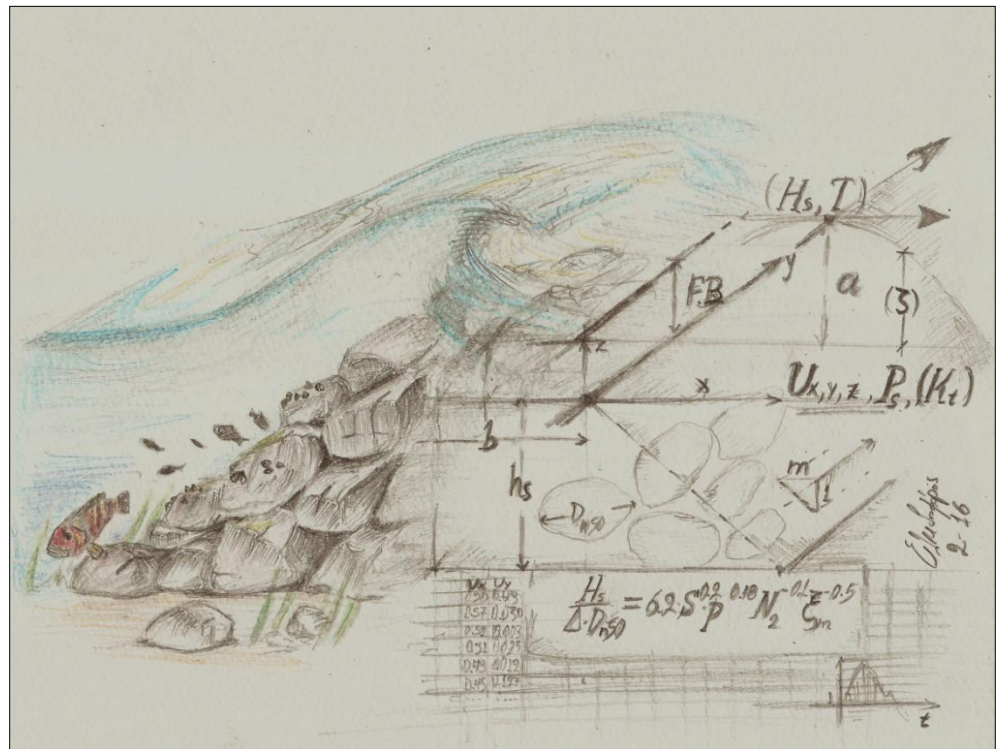




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ-ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ
ΣΕ ΥΦΑΛΟΥΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΕΣ**



Ελπιδοφόρος-Ευγένιος Γ. Ρεπούσης

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»

Επιβλέπων: Κ. Μέμος, Ομότιμος Καθηγητής

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016

Εικονογράφηση εξωφύλλου: Ελπιδοφόρος-Ευγένιος Γ. Ρεπούσης

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, θέλω να ευχαριστήσω θερμά όσους με βοήθησαν για την εκπόνησή της.

Αρχικά θέλω να εκφράσω τις πιο θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα της παρούσας εργασίας και δάσκαλό μου Ομότιμο Καθηγητή ΕΜΠ, Κωνσταντίνο Μέμο για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον αλλά συνάμα δύσβατο θέμα. Η συνεχής καθοδήγησή του και το ουσιαστικό ενδιαφέρον του με ενθάρρυναν να συνεχίσω με σταθερούς ρυθμούς καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειας αυτής.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον δάσκαλό μου Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ, Παναγιώτη Παπανικολάου. Η συνεχής του παρουσία, πάντα με καίριες επισημάνσεις ήταν καθοριστική για την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους Υποψήφιους Διδάκτορες, Αναστάσιο Μεταλληνό και Γεώργιο Κλωνάρη για την ουσιαστική συμβολή τους στην υλοποίησης της εργασίας αυτής, και πέρα από την παροχή των πειραματικών δεδομένων, που ήταν παρόντες να βοηθήσουν με κάθε τρόπο.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και ιδιαιτέρως τα αδέρφια μου για την αγάπη και την υποστήριξή τους.

Ελπιδοφόρος Ρεπούσης

Αθήνα 2016

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	iii
Ορισμοί συμβόλων	vii
Περίληψη	ix
Extended abstract`	xi
Introduction	xi
Previous research on SB and posing the problem	xii
Submerged rubble mound structures as artificial habitats	xiv
Managing with turbulent flow through SPBs	xvi
Methodology	xvii
Description of the experimental model set-ups	xix
Laboratory experiments by Metallinos <i>et. al.</i> (2014)-Pressures	xix
Laboratory experiments by Metallinos <i>et al.</i> 2016)	xxi
Analysis of the experimental data	xxii
Results.....	xxiv
Shorting in a usable manner the derived hydrodynamic values	xxiv
Proposed methodology based on normal probability distribution approach.....	xxv
Results in relevance to future research	xxvi
Stability of SPB	xxvii
Summary and conclusions	xxvii
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Αντικείμενο της εργασίας	1
1.2 Τοποθέτηση του προβλήματος	2

2	ΥΦΑΛΟΙ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΕΣ.....	5
2.1	Οι ύφαλοι κυματοθραύστες, μια εναλλακτική στη σύγχρονη εποχή	5
2.2	Βασικές παράμετροι σχεδιασμού Ύφαλων Κυματοθραυστών.....	10
2.3	Θεωρία κυματισμών.....	12
3	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	19
3.1	Εκλογή κλίμακας ομοιότητας	19
3.2	Υπολογισμός πορώδους του φυσικού ομοιώματος ύφαλου κυματοθραύστη.....	21
4	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ & ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	23
4.1	Πειράματα των Metallinos et. al (2014) – Ολικές πιέσεις.....	23
4.1.1	Γενική Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης.....	23
4.1.2	Διάταξη φυσικού μοντέλου των Metallinos et. al (2014)	25
4.2	Πειράματα των Metallinos et. al (2016) – Τροχιακές ταχύτητες.....	27
4.2.1	Γενική Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης.....	27
4.1.2	Διάταξη φυσικού μοντέλου των Metallinos et. al (2016)	27
5	ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.	31
5.1	Εισαγωγή.....	31
5.2	Ανάλυση πειραματικών δεδομένων	31
5.2.1	Πιέσεις - Πρωτογενή δεδομένα των Metallinos et al. 2014.....	32
5.2.2	Ταχύτητες - Πρωτογενή δεδομένα των Metallinos et al. 2016.....	39
6	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.	45
6.1	Εισαγωγή.....	45
6.2	Υδροδυναμικές πιέσεις.....	45
6.3	Τροχιακές ταχύτητες	67

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	77
7.1 Γενικότερα συμπεράσματα	77
7.2 Συμπεράσματα ως προς το πείραμα των <i>Metallinos et al. 2014</i>	77
7.3 Συμπεράσματα ως προς το πείραμα των <i>Metallinos et al. 2016</i>	78
7.4 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	78
8 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	79
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Πίνακες μετρήσεων και παράδειγμα αναγωγής μεγεθών κατ’ αναλογία Froude (Froude analogy upscaling) για ύψη υδροδυναμικής πίεσης γύρω και μέσα σε διαπερατό ύφαλο κυματοθραύστη (πειραματική διάταξη των <i>Metallinos et al. 2014</i>).....	79
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Πίνακες μετρήσεων και παράδειγμα αναγωγής μεγεθών κατ’ αναλογία Froude (Froude analogy upscaling) για τροχιακές ταχύτητες στο εσωτερικό διαπερατού ύφαλου κυματοθραύστη (πειραματική διάταξη των <i>Metallinos et al. 2016</i>).	93
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Σύγκριση μετρήσεων με θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης	109
9 Βιβλιογραφία	125

Ορισμοί συμβόλων

A) Σύμβολα με ελληνικά γράμματα

Δt : χρονικό βήμα

ε : παράμετρος κλίμακας που εκφράζει τη μη γραμμικότητα $\varepsilon=H/d$

ε : αδιάστατο ύψος κύματος ($=kH/2$)

ζ : ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας μετρούμενη από τη στάθμη ηρεμίας

ν : συντελεστής τυρβώδους συνεκτικότητας

ρ : πυκνότητα νερού

σ : παράμετρος κλίμακας που εκφράζει τη διασπορά συχνοτήτων $\sigma=h/L$

φ : γωνία φάσης

ω : γωνιακή συχνότητα ($=2\pi/T$)

Φ : συνάρτηση δυναμικού

φ : το πορώδες (λόγος του όγκου κενών προς το συνολικό όγκο)

B) Σύμβολα με λατινικά γράμματα

B : πλάτος στέψης ύφαλου κυματοθραύστη

CV : συντελεστής μεταβλητότητας

d_{50} : μέση διάμετρος ογκολίθου

h : βάθος θάλασσας μετρούμενο από τη στάθμη ηρεμίας

f : κυκλική συχνότητα ($=1/T$)

FB : ελεύθερο βάθος νερού

g : επιτάχυνση βαρύτητας

H : ύψος κύματος (κατακόρυφη απόσταση κοιλίας κορυφής)

k : αριθμός κύματος (μέτρο διανύσματος), $k=2\pi/L$

L : μήκος κύματος

P_s : Υδροδυναμική πίεση

T : περίοδος

V_x : συνιστώσα ταχύτητας κατά τη διεύθυνση x

V_y : συνιστώσα ταχύτητας κατά τη διεύθυνση y

V_z : συνιστώσα ταχύτητας κατά τη διεύθυνση z

U : τροχιακή ταχύτητα

z : απόσταση από τον πυθμένα

Γ) Συντομεύσεις

M.S.H: μέση στάθμη ηρεμίας

S.W.L.: Still Water level

Υ.Κ.: ύφαλοι κυματοθραύστες

SB: Submerged Breakwater

SPB: Submerged Permeable Breakwater

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η διερεύνηση του υδροδυναμικού πεδίου που διαμορφώνονται στο εσωτερικό ενός ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη από λιθορριπή και γίνεται μια προσπάθεια ποιοτικής αποτύπωσης μεγεθών όπως οι υδροδυναμικές πιέσεις και οι τροχιακές ταχύτητες, όπως εξελίσσονται υπό την κυματική δράση.

Για τις τυπικές εφαρμογές των Υ.Κ., η σχέση μεταξύ της απόδοσης ενός διαπερατού Υ.Κ. στην απομείωση της κυματικής ενέργειας και του βαθμού ικανότητάς του να λειτουργεί ως τεχνητός οικότοπος, είναι ένα αντικείμενο έρευνας στο οποίο δεν έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος. Κοινή συνισταμένη του τεχνικού αυτού έργου προστασίας και της δυνατότητα υποστήριξης θαλάσσιας ζωής γύρω και εντός αυτού, αποτελεί η διερεύνηση του υδροδυναμικού πεδίου που αναπτύσσεται αντιστοίχως.

Από πλευράς βιολογίας, η γνώση για την ανάπτυξη μεγεθών όπως η υδροδυναμική πίεση και η τροχιακή ταχύτητα είναι βασική πληροφορία για την αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος μιας τέτοιας κατασκευής καθώς η ευαισθησία των θαλασσιών οργανισμών στις διακυμάνσεις του υδροδυναμικού πεδίου απαιτεί μια πιο ακριβή διερεύνηση και καταγραφή. Πρόσθετοι λόγοι οι οποίοι υποστηρίζουν την ανάγκη αυτή συνοψίζονται στο γεγονός ότι οι αποκλίσεις των μοντέλων από τα πειραματικά δεδομένα (φυσικά μοντέλα συνήθως υπό κλίμακα 1:10) της τάξης του 5~10% για τις μέσες τιμές (κατ' αρχήν στο πλαίσιο του αποδεκτού), στην πράξη καταλήγουν να είναι σημαντικές ποσότητες. Αν λάβουμε υπόψη και τις διακυμάνσεις στην τιμή των μεγεθών λόγω της αλληλεπίδρασης μη γραμμικών και τυρβωδών φαινομένων τελικά οι προβλέψεις μπορεί να αποκλίνουν σημαντικά από την πραγματικότητα ιδίως για τις δυνητικά ακραίες (μέγιστες) τιμές των μεγεθών. Κατά συνέπεια επηρεάζεται η ορθή επιλογή μεγέθους ογκολίθων, πορώδους, διαστάσεων κατασκευής κ.α. (προβλήματα υπερδιαστασιολόγησης-υποδιαστασιολόγησης) αλλά και η εξασφάλιση τεχνικών χαρακτηριστικών όπως η ευστάθεια της κατασκευής (ανάπτυξη υποπίεσεων στον κατάντη πόδα). Επιπρόσθετα, η όσο το δυνατόν ακρίβεια στην καταγραφή, ποιοτικά και ποσοτικά, των μεγεθών που αναπτύσσονται εντός και γύρω (ιδίως στην υπήνεμη πλευρά) από μια ύφαλη κατασκευή, ενδεχομένως να παράσχει πληροφορία για πιο ασφαλείς εκτιμήσεις στη διάδοση των κυματισμών στα κατάντη αυτής, και κατά συνέπεια σε ορθότερο σχεδιασμό της προστασίας της ακτής.

Με βάση τα παραπάνω και αξιοποιώντας πειραματικά δεδομένα υδροδυναμικών πιέσεων και τροχιακών ταχυτήτων, και για μονοχρωματικούς κυματισμούς (Metallinos *et al.* 2014, Metallinos *et al.* 2016a, Metallinos 2016), επιχειρήθηκε μια ποιοτική αλλά και ποσοτική αποτύπωση των διακυμάνσεων των υδροδυναμικών μεγεθών στο εσωτερικό ύφαλων διαπερατών κυματοθραυστών.

Παρατηρήθηκε ότι οι αποκλίσεις των μέγιστων τιμών από τις μέσες δεν είναι αμελητέες ποσοτικά. Από την στατιστική ανάλυση δε των παραπάνω μετρήσεων, τόσο για τις υδροδυναμικές πιέσεις (δισδιάστατο φυσικό μοντέλο, $[P_s]$) αλλά και τις ταχύτητες (τριδιάστατο φυσικό μοντέλο-μετρήσεις ταχυτήτων στις τρεις κύριες διευθύνσεις, V_x, V_y, V_z) εντοπίστηκε μια σαφής συστηματικότητα στον τρόπο διακύμανσης των μεγεθών αυτών από τη μέση τους τιμή. Συστηματικότητα σε σχέση με το μέγιστο εύρος των αποκλίσεων ενός μεγέθους για δεδομένες συνθήκες από τη μέση του τιμή αλλά και στον τρόπο της πιθανοτικής κατανομής των διακυμάνσεων αυτών.

Με βάση αυτές τις παρατηρήσεις, μια απλή μεθοδολογία προτείνεται για την αντιμετώπιση του προβλήματος μοντελοποίησης του υδροδυναμικού πεδίου σε όρους όχι μόνο για μέσες συνθήκες αλλά και μέγιστες, μέσω συσχέτισης των αποκλίσεων αυτών με τη μέση τιμή με απλές αναλογίες (συντελεστής μεταβλητότητας).

Παραπλεύρως τέθηκε και το ζήτημα της ευστάθειας ενός Ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη, το οποίο και διερευνήθηκε μέσω της παρατήρησης των μεγεθών του υδροδυναμικού πεδίου στον κατάντη πόδα (υπήνεμη πλευρά), πιθανή θέση αστοχίας λόγω επανακυκλοφορίας της υδάτινης μάζας στο εσωτερικό της κατασκευής.

Extended abstract

Investigation of the hydrodynamic field in submerged rubble-mound breakwaters

by Elpidoforos G. Repousis

Introduction

Nowadays, the need for protecting the shore from wave action is one of the most frequent yet complex issues scientists, engineers, and managers have to deal with. In regard to coastal erosion, the necessity for sustainable protective measures increases constantly. In this direction, contemporary coastal zone management proposes, among other measures, multi-purpose and resilient protective infrastructures. Considering past experience, conventional installations as emerged shore-parallel breakwaters have been widely applied in defying beach erosion. Despite the overall acceptability of integrating such structures in the coastal zone, it has been observed that they are usually followed by a significant environmental impact, including low level of water renewal, degradation of the aesthetic value of the landscape, etc. As environmental awareness gradually increases, submerged breakwaters (SBs) have become a shore protection alternative aiming in confining side effects. Beyond the basic goal in protecting the coast, it has been deduced that especially permeable rubble mound submerged breakwaters (SPBs), focusing on herein, may function somehow similarly to natural reefs as they tend to attract marine life.

The scope of this postgraduate thesis is a detailed investigation of the hydrodynamic field developing inside submerged rubble mound permeable breakwaters (SPBs) with relatively steep slopes, based on previous experimental laboratory measurements. Within the framework of this study, measurements of natural models of SPBs, were analysed in an attempt of positioning the need for quantifying not only the average values of the core hydrodynamic parameters (average values of mean and turbulence component), in particular orbital velocities and hydrodynamic pressure developing inside SPBs, but also their maximum deviation due to their turbulent component as well, which in most relevant studies researchers tend to discard. It was observed that such fluctuations are not negligible when addressing the level of marine life support in SPBs. A simple methodology in quantifying deviations due to turbulence in conjunction to the average values is proposed, suitable for marine biologists,

based on observations of their probability of occurrence distribution as perceived during processing. A by-product of this study was to denote once again the technical issue of SPBs' instability, probable to appear due to rubbles' undersizing in the leeward slope of these structures.

Previous research on SB and posing the problem

Considering past experience, with the core defensive measure to wave action being the shore-parallel breakwater, conventional installations as emerged breakwaters have been widely adopted as a shore protective structure, with knowledge obtained on their coastal behaviour covering a wide scope. Therefore their defensive efficiency has been studied and assessed extensively both empirically and experimentally. Despite the overall acceptability of this practice, it has been observed that emerged breakwaters are usually followed by a significant environmental impact. In particular, they affect drastically water circulation, sediment transport climate, and yet the aesthetic value of the landscape, with submerged breakwaters (SBs) showing to be able to encounter with as a shore protection alternative.

Over the last decades in an attempt of a more environmentally friendly approach, protecting coastlines from erosion ceased from being the sole purpose of coastal structures applied. Beyond basic considerations on the developing abiotic parameters of the littoral environment, design of SBs serving not only in just minimizing degradation of the marine ecosystem but rather in its enrichment has become a challenge. In this direction submerged structure applications such as "Reef Balls" providing habitat enhancement have been already used in small depths near the coast, with applications of rubble mound porous (i.e. permeable) SB configurations showing a similar behavior. At this point and considering that marine biology issues are the main aspect of this study, a distinction between low crested structures, especially SPBs examined herein, and artificial reefs inserted in relatively significant depths serving solely for marine habitats must be noted.

Several studies examining phenomena around SBs can be found in the literature, including wave transmission (Panizzo & Briganti 2007, Metallinos *et al.* 2016b), wave induced set up in the protected area (Calabrese *et al.* 2008a), wave breaking macrofeatures (Calabrese *et al.* 2008b, Repousis *et al.* 2014), circulation pattern (Johnson *et al.* 2005, Johnson 2006, Hur *et al.* 2012), wave reflection and wave spectrum modifications (Myrhaug & Ong 2010, Young & Testik 2011). In contrast, the hydrodynamics inside a porous SB is a field of relatively less research. The response of marine organisms to the presence of SPBs has not yet been in-depth

investigated. Hydrodynamic parameters, mainly orbital velocities and secondarily pore pressures, inside their permeable body, have been observed to be significant factors when addressing marine life attraction within and around these artificial bars, in terms of, for example, distribution-species biodiversity and abundance. It has been stressed so far that acquiring information on the hydrodynamic field (including maximum wave-induced forces as well, directly related to pore pressures), is important in order to assess such structures' ecological potential along with their technical efficiency (Kontaxi & Memos 2005, Moschella *et al.* 2005). Vital parameters in forming tolerable and proper living conditions for each species may be different but at this point it can be reasonably argued that water velocities and pressures correlated with hydrodynamic forces, are the key hydraulic factors governing marine habitation levels (e.g. Siddon & Witman 2003, Hammond & Griffiths 2004).

Beyond the basic goal in protecting the coast, it has been deduced that especially permeable rubble mound submerged breakwaters (SPBs) may function similarly to natural reefs as they tend to attract marine life, as many subaqueous species make advantage of the voids and hollows between the rubbles for their living needs. This dual function is most effective in micro-tidal environments (Mediterranean Sea, Baltic Sea and Caribbean) of up to average exposure. However, and considering technical efficiency of the SPBs, two main mechanisms in reducing notably wave energy are generated: wave breaking and the fluid flow through the voids of the structure (Metallinos *et al.* 2016b). Another point, in relevance to the environmental impact of SPBs, is that they occupy smaller seabed areas than their emerged counterparts. In small-depth nearshore areas where such coast-parallel structures are usually placed, benthos thrives; especially in the Mediterranean, substantial benthos-positonia ecosystems develop. So, the criterion for as little as possible cover of such surfaces enhances further the environmental value of SPBs.

As said, the main reason for examining the hydrodynamic field inside rubble-mound SPBs, is that they have been observed to offer both a certain level of coastline stabilization and a mild, if not positive, intervention to local marine life with systematic provision of information still lacking for the latter. Additionally, it is inherently resilient due to its submerged nature but further improvement in this area is to be achieved as shown in previous studies (e.g. Kapsalis & Memos 2008). The investigation of this technical issue is also included in this thesis.

Beyond orbital velocity being the main parameter in assessing the potential of a SPB serving as an artificial habitat, hydrodynamic pressures are also a concern. It is known that when focusing on pressure, the hydrostatic component is the crucial habitation factor. However, the

hydrodynamic component is directly related with the forces induced by the moving water upon the stones' surface. So, and despite the tolerance of certain benthics to large hydrodynamic velocities, when water-mass projected forces exceed a limit, dislodgement and drifting of significant populations of various benthos species has been observed, thus leading to habitat aggravation. Furthermore, it has been deduced that pressure measurements are needed in order to investigate the stability of SPBs, as development of subpressures leading to dislodgement of rock units on the leeward slope of SPBs has been observed. Hydrodynamic pressures' profiles, inside and at the leeward slope of the SPBs are a rather perceptible way to investigate this stability issue, that may be affected by a gyre in that area.

Apart from concerns in coastline stabilization, enhanced by abstracting energy from incoming wave trains over submerged breakwaters, for marine biology issues mainly addressed herein, the structure's interaction with its biotic environment is multifold:

- SPB's high porosity may support habitation for certain marine flora and fauna.
- SPB's high permeability through and above the structure allows for better circulation and renewal of the coastal waters in the zone between the coastline and the structure, enhancing thus the nearshore water quality.
- The previous characteristics induce also a more efficient distribution of food for marine life.

Taking into account the above, the investigation of SPBs in order to serve as an artificial reef in shallow waters applied in the first hand for protecting the coastline, forms the core of this study.

Submerged rubble mound structures as artificial habitats

As mentioned above, mainly orbital velocities and in the second place pore pressures, directly related to hydrodynamic forces, are considered to be the basic mechanisms of disturbance in coastal ecosystems determining distribution and abundance of shallow-water and intertidal marine organisms and benthics (Siddon & Witman, 2003, Hammond & Griffiths, 2004 Kontaxi & Memos 2005). Thereafter, understanding and measuring the dynamic development of water particle velocities and hydrodynamic pressures within and around SBs installed in an offshore wave field, yields to be important in assessing such structures environmental value. Moving on one step further and focusing on the potential of ecological efficiency of low-crested coastal defense structures, studies identified the need to combine technical sufficiency with ecological requirements.

Specifically, Jensen (2002) presenting a review of artificial reefs placed in European waters, addressed that so far submerged structures have not reached such scale in order to function as self-sustaining ecosystems. Bacchiocchi & Airoidi (2003) presented quantitative data on the abundance and distribution of intertidal epibiota developing around the conventional coastal defense structures along the Emilia Romagna shores (North Adriatic shores, Italy) showing that although these structures are extensively and rapidly colonised by epibenthic assemblages, the diversity of species except for epibiota is low. They indicated need for further work in understanding the interaction of massive introduction of defense structures with the assemblages of marine organisms in the region examined. Siddon & Witman (2003) investigating the importance of hydrodynamic forces in causing a striking pattern of subtidal zonation between wave-exposed and protected sides of Halfway Rock (Gulf of Maine, USA), highlighted the significance of chronic, low-level forces in structuring marine benthic communities. In terms of biology, they suggested that the difference in patterns of subtidal zonation is created by the inhibition of movement at flow velocities significantly lower than those required to dislodge them (5 to 10 times). Moschella et al. (2005), investigating several coastal defense schemes in Italy, Spain, UK and Denmark, assessed the ecological similarity of low-crested coastal defense structures (LCS) to natural rocky shores by examining the influence of LCS design features on the colonising marine epibiota. Results based on data from the DELOS project indicated that the structural design of LCSs (free board, length, porosity, location on the shore) can be modified to influence the abundance and species composition of epibiota to achieve desired management goals such as controlling growth of nuisance algae or promoting diversity of habitats and species for recreational activities. Nevertheless, they pointed out that design criteria should always aim to promote integration of LCSs and other man-made structures in the coastal system, by minimising changes to the nature and identity of the surrounding environment. Burt et al. (2013), focusing on the response of the submerged rocky area provided by the construction of the Palm Jumeirah project (Dubai, Persian Gulf) in functioning as a fish habitat, showed that regardless of the degree of wave exposure, breakwater habitats can develop fish communities with abundance and richness comparable to that of natural coral reefs. With appropriate design for wave exposure, such structures can develop communities that may enhance the diversity of fish community types, and may even increase localized production of reef fish in areas where the natural reef habitat is limited. Although these structures are increasingly recognized to provide important habitat for benthic invertebrate communities, their importance in supporting abundant and diverse reef-associated fish communities remains poorly understood.

At this point further biological knowledge is needed, as case studies examination is limited with nature of these studies being rather qualitative.

Managing with turbulent flow through SPBs

Due to the turbulent nature of the hydrodynamic field (associated with wave propagation) inside and around a SPB, significant deviations from the average values develop. However, most numerical models focus on mean quantities, due to the complexity of the phenomenon that makes numerical simulation a very difficult undertaking. Specifically for SPBs, phenomena such as set-up and set down of sea water level due to shoaling, hydraulic bore induced by the steep-sloped bar, wave breaking, circulation pattern around and recursive flow inside the structure, sub-pressures development on the lee side of the bar, irregular shaped boundaries of the rubbles, random development and interaction of vortices and turbulent flow conditions, friction, wave reflection and sub-harmonics release downwards, refraction, diffraction etc along with interaction of all these features, inevitably make mathematical simulation very difficult. A few models predicting the hydrodynamic field under wave propagation inside a porous SB have been proposed, but their verification with “un-averaged” experimental data is still limited (Losada *et al.* 1995, Garcia *et al.* 2004, Lara *et al.* 2006, Chan *et al.* 2007, Metallinos *et al.* 2014). A systematic research on porous flow through rubble mounds, including measurements of velocity and its turbulent component for oscillatory streaming flow conditions, yielded a model proposed by Van Gent (1995), suitable also for SPBs under wave action. However the latter systematic study concluded in semi-empirical coefficients including turbulence that are able to capture mean conditions, as the natural porous models used were restrained into a U tube channel and put under oscillatory flow. However, the turbulence produced due to circular wave flow through a SPB by incoming waves (free water surface) is considered to have larger deviations from average hydrodynamic quantities. Another systematic research on the turbulent nature of wave breaking through numerical modeling of surf zone dynamics under weakly plunging breakers (as those occurring over SPBs) can be found in the literature (Makris *et al.* 2016) but the investigation of the induced by wave breaking turbulence over a porous medium, such as the SPB, is still lacking. Even so, Makris (2014) clarifies the main mechanisms related to the turbulent nature of wave breaking in the nearshore waters. Jensen *et al.* (2015) investigating flow and turbulence at the surface of the armor layer of a rubble-mound breakwater under solitary wave action, in an attempt to theoretically explain turbulence inducement between the armor layers, suggested that it was generated by four sources. Firstly, turbulence was assumed

to derive due to the existence of the boundary layer above the armor layer and subsequently was transported between the armor stones. Adding to the disturbance of the flow, wake turbulence generated behind the armor stones should also be taken into account. Another significant source mentioned, would probably be wave breaking and finally seepage/outflow turbulence generated from the flow exiting the porous core for the case of a permeable structure. Hydrodynamic horizontal velocity parameter (u) was considered for examination. Decomposition of velocity and extraction of turbulence was managed by assuming this parameter as a random function of space and time. By applying the Navier-Stokes turbulence equation ($u' = u - \bar{u}$), quantification of the level of turbulence (u') as the fluctuating component of the mean velocity (\bar{u}) was obtained by ensemble averaging over a number of repetitive solitons (samples for 30 repetitions). Due to the distinctively recursive nature of the flow i.e. run-up and rundown of a solitary wave on an emerged rubble-mound slope (captured by using high speed video recordings synchronized to velocity measurements), the mechanisms for the generation of turbulence were suggested to be associated to the different sequences of the wave flow cycle. However, the case of propagating gravity waves over a permeable SB is rather more complex and the above method could not be applied for the experimental data framing this study. Cheng and Wang (2015) presented a method for extracting turbulence from velocity measurements, under breaking conditions in the surf zone for regular and irregular wave conditions but the estimated average-turbulent component analogy relies significantly on qualitative criteria and is subjected to the definition of the turbulent component and measuring instrument. As a conclusion and additionally to shore protection,, when considering artificial habitat efficiency, systematic experimental investigation of hydrodynamic parameters including their turbulent component inside SPBs under wave action is still lacking, and a large amount of data is required to do so, thus this study attempt is only a step in the ongoing process of addressing and solving the issue.

Methodology

During the preliminary investigation in regard to literature, that preceded the methodology approach as is presented in this section, it became obvious that experiments providing accurate measurements were needed. Given the available information, it was concluded that experimental data of the hydrodynamic field in physical models of rubble mound SPBs with steep slopes as well as studying aspects of their stability should be the main features to be addressed.

In the above framework, assessment of the environmental value of SPBs, requires a solid understanding of its interaction with water waves, especially for rubble mounds with relatively steep slopes, addressed herein. In order to obtain useful information on the eco-hydraulic efficiency of SPBs, a series of laboratory measurements of orbital velocities and hydrodynamic pressures developing inside SPB natural models due to wave action, were acquired and frame this graduate dissertation. In particular, and for pore pressures the primary data of the laboratory measurements carried out by Metallinos *et al.* (2014) were processed. As for orbital velocities in 3 dimensions, unprocessed data of the laboratory experiments performed by Metallinos *et al.* (2016a) were acquired and contributed substantially to the purpose of this study. Both series of experimental data were produced within the framework of doctoral studies (Metallinos, 2016). As the challenge of SPBs' design improvement for serving as a multi-purpose coastal defensive structure has nowadays emerged, the author reclaimed this data, aiming in applying a thorough and detailed analysis, in terms of their average and turbulence components.

The main reason for working with these two series of data (one for velocities, and one for pressures), was the significant primary and "un-averaged" data amount of timeseries (for many locations inside SPBs natural models under various sea state and wave conditions), not to be found elsewhere in the literature, fairly suitable for the realization of this study.

Specifically, the hydrodynamic field inside the structure was studied. Experimental data of orbital velocities' timeseries, in three dimensions, developing inside a natural 3D SPB model under wave action, were acquired (Metallinos, 2016, Metallinos *et al.* 2016a), and analysed, including and focusing on turbulence levels, parameters that give a solid background to marine scientists for their performing of relevant habitation studies. As for pressures, experimental data of the hydrodynamic pressure component, evolving inside a 2D natural SPB model due to incoming wave trains over the bar, were extracted by laboratory timeseries measurements, provided by Metallinos *et al.* (2014). These were also analyzed, aiming in obtaining useful information to marine biologists as there is, although seeming indirect in the first place, a relation with the intensity of the forces induced by the moving water upon the stones' surface. Thus, and despite that the hydrostatic component is the most commonly concerning marine-life pressure parameter, hydrodynamic pressures, and their turbulence levels should not be neglected. Additionally, the above pressure measurements were analyzed in order to investigate the stability of SPBs, as previously discussed, in the direction of a preliminary stability assessment and possible failure positions on these structures (as denoted

by Kapsalis & Memos 2008). In fact, there are studies addressing the development of meso-scale eddies along the leeward slope of a SPB probably due to the recirculatory nature of the flow inside the structure that leads to significant energy loads in their core as well (Garcia *et al.* 2004, Metallinos *et al.* 2014).

Summarizing, and considering results that should be sought, the above methodological approach was followed, as it served in:

1. Attempting a step in providing quantitative information useful to marine biologists for their ecological assessment of the SPBs.
2. Addressing stability issues of SPBs associated with recursive flow in the insides of the structure.

A detailed description of the above two independent experimental set-ups (rubble mound models, wave state, measuring equipment and locations can be found in the section “description of the experimental model set-up”).

Description of the experimental model set-ups

Experimental data needed for conducting this study, were gathered by two different existing/previous laboratory investigations on SPBs, and the relevant set-ups are summarized below.

1. Laboratory measurements of pore pressures (300 timeseries for various locations and sea state), induced by regular waves’ action over a SPB 2D model, of a scale roughly to 1:10, with steep seaward and leeward slope, in a wave flume (Metallinos *et al.* 2014).
2. Laboratory measurements of hydrodynamic velocity in 3 dimensions (240 timeseries for various locations and wave scenarios), induced by regular waves’ action over a SPB 3D model, of a scale roughly between 1:15 to 1:20, with steep seaward and leeward slope , constructed in a wave basin (Metallinos *et al.* 2016a).

Laboratory experiments by Metallinos *et al.* (2014)-Pressures

Experiments involving regular waves under breaking and non-breaking conditions were performed by Metallinos *et al.* (2014) in order to obtain data, additionally serving to the verification of a novel Boussinesq-type model. These small-scale experiments on a SPB (scale roughly up to 1:10), were conducted in the Laboratory of Harbour Works, National Technical University of Athens, in a 27mlong, 0.90mwide and 1.53mhigh glass-walled wave flume equipped with a flap-type wave-maker, generating regular waves. Specifically, the height of

the physical model was 0.40m and the crest width 1.0m (Fig. 1). The structure's material was natural stones with $d_{50} = 0.08\text{m}$ and sloping 1:2 at both sides. Measurements of hydrodynamic pressures were taken over three sections in the interior of the structure at 19 points with 0.05m intervals along the vertical (Fig. 1). Pressure data were also taken at a reference section upstream of the mound.

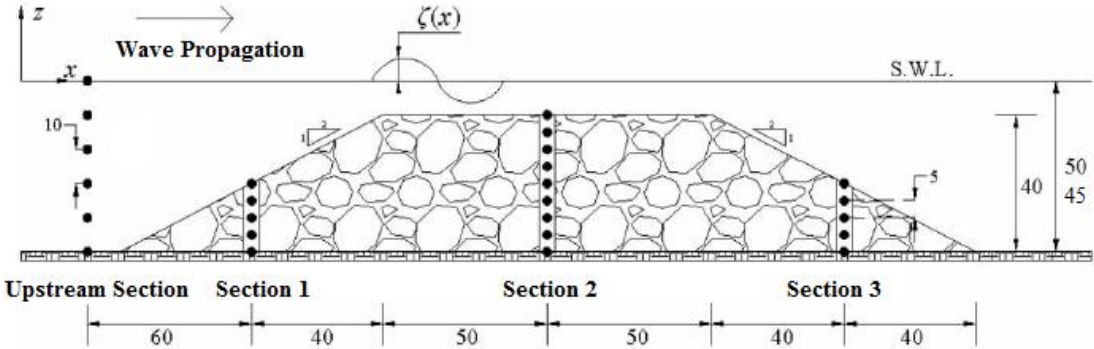


Figure 1 Layout of a 2D small-scale (roughly up to 1:10) SPB model for measuring hydrodynamic pressures towards the streaming flow, location of measurements (dots) for two water depths, 0.45 & 0.50 m (lengths in cm), Metallinos et. al (2014).

Wire-mesh cylinders were placed to protect the pressure probe used, by taking into account minimum effect of the cylindrical gap inside the porous medium to the water flow. The porosity of the mound was set to 0.52, close to real life applications of SPBs. Seven monochromatic wave cases were used as given in Table 1. Two typical water depths of $h = 0.50\text{m}$ (4 wave scenarios) and 0.45m (3 wave scenarios) were used to model sea state, and the location of measurements are also shown in Fig. 1. The total amount of the data, are 300 pore pressure timeseries measurements of 2 minutes each.

A resistive type pressure transducer (KYOWA BE-5KC), with capacity up to 5 kg/cm^2 , was used. Its diameter 3 cm and thickness 0.5 cm. The pressure gauge recorded total pressures. Data at the section and for calm conditions outside the structure were collected in order to calibrate the measuring system by comparing with the hydrostatic component. The minimum duration of point measurements both out- and inside the structure was 4 min with 0.005 s sampling interval.

Table 1. Cases tested, with Reynolds numbers ranging from 3212 to 7056, Metallinos et. al (2014).

Case #	Wave height H (m)	Period T (s)	Water depth h (m)	Breaking occurrence
1	0.065	2.12	0.5	No
2	0.080	1.85	0.5	No
3	0.095	1.58	0.5	Yes
4	0.107	1.31	0.5	Yes
5	0.040	2.12	0.45	No
6	0.057	1.85	0.45	Yes
7	0.075	1.58	0.45	Yes

Laboratory experiments by Metallinos et al. 2016)

In relevance and in sequence to the work mentioned in the previous section (Metallinos et al. 2014), small-scale experiments on a 3D SPB model (scale between 1:15 to 1:20), were conducted in the Hydraulic Engineering Laboratory, University of Patras, in a 12.0x7.0 m surface wave basin able to manage with water depth of 1.0 m, and equipped with a flap-paddle-type wave-maker of DHI, generating both regular and irregular waves (spectra of Jonswap type). Specifically, the height of the physical model was 0.20 m and the crest width 0.50 m (Fig. 2). The structure's material was natural stones with $d_{50} = 0.04$ m and sloping 1:2 at both sides. Measurements of hydrodynamic velocities were taken over two sections in the interior of the structure, namely section (I) SPB central section, and (II) SPB head. Measuring locations were determined on 10 points with 0.02m intervals along the vertical for each of these sections (Fig. 2). The structure was placed on a mild slope sea bed, with steepest offshore bottom slope in the area of wave generation. An acoustic Doppler velocimeter (a SONTEK ADV instrument), was used to collect the experimental data, i.e hydrodynamic velocities in three dimensions (V_x , V_y , V_z). The duration of each point measurements inside the structure was 3 min with $dt = 0.02$ s sampling interval.

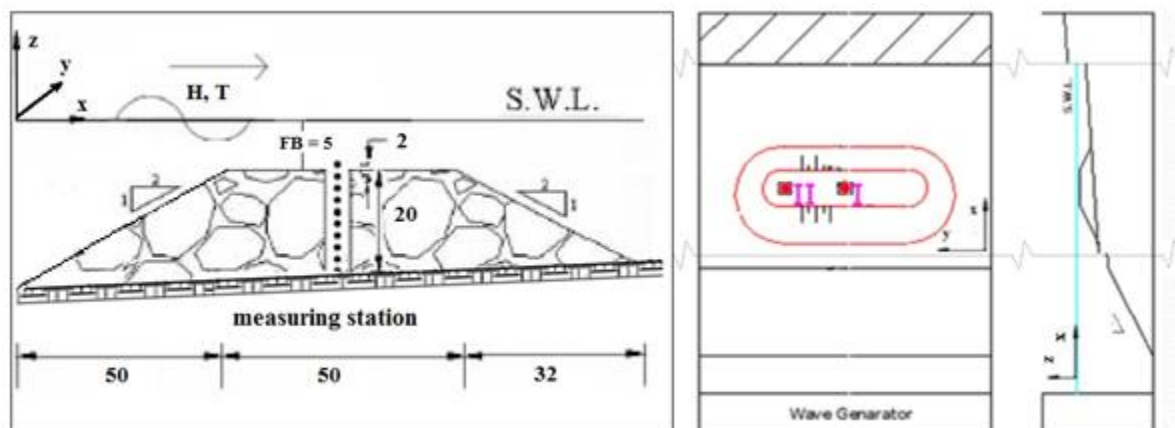


Fig. 2. Layout of a 3D small-scale (roughly between 1:15 to 1:20) SPB model for measuring hydrodynamic velocities in three dimensions (V_x , V_y , V_z), location of measurements (dots), one water depth, 0.25 m (lengths in cm), ADV instrument was used. Measurements refer to 2 typical sections: (I) SPB central section, (II) SPB head (Laboratory experiments carried out by Metallinos *et al.* 2016a).

Wire-mesh cylinders of 0.05 m diameter were placed to protect the velocity probe used, by taking into account minimum effect of the cylindrical gap inside the porous medium. The porosity of the mound was equal to 0.52, close to real life applications of SPBs. Four monochromatic wave cases were tested as given in Table 2. Water depth conditions in the middle of the structure were set to $h = 0.25$ m over the crest (4 wave scenarios, 2 breaking and 2 non breaking), and the location of measurements are also shown in Fig. 2. The total amount of the data, are 240 orbital velocity timeseries measurements of 3 minutes each.

Table 2. Cases tested, Metallinos *et al.* (2016a).

Case #	Wave height H (m)	Period T (s)	Water depth h (m)*	Breaking occurrence
1	0.045	1.25	0.25	No
2	0.045	2.00	0.25	No
3	0.080	1.25	0.25	Yes
4	0.080	2.00	0.25	Yes

* *At the bw axis*

Analysis of the experimental data

The parameters processed herein are:

- orbital velocities (in three dimensions: V_x , V_y , V_z), and turbulence levels inside a 3D small-scale natural rubble mound SPB.
- hydrodynamic pressures, and turbulence levels inside a 2D small-scale rubble mound SPB. Even so on the level of the SPB pores, the phenomenon is developing in 3 dimensions.

The technique for measuring velocities, an acoustic Doppler velocimeter, and in regard to pressure measurements in the 2D layout, provided a level of adequate accuracy in capturing turbulence fluctuations in the tested turbulent wave flows. A lot of discussion is put on which is the best technique to apply for measuring turbulence accurately, with Laser Doppler velocimeters gathering attention (Voulgaris & Trowbridge 1998). It can be said, that in this study, ADV measurements were quite satisfactory. Even for the pore pressures measured

through a resistive type pressure transducer (KYOWA BE-5KC) of a rather large diameter (3 cm) significant turbulent fluctuations were captured as well.

It should be added that significant scale effects may appear in such small-scale model tests (Heller 2011) especially when investigating the flow conditions inside the porous medium.

The range of the model structure's grain-related Reynolds number is also a concern, in order to ensure turbulent flow characteristics. A relation given by Hughes (1993) can be found in the literature, but it is rather difficult to implement, since the structure-related Reynolds number does not take into account the effect of wave breaking in the production of turbulence. In general it can be said that for the experimental data used, turbulent flow was generated.

For pore pressures, spectral analysis was used for analysing the noise floor, and determining the extent of filtering that should be applied. After processing also measurements for calm conditions, a low pass of 10 sampling segments filter was selected.

For orbital velocities, noise floor was significantly low and similar to pressures, a low pass of 2 sampling segments filter was selected. Due to the measuring inability of the ADV instrument when encountered air bubbles in the flow, (the main mechanism of introducing bubble flows in the water mass is wave breaking), a small level of contamination with spikes was observed for the data. For this cleaning process, a 3D phase method was applied (Goring & Nikora 2002), before removing noise floor.

By using the experimental data of Metallinos *et al.* (2014) and Metallinos *et al.* (2016a), it was evidenced that for both hydrodynamic pressure and hydrodynamic velocity measurements, showed that deviation of maximum values compared to average quantities is quite significant but in most relevant studies this is not taken into account so far.

In the following figure an example of deviations of local maxima from their average value is given, for a regular wave scenario, showing a 10 seconds horizontal hydrodynamic velocity timeseries. Similar observations were made for all the timeseries processed, for both orbital velocities and pore pressure.

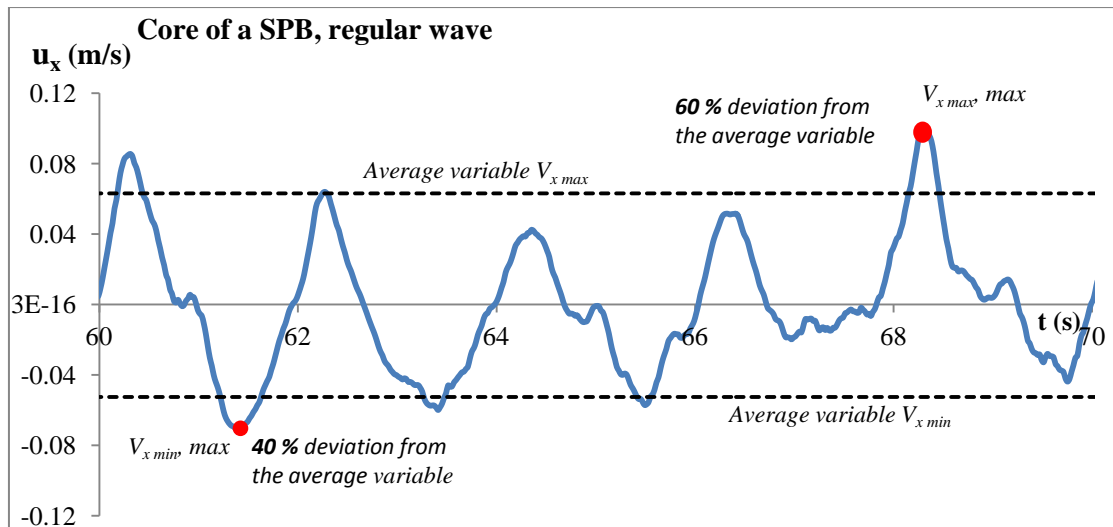


Fig. 3. Timeseries of hydrodynamic horizontal velocity measurement in the core-central section of permeable SB 3D natural model, $z=0.10$ m from sea bottom, regular wave of $T=2.0$ s and $H=0.045$ m (laboratory measurements, Metallinos *et al.* 2016a).

Moreover, as previously mentioned, an investigation on direct turbulence extraction methods for velocity timeseries was carried out focusing on the separate works of Jensen *et al.* (2015) and Cheng and Wang (2015). Despite the in a first view, similarities of these studies with this research, a lot of questioning about the accuracy of these methods remains, especially on the issue of separating the mean undisturbed component in total. After some tests, and specifically for the SPBs examined, it can be said that for a rough estimation in every time segment of the timeseries, implementing a simple low pass filter of about 10-20 time segments, and abstracting it from the initial data, may support reasonable values for “turbulence” extraction.

Results

Shorting in a usable manner the derived hydrodynamic values

Processing of raw data and shortening the values, was implemented in terms of providing usable Tables with orbital velocities’ and pressures’ average and turbulent components (specific values for the two -possibly applicable- layouts and for various sea state in laboratory conditions). An upscale version of these values based on Froude analogy is also attached in the Annex, serving accordingly to marine biologists. Additionally, diagrams of the height-wise profiles of these hydrodynamic parameters, in terms of average and maximum “heights” are provided for the different sections inside and around the SPB models selected to frame this research study.

Especially for velocities as there are cases of different wave height, of the same period, for similar sea state conditions to compare with it can be verified that the wave period is the crucial factor defining the overall amount of the mean orbital velocity values.

As for pore pressures, the derived values could be reduced to hydrodynamic forces, also concerning the habitat efficiency of SPBs, in a simple expression in correlation to an exposed surface of reference (surface of a rock unit, or a marine species).

Proposed methodology based on normal probability distribution approach

Based on rather statistical than turbulence extraction methods, derivation of probability distribution functions describing the turbulent and mean part of these parameters was perceived. The concept applied, as regular wave cases were managed, was by isolating for each period-cycle and for each one of the timeseries, a velocity or pressure height respectively, in accordance to wave height. Regression analysis of the timeseries showed that for the majority of timeseries, the time length was adequate for a reliable statistic analysis. As for the ratio of average and turbulent components for both orbital velocities in 3 dimensions, and pore pressures, the simple normal distribution approach was observed to retain most of the valuable information (Fig. 4). This is a strong indication that apart from the complexity of the water flow processes inside rubble mounds, randomness governs. However, small asymmetries could be observed, possibly in accordance to the asymmetry of the phenomenon due to wave propagation; despite that the porous medium has an overall symmetry, it is attacked by waves, breaking in most cases, from one side, its windward exposed area, generating water drifts over and inside, along with ellipsoid flow when shallow-depth conditions are favoured. Finally and for calculating for each timeseries the coefficient of variation, defined as the ratio of the standard deviation to the mean value, a tendency in approaching values within a certain ratio area in relation to the SPB section and wave scenario was observed.

Despite that the amount of the wave cases is not enough for producing a semi-empirical model (7 regular waves for pore pressures, 4 regular waves for orbital velocities), the large amount of locations permitted the observation of a persisting repetitive pattern in the ratio of average and turbulent components around certain values.

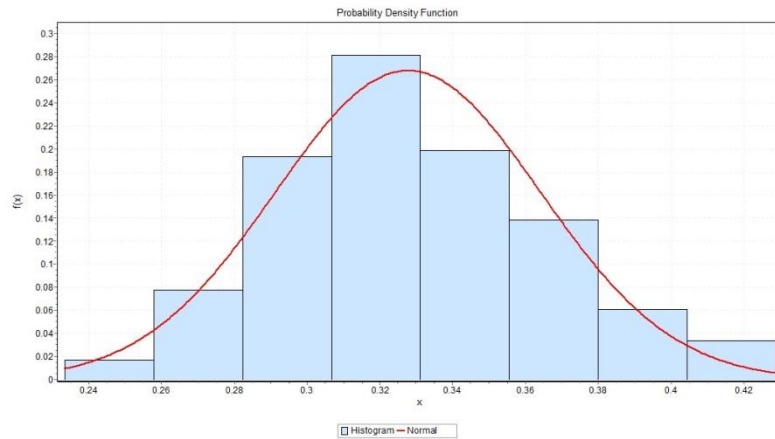


Fig. 4. An example of a normal probability distribution approach, extracted by a 3 minutes timeseries of hydrodynamic horizontal velocity measurement in the core-central section of permeable SB 3D natural model, $z=0.20$ m from sea bottom, regular wave of $T=2.0$ s and $H=0.045$ m, (laboratory measurements, Metallinos & Klonaris 2016).

Results in relevance to future research

The previously mentioned methodology, based on estimating coefficients of variation for a hydrodynamic parameter fluctuation, showing to follow deviations under a normal distribution pattern, is proposed to be a suitable and simple way to process relevant data, in order to support the eco-hydraulic design of SPBs by producing a semi-empirical numerical model for SPBs useful to marine biologists. Investigation of indications for probability distribution asymmetries is proposed to follow the same technique.

In order to investigate the ability in general of the numerical models existing up to date, to cope with the possibility of integrating accurately and beyond averaged values of the hydrodynamic parameters, their turbulent components as well, the (simple) 2nd Stokes theory was applied for the cases tested (free flow over a mildly sloping sea bottom). It was found, when compared to the experimental data, that even this improper numerical model may roughly capture the scale of developing mean hydrodynamic parameters inside a porous medium, leading to the notion that a accurate numerical model for marine-ecology purposes is probably possible to be produced and verified through relevant experimental or/and field data , with quite simple mathematical formulations.

However, considering the complexity of the phenomenon, this research reaches to the potential of a case specific study. Parameterized predictor semi-empirical formulation on the development of the hydrodynamic dimensions inside and around the SPBs, i.e. $\bar{u}+\Delta u$, $\bar{p}+\Delta p$,

requires a large amount of data and for several different layouts, wave conditions and measuring techniques.

Stability of SPB

Processing the experimental data of Metallinos et al. (2014), pore pressures’ vertical profiles in the leeward slope section (section 3, Fig.1), led to a by-product. The technical-resilience issue of SPBs’ instability was denoted, probable to appear due to rubbles’ undersizing in the leeward slope of these structures. In the following figure subpressures are observed, due to back flow with the weak spot of the structure being around and below mid-height of the leeward slope.

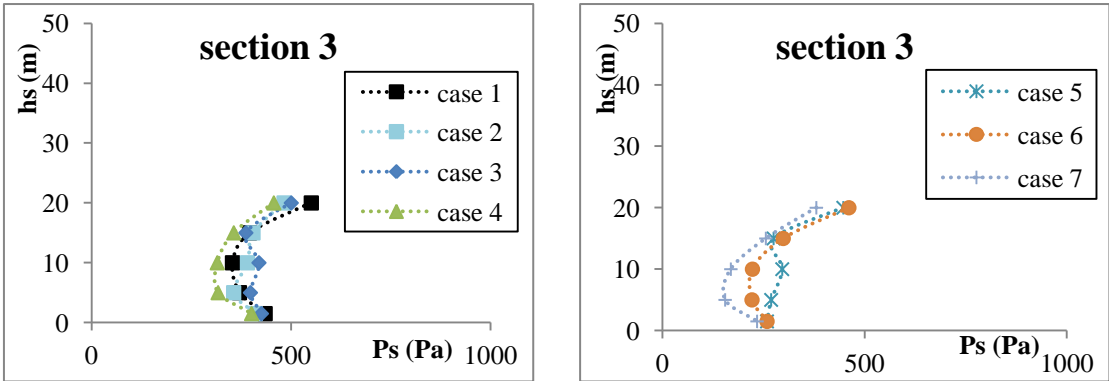


Fig. 5. Observation of subpressures development in the leeward side of a small scale SPB natural model, hydrodynamic pressure component (Laboratory experiments carried out by Metallinos *et al.* 2014).

It can be seen that for all cases (with or without wave breaking and despite the level of wave load) subpressures are generated. As the free board increases (wave cases with, free board of 0.05 m, compared to cases with a free board of 0.10 m), the curve of subpressures becomes steeper (Fig. 5). For the cases of breaking occurrence a relation to this phenomenon, cannot be obtained by the data used, as there are no cases of waves breaking and non-breaking of different wave height, of the same period, for similar sea state conditions to compare with.

Summary and conclusions

For the type of Submerged Permeable Breakwaters (SPBs) with steep slopes, it has been observed that apart from defying beach erosion, it may enhance, under specific circumstances, marine life conditions in the nearshore. This function of SPBs is implemented by providing shelter and suitable conditions for attracting marine life in and around the porous structure. To decide on the suitability of the hydraulic conditions for specific marine species, data are needed on such parameters as velocities, turbulence levels, pressures.

Considering the turbulent nature of the hydrodynamic field developing due to wave action around and inside SPBs, and in order to investigate the phenomenon experimentally, existing laboratory measurements were processed, for regular wave conditions.

Within the framework of this postgraduate thesis, measurements of natural models of SPBs, were used/analysed/processed in an attempt of positioning the need for quantifying not only the averaged values of the core hydrodynamic parameters (average values of mean and turbulence component), in particular orbital velocities and hydrodynamic pressure developing inside SPBs, but also their maximum deviation due to their turbulent component as well, as in most of relevant studies researchers tend to omit. It was observed that such fluctuations are not negligible when addressing the level of marine life support in SPBs. In this direction, and apart from collecting and shorting the values of the above parameters for the experimental data mentioned above, a simple methodology in quantifying deviations due to turbulence in conjunction to the average values is proposed, based on observations of their probability occurrence distribution as perceived during processing. In conclusion, the author believes that this study may be a minor but worthy step in providing information, useful to engineers and biologists, in assessing such structure's eco-hydraulic behaviour. A by-product of this study was to denote once again the technical issue of SPBs' instability, probable to appear due to rubbles' undersizing in the leeward slope of these structures. Although the proposed average-turbulent component correlating methodology applies for the cases of the experimental natural rubble mound models investigated herein, two characteristic cases of steep sloped SPBs (and in a rather statistic view for regular waves), further investigation is needed in order to verify and produce a generalized (empirical) model correlating a wider range of structure layouts and sea states, with the induced by wave action average and turbulent components of orbital velocities and hydrodynamic pressure.

Acknowledgments

The author acknowledges Anastasios Metallinos and Georgios Klonaris, Ph.D. candidates (Laboratory of Harbour Works, NTUA, Greece), for providing the experimental data framing this study and their support throughout this research. Also, the author acknowledges the support of Constantine Memos, Professor emeritus, NTUA, and Panos Papanikolaou Associate Professor, NTUA supervising and assisting substantially this effort..

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο της εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η διερεύνηση του υδροδυναμικού πεδίου που διαμορφώνονται κυρίως στο εσωτερικό ενός ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη από λιθορριπή και γίνεται μια προσπάθεια ποιοτικής αποτύπωσης μεγεθών όπως οι υδροδυναμικές πιέσεις και οι τροχιακές ταχύτητες, όπως εξελίσσονται υπό την κυματική δράση.

Σήμερα το ζήτημα του σχεδιασμού παράκτιων έργων προστασίας χαρακτηρίζεται ως ένα από τα πλέον πολύπλοκα που έχει να αντιμετωπίσει ο μηχανικός. Αφενός η διερεύνηση των φυσικών διεργασιών που διαμορφώνουν ένα κατεξοχήν δυναμικό σύστημα και αφετέρου άλλες μη φυσικές παράμετροι που το επηρεάζουν δραστικά, καθιστούν την προστασία της παράκτιας ζώνης ένα πολλά υποσχόμενο πεδίο έρευνας. Προϋπόθεση για την επιτυχία ενός εγχειρήματος ακτομηχανικής για την επίλυση μια σειράς αναγκών (προστασία του παράκτιου μετώπου από την κυματική δράση, ανάγκες ελλιμενισμού κ.α.), αποτελεί ο ορθός σχεδιασμός των τεχνικών έργων που απαιτούνται στη βάση των λύσεων που υιοθετούνται. Συνεπώς βασικό μέλημα και συνάμα πρόβλημα είναι η εξαγωγή εμπειρικών ή ημιεμπειρικών μοντέλων για την πρόβλεψη της λειτουργίας και της απόδοσης των θαλάσσιων αυτών κατασκευών. Οι αποσπασμένοι έξαλοι κυματοθραύστες αποτελούν συνήθη πρακτική παράκτιας προστασίας, με την εμπειρία που έχει αποκτηθεί σε σχέση με την ακτομηχανική συμπεριφορά τους να καλύπτει ένα ευρύ πεδίο εφαρμογής. Ως εκ τούτου έχουν μελετηθεί και αξιολογηθεί σε σημαντικό βαθμό τόσο εμπειρικά αλλά και πειραματικά.

Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια μια σειρά περιβαλλοντικών ζητημάτων έχει τεθεί σε σχέση με τη διαχείριση της παράκτιας ζώνης. Κατά τη διερεύνηση μιας πιο ορθολογικής και οικολογικής προσέγγισης, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο την οικιστική ανάπτυξη και την αναψυχή αλλά και τα θαλάσσια οικοσυστήματα, οι συμβατικοί αποσπασμένοι έξαλοι κυματοθραύστες δίνουν ολοένα και περισσότερο της θέση τους σε έργα προστασίας χαμηλής στέψης και συγκεκριμένα σε ύφαλους κυματοθραύστες (Υ.Κ.). Κερδίζουν έδαφος αφού αποτελούν μέτρο προστασίας των ακτών από διάβρωση που παρουσιάζει μια σειρά πλεονεκτημάτων με περιβαλλοντικά θετικό πρόσημο. Συγκριτικά με τις συμβατικές κατασκευές, είναι μικρότερες και λόγω του υποθαλάσσιου χαρακτήρα τους δεν αλλοιώνουν

αισθητικά την περιοχή παρέμβασης. Επιτρέπουν επαρκή ανανέωση των θαλάσσιων υδάτων και επηρεάζουν σε σημαντικά μικρότερο βαθμό τις παρακείμενες ακτές. Έχει παρατηρηθεί δε ότι τέτοιες κατασκευές ιδίως οι διαπερατές ελκύουν και ενθαρρύνουν τη θαλάσσια ζωή και μπορούν να λειτουργήσουν ως τεχνητοί οικότοποι. Ωστόσο αν πρώτο μέλημα στο σχεδιασμό είναι η αντιμετώπιση μιας ακτής από διάβρωση, το πεδίο εφαρμογής των Υ.Κ. περιορίζεται σε περιοχές με μικρό εύρος παλίρροιας (Μεσόγειος, Βαλτική, Καραϊβική), και στις οποίες δεν απαντάται ακραίο κυματικό κλίμα. Οι δε διαπερατές κατασκευές παρουσιάζουν μικρότερη απομείωση της κυματικής ενέργειας σε σχέση με τις αντίστοιχες αδιαπέρατες.

1.2 Τοποθέτηση του προβλήματος

Μια σειρά εργασιών που εξετάζουν φαινόμενα γύρω από τους Υ.Κ. μπορεί να αναζητηθεί στη διεθνή βιβλιογραφία. Η κυματική μετάδοση (Panizzo & Briganti 2007), η κυματογενής ανύψωση της θάλασσας στην προστατευόμενη κατάντη περιοχή (Calabrese *et al.* 2008a), ο τρόπος θραύση των κυματισμών (Calabrese *et al.* 2008b), η διαδρομή κυκλοφορίας του νερού (Johnson *et al.* 2005, Johnson 2006, Hur *et al.* 2012), η ανάκλαση κυματισμών και η μεταβολή στο φάσμα τους (Myrhaug & Ong 2010, Young & Testik 2011), είναι μια σειρά φαινομένων που έχουν απασχολήσει τους ερευνητές. Ωστόσο το υδροδυναμικό πεδίο στο εσωτερικό διαπερατού Υ.Κ. είναι ένα σχετικά πρόσφατο αντικείμενο μελέτης. Σε σχέση με τη βιοτική παράμετρο, παρόλο που η αντίδραση των θαλασσίων οργανισμών στην παρουσία των Υ.Κ. δεν έχει διερευνηθεί σημαντικά, το υδροδυναμικό πεδίο πιέσεων (P_s) και ταχυτήτων (U) εντός της κατασκευής καθορίζει σημαντικά την ικανότητα ανάπτυξης ενδιαιτήματος μέσα και γύρω αυτής. Ειδικά αναφέρεται η αναγκαιότητα απόκτησης πληροφορίας για το πεδίο πιέσεων εντός του Υ.Κ. (Kontaxi & Memos 2005, Moschella *et al.* 2005).

Στοχευμένες μελέτες έχουν παρουσιαστεί με στόχο την αξιολόγηση της οικολογικής φύσης των Υ.Κ. από τις οποίες και αναγνωρίστηκε η ανάγκη αλλά και η δυνατότητα για συνδυασμό τεχνικής επάρκειας με περιβαλλοντικές απαιτήσεις (Jensen *et al.* 1998, Jensen 2002, Bacchiocchi & Aioldi 2003, Siddon & Witman 2003, Moschella *et al.* 2005, Burt *et al.* 2013). Η φύση των μελετών αυτών παραμένει σε μεγάλο βαθμό ποιοτική. Από πλευράς βιολογίας ωστόσο, η ευαισθησία των θαλάσσιων οργανισμών (ιδίως των βενθικών) στις διακυμάνσεις του υδροδυναμικού πεδίου (π.χ. όρια ανοχής στην τροχιακή ταχύτητα) έχει διαπιστωθεί από σειρά ερευνητών (Eckman & Duggins 1993, Kawamata 1998, Alfaro & Carpenter 1999, Siddon & Witman 2003, Steffani & Branch, 2003, Hammond & Griffiths 2004).

Ο τρόπος με τον οποίο αναπτύσσεται (λόγω διάδοσης κυματισμών επάνω από έναν Υ.Κ.) και εξελίσσεται το υδροδυναμικό πεδίο εντός και γύρω από έναν διαπερατό Υ.Κ. παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις γύρω από μια εξεταζόμενη “μέση” τιμή. Ωστόσο η πολυπλοκότητα του φαινομένου (ανύψωση της θάλασσας λόγω ρήγωσης, υδραυλικό άλμα λόγω του ύψαλου αναβαθμού, θραύση κυματισμών, ροή και επανακυκλοφορία ύδατος στο εσωτερικό της κατασκευής, ανάπτυξη υποπίεσεων στον κατάντη πόδα, ακανόνιστα στερεά όρια στη θέση του έργου, ανάπτυξη και αλληλεπίδραση στροβίλων, τριβές, ανακλάσεις, διάθλαση, περίθλαση κ.α. καθώς και η αλληλεπίδρασή όλων των προηγούμενων) καθιστά την μαθηματική μοντελοποίηση αρκετά δύσκολη (Makris 2014). Μια σειρά μοντέλων για την πρόβλεψη του υδροδυναμικού πεδίου υπό την επίδραση κυματισμών στο εσωτερικό ενός διαπερατού Υ.Κ. έχει προταθεί αν και η επαλήθευσή τους με πειραματικές μετρήσεις παραμένει περιορισμένη (Chan *et al.* 2007, Losada *et al.* 1995, Garcia *et al.* 2004, Lara *et al.* 2006, Metallinos *et al.* 2014, Van Gent 1995).

Κοινή συνισταμένη της επαλήθευσης των παραπάνω προσπαθειών με πειραματικά δεδομένα αποτελεί το γεγονός της σύγκρισης με “μέσα” μετρούμενα μεγέθη. Επιπρόσθετα, στα μοντέλα αυτά ενσωματώνονται ημιεμπειρικοί συντελεστές οι οποίοι έχουν προσδιοριστεί κατά καιρούς πειραματικά αλλά έχουν εξαχθεί και αυτοί για “μέσες” συνθήκες υδροδυναμικού πεδίου. Κατά συνέπεια και τα αριθμητικά μοντέλα προσομοιώνουν “μέσα” μεγέθη. Μια σειρά τέτοιων συντελεστών η οποία έχει προταθεί και χρησιμοποιείται ευρέως είναι από τον Van Gent (1995) ο οποίος προσπάθησε σε μία αρκετά λεπτομερή εργασία να ενσωματώσει και την διακύμανση λόγω τυρβωδών φαινομένων για περιοδική ροή (oscillatory flow) σε πορώδες μέσο. Ωστόσο η φύση των πειραμάτων (ροή σε πορώδες μέσο σε συνθήκες κλειστού αγωγού) αναπόφευκτα παρέλειπε την πληροφορία της πλήρους ανάπτυξης της τρισδιάστατης δομής της τυρβώδους ροής (ροή σε πορώδες μέσο λόγω διάδοσης κυματισμού με ελεύθερη επιφάνεια). Σημαντικό εύρημα της συγκεκριμένης εργασίας το οποίο και δεν έχει περαιτέρω διερευνηθεί για τις εφαρμογές των Υ.Κ. αποτελεί η παρατήρηση μιας συστηματικότητας στον τρόπο που δύναται να διακυμανθεί η πίεση και η ταχύτητα (υδροδυναμικά μεγέθη) από τη μέση τους τιμή.

Με βάση τα παραπάνω αξιοποιώντας πειραματικά δεδομένα για μονοχρωματικούς κυματισμούς (Metallinos *et al.* 2014, Metallinos *et al.* 2016a, Metallinos 2016), επιχειρείται μια ποιοτική αλλά και ποσοτική αποτύπωση των διακυμάνσεων των υδροδυναμικών μεγεθών στο εσωτερικό ύφαλων διαπερατών κυματοθραυστών.

Για τον όρο “μέσο” μέγεθος, η βασική θεωρητική προσέγγιση εξετάζει τις παραμέτρους ως τυχαίες συναρτήσεις χρονικά και χωρικά ($U \sim x, t$, $P_s \sim x, t$) οπότε σύμφωνα με την εξίσωση τύρβης Navier-Stokes θεωρούμε ένα στιγμιαίο μέγεθος a της τυρβώδους ροής ίσο με $a = \bar{a} + a'$ (όπου \bar{a} η μέση τιμή και a' η χρονικά κυμαινόμενη τιμή ή διακύμανση), (Jensen *et al.* 2015, Cheng and Wang 2015).

2 ΥΦΑΛΟΙ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΕΣ

2.1 Οι ύφαλοι κυματοθραύστες, μια εναλλακτική στη σύγχρονη εποχή

Αν και στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία το ενδιαφέρον συγκεντρώνεται στις διακυμάνσεις των μεγεθών του υδροδυναμικού πεδίου όπως αυτό εξελίσσεται στο εσωτερικό ενός ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη κυρίως για οικολογικούς λόγους και την ενθάρρυνση της θαλάσσιας ζωής, δεν θα πρέπει να παραβλέπεται το γεγονός ότι οι ύφαλοι κυματοθραύστες σχεδιάζονται πρωτίστως για την προστασία της ακτής, αφού το σχετικά μικρό βάθος τοποθέτησής τους, δεν ευνοεί την ανάπτυξη αποικιών για αρκετά είδη βενθικών οργανισμών.

Με αυτό το σκοπευτικό, το υποκεφαλαίο αυτό έχει σκοπό να υπενθυμίσει και αυτό το ζήτημα, αφού η βασική φιλοσοφία για το πεδίο εφαρμογής τέτοιων κατασκευών, είναι αν πρέπει και μπορούν να αποτελέσουν μια βιώσιμη εναλλακτική πρακτική για τις συμβατικές κατασκευές. Σε ότι αφορά τους βασικούς μηχανισμούς της φύσης σήμερα είναι κοινά αποδεκτό ότι η θραύση των κυμάτων στην παράκτια ζώνη και η διαδικασία της απόσβεσης της ενέργειας που μεταδίδουν, συνδυάζεται με ποικίλους κάθετους και οριζόντιους σχηματισμούς παράκτιων ρευμάτων με αποτέλεσμα την μεταφορά των παράλιων ιζημάτων. Κατά την παρατήρηση της εξέλιξης ενός τέτοιου συστήματος γίνεται αντιληπτό ότι η κλίμακα αναδιανομής υλικού διαφοροποιείται από τοπικού χαρακτήρα αναβαθμούς και κοίλες διατάξεις ιζημάτων έως ανακατανομές σε ποσοτικούς όρους εκατοντάδων χιλιάδων κυβικών μέτρων υλικού κατά μήκος των ακτών. Το ενδιαφέρον της κατανόησης της εκ πρώτης όψεως στοχαστικότητας της φύσης έγκειται στην αναζήτηση μοτίβων. Σε συνδυασμό με τις προσπάθειες μαθηματικής περιγραφής των θαλασσιών διαταραχών (κυμάτων), η επαλήθευση ή μη των υποθέσεων παρατηρούμενης περιοδικότητας των φαινομένων αποτέλεσε βασικό εργαλείο της προσπάθειας ερμηνείας των φυσικών διεργασιών. Οι τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί αναφέρονται στην εκτίμηση του ρυθμού στερεομεταφοράς κατά μήκος ακτής που σήμερα είναι κοινά αποδεκτό ότι αποτελεί την πιο σημαντική παράκτια διεργασία διαμόρφωσης ενός ακταιού ιζηματογενούς συστήματος. Υπό την διαδικασία αυτή καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό η μορφολογία σε όρους **διάβρωσης, συσσώρευσης ή σταθερότητας**. Μια βασική κωδικοποίηση των αιτίων που συντελούν στη δυναμική μιας

ακτής καταγράφονται στον **Πίν. 1.Α**. Η κατανόηση των χαρακτηριστικών της κ.μ.α. στερεομεταφοράς κρίνεται απαραίτητη για την εφαρμογή ακτομηχανικού σχεδιασμού.

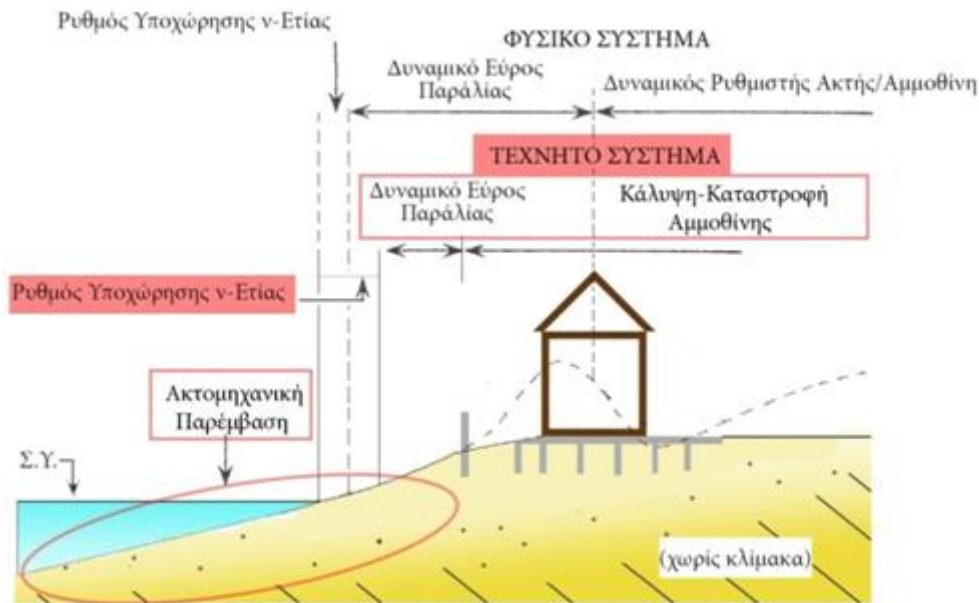
Πίν. 1.Α Βασικά αίτια μεταβολής ακτών σε χρονικά διαστήματα ορατά –σε όρους ανθρώπινης δραστηριότητας-που σχετίζονται με τη χωρική και χρονική διάταξη των ιζημάτων στην χερσαία και θαλάσσια ζώνη.

Αίτια μεταβολής ακτών	
<ul style="list-style-type: none"> • Υδροδυναμικό πεδίο • Μεταβολή στάθμης της θάλασσας • Κλίμα • Γεωλογικό υπόβαθρο 	Φυσικά
<ul style="list-style-type: none"> • Κατασκευή έργων • Αμμοληψίες 	Ανθρωπογενή
<ul style="list-style-type: none"> • Συνδυασμός Φυσικών και Ανθρωπογενών 	Συνδυασμός

Η σημαντικότερη κατηγορία ακτογραμμών που χρίζουν ανάγκης προστασίας είναι αυτές που χαρακτηρίζονται ως ιζηματογενείς. Και αυτό διότι η σχετικά μικρή έως καθόλου συνοχή των υλικών που διαμορφώνουν τέτοια παράκτια συστήματα τα καθιστά ευάλωτα στη διαρκή δράση των κυματισμών και των ρευμάτων (χαρακτηριστική είναι η διαβρωτική επίδραση της θάλασσας στις κοκκώδεις-αμμώδεις ακτές). Ταυτόχρονα δε οι τυχαίες ανθρώπινες παρεμβάσεις (παραλιακοί δρόμοι, οικήματα, τοιχία κ.α.) σε τέτοιες περιοχές συνετέλεσαν δραματικά στην διαβρωτική δράση της θάλασσας. Η πλέον χαρακτηριστική περίπτωση που έχει να αντιμετωπίσει σήμερα ο μηχανικός είναι τα προβλήματα που προκύπτουν σε μια αμμώδη ακτή λόγω της συνδυασμένης δράσης της θάλασσας και της ασφυκτικής ανθρώπινης πίεσης που διαταράσσει τη λειτουργία των αμμοθινών (**Σχ. 1.1**).

Οι συμβατικοί έξαλοι κυματοθραύστες (των οποίων δηλαδή η στέψη διαπερνά την θαλάσσια επιφάνεια) κατασκευάζονται τυπικά έτσι ώστε να καταστρέφουν ολοκληρωτικά κατά το δυνατόν την κυματική ενέργεια στη υπήνεμη πλευρά τους για συγκεκριμένες κυματικές συνθήκες σχεδιασμού. Για τις περισσότερες περιπτώσεις τα έργα αυτά είναι ογκώδη και χονδροειδή. Οι μεγάλες διαστάσεις κρίνονται αναγκαίες για τα ακραία κυματικά φαινόμενα τα οποία υφίστανται αυτές οι κατασκευές ιδίως όταν η ύπαρξή τους συνοδεύει ανάγκες ελλιμενισμού. Όμως τα τεχνητά αυτά στερεά όρια ανακοπής της φυσιολογικής κυκλοφορίας του νερού δημιουργούν συνθήκες αλλοίωσης των ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού και του βυθού στην υπό προστασία θαλάσσια περιοχή, ενώ ταυτόχρονα έχουν πολλές φορές απρόβλεπτες συνέπειες σε κοντινές ακτές. Επιπλέον η οπτική ρύπανση που προκύπτει αποτελεί πεδίο συζήτησης, ιδίως σε τουριστικές περιοχές. Συνεπώς η βιωσιμότητα των

ακτών ως σταθερά φυσικά οικοσυστήματα για τις ανάγκες της ανθρώπινης δραστηριότητας, εγείρει ζητήματα που κατά το πρόσφατο παρελθόν δεν είχαν επισημανθεί.



Σχ. 1.1 Διατάραξη του φυσιολογικού βαθμού διάβρωσης μιας κοκκώδους ακτής λόγω οικιστικής ανάπτυξης, απουσία περιβαλλοντικών όρων.

Στη σύγχρονη εποχή οι παραπάνω προβληματισμοί εκδηλώνονται ενίοτε ως αντίδραση στην τοποθέτηση σκληρών έργων προστασίας σε απόσταση από και κατά μήκος της ακτής για περιβαλλοντικούς λόγους. Ωστόσο η ανάγκη παραμένει. Ο αναπτυξιακός δρόμος που επιδιώκουν οι σύγχρονες οικονομίες συναντά την αναγκαιότητα εκμετάλλευσης της παράκτιας ζώνης. Κατά τη διερεύνηση μιας πιο ορθολογικής και οικολογικής προσέγγισης, τόσο η οικιστική ανάπτυξη και η αναψυχή, όσο και τα θαλάσσια οικοσυστήματα συναντούν ως κοινή συνισταμένη την διαμόρφωση προϋποθέσεων για ένα υγιές, βιώσιμο και όσο το δυνατόν φυσικό περιβάλλον.

Ως απόρροια των παραπάνω διαπιστώσεων, τα τελευταία χρόνια το σημείο ενδιαφέροντος περιστρέφεται γύρω από την ανάπτυξη εναλλακτικών έργων προστασίας τα οποία συνολικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως ύφαλοι κυματοθραύστες. Αυτές οι κατασκευές έχουν τη στέψη τους κάτω από ένα ορισμένο ύψος το οποίο ορίζεται π.χ. από τη ΜΣΗ και προσφέρουν ταυτόχρονα κάποιο ποσοστό προστασίας από την κυματική προσβολή της ακτής επιτρέποντας παράλληλα την απρόσκοπτη κυκλοφορία του θαλάσσιου ύδατος κατά μήκος της ακτής. Επιπροσθέτως τέτοιες κατασκευές έχουν βρει εφαρμογή και ως προκαταρκτικά αμυντικά μέτρα σε ακραία κυματικά κλίματα για τη μείωση της κυματικής ενέργειας προτού αυτή προσεγγίσει τα κύρια έργα προστασίας. Προς αυτήν την κατεύθυνση οι Υ.Κ. μπορούν

να παρέχουν μία πολύ καλή εναλλακτική λύση στην προστασία παρακτίων ζωνών με όσο το δυνατόν λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ωστόσο κατά την φάση επιλογής αυτής της λύσης γίνεται αντιληπτή η ανάγκη για εφαρμογή συνδυασμένων μεθόδων όπως η ταυτόχρονη επανατροφοδότηση των προβληματικών παρακτίων ζωνών με ιζημα. Για να γίνει πιο κατανοητός ο περιβαλλοντικός χαρακτήρας των Υ.Κ., παρατίθεται η περίπτωση της ακτής της Όστια στην δυτική Ιταλία πλησίον της Ρώμης, όπου λόγω της ανάγκης χρήσης της 7.5 χμ. παραλίας ως χώρου αναψυχής, οι συνεχείς παρεμβάσεις από τη δεκαετία του 70 βοήθησαν στην εξαγωγή κάποιων χρήσιμων συμπερασμάτων για την προοπτική των Υ.Κ. ως προς την αντικατάσταση των έξαλων κυματοθραυστών με ύφαλους (Ugo Tomasicchio 1996). Η οπτική ρύπανση και η διαμόρφωση της ακτογραμμής με συνεχόμενα μικρού πλάτους tombolo ως απόρροια των έξαλων κυματοθραυστών, που δυσχέραιναν τόσο τις κολυμβητικές δραστηριότητες όσο και την ποιότητα του νερού, βρήκαν απάντηση μέσω μιας συνολικής διαχειριστικής αναθεώρησης συνυφασμένης με τους Υ.Κ..

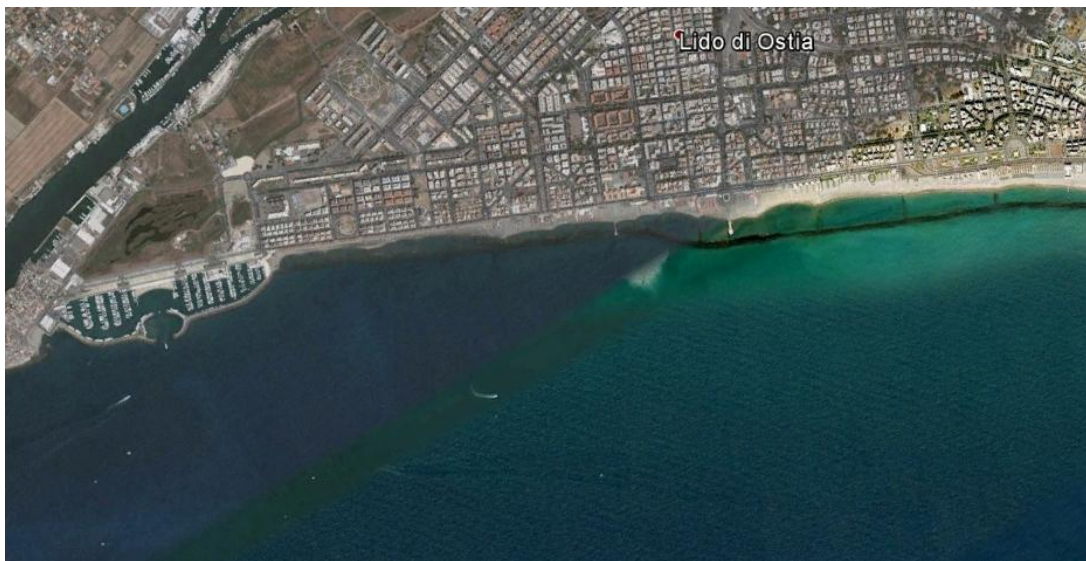


Σχ. 1.2 Πρακτική έξαλων αποσπασμένων κυματοθραυστών τη δεκαετία του 70 και δημιουργία tombolo (σημαινόμενα με κόκκινη γραμμή) στην Όστια, Δυτική Ιταλία.

Συγκεκριμένα προέκυψε ότι σωστά σχεδιασμένοι Υ.Κ. δύνανται να προστατέψουν την ακτή από την διάβρωση που προκαλούν οι κυματισμοί, επιτρέπουν την ανανέωση των υδάτων και την υγιεινή του νερού για κολυμβητικές δραστηριότητες, μπορούν να συγκρατήσουν ιζηματομεταφορά, εφόσον υπάρχει, συμβάλλοντας σε ένα φυσικό, χαμηλού κόστους και αρκετά σταθερό παράκτιο σύστημα. Επίσης δεν αλλοιώνουν το τοπίο και δεν εμποδίζουν τους κολυμβητές. Ωστόσο οι ύφαλες αυτές κατασκευές αυξάνουν τη διάβρωση στην εξωτερική τους πλευρά λόγω της θραύσης των κυματισμών στις σημεία χωροθέτησής τους ενώ βασική προϋπόθεση της επιτυχίας των Υ.Κ. αποτελεί το μικρό εύρος παλίρροιας (ειδικά για την περιοχή της Ιταλίας η μέγιστη πλήμμη δεν ξεπερνά τα 30 cm). Ωστόσο για την επιτυχία του εγχειρήματος απαιτούνται μια σειρά πρόσθετων και δαπανηρών αμυντικών έργων κατά μήκος της ακτής λόγω απουσίας επαρκούς ιζήματος. Ένα θέμα το οποίο θα

μπορούσε να τεθεί είναι αυτό του επανασχεδιασμού της παρέμβασης αυτής ώστε να λειτουργεί στο μέγιστο δυνατό βαθμό και ως τεχνητός οικότοπος.

Συνεπώς ως γενικό συμπέρασμα προκύπτει ότι οι Υ.Κ. δεν μπορούν να αποδώσουν τα αναμενόμενα εφόσον η κοκκομετρία και η ποσότητα των ιζημάτων-τα βασικότερα ίσως φυσικά παράκτια αμυντικά στοιχεία- δεν ανταποκρίνεται στην κλίμακα της ακτής που θέλουμε να συγκρατήσουμε ή να διαμορφώσουμε (Aminti,1987). Στη συνέχεια παρατίθεται μια αεροφωτογραφία μέρους των Υ. Κ. που συναντώνται στην περιοχή και έχουν αντικαταστήσει την πρακτική των έξαλων (**Εικ.1.1**). Χαρακτηριστική είναι η εξομάλυνση της ακτογραμμής που έχει επιτευχθεί συνδράμοντας στις δραστηριότητες των λουομένων. Να σημειωθεί ότι πέρα από τον συνεχόμενο Υ.Κ. που αποτελεί τη βασική δομή του συγκεκριμένου ακτομηχανικού έργου, για τον πληρέστερο έλεγχο της στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής υπάρχουν ως συμπληρωματικά έργα κάθετα σε αυτήν στοιχεία, επίσης ύφαλα δημιουργώντας ενότητες (blocks). Γενικότερα όμως η οπτική ρύπανση από αυτά τα έργα έχει μειωθεί δραστικά.



Εικ.1.1 Άποψη της σημερινής εικόνας της παραλίας της Όστια (Δυτική Ιταλία) μετά από παρεμβάσεις Υ.Κ..

Όπως προκύπτει λοιπόν από την ονομασία τους οι Υ. Κ. δεν είναι παρά μονίμως βυθισμένοι κυματοθραύστες (submerged breakwaters) που κατασκευάζονται συνήθως από λιθορριπή με τεχνητούς ή φυσικούς ογκόλιθους. Σκοπός της χρήσης του Υ.Κ. είναι να μειώσει τις υδραυλικές φορτίσεις κατάντη αυτού λόγω του κυματικού πεδίου σε τέτοιο σημείο ώστε να διατηρείται μια ωφέλιμη δυναμική ισορροπία στην παράκτια ζώνη. Οι Υ.Κ. προσφέρουν

ικανοποιητική προστασία έναντι της διάβρωσης της ακτής και σταθεροποιούν την ακτογραμμή. Ταυτόχρονα επιτρέπουν την απρόσκοπτη κυκλοφορία του νερού αφήνοντας τα παράκτια ρεύματα να περάσουν πάνω από την στέψη τους και μεταξύ υφάλου κυματοθραύστη και ακτογραμμής, εμποδίζοντας τελικά την διαμόρφωση ζωνών λιμναζόντων νερών.

2.2 Βασικές παράμετροι σχεδιασμού Ύφαλων Κυματοθραυστών

2.2.1 Επερχόμενο κύμα και οι βασικές παράμετροι που το συνοδεύουν

Το πιο σημαντικό παραμετρικό μέγεθος αποτελεί το επερχόμενο ύψος κύματος (incident wave height) H_i . Στην περίπτωση σύνθετων κυματισμών εκφράζεται ως το σημαντικό ύψος κύματος H_s ή H_{m0} (significant wave height). Προφανώς τα μικρά σε ύψος κύματα περνούν πιο εύκολα πάνω από τους Υ. Κ. και δίνουν μεγαλύτερους συντελεστές μετάδοσης από ότι τα υψηλά κύματα. Εκτός όμως του άμεσου καθορισμού του συντελεστή κυματικής μετάδοσης K_t ($K_t=H_{st}/H_{si}$), το μέγεθος του ύψους του επερχόμενου κύματος H_i καθορίζει βασικά σχεδιαστικά μεγέθη όπως η διάμετρος των ογκολίθων θωράκισης D_{n50} , το ελεύθερο βάθος θάλασσας FB πάνω από τη στέψη του Υ.Κ. ή το πλάτος στέψης B.

Ωστόσο να αναφερθεί και η σημασία της περιόδου επερχόμενου κύματος (incident wave period), T_i . Με τον όρο αυτό συνήθως εννοούμε την περίοδο του κύματος που αντιστοιχεί στην κορυφή του ενεργειακού φάσματος, T_p (peak spectral period), δηλ. $T_p=T_{pi}$. Για ημιδιαπερατές ύφαλες κατασκευές από λιθορριπή, κύματα με μεγαλύτερες περιόδους διαδίδονται ευκολότερα μέσα και πάνω από αυτές, επομένως δίνουν μεγαλύτερους συντελεστές K_t . Ο Van der Meer (1990) κατέληξε ότι τα μακρά κύματα διαδίδονται σχεδόν ανέπαφα, ενώ οι Υ.Κ. επηρεάζουν κυρίως τα βραχεία κύματα.

Η επίδραση της γωνίας διάδοσης του επερχόμενου κύματος (angle of incidence), β και κατ' επέκταση της γωνίας πρόσκρουσης του μετώπου των επερχόμενων κυμάτων στον κάθετο άξονα του έργου εξαρτάται από τη διαπερατότητα αυτού. Έχουμε δηλ. οριακή ως μηδενική επιρροή αυτής της παραμέτρου στις διαπερατές κατασκευές, ενώ για τις αδιαπέρατες έχουμε μια σχετική επίδραση της γωνίας πρόσκρουσης. Προτείνετε για κυματοθραύστες χαμηλής στέψης από λιθορριπή ότι η γωνία του μετώπου με την κατασκευή του μεταδιδόμενου κύματος είναι περίπου το 80% της γωνίας πρόσκρουσης του επερχόμενου κύματος ($\beta_t=0.8*\beta_i$).

Για ήπιες, λείες και αδιαπέρατες κατασκευές $\beta_i = \beta_i$ για $\beta_i \leq 45^\circ$ και $\beta_i = 45^\circ$ για $\beta_i \geq 45^\circ$.

Συνολικά για κυματοθραύστες από λιθορριπή καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η γωνία εφόρμησης του μετώπου του επερχόμενου κύματος προς τον άξονα της κατασκευής έχει οριακή ως μηδενική επίδραση στον υπολογισμό του συντελεστή κυματικής μετάδοσης K_t . Μόνο περιορισμό σε αυτό αποτελεί το γεγονός ότι τα πειράματα στα οποία βασίζεται η προηγούμενη ανάλυση και συμπεράσματα αφορούν ύφαλες κατασκευές και χαμηλής στέψης με σχετικά στενό πλάτος στέψης, δηλαδή μικρό B .

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας τα κυματικά σενάρια εκτείνονται σε ένα εύρος από βραχεία έως μακρά κύματα ενώ θεωρούμε το κύμα ότι προσπίπτει κάθετα στην κατασκευή μας (1D). Στο πλαίσιο των εργαστηριακών μετρήσεων που εξήχθησαν για διάφορα επερχόμενα ύψη κύματος, τα σχεδιαστικά μεγέθη και ο τρόπος καθορισμού της γενικότερης γεωμετρίας του φυσικού μοντέλου παρατίθενται στο κεφάλαιο 4.

2.2.2 Τραχύτητα και διαπερατότητα της κατασκευής

Οι έννοιες της τραχύτητας της επιφάνειας και της διαπερατότητας (surface roughness and permeability) είναι άμεσα συνδεδεμένες με την ονομαστική διάμετρο D_{n50} των ογκολίθων θωράκισης. Όσο μεγαλύτερη είναι η τελευταία τόσο πιο τραχεία και διαπερατή είναι η κατασκευή με αποτέλεσμα στις περισσότερες περιπτώσεις η απώλεια ενέργειας να είναι μεγαλύτερη. (Van der Meer & Daemen, 1994; Seabrook & Hall, 1998). Στα έργα χαμηλής στέψης (LCS) παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο, επιδρώντας ανταγωνιστικά στα φαινόμενα υπερπήδησης και αναρρίχησης. Στα ύφαλα έργα φαίνεται προσφάτως να επηρεάζουν εξίσου λόγω τριβής στον τραχύ πυθμένα και τυρβώδους διήθησης στην πορώδη στρώση θωράκισης (Siladharm & Hall, 2003).

Η διαπερατότητα του πυρήνα της κατασκευής δεν είναι ακόμα απολύτως ξεκάθαρο πώς επηρεάζει τη μετάδοση του κύματος σε Υ.Κ. Ένας αδιαπέρατος πυρήνας παρεμποδίζει την επέλαση των κυμάτων και τα ωθεί σε θραύση λόγω ρήχωσης, μειώνοντας τον συντελεστή μετάδοσης K_t , ενώ ταυτόχρονα ένας διαπερατός πυρήνας επιτρέπει τη διέλευση των κυμάτων μέσω του πορώδους προκαλώντας την καταστροφή ενέργειας όμως λόγω μη στρωτών, τυρβωδών ροών οι οποίες αναπτύσσονται στο εσωτερικό του Υ.Κ. Η εργασία αυτή προσανατολίζεται σε ακριβώς αυτήν την ανάγκη. Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν

στοχεύουν έστω να δώσουν μια σαφέστερη ένδειξη για την κατεύθυνση προσέγγισης της παραμέτρου αυτής.

2.3 Θεωρία κυματισμών

Οι γραμμικοί κυματισμοί όπως και οι πεπερασμένου εύρους μπορούν να περιγραφούν προσδιορίζοντας δυο αδιάστατες παραμέτρους, το σχετικό βάθος νερού h/L και την κλίση του κύματος H/L . Το σχετικό βάθος h/L νερού προσδιορίζει εάν οι κυματισμοί είναι πλήρους ή μερικής διασποράς και πότε η ταχύτητα, το μήκος κύματος, και το ύψος κυματισμού επηρεάζονται από το βάθος του νερού. Η κλίση του κύματος H/L είναι ένα όρος που προσδιορίζει την εξάρτηση του κυματισμού από το ύψος του και καθορίζει εάν οι παραδοχές της γραμμικής θεωρίας ισχύουν.

Ένας τρίτος όρος που χρησιμοποιείται στη θέση των προηγούμενων δυο είναι ο λόγος τους, δηλαδή:

$$\frac{H/L}{h/L} = \frac{H}{h} \quad (2.1)$$

Και ονομάζεται σχετικό ύψος κύματος. Μεγάλες τιμές της κλίσης και του σχετικού ύψους κύματος δηλώνουν ότι η παραδοχή μικρού εύρους κυματισμών δεν είναι κατάλληλη. Μια τέταρτη αδιάστατη παράμετρος που χρησιμοποιείται συχνά για την επιλογή θεωρίας διάδοσης κυματισμού, με γνωστό μήκος και ύψος κύματος σε ένα ορισμένο βάθος D , είναι ο αριθμός Ursell ή U_R .

$$U_R = \left(\frac{L}{h}\right)^2 \frac{H}{h} = \frac{L^2 H}{h^3} \quad (2.2)$$

Μεγάλες τιμές του συντελεστή U_R προκύπτουν για πεπερασμένου εύρους, πιο μακρούς κυματισμούς σε ρηγά νερά δηλώνοντας ότι η προσέγγιση τους πρέπει να γίνει με μη-γραμμικά χαρακτηριστικά.

Οι επεκτάσεις της θεωρίας του Stokes ισχύουν όταν: $H/h \ll (kh)^2$ για $kh < 1$ και $H/L \ll 1$. Αυτές οι απαιτήσεις ορίζουν έναν αριθμό Ursell, $U_R < 79$. Και έτσι αυτή η συνθήκη περιορίζει τα ύψη κυματισμών στα ρηγά νερά και περιορίζει την εφαρμογή των θεωριών Stokes (πρέπει $h/L > 1/8$ ή $kh > 0.78$). Συγκεκριμένο παράδειγμα είναι η μέγιστη τιμή του ύψους κύματος, που

μπορεί να περιγραφεί από τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης, και είναι ίση με το μισό του βάθους του νερού (Fenton 1985). Το πεδίο ισχύος της θεωρίας Cnoidal $h/L < 1/8$ και ο συντελεστής $U_R > 20$.

Ο Dean (1968,1974) παρουσίασε μια ανάλυση, στην οποία όριζε τις περιοχές εφαρμογής κάθε θεωρίας, χρησιμοποιώντας τους όρους H/T^2 και h/T^2 (το T^2 είναι ανάλογο του μήκους κύματος L). Ο Le Méhauté (1976) παρουσίασε μια ελαφρώς διαφορετική ανάλυση για να προσδιορίσει τα όρια καταλληλότητας της κάθε θεωρίας διάδοσης κυματισμών. Η 4^{ης} τάξης θεωρία Stokes αντικαθίσταται με αυτή της 5^{ης} τάξης αφού η τελευταία χρησιμοποιείται συχνότερα σε πολλές εφαρμογές. Οι Dean και Le Méhauté προτείνουν και οι δυο τη θεωρία Cnoidal για κυματισμούς σε ρηχά νερά μικρής κλίσης, και τη θεωρία Stokes υψηλότερης τάξης για μεγάλης κλίσης κυματισμούς διαδιδόμενους στα βαθιά νερά. Η γραμμική θεωρία προτείνεται για μικρής κλίσης κύματα και χαμηλές τιμές δείκτη Ursell. Στα «ενδιάμεσα» και «βαθιά» νερά η γραμμική θεωρία είναι επαρκής, ωστόσο και άλλες θεωρίες συμπεριφέρονται ικανοποιητικά. Η θεωρία της ροϊκής συνάρτησης ή και η παρόμοια θεωρία του Fenton (1988) είναι κατάλληλες για μεγάλη περιοχή των κυματικών παραμέτρων. Για γνωστές τιμές των H , h και T το **Σχ. 2.1** χρησιμοποιείται σαν οδηγός για την επιλογή της κατάλληλης θεωρίας.

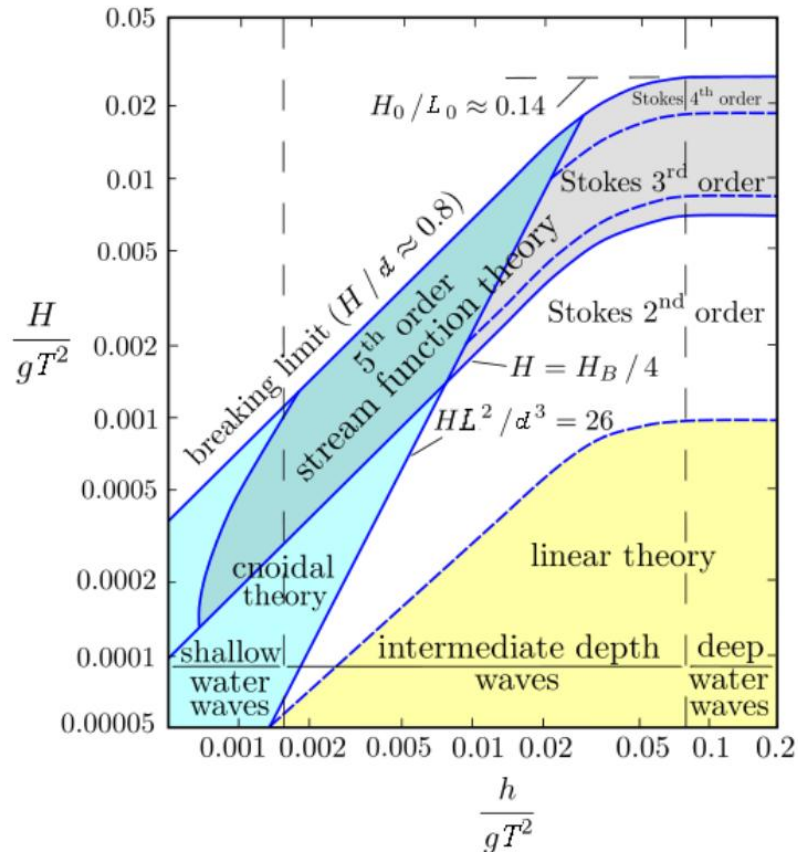
Είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τις οριακές τιμές του ύψους και της κλίσης κυματισμών σε διάφορα βάθη νερού, για να καθοριστεί η καταλληλότητα κάθε θεωρίας που χρησιμοποιεί την ανάλυση Stokes. Αυτό επιτυγχάνεται συγκρίνοντας το μέγεθος κάθε διαδοχικού όρου στην ανάλυση Stokes, όπου κάθε όρος πρέπει να είναι μικρότερος από αυτόν που προηγείται. Για παράδειγμα εάν ο δεύτερος όρος είναι μικρότερος από το 1% του πρώτου όρου της θεωρίας Stokes 2^{ης} τάξης, η οριακή κλίση δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{H}{L} \leq \frac{1}{80} \frac{\sinh^3 kh}{\cosh kh(3 + 2\sinh^2 kh)} \quad (2.3)$$

Εάν ο όρος της τρίτης τάξης είναι μικρότερος του 1% του αντίστοιχου δεύτερης τάξης, η οριακή κλίση είναι:

$$\frac{H}{L} \leq \frac{1}{7} \frac{\sinh^3 kh}{\sqrt{1 + 8\cosh^3 kh}} \quad (2.4)$$

Ομοίως, χρησιμοποιώντας την 5^η τάξης ανάλυση, οι ασύμπτωτες στην 3^η τάξης θεωρία είναι $H/L_0 < 0.1$ και $H/h < 3/4(kh)^2$ για βαθιά και ρηγά νερά αντίστοιχα. Αυτό επιτρέπει την επέκταση του εύρους της θεωρίας Stokes, προσθέτοντας μικρές διαδοχικές περιοχές στο πεδίο της γραμμικής θεωρίας όπως φαίνεται στο διάγραμμα (Σχ. 2.1), μέχρι να προσεγγιστεί το όριο θραύσης.



Σχ. 2.1 Περιοχές εφαρμογής διάφορων θεωριών διάδοσης κυματισμών. (Le Méhauté, 1976)

Οι κυματισμοί οι οποίοι εξετάστηκαν και όπως καταγράφηκαν από τα πειράματα που ανακτήθηκαν και αξιοποιήθηκαν έφεραν χαρακτηριστικά Stokes 2^{ης} και ανώτερης τάξης.

Με βάση τα παραπάνω, στο πλαίσιο της εργασίας επιχειρήθηκε η συσχέτιση των υπό εξέταση πειραματικών δεδομένων με ένα απλό μαθηματικό μοντέλο περιγραφής κυματικών διεργασιών. Επιλέχθηκε η θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης. Στο σημείο αυτό γίνεται μια επιγραμματική παρουσίαση της θεωρίας Stokes 2^{ης} τάξης η οποία με βάση την θεωρία Stokes 1^{ης} τάξης αποτέλεσε μοχλό για την ανάπτυξη και των υπολοίπων μη γραμμικών θεωριών ενώ στο Σχ. 2.2 παρατίθεται η κατατομή της ελεύθερης επιφάνειας για τις διάφορες θεωρίες κυματισμών.

Οι θεωρίες Stokes ανώτερης τάξης δίνουν μια προσεγγιστική λύση στο μη γραμμικό πρόβλημα βασιζόμενες στην κλασική μέθοδο των μικρών διαταραχών (perturbation method). Κατά τη μέθοδο αυτή, κάθε εξαρτημένη μεταβλητή εκφράζεται σαν μία πεπερασμένη σειρά δυνάμεων (δυναμοσειρά) μίας μικρής αδιάστατης παραμέτρου $\epsilon = ka$, η οποία, στην περίπτωση των κυματισμών, σχετίζεται με το ύψος και το μήκος κύματος.

$$\Phi = \epsilon \Phi_1 + \epsilon^2 \Phi_2 + \dots \quad (2.5)$$

Όπου Φ_1 η γραμμική θεωρία, Φ_2 η θεωρία δεύτερης τάξης κ.ο.κ. Οι όροι της σειράς υπολογίζονται από την λύση του συστήματος των εξισώσεων, που προκύπτουν από την ικανοποίηση των οριακών συνθηκών στην ελεύθερη επιφάνεια.

Σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης η συνάρτηση δυναμικού δίνεται από τη σχέση:

$$\Phi = \frac{Hg}{2\omega} \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cdot \sin(kx - \omega t) + \frac{3\pi H^2}{16T} \cdot \frac{\cosh 2k(h+z)}{\sinh^4 kh} \cdot \sin 2(kx - \omega t) \quad (2.6)$$

Η εξίσωση της ελεύθερης επιφάνειας έχει τη μορφή:

$$\zeta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) + \frac{\pi H^2}{8L} \cdot \frac{\cosh kh}{\sinh^3 kh} \cdot (\cos 2kh + 2) \cdot \cos 2(kx - \omega t) \quad (2.7)$$

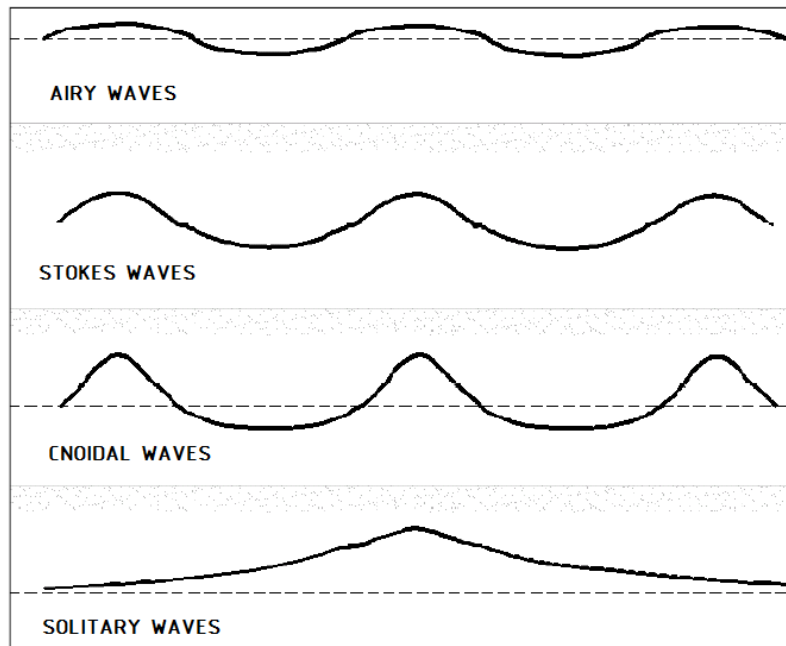
Η σχέση διασποράς της θεωρίας δεύτερης τάξης ταυτίζεται με την αντίστοιχη της πρώτης τάξης, είναι δηλαδή:

$$\omega^2 = gk \tanh kh \quad (2.8)$$

Οι συνιστώσες της ταχύτητας ενός ρευστού στοιχείου, σε οποιαδήποτε θέση x, z της μάζας του ρευστού, είναι:

$$u = \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \cdot \cos(kx - \omega t) + \frac{3}{4} \frac{\pi^2 H^2}{TL} \cdot \frac{\cosh 2k(h+z)}{\sinh^4 kh} \cdot \cos 2(kx - \omega t) \quad (2.9)$$

$$w = \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh kh} \cdot \sin(kx - \omega t) + \frac{3}{4} \frac{\pi^2 H^2}{TL} \cdot \frac{\sinh 2k(h+z)}{\sinh^4 kh} \cdot \sin 2(kx - \omega t) \quad (2.10)$$



Σχ. 2.2 Προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας για τις θεωρίες διάδοσης κυματισμών (CEM II-1)

2.4 Η έννοια της προστασίας της ακτής από έναν ύφαλο διαπερατό κυματοθραύστη

Τα έργα χαμηλής στέψης και συγκεκριμένα οι ύφαλοι κυματοθραύστες (Υ.Κ.), που αποτελούν μια τροποποίηση των παραδοσιακών αποσπασμένων κυματοθραυστών, κατασκευάζονται για να καταπολεμηθεί πρώτιστα η διάβρωση των ακτών μειώνοντας την προσπίπτουσα κυματική ενέργεια κάτω από συγκεκριμένες κυματικές συνθήκες σχεδιασμού. Σε συμφωνία με το ρόλο αυτών των κατασκευών, έχουν κατά καιρούς εκπονηθεί πλήθος εργασιών που εξετάζουν τα φαινόμενα που συμβαίνουν πάνω και γύρω από τους Υ.Κ. Η δημοσίευση των Metallinos et al. 2016b αποτελεί ένα καλό οδηγό αναζήτησης της σχετικής βιβλιογραφίας, ιδίως δε με το ενδιαφέρον να στρέφεται στους διαπερατούς ύφαλους κυματοθραύστες.

Δύο είναι οι βασικοί μηχανισμοί με τους οποίους δύναται μια διαπερατή ύφαλη τραπεζοειδής λιθορριπή να αποσβέσει μέρος της διαδιδόμενης κυματικής δράσης, και κατά συνέπεια να αποτελέσει ένα μέτρο προστασίας της ακτής από τη διάβρωση. Καθριστατικός είναι ο τύπος της θραύσης. Έχει παρατηρηθεί ότι ο τύπος που κυριαρχεί πάνω από διαπερατούς ύφαλους κυματοθραύστες είναι αυτός της κυλίσεως (spilling), που είναι σχετικά ήπιος. Είναι σαφές ότι ένας ύφαλος διαπερατός κυματοθραύστης δε μπορεί να προσφέρει τον ίδιο βαθμό απομείωσης της κυματικής ενέργειας σε σχέση με τους αντίστοιχους αδιαπέρατους. Ωστόσο, η συνεισφορά του πορώδους στην απομείωση της κυματικής ενέργειας δεν είναι αμελητέα και η ροή διαμέσου των κενών στον κορμό ενός τέτοιου έργου αποτελεί τον δεύτερο μηχανισμό ανάσχεσης των κυμάτων.

Πέρα από το γεγονός ότι μπορούν να αντιμετωπίσουν τον βασικό θέμα της προστασίας της ακτής, έχει πλέον αντιληπτό ότι ειδικά οι διαπερατοί λιθόρριπτοι ύφαλοι κυματοθραύστες, έχουν την ικανότητα να λειτουργήσουν σε αντιστοιχία με τους φυσικούς υφάλους καθώς τείνουν να προσελκύουν τη θαλάσσια ζωή και κατά συνέπεια θα πρέπει να υπεισέρχεται στο σχεδιασμό τους και αυτός ο παράγοντας..

3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

3.1 Εκλογή κλίμακας ομοιότητας

Για την εκλογή της κλίμακας ομοιότητας των ομοιώματων διαπερατής και αδιαπέρατης ύψαλης κατασκευής για τη διενέργεια των πειραμάτων στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η προσομοίωση υδροδυναμικών μηχανισμών όπως η ανάκλαση, διάθλαση και περίθλαση απαιτούν ομοιότητα κατά Froude του προσομοιώματος προς το πρωτότυπο:

$$F_r = \frac{u}{(gD)^{1/2}} \quad (3.1)$$

όπου u είναι χαρακτηριστική ταχύτητα (m/sec)

g η επιτάχυνση της βαρύτητας (m/sec²)

D το χαρακτηριστικό μήκος (m)

Η ορθή προσομοίωση των μηχανισμών απαιτεί το ομοίωμα να έχει την ίδια κλίμακα ομοιότητας προς τις τρεις διευθύνσεις. Η κλίμακα με την οποία προσομοιώνονται οι γραμμικές διαστάσεις του ομοιώματος είναι γνωστή ως γεωμετρική κλίμακα προσομοιώσεως (λ).

Αφού ορισθεί η γεωμετρική κλίμακα προσομοιώσεως, οι κλίμακες για τις υδροδυναμικές παραμέτρους μπορούν να υπολογισθούν σύμφωνα με τους νόμους ομοιότητας. Στο προκείμενο παράδειγμα προσομοιώσεως εκλέχθηκε γεωμετρική κλίμακα $\lambda=10$. Οι τιμές των λόγων ομοιότητας διάφορων παραμέτρων δίνονται στον επόμενο πίνακα.

Τα ίδια ισχύουν και αντιστρόφως, αν δηλαδή θέλουμε να κάνουμε αναγωγή από εργαστηριακές σε συνθήκες πεδίου.

Πίν. 4Γ Τιμές λόγων ομοιότητας διαφόρων παραμέτρων.

Παράμετρος	Κλίμακα	Τιμή
Μήκος	$\lambda = \lambda$	10
χρόνος	$\lambda_p = \lambda^{1/2}$	3.33
Ταχύτητα	$\lambda_T = \lambda^{1/2}$	3.33
Όγκος	$\lambda_o = \lambda^3$	1000
Μάζα	$\lambda_\mu = \lambda^3 \times (M_p/M_m)$	114.36
Επιτάχυνση	1	1
Πίεση	$\lambda = \rho_{fp}/\rho_{fm} \lambda$	10.25

Για την προσομοίωση της μάζας των στοιχείων της θωράκισης ισχύει :

$$\frac{m_p}{m_m} = \lambda^3 \cdot \frac{M_p}{M_m} \quad (3.2)$$

Όπου m_p η μάζα πρωτότυπου
 m_m η μάζα ομοιώματος

Ο λόγος M_p/M_m δίνεται από την σχέση:

$$\frac{M_p}{M_m} = \frac{\rho_{sp}}{\rho_{sm}} \cdot \left[\frac{\frac{\rho_{sm} - 1}{\rho_{fm}}}{\frac{\rho_{sp} - 1}{\rho_{fp}}} \right]^3 \quad (3.3)$$

όπου ρ_{sp} η πυκνότητα στερεού στο πρωτότυπο ίση με 2,65 t/m³
 ρ_{sm} η πυκνότητα στερεού στο ομοίωμα ίση με 2,65 t/m³
 ρ_{fp} η πυκνότητα υγρού στο πρωτότυπο ίση με 1,028 t/m³
 ρ_{fm} η πυκνότητα υγρού στο ομοίωμα ίση με 1,0 t/m³

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι μπορεί να παρουσιαστούν σημαντικές επιδράσεις κλίμακας (scale effects) κατά τη διενέργεια πειραμάτων σε φυσικά ομοιώματα υπό κλίμακα (Heller 2011), ιδίως όταν διερευνάται το υδροδυναμικό πεδίο σε πορώδες μέσο. Στην παρούσα εργασία ωστόσο η κλίμακα που επιλέχθηκε και είναι της τάξης του 1:10 προσομοιάζει επαρκώς την αντιστοιχη συμπεριφορά μιας κατασκευής σε φυσική κλίμακα. Σε ότι αφορά ζητήματα που εγείρονται ως προς το ειδικό βάρος των υλικών κατασκευής των

ομοιομάτων, παρατηρήθηκε η ευστάθεια τους έναντι καταπόνησής τους από τους εισερχόμενους κυματισμούς στο πλαίσιο του πειράματος. Επίσης αν λάβουμε υπόψη ότι ως βασική σχεδιαστική παραμέτρος για την εισαγωγή του στο μοντέλο ήταν το πορώδες και η συνεπαγόμενη συμπεριφορά του (μοντέλου) στην περιγραφή διάδοσης κυματισμών πάνω από ύφαλα εμπόδια, μπορούν να αγνοηθούν διαφοροποιήσεις λόγω κλίμακας σε σχέση με κατασκευή σε φυσικό μέγεθος, όπως ιδιότητες του νερού σχετιζόμενες με την τυρβώδη συνεκτικότητα.

3.2 Υπολογισμός πορώδους του φυσικού ομοιώματος ύφαλου κυματοθραύστη

Γενικά μπορεί να τεθεί ένα ζήτημα αν το πορώδες το οποίο μετράτε στο εργαστήριο είναι το σωστό, διότι συνήθως για τον υπολογισμό του αλλά και των πυκνοτήτων του υλικού του μοντέλου, χρησιμοποιείτε δοχείο και δεν μετράται απευθείας πάνω στη θέση του μοντέλου. Υπολογίζεται ο όγκος του δοχείου από τη μάζα του νερού:

$$V_{\delta\sigma\chi} = V_w = M_w \cdot \rho_w \quad (3.4)$$

Ένα δοχείο (άδειο) πληρώνεται με δείγμα από το υλικό άρα ο ολικός όγκος του πορώδους υλικού $V_{ολ}$ είναι $V_{\delta\sigma\chi}$. Ο ολικός όγκος ισούται με τον όγκο των κενών συν τον όγκο των στερεών:

$$V_{ολ} = V_{κεν} + V_s \quad (3.5)$$

Ζυγίζεται και βρίσκεται έτσι η μάζα του υλικού που είναι ίση και με τη μάζα των στερεών:

$$M_{ολ} = M_s + M_a = M_s \quad (3.6)$$

Στο δοχείο μπαίνει νερό που καταλαμβάνει όλο τον όγκο των κενών κι αυτό ζυγίζεται πάλι $M_{ολw}$. Αφαιρώντας τους λίθους και ζυγίζοντας το νερό που μένει M_w' υπολογίζεται ο όγκος του δηλαδή ο όγκος των κενών.

$$V_{κεν} = V_w' = M_w' \cdot \rho_w \quad (4.5)$$

Το πορώδες δηλαδή ο λόγος του όγκου των κενών προς τον ολικό όγκο του υπολογίζεται ως:

$$\varphi = \frac{V_{\text{κεν}}}{V_{\text{ολ}}} \quad (4.6)$$

Η πυκνότητα του συμπαγούς πετρώματος υπολογίζεται ως:

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (4.7)$$

Η πυκνότητα του υλικού υπολογίζεται από:

$$\rho = \frac{M_{\text{ολ}}}{V_{\text{ολ}}} \quad (4.8)$$

Με βάση τα παραπάνω η διάταξη του υλικού κατασκευής των λίθων κατά τη διαδικασία της μέτρησης του πορώδους μπορεί να οδηγήσει σε τιμές όχι αντιπροσωπευτικές του πορώδους. Μια ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται για τις περιπτώσεις όπου το υλικό έχει πορώδες φ μεταξύ 0.40 και 0.30, διότι μεταξύ αυτής της περιοχής γίνεται η μετάβαση από διαπερατές σε μερικώς αδιαπέρατες συνθήκες. Το συγκεκριμένο θέμα είναι κρίσιμο ειδικά όταν πρέπει να εισάγουμε το πορώδες σε παράμετρο σε ένα αριθμητικό μοντέλο.

4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ & ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

4.1 Πειράματα των Metallinos et. al (2014) – Ολικές πιέσεις

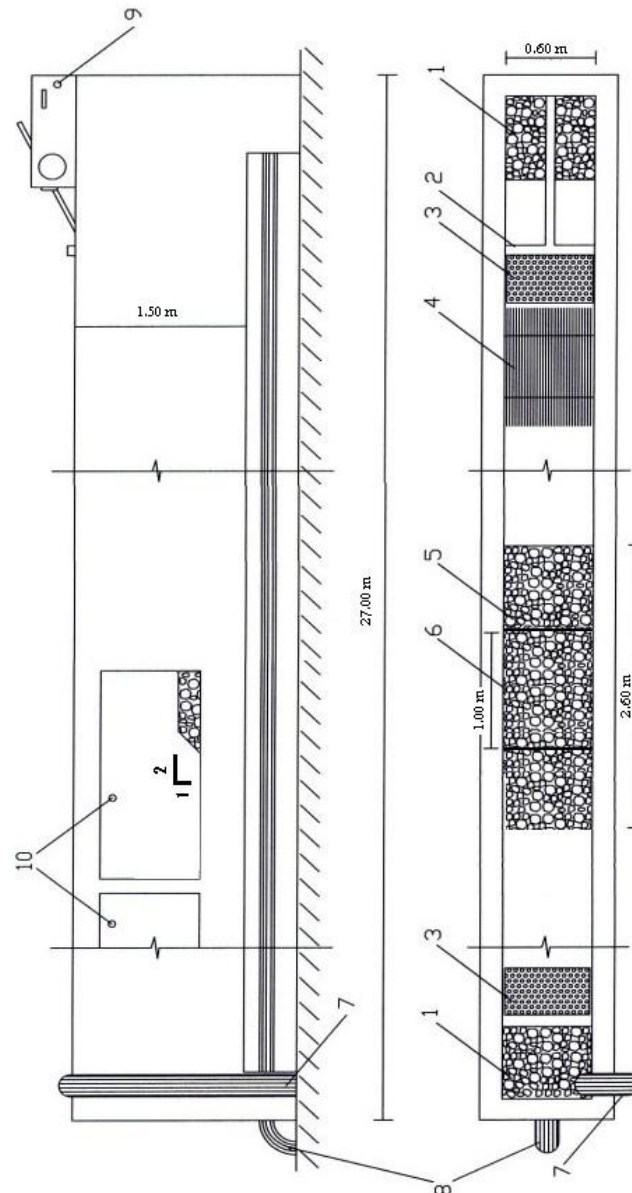
Για τις ανάγκες διερεύνησης της υδροδυναμικής πίεσης στο εσωτερικού λιθόρριπτου ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη αξιοποιήθηκαν οι πειραματικές μετρήσεις που συλλέχθηκαν από τη διεξαγωγή των πειραμάτων των Metallinos et. al (2014), Metallinos (2016). Τα πειράματα αυτά πραγματοποιήθηκαν στη διώρυγα κυματισμών βαρύτητας «Δημήτρης Κοιλάκος», στο Εργαστήριο Λιμενικών Έργων του ΕΜΠ στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου υπό την εποπτεία του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών. Ζητήθηκε και έγινε η ανάκτηση των πρωτογενών δεδομένων που είχαν συλλεχθεί, τα οποία αποτελούνται από ένα σημαντικό όγκο χρονοσειρών μέτρησης της υδροδυναμικής πίεσης από δοκιμές με διαδιδόμενους μονοχρωματικούς κυματισμούς σε φυσικό μοντέλο ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη από λιθορριπή και απότομες κλίσεις πρανών.

4.1.1 Γενική Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης

Η διώρυγα που χρησιμοποιήθηκε είναι σχήματος ορθογώνιου παραλληλογράμμου με βασικές διαστάσεις: καθαρό μήκος: 27.00 m, καθαρό πλάτος: 0.60 m, καθαρό ύψος: 1.53 m, πάχος τοιχίου: 0.21 m (Βερναρδάκης, 1990). Είναι κατασκευασμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα με διατομή ανεστραμμένου Π και στηρίζεται ως συνεχής δοκός σε βάθρο από οπλισμένο σκυρόδεμα ύψους 0.80 m. Στα δύο άκρα της διώρυγας υπάρχει αποσβεστήρας κυμάτων (απορροφητικές στοιβάδες – sponge layers). Στη θέση της κυματογεννήτριας, υπήρχε διαμορφωμένο πρανές με κροκάλες μέσης διαμέτρου 5 cm καλυμμένο με ψιλό συρματόπλεγμα για να εμποδίζεται η μετακίνησή τους. Στο άλλο ακρο επίσης είχε διαμορφωθεί ακτή με κροκάλες μέσης διαμέτρου 5 cm και είχε τοποθετηθεί απορροφητικό στρώμα κυλινδρικών στοιβάδων συρματοπλεγμάτων.

Σε απόσταση 5.75 m από το αριστερό άκρο, υπάρχουν δύο διαφανή παράθυρα (fiber glass) 0.95m x 2.90m. Στην περιοχή αυτή τοποθετήθηκε το φυσικό μοντέλο των Metallinos et. al (2014), με σκοπό την παρατήρηση και φωτογράφιση στοιχείων της πειραματικής διαδικασίας. Στο δεξί άκρο της διώρυγας είναι εγκατεστημένη η κυματογεννήτρια που χρησιμοποιείται για την παραγωγή των κυματισμών. Κατά μήκος της διώρυγας, σε απόσταση ένα μέτρο περίπου από το πτερύγιο της κυματογεννήτριας υπάρχει κατασκευή από παράλληλες, διάτρητες, μεταλλικές πλάκες διαστάσεων 1.0 m x 1.0 m. Χρησιμεύει στο να αποσβένει τις πλευρικές διαταραχές περιορίζοντας το φαινόμενο της περίθλασης ώστε να

αποκαθίσταται στη θέση γένεσης των κυματισμών η επιθυμητή διδιάστατη ροή. Στο Σχ.4.1 απεικονίζονται η κάτωψη και η τομή της διώρυγας με το φυσικό προσομοίωμα που εφαρμόστηκε.

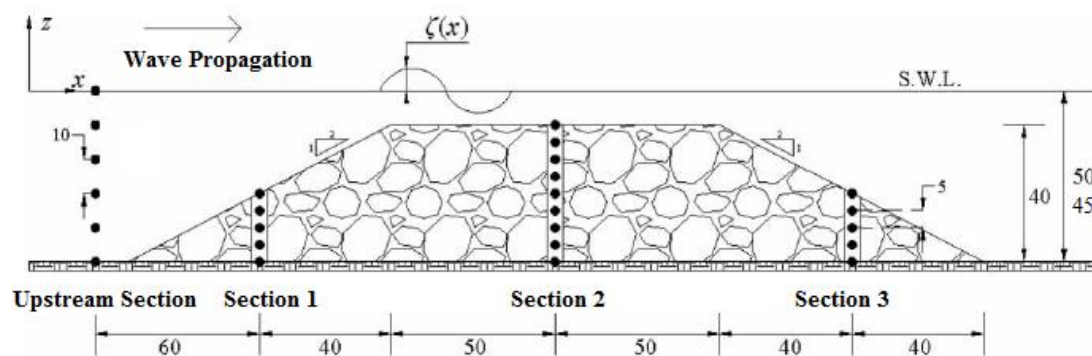


Σχ.4.1 Κάτοψη και τομή της πειραματικής διώρυγας και του φυσικού προσομοιώματος.

1. Ογκόλιθοι απορρόφησης κυματισμών 2. Κυματιστήρας 3. Φρεάτιο απορροής υδάτων 4. Διάτρητες μεταλλικές πλάκες 5. Ογκόλιθοι φυσικού προσομοιώματος 6. Στέψη μοντέλου 7. Αγωγός παροχής υδάτων 8. Αγωγός απορροής υδάτων 9. Κυματογεννήτρια 10. Παράθυρα παρατήρησης.

4.1.2 Διάταξη φυσικού μοντέλου των Metallinos *et. al* (2014)

Το πλάτος στέψης του ύφαλου κυματοθραύστη ήταν σταθερό στα 100 cm και το πλάτος στον πυθμένα ήταν 260 cm. Το ύψος του κυματοθραύστη ήταν 40 cm και η κλίση των πρανών 1:2. Ο υπολογισμός του πορώδους της κατασκευής, έγινε με πλήρωση δοχείου αμελητέου βάρους με νερό και τα υλικά κατασκευής μέσης διαμέτρου $d_{50}=8$ cm.. Τελικά, για το υλικό του κυματοθραύστη μετρήθηκε η τιμή του πορώδους σε $\phi=0.52$ (διαπερατές συνθήκες). Στο Σχ.4.2 απεικονίζεται η διάταξη και τα σημεία λήψης των μετρήσεων της πίεσης.



Σχ.4.2 Διάταξη φυσικού μοντέλου του Ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη και σημεία λήψης μετρήσεων υδροδυναμικών πιέσεων, υπό κλίμακα 1:10 Metallinos *et. al* (2014).

Η συνολική πίεση μετρήθηκε για δύο διαφορετικά βάθη της ύφαλης κατασκευής καθώς και για διαφορετικά σενάρια εισερχόμενων θραυόμενων (4 σενάρια) και μη (3 σενάρια) μονοχρωματικών κυματισμών, 7 στο σύνολο, βάθος νερού 0.45 m (3 κυματικά σενάρια) και 0.50 m (4 κυματικά σενάρια), (Πιν. 4.1). Οι μεταβολές αυτές στους κυματισμούς και στα βάθη του νερού, σε συνδυασμό με τις 4 διατομές μετρήσεων, μια στα ανάντη και τρεις στο εσωτερικό του κυματοθραύστη, οδήγησαν σε σύνολο 300 χρονοσειρών μέτρησης τάσης. Ανακτήθηκαν οι χρονοσειρές αυτές, 2 λεπτά η καθεμία (μετρημένες με κατάλληλο πιεσομετρικό όργανο τύπου αντίστασης της υδάτινης μάζας υπό την εκάστοτε θαλάσσια συνθήκη και θέση, 19 θέσεις στο εσωτερικό για κατακόρυφα διαστήματα των 5 cm, και 6 στα ανάντη με κατακόρυφα διαστήματα των 10 cm), οι οποίες και με κατάλληλη αναγωγή με διαδικασία που ακολούθησε κατά τους Metallinos *et. al* (2014) οδήγησαν σε αντίστοιχες χρονοσειρές ολικών πιέσεων. Για την παραγωγή των κυματισμών χρησιμοποιήθηκε η κυματογεννήτρια της διώρυγας. Οι μετρήσεις των υψών κύματος έγιναν με ανάγνωση σε κατακόρυφους κατάλληλα βαθμονομημένους χάρακες, ενώ για την μέτρηση των πιέσεων στο εσωτερικό του πορώδους χρησιμοποιήθηκε πιεσόμετρο KYOWA BE- 5KC διαμέτρου 3 cm και πάχους 0.5 cm. Οι οπτικές μετρήσεις στους γνώμονες θεωρήθηκαν αρκετά ακριβείς

καθώς έγινε μεγάλο πλήθος μετρήσεων με την πρέπουσα προσοχή και αρκετές επαναλήψεις, κατά συνέπεια γνωρίζουμε με μεγάλο βαθμό αξιοπιστίας τα χαρακτηριστικά των εισερχόμενων κυματισμών.

Για την εισδοχή και τοποθέτηση του πιεσόμετρου στο εσωτερικό του φυσικού μοντέλου, διαμορφώθηκαν 3 κυλινδρικές κατακόρυφες οπές επενδεδυμένες με συρματόπλεγμα για την προστασία του μετρητικού οργάνου, στο μέσο κατά το πλάτος της διάωρυγας, διαμέτρου της τάξης των μερικών εκατοστών, ώστε να εξασφαλιστεί επαρκής χώρος για το όργανο αλλά χωρίς να αλλοιώνεται η αναπαράσταση των πραγματικών συνθηκών της ροής στο εσωτερικό.

Για τη λήψη των μετρήσεων από το πιεσόμετρο χρησιμοποιήθηκε σύστημα συλλογής δεδομένων της KYOWA, συνδεδεμένο με κατάλληλη συσκευή δειγματοληψίας τύπου USB-1608FS ώστε να μετέφερονται τα δεδομένα στον υπολογιστή. Το πιεσόμετρο KYOWA BE-5KC που χρησιμοποιήθηκε είχε εύρος πεδίου τιμών από 0-5 kgf/cm², δηλαδή 0-490332.5 Pa με το σύστημα συλλογής δεδομένων να λειτουργεί για μέγιστη τάση 5V. Το χρονικό βήμα της μέτρησης ήταν 0.005 s (200 Hz).

Πίνακας 4.1: Σενάρια και τύποι κυματισμών και βάθους νερού, Metallinos *et. al* (2014).

σενάριο	Ύψος κύματος $H(m)$	Περίοδος $T(s)$	Βάθος νερού $h (m)$	Θραύση
1	0.065	2.12	0.5	Όχι
2	0.080	1.85	0.5	Όχι
3	0.095	1.58	0.5	Ναι
4	0.107	1.31	0.5	Ναι
5	0.040	2.12	0.45	Όχι
6	0.057	1.85	0.45	Ναι
7	0.075	1.58	0.45	Ναι

Συνοψίζοντας, οι πειραματικές μετρήσεις διεξήχθησαν προκειμένου να μετρηθεί η συνολική πίεση ανάντη και στο εσωτερικό ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη όπως εξελίσσονται λόγω κυματικής δράσης μονοχρωματικών κυματισμών, υπό κλίμακα περίπου 1:10 με απότομες κλίσεις πρανών, στη διάωρυγα «Δημήτρης Κοιλάκος» του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων, στο πλαίσιο διδακτορικών σπουδών (Metallinos 2016).

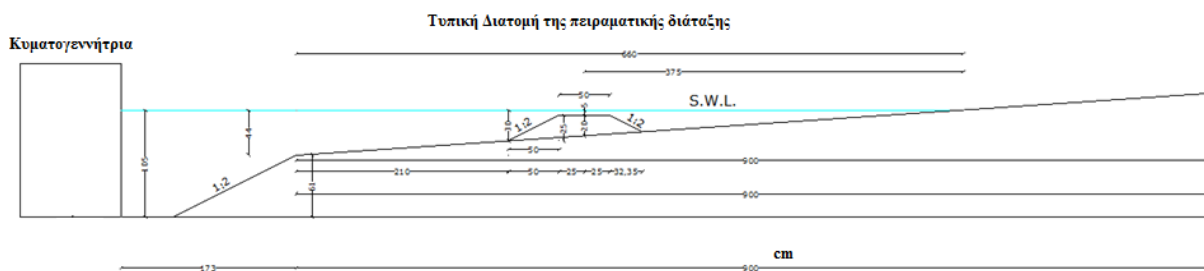
4.2 Πειράματα των Metallinos et. al (2016) – Τροχιακές ταχύτητες

Για τις ανάγκες διερεύνησης των τροχιακών ταχυτήτων στο εσωτερικού λιθόρριπτου ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη αξιοποιήθηκαν οι πειραματικές μετρήσεις που συλλέχθηκαν από τη διεξαγωγή των πειραμάτων των Metallinos 2016, Metallinos *et. al* (2016a). Τα πειράματα αυτά πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Υδραυλικής Μηχανικής Πανεπιστημίου Πατρών, στη δεξαμενή κυμάτων. Όπως και για τις πιέσεις, ζητήθηκε και έγινε η ανάκτηση των πρωτογενών δεδομένων που είχαν συλλεχθεί, τα οποία αποτελούνται από ένα σημαντικό όγκο χρονοσειρών μέτρησης των τροχιακών ταχυτήτων σε 3 διαστάσεις, από δοκιμές με διαδιδόμενους μονοχρωματικούς κυματισμούς σε φυσικό μοντέλο ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη από λιθορριπή και απότομες κλίσεις πρανών.

4.2.1 Γενική Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης

Η δεξαμενή κυματισμών που χρησιμοποιήθηκε είναι σχήματος ορθογώνιου παραλληλογράμμου με βασικές διαστάσεις: καθαρό μήκος: 12.00 m, καθαρό πλάτος: 7.00 m, και μέγιστο βάθος νερού 1.00 m. της διώρυγας υπάρχει αποσβεστήρας κυμάτων (απορροφητικές στοιβάδες – sponge layers). Η δεξαμενή διαθέτει κυματογεννήτρια της DHI με Flap Paddles και σύστημα ελέγχου ενεργητικής απόσβεσης ανακλάσεως κυματισμών.

Το φυσικό μοντέλο των Metallinos *et. al* (2016), τοποθετήθηκε σε βυθό ήπιας κλίσης Στο Σχ.4.3 απεικονίζονται η η τομή της δεξαμενής με το φυσικό μοντέλο που εφαρμόστηκε (υπό κλίμακα 1:10 με 1:15).

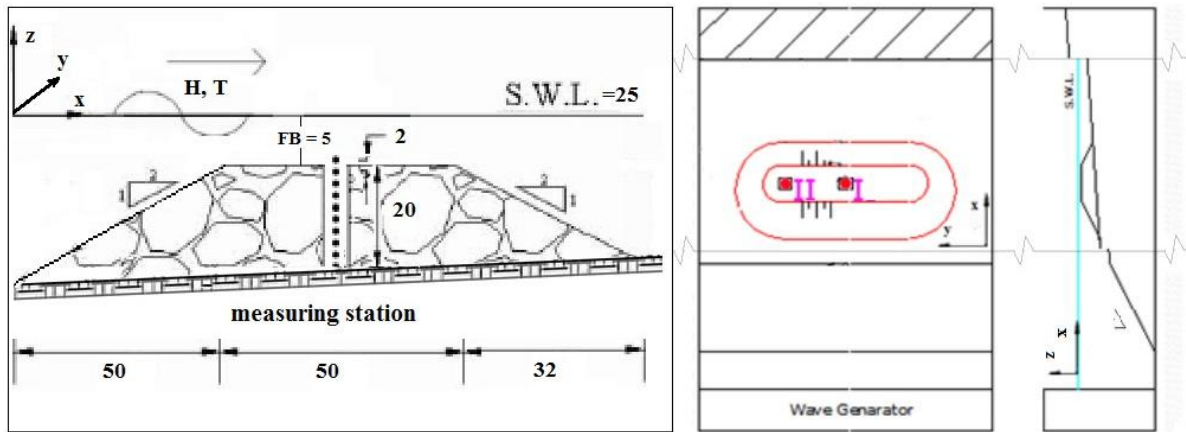


Σχ.4.3 Τομή της πειραματικής δεξαμενής και του φυσικού προσομοιώματος (Metallinos 2016, Metallinos *et al.* 2016a).

4.1.2 Διάταξη φυσικού μοντέλου των Metallinos *et. al* (2016)

Το πλάτος στέψης του ύφαλου κυματοθραύστη ήταν σταθερό στα 50 cm. Το μέσούψος του κυματοθραύστη ήταν 20 cm και η κλίση των πρανών 1:2. Τα υλικά κατασκευής ήταν πέτρες μέσης διαμέτρου $d_{50}=4$ cm.. Για τον κυματοθραύστη μετρήθηκε η τιμή του πορώδους σε

$\phi=0.50$ (διαπερατές συνθήκες). Στο **Σχ.4.4** απεικονίζεται η διάταξη και τα σημεία λήψης των μετρήσεων των ταχυτήτων. Μετρήσεις ελήφθησαν σε δύο θέσεις. Στην κεντρική διατομή και στο ακρομώλιο, στο εσωτερικό της κατασκευής. Σε κάθε μία από τις δύο αυτές θέσεις, οι μετρήσεις πάρθηκαν ανά δύο εκατοστά (10 σημεία ανά θέση).



Σχ.4.4 Διάταξη φυσικού μοντέλου του Ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη και σημεία λήψης μετρήσεων τροχιακών ταχυτήτων, υπό κλίμακα 1:10-1:15 Metallinos *et. al* (2016a).

Οι τροχιακές ταχύτητες μετρήθηκαν για ένα βάθος νερού, για διαφορετικά σενάρια εισερχόμενων θραυόμενων (2 σενάρια) και μη (2 σενάρια) μονοχρωματικών κυματισμών, 4 στο σύνολο, βάθος νερού 0.25 m στη θέση της στέψης του κυματοθραύστη (**Πιν. 4.2**). Οι μεταβολές αυτές στους κυματισμούς, σε συνδυασμό με τις 2 διατομές μετρήσεων, και για τρεις κατευθύνσεις, οδήγησαν σε σύνολο 240 χρονοσειρών ταχυτήτων 3 λεπτών η καθεμία οι οποίες και ανακτήθηκαν. Για την παραγωγή των κυματισμών χρησιμοποιήθηκε η κυματογεννήτρια της διάωρυγας. Οι μετρήσεις των υψών κύματος έγιναν με κυματομετρητές (wave gauges) της DHI, ενώ για την μέτρηση των πιέσεων στο εσωτερικό του πορώδους χρησιμοποιήθηκε όργανο τεχνολογίας ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) της SONTEK για τη μέτρηση της στιγμιαίας ταχύτητας (σε 3 διαστάσεις: V_x , V_y , V_z). Το χρονικό βήμα της μέτρησης ήταν 0.02 s (50 Hz).

Για την εισδοχή και τοποθέτηση του οργάνου στο εσωτερικό του φυσικού μοντέλου, διαμορφώθηκαν 2 κυλινδρικές κατακόρυφες οπές επενδεδυμένες με συρματοπλέγμα για την προστασία του μετρητικού οργάνου, στο μέσο κατά το πλάτος του μοντέλου, διαμέτρου της τάξης των 10 εκατοστών, ώστε να εξασφαλιστεί επαρκής χώρος για το όργανο αλλά και να μην αλλοιώνεται η αναπαράσταση των πραγματικών συνθηκών της ροής στο εσωτερικό. Επιπροσθέτως χρησιμοποιήθηκε πέτρινη περατή τάπα, ώστε να μειώνεται ο όγκος των οπών αυτών από τη στιγμή που το όργανο ξεκινούσε να λειτουργεί.

Πίνακας 4.2: Σενάρια και τύποι κυματισμών και βάθους νερού, Metallinos *et. al* (2016a).

σενάριο	Ύψος κύματος $H(m)$	Περίδος $T(s)$	Βάθος νερού $h (m)$	Θραύση
1	0.045	1.25	0.25	Όχι
2	0.040	2.00	0.25	Όχι
3	0.080	1.25	0.25	Ναι
4	0.080	2.00	0.25	Ναι

Συνοψίζοντας, οι πειραματικές μετρήσεις διεξήχθησαν προκειμένου να μετρηθούν οι τροχιακές ταχύτητες στο εσωτερικό ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη όπως εξελίσσονται λόγω κυματικής δράσης μονοχρωματικών κυματισμών, υπό κλίμακα περίπου 1:10 με απότομες κλίσεις πρανών, στη δεξαμενή κυμάτων του εργαστηρίου Υδραυλικής Μηχανικής στο Πανεπιστήμιο Πατρών, στο πλαίσιο διδακτορικών εν εξελίξη σπουδών (Metallinos 2016).

5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται τα βήματα με τα οποία έγινε η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων που ανακτήθηκαν από τους Metallinos *et al.* (2014), Metallinos *et al.* (2016a), Metallinos (2016). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν έχουν καταρτιστεί σε διαγράμματα και πίνακες (Κεφ. 6, και Παράρτημα). Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 4 τα πειράματα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη αναφέρεται σε μέτρηση ολικών πιέσεων στο εσωτερικό και στα ανάντη ύφαλου διαπερατού λιθόρριπτου κυματοθραύστη για δισδιάστατες συνθήκες (Metallinos *et al.* 2014), και η δεύτερη στην καταγραφή τροχιακών ταχυτήτων σε τρεις διαστάσεις για αντίστοιχο ύφαλο διαπερατό λιθόρριπτο κυματοθραύστη για τρισδιάστατες συνθήκες (Metallinos *et al.* 2016a). Και οι δύο περιπτώσεις αναφέρονται σε συνθήκες εργαστηριακές, για μετρήσεις φυσικών συθηκών υπό κλίμακα, και υπό τη δράση γραμμικών κυματισμών.

5.2 Ανάλυση πειραματικών δεδομένων

Οι χρονοσειρές των υδροδυναμικών πιέσεων έχουν ληφθεί ως μέσες τιμές για επιφάνεια αναφοράς ίση με αυτή του πιεσομέτρου που χρησιμοποιήθηκε (διάμετρος περίπου 3 cm). Αντιστοίχως οι τροχιακές ταχύτητες έχουν ληφθεί ως μέσες τιμές για όγκο αναφοράς σε ελλειψοειδές εκ περιστροφής (3mm x 9 mm περίπου). Αυτό έχει ως συνέπεια οι μετρήσεις να μην είναι σημειακές. Έχει γίνει δηλαδή πρωτογενώς ένα averaging.

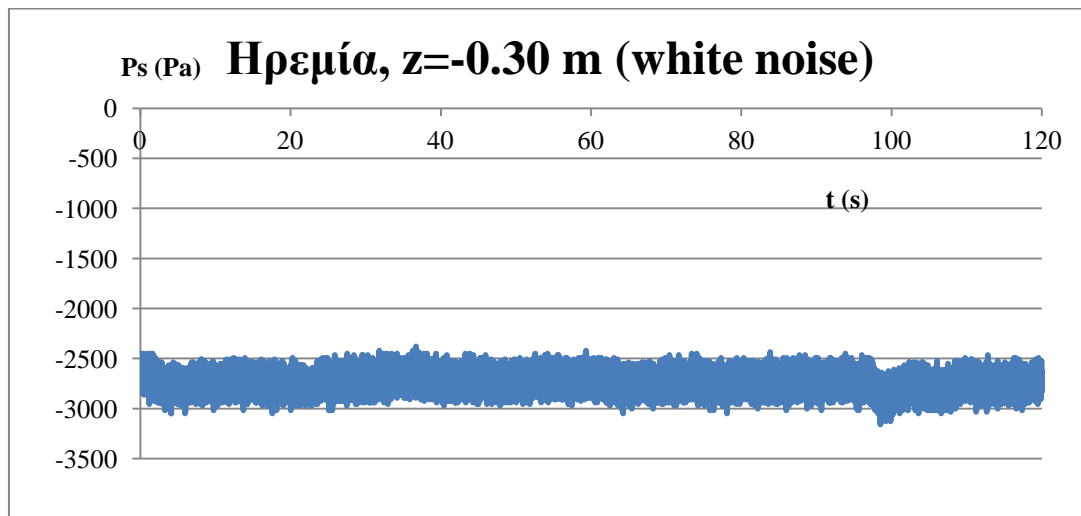
5.2.1 Πιέσεις - Πρωτογενή δεδομένα των Metallinos *et al.* 2014

Η πειραματική διάταξη περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4.1. Η ολική πίεση -άθροισμα υδροστατικής και υδροδυναμικής πίεσης- αποτελεί τη βασική υπό εξέταση παράμετρο της σειράς αυτών των πειραμάτων (Metallinos *et. al* 2014).

Κατ'αρχήν πραγματοποιήθηκε η αναγωγή των μετρήσεων σε συνολικές πιέσεις όπως εφαρμόστηκε από τους Metallinos *et. al* 2014. Για το σκοπό αυτό αξιοποιήθηκαν μετρήσεις που ελήφθησαν για κατάσταση ηρεμίας ανά διαστήματα των 5 cm καθ' ύψος. Γνωρίζοντας το βάθος και την πυκνότητα του νερού, έγινε καλιμπράρισμα ώστε να συσχετιστούν οι μετρούμενες τάσεις με την αντίστοιχη ολική πίεση.

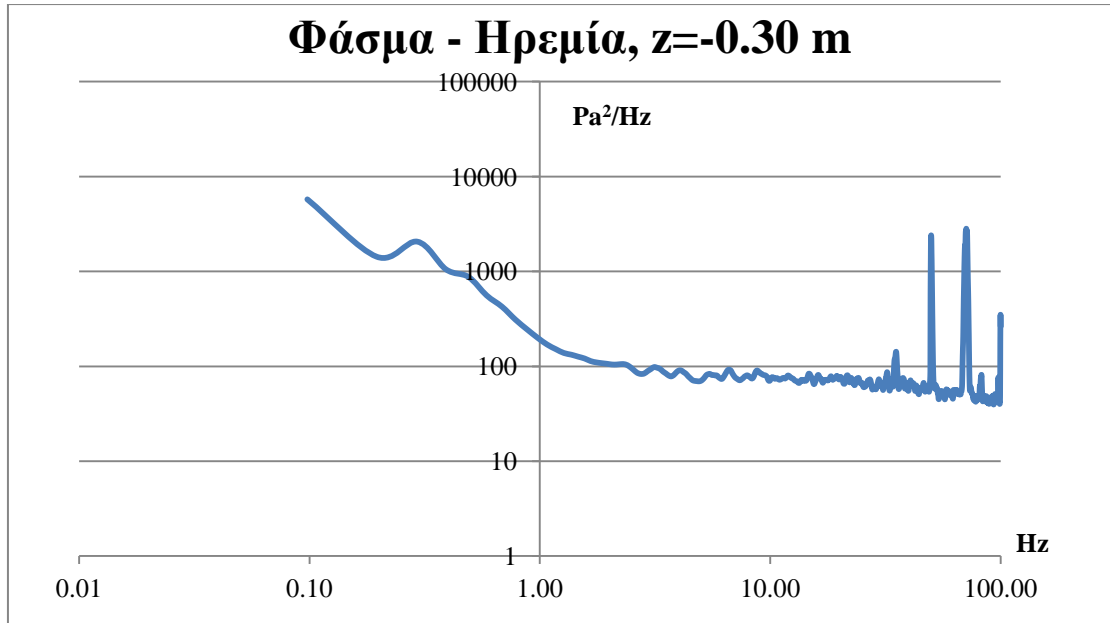
Το επόμενο ουσιαστικό βήμα αποτέλεσε η προσπάθεια καθαρισμού των δεδομένων λόγω θορύβου. Για το σκοπό αυτό αξιοποιήθηκαν οι μετρήσεις για κατάσταση ηρεμίας, και με φασματική ανάλυση επιλέχθηκε η μέθοδος καθαρισμού τους.

Στο ακόλουθο σχήμα δίδεται μια τυπική χρονοσειρά πιέσεων σε ηρεμία όπου παρατηρείται έντονη διακύμανση γύρω από μια μέση τιμή, πρακτικά ίσης με αυτήν της υδροστατικής πίεσης. Είναι φανερή η ανάγκη του καθαρισμού των χρονοσειρών.



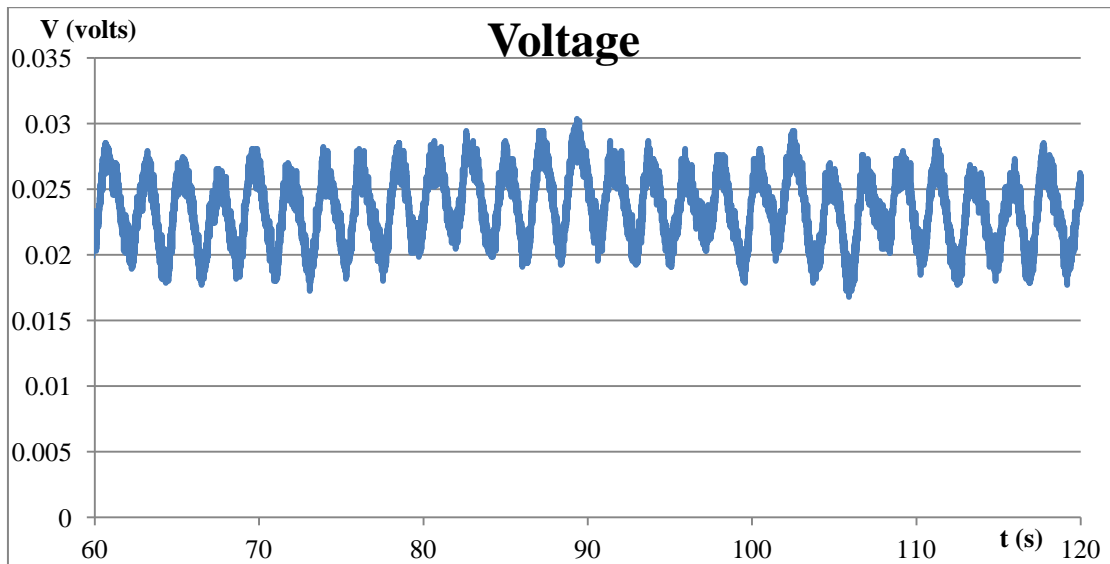
Σχ. 5.1 Ενδεικτική χρονοσειρά ολικών πιέσεων για κατάσταση ηρεμίας $z=-0.30$ m, αποκλίσεις της τάξης των 400-500 Pa.

Για τον υπολογισμό του φίλτρου καθαρισμού των χρονοσειρών χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία της φασματικής ανάλυσης σε αντιστοιχία με την περίπτωση του χαρακτηριστικού ύψους κύματος. Μέσω αυτής προσδιορίστηκε φάσμα για ολικές πιέσεις που εκφράζει την κατανομή της -σε αντιστοιχία με το χαρακτηριστικό ύψος κύματος- “ενέργειας” της πίεσης στις διάφορες συχνότητες (Σχ. 5.2). Οι αιχμές που εμφανίζονται αντιστοιχούν σε θόρυβο λόγω ηλεκτρικών σταθερών σημάτων που διαπερνούσαν την πειραματική διάταξη.

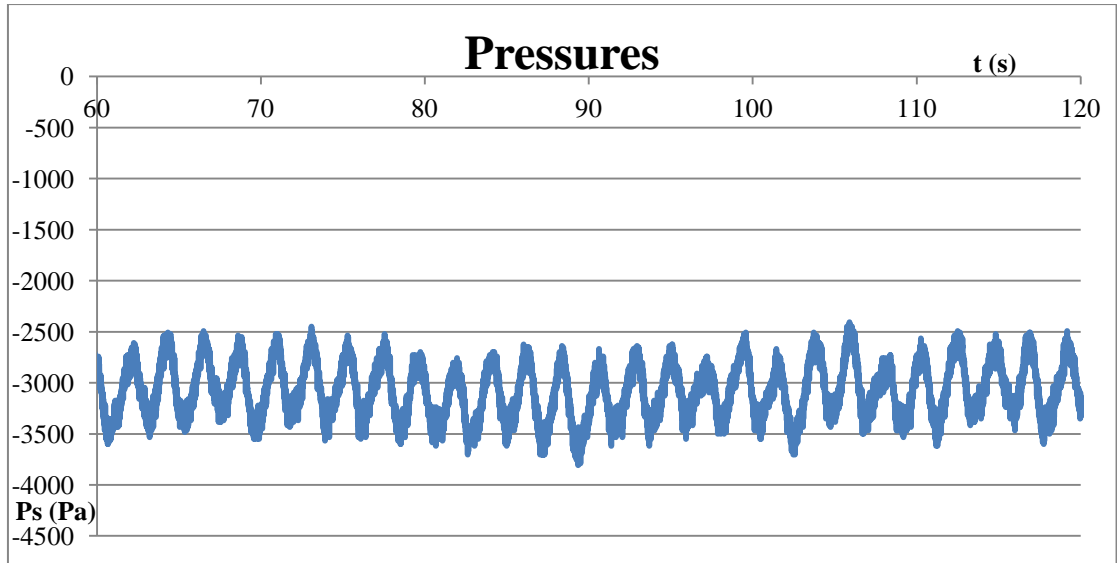


Σχ. 5.2 Ενδεικτικό Φάσμα χρονοσειράς πιέσεων για κατάσταση ηρεμίας, $z=-0.30$ m, λογαριθμική κλίμακα.

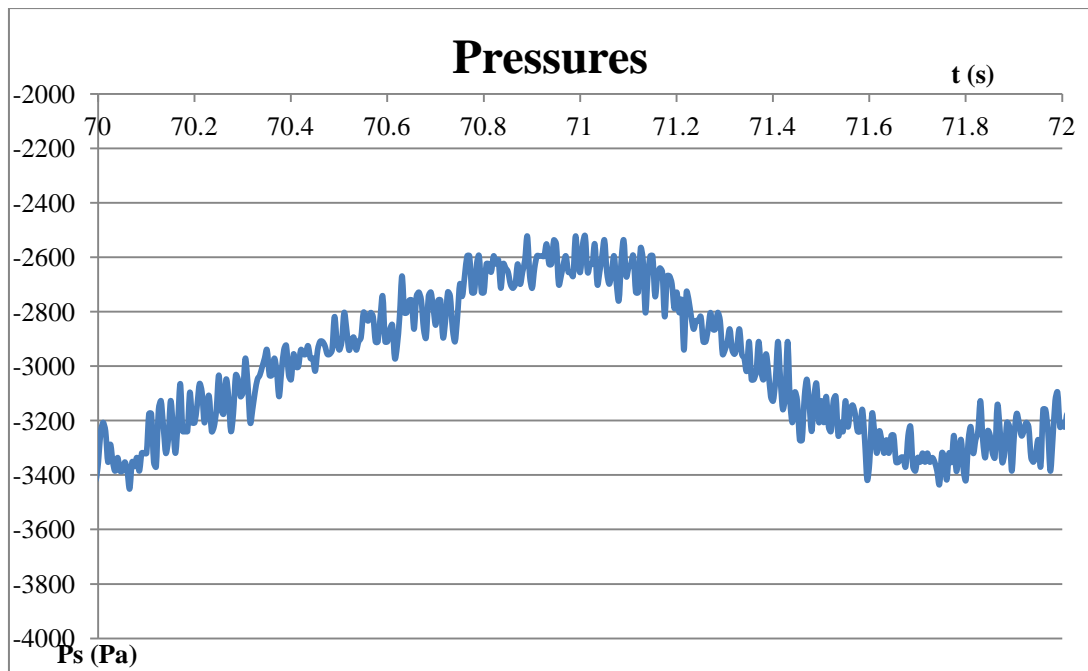
Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η ίδια διαδικασία για τις περιπτώσεις όπου αναπτύχθηκαν πλήρως κυματικές συνθήκες μονοχρωματικών κυματισμών. Για λόγους επαλήθευσης η διαδικασία εφαρμόστηκε τόσο σε επίπεδο τάσεων αλλά και αναγόμενων από αυτές ολικών πιέσεων. Παρακάτω ακολουθούν οι πρωτογενείς (αφιλτράριστες) χρονοσειρές για μια τυπική περίπτωση (Σχ. 5.3-5.5).



Σχ. 5.3 Χρονοσειρά τάσεων (διατομή στο προσήγεμο πρανές, $z=-0.30$ m, $H=0.065$ m, $T=2.12$ s), πρωτογενή δεδομένα των Metallinos *et al.* (2014).

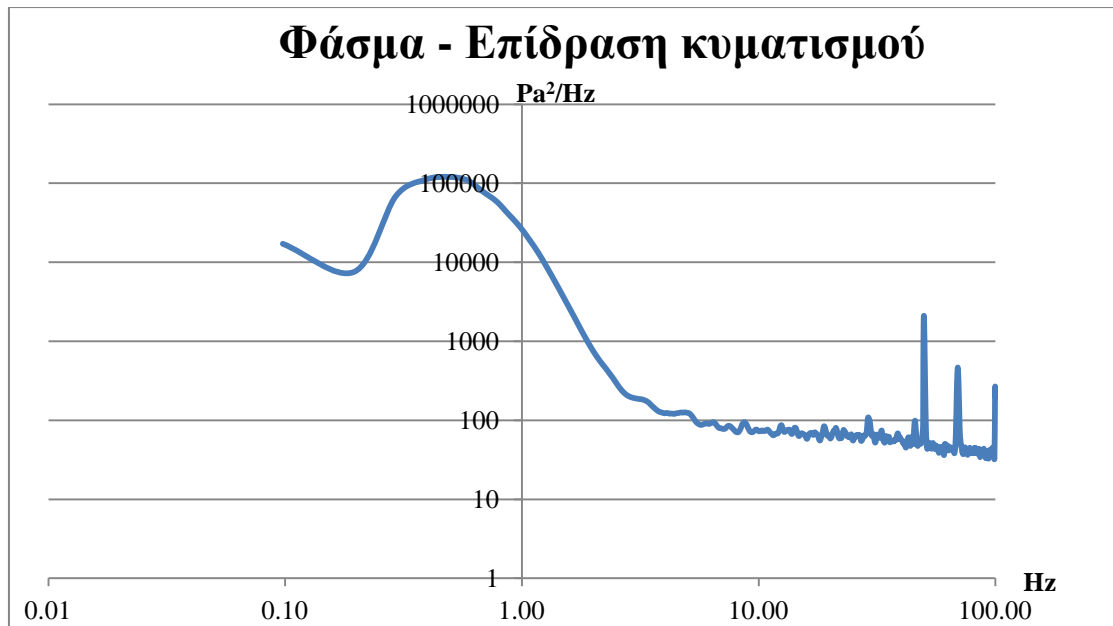


Σχ. 5.4 Τυπική χρονοσειρά ολικών πιέσεων (διατομή στο προσήνεμο πρανές, $z=-0.30$ m, $H=0.065$ m, $T=2.12$ s), πρωτογενή δεδομένα των Metallinos *et al.* (2014)..

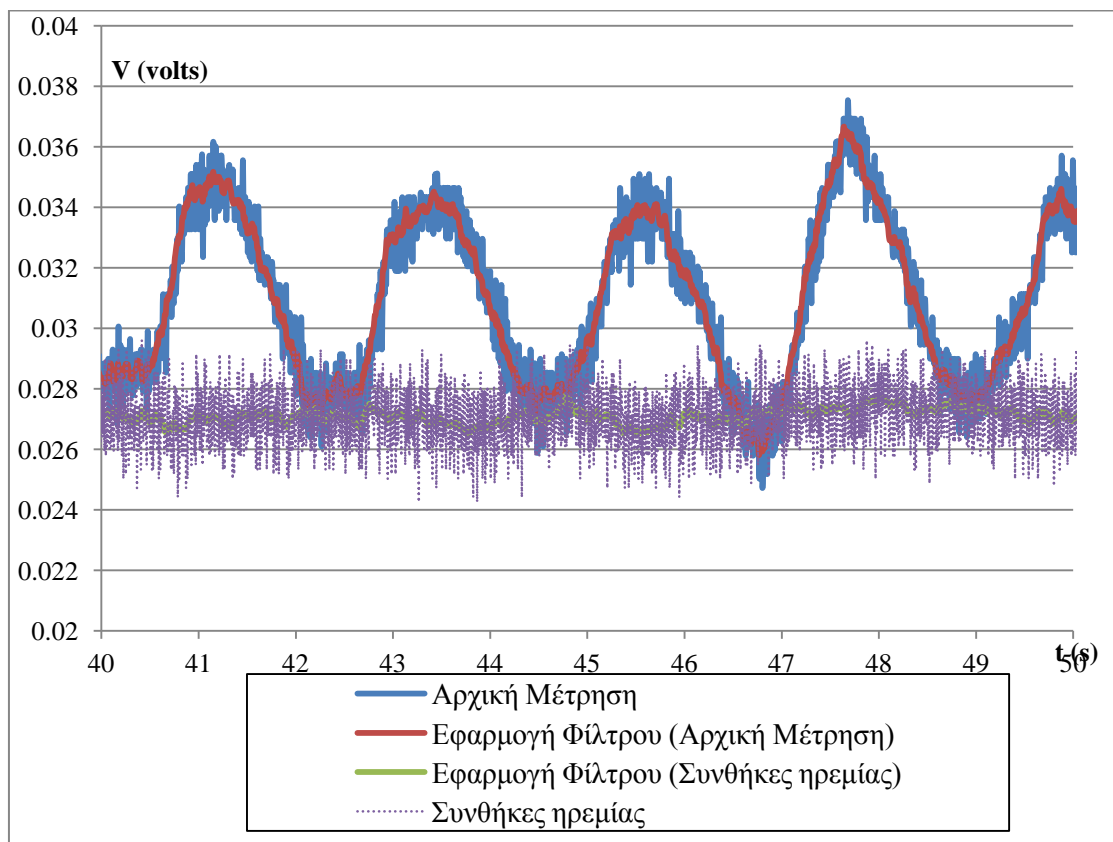


Σχ. 5.5 Ενδεικτική χρονοσειρά πιέσεων για 2.0 s (section 1, $z=-0.30$ m, $H=0.065$ m, $T=2.12$ s), πρωτογενή δεδομένα των Metallinos *et al.* (2014).

Ακολουθεί τυπικό παράδειγμα (Σχ. 5.6) φάσματος για ολικές πιέσεις που εκφράζει την κατανομή της -σε αντιστοιχία με το χαρακτηριστικό ύψος κύματος- “ενέργειας” της πίεσης στις διάφορες συχνότητες. Παρ’ ότι οι εισερχόμενοι κυματισμοί θεωρητικά είναι μονοχρωματικοί, υφίστανται μετασχηματισμούς και αποκτούν ελαφρά μη γραμμικότητα, η οποία και επιτρέπει την εφαρμογή φασμάτων.



Σχ. 5.6 Φάσμα χρονοσειράς ολικών πιέσεων (διατομή στο προσήνεμο πρανές, $z=-0.30$ m, $H=0.065$ m, $T=2.12$ s), λογαριθμική κλίμα
 Τέλος και ύστερα από μια σειρά δοκιμών όπως φαίνεται στο **Σχ. 5.7** με χρήση low pass filtering method, επιλέχθηκε η αναγωγή της κάθε μέτρησης (ανά dt) σε μέσο όρο των επομένων 10 καταγραφών, με γνώμονα να μην απορριφθεί χρήσιμη πληροφορία.

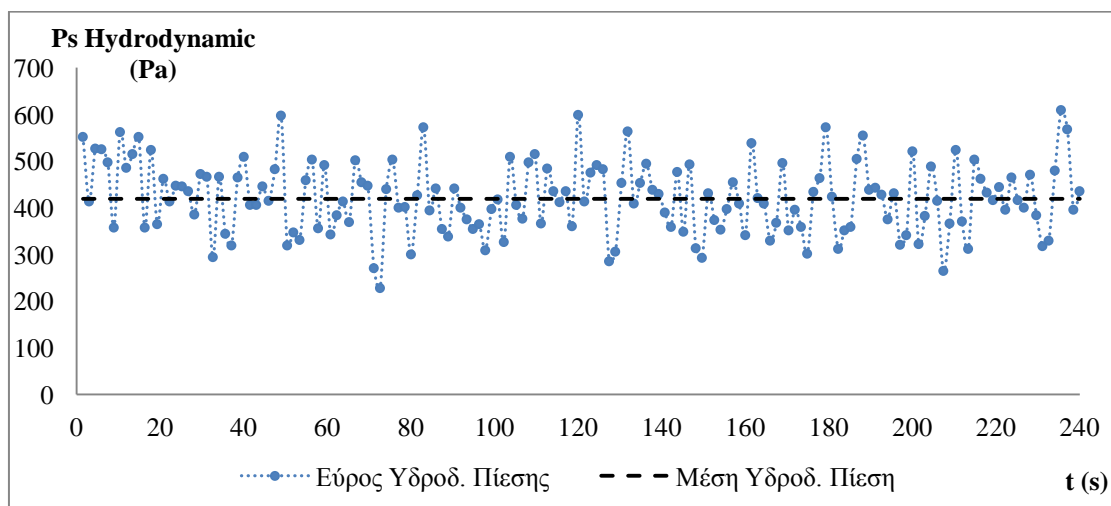


Σχ. 5.7 Χρονοσειρές πιέσεων: επίδραση κυματισμού, διατομή στο προσήνεμο πρανές, $z=-0.30$ m, $H=0.065$ m, $T=2.12$ s, και κατάσταση ηρεμίας πριν και μετά την εφαρμογή φίλτρου για τον καθαρισμό τους από τον θόρυβο.

Από τη στιγμή που έγινε ο καθαρισμός των πειραματικών δεδομένων αναζητήθηκε ο τρόπος επεξεργασίας του μεγάλου αυτού όγκου χρονοσειρών ολικών πιέσεων.

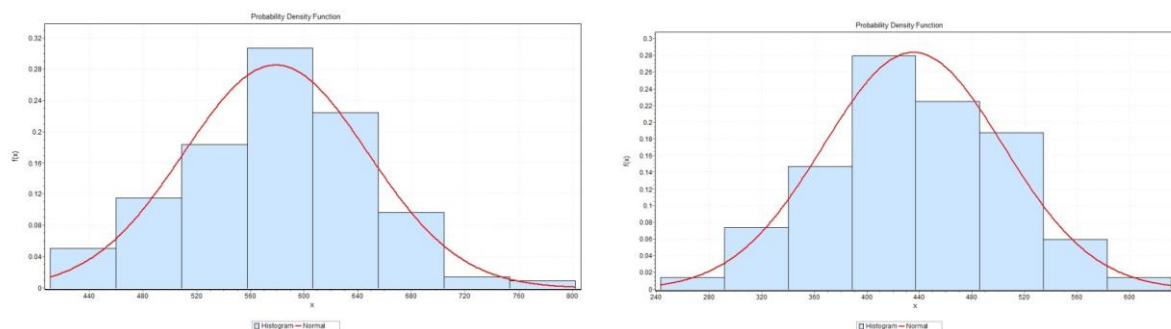
Λόγω της συνεχούς μεταβολής του βάθους σε μια θέση μέτρησης, (λόγω της διάδοσης των κυματισμών, ροή με ελεύθερη επιφάνεια), ο υδροδυναμικός όρος ήταν αρκετά δύσκολο να απομονωθεί με απλή αφαίρεση της υδροστατικής μιας και δεν υπήρχε ταυτόχρονη καταγραφή της ανύψωσης της ελεύθερης στάθμης από την στάθμη ηρεμίας. Κατά συνέπεια ακολουθήθηκε η ευρέως εφαρμοζόμενη πρακτική, αυτή της αντιμετώπισης ενός υδροδυναμικού μεγέθους που διακυμαίνεται, σε αντιστοιχία με την περίπτωση του χαρακτηριστικού ύψους κύματος. Κατ' αντιστοιχία ορίστηκε η έννοια του ύψους της μέσης υδροδυναμικής πίεσης και του μέγιστου ύψους που μπορεί αυτή να λάβει. Με βάση αυτή τη θεώρηση, για την κάθε χρονοσειρά ξεχωριστά, υπολογίστηκε με ακρίβεια η περίοδος, με απαρίθμηση των κυματικών κύκλων, και έσπασε σε αντίστοιχες μικρότερες χρονοσειρές της 1 περιόδου. Για την κάθε υπό-χρονοσειρά της μίας περιόδου εντοπίστηκε η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή. Στη συνέχεια υπολογίστηκε το ύψος της υδροδυναμικής πίεσης ως η κατ' απόλυτο διαφορά των δύο αυτών τιμών. Η διαδικασία επεκτάθηκε ακριβώς με τον ίδιο τρόπο αλλά με διαφορά μισής περιόδου. Με τον τρόπο αυτό υπολογίστηκε το ύψος της υδροδυναμικής πίεσης μεταξύ κορυφής και επόμενης κοιλάδας. Οι μετρήσεις αυτές αποτυπώθηκαν και σε όρους υψών για καθ' ύψος κατανομές των μέσων υδροδυναμικών πιέσεων και των αντίστοιχων μέγιστων εμφανιζόμενων τιμών τους.

Ακολουθεί ένα τυπικό παράδειγμα της διακύμανσης ανά περίοδο (T) του ύψους της υδροδυναμικής πίεσης. (Σχ. 5.8).



Σχ. 5.8 Τυπικό παράδειγμα υπολογισμού του μέσου ύψους και της διακύμανσης ύψους υδροδυναμικής πίεσης ανά περίοδο ($H=0.075$ m, $T=1.5$ s, $z=-0.05$ m, κεντρική διατομή).

Το επόμενο βήμα ήταν να γίνει μια προσπάθεια να συσχετιστούν οι παρατηρούμενες αποκλίσεις του ύψους της υδροδυναμικής πίεσης με τη καταγραφόμενη μέση τιμή του. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό EasyFit 5.6 (standard) το οποίο επέτρεψε την παρατήρηση και την ανάλυση σε επίπεδο πιθανοτικών κατανομών. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι για όλες τις περιπτώσεις των χρονοσειρών, σχετικά μικρού μήκους (4 λεπτά), η προσαρμογή με την κανονική κατανομή περιέγραφε με ικανοποιητική ακρίβεια την διακύμανση. Η κανονική κατανομή της διακύμανσης λόγω τύρβης είναι άλλωστε αναμενόμενη σύμφωνα και με τον κλασικό ορισμό της, κάτι που έχει διαπιστωθεί και πειραματικά σε πλήθος περιπτώσεων τυρβώδους ροής. Κάποιες ασυμμετρίες ωστόσο παρατηρήθηκαν που πιθανώς οφείλονται στο σχετικά μικρό πλήθος των υψών υδροδυναμικής πίεσης (μερικές εκατοντάδες) κάθε χρονοσειράς και συνδέονται επίσης με την ασυμμετρία της διάταξης. Δηλαδή έναν εισερχόμενο κυματισμό από την προσήνεμη πλευρά της κατασκευής διαδιδόμενο και ενίοτε θραυόμενο πάνω από το ύψαλο αυτό εμπόδιο. Ακολουθούν χαρακτηριστικά παραδείγματα της κανονικής κατανομής του ύψους της υδροδυναμικής πίεσης (Σχ. 5.9).



Σχ. 5.10 Τυπικά παράδειγματα κατανομής του ύψους της υδροδυναμικής πίεσης και προσαρμογή κανονικής κατανομής (αριστερά, $z=0.40$ m απόσταση από τον πυθμένα, δεξιά $z=0.35$ αντίστοιχα, σενάριο 5, κεντρική διατομή)

Τέλος υπολογίστηκε ο συντελεστής μεταβλητότητας CV (τυπική απόκλιση προς μέση τιμή) ώστε να διαπιστωθεί αν υπήρχαν κανονικότητες, με την προοπτική να προταθεί μια μεθοδολογία για μια μελλοντική προσπάθεια περιγραφής της μέγιστης πιθανής απόκλισης (και διακύμανσης) του ύψους της υδροδυναμικής πίεσης ως μια απλή μαθηματική συνάρτηση σε σχέση με τη μέση τιμή. Ένα απλό μαθηματικό μοντέλο αυτού του τύπου θα ήταν εύκολο να αξιοποιηθεί από βιολόγους για το σκοπό της περιβαλλοντικής αξιολόγησης ενός ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη. Ταυτοχρόνως θα επέτρεπε και την ανάπτυξη και επαλήθευση των υφιστάμενων αριθμητικών μοντέλων στο να προσομοιάσουν και τις τυρβώδεις ροή στο εσωτερικό ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη. Ο εντοπισμός μιας σχέσης αναλογίας της

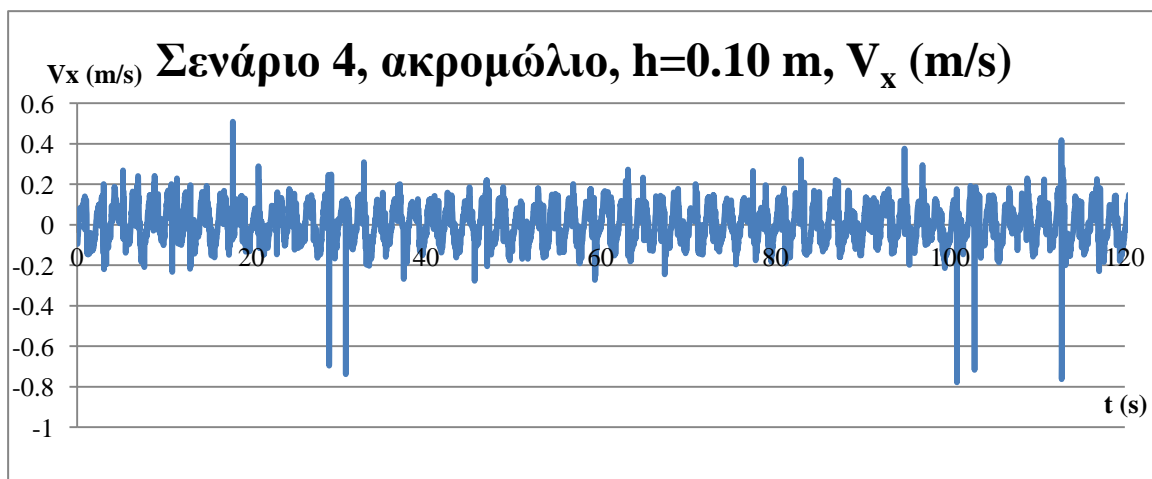
μέσης τιμής σε σχέση με τη μέγιστη απόκλιση, ιδίως δε με την πληροφορία της κατανομής της διακύμανσης αυτής θα μπορούσε να επιτρέψει και την αναγωγή των αποτελεσμάτων των υφιστάμενων μοντέλων τα οποία και συνήθως αναφέρονται σε μέσα μεγέθη. Ωστόσο η επιδίωξη αυτή για παραμετροποίηση της αναλογίας μέσης τιμής και μέγιστης απόκλισης, σε σχέση με το κυματικό πεδίο και τη γεωμετρία μιας διαπερατής ύψαλης κατασκευής δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο με τα πειραματικά δεδομένα που πλαισιώνουν την παρούσα εργασία. Απαιτείται μια συστηματική διερεύνηση για μεγαλύτερο πλήθος διατομών και σεναρίων, και όπως διαπιστώνεται και από τις εξεταζόμενες μετρήσεις των τροχιακών ταχυτήτων στη συνέχεια, είναι αναγκαία η ταυτόχρονη καταγραφή πιέσεων και ταχυτήτων ώστε να παραχθεί ένα αξιόπιστο απλό ημειμπειρικό αριθμητικό μοντέλο. Επίσης απαιτείται η καταγραφή των υδροδυναμικών μεγεθών και για μια σειρά σεναρίων πραγματικών κυματισμών, όπως αυτοί εξελίσσονται στη φύση. Τα παραπάνω αποτελέσματα ακολουθούν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 6.

Παρόλες τις παραπάνω επισημάνσεις, οι σχέσεις αναλογίας που εντοπίστηκαν σε όρους συντελεστή μεταβλητότητας, θα μπορούσαν να εφαρμοστούν σε περιπτώσεις κατασκευών και κυματικών συνθηκών όπως αυτές που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία. Για το σκοπό αυτό τα αποτελέσματα έχουν αναχθεί κατ' αναλογία Froude όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 3 για πραγματικές αντίστοιχες συνθήκες και παρατίθεντε στο παράρτημα.

5.2.2 Ταχύτητες - Πρωτογενή δεδομένα των Metallinos *et al.* 2016

Η πειραματική διάταξη περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4.2. Οι τροχιακές ταχύτητες (σε 3 διαστάσεις: V_x , V_y , V_z) αποτελούν τις βασικές υπό εξέταση παραμέτρους της σειράς αυτών των πειραμάτων (Metallinos *et al.* 2016a).

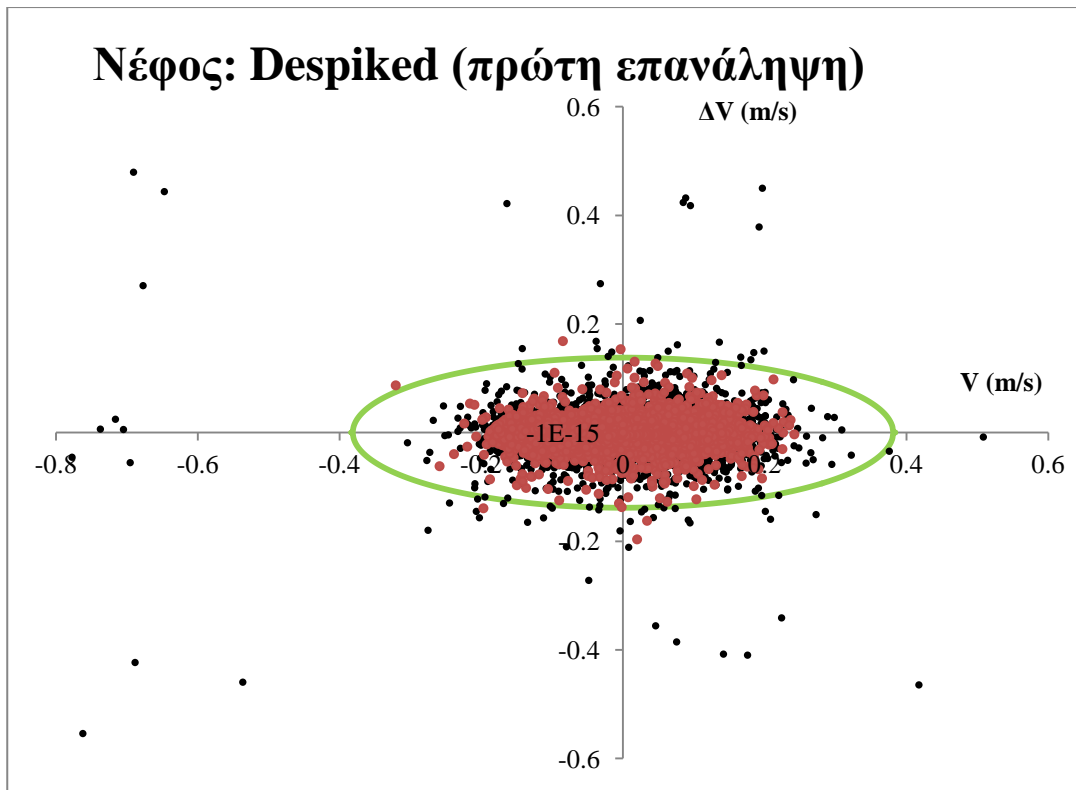
Το πρώτο βήμα, και σε αντιστοιχία με τους Cheng & Wang (2015), εφαρμόστηκε μέθοδος αφαίρεσης των αιχμών που εμφανίζονταν στις χρονοσειρές (Σχ. 5.10). Αυτές εμφανίζονται λόγω εγκλωβισμού φυσαλλίδων αέρα στην υδάτινη μάζα δημιουργώντας παρεμβολές κατά τη διαδικασία της μέτρησης. Εφαρμόστηκε η 3D phase-space despiking method των Goring & Nikora (2002). Με τη μέθοδο αυτή υπολογίζονται τα διαφορικά πρώτης και δεύτερης τάξης μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων (Δu και $\Delta^2 u$) και υπολογίζοντας τις τυπικές αποκλίσεις των u , Δu και $\Delta^2 u$, και με χρήση κατάλληλου συντελεστή (universal threshold λu) σχηματίζονται ελλειψοειδή με άξονες που εξαρτώνται από τα παραπάνω. Όσες τιμές ζευγών των διαφορικών αυτών με τις αρχικές μετρήσεις εντοπιστούν έξω από τα όρια των ελλείψεων αυτών (3 κριτήρια-ελλείψεις για κάθε χρονοσειρά), θεωρούνται αιχμές και μη πραγματικές μετρήσεις και αντικαθίστανται από μέσο όρο των εκατέρωθεν τιμών. Γράφτηκε κώδικας σε γλώσσα Fortran, και εφαρμόστηκε η παραπάνω διαδικασία. Στα ακόλουθα σχήματα παρατίθεται ένα χαρακτηριστικό παραδείγμα.



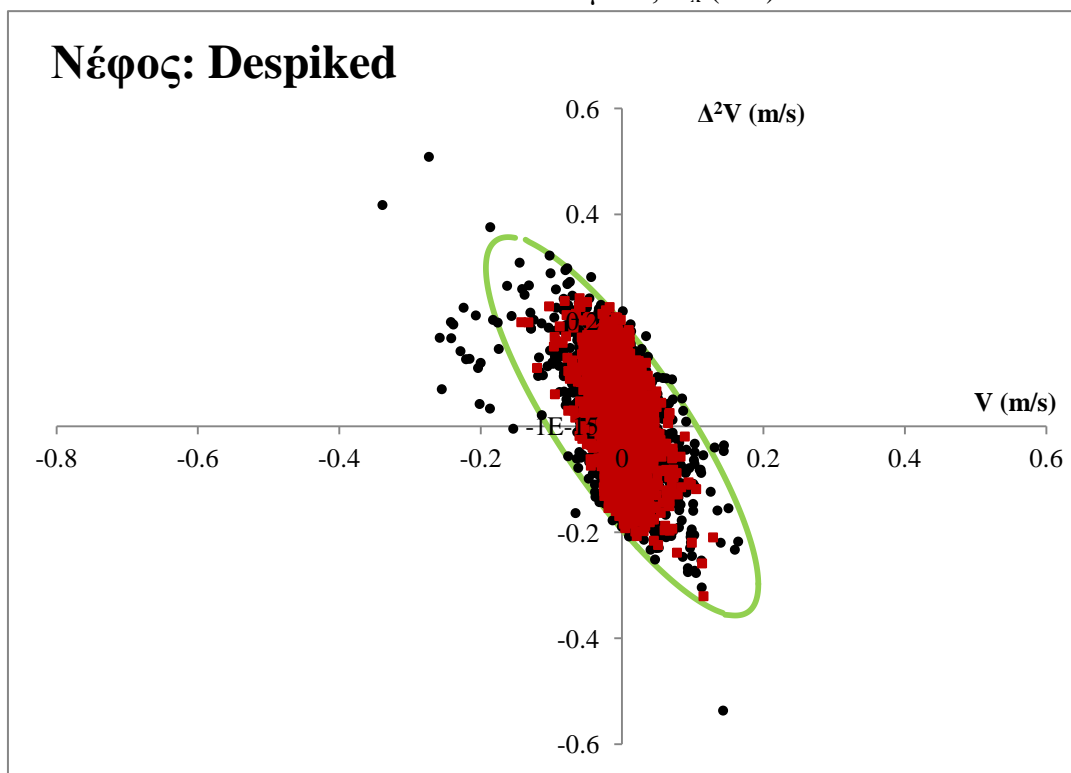
Σχ. 5.10 Ενδεικτική χρονοσειρά τροχιακών ταχυτήτων αφιλτράριστης από αιχμές, Σενάριο 4, ακρομόλιο, $h=0.10$ m από τον πυθμένα, V_x (m/s).

Ωστόσο παρατηρούμε ότι παραμένουν κάποιες μετρήσεις εκτός της έλλειψης που έχει υπολογιστεί. Αυτές απαλείφονται με διαδοχικές επαναλήψεις της μεθόδου.

Στη συνέχεια προκύπτουν νέφη για το παραπάνω παράδειγμα που ικανοποιούν τα κριτήρια της μεθόδου. Ακολουθεί ένα παράδειγμα και με το δεύτερο από τα τρία κριτήρια της μεθόδου (Σχ. 5.11).



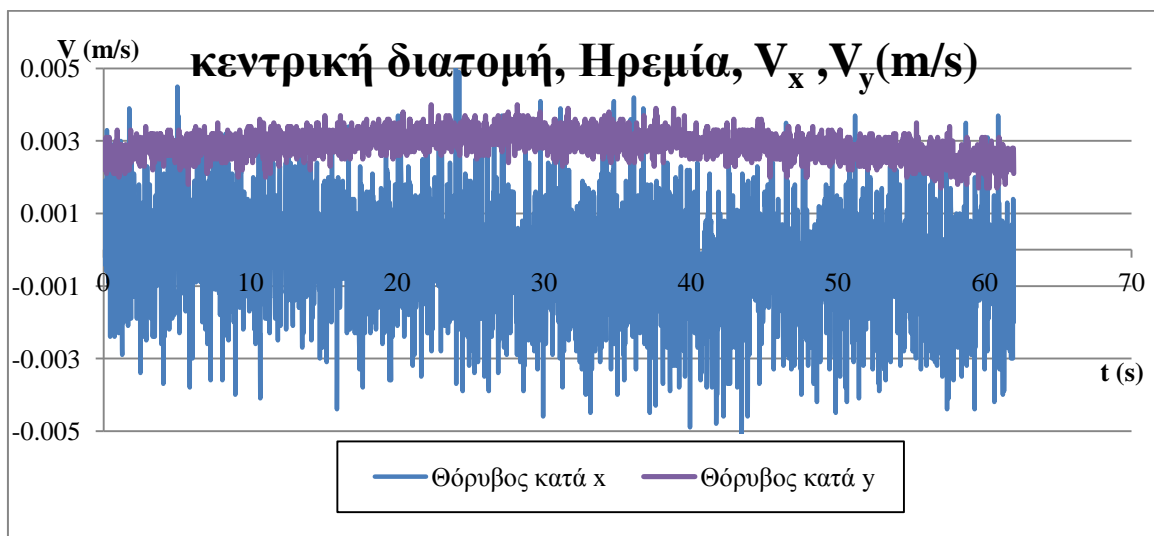
Σχ. 5.11 Ενδεικτικό νέφος τροχιακών ταχυτήτων αφιλτράριστη χρονοσειρά από αιχμές (μαύρες στιγμές) και απαλλαγμένης από αιχμές (κόκκινες στιγμές), Σενάριο 4, ακρομώλιο, $h=0.10$ m από τον πυθμένα, V_x (m/s).



Σχ. 5.12 Ενδεικτικό νέφος τροχιακών ταχυτήτων αφιλτράριστη χρονοσειρά από αιχμές (μαύρες στιγμές) και απαλλαγμένης από αιχμές (κόκκινες στιγμές), Σενάριο 4, ακρομώλιο, $h=0.10$ m από τον πυθμένα, V_x (m/s).

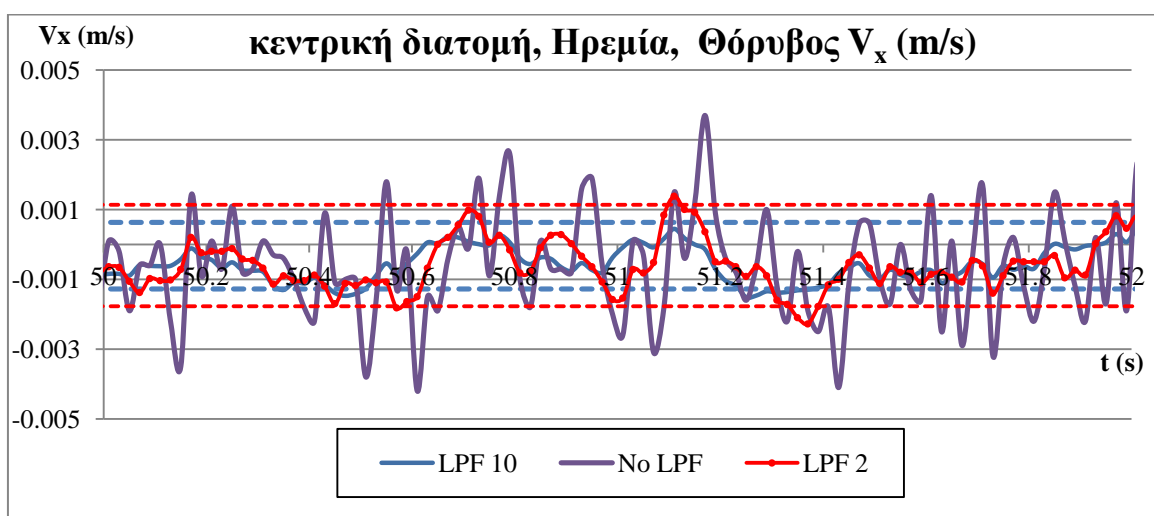
Το επόμενο σημαντικό βήμα αποτέλεσε η προσπάθεια καθαρισμού των δεδομένων λόγω θορύβου. Για το σκοπό αυτό αξιοποιήθηκαν οι μετρήσεις για κατάσταση ηρεμίας, και επιλέχθηκε η μέθοδος καθαρισμού τους από διαδικασία συγκρίσεων με εφαρμογή low pass filter.

Στο ακόλουθο σχήμα (Σχ. 5.13) δίδεται μια τυπική χρονοσειρά πιέσεων σε ηρεμία όπου παρατηρείται έντονη διακύμανση γύρω από μια μέση τιμή. Είναι φανερή η ανάγκη του καθαρισμού των χρονοσειρών όπως έχει διαπιστωθεί και από σχετικές εργασίες (Voulgaris & Trowbridge 1998, Cheng & Wang 2015).



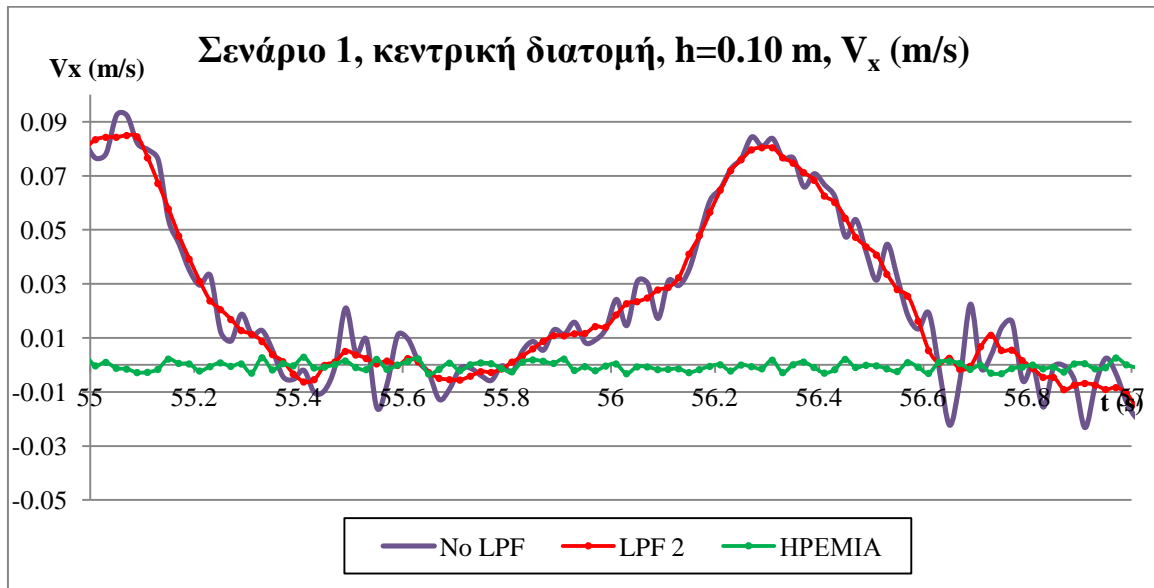
Σχ. 5.13 Ενδεικτική χρονοσειρά τροχιακών ταχυτήτων για κατάσταση ηρεμίας.

Για την επιλογή του φίλτρου καθαρισμού των χρονοσειρών, πραγματοποιήθηκε μια διαδικασία συγκρίσεων με εφαρμογή low pass filter.



Σχ. 5.14 Ενδεικτική χρονοσειράς για κατάσταση ηρεμίας και δοκιμές για την επιλογή της τάξης του Low Pass Filter (επιλογή για αναγωγή τιμών σε μέσο όρο 2 διαδοχικών στιγμιαίων μετρήσεων).

Στη συνέχεια παρατίθεται ένα παράδειγμα της τελικής χρονοσειράς όπως προέκυψε από τη διαδικασία του καθαρισμού. Ομοίως πραγματοποιήθηκε η παραπάνω διαδικασία για όλες τις χρονοσειρές (240 στο σύνολο).



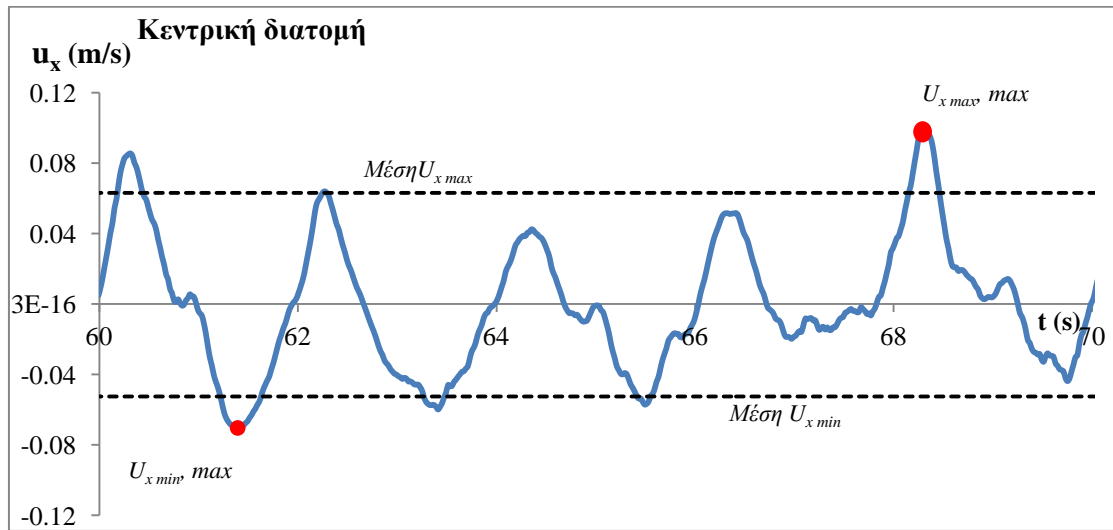
Σχ. 5.15 Χρονοσειρά τροχιακών ταχυτήτων (σενάριο 1, κεντρική διατομή, $h=0.10$ m, V_x), πρωτογενή δεδομένα των Metallinos *et al.* (2016a).

Από τη στιγμή που έγινε ο καθαρισμός των πειραματικών δεδομένων αναζητήθηκε ο τρόπος επεξεργασίας του μεγάλου αυτού όγκου χρονοσειρών τροχιακών ταχυτήτων.

Όπως και στις πιέσεις ακολουθήκε η ευρέως εφαρμοζόμενη πρακτική, αυτή της αντιμετώπισης ενός υδροδυναμικού μεγέθους που διακυμαίνεται, σε αντιστοιχία με την περίπτωση του χαρακτηριστικού ύψους κύματος. Κατ' αντιστοιχία ορίστηκε η έννοια του ύψους της μέσης τροχιακής ταχύτητας και του μέγιστου ύψους που μπορεί αυτή να λάβει. Ωστόσο επειδή η μέτρηση μπορεί να δώσει την πληροφορία θετικών και αρνητικών ταχυτήτων, η επεξεργασία έγινε και σε όρους μέσων μέγιστων (θετικών) και μέσων ελάχιστων (αρνητικών), και εντοπίστηκε για κάθε ένα από αυτά η μέγιστη συνεισφορά της τύρβης.

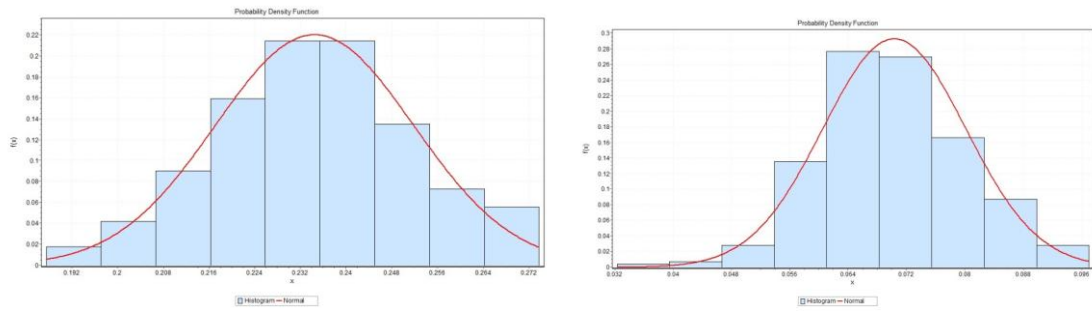
Με βάση τα παραπάνω, για την κάθε χρονοσειρά ξεχωριστά, υπολογίστηκε με ακρίβεια η περίοδος, με απαρίθμηση των κυματικών κύκλων, και έσπασε σε αντίστοιχες μικρότερες χρονοσειρές της 1 περιόδου. Για την κάθε υπό-χρονοσειρά της μίας περιόδου εντοπίστηκε η μέγιστη (θετική) και η ελάχιστη (αρνητική) τιμή. Με υπολογισμό των μέσων όρων των μεγίστων και των ελαχίστων αντίστοιχα προέκυπταν δύο αντίστοιχες μέσες τιμές (Βλ. **Σχ. 5.16**, παράδειγμα) Στη συνέχεια υπολογίστηκε το μέσο ύψος της ταχύτητας ως η κατ' απόλυτο διαφορά των δύο αυτών τιμών. Η διαδικασία επεκτάθηκε ακριβώς με τον ίδιο τρόπο αλλά με διαφορά μισής περιόδου. Με τον τρόπο αυτό υπολογίστηκε το ύψος της ταχύτητας

μεταξύ κορυφής και επόμενης κοιλίας. Οι μετρήσεις αυτές αποτυπώθηκαν και σε όρους υψών για καθ' ύψος κατανομές των μέσων τροχιακών μέγιστων και ελάχιστων ταχυτήτων και των αντίστοιχων μέγιστων εμφανιζόμενων τιμών τους.



Σχ. 5.16 Παράδειγμα υπολογισμού των μέσων τιμών των μεγίστων και των ελαχίστων τροχιακών ταχυτήτων.

Το επόμενο βήμα ήταν να γίνει μια προσπάθεια να συσχετιστούν οι παρατηρούμενες αποκλίσεις του ύψους της τροχιακής ταχύτητας με τη καταγραφόμενη μέση τιμή του. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό EasyFit 5.6 (standard) το οποίο επέτρεψε την παρατήρηση και την ανάλυση σε επίπεδο πιθανοτικών κατανομών. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι για όλες τις περιπτώσεις των χρονοσειρών, σχετικά μικρού μήκους (3 λεπτά), η προσαρμογή με την κανονική κατανομή περιέγραφε με ικανοποιητική ακρίβεια την διακύμανση. Η κανονική κατανομή της διακύμανσης λόγω τύρβης είναι άλλωστε αναμενόμενη σύμφωνα και με τον κλασσικό ορισμό της, κάτι που έχει διαπιστωθεί και πειραματικά σε πλήθος περιπτώσεων τυρβώδους ροής. Κάποιες ασυμμετρίες ωστόσο παρατηρήθηκαν που πιθανώς οφείλονται στο σχετικά μικρό πλήθος των υψών υδροδυναμικής πίεσης (μερικές εκατοντάδες) κάθε χρονοσειράς και συνδέονται επίσης με την ασυμμετρία της διάταξης. Δηλαδή έναν εισερχόμενο κυματισμό από την προσήνεμη πλευρά της κατασκευής διαδιδόμενο και ενίοτε θραυόμενο πάνω από το ύφαλο αυτό εμπόδιο. Ακολουθούν χαρακτηριστικά παραδείγματα της κανονικής κατανομής του ύψους της τροχιακής ταχύτητας (Σχ. 5.17).



Σχ. 5.17 Τυπικά παράδειγματα κατανομής του ύψους της τροχιακής ταχύτητας και προσαρμογή κανονικής κατανομής (αριστερά, $h=0.20$ m απόσταση από τον πυθμένα, δεξιά $h=0.06$ αντίστοιχα, σενάριο 1, κεντρική διατομή)

Τέλος υπολογίστηκε ο συντελεστής μεταβλητότητας CV (τυπική απόκλιση προς μέση τιμή) ώστε να διαπιστωθεί αν υπήρχαν κανονικότητες οι οποίες ακολουθούσαν πράγματι παρόμοιες παρατηρήσεις με την περίπτωση των υδροδυναμικών πιέσεων.

6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.

6.1 Εισαγωγή

Οι χρονοσειρές των υδροδυναμικών πιέσεων έχουν ληφθεί ως μέσες τιμές για επιφάνεια αναφοράς ίση με αυτή του πιεσομέτρου που χρησιμοποιήθηκε (διάμετρος περίπου 3 cm). Αντιστοίχως οι τροχιακές ταχύτητες έχουν ληφθεί ως μέσες τιμές για όγκο αναφοράς σε ελλειψοειδές εκ περιστροφής (3mm x 9 mm περίπου). Αυτό έχει ως συνέπεια οι μετρήσεις να μην είναι σημειακές. Έχει γίνει δηλαδή πρωτογενώς ένα averaging. Ωστόσο λαμβάνοντας υπόψη την κλίμακα Colmogorov, δεν δημιουργούνται ιδιαίτερα προβλήματα στην ακρίβεια των μεγεθών που μετρήθηκαν.

6.2 Υδροδυναμικές πιέσεις

Σε συνέχεια με το προηγούμενο κεφάλαιο και την προσέγγιση της αντιμετώπισης της υδροδυναμικής πίεσης σε αντιστοιχία με την περίπτωση του χαρακτηριστικού ύψους κύματος, οχρησιμοποιώντας την έννοια του ύψους της υδροδυναμικής πίεσης, ακολουθούν μια σειρά διαγραμμάτων και πινάκων που διακρίνονται στις εξής κατηγορίες

Διαγράμματα με προφίλ καθ' ύψος και για τα μέσα και μέγιστα ύψη των υδροδυναμικών πιέσεων για τις τέσσερις διατομές στο μοντέλο όπως φαίνονται στο **Σχ. 6.1**. Μία στα ανάντη, και τρεις στο εσωτερικό της κατασκευής, στο μέσο του προσήνεμου πρανούς, στο μέσο της στέψης και στο μέσο του υπήνεμου πρανούς (**Σχ. 6.2-6.12**), για τα 7 σενάρια κυματισμών όπως συνοψίζονται στον **Πιν. 6.1**.

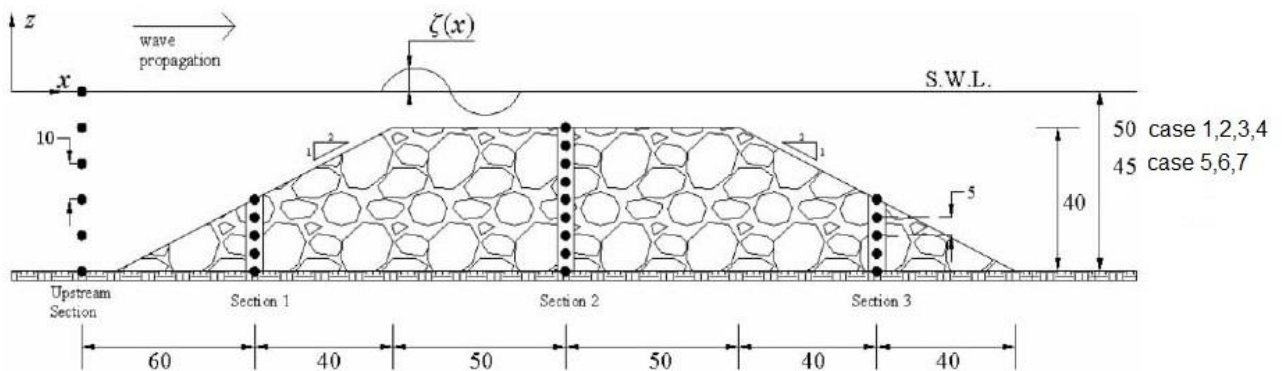
Αντίστοιχοι πίνακες με τις τιμές των ποσοστών απόκλισης των μέγιστων από τα μέσα ύψη των υδροδυναμικών πιέσεων (**Πιν. 6.2**).

Παρατίθενται διαγράμματα στα οποία φαίνεται η εξέλιξη των μέσων και μέγιστων υψών των υδροδυναμικών πιέσεων κατά μήκος της κατασκευής. (**Σχ. 6.13-6.19**)

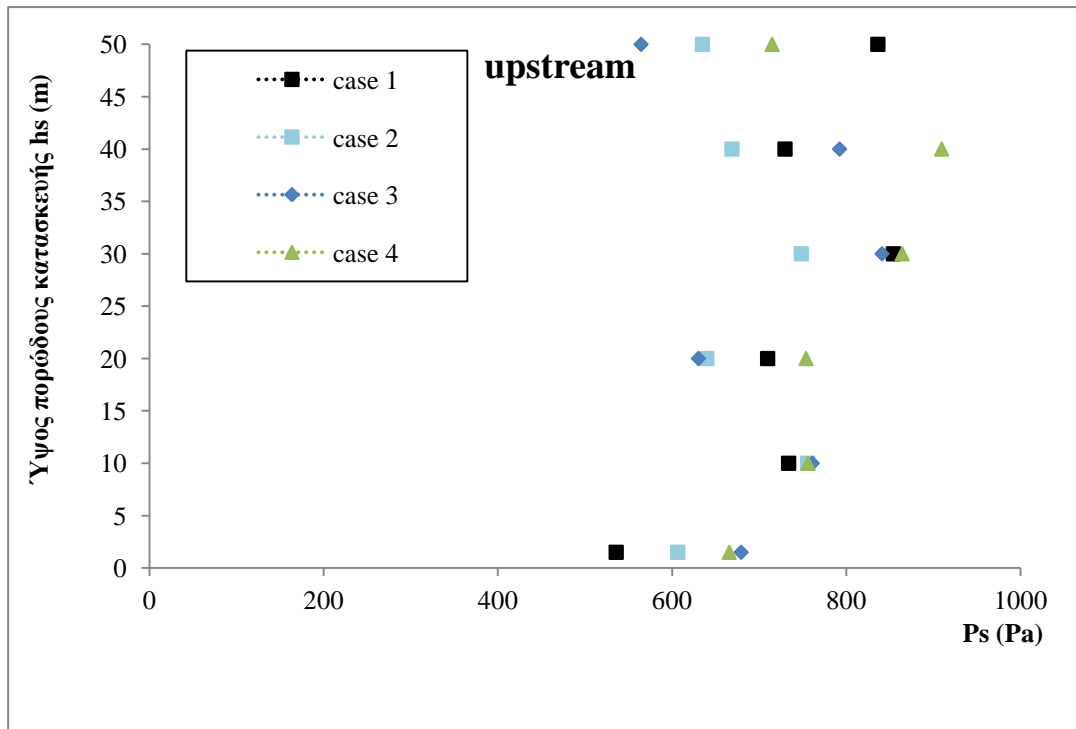
Τέλος παραθέεται σειρά πινάκων με τους υπολογιζόμενους συντελεστές μεταβλητότητας που προέκυψαν για τα παραπάνω μεγέθη, βασιζόμενοι στην παραδοχή της κανονικής κατανομής των υψών των υδροδυναμικών πιέσεων από τη μέση τους τιμή (**Πιν. 6.3**).

Πιν. 6.1. Κυματικά χαρακτηριστικά, μονοχρωματικοί κυματισμοί, 7 σενάρια (cases)

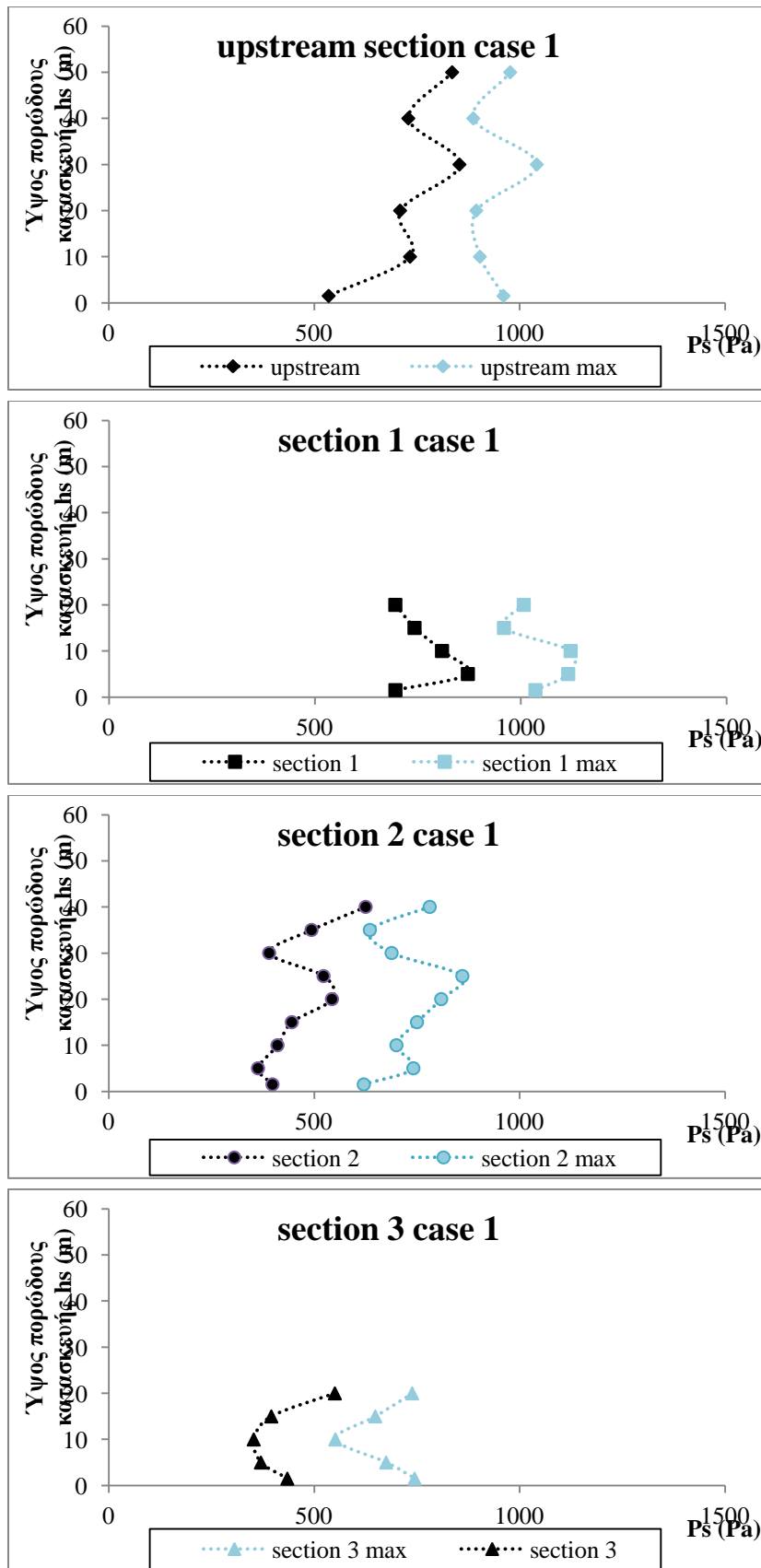
Κυματικά χαρακτηριστικά		
Σενάριο #	H (m)	T (s)
1	0.065	2.12
2	0.08	1.85
3	0.095	1.58
4	0.107	1.31
5	0.04	2.12
6	0.057	1.85
7	0.075	1.58



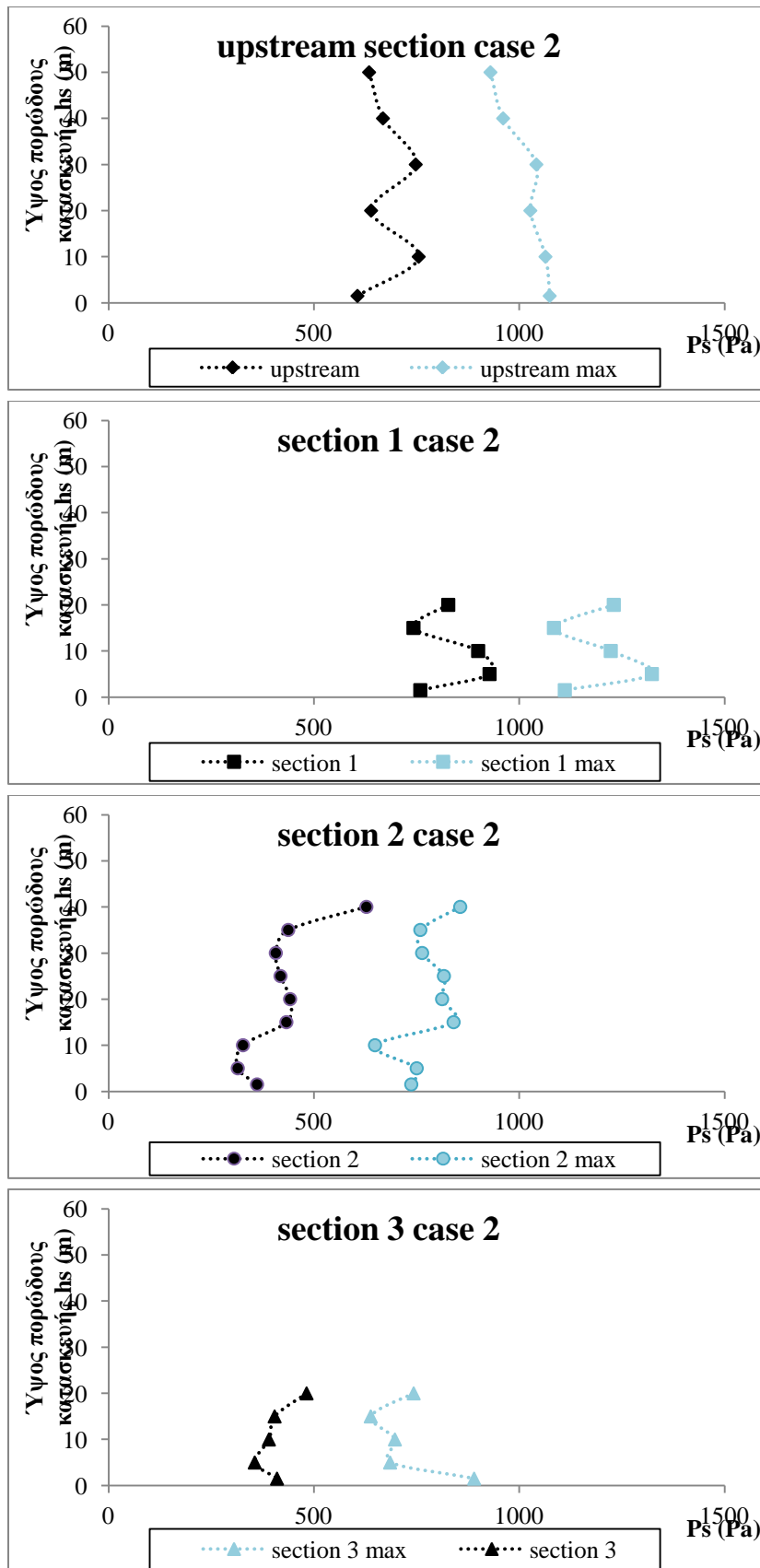
Σχ. 6.1. Διάταξη φυσικού μοντέλου του Ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη και σημεία λήψης μετρήσεων υδροδυναμικών πιέσεων, υπό κλίμακα 1:10 Metallinos *et. al* (2014).



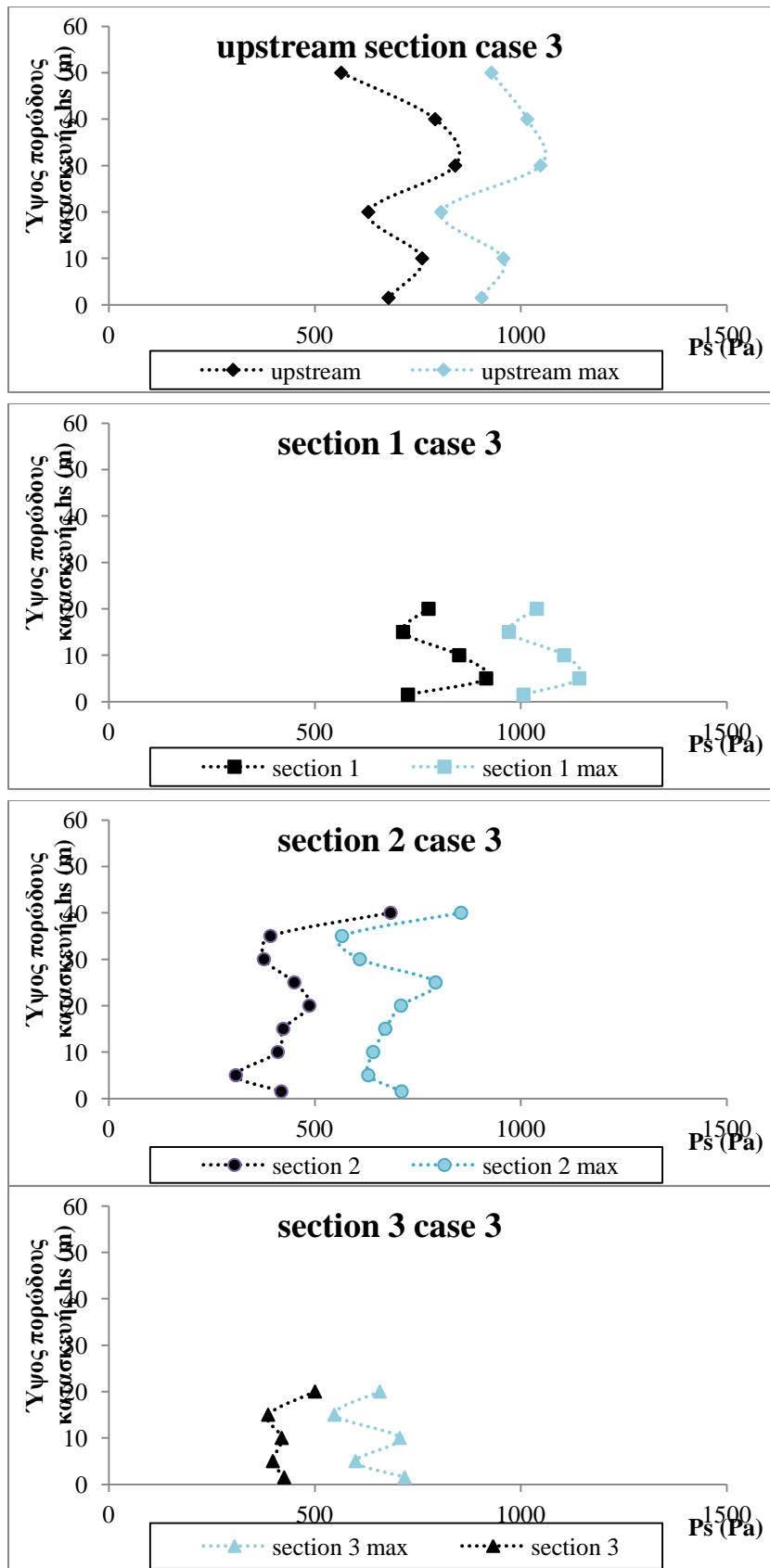
Σχ. 6.2. Προφίλ καθ' ύψος των μέσων υψών των υδροδυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη, βάθος νερού 0.50 m, σενάρια 1,2,3,4.



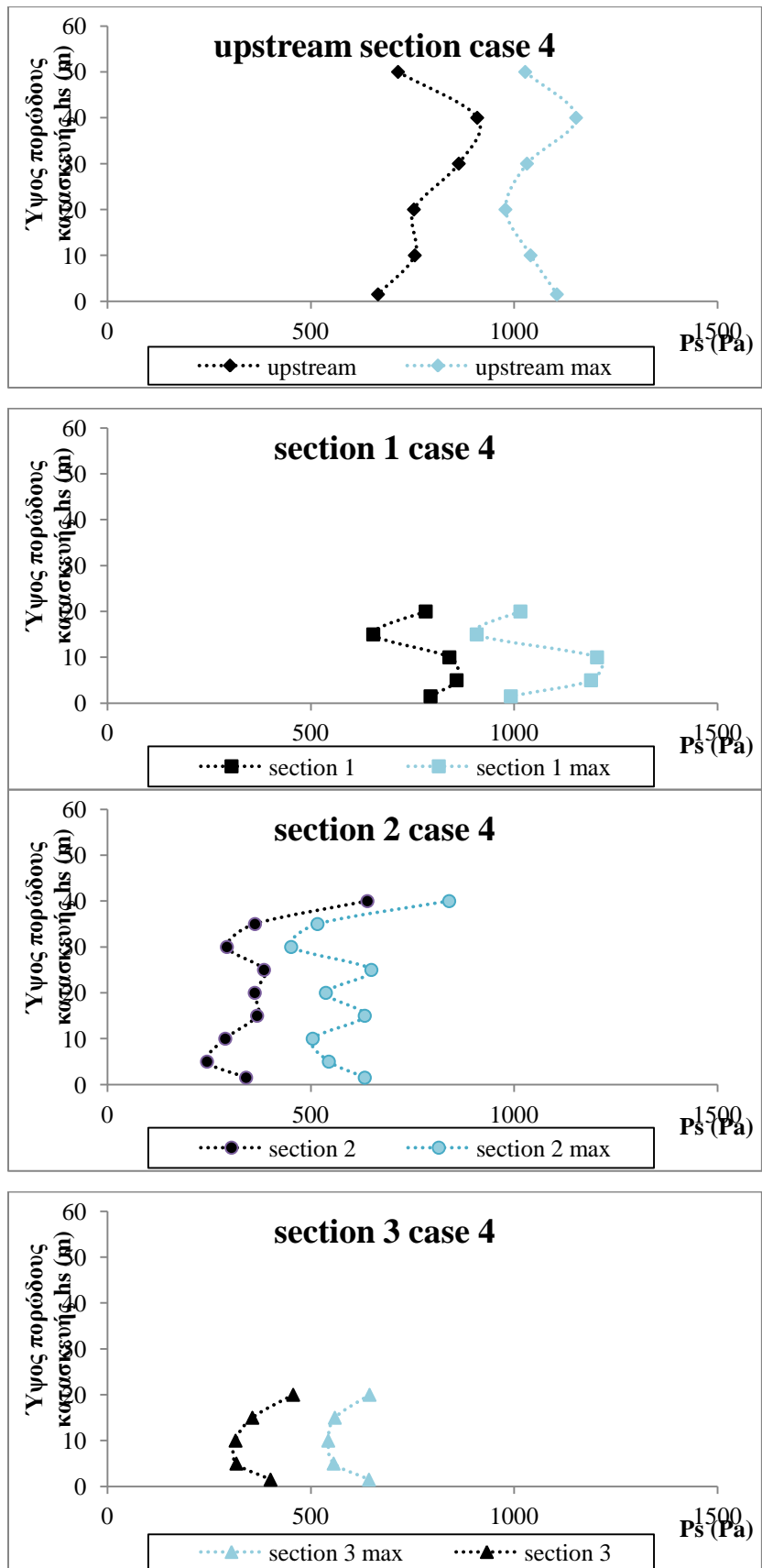
Σχ. 6.3. Προφίλ καθ' ύψος των μέσων και μέγιστων υψών των υδροδυναμικών πιέσεων για τις τέσσερις διατομές της πειραματικής διάταξης βάθους νερού 0.50 m, σενάριο 1.



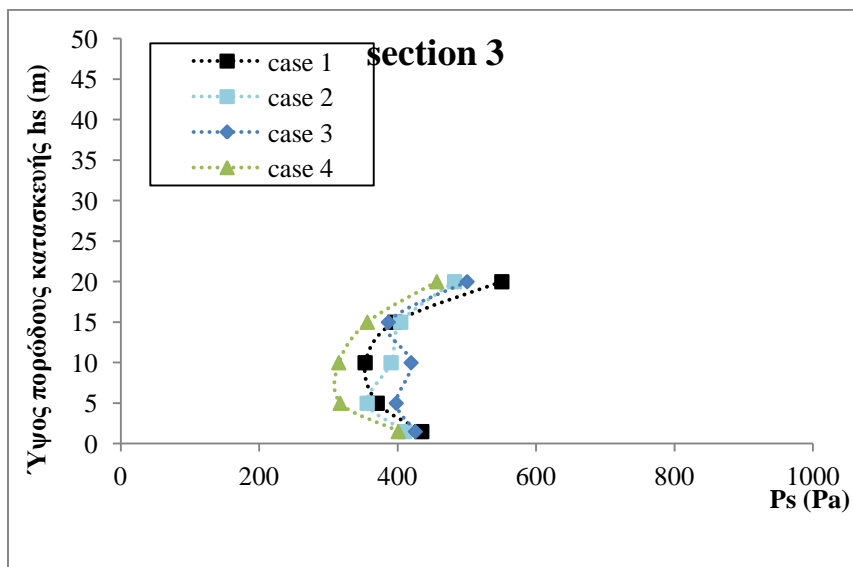
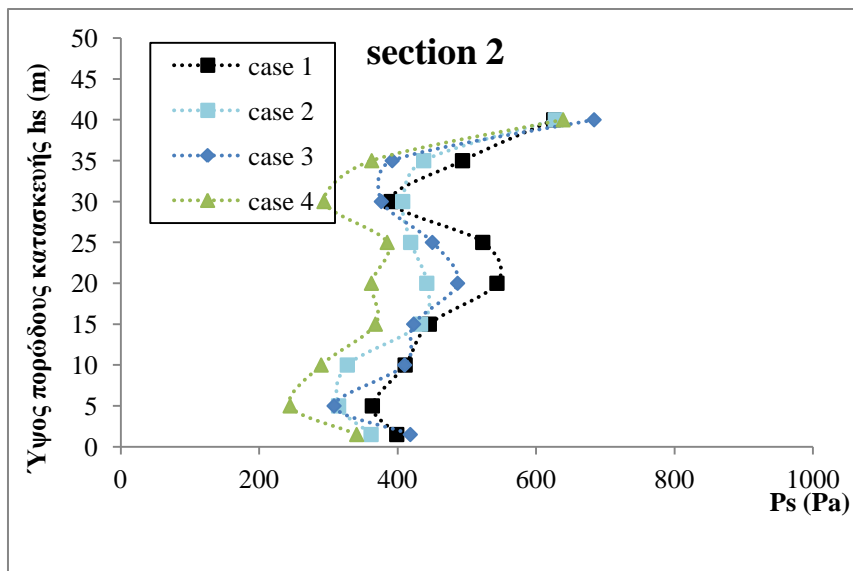
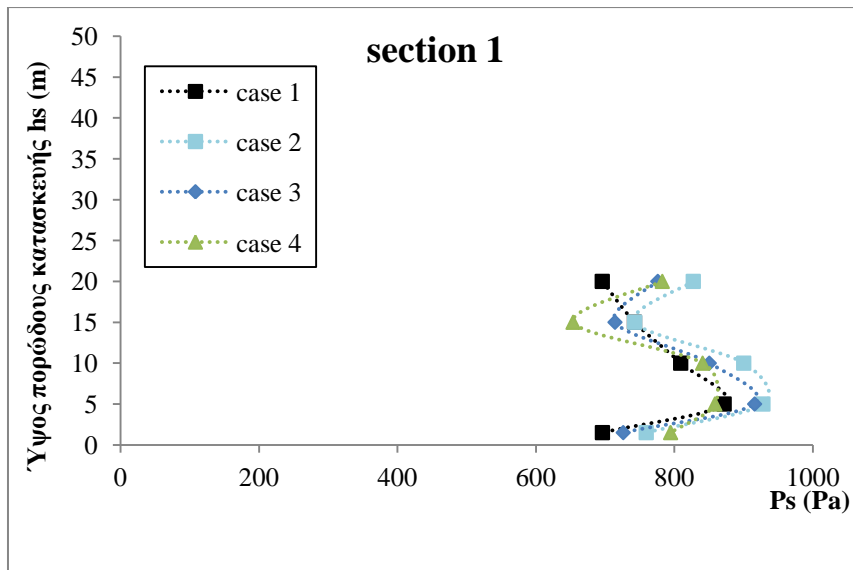
Σχ. 6.4 Προφίλ καθ' ύψος των μέσων και μέγιστων υψών των υδροδυναμικών πιέσεων, για τις τέσσερις διατομές της πειραματικής διάταξης βάθους νερού 0.50 m, σενάριο 2.



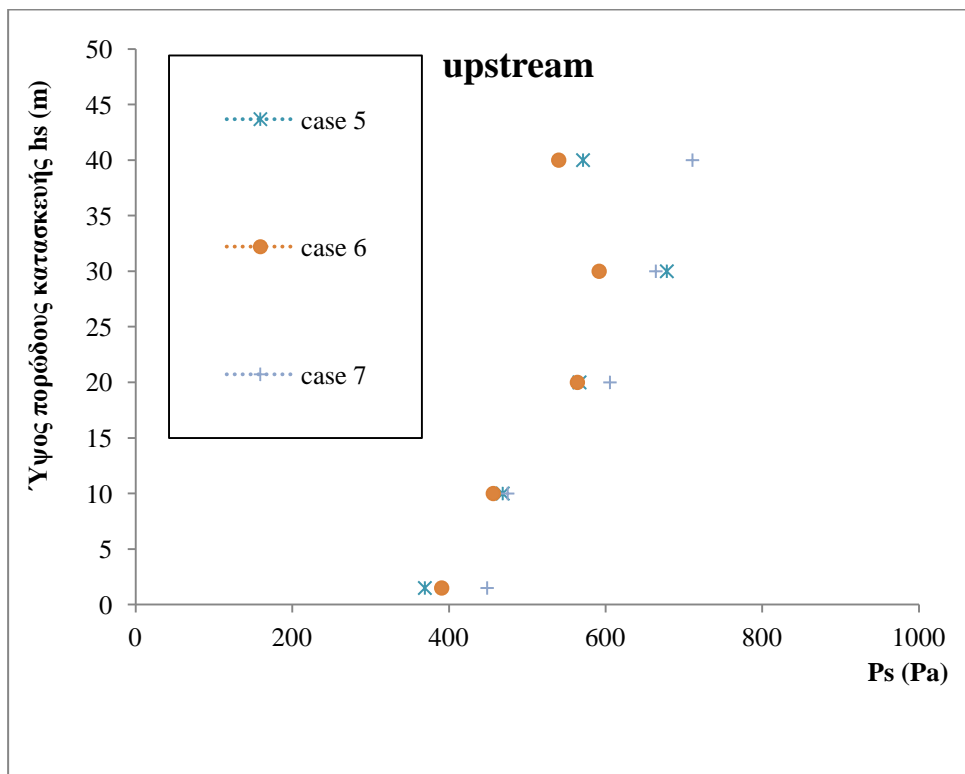
Σχ. 6.5 Προφίλ καθ' ύψος των μέσων και μέγιστων υψών των υδροδυναμικών πιέσεων, για τις τέσσερις διατομές της πειραματικής διάταξης βάθους νερού 0.50 m, σενάριο 3.



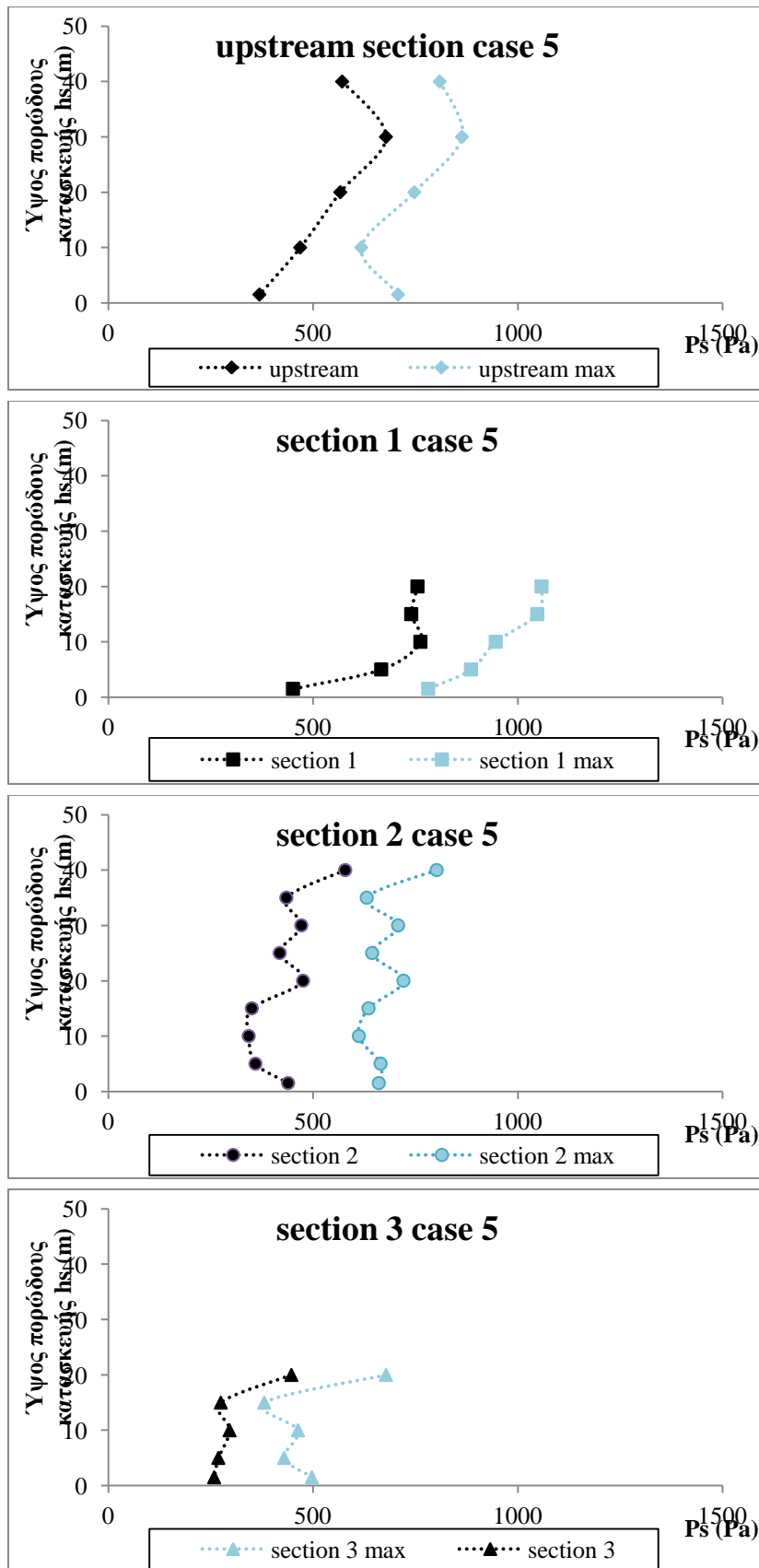
Σχ. 6.6 Προφίλ καθ' ύψος των μέσων και μέγιστων υψών των υδροδυναμικών πιέσεων για τις τέσσερις διατομές της πειραματικής διάταξης βάθους νερού 0.50 m, σενάριο 4.



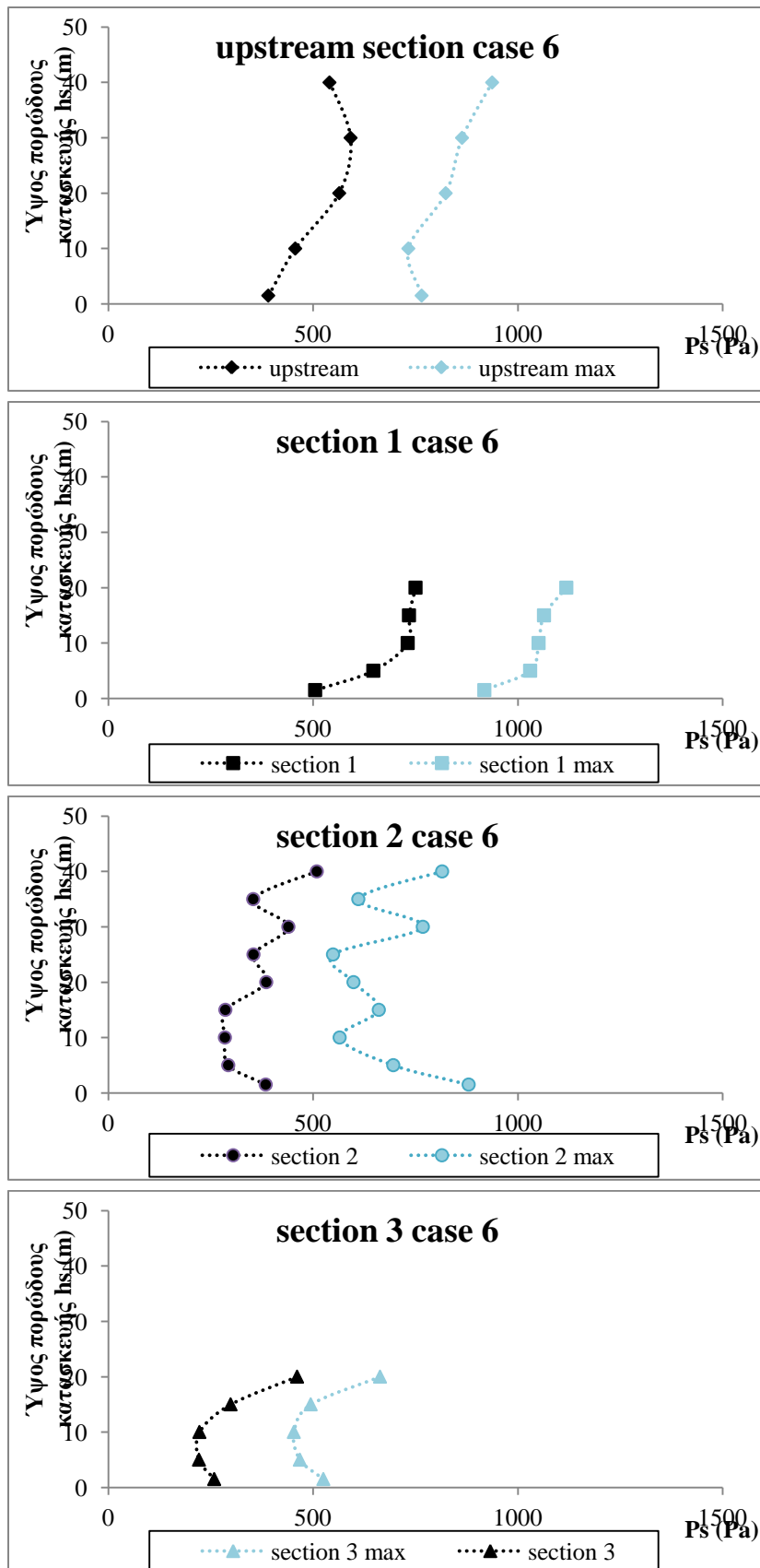
Σχ. 6.7 Προφίλ καθ' ύψος των μέσων και μέγιστων υψών των υδροδυναμικών πιέσεων για τις διατομές εντός της κατασκευής, βάθος νερού 0.50 m, σενάρια 1,2,3,4.



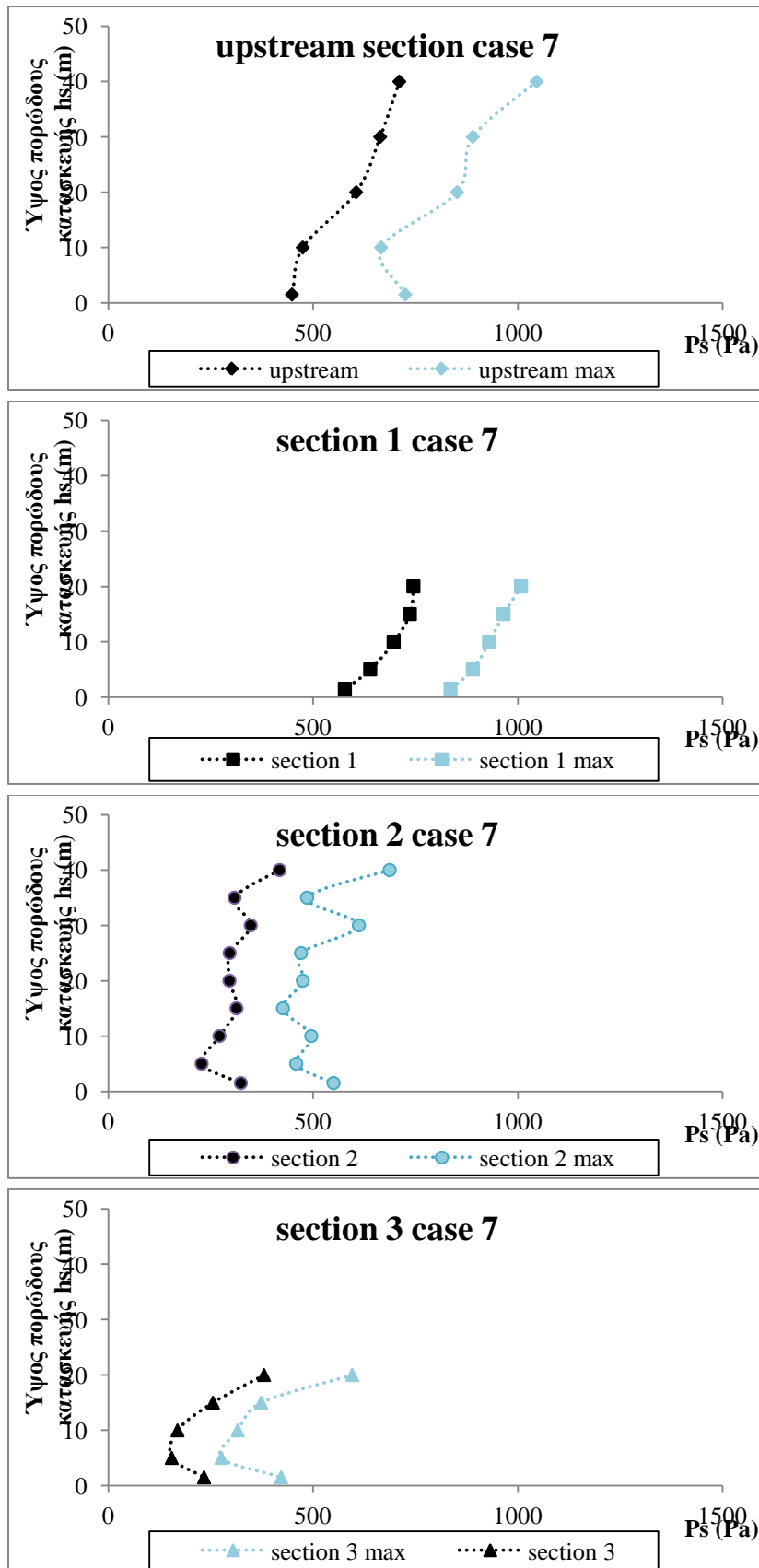
Σχ. 6.8 Προφίλ καθ' ύψος των μέσων υψών των υδροδυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη, βάθος νερού 0.45 m, σενάρια 5,6,7.



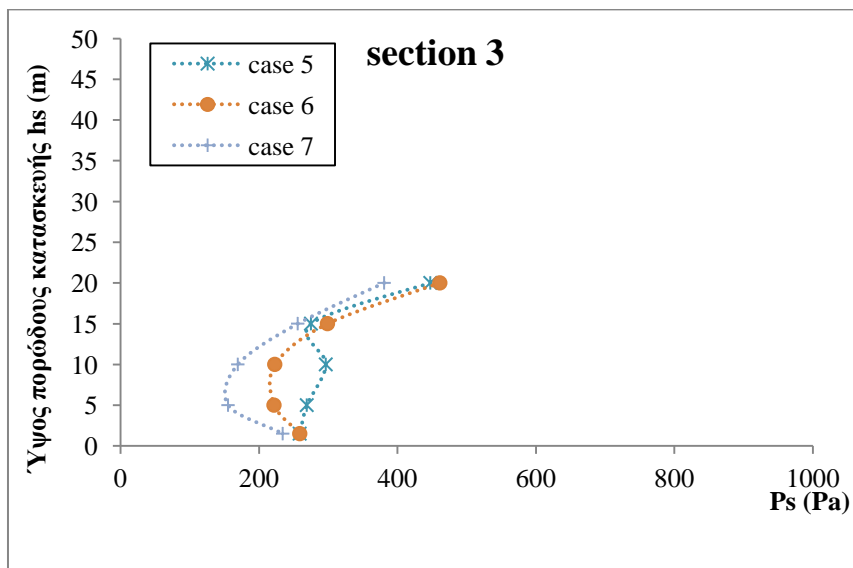
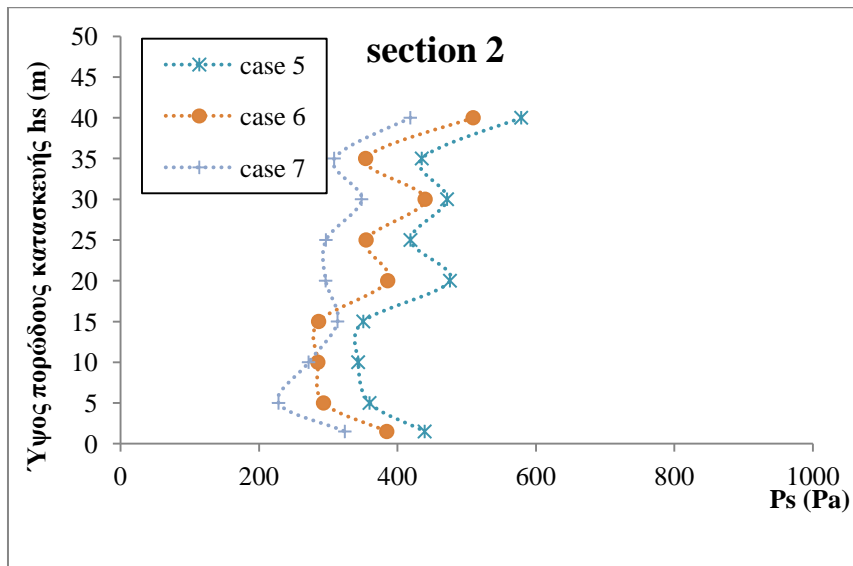
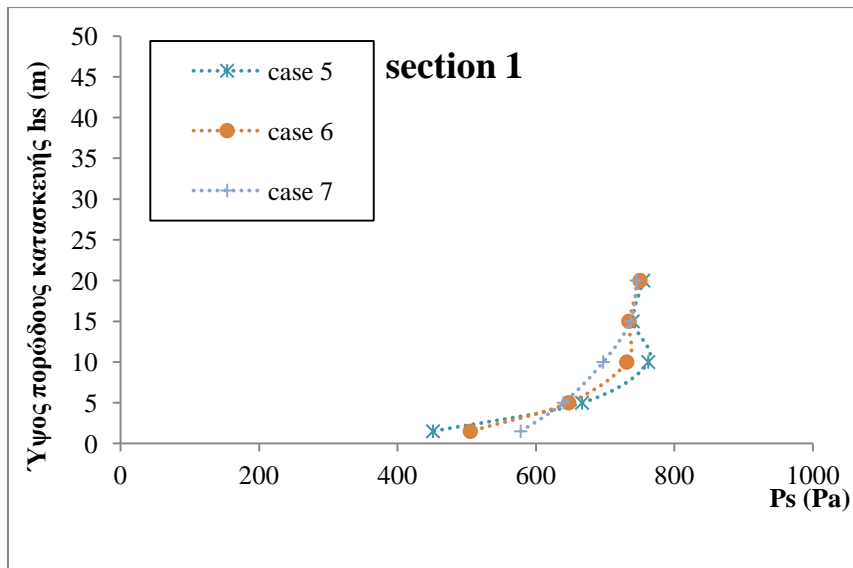
Σχ. 6.9 Προφίλ καθ' ύψος των μέσων και μέγιστων υψών των υδροδυναμικών πιέσεων για τις 4 διατομές της πειραματικής διάταξης, βάθος νερού 0.45 m, σενάριο 5.



Σχ. 6.10 Προφίλ καθ' ύψος των μέσων και μέγιστων υψών των υδροδυναμικών πιέσεων για τις 4 διατομές της πειραματικής διάταξης, βάθος νερού 0.45 m, σενάριο 6.



Σχ. 6.11 Προφίλ καθ' ύψος των μέσων και μέγιστων υψών των υδροδυναμικών πιέσεων για τις 4 διατομές της πειραματικής διάταξης, βάθος νερού 0.45 m, σενάριο 7.



Σχ. 6.12 Προφίλ καθ' ύψος των μέσων και μέγιστων υψών των υδροδυναμικών πιέσεων για τις διατομές στο εσωτερικό του κυματοθραύστη, βάθος νερού 0.45 m, σενάρια 5,6,7.

Πιν. 6.2 Ποσοστά απόκλισης μέγιστου ύψους από μέσο ύψος υδροδυναμικής πίεσης, σενάρια 1,2,3,4,5,6,7.

Σενάριο 1		Απόκλιση μέγιστου ύψους από μέσο ύψος %		
z (m)	Ps section 1	Ps section 2	Ps section 3	
0.4		24.92		
0.35		28.71		
0.3		76.21		
0.25		64.57		
0.2	44.80	48.88	34.15	
0.15	29.25	68.30	63.86	
0.1	38.59	70.40	56.21	
0.05	27.94	103.92	82.21	
0.015	48.84	55.69	71.16	

Σενάριο 2		Απόκλιση μέγιστου ύψους από μέσο ύψος %		
z (m)	Ps section 1	Ps section 2	Ps section 3	
0.4		36.39		
0.35		73.44		
0.3		87.43		
0.25		94.93		
0.2	48.71	83.66	54.04	
0.15	46.05	93.95	57.84	
0.1	35.86	98.12	78.50	
0.05	42.58	138.31	92.52	
0.015	46.32	103.74	116.92	

Σενάριο 3		Απόκλιση μέγιστου ύψους από μέσο ύψος %		
z (m)	Ps section 1	Ps section 2	Ps section 3	
0.4		25.00		
0.35		44.29		
0.3		61.76		
0.25		76.13		
0.2	33.88	45.71	31.42	
0.15	35.99	58.52	41.52	
0.1	29.96	56.37	68.34	
0.05	24.68	104.22	50.40	
0.015	38.62	69.83	68.69	

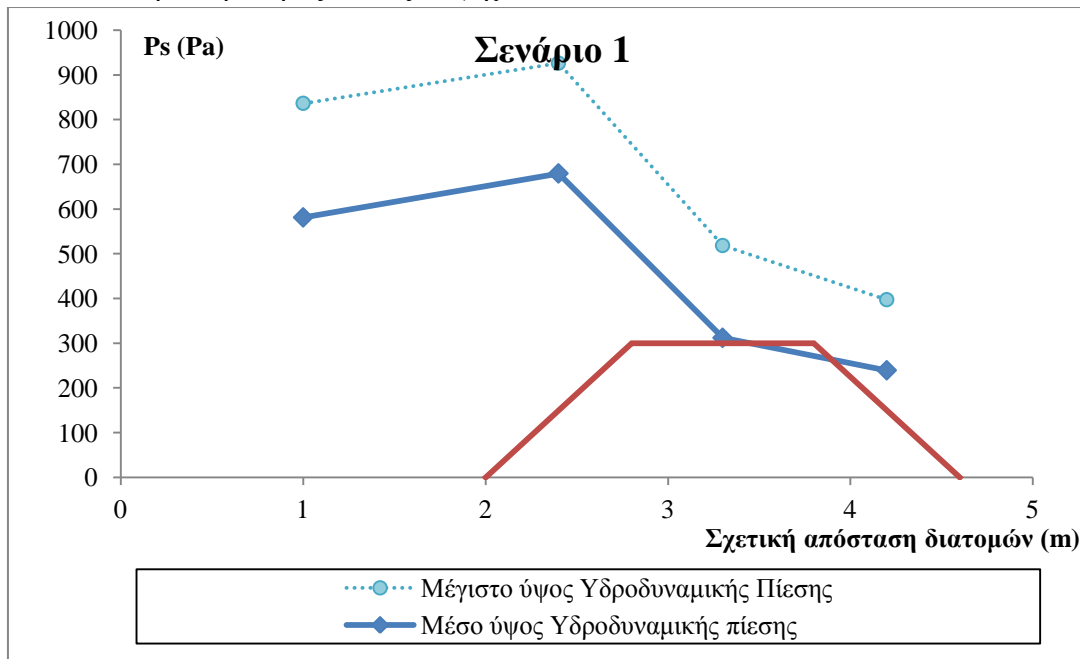
Σενάριο 4		Απόκλιση μέγιστου ύψους από μέσο ύψος %		
z (m)	Ps section 1	Ps section 2	Ps section 3	
0.4		31.45		
0.35		42.38		
0.3		53.76		
0.25		68.52		
0.2	29.75	48.24	41.10	
0.15	38.92	71.91	56.86	
0.1	43.17	74.16	72.29	
0.05	38.50	122.30	75.35	
0.015	24.84	85.55	60.33	

Σενάριο 5		Απόκλιση μέγιστου ύψους από μέσο ύψος %		
z (m)	Ps section 1	Ps section 2	Ps section 3	
0.4		38.58		
0.35		45.08		
0.3		50.06		
0.25		53.90		
0.2	40.10	51.53	51.63	
0.15	41.59	81.26	38.55	
0.1	24.12	78.35	56.35	
0.05	32.90	84.92	59.73	
0.015	73.15	50.40	92.19	

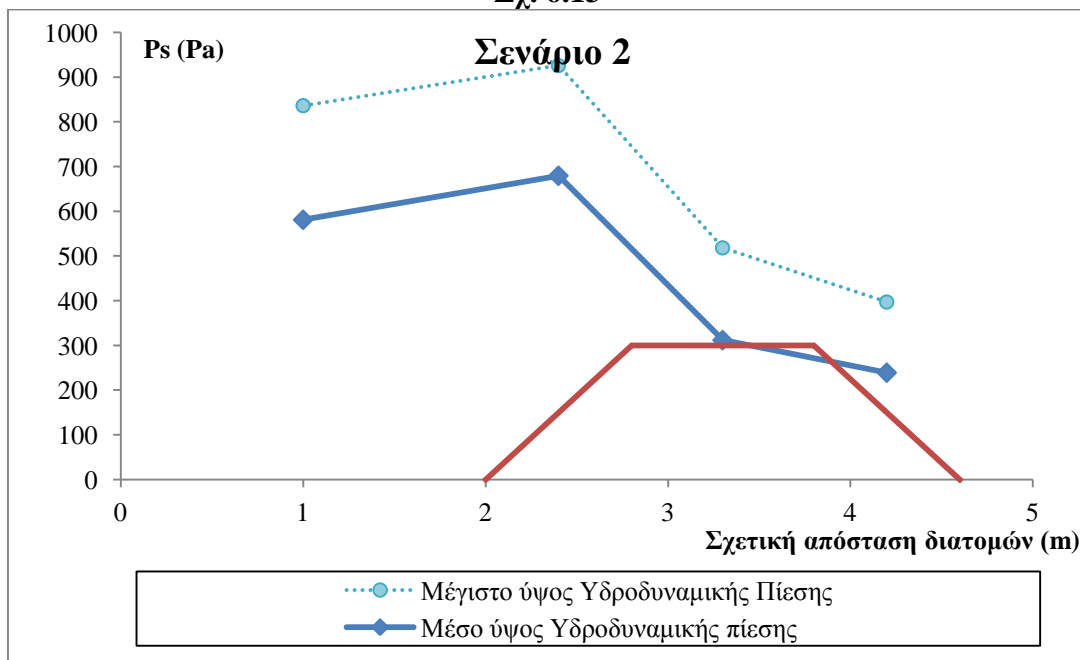
Σενάριο 6		Απόκλιση μέγιστου ύψους από μέσο ύψος %		
z (m)	Ps section 1	Ps section 2	Ps section 3	
0.4		60.06		
0.35		72.48		
0.3		74.59		
0.25		54.73		
0.2	49.05	55.19	43.90	
0.15	44.89	130.90	65.41	
0.1	43.69	98.26	103.43	
0.05	59.13	137.37	111.08	
0.015	81.73	128.82	102.91	

Σενάριο 7	Απόκλιση μέγιστου ύψους από μέσο ύψος %		
z (m)	Ps section 1	Ps section 2	Ps section 3
0.4		64.17	
0.35		57.38	
0.3		75.82	
0.25		58.72	
0.2	35.27	60.44	56.52
0.15	31.06	36.15	46.04
0.1	33.41	82.54	86.78
0.05	39.14	101.15	78.14
0.015	44.61	69.86	80.30

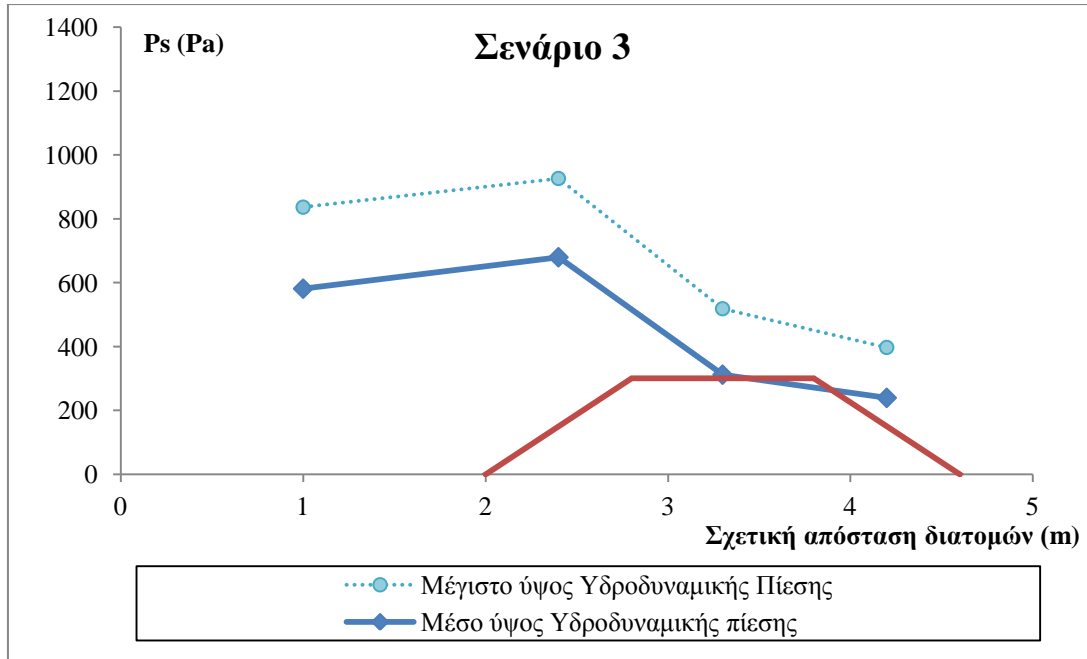
Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνεται η εξέλιξη του φαινομένου καθώς ο κυματισμός διαδίδεται από αριστερά προς τα δεξιά. (Σχ. 6.13-6.19)



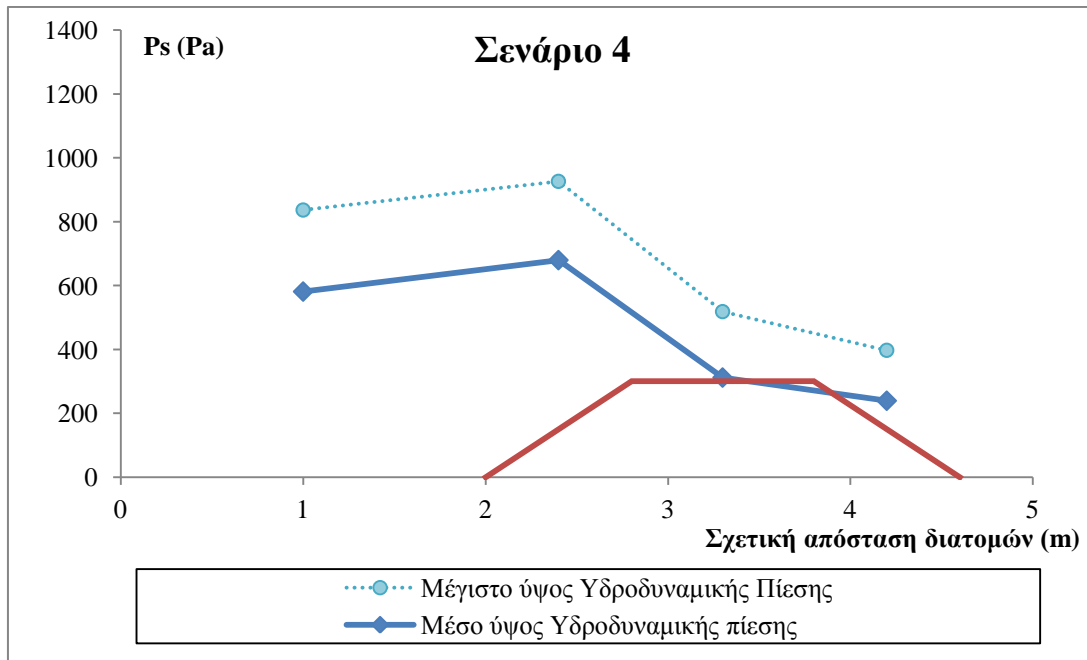
Σχ. 6.13



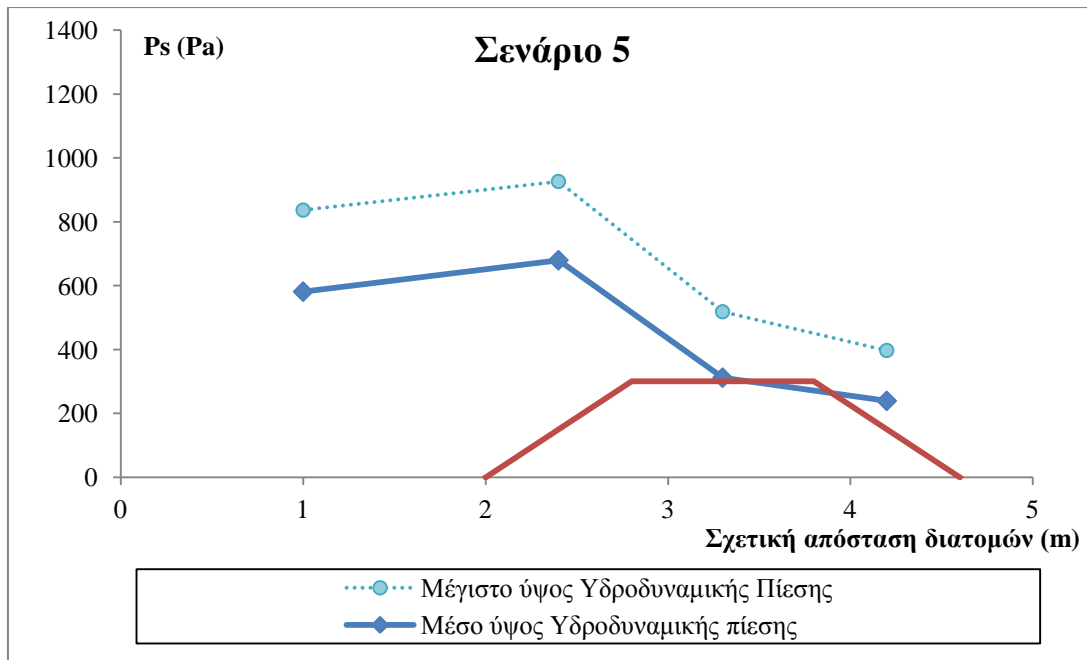
Σχ. 6.14



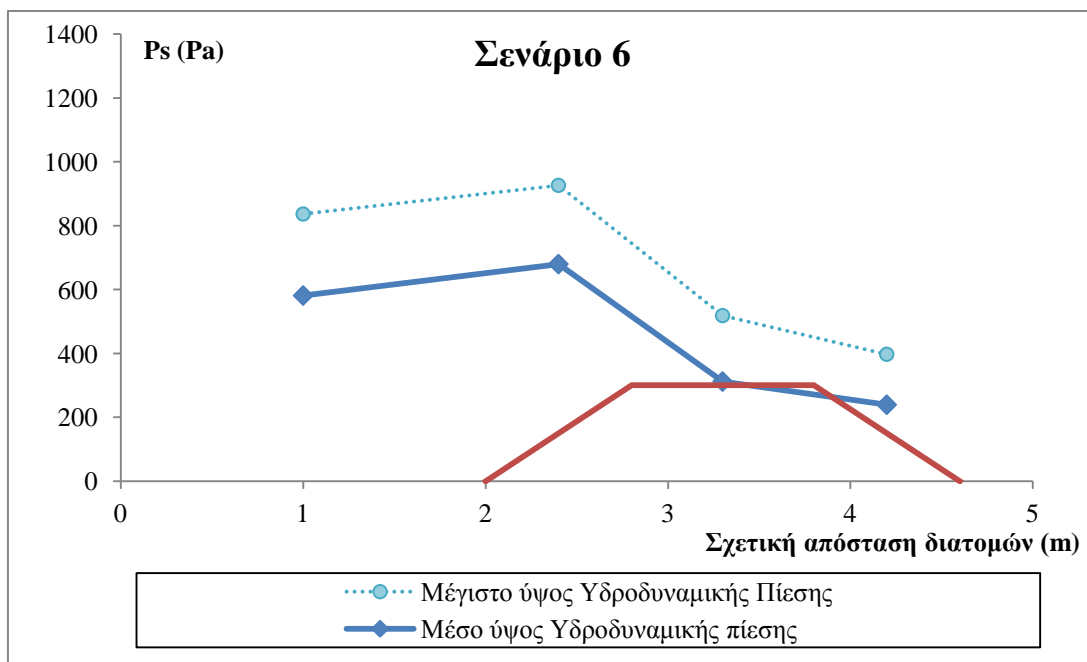
Σχ. 6.15



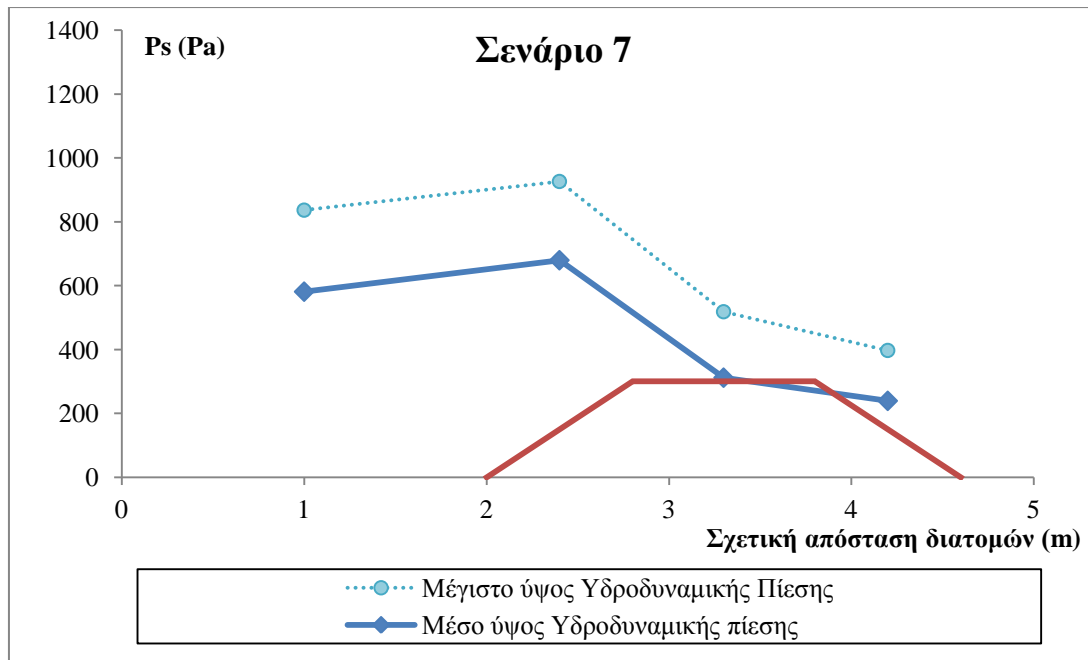
Σχ. 6.16



Σχ. 6.17



Σχ. 6.18



s η τυπική απόκλιση και *s/m* ο συντελεστής μεταβλητότητας.

Πίν. 6.3 Πίνακες με τους συντελεστές μεταβλητότητας όπως υπολογίστηκαν για τα ύψη των υδροδυναμικών πιέσεων, για τις 4 διατομές της πειραματικής διάταξης (σενάρια 1,2,3,4,5,6,7)

Σενάριο 1		
	s (average)	s/m (average)
section 1	90.506	0.121
section 2	86.444	0.194
section 3	79.266	0.193

Σενάριο 2		
	s (average)	s/m (average)
section 1	110.745	0.134
section 2	90.121	0.223
section 3	79.899	0.198

Σενάριο 3		
	s (average)	s/m (average)
section 1	94.738	0.121
section 2	79.338	0.189
section 3	73.301	0.173

Σενάριο 4		
	s (average)	s/m (average)
section 1	84.608	0.108
section 2	66.950	0.194
section 3	63.315	0.174

Σενάριο 5		
	s (average)	s/m (average)
section 1	100.491	0.163
section 2	82.337	0.198
section 3	65.891	0.222

Σενάριο 6		
	s (average)	s/m (average)
section 1	106.118	0.162
section 2	85.048	0.242
section 3	56.945	0.207

Σενάριο 7		
	s (average)	s/m (average)
section 1	88.866	0.132
section 2	66.482	0.215
section 3	43.424	0.189

Ανάντη διατομή (upstream section)	
σενάριο	s/m (average)
1	0.105684
2	0.146674
3	0.108985
4	0.124277
5	0.153519
6	0.176946
7	0.126541

6.3 Τροχιακές ταχύτητες

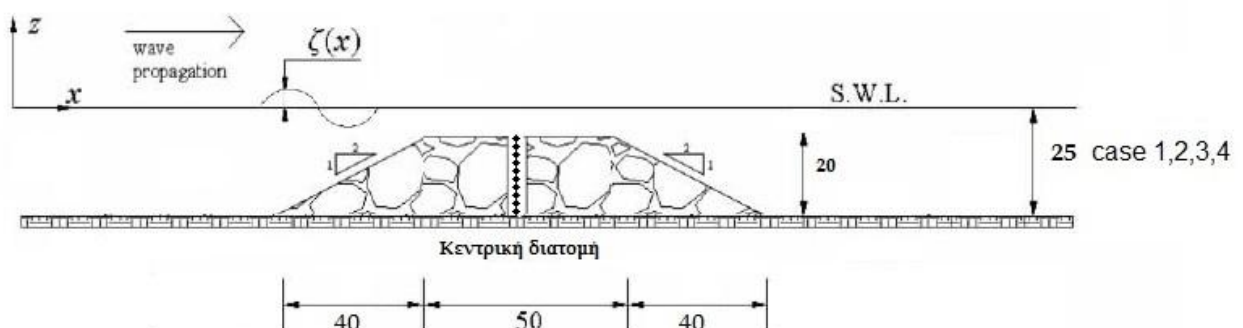
Σε συνέχεια με το προηγούμενο κεφάλαιο και την προσέγγιση της αντιμετώπισης των τροχιακών ταχυτήτων σε αντιστοιχία με την περίπτωση του χαρακτηριστικού ύψους κύματος, χρησιμοποιώντας την έννοια του ύψους της τροχιακής ταχύτητας, ακολουθούν μια σειρά διαγραμμάτων και πινάκων που διακρίνονται στις εξής κατηγορίες

Διαγράμματα με προφίλ καθ' ύψος για τις μέσες και μέγιστες και ελάχιστες τιμές των τροχιακών ταχυτήτων για τις δύο διατομές στο μοντέλο (Σχ. 6.20). Μία στην κεντρική διατομή και μία στο ακρομώλιο (Σχ. 6.21.-6.28), για τα 4 σενάρια κυματισμών όπως συνοψίζονται στον Πιν. 6.4 και για τις τρεις κατευθύνσεις.

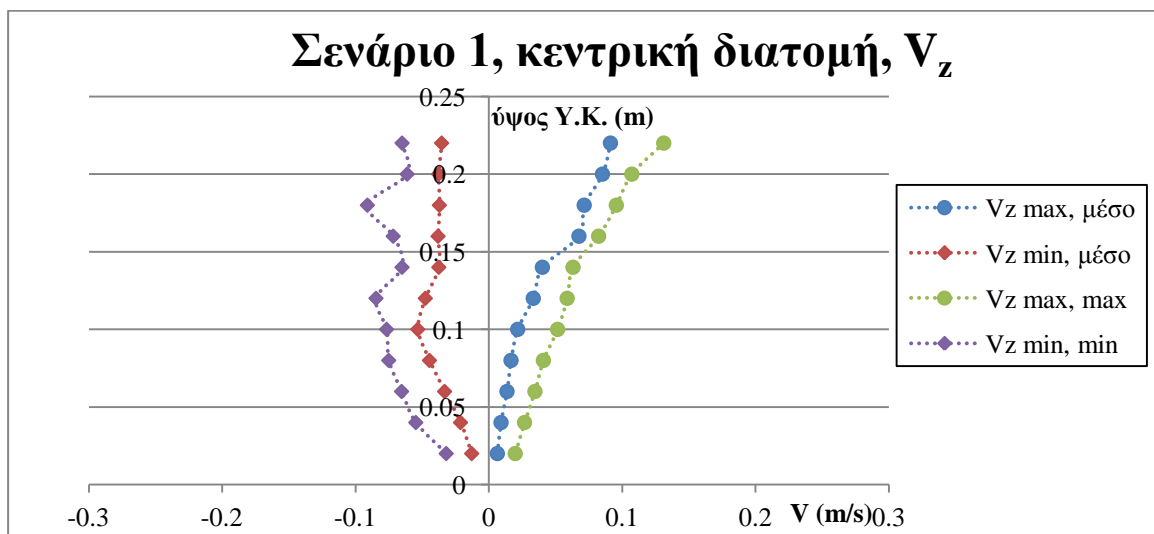
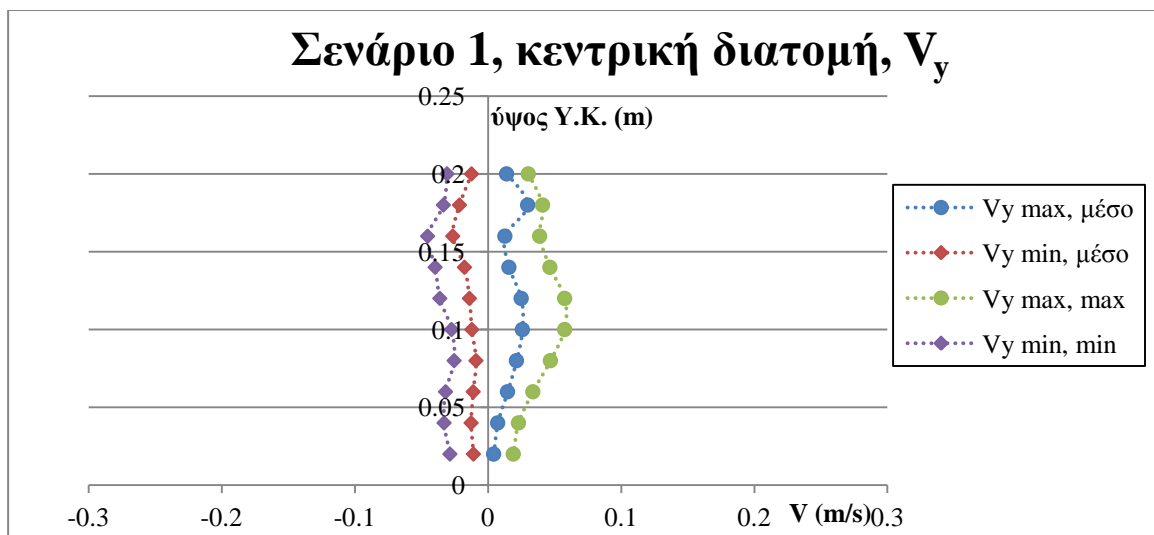
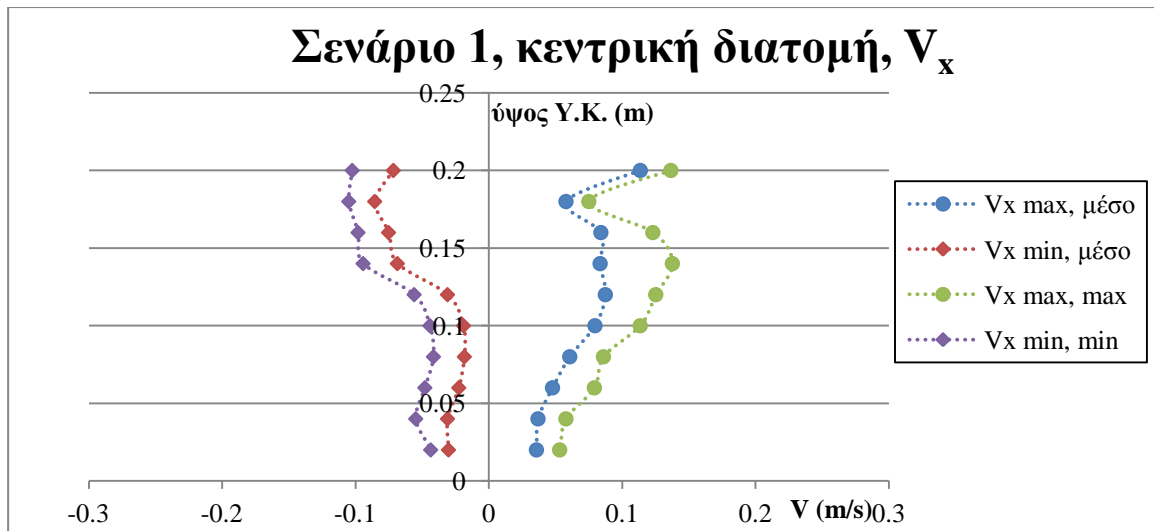
Τέλος παραθέτεται πίνακας με τους υπολογιζόμενους μέσους συντελεστές μεταβλητότητας ανά διατομή και ανά μέγεθος που προέκυψαν για τα παραπάνω μεγέθη, βασιζόμενοι στην παραδοχή της κανονικής κατανομής των υψών των υδροδυναμικών πιέσεων από τη μέση τους τιμή (Πιν. 6.5).

Πιν. 6.4. Κυματικά χαρακτηριστικά, μονοχρωματικοί κυματισμοί, 4 σενάρια (cases)

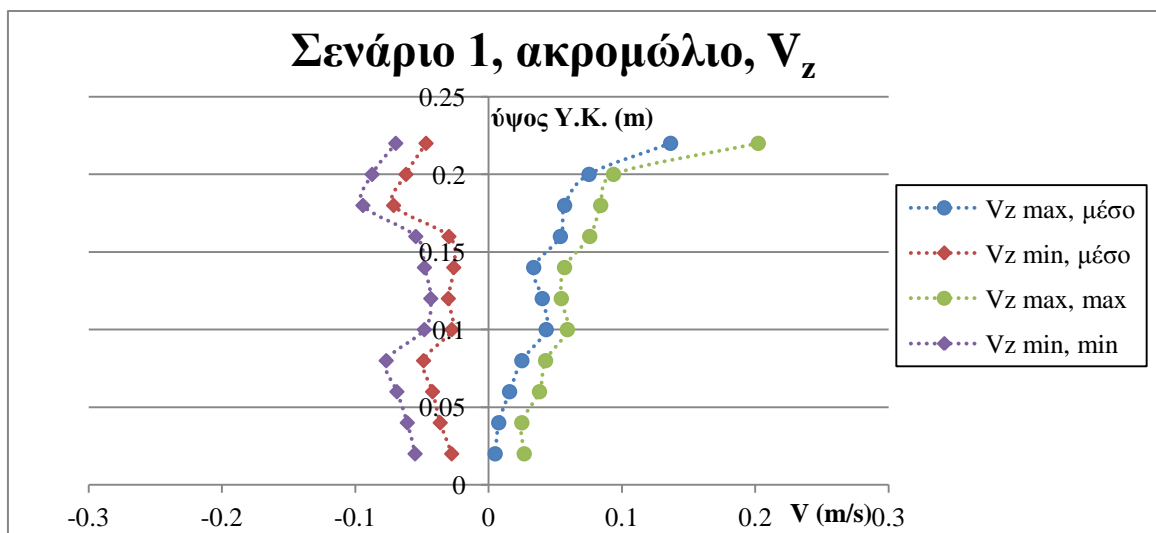
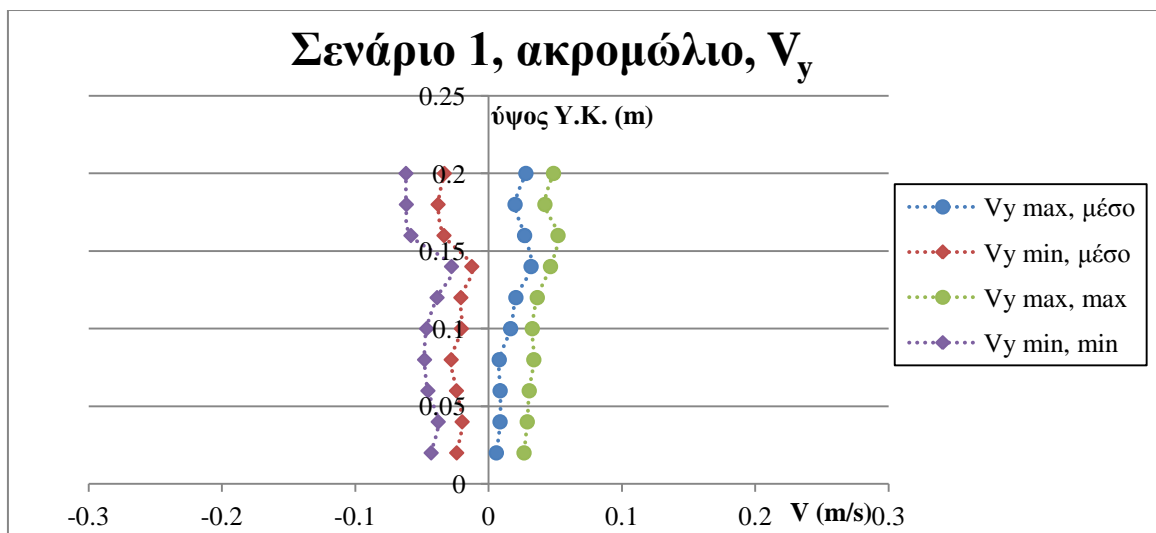
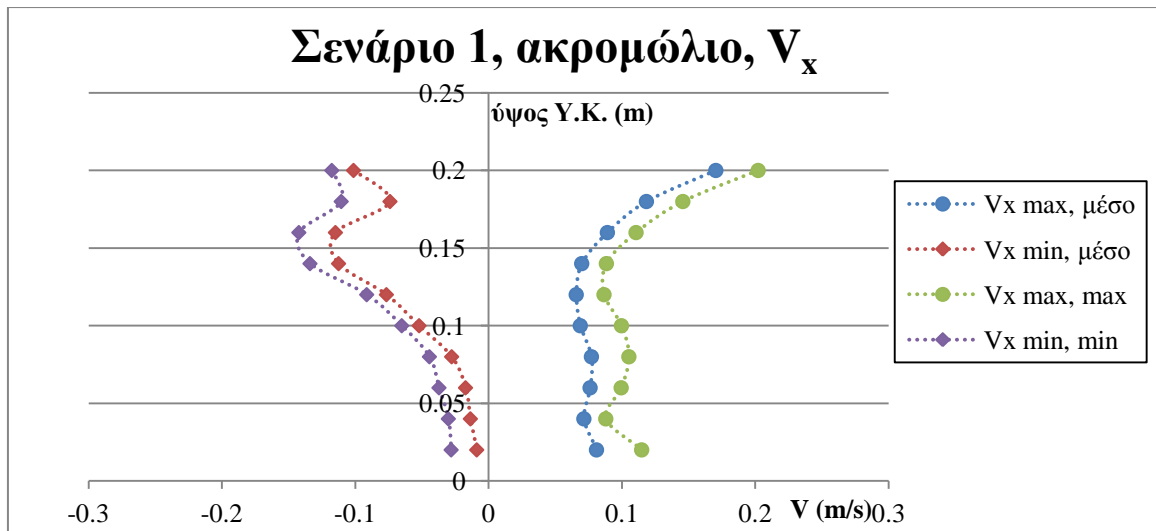
Σενάριο #	Κυματικά χαρακτηριστικά	
	H (m)	T (s)
1	0.045	1.25
2	0.045	2
3	0.08	1.25
4	0.08	2



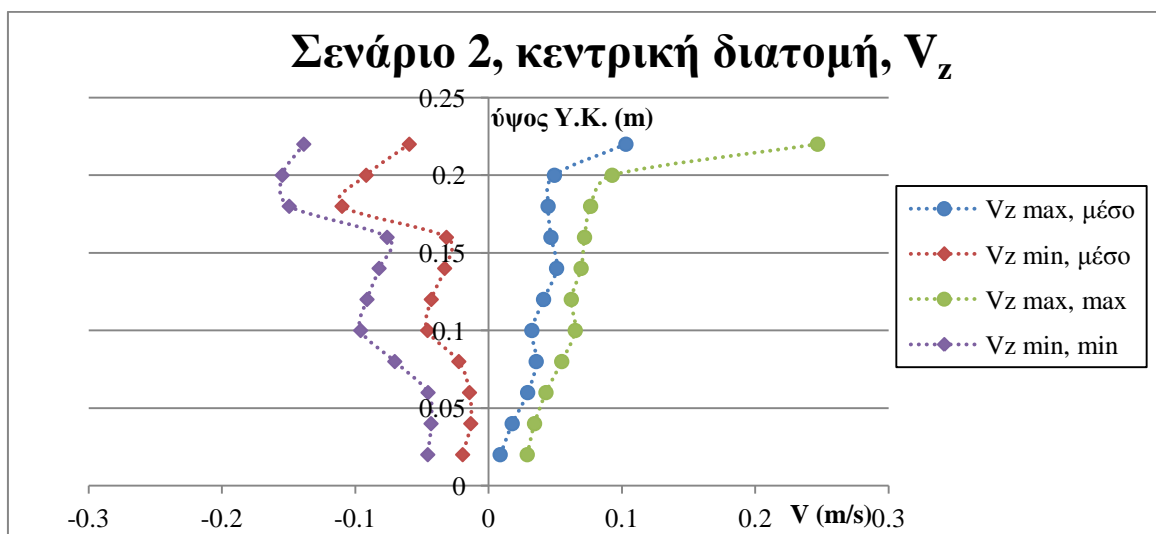
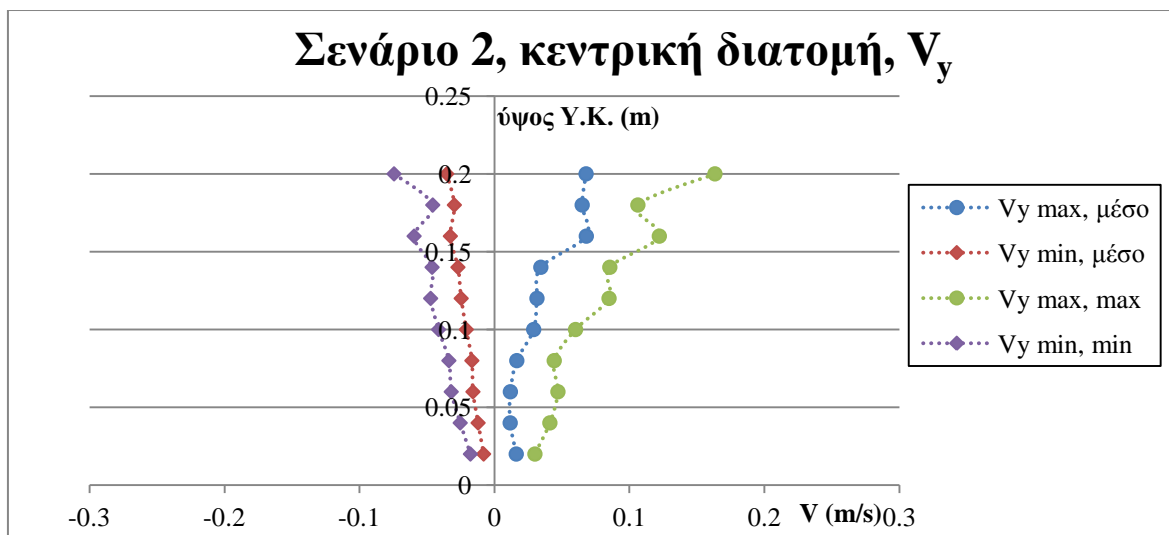
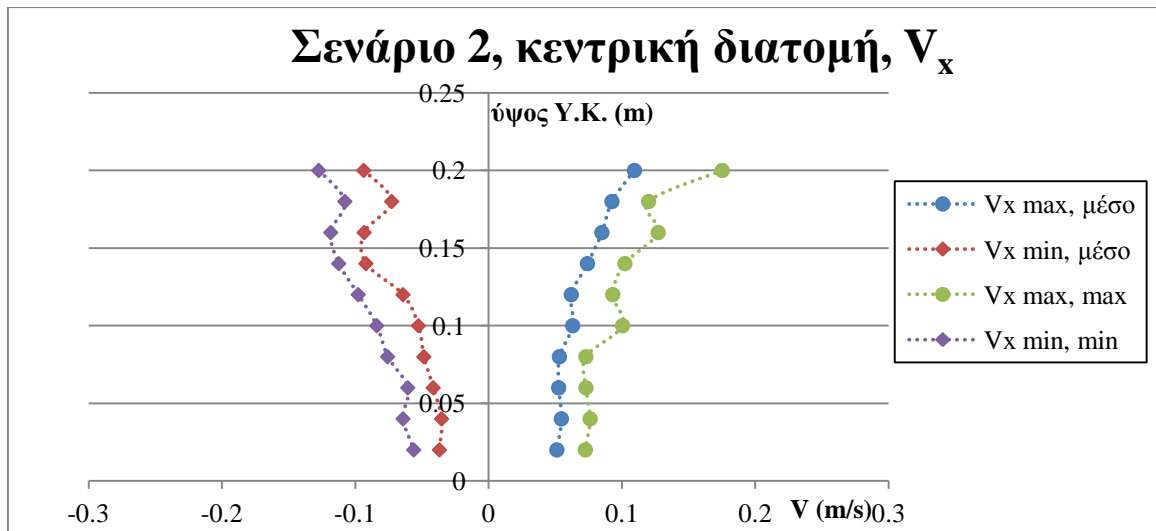
Σχ. 6.20. Διάταξη φυσικού μοντέλου του Ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη και σημεία λήψης μετρήσεων τροχιακών ταχυτήτων, υπό κλίμακα 1:10-1:15, Metallinos *et. al* (2016a).



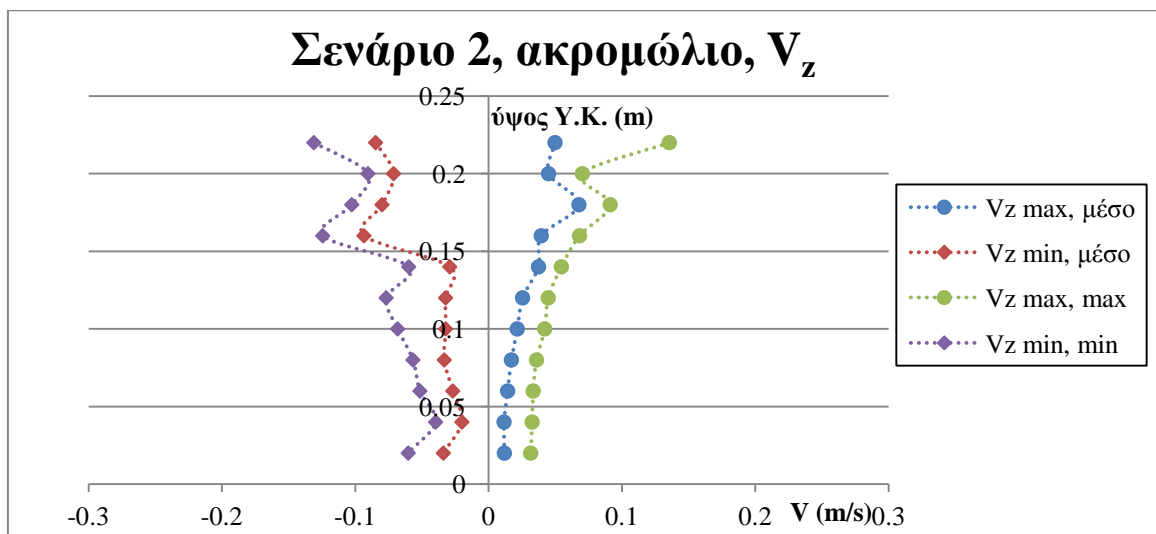
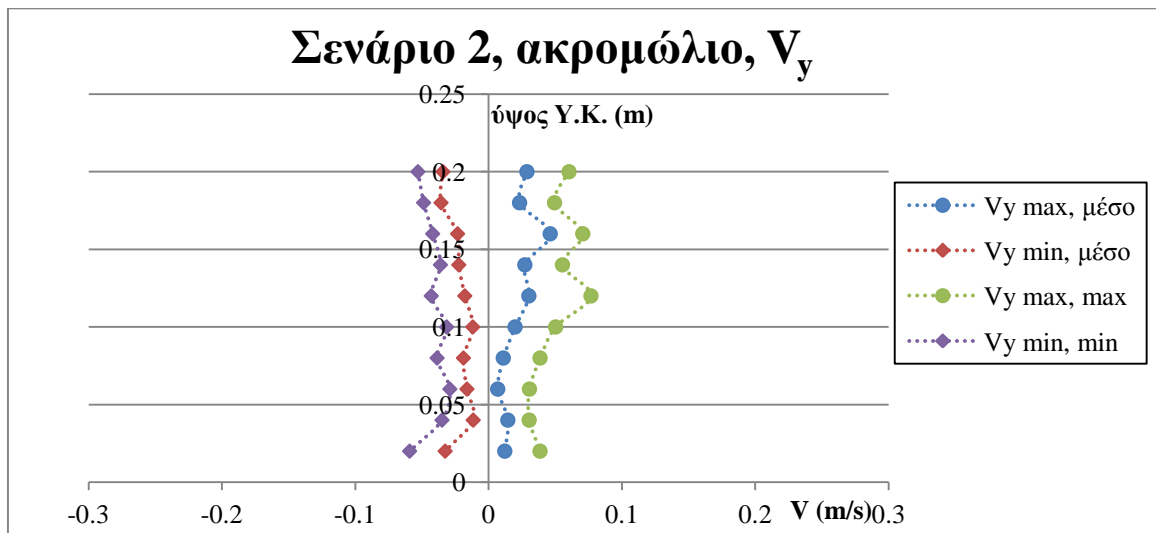
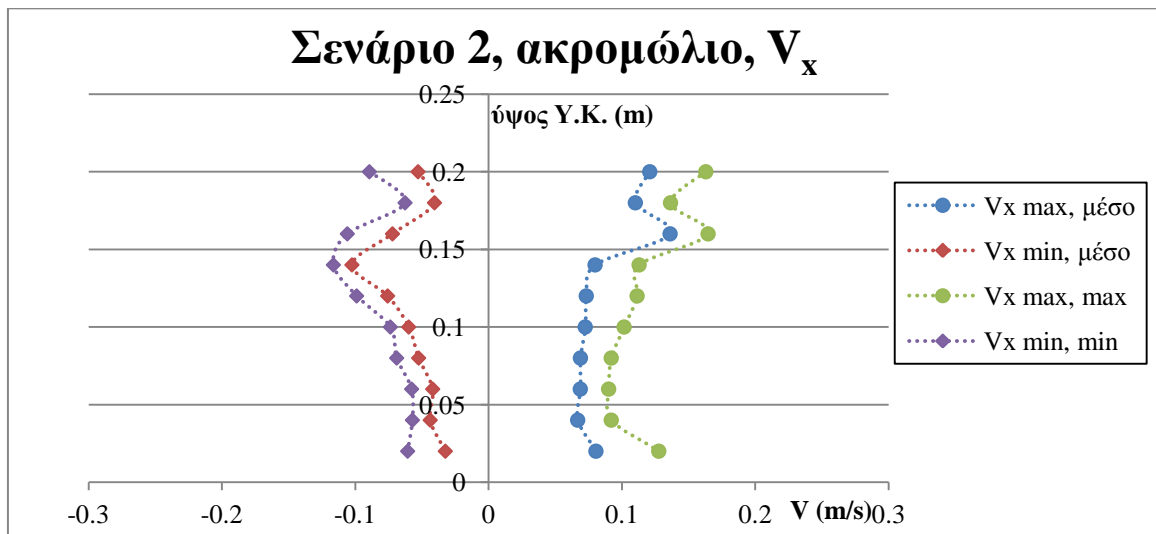
Σχ. 6.21 Διαγράμματα με προφίλ καθ' ύψος για τις μέσες και μέγιστες και ελάχιστες τιμές των τροχιακών ταχυτήτων, σενάριο 1, κεντρική διατομή, V_x , V_y , V_z .



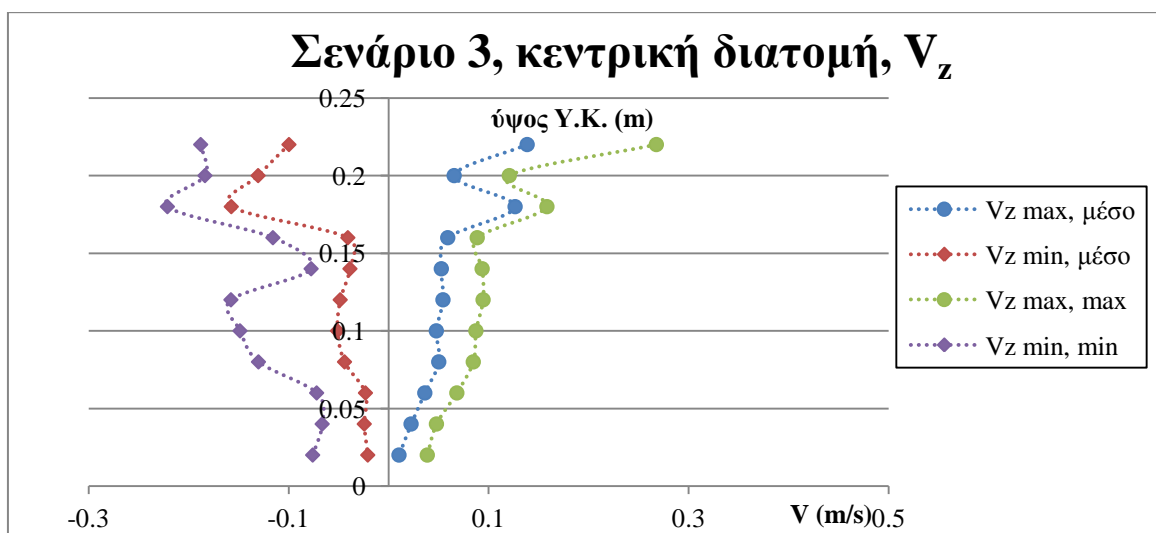
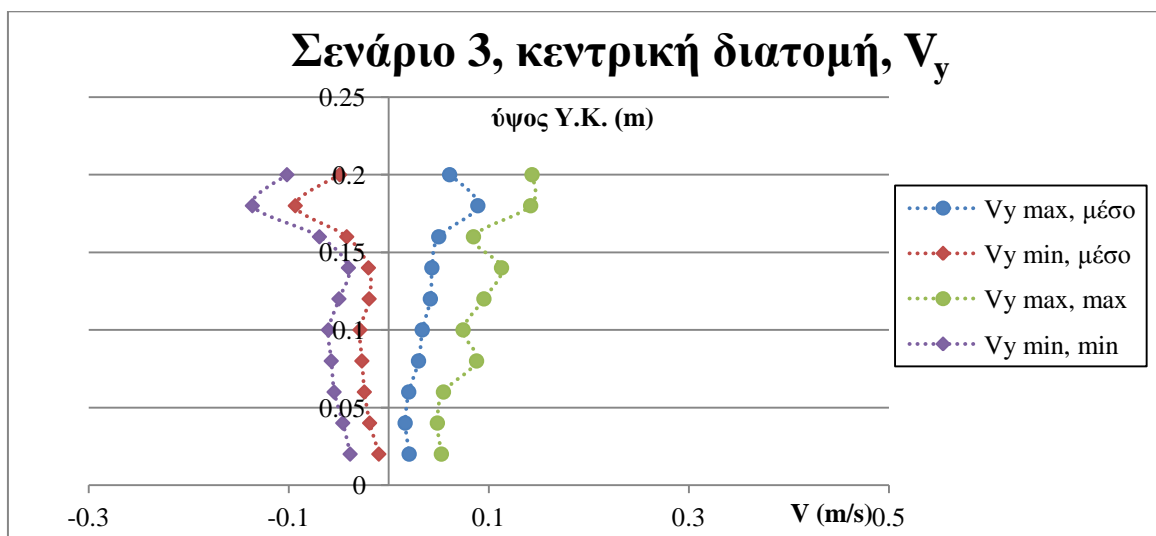
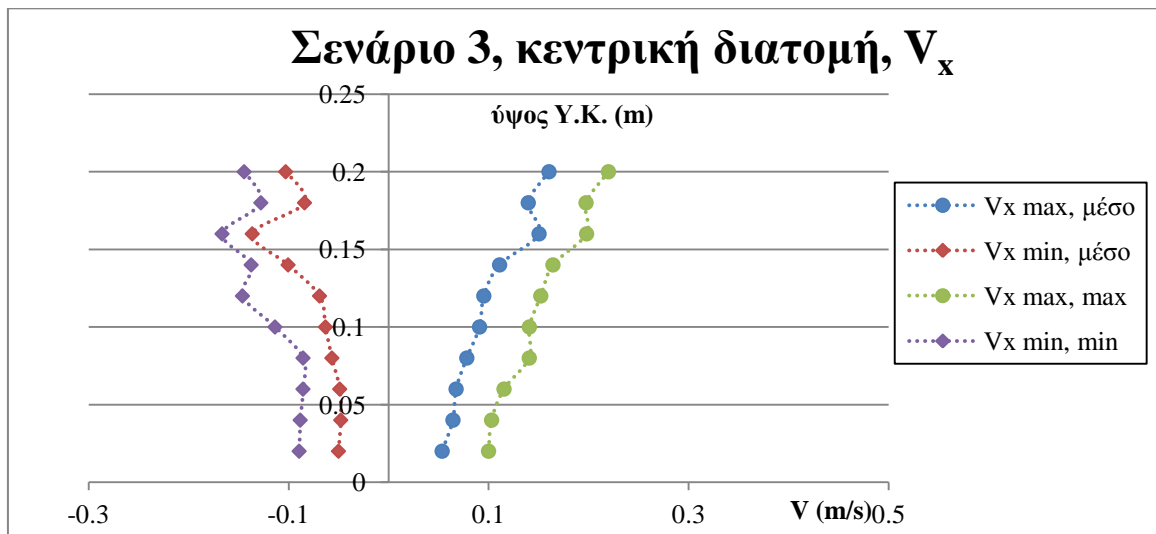
Σχ. 6.22 Διαγράμματα με προφίλ καθ' ύψος για τις μέσες και μέγιστες και ελάχιστες τιμές των τροχιακών ταχυτήτων, σενάριο 1, ακρομώλιο, V_x , V_y , V_z .



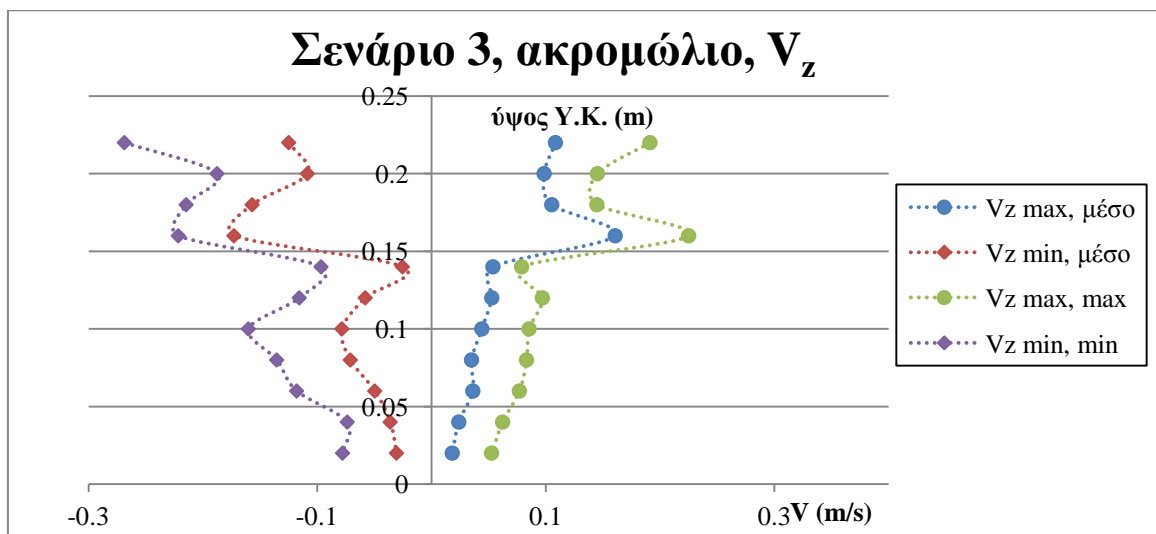
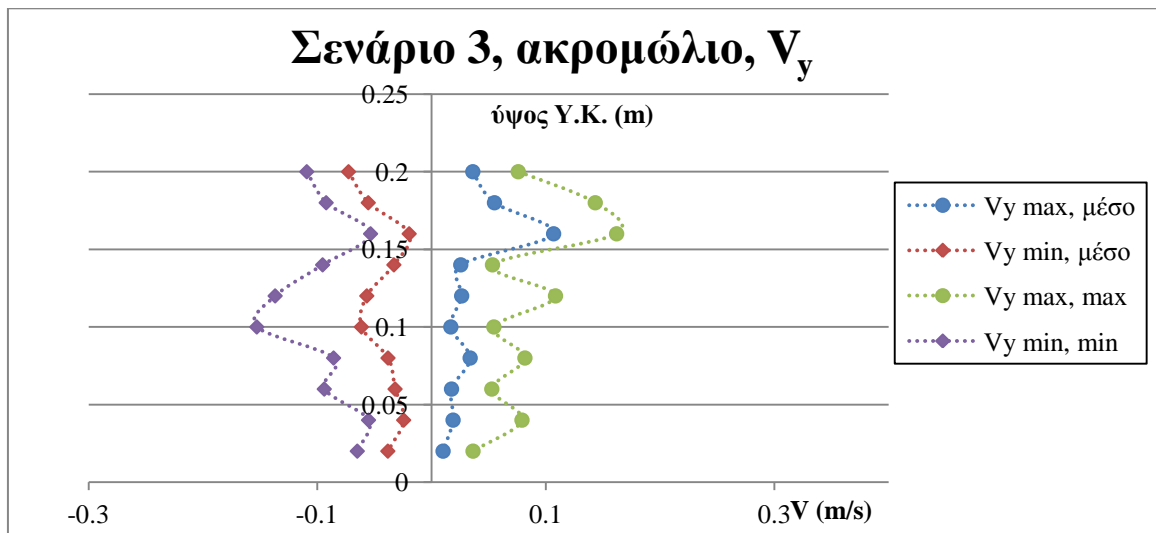
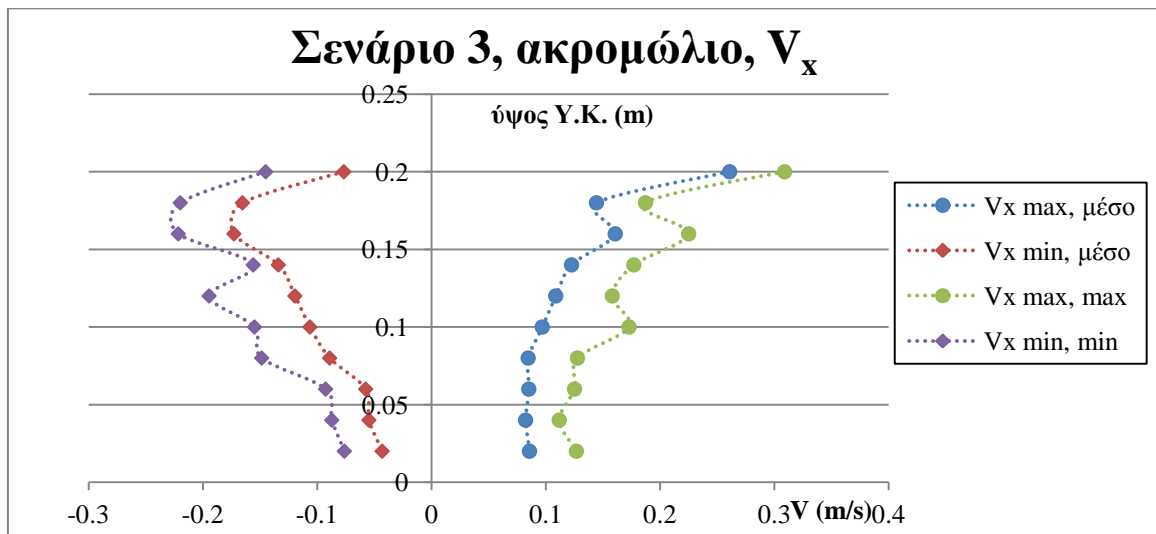
Σχ. 6.23 Διαγράμματα με προφίλ καθ' ύψος για τις μέσες και μέγιστες και ελάχιστες τιμές των τροχιακών ταχυτήτων, σενάριο 2, κεντρική διατομή, V_x , V_y , V_z .



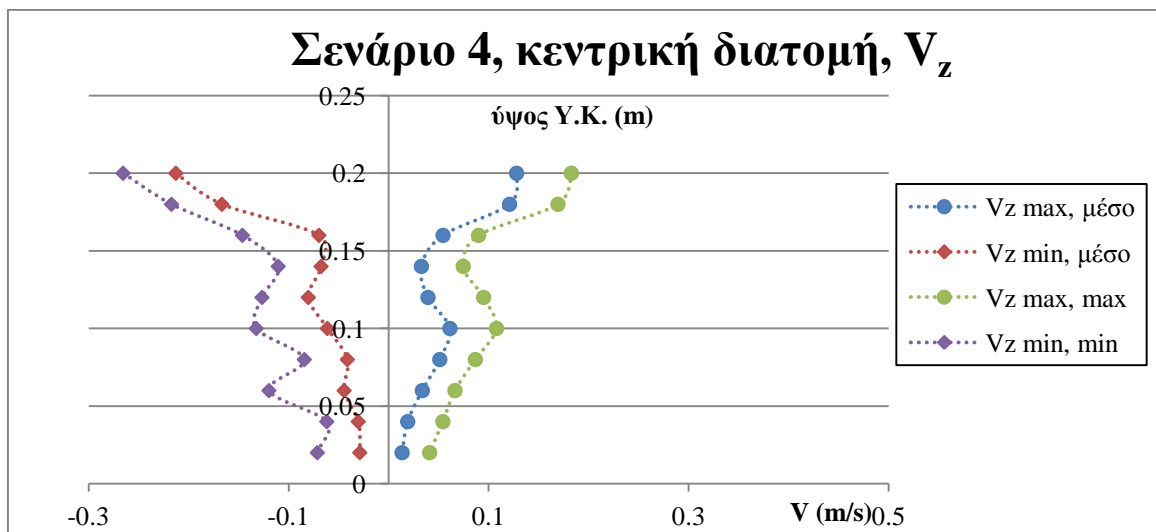
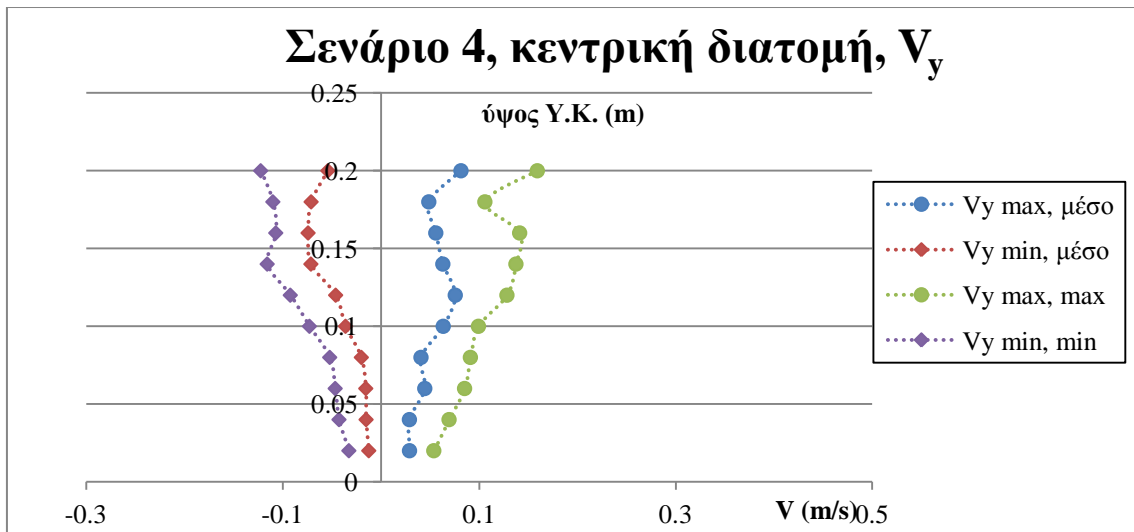
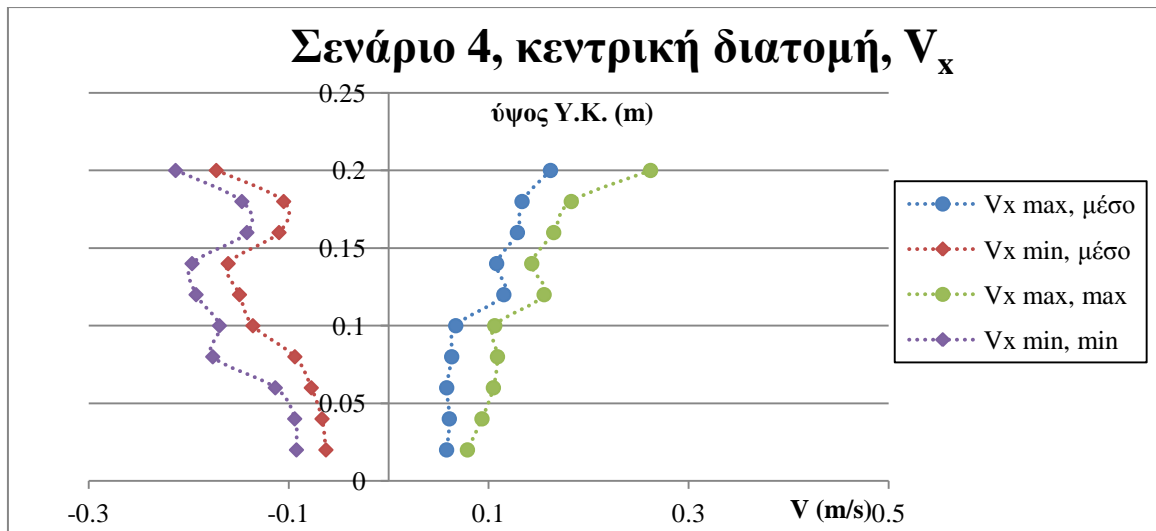
Σχ. 6.24 Διαγράμματα με προφίλ καθ' ύψος για τις μέσες και μέγιστες και ελάχιστες τιμές των τροχιακών ταχυτήτων, σενάριο 2, ακρομόλιο, V_x , V_y , V_z .



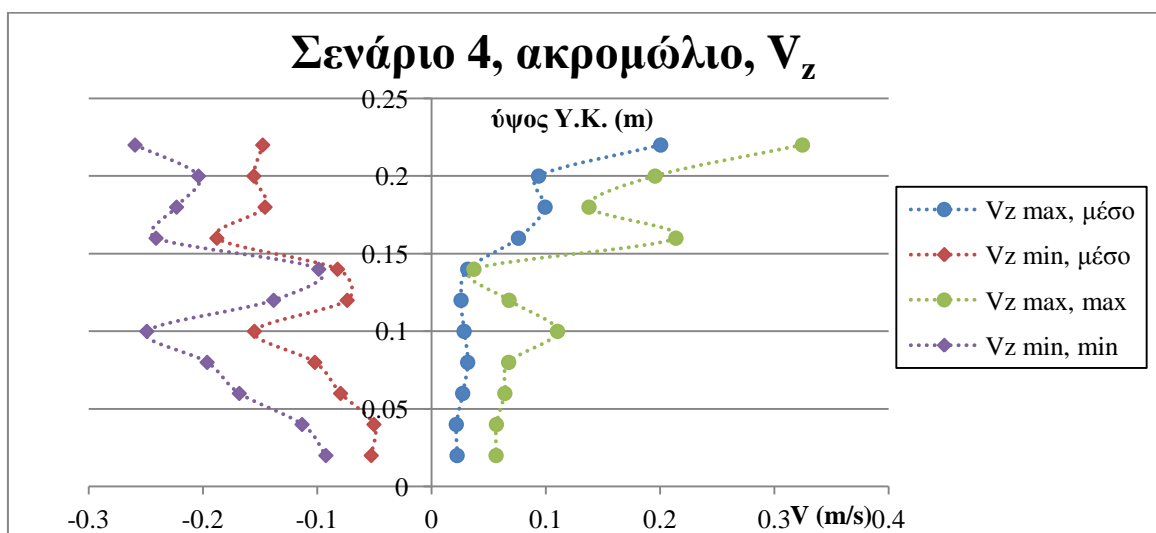
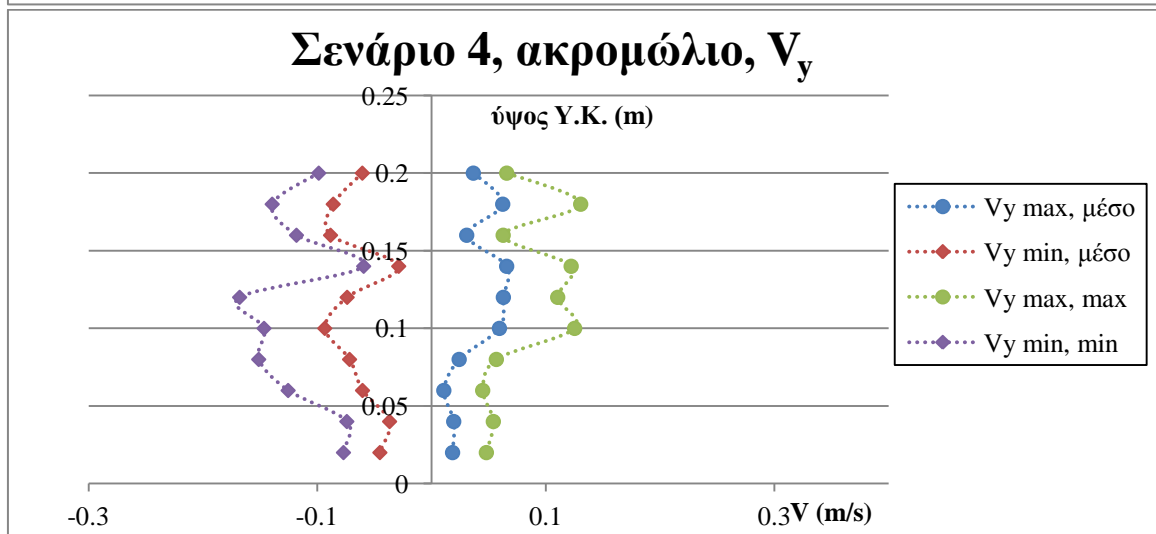
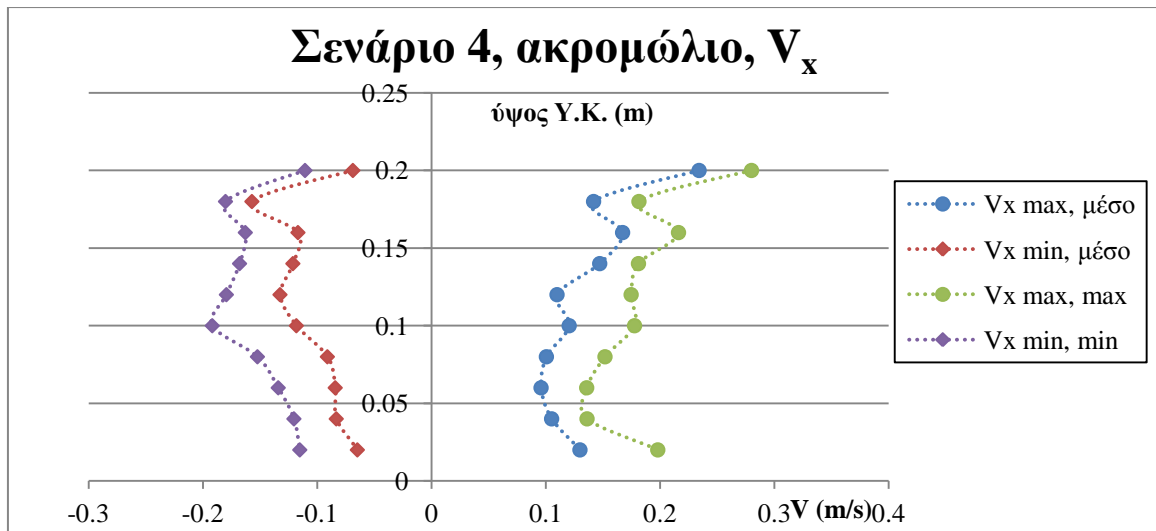
Σχ. 6.25 Διαγράμματα με προφίλ καθ' ύψος για τις μέσες και μέγιστες και ελάχιστες τιμές των τροχιακών ταχυτήτων, σενάριο 3, κεντρική διατομή, V_x , V_y , V_z .



Σχ. 6.26 Διαγράμματα με προφίλ καθ' ύψος για τις μέσες και μέγιστες και ελάχιστες τιμές των τροχιακών ταχυτήτων, σενάριο 3, ακρομώλιο, V_x , V_y , V_z .



Σχ. 6.27 Διαγράμματα με προφίλ καθ' ύψος για τις μέσες και μέγιστες και ελάχιστες τιμές των τροχιακών ταχυτήτων, σενάριο 4, κεντρική διατομή, V_x , V_y , V_z .



Σχ. 6.28 Διαγράμματα με προφίλ καθ' ύψος για τις μέσες και μέγιστες και ελάχιστες τιμές των τροχιακών ταχυτήτων, σενάριο 4, ακρομώλιο, V_x , V_y , V_z .

Στον κάτωθι πίνακα οι συστηματικότητες που εντοπίστηκαν είναι εμφανείς.

Πίν. 6.5 Μέσοι συντελεστές μεταβλητότητας ανά διατομή και ανά μέγεθος που προέκυψαν, βασιζόμενοι στην παραδοχή της κανονικής κατανομής των υψών των τροχιακών ταχυτήτων από τη μέση τους τιμή

Σενάριο 1	
	s/m (average per height)
V_x κεντρική	0.112
V_x ακρομώλιο	0.083
V_y ακρομώλιο	0.243
V_z κεντρική	0.211
V_z ακρομώλιο	0.167

Σενάριο 2	
	s/m (average per height)
V_x κεντρική	0.110
V_x ακρομώλιο	0.084
V_y ακρομώλιο	0.273
V_z κεντρική	0.230
V_z ακρομώλιο	0.202

Σενάριο 3	
	s/m (average per height)
V_x κεντρική	0.117
V_x ακρομώλιο	0.110
V_y ακρομώλιο	0.298
V_z κεντρική	0.254
V_z ακρομώλιο	0.228

Σενάριο 4	
	s/m (average per height)
V_x κεντρική	0.119
V_x ακρομώλιο	0.106
V_y ακρομώλιο	0.298
V_z κεντρική	0.218
V_z ακρομώλιο	0.229

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

7.1 Γενικότερα συμπεράσματα

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εξετάστηκε το υδροδυναμικό πεδίο στο εσωτερικό ύφαλων διαπερατών κυματοθραυστών με την αξιοποίηση υφιστάμενων πειραματικών δεδομένων. Τα γενικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα εξής :

- ❖ Από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, γίνεται εμφανής η ανάγκη για κατάστρωση ενός σχετικά απλού μοντέλου που θα προσομοιώνει τις υδροδυναμικό πεδίο στο εσωτερικό ύφαλων διαπερατών κυματοθραυστών υπό κυματική δράση και θα λαμβάνει υπόψη του τις διακυμάνσεις των μεγεθών από τις μέσες τους τιμές.
- ❖ Η θραύση σαν φυσικό φαινόμενο, η οποία και προκαλεί τύρβη και κατ' επέκταση συνεισφορά στη διακύμανση από μια μέση τιμή για όλα τα υδροδυναμικά μεγέθη που εξετάζει η παρούσα εργασία δεν έχει κατανοηθεί πλήρως, με αποτέλεσμα να είναι δυσδιάκριτη η επίδρασή της στο φαινόμενο. Η δυσκολία αυτή γίνεται πιο εμφανής στην περίπτωση έργων με πρηνή απότομης κλίσης, τα οποία περιγράφονται από ένα σύνολο γεωμετρικών και δομικών παραμέτρων καθιστώντας την προσέγγιση πολύπλοκη.
- ❖ Η παραγωγή παραμετροποιημένων μοντέλων για προσομοίωση υδροδυναμικών συνθηκών για την περίπτωση που εξετάζεται απαιτεί πολύ μεγάλο όγκο δεδομένων. Παρ' όλο που τα δεδομένα που ανακτήθηκαν είναι αρκετά εκ πρώτης όψεως, μόνο ενδείξεις μπορούν να δώσουν στην προσπάθεια μοντελοποίησης του φαινομένου.

7.2 Συμπεράσματα ως προς το πείραμα των Metallinos *et al.* 2014

Σε ότι αφορά τις υδροδυναμικές πιέσεις συνοπτικά αναφέρονται τα εξής:

- Κρίσιμο μέγεθος του σχεδιασμού είναι το ελεύθερο βάθος αφού εντοπίστηκε ότι για μια διαφορά της τάξης των 5 cm, οι υδροδυναμικές πιέσεις μεταβάλλονται σημαντικά σε μέγεθος.
- Για συνθήκες ίδιου βάθους και για τους κυματισμούς που εξετάστηκαν, η περίοδος φάνηκε να μην έχει πρωτεύοντα ρόλο. Αυτό εντοπίστηκε στην προσήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη και για τη διατομή έξω από αυτόν, όπου δεν έχει προηγηθεί θραύση ή τυρβώδης ροή στο πορώδες μέσο. Τα προφίλ για κυματικά σενάρια, ίδιου ελεύθερου βάθους ήταν παραπλήσια..
- Κρίσιμο στοιχείο φαίνεται να είναι η θραύση των κυματισμών, η ένταση της οποίας εξαρτάται από τα κυματικά χαρακτηριστικά και τη γεωμετρία της κατασκευής. Όσο πιο έντονο τυο φαινόμενο της θραύσης τόσο μικρότερες υδροδυναμικές πιέσεις (μέσα και μέγιστα ύψη υδροδυναμικών πιέσεων) εξελίσσονταν στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη.

- Η κατανομή του ύψους της υδροδυναμικής πίεσης, ανεξαρτήτως θέσης (μέσα και έξω) έδειξε να ακολουθεί την κανονική κατανομή.
- Η αναλογία του μέσου και μέγιστου ύψους υδροδυναμικής πίεσης όταν συσχετίστηκε με το συντελεστή μεταβλητότητας έδειξε μια σαφή τάση γύρω από ένα εύρος τιμών.
- Οι υποπίεσεις που παρατηρήθηκαν στην υπήνεμη διατομή μπορούν να αποτελέσουν ένα χρήσιμο εργαλείο κατά τη φάση διαστασιολόγησης της τυπικής διαμέτρου της λιθορριπής ενός ύφαλου κυματοθραύστη.

7.3 Συμπεράσματα ως προς το πείραμα των Metallinos *et al.* 2016

Σε ότι αφορά τις τροχιακές ταχύτητες συνοπτικά αναφέρονται τα εξής:

- Εφόσον εξετάστηκαν συνθήκες ίδιου ελεύθερου βάθους, κρίσιμο μέγεθος του σχεδιασμού εντοπίστηκε να είναι η περίοδος του εισερχόμενου κυματισμού.
- Κρίσιμο στοιχείο φαίνεται να είναι η θραύση των κυματισμών, σε αντιστοιχία με τις πιέσεις
- Η κατανομή του ύψους των τροχιακών ταχυτήτων και στις τρεις διευθύνσεις υδροδυναμικής πίεσης, ανεξαρτήτως θέσης έδειξε να ακολουθεί την κανονική κατανομή.
- Η αναλογία του μέσου και μέγιστου ύψους υδροδυναμικής πίεσης όταν συσχετίστηκε με το συντελεστή μεταβλητότητας έδειξε μια σαφή τάση γύρω από ένα εύρος τιμών.
- Πιο σημαντικά μεγέθη είναι οι οριζόντιες και κατακόρυφες συνιστώσες.

7.4 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Προτείνεται μέθοδος αντιμετώπισης πειραματικών δεδομένων όπως αυτά που εξετάστηκαν. Βασίζεται στην εκτίμηση συντελεστών μεταβλητότητας (Τυπική απόκλιση προς τη μέση τιμή) για ένα υδροδυναμικό μέγεθος το οποίο διακυμαίνεται και εμφανίζει χαρακτηριστικά κανονικής κατανομής. Είναι σχετικά απλή και κατάλληλη για να επεξεργαστεί κανείς δεδομένα, όπως χρονοσειρές υδροδυναμικών πιέσεων και τροχιακών ταχυτήτων. Στοχεύει στην υποστήριξη του οικολογικού σχεδιασμού των υφάλων διαπερατών κυματοθραυστών αλλά και τον ορθότερο σχεδιασμό εν γένει προς την αποφυγή κατασκευαστικών και οικονομικοτεχνικών προβλημάτων.

Είναι μια μέθοδος που παράγει αποτελέσματα εύκολα διαχειρίσιμα από τους θαλάσσιους βιολόγους και επιτρέπει επίσης την ανάπτυξη και επαλήθευση αριθμητικών μοντέλων αφού πρακτικά η τυρβώδης συνεισφορά σε ένα υδροδυναμικό μέγεθος σχεδιασμού αντιμετωπίζεται με την έννοια μιας απλής αναλογικής σχέσης, χωρίς όμως να παραλείπεται κρίσιμη πληροφορία. Υπό αυτό το σκεπτικό η παρούσα εργασία αποτελεί ίσως το έναυσμα για την συστηματική προσέγγιση των εξεταζόμενων φαινομένων, δηλαδή του υδροδυναμικού πεδίου όπως εξελίσσεται στο εσωτερικό αλλά και γύρω από έναν ύφαλο διαπερατό κυματοθραύστη.

8 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Πίνακες μετρήσεων και παράδειγμα αναγωγής μεγεθών κατ' αναλογία Froude (Froude analogy upscaling) για ύψη υδροδυναμικής πίεσης γύρω και μέσα σε διαπερατό ύφαλο κυματοθραύστη (πειραματική διάταξη των Metallinos *et al.* 2014).

Σε ότι αφορά το ύψος της υδροδυναμικής πίεσης παρατίθενται πίνακες με τις μετρήσεις όπως αυτές προέκυψαν μετά την επεξεργασία της παρούσας εργασίας (Πιν. Α-Α10) καθώς και ένα τυπικό παράδειγμα αναγωγής σε πραγματική κλίμακα (Πιν. Α1-Α4).

Πιν. Α. Κυματικά χαρακτηριστικά, και γεωμετρικά στοιχεία διαπερατού ύφαλου κυματοθραύστη (Metallinos *et al.* 2014) , κλίμακα 1:10.

	Ύψος κύματος	Περίδος $T(s)$	Βάθος νερού	Θραύση
σενάριο	$H(m)$		$h (m)$	
1	0.065	2.12	0.5	Όχι
2	0.08	1.85	0.5	Όχι
3	0.095	1.58	0.5	Ναι
4	0.107	1.31	0.5	Ναι
5	0.04	2.12	0.45	Όχι
6	0.057	1.85	0.45	Ναι
7	0.075	1.58	0.45	Ναι
Αναγωγή κατ' αναλογία Froude				
σενάριο	$H(m)$	$T(s)$	$h (m)$	
1	0.65	6.70	5.00	
2	0.80	5.85	5.00	
3	0.95	5.00	5.00	
4	1.07	4.14	5.00	
5	0.40	6.70	4.50	
6	0.57	5.85	4.50	
7	0.75	5.00	4.50	
πλάτος στέψης 10.00 m, ύψος διαπερατού Υ.Κ. 4.00 m, κλίση πρηνούς 1:2				

Πιν. Α1. Ύψος Υδροδυναμικής πίεσης, Σενάριο 1, Μέσο μέγεθος.

P_s average (Pa)				
z (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
0.50	836.1376			
0.45				
0.40	729.5357		625.7021	
0.35			494.0365	
0.30	853.9496		390.9389	
0.25			523.2258	
0.20	709.5765	696.0073	543.7791	550.8215
0.15		742.5402	446.0562	396.1583
0.10	733.668	809.3048	411.1749	353.3501
0.05		872.0857	363.7955	370.7975
0.015	535.6833	696.2412	398.9874	435.1516
Αναγωγή κατ' αναλογία Froude, P_s πραγματικότητας = 10.25*P_s μοντέλου				
P_s average (Pa)				
z (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
5.00	8570.41			
4.50				
4.00	7477.74		6413.45	
3.50			5063.87	
3.00	8752.98		4007.12	
2.50			5363.06	
2.00	7273.16	7134.07	5573.74	5645.92
1.50		7611.04	4572.08	4060.62
1.00	7520.10	8295.37	4214.54	3621.84
0.50		8938.88	3728.90	3800.67
0.15	5490.75	7136.47	4089.62	4460.30

Πιν. Α2. Ύψος Υδροδυναμικής πίεσης, Σενάριο 1, Μέγιστο μέγεθος

$P_s \text{ max (Pa)}$				
z (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
0.50	977.3777			
0.45				
0.40	887.5885		781.6078	
0.35			635.8843	
0.30	1042.144		688.8746	
0.25			861.0933	
0.20	894.9482	1007.846	809.5749	738.9211
0.15		959.7142	750.6967	649.1319
0.10	903.78	1121.629	700.6503	551.9829
0.05		1115.741	741.865	675.627
0.015	961.1862	1036.256	621.1647	744.8089
Αναγωγή κατ' αναλογία Froude, $P_{s \text{ πραγματικότητας}} = 10.25 * P_{s \text{ μοντέλου}}$				
$P_s \text{ max (Pa)}$				
z (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
5.00	10018.12			
4.50				
4.00	9097.78		8011.48	
3.50			6517.81	
3.00	10681.97		7060.96	
2.50			8826.21	
2.00	9173.22	10330.42	8298.14	7573.94
1.50		9837.07	7694.64	6653.60
1.00	9263.74	11496.70	7181.67	5657.82
0.50		11436.35	7604.12	6925.18
0.15	9852.16	10621.62	6366.94	7634.29

Πιν. Α3. Τυπική απόκλιση ύψους Υδροδυναμικής πίεσης, Σενάριο 1.

Stdev, Ps average				
z (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
0.50	73.03524			
0.45				
0.40	72.02439		69.95473	
0.35			59.80974	
0.30	61.52895		92.89458	
0.25			84.6783	
0.20	59.6298	102.3254	85.9483	69.75742
0.15		91.64591	108.9964	57.50257
0.10	62.41676	76.34143	89.01885	87.73081
0.05		79.51708	98.44112	75.945
0.015	110.8141	102.6977	88.25835	105.3952
Αναγωγή κατ' αναλογία Froude, P_s πραγματικότητας = $10.25 * P_s$ μοντέλου				
P_s max (Pa)				
z (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
5.00	748.61			
4.50				
4.00	738.25		717.04	
3.50			613.05	
3.00	630.67		952.17	
2.50			867.95	
2.00	611.21	1048.84	880.97	715.01
1.50		939.37	1117.21	589.40
1.00	639.77	782.50	912.44	899.24
0.50		815.05	1009.02	778.44
0.15	1135.84	1052.65	904.65	1080.30

Πιν. Α4. Συντελεστής Μεταβλητότητας (τυπική απόκλιση/μέσο) ύψους Υδροδυναμικής πίεσης, Σενάριο 1.

CV συντελεστής μεταβλητότητας				
<i>z</i> (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
0.50	0.09			
0.45				
0.40	0.10		0.11	
0.35			0.12	
0.30	0.07		0.24	
0.25			0.16	
0.20	0.08	0.15	0.16	0.13
0.15		0.12	0.24	0.15
0.10	0.09	0.09	0.22	0.25
0.05		0.09	0.27	0.20
0.015	0.21	0.15	0.22	0.24
Αναγωγή κατ' αναλογία Froude, P_s πραγματικότητας = 10.25 * P_s μοντέλου				
CV συντελεστής μεταβλητότητας				
<i>z</i> (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
0.50	0.09			
0.45				
0.40	0.10		0.11	
0.35			0.12	
0.30	0.07		0.24	
0.25			0.16	
0.20	0.08	0.15	0.16	0.13
0.15		0.12	0.24	0.15
0.10	0.09	0.09	0.22	0.25
0.05		0.09	0.27	0.20
0.015	0.21	0.15	0.22	0.24

Πιν. Α5. Στοιχεία Ύψους Υδροδυναμικής πίεσης, Σενάριο 2.

P_s average (Pa)				
z (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
0.50	634.7776			
0.45				
0.40	668.5574		628.1285	
0.35			437.9172	
0.30	748.2846		407.5809	
0.25			419.0826	
0.20	639.6286	827.5016	442.4082	482.5647
0.15		742.7836	433.3616	404.7391
0.10	755.5638	900.3625	327.6513	390.8683
0.05		928.0941	315.0041	356.2935
0.015	606.413	759.507	361.9521	410.5356

P_s max (Pa)				
z (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
0.50	930.2751			
0.45				
0.40	961.1862		856.6774	
0.35			759.5284	
0.30	1042.144		763.9443	
0.25			816.9347	
0.20	1027.424	1230.554	812.5188	743.3369
0.15		1084.83	840.4859	638.8282
0.10	1064.223	1223.194	649.1319	697.7064
0.05		1323.287	750.6967	685.9307
0.015	1074.527	1111.326	737.4491	890.5324

Stdev, Ps average				
z (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
0.50	104.6958			
0.45				
0.40	78.78128		88.32927	
0.35			75.31325	
0.30	87.54414		84.63217	
0.25			99.54339	
0.20	91.75319	117.1192	82.18412	71.39609
0.15		109.3409	110.9937	57.61114
0.10	83.96376	112.2734	91.08079	86.7863
0.05		101.5529	95.3859	80.53244
0.015	136.8716	113.4368	83.6272	103.1674

CV συντελεστής μεταβλητότητας				
z (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
0.50	0.16			
0.45				
0.40	0.12		0.14	
0.35			0.17	
0.30	0.12		0.21	
0.25			0.24	
0.20	0.14	0.14	0.19	0.15
0.15		0.15	0.26	0.14
0.10	0.11	0.12	0.28	0.22
0.05		0.11	0.30	0.23
0.015	0.23	0.15	0.23	0.25

Πιν. Α6. Στοιχεία Ύψους Υδροδυναμικής πίεσης, Σενάριο 3.

P_s average (Pa)				
z (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
0.50	564.2614			
0.45				
0.40	792.1949		684.1479	
0.35			392.4345	
0.30	840.9522		376.7289	
0.25			450.4592	
0.20	630.1336	776.2136	486.9243	500.6565
0.15		714.3733	423.4154	386.9091
0.10	760.8358	850.6159	410.4101	419.7173
0.05		916.1402	308.4933	398.3236
0.015	679.1561	726.2998	418.6247	425.8245

P_s max (Pa)				
z (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
0.50	928.8032			
0.45				
0.40	1015.648		855.2055	
0.35			566.2549	
0.30	1048.031		609.3891	
0.25			793.3834	
0.20	806.631	1039.2	709.482	657.9636
0.15		971.4899	671.2112	547.567
0.10	958.2423	1105.438	641.7721	706.5381
0.05		1142.237	629.9965	599.0854
0.015	905.2519	1006.817	710.9539	718.3137

Stdev, Ps average				
z (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
0.50	69.40895			
0.45				
0.40	65.43237		66.5511	
0.35			59.64476	
0.30	73.22038		72.02293	
0.25			99.23186	
0.20	73.98159	99.51642	77.8668	67.32243
0.15		92.77123	87.03217	60.67445
0.10	66.28638	83.9672	84.00875	78.14681
0.05		88.68716	83.73605	67.64002
0.015	106.4284	108.7491	83.94967	92.72306

CV συντελεστής μεταβλητότητας				
z (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
0.50	0.12			
0.45				
0.40	0.08		0.10	
0.35			0.15	
0.30	0.09		0.19	
0.25			0.22	
0.20	0.12	0.13	0.16	0.13
0.15		0.13	0.21	0.16
0.10	0.09	0.10	0.20	0.19
0.05		0.10	0.27	0.17
0.015	0.16	0.15	0.20	0.22

Πιν. Α7. Στοιχεία Ύψους Υδροδυναμικής πίεσης, Σενάριο 4.

P_s average (Pa)				
z (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
0.50	714.7312			
0.45				
0.40	909.4757		639.3967	
0.35			362.8744	
0.30	864.1229		293.8846	
0.25			385.2003	
0.20	753.7029	782.7539	362.4201	456.9055
0.15		653.7658	368.1755	356.5946
0.10	755.9403	840.9883	289.8932	315.2552
0.05		858.6984	244.996	317.2996
0.015	665.5336	794.7152	341.1196	401.1893

P_s max (Pa)				
z (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
0.50	1027.424			
0.45				
0.40	1152.54		840.4859	
0.35			516.656	
0.30	1031.84		451.89	
0.25			649.1319	
0.20	978.8496	1015.648	537.2633	644.716
0.15		908.1958	632.9404	559.3427
0.10	1040.672	1204.059	504.8803	543.1512
0.05		1189.339	544.6231	556.3987
0.015	1105.438	992.0972	632.9404	643.244

Stdev, P_s average				
z (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
0.50	76.49678			
0.45				
0.40	82.88159		70.02751	
0.35			54.98599	
0.30	75.88051		54.95919	
0.25			77.62747	
0.20	75.20784	86.57402	60.87396	62.84357
0.15		84.35053	76.28945	51.66097
0.10	119.0184	88.91369	56.86096	63.25396
0.05		90.52031	70.83081	65.66736
0.015	134.7467	72.6813	80.09774	73.15045

CV συντελεστής μεταβλητότητας				
z (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
0.50	0.11			
0.45				
0.40	0.09		0.11	
0.35			0.15	
0.30	0.09		0.19	
0.25			0.20	
0.20	0.10	0.11	0.17	0.14
0.15		0.13	0.21	0.14
0.10	0.16	0.11	0.20	0.20
0.05		0.11	0.29	0.21
0.015	0.20	0.09	0.23	0.18

Πιν. Α8. Στοιχεία Ύψους Υδροδυναμικής πίεσης, Σενάριο 5.

P_s average (Pa)				
z (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
0.45				
0.40	571.4424		578.8967	
0.35			435.2596	
0.30	678.4022		471.8154	
0.25			418.9061	
0.20	566.932	755.4113	475.9814	447.5225
0.15		740.1635	350.818	275.1646
0.10	468.8985	762.5466	343.3299	296.553
0.05		666.7683	359.7916	269.0859
0.015	369.4875	451.3944	439.4256	258.8749

P_s max (Pa)				
z (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
0.45				
0.40	809.5749		802.2151	
0.35			631.4684	
0.30	864.0372		708.01	
0.25			644.716	
0.20	747.7528	1058.335	721.2576	678.571
0.15		1048.031	635.8843	381.2362
0.10	618.2208	946.4666	612.333	463.6656
0.05		886.1165	665.3234	429.8107
0.015	708.01	781.6078	660.9075	497.5206

Stdev, P_s average				
z (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
0.45				
0.40	79.59057		68.48191	
0.35			68.35956	
0.30	80.32412		88.97707	
0.25			85.98369	
0.20	61.69604	94.75686	77.55337	67.42393
0.15		102.3584	92.07267	50.82686
0.10	48.1638	76.80223	86.68169	65.52519
0.05		81.22854	81.43329	66.97395
0.015	110.2455	147.3099	91.48897	78.70442

CV συντελεστής μεταβλητότητας				
z (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
0.45				
0.40	0.14		0.12	
0.35			0.16	
0.30	0.12		0.19	
0.25			0.21	
0.20	0.11	0.13	0.16	0.15
0.15		0.14	0.26	0.18
0.10	0.10	0.10	0.25	0.22
0.05		0.12	0.23	0.25
0.015	0.30	0.33	0.21	0.30

Πιν. Α9. Στοιχεία Ύψους Υδροδυναμικής πίεσης, Σενάριο 6.

P_s average (Pa)				
z (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
0.45				
0.40	540.3899		509.4578	
0.35			354.1662	
0.30	591.9835		440.0868	
0.25			354.827	
0.20	564.2145	750.5544	386.0442	461.3208
0.15		734.4837	286.2256	299.0019
0.10	456.8377	731.4109	285.1025	222.8574
0.05		647.4872	293.3069	221.7575
0.015	390.9758	505.4301	384.6851	258.9751

P_s max (Pa)				
z (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
0.45				
0.40	937.6349		815.4627	
0.35			610.8611	
0.30	864.0372		768.3602	
0.25			549.039	
0.20	824.2944	1118.685	599.0854	663.8514
0.15		1064.223	660.9075	494.5767
0.10	733.0333	1050.975	565.2305	453.3619
0.05		1030.368	696.2344	468.0815
0.015	765.4163	918.4995	880.2287	525.4877

Stdev, Ps average				
z (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
0.45				
0.40	76.96804		83.04119	
0.35			65.95603	
0.30	87.78355		88.98967	
0.25			83.17859	
0.20	88.66108	106.0269	68.92513	61.99872
0.15		111.6886	97.45796	56.76342
0.10	74.44321	99.68925	85.62095	51.49185
0.05		93.24166	87.84089	56.30928
0.015	107.095	119.9444	104.4176	58.16193

CV συντελεστής μεταβλητότητας				
z (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
0.45				
0.40	0.14		0.16	
0.35			0.19	
0.30	0.15		0.20	
0.25			0.23	
0.20	0.16	0.14	0.18	0.13
0.15		0.15	0.34	0.19
0.10	0.16	0.14	0.30	0.23
0.05		0.14	0.30	0.25
0.015	0.27	0.24	0.27	0.22

Πιν. Α10. Στοιχεία Ύψους Υδροδυναμικής πίεσης, Σενάριο 7.

Ps average (Pa)				
z (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
0.45				
0.40	711.1277		418.7037	
0.35			308.6441	
0.30	664.3817		348.2635	
0.25			296.7634	
0.20	605.7824	745.4043	296.3428	380.8705
0.15		736.7498	313.5263	256.016
0.10	475.2401	697.2858	271.7447	169.4351
0.05		640.035	228.3083	155.343
0.015	449.0009	578.1535	324.0951	234.2993

P_s max (Pa)				
z (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
0.45				
0.40	1046.56		687.4027	
0.35			485.7449	
0.30	890.5324		612.333	
0.25			471.0254	
0.20	852.2616	1008.289	475.4413	596.1415
0.15		965.6021	426.8668	373.8764
0.10	666.7953	930.2751	496.0486	316.4702
0.05		890.5324	459.2498	276.7274
0.015	725.6735	836.0701	550.5109	422.4509

Stdev, Ps average				
z (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
0.45				
0.40	62.33579		83.26061	
0.35			61.52844	
0.30	72.52292		77.49736	
0.25			59.61269	
0.20	73.80349	96.93929	73.47117	57.35582
0.15		94.00289	43.94529	44.29141
0.10	60.99918	81.47486	71.27482	34.25702
0.05		85.35404	56.34272	32.48481
0.015	83.38084	86.56	71.40185	48.72897

CV συντελεστής μεταβλητότητας				
z (m)	upstream	section 1	section 2	section 3
0.45				
0.40	0.09		0.20	
0.35			0.20	
0.30	0.11		0.22	
0.25			0.20	
0.20	0.12	0.13	0.25	0.15
0.15		0.13	0.14	0.17
0.10	0.13	0.12	0.26	0.20
0.05		0.13	0.25	0.21
0.015	0.19	0.15	0.22	0.21

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Πίνακες μετρήσεων και παράδειγμα αναγωγής μεγεθών κατ' αναλογία Froude (Froude analogy upscaling) για τροχιακές ταχύτητες στο εσωτερικό διαπερατού ύφαλου κυματοθραύστη (πειραματική διάταξη των Metallinos *et al.* 2016).

Σε ότι αφορά τις τροχιακές ταχύτητες παρατίθενται πίνακες με τις μετρήσεις όπως αυτές προέκυψαν μετά την επεξεργασία της παρούσας εργασίας (Πιν. Β-Β12) καθώς και ένα τυπικό παράδειγμα αναγωγής σε πραγματική κλίμακα (Πιν. Β1-Β3).

Πιν. Β. Κυματικά χαρακτηριστικά, και γεωμετρικά στοιχεία διαπερατού ύφαλου κυματοθραύστη (Metallinos *et al.* 2016) , κλίμακα 1:15.

	Ύψος κύματος	Περίδος $T(s)$	Βάθος νερού	Θραύση
σενάριο	$H(m)$		$h (m)$	
1	0.045	1.25	0.25	Όχι
2	0.04	2	0.25	Όχι
3	0.08	1.25	0.25	Ναι
4	0.08	2	0.25	Ναι
Αναγωγή κατ' αναλογία Froude (m/s)				
σενάριο	$H(m)$	$T(s)$	$h (m)$	
1	0.68	4.84	3.75	
2	0.60	7.75	3.75	
3	1.20	4.84	3.75	
4	1.20	7.75	3.75	
πλάτος στέψης 7.50 m, ύψος διαπερατού Υ.Κ. 3.00 m, κλίση πρσανούς 1:2				

Πιν. Β1. Τροχιακές ταχυότητες κατά την οριζόντια διεύθυνση, V_x , Σενάριο 1.

κεντρική διατομή V_x (m/s)				
z (m)	V_x max, μέσο	V_x min, μέσο	V_x max, max	V_x min, min
0.20	0.114	-0.072	0.137	-0.102
0.18	0.058	-0.086	0.075	-0.105
0.16	0.084	-0.075	0.123	-0.098
0.14	0.084	-0.069	0.138	-0.094
0.12	0.087	-0.031	0.125	-0.056
0.10	0.080	-0.019	0.114	-0.044
0.08	0.061	-0.018	0.086	-0.041
0.06	0.048	-0.022	0.079	-0.048
0.04	0.037	-0.031	0.058	-0.055
0.02	0.036	-0.030	0.053	-0.044

Αναγωγή κατ' αναλογία Froude (m/s)				
z (m)	V_x max, μέσο	V_x min, μέσο	V_x max, max	V_x min, min
3	0.440	-0.277	0.529	-0.397
2.7	0.224	-0.331	0.291	-0.407
2.4	0.326	-0.291	0.477	-0.380
2.1	0.324	-0.265	0.533	-0.365
1.8	0.339	-0.120	0.485	-0.217
1.5	0.309	-0.073	0.440	-0.171
1.2	0.235	-0.071	0.333	-0.161
0.9	0.185	-0.087	0.307	-0.186
0.6	0.143	-0.120	0.224	-0.212
0.3	0.139	-0.117	0.206	-0.169

ακρομόλιο V_x (m/s)					
z (m)	V_x max, μέσο	V_x min, μέσο	V_x max, max	V_x max, max	V_x min, min
0.2	0.170	-0.101		0.202	-0.118
0.18	0.118	-0.074		0.146	-0.110
0.16	0.089	-0.115		0.111	-0.142
0.14	0.070	-0.112		0.088	-0.134
0.12	0.066	-0.077		0.087	-0.091
0.1	0.069	-0.052		0.100	-0.065
0.08	0.077	-0.028		0.105	-0.044
0.06	0.076	-0.017		0.099	-0.037
0.04	0.072	-0.014		0.088	-0.030
0.02	0.081	-0.009		0.115	-0.028

Αναγωγή κατ' αναλογία Froude					
z (m)	V_x max, μέσο	V_x min, μέσο		V_x max, max	V_x min, min
3	0.660	-0.392		0.783	-0.455
2.7	0.459	-0.286		0.564	-0.428
2.4	0.345	-0.445		0.429	-0.551
2.1	0.271	-0.436		0.342	-0.519
1.8	0.255	-0.297		0.335	-0.354
1.5	0.267	-0.202		0.386	-0.252
1.2	0.299	-0.107		0.408	-0.172
0.9	0.295	-0.067		0.385	-0.144
0.6	0.277	-0.053		0.341	-0.117
0.3	0.314	-0.034		0.445	-0.109

Πιν. Β2. Τροχιακές ταχυτήτες κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, V_z , Σενάριο 1.

κεντρική διατομή V_z (m/s)				
z (m)	V_z max, average	V_z min, average	V_z max, max	V_z min, min
0.20	0.085	-0.038	0.107	-0.061
0.18	0.072	-0.037	0.096	-0.091
0.16	0.068	-0.038	0.082	-0.072
0.14	0.040	-0.037	0.063	-0.065
0.12	0.033	-0.048	0.059	-0.085
0.10	0.022	-0.053	0.052	-0.077
0.08	0.017	-0.044	0.041	-0.075
0.06	0.014	-0.033	0.035	-0.065
0.04	0.009	-0.021	0.027	-0.055
0.02	0.006	-0.013	0.020	-0.032
Αναγωγή κατ' αναλογία Froude				
z (m)	V_z max, average	V_z min, average	V_z max, max	V_z min, min
3	0.330	-0.146	0.416	-0.237
2.7	0.277	-0.143	0.371	-0.353
2.4	0.262	-0.147	0.319	-0.277
2.1	0.156	-0.145	0.245	-0.252
1.8	0.129	-0.184	0.228	-0.327
1.5	0.084	-0.206	0.200	-0.297
1.2	0.065	-0.172	0.159	-0.291
0.9	0.053	-0.128	0.134	-0.253
0.6	0.036	-0.082	0.104	-0.212
0.3	0.025	-0.049	0.077	-0.124

ακρομόλιο Vz (m/s)				
z (m)	V_z max, average	V_z min, average	V_z max, max	V_z min, min
0.2	0.075	-0.062	0.094	-0.087
0.18	0.057	-0.071	0.084	-0.094
0.16	0.054	-0.030	0.076	-0.055
0.14	0.034	-0.026	0.057	-0.048
0.12	0.040	-0.030	0.055	-0.043
0.1	0.043	-0.028	0.059	-0.048
0.08	0.025	-0.049	0.043	-0.077
0.06	0.016	-0.042	0.038	-0.069
0.04	0.008	-0.036	0.025	-0.061
0.02	0.005	-0.028	0.027	-0.055

Αναγωγή κατ' αναλογία Froude				
z (m)	V_z max, average	V_z min, average	V_z max, max	V_z min, min
3	0.292	-0.240	0.363	-0.338
2.7	0.221	-0.276	0.326	-0.365
2.4	0.209	-0.115	0.294	-0.211
2.1	0.131	-0.101	0.221	-0.186
1.8	0.156	-0.117	0.211	-0.168
1.5	0.168	-0.107	0.229	-0.186
1.2	0.097	-0.189	0.166	-0.297
0.9	0.061	-0.163	0.148	-0.266
0.6	0.030	-0.140	0.097	-0.236
0.3	0.019	-0.107	0.104	-0.213

Πιν. Β3. Τροχιακές ταχυτήτες κατά την εγκάρσια διεύθυνση, V_y , Σενάριο 1.

ακρομόλιο V_y (m/s)					
z (m)	V_y max, μέσο	V_y min, μέσο	V_y max, max	V_y max, max	V_y min, min
0.2	0.028	-0.033		0.049	-0.062
0.18	0.020	-0.038		0.042	-0.062
0.16	0.027	-0.033		0.052	-0.058
0.14	0.032	-0.013		0.046	-0.028
0.12	0.021	-0.021		0.037	-0.039
0.1	0.017	-0.020		0.033	-0.046
0.08	0.008	-0.028		0.034	-0.048
0.06	0.009	-0.024		0.031	-0.045
0.04	0.009	-0.020		0.029	-0.038
0.02	0.006	-0.024		0.027	-0.043
Αναγωγή κατ' αναλογία Froude					
z (m)	V_x max, μέσο	V_x min, μέσο		V_x max, max	V_x min, min
3	0.108	-0.128		0.189	-0.240
2.7	0.077	-0.146		0.164	-0.239
2.4	0.105	-0.129		0.202	-0.225
2.1	0.124	-0.049		0.180	-0.108
1.8	0.080	-0.080		0.142	-0.149
1.5	0.064	-0.079		0.127	-0.180
1.2	0.031	-0.108		0.132	-0.186
0.9	0.034	-0.093		0.118	-0.176
0.6	0.033	-0.077		0.113	-0.146
0.3	0.023	-0.092		0.103	-0.167

Πιν. Β4. Τροχιακές ταχυτήτες κατά την οριζόντια διεύθυνση, V_x , Σενάριο 2.

κεντρική διατομή V_x (m/s)				
z (m)	V_x max, μέσο	V_x min, μέσο	V_x max, max	V_x min, min
0.20	0.109	-0.094	0.175	-0.127
0.18	0.093	-0.073	0.120	-0.108
0.16	0.085	-0.093	0.127	-0.118
0.14	0.074	-0.092	0.102	-0.112
0.12	0.062	-0.064	0.093	-0.098
0.10	0.063	-0.053	0.101	-0.084
0.08	0.053	-0.049	0.073	-0.076
0.06	0.053	-0.042	0.073	-0.061
0.04	0.055	-0.035	0.076	-0.064
0.02	0.051	-0.037	0.073	-0.056

ακρομόλιο V_x (m/s)					
z (m)	V_x max, μέσο	V_x min, μέσο	V_x max, max	V_x max, max	V_x min, min
0.2	0.121	-0.053		0.163	-0.089
0.18	0.110	-0.041		0.137	-0.063
0.16	0.136	-0.072		0.165	-0.106
0.14	0.080	-0.102		0.113	-0.116
0.12	0.073	-0.076		0.111	-0.099
0.1	0.073	-0.060		0.102	-0.074
0.08	0.069	-0.052		0.092	-0.069
0.06	0.069	-0.042		0.090	-0.058
0.04	0.067	-0.044		0.092	-0.057
0.02	0.081	-0.032		0.128	-0.061

Πιν. B5. Τροχιακές ταχυότητες κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, V_z , Σενάριο 2.

κεντρική διατομή V_z (m/s)				
z (m)	V_z max, average	V_z min, average	V_z max, max	V_z min, min
0.20	0.049	-0.092	0.093	-0.155
0.18	0.045	-0.110	0.077	-0.149
0.16	0.047	-0.032	0.072	-0.076
0.14	0.051	-0.033	0.069	-0.082
0.12	0.041	-0.043	0.062	-0.091
0.10	0.033	-0.046	0.065	-0.096
0.08	0.036	-0.022	0.055	-0.070
0.06	0.029	-0.014	0.043	-0.045
0.04	0.018	-0.013	0.035	-0.043
0.02	0.009	-0.019	0.029	-0.046

ακρομώλιο V_z (m/s)				
z (m)	V_z max, average	V_z min, average	V_z max, max	V_z min, min
0.2	0.045	-0.071	0.070	-0.090
0.18	0.068	-0.080	0.091	-0.103
0.16	0.040	-0.093	0.068	-0.124
0.14	0.037	-0.029	0.055	-0.060
0.12	0.026	-0.032	0.045	-0.077
0.1	0.022	-0.032	0.042	-0.068
0.08	0.017	-0.033	0.036	-0.057
0.06	0.014	-0.027	0.033	-0.051
0.04	0.012	-0.020	0.033	-0.040
0.02	0.012	-0.034	0.032	-0.060

Πιν. Β6. Τροχιακές ταχυότητες κατά την εγκάρσια διεύθυνση, V_y , Σενάριο 2.

ακρομόλιο V_y (m/s)					
z (m)	V_y max, μέσο	V_y min, μέσο	V_y max, max	V_y max, max	V_y min, min
0.2	0.029	-0.034		0.060	-0.053
0.18	0.023	-0.036		0.050	-0.049
0.16	0.046	-0.023		0.071	-0.042
0.14	0.027	-0.022		0.055	-0.036
0.12	0.030	-0.018		0.077	-0.043
0.1	0.020	-0.012		0.050	-0.031
0.08	0.011	-0.019		0.039	-0.039
0.06	0.007	-0.016		0.031	-0.029
0.04	0.014	-0.011		0.030	-0.035
0.02	0.012	-0.033		0.039	-0.059

Πιν. Β7. Τροχιακές ταχυτήτες κατά την οριζόντια διεύθυνση, V_x , Σενάριο 3.

κεντρική διατομή V_x (m/s)				
z (m)	V_x max, μέσο	V_x min, μέσο	V_x max, max	V_x min, min
0.20	0.160	-0.103	0.220	-0.144
0.18	0.140	-0.084	0.198	-0.128
0.16	0.151	-0.136	0.198	-0.167
0.14	0.111	-0.100	0.164	-0.137
0.12	0.095	-0.069	0.152	-0.146
0.10	0.091	-0.063	0.141	-0.114
0.08	0.078	-0.057	0.141	-0.085
0.06	0.068	-0.049	0.116	-0.086
0.04	0.064	-0.048	0.103	-0.088
0.02	0.054	-0.050	0.100	-0.089

ακρομόλιο V_x (m/s)					
z (m)	V_x max, μέσο	V_x min, μέσο	V_x max, max	V_x max, max	V_x min, min
0.2	0.261	-0.077		0.309	-0.145
0.18	0.144	-0.165		0.187	-0.220
0.16	0.161	-0.173		0.225	-0.222
0.14	0.123	-0.134		0.177	-0.156
0.12	0.109	-0.119		0.158	-0.195
0.1	0.097	-0.106		0.173	-0.155
0.08	0.085	-0.089		0.128	-0.149
0.06	0.085	-0.058		0.125	-0.093
0.04	0.082	-0.055		0.112	-0.087
0.02	0.086	-0.043		0.127	-0.076

Πιν. Β8. Τροχιακές ταχυτήτες κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, V_z , Σενάριο 3.

κεντρική διατομή V_z (m/s)				
z (m)	V_z max, average	V_z min, average	V_z max, max	V_z min, min
0.20	0.066	-0.130	0.121	-0.184
0.18	0.127	-0.157	0.158	-0.221
0.16	0.059	-0.041	0.089	-0.116
0.14	0.053	-0.039	0.094	-0.077
0.12	0.054	-0.048	0.095	-0.158
0.10	0.048	-0.051	0.087	-0.149
0.08	0.050	-0.044	0.085	-0.130
0.06	0.036	-0.023	0.068	-0.072
0.04	0.023	-0.024	0.048	-0.066
0.02	0.010	-0.021	0.039	-0.076

ακρομόλιο V_z (m/s)				
z (m)	V_z max, average	V_z min, average	V_z max, max	V_z min, min
0.2	0.099	-0.108	0.145	-0.188
0.18	0.105	-0.157	0.145	-0.215
0.16	0.161	-0.173	0.225	-0.222
0.14	0.054	-0.025	0.079	-0.097
0.12	0.053	-0.058	0.097	-0.116
0.1	0.044	-0.078	0.085	-0.160
0.08	0.035	-0.071	0.083	-0.135
0.06	0.036	-0.050	0.077	-0.118
0.04	0.024	-0.036	0.062	-0.074
0.02	0.018	-0.031	0.053	-0.078

Πιν. Β9. Τροχιακές ταχυτήτες κατά την εγκάρσια διεύθυνση, V_y , Σενάριο 3.

ακρομόλιο V_y(m/s)					
z (m)	V_y max, μέσο	V_y min, μέσο	V_y max, max	V_y max, max	V_y min, min
0.2	0.036	-0.072		0.076	-0.109
0.18	0.055	-0.055		0.143	-0.092
0.16	0.107	-0.019		0.162	-0.053
0.14	0.026	-0.033		0.053	-0.095
0.12	0.027	-0.057		0.109	-0.137
0.1	0.017	-0.061		0.055	-0.153
0.08	0.034	-0.038		0.082	-0.086
0.06	0.018	-0.032		0.053	-0.094
0.04	0.019	-0.024		0.079	-0.055
0.02	0.010	-0.038		0.036	-0.065

Πιν. Β10. Τροχιακές ταχυτήτες κατά την οριζόντια διεύθυνση, V_x , Σενάριο 4.

κεντρική διατομή V_x (m/s)				
z (m)	V_x max, μέσο	V_x min, μέσο	V_x max, max	V_x min, min
0.20	0.162	-0.172	0.262	-0.213
0.18	0.134	-0.105	0.183	-0.147
0.16	0.129	-0.110	0.165	-0.142
0.14	0.108	-0.160	0.143	-0.197
0.12	0.115	-0.149	0.156	-0.192
0.10	0.067	-0.136	0.106	-0.169
0.08	0.063	-0.094	0.109	-0.176
0.06	0.058	-0.077	0.105	-0.113
0.04	0.061	-0.067	0.093	-0.094
0.02	0.058	-0.063	0.079	-0.092

ακρομόλιο V_x (m/s)					
z (m)	V_x max, μέσο	V_x min, μέσο	V_x max, max	V_x max, max	V_x min, min
0.2	0.234	-0.069		0.280	-0.111
0.18	0.142	-0.157		0.182	-0.180
0.16	0.167	-0.117		0.216	-0.163
0.14	0.147	-0.121		0.181	-0.168
0.12	0.110	-0.132		0.175	-0.179
0.1	0.121	-0.118		0.178	-0.192
0.08	0.101	-0.091		0.152	-0.152
0.06	0.096	-0.084		0.136	-0.134
0.04	0.105	-0.083		0.136	-0.120
0.02	0.130	-0.065		0.198	-0.115

Πιν. B11. Τροχιακές ταχυτήτες κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, V_z , Σενάριο 4.

κεντρική διατομή V_z (m/s)				
z (m)	V_z max, average	V_z min, average	V_z max, max	V_z min, min
0.20	0.128	-0.213	0.183	-0.265
0.18	0.121	-0.167	0.169	-0.217
0.16	0.055	-0.070	0.090	-0.146
0.14	0.033	-0.067	0.075	-0.110
0.12	0.039	-0.080	0.095	-0.127
0.10	0.061	-0.061	0.108	-0.132
0.08	0.051	-0.041	0.087	-0.084
0.06	0.034	-0.044	0.066	-0.120
0.04	0.019	-0.030	0.054	-0.062
0.02	0.014	-0.029	0.041	-0.071

Ακρομόλιο V_z (m/s)				
z (m)	V_z max, average	V_z min, average	V_z max, max	V_z min, min
0.2	0.094	-0.155	0.196	-0.204
0.18	0.099	-0.146	0.138	-0.223
0.16	0.076	-0.188	0.214	-0.241
0.14	0.032	-0.082	0.037	-0.099
0.12	0.026	-0.074	0.068	-0.138
0.1	0.029	-0.155	0.110	-0.249
0.08	0.032	-0.102	0.068	-0.196
0.06	0.027	-0.079	0.064	-0.168
0.04	0.022	-0.050	0.057	-0.113
0.02	0.023	-0.053	0.057	-0.092

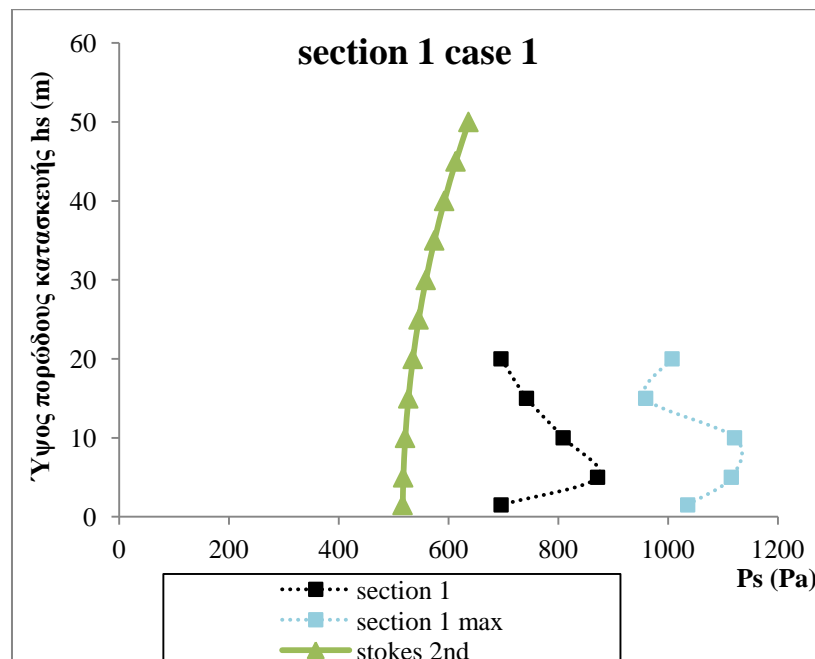
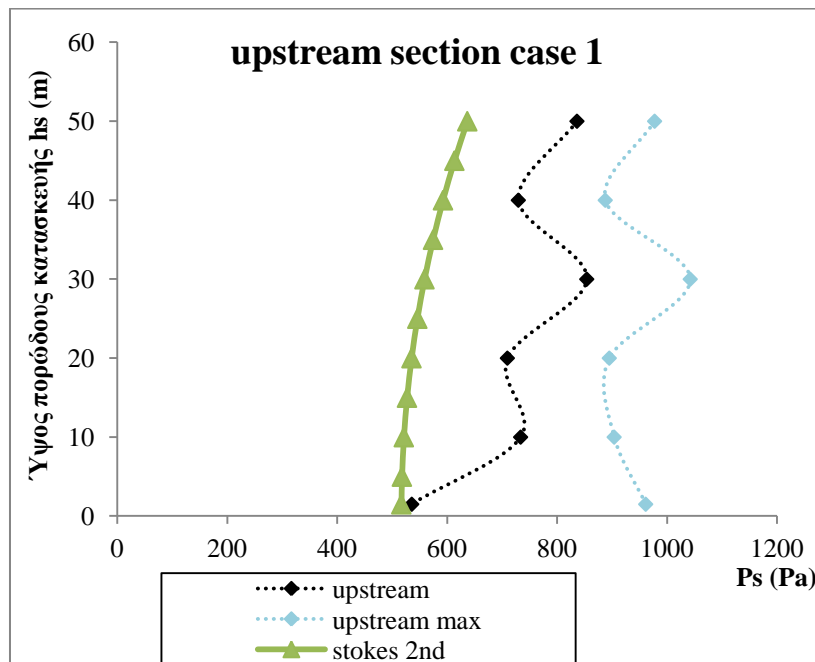
Πιν. Β12. Τροχιακές ταχυτήτες κατά την εγκάρσια διεύθυνση, V_y , Σενάριο 4.

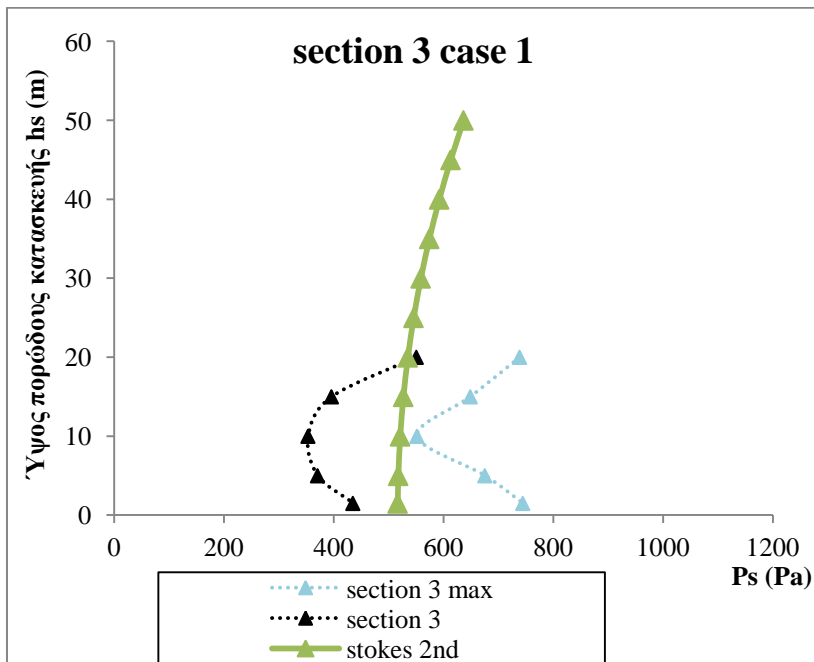
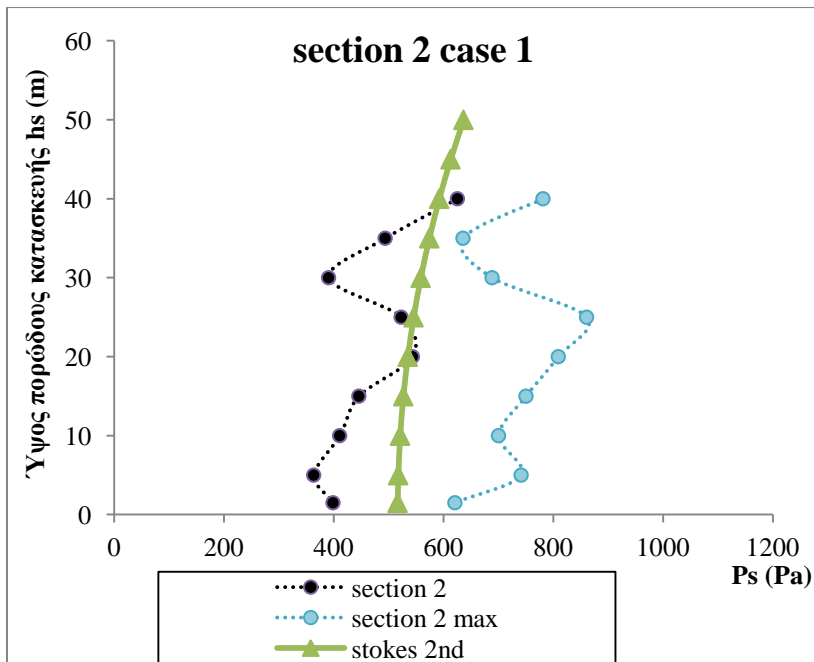
ακρομόλιο V_y (m/s)					
z (m)	V_y max, μέσο	V_y min, μέσο	V_y max, max	V_y max, max	V_y min, min
0.2	0.037	-0.060		0.066	-0.099
0.18	0.062	-0.086		0.131	-0.139
0.16	0.031	-0.088		0.063	-0.118
0.14	0.066	-0.029		0.122	-0.059
0.12	0.063	-0.074		0.111	-0.168
0.1	0.060	-0.093		0.125	-0.146
0.08	0.024	-0.072		0.057	-0.151
0.06	0.011	-0.060		0.045	-0.125
0.04	0.020	-0.037		0.054	-0.074
0.02	0.019	-0.045		0.048	-0.077

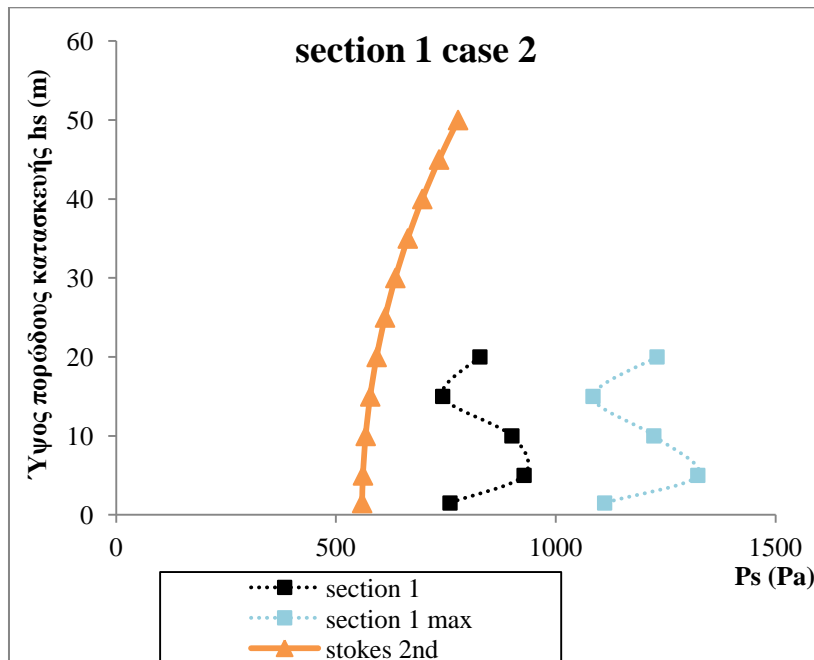
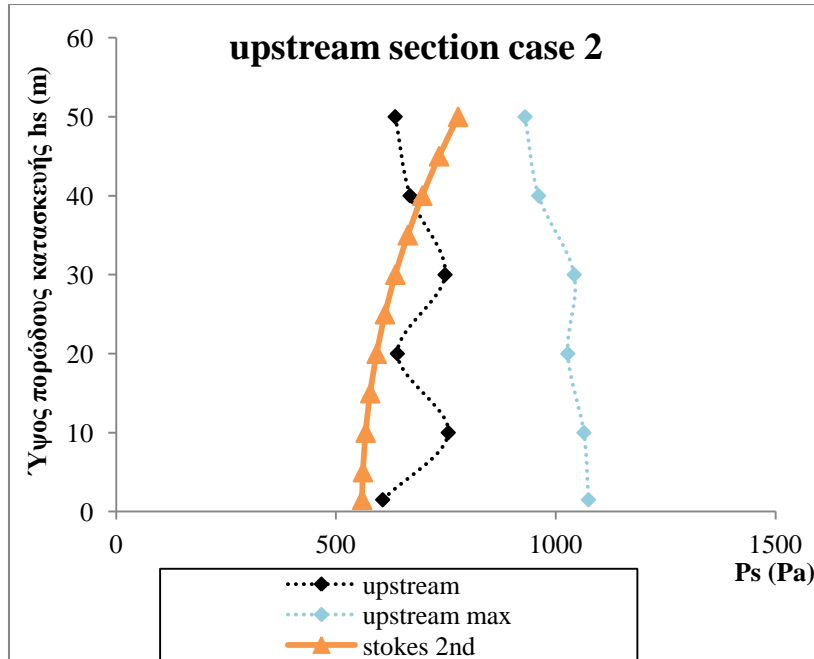
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Σύγκριση μετρήσεων με θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης

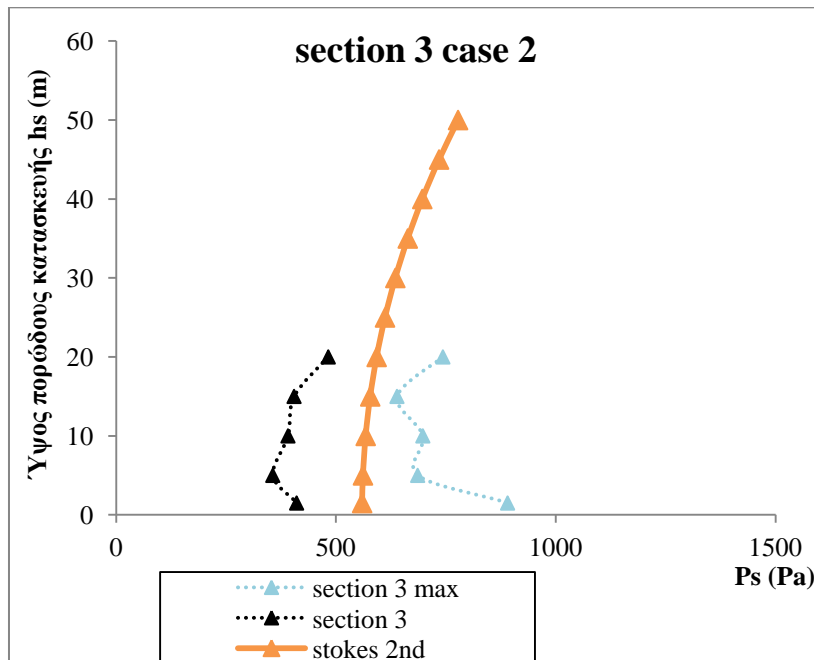
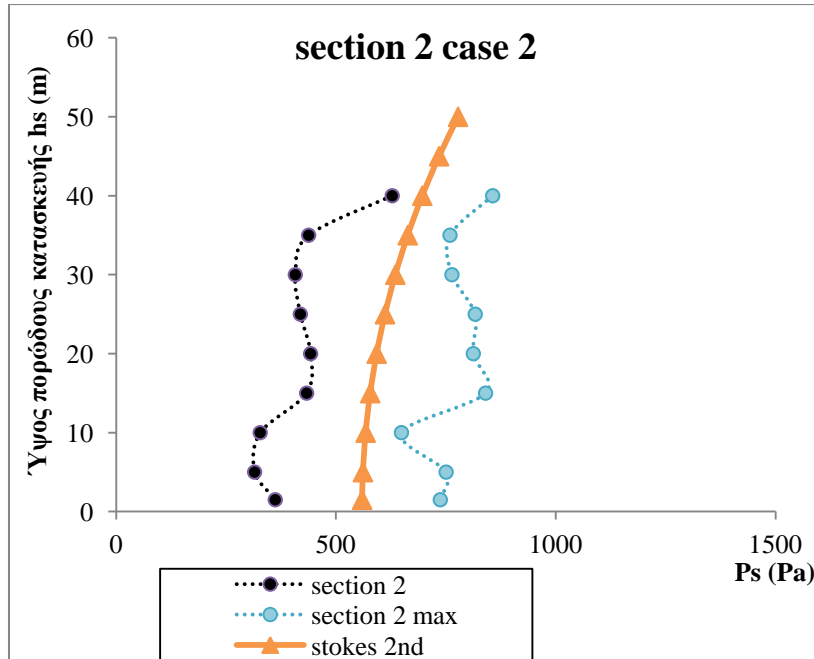
Σε ότι αφορά το ύψος της υδροδυναμικής πίεσης παρατίθενται διαγράμματα στα οποία φαίνεται ποιοτικά ο βαθμός της ικανότητας της θεωρίας Stokes 2^{ης} τάξης να αποτυπώσει την ανάπτυξη της στο εσωτερικό διαπερατού Υ.Κ. (πειραματική διάταξη των Metallinos et al. 2014). Ακολουθούν ενδεικτικά διαγράμματα.

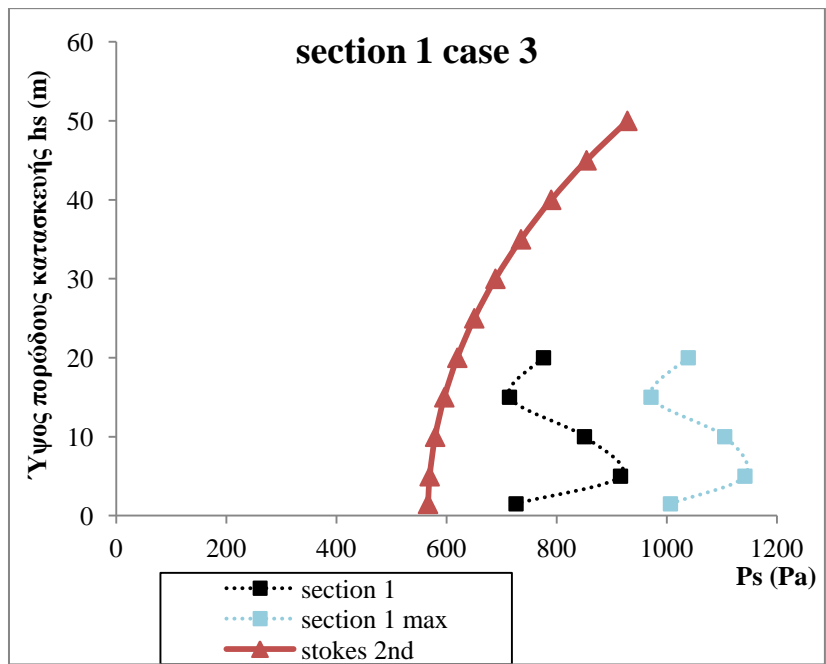
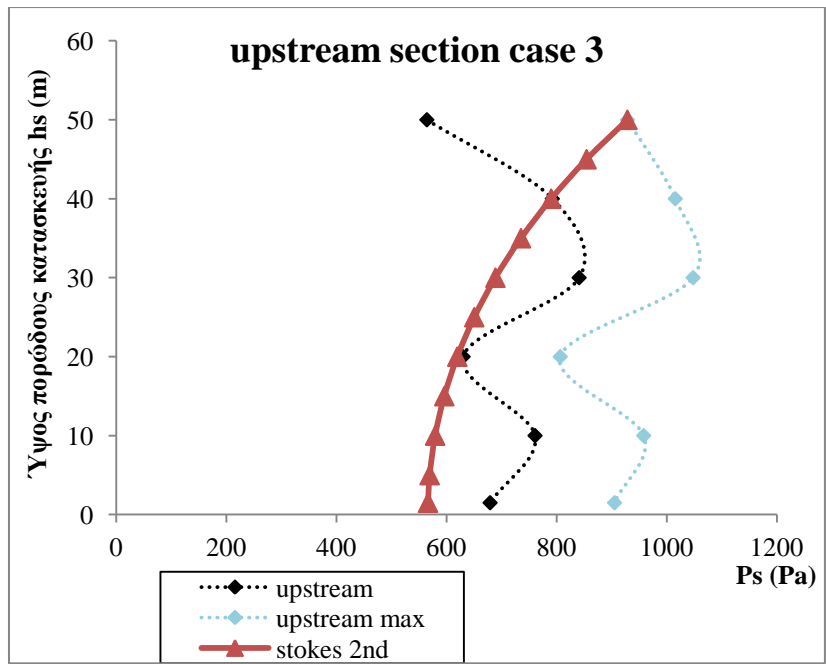
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ Γ1. Σύγκριση μετρήσεων με θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης, ύψος της υδροδυναμικής πίεσης, κυματικά σενάρια 1,2,3,4,5,6,7.

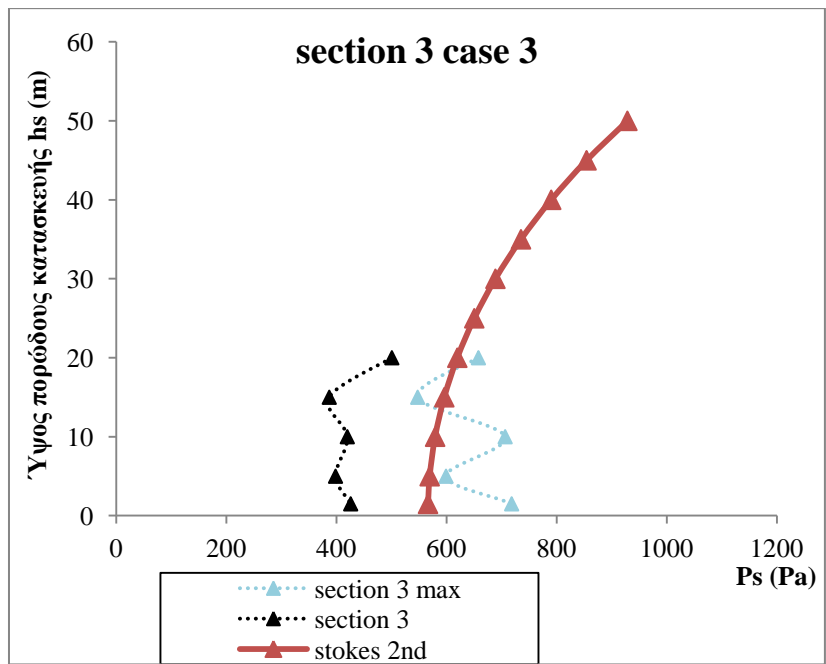
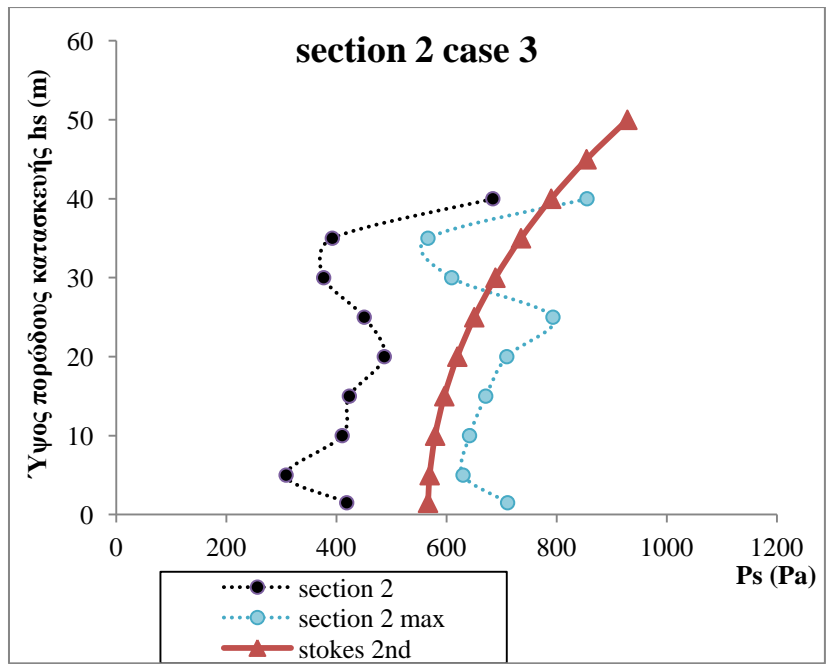


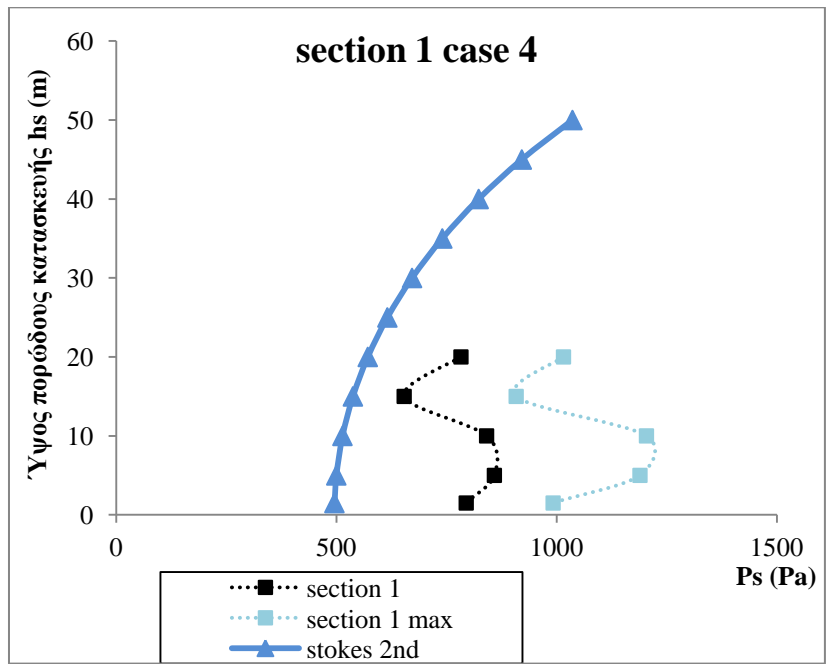
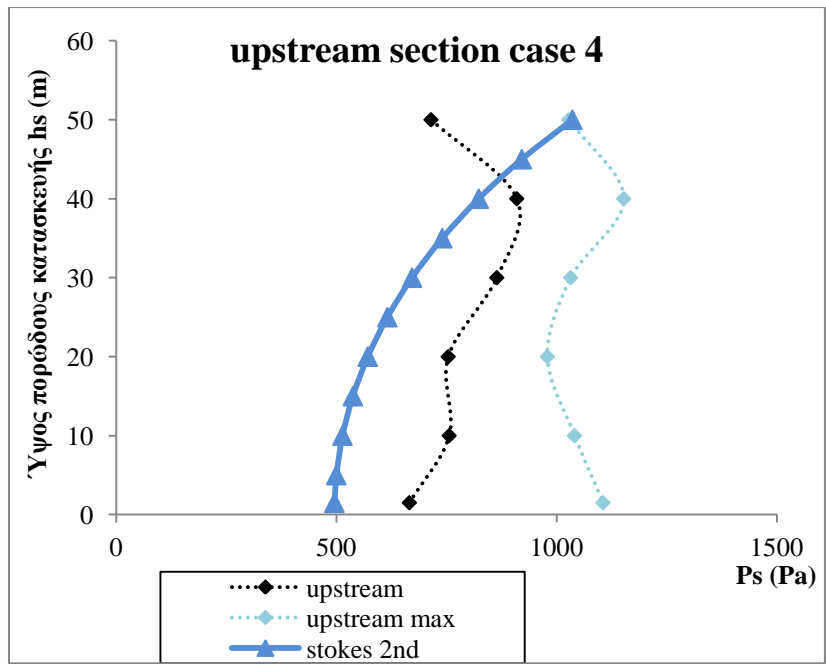


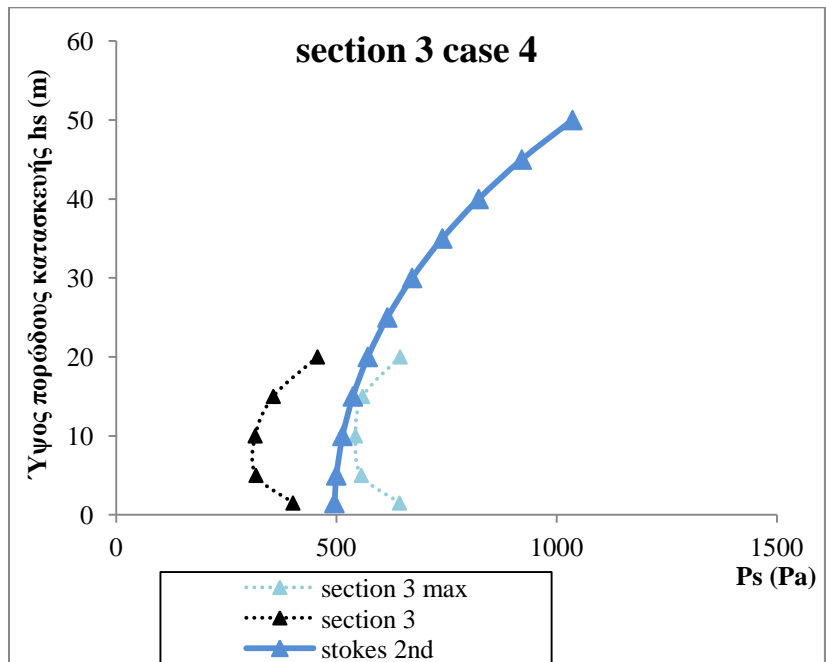
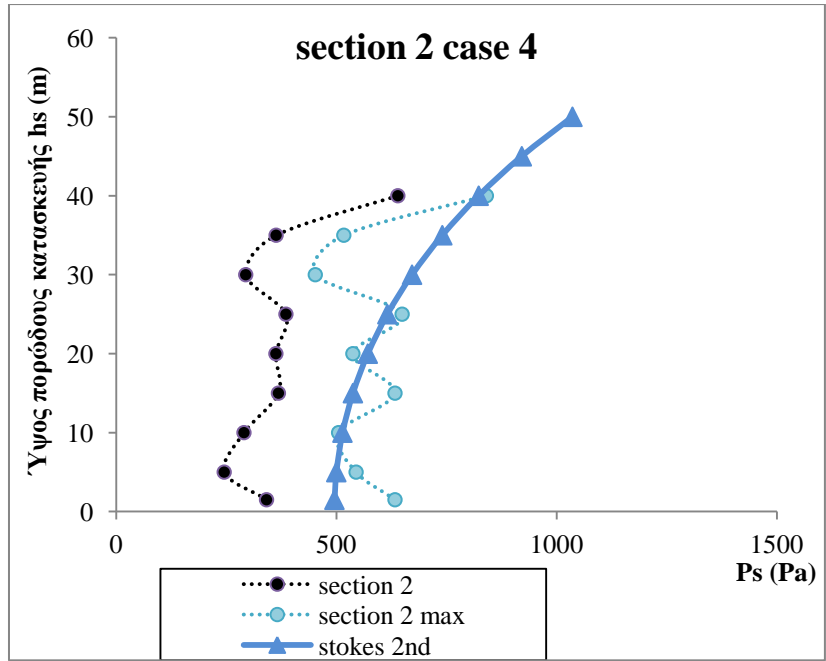


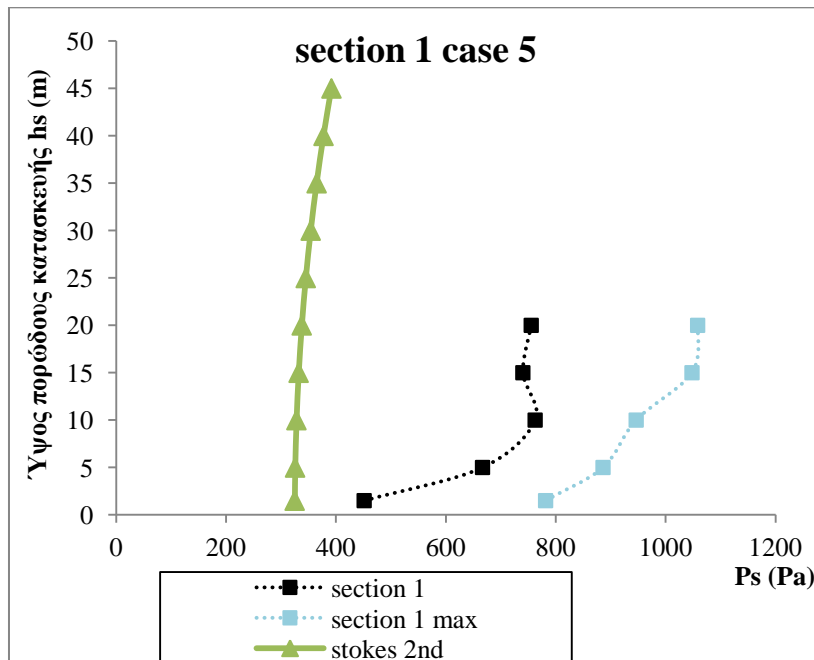
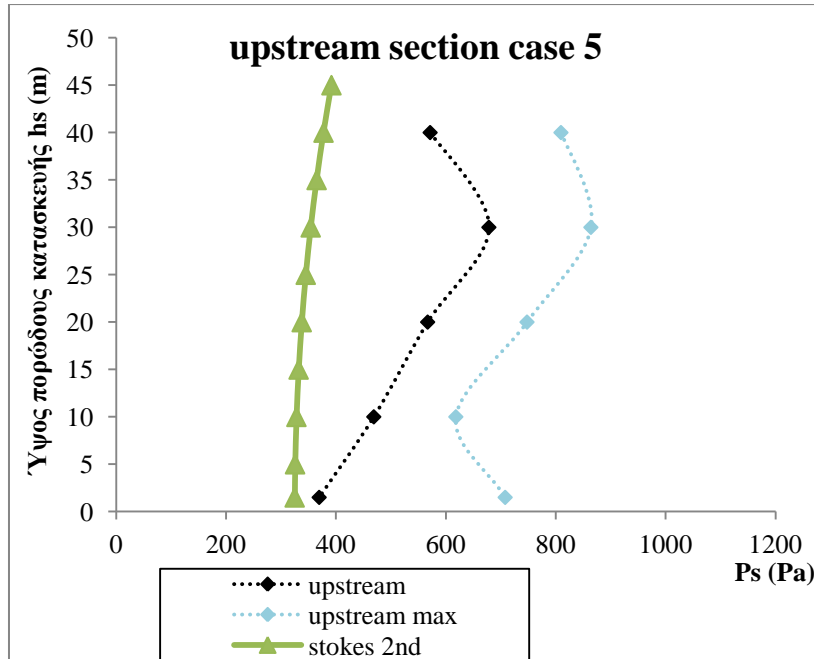


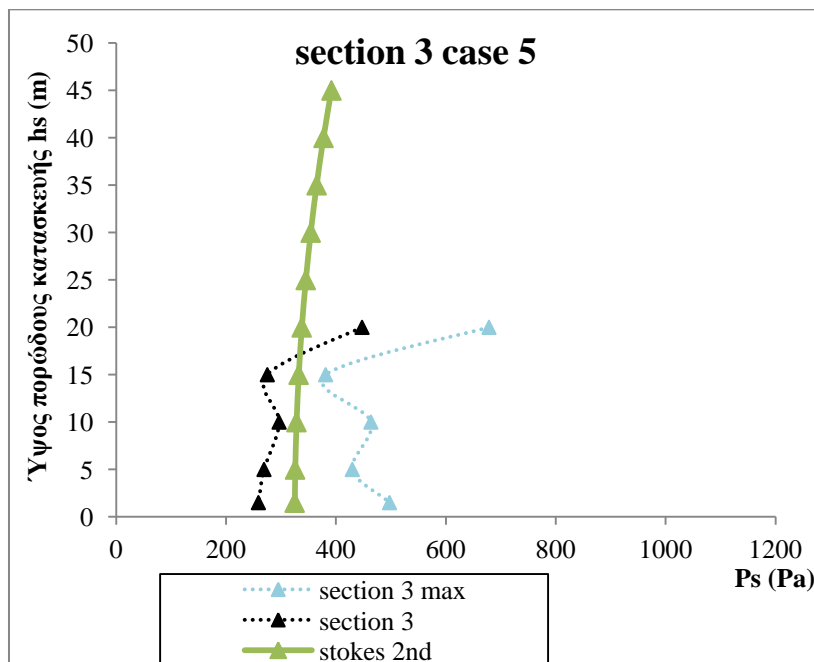
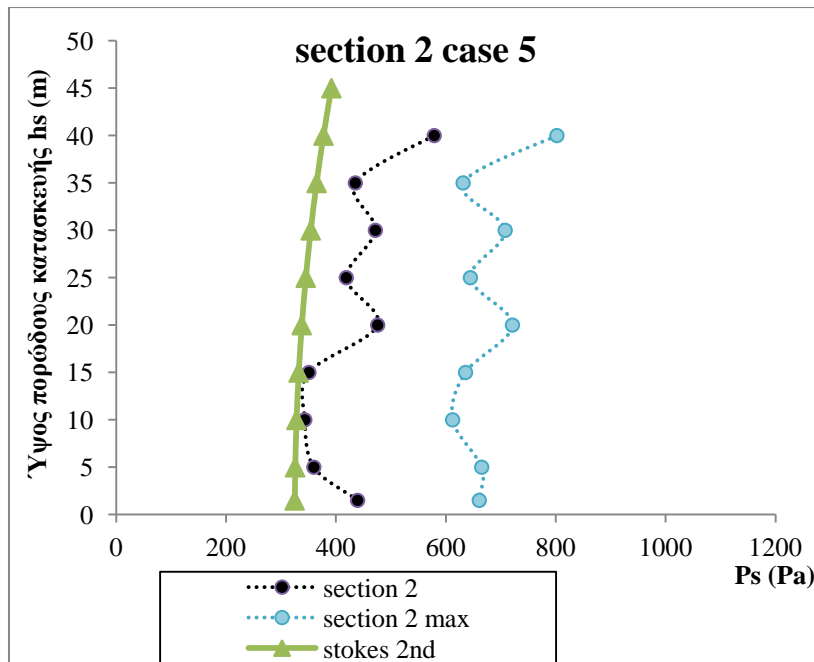


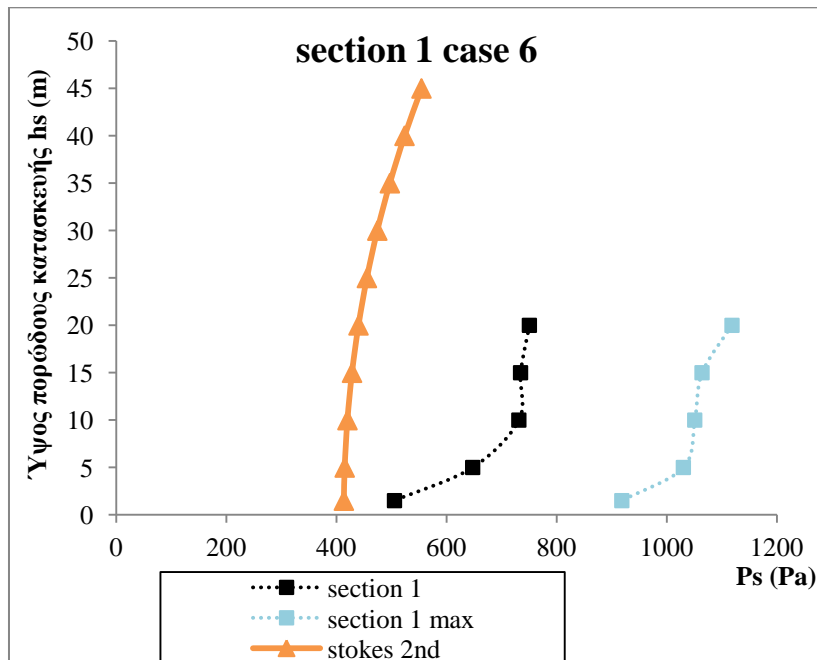
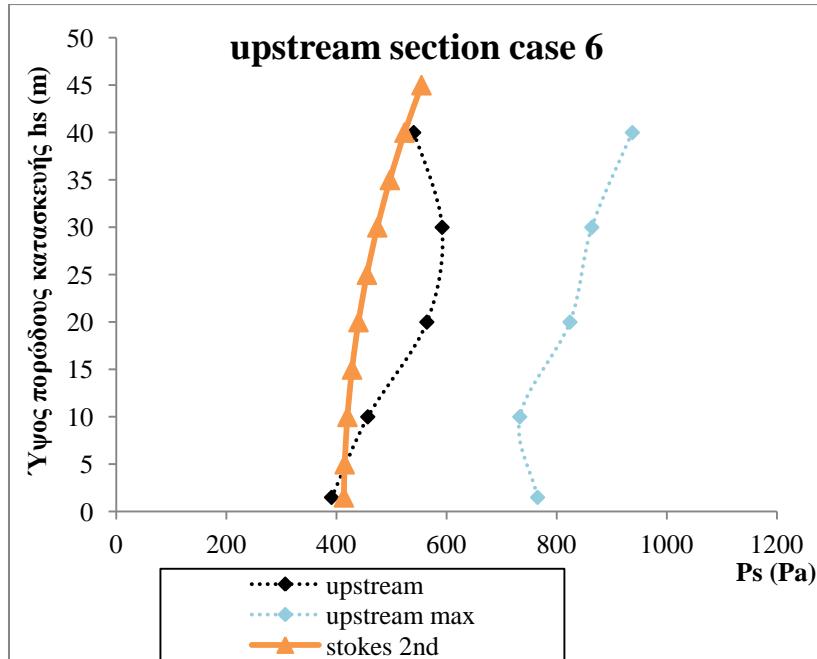


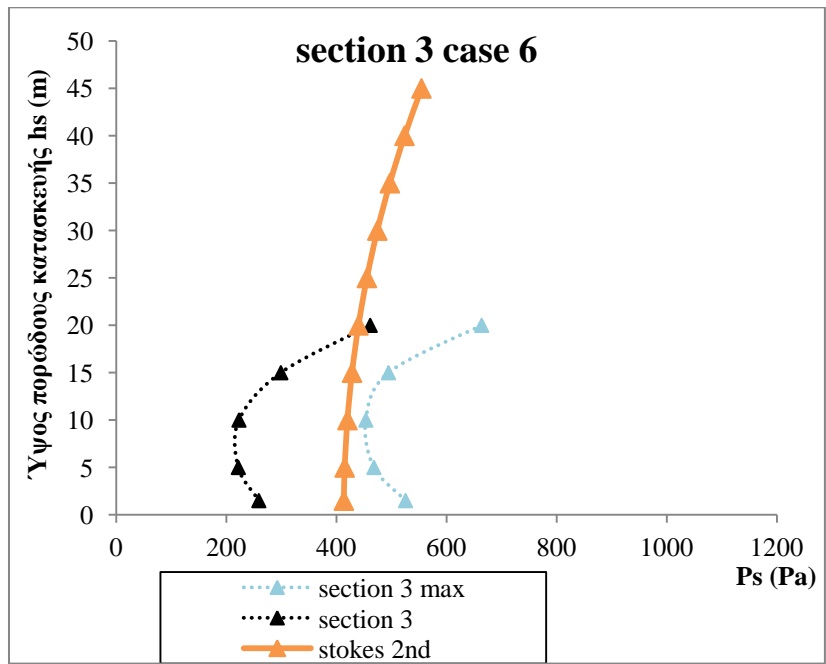
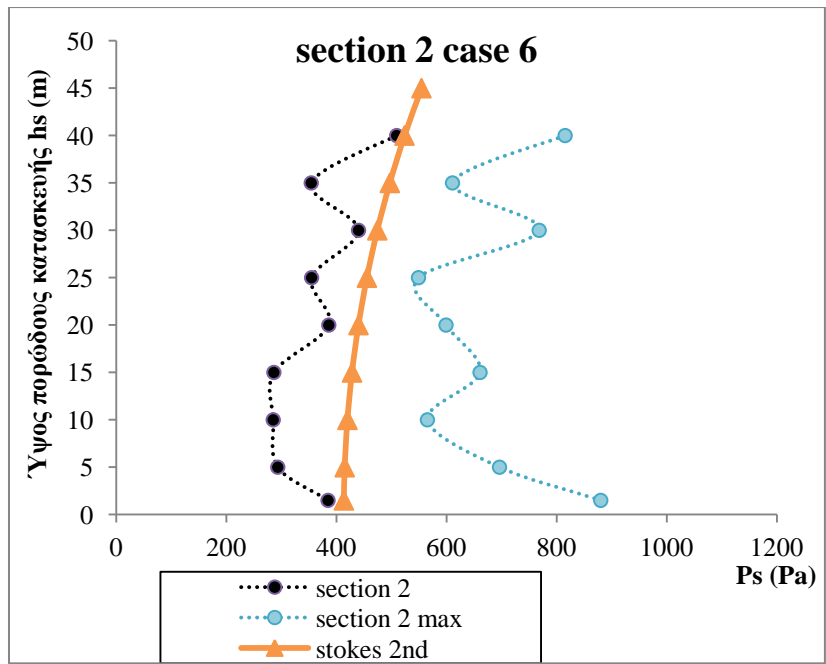


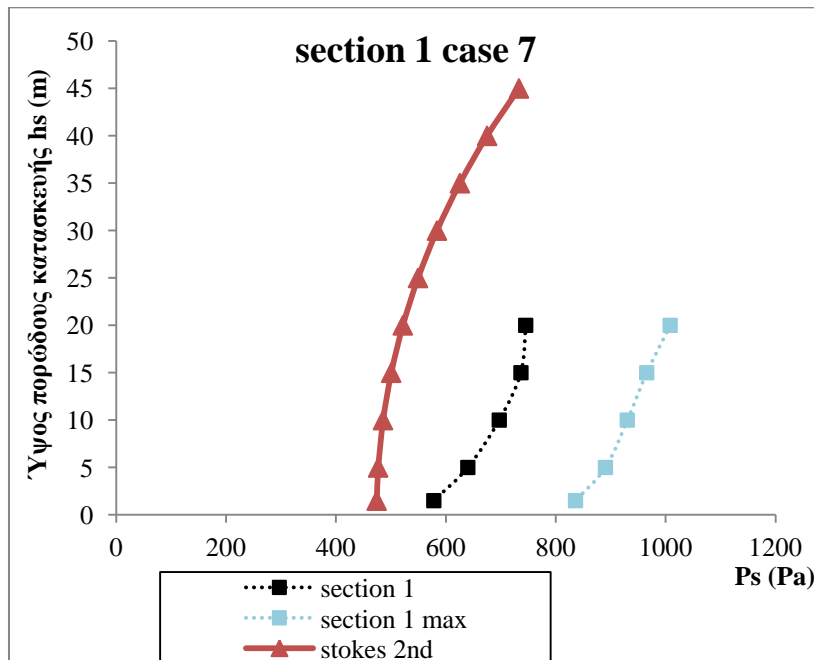
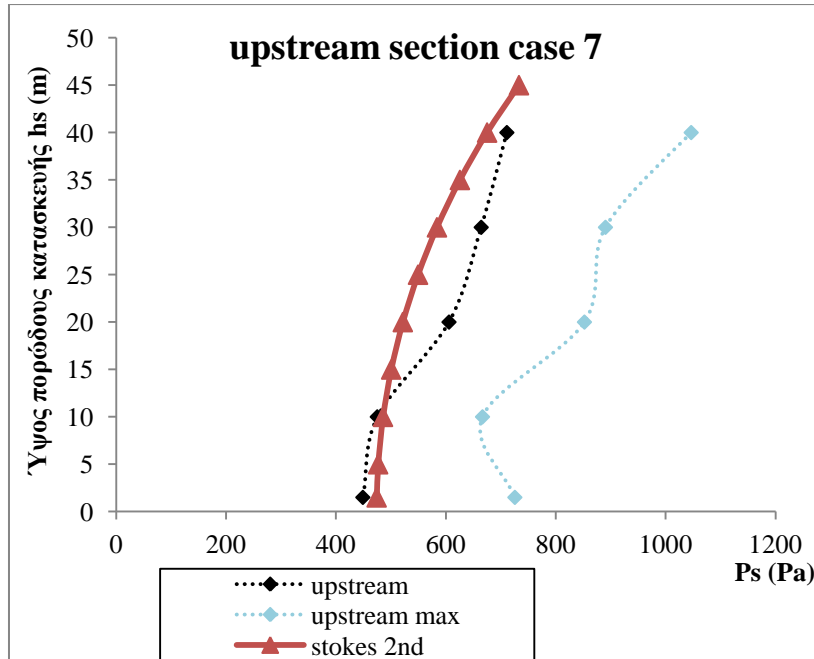


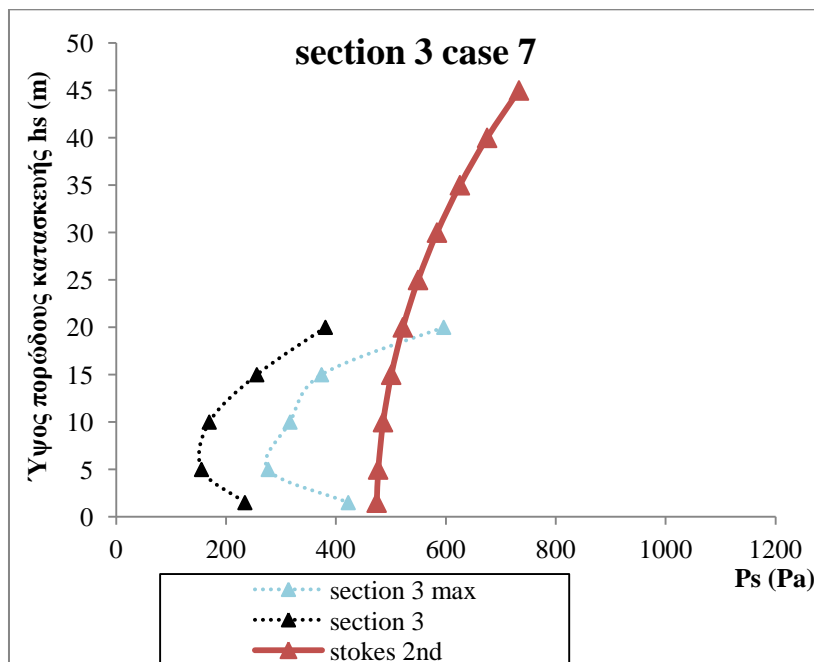
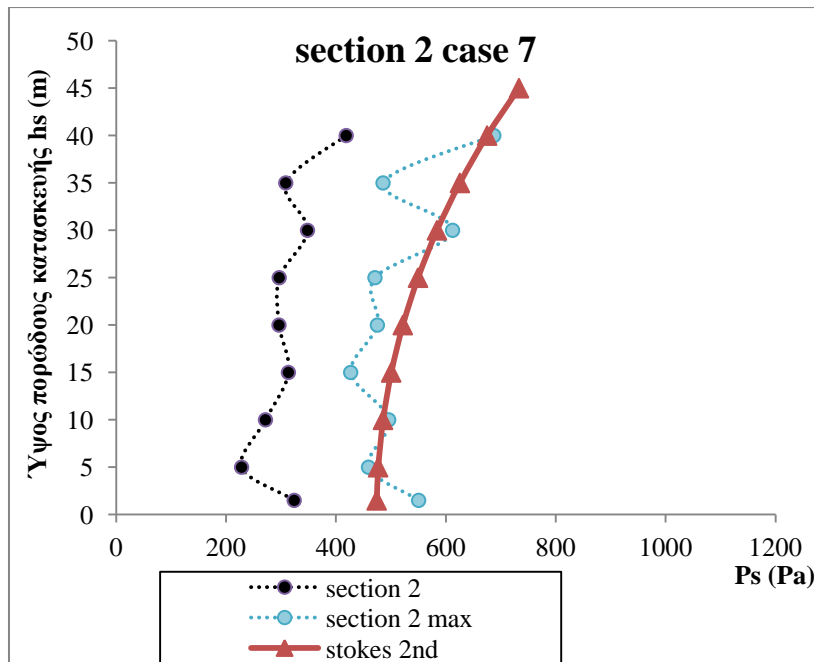






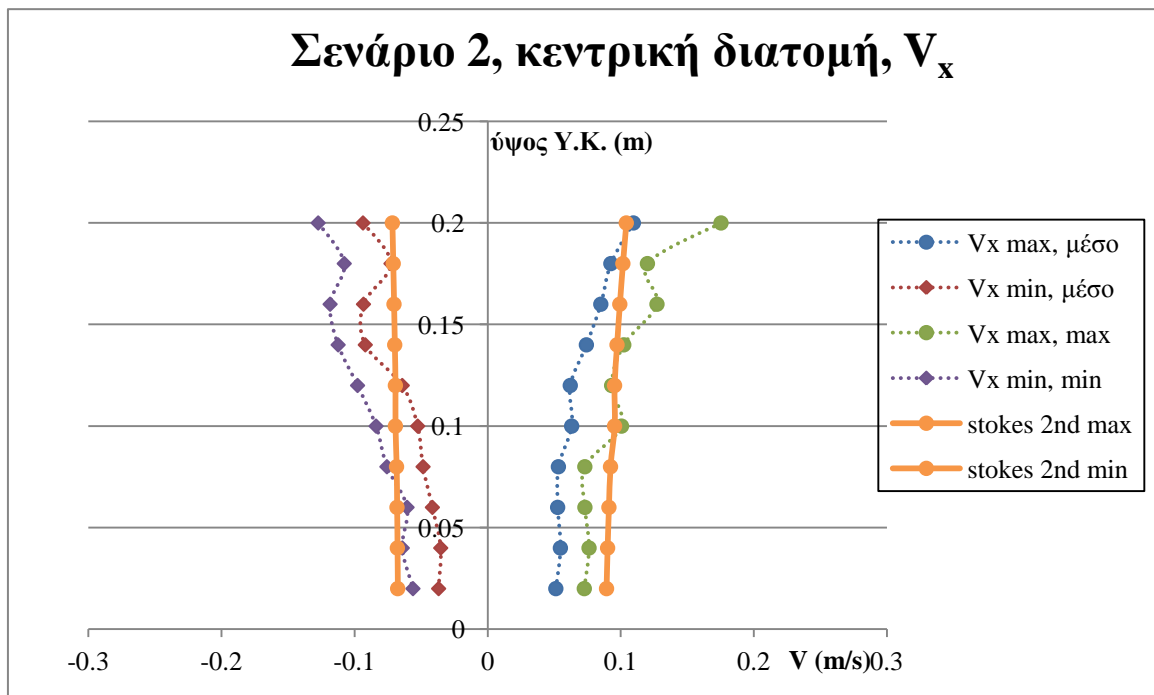
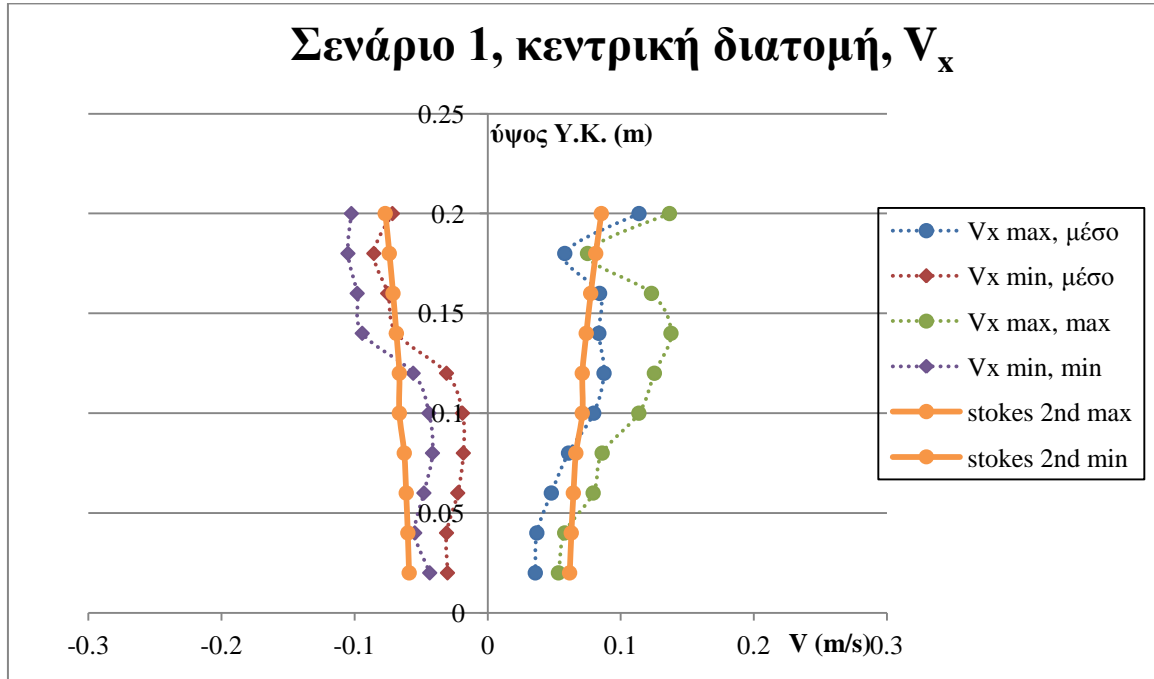




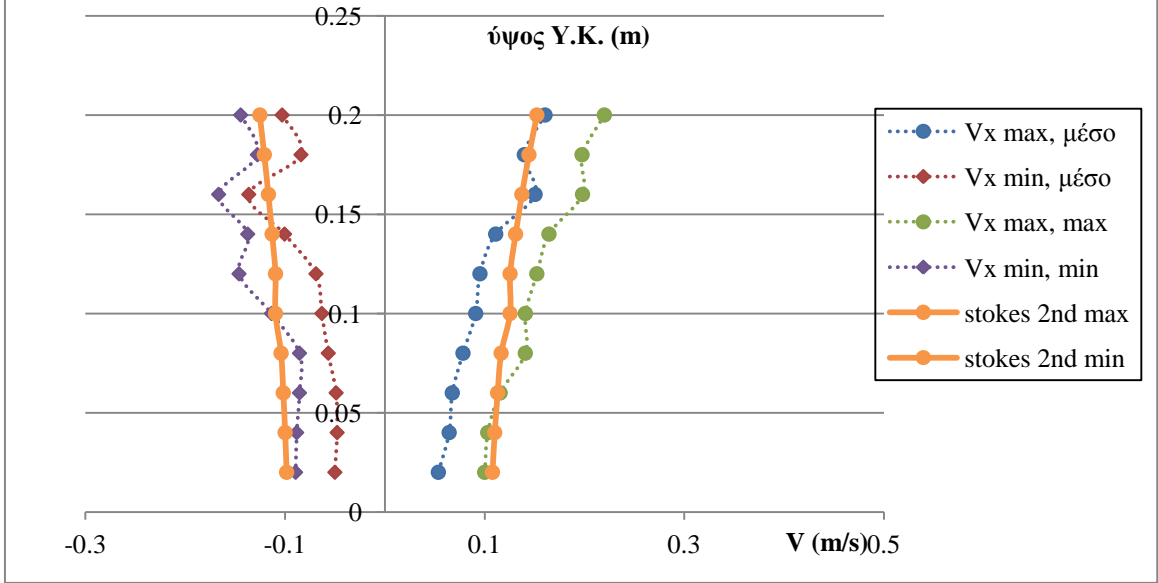


Σε ότι αφορά την τροχιακή ταχύτητα παρατίθενται διαγράμματα στα οποία φαίνεται ποιοτικά ο βαθμός της ικανότητας της θεωρίας Stokes 2^{ης} τάξης να αποτυπώσει την ανάπτυξή της στο εσωτερικό διαπερατού Υ.Κ (πειραματική διάταξη των Metallinos et al. 2016). Ακολουθούν διαγράμματα.

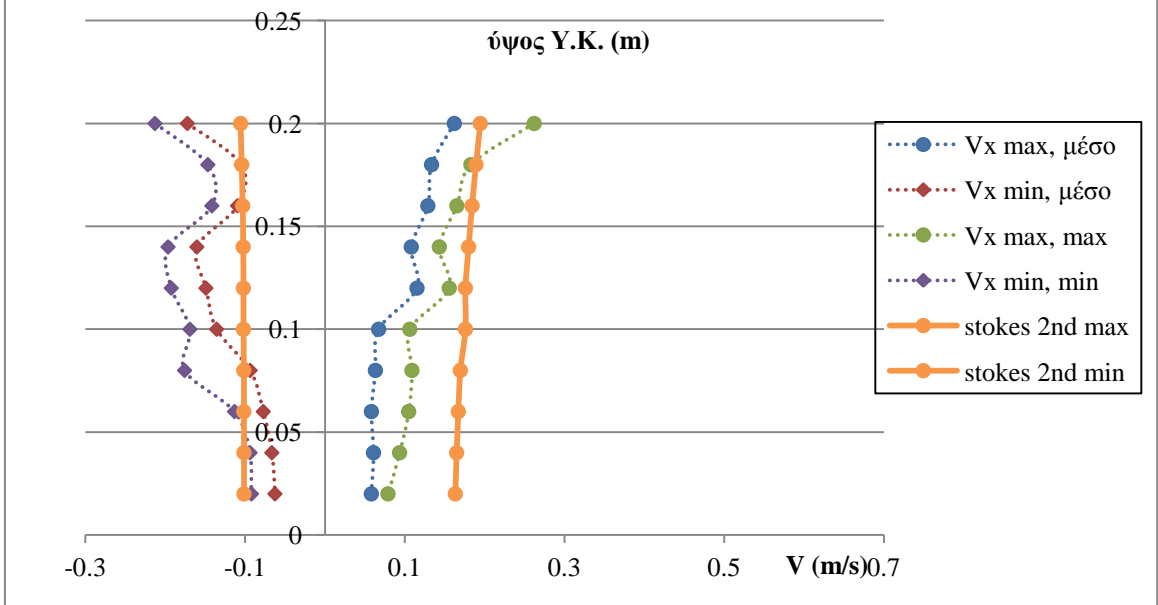
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ Γ2. Σύγκριση μετρήσεων με θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης, τροχιακή ταχύτητα κατά την κύρια διεύθυνση (οριζόντια), κυματικά σενάρια 1,2,3,4.



Σενάριο 3, κεντρική διατομή, V_x



Σενάριο 4, κεντρική διατομή, V_x



9 Βιβλιογραφία

Παρακάτω δίνεται μια καταγραφή των δημοσιεύσεων, συγγραμάτων, εργασιών και βιβλίων, στα οποία βασίστηκε η ανάπτυξη της παρούσας εργασίας, κυρίως της διεθνούς βιβλιογραφίας. Οι αναφορές ταξινομούνται αλφαβητικά..

Aminti, (1987). Prove su modello bidimensionale di protezioni di spiagge con ripascimenti artificiali. Atti IV Colloquio Nazionale AIOM.

Bacchiocchi, F., Airoidi, L. (2003). Distribution and dynamics of epibiota on hard structures for coastal protection. *Estuarine Coastal Shelf Sci.* 56(5-6), 1157-1166.

Burt, J., Feary, D., Cavalcante, G., Bauman, A., Usseglio, P. (2013) Urban breakwaters as reef fish habitat in the Persian Gulf Burt. *Marine Pollution Bulletin* 72, 342-350.

Calabrese, M., Buccino, M., Pasanisi, F. (2008a). Wave breaking macrofeatures on a submerged rubble mound breakwater. *J.Hydro-Environ. Res.*1(3-4), 216-225.

Calabrese, M., Buccino, M., Pasanisi, F., (2008b). 'Wave breaking macrofeatures on a submerged rubble mound breakwater, *Journal of Hydro-environment Research*, 1(3-4), 216-225.

CEM, Coastal Engineering Manual, (2006), <http://chl.erdc.usace.army.mil/cem>

Chan, H.C., Leu, G.M., Lai, C.J. (2007). Velocity and turbulence field around permeable structure: Comparisons between laboratory and numerical experiments. *J. Hydraulic Research.* 45(2), 216-226.

Cheng, J., Wang, P. 2015. Extracting Turbulence under Breaking Conditions in the Surf Zone. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 141 (6), 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000307, 06015003.

Eckman, J.E. and Duggins, D.O. (1993). "Effects of flow speed on growth of Benthic Suspension Feeders". *Biological Bulletin*, 185, 28-41.

Fenton J. D. (1985). A fifth-order Stokes theory for steady waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 111, No. 2, 216.

Fenton, J. D. 1988. The Numerical solution of Steady Water Wave Problem. *Jour. Comp. and Geo.*, 14, 357-368.

Garcia, N., Lara, J.L., Losada, I.J. (2004). 2-D numerical analysis of near-field flow at low-crested permeable breakwaters. *Coastal Engineering*. 51(10), 991-1020.

Goring, G. & Nikora, V. (2002) Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data. *Journal of Hydraulic Engineering*, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429.

Hammond, W. and Griffiths, Z.C.L. (2004). Influence of wave exposure on South African mussel beds and their associated infaunal communities. *Marine Biology*. 144, 547-552.

Heller, V. (2011). Scale effects in physical hydraulic engineering models. *J. Hydraulic Res.* 49(3), 293–306.

Hughes, S.A. (1993). Physical models and laboratory techniques in coastal engineering. *Advanced Series on Ocean Engineering*. World Scientific, Singapore.

Hur, D.S., Lee, W.D., Cho, W.C. (2012). Three-dimensional flow characteristics around permeable submerged breakwaters with open inlet. *Ocean Engineering*. 44(1), 100-116.

Jensen, A. (2002). Artificial reefs of Europe: Perspective and future. *J. Marine Sci.*, 59 (Supp.), 3-13.

Jensen, B. L, Christensen, E.D, Sumer, B.M., Vistisen, M. (2015). Flow and Turbulence at Rubble-Mound Breakwater Armor Layers under Solitary Wave. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 141 (6), 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000306, 04015006.

Johnson, H.K. (2006). Wave modelling in the vicinity of submerged breakwaters. *Coastal Eng.* 53(1), 39-48.

Johnson, H.K., Karambas, Th.V., Avgeris, I., Zanuttigh, B., Gonzales-Marco, D., Caceres, I. (2005). Modelling of waves and currents around submerged breakwaters. *Coastal Eng.* 52(10-11), 949-969. Johnson *et al.* 2005

Jonsson, I.G. (1966). Wave boundary layers and friction factors. *Proceedings of the 10th International Conference on Coastal Engineering*, pp. 127–148.

Kapsalis A. and Memos C. (2008) "Hydrodynamic field inside a permeable submerged breakwater", *4th National Conference of Management and Improvement of Coastal Zone*, Lesvos, Greece.

Kawamata, S. (1998). Effect of wave-induced oscillatory flow on grazing by a subtidal sea urchin *Strongylocentrotus nudus*, *Journal Experimental Marine Biology*, 224, 31-48.

Kontaxi, C., Memos, C.D. (2005). Submerged breakwaters as artificial habitats. Proc. *31st IAHR Congress*, Seoul, 3967-3975, J. Byong-Ho, I.L. Sang, S.I. Won, C. Gye-Woon, eds. IAHR, Madrid, Spain.

Lara, J.L., Garcia, N., Losada, I.J. (2006). RANS modeling applied to random wave interaction with submerged permeable structures. *Coastal Engineering*. 53(5-6), 395-417.

Le Méhauté, B. 1976. *Introduction to Hydrodynamics and Water Waves*, Springer-Verlag, New York.

Losada, I.J., Lara, J.L., Guanche, R., and Gonzalez-Ondina, J.M. (2008). Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters. *Coastal Eng.* 55(1), 47-62.

Losada, I.J., Losada, M.A., Martin, A. (1995). Experimental study of wave-induced flow in a porous structure. *Coastal Engineering*. 26(1-2), 77-98.

Makris et al. 2016 Makris, Ch. V., Memos, C.D., Krestenitis, Y. N. (2016). Numerical modeling of surf zone dynamics under weakly plunging breakers with SPH method. *Ocean Modelling*, 98, 12-35

Makris, Ch.V. (2014). Υπολογιστική Προσομοίωση Παράκτιων Κυματικών Διεργασιών με τη χρήση της Σωματιδιακής Μεθόδου Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). ΑΠΘ, Διδακτορική Διατριβή.

Metallinos A.S. , Klonaris, G., Memos, C.D., Dimas, A. (2016a). Hydrodynamics in a submerged porous breakwater. *J. Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*. (to be submitted)

Metallinos, A.S. (2016). Υδροδυναμικές συνθήκες σε ύφαλο διαπερατό κυματοθραύστη λόγω θαλάσσιων κυματισμών, ΕΜΠ, διδακτορική διατριβή. (εν εξελίξει)

Metallinos, A.S., Maria-Eirini A. Emmanouilidou, Memos, C.D. (2014). Wave-induced pore pressures in submerged rubble mound breakwaters simulated by a compound Boussinesq model. *J. Hydraulic Research*. 52(1), 24-35.

Metallinos, A.S., Repousis, E.G., Memos, C.D. (2016b). Wave propagation over a submerged porous breakwater with steep slopes. *Ocean Engineering*. 111, 424-438.

Moschella, P.S., Abbiati, M., Aberg, P., Airolidi, L., Anderson, J.M., Bacchiocchi, F., Bulleri, F., Dinesen, G.E., Frost, M., Gacia, E., Granhag, L., Jonsson, P.R., Satta, M.P., Sundelof, A., Thompson, R.C., Hawkins, S.J. (2005). Low-crested coastal defence structures as artificial habitats for marine life: Using ecological criteria in design. *Coastal Engineering*. 52(10-11), 1053-1071.

Myrhaug, D., Ong, M.C. (2010). Random wave-induced onshore scour characteristics around submerged breakwaters using a stochastic method. *Ocean Eng.* 37(13), 1233-1238.

Nadaoka, K., Beji, S., Nakagawa, Y., 1994. A fully-dispersive nonlinear wave model and its numerical solutions. In: *Proceedings of the 24th Coastal Engineering Conference*, Kobe, 427-441.

Panizzo, A., Briganti, R. (2007). Analysis of wave transmission behind low-crested breakwaters using neural networks. *Coastal Eng.* 54(9), 643-656.

Repousis E.G., Metallinos A.S., Memos C.D. (2014). Wave breaking over submerged breakwaters. In: *Proceedings of the 5th International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection*, Coastlab14, Varna, Bulgaria, 2, 54-63.

Seabrook, SR, and Hall, KR, (1998). Wave Transmission at Submerged Rubble Mound Breakwaters, *Proceedings of the 26th Int Conf on Coastal Engineering*, ASCE, pp 2000-2013.

Siddon, C.E., Witman, J.D. (2003). Influence of chronic, low-level hydrodynamic forces on subtidal community structure. *Marine Ecology Progress Series*. 261, 99-110.

Steffani, C.N. and Branch, G.M. (2003). Growth rate, condition, and shell shape of *Mytilus galloprovincialis*, *Journal Experimental Marine Biology*, 246, 197-209.

Ugo Tomasicchio (1996). Submerged breakwaters for the defence of the shoreline at Ostia Field experiences. In: *Proceedings of 25th Conference on Coastal Engineering*, Orlando, 2404- 2417.

Van der Meer, JW (1990). Data on Wave Transmission due to Overtopping, Technical Report, Delft Hydraulics Report, No H986.

Van der Meer, JW, and Daemen, IFR (1994). Stability and wave transmission at low crested rubble mound structures, *J Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 1994, Vol 100, No 1, pp 1-19.

Van der Meer, JW, Wang, B, Wolters, A, Zanuttigh, B, and Kramer, M (2003). Oblique wave transmission over lowcrested structures, *Proc Coastal Structures 2003*, ASCE, Portland, USA, pp. 567–579.

Van Gent, M. R. A., (1994). The modeling of wave action on and in coastal structures. *Coastal Eng.*, 22, 311-339.

Van Gent, M. R. A., (1995). Wave Interaction with Permeable Coastal Structures. Ph. D. Thesis, Delft University of Technology.

Voulgaris, G. & Trowbridge, J.H. (1998). Evaluation of the Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) for Turbulence Measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 15, 272-289.

Young, M.D., Testik, F.Y. (2011). Wave reflection by submerged vertical and semicircular breakwaters. *Ocean Eng.* 38(10), 1269-1276.

