

Εφαρμογή και Αξιολόγηση Μεθόδων Δορυφορικής Βαθυμετρίας (Satellite-derived Bathymetry) στη Λίμνη Τριχωνίδα με Δεδομένα Sentinel-2

ΠΕΡΙΒΟΛΙΩΤΗ Τ.^{1,*}, ΖΑΧΟΠΟΥΛΟΣ Κ.¹, ΑΠΟΣΤΟΛΑΚΗΣ Α.¹ και ΜΟΥΡΑΤΙΔΗΣ Α.²

¹Μουσείο Γουλανδρή Φυσικής Ιστορίας Ελληνικό Κέντρο Βιοτόπων / Υγροτόπων (ΕΚΒΥ), 14ο χλμ. Θεσσαλονίκης – Μηχανίωνας, 570 01 Θέρμη, Τ.Θ. 60394

²Κέντρο Διεπιστημονικής Έρευνας και Καινοτομίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 10ο χλμ. Θεσσαλονίκης – Θέρμης, 570 01

*Υπεύθυνος για την αλληλογραφία συγγραφέας / E-mail: triaperi@ekby.gr

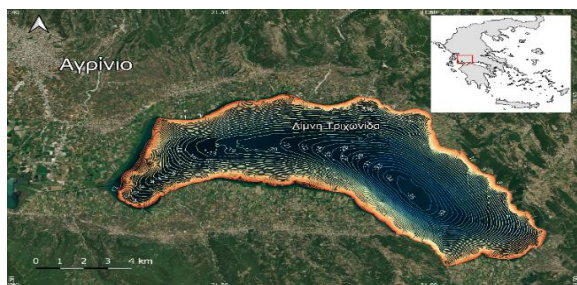
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γνώση της βαθυμετρίας μιας λίμνης, αποτελεί βασικό εργαλείο για την κατανόηση, διαχείριση και προστασία των λιμναίων οικοσυστημάτων. Η πιο αξιόπιστη μέθοδος βαθυμετρίας είναι με την χρήση ηχοβολιστικών συστημάτων (sonars) (Víaña-Borja et al., 2023). Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι η δυσκολία εφαρμογής σε μεγάλη κλίμακα, καθώς απαιτείται χρόνος και εξειδικευμένο προσωπικό. Μια ακόμα εναλλακτική εφαρμογή για την μέτρηση βάθους είναι η δορυφορική βαθυμετρία (SDB), η οποία προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς επιτρέπει τη χαμηλού κόστους, γρήγορη, επαναλαμβανόμενη αποτύπωση μεγάλων περιοχών, ακόμα και σε μη προσβάσιμες περιοχές (Xie et al., 2023). Ο συνδυασμός δορυφορικών και επιτόπιων δεδομένων μεγιστοποιεί την αποτελεσματικότητά καθώς τα δορυφορικά παρέχουν εύρος και συχνότητα, ενώ τα δεδομένα πεδίου προσφέρουν ακρίβεια και επικύρωση.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη και η αξιολόγηση τριών διαφορετικών μοντέλων δορυφορικής βαθυμετρίας, βασισμένων σε δεδομένα Sentinel-2. Συγκεκριμένα, εφαρμόζονται οι μέθοδοι των Stumpf, Lyzenga και Log-Linear Ratio Model (LRM) για την εκτίμηση του βάθους της υδάτινης στήλης. Τα αποτελέσματα των μοντέλων συγκρίνονται με Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, το οποίο προέκυψε από μετρήσεις πεδίου με τη χρήση ηχοβολιστικού συστήματος. Η παρούσα εργασία στοχεύει στην ανάδειξη των δυνατοτήτων των δορυφορικών δεδομένων ως εργαλείο για την βαθυμετρική αποτύπωση των ρηχών υδάτων.

ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η λίμνη Τριχωνίδα (38°34'21"N 21°33'09"E) είναι η μεγαλύτερη σε έκταση φυσική λίμνη της Ελλάδας, η οποία βρίσκεται στην Αιτωλοακαρνανία, στη δυτική Στερεά Ελλάδα (Σχήμα 1). Η έκταση της υπολογίζεται περίπου στα 98,6 km² (μήκος έως 19 km και πλάτος 6 km) και μέγιστο βάθος στα 52 m (Apostolakis and Demertzi, 2022; Perivolioti et al., 2025).



Σχήμα 1. Περιοχή μελέτης-Ισοβαθείς της λίμνης Τριχωνίδας. (Πηγή: Ελληνικό Κέντρο Βιοτόπων Υγροτόπων-ΕΚΒΥ)

ΜΕΘΟΔΟΣ

Συλλογή βαθυμετρικών δεδομένων

Για την αξιολόγηση της βαθυμετρίας από δεδομένα Sentinel-2 χρησιμοποιήθηκε το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους της λίμνης Τριχωνίδας, το οποίο αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του Εθνικού Δικτύου Παρακολούθησης Υδάτων, από το Ελληνικό Κέντρο Βιοτόπων-Υγροτόπων (ΕΚΒΥ) (Apostolakis and Demertzi, 2022). Η παραγωγή του βασίστηκε σε συνδυασμό μεθόδων, οι οποίες περιλαμβάνουν: (i) βαθυμετρικές αποτυπώσεις με χρήση ηχοβολιστικού συστήματος (sonar) και GPS, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν τον Ιούλιο, 2021 (ii) ψηφιοποίηση ισοϋψών καμπυλών και υψομετρικών σημείων, με βάση τοπογραφικούς χάρτες κλίμακας 1:5000, και (iii) παρεμβολή, με τη χρήση του εργαλείου "Topo to Raster" (ESRI ArcGIS έκδοση 10.8.2) των παραπάνω δεδομένων. Περισσότερες πληροφορίες είναι διαθέσιμες από τους Perivolioti et al. (2025).

Εξαγωγή βαθυμετρίας από δεδομένα Sentinel-2

Για την εφαρμογή των μεθόδων δορυφορικής βαθυμετρίας (SDB), χρησιμοποιήθηκε δορυφορική εικόνα Sentinel-2 (επίπεδο επεξεργασίας Level-1C), η οποία διατίθεται από την πλατφόρμα Copernicus Data Space Ecosystem [https://dataspace.copernicus.eu/]. Για την επιλογή του προϊόντος λήφθηκαν υπόψη τα εξής κριτήρια: 1) πλήρης κάλυψη της λίμνης Τριχωνίδας, 2) μηδενικό ποσοστό νεφοκάλυψης πάνω από την περιοχή μελέτης και 3) η ημερομηνία λήψης δεν έχει μεγάλη χρονική απόκλιση (είναι εντός του ίδιου μήνα - 12/07/2021) από τις μετρήσεις πεδίου. Έγινε ατμοσφαιρική διόρθωση της εικόνας με τη μέθοδο Acolite DSF (Vanhellemont and Ruddick, 2018; Vanhellemont, 2019; Vanhellemont, 2019b) η οποία έχει βρεθεί να είναι αποτελεσματική μέθοδος για εφαρμογές βαθυμετρίας (Vrdoljak and Kilić Ramuković, 2022). Η εικόνα περικόπηκε (subset) βάσει του ορίου της ακτογραμμής της λίμνης, λαμβάνοντας υπόψη τη μέση στάθμη της λίμνης τον Ιούλιο 2021 (~16 m).

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε κάρναβος σημείων (grid) με χωρική ανάλυση 300 m. Για κάθε σημείο εξήχθησαν οι τιμές ανακλαστικότητας από τα ατμοσφαιρικά διορθωμένα κανάλια της εικόνας, καθώς και οι αντίστοιχες τιμές βάθους από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους που παρήχθη από τις ηχοβολιστικές μετρήσεις. Δεδομένου του βάθους δίσκου Secchi (~8 m) την περίοδο των μετρήσεων, συμπεριλήφθησαν μόνο σημεία με βάθος έως 18 m, δηλαδή εντός των ορίων της εύφωτης ζώνης, τόσο για την εφαρμογή όσο και για την αξιολόγηση των μεθόδων SDB. Τρεις κοινές μέθοδοι δορυφορικής βαθυμετρίας χρησιμοποιήθηκαν: το μοντέλο Stumpf (Stumpf et al., 2003), το μοντέλο Lyzenga

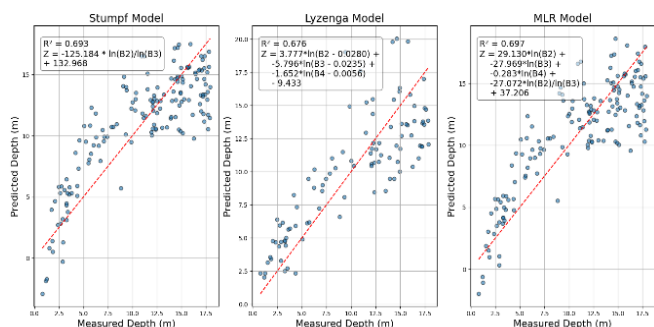
(Lyzenga et al., 2006), και η Πολλαπλή Γραμμική Παλινδρόμηση (MLR) (Yang et al., 2022).

Αξιολόγηση Ακρίβειας

Για την αξιολόγηση των μοντέλων δορυφορικής βαθυμετρίας υπολογίσθηκε η τυπική απόκλιση (σ), το Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (MAE), Μέσο Σφάλμα και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS error).

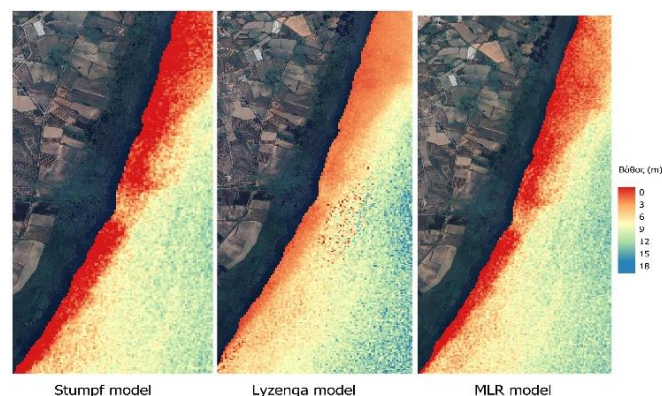
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το Σχήμα 2 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της παλινδρόμησης και τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της βαθυμετρίας από δορυφορικά δεδομένα. Όλα τα μοντέλα παρουσίασαν υψηλές τιμές R^2 (≈ 0.67 - 0.69).

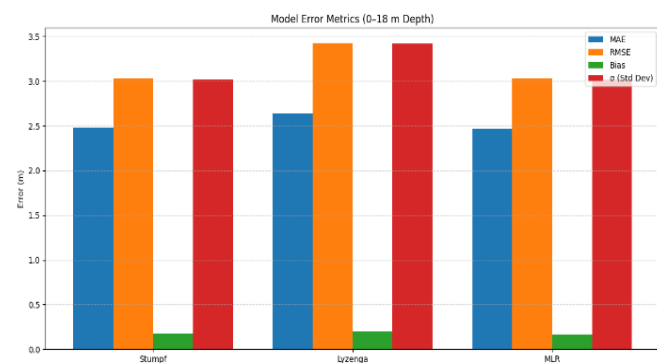


Σχήμα 2. Γραμμική παλινδρόμηση για την εκτίμηση των μοντέλων δορυφορικής βαθυμετρίας Stumpf, Lyzenga και MLR.

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η δορυφορική βαθυμετρική αποτύπωση ενός τμήματος της λίμνης Τριχωνίδας, ενώ η αξιολόγηση των μοντέλων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.



Σχήμα 3. Βαθυμετρική αποτύπωση ενός τμήματος της λίμνης Τριχωνίδας.



Σχήμα 4. Αξιολόγηση των τριών μεθόδων SDB.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μέθοδος Lyzenga εμφανίζει τα μεγαλύτερα σφάλματα, ενώ οι Stumpf και MLR έχουν παρόμοια απόδοση. Η δορυφορική βαθυμετρία μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο, αλλά η εφαρμογή της θα πρέπει να αξιολογείται σε περιπτώσεις που απαιτούν μεγάλη ακρίβεια.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Επιχορήγηση του Μουσείου Γουλανδρή Φυσικής Ιστορίας - Ελληνικό Κέντρο Βιοτόπων-Υδροτόπων για την υλοποίηση του έργου Λειτουργία εθνικού δικτύου παρακολούθησης των υδάτων των λιμνών της Ελλάδας (Οδηγία 2000/60/ΕΚ) 2024-2029. Στις εργασίες πεδίου για τη βαθυμετρική αποτύπωση της Τριχωνίδας συμμετείχαν οι Κ. Δεμερτζή και Δ. Παπαδήμος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Apostolakis A.P.D. and Demertzi K. (2021). Isobaths of Lake Trichonida. Greek Biotope Wetland Centre EKBV.
- Lyzenga D.R. et al. (2006). Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 44(8), 2251–2259.
- Perivolioti T.M. et al. (2025). Bathymetry and Morphometric Analysis of Greek Natural Lakes through a hybrid GIS-acoustic methodology. Inland Waters, 1-45.
- Stumpf R.P. et al. (2003). Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. Limnol. Oceanogr. 48(1), 547–556.
- Vanhellemont Q. (2019a). Adaptation of the dark spectrum fitting atmospheric correction for aquatic applications of the Landsat and Sentinel-2 archives. Remote Sens. Environ. 225, 175–192.
- Vanhellemont Q. (2019b). Daily metre-scale mapping of water turbidity using CubeSat imagery. Remote Sens. 11(18), 2159.
- Vanhellemont Q. and Ruddick K. (2018). Atmospheric correction of metre-scale optical satellite data for inland and coastal water applications. Remote Sens. Environ. 216, 586–597.
- Viaña-Borja S.P. et al. (2023). Semi-automated bathymetry using Sentinel-2 for coastal monitoring in the Western Mediterranean. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 120, 103328.
- Vrdoljak L. and Kilić Pamuković J. (2022). Assessment of atmospheric correction processors and spectral bands for satellite-derived bathymetry using Sentinel-2 data in the middle Adriatic. Hydrology 9(12), 215.
- Xie Y. et al. (2023). Auto-CM: Unsupervised deep learning for satellite imagery composition and cloud masking using spatio-temporal dynamics. Proc. AAAI Conf. Artif. Intell. 37(12), 14575–14583.
- Yang H. et al. (2022). Bathymetric inversion and mapping of two shallow lakes using Sentinel-2 imagery and bathymetry data in the central Tibetan Plateau. IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens. 15, 4279–4296.