



CLIMPACT

ΕΘΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ

NEWSLETTER #7

Κλιματική αλλαγή: Μεταβολές στάθμης θάλασσας και παράκτιες πλημμύρες

Γιάννης Ν. Κρεστενίτης
Χρήστος Μακρής
Γιάννης Ανδρουλιδάκης
Βασίλης Μπαλτίκας
Κατερίνα Κομπιάδου

Ομάδα Ωκεανογραφίας &
Παράκτιας Μηχανικής, Τμήμα
Πολιτικών Μηχανικών, ΑΠΘ

Η ανύψωση της στάθμης της θάλασσας, η οποία προκαλείται από την εμφάνιση χαρακτηριστικών 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 βαρομετρικών συστημάτων στην ατμόσφαιρα, αναφέρεται ως **μετεωρολογική παλίρροια** (storm surge). Λόγω του φαινομένου της μετεωρολογικής παλίρροιας, η στάθμη της θάλασσας στην παράκτια ζώνη μπορεί να ανυψωθεί από αρκετά εκατοστά έως και λίγα μέτρα από τη στάθμη ηρεμίας (ΣΗ) μέσα σε λίγες ώρες. Ο συνδυασμός δε της μετεωρολογικής παλίρροιας με την αστρονομική παλίρροια, στη φάση της πλημμυρίδας, και την κυματογενή ανύψωση της στάθμης της θάλασσας στα ρηχά, αυξάνει την πιθανότητα εμφάνισης **παράκτιων πλημμυρών** (coastal floods) και **κατάκλυσης των παράκτιων περιοχών** (coastal inundation). Οι συνθήκες που επηρεάζουν την εμφάνιση και σοβαρότητα/επικινδυνότητα μια παράκτιας πλημμύρας είναι το μέγεθος του βαρομετρικού χαμηλού, η ένταση και η ταχύτητα προώθησης του ατμοσφαιρικού συστήματος, ο προσανατολισμός των ανέμων σε σχέση με την ακτή, η βαθυμετρία της παράκτιας ζώνης και η μορφολογία της ακτής. 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 υποδομές, καθώς και περιβαλλοντικές επιπτώσεις (διάβρωση ακτών, ρήξη φυσικών αναχωμάτων και καταστροφή αμμολόφων, υφαλμύριση παράκτιων επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, υποχώρηση εδαφών και καταστροφή χλωρίδας) σε οικολογικά ευαίσθητες περιοχές της παράκτιας ζώνης.

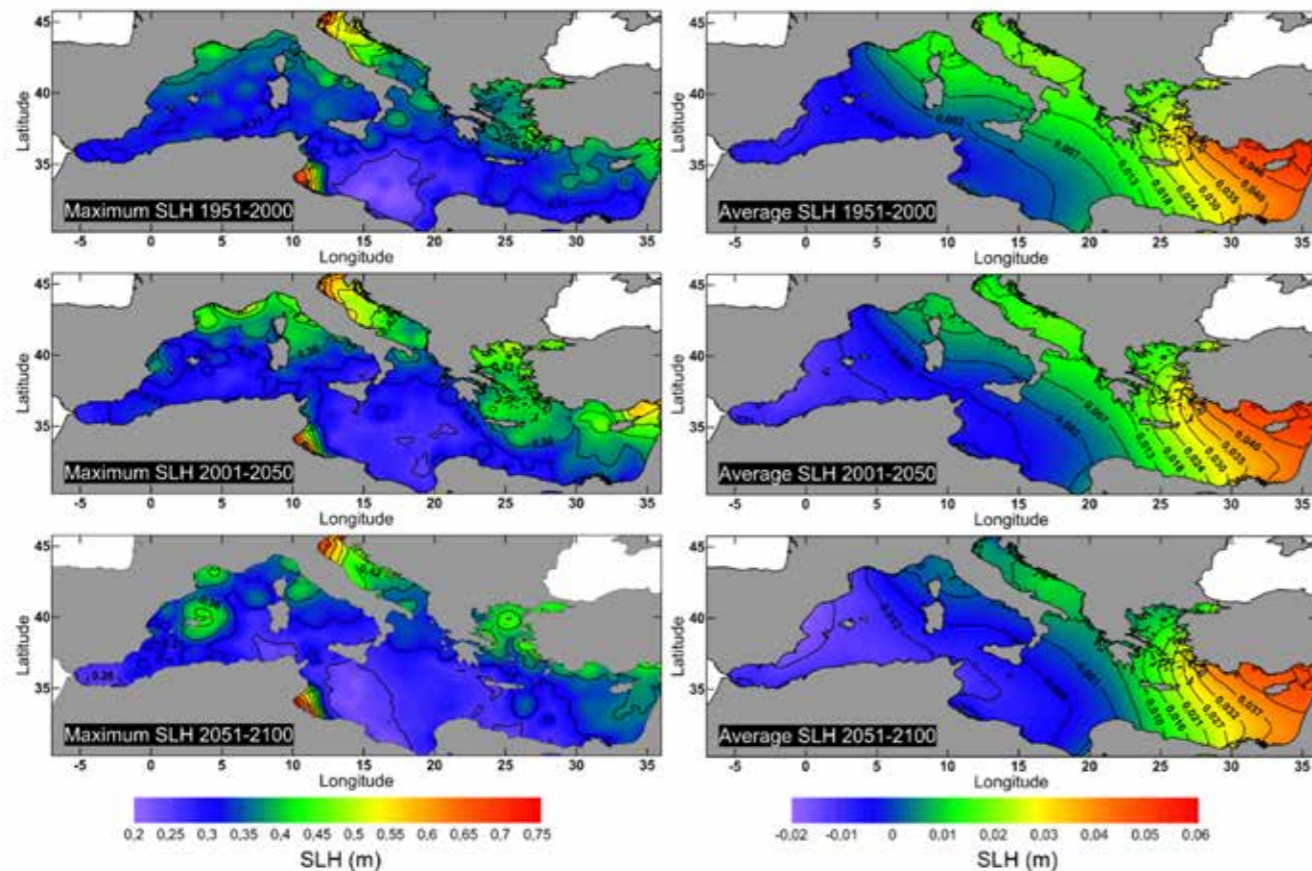
Η **Κλιματική Αλλαγή** επηρεάζει τη συχνότητα εμφάνισης, τις τροχιές και την ένταση των ατμοσφαιρικών συστημάτων που δημιουργούν χαμηλές ατμοσφαιρικές πιέσεις και δυνατούς ανέμους (τυφώνες, καταιγίδες κ.λπ.). Επομένως, εκτός από την απευθείας αύξηση της θερμοκρασίας και της μέσης στάθμης της θάλασσας, επηρεάζει και τη συχνότητα και σφοδρότητα των παράκτιων πλημμυρών που προκαλούνται από την επεισοδιακή υπερύψωση της θαλάσσιας στάθμης.

Στην παρούσα σύντομη παρουσίαση συνοψίζονται αποτελέσματα διερευνήσεων με υπολογιστικές προσομοιώσεις αναφορικά με την επίδραση της Κλιματικής Αλλαγής στην εξέλιξη της θαλάσσιας στάθμης λόγω των μετεωρολογικών παλίρροιών και επομένως και των δυνητικών παράκτιων πλημμυρών, στη Μεσόγειο και πιο ειδικά στο Αιγαίο και το Ιόνιο Πέλαγος και την ευρύτερη ελληνική παράκτια ζώνη.

Η ανάλυση καλύπτει μια ευρύτερη περίοδο 150 ετών (1951 – 2100), χωρισμένη σε 50ετίες ή 35ετίες ανάλογα με τα διαθέσιμα σύνολα δεδομένων ανά κλιματικό σενάριο, και βασίζεται σε αριθμητικές προσομοιώσεις με την ανάπτυξη και χρήση μοντέλου θαλάσσιας υδροδυναμικής κυκλοφορίας και μεταβολής θαλάσσιας στάθμης, σε υπολογιστικά πεδία υψηλής χωρικής ανάλυσης που καλύπτουν τη λεκάνη της Μεσογείου (με χωρική διακριτοποίηση 1/10° - 10Km) και το Αιγαίο και Ιόνιο Πέλαγος (με χωρική διακριτοποίηση 1/20° - 5Km). Τα διαθέσιμα ατμοσφαιρικά δεδομένα, που χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου στο υδροδυναμικό μοντέλο, προέρχονται από προσομοιώσεις με κλιματικά περιοχικά μοντέλα, όπως: α) το Regional Climate Model, RegCM3 και RegCM4 (Tolika et al., 2016) και β) τα CMCC-CCLM4 (μη-υδροστατικό μοντέλο), CNRM-ALADIN52 (περιορισμένης έκτασης διφασματικό κλιματικό μοντέλο), CCLM-NEMO (συζευγμένο ατμοσφαιρικό-ωκεανογραφικό μοντέλο με πεπερασμένες διαφορές, υδροστατικό μοντέλο για τη γενική ωκεάνια κυκλοφορία) που παρέχουν τα MED-44 και MED-10 πεδία για την περιοχή της Μεσογείου, με ανάλυση 0.44° και 0.1° αντίστοιχα, μέσω της πλατφόρμας MED-CORDEX (www.medcordex.eu, Ruti et al., 2016).

Στις προσομοιώσεις που υλοποιήθηκαν, η αρχική περίοδος, 1951-2000 και τα ατμοσφαιρικά της δεδομένα με ιστορικά καταγεγραμμένα τα στοιχεία εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, χρησιμοποιήθηκε ως περίοδος αναφοράς για την αξιολόγηση του θαλάσσιου υδροδυναμικού μοντέλου και την εκτίμηση της παρελθοντικής κλιματικής κατάστασης της θάλασσας. Ενώ για την επόμενη χρονική περίοδο, 2001-2100, υλοποιήθηκαν διαφορετικές προσομοιώσεις, έχοντας ως στοιχεία εισόδου στο θαλάσσιο υδροδυναμικό μοντέλο, διαφορετικά κλιματικά σενάρια, με βάση την κατηγοριοποίηση της IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) στις διάφορες διαθέσιμες εκθέσεις (Assessment Reports AR4 και AR5, του 2007 και 2014), όπως το παλαιότερο A1B (μετριοπαθές σενάριο εκτιμήσεων για τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου), και τα πιο πρόσφατα RCP4.5 (πιθανό μελλοντικό κλίμα με “μετριοπαθείς” εκτιμήσεις για τις συγκεντρώσεις αερίων θερμοκηπίου) και RCP8.5 (“απαισιόδοξο” σενάριο).

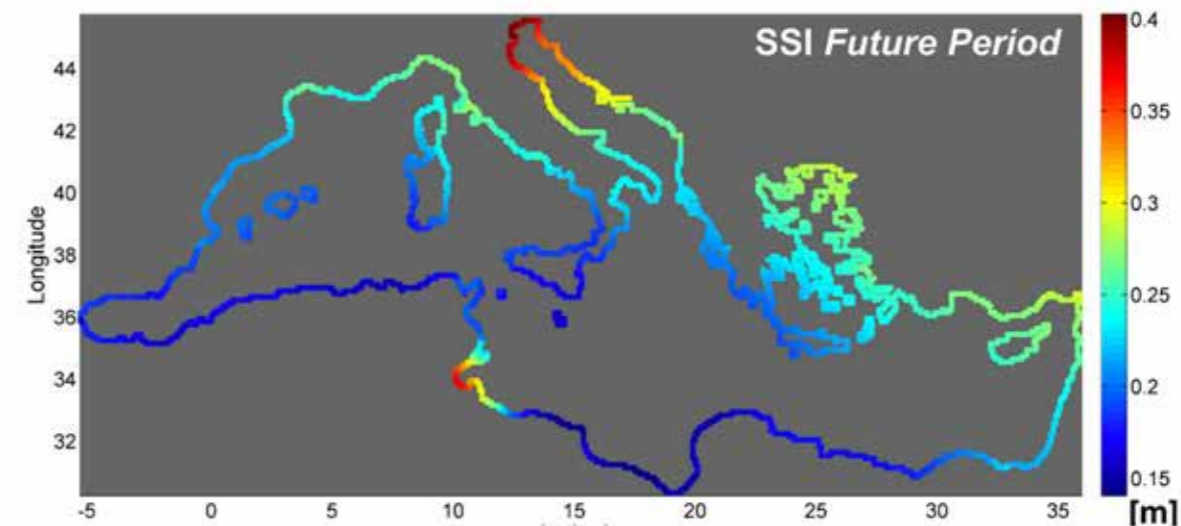
Τα αποτελέσματα του θαλάσσιου υδροδυναμικού μοντέλου, ενδεικτικά βάσει του μετριοπαθούς σεναρίου A1B, αναφέρονται σε χρονοσειρές μεταβολής της θαλάσσιας στάθμης στη Μεσόγειο και από αυτές προέκυψαν τα γραφήματα του Σχήματος 1. Σε αυτά παρουσιάζεται η χωρική κατανομή αφενός της μέγιστης τιμής (αριστερή στήλη) της θαλάσσιας στάθμης (SLH: Sea Level Height) και αφετέρου της μέσης τιμής της, για την περίοδο αναφοράς (1951-2000) και τις δύο μελλοντικές περιόδους (2001-2050) και (2051-2100).



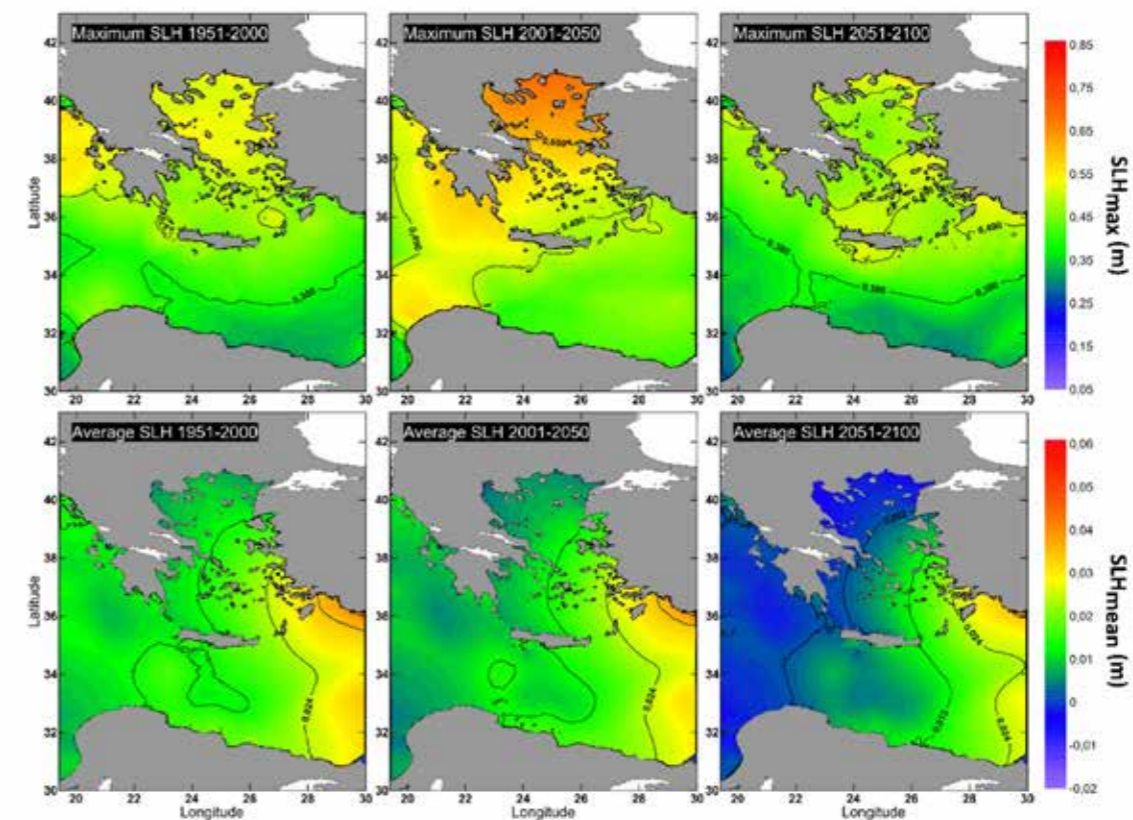
Σχήμα 1. Χωρική κατανομή της μέγιστης (SLH_{max} - αριστερά) και μέσης (SLH_{mean} - δεξιά) 50ετούς θαλάσσιας στάθμης (m). Τα γραφήματα από πάνω προς τα κάτω αντιστοιχούν στις περιόδους 1951-2000, 2001-2050, και 2051-2100.

Σε όλα τα διαγράμματα του Σχ. 1, παρατηρούμε αυξανόμενες τιμές της SLH από δυτικά προς ανατολικά, τόσο αναφορικά με τις μέγιστες τιμές (SLH_{max}) και κυρίως με τις μέσες τιμές (SLH_{mean}) της θαλάσσιας στάθμης. Αλλά, ενώ ως προς τις μέσες τιμές της θαλάσσιας στάθμης (δεξιά στήλη) δεν παρατηρούνται ουσιαστικές μεταβολές ανάμεσα στην 50ετία αναφοράς και τις μελλοντικές 50ετίες, υπολογίζεται μια σημαντική αύξηση των SLH_{max} στο 1ο μισό του 21ου αιώνα, σε σχέση με την περίοδο αναφοράς και τη μελλοντική 50ετία (2051-2100). Προς το πέρας του 21ου αιώνα οι μέγιστες μετεωρολογικές παλίρροιες εκτιμάται ότι θα μειωθούν σημαντικά στις διάφορες περιοχές της Μεσογείου, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μεγέθη της 1ης 50ετίας και αναφερόμενοι στα κλιματικά δεδομένα του ίδιου σεναρίου. Οι πιο έντονα πληττόμενες περιοχές είναι η Βόρεια Αδριατική Θάλασσα και ο Κόλπος Γκαμπές στην κεντρική Βόρεια Αφρική.

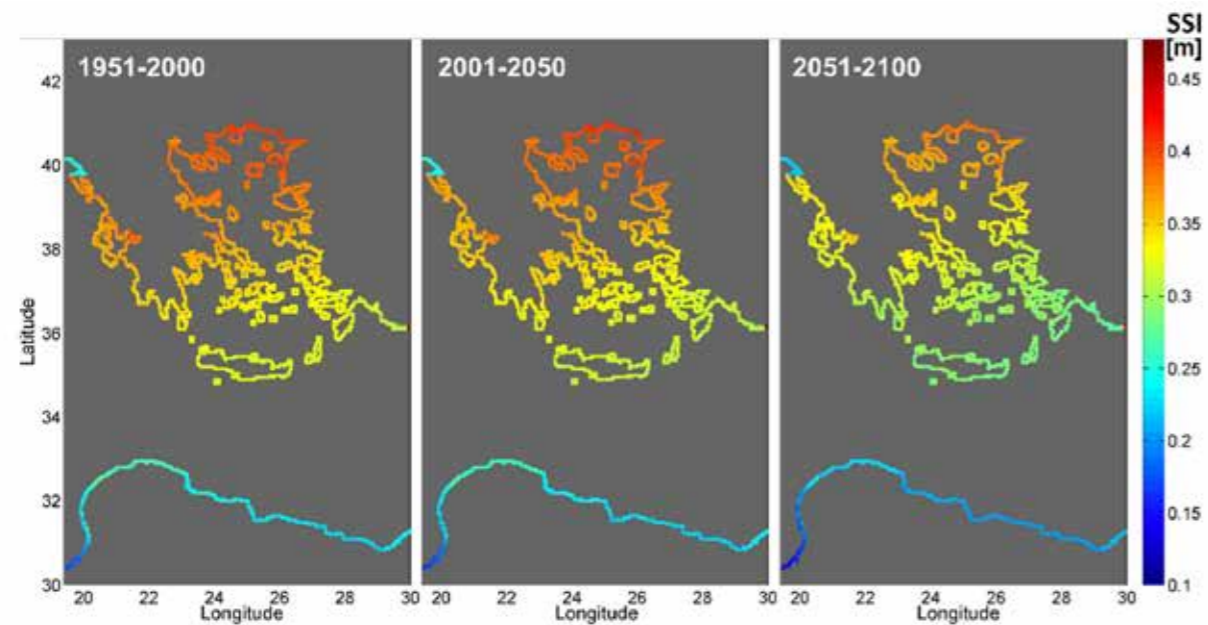
Για την αποτίμηση της «σφοδρότητας» της ανύψωσης της στάθμης που οφείλεται σε επεισόδια μετεωρολογικών παλίρροιών, χρησιμοποιείται ο δείκτης μετεωρολογικής παλίρροιας (Storm Surge Index, SSI). Ο δείκτης SSI (m) ορίζεται ως η μέση τιμή των τριών ανεξάρτητων μέγιστων καταγραφών της στάθμης θάλασσας SLH ανά έτος. Δύο γεγονότα ακραίων τιμών SLH, χαρακτηρίζονται ως ανεξάρτητα αν απέχουν χρονικά μεταξύ τους, τουλάχιστον 120 ώρες.



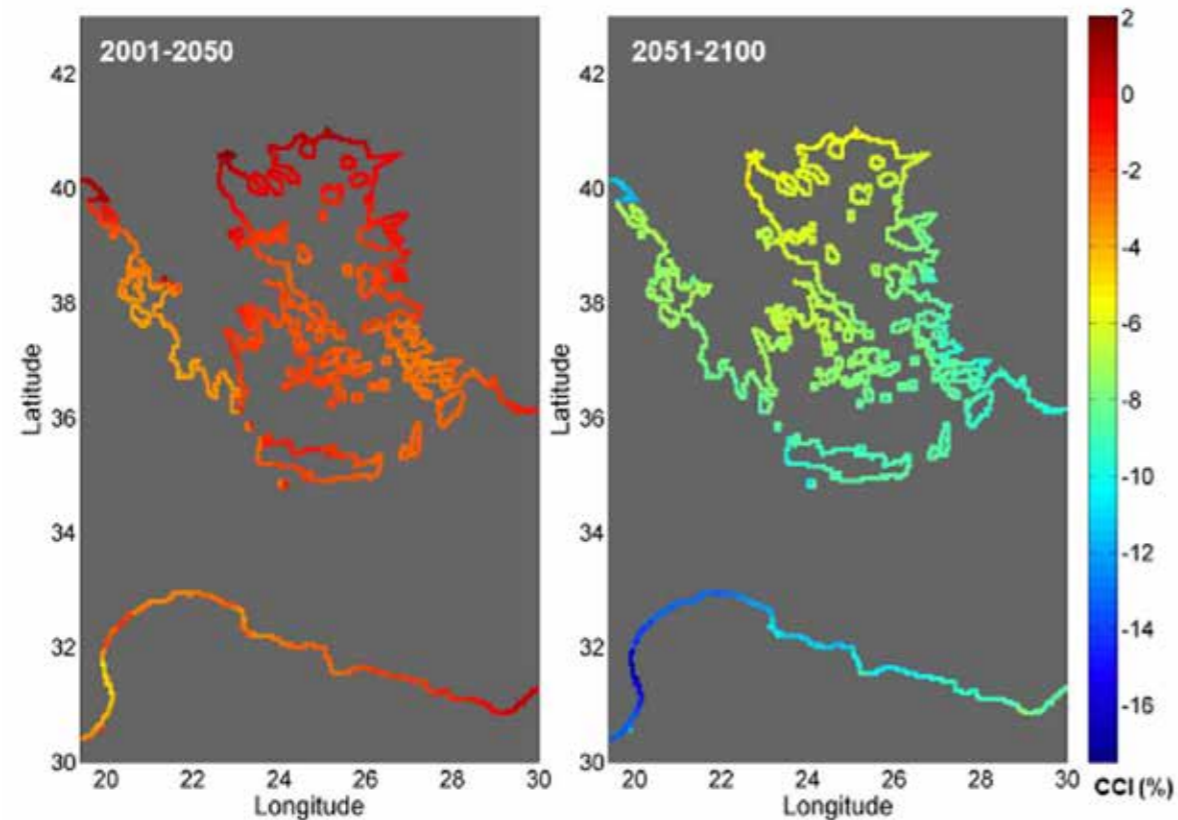
Σχήμα 2. Χωρική κατανομή του δείκτη SSI (m) κατά μήκος της Μεσογειακής παράκτιας ζώνης.



Σχήμα 3: Χωρική κατανομή της μέγιστης (SLH_{max} - επάνω) και μέσης (SLH_{mean} - κάτω) 50ετούς θαλάσσιας στάθμης (m). Τα γραφήματα από αριστερά προς τα δεξιά αντιστοιχούν στις περιόδους 1951-2000, 2001-2050, και 2051-2100.



Σχήμα 4: Οριζόντια κατανομή του μέσου 50ετούς δείκτη SSI (m) κατά μήκος της Ελληνικής ακτογραμμής, για τις περιόδους (από αριστερά στα δεξιά) 1951-2000, 2001-2050, και 2051-2100.



Σχήμα 5. Χωρική κατανομή του Δείκτη Κλιματικής Αλλαγής ως προς το δείκτη μετεωρολογικής παλίρροιας.

Ο δείκτης SSI υπολογίστηκε για το σύνολο της παράκτιας ζώνης της Μεσογείου και για τη μελλοντική περίοδο (2051-2100) παρουσιάζεται στο Σχήμα 2. Η απεικόνιση αυτή αποτελεί και μια επισημάτωση των παράκτιων περιοχών, ειδικά αυτών χαμηλού υψομέτρου, όπου είναι πιθανόν να εμφανιστούν παράκτιες πλημμύρες και κατακλύσεις περιοχών με θαλασσινά ύδατα.

Από την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων στο υψηλότερης ανάλυσης θαλάσσιο χωρικό πεδίο, του Αιγαίου και Ιονίου, προκύπτουν τα διαγράμματα των σχημάτων 3 και 4 όπου, για την 50ετία αναφοράς και τις 2 μελλοντικές 50ετίες του 21ου παρουσιάζονται αντίστοιχα οι χωρικές κατανομές της θαλάσσιας στάθμης (SLH) και του δείκτη μετεωρολογικής παλίρροιας (SSI).

Γενικά εκτιμάται μια σημαντική αύξηση των SLH_{max} στο 1ο μισό του 21ου αιώνα, σε σχέση με την περίοδο αναφοράς και τη μελλοντική 50ετία σε συμφωνία με τα αποτελέσματα σε άλλες υπο-λεκάνες της Μεσογείου (Σχ. 1). 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 21ου αιώνα οι μέγιστες μετεωρολογικές παλίρροιες εκτιμάται ότι θα μειωθούν στα περισσότερα τμήματα του Αιγαίου και Ιονίου, κυμαίνόμενες από 0.50 έως 0.60 m στο Β. Αιγαίο και από 0.40 έως 0.50 m στο Ιόνιο. Συνολικά η αποδυνάμωση του θελλώδους και των σχετικών μεγίστων μετεωρολογικών παλίρροιών αφορά την 50ετία 2051–2100, ενώ στην πρώτη περίοδο (τρέχουσα 50ετία) τα μεγέθη των μεμονωμένων απόλυτων ακραίων τιμών εκτιμάται ότι θα αυξηθούν και η αύξηση αυτή για το Β. Αιγαίο (που είναι η δυσμενέστερη περιοχή) θα είναι της τάξης του 30–40% σε σχέση με την περίοδο αναφοράς.

Η χρονική εξέλιξη της μετεωρολογικής παλίρροιας και των συνακόλουθων υπερυψώσεων της θαλάσσιας στάθμης στην παράκτια ζώνη, προκύπτουν και από τη χωρική κατανομή του δείκτη μετεωρολογικής παλίρροιας (SSI) κατά μήκος των ελληνικών ακτών, που παρουσιάζεται στο σχήμα 4. Η επικινδυνότητα είναι υψηλότερη κατά μήκος της βόρειας ακτογραμμής του Αιγαίου και των νησιών του Β. Αιγαίου και για τις τρεις περιόδους με τη μεγαλύτερη διακινδύνευση εμφάνισης παράκτιων πλημμυρών κατά την τρέχουσα 50ετία.

Για τη μελέτη της τάσης που μπορεί να εμφανιστεί στην ανύψωση της θαλάσσιας στάθμης, λόγω μετεωρολογικής παλίρροιας, σε συσχέτιση με την κλιματική αλλαγή, χρησιμοποιείται ο **Δείκτης Κλιματικής Αλλαγής** (Climate Change Index, CCI). Αυτός υπολογίζεται με βάση τις μέσες τιμές του δείκτη μετεωρολογικής παλίρροιας (SSI) μιας μελλοντικής περιόδου (10ετίας, 20ετίας, κλπ.) σε σχέση με το αντίστοιχο διάστημα αναφοράς (πχ. τρέχουσα 10ετία, 20ετία κλπ.), για κάθε υπό διερεύνηση θέση. Στο σχήμα 5 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή του δείκτη κλιματικής αλλαγής κατα

μήκος της ελληνικής παράκτιας ζώνης, υπολογίζοντας το μέγεθός του, για την τρέχουσα 50ετία (2001-2050) και τη μελλοντική 50ετία (2051-2100), σε σχέση με την 50ετία αναφοράς (1950-2000): $CCI(\%) = (SSI_{future} - SSI_{past}) / SSI_{past}$

Από το σχήμα 5 προκύπτει ότι ο δείκτης κλιματικής αλλαγής (CCI), ως προς τον δείκτη μετεωρολογικής παλίρροιας, για την περίοδο 2001-2050 κυμαίνεται μεταξύ +2 και -4% (μέση τιμή -1.5%), ενώ για την μελλοντική 50ετία (2051-2100) οι τιμές του βρίσκονται μεταξύ -5 και -12% (μέση τιμή -7.5%), γεγονός που υποδηλώνει την επιδείνωση των φαινομένων ανύψωσης της θαλάσσιας στάθμης λόγω μετεωρολογικών επεισοδίων (και άρα αύξηση του κινδύνου εμφάνισης παράκτιων πλημμυρών) κατά την τρέχουσα 50ετία και μείωση την μελλοντική 50ετία (2051-2100).

Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας τα συμπεράσματα από τις προηγούμενες ενότητες, αλλά και την έως τώρα ενασχόληση της ομάδας μας με το αντικείμενο (στις αναφορές που ακολουθούν παρουσιάζονται περισσότερα στοιχεία και αναλύσεις), μπορεί να επισημανθούν τα παρακάτω:

Οι ακραίες τιμές της θαλάσσιας στάθμης στο Β. Αιγαίο είναι μεγαλύτερες από αυτές του κεντρικού και του νοτίου Αιγαίου, λόγω διαφορών στους μηχανισμούς ατμοσφαιρικής διέγερσης (π.χ. αιολικά πεδία ή πρότυπα δράσης ανέμων) και στην τοπογραφία της περιοχής. Οι εκτιμήσεις των ακραίων τιμών με βάση τη μέγιστη ετήσια ανύψωση της θαλάσσιας στάθμης, λόγω μετεωρολογικών συνθηκών, προβλέπεται ότι θα αυξηθεί κατά τον τρέχοντα αιώνα. Η κλιματική αλλαγή (με βάση τα κλιματικά σενάρια που μελετήθηκαν) συνεπάγεται βραχυπρόθεσμη αύξηση των ετήσιων μέγιστων τιμών του δείκτη SSI (π.χ. για την 11ετία 2020-2030), και μακροπρόθεσμη πτώση του δείκτη SSI μετά το 2050, με πιθανή εκ νέου άνοδό του κατά τόπους ως το 2100, (αποτελέσματα από αναλύσεις που δεν παρουσιάζονται ως άνω, για λόγους συντομίας).

Τα τρέχοντα και μελλοντικά βήματα της έρευνας εστιάζονται 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 παλίρροιών, 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 21ο αιώνα, ειδικά σε σχέση με τα μεγέθη σχεδιασμού των μέτρων προστασίας.

Συναφείς εργασίες της ομάδας

Galiatsatou, P., Makris, C., Krestenitis, Y., and Prinos, P. (2021). Nonstationary Extreme Value Analysis of Nearshore Sea-State Parameters under the Effects of Climate Change: Application to the Greek Coastal Zone and Port Structures. *Journal of Marine Science and Engineering*, MDPI, 9(8), 817.

Skoulikaris Ch., Makris Ch., Katirtzidou M., Baltikas V., and Krestenitis Y. (2021). Assessing the vulnerability of a deltaic environment due to climate change impact on surface and coastal waters: the case of Nestos River (Greece). *Environmental Modeling & Assessment*, Springer, Vol. 26, pp. 459-486, doi:10.1007/s10666-020-09746-2

Makris C., Androulidakis Y., Karambas T., Papadimitriou A., Metallinos A., Kontos Y., Baltikas V., Chondros M., Krestenitis Y., Tsoukala V. and Memos C. (2020). Integrated modelling of sea-state forecasts for safe navigation and operational management in ports. *Applied Mathematical Modelling*, Elsevier.

Krestenitis, Y., Pytharoulis, I., Karacostas, T., Androulidakis, Y., Makris, C., Kombiadou, K., Tegoulis, I., Baltikas, V., Kotsopoulos, S. and Kartsios, S. (2017). Severe weather events and sea level variability over the Mediterranean Sea: The WaveForUs operational platform. In: *Perspectives of Atmospheric Sciences* (Eds: Karacostas, T., Bais, A., Nastos, P.T.), Springer Atmospheric Sciences, Pt.1: Meteorology, pp. 63-68. doi:10.1007/978-3-319-35095-0_9.

Makris, C., Galiatsatou, P., Tolika, K., Anagnostopoulou, C., Kombiadou, K., Prinos, P., Velikou, K., Kapelonis, Z., Tragou, E., Androulidakis, Y., Athanassoulis, G., Vagenas,

C., Tegoulis, I., Baltikas, V., Krestenitis, Y., Gerostathis, T., Belibassakis, K. and Rusu, E. (2016). Climate Change Effects on the Marine Characteristics of the Aegean and the Ionian Seas. *Ocean Dynamics*, 66(12), 1603-1635.

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.

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.

Tolika, K., Anagnostopoulou, C., Velikou, K. & Vagenas, C. (2016). 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*, 126(3), pp.715-726.

Tolika K., Makris Ch., Baltikas V., Velikou K., and Krestenitis Y. (2021). On the assessment of RCMs in simulating deep cyclones over the Mediterranean region: Impacts on the storm surges of coastal areas. *15th International Conference on Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics (COMECAP)*, 26-29 September 2021, Ioannina, Greece.

Ruti, P.M. et al. (2016) MED-CORDEX initiative for Mediterranean climate studies. *Bulletin of American Meteorological Society*, 97(7):1187-1208.