Περιβάλλον

και

Ανάπτυξη

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

«ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ»

2η ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ ΟΡΕΙΝΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ»

Μεταπτυχιακή (Διπλωματική) Εργασία

«Μεταβολή της βλάστησης στη Δημοτική Ενότητα Ινάχου με χρήση δορυφορικών εικόνων Sentinel-2 και επιτόπιων καταγραφών»

Μοίρα Ευαγγελία, Γεωπόνος

Εξεταστική Επιτροπή

Δρ. Μηχ. ΕΜΠ, Β. Ανδρώνης

Καθηγητής ΕΜΠ, Α. Καλλιώρας

Καθηγητής ΠΘ, Ι. Καζόγλου

Αθήνα, 2026

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ 7
ΠΕΡΙΛΗΨΗ 8
ABSTRACT 9
1 ΣΥΝΟΨΗ 10
2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 12
3 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ 15
3.1 Οριοθέτηση περιοχής 15
3.2 Προστατευόμενες περιοχές/καθεστώς προστασίας 17
3.3 Φυσικές συνθήκες 21
3.3.1 Υψόμετρο 21
3.3.2 Κλίση εδάφους 22
3.3.3 Υδρογραφικό δίκτυο 23
3.3.4 Κλίμα 25
3.4 Βιοποικιλότητα περιοχής 27
3.5 Κτηνοτροφική δραστηριότητα και χρήση βοσκοτόπων 32
3.6 Λιβαδικοί τύποι/ταξινόμηση βοσκοτόπων 33
4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ ΕΥΡΕΙΑ ΚΛΙΜΑΚΑ-ΕΠΙΠΕΔΟ Α 34
4.1 Μεθοδολογία-βήματα επεξεργασίας εικόνων 35
4.1.1 Χρήση δορυφορικών εικόνων Sentinel-2 L2A 35
4.1.2 Εφαρμογή στο Google Earth Engine 45
4.1.3 Εφαρμογή δεδομένων στο περιβάλλον της R 47
4.1.4 Μοντελοποίηση για πρόβλεψη συμπεριφοράς βλάστησης σε σχέση με διάφορους δείκτες 53
5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ ΤΟΠΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ- ΕΠΙΠΕΔΟ Β 56
5.1 Περιοχή μελέτης-επιτόπιες καταγραφές 58
5.2 Συλλογή δεδομένων πεδίου 60
5.3 Φυτική κάλυψη/χλωριδική σύνθεση καταγραφών πεδίου (ταυτοποίηση ειδών) 63
5.4 Αποτελέσματα σύνθεσης και κάλυψης βλάστησης 67
5.5 Σύνδεση με remote sensing/ανάλυση πολυγώνων δειγματοληψίας 69
5.5.1 Ανάλυση και ερμηνεία του δείκτη NDVI 69
5.5.2 Ανάλυση και ερμηνεία των δεικτών NDVI-EVI 71
5.5.3 Ανάλυση και ερμηνεία δεικτών NDMI-NDWIg 74
5.5.4 Ανάλυση και ερμηνεία δεικτών BSI-SAVI 77
5.5.5 Ανάλυση και επίδραση κλιματικών συνθηκών 79
5.6 Συζήτηση ανάλυσης τοπικής κλίμακας – ΕΠΙΠΕΔΟ Β 81

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 88
6.1 Κύρια ευρήματα τηλεπισκόπησης 88
6.2 Ρόλος της βόσκησης 89
6.3 Περιορισμοί και προτάσεις για μελλοντική ανάλυση 89
6.3.1 Περιορισμοί / Αβεβαιότητες 89
6.3.2 Προοπτικές για μελλοντική ανάλυση: 90
7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 92
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 95

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Διαθεσιμότητα προϊόντων Sentinel-2 στο Copernicus Data Space· επιλέχθηκε το Level-2A (Bottom-of-Atmosphere reflectance) με χωρική κάλυψη Ευρώπης και χρονική διαθεσιμότητα από Μάρτιο 2017 έως σήμερα (πηγή: https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/sentinel-data/sentinel-2).....36
Εικόνα 2: Περιβάλλον του Copernicus Browser για προβολή και λήψη δορυφορικών δεδομένων (πηγή: https://dataspace.copernicus.eu/browser/)[16]. 37
Εικόνα 3: Περιοχή μελέτης επιτόπιων καταγραφών.....58
Εικόνα 4: Κατηγοριοποίηση υψομέτρου στις περιοχές δειγματοληψιών, οι οποίες απεικονίζονται με ροζ χρώμα. 59
Εικόνα 5: Καταγραφή και μετρήσεις λιβαδικής βλάστησης (τομές, μετροταινία). 61
Εικόνα 6: Παρουσία αιγοπροβάτων και βραχυκερατικής φυλής βοοειδών στο σημείο δειγματοληψιών 1. 62
Εικόνα 7: Σύμφωνα με το CORINE Land Cover 2018 κατατάσσονται στην κατηγορία Grassland, κατά την επιτόπια παρατήρηση κατατάσσονται σε αραιά-πυκνά θαμνολίβαδα....63
Εικόνα 8: Ενδεικτικές επιτόπιες καταγραφές παρουσίας ζώων στο πολύγωνο 5:(α) περιττώματα αιγοπροβάτων, (β) περιττώματα ιπποειδών, (γ) περιττώματα βοοειδών. 86

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Απόσπασμα Αποτελεσμάτων Απογραφής Πληθυσμού – Κατοικιών έτους 2021 που αφορούν στο Μόνιμο Πληθυσμό της Χώρας (πηγή: ΦΕΚ 2802/Β/26-4-2023).....17
Πίνακας 2: Απόσπασμα από Πληθυσμιακά στοιχεία του ΥΔ Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (EL04) για τα έτη 2011 -2021(πηγή: 2η ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΠΟΤΑΜΩΝ ΤΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΟΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ (EL 04)). 17
Πίνακας 3: Στατιστικά χαρακτηριστικά υψομέτρου της περιοχής μελέτης βάσει του ψηφιακού μοντέλου υψομέτρων (DEM). 22
Πίνακας 4: Κατανομή της έκτασης της περιοχής μελέτης ανά υψομετρική ζώνη.....22
Πίνακας 5: Απόσπασμα του Πίνακα Αποτελέσματα αξιολόγησης της κατάστασης των ποτάμιων υδατικών συστημάτων ανά ΛΑΠ στο ΥΔ Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (EL04) σε σύγκριση με προηγούμενα εγκεκριμένα ΣΔΛΑΠ (πηγή: 2η ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΠΟΤΑΜΩΝ ΤΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΟΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ (EL 04)). 24
Πίνακας 6: Απόσπασμα του Πίνακα ποιοτικής και ποσοτικής κατάστασης υπόγειων υδατικών συστημάτων στη ΛΑΠ Αχελώου (EL0415) (πηγή: 2η ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΠΟΤΑΜΩΝ ΤΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΟΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ (EL 04)).....25
Πίνακας 7: Στατιστικά υψομέτρου (min, max, median) και συνολική επιφάνεια ανά κατηγορία CORINE Land Cover στην περιοχή μελέτης.....44
Πίνακας 8. Καταγεγραμμένα φυτικά είδη και οικογένειες στις περιοχές δειγματοληψίας κατά τις επιτόπιες καταγραφές του Ιουνίου 2025. 64

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1: Συλλογή Δεδομένων (πηγή: ΕΕΣ). 13
Σχήμα 2: Ψηφιακές τεχνολογίες για τη γεωργία (πηγή: ΕΕΣ, βάσει του πίνακα 2.1 του εγγράφου του ΟΟΣΑ «Digital Opportunities for Better Agricultural Policies», OECD Publishing, Παρίσι, 2019.). 14

Σχήμα 3: Γεωγραφική θέση της περιοχής μελέτης, καθώς και τα διοικητικά όρια της Δ.Ε Ινάχου. 15
Σχήμα 4: Κατανομή προστατευόμενων περιοχών (ΖΕΠ και ΚΑΖ) στην περιοχή μελέτης. ...19
Σχήμα 5: Η περιοχή μελέτης ανήκει σε περιοχή υπό καθεστώς προστασίας (ΖΕΠ και ΚΑΖ) καθώς και σε Σημαντική Περιοχή για τα Πουλιά (ΙΒΑ-Σ.Π.Π). 20
Σχήμα 6: Εύρος υψομέτρου της περιοχής μελέτης.....21
Σχήμα 7: Χάρτης κλίσεων της περιοχής μελέτης (%). 23
Σχήμα 8: Υδατικά Συστήματα περιοχής μελέτης. 24
Σχήμα 9: Χωρική κατανομή μέσου ετήσιου ύψους κατακρημνισμάτων στις υπολεκάνες του ΥΔ Δ. Στ. Ελλάδας (πηγή: 2η ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΠΟΤΑΜΩΝ ΤΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΟΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ (EL 04)). 26
Σχήμα 10: Ομβροθερμικό διάγραμμα περιοχής Βαρετάδας Αμφιλοχίας (πηγή: Προσωρινό Διαχειριστικό Σχέδιο Βόσκησης Δήμου Αμφιλοχίας, Π.Ε. Αιτωλοακαρνανίας). 27
Σχήμα 11: Εύρος τιμών NDVI για το έτος 2018.....40
Σχήμα 12: Εύρος τιμών NDVI για το έτος 2021.....40
Σχήμα 13: Εύρος τιμών NDVI για το έτος 2024.....40
Σχήμα 14: Κατηγοριοποίηση τιμών NDVI για τα έτη 2018, 2021 και 2024. 41
Σχήμα 15: Μεταβολές NDVI για τις περιόδους 2021–2024 (a) και 2018–2021 (b): Οι μπεζ αποχρώσεις δείχνουν ουδέτερες μεταβολές, ενώ οι πράσινες αντιστοιχούν σε αύξηση και οι πορτοκαλί/κόκκινες σε μείωση της βλάστησης. 42
Σχήμα 16: Χρήσεις/καλύψεις γης της περιοχής μελέτης βάσει CORINE Land Cover 2018, με έμφαση σε κατηγορίες σχετικές με τη βόσκηση. 43
Σχήμα 17: Χαρτογραφική απεικόνιση της μεταβολής του NDVI (2018–2024) ανά πολύγωνο, με κατηγοριοποίηση τάσεων και επικάλυψη κατηγοριών CORINE Land Cover 2018.....45
Σχήμα 18: Χρονική εξέλιξη του δείκτη βλάστησης NDVI ανά έτος και πολύγωνο στην περιοχή μελέτης (2018–2024). 47
Σχήμα 19: Μέσες τιμές NDVI ανά έτος και πολύγωνο στην περιοχή μελέτης (2018–2024)..48
Σχήμα 20: Χρονική εξέλιξη του δείκτη βλάστησης EVI ανά έτος και πολύγωνο στην περιοχή μελέτης (2018–2024). 48
Σχήμα 21: Συσχέτιση των τιμών NDVI με τη βροχόπτωση (precipitation) στην περιοχή μελέτης.....49
Σχήμα 22: Συσχέτιση των τιμών NDVI και NDWI (Green–NIR) ανά πολύγωνο (code_18) στην περιοχή μελέτης.....50
Σχήμα 23: Εκτίμηση της σχετικής συμβολής των μεταβλητών (NDWI, βροχόπτωση, κατηγορία κάλυψης γης και έτος) στο μοντέλο Random Forest.....55
Σχήμα 24: Ποσοστό κάλυψης (%) ανά κατηγορία βλάστησης στα σημεία δειγματοληψίας κατά τις επιτόπιες καταγραφές του Ιουνίου 2025. 67
Σχήμα 25: Ποσοστό σύνθεσης (%) ανά κατηγορία βλάστησης στα σημεία δειγματοληψίας κατά τις επιτόπιες καταγραφές του Ιουνίου 2025. 68
Σχήμα 26: Ετήσια εξέλιξη του δείκτη NDVI ανά πολύγωνο δειγματοληψίας στην περιοχή μελέτης για την περίοδο 2019–2024, με σύγκριση της διάμεσης τιμής (NDVI_median) και της τιμής κορυφής βλάστησης (NDVI_p90/peak). 70
Σχήμα 27: Ετήσια εξέλιξη του δείκτη peakiness (NDVI_p90 − NDVI_median) ανά πολύγωνο δειγματοληψίας για την περίοδο 2019-2024. 71
Σχήμα 28: Ετήσιες χρονοσειρές NDVI και EVI ανά πολύγωνο δειγματοληψίας για την περίοδο 2019–2024, με σύγκριση των μετρικών median και p90/peak.....72

Σχήμα 29: Ετήσιες χρονοσειρές των δεικτών NDMI και NDWIg ανά πολύγωνο δειγματοληψίας στην περιοχή μελέτης για την περίοδο 2019–2024, με σύγκριση των μετρικών median και p90/peak. 76
Σχήμα 30: Ετήσιες χρονοσειρές των δεικτών BSI και SAVI ανά πολύγωνο δειγματοληψίας στην περιοχή μελέτης για την περίοδο 2019–2024, με σύγκριση των μετρικών median και p90/peak. 78
Σχήμα 31: α) Εντοπισμός αρνητικών ανωμαλιών της βλάστησης ανά πολύγωνο και έτος μετά από κανονικοποίηση ως προς τις κλιματικές συνθήκες (anom_z ≤ −1). β) Χρονική εξέλιξη των climate-normalized αποκλίσεων (residuals) του δείκτη NDVI_p90 για κάθε πολύγωνο κατά την περίοδο μελέτης. 80
Σχήμα 32. Ετήσιες μεταβολές των δεικτών ΔNDVI και ΔBSI (median) ανά πολύγωνο για την περίοδο 2019–2024. Οι αρνητικές μεταβολές του NDVI και οι θετικές μεταβολές του BSI που υπερβαίνουν τα thresholds επισημαίνονται με κόκκινο. 81
Σχήμα 33: Ετήσια μεταβολή του δείκτη βλάστησης NDVI (ΔNDVI) ανά πολύγωνο. Οι κόκκινες τιμές αντιστοιχούν στο κατώτερο 10% της κατανομής και υποδηλώνουν τις εντονότερες μειώσεις της βλάστησης σε σχέση με το προηγούμενο έτος. 83
Σχήμα 34: Ετήσια μεταβολή του δείκτη υγρασίας NDMI (ΔNDMI) ανά πολύγωνο. Οι κόκκινες τιμές αντιστοιχούν στο κατώτερο 10% της κατανομής και υποδηλώνουν τις εντονότερες μειώσεις της βλάστησης σε σχέση με το προηγούμενο έτος. 83
Σχήμα 35: Ετήσια μεταβολή του δείκτη γυμνού εδάφους BSI (ΔBSI) ανά πολύγωνο. Οι κόκκινες τιμές αντιστοιχούν στο ανώτερο 10% της κατανομής και υποδηλώνουν τις μεγαλύτερες αυξήσεις της έκθεσης γυμνού εδάφους. 84
Σχήμα 36: Περιπτώσεις σύγκλισης των τριών δεικτών στα σημεία δειγματοληψίας ως ενδείξεις τοπικής πίεσης της βλάστησης. 85

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς τον κ. Βασίλη Ανδρώνη, υπεύθυνο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για την καθοδήγηση, τη στήριξη, την υπομονή και τις πολύτιμες συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της. Παράλληλα, ευχαριστώ θερμά τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τον κ. Καζόγλου Ιωάννη και τον κ. Καλλιώρα Ανδρέα για τον χρόνο που αφιέρωσαν για την αξιολόγηση της εργασίας μου.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στο Εργαστήριο Λιβαδοπονίας και Διαχείρισης Προστατευόμενων Περιοχών του Τμήματος Δασολογίας, Επιστημών Ξύλου και Σχεδιασμού του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, με Διευθυντή τον κ. Ιωάννη Καζόγλου για την πολύτιμη συμβολή του σε ζητήματα Λιβαδοπονίας και για την διεκπεραίωση των επιτόπιων καταγραφών. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον υποψήφιο διδάκτορα του Εργαστηρίου αυτού, κ. Δημήτριο Οικονόμου, για τη συνεργασία και τη σημαντική βοήθειά του τόσο κατά τις επιτόπιες καταγραφές όσο και καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας. Όσον αφορά την αναγνώριση των ειδών του πεδίου θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Δημήτριο Σαμαρά Διευθυντή του Εργαστηρίου Δασικής Βοτανικής & Δασοκομίας του Τμήματος Δασολογίας, Επιστημών Ξύλου και Σχεδιασμού του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την πολύτιμη υποστήριξή του. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ιωάννη Χατζηγεωργίου Ομότιμο Καθηγητή του Εργαστηρίου Φυσιολογίας Θρέψεως και Διατροφής του Τμήματος Επιστήμης Ζωικής Παραγωγής του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών για τις πολύτιμες γνώσεις που μου έχει προσφέρει από τα προπτυχιακά μου χρόνια έως και σήμερα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους κοντινούς μου ανθρώπους για τη στήριξη και την υπομονή τους όλο αυτό το διάστημα, και ιδιαίτερα τους φίλους μου, αλλά και τον Αργύρη φυσικά, που άντεξαν να ακούν αμέτρητες φορές τη φράση *«δεν μπορώ, έχω διπλωματική».*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά τη διαχρονική μεταβολή της βλάστησης και τη σχέση της με κλιματικούς και ανθρωπογενείς παράγοντες στη Δημοτική Ενότητα Ινάχου του Δήμου Αμφιλοχίας. Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από την παρουσία λιβαδικών, θαμνωδών και μεταβατικών μορφών φυτοκάλυψης, καθώς και από εκτατική βόσκηση, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για τη διερεύνηση της δυναμικής της βλάστησης υπό διαφορετικές περιβαλλοντικές και διαχειριστικές συνθήκες. Σκοπός της εργασίας είναι η αποτύπωση της μεταβολής της βλάστησης σε πολλαπλές χωρικές κλίμακες και η διερεύνηση πιθανών επιδράσεων της βόσκησης σε συνδυασμό με τις κλιματικές συνθήκες.

Η ανάλυση βασίστηκε στη χρήση δορυφορικών δεδομένων Sentinel-2 και σε τηλεπισκοπικούς δείκτες βλάστησης, υγρασίας και εδαφικής έκθεσης, όπως οι NDVI, EVI, NDWI, NDMI, BSI και SAVI. Παράλληλα, αξιοποιήθηκαν χρονοσειρές δεικτών και εφαρμόστηκε κανονικοποίηση ως προς το κλίμα (climate normalization), με τη χρήση δεδομένων βροχόπτωσης και θερμοκρασίας ERA5-Land, προκειμένου να εκτιμηθεί η επίδραση των κλιματικών παραγόντων και να εντοπιστούν πιθανές μη κλιματικές αποκλίσεις στη συμπεριφορά της βλάστησης. Η εργασία εξετάζει επίσης τον ρόλο της βόσκησης ως παράγοντα που συμβάλλει στη διαμόρφωση των λιβαδικών οικοσυστημάτων, μέσα από τον συνδυασμό τηλεπισκοπικών δεδομένων και επιτόπιων καταγραφών.

Η μεθοδολογία ακολούθησε πολυκλιμακική προσέγγιση. Σε ευρύτερη χωρική κλίμακα χρησιμοποιήθηκαν πολύγωνα CORINE Land Cover για την ανάλυση της διαχρονικής συμπεριφοράς της βλάστησης ανά κατηγορία κάλυψης γης. Σε τοπική κλίμακα, η ανάλυση εστίασε σε πέντε επιλεγμένα πολύγωνα στον οικισμό του Περδικακίου, όπου πραγματοποιήθηκαν επιτόπιες καταγραφές βλάστησης με τη μέθοδο γραμμής και σημείου. Οι καταγραφές αυτές επέτρεψαν τη συσχέτιση των τηλεπισκοπικών δεικτών με τη σύνθεση και την κάλυψη της βλάστησης, καθώς και με ενδείξεις βόσκησης και τοπικής πίεσης.

Τα αποτελέσματα ανέδειξαν σημαντική χωρική και χρονική μεταβλητότητα της βλάστησης, με διαφοροποιήσεις μεταξύ τύπων κάλυψης γης και μεταξύ των επιλεγμένων πολυγώνων. Σε αρκετές περιπτώσεις οι δείκτες βλάστησης παρουσίασαν συνολική τάση βελτίωσης ή σταθεροποίησης, ενώ οι δείκτες εδαφικής έκθεσης συνέβαλαν στον εντοπισμό τοπικών επεισοδίων πιθανής πίεσης. Η κανονικοποίηση ως προς το κλίμα επέτρεψε τον εντοπισμό ανωμαλιών που δεν εξηγούνται πλήρως από τη βροχόπτωση και τη θερμοκρασία, υποδεικνύοντας πιθανές μη κλιματικές πιέσεις, μεταξύ των οποίων η βόσκηση και άλλες ανθρωπογενείς παρεμβάσεις. Η ενσωμάτωση των δεδομένων πεδίου ενίσχυσε την ερμηνεία των τηλεπισκοπικών αποτελεσμάτων και ανέδειξε τη σημασία της τοπικής ετερογένειας.

Συνολικά, η εργασία επιβεβαιώνει τη χρησιμότητα της συνδυαστικής χρήσης τηλεπισκόπησης, κλιματικών δεδομένων και επιτόπιων καταγραφών για τη μελέτη της μεταβολής της βλάστησης σε λιβαδικά και θαμνώδη οικοσυστήματα. Παράλληλα, αναδεικνύει τους περιορισμούς που σχετίζονται με τη χωρική ανάλυση των δορυφορικών και κλιματικών δεδομένων, τη δυσκολία ποσοτικοποίησης της βόσκησης και την ανάγκη λεπτομερέστερων δεδομένων διαχείρισης. Μελλοντικές έρευνες μπορούν να ενισχύσουν την ανάλυση μέσω περισσότερων επιτόπιων δειγματοληψιών, εποχικών χρονοσειρών και ακριβέστερης καταγραφής της βοσκοφόρτωσης.

Λέξεις-κλειδιά: Βλάστηση, Τηλεπισκόπηση, Sentinel-2, NDVI, EVI, NDWI, NDMI, BSI, SAVI, Climate normalization, Βόσκηση, CORINE Land Cover, Χρονοσειρές, Δεδομένα πεδίου, Λιβαδικά οικοσυστήματα.

ABSTRACT

This thesis investigates the temporal changes in vegetation and their relationship with climatic and anthropogenic factors in the Municipal Unit of Inachos, Municipality of Amfilochia, Greece. The study area is characterized by grasslands, shrublands and transitional vegetation cover forms, as well as by extensive grazing, making it suitable for examining vegetation dynamics under different environmental and management conditions. The aim of the study is to assess vegetation change across multiple spatial scales and to investigate potential grazing-related effects in combination with climatic conditions.

The analysis was based on Sentinel-2 satellite data and a set of remote sensing indices describing vegetation condition, moisture status and soil exposure, including NDVI, EVI, NDWI, NDMI, BSI and SAVI. Time series analysis and climate normalization were applied using ERA5-Land precipitation and temperature data, in order to account for the influence of climatic variability and to identify possible non-climatic deviations in vegetation response. The role of grazing as a factor shaping grassland (in general rangeland) ecosystems was also examined through the integration of remote sensing data with field observations.

A multi-scale methodological framework was adopted. At the broader spatial scale, CORINE Land Cover polygons were used to analyze vegetation dynamics across land cover classes. At the local scale, the analysis focused on five selected polygons in the settlement of Perdikaki where field vegetation surveys were conducted using the transect line-point method. These field observations supported the interpretation of remote sensing indices in relation to vegetation composition, vegetation cover and indicators of grazing-related pressure.

The results revealed considerable spatial and temporal variability in vegetation, with differences among land cover types and among the selected field polygons. In several cases, vegetation indices indicated an overall tendency towards improvement or stabilization, while soil exposure indices helped identify local episodes of possible pressure. Climate normalization allowed the detection of anomalies not fully explained by precipitation and temperature, suggesting possible non-climatic pressures, including grazing and other anthropogenic influences. The integration of field data improved the interpretation of the remote sensing results and highlighted the importance of local vegetation heterogeneity.

Overall, the study demonstrates the value of combining remote sensing, climate data and field observations for assessing vegetation change in grassland and shrubland ecosystems. At the same time, it highlights limitations related to the spatial resolution of satellite and climate data, the difficulty of quantifying grazing intensity, and the need for more detailed information on site management. Future research could strengthen the analysis through additional field surveys, seasonal time series and more accurate records of grazing pressure.

Keywords: Vegetation, Remote sensing, Sentinel-2, NDVI, EVI, NDWI, NDMI, BSI, SAVI, Climate normalization, Grazing, CORINE Land Cover, Time series, Field data, Grassland/rangeland ecosystems

1 ΣΥΝΟΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη διαχρονική μεταβολή της βλάστησης και τη σχέση της με τη βόσκηση και τις κλιματικές συνθήκες στην ευρύτερη περιοχή του πρώην Δήμου Ινάχου, στον σημερινό Δήμο Αμφιλοχίας. Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από ορεινό και ημιορεινό ανάγλυφο, εκτεταμένες λιβαδικές και θαμνώδεις εκτάσεις και διαχρονική παρουσία εκτατικής κτηνοτροφίας, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για τη διερεύνηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ φυσικών διεργασιών και ανθρωπογενών πιέσεων. Στόχος της εργασίας είναι η αποτύπωση της δυναμικής της βλάστησης σε διαφορετικές χωρικές κλίμακες και η ερμηνεία των παρατηρούμενων μεταβολών, με έμφαση στη βόσκηση, χωρίς την απόδοσή τους σε μονοπαραγοντικές αιτίες.

Η μεθοδολογική προσέγγιση βασίστηκε στον συνδυασμό τηλεπισκοπικών δεδομένων Sentinel-2, γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (GIS), επεξεργασίας δεδομένων στο περιβάλλον Google Earth Engine και R, καθώς και επιτόπιων καταγραφών. Επιπλέον, ενσωματώθηκαν κλιματικές μεταβλητές, όπως η βροχόπτωση, προερχόμενες από δεδομένα βροχόπτωσης (ERA5), προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση των υδροκλιματικών συνθηκών στη βλάστηση.

Σε πρώτο επίπεδο (ευρεία χωρική κλίμακα), εξετάστηκαν επιλεγμένες κατηγορίες CORINE Land Cover που σχετίζονται με λιβαδικούς και ημιφυσικούς τύπους κάλυψης, οι οποίοι συνδέονται λειτουργικά με τη βόσκηση. Για τα πολύγωνα αυτά υπολογίστηκαν οι ετήσιες μέσες τιμές του δείκτη NDVI και διερευνητικά ο δείκτης EVI για τον μήνα Οκτώβριο της περιόδου 2018–2024, με χρήση δεδομένων Sentinel-2. Συμπληρωματικά, υπολογίστηκε ο δείκτης NDWI και ενσωματώθηκαν δεδομένα βροχόπτωσης (ERA5), προκειμένου να εξεταστεί η συσχέτιση της δυναμικής της βλάστησης με την υδροκλιματική μεταβλητότητα. Στο επίπεδο αυτό πραγματοποιήθηκε η κύρια στατιστική ανάλυση των δεδομένων, καθώς και η εφαρμογή μεθόδων μοντελοποίησης, με στόχο τη διερεύνηση των σχέσεων μεταξύ βλάστησης και περιβαλλοντικών παραγόντων σε περιφερειακή κλίμακα.

Σε δεύτερο στάδιο, και με στόχο τη διερεύνηση των τοπικών διεργασιών, επιλέχθηκαν πέντε αντιπροσωπευτικά πολύγωνα για επιτόπια καταγραφή σε τοπική κλίμακα στον οικισμό του Περδικακίου. Οι επιτόπιες καταγραφές πραγματοποιήθηκαν τον μήνα Ιούνιο και περιλάμβαναν παρατηρήσεις σχετικά με τον τύπο της βλάστησης, τη δομή της φυτοκάλυψης, την παρουσία ποώδους και θαμνώδους στοιχείου και ενδείξεις βόσκησης.

Για τα πέντε πολύγωνα επιτόπιας καταγραφής πραγματοποιήθηκε λεπτομερέστερη ανάλυση των δεικτών NDVI και EVI, των δεικτών νερού-υγρασίας NDMI και NDWI, των δεικτών γυμνού εδάφους BSI και SAVI καθώς και δεδομένα βροχόπτωσης, στο πλαίσιο της ερμηνείας των αποτελεσμάτων και της διάκρισης μεταξύ κλιματικών και τοπικών επιδράσεων στη δυναμική της βλάστησης. Η χρήση στατιστικών μετρικών όπως η διάμεσος και το 90ό εκατοστημόριο επέτρεψε την αποτύπωση της ενδοπολυγωνικής χωρικής ανομοιογένειας και τη σύνδεσή της με τις επιτόπιες παρατηρήσεις. Στα πολύγωνα αυτά, οι δείκτες NDVI και EVI παρουσιάζουν γενικά παρόμοια διαχρονική τάση, σε αντίθεση με την εικόνα που προκύπτει σε επίπεδο CORINE Land Cover. Και οι δύο δείκτες εμφανίζουν συνολικά ανοδική πορεία, με μικρές διακυμάνσεις ανά έτος, γεγονός που υποδηλώνει βελτίωση τόσο της συνολικής φυτοκάλυψης όσο και της δομής της βλάστησης. Η σταθερή αλλά όχι μεγάλη απόσταση μεταξύ των τιμών median και p90 στα πολύγωνα επιτόπιας καταγραφής υποδηλώνει χωρική ανομοιογένεια της βλάστησης εντός των πολυγώνων, συμβατή με την εικόνα μωσαϊκού ποώδους και θαμνώδους βλάστησης που καταγράφηκε στο πεδίο. Παράλληλα, η παρόμοια συμπεριφορά των δεικτών υγρασίας στα ίδια πολύγωνα υποδηλώνει κοινό υδροκλιματικό πλαίσιο, ενισχύοντας την ερμηνεία ότι οι παρατηρούμενες διαφοροποιήσεις στη βλάστηση δεν οφείλονται σε χωρικά διαφοροποιημένες κλιματικές συνθήκες, αλλά σε τοπικούς παράγοντες.

Η σύγκριση μεταξύ της γενικής εικόνας που προκύπτει από την ανάλυση CORINE Land Cover και των αποτελεσμάτων των επιτόπιων πολυγώνων αναδεικνύει τον καθοριστικό ρόλο της χωρικής κλίμακας στην ερμηνεία των τηλεπισκοπικών δεικτών. Σε ευρεία κλίμακα, οι δείκτες αποτυπώνουν τη συνολική δυναμική του τοπίου και τις γενικευμένες μεταβολές της βλάστησης, ενώ σε τοπική κλίμακα καθίσταται δυνατή η ανάδειξη των επιδράσεων των τοπικών πιέσεων στη δομή της φυτοκάλυψης.

Η βόσκηση εξετάστηκε ως πιθανός παράγοντας πίεσης, χωρίς να αντιμετωπιστεί ως αποκλειστική αιτία των παρατηρούμενων μεταβολών. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η βόσκηση στην περιοχή είναι διαχρονική και εκτεταμένη, όπως επιβεβαιώνεται και από το Προσωρινό Διαχειριστικό Σχέδιο Βόσκησης για την Αιτωλοακαρνανία [1], αλλά η έντασή της διαφοροποιείται χωρικά. Οι τηλεπισκοπικοί δείκτες δεν υποδεικνύουν γενικευμένη υποβάθμιση της βλάστησης, αλλά κυρίως αλλαγές στη δομή και την κατανομή της φυτοκάλυψης, συμβατές με μέτρια ή διαφοροποιημένη πίεση.

Συνολικά, η εργασία καταδεικνύει ότι ο συνδυασμός ανάλυσης σε πολλαπλές χωρικές κλίμακες, τηλεπισκοπικών δεικτών και επιτόπιων καταγραφών αποτελεί αποτελεσματική προσέγγιση για τη μελέτη της βλάστησης σε λιβαδικά και ημιφυσικά συστήματα. Τα αποτελέσματα συνιστούν τεκμηριωμένη εκτίμηση της δυναμικής της βλάστησης στην περιοχή μελέτης. Παράλληλα, επισημαίνεται ότι για μεγαλύτερη ακρίβεια και ασφαλέστερη διάκριση μεταξύ κλιματικών και ανθρωπογενών επιδράσεων απαιτούνται μακροχρόνιες χρονοσειρές δορυφορικών δεδομένων και εκτενέστερες επιτόπιες καταγραφές σε μεγαλύτερη χωρική κλίμακα.

2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα δορυφορικά δεδομένα αποτελούν σημαντικό εργαλείο για τη μελέτη της επίδρασης των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων στο περιβάλλον και χρησιμοποιούνται ευρέως για την παρακολούθηση της γήινης επιφάνειας και τη χαρτογράφηση της κάλυψης γης. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της τηλεπισκόπησης είναι η δυνατότητα ανάλυσης σε πολλαπλές χωρικές και χρονικές κλίμακες. Τα δορυφορικά συστήματα επιτρέπουν την καταγραφή περιοχών με περιορισμένη ή δύσκολη πρόσβαση, καθώς και την παραγωγή διαχρονικών δεδομένων με σταθερή επαναληψιμότητα και υψηλό βαθμό αντικειμενικότητας. Επιπλέον, η συνεχής και συστηματική παρατήρηση της επιφάνειας της Γης οδηγεί στη δημιουργία μεγάλου όγκου δεδομένων, τα οποία διαφοροποιούνται ως προς τη χωρική, φασματική και χρονική τους ανάλυση.

Σε μελέτες χαρτογράφησης οικοσυστημάτων, η επιλογή κατάλληλων δεδομένων αποτελεί κρίσιμο στάδιο, καθώς θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη η χωρική, φασματική και χρονική τους ανάλυση, καθώς και παράγοντες όπως το κόστος, η διαθεσιμότητα και η ποιότητά τους. Τα τελευταία χρόνια, η ανάπτυξη δορυφορικών αποστολών από την Εθνική Υπηρεσία Αεροναυπηγικής και Διαστήματος (NASA), όπως ο Landsat-8, και από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (ESA), όπως οι δορυφόροι Sentinel-2, έχει συμβάλει σημαντικά στην πρόοδο των επιστημών παρατήρησης της Γης. Τα δεδομένα αυτά παρέχονται δωρεάν και προσφέρουν ικανοποιητική χωρική ανάλυση (10–30 m), σε συνδυασμό με υψηλή χρονική επαναληψιμότητα. Παράλληλα, σε συνδυασμό με εμπορικά δορυφορικά δεδομένα πολύ υψηλής ανάλυσης (<10 m), συγκροτούν ένα ολοκληρωμένο σύνολο πληροφοριών, κατάλληλο για εφαρμογές χαρτογράφησης οικοσυστημάτων σε εθνική, περιφερειακή και τοπική κλίμακα [2].

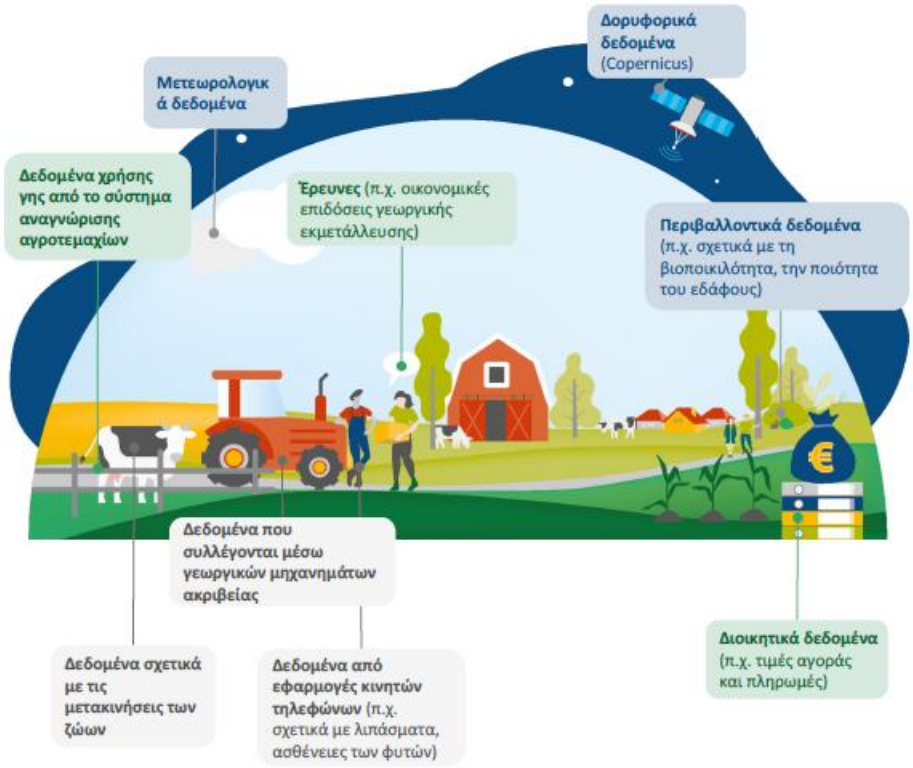
Η Κοινή Γεωργική Πολιτική (ΚΓΠ) αποτελεί μία από τις βασικότερες πολιτικές της Ευρωπαϊκής Ένωσης, απορροφώντας σημαντικό ποσοστό του συνολικού ενωσιακού προϋπολογισμού. Οι στόχοι της είναι σύνθετοι και αλληλένδετοι, καθώς περιλαμβάνουν τη στήριξη του αγροτικού εισοδήματος και της ποιότητας ζωής στις αγροτικές περιοχές, ενώ παράλληλα ενσωματώνουν περιβαλλοντικές παραμέτρους, δράσεις για την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή και την ευρύτερη βιώσιμη ανάπτυξη της υπαίθρου.

Στο πλαίσιο αυτό, ο έλεγχος επικεντρώθηκε στο κατά πόσο η Ευρωπαϊκή Επιτροπή αξιοποιεί επαρκώς τα διαθέσιμα δεδομένα και τα εργαλεία ανάλυσης για την υποστήριξη της πολιτικής της ΚΓΠ. Η αξιολόγηση αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία τόσο για την προγραμματική περίοδο που ξεκίνησε το 2023 όσο και για τον σχεδιασμό της πολιτικής μετά το 2027.

Συνιστάται στην Επιτροπή:

- η θέσπιση ενός ολοκληρωμένου πλαισίου για τη συστηματική αξιοποίηση αναλυτικών δεδομένων από τα κράτη μέλη, και
- η ενίσχυση της χρήσης υφιστάμενων πηγών δεδομένων, καθώς και η ανάπτυξη νέων, ώστε να καλύπτονται αποτελεσματικότερα οι ανάγκες της πολιτικής.

Μπορούν να συλλεχθούν δεδομένα από διαφορετικές πηγές, όπως αναλύονται στο κατωτέρω Σχήμα 1.



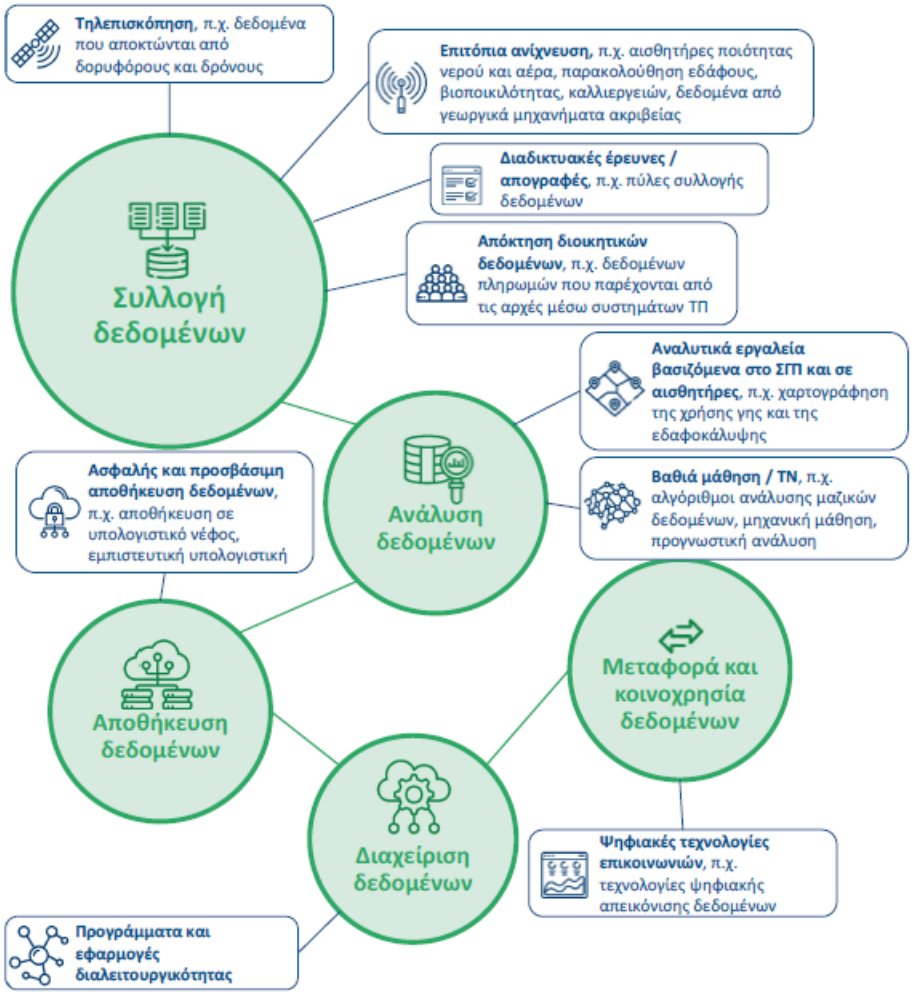
Σχήμα 1: Συλλογή Δεδομένων (πηγή: ΕΕΣ).

Σε διεθνές επίπεδο, παρατηρείται αυξανόμενη αξιοποίηση των «μαζικών δεδομένων» (big data), τα οποία προκύπτουν από διαφορετικές διαδικασίες συλλογής και χαρακτηρίζονται από μεγάλο όγκο και πολυπλοκότητα. Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Ελεγκτικό Συνέδριο, τα δεδομένα αυτά υπερβαίνουν τις δυνατότητες των παραδοσιακών συστημάτων επεξεργασίας και απαιτούν προηγμένες μεθόδους ανάλυσης και σημαντική υπολογιστική ισχύ.

Η γεωργία αποτελεί έναν τομέα όπου οι ψηφιακές τεχνολογίες και οι καινοτομίες εφαρμόζονται ολοένα και περισσότερο. Ενδεικτικά παραδείγματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 2, ενώ πολλές από αυτές τις τεχνολογίες μπορούν να αξιοποιηθούν και από τον δημόσιο τομέα. Η τεχνολογική πρόοδος συμβάλλει στη μείωση του χρόνου που απαιτείται για τη διαμόρφωση πολιτικών και ενισχύει τη βάση τεκμηρίωσης για τη λήψη αποφάσεων [3].

Ειδικότερα, η αξιοποίηση δεδομένων επιτρέπει:

- την καλύτερη κατανόηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της γεωργίας και τη διαμόρφωση πιο ολοκληρωμένων στόχων πολιτικής,
- τον σχεδιασμό πιο στοχευμένων και διαφοροποιημένων παρεμβάσεων, και
- την ανάπτυξη σύγχρονων συστημάτων παρακολούθησης βασισμένων σε δεδομένα.



Σχήμα 2: Ψηφιακές τεχνολογίες για τη γεωργία (πηγή: ΕΕΣ, βάσει του πίνακα 2.1 του εγγράφου του ΟΟΣΑ «Digital Opportunities for Better Agricultural Policies», OECD Publishing, Παρίσι, 2019.).

Παράλληλα, η Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος έχει επισημάνει, μέσα από σχετικές δημοσιεύσεις, τη σημασία της ενίσχυσης της αξιοποίησης των δεδομένων για τη βελτίωση της χάραξης πολιτικής, καθώς και ζητήματα που αφορούν την κοινοχρησία δεδομένων και τα χρησιμοποιούμενα εργαλεία στην Ευρωπαϊκή Ένωση [3].

Στο πλαίσιο αυτό, τα δορυφορικά δεδομένα του προγράμματος Copernicus εντάσσονται στην κατηγορία των «μαζικών δεδομένων». Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή προωθεί την προσέγγιση των «ελέγχων μέσω παρακολούθησης», η οποία βασίζεται σε αυτά τα δεδομένα και επιτρέπει την αυτοματοποιημένη παρακολούθηση της εφαρμογής της ΚΓΠ στα κράτη μέλη.

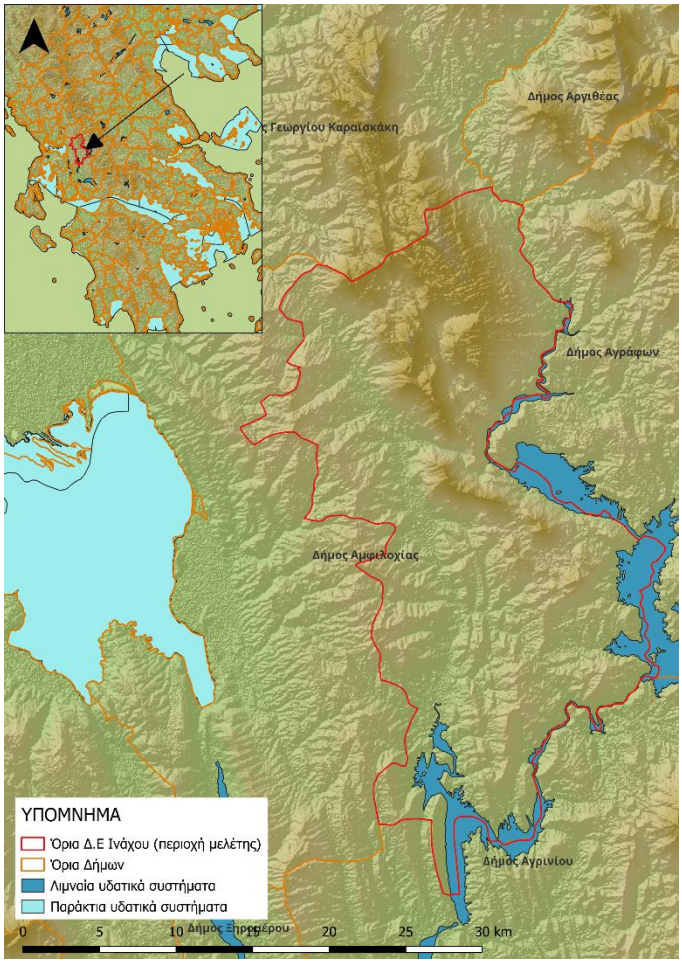
Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη χρήση πληροφοριών που προέρχονται από νέες τεχνολογίες, με στόχο την πληρέστερη αποτύπωση των επιδόσεων της ΚΓΠ κατά τη μετα-2020 περίοδο. Το νέο σύστημα δίνει τη δυνατότητα αυτοματοποιημένης επεξεργασίας δορυφορικών δεδομένων,

σε συνδυασμό με επιτόπιες καταγραφές, ενισχύοντας σημαντικά τις δυνατότητες παρακολούθησης και αξιολόγησης [3].

3 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

3.1 Οριοθέτηση περιοχής

Ο Δήμος Αμφιλοχίας, συστάθηκε το έτος 2011 στο πλαίσιο του προγράμματος Καλλικράτης, από τη συνένωση των προϋπαρχόντων Καποδιστριακών Δήμων Αμφιλοχίας, Μενιδίου και Ινάχου, με έδρα την Αμφιλοχία. Η περιοχή του Δήμου καλύπτει την επαρχία Βάλτου και συνορεύει βόρεια με τις Π.Ε. Άρτας και Καρδίτσας, ανατολικά με την Π.Ε. Ευρυτανίας και το Δήμο Αγρινίου, νότια με τους Δήμους Ακτίου-Βόνιτσας και Ξηρομέρου και δυτικά με τις Π.Ε. Πρεβέζης και Άρτας [1].



Σχήμα 3: Γεωγραφική θέση της περιοχής μελέτης, καθώς και τα διοικητικά όρια της Δ.Ε Ινάχου.

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στη δυτική ηπειρωτική Ελλάδα και ανήκει στη Περιφέρεια Δυτικής Ελλάδας, και ειδικότερα στην Περιφερειακή Ενότητα Αιτωλοακαρνανίας και στο Δήμο Αμφιλοχίας.

Ο Δήμος Αμφιλοχίας, που υπάγεται στην Π.Ε. Αιτωλοακαρνανίας, διοικητικά διαρθρώνεται ως εξής:

- ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΑΜΦΙΛΟΧΙΑΣ

        - Δημοτική Κοινότητα Αμφιλοχίας
        - Δημοτική Κοινότητα Αμπελακίου
        - Δημοτική Κοινότητα Ανοιξιάτικου
        - Δημοτική Κοινότητα Βαρετάδας
        - Δημοτική Κοινότητα Κεχρινιάς
        - Δημοτική Κοινότητα Λουτρού
        - Δημοτική Κοινότητα Μέγα Κάμπου
        - Δημοτική Κοινότητα Σαρδινίων
        - Δημοτική Κοινότητα Σπάρτου
        - Δημοτική Κοινότητα Στάνου
    - ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΙΝΑΧΟΥ (περιοχή μελέτης)
        - Δημοτική Κοινότητα Αγριδίου
        - Δημοτική Κοινότητα Αλευράδας
        - Δημοτική Κοινότητα Αμοργιανών
        - Δημοτική Κοινότητα Βρουβιανών
        - Δημοτική Κοινότητα Γιαννοπούλων
        - Δημοτική Κοινότητα Εμπεσού
        - Δημοτική Κοινότητα Μαλεσιάδας
        - Δημοτική Κοινότητα Μπαμπαλιού
        - Δημοτική Κοινότητα Πατιοπούλου
        - Δημοτική Κοινότητα Περδικακίου
        - Δημοτική Κοινότητα Πετρώνας
        - Δημοτική Κοινότητα Ποδογοράς
        - Δημοτική Κοινότητα Σταθά
        - Δημοτική Κοινότητα Τρικλίνου
        - Δημοτική Κοινότητα Χαλκιοπούλων
    - ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΜΕΝΙΔΙΟΥ
        - Δημοτική Κοινότητα Μενιδίου
        - Δημοτική Κοινότητα Φλωριάδος

Με βάση την υπ' αρίθμ. Απόφαση 2846/Β4-461 Αποτελέσματα της Απογραφής Πληθυσμού-Κατοικιών έτους 2021 που αφορούν στο Μόνιμο Πληθυσμό της Χώρας (ΦΕΚ 2802/Β/26-4-2023), για την περιοχή μελέτης τα αποτελέσματα έχουν ως εξής *Πίνακες 1,2* [4]:

Πίνακας 1: Απόσπασμα Αποτελεσμάτων Απογραφής Πληθυσμού – Κατοικιών έτους 2021 που αφορούν στο Μόνιμο Πληθυσμό της Χώρας (πηγή: ΦΕΚ 2802/Β/26-4-2023).

Α/Α	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	Μόνιμος πληθυσμός
1	**ΣΥΝΟΛΟ ΧΩΡΑΣ**	**10.482.487**
4435	**ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΑΙΤΩΛΟΑΚΑΡΝΑΝΙΑΣ (Έδρα: Μεσολόγγιον,το)**	**192.345**
4571	**ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΙΝΑΧΟΥ**	**3.967**
4572	Δημοτική Κοινότητα Χαλκιοπούλων	764
4573	Δημοτική Κοινότητα Αγριδίου	133
4574	Δημοτική Κοινότητα Αλευράδας	84
4575	Δημοτική Κοινότητα Αμοργιανών	324
4576	Δημοτική Κοινότητα Βρουβιανών	297
4577	Δημοτική Κοινότητα Γιαννοπούλων	179
4578	Δημοτική Κοινότητα Εμπεσού	406
4579	Δημοτική Κοινότητα Μαλεσιάδας	286
4580	Δημοτική Κοινότητα Μπαμπαλιού	54
4581	Δημοτική Κοινότητα Πατιοπούλου	504
4582	Δημοτική Κοινότητα Περδικακίου	310
4583	Δημοτική Κοινότητα Πετρώνας	146
4584	Δημοτική Κοινότητα Ποδογοράς	113
4585	Δημοτική Κοινότητα Σταθά	248
4586	Δημοτική Κοινότητα Τρικλίνου	119

Πίνακας 2: Απόσπασμα από Πληθυσμιακά στοιχεία του ΥΔ Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (EL04) για τα έτη 2011 -2021(πηγή: 2η ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΠΟΤΑΜΩΝ ΤΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΟΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ (EL 04)).

Δημοτική Ενότητα	Δήμος	Περιφερειακή Ενότητα	Περιφέρεια	Πραγματικός Πληθυσμός 2011	Πραγματικός Πληθυσμός 2021	Μεταβολή Πληθυσμού 2011 - 2021 (%)
Δ.Ε. ΙΝΑΧΟΥ	Δ. ΑΜΦΙΛΟΧΙΑΣ	Π.Ε. ΑΙΤΩΛΟΑΚΑΡΝΑΝΙΑΣ	ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ	4.819	4.270	-11,4%

Η επιλογή της Δημοτικής Ενότητας Ινάχου ως περιοχής μελέτης βασίστηκε στην έντονη παρουσία κτηνοτροφικών δραστηριοτήτων, που επιτρέπουν τη διερεύνηση της επίδρασης της βόσκησης στη δυναμική της βλάστησης.

3.2 Προστατευόμενες περιοχές/καθεστώς προστασίας

- ΠΕΡΙΟΧΗ NATURA 2000-ΖΩΝΗ ΕΙΔΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ (ΖΕΠ)

Περιοχή GR2110006 – Κοιλάδα Αχελώου και Όρη Βάλτου.

Σύμφωνα με την Ειδική Περιβαλλοντική Μελέτη, η οποία βρισκόταν σε Δημόσια Διαβούλευση, με τίτλο «ΕΠΜ 11β: Περιοχές Natura 2000 της Περιφέρειας Ηπείρου και Περιφέρειας Δυτικής Μακεδονίας – ΑΝΑΤΟΛΙΚΟ ΤΜΗΜΑ», η περιοχή GR2110006 - Κοιλάδα Αχελώου και Όρη Βάλτου χαρακτηρίζεται ως Ζώνη Ειδικής Προστασίας (ΖΕΠ ή Special Protection Area - SPA) και η συνολική της έκταση ανέρχεται σε 471,56 km2 με Συντεταγμένες 39.486111, 21.151111. Οι Περιφερειακές Ενότητες που εμπλέκονται στην περιοχή Natura 2000 είναι της Αιτωλοακαρνανίας, Άρτας, Καρδίτσας και Ευρυτανίας. Επίσης οι Δήμοι που περιλαμβάνονται στην περιοχή είναι ο Δήμος Αμφιλοχίας με τις Δ.Ε. Ινάχου αι Μενιδίου με ποσοστό έκτασης Δήμου εντός περιοχής να είναι 16.49, ο Δήμος Γεωργίου

Καραϊσκάκη με τις Δ.Ε. Γεωργίου Καραϊσκάκη, Ηρακλείας και Τετραφυλιάς με ποσοστό έκτασης 42.2, ο Δήμος Κεντρικών Τζουμέρκων με την Δ.Ε. Αθαμανίας να είναι 5.16, ο Δήμος Αργιθέας με Δ.Ε. Αργιθέας και Αχελώου να είναι το 16.49 και τέλος ο Δήμος Αγράφων με τις Δ.Ε. Απεραντίων και Ασπροποτάμου να είναι 0.81 [5].

Η οροσειρά των Ορέων Βάλτου καταλαμβάνει το βόρειο τμήμα της Περιφερειακής Ενότητας Αιτωλοακαρνανίας και το ΝΑ της Περιφερειακής Ενότητας Άρτας. Όριό της στα ανατολικά αποτελεί ο ποταμός Αχελώος. Τα Όρη Βάλτου φυλάνε το πέρασμα από τη Δυτική Ελλάδα και την Ήπειρο προς τον ποταμό Αχελώο και τα Άγραφα. Σχηματίζουν μια μικρή αλλά και επιμήκη «οροσειρά» με τη δίδυμη κορυφή Αετοί, την υψηλότερή της (1.852 m) [5].

Το τμήμα της περιοχής NATURA 2000 που εμπίπτει στην περιοχή μελέτης έχει συνολική έκταση 0,018 km². Το τμήμα της περιοχής NATURA 2000 που εμπίπτει στην περιοχή μελέτης παρουσιάζει εύρος υψομέτρου 252m – 1.771m με μέση τιμή 987m.

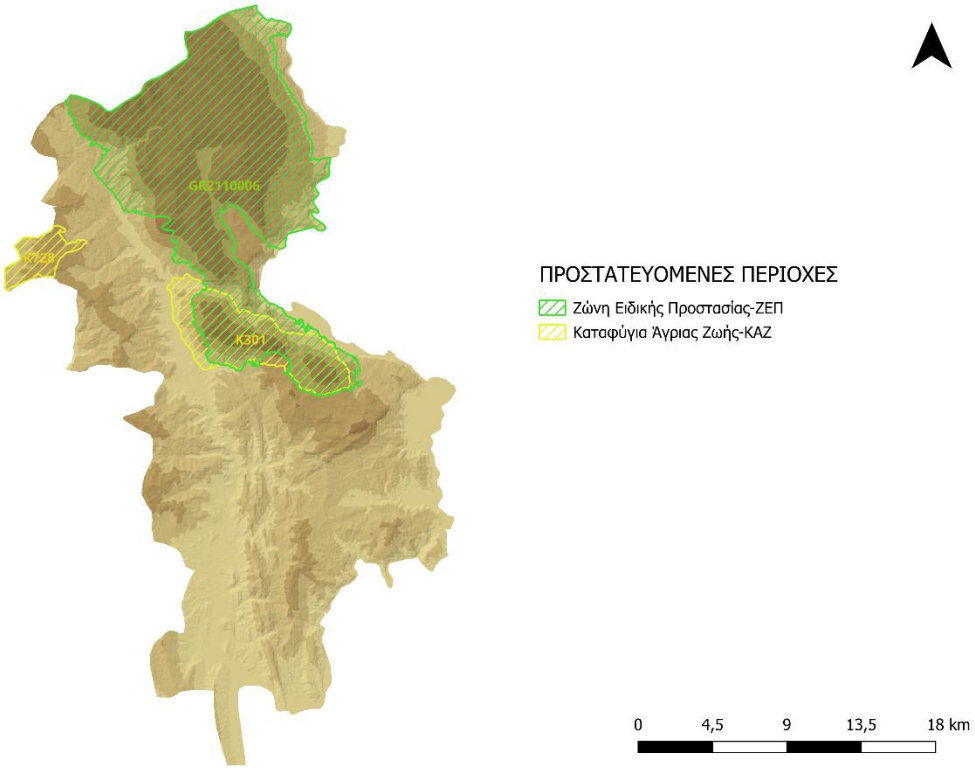
- ΚΑΤΑΦΥΓΙΑ ΑΓΡΙΑΣ ΖΩΗΣ (ΚΑΖ)

Σύμφωνα με τον ν. 2637/1998 (ΦΕΚ 200/Α/27.08.1998), τα καταφύγια θηραμάτων μετονομάστηκαν σε «Καταφύγια Άγριας Ζωής». Με βάση τον ν. 3937/2011 «Διατήρηση της βιοποικιλότητας και άλλες διατάξεις» (ΦΕΚ 60/Α/31.03.2011), ως καταφύγια άγριας ζωής χαρακτηρίζονται φυσικές περιοχές (χερσαίες, υγροτοπικές ή θαλάσσιες), που έχουν ιδιαίτερη σημασία ως σημαντικοί τόποι ανάπτυξης της άγριας χλωρίδας ή ως βιότοποι αναπαραγωγής, διατροφής, διαχείμασης ειδών της άγριας πανίδας, ή ως περιοχές αναπαραγωγής ψαριών και συγκέντρωσης γόνου, ή, τέλος, ως σημαντικοί θαλάσσιοι οικότοποι. Στην παρ. 4.3 του άρθρου 5 του νόμου, καθορίζονται συγκεκριμένοι όροι και περιορισμοί όσον αφορά στα ΚΑΖ. Οι λειτουργίες που πρέπει να επιτελούν, τα κριτήρια επιλογής τους καθώς και οι σκοποί που πρέπει να επιτυγχάνονται μέσω του νέου θεσμού είναι περισσότερο σύνθετοι, πολύπλοκοι και αποσκοπούν στη διατήρηση της βιολογικής ποικιλότητας, στην προστασία των ειδών, στη διατήρηση των σπάνιων και απειλούμενων ειδών της πανίδας και της αυτοφυούς χλωρίδας, καθώς και προστασία και την αύξηση του πληθυσμού των θηραμάτων. Κατά συνέπεια, ο στόχος ενός καταφυγίου άγριας ζωής δεν επικεντρώνεται πλέον μόνο στα θηράματα, αλλά σε όλα τα είδη άγριας πανίδας, αυτοφυούς χλωρίδας αλλά και του οικοσυστήματος γενικά. Στον ακόλουθο Πίνακα, δίνονται τα Καταφύγια Άγριας Ζωής της Περιφέρειας Δυτικής Ελλάδας. Σύμφωνα με τον ν. 3937/2011 (ΦΕΚ 60/Α/31.03.2011), τα κάτωθι ΚΑΖ, περιλαμβάνονται στην κατηγορία «Περιοχές Προστασίας Οικοτόπων και Ειδών», του Εθνικού Συστήματος Προστατευόμενων Περιοχών.

Η περιοχή μελέτης εμπίπτει εντός των κατωτέρω Καταφυγίων Άγριας Ζωής

- Καταφύγιο Άγριας Ζωής Κανάλα Βάλτου προστατεύεται με το ΦΕΚ 700/25-7-80.
- Καταφύγιο Άγριας Ζωής Ι.Μ. Ρέθα και Ι.Μ. Λόγγος, Αμφιλογίας, Μενιδίου, Ινάχου προστατεύεται με το ΦΕΚ 972/Β/15-07-03[6].

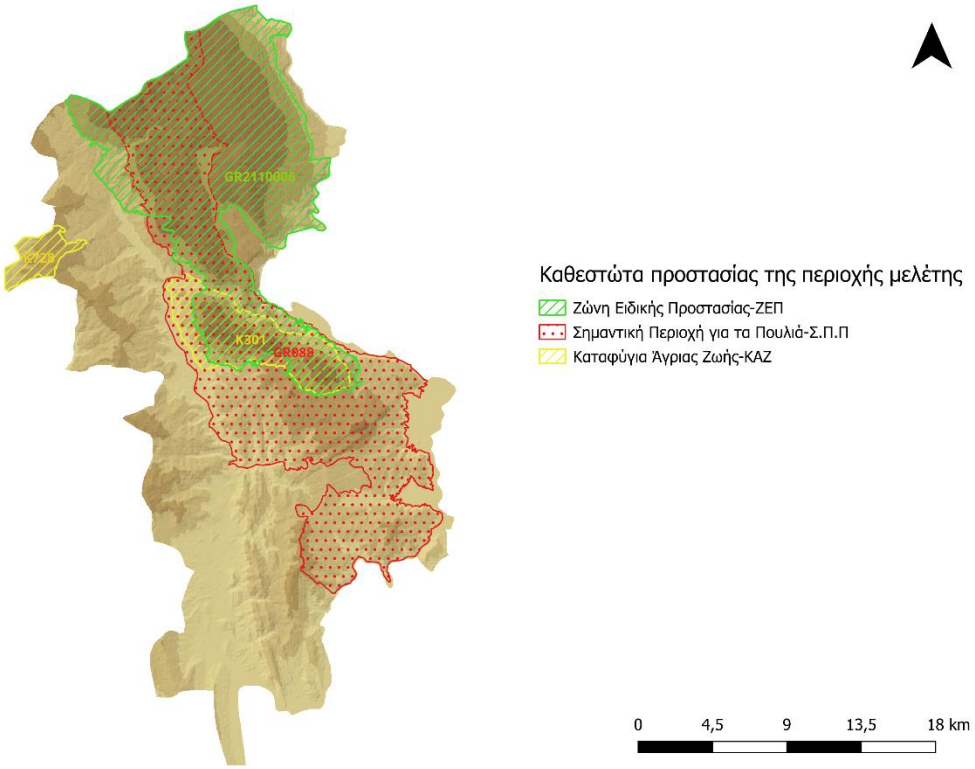
Τα γεωγραφικά όρια αποτυπώνονται στον χάρτη κατανομής των υπό προστασία περιοχών του Εθνικού Συστήματος Προστατευόμενων περιοχών (Σχήμα 4) σύμφωνα με το ν. 3937/2011 (ΦΕΚ Α’ 60).



Σχήμα 4: Κατανομή προστατευόμενων περιοχών (ΖΕΠ και ΚΑΖ) στην περιοχή μελέτης.

- ΣΗΜΑΝΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΓΙΑ ΤΑ ΠΟΥΛΙΑ (Σ.Π.Π)

Η περιοχή βρίσκεται και εντός της Σημαντικής Περιοχής για τα Πουλιά (ΣΠΠ) GR088 «Όρη Βάλτου».



Σχήμα 5: Η περιοχή μελέτης ανήκει σε περιοχή υπό καθεστώς προστασίας (ΖΕΠ και ΚΑΖ) καθώς και σε Σημαντική Περιοχή για τα Πουλιά (ΙΒΑ-Σ.Π.Π).

Η Σημαντική Περιοχή για τα Πουλιά (GR088) είναι εκτεταμένη οροσειρά με προσανατολισμό από ΒΔ προς ΝΑ που εκτείνεται σε μήκος περίπου 50 χιλιομέτρων, σχηματίζοντας τη δυτική πλευρά της κοιλάδας του ποταμού Αχελώου. Η περιοχή καλύπτεται από θαμνώνες μακί, δάση δρυός και στα μεγαλύτερα υψόμετρα από δάση ελάτης. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες περιλαμβάνουν την κτηνοτροφία και τη γεωργία.

Ενδιαιτήματα:

Θαμνώνες (47,7 %),
Δάση (22,9 %),
Λιβάδια (14,9 %),
Τεχνητά τοπία (10,2 %),
Βραχώδεις περιοχές (4 %),
Υγρότοποι (ενδοχώρας) (0,4 %)

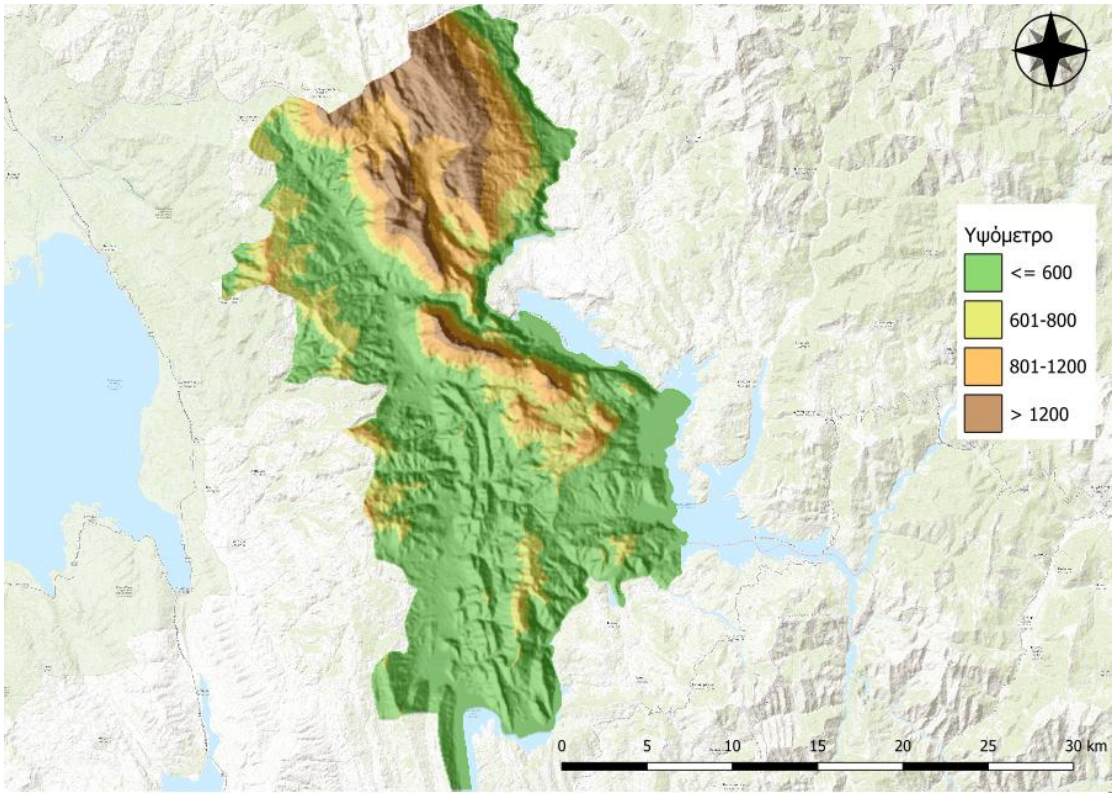
Θέματα διατήρησης:

Οι κύριες απειλές που αντιμετωπίζει η ορνιθοπανίδα της περιοχής σχετίζονται με την εγκατάλειψη των παραδοσιακών χρήσεων γης, ιδίως της εκτατικής - ημινομαδικής κτηνοτροφίας, που οδηγεί σε μείωση της διαθεσιμότητας τροφής για τα πτωματοφάγα αρπακτικά, καθώς και τη χρήση δηλητηριασμένων δολωμάτων. Η εντατικοποίηση της γεωργίας τοπικά καθώς και η σημειακή υπερβόσκηση, που εμποδίζει την αναγέννηση του δάσους, συνιστούν επίσης απειλές, όπως και η λαθροθηρία [7].

3.3 Φυσικές συνθήκες

Για την μελέτη της περιοχής χρησιμοποιήθηκε ψηφιακό μοντέλο εδάφους DEM, που είναι ένα τρισδιάστατο γραφικό της «γυμνής γης» της επιφάνειας της γης που απεικονίζεται χωρίς δέντρα, κτίρια ή άλλα αντικείμενα. Τα DEM μπορούν να δημιουργηθούν με τη χρήση παραδοσιακών τοπογραφικών χαρτών, σύγχρονων δεδομένων ανίχνευσης φωτός και τηλεπισκόπησης (LIDAR) και άλλων πηγών που συλλέγονται από εναέρια και διαστημικά όργανα. Τα δεδομένα DEM της NASA, όπως τα αρχεία που συλλέγονται από την αποστολή ραντάρ τοπογραφίας του διαστημικού λεωφορείου (SRTM), το προηγμένο διαστημικό θερμικό ραδιόμετρο εκπομπής και ανάκλασης (ASTER) και την παγκόσμια έρευνα για τη δυναμική του οικοσυστήματος (GEDI) και άλλα όργανα, είναι χρήσιμα για μια σειρά από έρευνες γης, από την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των πυρκαγιών έως τη χαρτογράφηση του υψομέτρου του εδάφους για τον σχεδιασμό της οικολογικής διατήρησης. Τα δεδομένα της NASA για τα ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα (DEM) προέρχονται από εναέριες και διαστημικές πηγές και είναι χρήσιμα για την ανάλυση της πλειονότητας του εδάφους της Γης [8].

3.3.1 Υψόμετρο



Σχήμα 6: Εύρος υψομέτρου της περιοχής μελέτης.

Οι ζώνες υψομέτρου κατηγοριοποιούνται (πεδινή 0-600 μ., ημιορεινή 601-800 μ., ορεινή 801-1200μ., πολύ ορεινή >1200 μ). με βάση την υπ' αριθμ. Κοινή Υπουργική Απόφαση 1058/71977/2017 ΄΄Καθορισμός των Προδιαγραφών και του Περιεχομένου των Διαχειριστικών Σχεδίων Βόσκησης, στο πλαίσιο εφαρμογής των διατάξεων του ν. 4351/2015 (ΦΕΚ 164 Α')΄΄ (ΦΕΚ 2331/Β/7-7-2017) [9].

Πίνακας 3: Στατιστικά χαρακτηριστικά υψομέτρου της περιοχής μελέτης βάσει του ψηφιακού μοντέλου υψομέτρων (DEM).

Count of non-NoData pixels: 651950
Minimum value: 128
Maximum value: 1771
Range: 1643
Sum: 394594201
Mean value: 605.2522448040494
Standard deviation: 351.7956167591134
Sum of the squares: 80685309925.08858
(από raster layer statistics)

Συμπερασματικά η στατιστική ανάλυση του ψηφιακού μοντέλου υψομέτρων (DEM) δείχνει ότι η περιοχή μελέτης παρουσιάζει σημαντική υψομετρική διακύμανση, με τιμές από 128 m έως 1771 m και συνολικό εύρος (range) 1643 m. Ο μέσος όρος υψομέτρου είναι περίπου 605 m, υποδεικνύοντας ότι η περιοχή κατατάσσεται γενικά στις ημιορεινές ζώνες, ενώ η υψηλή στατιστική διασπορά (standard deviation ≈ 351.8 m) δείχνει μεγάλη ποικιλία μορφολογίας, από πεδινά και ημιορεινά τμήματα έως ορεινές περιοχές. Τα δεδομένα αυτά είναι σημαντικά για την ερμηνεία των γεωγραφικών και οικολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής, καθώς και για τη συσχέτισή τους με χρήσεις γης όπως η βόσκηση, η γεωργία και οι δασικές εκτάσεις.

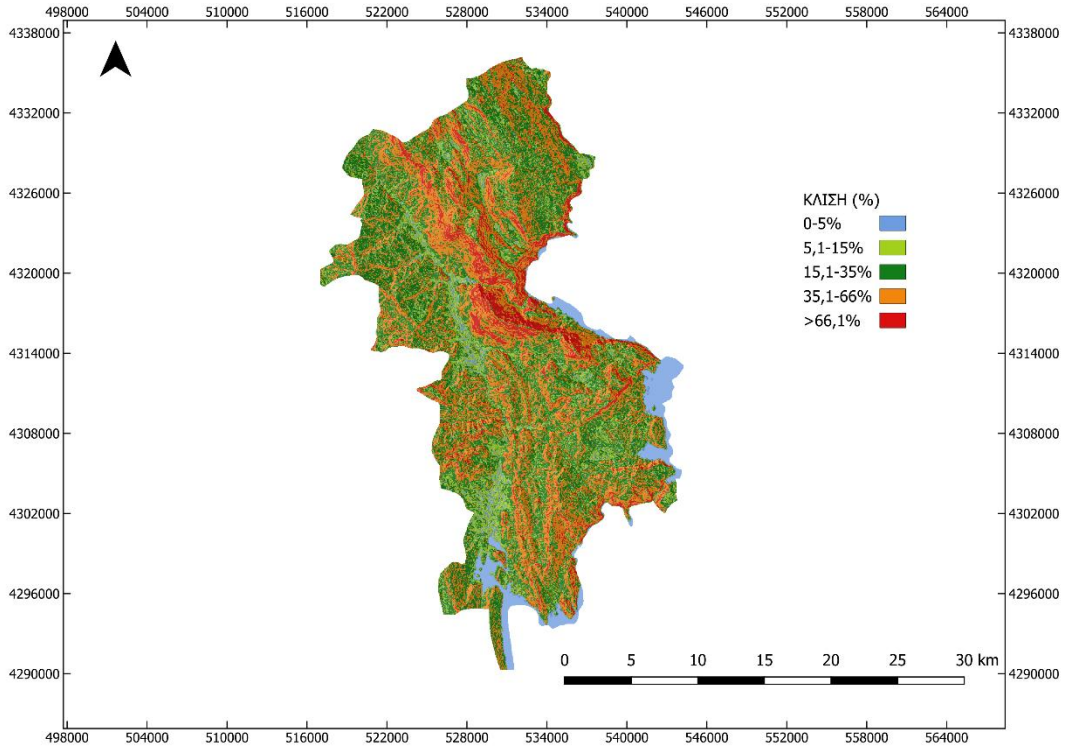
Πίνακας 4: Κατανομή της έκτασης της περιοχής μελέτης ανά υψομετρική ζώνη.

	Value	**Pixel count**	**Area (m²)**	**Area (stremma)**	**Ποσοστό**
	Πεδινή ζώνη (0-600μ)	393.927	355.424.512,29	355.424,51	60,4%
	Ημιορεινή ζώνη (601-800 μ)	103.063	92.989.605,97	92.989,61	15,8%
	Ορεινή ζώνη (801-1200 μ)	93.146	84.041.895,13	84.041,90	14,3%
	Πολύ ορεινή ζώνη (>1200 μ)	61.775	55.737.101,66	55.737,10	9,5%
SUM			588.193.115,04	588.193,12	100%

3.3.2 Κλίση εδάφους

Ο χάρτης κλίσεων προέκυψε από την επεξεργασία του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (DEM) στο περιβάλλον GIS. Με το εργαλείο Slope υπολογίστηκαν οι κλίσεις του αναγλύφου σε ποσοστό (%), και στη συνέχεια οι τιμές ταξινομήθηκαν σε κατηγορίες (0–5%, 5,1–15%, 15,1–35%, 35,1–66% και >66,1%) με βάση την υπ'αριθμ Κοινή Υπουργική Απόφαση 1058/71977/2017 ΄΄Καθορισμός των Προδιαγραφών και του Περιεχομένου των Διαχειριστικών Σχεδίων Βόσκησης, στο πλαίσιο εφαρμογής των διατάξεων του ν. 4351/2015

(ΦΕΚ 164 Α')΄΄ (ΦΕΚ 2331/Β/7-7-2017)[9]. Με τον τρόπο αυτό έγινε δυνατή η χωρική αποτύπωση των ήπιων, μέσων και έντονων κλίσεων στην περιοχή μελέτης.



Σχήμα 7: Χάρτης κλίσεων της περιοχής μελέτης (%).

Οι έντονες κλίσεις (>66%) εντοπίζονται κυρίως κατά μήκος του Αχελώου και στις βόρειες και κεντρικές πλαγιές της περιοχής μελέτης, όπου το ανάγλυφο γίνεται απότομο και σχηματίζονται χαράδρες και κορυφογραμμές. Οι μεσαίες κλίσεις (35–66%) καλύπτουν μεγάλο μέρος των ορεινών ζωνών, ενώ οι χαμηλότερες (0–15%) περιορίζονται σε κοιλάδες, γύρω από υδάτινες επιφάνειες και κοντά σε οικισμούς. Το Καταφύγιο Άγριας Ζωής Κ301-Κανάλα Βάλτου και η περιοχή του δικτύου Natura 2000 GR2110006 – Κοιλάδα Αχελώου και Όρη Βάλτου που εμπίπτουν στην περιοχή χαρακτηρίζονται στο μεγαλύτερο μέρος τους από ορεινό ανάγλυφο με επικράτηση έντονων κλίσεων.

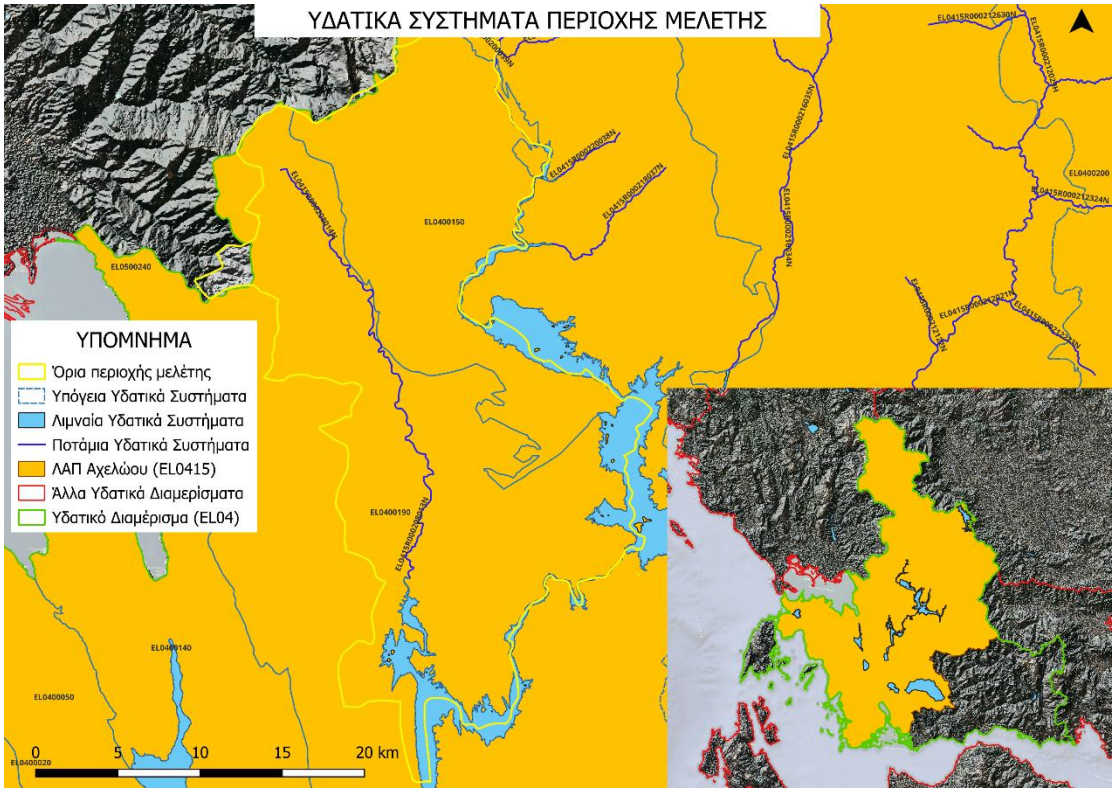
3.3.3 Υδρογραφικό δίκτυο

Λεκάνη Απορροής Ποταμού (ΛΑΠ) Αχελώου (EL0415)

Τα όρια της ΛΑΠ Αχελώου καθορίζονται από τις ακόλουθες οροσειρές: Δυτικά: Θύαμο, Μακρύ, Βάλτος, Αθαμάνια. Βορειοδυτικά: Λάκμος. Ανατολικά: Πίνδος, Τυμφρηστός, Οξιά, Παναιτωλικό. Περιλαμβάνει τους κύριους ποταμούς: Αχελώο με μήκος 220 km, Αγραφιώτη με μήκος 33 km, Ταυρωπό με μήκος 52 km, Ίναχο με μήκος 35 km και Κρικελιώτη με μήκος 37 km. Όλοι οι τελευταίοι αποτελούν παραπόταμους του Αχελώου. Η μέση κλίση των ορεινών λεκανών των ποταμών αυτών κυμαίνεται από 18 έως 30%.

Η ΛΑΠ Αχελώου περιλαμβάνει, επίσης, τις φυσικές λίμνες Τριχωνίδα, Λυσιμαχία, Οζερό, Βουλκαριά, Αμβρακία, Σαλτίνη και τις τεχνητές λίμνες Κρεμαστών, Ταυρωπού, Καστρακίου και Στράτου [10].

Τα Υδατικά Συστήματα που εμπίπτουν στην περιοχή μελέτης η οποία ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (EL04), παρουσιάζονται στο κατωτέρω Σχήμα 8.



Σχήμα 8: Υδατικά Συστήματα περιοχής μελέτης.

Σύμφωνα με την 2η Αναθεώρηση του Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής, όσον αφορά την αξιολόγηση της κατάστασης των ποτάμιων και υπόγειων υδατικών συστημάτων αναφέρονται οι κατωτέρω Πίνακες (*Πίνακες 5,6*) [10].

Πίνακας 5: Απόσπασμα του Πίνακα Αποτελέσματα αξιολόγησης της κατάστασης των ποτάμιων υδατικών συστημάτων ανά ΛΑΠ στο ΥΔ Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (EL04) σε σύγκριση με προηγούμενα εγκεκριμένα ΣΔΛΑΠ (πηγή: 2η ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΠΟΤΑΜΩΝ ΤΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΟΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ (EL 04)).

Α/Α	ΚΩΔΙΚΟΣ Υ.Σ. – 2η Αναθεώρηση ΣΔΛΑΠ	ΚΩΔΙΚΟΣ Υ.Σ. – 1η Αναθεώρηση ΣΔΛΑΠ	ΟΝΟΜΑ Υ.Σ.	ΚΑΤ [1]	Η.ΑΣ	ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΟΜΕΝΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ	1ο ΣΔΛΑΠ			1η ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΣΔΛΑΠ							2η ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΣΔΛΑΠ						
							ΟΙΚ/ΤΙΚΗ ΚΑΤ/ΣΗ / ΔΥΝΑΜΙΚΟ	ΧΗΜΙΚΗ ΚΑΤ/ΣΗ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΚΑΤ/ΣΗ	ΟΙΚ/ΤΙΚΗ ΚΑΤ/ΣΗ / ΔΥΝΑΜΙΚΟ	ΤΡΟΠΟΣ ΤΑΣΙΝΟ-ΜΗΣΗΣ	ΕΠΙΠΕΔΟ ΕΜΠ/ΝΗΣ ΤΑΣΙΝΟ-ΜΗΣΗΣ ΟΙΚ/ΚΗΣ ΚΑΤ/ΣΗΣ	ΧΗΜΙΚΗ ΚΑΤ/ΣΗ	ΤΡΟΠΟΣ ΤΑΣΙΝΟ-ΜΗΣΗΣ	ΕΠΙΠΕΔΟ ΕΜΠ/ΝΗΣ ΤΑΣΙΝΟ-ΜΗΣΗΣ Χ/ΚΗΣ ΚΑΤ/ΣΗΣ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΚΑΤ/ΣΗ	ΟΙΚ/ΤΙΚΗ ΚΑΤ/ΣΗ / ΔΥΝΑΜΙΚΟ	ΤΡΟΠΟΣ ΤΑΣΙΝΟ-ΜΗΣΗΣ	ΕΠΙΠΕΔΟ ΕΜΠ/ΝΗΣ ΤΑΣΙΝΟ-ΜΗΣΗΣ ΟΙΚ/ΚΗΣ ΚΑΤ/ΣΗΣ	ΧΗΜΙΚΗ ΚΑΤ/ΣΗ	ΤΡΟΠΟΣ ΤΑΣΙΝΟ-ΜΗΣΗΣ	ΕΠΙΠΕΔΟ ΕΜΠ/ΝΗΣ ΤΑΣΙΝΟ-ΜΗΣΗΣ Χ/ΚΗΣ ΚΑΤ/ΣΗΣ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΚΑΤ/ΣΗ
22	EL0415R000208013N	EL0415R000208015N	INAXOΣ Π. 1	R		ΟΧΙ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΟΜ	1	ΚΑΛΗ	ΟΜ	1	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΟΜ	1	ΚΑΛΗ	ΟΜ	1	ΚΑΛΗ
23	EL0415R000208014N	EL0415R000208014N	INAXOΣ Π. 2	R		ΟΧΙ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΟΜ	1	ΚΑΛΗ	ΟΜ	1	ΚΑΛΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΟΜ	1	ΚΑΛΗ	ΟΜ	1	ΜΕΤΡΙΑ

Πίνακας 6: Απόσπασμα του Πίνακα ποιοτικής και ποσοτικής κατάστασης υπόγειων υδατικών συστημάτων στη ΛΑΠ Αχελώου (EL0415) (πηγή: 2η ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΠΟΤΑΜΩΝ ΤΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΟΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ (EL 04)).

Α/Α	Κωδικός	Ονομασία	Ποσοτική κατάσταση	Τάση πτώσης στάθμης	Χημική κατάσταση	Ποιοτικά προβλήματα	Τάση ρύπων
11	EL0400150	Σύστημα Εμπεσού - Βάλτου	Καλή	Όχι	Καλή	Όχι	Όχι
13	EL0400190	Σύστημα υδροφοριών λεκάνης Αγελώου	Καλή	Όχι	Καλή	Όχι	Όχι

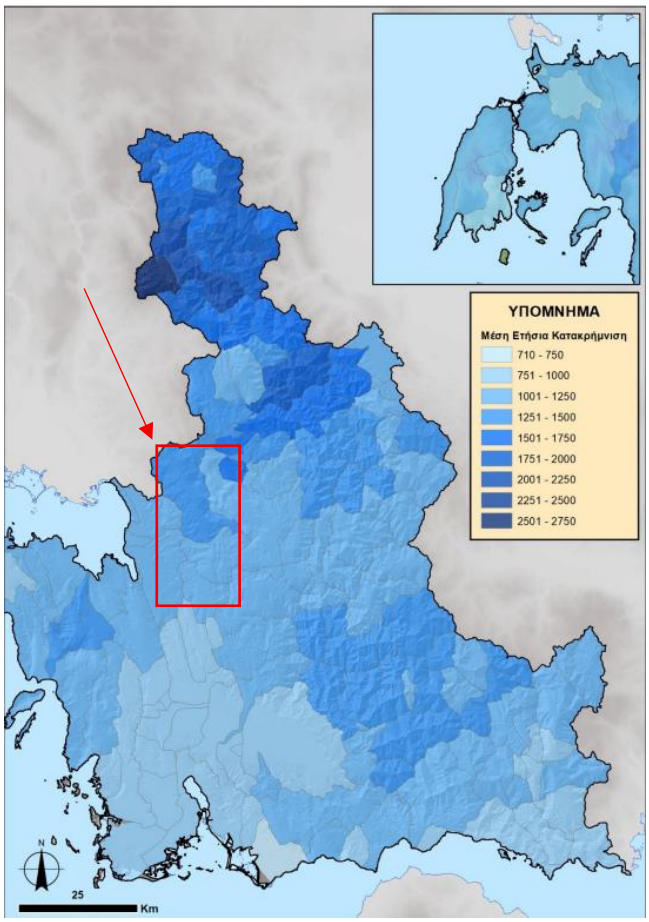
3.3.4 Κλίμα

Το κλίμα του Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Στερεάς Ελλάδας παρουσιάζει ποικιλία λόγω της γεωγραφικής του θέσης και της πολυμορφίας του. Οι κλιματικές περιοχές καθορίζονται από το ανάγλυφο, δηλαδή από τον προσανατολισμό, το υψόμετρο και την έκθεση στους ανέμους. Το Υδατικό Διαμέρισμα κλιματολογικά διαιρείται σε τρεις περιοχές: 1) την παράκτια όπου επικρατεί το μεσογειακό κλίμα, 2) την πεδινή με ηπειρωτικό κλίμα και 3) την ορεινή με ορεινό κλίμα.

Ειδικότερα, τα γενικά χαρακτηριστικά του κλίματος της περιοχής ανά εποχή είναι τα εξής:

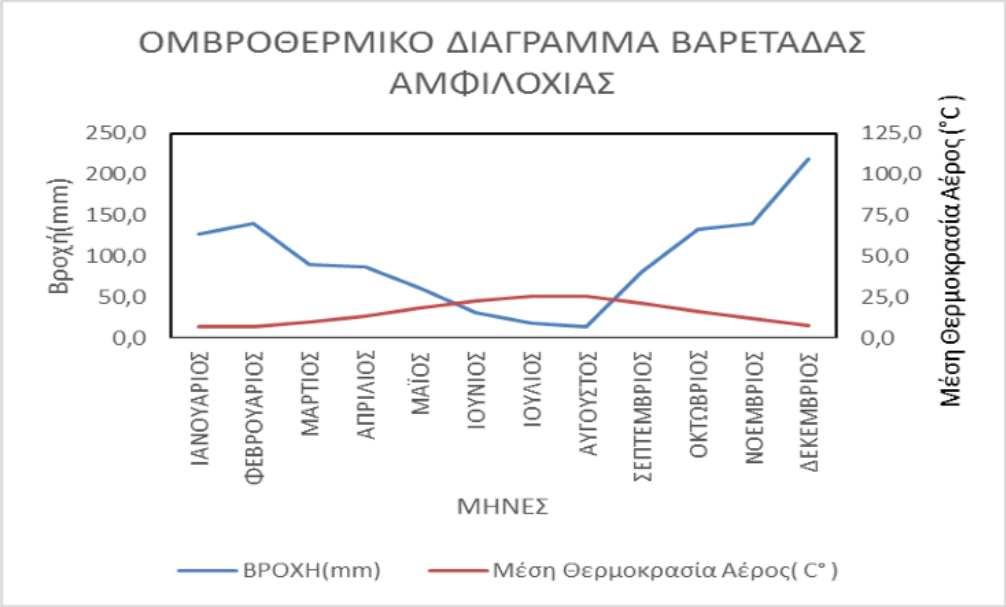
I. Χειμώνας: Ήπιος έως έντονος με εμφανή επηρεασμό από βόρειες ψυχρές μάζες
II. Άνοιξη: Ήπια χαρακτηριστικά κλίματος με σχετική μείωση των βροχών και χαμηλές σχετικά θερμοκρασίες
III. Καλοκαίρι: Σημαντική αύξηση της ξηρασίας με ανάλογη μείωση των βροχοπτώσεων και αντίστοιχη αύξηση της θερμοκρασίας
IV. Φθινόπωρο: Ήπια χαρακτηριστικά κλίματος με σχετική αύξηση των βροχοπτώσεων και αντίστοιχη αύξηση της υγρασίας

Στα ορεινά της Αιτωλοακαρνανίας το κλίμα είναι ψυχρό, ενώ στις πεδινές και τις παράκτιες περιοχές της είναι μεσογειακό. Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται από 17 έως 18°C. Το ύψος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων είναι το δεύτερο στη χώρα μετά από την Ήπειρο. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής ξεκινά από 800-1.000 mm στα παράκτια, φτάνει στα 1.400 mm στα ορεινά και ξεπερνά τα 1.800 mm στα πολύ μεγαλύτερα υψόμετρα. Η μέση ετήσια σχετική υγρασία κυμαίνεται από 64 έως 68% τόσο στην παράκτια ζώνη, όσο και στο εσωτερικό της Π.Ε. Αιτωλοακαρνανίας, κυρίως λόγω των μεγάλων υδάτινων όγκων. Κατά τους θερινούς μήνες επικρατούν βορειοδυτικοί άνεμοι, ενώ τον υπόλοιπο χρόνο νοτιοδυτικοί και βόρειοι - βορειοδυτικοί. Σπάνια εμφανίζονται στην περιοχή ανατολικοί άνεμοι, λόγω της οροσειράς της Πίνδου, η οποία αποτελεί φυσικό σύνορο στα ανατολικά [10].



Σχήμα 9: Χωρική κατανομή μέσου ετήσιου ύψους κατακρημνισμάτων στις υπολεκάνες του ΥΔ Δ. Στ. Ελλάδας (πηγή: 2η ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΠΟΤΑΜΩΝ ΤΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΟΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ (EL 04)).

Για την εκτίμηση του κλίματος λήφθηκαν υπόψη τα μετεωρολογικά στοιχεία του πλησιέστερου Μετεωρολογικού Σταθμού του ΕΘΙΑΓΕ-Ινστιτούτου Μεσογειακών Δασικών Οικοσυστημάτων και Τεχνολογίας Δασικών Προϊόντων που βρίσκεται στην περιοχή Βαρετάδας Βάλτου και έχει γεωγραφικό μήκος 21ο18΄25΄΄, γεωγραφικό πλάτος 38ο50΄35΄΄ και υπερθαλάσσιο ύψος 332,0 μ. Σύμφωνα με τα στοιχεία των ετών 1998-2012, το μέσο ετήσιο ύψος κατακρημνισμάτων ανέρχεται σε 1.144,2 mm και η μέση θερμοκρασία του αέρα στους 15,6 °C. Ο Ιούλιος και ο Αύγουστος είναι οι θερμότεροι μήνες με μέση θερμοκρασία 25,6°C και ο Ιανουάριος ο ψυχρότερος μήνας του έτους με μέση θερμοκρασία 7,0°C. Η μέση υγρασία του αέρα κυμαίνεται από 55,1% μέχρι 78,4%. Η περιοχή μελέτης εδράζεται και στις τρεις υψομετρικές ζώνες (πεδινή, ημιορεινή, ορεινή), έχει βιοκλίμα με χαρακτήρα έντονο μέσο-μεσογειακό έως ασθενές μέσο-μεσογειακό και εμπίπτει στον ύφυγρο βιοκλιματικό όροφο με ήπιο και ψυχρό χειμώνα, καθώς και στον υγρό βιοκλιματικό όροφο με ψυχρό χειμώνα και χειμώνα δριμύ (Μαυρομμάτης 1980). Η ξηρή περίοδος διαρκεί τρεις (3) και πλέον μήνες περίπου, από τον Ιούνιο μέχρι αρχές Σεπτεμβρίου (Σχήμα 10) [1].



Σχήμα 10: Ομβροθερμικό διάγραμμα περιοχής Βαρετάδας Αμφιλοχίας (πηγή: Προσωρινό Διαχειριστικό Σχέδιο Βόσκησης Δήμου Αμφιλοχίας, Π.Ε. Αιτωλοακαρνανίας).

3.4 Βιοποικιλότητα περιοχής

Πανίδα

Ο ποταμός Αχελώος, διέρχεται από τα ανατολικά σε τμήμα των ορίων των Περιφερειακών Ενοτήτων Άρτας, Τρίκαλων και Καρδίτσας. Η μορφολογία της κοιλάδας του Αχελώου είναι ιδιαιτέρα βαθιά, στενή και με απότομες κλίσεις. Εξαίρεση αποτελούν τα τμήματα ανάμεσα στα Τζουμέρκα και το Όρος Κανάλια και εκείνα μεταξύ του τελευταίου και των Ορέων του Βάλτου, όπου η μορφολογία γίνεται ηπιότερη και η κοιλάδα διευρύνεται [5].

Η παρόχθια βλάστηση όπως και η υπόλοιπη βλάστηση κατά μήκος των όχθεων καθώς επίσης και η πεδιάδα του ποταμού, γενικά, έχουν μεγάλη σημασία για τους εξής λόγους: α) προστασία του εδάφους από τη διάβρωση και την κατολίσθηση, β) διαμόρφωση σημαντικών ενδιαιτημάτων για τα ζώα της περιοχής (κυρίως για τη βίδρα *Lutra lutra* και για πολλά είδη πτηνών), γ) μείωση της ρύπανσης του ποταμού, δ) συγκράτηση των υλικών κατάντη του ποταμού, ε) βελτίωση, άμεση ή έμμεση, του κλίματος στην ευρύτερη περιοχή. Η περιοχή φιλοξενεί ελληνικά ενδημικά είδη φυτών που προστατεύονται από την ελληνική νομοθεσία (Προεδρικό Διάταγμα 67/81) και περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων WCMC των φυτών ως «σπάνιο». Τα είδη *Alnus glutinosa* (σκλήθρο) και *Fraxinus angustifolia* (φράξος), με αξιολόγηση D, παρουσιάζουν περιορισμένη εξάπλωση στην Ελλάδα και οι πληθυσμοί τους θα πρέπει να προστατευτούν. Μεγάλη ποικιλία ενδιαιτημάτων (δασών, παρόχθιων κοινωνιών, μακκίας), σε πολύ κατάσταση διατήρησης, εμφανίζεται στην περιοχή. Το γεγονός αυτό, προστίθεται στη γεωμορφολογία και στο απροσπέλαστο της περιοχής και όλα μαζί εξηγούν την ύπαρξη πλούσιας πανίδας στην περιοχή, κυρίως ορνιθοπανίδας.

Επιπλέον, εκτός από την οικολογική σημασία, ο ποταμός Αχελώος είναι σημαντικός και αξιόλογος για τους εξής λόγους:

1) αισθητική αξία του φυσικού περιβάλλοντος,
2) το σπουδαίο δυναμικό για περιβαλλοντική εκπαίδευση που προσφέρει,
3) η σημασία του για επιστημονική έρευνα,

4) η καταλληλότητά του για δραστηριότητες αναψυχής.

Επιπλέον, η περιοχή είναι υψηλής σημασίας λόγω της παρουσίας πολλών απειλούμενων και προστατευόμενων ειδών ζώων στα οποία προσφέρει ένα από τα λίγα εναπομείναντα καταφύγια. Παρατηρείται μια αναπαραγόμενη αποικία του όρνιου (*Griffon vultures, Gyps fulvus*) καθώς επίσης και άλλα αρπακτικά, όπως ο χρυσαετός (*Aquila chrysaetos*) κ.ά.. Πράγματι, η περιοχή χρησιμοποιείται από μεταναστευτικά είδη πτηνών ως ενδιάμεσος σταθμός και θεωρείται μία από τις Σημαντικές Περιοχές για τα Πουλιά της Ελλάδας (Σ.Π.Π.Ε.). Η βίδρα (*Lutra lutra*) κατοικεί στον ποταμό και η περιοδική παρουσία της καφέ αρκούδας (*Ursus arctos*) έχει καταγραφεί στον Αχελώο, στο νότιο τμήμα της περιοχής. Ο ποταμός αυτός αποτελεί, επίσης, ενδιαίτημα για σημαντικά είδη ψαριών που περιλαμβάνονται στο Παράρτημα ΙΙ της Οδηγίας 92/43/ΕΟΚ όπως είναι το ενδημικό είδος *Pseudophoxinus pleurobipunctatus*. Όσον αφορά στην πανίδα, εκτός των πτηνών, ορισμένα είδη του Παραρτήματος ΙΙ της Οδηγίας 92/43/ΕΟΚ έχουν καταγραφεί στην περιοχή. Μεταξύ αυτών, όπως προαναφέρθηκε η καφέ αρκούδα Ursus arctos έχει καταγραφεί περιστασιακά και στο βόρειο τμήμα της περιοχής. Αποτελεί είδος προτεραιότητας της Οδηγίας και απειλούμενο ελληνικό είδος (κατηγορία «κινδυνεύον»). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, το είδος ψαριού *Phoxinellus spp*. δίνεται ως *P. pleurobipunctatus*. Αρκετά ακόμη, είδη σπονδυλόζωων, πλην των ψαριών, έχουν αξιολογηθεί ως Άλλα και Ελληνικά σημαντικά είδη. Τα είδη Canis lupus (λύκος) και Capreolus capreolus (ζαρκάδι), είναι απειλούμενα ελληνικά και χαρακτηρίζονται «τρωτά». Το είδος *Scardinius acarnanicus* είναι ενδημικό της Ελλάδας. Εκτός από τα είδη του γένους *Apodemus* και το είδος *Scardinius acarnanicus*, τα υπόλοιπα είδη προστατεύονται από τη Σύμβαση της Βέρνης. Η αγριόγατα *Felis silvestris* αναφέρεται επίσης στη Σύμβαση CITES. Επιπρόσθετα, τα περισσότερα από αυτά τα είδη προστατεύονται από την ελληνική νομοθεσία (Προεδρικό Διάταγμα 67/81) (εξαιρέσεις αποτελούν τα εξής: *Rana ridibunda, Vipera ammodytes*, τα δύο taxa *Apodemus, Martes foina, Felis silvestris, C. capreolus* και τα κυπρινοείδη *Leuciscus svallize* και *Scardinius acarnanicus*). Τα είδη *Bufo viridis, Rana dalmatina, Canis lupus, Felis silvestris* και *C. capreolus* περιλαμβάνονται στο πρόγραμμα CORINE-Biotopes. Οι σαύρες *Alygyroides nigropunctatus* και *Podarcis erhardii*, καθώς και τα δύο taxa *Apodemus*, είναι βαλκανικά ενδημικά και όλα αναφέρονται σε δύο ακόμη διεθνή έγγραφα: τον Κόκκινο Κατάλογο της IUCN (1988) και τον Κατάλογο της UNEP. Για όλους αυτούς τους λόγους, τα σχετικά taxa δέχονται αξιολόγηση D. Σημαντικά ασπόνδυλα που απαντώνται στην περιοχή έχουν αξιολόγηση D και προστατεύονται από την ελληνική νομοθεσία (Προεδρικό Διάταγμα 67/81) [10].

Τα κυριότερα είδη πανίδας που απαντώνται στην περιοχή μελέτης και ευρύτερα είναι: ο Λαγός, η Αλεπού, το Κουνάβι, το Τσακάλι, ο Λύκος, ο Ασβός, το Αγριογούρουνο και ο Σκαντζόχοιρος [1].

<u>*Ειδικότερα όσον αφορά την Ορνιθοπανίδα*</u>

Στη ΖΕΠ «Κοιλάδα Αχελώου και Όρη Βάλτου» (GR2110006) συνολικά 58 είδη πτηνών έχει αναφερθεί ότι απαντούν στην περιοχή, σύμφωνα με την καταγεγραμμένη πληροφορία στο ΤΕΔ 2019, εκ των οποίων 32 περιλαμβάνονται στο Παράρτημα Ι της Οδηγίας 2009/147/ΕΚ. Από αυτά, τα 36 είδη και 3 είδη επιπλέον, που δεν αναφέρονται στο Τυποποιημένο Έντυπο Δεδομένων (ΤΕΔ), εντάσσονται στο προστατευτέο αντικείμενο της μελέτης ως σημαντικά, συμπεριλαμβανομένων των ειδών χαρακτηρισμού [5].

Τα είδη χαρακτηρισμού της ΖΕΠ είναι τέσσερα: Όρνιο (*Gyps fulvus*), Σταυραετός (*Hieraaetus pennatus*), Μαύρος Δρυοκολάπτης (*Dryocopus martius*) και Λευκονώτης (*Dendrocopos leucotos*).

Με βάση το ΤΕΔ της περιοχής (2019) η συνολική αξιολόγηση του βαθμού διατήρησης για 8 είδη-τύπους είναι Α, για 29 είδη-τύπους είναι Β, για 6 είδη-τύπους είναι C, ενώ για 1 είδος δεν έχει γίνει αξιολόγηση του βαθμού διατήρησης. Η ποιότητα δεδομένων για 22 είδη-τύπους είναι DD-Ανεπαρκής δεδομένο που συνηγορεί στο ότι απαιτούνται πιο στοχευμένα και αποτελεσματικά συστήματα παρακολούθησης για τα είδη αυτά. Όσον αφορά τα 3 είδη του προστατευτέου αντικειμένου εκτός ΤΕΔ προκύπτει βαθμός διατήρησης Β και C για 2 από αυτά, ενώ για το τρίτο δεν υπάρχει αξιολόγηση [5].

ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΤΟΥ ΟΡΝΙΟΥ ΣΤΑ ΟΡΗ ΒΑΛΤΟΥ - ΕΜΠΕΣΟΣ

Το Όρνιο (*Gyps fulvus*) είναι το πιο κοινό και διαδεδομένο είδος από τα τέσσερα πτωματοφάγα είδη γύπα της Ελλάδας (Handrinos & Akriotis 1997). Παρόλα αυτά ο εθνικός πληθυσμός του είδους έχει υποστεί πλέον δραματική μείωση η οποία άρχισε να παρατηρείται τις τελευταίες τρεις δεκαετίες του 20ου αιώνα (Handrinos & Akriotis 1997). Κύριες αιτίες της μείωσης του πληθυσμού του είδους είναι η παρακμή της νομαδικής κτηνοτροφίας και η χρήση των δηλητηριασμένων δολωμάτων που προορίζονται για την καταπολέμηση των σαρκοφάγων θηλαστικών που θεωρούνται επιβλαβή για τα κτηνοτροφικά ζώα (Handrinos & Akriotis 1997). Την τρέχουσα δεκαετία το είδος έχει πλέον απομείνει σε Θράκη (τέσσερις αποικίες με 10-12 ζευγάρια), Αιτωλοακαρνανία (τρεις αποικίες με 10-15 ζευγάρια), Κυκλάδες (μια αποικία σε Νάξο/Ηρακλειά με 9-10 ζευγάρια) και Κρήτη (78 αποικίες με 250-340 ζευγάρια και συνολικά 900-1000 άτομα). **Η αποικία στα Όρη Βάλτου αποτελεί μια από τις τρεις αποικίες που διατηρεί το είδος στην Αιτωλοακαρνανία (Δυτική Ελλάδα).** Κατά τα παλαιότερα έτη η περιοχή διατηρούσε αναπαραγωγικό πληθυσμό Όρνιων, όμως σύμφωνα με δεδομένα του 2003 το είδος θεωρούνταν ως εξαφανισμένο (Πορτόλου και συν. 2009) [11].

Κατά την αναπαραγωγική περίοδο του 2022 καταγράφηκαν 12 ζευγάρια από τα οποία τα 10 ζευγάρια καταγράφηκαν να επωάζουν αυγό ενώ τα 2 ζευγάρια παρατηρήθηκαν μόνο να κατασκευάζουν φωλιά, δίχως να πραγματοποιηθεί επώαση αυγού. **Οι περιοχές φωλιάσματος ήταν οι αντίστοιχες τρεις περιοχές με αυτές του προηγούμενου έτους στο νότιο τμήμα της περιοχής «Όρη Βάλτου» (GR2310012), στην ευρύτερη περιοχή του οικισμού Εμπεσός.** Σε σύγκριση με την αναπαραγωγική περίοδο του 2021 καταγράφηκε αύξηση 25% του αναπαραγόμενου πληθυσμού. Αναφορικά με την πληθυσμιακή τάση του είδους αυτή ήταν παρόμοια και στα δύο έτη και οι μεγαλύτεροι πληθυσμοί καταγράφηκαν τους μήνες Μάρτιο-Απρίλιο και Σεπτέμβριο και οι μικρότεροι τους θερινούς μήνες [11].

Υπάρχουν σημαντικά είδη ορνιθοπανίδας, κυρίως αρπακτικών που χρησιμοποιούν ως ενδιαίτημα την περιοχή μελέτης. Τα όρη Βάλτου, τα Ακαρνανικά όρη, όπως και η περιοχή μελέτης είναι τόποι αναπαραγωγής πτηνών μεγάλης οικολογικής σημασίας, τόσο για την Ελλάδα, όσο και για την υπόλοιπη Ευρώπη. Η ύπαρξη της σπάνιας και ποικίλης πανίδας (θηλαστικά, αμφίβια, ερπετά) αυξάνει ακόμη περισσότερο την οικολογική αξία της περιοχής [1].

Χλωρίδα

Για τον χλωριδικό κατάλογο της περιοχής αντλούνται στοιχεία και από το Προσωρινό Διαχειριστικό Σχέδιο Βόσκησης Δήμου Αμφιλοχίας και κατωτέρω παρατίθενται είδη τα οποία εντοπίστηκαν στην περιοχή μελέτης από την Ομάδα μελέτης.

Η συνολική περιοχή που πραγματεύεται το διαχειριστικό σχέδιο περιλαμβάνει δάση, δασικές και χορτολιβαδικές εκτάσεις. Σύμφωνα με τον Ντάφη (1973), η περιοχή κατατάσσεται στις εξής ζώνες βλάστησης:

- Η παραλιακή και λοφώδης περιοχή στην ευμεσογειακή ζώνη βλάστησης Quercetalia ilicis και την υποζώνη Quercion ilicis.

- Η λοφώδης και ημιορεινή ζώνη στην παραμεσογειακή ζώνη βλάστησης των φυλλοβόλων δασών (Quercetalia pubescentis) και στις υποζώνες Ostryo carpinion και Quercion confertae.
- Οι υψηλότερες περιοχές στην ζώνη βλάστησης των παραμεσογειακών κωνοφόρων (Fagetalia) με την υποζώνη της υβριδογενούς ελάτης στις πλέον υψηλές περιοχές και την υποζώνη Quercetum montanum, που ανήκει στη ζώνη Quercetalia pubescentis στα χαμηλότερα σημεία, η οποία είναι και η πιο κοινή στην ευρύτερη περιοχή μελέτης [1].

1. **Κατηγορία θαμνώνων αείφυλλων πλατύφυλλων ειδών**

Η κατηγορία των θαμνώνων αείφυλλων πλατύφυλλων ειδών συναντάται ιδιαίτερα στις νότιες και νοτιοανατολικές εκθέσεις, σε υποβαθμισμένες περιοχές. Επίσης, διακρίνονται και κατά ομάδες και σε μικρά υψώματα, ανάμεσα από γεωργικές καλλιέργειες.

Ανάλογα με τις ζώνες βλάστησης από τις χαμηλότερες προς τις υψηλότερες θέσεις τα επικρατέστερα είδη δένδρων και θάμνων σε κάθε υποζώνη είναι: *Quercus coccifera, Arbutus unedo, Phillyrea latifolia, Pistacia lentiscus, Myrtus communis, Phlomis fruticosa, Olea europea ssp. oleaster, Anthyllis hermanniae, Arbutus andrachne, Asparagus acutifolius, Calicotome vilosa, Carpinus orientalis, Cercis siliquastrum, Cistus creticus ssp. creticus, C. salvifolius,Clematis flammula, Clematis vitalba, Colutea arborescens, Erica arborea, E. manipuliflora, Carpinus orientalis, Fraxinus ornus, Juniperus oxycedrus, Laurus nobilis, Paliurus spina-christi, Pistacia terebinthus, Pyrus spinosa, Quercus pubescens, Phus coriaria, Rubia peregrina, Sarcopoterium spinosum, Spartium junceum,* κ.ά. (Ομάδα μελέτης). Στον υπόφορο τα κυριαρχούντα ποώδη είδη είναι: *Anthoxanthum odoratum, Dactylis glomerata, Origanum vulgare ssp. vulgare, Acinos arvensis, Agrostis capillaris, Allium spp, Anthemis arvensis ssp. arvensis, Asperula purpurea ssp. purpurea, Asphodelus ramosus, Asplenium ceratach, Avena barbata ssp. barbata, Brachypodium sylvaticum ssp. sylvaticum, B. distachyon, Briza maxima, Bromus arvensis, B. intermedius, Bupleurum flavum, Capsella rubella, Cichorium intybus, Convolvulus elegantissimus, Coridothymus capitatus, Crepis neglecta ssp. neglecta, Fumana procumbens, Gallium setaceum, Helianthemum nummularium ssp. nummularium, Hippocrepis emerus ssp. emeroides, Hordeum murinum ssp. murinum, Linum trigynum, Lolium perenne, Medicago minima, Melica ciliata, Micromeria Juliana, Phleum subulatum, Poa bulbosa, P. bulbosa ssp. bulbosa, Psoralea bituminosa, Pteridium aquilinum, Staehelina uniflosculosa, Stipa bromoides, S. capensis, Teucrium capitatum, Trifolium angustifolium, T. bocconei, T. campestre, T. fragiferum, T. scabrum, T. squamosum, T. sylvaticum, Vicia tenuifolia ssp. tenuifolia, Cruncianella macrostachya, Dittrichia viscosa, Geranium lucidum, Medicago lupulina, Sanguisorba minor ssp. minor*, κ.ά. [1].

2. **Κατηγορία μερικώς δασοσκεπών εκτάσεων**

Οι μερικώς δασοσκεπείς εκτάσεις συναντώνται και στις τρεις υψομετρικές ζώνες (πεδινή, ημιορεινή και ορεινή) και κυριαρχούνται από δασικά δενδρώδη είδη (ύψους> 3μ.) με κάλυψη μέχρι 40%, ενώ ο υπόροφος αποτελείται από ποώδη ή θαμνώδη ή και μικτή βλάστηση.

Στον ανώροφο επικρατούν είδη δρυός, π.χ. *Quercus ithaburensis subsp. macrolepis Q. frainetto, Q. pubescens, Q. cerris Q. ilex*, κ.ά., ενώ στον υπόροφο διάφορα είδη θάμνων, π.χ. *Quercus coccifera, Phillyrea latifolia, Myrtus communis, Arbutus unedo, Erica arborea, Pistacia lentiscus, P. terebinthus, Calicotome villosa, Carpinus orientalis, Cistus creticus ssp. creticus, Juniperus oxycedrus, Anthyllis hermanniae, Arbutus andrachne, Asparagus acutifolius, Cercis siliquastrum, Cistus salviifolius, Clematis flammula, C. vitalba, Colutea arborescens, Crataegus monogyna var. monogyna, Fraxinus ornus, Hedera helix, Laurus nobilis, Olea europaea ssp. oleaster, Phlomis fruticosa, P. samia, Prunus spinosa, Pyrus spinosa, Erica sp.*, κ.ά., καθώς και ποώδη φυτά όπως τα *Origanum vulgare ssp. vulgare, Dactylis glomerata, Cistus creticus ssp. creticus, Lolium perenne, Trifolium pratense, Pteridium aquilinum, Anthoxanthum odoratum, Aegilops triuncialis, Agrostis capillaries, Astragalus angustifolius, Avena barbata ssp. barbata, Brachypodium sylvaticum ssp. sylvaticum, B. distachyon, B. pinnatum, Briza maxima, Bromus intermedius, B. sterilis, Capsella bursa-pastoris, C. rubella, Carex distachya, Chrysopogon gryllus, Cistus creticus ssp. creticus, Clinopodium vulgare, Convolvulus elegantissimus, Coridothymus capitatus, Crepis neglecta ssp. neglecta, Cynosurus echinatus, Dorycnium hirsutum, Fumana procumbens, Galium mollugo agg., Galium setaceum, Geranium lucidum,. Hippocrepis ciliate, H. species, Hordeum murinum ssp. murinum, Hypericum perforatum, Lotus corniculatus, Malva neglecta, Medicago lupulina, M. minima, Onobrychis Montana, O. montana ssp. macroparpa, Phleum subulatum, Poa bulbosa, P. memoralis, Psoralea bituminosa, Ranunculus psilostachys, Rostraria litorea, Sanguisorba minor ssp. minor, Smilax aspera, Stipa bromoides, S. capensis, Teucrium capitatum, Trifolium angustifolium, T. campestre, T. fragiferum ssp. fragiferum, T. nigrescens ssp. Nigrescens, T. scabrum, T. squamosum, T. squarrosum, T. sylvaticum, Veronica chamaedrys ssp. chamaedrys, Vicia tenuifolia ssp. tenuifolia, Viola alba, Vulpia ciliate, Campanula patula ssp. Patula,* κ.ά. [1].

3. **Κατηγορία χορτολιβαδικών εκτάσεων (ποολίβαδα)**

Οι χορτολιβαδικές εκτάσεις καλύπτονται με ποώδη βλάστηση σε ποσοστό τουλάχιστον 85%. Σ' αυτές εντάσσονται και οι παραποτάμιες χορτολιβαδικές εκτάσεις.

Τα κυριότερα είδη των αγρωστωδών (πολυετή ή ετήσια) που συναντώνται στις εκτάσεις αυτές, ανάλογα με την υψομετρική ζώνη, τη γεωγραφική θέση και τον τύπο εδάφους, είναι τα παρακάτω**:** *Origanum vulgare ssp. vulgare, Dactylis glomerata, Cistus creticus ssp. creticus, Lolium perenne, Trifolium pratense, Pteridium aquilinum, Anthoxanthum odoratum, Aegilops triuncialis, Agrostis capillaries, Astragalus angustifolius, Avena barbata ssp. barbata, Brachypodium sylvaticum ssp. sylvaticum, B. distachyon, B. pinnatum, Briza maxima, Bromus intermedius, B. sterilis, Capsella bursa-pastoris, C. rubella, Carex distachya, Chrysopogon gryllus, Cistus creticus ssp. creticus, Clinopodium vulgare, Convolvulus elegantissimus, Coridothymus capitatus, Crepis neglecta ssp. neglecta, Cynosurus echinatus, Dorycnium hirsutum, Fumana procumbens, Galium mollugo agg., Galium setaceum, Geranium lucidum,. Hippocrepis ciliate, H. species, Hordeum murinum ssp. murinum, Hypericum perforatum, Lotus corniculatus, Malva neglecta, Medicago lupulina, M. minima, Onobrychis montana, O. montana ssp. macroparpa, Phleum subulatum, Poa bulbosa, P. memoralis, Psoralea bituminosa, Ranunculus psilostachys, Rostraria litorea, Sanguisorba minor ssp. minor, Smilax*

aspera, Stipa bromoides, S. capensis, Teucrium capitatum, Trifolium angustifolium, T. campestre, T. fragiferum ssp. fragiferum, T. nigrescens ssp. nigrescens, T. scabrum, T. squamosum, T. squarrosum, T. sylvaticum, Veronica chamaedrys ssp. chamaedrys, Vicia tenuifolia ssp. tenuifolia, Viola alba, Vulpia ciliate, Campanula patula ssp. patula, κ.ά. [1].

3.5 Κτηνοτροφική δραστηριότητα και χρήση βοσκοτόπων

Σύμφωνα με τα στοιχεία του Προσωρινού Διαχειριστικού Σχεδίου Βόσκησης του Δήμου Αμφιλοχίας, το οποίο καλύπτει το σύνολο του Δήμου και περιλαμβάνει και τη Δημοτική Ενότητα Ινάχου (περιοχή μελέτης), το ζωικό κεφάλαιο ανέρχεται σε 34.162,4 Μεγάλες Ζωικές Μονάδες (ΜΖΜ), που αντιστοιχούν σε 181.572 κεφαλές ζώων. Το μεγαλύτερο ποσοστό αφορά πρόβατα, τα οποία αποτελούν περίπου το 63% του συνολικού ζωικού κεφαλαίου και βόσκουν κυρίως σε ποολίβαδα και εγκαταλειμμένες γεωργικές εκτάσεις κοντά στους οικισμούς. Από την ανάλυση 28 ερωτηματολογίων προκύπτει ότι οι κτηνοτροφικές εκμεταλλεύσεις είναι κατά κύριο λόγο μη μετακινούμενες, με τα ζώα να παραμένουν στην περιοχή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Η βόσκηση πραγματοποιείται σχεδόν συνεχώς, με εξαίρεση σύντομες περιόδους τον χειμώνα και το καλοκαίρι, κατά τις οποίες τα ζώα μετακινούνται σε γεωργικές εκτάσεις ή τρέφονται σε ιδιόκτητα χωράφια. Ιδιαίτερα σημαντικό εύρημα αποτελεί το γεγονός ότι σχεδόν όλοι οι κτηνοτρόφοι χρησιμοποιούν συμπληρωματική διατροφή (σανό και κυρίως καρπούς) καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, ακόμη και όταν τα ζώα βόσκουν. Η πρακτική αυτή επιτρέπει τη διατήρηση υψηλού ζωικού φορτίου πέραν της φυσικής βοσκοϊκανότητας των εκτάσεων. Η βοσκοφόρτωση υπερβαίνει σημαντικά τη βοσκοϊκανότητα (3,1 ΜΖΜ/ha έναντι 2,1 ΜΖΜ/ha), γεγονός που υποδηλώνει γενικευμένη υπερβόσκηση και οδηγεί σε υποβάθμιση των βοσκοτόπων, ιδιαίτερα των δασολίβαδων της πεδινής ζώνης (έως 600 m), όπου εντοπίζεται το μεγαλύτερο ποσοστό των τύπων βλάστησης. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός, ότι τα θαμνολίβαδα, παρά την κακή λιβαδική κατάσταση και τα αβαθή τους εδάφη, συνεχίζουν να είναι αρκετά παραγωγικά προφανώς εξαιτίας της υψηλής παραγωγικότητας των θάμνων και ιδιαίτερα του πουρναριού. Παράλληλα, στην περιοχή έχει κατασκευαστεί σημαντικός αριθμός ομβροδεξαμενών (ποτίστρες), οι οποίες καλύπτουν σε μεγάλο βαθμό τις ανάγκες των ζώων για νερό. Ιδιαίτερα στη Δημοτική Ενότητα Ινάχου παρατηρείται αυξημένη συγκέντρωση τέτοιων υποδομών, γεγονός που διευκολύνει τη χωρική επέκταση της βόσκησης και ενισχύει την πρόσβαση των ζώων σε ευρύτερες περιοχές [1].

Η έκταση της περιοχής υποδεικνύει, ωστόσο, ότι οι υφιστάμενες υποδομές δεν επαρκούν πλήρως, ενώ στο πλαίσιο του Οριστικού Διαχειριστικού Σχεδίου Βόσκησης προβλέπεται η ενίσχυση των έργων ποτισμού, με την κατασκευή νέων ομβροδεξαμενών και την ένταξη σχετικών παρεμβάσεων σε μελλοντικές προγραμματικές περιόδους. Παρά το γεγονός ότι τα συστήματα εκτροφής χαρακτηρίζονται ως εκτατικά, η συνδυασμένη επίδραση της υψηλής βοσκοφόρτωσης, της συνεχούς βόσκησης και της χρήσης συμπληρωματικών ζωοτροφών υποδηλώνει ότι στην πράξη παρουσιάζουν χαρακτηριστικά ημιεντατικής διαχείρισης. Τα παραπάνω στοιχεία αποτυπώνουν τη γενική εικόνα της βόσκησης στην ευρύτερη περιοχή και παρέχουν το απαραίτητο πλαίσιο για την κατανόηση των μεταβολών της βλάστησης που αναλύονται στη συνέχεια [3].

Η παραπάνω εικόνα της κτηνοτροφικής δραστηριότητας συνδέεται άμεσα με τον τρόπο αξιοποίησης των βοσκοτόπων, καθώς η επίδραση της βόσκησης δεν εξαρτάται μόνο από τον αριθμό των ζώων, αλλά και από τη συμπεριφορά τους κατά τη βόσκηση. Τα ζώα ασκούν πίεση στη βλάστηση μέσω της κατανάλωσης της βοσκήσιμης ύλης, του ποδοπατήματος και της μετακίνησής τους στον χώρο, ενώ η ένταση και η μορφή της πίεσης διαφοροποιούνται ανάλογα με την επιλεκτικότητα, τη συχνότητα και την περίοδο βόσκησης. Παράλληλα, διαφορετικά είδη ζώων αξιοποιούν τη βλάστηση με διαφορετικό τρόπο. Τα βοοειδή προτιμούν κυρίως ποώδη βλάστηση, οι αίγες αξιοποιούν σε μεγαλύτερο βαθμό ξυλώδη και θαμνώδη είδη, ενώ τα

πρόβατα εμφανίζουν ενδιάμεση συμπεριφορά. Επιπλέον, η κατανομή των ζώων στον χώρο επηρεάζεται από παράγοντες όπως η απόσταση από το νερό, η τοπογραφία και τα χαρακτηριστικά της βλάστησης, με αποτέλεσμα η βόσκηση να κατανέμεται ανομοιόμορφα εντός του λιβαδιού [12].

3.6 Λιβαδικοί τύποι/ταξινόμηση βοσκοτόπων

Σε συνέχεια των παραπάνω, για την κατανόηση της χωρικής διαφοροποίησης της βόσκησης και της επίδρασής της στη βλάστηση, απαιτείται η ταξινόμηση των βοσκήσιμων γαιών σε επιμέρους λιβαδικούς τύπους. Σύμφωνα με το ΦΕΚ 2331/Β/7-7-2017, οι βοσκήσιμες γαίες ταξινομούνται με βάση τη φυσιογνωμία και τη γενική όψη της λιβαδικής βλάστησης (τύποι λιβαδικής βλάστησης, σύμφωνα με την επιστήμη της Λιβαδοπονίας) στις ακόλουθες κατηγορίες:

1) **Ποολίβαδα** (χορτολιβαδικές εκτάσεις στις οποίες επικρατούν τα ποώδη φυτά με ποσοστό κάλυψης του εδάφους > 85% και πυκνότητα ξυλώδους βλάστησης <10%).

2) **Φρυγανολίβαδα** (εκτάσεις στην ξηροθερμική ζώνη της χώρας, στις οποίες κυριαρχούν τα φρύγανα, δηλ. ημίθαμνοι − Κύρια είδη φρύγανων είναι η αστοιβίδα *Sarcopoterium spinosum*), η ασφάκα (*Phlomis fruticosa*),η γαλατοστοιβιά (*Euphorbia acanthothamnos*), το θυμάρι (*Corydothymus capitatus*) και η λαδανιά (*Cistus spp.*).

3) **Θαμνολίβαδα** (εκτάσεις όπου κυριαρχούν οι θάμνοι).

4) **Δασολίβαδα** ή μερικώς δασοσκεπή λιβάδια (εκτάσεις που καλύπτονται από δασικά δενδρώδη είδη (ύψος> 3μ.) στον ανώροφο με κάλυψη μέχρι 40% και από ποώδη ή ξυλώδη ή μικτό υπόροφο) [9].

4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ ΕΥΡΕΙΑ ΚΛΙΜΑΚΑ-ΕΠΙΠΕΔΟ Α

Σε πρώτο επίπεδο (ευρεία χωρική κλίμακα), εξετάστηκαν επιλεγμένες κατηγορίες CORINE Land Cover που σχετίζονται με λιβαδικούς και ημιφυσικούς τύπους κάλυψης (ενδεικτικά οι κωδικοί 231, 243, 321, 323, 324, 333), οι οποίοι συνδέονται λειτουργικά με τη βόσκηση. Για τα πολύγωνα αυτά υπολογίστηκαν οι ετήσιες μέσες τιμές των δεικτών NDVI και EVI για τον μήνα Οκτώβριο της περιόδου 2018–2024, με χρήση δεδομένων Sentinel-2 και επεξεργασία μέσω Google Earth Engine και το περιβάλλον της R. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε συγκριτική χαρτογραφική απεικόνιση του NDVI για τρία επιλεγμένα έτη (2018, 2021 και 2024), με χρήση δορυφορικής εικόνας μίας ημερομηνίας ανά έτος, με στόχο την οπτική αποτύπωση των μεταβολών σε χαρακτηριστικές χρονικές στιγμές.

Η επιλογή του Οκτωβρίου βασίστηκε στο γεγονός ότι αποτελεί μεταβατικό μήνα στη Μεσογειακή λεκάνη, κατά τον οποίο σηματοδοτείται η έναρξη της φθινοπωρινής υγρής περιόδου και ενεργοποιείται εκ νέου η βλαστητική δραστηριότητα πολλών σκληρόφυλλων και θαμνωδών ειδών, επιτρέποντας συγκρίσιμη διαχρονική αξιολόγηση. Το επίπεδο αυτό αποσκοπεί στην αποτύπωση της γενικευμένης διαχρονικής συμπεριφοράς της βλάστησης σε περιφερειακή κλίμακα, χωρίς άμεση ενσωμάτωση επιτόπιων δεδομένων έντασης βόσκησης, αλλά με έμφαση στη συνολική λειτουργική δυναμική των λιβαδικών οικοσυστημάτων.

Συμπληρωματικά, υπολογίστηκε ο δείκτης NDWI (Green–NIR) για τη διερεύνηση της επιφανειακής υδατικής συμπεριφοράς, καθώς και χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα βροχόπτωσης (precipitation), προκειμένου να εξεταστεί η πιθανή συσχέτιση των μεταβολών των δεικτών βλάστησης με την υδρολογική μεταβλητότητα της περιοχής.

4.1 Μεθοδολογία-βήματα επεξεργασίας εικόνων

4.1.1 Χρήση δορυφορικών εικόνων Sentinel-2 L2A

Sentinel-2 είναι μια ευρωπαϊκή αποστολή που χρησιμοποιεί πολυφασματική απεικόνιση ευρείας κλίμακας και υψηλής ανάλυσης. Αφιερωμένη στο ευρωπαϊκό πρόγραμμα Copernicus, η αποστολή υποστηρίζει επιχειρησιακές εφαρμογές κυρίως για υπηρεσίες εδάφους, συμπεριλαμβανομένης της παρακολούθησης της βλάστησης, του εδάφους και της υδατικής κάλυψης, καθώς και της παρατήρησης των εσωτερικών υδάτινων οδών και των παράκτιων περιοχών [13].

Οι δίδυμοι δορυφόροι πετούν στην ίδια τροχιά, αλλά έχουν φάσεις 180°, και οι πλήρεις προδιαγραφές της αποστολής έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν υψηλή συχνότητα επαναφοράς 5 ημερών στον Ισημερινό.

Τα προϊόντα δεδομένων του Sentinel διατίθενται συστηματικά και δωρεάν σε όλους τους χρήστες δεδομένων, συμπεριλαμβανομένου του γενικού κοινού, των επιστημονικών και εμπορικών χρηστών.

Η διαμόρφωση των φασματικών ζωνών της αποστολής Sentinel-2 προέκυψε ως αποτέλεσμα της διαβούλευσης με την κοινότητα των χρηστών κατά τη φάση του σχεδιασμού. Ο Sentinel-2 είναι εξοπλισμένος με ένα ωφέλιμο φορτίο οπτικών οργάνων που δειγματοληπτεί 13 φασματικές ζώνες, μεταξύ των οποίων:

- τέσσερις ζώνες στα 10 m
- έξι ζώνες στα 20 m
- τρεις ζώνες σε χωρική ανάλυση 60 m

Το πλάτος της τροχιακής σάρωσης είναι 290 km [13].

Οι δίδυμοι δορυφόροι Sentinel-2 παρέχουν δεδομένα εικόνας που συμβάλλουν σε μεγάλο βαθμό στις υπάρχουσες και τρέχουσες πολυφασματικές παρατηρήσεις.

Αυτοί οι δορυφόροι υποστηρίζουν μια ποικιλία υπηρεσιών και εφαρμογών που προσφέρονται από το Copernicus, όπως: παρακολούθηση γης, γεωπονία, διαχείριση κρίσεων, Χαρτογράφηση κινδύνων, ασφάλεια, δασοκομία, κλιματική αλλαγή, έλεγχος καταστροφών, θαλάσσιες και ανθρωπιστικές επιχειρήσεις αρωγής [13].

Τα ακόλουθα προϊόντα είναι διαθέσιμα στο χώρο δεδομένων:

PRODUCT TYPE	SPATIAL EXTENT	TEMPORAL EXTENT	VIEW ON BROWSER	DOCUMENTATION
Level 2A (*) Packed or Unpacked (original ESA product) (IAD)	Europe	March 2017 - Present	Browser	Documentation
Level 2A Packed or Unpacked (Product generated by CloudFerro using sen2cor processor) (IAD)	Random coverage based on user request	July 2015 - January 2023		Documentation
Level 1C Packed or Unpacked (IAD)	World	Jul 2015 - Present	Browser	Documentation
Level 1B (**) EUP (IAD)	World	Last two weeks		Documentation
Level 3 Quarterly Mosaics Packed or Unpacked (IAD)	World	(***) Jan 2022 - Present	Browser	Documentation
POD AUX_GNSSRD				Documentation
POD AUX_PROQUA				Documentation
POD AUX_POEORB (****)				Documentation

Εικόνα 1: Διαθεσιμότητα προϊόντων Sentinel-2 στο Copernicus Data Space· επιλέχθηκε το Level-2A (Bottom-of-Atmosphere reflectance) με χωρική κάλυψη Ευρώπης και χρονική διαθεσιμότητα από Μάρτιο 2017 έως σήμερα (πηγή: https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/sentinel-data/sentinel-2).

Κάθε προϊόν Sentinel-2 αποτελείται από περίπου 110x110 km σε χαρτογραφική γεωμετρία (προβολή UTM/WGS84). Η Γη υποδιαιρείται σε ένα προκαθορισμένο σύνολο πλακιδίων, που ορίζονται σε προβολή UTM/WGS84 και με βήμα 100 km. Ωστόσο, κάθε πλακίδιο έχει επιφάνεια 110x110 km² προκειμένου να παρέχεται μεγάλη επικάλυψη με τα γειτονικά [14].

Πιο συγκεκριμένα ο δορυφόρος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία ήταν ο **Sentinel-2 Level 2A Surface Reflectance.**

Το προϊόν επιπέδου 2A παρέχει ατμοσφαιρικά διορθωμένες εικόνες ανάκλασης επιφάνειας (SR), οι οποίες προέρχονται από τα σχετικά προϊόντα επιπέδου 1C. Η ατμοσφαιρική διόρθωση των εικόνων του Sentinel-2 περιλαμβάνει τη διόρθωση της σκέδασης των μορίων του αέρα (σκέδαση Rayleigh), της απορρόφησης και της σκέδασης των ατμοσφαιρικών αερίων, ιδίως του όζοντος, του οξυγόνου και των υδρατμών, καθώς και τη διόρθωση της απορρόφησης και της σκέδασης λόγω των σωματιδίων αερολύματος. Πρόσθετα προϊόντα εικόνας εξόδου επιπέδου 2A είναι ένας χάρτης οπτικού πάχους αερολυμάτων (AOT), ένας χάρτης υδρατμών (Vapour-WV) και ένας χάρτης ταξινόμησης σκηνής (Classification-SCL). Αυτά τα προϊόντα

εικόνας, καθώς και η Επιφανειακή Αντανάκλαση για τις διάφορες φασματικές ζώνες, επαναδειγματοληπτούνται σε διαφορετικές χωρικές αναλύσεις (10 μ, 20μ ή 60μ). Το προϊόν επιπέδου 2A θεωρείται ένα προϊόν ARD [14].

Βασική γραμμή επεξεργασίας Sentinel-2:

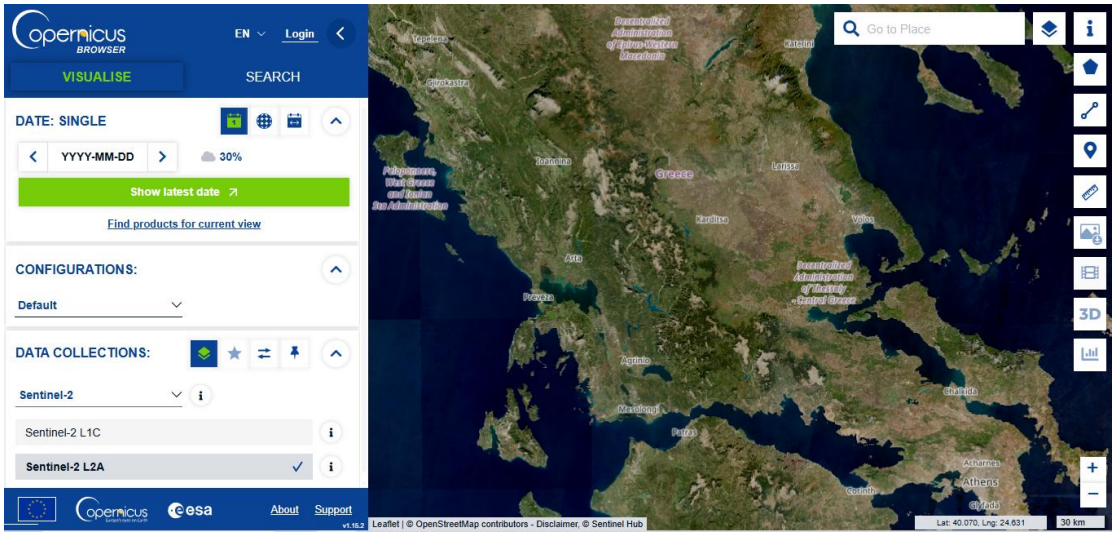
Η βασική γραμμή επεξεργασίας υποδεικνύει την έκδοση του αλγορίθμου επεξεργασίας που εφαρμόζεται στα ακατέργαστα δεδομένα για τη δημιουργία των προϊόντων Sentinel-2.

Τα προϊόντα που έχουν υποστεί εκ νέου επεξεργασία αναφέρονται ως Sentinel-2 Collection-1 και διαφέρουν από τα προϊόντα που παραδίδονται στο πλαίσιο των ονομαστικών εργασιών ανίχνευσης [14].

4.1.1.1 Προ επεξεργασία δορυφορικών εικόνων 18-24

Για τη λήψη των δορυφορικών εικόνων Sentinel-2 επιπέδου Level-2A χρησιμοποιήθηκε το Copernicus Browser, το οποίο αποτελεί διαδικτυακή εφαρμογή του European Space Agency στο πλαίσιο του Copernicus Data Space Ecosystem. Η πλατφόρμα λειτουργεί ως κεντρικός κόμβος για την πρόσβαση, την εξερεύνηση και τη διαχείριση δεδομένων παρατήρησης της Γης, παρέχοντας στους χρήστες τη δυνατότητα αναζήτησης, οπτικοποίησης και λήψης δορυφορικών δεδομένων [15].

Το Copernicus Browser βασίζεται στο EO Browser του Sentinel Hub και επιτρέπει την απεικόνιση, σύγκριση, ανάλυση και εξαγωγή δεδομένων Sentinel για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως η περιβαλλοντική παρακολούθηση, η διαχείριση φυσικών καταστροφών, ο αστικός σχεδιασμός και η γεωργία [15].



Εικόνα 2: Περιβάλλον του Copernicus Browser για προβολή και λήψη δορυφορικών δεδομένων (πηγή: https://dataspace.copernicus.eu/browser/)[16].

Οι εικόνες που λήφθηκαν αφορούσαν τα έτη 2018, 2021 και 2024 και συγκεκριμένα την περίοδο του Φθινοπώρου (μήνας Οκτώβριος) είναι οι κάτωθι:

S2A_MSIL2A_20181011T092031_N0500_R093_T34SEJ_20230816T050604

S2A_MSIL2A_20211005T092031_N0500_R093_T34SEJ_20230110T174923

S2B_MSIL2A_20241014T092029_N0511_R093_T34SEJ_20241014T121124

Η Ευρωπαϊκή επιτροπή διαστήματος έχει δημιουργήσει για εικόνες Sentinel το SNAP **Sentinel Application Platform**.

Η Brockmann Consult, η SkyWatch και η C-S αναπτύσσουν από κοινού μια κοινή αρχιτεκτονική για όλες τις εργαλειοθήκες Sentinel, η οποία ονομάζεται Πλατφόρμα Εφαρμογών Sentinel (SNAP) [17].

Το εργαλείο αυτό χρησιμοποιήθηκε για την προσαρμογή όλων των καναλιών της εικόνας σε 10 μέτρα. Σημειώνεται εδώ ότι δεν είναι όλα τα κανάλια σε 10 μέτρα ανάλυση επομένως κρίνεται σκόπιμη αυτή η προσαρμογή. Στη συνέχεια με την εντολή geometric έγινε resampling και χρησιμοποιώντας ένα κανάλι αναφοράς (πχ το 2) το οποίο είναι 10 μέτρα έγινε η αναπροσαρμογή και στα υπόλοιπα κανάλια και τέλος αποθηκεύεται ως αρχείο tif. Τέλος με την εντολή subset είναι δυνατόν να κοπεί η εικόνα ως προς τα κανάλια (κρατώντας τα κανάλια B2,B3,B4,B5,B6,B7,B8,B8A,B11,B12) και ως προς τα όρια της περιοχής μελέτης.

4.1.1.2 QGIS και απεικόνιση δεδομένων

Στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο QGIS, το οποίο είναι ένα δωρεάν λογισμικό ανοικτού κώδικα που επιτρέπει την δημιουργία, την επεξεργασία, την οπτικοποίηση, την ανάλυση και την δημοσίευση γεωχωρικών πληροφοριών.

Επίσης χρησιμοποιήθηκαν διάφορα γεωχωρικά δεδομένα για την απεικόνιση της περιοχής και κατ επέκταση την ανάλυσή της και μελέτης της.

Η παρούσα ανάλυση βασίζεται σε επιλεγμένες δορυφορικές εικόνες Sentinel-2 μίας συγκεκριμένης ημερομηνίας για τα έτη τον μήνα Οκτώβριο 2018, 2021 και 2024, με σκοπό τη συγκριτική οπτική αποτύπωση της χωρικής κατανομής του NDVI, ο οποίος ορίζεται κατωτέρω, σε χαρακτηριστικές χρονικές στιγμές. Η προσέγγιση αυτή δεν συνιστά ετήσιο σύνθετο προϊόν (annual composite), αλλά στιγμιαία απεικόνιση της βλάστησης, η οποία λειτουργεί συμπληρωματικά προς τη διαχρονική στατιστική ανάλυση που παρουσιάζεται σε επόμενο στάδιο. Στόχος της είναι η χαρτογραφική ανάδειξη των χωρικών διαφοροποιήσεων της φυτοκάλυψης μεταξύ των επιλεγμένων ετών.

Στη Μεσόγειο, τα ποώδη είδη και οι θάμνοι αυξάνονται σημαντικά από την αρχή της υγρής περιόδου τον Οκτώβριο έως τον Φεβρουάριο και μετά (τα πρώτα) αρχίζουν να ξεραίνονται [18]. Οπότε τον Οκτώβριο υπάρχει σημαντική αύξηση των δεικτών NDVI, EVI κλπ

Ο μήνας Οκτώβριος είναι καλός για την παρακολούθηση της βλάστησης. Σηματοδοτεί την έναρξη της περιόδου των βροχών στη λεκάνη της Μεσογείου [19]. Είναι ένας σημαντικός μήνας για την παρακολούθηση του οικοσυστήματος, καθώς στην ανατολική Μεσόγειο, συμπεριλαμβανομένης της Ελλάδας, σηματοδοτεί τη μετάβαση από τις ζεστές και ξηρές συνθήκες του καλοκαιριού στο πιο δροσερό και υγρό καθεστώς του χειμώνα [20]. Τα σκληρόφυλλα, οι θάμνοι και τα κωνοφόρα είδη, τα πιο κυρίαρχα είδη στα μεσογειακά οικοσυστήματα, έχουν πρωτογενή ή τουλάχιστον δευτερεύουσα φάση ανάπτυξης με την έναρξη των φθινοπωρινών βροχών τον Οκτώβριο που διαρκούν έως τον Νοέμβριο (κωνοφόρα είδη) ή τον Μάιο (σκληρόφυλλη βλάστηση).

NDVI- Κανονικοποιημένος δείκτης διαφοράς βλάστησης:

Ο γνωστός και ευρέως χρησιμοποιούμενος δείκτης NDVI-Normalized Difference Vegetation Index είναι ένας απλός αλλά αποτελεσματικός δείκτης για την ποσοτικοποίηση της πράσινης βλάστησης. Κανονικοποιεί τη σκέδαση των πράσινων φύλλων στα κοντινά υπέρυθρα μήκη κύματος με την απορρόφηση της χλωροφύλλης στα κόκκινα μήκη κύματος [21].

Το εύρος τιμών του NDVI είναι από -1 έως 1. Οι αρνητικές τιμές του NDVI (τιμές που πλησιάζουν το -1) αντιστοιχούν σε νερό. Οι τιμές κοντά στο μηδέν (-0,1 έως 0,1) αντιστοιχούν γενικά σε άγονες περιοχές από βράχο, άμμο ή χιόνι. Οι χαμηλές, θετικές τιμές αντιστοιχούν σε θάμνους και λιβάδια (περίπου 0,2 έως 0,4), ενώ οι υψηλές τιμές υποδηλώνουν εύκρατα και τροπικά τροπικά δάση (τιμές που πλησιάζουν το 1). Αποτελεί ένα καλό υποκατάστατο για τη ζωντανή πράσινη βλάστηση [21].

Ο κανονικοποιημένος δείκτης διαφοράς βλάστησης, συντομογραφικά NDVI, ορίζεται ως εξής:

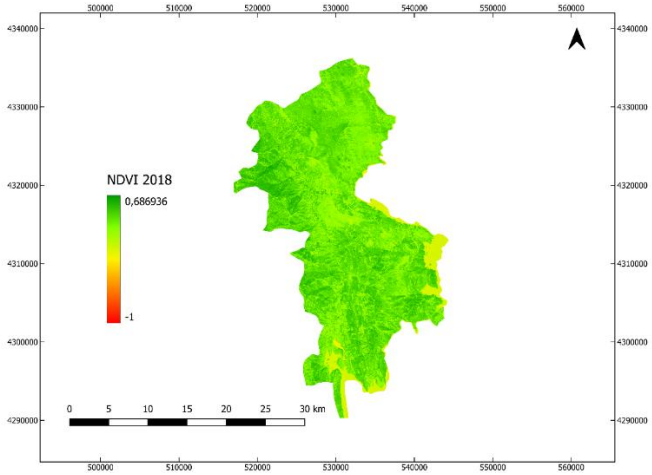
$$NDVI := \texttt{Index}(NIR, RED) = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}.$$

Για τον Sentinel-2, ο δείκτης υπολογίζεται όπως παρακάτω [21]:

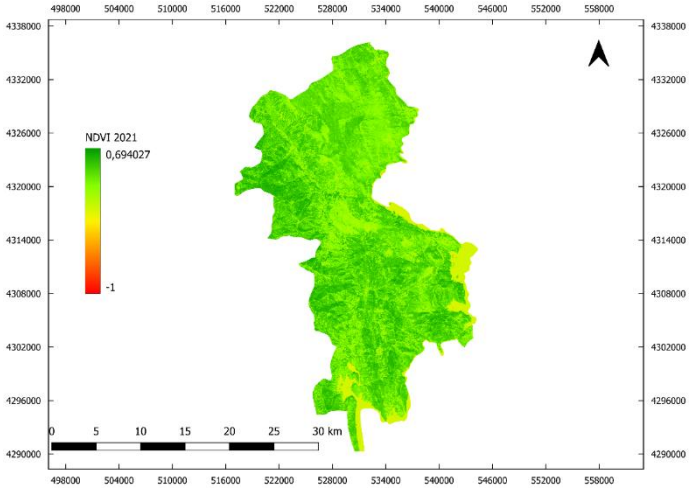
$$NDVI := \texttt{Index}(B8, B4) = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}.$$

Έχοντας επεξεργαστεί την δορυφορική εικόνα στο SNAP δημιουργείται ο δείκτης NDVI με τα κομμένα κανάλια (2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 8A, 11, 12). Χρησιμοποιώντας το Raster Calculator και εφαρμόζοντας το τύπο του NDVI (NIR - RED)/ (NIR + RED) προκύπτουν τα κάτωθι αποτελέσματα για την περιοχή όσον αφορά τα έτη 2018, 2021 και 2024 με σκοπό την απεικόνιση των δεδομένων.

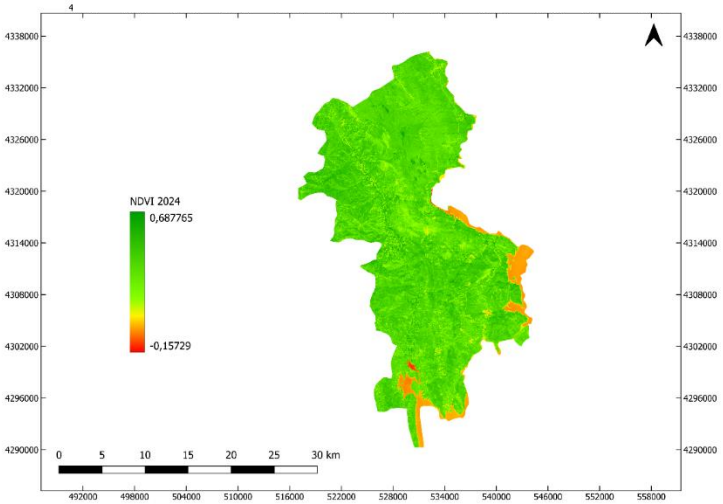
Οι παρακάτω χάρτες αντικατοπτρίζουν το συνολικό εύρος των τιμών NDVI για τα έτη 2018, 2021 και 2024, προσφέροντας μια γενική εικόνα της χωρικής κατανομής της βλάστησης στην περιοχή μελέτης, στην συνέχεια οι χάρτες εμφανίζουν τις τιμές NDVI με κατηγοριοποίηση των τιμών για τα έτη 2018, 2021 και 2024 και στον τελευταίο χάρτη ανιχνεύονται οι μεταβολές του NDVI στα διαστήματα 2018-2021 και 2021-2024.



Σχήμα 11: Εύρος τιμών NDVI για το έτος 2018.



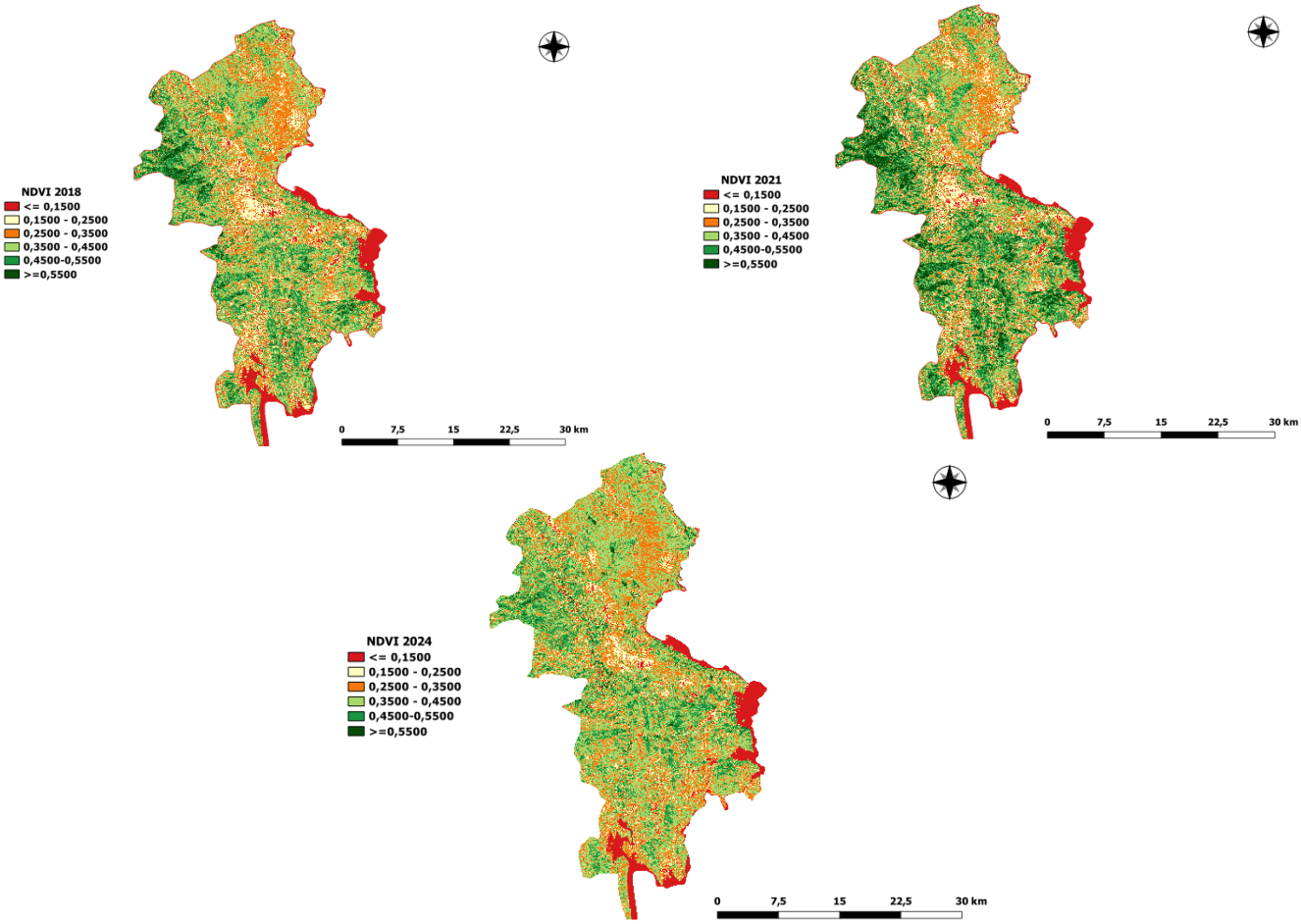
Σχήμα 12: Εύρος τιμών NDVI για το έτος 2021.



Σχήμα 13: Εύρος τιμών NDVI για το έτος 2024.

Αντίθετα, στους επόμενους χάρτες οι τιμές του NDVI έχουν κατηγοριοποιηθεί σε επιμέρους ζώνες, ώστε να εντοπίζονται ευκολότερα οι περιοχές με υψηλή ή χαμηλή φυτοκάλυψη. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει πιο στοχευμένη ανάλυση, καθώς αναδεικνύει τις εκτάσεις που

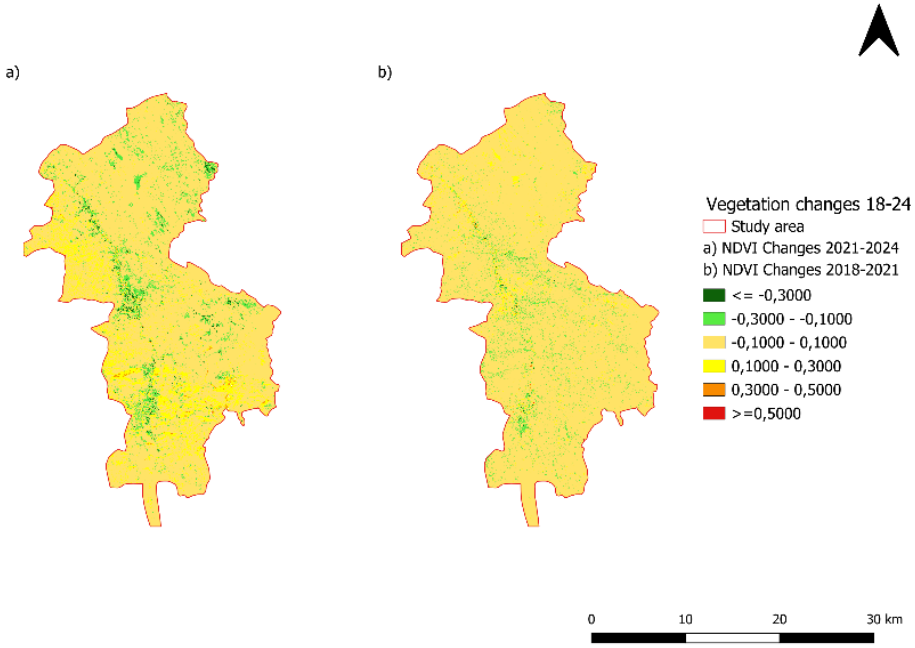
παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη μελέτη της βόσκησης και των διαχρονικών αλλαγών στη βλάστηση.



Σχήμα 14: Κατηγοριοποίηση τιμών NDVI για τα έτη 2018, 2021 και 2024.

Η οπτική σύγκριση των χαρτών NDVI για τις επιλεγμένες ημερομηνίες του Οκτωβρίου των ετών 2018, 2021 και 2024 καταδεικνύει διαφοροποιήσεις στη χωρική κατανομή της φυτοκάλυψης. Το 2021 παρατηρείται μεγαλύτερη έκταση περιοχών με υψηλές τιμές NDVI (κατηγορία ≥ 0,55) σε σχέση με το 2018, γεγονός που υποδηλώνει εντονότερη βλαστητική δραστηριότητα κατά τη συγκεκριμένη ημερομηνία.

Αντίθετα, το 2024 εμφανίζεται περιορισμός των ζωνών με πολύ υψηλές τιμές NDVI (>0,45) και μεγαλύτερη παρουσία ενδιάμεσων κατηγοριών, στοιχείο που υποδηλώνει διαφοροποίηση της βλαστητικής κατάστασης σε σχέση με το 2021. Οι μεταβολές αυτές αφορούν αποκλειστικά τη συγκεκριμένη ημερομηνία λήψης κάθε εικόνας και αποτυπώνουν τη χωρική δυναμική της βλάστησης κατά τον μήνα Οκτώβριο.



Σχήμα 15: Μεταβολές NDVI για τις περιόδους 2021–2024 (a) και 2018–2021 (b): Οι μπεζ αποχρώσεις δείχνουν ουδέτερες μεταβολές, ενώ οι πράσινες αντιστοιχούν σε αύξηση και οι πορτοκαλί/κόκκινες σε μείωση της βλάστησης.

Κατά την περίοδο 2018–2021 η βλάστηση εμφανίζει γενικά σχετική σταθερότητα, με κυριαρχία ουδέτερων μεταβολών NDVI (–0,10 έως +0,10) και περιορισμένες τοπικές αυξήσεις. Οι μεταβολές εντοπίζονται κυρίως σε επιμέρους χωρικές ενότητες και δεν παρουσιάζουν εκτεταμένη γεωγραφική συγκέντρωση.

Αντίθετα, κατά την περίοδο 2021–2024 παρατηρείται μεγαλύτερη χωρική έκταση θετικών μεταβολών NDVI, γεγονός που υποδηλώνει αύξηση της φυτοκάλυψης σε αρκετές ζώνες της περιοχής μελέτης. Παράλληλα, εντοπίζονται και τοπικές αρνητικές μεταβολές, γεγονός που καταδεικνύει ότι οι αλλαγές δεν είναι ομοιόμορφες. Η χωρική διαφοροποίηση των μεταβολών υποδηλώνει ετερογένεια στη δυναμική της βλάστησης.

4.1.1.3 Συσχέτιση CORINE Land Cover με τη βόσκηση

Η απογραφή των βοσκοτόπων στην Ελλάδα έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης τις τελευταίες δεκαετίες, με διαφορετικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις που συχνά οδηγούν σε αποκλίσεις ως προς την εκτιμώμενη έκταση και τα χαρακτηριστικά τους. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα συχνό στα μεσογειακά οικοσυστήματα και σχετίζεται με τη δυσκολία σαφούς διάκρισης μεταξύ δασών και δασικών εκτάσεων, καθώς και με την έντονη ετερογένεια του τοπίου. Παράγοντες όπως η μορφολογία του εδάφους, η ποιότητα των εδαφικών πόρων, οι μεταβολές στις χρήσεις γης, αλλά και η ποικιλομορφία της βλάστησης και των μικροκλιματικών συνθηκών συμβάλλουν στη δημιουργία ενός δυναμικού και μεταβαλλόμενου συστήματος. Επιπλέον, οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες, συχνά προσαρμοσμένες σε εποχιακές ανάγκες, επηρεάζουν σημαντικά τη δομή και τη χρήση των βοσκοτόπων. Από τη δεκαετία του 1980, το Ινστιτούτο Δασικών Ερευνών προχώρησε σε συστηματική καταγραφή των βοσκοτόπων, αρχικά μέσω φωτοερμηνείας και στη συνέχεια με την αξιοποίηση των Γεωγραφικών Συστημάτων

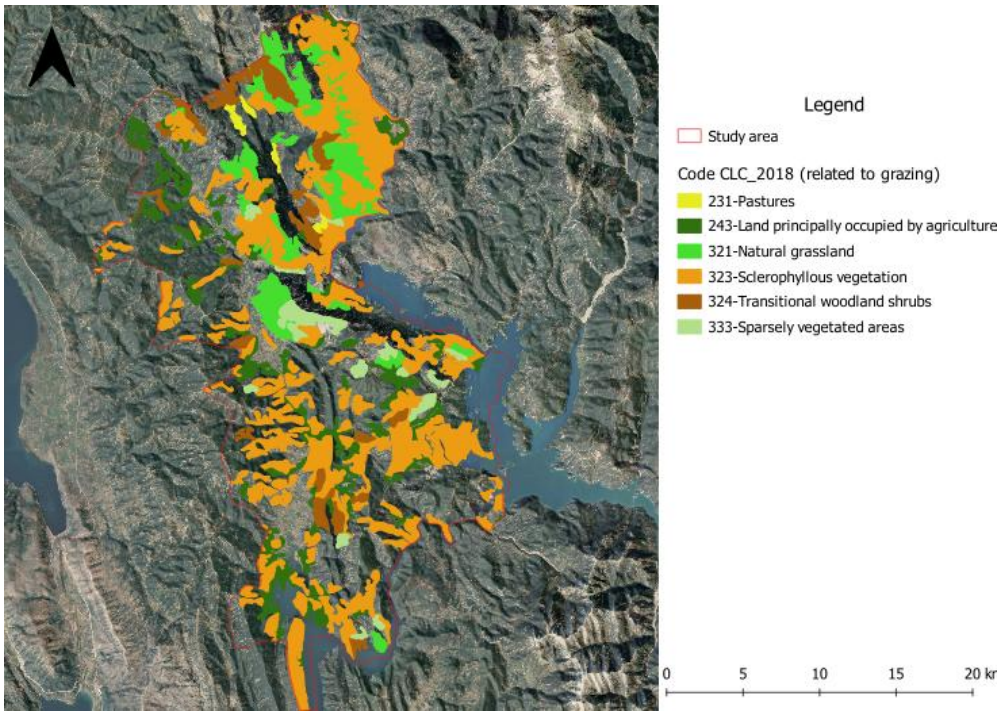
Πληροφοριών (Γ.Σ.Π.). Μια συνολική αποτίμηση των βασικών ζητημάτων και προκλήσεων που σχετίζονται με την απογραφή των βοσκοτόπων παρουσιάζεται στο πόρισμα της ομάδας εργασίας του ΓΕΩΤΕΕ (2014) [22].

Για την κατωτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων των δεικτών επιλέχθηκαν περιοχές του CORINE Land Cover 2018 και συγκεκριμένα οι κωδικοί που συσχετίζονται με τη βόσκηση. Το CORINE Land Cover 2018 (CLC2018) είναι ένα από τα σύνολα δεδομένων CORINE Land Cover (CLC) που παράγονται στο πλαίσιο της υπηρεσίας παρακολούθησης γης Copernicus Land Monitoring Service και αναφέρονται στην κατάσταση κάλυψης / χρήσης γης του έτους 2018. Η υπηρεσία CLC έχει μακρόχρονη κληρονομιά (παλαιότερα γνωστή ως «CORINE Land Cover Programme»), η οποία συντονίζεται από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος (ΕΟΠ). Παρέχει συνεπείς και θεματικά λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με την κάλυψη γης και τις αλλαγές στην κάλυψη γης σε ολόκληρη την Ευρώπη [23].

Η επιλογή των κατηγοριών χρήσεων γης βασίστηκε στη μεθοδολογία προηγούμενων μελετών που αξιοποιούν τα δεδομένα CORINE Land Cover (CLC) για τον εντοπισμό βοσκήσιμων γαιών [22]. Στη συγκεκριμένη μελέτη, οι κατηγορίες προσαρμόστηκαν στα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, περιλαμβάνοντας τους κωδικούς 231, 321, 323, 324, 333 και 243, οι οποίοι σχετίζονται με εκτάσεις δυνητικά κατάλληλες για βόσκηση.

Οι κωδικοί CLC 2018 που χρησιμοποιήθηκαν:

- 231-Pastures- Βοσκότοποι
- 243- Land principally occupied by agriculture- Εκτάσεις που καταλαμβάνονται κυρίως από την γεωργία
- 321-Natural Grasslands- Φυσικά λιβάδια
- 323-Sclerophyllous vegetation- Σκληρόφυλλη βλάστηση
- 324-Transitional woodland-shrub- Μεταβατικά δάση-θάμνοι
- 333-Sparsely vegetated areas- Εκτάσεις με αραιή βλάστηση



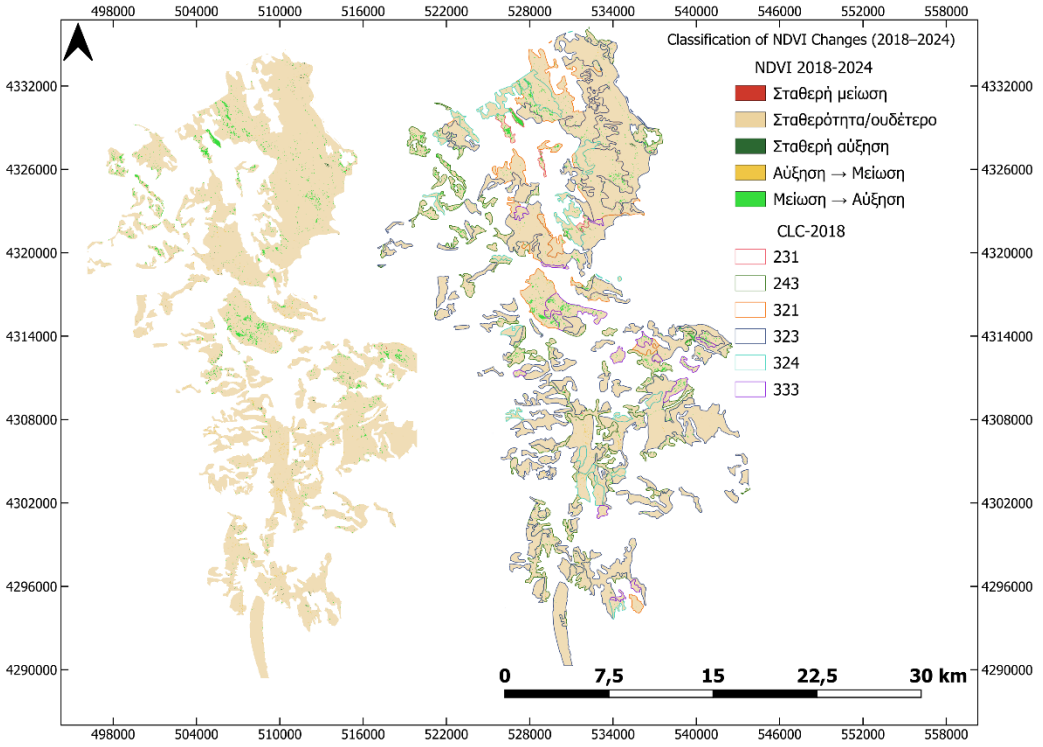
Σχήμα 16: Χρήσεις/καλύψεις γης της περιοχής μελέτης βάσει CORINE Land Cover 2018, με έμφαση σε κατηγορίες σχετικές με τη βόσκηση.

Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται στοιχεία σχετικά με το ελάχιστο-μέγιστο υψόμετρο, το μέσο υψόμετρο καθώς και για την έκταση των κωδικών CORINE Land Cover που έχουν απομονωθεί για την περιοχή μελέτης:

Πίνακας 7: Στατιστικά υψομέτρου (min, max, median) και συνολική επιφάνεια ανά κατηγορία CORINE Land Cover στην περιοχή μελέτης.

code_18	elev_min	elev_max	elev_median	Area_Ha_sum (ha)
321	132	1.771	964,39	4.492,79
324	128	1.714	562,94	2.698,94
333	132	1.570	714,45	1.080,38
231	673	1.054	947,00	224,31
243	131	1.295	386,39	5.070,42
323	129	1.526	407,15	20.389,50

Συμπερασματικά, οι κωδικοί CORINE Land Cover 321 – Φυσικά λιβάδια και 231 - Βοσκότοποι παρουσιάζουν τα μεγαλύτερα διάμεσα υψόμετρα ενώ αντιθέτως οι κωδικοί CORINE Land Cover – Εκτάσεις που καταλαμβάνονται κυρίως από την γεωργία και CORINE Land Cover 323 – Σκληρόφυλλη βλάστηση παρουσιάζουν τα χαμηλότερα διάμεσα υψόμετρα. Όσον αφορά τον κωδικό 323 – Σκληρόφυλλη βλάστηση έχει τη μεγαλύτερη συνολική έκταση 20.389 ha από όλους, με διάμεσο υψόμετρο 407 m, άρα απαντά κυρίως σε χαμηλές έως μεσαίες υψομετρικές ζώνες. Επίσης ο κωδικός CORINE Land Cover 321 – Φυσικά λιβάδια έχει το υψηλότερο μέγιστο υψόμετρο 1771 m και διάμεσο 964 m, δείχνοντας κυρίως ορεινές περιοχές. Παρότι έχει μέτρια έκταση 4492 ha, καλύπτει μεγάλο εύρος υψομέτρου.



Σχήμα 17: Χαρτογραφική απεικόνιση της μεταβολής του NDVI (2018–2024) ανά πολύγωνο, με κατηγοριοποίηση τάσεων και επικάλυψη κατηγοριών CORINE Land Cover 2018.

Η ανάλυση των διαχρονικών μεταβολών NDVI για την περίοδο 2018–2024 ανέδειξε διαφορετικά πρότυπα δυναμικής της βλάστησης εντός των βοσκήσιμων και ημιφυσικών εκτάσεων. Σε σημαντικό τμήμα των περιοχών παρατηρείται αρχικά μείωση του NDVI κατά την περίοδο 2018–2021 και στη συνέχεια αύξηση κατά την περίοδο 2021–2024 (κατηγορία "πρώτα μείωση, μετά αύξηση"). Το πρότυπο αυτό υποδηλώνει μεταβατική διακύμανση της βλαστητικής δραστηριότητας, η οποία ενδέχεται να σχετίζεται με διαφοροποιήσεις στην ένταση χρήσης γης, στη βοσκοφόρτωση ή στις κλιματικές συνθήκες. Παράλληλα, εντοπίζονται σποραδικές εκτάσεις με σταθερή αύξηση NDVI και περιορισμένες ζώνες με σταθερή μείωση, γεγονός που καταδεικνύει χωρική ετερογένεια στη δυναμική της φυτοκάλυψης. Ωστόσο, το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής χαρακτηρίζεται από ουδέτερη μεταβολή, στοιχείο που υποδηλώνει σχετική σταθερότητα της βλάστησης σε περιφερειακή κλίμακα.

Η ερμηνεία των προτύπων αυτών απαιτεί συνδυασμό με δεδομένα πεδίου και κλιματικά στοιχεία, προκειμένου να αποδοθούν με μεγαλύτερη βεβαιότητα τα πιθανά αίτια των παρατηρούμενων μεταβολών.

4.1.2 Εφαρμογή στο Google Earth Engine

Στην ανάλυση Επιπέδου Α εξήχθησαν από το Google Earth Engine (GEE) τιμές NDVI, EVI, NDWI και precipitation για τον μήνα Οκτώβριο κάθε έτους της περιόδου 2018–2024, για τα πολύγωνα των κατηγοριών CORINE Land Cover που εξετάζονται. Το Google Earth Engine αποτελεί πλατφόρμα ανάλυσης γεωχωρικών δεδομένων μεγάλης κλίμακας, η οποία επιτρέπει την επεξεργασία δορυφορικών χρονοσειρών και την εξαγωγή δεικτών τηλεπισκόπησης σε παγκόσμια κλίμακα [24].

Ο κώδικας 1 παρατίθεται στο Παράρτημα.

Το ανωτέρω εκτελέστηκε και για τους κατωτέρω δείκτες:

EVI-Ενισχυμένος Δείκτης Βλάστησης:

Ο EVI-Enhanced Vegetation Index χρησιμοποιείται σε περιοχές με πυκνή κάλυψη κομοστέγης, όπου ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI) είναι υψηλός και τα μπλε μήκη κύματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της ακρίβειας του NDVI, καθώς διορθώνουν τα σήματα υποβάθρου του εδάφους και τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις [25].

Το εύρος των τιμών του EVI είναι -1 έως 1, με την υγιή βλάστηση γενικά γύρω στο 0,20 έως 0,80.

Για τον Sentinel-2, ο δείκτης υπολογίζεται όπως παρακάτω [25]:

$$EVI = 2.5 \cdot (\frac{B8 - B4}{B8 + 6 \cdot B4 - 7.5 \cdot B2 + 1})$$

NDWI- Κανονικοποιημένος δείκτης διαφοράς νερού:

Το NDWI-Normalized Difference Water Index χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση των αλλαγών που σχετίζονται με την περιεκτικότητα σε νερό στα υδάτινα σώματα. Καθώς τα υδάτινα σώματα απορροφούν έντονα το φως στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα από το ορατό έως το υπέρυθρο, το NDWI χρησιμοποιεί πράσινες και εγγύς υπέρυθρες ζώνες για να αναδείξει τα υδάτινα σώματα. Είναι ευαίσθητο στις δομημένες εκτάσεις και μπορεί να οδηγήσει σε υπερεκτίμηση των υδάτινων σωμάτων. Ο δείκτης προτάθηκε από τον McFeeters, 1996 [26].

Sentinel-2 NDWI = (B03 - B08) / (B03 + B08)

Οι τιμές του δείκτη μεγαλύτερες από 0,5 αντιστοιχούν συνήθως σε υδάτινα σώματα. Η βλάστηση αντιστοιχεί συνήθως σε πολύ μικρότερες τιμές και οι δομημένες περιοχές σε τιμές μεταξύ μηδέν και 0,2 [26].

Φίλτρο Kalman

Οι χρονοσειρές που παράγονται από δορυφορικά δεδομένα ενδέχεται να παρουσιάζουν ελλιπείς τιμές ή θόρυβο, ακόμη και όταν η ανάλυση περιορίζεται σε συγκεκριμένη εποχική περίοδο. Παράγοντες όπως η νεφοκάλυψη, οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις και τα φίλτρα ποιότητας των αισθητήρων μπορούν να επηρεάσουν τη διαθεσιμότητα των παρατηρήσεων και να δημιουργήσουν ασυνέχειες στις χρονοσειρές τηλεπισκοπικών δεδομένων, γεγονός που καθιστά συχνά αναγκαία την εφαρμογή μεθόδων εξομάλυνσης ή ανακατασκευής των δεδομένων [27].

Σε περιορισμένο αριθμό περιπτώσεων δεν υπήρχε διαθέσιμη τιμή για συγκεκριμένο έτος λόγω των παραπάνω παραγόντων. Για τη συμπλήρωση αυτών των ελλείψεων εφαρμόστηκε διαδικασία παρεμβολής (imputation) με χρήση φίλτρου Kalman.

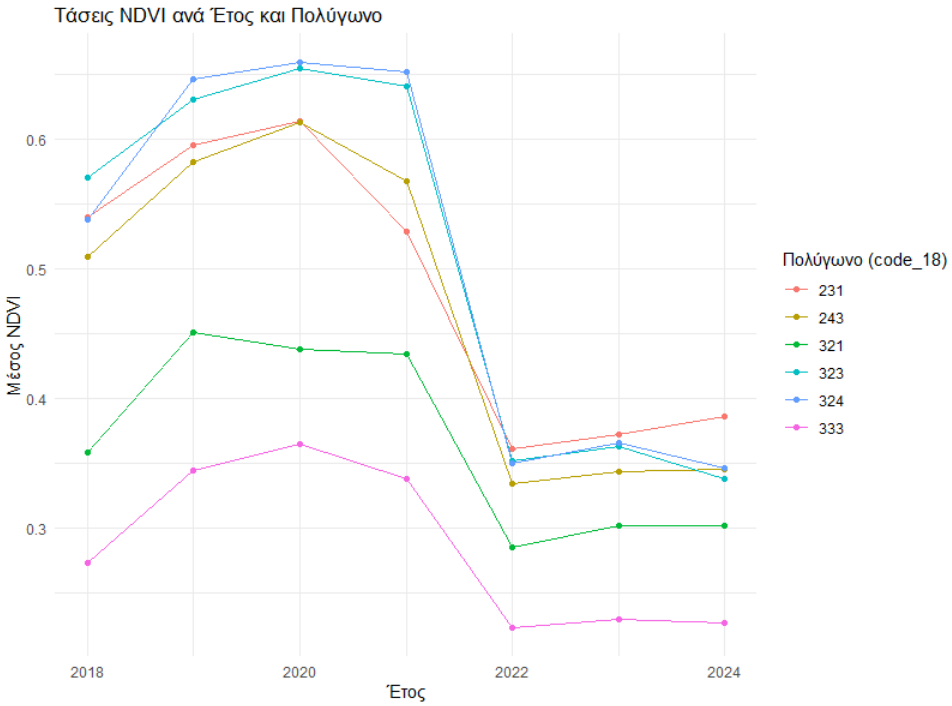
Το φίλτρο Kalman αποτελεί έναν αναδρομικό αλγόριθμο εκτίμησης καταστάσεων, ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως στην ανάλυση χρονοσειρών και στην ενοποίηση δεδομένων, συνδυάζοντας παρατηρήσεις και μοντέλα με στόχο τη βέλτιστη εκτίμηση μεταβαλλόμενων φαινομένων υπό συνθήκες αβεβαιότητας [28]. Στην παρούσα εφαρμογή το φίλτρο χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά για τη συμπλήρωση ελλειπουσών ετήσιων τιμών του μηνός Οκτωβρίου και όχι για πλήρη μοντελοποίηση συνεχούς ενδοετήσιας χρονοσειράς.

4.1.3 Εφαρμογή δεδομένων στο περιβάλλον της R

Στη συνέχεια αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για να συσχετισθούν οι μεταβολές των δεικτών με τα πολύγωνα του CORINE Land Cover 2018, που επιλέχθηκαν όπως αναφέρεται ανωτέρω και παρατηρήθηκε η συμπεριφορά των δεικτών αυτών μέσω του περιβάλλοντος της R.

Η R αποτελεί ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον προγραμματισμού ανοικτού κώδικα, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως για την επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων. Παρέχει ένα συνεκτικό σύνολο εργαλείων για τη διαχείριση και αποθήκευση δεδομένων, την εκτέλεση αριθμητικών και στατιστικών υπολογισμών, καθώς και την παραγωγή γραφημάτων και οπτικοποιήσεων. Επιπλέον, διαθέτει ένα ευέλικτο προγραμματιστικό σύστημα που επιτρέπει την ανάπτυξη αλγορίθμων και την εφαρμογή στατιστικών μοντέλων, υποστηρίζοντας δομές όπως επαναλήψεις, συνθήκες και συναρτήσεις. Το περιβάλλον της R χαρακτηρίζεται από τη συνοχή και την επεκτασιμότητά του, καθώς μπορεί να εμπλουτιστεί με πληθώρα πακέτων που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στην ανάλυση δεδομένων και την επιστημονική έρευνα [29].

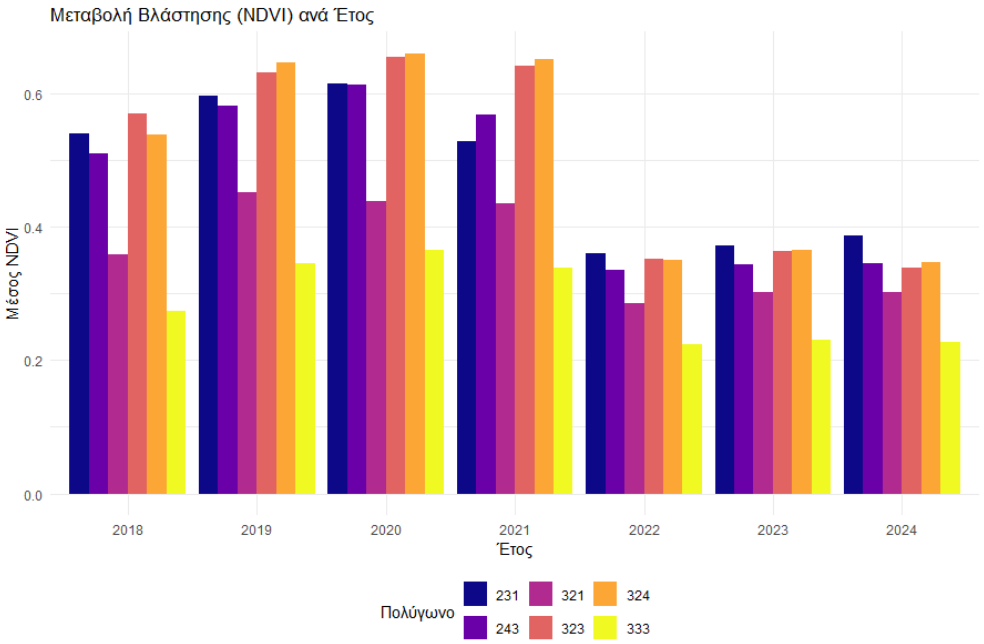
Δημιουργήθηκαν διαγράμματα για τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ των δεικτών NDVI με *Precipitation και NDWI* στα επιλεγμένα πολύγωνα του CORINE Land Cover που αφορούν τη βόσκηση.



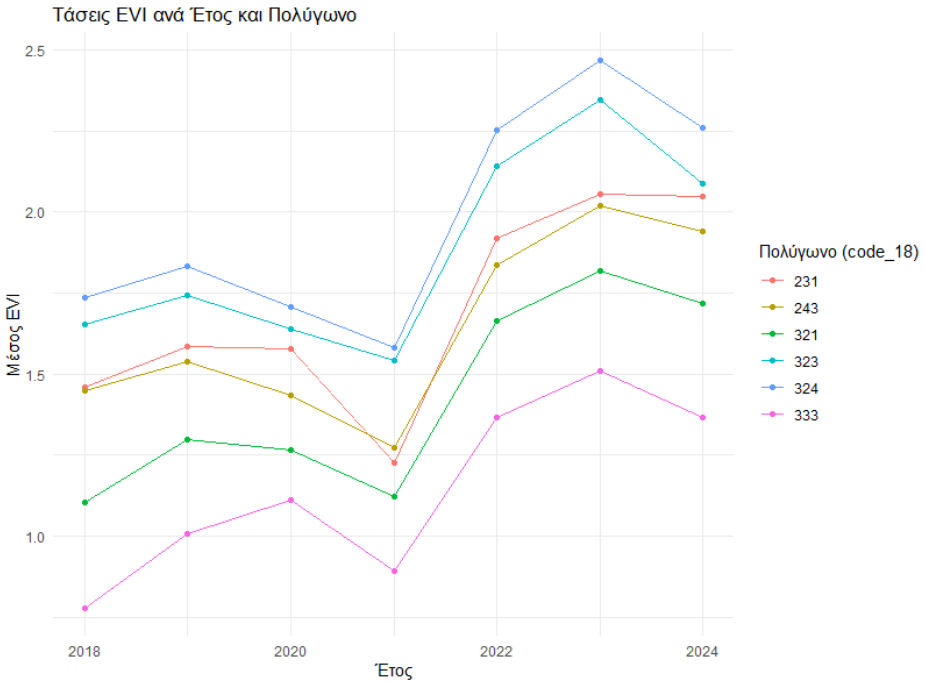
Σχήμα 18: Χρονική εξέλιξη του δείκτη βλάστησης NDVI ανά έτος και πολύγωνο στην περιοχή μελέτης (2018–2024).

Ενδεικτικά:

Ο κώδικας 2 παρατίθεται στο Παράρτημα.



Σχήμα 19: Μέσες τιμές NDVI ανά έτος και πολύγωνο στην περιοχή μελέτης (2018–2024).



Σχήμα 20: Χρονική εξέλιξη του δείκτη βλάστησης EVI ανά έτος και πολύγωνο στην περιοχή μελέτης (2018–2024).

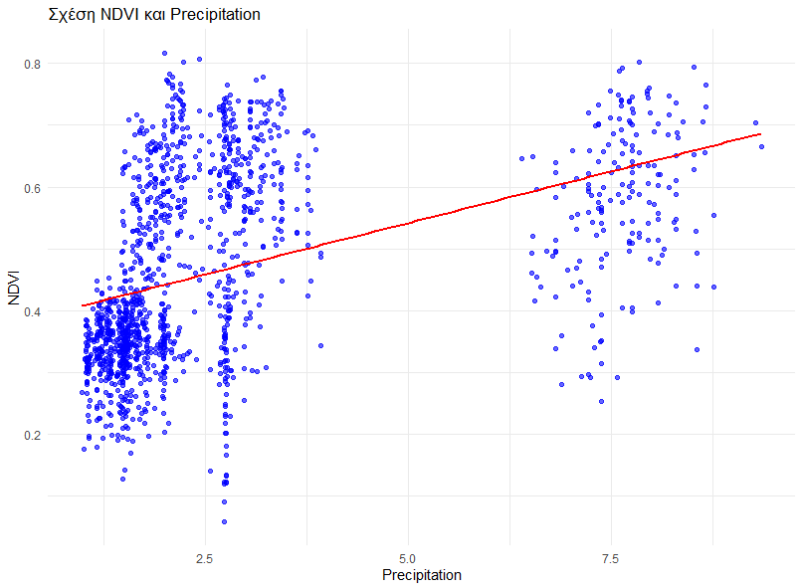
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:

Από τα διαγράμματα προκύπτει ότι ο NDVI παρουσιάζει σταδιακή αύξηση κατά την περίοδο 2018–2020, ακολουθούμενη από ήπια μείωση το 2021 και έντονη πτώση το 2022 σε όλους τους τύπους κάλυψης CORINE Land Cover. Μετά το 2022, οι τιμές σταθεροποιούνται σε χαμηλότερα επίπεδα, με περιορισμένη ανάκαμψη την περίοδο 2023–2024.

Αντίθετα, ο EVI εμφανίζει παρόμοια τάση έως το 2021, αλλά δεν καταγράφει αντίστοιχα έντονη πτώση το 2022· αντιθέτως, παρουσιάζει αύξηση κατά την περίοδο 2022–2023 και κορύφωση το 2023, πριν εμφανίσει ελαφρά μείωση το 2024.

Λόγω της διερευνητικής χρήσης του EVI στην ευρεία ανάλυση και της πιθανής ευαισθησίας του στον τρόπο κλιμάκωσης των φασματικών τιμών, τα αποτελέσματά του αξιοποιούνται μόνο συμπληρωματικά και δεν αποτελούν βάση για κύρια οικολογικά συμπεράσματα.

Σχέση NDVI με Precipitation



Σχήμα 21: Συσχέτιση των τιμών NDVI με τη βροχόπτωση (precipitation) στην περιοχή μελέτης.

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:

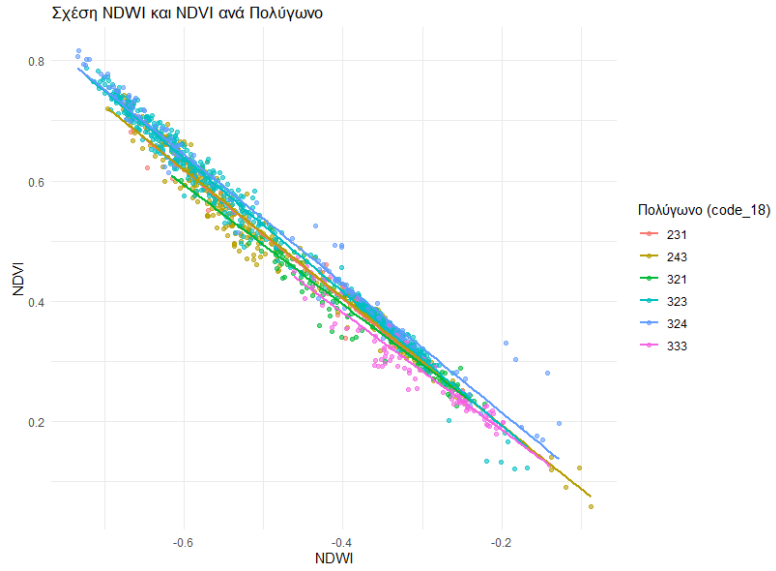
Στο διάγραμμα διασποράς παρατηρείται μια θετική γραμμική τάση μεταξύ των δύο μεταβλητών, όπως υποδεικνύεται από τη γραμμή παλινδρόμησης. Συγκεκριμένα, η αύξηση της βροχόπτωσης φαίνεται να συνδέεται γενικά με υψηλότερες τιμές NDVI.

Η σχέση αυτή είναι αναμενόμενη, καθώς η αυξημένη διαθεσιμότητα νερού ευνοεί την ανάπτυξη της βλάστησης. Η καλύτερη ανάπτυξη και η αυξημένη πυκνότητα της φυτοκάλυψης οδηγούν σε μεγαλύτερη ανακλαστικότητα στο φασματικό κανάλι του εγγύς υπερύθρου (Near Infrared – NIR), γεγονός που συμβάλλει σε υψηλότερες τιμές NDVI. Συνεπώς, περιοχές ή χρονικές περίοδοι με υψηλότερα επίπεδα βροχόπτωσης τείνουν να εμφανίζουν εντονότερη φωτοσυνθετική δραστηριότητα και μεγαλύτερη πυκνότητα βλάστησης.

Παράλληλα, στο διάγραμμα παρατηρείται σημαντική διασπορά των τιμών NDVI, ιδιαίτερα σε χαμηλότερα επίπεδα βροχόπτωσης. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η κατάσταση της βλάστησης δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τη βροχόπτωση, αλλά επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες, όπως η ένταση της βόσκησης, οι θερμοκρασιακές συνθήκες, τα χαρακτηριστικά του εδάφους και γενικότερα οι τοπικές περιβαλλοντικές συνθήκες.

Με βάση τα παραπάνω, η απότομη μείωση των τιμών NDVI που παρατηρείται το έτος 2022 ενδέχεται να σχετίζεται με περίοδο μειωμένων βροχοπτώσεων ή συνθηκών ξηρασίας. Ωστόσο, δεδομένης της διακύμανσης που εμφανίζεται στις τιμές NDVI, η μεταβολή αυτή πιθανότατα οφείλεται σε συνδυασμό παραγόντων και όχι αποκλειστικά στη μεταβολή της βροχόπτωσης.

Ισχυρή αρνητική συσχέτιση NDVI-NDWI



Σχήμα 22: Συσχέτιση των τιμών NDVI και NDWI (Green–NIR) ανά πολύγωνο (code_18) στην περιοχή μελέτης.

Η ισχυρή αρνητική συσχέτιση μεταξύ NDVI και NDWI (Green–NIR) αποδίδεται αφενός στη μαθηματική δομή των δύο δεικτών, καθώς αμφότεροι περιλαμβάνουν το κανάλι NIR με αντίθετο πρόσημο, αλλά και σε πραγματικές φυσικές διεργασίες που σχετίζονται με την κατάσταση της βλάστησης και την περιεκτικότητα σε υγρασία. Ειδικότερα, αυξημένες τιμές NDVI συνδέονται με υψηλή φυτοκάλυψη και έντονη φωτοσυνθετική δραστηριότητα, οι οποίες συχνά συνοδεύονται από μειωμένη επιφανειακή υγρασία ή διαφοροποιημένη φασματική απόκριση στο πράσινο και το NIR τμήμα του φάσματος. Αντίστοιχα, υψηλότερες τιμές NDWI αντανακλούν αυξημένη παρουσία υγρασίας στο έδαφος ή/και στη βλάστηση, γεγονός που σχετίζεται με χαμηλότερες τιμές NDVI σε ορισμένες περιπτώσεις.

Συνεπώς, η παρατηρούμενη αρνητική σχέση προκύπτει τόσο από τη φασματική δομή των δεικτών όσο και από πραγματικές οικολογικές και υδρολογικές διεργασίες, χωρίς ωστόσο να μπορεί να ερμηνευθεί μονοσήμαντα ως δείκτης αιτιώδους σχέσης μεταξύ βλάστησης και υγρασίας.

ΓΕΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ/ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΔΕΙΚΤΩΝ

Η διαφοροποίηση των δεικτών βλάστησης ενδέχεται να αντανακλά διαφορετική φασματική απόκριση των δύο δεικτών στις μεταβολές της βλάστησης.

1. Η Ευαισθησία των Δεικτών

Ο NDVI αποτελεί έναν ευρέως χρησιμοποιούμενο δείκτη φυτικής δραστηριότητας, ιδιαίτερα ευαίσθητο στη συνολική φυτοκάλυψη και στη μεταβολή της επιφανειακής βιομάζας. Ωστόσο, σε περιοχές με υψηλή πυκνότητα βλάστησης, ο NDVI μπορεί να παρουσιάσει φαινόμενο κορεσμού, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ικανότητά του να διακρίνει περαιτέρω αυξήσεις της φυτικής μάζας.

Αντίθετα, ο EVI έχει σχεδιαστεί ώστε να περιορίζει την επίδραση της ατμοσφαιρικής διασποράς και της φωτεινότητας του εδάφους μέσω της ενσωμάτωσης επιπλέον φασματικών διορθώσεων. Ως εκ τούτου, εμφανίζει μεγαλύτερη σταθερότητα σε περιοχές με αραιή ή ετερογενή βλάστηση και μειωμένη ευαισθησία στον κορεσμό, καθιστώντας τον συχνά πιο κατάλληλο για την αποτύπωση δομικών μεταβολών της βλάστησης.

2. Πιθανή μεταβολή στη δομή της βλάστησης

Οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των δύο δεικτών ενδέχεται να συνδέονται με μεταβολές στη δομή ή στη σύνθεση της βλάστησης. Ενδεχόμενες αλλαγές μεταξύ ποώδους και θαμνώδους/ξυλώδους βλάστησης θα μπορούσαν να επηρεάζουν διαφορετικά τους δύο δείκτες λόγω της διαφορετικής φασματικής τους ευαισθησίας. Ο NDVI ανταποκρίνεται κυρίως στη συνολική φυτοκάλυψη και στη μεταβολή της πράσινης βιομάζας, ενώ ο EVI θεωρείται περισσότερο ευαίσθητος σε δομικά χαρακτηριστικά της βλάστησης και παρουσιάζει μικρότερη τάση κορεσμού σε περιοχές με αυξημένη φυτοκάλυψη.

Παράλληλα, η διαφοροποιημένη συμπεριφορά των δεικτών μπορεί να σχετίζεται με μεταβολές στη διάρκεια ή στη φάση της ενεργού φυτοκάλυψης υπό διαφοροποιημένες υδροκλιματικές συνθήκες. Για παράδειγμα, περιορισμένη διάρκεια της υγρής περιόδου ή ήπιο υδατικό στρες θα μπορούσαν να επηρεάζουν περισσότερο την ποώδη βλάστηση, ενώ περισσότερο ανθεκτικά θαμνώδη ή ξυλώδη είδη ενδέχεται να διατηρούν ενεργή φυλλική επιφάνεια για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Υποθετικά σενάρια διαταραχής και συμπεριφορά των δεικτών

1. Σενάριο ξηρασίας

Σε συνθήκες έντονης ξηρασίας:

- μειώνεται η φωτοσυνθετική δραστηριότητα,
- μειώνεται η φυλλική υγρασία,
- παρατηρείται γενικά μείωση της πράσινης φυτοκάλυψης και της φυτικής δραστηριότητας,
- οι μεταβολές αυτές αποτυπώνονται συνήθως σε χαμηλότερες τιμές NDVI.

Παράλληλα, σε συνθήκες περιορισμένης υδατικής διαθεσιμότητας ενδέχεται να επηρεάζονται και άλλοι δείκτες βλάστησης ή υγρασίας, ανάλογα με τη δομή της βλάστησης, τη φαινολογική φάση των φυτικών ειδών και τη διάρκεια του υδατικού στρες.

Η παρατηρούμενη πτώση του NDVI, σε συνδυασμό με τη θετική σχέση NDVI–βροχόπτωσης, ενδέχεται να αντανακλά επίδραση μειωμένης υδατικής διαθεσιμότητας στη φυτική

δραστηριότητα. Ωστόσο, τα διαθέσιμα δεδομένα δεν επιτρέπουν ασφαλή διάκριση μεταξύ επιδράσεων ξηρασίας, βόσκησης και φυσικής διαχρονικής μεταβλητότητας της βλάστησης.

Σε μεσογειακά οικοσυστήματα, η απόκριση των δεικτών βλάστησης σε συνθήκες ξηρασίας ενδέχεται να διαφοροποιείται ανάλογα με τη δομή και τη λειτουργική σύνθεση της βλάστησης. Ο NDVI επηρεάζεται κυρίως από τη μεταβολή της πράσινης ποώδους κάλυψης και της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας, ενώ ο EVI θεωρείται περισσότερο ευαίσθητος σε δομικά χαρακτηριστικά της κόμης και εμφανίζει μικρότερη τάση κορεσμού. Ως αποτέλεσμα, σε περιοχές με θαμνώδη ή σκληρόφυλλη μεσογειακή βλάστηση είναι πιθανό ο NDVI να εμφανίζει εντονότερες μεταβολές υπό συνθήκες υδατικού στρες, ενώ ο EVI να παρουσιάζει πιο σταθερή συμπεριφορά.

Ο EVI χρησιμοποιήθηκε συμπληρωματικά για την παρατήρηση γενικών τάσεων της βλάστησης. Παρότι θεωρητικά μπορεί να εμφανίζει διαφορετική απόκριση σε μεταβολές της δομής της βλάστησης, στην παρούσα εργασία δεν αξιοποιείται για εκτεταμένη οικολογική ερμηνεία των παρατηρούμενων μεταβολών.

2. Σενάριο μεταβολής της φάσης και διάρκειας ενεργού βλάστησης υπό διαφοροποιημένες υδροκλιματικές συνθήκες

Οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των δύο δεικτών ενδέχεται να συνδέονται με μεταβολές στη δομή ή στη σύνθεση της βλάστησης. Ενδεχόμενες αλλαγές μεταξύ ποώδους και θαμνώδους/ξυλώδους βλάστησης θα μπορούσαν να επηρεάζουν διαφορετικά τους δύο δείκτες λόγω της διαφορετικής φασματικής τους ευαισθησίας.

Ο NDVI ανταποκρίνεται κυρίως στη συνολική φυτοκάλυψη και στη μεταβολή της πράσινης βιομάζας, ενώ ο EVI θεωρείται ότι επηρεάζεται περισσότερο από δομικά χαρακτηριστικά της βλάστησης.

Παράλληλα, η διαφοροποιημένη συμπεριφορά των δεικτών μπορεί να σχετίζεται με μεταβολές στη διάρκεια ή στη φάση της ενεργού φυτοκάλυψης υπό διαφοροποιημένες υδροκλιματικές συνθήκες. Για παράδειγμα, περιορισμένη διάρκεια της υγρής περιόδου ή ήπιο υδατικό στρες θα μπορούσαν να επηρεάζουν περισσότερο την ποώδη βλάστηση, ενώ περισσότερο ανθεκτικά θαμνώδη ή ξυλώδη είδη ενδέχεται να διατηρούν ενεργή φυλλική επιφάνεια για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

3. Σενάριο βόσκησης

Η βόσκηση επιδρά κυρίως:

- στη μείωση της ποώδους βιομάζας,
- στην αύξηση του γυμνού εδάφους,
- στη δημιουργία χωρικού μωσαϊκού της βλάστησης.

Σε συνθήκες έντονης και συνεχιζόμενης υπερβόσκησης αναμένεται γενικά μείωση της φυτικής δραστηριότητας και πτώση των δεικτών βλάστησης, κυρίως του NDVI, ο οποίος ανταποκρίνεται άμεσα στη μεταβολή της πράσινης φυτοκάλυψης και της επιφανειακής βιομάζας.

Ειδικά σε περιοχές με παρουσία βοοειδών, αιγών και προβάτων:

- τα βοοειδή προτιμούν κυρίως ποώδη βλάστηση,
- οι αίγες αξιοποιούν σε μεγαλύτερο βαθμό ξυλώδη και θαμνώδη είδη,
- τα πρόβατα εμφανίζουν ενδιάμεση συμπεριφορά.

Ως αποτέλεσμα, η επιλεκτική βόσκηση μπορεί να επηρεάζει διαφορετικά τις λειτουργικές ομάδες φυτών και να μεταβάλλει σταδιακά τη σύνθεση και τη χωρική δομή της βλάστησης. Είναι επίσης πιθανή η ενίσχυση θαμνωδών στοιχείων ή η τοπική αναβλάστηση μετά από προσωρινή πίεση.

Η βόσκηση επηρεάζει κυρίως τη φυτοκάλυψη, τη χωρική ετερογένεια και τη σχέση μεταξύ βλάστησης και γυμνού εδάφους. Σε συνθήκες αυξημένης πίεσης αναμένεται μεταβολή της φυτικής βιομάζας και της χωρικής δομής της βλάστησης.

Παράλληλα, οι δύο δείκτες ενδέχεται να εμφανίζουν διαφορετική απόκριση στις μεταβολές αυτές λόγω της διαφορετικής φασματικής τους ευαισθησίας. Ο NDVI ανταποκρίνεται κυρίως στη μεταβολή της πράσινης φυτοκάλυψης και της επιφανειακής βιομάζας, ενώ ο EVI θεωρείται ότι επηρεάζεται περισσότερο από δομικά χαρακτηριστικά της βλάστησης και από τη χωρική ετερογένεια της κόμης.

Ωστόσο, τα διαθέσιμα δεδομένα δεν επιτρέπουν ασφαλή διάκριση μεταξύ επιδράσεων βόσκησης, κλιματικών παραγόντων και φυσικής διαχρονικής μεταβλητότητας της βλάστησης. Συνεπώς, οι παρατηρούμενες διαφοροποιήσεις μεταξύ NDVI και EVI ερμηνεύονται κυρίως ως ενδείξεις διαφορετικής φασματικής απόκρισης των δύο δεικτών και όχι ως άμεση τεκμηρίωση συγκεκριμένης οικολογικής διεργασίας.

Τέλος, λόγω της διερευνητικής χρήσης του EVI στην ευρεία ανάλυση και της πιθανής ευαισθησίας του στον τρόπο κλιμάκωσης των φασματικών τιμών, τα αποτελέσματά του αξιοποιούνται μόνο συμπληρωματικά και δεν αποτελούν βάση για κύρια οικολογικά συμπεράσματα.

4.1.4 Μοντελοποίηση για πρόβλεψη συμπεριφοράς βλάστησης σε σχέση με διάφορους δείκτες

Μοντελοποίηση (Modelling approach)

Για τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ της βλάστησης, των κλιματικών μεταβλητών και των δεικτών υγρασίας εφαρμόστηκαν δύο συμπληρωματικές προσεγγίσεις μοντελοποίησης, οι οποίες εξυπηρετούν διαφορετικούς επιστημονικούς στόχους: αφενός την ερμηνεία των σχέσεων μεταξύ μεταβλητών (inference) και αφετέρου την πρόβλεψη και ιεράρχηση της σημασίας των παραγόντων (prediction) [30].

Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την εκτίμηση της επίδρασης των περιβαλλοντικών μεταβλητών στη βλάστηση, λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη τη χωρική και ιεραρχική δομή των δεδομένων μέσω της ενσωμάτωσης σταθερών και τυχαίων επιδράσεων, όπως προτείνεται στη σχετική βιβλιογραφία για την ανάλυση οικολογικών δεδομένων [30].

Μεικτό γραμμικό μοντέλο (Mixed Effects Model – inference)

Αρχικά εφαρμόστηκε μεικτό γραμμικό μοντέλο (Linear Mixed Effects Model) με σκοπό τη διερεύνηση των παραγόντων που επηρεάζουν τη μεταβολή της βλάστησης. Ως εξαρτημένη μεταβλητή χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης NDVI (μέση τιμή του μηνός Οκτωβρίου για κάθε έτος της περιόδου 2018–2024). Ως σταθερές επιδράσεις (fixed effects) συμπεριλήφθηκαν μεταβλητές που σχετίζονται με τις κλιματικές συνθήκες και την υδατική κατάσταση της επιφάνειας, όπως η βροχόπτωση (precipitation), ο δείκτης υδάτινων σωμάτων NDWI και το έτος (year), το οποίο εισήχθη ως μεταβλητή που αποτυπώνει τη χρονική τάση της βλάστησης.

Η χωρική ετερογένεια μεταξύ των περιοχών αποτυπώθηκε με την εισαγωγή τυχαίου όρου (random intercept) ανά πολύγωνο/κατηγορία CORINE Land Cover (code_18), ώστε να ληφθεί

υπόψη ότι διαφορετικές περιοχές μπορεί να παρουσιάζουν διαφορετικά βασικά επίπεδα βλάστησης (baseline NDVI) λόγω διαφορών στη χρήση γης. Τα climate normalized residuals του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν ως ανωμαλίες (anomalies) που δεν εξηγούνται από το κλίμα.

Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την εκτίμηση της επίδρασης των περιβαλλοντικών μεταβλητών στη βλάστηση, λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη τη χωρική δομή των δεδομένων.

Ο κώδικας 3 παρατίθεται στο Παράρτημα.

Τα αποτελέσματα της εξίσωσης NDVI ~ precipitation + NDWI + year + (1|code_18) αφορούν το μεικτό γραμμικό μοντέλο και όχι το Random Forest. Το Random Forest αξιοποιήθηκε συμπληρωματικά για την πρόβλεψη και την εκτίμηση σχετικής σημαντικότητας μεταβλητών.

Random Forest (prediction και variable importance)

Στη συνέχεια εφαρμόστηκε μοντέλο Random Forest παλινδρόμησης (Random Forest regression) με σκοπό τη διερεύνηση της σχετικής σημασίας των παραγόντων που σχετίζονται με τις μεταβολές του δείκτη NDVI στο σύνολο των δεδομένων. Το Random Forest αποτελεί μέθοδο ensemble μάθησης που βασίζεται στη δημιουργία μεγάλου αριθμού δέντρων απόφασης και είναι ικανό να αποτυπώσει μη γραμμικές σχέσεις και αλληλεπιδράσεις μεταξύ μεταβλητών [31].

Ως εξαρτημένη μεταβλητή χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης NDVI, ενώ ως ανεξάρτητες μεταβλητές συμπεριλήφθηκαν οι εξής παράγοντες:

- precipitation (βροχόπτωση),
- NDWI (δείκτης διαφοράς νερού),
- year (έτος),
- code_18 (πολύγωνο / κατηγορία περιοχής).

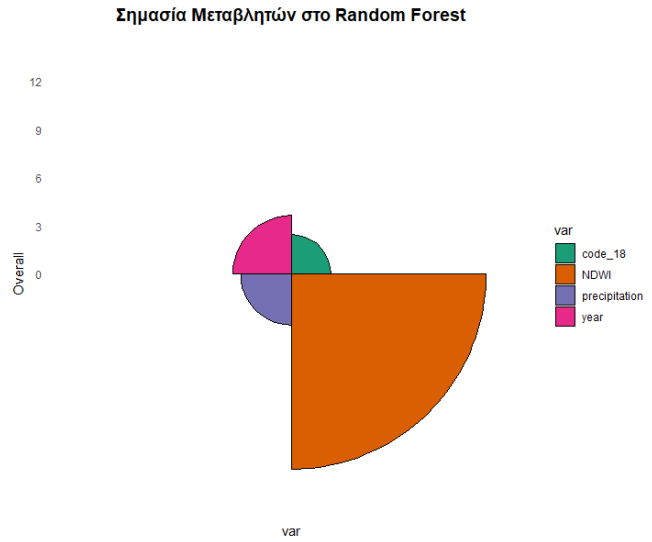
Η μεταβλητή code_18 εισήχθη ως κατηγορική μεταβλητή (factor), επιτρέποντας στο μοντέλο να λαμβάνει υπόψη τη χωρική διαφοροποίηση μεταξύ των πολυγώνων. Σε αντίθεση με τα μεικτά γραμμικά μοντέλα, στο Random Forest η μεταβλητή αυτή δεν λειτουργεί ως τυχαίο αποτέλεσμα (random effect), αλλά ως predictor που επιτρέπει στο μοντέλο να μάθει διαφορετικά βασικά επίπεδα NDVI μεταξύ περιοχών.

Ερμηνεία της σημαντικότητας μεταβλητών (Variable Importance)

Η σημαντικότητα μεταβλητών (variable importance) στο Random Forest εκφράζει το βαθμό στον οποίο κάθε predictor συμβάλλει στη βελτίωση της προβλεπτικής ικανότητας του μοντέλου [31]. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι ο δείκτης NDWI εμφανίζεται ως ο σημαντικότερος παράγοντας που σχετίζεται με τις μεταβολές του NDVI, γεγονός που είναι συνεπές με τη στενή σχέση μεταξύ της υδατικής κατάστασης της επιφάνειας και της φασματικής απόκρισης της βλάστησης. Αναλυτικότερα Η υψηλή σημαντικότητα του NDWI στο Random Forest πρέπει να ερμηνευθεί με προσοχή, καθώς ο NDWI Green-NIR και ο NDVI μοιράζονται κοινά φασματικά κανάλια, ιδίως το NIR. Συνεπώς, η σχέση αυτή αντανακλά τόσο πραγματικές περιβαλλοντικές συνθήκες όσο και μαθηματική/φασματική συνάφεια μεταξύ των δεικτών.

Η βροχόπτωση παρουσιάζει χαμηλότερη σχετική σημαντικότητα σε σχέση με τον NDWI, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στο ότι ο NDVI ανταποκρίνεται πιο άμεσα στις τοπικές συνθήκες υγρασίας που αποτυπώνονται από τον NDWI, ενώ η βροχόπτωση δρα συχνά πιο έμμεσα, μέσω διεργασιών όπως η αποθήκευση νερού στο έδαφος, οι χρονικές υστερήσεις ή οι τοπογραφικές διαφοροποιήσεις.

Επιπλέον, η μεταβλητή year παρουσιάζει μη μηδενική επίδραση, γεγονός που υποδηλώνει την ύπαρξη χρονικής μεταβολής ή τάσης στη δυναμική της βλάστησης κατά την περίοδο μελέτης. Παράλληλα, η μεταβλητή code_18 συμβάλλει επίσης στην ερμηνεία του μοντέλου, υποδεικνύοντας ότι οι διαφορετικές περιοχές παρουσιάζουν διαφοροποίηση στη βασική συμπεριφορά της βλάστησης, πιθανώς λόγω διαφορών στον τύπο κάλυψης γης, στις εδαφικές συνθήκες ή στο μικροκλίμα.



Σχήμα 23: Εκτίμηση της σχετικής συμβολής των μεταβλητών (NDWI, βροχόπτωση, κατηγορία κάλυψης γης και έτος) στο μοντέλο Random Forest.

Ο κώδικας 4 παρατίθεται στο Παράρτημα.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η σημαντικότητα μεταβλητών στο Random Forest δεν υποδηλώνει απαραίτητα αιτιώδη σχέση μεταξύ των μεταβλητών, αλλά αποτελεί ένδειξη της σχετικής συμβολής τους στην πρόβλεψη του δείκτη NDVI στο συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων. Το Random Forest αξιοποιήθηκε συμπληρωματικά για την πρόβλεψη και την εκτίμηση σχετικής σημαντικότητας μεταβλητών.

5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ ΤΟΠΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ- ΕΠΙΠΕΔΟ Β

Η τηλεπισκόπηση δεν μπορεί να υποκαταστήσει πλήρως τις επιτόπιες παρατηρήσεις. Για την αξιόπιστη χαρτογράφηση οικοτόπων, θεωρείται απαραίτητος ο συνδυασμός εργασίας πεδίου με δεδομένα από οπτικούς δορυφορικούς αισθητήρες. Η συλλογή δεδομένων πεδίου αποτελεί κρίσιμο στάδιο, τόσο για τον σχεδιασμό του συστήματος ταξινόμησης και τη δημιουργία δεδομένων αναφοράς, όσο και για την επαλήθευση και αξιολόγηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων [2].

Η επιτόπια επαλήθευση συνίσταται στη συστηματική επιβεβαίωση των πληροφοριών που αφορούν τα οικοσυστήματα σε συγκεκριμένες θέσεις. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να προέρχονται είτε από πρόσφατες υφιστάμενες μελέτες είτε από δειγματοληψίες πεδίου, κατά τις οποίες πραγματοποιούνται καταγραφές μέσω επισκέψεων σε επιλεγμένα σημεία [2].

Αντίστοιχη λογική της παρούσας μελέτης ακολουθείται στο πλαίσιο του έργου LIFE IP 4 NATURA, όπου η χαρτογράφηση και αξιολόγηση των οικοσυστημάτων βασίζεται στη συνδυαστική αξιοποίηση τηλεπισκοπικών δεδομένων, βοηθητικών γεωχωρικών πληροφοριών και δεδομένων πεδίου, σε διαφορετικές χωρικές κλίμακες ανάλυσης, στην εφαρμογή αλγορίθμων επιβλεπόμενης ταξινόμησης για τη διάκριση των τύπων κάλυψης γης κ.α. [2].

Σε δεύτερο επίπεδο (τοπική χωρική κλίμακα), πραγματοποιήθηκε αναλυτικότερη διερεύνηση σε πέντε επιλεγμένα πολύγωνα εντός των αντίστοιχων κατηγοριών CORINE Land Cover, στα οποία διενεργήθηκαν επιτόπιες καταγραφές βλάστησης. Οι επιτόπιες καταγραφές πραγματοποιήθηκαν τον μήνα Ιούνιο, περίοδο κατά την οποία η ποώδης βλάστηση βρίσκεται στο μέγιστο ή ώριμο στάδιο ανάπτυξής της πριν την πλήρη θερινή ξήρανση, γεγονός που επιτρέπει σαφέστερη αποτύπωση της δομής της φυτοκάλυψης και των ποσοστών ποώδους, θαμνώδους και γυμνού εδάφους. Αντίθετα, η τηλεπισκοπική ανάλυση του Επιπέδου Β δεν περιορίστηκε στον Ιούνιο, αλλά βασίστηκε σε ετήσιες συνθέσεις δεικτών NDVI, EVI, NDMI, NDWIg, BSI και SAVI [32] από Sentinel-2 για την περίοδο 2018–2024. Για κάθε πολύγωνο υπολογίστηκαν ετήσιες τιμές median και p90 [33] για τους δείκτες NDVI, EVI, NDMI, NDWIg, BSI και SAVI, καθώς και οι ετήσιες μεταβολές τους σε σχέση με το προηγούμενο έτος. Με τον τρόπο αυτό κατέστη δυνατή η ανάλυση της ετήσιας δυναμικής της βλάστησης σε τοπική κλίμακα, ενώ οι επιτόπιες καταγραφές του Ιουνίου χρησιμοποιήθηκαν ως σημείο αναφοράς για την οικολογική ερμηνεία των δεικτών όπως θα αναλυθεί εντός κεφαλαίου 5, υποκεφάλαιο 5.5.

Για την ποσοτικοποίηση της φυτοκάλυψης εφαρμόστηκε η μέθοδος line-point intercept: ανά πολύγωνο χαράχθηκαν γραμμικές τομές μήκους 50 m, με καταγραφή (με δειγματοληπτική βελόνα) ανά 1 m. Σε κάθε σημείο καταγραφόταν η πρώτη επαφή της βελόνας με το υπόστρωμα/βλάστηση και ταξινομούταν σε προκαθορισμένες κατηγορίες (αγρωστώδη, πλατύφυλλες πόες, ψυχανθή, ξυλώδη, ξηροφυλλάδα, γυμνό έδαφος, λίθοι). Παράλληλα καταγράφονταν ενδείξεις βόσκησης (περιττώματα ζώων, πατήματα, εμφανής “κουρεμένη” βλάστηση, μονοπάτια ζώων), φωτογραφική τεκμηρίωση και η ακριβής γεωαναφορά των θέσεων. Τα αποτελέσματα του πεδίου αξιοποιήθηκαν με δύο τρόπους: (i) ως ποιοτικός έλεγχος/επικύρωση της χωρικής ετερογένειας που “βλέπουν” οι δείκτες (median vs p90), και (ii) ως ποσοτικό μέτρο πίεσης / υποβάθμισης μέσω του ποσοστού γυμνού εδάφους και λίθων, το οποίο συγκρίθηκε με δείκτες όπως BSI/SAVI και με μεταβολές NDVI/NDMI.

Η χρονική διαφοροποίηση μεταξύ Οκτωβρίου (πολύγωνα CORINE Land Cover, τηλεπισκοπική περιφερειακή ανάλυση) και Ιουνίου (επιτόπια καταγραφή, τοπική ανάλυση) δεν αποτελεί άμεση αντιστοίχιση δεικτών μεταξύ ίδιων ημερομηνιών. Οι επιτόπιες καταγραφές λειτουργούν ως ground truth για τον τύπο και τη δομή της βλάστησης. Αντίθετα, τα δεδομένα Οκτωβρίου χρησιμοποιούνται για τη συγκρίσιμη διαχρονική αξιολόγηση της λειτουργικής

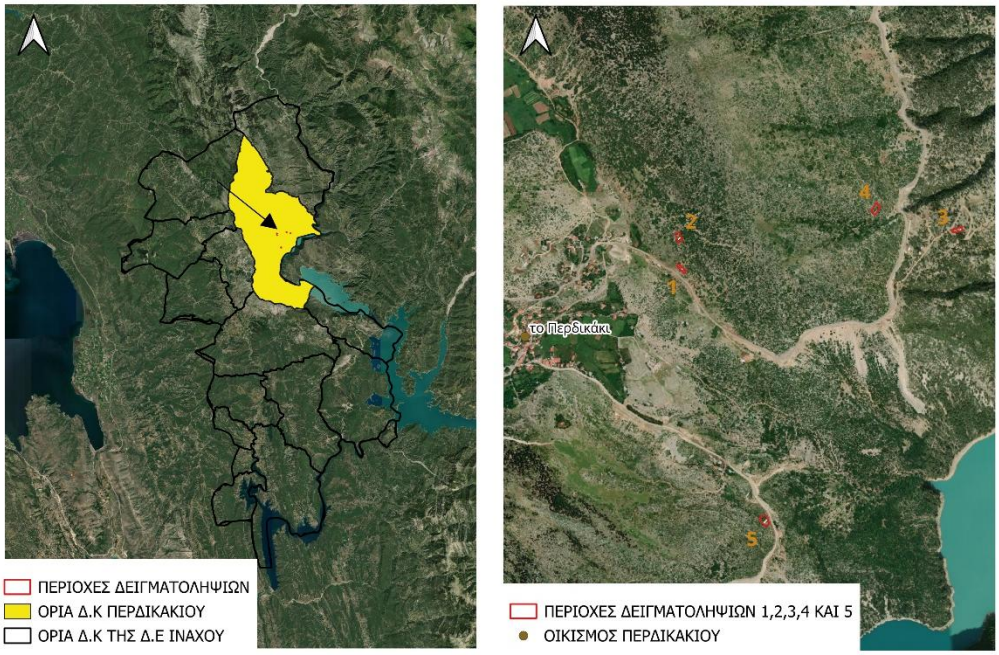
απόκρισης των τύπων κάλυψης σε περιφερειακή κλίμακα. Στην ευρεία κλίμακα (πολύγωνα CORINE Land Cover), η χρήση του μηνός Οκτωβρίου εξυπηρετεί τη συγκρίσιμη τηλεπισκοπική παρακολούθηση της διαχρονικής κατάστασης της βλάστησης σε μεταβατική εποχική φάση, μετά την θερινή υδατική καταπόνηση και πριν την πλήρη χειμερινή ανάπτυξη. Αντίθετα, στην τοπική κλίμακα των επιτόπιων πολυγώνων, η επιλογή του Ιουνίου συνδέεται άμεσα με τη φαινολογική κορύφωση της ποώδους βλάστησης [34] ενώ η τηλεπισκοπική ανάλυση δεν περιορίζεται στον συγκεκριμένο μήνα αλλά βασίζεται σε δεδομένα από όλη τη διάρκεια του έτους.

Αντίθετα, στην τοπική κλίμακα των επιτόπιων πολυγώνων, η επιλογή του Ιουνίου συνδέεται άμεσα με τη φαινολογική κορύφωση της ποώδους βλάστησης και επιτρέπει την ακριβέστερη αξιολόγηση των δορυφορικών δεικτών με τις καταγραφές πεδίου. Η συμπληρωματική χρήση δύο διαφορετικών χρονικών στιγμών ενισχύει την ερμηνευτική διερεύνηση της μελέτης, καθώς διαχωρίζει τη διαχρονική τηλεπισκοπική παρακολούθηση από τη δομική αποτύπωση της βλάστησης στο πεδίο.

5.1 Περιοχή μελέτης-επιτόπιες καταγραφές

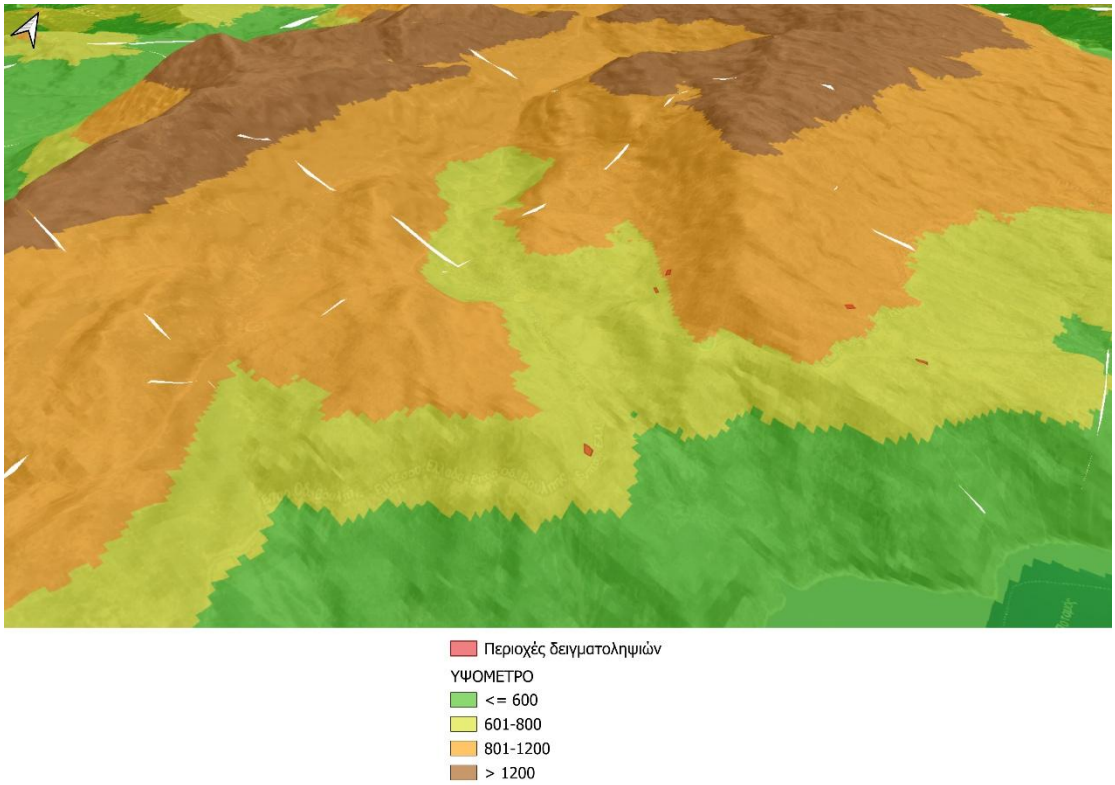
Οι επιτόπιες καταγραφές πραγματοποιήθηκαν γύρω από τον οικισμό Περδικακίου, Δ.Κ Περδικακίου, Δ.Ε. Ινάχου, Π.Ε Αιτωλοακαρνανίας (Εικόνα 3).

Η Δ.Κ. Περδικακίου αποτελείται από τον οικισμό Περδικάκι και τον οικισμό Πηγάδια. Από τα Αποτελέσματα της απογραφής πληθυσμού-κατοικιών έτους 2021, που αφορούν τον μόνιμο πληθυσμό της χώρας ο οικισμός του Περδικακίου αποτελείται από 269 κατοίκους και ο οικισμός Πηγάδια αποτελείται από 41 κατοίκους (ΦΕΚ 2090/Β/7-4-2024).



Εικόνα 3: Περιοχή μελέτης επιτόπιων καταγραφών.

Η υψομετρική διαβάθμιση της περιοχής μελέτης αποτυπώνεται στην Εικόνα 4, όπου παρουσιάζεται η κατανομή των υψομετρικών ζωνών στις θέσεις δειγματοληψίας. Όπως προκύπτει, οι περιοχές αυτές εκτείνονται σε ένα ευρύ υψομετρικό εύρος, το οποίο διακρίνεται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες (<600 m, 601–800 m, 801–1200 m και >1200 m).



Εικόνα 4: Κατηγοριοποίηση υψομέτρου στις περιοχές δειγματοληψιών, οι οποίες απεικονίζονται με ροζ χρώμα.

Σε συνάρτηση με την υψομετρική διαφοροποίηση της περιοχής, εξετάζεται και η κατανομή των τύπων κάλυψης γης. Τα πολύγωνα 1 και 2, καθώς και το πολύγωνο 5, εντάσσονται στον τύπο CORINE Land Cover 323 (Sclerophyllous vegetation), ενώ τα πολύγωνα 3 και 4 αντιστοιχούν στον τύπο CORINE Land Cover 321 (Natural grasslands).

Επιπλέον, από τα ερωτηματολόγια που περιλαμβάνονται στο Προσωρινό Διαχειριστικό Σχέδιο Βόσκησης, που έχει αναφερθεί στο Κεφ. 3/3.5., εντοπίζονται επιμέρους καταγραφές που αφορούν την περιοχή του Περδικακίου και τον γειτονικό συνοικισμό Πηγάδια. Συγκεκριμένα, από το σύνολο των 28 ερωτηματολογίων, τρία σχετίζονται με την εν λόγω περιοχή και αξιοποιούνται ως ενδεικτικά στοιχεία για την τοπική άσκηση της βόσκησης. Τα δεδομένα αυτά, αν και δεν αποτελούν πλήρως αντιπροσωπευτικό δείγμα, παρέχουν χρήσιμη ποιοτική πληροφορία. Από την ανάλυσή τους προκύπτει η παρουσία μικτής βόσκησης, με συνύπαρξη αιγοπροβάτων, βοοειδών και ιπποειδών, καθώς και σχετικά υψηλός αριθμός ζώων ανά εκμετάλλευση. Επιπλέον, καταγράφεται εκτεταμένη διάρκεια βόσκησης, η οποία σε ορισμένες περιπτώσεις καλύπτει σχεδόν ολόκληρο το έτος. Παράλληλα, επιβεβαιώνεται η χρήση συμπληρωματικής διατροφής (σανός και καρποί), ακόμη και κατά την περίοδο βόσκησης. Τα παραπάνω στοιχεία, σε συνδυασμό με τις επιτόπιες παρατηρήσεις (π.χ. παρουσία περιττωμάτων και ίχνη βόσκησης), συγκροτούν μια συνεκτική εικόνα ενεργής και συνεχούς βόσκησης στην περιοχή του Περδικακίου, χωρίς ωστόσο να επιτρέπουν γενικεύσεις για το σύνολο των κτηνοτροφικών δραστηριοτήτων [1].

Συμπληρωματικά, από προφορική επικοινωνία με κτηνοτρόφο της περιοχής προκύπτει ότι δραστηριοποιούνται δεκάδες ενεργές εκτροφές (της τάξης των 40–50), με σχετικά μικρό αριθμό ζώων (βοοειδή) ανά μονάδα (περίπου 50–100 ζώα). Επιπλέον, αναφέρεται ότι κατά το παρελθόν υπήρχε μεγαλύτερος αριθμός αιγοπροβάτων, ενώ σήμερα η παρουσία τους έχει

μειωθεί, σε αντίθεση με τα βοοειδή της τοπικής βραχυκερατικής φυλής, τα οποία διατηρούν σταθερή παρουσία στην περιοχή. Αν και τα στοιχεία αυτά δεν αποτελούν συστηματική καταγραφή, παρέχουν μια ενδεικτική εικόνα της έντασης και της δομής της κτηνοτροφικής δραστηριότητας και ενισχύουν την εκτίμηση ότι η βόσκηση αποτελεί σημαντικό παράγοντα διαμόρφωσης της βλάστησης στην περιοχή μελέτης.

5.2 Συλλογή δεδομένων πεδίου

Η αξιοποίηση δεδομένων πεδίου (ground truth data) αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη βαθμονόμηση και επικύρωση μοντέλων τηλεπισκόπησης. Ωστόσο, συχνά παρατηρείται ασυμφωνία μεταξύ των επιτόπιων καταγραφών και των τηλεπισκοπικών δεδομένων, τόσο ως προς τη χωρική κλίμακα όσο και ως προς το είδος της καταγραφόμενης πληροφορίας, καθώς οι δορυφορικοί αισθητήρες αποτυπώνουν κυρίως τη φασματική απόκριση της ανώτερης φυτοκάλυψης. Η γεφύρωση του χάσματος απαιτεί προσαρμογή των πρωτοκόλλων παρακολούθησης και τυποποίηση των δεδομένων πεδίου, ώστε να είναι συμβατά με δείκτες που μπορούν να ανιχνευθούν μέσω τηλεπισκόπησης [35].

Η επιτόπια καταγραφή πραγματοποιήθηκε τον μήνα Ιούνιο του 2025, περίοδο κατά την οποία η ποώδης βλάστηση βρίσκεται σε μέγιστη ανάπτυξη και επιτρέπει την αξιόπιστη αναγνώριση των ειδών και τον χαρακτηρισμό της σύνθεσης και της δομής της βλάστησης, με στόχο την επιβεβαίωση των ευρημάτων τηλεπισκόπησης και τη χαρακτηριστική ταξινόμηση των λιβαδικών τύπων.

Μέθοδος γραμμής και σημείου

Η μέθοδος γραμμής και σημείου αποτελεί μία από τις βασικές τεχνικές εκτίμησης της κάλυψης της βλάστησης, η οποία εφαρμόζεται κυρίως σε ποολίβαδα και χαμηλά φρυγανολίβαδα. Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται συρμάτινη βελόνα μήκους περίπου 1 m, η οποία φέρει δακτύλιο συγκράτησης στο άνω άκρο.

Κατά την εφαρμογή της, τοποθετείται μετροταινία κατά μήκος προκαθορισμένης τομής και λαμβάνονται παρατηρήσεις σε τακτά διαστήματα. Σε κάθε σημείο δειγματοληψίας, η βελόνα τοποθετείται κάθετα προς το έδαφος και καταγράφεται το πρώτο στοιχείο που συναντά (είδος βλάστησης, ξηρή ύλη, γυμνό έδαφος κ.λπ.).

Από το σύνολο των καταγραφών υπολογίζεται το ποσοστό κάλυψης των επιμέρους κατηγοριών, ενώ η μέθοδος χαρακτηρίζεται από υψηλή ακρίβεια και σχετικά γρήγορη εφαρμογή [36].

Η μέθοδος που εφαρμόστηκε ήταν η μέθοδος γραμμής και σημείου (line-point intercept), η οποία θεωρείται ακριβής, ταχεία στην εφαρμογή της και επομένως οικονομική.

Για κάθε περιοχή δειγματοληψίας πραγματοποιήθηκαν τρεις (3) γραμμικές τομές μήκους 50 μέτρων (15 τομές συνολικά), με τη συχνότητα καταγραφής να είναι ένα σημείο ανά μέτρο. Σε κάθε σημείο (1,2,3,4 και 5), καταγραφόταν μόνο η πρώτη επαφή της βελόνας (needle point),ανά ένα (1) μέτρο σε κάθε τομή μήκους 50 μέτρων, με το φυτικό κάλυμμα ή το υπόστρωμα, ακολουθώντας τις αρχές της μη τυχαίας επιλογής κατεύθυνσης. Η έναρξη κάθε τομής καθοριζόταν με τυχαίο τρόπο στο πεδίο: ο παρατηρητής έκλεινε τα μάτια και εκτόξευε προς τα πίσω ένα αντικείμενο (π.χ. πέτρα), και η τομή χαρασσόταν προς την κατεύθυνση πτώσης του αντικειμένου, ώστε να αποφεύγεται η υποκειμενικότητα στην επιλογή του σημείου.

Η καταγραφή και οι μετρήσεις της λιβαδικής βλάστησης πραγματοποιήθηκαν με χρήση γραμμικών τομών με μετροταινία και βελόνα καταγραφής Εικόνα 5.

Εικόνα 5: Καταγραφή και μετρήσεις λιβαδικής βλάστησης (τομές, μετροταινία).

Η καταγραφή γινόταν με βάση συγκεκριμένες κατηγορίες φυτοκάλυψης, όπως αυτές ορίζονταν από την προκαθορισμένη μεθοδολογια και ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην καταγραφή του γυμνού εδάφους και των λιθικών στοιχείων ως διακριτές κατηγορίες, λόγω της σημασίας τους για την αξιολόγηση της λιβαδικής υποβάθμισης στην περιοχή του Περδικακίου.

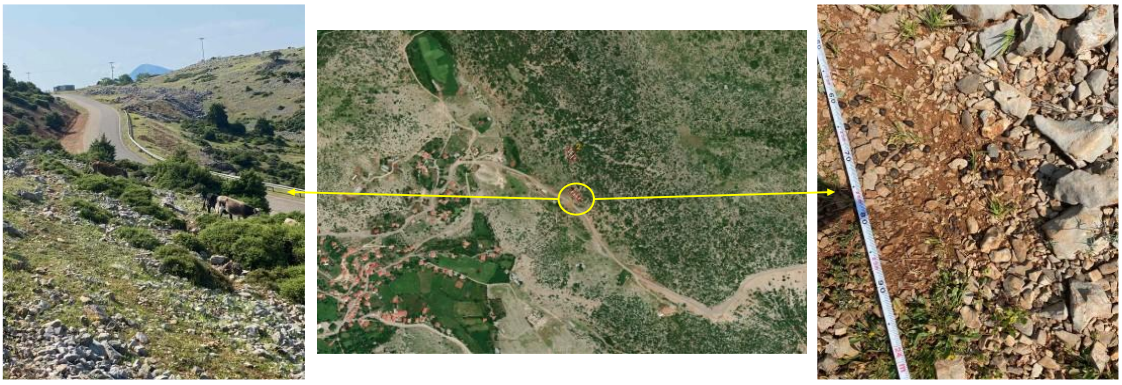
Οι κατηγορίες κάλυψης που χρησιμοποιήθηκαν περιλαμβάνουν:

- Αγρωστώδη (grasses),
- Αγρωστοειδή (graminoids)
- Ψυχανθή (legumes),
- Πλατύφυλλες πόες (herbs),
- Ξυλώδη είδη (woody plants),
- Ξηροφυλλάδα (νεκρή φυτική ύλη),
- Γυμνό έδαφος (χωρίς κάλυψη),
- Λίθοι (μη φυτική κάλυψη).

Η μέθοδος θεωρείται ακριβής, ταχεία και χαμηλού κόστους, ενώ τα αποτελέσματά της μπορούν να αναλυθούν ποσοτικά για την εξαγωγή στοιχείων κάλυψης, σύνθεσης και εκτίμησης της βοσκοϊκανότητας του κάθε τύπου λιβαδικής βλάστησης [36].

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου γραμμής και σημείου, προέκυψαν ορισμένες πρακτικές δυσκολίες λόγω των μορφολογικών χαρακτηριστικών του τοπίου και της πυκνότητας της βλάστησης. Πιο συγκεκριμένα, σε περιοχές με έντονη υψομετρική διαφοροποίηση και πυκνή φυτοκάλυψη, η προσπάθεια να διατηρηθεί σταθερή και συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ των γραμμικών τομών οδήγησε σε περιπτώσεις όπου η κατάληξη της μετροταινίας βρισκόταν σε χαμηλότερο σημείο της πλαγιάς, ενδεχομένως σε απόσταση κοντινή ή επικάλυψη με προϋπάρχουσα τομή.

Για την αποφυγή τέτοιων επικαλύψεων και για να εξασφαλιστεί η χωρική ανεξαρτησία των τομών, κρίθηκε αναγκαίο σε ορισμένες περιπτώσεις να μετακινηθεί η έναρξη της τομής σε υψηλότερο σημείο, αυξάνοντας ελαφρώς την υψομετρική απόσταση μεταξύ των διαδοχικών τομών. Η απόφαση αυτή λήφθηκε με γνώμονα τη διατήρηση της αντιπροσωπευτικότητας, χωρίς να παραβιαστεί το βασικό πρωτόκολλο της μεθοδολογίας.



Εικόνα 6: Παρουσία αιγοπροβάτων και βραχυκερατικής φυλής βοοειδών στο σημείο δειγματοληψιών 1.

Οι επιτόπιες καταγραφές έδειξαν ότι ακόμη και στα πολύγωνα που ταξινομούνται ως φυσικά χορτολίβαδα (321), η βλάστηση δεν είναι αποκλειστικά ποώδης, αλλά παρουσιάζει χαρακτηριστικά θαμνολίβαδων, με αραιότερη ή πυκνότερη παρουσία θαμνωδών ειδών.

Η ταξινόμηση CORINE Land Cover αποτυπώνει τον κυρίαρχο τύπο κάλυψης γης σε ευρύτερη κλίμακα, ενώ οι επιτόπιες καταγραφές αναδεικνύουν τη λεπτομερέστερη δομική διαφοροποίηση της βλάστησης σε τοπικό επίπεδο.

Παρακάτω φωτογραφική τεκμηρίωση *Εικόνα 7* από την επιτόπια δειγματοληψία βλάστησης στην περιοχή Περδικάκι του Δήμου Αμφιλοχίας, η οποία, βάσει CORINE Land Cover (code 321), καταγράφεται ως «Φυσικά λιβάδια».

Ωστόσο, οι επιτόπιες παρατηρήσεις αναδεικνύουν σαφείς ενδείξεις αναντιστοιχίας μεταξύ της τηλεπισκοπικής ταξινόμησης και της πραγματικής δομής της βλάστησης. Παρατηρείται έντονη παρουσία λίθων και βραχωδών εξάρσεων. Η ποώδης βλάστηση είναι σποραδική και δεν σχηματίζει συνεχές στρώμα. Υπάρχει διάσπαρτη παρουσία θαμνώνων και νεαρών δέντρων (πχ κέδρων). Η περιοχή παρουσιάζει μορφή μωσαϊκού και δεν ανταποκρίνεται στον ορισμό του ποολίβαδου.

Εικόνα 7: Σύμφωνα με το CORINE Land Cover 2018 κατατάσσονται στην κατηγορία Grassland, κατά την επιτόπια παρατήρηση κατατάσσονται σε αραιά-πυκνά θαμνολίβαδα.

Η συγκεκριμένη περίπτωση αναδεικνύει την ανάγκη συστηματικής επιτόπιας επαλήθευσης των κατηγοριών κάλυψης γης, ιδίως σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο, όπου η ανάλυση των δορυφορικών δεδομένων ενδέχεται να οδηγήσει σε υπεραπλουστεύσεις ή παρανοήσεις όσον αφορά τη βλάστηση και τη βοσκοϊκανότητα.

5.3 Φυτική κάλυψη/χλωριδική σύνθεση καταγραφών πεδίου (ταυτοποίηση ειδών)

Κατά τις επιτόπιες καταγραφές και σύμφωνα με την ως άνω διαδικασία καταγραφής τα είδη που εντοπίστηκαν στις περιοχές δειγματοληψίας (Σημείο 1,2,3,4 και 5) αναφέρονται στον κατωτέρω Πίνακα.

Πίνακας 8. Καταγεγραμμένα φυτικά είδη και οικογένειες στις περιοχές δειγματοληψίας κατά τις επιτόπιες καταγραφές του Ιουνίου 2025.

Οικογένεια/Κατηγορία	**Είδος**
Apiaceae	*Tordylium officinale*
	Torilis nodosa
Araliaceae	*Hedera helix*
Asteraceae	*Anthemis* sp.
	Bellis perennis
	Cirsium sp.
	Crepis sp.
	Matricaria chamomilla
Λοιπά Asteraceae	-
Caryophyllaceae	*Polycarpon tetraphyllum*
	Λοιπά Caryophyllaceae
Cistaceae	*Helianthemum nummularium*
Convolvulaceae	*Convolvulus althaeoides*
	Convolvulus cantabrica
Crassulaceae	*Sedum* sp.
Cupressaceae	*Juniperus communis*
Euphorbiaceae	*Euphorbia peplus*
Fabaceae	*Trifolium campestre*
	Trifolium pratense
	Trifolium resupinatum
	Medicago orbicularis
	Lotus corniculatus
	Dorycnium sp.
	Ononis sp.
	Coronilla scorpioides
	Hippocrepis comosa

Οικογένεια/Κατηγορία	**Είδος**
	Scorpiurus muricatus
Λοιπά ψυχανθή	-
Fagaceae	*Quercus coccifera*
Lamiaceae	*Lamium* sp.
	Phlomis fruticosa
	Prunella vulgaris
	Sideritis purpurea
	Teucrium chamaedrys
	Thymus sp.
Linaceae	*Linum strictum*
Oleaceae	*Fraxinus ornus*
	Phillyrea latifolia
Plantaginaceae	*Plantago bellardii*
	Plantago lanceolata
Poaceae	*Brachypodium* sp.
	Bromus sp.
	Catapodium rigidum
	Dactylis glomerata
	Festuca ovina
	Lolium perenne
	Phleum sp.
	Rostraria cristata
Λοιπά αγρωστώδη	-
Polygonaceae	*Rumex* sp.
Rosaceae	*Pyrus spinosa*
Rubiaceae	*Galium* sp.
Urticaceae	*Parietaria judaica*
Λοιπά αγρωστοειδή	-

Η επιτόπια δειγματοληψία στα πολύγωνα της περιοχής μελέτης κατέγραψε φυτικά είδη που ανήκουν σε διαφορετικές μορφές ζωής και λειτουργικές ομάδες, σύμφωνα με τη λιβαδοπονική ταξινόμηση. Με βάση τα δεδομένα πεδίου, η βλάστηση οργανώνεται σε ξυλώδη είδη, πλατύφυλλες πόες, ψυχανθή και αγρωστώδη, τα οποία συνυπάρχουν σε διαφορετικές αναλογίες στα σημεία δειγματοληψίας.

Τα ξυλώδη είδη περιλαμβάνουν κυρίως θαμνώδη και μικρά δενδρώδη στοιχεία, όπως *Quercus coccifera*, *Phillyrea latifolia*, *Juniperus communis*, *Fraxinus ornus*, *Pyrus spinosa* και *Hedera helix*. Τα είδη αυτά σχηματίζουν τον ανώτερο ή μεσαίο όροφο της βλάστησης και αποτελούν το βασικό δομικό στοιχείο των πολυγώνων, προσδίδοντας στη βλάστηση μόνιμο χαρακτήρα και χωρική συνέχεια.

Ο ποώδης υπόροφος αποτελείται από πλατύφυλλες πόες, αγρωστώδη και ψυχανθή. Οι πλατύφυλλες πόες περιλαμβάνουν είδη όπως *Anthemis* sp., *Matricaria chamomilla*, *Crepis* sp., *Cirsium* sp., *Bellis perennis*, *Plantago lanceolata*, *Plantago bellardii*, *Galium* sp., *Rumex* sp., *Linum strictum*, *Parietaria judaica*, καθώς και είδη των οικογενειών Apiaceae και Caryophyllaceae.

Τα ψυχανθή καταγράφηκαν με παρουσία ειδών όπως *Trifolium pratense*, *Trifolium campestre*, *Trifolium resupinatum*, *Medicago orbicularis*, *Lotus corniculatus*, *Hippocrepis comosa*, *Coronilla scorpioides*, *Scorpiurus muricatus*, *Ononis* sp. και *Dorycnium* sp. Τα είδη αυτά συμμετέχουν στον ποώδη όροφο και συνεισφέρουν στη λειτουργική ποικιλότητα της βλάστησης, εμφανιζόμενα διάσπαρτα ή σε μικρές συστάδες εντός των πολυγώνων.

Τα αγρωστώδη αποτελούν σημαντικό τμήμα της ποώδους βλάστησης και περιλαμβάνουν είδη όπως *Dactylis glomerata*, *Festuca ovina*, *Lolium perenne*, *Bromus* sp., *Catapodium rigidum*, *Rostraria cristata*, *Phleum* sp. και *Brachypodium* sp. Τα είδη αυτά εμφανίζονται στον υπόροφο, είτε ως συνεχής κάλυψη είτε σε μωσαϊκή κατανομή μεταξύ των ξυλωδών ειδών.

Επιπλέον, στα δεδομένα πεδίου καταγράφηκαν ημιθαμνώδη και χαμηλά φρυγανόμορφα είδη, όπως *Teucrium chamaedrys*, *Thymus* sp., *Phlomis fruticosa*, *Sideritis purpurea*, *Prunella vulgaris*, *Lamium* sp., *Helianthemum nummularium* και είδη του γένους *Convolvulus*. Τα είδη αυτά εντοπίζονται κυρίως στον χαμηλό όροφο της βλάστησης και συνυπάρχουν με τα ξυλώδη και ποώδη στοιχεία.

5.4 Αποτελέσματα σύνθεσης και κάλυψης βλάστησης

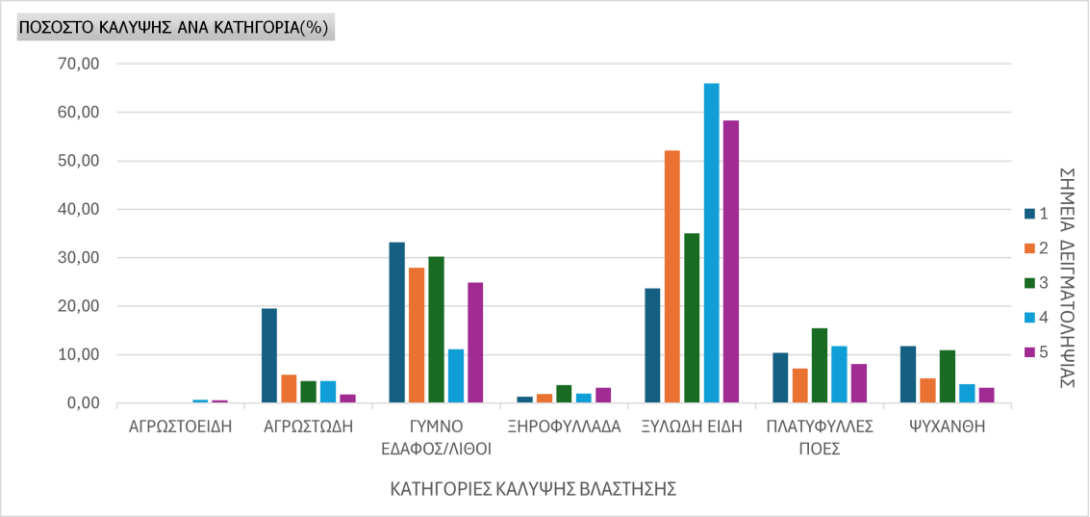
Για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν οι κατωτέρω όροι:

Κάλυψη ή φυτοκάλυψη ονομάζεται το εκατοστιαίο ποσοστό του εδάφους που καλύπτεται από την κατακόρυφη προβολή του ζωντανού υπέργειου τμήματος ενός ή περισσότερων λιβαδικών φυτών. Αποτελεί πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό της λιβαδικής βλάστησης και χρησιμοποιείται στη μελέτη του βαθμού διάβρωσης του εδάφους, στον βαθμό χρήσης και επίδρασης ενός συγκεκριμένου συστήματος βόσκησης, στις μεταβολές της βλάστησης και στις συνθήκες αποσύνθεσης της οργανικής ουσίας [36].

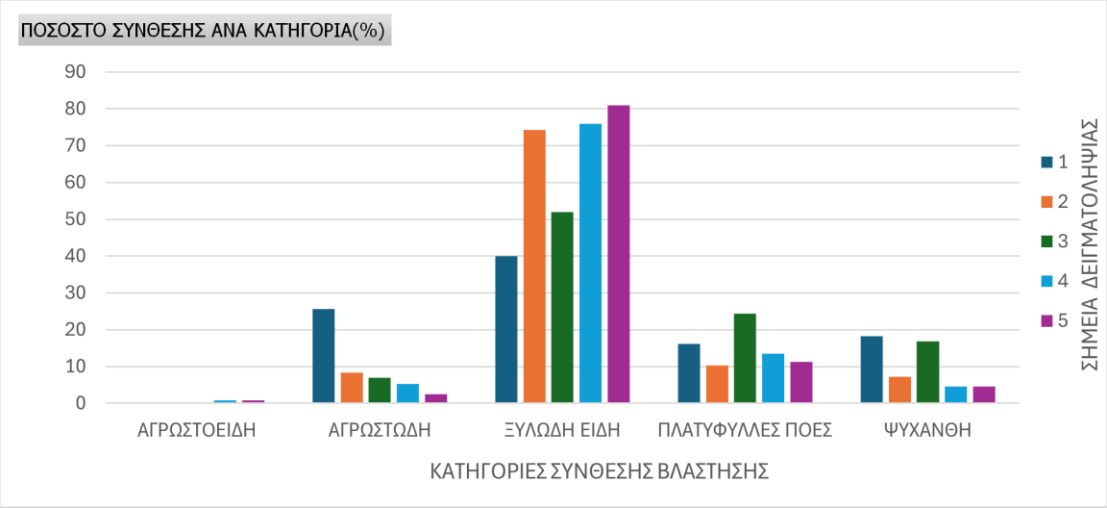
Σύνθεση λιβαδικής βλάστησης καλείται η ποσοστιαία συμμετοχή των λιβαδικών φυτών στο σύνολο της λιβαδικής βλάστησης. Υπολογίζεται είτε άμεσα με απευθείας μέτρηση είτε έμμεσα με μία από τις μεθόδους μέτρησης της κάλυψης και με αναγωγή των ποσοστών καλύψεως των επιμέρους φυτών σε ποσοστά εκατοστιαίας συμμετοχής τους στη συνολική κάλυψη της βλάστησης [36].

Οι μετρήσεις της κάλυψης αποτελούν εκτιμήσεις της σχετικής επιφάνειας του εδάφους που καταλαμβάνει η βλάστηση μέσω των χλωροφυλλούχων οργάνων της, και συνεπώς σχετίζονται άμεσα με τη δυνατότητα απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας και τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης. Από την επεξεργασία των δεδομένων κάλυψης προκύπτει η ποσοστιαία έκφρασή της μετά την αφαίρεση των μη φυτικών συστατικών (π.χ. γυμνό έδαφος, λίθοι), η οποία ορίζεται ως σύνθεση της βλάστησης [36].

Αντίθετα, η βιομάζα εκφράζει την αποτελεσματικότητα της φωτοσύνθεσης, καθώς ποσοτικοποιεί τη φωτοσυνθετική απόδοση των φυτών και την πρωτογενή παραγωγή. Στο πλαίσιο της διαχείρισης βοσκοτόπων, ιδιαίτερη σημασία έχει η βιομάζα συγκεκριμένων ειδών που αποτελούν πηγές βοσκήσιμης ύλης, καθώς η αύξησή της συνδέεται άμεσα με τη βοσκοϊκανότητα και την παραγωγικότητα του οικοσυστήματος [36].



Σχήμα 24: Ποσοστό κάλυψης (%) ανά κατηγορία βλάστησης στα σημεία δειγματοληψίας κατά τις επιτόπιες καταγραφές του Ιουνίου 2025.



Σχήμα 25: Ποσοστό σύνθεσης (%) ανά κατηγορία βλάστησης στα σημεία δειγματοληψίας κατά τις επιτόπιες καταγραφές του Ιουνίου 2025.

Τα ποσοστά κάλυψης και σύνθεσης της βλάστησης στα σημεία δειγματοληψίας (Σχήμα 24, Σχήμα 25) αναδεικνύουν τη διαφοροποίηση της δομής και της φυσιογνωμίας των λιβαδικών τύπων στην περιοχή μελέτης. Ειδικότερα, παρατηρείται σημαντική συμμετοχή των ξυλωδών ειδών σε ορισμένα σημεία, γεγονός που υποδηλώνει την παρουσία θαμνώδους βλάστησης, ενώ σε άλλα σημεία καταγράφεται αυξημένη συμμετοχή ποωδών ειδών, αντανακλώντας πιο ανοικτές λιβαδικές συνθήκες. Η κατηγορία των γυμνών εδαφών εμφανίζει επίσης αξιοσημείωτα ποσοστά σε επιμέρους θέσεις, στοιχείο που ενδέχεται να σχετίζεται με την επίδραση της βόσκησης ή/και τις τοπικές εδαφικές και τοπογραφικές συνθήκες. Παράλληλα, η παρουσία πλατύφυλλων ποωδών και ψυχανθών, έστω και σε μικρότερα ποσοστά, συμβάλλει στη διαφοροποίηση της σύνθεσης και υποδηλώνει την ύπαρξη λειτουργικά διαφορετικών φυτικών ομάδων. Συνολικά, τα παραπάνω πρότυπα επιβεβαιώνουν ότι η βλάστηση της περιοχής χαρακτηρίζεται από μωσαϊκή κατανομή και ετερογένεια, με εναλλαγή θαμνωδών και ποωδών στοιχείων. Η εικόνα αυτή είναι συμβατή με λιβαδοπονικά συστήματα μεσογειακού τύπου υπό καθεστώς βόσκησης, όπου η ένταση και η διάρκεια της βόσκησης, σε συνδυασμό με τις περιβαλλοντικές συνθήκες, διαμορφώνουν τη δομή και τη σύνθεση της βλάστησης.

Όσον αφορά τους δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν για την ανίχνευση των μεταβολών της βλάστησης σε επίπεδο πολυγώνων, η ερμηνεία των τιμών τους συνδέεται άμεσα με τη σύνθεση και τη δομή της βλάστησης, όπως αυτή προέκυψε από τις επιτόπιες καταγραφές. Ειδικότερα, οι κατηγορίες κάλυψης βλάστησης που αποτυπώνονται στο Σχήμα 24 (π.χ. ποώδη, ξυλώδη, γυμνό έδαφος) επηρεάζουν τη φασματική απόκριση της επιφάνειας και, κατά συνέπεια, τις τιμές των τηλεπισκοπικών δεικτών.

Ωστόσο, σημειώνεται ότι η σύγκριση αυτή δεν μπορεί να θεωρηθεί πλήρως ποσοτική, καθώς οι επιτόπιες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε χωρικά περιορισμένες επιφάνειες, οι οποίες δεν καλύπτουν κατ' ανάγκη ολόκληρη την ετερογένεια των πολυγώνων ανάλυσης της τηλεπισκόπησης.

5.5 Σύνδεση με remote sensing/ανάλυση πολυγώνων δειγματοληψίας

Σύμφωνα με την υπ'αριθμ. 1058/71977 Απόφαση περί "Καθορισμού των Προδιαγραφών και του Περιεχομένου των Διαχειριστικών Σχεδίων Βόσκησης", στο πλαίσιο εφαρμογής των διατάξεων του ν. 4351/2015 (ΦΕΚ 164 Α') (ΦΕΚ 2331/Β/7-7-2017), προτείνεται η αξιοποίηση σύγχρονων τεχνολογιών γεωπληροφορικής, όπως εφαρμογές τηλεπισκόπησης, ψηφιακής φωτογραμμετρίας και Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ), με στόχο την αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης και τη διαχρονική παρακολούθηση της βλάστησης μέσω δορυφορικών δεδομένων ή/και αεροφωτογραφιών υψηλής ανάλυσης [9]. Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, η προσέγγιση αυτή εφαρμόζεται μέσω της ανάλυσης τηλεπισκοπικών δεδομένων στα πολύγωνα των επιτόπιων καταγραφών, επιτρέποντας τη διαχρονική διερεύνηση των μεταβολών της βλάστησης και τη συσχέτισή τους με τις πιέσεις που ασκούνται στο λιβαδικό οικοσύστημα.

Οι τιμές των δεικτών εξήχθησαν ξανά από το Google Earth Engine και οργανώθηκαν σε χρονοσειρές ανά πολύγωνο και ανά έτος. Σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρήθηκαν ελλείψεις τιμών λόγω νεφοκάλυψης ή φίλτρων ποιότητας των δορυφορικών εικόνων. Σε περιορισμένες περιπτώσεις εξετάστηκε η δυνατότητα συμπλήρωσης ελλειπουσών τιμών με φίλτρο Kalman. Ωστόσο, η τελική ανάλυση βασίστηκε κυρίως σε διαθέσιμες καθαρές παρατηρήσεις και σε ετήσια στατιστικά (median, p90). Η χρήση Kalman δεν αποτέλεσε κεντρικό στάδιο της τελικής μεθοδολογίας.

Η ανάλυση σε τοπική κλίμακα βασίστηκε σε ετήσια στατιστική επεξεργασία των δεικτών NDVI, EVI, NDMI, NDWIg, BSI και SAVI [32] [35], μέσω υπολογισμού της διάμεσης τιμής (median) και της 90ης εκατοστιαίας θέσης (p90) [33] για κάθε έτος της περιόδου μελέτης. Η χρήση της median επιτρέπει τη σταθερή αποτύπωση της κεντρικής τάσης των τιμών περιορίζοντας την επίδραση ακραίων τιμών, ενώ η p90 αποτυπώνει τη συμπεριφορά των υψηλότερων τιμών φυτοκάλυψης, παρέχοντας ένδειξη της μέγιστης λειτουργικής απόκρισης της βλάστησης εντός κάθε πολυγώνου. Για την αξιολόγηση της επίδρασης των κλιματικών συνθηκών στη δυναμική της βλάστησης εφαρμόστηκε μοντέλο κανονικοποίησης ως προς το κλίμα (climate normalization), στο οποίο ο δείκτης κορύφωσης της βλάστησης (NDVI_p90) μοντελοποιήθηκε ως συνάρτηση της ετήσιας βροχόπτωσης και της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (ERA5-Land) . Με τον τρόπο αυτό εκτιμήθηκε η αναμενόμενη τιμή του NDVI με βάση τις κλιματικές συνθήκες, ενώ η διαφορά μεταξύ της παρατηρούμενης και της προβλεπόμενης τιμής (residual) ερμηνεύθηκε ως κλιματικά κανονικοποιημένη απόκλιση της βλάστησης [37].

5.5.1 Ανάλυση και ερμηνεία του δείκτη NDVI

«Για την αποτύπωση των υψηλών τιμών βλάστησης χρησιμοποιήθηκε το 90ό ποσοστημόριο (p90) των τιμών NDVI ανά πολύγωνο και έτος. Η επιλογή του p90 έγινε ώστε να αποτυπώνονται οι κορυφές της βλάστησης χωρίς να επηρεάζονται τα αποτελέσματα από μεμονωμένες ακραίες τιμές ή θόρυβο, όπως θα συνέβαινε με τη χρήση του μέγιστου.»

Ο κώδικας 5 παρατίθεται στο Παράρτημα.

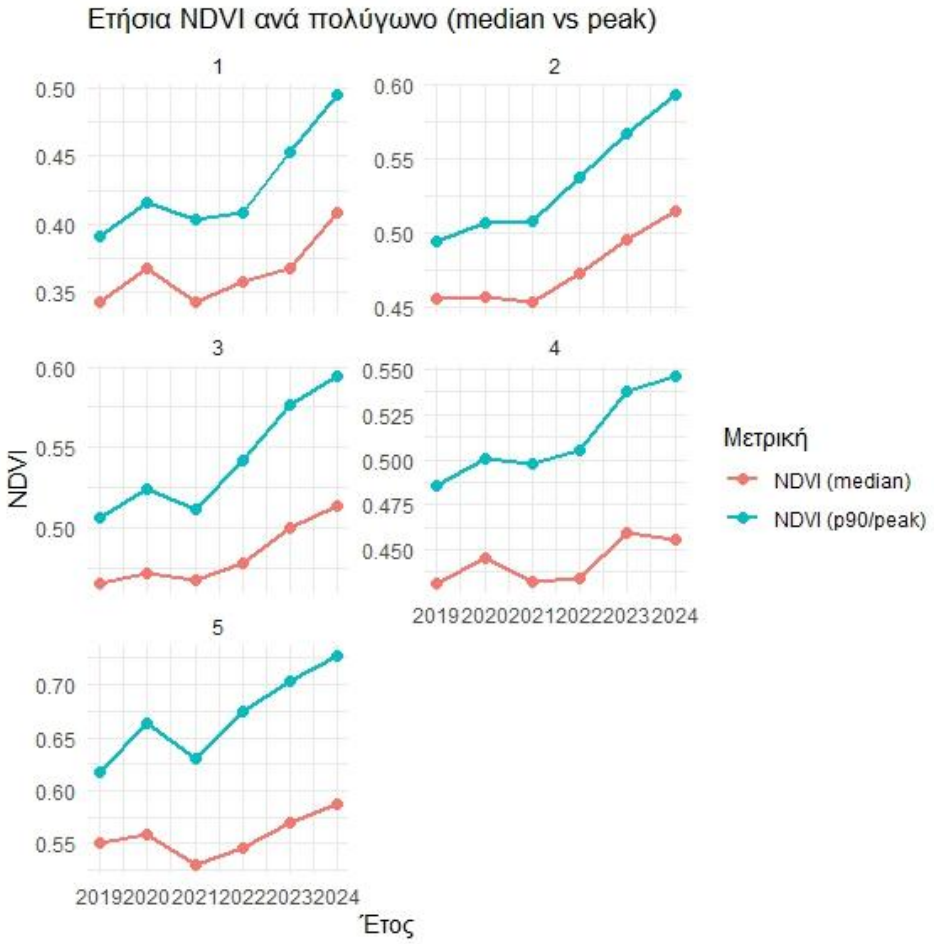
«Ετήσια NDVI ανά πολύγωνο (median vs p90/peak)»

Το γράφημα παρουσιάζει την ετήσια εξέλιξη της βλάστησης για κάθε πολύγωνο την περίοδο 2019–2024, χρησιμοποιώντας δύο συμπληρωματικές στατιστικές του NDVI:

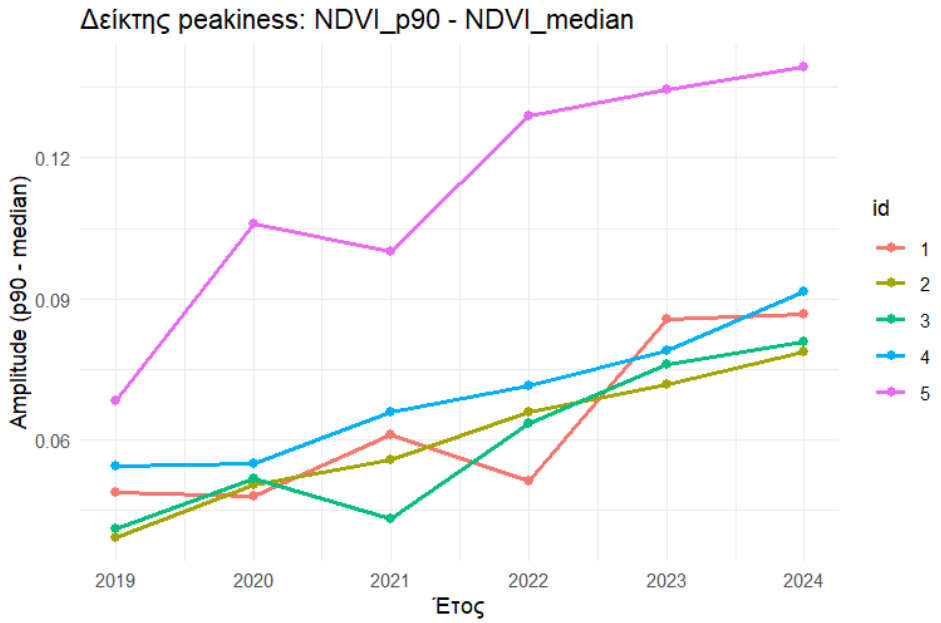
- τη διάμεσο τιμή (median), που εκφράζει τη γενική/μέση κατάσταση της βλάστησης, και
- το 90ό εκατοστημόριο (p90/peak), που αποτυπώνει τις υψηλότερες τιμές NDVI, δηλαδή τις πιο παραγωγικές ή πυκνές φυτοκαλύψεις εντός του πολυγώνου.

Σε όλα τα πολύγωνα παρατηρείται ότι οι τιμές NDVI p90 είναι συστηματικά υψηλότερες από τις median, γεγονός που υποδηλώνει την ύπαρξη χωρικής ετερογένειας στη βλάστηση (πυκνότερες "νησίδες" μέσα σε πιο μέτρια φυτοκάλυψη).

Η παράλληλη ανοδική τάση τόσο της median όσο και της p90 στις περισσότερες περιπτώσεις υποδηλώνει γενική βελτίωση της φυτοκάλυψης με την πάροδο του χρόνου, ενώ τα έτη με μικρές αποκλίσεις ή προσωρινές πτώσεις (π.χ. γύρω στο 2020–2021) μπορεί να σχετίζονται με κλιματικές πιέσεις ή αλλαγές στη χρήση γης (Σχήμα 26).



Σχήμα 26: Ετήσια εξέλιξη του δείκτη NDVI ανά πολύγωνο δειγματοληψίας στην περιοχή μελέτης για την περίοδο 2019–2024, με σύγκριση της διάμεσης τιμής (NDVI_median) και της τιμής κορυφής βλάστησης (NDVI_p90/peak).



Σχήμα 27: Ετήσια εξέλιξη του δείκτη peakiness (NDVI_p90 − NDVI_median) ανά πολύγωνο δειγματοληψίας για την περίοδο 2019-2024.

Το διάγραμμα του δείκτη peakiness (NDVI_p90 − NDVI_median) αποτυπώνει τη χωρική ανομοιογένεια της βλάστησης εντός των πολυγώνων. Η γενικευμένη αύξηση του amplitude την περίοδο 2019–2024 υποδηλώνει ότι η βελτίωση της βλάστησης δεν είναι ομοιόμορφη, αλλά εκφράζεται κυρίως μέσω ενίσχυσης συγκεκριμένων ιδιαίτερα παραγωγικών patches. Το φαινόμενο είναι εντονότερο στο πολύγωνο 5, όπου παρατηρείται σταθερά υψηλή και αυξανόμενη τιμή του δείκτη, γεγονός που υποδηλώνει έντονη μωσαϊκή δομή βλάστησης.

Η ανάλυση των NDVI median και NDVI p90 ανά πολύγωνο επιτρέπει τη διάκριση μεταξύ "γενικευμένης" μεταβολής της βλάστησης και μεταβολής που περιορίζεται σε ιδιαίτερα παραγωγικά patches. Η αύξηση του δείκτη amplitude (NDVI p90 − NDVI median) υποδηλώνει ενίσχυση της χωρικής ανομοιογένειας (patchiness), δηλαδή βελτίωση/διατήρηση υψηλών τιμών σε περιορισμένες νησίδες βλάστησης ενώ το υπόλοιπο πολύγωνο παραμένει χαμηλότερο. Το μοτίβο αυτό είναι συμβατό με ανομοιόμορφες τοπικές πιέσεις, όπως η βόσκηση (διαφορετική ένταση/πρόσβαση εντός του πολυγώνου), σε αντίθεση με κλιματικές επιδράσεις που τείνουν να μεταβάλλουν πιο ομοιόμορφα το σύνολο του πολυγώνου.

Τα αποτελέσματα της επιτόπιας καταγραφής της βλάστησης δείχνουν σαφείς διαφοροποιήσεις στη σύνθεση και την πυκνότητα της φυτοκάλυψης μεταξύ των πέντε ομάδων. Ομάδες με αυξημένα ποσοστά ξυλωδών ειδών, πλατύφυλλων ποωδών και γενικότερα πυκνότερης βλάστησης εμφανίζουν υψηλότερα ποσοστά φυτοκάλυψης, ενώ ομάδες με μεγαλύτερη συμμετοχή γυμνού εδάφους ή αραιής βλάστησης παρουσιάζουν χαμηλότερη συνολική κάλυψη.

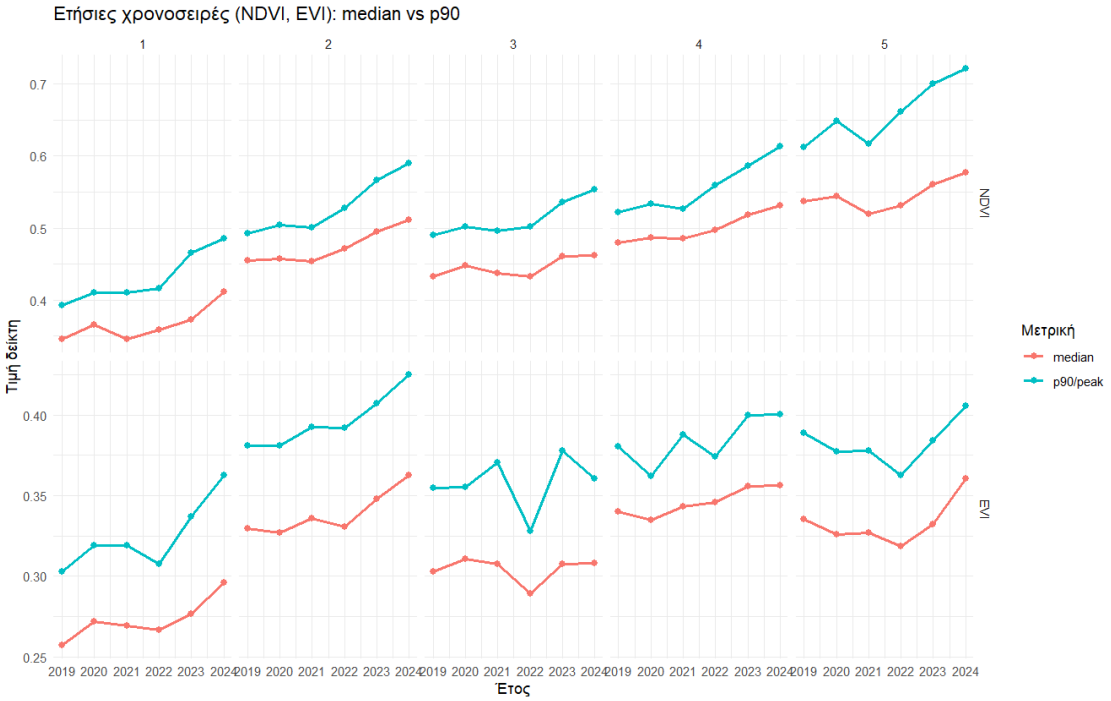
5.5.2 Ανάλυση και ερμηνεία των δεικτών NDVI-EVI

Ο δείκτης NDVI παρουσιάζει περιορισμούς ως προς την ικανότητά του να αποτυπώνει λεπτές μεταβολές στον φαινολογικό κύκλο της βλάστησης, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου οι αλλαγές είναι μικρής έντασης. Για τον λόγο αυτό, δεν θεωρείται πάντα ο καταλληλότερος δείκτης για την παρακολούθηση δυναμικών μεταβολών της βλάστησης σε βάθος χρόνου. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί εναλλακτικοί δείκτες, όπως ο δείκτης Green Red Vegetation Index (GRVI), ο οποίος χρησιμοποιήθηκε από τους Motohka et al. (2010) για τη μελέτη της

φαινολογίας καλλιεργειών. Ο δείκτης αυτός λαμβάνει θετικές τιμές για υγιή βλάστηση, αρνητικές για γυμνό έδαφος και τιμές κοντά στο μηδέν για υδάτινες επιφάνειες [2].

Ο Βελτιωμένος Δείκτης Βλάστησης (Enhanced Vegetation Index – EVI) (Huete & Justice, 1999) αναπτύχθηκε ως βελτιωμένη εκδοχή του NDVI, ενσωματώνοντας επιπλέον φασματική πληροφορία με στόχο τη μείωση των σφαλμάτων που σχετίζονται με την επίδραση του εδάφους και της ατμόσφαιρας, ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλή βιομάζα. Ο δείκτης EVI εμφανίζει αυξημένη ευαισθησία σε χαρακτηριστικά της φυτοκάλυψης, όπως η φυλλική επιφάνεια (Leaf Area Index – LAI), η δομή της κόμης και οι φαινολογικές μεταβολές. Ωστόσο, για τον υπολογισμό του απαιτείται η χρήση του μπλε φασματικού καναλιού, γεγονός που μπορεί να περιορίσει την εφαρμογή του σε περιπτώσεις όπου τα διαθέσιμα δεδομένα δεν περιλαμβάνουν τη συγκεκριμένη πληροφορία [2].

Η εικόνα που προκύπτει από τις επιτόπιες καταγραφές είναι σε γενικές γραμμές συνεπής με τα αποτελέσματα των δεικτών NDVI και EVI. Συγκεκριμένα, πολύγωνα/ομάδες που στο πεδίο χαρακτηρίστηκαν από μεγαλύτερη πυκνότητα και πιο ανεπτυγμένη φυτοκάλυψη αντιστοιχούν σε υψηλότερες τιμές NDVI και EVI στις ετήσιες χρονοσειρές. Αντίθετα, περιοχές με αυξημένη παρουσία γυμνού εδάφους ή χαμηλής ποώδους κάλυψης εμφανίζουν χαμηλότερες τιμές των δεικτών.



Σχήμα 28: Ετήσιες χρονοσειρές NDVI και EVI ανά πολύγωνο δειγματοληψίας για την περίοδο 2019–2024, με σύγκριση των μετρικών median και p90/peak.

Ιδιαίτερα ο δείκτης EVI παρουσιάζει εντονότερες διακυμάνσεις σε σχέση με τον NDVI, γεγονός που μπορεί να ερμηνευθεί ως μεγαλύτερη ευαισθησία του EVI στη δομή και την πυκνότητα της βλάστησης, ιδίως σε περιοχές με υψηλότερη φυλλική επιφάνεια. Αυτό πιθανόν να μπορεί να συσχετιστεί με τις επιτόπιες παρατηρήσεις, όπου διαφορές στην πυκνότητα και στο είδος της βλάστησης (π.χ. ξυλώδη έναντι ποωδών) αποτυπώνονται πιο καθαρά στον EVI.

Στο επόμενο στάδιο της ανάλυσης, η ενσωμάτωση δεικτών υγρασίας και κλιματικών μεταβλητών θα επιτρέψει τη διάκριση μεταξύ μεταβολών που σχετίζονται με κλιματικούς παράγοντες και μεταβολών που ενδέχεται να οφείλονται σε τοπικές πιέσεις, όπως η βόσκηση.

Ως προς την συμπεριφορά των δεικτών και των διαγραμμάτων τους

Η ανάλυση των διαγραμμάτων των δεικτών NDVI και EVI για τα επιμέρους πολύγωνα της περιοχής μελέτης ανέδειξε σαφείς διαφοροποιήσεις τόσο ως προς το επίπεδο της φυτοκάλυψης όσο και ως προς τη χωρική της κατανομή. Το Πολύγωνο 1 εμφανίζει συστηματικά τις χαμηλότερες τιμές NDVI και EVI, καθώς και περιορισμένη διαφορά μεταξύ της διάμεσης τιμής (median) και του 90ου εκατοστημορίου (p90). Το μοτίβο αυτό υποδηλώνει μια σχετικά ομοιογενή αλλά συνολικά φτωχή βλάστηση, χωρίς την παρουσία έντονων πυκνών τμημάτων υψηλής φυτομάζας. Η εικόνα αυτή διαφοροποιείται από τα Πολύγωνα 2 και 3, όπου παρατηρούνται υψηλότερες τιμές NDVI και EVI και μεγαλύτερη διαφοροποίηση μεταξύ median και p90. Στο Πολύγωνο 2, η παράλληλη αύξηση της median και της p90 τιμής υποδηλώνει σχετικά ομοιογενή βελτίωση της βλάστησης σε ολόκληρη την έκταση του πολυγώνου, χωρίς έντονη ανάπτυξη μεμονωμένων "νησίδων" υψηλής φυτοκάλυψης. Αντίθετα, στο Πολύγωνο 3 η αυξημένη απόκλιση μεταξύ median και p90, ιδίως στα πιο πρόσφατα έτη, καταδεικνύει μεγαλύτερη χωρική ανομοιογένεια και μωσαϊκή κατανομή της βλάστησης. Η συμπεριφορά αυτή αποτυπώνεται εντονότερα στον δείκτη EVI, ο οποίος εμφανίζει μεγαλύτερες διακυμάνσεις σε σχέση με τον NDVI, γεγονός που υποδηλώνει αυξημένη ευαισθησία του δείκτη στη δομή και την κατακόρυφη ανάπτυξη της βλάστησης. Τα Πολύγωνα 4 και 5 παρουσιάζουν συνολικά τις υψηλότερες τιμές NDVI και EVI, γεγονός που υποδηλώνει καλή έως πολύ καλή κατάσταση της φυτοκάλυψης. Και στα δύο πολύγωνα παρατηρείται ταυτόχρονη άνοδος τόσο της median όσο και της p90 τιμής, στοιχείο που αντανακλά γενικευμένη ανάπτυξη της βλάστησης. Ωστόσο, στο Πολύγωνο 5 η μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ median και p90 υποδηλώνει εντονότερη χωρική ανομοιογένεια και την παρουσία πολύ πυκνών νησίδων βλάστησης, σε αντίθεση με το Πολύγωνο 4, όπου η βλάστηση εμφανίζεται περισσότερο ομοιογενώς κατανεμημένη.

Ως προς τις καταγραφές πεδίου και τις πιέσεις

Η ερμηνεία των δεικτών NDVI και EVI ενισχύεται από τη σύγκρισή τους με τις επιτόπιες καταγραφές και τις παρατηρούμενες πιέσεις στην περιοχή μελέτης. Στο Πολύγωνο 1, οι χαμηλές τιμές των δεικτών συνάδουν με την επιτόπια εικόνα περιορισμένης φυτοκάλυψης, αυξημένης παρουσίας αραιής ποώδους βλάστησης και σημαντικών ποσοστών γυμνού εδάφους. Η συμπεριφορά αυτή είναι συμβατή με συνθήκες αυξημένης πίεσης και περιορισμένης αναγεννητικής ικανότητας της βλάστησης.

Στο Πολύγωνο 2, οι μέτριες έως υψηλές τιμές NDVI και EVI συμφωνούν με τις επιτόπιες καταγραφές αυξημένης και σχετικά συνεχούς φυτοκάλυψης, με περιορισμένες ενδείξεις γυμνού εδάφους. Η απουσία έντονης απόκλισης μεταξύ median και p90 υποδηλώνει ότι η βλάστηση είναι σχετικά ομοιόμορφα κατανεμημένη, χωρίς σαφή ενδείξεις χωρικής υποβάθμισης ή συγκέντρωσης πιέσεων.

Στο Πολύγωνο 3, η αυξημένη χωρική ανομοιογένεια που αποτυπώνεται στα διαγράμματα NDVI και EVI αντανακλάται και στις επιτόπιες παρατηρήσεις, όπου καταγράφηκε μωσαϊκή δομή βλάστησης με συνύπαρξη πυκνότερων και αραιότερων τμημάτων. Η εικόνα αυτή μπορεί να συνδέεται με διαφοροποιημένη ένταση πιέσεων σε τοπική κλίμακα ή με μικροπεριβαλλοντικές διαφοροποιήσεις που επηρεάζουν τη δομή της βλάστησης.

Τέλος, στα Πολύγωνα 4 και 5, οι υψηλές τιμές NDVI και EVI επιβεβαιώνουν τη γενικά καλή κατάσταση της βλάστησης που καταγράφηκε στο πεδίο. Στο Πολύγωνο 4, η ομοιογενής κατανομή της φυτοκάλυψης υποδηλώνει περιορισμένες πιέσεις και σταθερές συνθήκες ανάπτυξης. Αντίθετα, στο Πολύγωνο 5, παρά τη συνολικά υψηλή φυτοκάλυψη, η έντονη χωρική ανομοιογένεια και η παρουσία πολύ πυκνών νησίδων βλάστησης υποδηλώνουν

διαφοροποιημένη κατανομή της βλάστησης, η οποία ενδέχεται να σχετίζεται με τοπικές διαφοροποιήσεις πιέσεων ή χρήσεων γης.

Σύνδεση NDVI / EVI με βόσκηση

Η χωρική και χρονική συμπεριφορά των δεικτών NDVI και EVI μπορεί να ερμηνευθεί σε σημαντικό βαθμό υπό το πρίσμα της βόσκησης.
Στα πολύγωνα όπου παρατηρούνται χαμηλότερες τιμές median NDVI/EVI και μικρότερη διαφορά μεταξύ median και p90 (π.χ. Πολύγωνο 1), η εικόνα είναι συμβατή με εκτεταμένη ή πιο ομοιόμορφη πίεση βόσκησης, η οποία περιορίζει τη συνολική φυτοκάλυψη και δεν επιτρέπει την ανάπτυξη ιδιαίτερα πυκνών νησίδων βλάστησης. Το εύρημα αυτό ενισχύεται από την επιτόπια καταγραφή αυξημένων ποσοστών γυμνού εδάφους και αραιής ποώδους βλάστησης.

Αντίθετα, στα πολύγωνα με υψηλότερες τιμές NDVI/EVI και αυξημένο amplitude (p90 − median), όπως το Πολύγωνο 5, η ύπαρξη πυκνών "patches" βλάστησης υποδηλώνει χωρικά ανομοιόμορφη πίεση βόσκησης. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η βόσκηση φαίνεται να συγκεντρώνεται σε συγκεκριμένα τμήματα του πολυγώνου, αφήνοντας άλλες περιοχές λιγότερο καταπονημένες, όπου η βλάστηση αναπτύσσεται πυκνότερα. Η συμπεριφορά αυτή αποτυπώνεται καθαρά στη διάκριση μεταξύ median (γενική κατάσταση) και p90 (καλύτερα patches).

Τα ενδιάμεσα πολύγωνα (2–4) εμφανίζουν πιο παράλληλη μεταβολή median και p90, γεγονός που υποδηλώνει σχετικά ομοιόμορφη κατάσταση βλάστησης, πιθανώς αποτέλεσμα είτε χαμηλότερης έντασης βόσκησης είτε σταθερής διαχειριστικής πρακτικής.

Οι τιμές του EVI εμφανίζονται συστηματικά χαμηλότερες από τις αντίστοιχες του NDVI σε όλα τα πολύγωνα και έτη, γεγονός αναμενόμενο λόγω του διαφορετικού μαθηματικού ορισμού των δύο δεικτών. Ο EVI ενσωματώνει διορθώσεις για την επίδραση του εδάφους και της ατμόσφαιρας και είναι λιγότερο ευαίσθητος σε έντονα πράσινα patches, αποδίδοντας πιο συντηρητικές τιμές. Η συμπεριφορά αυτή είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για λιβαδικά οικοσυστήματα με ανομοιογενή φυτοκάλυψη, όπως αυτά της περιοχής μελέτης.

5.5.3 Ανάλυση και ερμηνεία δεικτών NDMI-NDWIg

Στην παρούσα εργασία ο NDMI αποτυπώνει κυρίως τη σχετική υγρασία της βλάστησης, ενώ ο NDWIg (Green-NIR) σχετίζεται με επιφανειακό νερό / πολύ υγρές επιφάνειες, και μπορεί να λειτουργήσει βοηθητικά, όχι όμως ως μοναδικός δείκτης υδατικής κατάστασης στα λιβαδικά οικοσυστήματα. Η ταυτόχρονη παρουσία median και p90 επιτρέπει τη διάκριση μεταξύ της γενικής κατάστασης υγρασίας στο πολύγωνο και των υγρότερων τμημάτων του.

Στη βιβλιογραφία ο όρος "NDWI" χρησιμοποιείται με δύο διαφορετικούς ορισμούς και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε παρερμηνείες.
Ο NDWI του McFeeters (1996) ορίζεται ως (Green − NIR) / (Green + NIR) και χρησιμοποιείται κυρίως για τον εντοπισμό υδάτινων επιφανειών, όπου οι τιμές τείνουν να είναι θετικές [38]. Σε χερσαία οικοσυστήματα με βλάστηση, ο δείκτης αυτός δίνει συχνά αρνητικές τιμές και δεν αποτελεί άμεσο δείκτη υγρασίας βλάστησης.

Για την εκτίμηση της υδατικής κατάστασης της βλάστησης είναι καταλληλότερος ο NDMI (Normalized Difference Moisture Index), ο οποίος ορίζεται ως (NIR − SWIR) / (NIR + SWIR) (π.χ. B8 και B11/B12 στο Sentinel-2) και σχετίζεται περισσότερο με το περιεχόμενο νερού στο φύλλωμα / κόμη και προτάθηκε αρχικά από τον Gao (1996) ως NDWI [39].

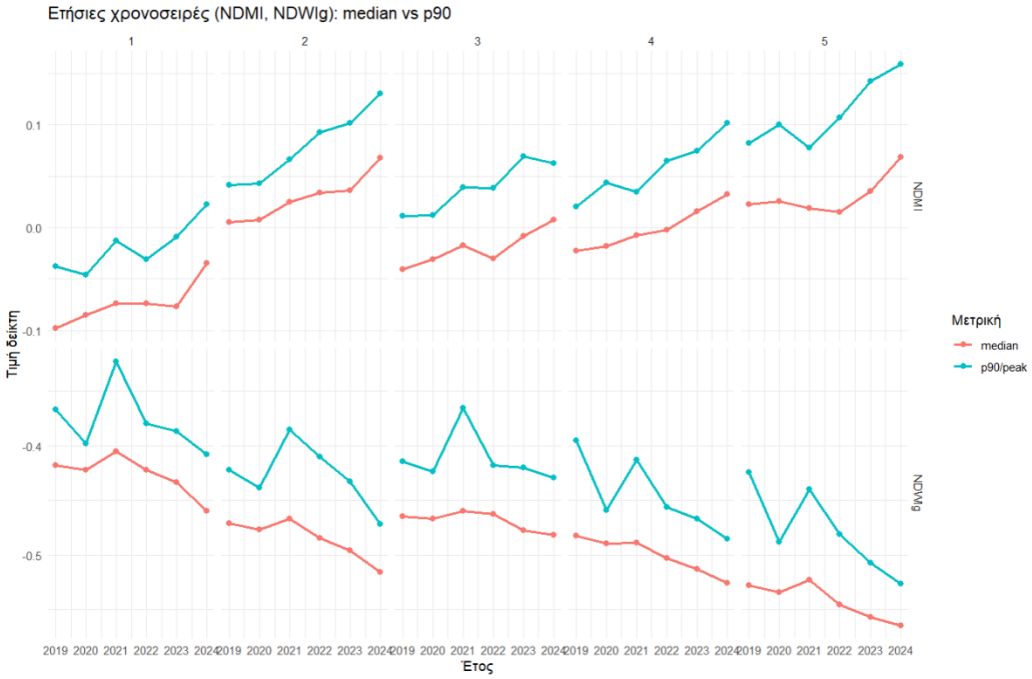
Οι δείκτες υγρασίας/νερού (NDMI και NDWIg) δείχνουν ότι η "υγρή" συνιστώσα του συστήματος μεταβάλλεται χωροχρονικά, αλλά η ερμηνεία τους απαιτεί προσοχή λόγω του διαφορετικού φυσικού νοήματος κάθε δείκτη (π.χ. ο NDMI είναι πιο κατάλληλος για σχετική υγρασία βλάστησης, ενώ ο NDWIg αντανακλά κυρίως αντιθέσεις νερού-ξηράς και σχετίζεται έντονα με το NIR). Συνεπώς, τα συμπεράσματα για "υγρασία εδάφους" δεν πρέπει να στηρίζονται σε έναν μόνο δείκτη.

Ως προς την συμπεριφορά των δεικτών και των διαγραμμάτων τους

Το Σχήμα 30 απεικονίζει τις ετήσιες χρονοσειρές των δεικτών NDMI και NDWIg (median και p90) για τα πέντε πολύγωνα της περιοχής μελέτης. Στον NDMI παρατηρείται σαφής ανοδική τάση τόσο στη median όσο και στην p90 τιμή σχεδόν σε όλα τα πολύγωνα, με την p90 να παρουσιάζει συστηματικά υψηλότερες τιμές. Αυτό υποδηλώνει ότι, παρά τις ετήσιες διακυμάνσεις, η βλάστηση εμφανίζει σταδιακή βελτίωση της υδατικής της κατάστασης την περίοδο 2019–2024, ιδιαίτερα στα πιο ευνοημένα ή προστατευμένα patches. Η σύγκλιση ή παράλληλη άνοδος median και p90 δείχνει ότι η αύξηση της υγρασίας δεν περιορίζεται μόνο σε μεμονωμένες νησίδες, αλλά αφορά σε μεγάλο βαθμό και τη γενική επιφάνεια των πολυγώνων.

Αντίθετα, ο NDWIg εμφανίζει πτωτική τάση σε όλα τα πολύγωνα, με τις median τιμές να μειώνονται σταδιακά και τις p90 να ακολουθούν την ίδια κατεύθυνση. Η συμπεριφορά αυτή υποδηλώνει μείωση της επιφανειακής υγρασίας ή/και της υγρασίας του εδάφους, πιθανώς λόγω αυξημένης εξατμισοδιαπνοής, μικρότερης διάρκειας υγρών περιόδων ή γενικότερης ξηρότερης επιφανειακής κατάστασης. Η ταυτόχρονη πτώση median και p90 υποδηλώνει ότι το φαινόμενο είναι χωρικά γενικευμένο και όχι τοπικό.

Ο συνδυασμός των δύο δεικτών διαπιστώνει ότι: ενώ η βλάστηση φαίνεται να διατηρεί ή και να βελτιώνει την εσωτερική της υγρασία (NDMI), η επιφανειακή υγρασία του εδάφους μειώνεται (NDWIg). Αυτό το μοτίβο είναι συμβατό με συνθήκες όπου η βλάστηση προσαρμόζεται σε ξηρότερες συνθήκες, αξιοποιώντας βαθύτερα εδαφικά αποθέματα ή σύντομες υγρές περιόδους, χωρίς να αναιρείται η συνολική τάση επιφανειακής ξηρασίας.



Σχήμα 29: Ετήσιες χρονοσειρές των δεικτών NDMI και NDWIg ανά πολύγωνο δειγματοληψίας στην περιοχή μελέτης για την περίοδο 2019–2024, με σύγκριση των μετρικών median και p90/peak.

Ως προς τις καταγραφές πεδίου και τις πιέσεις

Στο πλαίσιο της βόσκησης, η πτώση του NDWIg μπορεί να αντανακλά αλλαγές στη φασματική αντίθεση Green–NIR και πιθανή διαφοροποίηση της επιφανειακής υγρασίας ή της φυτοκάλυψης. Η ερμηνεία του πρέπει να γίνεται συμπληρωματικά με τους δείκτες NDMI και BSI, καθώς και με επιτόπιες παρατηρήσεις και στοιχεία βόσκησης. Παράλληλα, η διατήρηση ή αύξηση του NDMI υποδηλώνει ότι η βλάστηση που παραμένει διατηρεί λειτουργική δραστηριότητα και προσαρμοστικότητα στις τοπικές συνθήκες. Το εύρημα αυτό συμβάλλει στη διάκριση μεταξύ κλιματικά καθοδηγούμενων μεταβολών και πιθανών τοπικών πιέσεων, προσθέτοντας συμπληρωματική ερμηνεία πέρα από τους δείκτες βλάστησης NDVI και EVI.

5.5.4 Ανάλυση και ερμηνεία δεικτών BSI-SAVI

Επίσης, για την ανίχνευση των μεταβολών στην βλάστηση ελέγχθηκαν και οι δείκτες SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) καθώς και BSI (Bare Soil Index). Η ταυτόχρονη αξιοποίηση των δύο δεικτών μπορεί να ενισχύσει τα αποτελέσματα του NDVI αποκαλύπτοντας περιοχές όπου η βλάστηση αυξάνεται πραγματικά και περιοχές όπου παρατηρείται υποβάθμιση με αυξημένη παρουσία γυμνού εδάφους.

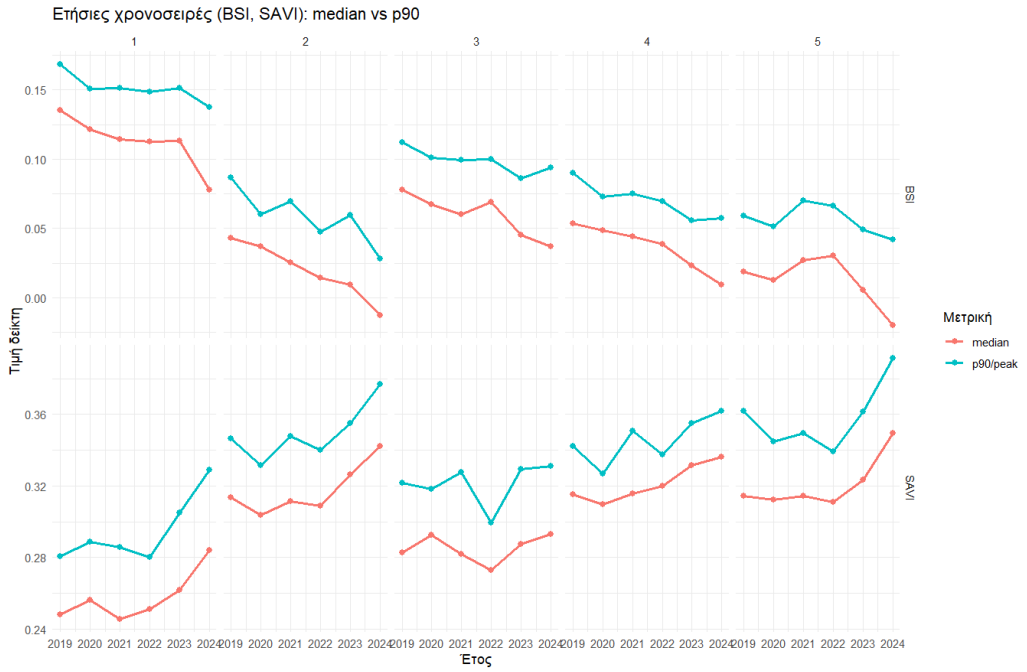
Ως προς την συμπεριφορά των δεικτών και των διαγραμμάτων τους

Η ανάλυση των δεικτών BSI και SAVI παρέχει πληροφορίες για τη σχέση μεταξύ φυτοκάλυψης και έκθεσης του εδάφους, λειτουργώντας συμπληρωματικά προς τους δείκτες καθαρής βλάστησης (NDVI, EVI).

Ο δείκτης βλάστησης SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) είναι ένας τροποποιημένος NDVI, για να διορθώσει την επίδραση της φωτεινότητας του εδάφους σε περιοχές με χαμηλή κάλυψη βλάστησης (Huete 1988). Ο SAVI λαμβάνει τιμές στο ίδιο φάσμα όπως και ο NDVI από –1 ως +1. Αυτός ο δείκτης έχει καλύτερη χρήση σε περιοχές με αραιή βλάστηση, όπου το έδαφος είναι ορατό διαμέσου της κόμης [2].

Ο δείκτης BSI στοχεύει στον εντοπισμό και την ανάδειξη περιοχών με γυμνό ή αραιά καλυμμένο έδαφος, αξιοποιώντας τις φασματικές διαφορές μεταξύ εδάφους και βλάστησης. Μέσω συνδυασμού φασματικών ζωνών, επιτρέπει τον διαχωρισμό περιοχών με εκτεθειμένο έδαφος από περιοχές με ενεργή φυτοκάλυψη [40].

Στα εξεταζόμενα πολύγωνα παρατηρείται γενικά αντίστροφη συμπεριφορά των δύο δεικτών: ο BSI εμφανίζει πτωτική τάση με τον χρόνο, ενώ ο SAVI παρουσιάζει σταθεροποίηση ή αύξηση, τόσο στις median όσο και στις p90 τιμές. Το εύρημα αυτό υποδηλώνει μείωση των επιφανειών γυμνού ή αραιά καλυμμένου εδάφους και ενίσχυση της φυτοκάλυψης. Αν και οι τιμές p90 του δείκτη BSI είναι συστηματικά υψηλότερες από τις αντίστοιχες median, η μικρή και σταθερή απόκλιση μεταξύ τους, καθώς και η παράλληλη χρονική εξέλιξή τους, δεν υποδηλώνουν την ύπαρξη διακριτών χωρικών “νησίδων” αυξημένου ακάλυπτου εδάφους. Αντιθέτως, το εύρημα αυτό αντανακλά μια γενικευμένη και χωρικά ομοιόμορφη κατανομή του εδαφικού υποβάθρου εντός των πολυγώνων, σε αντίθεση με τον δείκτη NDVI, όπου η απόκλιση median–p90 αποτελεί σαφή ένδειξη χωρικής ανομοιογένειας της βλάστησης.



Σχήμα 30: Ετήσιες χρονοσειρές των δεικτών BSI και SAVI ανά πολύγωνο δειγματοληψίας στην περιοχή μελέτης για την περίοδο 2019–2024, με σύγκριση των μετρικών median και p90/peak.

Ως προς τις καταγραφές πεδίου και τις πιέσεις

Ο δείκτης BSI παρουσιάζει υψηλότερες τιμές στο πολύγωνο 1, ακολουθούμενο από το πολύγωνο 3, ενώ τα πολύγωνα 2, 4 και 5 εμφανίζουν χαμηλότερες και σχετικά παρόμοιες τιμές. Το μοτίβο αυτό υποδηλώνει αυξημένη έκθεση γυμνού εδάφους στο πολύγωνο 1 και, σε μικρότερο βαθμό, στο πολύγωνο 3, σε συμφωνία με τις επιτόπιες παρατηρήσεις.

Αντίστοιχα, ο δείκτης SAVI εμφανίζει τις χαμηλότερες τιμές στο πολύγωνο 1 και ελαφρώς υψηλότερες αλλά ακόμη μειωμένες τιμές στο πολύγωνο 3, ενώ τα πολύγωνα 2, 4 και 5 συγκεντρώνονται σε υψηλότερα και παρόμοια επίπεδα. Η κατανομή αυτή αντανακλά τη γενική εικόνα της φυτοκάλυψης που παρατηρήθηκε στο πεδίο: περιοχές με αραιή και διακεκομμένη βλάστηση στα πολύγωνα 1 και 3, έναντι πιο πυκνής και συνεχούς βλάστησης στα πολύγωνα 2, 4 και 5.

Ο συνδυασμός των δύο δεικτών επιτρέπει μια πιο ολοκληρωμένη ερμηνεία των πιέσεων. Στο πολύγωνο 1, ο συνδυασμός χαμηλού SAVI και υψηλού BSI υποδηλώνει έντονη έκθεση εδάφους και υποβάθμιση της φυτοκάλυψης, εικόνα που είναι συμβατή με αυξημένη ένταση βόσκησης όπως καταγράφηκε στο πεδίο. Στο πολύγωνο 3, αν και οι τιμές SAVI είναι επίσης χαμηλές, οι τιμές BSI είναι χαμηλότερες σε σχέση με το πολύγωνο 1, γεγονός που υποδηλώνει ότι η αραιή βλάστηση δεν οφείλεται αποκλειστικά σε έντονες ανθρωπογενείς πιέσεις, αλλά πιθανόν σχετίζεται και με φυσικούς περιορισμούς του οικοσυστήματος. Αντίθετα, στα πολύγωνα 2, 4 και 5, ο συνδυασμός υψηλότερου SAVI και χαμηλότερου BSI υποδηλώνει καλύτερη κατάσταση φυτοκάλυψης και περιορισμένη έκθεση εδάφους, σε συμφωνία με τις επιτόπιες καταγραφές για μικρότερη ένταση πιέσεων. Η συνολική εικόνα δηλαδή αυτή των σημείων αποτυπώνεται και στις επιτόπιες καταγραφές. Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις πεδίου, το πολύγωνο 1 εμφανίζει τη μεγαλύτερη έκταση γυμνού εδάφους και τη χαμηλότερη συνολική φυτοκάλυψη, ενώ το πολύγωνο 3 παρουσιάζει επίσης εμφανώς αραιή βλάστηση και αυξημένη έκθεση εδάφους, αν και σε μικρότερο βαθμό σε σχέση με το πολύγωνο 1. Αντίθετα, τα

πολύγωνα 2, 4 και 5 χαρακτηρίζονται από πυκνότερη και πιο συνεκτική φυτοκάλυψη, με σαφώς μικρότερη παρουσία γυμνού εδάφους.

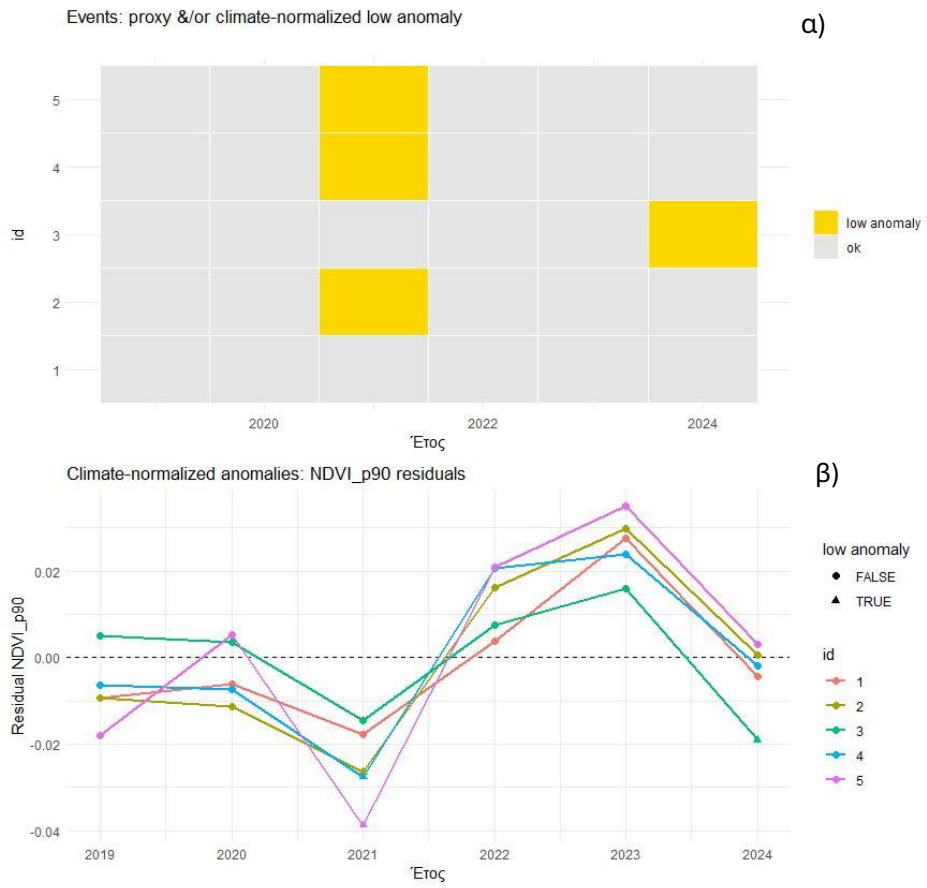
5.5.5 Ανάλυση και επίδραση κλιματικών συνθηκών

Μέσω του μοντέλου climate normalization [37] αφαιρέθηκε το μέρος της μεταβλητότητας του δείκτη NDVI που εξηγείται από τις κλιματικές μεταβλητές (ετήσια βροχόπτωση και θερμοκρασία) και από τις διαφορές στο βασικό επίπεδο βλάστησης μεταξύ πολυγώνων. Τα residuals του μοντέλου αντιπροσωπεύουν επομένως την απόκλιση της παρατηρούμενης βλάστησης από την αναμενόμενη υπό τις δεδομένες κλιματικές συνθήκες. Οι αποκλίσεις κανονικοποιήθηκαν περαιτέρω σε τυποποιημένες τιμές (z-scores), ώστε να είναι συγκρίσιμες μεταξύ ετών και πολυγώνων. Ως αρνητικές ανωμαλίες της βλάστησης ορίστηκαν οι περιπτώσεις όπου η τυποποιημένη απόκλιση ήταν μικρότερη ή ίση με −1 (anom_z ≤ −1), τιμή που αντιστοιχεί σε σημαντικά χαμηλότερη από την αναμενόμενη παραγωγικότητα της βλάστησης. Οι περιπτώσεις αυτές επισημάνθηκαν ως “flags” στο dataset και χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό πιθανών επεισοδίων πίεσης στο οικοσύστημα.

Στο διάγραμμα των climate-normalized residuals (Σχήμα 31β) παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη αυτών των αποκλίσεων για κάθε πολύγωνο. Θετικές τιμές υποδηλώνουν ότι η βλάστηση είναι υψηλότερη από την αναμενόμενη με βάση τις κλιματικές συνθήκες, ενώ αρνητικές τιμές υποδηλώνουν χαμηλότερη από την αναμενόμενη παραγωγικότητα. Παρατηρείται ότι το έτος 2021 εμφανίζει γενικευμένες αρνητικές αποκλίσεις σε όλα σχεδόν τα πολύγωνα, γεγονός που υποδηλώνει ότι η κορύφωση της βλάστησης ήταν χαμηλότερη από αυτή που θα αναμενόταν με βάση τις ετήσιες τιμές βροχόπτωσης και θερμοκρασίας. Αντίθετα, κατά τα έτη 2022 και 2023 οι αποκλίσεις είναι κυρίως θετικές, γεγονός που υποδηλώνει καλύτερη από την αναμενόμενη κατάσταση της βλάστησης.

Στο διάγραμμα events (Σχήμα 31α) συνοψίζονται οι περιπτώσεις όπου οι αρνητικές αποκλίσεις υπερβαίνουν ένα προκαθορισμένο στατιστικό όριο (anom_z ≤ −1), το οποίο αντιστοιχεί σε τιμές του NDVI σημαντικά χαμηλότερες από τον μέσο όρο των residuals**. Με βάση το κριτήριο αυτό εντοπίζονται ανωμαλίες το 2021 στα πολύγωνα 2, 4 και 5, καθώς και το 2024 στο πολύγωνο 3.** Η ταυτόχρονη εμφάνιση αρνητικών ανωμαλιών σε περισσότερα του ενός πολύγωνα το 2021 υποδηλώνει πιθανό περιφερειακό ή συστημικό γεγονός που επηρέασε τη βλάστηση εκείνη τη χρονιά. Αντίθετα, η εμφάνιση ανωμαλίας το 2024 μόνο σε ένα πολύγωνο (id=3) είναι περισσότερο συμβατή με τοπικούς παράγοντες, όπως διαφοροποιήσεις στη διαχείριση της βόσκησης ή μικροπεριβαλλοντικές συνθήκες.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι κλιματικές μεταβλητές (βροχόπτωση και θερμοκρασία) προέρχονται από το dataset ERA5-Land [41] και παρουσιάζουν ίδιες τιμές για όλα τα πολύγωνα σε κάθε έτος, γεγονός που οφείλεται στη σχετικά χαμηλή χωρική ανάλυση του dataset σε σχέση με τη μικρή απόσταση μεταξύ των περιοχών μελέτης. Συνεπώς, οι μεταβλητές αυτές λειτουργούν κυρίως ως ετήσιο κλιματικό σήμα και όχι ως χωρικά διαφοροποιημένοι παράγοντες μεταξύ πολυγώνων.



Σχήμα 31: α) Εντοπισμός αρνητικών ανωμαλιών της βλάστησης ανά πολύγωνο και έτος μετά από κανονικοποίηση ως προς τις κλιματικές συνθήκες (anom_z ≤ −1). β) Χρονική εξέλιξη των climate-normalized αποκλίσεων (residuals) του δείκτη NDVI_p90 για κάθε πολύγωνο κατά την περίοδο μελέτης.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το έτος 2021 παρουσιάζει κυρίως αρνητικές αποκλίσεις για τα περισσότερα πολύγωνα, γεγονός που υποδηλώνει ότι η κορύφωση της βλάστησης (NDVI_p90) ήταν χαμηλότερη από την αναμενόμενη τιμή που προβλέπεται με βάση τις κλιματικές συνθήκες. Αντίθετα, κατά τα έτη 2022 και 2023 οι αποκλίσεις είναι κυρίως θετικές, γεγονός που υποδηλώνει ότι η βλάστηση παρουσίασε υψηλότερες τιμές από αυτές που θα αναμένονταν με βάση το κλίμα. Το 2024 παρατηρείται εκ νέου μείωση των τιμών, με το πολύγωνο id=3 να εμφανίζει τη μεγαλύτερη αρνητική απόκλιση.

Η παρουσία αρνητικών αποκλίσεων το 2021 ακόμη και μετά την κανονικοποίηση ως προς το κλίμα υποδηλώνει ότι οι μεταβολές της βλάστησης δεν μπορούν να εξηγηθούν πλήρως από τις ετήσιες κλιματικές μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο. Ένας πιθανός λόγος είναι ότι η βλάστηση ανταποκρίνεται όχι μόνο στο συνολικό ετήσιο ύψος βροχόπτωσης, αλλά και στη χρονική κατανομή των βροχοπτώσεων μέσα στο έτος (seasonality), η οποία δεν αποτυπώνεται πλήρως στις ετήσιες τιμές precipitation και temperature. Συνεπώς, η αρνητική απόκλιση που παρατηρείται το 2021 ενδέχεται να αντανακλά είτε πραγματικό οικολογικό σήμα που σχετίζεται με τη λειτουργία του οικοσυστήματος είτε περιορισμό της ανάλυσης που βασίζεται σε ετήσιες κλιματικές μεταβλητές. Παράλληλα, το γεγονός ότι οι αρνητικές αποκλίσεις εμφανίζονται ταυτόχρονα σε περισσότερα από ένα πολύγωνα (id = 2, 4 και 5) υποδηλώνει ότι το φαινόμενο πιθανόν συνδέεται με ευρύτερο περιφερειακό παράγοντα που επηρέασε τη βλάστηση κατά το συγκεκριμένο έτος.

Συνολικά, η περίοδος 2019–2024 εμφανίζει γενική τάση βελτίωσης της φυτοκάλυψης, με μεμονωμένα επεισόδια αρνητικών αποκλίσεων, **κυρίως το 2021 στα πολύγωνα id = 2, 4 και**

5, ενώ μια επιπλέον τοπική αρνητική απόκλιση παρατηρείται το 2024 στο πολύγωνο id = 3. Σε αντίθεση με το 2021, η εμφάνιση της απόκλισης μόνο σε ένα πολύγωνο το 2024 είναι περισσότερο συμβατή με τοπικό παράγοντα, όπως διαφοροποιήσεις στη διαχείριση της περιοχής, την ένταση βόσκησης ή μικροπεριβαλλοντικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα αυτά υποδηλώνουν ότι η περιοχή δεν παρουσιάζει σαφή ένδειξη συστηματικής υποβάθμισης της βλάστησης, αλλά μάλλον γενική ανάκαμψη με περιστασιακά επεισόδια πίεσης.

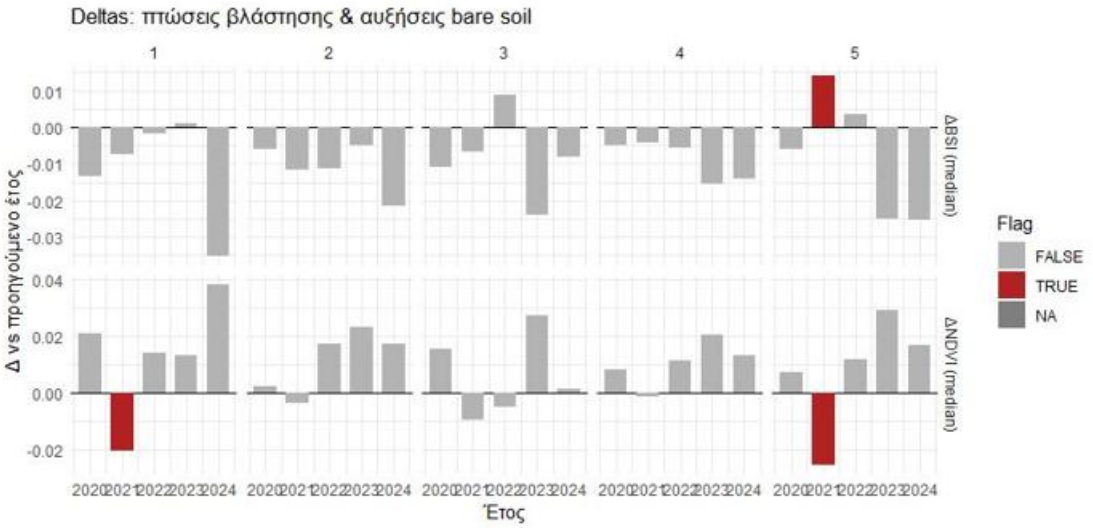
5.6 Συζήτηση ανάλυσης τοπικής κλίμακας – ΕΠΙΠΕΔΟ Β

Σενάρια των μεταβολών για εντοπισμό πιέσεων

1. Σύμφωνα με το Σχήμα 32 η ανάλυση των ετήσιων μεταβολών των δεικτών (deltas) δείχνει ότι το 2021 αποτελεί το πιο χαρακτηριστικό έτος αρνητικής μεταβολής της βλάστησης σε επίπεδο τοπικών πολυγώνων. Ειδικότερα, στον δείκτη **ΔNDVI (median)** καταγράφονται δύο σαφείς αρνητικές αποκλίσεις που υπερβαίνουν το επιλεγμένο threshold, στα πολύγωνα **id = 1** και **id = 5**, γεγονός που υποδηλώνει αισθητή μείωση της βλάστησης σε σχέση με το προηγούμενο έτος.

```
#thresholds
thr_drop_ndvi <- -0.02
thr_rise_bsi  <-  0.01
```

Παράλληλα, στον δείκτη ΔBSI (median) το πολύγωνο id = 5 εμφανίζει θετική μεταβολή που υπερβαίνει το αντίστοιχο threshold, δηλαδή αύξηση του bare soil. Ο συνδυασμός **μείωσης του NDVI** και αύξησης του BSI στο ίδιο πολύγωνο και στο ίδιο έτος συνιστά κλασική ένδειξη τοπικής διαταραχής, καθώς αντανακλά ταυτόχρονα υποχώρηση της βλάστησης και μεγαλύτερη έκθεση του εδάφους.



Σχήμα 32. Ετήσιες μεταβολές των δεικτών ΔNDVI και ΔBSI (median) ανά πολύγωνο για την περίοδο 2019–2024. Οι αρνητικές μεταβολές του NDVI και οι θετικές μεταβολές του BSI που υπερβαίνουν τα thresholds επισημαίνονται με κόκκινο.

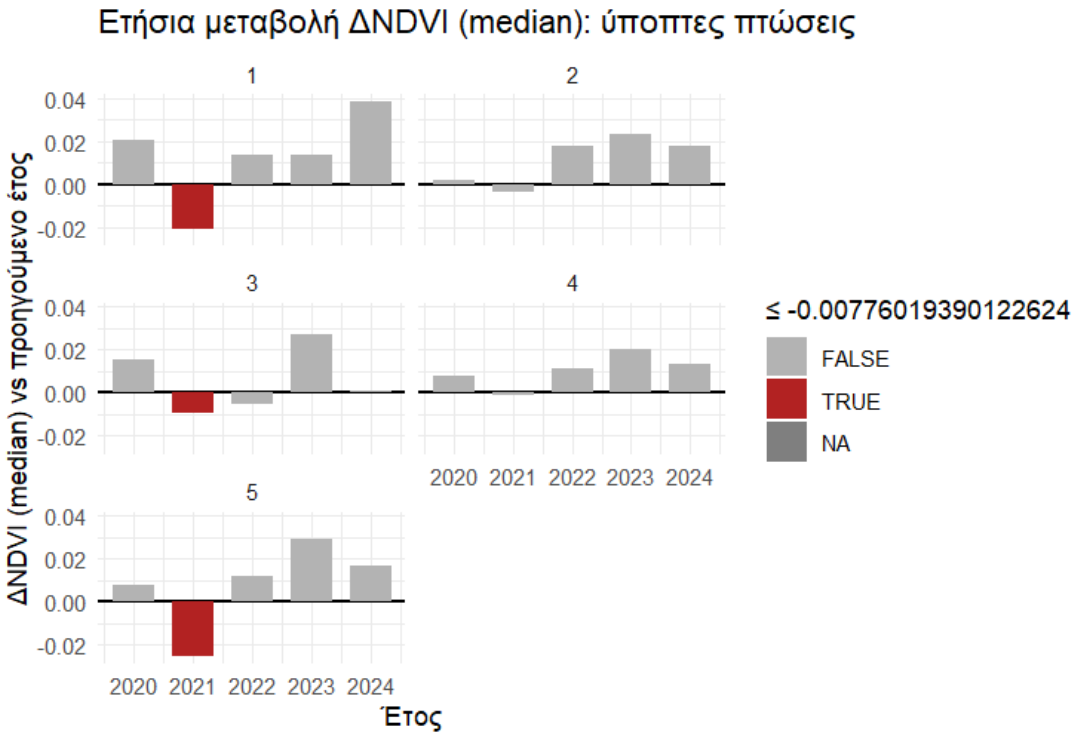
Με βάση τα παραπάνω, το id = 5 για το έτος 2021 μπορεί να θεωρηθεί η πιο ύποπτη περίπτωση επεισοδίου πίεσης στο σύνολο της χρονοσειράς. Ωστόσο, η υπογραφή αυτή δεν αρκεί από μόνη της για να τεκμηριώσει συστηματική υπερβόσκηση, αλλά αποτελεί ένδειξη τοπικής πίεσης ή

διαταραχής, η οποία μπορεί να σχετίζεται με βόσκηση, με άλλες διαχειριστικές παρεμβάσεις ή με φυσικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες.

Συνολικά, τα deltas υποδεικνύουν ότι η περίοδος 2019–2024 χαρακτηρίζεται από γενική βελτίωση της βλάστησης, με μεμονωμένα επεισόδια αρνητικής μεταβολής, κυρίως γύρω από το 2021. Το εύρημα αυτό είναι περισσότερο συμβατό με εικόνα γενικής ανάκαμψης με τοπικά επεισόδια πίεσης, παρά με συστηματική και συνεχόμενη υποβάθμιση της βλάστησης.

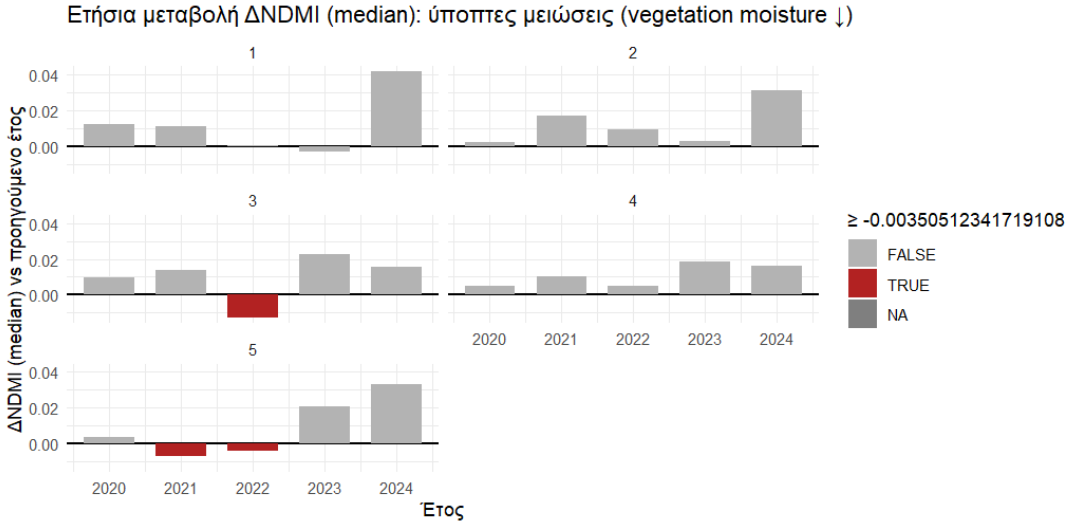
2. Για τον εντοπισμό πιθανών επεισοδίων πίεσης χρησιμοποιήθηκαν και τα ίδια τα δεδομένα. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε προσέγγιση βασισμένη σε ποσοστημόρια (quantiles), ώστε να εντοπιστούν οι ακραίες μεταβολές των δεικτών. Για τους δείκτες βλάστησης NDVI και NDMI εξετάστηκε το κατώτερο 10% των μεταβολών (10ο ποσοστημόριο), το οποίο αντιστοιχεί στις μεγαλύτερες πτώσεις της βλάστησης και της υγρασίας αντίστοιχα. Αντίθετα, για τον δείκτη BSI εξετάστηκε το ανώτερο 10% των μεταβολών (90ο ποσοστημόριο), το οποίο αντιστοιχεί στις μεγαλύτερες αυξήσεις του γυμνού εδάφους. Με τον τρόπο αυτό, τα "ύποπτα" γεγονότα δεν ορίζονται με σταθερά thresholds, αλλά ως οι πιο ακραίες μεταβολές εντός του ίδιου του dataset.

Στο σχήμα της μεταβολής του NDVI (ΔNDVI), οι κόκκινες τιμές αντιστοιχούν στο κατώτερο 10% της κατανομής και υποδηλώνουν τις πιο έντονες μειώσεις της βλάστησης. Οι αρνητικές μεταβολές εμφανίζονται σε περιορισμένο αριθμό πολυγώνων και ετών, υποδηλώνοντας τοπικά επεισόδια μείωσης της φυτοκάλυψης. Ωστόσο, στο μεγαλύτερο μέρος των πολυγώνων οι μεταβολές του NDVI είναι μικρής έντασης ή κοντά στο μηδέν, γεγονός που υποδηλώνει σχετική σταθερότητα της βλάστησης σε ετήσια βάση (Σχήμα 33).



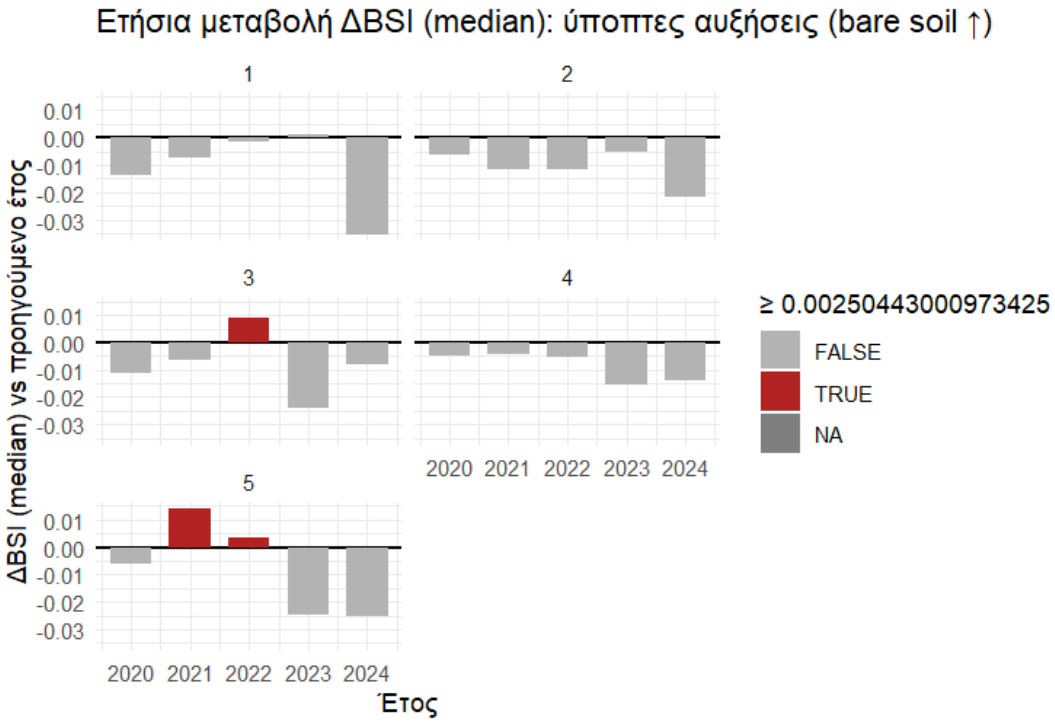
Σχήμα 33: Ετήσια μεταβολή του δείκτη βλάστησης NDVI (ΔNDVI) ανά πολύγωνο. Οι κόκκινες τιμές αντιστοιχούν στο κατώτερο 10% της κατανομής και υποδηλώνουν τις εντονότερες μειώσεις της βλάστησης σε σχέση με το προηγούμενο έτος.

Στο σχήμα της μεταβολής του NDMI (ΔNDMI) (Σχήμα 34), οι κόκκινες τιμές υποδηλώνουν τις μεγαλύτερες μειώσεις της υγρασίας της βλάστησης (κατώτερο 10%). Οι μεταβολές αυτές εμφανίζονται αποσπασματικά και δεν αφορούν το σύνολο των πολυγώνων, γεγονός που υποδεικνύει ότι η υδατική καταπόνηση δεν αποτελεί γενικευμένο φαινόμενο στην περιοχή μελέτης. Στα περισσότερα πολύγωνα, οι τιμές του NDMI παρουσιάζουν ήπιες διακυμάνσεις, χωρίς έντονες αποκλίσεις.



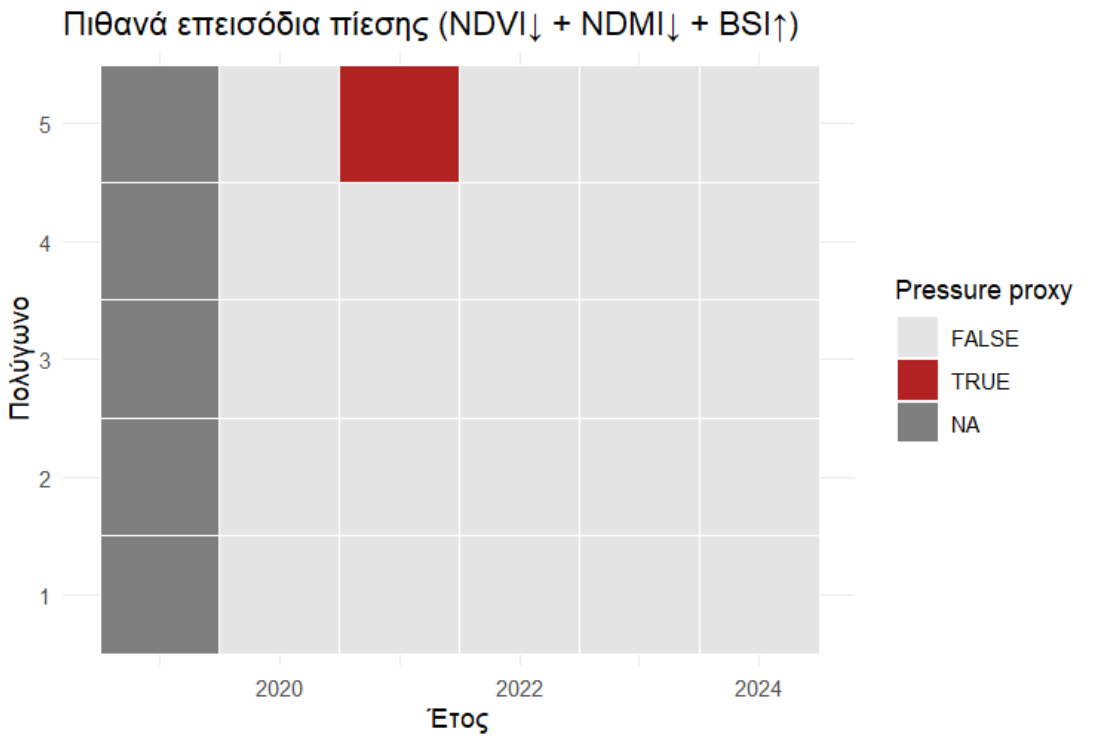
Σχήμα 34: Ετήσια μεταβολή του δείκτη υγρασίας NDMI (ΔNDMI) ανά πολύγωνο. Οι κόκκινες τιμές αντιστοιχούν στο κατώτερο 10% της κατανομής και υποδηλώνουν τις εντονότερες μειώσεις της βλάστησης σε σχέση με το προηγούμενο έτος.

Στο σχήμα της μεταβολής του BSI (ΔBSI) (Σχήμα 35), οι κόκκινες τιμές αντιστοιχούν στις μεγαλύτερες αυξήσεις γυμνού εδάφους (ανώτερο 10%). Οι αυξήσεις αυτές εντοπίζονται σε συγκεκριμένες περιπτώσεις και δεν εμφανίζονται συστηματικά σε όλα τα πολύγωνα. Για την πλειονότητα των πολυγώνων, οι μεταβολές του BSI είναι περιορισμένες, γεγονός που υποδηλώνει ότι δεν παρατηρείται γενικευμένη αύξηση της έκθεσης του εδάφους.



Σχήμα 35: Ετήσια μεταβολή του δείκτη γυμνού εδάφους BSI (ΔBSI) ανά πολύγωνο. Οι κόκκινες τιμές αντιστοιχούν στο ανώτερο 10% της κατανομής και υποδηλώνουν τις μεγαλύτερες αυξήσεις της έκθεσης γυμνού εδάφους.

Όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 36 η σύγκλιση των τριών δεικτών παρατηρείται σε μία συγκεκριμένη περίπτωση, η οποία αντιστοιχεί στο πολύγωνο **id = 5 για το έτος 2021**, και ξεχωρίζει ως η πιο έντονη ένδειξη πιθανής πίεσης στο σύνολο της χρονοσειράς. Στην περίπτωση αυτή καταγράφεται ταυτόχρονα μείωση της βλάστησης (ΔNDVI), μείωση της υγρασίας (ΔNDMI) και αύξηση του γυμνού εδάφους (ΔBSI), συνδυασμός που αποτελεί χαρακτηριστική ένδειξη διαταραχής του συστήματος. Αντίθετα, στα υπόλοιπα πολύγωνα οι μεταβολές εμφανίζονται είτε μεμονωμένα είτε με μικρότερη ένταση και δεν συμπίπτουν χρονικά, γεγονός που υποδηλώνει ότι δεν παρατηρείται γενικευμένο μοτίβο υποβάθμισης της βλάστησης στην περιοχή μελέτης. Συνεπώς, η εικόνα που προκύπτει είναι αυτή μιας συνολικά σταθερής ή ήπια μεταβαλλόμενης βλάστησης, με μεμονωμένα επεισόδια πίεσης που εμφανίζονται τοπικά.



Σχήμα 36: Περιπτώσεις σύγκλισης των τριών δεικτών στα σημεία δειγματοληψίας ως ενδείξεις τοπικής πίεσης της βλάστησης.

Η σύγκλιση των τριών δεικτών (μείωση NDVI, μείωση NDMI και αύξηση BSI) παρατηρείται στο πολύγωνο **id = 5 για το έτος 2021**, το οποίο αναδεικνύεται ως η πιο έντονη ένδειξη πιθανής πίεσης στο σύνολο της χρονοσειράς.

Το εύρημα αυτό αποκτά ιδιαίτερη σημασία όταν συσχετιστεί με τα αποτελέσματα της κλιματικής κανονικοποίησης, σύμφωνα με τα οποία το 2021 εμφανίζει αρνητικές αποκλίσεις της βλάστησης σε περισσότερα από ένα πολύγωνα, όπως αναλύθηκε ανωτέρω Κεφ.5/5.5.5.. Ωστόσο, η ερμηνεία των αποκλίσεων αυτών θα πρέπει να γίνει με προσοχή, καθώς το μοντέλο βασίζεται σε ετήσιες τιμές βροχόπτωσης και θερμοκρασίας, οι οποίες δεν αποτυπώνουν πλήρως τη χρονική κατανομή των κλιματικών συνθηκών (seasonality). Συνεπώς, μέρος της αρνητικής απόκρισης της βλάστησης το 2021 ενδέχεται να σχετίζεται με τη χρονική κατανομή των βροχοπτώσεων ή άλλες φαινολογικές διεργασίες που δεν καταγράφονται από τις ετήσιες μεταβλητές. Παρ' όλα αυτά, στην περίπτωση του πολυγώνου **id = 5**, η ταυτόχρονη εμφάνιση αρνητικής απόκλισης του NDVI, σε συνδυασμό με μείωση του NDMI και αύξηση του BSI, ενισχύει την υπόθεση ύπαρξης τοπικής πίεσης ή διαταραχής. Η απόκλιση αυτή παραμένει ακόμη και μετά την κανονικοποίηση ως προς τις κλιματικές μεταβλητές, γεγονός που υποδηλώνει ότι δεν μπορεί να αποδοθεί αποκλειστικά σε ετήσιες κλιματικές συνθήκες. Ωστόσο, η ερμηνεία αυτή πρέπει να γίνεται με προσοχή, καθώς το κλιματικό σήμα που χρησιμοποιείται στο μοντέλο είναι κοινό για όλα τα πολύγωνα ανά έτος και δεν αποτυπώνει πλήρως χωρικές διαφοροποιήσεις ή εποχικές κατανομές των κλιματικών παραγόντων.

Η ερμηνεία όμως αυτή ενισχύεται από τα αποτελέσματα των επιτόπιων καταγραφών, τα οποία δείχνουν ότι στο πολύγωνο 5 παρατηρείται αυξημένο ποσοστό κάλυψης από ξυλώδη είδη, καθώς και αυξημένη παρουσία γυμνού εδάφους και λίθων, σε συνδυασμό με μειωμένη συμμετοχή ποωδών κατηγοριών, όπως τα αγρωστώδη και τα ψυχανθή. Η δομή αυτή είναι συμβατή με συνθήκες μειωμένης φυτοκάλυψης και αυξημένης εδαφικής έκθεσης.

Παράλληλα, η σύνθεση της βλάστησης στο ίδιο πολύγωνο χαρακτηρίζεται από κυριαρχία ξυλωδών ειδών, ενώ τα ποώδη εμφανίζονται περιορισμένα. Το πρότυπο αυτό είναι ενδεικτικό επιλεκτικής πίεσης, καθώς τα ποώδη είδη αποτελούν βασική τροφή για τα ζώα και μειώνονται εντονότερα υπό συνθήκες βόσκησης, ενώ τα ξυλώδη εμφανίζουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα.

Σύμφωνα με την Εικόνα 8 τα παραπάνω ευρήματα επιβεβαιώνονται από τα δεδομένα πεδίου, όπου καταγράφηκαν σαφείς ενδείξεις παρουσίας ζώων, όπως περιττώματα διαφορετικής μορφολογίας, τα οποία αποδίδονται σε διαφορετικές κατηγορίες φυτοφάγων, συμπεριλαμβανομένων αιγοπροβάτων, βοοειδών και ιπποειδών. Η συνύπαρξη αυτών των ομάδων υποδηλώνει μικτή και ενδεχομένως εντατικοποιημένη βόσκηση, η οποία μπορεί να επηρεάζει τη βλάστηση με διαφορετικούς μηχανισμούς, καθώς τα είδη αυτά παρουσιάζουν διαφορετικές προτιμήσεις τροφής και πρότυπα χρήσης του χώρου. Επιπλέον, η παρουσία μονάδων εκτροφής βοοειδών/αιγοπροβάτων στην ευρύτερη περιοχή, και ιδιαίτερα σε μικρή απόσταση από το πολύγωνο id = 5, ενισχύει την πιθανότητα χρήσης της περιοχής για βόσκηση. Δεδομένου ότι πρόκειται για εκτατικά συστήματα εκτροφής, τα ζώα όμως μπορούν να κινούνται σε μεγαλύτερη ακτίνα και να αξιοποιούν τις διαθέσιμες λιβαδικές εκτάσεις.

Εικόνα 8: Ενδεικτικές επιτόπιες καταγραφές παρουσίας ζώων στο πολύγωνο 5:(α) περιττώματα αιγοπροβάτων, (β) περιττώματα ιπποειδών, (γ) περιττώματα βοοειδών.

Συνολικά, η σύγκλιση πολλαπλών δεικτών τηλεπισκόπησης, ο χωρικός εντοπισμός του φαινομένου στο πολύγωνο 5 και η συμφωνία με τα δεδομένα πεδίου και τις χρήσεις γης συγκροτούν ένα συνεκτικό σύνολο ενδείξεων που υποστηρίζει την ύπαρξη τοπικής πίεσης στη βλάστηση. Ωστόσο, η ερμηνεία αυτή δεν μπορεί να θεωρηθεί αποκλειστική, καθώς οι μεταβολές της βλάστησης επηρεάζονται και από κλιματικούς και άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες, γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη συνδυαστική αξιολόγηση των δεδομένων.

Σύνοψη της ανάλυσης:

Σε επίπεδο των πέντε επιφανειών, οι ετήσιες χρονοσειρές των δεικτών βλάστησης (NDVI, EVI, SAVI) παρουσιάζουν συνολικά ανοδική τάση στην περίοδο 2019-2024, τόσο ως προς τις "τυπικές" τιμές (median) όσο και ως προς τις "κορυφές" βλάστησης (p90/peak). Παρά τις επιμέρους διακυμάνσεις μεταξύ ετών, δεν προκύπτει ένα μοτίβο σταθερής, προοδευτικής υποβάθμισης της φυτοκάλυψης σε όλες τις θέσεις. Αντίθετα, η γενική εικόνα πιθανόν υποδεικνύει ανάκαμψη/ενίσχυση της πράσινης βλάστησης, η οποία μπορεί να σχετίζεται με κλιματική μεταβλητότητα, με αλλαγές στη διαχείριση, ή με μεταβολές στη σύνθεση της βλάστησης (π.χ. μεγαλύτερη συμμετοχή θαμνωδών/σκληρόφυλλων ειδών που διατηρούν υψηλές τιμές δεικτών).
Παράλληλα, οι δείκτες που σχετίζονται με εκτεθειμένο έδαφος (BSI) εμφανίζουν συνολικά πτωτική τάση (μείωση BSI), γεγονός που είναι συμβατό με μείωση της σχετικής έκθεσης γυμνού εδάφους ή/και αύξηση φυτοκάλυψης.
Αυτό λειτουργεί ως έμμεση ένδειξη ότι, τουλάχιστον για την εξεταζόμενη περίοδο και στις συγκεκριμένες επιφάνειες, δεν παρατηρείται γενικευμένη "απογύμνωση" του εδάφους που θα αναμενόταν σε έντονα υποβαθμισμένα σενάρια υπερβόσκησης. Ωστόσο, η βόσκηση μπορεί να προκαλεί πιέσεις που δεν εκφράζονται αποκλειστικά ως μείωση NDVI, αλλά ως μεταβολή σύνθεσης (π.χ. μείωση ποωδών - αύξηση φρυγάνων/θάμνων), κάτι που απαιτεί ισχυρότερη σύνδεση με τα δεδομένα πεδίου (είδη, κάλυψη ανά λειτουργική ομάδα, παρουσία γυμνού εδάφους/λίθων, ίχνη ποδοπάτησης).
Η ενσωμάτωση ετήσιων κλιματικών μεταβλητών (ERA5: συνολική βροχόπτωση και μέση θερμοκρασία) επέτρεψε την ανάπτυξη ενός πλαισίου κλιματικής κανονικοποίησης (climate normalization). Με τη λογική αυτή, εκτιμήθηκαν ανωμαλίες (residuals) των δεικτών βλάστησης αφού αφαιρεθεί το μέρος της μεταβλητότητας που εξηγείται από βροχόπτωση/θερμοκρασία. Τα έτη με αρνητικές ανωμαλίες μπορούν να αντιμετωπιστούν ως υποψήφια "events" πίεσης που δεν εξηγούνται αποκλειστικά από το κλίμα και συνεπώς αξίζουν στοχευμένη ερμηνεία με δεδομένα πεδίου και πληροφορίες βόσκησης (π.χ. τοπική αύξηση βοσκοφόρτωσης, μεταβολή διαδρομών κοπαδιών, ποδοπάτηση σε συγκεκριμένες θέσεις).

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 Κύρια ευρήματα τηλεπισκόπησης

Η παρούσα έρευνα διερεύνησε τη δυναμική της βλάστησης στην περιοχή μελέτης για την περίοδο 2019–2024, συνδυάζοντας τηλεπισκοπικούς δείκτες και επιτόπιες καταγραφές σε δύο χωρικές κλίμακες.

Σε περιφερειακό επίπεδο (Επίπεδο Α), η ανάλυση βασίστηκε σε κατηγορίες κάλυψης γης (CORINE Land Cover) και στην εφαρμογή στατιστικών μεθόδων, όπως τα μοντέλα Random Forest και τα μοντέλα μικτών επιδράσεων (mixed effects), επιτρέποντας τη διερεύνηση των παραγόντων που σχετίζονται με τη μεταβολή της βλάστησης. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η υδατική κατάσταση της επιφάνειας (όπως αποτυπώνεται μέσω του δείκτη NDWI) φαίνεται να σχετίζεται άμεσα με τις μεταβολές του NDVI, ενώ οι κλιματικοί παράγοντες, όπως η βροχόπτωση και η μεταβλητή του έτους συμβάλλουν επίσης στην ερμηνεία της δυναμικής της βλάστησης. Παράλληλα, η χωρική διαφοροποίηση μεταξύ των κατηγοριών κάλυψης γης φαίνεται να επηρεάζει τα βασικά επίπεδα της βλάστησης, χωρίς ωστόσο τα αποτελέσματα να οδηγούν σε απόλυτα ή καθολικά συμπεράσματα.

Σε τοπικό επίπεδο (Επίπεδο Β), η ανάλυση σε επίπεδο πολυγώνων βασίστηκε σε ετήσια στατιστική επεξεργασία των δεικτών NDVI, EVI, NDMI, NDWIg, BSI και SAVI, ενώ στη συνέχεια εξετάστηκε η ταυτόχρονη μεταβολή των δεικτών NDVI, NDMI και BSI. Η προσέγγιση αυτή επέτρεψε τον εντοπισμό χωρικά εντοπισμένων επεισοδίων πίεσης. **Πιο χαρακτηριστική είναι η περίπτωση του πολυγώνου id = 5 για το έτος 2021, όπου παρατηρείται ταυτόχρονη μείωση της βλάστησης και αύξηση του γυμνού εδάφους, ενώ το 2024 εντοπίζεται ηπιότερη αρνητική απόκλιση στο πολύγωνο id = 3.**

Επίσης οι επιτόπιες καταγραφές έδωσαν οικολογικό περιεχόμενο στις δορυφορικές τιμές, καθώς τεκμηρίωσαν τη σύνθεση της βλάστησης, την παρουσία γυμνού εδάφους και τις ενδείξεις βόσκησης. Έδειξαν επίσης ότι υψηλή τιμή ενός δείκτη βλάστησης δεν σημαίνει απαραίτητα υψηλή ποιότητα βοσκήσιμης ύλης, καθώς μπορεί να οφείλεται σε πυκνή θαμνώδη ή ξυλώδη βλάστηση.

Η σύγκριση μεταξύ της περιφερειακής και της τοπικής ανάλυσης ανέδειξε τη σημασία της χωρικής κλίμακας στην ερμηνεία των μεταβολών της βλάστησης. Η περιφερειακή προσέγγιση αποτυπώνει τα γενικά πρότυπα και τις σχέσεις με περιβαλλοντικούς παράγοντες, ενώ η τοπική ανάλυση επιτρέπει την ανίχνευση επιμέρους πιέσεων που δεν είναι εμφανείς σε μεγαλύτερη κλίμακα. Γι’ αυτό και η ανάλυση ευρείας κλίμακας λειτούργησε κυρίως ως πλαίσιο αναφοράς για την αποτύπωση γενικών τάσεων της βλάστησης, χωρίς να παρουσιάζει την ίδια ερμηνευτική ισχύ με την τοπική ανάλυση. Τα πολύγωνα CORINE Land Cover χαρακτηρίζονται από μεγάλη χωρική ετερογένεια, ενώ οι συσχετίσεις μεταξύ NDVI, EVI, NDWI και βροχόπτωσης ενδέχεται να επηρεάζονται από επιδράσεις κλίμακας (scale effects), μεικτά εικονοστοιχεία (mixed pixels) και μαθηματική συνάφεια μεταξύ των δεικτών. Οι περιορισμοί αυτοί λαμβάνονται υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων και αναδεικνύουν τη σημασία της τοπικής ανάλυσης και των δεδομένων πεδίου. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα δεδομένα της κλιματικής κανονικοποίησης υποδεικνύει ότι οι μεταβολές της βλάστησης δεν εξηγούνται πλήρως από τις ετήσιες κλιματικές μεταβλητές. Ειδικότερα για το 2021, η παρουσία αρνητικών αποκλίσεων σε περισσότερα από ένα πολύγωνα ενδέχεται να σχετίζεται είτε με εποχικούς παράγοντες είτε με πρόσθετες τοπικές πιέσεις.

Συνολικά, η περίοδος 2019-2024 δεν παρουσιάζει μοτίβο συστηματικής και συνεχούς υποβάθμισης της βλάστησης στα πέντε πολύγωνα επιτόπιας καταγραφής. Αντίθετα, οι περισσότεροι δείκτες υποδεικνύουν γενική τάση βελτίωσης ή σταθεροποίησης της

φυτοκάλυψης. Ωστόσο, εντοπίζονται μεμονωμένα επεισόδια πίεσης, με χαρακτηριστικότερο το πολύγωνο 5 το έτος 2021, όπου συνυπάρχουν μείωση NDVI, μείωση NDMI και αύξηση BSI.

6.2 Ρόλος της βόσκησης

Η ανωτέρω ερμηνεία ενισχύεται από τα δεδομένα πεδίου και τα διαθέσιμα ερωτηματολόγια για την περιοχή του Περδικακίου, τα οποία καταδεικνύουν την παρουσία μικτής και σχεδόν συνεχούς βόσκησης, καθώς και αυξημένη ένταση χρήσης των βοσκοτόπων.

Συνολικά, τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η περιοχή δεν παρουσιάζει σαφή ένδειξη γενικευμένης υποβάθμισης, αλλά μια εικόνα σχετικής σταθερότητας με τάσεις αύξησης της βλάστησης και μεμονωμένα επεισόδια πίεσης. Η βόσκηση φαίνεται να αποτελεί έναν πιθανό παράγοντα που συμβάλλει στις τοπικές μεταβολές της βλάστησης στην περιοχή μελέτης, χωρίς ωστόσο να μπορεί να τεκμηριωθεί ως η αποκλειστική αιτία τους. Η περίπτωση του πολυγώνου id = 5 είναι ενδεικτική, καθώς η σύγκλιση των τηλεπισκοπικών δεικτών το 2021, σε συνδυασμό με την επιτόπια καταγραφή αυξημένης συμμετοχής ξυλωδών ειδών και της κατηγορίας γυμνό έδαφος/λίθοι, καθώς και με τις ενδείξεις παρουσίας διαφορετικών κατηγοριών ζώων, υποδηλώνει πιθανή τοπική πίεση. Παρόλα αυτά, η ερμηνεία των μεταβολών πρέπει να γίνεται με προσοχή, καθώς η δομή της βλάστησης επηρεάζεται επίσης από τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, τη φυσική ετερογένεια του υποστρώματος και τη χρονική κατανομή των κλιματικών συνθηκών.

6.3 Περιορισμοί και προτάσεις για μελλοντική ανάλυση

6.3.1 Περιορισμοί / Αβεβαιότητες

- **Τηλεπισκοπικοί δείκτες**

Η παρούσα ανάλυση βασίζεται σε τηλεπισκοπικούς δείκτες (NDVI, EVI, NDMI, NDWIg, BSI, SAVI), οι οποίοι λειτουργούν ως έμμεσοι δείκτες της κατάστασης και της δομής της βλάστησης και της υγρασίας, και όχι ως άμεσες μετρήσεις βιομάζας [35], παραγωγικότητας ή έντασης βόσκησης. Ειδικότερα, οι δείκτες αυτοί αποτυπώνουν κυρίως τη φασματική απόκριση της βλάστησης (π.χ. περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη και ανακλαστικότητα) και όχι άμεσα την ποιότητα ή τη διαθεσιμότητα της βοσκήσιμης ύλης. Κατά συνέπεια, οι εκτιμήσεις που προκύπτουν εμπεριέχουν εγγενή αβεβαιότητα [35], καθώς οι δείκτες επηρεάζονται από παράγοντες όπως το υπόβαθρο του εδάφους, η μίξη pixels σε ετερογενή τοπία (ιδίως σε μεταβατικά λιβαδικά–θαμνώδη συστήματα), καθώς και από ατμοσφαιρικές και γεωμετρικές συνθήκες λήψης. Παρά τη χρήση τεχνικών καθαρισμού (pixel-level masking), η επίδραση νεφών και σκιάσεων δεν μπορεί να εξαλειφθεί πλήρως.

- **Μικρός αριθμός πολυγώνων**

Η χρήση ετήσιων συνοπτικών μετρικών (διάμεσος τιμή και p90) συμβάλλει στη μείωση του θορύβου των δεδομένων, ωστόσο οδηγεί σε μερική «συμπίεση» της φαινολογικής πληροφορίας. Ως αποτέλεσμα, ενδοετήσιες μεταβολές της βλάστησης ή βραχυχρόνια γεγονότα (όπως επεισόδια ξηρασίας ή έντονης βόσκησης) ενδέχεται να μην αποτυπώνονται επαρκώς. Το πρόβλημα αυτό είναι εντονότερο σε πολύγωνα μικρής έκτασης, όπου ο περιορισμένος αριθμός έγκυρων pixels αυξάνει τη στοχαστική διακύμανση και την ευαισθησία των αποτελεσμάτων σε μεμονωμένες παρατηρήσεις.

- **Εφαρμογή thresholds**

Η εφαρμογή κατωφλίων για την εκτίμηση της φυτοκάλυψης (π.χ. NDVI > 0.30) αποτελεί μια λειτουργική αλλά εμπειρική προσέγγιση. Σε περιπτώσεις υψηλής φυτοκάλυψης, μπορεί να

παρατηρηθεί «κορεσμός» της μεταβλητής (τιμές κοντά στο 100%), γεγονός που περιορίζει τη διακριτική ικανότητα της μεθόδου και οδηγεί σε απώλεια πληροφορίας.

- **Χρονική ασυμφωνία fieldwork και ετήσιων/Οκτωβριανών remote sensing metrics**

Η σύγκριση των δορυφορικών δεδομένων με επιτόπιες καταγραφές εισάγει πρόσθετη αβεβαιότητα, κυρίως λόγω της ασυμφωνίας στη χρονική κλίμακα (στιγμιαίες μετρήσεις πεδίου έναντι ετήσιων δορυφορικών στατιστικών), αλλά και λόγω της αδυναμίας των επιτόπιων δειγματοληψιών να καλύψουν πλήρως την ενδοπολυγωνική ετερογένεια της βλάστησης.

- **ERA5-Land χονδρική χωρική ανάλυση**

Όσον αφορά την απομόνωση της κλιματικής επίδρασης, η εφαρμογή μεθόδων "climate normalization" [37] με δεδομένα ERA5-Land (ετήσια βροχόπτωση και θερμοκρασία) [41] αποτελεί χρήσιμο εργαλείο, ωστόσο συνοδεύεται από περιορισμούς. Συγκεκριμένα, η σχετικά χαμηλή χωρική ανάλυση των reanalysis δεδομένων μπορεί να εξομαλύνει τις τοπικές διαφοροποιήσεις μεταξύ γειτονικών πολυγώνων, ενώ η χρήση ετήσιων τιμών δεν αποτυπώνει επαρκώς τη χρονική κατανομή της βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας.

- **Απουσία ανεξάρτητης ποσοτικής βοσκοφόρτωσης και ανάγκη πολυετούς επιτόπιας παρακολούθησης**

Τα συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της βόσκησης βασίζονται σε συσχετίσεις και όχι σε άμεση αιτιολογική τεκμηρίωση. Η απουσία ανεξάρτητων, ποσοτικών δεδομένων έντασης βόσκησης ανά πολύγωνο (π.χ. πυκνότητα ζωικού κεφαλαίου ή χωρική κατανομή δραστηριότητας) περιορίζει τη δυνατότητα πλήρους επικύρωσης των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, η επιβεβαίωση τέτοιων σχέσεων θα απαιτούσε πολυετή και συστηματική επιτόπια παρακολούθηση, ενώ δεν μπορεί να αποκλειστεί πλήρως η συνεισφορά άλλων παραγόντων, όπως πυρκαγιές, αλλαγές χρήσεων γης ή διαχειριστικές παρεμβάσεις.

6.3.2 Προοπτικές για μελλοντική ανάλυση:

Με βάση την ανάλυση και τους περιορισμούς της παρούσας μελέτης, προκύπτουν σημαντικές δυνατότητες για περαιτέρω έρευνα και βελτίωση της μεθοδολογίας:

- **Χρονική ανάλυση:** Η ενσωμάτωση δεικτών σε μικρότερη χρονική κλίμακα (π.χ. μηνιαία ή εποχικά δεδομένα) θα μπορούσε να αποτυπώσει πληρέστερα τη φαινολογία της βλάστησης και να επιτρέψει τη διάκριση μεταξύ διαφορετικών τύπων πίεσης, όπως η ξηρασία και η βόσκηση.
- **Κλιματικά δεδομένα:** Η χρήση κλιματικών δεδομένων υψηλότερης χωρικής και χρονικής ανάλυσης, καθώς και η αξιοποίηση μεταβλητών που σχετίζονται με την εποχικότητα της βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας, θα μπορούσε να βελτιώσει την προσέγγιση της κλιματικής κανονικοποίησης και να μειώσει την αβεβαιότητα στην ερμηνεία των αποκλίσεων της βλάστησης.
- **Δεδομένα βόσκησης:** Η ενσωμάτωση ανεξάρτητων δεδομένων έντασης βόσκησης, όπως στοιχεία για τον αριθμό ζώων ανά έκταση ή δεδομένα κίνησης κοπαδιών (π.χ. μέσω GPS), επιτρέπει πιο άμεση συσχέτιση των τηλεπισκοπικών δεικτών με την πραγματική πίεση που ασκείται στο οικοσύστημα.
- **Επιτόπιες καταγραφές:** Η αύξηση του αριθμού και της χωρικής κατανομής των επιτόπιων καταγραφών, καθώς και η συστηματική παρακολούθησή τους σε διαφορετικές εποχές του έτους, θα μπορούσε να βελτιώσει την αντιστοίχιση μεταξύ δορυφορικών δεδομένων και πραγματικής δομής της βλάστησης.
- **Τηλεπισκοπικά δεδομένα:** Η συνδυαστική χρήση επιπλέον δεδομένων (π.χ. υψηλότερης χωρικής ανάλυσης ή δεδομένων ραντάρ) θα μπορούσε να συμβάλει στην καλύτερη αποτύπωση της δομής της βλάστησης και της υγρασίας του εδάφους, μειώνοντας τις αβεβαιότητες που σχετίζονται με τη μίξη pixels και την ετερογένεια του τοπίου.

- **Μεθοδολογική εξέλιξη:** Η καλύτερη εποχική σύγκλιση μεταξύ τηλεπισκοπικών δεδομένων και επιτόπιων καταγραφών (π.χ. άνοιξη), καθώς και η εφαρμογή πιο σύνθετων προσεγγίσεων, όπως ιεραρχικά ή μεικτά μοντέλα και μοντέλα αιτιότητας, θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε πιο ισχυρά και τεκμηριωμένα συμπεράσματα σχετικά με τον ρόλο της βόσκησης και της υπερβόσκησης.
- **Δημιουργία λειτουργικού εργαλείου υποστήριξης αποφάσεων:** Θα συνδυάζονται τηλεπισκοπικά δεδομένα, επιτόπιες μετρήσεις, κλιματικές πληροφορίες και δεδομένα ζωικού κεφαλαίου. Ένα τέτοιο εργαλείο, που θα συνέβαλλε στην έγκαιρη αναγνώριση πιέσεων και στη βιώσιμη διαχείριση των λιβαδικών οικοσυστημάτων.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Π. Πλατής, Θ. Παπαχρήστου, Ι. Μελιάδης, Β. Παπαναστάσης, and Κ. Μαντζανάς, 'Προσωρινό Διαχειριστικό Σχέδιο Βόσκησης Δήμου Αμφιλοχίας Περιφερειακής Ενότητας Αιτωλοακαρνανίας', ΕΛΓΟ-ΔΗΜΗΤΡΑ – Γενική Διεύθυνση Αγροτικής Έρευνας – Ινστιτούτο Δασικών Ερευνών, Θεσσαλονίκη, Τεύχος Α – Προσωρινό Διαχειριστικό Σχέδιο Βόσκησης, 2015.

[2] Π. ΔΗΜΟΠΟΥΛΟΣ *et al.*, 'LIFE-IP 4 NATURA: Ολοκληρωμένες δράσεις για την διατήρηση και διαχείριση των περιοχών του δικτύου Natura 2000, των ειδών, των οικοτόπων και των οικοσυστημάτων στην Ελλάδα.', Πανεπιστήμιο Πατρών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Πάτρα, Παραδοτέο Δράσης Α.3: Τεχνικός - Μεθοδολογικός Οδηγός για τον προσδιορισμό και την αξιολόγηση των τύπων οικοσυστημάτων και των οικοσυστημικών υπηρεσιών τους στην Ελλάδα, σε εθνική, περιφερειακή και τοπική κλίμακα., 2018.

[3] Ευρωπαϊκό Ελεγκτικό Συνέδριο, 'Ειδική έκθεση 16/2022: Δεδομένα στην κοινή γεωργική πολιτική Τα μαζικά δεδομένα δεν αξιοποιούνται στο έπακρο στο πλαίσιο των αξιολογήσεων πολιτικής', Ευρωπαϊκό Ελεγκτικό Συνέδριο, Λουξεμβούργο, Ειδική Έκθεση, 2022.

[4] Ελληνική Δημοκρατία, 'Αποτελέσματα της Απογραφής Πληθυσμού-Κατοικιών έτους 2021 που αφορούν στο Μόνιμο Πληθυσμό της Χώρας.', Αθήνα, ΦΕΚ 2802/Β/26-04-2023, 2023.

[5] Δ. Αργυρόπουλος, Ι. Κατσαρέλης, and Ι. Γκουρτσούλη-Αντωνιάδου, 'Τεύχη ΕΠΜ 2ης ομάδας περιοχών, ΤΑ1: Εισαγωγή, Υφιστάμενη Κατάσταση. Παραδοτέο Μελέτης «Μελέτη11: Εκπόνηση ΕΠΜ και ΣΔ για τις περιοχές Natura 2000 της Περιφέρειας Ηπείρου και Περιφέρειας Δυτικής Μακεδονίας (μέρους)»', Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Αθήνα, Ειδική Περιβαλλοντική Μελέτη (ΕΠΜ), 2025.

[6] Περιφέρεια Δυτικής Ελλάδας, 'ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ (ΣΜΠΕ) ΤΟΥ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ «ΔΥΤΙΚΗ ΕΛΛΑΔΑ 2021-2027»', Περιφέρεια Δυτικής Ελλάδας, 2022.

[7] Ελληνική Ορνιθολογική Εταιρεία, 'GR088 - Όρη Βάλτου'. Accessed: Feb. 11, 2026. [Online]. Available: https://ornithologiki.gr/el/oi-draseis-mas/diatirisi-erevna/simantikes-perioxes-gia-ta-poulia-tis-elladas/xartis-perioxon/GR088

[8] National Aeronautics and Space Administration (NASA), 'Digital Elevation/Terrain Model (DEM)', Earthdata. Accessed: Sep. 15, 2025. [Online]. Available: https://www.earthdata.nasa.gov/topics/land-surface/digital-elevation-terrain-model-dem

[9] Ελληνική Δημοκρατία, 'Καθορισμός των Προδιαγραφών και του Περιεχομένου των Διαχειριστικών Σχεδίων Βόσκησης, στο πλαίσιο εφαρμογής των διατάξεων του ν. 4351/2015 (ΦΕΚ 164 Α')', ΦΕΚ 2331/Β/2017, 2017.

[10] Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, '2η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του ΥΔ Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (EL04)', Αθήνα, Εγκεκριμένο Σχέδιο Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμού, 2024.

[11] Ελληνική Ορνιθολογική Εταιρεία, 'Έκθεση αποτελεσμάτων παρακολούθησης πληθυσμών Όρνιου, Γυπαετού και Μαυρόγυπα στην Ελλάδα για το 2022. Έργο LIFE-IP 4 NATURA (LIFE16 IPE/GR/000002), Παραδοτέο Δράσης C.1.', Αθήνα, 2023.

[12] Θ. Παπαχρήστου, 'Διαχειριστικά σχέδια βόσκησης και η συμπεριφορά των ζώων', Agro24. Accessed: Nov. 19, 2025. [Online]. Available: https://www.agro24.gr/agrotika/arthra/diaheiristika-shedia-voskisis-kai-i-symperifora-ton-zoon

[13] European Space Agency (ESA), 'Sentinel-2', Copernicus Data Space Ecosystem. Accessed: Apr. 15, 2025. [Online]. Available: https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/sentinel-data/sentinel-2

[14] European Commission, 'Sentinel-2', Copernicus Data Space Ecosystem Documentation. Accessed: Apr. 15, 2025. [Online]. Available: Copernicus https://documentation.dataspace.copernicus.eu/Data/SentinelMissions/Sentinel2.html

[15] European Commission, ‘Copernicus Browser’, Copernicus Data Space Ecosystem Documentation. Accessed: Apr. 15, 2025. [Online]. Available: https://documentation.dataspace.copernicus.eu/Applications/Browser.html
[16] European Commission, ‘Copernicus Browser’. Accessed: Apr. 15, 2025. [Online]. Available: https://dataspace.copernicus.eu/browser/
[17] European Space Agency (ESA), ‘SNAP (Sentinel Application Platform)’, ESA STEP (Science Toolbox Exploitation Platform). Accessed: Apr. 15, 2025. [Online]. Available: https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/
[18] R. Milla, ‘Seasonal Branch Nutrient Dynamics in Two Mediterranean Woody Shrubs with Contrasted Phenology’, *Ann. Bot.*, vol. 93, no. 6, pp. 671–680, Jun. 2004, doi: 10.1093/aob/mch094.
[19] A. V. Mehta and S. Yang, ‘Precipitation climatology over Mediterranean Basin from ten years of TRMM measurements’, *Adv. Geosci.*, vol. 17, pp. 87–91, Dec. 2008, doi: 10.5194/adgeo-17-87-2008.
[20] J. Vogel, E. Paton, and V. Aich, ‘Seasonal ecosystem vulnerability to climatic anomalies in theMediterranean’, Mar. 08, 2021, *Biogeophysics: Physical - Biological Coupling*. doi: 10.5194/bg-2021-47.
[21] Sentinel Hub, ‘NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)’, Sentinel Hub Custom Scripts. Accessed: Apr. 20, 2025. [Online]. Available: https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/ndvi/
[22] Ρ. Τσιακίρης, Μ. Παπουτσάκης, Ι. Καζόγλου, and Π. Πλατής, ‘Διαχειριστικά Σχέδια Βόσκησης: Η πρόκληση της πρώτης συστηματικής καταγραφής των «βοσκήσιμων γαιών» στην Ελλάδα’, in *Η Ελληνική Λιβαδοπονία μπροστά σε νέες προκλήσεις*, Ελληνική Λιβαδοπονική Εταιρεία, pp. 327–334.
[23] European Environment Agency (EEA), ‘Copernicus Corine Land Cover (CLC) 2018, Version 20.01’. European Environment Agency, 2019. Accessed: Apr. 21, 2025. [Online]. Available: https://sdi.eea.europa.eu/catalogue/copernicus/api/records/71c95a07-e296-44fc-b22b-415f42acfdf0?language=all
[24] N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, and R. Moore, ‘Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone’, *Remote Sens. Environ.*, vol. 202, pp. 18–27, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
[25] Sentinel Hub, ‘EVI (Enhanced Vegetation Index)’, Sentinel Hub Custom Scripts. Accessed: Apr. 20, 2025. [Online]. Available: https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/evi/
[26] Sentinel Hub, ‘NDWI Normalized Difference Water Index’, Sentinel Hub Custom Scripts. Accessed: Apr. 20, 2025. [Online]. Available: https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/ndwi/
[27] P. M. Atkinson, C. Jeganathan, J. Dash, and C. Atzberger, ‘Inter-comparison of four models for smoothing satellite sensor time-series data to estimate vegetation phenology’, *Remote Sens. Environ.*, vol. 123, pp. 400–417, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.rse.2012.04.001.
[28] F. Zhou and D. Zhong, ‘Kalman filter method for generating time-series synthetic Landsat images and their uncertainty from Landsat and MODIS observations’, *Remote Sens. Environ.*, vol. 239, p. 111628, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.rse.2019.111628.
[29] W. N. Venables, D. M. Smith and and the R Core Team, *An Introduction to R Notes on R: A Programming Environment for Data Analysis and Graphics Version 4.5.3 (2026-03-11)*, Version 4.5.3.
[30] X. A. Harrison *et al.*, ‘A brief introduction to mixed effects modelling and multi-model inference in ecology’, *PeerJ*, vol. 6, p. e4794, May 2018, doi: 10.7717/peerj.4794.
[31] Y. Wang, X. Chen, M. Gao, and J. Dong, ‘The use of random forest to identify climate and human interference on vegetation coverage changes in southwest China’, *Ecol. Indic.*, vol. 144, p. 109463, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109463.
[32] G. Kefalas, P. Lattas, P. Xofis, R. S. Lorilla, A. Martinis, and K. Poirazidis, ‘The use of vegetation indices and change detection techniques as a tool for monitoring ecosystem and biodiversity integrity’.

[33] S. Nakamura, N. Tsendbazar, H. Ter Steege, L. Hein, and J. Schultner, ‘Mapping tree species diversity across the Amazon using remote sensing, diverse environmental data and machine learning’, *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation*, vol. 148, p. 105226, Apr. 2026, doi: 10.1016/j.jag.2026.105226.
[34] M. Zunzunegui, M. C. Díaz Barradas, F. Ain-Lhout, L. Alvarez-Cansino, M. P. Esquivias, and F. García Novo, ‘Seasonal physiological plasticity and recovery capacity after summer stress in Mediterranean scrub communities’, *Plant Ecol.*, vol. 212, no. 1, pp. 127–142, Jan. 2011, doi: 10.1007/s11258-010-9809-7.
[35] A.-K. Holtgrave *et al.*, ‘Review of Remote Sensing indices for monitoring environmental grassland indicators in Europe’, *Ecol. Indic.*, vol. 185, p. 114732, Apr. 2026, doi: 10.1016/j.ecolind.2026.114732.
[36] M. Βραχνάκης, *ΛΙΒΑΔΟΠΟΝΙΑ*. Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών (ΣΕΑΒ).
[37] J. Evans and R. Geerken, ‘Discrimination between climate and human-induced dryland degradation’, *J. Arid Environ.*, vol. 57, no. 4, pp. 535–554, Jun. 2004, doi: 10.1016/S0140-1963(03)00121-6.
[38] S. K. McFEETERS, ‘The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features’, *Int. J. Remote Sens.*, vol. 17, no. 7, pp. 1425–1432, May 1996, doi: 10.1080/01431169608948714.
[39] B. Gao, ‘NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space’, *Remote Sens. Environ.*, vol. 58, no. 3, pp. 257–266, Dec. 1996, doi: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
[40] C. T. Nguyen, A. Chidthaisong, P. Kieu Diem, and L.-Z. Huo, ‘A Modified Bare Soil Index to Identify Bare Land Features during Agricultural Fallow-Period in Southeast Asia Using Landsat 8’, *Land*, vol. 10, no. 3, p. 231, Mar. 2021, doi: 10.3390/land10030231.
[41] J. Muñoz-Sabater *et al.*, ‘ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications’, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 13, no. 9, pp. 4349–4383, Sep. 2021, doi: 10.5194/essd-13-4349-2021.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στο παρόν Παράρτημα παρατίθενται οι κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία, ανάλυση και οπτικοποίηση των δεδομένων. Η σειρά παρουσίασής τους ακολουθεί τη ροή της μεθοδολογίας και τη σειρά αναφοράς τους στο κυρίως κείμενο.

Κώδικας 1

```
// Υπολογισμός μέσου NDVI ανά κατηγορία γης για κάθε έτος
var calculateMeanNDVI = function(feature) {
  var meanNDVI = ndviTimeSeries.map(function(image) {
    var year = image.get('year');
    var mean = image.reduceRegion({
      reducer: ee.Reducer.mean(),
      geometry: feature.geometry(),
      scale: 10, // Ανάλυση Sentinel-2 (10m)
      maxPixels: 1e13
    }).get('NDVI');
    return ee.Feature(null, {
      'code_18': feature.get('code_18'),
      'year': year,
      'mean_NDVI': mean
    });
  });
  return meanNDVI;
};

var results = shapefile.map(calculateMeanNDVI).flatten();
// Εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε CSV
Export.table.toDrive({
  collection: results,
  description: 'NDVI_TimeSeries_By_LandCover',
  fileFormat: 'CSV',
  selectors: ['code_18', 'year', 'mean_NDVI']
});

// Εμφάνιση των αποτελεσμάτων στην κονσόλα
print(results);
```

Κώδικας 2

```
# Visualizing the temporal variation of mean NDVI values per CORINE polygon, enabling the evaluation of overall vegetation dynamics across the broader study area.

ggplot(trend_data, aes(x = year, y = mean_NDVI, color = as.factor(code_18))) +
  geom_line() +
  geom_point() +
  labs (title = "Τάσεις NDVI ανά Έτος και Πολύγωνο",
       x = "Έτος",
       y = "Μέσος NDVI",
       color = "Πολύγωνο (code_18)") +
  theme_minimal()
```

Κώδικας 3

```
# Αποτελέσματα του Μοντέλου

Formula: NDVI ~ precipitation + NDWI + year + (1 | code_18)

Number of obs: 1393, groups:  code_18, 6

Fixed effects:

                Estimate Std. Error         df  t value Pr(>|t|)

(Intercept)   -3.193e+00  6.674e-01  1.389e+03   -4.785 1.89e-06 ***

precipitation -4.661e-03  2.923e-04  1.388e+03  -15.945  < 2e-16 ***

NDWI          -1.136e+00  5.779e-03  1.385e+03 -196.603  < 2e-16 ***

year           1.562e-03  3.295e-04  1.389e+03    4.741 2.35e-06 ***

---

Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Correlation of Fixed Effects:

            (Intr) prcptt NDWI

precipitatn  0.255

NDWI         0.660  0.541

year        -1.000 -0.254 -0.658
```

Κώδικας 4

```
# Δημιουργία διαγράμματος Polar Chart
ggplot(i_scores, aes(x = var, y = Overall, fill = var)) +
  geom_bar(stat = "identity", width = 1, color = "black") +  # Μπάρες
  coord_polar(theta = "x") +  # Μετατροπή σε κυκλικό διάγραμμα
  theme_minimal() +  # Καθαρό θέμα
  labs(title = "Σημασία Μεταβλητών στο Random Forest") +
  theme(axis.text.x = element_blank(),  # Απόκρυψη ονομάτων αξόνων
        axis.ticks = element_blank(),
        panel.grid = element_blank(),
        plot.title = element_text(hjust = 0.5, face = "bold", size = 14)) +
  scale_fill_brewer(palette = "Dark2")  # Ελκυστική παλέτα χρωμάτων
```

Κώδικας 5

```
# Transforming NDVI median and p90 values into long format to allow direct comparison of typical versus peak vegetation conditions across polygons and years.
df_long <- df2 %>%
select (id, year, mean_NDVI_med, mean_NDVI_p90) %>%
pivot_longer(cols = c(mean_NDVI_med, mean_NDVI_p90),
names_to = "metric", values_to = "ndvi") %>%
mutate (metric = recode (metric,
mean_NDVI_med = "NDVI (median)",
mean_NDVI_p90 = "NDVI (p90/peak)"))


# Visualizing annual NDVI trends per polygon, comparing median and p90 metrics to assess differences between average and peak vegetation responses.
ggplot (df_long, aes(year, ndvi, color = metric)) +
geom_line(linewidth = 0.9) +
geom_point(size = 2) +
facet_wrap(~ id, ncol = 2, scales = "free_y") +
theme_minimal() +
labs (title = "Ετήσια NDVI ανά πολύγωνο (median vs peak)",
```