

ΑΚΡΑΙΕΣ ΤΙΜΕΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΠΑΛΙΡΡΟΙΑΣ ΣΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ ΘΑΛΑΣΣΑ ΛΟΓΩ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ

Γιάννης Ν. Κρεστενίτης, Καθηγητής
Γιάννης Σ. Ανδρουλιδάκης, Ερευνητικός Συνεργάτης
Κατερίνα Κομπιάδου, Ερευνητικός Συνεργάτης
Χρήστος Μακρής, Ερευνητικός Συνεργάτης
Βασίλης Μπαλτίκας, Ερευνητικός Συνεργάτης

Εργαστήριο Θαλάσσιας Τεχνικής και Θαλασσίων Έργων,
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,
54124, Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα ακραία γεγονότα μετεωρολογικής παλίρροιας αποτελούν σημαντικό κίνδυνο για την παράκτια ζώνη. Στην παρούσα εργασία διερευνώνται οι τάσεις των ακραίων τιμών της μεταβολής στάθμης στην περιοχή της Μεσογείου για μία περίοδο 150 χρόνων (1951-2100) με την χρήση ενός υψηλής ανάλυσης υδροδυναμικού μαθηματικού μοντέλου, υπό τις συνθήκες του κλιματικού σεναρίου A1B. Η σύγκριση στατιστικών δεικτών και των χωρικών κατανομών των ακραίων τιμών μεταξύ ιστορικών δεδομένων και αποτελεσμάτων της προσομοίωσης βρίσκονται σε καλή συμφωνία και επιβεβαιώνουν την ικανότητα του υδροδυναμικού μοντέλου να αποτυπώσει ικανοποιητικά την εξέλιξη των ακραίων τιμών της στάθμης κάτω από μελλοντικές κλιματικές ατμοσφαιρικές συνθήκες. Μελετήθηκαν οι μελλοντικές τάσεις, η μεταβλητότητα και η συχνότητα εμφάνισης των τοπικών ακρότατων, καθώς και οι κύριοι μηχανισμοί διέγερσης των γεγονότων μετεωρολογικής παλίρροιας στην Μεσόγειο Θάλασσα. Η μελλοντική τάση του φαινομένου των μετεωρολογικών παλίρροιών είναι φθίνουσα κάτω από το συγκεκριμένο ατμοσφαιρικό σενάριο. Η τάση αυτή σχετίζεται κυρίως με την συχνότητα των τοπικών ακρότατων, την διάρκεια των συμβάντων και την χωρική κάλυψη τους, ενώ, σε αρκετές περιπτώσεις, οι απόλυτες τιμές των ακραίων τιμών της ανύψωσης στάθμης αυξήθηκαν μέσα στον 21^ο αιώνα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα τοπικά μορφολογικά χαρακτηριστικά των διάφορων περιοχών της Μεσογείου μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την μεταβλητότητα των μέγιστων τιμών της ανύψωσης της θάλασσας. Η ατμοσφαιρική πίεση και ο άνεμος επηρεάζουν με διαφορετικό τρόπο την εξέλιξη των γεγονότων μετεωρολογικής παλίρροιας στις διάφορες περιοχές της Μεσογείου. Οι τιμές των υψομέτρων θάλασσας καθορίζονται από την πίεση σε συγκεκριμένες περιοχές ενώ υπάρχει εμφανής διαφορά της επιρροής του ανέμου ανάμεσα στην ανατολική και δυτική περιοχή της Μεσογείου.

CLIMATE CHANGE IMPACT ON EXTREME VALUES OF STORM SURGES IN THE MEDITERRANEAN SEA

Yannis N. Krestenitis, Professor
Yannis S. Androulidakis, Research Associate
Katerina Kombiadou, Research Associate
Christos Makris, Research Associate
Vassilis Baltikas, Research Associate

Laboratory of Maritime Engineering and Maritime Works,
Civil Engineering Department, Aristotle University of Thessaloniki,
54124, Thessaloniki
email: yнкrest@civil.auth.gr

ABSTRACT

Extreme storm surge events pose a great risk to coastal areas and can cause loss of land and property, damages to structures and even loss of human lives. In the present paper, we explore the trends of sea level extremes in the Mediterranean Sea for a period of 150 years (1951-2100), using a high-resolution storm surge model, under the A1B future climate scenario. Statistical indexes and spatial distribution of extreme values, from both historical data and modeling, show good agreement and confirm the ability of our model to predict the response of the sea surface to future climatic conditions. We investigate the future trends, the variability and frequency of local extremes and the main forcing mechanisms that can induce strong surges in the Mediterranean region. There is a general decreasing trend in storminess under the considered climate scenario, which, however, is more related to the frequency of local peaks and the duration and spatial coverage of the storm surges and not to the local peak magnitudes that, in some cases, increase during the 21st century. Our results show that the different morphological characteristics of the regional Seas of the Mediterranean basin have a significant influence on the maximum sea level height variability. There are clear distinctions in the contributions of winds and pressure fields to the sea level height for various regions of the Mediterranean Sea, as well as on the seasonal variability of extreme values. The values of sea level heights appear to be mainly controlled by pressure in specific areas and there is a clear distinction in the related contribution of winds between the eastern and western parts of the region.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι περιοχές χαμηλού υψομέτρου κατά μήκος της ακτογραμμής της Μεσογείου αντιμετωπίζουν άμεσους (π.χ. πλημμύρες, διάβρωση ακτών, ζημιές στις θαλάσσιες κατασκευές) και έμμεσους (π.χ. υφαλμύρωση υπόγειων υδροφορέων, καταστροφή υδάτινων πόρων, καταστροφή καλλιεργειών, υποβάθμιση παράκτιων περιοχών) κινδύνους λόγω ακραίων συμβάντων μετεωρολογικής παλίρροιας. Η μετεωρολογική παλίρροια παρουσιάζει σημαντικές διαφορές μεταξύ των υπο-περιοχών της Μεσογείου εξαιτίας διαφορών στην τοπογραφία και των χαρακτηριστικών των συστημάτων χαμηλής πίεσης. Οι Conte and Lionello (2013), βασισμένοι σε μία μελέτη κλιματικής αλλαγής για την περίοδο 1951-2050, έδειξαν μία φθίνουσα τάση της έντασης των γεγονότων μετεωρολογικής παλίρροιας στην Μεσόγειο Θάλασσα. Αντίθετα, οι Bondesan et al. (1995) έδειξαν ότι η απώλεια χερσαίας παράκτιας περιοχής σε διάφορες περιοχές της Αδριατικής Θάλασσας εξαιτίας του φαινομένου μετεωρολογικής παλίρροιας μπορεί να κυμανθεί μεταξύ 0.5 και 1.5 μέτρα μέχρι το 2100.

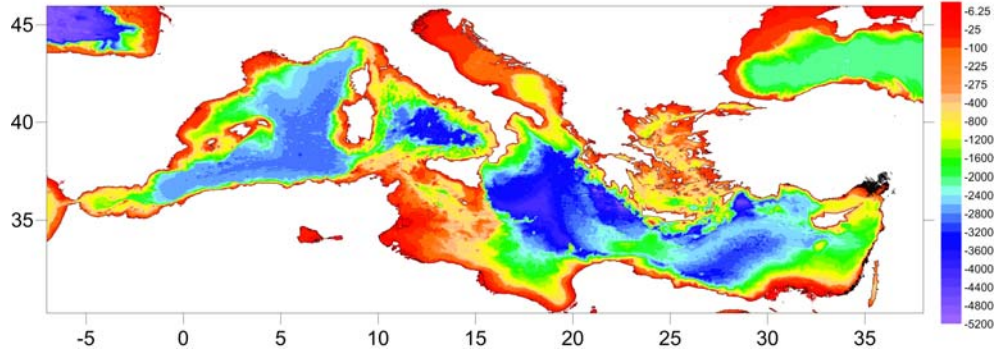
Ο στόχος της συγκεκριμένης εργασίας είναι η διερεύνηση της υπερετήσιας, εποχιακής και χωρικής μεταβλητότητας των ακραίων τιμών μετεωρολογικής παλίρροιας στην Μεσόγειο Θάλασσα για την περίοδο 1951-200 κάτω από συγκεκριμένες κλιματικές συνθήκες και η εξέταση των βασικών μηχανισμών διέγερσης των συμβάντων αυτών στις επιμέρους παράκτιες περιοχές. Το μελλοντικό κλιματικό σενάριο που χρησιμοποιήθηκε είναι το A1B (IPCC, 2001), το οποίο χαρακτηρίζεται από αυξανόμενες συγκεντρώσεις αερίων του θερμοκηπίου.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

Τα δεδομένα εισόδου στις προσομοιώσεις μετεωρολογικής παλίρροιας αφορούν ατμοσφαιρικά κλιματικά πεδία ατμοσφαιρικής πίεσης (Sea Level Pressure, SLP) και ανέμου πάνω από την περιοχή μελέτης για την περίοδο 1951-2100. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το κλιματικό μοντέλο RegCM3 (Pal et al., 2007; Katragkou et al., 2011), το οποίο χρησιμοποίησε το σενάριο εκπομπών A1B (IPCC, 2001). Τα δεδομένα εισόδου αφορούν την περιοχή μελέτης της Μεσογείου με οριζόντια χωρική ανάλυση 25km x 25km και με 6-ωρο χρονικό βήμα.

Το μοντέλο μετεωρολογικής παλίρροιας (Mediterranean Climate Surge Model, MeCSM) είναι ένα υδροδυναμικό μοντέλο (Krestenitis et al., 2011) που επιλύει τις εξισώσεις ρηχών νερών υπολογίζοντας την μεταβολή στάθμης της ελεύθερης επιφανείας σε κάθε κελί του υπολογιστικού κανάβου (Σχήμα 1). Το μοντέλο εφαρμόστηκε στο πεδίο της Μεσογείου με χωρικό βήμα $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ ($dx=dy \sim 10\text{km}$).



Σχήμα 1. Βαθυμετρία (m) και όρια μοντέλου Μεσογείου Θάλασσας
Figure 1. Bathymetry (m) and model domain of Mediterranean Sea

Μετεωρολογικά αποτελέσματα του μοντέλου RegCM3, όπως η πίεση και η ταχύτητα του ανέμου, χρησιμοποιήθηκαν για την διέγερση του μοντέλου. Τα δεδομένα αυτά λαμβάνονται, σε κάθε χρονικό βήμα προσομοίωσης, από το κλιματικό ατμοσφαιρικό μοντέλο. Οι βασικές εξισώσεις του μοντέλου MeCSM είναι οι κλασσικές εξισώσεις κίνησης και συνέχειας

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fu + g \frac{\partial z}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\rho_o} \frac{\tau_x}{(h+z)} - k \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{\rho_o (h+z)} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fv + g \frac{\partial z}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{\rho_o} \frac{\tau_y}{(h+z)} - k \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{\rho_o (h+z)} \quad (2)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(h+z)u}{\partial x} + \frac{\partial(h+z)v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

όπου u, v είναι οι συνιστώσες ταχύτητας, x, y οι οριζόντιες μετρικές συντεταγμένες του καννάβου, t ο χρόνος, f η παράμετρος Coriolis, g η επιτάχυνση της βαρύτητας, ρ_o η ομοιόμορφη πυκνότητα του νερού, P η ατμοσφαιρική πίεση, τ_x, τ_y οι συνιστώσες των τάσεων τριβής, k ο συντελεστής τριβής στον πυθμένα, z το υψόμετρο της ελεύθερης επιφάνειας και h το βάθος του νερού από την επιφάνεια ηρεμίας. Η τιμή του συντελεστή Coriolis υπολογίστηκε σε κάθε κελί βάσει των γεωγραφικών συντεταγμένων του. Ο υπολογισμός του διανυσματικού πεδίου των τάσεων τριβής επιφανείας βασίστηκε στις ταχύτητες ανέμου στα 10 μέτρα από την επιφάνεια της θάλασσας με τη χρήση της εξίσωσης:

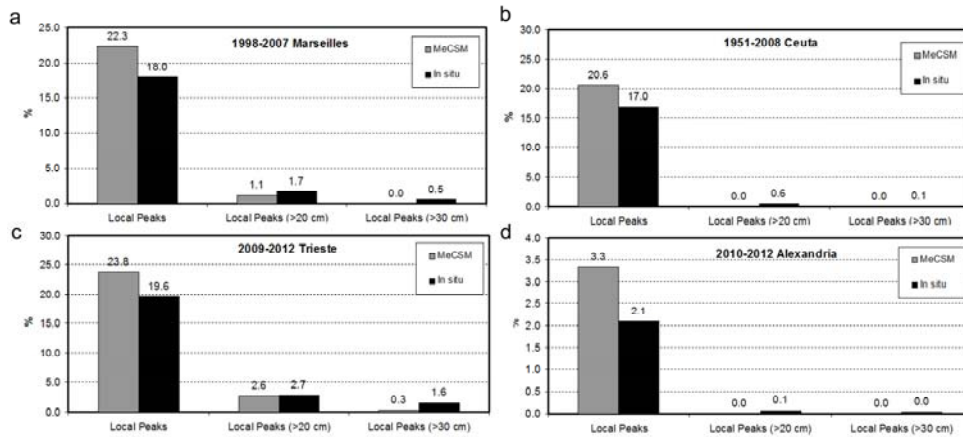
$$\tau = \rho_A C_D |W| \cdot W \quad (4)$$

όπου ρ_A είναι η πυκνότητα αέρα, W το πεδίο της ταχύτητας ανέμου στα 10 μέτρα και C_D ο συντελεστής τάσης τριβής επιφανείας. Επίσης εκτελέστηκαν πειράματα για τον προσδιορισμό του C_D με χρήση της εξίσωσης (Smith and Banke, 1975):

$$C_D \cdot 10^3 = 0.63 + 0.066 \cdot W \quad (5)$$

2.2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Τα αποτελέσματα της μαθηματικής προσομοίωσης συγκρίθηκαν με μετρήσεις πεδίου όπως συλλέχτηκαν από διάφορους σταθμούς της Μεσογείου (π.χ. Marseilles, Trieste, Alexandria και Ceuta), καλύπτοντας διαφορετικά χρονικά διαστήματα της περιόδου μελέτης 1951-2012 (Σχήμα 2).



Σχήμα 2. Συχνότητες εμφάνισης (%) των τοπικών ακρότατων στάθμης θάλασσας από μέσες ημερήσιες τιμές μετρήσεων (μαύρο) και των αντίστοιχων αποτελεσμάτων του MeCSM (γκρι)

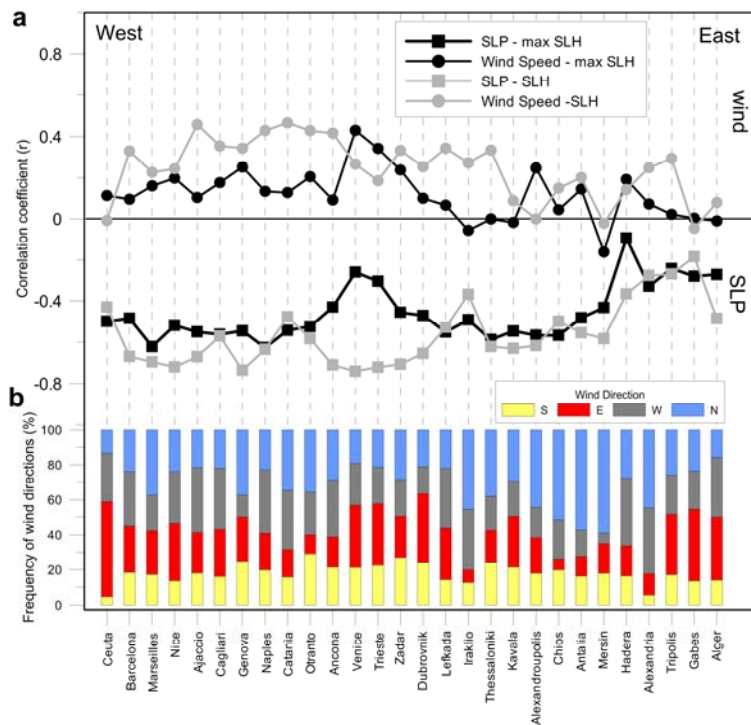
Figure 2. Occurrence frequency (%) of sea level height local peaks from daily averaged in situ (black) data and respective MeCSM results (grey).

Η σύγκριση μεταξύ των συχνότητων εμφάνισης των τοπικών ακρότατων είναι ικανοποιητική και για τους 4 σταθμούς, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν διαφορετικές περιοχές της Μεσογείου. Ειδικά για τις ακρότατες τιμές (>20cm και >30cm), οι συχνότητες που προέκυψαν από τις μαθηματικές προσομοιώσεις βρίσκονται σε αντίστοιχα επίπεδα με αυτές των μετρημένων τιμών. Υψηλότερες συχνότητες εμφάνισης, τόσο στις μετρήσεις όσο και στις προσομοιώσεις, εμφανίζονται στην Αδριατική, ενώ χαμηλότερα είναι τα επίπεδα στην νότια Μεσόγειο.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 ΕΠΙΡΡΟΗ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΠΙΕΣΗΣ

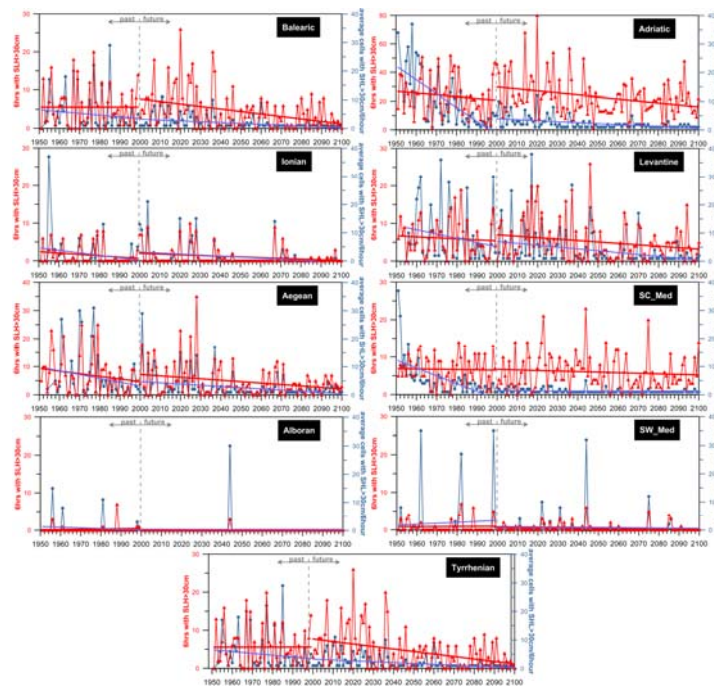
Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των μέγιστων και μέσων ετήσιων τιμών στάθμης και των αντίστοιχων τιμών πίεσης και ταχύτητας ανέμου, όπως υπολογίστηκαν για όλη την περίοδο μελέτης (150 χρόνια) και για 28 σταθμούς της Μεσογείου. Στο γράφημα παρουσιάζονται επίσης και οι αντίστοιχες συχνότητες πνοής των κύριων διευθύνσεων ανέμου.



Σχήμα 3. Συντελεστές συσχέτισης μεταξύ στάθμης-πίεσης και στάθμης-ανέμου και οι αντίστοιχες συχνότητες εμφάνισης των 4 ανεμολογικών κατευθύνσεων για 28 σταθμούς
Figure 3 Correlation coefficients between the SLH-SLP and SLH-wind speed values for 28 stations and the 4 respective occurrence frequencies of wind directions

Όπως είναι αναμενόμενο η μεταβολή της στάθμης είναι αντιστρόφως συσχετισμένη με την πίεση (αρνητικές τιμές) και θετικά συσχετισμένη με τον άνεμο κατά την εμφάνιση ακραίων τιμών. Η Γαλλική ακτή, η δυτική Ιταλία και το Β. Αιγαίο παρουσιάζουν υψηλή συσχέτιση μεταξύ ακρότατων τιμών στάθμης και πίεσης (~ -0.6). Η μικρή συσχέτιση της στάθμης με τον άνεμο στην Γαλλική ακτή οφείλεται στις χαμηλές συχνότητες εμφάνισης των νότιων ανέμων (Σχήμα 3; π.χ. Marseilles, Nice), οι οποίοι ευνοούν την συσσώρευση νερών στις συγκεκριμένες ακτές. Στην περιοχή του Β. Αιγαίου, η επιρροή της πίεσης είναι ο βασικός παράγοντας της εμφάνισης ακραίων τιμών σε αντίθεση με την Β. Αδριατική, όπου οι νοτιοανατολικοί άνεμοι καθορίζουν την εμφάνιση των ακραίων τιμών μετεωρολογικής παλίρροιας. Σημειώνεται ότι η μέση τιμή της στάθμης για την περιοχή της Β. Αδριατικής παρουσιάζει την αντίστροφη συμπεριφορά, και καθορίζεται κυρίως από τις βαροβαθμίδες, με μικρή επίδραση των ανέμων.

3.2. ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΚΑΙ ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΛΥΨΗ ΑΚΡΑΙΩΝ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ



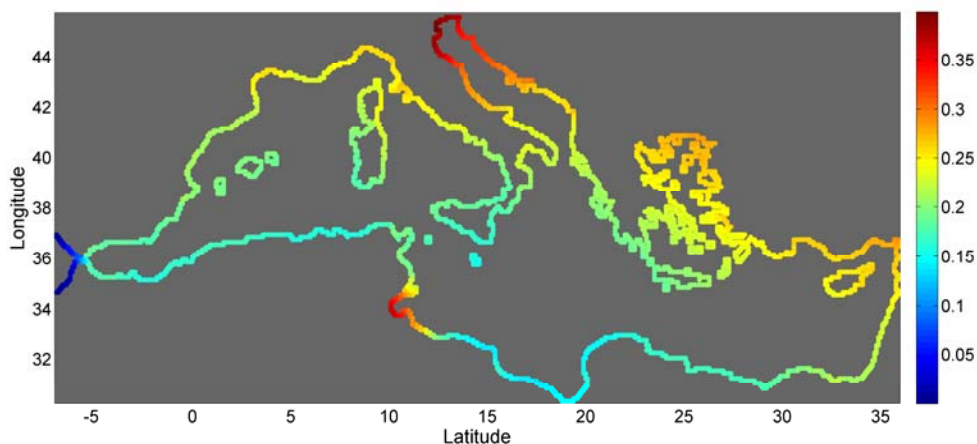
Σχήμα 4. Ετήσιος αριθμός 6-ώρων και των αντιστοίχων μέσου ετήσιου πλήθους κελίων του μοντέλου με τιμές στάθμης μεγαλύτερες των 30 cm για 9 υπολεκάνες της Μεσογείου.
Figure 4. Annual number of 6-hour intervals and the corresponding annual average number of model cells with sea level heights greater than 30 cm for 9 Mediterranean regional basins.

Για την διερεύνηση της εξέλιξης της διάρκειας και της χωρικής κάλυψης των ακραίων γεγονότων στις διάφορες υπολεκάνες της Μεσογείου, υπολογίστηκε ο συνολικός αριθμός των 6-ώρων διαστημάτων καθώς και ο μέσος ετήσιος αριθμός των κελιών του μοντέλου όπου η προσομοιωμένη στάθμη ξεπέρασε το επίπεδο των 30 cm σε κάθε υπολεκάνη για όλη την περίοδο μελέτης (Σχήμα 4). Οι γραμμικές τάσεις ανάμεσα στο παρελθόν (1951-2000) και στο μέλλον (2000-2100) παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές. Όλες σχεδόν οι περιοχές παρουσιάζουν φθίνουσες τάσεις τόσο στην διάρκεια όσο και στην χωρική κάλυψη των ακραίων συμβάντων. Οι υψηλότερες και οι χαμηλότερες τιμές διάρκειας παλίρροιας για όλες τις περιοχές εμφανίζονται στο πρώτο και δεύτερο μισό της μελλοντικής περιόδου, αντίστοιχα. Η Αδριατική παρουσιάζει τις υψηλότερες ετήσιες τιμές διάρκειας, επιβεβαιώνοντας τον υψηλό κίνδυνο των βόρειων, κυρίως, ακτών της. Οι μεγαλύτερες τιμές εμφανίζονται κατά κύριο λόγο στο πρώτο μισό του 21^ο αιώνα, καθώς εμφανίζεται μια μεγάλη πτώση κατά το δεύτερο μισό. Υψηλές τιμές διάρκειας καταιγίδων υπολογίστηκαν και για τις περιοχές των Βαλεαρίδων, της Λεβαντίνης, της Τυρρηνικής και του Αιγαίου. Η περιοχή κάλυψης εμφανίζει υψηλότερες τιμές στο παρελθόν ενώ εμφανίζονται χαμηλότερες τιμές από το 2050 και έπειτα, επιβεβαιώνοντας την μείωση της έντασης του φαινομένου μετεωρολογικής παλίρροιας για ολόκληρη την Μεσόγειο Θάλασσα προς το τέλος του 21^{ου} αιώνα.

3.3. ΓΕΝΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ

Η στατιστικά σημαντική ετήσια ανωμαλία στάθμης μπορεί να εκφραστεί με τον δείκτη μετεωρολογικής παλίρροιας (Storm Surge Index, SSI). Ο δείκτης SSI υπολογίζεται από τα τρία υψηλότερα ακρότατα του κάθε έτους, τα οποία ανήκουν σε διαφορετικά γεγονότα μετεωρολογικής παλίρροιας. Σύμφωνα με τους Conte και Lionello (2013), τα γεγονότα αυτά απέχουν χρονικά κατ' ελάχιστο 120 ώρες μεταξύ τους (εκτίμηση της μεγαλύτερης διάρκειας μια καταιγίδας). Βάσει των παραπάνω, η στατιστικά σημαντικότερη ακρότατη τιμή για την παράκτια ζώνη της Μεσογείου για την περίοδο 1951-2100 μπορεί να εκφραστεί με την χρήση του SSI και παρουσιάζεται στο Σχήμα 5 από τα αποτελέσματα του MECISM.

Υψηλές τιμές SSI υπολογίστηκαν στις ακτές της Β. Αδριατικής και κυρίως στον κόλπο της Βενετίας (~38cm). Στην Ν. Αδριατική και στις ακτές του Ιονίου τα επίπεδα του δείκτη είναι χαμηλότερα (~20cm), ενώ ιδιαίτερα υψηλές τιμές υπολογίστηκαν στην ρηχή περιοχή του κόλπου του Γκαμπές (Λιβύη). Υψηλές τιμές επίσης παρουσιάζονται κατά μήκος των ακτών του Β. Αιγαίου, της Μικράς Ασίας και των βορειανατολικών ακτών της Θάλασσας της Λεβαντίνης (~25cm). Γενικά, το SSI παρουσιάζει τιμές μεγαλύτερες του γενικού μέσου όρου κατά μήκος των ακτών της κεντρικής και ανατολικής Ευρώπης με εξαίρεση την Ν. Αδριατική, το Ιόνιο και το Ν. Αιγαίο.



Σχήμα 5. Δείκτης Μετεωρολογικής Παλίρροιας (SSI, σε m) κατά μήκος της ακτογραμμής της Μεσογείου

Figure 5. Storm Surge Index (SSI, in m) along the entire Mediterranean coastline

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αριθμητικές υδροδυναμικές προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν για την διερεύνηση της εξέλιξης και των χαρακτηριστικών των ακραίων γεγονότων μετεωρολογικής παλίρροιας στην Μεσόγειο Θάλασσα για την περίοδο 1951-2100. Δεδομένα μετρήσεων από διάφορους σταθμούς επιβεβαίωσαν την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων σε διάφορες περιοχές και περιόδους που ερευνήθηκαν. Η εξέταση των μηχανισμών ατμοσφαιρικής διέγερσης των ακραίων συμβάντων ανέδειξε ότι υφίστανται σημαντικές διαφορές στην επιρροή του ανέμου και της ατμοσφαιρικής πίεσης ανάμεσα στις υπολεκάνες της Μεσογείου. Υψηλές συχνότητες εμφάνισης ακραίων τιμών προέκυψαν στις παράκτιες περιοχές της Β. Αδριατικής και του Β. Αιγαίου, με διαφορετικούς όμως μηχανισμούς διέγερσης για την κάθε μία. Οι ακραίες τιμές στο Β. Αιγαίο χαρακτηρίζονται κυρίως από την επιρροή της ατμοσφαιρικής πίεσης σε αντίθεση με την Β. Αδριατική όπου η κατεύθυνση και η ένταση του ανέμου παίζει το κεντρικό ρόλο στα χαρακτηριστικά της μετεωρολογικής παλίρροιας.

Η διάρκεια των ετήσιων ακραίων συμβάντων παρουσιάζει μείωση για όλη την Μεσόγειο βάσει του συγκεκριμένου κλιματικού σεναρίου με πιο έντονη φθίνουσα τάση κατά το δεύτερο μισό του 21^{ου} αιώνα. Τα χαμηλότερα επίπεδα διάρκειας και χωρικής κάλυψης μετεωρολογικής παλίρροιας εμφανίζονται στην νότια και νοτιοδυτική Μεσόγειο, όπου η εξασθένιση του φαινομένου είναι εντονότερη σε σύγκριση με άλλες περιοχές. Γενικά, η εξασθένιση του φαινομένου της μετεωρολογικής παλίρροιας σχετίζεται περισσότερο με μείωση της διάρκειας

και της χωρικής κάλυψης και όχι τόσο στην μείωση του μεγέθους (απόλυτες τιμές ανύψωσης στάθμης θάλασσας) των ακραίων γεγονότων.

Παράλληλα, η διερεύνηση της στατιστικά σημαντικής ανύψωσης της στάθμης της θάλασσας έδειξε ότι αναμένεται σημαντική συσσώρευση μαζών κατά μήκος των ακτών της κεντρικής και ανατολικής Ευρώπης με εξαίρεση την Ν. Αδριατική, το Ιόνιο και το Ν. Αιγαίο. Συνεπώς, παρά τη μείωση της διάρκειας καταιγίδων κατά το κλιματικό σενάριο που διερευνήθηκε, η επικινδυνότητα του φαινομένου είναι μεγάλη, ιδιαίτερα για παράκτιες περιοχές χαμηλού υψομέτρου.

5. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος: ΘΑΛΗΣ-ΑΠΘ: «Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στη στάθμη και το κυματικό κλίμα των ελληνικών θαλασσών, στην τρωτότητα των παράκτιων περιοχών και στην ασφάλεια θαλάσσιων και παράκτιων έργων» που συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση και την Ελλάδα μέσω του επιχειρησιακού προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς 2007 – 2013 (ΕΣΠΑ). Ευχαριστούμε ιδιαίτερα τους Ι. Τεγούλια, Χ. Αναγνωστοπούλου και Κ. Τολίκα (Τμήμα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Α.Π.Θ.) για την ευγενική παραχώρηση των ατμοσφαιρικών πεδίων του μοντέλου RegCM3.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bondesan M., G.B. Castiglioni, C. Elmi, G. Gabbiabelli, R. Marocco, P.A. Pirazzoli and A. Tomasin. (1995). “Coastal areas at risk from Storm surges and sea-level rise in northeastern Italy”, *J. Coast. Res.*, 11(4), 1354-1379.
- Conte D., and P. Lionello. (2013). “Characteristics of large positive and negative surges in the Mediterranean Sea and their attenuation in future climate scenarios”. *Global Planet Change*, 111, 159-173.
- IPCC (2001). “Climate Change, The Scientific Basis”, *Cambridge Univ Press*, pp. 881
- Krestenitis, Y.N., Androulidakis, Y.S., Kontos, Y.N., and G. Georgakopoulos. (2011). Coastal inundation in the north-eastern Mediterranean coastal zone due to storm surge events”. *J Coast Conservat*, 15(3), 353-368.
- Katragkou, E., Zanis, P., Kioutsioukis, I., Tegoulas, I., Melas, D., Krüger, B.C. and Coppola, E. (2011). “Future climate change impacts on summer surface ozone from regional climate - air quality simulations over Europe”. *J. Geophys. Res.*, 116, D22307, doi:10.1029/2011JD015899.
- Pal, J.S., and Coauthors (2007) “Regional Climate Modeling for the Developing World: The ICTP RegCM3 and RegCNET”. *B. Am. Meteorol. Soc.*, 88, 1395–1409.
- Smith S.D. and E.G. Banke. (1975). “Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed”. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 101(429), 665-673.