή την κατεύθυνση. Η χρονική ολοκλήρωση γίνεται μέσω ενός ρητού Taylor-Galerkin τριών βημάτων ή μέσω μιας τέταρτης τάξης μεθόδου πρόβλεψης-διόρθωσης (predictor-corrector) Adams-Bashforth-Moulton. Ένα σετ τριών γραμμικών εξισώσεων πρέπει να επιλυθεί. Για μικρά προβλήματα αυτά τα συστήματα επιλύονται με απαλοιφή κατά Gauss. Για πιο μεγάλα συστήματα πρέπει να εφαρμόζονται πιο χρονοβόρες μέθοδοι, όπως η Krylov επαναληπτική μέθοδος (GMRES) σε συνδυασμό με μία επαρκή προϋπόθεση (μια ημιτελή LU παραγοντοποίηση) όπως περιγράφεται αναλυτικά από τους Sørensen et al.

(2004). Οι εκδόσεις του ΜΙΚΕ21 ΒW μεταγενέστερα του 2004, υποστηρίζουν σταθερό και μεταβαλλόμενο πλέγμα (mesh) για μέγιστο βαθμό προσαρμοστικότητας.

**ΜΕΡΟΣ 4: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΜΙΚΕ 21 ΒW**

---

## 6. Περιοχή μελέτης – δεδομένα

### 6.1 Γενικά

Στην παρούσα εργασία, όπως έχει ήδη αναφερθεί, γενικός στόχος είναι να μελετηθεί η πιθανότητα στερεομεταφοράς στο εσωτερικό της μαρίνας. Για την προσομοίωση, θεωρούνται τυχαίοι σύνθετοι κυματισμοί με δεδομένα τη ρίζα του μέσου τετραγωνικού ύψους κύματος  $H_{rms}$ , την περίοδο αιχμής  $T_p$  και τη μέση γωνία διεύθυνσης  $\theta$ . Στην παρούσα εργασία επιλέγονται δύο κυματικά σενάρια τα οποία παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Επισημαίνεται ότι οι γωνίες είναι μετρημένες ως προς τον θετικό ημίξονα  $x$  του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων και ότι η πρώτη γωνία διεύθυνσης  $\theta=45^\circ$  θεωρείται η δυσμενέστερη περίπτωση ως προς την ένταση του δημιουργηθέντος κυματογενούς ρεύματος. Επίσης, παρά το γεγονός ότι δεν αποτελούν πραγματικές μετρήσεις κάποιας παράκτιας περιοχής, τα δεδομένα είναι προσαρμοσμένα στον ελληνικό χώρο.

**Πίνακας 6-1: 1 Κυματικά σενάρια**

Κυματικό Σενάριο	$H_{rms}$ (m)	$T_p$ (s)	$\theta$ (°)
Πρώτο	2	6	10
Δεύτερο	2.5	6.5	45

### 6.2 Σχεδιασμός παράκτιας περιοχής

Η περιοχή μελέτης δεν αποτελεί κάποιο πραγματικό παράδειγμα αλλά είναι μια απλουστευμένη φανταστική περιοχή που σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα AutoCad. Στο παρόν εδάφιο, περιγράφεται ο σχεδιασμός της βαθυμετρίας και των διατάξεων. Σημειώνεται, ότι για τα λογισμικά που περιγράφουν τις διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στην παράκτια ζώνη, ο καθορισμός της βαθυμετρίας αποτελεί το σημαντικότερο παράγοντα για την επιτυχία του μοντέλου. Πρέπει να υπάρχουν επαρκή στοιχεία για τα βάθη της παράκτιας περιοχής. Πέραν αυτού, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η εκλογή των

κατάλληλων διαστάσεων της περιοχής μελέτης οι οποίες πρέπει να είναι επαρκείς ώστε να μπορεί να καταστεί δυνατή η καταγραφή όλων των εξεταζόμενων φυσικών διεργασιών.

### **6.3 Σχεδιασμός βαθυμετρίας**

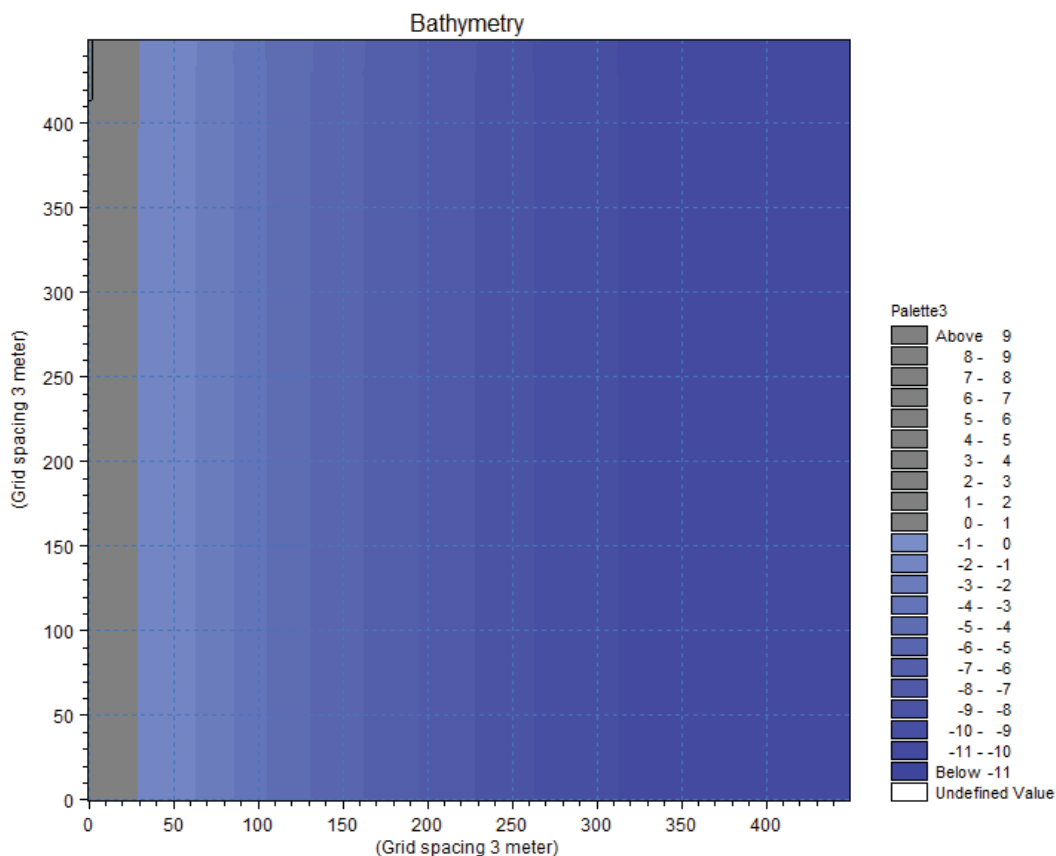
Στην εξεταζόμενη περιοχή, ο πυθμένας είναι επίπεδος, με κλίση περίπου 5%, ενώ το μέγιστο βάθος φτάνει τα 10m.

Οι ισοβαθείς είναι ευθύγραμμες και παράλληλες μεταξύ τους. Επίσης, η ακτή είναι ευθύγραμμη και παράλληλη προς τις ισοβαθείς. Αρχικά, σχεδιάζονται οι ισοβαθείς με χρήση του λογισμικού AutoCad 2011 ανά 1m βάθος. Στη συνέχεια, και με χρήση εφαρμογής, εξάγονται οι συντεταγμένες (x,y) των σημείων που αποτελούν τις ισοβαθείς. Μετά από κατάλληλη επεξεργασία στο πρόγραμμα Microsoft Excel, τα σημεία μετατρέπονται σε αρχεία (x,y,z) τριών διαστάσεων με τη μεταβλητή z να δηλώνει το βάθος τους. Πλέον, τα σημεία είναι έτοιμα να εισαχθούν στο λογισμικό προσομοίωσης Mike 21. Σημειώνεται ότι στο παρόν κεφάλαιο αναφέρεται μόνο η προεργασία που αφορά το σχεδιασμό της περιοχής μελέτης. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στο Mike21, αυτό γίνεται με την επιλογή Bathymetries του Mike Zero, στην οποία, αφού καθοριστεί το μέγεθος της περιοχής μελέτης, εισάγονται τα αρχεία .xyz που έχουν κατασκευαστεί.

Εν συνεχεία, κατασκευάζεται ο κানাβος του μοντέλου, που στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε να είναι διάστασης 3m (στην οριζόντια και στην κατακόρυφη διεύθυνση). Αυτό έγινε με βάση τις απαιτήσεις του προγράμματος, οι οποίες θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

Το δημιουργηθέν αρχείο βαθυμετρίας .Batsf δημιουργεί τιμές βάθους για όλα τα κελιά. Αυτό γίνεται δια μέσου του προγράμματος με παρεμβολή των τιμών βάθους που έχουν ήδη εισαχθεί. Η τελική βαθυμετρία που θα χρησιμοποιηθεί στη μελέτη φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η ισοδιάσταση των ισοβαθών είναι ανά μέτρο, ενώ με γκρι χρώμα απεικονίζεται η στεριά.





**Σχήμα 6-1: Βαθυμετρία περιοχής μελέτης**

#### 6.4 Διατάξεις μαρίνων –εναλλακτικά σενάρια

Οι πέντε διατάξεις μαρίνων έχουν σχεδιαστεί με βάση διερεύνηση της κατασκευής ελληνικών μαρίνων με αντίστοιχη ικανότητα ελλιμενισμού, επιφάνεια και πλάτος ανοίγματος εισόδου. Έγινε προσπάθεια να διαφέρουν μεταξύ τους ως προς το σχεδιασμό, ώστε να διερευνηθεί η επίδραση αυτού στη στερεομεταφορά. Οι πέντε διατάξεις (Σχήμα 3.5) σχεδιάστηκαν ώστε να έχουν ίδιο πλάτος ανοίγματος εισόδου 40m, περίπου ίδια επιφάνεια και ικανότητα ελλιμενισμού. Το πλάτος σχεδιασμού της μαρίνας είναι 10m και το βάθος είναι 4m σταθερό καθ' όλη την επιφάνεια των μαρίνων. Για την παρούσα θεωρήθηκε ότι το κάθε σκάφος καταλαμβάνει 5 m κρηπιδώματος, το μέγιστο κατασκευαστικό ύψος των σκαφών φτάνει τα 2m και η πληρότητα των μαρίνων αγγίζει το 80%.

**Πίνακας 6-2: Κατασκευαστικά στοιχεία διατάξεων μαρίνων**

Διατάξεις μαρίνων	Πλάτος ανοίγματος (m)	Επιφάνεια (m <sup>2</sup> )	Περίμετρος (m)	Ικανότητα Ελλιμενισμού (Σκάφη)
<b>Διάταξη 1</b>	40.00	44000.00	700.00	~135
<b>Διάταξη 2</b>	40.00	34150.00	663.00	~120
<b>Διάταξη 3</b>	40.00	31416.00	628.00	~110
<b>Διάταξη 4</b>	40.00	36000.00	730.00	~115
<b>Διάταξη 5</b>	42.00	34487.50	677.78	~120

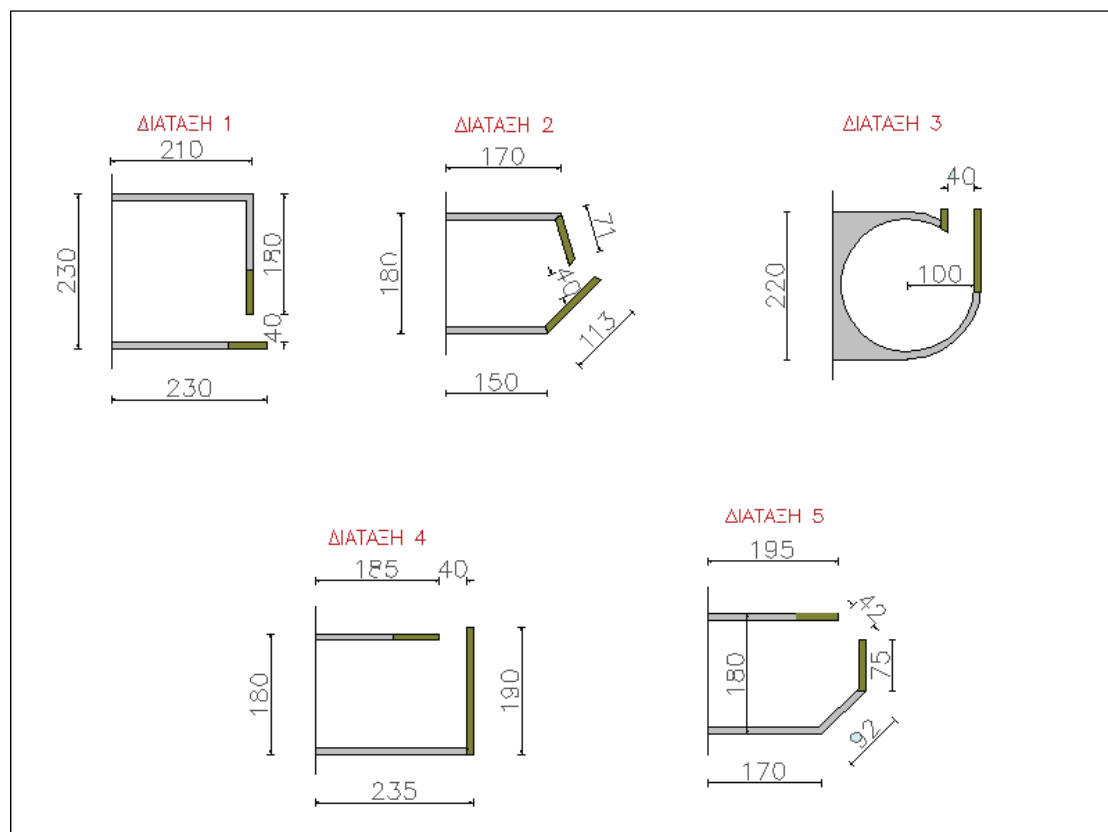
Όσον αφορά το σχεδιασμό τους, αξίζει να αναφερθούν τα παρακάτω:

- η είσοδος είναι παράλληλη προς τις ισοβαθείς στη διάταξη 1, κάθετη στις διατάξεις 3 και 4, ενώ στις διατάξεις 2 και 5 τα σκάφη εισέρχονται υπό γωνία.
- για να επιτευχθούν οι απαιτήσεις σχεδιασμού που προαναφέρθηκαν χρειάζεται να γίνουν επιπλέον εκσκαφές κοντά στην περιοχή της εισόδου για την κατασκευή των διατάξεων 2, 3 και 4. Αυτό χρειάζεται όταν στις περιοχές αυτές υπάρχουν βάθη λίγο μικρότερα των 4m προκειμένου να μην υπάρχει πρόβλημα κατά την είσοδο των σκαφών στη μαρίνα.

Όσον αφορά τη διάταξη των μαρίνων σε σχέση με τα κυματικά σενάρια, παρατηρείται ότι :

- η διάταξη 1 δεν είναι προστατευμένη ως προς τους επικρατούντες κυματισμούς. Αυτό έχει γίνει για να εξεταστεί κατά το δυνατό η δυσμενέστερη περίπτωση.
- το προαναφερθέν γεγονός συμβαίνει εν μέρει για τις διατάξεις 2 και 5, ενώ η 3 και 4 είναι προστατευμένες.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι διατάξεις διαστασιολογημένες όπως σχεδιάστηκαν αρχικά στο πρόγραμμα AutoCad.



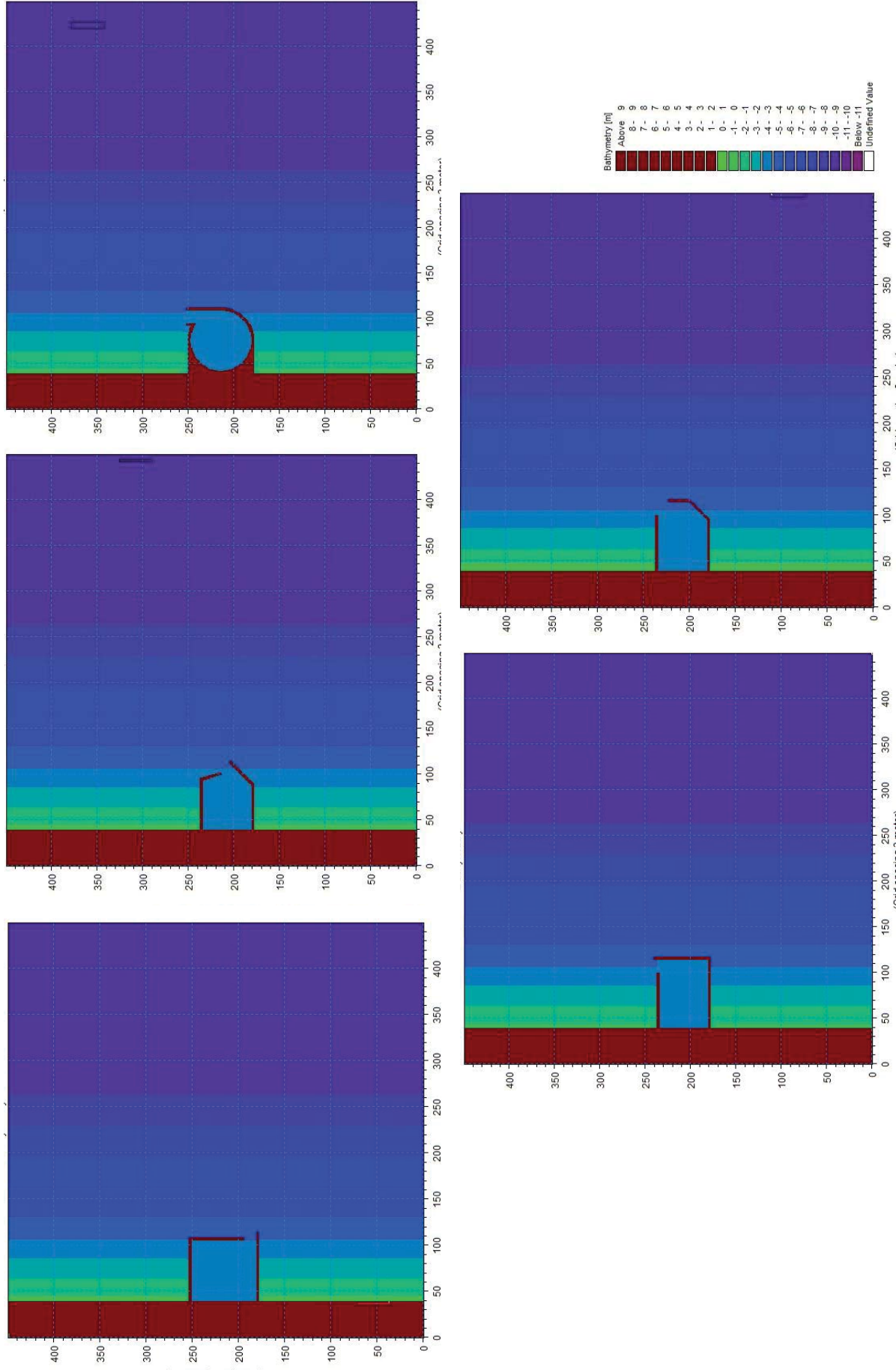
**Σχήμα 6-2: Διατάξεις μαρίνων**

Οι διατάξεις σχεδιάζονται κατά το δυνατό στο μέσο της περιοχής. Τούτο έγινε μετά από δοκιμές και διαφορετικές πιθανές θέσεις κατασκευής της μαρίνας καθ' ύψος αυτής. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο σχεδιασμός της παράκτιας περιοχής, η επιλογή του κανάβου αλλά ακόμη και η σωστή τοποθέτηση του λιμενικού έργου στο μοντέλο είναι μείζονος σημασίας για την επιτυχία της προσομοίωσης.

Στο σχήμα Σχήμα 6-2 με γκρι χρώμα φαίνονται τα τμήματα των έργων που κατασκευάζονται με κατακόρυφα μέτωπα και με κίτρινο τα τμήματα που προβλέπονται με πρανή (απορροφητικές διατάξεις). Τα πρανή προβλέπονται στην περιοχή της εισόδου και στο εξωτερικά έργα και τούτο για την δημιουργία ηπιότερων συνθηκών στο κρίσιμο τμήμα αυτό της κατασκευής, όπως είθισται να γίνεται κατά το σχεδιασμό των συνήθων λιμενικών έργων.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΜΙΚΕ 21 ΒΩ

ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ - ΔΕΛΟΜΕΝΑ



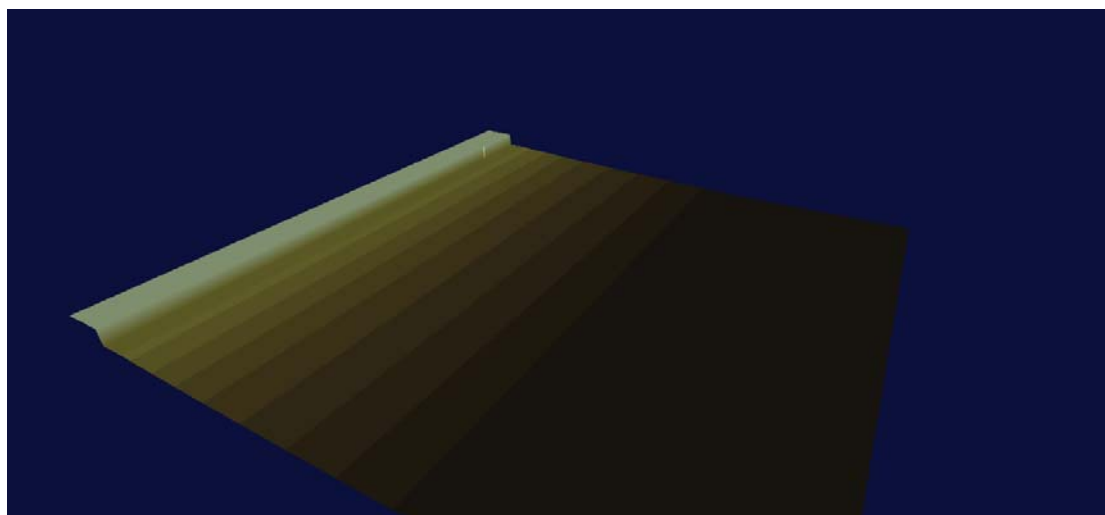
Σχήμα 6-3: Διατάξεις μαρινών στο πρόγραμμα Mike 21

## 6.5 Δεδομένα Εισόδου και Βασικές Παραδοχές

### Ψηφιακή Βυθομετρία

Το βασικότερο δεδομένο εισόδου για την κυματική προσομοίωση της περιοχής είναι η ψηφιοποιημένη βυθομετρία της.

Η περιοχή που μελετάται αφορά την περιοχή μελέτης, με τις διάφορες εναλλακτικές διατάξεις, σε κάναβο με ισοδιάσταση 3 m για το πρώτο στάδιο της εκτίμησης των κυματικών συνθηκών στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης και πυκνότερος για το δεύτερο στάδιο, ήτοι 1,5m. Η τριδιάστατη απεικόνισή της παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα:



**Σχ. 6-1 Τριδιάστατη απεικόνιση της βυθομετρίας της περιοχής μελέτης**

Σε περιοχές που δεν επηρεάζουν αποτελέσματα της μαθηματικής προσομοίωσης εισήχθη «τεχνητή» ξηρά για λόγους μείωσης του υπολογιστικού φόρτου.

### Χρονικό βήμα και διάστημα προσομοίωσης

Η κάθε προσομοίωση απαιτεί ένα ελάχιστο χρονικό διάστημα για την προώθηση των κυματισμών από την θέση της κυματογεννήτριας μέχρι την περιοχή ενδιαφέροντος και για την επίτευξη εκεί δυναμικής ισορροπίας. Ο μέγιστος χρόνος που απαιτείται για την προώθηση των κυματισμών σε όλο

το πεδίο κυμαίνεται μεταξύ 8 και 10 λεπτών. Κατά συνέπεια η συνολική διάρκεια προσομοίωσης επεκτάθηκε στα 20 λεπτά, χρόνος αρκετός και για την επίτευξη δυναμικής ισορροπίας στην περιοχή ενδιαφέροντος. Το χρονικό βήμα της προσομοίωσης ορίστηκε στα 0,09 δευτερόλεπτα, ούτως ώστε να εξασφαλίζεται ότι το κριτήριο της αριθμητικής σταθερότητας Courant είναι μικρότερο της μονάδας ( πολύ μικρότερο του 1,0 για όλες τις προσομοιώσεις).

### **Εισερχόμενοι Κυματισμοί**

Η αναπαραγωγή των κυματικών χαρακτηριστικών θεωρήθηκε ότι έγινε βάσει του ευρέως χρησιμοποιούμενου φάσματος JONSWAP ( $\gamma=3,3$ ) που προσιδιάζει καλύτερα από τα άλλα, ευρέως διαδεδομένα (PM, TMA), τις συνθήκες στην Μεσόγειο θάλασσα. Ελλείπει μετρήσεων κατευθυντικής διασποράς των κυματισμών στην περιοχή επελέγη η χρήση του νόμου της κατευθυντικής διασποράς  $\cos^n(\theta-\theta_m)$  όπου  $n=5$  και η μέγιστη απόκλιση από την μέση διεύθυνση του κυματισμού  $\theta_m=30^\circ$ .

Τα φασματικά χαρακτηριστικά των κυματισμών που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

	Κυματικό σενάριο 1	Κυματικό σενάριο 2
$H_{m0}$ (m)	2,00	2,50
$T_p$ (sec)	6,00	6,50
Γωνία (με τον άξονα x)	$10^\circ$	$45^\circ$
n	5	5
Μέγιστη απόκλιση από την μέση διεύθυνση προώθησης ( $^\circ$ )	30	30
Κυματικό Φάσμα	JONSWAP	JONSWAP

**Πίνακας 6-3 : Φασματικά χαρακτηριστικά χρησιμοποιηθέντων κυματισμών**

Στο πρώτο στάδιο της προσομοίωσης τοποθετούνται 2 κυματογεννήτριες (μια κατακόρυφη και μια βοηθητική οριζόντια) έτσι ώστε να εξασφαλιστεί

ότι τα κύματα θα φτάνουν έως την είσοδο της εκάστοτε διάταξης. Στο δεύτερο στάδιο επιλέχθηκε μεγαλύτερη περιοχή προσομοίωσης και έτσι χρησιμοποιήθηκε μία και μόνο κατακόρυφη κυματογεννήτρια.

### **Οριακές συνθήκες**

Δεδομένου ότι η γεννήτρια κυματισμών τοποθετείται εντός του μαθηματικού πεδίου, απαιτείται η τοποθέτηση απορροφητικών στοιβάδων στα όρια του ούτως ώστε τα εξερχόμενα κύματα να μην επανακλώνονται και κατά συνέπεια να αλλοιώνουν το κυματικό πεδίο. Οι στοιβάδες αυτές απαιτείται να έχουν επαρκές πλήθος για να λειτουργήσουν αποτελεσματικά. Για την επιλογή των συντελεστών απορρόφησης χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση:

$$C_{\text{sponge}} = a^{(r^{i-1})}, \quad i=1, N_{\text{sponge}}$$

όπου  $a$  και  $r$  είναι σταθερές και  $N_{\text{sponge}}$  ο αριθμός γραμμών των απορροφητικών στοιβάδων.

Οι περιοχές που τοποθετήθηκαν οι απορροφητικές στοιβάδες είναι αυτές που δεν επηρεάζουν την περιοχή ενδιαφέροντος και αποτελούν τα όρια του μοντέλου.

### **Πορώδες εξωτερικών έργων**

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, περί της εισόδου του λιμένα προβλέπεται η κατά σκευή των μώλων από έργα με πρανή προκειμένου να αποφευχθούν ανεπιθύμητα φαινόμενα λόγω ανακλάσεων των κυματισμών, τα οποία θα προκαλούσαν πληθώρα προβλημάτων κατά την προσέγγιση αλλά και τον ελλιμενισμό των χρηστών της λιμενικής εγκατάστασης. Τα τμήματα των έργων τα οποία προβλέπονται με πρανή παρουσιάζονται στο Σχήμα 6-2: Διατάξεις μαρίνων.

Για την επίτευξη πιστότερης προσομοίωσης των κυματικών συνθηκών στην περιοχή ενδιαφέροντος, τα διάφορα έργα που χωροθετούνται εντός της, μοντελοποιήθηκαν ως μερικώς ανακλαστικά στους προσπίπτοντες κυματισμούς, προσδίδοντας στο καθένα τον ανάλογο συντελεστή ανάκλασης (ή ισοδύναμα απορρόφησης της κυματικής ενέργειας). Η μεθοδολογία υπολογισμού της ανακλαστικότητας των έργων με

θωρακισμένα πρηνή βασίζεται στη μεθοδολογία Seelig (1983, C.E.M. 2006) και βασίζεται στις σχέσεις:

$$C_r = \frac{a\xi^2}{(b + \xi^2)}, \text{ με } \xi = \frac{\tan\alpha}{\sqrt{\frac{2\pi H}{gT^2}}}$$

όπου  $a$ ,  $b$  είναι συντελεστές που αφορούν το είδος της κατασκευής,  $H$  είναι το τοπικό ύψος κύματος,  $T$  είναι η περίοδος του και  $\tan\alpha$  η κλίση του πρηνούς. Για θωράκιση από φυσικούς ογκολίθους οι τιμές των  $a$ ,  $b$  που λαμβάνονται είναι 0,5 και 5 αντίστοιχα.

Τα μέτωπα των κρηπιδωμάτων στο εσωτερικό του λιμένα του εξωτερικού μώλου προσομοιώθηκαν συντηρητικά ως πλήρως ανακλαστικά.

Για την προσομοίωση της εν λόγω κατασκευής ορίζεται ανακλαστική στοιβάδα με συγκεκριμένη τιμή 0,86.

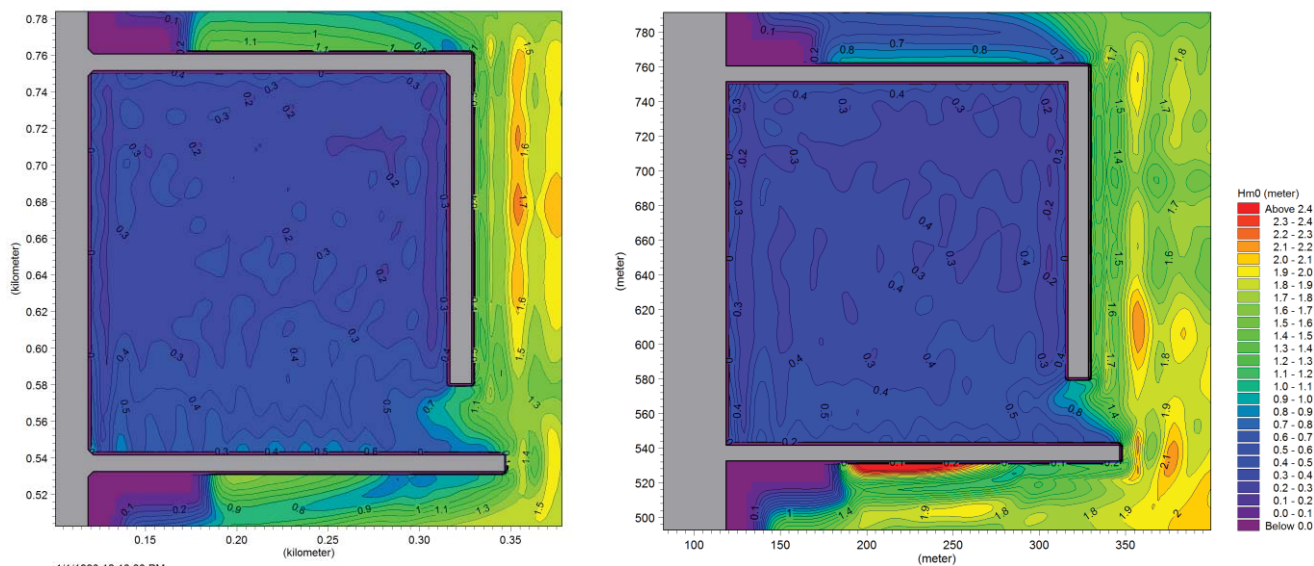


## 7. Αποτελέσματα προσομοίωσης

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων εξήχθησαν σε διδιάστατους χάρτες που περιέχουν στιγμιότυπα της διακύμανσης της ελεύθερης επιφάνειας μετά την επίτευξη της δυναμικής ισορροπίας. Οι διδιάστατοι χάρτες των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στο τέλος του παρόντος τεύχους. Η εισερχόμενη κυματική ενέργεια στον λιμένα διαφοροποιείται για την εκάστοτε διάταξη, όπως ήταν αναμενόμενο, καθώς η διάταξη της εισόδου της εκάστοτε εναλλακτικής παίζει σημαντικό ρόλο.

### 7.1 Πρώτο στάδιο – Εκτίμηση κυματικής διαταραχής στο εσωτερικό των λιμενολεκανών

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στο πρώτο στάδιο της παρούσας η προσομοίωση έγινε για όλες τις εναλλακτικές διατάξεις και για 2 κυματικά σενάρια. Η περιοχή μελέτης, με τις διάφορες εναλλακτικές διατάξεις, αναλύεται σε κানাβο με ισοδιάσταση 3 m.



1<sup>ο</sup> κυματικό σενάριο ( $H_{m0} = 2.0\text{m}$ ,  $\theta = 10^\circ$ )

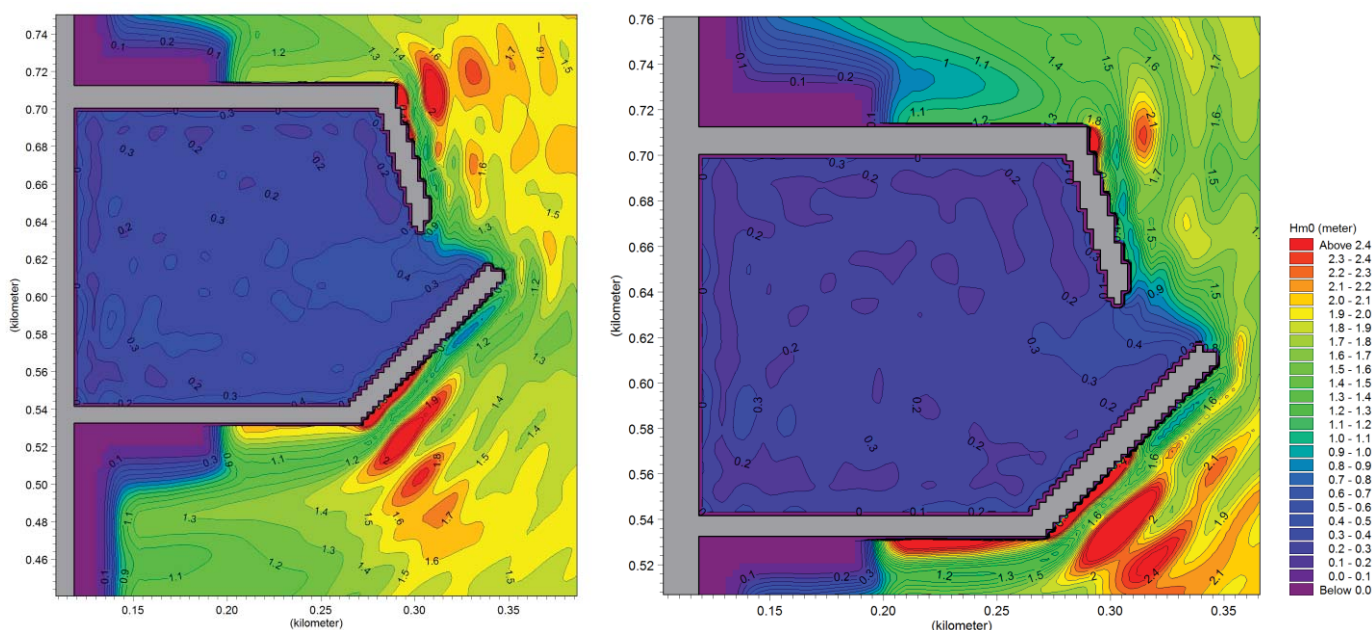
2<sup>ο</sup> κυματικό σενάριο ( $H_{m0} = 2.5\text{m}$ ,  $\theta = 45^\circ$ )

#### Εικόνα 7-1: Εναλλακτική διάταξη 1 – Αποτελέσματα κυματικής διείσδυσης

Έτσι, για την εναλλακτική διάταξη 1 οι τιμές των εισερχόμενων κυματισμών κυμαίνονται από 0,2 έως 1,0m με τα μέγιστα να παρουσιάζονται στην περιοχή της εισόδου. Ελαφρώς ενισχυμένες τιμές

παρουσιάζουν οι κυματισμοί στο 2<sup>ο</sup> κυματικό σενάριο καθώς ο προωθούμενος κυματισμός από τα βαθιά κυματισμός έχει μεγαλύτερο ύψος πλην όμως προσπίπτει στον προσήνεμο μώλο με μικρότερη γωνία (το μέτωπο του κυματισμού σχηματίζει γωνία 45° με τον οριζόντιο άξονα) περιορίζοντας έτσι το ποσοστό της κυματικής ενέργειας που εισέρχεται στη λιμενολεκάνης λόγω περίθλασης περί τον προσήνεμο μώλο.

Στην εναλλακτική διάταξη 2, οι τιμές στο εσωτερικό της και στις θέσεις πλησίον των κρηπιδωμάτων δεν ξεπερνούν τα 0,2m. Μεγαλύτερες τιμές παρουσιάζονται στην περιοχή εσωτερικά της εισόδου που φτάνουν τα 0,5m. Στην είσοδο οι συνθήκες είναι ενισχυμένες, γεγονός που είναι αναμενόμενο καθώς ο κυματισμός προσπίπτει με πολύ μικρή γωνία στον προσήνεμο μώλο και περιθλάται στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης απομειωμένος σε μικρό ποσοστό.



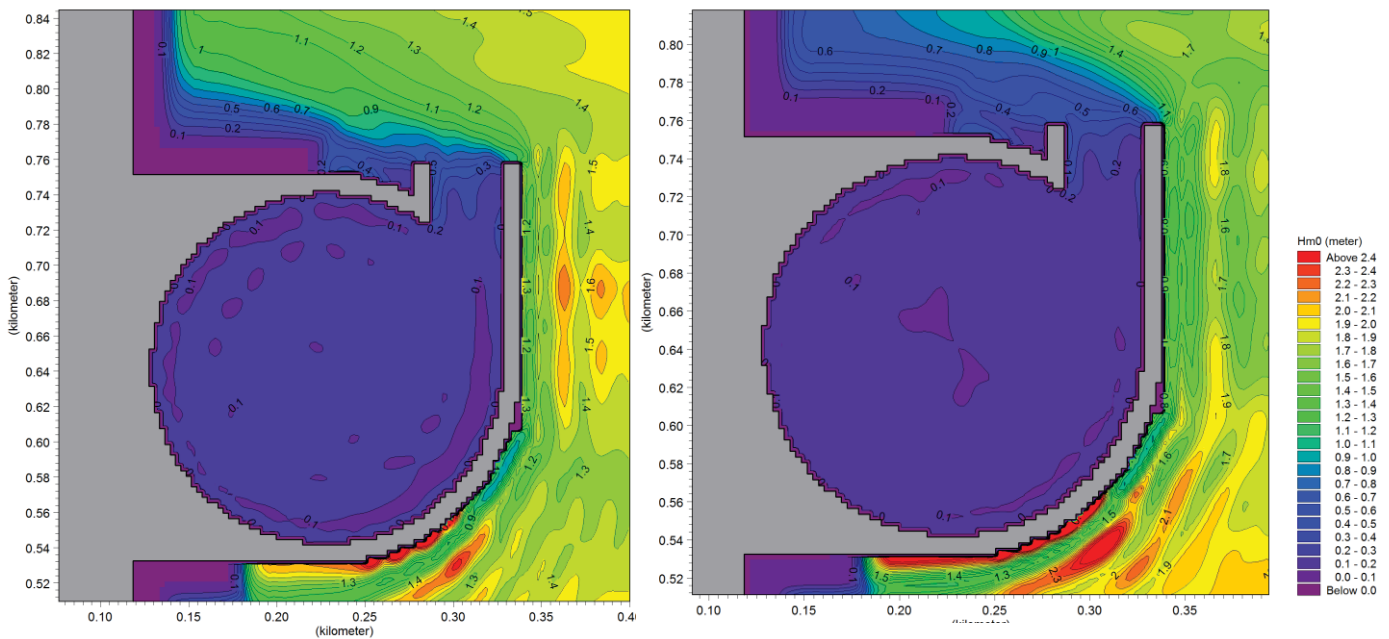
1<sup>ο</sup> κυματικό σενάριο ( $H_{m0} = 2.0\text{m}$ ,  $\theta=10^\circ$ )

2<sup>ο</sup> κυματικό σενάριο ( $H_{m0} = 2.5\text{m}$ ,  $\theta=45^\circ$ )

### Εικόνα 7-2: Εναλλακτική διάταξη 2 – Αποτελέσματα κυματικής διείσδυσης

Στην 3<sup>η</sup> διάταξη η εισερχόμενη κυματική ενέργεια είναι σχεδόν αμελητέα και το σημαντικό ύψος κύματος  $H_{m0}$  δεν υπερβαίνει την τιμή των 0,10 – 0,20 μ σε όλη την έκταση της λιμενολεκάνης. Οι υψηλότερες τιμές ύψους κύματος εμφανίζονται στην είσοδο του λιμένα αλλά οι συνθήκες μπορούν να θεωρηθούν ασφαλείς για κάθε είδους σκάφος που εξυπηρετείται εντός αυτού. Ουσιαστικά πρόκειται για τη βέλτιστη από τις 5 διατάξεις λόγω του προσανατολισμού της εισόδου της και την καμπύλης διάταξής της. Πιο η

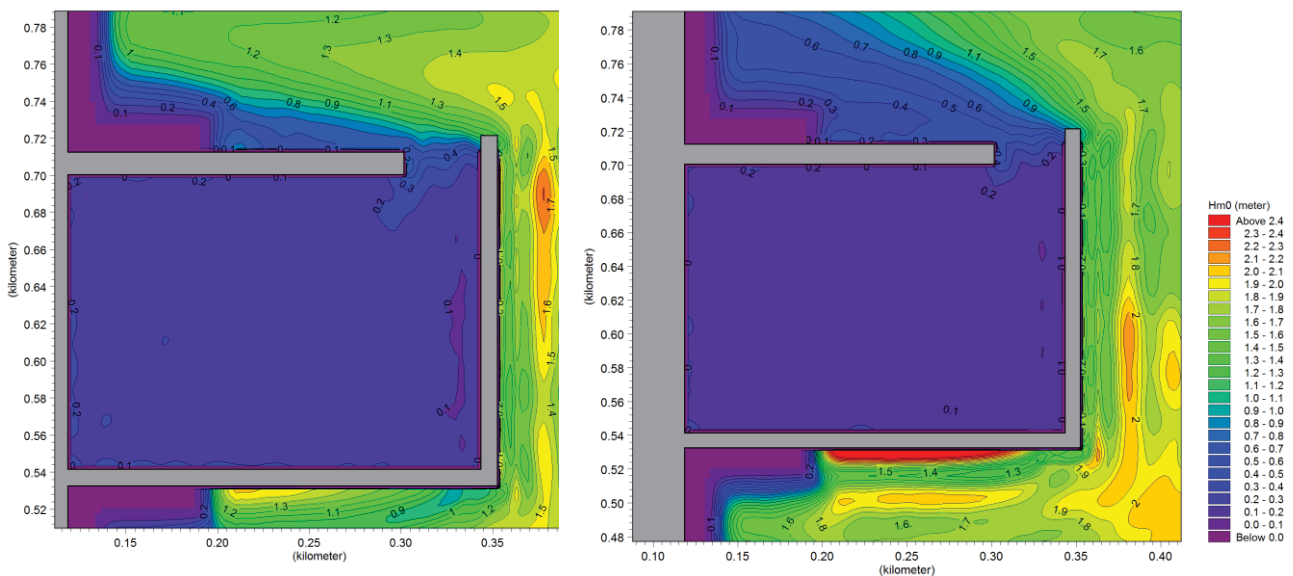
τοποθέτηση της εισόδου στην υπήνεμη ουσιαστικά πλευρά της μαρίνας την καθιστά την πλέον προστατευμένη αποτρέποντας τον κυματισμό να εισέλθει στη λιμενολεκάνη. Ταυτόχρονα το καμπύλο σχήμα των κρηπιδωμάτων στο εσωτερικό περιορίζει τα φαινόμενα ανακλάσεων και στάσιμων κυματισμών. Παρόμοια είναι και τα αποτελέσματα για την διάταξη 4, πλην όμως παρατηρούνται μικρές ενισχύσεις στις γωνίες των κρηπιδωμάτων λόγω ανακλάσεων.



1<sup>ο</sup> κυματικό σενάριο ( $H_{m0} = 2.0\text{m}$ ,  $\theta = 10^\circ$ )

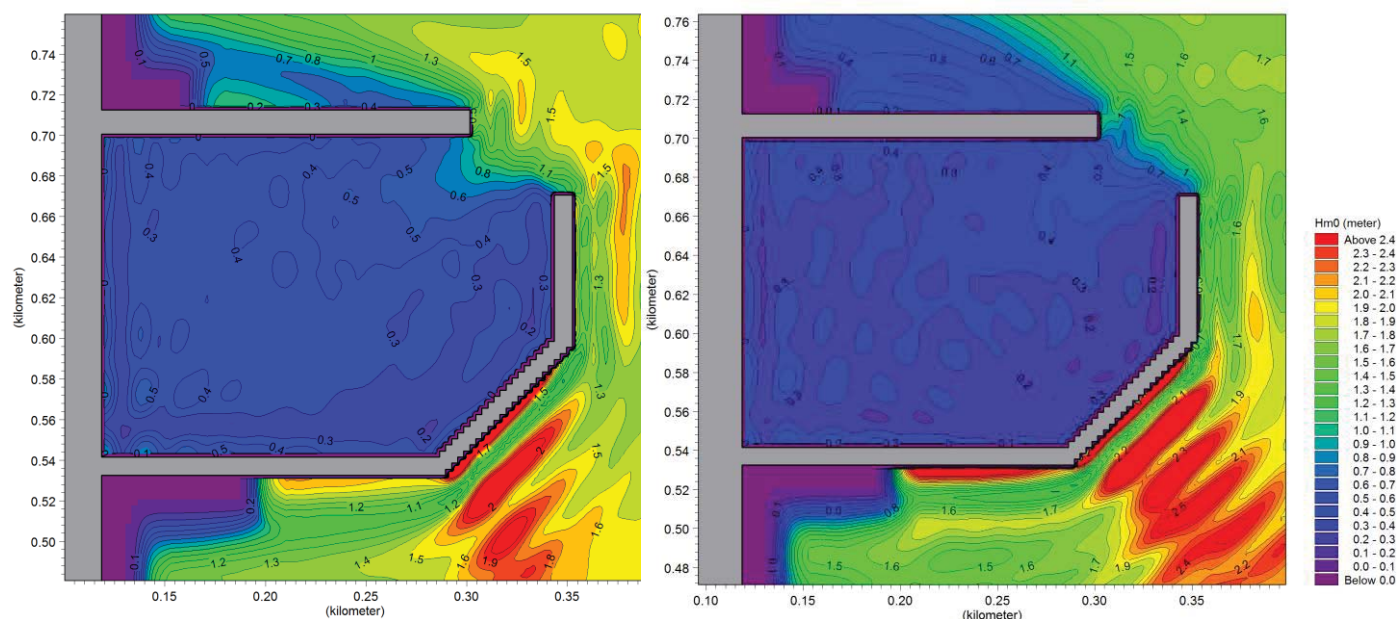
2<sup>ο</sup> κυματικό σενάριο ( $H_{m0} = 2.5\text{m}$ ,  $\theta = 45^\circ$ )

**Εικόνα 7-3: Εναλλακτική διάταξη 3 – Αποτελέσματα κυματικής διείσδυσης**



1<sup>ο</sup> κυματικό σενάριο ( $H_{m0} = 2.0m$ ,  $\theta=10^\circ$ )2<sup>ο</sup> κυματικό σενάριο ( $H_{m0} = 2.5m$ ,  $\theta=45^\circ$ )**Εικόνα 7-4: Εναλλακτική διάταξη 4 – Αποτελέσματα κυματικής διείσδυσης**

Τέλος, ενισχυμένο κυματικό πεδίο επικρατεί και στην 5<sup>η</sup> εναλλακτική διάταξη. Στην εν λόγω διάταξη οι τιμές πλησίον των κρηπιδωμάτων φτάνουν έως και τα 0,5m ενώ ενισχυμένες συνθήκες παρουσιάζονται και στην είσοδο αυτής. Τα παραπάνω οφείλονται στο γεγονός ότι ο προσήνεμος μώλος δεν έχει ικανό μήκος ώστε να παρέχει προστασία στη λιμενολεκάνη και ιδιαίτερα στην είσοδο η οποία είναι εκτεθειμένη πλήρως.

1<sup>ο</sup> κυματικό σενάριο ( $H_{m0} = 2.0m$ ,  $\theta=10^\circ$ )2<sup>ο</sup> κυματικό σενάριο ( $H_{m0} = 2.5m$ ,  $\theta=45^\circ$ )**Εικόνα 7-5: Εναλλακτική διάταξη 5 – Αποτελέσματα κυματικής διείσδυσης**

Ένα βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από τις παραπάνω προσομοιώσεις είναι ότι ο προσανατολισμός και η θέση της εισόδου μιας λιμενολεκάνης επηρεάζει σημαντικά την κυματική διείσδυση στο εσωτερικό της. Η είσοδος στην υπήνεμη πλευρά του λιμένα (διατάξεις 3 και 4) δημιουργεί καλύτερες συνθήκες στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης.

Επίσης σημαντικό ρόλο παίζει και η προστασία της ίδιας της εισόδου. Για παράδειγμα, εισοδοί όπως αυτοί της διάταξης 5, οι οποίες παρόλο που βρίσκονται στην υπήνεμη πλευρά του έργου, δεν είναι πλήρως προστατευμένες, επιτρέπουν στον κυματισμό να εισέρχεται στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης χωρίς να υφίσταται σημαντική μείωση της ενέργειάς του. Μάλιστα, με όσο μικρότερη γωνία προσπίπτει ο κυματισμός στο



προσήνεμο έργο προστασίας, (κυματικό σενάριο 1), τόσο μικρότερη μείωση υφίσταται.

Περαιτέρω, στην περίπτωση της εναλλακτικής 1, η είσοδος του λιμένα «κοιτάει» προς τα ανοιχτά γεγονός που επιτρέπει την διείσδυση του κυματισμού.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, σε όλες της παραπάνω διατάξεις έχει προβλεφθεί η κατασκευή των εξωτερικών έργων την περιοχή της εισόδου με πρανή (κατασκευή με μεγάλο πορώδες). Η παραπάνω τακτική είναι συνήθης στην κατασκευή λιμενικών έργων παγκοσμίως καθώς περιορίζονται σημαντικά τα φαινόμενα των ανακλάσεων των κυματισμών στην περιοχή της εισόδου. Επομένως, η ύπαρξη πρανών στην είσοδο της λιμενολεκάνης δρα ευεργετικά για όλες της παραπάνω διατάξεις.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των παραπάνω προσομοιώσεων σε κρίσιμες περιοχές στην εκάστοτε λιμενολεκάνη: κατά μήκος των κρηπιδωμάτων και στην περιοχή της εισόδου μεταξύ των δύο μώλων:

**Πίνακας 7-1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα τοπικού  $H_{m0}$  στο χρονικό πέρας της προσομοίωσης**

	$H_{m0}$ ΑΝΟΙΚΤΑ (m)	Τιμές στο εσωτερικό Περιοχή παραλιακών κρηπιδωμάτων (m)					Μέγιστες τιμές στην είσοδο (μεταξύ των δύο μώλων) (m)				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Κυματικό σενάριο 1	2,00	0,4-0,5	0,1- 0,2	<0,1	0,2	0,4- 0,5	0,7- 1,0	0,4- 0,9	0,3	0,4	Έως 1,2
Κυματικό σενάριο 2	2,50	0,3-0,4	<0,1	<0,1	0,1	0,4	0,8- 1,1	0,3- 0,9	0,3	0,4	Έως 1,1

Σύμφωνα με διεθνείς συστάσεις και κανονισμούς (εκτενής αναφορά έγινε στο κεφάλαιο 3.2.2 της παρούσας), προτείνονται τα ακόλουθα κριτήρια ως όρια λειτουργίας μαρινών και λιμένων μικρών σκαφών:

- PIANC 1995, Criteria for Movements of Moored Ships in Harbours-:  $H_s \leq 0.30$  m
- OCDI Technical Standards and Commentaries for Ports and Harbours Facilities In Japan-2002: max  $H_{1/3} = 0.30$  m
- Australian Standard™ AS 3962-2001 :  $H_s \leq 0.3$  m

Βάσει των ανωτέρω διεθνώς καθορισμένων ορίων κρίνεται ότι οι συνθήκες ελλιμενισμού για συνθήκες συνήθους λειτουργίας των παραπάνω λιμενικών εγκαταστάσεων, ιδιαίτερα για σκάφη αναψυχής και μικρά τουριστικά σκάφη που εμπίπτουν και σε αυστηρότερους περιορισμούς κυματικών συνθηκών λόγω του μικρότερου μεγέθους τους, είναι ικανοποιητικές στις εναλλακτικές διατάξεις 2,3 και 4 και μη ικανοποιητικές στις εναλλακτικές 1 και 5.

Από την άλλη πλευρά στις διατάξεις 1 ,2 και 5 τόσο οι υψηλοί κυματισμοί που επικρατούν στην είσοδο της λιμενολεκάνης όσο και στο εσωτερικό αυτής, δύναται να δημιουργήσουν συνθήκες μετακίνησης των ιζημάτων που θα αποτεθούν εντός της λιμενολεκάνης. Αυτή η δυνατότητα θα εξεταστεί στη συνέχεια.

## 7.2 Δυναμικό προσάμμωσης πλησίον της περιοχής της εισόδου

Οι με την παρούσα μελετούμενες διατάξεις, έχουν ελεγχθεί στο πλαίσιο παλαιότερης Μεταπτυχιακής Εργασίας (Διερεύνηση Σχεδιασμού Διάταξης Μαρinas σε Σχέση με τη Στερεομεταφορα στην Είσοδο και Προτάσεις Βελτίωσης Μαυραντωνάκης Αντ., 2013) σε σχέση με τις συνθήκες στερεομεταφοράς στην είσοδό τους. Η εν λόγω εργασία εκπονήθηκε με χρήση το υπολογιστικό πακέτο Mike DHI 21 ST και υπολογίστηκαν μεταξύ άλλων και οι ρυθμοί προσάμμωσης για τις διάφορες εναλλακτικές διατάξεις.

**Πίνακας 7-2: Αποτελέσματα μέγιστης στερεομεταφοράς  $TC_{max}$  στην περιοχή κοντά στη μαρίνα και στερεομεταφοράς  $TC$  στην περιοχή κοντά στην είσοδο αυτής για το 1ο κυματικό σενάριο(Πηγή : Μαυραντωνάκης 2013)**

Διατάξεις	$TC_{max}$ ( $m^3/yr/m$ )	$TC$ ( $m^3/yr/m$ )
<b>Διάταξη 1</b>	6272,71	<b>2000</b>
<b>Διάταξη 2</b>	2839,84	1500
<b>Διάταξη 3</b>	2598,38	900
<b>Διάταξη 4</b>	6400	900
<b>Διάταξη 5</b>	2875	1200

Για το πρώτο κυματικό σενάριο, στην περιοχή κοντά στην είσοδο η διάταξη 1 είναι η δυσμενέστερη περίπτωση με  $2000 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$ , ακολουθεί η 2 με περίπου  $1500 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$  και η διάταξη 5 με  $1200 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$ , ενώ η διάταξη 3 και η διάταξη 4 παρουσιάζουν τις μικρότερες τιμές με  $900 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$ . Αξίζει να σημειωθεί ότι οι διατάξεις 3 και 4 έχουν την είσοδό τους τοποθετημένη κάθετα στην ακτογραμμή και άρα προστατευμένη ως προς τη διεύθυνση ροής του κυματικού ρεύματος.

**Πίνακας 7-3: Αποτελέσματα μέγιστης στερεομεταφοράς  $TC_{\max}$  στην περιοχή κοντά στη μαρίνα και στερεομεταφοράς TC στην περιοχή κοντά στην είσοδο αυτής για το 2ο κυματικό σενάριο (Πηγή : Μαυραντωνάκης 2013)**

Διατάξεις	$TC_{\max}$ ( $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ )	TC ( $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ )
<b>Διάταξη 1</b>	1490,6	<b>900</b>
<b>Διάταξη 2</b>	1054	600
<b>Διάταξη 3</b>	1100,9	450
<b>Διάταξη 4</b>	1562,42	600
<b>Διάταξη 5</b>	1074	450

Όπως και στο πρώτο κυματικό σενάριο και στο δεύτερο, όσον αφορά την περιοχή εγγύς της εισόδου, η διάταξη 1 παραμένει η δυσμενέστερη περίπτωση με  $900 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$ , ενώ ακολουθούν η 2 και 4 με περίπου  $600 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$ , ενώ η διάταξη 3 και η διάταξη 5 παρουσιάζουν τους μικρότερους ρυθμούς στερεομεταφοράς με  $450 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$ .

Από τα παραπάνω προκύπτει λοιπόν ότι η διάταξη 1 είναι σαφώς η δυσμενέστερη από τις πέντε υπόλοιπες ενώ ακολουθούν οι διατάξεις 4 και 5.

Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της παραγράφου 7.1 οδηγούν στα εξής συμπεράσματα:

- Η εναλλακτική διάταξη 3 είναι η πλέον κατάλληλη διάταξη καθώς 1) επικρατούν στο εσωτερικό και στην είσοδό της ήπιες κυματικές συνθήκες χαμηλής ενέργειας που αφενός είναι κατάλληλες για τον

- ελλιμενισμό και προσέγγιση των σκαφών 2) δεν αντιμετωπίζει σημαντικά προβλήματα στερεομεταφοράς κοντά στην είσοδό της
- Η εναλλακτική διάταξη 4 παρουσιάζει σημαντικό ρυθμό προσάμμωσης στην είσοδό της κυρίως για το κυματικό σενάριο 2, πλην όμως το διαμορφωθέν κυματικό πεδίο στο εσωτερικό της και στην είσοδό της παρουσιάζει πολύ μικρές τιμές κυματικής ενέργειας, καθώς η γωνία πρόσπτωσης των κυματισμών στον προσήνεμο μώλο προστασίας είναι μεγάλη και ο προσανατολισμός της εισόδου της είναι τέτοιος ώστε είναι προφυλαγμένη από τους κυματισμούς. Ως εκ τούτου δε χρήζει περαιτέρω διερεύνησης στο επόμενο στάδιο.
  - Οι εναλλακτικές 1, 2 και 5 παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Στις 1 και 5, αφενός επικρατούν στις εισόδους τους συνθήκες έντονης προσάμμωσης (κυρίως στην 1) και αφετέρου στο εσωτερικό τους εισέρχονται υψηλά ποσοστά κυματικής ενέργειας, οπότε είναι πιθανό να εισέρχονται σε αυτές ιζήματα τα οποία δύνανται να μετακινηθούν και να τεθούν σε κίνηση στη συνέχεια. Η διάταξη 2 παρουσιάζει ηπιότερο κυματικό πεδίο στο εσωτερικό της και μικρότερες τιμές από τις παραπάνω διατάξεις στην είσοδο πλην όμως έχει υψηλό δυναμικό προσάμμωσης στην είσοδό της.

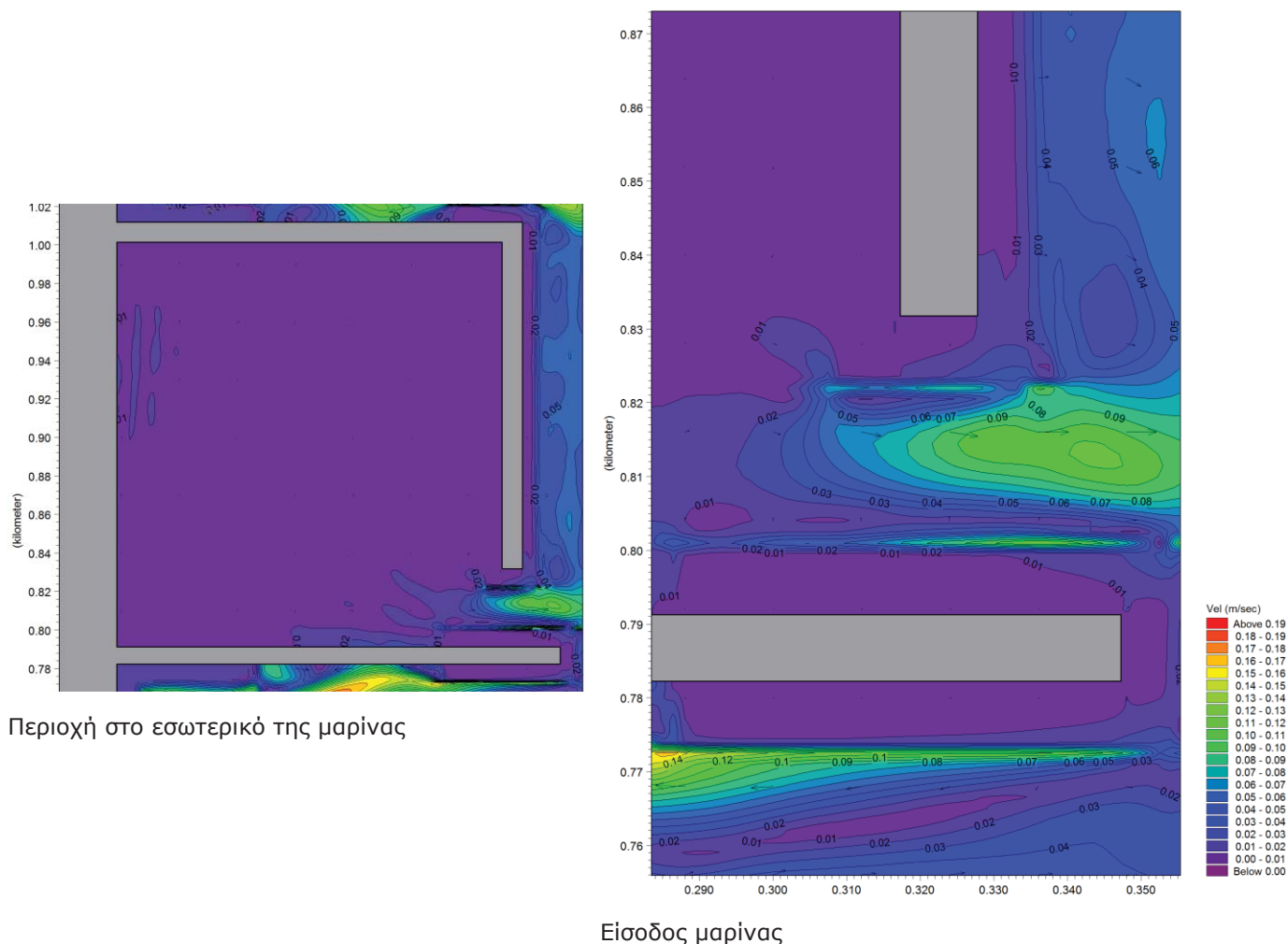
Επομένως, στη συνέχεια της παρούσας θα εξεταστούν και θα γίνει υπολογισμός του πεδίου ταχυτήτων άρα και έλεγχος για τη δυνατότητα στερεομεταφοράς για τις διατάξεις 1,2 και 5.

### **7.3 Δεύτερο στάδιο – υπολογισμός πεδίου ταχυτήτων στο εσωτερικό**

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στο δεύτερο στάδιο της παρούσας η προσομοίωση έγινε για τις δυσμενέστερες με βάση την ανάλυση που έγινε στο προηγούμενο στάδιο, εναλλακτικές διατάξεις ήτοι για την 1,2 και 5 και για 2 τα δύο κυματικά σενάρια. Η περιοχή μελέτης με τις διάφορες εναλλακτικές διατάξεις, αναλύεται στο στάδιο αυτό σε πυκνότερο κλίμακα με ισοδιάσταση 1,5 m. προκειμένου να εκτιμηθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια η τιμές του πεδίου των ταχυτήτων.

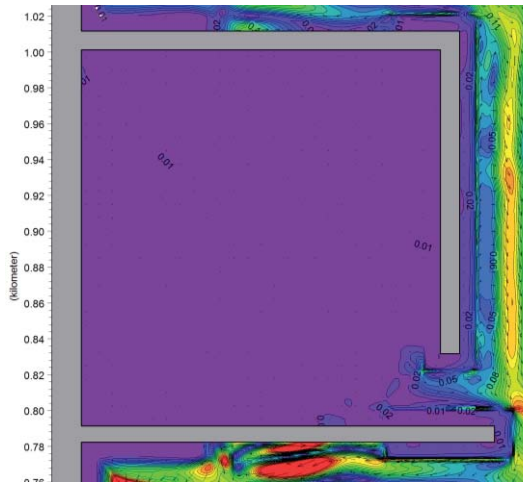


Σημειώνεται, στο σημείο αυτό ότι οι υπολογιζόμενες ταχύτητες αφορούν τις μέσες ως προς το χρονικό βήμα στιγμιαίες ταχύτητες των σωματιδίων ολοκληρωμένες ως προς το βάθος. Για τη διερεύνηση των συνθηκών στρεομεταφοράς πρέπει να γίνει εκτίμηση των ταχυτήτων και των τάσεων στον πυθμένα, διαδικασία που θα πραγματοποιηθεί στο επόμενο κεφάλαιο. Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι συνισταμένες κατά x και y των εν λόγω ταχυτήτων.

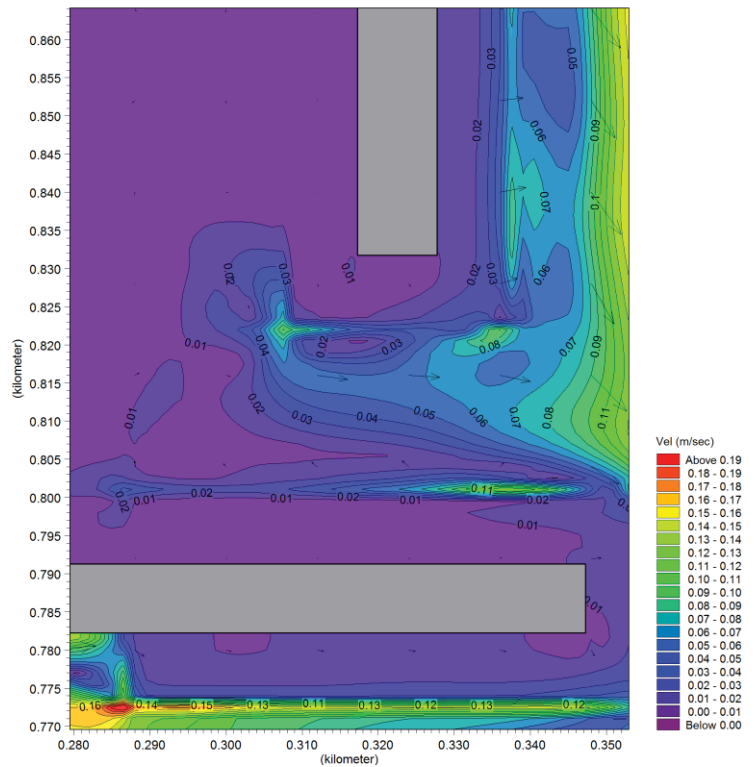


**Εικόνα 7-6: Εναλλακτική διάταξη 1 – Αποτελέσματα πεδίου ταχυτήτων 1<sup>ο</sup> κυματικό σενάριο ( $H_{mo} = 2.0m$ ,  $\theta = 10^\circ$ )**

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα για την εναλλακτική διάταξη 1 και για το 1<sup>ο</sup> κυματικό σενάριο (βλ. Εικόνα 7-6) το πεδίο των ταχυτήτων στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης λαμβάνει αρκετά χαμηλές τιμές, μικρότερες των 0,01 m/sec σχεδόν σε όλη την επιφάνειά της. Ενισχυμένο παρουσιάζεται στην είσοδο της μαρίνας, ανάμεσα από τους δύο μώλους, με τιμές που φτάνουν έως και τα 0,09 m/sec.



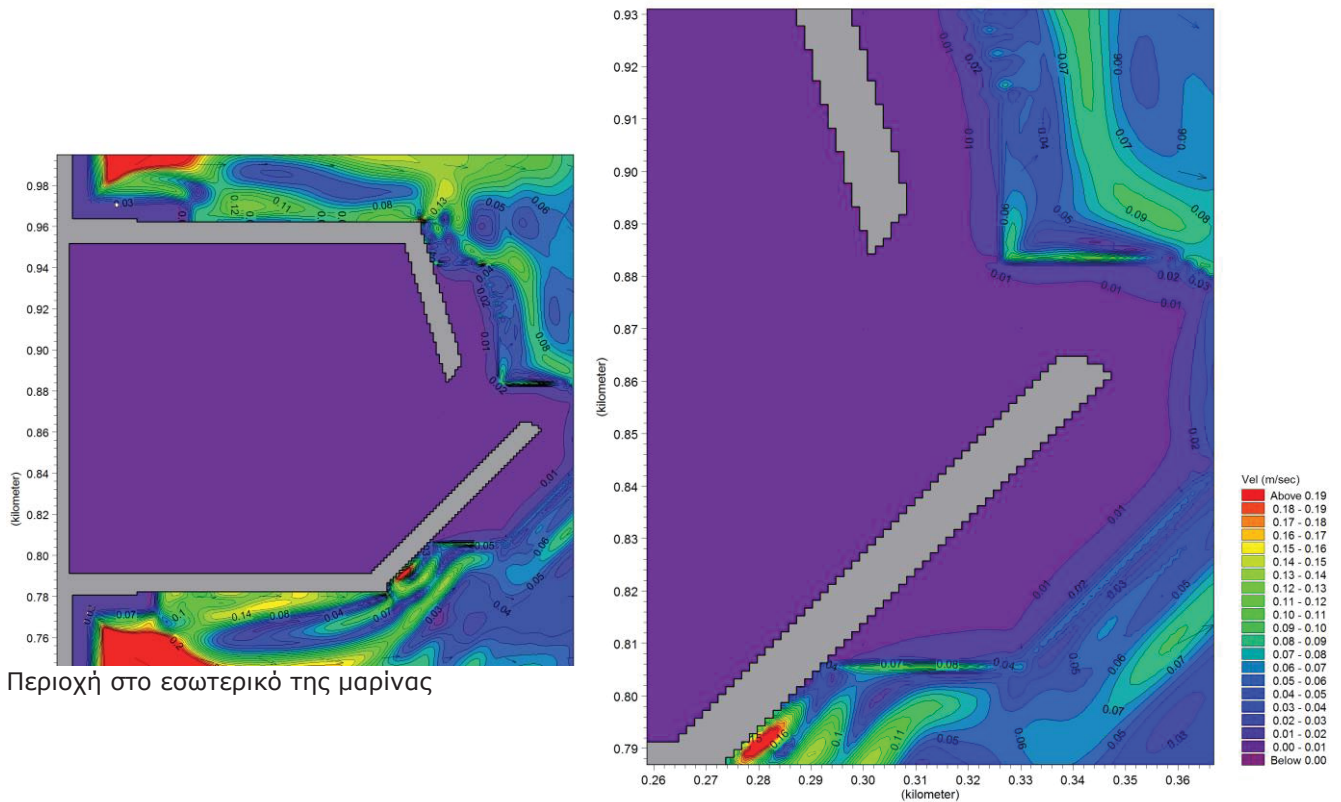
Περιοχή στο εσωτερικό της μαρίνας



Είσοδος μαρίνας

**Εικόνα 7-7: Εναλλακτική διάταξη 1 – Αποτελέσματα πεδίου ταχυτήτων 2<sup>ο</sup> κυματικό σενάριο ( $H_{mo} = 2.5m, \theta = 45^\circ$ )**

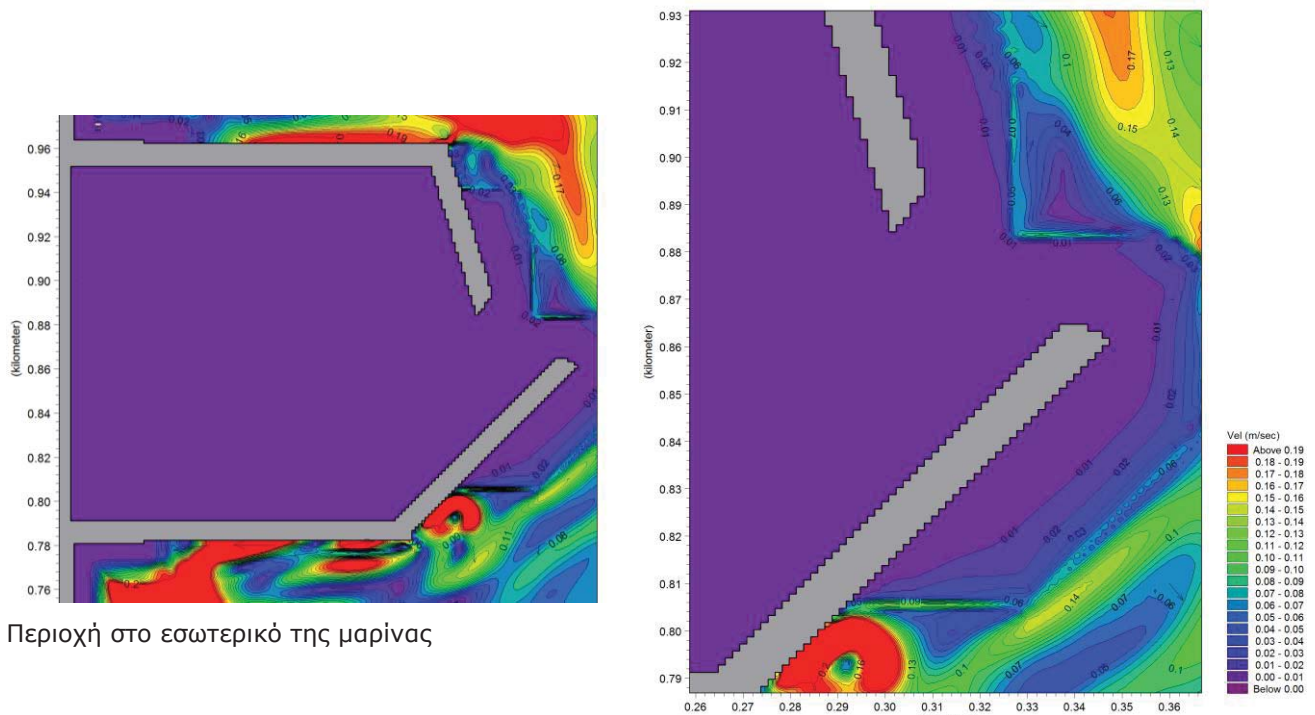
Στο δεύτερο κυματικό σενάριο (διάταξη 1), οι συνθήκες σε γενικές γραμμές είναι οι ίδιες, με εξαίρεση μια περιοχή εσωτερικά της εισόδου κοντά όμως σε αυτή, όπου εμφανίζονται τοπικά τιμές λίγο μεγαλύτερες των 0,08 m/sec.



Περιοχή στο εσωτερικό της μαρίνας

Είσοδος μαρίνας

**Εικόνα 7-8: Εναλλακτική διάταξη 2 – Αποτελέσματα πεδίου ταχυτήτων 1<sup>ο</sup> κυματικό σενάριο ( $H_{mo} = 2.0m, \theta = 10^\circ$ )**



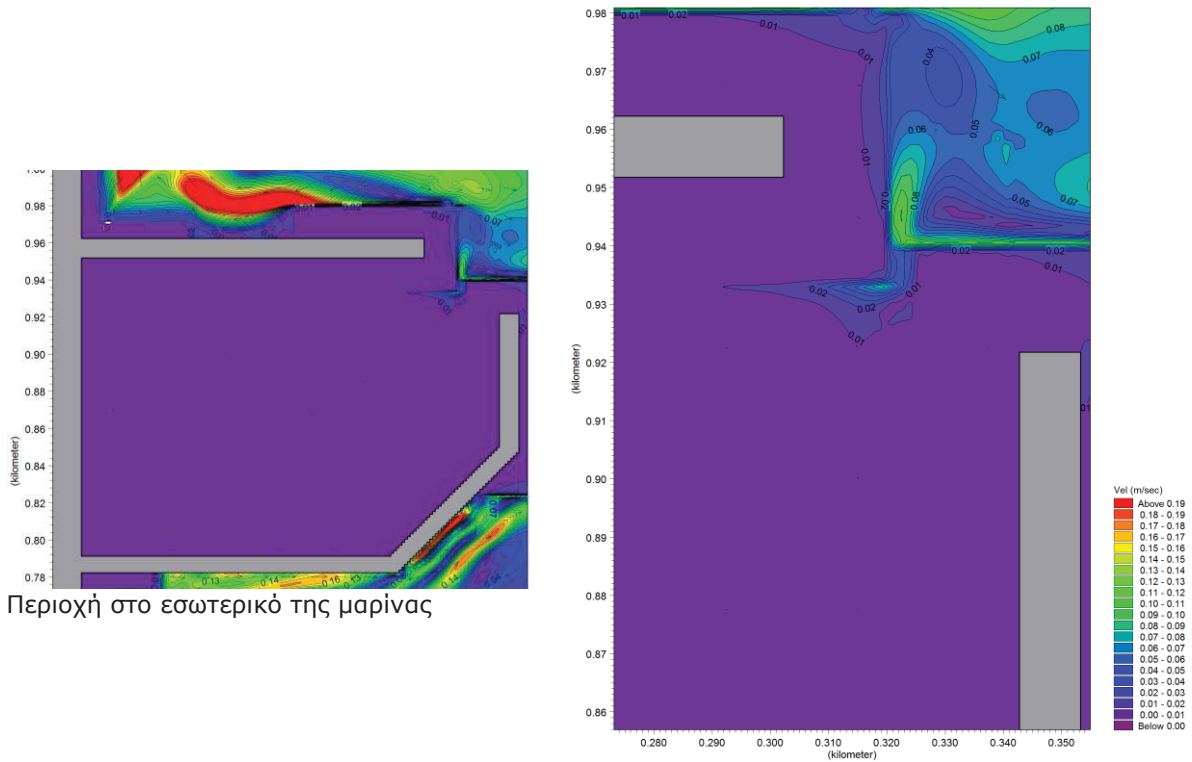
Περιοχή στο εσωτερικό της μαρίνας

Είσοδος μαρίνας

**Εικόνα 7-9: Εναλλακτική διάταξη 2 – Αποτελέσματα πεδίου ταχυτήτων 2<sup>ο</sup> κυματικό σενάριο ( $H_{mo} = 2.5m, \theta = 45^\circ$ )**

Στην περίπτωση της διάταξης 2 οι ταχύτητες στην είσοδο της λιμενολεκάνης είναι αρκετά μικρές, μάλιστα οι μικρότερες που απαντώνται

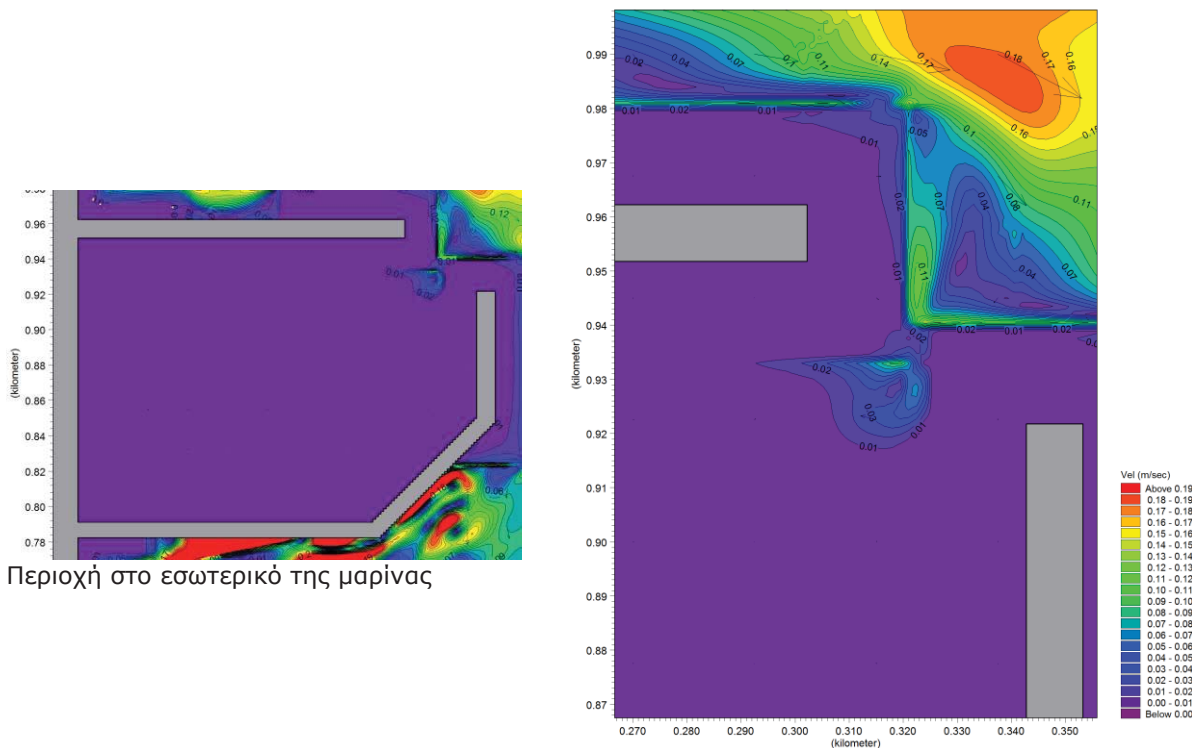
τόσο στο εσωτερικό όσο και την είσοδο και στις τρεις εναλλακτικές διατάξεις που μελετώνται στο παρόν στάδιο.



Περιοχή στο εσωτερικό της μαρίνας

Είσοδος μαρίνας

**Εικόνα 7-10: Εναλλακτική διάταξη 5 – Αποτελέσματα πεδίου ταχυτήτων 1° κυματικό σενάριο ( $H_{mo} = 2.0m, \theta = 10^\circ$ )**



Περιοχή στο εσωτερικό της μαρίνας

Είσοδος μαρίνας

**Εικόνα 7-11: Εναλλακτική διάταξη 5 – Αποτελέσματα πεδίου ταχυτήτων 2° κυματικό σενάριο ( $H_{mo} = 2.5m, \theta = 45^\circ$ )**

Στην διάταξη 5, το πεδίο ταχυτήτων εσωτερικά και για τα δύο κυματικά σενάρια είναι ήπιο, Όμως Στην είσοδο του λιμένα εντοπίζονται ταχύτητες πάνω από 0,11 m/sec και 0,13 m/sec για τα κυματικά σενάρια 1 και 2 αντίστοιχα. Τούτο παρατηρείται καθώς η είσοδος του λιμένα είναι ακάλυπτη από τον προσήνεμο μώλο σε σχέση με τους προσπίπτοντες επικρατούντες κυματισμούς.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί και πάλι ότι οι συνθήκες είναι σαφώς βελτιωμένες στην είσοδο καθώς η κατασκευή των μώλων εκεί προβλέπεται με πρηνή και όχι με κατακόρυφα μέτωπα, γεγονός που περιορίζει σημαντικά τα φαινόμενα ανακλάσεων και δημιουργίας στάσιμων κυματισμών.

Συμπερασματικά, στο εσωτερικό και των τριών διατάξεων, το ήπιο πεδίο ταχυτήτων των κυματισμών δε φαίνεται να επιτρέπει την όποια μετακίνηση των ιζημάτων και επιτρέπει την καθίζηση αυτών.

Σε ότι αφορά την κίνηση των ιζημάτων, όπως έχει προαναφερθεί, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η τοπική ταχύτητα των υδάτων κοντά στη είσοδο της μαρίνας, καθώς σε μεγάλες ταχύτητες το ίζημα κινείται και καθιζάνει σε μικρότερο βαθμό. Συνεπώς, πολύ μεγάλες ταχύτητες στην είσοδο του έργου μπορεί να θέσουν τα ιζήματα σε κίνηση και να δράσουν αποτρεπτικά σε σχέση με την καθίζηση αυτών. Σε διατάξεις με μεγάλη διαφορά πεδίου ταχυτήτων στην είσοδο και στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης, όπως οι διατάξεις 1, 2 και 5 παρουσιάζουν μεγαλύτερη πιθανότητα να εισέλθουν ιζήματα στο εσωτερικό τους και να εγκλωβιστούν εκεί. Στη συνέχεια θα εξεταστεί αν οι ταχύτητες παραπάνω διατάξεων είναι τέτοιες ώστε να μπορούν να θέσουν σε κίνηση το εγκλωβισμένο ίζημα.

Πιο συγκεκριμένα, θα εξεταστούν στο επόμενο κεφάλαιο, οι ενισχυμένες συνθήκες που επικρατούν στις εισόδους των διατάξεων 1, 2 και 5.

## **ΜΕΡΟΣ 5: ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΙΖΗΜΑΤΩΝ**

---

## 8. Έλεγχος δυνατότητας κίνησης ιζημάτων

### 8.1 Υπολογισμός $\tau_{bcr}$

Όπως αναφέρθηκε εκτενώς και στην παράγραφο 2.4 του παρόντος τεύχους, όταν η συνολική διατμητική τάση  $\tau_b$  στον πυθμένα ξεπεράσει την παραπάνω κρίσιμη τιμή  $\tau_{bcr}$  τότε πραγματοποιείται αποκόλληση των κόκκων του υλικού του πυθμένα οι οποίοι μεταφέρονται τόσο κοντά στον πυθμένα όσο και σε αιώρηση. Για ίζημα δεδομένης κοκκομετρίας το οποίο στην παρούσα εργασία θεωρείται αμμόδες, με μέσο μέγεθος κόκκου  $D_{50}=1\text{mm}$ , σχετικά καλής διαβάθμισης με  $\sigma_g=(D_{84}/D_{16})0.5=(1.28/0.82)0.5=1.25$  (τιμές που έχουν υπολογιστεί από την κοκκομετρία του εδαφικού υλικού του πυθμένα) προσαρμοσμένο κι αυτό στα ελληνικά δεδομένα.

Αρχικά υπολογίζεται ή τιμή του αδιάσταστου μεγέθους των κόκκων  $D^*$  (σχέση 2.1):

$$D^* = D_{50} \left( \frac{g\Delta}{\nu^2} \right)^{1/3} = 20.31$$

όπου,  $D_{50} = 0,001\text{m}$ ,

$$\nu = 1.36 \cdot 10^{-6}$$

$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} = 1.58 \text{ για } \rho = 1027\text{kg/m}^3 \text{ και } \rho_s = 2065\text{kg/m}^3$$

Η τιμή της παραμέτρου  $\theta_c$  δίνεται παίρνει τιμές :

$$\square \text{ Για } 20 < D^* < 150 \quad \theta_{cr} = 0,013 D^{*0,29} = 0,031 \text{ (Καραμπας 2004)}$$

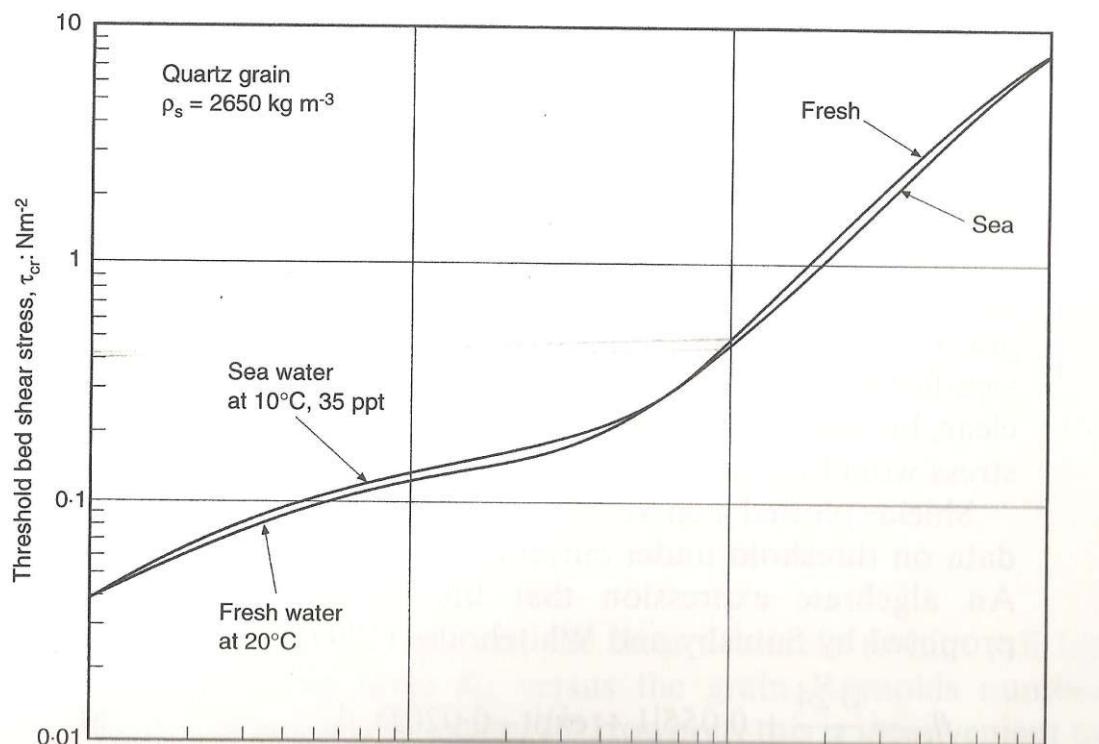
Οπότε υπολογίζονται οι εξής τιμές

$$\square \tau_{bcr} = \theta_c (\rho_s - \rho) g D_{50} = 0,496\text{N/m}^2$$

□ Εναλλακτικά η κρίσιμη τιμή της διατμητικής αντοχής του πυθμένα μπορεί να υπολογιστεί από το παρακάτω διάγραμμα, οπότε και προκύπτει:  $\tau_{bcr} = 0,5 \text{ N/m}^2$

Επομένως λαμβάνεται η τιμή  $\tau_{bcr} = \underline{\underline{0,496\text{N/m}^2}}$  ως **δυσμενέστερη**





**Σχήμα 8-1: Διάγραμμα του Shields**

## 8.2 Υπολογισμός τραχύτητας πυθμένα $\tau_b$

Στο κεφάλαιο 4 έγινε αναφορά στον υπολογισμό της διατμητικής τάσης στον πυθμένα. Στο παρόν με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης του δεύτερου σταδίου προσομοίωσης των κυματισμών γίνεται υπολογισμός της διατμητικής τάσης στον πυθμένα προκειμένου να ελεγχθεί εάν αυτές ξεπερνούν την κρίσιμη τιμή που υπολογίστηκε στην παράγραφο 8.1.

Ο υπολογισμός γίνεται σημειακά στην περιοχή της εισόδου των διατάξεων όπου και παρουσιάζονται οι μεγαλύτερες τιμές των ταχυτήτων.

Προκειμένου να υπολογιστούν οι τάσεις στον πυθμένα είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των αντίστοιχων ταχυτήτων στην περιοχή του πυθμένα. Το λογισμικό MIKE 21 BW δίνει αποτελέσματα του πεδίου των ταχυτήτων ολοκληρωμένα ως προς το βάθος. Επομένως για την μετατροπή των ταχυτήτων λαμβάνονται οι τύποι (4.78) και (4.79) λαμβάνοντας σταθερό βάθος 4m (βλ. και κεφ 4):



$$u_o = U + \left(\frac{d}{2}\right) \frac{\partial^2 (dU)}{\partial x^2} - \left(\frac{d^2}{3}\right) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad (8.1)$$

$$v_o = V + \left(\frac{d}{2}\right) \frac{\partial^2 (dV)}{\partial y^2} - \left(\frac{d^2}{3}\right) \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \quad (8.2)$$

η δεύτερη παράγωγος προκύπτει με τον υπολογισμό κεντρικών διαφορών για κάθε κελί προσομοίωσης στα σημεία ενδιαφέροντος:

$$\frac{\partial^2 (U)}{\partial x^2} = \frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{\Delta x^2} \quad (8.3)$$

και

$$\frac{\partial^2 (V)}{\partial x^2} = \frac{v_{i+1} - 2v_i + v_{i-1}}{\Delta x^2} \quad (8.4)$$

όπου  $\Delta x = 1.5\text{m}$  η ισοδιάσταση του κανάβου προσομοίωσης του δεύτερου σταδίου ανάλυσης.

Οι αυξομειούμενες συνιστώσες των ταχυτήτων (κοντά στον) πυθμένα  $u_{ow}$  και  $v_{ow}$  υπολογίζονται από τις ταχύτητες κοντά στον πυθμένα αφαιρώντας τις μέσες ταχύτητες ρεύματος:  $u_{ow} = u_o - \bar{u}_o$  και  $v_{ow} = v_o - \bar{v}_o$ .

Οι στιγμιαίες διατμητικές τάσεις στον πυθμένα δίνονται από τους ακόλουθους τύπους (για 2 διαστάσεις):

$$\tau_{bx} = \frac{1}{2} f_{cw} u_o |\mathbf{u}_o|, \tau_{by} = \frac{1}{2} f_{cw} v_o |\mathbf{u}_o| \quad (8.5)$$

όπου  $|\mathbf{u}_o| = \sqrt{u_o^2 + v_o^2}$  και λαμβάνοντας στην παρούσα ότι δεν επικρατούν ρεύματα

$$f_{cw} = f_w \quad (8.6)$$

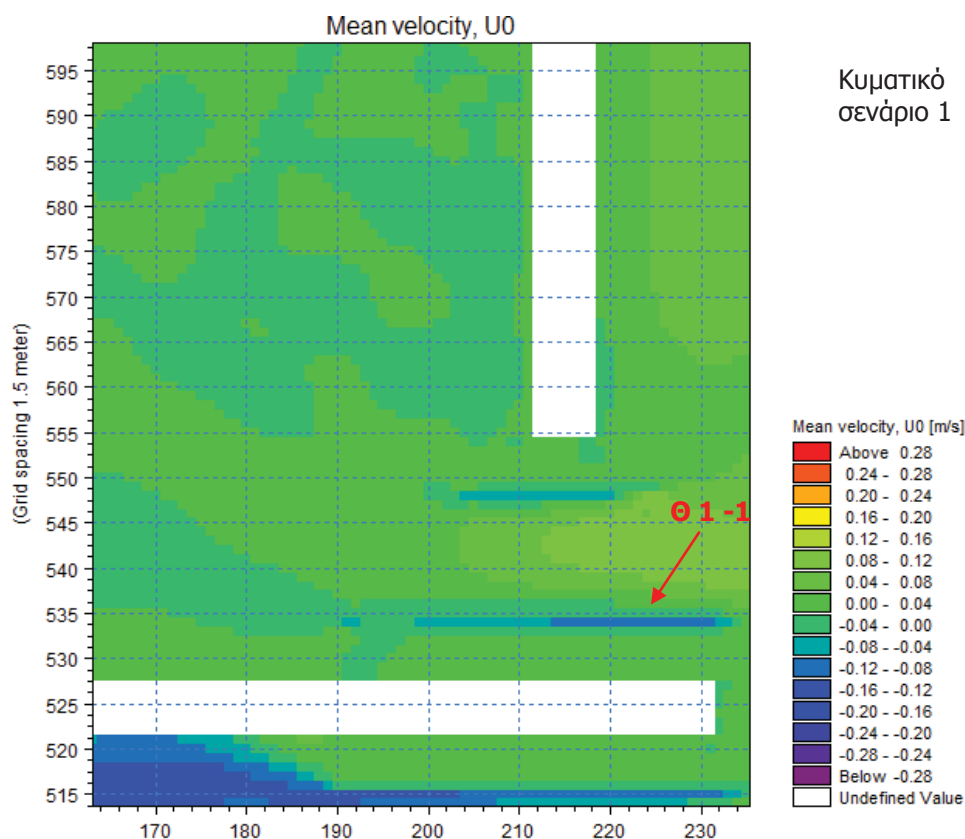
$$f_w = \exp \left[ -5.977 + 5.213 \left( \frac{K_N}{A_b} \right)^{0.194} \right] \quad \text{για } \frac{K_N}{A_b} < 0,63 \quad (8.7)$$

$$f_w = 0,3 \quad \text{για } \frac{K_N}{A_b} \geq 0,63$$

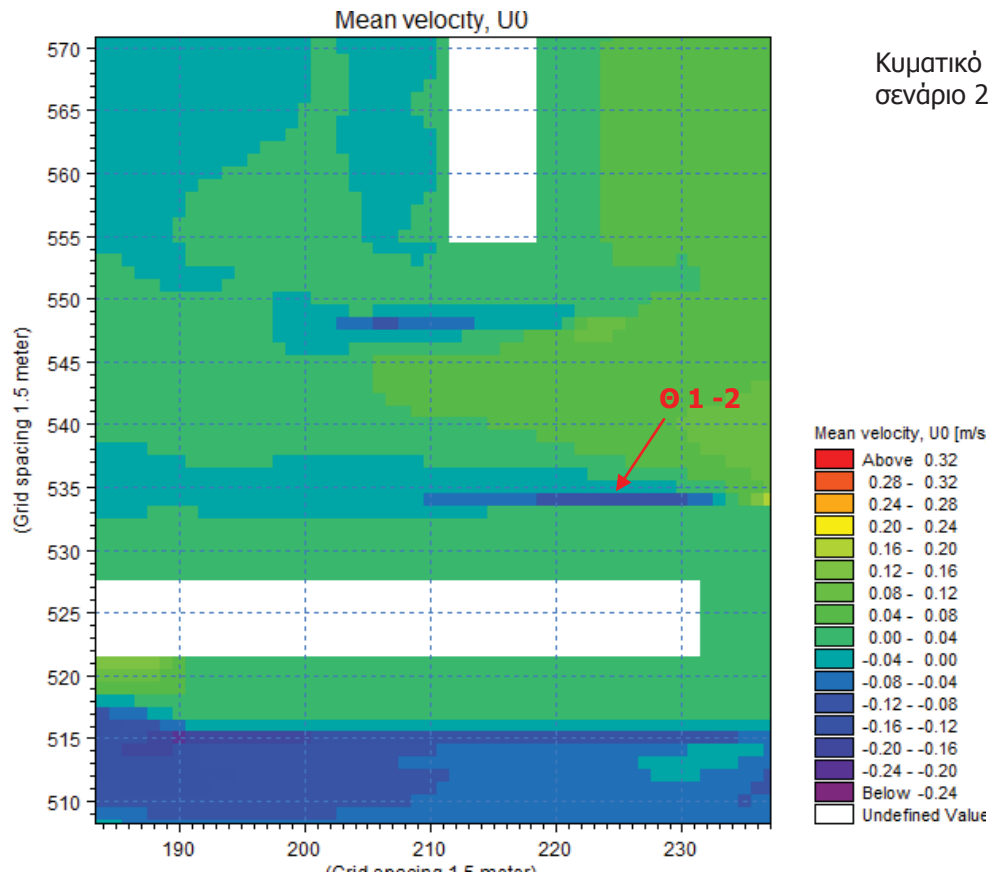
όπου  $K_N=2,5D_{50}=0,0025$  και  $A_b=u_{ow-max}/\omega$

### 8.2.1 Υπολογισμός $\tau_b$ - Εναλλακτική διάταξη 1

Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης του σταδίου 2 στην περιοχή περί της εισόδου της λιμενολεκάνης εντοπίστηκαν οι μέγιστες ταχύτητες με μεγαλύτερες τις  $u$  (κατά τη διεύθυνση  $x$ ) στην περιοχή που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Οι παρακάτω θέσεις  $\Theta 1-1$  και  $\Theta 1-2$  λαμβάνονται ως θέσεις ελέγχου και εφαρμόζεται η μεθοδολογία της προηγούμενης παραγράφου.:



**Εικόνα 8-1: Περιοχές ελέγχου εναλλακτική διάταξη 1 –κυμ. σενάριο 1**



**Εικόνα 8-2: Περιοχές ελέγχου εναλλακτική διάταξη 1–κυμ. σενاريو 2**

Οι τιμές των στιγμιαίων ταχυτήτων κατά x και y είναι οι παρακάτω:

**Πίνακας 8-1: Τιμές στιγμιαίων ταχυτήτων (μέσες ως προς z) στις θέσεις ελέγχου Διάταξη 1**

		<b>Διάταξη 1</b>
Συντεταγμένες Κελιού Αρχείου Αποτελεσμάτων (x,y)		(225,534)
Κυματικό σενάριο 1 Θ 1-1	u (m/sec)	-0,1066
	v (m/sec)	0,0135
Συντεταγμένες Κελιού Αρχείου Αποτελεσμάτων (x,y)		(225,534)
Κυματικό σενάριο 2 Θ 1-2	u (m/sec)	-0,11098
	v (m/sec)	0,00264

Για τις παραπάνω τιμές υπολογίζονται οι ποσότητες από τις εξισώσεις 8.1 έως 8.7 και στη συνέχεια οι διατμητικές τάσεις στον πυθμένα. Συνολικά τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

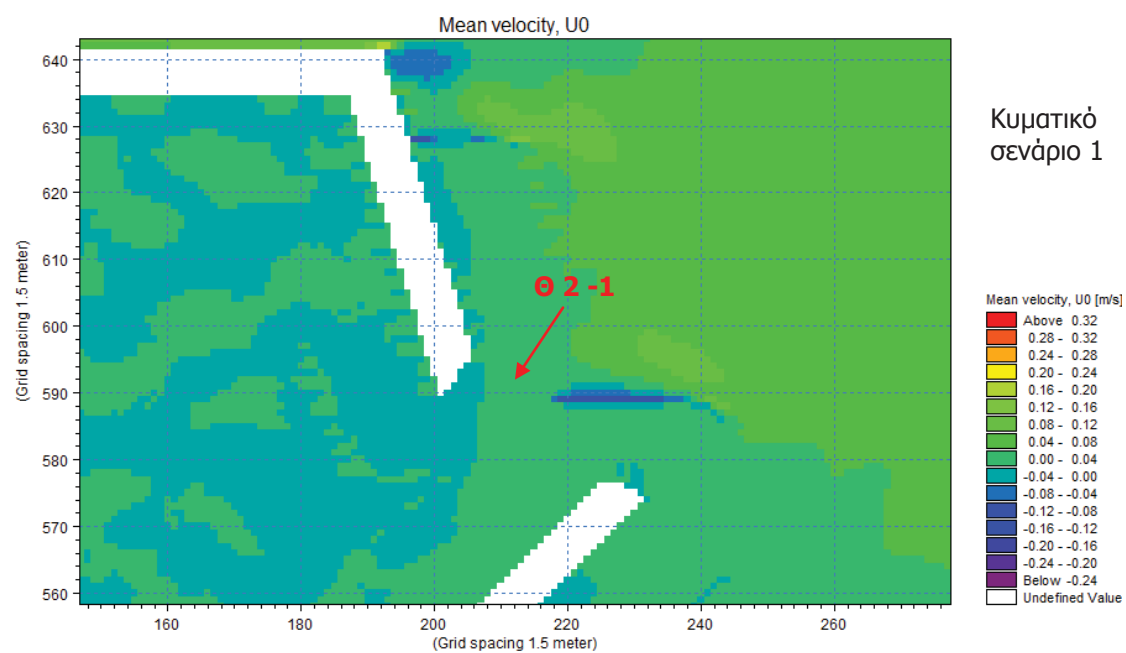
**Πίνακας 8-2: Υπολογισμός  $\tau_{bx}$  και  $\tau_{by}$  Διάταξη 1**

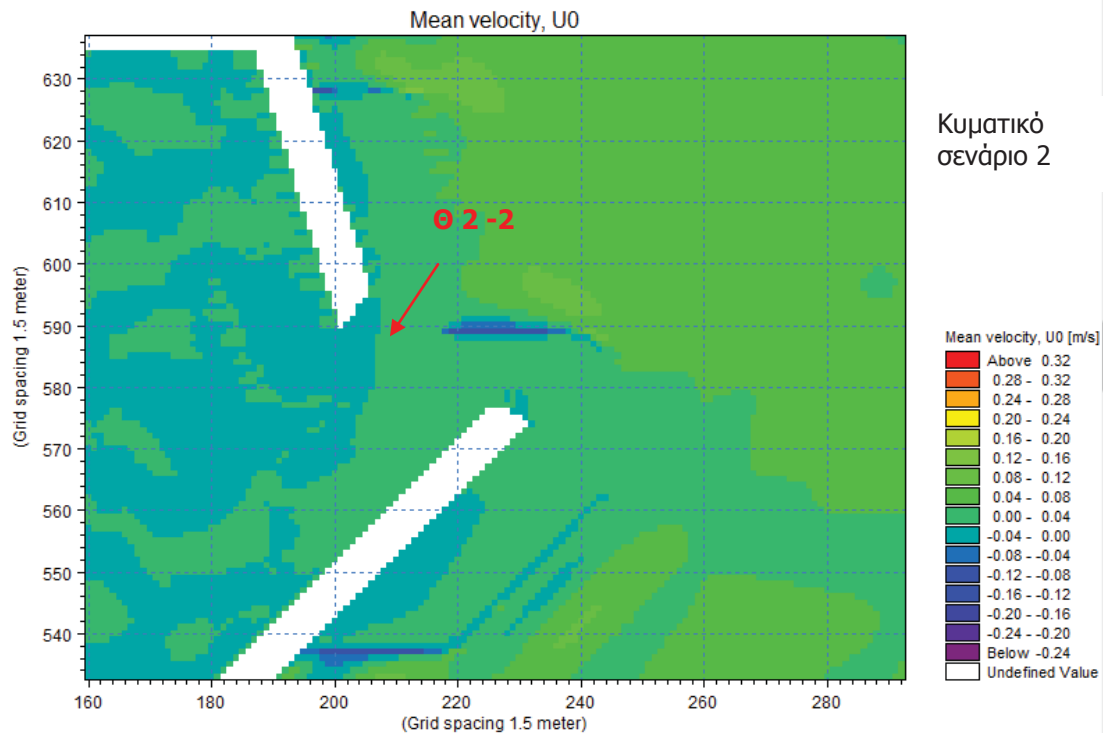
Διατομή Ελέγχου	Θ 1-1	Θ 1-2
$\tau_{bx} (N/m^2)$	-0.406845	-0.411580
$\tau_{by} (N/m^2)$	0.011237	0.006294
$\tau_b (N/m^2)$	0.407	0.412

Οι τιμές που προκύπτουν είναι αρκετά από την  $\tau_{bcr} =$  και επομένως **δεν αναμένεται να υπάρχουν μετατοπίσεις φερτών υλών στην είσοδο στην περίπτωση της εναλλακτικής διάταξης 1.**

### 8.2.2 Υπολογισμός $\tau_b$ - Εναλλακτική διάταξη 2

Ομοίως, για την διάταξη 5 λαμβάνονται οι παρακάτω θέσεις Θ2-1 και Θ2-2 ως θέσεις ελέγχου και εφαρμόζεται η μεθοδολογία της προηγούμενης παραγράφου:

**Εικόνα 8-3: Περιοχές ελέγχου εναλλακτική διάταξη 2-κυμ. σενάριο 1**



**Εικόνα 8-4: Περιοχές ελέγχου εναλλακτική διάταξη 2–κυμ. σενاريو 2**

Οι τιμές των στιγμιαίων ταχυτήτων κατά x και y είναι οι παρακάτω:

**Πίνακας 8-3: Τιμές στιγμιαίων ταχυτήτων (μέσες ως προς z) στις θέσεις ελέγχου Διάταξη 2**

		<b>Διάταξη 5</b>
Συντεταγμένες Κελιού Αρχείου Αποτελεσμάτων (x,y)		(214,589)
Κυματικό σενάριο 1 Θ 1-1	u (m/sec)	0.00309
	v (m/sec)	-0.00432
Συντεταγμένες Κελιού Αρχείου Αποτελεσμάτων (x,y)		(215,588)
Κυματικό σενάριο 2 Θ 1-2	u (m/sec)	0.00856
	v (m/sec)	-0.00015

Για τις παραπάνω τιμές υπολογίζονται οι ποσότητες από τις εξισώσεις 8.1 έως 8.7 και στη συνέχεια οι διατμητικές τάσεις στον πυθμένα. Συνολικά τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

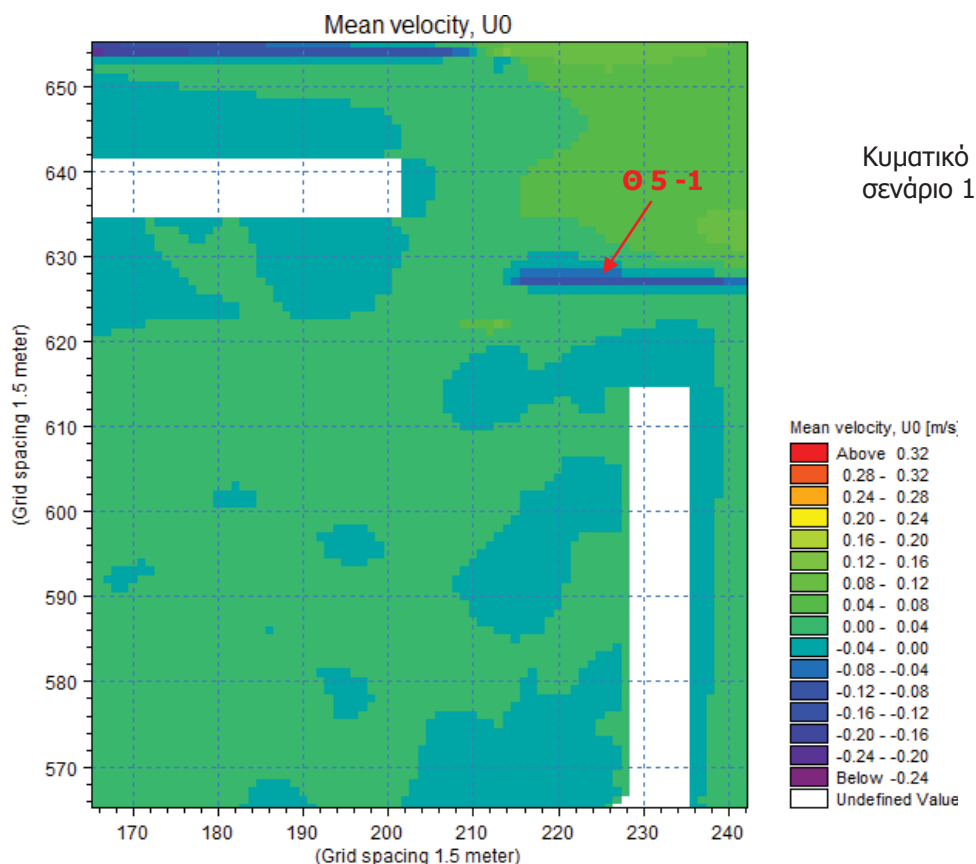
**Πίνακας 8-4: Υπολογισμός  $\tau_{bx}$  και  $\tau_{by}$  Διάταξη 2**

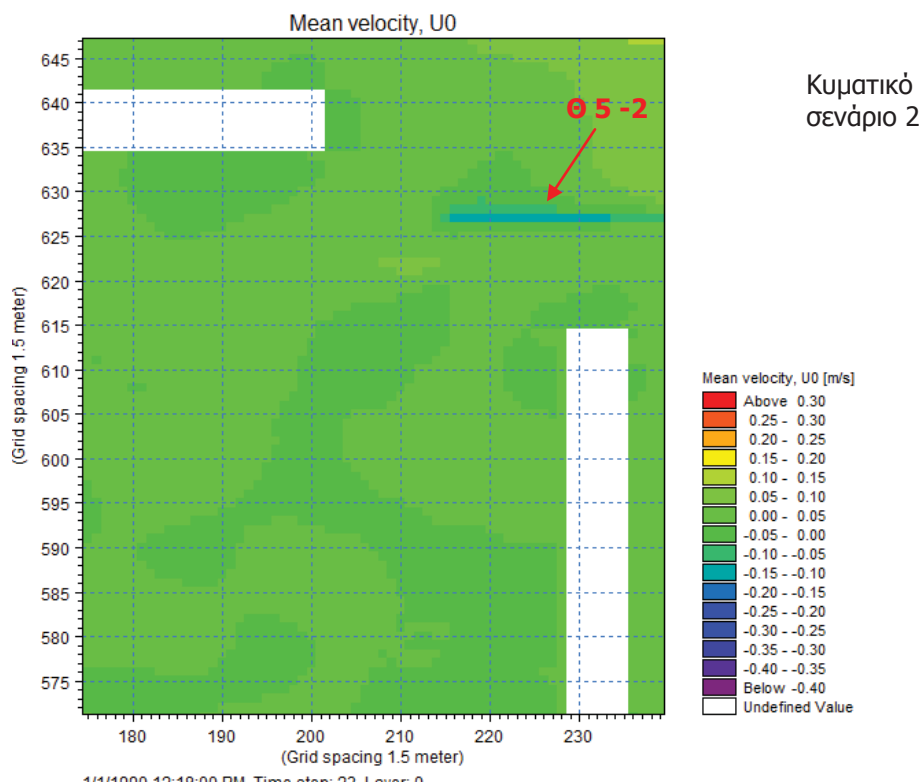
Διατομή Ελέγχου	Θ 2-1	Θ 2-2
$\tau_{bx} (N/m^2)$	0.000112	0.000871
$\tau_{by} (N/m^2)$	-0.000179	-0.000004
$\tau_b (N/m^2)$	0.000211	0.000871

Οι τιμές που προκύπτουν είναι πολύ μικρότερες από την  $\tau_{bcr}$  και επομένως **δεν αναμένεται να υπάρχουν μετατοπίσεις φερτών υλών στην είσοδο και στην περίπτωση της εναλλακτικής 2.**

### 8.2.3 Υπολογισμός $\tau_b$ - Εναλλακτική διάταξη 5

Ομοίως, για την διάταξη 5 λαμβάνονται οι παρακάτω θέσεις Θ5-1 και Θ5-2 ως θέσεις ελέγχου και εφαρμόζεται η μεθοδολογία της προηγούμενης παραγράφου.:

**Εικόνα 8-5: Περιοχές ελέγχου εναλλακτική διάταξη 5-κυμ. σενάριο 1**



**Εικόνα 8-6: Περιοχές ελέγχου εναλλακτική διάταξη 5–κυμ. σενاريو 2**

Οι τιμές των στιγμιαίων ταχυτήτων κατά x και y είναι οι παρακάτω:

**Πίνακας 8-5: Τιμές στιγμιαίων ταχυτήτων (μέσες ως προς z) στις θέσεις ελέγχου Διάταξη 5**

		<b>Διάταξη 5</b>
Συντεταγμένες Κελιού Αρχείου Αποτελεσμάτων (x,y)		(225,627)
Κυματικό σενάριο 1 Θ 1-1	u (m/sec)	-0.1120
	v (m/sec)	0.0063
Συντεταγμένες Κελιού Αρχείου Αποτελεσμάτων (x,y)		(223,627)
Κυματικό σενάριο 2 Θ 1-2	u (m/sec)	-0.1109
	v (m/sec)	0.0026

Για τις παραπάνω τιμές υπολογίζονται οι ποσότητες από τις εξισώσεις 8.1 έως 8.7 και στη συνέχεια οι διατμητικές τάσεις στον πυθμένα. Συνολικά τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 8-6: Υπολογισμός  $\tau_{bx}$  και  $\tau_{by}$  Διάταξη 5**

Διατομή Ελέγχου	Θ 5-1	Θ 5-2
$\tau_{bx} (N/m^2)$	-0.476217	-0.467897
$\tau_{by} (N/m^2)$	0.006394	0.001951
$\tau_b (N/m^2)$	0.476	0.468

Οι τιμές που προκύπτουν είναι μικρότερες από την  $\tau_{bcr}$  και επομένως **δεν αναμένεται να υπάρχουν μετατοπίσεις φερτών υλών στην είσοδο και στην περίπτωση της εναλλακτικής 5.**



**ΜΕΡΟΣ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΥΝΟΨΗ**

---

## 9. Συγκριτική αξιολόγηση διατάξεων

Με βάση την ανάλυση των αποτελεσμάτων και τη συγκριτική αξιολόγηση των εναλλακτικών διατάξεως προκύπτουν τα εξής:

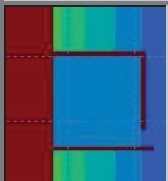
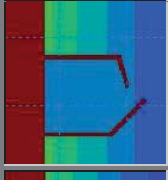
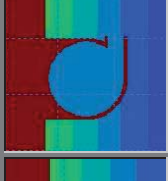
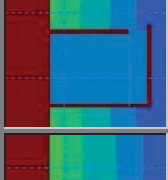

- Η **βέλτιστη** εκ των πέντε διατάξεων είναι η **διάταξη 3 (12 βαθμοί)**. α) Στο εσωτερικό της επικρατεί ήπιο κυματικό κλίμα ιδανικό για τον ασφαλή ελλιμενισμό σκαφών, β) το δυναμικό προσάμμωσης στην είσοδό της είναι μικρό επομένως δεν αναμένεται να δημιουργηθούν προβλήματα στην λειτουργικότητα του λιμένα γ) η μέγιστη στερεομεταφορά στην περιοχή γύρω από τη μαρίνα λαμβάνει χαμηλές τιμές γεγονός που καταδεικνύει το μικρό βαθμό περιβαλλοντικής όχλησης του έργου.
- Οι διατάξεις οι οποίες δεν είναι **λειτουργικές** με την υφιστάμενη μορφή τους και χρήζουν σημαντικών παρεμβάσεων είναι οι **διατάξεις 1 και 5**. Η διάταξη 1 παρουσιάζει: α) ενισχυμένο κυματικό κλίμα στο εσωτερικό και στην είσοδό της, β) συσσώρευση σε μεγάλο βαθμό ιζημάτων στην περιοχή κοντά στην είσοδο γ) υψηλό πεδίο ταχυτήτων στην είσοδο σε σχέση με το εσωτερικό της λιμενολεκάνης που ευνοεί την μεταφορά ιζημάτων στο εσωτερικό της μαρίνας δ) ταχύτητες στην είσοδό της μη ικανές να θέσουν τα ιζήματα σε κίνηση και ε) υψηλό βαθμό στερεομεταφοράς στην παράκτια ζώνη. Τα παραπάνω ισχύουν και για τη διάταξη 5 πλην όμως οι συνθήκες προσάμμωσης κυρίως στην ευρύτερη περιοχή δεν είναι τόσο δυσμενείς.
- Η **διάταξη 2** διαθέτει προστατευμένη είσοδο και το κυματικό κλίμα στο εσωτερικό είναι αποδεκτό συγκρινόμενο με τις διεθνείς συστάσεις. Παρ' όλα αυτά, στην είσοδό της παρουσιάζεται έντονη κυματική δράση άρα και υψηλό κυματικό πεδίο που έρχεται σε αντίθεση με τις ήπιες συνθήκες στο εσωτερικό της, γεγονός που ευνοεί την μεταφορά ιζημάτων στο εσωτερικό της μαρίνας.
- Η **διάταξη 4**, από άποψης κυματικής διαταραχής και πεδίου ταχυτήτων είναι αποδεκτή, πλην όμως αντιμετωπίζει κυρίως θέματα προσαμμώσεων τα οποία θα πρέπει να επιλυθούν προκειμένου να λειτουργήσει ασφαλώς.

Για την ποσοτικοποίηση των παραπάνω συμπερασμάτων πραγματοποιήθηκε στοιχειώδης πολυκριτηριακή ανάλυση και βαθμολόγησή τους, η οποία παρουσιάζεται στον Πίνακα 9-1, λαμβάνοντας υπόψη τρία βασικά ισοδύναμα κριτήρια:

- I. κυματική διαταραχή στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης
- II. συνθήκες στερεομεταφοράς στην είσοδο και στο εσωτερικό τους
- III. συνθήκες στερεομεταφοράς στην ευρύτερη παράκτια περιοχή.

Τα τρία κριτήρια είναι ισοδύναμα και βαθμολογούνται από το 1 έως το 4.

**Πίνακας 9-1: Πολυκριτηριακή αξιολόγηση διατάξεων μαρινών 1 έως 5**

Διάταξη		Κριτήριο I	Κριτήριο II	Κριτήριο III	Συνολική βαθμολογία
1		1	1	1	3
2		3	2	2	7
3		4	4	4	<b>12</b>
4		3	3	3	9
5		1	1	2	4

Πιο συγκεκριμένα, για το κριτήριο I: 4= πολύ μικρή διαταραχή, 3 = μικρή διαταραχή, 2= μέτρια διαταραχή, 1= μεγάλη διαταραχή (πάνω από τα αποδεκτά διεθνώς όρια για μικρούς λιμένες)

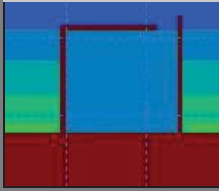
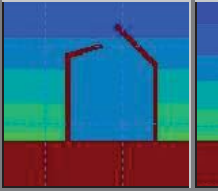
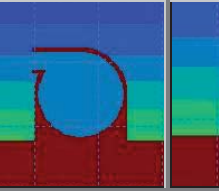
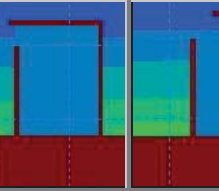
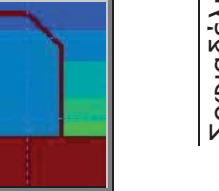
Για το κριτήριο II : 4= πολύ χαμηλό δυναμικό προσάμμωσης και μικρή διαφορά πεδίου ταχυτήτων στην είσοδο και τη λιμενολεκάνη, 3 = μέτριο ή χαμηλό δυναμικό προσάμμωσης και μικρή διαφορά πεδίου ταχυτήτων στην

είσοδο και τη λιμενολεκάνη, 2 = μέτριο ή υψηλό δυναμικό προσάμμωσης και μεγάλη διαφορά πεδίου ταχυτήτων στην είσοδο και τη λιμενολεκάνη, 1= υψηλό ή μέτριο δυναμικό προσάμμωσης και μεγάλη διαφορά πεδίου ταχυτήτων στην είσοδο και τη λιμενολεκάνη.

Για το κριτήριο III : 4= πολύ χαμηλό δυναμικό προσάμμωσης, 3 = χαμηλό δυναμικό προσάμμωσης, 2 = μέτριο δυναμικό προσάμμωσης, 1= πολύ υψηλό δυναμικό προσάμμωσης.

Συνοψίζοντας, στη συνέχεια παρουσιάζεται ο Πίνακας 9-2, με συγκεντρωτικά στοιχεία για τις μελετούμενες διατάξεις. Τα στοιχεία προέκυψαν από την παρούσα αλλά και από τις αναλύσεις του Α. Μαυραντωνάκη το 2009.

**Πίνακας 9-2: Παρουσίαση συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων αναλύσεων διατάξεων μαρινών 1 έως 5**

		Μέγιστη στερεομεταφορά κοντά στη μαρίνα $TC_{max}$ ( $m^3/yr/m$ )	Στερεομεταφορά στην περιοχή κοντά στην είσοδο $TC$ ( $m^3/yr/m$ )	Μέγιστη κυματική διαταραχή στη λιμενολεκάνη $H_s$ (m)	Μέγιστη κυματική διαταραχή στην είσοδο $H_s$ (m)	Διατηρητική τάση στον πυθμένα στην είσοδο $\tau_b$ ( $N/m^2$ )
	Κυματικό σενάριο 1	<b>6272,71</b>	<b>2000</b>	<b>0,5</b>	1,0	0,407
	Κυματικό σενάριο 2	1490,6	900	0,4	1,1	0,412
	Κυματικό σενάριο 1	2839,84	1500	0,2	0,9	0,00021
	Κυματικό σενάριο 2	1054	600	<0,1	0,9	0,00087
	Κυματικό σενάριο 1	2598,38	900	<0,1	0,3	<<
	Κυματικό σενάριο 2	1100,9	450	<0,1	0,3	<<
	Κυματικό σενάριο 1	6400	900	0,2	0,4	<<
	Κυματικό σενάριο 2	1562,42	600	0,1	0,4	<<
	Κυματικό σενάριο 1	2875	1200	<b>0,5</b>	<b>1,2</b>	<b>0,476</b>
	Κυματικό σενάριο 2	1074	450	0,4	1,1	0,468

## 10. Συμπεράσματα και θέματα προς περαιτέρω διερεύνηση

Στο πρώτο στάδιο της παρούσας εργασίας έγινε διερεύνηση των συνθηκών κυματικής διαταραχής στο εσωτερικό διατάξεων μαρινών με διαφορετική διάταξη εισόδου και εξωτερικών έργων προστασίας. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκε, πόσο επηρεάζει η διάταξη της εισόδου σε σχέση με τη διεύθυνση του προσπίπτοντος κυματισμού την κυματική ενέργεια που εισέρχεται στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης. Στο δεύτερο στάδιο, με βάση τα αποτελέσματα το πρώτου σταδίου και στοιχεία για το δυναμικό προσάμμωσης στην είσοδο των εν λόγω διατάξεων (Μαυραντωνάκης 2013), εξετάστηκε κατά πόσο θα μπορούσε να υπάρξει μετακίνηση ιζήματος στο εσωτερικό της μαρίνας. Εξετάστηκαν οι διατάξεις στις οποίες παρουσιάστηκε έντονη κυματική διαταραχή στο εσωτερικό και στην είσοδο τους αλλά και παρουσίαζαν υψηλό δυναμικό προσάμμωσης.

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης προέκυψαν τα εξής:

- Η διάταξη της εισόδου της μαρίνας πρέπει να είναι προστατευμένη από τους προσπίπτοντες κυματισμούς και μάλιστα να σχεδιάζεται στην υπήνεμη πλευρά (σε σχέση με την επικρατούσα διεύθυνση κυματισμών) (διατάξεις 3 και 4) προκειμένου να δημιουργούνται υπήνεμες συνθήκες στο εσωτερικό της.
- Περαιτέρω, διατάξεις με είσοδο προσανατολισμένη προς την ανοιχτή θάλασσα (διάταξη 1) αντιμετωπίζουν σοβαρά προβλήματα σε ότι αφορά τους κυματισμούς που εισέρχονται στο εσωτερικό τους.
- Ακόμα και αν η είσοδος τοποθετείται στην υπήνεμη πλευρά του έργου θα πρέπει να είναι προστατευμένη από τους επικρατούντες κυματισμούς. Επομένως, θα πρέπει ο προσήνεμος μώλος της να έχει ικανό μήκος έτσι ώστε η περιοχή της εισόδου της να βρίσκεται υπό την «σκιά» του (διατάξεις 3 και 4). Διατάξεις όπως η διάταξη 5, στις οποίες ο προσήνεμος μώλος δεν παρέχει πλήρη κάλυψη στην είσοδο αυτού, παρουσιάζουν συνθήκες μεγαλύτερης κυματικής διείσδυσης.

- Σε ότι αφορά την κίνηση των ιζημάτων, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η τοπική ταχύτητα των υδάτων κοντά στη είσοδο της μαρίνας, καθώς σε μεγάλες ταχύτητες το ίζημα κινείται και καθιζάνει σε μικρότερο βαθμό. Συνεπώς, πολύ μεγάλες ταχύτητες στην είσοδο του έργου μπορεί να διατηρήσουν τα ιζήματα σε κίνηση και να δράσουν αποτρεπτικά σε σχέση με την καθίζηση αυτών. Διατάξεις με μεγάλη διαφορά πεδίου ταχυτήτων στην είσοδο και στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης, όπως οι 1, 2 και 5 έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να παρασύρουν ιζήματα στο εσωτερικό τους και να εγκλωβιστούν εκεί. Από την άλλη πλευρά, σε λιμενολεκάνες που επικρατούν στην είσοδο και στο εσωτερικό τους (διατάξεις 1, 2 και 5) έντονοι κυματισμοί, δύναται να δημιουργηθούν συνθήκες μετακίνησης των ιζημάτων που θα αποτεθούν εντός της λιμενολεκάνης και για το λόγο αυτό διερευνήθηκαν στο δεύτερο στάδιο.
- Για το δεδομένο στην παρούσα κυματικό κλίμα δεν είναι δυνατή μετακίνηση ιζήματος στο εσωτερικό των διατάξεων που εξετάστηκαν στο δεύτερο στάδιο της παρούσας. Ακόμα και στην περιοχή της εισόδου, όπου το πεδίο των ταχυτήτων είναι πιο έντονο, κυρίως στις διατάξεις 1 και 5, δεν παρατηρούνται ταχύτητες στον πυθμένα ικανές να θέσουν το ίζημα σε κίνηση.
- Διατάξεις με εκτεθειμένες εισόδους παρουσιάζουν πιο έντονο πεδίο ταχυτήτων στην είσοδο και στο εσωτερικό, και επομένως σε περίπτωση ύπαρξης στην περιοχή ιζήματος πιο λεπτόκοκκου από αυτό το οποίο εξετάστηκε στην παρούσα (άμμος με  $d_{50} = 1\text{mm}$ ), τούτο θα μπορούσε να τεθεί σε κίνηση στην περιοχή της εισόδου, πλην όμως θα επικρατούσαν διαφοροποιημένες συνθήκες στερομεταφοράς και θα απαιτούνταν περαιτέρω διερεύνηση.
- Αξίζει να σημειωθεί ότι σε γενικές γραμμές, μικρές μαρίνες, προτείνεται να εξετάζεται η εφαρμογή της διάταξης 3. Η είσοδός τους θα πρέπει να βρίσκεται στην υπήνεμη πλευρά, να είναι προστατευμένη από τους προσπίπτοντες κυματισμούς και το έργο να σχεδιάζεται με καμπύλα στοιχεία ώστε να παρατηρείται μείωση στην ένταση των στροβίλων που δημιουργούνται στις ασυνέχειες της διαδρομής των προσπιπτόντων ρευμάτων και κατά συνέπεια

της στερεομεταφοράς εμπρός από την είσοδο (Μαυραντωνάκης 2013). Μοναδικό μειονέκτημα, κατασκευαστικό και λειτουργικό, αποτελούν τα καμπύλα μέτωπα στο εσωτερικό αυτής που όμως μπορούν να κατασκευαστούν από επιμέρους ευθύγραμμα τμήματα. Η δεδομένη γεωμετρία και σε σχέση πάντα με το πλαίσιο της παρούσας εργασίας, παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα για όλες τις περιπτώσεις.



**ΜΕΡΟΣ 7: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

---

Καραμπάς Θ., 2004 Υπολογιστική Κυματομηχανική και Ακτομηχανική Θεωρητική Προσέγγιση Εκπαιδευτικό και Επιχειρησιακό Λογισμικό, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μυτιλήνη

Κονισπολιάτης Ν., 2009. Παράκτιο Περιβάλλον. Σημειώσεις Μαθήματος. ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία των Υδατικών Πόρων.

Κουτίτας Χρ., 1998. Εισαγωγή στην Παράκτια Τεχνική και τα Λιμενικά Έργα. Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Κουτσοελάκης Ι. 2009. Προσομοίωση θραύσης μονοχρωματικών κυματισμών και τριβής πυθμένα σε εξελιγμένο ομοίωμα Boussinesq . Μεταπτυχιακή Εργασία. ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία των Υδατικών Πόρων.

Κόφτης Θ., 2010. Ακτομηχανική και Λιμενικά Έργα, Παραδόσεις Εαρινού Εξαμήνου 2009-2010.

Μαυραντωνάκης Αντ., 2013. Διερεύνηση Σχεδιασμού Διάταξης Μαρίνας σε Σχέση με τη Στερεομεταφορά στην Είσοδο Και Προτάσεις Βελτίωσης Μεταπτυχιακή Εργασία. ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία των Υδατικών Πόρων.

Μουτζούρης Κ.Ι., 2005. Εισαγωγή στην Ακτομηχανική. ΕΜΠ, Αθήνα.

Μέμος Κ.Δ., 2007. Θαλάσσια Υδροδυναμική. Σημειώσεις Μαθήματος. ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία των Υδατικών Πόρων.

Μέμος Κ.Δ., 2008. Εισαγωγή στα Λιμενικά Έργα. Συμμετρία, Αθήνα.

Μέμος Κ.Δ., 2009. Ολοκληρωμένη Διαχείριση Παράκτιας Ζώνης. Σημειώσεις Μαθήματος. ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία των Υδατικών Πόρων.

Παναγιωτίδης Π., Χατζημήτρος Κ., 2004. Παράκτια Οικοσυστήματα και Ανθρωπογενείς Πιέσεις στις Ακτές. ΕΛΚΕΘΕ, Αθήνα.

Australian Standard™ AS 3962-2001

Brawn P., 1976. Port Engineering. Gulf Publishing Company, Texas, USA.

California Department of Boating and Waterways (DBW), 2005. Guidelines for Marina Berthing Facilities, California, USA.

Dean R.G., Darlymple R.A., 1984. Water Mechanics for Engineers and Scientists. Prentice Hall, Inc., New Jersey.

DHI, 2011. User Guide and Reference Manual. Danish Hydraulic Institute, Water and Environment, Denmark.

L.C. van Rijn, 2012. Principles of Sedimentation and Erosion Engineering in Rivers, Estuaries and Coastal Areas. Aqua Publications, The Netherlands.

Larsen, J & Dancy, M (1983) Open boundaries in Short -wave Simulations – A new approach. Coastal Engineering, 7.

Madsen, P A, Murray, R & Sørensen, O R 1991 A new form of Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics (Part1) Coastal Engineering., 15, No4.

Madsen, P A & Sørensen, O R, 1992 A new form of Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics Part2 :A slowly varying bathymetry. Coastal Eng., 18, pp. 183-204.

Memos, C.D., PORT PLANNING

Memos, C.D., Th.V. Karambas, I. Avgeris, 2005. Irregular wave transformation in the nearshore zone: experimental investigations and comparison with a higher order Boussinesq model. Ocean Engineering 32, 1465–1485.

OCDI -2002 Technical Standards and Commentaries for Ports and Harbours Facilities In Japan

PIANC International Navigation Association, 1995. , *Criteria for Movements of Moored Ships in Harbours.*

Soulsby R. 1997, Dynamics of marine sands, HR Wallingford

Schäffer, H A , Madsen, P A & Sørensen, O R 1993 A Boussinesq model for waves breaking in shallow water. Coastal Engineering, 20, pp. 185-202.

Thomson, E F , H S Chen and LL Hadley 1996: Validation of numerical model for wind waves and swell in harbours. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 112,5. pp. 245-257

US Army Corps of Engineers, 2006. Coastal Engineering Management (CEM) Part 3, Chapter 1, Coastal Sediment Properties.

**ΜΕΡΟΣ 8: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ - ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ**

---

***Αποτελέσματα ΜΙΚΕ 21BW***

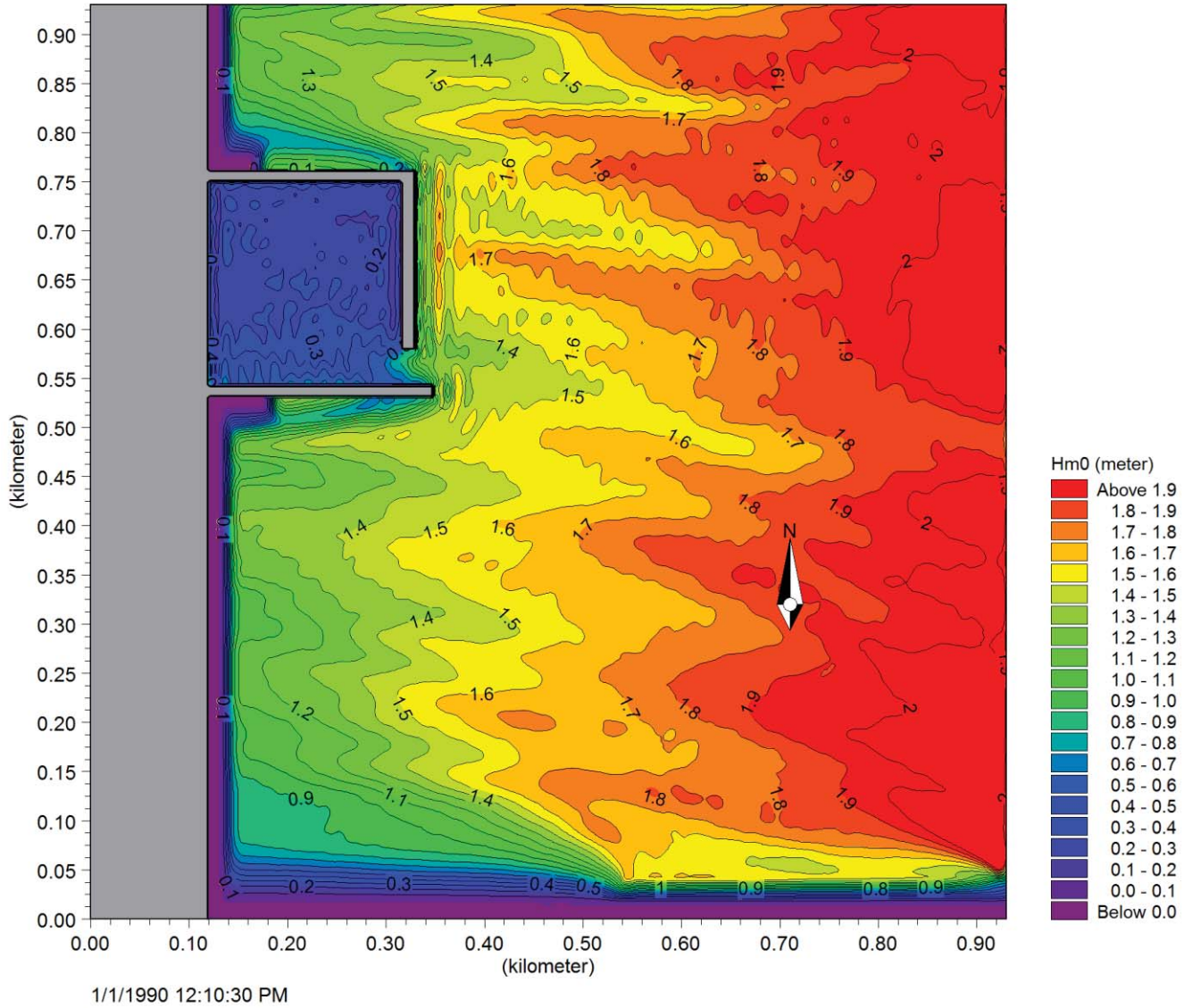
---

Σχήμα ΚΔ-1.1

Εφαρμογή Τοπικού Μοντέλου BW  
Υπολογισμός  $H_{m0}$

Διάταξη 1 - Κυματικό σενάριο 1

$H_s=2,0m$ ,  $T_p=6,0sec$ , Mean Wave Direction= $170^\circ$



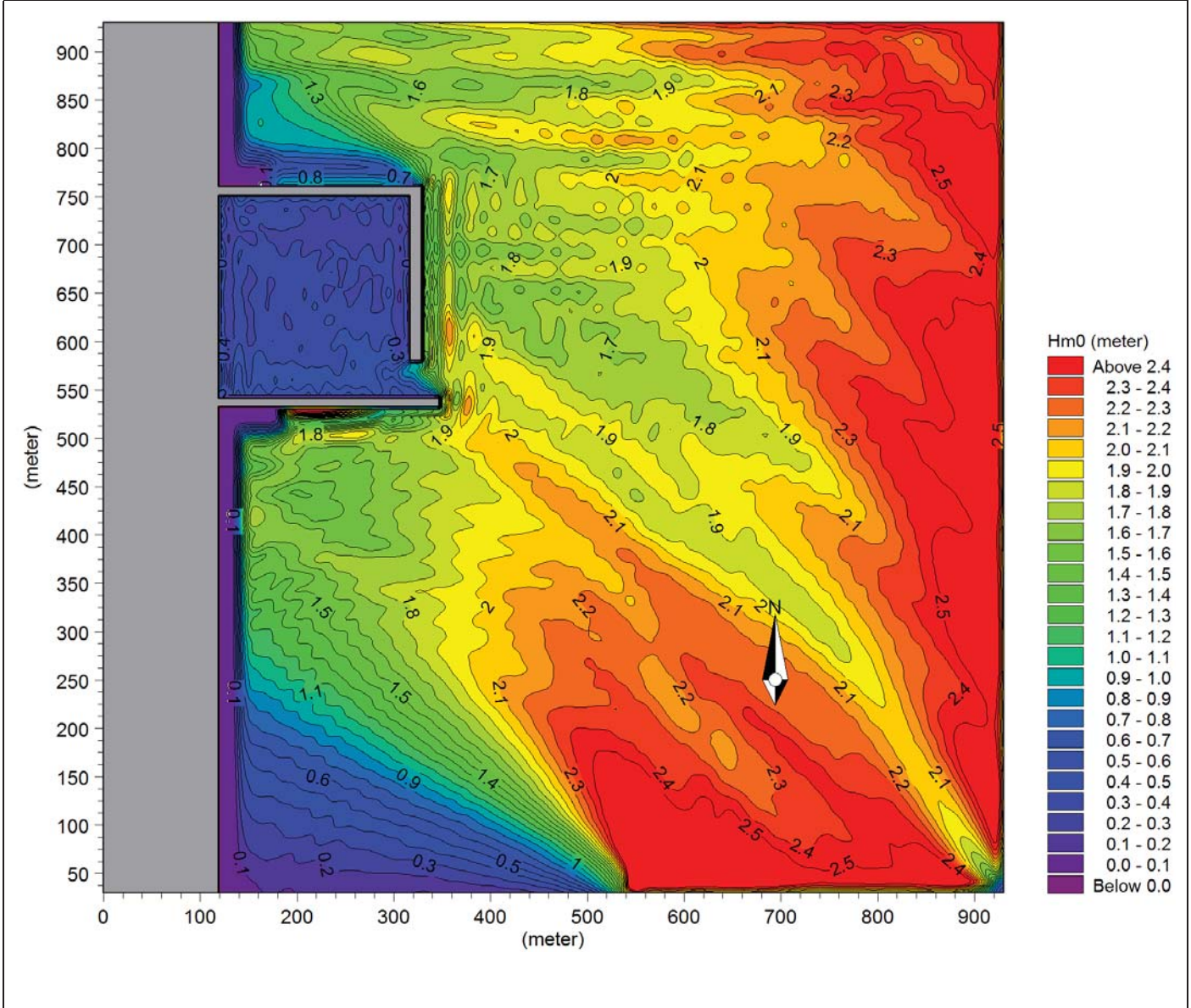


Σχήμα ΚΔ-1.2

Εφαρμογή Τοπικού Μοντέλου BW  
Υπολογισμός  $H_{m0}$

Διάταξη 1 - Κυματικό σενάριο 2

$H_s=2,5m$ ,  $T_p=6,5sec$ , Mean Wave Direction= $135^\circ$



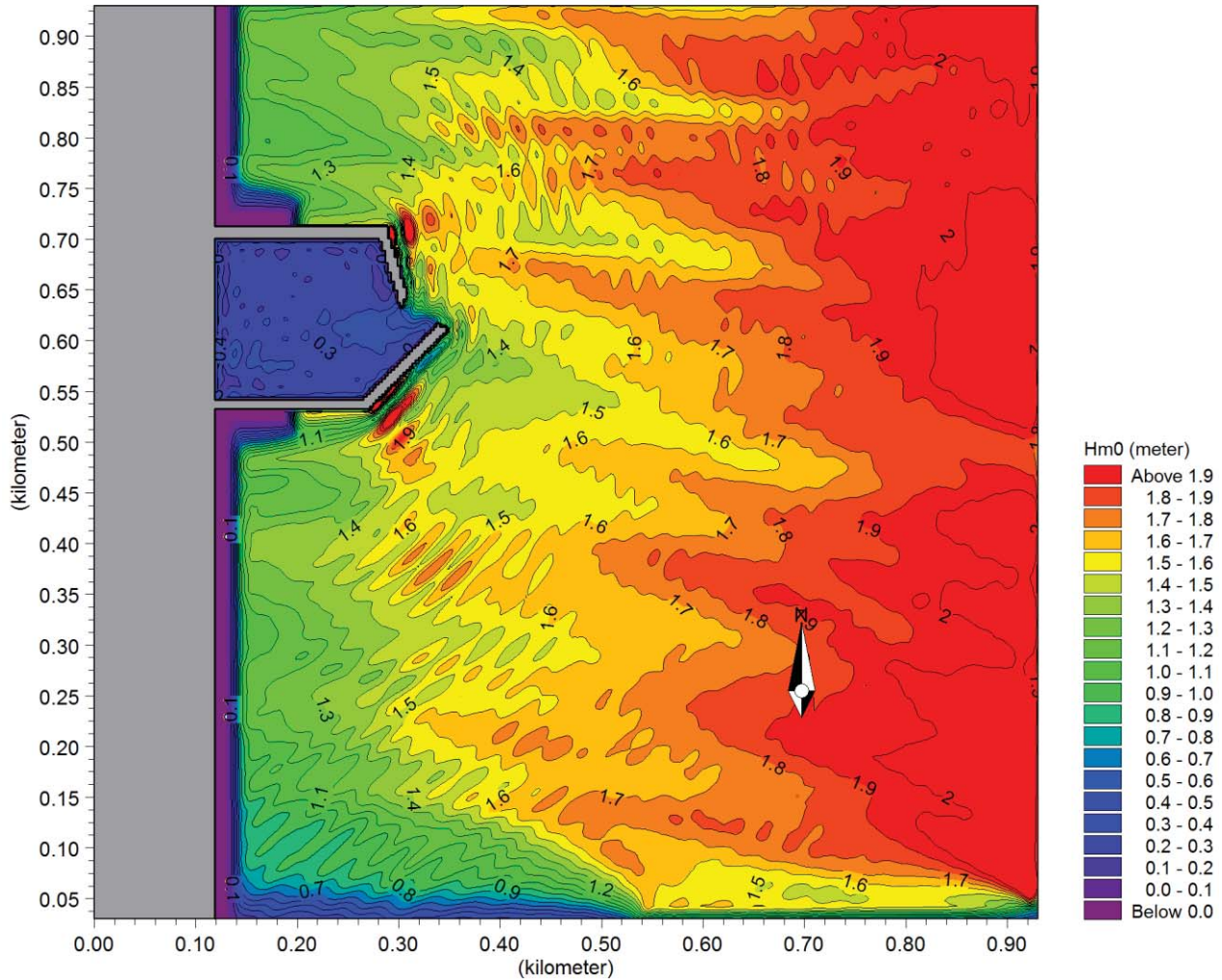


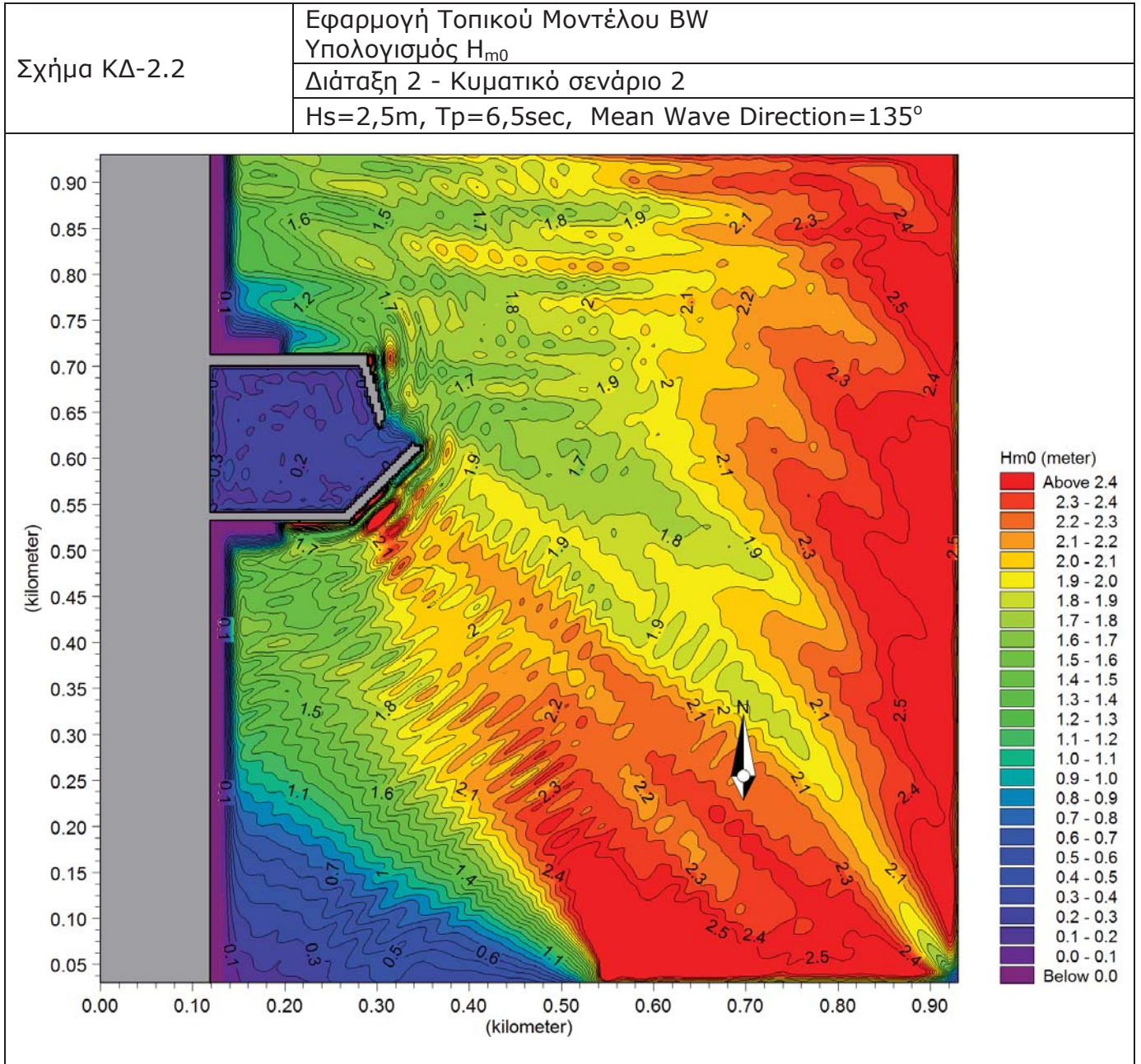
Σχήμα ΚΔ-2.1

Εφαρμογή Τοπικού Μοντέλου BW  
Υπολογισμός  $H_{m0}$

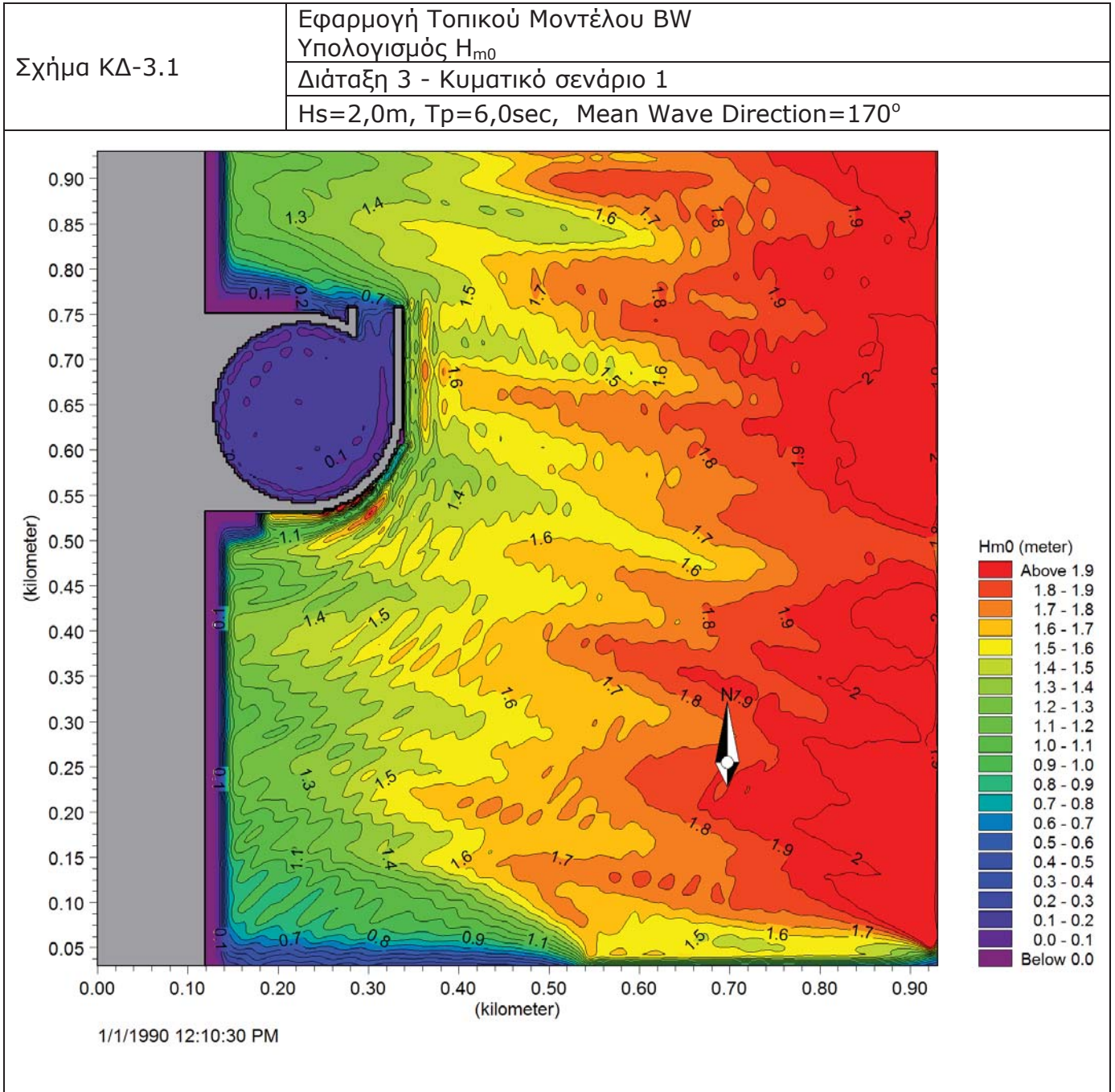
Διάταξη 2 - Κυματικό σενάριο 1

$H_s=2,0m$ ,  $T_p=6,0sec$ , Mean Wave Direction= $170^\circ$









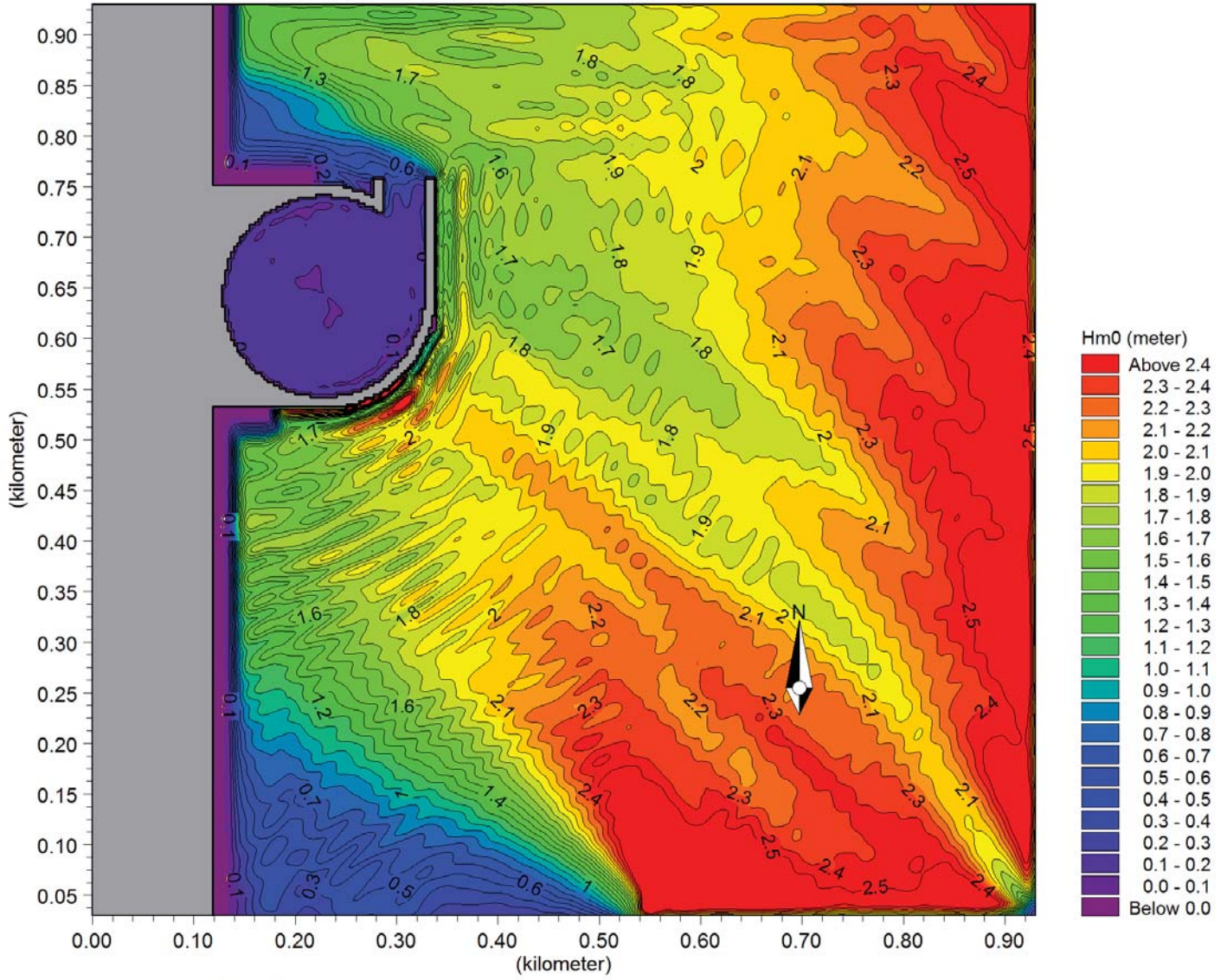
Σχήμα ΚΔ-3.2

Εφαρμογή Τοπικού Μοντέλου BW

Υπολογισμός  $H_{m0}$

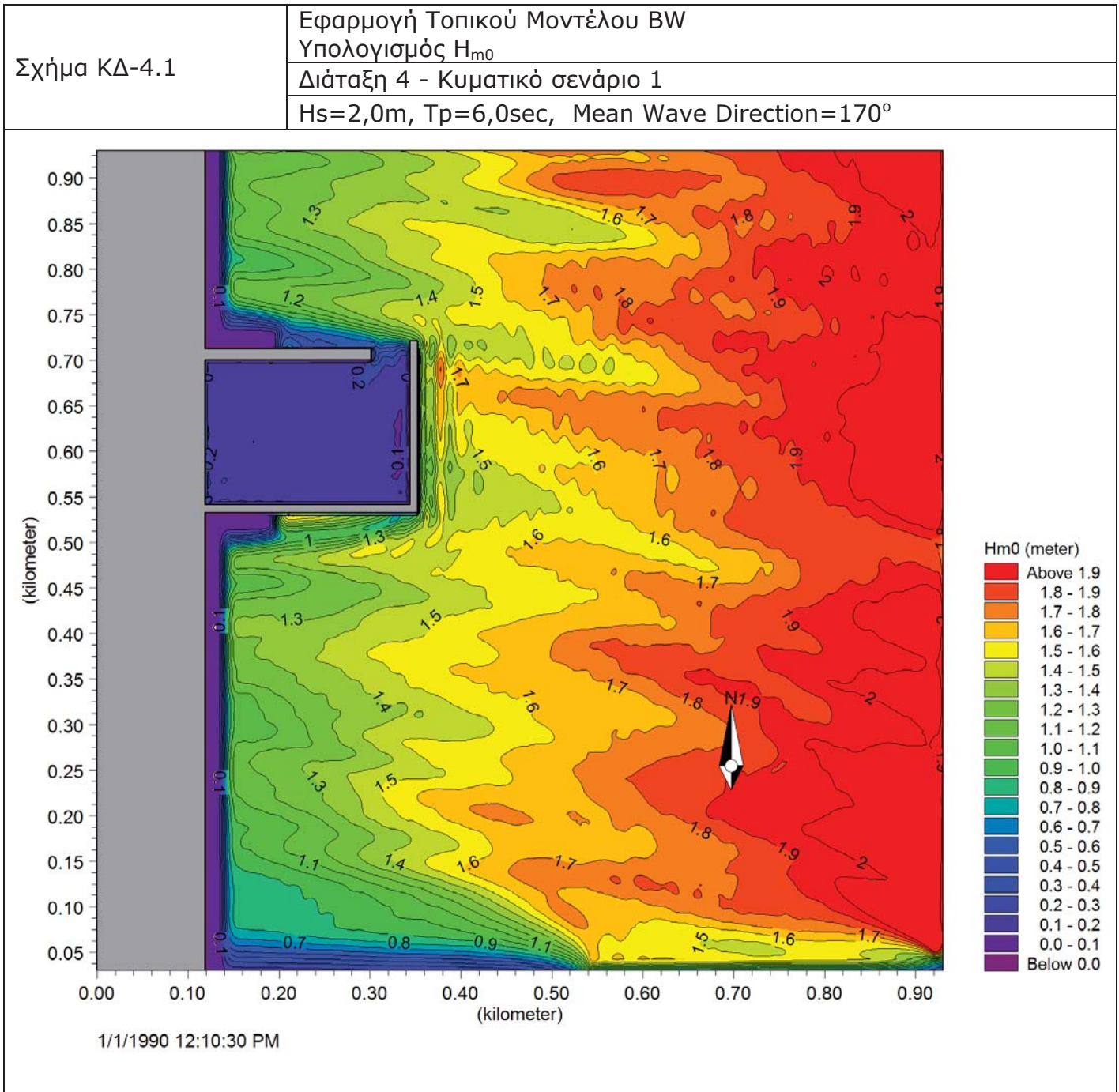
Διάταξη 3 - Κυματικό σενάριο 2

$H_s=2,5m$ ,  $T_p=6,5sec$ , Mean Wave Direction= $135^\circ$

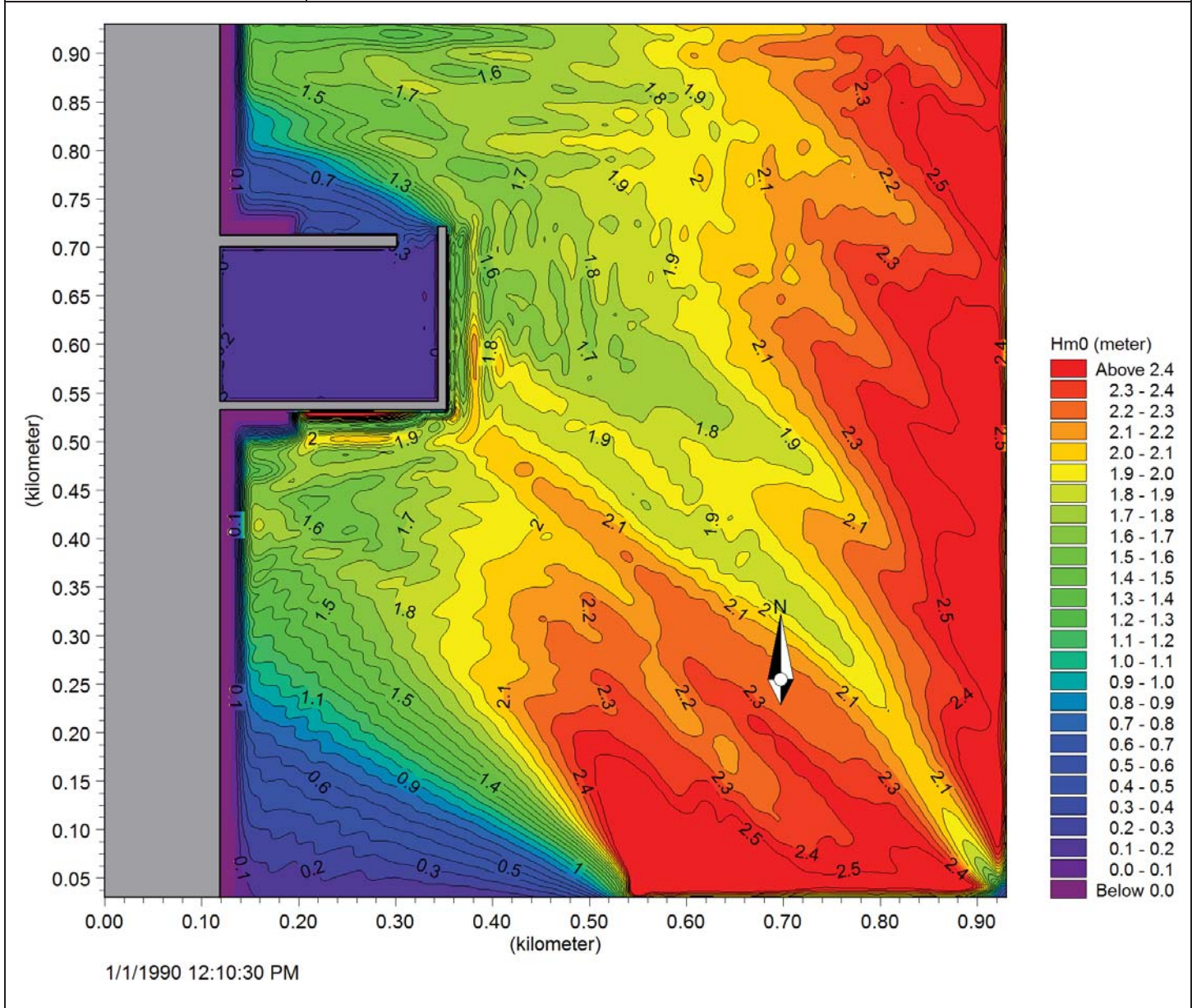


1/1/1990 12:10:30 PM





Σχήμα ΚΔ-4.2	Εφαρμογή Τοπικού Μοντέλου BW
	Υπολογισμός $H_{m0}$
	Διάταξη 4 - Κυματικό σενάριο 2
Hs=2,5m, T <sub>p</sub> =6,5sec, Mean Wave Direction=135°	



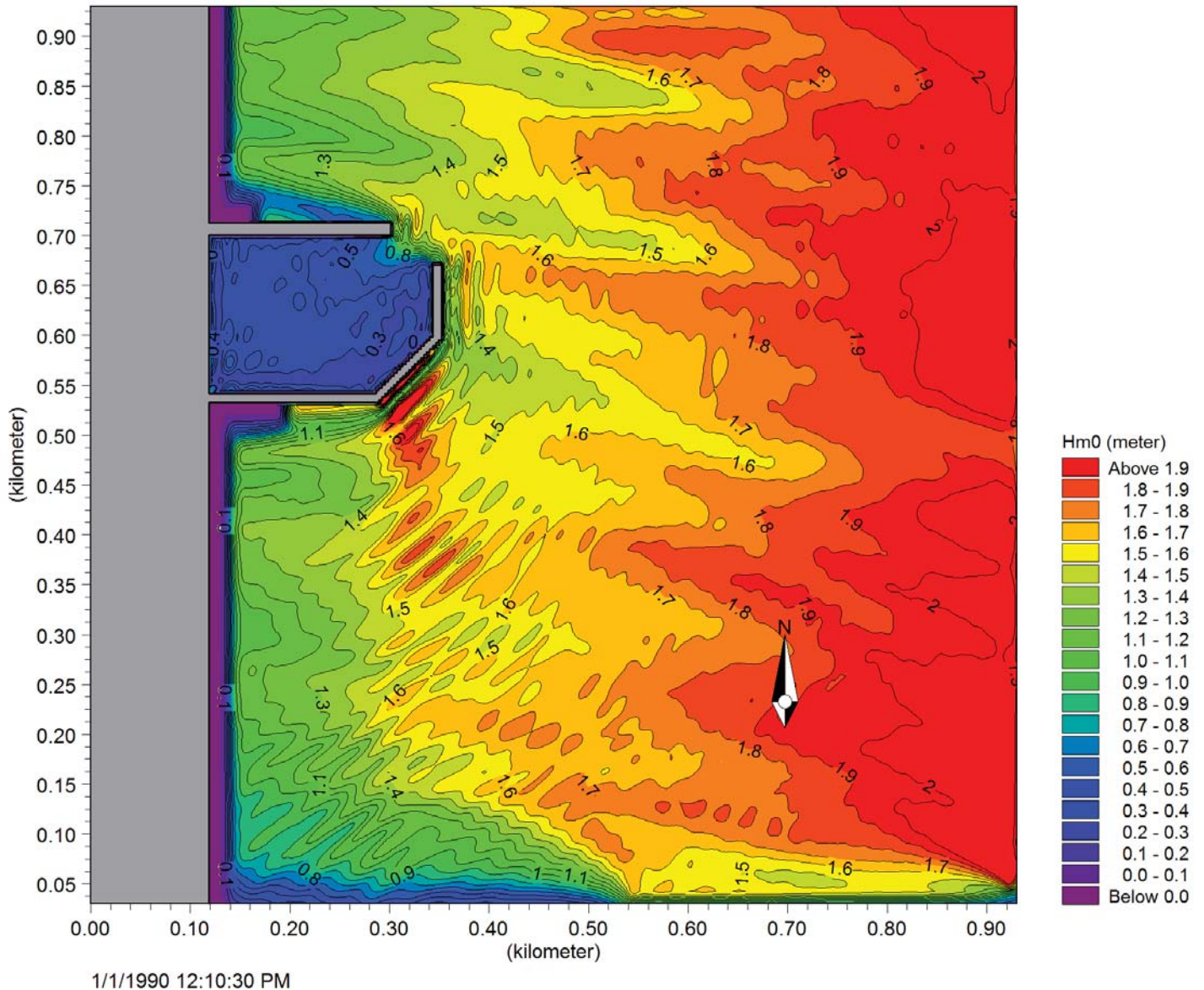


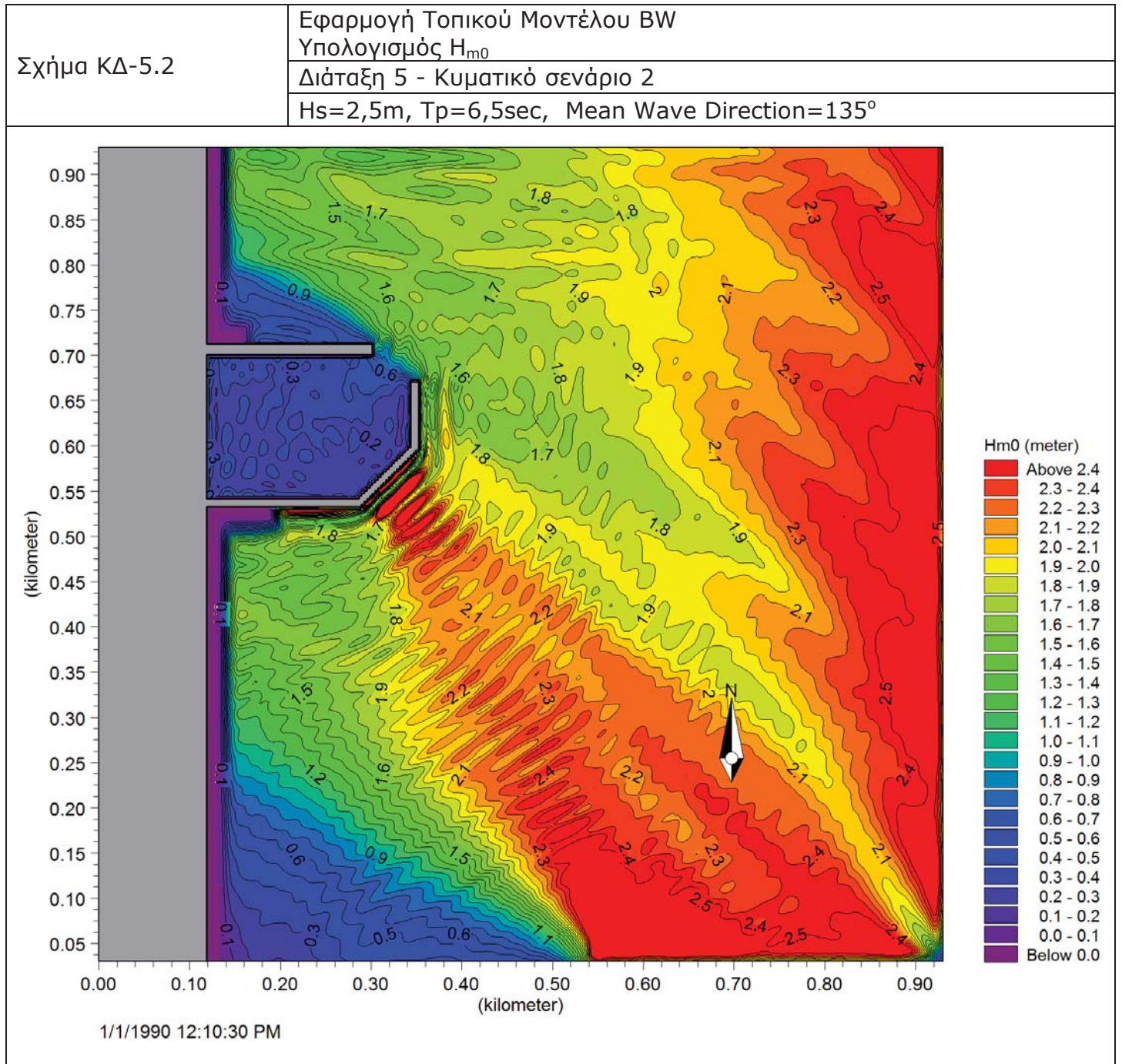
Σχήμα ΚΔ-5.1

Εφαρμογή Τοπικού Μοντέλου BW  
Υπολογισμός  $H_{m0}$

Διάταξη 5 - Κυματικό σενάριο 1

$H_s=2,0m$ ,  $T_p=6,0sec$ , Mean Wave Direction= $170^\circ$

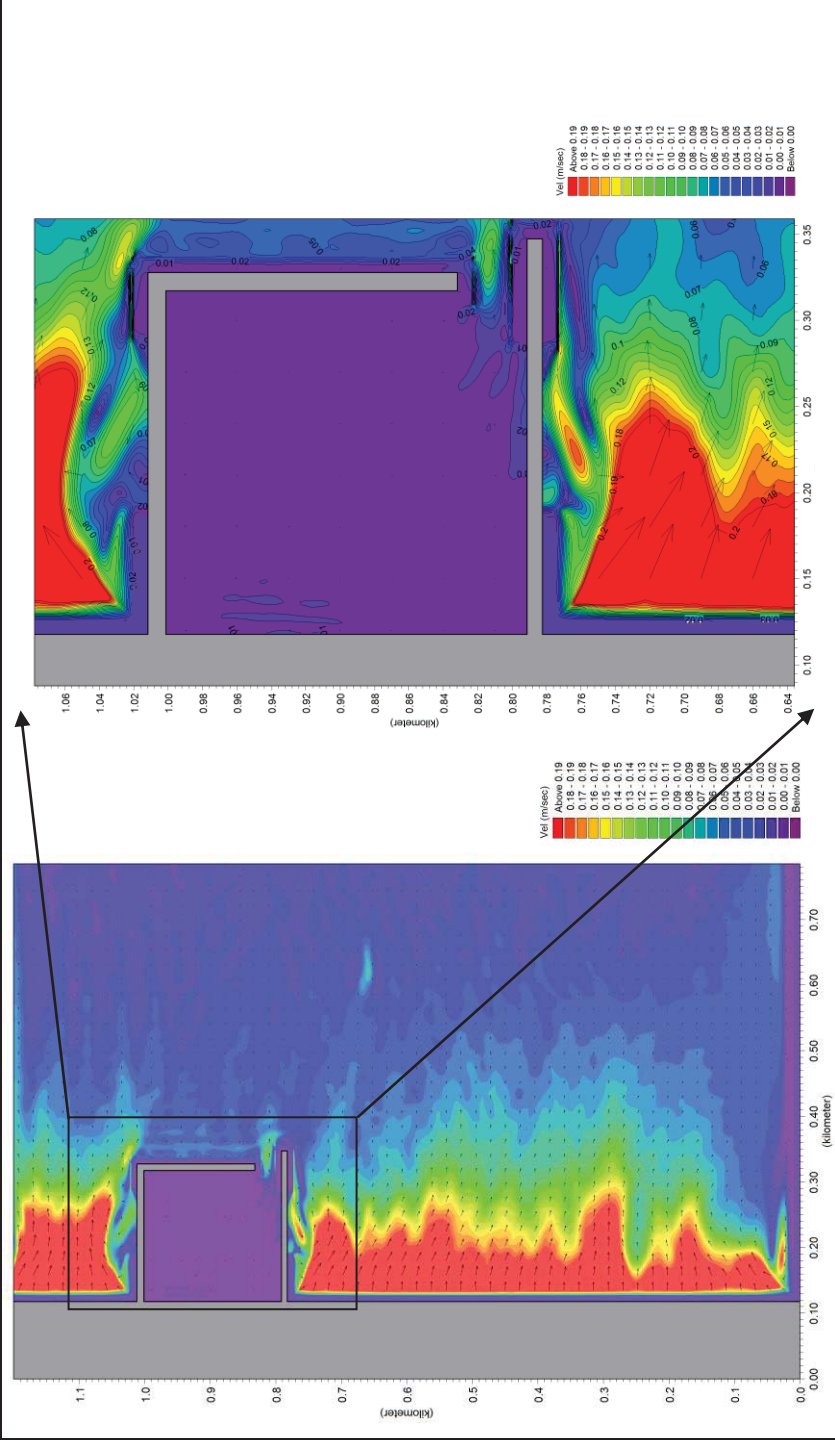


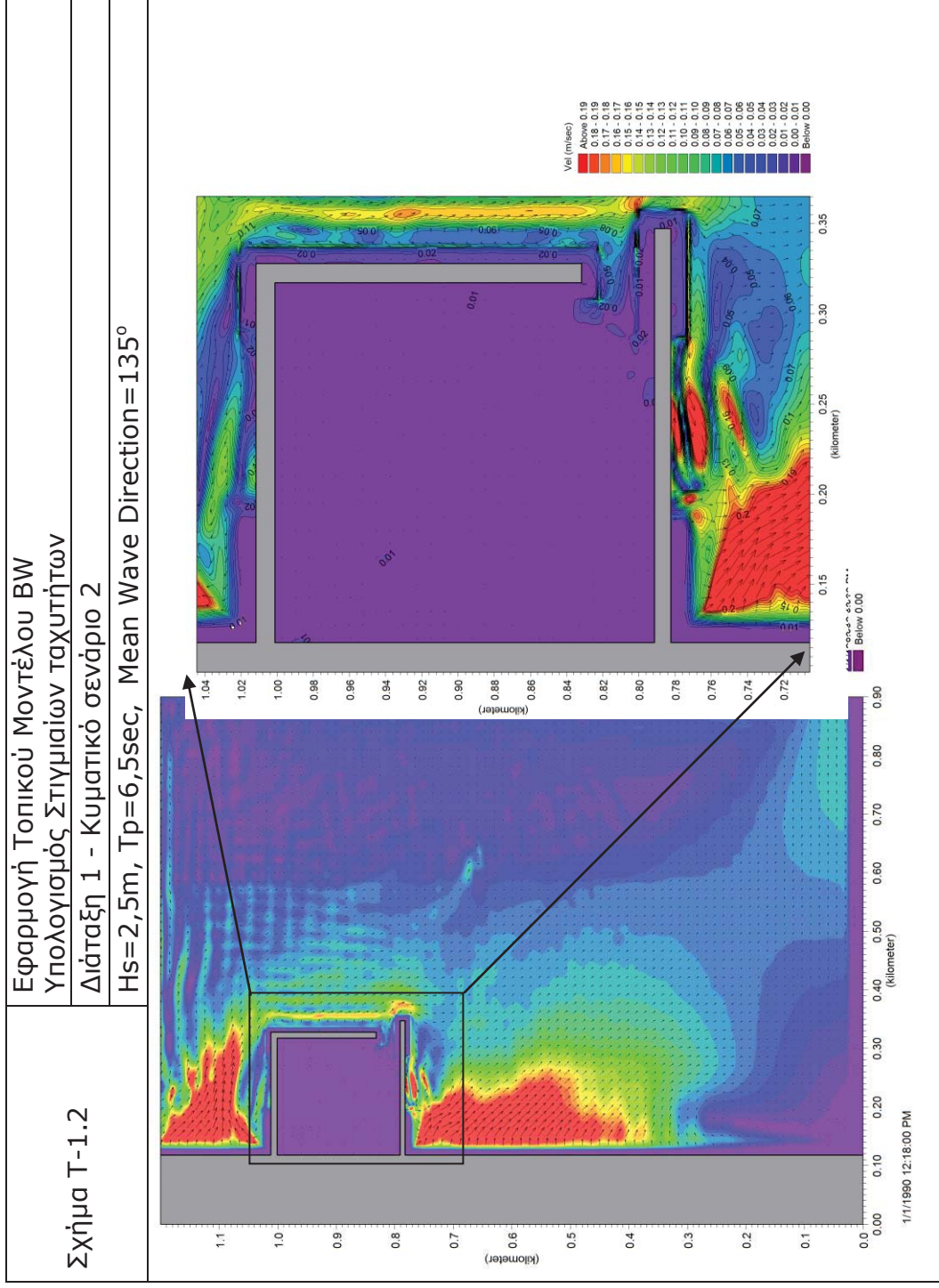


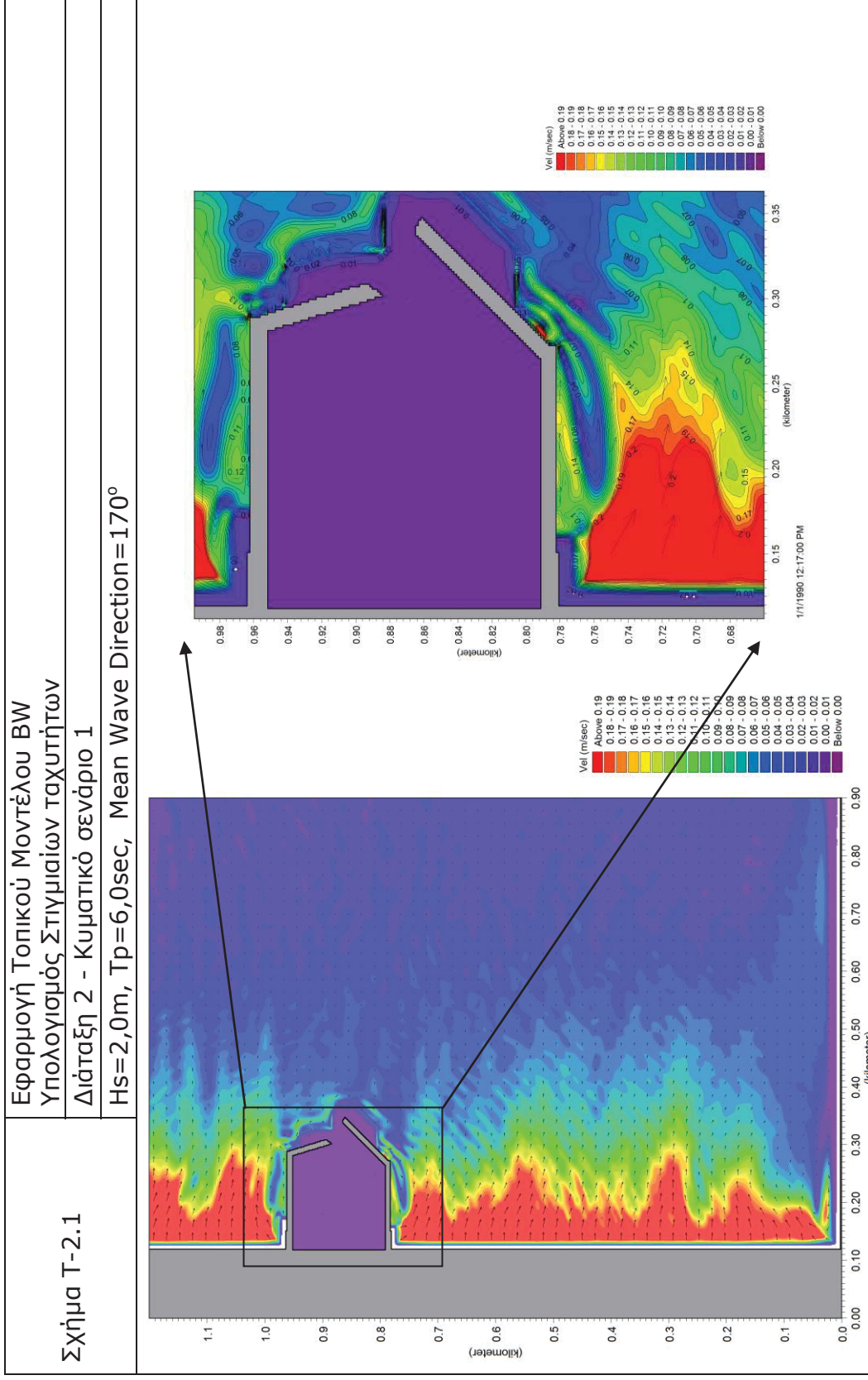


Σχήμα T-1.1

Εφαρμογή Τοπικού Μοντέλου BW  
Υπολογισμός Στιγμιαίων ταχυτήτων  
Διάταξη 1 - Κυματικό σενάριο 1  
Hs=2,0m, T<sub>p</sub>=6,0sec, Mean Wave Direction=170°

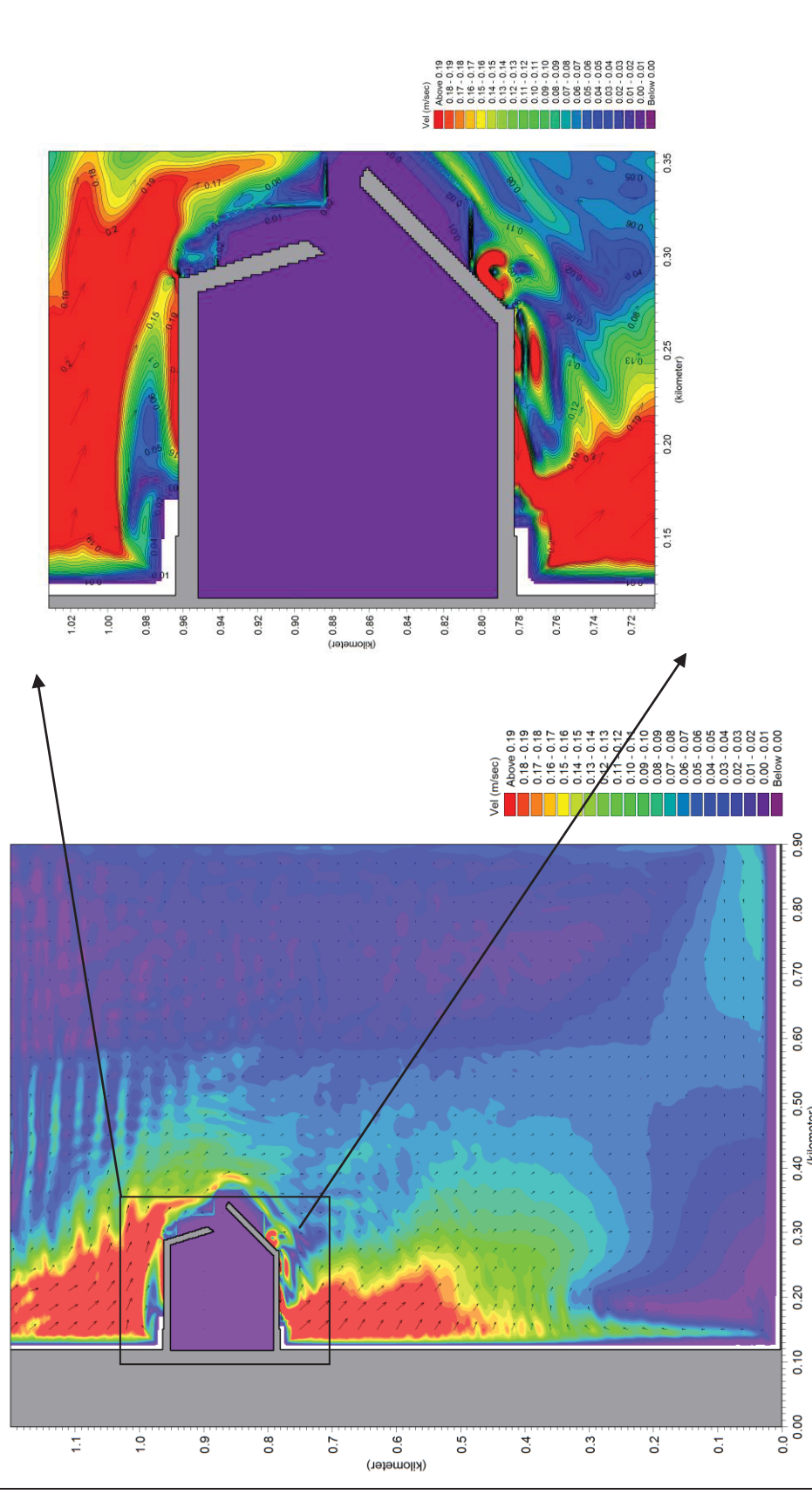




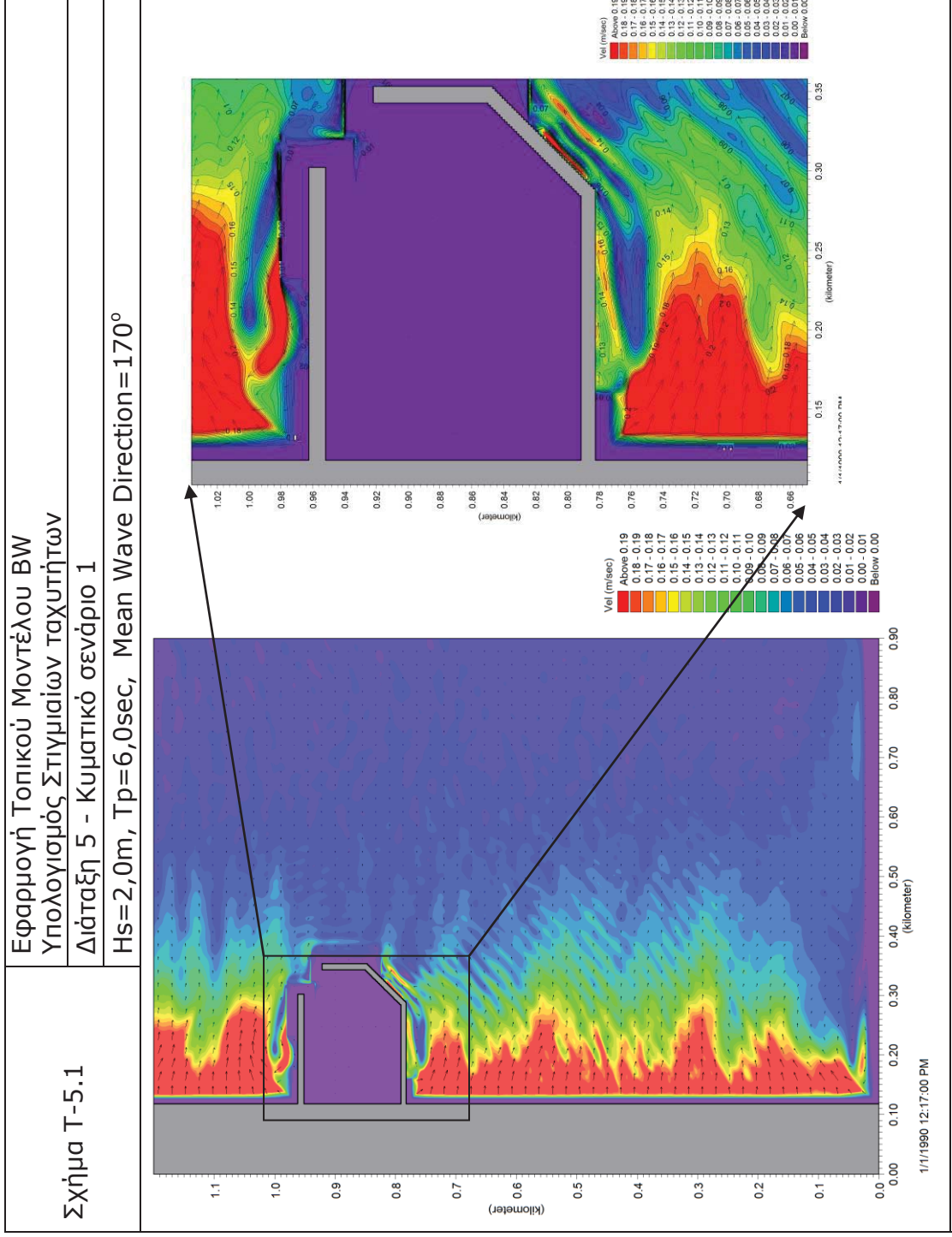


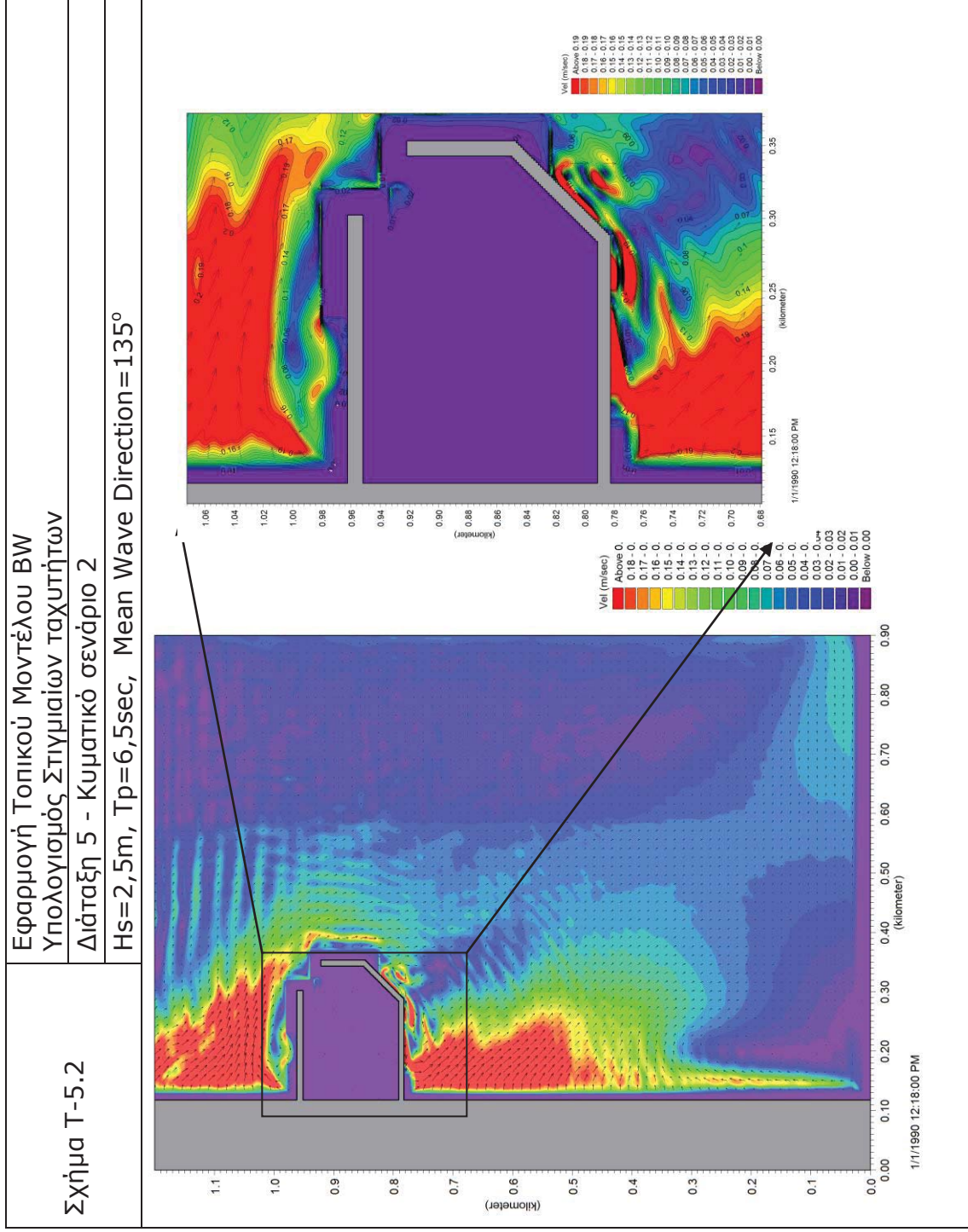
Εφαρμογή Τοπικού Μοντέλου BW  
Υπολογισμός Στιγμιαίων ταχυτήτων  
Διάταξη 2 - Κυματικό σενάριο 2  
Hs=2,5m, Tr=6,5sec, Mean Wave Direction=135°

Σχήμα T-2.2









***Υπολογισμοί  $\tau_b$***

---



**Υπολογισμός ταχύτητας στον πυθμένα**

**Κυματικό σενάριο:** 1 **Διάταξη:** 1

$$u_0 = U + \left(\frac{d}{2}\right) \frac{\partial^2 (dU)}{\partial x^2} - \left(\frac{d^2}{3}\right) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}$$

$$v_0 = V + \left(\frac{d}{2}\right) \frac{\partial^2 (dV)}{\partial y^2} - \left(\frac{d^2}{3}\right) \frac{\partial^2 V}{\partial y^2}$$

<b>κελιά :</b>	(224 , 534)	<b>(225 , 534)</b>	(226 , 533)
<b>u (m/sec)</b>	-0.104732	<b>-0.1066413</b>	-0.1072639

d = 4 m

u'' 0.00057187

**u0 -0.1051163 m/sec**

<b>κελιά :</b>	(225 , 533)	<b>(225 , 534)</b>	(225 , 535)
<b>v (m/sec)</b>	0.01373749	<b>0.01345538</b>	0.01017532

d = 4 m

v'' -0.00133242

**v0 0.0099023 m/sec**

**Υπολογισμός διατμητικής αντοχής στον πυθμένα**

$$\tau_{bx} = \frac{1}{2} f_{cw} u_0 |u_0| \quad \tau_{by} = \frac{1}{2} f_{cw} v_0 |v_0|$$

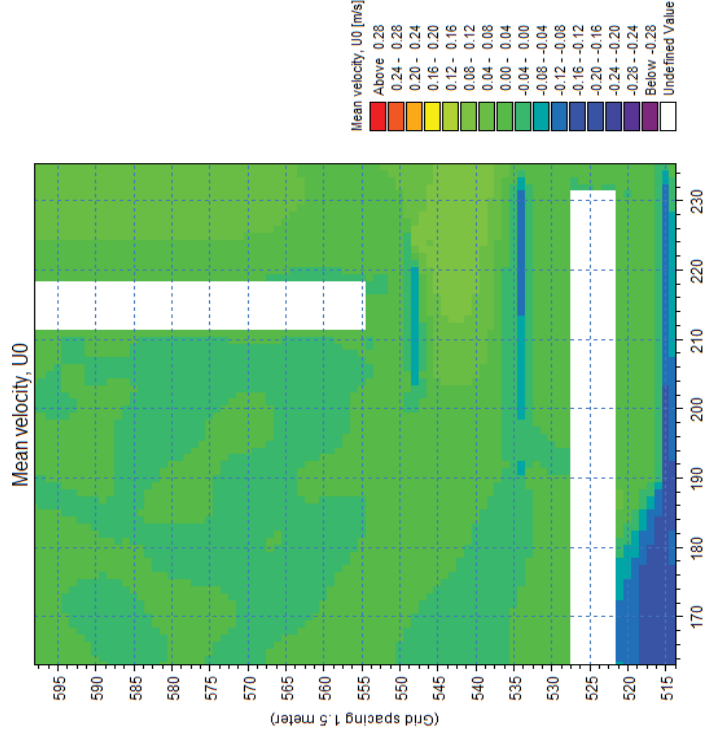
$\omega$  1.04719755  $A_{bx}$  -0.1  $\delta_{ra}$  0.07139  
 $A_{by}$  0.01  $f_{wy}$  0.02093

$U_0$  0.1055817 m/sec

Οπότε

**$\tau_{bx} = -0.000396$**

**$\tau_{by} = 0.000011$**



**Υπολογισμός ταχύτητας στον πυθμένα**

**Κυριακό σενάριο: 1 Διάταξη: 2**

$$u_o = U + \left(\frac{d}{2}\right) \frac{\partial^2 (dU)}{\partial x^2} - \left(\frac{d^2}{3}\right) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}$$

$$v_o = V + \left(\frac{d}{2}\right) \frac{\partial^2 (dV)}{\partial y^2} - \left(\frac{d^2}{3}\right) \frac{\partial^2 V}{\partial y^2}$$

<b>κελίδι :</b>	(213 , 589)	<b>(214 , 589)</b>	(215 , 589)
<b>u (m/sec)</b>	0.002911232	<b>0.00309109</b>	0.003231153

d = 4 m

u'' -1.76822E-05

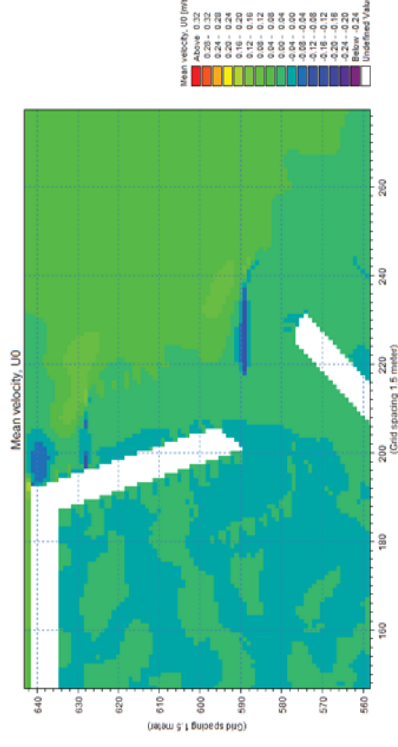
**uo 0.00304393 m/sec**

<b>κελίδι :</b>	(214 , 590)	<b>(214 , 589)</b>	(214 , 588)
<b>v (m/sec)</b>	-0.004769922	<b>-0.0043158</b>	-0.00386135

d = 4 m

v'' 1.40444E-07

**vo -0.00431542 m/sec**



**Υπολογισμός διατηρητικής αντοχής στον πυθμένα**

$$\tau_{bx} = \frac{1}{2} f_{sw} u_o |u_o| \quad \tau_{by} = \frac{1}{2} f_{sw} v_o |u_o|$$

ω = 1.047197551      A<sub>bx</sub> = 0      άρα      f<sub>wix</sub> = 0.01359  
 =      A<sub>by</sub> = -0      =      f<sub>wiy</sub> = 0.01529

**Uo 0.005280945 m/sec**

Οπότε

**tbx = 0.00000011**

**tby = -0.00000017**

**Υπολογισμός ταχύτητας στον πυθμένα**

**Κυματικό σενάριο: 2 Διάταξη: 1**

$$u_0 = U + \left(\frac{d}{2}\right) \frac{\partial^2 (dU)}{\partial x^2} \quad \left(\frac{d^2}{3}\right) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}$$

$$v_0 = V + \left(\frac{d}{2}\right) \frac{\partial^2 (dV)}{\partial y^2} \quad \left(\frac{d^2}{3}\right) \frac{\partial^2 V}{\partial y^2}$$

<b>κελιά :</b>	(224 , 534)	<b>(225 , 534)</b>	(226 , 533)
<b>u (m/sec)</b>	-0.1061817	<b>-0.1094976</b>	-0.10959

d =

4 m

u'' 0.00143267

**u0 -0.1056772 m/sec**

<b>κελιά :</b>	(225 , 533)	<b>(225 , 534)</b>	(225 , 535)
<b>v (m/sec)</b>	0.01181679	<b>0.01157204</b>	0.007063699

d =

4 m

v'' -0.00189493

**v0 0.0065189 m/sec**

**Υπολογισμός διατμητικής αντοχής στον πυθμένα**

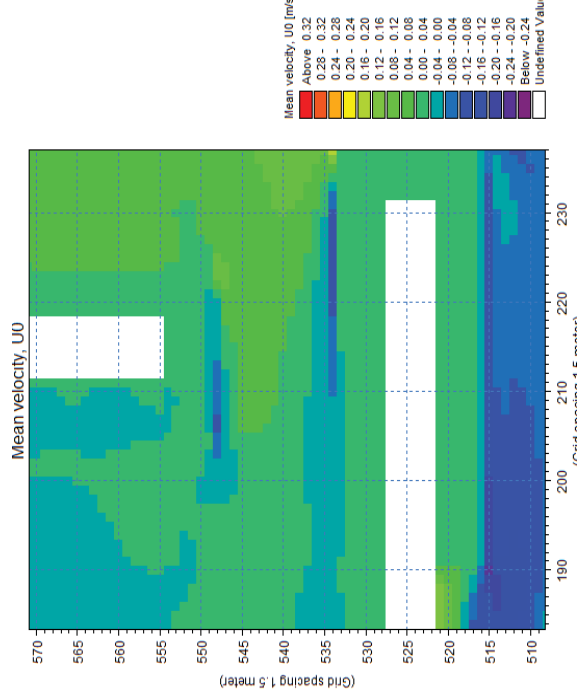
$$\tau_{bx} = \frac{1}{2} f_{sw} u_0 |u_0| \quad \tau_{by} = \frac{1}{2} f_{sw} v_0 |v_0|$$

$\omega$  1.04719755  $A_{bx}$  -0.1  $f_{wx}$  = 0.07164  
 $A_{by}$  0.01  $f_{wy}$  = 0.01776

$U_0$  0.10587803 m/sec

Οπότε

**$\tau_{bx}$  = -0.000401**  
 **$\tau_{by}$  = 0.000006**



**Υπολογισμός ταχύτητας στον πυθμένα**

**Κυματικό σενάριο: 2 Διάταξη: 2**

$$u_0 = U + \left(\frac{d}{2}\right) \frac{\partial^2 (dU)}{\partial x^2} - \left(\frac{d^2}{3}\right) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}$$

$$v_0 = V + \left(\frac{d}{2}\right) \frac{\partial^2 (dV)}{\partial y^2} - \left(\frac{d^2}{3}\right) \frac{\partial^2 V}{\partial y^2}$$

<b>κελιά :</b>	(214 ,588)	<b>(215 ,588)</b>	(216 ,588)
<b>u (m/sec)</b>	0.007025667	<b>0.00856202</b>	0.01059177

d = 4 m

u'' 0.000219286

**u0 0.009146784 m/sec**

<b>κελιά :</b>	(215 ,589)	<b>(215 ,588)</b>	(215 ,587)
<b>v (m/sec)</b>	-0.000554601	<b>-0.0001526</b>	0.000267308

d = 4 m

v'' 7.91809E-06

**v0 -0.000131439 m/sec**

**Υπολογισμός διατμητικής αντοχής στον πυθμένα**

$$\tau_{bx} = \frac{1}{2} f_{sw} u_0 |u_0| \quad \tau_{by} = \frac{1}{2} f_{sw} v_0 |v_0|$$

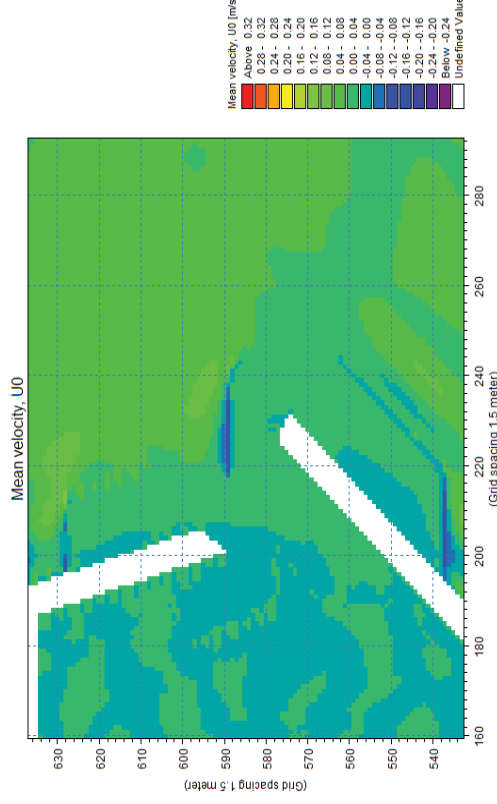
ω 1.047197551 A<sub>bx</sub> 0.01 άρα f<sub>wx</sub> = 0.02027  
 A<sub>by</sub> 0.000 f<sub>wy</sub> = 0.00632

U<sub>0</sub> 0.009147728 m/sec

Οπότε

**τ<sub>bx</sub> = 0.0000000848**

**τ<sub>by</sub> = -0.0000000004**



**Υπολογισμός ταχύτητας στον πυθμένα**

**Κυριακό σενάριο: 1 Διάταξη: 5**

$$u_0 = U + \left(\frac{d}{2}\right) \frac{\partial^2 (dU)}{\partial x^2} - \left(\frac{d^2}{3}\right) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}$$

$$v_0 = V + \left(\frac{d}{2}\right) \frac{\partial^2 (dV)}{\partial y^2} - \left(\frac{d^2}{3}\right) \frac{\partial^2 V}{\partial y^2}$$

<b>κελίά :</b>	(224 , 627)	<b>(225 , 627)</b>	(226 , 627)
<b>u (m/sec)</b>	-0.1135548	<b>-0.1138535</b>	-0.1123064

d = 4 m

u'' 0.00082036

**u0 -0.1116659 m/sec**

<b>κελίά :</b>	(225 , 628)	<b>(225 , 627)</b>	(225 , 626)
<b>v(m/sec)</b>	0.00693285	<b>0.01015239</b>	0.01015239

d = 4 m

v'' -0.00143091

v0 **0.0063366** m/sec

**Υπολογισμός διατηπητικής αντοχής στον πυθμένα**

$$\tau_{bx} = \frac{1}{2} f_{cw} u_0 |u_0| \quad \tau_{by} = \frac{1}{2} f_{cw} v_0 |v_0|$$

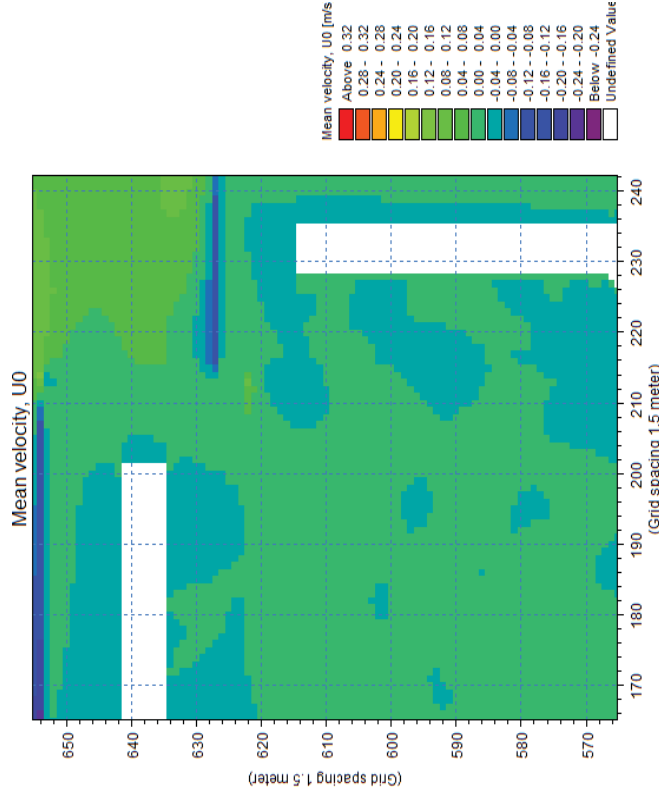
ω 1.04719755 A<sub>bx</sub> -0.11 άρα f<sub>wx</sub> = 0.07425  
 A<sub>by</sub> 0.01 f<sub>wy</sub> = 0.01757

U<sub>0</sub> 0.11184553 m/sec

Οπότε

**τ<sub>bx</sub> = -0.000464**

**τ<sub>by</sub> = 0.000006**



**Υπολογισμός ταχύτητας στον πυθμένα**

**Κυριατικό σενάριο: 2 Διάταξη: 5**

$$u_0 = U + \left(\frac{d}{2}\right) \frac{\partial^2 (dU)}{\partial x^2} - \left(\frac{d^2}{3}\right) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}$$

$$v_0 = V + \left(\frac{d}{2}\right) \frac{\partial^2 (dV)}{\partial y^2} - \left(\frac{d^2}{3}\right) \frac{\partial^2 V}{\partial y^2}$$

<b>κελίά :</b>	(223 , 627)	<b>(224 , 627)</b>	(225 , 627)
<b>u (m/sec)</b>	-0.1119329	<b>-0.1101615</b>	-0.1090827

d = 4 m

u'' -0.00030782

**u0 -0.1109824 m/sec**

<b>κελίά :</b>	(224 , 628)	<b>(224 , 627)</b>	-224,626
<b>v (m/sec)</b>	0.00188663	<b>0.00587143</b>	0.007126776

d = 4 m

v'' -0.00121308

**v0 0.0026365 m/sec**

**Υπολογισμός διατμητικής αντοχής στον πυθμένα**

$$\tau_{bx} = \frac{1}{2} f_{sw} u_0 |u_0| \quad \tau_{by} = \frac{1}{2} f_{sw} v_0 |u_0|$$

$\omega$  1.04719755  $A_{bx}$  -0.11  $\acute{\alpha}\rho\alpha$   $f_{wx}$  = 0.07396  
 $A_{by}$  0.003  $f_{wy}$  = 0.01298

$U_0$  0.11101367 m/sec

Οπότε

**$\tau_{bx}$  = -0.000456**

**$\tau_{by}$  = 0.000002**

