

Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΙΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΑΛΙΡΡΟΙΕΣ ΤΩΝ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΘΑΛΑΣΣΩΝ

Χρήστος Μακρής^{1,*}, Γιάννης Ανδρουλιδάκης¹, Κατερίνα Κομπιάδου¹, Βασίλης Μπαλτίκας¹, Γιάννης Κρεστενίτης¹

¹Εργαστήριο Θαλάσσιας Τεχνικής και Θαλάσσιων Έργων, Τομέας Υδραυλικής και Τεχνικής Περιβάλλοντος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, 54124, Α.Π.Θ.

*Στοιχεία επικοινωνίας: cmakris@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Διερευνάται η επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην εξέλιξη των μετεωρολογικών παλίρροιών στο Αιγαίο και το Ιόνιο Πέλαγος και την παράκτια ζώνη της Ελλάδας. Η ανάλυση καλύπτει την περίοδο 1951-2100 (κλιματικό σενάριο A1B για τον 21^ο αιώνα) και στηρίζεται σε προσομοιώσεις με ένα διδιάστατο υδροδυναμικό μοντέλο υψηλής χωρικής ανάλυσης (GreCSSM). Η σύγκριση των προσομοιωμένων αποτελεσμάτων έναντι επί τόπου παρατηρήσεων με βάση στατιστικά μέτρα και δείκτες είναι ικανοποιητική. Παρουσιάζονται επίσης οι μελλοντικές τάσεις, η μεταβλητότητα και η συχνότητα εμφάνισης έντονων γεγονότων μετεωρολογικής παλίρροιας στις ελληνικές θάλασσες και την ελληνική παράκτια ζώνη. Δίνονται επίσης εκτιμήσεις για την τάση της πιθανής κλιματικής αλλαγής μέχρι το 2100, μαζί τις μέσες, ετήσιες και υπερετήσιες μέγιστες τιμές της θυελλογενούς ανύψωσης της θαλάσσιας στάθμης στο Αιγαίο και το Ιόνιο Πέλαγος.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Μετεωρολογική παλίρροια, κλιματική αλλαγή, σενάριο A1B, ελληνικές θάλασσες, παράκτια ζώνη

THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON THE STORM SURGES OF THE GREEK SEAS

Christos Makris^{1,**}, Yannis Androulidakis¹, Katerina Kombiadou¹, Vassilis Baltikas¹, Yannis Krestenitis¹

¹Lab. of Maritime Engineering and Maritime Works, Div. of Hydraulics and Environmental Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, 54124, A.U.Th.

**Corresponding author: cmakris@civil.auth.gr

ABSTRACT

The impact of climate change on the evolution of storm surges in the Aegean and Ionian Seas (AIS) and the Greek coastal zone is studied. The analysis covers the 1951-2100 period (A1B climate scenario for the 21st century), and hinges on simulations with a two-dimensional hydrodynamic model of high spatial resolution (GreCSSM). The comparison of model results against *in situ* observations is satisfactory based on statistical measures and indices. Future trends, variability and occurrence frequency of severe storm surge events are also presented concerning the Greek maritime basins and coastal regions. Estimations are also provided for the probable climate change signal until 2100, along with averaged, intra- and inter-annual maxima of storm-induced sea level height of the Aegean and Ionian Seas.

KEY WORDS: Storm surge, climate change, A1B scenario, Greek seas, coastal zone

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα έντονα γεγονότα ανύψωσης της Στάθμης Θάλασσας (ΣΘ), λόγω μετεωρολογικής παλίρροιας (storm surge), αποτελούν σημαντικό κίνδυνο για την ελληνική παράκτια ζώνη, ειδικά σε περιοχές με χαμηλό υψόμετρο εδάφους. Με τον όρο μετεωρολογική παλίρροια περιγράφεται η μεταβολή (ανύψωση ή ταπείνωση) της στάθμης της θάλασσας λόγω (έντονων ή ήπιων, αντίστοιχα) ατμοσφαιρικών συνθηκών και συγκεκριμένα εξαιτίας της δράσης της ατμοσφαιρικής πίεσης και των ανέμων που εμφανίζονται πάνω από μια θαλάσσια περιοχή κατά τη διάρκεια ανάπτυξης (χαμηλών ή υψηλών, αντίστοιχα) βαρομετρικών συστημάτων στην ατμόσφαιρα (Κρεστενίτης κ. αλ., 2015). Οι μετεωρολογικές παλίρροιες λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους (Ανώτατη Στάθμη Θάλασσας, ΑΣΘ) όταν η θυελλογενής ανύψωση της ΣΘ (Sea Level Height, *SLH*) συμπίπτει με τη μέγιστη ανώτατη πλήμμη στον κύκλο της αστρονομικής παλίρροιας. Οι Marcos et al. (2009) αναφέρουν ωστόσο, ότι οι ακραίες τιμές ανύψωσης της ΣΘ στην περιοχή της Μεσογείου οφείλονται κυρίως στα μέγιστα των μετεωρολογικών παλίρροιών, παρά στον συνδυασμό τους με τις αστρονομικές παλίρροιες. Η επίδραση των χαμηλών πιέσεων και των δυνατών ανέμων, κατά τη διάρκεια τυφώνων, θυελλών και καταιγίδων, πάνω στη δυναμική εξέλιξη της ΣΘ στο παράκτιο περιβάλλον είναι μία από τις βασικές αιτίες πλημμυρών της παράκτιας ζώνης (Κρεστενίτης κ. αλ., 2015). Στο παρελθόν, παρόμοια γεγονότα έχουν προκαλέσει εκτεταμένη κατάκλυση με αποτέλεσμα ενίοτε ανθρώπινες και συχνά υλικές απώλειες, καταστροφές σε λιμενικά έργα, θαλάσσιες και παράκτιες κατασκευές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις (διάβρωση ακτών, υφαλμύριση παράκτιων επιφανειακών και υπόγειων νερών, υποχώρηση εδαφών και καταστροφή χλωρίδας) σε οικολογικά ευαίσθητες περιοχές της παράκτιας ζώνης (White, 1974).

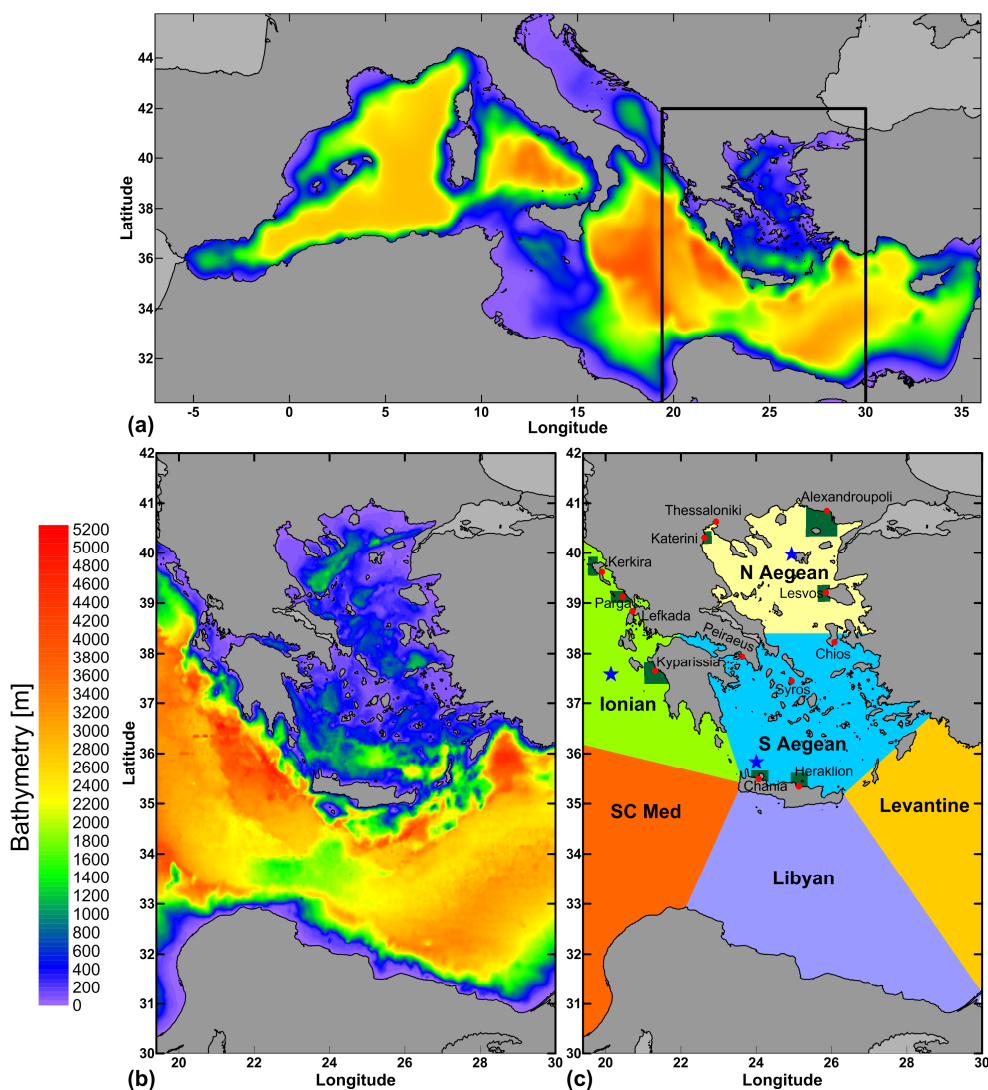
Επιπρόσθετα, η εκτιμώμενη Κλιματική Αλλαγή στον 21^ο αιώνα αναμένεται να επηρεάσει τη συχνότητα εμφάνισης, τις τροχιές και την ένταση των έντονων καταιγίδων, σύμφωνα με τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC, 2007, 2012). Αυτό το γεγονός μπορεί δυνητικά να προκαλέσει αύξηση των ακραίων τιμών της ΑΣΘ τοπικά (Wang et al., 2008). Ενδείξεις των επιπτώσεων της Κλιματικής Αλλαγής στα πρότυπα ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας και στην υδροδυναμική απόκριση των θαλασσιών μαζών στην περιοχή της Ευρώπης έχουν εντοπιστεί σε πληθώρα ερευνητικών προσπαθειών (π.χ. Esteves et al., 2011 και Van den Eynde et al., 2012). Αρκετοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί και με τη Μεσόγειο ή επιμέρους υπολεκάνες αυτής, π.χ. την ανατολική Ιβηρική παράκτια ζώνη, την Αδριατική, τις Βαλεαρίδες, τη θάλασσα της Λεβαντίνης, το Λυβικό Πέλαγος κ.λπ. Σχετικές μελέτες για τη δυναμική εξέλιξη της ΣΘ, που να εστιάζουν στην περιοχή της ανατολικο-κεντρικής Μεσογείου και ειδικά στο Αιγαίο και στο Ιόνιο Πέλαγος (ΑΠ) δεν έχουν γίνει στο παρελθόν, εκτός από τις πρόσφατες εργασίες των Androulidakis et al. (2015) και Makris et al. (2016). Σε αυτές υπολογίστηκε μια τάση εξασθένησης του θυελλώδους (storminess) υπό την επίδραση του κλιματικού σεναρίου A1B, η οποία σχετίζεται κυρίως με τη συχνότητα, τη διάρκεια και τη χωρική κάλυψη των τοπικών μεγίστων της μετεωρολογικής παλίρροιας. Συνεκδοχικά, για να καλυφθεί το σχετικό κενό στην ελληνική βιβλιογραφία, οι κύριοι στόχοι της παρούσας εργασίας είναι οι ακόλουθοι:

α) Να γίνει χρήση εκτιμήσεων του μελλοντικού κλίματος στην περιοχή της Ελλάδας, και ειδικά προσομοιωμένων πεδίων ανέμου και ατμοσφαιρικών πιέσεων στη ΣΘ (Sea Level Pressure, *SLP*) για τον 21^ο αιώνα, έτσι ώστε να εκτιμηθούν οι επιδράσεις της Κλιματικής Αλλαγής μέχρι και το 2100 στην απόκριση της ΣΘ των ελληνικών θαλασσών σε έντονες καιρικές συνθήκες.

β) Να ποσοτικοποιηθούν η δριμύτητα και η συχνότητα των έντονων γεγονότων μετεωρολογικής παλίρροιας στο ΑΠ, έτσι ώστε να παραχθούν τα μεγέθη σχεδιασμού για λιμενικά και παράκτια τεχνικά έργα προστασίας στην Ελλάδα.

γ) Να εντοπιστούν συγκεκριμένοι μηχανισμοί της Κλιματικής Αλλαγής στην περιοχή του ΑΠ, δηλ. να εκτιμηθεί η συνολική εξασθένηση ή ενίσχυση του καθεστώτος των έντονων καταιγίδων και των συνακόλουθων γεγονότων ΑΣΘ στις ελληνικές θάλασσες προς το 2100.

Συνεπώς, στην παρούσα εργασία διερευνάται η επίδραση της δυνητικής Κλιματικής Αλλαγής στην εξέλιξη των ετήσιων μέγιστων τιμών της μεταβολής της ΣΘ στην ανοιχτή θάλασσα και στις παράκτιες ζώνες του ΑΠ. Οι συγκρίσεις ανάμεσα στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τον 21^ο αιώνα σε σχέση με αυτά του 20^{ου} βοηθούν στην ποσοτικοποίηση των επιδράσεων της Κλιματικής Αλλαγής πάνω στη δριμύτητα, την εποχικότητα, τη συχνότητα εμφάνισης και τις τάσεις εξέλιξης των ακραίων γεγονότων μετεωρολογικής παλίνρροιας. Στόχος είναι η ανάδειξη προτύπων αλλαγής του τρέχοντος και μελλοντικού κλίματος στο θαλάσσιο περιβάλλον του ΑΠ σε σχέση με το παρελθόν.



Σχήμα 1: Βαθυμετρία (m) της περιοχής μελέτης, χαρακτηριστικές υπο-περιοχές και συγκεκριμένοι σταθμοί ενδιαφέροντος. (a) Πεδίο MeSCSSM με χωρική ανάλυση 1/10°, (b) πεδίο GreCSSM με χωρική ανάλυση 1/20°, (c) 6 υπο-περιοχές ενδιαφέροντος (B./N. Αιγαίο, Ιόνιο, Ν.Κ. Μεσόγειος, Λιβυκό, Λεβαντίνη με διαφορετικά χρώματα) και 13 παράκτιοι σταθμοί ελέγχου ΣΘ (κόκκινες κουκίδες).

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο ανατολικο-κεντρικό τμήμα της Μεσογείου (Σχήμα 1a) μεταξύ των μεσημβρινών με γεωγραφικά μήκη 19.4° – 30° E και των παράλληλων με

γεωγραφικά πλάτη $30^{\circ} - 42^{\circ} N$. Αφορά κυρίως στο Αιγαίο και το Ιόνιο Πέλαγος και συνεπώς την παράκτια ζώνη ολόκληρης της ελληνικής επικράτειας μαζί με αυτή της δυτικής Ανατολίας στην Τουρκία (Σχήμα 1b). Το συνολικό πεδίο προσομοίωσης καλύπτει επίσης ένα μέρος της νότιας κεντρικής Μεσογείου, ένα τμήμα του Λιβυκού Πελάγους, και ένα μικρό (δυτικό) τμήμα της θάλασσας της Λεβαντίνης (ο διαμερισμός στο Σχήμα 1c είναι ενδεικτικός και έχει γίνει για υπολογιστικούς σκοπούς). Η πολύπλοκη γεωμορφολογία και η παρουσία μεγάλου αριθμού νησιών, κυρίως στο αρχιπέλαγος του Αιγαίου, καθιστούν την περιοχή ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα από την άποψη κλιματικών μελετών. Η περιοχή διακρίνεται για τις έντονα μεταβαλλόμενες βαθυμετρίες με βαθιές λεκάνες, εκτεταμένα και στενά τμήματα ρηχών υφαλοκρηπίδων, και εξαιρετικά πολύπλοκες ακτογραμμές. Οι τελευταίες είναι σχεδόν ισομερώς κατανεμημένες σε απότομους (ανακλαστικούς) βραχώδεις σχηματισμούς που διακόπτονται πολύ συχνά από σχετικά μικρές σε μήκος και σπάνια φαρδιές (ιζηματογενείς) παραλίες. Στην ελληνική παράκτια ζώνη υπάρχουν περιοχές με σχετικά ήπιες κλίσεις, που είναι ιδανικές για τουριστικές δραστηριότητες, όμως δυνητικά απειλούνται από επικίνδυνα γεγονότα κατάκλυσης κατά τη διάρκεια έντονων φαινόμενων ανύψωσης της ΣΘ. Στο Αιγαίο και στο Ιόνιο λαμβάνει χώρα μεγάλος αριθμός ναυτικών και θαλάσσιων δραστηριοτήτων, όπως εμπόριο, ναυσιπλοΐα, μεταφορές, αλιεία και υδατοκαλλιέργειες, ιστιοπλοΐα, αθλητικές εκδηλώσεις, και τουρισμός, ιδιαίτερα κατά τη θερινή περίοδο. Επιπλέον, η ελληνική παράκτια ζώνη είναι ιδιαίτερα πυκνοκατοικημένη με πολλά αστικά κέντρα, λιμάνια και μαρίνες. Περιέχει επίσης οικολογικά ευαίσθητες περιοχές, όπως δέλτα ποταμών, λιμνοθάλασσες και εστούρες, προστατευόμενους υγροτόπους, βραχονησίδες, και ιδιαίτερα πολυσχιδή ακτογραμμή με περιοχές χαμηλού υψόμετρου. Σε αυτές, η επικινδυνότητα πλημμύρας είναι αρκετά έντονη κατά τη διάρκεια ακραίων γεγονότων μετεωρολογικής παλίρροιας, ιδιαίτερα όταν αυτά συνδυάζονται με υψηλές τιμές κυματογενούς ανύψωσης στη ζώνη θραύσης και αναρρίχηση στην ακτή. Η τοπογραφία συγκεκριμένων παράκτιων περιοχών (Σχήμα 1c) τις καθιστά δυνητικά επιρρεπείς σε παράκτιες πλημμύρες, ακόμη και για μέτριες τιμές ΑΣΘ λόγω μετεωρολογικών παλίρροιών. Οι τελευταίες προκαλούνται στο ΑΠΠ κύρια λόγω της επίδρασης του «ανεστραμμένου βαρόμετρου» και λιγότερο λόγω της πνοής ισχυρών ανέμων (συνηθέστερα στο Β. Αιγαίο). Τα αντίστοιχα βαρομετρικά συστήματα οφείλονται συνήθως σε αμβλυμμένες υποτροπικές καταιγίδες (sub-tropical storms) και Μεσογειακούς τυφώνες (Medicanes) με κατεύθυνση από τα δυτικά προς τα ανατολικά στη Μεσόγειο (Krestenitis et al., 2011, Androulidakis et al., 2015).

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Γίνεται χρήση των αποτελεσμάτων ενός περιοχικού κλιματικού μοντέλου (RegCM3) με δυναμικό καταβιβασμό κλίμακας σε χωρική ανάλυση 10×10 Km (Tolika et al., 2015) και τα ατμοσφαιρικά δεδομένα για τα πεδία ανέμου και *SLP* χρησιμοποιούνται για τις προσομοιώσεις μετεωρολογικών παλίρροιών στην περιοχή μελέτης. Το RegCM3 είναι ένα ατμοσφαιρικό αριθμητικό μοντέλο πεπερασμένων διαφορών, με υδροστατική ισορροπία και «σίγμα» κατακόρυφες συντεταγμένες, το οποίο λαμβάνει αρχικές και οριακές συνθήκες από τα ατμοσφαιρικά πεδία του παγκόσμιου κλιματικού μοντέλου ECHAM5. Έχει χρησιμοποιηθεί και αξιολογηθεί εκτενώς για τη μελέτη της εξέλιξης ατμοσφαιρικών παραμέτρων για προσομοιώσεις σε παρελθόντες χρόνους (hindcasts) και μελλοντικές προγνώσεις (forecasts). Οι βασικές παραμετροποιήσεις για τις προσομοιώσεις με καταβιβασμό κλίμακας στην περιοχή μελέτης δίνονται από τους Tolika et al. (2015) και Makris et al. (2016). Το μοντέλο έχει αξιολογηθεί εκτενώς έναντι των δεδομένων ERA-Interim (<http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim>) και παρείχε τα δεδομένα εισόδου, δηλ. πεδία ανέμου στα 10 m από ΣΘ και ατμοσφαιρικής πίεσης στην επιφάνεια της θάλασσας (*SLP*) για το GreCSSM.

3.1. ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΠΑΛΙΡΡΟΙΑΣ

Οι προσομοιώσεις μεταβολής ΣΘ λόγω ατμοσφαιρικών συνθηκών, για την προσομοίωση του παρόντος και μελλοντικού κλίματος των μετεωρολογικών παλιρροιών, έγιναν με το αριθμητικό ομοίωμα υψηλής χωρικής ανάλυσης Greek Climatic Storm Surge Model (GreCSSM – Krestenitis et al., 2015a, Makris et al., 2015, 2016), το οποίο βασίζεται στο πρότυπο αριθμητικό ομοίωμα για τον υπολογισμό των θυελλογενών μεταβολών της ΣΘ των De Vries et al. (1995), το οποίο έχει βαθμονομηθεί και αξιολογηθεί εκτενώς στο παρελθόν σε μελέτες κλιματικών προσομοιώσεων (Krestenitis et al., 2011, Trifonova, et al., 2012, Krestenitis et al., 2015a, 2015b, Makris et al., (2015), Androulidakis et al. (2015), Makris et al., 2016). Το GreCSSM είναι μονόδρομα εμφωλευμένο και λαμβάνει οριακές συνθήκες από το αδρότερης χωρικής ανάλυσης μοντέλο για τη Μεσόγειο (Mediterranean Climatic Storm Surge Model; MeCSSM) το οποίο έχει παρουσιαστεί εκτενώς από τους Κρεστενίτης κ. αλ. (2014), Krestenitis et al. (2014), και Androulidakis et al. (2015). Πρόκειται για διδιάστατο, βαροτροπικό, υδροδυναμικό μοντέλο κυκλοφορίας που επιλύει τις ολοκληρωμένες κατά το βάθος εξισώσεις ρηχών νερών υπό την επίδραση του ανέμου και της ατμοσφαιρικής πίεσης στις θάλασσες της ελληνικής επικράτειας σε έναν υπολογιστικό κάναβο $1/20^\circ \times 1/20^\circ$ (περίπου 5×5 Km στην περιοχή του ΑΠΠ). Τα κύρια χαρακτηριστικά του μοντέλου GreCSSM δίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Βασικές παραμετροποιήσεις του μοντέλου GreCSSM.

Παραμετροποίηση	Βιβλιογραφική Αναφορά ή Τιμή Παραμέτρου
Ατμοσφαιρικά δεδομένα εισόδου	6ωρα από RegCM3
Βαθυμετρία / Κελιά Χωρική ανάλυση	GEBCO / 213×261 $1/20^\circ \times 1/20^\circ$ (περίπου 5×5 Km στο ΑΠΠ)
Χρόνος Ολοκλήρωσης Χρονικό Βήμα Επίλυσης	$1/1/1950 - 31/12/2100$ 30 s
Οδηγοί ρύθμισης μοντέλων ECHAM5/RegCM3	1951–2000: Προσομοίωση ελέγχου με δεδομένα 20C3M 2001–2100: Προσομοίωση υπό το σενάριο A1B
Τριβές διεπιφάνεια αέρα-νερού Τριβές πυθμένα	Smith and Banke (1975) Wang (2002)
Οριακές συνθήκες Τεχνική εμφώλευσης	Από μοντέλο MeCSSM Ανοιχτό όριο τύπου Dirichlet για τη ΣΘ
Τυρβώδης κινηματική συνεκτικότητα	Υπόθεση Boussinesq Μοντέλο Smagorinsky για οριζόντιες δίνες

Οι προσομοιώσεις καλύπτουν την 150ετή περίοδο 1951–2100. Η προσομοίωση ελέγχου έχει γίνει για την Περίοδο Αναφοράς (1951-2000) και η προσομοίωση σεναρίου για την Τρέχουσα Περίοδο (2001–2050, αντιπροσωπευτική του παρόντος και κοντινού μέλλοντος) και τη Μελλοντική Περίοδο (2051–2100). Η φόρτιση του κλιματικού μοντέλου με πεδία αρχικών/οριακών συνθηκών υπόκειται στο σενάριο 20C3M για τα ιστορικά καταγεγραμμένα στοιχεία εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας του 20^{ου} αιώνα. Το σενάριο A1B έχει χρησιμοποιηθεί για τις κλιματικές προσομοιώσεις του 21^{ου} αιώνα (Vagenas et al., 2014, Velikou et al., 2014) και βασίζεται στην παραδοχή ότι όλες οι πηγές ενέργειας θα χρησιμοποιούνται ισότιμα και χαρακτηρίζεται ως μετριοπαθές αναφορικά με τις προβλέψεις συγκεντρώσεων CO₂ (700 ppm) μέχρι το 2100 (IPCC, 2001). Ανήκει στα σενάρια που περιγράφουν έναν μελλοντικό κόσμο πολύ ταχείας οικονομικής ανάπτυξης με την άμεση εισαγωγή νέων πιο ικανών τεχνολογιών και γρήγορη αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού που κορυφώνει στο μέσο του 21^{ου} αιώνα, όμως μειώνεται στη συνέχεια.

3.2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΣΗ ΣΤΑΘΜΗ ΘΑΛΑΣΣΑΣ

Τα δεδομένα παρατήρησης, που χρησιμοποιήθηκαν για σύγκριση με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, παραχωρήθηκαν από την Υδρογραφική Υπηρεσία του Πολεμικού Ναυτικού (ΥΥΠΝ). Οι καταγραφές των παλιρροιογράφων είναι μέσες ημερήσιες τιμές ανύψωσης της ΣΘ με ψηφιακούς μετρητές στην Αλεξανδρούπολη, τη Χίο και τη Λευκάδα, και αναλογικούς στη Θεσσαλονίκη και το Ηράκλειο (<http://www.hnhs.gr/portal/page/portal/HNHS>). Οι χρονοσειρές έχουν επεξεργαστεί κατάλληλα με φίλτρα αφαίρεσης αρμονικών, έτσι ώστε να απομακρυνθεί το σήμα της αστρονομικής παλίρροιας (με το *T-Tide*) και να αποκλειστούν οι μακροπρόθεσμες (>30 ημέρες) ταλαντώσεις της θαλάσσιας επιφάνειας (Conte and Lionello, 2013) λόγω εσωτερικών (steric) φαινομένων, δηλαδή των μεγάλης κλίμακας, βραχύσυχων, θερμοαλατικών διακυμάνσεων της συνολικής μάζας στη Μεσόγειο (Carillo et al., 2012). Τα δεδομένα ΣΘ των παλιρροιογράφων καλύπτουν την περίοδο 1995-2012, δηλ. τα τελευταία 6 έτη της Περιόδου Αναφοράς και τα πρώτα 12 έτη της προσομοίωσης με το σενάριο A1B.

4. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΠΑΛΙΡΡΟΙΑΣ

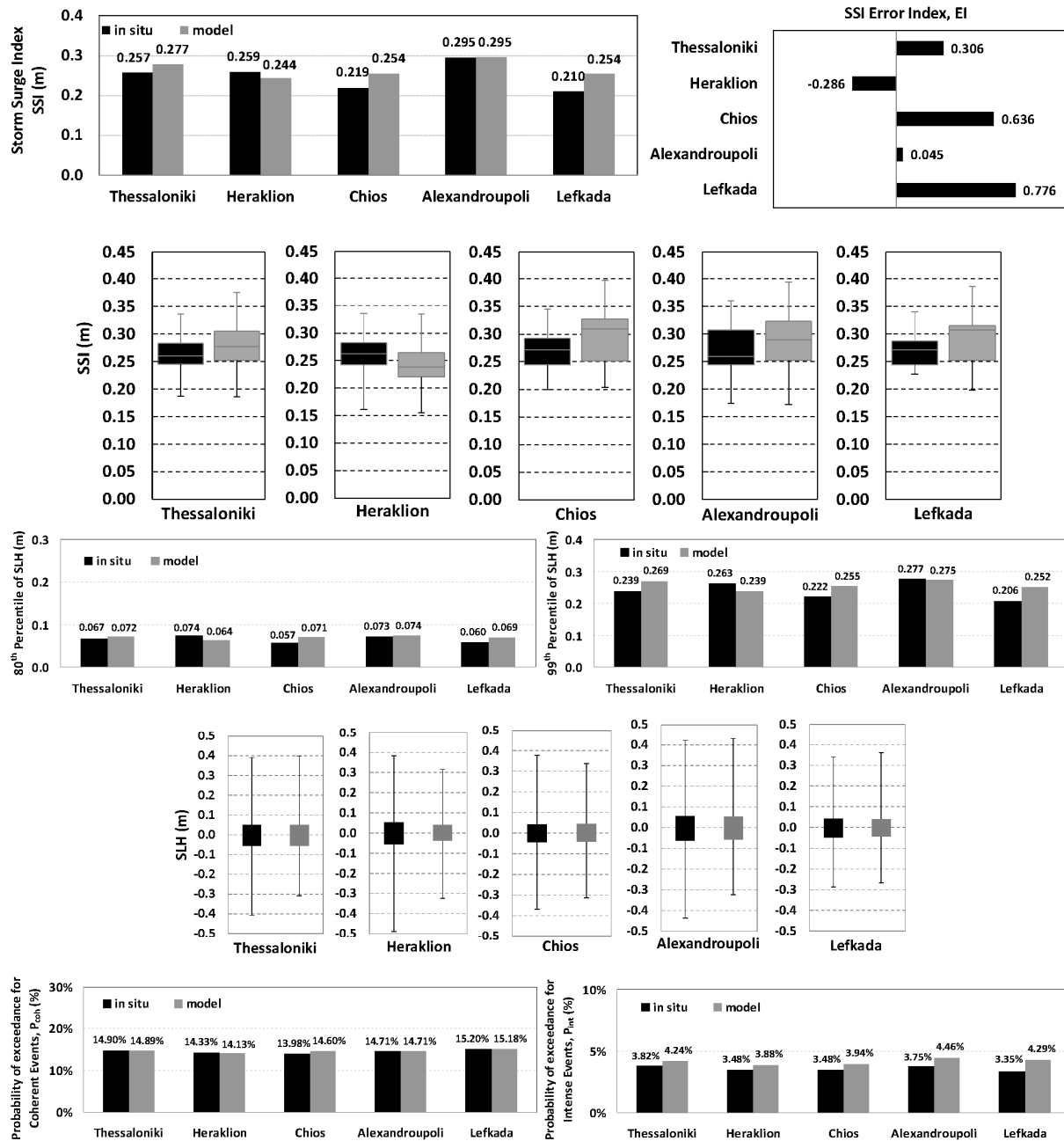
Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του GreCSSM με βάση συγκρίσεις σε 5 σταθμούς για 18 έτη. Αυτές αφορούν στις στατιστικά σημαντικές τιμές των ακραίων ετήσιων καταγραφών *SLH*, δηλ. τον δείκτη μετεωρολογικής παλίρροιας (Storm Surge Index, *SSI*) των Conte and Lionello (2013). Ο *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. Το ανηγμένο σφάλμα *EI* του *SSI* είναι:

$$EI = \left(\overline{SSI}_{mod} - \overline{SSI}_{obs} \right) / \sqrt{\left(\sigma_{SSI_{mod}}^2 + \sigma_{SSI_{obs}}^2 \right) / 2} \quad (1)$$

όπου η επιγράμμιση 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. Στις δύο πρώτες σειρές γραφημάτων του Σχήματος 2 παρουσιάζονται εκτός των μέσων 18ετών *SSI* και *EI*, τα θηκογράμματα των κατανομών των *SSI*. 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) ακολουθούμενες από τους σταθμούς της Θεσσαλονίκης και Χίου. Το μέγιστο αποδεκτό σφάλμα ($EI \approx 0.78$) εντοπίζεται στη Λευκάδα (Ιόνιο), η οποία όμως βρίσκεται πολύ κοντά στο δυτικό όριο του υπολογιστικού πεδίου και μπορεί να επηρεάζεται από ζητήματα ακρίβειας των αριθμητικών προσομοιώσεων εκεί. Με βάση τα θηκογράμματα των *SSI*, τα 18ετή ελάχιστα των *SSI* έχουν εκτιμηθεί με πολύ καλή ακρίβεια από το μοντέλο σε όλους τους σταθμούς, ενώ τα μέγιστα έχουν υπερεκτιμηθεί παντού εκτός από το Ηράκλειο, όπου έχουν αναπαραχθεί με ακρίβεια σε σύγκριση με τις παρατηρημένες τιμές. Παρόμοια αναλογία ισχύει και για τα 18ετή 1^α και 3^α τεταρτημόρια των χρονοσειρών των *SSI*.

Τα υπόλοιπα γραφήματα του Σχήματος 2 αφορούν στα υπερετήσια 18ετή μέγιστα των *SLH*, δηλ. στα μέσης και ανώτερης τάξης (80^ο και 99^ο) εκατοστημόρια (percentiles) των *SLH* (3^η σειρά), τα θηκογράμματα των *SLH* (4^η σειρά) και στις πιθανότητες υπέρβασης των συνεκτικών (coh) και έντονων (int) γεγονότων, P_{coh} και P_{int} (%). Τα τελευταία είναι ευρετικά στατιστικά μέτρα (Androulidakis et al., 2015, Makris et al., 2016), 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*). Τα εκατοστημόρια των *SLH* δείχνουν ότι οι προσομοιωμένες τιμές είναι αρκετά κοντά στις παρατηρήσεις, γεγονός που καθιστά το μοντέλο GreCSSM επαρκές για την εκτίμηση ακραίων τιμών μετεωρολογικής παλίρροιας σε

κλιματικές προσομοιώσεις. Ο σταθμός της Αλεξανδρούπολης (Β. Αιγαίο) δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με τους υπόλοιπους.



Σχήμα 2: Αξιολόγηση μοντέλου GreCSSM έναντι παρατηρήσεων σε 5 ελληνικούς σταθμούς για τη 18ετία 1995-2012. Συγκρίσεις δεικτών SSI (m) και EI (1^η σειρά), θηκογραμμάτων των SSI (2^η σειρά), μέσης και υψηλής τάξης (80^{ου} και 99^{ου}) εκατοστημορίων SLH (m) (3^η σειρά), θηκογραμμάτων των SLH (4^η σειρά), πιθανοτήτων υπέρβασης συνεκτικών/έντονων γεγονότων, P_{coh}/P_{int} (%) (5^η σειρά).

Σύμφωνα και με τους Makris et al. (2015), οι προσομοιώσεις υψηλότερης χωρικής ανάλυσης με το GreCSSM έχουν δώσει βελτιωμένα αποτελέσματα για τα πεδία των SLH στο ΑΠ, παράγοντας μεγαλύτερες τιμές και μικρότερα σφάλματα από τις προσομοιώσεις με το MeCSSM (Androulidakis et al., 2015· εφιστάται προσοχή στη διαφορά της χρονικής περιόδου υπό σύγκριση, 18ετία και 11ετία στα δύο άρθρα) στις ελληνικές θάλασσες.

Ειδικότερα η απόδοση του GreCSSM είναι ποιοτικότερη στη Θεσσαλονίκη, την Αλεξ/πολη και τη Χίο (βόρειο τμήμα της προσομοίωσης), όπου τα ατμοσφαιρικά δεδομένα εισόδου υψηλής χωρικής ανάλυσης έχουν βελτιωθεί (Tolika et al., 2015). Τα θηκογράμματα δείχνουν ότι τα 18ετή τεταρτημόρια και μέγιστα των SLH έχουν εκτιμηθεί σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό από το μοντέλο σε όλους τους σταθμούς, με μια υποεκτίμηση 10-15% των ελαχίστων τιμών SLH (αναπαριστούν τις μέγιστες τιμές των υφέσεων της ΣΘ), οι οποίες όμως δεν είναι κρίσιμες για την παρούσα ανάλυση. Επιπρόσθετα, οι πιθανότητες υπέρβασης συνεκτικών συμβάντων από τα αποτελέσματα του μοντέλου συσχετίζονται πολύ ικανοποιητικά με τις μετρημένες τιμές σε όλους τους σταθμούς. Οι πιθανότητες των έντονων συμβάντων υπερεκτιμώνται ελαφρά σε σύγκριση με τα επί τόπου δεδομένα, όμως οι διαφορές είναι μικρές (0.4~0.9%). Συνεπώς οι συγκρίσεις πιστοποιούν την καλή απόδοση του μοντέλου GreCSSM αναφορικά με τα ετήσια και υπερετήσια μέγιστα για την 18ετή περίοδο αξιολόγησης. Επίσης υπολογίστηκε ο δείκτης Hit Rate of Percentiles (HRP : Schoetter et al., 2012) για ολόκληρη τη 18ετή χρονοσειρά των SLH , ώστε να εξεταστεί η αναγκαιότητα πιθανής διόρθωσης σφάλματος (bias correction) των αποτελεσμάτων του GreCSMM (Makris et al., 2016). Ο HRP ορίζεται ως το άθροισμα των κατηγορικών κλασμάτων, δηλ. των απόλυτων διαφορών μεταξύ των διατεταγμένων (από το 1^ο στο 99^ο) εκατοστημόριων των προσομοιωμένων και παρατηρημένων τιμών SLH σε σύγκριση με μια επιτρεπόμενη απόκλιση. Η τελευταία έχει ληφθεί ίση με τον μέσο όρο των τυπικών αποκλίσεων των παρατηρούμενων και προσομοιωμένων χρονοσειρών της SLH , δηλ. $(\sigma_{SLHmod} + \sigma_{SLHobs})/2 \approx 4$ cm, που είναι περίπου το 5-10% του μέσου όρου της παρατηρούμενης ετήσιας μέγιστης καταγραφής SLH_{max} . Διαπιστώθηκε ότι ο HRP κυμαίνεται μεταξύ 0.95 και 1 σε όλους τους σταθμούς, ως εκ τούτου, δεν απαιτείται διόρθωση σφάλματος του μοντέλου.

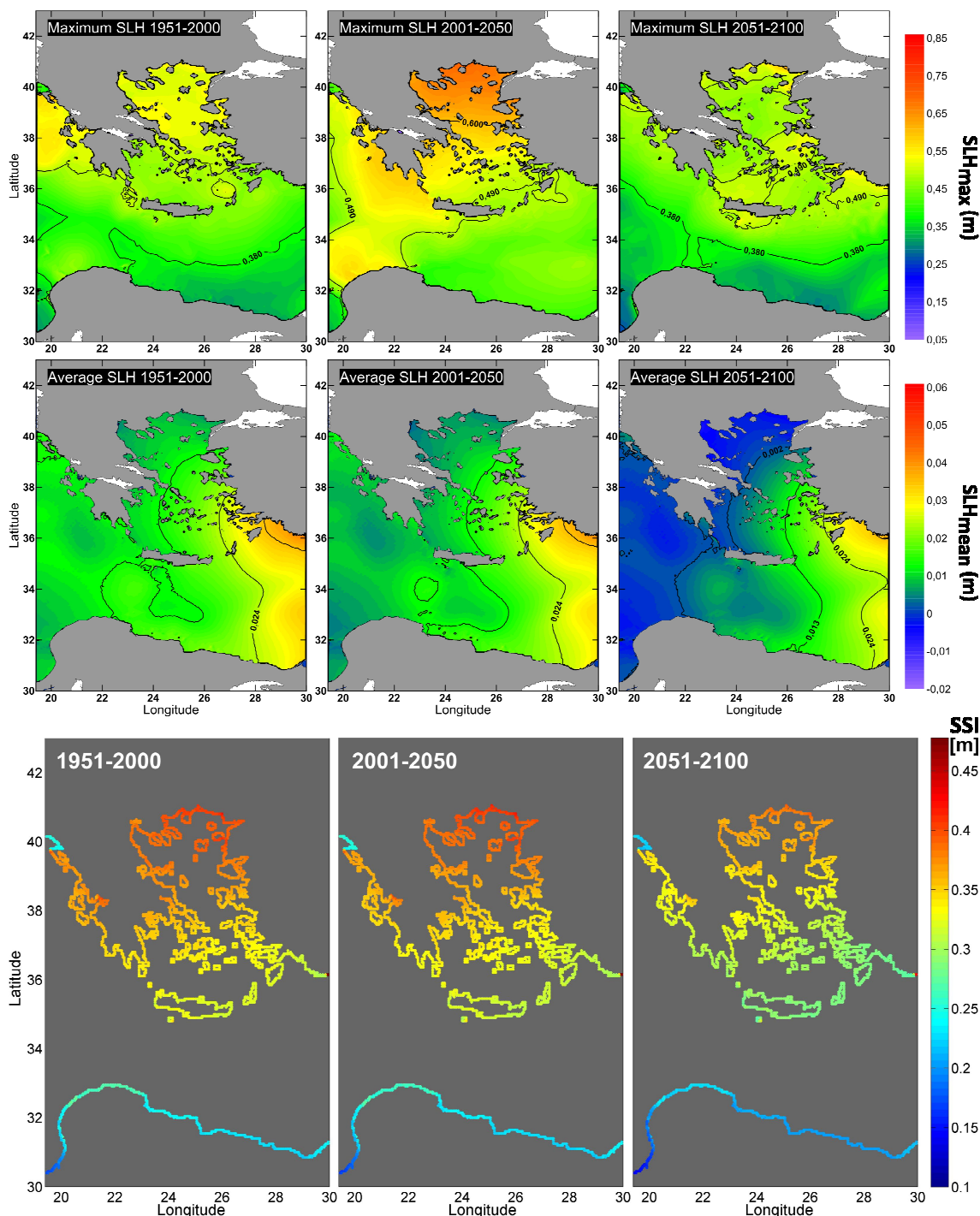
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα αφορούν κύρια στην εξέλιξη των ετήσιων μέγιστων τιμών ανύψωσης της ΣΘ (SLH) λόγω μετεωρολογικής παλίρροιας (π.χ. SSI και SLH_{max}). Η ανάλυση βασίζεται σε προσομοιώσεις ελέγχου για την περίοδο αναφοράς (1951-2000) και προσομοιώσεις υπό το σενάριο A1B για τον 21^ο αιώνα (2001-2100). Οι συγκρίσεις μεταξύ τριών 50ετών περιόδων στοχεύουν στον εντοπισμό δεικτών επίδρασης της Κλιματικής Αλλαγής στα χαρακτηριστικά των μετεωρολογικών παλίρροιών στις ελληνικές θάλασσες (ΑΠΠ).

5.1. ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΠΑΛΙΡΡΟΙΑΣ

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η οριζόντια κατανομή του μέγιστου και μέσου 50ετούς SLH μαζί με τον μέσο 50ετή δείκτη SSI κατά μήκος της ακτογραμμής στην περιοχή μελέτης από τις προσομοιώσεις του GreCSSM για τις τρεις 50ετείς περιόδους μελέτης. Παρατηρούμε ένα ευσταθές πρότυπο με αυξανόμενες τιμές της ΜΣΘ από δυτικά προς ανατολικά. Παρόλο που η περίοδος αναφοράς και η τρέχουσα 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. Γενικά εκτιμάται μια σημαντική αύξηση των SLH_{max} στο 1^ο μισό του 21^{ου} αιώνα, σε σχέση με την περίοδο αναφοράς και τη μελλοντική 50ετία. Τα μεγέθη κυμαίνονται από 0.60 έως 0.85 m στο Β. Αιγαίο με τις υψηλότερες τιμές κατά μήκος της βόρειας ακτογραμμής. Οι αντίστοιχες τιμές της περιόδου αναφοράς είναι της τάξης των 0.50–0.55 m. Στο Ν. Αιγαίο, η SLH_{max} εκτιμάται μεταξύ 0.50 και 0.60 m την περίοδο 2001–2050, ενώ για την περίοδο αναφοράς είναι μέχρι και 10 cm (16-20%) μικρότερες. Προς το πέρασ του 21^{ου} αιώνα οι μέγιστες μετεωρολογικές παλίρροιας εκτιμάται ότι θα μειωθούν σημαντικά στα περισσότερα τμήματα του ΑΠΠ, κυμαινόμενες από 0.50 έως 0.60 m στο Β. Αιγαίο και από 0.40 έως 0.50 m στο Ιόνιο. Στο βορειοανατολικό τμήμα του Ν. Αιγαίου και το δυτικό Κρητικό Πέλαγος τα επίπεδα των μεγίστων SLH αναμένεται να παραμείνουν ίδια για την τρέχουσα περίοδο. Συνολικά η αποδυνάμωση του θυελλώδους και των σχετικών μεγίστων μετεωρολογικών

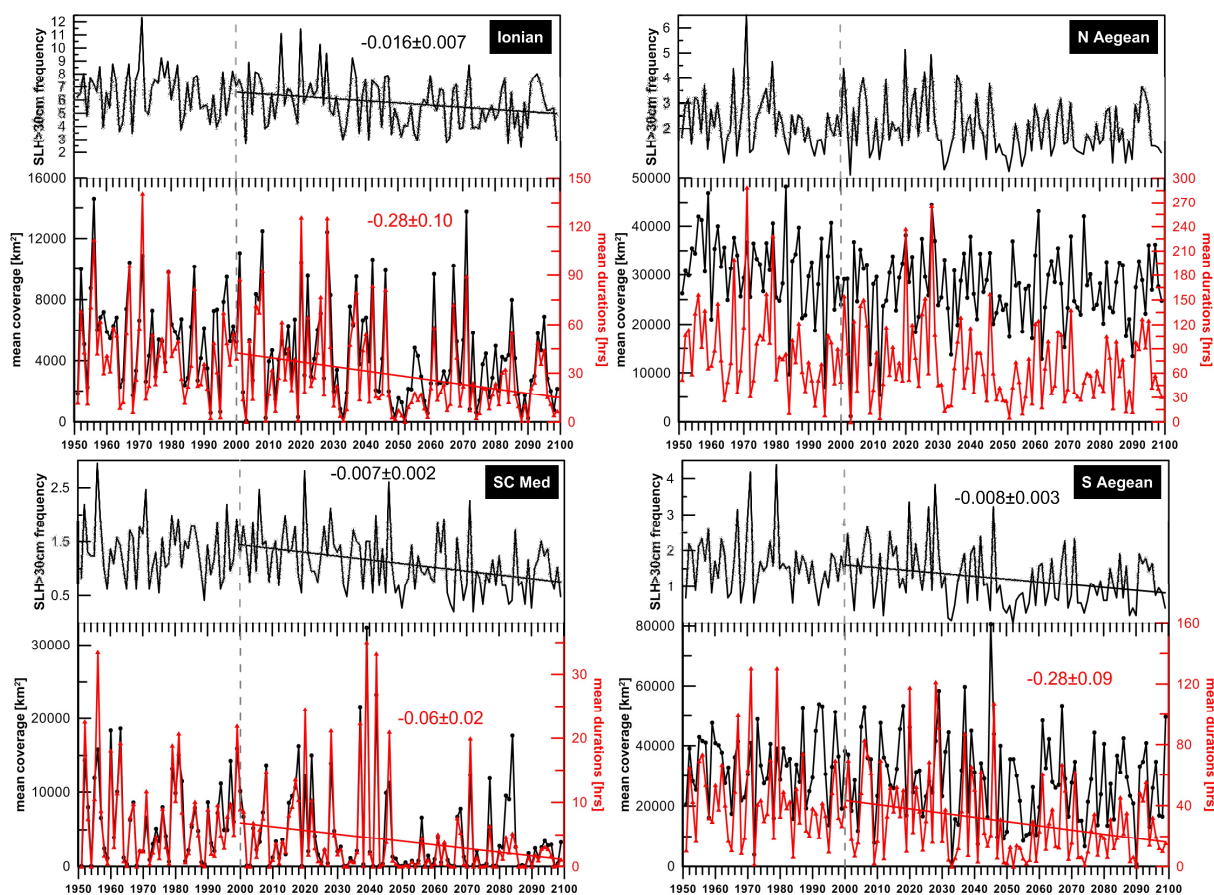
παλιρροιών στο ΑΠΠ αφορά την 50ετία 2051–2100, ενώ τα μεγέθη των μεμονωμένων απόλυτων ακραίων τιμών είναι πιθανότερο ότι θα αυξηθούν κατά την τρέχουσα περίοδο (π.χ. κατά 30~40% στο Β. Αιγαίο μέχρι το 2050).



Σχήμα 3: Οριζόντια κατανομή του μέγιστου και μέσου 50ετούς *SLH* (m) (άνω και μεσαία σειρά, αντίστοιχα) και μέσος 50ετής δείκτης *SSI* (m) κατά μήκος της ακτογραμμής στην περιοχή μελέτης (κάτω σειρά). Τα γραφήματα από αριστερά προς τα δεξιά αντιστοιχούν στις περιόδους 1951-2000, 2001-2050, και 2051-2100 για την προσομοίωση με το GreCSSM.

Το Σχήμα 3 (κάτω γραφήματα) δείχνει επίσης τη μέση τιμή 50ετίας των *SSI* (SSI_{50yr}) κατά μήκος της παράκτιας ζώνης της περιοχής μελέτης. Το πρότυπο της χωρικής κατανομής του SSI_{50yr} στην παράκτια ζώνη είναι παρόμοιο με αυτό των ετήσιων μέγιστων τιμών ΣΘ 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 m για το Κεντρικό Αιγαίο και το Ιόνιο, φτάνοντας περίπου τα 0.3 m στο Ν. Αιγαίο και την Κρήτη, και κάτω από 0.25 m για τις βόρειες αφρικανικές ακτές. Η εξασθένηση των θυελλών/καταιγίδων και της μέγιστης *SLH* για την περίοδο 2051-2100 επιβεβαιώνεται και από τη χρονική εξέλιξη του *SSI*_{50yr}. Εξετάζοντας τους *SSI*_{50yr} μεταξύ της περιόδου 2001-2050 και τις προηγούμενης 50ετίας, παρατηρούνται διαφορές, που κυμαίνονται από -1.4 έως +0.8 cm (-5 έως +20%), με ένα μικρό μέσο όρο -0.6 cm (-1.6%). 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 (Makris et al., 2016). Συγκρίνοντας το 2^ο με το 1^ο μισό του 21^{ου} αιώνα, βλέπουμε ότι οι *SSI* μειώνονται σε γενικές γραμμές, με σχετικές διαφορές ανάμεσα σε -4.7 και 0.2 cm (-18 ως +2%), και κατά μέσο όρο -2.6 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} μισού του 21^{ου} αιώνα.



Σχήμα 4: Ετήσια διάρκεια εμφάνισης (hrs) (κόκκινες καμπύλες με τρίγωνα) και αντίστοιχο μέσο εμβαδόν κάλυψης (Km²) (μαύρες καμπύλες με τελείες) για γεγονότα μετεωρολογικών παλιρροιών με $SLH > (m+3\sigma)SLH_{obs} \approx 30$ cm σε όλες τις υπο-περιοχές (βλ. Σχήμα 1). Γραμμικές τάσεις εξέλιξης παραμέτρων στον 21^ο αιώνα, με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Οι τιμές κλίσης των τάσεων δίνονται με αντίστοιχο χρώμα.

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η μέση ετήσια διάρκεια και το αντίστοιχο μέσο εμβαδόν κάλυψης (κόκκινες και μαύρες καμπύλες, αντίστοιχα) μετεωρολογικών παλιρροιών για τις

οποίες η SLH ξεπερνάει το κρίσιμο όριο για δριμεία γεγονότα. Αυτά ορίζονται στατιστικά ως $(m+3\sigma)_{SLH,obs} \approx 30$ cm με βάση 18ετείς καταγραφές σε 5 παλιρροιογράφους της ΥΥΠΝ. Μόνο στατιστικά σημαντικές μονοτονικές τάσεις (θεωρώντας επίπεδο εμπιστοσύνης 95% με το τεστ Mann-Kendall) έχουν επίσης σχεδιαστεί στα γραφήματα για κάθε παράμετρο και αιώνα 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), 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. 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. Η τάση μείωσης είναι σε συμφωνία με την προβλεπόμενη εξασθένηση των καταγίδων 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 καταγίδων στο Ιόνιο και το Ν. Αιγαίο έχουν μέγιστα την περίοδο 2001-2050. Για το Β. Αιγαίο εκτιμάται μια γενική τάση μείωσης της χωρικής και χρονικής κάλυψης των μεγίστων μετεωρολογικών παλιρροιών στον 21^ο αιώνα (σενάριο A1B), χωρίς όμως μεγάλη πιθανότητα, και ακολουθείται από βραχυπρόθεσμα έντονα γεγονότα σε ορισμένα σημεία του πεδίου την τρέχουσα περίοδο 2001-2050.

5.2. ΕΠΟΧΙΚΟΤΗΤΑ & ΤΑΣΕΙΣ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΠΑΛΙΡΡΟΙΩΝ

Με βάση την ανάλυση χρονοσειρών σε τοπικό επίπεδο (συγκεκριμένους σταθμούς, Σχήμα 1c) υπολογίστηκε η εποχιακή συχνότητα εμφάνισης των ετήσιων SLH_{max} για τις 3 περιόδους ξεχωριστά, έτσι ώστε να διερευνηθούν πιθανές μεταβολές στην εποχικότητά τους. Όπως ήταν αναμενόμενο, η πλειάδα των μεγίστων γεγονότων μετεωρολογικής παλίρροιας λαμβάνει χώρα κυρίως κατά τη χειμερινή περίοδο (60-78%), ακολουθούμενη από την εαρινή (10-36%) και τη φθινοπωρινή (2-18%) περίοδο του έτους σε όλους τους σταθμούς. Οι ακτές του Β. Αιγαίου (Καβάλα και Αλεξ/πολη) παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες φθινοπωρινές συχνότητες εμφάνισης για την περίοδο αναφοράς και έντονη μείωση στον 21^ο αιώνα, ακολουθούμενη από αύξηση των εαρινών συχνοτήτων. Στους σταθμούς του Κεντρικού και Ν. Αιγαίου παρατηρείται ηπιότερη αύξηση κατά την εαρινή περίοδο. Μεγαλύτερες ανοιξιότικες συχνότητες παρατηρούνται στην πλειονότητα των σταθμών του Ιονίου και του Β. Αιγαίου (>30%). Η μόνη περιοχή με αύξηση των χειμερινών συχνοτήτων, υπό το σενάριο A1B, είναι η Ρόδος, όπου μια ισχυρή αύξηση 4% εντοπίζεται κατά το 2^ο μισό του 21^{ου} αιώνα, σε σχέση με την τρέχουσα 50ετία. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δείχνουν μια πιθανή μείωση των χειμερινών συχνοτήτων εμφάνισης στο 2^ο μισό του 21^{ου} αιώνα, μαζί με μια αντίστοιχη αύξηση των εαρινών τιμών, κατά μήκος της παράκτιας περιοχής του ΑΠΙ. Κανένα μέγιστο δεν παρατηρείται κατά τη θερινή περίοδο πουθενά και σε καμιά από τις 50ετείς περιόδους μελέτης. Συνεπώς διαφαίνεται μια γενική τάση διαστολής τους εύρους του εποχιακού κύκλου των μετεωρολογικών παλιρροιών με μείωση των ακραίων γεγονότων της «κρύας» περιόδου του έτους και αντίστοιχη αύξηση κατά την εαρινή περίοδο του έτους. Αυτά τα ευρήματα είναι σε συμφωνία με τις τάσεις που περιγράφονται από τους Jordà et al. (2012).

Επιπρόσθετα έχουν υπολογιστεί και οι κλίσεις των μονοτονικών γραμμικών τάσεων των 150ετών χρονοσειρών για τις ετήσιες τιμές SLH_{max} στους σταθμούς του ΑΠΙ, οι οποίες έχουν προκύψει από γραμμική παλινδρόμηση, θεωρώντας πολύ υψηλά επίπεδα εμπιστοσύνης (99% με βάση το τεστ Mann-Kendall). Παρατηρείται μια ξεκάθαρη τάση μείωσης των ετήσιων μεγίστων γεγονότων μετεωρολογικής παλίρροιας από -0.4 ± 0.1 έως -0.2 ± 0.1 mm/έτος σε όλους τους παράκτιους σταθμούς (βλ. Σχήμα 1c), από το 1951 προς το 2100. Αυτή η παρατήρηση είναι σύμφωνη με την εκτίμηση της γενικής εξασθένησης του θυελλώδους στην περιοχή της Μεσογείου (Conte and Lionello, 2013).

5.3. ΔΕΙΚΤΕΣ ΤΑΣΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ

Για μια πιο γενικευμένη εποπτεία πάνω στην τάση της Κλιματικής Αλλαγής σε σχέση με τις μετεωρολογικές παλίρροιες του ΑΠΙ στον 21^ο αιώνα, έγινε χρήση του Δείκτη Κλιματικής Αλλαγής (Climate Change Index, *CCI*). Αυτός υπολογίζεται με βάση τις 50ετείς μέσες τιμές του *SSI* σε κάθε διακριτό παράκτιο θαλάσσιο κελί του υπολογιστικού πεδίου και δίνεται από:

$$CCI_{\text{μέλλον}} (\%) = 100 \cdot \left(\overline{SSI_{\text{mod}}^{(\text{μέλλον})}} - \overline{SSI_{\text{mod}}^{(\text{αναφοράς})}} \right) / \left(\overline{SSI_{\text{mod}}^{(\text{αναφοράς})}} \right) \quad (2)$$

$$CCI_{\text{τρέχον}} (\%) = 100 \cdot \left(\overline{SSI_{\text{mod}}^{(\text{τρέχον})}} - \overline{SSI_{\text{mod}}^{(\text{αναφοράς})}} \right) / \left(\overline{SSI_{\text{mod}}^{(\text{αναφοράς})}} \right)$$

όπου η επιγράμμιση δηλώνει τις χρονικά μέσες τιμές. Ο *CCI* υπολογίζεται κατά μήκος της παράκτιας ζώνης και δίνεται τελικά από τον χωρικό μέσο επί όλων των παράκτιων κελιών της κάθε υπο-περιοχής μελέτης του ΑΠΙ. Οι τιμές του *CCI* παρουσιάζονται ως το άθροισμα της μέσης τιμής και της χωρικής τυπικής απόκλισης ($m \pm \sigma$). Για την Τρέχουσα Περίοδο ο *CCI*_{τρέχον} βρέθηκε ότι είναι $-2.48 \pm 1.24\%$, $-0.65 \pm 0.93\%$, και $-2.09 \pm 0.47\%$, για το Ιόνιο, το Β. Αιγαίο, αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές καταδεικνύουν μια γενική μικρή μείωση των ετήσιων μεγίστων της μετεωρολογικής παλίρροιας με μια μικρή πιθανή αύξηση μόνο στο Β. Αιγαίο για την Τρέχουσα Περίοδο (2001-2050). Οι αντίστοιχες τιμές για το 2^ο μισό του 21^{ου} αιώνα είναι $-10.11 \pm 1.08\%$, $-7.17 \pm 1.46\%$, και $-9.94 \pm 1.02\%$. Συνεπώς μια γενική ξεκάθαρη αποδυνάμωση των γεγονότων μετεωρολογικής παλίρροιας εκτιμάται επί του συνόλου της ελληνικής παράκτιας ζώνης για την περίοδο 2050-2100. Αυτή η παρατήρηση είναι ποιοτικά σύμφωνη με τα ευρήματα των Marcos et al. (2011), Jordà et al. (2012), Lionello et al. (2012), Šerpić et al. (2012), Conte and Lionello (2013), και Androulidakis et al. (2015).

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτήν την εργασία μελετήθηκαν οι μεταβολές στα κύρια χαρακτηριστικά των έντονων γεγονότων μετεωρολογικής παλίρροιας στο Αιγαίο και το Ιόνιο Πέλαγος από το 1951 έως το 2100 υπό την επίδραση της Κλιματικής Αλλαγής, όπως αυτή προϋποτίθεται στο κλιματικό σενάριο A1B της IPCC. Χρησιμοποιήθηκαν αποτελέσματα αριθμητικών υδροδυναμικών προσομοιώσεων με το μοντέλο του ΑΠΘ GreCCSM. Η σύγκρισή τους με δεδομένα μετρήσεων ανύψωσης της ΣΘ, από διάφορους σταθμούς στις ελληνικές θάλασσες, επιβεβαίωσαν την αξιοπιστία του μοντέλου μετεωρολογικής παλίρροιας. Σε συμφωνία με τα ευρήματα των Conte and Lionello (2013) βρέθηκε μια εκτιμώμενη ξεκάθαρη τάση εξασθένησης του θυελλώδους και των συνακόλουθων έντονων γεγονότων μετεωρολογικής παλίρροιας ειδικά για την περίοδο 2050-2100. Τα μεγέθη των ετήσιων μεγίστων όμως εκτιμάται ότι θα αυξηθούν κατά 30–40% στο Β. Αιγαίο το 1^ο μισό του 21^{ου} αιώνα, ενώ η συχνότητα εμφάνισής τους εκτιμάται ότι θα ελαττωθεί. Στο Ν. Αιγαίο εκτιμάται ότι δεν θα υπάρχει τόσο έντονη μεταβολή και κατά τόπους είναι πιθανή η μείωση της δριμύτητας των έντονων φαινομένων θυελλογενούς ανύψωσης της ΣΘ. Η γενική τάση εξασθένησης των ακραίων φαινομένων πιθανότατα οφείλεται στη μετατόπιση του κέντρου βάρους του εποχιακού κύκλου εκδήλωσης των ατμοσφαιρικών προτύπων και εμφάνισης των βαρομετρικών χαμηλών στην περιοχή της Ελλάδας (Makris et al., 2016), το οποίο είναι ποιοτικά σύμφωνο με τη μελέτη των Jordà et al. (2012). Γενικά, η εξασθένηση των έντονων μετεωρολογικών παλιρροιών, υπό το σενάριο A1B, σχετίζεται με μείωση της διάρκειας και της χωρικής κάλυψης και όχι με την απόλυτη ένταση των ακραίων γεγονότων. Συνεπώς διαφαίνεται η πιθανή ανάπτυξη ενός μηχανισμού αυτορρύθμισης του κλίματος (σε ατμόσφαιρα και θάλασσα) σε τοπικό επίπεδο της Μεσογείου και των ελληνικών θαλασσών. Τα μελλοντικά βήματα της έρευνας θα πρέπει να εστιάζουν στις επιδράσεις της Κλιματικής Αλλαγής στην τρωτότητα της ελληνικής παράκτιας ζώνης και των έργων σε αυτήν, παίρνοντας υπόψη τη συνδυασμένη δράση ακραίων κυμάτων, έντονων μετεωρολογικών και αστρονομικών παλιρροιών, και την προβλεπόμενη άνοδο της μέσης στάθμης της θάλασσας.

Αυτού του είδους η εκτίμηση είναι ζωτικής σημασίας για τη διαμόρφωση ολοκληρωμένης πολιτικής διαχείρισης της ελληνικής παράκτιας ζώνης στον 21^ο αιώνα, ειδικά σε σχέση με τα μεγέθη σχεδιασμού των μέτρων προστασίας. Μία αρχική εκδοχή αυτής της εργασίας παρουσιάστηκε στο 3^ο Κοινό Συνέδριο (13^ο ΕΥΕ, 9^ο ΕΕΔΥΠ και 1^ο ΕΥΣ) «*Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων στη Νέα Εποχή*», Αθήνα, 10-12 Δεκεμβρίου 2015.

7. 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. Ευχαριστούμε την ΥΥΠΝ για την παροχή δεδομένων στάθμης θάλασσας από 5 ελληνικούς παλιρροιογράφους για την περίοδο 1995-2012.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Κρεστενίτης, Γ.Ν., Ανδρουλιδάκης, Γ., Κομπιάδου, Κ., Μακρής, Χ. και Μπαλτίκας, Β. 2014. *Ακραίες Τιμές Μετεωρολογικής Παλίρροιας στη Μεσόγειο Θάλασσα λόγω Κλιματικής Αλλαγής*. Πρακτικά 6^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Διαχείρισης και Βελτίωσης Παράκτιων Ζωνών, Αθήνα.
- Κρεστενίτης, Γ.Ν., Κομπιάδου, Κ.Δ., Μακρής, Χ.Β., Ανδρουλιδάκης, Γ.Σ. και Καραμπάς, Θ.Β. 2015. *Παράκτια Μηχανική – Θαλάσσια Περιβαλλοντική Υδραυλική*. Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα, Κάλλιπος, Αθήνα.
- Androulidakis, Y.S., Kombiadou, K.D., Makris, C.V., Baltikas, V.N. and 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. and 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. 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.
- De Vries, H., Breton, M., de Mulder, T., Krestenitis, Y., Ozer, J., Proctor, R., ..., Voorrips, A. 1995. *A comparison of 2D storm surge models applied to three shallow European seas*. *Environmental Software*, 10(1): 23–42.
- Esteves, L.S., Williams, J.J. and Brown, J.M. 2011. *Looking for evidence of climate change impacts in the eastern Irish Sea*. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 11:1641–1656.
- IPCC 2001. *Climate change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. J.T. Houghton et al. (Editors), Cambridge University Press.
- IPCC 2007. *Climate change 2007: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. Solomon et al. (Editors), Cambridge University Press.
- IPCC 2012. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, C.B. Field et al. (Editors), Cambridge University Press.
- Jordà, G., Gomis, D., Álvarez-Fanjul, E. and Somot, S. 2012. *Atmospheric contribution to Mediterranean and nearby Atlantic sea level variability under different climate change scenarios*. *Global and Planetary Change*, 80–81(0): 198–214.

- 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(3): 353–368.
- Krestenitis, Y., Androulidakis, Y., Kombiadou, K., Makris, C. and Baltikas, V. 2014. *Modeling storm surges in the Mediterranean Sea under the A1B climate scenario*. Proceedings of the 12th COMECAP, Heraklion (Crete), Greece.
- Krestenitis, Y., Androulidakis, Y., Makris, C., Kombiadou, K., Baltikas, V. and Diamanti, P. 2015a. *Evolution of storm surge extreme events in Greek Seas under climate change scenario*. 11^o Πανελλήνιο Συμπόσιο Ωκεανογραφίας & Αλιείας, Μυτιλήνη, 849-852.
- Krestenitis, Y., Makris, C., Androulidakis, Y., Kombiadou, K. and Baltikas, V. 2015b. *Variability of Storm Surge Extremes in the Greek Seas under Climate Change*. Proceedings of 2015 ASLO Aquatic Sciences Meeting, Granada, Spain.
- Lionello, P. et al. 2012. *Introduction: Mediterranean climate-background information*. In: The Climate of the Mediterranean Region, Elsevier.
- Makris, C.V., Androulidakis, Y.S., Krestenitis, Y.N., Kombiadou, K.D. and Baltikas, V.N. 2015. *Numerical Modelling of Storm Surges in the Mediterranean Sea under Climate Change*, Proceedings of 36th IAHR World Congress, The Hague, The Netherlands.
- Marcos, M., Tsimplis, M.N. and Shaw, A.G. 2009. *Sea level extremes in southern Europe*. Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012), 114(C1).
- Marcos, M., Jordà, G., Gomis, D. and Pérez, B. 2011. *Changes in storm surges in southern Europe from a regional model under climate change scenarios*. Global and Planetary Change, 77(3–4): 116–128.
- Schoetter, R., Hoffmann, P., Rechid, D. and Schlunzen, K.H. 2012. *Evaluation and Bias Correction of Regional Climate Model Results Using Model Evaluation Measures*. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 51: 1670–1684.
- Šepić, J., Vilibic, I., Jordà, G. and Marcos, M. 2012. *Mediterranean sea level forced by atmospheric pressure and wind: variability of the present climate and future projections for several period bands*. Global and Planetary Change, 86-87: 20–30.
- Smith, S.D. and Banke, E.G. 1975. *Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 101(429): 665–673.
- Tolika, K., Anagnostopoulou, C., Velikou, K. and Vagenas, C. 2015. *A comparison of the updated very high resolution model RegCM3_10km with the previous version RegCM3_25km over the complex terrain of Greece: present and future projections*. Theoretical and Applied Climatology, 1–12.
- Trifonova, E., Valchev, N., Krestenitis, Y., Androulidakis, I., Kombiadou, K., Eftimova, P., Andreeva, N., Kotsev, I. and Kirilova, D. 2012. *Estimation of storm flood under conditions of future climate for Varna region (western Black Sea)*, Proceedings of 11th International Conference on Marine Sciences & Technologies - Black Sea, Varna, Bulgaria, 85–91.
- Vagenas, C., Anagnostopoulou, C. and Tolika, K. 2014. *Climatic study of the surface wind field and extreme winds over the Greek seas*. Proceedings of the 12th COMECAP.
- Van den Eynde, D., De Sutter, R. and Haerens, P. 2012. *Evolution of marine storminess in the Belgian part of the North Sea*. Natural Hazards and Earth System Science, 12: 305–312.
- Velikou, K., Tolika, K., Anagnostopoulou, I. and Vagenas, C. 2014. *High resolution climate over Greece: Assessment and future projections*. Proceedings of the 12th COMECAP.
- Wang, S., McGrath, R., Hanafin, J.A., Lynch, P., Semmler, T. and Nolan, P. 2008. *The impact of climate change on storm surges over Irish waters*. Ocean Modelling, 25: 83–94.
- Wang, X.H. 2002. *Tide-induced sediment resuspension and the bottom boundary layer in an idealized estuary*. Journal of Physical Oceanography, 32: 3113– 3131.
- White, A.U. 1974. *Global summary of human response to natural hazards: tropical cyclones*. In: Natural Hazards: Local, National, Global, Oxford University Press, NY, 255–265.