

Μελέτη παγκόσμιων μοντέλων βαθυμετρίας και δεδομένων ηχοβολίσεων στην περιοχή του δέλτα Αξιού - Λουδία - Αλιάκμονα

Βασίλειος Ν. Γρηγοριάδης¹, Ηλίας Ν. Τζιαβός²,
Γεώργιος Σ. Βέργος³, Δημήτριος Α. Νατσιόπουλος⁴

1 Λέκτορας, 2 Καθηγητής, 3 Επίκουρος Καθηγητής, 4 Υποψήφιος Διδάκτορας
Τομέας Γεωδαισίας και Τοπογραφίας, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών,
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Περίληψη: Στην παρούσα εργασία περιγράφεται η συγκριτική μελέτη παγκόσμιων μοντέλων βαθυμετρίας και in-situ μετρήσεων, ηχοβολίσεων, στην ευρύτερη περιοχή του δέλτα των ποταμών Αξιού-Λουδία-Αλιάκμονα. Η βαθυμετρία των παγκόσμιων μοντέλων βασίζεται κυρίως σε δεδομένα δορυφορικής αλτιμετρίας για την ανοικτή θάλασσα και στο συνδυασμό τους με ηχοβολιστικές μετρήσεις, κατά κανόνα σε παράκτιες περιοχές, καθώς η δορυφορική αλτιμετρία δεν παρέχει αξιόπιστες τιμές βαθών σε αποστάσεις της τάξης του 0.5km έως 1km από την ακτή. Η εφαρμογή στη συγκεκριμένη θαλάσσια περιοχή επικεντρώνεται στην επεξεργασία ηχοβολιστικών μετρήσεων και στη σύγκρισή τους με τιμές βαθών από παγκόσμια μοντέλα δορυφορικής αλτιμετρίας. Σχολιάζονται συνοπτικά οι κύριες αναγωγές στα ηχοβολιστικά δεδομένα λαμβάνοντας υπόψη μοντέλα μέσης στάθμης θάλασσας και γεωειδούς. Τέλος, αναδεικνύεται η χρησιμότητα του συνδυασμού των δεδομένων από τις δύο πηγές (ηχοβολιστική, δορυφορική αλτιμετρία) κατά την απεικόνιση του θαλάσσιου βυθού σε περιοχές αβαθών υδάτων. Ο συνδυασμός αυτός μπορεί να οδηγήσει στον εντοπισμό συστηματικών επιδράσεων στα δεδομένα της δορυφορικής αλτιμετρίας και στην ελαχιστοποίησή τους μέσω κατάλληλων διορθώσεων.

Εισαγωγή

Η ακριβής απεικόνιση του θαλάσσιου πυθμένα και η σύνταξη διαγραμμάτων και χαρτών σε διάφορες κλίμακες αποτελούν βασικά εργαλεία για την ασφαλή πλοήγηση και καλύπτουν ευρύ φάσμα εφαρμογών που συνδέονται με το θαλάσσιο περιβάλλον. Η ασφαλής γνώση της μορφολογίας του θαλάσσιου βυθού στη θαλάσσια ζώνη κοντά στην ακτή είναι επίσης χρήσιμη για ειδικές κατασκευές και ποικίλες εφαρμογές στις επιστήμες της θάλασσας και τις γεωεπιστήμες γενικότερα.

Για τον προσδιορισμό του βάθους του θαλάσσιου πυθμένα χρησιμοποιούνται διάφορες μεθοδολογίες, οι κυριότερες εκ των οποίων είναι (βλ., π.χ., Τζιαβός 2002, Γρηγοριάδης και Τζιαβός 2005):

α) *Ηχοβολίσεις.* Πραγματοποιούνται μετρήσεις με ηχοβολιστικές συσκευές κατά

μήκος ειδικά σχεδιασμένων γραμμών πλευσης του υδρογραφικού σκάφους, των ηχοβολιστικών γραμμών, οι οποίες παρουσιάζουν συγκεκριμένη γεωμετρία (παράλληλες, κυκλικές, κ.λπ.) και ο προσδιορισμός του θαλάσσιου βάρους είναι άμεσος. Η μέθοδος αξιοποιείται κατά κανόνα στην παράκτια ζώνη, σε βάθη έως 200m περίπου, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε μεγαλύτερα βάθη. Οι μετρήσεις με ηχοβολιστικές συσκευές είναι ακριβείς και συνδυάζονται με δέκτες Παγκόσμιων Συστημάτων Προσδιορισμού Θέσης (Global Navigation Satellite Systems – GNSS/Global Positioning System–GPS) για τον ταυτόχρονο προσδιορισμό της οριζόντιας θέσης των σημείων της ηχοβόλισης.

- β) *Δορυφορική αλτιμετρία*. Για τον προσδιορισμό του βάρους χρησιμοποιούνται υψόμετρα της επιφάνειας της θάλασσας από δεδομένα δορυφορικής αλτιμετρίας. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι (βλ., π.χ. Sandwell and Smith 2001, Αραμπέλος και Τζιαβός 2007), οι οποίες βασίζονται κυρίως στον υπολογισμό των βαθών από συνιστώσες του πεδίου βαρύτητας της Γης, όπως είναι οι ανωμαλίες της βαρύτητας, οι βαθμίδες της βαρύτητας και οι αποκλίσεις της κατακορύφου, μέσω κατάλληλων αλγορίθμων αντιστροφής. Οι αλγόριθμοι αντιστροφής συνήθως έχουν βάση φασματικές τεχνικές και ειδικότερα τους μετασχηματισμούς Fourier (FFT), που είναι ιδιαίτερα ευέλικτοι στη διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων και απαιτούν μειωμένο υπολογιστικό φόρτο σε σύγκριση με άλλες μεθόδους εκτίμησης, όπως είναι οι στοχαστικοί αλγόριθμοι. Τα αλτιμετρικά δεδομένα χρησιμοποιούνται κυρίως για την βαθυμετρική κάλυψη ωκεάνιων εκτάσεων και τη δημιουργία ψηφιακών μοντέλων βάρους. Στην παράκτια ζώνη είναι δυνατόν να συνδυασθούν με ηχοβολίσεις, εφόσον τα δεδομένα υποστούν κατάλληλη επεξεργασία, όπως σχολιάζεται στις επόμενες ενότητες.
- γ) *Βαθυμετρία laser - LIDAR* (Light Detection And Ranging). Οι μετρήσεις γίνονται από αέρα (ελικόπτερο ή αεροπλάνο) με την χρήση διπλής ακτινοβολίας laser. Τα εκπεμπόμενα σήματα του laser ανακλώνται από την επιφάνεια της θάλασσας και το θαλάσσιο βυθό και μέσω κατάλληλης επεξεργασίας προκύπτουν οι τιμές βαθών. Με τη μέθοδο αυτή καλύπτονται ταχύτατα μεγάλες θαλάσσιες εκτάσεις. Η μέθοδος εφαρμόζεται κυρίως στη θαλάσσια ζώνη κοντά στην ακτή για βάθη κυμαινόμενα από 30m έως 40m περίπου. Η τεχνική αυτή είναι χρήσιμη για την κάλυψη της προαναφερθείσας θαλάσσιας έκτασης με ακρίβειες προσδιορισμού της τάξης του 1% έως 2% του μετρούμενου βάρους, αλλά το κόστος των μετρήσεων είναι πολύ υψηλό.
- δ) *Πολυφασματική βαθυμετρία*. Χρησιμοποιούνται εικόνες δορυφόρων τηλεοπτικής (SPOT, LANDSAT, κ.λπ.) για την εξαγωγή δεδομένων βαθυμετρίας στην παράκτια ζώνη (βάθη έως 30m περίπου), μέσω φασματικής ανάλυσης και την εφαρμογή χωρικών φίλτρων χαμηλής διέλευσης και αντίστοιχων φίλτρων Fourier (Ζήδρου κ.ά. 1999).

Στην παρούσα μελέτη αξιοποιούνται δεδομένα των δύο πρώτων πηγών. Οι σύγ-

χρονες ηχοβολιστικές συσκευές και τα ηχοβολιστικά συστήματα μόνιμης εγκατάστασης επί του σκάφους παρέχουν υψηλής ακρίβειας και χωρικής ανάλυσης μετρήσεις βάθους. Έτσι, είναι σήμερα εφικτός ο προσδιορισμός αξιόπιστων ψηφιακών μοντέλων βαθυμετρίας (Digital Depth Models -DDMs) για την απεικόνιση του θαλάσσιου πυθμένα. Τα DDMs καλύπτουν, πέραν της παράκτιας ζώνης, την ανοικτή θάλασσα και τις ωκεάνιες εκτάσεις μέσω των δεδομένων της δορυφορικής αλτιμετρίας. Η διακριτική ικανότητά των μοντέλων αυτών είναι 1kmσε παγκόσμια κλίμακα και σε ορισμένες περιοχές υψηλότερη, όταν οι διαθέσιμες βάσεις δεδομένων προσφέρουν αυτή τη δυνατότητα. Αξίζει να επισημανθεί ότι οι εφαρμογές της δορυφορικής αλτιμετρίας διευρύνονται τις τελευταίες δεκαετίες, καλύπτοντας ευρύτατο φάσμα των γεωεπιστημών. Αυτό οφείλεται στην υψηλή ακρίβεια των δεδομένων των αντίστοιχων δορυφορικών αποστολών και στη βελτίωση των αλγορίθμων επεξεργασίας των μετρήσεων, ώστε αυτές να είναι αξιόπιστες σε συνεχώς μικρότερες αποστάσεις από την ακτή.

1. Ηχοβολίσεις, επιφάνειες αναφοράς και διορθώσεις

Οι ηχοβολιστικές συσκευές διακρίνονται ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους σε απλής δέσμης, πολλαπλής δέσμης και σε πλευρικά ηχοβολιστικά συστήματα, τα οποία συνήθως είναι συστήματα μόνιμης εγκατάστασης σε ένα υδρογραφικό σκάφος. Η μέτρηση του βάθους με την χρήση ηχοβολιστικών συσκευών βασίζεται στον προσδιορισμό του χρόνου διάδοσης των ακουστικών κυμάτων στο νερό. Συγκεκριμένα, ο προβολέας της ηχοβολιστικής συσκευής εκπέμπει ηχητικά κύματα τα οποία ανακλώνται από τον πυθμένα. Το ανακλώμενο σήμα λαμβάνεται από τον αισθητήρα της συσκευής και στη συνέχεια γίνεται ο προσδιορισμός του βάθους. Για ηχοβολιστική συσκευή απλής δέσμης το βάθος D υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση

$$D = 0.5 \cdot u_w \cdot t_w, \quad (1)$$

όπου u_w η ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο νερό και t_w ο χρόνος διάδοσής του (εκπομπή και επιστροφή στον αισθητήρα της συσκευής).

Για τον υπολογισμό των παγκόσμιων μοντέλων βάθους αξιοποιούνται σήμερα τα πολυάριθμα και υψηλής ακρίβειας δεδομένα από τις σύγχρονες αλτιμετρικές αποστολές (JASON, ENVISAT, CRYOSAT, κ.ά.). Τα δεδομένα αυτά συνδυάζονται και με ηχοβολίσεις στην παράκτια ζώνη για την αντίστοιχη βελτίωση των DDMs. Ο συνδυασμός των δορυφορικών με επίγεια δεδομένα κρίνεται ιδιαίτερα αναγκαίος σε παράκτιες περιοχές, όπως προαναφέρθηκε, όπου η δορυφορική αλτιμετρία αποδεδειγμένα παρουσιάζει προβλήματα και υστερεί σημαντικά σε ακρίβεια συγκρινόμενη με τις ηχοβολίσεις.

Οι μετρήσεις στη θάλασσα, επίγειες και δορυφορικές, συνδέονται άμεσα με τις

επιφάνειες αναφοράς που χρησιμοποιούνται στην υδρογραφία και τη θαλάσσια γεωδαισία, δηλαδή τη Μέση Στάθμη της Θάλασσας (ΜΣΘ), το γεωειδές και το Ελλειψοειδές Εκ Περιστροφής (ΕΕΠ). Η θεμελιώδης σχέση που συνδέει το ορθομετρικό υψόμετρο H , το γεωμετρικό υψόμετρο h και τις αποχές του γεωειδούς N είναι:

$$H = h - N \quad (2)$$

Στις βαθυμετρικές και εν γένει υδρογραφικές αποτυπώσεις οι μετρήσεις αναφέρονται συνήθως, μετά από αναγωγές και διορθώσεις, στη ΜΣΘ. Η επιφάνεια της ΜΣΘ δεν ταυτίζεται με την επιφάνεια του γεωειδούς. Η διαφορά μεταξύ των δύο επιφανειών είναι το σχεδόν στάσιμο μέρος της τοπογραφίας της επιφάνειας της θάλασσας (ΣΣΤΘ) ζ_c (Αραμπέλος και Τζιαβός 2007), το οποίο σε παγκόσμια κλίμακα είναι της τάξης του $\pm 1\text{m}$ (μέγιστη διακύμανση 2m). Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα γεωμετρικά υψόμετρα $h_{\Sigma\Theta}$, τα οποία προκύπτουν από την επεξεργασία μετρήσεων ενός δέκτη GNSS, αναφέρονται στη Στιγμιαία Επιφάνεια της Θάλασσας (ΣΕΘ), η εξίσωση (2) τροποποιείται ως εξής:

$$h_{\Sigma\Theta} - \zeta_t = N + \zeta_c, \quad (3)$$

όπου ζ_t είναι η δυναμική ή χρονικά μεταβαλλόμενη τοπογραφία της επιφάνειας της θάλασσας (ΔΤΘ) που οφείλεται σε παλίρροιες, μετεωρολογικές συνθήκες, ρεύματα, κυματισμούς και άλλες αιτίες. Από την εξίσωση (2), εφόσον είναι διαθέσιμες οι τιμές για τις αποχές του γεωειδούς, το ΣΣΤΘ και τα γεωμετρικά υψόμετρα της ΣΕΘ, υπολογίζεται η ΔΤΘ. Όσον αφορά τις αποχές του γεωειδούς, αυτές θα πρέπει να αναφέρονται σε ένα μέσο γεωειδές (mean geoid). Στην περίπτωση που οι αποχές προέρχονται από μοντέλο γεωειδούς ελεύθερου παλιρροιών (tide free), τότε είναι απαραίτητο να εφαρμοσθεί η ακόλουθη αναγωγή (Ekman, 1989):

$$\Delta N_{mTF} = N_m - N_{TF} = (1 + k)(9.9 - 26 \sin^2 \varphi) \cdot 100, \quad (4)$$

όπου N_m και N_{TF} είναι οι αποχές του γεωειδούς που αναφέρονται σε ένα μέσο και ένα ελεύθερου παλιρροιών μοντέλο αντιστοίχως, φ είναι το γεωδαιτικό πλάτος και k ο αριθμός Love που θεωρείται κατά προσέγγιση ίσος με 0.30.

Όταν δεν είναι διαθέσιμος εξοπλισμός για τον υπολογισμό επιμέρους δυναμικών μεταβολών (π.χ., παλιρροιογράφος για τον προσδιορισμό της επίδρασης των παλιρροιών, ισοσταθμιστής για την εκτίμηση της κατακόρυφης μεταβολής της θέσης του σκάφους), ο υπολογισμός της ΔΤΘ γίνεται μέσω της εξίσωσης (3). Στη συνέχεια διορθώνονται οι μετρήσεις που λαμβάνονται από την ηχοβολιστική συσκευή. Η διορθωμένη τιμή του βάθους D_f δίνεται τελικώς από την ακόλουθη σχέση:

$$D_f = D_m + \zeta_t, \quad (5)$$

όπου D_m είναι η μετρούμενη τιμή του βάθους.

2. Παγκόσμια μοντέλα βαθυμετρίας

Τα παγκόσμια μοντέλα βαθυμετρίας που αξιολογήθηκαν στην παρούσα εργασία μέσω συγκρίσεων με επίγειες in-situ μετρήσεις στην περιοχή εφαρμογών, είναι τα DTU10, ETOPO1, GEBCO2014 και το SRTM15-Plus v1. Μία σύντομη περιγραφή του κάθε μοντέλου δίνεται στη συνέχεια.

Το πρώτο μοντέλο που επιλέχθηκε για σύγκριση με τα δεδομένα των ηχοβολίσεων είναι το παγκόσμιο μοντέλο DTU10 (Andersen and Knudsen 2008), που υπολογίστηκε στο Εθνικό Διαστημικό Κέντρο της Δανίας (Danish National Space Center). Το μοντέλο βασίζεται κατά κύριο λόγο σε αντιστροφή δεδομένων αλτιμετρίας, στα οποία έχουν εφαρμοσθεί κατάλληλοι αλγόριθμοι εντοπισμού-πρόγνωσης (retracking algorithms) για τη βελτίωσή του πλέγματος των βαθών στις παράκτιες και νησιωτικές περιοχές. Το μοντέλο έχει ανάλυση 1 arcmin (~2km) και έγινε ευρέως διαθέσιμο το 2010.

Το δεύτερο παγκόσμιο μοντέλο βαθυμετρίας είναι το ETOPO1 (Amante and Eakins 2009), που υπολογίστηκε στο Εθνικό Κέντρο Γεωφυσικών Δεδομένων (National Geophysical Data Center) της Εθνικής Υπηρεσίας Ωκεανών και Ατμόσφαιρας των ΗΠΑ (National Oceanic and Atmospheric Administration). Το ETOPO1 αποτελεί ένα μοντέλο συνδυασμού, καθώς έχει προκύψει από δεδομένα διαφορετικών πηγών, τα οποία ομογενοποιήθηκαν ως προς το κατακόρυφο και οριζόντιο σύστημα αναφοράς τους. Ειδικότερα για την περιοχή της Μεσογείου, τα αρχικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από επίγειες μετρήσεις, ηχοβολίσεις, και το παγκόσμιο μοντέλο GEBCO. Η ανάλυση του ETOPO1 είναι ίση με 1 arcmin (~2km) και έγινε ευρέως διαθέσιμο το 2009.

Επόμενο παγκόσμιο μοντέλο που αξιολογήθηκε είναι το GEBCO2014 (<http://www.gebco.net/>), το οποίο αποτελεί την ανανεωμένη έκδοση του μοντέλου GEBCO2008. Το τελευταίο βασίζεται, για τις θαλάσσιες εκτάσεις, στο μοντέλο βαθυμετρίας SRTM30-Plusv4 και σε περισσότερες από 290 εκατομμύρια τιμές βάθους από ηχοβολίσεις. Οι τιμές αυτές αποτελούν τη συνεισφορά εθνικών και διεθνών οργανισμών για τη δημιουργία της εν λόγω βάσης βαθυμετρίας. Το GEBCO2014 περιλαμβάνει επιπλέον επίγεια δεδομένα σε σχέση με το GEBCO2008, ενώ η ανάλυσή του αυξήθηκε στα 30 arcsec (~1km). Το μοντέλο έγινε ευρέως διαθέσιμο το 2014.

Το τελευταίο παγκόσμιο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη είναι το SRTM15-Plusv1 (Becker et al. 2009, Smith and Sandwell 1997), το οποίο δημιουργήθηκε από το Ινστιτούτο Ωκεανογραφίας Scripps του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνια. Το μοντέλο συνδυάζει βάθη από αντιστροφή δεδομένων αλτιμετρίας και εφαρμογή αλγορίθμων εντοπισμού, καθώς και επίγειες μετρήσεις (ηχοβολίσεις). Η ανάλυση του SRTM15-Plusv1 είναι ίση με 15 arcsec (~0.5km) και αποτελεί, κατά τη συγγραφή της παρούσης εργασίας, το μοντέλο με την υψηλότερη ανάλυση. Θα πρέπει να τονισθεί πως η ανάλυση αυτή δεν είναι ενιαία για ολόκληρη

την υδρόσφαιρα, καθώς σε επιμέρους εκτάσεις η διακριτική του ικανότητα είναι υποδεέστερη και ακολουθεί τη διακριτική ικανότητα των αρχικά διαθέσιμων δεδομένων. Το μοντέλο έγινε ευρέως διαθέσιμο στα τέλη του 2014.

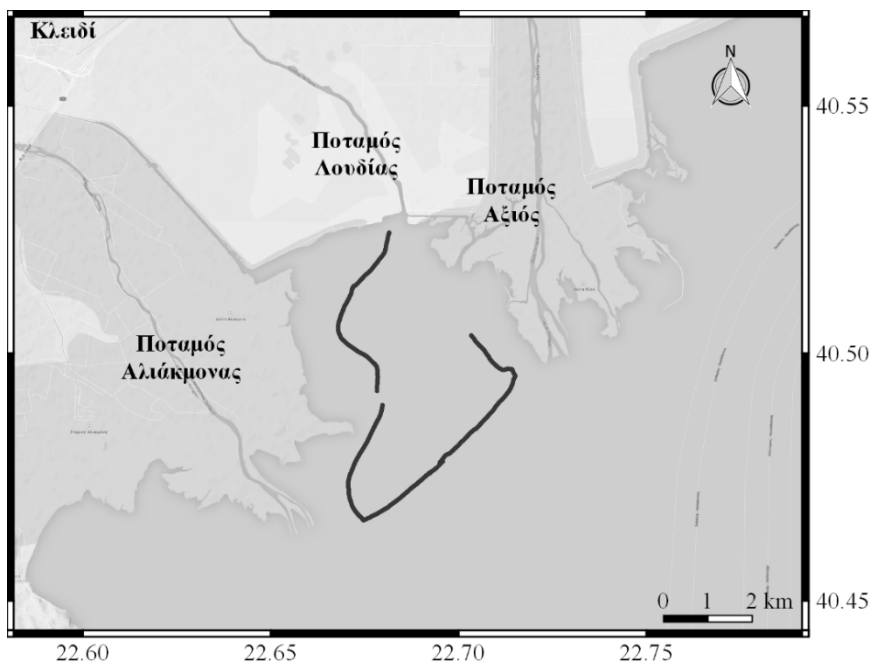
3. Εφαρμογή στην περιοχή του Δέλτα Αξιού - Λουδία - Αλιάκμονα

Η περιοχή της πρακτικής εφαρμογής της παρούσας εργασίας βρίσκεται στην περιοχή του δέλτα των ποταμών Αξιού, Λουδία και Αλιάκμονα (βλ. Σχήμα 1). Η περιοχή περιλαμβάνεται στις προστατευόμενες περιοχές της συνθήκης Ramsar λόγω της υψηλής περιβαλλοντικής της αξίας και ιδιαίτερα της υψηλής βιοποικιλότητας που την χαρακτηρίζει. Εξετάζοντας την παράκτια ζώνη, πέρα από τη σημαντική θαλάσσια χλωρίδα και πανίδα, η μορφολογία τόσο του βυθού όσο και της ακτογραμμής του δέλτα επηρεάζεται άμεσα από τις εκροές των ποταμών και γενικότερα από την ανθρώπινη δραστηριότητα. Είναι αξιοσημείωτο ότι στην ευρύτερη θαλάσσια περιοχή φιλοξενείται μεγάλος αριθμός οστρακο-καλλιέργειών και υπάρχει έντονη αλιευτική δραστηριότητα. Επομένως, η διεξαγωγή υδρογραφικών μετρήσεων και βαθυμετρικών αποτυπώσεων συνεισφέρουν στη γενικότερη μελέτη του υγροτόπου και του οικοσυστήματος και ειδικότερα στον εντοπισμό και χαρτογράφηση των μορφολογικών χαρακτηριστικών της παράκτιας ζώνης. Η επανάληψη των μετρήσεων αυτών σε τακτά χρονικά διαστήματα είναι χρήσιμη για τη διαχρονική μελέτη των μεταβολών και διεργασιών στο θαλάσσιο πυθμένα, οι οποίες οφείλονται κυρίως σε εναποθέσεις φερτών υλικών.

Η βαθυμετρική αποτύπωση πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος ECO-Satellite (Tziavos et al. 2013). Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η πορεία του υδρογραφικού σκάφους κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν δύο γεωδαιτικοί δέκτες GPS (Leica SR520), μία ηχοβολιστική συσκευή απλής δέσμης (Bruttour Cee Star) και για τον έλεγχο και καταγραφή των μετρήσεων στο πεδίο αξιοποιήθηκε το λογισμικό Sea Survey (Grigoriadis and Tziavos 2004).

Για τον προσδιορισμό της οριζόντιας θέσης του σκάφους χρησιμοποιήθηκε η σχετική κινηματική μέθοδος προσδιορισμού. Ο ένας δέκτης τοποθετήθηκε σε προκαθορισμένη θέση στην ξηρά, ενώ ο δεύτερος τοποθετήθηκε στο σκάφος. Η δορυφορική κεραία του δεύτερου δέκτη και ο αισθητήρας της ηχοβολιστικής συσκευής τοποθετήθηκαν στο επάνω και κάτω μέρος αντιστοίχως ειδικού κριώματος, που εγκαταστάθηκε στο πλαϊνό μέρος του σκάφους (βλ. Σχήμα 2).

Πριν την έναρξη των μετρήσεων έγινε η βαθμονόμηση της ηχοβολιστικής συσκευής με ταυτόχρονες ηχοβολίσεις και μετρήσεις με σταδία. Συγκεκριμένα, έγιναν με την ηχοβολιστική συσκευή μετρήσεις βαθών μεταξύ 30cm έως 2m σε μεγάλο αριθμό σημείων και καταγράφηκαν οι αντίστοιχες αναγνώσεις από τη σταδία στα ίδια σημεία. Οι διαφορές των βαθών ήταν της τάξης των 0.5cm. Σημειώνεται



Σχήμα 1: Η περιοχή μελέτης και η πορεία των επίγειων μετρήσεων (μαύρη γραμμή), υπό-βαθρο GoogleMaps.



Σχήμα 2: Το ικρίωμα με τον προβολέα της ηχοβολιστικής συσκευής και την κεραία του δέκτη GPS (αριστερά) και οι συσκευές ελέγχου (δεξιά).

ότι η ακρίβεια μέτρησης βάθους σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές της ηχοβολιστικής συσκευής είναι της τάξης του $\pm 1\text{cm}$ για ένα εύρος βαθών από 30cm έως 100m. Περισσότερες πληροφορίες για τον τρόπο εγκατάστασης των συσκευών στο υδρογραφικό σκάφος, την καταγραφή των δεδομένων και τη μεθοδολογία μέτρησης κατά την υδρογραφική αποτύπωση μπορεί να αναζητηθούν σε διάφορες εργασίες (Γρηγοριάδης 2003, Γρηγοριάδης και Τζιαβός 2005).

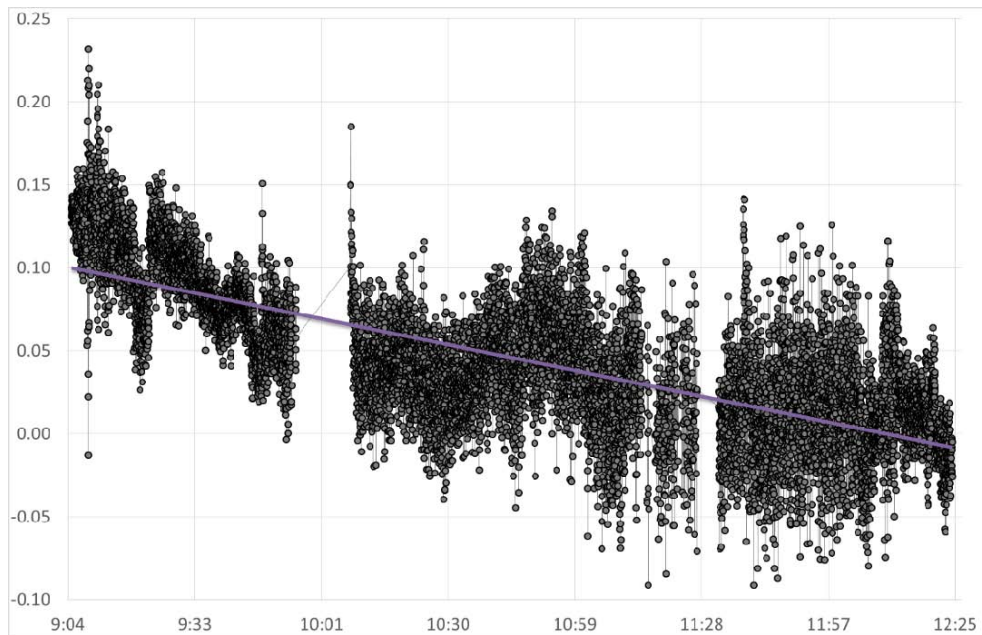
Πίνακας 1: Στατιστικά αποτελέσματα για τις αρχικές και τελικές τιμές βάθους, τις αποχές του γεωειδούς από το γεωδυναμικό μοντέλο EGM2008 για την περιοχή μελέτης και τη $\Delta T\Theta$. Μονάδες: [m]

	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
Αρχικές τιμές βαθών	11.80	8.91	0.63	24.93
Αποχές γεωειδούς (EGM2008)	40.83	0.05	40.76	40.94
$\Delta T\Theta$	0.05	0.04	-0.09	0.23
Διορθωμένες τιμές βαθών	11.85	8.89	0.62	24.91

Η διάρκεια των ηχοβολίσεων ήταν περίπου 4 ώρες και ελήφθησαν 10755 τιμές βάθους. Η εκ των υστέρων επεξεργασία των μετρήσεων (post-processing) έγινε σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο ελέγχθηκαν οι τιμές βάθους για εσφαλμένες μετρήσεις, με αποτέλεσμα να εντοπισθούν και να απορριφθούν 309 τιμές, κυρίως λόγω του φαινομένου της πολυανάκλασης (Γρηγοριάδης 2003). Στο δεύτερο στάδιο έγινε ο προσδιορισμός της θέσης του σταθμού στην ξηρά, όπου χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα που κατέγραψε ο δέκτης GPS και τα αντίστοιχα δεδομένα του μόνιμου δορυφορικού σταθμού AUT1 του Ευρωπαϊκού Δικτύου Μόνιμων Σταθμών EUREF. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η θέση του κινητού δέκτη, ο οποίος ήταν τοποθετημένος στο σκάφος, ως προς το σταθμό ξηράς. Πέραν της θέσης του σκάφους (γεωδαιτικό γεωγραφικό μήκος και πλάτος) προσδιορίστηκε και το γεωμετρικό υψόμετρο του δέκτη. Επίσης, στις θέσεις των μετρήσεων (βαθών) υπολογίστηκαν οι αποχές του γεωειδούς από το γεωδυναμικό μοντέλο EGM2008 (Pavlis et al. 2012) καθώς και το στάσιμο μέρος της τοπογραφίας της επιφάνειας της θάλασσας από το μοντέλο SMDT-MED-2014 (Rio et al. 2014). Οι αποχές του γεωειδούς, το $\Sigma T\Theta$ και το γεωμετρικό υψόμετρο χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της $\Delta T\Theta$, σύμφωνα με την εξίσωση (3), και στη συνέχεια για τον προσδιορισμό του τελικού διορθωμένου βάθους (βλ. εξίσωση 5). Τα στατιστικά αποτελέσματα των αρχικών τιμών βάθους, όπως αυτές προέκυψαν μετά από το στάδιο της επεξεργασίας, των αποχών του γεωειδούς από το μοντέλο EGM2008, των τιμών της $\Delta T\Theta$ και των τελικών τιμών βάθους δίνονται στον Πίνακα 1. Η διόρθωση λόγω του στάσιμου μέρους της τοπογραφίας της επιφάνειας της θάλασσας για την περιοχή μελέτης είναι περίπου ίση με -4cm με αμελητέες διακυμάνσεις. Ακόμη, από τη

μελέτη των στατιστικών μεγεθών προκύπτει ότι λόγω της μικρής έκτασης της περιοχής μελέτης, οι αποχές του γεωειδούς έχουν μικρή διακύμανση, η οποία είναι της τάξης των 5cm σε τιμές τυπικής απόκλισης. Επομένως, τα σφάλματα που προέρχονται από τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της ΔΤΘ, έχουν συστηματικό χαρακτήρα και κατά συνέπεια δεν επηρεάζουν τις συγκρίσεις των τιμών των ηχοβολίσεων με τις αντίστοιχες τιμές βάθους από τα παγκόσμια μοντέλα βαθυμετρίας.

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται οι τιμές της ΔΤΘ ως προς τον χρόνο καταγραφής των μετρήσεων, όπου παρατηρείται μια ωριαία μεταβολή των μέσων τιμών. Η διακύμανση των τιμών της βαθυμετρίας εξαρτάται από τις συνθήκες που παρατηρήθηκαν στο πεδίο κατά τη διάρκεια των μετρήσεων και την πορεία του σκάφους από την ακτή προς την ανοιχτή θάλασσα. Συγκεκριμένα, από τις 9:00 έως τις 11:30 το σκάφος βρισκόταν εντός του κόλπου και είχε κατεύθυνση προς την ανοιχτή θάλασσα. Από τις 11:30 και έπειτα οι μετρήσεις βαθών πραγματοποιήθηκαν στην ανοιχτή θάλασσα. Αξίζει να σημειωθεί πως ορισμένες εξάρσεις που παρατηρούνται στο γράφημα, οφείλονται κυρίως στους προκαλούμενους κυματισμούς από τα διερχόμενα αλευτικά σκάφη, καθώς, όπως ήδη προαναφέρθηκε, στην περιοχή υπάρχουν αρκετές εγκαταστάσεις καλλιέργειας μυδιών.



Σχήμα 3: Τιμές της δυναμικής τοπογραφίας της επιφάνειας της θάλασσας (κατακόρυφος άξονας) ως προς τον χρόνο μέτρησης του βάθους (οριζόντιος άξονας). Μονάδες: [m]

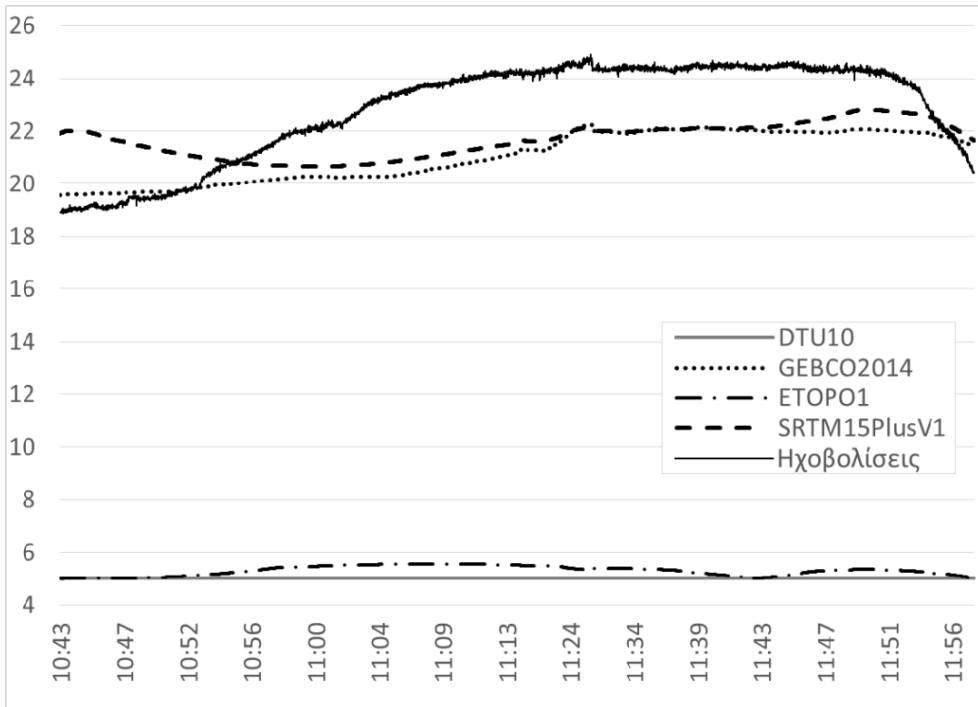
4. Συγκρίσεις και σχολιασμός

Στην ενότητα αυτή δίνονται τα αποτελέσματα των συγκρίσεων μεταξύ των παγκόσμιων μοντέλων και των επίγειων μετρήσεων (ηχοβολίσεων) στην περιοχή μελέτης. Οι συγκρίσεις έγιναν με τη μέθοδο της διγραμμικής παρεμβολής, κατά την εφαρμογή της οποίας έγινε πρόγνωση από τα παγκόσμια μοντέλα στη θέση των σημειακών τιμών βάθους των μετρήσεων. Τα στατιστικά μεγέθη των διαφορών που υπολογίστηκαν δίνονται στον Πίνακα 2. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονισθεί πως οι συγκρίσεις υπόκεινται σε δύο περιορισμούς, τη διακριτική ικανότητα των μοντέλων και την έκταση που καλύπτουν οι επίγειες μετρήσεις. Συνεπώς, οι διαφορές που παρουσιάζονται αποσκοπούν στη διερεύνηση της συμπεριφοράς των παγκόσμιων μοντέλων βαθυμετρίας στην παράκτια περιοχή μελέτης, η οποία είναι πρακτικά η ζώνη μετάβασης από τη θάλασσα στην ξηρά. Στη ζώνη αυτή επικεντρώνεται σήμερα και το ερευνητικό ενδιαφέρον όσων ασχολούνται σήμερα με τις μετρήσεις της δορυφορικής αλτιμετρίας. Η έρευνα αυτή αποσκοπεί στη βελτίωση των αλγορίθμων εντοπισμού προκειμένου να επιτευχθούν ασφαλέστερες δορυφορικές μετρήσεις κατά την προσέγγιση του δορυφορικού ίχνους στις ηπειρωτικές εκτάσεις.

Πίνακας 2: Στατιστικά αποτελέσματα των διαφορών μεταξύ των παγκόσμιων μοντέλων βαθυμετρίας και των ηχοβολίσεων στην περιοχή μελέτης. Μονάδες: [m]

Μοντέλο (ανάλυση)	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
DTU10 (2km x 2km)	7.11	8.72	-4.38	19.91
ETOPO1 (2km x 2km)	7.70	8.00	-2.59	19.59
GEBCO2014 (1km x 1km)	-2.28	5.45	-17.07	3.41
SRTM15-Plus v1 (0.5km x 0.5km)	-2.39	5.51	-16.83	2.95

Από τον Πίνακα 2 προκύπτει πως τα μοντέλα GEBCO2014 και SRTM15-Plusv1 παρουσιάζουν μικρότερες διαφορές με τις ηχοβολίσεις σε σχέση με τα DTU10 και ETOPO1 σε όρους τυπικής απόκλισης. Το ίδιο ισχύει για τον μέσο όρο και το εύρος των διαφορών. Από τα αποτελέσματα μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως τα πιο πρόσφατα μοντέλα, GEBCO2014 και SRTM15-Plusv1, έχουν καλύτερη συμβατότητα με τις in-situ μετρήσεις στην περιοχή μελέτης. Βέβαια, τα μοντέλα DTU10 και ETOPO1 έχουν μικρότερη ανάλυση. Για τον λόγο αυτόν επιλέχθηκε να μελετηθούν τα βάθη και κατά μήκος ενός προφίλ των μετρήσεων, προκειμένου να διερευνηθεί αν το προαναφερθέν συμπέρασμα οφείλεται στην χωρική ανάλυση των μοντέλων. Το συγκεκριμένο προφίλ αρχίζει από το νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής με κατεύθυνση βορειοανατολικά (βλ. Σχήμα 1) και το μεγαλύτερο μέρος του βρίσκεται στην ανοιχτή θάλασσα. Το τμήμα αυτό των μετρήσεων καλύφθηκε



Σχήμα 4: Προφίλ βάθους όπως προκύπτει για τα μοντέλα DTU10, GEBCO2014, ETOPO1 και SRTM15-PlusV1 από διγραμμική παρεμβολή στις θέσεις των ηχοβολίσεων. Στον οριζόντιο άξονα δίνεται ο χρόνος, ενώ στον κατακόρυφο οι τιμές του βάθους σε [m].

σε περίπου 1 ώρα και 15 λεπτά, ενώ το μήκος του είναι σχεδόν 6.4 km. Στο Σχήμα 4 δίνεται το προφίλ των επίγειων μετρήσεων ως προς το χρόνο που πραγματοποιήθηκαν σε συνδυασμό με τις τιμές βάθους που προέκυψαν με παρεμβολή από τα μοντέλα. Από τη μελέτη του σχήματος διαπιστώνεται καταρχήν πως τα δύο μοντέλα DTU10 και ETOPO1 παρουσιάζουν διαφορές της τάξης των 14 μέτρων με τις ηχοβολίσεις. Από το μέγεθος της διακύμανσης προκύπτει ότι τα δύο αυτά μοντέλα είναι εντελώς ασύμβατα με τις in-situ μετρήσεις. Αντίθετα, τα μοντέλα GEBCO2014 και SRTM15-Plusv1 είναι συμβατά με τις επίγειες μετρήσεις, αλλά παρατηρείται πως η ανάλυσή τους δεν είναι αρκετή για να αποδώσουν επαρκώς τη μορφολογία του θαλάσσιου πυθμένα. Το συμπέρασμα αυτό ισχυροποιείται και από τις τιμές βαθών στα σημεία τομής του γραφήματος βάθους των δύο μοντέλων με το αντίστοιχο γράφημα των ηχοβολίσεων (Σχήμα 4). Τα δύο αυτά σημεία εντοπίζονται στο ίδιο βάθος, των 21m περίπου, στις χρονικές στιγμές παρατήρησης 10:55 και 11:55.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων των συγκρίσεων προκύπτει πως είναι εφι-

κτική η μορφολογική απεικόνιση του θαλάσσιου πυθμένα στην παράκτια ζώνη από δεδομένα δορυφορικής αλτιμετρίας σε συνδυασμό με επίγειες μετρήσεις (ηχοβολίσεις). Απαραίτητες προϋποθέσεις για την επίτευξη του στόχου αυτού είναι

- (α) η υψηλή χωρική ανάλυση των μοντέλων βαθυμετρίας (καλύτερη από 0.5km) και
- (β) η χρησιμοποίηση in-situ μετρήσεων που να καλύπτουν όσο το δυνατόν εκτενέστερες περιοχές.

Βιβλιογραφία

- Andersen, O.B. and Knudsen, P., 2008. *The DNSC08 global mean sea surface and bathymetry*. Presented at EGU-2008, Vienna, Austria, April 2008.
- Amante, C. and Eakins, B.W., 2009. *ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model Procedures, Data Sources and Analysis*. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. National Geophysical Data Center, NOAA, doi: 10.7289V5C8276M.
- Becker, J.J. et al., 2009. *Global Bathymetry and Elevation Data at 30 Arc Seconds Resolution: SRTM30_PLUS*. MarGeod, 32(4): 355-371.
- Ekman, M., 1989. *Impacts of geodynamic phenomena on systems for height and gravity*. BullGeod, 63: 281-296.
- Grigoriadis, V.N. and Tziavos, I.N., 2004. *Development of a software package for the automation of measurements in bathymetric mapping*. Presented at the FIG Working Week 2004 on “The Olympic Spirit in Surveying”, Athens, May 22-27 (e-proceedings).
- Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C., Factor, J.K., 2012. *The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)*. J Geophys Res, 117(B4), B04406.
- Rio, M.-H., Pascual, A., Poulain, P.-M., Menna, M., Barceló, B., Tintoré, J., 2014. *Computation of a new mean dynamic topography for the Mediterranean Sea from model outputs, altimeter measurements and oceanographic in situ data*. Ocean Science, 10: 731-744.
- Sandwell, D.T. and Smith, W.H., 2001. *Bathymetric estimation*. In: Fu, L.L. and Cazenave, A. (Editors), *Satellite Altimetry and Earth Sciences, a Handbook of Methods and Applications*, Academic press, San Diego, pp. 44-457.
- Smith, W.H.F. and Sandwell, D.T., 1997. *Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings*. Science, 277: 1957-1962.
- Tziavos, I.N., et al., 2013. *Development of a WebGIS-based monitoring and environmental protection and preservation system for the Black Sea: The ECO-Satellite project*. Presented at the 2013 EGU General Assembly, Session OS2.2 “Advances in understanding of the multi-disciplinary dynamics of the Southern European Seas (Mediterranean and Black Sea)”, April 7th-12th, Vienna, Austria.

- Αραμπέλος, Δ. και Τζιαβός, Η.Ν., 2007. *Εισαγωγή στο πεδίο βαρύτητας της Γης*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 368 σελ.
- Γρηγοριάδης, Β.Ν., 2003. *Αυτοματοποίηση στον υδρογραφικό εντοπισμό οριζόντιας θέσης και βάθους με συνδυασμό GPS και ηχοβολιστικής συσκευής*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τομέας Γεωδαισίας και Τοπογραφίας, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Γρηγοριάδης, Β.Ν. και Τζιαβός, Η.Ν., 2005. *Μέθοδοι και όργανα βαθυμετρικών αποτυπώσεων*. Πρακτικά συνεδρίου “Η Εξέλιξη των οργάνων, των μεθόδων και των συστημάτων μετρήσεων των επιστημών της αποτύπωσης στην Ελλάδα”, Θεσσαλονίκη, 15-16 Απριλίου 2005, εκδόσεις Ζήτη, σελ. 255-267.
- Ζήδρου, Ε., Καρκάνη, Ζ., Ματζίρη, Μ., Παπαδοπούλου, Μ., Τζιαβός, Η.Ν., Τσακίρη-Στρατή, Μ., Χατζηγάκη, Σ., 1999. *Πολυφασματική βαθυμετρία με συνδυασμό δεδομένων από ηχοβολία και εντοπισμό με το σύστημα GPS*. Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, Ι, τεύχ. 2: 99-110.
- Τζιαβός, Η.Ν., 2002. *Υδρογραφία και Θαλάσσια Γεωδαισία*. Διδακτικές Σημειώσεις, 200 σελ.