

**ΕΚΤΟ ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ**  
**ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΖΩΝΩΝ**

**ΑΘΗΝΑ, 24 - 27 ΝΟΕΜΒΡΙΟΥ 2014**

**ΕΙΣΗΓΗΣΕΙΣ**



Έκδοση  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ  
Ε.Μ.Π.

**ΤΡΙΤΗ ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΝΕΔΡΙΑ****ΘΑΛΗΣ – ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ ΚΑΙ ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΚΤΙΕΣ ΖΩΝΕΣ**

31	Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΙΣ ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΘΑΛΑΣΣΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΤΙΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ – ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΘΑΛΗΣ-CCSEAWAYS	Πρίνος Π.	315
32	ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΑΛΙΡΡΟΙΑ ΣΤΟ ΑΙΓΑΙΟ. ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΕΠΕΙΣΟΔΙΩΝ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΠΑΛΙΡΡΟΙΑΣ ΣΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΜΕ ΤΗΝ ΓΕΝΙΚΗ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ	Αναγνωστοπούλου Χ. Τολικά Κ. Βελίκου Κ. Τεγούλιας Ι. Βαγενάς Χ.	325
33	ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΑΝΟΔΟΥ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΩΝ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΘΑΛΑΣΣΩΝ	Μαμούτος Ι. Τράγου Ε. Κακαγιάννης Γ.	335
34	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ SWAN ΓΙΑ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ ΣΕ ΠΑΡΑΚΤΙΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ	Αθανασούλης Γ.Α. Μπελιμπασάκης Κ.Α. Γεροστάθης Θ.Π. Καπελώνης Ζ.Γ.	345
35	ΑΚΡΑΙΕΣ ΤΙΜΕΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΠΑΛΙΡΡΟΙΑΣ ΣΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ ΘΑΛΑΣΣΑ ΛΟΓΩ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ	Κρεστενίτης Γ.Ν. Ανδρουλιδάκης Γ.Σ. Κομπιάδου Κ. Μακρής Χ. Μπαλτίκας Β.	355
36	ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΙΣ ΑΚΡΑΙΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΚΛΙΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΑΙΓΑΙΟ ΠΕΛΑΓΟΣ	Γαλιατσάτου Π. Πρίνος Π.	365
37	ΔΕΙΚΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΚΑΤΑΚΛΙΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΤΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ ΠΕΛΑΓΟΥΣ	Κόκκινος Δ. Γαλιατσάτου Π. Πρίνος Π.	375
38	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΩΝ ΑΚΤΩΝ	Καραμπάς Θ. Γαλιατσάτου Π. Πρίνος Π.	385

## ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΑΝΟΔΟΥ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΩΝ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΘΑΛΑΣΣΩΝ

**Ι. Μαμούτος**, Υποψήφιος Διδάκτορας Τ.Ε.Θ., Πανεπιστήμιο Αιγαίου  
**Ε. Τράγου**, Επίκ. Καθηγήτρια Τ.Ε.Θ., Πανεπιστήμιο Αιγαίου  
**Γ. Κακαγιάννης**, Υποψήφιος Διδάκτορας Τ.Ε.Θ., Πανεπιστήμιο Αιγαίου

Τμήμα Επιστημών της Θάλασσας (Τ.Ε.Θ.),  
Σχολή Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αιγαίου,  
Λόφος Πανεπιστημίου, 81100 Μυτιλήνη

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία ερευνήθηκε η μακροχρόνια μεταβλητότητα της μέσης στάθμης των Ελληνικών θαλασσών, όπως έχει καταγραφεί από δορυφορική υψομετρία στη διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών και όπως προβλέπεται να εξελιχθεί μέχρι το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα βάσει προβλέψεων ωκεάνιου κλιματικού μοντέλου υψηλής διακριτοποίησης. Οι τάσεις υπολογίστηκαν από δορυφορικά δεδομένα υψομετρίας σε τέσσερις υποπεριοχές (Βόρειο και Νότιο Αιγαίο, Βόρειο και Νότιο Ιόνιο) που επιλέχθηκαν ως περιοχές μελέτης για τις ανάγκες του προγράμματος THALIS-CCSEAWAVS. Όλες οι τάσεις είχαν θετικό πρόσημο, η υψηλότερη τάση υπολογίστηκε στο Νότιο Αιγαίο (+4.6mm/yr), ενώ στο Βόρειο ήταν ελαφρώς μικρότερη (+4.3mm/yr). Οι τάσεις στο Ιόνιο ήταν σημαντικά μικρότερες με τιμές +2.4mm/yr στο Βόρειο και +2.8mm/yr στο Νότιο. Οι τιμές αυτές είναι κοντά στη μέση τάση για όλη τη Μεσόγειο (+3.0mm/yr), με την ανοδική τάση να εμφανίζεται αρκετά μεγαλύτερη στο Αιγαίο Πέλαγος.

Η σύγκριση των καταγεγραμμένων τάσεων στη διάρκεια των τελευταίων δύο δεκαετιών με τη στάθμη που μπορεί να υπολογιστεί από αποτελέσματα μοντέλου (συνδυάζοντας την στερική επίδραση, την επίδραση ανάστροφου βαρόμετρου και τη δυναμική τοπογραφία) έδειξε ότι το κλιματικό μοντέλο υποεκτιμά τις τάσεις σε όλες τις περιοχές. Οι μεγαλύτερες διαφορές του μοντέλου από την υψομετρία καταγράφηκαν στο Αιγαίο Πέλαγος και ιδιαίτερα στο Βόρειο όπου η επίδραση των Δαρδανελλίων είναι εντονότερη. Αυτό πιθανότατα αποδίδεται στην επίδραση των Δαρδανελλίων οι ανταλλαγές μέσω των οποίων είναι πιθανόν ότι δεν παραμετροποιούνται επαρκώς από το συγκεκριμένο μοντέλο.

Με βάση τα αποτελέσματα του κλιματικού μοντέλου που ακολουθούν το σενάριο A2, και κάνοντας χρήση των πρώτων εκτιμήσεων της τάσης στη μεταβολή της μάζας (περίοδος επτά ετών), η εκτίμηση για τη θαλάσσια στάθμη μέχρι το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα ήταν άνοδος στις Ελληνικές θάλασσες με εύρος τιμών από 10 έως 20 cm, αν και το αποτέλεσμα αυτό θεωρείται ότι εμπεριέχει σημαντικά σφάλματα, ιδιαίτερα όσον αφορά τις ανταλλαγές θερμότητας και μάζας με τη Μαύρη Θάλασσα, άρα θα πρέπει να θεωρηθεί μόνο σαν μια πρώτη προσπάθεια να μελετηθεί η εξέλιξη της στάθμης στις Ελληνικές ακτές. Είναι αναγκαία η μελλοντική εξέταση σειράς περιοχικών μοντέλων με διαφορετικά σενάρια.

## MEAN SEA-LEVEL CHANGES IN THE GREEK SEAS

**G. Mamoutos**, PhD Student, DMS, University of the Aegean  
**E. Tragou**, Assistant Professor, DMS, University of the Aegean  
**G. Kakagiannis**, PhD Student, DMS, University of the Aegean

Department of Marine Sciences (D.M.S.)  
School of the Environment, University of the Aegean  
University Hill, 81100 Mytilene, Greece, tel. +30-22510-36843,  
e-mail: [tragou@marine.aegean.gr](mailto:tragou@marine.aegean.gr)

### ABSTRACT

Long-term sea level variability in the Greek Seas is studied on the basis of altimetry (over the period 1992 – 2008) and high-resolution model results (during the 21st century), in the framework of the project THALIS-CCSEAWAVS. Satellite altimetry data for four sub-regions (namely the North and South Aegean Sea, North and South Ionian) revealed an observed increase in the sea level (Fig. 1) corresponding to a positive trend of +4.6mm/yr and +4.3 mm/yr for the North and South Aegean, respectively, whereas the trend was found to be considerably smaller in the Ionian (+2.4mm/yr and +2.8mm/yr for the North and South Ionian, respectively). These trends are within the Mediterranean trend of  $3.0 \pm 0.5$  mm/yr, although the Aegean sea level appears to be rising at a higher rate.

A comparison of altimetry data with model results (including steric effect, inverse barometer and dynamic topography), for the period where both datasets are available, revealed underestimation of the trends by the model (Fig. 1), perhaps due to its weaknesses to represent the Dardanelles outflow into the Aegean, where differences are the greatest.

Model predictions for the 21<sup>st</sup> century under the A2 emission scenario, regarding the effect of steric, dynamic and inverse barometer components, show sea level drop in the Greek seas (Fig. 2). However, the negative trend is reversed when the mass component trend (making use of gravity measurements from the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) (2002–2010) is added to the model results (Fig. 3). The overall estimate for the sea level rise in the Greek Seas ranges between 10 and 20 cm by the end of the 21<sup>st</sup> century, although this result should only be considered as a first attempt to examine the future sea level changes in the Greek Seas. Further research with a series of different models and under a series of scenarios would provide more trustworthy results.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις παρατηρούμενες μεταβολές της μέσης στάθμης της θάλασσας αποτυπώνεται όχι μόνο ο συνδυασμός όλων των πολύπλοκων μεταβολών που ευθύνονται για τη διαμόρφωση των θερμόαλων χαρακτηριστικών του νερού που προστίθεται στις μεταβολές της στάθμης εξαιτίας της καθαρής απώλειας ή προσθήκης ωκεάνιας μάζας. Στις μεταβολές της στάθμης αποτυπώνονται επίσης οι κινήσεις της γης και οι αλλαγές στο σχήμα (γεωμετρία) των ωκεάνιων λεκανών, ανάλογα με το σύστημα αναφοράς που χρησιμοποιούμε για να μετρήσουμε αυτές τις μεταβολές. Όσον αφορά τα θερμόαλα χαρακτηριστικά, αυτά διαμορφώνονται από τις ροές θερμότητας και μάζας, ενώ οι αλλαγές στην ωκεάνια μάζα οφείλονται στην ανακατανομή του νερού εξαιτίας της μηχανικής διέγερσης από την ατμόσφαιρα, καθώς και στην προσθήκη ή απώλεια μάζας νερού που προέρχεται είτε από ηπειρωτικές περιοχές είτε από την κρυσταλλική σφαιρα. Οι μεταβολές στα θερμόαλα χαρακτηριστικά και στη μάζα είναι αποτέλεσμα της επίδρασης μεγάλης κλίμακας ατμοσφαιρικών αλλαγών (που συχνά ανιχνεύονται με τη βοήθεια «κλιματικών καταστάσεων» - climate modes), οι οποίες με τη σειρά τους σηματοδοτούν αλλαγές στην ατμοσφαιρική δύναμη βαροβαθμίδας, στις ροές θερμότητας και μάζας μεταξύ θάλασσας και ατμόσφαιρας, καθώς και στην κυκλοφορία του ωκεανού (πχ Martínez-Asensio et al. 2014). Ο διαχωρισμός της συνεισφοράς κάθε μιας από τις παραπάνω συνιστώσες στη συνολική μεταβολή της μέσης στάθμης δεν είναι εύκολη υπόθεση. Είναι όμως αναγκαίος επειδή η κατανόηση της κάθε συνιστώσας μπορεί να επιτρέψει προβλέψεις για την εξέλιξη της στο μέλλον, υπό το πρίσμα σεναρίων κλιματικής αλλαγής.

Υπάρχει πλήθος εργασιών που εστιάζουν στη μελέτη των παγκόσμιων αλλαγών της μέσης στάθμης της θάλασσας, και αντίστοιχα, μεγάλος αριθμός εργασιών που αφορούν τη μελέτη των αλλαγών της μέσης στάθμης σε ολόκληρη τη Μεσόγειο Θάλασσα και ως προς τις μέχρι τώρα εκτιμήσεις αλλά και ως προς τις προβλέψεις για το μέλλον (π.χ Tsimplis et al. 2008). Όταν όμως το ενδιαφέρον μας εστιάζεται στην προστασία της παράκτιας ζώνης, οι εκτιμήσεις και οι προβλέψεις για τις παγκόσμιες ή μεγάλης κλίμακας τιμές της στάθμης της θάλασσας κρίνονται ανεπαρκείς εξαιτίας της εξάρτησής τους από διεργασίες που αφορούν την ανοικτή θάλασσα. Αυτό γίνεται ιδιαίτερα φανερό από τη σύγκριση της παγκόσμιας τάσης ανόδου (1.7 mm/yr) με την τάση στη Μεσόγειο (1.1–1.3mm/yr, Marcos and Tsimplis 2008) όπως υπολογίζεται από δεδομένα παλιρροιογράφων στη διάρκεια του 20<sup>ου</sup> αιώνα.

Σκοπός αυτής της εργασίας, που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος THALIS-CCSEAWAVS, είναι η σύνθεση των μέχρι σήμερα επιστημονικών γνώσεων για τη μακροχρόνια μεταβλητότητα της μέσης στάθμης όπως έχει παρατηρηθεί στις Ελληνικές θάλασσες, καθώς επίσης και των προβλέψεων για την εξέλιξη της μέχρι το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα. Σαν αποτέλεσμα της εργασίας τίθενται οι βασικές κατευθύνσεις της μελλοντικής έρευνας που προτείνεται για τη στάθμη στις Ελληνικές θάλασσες. Αφού αναπτύξουμε τις πηγές δεδομένων που διαθέτουμε μέχρι τώρα για τη μελέτη των τάσεων στην περιοχή (παράγραφος 2), θα παρουσιάσουμε τις εκτιμήσεις της στάθμης από αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου (παράγραφος 3), τα οποία αρχικά θα συγκρίνουμε με τις δορυφορικές παρατηρήσεις και στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε τις προβλέψεις τους για το μέλλον (παράγραφος 4). Τα συμπεράσματά μας παρουσιάζονται στην παράγραφο 5.

## 2. ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΜΕΣΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΣΤΙΣ ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΘΑΛΑΣΣΕΣ

Η γνώση μας για την καταγεγραμμένη μεταβλητότητα στις Ελληνικές θάλασσες προέρχεται από παλιρροιογράφους και από δορυφορικά δεδομένα υψομετρίας. Τα προβλήματα και οι ιδιαιτερότητες που μπορεί να εμφανίζουν αυτές οι μετρήσεις στις Ελληνικές θάλασσες αναπτύσσονται σύντομα στις επόμενες δύο παραγράφους

### 2.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΑΠΟ ΠΑΛΙΡΡΟΙΟΓΡΑΦΟΥΣ

Από τους 27 παλιρροιογράφους των Ελληνικών θαλασσών μόνο 6 παρέχουν μετρήσεις για χρονικές περιόδους μεγαλύτερες των 40 ετών (δηλαδή θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε μελέτες κλιματικής μεταβλητότητας). Μετά από ποιοτικό έλεγχο, οι σταθμοί που μπορούν να χαρακτηριστούν κατάλληλοι για κλιματικές μελέτες είναι της Θεσσαλονίκης, Κατάκολου, Αλεξανδρούπολης και Λέρου. Δυστυχώς, σύμφωνα με τους Marcos and Tsimplis (2008), στους περισσότερους από τους 27 σταθμούς των Ελληνικών θαλασσών τα δεδομένα της στάθμης εμφάνιζαν πολύ διαφορετικές συμπεριφορές σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες, με αποτέλεσμα να μην έχουν θεωρηθεί αξιοποιήσιμα για τη μελέτη των κλιματικών τάσεων, στις μέχρι πρόσφατα σχετικές εργασίες. Επισημαίνεται ότι από τον Αύγουστο 2013 η Υδρογραφική Υπηρεσία του Πολεμικού Ναυτικού, συμπεριέλαβε διορθώσεις ως προς το τοπικό σημείο αναφοράς των σταθμών (RLR-Revised Local Reference), οι οποίες μένει να αποδειχθεί κατά πόσο μπορεί να τροποποιούν τις μέχρι σήμερα υπολογισμένες τάσεις των Ελληνικών σταθμών.

Πρέπει ακόμα να τονιστεί ότι σημαντικότερο ρόλο στην αξιοποίηση των δεδομένων από τους παλιρροιογράφους παίζει η δυνατότητά μας να τα συνδυάσουμε με δεδομένα για τις κατακόρυφες κινήσεις της γης (από GPS, όπως πχ Wöppelmann & Marcos, 2012), ώστε να διαχωριστεί η συνεισφορά των κινήσεων της γης από τη μεταβλητότητα που οφείλεται στην κλιματική αλλαγή. Τέτοιες προσπάθειες εντάσσονται στα πλαίσια του προγράμματος SONEL στο οποίο εντάσσονται 6 σταθμοί GPS εγκατεστημένοι στον Ελλαδικό χώρο, τα αποτελέσματα των οποίων αναμένεται να βελτιώσουν την αξιοπιστία των γειτονικών παλιρροιογράφων.

### 2.2 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΑΠΟ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗΣ ΥΨΟΜΕΤΡΙΑΣ

Τις τελευταίες δεκαετίες υπάρχει μια πολύτιμη για την περιοχή πηγή δεδομένων: τα δεδομένα δορυφορικής υψομετρίας τα οποία στην παρούσα εργασία προέρχονται από τη διαδικτυακή βάση AVISO (διαθέσιμα στο <http://www.aviso.oceanobs.com>). Συγκεκριμένα, πρόκειται για δεδομένα ανωμαλίας της στάθμης (Sea Level Anomaly-SLA) σε πλέγμα σημείων, χωρικής ανάλυσης  $1/8^\circ \times 1/8^\circ$ , που παρέχονται ημερήσια, για τη χρονική περίοδο 1992-2008. Όταν τα δεδομένα εμφανίζουν κενά συμπληρώνονται με γραμμική παρεμβολή.

Σημειώνουμε ότι τα δεδομένα προέρχονται από συνδυασμό παρατηρήσεων διαφορετικών δορυφόρων (ERS-1/2, Topex/Poseidon (T/P), ENVISAT, and Jason-1/Jason-2), συνεπώς υπάρχει πιθανότητα κάποιο μέρος των τάσεων που εμφανίζονται σε αυτά να οφείλεται στην αλλαγή της πλατφόρμας και όχι σε κλιματική αλλαγή (Martínez-Asensio et al. 2014). Επισημαίνεται ότι η αξιοπιστία των δορυφορικών δεδομένων σε παράκτιες περιοχές εξαρτάται και από την «επιμόλυνση» του σήματος εξαιτίας της στεριάς. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιοχές όπως το Αιγαίο ή οι ανατολικές ακτές του Ιονίου που χαρακτηρίζονται από πολύπλοκη ακτογραμμή και μεγάλο αριθμό νησιών. Συνεπώς, δεδομένα που καταγράφονται μέχρι λίγες δεκάδες χιλιόμετρα από την ακτή δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα. Προσπάθειες για την ελαχιστοποίηση αυτών των σφαλμάτων

γίνονται από την ερευνητική κοινότητα και ως προς την επεξεργασία των δεδομένων που έχουν ήδη συλλεχθεί, αλλά ως προς την ανάπτυξη νέων οργάνων. Σε κάθε περίπτωση, η βελτίωση αυτών των καταγραφών είναι τεράστιας σημασίας για τις Ελληνικές θάλασσες.

### 2.3 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΜΑΖΑΣ ΑΠΟ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΒΑΡΥΤΟΜΕΤΡΙΑΣ

Παρόλο που οι εκτιμήσεις της μεταβολής μάζας δεν επιτρέπουν προς το παρόν υψηλή χωρική ανάλυση ώστε να εκτιμηθεί η συνεισφορά της στις μικρότερης κλίμακας Ελληνικές θάλασσες, εδώ γίνεται μια προσπάθεια να συμπεριληφθούν έστω και σε κλίμακα Μεσογειακής λεκάνης. Για την εκτίμηση της μεταβολής της μάζας στη Μεσόγειο χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από το πρόγραμμα GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment, από το <http://grace.jpl.nasa.gov/data/mass/>). Τα δεδομένα παρέχονται μηνιαία, σε ωκεάνιο πλέγμα και καλύπτουν την περίοδο μεταξύ Ιανουαρίου 2003 και Ιουλίου 2013.

### 3. ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΑΠΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΚΛΙΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Εκτός από τις καταγραφές της μεταβλητότητας της στάθμης, πολύτιμο εργαλείο στην κατανόηση των διεργασιών με στόχο την πρόγνωση αποτελούν τα αποτελέσματα κλιματικών μοντέλων. Για την μελέτη της προβλεπόμενης μεταβλητότητας της μέσης στάθμης της θάλασσας επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα του περιοχικού μοντέλου SAMM (Sea Atmosphere Mediterranean Model, Somot et al., 2008), το οποίο στην πρόσφατη βιβλιογραφία, θεωρείται περισσότερο αξιόπιστο στις κλιματικές προβλέψεις του για την θαλάσσια περιοχή της Μεσογείου. Το μοντέλο έχει αναπτυχθεί με σκοπό τη μελέτη της εξέλιξης του κλίματος της περιοχής της Μεσογείου και της Ευρώπης γενικότερα στη διάρκεια του 21<sup>ου</sup> αιώνα, και αποτελεί μια νέα εκδοχή του AORCM (Atmosphere-Ocean Regional Climate Model), όπου ένα παγκόσμιο ατμοσφαιρικό μοντέλο γίνεται τοπικά συζευγμένο με ένα περιοχικό μοντέλο ωκεάνιας κυκλοφορίας. Η οριζόντια ανάλυση του ωκεάνιου NEMOMED είναι  $1/8^{\circ} \times 1/8^{\circ} \cos(\phi)$ , όπου  $\phi$  το γεωγραφικό πλάτος. Επιπλέον, έχει 43 επίπεδα στην κατακόρυφη διεύθυνση με μεταβλητή κατανομή (από  $\Delta Z=6$  m στην επιφάνεια μέχρι  $\Delta Z=200$  m στο βυθό και με 25 επίπεδα στα πρώτα 1000 m). Η εκροή της Μαύρης Θάλασσας στο Αιγαίο και οι ποτάμιες εκροές διατηρούνται σταθερές σε τιμές που έχουν προέλθει από παρατηρήσεις.

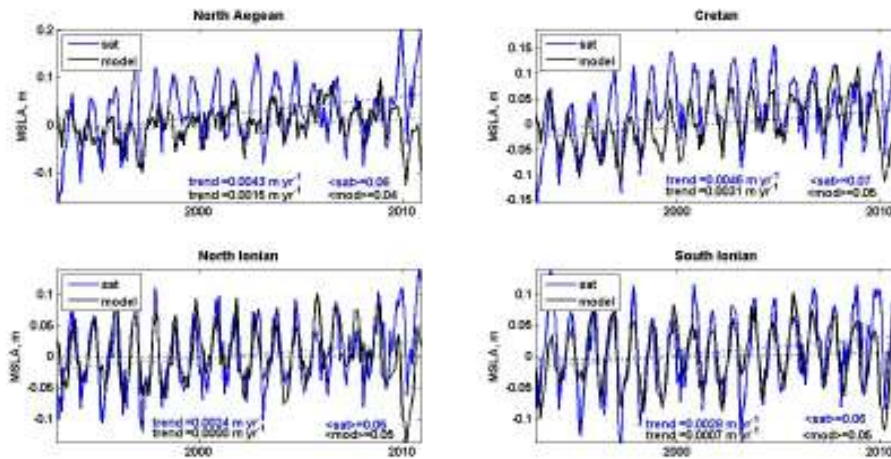
Τα αποτελέσματά του αφορούν την περίοδο από το 1960 έως το 2099. Από το 1960 έως το 2000, το μοντέλο διεγείρεται από τιμές παρατηρήσεων, ενώ από το 2000 έως το 2099, η διεγερση ακολουθεί το σενάριο SRES-A2. Για την εξασφάλιση της σταθερότητας των αποτελεσμάτων, εφαρμόζεται μηνιαία διόρθωση των ροών θερμότητας στις ανταλλαγές θάλασσας-ατμόσφαιρας.

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων του μοντέλου έγινε με στόχο τον έλεγχο των διεργασιών που είναι υπεύθυνες για την μεταβλητότητα της στάθμης της θάλασσας στον Ελληνικό θαλάσσιο χώρο. Για να είναι εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τα δεδομένα υψομετρίας, προστέθηκε στα δεδομένα δυναμικής τοπογραφίας όπως παρέχονται από τη βάση αποτελεσμάτων του μοντέλου, η στερική επίδραση (όπως υπολογίζεται από τα χαρακτηριστικά των προσομοιώσεων θερμοκρασίας και αλατότητας), αλλά και η επίδραση του ανάστροφου βαρόμετρου, χρησιμοποιώντας δεδομένα επιφανειακής πίεσης από τα δεδομένα ECMWF για την ίδια χρονική περίοδο και περιοχή.

### 3.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ

Με σκοπό την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μέσης στάθμης που υπολογίζεται από το ωκεάνιο κλιματικό μοντέλο, χρησιμοποιήσαμε τα δεδομένα δορυφορικής υψομετρίας για τέσσερις υποπεριοχές των Ελληνικών θαλασσών (Βόρειο και Νότιο Αιγαίο, Βόρειο και Νότιο Ιόνιο) και για τη χρονική περίοδο που υπήρχε αλληλοεπικάλυψη (1992-2011). Αρχικά υπολογίστηκαν οι μέσες μηνιαίες τιμές (από ημερήσιες, αφού αφαιρέθηκε ο μέσος όρος) και υπολογίστηκε ο συντελεστής συσχέτισης. Η συσχέτιση μεταξύ των δύο πηγών δεδομένων είναι εξαιρετικά μικρή στην περιοχή του Αιγαίου (Βόρειο Αιγαίο 0.05 και Κρητικό 0.14), ενώ γίνεται σημαντική στο Ιόνιο Πέλαγος (μέγιστη τιμή 0.48).

Η μεταβλητότητα και οι τάσεις που προκύπτουν από τις δύο βάσεις δεδομένων παρουσιάζονται στο Σχ. 1. Τα δεδομένα εμφανίζουν μεγαλύτερη συμφωνία μεταξύ τους στις περιοχές του Ιονίου και μικρότερη στο εσωτερικό του Αιγαίου. Οι διαφορές είναι πολύ μεγαλύτερες στη διάρκεια των μηνών με τις μέγιστες τιμές στάθμης (από το Σεπτέμβριο μέχρι τον Ιανουάριο). Η συστηματική εμφάνιση μεγαλύτερων διαφορών σε όλες τις στατιστικές τιμές της ανωμαλίας της στάθμης στην περιοχή του Αιγαίου πιθανότατα υποδηλώνει αδυναμία του κλιματικού μοντέλου να προσομοιάσει με ακρίβεια τις συνθήκες που επικρατούν στο Αιγαίο Πέλαγος. Μια πιθανή εξήγηση για αυτό το συστηματικό πρόβλημα μπορεί να βρίσκεται στο σημαντικό ρόλο που παίζουν τα στενά των Δαρδανελλίων στη διαμόρφωση των υδρογραφικών χαρακτηριστικών του Αιγαίου. Ανεπαρκής προσομοίωση της ανταλλαγής θερμότητας και μάζας με τη Μαύρη Θάλασσα είναι πολύ πιθανό ότι οδηγεί σε τοπικά αναξιόπιστα αποτελέσματα, παρόλο που σε επίπεδο Μεσογειακής λεκάνης το μοντέλο θεωρείται ιδιαίτερα επιτυχές.



**Σχήμα 1.** Μακροχρόνια μεταβλητότητα της μέσης στάθμης της θάλασσας όπως υπολογίζεται για τις τέσσερις υποπεριοχές μελέτης από τα δορυφορικά δεδομένα υψομετρίας (μπλε) και τα αποτελέσματα του ωκεάνιου μοντέλου (μαύρο).

**Figure 1.** Long-term variability of mean sea level at four sub-regions, from satellite altimetry (blue) and model results (black).



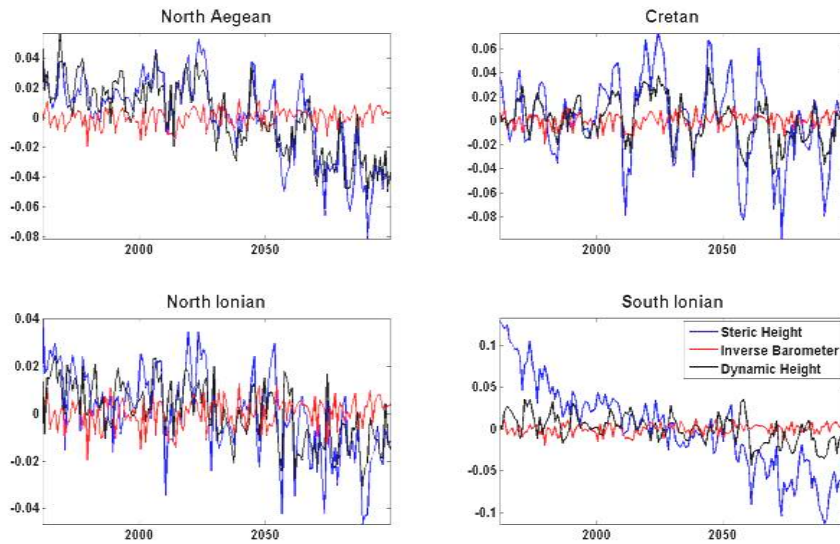
Στο Σχ. 1 καταγράφονται επίσης οι τάσεις για τις περιοχές μελέτης, όπως υπολογίστηκαν από τις δύο πηγές δεδομένων. Οι τάσεις είναι θετικές στη διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών σε όλες τις υποπεριοχές, με τιμές που κυμαίνονται μεταξύ +2.4 και +4.6 mm/yr για τα δορυφορικά δεδομένα, ενώ οι τιμές της τυπικής απόκλισης είναι μικρότερες για το Ιόνιο (50mm/yr) και μεγαλύτερες για το Αιγαίο ( 60-70mm/yr). Για τα αποτελέσματα του ωκεάνιου μοντέλου, οι τάσεις είναι πάλι θετικές, αν και σημαντικά μικρότερες και κυμαίνονται μεταξύ +0 και +3.1mm/yr με μικρότερες τιμές στο Ιόνιο (οι τυπικές αποκλίσεις είναι παρόμοιες με εκείνες των δορυφορικών).

Κάνοντας χρήση των δεδομένων της βαρυτομετρίας (GRACE), δηλαδή της χρονοσειράς για τη μέση τιμή όλης της Μεσογείου, είναι δυνατός ο μηνιαίος υπολογισμός της προσθήκης μάζας στη μέση στάθμη του μοντέλου για την περίοδο μετά τον Ιανουάριο του 2003 έως τον Δεκέμβριο 2010. Οι υπολογισμοί έδειξαν ότι η εποχική μεταβλητότητα κυριαρχείται από τη μεταβλητότητα της στερικής επίδρασης.

#### **4. ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ 21<sup>Ο</sup> ΑΙΩΝΑ**

Σε γενικές γραμμές, οι προβλέψεις του μοντέλου για τις αλλαγές των υδρογραφικών χαρακτηριστικών της περιοχής είναι θέρμανση και αύξηση της αλατότητας. Δεδομένης της μεγάλης σημασίας που έχουν οι ανταλλαγές του Αιγαίου με τη Μαύρη Θάλασσα μέσω του στενού των Δαρδανελίων, είναι φανερό ότι η αξιόπιστη πρόβλεψη της εξέλιξης της θερμόαλης κυκλοφορίας και λειτουργίας του Αιγαίου εξαρτάται πάρα πολύ από την σωστή προσομοίωση των ροών στα στενά.

Για την εκτίμηση της συνολικής μεταβολής της μέσης στάθμης της θάλασσας πρέπει να συνυπολογισθούν όλες οι επί μέρους διεργασίες. Αθροίζοντας τη μεταβολή της μέσης στάθμης της θάλασσας που προκύπτει από τα αποτελέσματα του μοντέλου για την στερική επίδραση, με την μεταβολή στη μέση στάθμη εξαιτίας της επίδρασης του ανάστροφου βαρόμετρου (από δεδομένα μεταβολής της πίεσης που προβλέπεται για τον 21ο αιώνα, σύμφωνα με το σενάριο A2), καθώς και τα αποτελέσματα του μοντέλου για τη δυναμική τοπογραφία, καταλήγουμε στις χρονοσειρές του Σχ. 2, φιλτραρισμένες για την εξάλειψη της υψίσυχνης εποχικής μεταβλητότητας. Οι προβλέψεις δείχνουν πολύ μικρή συνεισφορά της ατμοσφαιρικής πίεσης. Το σημαντικότερο μέρος της μεταβλητότητας και των τάσεων προκύπτει από τη στερική μεταβολή αλλά και τη δυναμική τοπογραφία. Και οι δύο μεταβολές εμφανίζουν πτωτικές τάσεις για τις περιοχές που μελετήθηκαν.

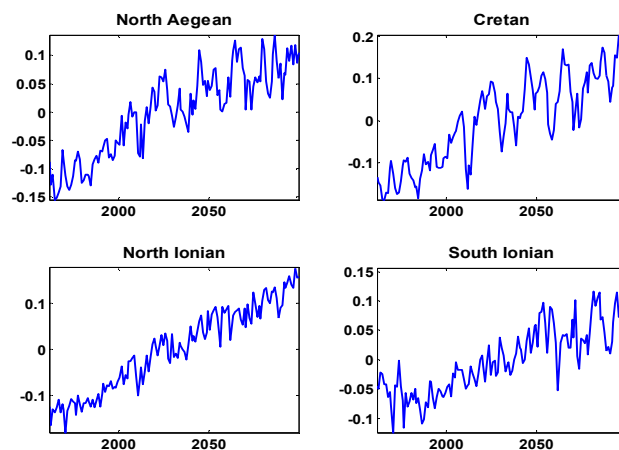


**Σχήμα 2.** Φιλτραρισμένη μηνιαία συνεισφορά από κάθε συνιστώσα υπεύθυνη για την προβλεπόμενη μεταβλητότητα της στάθμης της θάλασσας στα αποτελέσματα του μοντέλου (σε μέτρα) – χωρίς διόρθωση μάζας.

**Figure 2.** Low-pass filtered monthly mean contribution to the mean sea level variability from three components responsible for model sea level variability (in meters) – without mass component

Είναι αξιοσημείωτο ότι σύμφωνα με τις προβλέψεις του SAMM η μέση στάθμη της θάλασσας στις τέσσερις περιοχές του Ελληνικού θαλάσσιου χώρου εμφανίζει πτωτική τάση μέχρι το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα, που κυμαίνεται μεταξύ 0-10cm. Η τάση θεωρείται επακόλουθο της έντονης αλατικής συστολής που προβλέπεται από το συγκεκριμένο μοντέλο, αν και υπάρχει έντονος προβληματισμός για την αξιοπιστία αυτού του αποτελέσματος. Επίσης υπάρχει σημαντική διαφορά στο εύρος της προβλεπόμενης διακύμανσης μεταξύ των υποπεριοχών.

Όμως, όπως έχει αποδειχθεί, ο ρόλος της μεταβολής της μάζας στη συνολική μεταβλητότητα της μέσης στάθμης της θάλασσας μπορεί να κυριαρχεί σε μακροχρόνιες παρατηρήσεις (Tsimplis et al., 2013). Σε μια προσπάθεια να συμπεριλάβουμε την θετική τάση που έχει υπολογιστεί από τις τελευταίες δύο δεκαετίες (και με την επιβεβαίωση από τα δεδομένα βαρυτομετρίας - GRACE), προστέθηκε στις προβλέψεις του 21<sup>ου</sup> αιώνα μια σταθερή τάση 2.5 mm/yr, για όλες τις υποπεριοχές. Οι αντίστοιχες χρονοσειρές μετά από πρόσθεση της θετικής τάσης της μάζας παρουσιάζονται στο Σχ. 3. Είναι αξιοσημείωτο ότι η τάση της προσθήκης μάζας αλλάζει τη συνολική κλίση της προβλεπόμενης μέσης στάθμης και στις τέσσερις υποπεριοχές, με τελικές προβλέψεις για άνοδο της στάθμης στα τέλη του 21<sup>ου</sup> αιώνα που φτάνει τα 20cm.



**Σχήμα 3.** Αποτελέσματα μοντέλου για τη μέση στάθμη της θάλασσας (σε μέτρα) συμπεριλαμβάνοντας τη διόρθωση της μάζας (2.5mm/yr).  
**Figure 3.** Sea level model predictions (in meters) including the mass component trend of (2.5mm/yr).

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία εκτιμήθηκε η τάση της στάθμης στις τελευταίες δύο δεκαετίες όπως προκύπτει από δορυφορικά δεδομένα για τέσσερις περιοχές των Ελληνικών θαλασσών. Η τάση είναι θετική με τιμές μεταξύ +2.4 και +4.6 mm/yr, κοντά στις εκτιμήσεις για όλη τη Μεσόγειο στην ίδια περίοδο (+3.0 mm/yr, Tsimplis et al. 2013). Οι τάσεις των δορυφορικών δεδομένων ήταν γενικά μεγαλύτερες συγκρινόμενες με τις τάσεις που υπολογίστηκαν από τα αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου. Γενικά, η υπολογισμένη στάθμη από το κλιματικό μοντέλο βρέθηκε σε μεγαλύτερη συμφωνία με τις δορυφορικές εκτιμήσεις στο Ιόνιο ενώ αποκλίνει σημαντικά από τις δορυφορικές εκτιμήσεις στην περιοχή του Αιγαίου. Αυτό πιθανότατα αποδίδεται στην επίδραση των Δαρδανελίων οι ανταλλαγές μέσω των οποίων είναι πιθανόν ότι δεν παραμετροποιούνται επαρκώς από το συγκεκριμένο μοντέλο. Συνεπώς, οποιαδήποτε προσπάθεια για πρόγνωση της θαλάσσιας στάθμης στο Αιγαίο μέχρι το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα απαιτεί μεγαλύτερη εμπιστοσύνη στις προβλέψεις μας για τη μεταβλητότητα των ροών θερμότητας και μάζας μεταξύ Αιγαίου και Μαύρης Θάλασσας. Με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου που διαθέτουμε, και κάνοντας χρήση των πρώτων εκτιμήσεων της τάσης στη μεταβολή της μάζας, η εκτίμηση μας είναι άνοδος της στάθμης στις Ελληνικές θάλασσες από 10 έως 20 cm. Το αποτέλεσμα αυτό θεωρούμε ότι εμπεριέχει σημαντικά σφάλματα. Άρα θα πρέπει να θεωρηθεί μόνο σαν μια πρώτη προσπάθεια να μελετηθεί η εξέλιξη της στάθμης στις Ελληνικές ακτές και επισημαίνουμε ότι είναι αναγκαία η μελλοντική εξέταση σειράς περιοχικών μοντέλων με διαφορετικά σενάρια.

Παρόλο που η μακροχρόνια μεταβολή της στάθμης της θάλασσας αποτελεί εξαιρετικά κρίσιμη παράμετρο για την εξέλιξη της Ελληνικής παράκτιας ζώνης, παραμένουν μεγάλα κενά στην καταγραφή της και κατά συνέπεια στην κατανόηση της

συμπεριφορά της. Τόσο οι άμεσες παρατηρήσεις μέσω παλιρροιογράφων και ο συνδυασμός τους με μετρήσεις κατακόρυφων κινήσεων της γης, όσο και η αξιοπιστία των κλιματικών μοντέλων μέσω των οποίων μπορούν να γίνουν μακροχρόνιες προγνώσεις, εμφανίζουν αδυναμίες. Περισσότερο εστιασμένες προσπάθειες για τη βελτίωση και των μετρήσεων και των προγνώσεων της στάθμης πρέπει να τεθούν σε προτεραιότητα σε αυτή την ευαίσθητη περιοχή η οποία εξαρτάται σημαντικά από την παράκτια ζώνη της.

#### **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ:**

Η εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Ερευνητικού Προγράμματος (CCSEAWAVS: Estimating the effects of climate change on sea level and wave climate of the Greek seas, coastal vulnerability and safety of coastal and marine structures). Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Θαλής. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.

Ευχαριστούμε θερμά τον Samuel Somot για τη διάθεση των αποτελεσμάτων του SAMM. Τα δεδομένα υψομετρίας προήλθαν από τη βάση AVISO (<http://www.aviso.oceanobs.com/>), ενώ τα δεδομένα βαρυτομετρίας από το πρόγραμμα GRACE (<http://grace.jpl.nasa.gov/data/mass/>).

#### **6. REFERENCES**

- Marcos, M. and Tsimplis, M.N. (2008). “Coastal sea level trends in Southern Europe”, *Geophysical Journal International*, 175(1), 70-82.
- Martínez-Asensio, A., M. Marcos, M.N. Tsimplis, D. Gomis, S. Josey, G. Jordà. (2014). "Impact of the atmospheric climate modes on Mediterranean sea level variability", *Global Planet. Change*, 118, 1-15.
- Somot, S., Sevault, F., Déqué, M. and Crépon, M., (2008). “21<sup>st</sup> century climate change scenario for the Mediterranean using a coupled atmosphere-ocean regional climate model”, *Global and Planetary Change*, 63, 112-126.
- Tsimplis, M., Marcos, M., Somot, S. and Barnier, B.(2008).“Sea level forcing in the Mediterranean Sea between 1960 and 2000”,*Global and Planetary Change*, 63(4), 325-332.
- Tsimplis, M. N., Calafat, F. M., Marcos, M., Jordà, G., Gomis, D., Fenoglio-Marc, D. , et al. (2013). “The effect of the NAO on sea level and on mass changes in the Mediterranean Sea”, *J. Geophys. Res.: Oceans*, Vol. 118, 944–952, doi:10.1002/jgrc.20078, 2013
- Wöppelmann, G. and M. Marcos. (2012). “Coastal sea level rise in southern Europe and the non-climate contribution of vertical land motion”, *J. of Geophys. Res.*, 117 (2012), p. C01007 <http://dx.doi.org/10.1029/2011JC007469>