

Διερεύνηση του φαινομένου της μετεωρολογικής παλίρροιας στην ελληνική παράκτια ζώνη: ανάλυση δεδομένων από παλιρροιογράφους και αριθμητικές προσομοιώσεις

Διαμαντή, Π.¹, Μακρής, Χ.¹, Κρεστενίτης, Γ.¹, Ανδρουλιδάκης, Γ.¹

¹Εργαστήριο Θαλάσσιας Τεχνικής και Θαλάσσιων Έργων, Τομέας Υδραυλικής και Τεχνικής Περιβάλλοντος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124 Θεσσαλονίκη, ndiamad@civil.auth.gr, cmakris@civil.auth.gr, ynkrest@civil.auth.gr, iandroul@civil.auth.gr

Περίληψη

Οι μετεωρολογικές παλίρροιες αποτελούν πολύ σημαντικό παράγοντα όχλησης, ιδιαίτερα των παράκτιων περιοχών με χαμηλό υψόμετρο και ήπιο ανάγλυφο, καθώς συμβάλλουν δραστικά στη συνολική ανύψωση της στάθμης της θάλασσας και στην αύξηση του κινδύνου πλημμύρας. Στην παρούσα εργασία, ως περιοχή μελέτης ορίζεται η ελληνική παράκτια ζώνη. Συγκρίνονται διαθέσιμες χρονοσειρές στάθμης της θάλασσας για τη χρονική περίοδο 2002-2012 από καταγραφές παλιρροιογράφων με αντίστοιχα δεδομένα από προσομοιώσεις των κλιματικών μοντέλων μετεωρολογικής παλίρροιας MeCSM και GrCSM. Γίνεται χρήση κατάλληλων δεικτών και στατιστικών μέτρων διασποράς για τη σύγκριση των MeCSM και GrCSM μεταξύ τους και για την αξιολόγηση του κλιματικού σεναρίου A1B, σχετικά με την επιρροή του στο φαινόμενο της μετεωρολογικής παλίρροιας. Με βάση τον καλύτερο συνδυασμό μοντέλου και σεναρίου, εκτιμάται η αναμενόμενη μεταβολή των ακραίων τιμών στάθμης θάλασσας σε συγκεκριμένους σταθμούς, για μια ενδεικτική ενδεκαετία (2022-2032) στο κοντινό μέλλον.

Λέξεις κλειδιά: ανύψωση στάθμης θάλασσας, δείκτης κλιματικής αλλαγής, εκατοστημόρια

Investigation of the effect of storm surges in Greek coastal zone: analysis of tide-gauge records and numerical simulations data

Diamanti, P.¹, Makris, C.¹, Krestenitis, Y.¹, Androulidakis, Y.¹

¹Laboratory of Maritime Engineering and Maritime Works, Division of Hydraulics and Environmental Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, 54124 Thessaloniki, ndiamad@civil.auth.gr, cmakris@civil.auth.gr, ynkrest@civil.auth.gr, iandroul@civil.auth.gr

Abstract

Storm surges are a very important factor of inundation, especially for low-land, bas relief coastal areas, since they contribute significantly to the overall sea surface elevation and the increase of flood risk. The study area of the present paper is the Greek coastal zone. Available Sea Level Height (SLH) timeseries, based on tide gauge records for the time period 2002-2012, are compared against corresponding simulation results by the climatic surge models MeCSM and GrCSM. Appropriate indexes and statistical dispersion measures are implemented for the intercomparison of MeCSM and GrCSM and for the evaluation of the climatic scenario A1B, concerning its impact on storm surges. The best model-scenario combination is used in order to estimate the variation of SLH extremes at the examined stations, for an indicative eleven-year period (2022-2032) in the near future.

Keywords: sea level height, climate change index, percentiles

1. Εισαγωγή

Το φαινόμενο της μετεωρολογικής παλίρροιας είναι η ανύψωση στη στάθμη της θάλασσας (Sea Level Height, SLH), που πιθανότατα συνοδεύεται από πλημμυρικά γεγονότα στην παράκτια ζώνη, και οφείλεται σε ακραίες μετεωρολογικές συνθήκες (θύελλα, καταιγίδα κλπ). Κυρίως σχετίζεται με τη διέλευση συστημάτων βαρομετρικού χαμηλού και την ταυτόχρονη παρουσία ισχυρών ανέμων. Σε ολόκληρη τη λεκάνη της Μεσογείου, υπάρχουν παράκτιες περιοχές που εμφανίζουν υψηλό κίνδυνο τρωτότητας, λόγω χαμηλού υψομέτρου, λείου ανάγλυφου και ήπιων κλίσεων. Ειδικά οι περιοχές του βόρειου Αιγαίου εμφανίζουν τη μεγαλύτερη επικινδυνότητα κατάκλυσης λόγω μετεωρολογικών

παλιρροιών (Laskaratos et al., 1991). Τα φαινόμενα διάβρωσης και πλημμυρών στην παράκτια ζώνη, τα οποία οφείλονται σε ακραίες τιμές *SLH*, μπορούν να έχουν εξαιρετικά δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον και την οικονομία, και να προκαλέσουν ακόμα και απώλειες ανθρώπινων ζώων. Για το λόγο αυτό, είναι ιδιαίτερα σημαντική η ανάδειξη των ευάλωτων περιοχών που χρήζουν απαραίτητων μέτρων προστασίας.

2. Μεθοδολογία

2.1 Διαθέσιμα δεδομένα

Τα δεδομένα στάθμης θάλασσας που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από τις καταγραφές των παλιρροιογράφων της Υδρογραφικής Υπηρεσίας Πολεμικού Ναυτικού (ΥΥΠΝ), οι οποίοι είναι τοποθετημένοι εντός λιμένων για την προστασία των μετρήσεων από το υψίσυχο σήμα της δράσης των παράκτιων κυματισμών. Επιλέχθηκαν πέντε σταθμοί (Αλεξανδρούπολη, Θεσσαλονίκη, Λευκάδα, Ηράκλειο, Χίος) με τρόπο που να καλύπτουν γεωγραφικά όλη την περιοχή μελέτης. Προκειμένου να αφαιρεθεί η συνιστώσα που σχετίζεται με την επίδραση των στερεοτικών φαινομένων μεγάλης κλίμακας της Μεσογείου, από τις καταγραφές των παλιρροιογράφων, έγινε χρήση φίλτρου διάβασης υψίσυχων αρμονικών (high-pass filter), τύπου κινούμενου μέσου με βήμα μεσοστάθμισης 30 ημερών (Conte & Lionello, 2013). Οι τιμές αριθμητικής προσομοίωσης για την *SLH* προέρχονται από τα κλιματικά μοντέλα μετεωρολογικής παλίρροιας MeCSM (Mediterranean Climatic Surge Model) και GrCSM (Greek Climatic Surge Model), από τα οποία το δεύτερο είναι υψηλότερης χωρικής ανάλυσης (Κρεστενίτης et al., 2014). Η διέγερση των μοντέλων γίνεται με αντίστοιχης ανάλυσης δεδομένα ατμοσφαιρικών συνιστωσών από το κλιματικό μοντέλο RegCM-III υπό το σενάριο A1B της IPCC. Περισσότερες πληροφορίες για το μαθηματικό ομοίωμα μπορούν να αναζητηθούν στο άρθρο των Krestenitis et al. (2011).

2.2 Δείκτες σύγκρισης

Ο ετήσιος δείκτης *SSI* (Storm Surge Index) ορίζεται ως ο μέσος όρος των τριών μέγιστων τιμών *SLH* ανά έτος, οι οποίες όμως αντιστοιχούν σε ανεξάρτητα συμβάντα. Για την περιοχή της Μεσογείου, η μέγιστη διάρκεια ενός συμβάντος θυέλλης εκτιμάται γύρω στις 120 ώρες. Ο δείκτης *SSI* της περιόδου 2002-2012 αποτελεί το μέσο όρο των 11 ετήσιων τιμών *SSI* (*mod*: δεδομένα προσομοιώσεων, *in situ*: επί τόπου μετρήσεις). Ο δείκτης σφάλματος *EI* είναι θετικός στις περιπτώσεις που το μοντέλο υπερεκτιμάει τις τιμές ανύψωσης της στάθμης και αρνητικός στις περιπτώσεις που τις υποεκτιμάει. Ο *EI* υπολογίζεται, βάσει της τυπικής απόκλισης σ , από τη σχέση:

$$EI = \frac{\overline{SSI_{mod}} - \overline{SSI_{in situ}}}{\sqrt{\sigma_{SSI_{mod}}^2 + \sigma_{SSI_{in situ}}^2}} \quad (1)$$

Ο ποσοστιαίος δείκτης Κλιματικής Αλλαγής ΔE (%) εκτιμά τη μεταβολή των ακραίων τιμών στάθμης για μια περίοδο στο μέλλον, σε σύγκριση με μια αντίστοιχη στο παρελθόν (Conte & Lionello, 2013). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τιμές προσομοίωσης της στάθμης από το μοντέλο GrCSM για δύο περιόδους, 2002-2012 και 2022-2032 (ενδεικτική ενδεκαετία στο μέλλον).

$$\Delta E (\%) = \frac{\overline{SSI_{mod}^{2022-2032}} - \overline{SSI_{mod}^{2002-2012}}}{\overline{SSI_{mod}^{2002-2012}}} \cdot 100 \quad (2)$$

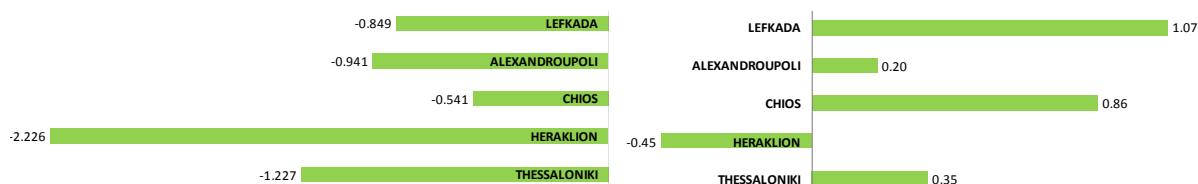
3. Αποτελέσματα

Με βάση τις καταγραφές των παλιρροιογράφων για την ενδεκαετία 2002-2012, οι μέγιστες τιμές στάθμης που οφείλονται στο φαινόμενο της μετεωρολογικής παλίρροιας παρουσιάστηκαν στις περιοχές του βόρειου και βορειοανατολικού Αιγαίου, δηλαδή στη Θεσσαλονίκη και στην Αλεξανδρούπολη (Πίνακας 1). Οι προσομοιωμένες τιμές *SLH*, με βάση το κλιματικό σενάριο A1B, για

την περίοδο αυτή ακολουθούν την ίδια λογική, και καταδεικνύουν ότι το MeCSM υποεκτιμά τις τιμές του *SSI* σε όλους τους σταθμούς της περιοχής μελέτης σε σχέση με το μοντέλο υψηλής ανάλυσης GrCSM. Σύμφωνα με τη σύγκριση των τιμών του δείκτη *SSI*, τα αποτελέσματα προσομοίωσης είναι πιο αξιόλογα στην περίπτωση του GrCSM. Στην Εικ. 1 παρουσιάζονται σε αντιδιαστολή οι *EI* από τις προσομοιώσεις με το MeCSM και το GrCSM. Παρατηρείται ότι η βελτίωση της απόδοσης του μοντέλου (Αλεξανδρούπολη, Ηράκλειο, Θεσσαλονίκη) με βάση την απόλυτη τιμή του *EI* είναι μεγαλύτερη από την υποβάθμισή της (Λευκάδα, Χίος). Σύμφωνα με το μοντέλο υψηλής ανάλυσης GrCSM, υποεκτίμηση των ανωμαλιών στάθμης θάλασσας από μετεωρολογική παλίρροια γίνεται μόνο στην περιοχή του νότιου Αιγαίου (Ηράκλειο).

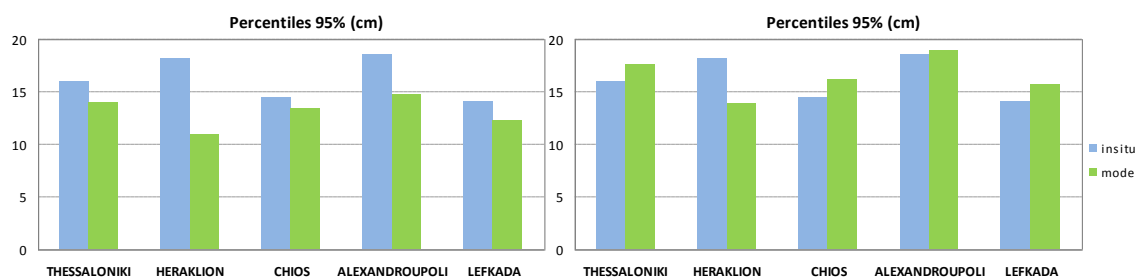
Πίνακας 1. Δείκτης *SSI* (m) για την περίοδο 2002-2012 με βάση τις καταγραφές των παλιρροιογράφων, και τις προσομοιώσεις των μοντέλων MeCSM και GrCSM.

Σταθμοί	In situ	MeCSM	GrCSM
Lefkada	0,214	0,177	0,263
Alexandroupoli	0,286	0,226	0,297
Chios	0,226	0,200	0,265
Heraklion	0,257	0,159	0,236
Thessaloniki	0,266	0,211	0,283

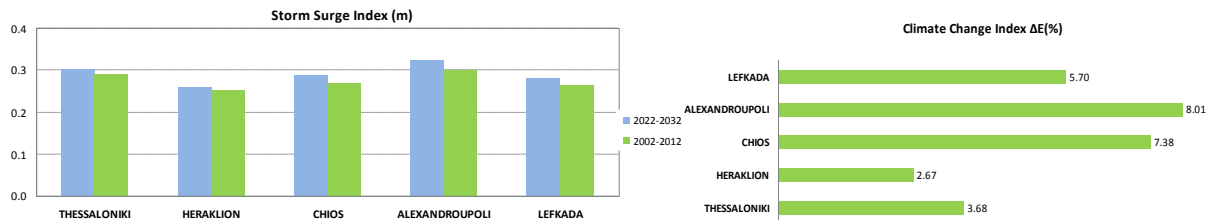


Εικ. 1. Δείκτης σφάλματος *EI* των προσομοιώσεων MeCSM (αριστερά) και του GrCSM (δεξιά).

Στην Εικ. 2 παρουσιάζεται το 95^ο εκατοστημόριο της κατανομής *SLH* (cm), για την περίοδο 2002-2012, με βάση τις *in situ* μετρήσεις και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Φαίνεται ότι στις περιοχές της Αλεξανδρούπολης και του Ηρακλείου τα αποτελέσματα βελτιώνονται σημαντικά για το αναλυτικό μοντέλο GrCSM, ενώ δεν διορθώνονται με αξιοσημείωτο τρόπο στις υπόλοιπες περιοχές. Η μέγιστη τιμή του 95^{ου} εκατοστημορίου για την *SLH* (~18 cm), εντοπίζεται στην Αλεξανδρούπολη (Εικ. 2), τόσο με βάση τις καταγραφές των οργάνων όσο και τα αποτελέσματα των μοντέλων. Όπως φαίνεται στην Εικ. 3 (αριστερό γράφημα), η τιμή του *SSI* προβλέπεται ότι θα αυξηθεί κατά την ενδεκαετία 2022-2032 και στους πέντε σταθμούς, με βάση την ανάλυση των προσομοιώσεων GrCSM. Η μέγιστη τιμή του *SSI* προκύπτει για την Αλεξανδρούπολη, όπου θα αγγίξει τα 32,5 cm. Στην Εικ. 3 (δεξιό γράφημα) απεικονίζεται ο δείκτης *ΔΕ* (%), που αντιστοιχεί στη μελλοντική τάση εξέλιξης του δείκτη *SSI*, λόγω βραχυπρόθεσμης επιρροής της Κλιματικής Αλλαγής. Οι τιμές του είναι θετικές σε όλους τους σταθμούς, μικρότερες όμως από τις αντίστοιχες από τις προσομοιώσεις με το MeCSM (δεν παρουσιάζεται εδώ). Οι μεγαλύτερες αυξήσεις σε ακραίες τιμές *SLH* ($\Delta E > 6\%$) προβλέπεται ότι θα παρατηρηθούν στο βορειοανατολικό και ανατολικό Αιγαίο (Αλεξανδρούπολη, Χίος).



Εικ. 2. Συγκρίσεις καταγραφών παλιρροιογράφων (γαλάζιο) έναντι αποτελεσμάτων προσομοιώσεων (πράσινο) από MeCSM (αριστερό γράφημα) και GrCSM (δεξιό γράφημα) με βάση το 95^ο εκατοστημόριο της κατανομής *SLH* (cm) για την περίοδο 2002-2012.



Εικ. 3. Δείκτης SSI (m) [αριστερό γράφημα] για την παρελθοντική (2002-2012) και τη μελλοντική (2022-2032) περίοδο από προσομοιώσεις GrCSM – Ποσοστιαίος δείκτης κλιματικής αλλαγής ΔE (%) [δεξιό γράφημα]

4. Συμπεράσματα

Οι συγκρίσεις των δεδομένων παρατήρησης έναντι των αποτελεσμάτων προσομοίωσης καταδεικνύουν ότι το μοντέλο υψηλής χωρικής ανάλυσης έχει μεγαλύτερη αξιοπιστία από το πιο αδρό MeCSM, όσον αφορά τόσο στον δείκτη SSI όσο και στα στατιστικά μέτρα διασποράς (υψηλής τάξης εκατοστημόρια). Οι συγκρίσεις των δεικτών SSI των δεδομένων παρατήρησης και των τιμών προσομοίωσης του μοντέλου υψηλής ανάλυσης GrCSM, υπό το σενάριο A1B, καταδεικνύουν και την πιθανότητα εμφάνισης του κλιματικού σεναρίου A1B. Η προβλεπόμενη μέγιστη ανύψωση της στάθμης θάλασσας, λόγω μετεωρολογικής παλίρροιας, είναι μεγαλύτερη στους σταθμούς του βορειοανατολικού και βόρειου Αιγαίου (Αλεξανδρούπολη και Θεσσαλονίκη) απ' ότι στις υπόλοιπες περιοχές. Με βάση τις πιο αξιόλογες προσομοιώσεις, το μελλοντικό σενάριο προβλέπει ενδεικτικά κατά την ενδεκαετία 2022-2032 τη μεγαλύτερη αύξηση των ακραίων επεισοδίων ανύψωσης στάθμης στο βορειοανατολικό και ανατολικό Αιγαίο (Αλεξανδρούπολη και Χίος).

5. Ευχαριστίες

Ευχαριστούμε θερμά την ΥΓΠΝ, και συγκεκριμένα τους κ.κ. Καρδαρά και Σκουτέλα για τη χορήγηση των δεδομένων από τις καταγραφές παλιρροιογράφων για την περίοδο 2002-2012.

6. Βιβλιογραφία

- Conte, D. and Lionello, P. 2013. Characteristics of large positive and negative surges in the Mediterranean Sea and their attenuation in future climate scenarios. *Global and Planetary Change*, 111, 159-173.
- Krestenitis, Y.N., Androulidakis, Y.S., Kontos, Y.N. and Georgakopoulos, G. 2011. Coastal inundation in the north-eastern Mediterranean coastal zone due to storm surge events. *Journal of Coastal Conservation*, 15, 353-368.
- Laskaratos, A., Krestenitis, Y. and Nittis, K. 1991. Experimental and numerical studies of storm surges in the Aegean Sea. *Research Project: Temporal and spatial variability of major floods around European coasts. Final Report*. University of Athens.
- Κρεστενίτης, Γ., Ανδρουλιδάκης, Γ., Κομπιάδου, Κ., Μακρής, Χ. και Μπαλτίκας, Β. 2014. Ακραίες τιμές μετεωρολογικής παλίρροιας στη Μεσόγειο Θάλασσα και στο Αιγαίο Πέλαγος λόγω Κλιματικής Αλλαγής. Σε: 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Διαχείρισης Και Βελτίωσης Παράκτιων Ζωνών. Πρακτικά Συνεδρίου. Εργαστήριο Λιμενικών Έργων Ε.Μ.Π., Αθήνα.