



**8<sup>ο</sup> ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ**  
**της Ελληνικής Γεωγραφικής Εταιρείας**

8<sup>TH</sup> PAN-HELLENIC GEOGRAPHICAL CONFERENCE  
of the Greek Geographical Society

# **Παράκτια Γεωμορφολογία- Ωκεανογραφία**



## ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΥΘΜΟΥ ΣΤΕΡΕΟΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΤΗ ΠΑΡΑΛΙΑ ΤΗΣ ΠΑΧΙΑΣ ΑΜΜΟΥ (ΒΑ ΚΡΗΤΗ)

Αγγελόπουλος Χ.<sup>1</sup>, Αναστασάκης Γ.<sup>1</sup>, Πούλος Σ.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Τομέας Ιστορικής Γεωλογίας και Παλαιοντολογίας, Παν/πολη Ζωγράφου, Αθήνα 15784

<sup>2</sup>Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Τομέας Γεωγραφίας και Κλιματολογίας, Παν/πολη Ζωγράφου, Αθήνα 15784

### Περίληψη

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις υδροδυναμικές μετρήσεις πεδίου και την προσομοίωση του ρυθμού στερεομεταφοράς στην παράλια ζώνη της Παχιάς Άμμου, μια ακτής θυλακίου (pocket beach) με μικρό εύρος παλίρροιας που βρίσκεται στο Κόλπο Μιραμπέλλου (ΒΑ Κρήτη).

Οι υδροδυναμικές μετρήσεις πεδίου πραγματοποιήθηκαν στην προάκτια ζώνη της ακτής με χρήση ρευματομέτρου στήλης Aquadopp από το Μάιο 2001 έως το Μάιο 2002 για ένα σύνολο 230 ημερών. Συμπληρωματικά στοιχεία για το κυματικό καθεστώς ελήφθησαν και στατιστικά συσχετίστηκαν από το πλωτό μετρητικό σταθμό του 'συστήματος Ποσειδώνα' που ήταν εγκατεστημένος στη θέση Αυγό (35° 37,37' Β και 25° 38,24' Α) του νότου Αιγαίου (57 km ΒΔ της παραλίας της Παχιάς Άμμου).

Ακραίες υδροδυναμικές (κυματικές) συνθήκες παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου 2001 με μέγιστο μέγεθος σημαντικού κύματος ύψους ( $H_s \max$ ) 2,4 m, κορυφαία περίοδο (Tp) 7,7 sec και κύρια κατεύθυνση περίπου προς νότον (190ο). Με τη χρήση του μοντέλου παράκτιας μηχανικής CEDAS υπολογίστηκαν τα θεωρητικά κυματικά χαρακτηριστικά στη ζώνη θραύσης καθώς και του θεωρητικού ρυθμού της επιμήκους παράκτιας στερεομεταφοράς (QI), η διεύθυνση της οποίας παρουσιάζει όχι μόνο εποχιακή αλλά και ετήσια αλλαγή τόσο στο όγκο (περί τα 700.000 m<sup>3</sup>) όσο και στη κατεύθυνσή της. Το γεγονός αυτό συνάδει με τον χαρακτηρισμό της παραλίας της Παχιάς Άμμου ως 'rocket beach', με τυχόν αλλαγές του πλάτους της να σχετίζονται με στερεομεταφορά κάθετα και όχι παράλληλα με την ακτογραμμή.

### OBSERVED HYDRODYNAMICS AND MODELLED SEDIMENT TRANSPORT RATE IN THE CASE OF PACHIA AMMOS (NE CRETE)

Angelopoulos C<sup>1</sup>, Anastasakis G.<sup>1</sup>, Poulos S.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National and Kapodistrian University of Athens, Faculty of Geology and Geoenvironment, Department of Historical Geology and Paleontology, Panepistimioupolis – Zografou, Athens 15784

<sup>2</sup>National and Kapodistrian University of Athens, Faculty of Geology and Geoenvironment, Department of Geography and Climatology, Panepistimioupolis – Zografou, Athens 15784

### Abstract

This paper describes the observed hydrodynamics and the modelled sediment transport rate in the coastal area of Pachia Ammos, which is a microtidal pocket beach located in the Gulf of Mirabellou (NE Crete, Greece). Hydrodynamic field data were collected from the transitional zone of the beach using an acoustic Doppler current profiler for 230 days, from May 2001 to May 2002 for 230 days. Additional wave data were interpolated and statistically correlated form a complete hydrodynamic data set, expanding from January 2001 to November 2002, obtained from the observation buoy of the 'Poseidon project', which is

located at the Avgo site st the SE Aegean Sea ( $35^{\circ} 37.37' N$  &  $25^{\circ} 38.24' E$ , 57 km NW from the study site).

Extreme conditions were observed during fall 2001 with maximum significant wave height ( $H_{s\ max}$ ) of 2.4 m, peak period ( $T_p$ ) 7.7 sec and main direction being southerly ( $190^{\circ}$ ). The model of CEDAS was used to calculate the theoretical wave parameters at the breaker zone as well as the longshore sediment transport rate ( $Q_l$ ). The direction and value of the potential longshore sediment transport ( $Q_l$ ) changes not only seasonally (winter and summer is eastward and spring and autumn is westward) but also from one year to the other; the estimated difference in the annual rate of transport accounts  $730 \times 10^3 \text{ m}^3$  between the years 2001 and 2002 presenting also a reverse direction, being eastward during the year 2001 and westward during the year 2002. This is in accordance to the geomorphological/sedimentological characterisation of the Pachia Ammos beach, as a 'pocket beach', which means that any exchange of sediment is at an off/on-shore direction.

**Λέξεις κλειδιά:** Νήσος Κρήτη, ακτή θυλακίου, παράκτια στερεομεταφορά, Παχιά Άμμος.

**Key words:** Crete Island, 'pocket beach', longshore transport, Pachia Ammos.

## 1. Εισαγωγή



Σχήμα 1. Θέση περιοχής μελέτης (Παχιά Άμμος)

Η παραλία της Παχιάς Άμμου βρίσκεται στην νότια πλευρά του κόλπου του Μιραμπέλλου (Σχήμα 1) και το μέγιστο ανάπτυγμα ανέμου είναι της τάξης των 400 km με διεύθυνση Βόρεια με Βορειοανατολική. Το μέγιστο μέγεθος σημαντικού κύματος ύψους ( $H_{s\ max}$ ) σύμφωνα με το παραπάνω ανάπτυγμα ανέμου είναι 6,1 m, ενώ η κορυφαία περίοδος ( $T_p$ ) είναι 12,9 sec. Το εύρος της παλίρροιας στο Αιγαίο Πέλαγος είναι πολύ μικρό και μειώνεται γραμμικά από τον βορά προς το νότο, έχοντας τιμές ολίγων εκατοστών στις ακτές της βόρειας Κρήτης (Andriatsanos *et al.*, 2000). Η ακτή της Παχιάς Άμμου αποτελεί ανεξάρτητο ιζηματολογικό κελί σύμφωνα με τη θεώρηση του Sanderson and Elliot (1999), έχοντας μια αλιευτική μαρίνα στο

δυτικό άκρο της και απότομη βραχώδη ακτή στο ανατολικό της. Το συνολικό μήκος της ακτογραμμής είναι περί τα 1500 m.

## 2. Μεθοδολογία

Για την συλλογή των δεδομένων που αφορούν τα κύματα και τα θαλάσσια ρεύματα σε διαφορετικά βάθη της θαλάσσιας στήλης χρησιμοποιήθηκε ο μετρητής προφίλ ρεύματος Aquadopp Current Profiler της εταιρείας Nortek (Idier *et al.*, 2002). Η θέση και οι περίοδοι μέτρησης δίνονται στον Πίνακα 1. Το όργανο έπερνε μετρήσεις κάθε 4 ώρες για χρονικό διάστημα 30 min αποθηκεύοντας το μέσο όρο κάθε φορά.

Συμπληρωματικές μετρήσεις κύματος προέρχονται από τον πλωτό ωκεανογραφικό μετρητικό σταθμό (buoy) του δικτύου ΠΟΣΕΙΔΩΝ, του Ελληνικού Κέντρου Θαλάσσιων Ερευνών (ΕΛ.Κ.Θ.Ε.) που βρισκόταν στο νοτιανατολικό Αιγαίο (θέση Αυγό, συντεταγμένες  $35^{\circ} 37,37' B$  και  $25^{\circ} 38,24' A$ ) και σε απόσταση 57 km ΒΔ της παραλίας της Παχιάς Άμμου. Η συχνότητα συλλογής δεδομένων ήταν ανά 3 ώρες (Soukissian *et al.*, 1999).

Για τη συσχέτιση των δύο χρονοσειρών χρησιμοποιήθηκε γραμμική συσχέτιση (linear regression) καθώς και άλλες στατιστικές παράμετροι όπως ο συντελεστής σφάλματος  $R$  (root

mean square error – R) και ο δείκτης διασποράς ΔΔ (scatter index) που υπολογίστηκαν σύμφωνα με τις εξισώσεις:

$$R = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{i,Ποσειδών} - X_{i,ΠαχειάΆμμος})^2} \quad (1)$$

$$\Delta\Delta = \frac{R}{\bar{X}_{ΠαχειάΆμμος}} \quad (2)$$

Τα κυματικά χαρακτηριστικά στη ζώνη θραύσης υπολογίστηκαν με βάση τις μετρήσεις των κυμάτων σε συνθήκες βαθιών νερών και τη χρήση του λογισμικού RCPWAVE (μοντέλο προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων σε δύο διαστάσεις), το οποίο έχει διαμορφωθεί από το Αμερικάνικο Σώμα Μηχανικών (US Army Corps of Engineers) και χρησιμοποιεί τις παρακάτω παραμέτρους της γραμμικής κυματικής θεωρίας: διάθλαση, θραύση κύματος, ρήγιση και διάθλαση λόγω αλλαγής της βυθομετρίας. Για την εφαρμογή του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε η βυθομετρία που είχε συλλεχθεί σε ψηφιακή μορφή για δε τη δημιουργία του κανάβου εργασίας χρησιμοποιήθηκε η 'ρουτίνα' GRIDGEN.

Τέλος, για τον υπολογισμό του θεωρητικού ρυθμού στερεομεταφοράς χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση:

$$Q_l = \frac{k}{(\rho_s - \rho)g(1-n)} \left( \frac{\rho g H_s^2}{8} \right) \sqrt{gd} \sin a_b \cos a_b \quad (3)$$

όπου  $k$ = ο αριθμός κύματος,  $\rho$ = πυκνότητα του νερού,  $\rho_s$ =  $\eta$  πυκνότητα του ιζήματος,  $g=9.81m/sec^2$ ,  $H_s$ = το σημαντικό ύψος κύματος,  $d$ = το βάθος νερού στη ζώνη θραύσης και  $a_b$ = η γωνία του προσπώμενου κύματος στη ζώνη θραύσης.

### 3. Ανάλυση δεδομένων - Αποτελέσματα

#### 3.1 Δεδομένα ρευματομέτρου στήλης

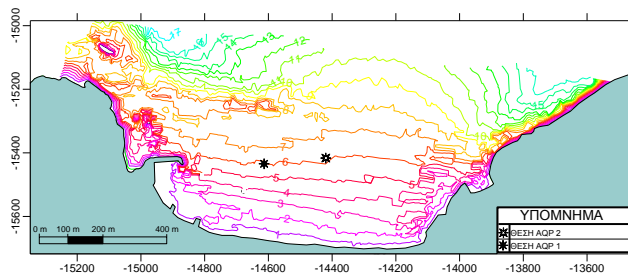
Με το ρευματομέτρο μέτρησης στήλης συλλέχθηκε μία σειρά δεδομένων συνολικής χρονικής διάρκειας σχεδόν οκτώ μηνών μέσα από το Μάιο 2001 έως το Μάιο 2002 (Πίνακας 1) σε δύο διαφορετικές θέσεις (Σχήμα 2).

Πίνακας 1. Πληροφορίες για τη λειτουργία του ρευματομέτρου στήλης στην Παχιά Άμμο (η ακριβής θέση πόντισης των οργάνων AQP1&2 φαίνεται στο σχήμα 2)

α/α χρονικών περιόδων μέτρησης	Θέση	Ημερομηνία έναρξης	Ώρα έναρξης	Συνολικός χρόνος μέτρησης (h)
1	AQP 1	4/5/2001	22:00:00	442
2	AQP 1	24/5/2001	11:00:00	1104
3	AQP 1	17/7/2001	22:00:00	748
4	AQP 1	6/10/2001	16:00:00	665
5	AQP 1	5/11/2001	18:00:00	332
6	AQP 2	11/12/2001	17:00:00	92
7	AQP 1	11/12/2001	17:00:00	92
8	AQP 1	26/4/2002	20:19:14	359

Οι μετρήσεις καλύπτουν το χρονικό διάστημα από την Άνοιξη του 2001 έως και την Άνοιξη του 2002. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν σε δύο διαφορετικές θέσεις (Σχήμα 2) και σε συνθήκες ενδιάμεσου βάθους.

Οι τιμές των μέγιστων τιμών του σημαντικού ύψους κύματος ( $H_s \max$ ) στην περιοχή παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου 2001. Ειδικότερα υπήρξαν δύο επεισόδια έντονων υδροδυναμικών συνθηκών διάρκειας επτά και τριών ημερών, με το πρώτο να εκδηλώνεται από την 24/10/2001 και το δεύτερο, την 16/11/2001. Καθόλη τη διάρκεια του πρώτου έντονου επεισοδίου τα σημαντικά ύψη κύματος ( $H_s$ ) ήταν  $>1,2$  m έχοντας μέση τιμή της κύριας κατεύθυνσης  $185^\circ$  (Νότια). Επιπλέον η διασπορά της κατεύθυνσης ήταν σχετικά μικρή με τιμές που κυμάνθηκαν από  $15^\circ$  έως  $20^\circ$ . Η μέση τιμή της περιόδου μηδενικής συνάντισης ( $T_0$ ) για τα αντίστοιχα  $H_s$  σε αυτό το χρονικό διάστημα είχε τιμές από 5 sec έως 6 sec, ενώ η κορυφαία περίοδος ( $T_p$ ) κυμάνθηκε στα 7 sec.



Σχήμα 2. Βαθυμετρικός χάρτης της ακτής της Παχιάς Άμμου και θέσεις ποντίσεως των οργάνων

Ακόμα εντονότερες υδροδυναμικές συνθήκες παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια του δεύτερου επεισοδίου. Η κορύφωση σε αυτή την περίπτωση διάρκεσε δύο ημέρες (17 & 18/11/2001) με τιμές  $H_s > 1,3$  m για όλη τη διάρκεια της κορύφωσης, ενώ από τις 18:00 της 17/11/2001 έως 02:00 της 18/11/2001 καταγράφηκαν οι μέγιστες τιμές του  $H_s \max$  που παρατηρήθηκαν στην περιοχή ( $H_s = 2,2-2,4$  m) για ολόκληρη την περίοδο των μετρήσεων. Η μέση κατεύθυνση των κυμάτων είχε τιμές από  $185^\circ-190^\circ$ , ενώ το εύρος τιμών της κύριας κατεύθυνσης ήταν  $182^\circ-188^\circ$  (Νότια). Η διασπορά κατεύθυνσης και στις δύο περιπτώσεις ήταν λίγο μεγαλύτερη από αυτή του πρώτου επεισοδίου με τιμές από  $16^\circ$  έως  $21^\circ$ . Η μέση  $T_0$  κυμάνθηκε από 5 sec έως 6 sec, ενώ η  $T_p$  από 7 sec έως 8 sec.

### 3.2 Δεδομένα πλωτού σταθμού Ποσειδώνα

Η διεύθυνση προέλευσης κύματος χωρίστηκε σε 12 ομάδες με διαφορά  $30^\circ$  μεταξύ τους και σε 8 κλάσεις ανάλογα με την τιμή του  $H_s$  (Πίνακας 2). Οι πιο συχνές διευθύνσεις προέλευσης κύματος ήταν οι  $290^\circ$ ,  $310^\circ$ ,  $330^\circ$  και  $10^\circ$ . Οι κλάσεις χωρίστηκαν με διαφορά 0,5 m και η τιμή της κάθε κλάσης αποτελεί την αντιπροσωπευτική τιμή, ενώ όλες οι μετρήσεις της κλάσης έχουν μέγεθος  $\pm 0,25$  m της χαρακτηριστικής μέσης τιμής. Παρόλο που μερικές από τις διευθύνσεις κύματος ( $290^\circ$ ,  $310^\circ$  και  $330^\circ$ ) δεν επηρεάζουν άμεσα τις περιοχές μελέτης, μέσα από το φαινόμενο της περιθλάσης των κυμάτων στο ακρωτήριο Αγ. Ιωάννη, καταφέρνουν τελικά να τις επηρεάσουν. Η συνολική συχνότητα αυτών των διευθύνσεων φτάνει το 90 % του συνόλου για το καλοκαίρι του 2001, ενώ είναι πάνω από το 43 % για όλο το υπόλοιπο χρονικό διάστημα. Η κλάση με το μέγιστο ύψος σημαντικού κύματος ( $H_s \max = 4,0$  m) είχε διεύθυνση προέλευσης  $310^\circ$  και  $330^\circ$  και εμφανίστηκε μόνο κατά τη χρονική περίοδο του χειμώνα 2002 με συγκεντρωτική συχνότητα 0,8% (0,4% για την προέλευση  $310^\circ$  και 0,4% για την προέλευση  $330^\circ$ ). Κατά την ίδια περίοδο (χειμώνας 2002) παρατηρήθηκε και η επόμενη μεγαλύτερη κλάση  $H_s$  (3,5 m) με συνολική συχνότητα εμφάνισης 3,6%. Η κατεύθυνση προέλευσης των κυμάτων αυτής της κλάσης ήταν από  $310^\circ$  (0,6%),  $330^\circ$  (2,4%) και  $10^\circ$  (0,6%). Η συχνότερη κλάση που μετρήθηκε στο σταθμό του Ποσειδώνα ήταν η 1,0 m με συγκεντρωτική εμφάνιση 40,6% κατά τη διάρκεια του

καλοκαιριού 2001. Ειδικότερα, η κλάση αυτή είχε συχνότητα εμφάνισης 23,1% για διεύθυνση προέλευσης 310° και 17,5% για προέλευση από 330° για αυτή την περίοδο.

Η περίοδος του  $H_s$  που μετρήθηκε στον πλωτό σταθμό είχε γενικά σταθερές τιμές. Ειδικότερα η μέση τιμή της  $T_o$  ήταν 3,9 sec ενώ η μέση τιμή της  $T_p$  ήταν 5,1 sec. Η τυπική απόκλιση της  $T_o$  ήταν 0,7 sec ενώ της  $T_p$  ήταν 1,4 sec. Οι μέγιστες τιμές ήταν 7,5 sec και 12,3 sec αντίστοιχα, ενώ οι ελάχιστες 2,3 sec και 2,0 sec.

Ακολουθώς έγινε συσχέτιση των τιμών των χαρακτηριστικών των κυμάτων μεταξύ των δυο χρονοσειρών των κυματικών παραμέτρων (βλέπε ενότητα Μεθοδολογίας), δηλαδή αυτών που προέρχονται από την ανοικτή θάλασσα (σταθμός Ποσειδώνα) και αυτών που μετρήθηκαν μέσα στον Κόλπου Μιραμπέλλου. Ο συνολικός αριθμός των στοιχείων που συγκρίθηκαν ήταν  $N=1.701$  από σύνολο 1.846 καθώς στη σύγκριση χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι περιπτώσεις των κυμάτων που επηρεάζουν τη περιοχή μελέτης, δηλαδή ΒΑ, Β και ΒΔ προέλευσης.

Πίνακας 2. Αναλυτικά αποτελέσματα εποχιακών  $H_s$  (% του συνόλου) του πλωτού σταθμού Ποσειδώνα για τις κυριότερες διευθύνσεις προέλευσης.

Διεύθυνση	$H_s$ (m) (συγκεντρωτική συχνότητα %)								Εποχή
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	
290°	14,9	5,7	5,3	3,6	1,3	0,2	0,0	0,0	Άνοιξη 2001
290°	12,9	10,8	0,6	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	Καλοκαίρι 2001
290°	8,5	5,5	2,3	0,6	0,1	0,0	0,0	0,0	Φθινόπωρο 2001
290°	4,1	3,9	7,1	1,9	1,7	0,0	0,0	0,0	Χειμώνας 2002
290°	8,3	6,6	3,2	0,8	0,8	0,0	0,0	0,0	Άνοιξη 2002
290°	14,7	7,7	0,7	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	Καλοκαίρι 2002
290°	11,5	3,8	1,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	Φθινόπωρο 2002
310°	7,8	2,4	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Άνοιξη 2001
310°	11,6	23,1	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Καλοκαίρι 2001
310°	5,6	3,3	1,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	Φθινόπωρο 2001
310°	0,4	1,7	2,4	1,1	0,2	0,6	0,6	0,4	Χειμώνας 2002
310°	5,3	2,9	1,1	1,3	0,3	0,0	0,0	0,0	Άνοιξη 2002
310°	7,8	5,7	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Καλοκαίρι 2002
310°	3,5	0,8	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Φθινόπωρο 2002
330°	4,9	4,1	3,7	1,8	1,1	0,0	0,0	0,0	Άνοιξη 2001
330°	8,1	17,5	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Καλοκαίρι 2001
330°	6,5	8,8	5,2	1,9	1,2	0,0	0,0	0,0	Φθινόπωρο 2001
330°	4,1	4,5	3,5	3,5	0,9	2,8	2,4	0,4	Χειμώνας 2002
330°	3,9	8,4	5,2	1,9	0,2	0,0	0,0	0,0	Άνοιξη 2002
330°	7,7	12,2	5,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Καλοκαίρι 2002
330°	6,9	3,2	2,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	Φθινόπωρο 2002
10°	4,5	1,0	0,3	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	Άνοιξη 2001
10°	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Καλοκαίρι 2001
10°	2,9	0,4	1,0	0,4	0,7	0,1	0,0	0,0	Φθινόπωρο 2001
10°	0,9	0,6	1,1	0,2	0,0	0,9	0,6	0,0	Χειμώνας 2002
10°	5,8	1,3	0,6	0,5	0,2	0,0	0,0	0,0	Άνοιξη 2002
10°	1,4	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Καλοκαίρι 2002
10°	6,2	1,5	0,3	0,5	0,2	0,0	0,0	0,0	Φθινόπωρο 2002

Η σύγκριση ολόκληρης της χρονοσειράς έχει συντελεστή  $R = 0,66$  και  $\Delta\Delta = 0,85$  για το σημαντικό ύψος κύματος,  $R = 0,55$  και  $\Delta\Delta = 0,30$  για την  $T_p$  και  $R = 0,54$  και  $\Delta\Delta = 0,29$  για την  $T_m$ . Με την εφαρμογή διαφορετικών φίλτρων υστέρησης μεταξύ των χρονοσειρών παρατηρούνται διαφορετικά αποτελέσματα στις στατιστικές παραμέτρους. Η καλύτερη συσχέτιση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας υστέρηση μίας ώρας στα δεδομένα της Παχιάς Άμμου (Πίνακας 3). Η συσχέτιση αυτή βελτιώνεται με τη χρήση κυμάτων με προέλευση μόνο  $\pm 45^\circ$  από το Βορά καθώς και με πολυωνυμική συσχέτιση, αλλά για λόγους απλότητας η γραμμική συσχέτιση παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα και ευκολία χρήσης.

Πίνακας 3. Στατιστικοί παράμετροι συσχέτισης κυματικών δεδομένων πλωτού σταθμού Ποσειδώνια και Παχιάς Άμμου.

Χρονοσειρά	R	$\Delta\Delta$	$\alpha$	$\beta$	N
<b><math>H_s</math></b>					
Υστέρηση 0 ώρες	0,66	0,85	-0,002	1,058	1701
Υστέρηση 1 ώρα	0,69	0,86	-0,01	1,109	1701
<b><math>T_p</math></b>					
Υστέρηση 0 ώρες	0,55	0,30	-0,003	5,442	1701
Υστέρηση 1 ώρα	0,56	0,23	-0,012	4,058	1701
<b><math>T_m</math></b>					
Υστέρηση 0 ώρες	0,54	0,29	-0,004	5,358	1701
Υστέρηση 1 ώρα	0,57	0,22	-0,015	3,958	1701

### 3.3 Θεωρητικός ρυθμός στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτογραμμής

Ο κάναβος που δημιουργήθηκε είχε μέγεθος 94 x 137 κελιά (x-y άξονες αντίστοιχα) και το μέγεθος των κελιών ήταν 10 x 10 m. Το αζιμούθιο της ακτογραμμής σύμφωνα με το μοντέλο ήταν 181 μοίρες και οι τοπικές συντεταγμένες των σταθμών που υπήρχαν ήταν (i, j) 62, 27 για τον σταθμό 1 και 65, 58 για τον σταθμό 2 (θέσεις AQP 1 & 2 του Σχήματος 2). Οι κύριες διευθύνσεις προέλευσης κυμάτων είναι 270°, 290°, 310°, 330° και 10°. Δημιουργήθηκαν πέντε ομάδες προσομοίωσης, μία για κάθε διεύθυνση και η κάθε ομάδα είχε εννέα προσομοιώσεις με αρχικό  $H_s$  0,5 m και βήμα αύξησης του μεγέθους του 0,5 m. Η περίοδος ήταν 5,0 sec για όλες τις προσομοιώσεις, τιμή κοντά στην μέση  $T_p$  που παρατηρήθηκε.

Χρησιμοποιώντας την κύρια ρουτίνα RCPWAVE του μαθηματικού μοντέλου CEDAS βρέθηκαν οι παρακάτω φυσικές παράμετροι για ολόκληρη την παράλια ζώνη της Παχιάς Άμμου ( $\alpha$ ) το  $H_s$ , ( $\beta$ ) η τοπική διεύθυνση του (γωνία  $\theta_0$ ), ( $\gamma$ ) ο αριθμός κύματος ( $k$ ) και ( $\delta$ ) το ύψος ( $H_b$ ) και η γωνία  $\alpha_b$  του  $H_s$  στη ζώνη θραύσης.

Οι κυματικές παράμετροι του μοντέλου συσχετίστηκαν με τις πραγματικές που είχαν μετρηθεί κατά τη χρονική περίοδο Μαρτίου 2001 έως Μαΐου 2002. Η ομαδοποίηση των πραγματικών δεδομένων των σταθμών 1 και 2 έγινε χρησιμοποιώντας διασπορά  $\pm 0,25$  m για την κεντρική τιμή  $H_s$  και  $\pm 10^\circ$  για τη διεύθυνση των δεδομένων του πλωτού σταθμού Ποσειδώνια. Οι τιμές αυτές της διασποράς επιλέχθηκαν ώστε να δημιουργηθεί ένας ικανοποιητικός αριθμός στοιχείων για κάθε ομάδα, χωρίς όμως να υπάρχει μεγάλη διασπορά και αποκλίσεις τιμών.

Οι διαφορές που παρουσιάζει το μοντέλο σε σχέση με τις πραγματικές μετρήσεις βρίσκονται στο αναμενόμενο επίπεδο βάσει της διεθνούς βιβλιογραφίας (Maa et al., 2000). Η απόκλιση της διεύθυνσης του θεωρητικού σημαντικού κύματος από το μοντέλο έχει διακύμανση από 47,3ο έως 1,3ο σε σχέση με τις τιμές που παρατηρήθηκαν στον σταθμό 1. Αντίστοιχα, στον σταθμό 2 η διακύμανση της απόκλισης αυτής έχει μέγιστη τιμή 40,9ο και



ελάχιστη 0. Αυτές οι αποκλίσεις παρουσιάζουν την ακόλουθη κλιμάκωση. Όσο η κατεύθυνση προέλευσης του εισερχόμενου κύματος πλησιάζει το Βορά, η απόκλιση μειώνεται σημαντικά και στους δύο σταθμούς. Αυτό είναι κάτι αναμενόμενο αφού η ακρίβεια του μοντέλου αυξάνει όσο το προσπίπτον κύμα πλησιάζει να είναι κάθετο στην ακτογραμμή. Ειδικά στην περίπτωση της κατεύθυνσης  $10^\circ$  η διακύμανση είναι μόνο  $\pm 6,6^\circ$ . Η διακύμανση αυτή της διαφοράς προέλευσης του κύματος δεν επηρεάζεται από τη θέση του σταθμού. Δηλαδή τόσο στον σταθμό 1 που είναι κοντά στο λιμάνι, όσο και στον σταθμό 2 που βρίσκεται στο κέντρο της παράκτιας ζώνης οι διαφορές είναι της ίδιας τάξης μεγέθους.

Οι διαφορές που παρατηρούνται στο σημαντικό ύψος κύματος χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη είναι η συσχέτιση με τις μέγιστες τιμές που παρατηρήθηκαν ενώ η δεύτερη είναι με την μέση τιμή. Όσον αφορά τη διαφορά σε σχέση με την μέγιστη τιμή υπάρχει μια διακύμανση από  $-0,8^\circ$  σε σχέση με την τιμή που μετρήθηκε έως  $+14^\circ$ . Οι μέγιστες διαφορές παρατηρούνται στον σταθμό 1 για τη διεύθυνση  $10^\circ$ . Η βασική αιτία για αυτό το γεγονός είναι ότι οι πραγματικές τιμές έχουν μικρό πληθυσμό, της τάξης των 1 έως 3 μετρήσεων. Γενικότερα για τον σταθμό 1 στις μικρές τιμές αρχικού  $H_s$ , δηλαδή έως και 1,5 m, το μοντέλο κάνει υποεκτίμηση ενώ στις μεγαλύτερες τιμές παρουσιάζεται μια υπερεκτίμηση. Αντίστοιχα στον σταθμό 2 αυτό συμβαίνει μόνο για τις διευθύνσεις  $290^\circ$  και  $310^\circ$ , ενώ για τις διευθύνσεις  $330^\circ$  και  $10^\circ$  υπάρχει μια μόνιμη υπερεκτίμηση. Ανάλογα αποτελέσματα έχει και η σύγκριση με τις μέσες τιμές. Η διαφορά στη περίπτωση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η υποεκτίμηση είναι μικρότερη ενώ η υπερεκτίμηση μεγαλύτερη. Η διακύμανση είναι από  $-0,4^\circ$  έως  $+15^\circ$  για το σταθμό 1 και  $-0,7^\circ$  έως  $+2,6^\circ$  για το σταθμό 2.

Στη σύγκριση του  $k$  (αριθμού κύματος) χρησιμοποιήθηκε τόσο η μέγιστη τιμή όσο και η μέση τιμή. Στον σταθμό 1 παρατηρείται μια διαφορά με διακύμανση στο μέγεθος από  $-0,38$  έως  $0,48$  για τη μέγιστη τιμή, ενώ για τη μέση τιμή η διακύμανση είναι από  $-0,16$  έως  $0,52$  (η διακύμανση αναφέρεται στο μέγεθος του  $k$ ). Αντίστοιχα στον σταθμό 2 η διακύμανση κυμαίνεται από  $-0,44$  έως  $-0,08$  για τη μέγιστη τιμή και  $-0,39$  έως  $-0,01$  για τη μέση τιμή. Η πρόβλεψη του μοντέλου ανταποκρίνεται αρκετά στη παρατηρούμενη μέση τιμή  $k$ . Οι μέγιστες αποκλίσεις παρουσιάζονται και πάλι στην περίπτωση που ο αριθμός των παρατηρήσεων είναι πολύ μικρός.

Από την κατανομή των κυματικών παραμέτρων στις προσομιώσεις παρουσιάζεται μια έντονη ζώνη σύγκλισης και απόκλισης κυμάτων στην βορειοανατολική περιοχή για τις αρχικές διευθύνσεις  $290^\circ$  και  $310^\circ$ . Η διαφορά αυτή στο  $H_s$  μεταξύ γειτονικών κελιών ξεκινάει από  $0,3$  m με τιμή  $H_{s\ max} = 0,5$  m και φτάνει στα  $2,1$  m με τιμή  $H_{s\ max} = 5,2$  m. Στην ζώνη θραύσης του κύματος για τις δύο αυτές αρχικές διευθύνσεις παρατηρείται μια ζώνη απόκλισης της κυματικής ενέργειας που είναι σχεδόν ταυτόσημη και για τις δύο διευθύνσεις. Η απόκλιση αυτή παρατηρείται περίπου  $180$  m από το δυτικό άκρο της ακτής (λιμάνι) και η κυματική κατεύθυνση είναι προς τα δυτικά (προς το λιμάνι). Η θέση του σημείου απόκλισης είναι σχεδόν σταθερή ανεξάρτητα από το αρχικό  $H_s$  και κυμαίνεται από  $180$  m έως  $160$  m, από το δυτικό της άκρο.

Ο εποχιακός ρυθμός στερεομεταφορά παράλληλα προς την ακτή ( $Q_l$ ) στην περιοχή της Παχιάς Άμμου παρουσιάζει εναλλαγή στη διεύθυνση κάθε εποχή (Πίνακας 4). Την άνοιξη και το φθινόπωρο έχει φορά προς τη δύση (περιοχή του λιμανιού), ενώ το καλοκαίρι και το χειμώνα προς την ανατολή. Το μέγεθος επίσης έχει διακύμανση από ελάχιστη τιμή  $0,46 \times 10^3$  m<sup>3</sup>/day το φθινόπωρο του 2001 έως  $3,29 \times 10^3$  m<sup>3</sup>/day το φθινόπωρο του 2002. Ενδιαφέρον, τέλος παρουσιάζει το γεγονός ότι ο ρυθμός της μέσης ετήσιας τιμής της δυνητικής παράκτιας στερεομεταφοράς ( $Q_l$ ) για μεν τη περίοδο Άνοιξη 2001 – Χειμώνας 2002 (μέχρι Φεβρ. 2002) είναι  $1,2 \times 10^3$  m<sup>3</sup>/day με κατεύθυνση ανατολική, ενώ ακολούθως για το χρονικό διάστημα Χειμώνα 2002 – Φθινόπωρο 2002 έχει κατεύθυνση προς τα δυτικά και τιμή  $3,2 \times 10^3$  m<sup>3</sup>/day.

Πίνακας 4. Εποχιακός θεωρητικός ρυθμός στερεομεταφοράς ( $Q_i$ ) στην περιοχή της Παχιάς Άμμου

Εποχή	$Q_i$ ( $\times 10^3$ m <sup>3</sup> /day)	Κατεύθυνση
Άνοιξη 2001	1,22	Δύση
Καλοκαίρι 2001	1,13	Ανατολή
Φθινόπωρο 2001	0,46	Δύση
Χειμώνας 2002	1,35	Ανατολή
Άνοιξη 2002	2,14	Δύση
Καλοκαίρι 2002	0,89	Ανατολή
Φθινόπωρο 2002	3,29	Δύση

#### 4. Συζήτηση - Συμπεράσματα

Με τη χρήση γραμμικής συσχέτισης και με φίλτρο υστέρησης μίας ώρας οι υδροδυναμικές μετρήσεις πεδίου που πραγματοποιήθηκαν στην μεταβατική ζώνη της ακτής της Παχιάς Άμμου συγκρίθηκαν με ανάλογες μετρήσεις του πλωτού μετρητικού σταθμού Ποσειδώνα, στη θέση Αυγό, που βρίσκεται έξω από το Κόλπο Μιραμπέλλου. Η συσχέτιση των δύο χρονοσειρών παρουσίασε στο σύνολο της πολύ καλή συσχέτιση ( $R$  0,7 και  $\Delta\Delta = 0,2$ ) για το σημαντικό ύψος των προσερχόμενων κυμάτων. Με βάση τις μετρήσεις εντός του Κόλπου Μιραμπέλλου, σε βάθη περί τα 5 μέτρων, και εκείνων του σταθμού του Ποσειδώνα (για τα χρονικά διαστήματα που δεν είχαμε μετρήσεις εντός του Κόλπου), η διεύθυνση της δυνητικής (θεωρητικά υπολογιζόμενης) παράκτιας στερεομεταφοράς ( $Q_i$ ) στη παραλία της Παχιάς Άμμου εμφανίζει όχι μόνο εποχιακή αλλά διαχρονική αναστροφή ως προς την κατεύθυνσή της και μεταβολή της μέσης ετήσιας τιμής που είναι της τάξης των  $2 \times 10^3$  m<sup>3</sup>/day ( $730 \times 10^3$  m<sup>3</sup>/year). Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι στη περίπτωση της Παχιάς Άμμου, για ασφαλή συμπεράσματα περί της παράκτιας στερεομεταφοράς απαιτούνται μακροχρόνιες μετρήσεις, ενώ με βάση το γεγονός ότι αποτελεί ένα ανεξάρτητο ιζηματολογικό κελί τα ιζήματα αναμένονται να είναι εγκλωβισμένα και απλά να μεταφέρονται τότε προς τα δυτικά τότε προς τα ανατολικά (εποχιακά και διαχρονικά) μεταβάλλοντας και το πλάτος της παραλίας. Για τυχόν δε μεταβολές του πλάτους της παραλιακής ζώνης της Παχιάς Άμμου θα πρέπει να διερευνηθεί η στερεομεταφορά με διεύθυνση κάθετα στην ακτογραμμή.

#### Βιβλιογραφία

- Andritsanos, V. A., D. Arabelos, S.D. Spatalas, I.N. Tziavos, 2000: Mean Sea Level Studies in the Aegean Sea. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*. 25, 53-56.
- Idier, D., A. Ehrhold, T. Garlan, 2002: Morphodynamique d'une dune sous-marine du Detroit du pas de Calais: Morphodynamics of an undersea sandwave of the Dover Straits. *Comptes Rendus Geosciences*. 334(15), 1079-1085.
- Maa J.P.Y., T. W. Hsu, C.H. Tsai, W.J. Juang, 2000: Comparison of wave refraction and diffraction models. *Journal of Coastal Research*. 16 (4), 1073-1082.
- Sanderson, P. G., I. Eliot, 1999: Compartmentalisation of beachface sediments along the southwestern coast of Australia. *Marine Geology*. 162, 145-164.
- Soukissian, T., G. Chronis, K. Nittis, 1999: POSEIDON: Operational marine monitoring system for Greek Seas. *Sea Technology*. 40(7), 31-37.