

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
στα ΠΟΛΥΠΛΟΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ και ΔΙΚΤΥΑ
ΤΜΗΜΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τίτλος Εργασίας

Χωροχρονική διερεύνηση των σχέσεων βλάστησης-κλίματος στη Β. Ελλάδα με χρήση δεδομένων από την πλατφόρμα Google Earth Engine.

Exploring long-term spatiotemporal vegetation-climate interactions in Northern Greece using Google Earth Engine.

Αναστάσιος-Πέτρος Καζαμίας

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Στέφανος Σγαρδέλης, Καθηγητής, Τμήμα Βιολογίας, Α.Π.Θ.

Θεσσαλονίκη, Δεκέμβριος 2019



Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

	ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ στα ΠΟΛΥΠΛΟΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ και ΔΙΚΤΥΑ ΤΜΗΜΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΤΜΗΜΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΛΟΓΙΑΣ ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ	
---	--	---

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τίτλος Εργασίας

Χωροχρονική διερεύνηση των σχέσεων βλάστησης-κλίματος
στη Β. Ελλάδα με χρήση δεδομένων από την πλατφόρμα
Google Earth Engine.

Exploring long-term spatiotemporal vegetation-climate
interactions in Northern Greece using Google Earth Engine.

Αναστάσιος-Πέτρος Καζαμίας

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Στέφανος Σγαρδέλης, Καθηγητής, Τμήμα Βιολογίας, Α.Π.Θ.

Εγκρίθηκε από την Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή την 20η Δεκεμβρίου 2019.

.....
Σ. Σγαρδέλης
Καθηγητής Α.Π.Θ.

.....
Θ. Καρακώστας
Ομ. Καθηγητής Α.Π.Θ.

.....
Χ. Μπράτσας
ΕΔΙΠ Α.Π.Θ.

Θεσσαλονίκη, Δεκέμβριος 2019



.....

Αναστάσιος-Πέτρος Κ. Καζαμίας

Πτυχιούχος Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος Α.Π.Θ.

Copyright © Αναστάσιος-Πέτρος Κ. Καζαμίας, 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

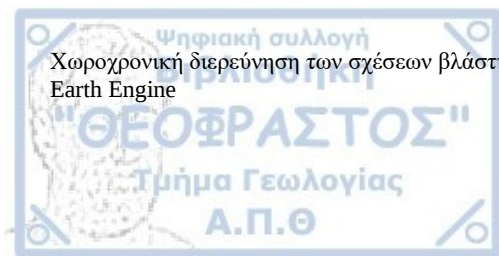
Η λειτουργία της βλάστησης στη βιόσφαιρα είναι πολυσύνθετη και για αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό να μελετηθεί η δυναμική της και να διερευνηθούν οι σχέσεις αλληλοεπίδρασης που αναπτύσσει με τους κλιματικούς παράγοντες, ιδιαίτερα υπό το πρίσμα της κλιματικής αλλαγής του πλανήτη. Χρησιμοποιώντας τη διαδικτυακή πλατφόρμα Google Earth Engine δημιουργήθηκαν για το χρονικό διάστημα 1985-2018 ετήσιες χρονοσειρές του δείκτη βλάστησης NDVI της θερινής περιόδου από δορυφορικά δεδομένα Landsat και χρονοσειρές κλιματικών δεδομένων (βροχόπτωση, μέγιστη/ελάχιστη θερμοκρασία) οι οποίες καλύπτουν 5 Υδατικά Διαμερίσματα (ΥΔ) της Β. Ελλάδας. Με αυτές τις χρονοσειρές μελετήθηκε η χωρο-χρονική εξέλιξη του NDVI και των κλιματικών παραγόντων σε επίπεδο Υδατικού Διαμερίσματος και σε επίπεδο κάλυψης γης, πραγματοποιήθηκε ανάλυση τάσης της χρονοσειράς του NDVI με τον μη-παραμετρικό έλεγχο Mann-Kendall σε επίπεδο εικονοστοιχείου και τέλος έγινε διερεύνηση των σχέσεων του NDVI με τους κλιματικούς παράγοντες μέσω ανάλυσης γραμμικής συσχέτισης και πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης. Η μέση τιμή του NDVI της περιόδου βλάστησης παρουσίασε αύξηση από 0.48 σε 0.67 για το σύνολο της περιοχής μελέτης, ενώ παρόμοια επίπεδα αύξησης παρουσίασαν όλες οι επιμέρους κατηγορίες κάλυψης γης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του ελέγχου Mann-Kendall το 78% των εικονοστοιχείων του NDVI της περιοχής μελέτης παρουσιάζει στατιστικά σημαντική θετική τάση ($\tau > 0$, $p < 0.05$) για το χρονικό διάστημα 1985-2018, με μέσο ρυθμό αύξησης 0.005/έτος. Οι δασικές εκτάσεις της περιοχής μελέτης είχαν την υψηλότερη μέση τιμή για την στατιστική παράμετρο Kendall tau (≈ 0.60) και παράλληλα τη μεγαλύτερη χωρική ομοιογένεια. Οι μέσες ετήσιες τιμές των κλιματικών παραγόντων που μελετήθηκαν παρουσίασαν αυξητική πορεία στο χρονικό διάστημα 1985-2018, ενώ οι τιμές τους την τελευταία δεκαετία είναι πάνω από το μέσο όρο των 34 ετών. Η βροχόπτωση και η ελάχιστη θερμοκρασία είναι οι δύο κλιματικοί παράγοντες που εμφάνισαν συσχέτιση με το δείκτη NDVI, η οποία διαφέρει ανάλογα με τη γεωγραφική θέση και το είδος βλάστησης. Οι δασικές εκτάσεις εμφάνισαν σχετικά υψηλές τιμές συσχέτισης με την ελάχιστη θερμοκρασία (≈ 0.62), ενώ οι θάμνοι-χερσότοποι με τη βροχόπτωση (0.67).

Λέξεις κλειδιά: Δυναμική της βλάστησης, Google Earth Engine, NDVI, Χρονοσειρές Δορυφορικών δεδομένων, Ανάλυση τάσεων

ABSTRACT

Vegetation serves several critical functions in the biosphere and for this reason it is of great importance to assess long-term vegetation dynamics and their relationship with climatic factors, especially under future climate change. The cloud-based Google Earth Engine platform was used to construct annual time-series of growing season NDVI for the time period 1985-2018 based on Landsat satellite data and annual time-series of gridded climate data (precipitation, min/max temperature) that cover five Water Districts in Northern Greece. Based on these data the spatiotemporal vegetation and climate dynamics were studied at different spatial scales (Water District and land cover), the non-parametric Mann-Kendall test was used to assess vegetation trend at pixel level and finally vegetation-climate interactions were explored through correlation analysis and multiple linear regression. The average growing season NDVI for the entire study area showed an increase over the years from 0.48 (1985) to 0.67 (2018). Also, all land cover classes exhibited the same behavior. The Mann-Kendall trend test results revealed that 78% of the area is under statistically significant positive trend ($\tau > 0$, $p < 0.05$) for the time period 1985-2018, with an average rate of 0.005/year. Forest-covered areas had the higher values of statistical parameter Kendall tau (≈ 0.60) and showed great spatial homogeneity. The annual average values of all climatic factors demonstrated an increase during the period 1985-2018, having above average values in the last decade. Precipitation and minimum temperature are the two most important climatic drivers of NDVI, with variations in correlation according to location and land cover type. Forest-covered areas exhibited positive correlation with minimum temperature (≈ 0.62), while moors and heathland with rainfall (0.67).

Keywords: Vegetation dynamics, Google Earth Engine, NDVI, Time series remote sensing, Trend analysis



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
ABSTRACT	4
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	5
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	8
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	8
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
1.1. Θεωρητικό υπόβαθρο.....	9
1.2. Παρακολούθηση της δυναμικής της βλάστησης και του κλίματος με χρήση δορυφορικών δεδομένων	10
1.3. Μεγάλα Δορυφορικά Δεδομένα και Google Earth Engine.....	11
1.4. Εργασίες που μελετούν τη σχέση βλάστησης - κλίματος με χρήση δορυφορικών δεδομένων	14
1.5. Αντικείμενο της παρούσας μελέτης.....	16
1.6. Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας	17
2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	19
2.1. Περιοχή μελέτης	19
2.2. Δείκτης βλάστησης NDVI	21
2.3. Δεδομένα από την πλατφόρμα GEE	21
2.4. Λοιπά δεδομένα	25
2.5. Μεθοδολογία.....	25
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	33
3.1. Δυναμική της βλάστησης.....	33
3.2. Δυναμική των κλιματικών παραγόντων	42

Αναστάσιος-Πέτρος Καζαμίας

"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"

3.3. Διερεύνηση σχέσης βλάστησης-κλιματικών παραγόντων.....46

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... 53

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... 56

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Απόσπασμα γραφικού περιβάλλοντος του Google Earth Engine Code Editor (https://code.earthengine.google.com/)	13
Εικόνα 2. Γεωγραφικός χάρτης με το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης (5 Υδατικά Διαμερίσματα) σε προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ '87	19
Εικόνα 3. Χάρτης κάλυψης γης της περιοχής μελέτης, σύμφωνα με το πρόγραμμα CORINE Land Cover, σε προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ '87.....	20
Εικόνα 4. Χωρική διακύμανση των διαμέσων τιμών του δείκτη βλάστησης NDVI κατά τη θερινή περίοδο (Ιούνιος-Ιούλιος) για το διάστημα 1985-2018 στην περιοχή μελέτης	33
Εικόνα 5. Χάρτης της περιοχής μελέτης στον οποίο απεικονίζεται η ανωμαλία του δείκτη βλάστησης για τα έτη 1988 (αριστερά) και 2018 (δεξιά). Με μπλε αποχρώσεις είναι οι θετικές τιμές και με κόκκινες αποχρώσεις οι αρνητικές τιμές.	40
Εικόνα 6. Χάρτης της περιοχής μελέτης με τα αποτελέσματα του στατιστικού μεγέθους Kendall's tau	41
Εικόνα 7. Χωρική κατανομή μέσης βροχόπτωσης υδρολογικού έτους (Οκτώβριος-Σεπτέμβριος) για τη χρονική περίοδο 1985-2018	43
Εικόνα 8. Χωρική κατανομή μέσης ετήσιας ελάχιστης θερμοκρασίας (αριστερά) και μέγιστης θερμοκρασίας (δεξιά) για τη χρονική περίοδο 1985-2018.....	45
Εικόνα 9. Χωρική κατανομή του συντελεστή συσχέτισης (Pearson) μεταξύ NDVI και Βροχόπτωσης υδρολογικού έτους για τη χρονική περίοδο 1985-2018	48
Εικόνα 10. Χωρική κατανομή του συντελεστή συσχέτισης (Pearson) μεταξύ NDVI και Ελάχιστης θερμοκρασίας για τη χρονική περίοδο 1985-2018.....	49
Εικόνα 11. Χωρική κατανομή του συντελεστή συσχέτισης (Pearson) μεταξύ NDVI και Μέγιστης θερμοκρασίας για τη χρονική περίοδο 1985-2018.....	49
Εικόνα 12. Χωρική κατανομή του συντελεστή παλινδρόμησης για τη βροχόπτωση (αριστερά) και την ελάχιστη θερμοκρασία (δεξιά) όπως αυτοί προέκυψαν από την εφαρμογή πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης σε κάθε εικονοστοιχείο.....	51

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1. Διαγράμματα σε σχήματα βιολιού (violin plots) για τις τιμές NDVI ανά κατηγορία κάλυψης γης	35
Διάγραμμα 2. Χρονική εξέλιξη διάμεσης τιμής NDVI ανά έτος για την περιοχή μελέτης και οι εξισώσεις για τα δύο χρονικά διαστήματα όπως προέκυψαν από την κατά τμήματα γραμμική παλινδρόμηση.....	36
Διάγραμμα 3. α) Διασπορά των συντελεστών Κυρτότητας-Λοξότητας για τις κατανομές των τιμών NDVI σε κάθε έτος από το 1985 έως το 2018 (αριστερά) , β) Καμπύλες σχετικών συχνότητων των τιμών NDVI για κάποια έτη (δεξιά)	37
Διάγραμμα 4. Χρονική εξέλιξη μέσης τιμής NDVI ανά έτος για κάθε κατηγορία κάλυψης γης..	38
Διάγραμμα 5. Ραβδόγραμμα με την ετήσια ανωμαλία του δείκτη NDVI για κάθε κατηγορία κάλυψης γης	39
Διάγραμμα 6. α) Χρονική εξέλιξη μέσης βροχόπτωσης υδρολογικού έτους (1985-2018), β) Ραβδόγραμμα με την ετήσια ανωμαλία της μέσης βροχόπτωσης υδρολογικού έτους (1985-2018)	44
Διάγραμμα 7. α) Χρονική εξέλιξη μέσης ετήσιας ελάχιστης θερμοκρασίας (1985-2018), β) Ραβδόγραμμα με την ετήσια ανωμαλία της μέσης ελάχιστης θερμοκρασίας (1985-2018).....	45
Διάγραμμα 8. α) Χρονική εξέλιξη μέσης ετήσιας μέγιστης θερμοκρασίας (1985-2018), β) Ραβδόγραμμα με την ετήσια ανωμαλία της μέσης μέγιστης θερμοκρασίας (1985-2018).....	46

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά των δορυφόρων Landsat 5-8 και η συλλογή δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για κάθε δορυφόρο από την πλατφόρμα GEE	22
Πίνακας 2. Μέση τιμή και Συντελεστής μεταβλητότητας (CV) NDVI κατά τη θερινή περίοδο (Ιούνιος-Ιούλιος) για τα έτη 1985-2018 ανά κατηγορία κάλυψης γης στην περιοχή μελέτης	35
Πίνακας 3. Αποτελέσματα Kendall's tau, κλίσης Sen και Pettitt test για τη χρονοσειρά NDVI ανά κατηγορία κάλυψης γης στην περιοχή μελέτης.	42
Πίνακας 4. Κλιματικά χαρακτηριστικά των ΥΔ της περιοχής μελέτης.....	44
Πίνακας 5. Συντελεστές συσχέτισης (Pearson) μεταξύ του δείκτη NDVI και των κλιματικών παραμέτρων (βροχόπτωση, ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία) ανά Υδατικό Διαμέρισμα.....	47
Πίνακας 6. Συντελεστές συσχέτισης (Pearson) μεταξύ του δείκτη NDVI και των κλιματικών παραμέτρων (βροχόπτωση, ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία) ανά κατηγορία κάλυψης γης ...	50
Πίνακας 7. Μέσες τιμές των συντελεστών της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για κάθε κλιματικό παράγοντα ανά Υδατικό Διαμέρισμα.....	51
Πίνακας 8. Μέσες τιμές των συντελεστών της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για κάθε κλιματικό παράγοντα ανά κατηγορία κάλυψης γης στην περιοχή μελέτης	52

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Θεωρητικό υπόβαθρο

Η βλάστηση αποτελεί το βασικότερο στοιχείο των χερσαίων οικοσυστημάτων καθώς αποτελεί τον συνδετικό κρίκο μεταξύ εδαφικών και ατμοσφαιρικών διεργασιών που συντελούνται στη βιόσφαιρα (de Jong et al. 2011). Έχει σημαντική επίδραση σε διάφορες διεργασίες του υδρολογικού κύκλου (π.χ. εξατμισοδιαπνοή, υδατοσυγκράτηση), στις διαδικασίες ανταλλαγής ενέργειας και στον κύκλο του άνθρακα, καθώς λειτουργεί ως δεξαμενή/πηγή άνθρακα μέσω της φωτοσύνθεσης και της διαπνοής (Feng et al. 2017). Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη βλάστηση είναι αρκετοί, μεταξύ των οποίων οι σημαντικότεροι είναι: 1) οι κλιματικές μεταβολές, 2) οι οικολογικές διαταραχές (π.χ. οι πυρκαγιές, ξηρασία) και 3) οι ανθρωπογενείς επιδράσεις, με κυριότερη την αλλαγή χρήσεων/κάλυψης γης.

Υπάρχουν σαφείς ενδείξεις περί ισχυρών αλληλεπιδράσεων μεταξύ χερσαίων οικοσυστημάτων και κλιματικών μεταβολών (Cao and Woodward 1998). Οι κλιματικές μεταβολές θεωρούνται ως ένας από τους πιο ισχυρούς παράγοντες που καθορίζουν την ύπαρξη, τη δομή και την εξέλιξη ενός οικοσυστήματος (Guo et al. 2014; Zhang et al. 2018b), ενώ από την άλλη η βλάστηση των χερσαίων οικοσυστημάτων επηρεάζει το κλιματικό σύστημα μέσω διαφόρων βιογεωχημικών μηχανισμών ανατροφοδότησης (feedback processes) (Zhou et al. 2007). Αρκετές μελέτες στη βιβλιογραφία αναφέρουν ότι αλλαγές στη χερσαία βλάστηση μπορούν να τροποποιήσουν το κλίμα σε τοπικό, περιφερειακό ή και παγκόσμιο επίπεδο (Bonan 1997; Bounoua et al. 2000).

Η μελέτη της δυναμικής της βλάστησης, δηλαδή της ποσοτικής και ποιοτικής διακύμανσης των φυτοκοινωνιών στο χρόνο, σε συνδυασμό με τη διερεύνηση της σχέσης της με κλιματικούς παράγοντες αποτελεί αντικείμενο παγκόσμιας έρευνας για την κλιματική αλλαγή στον πλανήτη (Rees et al. 2001). Συνήθως, οι δύο κλιματικοί παράγοντες που εξετάζονται είναι η θερμοκρασία και η βροχόπτωση, καθώς αυτοί καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τις διαφοροποιήσεις στην ποιότητα και ποσότητα της βλάστησης των χερσαίων οικοσυστημάτων (Palmate et al. 2017). Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας θα επιτρέψουν μια καλύτερη προσέγγιση σε θέματα περιβαλλοντικής διαχείρισης και αντιμετώπισης οικολογικών καταστροφών, ιδιαίτερα υπό το πρίσμα της κλιματικής αλλαγής. Για αυτό το λόγο τις τελευταίες δεκαετίες έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες οι οποίες χρησιμοποιώντας μακροχρόνια δορυφορικά δεδομένα προσπαθούν να διαπιστώσουν αν οι αλλαγές

στη δυναμική της βλάστησης σχετίζονται με κλιματικές μεταβολές. Έχει αποδειχθεί ότι τα τηλεπισκοπικά δορυφορικά δεδομένα παρέχουν τη δυνατότητα της συστηματικής και μακροχρόνιας παρακολούθησης της βλάστησης και της διερεύνησης των επιδράσεων που έχει από κλιματικές μεταβολές (Huete 2016).

1.2. Παρακολούθηση της δυναμικής της βλάστησης και του κλίματος με χρήση δορυφορικών δεδομένων

Η συνεχής πρόοδος των τελευταίων δεκαετιών στους τομείς της διαστημικής τεχνολογίας και της τεχνολογίας των υπολογιστών, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη νέων αλγορίθμων έχουν επιφέρει μεγάλη ανάπτυξη στην παραγωγή και διάθεση δορυφορικών δεδομένων για την παρατήρηση της Γης και τη μελέτη του περιβάλλοντος. Το γεγονός ότι τα δορυφορικά συστήματα παρακολούθησης της Γης προσφέρουν πλέον μακροχρόνια δεδομένα, σε υψηλή χωρική ανάλυση και με σταθερή επαναληψιμότητα τα καθιστά ως ένα εξαιρετικό εργαλείο για τη χωροχρονική μελέτη δυναμικών φαινομένων σε μεγάλη κλίμακα.

Οι δορυφόροι που κινούνται σε τροχιά γύρω από τη Γη ανάλογα με τους οπτικούς αισθητήρες με τους οποίους είναι εξοπλισμένοι συλλέγουν πληροφορίες σε διάφορες περιοχές του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Μια κατηγορία δορυφορικών συστημάτων είναι αυτά που καταγράφουν πολυφασματικές εικόνες (multispectral image data), καθώς είναι εξοπλισμένα με αισθητήρες που χρησιμοποιούν διάφορα φασματικά κανάλια (bands) για να καταγράψουν την ανακλώμενη ηλιακή και θερμική ακτινοβολία στα ορατά και στα υπέρυθρα μήκη κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η λήψη τέτοιων εικόνων επιτρέπει την εύρεση διαφορών μεταξύ βιοφυσικών παραμέτρων στην επιφάνεια της Γης, οι οποίες δεν θα ήταν δυνατό να γίνουν αντιληπτές από μια μονοφασματική εικόνα. Συνήθως, για τη μελέτη της βλάστησης γίνεται μετασχηματισμός των πολυφασματικών εικόνων με τον υπολογισμό ενός δείκτη βλάστησης, ο οποίος έχει ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών και αντικατοπτρίζει κάποια συγκεκριμένη ιδιότητα της βλάστησης. Ο δείκτης βλάστησης προκύπτει από έναν μαθηματικό τύπο που συνδυάζει τις τιμές των εικονοστοιχείων (pixel) από κάποια φασματικά κανάλια (bands) του αισθητήρα του δορυφόρου. Μερικοί δείκτες βλάστησης οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρέως είναι: ο NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), ο RVI (Ratio Vegetation Index), ο EVI (Enhance Vegetation Index) και ο SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index).

Ο κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) είναι ο πιο διαδεδομένος δείκτης βλάστησης παγκοσμίως και χρησιμοποιείται πολύ συχνά ως

«υποκατάστατο» της βλάστησης σε μεγάλης κλίμακας μελέτες, καθώς έχει ισχυρή συσχέτιση με το ποσοστό της απορροφούμενης φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας, το ποσοστό φυτοκάλυψης και το δείκτη φυλλικής επιφάνειας (Tucker et al. 2001; Wang et al. 2003; Pettorelli et al. 2005). Για αυτό το λόγο ο δείκτης NDVI έχει χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα εργασιών που εξετάζουν τη δυναμική της βλάστησης μέσω δορυφορικών δεδομένων (Beck et al. 2006; de Jong et al. 2011) και τη μελέτη των σχέσεων μεταξύ βλάστησης και κλιματικών παραγόντων (Bao et al. 2014; Liu and Lei 2015; Chu et al. 2019).

Οι δορυφόροι του προγράμματος Landsat παρέχουν πολυφασματικές εικόνες μεσαίας χωρικής ανάλυσης (30m χωρική ανάλυση) από το 1972 και έπειτα, με σταθερή επαναληψιμότητα και πλήρη κάλυψη της γήινης επιφάνειας. Από τα δεδομένα αυτά είναι δυνατό να κατασκευαστεί η μακροβιότερη χρονοσειρά δείκτη βλάστησης σε μηνιαία ή εποχική χρονική κλίμακα για οποιαδήποτε επιφάνεια του πλανήτη Γη. Αν συνυπολογιστεί το γεγονός ότι τα δεδομένα του προγράμματος Landsat διατίθενται στο ευρύ κοινό χωρίς κόστος, τα καθιστά ως ένα μοναδικό εργαλείο για την παρατήρηση και μελέτη μακροχρόνιων μεταβολών της βλάστησης.

Για τη μελέτη των κλιματικών μεταβλητών (βροχόπτωση, θερμοκρασία κ.α.) υπάρχουν μακροχρόνιες χρονοσειρές από επίγειες σημειακές μετρήσεις, οι οποίες όμως αν χρησιμοποιηθούν σε μεγάλης κλίμακας μελέτες δεν αντιπροσωπεύουν σωστά τη χωρική μεταβλητότητα των κλιματικών μεταβλητών. Τα τελευταία χρόνια έχουν παραχθεί και είναι ελεύθερα διαθέσιμες αρκετές χρονοσειρές πλεγματικών δεδομένων (raster dataset) που αφορούν κλιματικές μεταβλητές. Συνήθως τα δεδομένα αυτά έχουν παραχθεί από την εφαρμογή κλιματικών και στατιστικών μοντέλων σε μακροχρόνιες δορυφορικές και επίγειες παρατηρήσεις κλιματικών μεταβλητών. Παρόλο που τα δεδομένα αυτά έχουν χαμηλή χωρική διακριτική ικανότητα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη χωρο-χρονική μελέτη της σχέσης βλάστησης-κλίματος σε επίπεδο εικονοστοιχείου (pixel) για διάφορες χωρικές κλίμακες (π.χ. παγκόσμιο επίπεδο, περιφερειακό επίπεδο, λεκάνης απορροής κ.α.).

1.3. Μεγάλα Δορυφορικά Δεδομένα και Google Earth Engine

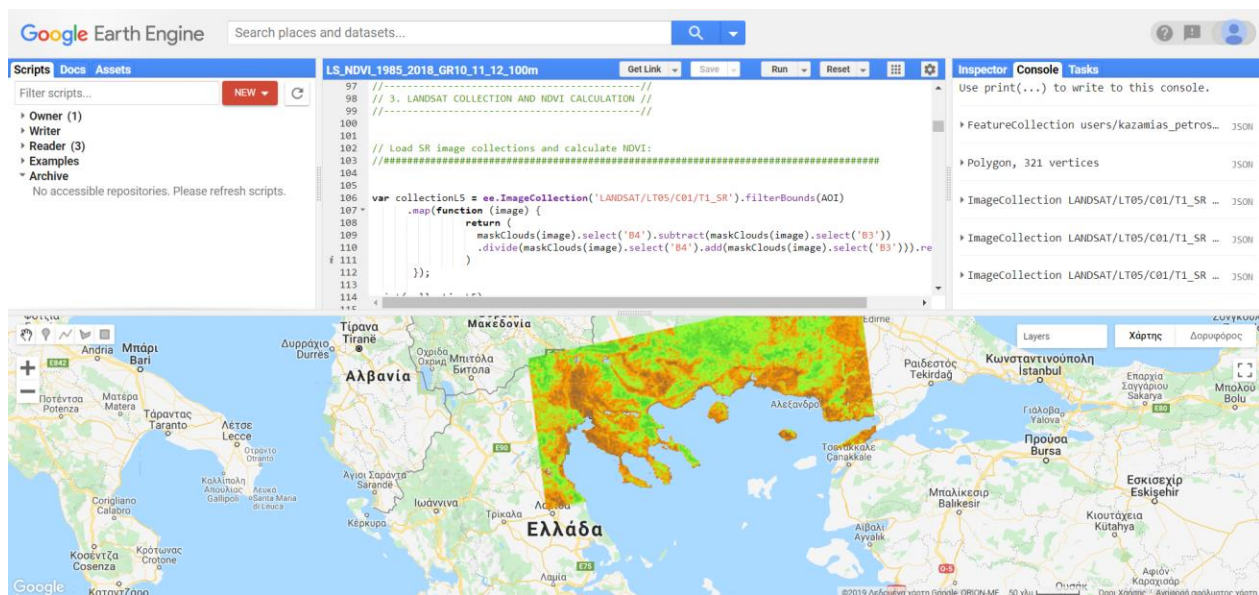
Η συμβατική μέθοδος για τη δημιουργία μακροχρόνιας χρονοσειράς ενός δείκτη βλάστησης για μια εκτενή γεωγραφική περιοχή (π.χ. επίπεδο περιφέρειας ή χώρας) με χρήση δορυφορικών δεδομένων απαιτεί αρχικά τη λήψη δεκάδων ή και εκατοντάδων δορυφορικών εικόνων. Στη συνέχεια είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί μια σειρά εργασιών προ-επεξεργασίας των δορυφορικών εικόνων, οι

οποίες περιλαμβάνουν την ατμοσφαιρική, τη ραδιομετρική και τη γεωμετρική διόρθωση. Τέλος, για να υπολογιστεί ο εκάστοτε δείκτης βλάστησης πρέπει να γίνει εφαρμογή ενός μαθηματικού τύπου που συνδυάζει τις φασματικές τιμές των καναλιών κάθε δορυφορικής εικόνας. Όπως μπορεί εύκολα να γίνει κατανοητό η παραπάνω διαδικασία είναι εξαιρετικά χρονοβόρα, απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ, πολύ μεγάλο διαθέσιμο όγκο για την αποθήκευση των δεδομένων και συνήθως εξειδικευμένο λογισμικό για την επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων. Λόγω των παραπάνω χαρακτηριστικών τα τελευταία χρόνια οι χρονοσειρές δορυφορικών δεδομένων κατατάσσονται στα Μεγάλα Δεδομένα (Big data). Με τον όρο αυτό αναφερόμαστε σε μια συλλογή δεδομένων των οποίων ο όγκος και ο ρυθμός παραγωγής τους είναι σε τέτοια κλίμακα που ακόμα και στα πιο υπερσύγχρονα υπολογιστικά συστήματα απαιτούνται καινοτόμες μέθοδοι για τον χειρισμό και την επεξεργασία τους (Ma et al. 2015). Τα Μεγάλα Δορυφορικά/Γεωχωρικά Δεδομένα, πέρα από το μεγάλο όγκο και τη ραγδαία αύξηση που παρουσιάζουν, έχουν επίσης και μεγάλη πολυπλοκότητα η οποία δυσκολεύει περαιτέρω τόσο την αναζήτηση τους, όσο και την επεξεργασία τους.

Υπάρχουν αρκετές πλατφόρμες λογισμικού για τη διαχείριση και επεξεργασία Μεγάλων Δορυφορικών Δεδομένων, μεταξύ των οποίων δύο από τις πιο γνωστές είναι το Hadoop και το GeoSpark οι οποίες βασίζονται σε πλαίσιο ανοιχτού κώδικα. Δυστυχώς, για να αξιοποιηθούν πλήρως οι δυνατότητες αυτών των λογισμικών απαιτούνται εξειδικευμένες τεχνικές δεξιότητες και προηγμένα υπολογιστικά συστήματα (π.χ. υπερυπολογιστικές δομές), με αποτέλεσμα να μην είναι τόσο «εύκολη» και προσιτή η χρήση τους από το ευρύ κοινό αλλά και από μεγάλο μέρος της ερευνητικής κοινότητας (Gorelick et al. 2017). Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί αρκετές πλατφόρμες υπολογιστικού νέφους (cloud computing) οι οποίες επιτρέπουν την εύκολη πρόσβαση μέσω διαδικτύου σε απομακρυσμένους υπολογιστικούς πόρους για διαχείριση και ανάλυση Μεγάλων Δεδομένων.

Το **Google Earth Engine (GEE)** αποτελεί μια διαδικτυακή πλατφόρμα υπολογιστικού νέφους για την ανάλυση, επεξεργασία και οπτικοποίηση Μεγάλων Γεωχωρικών και Δορυφορικών δεδομένων σε πολύ μικρούς χρόνους βασιζόμενη στις υπερυπολογιστικές δομές (High Performance Computing-HPC) που διαθέτει η Google (Gorelick et al. 2017). Η πλατφόρμα διαθέτει μία τεράστια βάση δορυφορικών δεδομένων (multi-petabyte) η οποία περιλαμβάνει μεταξύ άλλων την πλήρη συλλογή εικόνων από τα κυριότερα δορυφορικά συστήματα που καταγράφουν τη γη, όπως είναι οι δορυφόροι LANDSAT και MODIS της NASA (National Aeronautics and Space Administration) και οι δορυφόροι Sentinel της ESA (European Space Agency). Επίσης, περιέχει πλήθος άλλων περιβαλλοντικών, κλιματικών και γεωχωρικών δεδομένων τόσο σε πλεγματική/καναβική μορφή

(raster), όσο και σε διανυσματική μορφή (vector). Η πρόσβαση στην πλατφόρμα GEE γίνεται μέσω API (Application Programming Interface-Διεπαφή Προγραμματισμού Εφαρμογών) το οποίο υποστηρίζει την ανάπτυξη κώδικα σε γλώσσες προγραμματισμού JavaScript και Python. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα πρόσβασης στην πλατφόρμα μέσω του Code Editor (code.earthengine.google.com) το οποίο αποτελεί ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (IDE-Integrated Development Environment) στο διαδίκτυο για το JavaScript API του GEE. Αξίζει να σημειωθεί ότι η πρόσβαση στην πλατφόρμα και τα παραγόμενα αποτελέσματα είναι δωρεάν για ερευνητικούς σκοπούς. Το γραφικό περιβάλλον του Code Editor (Εικόνα 1) παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα να εκτελέσει εντολές (JavaScript Code Editor) και να χρησιμοποιήσει ένα πλήθος έτοιμων βιβλιοθηκών σε γλώσσα προγραμματισμού JavaScript. Παράλληλα, υπάρχει η δυνατότητα για άμεση οπτικοποίηση των γεωχωρικών/δορυφορικών δεδομένων ή των παραγόμενων αποτελεσμάτων σε χάρτη Google Maps που υπάρχει διαθέσιμος στο Code Editor. Ενώ, υπάρχει και η δυνατότητα εξαγωγής δεδομένων και παραγόμενων αποτελεσμάτων σε περιβάλλον Google Drive.



Εικόνα 1. Απόσπασμα γραφικού περιβάλλοντος του Google Earth Engine Code Editor (<https://code.earthengine.google.com/>)

Οι δυνατότητες της πλατφόρμας GEE ως προς τη χρήση δορυφορικών δεδομένων σε μελέτες μεγάλης χωρικής και χρονικής κλίμακας έχουν ήδη επισημανθεί σε αρκετές επιστημονικές

Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

δημοσιεύσεις. Για παράδειγμα, οι Hansen et al. 2013 μελέτησαν μέσω της πλατφόρμας GEE την αποψίλωση δασικών εκτάσεων σε παγκόσμια κλίμακα στο χρονικό διάστημα 2000 με 2014, χρησιμοποιώντας δορυφορικές εικόνες Landsat με χωρική ανάλυση στα 30m. Επίσης, οι Zhang et al. 2018 και Shelestov et al. 2017 χρησιμοποιώντας την πλατφόρμα GEE χαρτογράφησαν τις γεωργικές καλλιέργειες της Κίνας και της Ουκρανίας, αντίστοιχα, σε υψηλή χωρική ανάλυση με δεδομένα από τους δορυφόρους Sentinel και Landsat.

1.4. Εργασίες που μελετούν τη σχέση βλάστησης - κλίματος με χρήση δορυφορικών δεδομένων

Με δεδομένο ότι υπάρχουν πλέον χρονοσειρές δορυφορικών εικόνων με πολυφασματικά δεδομένα για 30+ χρόνια, έχουν εκπονηθεί αρκετές εργασίες οι οποίες διερευνούν τη σχέση βλάστησης-κλίματος σε διάφορες χωρο-χρονικές κλίμακες. Παρακάτω γίνεται μια σύντομη αναφορά σε κάποιες από αυτές τις εργασίες και στα αποτελέσματα που κατέληξαν. Αρχικά παρουσιάζονται εργασίες που πραγματοποιήθηκαν σε παγκόσμιο/περιφερειακό επίπεδο και στη συνέχεια κάποιες που μελέτησαν τη δυναμική βλάστησης-κλίματος σε επίπεδο λεκάνης απορροής.

• Παγκόσμιο/περιφερειακό επίπεδο

Οι Yang et al. 2019 μελέτησαν τους παράγοντες που επιδρούν στην εξέλιξη της βλάστησης σε παγκόσμιο επίπεδο για το χρονικό διάστημα 1982-2015, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα GIMMS NDVI του ραδιόμετρου AVHRR με χωρική ανάλυση 8 km και χρονική διακριτική ικανότητα τις 16 ημέρες. Τα αποτελέσματα τους έδειξαν ότι το 34% της χερσαίας επιφάνειας της γης παρουσιάζει αύξηση τους δείκτη NDVI σε ετήσια βάση και μόνο 10% μείωση. Οι περιοχές με την μεγαλύτερη αύξηση είναι η Ευρώπη, η Ινδία και η Νότια Κίνα, ενώ αντιθέτως μείωση εμφάνισαν περιοχές στον Καναδά, τη Νότια Αμερική, την κεντρική Αφρική και Κεντρική Ασία. Από τους παράγοντες που μελέτησαν η βροχόπτωση (63.1%), κυρίως, και ακολούθως η θερμοκρασία (15%) είχαν τη μεγαλύτερη επίδραση στη βλάστηση. Πολύ μικρή επίδραση είχαν η κάλυψη γης (8.6%), ο πληθυσμός (6,5%) και το υψόμετρο (6.4%).

Οι Liu et al. 2015 επίσης μελέτησαν τη χωροχρονική εξέλιξη του δείκτη NDVI σε παγκόσμιο επίπεδο και τη συσχέτιση του με κλιματικούς και ανθρωπογενείς παράγοντες, στο χρονικό διάστημα 1982-2012. Ο δείκτης NDVI προήλθε από τα δεδομένα GIMMS NDVI3g και τα κλιματικά δεδομένα από την πλεγματική βάση δεδομένων Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) του

Οι Liu and Lei 2015 εξέτασαν τη χωροχρονική μεταβολή του δείκτη NDVI υπό την επίδραση κλιματικών παραγόντων στην κινεζική επικράτεια για το διάστημα 1982-2011, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα GIMMS NDVI3g και εφαρμόζοντας μεθόδους παλινδρόμησης και συσχέτισης. Τα αποτελέσματα τους έδειξαν ότι στο 76.5% της περιοχής έρευνας ο δείκτης NDVI αυξήθηκε, και ειδικότερα ότι ο δείκτης NDVI της περιόδου βλάστησης αυξήθηκε κατά μέσο όρο 0.0007/έτος. Σε εποχικό επίπεδο, ο δείκτης NDVI είχε μεγαλύτερη αύξηση κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του φθινοπώρου και μικρότερη κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Όσον αφορά την επίδραση των κλιματικών παραγόντων, η θερμοκρασία και οι βροχοπτώσεις είχαν στατιστικά σημαντική και θετική συσχέτιση με το δείκτη NDVI της περιόδου βλάστησης σε επίπεδο χώρας, με τη θερμοκρασία να αποτελεί τον πιο καθοριστικό παράγοντα. Τέλος, σε περιφερειακό επίπεδο, η αύξηση της θερμοκρασίας είχε μεγαλύτερη επίδραση στο δείκτη NDVI της περιόδου βλάστησης σε δασικές περιοχές της νότιας Κίνας και η βροχόπτωση σε χορτολιβαδικές εκτάσεις της βόρειας Κίνας, αντίστοιχα.

Οι Chu et al. 2019 μελέτησαν την επίδραση της κλιματικής αλλαγής στη βλάστηση της λεκάνης απορροής του ποταμού Amur (Amur-Heilong River Basin), η οποία βρίσκεται στα εδάφη της Κίνας και τη Ρωσίας. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε με τα δεδομένα GIMMS NDVI3g και κλιματικά δεδομένα σε ψηφιακή μορφή για το χρονικό διάστημα 1982-2015, εφαρμόζοντας μεθόδους ανάλυσης τάσεων και συσχέτισης. Σε επίπεδο λεκάνης απορροής ο δείκτης NDVI της περιόδου βλάστησης παρουσίασε συνολικά αυξητική τάση στο χρονικό διάστημα της μελέτης με ρυθμό αύξησης 0.0005/έτος. Υπήρχε ένα ενδιάμεσο διάστημα από τα μέσα της δεκαετίας του 1990 μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 2000 στο οποίο ο δείκτης NDVI της περιόδου βλάστησης παρουσίασε πτωτική τάση, η

οποία κατά κύριο λόγο οφειλόταν στην εναλλαγή από περίοδο ξηρασίας σε υγρή περίοδο, καταδεικνύοντας ότι η βροχόπτωση αποτελεί τον ρυθμιστικό παράγοντα για το δείκτη NDVI της περιόδου βλάστησης. Για τις σχέσεις βλάστησης-κλιματικών παραγόντων σε εποχικό επίπεδο, η θερμοκρασία αποτέλεσε τον πιο καθοριστικό παράγοντα για το δείκτη NDVI την περίοδο της άνοιξης, καθώς εμφάνισε στατιστικά σημαντική υψηλή θετική συσχέτιση με αυτόν. Ενώ η βροχόπτωση εμφάνισε στατιστικά σημαντική και αρνητική συσχέτιση με τον δείκτη NDVI για την περίοδο του φθινοπώρου. Τέλος, επισημαίνεται ότι η επίδραση των κλιματικών παραγόντων στη δυναμική της βλάστησης παρουσιάζει διαφορές ανάλογα με το είδος τη βλάστησης. Οι χορτολιβαδικές εκτάσεις εμφάνισαν θετική συσχέτιση με τη βροχόπτωση σε όλες τις εποχές του χρόνου, ενώ οι δασικές εκτάσεις είχαν θετική συσχέτιση με τη θερμοκρασία σε όλες τις εποχές και αρνητική με τις βροχοπτώσεις την περίοδο του φθινοπώρου.

Οι Na-u-dom et al. 2017 διερεύνησαν την επίδραση κλιματικών παραγόντων στη δυναμική της βλάστησης στη λεκάνη απορροής του ποταμού Mekong στη Κίνα για το χρονικό διάστημα 1982-2015, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα GIMMS NDVI3g και παγκόσμια κλιματικά δεδομένα σε ψηφιακή μορφή από το ινστιτούτο Climatic Research Unit του πανεπιστημίου East Anglia. Τα αποτελέσματα έδειξαν αύξηση του δείκτη NDVI και όλων των κλιματικών παραγόντων, κυρίως της θερμοκρασίας, στη χρονική περίοδο μελέτης και για όλα τα είδη βλάστησης. Επίσης, η θερμοκρασία, η βροχόπτωση και η δυνητική εξατμισοδιαπνοή εμφάνισαν θετική συσχέτιση με το δείκτη NDVI στο ανώτερο τμήμα της λεκάνης απορροής.

1.5. Αντικείμενο της παρούσας μελέτης

Η μελέτη της δυναμικής της βλάστησης σε μεγάλη κλίμακα και η διερεύνηση της σχέσης της με κλιματικούς παράγοντες έχουν αποτελέσει αντικείμενο εκτενούς έρευνας τα τελευταία χρόνια, καθώς είναι επιτακτική η ανάγκη να μελετηθούν οι πιθανές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στη βλάστηση. Το γεγονός ότι μέχρι στιγμής δεν έχει πραγματοποιηθεί κάποια παρόμοια εργασία στον ελλαδικό χώρο, σε συνδυασμό με τις δυνατότητες που προσφέρει η πλατφόρμα Google Earth Engine για την υλοποίηση μιας τέτοιας μελέτης αποτέλεσαν το κίνητρο για την παρούσα διπλωματική εργασία.

Αντικείμενο της συγκεκριμένης εργασίας αποτελεί η χωροχρονική διερεύνηση της σχέσης βλάστησης-κλίματος στη Βόρεια Ελλάδα με χρήση δεδομένων από την πλατφόρμα Google Earth Engine. Για την πραγματοποίηση αυτής της μελέτης τέθηκαν οι παρακάτω επιμέρους στόχοι:

Πρώτος στόχος είναι η μελέτη της δυναμικής της βλάστησης στη Βόρεια Ελλάδα για το χρονικό διάστημα 1985-2018 (34 χρόνια) μέσω ετήσιας χρονοσειράς NDVI που δημιουργήθηκε σε περιβάλλον Google Earth Engine από δεδομένα Landsat.

Δεύτερος στόχος είναι η μελέτη της χωροχρονικής εξέλιξης τριών κλιματικών παραγόντων, βροχόπτωση και ελάχιστη/μέγιστη θερμοκρασία, στο ίδιο χρονικό διάστημα των 34 ετών και η συσχέτιση τους με τη χρονοσειρά του δείκτη βλάστησης NDVI.

1.6. Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας

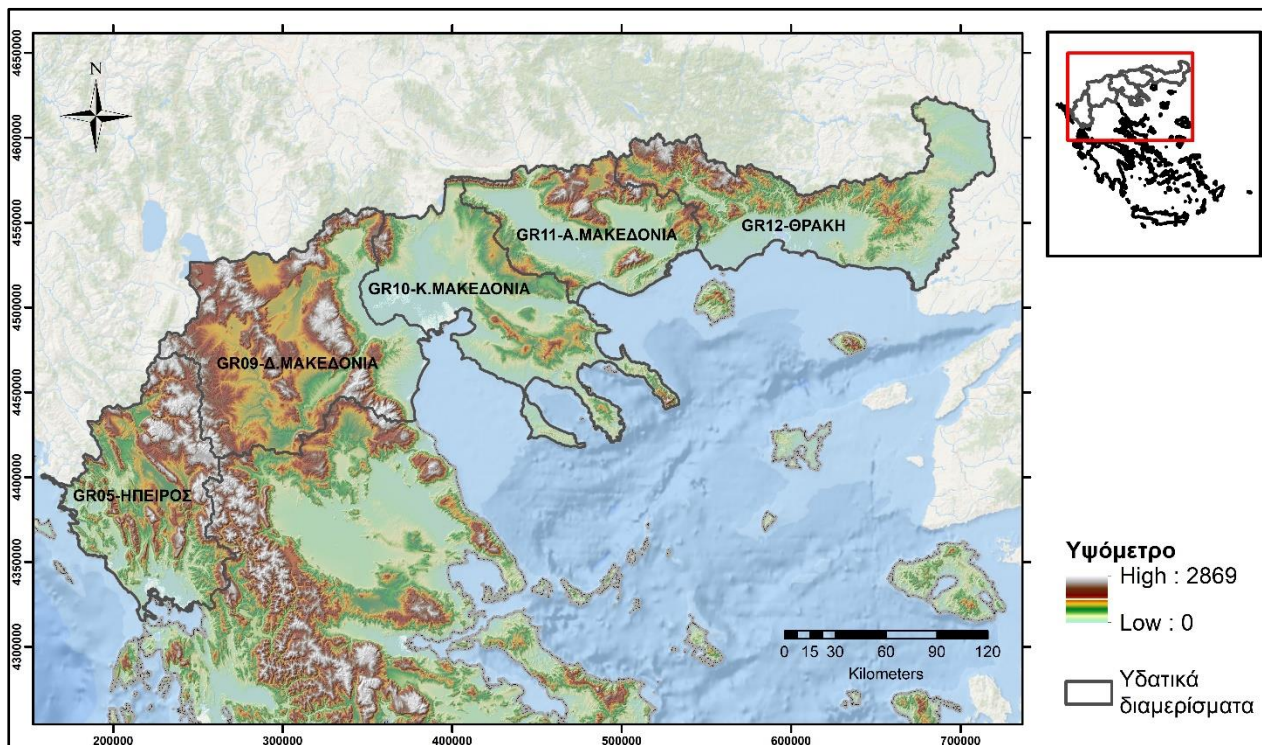
Η εργασία αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια. Το **Κεφάλαιο 1** αποτελεί το παρόν εισαγωγικό κεφάλαιο της εργασίας και περιλαμβάνει το θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας, αναφορά σε εργασίες που υπάρχουν στη βιβλιογραφία και μελετούν τις σχέσεις βλάστησης - κλίματος με χρήση δορυφορικών δεδομένων, το αντικείμενο και τους επιμέρους στόχους της εργασίας. Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης της εργασίας, το μεθοδολογικό πλαίσιο που ακολουθήθηκε και τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν. Στο **Κεφάλαιο 3** γίνεται εκτενής παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων της εργασίας και τέλος στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την υλοποίηση της διπλωματικής εργασίας.



2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

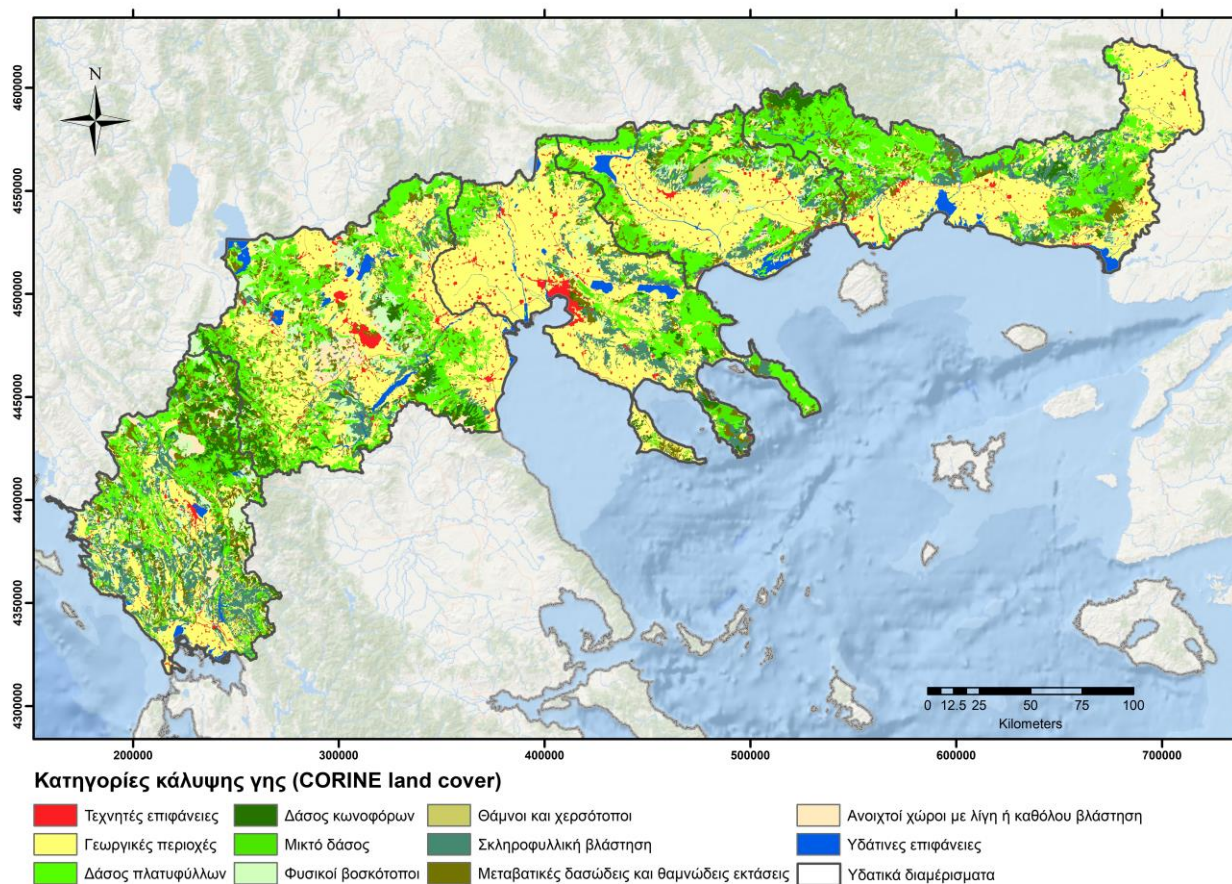
2.1. Περιοχή μελέτης

Η παρούσα εργασία έχει ως περιοχή μελέτης (Εικόνα 2) ένα μεγάλο τμήμα της βορειοδυτικής Ελλάδας, όπως αυτό οριοθετείται από τα ακόλουθα πέντε Υδατικά Διαμερίσματα (ΥΔ): ΥΔ Ηπείρου (GR05), ΥΔ Δυτικής Μακεδονίας (GR09), ΥΔ Κεντρικής Μακεδονίας (GR10), ΥΔ Ανατολικής Μακεδονίας (GR11) και ΥΔ Θράκης (GR12). Σύμφωνα με την Ειδική Γραμματεία Υδάτων, του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής (ΥΠΕΚΑ), και την κοινοτική οδηγία περί υδάτων (2000/60/EK) έχει γίνει ο καθορισμός 14 Υδατικών Διαμερισμάτων που καλύπτουν το σύνολο της ελληνικής επικράτειας. Τα Υδατικά Διαμερίσματα είναι περιοχές λεκανών απορροής ποταμών με κατά το δυνατόν όμοιες υδρολογικές/υδρογεωλογικές συνθήκες και θεσπίστηκαν για τη διαχείριση των υδάτων σε περιφερειακό επίπεδο. Τα πέντε Υδατικά Διαμερίσματα της περιοχής μελέτης έχουν τα ίδια γεωγραφικά όρια με τις Περιφέρειες Ηπείρου, Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, Κεντρικής Μακεδονίας και Δυτικής Μακεδονίας.



Εικόνα 2. Γεωγραφικός χάρτης με το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης (5 Υδατικά Διαμερίσματα) σε προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ '87

Η περιοχής μελέτης έχει έκταση περίπου 51,000 km² και παρουσιάζει έντονη ποικιλομορφία στο ανάγλυφο της. Τα δύο Υδατικά Διαμερίσματα στα ανατολικά, ΥΔ Ανατολικής Μακεδονίας και ΥΔ Θράκης, έχουν πεδινό ανάγλυφο στα παράλια και ορεινό στα βόρεια όρια τους. Το ΥΔ Κεντρικής Μακεδονίας είναι στο μεγαλύτερο μέρος του πεδινό, με κάποιες ημιορεινές περιοχές στα κεντρικά του. Τέλος, τα δύο Υδατικά Διαμερίσματα στα δυτικά, ΥΔ Δυτικής Μακεδονίας και ΥΔ Ηπείρου, έχουν πολύ έντονο γεωμορφολογικό ανάγλυφο, κυρίως ορεινό με μεγάλα υψόμετρα. Λόγω της ποικιλομορφίας στο ανάγλυφο, η περιοχή χαρακτηρίζεται και από ποικιλία κλιματικών συνθηκών, όπως το μεσογειακό στην περιοχή της Χαλκιδικής (ΥΔ Κεντρικής Μακεδονίας), το θαλάσσιο στις παράκτιες περιοχές, το ηπειρωτικό στο εσωτερικό και το ορεινό στις βόρειες ορεινές περιοχές που έχουν μεγάλο υψόμετρο.



Εικόνα 3. Χάρτης κάλυψης γης της περιοχής μελέτης, σύμφωνα με το πρόγραμμα CORINE Land Cover, σε προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ '87

Ο χάρτης κάλυψης γης τις περιοχής μελέτης (Εικόνα 3) προέκυψε από τα δεδομένα του προγράμματος CORINE Land Cover (CLC2018). Το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μελέτης καλύπτεται από γεωργικές εκτάσεις (40%) και από δάση πλατύφυλλων (20%). Ακολουθούν η σκληροφυλλική βλάστηση (10%), οι μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις (8%) και οι φυσικοί βοσκότοποι (6%). Αναλυτικά τα ποσοστά των κατηγοριών κάλυψης γης για την περιοχή μελέτης παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

2.2. Δείκτης βλάστησης NDVI

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε ο δείκτης βλάστησης NDVI για τη μελέτη της δυναμικής της βλάστησης, καθώς αποτελεί αντιπροσωπευτικό δείγμα της ζωτικότητας και της πυκνότητας της βλάστησης. Ο NDVI βασίζεται στην υψηλή ανάκλαση της βλάστησης στο εγγύς υπέρυθρο φάσμα και την απορρόφηση της χλωροφύλλης στο ερυθρό φάσμα. Ο δείκτης υπολογίζεται από πολυφασματικά δορυφορικά δεδομένα βάση του λόγου της διαφοράς ανακλαστικότητας στο εγγύς υπέρυθρο (NIR) και ερυθρό (red) προς το άθροισμα τους:

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{red}) \quad (1)$$

όπου ρ_{NIR} είναι οι τιμές ανάκλασης στον εγγύς υπέρυθρο διάυλο (0.7-1.1 μm) και ρ_{red} είναι οι τιμές ανάκλασης στον ερυθρό διάυλο (0.6-0.7 μm).

Ο δείκτης NDVI καθώς είναι κανονικοποιημένος παίρνει τιμές από -1 (μη ύπαρξη φυτοκάλυψης) έως 1 (πλήρης φυτοκάλυψη). Αρνητικές τιμές NDVI έχουν τα σύννεφα, το χιόνι και το νερό. Χαμηλές τιμές NDVI (<0.2) υποδηλώνουν απουσία ή περιορισμένη φυτοκάλυψη, ενώ υψηλές τιμές NDVI (>0.5) υποδηλώνουν υψηλή πυκνότητα βλάστησης.

2.3. Δεδομένα από την πλατφόρμα GEE

2.3.1. Δεδομένα Landsat

Ανάμεσα στα διαθέσιμα δεδομένα που υπάρχουν στην πλατφόρμα GEE υπάρχει και το αρχείο των δορυφορικών εικόνων του προγράμματος Landsat (Landsat Collection). Το πρόγραμμα Landsat αναπτύχθηκε από τη NASA (National Aeronautics and Space Administration) και τη USGS (U.S. Geological Survey) και παρέχει δορυφορικές εικόνες από το 1972 μέχρι σήμερα με 8 επιτυχείς

αποστολές δορυφόρων (Landsat 1-8). Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν οι ατμοσφαιρικά διορθωμένες δορυφορικές εικόνες από τους τρεις τελευταίους δορυφόρους Landsat (Πίνακας 1), δηλαδή τους Landsat-5, Landsat-7 και Landsat-8. Η ατμοσφαιρική διόρθωση αποτελεί τη διαδικασία κατά την οποία οι τιμές ανακλαστικότητας στην κορυφή της ατμόσφαιρας (Top of Atmosphere-ToA) μετατρέπονται σε επιφανειακή ανακλαστικότητα (Surface Reflectance) και με βάση αυτές τις τιμές υπολογίζονται οι δείκτες βλάστησης.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά των δορυφόρων Landsat 5-8 και η συλλογή δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για κάθε δορυφόρο από την πλατφόρμα GEE

Δορυφόρος-Αισθητήρας	Χρονικό εύρος διαθέσιμων δεδομένων	Χρονική διακριτική ικανότητα	Χωρική διακριτική ικανότητα	GEE Image Collection ID
Landsat-5 TM	01/01/1984-05/05/2012	16-ημέρες	30 m x 30 m	LANDSAT/LT05/C01/T1_SR
Landsat-7 ETM+	01/01/1999-31/05/2018	16-ημέρες	30 m x 30 m	LANDSAT/LE07/C01/T1_SR
Landsat-8 OLI	11/04/2013-14/06/2018	16-ημέρες	30 m x 30 m	LANDSAT/LC08/C01/T1_SR

2.3.2. Δημιουργία χρονοσειράς NDVI

Χρησιμοποιώντας το περιβάλλον GEE Code Editor και τη γλώσσα προγραμματισμού JavaScript αναπτύχθηκε ο κατάλληλος αλγόριθμος για τη δημιουργία μιας ετήσιας χρονοσειράς NDVI για το χρονικό διάστημα 1985-2018. Παρακάτω γίνεται μια σύντομη περιγραφή των βημάτων που ακολουθήθηκαν στην πλατφόρμα GEE για τη δημιουργία της χρονοσειράς NDVI για την περιοχή μελέτης:

- 1) Από τα διαθέσιμα δεδομένα της πλατφόρμας GEE επιλέχθηκαν όλα τα δεδομένα επιφανειακής ανακλαστικότητας (Surface Reflectance) για κάθε έναν από τους δορυφόρους Landsat-5,-7,-8 (USGS Landsat-5,-7,-8 Surface Reflectance Tier 1) για τα έτη 1985 έως 2018.
- 2) Από την παραπάνω συλλογή δεδομένων έγινε επιλογή μόνο των διαθέσιμων εικόνων για τους μήνες Ιούνιο-Ιούλιο κάθε έτους από κάθε δορυφόρο, καθώς η παρούσα εργασία αποσκοπεί στη μελέτη της δυναμικής της βλάστησης κατά τη θερινή περίοδο (περίοδος βλάστησης).

3) Εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος cfmask (Zhu et al. 2015) σε κάθε δορυφορική εικόνα για την απομάκρυνση εικονοστοιχείων (pixel) που αντιστοιχούν σε σύννεφα, σκιές σύννεφων, χιόνια και νερό, χρησιμοποιώντας το αντίστοιχο φασματικό κανάλι (band) που περιέχει πληροφορία για την ποιότητα κάθε pixel (pixel_qa).

4) Πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός του δείκτη NDVI χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από το ερυθρό και εγγύς υπέρυθρο φασματικό κανάλι κάθε δορυφορικής εικόνας. Για τη συλλογή δορυφορικών εικόνων από Landsat-5 και Landsat-7 ο δείκτης NDVI υπολογίστηκε με δεδομένα από τα φασματικά κανάλια (bands) 4 και 3 που αντιστοιχούν στις τιμές ανάκλασης στον εγγύς υπέρυθρο και ερυθρό διάυλο, αντίστοιχα. Ενώ, για τη συλλογή εικόνων του δορυφόρου Landsat-8 υπολογίστηκε από τα δεδομένα των φασματικών καναλιών (bands) 5 και 4 που αντιστοιχούν στις τιμές ανάκλασης στον εγγύς υπέρυθρο και ερυθρό διάυλο, αντίστοιχα.

5) Για τη δημιουργία της ετήσιας χρονοσειράς NDVI υπολογίστηκε σε κάθε έτος η διάμεση τιμή των εικονοστοιχείων (pixel) από το σύνολο των διαθέσιμων εικόνων NDVI της θερινής περιόδου κάθε δορυφόρου.

6) Πραγματοποιήθηκε περικοπή των δεδομένων (clip) της ετήσιας χρονοσειράς NDVI στα όρια των Υδατικών Διαμερισμάτων της περιοχής μελέτης.

7) Ορίστηκε προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ'87 (EPSG:2100) στις εικόνες NDVI της χρονοσειράς και πραγματοποιήθηκε εξαγωγή τους σε μορφή TIFF με χωρική ανάλυση 30m. Η εξαγωγή των εικόνων έγινε στη διαδικτυακή πλατφόρμα αποθήκευσης Google Drive.

Το τελικό αποτέλεσμα ήταν να παραχθούν 34 εικόνες, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τη διάμεση τιμή NDVI της θερινής περιόδου (Ιούνιος-Ιούλιος) για κάθε έτος μελέτης από το 1985-2018. Κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν δυο περιορισμοί που υπάρχουν στη δημιουργία μακροχρόνιων χρονοσειρών από τα δεδομένα των δορυφόρων Landsat-5,-7,-8. Πρώτον, όλες οι εικόνες του δορυφόρου Landsat-7 από τις 31 Μάϊου 2003 και έπειτα έχουν απώλεια δεδομένων, λόγω προβλήματος που παρουσιάστηκε στη διάταξη SLC (Scan Line Corrector), η οποία διατηρεί τις γραμμές σάρωσης παράλληλες μεταξύ

τους. Στην παρούσα εργασία για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, εφαρμόστηκε ένα φίλτρο στην πλατφόρμα GEE με το οποίο απομακρύνθηκαν όλα τα εικονοστοιχεία με προβληματικές τιμές από τις εικόνες του δορυφόρου Landsat-7 και δεν χρησιμοποιήθηκαν στη δημιουργία της ετήσιας χρονοσειράς NDVI. Δεύτερον, η δημιουργία μια μακροχρόνιας χρονοσειράς NDVI από δορυφόρους Landsat απαιτεί τη χρήση δεδομένων από αρκετούς διαφορετικούς αισθητήρες. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιούνται δεδομένα από τρεις διαφορετικούς αισθητήρες (Landsat-5,-7,-8). Υπάρχουν αρκετές εργασίες στη βιβλιογραφία οι οποίες αναφέρουν ότι λόγω διαφορετικών φασματικών χαρακτηριστικών μεταξύ των αισθητήρων των τριών δορυφόρων είναι πιθανό να υπάρχουν μικρές διαφοροποιήσεις στις τιμές του δείκτη NDVI από κάθε δορυφόρο (Ju and Masek 2016; Roy et al. 2016). Οι διαφορές αυτές είναι δυνατό να επηρεάσουν την ανάλυση τάσης μιας μακροχρόνιας χρονοσειράς, παρόλα αυτά δεν κρίθηκε σκόπιμο στο πλαίσιο αυτής της εργασίας να πραγματοποιηθεί βαθμονόμηση των τιμών NDVI μεταξύ των 3 αισθητήρων.

2.3.3. Χρονοσειρές κλιματικών δεδομένων

Τα δεδομένα βροχόπτωσης που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία είναι από την πλεγματική (raster) βάση δεδομένων **CHIRPS** (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) (Funk et al. 2015). Τα δεδομένα είναι διαθέσιμα για την περίοδο από το 1981 έως και σήμερα, με ημερήσια χρονική κλίμακα και χωρική ανάλυση 0.05° (περίπου 5.5 km). Προέρχονται από δορυφορικά δεδομένα βροχόπτωσης με διορθώσεις από επίγειους σταθμούς που βρίσκονται σε όλο τον κόσμο. Για την παρούσα εργασία δημιουργήθηκε στην πλατφόρμα GEE χρονοσειρά εικόνων με τη μηνιαία βροχόπτωση για το διάστημα 1985-2018, η οποία καλύπτει ολόκληρη την περιοχή μελέτης. Κάθε εικονοστοιχείο της μηνιαίας εικόνας αντιστοιχεί στο μηνιαίο άθροισμα βροχόπτωσης (mm/μήνα).

Τα δεδομένα θερμοκρασίας προέρχονται από τη πλεγματική (raster) βάση δεδομένων **TerraClimate** (Abatzoglou et al. 2017), η οποία παρέχει αρκετές μεταβλητές που σχετίζονται με το μηνιαίο κλίμα και το κλιματικό υδατικό ισοζύγιο της γήινης επιφανείας σε παγκόσμια κλίμακα, με υψηλή χωρική ανάλυση ($1/24^\circ \approx 4$ km) για την περίοδο από το 1958 έως σήμερα. Τα δεδομένα προέρχονται από το συνδυασμό και την περαιτέρω στατιστική ανάλυση των μέσων ετήσιων κλιματικών δεδομένων της βάσης WorldClim (Hijmans et al. 2005), που έχουν υψηλή χωρική ανάλυση, με διάφορα άλλα μηνιαία κλιματικά δεδομένα που έχουν χαμηλή χωρική ανάλυση. Για την παρούσα εργασία δημιουργήθηκαν στην πλατφόρμα GEE δύο χρονοσειρές εικόνων για το χρονικό

διάστημα 1985-2018, μια για τη μέση μηνιαία ελάχιστη θερμοκρασία (T_{min}) και μια για τη μέση μηνιαία μέγιστη θερμοκρασία (T_{max}) στην περιοχή μελέτης.

Η εξαγωγή των χρονοσειρών των κλιματικών δεδομένων έγινε σε μορφή TIFF στη πλατφόρμα Google Drive, αφού πρώτα ορίστηκε προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ'87 (EPSG:2100) και πραγματοποιήθηκε περικοπή στα όρια της περιοχής μελέτης.

2.4. Λοιπά δεδομένα

Τα δεδομένα κάλυψης/χρήσεων γης για την περιοχή μελέτης αντλήθηκαν από το πρόγραμμα CORINE Land Cover 2018 (CLC2018) σε μορφή καννάβου (raster) με χωρική ανάλυση 100 m. Από τις κατηγορίες του CLC που υπάρχουν στο Επίπεδο 3 έγινε μια περαιτέρω ομαδοποίηση ώστε να μειωθούν οι κατηγορίες κάλυψης/χρήσεων γης.

Τα γεωχωρικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν συμπεριλαμβανομένων των ορίων των Υδατικών Διαμερισμάτων της περιοχής μελέτης αντλήθηκαν από το διαδικτυακό τόπο <http://geodata.gov.gr>.

2.5. Μεθοδολογία

Σε αυτήν την ενότητα, αρχικά, περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τη χωροχρονική διερεύνηση των σχέσεων βλάστησης-κλίματος, η οποία μπορεί να επιμεριστεί σε τρία επιμέρους στάδια. Στη συνέχεια γίνεται αναλυτική περιγραφή των στατιστικών μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

• 1^ο Στάδιο: Δυναμική της βλάστησης

Η μελέτη της δυναμικής της βλάστησης επικεντρώνεται στο διάστημα της θερινής περιόδου (Ιούνιος-Ιούλιος), η οποία αποτελεί και βλαστική περίοδο για μεγάλο μέρος των ειδών. Αρχικά, έγινε διερεύνηση της χωρικής και χρονικής εξέλιξης της ετήσιας χρονοσειράς του δείκτη NDVI θερινής περιόδου σε επίπεδο περιοχής μελέτης και ανά κατηγορία κάλυψης/χρήσης γης. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η ανωμαλία του δείκτη NDVI για το χρονικό διάστημα 1985-2018 με στόχο την εξεύρεση ακραίων τιμών. Επίσης, πραγματοποιήθηκε ανάλυση τάσεων του ετήσιου δείκτη NDVI με χρήση του μη-παραμετρικού ελέγχου Mann-Kendall σε επίπεδο εικονοστοιχείου, κατηγορίας κάλυψης/χρήσης γης και συνολικά για την περιοχή μελέτης. Παράλληλα υπολογίστηκε και ο ρυθμός

μεταβολής (κλίση) του ετήσιου NDVI μέσω της μεθόδου Sen. Για τη μελέτη των χρονοσειρών NDVI δεν εξετάστηκε η σειριακή συσχέτιση και η εποχικότητα. Θεωρήθηκε ότι η αυτοσυσχέτιση (autocorrelation) των δεδομένων είναι εξαιρετικά χαμηλή για χρονοσειρά 34 ετών και επίσης ότι εφόσον επιλέγεται μόνο η διάμεση τιμή NDVI της θερινού περιόδου δεν θα επηρεάζονται οι τιμές από εποχικότητα. Τέλος, έγινε και διερεύνηση απότομων αλλαγών στις τιμές της χρονοσειράς NDVI μέσω του ελέγχου Pettit. Τα δεδομένα της χρονοσειράς NDVI που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το στάδιο έχουν χωρική ανάλυση 30m, όπως και τα δεδομένα Landsat από τα οποία προέρχονται. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι από κάθε εικόνα της χρονοσειράς αφαιρέθηκαν τα pixel με $NDVI < 0.1$ καθώς δεν ανταποκρίνονται σε βλάστηση, αλλά σε άγονες περιοχές με βράχους ή άμμο.

• 2^ο Στάδιο: Δυναμική των κλιματικών παραγόντων

Η δυναμική των κλιματικών παραγόντων πραγματοποιήθηκε με τη μελέτη της χωρικής και χρονικής εξέλιξης της χρονοσειράς βροχοπτώσεων ανά υδρολογικό έτος και της μέσης ετήσιας ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας. Επιπλέον, υπολογίστηκε η ανωμαλία του κάθε κλιματικού παράγοντα για το χρονικό διάστημα 1985-2018. Τα δεδομένα της χρονοσειράς των βροχοπτώσεων έχουν χωρική ανάλυση 5.5km και τα αντίστοιχα για τις θερμοκρασίες έχουν 4km.

• 3^ο Στάδιο: Διερεύνηση σχέσεων βλάστησης-κλίματος

Για τη διερεύνηση των σχέσεων βλάστησης-κλίματος υπολογίστηκε ο συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ δείκτη NDVI και κλιματικών παραγόντων συνολικά για τη περιοχή μελέτης, αλλά και για κάθε κατηγορία κάλυψης/χρήσης γης. Στη συνέχεια, για τον προσδιορισμό της επίδρασης που έχει ο κάθε κλιματικός παράγοντας στο δείκτη NDVI πραγματοποιήθηκε πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση με εξαρτημένη μεταβλητή το δείκτη NDVI και ανεξάρτητες μεταβλητές τους κλιματικούς παράγοντες. Για να πραγματοποιηθούν οι εργασίες αυτού του σταδίου όλες οι χρονοσειρές πρέπει να έχουν κοινό προβολικό σύστημα αναφοράς και ίδια χωρική ανάλυση. Έτσι, πραγματοποιήθηκε επαναδειγματοληψία (resampling) στις χρονοσειρές του NDVI και των κλιματικών παραγόντων από την αρχική τους ανάλυση στα 100m, με τη μέθοδο της διγραμμικής παρεμβολής (bilinear interpolation).

Όλες οι επιμέρους εργασίες κάθε σταδίου, καθώς και η στατιστική ανάλυση των δεδομένων πραγματοποιήθηκαν στη γλώσσα προγραμματισμού R.

2.5.1. Ανάλυση τάσεων και διερεύνηση σημείου αλλαγής τάσης

Ο μη-παραμετρικός έλεγχος **Mann-Kendall** (Mann 1945; Kendall 1975) είναι από τους πιο διαδεδομένους στατιστικούς ελέγχους για τον εντοπισμό μονοτονικής τάσης σε χρονοσειρές περιβαλλοντικών, κλιματικών ή υδρολογικών δεδομένων. Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του ελέγχου είναι ότι τα δεδομένα δεν χρειάζεται να ακολουθούν την κανονική κατανομή. Ο έλεγχος βασίζεται στην υπόθεση ότι οι παρατηρήσεις X_i προκύπτουν από μία συνεχή μονότονη (αύξουσα ή φθίνουσα) συνάρτηση του χρόνου $f(t_i)$ ακολουθώντας το παρακάτω μοντέλο:

$$X_i = f(t_i) + \varepsilon_i \quad (2)$$

όπου τα ε_i είναι τα υπόλοιπα τα οποία προέρχονται από την ίδια κατανομή με μέσο 0.

Ο στατιστικός έλεγχος είναι μεταξύ της μηδενικής υπόθεσης H_0 και της εναλλακτικής H_1 όπως παρακάτω:

- H_0 : οι παρατηρήσεις είναι τυχαία κατανεμημένες στο χρόνο
- H_1 : υπάρχει μονοτονική τάση στα δεδομένα (αύξουσα ή φθίνουσα)

Για τον έλεγχο της της υπόθεσης της μονότονης τάσης χρησιμοποιείται αρχικά η παρακάτω συνάρτηση:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k) \quad (3)$$

όπου x_j και x_k είναι 2 διαδοχικές παρατηρήσεις της χρονοσειράς μελέτης ($j > k$), n είναι ο αριθμός των παρατηρήσεων και S η στατιστική τιμή του ελέγχου.

$$\text{sign}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{εάν } x_j - x_k > 0 \\ 0 & \text{εάν } x_j - x_k = 0 \\ -1 & \text{εάν } x_j - x_k < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Όπως φαίνεται από την παραπάνω σχέση κάθε τιμή στο δείγμα συγκρίνεται με όλες τις επόμενες (χρονικά) τιμές. Για κάθε επόμενη τιμή που υπερβαίνει την συγκεκριμένη, η τιμή του S αυξάνεται κατά μια μονάδα, ενώ για κάθε τιμή που είναι μικρότερη της προηγούμενης το S μειώνεται κατά μια μονάδα. Αυτό σημαίνει πως αν στο τελικό αποτέλεσμα η τιμή του S είναι μεγάλη και θετική, τότε υπάρχει αύξηση στις τιμές του δείγματος, οπότε υπάρχει και θετική τάση. Αν το S είναι μεγάλη αρνητική τιμή, τότε οι τιμές τείνουν να μειώνονται και άρα υπάρχει αρνητική τάση. Αν η τιμή του S είναι σχετικά μικρή (θετική ή αρνητική) και κοντά στο μηδέν, τότε η χρονοσειρά είναι στάσιμη. Σύμφωνα με τον Kendall για χρονοσειρά με $n \geq 10$ παρατηρήσεις, η στατιστική παράμετρος S ακολουθεί την κανονική κατανομή με μέση τιμή και διακύμανση όπως παρακάτω:

$$E(S) = 0 \quad (5)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q E_p(E_p-1)(2E_p+5) \right] \quad (6)$$

όπου E_p είναι ο αριθμός των ισοπαλιών στο σύνολο p και q ο αριθμός των συνόλων που έχουν την ίδια τιμή.

Έτσι μπορεί να υπολογιστεί το κανονικοποιημένο στατιστικό μέγεθος Z , το οποίο ακολουθεί την τυποποιημένη κανονική κατανομή με μέση τιμή το 0 και διασπορά το 1, όπως παρακάτω:

$$Z = \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \quad \text{εάν } S > 0 \quad (7)$$

$$Z = \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \quad \text{εάν } S < 0 \quad (8)$$

$$Z = 0 \quad \text{εάν } S = 0 \quad (9)$$

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζεται και το στατιστικό μέγεθος τ του Kendall:

$$\tau = \frac{S}{D} \quad (10)$$

$$D = \left[\frac{1}{2} n(n-1) - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m t_j(t_j-1) \right]^{1/2} \left[\frac{1}{2} n(n-1) \right]^{1/2} \quad (11)$$

Σε δίπλευρο στατιστικό έλεγχο εάν $|Z| > Z_{\alpha/2}$, όπου το α αποτελεί το επιλεγμένο επίπεδο σημαντικότητας (π.χ. $\alpha=5\%$, με $Z_{\alpha/2}= 1.96$) τότε η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται και υπάρχει μονοτονική τάση. Θετικές τιμές της στατιστικής συνάρτησης Z δείχνουν την ύπαρξη αύξουσας τάσης, ενώ αρνητικές τιμές την ύπαρξη φθίνουσας τάσης.

Εάν εντοπιστεί η ύπαρξη μονοτονικής τάσης, το μέγεθος της μπορεί να υπολογιστεί με τη **μέθοδο του Sen** (Sen 1968), που αποτελεί μια μη παραμετρική μέθοδο για την εκτίμηση της κλίσης της τάσης. Για να συμβεί αυτό, τα δεδομένα θα πρέπει να ακολουθούν την παρακάτω εξίσωση της συνάρτησης $f(t)$, η οποία είναι ανεξάρτητη του χρόνου t :

$$f(t) = Qt + B \quad (12)$$

όπου Q η τιμή της μεταβλητής που δείχνει την κλίση της τάσης και B η σταθερά της εξίσωσης.

Για να υπολογιστεί η κλίση Q της παραπάνω εξίσωσης, υπολογίζονται πρώτα οι κλίσεις όλων των τιμών των ζευγών παρατήρησης της χρονοσειράς μελέτης σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο :

$$Q_i = \frac{(x_j - x_k)}{(j - k)} \text{ για } j = 1, \dots, n \quad (13)$$

όπου x_j και x_k είναι 2 διαδοχικές παρατηρήσεις της χρονοσειράς μελέτης ($j > k$).

Τέλος, για τον εντοπισμό ανομοιογενειών σε μια χρονοσειρά δεδομένων μπορεί να εφαρμοστεί ο **μη-παραμετρικός έλεγχος Pettit** (Pettitt 1979). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε στη χρονοσειρά με τις ετήσιες τιμές NDVI για τον εντοπισμό του έτους στο οποίο παρουσιάζεται απότομη αλλαγή τάσης.

2.5.2. Υπολογισμός ανωμαλίας (Z-score)

Για τον υπολογισμό της διαφοράς μια τιμής σε σχέση με τη μακροχρόνια μέση τιμή της χρησιμοποιήθηκε το Z-score (πρότυπο σκορ), το οποίο υπολογίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$Z_i = \frac{(x_i - \mu)}{\sigma} \text{ για } i = 1, \dots, n \quad (14)$$

όπου x_i είναι η τιμή μιας μεταβλητής για το έτος i , μ και σ είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση αντίστοιχα όλων των διαθέσιμων τιμών της μεταβλητής και n είναι τα χρόνια για τα οποία υπάρχουν τιμές.

Ο υπολογισμός του Z-score έγινε σε επίπεδο εικονοστοιχείου (pixel) για κάθε έτος μιας χρονοσειράς δεδομένων (δείκτης βλάστησης, κλιματικά δεδομένα). Το Z-score ποσοτικοποιεί την απόσταση μιας τιμής από τη μέση τιμή όσον αφορά την τυπική απόκλιση και μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό ακραίων τιμών και ανωμαλιών. Καθώς αποτελεί ένα κανονικοποιημένο μέγεθος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση των ετήσιων ανωμαλιών του δείκτη βλάστησης NDVI και των αντίστοιχων ανωμαλιών που παρουσιάζουν οι κλιματικοί παράγοντες

2.5.3. Έλεγχος συσχέτισης της βλάστησης με τους κλιματικούς παράγοντες

Για τον υπολογισμό της συσχέτισης ανάμεσα στο δείκτη βλάστησης NDVI και κάθε έναν από τους κλιματικούς παράγοντες (βροχόπτωση, μέγιστη/ελάχιστη θερμοκρασία) χρησιμοποιήθηκε ο **συντελεστής συσχέτισης του Pearson (r)**, με τον οποίο υπολογίζεται ο βαθμός της γραμμικής συσχέτισης μεταξύ δύο μεταβλητών. Οι τιμές του κυμαίνονται από -1 έως 1, όσο πιο κοντά βρίσκεται η τιμή του r στα δύο άκρα τόσο μεγαλύτερη συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών υπάρχει. Όταν ο συντελεστής είναι ίσος με το μηδέν, οι δύο μεταβλητές δεν έχουν γραμμική συσχέτιση. Ο τύπος του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης Pearson είναι ο εξής:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (15)$$

όπου x_i , y_i οι τιμές των δύο μεταβλητών σε χρόνο i , $\bar{x}$, $\bar{y}$ οι μέσες τιμές των δύο μεταβλητών και n το πλήθος από ζεύγη παρατηρήσεων μεταξύ των δύο μεταβλητών.

Ο συντελεστής συσχέτισης r μεταξύ δύο μεταβλητών αποτελεί εκτίμηση της συσχέτισης από ένα δείγμα τιμών και για αυτό ακολούθως πρέπει να καθοριστεί εάν αυτή η συσχέτιση ισχύει και στο γενικό σύνολο τιμών. Έτσι, πραγματοποιείται έλεγχος υποθέσεων (t-test) για να καθοριστεί η στατιστική σημαντικότητα του συντελεστή, η οποία εκφράζεται από την τιμή p-value (παρατηρούμενο επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας). Σημαντική παράμετρος του στατιστικού ελέγχου αποτελούν οι βαθμοί ελευθερίας (degrees of freedom), οι οποίοι υπολογίζονται ως πλήθος δεδομένων μείον δύο ($n-2$).

2.5.4. Πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση

Για τη διερεύνηση της συνεισφοράς του κάθε κλιματικού παράγοντα στο δείκτη βλάστησης NDVI πραγματοποιήθηκε πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση με εξαρτημένη μεταβλητή το δείκτη NDVI και ανεξάρτητες μεταβλητές τους κλιματικούς παράγοντες (βροχόπτωση, μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία). Για να είναι ερμηνεύσιμα τα αποτελέσματα και να μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση της επιμέρους επίδρασης του κάθε κλιματικού παράγοντα στο δείκτη NDVI, όλες οι χρονοσειρές κανονικοποιήθηκαν με αφαίρεση της μέσης τιμής και διαίρεση με την τυπική απόκλιση των τιμών για τα όλα τα χρόνια μελέτης. Έτσι, οι χρονοσειρές που χρησιμοποιήθηκαν ως μεταβλητές της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης είναι ουσιαστικά οι ίδιες με αυτές που προέκυψαν από τη χρήση του Z-score για τον υπολογισμό της ανωμαλίας. Η εξίσωση της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης έχει την παρακάτω μορφή:

$$\frac{NDVI - \overline{NDVI}}{\sigma_{NDVI}} = \beta_0 + \beta_1 \frac{Rain - \overline{Rain}}{\sigma_{Rain}} + \beta_2 \frac{T_{max} - \overline{T_{max}}}{\sigma_{T_{max}}} + \beta_3 \frac{T_{min} - \overline{T_{min}}}{\sigma_{T_{min}}} \quad (16)$$

όπου NDVI, Rain, T_{max}, T_{min} είναι οι τιμές του δείκτη βλάστησης NDVI, της βροχόπτωσης, της μέγιστης θερμοκρασίας και της ελάχιστης θερμοκρασίας, αντίστοιχα, στο εικονοστοιχείο με συντεταγμένες x-y, $\overline{NDVI}$, $\overline{Rain}$, $\overline{T_{max}}$, $\overline{T_{min}}$ και σ_{NDVI} , σ_{Rain} , $\sigma_{T_{max}}$, $\sigma_{T_{min}}$ είναι αντίστοιχα η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση όλων των διαθέσιμων τιμών για 34 χρόνια στο εικονοστοιχείο με συντεταγμένες x-y, και τέλος β_0 , β_1 , β_2 και β_3 είναι οι συντελεστές της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης.



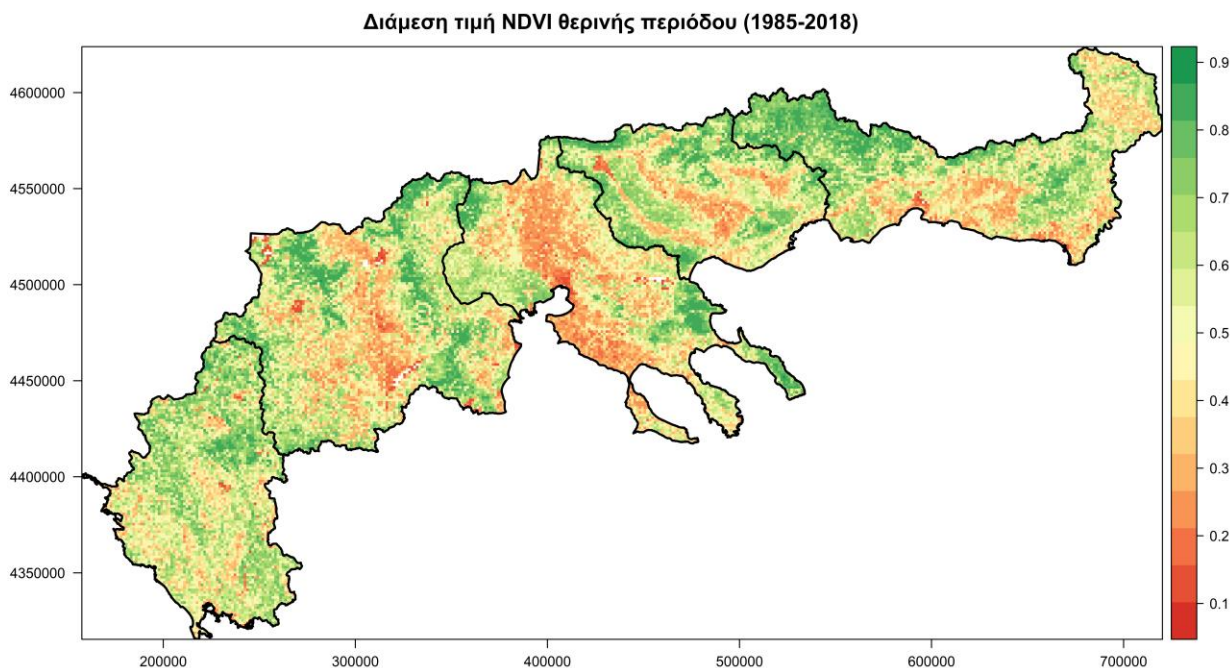
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1. Δυναμική της βλάστησης

Η αρχική ενότητα των αποτελεσμάτων καταγράφει τη δυναμική της βλάστησης όπως αυτή προκύπτει από τη χωρική και χρονική εξέλιξη του δείκτη NDVI στο σύνολο της περιοχή μελέτης, στα επιμέρους Υδατικά Διαμερίσματα και ανά κατηγορία κάλυψης γης.

3.1.1. Χωρική κατανομή του δείκτη NDVI

Στην Εικόνα 4 απεικονίζεται ο χάρτης της χωρικής κατανομής του δείκτη NDVI στην περιοχή μελέτης για το διάστημα 1985-2018, με την τιμή κάθε εικονοστοιχείου (pixel) να αποτελεί τη διάμεση τιμή NDVI των 34 ετών. Οι δασικές και οι θαμνώδεις εκτάσεις παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές NDVI, αντιθέτως οι τεχνητές επιφάνειες, οι γεωργικές εκτάσεις και οι υδάτινες επιφάνειες τις χαμηλότερες τιμές.



Εικόνα 4. Χωρική διακύμανση των διαμέσων τιμών του δείκτη βλάστησης NDVI κατά τη θερινή περίοδο (Ιούνιος-Ιούλιος) για το διάστημα 1985-2018 στην περιοχή μελέτης

Τα τέσσερα από τα πέντε ΥΔ της περιοχής μελέτης, ΥΔ Ηπείρου, ΥΔ Δυτικής Μακεδονίας, ΥΔ Ανατολικής Μακεδονίας και ΥΔ Θράκης, έχουν παρόμοιες μέσες τιμές NDVI μεταξύ 0.54-0.58. Το ΥΔ Κεντρικής Μακεδονίας εμφανίζει τη χαμηλότερη μέση τιμή NDVI (0.47), καθώς καλύπτεται κατά 56% από γεωργικές εκτάσεις οι οποίες παρουσιάζουν χαμηλές τιμές NDVI.

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι αναλυτικά οι μέσες τιμές NDVI και οι συντελεστές μεταβλητότητας για κάθε κατηγορία κάλυψης γης στην περιοχή μελέτης. Την υψηλότερη μέση τιμή NDVI παρουσιάζουν τα Δάση πλατυφύλλων (0.74), τα οποία καταλαμβάνουν το 20% της περιοχής μελέτης, και ακολουθούν τα Μικτά δάση (0.68) και τα Δάση κωνοφόρων (0.65). Αυτές οι τρεις κατηγορίες εμφανίζουν και τους χαμηλότερους συντελεστές μεταβλητότητα, με 0.13, 0.16 και 0.17, αντίστοιχα, καταδεικνύοντας ότι οι διάμεσες τιμές NDVI των δασικών εκτάσεων για το διάστημα 1985-2018 παρουσιάζουν μια χωρική ομοιογένεια στην περιοχή μελέτης. Οι τρεις κατηγορίες κάλυψης γης που αποτελούν τη θαμνώδη βλάστηση (θάμνοι και χερσότοποι, σκληροφυλλική βλάστηση, μεταβατικές δασώδεις/θαμνώδεις εκτάσεις) παρουσιάζουν μέσες τιμές NDVI μεταξύ 0.50-0.60 και τιμές μεταβλητότητας που κυμαίνονται από 0.21-0.23. Όσον αφορά τις υπόλοιπες κατηγορίες κάλυψης γης που σχετίζονται με βλάστηση, οι φυσικοί βοσκότοποι και οι γεωργικές εκτάσεις έχουν μέση τιμή NDVI 0.45, ενώ οι ανοιχτοί χώροι με λίγη ή καθόλου βλάστηση μέση τιμή 0.37. Οι φυσικοί βοσκότοποι και οι γεωργικές εκτάσεις παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές μεταβλητότητας από όλες τις κατηγορίες βλάστησης, με 0.28 και 0.34 αντίστοιχα, γεγονός το οποίο υποδηλώνει ότι υπάρχει υψηλή ανομοιογένεια στο χώρο για τα εικονοστοιχεία που ανήκουν σε αυτές τις δυο κατηγορίες. Για τις γεωργικές εκτάσεις ο υψηλός συντελεστής διακύμανσης μπορεί να δικαιολογηθεί καθώς το είδος καλλιέργειας, το στάδιο που αυτή βρίσκεται και η μέθοδος καλλιέργειας που ακολουθείται επηρεάζουν το δείκτη NDVI. Τέλος, οι τεχνητές και οι υδάτινες επιφάνειες έχουν τις χαμηλότερες τιμές NDVI, το οποίο είναι και απολύτως φυσιολογικό, καθώς απουσιάζει η βλάστηση. Για το υπόλοιπο της εργασίας θα μελετηθούν μόνο οι κατηγορίες κάλυψης γης που σχετίζονται με τη βλάστηση, για αυτό το λόγο τα εικονοστοιχεία που ανήκουν στις δύο τελευταίες κατηγορίες (τεχνητές επιφάνειες και οι υδάτινες επιφάνειες) θα αφαιρεθούν.

Πίνακας 2. Μέση τιμή και Συντελεστής μεταβλητότητας (CV) NDVI κατά τη θερινή περίοδο (Ιούνιος-Ιούλιος) για τα έτη 1985-2018 ανά κατηγορία κάλυψης γης στην περιοχή μελέτης

Κατηγορία κάλυψης γης	Μέση τιμή NDVI	Συντελεστής μεταβλητότητας NDVI (Coefficient of variation)	Ποσοστά κάλυψης γης (%)
Τεχνητές επιφάνειες	0.34	0.37	3.02
Γεωργικές περιοχές	0.45	0.34	39.96
Δάσος πλατυφύλλων	0.74	0.13	19.51
Δάσος κωνοφόρων	0.65	0.17	3.61
Μικτό δάσος	0.68	0.16	5.02
Φυσικοί βοσκότοποι	0.45	0.28	6.13
Θάμνοι και χερσότοποι	0.53	0.22	0.22
Σκληροφυλλική βλάστηση	0.53	0.23	10.00
Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις	0.59	0.21	8.02
Ανοιχτοί χώροι με λίγη ή καθόλου βλάστηση	0.37	0.34	1.98
Υδάτινες επιφάνειες	0.35	0.53	2.52

Επίσης, στο Διάγραμμα 1 παρουσιάζονται διαγράμματα σε σχήμα βιολιού (violin plots) για την πληρέστερη περιγραφή της κατανομής των τιμών NDVI και τη μεταβλητότητα που παρουσιάζουν ανά κατηγορία κάλυψης γης.

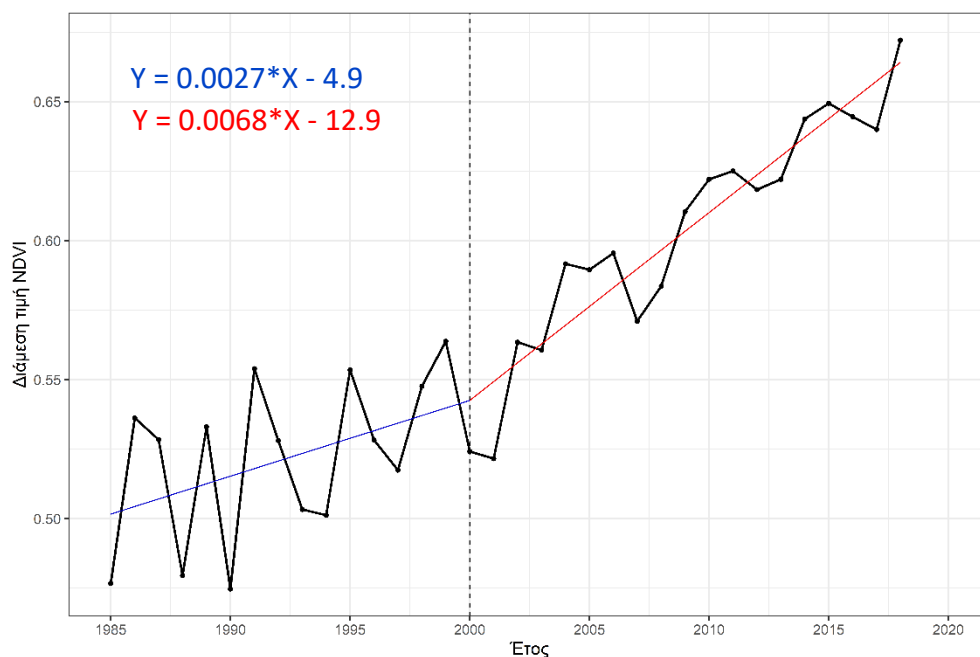


Διάγραμμα 1. Διαγράμματα σε σχήματα βιολιού (violin plots) για τις τιμές NDVI ανά κατηγορία κάλυψης γης

Τα παραπάνω διαγράμματα αποτελούν έναν συνδυασμό θηκογράμματος (boxplot) και καμπύλης σχετικών συχνοτήτων (density plot). Από τα διαγράμματα αυτά επιβεβαιώνεται περαιτέρω ότι οι δασικές εκτάσεις έχουν μεγάλη ομοιογένεια τιμών NDVI, ενώ οι θάμνοι και χερσότοποι, η σκληροφυλλική βλάστηση και οι μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις έχουν μεγάλη διασπορά τιμών και χωρική ανομοιογένεια στην περιοχή μελέτης.

3.1.2. Χρονική εξέλιξη του δείκτη NDVI

Μια πρώτη γενική εικόνα για την πορεία εξέλιξης της διάμεσης τιμής NDVI της θερινής περιόδου κάθε έτους από το 1985 έως το 2018 σε ολόκληρη την περιοχή μελέτης παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 2. Όπως φαίνεται υπάρχει μια αυξητική τάση του δείκτη NDVI, από 0.48 (1985) σε 0.67 (2018). Επίσης, παρουσιάζεται έντονη διακύμανση μεταξύ των ετήσιων τιμών για το διάστημα 1985-2002, ενώ για το διάστημα 2002-2018 οι μεταβολές της ετήσιας τιμής NDVI είναι πιο ομαλές.

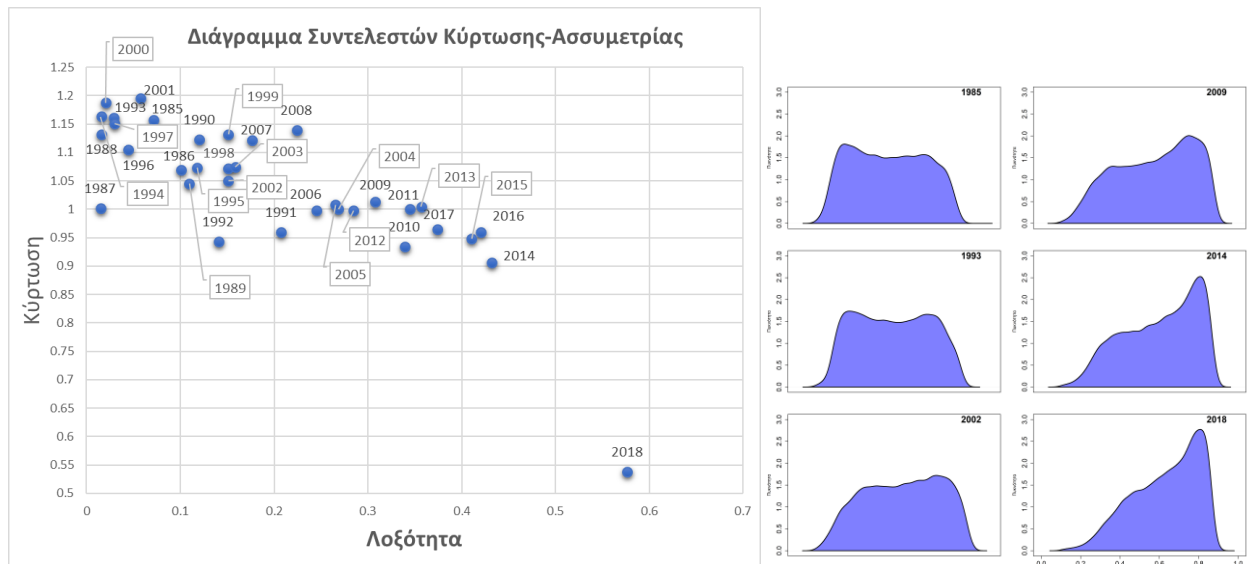


Διάγραμμα 2. Χρονική εξέλιξη διάμεσης τιμής NDVI ανά έτος για την περιοχή μελέτης και οι εξισώσεις για τα δύο χρονικά διαστήματα όπως προέκυψαν από την κατά τμήματα γραμμική παλινδρόμηση

Με βάση το Διάγραμμα 2 ο ρυθμός αύξησης του δείκτη NDVI θα μπορούσε να χωριστεί σε δύο επιμέρους διαστήματα καθώς τα πρώτα 10-15 χρόνια παρουσιάζει μια ήπια αύξηση, ενώ στη συνέχεια γίνεται πιο έντονος. Με την εφαρμογή της κατά τμήματα γραμμικής παλινδρόμησης (Piecewise Linear

Regression) στις ετήσιες τιμές του δείκτη NDVI προέκυψαν 2 διαστήματα, το 1^ο αντιστοιχεί στα έτη 1985-2000 με ρυθμό αύξησης 0.0027/έτος και το 2^ο ανταποκρίνεται στα έτη 2000-2018 όπου ο δείκτης NDVI παρουσιάζει διπλάσιο ρυθμό αύξησης (0.0068/έτος).

Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα που αφορούν την κατανομή των τιμών του NDVI για κάθε έτος, έτσι ώστε να προσδιοριστεί αν η αύξηση του NDVI με τη πάροδο των ετών εμφανίζεται στο σύνολο των εικονοστοιχείων της περιοχής μελέτης. Οι συντελεστές λοξότητας (skewness) και κύρτωσης (kurtosis) είναι δύο παράμετροι που δίνουν πληροφορίες για τη μορφή/ασυμμετρία της κατανομής των τιμών. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα διασποράς των συντελεστών λοξότητας με τους συντελεστές κύρτωσης για τις κατανομές των τιμών NDVI σε κάθε έτος από το 1985 έως το 2018 (Διάγραμμα 3α).

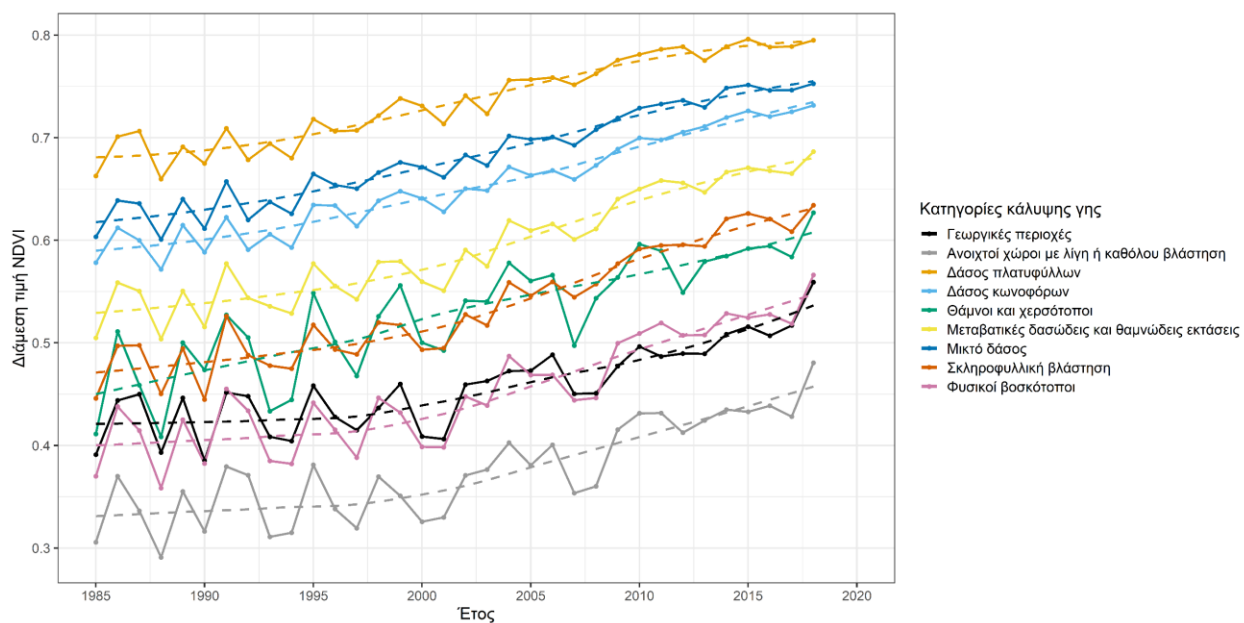


Διάγραμμα 3. α) Διασπορά των συντελεστών Κύρτωσης-Λοξότητας για τις κατανομές των τιμών NDVI σε κάθε έτος από το 1985 έως το 2018 (αριστερά), β) Καμπύλες σχετικών συχνοτήτων των τιμών NDVI για κάποια έτη (δεξιά)

Όπως μπορεί να παρατηρήσει κάποιος με το πέρασμα των ετών, πηγαίνοντας από το 1985 προς το 2018, υπάρχει μια μείωση του συντελεστή κύρτωσης και αντίστοιχα αύξηση του συντελεστή λοξότητας. Ειδικότερα, υπάρχει μια συστηματική αύξηση του συντελεστή λοξότητας σχεδόν σε κάθε έτος της τελευταίας δεκαετίας. Το έτος 2018 αποτελεί μια εξαιρετικά ακραία τιμή για την περίοδο μελέτης, καθώς έχει την υψηλότερη τιμή του συντελεστή λοξότητας και την χαμηλότερη του συντελεστή κύρτωσης μεταξύ όλων των ετών. Στο Διάγραμμα 3β ενδεικτικά παρατίθενται για κάποια έτη οι καμπύλες σχετικών συχνοτήτων των τιμών NDVI. Στα πρώτα 15 χρόνια η κατανομή των τιμών του NDVI είναι πλατύκυρτη και συμμετρική, όπως φαίνεται και στις καμπύλες σχετικών συχνοτήτων

για τα έτη 1985 και 1993. Στη συνέχεια η κατανομή των τιμών του NDVI αλλάζει μορφή και αρχίζει να εμφανίζει σταδιακά αρνητική ασυμμετρία (έτος 2002), ενώ τα τελευταία χρόνια παρουσιάζει έντονη ασυμμετρία και λεπτόκυρτη μορφή. Τα παραπάνω αποτελούν ισχυρή ένδειξη ότι υπάρχει μια συνολική αύξηση του NDVI στο χώρο για το διάστημα 1985-2018.

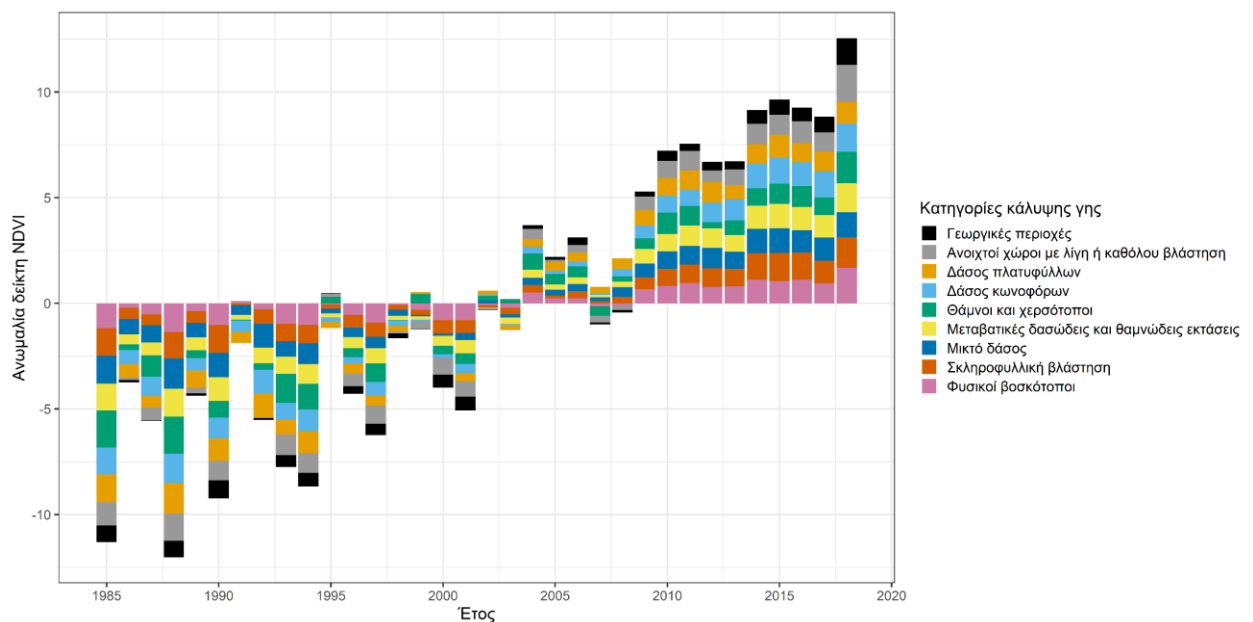
Το Διάγραμμα 4 παρουσιάζει τη χρονική εξέλιξη της διάμεσης τιμής NDVI ανά κατηγορία κάλυψης γης στην περιοχή μελέτης. Οι ετήσιες χρονοσειρές του δείκτη NDVI για κάθε κατηγορία κάλυψη γης έχουν παρόμοια συμπεριφορά με αυτή που αφορούσε το σύνολο της περιοχής (Διάγραμμα 2). Σε όλες τις κατηγορίες κάλυψης γης παρουσιάζεται σταθερή αύξηση του NDVI από το 1985 στο 2018, με εξαίρεση το διάστημα 1985-2002 στο οποίο υπάρχει αυξητική τάση αλλά παρουσιάζονται έντονες διακυμάνσεις μεταξύ των ετήσιων μέσων τιμών του δείκτη NDVI. Οι δασικές εκτάσεις παρουσιάζουν διαχρονικά μικρότερες ετήσιες μεταβολές, ενώ οι ανοιχτοί χώροι με λίγη ή καθόλου βλάστηση και οι θαμνότοποι έχουν μεγάλες μεταβολές ανά έτος.



Διάγραμμα 4. Χρονική εξέλιξη μέσης τιμής NDVI ανά έτος για κάθε κατηγορία κάλυψης γης

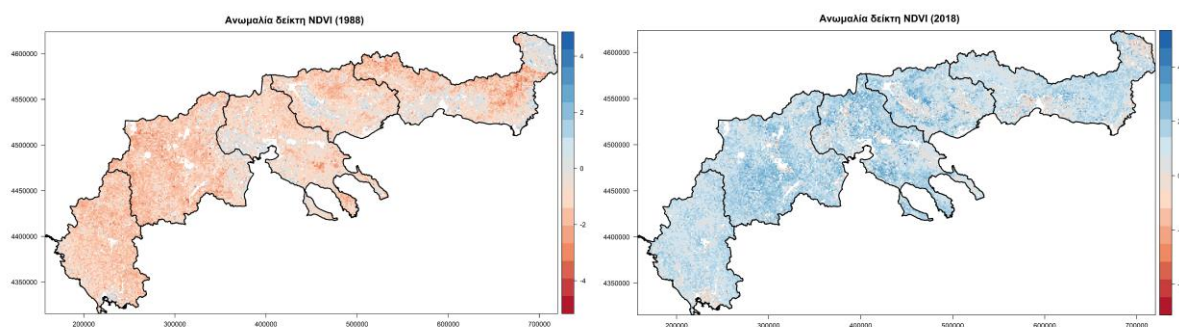
3.1.3. Ανωμαλία του δείκτη NDVI

Το Διάγραμμα 5 απεικονίζει ένα στοιβαγμένο ραβδόγραμμα (stacked barplot) με την αθροιστική ετήσια ανωμαλία του δείκτη NDVI για κάθε κατηγορία κάλυψης γης. Μέχρι και το έτος 2001 οι τιμές της ανωμαλίας του δείκτη NDVI είναι ως επί το πλείστον αρνητικές για όλες τις κατηγορίες κάλυψης γης, ενώ από το έτος 2004 και μετά είναι σχεδόν πάντα θετικές. Το χρονικό διάστημα μεταξύ των ετών 2001-2004 υπάρχει μια έντονη αλλαγή στην ανωμαλία του δείκτη NDVI. Τέλος, το έτος 2018 παρουσιάζει πολύ έντονη θετική ανωμαλία.



Διάγραμμα 5. Ραβδόγραμμα με την ετήσια ανωμαλία του δείκτη NDVI για κάθε κατηγορία κάλυψης γης

Στην Εικόνα 5 παρουσιάζονται δύο χάρτες της περιοχής μελέτης με την ανωμαλία του δείκτη βλάστησης NDVI για τα έτη 1988 και 2018. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί οι τιμές είναι στην πλειονότητα τους αρνητικές σε όλη την περιοχή μελέτης για το έτος 1988 και αντιθέτως θετικές για το έτος 2018.

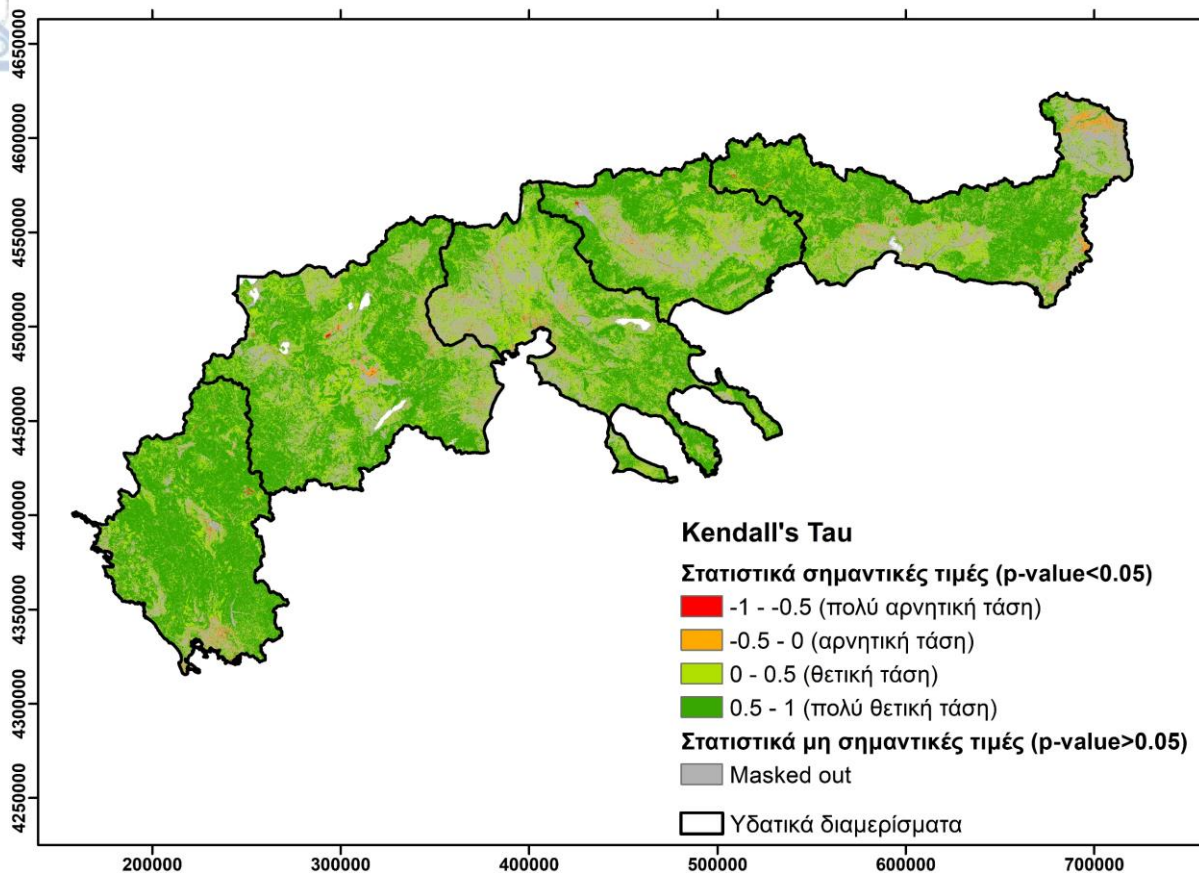


Εικόνα 5. Χάρτης της περιοχής μελέτης στον οποίο απεικονίζεται η ανωμαλία του δείκτη βλάστησης για τα έτη 1988 (αριστερά) και 2018 (δεξιά). Με μπλε αποχρώσεις είναι οι θετικές τιμές και με κόκκινες αποχρώσεις οι αρνητικές τιμές.

3.1.4. Ανάλυση τάσεων δείκτη βλάστησης NDVI

Η μελέτη της τάσης της χρονοσειράς του ετήσιου δείκτη NDVI για το χρονικό διάστημα 1985-2018 πραγματοποιήθηκε με τον μη-παραμετρικό έλεγχο Mann-Kendall και η κλίση της τάσης με τη μέθοδο του Sen. Επίσης, έγινε έλεγχος με το Pettitt test για να βρεθεί το χρονικό σημείο που πραγματοποιήθηκε απότομη αλλαγή της τάσης του δείκτη NDVI. Ως επίπεδο σημαντικότητας ορίστηκε η τιμή $\alpha=5\%$ (0.05), άρα αν η τιμή p-value είναι μικρότερη ή ίση από το 0.05 τότε απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση και τα αποτελέσματα θεωρούνται στατιστικά σημαντικά.

Με βάση τα αποτελέσματα του μη-παραμετρικού ελέγχου Mann-Kendall, το 78% της περιοχής μελέτης παρουσιάζει στατιστικά σημαντική θετική τάση του NDVI ($\tau > 0$, $p < 0.05$) και μόνο το 2.1% της περιοχής μελέτης παρουσιάζει στατιστικά σημαντική αρνητική τάση του NDVI ($\tau < 0$, $p < 0.05$). Στην Εικόνα 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του στατιστικού μεγέθους Kendall's tau για το σύνολο των εικονοστοιχείων της περιοχής μελέτης. Με πράσινες αποχρώσεις παρουσιάζονται τα εικονοστοιχεία που έχουν στατιστικά σημαντική θετική τάση και με κόκκινες αποχρώσεις τα εικονοστοιχεία που έχουν στατιστικά σημαντική αρνητική τάση. Με γκρι αποχρώσεις απεικονίζονται τα εικονοστοιχεία που έχουν στατιστικά μη σημαντικές τιμές ($p > 0.05$).



Εικόνα 6. Χάρτης της περιοχής μελέτης με τα αποτελέσματα του στατιστικού μεγέθους Kendall's tau

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ελέγχου Mann-Kendall μέσω του στατιστικού μεγέθους Kendall's tau, της κλίσης της τάσης της χρονοσειράς του NDVI με τη μέθοδο Sen και του Pettitt test ανά κατηγορία κάλυψης γης. Όλες οι κατηγορίες παρουσιάζουν θετική μέση τιμή και στατιστικά σημαντική για το Kendall tau. Εξαίρεση αποτελούν οι γεωργικές περιοχές με χαμηλή μέση τιμή του Kendall tau και στατιστικά μη σημαντική ($p\text{-value} > 0.05$). Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6 τα εικονοστοιχεία με γκρι χρώμα είναι στην πλειονοψηφία τους ομαδοποιημένα σε γεωργικές περιοχές, όπως είναι η πεδιάδα της Κεντρικής Μακεδονίας, η πεδιάδα των Σερρών και δελταϊκή πεδιάδα. Για όλες τις κατηγορίες κάλυψης γης η μέση τιμή του ρυθμού αύξησης του NDVI όπως προέκυψε από τη μέθοδο Sen κυμαίνεται μεταξύ 0.004/έτος - 0.005/έτος. Τέλος, με βάση τα αποτελέσματα του ελέγχου Pettitt υπάρχει απότομη αλλαγή τάσης της χρονοσειράς του NDVI το 2001 για τις μισές κατηγορίες κάλυψης γης και το 2003 για τις άλλες μισές. Αξίζει να αναφερθεί ότι και οι

τιμές της ανωμαλίας του δείκτη βλάστησης NDVI παρουσίασαν αλλαγή από αρνητικές σε θετικές στο χρονικό διάστημα 2001-2004.

Πίνακας 3. Αποτελέσματα Kendall's tau, κλίσης Sen και Pettitt test για τη χρονοσειρά NDVI ανά κατηγορία κάλυψης γης στην περιοχή μελέτης.

Κατηγορία κάλυψης γης	Kendall's tau	Κλίση Sen	Kendall's p-value	Pettitt test	Έτος αλλαγής	Pettitt's p-value
Γεωργικές περιοχές	0.30	0.003	0.15	17	2001	0.14
Δάσος πλατυφύλλων	0.57	0.004	0.01*	19	2003	0.01*
Δάσος κωνοφόρων	0.61	0.005	0.01*	17	2001	0.01*
Μικτό δάσος	0.60	0.004	0.01*	19	2003	0.01*
Φυσιικοί βοσκότοποι	0.50	0.005	0.03*	19	2003	0.02*
Θάμνοι και χερσότοποι	0.51	0.005	0.02*	17	2001	0.03*
Σκληροφυλλική βλάστηση	0.57	0.005	0.02*	19	2003	0.01*
Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις	0.57	0.005	0.03*	19	2003	0.02*
Ανοιχτοί χώροι με λίγη ή καθόλου βλάστηση	0.45	0.004	0.04*	17	2001	0.04*

*αντιστοιχεί σε $p\text{-value} < 0.05$

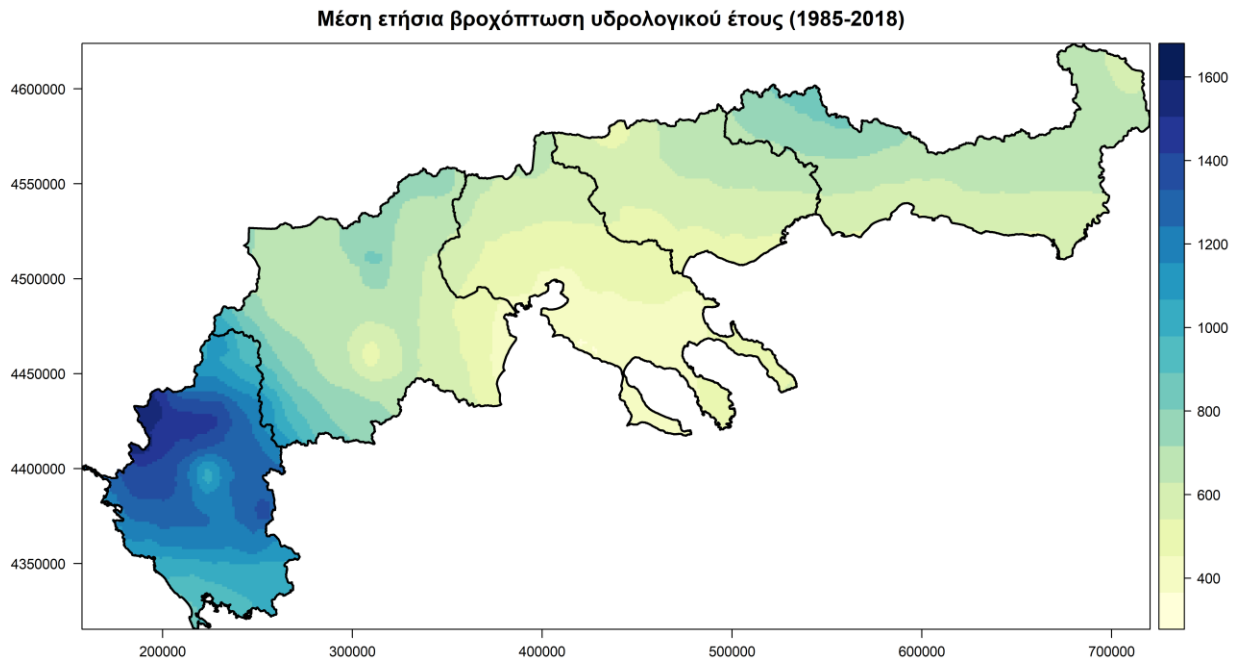
3.2. Δυναμική των κλιματικών παραγόντων

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζεται η χωρική και χρονική εξέλιξη των κλιματικών παραγόντων στην περιοχή μελέτης για το χρονικό διάστημα 1985-2018.

3.2.1. Βροχόπτωση

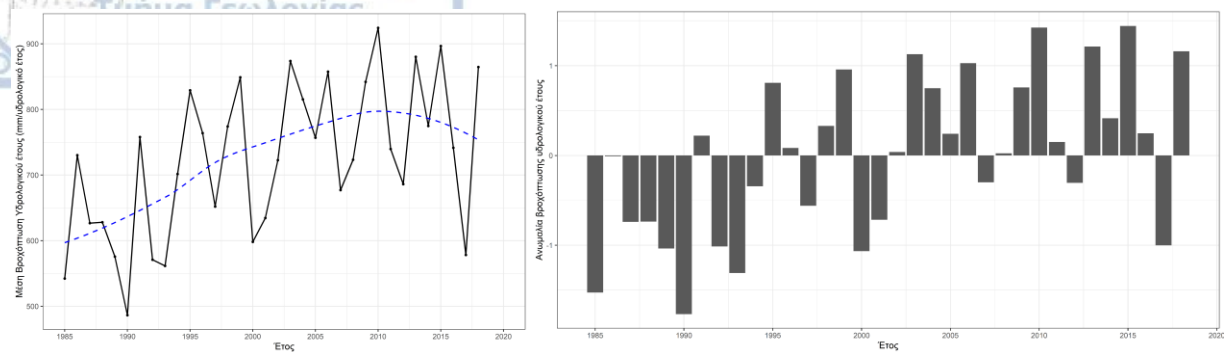
Στην Εικόνα 7 απεικονίζεται η χωρική κατανομή της μέσης βροχόπτωσης υδρολογικού έτους στην περιοχή μελέτης για την περίοδο 1985-2018, όπου η τιμή κάθε εικονοστοιχείου (pixel) έχει προκύψει ως η μέση τιμή βροχόπτωσης για 34 υδρολογικά έτη. Το ύψος βροχής ανά υδρολογικό έτος υπολογίστηκε ως άθροισμα των μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης των δεδομένων CHIRPS από τον Οκτώβριο του προηγούμενου έτους έως το Σεπτέμβριο του έτους αναφοράς (π.χ. η βροχόπτωση του υδρολογικού έτους 2018 έχει προκύψει ως άθροισμα των μηνιαίων βροχοπτώσεων από τον Οκτώβριο του 2017 έως το Σεπτέμβριο του 2018). Το μέσο ύψος βροχής ανά υδρολογικό έτος κυμαίνεται από 360 mm έως 1600 mm, με μέση τιμή 720 mm. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής που δέχεται το ΥΔ Ηπείρου είναι σχεδόν διπλάσιο από τα υπόλοιπα ΥΔ, λόγω του πολύπλοκου ανάγλυφου που δημιουργεί η οροσειρά της Πίνδου. Πιο συγκεκριμένα το ΥΔ Ηπείρου έχει μέσο ετήσιο ύψος βροχής στα 1200 mm, ενώ τα υπόλοιπα ΥΔ έχουν από 500-680 mm. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι η

Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.
βροχόπτωση κατανέμεται ομοιόμορφα στο ΥΔ Ηπείρου, ενώ στα υπόλοιπα ΥΔ το ύψος βροχής αυξάνεται με την αύξηση του υψομέτρου.



Εικόνα 7. Χωρική κατανομή μέσης βροχόπτωσης υδρολογικού έτους (Οκτώβριος-Σεπτέμβριος) για τη χρονική περίοδο 1985-2018

Η χρονική εξέλιξη του ύψους βροχής ανά υδρολογικό έτος παρουσιάζει μια αυξητική τάση από το 1985 μέχρι και το 2010 και εν συνεχεία μια ήπια πτωτική πορεία μέχρι και το 2018 (Διάγραμμα 6α). Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό γνώρισμα που εμφανίζει είναι ότι έχει έντονες διακυμάνσεις κάθε 1-3 χρόνια. Παραδείγματος χάριν, το μέσο ύψος βροχής του υδρολογικού έτους 1985 είναι στα 540 mm, την αμέσως επόμενη χρονιά έχει μια ραγδαία αύξηση στα 730 mm και στη συνέχεια μέσα σε διάστημα δυο ετών πέφτει ξανά στα 485 mm. Αυτό το μοτίβο επαναλαμβάνεται για όλο το χρονικό διάστημα μελέτης. Το Διάγραμμα 6β παρουσιάζει την ανωμαλία του ύψους βροχής ανά υδρολογικό έτος, στο οποίο μπορεί κάποιος να διακρίνει 2 περιόδους. Την περίοδο 1985-2001 στην οποία κυριαρχούν οι αρνητικές τιμές για κάθε έτος και την περίοδο 2002-2018 στην οποία κυριαρχούν οι θετικές τιμές και μόνο 3 υδρολογικά έτη έχουν αρνητικές τιμές.



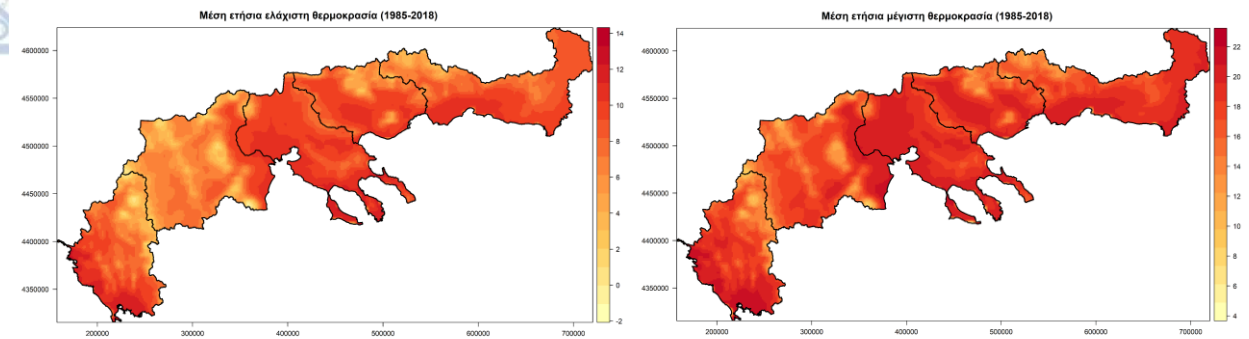
Διάγραμμα 6. α) Χρονική εξέλιξη μέσης βροχόπτωσης υδρολογικού έτους (1985-2018), β) Ραβδόγραμμα με την ετήσια ανωμαλία της μέσης βροχόπτωσης υδρολογικού έτους (1985-2018)

3.2.2. Θερμοκρασία

Στην Εικόνα 8 απεικονίζεται η χωρική κατανομή της μέσης ετήσιας ελάχιστης θερμοκρασίας (T_{min}) και μέγιστης θερμοκρασίας (T_{max}) για την περίοδο 1985-2018. Οι τιμές κάθε εικονοστοιχείου (pixel) έχουν προκύψει ως η μέση τιμή της ετήσιας ελάχιστης (μέγιστης) θερμοκρασίας των 34 ετών, όπου για κάθε έτος έχει υπολογιστεί η μέση ελάχιστη (μέγιστη) θερμοκρασία των 12 μηνών από τα δεδομένα TerraClimate. Οι τιμές της μέσης ετήσιας ελάχιστης θερμοκρασίας κυμαίνονται μεταξύ -1.2°C και 13.7°C , με μέση τιμή τους 8°C . Οι τιμές της μέσης ετήσιας μέγιστης θερμοκρασίας κυμαίνονται μεταξύ 4.4°C και 22.09°C , με μέση τιμή τους 17.85°C . Οι χαμηλότερες τιμές εντοπίζονται στα βόρεια ορεινά τμήματα των ΥΔ Ανατολικής Μακεδονίας (GR11) και Θράκης (GR12), στο μεγαλύτερο τμήμα του ΥΔ Δυτικής Μακεδονίας (GR09) το οποίο και έχει κυρίως ορεινό και ημι-ορεινό ανάγλυφο και στο τμήμα της οροσειράς της Πίνδου του ΥΔ Ηπείρου (GR05). Οι υψηλότερες τιμές εντοπίζονται στις παράκτιες περιοχές των ΥΔ, στο σύνολο του ΥΔ της Κεντρικής Μακεδονίας (GR10) και στο πεδινό τμήμα του ΥΔ της Ανατολικής Μακεδονίας (GR11).

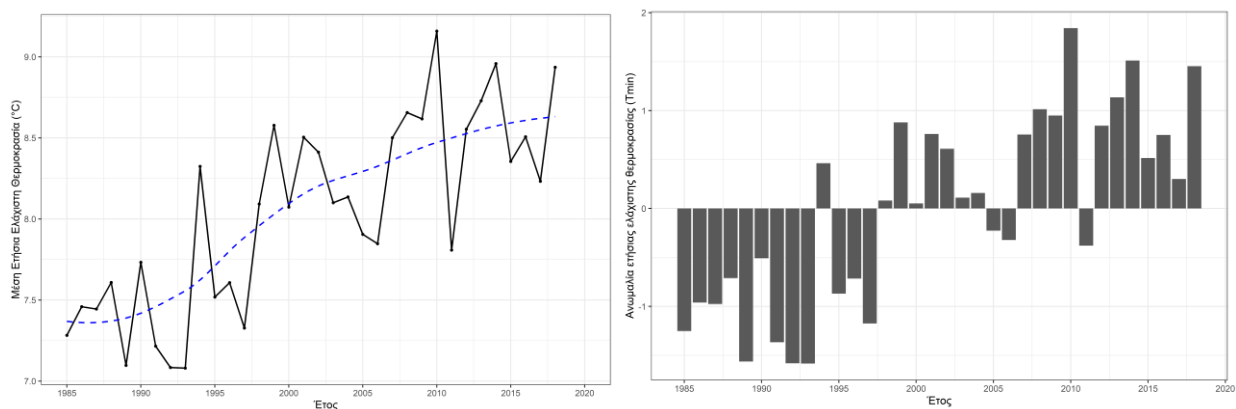
Πίνακας 4. Κλιματικά χαρακτηριστικά των ΥΔ της περιοχής μελέτης

Υδατικό Διαμέρισμα	Μέση ετήσια βροχόπτωση (mm/έτος)	Μέση ετήσια ελάχιστη θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)	Μέση ετήσια μέγιστη θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)
Θράκης	658.6	8.3	18.0
Ανατολικής Μακεδονίας	589.7	8.4	17.9
Κεντρικής Μακεδονίας	496.1	9.7	19.2
Δυτικής Μακεδονίας	687.9	6.5	17.0
Ηπείρου	1207.0	8.0	17.8



Εικόνα 8. Χωρική κατανομή μέσης ετήσιας ελάχιστης θερμοκρασίας (αριστερά) και μέγιστης θερμοκρασίας (δεξιά) για τη χρονική περίοδο 1985-2018

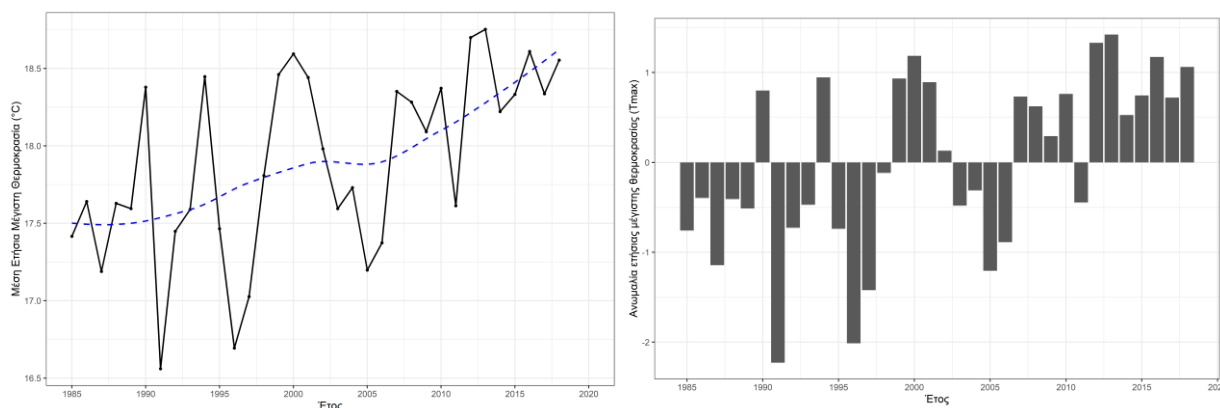
Η χρονική εξέλιξη της μέσης ετήσιας ελάχιστης θερμοκρασίας παρουσιάζει μια έντονα αυξητική τάση από το 1989 μέχρι και το έτος 2018. Η μέση τιμή της ελάχιστης ετήσιας θερμοκρασίας το 1989 είναι 7.1°C και φτάνει τους 8.94°C το 2018. Μεταξύ των ετών υπάρχουν έντονες αυξομειώσεις της θερμοκρασίας που σε κάποιες περιπτώσεις ξεπερνούν και τον 1°C . Παρατηρώντας το Διάγραμμα 7β με την ετήσια ανωμαλία της ελάχιστης θερμοκρασίας μπορεί να γίνει διάκριση σε δύο χρονικές περιόδους, μία από το 1985-1997 στην οποία κυριαρχούν οι αρνητικές τιμές και μια από το 1998-2018 στην οποία κυριαρχούν οι θετικές τιμές.



Διάγραμμα 7. α) Χρονική εξέλιξη μέσης ετήσιας ελάχιστης θερμοκρασίας (1985-2018), β) Ραβδόγραμμα με την ετήσια ανωμαλία της μέσης ελάχιστης θερμοκρασίας (1985-2018)

Η χρονική εξέλιξη της μέσης ετήσιας ελάχιστης θερμοκρασίας παρουσιάζει αυξητική τάση κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου 1985-2018, ξεκινώντας από 17.42°C το 1985 και φτάνοντας τους 18.55°C το 2018.

Όπως στην μέση ετήσια ελάχιστη θερμοκρασία, έτσι και εδώ υπάρχουν έντονες διακυμάνσεις στη θερμοκρασία μεταξύ των ετών. Το Διάγραμμα 8β με την ετήσια ανωμαλία της μέγιστης θερμοκρασίας μπορεί να χωριστεί σε δύο χρονικές περιόδους, μια πριν το 2006 στην οποία η πλειοψηφία των ετών εμφανίζει αρνητικές τιμές και μια μετά το 2007 στην οποία όλα τα έτη πλην του έτους 2011 έχουν θετικές τιμές.



Διάγραμμα 8. α) Χρονική εξέλιξη μέσης ετήσιας μέγιστης θερμοκρασίας (1985-2018), β) Ραβδόγραμμα με την ετήσια ανωμαλία της μέσης μέγιστης θερμοκρασίας (1985-2018)

3.3. Διερεύνηση σχέσης βλάστησης-κλιματικών παραγόντων

3.3.1. Συσχέτιση NDVI και κλιματικών παραγόντων

Για τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ του δείκτη βλάστησης NDVI και των κλιματικών παραγόντων πραγματοποιήθηκε ανάλυση συσχέτισης μέσω του συντελεστή Pearson. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε μεταξύ των ετήσιων χρονοσειρών του δείκτη NDVI και του εκάστοτε κλιματικού παράγοντα σε επίπεδο εικονοστοιχείου (pixel-by-pixel correlation analysis). Ο συντελεστής συσχέτισης υπολογίστηκε σε κάθε θέση x_i-y_i , όπου $i=1$ έως m (m =συνολικός αριθμός των εικονοστοιχείων μιας εικόνας NDVI) για ένα ζεύγος 34 εικονοστοιχείων που αντιστοιχούν στις ετήσιες τιμές του δείκτη NDVI και ενός κλιματικού παράγοντα για τα 34 χρόνια της περιόδου που μελετήθηκε. Η στατιστική σημαντικότητα σε κάθε υπολογισμό προσδιορίστηκε από την κατανομή Student με $n-2$ βαθμούς ελευθερίας. Οι μέγιστοι βαθμοί ελευθερίας (degrees of freedom) σε κάθε υπολογισμό συσχέτισης ανέρχονται σε 32 ($n-2$), και αυτό γιατί σε περίπτωση απουσίας τιμής NDVI στη χρονοσειρά κάποιου εικονοστοιχείου τότε τα ζεύγη τιμών μειώνονται και άρα μειώνονται και οι βαθμοί ελευθερίας.

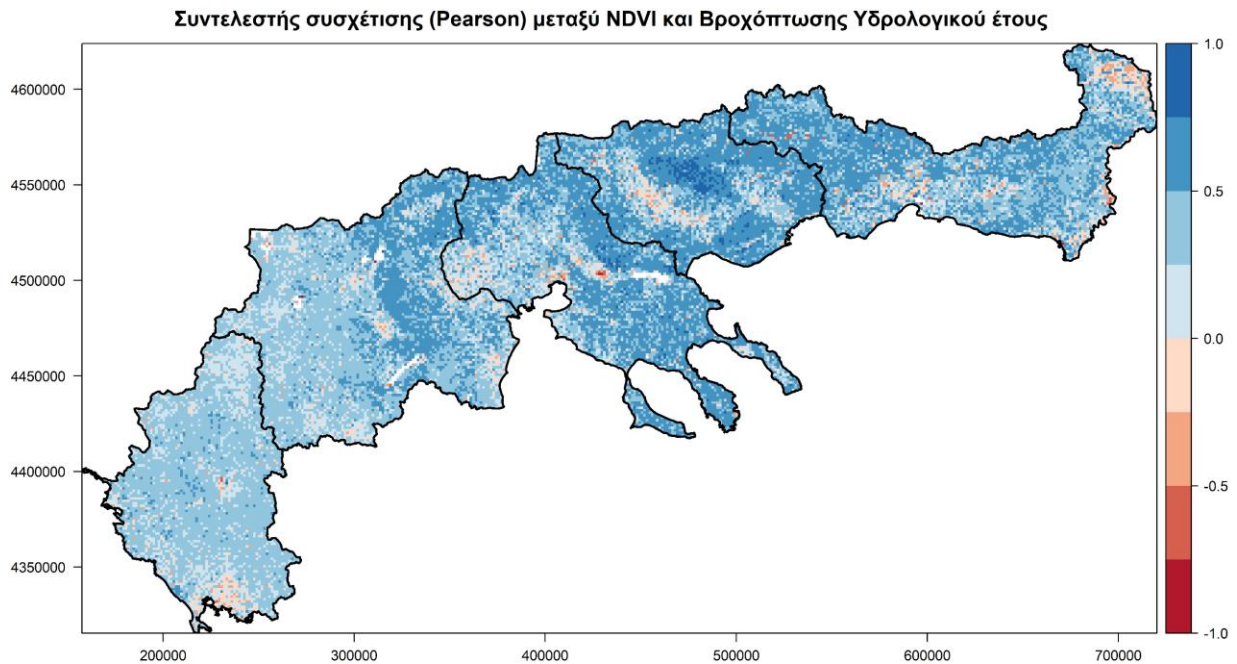
Οι Εικόνες 9, 10, 11 παρουσιάζουν τη χωρική κατανομή των συντελεστών συσχέτισης Pearson μεταξύ NDVI με τη βροχόπτωση υδρολογικού έτους, την ελάχιστη θερμοκρασία και τη μέγιστη θερμοκρασία, αντίστοιχα. Οι θετικές τιμές του συντελεστή συσχέτισης απεικονίζονται σε κλίμακα μπλε αποχρώσεων, ενώ οι αρνητικές τιμές σε κλίμακα κόκκινων αποχρώσεων. Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές του συντελεστή συσχέτισης Pearson μεταξύ NDVI και κλιματικών παραγόντων για κάθε Υδατικό Διαμέρισμα της μελέτης. Παράλληλα δίνονται και οι μέσες τιμές για το παρατηρούμενο επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας (p-value) σε κάθε Υδατικό Διαμέρισμα.

Πίνακας 5. Συντελεστές συσχέτισης (Pearson) μεταξύ του δείκτη NDVI και των κλιματικών παραμέτρων (βροχόπτωση, ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία) ανά Υδατικό Διαμέρισμα

Υδατικό Διαμέρισμα	NDVI vs Βροχόπτωση	NDVI vs Ελάχιστη θερμοκρασία	NDVI vs Μέγιστη θερμοκρασία
Θράκης	0.52**	0.51*	0.35
Ανατολικής Μακεδονίας	0.60**	0.51*	0.34
Κεντρικής Μακεδονίας	0.55**	0.41*	0.24
Δυτικής Μακεδονίας	0.50**	0.46*	0.21
Ηπείρου	0.35*	0.53*	0.29

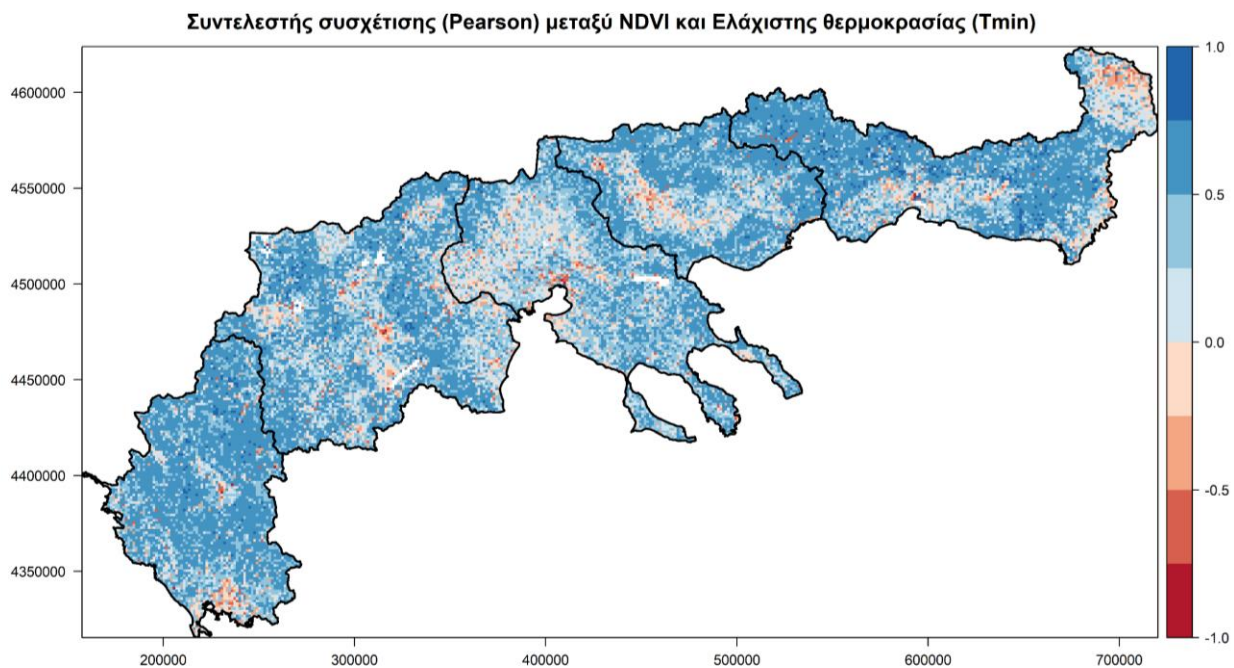
**αντιστοιχεί σε $p\text{-value} < 0.05$, * αντιστοιχεί σε $p\text{-value} < 0.1$

Η μέση τιμή του συντελεστή συσχέτισης Pearson μεταξύ NDVI-Βροχόπτωσης για ολόκληρη την περιοχή μελέτης είναι 0.39. Η συντριπτική πλειοψηφία των εικονοστοιχείων εμφανίζουν θετική συσχέτιση με εξαίρεση κάποιες αγροτικές περιοχές όπου υπάρχει αρνητική συσχέτιση μεταξύ NDVI-Βροχόπτωσης. Επίσης, είναι εμφανές από την Εικόνα 9 ότι υπάρχει μια έντονη διαφοροποίηση στη χωρική κατανομή των τιμών συσχέτισης, καθώς το ΥΔ Ηπείρου και το δυτικό τμήμα του ΥΔ Δυτικής Μακεδονίας εμφανίζουν χαμηλές τιμές συσχέτισης. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5 το ΥΔ Ηπείρου, το οποίο δέχεται σχεδόν διπλάσια βροχόπτωση ανά έτος σε σχέση με τα υπόλοιπα ΥΔ, εμφανίζει τη χαμηλότερη συσχέτιση μεταξύ NDVI-Βροχόπτωσης ($r=0.35$, $p<0.1$) από τα πέντε ΥΔ της περιοχής μελέτης. Ακολουθεί το ΥΔ Δυτικής Μακεδονίας με τη μέση τιμή του συντελεστή συσχέτισης να είναι 0.50, ενώ τα υπόλοιπα τρία ΥΔ έχουν μέσες τιμές που κυμαίνονται από 0.52-0.60. Οι μέσες τιμές του συντελεστή συσχέτισης σε αυτά τα τέσσερα ΥΔ είναι και στατιστικά σημαντικές σε επίπεδο σημαντικότητας 5% ($p\text{-value} < 0.05$).

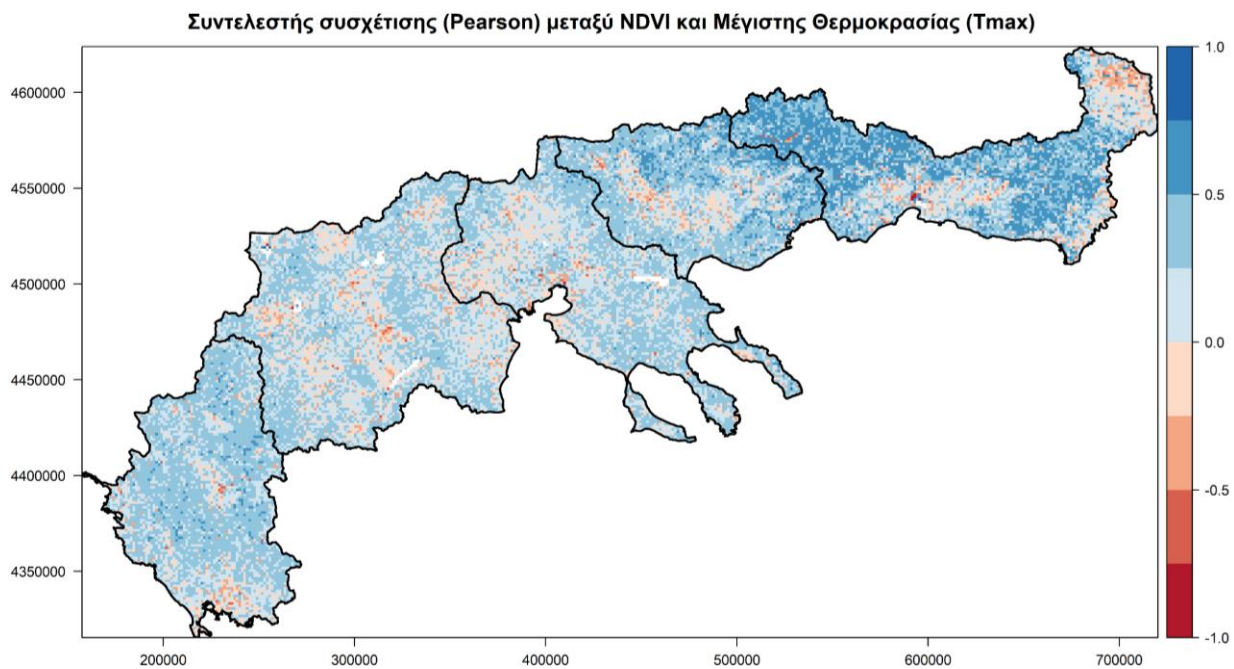


Εικόνα 9. Χωρική κατανομή του συντελεστή συσχέτισης (Pearson) μεταξύ NDVI και Βροχόπτωσης υδρολογικού έτους για τη χρονική περίοδο 1985-2018

Η μέση τιμή του συντελεστή συσχέτισης Pearson μεταξύ NDVI-Μέγιστης θερμοκρασίας για ολόκληρη την περιοχή μελέτης είναι 0.23. Σχεδόν όλα τα εικονοστοιχεία εμφανίζουν χαμηλή συσχέτιση μεταξύ NDVI και Μέγιστης θερμοκρασίας. Αντίστοιχα και οι μέσες τιμές του συντελεστή συσχέτισης σε κάθε Υδατικό Διαμέρισμα (Πίνακας 5) είναι χαμηλές και μη στατιστικά σημαντικές ($r < 0.35$, $p\text{-value} > 0.1$). Η μέση τιμή του συντελεστή συσχέτισης Pearson μεταξύ NDVI-Ελάχιστης θερμοκρασίας για ολόκληρη την περιοχή μελέτης είναι 0.41. Όπως και με τη βροχόπτωση η πλειονότητα των εικονοστοιχείων του NDVI εμφανίζουν θετική συσχέτιση με την Ελάχιστη θερμοκρασία, με εξαίρεση αυτά που αντιπροσωπεύουν αγροτικές περιοχές. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5 σε όλα τα Υδατικά Διαμερίσματα οι μέσες τιμές του συντελεστή συσχέτισης είναι κοντά στο 0.50 και είναι στατιστικά σημαντικές σε επίπεδο σημαντικότητας 10% ($p\text{-value} < 0.1$).



Εικόνα 10. Χωρική κατανομή του συντελεστή συσχέτισης (Pearson) μεταξύ NDVI και Ελάχιστης θερμοκρασίας για τη χρονική περίοδο 1985-2018



Εικόνα 11. Χωρική κατανομή του συντελεστή συσχέτισης (Pearson) μεταξύ NDVI και Μέγιστης θερμοκρασίας για τη χρονική περίοδο 1985-2018

Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ του δείκτη NDVI και των κλιματικών παραγόντων ανά κατηγορία κάλυψης γης. Οι δασικές εκτάσεις παρουσιάζουν σχετικά υψηλές θετικές τιμές συσχέτισης μεταξύ του δείκτη NDVI με την Ελάχιστη θερμοκρασία ($r=0.58$, $p<0.05$). Οι θάμνοι-χερσότοποι και η σκληροφυλλική βλάστηση παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές συσχέτισης μεταξύ NDVI-Ελάχιστης θερμοκρασίας και NDVI-Βροχόπτωσης, με τιμές κοντά στο 0.50 ($p<0.05$). Ο δείκτης NDVI δεν φαίνεται να συσχετίζεται με τη Μέγιστη Θερμοκρασία, καθώς σε όλες τις κατηγορίες κάλυψης γης παρουσιάζει χαμηλές τιμές συσχέτισης ($p>0.05$).

Πίνακας 6. Συντελεστές συσχέτισης (Pearson) μεταξύ του δείκτη NDVI και των κλιματικών παραμέτρων (βροχόπτωση, ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία) ανά κατηγορία κάλυψης γης

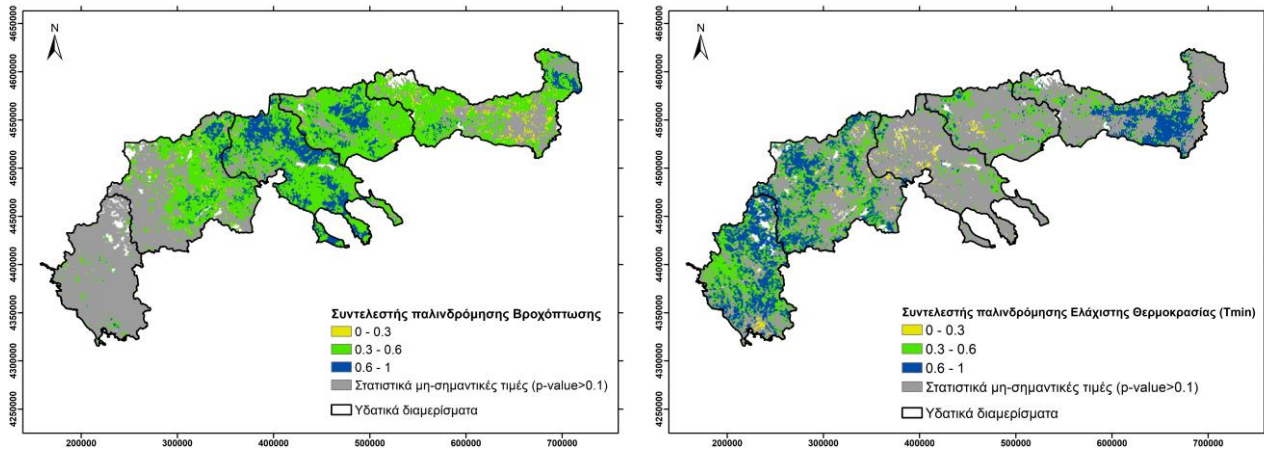
Κατηγορία κάλυψης γης	NDVI vs Βροχόπτωση	NDVI vs Ελάχιστη θερμοκρασία	NDVI vs Μέγιστη θερμοκρασία
Γεωργικές περιοχές	0.47*	0.37	0.20
Δάσος πλατυφύλλων	0.51**	0.61**	0.39*
Δάσος κωνοφόρων	0.45**	0.62**	0.39*
Μικτό δάσος	0.50**	0.62**	0.40*
Φυσιικοί βοσκότοποι	0.50**	0.51**	0.27
Θάμνοι και χερσότοποι	0.67**	0.56**	0.32
Σκληροφυλλική βλάστηση	0.51**	0.56**	0.34
Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις	0.47**	0.57**	0.34
Ανοιχτοί χώροι με λίγη ή καθόλου βλάστηση	0.49**	0.45*	0.21

**αντιστοιχεί σε $p\text{-value} < 0.05$, * αντιστοιχεί σε $p\text{-value} < 0.1$

3.3.2. Συνεισφορά των κλιματικών παραγόντων στο δείκτη NDVI

Η εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης σε επίπεδο εικονοστοιχείου με την κανονικοποιημένη χρονοσειρά του δείκτη NDVI ως εξαρτημένη μεταβλητή και τις τρεις κανονικοποιημένες χρονοσειρές των κλιματικών παραγόντων (βροχόπτωση, μέγιστη/ελάχιστη θερμοκρασία) ως ανεξάρτητες μεταβλητές προσδιόρισε την ταυτόχρονη επίδραση κάθε κλιματικού παράγοντα στην αλλαγή του NDVI στην πορεία των χρόνων. Στην Εικόνα 12 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των συντελεστών της Βροχόπτωσης και της Ελάχιστης θερμοκρασίας όπως προέκυψαν από την εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης. Τα εικονοστοιχεία που έχουν υψηλές τιμές για έναν συντελεστή (0.6-1) απεικονίζονται με μπλε χρώμα, ενώ αυτά που έχουν χαμηλές τιμές παρουσιάζονται με κίτρινο χρώμα (0-0.3). Οι ενδιάμεσες τιμές απεικονίζονται με πράσινο χρώμα (0.3-

0.6). Για τον στατιστικό έλεγχο υποθέσεων των συντελεστών της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης επιλέχθηκε επίπεδο σημαντικότητας 10%. Τα εικονοστοιχεία με στατιστικά μη-σημαντικές τιμές ($p\text{-value} > 0.1$) δεν απεικονίζονται.



Εικόνα 12. Χωρική κατανομή του συντελεστή παλινδρόμησης για τη βροχόπτωση (αριστερά) και την ελάχιστη θερμοκρασία (δεξιά) όπως αυτοί προέκυψαν από την εφαρμογή πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης σε κάθε εικονοστοιχείο

Παρατηρώντας την Εικόνα 12 είναι ευδιάκριτο ότι στα ΥΔ Κ. Μακεδονίας και Α. Μακεδονίας η βροχόπτωση αποτελεί τον κλιματικό παράγοντα με τη μεγαλύτερη επίδραση στην αλλαγή του δείκτη NDVI, ενώ αντίθετα στο ΥΔ Ηπείρου η ελάχιστη θερμοκρασία. Στα ΥΔ Δ. Μακεδονίας και Θράκης και οι δύο κλιματικοί παράγοντες παίζουν εξίσου σημαντικό ρόλο. Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώνονται με τις μέσες τιμές των συντελεστών παλινδρόμησης για κάθε κλιματικό παράγοντα ανά Υδατικό Διαμέρισμα που αναγράφονται στον Πίνακα 7.

Πίνακας 7. Μέσες τιμές των συντελεστών της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για κάθε κλιματικό παράγοντα ανά Υδατικό Διαμέρισμα

Υδατικό Διαμέρισμα	Συντελεστής Παλινδρόμησης Βροχόπτωσης	Συντελεστής Παλινδρόμησης Ελάχιστης Θερμ.	Συντελεστής Παλινδρόμησης Μέγιστης Θερμ.
Θράκης	0.33	0.37	-0.04
Ανατολικής Μακεδονίας	0.47*	0.21	0.06
Κεντρικής Μακεδονίας	0.52*	0.03	0.14
Δυτικής Μακεδονίας	0.31	0.35	-0.04
Ηπείρου	0.10	0.50*	-0.03

* αντιστοιχεί σε $p\text{-value} < 0.1$

Ο Πίνακας 8 παρουσιάζει τις μέσες τιμές των συντελεστών της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για κάθε κλιματικό παράγοντα σε επίπεδο κατηγορίας κάλυψης γης. Η αλλαγή του NDVI των δασικών εκτάσεων επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από την ελάχιστη θερμοκρασία, ενώ αντίστοιχα στους θάμνους και χερσότοπους έχει μεγαλύτερη επίδραση η βροχόπτωση. Στις υπόλοιπες κατηγορίες συμμετέχουν εξίσου και οι δύο παραπάνω κλιματικοί παράγοντες. Η μέγιστη θερμοκρασία δεν φαίνεται να έχει επίδραση στην αλλαγή του NDVI καθώς οι μέσες τιμές του συντελεστή παλινδρόμησης της προσεγγίζουν το 0 τόσο σε επίπεδο Υδατικού Διαμερίσματος, όσο και σε επίπεδο κατηγορίας κάλυψης γης.

Πίνακας 8. Μέσες τιμές των συντελεστών της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για κάθε κλιματικό παράγοντα ανά κατηγορία κάλυψης γης στην περιοχή μελέτης

Κατηγορία κάλυψης γης	Συντελεστής Παλινδρόμησης Βροχόπτωσης	Συντελεστής Παλινδρόμησης Ελάχιστης Θερμ.	Συντελεστής Παλινδρόμησης Μέγιστης Θερμ.
Γεωργικές περιοχές	0.41	0.14	0.04
Δάσος πλατυφύλλων	0.29	0.47*	0.00
Δάσος κωνοφόρων	0.22	0.50*	0.01
Μικτό δάσος	0.27	0.48*	0.00
Φυσικοί βοσκότοποι	0.33	0.36	-0.01
Θάμνοι και χερσότοποι	0.54*	0.25	0.02
Σκληροφυλλική βλάστηση	0.31	0.42	-0.01
Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις	0.29	0.41	-0.01
Ανοιχτοί χώροι με λίγη ή καθόλου βλάστηση	0.35	0.30	-0.01

* αντιστοιχεί σε $p\text{-value} < 0.1$

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελέτησε τη δυναμική της βλάστησης μέσω του δείκτη NDVI για τη χρονική περίοδο 1985-2018 στη Βόρεια Ελλάδα και επιπλέον προσπάθησε να διερευνήσει τις σχέσεις που υπάρχουν μεταξύ της δυναμικής της βλάστησης με κάποιους κλιματικούς παράγοντες, όπως είναι η βροχόπτωση και η θερμοκρασία. Μια βασική παράμετρος για να πραγματοποιηθεί η συγκεκριμένη εργασία ήταν η δημιουργία μακροχρόνιων χρονοσειρών του δείκτη βλάστησης NDVI και των υπό μελέτη κλιματικών παραγόντων αξιοποιώντας τις δυνατότητες που προσφέρει η πλατφόρμα Google Earth Engine (GEE). Η πλατφόρμα GEE αποτελεί ένα πρωτοποριακό εργαλείο στον τομέα της γεωχωρικής ανάλυσης, καθώς προσφέρει τη δυνατότητα αναζήτησης, οπτικοποίησης και επεξεργασίας δορυφορικών/γεωχωρικών/κλιματικών δεδομένων σε πολύ σύντομους χρόνους. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας αξιοποιήθηκαν τα δορυφορικά δεδομένα Landsat για τη δημιουργία ετήσιας χρονοσειράς NDVI από το 1985-2018 και αντίστοιχα δημιουργήθηκαν ετήσιες χρονοσειρές για τη βροχόπτωση και τη θερμοκρασία από τις πλεγματικές βάσεις CHIRPS και TerraClimate.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη χρήση της πλατφόρμας είναι ότι με κάποιες βασικές γνώσεις προγραμματισμού και χρησιμοποιώντας τις ήδη υπάρχουσες συναρτήσεις που παρέχονται μπορεί ο χρήστης να αναζητήσει και να επεξεργαστεί ταχύτατα μεγάλο όγκο δορυφορικών δεδομένων, ενώ παράλληλα μπορεί και να δημιουργήσει χρονοσειρές δορυφορικών δεδομένων σε υψηλή χωρική και χρονική κλίμακα για μεγάλες εκτάσεις, κάτι που είναι εξαιρετικά δύσκολο και χρονοβόρο να πραγματοποιηθεί με τα διαθέσιμα λογισμικά προγράμματα σε συμβατικούς Η/Υ. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι υπάρχει συνεχής προσπάθεια τεχνικής υποστήριξης και εμπλουτισμού της πλατφόρμας με καινούργια δεδομένα από την Google. Παράλληλα, και η ερευνητική κοινότητα δείχνει μεγάλο ενδιαφέρον στη χρήση της πλατφόρμας με αποτέλεσμα να υπάρχουν συνεχώς καινούργιες επιστημονικές εργασίες και εφαρμογές που αναπτύσσονται σε περιβάλλον GEE.

Από τα αποτελέσματα της δυναμικής της βλάστησης μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για το σύνολο της περιοχής μελέτης, αλλά και για τις επιμέρους κατηγορίες κάλυψης γης. Παρατηρείται μια συνολική αύξηση της τιμής του NDVI για όλες τις επιμέρους κατηγορίες κάλυψης γης στην περιοχή μελέτης. Πιο συγκεκριμένα η μέση τιμή του NDVI της περιόδου βλάστησης για το σύνολο της περιοχής μελέτης παρουσίασε αύξηση από 0.48 (1985) σε 0.67 (2018). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης τάσης που πραγματοποιήθηκε το 78% των εικονοστοιχείων της περιοχής μελέτης παρουσίασαν στατιστικά σημαντική θετική τάση του δείκτη

NDVI, με μέσο ρυθμό αύξησης 0.005/έτος. Οι δασικές εκτάσεις έχουν διαχρονικά τις υψηλότερες τιμές NDVI μεταξύ όλων των κατηγοριών κάλυψης. Επίσης, εμφάνισαν την υψηλότερη τιμή για το δείκτη τάσης Kendall tau (≈ 0.60). Οι μεταβατικές εκτάσεις, οι θαμνώδεις εκτάσεις και η σκληροφυλική βλάστηση παρουσίασαν επίσης μεγάλη αύξηση του NDVI μέσα στα χρόνια, η οποία όμως συνοδευόταν από έντονες αυξομειώσεις του NDVI στα πρώτα 15 χρόνια. Αυτές οι κατηγορίες κάλυψης γης εμφανίζουν και μεγάλη χωρική ανομοιογένεια στις τιμές του NDVI. Τα παραπάνω είναι ενδείξεις της φυσικής εξέλιξης της βλάστησης και των διαχρονικών πιέσεων που ασκούνται σε αυτές τις εκτάσεις από ανθρωπογενείς δραστηριότητες με αποτέλεσμα να συντελούνται αλλαγές χρήσεων/κάλυψης της γης.

Οι μέσες ετήσιες τιμές των κλιματικών παραγόντων που μελετήθηκαν παρουσιάζουν μια γενικότερη αυξητική πορεία στο χρονικό διάστημα 1985-2018. Η μέση ελάχιστη/μέγιστη θερμοκρασία παρουσιάζει σταθερή, και σε κάποια χρονικά διαστήματα, έντονη αύξηση. Η βροχόπτωση μετά από μια σταθερή πορεία αύξησης μέχρι και το 2010, στη συνέχεια παρουσιάζει μια ελαφρώς πτωτική πορεία. Οι τιμές όλων των κλιματικών παραγόντων παρουσιάζουν έντονη θετική ανωμαλία μετά το 2003.

Το κυριότερο συμπέρασμα που προέκυψε από τη διερεύνηση των σχέσεων του δείκτη NDVI με τους κλιματικούς παράγοντες είναι ότι η βροχόπτωση και η ελάχιστη θερμοκρασία έχουν συσχέτιση και επίδραση στο δείκτη NDVI, η οποία καθορίζεται από την τοποθεσία και το είδος κάλυψης γης. Στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης (4 από τα 5 ΥΔ), μεταξύ των κλιματικών παραγόντων που μελετήθηκαν, η βροχόπτωση εμφανίζει την υψηλότερη συσχέτιση με το δείκτη NDVI. Εξαίρεση αποτελεί το ΥΔ Ηπείρου, το οποίο δέχεται διπλάσιο ετήσιο ύψος βροχής σε σχέση με τα άλλα ΥΔ, και εμφάνισε χαμηλό συντελεστή συσχέτισης με τη βροχόπτωση αλλά αρκετά υψηλότερο με την ελάχιστη θερμοκρασία. Σε επίπεδο κάλυψης γης οι δασικές εκτάσεις εμφάνισαν υψηλές τιμές συσχέτισης (>0.6) με την ελάχιστη θερμοκρασία, ενώ οι θάμνοι-χερσότοποι με τη βροχόπτωση. Οι υπόλοιπες κατηγορίες κάλυψης γης εμφάνισαν παρόμοιες τιμές συσχέτισης (≈ 0.50) και για τους δυο κλιματικούς παράγοντες. Τα αποτελέσματα της γραμμικής παλινδρόμησης επιβεβαίωσαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση συσχέτισης. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν προέκυψε συσχέτιση μεταξύ NDVI και μέγιστης θερμοκρασίας σε επίπεδο ΥΔ ή σε κάποια από τις κατηγορίες κάλυψης γης. Τέλος, είναι εμφανές ότι η θετική ανωμαλία που παρουσιάζουν όλοι οι κλιματικοί παράγοντες μετά το 2003, επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την αύξηση του δείκτη NDVI στην περιοχή μελέτης και αυτό αποτυπώνεται με τη θετική ανωμαλία του NDVI στο ίδιο χρονικό διάστημα.

Εν κατακλείδι, η παρούσα εργασία παρουσιάζει μια προσέγγιση για τη μελέτη της δυναμικής της βλάστησης και της σχέσης της με κλιματικούς παράγοντες αξιοποιώντας ελεύθερα διαθέσιμα δορυφορικά δεδομένα υψηλής χωροχρονικής ανάλυσης και την πλατφόρμα Google Earth Engine. Η μεθοδολογία που ακολουθείται για τη δημιουργία χρονοσειρών στο GEE μπορεί να πραγματοποιηθεί και σε άλλα δορυφορικά ή κλιματικά δεδομένα, όπως επίσης και για τον υπολογισμό άλλων δεικτών βλάστησης. Επίσης, θα ήταν χρήσιμο να διερευνηθούν οι μακροχρόνιες σχέσεις βλάστησης-κλίματος σε υψηλότερη χρονική κλίμακα (π.χ. μηνιαία ή εποχικά) και για συγκεκριμένα είδη βλάστησης, ώστε να προσδιοριστούν επακριβώς οι πιέσεις που δέχονται και παράλληλα να μπορέσουν να σχεδιαστούν τα κατάλληλα διαχειριστικά μέτρα για την προσαρμογή στη κλιματική αλλαγή.



Abatzoglou JT, Dobrowski SZ, Parks SA, Hegewisch KC (2017) Data Descriptor : TerraClimate , a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958 – 2015. 1–12

Bao G, Qin Z, Bao Y, et al (2014) NDVI-Based Long-Term Vegetation Dynamics and Its Response to Climatic Change in the Mongolian Plateau. 8337–8358

Beck PSA, Atzberger C, Høgda KA, et al (2006) Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI. Remote Sens Environ. Remote Sens Environ 100:321–334

Bonan GB (1997) Effects of Land Use on the Climate of the United States. Clim Change. Clim Change 37:449–486

Bounoua L, Collatz GJ, Los SO, et al (2000) Sensitivity of Climate to Changes in NDVI. J Clim. J Clim 13:2277–2292

Cao M, Woodward FI (1998) Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. Nature. Nature 393:249–252

Chu H, Venevsky S, Wu C, Wang M (2019) NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015. Sci Total Environ. Sci Total Environ 650:2051–2062

de Jong R, de Bruin S, de Wit A, et al (2011) Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series. Remote Sens Environ. Remote Sens Environ 115:692–702

Feng H, Zou B, Luo J (2017) Coverage-dependent amplifiers of vegetation change on global water cycle dynamics. J Hydrol. J Hydrol 550:220–229

Funk C, Peterson P, Landsfeld M, et al (2015) The climate hazards infrared precipitation with stations — a new environmental record for monitoring extremes. 1–21

Gorelick N, Hancher M, Dixon M, et al (2017) Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sens Environ. Remote Sens Environ 202:18–27

Guo B, Zhou Y, Wang S, Tao H (2014) The relationship between normalized difference vegetation index (NDVI) and climate factors in the semiarid region: A case study in Yalu Tsangpo River basin of Qinghai-Tibet Plateau. J Mt Sci. J Mt Sci 11:926–940

Hansen MC, Potapov P V, Moore R, et al (2013) High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. Science (80-). Science (80-) 342:850 LP – 853

Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, et al (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. Int J Climatol. Int J Climatol 25:1965–1978

Huete A (2016) Vegetation's responses to climate variability. Nature. Nature 531:181–182

Ju J, Masek JG (2016) The vegetation greenness trend in Canada and US Alaska from 1984–2012 Landsat data. Remote Sens Environ. Remote Sens Environ 176:1–16

Kendall MG (1975) Rank correlation methods. Griffin, London

Liu Y, Lei H (2015) Responses of natural vegetation dynamics to climate drivers in China from 1982 to 2011. Remote Sens. Remote Sens 7:10243–10268

Liu Y, Li Y, Li S, Motesharrei S (2015) Spatial and temporal patterns of global NDVI trends: Correlations with climate and human factors. Remote Sens. Remote Sens 7:13233–13250

Ma Y, Wu H, Wang L, et al (2015) Remote sensing big data computing: Challenges and opportunities. Futur Gener Comput Syst. Futur Gener Comput Syst 51:47–60

Mann H (1945) Mann Nonparametric test against trend. Econometrica

Na-u-dom T, Mo X, Ì MG (2017) Assessing the Climatic Effects on Vegetation Dynamics in the Mekong River Basin. 1–15

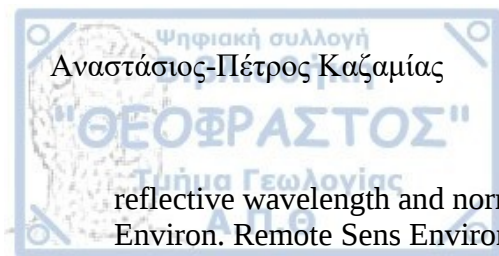
Palmate SS, Pandey A, Kumar D, et al (2017) Climate change impact on forest cover and vegetation in Betwa Basin, India. Appl Water Sci. Appl Water Sci 7:103–114

Pettitt AN (1979) A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. J R Stat Soc Ser C (Applied Stat. J R Stat Soc Ser C (Applied Stat 28:126–135

Pettorelli N, Vik JO, Mysterud A, et al (2005) Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. Trends Ecol Evol. Trends Ecol Evol 20:503–510

Rees M, Condit R, Crawley M, et al (2001) Long-Term Studies of Vegetation Dynamics. Science (80-). Science (80-) 293:650 LP – 655

Roy DP, Kovalskyy V, Zhang HK, et al (2016) Characterization of Landsat-7 to Landsat-8



reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity. Remote Sens Environ. Remote Sens Environ 185:57–70

Sen PK (1968) Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. J Am Stat Assoc. J Am Stat Assoc 63:1379–1389

Shelestov A, Lavreniuk M, Kussul N, Novikov A (2017) Exploring Google Earth Engine Platform for Big Data Processing : Classification of Multi-Temporal Satellite Imagery for Crop Mapping. 5:1–10

Tucker CJ, Slayback DA, Pinzon JE, et al (2001) Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999. Int J Biometeorol. Int J Biometeorol 45:184–190

Wang J, Rich PM, Price KP (2003) Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. Int J Remote Sens. Int J Remote Sens 24:2345–2364

Yang Y, Wang S, Bai X, et al (2019) Factors affecting long-term trends in global NDVI. Forests. Forests 10:1–17

Zhang X, Wu B, Ponce-campos GE, et al (2018a) Mapping up-to-Date Paddy Rice Extent at 10 M Resolution in China through the Integration of Optical and Synthetic Aperture Radar Images. 1–26

Zhang Y, Wang X, Li C, et al (2018b) NDVI dynamics under changing meteorological factors in a shallow lake in future metropolitan, semiarid area in North China. Sci Rep. Sci Rep 8:15971

Zhou D, Fan G, Huang R, et al (2007) Interannual variability of the normalized difference vegetation index on the Tibetan Plateau and its relationship with climate change. Adv Atmos Sci. Adv Atmos Sci 24:474–484

Zhu Z, Wang S, Woodcock CE (2015) Improvement and expansion of the Fmask algorithm: cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4–7, 8, and Sentinel 2 images. Remote Sens Environ. Remote Sens Environ 159:269–277