

# Αξιοποίηση δεδομένων Δορυφορικής Αλτιμετρίας για τυπικές χαρτογραφικές εφαρμογές στον τομέα της θαλάσσιας Γεωδαισίας και Ωκεανογραφίας

Δ. Δεληκαράογλου<sup>1</sup>, Χ. Χατζηκυριάκου

*1 Αναπληρωτής Καθηγητής*

*Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών  
ddeli@mail.ntua.gr*

**Περίληψη:** Σήμερα, η δορυφορική αλτιμετρία, αφού αναπτύχθηκε συνεχώς τα 30 περίπου τελευταία χρόνια, είναι πλέον μια προηγμένη και ώριμη γεωδαιτική τεχνολογία κατάλληλη για την παρατήρηση και καταγραφή βασικών χαρακτηριστικών που σχετίζονται με τη δυναμική κατάσταση των θαλασσών. Από την έναρξη των επιχειρησιακών αλτιμετρικών αποστολών στη δεκαετία του 1980 μέχρι και σήμερα, υπάρχει συνεχής παροχή αλτιμετρικών δεδομένων, από σειρά δορυφόρων, με ευρύτατα τεχνικά χαρακτηριστικά χωρο-χρονικής κάλυψης της θαλάσσιας επιφάνειας, γεγονός που επιτρέπει στην επιστημονική κοινότητα να διερευνά τα ωκεάνια, και όχι μόνο, φαινόμενα σε βάθος χρόνου. Η συγκεκριμένη εργασία εστιάζει στην ανάγκη χρήσης κατάλληλων και εύχρηστων λογισμικών που απαιτούνται για την ανάλυση προ-επεξεργασμένων (από τους διεθνείς φορείς διανομής τους) αλτιμετρικών δεδομένων με στόχο τη δημιουργία προϊόντων προστιθέμενης αξίας χρήσιμων σε εφαρμογές που επιλέχθηκαν με βάση τον επίκαιρο χαρακτήρα τους και το γεωδαιτικό ή ωκεανογραφικό ενδιαφέρον τους. Αναδεικνύεται ότι μια τέτοια δυνατότητα ανάλυσης αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες επιτυχούς αξιοποίησης των ευρέως διαθέσιμων σήμερα ανοικτών πηγών πρόσβασης σε αλτιμετρικά δεδομένα.

## 1. Εισαγωγή

Η διαχρονική εξέλιξη της δορυφορικής αλτιμετρίας, μέσω μιας σειράς αλτιμετρικών αποστολών, την έχει καταστήσει ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τη μελέτη ποικίλων θαλάσσιων φαινομένων και οι προγραμματισμένες μελλοντικές εξελίξεις της διαφαίνεται ότι θα αυξήσουν περισσότερο το ρόλο της στις μελέτες της δυναμικής κατάστασης των θαλασσών. Ειδικότερα, οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην κατάσταση των ωκεανών, καθώς και η αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας ως μιας σημαντικής ανανεώσιμης πηγής καθαρής ενέργειας είναι πεδία που απασχολούν έντονα την επιστημονική κοινότητα και σήμερα διενεργούνται εκτεταμένες έρευνες γύρω από αυτά βασιζόμενες στη σημαντική συνεισφορά της δορυφορικής αλτιμετρίας. Η αξιοποίηση του μεγάλου όγκου αλτιμετρικών δεδομένων

νων που έχουν συσσωρευτεί κυρίως την τελευταία εικοσιπενταετία, επιβάλλει τη χρήση κατάλληλων και εύχρηστων λογισμικών για την επεξεργασία τους. Το *Basic Radar Altimetry Toolbox* (BRAT) είναι ένα τέτοιο εκπαιδευτικό λογισμικό που έχει αναπτυχθεί υπό την εποπτεία της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Διαστήματος (ESA) και του (Γαλλικού) Εθνικού Κέντρου Διαστημικών Μελετών (CNES) για την διευκόλυνση της επεξεργασίας αλτιμετρικών δεδομένων. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται ορισμένες χαρακτηριστικές εφαρμογές στο περιβάλλον του BRAT που αναδεικνύουν τις δυνατότητες του.

## 2. Η μέθοδος της Δορυφορικής Αλτιμετρίας

Η μέθοδος της δορυφορικής αλτιμετρίας στηρίζεται σε μια φαινομενικά απλή λειτουργική αρχή που επιτρέπει τον υπολογισμό της απόστασης  $R$  μεταξύ του δορυφόρου και της επιφάνειας της θάλασσας. Σύμφωνα με τους Lee-Lueng και Casanave (2001), το αλτίμετρο του δορυφόρου εκπέμπει ένα παλμικό κύμα μικροκυματικής ακτινοβολίας (ραντάρ), μεγάλης συχνότητας (πάνω από 1700 παλμούς ανά δευτερόλεπτο), με κατεύθυνση κατακόρυφα προς την επιφάνεια της θάλασσας. Ο παλμός αυτός αλληλεπιδρά με τη συνήθως ανώμαλη (εξ' αιτίας των κυματισμών) επιφάνεια της θάλασσας και μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ανακλάται κάθετα προς το αλτίμετρο του δορυφόρου, το οποίο τη λαμβάνει και καταγράφει με ακρίβεια το χρόνο λήψης του επιστρέφοντος παλμού. Από τον καταγεγραμμένο χρόνο  $t$  της διπλής διαδρομής του παλμικού κύματος υπολογίζεται μια αρχική εκτίμηση για το ζητούμενο μέγεθος  $R$  από την ακόλουθη σχέση (1):

$$R = (c * t) / 2 \quad (1)$$

όπου  $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός.

Αν ληφθούν υπόψη οι διάφορες επιδράσεις στη διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας του παλμού κατά μήκος της διαδρομής του (π.χ. υδρατμοί, ιονισμός, στιγμιαία κατάσταση της θάλασσας κλπ.), η τελική απόσταση  $R$  υπολογίζεται ακριβέστερα μέσω της εφαρμογής μιας σειράς αντίστοιχων διορθώσεων από την αρχική εκτίμηση της απόστασης  $R$ .

Για να είναι πιο εύκολα αξιοποιήσιμη σε ωκεανογραφικές εφαρμογές, η εκτίμηση της απόστασης  $R$  πρέπει να αναφέρεται σε ένα σαφώς προσδιορισμένο σύστημα συντεταγμένων. Αυτό επιτυγχάνεται με τον ακριβή τροχιακό προσδιορισμό του υψόμετρου  $h$  του δορυφόρου σε σχέση με ένα συγκεκριμένο ελλειψοειδές αναφοράς. Η απόσταση  $R$ , στη συνέχεια, μετατρέπεται στο αποκαλούμενο *Υψόμετρο της Επιφάνειας της Θάλασσας* SSH (Sea Surface Height) που είναι η απόσταση μεταξύ της επιφάνειας της θάλασσας και του ελλειψοειδούς αναφοράς και μαθηματικά περιγράφεται από την απλή σχέση (2):

$$SSH = h - R \quad (2)$$

Το μέγεθος και η μορφή του επιστρέφοντος παλμού (κυματομορφή) ποικίλλει ανάλογα με τη φύση της ανακλαστικής επιφάνειας (νερό, πάγος, έδαφος) και τη στιγμιαία κατάσταση της επιφάνειας αυτής, όπως π.χ. αν είναι επίπεδη (ήρεμη) ή κυματώδης θαλάσσια επιφάνεια (CNES, 2014). Γενικά, όταν ο παλμός προσπίπτει σε θαλάσσια επιφάνεια και ειδικότερα ωκεάνια, η οποία από τη φύση της είναι αρκετά ομοιογενής, η κυματομορφή που επιστρέφει στο δορυφόρο είναι χαρακτηριστική και μπορεί εύκολα να περιγραφεί αναλυτικά και ο υπολογισμός της μετρούμενης απόστασης  $R$  μπορεί να επιτευχθεί με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια. Αντιθέτως, όταν η επιφάνεια παρουσιάζει ασυνέχειες ή σημαντικές κλίσεις, όπως συμβαίνει στις παράκτιες περιοχές, η ερμηνεία των κυματομορφών γίνεται πιο δύσκολη και ανακριβής. Οι κυματομορφές περιέχουν σε όλες αυτές τις περιπτώσεις χρήσιμες πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά των επιφανειών που προκάλεσαν την ανάκλαση των παλμών.

Όσον αφορά στις χρησιμοποιούμενες από τα ραντάρ αλτίμετρα συχνότητες, η επιλογή τους εξαρτάται από το αντικείμενο της εκάστοτε αποστολής, τις προδιαγραφές λειτουργίας και τους περιορισμούς, καθώς και από τις γενικές τεχνικές δυνατότητες του δορυφόρου. Οι συνήθεις συχνότητες είναι στις φασματικές ζώνες  $Ku$  (13.6 GHz),  $C$  (5.3 GHz),  $S$  (3.2 GHz), και  $Ka$  (35 GHz), ενώ συνήθως γίνεται χρήση δύο διαφορετικών συχνοτήτων για τον ακριβέστερο υπολογισμό της επίδρασης της ιονόσφαιρας.

### 3. Επεξεργασία αλτιμετρικών δεδομένων

Το βασικότερο στοιχείο στη μελέτη θαλάσσιων φαινομένων με τη βοήθεια της δορυφορικής αλτιμετρίας αποτελούν τα διαθέσιμα αλτιμετρικά δεδομένα που πρόκειται να αξιοποιηθούν. Ανάλογα με τη φύση, το χαρακτήρα και τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής ενδιαφέροντος, ο μελετητής καλείται να επιλέξει κάθε φορά τα κατάλληλα προ-επεξεργασμένα δεδομένα, καθώς υπάρχουν αρκετά διαφορετικά είδη και επίπεδα αναγωγών και διορθώσεων στις οποίες υπόκεινται οι πρωτογενείς παρατηρήσεις πριν διατεθούν στους χρήστες.

Τα διαθέσιμα αλτιμετρικά δεδομένα διέρχονται από μια διεξοδική διαδικασία προεπεξεργασίας τους που διαχωρίζεται σε πέντε βήματα (Βήμα 0 – 4). Μετά τη διεκπεραίωση κάθε βήματος, τα δεδομένα αναβαθμίζονται σε πιο εξειδικευμένα προϊόντα αντίστοιχα *Επίπεδου (ή Level) 0* έως *4*.

Συγκεκριμένα, το *Βήμα 0*, περιλαμβάνει τη λήψη από το δορυφόρο δεδομένων τηλεμετρίας (*Επίπεδο 0*) σε δυαδική κωδικοποιημένη μορφή. Κατά το *Βήμα 1*, πραγματοποιείται αρχικός ποιοτικός έλεγχος και τα ελεγμένα τηλεμετρικά δεδομένα προωθούνται στα κέντρα επεξεργασίας δεδομένων των αρμόδιων φορέων για τη χρονολόγησή τους, την χωροθέτησή τους και την έκφρασή τους στις κατάλληλες μονάδες μέτρησης (*Επίπεδο 1*). Τα δεδομένα αυτά διορθώνονται ως προς τα σφάλ-

ματα του οργάνου, τα σφάλματα που προκύπτουν κατά τη διάδοση του σήματος στην ατμόσφαιρα και τις διαταραχές στις οποίες υπόκειται το σήμα κατά την ανάκλασή του από την προσπίπτουσα επιφάνεια (*Βήμα 2*). Ειδικότερα, στο στάδιο αυτό επιτελείται ο ακριβής προσδιορισμός της τροχιάς του δορυφόρου, που επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των σύγχρονων συστημάτων δορυφορικού εντοπισμού και των ακριβέστερων τροχιακών μοντέλων και ταυτόχρονα τα δεδομένα υπόκεινται σε μια εκτεταμένη σειρά από γεωφυσικές αναγωγές και διορθώσεις, όπως:

- Λόγω του γεωειδούς και των παλιρροιών (ωκεάνια παλίρροια, παλίρροια του στερεού φλοιού της Γης και παλίρροια των πόλων), των οποίων η διόρθωση πραγματοποιείται με τη χρήση σχετικών μοντέλων υψηλής ακρίβειας.
- Για σφάλματα λόγω της ιονόσφαιρας που διορθώνονται με τη χρήση δύο διαφορετικών συχνοτήτων, ενώ τα σφάλματα λόγω του υγρού και του ξηρού μέρους της τροπόσφαιρας διορθώνονται με τη χρήση μετρήσεων από το μικροκυματικό ραδιόμετρο που είναι εξοπλισμένοι οι δορυφόροι.
- Τα σφάλματα λόγω των μεταβολών της επιφάνειας της θάλασσας, π.χ. λόγω της αντίστροφης επίδρασης της ατμοσφαιρικής πίεσης και του ηλεκτρομαγνητικού συστηματικού σφάλματος του παλμού λόγω της κατάστασης της θάλασσας.
- Τα ενδογενή σφάλματα κατά τη λειτουργία του αλτιμετρικού ραντάρ.

Με τον τρόπο αυτό παράγονται τα δεδομένα *Επιπέδου 2* που είναι συνήθως γνωστά και ως γεωφυσικά δεδομένα. Στη συνέχεια, κατά το *Βήμα 3*, τα γεωφυσικά δεδομένα επικυρώνονται ακολουθώντας αυστηρούς κανόνες διασφάλισης ποιότητας και μετατρέπονται πλέον σε επικυρωμένα δεδομένα (*Επιπέδου 3*) μετρήσεων από διακριτά σημεία κατά μήκος της τροχιάς του δορυφόρου και αντίστοιχα επί της θαλάσσιας επιφάνειας *κατά μήκος του επίγειου ίχνους* της τροχιάς (*Along-track δεδομένα*). Τέλος, κατά το *Βήμα 4*, πραγματοποιείται δια-δορυφορική βαθμονόμηση μεταξύ αποστολών, δηλαδή τα δεδομένα από διαφορετικούς δορυφόρους συνδυάζονται μετά από εκτενείς ελέγχους συμβατότητας. Στο στάδιο αυτό, μετατρέπονται σε *Gridded δεδομένα*, δηλαδή προϊόντα που ανάγουν τις αλτιμετρικές πληροφορίες από τα επίγεια ίχνη των πολλαπλών δορυφόρων στα σημεία καννάβων, και ανήκουν πλέον στο *Επίπεδο 4*.

Τα διαθέσιμα στους χρήστες αλτιμετρικά προϊόντα, εκτός από τη διάκριση τους σε *Along-track* και *Gridded* δεδομένα, κατηγοριοποιούνται επίσης με βάση έναν αριθμό άλλων κριτηρίων που ορίζονται με βάση τον τοπικό και χρονικό τους χαρακτήρα, καθώς και με βάση τους δορυφόρους συγκεκριμένων αποστολών που συνεισφέρουν δεδομένα για τη δημιουργία τους. Συγκεκριμένα, με βάση το χρόνο που απαιτείται για τη διάθεσή τους στους χρήστες μετά τη λήψη των παρατηρήσεων, διακρίνονται σε *Real-Time* ή *RT* (διαθέσιμα μετά από 3 έως 5 ώρες), σε *Near-Real Time* ή *NRT* (μετά από 2 έως 3 ημέρες) και σε *Delayed Time* ή *DT* (μετά από περίπου 30 ημέρες). Επιπλέον διακρίνονται σε δεδομένα μιας και μόνο αποστολής (*Mono-mission*) και σε συνδυασμού δύο ή περισσότερων αποστολών (*Multi-*

*mission*). Επίσης, με βάση τη διάρκεια τους διακρίνονται σε ημερήσια (*daily*), εβδομαδιαία (*weekly*), μηνιαία (*monthly*), εποχιακά (*seasonal*) και σε μέσες τιμές ορισμένων ετών (*several years mean*), ενώ με βάση τη χωρική τους κάλυψη σε παγκόσμια (*global*) και περιφερειακά (*regional*) δεδομένα.

#### **4. Εισαγωγή στο Basic Radar Altimetry Toolbox (BRAT)**

Για την παραγωγή των χαρτών στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το ελεύθερο λογισμικό BRAT που περιλαμβάνει μια συλλογή από εργαλεία και εγχειρίδια, σχεδιασμένα για να διευκολύνουν τη χρήση των αλτιμετρικών δεδομένων τόσο από αρχάριους, όσο και έμπειρους χρήστες. Στο BRAT μπορεί κανείς να διαχειριστεί διάφορους μορφότυπους (*formats*) δεδομένων από την πλειονότητα των αλτιμετρικών δορυφόρων, όπως ERS-1 & 2, Topex/Poseidon, Geosat Follow-on, Jason-1, Envisat και τη σχετικά πιο πρόσφατη αποστολή Cryosat-2 (Benveniste et al. 2008). Στο περιβάλλον του παρέχεται η δυνατότητα εισαγωγής και προεπισκόπησης των δεδομένων, επεξεργασίας και οπτικοποίησης τους, με βάση απλά κριτήρια ή συνδυασμό κριτηρίων που ορίζονται από το χρήστη, και εξαγωγής τους στο δυαδικό μορφότυπο NetCDF (Network Common Data Form), σε αρχεία ASCII, Geo Tiff, σε αρχεία αναγνώσιμα από το πρόγραμμα Google Earth (*kml*) ή ακόμη και σε εικόνες μορφής *.png*, *.jpeg*, *.bmp*, *.tiff* και *.pnm*. Είναι δυνατή, επίσης, η αναδειγματοληψία δεδομένων, η ανταλλαγή και οι συνδυασμοί αυτών ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή.

#### **5. Ενδεικτικά αποτελέσματα εφαρμογών Δορυφορικής Αλτιμετρίας**

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας αναφέρονται στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου Θάλασσας ( $30^{\circ}$  -  $46^{\circ}$ B,  $6^{\circ}$ Δ -  $36^{\circ}$ A). Ο κύριος σκοπός της πραγματοποίησης των εφαρμογών που εξετάστηκαν ήταν η μελέτη ποικίλων θαλάσσιων φαινομένων ενδιαφέροντος, κυρίως ωκεανογραφικού χαρακτήρα, αλλά και η σύγκριση των αποτελεσμάτων για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη χρηστικότητα των διαφόρων τύπων αλτιμετρικών δεδομένων. Ειδικότερα, οι Ανωμαλίες του Επιπέδου της Θάλασσας σχετίζονται με την άνοδο της στάθμης της, φαινόμενο το οποίο αποδίδεται στην κλιματική αλλαγή και αποτελεί ένα πεδίο υψηλού ενδιαφέροντος και εκτεταμένης έρευνας τα τελευταία χρόνια κυρίως λόγω των διαφαινόμενων καταστροφικών κοινωνικών και οικονομικών επιπτώσεων, ιδιαίτερα στις παράκτιες περιοχές. Επιπλέον, η Απόλυτη Δυναμική Τοπογραφία και τα Γεωστρωφικά Ρεύματα είναι φαινόμενα αλληλένδετα, τόσο μεταξύ τους, όσο και με τις Ανωμαλίες του Επιπέδου της Θάλασσας. Τέλος, η εφαρμογή του Σημαντικού Ύψους Κύματος επιλέχθηκε λόγω του πολυσυζητημένου θέματος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και συγκεκριμένα της αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας. Σαν

κύρια πηγή άντλησης αλτιμετρικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η διαδικτυακή ftp υπηρεσία παροχής αλτιμετρικών δεδομένων AVISO+ της CNES.

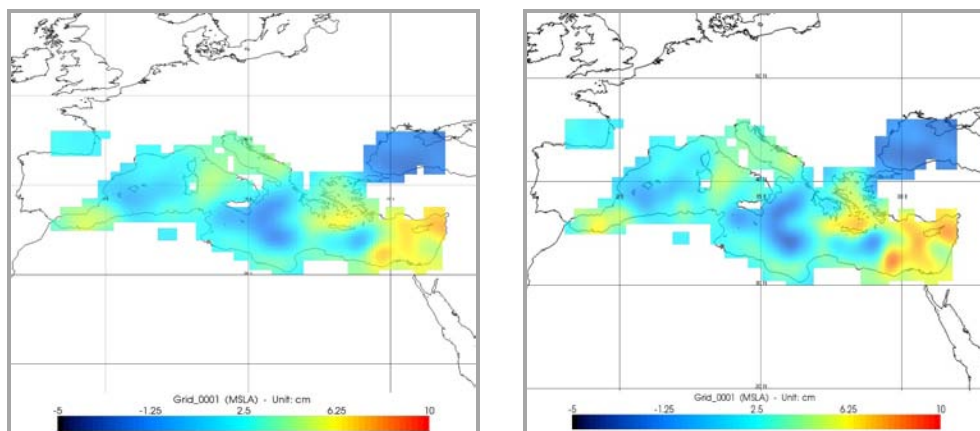
Από την επεξεργασία κατάλληλων αλτιμετρικών δεδομένων στο BRAT προέκυψαν για καθεμία από τις εφαρμογές ενδιαφέροντος ένας αριθμός χαρτών, για τη δημιουργία των οποίων χρησιμοποιήθηκε η χαρτογραφική προβολή Plate Carrée. Η συγκεκριμένη προβολή ανήκει στις λεγόμενες ισορθογώνιες προβολές που είναι, επίσης, γνωστές στην ξενόγλωσση βιβλιογραφία και με τις ονομασίες *equirectangular*, *equidistant cylindrical* ή *la carte parallélogrammatique projection*, και προτιμάται επειδή προσφέρει πιο εποπτική άποψη της κατανομής των τιμών ενός θαλάσσιου φαινομένου σε περιφερειακή κλίμακα. Στις περιπτώσεις που χρησιμοποιήθηκαν Gridded δεδομένα, εφαρμόστηκαν, επίσης, φίλτρα εξομάλυνσης ή/και παρεμβολής. Αυτό σημαίνει ότι οι τιμές που αναγράφονται στη χρωματική κλίμακα των εν λόγω χαρτών δεν είναι οι πραγματικές αλλά αυτές που προέκυψαν μετά την εφαρμογή του φίλτρου.

Σημειώνεται ότι λόγω περιορισμών χώρου στην παρούσα εργασία δεν είναι εφικτό να παρατεθούν όλοι οι χάρτες που δημιουργήθηκαν για τις ανάγκες των ενδεικτικών εφαρμογών που εξετάστηκαν. Ωστόσο, η πλήρης σειρά τους είναι διαθέσιμη στην αναλυτικότερη εργασία της Χατζηκυριάκου (2014).

## **5.1 Δημιουργία Χαρτών για τη μελέτη των Ανωμαλιών του Επιπέδου της Θάλασσας (MSLA)**

Ως Ανωμαλία του Επιπέδου της Θάλασσας (Sea Level Anomaly, SLA) ή αλλιώς Ανωμαλία του Υψομέτρου της Επιφάνειας της Θάλασσας (Sea Surface Height Anomaly, SSHA) ορίζεται η απόκλιση της στιγμιαίας επιφάνειας της θάλασσας από τη Μέση Στάθμη της Θάλασσας (ΜΣΘ). Σύμφωνα με τους Niedzielski and Kosek (2009), οι αλλαγές του υψομέτρου της επιφάνειας της θάλασσας υποδηλώνουν τις περιοδικές διακυμάνσεις που οφείλονται στην αυξομείωση του όγκου των ωκεανών με μάζες νερού (eustatic effect), στις επιδράσεις της αύξησης της θερμοκρασίας του νερού των ωκεανών και στην αύξηση της στάθμης λόγω αλλαγών της αλατότητας (halosteric rise), καθώς και στις γεωλογικές διεργασίες που μεταβάλλουν τη γεωμορφολογία των ωκεάνιων πυθμένων, με κυριότερη μορφή εκείνη της ισοστασίας (isostatic effect). Για την ερμηνεία των εν λόγω ανωμαλιών, σημειώνεται ότι θετικές τιμές υποδεικνύουν υψηλότερες θερμοκρασίες νερού και θερμοκλινές σε μεγαλύτερο βάθος, ενώ αρνητικές τιμές υποδεικνύουν χαμηλότερες θερμοκρασίες νερού και θερμοκλινές σε μικρότερο βάθος (ESA, 2014).

Αρχικά, στην πρώτη περίπτωση δημιουργίας χαρτών SLA χρησιμοποιήθηκαν DT Gridded Multi-mission δεδομένα, χωρικής ανάλυσης  $1/4^\circ \times 1/4^\circ$  για όλη τη διάρκεια του έτους 2012. Αυτός ο τύπος δεδομένων διατίθεται σε δύο είδη: τα “two-sat merged” δεδομένα από δύο μόνο δορυφόρους (Εικόνα 1), και τα “all-sat merged” από όλους τους διαθέσιμους δορυφόρους (Εικόνα 2). Ο δεύτερος χάρτης παρου-



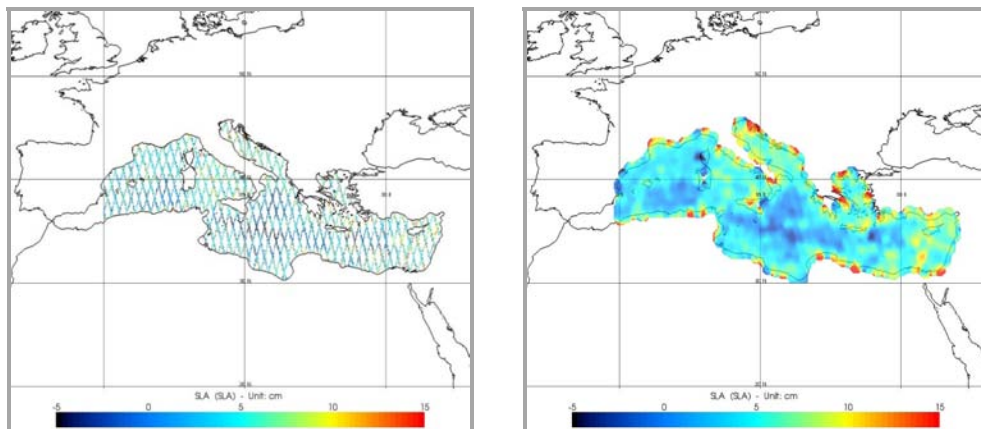
**Εικόνες 1 και 2:** Χάρτες Ανωμαλιών του Επιπέδου της Θάλασσας (MSLA) για το έτος 2012 από δεδομένα “two-sat-merged” (αριστερά) και “all-sat-merged” (δεξιά). Πηγή: Χατζηκυριάκου, 2014

σιάζει σαφώς περισσότερη λεπτομέρεια λόγω της συνεισφοράς δεδομένων από πολλαπλούς δορυφόρους, με αποτέλεσμα να διατηρείται μεγαλύτερο μέρος του σήματος, ειδικά αυτό που είναι σε χαμηλές συχνότητες. Αντίθετα, στην περίπτωση χρήσης δεδομένων δύο μόνο αλτιμετρικών αποστολών, το σήμα χαμηλής συχνότητας χάνεται πιο εύκολα, με αποτέλεσμα την χαμηλότερη διακριτική ικανότητα του παραγόμενου χάρτη.

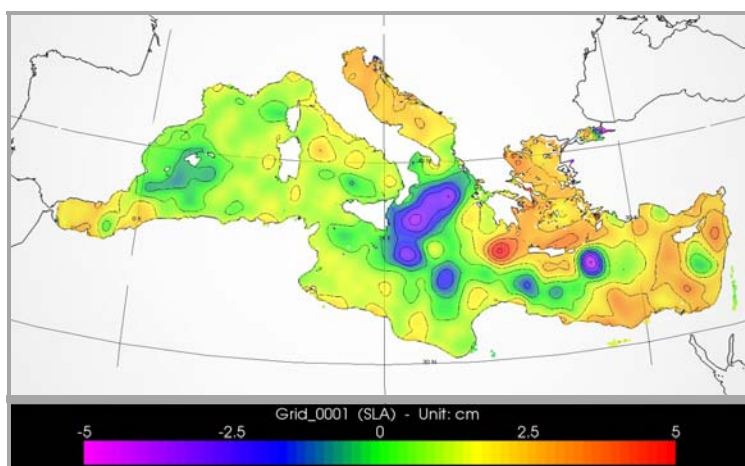
Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκαν DT Along-track δεδομένα, χωρικής ανάλυσης  $1/8^\circ \times 1/8^\circ$ , προερχόμενα από το δορυφόρο Envisat και για όλη τη διάρκεια του έτους 2012. Στον συγκεκριμένο τύπο δεδομένων έχει γίνει προεπεξεργασία με τη χρήση του φίλτρου Lanczos για την αφαίρεση του εναπομείναντος θορύβου και των σημάτων χαμηλών συχνοτήτων. Στις Εικόνες 3 και 4 παρουσιάζονται χάρτες MSLA χωρίς και με τη χρήση φίλτρου εξομάλυνσης αντίστοιχα.

Συγκρίνοντας, τις βασικές διαφορές μεταξύ των χαρτών από δεδομένα Gridded (Εικόνες 1 και 2) και Along-track (Εικόνες 3 και 4), συνάγεται ότι οι δεύτεροι έχουν σαφώς μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα, κάτι που ήταν και αναμενόμενο από την ονομαστική τους χωρική ανάλυση (Gridded  $1/4^\circ$ , Along-track  $1/8^\circ$ ). Ειδικότερα, στα Along-track δεδομένα με τη χρήση φίλτρου (Εικόνα 4) μπορεί να διακρίνει κανείς αρκετά μεγαλύτερη λεπτομέρεια όσον αφορά τις ανωμαλίες του επιπέδου της θάλασσας και να εξάγει συμπεράσματα σχετικά με αυτές σε μεγαλύτερη κλίμακα και με χαμηλότερη αβεβαιότητα.

Τέλος, στην τρίτη περίπτωση δημιουργίας χαρτών SLA χρησιμοποιήθηκαν DT Gridded Multi-mission εποχιακά (*Seasonal mean of SLA*) και μηνιαία (*Monthly averaged SLA*) προεπεξεργασμένα δεδομένα, χωρικής ανάλυσης  $1/4^\circ \times 1/4^\circ$  για τη συνολική χρονική περίοδο 1993-2012.



**Εικόνες 3 και 4:** Χάρτες Ανωμαλιών του Επιπέδου της Θάλασσας (MSLA) από δεδομένα DT-SLA του δορυφόρου Envisat για το έτος 2012 χωρίς (αριστερά) και με (δεξιά) τη χρήση φίλτρου. Πηγή: Χατζηκυριάκου, 2014



**Εικόνα 5:** Χάρτης Ανωμαλιών του Επιπέδου της Θάλασσας (MSLA) από δεδομένα “Seasonal mean of SLA” για την χρονική περίοδο 1993-2012. Πηγή: Χατζηκυριάκου, 2014

Από την Εικόνα 5 δίνεται η δυνατότητα να εξαχθούν ακριβή συμπεράσματα για τις γενικές τάσεις των ανωμαλιών του επιπέδου της θάλασσας. Συγκεκριμένα, εντοπίζονται εύκολα οι περιοχές με τις έντονες κυκλωνικές κινήσεις των υδάτινων μαζών που σχετίζονται με την ύπαρξη των αντικυκλώνων του Πέλοπα (νότια της Πύλου) και της Ιεράπετρας (νότια της Κρήτης) και του κυκλώνα της Δυτικής Κρήτης, οι οποίοι καταβυθίζουν και αναδύουν τεράστιες ποσότητες νερού, κάθε μέρα, εδώ και χιλιάδες χρόνια. Επίσης, διακρίνεται η ευρύτερη περιοχή με χαμηλά επίπεδα τιμών που εκτείνεται από το Ιόνιο Πέλαγος μέχρι τη Σικελία. Η υψηλή ανάλυση αυτού

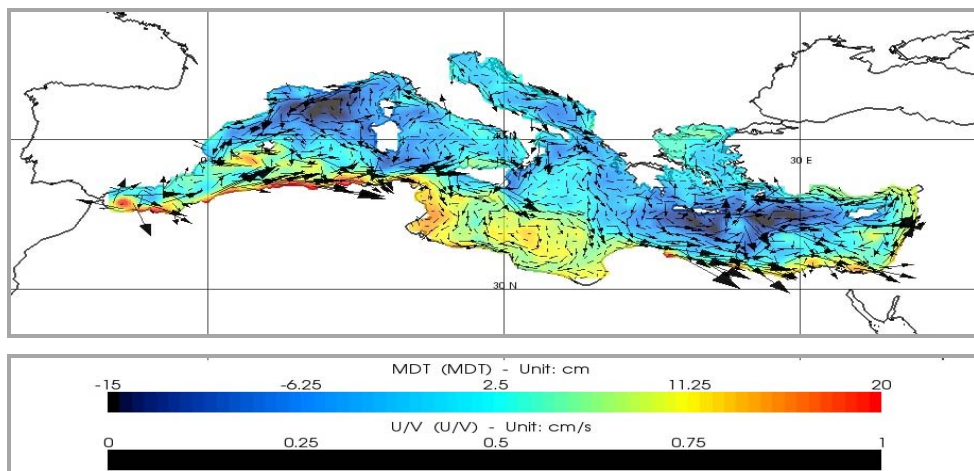


του χάρτη προκύπτει από την ειδική επεξεργασία και το μεγάλο όγκο δεδομένων 10 ετών, καθώς και από τον αριθμό των αλιμετρικών αποστολών που συμβάλλουν στη δημιουργία τους, που είναι ο μέγιστος δυνατός.

Κατά τον ίδιο τρόπο, μπορούν να δημιουργηθούν αντίστοιχοι μηνιαίοι χάρτες από δεδομένα “Monthly averaged SLA”, στους οποίους, εν γένει παρατηρείται σαφώς το γεγονός ότι το επίπεδο της θάλασσας είναι χαμηλότερο κατά τους χειμερινούς μήνες και υψηλότερο τους θερινούς, παρουσιάζοντας έντονες διακυμάνσεις (Χατζηκυριάκου, 2014). Αυτό συμβαίνει, διότι το νερό θερμαίνεται κατά μεγαλύτερο ποσοστό από άμεση ηλιακή ακτινοβολία κατά τους θερινούς μήνες και λιγότερο κατά τους χειμερινούς.

## 5.2 Δημιουργία Χαρτών για τη μελέτη των Γεωστροφικών Ρευμάτων

Το κύριο χαρακτηριστικό της παγκόσμιας ωκεάνιας κυκλοφορίας μεγάλης κλίμακας αποτελούν τα *γεωστροφικά ρεύματα*, τα οποία κινούνται στο επιφανειακό στρώμα των ωκεανών. Η κίνηση τους διαμορφώνεται κυρίως σε στροβίλους ή αλλιώς γύρους (gyres) και είναι αποτέλεσμα της γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας και της παρουσίας των ηπείρων. Συγκεκριμένα, η δημιουργία τους οφείλεται στη διατμητική τάση που ασκεί ο άνεμος που πνέει πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και έχει ως αποτέλεσμα να συμπαρασύρει τα επιφανειακά νερά προς την ίδια κατεύθυνση. Οφείλεται, επίσης, στη δύναμη Coriolis που επιδρά κάθετα στη διεύθυνση της κίνησης των θαλάσσιων μαζών (προς τα δεξιά στο βόρειο ημισφαίριο και προς τα αριστερά στο νότιο), καθώς και στη βαρύτητα που τροποποιεί (διαθλά) την αρχική καθαρή δεξιόστροφη κίνηση του νερού.



**Εικόνα 6:** Χάρτης Μέσων Γεωστροφικών Ταχυτήτων από βοηθητικά αλιμετρικά προϊόντα για τη χρονική περίοδο 1993-1999 με την παράλληλη απεικόνιση της Μέσης Δυναμικής Τοπογραφίας. Πηγή: Χατζηκυριάκου, 2014

Για τέτοιες εφαρμογές, τυπικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν DT Gridded Multi-mission δεδομένα ανωμαλιών γεωστροφικών ταχυτήτων, χωρικής ανάλυσης  $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ , για όλη τη διάρκεια συγκεκριμένων ετών ενδιαφέροντος. Οι χάρτες που παράγονται συνδυάζονται με τους αντίστοιχους χάρτες SLA για τις ίδιες χρονικές περιόδους. Τέτοιοι χάρτες, ωστόσο, δεν απεικονίζουν ιδιαίτερα μεγάλη λεπτομέρεια και χρησιμεύουν μόνο για να παρατηρηθούν, ανάμεσα στα διαδοχικά έτη, οι κοινές κύριες τάσεις των γεωστροφικών ρευμάτων.

Ενδεικτικά, για αυτόν τον τύπο εφαρμογής, χρησιμοποιήθηκαν κάποια βοηθητικά προϊόντα της υπηρεσίας Aviso+, τα οποία περιείχαν δεδομένα των μέσων γεωστροφικών ταχυτήτων κατά παράλληλο (Zonal – U) και μεσημβρινό (Meridian – V), με χωρική ανάλυση  $1/8^\circ \times 1/8^\circ$ , για τη χρονική περίοδο 1993-1999.

Από την Εικόνα 6, είναι προφανές ότι τα βοηθητικά προϊόντα αποδίδουν εξαιρετικά λεπτομερή πληροφορία για τις γεωστροφικές ταχύτητες, λόγω της υψηλότερης χωρικής ανάλυσης, του χρονικού εύρους και της ειδικής προεπεξεργασίας των δεδομένων τους. Συγκεκριμένα επιτρέπουν να εξαχθούν γενικά συμπεράσματα για την ένταση και την κατεύθυνσή των γεωστροφικών ρευμάτων με βάση το σχετικό μέγεθος και τη φορά των αντίστοιχων διανυσμάτων. Στον εν λόγω χάρτη, παρουσιάζονται υψηλές ανωμαλίες στην ευρύτερη περιοχή του Ιονίου και του Λιβυκού Πελάγους και το γεγονός ότι η δομή των διανυσμάτων είναι σε κυκλωτερή σχήματα παραπέμπει στην ύπαρξη στροβίλων. Έντονη δραστηριότητα παρουσιάζεται, επίσης, στο στενό του Γιβραλτάρ, όπως ήταν αναμενόμενο λόγω της εισροής μεγάλων μαζών νερού από τον Ατλαντικό ωκεανό προς τη Μεσόγειο. Παρατηρείται, επίσης, ότι οι μεγαλύτερες ανωμαλίες γεωστροφικών ταχυτήτων φαίνονται να μετατοπίζονται από έτος σε έτος, μεταξύ των ακτών της Ιταλίας, του Λιβυκού Πελάγους και της περιοχής νότια και ανατολικά της Κρήτης.

Σημειώνεται ότι από τα ίδια δεδομένα μπορούν επίσης να παραχθούν αντίστοιχοι χάρτες που να απεικονίζουν τις συνιστώσες των γεωστροφικών ταχυτήτων U και V ξεχωριστά και αναδεικνύουν ότι η πρώτη συνιστώσα αποδίδεται καλύτερα από την δεύτερη (Χατζηκυριάκου, 2014). Χάρτες αυτού του τύπου συνήθως συμπληρώνονται από χάρτες της κινητικής ενέργειας (*Eddy Kinetic Energy, EKE*) στους οποίους απεικονίζονται οι δίοδοι των γεωστροφικών ρευμάτων, δεδομένου ότι περιοχές με μεγαλύτερες τιμές κινητικής ενέργειας αντιπροσωπεύουν και τις περιοχές υψηλών γεωστροφικών ταχυτήτων.

### **5.3 Δημιουργία Χαρτών για τη μελέτη του Σημαντικού Ύψους Κύματος (MSWH)**

Ως *κυματισμός* ορίζεται κάθε περιοδική ή μη περιοδική διαταραχή της επιφάνειας της θάλασσας, η οποία, συνήθως, προκαλείται από την επίδραση των ανέμων. Το ύψος του κύματος εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου, από την έκταση στην οποία οι άνεμοι, που πνέουν, έχουν περίπου ίδια ταχύτητα και κατεύθυνση και από

τη διάρκεια κατά την οποία οι άνεμοι πνέουν συνεχώς κατά μήκος της εν λόγω περιοχής.

Το *Σημαντικό Ύψος Κύματος* (Significant Wave height, SWH) είναι μια αντιπροσωπευτική τιμή που εκφράζει τη μέση τιμή του ενός τρίτου των υψηλότερων παρατηρούμενων κυμάτων ( $H_{1/3}$ ) σε ένα σημείο κατά τη διάρκεια μιας δειγματοληψίας. Αυτή η τιμή δίνεται στα αρχεία των αλτιμετρικών δεδομένων ενός δορυφόρου, η οποία υπολογίζεται από τη δειγματοληψία των κυμάτων μέσα στη θαλάσσια περιοχή που "καλύπτεται" από τη δέσμη του ανακλώμενου παλμού ραντάρ. Ειδικότερα, τα δεδομένα που αφορούν, εκτός των άλλων, και το σημαντικό ύψος των κυμάτων στην περιοχή των μετρήσεων αντλούνται από την κυματομορφή του παλμού που περιέχει πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας, η οποία προκάλεσε την ανάκλαση του παλμού που εκπέμπεται από το δορυφορικό αλτίμετρο. Η οπισθοσκέδαση (backscatter) του παλμού επηρεάζεται από την τραχύτητα της επιφάνειας της θάλασσας εξαιτίας των επιφανειακών κυματισμών, δεδομένου ότι το αλτίμετρο μετρά πρώτα την κορυφή και στη συνέχεια την κοιλάδα των κυμάτων.

Για τη δημιουργία χαρτών SWH τυπικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όπως έγινε στην παρούσα εργασία, NRT Gridded Multi-mission δεδομένα SWH, χωρικής ανάλυσης  $1^\circ \times 1^\circ$ , για τη συνολική διάρκεια τουλάχιστον ενός έτους προκειμένου να παραχθούν χάρτες SWH ανά εποχή για τη χρονική διάρκεια ενδιαφέροντος. Ωστόσο, παρατηρείται ότι χρησιμοποιώντας Gridded δεδομένα SWH για τη μελέτη του κυματισμού σε μια κλειστή θάλασσα όπως η Μεσόγειος, προκύπτουν χάρτες χαμηλής σχετικά χωρικής ανάλυσης που παρέχουν μόνο μια εξομαλυσμένη εικόνα της κυματικής δραστηριότητας. Μέσω τέτοιων χαρτών δεν είναι δυνατή η λεπτομερής μελέτη της συχνότητας ή της μεταβολής του μεγέθους των κυμάτων, αλλά μπορούν να γίνουν σημαντικές γενικές διαπιστώσεις για τις τοπικές συνθήκες κυματισμού, π.χ. κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών σε σχέση με το υπόλοιπο έτος και ιδίως σε σχέση με τους καλοκαιρινούς μήνες. Για την πληρέστερη εικόνα του κυματικού ενεργειακού δυναμικού σε μια περιοχή, που παρουσιάζει και το μεγαλύτερο πρακτικό ενδιαφέρον, οι Δεληκαράογλου Δ. και Σ. (2012) έχουν δείξει ότι επιβάλλεται να χρησιμοποιηθούν μακροχρόνιες χρονοσειρές δεδομένων SWH σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά σημεία, μέσω της ανάλυσης των οποίων δίνεται καλύτερη δυνατότητα να υπολογιστούν λεπτομερή στατιστικά στοιχεία των κυματικών συνθηκών και του κυματικού ενεργειακού δυναμικού στις περιοχές που αντιπροσωπεύουν τα εν λόγω σημεία.

## 6. Συμπεράσματα

Η εκπόνηση χαρακτηριστικών εφαρμογών στο περιβάλλον του λογισμικού BRAT επέτρεψε να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τη χρησιμότητα των διαφόρων διαθέσιμων προεπεξεργασμένων αλτιμετρικών δεδομένων. Γενικά, κρί-

νεται ότι τα Along-track δεδομένα παράγουν χάρτες υψηλότερης διακριτικής ικανότητας. Τα Gridded δεδομένα, παρέχουν δυνατότητες ευκολότερου συνδυασμού με άλλου τύπου δεδομένων από επί τόπου ωκεανογραφικές μετρήσεις και θεωρούνται καταλληλότερα για μελέτες μεγαλύτερων περιοχών σε σχέση με τη Μεσόγειο Θάλασσα, που είναι μια κλειστή θάλασσα. Περαιτέρω, αν εξετασθεί η διάκριση των Gridded δεδομένων σε “two-sat-merged” και “all-sat-merged”, τα τελευταία, συμπεραίνοντας από τους σχετικούς χάρτες, διατηρούν μεγαλύτερο μέρος πληροφορίας για τους λόγους που αναφέρθηκαν νωρίτερα. Κατά τη σύγκριση των δεδομένων ως προς το χρόνο διάθεσής τους στους χρήστες, τα δεδομένα Delayed-Time (DT) παρουσιάζουν, επίσης, βελτιωμένα αποτελέσματα σε σχέση με τα Near-Real-Time (NRT) δεδομένα. Το γεγονός αυτό, είναι αναμενόμενο, καθώς, κατά την προεπεξεργασία των δεδομένων DT πραγματοποιείται ακριβής προσδιορισμός της τροχιάς του εκάστοτε δορυφόρου και αυτά υποβάλλονται σε μια σειρά διορθώσεων, που τα καθιστούν ακριβέστερα. Τα βοηθητικά προϊόντα της AVISO+, επίσης, παρουσιάζουν τα πιο ακριβή και λεπτομερή αποτελέσματα. Ωστόσο, επειδή αναφέρονται σε μια αρκετά μεγάλη χρονική περίοδο, είναι κατάλληλα κυρίως για τη γενικότερη μελέτη ενός θαλάσσιου φαινομένου και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διερεύνηση της δυναμικότητάς του συναρτήσει του χρόνου.

## Βιβλιογραφία

- Benveniste, J., Vinca, R., Sander, N., and Picot, N., (2008) *BASIC RADAR ALTIMETRY TOOLBOX*. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Boston, USA, July 8-11: 895-898.
- Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), Aviso+.  
<<http://www.aviso.altimetry.fr/>> (πρόσβαση, Ιούνιος 2014)
- European Space Agency (ESA). <<https://earth.esa.int/>> (πρόσβαση, Ιούνιος 2014).
- Lee-Lueng, F. and Cazanave, A., 2001. *Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications*, 69, Academic Press, 463 pp.
- Niedzielski, T. and Kosek, W., 2009. *Forecasting sea level anomalies from TOPEX/Poseidon and Jason-1 satellite altimetry*. Journal of Geodesy, 83(5): 469-476.
- Δεληκαράογλου, Δ. και Δεληκαράογλου Σ., 2012. *Χαρτογράφηση του ελληνικού θαλάσσιου χώρου στα πλαίσια ενός σχεδίου δράσης με αντικείμενο την ολοκληρωμένη θαλάσσια πολιτική Η συνεισφορά των αλτιμετρικών γεωδαιτικών δορυφόρων*. 11ο Εθνικό Συνέδριο Χαρτογραφίας – Ναύπλιο-Αργος, 8-10 Δεκεμβρίου, 495-518.  
<<https://app.box.com/s/j2hxt55h5cadhu8jtb3k>> (πρόσβαση, Δεκέμβριος 2014)
- Χατζηκυριάκου Χ., 2014. *Διερεύνηση μεθοδολογιών για την παραγωγή προϊόντων προστιθέμενης αξίας από δεδομένα Δορυφορικής Αλτιμετρίας*. Διπλωμ. Εργ. Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.  
<<https://app.box.com/s/4jp41aet6c56hz9ov43>> (πρόσβαση, Δεκέμβριος 2014)