ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

Η ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΤΑΜΙΕΤΗΡΑ ΤΗΣ ΥΛΙΚΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Νικόλαος Γ. Γουργουλέτης

Επιβλέπων: Ε. Μπαλτάς, Καθηγητής ΕΜΠ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

Αθήνα, Ιούλιος 2022

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

Η ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΤΑΜΙΕΤΗΡΑ ΤΗΣ ΥΛΙΚΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Νικόλαος Γ. Γουργουλέτης

Επιβλέπων: Ε. Μπαλτάς, Καθηγητής ΕΜΠ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

Αθήνα, Ιούλιος 2022

Copyright © Νικόλαος Γουργουλέτης

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Οι υδατικοί πόροι αντιμετωπίζουν διαρκώς αυξανόμενες ποσοτικές και ποιοτικές πιέσεις, οι οποίες οφείλονται σε ανθρωπογενή αίτια καθώς και την υπό εξέλιξη κλιματική αλλαγή. Η παρακολούθηση των ταμιευτήρων είναι ζωτικής σημασίας για την αειφόρο διαχείριση των αποθεμάτων και την ασφάλεια έναντι της λειψυδρίας και ακραίων φαινομένων, όπως οι ξηρασίες. Η παρούσα εργασία, βασιζόμενη στις δορυφορικές αποστολές Sentinel-2 και 3, επιδιώκει να παρουσιάσει την αποτελεσματικότητα του συνδυασμού εκτιμήσεων της επιφάνειας και της στάθμης του νερού στον ταμιευτήρα της Υλίκης, για την εκτίμηση της μεταβολής του αποθηκευμένου όγκου νερού. Ο εν λόγω ταμιευτήρας, πρόκειται για έναν από τους λίγους επαρκώς παρακολουθούμενους ταμιευτήρες στην Ελλάδα, επιτρέποντας μία ευθεία σύγκριση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθοδολογίας με δεδομένα επίγειων παρατηρήσεων. Επίσης, η παρούσα έρευνα προτείνει το συνδυασμό των εκτιμήσεων επιφάνειας και στάθμης εντός εβδομαδιαίου χρονικού εύρους, εν αντιθέσει με μικρότερης διάρκειας χρονικά εύρη. Τα αποτελέσματα επιδεικνύουν την υψηλή απόδοση της δορυφορικής τηλεπισκόπησης στην παραγωγή εμπειρικών σχέσεων στάθμης – επιφάνειας – χωρητικότητας (Σ-Ε-Χ). Η συσχέτιση των επίγειων παρατηρήσεων χωρητικότητας με την εκτιμώμενη στάθμη και επιφάνεια νερού υπολογίστηκε σε 98,81% και 99,27% αντίστοιχα. Η μεταβολή της χωρητικότητας του ταμιευτήρα εκτιμήθηκε και συγκρίθηκε με την επίγεια παρατηρημένη χρονοσειρά της χωρητικότητας, οδηγώντας σε σφάλμα RMSE ίσο με το 1,28% της μέγιστης χωρητικότητας του ταμιευτήρα και σε συσχέτιση ίση με 96,14%. Τέλος, βρέθηκε πως η εμπειρική σχέση στάθμης – χωρητικότητας υποεκτιμά τη χωρητικότητα, ενώ η εμπειρική σχέση επιφάνειας – χωρητικότητας υπερεκτιμά τη χωρητικότητα, σε σχέση με μία υφιστάμενη καμπύλη Σ-Ε-Χ.

Λέξεις κλειδιά: Χωρητικότητα ταμιευτήρα, Τηλεπισκόπηση, Δορυφορική παρακολούθηση στάθμης ταμιευτήρα, Δορυφορική παρακολούθηση επιφάνειας ταμιευτήρα.

Abstract

Inland water resources are facing increasing quantitative and qualitative pressures, deriving from anthropogenic causes and the ongoing climate change. The monitoring of reservoirs is essential for sustainable management and preparation against water scarcity and extreme events, such as droughts. This research, relying on the Sentinel-2 and 3 missions, attempts to demonstrate the efficiency of combining remotely sensed water level and water area estimations, in order to estimate the water storage variation of Yliki reservoir. The case study is conducted in one of the few sufficiently monitored reservoirs in Greece, enabling a direct comparison of the proposed methodology results with in situ observations. Moreover, this research work proposes a weekly time interval for pairing level and area estimations, instead of shorter time intervals. The results strongly demonstrate the efficiency of remote sensing in the production of empirical level–area–storage (L–A–S) curves. Correlation to in situ monitored storage- and satellite-derived water level, area stand for 98.81% and 99.27% respectively. Water storage variation is estimated and compared to the observed time series, resulting in an RMSE of 1.28% of the reservoir capacity and a correlation of 96.14%. The empirical L–S relationship underestimates storage, while the A–S relationship overestimates storage when compared to the existing L–A–S curve.

Keywords: reservoir storage; remote sensing; satellite water level monitoring; water area.

Extended Abstract

Natural lakes and manmade reservoirs constitute a crucial part of the Earth's water cycle. They contribute to the fulfillment of the human water demand and they provide important ecosystem services. Moreover, they stand for a sensitive proxy of climate change and human impacts on the natural environment, while simultaneously regulate normal and extreme water flows. Climate change is expected to intensify the lake-system related pressures. Thus, there are expected alternations of the lake systems water cycle health (Busker et al., 2018; Crétaux et al., 2016; Frappart et al., 2021).

Greece is expected to receive significant augmentations of climate related pressures to inland water. Moreover, the past decades significant land use changes have occurred, adding more pressures to water resources. Therefore, a negative combination is expected in greek inland waters state, urging for sustainable water resources management. A vital aspect of sustainable water resources management is considered the proper monitoring of water bodies. The previous decades, along with in-situ monitoring and hydrologic modelling, a new monitoring approach has developed; remote sensing techniques. The present research, identifying the gap of remote sensing applications in greek water bodies, attempts to demonstrate the high efficiency of satellite remote sensing over the Yliki reservoir for the monitoring of the quantitative characteristics of the reservoirs. Yliki reservoir is the outflow point of the 1850km^2 Boeotikos Kifisos River Basin and is presented in Figure 1.

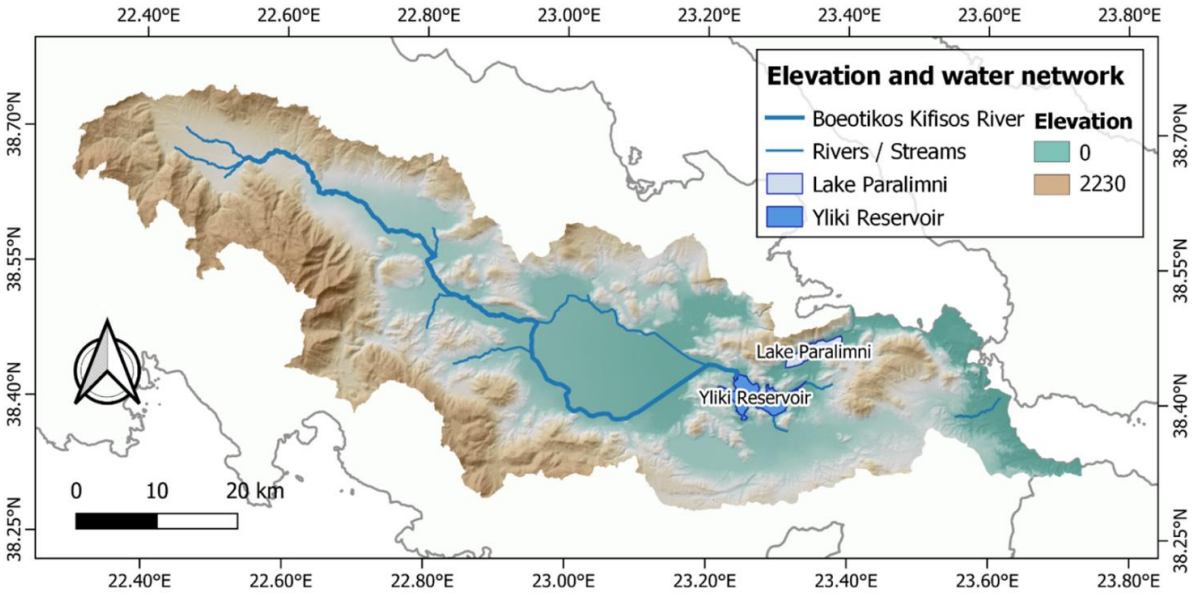


Figure 1. Boeotikos Kifissos River Basin District river network, Yliki reservoir, and Lake Paralimni with a digital elevation model background.

For this purpose, the Normalized Difference Water Index (NDWI) is applied for the extraction of the reservoir's water extent, using Sentinel-2 data. Moreover, Sentinel-3 Synthetic Aperture Radar Altimeter instrument (SRAL) measurement are utilized for the estimation of the reservoir's water level. Yliki reservoir is selected as the present case study since it its monitored by its operator and daily measurements of the observed storage are available online. The present research, combines the satellite derived estimations of water level and water area in order to estimate the storage variation of the reservoir, testing four suggested methodologies (Baup et al., 2014; Busker et al., 2018; Crétaux et al., 2016; Lin et al., 2020). The approaches are validated with the comparison between the satellite derived and the observed by the operator storage variation.

The NDWI is calculated, taking advantage of the minimum threshold approach (Sekertekin, 2020) to distinguish water and non-water pixels. Sixty-nine high resolution images (10m x 10m) were used covering the period between March 2016 and September 2021, with an average monthly time step. During the abovementioned period a maximum water area was estimated at 23.14km^2 corresponding to observed storage of 568.93hm^3, while minimum water area was found 18.21km^2 corresponding to observed storage of 344.47hm^3, as depicted in Figure 2. Overall, during the abovementioned period, the average water area and storage were calculated at 20.94km^2 and 469.39hm^3 respectively. The proposed methodology's performance was determined by a high correlation coefficient of 0.99.

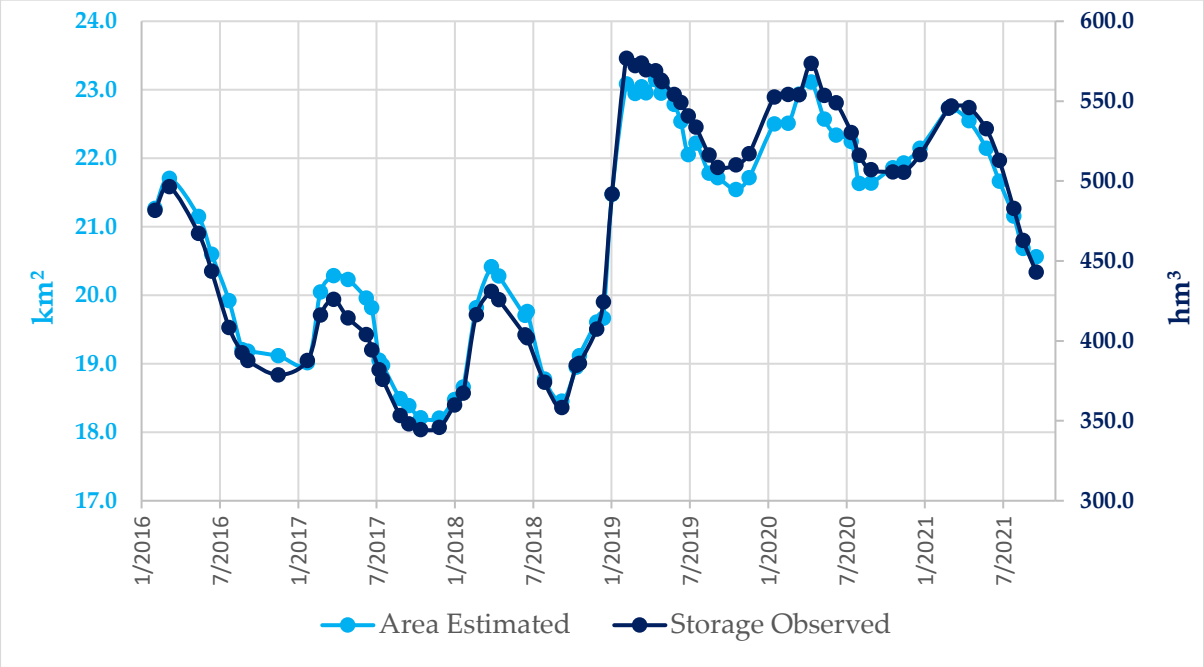


Figure 2. Sentinel-2-derived Yliki reservoir water area and observed storage time series.

Regarding the reservoir's water area and storage relationship, a linear expression was found to be suitable fitting. The highest filling period was found to be during the hydrologic year 2019 with a storage increase of 218.53 hm^3 was observed, corresponding to a water area increase of 4.64 km^2 and to an average filling rate of 1.477 hm^3/d and of 0.031 km^2/d. The highest emptying was found to be during the hydrologic year 2021 with a storage decrease of 104.04 hm^3 was observed, corresponding to a water area decrease of 2.19 km^2 and an average emptying rate of 0.534 hm^3/d and of 0.012 km^2/d.

Regarding consecutive measurements-derived filling and emptying maximum rates, the following were identified. From December 2018 and January 2019, Yliki stored 67.6 hm^3 and the reservoir area was increased by 1.81 km^2, resulting in a filling rate of 3.38 hm^3/d and 0.091 km^2/d. The highest emptying rate was identified between July and August 2021, when Yliki outpoured 19.99 hm^3 and water area was decreased by 0.47 km^2, corresponding to an emptying rate of 0.91 hm^3/d and 0.022 km^2/d.

The water level is calculated as the arithmetic mean of the Sentinel-3 measurements over the temporally closest extracted water perimeter. Thirty-seven measurements were used covering the period between November 2018 and September 2021, with an average monthly time step. During the abovementioned period a maximum water level was estimated at 80.1m corresponding to observed storage of 571.5hm^3, while minimum water level was found 71.3m corresponding to observed storage of 385.9hm^3, as depicted in Figure 3. Overall, during the abovementioned period, the average water

level and storage were calculated at 77.4m and 518.7hm^3 respectively. The proposed methodology's performance was determined by a high correlation coefficient of 0.99.

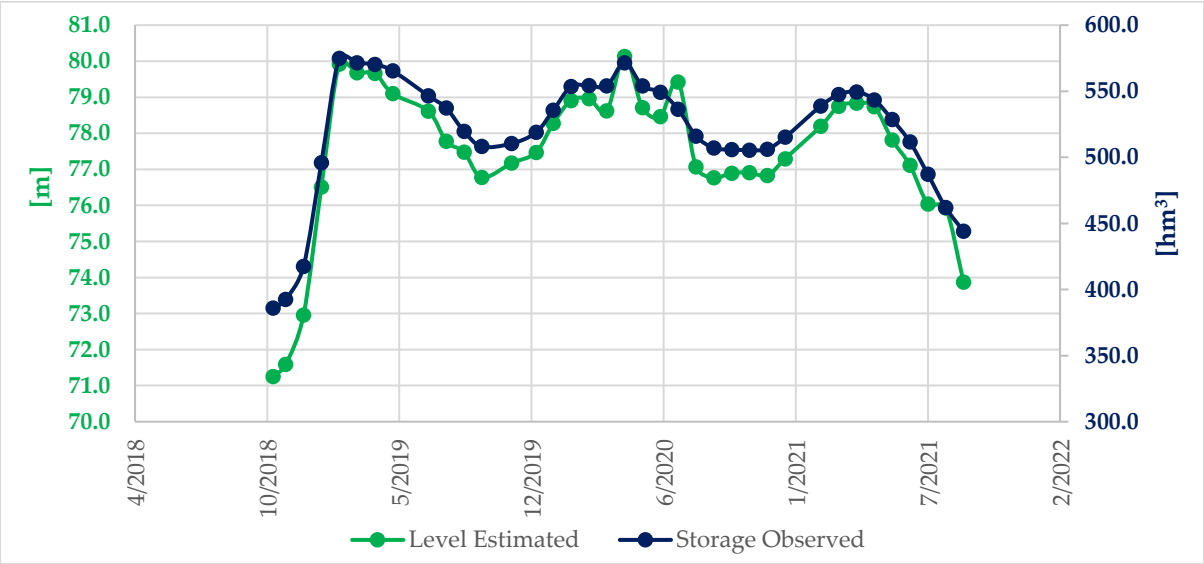


Figure 3. Sentinel-3-derived Yliki reservoir water level and observed storage time series.

Regarding the reservoir's water level and storage relationship, the linear expression was found to be the most fitting. The highest filling period was found to be during the hydrologic year 2020, with a storage increase of 63.3 hm^3 was observed, corresponding to a water level increase of 3.4 m and to an average filling rate of 0.293 hm^3/d and of 0.016 m/d. The highest emptying was found to be during the hydrologic year 2021 with a storage decrease of 105.5 hm^3 was observed, corresponding to a water area decrease of 5.0 m and an average emptying rate of 0.652 hm^3/d and of 0.031 m/d.

Afterwards, water level and water area estimations are combined in order to calculate the water storage variation of the Yliki reservoir. Towards this aim, several time intervals are tested in order to achieve a high number of available level and area pairs with a low error margin. Analyzing the temporal variability of the reservoir storage timeseries, a seven-day time interval is chosen. The abovementioned 7-day time interval grants 40% more data pairs compared with a five-day interval, which is slightly more accurate.

Concluding to the seven-day time interval, twenty-eight pairs of water level and area are derived and four different methodologies are tested for estimating the reservoir's storage variation. The approach proposed by Y. Lin et al. (2020) was found to perform the best, showing a RMSE of 7.69hm^3 (1.28% of reservoir capacity) and a correlation coefficient of 0.96. The comparison of the estimated and observed storage observation of the selected approach is presented in Figure 4.

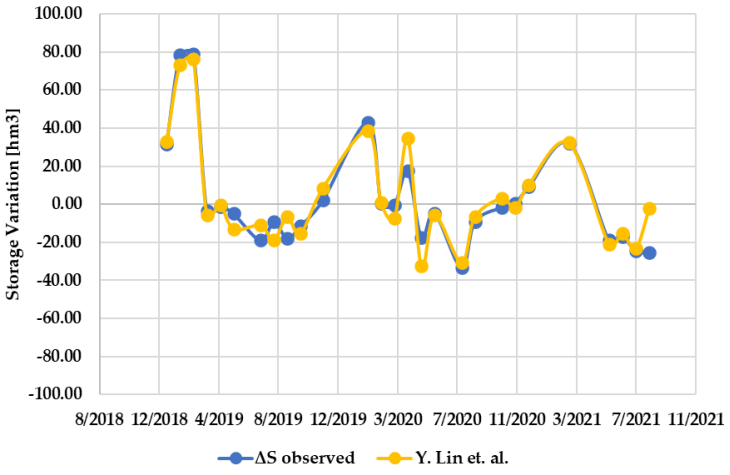


Figure 4. Comparison of observed storage variation with the estimation highest performing methodology of Y. Lin et al., (2020).

Comparing the observed storage variation to the selected methodology for the 28 quasi-synchronous water level–water area pairs, a maximum reservoir filling between consecutive pairs observed accounts for 79.05 hm^3, and the corresponding storage variation estimation accounts for 76.20hm^3. Maximum reservoir emptying observed accounts for 33.22hm^3 and the corresponding storage variation estimation accounts for 32.55hm^3. Regarding the two full water cycles documented, during every filling and emptying period, a maximum declination is observed of 2% of the reservoir's capacity.

The present research explores another important aspect of exploiting remote sensing methodologies. This stands for the comparison to existing lake characteristics curves. Regarding Yliki reservoir, an existing reservoir curve (Efstratiadis & Tsoukalas, 2019) is found and compared to the satellite derived ones. Although, the date of creation of the above existing curve is not known, a significant difference is depicted, implying alternations to the reservoir characteristics. Specifically, the two water area – storage relationships vary by 9% of the reservoir's capacity, while the two water level – storage relationships vary by 5.5% of the reservoir's capacity.

Concluding, the efficiency of NDWI, along with a measurement-specific threshold, is proved excellent, despite the complex terrain of the Yliki broader area. Likewise, reservoir water level estimation from Sentinel-3 SAR data, without implementing a complex retracking or other correction procedures, displays high levels of efficiency. This research highlights another substantial finding concerning the temporal interval for combining water area and level estimations.

This research confirmed the applicability of remote sensing techniques for the monitoring of water level area of lakes and reservoirs. It is argued that remote sensing techniques are capable of providing crucial information of the inland water cycle for monthly and annual temporal resolutions. Moreover, new approaches were discussed, including the temporal interval of water level and water area measurements pairing, suggesting a seven-day time interval. Finally, the comparison between the derived L–A–S relationship compared to the existing one indicates the usefulness of remote sensing techniques for reservoir operators to revisit and capture changes of a reservoir's hydrologic characteristics.

An opportunity is identified for future research to further integrate level (ICESat-2, SARAL, etc.) and area (Sentinel-1, Landsat 8, 9, etc.) satellite observations. Besides, it is argued that there is available space for the application of universal approaches towards the estimation of lake or reservoir water volume covering a broad range of lake or reservoir types at different latitudes. Lastly, a further research field is identified, aiming at the following of a lake's or reservoir's Level Area Storage relationships and their alternation related to time or other phenomena.

Selected Reference

Baup, F., Frappart, F., & Maubant, J. (2014). Combining high-resolution satellite images and altimetry to estimate the volume of small lakes. *Hydrology and Earth System Sciences*, *18*(5), 2007–2020. https://doi.org/10.5194/hess-18-2007-2014

Busker, T., de Roo, A., Gelati, E., Schwatke, C., Adamovic, M., Bisselink, B., Pekel, J.-F., & Cottam, A. (2018). A global lake and reservoir volume analysis using a surface water dataset and satellite altimetry. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1–32. https://doi.org/10.5194/hess-2018-21

Crétaux, J. F., Abarca-del-Río, R., Bergé-Nguyen, M., Arsen, A., Drolon, V., Clos, G., & Maisongrande, P. (2016). Lake Volume Monitoring from Space. In *Surveys in Geophysics* (Vol. 37, Issue 2, pp. 269–305). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/s10712-016-9362-6

Efstratiadis, A., & Tsoukalas, I. (2019). *Revision of the Yliki and Paralimni water balance and evaluation of the overflow risk during current hydrologic year*. http://www.itia.ntua.gr/el/docinfo/2014/

Frappart, F., Zeiger, P., Betbeder, J., Gond, V., Bellot, R., Baghdadi, N., Blarel, F., Darrozes, J., Bourrel, L., & Seyler, F. (2021). Automatic Detec-tion of Inland Water Bodies along Altimetry Tracks for Estimating Surface Water Storage Variations in the Congo Basin. *Remote Sensing*, 10. https://doi.org/10.3390/rs13193804ï

Lin, Y., Li, X., Zhang, T., Chao, N., Yu, J., Cai, J., & Sneeuw, N. (2020). Water volume variations estimation and analysis using multisource satellite data: A case study of Lake Victoria. *Remote Sensing*, *12*(18). https://doi.org/10.3390/RS12183052

Sekertekin, A. (2020). A Survey on Global Thresholding Methods for Mapping Open Water Body Using Sentinel-2 Satellite Imagery and Normalized Difference Water Index. *Archives of Computational Methods in Engineering*, *0123456789*. https://doi.org/10.1007/s11831-020-09416-2

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη ..... *iii*

Abstract ..... *iii*

Extended Abstract ..... *iv*

Πίνακας Περιεχομένων ..... *ix*

1. Εισαγωγή *11*

2. Περιοχή μελέτης – Δεδομένα *19*

2.1. Περιοχή μελέτης **19**

2.1.1. Γεωγραφικές πληροφορίες 19

2.1.2. Υδρολογικές πληροφορίες 21

2.1.3. Γεωλογικές πληροφορίες 21

2.1.4. Υδρογεωλογικές πληροφορίες 21

2.1.5. Ανθρωπογενές περιβάλλον 21

2.1.6. Εφαρμογή της Οδηγίας Πλαίσιο 2000/60/ΕΚ 24

2.2. Δεδομένα **25**

2.2.1. Δεδομένα Όγκου Αποθήκευσης 25

2.2.2. Δορυφορικά Δεδομένα προς εξαγωγή Επιφάνειας Νερού 26

2.2.3. Δορυφορικά Δεδομένα προς εξαγωγή Στάθμης Νερού 28

3. Μεθοδολογία *31*

3.1. Εκτίμηση της επιφάνειας νερού του ταμιευτήρα Υλίκης **31**

3.1.1. Αναλυτική μεθοδολογία εκτίμησης της επιφάνειας νερού του ταμιευτήρα Υλίκης 32

3.2. Εκτίμηση της στάθμης νερού του ταμιευτήρα Υλίκης **33**

3.3. Συνδυασμός των εκτιμήσεων στάθμης – επιφάνειας νερού ταμιευτήρα Υλίκης **34**

3.4. Εκτίμηση της μεταβολής του αποθηκευμένου όγκου νερού του ταμιευτήρα Υλίκης **35**

3.4.1. Μέθοδος γραμμικής σχέσης υψομέτρου – επιφάνειας 35

3.4.2. Μέθοδος τριγωνικού σχήματος λίμνης 36

3.4.3. Μέθοδος ολοκλήρωσης 37

3.4.4. Μέθοδος προσέγγισης πυραμίδας 37

3.5. Σύγκριση των εξαγόμενων χαρακτηρισιτκών του ταμιευτήρα με τη βιβλιογραφία **38**

4. Αποτελέσματα *39*

4.1. Εκτίμηση της επιφάνειας νερού του ταμιευτήρα Υλίκης **39**

4.1.1. Παράδειγμα εφαρμογής μεθοδολογίας υπολογισμού επιφάνειας νερού 39

4.1.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων εφαρμογής μεθοδολογίας υπολογισμού επιφάνειας νερού 44

4.2. Εκτίμηση της στάθμης νερού του ταμιευτήρα Υλίκης **48**

4.2.1. Παράδειγμα εφαρμογής μεθοδολογίας υπολογισμού στάθμης νερού 48

4.2.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων εφαρμογής μεθοδολογίας υπολογισμού στάθμης νερού 49

4.3. Συνδυασμός των εκτιμήσεων στάθμης – επιφάνειας νερού ταμιευτήρα Υλίκης **55**

4.4. Εκτίμηση της μεταβολής του αποθηκευμένου όγκου νερού του ταμιευτήρα Υλίκης **56**

4.5. Σύγκριση των εξαγόμενων χαρακτηρισιτκών του ταμιευτήρα με τη βιβλιογραφία **59**

5. Συζήτηση αποτελεσμάτων *61*

6. Συμπεράσματα 63

Καταγραφή Σχημάτων 65

Καταγραφή Εικόνων 66

Καταγραφή Πινάκων 67

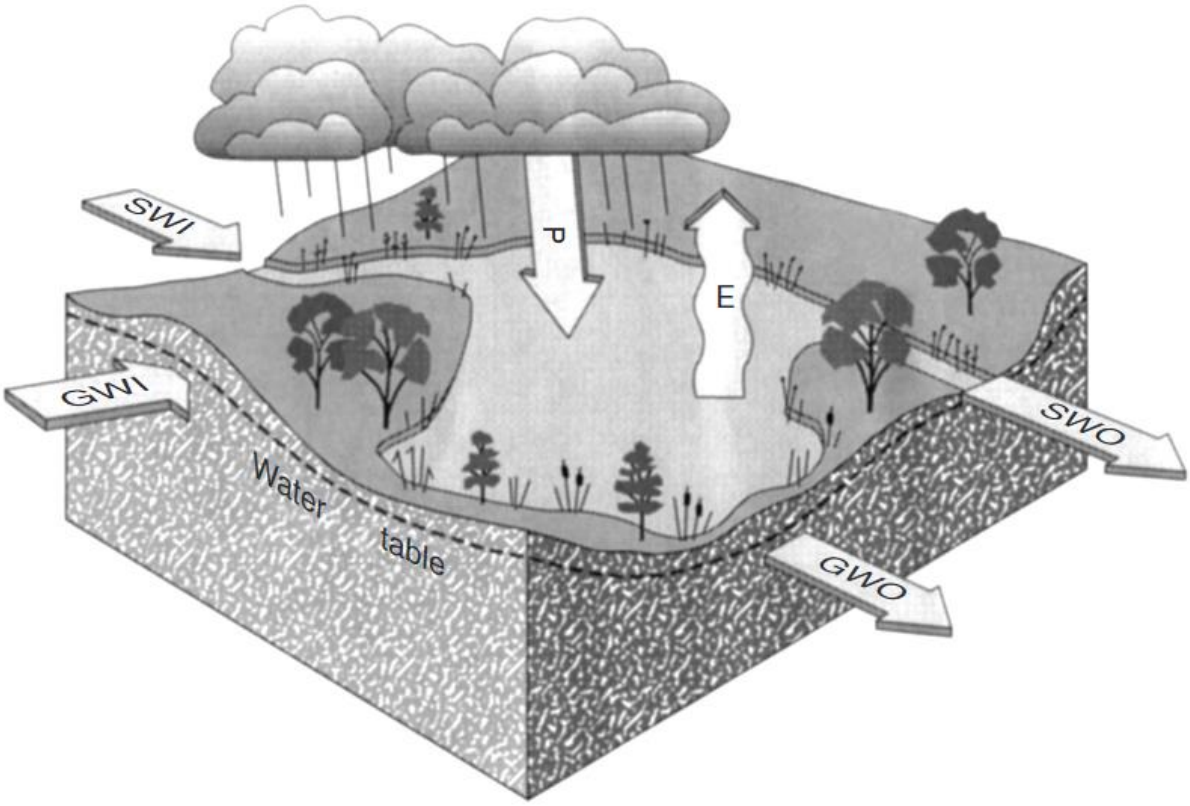
Βιβλιογραφία 68

1. Εισαγωγή

Το νερό αποτελεί ακρογωνιαίο λίθο για τη ζωή στον πλανήτη Γη. Η επαρκής παροχή καθαρού και ασφαλούς νερού είναι βασική προϋπόθεση για την εξασφάλιση της ανθρώπινης επιβίωσης και ευημερίας. Το γεγονός ότι οι ποσότητες νερού δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες στο χώρο και το χρόνο, καθιστά πολλές φορές ασύμβατες τη ζήτηση με την προσφορά νερού των ανθρωπογενών και των οικοσυστημικών δραστηριοτήτων (Crétaux et al., 2016). Οι φυσικές λίμνες και οι ταμιευτήρες αποτελούν σημαντικά στοιχεία του υδρολογικού κύκλου της γης, παρέχοντας υδατικούς πόρους στο ανθρωπογενές περιβάλλον καθώς και αξιοσημείωτες οικοσυστημικές υπηρεσίες (Busker et al., 2018; Frappart et al., 2021; Williamson et al., 2009). Αναφορικά με τους ταμιευτήρες, οι οποίοι πρόκειται για λίμνες που σχηματίστηκαν κατόπιν ανθρώπινης παρέμβασης – τεχνικών έργων, και τις φυσικές λίμνες θεωρείται πως έχουν κρίσιμη σημασία στην απορροή των λεκανών, όντας ικανοί να μεταβάλλουν τον υδρολογικό κύκλο, με την αποθήκευση, κατακράτηση και απελευθέρωση όγκων νερού (Busker et al., 2018; Frappart et al., 2021). Ακόμα, συνιστούν σημαντικούς πόρους για την παραγωγή ενέργειας (υδροηλεκτρικής), την προσφορά νερού ανθρώπινης, αρδευτικής και βιομηχανικής χρήσης. Τέλος διαδραμματίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στις βιοχημικές διεργασίες, καθώς χαρακτηριστικά συμβάλλουν στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και μεθανίου.

Οι λίμνες και οι ταμιευτήρες αποτελούν σημεία αναφοράς στο φυσικό περιβάλλον, συνιστώντας ένα εκτεταμένο δίκτυο ανά τη γη, το οποίο δύναται να παρέχει πληροφορίες για τα μοτίβα και τις τάσεις των μεταβολών των ηπειρωτικών και υδατικών οικοσυστημάτων σε σχέση με την υπό εξέλιξη κλιματική αλλαγή. Μάλιστα οι λίμνες και οι ταμιευτήρες αλληλοεπιδρούν τόσο με το ατμοσφαιρικό, το επιφανειακό όσο και με το υπόγειο νερό (O'Sullivan & Reynolds, 2003). Οι λίμνες και οι ταμιευτήρες, μπορούν να δώσουν στοιχεία αναφορικά με πληθώρα περιβαλλοντικών παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία, η βροχόπτωση, η ηλικιακή ακτινοβολία κ.ά. (Williamson et al., 2009). Σε σχέση με την ποσότητα νερού ενός ταμιευτήρα ή και μίας λίμνης, το ισοζύγιο προκύπτει από τη διαφορά των εισροών και των εκροών. Οι εισροές μπορεί να προέρχονται από την απευθείας κατακρήμνιση εντός της επιφάνειας του ταμιευτήρα, από την εισροή παροχών από ποτάμια και υδατορέματα, από εκφορτίσεις υδροφόρων καθώς και από εισροές από ανθρωπογενείς δραστηριότητες όπως το βιομηχανικό νερό ψύξης (Busker et al., 2018). Παρά τα παραπάνω δεδομένα, τα εσωτερικά ύδατα θεωρούνται μέχρι πρότινος ήσσονος σημασίας για τη βιόσφαιρα και συνεπώς δεν είχαν μελετηθεί, χαρτογραφηθεί και συγκεντρωθεί στοιχεία τους εκτενώς, ειδικά όσον αφορά τα λιμναία συστήματα. (Crétaux et al., 2016).

Δίνοντας έμφαση στα ποσοτικά χαρακτηριστικά των λιμναίων συστημάτων, ο αποθηκευμένος όγκος νερού τους αποτελεί έναν ευαίσθητο δείκτη των κατακρημνίσεων. Συνεπώς τα λιμναία συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη μελέτη τόσο της κλιματικής αλλαγής όσο και στη διαχείριση υδατικών πόρων (Crétaux & Birkett, 2006). Βασικό στοιχείο της μελέτης των λιμναίων συστημάτων αποτελεί το ισοζύγιο νερού, ή αλλιώς προϋπολογισμός νερού (water budget) (Crétaux & Birkett, 2006; O'Sullivan & Reynolds, 2003). Τα βασικά στοιχεία του ισοζυγίου νερού μιας τυπικής λίμνης παρουσιάζονται στο Σχήμα 1-1 και αναλύονται παρακάτω. Στην περίπτωση ενός ταμιευτήρα, ισχύουν όσα ισχύουν και για τις φυσικές λίμνες με την προσθήκη της ανθρώπινης παρέμβασης, είτε αυτή αφορά εισροές νερού (π.χ. διάθεση λυμάτων) είτε εκροές νερού (π.χ. απολήψεις).



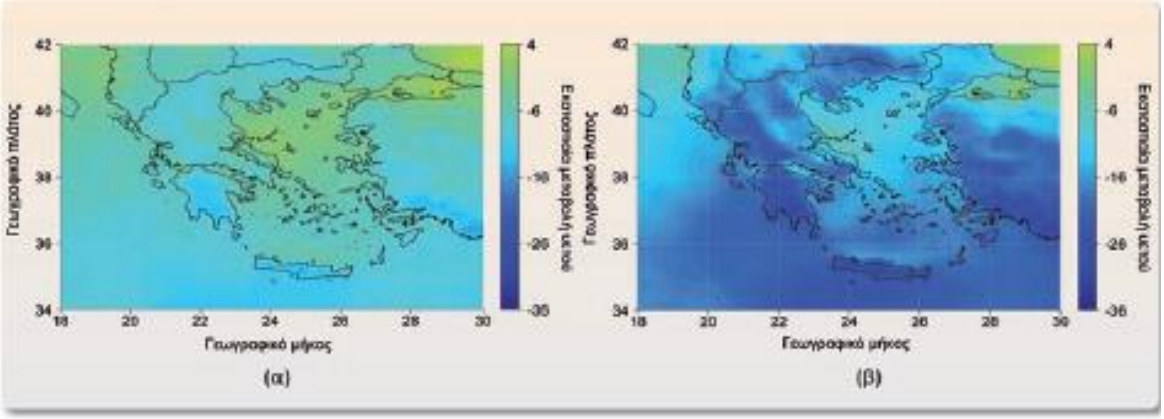
Σχήμα 1-1. Γραφική αναπαράσταση των σημαντικότερων στοιχείων του ισοζυγίου νερού λιμναίων συστημάτων (Πηγή: O'Sullivan & Reynolds (2003)).

Τα βασικότερα στοιχεία που επηρεάζουν το ισοζύγιο νερών των λιμναίων συστημάτων που παρουσιάζονται στο Σχήμα 1-1, αφορούν την αλληλεπίδραση της λίμνης με το ατμοσφαιρικό νερό (P: Κατακρήμνιση, E: Εξάτμιση), με το επιφανειακό νερό μέσω υδατορεμάτων (SWI: Εισροές επιφανειακού νερού, SWO: Εκροές επιφανειακού νερού) και με το υπόγειο νερό (GWI: Εισροές υπόγειου νερού, GWO: Εκροές υπόγειου νερού) (O'Sullivan & Reynolds, 2003).

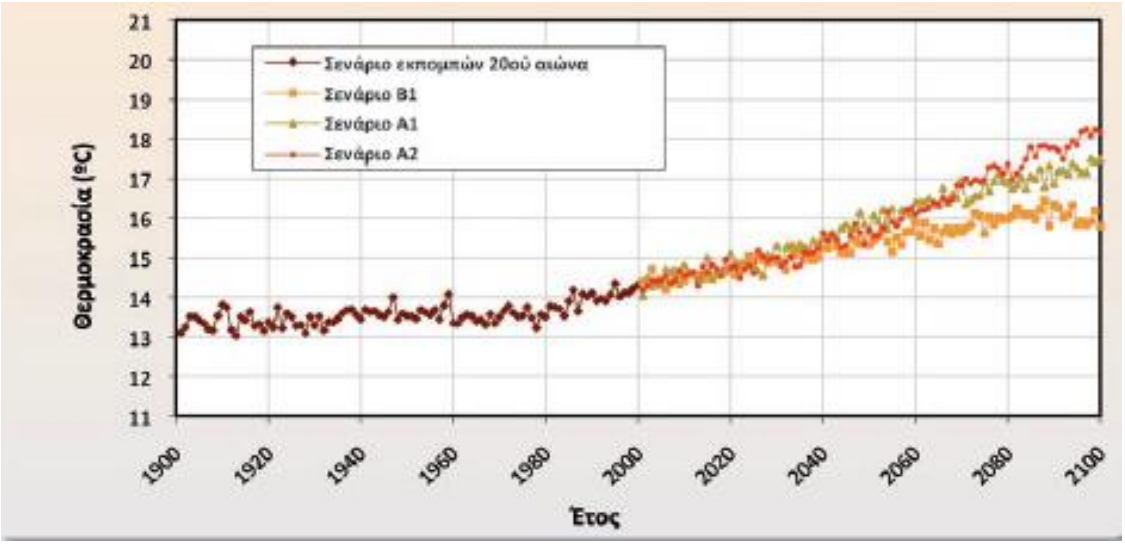
Η κλιματική αλλαγή αναμένεται να εντείνει τις υφιστάμενες πιέσεις και τις επιπτώσεις αυτών στους υδατικού πόρους. Μάλιστα στα μεσαία γεωγραφικά πλάτη όπου βρίσκεται η περιοχή της Μεσογείου, αναμένονται εντονότερες πιέσεις από άλλες περιοχές, με αποτέλεσμα ενδεχόμενες σημαντικές μεταβολές του υδρολογικού κύκλου (Jimenez Cisneros et al., 2014; Kovats et al., 2014). Πέραν της κλιματικής αλλαγής, σημαντικοί παράγοντες πίεσης των υδατικών πόρων είναι οι αλλαγές των χρήσεων γης, η αύξηση των αγροκτηνοτροφικών αναγκών παραγωγής με συνήθη συνέπεια την αποψίλωση δασών και την αύξηση της ζήτησης νερού (Thornton & Herrero, 2010; Weatherhead & Howden, 2009).

Αναφορικά με την Ελλάδα και τις συνέπειες της κλιματικής αλλαγής, αναμένεται μείωση της βροχόπτωσης, όπως παρουσιάζεται στην έκθεση της Τράπεζας της Ελλάδας (ΤτΕ) για την κλιματική αλλαγή στην κεντρική και βόρεια Ελλάδα (Skourtos et al., 2011). Επίσης σημειώνεται και μείωση των επιφανειακών απορροών, σε ποσοστό 5 - 10%. Για την περιοχή της Κεντρικής Ελλάδας, εκτιμάται μείωση της ετήσιας βροχόπτωσης περί τα 95 mm για το δυσμενέστερο σενάριο μελέτης για τη δεκαετία 2081-

2090. Μάλιστα σε όλα τα σενάρια για κάθε δεκαετία που εξετάζεται εκτιμάται πως θα υπάρξει μείωση της βροχόπτωσης, (Bank of Greece, 2011), κάτι που αναπαρίσταται ενδεικτικά στο Σχήμα 1-2. Ακόμα, ηπιότερο σενάριο εκτιμά πως η θερμοκρασία θα αυξηθεί περί τους 3°C ως το έτος 2100 σε σχέση με το 1901, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-3. Κατά τους θερινούς μήνες, την εποχή με τη μεγαλύτερη ζήτηση νερού η μείωση της βροχόπτωσης εκτιμάται πως θα κυμαίνεται κοντά στο 40%. Ακόμα και η σχετική υγρασία του εδάφους αναμένεται να μειωθεί στο σύνολο του ελλαδικού χώρου μέχρι και 4.5%. Τέλος η μέση μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία, ο αριθμός των ημερών με μέγιστη θερμοκρασία > 35°C, η συχνότητα εμφάνισης αιφνίδιων πλημμυρών και η διάρκεια των ξηρασιών επίσης αναμένεται να αυξηθούν. Μάλιστα, μετά τα μισά του 20ου αιώνα, καταγράφεται αύξηση των φαινομένων ξηρασίας με ταυτόχρονη μείωση των αποθεμάτων υδατικών πόρων (Karavitis et al., 2012; Livada & Assimakopoulos, 2007; *Water and Climate Change Adaptation*, 2013).



Σχήμα 1-2. Ποσοστιαία μεταβολή του μέσου ετήσιου υετού κατά το Σενάριο A1B. (α) 1961 – 1990 / 2021 – 2050 και (β) 1961 – 1990 / 2071 – 2100. (Πηγή: Τράπεζα της Ελλάδα, 2011).



Σχήμα 1-3. Χρονοσειρά εξέλιξης της μέση ετήσιας θερμοκρασίας για την Ελλάδα (Πηγή: Τράπεζα της Ελλάδα, 2011)

Η κλιματική αλλαγή στην Ελλάδα πρόκειται να δράσει μάλιστα σε συνέργεια με άλλες πηγές πιέσεων και ιδίως με την πολύ έντονη κατά τις πρόσφατες δεκαετίες, εκμετάλλευση των εδαφικών πόρων. Είναι

χαρακτηριστικό ότι σημαντικά ποσοστά φυσικής γης έχουν μετασχηματιστεί σε τεχνητές εκτάσεις, οι οποίες αποτελούν πηγές πίεσης στους υδατικούς και εδαφικούς πόρους (Bariamis et al., 2018).

Ο ταμιευτήρας της Υλίκης συνδυάζει δύο σημαντικά στοιχεία για τις ανάγκες της παρούσας ερευνητικής εργασίας. Αφενός, για πολλές δεκαετίες αποτελούσε σημαντική πηγή υδροδότησης της Αθήνας, όπου ακόμα λειτουργεί ως εφεδρικός ταμιευτήρας. Συνεπώς, πρόκειται για έναν από τους λίγους ταμιευτήρες στην Ελλάδα, οι οποίοι παρακολουθούνται συστηματικά και τα δεδομένα της παρακολούθησης είναι προσβάσιμα. Αφετέρου, πρόκειται για έναν ταμιευτήρα, όπου κατά τις πρόσφατες δεκαετίες αποτελεί δείγμα των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής. Συγκεκριμένα, στις 2 Δεκεμβρίου του 1990, κατόπιν μίας παρατεταμένης περιόδου ξηρασιών, καταγράφηκε αποθηκευμένος όγκος νερού του ταμιευτήρα ίσος με 25,7hm^3. Λαμβάνοντας υπόψη πως η συνολική χωρητικότητα του ταμιευτήρα είναι της τάξης των 600hm^3, καθίσταται σαφές πως ο ταμιευτήρας επί της ουσίας άδειασε και ήταν πιθανό η πρωτεύουσα της Ελλάδας να μείνει χωρίς υδρευτικό νερό (Terzidis, 1992). Μάλιστα, μετά από τις εν λόγω ξηρασίες, δρομολογήθηκε με ταχύς ρυθμούς ο ταμιευτήρας του Ευήνου, θέτοντας αυτόν της Υλίκης σε καθεστώς εφεδρείας.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, οι αθροιστικές πιέσεις στους υδατικούς πόρους αναμένεται να ενταθούν τα επόμενα χρόνια, ενώ ταυτόχρονα, οι ίδιοι αυτοί πόροι, θα διαδραματίζουν έναν όλο και σημαντικότερο ρόλο στην εύρυθμη λειτουργία και ανάπτυξη τόσο του ανθρώπινου όσο και του φυσικού περιβάλλοντος. Συνεπώς η αειφόρος ανάπτυξη και διαχείριση των υδατικών πόρων θα είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση επάρκειας και τη θωράκιση έναντι ακραίων φαινομένων. Ως αειφόρος ανάπτυξη γενικά λογίζεται η «ανάπτυξη που ικανοποιεί τις ανάγκες του παρόντος χωρίς να διακυβεύει την ικανότητα των μελλοντικών γενεών να ικανοποιήσουν τις δικές τους ανάγκες» (Keeble, 1988). Η οικονομική αύξηση, η κοινωνική συνοχή και η περιβαλλοντική προστασία θεωρείται πως πρέπει να συμβαδίζουν.

Η αειφόρος διαχείριση συγκεκριμένα των υδατικών πόρων εστιάζει στον συνυπολογισμό των βραχυπρόθεσμων όσο και των μακροπρόθεσμων αναγκών σε νερό. Αναλυτικότερα, ένα σύστημα διαχείρισης υδάτων χαρακτηρίζεται αειφόρο όταν επιδεικνύει κάλυψη των μεταβαλλόμενων τιμών της ζήτησης που του τίθενται στο παρόν και ικανότητα κάλυψης στο μέλλον χωρίς την υποβάθμιση των υδατικών πόρων (Loucks, 2000). Ουσιώδες στοιχείο της αειφόρου διαχείρισης των υδατικών πόρων αποτελεί επίσης η ετοιμότητα έναντι κλιματικής αλλαγής, των μεταβολών της ζήτησης, της γήρανσης των τεχνικών υποδομών και της φυσικής μεταβολής των υδατικών συστημάτων. Στις εν λόγω μεταβολές, με αβέβαιες συνέπειες, κρίνεται αναγκαία, η ικανότητα προσαρμογής, υπό το πρίσμα της διαρκούς εξέλιξης της γνώσης και τεχνολογίας. Εν κατακλείδι, κύρια συστατικά για την αειφόρο διαχείριση είναι: (α) η ανάπτυξη οικονομικών, κοινωνικών και περιβαλλοντικών στόχων που συμβαδίζουν, (β) η συντονισμένη προσέγγιση όλων των ενδιαφερόμενων/επηρεαζόμενων μερών, λαμβάνοντας υπόψη τη διατήρηση της ζωτικότητας της οικονομίας, της ποιότητας του περιβάλλοντος και της βιοποικιλότητας καθώς και (γ) η διαρκής ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών στη διαχείριση. Η θωράκιση έναντι κινδύνων προς την κοινωνία και το περιβάλλον συνιστά σημαντικό όρο της αειφόρου διαχείρισης (Loucks, 2000).

Η παρακολούθηση των υδατικών πόρων λογίζεται ως ένα απαραίτητο εργαλείο για την αειφόρο διαχείρισή τους (Biswas, 2004; Schwatke et al., 2015). Εν γένει, η παρακολούθηση των υδατικών πόρων, συμπεριλαμβανομένων των φυσικών λιμνών και των ταμιευτήρων, επιτυγχάνεται μέσω επιτόπιων (in-situ) μεθόδων, υδρολογικών μοντέλων και εσχάτως μέσω μεθόδων τηλεπισκόπησης (remote sensing) (Baup et al., 2014). Μάλιστα από τη δεκαετία του 1990, η χρήση μεθόδων τηλεπισκόπησης για την

παρακολούθηση των εσωτερικών υδάτων λαμβάνει διαρκώς περισσότερο προσοχή από το σύνολο των εμπλεκόμενων επιστημόνων και φορέων. Τα σημαντικότερα στοιχεία που απασχολούν την τηλεπισκόπηση των εσωτερικών υδάτων αφορούν τη στάθμη του νερού, την επιφάνειά του καθώς και τον αποθηκευμένο όγκο σε λίμνες και ταμιευτήρες.

Ένας πρώιμος ορισμός της τηλεπισκόπησης περιλαμβάνει τα ακόλουθα στοιχεία (Fussell et al., 1986):

- Την άνευ φυσικής επαφής απόκτηση, συλλογή ή και καταγραφή.
- Τη χρήση περιοχών του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος – όχι δεσμευτικά – οι οποίες περιλαμβάνουν και υπερβαίνουν το ορατό φάσμα.
- Τη χρήση οργάνων.
- Τη χρήση κινητών πλατφορμών.
- Το συμβολικό μετασχηματισμό της συλλεγόμενης πληροφορίας.
- Τα μέσα ερμηνείας της πληροφορίας ή της αναγνώρισης μοτίβων με τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Ένας πιο σύγχρονος ορισμός της τηλεπισκόπησης δίνεται ως «μία σύγχρονη τεχνολογία που χρησιμοποιείται για τη λήψη πληροφοριών σχετικά με έναν στόχο μέσα από την ανάλυση δεδομένων που αποκτήθηκαν σε σχέση με τον στόχο από απόσταση. Αποτελείται από τρία βασικά μέρη, που είναι:

- οι στόχοι – αντικείμενα ή φαινόμενα σε μια περιοχή,
- η απόκτηση δεδομένων – μέσω ορισμένων μέσων,
- και η ανάλυση των δεδομένων με τη χρήση εξειδικευμένων λογισμικών και υπολογιστών με υψηλές προδιαγραφές.» (Παρχαρίδης, 2015)

Η είσοδος στην εποχή της περιβαλλοντικής τηλεπισκόπησης (Environmental remote sensing) με δορυφόρους, σηματοδοτείται επί της ουσίας με την εκτόξευση του αμερικανικής κατασκευής δορυφόρου Landsat 1, τον Ιούνιο του 1972 (Παρχαρίδης, 2015). Αναφορικά με την περιβαλλοντική τηλεπισκόπηση των λιμνών και των ταμιευτήρων, κομβική θεωρείται η ανάπτυξη του δείκτη NDWI (Normalized Difference Water Index) (McFeeters, 1996). Ο εν λόγω δείκτης, σε συνέχεια του φυτικού δείκτη NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), αξιοποιεί τις πολυφασματικές λήψεις των οπτικών οργάνων δορυφόρων, όπως ο Landsat 4 για το 1996 και εκφράζεται ως ο παρακάτω λόγος:

$$\frac{Πράσινο - Σχεδόν\ Υπέρυθρο}{Πράσινο + Σχεδόν\ Υπέρυθρο}$$

Η επιλογή των δύο παραπάνω φασμάτων γίνεται για τους εξής λόγους. Αφενός μεγιστοποιείται η τυπική αντανάκλαση των υδάτινων σωμάτων μέσω της αξιοποίησης του πράσινου φάσματος και αφετέρου ελαχιστοποιείται η χαμηλή ακτινοβολία των υδάτινων σωμάτων στο σχεδόν υπέρυθρο φάσμα. Ταυτοχρόνως, αξιοποιείται και η υψηλή αντανάκλαση του σχεδόν υπέρυθρου φάσματος από την εδαφική βλάστηση και τα στοιχεία του εδάφους που δυνητικά περικυκλώνουν το υδάτινο σώμα. Συνεπώς οι αρνητικές τιμές [-1,0) αντιπροσωπεύουν το έδαφος και την εδαφική βλάστηση, ενώ τα υδάτινα στοιχεία παρουσιάζουν θετικές τιμές (0,1] (McFeeters, 1996). Έκτοτε, έχουν αναπτυχθεί πληθώρα μεθοδολογιών που αξιοποιούν νεότερες δορυφορικές αποστολές, όπως την οικογένεια Landsat (λ.χ. Landsat 8) ή την ευρωπαϊκή αποστολή Sentinel-2, με τη χρήση του NDWI, τροποποιήσεων του αρχικού δείκτη όπως ο mNDWI (modified Normalized Difference Water Index) ή ακόμα και πιο σύνθετες προσεγγίσεις με αλγορίθμους μηχανικής μάθησης αξιοποιώντας περισσότερα των δύο φασμάτων (Baup et al., 2014; Du et al., 2016; Lin et al., 2020; Zhang et al., 2021b).

Αναφορικά με την εκτίμηση της στάθμης του νερού, πολλές δορυφορικές αποστολές έχουν προσφέρει δεδομένα, τα οποία όσο πιο σύγχρονη είναι η αποστολή τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια προσφέρουν, φτάνοντας σε μερικά εκατοστά, όπως η αποστολή Sentinel-3. Οι δορυφορικές αποστολές, ενδεικτικά ICESat-1, ICESat-2, SARAL, Sentinel-3 κ.ά., μπορούν να αξιοποιηθούν είτε άμεσα, με σχεδόν απευθείας χρήση των δεδομένων τους είτε με τη χρήση εξεζητημένων αλγορίθμων για περαιτέρω βελτίωση της εκτιμώμενης στάθμης νερού του υδάτινου σώματος ενδιαφέροντος (Carabajal & Boy, 2021; Duan & Bastiaanssen, 2013; Kittel et al., 2021; Song et al., 2014). Η επιμέρους κατηγοριοποίηση των δορυφορικών αποστολών, μπορεί να γίνει σε τρεις ομάδες. Οι πρώτες δύο αφορούν τη λήψη σημειακών καταγραφών κατά μήκος της τροχιάς του δορυφόρου είτε με τη χρήση τεχνολογίας ραντάρ (Sentinel-3) είτε με τη χρήση laser (ICESat-2). Από την άλλη η τρίτη ομάδα, αφορά αποστολές που αποσκοπούν στην παραγωγή ολοκληρωμένων ΨΜΕ, όπως είναι η αποστολή SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), των οποίων όμως η ακρίβεια μέχρι σήμερα δεν επαρκεί για την τακτική παρακολούθηση της στάθμης των εσωτερικών υδάτινων σωμάτων (Carabajal & Boy, 2021).

Αποκτώντας γνώση της στάθμης του νερού και της υδάτινης επιφάνειας των λιμνών και των ταμιευτήρων, καθίσταται δυνατή η παρακολούθηση των μεταβολών του όγκου του νερού. Ο βασικότερος λόγος που η γνώση των μεταβολών του όγκου νερού μιας λίμνης ή ενός ταμιευτήρα κυριαρχεί της τρέχουσας ακαδημαϊκής και επιχειρησιακής έρευνας, έγκειται στο γεγονός ότι ο όγκος αντανακλά την διαθέσιμη ή μη διαθέσιμη ποσότητα νερού τόσο για οικοσυστημικές υπηρεσίες όσο και για την κάλυψη των αναγκών του ανθρώπου. Συνεπώς, ιδίως κατά την τελευταία δεκαετία έχουν αναπτυχθεί ποικίλες προσεγγίσεις αναφορικά με την εκτίμηση του όγκου νερού στα λιμναία υδάτινα σώματα.

Ο πρώτος άξονας ανάπτυξης τέτοιων μεθοδολογιών είναι ο συνδυασμός της πληροφορίας στάθμης και επιφάνειας για την εκτίμηση είτε απευθείας του όγκου (Busker et al., 2018) είτε για την εκτίμηση της μεταβολής του όγκου ανά τακτά χρονικά διαστήματα (Zhang et al., 2021b). Ο δεύτερος άξονας εκτίμησης του όγκου μιας λίμνης ή ενός ταμιευτήρα αποτελεί η τηλεπισκόπηση και χαρτογράφηση του βυθού του υδάτινου σώματος, η οποία όταν ολοκληρωθεί με την επιφάνεια, μπορεί να επιτύχει τον υπολογισμό του όγκου (Arsen et al., 2013; Elsahabi et al., 2018; Forfinski-Sarkozi & Parrish, 2016; Getirana et al., 2018). Η εν λόγω προσέγγιση εμπεριέχει εγγενείς δυσκολίες και εξαρτάται άμεσα από τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε λίμνης, όπως τη βαθυμετρία, τη συγκέντρωση στερεών και τη θολότητα και μέχρι σήμερα δύναται να έχει επιτυχή αποτελέσματα σε ρηχές λίμνες (βάθους < 10m). Παρόμοιας λογικής είναι και η ολοκλήρωση της εκτιμώμενης επιφάνειας νερού με κάποιο ΨΜΕ, ώστε να υπολογιστεί απευθείας ο όγκος νερού. Ωστόσο, με τη χρησιμοποίηση ενός συγκεκριμένου ΨΜΕ, ακόμα και εάν επικαιροποιείται ανά τακτά χρονικά διαστήματα απολύεται ο βασικός χαρακτήρας των μεθόδων τηλεπισκόπησης, αυτός της χρονικής δυναμικότητας.

Σε σχέση με τις διαφορετικές μεθοδολογίες εκτίμησης του όγκου ή της μεταβολής αυτού σε λίμνες και ταμιευτήρες, πρέπει να σημειωθεί ότι οι περισσότερες δημοσιεύσεις αφορούν συγκεκριμένες περιπτώσεις λιμνών και δεν δοκιμάζονται σε διαφορετικές λίμνες με ποικίλα χαρακτηριστικά. Εξαιρέσεις αποτελούν ορισμένες βάσεις δεδομένων, με τις οποίες έχει αποπειραθεί η ομοιογενής εκτίμηση του όγκου ή της μεταβολής αυτού, με χαρακτηριστικότερο παράδειγμα τη βάση δεδομένων DAHITI (Database for Hydrological Time Series over Inland Waters), η οποία καλύπτει 137 λίμνες και ταμιευτήρες ανά τον κόσμο (Busker et al., 2018).

Αναφορικά με την Ελλάδα, παρά την εγνωσμένη έλλειψη δεδομένων αναφορικά με τα ποσοτικά χαρακτηριστικά των επιφανειακών υδάτινων σωμάτων, δεν έχουν καταγραφεί μελέτες εφαρμογής μεθόδων τηλεπισκόπησης για την πλήρωση αυτού του κενού δεδομένων. Παρόλα αυτά, αξίζει να σημειωθεί ότι έχουν πραγματοποιηθεί σημαντικές εφαρμογές δορυφορικής τηλεπισκόπησης σε σχέση με τα παρακάτω στοιχεία των επιφανειακών υδάτων: (α) Μοντελοποίηση ποιοτικών χαρακτηριστικών σε λίμνες με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων (Markogianni et al., 2022), (β) Μελέτη του φαινομένου του ευτροφισμού στη λίμνη Παμβώτιδα ((Peppa et al., 2020), (γ) Αειφόρος ανάπτυξη της λίμνης Κορώνειας με αξιοποίηση δορυφορικών δεδομένων (Alexandridis et al., 2007), (δ) Παρακολούθηση της απόκρισης της υδρολογικής λεκάνης του Στρυμόνα μετά από πλημμυρικά γεγονότα (Capolongo et al., 2019), (ε) Αξιοποίηση δορυφορικών δεδομένων για την εκτίμηση της επικινδυνότητας πλημμυρών ταχείας απόκρισης (flash floods) στη Θεσσαλική πεδιάδα (Psomiadis et al., 2019), (στ) Αξιοποίηση δορυφορικών δεδομένων για τη συμπλήρωση της πληροφορίας βροχόπτωσης – απορροής στον Πηνειό ποταμό (Elhag & Yilmaz, 2021) και (ζ) Παρακολούθηση των χωροχρονικών μεταβολών σε υγροτόπους στη Βόρεια Ελλάδα (Papastergiadou et al., 2008).

Πρέπει να τονιστεί η μεγάλη σημασία των λιμνών και των ταμιευτήρων στους ελληνικούς υδατικούς πόρους, δεδομένου ότι καλύπτουν μεγάλα μέρη των ανθρωπογενών αναγκών ύδρευσης, άρδευσης αλλά και ηλεκτροπαραγωγής, ενώ ταυτόχρονα συνιστούν σημαντικούς υγροβιότοπους και παρόχους οικοσυστημικών υπηρεσιών. Μάλιστα, σύμφωνα με την 1η Αναθεώρηση των Σχεδίων Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών για την ελληνική επικράτεια, καταγράφονται 43 ταμιευτήρες και 31 φυσικές λίμνες. Μάλιστα, 24 εκ των 43 ταμιευτήρων και 25 εκ των 31 φυσικών λιμνών δεν βρίσκονται σε καλή συνολική κατάσταση. Συνεπώς, στην Ελλάδα, το 66% των λιμναίων υδάτινων σωμάτων που εξετάζονται στα πλαίσια της Οδηγίας 2000/60 δεν βρίσκονται σε καλή κατάσταση, ή δεν υπάρχουν στοιχεία για την οικολογική και τη χημική τους κατάσταση. Μάλιστα τα τελευταία χρόνια, μετά και τις ξηρασίες που έπληξαν τη χώρα περί το 1990, αυξάνουν διαρκώς τα δημοσιεύματα στον εγχώριο τύπο για ποσοτικά προβλήματα σε διάφορες ελληνικές λίμνες, με χαρακτηριστικότερες τη λίμνη Κορώνεια, τις Πρέσπες, τη λίμνη Βεγορίτιδα κ.ά. (*Ηλεία: Η Λίμνη Πηνειού Αδειάζει Και Αποκαλύπτει Το Παρελθόν Της – Εντυπωσιακές Εικόνες Από Ψηλά*, 2020; "Ορθή Διαχείριση Της Λίμνης Πλαστήρα Ζητά Με Επείγουσα Επιστολή ο Π. Νάνος," 2019; *Τι Φταίει Για Την Οικολογική Καταστροφή Στην Κορώνεια*, 2019; Κώνστας & Καρτσωνάκης, 2013; Τσιγγανάς et al., 2008).

Επομένως, εντοπίζεται ένα σχετικό κενό στη βιβλιογραφία αναφορικά με την Ελλάδα, το οποίο η παρούσα ερευνητική εργασία εντοπίζει ως μία ευκαιρία για την ανίχνευση και εφαρμογή ενός συνδυασμού εφαρμοσμένων μεθοδολογιών για την εκτίμηση του όγκου, ή της μεταβολής αυτού, σε λιμναία υδάτινα σώματα. Σημαντικό κριτήριο κατά την εξέταση και εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας, αποτελεί η εξεύρεση εύκολων στη χρήση επιλύσεων, οι οποίοι δεν απαιτούν τη χρήση εξεζητημένων προσεγγίσεων. Η παραπάνω αναζήτηση, στοχεύει στην παρουσίαση μιας μεθοδολογίας, η οποία θα μπορεί να εφαρμοστεί ταχέως σε διαφορετικές περιοχές μελέτης από ένα ευρύ φάσμα μηχανικών, ερευνητών και φορέων, ώστε να καταστεί δυνατή η όσο το δυνατόν σύντομη του γνωσιακού κενού αναφορικά με τα ποσοτικά χαρακτηριστικά των λιμναίων υδάτινων σωμάτων στην ελληνική επικράτεια. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η λίμνη Υλίκη, αποτελεί ιδανική επιλογή μελέτης περίπτωσης, καθότι πρόκειται για μία από τις λίγες τακτικά παρακολουθούμενες, η οποία μάλιστα παρουσιάζει έντονο ανάγλυφο, ελέγχοντας έτσι τα όρια ακριβείας της εκάστοτε μεθοδολογίας. Μάλιστα, για τον ταμιευτήρα της Υλίκης παρατίθενται και σχέσεις Στάθμης – Επιφάνειας – Χωρητικότητας νερού και από

άλλους ερευνητές (Efstratiadis & Tsoukalas, 2019), με τις οποίες συγκρίνονται τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.

2. Περιοχή μελέτης – Δεδομένα

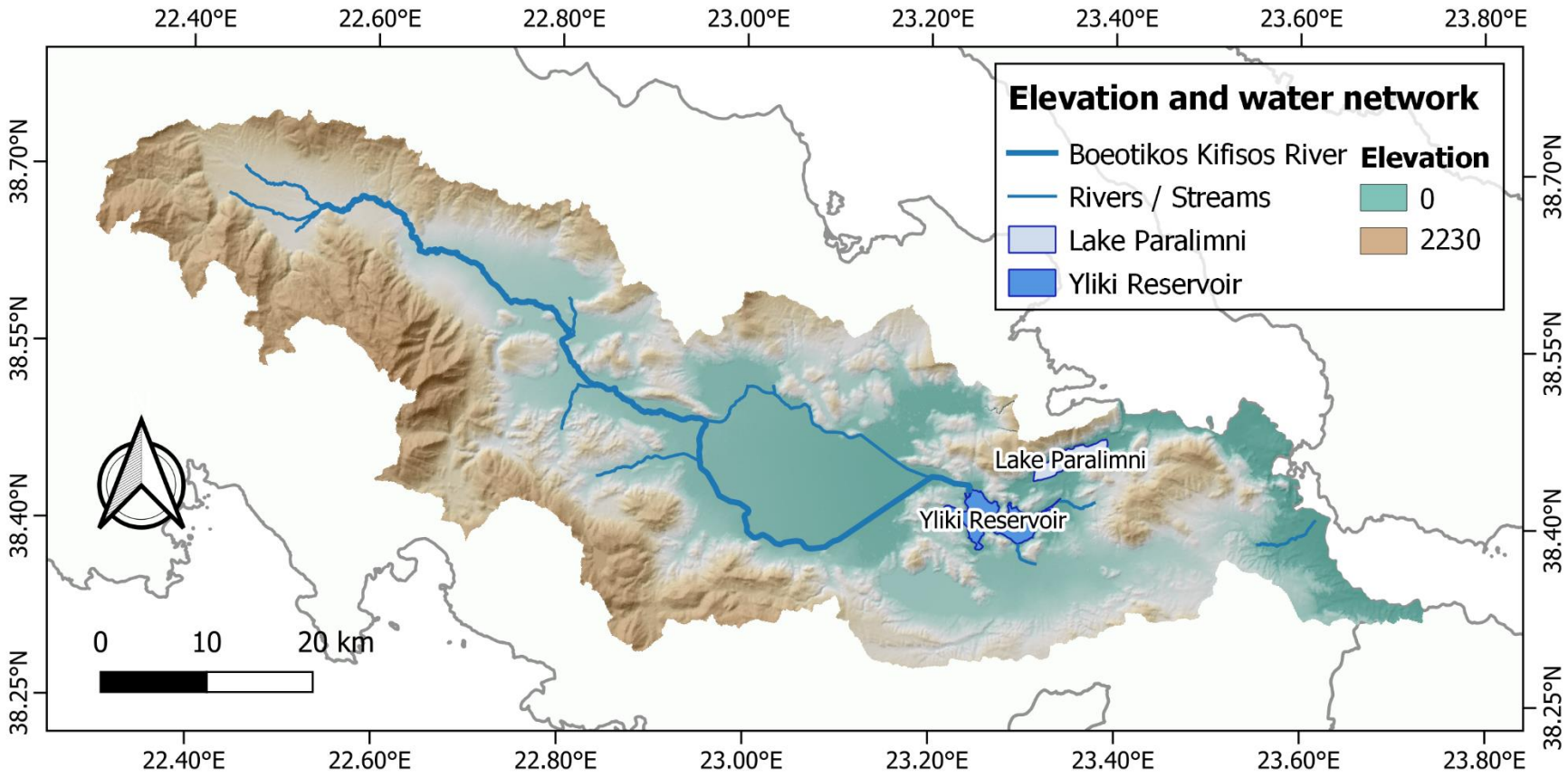
2.1. Περιοχή μελέτης

Ο ταμιευτήρας της Υλίκης, ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα (ΥΔ) της Ανατολική Στερεάς Ελλάδας (EL07) και συγκεκριμένα στη Λεκάνη Απορροής (ΛΑΠ) Βοιωτικού Κηφισού (EL0723) (Special Secreteriat for Water, 2017b). Το ΥΔ Ανατολικής Στερεάς Ελλάδα περιλαμβάνει πλήρως τις Περιφερειακές Ενότητες Ευβοίας και Βοιωτίας, το μεγαλύτερο ποσοστό των Περιφερειακών Ενοτήτων Φθιώτιδας και Φωκίδας, καθώς και μικρά μέρη των Περιφερειακών Ενοτήτων Αττικής, Μαγνησίας και Ευρυτανίας (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017a).

2.1.1. Γεωγραφικές πληροφορίες

Αναφορικά με τη ΛΑΠ Βοιωτικού Κηφισού, η συνολική έκτασή της ανέρχεται στα 2.719km^2. Η ΛΑΠ Βοιωτικού Κηφισού ορίζεται στα βόρεια και βορειοανατολικά από τα όρη Οίτη, Καλλίδρομο, Σφίγγιο και Χλωμό, ενώ στα νότια και νοτιοδυτικά από τα όρη Γκιώνα, Παρνασσός και Ελικώνας (Ευστρατιάδης et al., 2004). Η βασική πηγή εισροών της Υλικής είναι ο Κηφισός Ποταμός, με συνολική λεκάνη απορροής περί τα 1850 km^2 και μέση ετήσια απορροή περί τα 387 hm^3. Στο Σχήμα 2-1 παρουσιάζεται η ΛΑΠ Βοιωτικού Κηφισού, ο ταμιευτήρας της Υλίκης και η γειτονική λίμνη Παραλίμνη. Σύμφωνα με την 1^η Αναθεώρηση του ΣΔΛΑΠ Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας, η λίμνη Υλίκη θεωρείται Ιδιαιτέρως Τροποποιημένο Υδατικό Σύστημα (ΙΤΥΣ), με μέση έκταση περί τα 19,59km^2 και μέση περίμετρο στα 50,38km. Η μέγιστη έκταση και συγκεκριμένα η επιφάνεια στη στάθμη υπερχείλισης που της αποδίδεται είναι τα 24,5km^2 (ΕΥΔΑΠ, n.d.).

Η υγρή περίμετρος της Υλίκης περικλείεται από τα όρη Μεσσάπιο στα ανατολικά, Πτώο στα βόρια, Σφίγγειο στα δυτικά και από χαμηλούς λόφους στα νότια. Σημαντικό στοιχείο ανθρωπογενούς παρέμβασης στο σύστημα της Υλίκης – Παραλίμνης, αποτελεί η διώρυγα που συνδέει τον ταμιευτήρα της Υλίκης με τη λίμνη Παραλίμνη, η οποία έχει μήκος 2,5km. Η ρόλος της εν λόγω σήραγγας, συνίστατο ιδίως κατά το παρελθόν στην παροχέτευση των πλεοναζόντων υδάτων της Υλίκης προς την Παραλίμνη (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2013). Η θέση της διώρυγας εντοπίζεται στο ανατολικό άκρο του ταμιευτήρα της Υλίκης. Το σχήμα του ταμιευτήρα θεωρείται ακανόνιστο, με βραχώδεις όχθες οι οποίες παρουσιάζουν έντονο οριζόντιο διαμελισμό (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2013). Το μέγιστο υψόμετρο φυσικής στάθμης είναι +78.1 μ.σ.θ., ενώ με τη χρήση ενός είδους θυροφράγματος σε μία στένωση του αναγλύφου στα ανατολικά του ταμιευτήρα, μπορεί να επιτευχθεί μέγιστη στάθμη έως και 79,8 μ.υ.θ. Η μέγιστη χωρητικότητα του ταμιευτήρα λογίζεται ίση με 600hm^3 (ΕΥΔΑΠ, n.d.).



Σχήμα 2-1. Περιοχή της ΛΑΠ Βοιωτικού Κηφισού, Ταμιευτήρας Υλίκης, Λίμνη Παραλίμνη και βασικό υδρογραφικό δίκτυο σε υπόβαθρο ΨΜΕ.

2.1.2. Υδρολογικές πληροφορίες

Η μέση ετήσια βροχόπτωση στον ταμιευτήρα της Υλίκης θεωρείται από το διαχειριστή της (ΕΥΔΑΠ) ίση με 648mm/έτος έχοντας τυπική απόκλιση της τάξης των 165mm/έτος (ΕΥΔΑΠ, n.d.). Βέβαια, πιο πρόσφατη μελέτη, καταδεικνύει για την περιοχή του ταμιευτήρα μέση ετήσια βροχόπτωση της τάξης των 603,5mm/έτος για την περίοδο 1964 – 2000 και 562,1mm/έτος για την περίοδο 2001 – 2015 (Efstratiadis & Tsoukalas, 2019). Αναφορικά με το ύψος του νερού εξάτμισης αυτό εκτιμάται κατά μέσο όρο σε 1345mm/έτος με μικρή τυπική απόκλιση (τάξης των 30mm) (Efstratiadis & Tsoukalas, 2019).

Σύμφωνα με τον Ευστρατιάδη κ.ά. (2004), ως αντιπροσωπευτικό δείγμα της παρούσας δυναμικότητας του Βοιωτικού Κηφισού θεωρείται η περίοδος των υδρολογικών ετών 1970 – 1971 με 2002 – 2003, όπου έχουν υπολογίσει μέση ετήσια απορροή της τάξης των 286hm^3. Παρόλα αυτά, κατά την 1η Αναθεώρηση του ΣΔΛΑΠ Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας, έχει θεωρηθεί μέση ετήσια απορροή για τον Βοιωτικό Κηφισό της τάξης των 387hm^3. Για το σύνολο των ετών παρακολούθησης της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού (1907 – 2019), η μέση ετήσια απορροή έχει βρεθεί ίση με 368,7hm^3 (Efstratiadis & Tsoukalas, 2019).

2.1.3. Γεωλογικές πληροφορίες

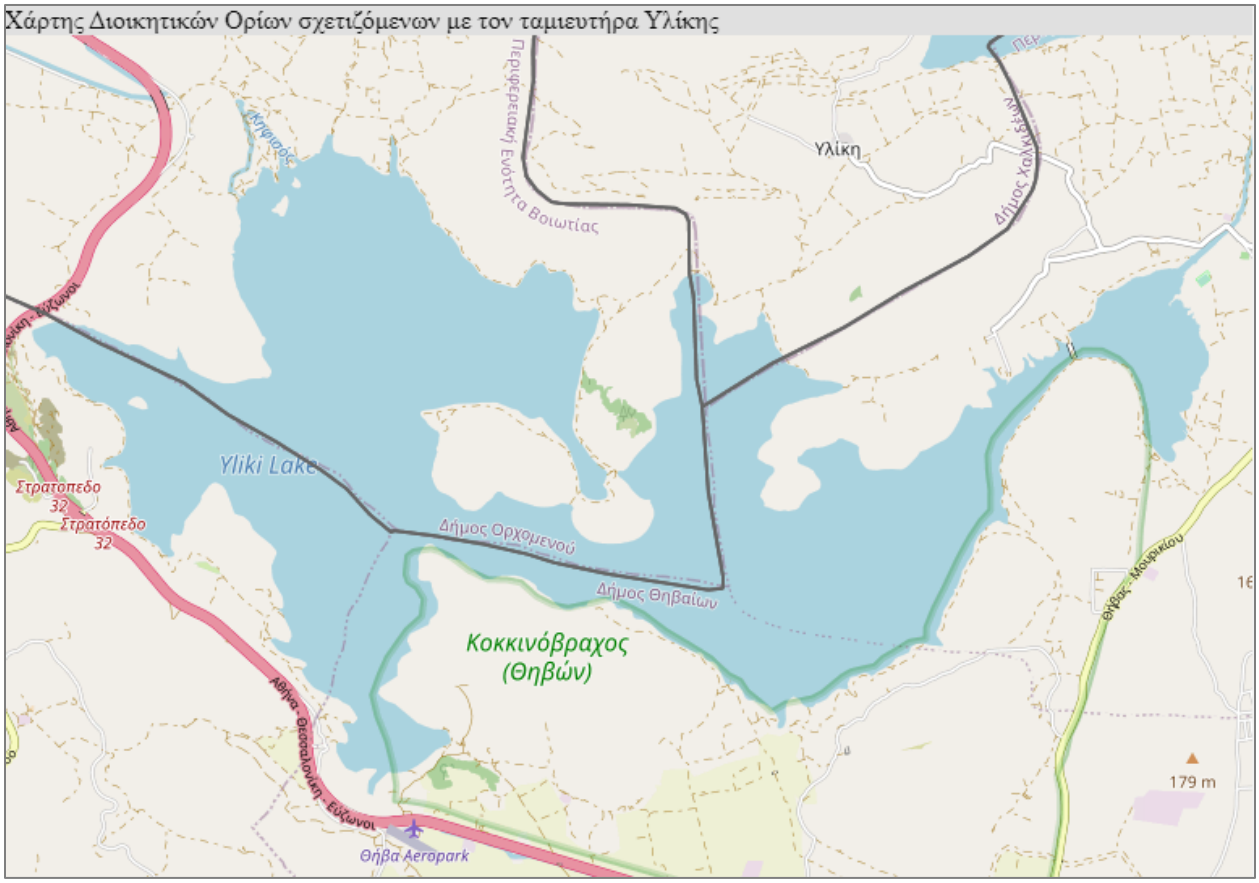
Το ΥΔ Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας χαρακτηρίζεται από μεταλπικούς σχηματισμούς του Τεταρτογενούς και Νεογενούς στις πεδινές περιοχές. Στις λοφώδεις εξάρσεις και του ορεινούς όγκους απαντώνται διάφοροι σχηματισμοί του υποβάθρου των ζωνών Πίνδου, Παρνασσού – Γκιώνας, Βοιωτικής και Υποπελαγονικής. Σε σχέση με την περιοχή του ταμιευτήρα της Υλίκης, σημαντικό στοιχείο είναι οι τεταρτογενείς αποθέσεις που καταλαμβάνουν τη λεκάνης της Κωπαΐδας και μεγάλο μέρος της περιοχής της Θήβας (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2018).

2.1.4. Υδρογεωλογικές πληροφορίες

Στο ΥΔ Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας συναντώνται τρία βασικά είδη υδροφόρων συστημάτων: (α) κοκκώδες σύστημα στις τεταρτογενείς και τριτογενείς αποθέσεις, (β) καρστικό σύστημα εντός των υδροπερατών ανθρακικών σχηματισμών και (γ) ρωγματικό σύστημα εντός μεταμορφωμένων και πυριγενών πετρωμάτων. Αναφορικά με την περιοχή της Υλίκης άξια μνείας είναι τα κοκκώδη υδροφόρα συστήματα που απαντώνται στις πεδινές λεκάνες στο κατάντη τμήμα του ρου του Βοιωτικού Κηφισού και τα καρστικά υδροφόρα συστήματα της περιοχής Υλίκης – Παραλίμνης. Σημειώνεται μάλιστα πως έχει εντοπιστεί αμφίδρομη επικοινωνία του Βοιωτικού Κηφισού με τον ταμιευτήρα Υλίκης και τη λίμνη Παραλίμνης (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2018).

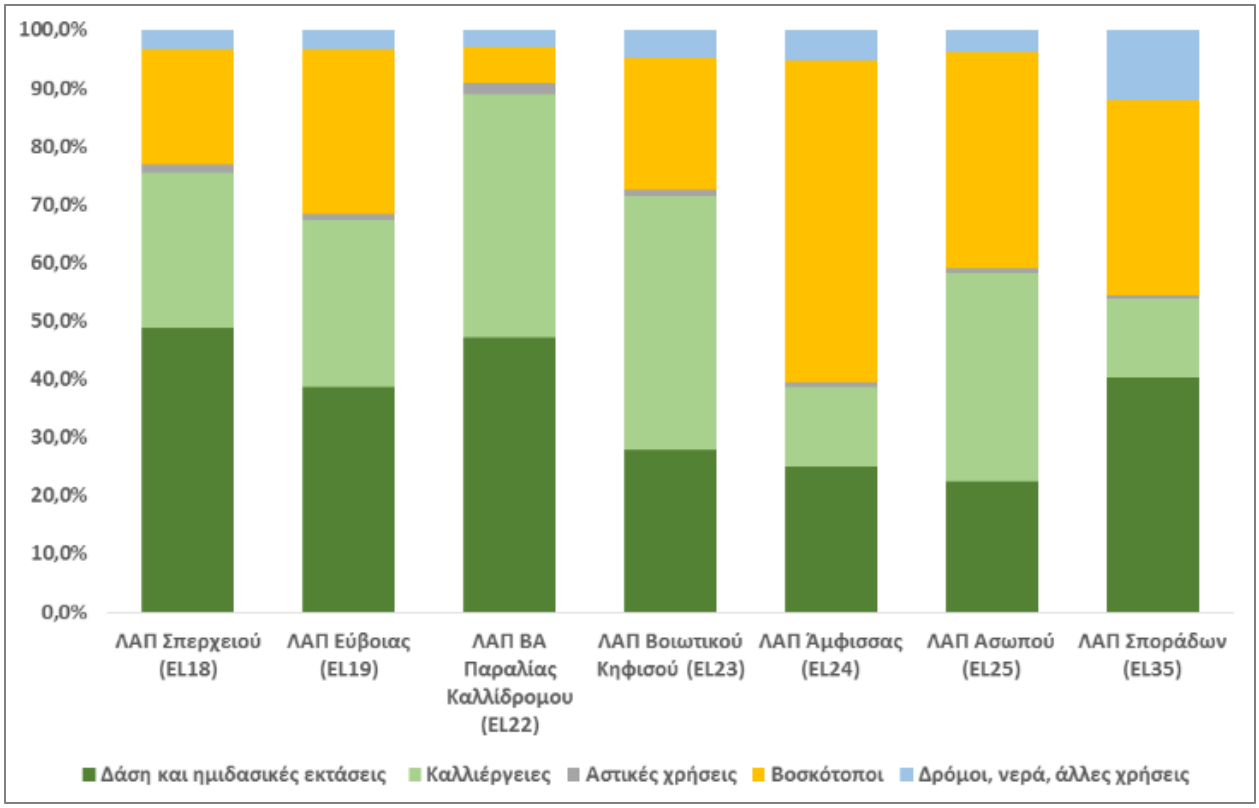
2.1.5. Ανθρωπογενές περιβάλλον

Ο ταμιευτήρας της Υλίκης υπάγεται διοικητικά στους Καλλικρατικούς Δήμους Θηβαίων, Ορχομενού και Χαλκιδαίων των Περιφερειακών Ενοτήτων Βοιωτίας και Ευβοίας, όπως αποτυπώνεται και στο Σχήμα 2-2. Η πλησιέστερη πόλη είναι αυτή της Θήβας, σε απόσταση περίπου 7km.



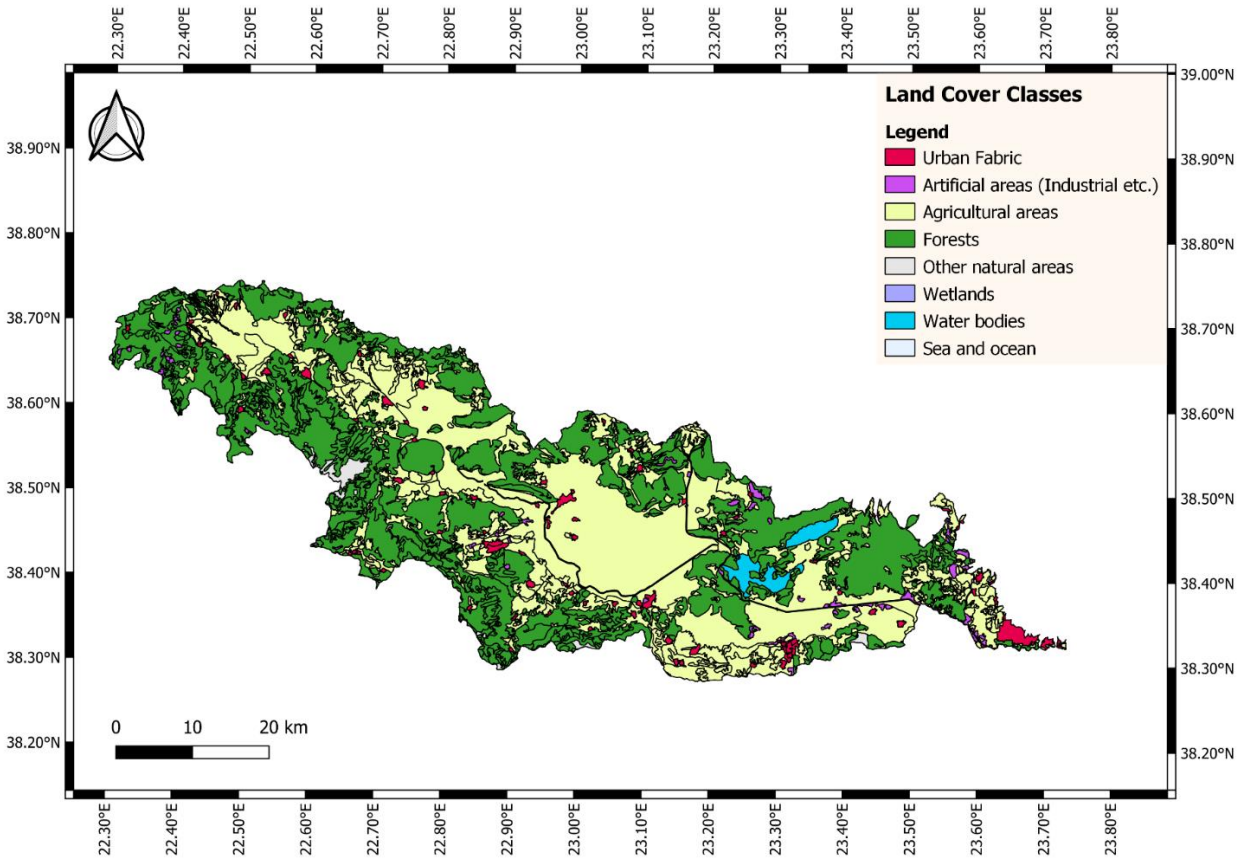
Σχήμα 2-2. Χάρτης αναπαράστασης διοικητικής υπαγωγής ταμιευτήρα Υλίκης (Πηγή: ΕΓΥ, 2022).

Όσον αφορά τις χρήσεις γης, για το Υδατικό Διαμέρισμα Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας, κυριαρχεί η δασώδης κάλυψη, σε ποσοστό 36%. Η κύρια ανθρωπογενής χρήση είναι η αγροτική, με τις καλλιέργειες να καταλαμβάνουν το 31% της συνολική έκτασης του ΥΔ EL07. Ακολούθως, το 27% του ΥΔ EL07 καλύπτεται από βοσκότοπους σε ποσοστό 27%. Αναφορικά με τη ΛΑΠ Βοιωτικού Κηφισού παρατηρείται αισθητά εντονότερη χρήση γης σε καλλιέργειες, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-3 (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017b). Χωρική αναπαράσταση των χρήσεων γης για την περίοδο 2017 -2018 δίνεται στο Σχήμα 2-4. Από το τελευταίο αναπαρίσταται χαρακτηριστικά η εκτεταμένη αγροτική έκταση στα δυτικά του ταμιευτήρα της Υλίκης, η οποία αποτελεί τη βασική πεδιάδα της Κωπαΐδας, από την οποία διέρχεται το κανάλι, εντός του οποίου έχει διευθετηθεί σημαντικό μήκος του Βοιωτικού Κηφισού και το οποίο εκβάλλει στο βορειοδυτικό άκρο του ταμιευτήρα Υλίκης. Η Εικόνα 2-1 απεικονίζει την περιοχή της εισόδου του καναλιού στον ταμιευτήρα αφού διέλθει από τεχνικό έργο διέλευσης της ΕΟ Αθηνών – Λαμίας (Ε75).



Σχήμα 2-3. Κύριες χρήσεις γης ανά επιμέρους ΛΑΠ, του ΥΔ EL07. (Πηγή: Special Secreteriat for Water, 2017**).**

Εικόνα 2-1. Δορυφορική λήψη της αποστολής Sentinel-2 στις 07/12/2017. Περιοχή εισόδου καναλιού Βοιωτικού Κηφισού.



Σχήμα 2-4. Χάρτης αναπαράστασης βασικών χρήσεων γης για το έτος 2017 – 2018. (Πηγή δεδομένων: CLC 2018 — Copernicus Land Monitoring Service, n.d.).

2.1.6. Εφαρμογή της Οδηγίας Πλαίσιο 2000/60/ΕΚ

Σύμφωνα με την 1η Αναθεώρηση του ΣΔΛΑΠ Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας για τα Υδατικά Συστήματα που αφορούν την περιοχή της Υλίκης καταγράφονται τα εξής (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017b):

- Στο πρώτο ανάντη σκέλος του Βοιωτικού Κηφισού, επονομαζόμενο ρέμα Κανιάτης και μήκους 11,06km καταγράφεται καλή οικολογική και χημική κατάσταση. Στο εν λόγω σκέλος που ξεκινά από το χωριό Καστέλλια και φτάνει περί τη θέση του Σιδηροδρομικού Σταθμού (ΣΣ) Λιλαία, εντοπίζεται υψηλή ένταση πιέσεων που σχετίζονται με ουσίες προτεραιότητας, ειδικούς ρύπους κλπ., καθώς και υψηλή ένταση άλλων πιέσεων.
- Στο δεύτερο ανάντη σκέλος του Βοιωτικού Κηφισού, επονομαζόμενο ρέμα Αποστολίας, το οποίο ρέει παράλληλα του ρέματος Κανιάτης για 10,26km έως ότου συμβάλλουν, καταγράφεται μέτρια οικολογική και άγνωστη χημική κατάσταση. Στο εν λόγω σκέλος που ξεκινά από το ΣΣ Μπράλου και φτάνει περί τη θέση του ΣΣ Λιλαία, εντοπίζεται υψηλή ένταση πιέσεων που σχετίζονται με ουσίες προτεραιότητας, ειδικούς ρύπους κλπ., καθώς και υψηλή ένταση άλλων πιέσεων.
- Κατάντη της συμβολής των δύο παραπάνω ρεμάτων και μέχρι θέσεως ανάντη του ΣΣ Δαύλεια πλησίον του χωριού Βασιλικά, εντοπίζεται το τρίτο σκέλος του Βοιωτικού Κηφισού, στο οποίο καταγράφεται καλή οικολογική και άγνωστη χημική κατάσταση. Στο εν λόγω σκέλος, μήκους

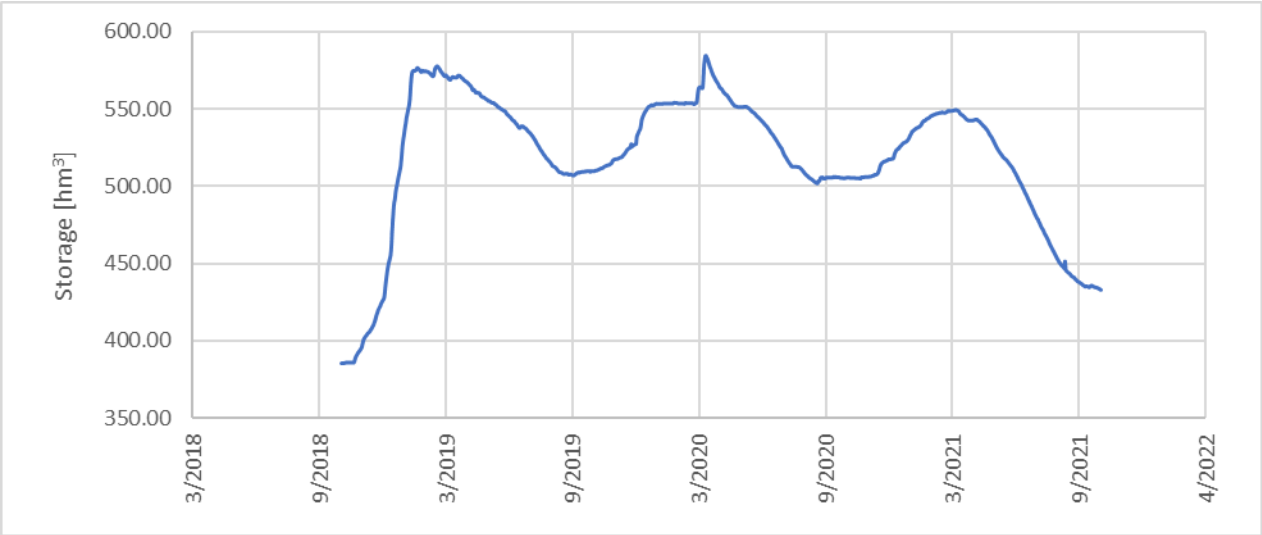
36,95km εντοπίζεται υψηλή ένταση πιέσεων που σχετίζονται με ουσίες προτεραιότητας, ειδικούς ρύπου κλπ., καθώς και μεσαία ένταση άλλων πιέσεων.

- Από το ΣΣ Δαύλεια και μέχρι θέσεως στα δυτικά του Ορχομενού, οριοθετείται το τέταρτο σκέλος του Βοιωτικού Κηφισού, μήκους 16,84km, στο οποίο καταγράφεται καλή οικολογική και καλή χημική κατάσταση. Στο εν λόγω σκέλος, εντοπίζεται χαμηλή ένταση πιέσεων.
- Από τα δυτικά του Ορχομενού και μέχρι τις εκβολές του ποταμού στον ταμιευτήρα Υλίκης, εντοπίζεται το πέμπτο σκέλος του Βοιωτικού Κηφισού, μήκους 37,81km, το οποίο βαίνει εντός καναλιού και στο οποίο καταγράφεται άγνωστη οικολογική και άγνωστη χημική κατάσταση. Στο εν λόγω σκέλος εντοπίζεται υψηλή ένταση πιέσεων που σχετίζονται με ουσίες προτεραιότητας, ειδικούς ρύπους κλπ., καθώς και υψηλή ένταση απολήψεων.
- Αναφορικά με το Υπόγειο Υδατικό Σύστημα Υλίκης – Παραλίμνης καταγράφεται καλή ποσοτική και ποιοτική κατάσταση. Επίσης δεν καταγράφεται εμφάνιση τάσης πτώσης στάθμης, ενώ οι κύριες καταγραφόμενες πιέσεις είναι η γεωργία και τα μεταλλεία.

2.2. Δεδομένα

2.2.1. Δεδομένα Όγκου Αποθήκευσης

Ο ταμιευτήρας της Υλίκης παρακολουθείται συστηματικά από τον διαχειριστή της, την Επιχείρηση Ύδρευσης και Αποχέτευσης Πρωτευούσης (ΕΥΔΑΠ). Μάλιστα οι καθημερινές παρατηρήσεις του αποθηκευμένου όγκου νερού του ταμιευτήρα δίνονται ως ανοικτά δεδομένα στην ιστοσελίδα της ΕΥΔΑΠ (ΕΥΔΑΠ Α.Ε., n.d.). Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, πρόκειται να αξιοποιηθούν τα δεδομένα του αποθηκευμένου όγκου νερού κατά την περίοδο Μάρτιος 2016 – Σεπτέμβριος 2021, για την οποία αξιοποιούνται ορισμένες μόνο μετρήσεις που σχετίζονται με τις διαθέσιμες ημερομηνίες λήψεις του δορυφόρου Sentinel-2. Παρόλα αυτά και για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, έχει καταγραφεί και παρουσιάζεται παρακάτω, στο Σχήμα 2-5 η πλήρης χρονοσειρά του αποθηκευμένου όγκου του ταμιευτήρα της Υλίκης για την περίοδο Νοέμβριος 2018 – Οκτώβριος 2021.



Σχήμα 2-5. Χρονοσειρά καθημερινών παρατηρήσεων αποθηκευμένου όγκου νερού ταμιευτήρα Υλίκης.

2.2.2. Δορυφορικά Δεδομένα προς εξαγωγή Επιφάνειας Νερού

Για την εκτίμηση της επιφάνειας του νερού του ταμιευτήρα Υλίκης, κατά την προτεινόμενη μεθοδολογία, πρόκειται να χρησιμοποιηθούν λήψεις της δορυφορικής αποστολής Sentinel-2. Η αποστολή Sentinel-2 πρόκειται για ευρωπαϊκή αποστολή, αποτελούμενη από δύο «δίδυμους» δορυφόρους, με βασικό στόχο την παρακολούθηση των μεταβολών των συνθηκών της επιφάνειας της γης μέσω πολυφασματικών φωτογραφήσεων της γης. Χαρακτηρίζεται από μεγάλο εύρος και υψηλή συχνότητα λήψεων (5 ημέρες στον Ισημερινό). Οι βασικότεροι στόχοι της αποστολής είναι η παροχή δεδομένων εισόδου για τη χαρτογράφηση των μεταβολών της κάλυψης και των χρήσεων γης καθώς και την αξιολόγηση βιογεωφυσικών παραμέτρων, όπως το Leaf Area Index, Leaf Chlorophyll Content και Leaf Cover.

Οι δύο δορυφόροι που συνιστούν την αποστολή Sentinel-2 είναι βάρους 1,2 τόνων και έχουν προσδόκιμο ζωής τα 7,25 έτη, παρότι έχουν σχεδιαστεί για μέχρι και 12 έτη λειτουργίας. Το μέσο υψόμετρο λειτουργίας τους είναι τα 786km ενώ και οι δύο φέρουν το Multi-Spectral Instrument (MSI), Πολύ-Φασματικό Όργανο, το οποίο λειτουργεί παθητικά, συλλέγοντας ηλιακή ακτινοβολία, όπως αντανακλάται από τη γη. Το Πολύ-Φασματικό Όργανο διαθέτει φασματικά φίλτρα για το διαχωρισμό του εισερχόμενου φωτός σε διακριτά μήκη κύματος – φάσματα. Η Εικόνα 2-2 αναπαριστά τους δορυφόρους της αποστολής Sentinel-2.

Εικόνα 2-2. Σχηματική αναπαράσταση δορυφόρου αποστολής Sentinel-2. (Πηγή: (SUHET, 2015)**).**

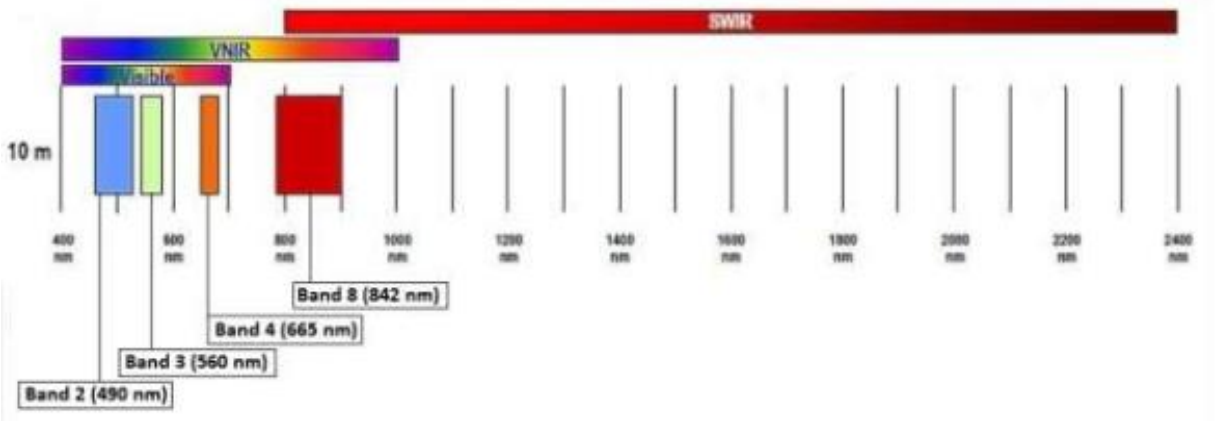
Η αποστολή Sentinel-2 πρόκειται επί της ουσίας για συνέχεια των αποστολών 1 – 7 της οικογένειας Landsat, οι οποίες ξεκίνησαν το 1972 και συνεχίζονται μέχρι και σήμερα. Βασικές διαφορές της εν λόγω αποστολής από την οικογένεια Landsat αλλά και από την αποστολή SPOT, είναι η υψηλότερη συχνότητα λήψης, το μεγαλύτερο εύρος λήψης (290km έναντι 185km των Landsat), οι περισσότερες φασματικές ομάδες λήψεις (13 έναντι 7 των Landsat) καθώς και η υψηλή χωρική ανάλυση (10m για οκτώ φάσματα).

Τα προϊόντα της δορυφορικής αποστολής Sentinel-2 διακριτοποιούνται με βάση το βαθμό επεξεργασίας πριν αυτά γίνουν διαθέσιμα προς τους τελικούς χρήστες μέσω ειδικής πλατφόρμα του Copernicus.

1. Επίπεδο – 0 : Τα προϊόντα Επιπέδου – 0 δεν είναι διαθέσιμα στους χρήστες. Πρόκειται για τα ανεπεξέργαστα δεδομένα – φωτογραφικές λήψεις, τα οποία επεξεργάζονται ώστε να παραχθούν τα προϊόντα Επιπέδου – 1.
2. Επίπεδο – 1A: Τα προϊόντα Επιπέδου – 1A δεν είναι διαθέσιμα στους χρήστες. Πρόκειται για τα αποσυμπιεσμένα δεδομένα από το Επίπεδο – 0, στα οποία γίνεται γεωχωρικός εντοπισμός, ώστε κάθε φατνίο (pixel) να αποδίδεται ακριβώς σε μία γεωγραφική θέση.
3. Επίπεδο – 1B: Τα προϊόντα Επιπέδου – 1B είναι διαθέσιμα στους χρήστες. Πρόκειται για τα προϊόντα Επιπέδου – 1A διορθωμένα για ραδιομετρικούς παράγοντες στην κορυφή της ατμόσφαιρας (Top-Of-Atmosphere) καθώς και για τη γεωμετρία του οργάνου – αισθητήρα.
4. Επίπεδο – 1C: Τα προϊόντα Επιπέδου – 1C είναι διαθέσιμα στους χρήστες. Πρόκειται για τα προϊόντα Επιπέδου – 1B που συνδυαζόμενα με ένα Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ) προβάλλονται σε συγκεκριμένο σύστημα συντεταγμένων.
5. Επίπεδο – 2: Τα προϊόντα Επιπέδου – 2 είναι διαθέσιμα στους χρήστες. Πρόκειται για τα προϊόντα Επιπέδου – 1C διορθωμένα στο επίπεδο της επιφάνειας της γης, ήτοι στο επίπεδο του κάτω επιπέδου της Ατμόσφαιρας (Bottom of Atmosphere).

Αναφορικά με τη χωρική ανάλυση των φασμάτων που λαμβάνονται από την αποστολή Sentinel – 2, ισχύουν τα ακόλουθα:

- Παρέχονται 4 φάσματα σε ανάλυση 10m: B2 στα 490mm, B3 στα 560mm, B4 στα 665mm και B8 στα 842mm. (Εικόνα 2-3)
- Παρέχονται 6 φάσματα σε ανάλυση 20m: B5 στα 705mm, B6 στα 740mm, B7 στα 783mm, B8a στα 865mm, B11 στα 1.610mm και B12 στα 2.190mm.
- Παρέχονται 3 φάσματα σε ανάλυση 60m: B1 στα 443mm, B9 στα 945mm και B10 στα 1.375mm.



Εικόνα 2-3. Αναπαράσταση των 4 φασμάτων που παρέχονται σε ανάλυση 10m. (Πηγή: (SUHET, 2015)).

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας επιλέγονται να χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα Επιπέδου – 2, καθότι δεν απαιτούν περαιτέρω επεξεργασία αναφορικά με ατμοσφαιρικές διορθώσεις ή διορθώσεις του οργάνου. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται λήψεις της χωρικής ανάλυσης 10m, οι οποίες επιλέγονται ώστε να μην καλύπτεται από σύννεφα η περιοχή του ταμιευτήρα Υλίκης. Ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων λήψεων είναι 69, με το μέσο χρονικό βήμα μεταξύ διαδοχικών λήψεων να

υπολογίζεται σε ένα μήνα. Η κάθε λήψη συνδυάζεται με τον αποθηκευμένο όγκο που έχει καταγράψει και διαθέτει στην ιστοσελίδα του ο διαχειριστής του ταμιευτήρα (ΕΥΔΑΠ).

2.2.3. Δορυφορικά Δεδομένα προς εξαγωγή Στάθμης Νερού

Για την εξαγωγή της στάθμης νερού του ταμιευτήρα, κατά την προτεινόμενη μεθοδολογία, πρόκειται να αξιοποιηθούν τα δεδομένα της αποστολής Sentinel-3. Η αποστολή Sentinel-3 πρόκειται για ευρωπαϊκή αποστολή, η οποία ενσωματώνει επιμέρους αποστολές υπό την ευρύτερη αποστολή δύο «δίδυμων» δορυφόρων (Εικόνα 2-4). Σκοπός της αποστολής Sentinel-3 αποτελεί η οπτική απεικόνιση των ωκεανών και της γης με γνώμονα την απόκτηση βιολογικών πληροφοριών, η απόκτηση πληροφορίας της επιφανειακής θερμοκρασίας σε παγκόσμια κλίμακα και η παροχή επιχειρησιακών μετρήσεων υψομετρίας σε ορίζοντα εικοσαετίας.

Εικόνα 2-4. Ο δορυφόρος Sentinel-3A. (Πηγή: ESA, 2022)

Για τους παραπάνω σκοπούς, οι δορυφόροι της αποστολής Sentinel-3 ενσωματώνουν τρία διαφορετικά συστήματα οργάνων. Αναφορικά με την οπτική απεικόνιση των ωκεανών και της γης, ενσωματώνουν το όργανο OLCI (Ocean and Land Colour Instrument), το οποία παράγει πλάνα με χωρική ανάλυση 300m. Σε σχέση με την παρακολούθηση της επιφανειακής θερμοκρασίας πάνω από τον ωκεανό και τη στεριά, η αποστολή ενσωματώνει το όργανο SLSTR (Sea and Land Surface Temperature). Ο σχεδιασμός του οργάνου SLSTR αποσκοπεί στην παροχή λήψεων της επιφανειακής θερμοκρασίας με μηδενικό σφάλμα και αβεβαιότητα της τάξης των 0,3K, σε πλάνα πλάτους 1400km κατά μήκος της πορείας και 740km εκτός πορείας. Η χωρική ανάλυση των μετρήσεων του οργάνου SLSTR κυμαίνεται μεταξύ 0,5km – 1km (European Space Agency, n.d.-b, n.d.-a).

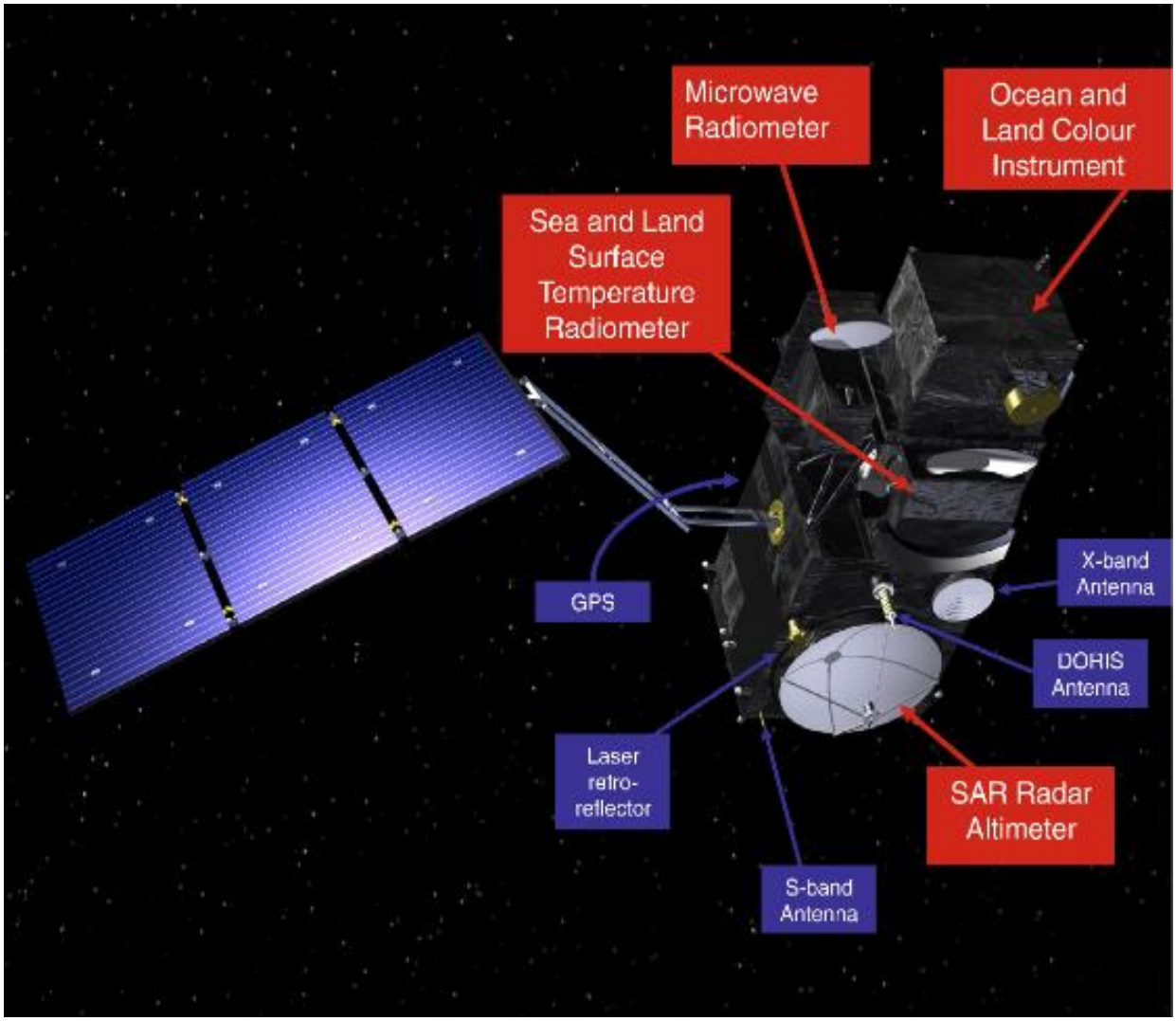
Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, πρόκειται να αξιοποιηθεί η αποστολή Sentinel-3 topography mission (αποστολή τοπογραφίας). Ο πρωταρχικός σκοπός της εν λόγω αποστολής, υπήρξε η μελέτη της

ωκεάνιας τοπογραφίας, συμπεριλαμβανομένων της μέσης στάθμης θάλασσας, του ύψους κύματος καθώς και της ταχύτητας του ανέμου κ.ά. Παρόλα αυτά, σημαντική θεωρείται η συνεισφορά της εν λόγω αποστολής και στη μελέτη της ηπειρωτικής τοπογραφίας και κυρίως των ηπειρωτικών παγετώνων, της στεριάς και των εσωτερικών υδάτων (λ.χ. ποτάμια, λίμνες).

Η αποστολή Sentinel-3 έχει ενσωματώσει αναβαθμισμένης ακρίβειας όργανα για σημειακές μετρήσεις κατά μήκος της πορείας (τροχιάς) του κάθε δορυφόρου. Ως εκ τούτου, η χωρική ανάλυση ανέρχεται στα 300m κατά μήκος της πορείας και δίνει τη δυνατότητα λήψης δεδομένων στάθμης νερού ακόμα και σε σχετικά στενούς ποταμούς και μικρές λίμνες. Αναφορικά με τη χρονική ανάλυση, ο κύκλος του δορυφόρου για να ακολουθήσει την ίδια τροχιά είναι περί τις 27 ημέρες, όπου όμως λόγω των αποκλίσεων της τροχιάς μπορεί να μην στοχεύσει την εκάστοτε λίμνη ή ποτάμι σε κάθε κύκλου, εάν αυτά είναι μικρού μεγέθους.

Σε σχέση με τα επίπεδα των προϊόντων του οργάνου της υψομετρίας, επονομαζόμενου SRAL (Synthetic aperture Radar Altimeter), τα προϊόντα Επιπέδου 0 και Επιπέδου 1 αφορούν τις κυματομορφές που λαμβάνει ο δέκτης του εν λόγω ραντάρ με ανά περίπτωση ορισμένες διορθώσεις. Τα προϊόντα Επιπέδου 2, τα οποία χρησιμοποιούνται κατά την προτεινόμενη μεθοδολογία, παρέχουν έτοιμα προς χρήση τις σημειακές πλέον μετρήσεις των τιμών, όπως αυτές προκύπτουν από την επεξεργασία των κυματομορφών των χαμηλότερων επιπέδων. Τα προϊόντα επιπέδου 2 παρέχουν μετρήσεις για τρία διαφορετικά φάσματα εκπομπής: (α) Φάσμα Ku στα 20Hz, (β) Φάσμα C στα 20Hz και (γ) Φάσματα Ku και C στο 1Hz.

Η μέτρηση της απόστασης του δορυφόρου από το γεωειδές επιτυγχάνεται από τη βασική συχνότητα λειτουργίας που είναι η Ku (13.575GHz) ενώ η συχνότητα C χρησιμοποιείται για διορθώσεις των μετρήσεων της συχνότητας Ku. Την αποστολή της τοπογραφίας των δορυφόρων Sentinel-3, συμπληρώνουν μικρότερα όργανα τα οποία είναι απαραίτητα της καλής λειτουργίας του SRAL. Τέτοια είναι παραδείγματος χάριν ο μηχανισμός DORIS, το οποίο είναι ένα όργανο για τον ακριβή γεωχωρικό εντοπισμό της ακριβούς τροχιάς του δορυφόρου (European Space Agency, n.d.-b, n.d.-a).



Εικόνα 2-5. Τα βασικά όργανα των δορυφόρων της αποστολής Sentinel-3. (Πηγή: ESA, 2022)

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν 37 «περάσματα» των δορυφόρων της αποστολής Sentinel-3, τα οποία κατέγραψαν μετρήσεις στην επιφάνεια νερού του ταμιευτήρα. Οι εν λόγω μετρήσεις αφορούν τη χρονική περίοδο μεταξύ Νοεμβρίου 2018 και Σεπτεμβρίου 2021. Κατά μέσο όρο, το χρονικό βήμα μεταξύ διαδοχικών περασμάτων των δορυφόρων υπολογίστηκε σε ένα μήνα. Κάθε λήψη που χρησιμοποιήθηκε, συνδυάστηκε με τον καταγεγραμμένο από το διαχειριστή όγκο νερού του ταμιευτήρα.

3. Μεθοδολογία

Στο παρόν Κεφάλαιο παρατίθενται οι βασικές αρχές των μεθοδολογικών προσεγγίσεων που πρόκειται να δοκιμαστούν στον ταμιευτήρα της Υλίκης. Επίσης, παρουσιάζεται ο τρόπος που υλοποιείται η εκάστοτε μεθοδολογική προσέγγιση. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά, παρουσιάζεται η μεθοδολογία εκτίμησης της επιφάνειας νερού του ταμιευτήρα Υλίκης και η μεθοδολογία εκτίμησης της στάθμης νερού του ταμιευτήρα. Κατόπιν, συζητείται ο συνδυασμός των εκτιμήσεων στάθμης και επιφάνειας νερού και ιδίως το χρονικό διάστημα εντός του οποίου συνδυάζεται οι πλησιέστερες, χρονικά, εκτιμήσεις. Έπειτα, παρουσιάζονται οι διαφορετικές προσεγγίσεις σε σχέση με την εκτίμηση της μεταβολής του όγκου νερού σε λίμνες και ταμιευτήρες, οι οποίες πρόκειται να δοκιμαστούν στον ταμιευτήρα. Τέλος, παρουσιάζεται η σύγκριση που θα λάβει χώρα των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθοδολογίας με τις διαθέσιμες στη βιβλιογραφία καμπύλες Στάθμης – Επιφάνειας – Χωρητικότητας (Σ-Ε-Χ) του ταμιευτήρα.

3.1. Εκτίμηση της επιφάνειας νερού του ταμιευτήρα Υλίκης

Για την εκτίμηση της επιφάνειας νερού του ταμιευτήρα της Υλίκης, όπως έχει αναφερθεί και στην Παράγραφο 2.2.2., πρόκειται να χρησιμοποιηθούν δεδομένα της αποστολής Sentinel-2. Πιο συγκεκριμένα, επιλέγονται λήψεις του οργάνου MSI, επιπέδου επεξεργασία Επίπεδο-2. Οι λήψεις Επιπέδου-2 δεν απαιτούν οποιουδήποτε είδους περαιτέρω επεξεργασίας και μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας για την εκτίμηση των δεικτών διαχωρισμού νερού – εδάφους / εδαφικής βλάστησης. Δεδομένου ότι ο δείκτης NDWI αποτελεί τεκμηριωμένα τον πιο διαδεδομένο δείκτη του προαναφερθέντος διαχωρισμού και είναι εγνωσμένης αποδοτικότητας στον εντοπισμό των υδάτινων στοιχείων (Cavallo et al., 2021; Yang et al., 2017), επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί αυτός και όχι κάποια από τις παραλλαγές του.

Τα προϊόντα της αποστολής Sentinel-2 είναι ορθοφωτογραφίες, διορθωμένες τόσο στην κορυφή όσο και στο κάτω επίπεδο της ατμόσφαιρας. Από τις επιμέρους κάψουλες δεδομένων κάθε ημερομηνίας λήψης, επιλέγεται η κάψουλα χωρικής ανάλυσης 10m, ως η πιο ακριβής. Για τον υπολογισμό του δείκτη NDWI χρησιμοποιούνται, όπως έχει παρατεθεί και στο Κεφάλαιο 1, τα φάσματα του πράσινου χρώματος και του σχεδόν υπέρυθρου. Η κάψουλα ανάλυσης 10m, περιέχει δύο διακριτά raster αρχεία λήψης, το ένα στο πράσινο φάσμα (Band3 - 560mm) και το έτερο στο σχεδόν υπέρυθρο (Band8 - 842mm). Με βάση τα παραπάνω ο δείκτης NDWI που πρόκειται να εφαρμοστεί διαμορφώνεται όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$NDWI_{Sentinel-2} = \frac{Band3 - Band8}{Band3 + Band8}$$

Για τις ανάγκες υπολογισμού του δείκτη NDWI, διαμορφώνεται σε περιβάλλον Python, μία αυτόματη διαδικασία υπολογισμού, η οποία πρόκειται να παρουσιαστεί παρακάτω. Σημαντικό στοιχείο, της εν λόγω διαδικασίας είναι η βελτιστοποίηση του κατωφλιού διαχωρισμού νερού – εδάφους / εδαφικής βλάστησης. Συγκεκριμένα, έχει αποδειχθεί ότι στις πλείστες περιπτώσεις ότι το κατώφλι διαχωρισμού τιμής 0 δεν είναι πάντοτε το πιο αποτελεσματικό (Sekertekin, 2020). Ο Sekertekin μάλιστα εξετάζει διαφορετικές μεθοδολογίες εύρεσης του ιδανικού κατωφλιού και καταλήγει στην ιδανικότερη αναφορικά με τη χρήση του NDWI, με δεδομένα της αποστολής Sentinel-2, η οποία είναι η μέθοδος ελάχιστου κατωφλιού. Η μέθοδος ελάχιστου κατωφλιού παρουσιάστηκε πρώτη φορά το 1966 και αφορούσε τη διάκριση κυτταρικών εικόνων (Prewitt & Mendelsohn, 2006). Κατά την παραπάνω μέθοδο,

το ιστόγραμμα κάθε εικόνας λειαίνεται έως ότου διαμορφωθούν μόλις δύο τοπικά μέγιστα. Το ιδανικό κατώφλι αναγνωρίζεται στο τοπικό ελάχιστο, εντός των δύο τοπικών μεγίστων. Με το ιδανικό κατώφλι γίνεται επαναϋπολογισμός του αρχικού δείκτη NDWI, και υπολογίζεται η επιφάνεια των υδάτινων στοιχείων.

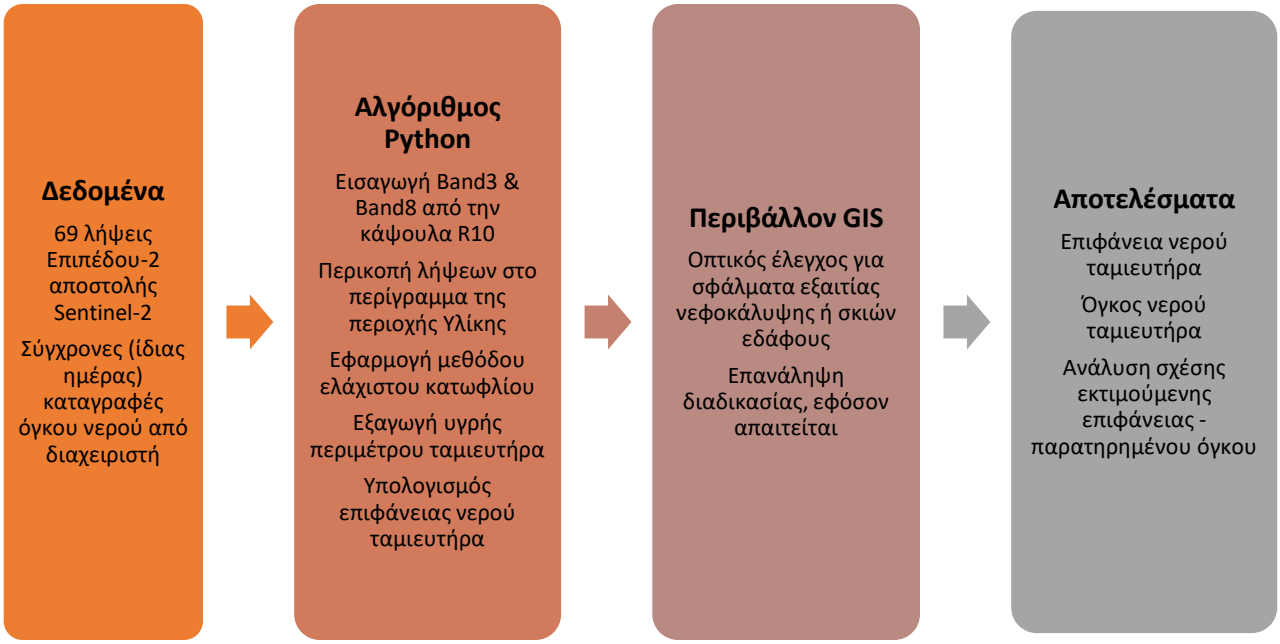
3.1.1. Αναλυτική μεθοδολογία εκτίμησης της επιφάνειας νερού του ταμιευτήρα Υλίκης

Στο περιβάλλον Python και συγκεκριμένα με το εργαλείο Jupyter Notebook, εισάγονται τα δύο raster αρχεία του πράσινου και σχεδόν υπέρυθρου χρώματος. Επίσης εισάγονται τα πακέτα εργαλείων “Geopandas”, “Rasterio”, “Fiona”, “Numpy” και “Shapely”. Αρχικά, τα δύο raster (κανονικοποιημένα) αρχεία περικόπτονται με το περίγραμμα της ευρύτερης περιοχής του ταμιευτήρα Υλίκης και δημιουργούνται δύο νέα raster αρχεία που καλύπτουν μόνο την εν λόγω περιοχή. Κατόπιν, καταρτίζεται ένα raster αρχείο το οποίο περιέχει τον αρχικά υπολογισμένο δείκτη NDWI.

Στο αρχείο του υπολογισμένο δείκτη NDWI λαμβάνει χώρα η διαδικασία λείανσης του ιστογράμματος, από την οποία προκύπτει η τιμή του ιδανικού κατωφλίου, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Με την εφαρμογή του ιδανικού κατωφλίου, γίνεται ο διαχωρισμός των τιμών του δείκτη NDWI σε φατνία νερού και φατνία μη νερού. Με βάση τα διακριτοποιημένα φατνία, υπολογίζεται η περίμετρος του υδάτινου σώματος του ταμιευτήρας και αποθηκεύεται σε μορφή shapefile.

Η περίμετρος του νερού έπειτα μετατρέπεται σε πολύγωνο, καθιστώντας δυνατό τον υπολογισμό της επιφάνειας νερού του ταμιευτήρα. Η υπολογισμένη τιμή της επιφάνειας, ανατίθεται σε νέο πεδίο στο shapefile που διαθέτει την περίμετρο και καταγράφεται. Για την ημερομηνία στην οποία αναλογεί κάθε υπολογισμένη επιφάνεια νερού, ανατίθεται και ο καταγεγραμμένος όγκος νερού του ταμιευτήρα, όπως αυτός παρέχεται από το διαχειριστή του (ΕΥΔΑΠ).

Τελικώς, το εξαγόμενο shapefile της περιμέτρου, που περιέχει την πληροφορία της επιφάνειας, εισάγεται σε περιβάλλον GIS. Εκεί, λαμβάνει χώρα οπτικός έλεγχος για τη διαπίστωση της ορθότητας των εξαγόμενων αποτελεσμάτων σε σχέση με προβλήματα που μπορεί να δημιουργήσει η νεφοκάλυψη ή κατά τους χειμερινούς μήνες, οι σκιές των λόφων που περικλείουν τον ταμιευτήρα. Εφόσον, διαπιστωθεί αλλοίωση της υπολογιζόμενης επιφάνειας, η λήψη με την οποία έγιναν οι παραπάνω υπολογισμοί απορρίπτεται και αναζητείται η κοντινότερη χρονολογικά λήψη με την οποία επαναλαμβάνεται η παραπάνω διαδικασία. Στο Σχήμα 3-1 δίνεται μία σχηματική αναπαράσταση της περιγραφόμενης μεθοδολογίας.



Σχήμα 3-1. Σχηματική αναπαράσταση μεθοδολογίας εκτίμησης επιφάνειας νερού ταμιευτήρα Υλίκης

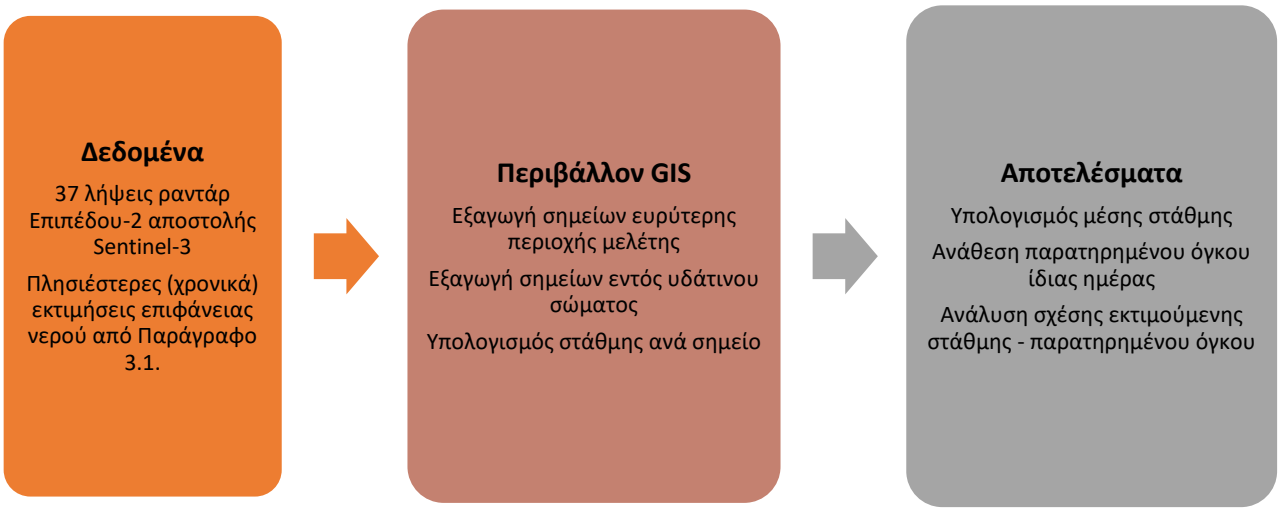
3.2. Εκτίμηση της στάθμης νερού του ταμιευτήρα Υλίκης

Η εξαγωγή της στάθμης του νερού του ταμιευτήρα σε μ.σ.θ. λαμβάνει χώρα μέσω της εισαγωγής των δεδομένων του Sentinel-3 σε περιβάλλον GIS. Το διανυσματικό αρχείο (shapefile) που εισάγεται περιέχεται τις σημειακές μετρήσεις κατά μήκος ενός πλήρους κύκλου, ενός εκ των δύο δορυφόρων της αποστολής. Συνεπώς, αρχικά περικόπτεται στο περίγραμμα της ευρύτερης περιοχής του ταμιευτήρα. Από τις διαθέσιμες μετρήσεις Επιπέδου-2, χρησιμοποιείται το φάσμα εκπομπής ku 20Hz, όπως έχει αναλυθεί και στην Παράγραφο 2.2.3. Αφότου πραγματοποιηθεί η περικοπή με βάση την ευρύτερη περιοχή μελέτης, λαμβάνει χώρα οπτικός έλεγχος ώστε να επιλεγούν οι σημειακές μετρήσεις που βρίσκονται μετά βεβαιότητας εντός της υγρής περιμέτρου του ταμιευτήρα. Συνεπώς, οι σημειακές μετρήσεις συγκρίνονται με την πλησιέστερη χρονική εξαγμένη περίμετρο νερού του ταμιευτήρα. Τα σημεία που δεν βρίσκονται εντός της τελευταίας διαγράφονται από το τελικό αρχείο.

Η στάθμη του νερού του ταμιευτήρα υπολογίζεται ως η διαφορά των μετρήσεων των πεδίων “elevation_ocog_20_ku” και “mean_surface_sol_20_ku”. Το πρώτο πεδίο ενσωματώνει την υπολογιζόμενη διαφορά μεταξύ του υψομέτρου πτήσης του δορυφόρου καθώς και της απόστασης που υπολογίζει το ραντάρ μεταξύ δορυφόρου και αντανακλώμενης επιφάνειας (επιφάνεια νερού ταμιευτήρα στην προκειμένη περίπτωση). Επιπρόσθετα, ο όρος «ocog», αναφέρεται σε έναν εμπειρικό αλγόριθμο, (Offset Centre of Gravity OCOG retracker), ο οποίος διορθώνει την υπολογισμένη διαφορά δορυφόρου – γήινης επιφάνειας, επαναϋπολογίζοντας την ακριβή τροχιά του δορυφόρου. Ο εν λόγω αλγόριθμος, έχει υπολογιστεί πως παρουσιάζει απόλυτο σφάλμα της τάξης των 285 ± 20mm (Crétaux et al., 2018). Διαφορετική μελέτη περίπτωσης στη λίμνη Βοστόκ, τεκμηριώνει για τον ίδιο αλγόριθμο τυπική απόκλιση της τάξης των 20cm (Schröder et al., 2017). Αφετέρου, το δεύτερο πεδίο, περιέχει τον υπολογισμό του υψομέτρου του γεωειδούς σε κάθε σημείο μέτρησης. Συνεπώς η διαφορά τους έχει σαν αποτέλεσμα τη στάθμης του νερού σε μ.σ.θ. Παρότι, καταγράφονται και πιο σύνθετοι λογάριθμοι με ανά περίπτωση

ακριβέστερα αποτελέσματα σε σχέση με τον OCOG, το βασικό προτέρημα του εν λόγω λογαρίθμου είναι ότι δίδεται το αποτέλεσμά του απευθείας στο διανυσματικό αρχείο κάθε μέτρησης της αποστολής Sentinel-3. Συνεπώς εξυπηρετεί τους στόχους της παρούσας ερευνητικής εργασίας, οι οποίοι, όπως έχει αναφερθεί, είναι η εξεύρεση και η πρόταση μίας εύκολης στην εφαρμογή μεθοδολογίας υπολογισμού της μεταβολής του όγκου νερού σε ταμιευτήρες και λίμνες.

Τα υπολογισμένα σημεία που περιέχουν τιμές στάθμης κατόπιν εισάγονται σε υπολογιστικό φύλλο, όπου εξάγονται τα βασικά στατιστικά τους χαρακτηριστικά. Παρότι προτείνονται διαφορετικές προσεγγίσεις σε σχέση με τον υπολογισμό της τιμής που ανατίθεται ως στάθμη στο σύνολο της υδάτινης επιφάνειας, στην παρούσα ερευνητική εργασία, επιλέγεται ο ευθύς υπολογισμός της στάθμης από τον μέσο όρο των διαθέσιμων σημείων, εντός τη υδάτινης επιφάνειας. Για κάθε ημερομηνία διέλευσης των δορυφόρων Sentinel-3 για την οποία έχει υπολογιστεί στάθμη του ταμιευτήρα, ανατίθεται και η τιμή του καταγεγραμμένου από το διαχειριστή του ταμιευτήρα όγκου. Μετά τον υπολογισμό των σταθμών για 37 δορυφορικές λήψεις ραντάρ, λαμβάνει χώρα ανάλυση της σχέσης μεταξύ εκτιμωμένης στάθμης και παρατηρημένου όγκου νερού. Οι δορυφορικές λήψεις αφορούν το διάστημα μεταξύ Νοεμβρίου 2018 και Σεπτεμβρίου 2021 και χαρακτηρίζονται από μέση χρονική απόσταση περί του ενός μήνα.



Σχήμα 3-2. Σχηματική αναπαράσταση μεθοδολογίας εκτίμησης στάθμης νερού ταμιευτήρα Υλίκης

3.3. Συνδυασμός των εκτιμήσεων στάθμης – επιφάνειας νερού ταμιευτήρα Υλίκης

Έχοντας υπολογίσει από τα δεδομένα δορυφορικής τηλεπισκόπησης τόσο τη στάθμη του νερού όσο και την επιφάνειά του, πολύ σημαντικό στοιχείο για την εκτίμηση της μεταβολής του όγκου νερού των λιμναίων συστημάτων, αποτελεί το χρονικό εύρος εντός του οποίου τα παραπάνω δεδομένα συνδυάζονται. Πιο συγκεκριμένα, για τις ανάγκες υπολογισμού της μεταβολής του όγκου, απαιτείται η δημιουργία ζευγών των τιμών στάθμης – επιφάνειας.

Για την επίτευξη του παραπάνω σκοπού, πρέπει να επιλεγεί ένα ορισμένο χρονικό εύρος κάποιων ημερών, το οποίο αφενός να εξασφαλίζει την ύπαρξη τέτοιων ζευγών και αφετέρου να μην είναι τόσο μεγάλο ώστε να επιβαρύνεται αισθητά η ακρίβεια του αποτελέσματος. Στα πλαίσια μελέτης περίπτωσης εκτίμησης μεταβολής του όγκου της λίμνης Βικτώρια (68,870 km^2), οι ερευνητές είχαν υιοθετήσει χρονικό εύρος δύο ημερών, δίχως σαφή τεκμηρίωση της επιλογής τους (Lin et al., 2020). Σε μία διαφορετική

μελέτη περίπτωσης, σαφώς μικρότερων λιμνών (<1km^2), οι ερευνητές υιοθετούν αντίστοιχα χρονικό εύρος πέντε ημερών, ξανά όμως δίχως σαφή τεκμηρίωση της επιλογής τους (Baup et al., 2014). Συνεπώς, για την υιοθέτηση ενός κατάλληλου χρονικού εύρους, στα πλαίσια της παρούσας ερευνητικής εργασίας, αναλύεται η διαθέσιμη χρονοσειρά όγκου νερού του ταμιευτήρα, την περίοδο που καλύπτει τις εκτιμήσεις στάθμης και εξετάζονται διαφορετικές τιμές ημερών εύρους για το συνδυασμό των εκτιμήσεων στάθμης και επιφάνειας νερού του ταμιευτήρα.

3.4. Εκτίμηση της μεταβολής του αποθηκευμένου όγκου νερού του ταμιευτήρα Υλίκης

Αφότου επιλεχθεί το κατάλληλο χρονικό εύρος της Παραγράφου 3.3., τα αποτελέσματα των Παραγράφων 3.1. και 3.2. συνδυάζονται για τον υπολογισμό του όγκου ή της μεταβολής αυτού του ταμιευτήρα Υλίκης. Καθότι οι τρεις εκ των τεσσάρων διαφορετικών μεθοδολογιών που θα εξεταστούν στον ταμιευτήρα, προσδοκούν στην εκτίμηση της μεταβολής του όγκου μεταξύ δύο διαδοχικών ζευγών στάθμης – επιφάνειας, και η τέταρτη μεθοδολογία, η οποία υπολογίζει τον όγκο του ταμιευτήρα, ανάγεται στον υπολογισμό της μεταβολής για λόγους συμβατότητας. Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω μεθοδολογίες, δημιουργούνται τέσσερεις διαφορετικές χρονοσειρές μεταβολής του όγκου του ταμιευτήρα, οι οποίες συγκρίνονται με την πραγματική χρονοσειρά, βάση των καταγραφών του διαχειριστή. Συγκεκριμένα, ελέγχεται το σφάλμα μεταξύ κάθε εκτίμησης και της καταγεγραμμένης χρονοσειρά καθώς και τα λογικά σφάλματα, δηλαδή εκτιμήσεις μεταβολής όγκου που δεν συμφωνεί το πρόσημό τους με το καταγεγραμμένο. Οι τέσσερεις διαφορετικές προσεγγίσεις παρουσιάζονται παρακάτω.

3.4.1. Μέθοδος γραμμικής σχέσης υψομέτρου – επιφάνειας

Οι Busker et. al. (2018), στα πλαίσια της προαναφερθείσας βάσης δεδομένων για 137 λίμνες, DAHITI, προχωρούν στην εκτίμηση του όγκου κάθε λίμνης με την υπόθεση γραμμικής σχέσης μεταξύ στάθμης και επιφάνειας νερού. Η εν λόγω υπόθεση εφαρμόστηκε στις 137 λίμνες, οι οποίες παρουσιάζουν πολύ διαφορετικά χαρακτηριστικά μεταξύ τους, με τις μικρότερες να χαρακτηρίζονται από μέγιστα επιφάνεια νερού μερικών τετραγωνικών χιλιομέτρων και τη μεγαλύτερη, τη λίμνη Βαϊκάλη, να παρουσιάζει μέγιστη επιφάνεια νερού 31.572,6km^2.

Για τους σκοπούς της έρευνάς τους χρησιμοποιούν τα δεδομένα επιφάνειας νερού από τη σύνολο δεδομένων JRC Global Surface Water (GSW), το οποίο βασίζεται σε ορθοφωτογραφίες των αποστολών Landsat. Ο συνδυασμός των δύο συνόλων δεδομένων, του DAHITI και του GSW, είχε ως αποτέλεσμα την επιτυχή εκτίμηση του όγκου νερού των 137 λιμνών. Πιο συγκεκριμένα σε 58 λίμνες ο συντελεστής προσδιορισμού υπολογίστηκε μεγαλύτερος του 0,8, ενώ σε άλλες 42 λίμνες παρατηρήθηκε σχεδόν σταθερή επιφάνεια νερού. Τέλος, διαπιστώθηκε χαμηλότερη ικανότητα υπολογισμού του όγκου νερού σε 37 λίμνες, οι οποίες επηρεάζονταν έντονα από κάλυψη πάγου ή το σύνολο δεδομένων GSW δεν περιείχε επαρκή στοιχεία για την επιφάνειά τους. Τα θετικά αποτελέσματα της παραπάνω εφαρμογής συντείνουν στο γεγονός ότι η εν λόγω μεθοδολογία θα μπορούσε με επιτυχία να εφαρμοστεί και στον ταμιευτήρα της Υλίκης.

Η βασική υπόθεση της παραπάνω μεθοδολογίας παρουσιάζεται στην Εξίσωση 3-1 παρακάτω:

$$h_i = a \times A_i + b + \varepsilon_i \quad (3\text{-}1)$$

Όπου τα h_i και A_i αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα τη στάθμη και την επιφάνεια νερού κάθε ζεύγους μετρήσεων, ενώ το *α* και *b*, αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα την κλήση και τη σταθερά της γραμμικής παρεμβολής. Τέλος ο όρος ε_i αντιπροσωπεύει το σφάλμα για κάθε χρονικό βήμα *i*. Για το σύνολο των ζευγών στάθμης – επιφάνειας, οι παράμετροι *α* και *b* υπολογίζονται ελαχιστοποιώντας τον όρο σφάλματος $\sum \varepsilon_i^2$. Έχοντας υπολογίσει τα παραπάνω και με την υπόθεση της γραμμικής σχέση στάθμης – επιφάνειας, δύναται να εκτιμηθεί ο όγκος της λίμνης για το συγκεκριμένο ζεύγος τιμών του χρόνου *i*, σύμφωνα με την Εξίσωση 3-2.

$$E[V_i] = \frac{(h_i - b) \times A_i}{2} \quad (3\text{-}2)$$

Τέλος, υποθέτοντας ότι για η παράμετρος *b* ισοδυναμεί με το υψόμετρο του πυθμένα, δηλαδή όταν η λίμνη είναι άδεια νερού (A=0), η Εξίσωση 3-2 μετασχηματίζει στην Εξίσωση 3-3, με την οποία μπορεί να εκτιμηθεί ο όγκος νερού μόνο με το δεδομένο της στάθμης ή της επιφάνειας του νερού.

$$E[V_i] = \frac{(h_i - b)^2}{2 \times \alpha} = \frac{\alpha \times A_i^2}{2} \quad (3\text{-}3)$$

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή της Παραγράφου 3.4., καθώς οι επόμενες μεθοδολογίες της παρούσας ερευνητικής εργασίας εξετάζουν τη μεταβολή του όγκου, η παραπάνω μεθοδολογία χρησιμοποιείται όπως παρουσιάζεται παρακάτω, στην Εξίσωση 3-4.

$$\Delta V_{i,i+1} = E[V_{i+1}] - E[V_i] \quad (3\text{-}4)$$

3.4.2. Μέθοδος τριγωνικού σχήματος λίμνης

Οι Baup et. al. (2014), στα πλαίσια υπολογισμού της μεταβολής του όγκου νερού μικρών λιμνών (επιφάνειας A<1km^2), υιοθετούν ένα τριγωνικό σχήμα λίμνης. Μέσω της γεωμετρίας της παραπάνω υπόθεσης, υπολογίζουν τη μεταβολή του όγκου νερού όπως παρουσιάζεται στην Εξίσωση 3-5.

$$\Delta V = A(t1) \times |\Delta H| + sgn(\Delta H) \times \frac{|\Delta A| \times |\Delta H|}{2} \quad (3\text{-}5)$$

Όπου, το *ΔV* συμβολίζει τη μεταβολή του όγκου μεταξύ δύο χρόνων *t1* και *t2*, το *ΔH* ορίζεται ως η διαφορά της στάθμης μεταξύ των δύο χρόνων και το *ΔA* ως η διαφορά της επιφάνειας νερού.

Στα πλαίσια της έρευνάς τους, οι παραπάνω συγγραφείς εξετάζουν τη μεταβολή του όγκου της λίμνης La Bure, η οποία βρίσκεται στη νοτιοδυτική Γαλλία και χαρακτηρίζεται από μέγιστη επιφάνεια νερού 0,52km^2 και χωρητικότητα 4,1hm^3. Πιο συγκεκριμένα, αξιοποιώντας ορθοφωτογραφίες ραντάρ (Synthetic Aperture Radar – SAR) από δύο διαφορετικούς δορυφόρους, δεδομένα ραντάρ υψομετρία του δορυφόρου ENVISAT καθώς και στοιχεία από τη διαχειρίστρια εταιρία της λίμνης εξετάζουν τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις ελέγχου της μεταβολής του αποθηκευμένου όγκου νερού. Η πρώτη συνίσταται στην εκτίμηση του όγκου νερού με τη χρήση μόνο των ορθοφωτογραφιών ραντάρ και την αξιοποίηση των δεδομένων βυθομετρικής χαρτογράφησης της λίμνης από το διαχειριστή της. Η δεύτερη αφορά την εξαγωγή της μεταβολής του όγκου νερού της λίμνης με αξιοποίηση μόνο των δεδομένων υψομετρίας, η οποία επαληθεύεται με τις καταγραφές στάθμης από το διαχειριστή της λίμνης. Η τρίτη

προσέγγιση συνδυάζει την εκτίμηση της επιφάνειας νερού με τις εκτιμήσεις στάθμης από δορυφορικά δεδομένα και αξιοποιώντας την Εξίσωση 3-5 υπολογίζεται η μεταβολή του αποθηκευμένου όγκου νερού της λίμνης. Τελικώς, οι συγγραφείς καταλήγουν στην τρίτη προσέγγιση ως ακριβέστερη και πιο αποτελεσματική, με συντελεστή προσδιορισμού 0,98 και RMSE ίσο με το 1,46% της χωρητικότητας της λίμνης.

3.4.3. Μέθοδος ολοκλήρωσης

Οι Lin et. al. (2020), πραγματοποιώντας παρόμοια έρευνα όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, ερεύνησαν τον υπολογισμό της μεταβολής του όγκου νερού της λίμνης Βικτώρια στην Αυστραλία, με δεδομένα από πολλούς δορυφόρους. Για τους σκοπούς αυτούς, θεωρούν τον όγκο νερού ως ένα ολοκλήρωμα της επιφάνειας του νερού μεταξύ του συνόλου σταθμών. Η επιφάνεια νερού θεωρείται και αυτή συνάρτηση της στάθμης νερού και η σχέση τους υπολογίζεται με βάση τα ζεύγη μετρήσεων από τα δεδομένα της τηλεπισκόπησης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση της λίμνης Βικτώρια, βρέθηκε πως η καταλληλότερη σχέση που περιγράφει τη σχέση στάθμης – επιφάνειας, είναι η εκθετική, με συντελεστή προσδιορισμού 0,88 και RMSE ίσο με το 0,06 της μέγιστης επιφάνειας της λίμνης. Βέβαια λόγω του περιορισμένου εύρους διακύμανσης του όγκου νερού της λίμνης δεν μπορούν για να αξιοποιήσουν κάποιο σύνολο δεδομένων (λ.χ. το GRACE[1]) για την ποσοτική επαλήθευση των εκτιμήσεων μεταβολής όγκου νερού. Σε κάθε περίπτωση, καταλήγουν στον υπολογισμό της μεταβολής του όγκου μέσω ολοκλήρωσης της συνάρτησης που έχει αποδοθεί στη σχέση στάθμης – επιφάνειας, ως προς τη στάθμη, μεταξύ των ζητούμενων χρονικών στιγμών κάθε ζεύγους. Η προσέγγιση συνοψίζεται παρακάτω, στην Εξίσωση 3-6.

$$V = \int AdH = \int f(H)dH \qquad (3\text{-}6)$$

3.4.4. Μέθοδος προσέγγισης πυραμίδας

Οι Crétaux et. al. (2016), εξετάζοντας αντίστοιχα τη μελέτη περίπτωσης του υψιπέδου του Θιβέτ, όπου χωροθετούνται αρκετές λίμνες διαφόρων μεγεθών, υποθέτουν για τις λίμνες ένα πυραμιδοειδές σχήμα. Κατ' αυτόν τον τρόπο, αξιοποιούν τη σχέση υπολογισμού του όγκου πυραμίδας που πρωτοδιατυπώθηκε από τον Ήρωνα (Vignudelli et al., 2011). Κατά την προσέγγισή τους, η μεταβολή του όγκου νερού μεταξύ δύο χρονικών στιγμών T_1 και T_2, υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 3-7.

$$\Delta V = \frac{\left((H_{i+1} - H_i) \times \left(A_{i+1} + A_i \times \sqrt{A_{i+1} \times A_i}\right)\right)}{3} \qquad (3\text{-}7)$$

Αξιοποιώντας την Εξίσωση 3-7 με εκτιμήσεις στάθμης και επιφάνειας νερού από πολλαπλούς δορυφόρους, υπολογίζουν τη μεταβολή του αποθηκευμένου όγκου νερού σε 11 μεγάλες λίμνες εντός του υψιπέδου του Θιβέτ. Η χρήση πολλαπλών δορυφόρων επιτρέπει στους συγγραφείς να εκτιμήσουν τη μεταβολή του όγκου εντός ευρείας χρονικής περιόδου περίπου 15 ετών.

[1] Το σύνολο δεδομένων GRAVE – Gravity Recovery and Climate Experiment – προέρχεται από δύο δορυφόρους με τα πρωτογενή δεδομένα των οποίων υπολογίζεται η μεταβολή της μάζας της γης σε επίπεδο πλανήτη με χωρική ανάλυση 0,5° x 0,5°. Το εν λόγω σύνολο δεδομένων χρησιμοποιείται συχνά στην υδρολογία για την παρακολούθηση λεκανών απορροής επιφάνειας μεγαλύτερης των 4 x 10^5 km^2.

3.5. Σύγκριση των εξαγόμενων χαρακτηρισιτκών του ταμιευτήρα με τη βιβλιογραφία

Για τον έλεγχο των εξαγόμενων σχέσεων στάθμης – επιφάνειας – όγκου του ταμιευτήρα Υλίκης, από τα δεδομένα της τηλεπισκόπησης γίνεται σύγκριση με μία αντίστοιχη σχέση της βιβλιογραφίας. Η εν λόγω σχέση παρουσιάζεται από τους Efstratiadis & Tsoukalas, (2019), υπό τη μορφή του Πίνακα 3-1. Από τα στοιχεία του Πίνακα 3-1, επιλέγονται και εξετάζονται τελικώς όσα πεδία βρίσκονται εντός του εύρους των δορυφορικών εκτιμήσεων. Η σύγκριση παρουσιάζεται παρακάτω στην Παράγραφο 4.5.

Πίνακας 3-1. Σχέση στάθμης – επιφάνειας – αποθέματος ταμιευτήρα Υλίκης (Πηγή Efstratiadis & Tsoukalas, 2019).

Στάθμη [m]	Επιφάνεια [km^2]	Απόθεμα [hm^3]	Στάθμη [m]	Επιφάνεια [km^2]	Απόθεμα [hm^3]
40,0	0,0	0,0	61,0	16,2	219,9
41,0	1,0	0,4	62,0	16,6	236,3
42,0	3,6	2,5	63,0	16,9	253,0
43,0	5,8	7,2	64,0	17,3	270,1
44,0	7,4	13,8	65,0	17,7	287,6
45,0	8,3	21,7	66,0	18,0	305,5
46,0	8,8	30,2	67,0	18,4	323,7
47,0	9,3	39,3	68,0	18,8	342,3
48,0	9,7	48,8	69,0	19,2	361,3
49,0	10,2	58,7	70,0	19,6	380,7
50,0	10,7	69,2	71,0	20,0	400,5
51,0	11,3	80,2	72,0	20,4	420,7
52,0	11,9	91,8	73,0	20,8	441,3
53,0	12,5	104,0	74,0	21,2	462,3
54,0	13,1	116,8	75,0	21,7	483,7
55,0	13,6	130,2	76,0	22,5	505,8
56,0	14,1	144,0	77,0	22,8	528,5
57,0	14,5	158,3	78,0	23,3	551,5
58,0	15,0	173,1	79,0	24,1	575,2
59,0	15,4	188,3	80,0	24,9	599,7
60,0	15,8	203,9	-		

4. Αποτελέσματα

4.1. Εκτίμηση της επιφάνειας νερού του ταμιευτήρα Υλίκης

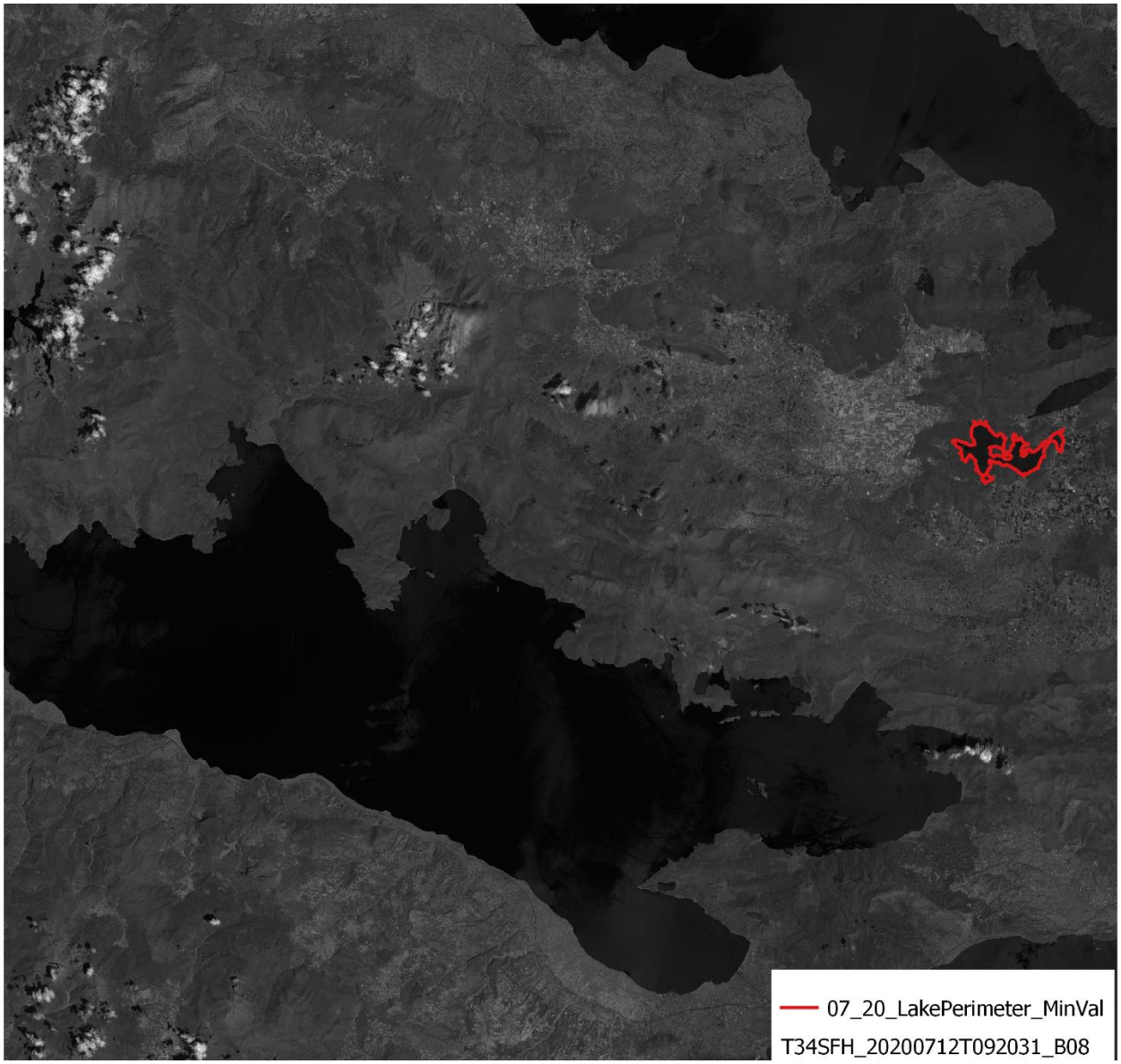
4.1.1. Παράδειγμα εφαρμογής μεθοδολογίας υπολογισμού επιφάνειας νερού

Προτού παρουσιαστούν τα συνολικά αποτελέσματα και η χρονοσειρά της εκτιμημένης επιφάνειας του ταμιευτήρα Υλίκης, στις ακόλουθες Εικόνες 4-1 έως και 4-7, παρουσιάζεται ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα εφαρμογής της μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 3.1.1. Στις Εικόνες 4-1 και 4-2 παρατίθενται οι λήψεις της 12^{ης} Ιουλίου 2020 του πράσινου και του σχεδόν υπέρυθρου φασμάτων που λήφθηκαν από την δορυφορική αποστολή Sentinel-2. Επίσης, έχει προστεθεί στις δύο εικόνες και η τελικά υπολογισμένη περίμετρος του ταμιευτήρα Υλίκης ώστε να παρασταθεί γραφικά το μεγάλο μέγεθος των αρχικών λήψεων και η ανάγκη περικοπής αυτού, με βάση την ευρύτερη περιοχή του ταμιευτήρα. Οι ίδιες λήψεις, αφότου περικοπούν και χωρίς περαιτέρω επεξεργασία παρουσιάζονται στις Εικόνες 4-3 και 4-4. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το μέγεθος κάθε αρχείου των αρχικών λήψεων (110km x 110km) είναι της τάξης των ≈110.000kB, ενώ οι λήψεις αφότου «κοπούν» στην περιοχή μελέτης καταλαμβάνουν ψηφιακό αποθηκευτικό χώρο της τάξης των ≈1.650kB.

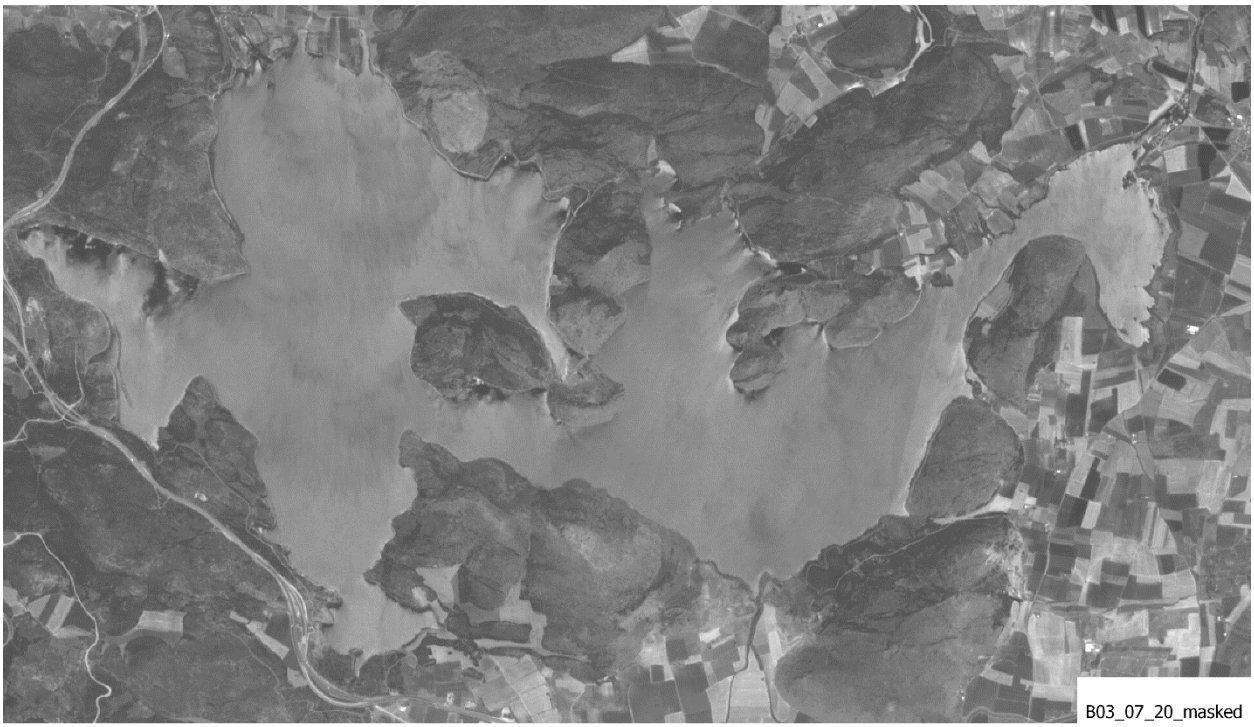
Κατόπιν, στην Εικόνα 4-5 παρουσιάζεται ο αρχικά υπολογισθείς δείκτης NDWI. Μάλιστα, το γεγονός ότι οι ακραίες τιμές του ιστογράμματός του δεν είναι ίσες με +1 και -1, υποδηλώνει την ανάγκη εφαρμογής μεθόδων προσδιορισμού του βέλτιστου κατωφλίου (έναντι του μηδενός) για τη διάκριση των φατνίων νερού και μη νερού. Ακολούθως στην Εικόνα 4-6, παρατίθενται ο διακριτοποιημένος δείκτης NDWI, στον οποίο ήδη έχει εφαρμοστεί και το βέλτιστο κατώφλι διάκρισης, όπως περιγράφηκε στην Παράγραφο 3.1.1. Σημειώνεται ότι το βέλτιστο κατώφλι που υπολογίστηκε για την εν λόγω λήψη είναι ίσο με -0,021.

Τέλος, στην Εικόνα 4-7 παρουσιάζεται το διανυσματικό αρχείο της υγρής περιμέτρου του ταμιευτήρα, όπως υπολογίστηκε με βάση το βελτιστοποιημένο κατώφλι. Επίσης, παρατίθενται μαζί τη σύνθεση των πραγματικών χρωμάτων που καταγράφηκαν από το δορυφόρο της αποστολής Sentinel-2. Η συγκεκριμένη παράθεση, λαμβάνει χώρα σε κάθε νέα εξαγωγή διανυσματικού αρχείου για τον οπτικό έλεγχο έναντι επιδράσεων από νέφη ή από το ανάγλυφο, όπως έχει αναφερθεί και στην Παράγραφο 3.1.1.

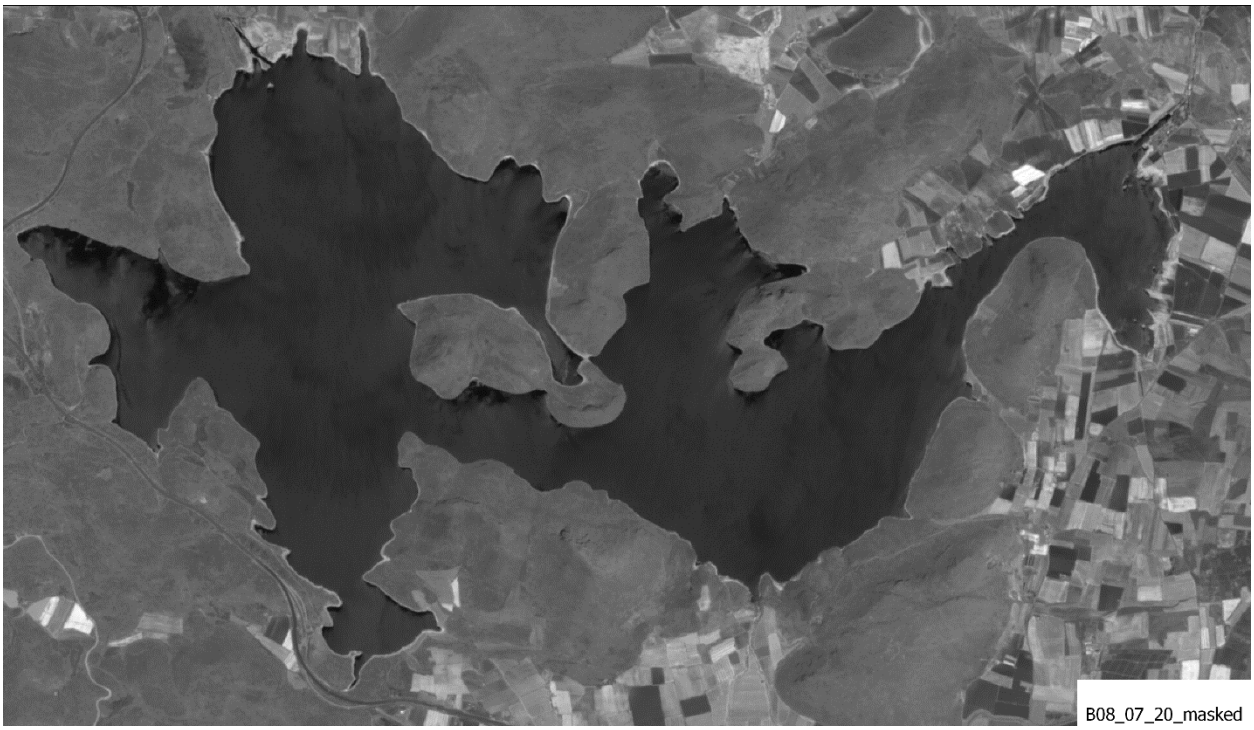
Εικόνα 4-1. Λήψη φάσματος Band3 – Πράσινο, 12/07/2020, Sentinel-2 και περιοχή ταμιευτήρα Υλίκης.



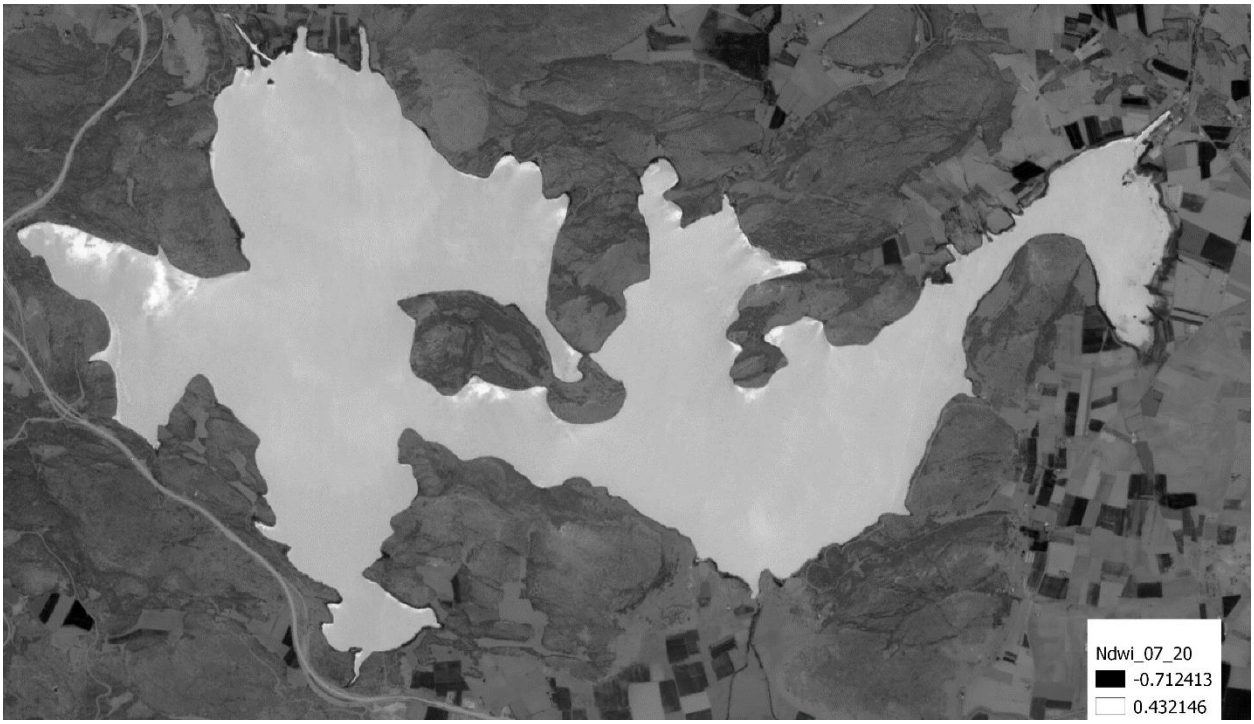
Εικόνα 4-2. Λήψη φάσματος Band8 – Σχεδόν υπέρυθρο, 12/07/2020, Sentinel-2 και περιοχή ταμιευτήρα Υλίκης.



Εικόνα 4-3. Περικοπή λήψης φάσματος Band3 – Πράσινο, 12/07/2020, Sentinel-2 στην περιοχή ταμιευτήρα Υλίκης.

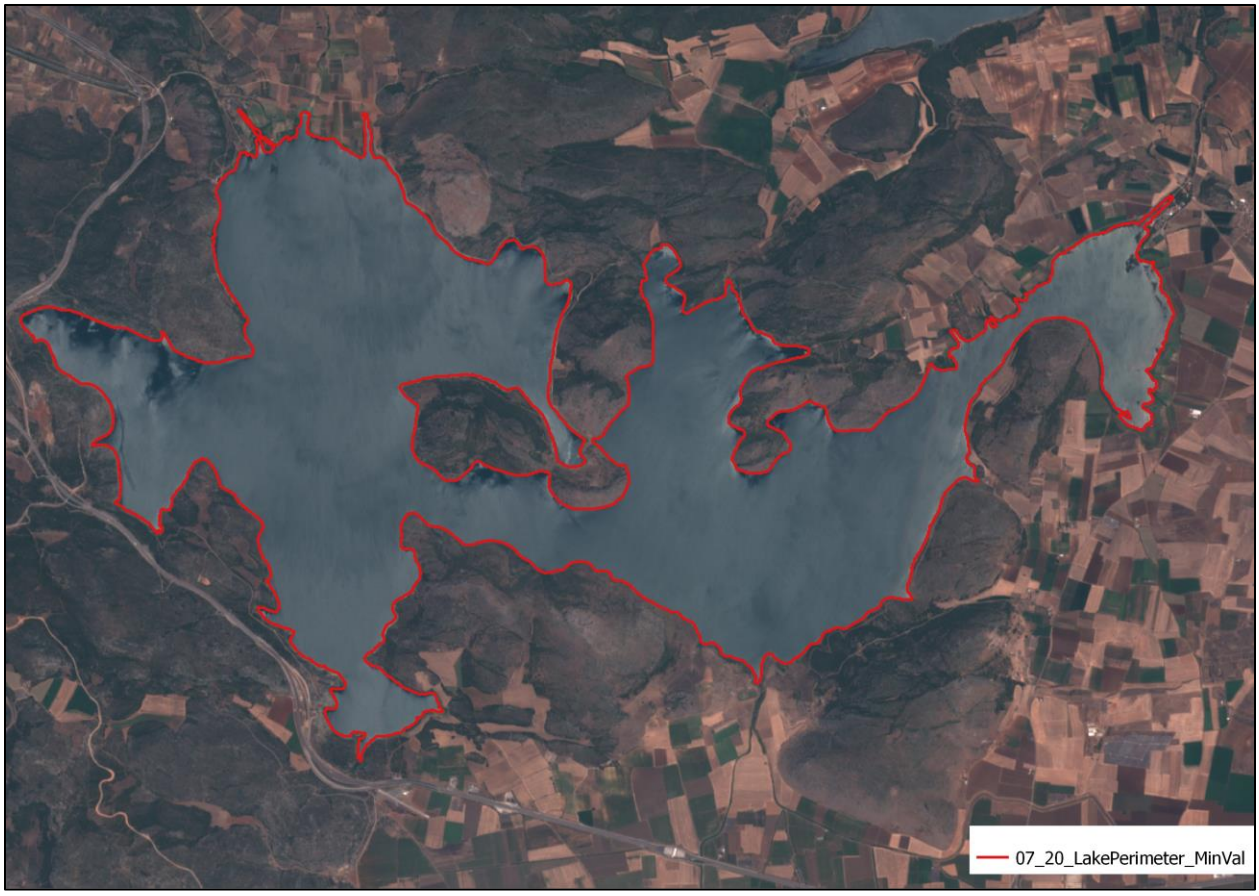


Εικόνα 4-4. Περικοπή λήψης φάσματος Band8 – Σχεδόν υπέρυθρο, 12/07/2020, Sentinel-2 στην περιοχή ταμιευτήρα Υλίκης.



Εικόνα 4-5. Αρχικά υπολογισμένος δείκτης NDWI, 12/07/2021 ταμιευτήρα Υλίκης.

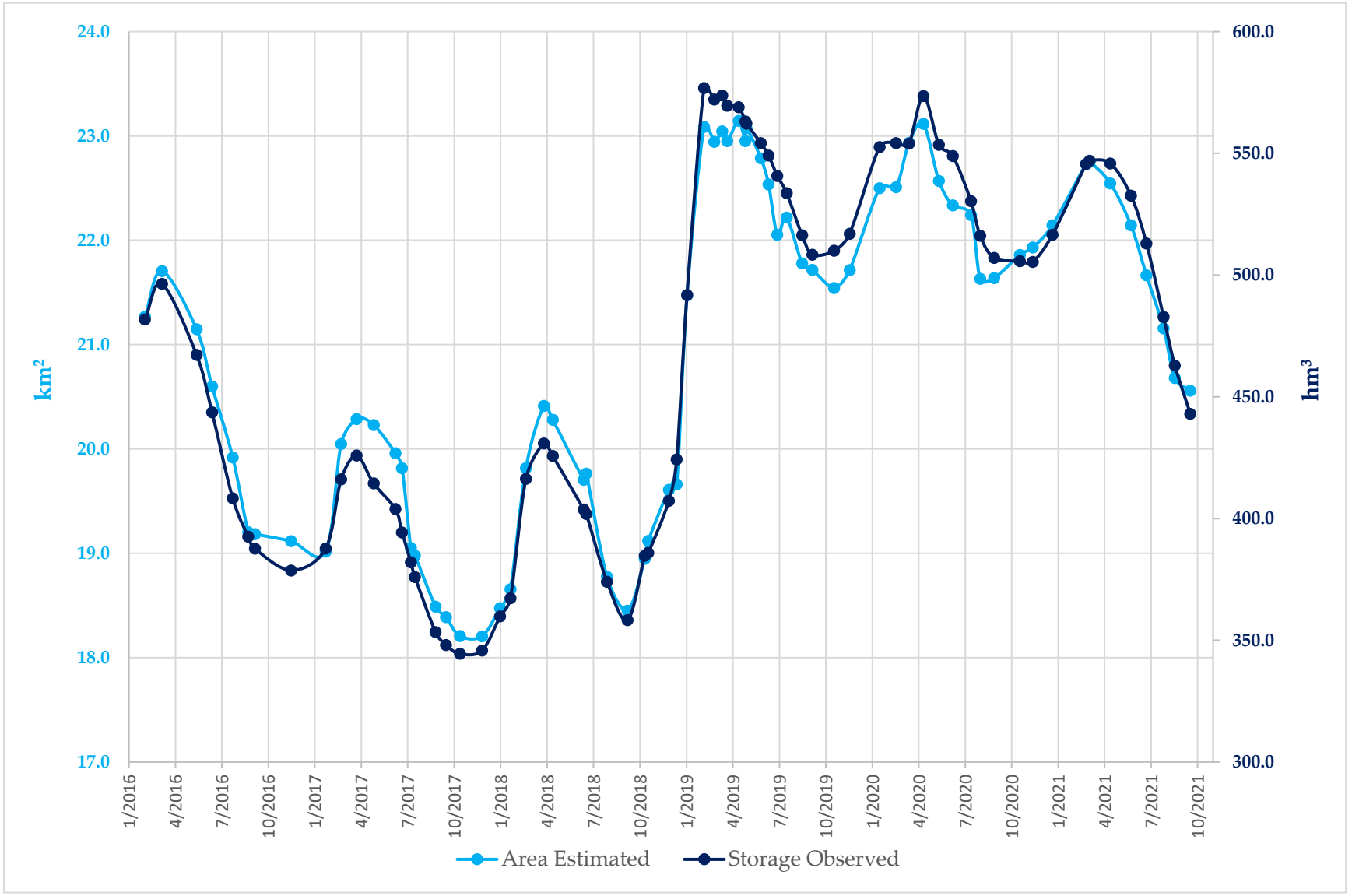
Εικόνα 4-6. Τελικός και διακριτοποιημένος δείκτης NDWI, 12/07/2021 ταμιευτήρα Υλίκης.



Εικόνα 4-7. Τελική περίμετρος υγρής επιφάνειας ταμιευτήρα Υλίκης, 12/07/2020 με υπόβαθρο τη λήψη πραγματικών χρωμάτων της αποστολής Sentinel-2.

4.1.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων εφαρμογής μεθοδολογίας υπολογισμού επιφάνειας νερού

Για την εκτίμηση της επιφάνειας νερού του ταμιευτήρα της Υλίκης, χρησιμοποιήθηκαν 69 λήψεις της δορυφορικής αποστολής Sentinel-2, από το Μάρτιο του 2016 έως και τον Σεπτέμβριο του 2021. Οι 69 εκτιμήσεις της επιφάνειας νερού που προέκυψαν με την εφαρμογή της μεθοδολογίας της Παραγράφου 3.1.1. παρουσιάζονται παρακάτω στο Σχήμα 4-1, ταυτόχρονα με τις παρατηρήσεις όγκου του διαχειριστή του ταμιευτήρα για την ίδια ημερομηνία. Η μέγιστη παρατηρούμενη επιφάνεια του ταμιευτήρα Υλίκης είναι 23,14km^2 στις 26 Απριλίου 2019, όπου ο διαχειριστής αναφέρει όγκο νερού 568,93hm^3. Αντίστοιχα η ελάχιστη παρατηρούμενη επιφάνεια του ταμιευτήρα Υλίκης είναι 18,21km^2 στις 2 Νοεμβρίου 2017, όπου ο διαχειριστής αναφέρει όγκο νερού 344,47hm^3. Η μέση επιφάνεια νερού όπως εκτιμήθηκε από τις 69 λήψεις ανέρχεται σε 20,94km^2 και ο αντίστοιχος όγκος νερού με βάση τα στοιχεία του διαχειριστή του ταμιευτήρα σε 469,39hm^3. Συνολικά, η απόδοση της εφαρμογής του δείκτη NDWI όπως έχει εφαρμοστεί, αποτιμάται άκρως θετικά, καθώς ο συντελεστής συσχέτισης υπολογίστηκε ίσος με 99,27%. Επομένως, όπως αποδεικνύεται και από το Σχήμα 4-1, η επιφάνεια νερού του ταμιευτήρα Υλίκης μπορεί να εκτιμηθεί με ακρίβεια από τις δορυφορικές οπτικές εικόνες των δορυφόρων Sentinel-2.



Σχήμα 4-1. Παράθεση των 69 εκτιμήσεων επιφάνειας νερού ταμιευτήρα Υλίκης με τις αντίστοιχες καταγραφές όγκου νερού από το διαχειριστή του ταμιευτήρα.

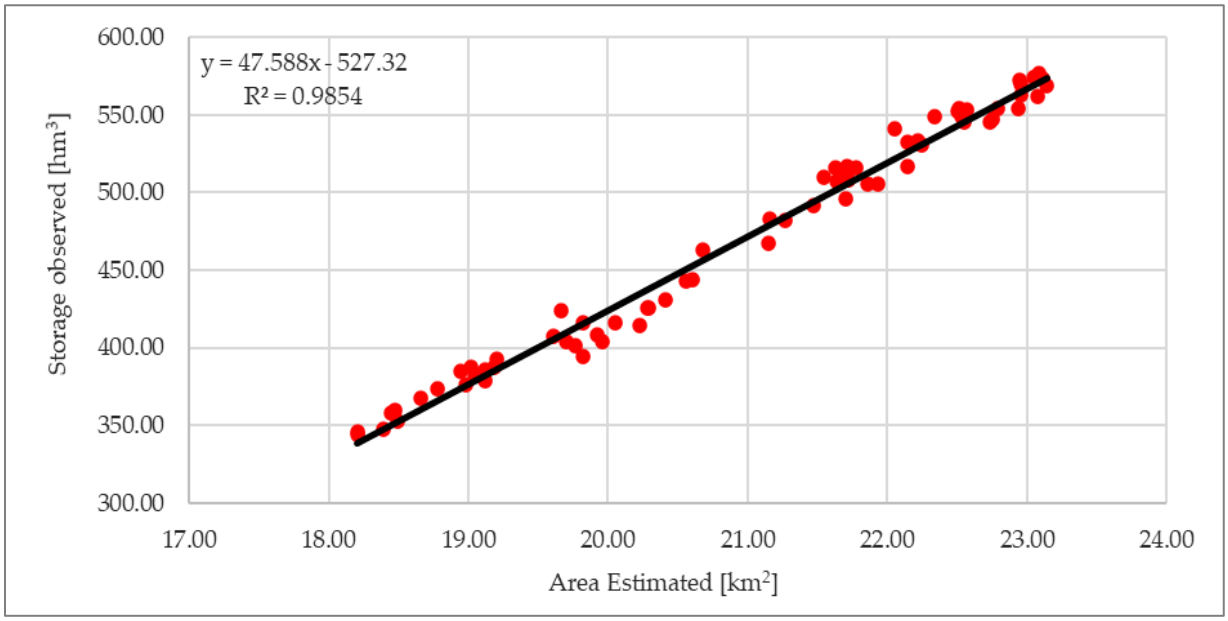
Στο Σχήμα 4-2 παρουσιάζονται και δύο χαρακτηριστικές λήψεις – εκτιμήσεις της επιφάνειας νερού του ταμιευτήρα, εντός του διαστήματος των 69 μετρήσεων, όπου αποτυπώνεται η διαφορά μεταξύ της 6ης Οκτωβρίου 2017, όπου ο ταμιευτήρα παρουσιάζει σχετικά χαμηλά αποθέματα νερού, και της 18ης Απριλίου 2020, όπου ο ταμιευτήρας ήταν σχεδόν πλήρης.

Ημερομηνία: 06/10/2017	Επιφάνεια: 18.39 km^2	Όγκος: 348.04 hm^3

Ημερομηνία: 18/04/2020	Επιφάνεια: 23.12 km^2	Όγκος: 573.59 hm^3

Σχήμα 4-2. Σύγκριση των αποτελεσμάτων εκτίμησης επιφάνειας νερού για σχετικά χαμηλή και μεγάλη επιφάνεια νερού.

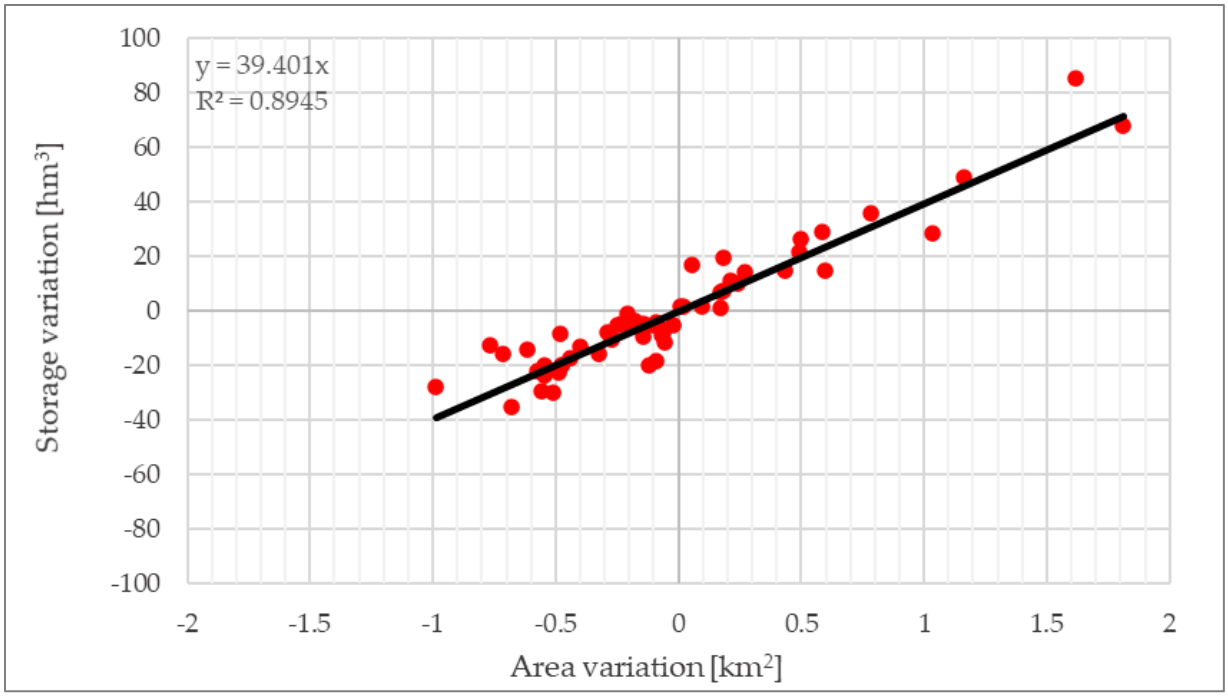
Με το σύνολο των 69 ζευγών εκτιμημένης επιφάνειας – παρατηρημένου όγκου, καταρτίζεται η καμπύλη επιφάνειας – όγκου για το εύρος των μετρημένων τιμών, η οποία όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-3 παρουσιάζει έντονα γραμμική συμπεριφορά, με συντελεστή προσδιορισμού 0,9854.



Σχήμα 4-3. Γραμμική σχέση επιφάνειας – όγκου νερού ταμιευτήρα Υλίκης για το εύρος τιμών των 69 ζευγών.

Όσον αφορά τον υδρολογικό κύκλο του ταμιευτήρα, ο οποίος αποτυπώνεται με σαφήνεια και παραπάνω στο Σχήμα 4-1, παρατηρούνται τέσσερεις περίοδοι απώλειας αποθεμάτων και πέντε περίοδοι ενίσχυσης αποθεμάτων. Η πιο έντονη περίοδος ενίσχυσης των αποθεμάτων του ταμιευτήρα καταγράφεται μεταξύ του Σεπτεμβρίου 2018 και του Φεβρουαρίου 2019, όπου τα αποθέματα του ταμιευτήρα αυξάνονται κατά 218,53hm^3, ήτοι το 36,4% της συνολικής χωρητικότητας του ταμιευτήρα. Η εν λόγω αύξηση ισοδυναμεί σε αύξηση της επιφάνειας κατά 4,64km^2. Κατά την παραπάνω περίοδο, στον ταμιευτήρα εισρέουν ημερησίως κατά μέσο όρο 1,5hm^3 και η επιφάνειά του αυξάνει κατά 0,03km^2 ανά ημέρα. Στον αντίποδα, η πιο έντονη ξηρή περίοδος, όπου παρατηρείται η εντονότερη μείωση των αποθεμάτων του ταμιευτήρα, καταγράφεται μεταξύ Μαρτίου 2021 και Σεπτεμβρίου 2021, όπου ο ταμιευτήρας χάνει 104,04hm^3, ήτοι το 17,3% της συνολικής του χωρητικότητας. Κατά την παραπάνω περίοδο, ο ταμιευτήρας απολύει κατά μέσο όρο 0,5hm^3 νερού την ημέρα, με τη επιφάνειά του να μειώνεται κατά 2,2km^2.

Η μεταβολή της επιφάνειας και του όγκου νερού του ταμιευτήρα ανά διαδοχικά ζεύγη μετρήσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-4. Και σε αυτή την περίπτωση καταγράφεται έντονα γραμμική συμπεριφορά, παρουσιάζοντας συντελεστή προσδιορισμού ίσο με 0,8945. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το διάστημα μεταξύ Δεκεμβρίου 2018 και Ιανουαρίου 2019, όπου ο ταμιευτήρας καταγράφει αύξηση των αποθεμάτων ίση με 67,6hm^3 με ταυτόχρονη αύξηση της επιφάνειάς του κατά 1,8km^2. Σημειώνεται ότι ο αναλογούν ρυθμός πλήρωσης της παραπάνω περιόδου ισούται με σχεδόν 3,4hm^3 /ημέρα. Στον αντίποδα, οι υψηλότερες μηνιαίες απώλειες καταγράφονται μεταξύ Ιουλίου και Αυγούστου του 2021, με τον ταμιευτήρα να απολύει συνολικά 20hm^3 νερού, και επιφάνεια 0,5km^2. Ο αντίστοιχος ημερήσιος ρυθμός απωλειών ισοδυναμεί με 0,9hm^3 ημερησίως.

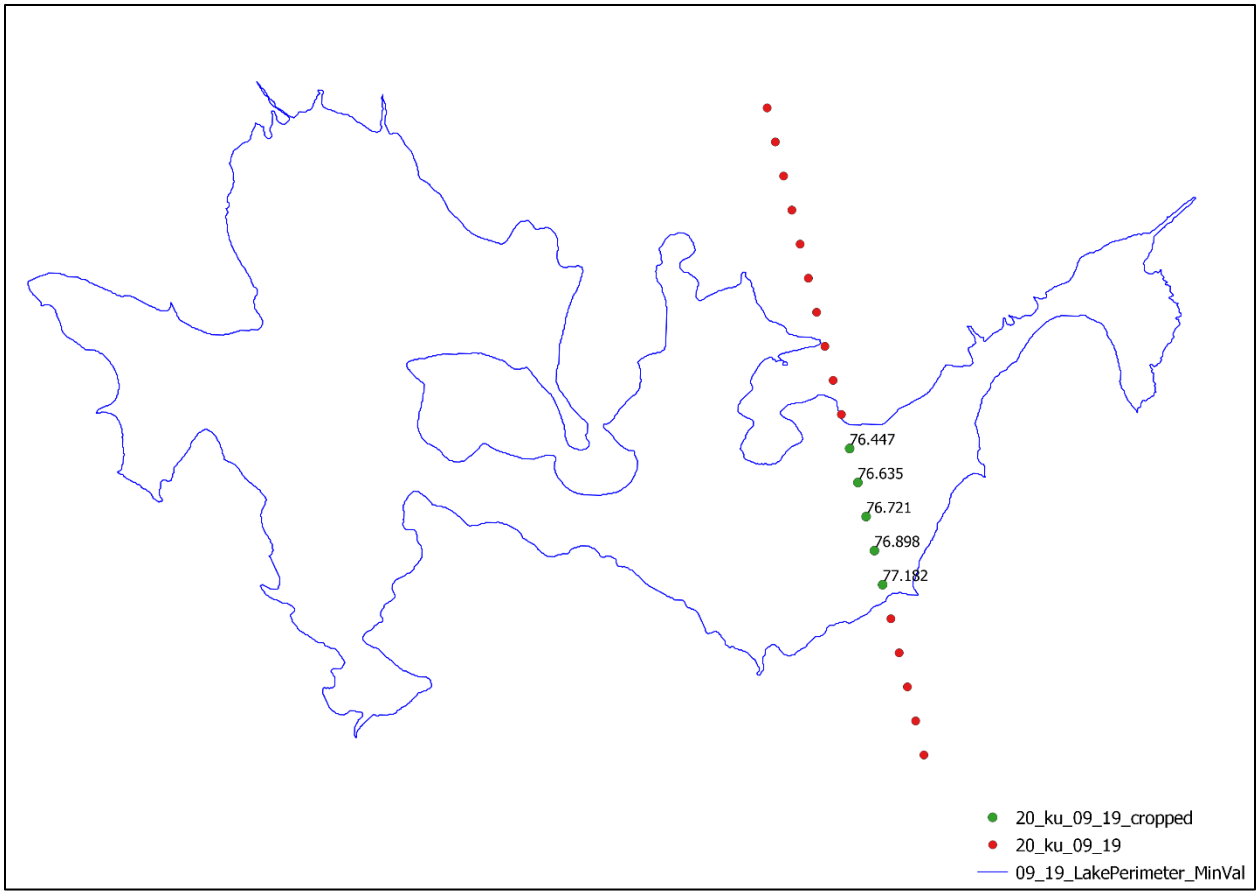


Σχήμα 4-4. Ζεύγη διαδοχικών μεταβολών επιφάνειας – όγκου και γραμμική σχέση τους.

4.2. Εκτίμηση της στάθμης νερού του ταμιευτήρα Υλίκης

4.2.1. Παράδειγμα εφαρμογής μεθοδολογίας υπολογισμού στάθμης νερού

Προτού παρουσιαστούν τα συνολικά αποτελέσματα και η χρονοσειρά της εκτιμημένης στάθμης του ταμιευτήρα Υλίκης, στο ακόλουθο Σχήμα 4-5 και τον Πίνακα 4-1, παρουσιάζεται ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα εφαρμογής της μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 3.2. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4-5 παρατίθενται τα σημεία των μετρήσεων της δορυφορικής αποστολής Sentinel-3 εντός της ευρύτερης περιοχής του ταμιευτήρα Υλίκης. Με κόκκινο χρώμα συμβολίζεται το σύνολο αυτών των σημείων, ενώ με πράσινο συμβολίζονται τα σημεία που βρίσκονται εντός της χρονικά πλησιέστερης εκτιμημένης από τους δορυφόρους Sentinel-2 υγρής περιμέτρου. Επίσης σε κάθε έγκυρο σημείο, εντός της επιφάνειας νερού, παρατίθεται και η τιμή στάθμης, όπως υπολογίζεται σύμφωνα με την Παράγραφο 3.2. Οι παραπάνω τιμές μαζί με τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-1. Σημαντικά στοιχεία του Πίνακα 4-1 για τις πέντε τιμές στάθμης αποτελούν η ταύτιση αριθμητικού και γεωμετρικού μέσου καθώς, η χαμηλή διακύμανση καθώς και η τυπική απόκλιση των μετρήσεων που βρίσκεται ίδιας τάξης με τη βιβλιογραφία, όπως έχει περιγραφεί στην Παράγραφο 3.2.



Σχήμα 4-5. Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας υπολογισμού στάθμης για τη δορυφορική λήψη της 17ης Σεπτεμβρίου 2019.

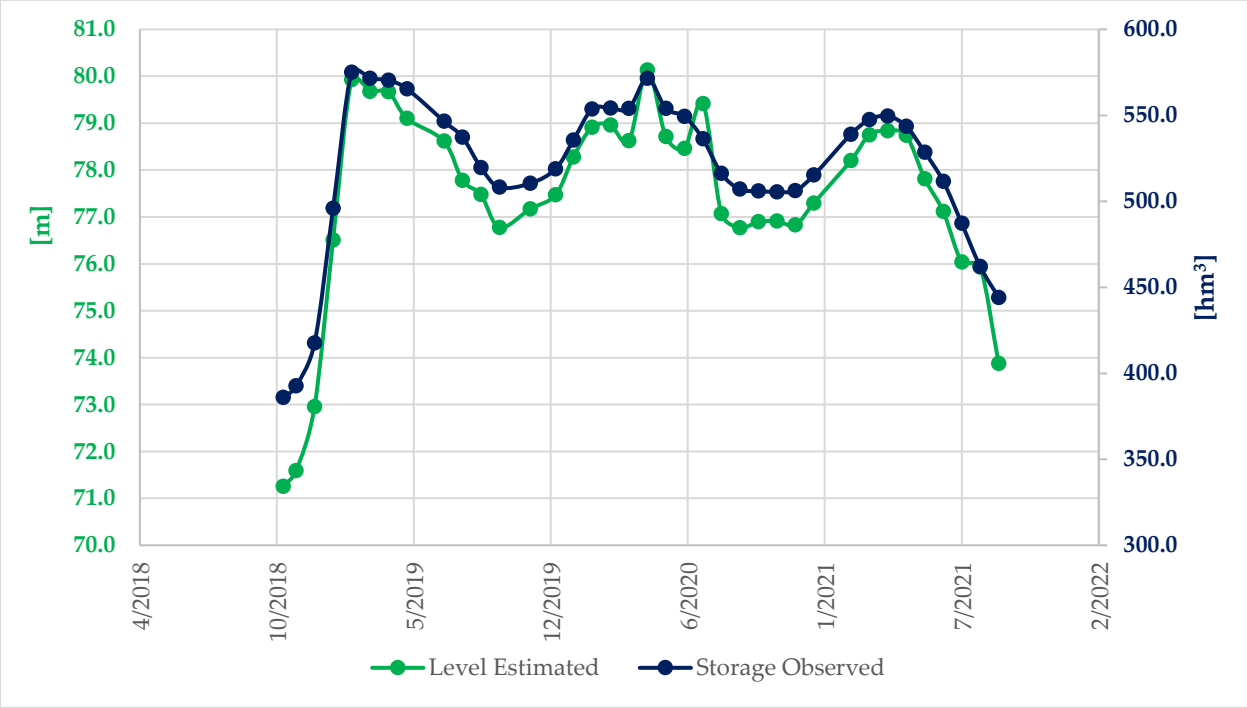
Πίνακας 4-1. Τιμές και βασικά στατιστικά μεγέθη υπολογισμού στάθμης από τη δορυφορική λήψης της 17ης Σεπτεμβρίου 2019.

17/9/2019				
Τιμές	ku_20Hz			
76.4	Αριθμητικός μέσος	Γεωμετρικός μέσο	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστο
76.6	76.8	76.8	0.28	76.4
76.7	Μέγιστο	Διαφορά	Διακύμανση	Αριθμός μετρήσεων
76.9	77.2	0.7	7.77E-02	5
77.2				

4.2.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων εφαρμογής μεθοδολογίας υπολογισμού στάθμης νερού

Για την εκτίμηση της στάθμης νερού του ταμιευτήρα της Υλίκης, χρησιμοποιήθηκαν 37 λήψεις της δορυφορικής αποστολής Sentinel-3, από το Νοέμβριο του 2018 έως και τον Σεπτέμβριο του 2021. Οι 37 εκτιμήσεις της στάθμης νερού που προέκυψαν με την εφαρμογή της μεθοδολογίας της Παραγράφου 3.2. παρουσιάζονται παρακάτω στο Σχήμα 4-6, ταυτόχρονα με τις παρατηρήσεις όγκου του διαχειριστή του ταμιευτήρα για την ίδια ημερομηνία. Η μέγιστη παρατηρούμενη στάθμη του ταμιευτήρα Υλίκης είναι 80,1m στις 20 Απριλίου 2020, όπου ο διαχειριστής αναφέρει όγκο νερού 571,5hm^3. Αντίστοιχα η ελάχιστη παρατηρούμενη στάθμη του ταμιευτήρα Υλίκης είναι 71,3m στις 5 Νοεμβρίου 2018, όπου ο διαχειριστής

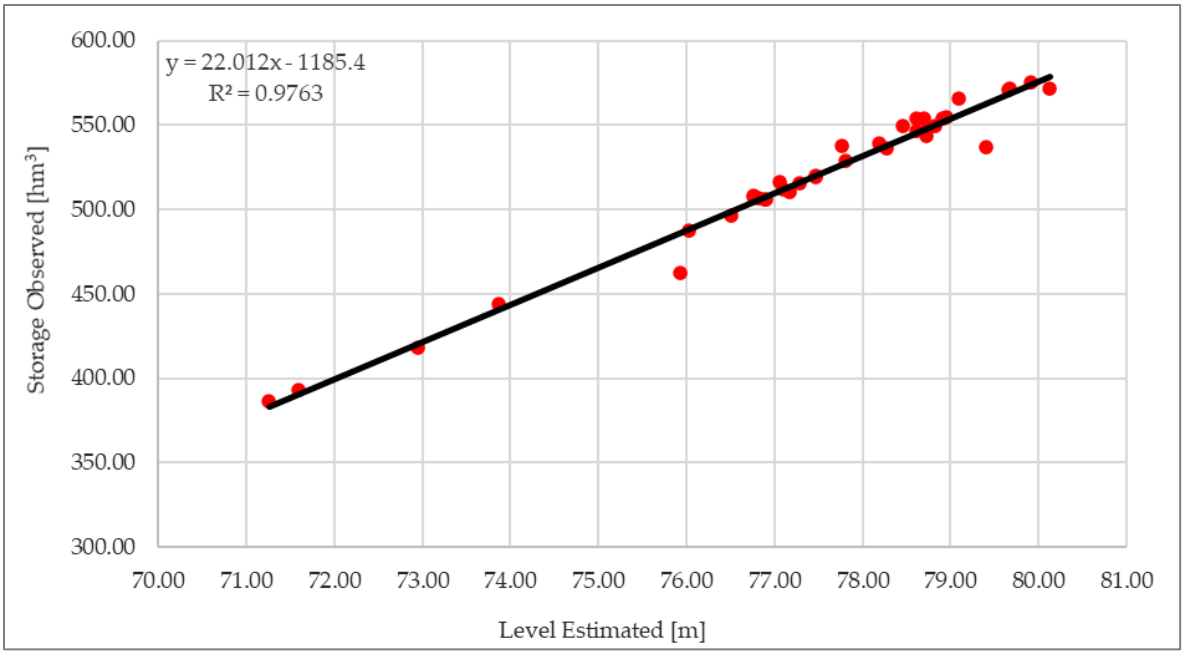
αναφέρει όγκο νερού 385,9hm^3. Η μέση στάθμη νερού όπως εκτιμήθηκε από τις 37 λήψεις ανέρχεται σε 77,4m και ο αντίστοιχος όγκος νερού με βάση τα στοιχεία του διαχειριστή του ταμιευτήρα σε 518,7hm^3. Συνολικά, η απόδοση της εφαρμογής της μεθοδολογίας υπολογισμού στάθμης όπως έχει εφαρμοστεί, αποτιμάται άκρως θετικά, καθώς ο συντελεστής συσχέτισης υπολογίστηκε ίσος με 98,81%. Επομένως, όπως αποδεικνύεται και από το Σχήμα 4-6, η στάθμη νερού του ταμιευτήρα Υλίκης μπορεί να εκτιμηθεί με ακρίβεια από τις δορυφορικές λήψεις ραντάρ των δορυφόρων Sentinel-3.



Σχήμα 4-6. Παράθεση των 37 εκτιμήσεων στάθμης νερού ταμιευτήρα Υλίκης με τις αντίστοιχες καταγραφές όγκου νερού από το διαχειριστή του ταμιευτήρα.

Τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά του δείγματος των 37 λήψεων – εκτιμήσεων στάθμης από τους δορυφόρους Sentinel-3, επιβεβαιώνουν τα στοιχεία της ακρίβειας της δορυφορικής αποστολής. Για το σύνολο των 37 λήψεων, με κατά μέσο όρο 7 σημεία εντός της υγρής επιφάνειας του ταμιευτήρα, υπολογίζεται τυπική απόκλιση μεταξύ των σημείων κάθε ημερομηνίας κατά μέσο όρο ίση με 0,30m. Επίσης, η μέση διακύμανση μεταξύ των σημείων κάθε ημερομηνίας υπολογίζεται ίση με 0,15m. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο αριθμός των μετρήσεων εντός της υγρής επιφάνειας του ταμιευτήρα μεταβάλλεται έντονα ανάλογα με την τροχιά των δορυφόρων καθώς και τον όγκο νερού και για τις λήψεις που εξετάστηκαν, βρίσκεται μεταξύ των [2,12].

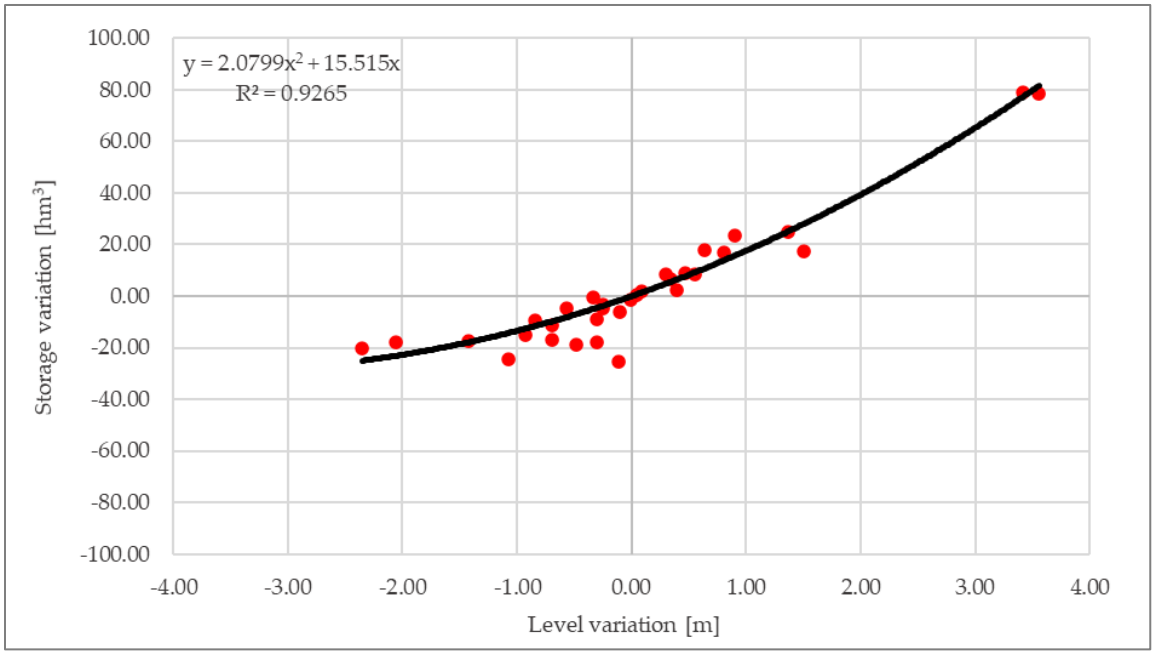
Με το σύνολο των 37 ζευγών εκτιμημένης στάθμης – παρατηρημένου όγκου, καταρτίζεται η καμπύλη στάθμης – όγκου για το εύρος των μετρημένων τιμών, η οποία όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-7 παρουσιάζει έντονα γραμμική συμπεριφορά, με συντελεστή προσδιορισμού 0,9763.



Σχήμα 4-7. Γραμμική σχέση στάθμης – όγκου νερού ταμιευτήρα Υλίκης για το εύρος τιμών των 37 ζευγών.

Όσον αφορά τον υδρολογικό κύκλο του ταμιευτήρα, ο οποίος αποτυπώνεται με σαφήνεια και παραπάνω στο Σχήμα 4-6, παρατηρούνται τρεις περίοδοι απώλειας αποθεμάτων και δύο περίοδοι ενίσχυσης αποθεμάτων. Η πιο έντονη περίοδος ενίσχυσης των αποθεμάτων του ταμιευτήρα καταγράφεται μεταξύ του Σεπτεμβρίου 2019 και του Απριλίου 2020, όπου τα αποθέματα του ταμιευτήρα αυξάνονται κατά 63,3hm^3, ήτοι το 10,5% της συνολικής χωρητικότητας του ταμιευτήρα. Η εν λόγω αύξηση ισοδυναμεί σε αύξηση της στάθμης κατά 3,4m. Κατά την παραπάνω περίοδο, στον ταμιευτήρα εισρέουν ημερησίως κατά μέσο όρο 0,3hm^3 και η στάθμη του αυξάνει κατά 0,016m ανά ημέρα. Στον αντίποδα, η πιο έντονη ξηρή περίοδος, όπου παρατηρείται η εντονότερη μείωση των αποθεμάτων του ταμιευτήρα, καταγράφεται μεταξύ Μαρτίου 2021 και Σεπτεμβρίου 2021, όπου ο ταμιευτήρας χάνει 105,5hm^3, ήτοι το 17,6% της συνολικής του χωρητικότητας. Κατά την παραπάνω περίοδο, ο ταμιευτήρας απολύει κατά μέσο όρο 0,65hm^3 νερού την ημέρα, με τη στάθμη του να μειώνεται κατά 5m.

Η μεταβολή της στάθμης και του όγκου νερού του ταμιευτήρα ανά διαδοχικά ζεύγη μετρήσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-8. Σε αυτή την περίπτωση καταγράφεται έντονα παραβολική συμπεριφορά, παρουσιάζοντας συντελεστή προσδιορισμού ίσο με 0,9265. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το διάστημα μεταξύ Δεκεμβρίου 2018 και Ιανουαρίου 2019, όπου ο ταμιευτήρας καταγράφει αύξηση των αποθεμάτων ίση με 78,4hm^3 με ταυτόχρονη αύξηση της στάθμης του κατά 3,6m. Σημειώνεται ότι ο αναλογούν ρυθμός πλήρωσης της παραπάνω περιόδου ισούται με 2,9hm^3 /ημέρα. Στον αντίποδα, οι υψηλότερες μηνιαίες απώλειες καταγράφονται μεταξύ Ιουλίου και Αυγούστου του 2021, με τον ταμιευτήρα να απολύει συνολικά 20,2hm^3 νερού, και στάθμη 2,3m. Ο αντίστοιχος ημερήσιος ρυθμός απωλειών ισοδυναμεί με 0,75hm^3 ημερησίως.



Σχήμα 4-8. Ζεύγη διαδοχικών μεταβολών στάθμης – όγκου και γραμμική σχέση τους.

Στον Πίνακα 4-2 παρουσιάζονται αναλυτικά το σύνολο των εκτιμήσεων στάθμης και επιφάνειας νερού του ταμιευτήρα Υλίκης, καθώς και οι παρατηρήσεις του αποθηκευμένου νερού της ίδιας ημερομηνίας από το διαχειριστή του ταμιευτήρα.

Πίνακας 4-2. Αναλυτικός πίνακας παρουσίασης συνόλου εκτιμήσεων στάθμης και επιφάνειας νερού ταμιευτήρα Υλίκης, με ταυτόχρονες παρατηρήσεις αποθηκευμένου όγκου νερού από το διαχειριστή.

Ημερομηνία	Εκτίμηση στάθμης [m]	Εκτίμηση επιφάνειας [km²]	Παρατήρηση όγκου [hm³]
	Sentinel-3	***Sentinel-2***	***ΕΥΔΑΠ***
2-Μαρ-16		21.27	481.75
4-Απρ-16		21.70	496.39
10-Ιουν-16		21.15	467.26
10-Ιουλ-16		20.60	443.62
19-Αυγ-16		19.92	408.30
18-Σεπ-16		19.20	392.58
1-Οκτ-16		19.18	387.64
10-Δεκ-16		19.12	378.71
15-Φεβ-17		19.02	387.64
17-Μαρ-17		20.05	416.08
16-Απρ-17		20.29	425.92
19-Μαϊ-17		20.23	414.44
30-Ιουν-17		19.96	403.92
13-Ιουλ-17		19.82	394.37
30-Ιουλ-17		19.05	382.01
7-Αυγ-17		18.98	376.00
16-Σεπ-17		18.49	353.36
6-Οκτ-17		18.39	348.04

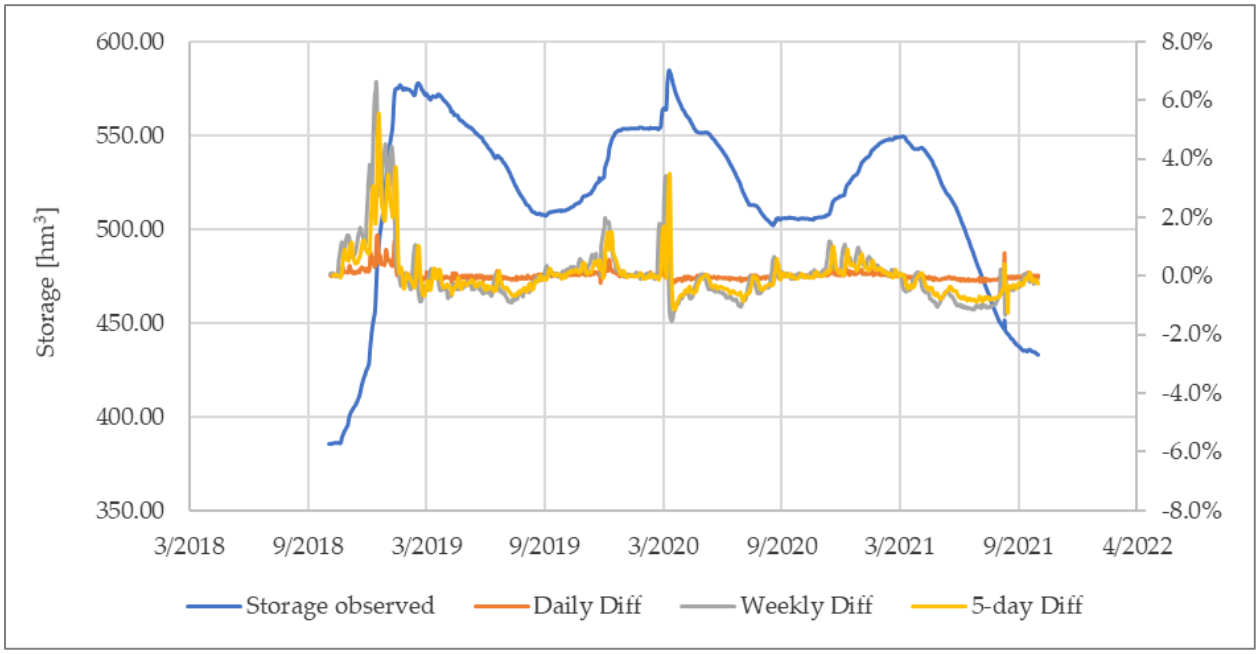
Ημερομηνία	Εκτίμηση στάθμης [m]	Εκτίμηση επιφάνειας [km^2]	Παρατήρηση όγκου [hm^3]
2-Νοε-17		18.21	344.47
15-Δεκ-17		18.21	345.79
19-Ιαν-18		18.48	359.85
8-Φεβ-18		18.66	367.30
10-Μαρ-18		19.82	416.29
14-Απρ-18		20.41	430.90
1-Μαϊ-18		20.28	425.72
30-Ιουν-18		19.70	403.73
5-Ιουλ-18		19.76	401.93
14-Αυγ-18		18.78	374.06
23-Σεπ-18		18.45	358.32
26-Οκτ-18		18.95	384.73
2-Νοε-18		19.12	385.89
5-Νοε-18	71.25		385.89
24-Νοε-18	71.59		392.58
12-Δεκ-18		19.61	407.31
21-Δεκ-18	72.96		417.52
27-Δεκ-18		19.66	424.28
16-Ιαν-19		21.47	491.88
17-Ιαν-19	76.51		495.94
13-Φεβ-19	79.92		574.98
18-Φεβ-19		23.09	576.85
10-Μαρ-19		22.95	572.19
12-Μαρ-19	79.68		571.49
25-Μαρ-19		23.04	573.82
4-Απρ-19		22.95	569.63
8-Απρ-19	79.67		570.32
26-Απρ-19		23.14	568.93
5-Μαϊ-19	79.10		565.43
9-Μαϊ-19		22.95	563.10
11-Μαϊ-19		23.08	562.17
8-Ιουν-19		22.79	554.25
23-Ιουν-19		22.54	549.12
28-Ιουν-19	78.61		546.56
10-Ιουλ-19		22.05	540.73
25-Ιουλ-19	77.78		537.28
28-Ιουλ-19		22.22	533.67
21-Αυγ-19	77.48		519.57
27-Αυγ-19		21.78	516.37
16-Σεπ-19		21.72	508.42
17-Σεπ-19	76.78		508.19
28-Οκτ-19		21.54	510.01
1-Νοε-19	77.17		510.46
27-Νοε-19		21.72	517.05
8-Δεκ-19	77.47		518.88

Ημερομηνία	Εκτίμηση στάθμης [m]	Εκτίμηση επιφάνειας [km^2]	Παρατήρηση όγκου [hm^3]
3-Ιαν-20	78.28		535.67
24-Ιαν-20		22.50	552.62
30-Ιαν-20	78.91		553.55
25-Φεβ-20		22.51	554.25
26-Φεβ-20	78.96		554.25
21-Μαρ-20		22.93	554.01
24-Μαρ-20	78.63		554.01
18-Απρ-20		23.12	573.59
20-Απρ-20	80.13		571.49
17-Μαϊ-20	78.71		554.01
18-Μαϊ-20		22.57	553.55
13-Ιουν-20	78.46		549.35
14-Ιουν-20		22.34	548.89
10-Ιουλ-20	79.42		536.36
19-Ιουλ-20		22.24	530.38
6-Αυγ-20		21.63	516.14
6-Αυγ-20	77.07		516.14
2-Σεπ-20		21.64	507.06
2-Σεπ-20	76.77		507.06
29-Σεπ-20	76.90		505.92
22-Οκτ-20		21.86	505.70
26-Οκτ-20	76.91		505.47
16-Νοε-20		21.93	505.47
22-Νοε-20	76.83		506.15
19-Δεκ-20	77.30		515.23
24-Δεκ-20		22.15	516.59
11-Φεβ-21	78.20		538.89
27-Φεβ-21		22.73	545.63
6-Μαρ-21		22.75	547.02
10-Μαρ-21	78.75		547.49
6-Απρ-21	78.84		549.59
15-Απρ-21		22.55	545.86
3-Μαϊ-21	78.74		543.53
25-Μαϊ-21		22.14	532.68
30-Μαϊ-21	77.81		528.54
24-Ιουν-21		21.67	512.96
26-Ιουν-21	77.11		511.60
23-Ιουλ-21	76.04		487.15
27-Ιουλ-21		21.16	482.88
18-Αυγ-21		20.68	462.88
19-Αυγ-21	75.93		462.01
15-Σεπ-21	73.87		444.04
17-Σεπ-21		20.56	442.98

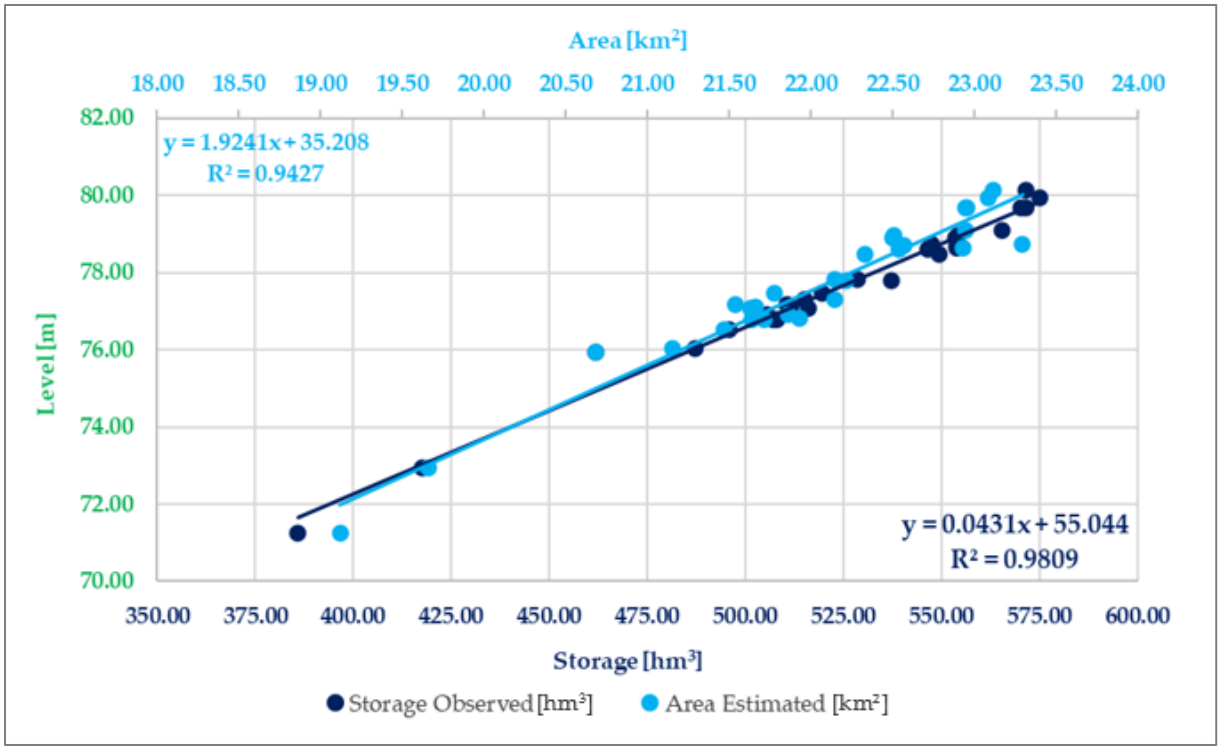
4.3. Συνδυασμός των εκτιμήσεων στάθμης – επιφάνειας νερού ταμιευτήρα Υλίκης

Όπως έχει περιγραφεί και στην Παράγραφο 3.3., απαραίτητη για το συνδυασμό των εκτιμήσεων στάθμης – επιφάνειας νερού του ταμιευτήρα είναι η επιλογή του κατάλληλου χρονικού εύρους, εντός του οποίου συνδυάζονται οι εκτιμήσεις στάθμης και επιφάνειας για να διαμορφωθούν τα ζεύγη προς την εκτίμηση της μεταβολής του αποθηκευμένου όγκου νερού. Για τον παραπάνω σκοπό, ελέγχονται διαφορετικά χρονικά εύρη, από μία ημέρα έως και δέκα, ώστε να συγκριθούν με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά μεταβολής του όγκου, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-9. Για το χρονικό εύρος μίας ημέρας, η μέση μεταβολή του όγκου του ταμιευτήρα ισοδυναμεί με το 0,10% της χωρητικότητάς του, ενώ η μέγιστη παρατηρούμενη μεταβολή είναι ίση με το 1,44% της χωρητικότητας. Το χρονικό εύρος πέντε ημέρων, το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί από τους Baup et. al. (2014) για μικρές λίμνες, παρουσιάζει μέση μεταβολή όγκου νερού ίση με 0,46% της χωρητικότητας και μέγιστη μεταβολή της τάξης του 5,55%. Εξετάζοντας χρονικό εύρος επτά ημερών, ήτοι μίας εβδομάδας, βρίσκεται ότι η μέση μεταβολή του όγκου ισοδυναμεί με το 0,64% της χωρητικότητας, με τη μέγιστη μεταβολή να ανέρχεται σε 6,64%.

Σε σχέση με τον αριθμό των ζευγών εκτιμημένης στάθμης – επιφάνειας που προκύπτουν από τα παραπάνω χρονικά εύρη, σημειώνεται ότι για εύρος μίας ημέρας προκύπτουν μόλις δύο ζεύγη εκτιμήσεων. Προχωρώντας στο χρονικό εύρος πέντε ημερών, παρατηρούνται 20 ζεύγη επιφάνειας – στάθμης. Η επιλογή χρονικού εύρους επτά ημερών – μίας εβδομάδας – αντιστοιχεί σε 28 ζεύγη επιφάνεια – στάθμης. Συνεπώς, επιλέγονται το χρονικό εύρος επτά ημερών, έναντι των πέντε, γίνεται αποδοχή ενός μέγιστου σφάλματος μεγαλύτερου κατά 1% της χωρητικότητας, ενώ αποκομίζονται 40% περισσότερα ζεύγη εκτιμήσεων στάθμης – επιφάνειας. Τα 28 ζεύγη εκτιμήσεων στάθμης επιφάνειας που προκύπτουν από την εν λόγω επιλογή παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-10.



Σχήμα 4-9. Η χρονοσειρά του αποθηκευμένου όγκου του ταμιευτήρα καθώς και οι ποσοστιαίες μεταβολές όγκου για χρονικό εύρος μίας, πέντε και επτά ημερών.



Σχήμα 4-10. Ζεύγη και γραμμικές σχέσεις 28 ζευγών στάθμης και επιφάνεια με τις παρατηρήσεις όγκου ταμιευτήρα Υλίκης

4.4. Εκτίμηση της μεταβολής του αποθηκευμένου όγκου νερού του ταμιευτήρα Υλίκης

Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω 28 ζεύγη στάθμης – επιφάνειας, εφαρμόζονται οι τέσσερεις μεθοδολογίες που περιγράφηκαν στην Παράγραφο 3.4. Τα αποτελέσματα των διαφορετικών προσεγγίσεων παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 4-3, ενώ αναπαρίστανται αναλυτικά στο Σχήμα 4-11. Σύμφωνα με τον Πίνακα 4-3, όσο και με τα γραφήματα του Σχήματος 4-11, φαίνεται πως η ασθενέστερη μεθοδολογία στην περίπτωση του ταμιευτήρα Υλίκης, για την εκτίμηση της μεταβολής του όγκου νερού αποδεικνύεται αυτή της γραμμικής σχέσης, όπως προτάθηκε από τους T. Busker et. al., (2018), τόσο σε όρους σφάλματος (RMSE), όσο και σε όρους συσχέτισης και λογικών σφαλμάτων. Αναφορικά με τις υπόλοιπες τρεις μεθόδους, αυτές αποδεικνύεται πως έχουν πολύ καλή απόδοση στην εκτίμηση της μεταβολής του όγκου του ταμιευτήρα Υλίκης, παρουσιάζοντας σφάλμα της τάξης του 1,3% της χωρητικότητας του ταμιευτήρα, υψηλή συσχέτιση καθώς και περιορισμένο αριθμό λογικών σφαλμάτων.

Πίνακας 4-3. Συνοπτικά αποτελέσματα εφαρμογής των τεσσάρων μεθοδολογιών εκτίμησης μεταβολής όγκου ταμιευτήρα Υλίκης.

Μεθοδολογία	RMSE [hm³]	Συντελεστής Συσχέτισης	Λογικά Σφάλματα
Γραμμικής σχέσης - (Busker et al., 2018)	9,83	93,82%	5

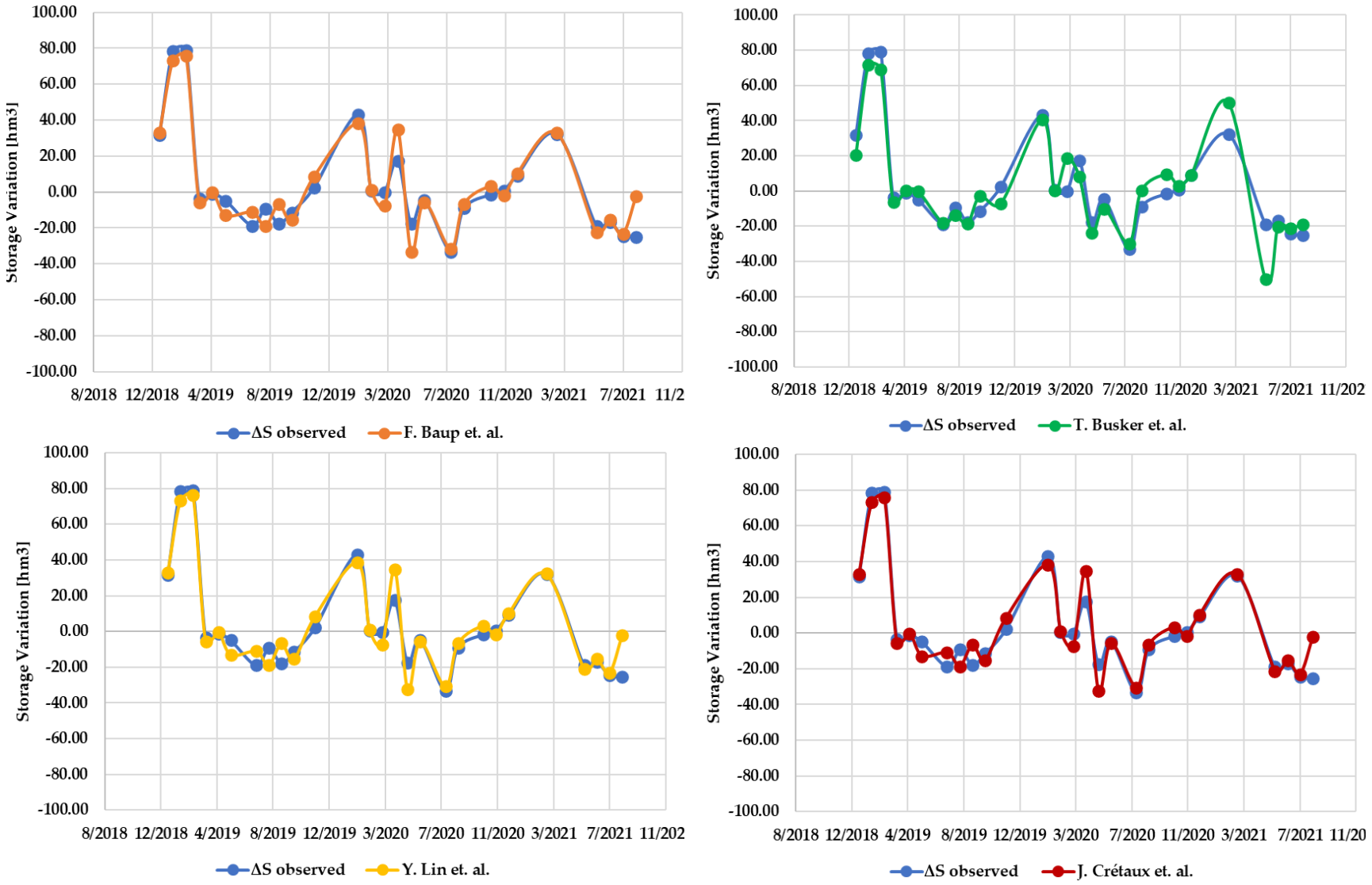
Μεθοδολογία	RMSE [hm^3]	Συντελεστής Συσχέτισης	Λογικά Σφάλματα
Τριγωνικού σχήματος - (Baup et al., 2014)	7,78	96,05%	2
Ολοκλήρωσης - (Lin et al., 2020)	7,69	96,14%	2
Πυραμίδας - (Crétaux et al., 2016)	7,73	96,10%	2

Πιο συγκεκριμένα, την καλύτερη απόδοση σε όρους σφάλματος όσο και συσχέτισης παρουσιάζει η μεθοδολογία της Ολοκλήρωσης των Lin et. al. (2020). Για την εφαρμογή της εν λόγω μεθοδολογίας, χρησιμοποιούνται τα 28 ζεύγη στάθμης – επιφάνειας, τα οποία εμφανίζουν ισχυρά γραμμική σχέση, όπως φάνηκε και στο Σχήμα 4-10. Συνεπώς η γενική Εξίσωση 3-7 της Παραγράφου 3.4.3., λαμβάνει την μορφή της Εξίσωση 4-1, όπως παρουσιάζεται παρακάτω, μεταξύ δύο χρονικών στιγμών, T_i και T_{i+1}. Τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας ολοκλήρωσης παρουσιάζονται αναλυτικότερα στην επόμενη παράγραφο.

$$\Delta V = \int_{T_i}^{T_{i+1}} (0{,}4899 \times h - 15{,}989) dh \qquad (4\text{-}1)$$

Αναφορικά με τα λογικά σφάλματα, αυτά παρατηρούνται σε ορισμένες περιπτώσεις πολύ μικρής μεταβολής των στοιχείων στάθμης – επιφάνειας – όγκου νερού του ταμιευτήρα. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα μεταβολής όγκου μεταξύ Σεπτεμβρίου και Οκτωβρίου 2020, όπου η στάθμη και η επιφάνεια νερού εκτιμήθηκαν πως αυξάνονται κατά 0,14m και 0,22km^2 αντίστοιχα. Συνεπώς με βάση τις εκτιμήσεις της μεθοδολογία ολοκλήρωσης, προκύπτει αύξηση του όγκου νερού κατά 3,1hm^3. Όμως, δεδομένου ότι με βάση τα στοιχεία του διαχειριστή του ταμιευτήρα παρατηρείται μείωση των αποθεμάτων κατά 1,6hm^3. Δεδομένου ότι τόσο η υπολογιζόμενη αύξηση, όσο και η παρατηρημένη μείωση των αποθεμάτων, είναι της τάξης <1% της χωρητικότητας του ταμιευτήρα, το λογικό σφάλμα αποτελεί ενδεχομένως ένα δείκτη της ακρίβειας της χρησιμοποιούμενης μεθοδολογίας.

Για το χρονικό διάστημα των 28 ζευγών που εξετάζονται με την εφαρμογή της μεθοδολογίας ολοκλήρωσης, η εκτίμηση με τα δεδομένα τηλεπισκόπησης οδηγεί σε θετική μέση μεταβολή όγκου νερού της τάξης των 2,8hm^3, με την αντίστοιχη μέση παρατηρημένη αύξηση να υπολογίζεται σε 3,48hm^3. Η μέγιστη αύξηση του αποθηκευμένου όγκου νερού που παρατηρείται μεταξύ διαδοχικών ζευγών, υπολογίζεται από τη μέθοδο ολοκλήρωσης σε 76,2hm^3, ενώ από τις παρατηρήσεις του διαχειριστή προκύπτει ίση με 79,05hm^3. Αναφορικά με τη μέγιστη μείωση των αποθεμάτων του ταμιευτήρα μεταξύ διαδοχικών ζευγών, η μέθοδος ολοκλήρωσης υπολογίζει 32,6hm^3, με τις παρατηρήσεις να διαχειριστή να έχουν ως αποτέλεσμα τα 33,2hm^3.

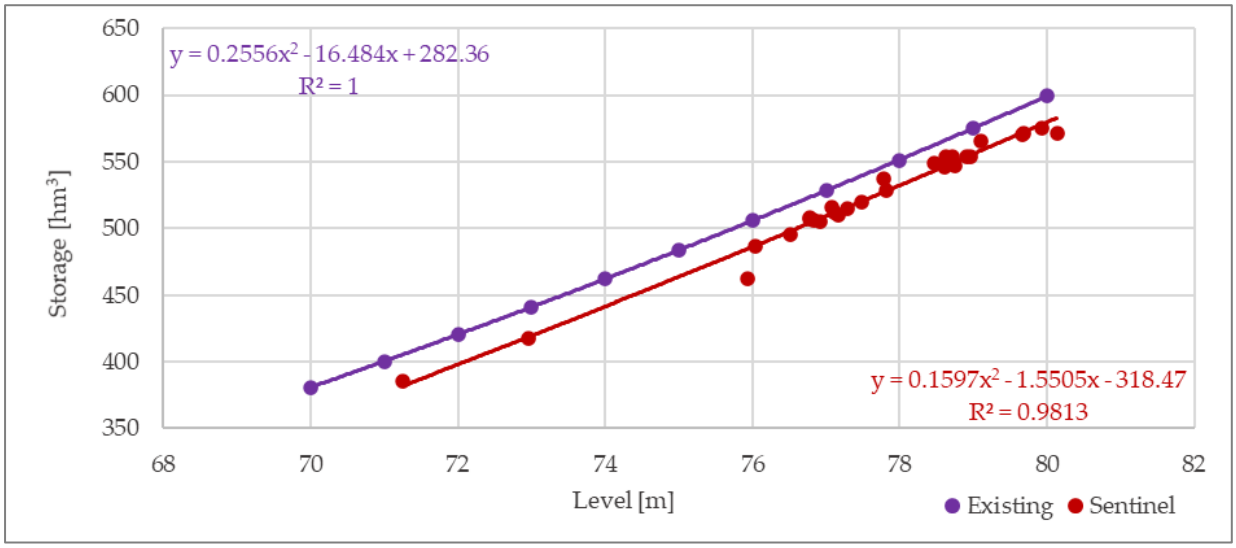


Σχήμα 4-11. Αναλυτική παρουσίαση εκτίμησης όγκου νερού ταμιευτήρα Υλίκης με τέσσερεις μεθοδολογίες.

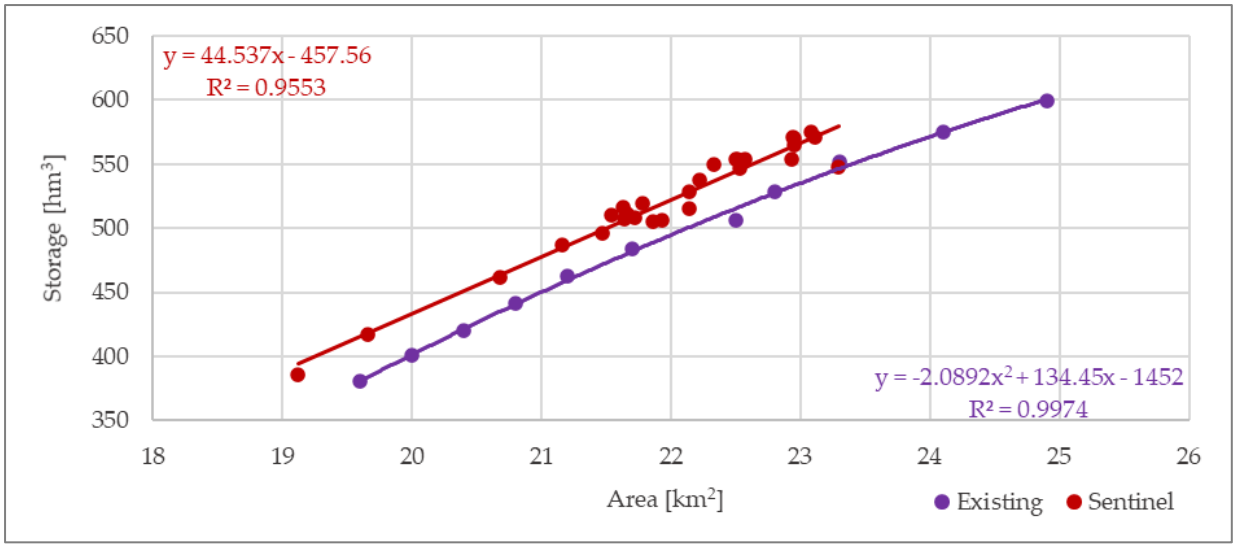
Κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου που καλύπτεται από τα 28 ζεύγη εκτιμημένης στάθμης – επιφάνειας, εντοπίζονται τέσσερα υδρολογικά εξάμηνα του ταμιευτήρα. Από το Φεβρουάριο 2019 έως το Σεπτέμβριο του 2019, η Υλίκη απολύει σύμφωνα με τις παρατηρήσεις του διαχειριστή 66,8hm^3. Την αντίστοιχη περίοδο, με χρήση των δεδομένων τηλεπισκόπησης, υπολογίζεται με τη μέθοδο ολοκλήρωσης απώλεια 70,5hm^3 νερού. Η διαφορά μεταξύ των δύο παραπάνω ποσοτήτων ισοδυναμεί με το 0,62% της χωρητικότητας του ταμιευτήρα. Αντίστοιχα, την περίοδο μεταξύ Σεπτεμβρίου 2019 και Απριλίου 2020, ο αποθηκευμένος όγκος νερού της Υλίκης, αυξήθηκε κατά 63,3hm^3, σύμφωνα με τις εκτιμήσεις του διαχειριστή, ενώ τα δεδομένα των δορυφορικών αποστολών Sentinel-2 και 3, οδηγούν σε υπολογισμό 75,3hm^3. Η διαφορά της παρατηρημένης και εκτιμημένης μεταβολής του όγκου του ταμιευτήρα ισοδυναμεί με το 2% της χωρητικότητάς του. Αντίστοιχα για την περίοδο μείωσης αποθεμάτων μεταξύ Απριλίου και Οκτωβρίου του 2020 και την περίοδο αύξηση των αποθεμάτων Οκτωβρίου 2020 – Μαρτίου 2021, οι διαφορά μεταξύ παρατηρημένης και εκτιμημένης μεταβολής του όγκου νερού υπολογίζεται σε 1,05% και 0,08% αντίστοιχα.

4.5. Σύγκριση των εξαγόμενων χαρακτηρισιτκών του ταμιευτήρα με τη βιβλιογραφία

Τα 28 ζεύγη δεδομένων των δορυφορικών αποστολών Sentinel-2 και 3, πέραν της εκτίμησης του αποθηκευμένου όγκου νερού του ταμιευτήρα και τη σύγκριση με τις παρατηρήσεις του διαχειριστή, συγκρίνονται και ως προς τις υφιστάμενες σχέσεις που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία, όπως παρουσιάστηκε και στην Παράγραφο 3.5. Τόσο το Σχήμα 4-12, όσο και το Σχήμα 4-13, καταδεικνύουν ότι υπάρχει μία αισθητή διαφορά μεταξύ των εκτιμήσεων των δορυφορικών δεδομένων και των στοιχείων της βιβλιογραφικής εργασίας. Αναφορικά με τις σχέσεις στάθμης – όγκου, η εξαγόμενη από τα δορυφορικά δεδομένα σχέση, με βάση και το Σχήμα 4-12, υποεκτιμά την αποθηκευτικότητα για δεδομένη στάθμη νερού κατά 9% της χωρητικότητας του ταμιευτήρα. Εν αντιθέσει, στην περίπτωση της σχέσης επιφάνειας – όγκου, στο Σχήμα 4-13, καταγράφεται υπερεκτίμηση της αποθηκευτικότητας για δεδομένη επιφάνεια νερού, σε σχέση με τις υφιστάμενες σχέσεις κατά 5,5% της χωρητικότητα.



Σχήμα 4-12. Σύγκριση της σχέσης στάθμης – όγκου για τα 28 ζεύγη τηλεπισκόπησης με τα δεδομένα της υφιστάμενης σχέσης.



Σχήμα 4-13. Σύγκριση της σχέσης επιφάνειας – όγκου για τα 28 ζεύγη τηλεπισκόπησης με τα δεδομένα της υφιστάμενης σχέσης.

5. Συζήτηση αποτελεσμάτων

Η παρούσα ερευνητική εργασία επαλήθευσε, μέσω in-situ παρατηρήσεων, την εφαρμοσιμότητα της χρήσης δορυφορικών δεδομένων για την εκτίμηση της στάθμης, της επιφάνειας και του αποθηκευμένου όγκου νερού του ταμιευτήρα Υλίκης. Η εφαρμογή του δείκτη NDWI, με την αξιοποίηση της μεθόδου ελάχιστου κατωφλίου, παρουσιάζει εξαιρετικά αποτελέσματα για την εκτίμηση της επιφάνειας νερού του ταμιευτήρα, παρά το πολυσχιδές ανάγλυφο που χαρακτηρίζει την περιοχή. Επιβεβαιώνεται ακόμα η δυνατότητα χρήση των πολυφασματικών οπτικών λήψεων της δορυφορικής αποστολής Sentinel-2 για την εξαγωγή εκτιμήσεων της επιφάνειας τόσο σε μηνιαία όσο και σε ετήσια βάση. Ακόμα, αποδεικνύεται πως είναι σαφής η χαρτογράφηση των υγρών και των ξηρών περιόδων του υδρολογικού κύκλου του ταμιευτήρα.

Αντιστοίχως, με επιτυχία χαρακτηρίζεται και η προσέγγιση για την εκτίμηση της στάθμης νερού του ταμιευτήρα με τη χρήση των δεδομένων των δορυφόρων Sentinel-3. Συγκεκριμένα, παρότι δεν υιοθετήθηκαν ή αναπτύχθηκαν εξεζητημένοι λογάριθμοι ή μεθοδολογίες βελτίωσης των μετρήσεων, και επιλέχθηκε μία προσέγγιση που αξιοποιεί έτοιμα δεδομένα, αποδείχτηκε ότι η εκτιμημένη στάθμη νερού ακολουθούσε σε πολύ υψηλό βαθμό τη χρονοσειρά των παρατηρήσεων όγκου νερού. Μάλιστα το γεγονός ότι επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ως τιμή στάθμης κάθε «περάσματος», η μέση αριθμητική τιμή των σημείων των λήψεων ραντάρ εντός του ταμιευτήρα, καταδεικνύει ότι είναι εφικτή η παραπάνω λύση, έναντι πιο σύνθετων προσεγγίσεων. Σημειώνεται ότι τέτοιου τύπου προσέγγιση είχε υιοθετηθεί στη λίμνη Gahai (Zhang et al., 2021a), η οποία παρουσιάζει παρόμοια χαρακτηριστικά με τον ταμιευτήρα Υλίκης, ως προς την επιφάνειά της και το αδρό ανάγλυφο. Δεδομένου ότι η τυπική απόκλιση μεταξύ των σημείων που χρησιμοποιήθηκαν ανά ημερομηνία λήψης του δορυφόρου βρίσκεται εντός των τιμών που αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία, καθώς και του υψηλού συντελεστή συσχέτισης (98,81%) με τον παρατηρημένο όγκου νερού, τεκμηριώνεται επαρκώς η χρήση του αριθμητικού μέσου όπως έλαβε χώρα στην παρούσα έρευνα.

Επίσης, η παρούσα έρευνα συνεισφέρει και στις διαφορετικές προσεγγίσεις αναφορικά με την επιλογή χρονικού εύρους για το συνδυασμό των εκτιμήσεων στάθμης και επιφάνειας. Σε πολλές περιπτώσεις, όπου τα «περάσματα» δορυφόρων υψομετρίας δεν είναι συχνά, η υιοθέτηση μικρού χρονικού εύρους – 2 ή και 5 ημερών – δύναται να περιορίσει σημαντικά των αριθμό των διαθέσιμων ζευγών. Επομένως, η προτεινόμενη από την παρούσα έρευνα επιλογή των 7 ημερών ως επιτρεπτό χρονικό εύρος παρουσιάζει σημαντικό πλεονέκτημα. Υπό την αίρεση ότι η συμπεριφορά του λιμναίου συστήματος είναι παρόμοια με αυτή της Υλίκης, η επιλογή των 7 ημερών, μπορεί να προσφέρει σημαντική αύξηση της διαθεσιμότητας των δεδομένων με ταυτόχρονα μικρή – αν και όχι αμελητέα – αύξηση του σφάλματος των εκτιμήσεων. Υπενθυμίζεται ότι χαρακτηριστικά στην περίπτωση της Υλίκης, η επιλογή χρονικού εύρους 7 ημερών έναντι των 5, αυξάνει τα διαθέσιμα ζεύγη κατά 40%, με την αποδοχή μεγαλύτερης αβεβαιότητας της τάξης του 1% της χωρητικότητας του ταμιευτήρα.

Τα στοιχεία των δορυφορικών αποστολών Sentinel-2 και Sentinel-3 που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, κατέστησαν δυνατή την εκτίμηση των μεταβολών του όγκου νερού και την παρακολούθηση των υδρολογικών στοιχείων του ταμιευτήρα Υλίκης για χρονικό διάστημα περίπου 3 ετών. Συνεπώς, αναγνωρίζεται η ευκαιρία της μελλοντικής έρευνας για να εστιάσει στην ενσωμάτωση και άλλων δορυφορικών αποστολών για την εκτίμηση της στάθμης (ICESat-2, SARAL, κ.ά.) και της επιφάνειας (Sentinel-1, Landsat-8,9, κ.ά.). Με την ενσωμάτωση περισσότερων δορυφορικών αποστολών αναμένεται να αυξήσει σημαντικά τα διαθέσιμα ζεύγη στάθμης – επιφάνειας, επιτρέποντας την πιο διεισδυτική διερεύνηση των υδρολογικών χαρακτηριστικών του

ταμιευτήρα και ιδίως κατά περιόδους, όπου ο όγκος νερού ήταν αισθητά χαμηλότερος από την τριετία που εξετάστηκε.

Σε σχέση με την εκτίμηση της μεταβολής του όγκου νερού του ταμιευτήρα Υλίκης, εξετάστηκαν τέσσερεις διαφορετικές μεθοδολογίες και συγκρίθηκαν με τη χρονοσειρά του καταγεγραμμένου από το διαχειριστή όγκου νερού του ταμιευτήρα. Οι τρεις από τις τέσσερεις μεθοδολογίες που εξετάστηκαν παρουσίασαν αποτελέσματα υψηλής ακρίβειας, με τη μέθοδο ολοκλήρωσης των Lin et al., (2020) να χαρακτηρίζεται ως η πιο ακριβής, με RMSE ίσο με το 1,28% της χωρητικότητας του ταμιευτήρα. Σε σύγκριση με την αρχική εφαρμογή της εν λόγω μεθόδου στη λίμνη Βικτώρια, η παρούσα έρευνα τεκμηριώνει την εφαρμοσιμότητά της και σε μικρότερα λιμναία συστήματα, όπως αυτό της Υλίκης. Ακόμα, σύμφωνα με τα παρεμφερή αποτελέσματά τους, τόσο η μέθοδος τριγωνικού σχήματος λίμνης (Baup et. al., 2014), όσο και η μέθοδος προσέγγισης πυραμίδας (Crétaux et. al. 2016) δεν μπορούν να αποκλειστούν από τις δυνατότητες εφαρμογής του σε λιμναία συστήματα παρεμφερή της Υλίκης. Επομένως κρίνεται εφικτή και άξια διερεύνησης η εφαρμοσιμότητα των παραπάνω προσεγγίσεων σε διαφορετικά είδη λιμναίων συστημάτων ανά ποικίλα γεωγραφικά πλάτη.

Αναφορικά με τη σύγκριση που έλαβε χώρα μεταξύ της σχέσης στάθμης – επιφάνειας – αποθηκευμένου όγκου νερού που υπολογίστηκε από τα δορυφορικά δεδομένα και της αντίστοιχης που εντοπίστηκε στη βιβλιογραφία, παρατηρούνται ορισμένες αποκλίσεις. Αυτές οι αποκλίσεις υποδεικνύουν μία πιθανή μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ταμιευτήρα. Οι εν λόγω αποκλίσεις, 5,5% για τη σχέση επιφάνειας – όγκου και 9% για τη σχέση στάθμης – όγκου, είναι μεγαλύτερες τόσο από τις θεωρητικές όσο και από τις υπολογισμένες αποκλίσεις. Συνεπώς δεν μπορούν να οφείλονται κατ’ αποκλειστικότητα στα περιθώρια σφάλματος της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Κατά προέκταση, αν και δεν είναι γνωστή η χρονολογία ή η εποχή στην οποία βασίστηκε η κατάρτιση της βιβλιογραφικής σχέσης, υπάρχουν πιθανότητες οι παρατηρούμενες αποκλίσεις να οφείλονται και σε φυσικά αίτια. Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα εφαρμογών τηλεπισκόπησης λιμναίων συστημάτων θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την επαλήθευση ή την επικαιροποίηση των καμπυλών στάθμης – επιφάνειας – αποθηκευμένου όγκου νερού, λόγω φαινομένων και μηχανισμών, όπως η στερεομεταφορά και απόθεση φερτών εντός των λιμναίων συστημάτων ή και των τεκτονικών μετακινήσεων της γης. Τα παραπάνω αποτελούν όρια της παρούσας έρευνας, τα οποία καλούνται οι μελλοντικές μελέτες να λάβουν υπόψη και να τα εξετάσουν.

6. Συμπεράσματα

Από την παρούσα έρευνα προκύπτουν συγκεκριμένα ποσοτικά ευρήματα για τη χρονική περίοδο που ελέγχθηκε με τα δεδομένα τηλεπισκόπησης των Sentinel-2 και Sentinel-3:

- Μεταξύ Μαρτίου 2016 και Σεπτεμβρίου 2021, η επιφάνεια του ταμιευτήρα που παρατηρήθηκε από τους δορυφόρους Sentinel-2, παρουσίασε μέγιστη τιμή τα 23,14km^2 και ελάχιστη τα 18,21km^2.
- Μεταξύ Νοεμβρίου 2018 και Σεπτεμβρίου 2021, η στάθμη του ταμιευτήρα που παρατηρήθηκε από τους δορυφόρους Sentinel-3, παρουσίασε μέγιστη τιμή τα 80,1m και ελάχιστη τα 71,3m.
- Ο βραχυπρόθεσμος (μηνιαίος) μέγιστος ρυθμός αύξησης και μείωσης της επιφάνειας του ταμιευτήρα υπολογίστηκε σε 0,091km^2, ήτοι 91.000m^2 ανά ημέρα και 0,022km^2, ήτοι 22.000m^2 ανά ημέρα αντίστοιχα.
- Ο βραχυπρόθεσμος (μηνιαίος) μέγιστος ρυθμός αύξησης και μείωσης της στάθμης του ταμιευτήρα υπολογίστηκε σε 0,132m/ημέρα και 0,087m/ημέρα αντίστοιχα.
- Η εκτίμηση της μεταβολής του αποθηκευμένου όγκου νερού, στο εύρος του 64% έως και του 96% της χωρητικότητάς του, αποδείχτηκε επιτυχής. Το RMSE της εκτίμησης υπολογίστηκε σε 7,69hm^3 (1,28% της χωρητικότητας), και ο συντελεστής συσχέτισης σε 96,14%.

Η παρούσα έρευνα επιβεβαίωσε την εφαρμοσιμότητα των μεθόδων δορυφορικής τηλεπισκόπησης για την παρακολούθηση της στάθμης και της επιφάνειας νερού των λιμναίων συστημάτων. Τεκμηριώνεται πως οι μέθοδοι τηλεπισκόπησης είναι ολοένα και πιο ικανοί να παρέχουν σημαντικές πληροφορίες αναφορικά με τον υδρολογικό κύκλο των εσωτερικών υδάτων τόσο σε μηνιαία όσο και σε ετήσια κλίμακα. Τέλος, αξιοποιώντας το γεγονός ότι ο ταμιευτήρας της Υλίκης παρακολουθείται διαχρονικά από το διαχειριστή του, δοκιμάστηκαν τέσσερεις μέθοδοι εκτίμησης της μεταβολής του αποθηκευμένου όγκου νερού, εκ των οποίων οι τρεις είχαν θετικά αποτελέσματα, υψηλής ακρίβειας.

Επίσης, συζητήθηκαν διαφορετικές προσεγγίσεις σε επιμέρους ζητήματα της τηλεπισκόπησης, και προτάθηκαν συγκεκριμένες ανά περίπτωση λύσεις. Χαρακτηριστικά, η προτεινόμενη επιλογή χρονικού εύρους συνδυασμού των εκτιμήσεων στάθμης – επιφάνειας αποδείχτηκε πως μπορεί να αυξήσει κατά πολύ τα διαθέσιμα ζεύγη δεδομένων, με αρκετά μικρή σχετικά μείωση της ακρίβειας της μεθόδου. Ακόμα, η εφαρμογή μεθόδου που είχαν δοκιμαστεί σε πολύ διαφορετικά λιμναία συστήματα, είτε από άποψη γεωμετρίας είτε από άποψη υδρολογίας και γεωγραφικού πλάτους, καταδεικνύει την ικανότητα των μεθόδων τηλεπισκόπησης για την εκτίμηση της μεταβολής του αποθηκευμένου όγκου νερού να εφαρμοστούν σε ποικίλα λιμναία συστήματα. Τέλος, οι διαφορές που διαπιστώθηκαν από τη σύγκριση των εκτιμημένων σχέσεων στάθμης – επιφάνειας – όγκου νερού με τη βιβλιογραφία, μπορεί να προσφέρει στο διαχειριστή του ταμιευτήρα την ευκαιρία για την ενδεχόμενη επικαιροποίηση των εν λόγω σχέσεων, ώστε να αποτυπωθούν οι πιθανές μεταβολές στη γεωμετρία και την υδρολογική συμπεριφορά του ταμιευτήρα.

Τελικώς καταγράφονται ορισμένες ευκαιρίες μελλοντικής έρευνας με βάση την παρούσα διπλωματική εργασία. Αφενός ευκαιρία μελλοντικής έρευνας αποτελεί η επέκταση της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε περισσότερα λιμναία συστήματα του ελλαδικού χώρου και αφετέρου η ενσωμάτωση περισσότερων δορυφόρων στην υφιστάμενη μεθοδολογία. Το τελευταίο πρόκειται να προσφέρει πυκνότερη χρονική ανάλυση της τάξης μίας εβδομάδας ή και πυκνότερα. Ακόμα, αναγνωρίζεται η πιθανότητα της χρήσης της προτεινόμενης μεθοδολογίας για τον έλεγχο και την επικαιροποίηση των χαρακτηριστικών καμπυλών υφιστάμενων ταμιευτήρων και λιμνών.

Καταγραφή Σχημάτων

Σχήμα 1-1. Γραφική αναπαράσταση των σημαντικότερων στοιχείων του ισοζυγίου νερού λιμναίων συστημάτων (Πηγή: O'Sullivan & Reynolds (2003)). 12
Σχήμα 1-2. Ποσοστιαία μεταβολή του μέσου ετήσιου υετού κατά το Σενάριο A1B. (α) 1961 – 1990 / 2021 – 2050 και (β) 1961 – 1990 / 2071 – 2100. (Πηγή: Τράπεζα της Ελλάδα, 2011). 13
Σχήμα 1-3. Χρονοσειρά εξέλιξης της μέση ετήσιας θερμοκρασίας για την Ελλάδα (Πηγή: Τράπεζα της Ελλάδα, 2011) 13
Σχήμα 2-1. Περιοχή της ΛΑΠ Βοιωτικού Κηφισού, Ταμιευτήρας Υλίκης, Λίμνη Παραλίμνη και βασικό υδρογραφικό δίκτυο σε υπόβαθρο ΨΜΕ. 20
Σχήμα 2-2. Χάρτης αναπαράστασης διοικητικής υπαγωγής ταμιευτήρα Υλίκης (Πηγή: ΕΓΥ, 2022). .. 22
Σχήμα 2-3. Κύριες χρήσεις γης ανά επιμέρους ΛΑΠ, του ΥΔ EL07. (Πηγή: Special Secreteriat for Water, 2017). 23
Σχήμα 2-4. Χάρτης αναπαράστασης βασικών χρήσεων γης για το έτος 2017 – 2018. (Πηγή δεδομένων: CLC 2018 — Copernicus Land Monitoring Service, n.d.). 24
Σχήμα 2-5. Χρονοσειρά καθημερινών παρατηρήσεων αποθηκευμένου όγκου νερού ταμιευτήρα Υλίκης. 25
Σχήμα 3-1. Σχηματική αναπαράσταση μεθοδολογίας εκτίμησης επιφάνειας νερού ταμιευτήρα Υλίκης 33
Σχήμα 3-2. Σχηματική αναπαράσταση μεθοδολογίας εκτίμησης στάθμης νερού ταμιευτήρα Υλίκης 34
Σχήμα 4-1. Παράθεση των 69 εκτιμήσεων επιφάνειας νερού ταμιευτήρα Υλίκης με τις αντίστοιχες καταγραφές όγκου νερού από το διαχειριστή του ταμιευτήρα. 45
Σχήμα 4-2. Σύγκριση των αποτελεσμάτων εκτίμησης επιφάνειας νερού για σχετικά χαμηλή και μεγάλη επιφάνεια νερού. 46
Σχήμα 4-3. Γραμμική σχέση επιφάνειας – όγκου νερού ταμιευτήρα Υλίκης για το εύρος τιμών των 69 ζευγών. 47
Σχήμα 4-4. Ζεύγη διαδοχικών μεταβολών επιφάνειας – όγκου και γραμμική σχέση τους. 48
Σχήμα 4-5. Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας υπολογισμού στάθμης για τη δορυφορική λήψη της 17ης Σεπτεμβρίου 2019. 49
Σχήμα 4-6. Παράθεση των 37 εκτιμήσεων στάθμης νερού ταμιευτήρα Υλίκης με τις αντίστοιχες καταγραφές όγκου νερού από το διαχειριστή του ταμιευτήρα. 50
Σχήμα 4-7. Γραμμική σχέση στάθμης – όγκου νερού ταμιευτήρα Υλίκης για το εύρος τιμών των 37 ζευγών. 51
Σχήμα 4-8. Ζεύγη διαδοχικών μεταβολών στάθμης – όγκου και γραμμική σχέση τους. 52
Σχήμα 4-9. Η χρονοσειρά του αποθηκευμένου όγκου του ταμιευτήρα καθώς και οι ποσοστιαίες μεταβολές όγκου για χρονικό εύρος μίας, πέντε και επτά ημερών. 55
Σχήμα 4-10. Ζεύγη και γραμμικές σχέσεις 28 ζευγών στάθμης και επιφάνεια με τις παρατηρήσεις όγκου ταμιευτήρα Υλίκης 56
Σχήμα 4-11. Αναλυτική παρουσίαση εκτίμησης όγκου νερού ταμιευτήρα Υλίκης με τέσσερεις μεθοδολογίες. 58
Σχήμα 4-12. Σύγκριση της σχέσης στάθμης – όγκου για τα 28 ζεύγη τηλεπισκόπησης με τα δεδομένα της υφιστάμενης σχέσης. 59
Σχήμα 4-13. Σύγκριση της σχέσης επιφάνειας – όγκου για τα 28 ζεύγη τηλεπισκόπησης με τα δεδομένα της υφιστάμενης σχέσης. 60

Καταγραφή Εικόνων

Εικόνα 2-1. Δορυφορική λήψη της αποστολής Sentinel-2 στις 07/12/2017. Περιοχή εισόδου καναλιού Βοιωτικού Κηφισού. 23
Εικόνα 2-2. Σχηματική αναπαράσταση δορυφόρου αποστολής Sentinel-2. (Πηγή: (SUHET, 2015)). . 26
Εικόνα 2-3. Αναπαράσταση των 4 φασμάτων που παρέχονται σε ανάλυση 10m. (Πηγή: (SUHET, 2015)). 27
Εικόνα 2-4. Ο δορυφόρος Sentinel-3A. (Πηγή: ESA, 2022) 28
Εικόνα 2-5. Τα βασικά όργανα των δορυφόρων της αποστολής Sentinel-3. (Πηγή: ESA, 2022)..... 30
Εικόνα 4-1. Λήψη φάσματος Band3 – Πράσινο, 12/07/2020, Sentinel-2 και περιοχή ταμιευτήρα Υλίκης. 40
Εικόνα 4-2. Λήψη φάσματος Band8 – Σχεδόν υπέρυθρο, 12/07/2020, Sentinel-2 και περιοχή ταμιευτήρα Υλίκης. 41
Εικόνα 4-3. Περικοπή λήψης φάσματος Band3 – Πράσινο, 12/07/2020, Sentinel-2 στην περιοχή ταμιευτήρα Υλίκης. 42
Εικόνα 4-4. Περικοπή λήψης φάσματος Band8 – Σχεδόν υπέρυθρο, 12/07/2020, Sentinel-2 στην περιοχή ταμιευτήρα Υλίκης. 42
Εικόνα 4-5. Αρχικά υπολογισμένος δείκτης NDWI, 12/07/2021 ταμιευτήρα Υλίκης. 43
Εικόνα 4-6. Τελικός και διακριτοποιημένος δείκτης NDWI, 12/07/2021 ταμιευτήρα Υλίκης. 43
Εικόνα 4-7. Τελική περίμετρος υγρής επιφάνειας ταμιευτήρα Υλίκης, 12/07/2020 με υπόβαθρο τη λήψη πραγματικών χρωμάτων της αποστολής Sentinel-2..... 44

Καταγραφή Πινάκων

Πίνακας 3-1. Σχέση στάθμης – επιφάνειας – αποθέματος ταμιευτήρα Υλίκης (Πηγή Efstratiadis & Tsoukalas, 2019). 38
Πίνακας 4-1. Τιμές και βασικά στατιστικά μεγέθη υπολογισμού στάθμης από τη δορυφορική λήψης της 17ης Σεπτεμβρίου 2019. 49
Πίνακας 4-2. Αναλυτικός πίνακας παρουσίασης συνόλου εκτιμήσεων στάθμης και επιφάνειας νερού ταμιευτήρα Υλίκης, με ταυτόχρονες παρατηρήσεις αποθηκευμένου όγκου νερού από το διαχειριστή. 52
Πίνακας 4-3. Συνοπτικά αποτελέσματα εφαρμογής των τεσσάρων μεθοδολογιών εκτίμησης μεταβολής όγκου ταμιευτήρα Υλίκης. 56

Βιβλιογραφία

Alexandridis, T. K., Takavakoglou, V., Crisman, T. L., & Zalidis, G. C. (2007). Remote sensing and GIS techniques for selecting a sustainable scenario for Lake Koronia, Greece. *Environmental Management*, *39*(2), 278–290. https://doi.org/10.1007/s00267-005-0364-2

Arsen, A., Crétaux, J. F., Berge-Nguyen, M., & del Rio, R. A. (2013). Remote sensing-derived bathymetry of Lake Poopó. *Remote Sensing*, *6*(1), 407–420. https://doi.org/10.3390/rs6010407

Bank of Greece. (2011). *The environmental, financial and social implications of climate change in Greece*. (in Greek).

Bariamis, G., Paschos, G., & Baltas, E. (2018). Land Accounts in the River Basin Districts of Greece. *Environmental Processes*, *5*, 213–237. https://doi.org/10.1007/s40710-018-0321-8

Baup, F., Frappart, F., & Maubant, J. (2014). Combining high-resolution satellite images and altimetry to estimate the volume of small lakes. *Hydrology and Earth System Sciences*, *18*(5), 2007–2020. https://doi.org/10.5194/hess-18-2007-2014

Biswas, A. K. (2004). Integrated Water Resources Management: A Reassessment. *Water International*, *29*(2), 248–256. https://doi.org/10.1080/02508060408691775

Busker, T., de Roo, A., Gelati, E., Schwatke, C., Adamovic, M., Bisselink, B., Pekel, J.-F., & Cottam, A. (2018). A global lake and reservoir volume analysis using a surface water dataset and satellite altimetry. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1–32. https://doi.org/10.5194/hess-2018-21

Capolongo, D., Refice, A., Bocchiola, D., D'Addabbo, A., Vouvalidis, K., Soncini, A., Zingaro, M., Bovenga, F., & Stamatopoulos, L. (2019). Coupling multitemporal remote sensing with geomorphology and hydrological modeling for post flood recovery in the Strymonas dammed river basin (Greece). *Science of the Total Environment*, *651*, 1958–1968. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.114

Carabajal, C. C., & Boy, J. P. (2021). Lake and reservoir volume variations in South America from radar altimetry, ICESat laser altimetry, and GRACE time-variable gravity. *Advances in Space Research*, *68*(2), 652–671. https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.04.022

Cavallo, C., Papa, M. N., Gargiulo, M., Palau-Salvador, G., Vezza, P., & Ruello, G. (2021). Continuous Monitoring of the Flooding Dynamics in the Albufera Wetland (Spain) by Landsat-8 and Sentinel-2 Datasets. *Remote Sensing*, *13*(17), 3525. https://doi.org/10.3390/rs13173525

CLC 2018 — Copernicus Land Monitoring Service. (n.d.).

Crétaux, J. F., Abarca-del-Río, R., Bergé-Nguyen, M., Arsen, A., Drolon, V., Clos, G., & Maisongrande, P. (2016). Lake Volume Monitoring from Space. In *Surveys in Geophysics* (Vol. 37, Issue 2, pp. 269–305). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/s10712-016-9362-6

Crétaux, J. F., Bergé-Nguyen, M., Calmant, S., Jamangulova, N., Satylkanov, R., Lyard, F., Perosanz, F., Verron, J., Montazem, A. S., Guilcher, G. le, Leroux, D., Barrie, J., Maisongrande, P., & Bonnefond, P. (2018). Absolute calibration or validation of the altimeters on the Sentinel-3A and the Jason-3 over Lake Issykkul (Kyrgyzstan). *Remote Sensing*, *10*(11). https://doi.org/10.3390/rs10111679

Crétaux, J. F., & Birkett, C. (2006). Lake studies from satellite radar altimetry. *Comptes Rendus - Geoscience*, *338*(14–15), 1098–1112. https://doi.org/10.1016/j.crte.2006.08.002

Du, Y., Zhang, Y., Ling, F., Wang, Q., Li, W., & Li, X. (2016). Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the swir band. *Remote Sensing*, *8*(4). https://doi.org/10.3390/rs8040354

Duan, Z., & Bastiaanssen, W. G. M. (2013). Estimating water volume variations in lakes and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data. *Remote Sensing of Environment*, *134*, 403–416. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.010

Efstratiadis, A., & Tsoukalas, I. (2019). *Revision of the Yliki and Paralimni water balance and evaluation of the overflow risk during current hydrologic year*. http://www.itia.ntua.gr/el/docinfo/2014/

Elhag, M., & Yilmaz, N. (2021). Insights of remote sensing data to surmount rainfall/runoff data limitations of the downstream catchment of Pineios River, Greece. *Environmental Earth Sciences*, *80*(1). https://doi.org/10.1007/s12665-020-09289-5

Elsahabi, M., Makboul, O., & Negm, A. M. (2018). Lake Nubia bathymetry detection by satellite remote sensing. *International Water Technology Journal, IWTJ*, *8 (1)*(March 2018).

European Space Agency. (n.d.-a). *Sentinel-3 Altimetry Technical Guide*. Retrieved October 21, 2021, from https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-3-altimetry/

European Space Agency. (n.d.-b). *Sentinel-3 Atlimetry Overview*. Retrieved October 10, 2021, from https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-3-altimetry/overview

Forfinski-Sarkozi, N. A., & Parrish, C. E. (2016). Analysis of MABEL bathymetry in Keweenaw Bay and implications for ICESat-2 ATLAS. *Remote Sensing*, *8*(9). https://doi.org/10.3390/rs8090772

Frappart, F., Zeiger, P., Betbeder, J., Gond, V., Bellot, R., Baghdadi, N., Blarel, F., Darrozes, J., Bourrel, L., & Seyler, F. (2021). Automatic Detec-tion of Inland Water Bodies along Altimetry Tracks for Estimating Surface Water Storage Variations in the Congo Basin. *Remote Sensing*, 10. https://doi.org/10.3390/rs13193804ï

Fussell, J., Rundquist, D., & Harrington, J. A. (1986). On Defining Remote Sensing. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*.

Getirana, A., Jung, H. C., & Tseng, K. H. (2018). Deriving three dimensional reservoir bathymetry from multi-satellite datasets. *Remote Sensing of Environment*, *217*(August), 366–374. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.030

Jimenez Cisneros, B. E., Oki, T., Arnell, N. W., Benito, G., Cogley, J. G., Döll, P., Jiang, T., & Mwakalila, S. S. (2014). Freshwater Resources. In C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, & L. L. White (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1199–1265). Cambridge University Press.

Karavitis, C. A., Chortaria, C., Alexandris, S., Vasilakou, C. G., & Tsesmelis, D. E. (2012). Development of the standardised precipitation index for Greece. *Urban Water Journal*, *9*(6), 401–417. https://doi.org/10.1080/1573062X.2012.690431

Keeble, B. R. (1988). The Brundtland report: 'Our common future.' *Medicine and War*, *4*(1), 17–25. https://doi.org/10.1080/07488008808408783

Kittel, C. M. M., Jiang, L., Tøttrup, C., & Bauer-Gottwein, P. (2021). Sentinel-3 radar altimetry for river monitoring - A catchment-scale evaluation of satellite water surface elevation from Sentinel-3A and Sentinel-3B. *Hydrology and Earth System Sciences*, *25*(1), 333–357. https://doi.org/10.5194/hess-25-333-2021

Kovats, R. S., Valentini, R., M.Bouwer, L., Georgopoulou, E., Jacob, D., Martin, E., Rounsevell, M., & Soussana, J.-F. (2014). Europe. In C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, & L. L. White (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1267–1326). Cambridge University Press.

Lin, Y., Li, X., Zhang, T., Chao, N., Yu, J., Cai, J., & Sneeuw, N. (2020). Water volume variations estimation and analysis using multisource satellite data: A case study of Lake Victoria. *Remote Sensing*, *12*(18). https://doi.org/10.3390/RS12183052

Livada, I., & Assimakopoulos, V. D. (2007). Spatial and temporal analysis of drought in Greece using the Standardized Precipitation Index (SPI). *Theoretical and Applied Climatology*, *89*(3–4), 143–153. https://doi.org/10.1007/s00704-005-0227-z

Loucks, D. P. (2000). Sustainable water resources management. *Water International*, *25*(1), 3–10. https://doi.org/10.1080/02508060008686793

Markogianni, V., Kalivas, D., Petropoulos, G. P., & Dimitriou, E. (2022). Modelling of Greek Lakes Water Quality Using Earth Observation in the Framework of the Water Framework Directive (WFD). *Remote Sensing*, *14*(3), 739. https://doi.org/10.3390/rs14030739

McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, *17*(7), 1425–1432. https://doi.org/10.1080/01431169608948714

O'Sullivan, P. E., & Reynolds, C. S. (Eds.). (2003). *The Lakes Handbook, Volume 1*. Blackwell Science Ltd. https://doi.org/10.1002/9780470999271

Papastergiadou, E. S., Retalis, A., Apostolakis, A., & Georgiadis, T. (2008). Environmental monitoring of spatio-temporal changes using remote sensing and GIS in a Mediterranean Wetland of Northern Greece. *Water Resources Management*, *22*(5), 579–594. https://doi.org/10.1007/s11269-007-9179-7

Peppa, M., Vasilakos, C., & Kavroudakis, D. (2020). Eutrophication monitoring for Lake Pamvotis, Greece, using sentinel-2 data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *9*(3). https://doi.org/10.3390/ijgi9030143

Prewitt, J. M. S., & Mendelsohn, M. L. (2006). THE ANALYSIS OF CELL IMAGES*. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *128*(3), 1035–1053. https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1965.tb11715.x

Psomiadis, E., Soulis, K. X., Zoka, M., & Dercas, N. (2019). Synergistic approach of remote sensing and gis techniques for flash-flood monitoring and damage assessment in Thessaly plain area, Greece. *Water (Switzerland)*, *11*(3). https://doi.org/10.3390/w11030448

Schröder, L., Richter, A., Fedorov, D. v., Eberlein, L., Brovkov, E. v., Popov, S. v., Knöfel, C., Horwath, M., Dietrich, R., Matveev, A. Y., Scheinert, M., & Lukin, V. v. (2017). Validation of satellite altimetry by kinematic GNSS in central East Antarctica. *The Cryosphere*, *11*(3), 1111–1130. https://doi.org/10.5194/tc-11-1111-2017

Schwatke, C., Dettmering, D., Bosch, W., & Seitz, F. (2015). DAHITI - An innovative approach for estimating water level time series over inland waters using multi-mission satellite altimetry. *Hydrology and Earth System Sciences*, *19*(10), 4345–4364. https://doi.org/10.5194/hess-19-4345-2015

Sekertekin, A. (2020). A Survey on Global Thresholding Methods for Mapping Open Water Body Using Sentinel-2 Satellite Imagery and Normalized Difference Water Index. *Archives of Computational Methods in Engineering*, *0123456789*. https://doi.org/10.1007/s11831-020-09416-2

Skourtos, M., Machleras, A., & Kontogianni, A. (2011). *Financial assessment of the implications of climate change for water resources* (pp. 0–54). Bank of Greece (in Greek).

Song, C., Huang, B., & Ke, L. (2014). Inter-annual changes of alpine inland lake water storage on the Tibetan Plateau: Detection and analysis by integrating satellite altimetry and optical imagery. *Hydrological Processes*, *28*(4), 2411–2418. https://doi.org/10.1002/hyp.9798

SUHET. (2015). *SENTINEL-2 User Handbook*. https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/document-library/-/asset_publisher/xlslt4309D5h/content/sentinel-2-user-handbook

Terzidis, G. (1992). Water Scarcity; Causes, forecasting potential and mitigation measures in the urban and agricultural development of Greece. *Water Scarcity and Floods*, 25–40.

Thornton, P. K., & Herrero, M. (2010). *The Inter-linkages between Rapid Growth in Livestock Production, Climate Change, and the Impacts on Water Resources, Land Use, and Deforestation Background Paper to the 2010 World Development Report*. http://hdl.handle.net/10986/9223

Vignudelli, S., Scozzari, A., Abileah, R., & Scozzari, A. (2011). A Completely Remote Sensing Approach To Monitoring Reservoirs Water Volume. In *IWTC* (Vol. 15). https://www.researchgate.net/publication/228517141

Water and Climate Change Adaptation. (2013). OECD. https://doi.org/10.1787/9789264200449-en

Weatherhead, E. K., & Howden, N. J. K. (2009). The relationship between land use and surface water resources in the UK. *Land Use Policy*, *26*(SUPPL. 1). https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.08.007

Williamson, C. E., Saros, J. E., Vincent, W. F., & Smol, J. P. (2009). Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change. *Limnology and Oceanography*, *54*(6part2), 2273–2282. https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2273

Yang, X., Zhao, S., Qin, X., Zhao, N., & Liang, L. (2017). Mapping of urban surface water bodies from sentinel-2 MSI imagery at 10 m resolution via NDWI-based image sharpening. *Remote Sensing*, *9*(6), 1–19. https://doi.org/10.3390/rs9060596

Zhang, C., Lv, A., Zhu, W., Yao, G., & Qi, S. (2021a). Using multisource satellite data to investigate lake area, water level, and water storage changes of terminal lakes in ungauged regions. *Remote Sensing*, *13*(16). https://doi.org/10.3390/rs13163221

Zhang, C., Lv, A., Zhu, W., Yao, G., & Qi, S. (2021b). Using Multisource Satellite Data to Investigate Lake Area, Water Level, and Water Storage Changes of Terminal Lakes in Ungauged Regions. *Remote Sensing*, *13*(16), 3221. https://doi.org/10.3390/rs13163221

Ειδική Γραμματεία Υδάτων. (2013). *ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ 7 Α ΦΑΣΗΣ: ΟΡΙΣΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΙΔΙΑΙΤΕΡΩΣ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ. Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας*.

Ειδική Γραμματεία Υδάτων. (2017a). *Στρατηγική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων 1ης Αναθεώρησης Σχεδίου Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (EL07)*.

Ειδική Γραμματεία Υδάτων. (2017b). *1η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (EL07)*. http://wfdver.ypeka.gr/wp-content/uploads/2017/12/EL07_SDLAP_APPROVED.pdf

Ειδική Γραμματεία Υδάτων. (2018). *ΣΧΕΔΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας*.

ΕΥΔΑΠ. (n.d.). *Χαρακτηριστικά Ταμιευτήρα Υλίκης*. Retrieved April 27, 2022, from https://www.eydap.gr/userfiles/c3c4382d-a658-4d79-b9e2-ecff7ddd9b76/fact-sheet-ylikis.pdf

ΕΥΔΑΠ Α.Ε. (n.d.). *ΑΠΟΘΕΜΑΤΑ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ*. Retrieved December 14, 2021, from https://www.eydap.gr/en/TheCompany/Water/Savings/

Ευστρατιάδης, Α., Ναλμπάντης, Ι., Ρόζος, Ε., & Κουτσογιάννης, Δ. (Επιστημονικός Υ. (2004). *ΕΚΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΠΟΠΤΕΙΑΣΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝΥΔΡΕΥΣΗΣ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ*.

Ηλεία: Η λίμνη Πηνειού αδειάζει και αποκαλύπτει το παρελθόν της – Εντυπωσιακές εικόνες από ψηλά. (2020, November 15). https://blueskytv.gr/2020/11/%CE%B7%CE%BB%CE%B5%CE%AF%CE%B1-%CE%B7-%CE%BB%CE%AF%CE%BC%CE%BD%CE%B7-%CF%80%CE%B7%CE%BD%CE%B5%CE%B9%CE%BF%CF%8D-%CE%B1%CE%B4%CE%B5%CE%B9%CE%AC%CE%B6%CE%B5%CE%B9-%CE%BA%CE%B1%CE%B9-%CE%B1%CF%80%CE%BF/

Κώνστας, Γ., & Καρτσωνάκης, Μ. (2013, November 4). *"Αδειάζει" η λίμνη του Κουρνά*. https://www.haniotika-nea.gr/adiazi-limni-tou-kourna/

Ορθή διαχείριση της λίμνης Πλαστήρα ζητά με επείγουσα επιστολή ο Π. Νάνος. (2019, July 31). *Ertnews.Gr*. https://www.ertnews.gr/perifereiakoi-stathmoi/volos/%CE%BF%CF%81%CE%B8%CE%AE-%CE%B4%CE%B9%CE%B1%CF%87%CE%B5%CE%AF%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%B7-%CF%84%CE%B7%CF%82-%CE%BB%CE%AF%CE%BC%CE%BD%CE%B7%CF%82-%CF%80%CE%BB%CE%B1%CF%83%CF%84%CE%AE%CF%81%CE%B1-%CE%B6/

Παρχαρίδης, Ι. (2015). *Αρχές δορυφορικής τηλεπισκόπησης* (Κ. Νικολακόπουλος, Ed.). Κάλλιπος, Ανοικτές ακαδημαϊκές εκδόσεις.

Τι φταίει για την οικολογική καταστροφή στην Κορώνεια. (2019, September 23). https://ecopress.gr/ti-ftei-gia-tin-ikologiki-katastro/

Τσιγγανάς, Θ., Μυρτσιώτη, Γ., & Φωτιάδη, Ι. (2008, November 14). *Η Ελλάδα σιγά σιγά χάνει τις λίμνες της*. https://www.kathimerini.gr/society/340164/i-ellada-siga-siga-chanei-tis-limnes-tis/