

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΠΑΛΙΡΡΟΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΖΩΝΗ ΥΠΟ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ

**Γιάννης Κρεστενίτης, Χρήστος Μακρής, Γιάννης Ανδρουλιδάκης,
Κατερίνα Κομπιάδου, Βασίλης Μπαλτίκας**

Εργαστήριο Θαλάσσιας Τεχνικής και Θαλάσσιων Έργων, Τομέας Υδραυλικής και Τεχνικής
Περιβάλλοντος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσ/νίκης, 54124
Θεσ/νίκη. E-mail: cmakris@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η εξέλιξη των ακραίων τιμών της μεταβολής της θαλάσσιας στάθμης στις παράκτιες ζώνες του Αιγαίου και του Ιονίου Πελάγους. Η ανάλυση καλύπτει μία περίοδο 150 ετών (1951-2100) και στηρίζεται σε προσομοιώσεις με τη χρήση ενός διδιάστατου υδροδυναμικού μοντέλου (GreCSSM) υψηλής χωρικής ανάλυσης, με βάση το κλιματικό σενάριο A1B της IPCC για την περίοδο 2001-2100. Η σύγκριση στατιστικών μέτρων/δεικτών και χωρικών κατανομών των ακραίων τιμών μεταξύ παρατηρήσεων και αποτελεσμάτων της προσομοίωσης βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία. Παρουσιάζονται οι μελλοντικές τάσεις, η μεταβλητότητα και η συχνότητα εμφάνισης των ακραίων τιμών μετεωρολογικής παλίρροιας στις θαλάσσιες λεκάνες που βρέχουν τις ηπειρωτικές και νησιωτικές παράκτιες περιοχές της ελληνικής επικράτειας.

Λέξεις-κλειδιά: μετεωρολογική παλίρροια, κλιματική αλλαγή, αριθμητική προσομοίωση, ελληνική παράκτια ζώνη, μελλοντικές τάσεις

STORM SURGE SIMULATIONS IN THE GREEK COASTAL ZONE UNDER CLIMATE CHANGE

**Yannis Krestenitis, Christos Makris, Yannis Androulidakis, Katerina Kombiadou,
Vassilis Baltikas,**

Lab. of Maritime Engineering and Maritime Works, Div. of Hydraulics and Environmental
Engineering, Dept. of Civil Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, GR-54124
Thessaloniki, Greece. E-mail: cmakris@civil.auth.gr

ABSTRACT

In the present study, we investigate the evolution of sea level anomalies maxima in the coastal zones of the Aegean and Ionian Seas. The analysis covers a period of 150 years (1951-2100) and hinges on simulations with the use of a two-dimensional hydrodynamic model (GreCSSM) of high spatial resolution, based on the A1B climate scenario of IPCC for the 2001-2100 period. The comparison between in situ observations and simulation results of statistical measures/indices and spatial distribution of maxima values are in satisfactory agreement. Future trends, variability and occurrence frequency of storm surge maxima are also presented concerning the maritime basins that abut the continental and island coastal regions of Greece.

Key-words: storm surges, climate change, numerical simulation, Greek coastal zone, future trends

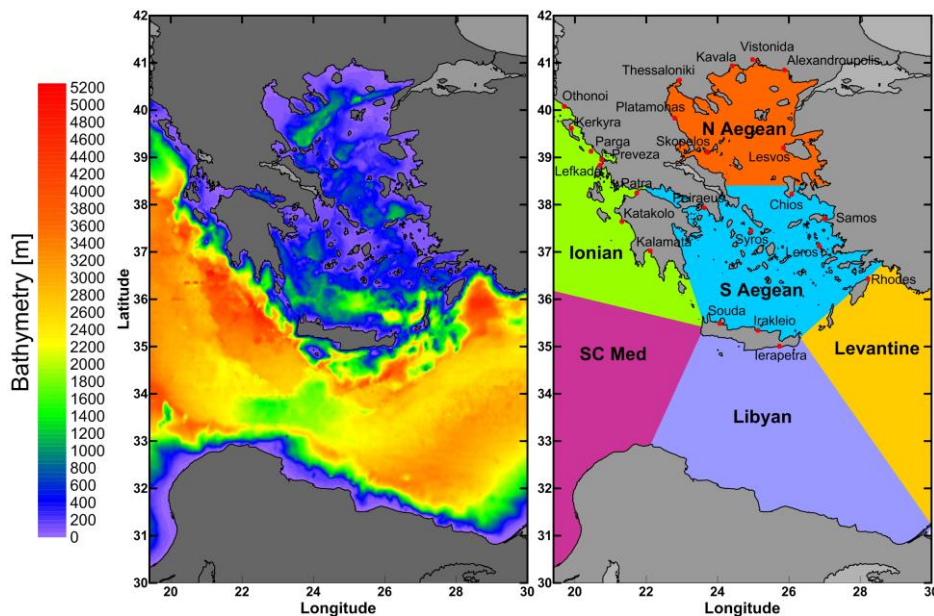
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ακραία γεγονότα ανύψωσης της Μέσης Στάθμης Θάλασσας (ΜΣΘ), λόγω μετεωρολογικής παλίρροιας (storm surge/tide), αποτελούν σημαντικό κίνδυνο για την ελληνική παράκτια ζώνη, ειδικά σε περιοχές με χαμηλό υψόμετρο εδάφους. Στο παρελθόν, παρόμοια γεγονότα έχουν προκαλέσει εκτεταμένη κατάκλυση με αποτέλεσμα ενίοτε ανθρώπινες και συχνά υλικές απώλειες, καταστροφές σε λιμενικά έργα και παράκτιες κατασκευές, και έμμεσες περιβαλλοντικές επιπτώσεις (διάβρωση ακτών, υφαλμύριση παράκτιων επιφανειακών νερών και υπόγειων υδροφορέων, καθίζηση εδάφους και καταστροφή χλωρίδας) σε οικολογικά ευαίσθητες περιοχές της παράκτιας ζώνης (White, 1974). Επιπρόσθετα, η εκτιμώμενη Κλιματική Αλλαγή στον 21^ο αιώνα αναμένεται να επηρεάσει τη συχνότητα εμφάνισης, τις τροχιές και την ένταση των έντονων καταιγίδων, σύμφωνα με τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC), γεγονός το οποίο μπορεί να προκαλέσει αύξηση των ακραίων τιμών της ανύψωσης τη στάθμης θάλασσας τοπικά, λόγω της συνδυασμένης επίδρασης της ανύψωσης της ΜΣΘ στον παγκόσμιο ωκεανό και των υψηλότερων τιμών μετεωρολογικών παλίρροιών (Wang et al., 2008). Αρκετοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με αυτό το επιστημονικό αντικείμενο για τις περισσότερες θάλασσες στην Ευρώπη, ενώ για τη Μεσόγειο, οι διαθέσιμες μελέτες αφορούν κυρίως ολόκληρη τη λεκάνη και μερικές από αυτές έχουν εστιάσει και σε επιμέρους υπο-λεκάνες (π.χ. Βαlearική και Αδριατική Θάλασσα κλπ). Στην παρούσα εργασία διερευνάται η εξέλιξη των ετήσιων ακραίων τιμών της μεταβολής της θαλάσσιας στάθμης στις παράκτιες ζώνες του Αιγαίου και του Ιονίου Πελάγους. Η ανάλυση καλύπτει μία περίοδο 150 ετών (1951-2100) και βασίζεται σε αριθμητικές προσομοιώσεις με τη χρήση υδροδυναμικού μοντέλου σε υπολογιστικό πεδίο υψηλής χωρικής ανάλυσης. Τα ατμοσφαιρικά δεδομένα εισόδου προέρχονται από κλιματικές προσομοιώσεις με την 3^η έκδοση του Regional Climate Model (RegCM3). Η προσομοίωση ελέγχου για την περίοδο αναφοράς (1951-2000) γίνεται με βάση ιστορικά καταγεγραμμένα στοιχεία εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας στη στάθμη της θάλασσας. Για τη μελλοντική περίοδο 2001-2100, η προσομοίωση βασίζεται στο κλιματικό σενάριο A1B της IPCC. Ελέγχεται η ικανότητα του μοντέλου μετεωρολογικής παλίρροιας να αποτυπώσει επαρκώς την εξέλιξη των ακραίων τιμών της ΜΣΘ για μελλοντικές ατμοσφαιρικές συνθήκες, υπό την επιρροή της Κλιματικής Αλλαγής. Η αξιολόγηση γίνεται μέσω σύγκρισης στατιστικών μέτρων και δεικτών των ακραίων τιμών μεταξύ επί τόπου παρατηρήσεων και αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, οι οποίες βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αφορούν κυρίως στις μελλοντικές τάσεις, και στη χωρική μεταβλητότητα των ετήσιων ακραίων τιμών της ανύψωσης της ΜΣΘ, ενώ εξετάζεται επίσης η διάρκεια και η χωρική κάλυψη ακραίων γεγονότων. Η εργασία έγινε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου CCSEAWAVS (Πρόγραμμα ΘΑΛΗΣ, <http://www.thalis-ccseawavs.web.auth.gr/en/>).

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης (Εικ. 1) βρίσκεται στο ανατολικό τμήμα της Μεσογείου, καλύπτει μέρος του κεντρικού της τμήματος, μεταξύ των μεσημβρινών 19.4° E και 30° E, και αφορά κυρίως στο Αιγαίο και στο Ιόνιο Πέλαγος, και συνεπώς την παράκτια ζώνη ολόκληρης της ελληνικής επικράτειας, αλλά και της δυτικής Ανατολίας (Τουρκία). Το συνολικό πεδίο προσομοίωσης καλύπτει επίσης το Λιβυκό Πέλαγος και ένα μικρό τμήμα της θάλασσας της Λεβαντίνης. Η πολύπλοκη γεωμορφολογία και η παρουσία μεγάλου αριθμού νησιών, κυρίως στο αρχιπέλαγος του Αιγαίου, καθιστούν την περιοχή μελέτης ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα. Οι θαλάσσιες υπο-περιοχές του πεδίου μελέτης (Εικ. 1) διακρίνονται από έντονα μεταβαλλόμενες βαθυμετρίες, με βαθιές λεκάνες, εκτεταμένα, ρηχά τμήματα υφαλοκρηπίδας, και εξαιρετικά πολύπλοκες ακτογραμμές. Οι τελευταίες είναι σχεδόν ισομερώς κατανομημένες σε απότομους (ανακλαστικούς) βραχώδεις σχηματισμούς και διακόπτονται πολύ συχνά από μικρές σε μήκος και σπάνια φαρδιές παραλίες απόσβεσης της κυματικής ενέργειας. Οι τελευταίες έχουν σχετικά ήπιες κλίσεις και είναι ιδανικές για τουριστικές δραστηριότητες αναψυχής, όμως απειλούνται άμεσα από κατάκλυση κατά τη

διάρκεια έντονων φαινόμενων ανύψωσης της ΜΣΘ. Ιδιαίτερα στις θάλασσες του Αιγαίου και του Ιονίου, λαμβάνει χώρα μεγάλος αριθμός ναυτικών και/ή θαλάσσιων δραστηριοτήτων, όπως εμπόριο, μεταφορές, αλιεία και υδατοκαλλιέργειες, ιστιοπλοΐα, αθλητικές εκδηλώσεις, και τουρισμός, ιδιαίτερα κατά τη θερινή περίοδο. Επιπλέον, η ελληνική παράκτια ζώνη είναι ιδιαίτερα πυκνοκατοικημένη με πολλές παράκτιες πόλεις, λιμάνια και μαρίνες, δέλτα ποταμών, προστατευμένους υγροτόπους, βραχονησίδες, νησιωτικούς σχηματισμούς, και ιδιαίτερα πολυσχιδή ακτογραμμή με παράκτιες περιοχές χαμηλού υψόμετρου. Οι μετεωρολογικές παλίρροιες στο Ιόνιο και το Αιγαίο Πέλαγος προκαλούνται, λόγω της επίδρασης του «ανεστραμμένου βαρόμετρου» και της πνοής δυνατών ανέμων, τα οποία οφείλονται συνήθως σε αμβλυμένες υπερ-τροπικές καταιγίδες που ακολουθούν κατεύθυνση από δυτικά προς ανατολικά στη Μεσόγειο (Krestenitis et al., 2011). Το σήμα της αστρονομικής παλίρροιας στην περιοχή μελέτης είναι σχετικά ασθενές, και συνεπώς οι ακραίες τιμές της ΜΣΘ σχετίζονται περισσότερο με τις μετεωρολογικές παλίρροιες παρά με το συνδυασμό τους με αστρονομικές συνιστώσες ανύψωσης (Marcos et al., 2009).



ΕΙΚΟΝΑ 1 Βαθυμετρία (m) της περιοχής μελέτης και χαρακτηριστικές υπο-περιοχές με συγκεκριμένους σταθμούς ενδιαφέροντος (αριστερό και δεξί γράφημα, αντίστοιχα).

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1. Μοντέλα προσομοίωσης κλίματος και μετεωρολογικής παλίρροιας

Το περιοχικό μοντέλο προσομοίωσης του κλίματος RegCM3 είναι ένα ατμοσφαιρικό αριθμητικό ομοίωμα πεπερασμένων διαφορών, με υδροστατική ισορροπία και «σίγμα» κατακόρυφες συντεταγμένες. Έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως και αξιολογηθεί εκτενώς για τη μελέτη της εξέλιξης των ατμοσφαιρικών παραμέτρων τόσο για προσομοιώσεις σε παρελθόντες χρόνους (hindcasts) όσο και μελλοντικές προγνώσεις (forecasts). Οι βασικές παραμετροποιήσεις του RegCM3 για τις προσομοιώσεις στην περιοχή μελέτης δίνονται στον Πίνακα 1. Το μοντέλο έχει αξιολογηθεί εκτενώς έναντι επί τόπου δεδομένων παρατήρησης, για τη διερεύνηση μεταβολών του κλίματος στην περιοχή μελέτης (Tolika et al., 2015). Το κλιματικό σενάριο A1B βασίζεται στην παραδοχή ότι όλες οι πηγές ενέργειας θα χρησιμοποιούνται ισότιμα και χαρακτηρίζεται ως μετριοπαθές, αναφορικά με τις προβλέψεις συγκεντρώσεων CO₂ μέχρι το τέλος του 21^{ου} αιώνα (IPCC). Το RegCM3 παρείχε τα δεδομένα εισόδου για το μοντέλο προσομοίωσης της μετεωρολογικής παλίρροιας, δηλαδή τα πεδία ανέμου στα 10 m από τη θαλάσσια στάθμη ηρεμίας και ατμοσφαιρικής πίεσης στην επιφάνεια της θάλασσας με χωρική διακριτοποίηση 10×10 Km. Οι προσομοιώσεις της μεταβολής της ΜΣΘ, λόγω ατμοσφαιρικών συνθηκών, που στοχεύουν στην προσομοίωση του παρόντος και μελλοντικού κλίματος αναφορικά με τις μετεωρολογικές παλίρροιες, έγιναν με το αριθμητικό ομοίωμα υψηλής χωρικής ανάλυσης Greek Climatic Storm

Surge Model (GreCSSM) (Krestenitis et al., 2015 και Makris et al., 2015). Το GreCSSM είναι μονόδρομα εμφωλευμένο στο αδρότερης χωρικής ανάλυσης μοντέλο για τη Μεσόγειο (MeCSSM), το οποίο έχει παρουσιαστεί, βαθμονομηθεί και αξιολογηθεί εκτενώς από τους Androulidakis et al. (2015) και Krestenitis et al., 2014. Πρόκειται για 2-διάστατο υδροδυναμικό μοντέλο που επιλύει τις ολοκληρωμένες κατά το βάθος εξισώσεις ρηχών νερών και το οποίο προσομοιώνει τις μεταβολές της ΜΣΘ, λόγω ατμοσφαιρικών συνθηκών, στις θάλασσες που βρέχουν την ελληνική επικράτεια σε έναν υπολογιστικό κানাβο $1/20^\circ \times 1/20^\circ$ ($\Delta x \approx 5$ Km). Τα κύρια χαρακτηριστικά του μοντέλου GreCSSM δίνονται στον Πίνακα 1 και περαιτέρω λεπτομέρειες από τους Androulidakis et al. (2015) και Makris et al. (2015).

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Βασικές παραμετροποιήσεις του RegCM3 και GreCSSM για την περιοχή μελέτης.

Παραμετροποίηση RegCM3	Βιβλιογραφική Αναφορά ή Τιμή Παραμέτρου
Κελιά κανάβου / Κατακόρυφα επίπεδα	128x160 / 18
Βάση προσομοίωσης 1951-2000 / 2001-2100	Ιστορικά δεδομένα 20C3M / Κλιματικό σενάριο A1B
Χρόνος Ολοκλήρωσης – Χρονικό Βήμα	1/1/1950–31/12/2100 – 30 sec
Πεδίο αρχικοποίησης προσομοίωσης	RegCM3 για ολόκληρη την Ευρώπη
Χωρική Ανάλυση εδάφους και χρήσεων γης	3 πρώτα λεπτά της μοίρας
Νεφοκάλυψη - Συναγωγή - Οριακή Στοιβάδα	Grell, 1993 – Fritsch & Chappell, 1980 - Holtslag et al., 1991 *
Παραμετροποίηση GreCSSM	Βιβλιογραφική Αναφορά ή Τιμή Παραμέτρου
Ατμοσφαιρικά δεδομένα εισόδου	RegCM3
Βαθυμετρία / Κελιά / Χωρική ανάλυση	GEBCO / $213 \times 261 / 1/20^\circ \times 1/20^\circ$
Χρόνος Ολοκλήρωσης – Χρονικό Βήμα	1/1/1950–31/12/2100 – 30 sec
Τριβές διεπιφάνεια αέρα-νερού / πυθμένα	Smith and Banke (1975) / Wang (2002) **
Οριακές συνθήκες / Τεχνική εμφώλευσης	MeCSSM (Androulidakis et al. 2015) / Ανοιχτό όριο ΜΣΘ
Τυρβώδης κινηματική συνεκτικότητα	Υπόθεση Boussinesq: οριζόντιο μοντέλο Smagorinsky
*/** Οι σχετικές αναφορές μπορούν να εντοπιστούν στο άρθρο των Androulidakis et al. (2015)	

3.2. Δεδομένα παρατήρησης για τη μέση στάθμη θάλασσας

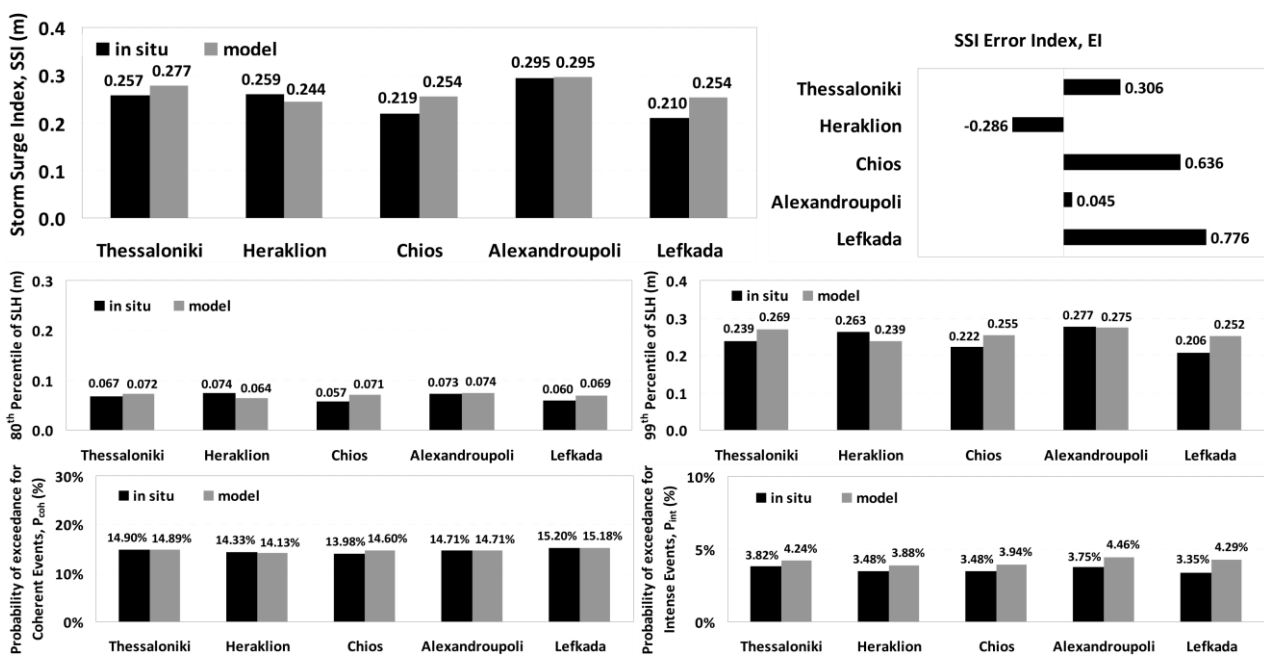
Τα δεδομένα παρατήρησης, που χρησιμοποιήθηκαν για σύγκριση με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, παραχωρήθηκαν από την Υδρογραφική Υπηρεσία του Πολεμικού Ναυτικού (ΥΥΠΝ, <http://www.hnhs.gr/portal/page/portal/HNHS>). Οι καταγραφές των παλιρροιογράφων είναι μέσες ημερήσιες τιμές ανύψωσης της ΜΣΘ, τις οποίες έχουμε μετεπεξεργαστεί με κατάλληλα φίλτρα αφαίρεσης αρμονικών, έτσι ώστε να απομακρυνθεί το σήμα της αστρονομικής παλίρροιας και να αποκλειστούν οι μακροπρόθεσμες (>30 ημέρες) ταλαντώσεις της θαλάσσιας επιφάνειας (Conte and Lionello, 2013) λόγω στερικών (steric) φαινομένων, δηλαδή των μεγάλης κλίμακας, βραχύσυχων, θερμοαλατικών διακυμάνσεων και/ή μεταβολών της συνολικής μάζας στη Μεσόγειο (Carillo et al., 2012). Τα δεδομένα ΜΣΘ των παλιρροιογράφων καλύπτουν την περίοδο 1995-2012, δηλ. τα τελευταία 6 έτη (1995-2000) της περιόδου αναφοράς και την πρώτη 12ετία (2001-2012) της προσομοίωσης βάσει του κλιματικού σεναρίου. Για τις συγκρίσεις, γίνεται χρήση της ενιαίας χρονοσειράς της 18ετίας (1995-2012), καθώς οι μελλοντικές προβολές μέχρι το 2012 π.χ. των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ακολουθούν τις τάσεις των ιστορικά μετρημένων παρατηρήσεων (IPCC).

4. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΠΑΛΙΡΡΟΙΑΣ

Τα αποτελέσματα του μοντέλου GreCSSM αφορούν στην ανύψωση της ΜΣΘ (Sea Level Height, *SLH*). Διερευνήθηκαν οι στατιστικά σημαντικές τιμές με βάση τις ακραίες ετήσιες καταγραφές *SLH*, με τη χρήση του δείκτη μετεωρολογικής παλίρροιας (Storm Surge Index, *SSI*) των Conte and Lionello (2013). Ο *SSI* ορίζεται ως η μέση τιμή των τριών ανεξάρτητων μέγιστων καταγραφών *SLH* ανά έτος. Μόνο γεγονότα που διαχωρίζονται μεταξύ τους κατά τουλάχιστον 120 ώρες (εκτίμηση μέγιστης διάρκειας καταιγίδας στην περιοχή), θεωρούνται ανεξάρτητα. Ο *SSI* υπολογίστηκε σε 5 σταθμούς μελέτης, μαζί με το αντίστοιχο ανηγμένο σφάλμα:

$$EI = \left(\overline{SSI}_{\text{mod}} - \overline{SSI}_{\text{obs}} \right) / \sqrt{\left(\sigma_{SSI_{\text{mod}}}^2 + \sigma_{SSI_{\text{obs}}}^2 \right) / 2}$$

όπου η υπεργράμμιση συμβολίζει μέσες τιμές του *SSI* για τις περιόδους σύγκρισης, από τα δεδομένα προσομοίωσης (mod) και παρατήρησης (obs), και σ είναι η τυπική απόκλιση της μεταβολής του *SSI* για κάθε σταθμό. Το *EI* είναι θετικό όταν το μοντέλο υπερεκτιμά την ακραία ετήσια τιμή της ΜΣΘ έναντι των δεδομένων των παλιρροιογράφων. Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται η αξιολόγηση των προσομοιώσεων με το GreCSSM με βάση τις προαναφερθείσες συγκρίσεις σε 5 σταθμούς. Τα άνω γραφήματα αναφέρονται στα μεγέθη *SSI* και *EI*, ενώ τα μεσαία αφορούν τα μέσης και ανώτερης τάξης (80^ο και 99^ο) εκατοστημόρια (percentiles) του *SLH*. Εκτός από τα προαναφερθέντα ετήσια και 18ετή μέγιστα, τα κάτω γραφήματα (Εικ. 2) παρουσιάζουν τις πιθανότητες υπέρβασης των συνεκτικών (coh) και έντονων (int) γεγονότων, P_{coh} και P_{int} (%). Τα τελευταία είναι ευρετικά στατιστικά μέτρα (Androulidakis et al., 2015), που εκφράζουν το ποσοστό των συμβάντων που ξεπερνούν κρίσιμες τιμές της χρονοσειράς του *SLH* ($SLH_{coh} > m + \sigma$ και $SLH_{int} > m + 2\sigma$, m είναι το μέσο *SLH*). Οι συγκρίσεις υποστηρίζουν την καλή απόδοση του μοντέλου, με μικρές τιμές σφάλματος για τον *SSI* ($EI < 0.8$ σε όλους τους σταθμούς). Τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα του μοντέλου, με όρους ετήσιων μέγιστων του *SLH* (*SSI*), αφορούν το Β. και Ν. Αιγαίο (Αλεξανδρούπολη και Ηράκλειο). Το μέγιστο αποδεκτό σφάλμα ($EI \approx 0.78$) εντοπίζεται στη Λευκάδα (Ιόνιο), η οποία βρίσκεται κοντά στο δυτικό όριο του πεδίου. Το 80^ο και 99^ο εκατοστημόριο του *SLH* για όλη τη 18ετία (μεσαία γραφήματα Εικ. 2) δείχνουν ότι οι προσομοιωμένες τιμές είναι αρκετά κοντά στις παρατηρήσεις, γεγονός που καθιστά το μοντέλο GreCSSM επαρκές για την εκτίμηση των ακραίων τιμών μετεωρολογικής παλίρροιας σε κλιματικές προσομοιώσεις. Ο σταθμός της Αλεξανδρούπολης (Β. Αιγαίο) δίνει πάλι τα καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τους υπόλοιπους. Επιπρόσθετα, οι πιθανότητες υπέρβασης από τα αποτελέσματα του μοντέλου συσχετίζονται πολύ ικανοποιητικά με τις μετρημένες τιμές σε όλους τους σταθμούς. Οι πιθανότητες των ακραίων συμβάντων υπερεκτιμώνται ελαφρά σε σύγκριση με τα επί τόπου δεδομένα, όμως οι διαφορές είναι μικρές (0.4~0.9%).

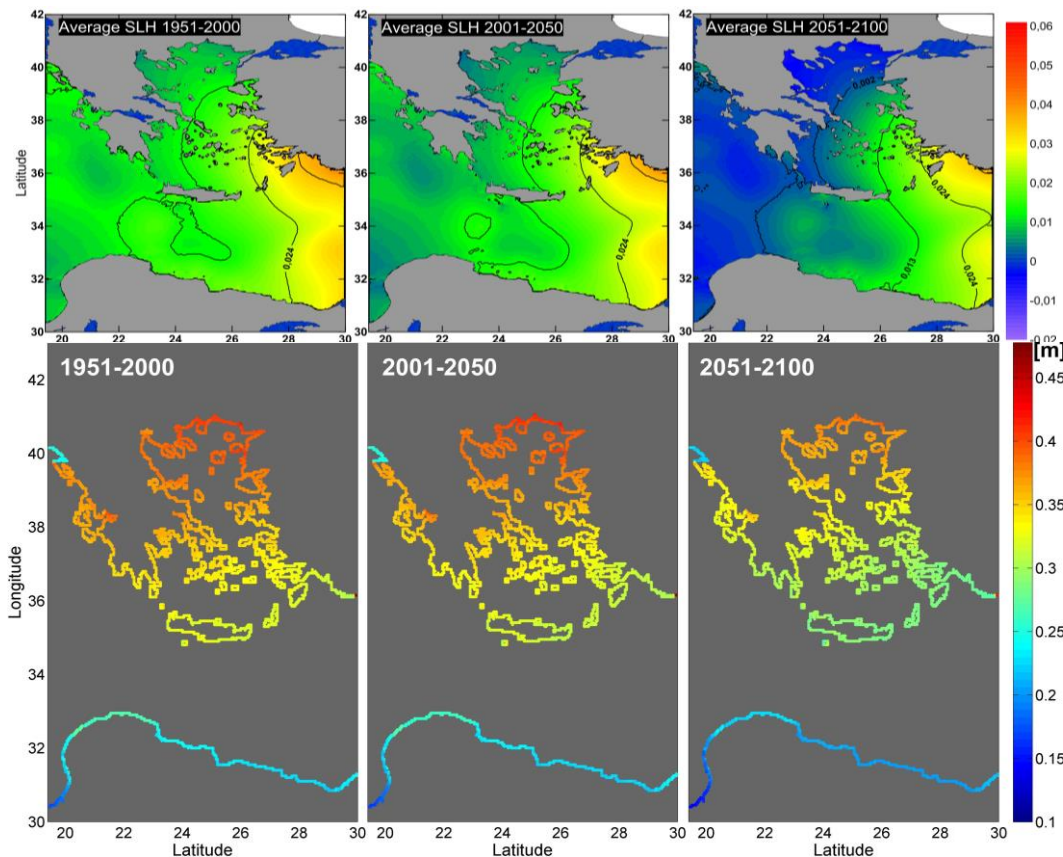


ΕΙΚΟΝΑ 2 Αξιολόγηση του μοντέλου GreCSSM έναντι επί τόπου παρατηρήσεων σε 5 ελληνικούς σταθμούς για τη 18ετία 1995-2012. Συγκρίσεις με βάση τους δείκτες *SSI* (m) και *EI* (πάνω αριστερά και δεξιά), τα μέσης και υψηλής τάξης (80^ο και 99^ο) εκατοστημόρια του *SLH* (m) (μέση αριστερά και δεξιά), και τις πιθανότητες υπέρβασης συνεκτικών και έντονων γεγονότων, P_{coh} και P_{int} (%) (κάτω αριστερά και δεξιά).

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα αφορούν στην εξέλιξη των ακραίων τιμών ανύψωσης της ΜΣΘ, λόγω μετεωρολογικής παλίρροιας. Η ανάλυση βασίζεται σε προσομοιώσεις ελέγχου για την περίοδο

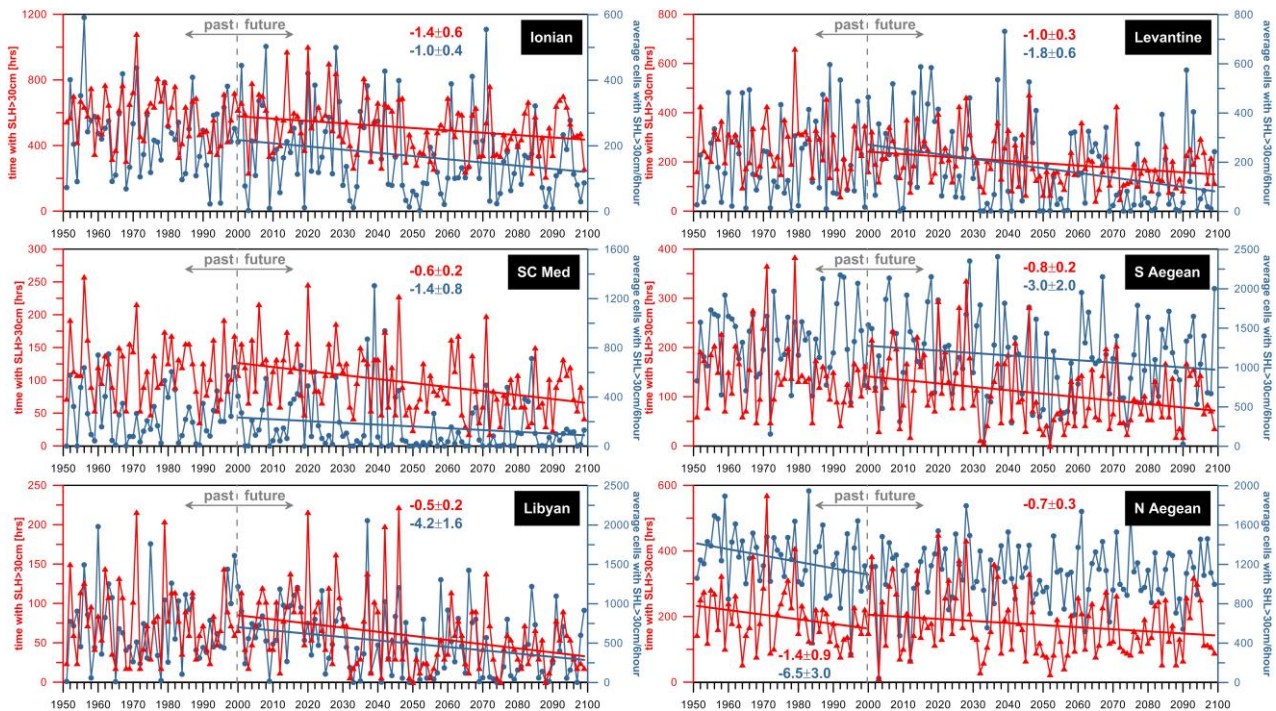
αναφοράς (1951-2000) και προσομοιώσεις υπό το σενάριο A1B για την μελλοντική περίοδο (2001-2100). Η τελευταία χωρίζεται περαιτέρω σε δύο 50ετείς υπο-περιόδους (2001-2050 και 2051-2100). Οι συγκρίσεις των αποτελεσμάτων μεταξύ των τριών υπο-περιοδών στοχεύουν στον εντοπισμό εμφανούς σήματος επίδρασης της Κλιματικής Αλλαγής στο μελλοντικό καθεστώς των μετεωρολογικών παλιρροιών στην ελληνική παράκτια ζώνη. Η Εικόνα 3 (άνω γραφήματα) παρουσιάζει την χωρική κατανομή του μέσου SLH (m), λόγω μετεωρολογικών παλιρροιών, από τις προσομοιώσεις του GreCSSM για τις τρεις υπο-περιόδους μελέτης. Παρατηρούμε ένα ευσταθές πρότυπο για την ανύψωση της ΜΣΘ, με αυξανόμενες τιμές από δυτικά προς ανατολικά. Παρόλο που η περίοδος αναφοράς και η 1^η μελλοντική 50ετία δε διαφέρουν σημαντικά, η εκτίμηση για το 2^ο μισό του 21^{ου} αιώνα είναι ότι θα παρατηρηθεί μια έντονη μείωση των τιμών της ΜΣΘ.



ΕΙΚΟΝΑ 3 Οριζόντια κατανομή του μέσου (άνω γραφήματα) SLH (m) για τις περιόδους 1951-2000, 2001-2050, και 2051-2100 (από αριστερά προς τα δεξιά) για την προσομοίωση με το GreCSSM. Δείκτης SSI (m) κατά μήκος της ακτογραμμής στην περιοχή μελέτης, χρονικά μεσοσταθμισμένος ανά 50ετία.

Το στατιστικά σημαντικό ετήσιο μέγιστο SLH που εκτιμάται ότι θα παρατηρηθεί στις δύο μελλοντικές υπο-περιόδους, υπό το κλιματικό σενάριο A1B, μπορεί να αποτυπωθεί από τον δείκτη SSI . Η Εικόνα 3 (κάτω γραφήματα) δείχνει τη μέση τιμή 50ετίας των SSI (SSI_{50yr}) κατά μήκος της παράκτιας ζώνης της περιοχής μελέτης, που περιλαμβάνει ολόκληρη την ελληνική ακτογραμμή και τις ακτές της Ανατολίας και της Β. Αφρικής. Το πρότυπο της χωρικής κατανομής του SSI_{50yr} στην παράκτια ζώνη είναι παρόμοιο με αυτό των ετήσιων μέγιστων τιμών ΜΣΘ στα στερεά όρια της περιοχής μελέτης (Makris et al., 2015). Οι μέγιστες τιμές του SSI (>40 cm) εντοπίζονται κατά μήκος των βόρειων ακτών του Αιγαίου (κυρίως στο Θρακικό πέλαγος). Οι τιμές του SSI φαίνεται ότι ελαττώνονται από Βορρά προς Νότο, κυμαίνονται από 0.32 έως 0.38 cm για το Κεντρικό Αιγαίο και το Ιόνιο, φτάνοντας περίπου 0.3 cm στο Ν. Αιγαίο και την Κρήτη, και κάτω από 0.25 cm για τις βόρειες αφρικανικές ακτές. Η εξασθένηση των θυελλών/καταιγίδων και της μέγιστης ανύψωσης της ΜΣΘ για την περίοδο 2051-2100 επιβεβαιώνεται και από τη χρονική εξέλιξη του SSI_{50yr} . Εξετάζοντας τα SSI_{50yr} μεταξύ της περιόδου 2001-2050 και τις προηγούμενης 50-ετίας, παρατηρούνται διαφορές, που κυμαίνονται από -1.5 έως +1.0 cm (-5 έως +20%), με ένα μικρό μέσο

όρο -0.5 cm (-1.5%). Συνεπώς, παρότι τα μεγαλύτερα ακραία γεγονότα μετεωρολογικής παλίρροιας μπορεί να συμβούν τα πρώτα 50 έτη της μελλοντικής περιόδου (Makris et al., 2015), η συχνότητά τους είναι μικρή, με τιμές SSI_{50-yr} σε επίπεδα αντίστοιχα με αυτά της περιόδου αναφοράς. Συγκρίνοντας το 2^ο με το 1^ο μισό του 21^{ου} αιώνα, βλέπουμε ότι τα SSI μειώνονται σε γενικές γραμμές, με σχετικές διαφορές ανάμεσα σε -1.5 και 0.0 cm (-18 ως +2%), και κατά μέσο όρο -5 cm (-8%). Συνεπώς, σύμφωνα με το σενάριο A1B, αναμένεται σαφής εξασθένηση της έντασης των θυελλών/καταιγίδων και των ετήσιων μέγιστων μετεωρολογικών παλιρροιών στο Αιγαίο και το Ιόνιο Πέλαγος κατά τη διάρκεια του 2^{ου} μέρους της μελλοντικής περιόδου. Παρ' όλα αυτά, το μέγεθος των απόλυτα ακραίων τιμών ΜΣΘ αναμένεται να αυξηθεί κατά τη διάρκεια του 1^{ου} μισού του 21^{ου} αιώνα, π.χ. κατά 30-40%, ιδίως στο Βόρειο Αιγαίο (Makris et al., 2015).



ΕΙΚΟΝΑ 4 Ετήσια διάρκεια (hrs) (κόκκινες καμπύλες με τρίγωνα) και αντίστοιχος μέσος αριθμός κελιών (μπλε καμπύλες με τελείες) για $SLH > 30$ cm σε όλες τις τοπικές υπο-περιοχές (Εικ. 1). Γραμμικές τάσεις εξέλιξης παραμέτρων στον 21^ο αιώνα, με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, ξεχωριστά για περίοδο αναφοράς και μέλλον. Τιμές κλίσης των τάσεων με αντίστοιχο χρώμα.

Στην Εικόνα 4 παρουσιάζονται η μέση ετήσια διάρκεια σε ώρες και ο αντίστοιχος μέσος αριθμός κελιών (κόκκινες και μπλε καμπύλες, αντίστοιχα) για τα οποία το SLH ξεπερνάει τα 30 cm σε όλες τις υπο-περιοχές μελέτης (Εικ. 1). Μόνο στατιστικά σημαντικές τάσεις (θεωρώντας επίπεδο εμπιστοσύνης 95%) έχουν σχεδιαστεί στα γραφήματα για κάθε παράμετρο και κάθε περίοδο (αναφοράς και μελλοντική) ξεχωριστά, μαζί με τις αντίστοιχες τιμές των κλίσεων των τάσεων. Οι μέγιστες τιμές της χωρικής κάλυψης των μετεωρολογικών παλιρροιών παρατηρούνται στο κεντρικό τμήμα του υπολογιστικού πεδίου (Αιγαίο και Λιβυκό Πέλαγος), ενώ τα πιο συχνά γεγονότα μεγάλης διάρκειας με $SLH > 30$ cm εκτιμάται ότι θα συμβούν στο Ιόνιο. Για την περίοδο αναφοράς δε διαφαίνεται ξεκάθαρη τάση, τόσο για τη διάρκεια όσο και για τη χωρική κάλυψη των μετεωρολογικών παλιρροιών σε όλες τις περιοχές, εκτός από το Β. Αιγαίο, όπου παρατηρείται έντονη μείωση και στα δύο. Για την περίοδο 2001-2100 παρατηρείται καθαρή πτωτική τάση και για τους δύο παράγοντες σχεδόν στο σύνολο του πεδίου μελέτης, εκτός από το Β. Αιγαίο, όπου δεν υπάρχει αξιόπιστη τάση για τη χωρική κάλυψη. Η μειωτική τάση είναι σε συμφωνία με την προβλεπόμενη εξασθένηση των καταιγίδων υπό το σενάριο A1B. Ωστόσο, παρόλο που μειώνονται οι γενικές μελλοντικές τάσεις, παρατηρούμε βραχυπρόθεσμες εξάρσεις στις χρονοσειρές του 2001-2100, που υπερβαίνουν τις τιμές του παρελθόντος, π.χ. η χρονική διάρκεια των καταιγίδων στο Ιόνιο, το Ν. Αιγαίο και το Λιβυκό Πέλαγος έχουν μέγιστα την περίοδο 2001-2050. Για το Β. Αιγαίο

εκτιμούμε μια γενική τάση μείωσης της χωρικής και χρονικής κάλυψης των ακραίων γεγονότων μετεωρολογικής παλίρροιας στο μέλλον (σενάριο A1B), ακολουθούμενη όμως από μεγάλη πιθανότητα βαρχυπρόθεσμων ακραίων γεγονότων σε ορισμένα σημεία του πεδίου, ειδικά την περίοδο 2001-2050.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αριθμητικές υδροδυναμικές προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν για την διερεύνηση της εξέλιξης και των χαρακτηριστικών των ακραίων γεγονότων μετεωρολογικής παλίρροιας στο Αιγαίο και το Ιόνιο Πέλαγος για την περίοδο 1951-2100. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων του υδροδυναμικού μοντέλου GreCCSM με δεδομένα μετρήσεων ΜΣΘ από διάφορους σταθμούς επιβεβαίωσαν την αξιοπιστία του. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν ότι στο Β. Αιγαίο παρατηρούνται οι μέγιστες ακραίες τιμές ανύψωσης της ΜΣΘ, ενώ η διάρκεια και η κάλυψη των ετήσιων ακραίων συμβάντων παρουσιάζει μείωση, βάσει του κλιματικού σεναρίου A1B, κατά τον 21^ο αιώνα. Η μείωση αυτή είναι εντονότερη κατά την τελευταία 50-ετία, ενώ για το διάστημα 2001-2050 οι ακραίες τιμές ΜΣΘ βρίσκονται στα επίπεδα του παρελθόντος κλίματος και σε μερικές περιπτώσεις (Β. Αιγαίο) παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές. Γενικά, η εξασθένιση των μετεωρολογικών παλιρροιών, υπό το σενάριο A1B, σχετίζεται με μείωση της διάρκειας και της χωρικής κάλυψης και όχι με την απόλυτη ένταση των ακραίων γεγονότων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση & Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς. Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: ΘΑΛΗΣ. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του ΕΚΤ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Androulidakis Y.S., Kombiadou K.D., Makris C.V., Baltikas V.N., Krestenitis Y.N. (2015) Storm surges in the Mediterranean Sea: variability and trends under future climatic conditions, *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 71, 56-82.
- Carillo A., Sannino G., Artale V., Ruti P.M., Calmanti S., Dell'Aquila A. (2012) Steric sea level rise over the Mediterranean Sea: present climate and scenario simulations, *Climate Dynamics*, 39(9-10), 2167-2184.
- Conte D., 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., Georgakopoulos G. (2011) Coastal inundation in the north-eastern Mediterranean coastal zone due to storm surge events, *Journal of Coastal Conservation*, 15(3), 353-368.
- Krestenitis Y., Androulidakis Y., Kombiadou K., Makris C., Baltikas V. (2014) Modeling storm surges in the Mediterranean Sea under the A1B climate scenario, *Proc. 12th International Conference on Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics*, Heraklion (Crete), Greece.
- Krestenitis Y., Androulidakis Y., Makris C., Kombiadou K., Baltikas V., Diamanti P. (2015) Evolution of storm surge extreme events in Greek Seas under climate change scenario, *Proc. 11th Panhellenic Symposium on Oceanography and Fisheries*, Mytilene (Lesvos), Greece, pp. 849-852.
- Makris C., Androulidakis Y., Krestenitis Y., Kombiadou K., Baltikas V. (2015) Numerical Modelling of Storm Surges in the Mediterranean Sea under Climate Change, *Proc. 36th International Association of Hydraulic Research World Congress*, Hague, Netherlands.
- Marcos M., Tsimplis M.N., Shaw A.G. (2009) Sea level extremes in southern Europe, *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 114(C1).

- Tolika K., Anagnostopoulou C., Velikou K., Vagenas C. (2015) Future projections of the updated very high resolution model RegCM3_10km over the complex terrain of Greece: a comparison with the previous version RegCM3_25km. (under review)
- Wang S., McGrath R., Hanafin J.A., Lynch P., Semmler T., Nolan P. (2008) The impact of climate change on storm surges over Irish waters, *Ocean Modelling*, 25, 83-94.
- White A.U. (1974) Global summary of human response to natural hazards: tropical cyclones. *In: Natural Hazards: Local, National, Global*, Oxford University Press, New York, pp. 255-265.