

# Περιβαλλοντική Αξιολόγηση του Ποταμού Μεσσαπίου στην Εύβοια μέσω Δεικτών

Ιωάννης Κυπαρισσόπουλος<sup>1</sup>, Δημήτριος Τσεσμελής<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάροδος Αριστοτέλους 18, 26335 Πάτρα

<sup>2</sup>Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωπονίας, Πανεπιστημιούπολη Μεσολογγίου, 30200 Μεσολόγγι

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αξιολογεί την περιβαλλοντική κατάσταση του ποταμού Μεσσαπίου και της ευρύτερης περιοχής του Δήμου Διρφύων-Μεσσαπίων στην κεντρική Εύβοια, με αφορμή τα επαναλαμβανόμενα πλημμυρικά φαινόμενα και ιδιαίτερα την καταστροφική πλημμύρα του Αυγούστου 2020. Χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικά δεδομένα Landsat 7 ETM+ Level 2 και εργαλεία GIS για την περίοδο 2000-2023, με σταθερό εποχικό παράθυρο Μαΐου-Οκτωβρίου. Υπολογίστηκαν οι δείκτες NDVI, MNDWI, LST-C, NDMI, NDBI και BSI, δημιουργήθηκαν ετήσιες συνθέσεις διάμεσης τιμής και στη συνέχεια μία αντιπροσωπευτική σύνθεση της 24ετίας. Οι δείκτες κανονικοποιήθηκαν στο διάστημα 0-1 με χρήση των εκατοστημορίων P2-P98 και εναρμονίστηκαν προς κοινή περιβαλλοντική κατεύθυνση. Για τη σύνθεση του ENV\_SCORE εφαρμόστηκε εμπειρική στάθμιση, βάσει του απόλυτου μεγέθους των συσχετίσεων Pearson των MNDWI, NDMI, NDBI και BSI με τη θερμοκρασία επιφάνειας LST-C. Τα βάρη ανήλθαν σε 13,73%, 27,90%, 24,89% και 33,48% αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα δείχνουν πτωτική τάση της LST-C, αύξηση του NDMI και μετατόπιση των NDBI και BSI προς περισσότερο αρνητικές τιμές. Ο τελικός χάρτης ENV\_SCORE, χωρικής ανάλυσης 30 m, αποτυπώνει τη σχετική αντιπροσωπευτική περιβαλλοντική κατάσταση της περιόδου 2000-2023 και μπορεί να υποστηρίξει τον περιβαλλοντικό και αντιπλημμυρικό σχεδιασμό, χωρίς να αποτελεί αυτοτελή χάρτη πλημμυρικού κινδύνου ή διαχρονικής μεταβολής.

**Λέξεις κλειδιά:** Μεσσαπίος ποταμός, τηλεπισκόπηση, GIS, περιβαλλοντικοί δείκτες, ENV\_SCORE, πλημμυρικός κίνδυνος

## ABSTRACT

This study assesses the environmental condition of the Messapios River and the wider Municipality of Dirfys-Messapia in central Evia, motivated by recurrent flood events and especially the destructive flood of August 2020. Landsat 7 ETM+ Level 2 imagery and GIS tools were used for the 2000-2023 period, considering a fixed May-October seasonal window. Six indicators were calculated: NDVI, MNDWI, land surface temperature in degrees Celsius (LST-C), NDMI, NDBI and BSI. Annual median composites and a representative 24-year median composite were produced. The indicators were normalized to the 0-1 interval using the 2nd and 98th percentiles and harmonized towards a common environmental direction. The final ENV\_SCORE was derived through an empirical weighted linear combination of MNDWI, NDMI, NDBI and BSI, using the absolute Pearson correlations with LST-C. The resulting weights were 13.73%, 27.90%, 24.89% and 33.48%, respectively. The results indicate a declining LST-C trend, increasing NDMI values and progressively more negative NDBI and BSI values. The final 30 m ENV\_SCORE raster represents the relative environmental condition of the 2000-2023 period and may support environmental and flood-mitigation planning. It should not be interpreted as an absolute environmental quality metric, a flood-risk map, or a direct map of temporal change.

**Keywords:** Messapios River, remote sensing, GIS, environmental indicators, ENV\_SCORE, flood risk

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι πλημμύρες αποτελούν ένα από τα συχνότερα και πλέον καταστροφικά υδρομετεωρολογικά φαινόμενα, με επιπτώσεις στην ανθρώπινη ζωή, στις υποδομές, στις οικονομικές δραστηριότητες και στα οικοσυστήματα. Η εκδήλωσή τους ελέγχεται από τη συνδυασμένη επίδραση της έντασης και διάρκειας της βροχόπτωσης, της γεωμορφολογίας και γεωλογικής δομής, της κατάστασης κορεσμού του εδάφους, της κάλυψης γης και των ανθρώπινων παρεμβάσεων. Η αστικοποίηση, η αύξηση των αδιαπέραστων επιφανειών, η καταπάτηση ή στένωση ρεμάτων, η ανεπαρκής συντήρηση υποδομών και η αποψίλωση μειώνουν τη φυσική διήθηση και επιταχύνουν την επιφανειακή απορροή (Directive 2007/60/EC, 2007; Diakakis, 2011; Σκυλοδήμου κ.ά., 2016).

Στην κεντρική Εύβοια ο Μεσσάπιος ποταμός διασχίζει τον Δήμο Διρφύων-Μεσσαπίων και συνδέεται άμεσα με τις γεωργικές και λοιπές δραστηριότητες της περιοχής. Το κύριο υδατόρεμα έχει μήκος περίπου 9 km, ενώ μαζί με τους παραποτάμους του φθάνει περίπου τα 34 km και η λεκάνη απορροής του εκτιμάται σε 216 km<sup>2</sup>. Κατά τις τελευταίες δύο δεκαετίες έχουν καταγραφεί σημαντικά πλημμυρικά γεγονότα το 2006, το 2009 και το 2020. Η πλημμύρα του Αυγούστου 2020 προκάλεσε οκτώ θανάτους στην ευρύτερη περιοχή της κεντρικής Εύβοιας και ανέδειξε την ανάγκη συστηματικής παρακολούθησης των περιβαλλοντικών συνθηκών.

Η δορυφορική τηλεπισκόπηση παρέχει επαναλαμβανόμενες, χωρικά συνεπείς παρατηρήσεις και επιτρέπει τη μελέτη μεγάλων περιοχών σε βάθος χρόνου. Οι φασματικοί δείκτες μπορούν να περιγράψουν πτυχές της βλάστησης, της υγρασίας, των υδάτινων επιφανειών, των δομημένων εκτάσεων, του γυμνού εδάφους και της θερμικής απόκρισης. Η ενσωμάτωσή τους σε περιβάλλον GIS υποστηρίζει τη σύνθεση σύνθετων περιβαλλοντικών δεικτών και τη χωρική ανάδειξη περιοχών με ευνοϊκότερη ή δυσμενέστερη σχετική κατάσταση (Tsesmelis et al., 2021; Efraimidou et al., 2024).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η περιβαλλοντική αξιολόγηση του Μεσσαπίου και της ευρύτερης διοικητικής περιοχής του Δήμου Διρφύων-Μεσσαπίων για την περίοδο 2000-2023. Εξετάζονται οι διαχρονικές τάσεις έξι δεικτών και παράγεται ο σύνθετος δείκτης ENV\_SCORE. Η ανάλυση δεν περιορίζεται αποκλειστικά στην κοίτη του ποταμού, αλλά καλύπτει το σύνολο του Δήμου, ώστε να αποτυπώνει τις ευρύτερες μεταβολές της κάλυψης γης και της θερμικής και υδρολογικής κατάστασης.

## 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

### 2.1 Πλημμυρικά φαινόμενα και περιβαλλοντικές μεταβολές

Η ευρωπαϊκή Οδηγία 2007/60/EK ορίζει την πλημμύρα ως την προσωρινή κάλυψη από νερό εδάφους που υπό φυσιολογικές συνθήκες δεν καλύπτεται από νερό. Ο κίνδυνος πλημμύρας συνδυάζει την πιθανότητα εκδήλωσης και τις δυνητικές αρνητικές συνέπειες για την ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και την οικονομία. Η επικινδυνότητα, η έκθεση και η τρωτότητα είναι διακριτές αλλά αλληλένδετες έννοιες. Η παρούσα εργασία δεν υπολογίζει υδραυλικά μεγέθη, βάθη ή ταχύτητα ροής και επομένως δεν παράγει χάρτη επικινδυνότητας. Εξετάζει περιβαλλοντικές μεταβλητές που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της λεκάνης και μπορούν να λειτουργήσουν συμπληρωματικά στον σχεδιασμό.

Οι ποτάμιες και αιφνίδιες πλημμύρες ενισχύονται όταν η έντονη βροχόπτωση συνδυάζεται με κορεσμένα εδάφη, απότομες κλίσεις στα ανάντη, περιορισμένη χωρητικότητα κοίτης και αυξημένη στεγάνωση. Η βλάστηση συγκρατεί νερό και φερτά υλικά και μειώνει την ταχύτητα της απορροής, ενώ το γυμνό έδαφος και οι τεχνητές επιφάνειες αυξάνουν την απορροή και τη θερμική επιβάρυνση. Οι αλλαγές χρήσεων γης και η εγκατάλειψη γεωργικών εκτάσεων μπορούν να μεταβάλουν σημαντικά τη φυτοκάλυψη, την υγρασία και τη θερμοκρασία επιφανείας.

## 2.2 Φασματικοί δείκτες

| Δείκτης | Περιβαλλοντική πληροφορία     | Ερμηνεία υψηλών τιμών                   |
|---------|-------------------------------|-----------------------------------------|
| NDVI    | Υγεία και πυκνότητα βλάστησης | Πυκνότερη/υγιέστερη βλάστηση            |
| MNDWI   | Ανοιχτές υδάτινες επιφάνειες  | Μεγαλύτερη παρουσία νερού               |
| LST-C   | Θερμοκρασία επιφανείας        | Θερμότερη επιφάνεια                     |
| NDMI    | Υγρασία βλάστησης και εδάφους | Μεγαλύτερη υγρασία                      |
| NDBI    | Δομημένες ή ξηρές επιφάνειες  | Περισσότερες δομημένες/ξηρές επιφάνειες |
| BSI     | Γυμνό και εκτεθειμένο έδαφος  | Μεγαλύτερη παρουσία γυμνού εδάφους      |

Πίνακας 1: Περιβαλλοντική πληροφορία και ερμηνεία των έξι δεικτών.

Ο NDVI βασίζεται στην αντίθεση μεταξύ εγγύς υπέρυθρου και κόκκινου φάσματος και χρησιμοποιείται ευρέως για την παρακολούθηση της βλάστησης (Tucker, 1979). Ο MNDWI αξιοποιεί το πράσινο και το βραχύ υπέρυθρο φάσμα και ενισχύει την απόκριση των ανοιχτών υδάτινων επιφανειών (Xu, 2006). Η LST-C προκύπτει από το θερμικό κανάλι και εκφράζει τη θερμοκρασία της επιφανείας, η οποία διαφέρει από τη θερμοκρασία αέρα. Ο NDMI χρησιμοποιεί NIR και SWIR για την εκτίμηση της υγρασίας της βλάστησης (Gao, 1996). Οι NDBI και BSI χρησιμοποιούνται αντίστοιχα για τις δομημένες/ξηρές επιφάνειες και το γυμνό έδαφος (Zha et al., 2003; Rikimaru et al., 2002).

## 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

### 3.1 Περιοχή ανάλυσης και δορυφορικά δεδομένα

Ως περιοχή μελέτης χρησιμοποιήθηκε το διοικητικό όριο του Δήμου Διρφύων-Μεσσαπίων. Το όριο εισήχθη στο Google Earth Engine ως Feature Collection και χρησιμοποιήθηκε για τη χωρική αναζήτηση εικόνων, την αποκοπή των raster και τον υπολογισμό στατιστικών και εκατοστημορίων. Επιλέχθηκε η συλλογή LANDSAT/LE07/C02/T1\_L2 του Landsat 7 ETM+, Collection 2, Level 2. Χρησιμοποιήθηκαν μόνο προϊόντα με PROCESSING\_LEVEL=L2SP, ώστε να είναι διαθέσιμα τα οπτικά κανάλια επιφανειακής ανακλαστικότητας και το θερμικό κανάλι ST\_B6.

Η χρονική περίοδος καλύπτει τα έτη 2000-2023. Για κάθε έτος χρησιμοποιήθηκαν εικόνες από τον Μάιο έως τον Οκτώβριο. Η σταθερή εποχική περίοδος μειώνει την εποχική μεταβλητότητα και αποφεύγει τη σύγκριση διαφορετικών φαινολογικών και θερμοκρασιακών συνθηκών. Συνεπώς, τα αποτελέσματα εκφράζουν κυρίως τις συνθήκες της θερμής περιόδου και δεν πρέπει να ερμηνεύονται ως μέσες ετήσιες τιμές.

### 3.2 Προεπεξεργασία και παραγωγή ετήσιων συνθέσεων

Για την απομάκρυνση προβληματικών εικονοστοιχείων χρησιμοποιήθηκε το QA\_PIXEL, ώστε να αποκλειστούν περιοχές χωρίς δεδομένα, νέφη, διασταλμένες περιοχές νεφών, σκιές και χιονοκαλυμμένες επιφάνειες. Το QA\_RADSAT χρησιμοποιήθηκε για την απομάκρυνση κορεσμένων και dropped pixels. Οι αρχικές ψηφιακές τιμές των οπτικών καναλιών μετατράπηκαν σε επιφανειακή ανακλαστικότητα με τον επίσημο συντελεστή κλιμάκωσης 0,0000275 και offset -0,2. Η θερμοκρασία ST\_B6 μετατράπηκε από Kelvin σε βαθμούς Κελσίου.

Για κάθε έτος δημιουργήθηκε σύνθεση διάμεσης τιμής όλων των διαθέσιμων εικόνων Μαΐου-Οκτωβρίου. Η διάμεση τιμή είναι λιγότερο ευαίσθητη σε ακραίες παρατηρήσεις, υπολειπόμενα νέφη και σκιές και περιορίζει τα χωρικά κενά που σχετίζονται με το πρόβλημα SLC-off του Landsat 7. Στη συνέχεια, για κάθε δείκτη υπολογίστηκε η διάμεση των 24 ετήσιων raster. Με τον τρόπο αυτό κάθε έτος συμμετέχει ισότιμα, ανεξάρτητα από τον αριθμό των διαθέσιμων εικόνων.



Εικόνα 1: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας παραγωγής του ENV\_SCORE.

### 3.3 Κανονικοποίηση και κοινή περιβαλλοντική κατεύθυνση

Οι δείκτες είχαν διαφορετικό εύρος και κατανομή τιμών και κανονικοποιήθηκαν στο κοινό διάστημα 0-1. Για τον περιορισμό της επίδρασης ακραίων εικονοστοιχείων χρησιμοποιήθηκαν το 2ο και το 98ο εκατοστημόριο. Τιμές κάτω από το P2 και πάνω από το P98 περιορίστηκαν στα άκρα του διαστήματος. Η προσέγγιση αυτή είναι πιο ανθεκτική στον θόρυβο σε σχέση με τη χρήση απόλυτου ελαχίστου και μέγιστου.

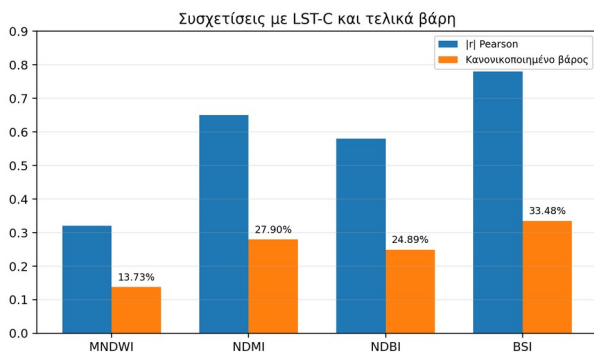
Όλα τα επιμέρους scores μετατράπηκαν προς την ίδια περιβαλλοντική κατεύθυνση: 0 για τη δυσμενέστερη και 1 για την ευνοϊκότερη σχετική κατάσταση. Για MNDWI και NDMI διατηρήθηκε η αρχική κατεύθυνση, καθώς η μεγαλύτερη παρουσία νερού και υγρασίας θεωρήθηκε ευνοϊκή. Για NDBI και BSI εφαρμόστηκε αντιστροφή (1-S), επειδή οι χαμηλότερες τιμές αντιστοιχούν σε μικρότερη παρουσία δομημένων, ξηρών ή γυμνών επιφανειών.

### 3.4 Συσχετίσεις, βάρη και ENV\_SCORE

Οι συντελεστές Pearson με τη LST-C ήταν -0,32 για τον MNDWI, -0,65 για τον NDMI, +0,58 για τον NDBI και +0,78 για τον BSI. Για τη στάθμιση χρησιμοποιήθηκε το απόλυτο μέγεθος κάθε συντελεστή και τα βάρη κανονικοποιήθηκαν ώστε να αθροίζουν στη μονάδα. Η μέθοδος αποτελεί εμπειρική στάθμιση που συνδέει την περιβαλλοντική πληροφορία των δεικτών με τη θερμική απόκριση. Δεν αποτελεί τυπική AHP και η συσχέτιση δεν αποδεικνύει αιτιώδη σχέση.

| Δείκτης | Pearson r με LST-C | Τελικό βάρος |
|---------|--------------------|--------------|
| MNDWI   | -0,32              | 13,73%       |
| NDMI    | -0,65              | 27,90%       |
| NDBI    | +0,58              | 24,89%       |
| BSI     | +0,78              | 33,48%       |

Πίνακας 2: Συντελεστές Pearson με τη LST-C και τελικά βάρη.



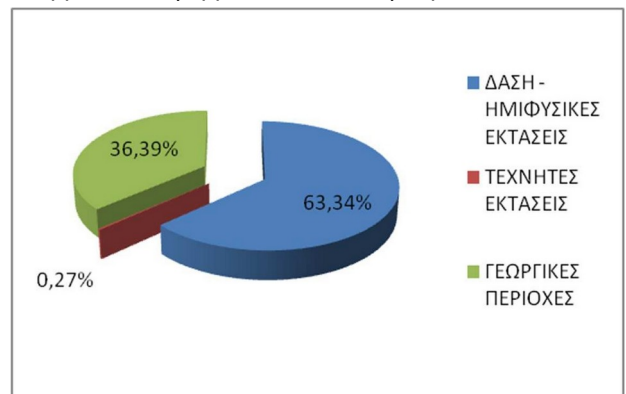
Εικόνα 2: Απόλυτες συσχετίσεις Pearson και κανονικοποιημένα βάρη.

Ο τελικός δείκτης υπολογίστηκε με τη μέθοδο της γραμμικής στάθμισης (Weighted Linear Combination):  $ENV\_SCORE = 0,1373 \cdot S\_MNDWI + 0,2790 \cdot S\_NDMI + 0,2489 \cdot S\_NDBI + 0,3348 \cdot S\_BSI$ . Οι  $S\_NDBI$  και  $S\_BSI$  αντιστοιχούν στις ανεστραμμένες κανονικοποιημένες τιμές. Ο NDVI και η LST-C διατηρήθηκαν για την περιγραφική ανάλυση και τον έλεγχο, αλλά δεν εντάχθηκαν στο σταθμισμένο άθροισμα, επειδή δεν είχαν προσδιοριστεί ανεξάρτητα βάρη.

## 4. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Ο Μεσσαπίος βρίσκεται στη Δημοτική Ενότητα Μεσσαπίων του Δήμου Διρφύων-Μεσσαπίων. Διέρχεται από τη Δημοτική Κοινότητα Ψαχνών και την Τοπική Κοινότητα Καστέλλας και εκβάλλει στον Βόρειο Ευβοϊκό. Η συνολική έκταση του Δήμου είναι 779,86 km<sup>2</sup> και ο πληθυσμός του, σύμφωνα με την απογραφή 2011, ανερχόταν σε 18.800 κατοίκους. Η τοπική οικονομία συνδέεται σε μεγάλο βαθμό με τον πρωτογενή τομέα, γεγονός που καθιστά τη διαχείριση του νερού κρίσιμη για την περιοχή.

Η περιοχή εντάσσεται στον μεσογειακό βιοκλιματικό όροφο και χαρακτηρίζεται ως υγρή με ήπιο χειμώνα. Στην ευρύτερη ζώνη βρίσκονται οι προστατευόμενες περιοχές Όρος Καντήλι και Δίρφη-Δάσος Στενής, καταφύγιο άγριας ζωής και ο υδροβιότοπος Κολοβρέχτης. Οι πεδινές περιοχές Ψαχνών και Καστέλλας έως την παραλιακή ζώνη δομούνται κυρίως από πρόσφατες αλλοιωματικές αποθέσεις. Η κοίτη και οι μικρότεροι χείμαρροι περιλαμβάνουν αργίλους, άμμους και χαλίκια με μικρή συνεκτικότητα, ενώ οι όχθες αποτελούνται από άμμο, ιλυώδη άμμο και υλικά αναβαθμίδων.



Εικόνα 3: Κάλυψη γης στον Δήμο Διρφύων-Μεσσαπίων, όπως παρουσιάζεται στη διπλωματική εργασία.

Η χωρική ετερογένεια του Δήμου περιλαμβάνει πεδινές γεωργικές εκτάσεις, οικιστικές ζώνες, δασικές και ημιορεινές περιοχές. Η συνύπαρξη αλλοιωματικών πεδιδάδων, χείμαρρων, έντονου ανάγλυφου στα ανάντη και ανθρώπινων χρήσεων γης δημιουργεί σύνθετες συνθήκες απορροής. Για τον λόγο αυτό η περιβαλλοντική αξιολόγηση σε επίπεδο Δήμου παρέχει χρήσιμη συμπληρωματική πληροφορία για τον σχεδιασμό, αλλά απαιτείται πρόσθετη υδρολογική και υδραυλική ανάλυση για την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου.

## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 5.1 NDVI και MNDWI

Ο NDVI παρουσίασε μέσες ετήσιες τιμές από περίπου 0,45 έως 0,54. Η χαμηλότερη τιμή της χρονοσειράς καταγράφηκε το 2001, ενώ υψηλές τιμές παρατηρήθηκαν το 2009, το 2015 και το 2022. Η συνολική εικόνα υποδηλώνει σχετικά σταθερή έως ενισχυμένη φυτοκάλυψη, με διακυμάνσεις που συνδέονται με τις συνθήκες κάθε θερμής περιόδου. Ο NDVI δεν εντάχθηκε στον ENV\_SCORE, αλλά χρησιμοποιήθηκε για τη σύγκριση της βλάστησης με τους δείκτες υγρασίας, γυμνού εδάφους και θερμοκρασίας.

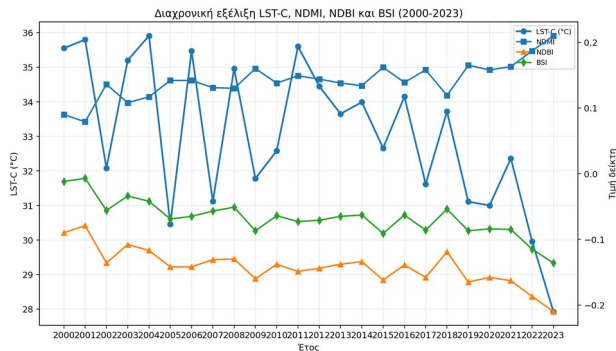
Ο MNDWI κυμάνθηκε σε αρνητικές μέσες τιμές και δεν παρουσίασε μεγάλες διακυμάνσεις κατά το μεγαλύτερο μέρος της περιόδου. Οι χαμηλότερες τιμές εμφανίστηκαν στα έτη 2009, 2015 και 2018, περίπου -0,425 έως -0,426, ενώ το 2023 καταγράφηκε η υψηλότερη τιμή της σειράς (-0,355). Η κυριαρχία αρνητικών τιμών είναι αναμενόμενη σε μία ευρεία χερσαία περιοχή, όπου οι ανοιχτές υδάτινες επιφάνειες καταλαμβάνουν μικρό ποσοστό σε σχέση με τη συνολική έκταση.

### 5.2 LST-C και NDMI

Η μέση θερμοκρασία επιφάνειας για την περίοδο ήταν 33,05°C. Η μέγιστη τιμή καταγράφηκε το 2004 (35,91°C), ενώ η ελάχιστη το 2023 (27,93°C). Από 35,55°C το 2000 η

LST-C μειώθηκε σε 27,93°C το 2023, μεταβολή που αντιστοιχεί σε 21,43%. Η γραμμή τάσης είναι πτωτική, με έντονες ετήσιες διακυμάνσεις. Η ερμηνεία αφορά τις δορυφορικές συνθήκες Μαΐου-Οκτωβρίου και δεν ισοδυναμεί με πτώση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας αέρα.

Ο NDMI παρουσίασε αυξητική τάση, από ελάχιστη τιμή 0,079 το 2001 σε μέγιστη 0,210 το 2023. Η συσχέτισή του με τη LST-C ήταν ισχυρά αρνητική ( $r=-0,65$ ), γεγονός που δείχνει ότι οι υψηλότερες τιμές υγρασίας της βλάστησης συνδέονται με χαμηλότερες θερμοκρασίες επιφάνειας. Στο τέλος της χρονοσειράς, ειδικά το 2022-2023, η αύξηση του NDMI συμπίπτει με τις χαμηλότερες τιμές LST-C.

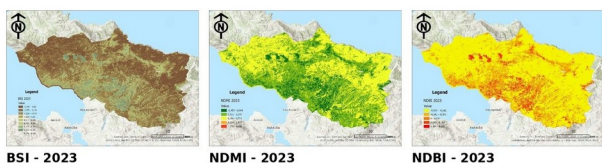


Εικόνα 4: Διαχρονική εξέλιξη LST-C, NDMI, NDBI και BSI κατά την περίοδο 2000-2023.

### 5.3 NDBI και BSI

Ο NDBI παρουσίασε μειωτική τάση, από -0,079 το 2001 σε -0,210 το 2023. Οι περισσότερο αρνητικές τιμές ερμηνεύονται ως μικρότερη σχετική παρουσία δομημένων ή ξηρών επιφανειών και μεγαλύτερη συμμετοχή βλάστησης και υγρασίας στη φασματική απόκριση. Η θετική συσχέτιση με τη LST-C ( $r=+0,58$ ) σημαίνει ότι η μετατόπιση του NDBI προς χαμηλότερες τιμές συνοδεύεται από μείωση της θερμοκρασίας επιφάνειας.

Αντίστοιχα, ο BSI μειώθηκε από -0,007 το 2001 σε -0,136 το 2023. Η συσχέτισή του με τη LST-C ήταν η ισχυρότερη μεταξύ των εξεταζόμενων δεικτών ( $r=+0,78$ ), γι' αυτό και έλαβε το μεγαλύτερο βάρος στον ENV\_SCORE. Η μείωση του BSI υποδηλώνει μικρότερη παρουσία γυμνού ή εκτεθειμένου εδάφους ή αύξηση της πυκνότητας της φυτοκάλυψης. Οι χαμηλότερες τιμές του 2022-2023 συμπίπτουν με τις χαμηλότερες θερμοκρασίες επιφάνειας.

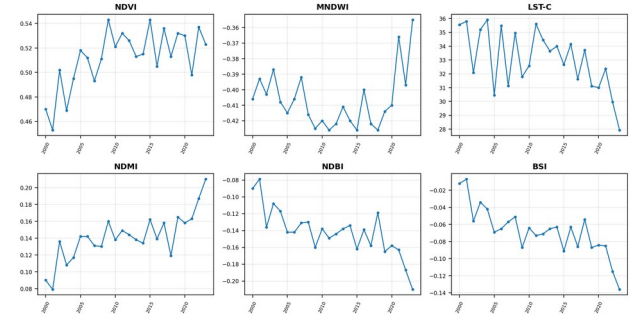


Εικόνα 5: Χωρική κατανομή των τριών δεικτών με τα μεγαλύτερα βάρη στον ENV\_SCORE για το 2023.

### 5.4 Συγκριτική αξιολόγηση των δεικτών

Η κοινή διαχρονική συμπεριφορά της LST-C, του NDMI, του NDBI και του BSI υποστηρίζει την ερμηνεία ότι η θερμική καταπόνηση μειώνεται όταν αυξάνεται η υγρασία της βλάστησης και περιορίζονται οι γυμνές ή ξηρές επιφάνειες. Το έτος 2023 αποτελεί το εντονότερο σημείο της χρονοσειράς, καθώς συνδυάζει το ιστορικό ελάχιστο της LST-C, το μέγιστο NDMI και τις χαμηλότερες τιμές NDBI και BSI. Ο NDBI παραμένει σε σχετικά υψηλή τιμή 0,523, ενώ ο MNDWI εμφανίζει σαφή άνοδο προς λιγότερο αρνητική τιμή.

Διακύμανση των έξι δεικτών κατά την περίοδο 2000-2023

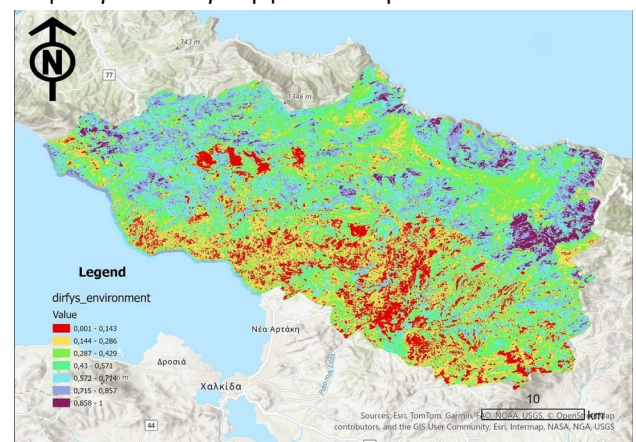


Εικόνα 6: Διακύμανση των έξι δεικτών για τα έτη 2000-2023.

Τα δεδομένα της διπλωματικής αποδίδουν την παρατηρούμενη μεταβολή σε συνδυασμό αύξησης της φυτοκάλυψης, υγρασίας και πιθανής αλλαγής χρήσεων γης. Οι πλημμύρες των τελευταίων ετών και η εγκατάλειψη μέρους των αγροτικών εκτάσεων αναφέρονται ως παράγοντες που μπορεί να έχουν ενισχύσει τη φυσική βλάστηση. Η ερμηνεία αυτή πρέπει να αντιμετωπίζεται ως περιβαλλοντικά εύλογη συσχέτιση και όχι ως αποδεδειγμένη αιτιώδης σχέση, επειδή δεν πραγματοποιήθηκε ανεξάρτητη ταξινόμηση αλλαγών χρήσεων γης ή επιτόπια επαλήθευση για κάθε έτος.

### 5.5 Τελικός περιβαλλοντικός δείκτης ENV\_SCORE

Το ENV\_SCORE διατηρήθηκε ως συνεχές raster στο διάστημα 0-1. Η τιμή 0 αντιπροσωπεύει τη δυσμενέστερη σχετική σύνθεση των τεσσάρων σταθμισμένων δεικτών, ενώ η τιμή 1 την ευνοϊκότερη. Για τη χαρτογραφική παρουσίαση χρησιμοποιήθηκαν ερμηνευτικά διαστήματα από πολύ χαμηλό έως πολύ υψηλό score. Τα διαστήματα είναι ίσα και χρησιμοποιούνται μόνο για το υπόμνημα, επειδή δεν υπάρχουν βιβλιογραφικά ή επιτόπια επικυρωμένα οικολογικά κατώφλια για τον συγκεκριμένο δείκτη.



Εικόνα 7: Τελικός συνεχής περιβαλλοντικός δείκτης ENV\_SCORE (0-1) για την αντιπροσωπευτική περίοδο 2000-2023.

Ο τελικός χάρτης αναδεικνύει περιοχές με διαφορετική σχετική περιβαλλοντική κατάσταση σε όλη την έκταση του Δήμου. Οι χαμηλές τιμές συνδέονται με συνδυασμό χαμηλότερης υγρασίας και μεγαλύτερης παρουσίας γυμνού ή ξηρού εδάφους και δομημένων επιφανειών. Οι υψηλότερες τιμές συνδέονται με μεγαλύτερη παρουσία υγρασίας και μικρότερη συμμετοχή των επιβαρυντικών επιφανειών. Το προϊόν εξήχθη ως μονοκαναλικό GeoTIFF Float32, χωρικής ανάλυσης 30 m, με περίοδο αναφοράς 2000-2023 και εποχική περίοδο Μαΐου-Οκτωβρίου.

### 6. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

Η χρήση μίας σταθερής δορυφορικής συλλογής και κοινής εποχικής περιόδου εξασφαλίζει συγκρισιμότητα, αλλά συνεπάγεται περιορισμούς. Το Landsat 7 παρουσιάζει το πρόβλημα SLC-off μετά το 2003, το οποίο αντιμετωπίστηκε με πολλαπλές εικόνες και διαμέσους συνθέσεις, χωρίς όμως να εξαλειφεται πλήρως η πιθανότητα τοπικών κενών ή θορύβου. Οι μέσες τιμές κάθε έτους εξαρτώνται από τον

αριθμό και τη χρονική κατανομή των διαθέσιμων καθαρών εικόνων.

Η LST-C είναι θερμοκρασία επιφάνειας και όχι θερμοκρασία αέρα. Επηρεάζεται από την ώρα διέλευσης του δορυφόρου, την υγρασία, τη βλάστηση, την ανακλαστικότητα και τις τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες. Η πτώση της χρονοσειράς δεν πρέπει να ερμηνευθεί αυτομάτως ως γενική κλιματική ψύξη. Για ισχυρότερη τεκμηρίωση θα απαιτούνταν σύγκριση με επίγειους μετεωρολογικούς σταθμούς, ανάλυση ανωμαλιών και έλεγχος της στατιστικής σημαντικότητας των τάσεων.

Οι NDMI και NDBI χρησιμοποιούν κοινή φασματική πληροφορία NIR-SWIR και δεν είναι πλήρως ανεξάρτητες μεταβλητές. Η ταυτόχρονη ένταξή τους αυξάνει τη συμμετοχή αυτής της κοινής πληροφορίας στον τελικό δείκτη και αναγνωρίζεται ως περιορισμός. Παρόμοια, η χρήση της LST-C ως μεταβλητής αναφοράς για όλα τα βάρη δίνει έμφαση στη θερμική διάσταση της περιβαλλοντικής κατάστασης. Μελλοντική ανάλυση θα μπορούσε να συγκρίνει τα εμπειρικά βάρη με AHP, entropy weighting ή principal component analysis και να πραγματοποιήσει ανάλυση ευαισθησίας.

Ο ENV\_SCORE είναι σχετικός για τη συγκεκριμένη περιοχή, περίοδο και κανονικοποίηση. Οι τιμές δεν αποτελούν απόλυτη μέτρηση περιβαλλοντικής ποιότητας και δεν μπορούν να μεταφερθούν αυτούσιες σε άλλη περιοχή. Επιπλέον, ο τελικός χάρτης είναι αντιπροσωπευτική σύνθεση της 24ετίας και όχι χάρτης της κατεύθυνσης ή του μεγέθους της μεταβολής. Για τη διερεύνηση μεταβολών απαιτείται χωριστή ανάλυση τάσεων, σύγκριση υποπεριόδων ή παραγωγή διαφορών ανά δείκτη.

Τέλος, η περιβαλλοντική αξιολόγηση δεν αντικαθιστά υδρολογικό-υδραυλικό μοντέλο. Η εκτίμηση πλημμυρικής επικινδυνότητας χρειάζεται δεδομένα βροχόπτωσης σχεδιασμού, παροχές, γεωμετρία κοίτης, τραχύτητα, κατασκευές, αναχώματα και υδραυλική προσομοίωση. Ο ENV\_SCORE μπορεί να λειτουργήσει ως συμπληρωματικό εργαλείο ιεράρχησης περιοχών για περαιτέρω έρευνα, λύσεις βασισμένες στη φύση, αποκατάσταση παρόχθιας βλάστησης και σχεδιασμό μέτρων διαχείρισης.

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εφαρμογή δορυφορικής τηλεπισκόπησης και GIS επέτρεψε την ενιαία αξιολόγηση της περιβαλλοντικής κατάστασης του Δήμου Διρφύων-Μεσσαπίων για την περίοδο 2000-2023. Οι έξι δείκτες περιέγραψαν συμπληρωματικές διαστάσεις της βλάστησης, του νερού, της υγρασίας, της θερμοκρασίας, των δομημένων επιφανειών και του γυμνού εδάφους.

Η LST-C παρουσίασε πτωτική τάση και μειώθηκε από 35,55°C το 2000 σε 27,93°C το 2023. Ο NDMI αυξήθηκε και το 2023 έφθασε το μέγιστο 0,210. Οι NDBI και BSI μετατοπίστηκαν προς περισσότερο αρνητικές τιμές, με το 2023 να καταγράφει -0,210 και -0,136 αντίστοιχα. Οι συσχετίσεις με τη LST-C ήταν ισχυρότερες για τον BSI και τον NDMI, γεγονός που οδήγησε στα μεγαλύτερα βάρη τους στον σύνθετο δείκτη.

Ο ENV\_SCORE συνδυάζει MNDWI, NDMI, NDBI και BSI σε μία συνεχή επιφάνεια 30 m. Η χαρτογραφική του απεικόνιση παρέχει συνοπτική εικόνα της σχετικής περιβαλλοντικής κατάστασης και μπορεί να υποστηρίξει τη βιώσιμη διαχείριση υδάτινων πόρων, την προστασία της βλάστησης και τον αντιπλημμυρικό σχεδιασμό. Η χρήση του πρέπει να συνοδεύεται από τις μεθοδολογικές διευκρινίσεις σχετικά με τη σχετικότητα των τιμών, την εποχική περίοδο, τις κοινές φασματικές πληροφορίες και την απουσία άμεσης υδραυλικής επικύρωσης.

Η επέκταση της μελέτης με δεδομένα Landsat 8/9 και Sentinel-2, επιτόπιες παρατηρήσεις, ταξινόμηση χρήσεων γης, υδρομετεωρολογικές χρονοσειρές και σύγκριση με καταγεγραμμένα πλημμυρικά γεγονότα θα ενίσχυε την ακρίβεια και τη χρησιμότητα του δείκτη. Παρά τους περιορισμούς, η εργασία καταδεικνύει ότι οι σύνθετοι δείκτες τηλεπισκόπησης μπορούν να προσφέρουν λειτουργικά και επαναλήψιμα εργαλεία για την παρακολούθηση περιβαλλοντικά ευαίσθητων λεκανών.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council. (2007). On the assessment and management of flood risks. Official Journal of the European Union, L288, 27-34.
- Κοινή Υπουργική Απόφαση Η.Π. 31822/1542/Ε103. (2010). Καθορισμός μέτρων, όρων και διαδικασιών για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας. ΦΕΚ 1108/Β/21-07-2010.
- Diakakis, M. (2011). A flash flood hazard clustering identification method based on geomorphological and hydrological characteristics. *Natural Hazards*, 56(3), 775-791.
- Diakakis, M., Deligiannakis, G., Katsetsiadou, K. N., Antoniadis, Z., & Melaki, M. (2017). Effects of forest fires on flash flood generation: A case study in Greece. *Journal of Hydrology*, 544, 356-369.
- Σκυλοδήμου, Ε. Δ., Μπαθρέλλος, Γ. Δ., & Μαρίνος, Β. (2016). Ανθρωπογενείς επεμβάσεις στο περιβάλλον και η επίδρασή τους στην εκδήλωση φυσικών καταστροφών. Εκδόσεις Τζιόλα.
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127-150.
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025-3033.
- Cook, M., Schott, J. R., Mandel, J., & Raqueno, N. (2014). Development of an operational calibration methodology for the Landsat thermal infrared sensor. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(10), 6141-6155.
- Gao, B. C. (1996). NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257-266.
- Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24(3), 583-594.
- Rikimaru, A., Roy, P. S., & Miyatake, S. (2002). Tropical forest cover density mapping with the Revised Forest Density Monitoring Model. *ITTO Tropical Forest Update*, 12(4), 8-11.
- Estoque, R. C., & Murayama, Y. (2017). Quantifying associations between land use/land cover patterns and land surface temperature. *Theoretical and Applied Climatology*, 127(3), 623-640.
- Tsesmelis, D. E., Karavitis, C. A., Kalogeropoulos, K., et al. (2021). Development and application of a composite index for environmental vulnerability assessment using remote sensing and GIS. *Sustainability*, 13(16), 9142.
- Efraimidou, M., Spiliotis, M., & Tsesmelis, D. E. (2024). Assessing watershed vulnerability using composite environmental indices and remote sensing technologies. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(5), 482-498.
- Malczewski, J. (2000). On the use of weighted linear combination method in GIS: Common ambiguities. *Transactions in GIS*, 4(1), 5-22.
- Ελληνική Στατιστική Αρχή. (2012). Απογραφή Πληθυσμού-Κατοικιών 2011: Μόνιμος Πληθυσμός κατά Περιφερειακή Ενότητα, Δήμο, Δημοτική Ενότητα και Κοινότητα.
- Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία. (2010). Κλιματικές προδιαγραφές και στατιστικά δεδομένα μετεωρολογικών σταθμών Στερεάς Ελλάδας και Εύβοιας, περίοδος 1971-2000.
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2017). Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας του Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (ΕΛ07).
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2025). 1η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας του ΥΔ Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (ΕΛ07).
- Emberger, L. (1955). Une méthode biogéographique d'action des climats sur la végétation. *Annales Biologiques*, 31(5-6), 249-258.
- Μπαλαφούτης, Χ., & Φλόκας, Α. (2004). Μαθήματα Κλιματολογίας και Μετεωρολογίας. Εκδόσεις Ζήτη.
- Ευστρατιάδης, Α., & Μαμάσης, Ν. (2011). Η Οδηγία-Πλαίσιο 2007/60 για την εκτίμηση και τη διαχείριση της πλημμυρικής διακινδύνευσης. ΕΜΠ.