



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών
Γεωπληροφορικής
Τομέας Γεωγραφίας και Περιφερειακού Σχεδιασμού

ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΞΑΡΤΩΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ (GDEs): "ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟΝ ΚΑΜΠΟ ΧΑΝΙΩΝ"

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΚΕΡΑΛΑΝΤΟ ΚΟΛΙΤΣΙ

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Παπαδοπούλου Μαρία, Καθηγήτρια Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών
Γεωπληροφορικής
Τομέας Γεωγραφίας και Περιφερειακού Σχεδιασμού

ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΟΙΚΟΣΥΤΗΜΑΤΩΝ ΕΞΑΡΤΩΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ (GDEs): "ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟΝ ΚΑΜΠΟ ΧΑΝΙΩΝ"

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΚΕΡΑΛΝΤΟ ΚΟΛΙΤΣΙ

Επιβλέπουσα καθηγήτρια:

Παπαδοπούλου Μαρία, Καθηγήτρια Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π.

Τριμελής εξεταστική επιτροπή:

Παπαδοπούλου Μαρία, Καθηγήτρια Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π.

Τσιχριντζής Βασίλειος, Καθηγητής, Ε.Μ.Π.

Χατζηχρήστος Θωμάς, Επίκουρος Καθηγητής, Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2024

Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας σηματοδοτεί μια σημαντική στιγμή στην πορεία μου ως φοιτητή, αλλά και την έναρξη ενός νέου κεφαλαίου στη ζωή μου. Κατά τη διάρκεια αυτής της πορείας, είχα την ευκαιρία να συνεργαστώ με πολλούς αξιόλογους συμφοιτητές και καθηγητές, στους οποίους θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κα. Μαρία Παπαδοπούλου για την δυνατότητα που μου έδωσε να αναπτύξω μια εργασία πάνω σε ένα τόσο ενδιαφέρον και πρωτοποριακό θέμα, καθώς επίσης και για την καθοδήγησή της, χάρη στην οποία προέκυψε ένα άρτιο αποτέλεσμα.

Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στην υποψήφια διδάκτορα Δέσποινα Χαρχούση για την άψογη συνεργασία και την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια της συγγραφής της εργασίας μου.

Επίσης, ευχαριστώ τους γονείς και την αδερφή μου για την συνεχή τους στήριξη καθόλη την διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κοπέλα μου Ρέα, αλλά και όλους τους φίλους μου για την αμέριστη στήριξη που μου παρείχαν όχι μόνο στα εύκολα, αλλά και στα δύσκολα.

Περίληψη

Η υπεράντληση των υπογείων υδάτων (GW) έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, και αντιτίθεται στην οικολογική ισορροπία των οικοσυστημάτων που εξαρτώνται από τα υπόγεια ύδατα (GDEs). Η έρευνα για τα GDEs είναι περιορισμένη, απαιτώντας ολοκληρωμένες, διεπιστημονικές περιβαλλοντικές προσεγγίσεις που εξασφαλίζουν την παρακολούθηση και τη διαχείρισή τους λαμβάνοντας υπόψη τις ανθρωπογενείς παρεμβάσεις στο χώρο σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής. Απαραίτητη προϋπόθεση για την προστασία και την θέσπιση αποτελεσματικής πολιτικής διαχείρισης των GDEs, είναι η χαρτογράφηση και η αναγνώριση τους. Αξίζει να σημειωθεί πως στην Ελλάδα δεν υπάρχει καμία βιβλιογραφική αναφορά για την χαρτογράφηση των GDEs και καμία υπουργική απόφαση που να θεσπίζει την ανάγκη χαρτογράφησης τους, σε αντίθεση με άλλες ευρωπαϊκές χώρες όπως η Ολλανδία.

Στο πλαίσιο της παρούσα διπλωματικής εργασίας υλοποιείται η χαρτογράφηση των οικοσυστημάτων που εξαρτώνται από τα υπόγεια ύδατα (GDEs) στην περιοχή των Χανίων (Κρήτη). Η χαρτογράφηση πραγματοποιήθηκε για δύο χρονικές περιόδους, το έτος 2017 που έχει χαρακτηριστεί ως μια υγρή χρονιά για την περιοχή μελέτης και το έτος 2022 που σε αντίθεση έχει χαρακτηριστεί ως μια ξηρή χρονιά. Η επιλογή αυτή έγινε με σκοπό την ανάδειξη του βαθμού ευαισθησίας των οικοσυστημάτων που εξαρτώνται από τα υπόγεια νερά σε σχέση με κλιματολογικές συνθήκες. Το αποτέλεσμα της σύγκρισης των δύο χρονολογιών ανέδειξε πως στην υγρή χρονιά έχουν κατά 11% μεγαλύτερη πιθανότητα εύρεσης GDEs.

Η μέθοδος χαρτογράφησης των GDEs, η οποία εφαρμόζεται στο πλαίσιο της παρούσας ΔΕ προτάθηκε από τους Duran-Llacer et al. (2021). Ένα καινοτόμο γεωχωρικό μοντέλο με ολοκληρωμένη προσέγγιση αναπτύχθηκε με βάση πολυκριτηριακή μεθοδολογία, συνδυάζοντας τηλεπισκοπικές μεθόδους και σύγχρονα γεωπληροφορικά συστήματα πληροφοριών (GIS) για την χαρτογράφηση των GDEs. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην επιλογή παραμέτρων που σχετίζονται άμεσα με την ύπαρξη των GDEs, οι οποίες κανονικοποιήθηκαν σε κλίμακα από 1 (πολύ μικρή πιθανότητα εύρεσης GDEs) έως 5 (πολύ μεγάλη πιθανότητα εύρεσης GDEs), αντικατοπτρίζοντας το βαθμό πιθανότητας παρουσίας των GDEs. Οι παράμετροι αυτοί διαχωρίζονται σε 4 κατηγορίες, τα συμβατικά επίπεδα GIS (πχ. Ανάγλυφο), τοπογραφικοί παράμετροι (πχ. Δείκτης Τοπογραφικής υγρασίας - TWI), πολυφασματικοί δείκτες (πχ. Κανονικοποιημένος Δείκτης Υγρασίας - NDMI) και τέλος κλιματολογικοί παράμετροι (πχ. Δείκτης ξηρότητας).

Για το τελικό αποτέλεσμα της χαρτογράφησης κρίσιμο ρόλο έχουν τα βάρη -βαθμός σημαντικότητας- που αποδίδονται σε κάθε παράμετρο για τον εντοπισμό και την απεικόνιση των GDEs. Για το λόγο αυτό, για το έτος 2022 δημιουργήθηκαν 5 σενάρια όπου σε κάθε σενάριο αποδίδεται μια διαφορετική τιμή στα βάρη των παραμέτρων. Τέλος, συγκρίνοντας, αυτά τα 5 σενάρια καταλήγουμε σε συμφωνία 25%.

Abstract

Over-abstraction of groundwater (GW) has increased significantly in recent years and runs counter to the ecological balance of groundwater-dependent ecosystems (GDEs). Research on GDEs is limited, requiring integrated, interdisciplinary environmental approaches that ensure their monitoring and management taking into account anthropogenic interventions in space under climate change conditions. A prerequisite for the protection and establishment of an effective GDE management policy is their mapping and identification. It is worth noting that in Greece there is no bibliographic reference for the mapping of GDEs and no ministerial decision establishing the need for their mapping, unlike other European countries such as the Netherlands.

In the context of this diploma thesis, the mapping of groundwater-dependent ecosystems (GDEs) in the area of Chania (Crete) is implemented. The mapping was carried out over two time periods, the year 2017 which has been classified as a wet year for the study area and the year 2022 which in contrast has been classified as a dry year. This choice was made in order to highlight the degree of sensitivity of ecosystems that depend on groundwater in relation to climatic conditions. The result of comparing the two dates showed that in the wet year they are 11% more likely to find GDEs.

The GDE mapping method applied in the context of this AL was proposed by Duran-Llacer et al. (2021). An innovative geospatial model with an integrated approach was developed based on multicriteria methodology, combining remote sensing methods and modern geoinformatics information systems (GIS) for the mapping of GDEs. This method is based on the selection of parameters directly related to the existence of GDEs, which were normalized on a scale from 1 (very low probability of finding GDEs) to 5 (very high probability of finding GDEs), reflecting the degree of probability of GDEs. These parameters are divided into 4 categories, conventional GIS levels (e.g. relief), topographic parameters (e.g. Topographic humidity index - TWI), multispectral indicators (e.g. Normalized humidity index – NDMI) and finally climatic parameters (e.g. dryness index).

For the result of the mapping, the weights -degree of significance- assigned to each parameter for the detection and visualization of GDEs play a crucial role. For this reason, for the year 2022, 5 scenarios were created where in each scenario a different value is assigned to the weights of the parameters. Finally, by comparing, these 5 scenarios result in a 25% agreement.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	i
Περίληψη.....	ii
Abstract	iii
Κατάλογος Χαρτών	vi
Κατάλογος Εικόνων.....	viii
Κατάλογος Πινάκων	ix
Κατάλογος Διαγραμμάτων.....	x
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	1
1.1 Τα Εξαρτώμενα από τα υπόγεια ύδατα οικοσυστήματα (Groundwater Dependent Ecosystems – GDEs) και οι σχετιζόμενες οικοσυστημικές υπηρεσίες	2
1.2 Η σημασία της χαρτογράφησης των GDEs.....	4
1.3 Μέθοδοι χαρτογράφησης GDEs.....	6
1.3.1 Ψηφιακής τηλεπισκόπησης (Remote sensing)	6
1.3.2 Πολυκριτηριακή ανάλυση (MCDA).....	7
1.4 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας	9
1.5 Διάρθρωση Διπλωματικής εργασίας.....	10
Κεφάλαιο 2: Περιοχή μελέτης	11
2.1 Ορισμός περιοχής μελέτης	12
2.2 Χρήσεις γης.....	12
2.3 Επιφανειακά υδάτινα συστήματα.....	14
2.3.1 Ποτάμια υδάτινα συστήματα.....	15
2.3.2 Λιμναία υδάτινα συστήματα.....	16
2.3.3 Μεταβατικά υδάτινα συστήματα.....	17
2.3.4 Παράκτια υδάτινα συστήματα.....	18
2.4 Υπόγεια ύδατα.....	19
2.5 Προστατευόμενες περιοχές	19
Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία.....	23
3.1 Εισαγωγικά.....	24
3.2 Παράμετροι που σχετίζονται με την ύπαρξη GDEs	25
3.2.1 Συμβατικά Επίπεδα GIS	26
3.2.2 Τοπογραφικές Παράμετροι.....	27
3.2.3 Πολυφασματικοί Δείκτες.....	31
3.2.4 Κλιματικές Μεταβλητές	33
3.3 Εκτίμηση βαθμού συσχέτισης παραμέτρων	34
3.4 Εκτίμηση βάρους παραμέτρων.....	38
Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα Εφαρμογής Μεθοδολογίας.....	41

4.1 Χαρτογράφηση μεταβλητών	42
4.1.1 Συμβατικά επίπεδα GIS	42
4.1.2 Τοπογραφικές παράμετροι.....	43
4.1.3 Πολυφασματικοί Παράμετροι	49
4.1.4 Κλιματικές Παράμετροι.....	50
4.2 Τελικά αποτελέσματα χαρτογράφησης GDEs	52
4.2.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων για το έτος 2022 – Σύγκριση 4 σεναρίων βαρών	52
4.2.2 Ανάλυση επιρροής κλιματικών δεδομένων στη χαρτογράφηση των GDEs.....	58
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα.....	61
5.1 Γενικά Συμπεράσματα.....	62
5.2 Επόμενα βήματα - Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	63
Βιβλιογραφία.....	65
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	73

Κατάλογος Χαρτών

Χάρτης 2. 1 Διοικητική Διαίρεση Περιοχής Μελέτης (Χάρτης Δ1).....	12
Χάρτης 2. 2 Υδατικό Δυναμικό Περιοχής Μελέτης (Χάρτης Υ1).....	15
Χάρτης 4. 1 Ταξινόμηση Γεωλογικών Σχηματισμών στην 5βάθμια κλίμακα πιθανότητας εύρεσης GDEs	42
Χάρτης 4. 2 Ταξινόμηση Χρήσεων Γης στην 5βάθμια κλίμακα πιθανότητας εύρεσης GDEs	43
Χάρτης 4. 3: Ταξινόμηση Συσσώρευσης Ροής στην 5βάθμια κλίμακα πιθανότητας εύρεσης GDEs	44
Χάρτης 4. 4 Ταξινόμηση Κλίσεων στην 5βάθμια κλίμακα πιθανότητας εύρεσης GDEs	44
Χάρτης 4. 5: Ταξινόμηση Καμπυλότητας στην 5βάθμια κλίμακα πιθανότητας εύρεσης GDEs	45
Χάρτης 4. 6: Ταξινόμηση Εγγύτητας σε ποτάμια και υδάτινα σώματα στην 5βάθμια κλίμακα πιθανότητας εύρεσης GDEs	46
Χάρτης 4. 7: Ταξινόμηση Υδρογραφικής πυκνότητας στην 5βάθμια κλίμακα πιθανότητας εύρεσης GDEs	46
Χάρτης 4. 8: Ταξινόμηση Πυκνότητας Φωτογράμμωσης στην 5βάθμια κλίμακα πιθανότητας εύρεσης GDEs	47
Χάρτης 4. 9: Ταξινόμηση Δείκτη Τραχύτητας Εδάφους (TRI) στην 5βάθμια κλίμακα πιθανότητας εύρεσης GDEs, 2017	48
Χάρτης 4. 10: Ταξινόμηση Τοπογραφικού Δείκτη Υγρασίας (TWI) στην 5βάθμια κλίμακα πιθανότητας εύρεσης GDEs, 2017	49
Χάρτης 4. 11: Ταξινόμηση Κανονικοποιημένου Δείκτη Υγρασίας (NDMI) στην 5βάθμια κλίμακα πιθανότητας εύρεσης GDEs, 2017	50
Χάρτης 4. 12: Ταξινόμηση Κανονικοποιημένου Δείκτη Υγρασίας (NDMI) στην 5βάθμια κλίμακα πιθανότητας εύρεσης GDEs, 2022	50
Χάρτης 4. 13: Ταξινόμηση Δείκτη Ξηρότητας (AI) στην 5βάθμια κλίμακα πιθανότητας εύρεσης GDEs, 2017	51
Χάρτης 4. 14: Ταξινόμηση Δείκτη Ξηρότητας (AI) στην 5βάθμια κλίμακα πιθανότητας εύρεσης GDEs, 2022	51
Χάρτης 4. 15: Πιθανότητα εύρεσης GDEs (1ο σενάριο απόδοσης βαρών – όλες οι παράμετροι ισοβαρείς)	53
Χάρτης 4. 16 Πιθανότητα εύρεσης GDEs (2ο σενάριο απόδοσης βαρών – ισοβαρείς κατηγορίες παραμέτρων – συμβατικές, τοπογραφικές, πολυφασματικές, κλιματικές).....	54
Χάρτης 4. 17 Πιθανότητα εύρεσης GDEs (3ο σενάριο απόδοσης βαρών - Τυχαία βάρη)	55
Χάρτης 4. 18 Πιθανότητα εύρεσης GDEs (4ο σενάριο απόδοσης βαρών - Τυχαία βάρη)	56
Χάρτης 4. 19 Πιθανότητα εύρεσης GDEs (Τυχαία βάρη 3).....	57
Χάρτης 4. 20 Επιπτώσεις των σταθμίσεων στην GDEs: Ζώνες με δυναμικό GDEs μεταξύ των 5 σεναρίων σε συμφωνία (με πράσινο χρώμα). Στο κόκκινο, περιοχές όπου τα σεναρία των 5 σταθμίσεων οδηγούν σε διαφοροποιημένα αποτελέσματα.	58
Χάρτης 4. 21: Πιθανότητα εύρεσης GDEs, με τις παραμέτρους του έτους 2017	59
Χάρτης 4. 22: Πιθανότητα εύρεσης GDEs για την χρονολογία του 2017 αλλά με τον δείκτη ξηρότητας και τον δείκτη NDMI του 2022	59
Χάρτης 4. 23: Ανάλυση επιρροής κλιματικών δεδομένων μέσω του Δείκτη Ξηρότητας (AI) και του Δείκτη NDMI. Οι περιοχές σε συμφωνία απεικονίζονται με πράσινο χρώμα και αντίθετα οι περιοχές που δεν είναι σε συμφωνία με κόκκινο χρώμα	60
Χάρτης Π. 1 Απεικόνιση Χρήσεων Γης μέσω του Corine Land Cover	78
Χάρτης Π. 2 Γεωλογικοί Σχηματισμοί	78
Χάρτης Π. 3 Γεωμορφολογικοί Σχηματισμοί.....	79
Χάρτης Π. 4 Ύψομετρία (σε m)	79

Χάρτης Π. 5 Κλίση (S).....	80
Χάρτης Π. 6 Καμπυλότητα (Ct)	80
Χάρτης Π. 7 Εγγύτητα σε Ποτάμια και Υδάτινα Σώματα (Prwb).....	81
Χάρτης Π. 8 Συσσώρευση Ροής (Fa)	81
Χάρτης Π. 9 Υδρογραφική Πυκνότητα (Dd).....	82
Χάρτης Π. 10 Πυκνότητα Φωτογράμμωσης (Ld)	82
Χάρτης Π. 11 Τοπογραφικός Δείκτης Υγρασίας (TWD).....	83
Χάρτης Π. 12 Τοπογραφικός Δείκτης Θέσης (TPI).....	83
Χάρτης Π. 13 Δείκτης Τραχύτητας Εδάφους (TRI)	84
Χάρτης Π. 14 Κανονικοποιημένος Δείκτης Βλάστησης (NDVI) για το έτος 2017	84
Χάρτης Π. 15 Κανονικοποιημένος Δείκτης Βλάστησης (NDVI) για το έτος 2022	85
Χάρτης Π. 16 Κανονικοποιημένος Δείκτης Υγρασίας (NDMI) για το έτος 2017	85
Χάρτης Π. 17 Κανονικοποιημένος Δείκτης Υγρασίας (NDMI) για το έτος 2022	86
Χάρτης Π. 18 Δείκτης Ενισχυμένης Βλάστησης (EVI) για το έτος 2017	86
Χάρτης Π. 19 Δείκτης Ενισχυμένης Βλάστησης (EVI) για το έτος 2022	87
Χάρτης Π. 20 Ετήσια Βροχόπτωση για το έτος 2017 (σε mm/έτος).....	87
Χάρτης Π. 21 Ετήσια Βροχόπτωση για το έτος 2022 (σε mm/έτος).....	88
Χάρτης Π. 22 Δείκτης Ξηρότητας (Aridity Index) για το έτος 2017	88
Χάρτης Π. 23 Δείκτης Ξηρότητας (Aridity Index) για το έτος 2022	89

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. 1 Τύποι GDEs που βρίσκονται στην ενδοχώρα, την ακτή και το υπέδαφος. Πηγή: https://water.dpie.nsw.gov.au/ (GDEs, NSW Government)	3
Εικόνα 1. 2 Οικοσυστημικές υπηρεσίες που εξαρτώνται από τα υπόγεια ύδατα (GDEs). Πηγή: Griebler & Avramov, 2014.....	4
Εικόνα 1. 3 Κατηγορίες οικοσυστημικών υπηρεσιών (Πηγή: LIVING PLANET REPORT, WWF 2016).....	5
Εικόνα 1. 4 Απεικόνιση των πιθανών επιπτώσεων από την άντληση υπογείων υδάτων στα GDEs. Πηγή: Groundwater Dependent Ecosystems: Classification, Identification Techniques and Threats, Eamus et al., 2016.....	7
Εικόνα 2. 1 Παραλία Μάλαμε όπως φαίνεται από την θέση Σπηλιαρίδια Αφράτων Πηγή: ecovalue-crete.eu/el/sites/gr4340003)	20
Εικόνα 2. 2 Λίμνη Αγιάς και στο βάθος τα Λευκά Όρη (Πηγή: http://www.ecovalue-crete.eu/el/sites/gr4340006).....	20
Εικόνα 2. 3 Φαράγγι Θέρισου (Πηγή: http://www.ecovalue-crete.eu/el/sites/gr4340007)	21

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2. 1 Ποσοστά κάλυψης χρήσεων γης που απαρτίζουν την περιοχή μελέτης (Corine Land Cover 2018).....	13
Πίνακας 2. 2 Εκτενής περιγραφή χρήσεων γης και ποσοστό κάλυψης τους (Corine Land Cover 2018).....	13
Πίνακας 2. 3 Χαρακτηριστικά Μεσογειακού τύπου ποταμών, σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Απόφαση 2013/480/ΕΚ και την MED GIG	15
Πίνακας 2. 4 Ποτάμια υδάτινα συστήματα της περιοχής μελέτης (Πηγή: Σχέδιο ΛΑΠ Κρήτης 2017).....	16
Πίνακας 2. 5 Τύποι λιμνών (ταμιευτήρες), σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2018/229/ΕΚ	17
Πίνακας 2. 6: Τύποι φυσικών λιμνών (Πηγή: Σχέδιο ΛΑΠ Κρήτης, 2017)	17
Πίνακας 2. 7: Τύποι μεταβατικών υδάτινων συστημάτων (Σχέδιο ΛΑΠ Κρήτης, 2017)	18
Πίνακας 2. 8: Μεταβατικά ύδατα εντός των ορίων περιοχής μελέτης (Πηγή: Σχέδιο ΛΑΠ Κρήτης, 2017)	18
Πίνακας 2. 9: Παράκτια ύδατα (Πηγή: Σχέδιο ΛΑΠ Κρήτης, 2017)	19
Πίνακας 3. 1 Οι τιμές κατωφλίου Δείκτη Ανυδρίας (Aridity Index - AI) για την κατηγοριοποίηση των κλιματικών ζωνών ανυδρίας σύμφωνα με τα σχέδια κατηγοριοποίησης της UNESCO και του UNEP.	33
Πίνακας 3. 2 Πίνακας Συσχέτισης παραμέτρων για το έτος 2017	35
Πίνακας 3. 3 Πίνακας Συσχέτισης παραμέτρων για το έτος 2022	36
Πίνακας 3. 4 Τελικοί παράμετροι για την παραγωγή των χαρτών GDEs	37
Πίνακας 3. 5 Σενάρια απόδοσης βαρών για την παραγωγή τελικού χάρτη GDEs	39
Πίνακας Π. 1: Εύρος και βάρος κάθε γεωχωρικής μεταβλητής κατηγοριοποιημένα σύμφωνα με την πιθανότητα παρουσίας της GDEZ για το έτος 2017	74
Πίνακας Π. 2: Εύρος και βάρος κάθε γεωχωρικής μεταβλητής κατηγοριοποιημένα σύμφωνα με την πιθανότητα παρουσίας της GDEZ για το έτος 2022.	76

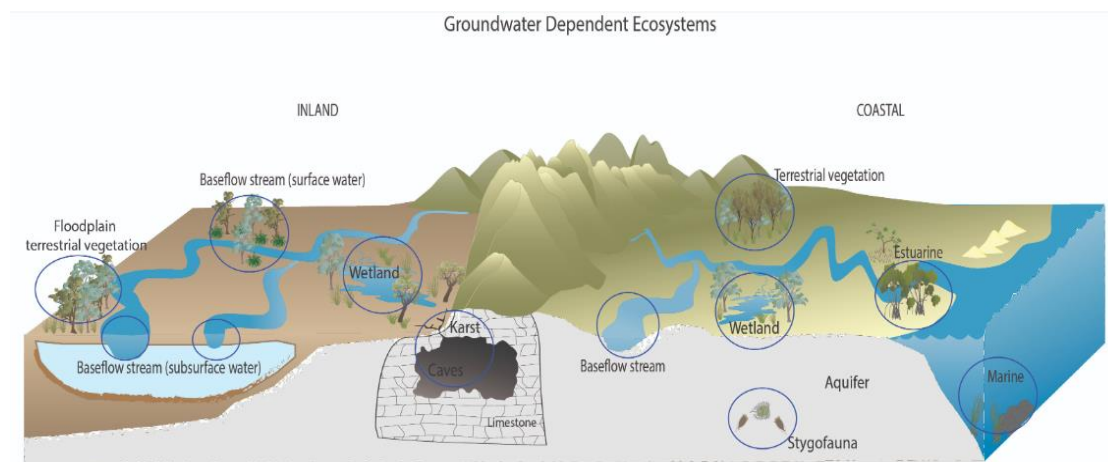
Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 2. 1 Κατανομή χρήσεων γης που αφορούν την περιοχή μελέτης (Corine Land Cover 2018).....	13
Διάγραμμα 3. 1 Πορεία βημάτων για τη χαρτογράφηση GDEs με βάση την προτεινόμενη μεθοδολογία των Duran-Llacer et al., 2021	25

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Τα εξαρτώμενα από τα υπόγεια ύδατα οικοσυστήματα (Groundwater Dependent Ecosystems – GDEs) και οι σχετιζόμενες οικοσυστημικές υπηρεσίες

Τα εξαρτώμενα από τα υπόγεια ύδατα οικοσυστήματα (Groundwater Dependent Ecosystems – GDEs) είναι οικοσυστήματα τα οποία βασίζονται στα υπόγεια ύδατα -σε μόνιμη ή διαλείπουσα βάση- για να καλύψουν το σύνολο ή μέρος των αναγκών τους σε νερό για τη διατήρηση της οικολογικής τους κατάσταση (Duran-Llacer et al., 2021, Eamus et al., 2016). Τα GDEs, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία καθώς και την απεικόνιση στην Εικόνα 1.1, αναφέρονται σε οικοσυστήματα όπως πηγές, υγρότοποι, δασικές εκτάσεις, λίμνες, παράκτιες λιμνοθάλασσες και υδροφορείς σπηλαίων (Klønne et al., 2011, Eamus et al., 2006).



Εικόνα 1. 1 Τύποι GDEs που βρίσκονται στην ενδοχώρα, την ακτή και το υπέδαφος. Πηγή: <https://water.dpie.nsw.gov.au/> (GDEs, NSW Government)

Με βάση την εξάρτησή τους από τα υπόγεια ύδατα, τα GDEs μπορούν να ταξινομηθούν σε GDE (Serov et al., 2012):

- 1) που εξαρτώνται **πλήρως** από τα υπόγεια ύδατα,
- 2) που εξαρτώνται **σε μεγάλο βαθμό** από τα υπόγεια ύδατα,
- 3) **με μερική εξάρτηση** από τα υπόγεια ύδατα και
- 4) **με πολύ περιορισμένη εξάρτηση** από τα υπόγεια ύδατα

Ωστόσο, αυτό το είδος ταξινόμησης περιέχει το μειονέκτημα ότι ο βαθμός εξάρτησης των GDE από τα υπόγεια ύδατα είναι δύσκολο να προσδιοριστεί. Οι Serov et al. (2012) προτείνουν 7 κατηγορίες για υπόγεια και επιφανειακά οικοσυστήματα που χαρακτηρίζεται ως GDEs:

Υπόγεια οικοσυστήματα:

- Καρστ και σπηλιές
- Οικοσυστήματα φρεατικών υδροφορέων
- Βασική ροή ποταμών (οικοσυστήματα υπορροϊκής ζώνης)

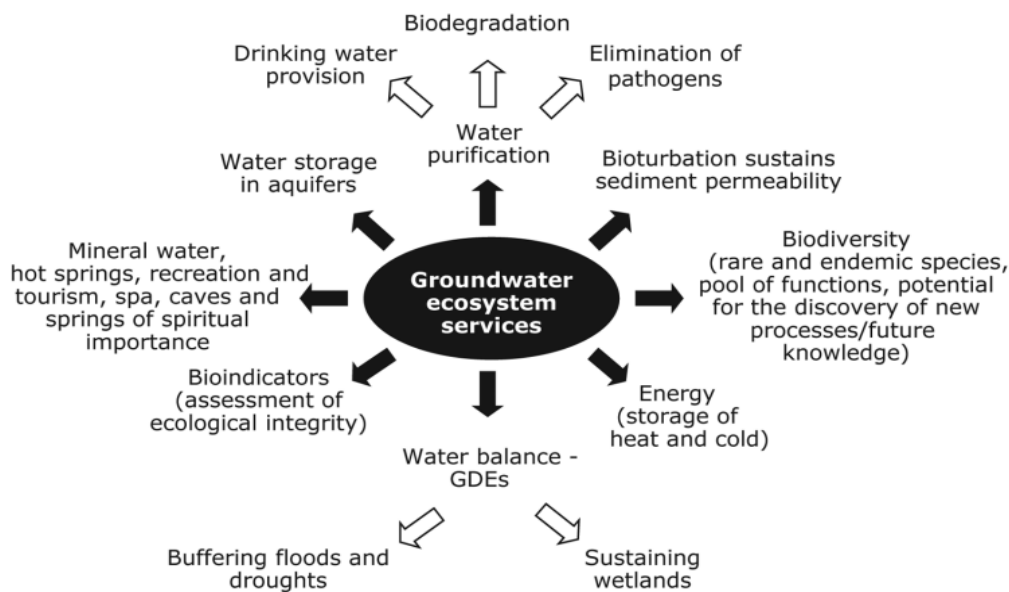
Επιφανειακά οικοσυστήματα:

- Υγρότοποι που εξαρτώνται από τα υπόγεια ύδατα
- Βασική ροή ποταμών (επιφανειακά οικοσυστήματα)
- Εκβολές ποταμών και παραθαλάσσια οικοσυστήματα
- Φρεατο-φυτά (φυτά που οι ρίζες τους εκτείνονται σε τέτοιο βάθος που συναντούν υπόγειους υδροφορείς, απορροφώντας το νερό που χρειάζονται για την διαβίωση και ανάπτυξη τους)

Τέλος, το Γραφείο Μετεωρολογίας της Αυστραλιανής Κυβέρνησης έχει υιοθετήσει στον Εθνικό Άτλαντα GDEs της Αυστραλίας¹ την ακόλουθη ταξινόμηση, όπως προτείνεται από τους Eamus et al. (2006):

- Υδάτινα οικοσυστήματα** (π.χ. πηγές, υγρότοποι, ποτάμια και άλλα),
- Χερσαία οικοσυστήματα** (οικοσυστήματα βλάστησης που εξαρτώνται από την παρουσία υπόγειων υδάτων που προσπελάζονται μέσω των ριζών τους)
- Υπόγεια οικοσυστήματα** (οικοσυστήματα σπηλαίων και υδροφορέων - συμπεριλαμβανομένων των καρστικών και αλλουβιακοί υδροφορείς).

Η ανθρώπινη υγεία, η ασφάλεια και τα υλικά αγαθά που είναι απαραίτητα για την ευημερία συσχετίζονται με τις λειτουργίες του οικοσυστήματος και την περιβαλλοντική υγεία μέσω των οικοσυστημικών υπηρεσιών (Griebler and Avramov, 2014). Ειδικότερα, οι οικοσυστημικές υπηρεσίες αφορούν τα διάφορα οφέλη που χρησιμοποιεί η κοινωνία καθημερινά για να καλύψει βασικές ανάγκες και ανάγκες ψυχαγωγίας. Ενδεικτικές οικοσυστημικές υπηρεσίες που προσφέρονται από τα υπόγεια οικοσυστήματα -και κατ' επέκταση από τα GDEs- απεικονίζονται στην Εικόνα 1.2(Griebler & Avramov, 2014).

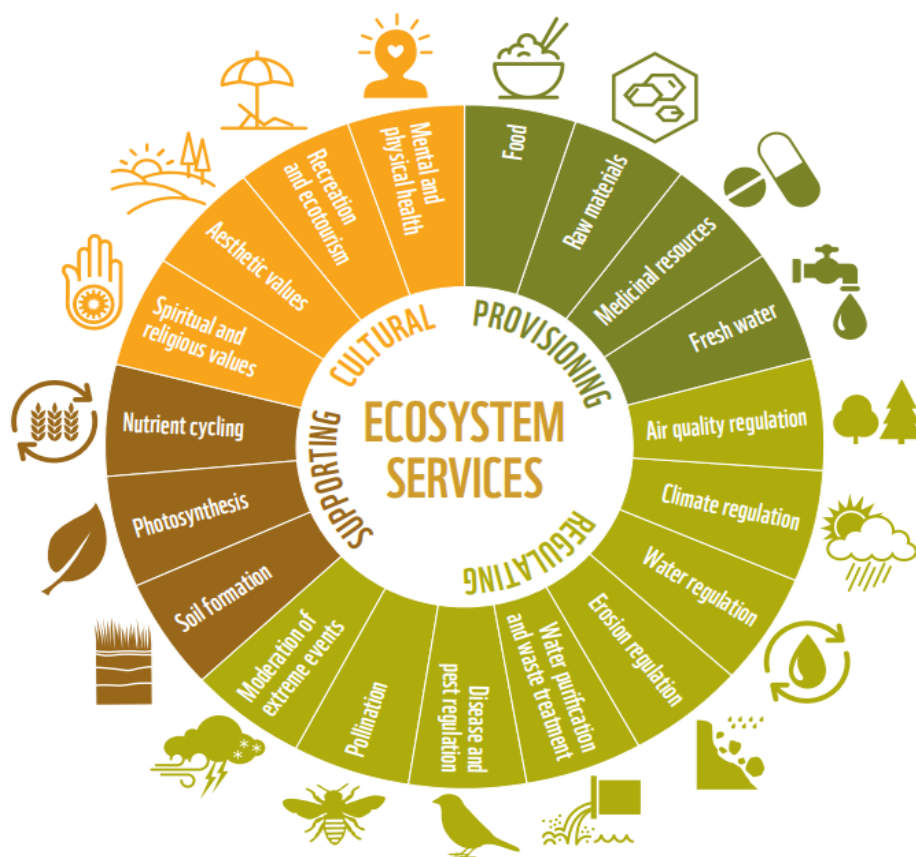


Εικόνα 1. 2 Οικοσυστημικές υπηρεσίες που εξαρτώνται από τα υπόγεια ύδατα (GDEs). Πηγή: Griebler & Avramov, 2014

Οι οικοσυστημικές υπηρεσίες μπορούν να διαχωριστούν σε 4 κατηγορίες: α) τις προμηθευτικές, β) τις ρυθμιστικές, γ) τις υποστηρικτικές και δ) τις πολιτιστικές (Εικόνα 1.3). Ο διαχωρισμός αυτός μπορεί να υιοθετηθεί και για τις οικοσυστημικές υπηρεσίες που προσφέρονται από τα GDEs. Οι **προμηθευτικές υπηρεσίες** αναφέρονται στα αγαθά και στα

¹ <http://www.bom.gov.au/water/groundwater/gde/map.shtml>

προϊόντα που μπορεί να λάβει ο άνθρωπος από τα οικοσυστήματα. Οι **ρυθμιστικές υπηρεσίες** αναφέρονται στους τρόπους με τους οποίους τα οικοσυστήματα ρυθμίζουν και διατηρούν παραμέτρους του περιβάλλοντος. Παραδείγματος χάρη, οι ρίζες των κορμών συγκρατούν τα φερτά υλικά και μειώνουν την ταχύτητα της απορροής των κατακρημνίσεων. Οι **υποστηρικτικές υπηρεσίες** είναι αυτές οι οποίες είναι απαραίτητες για την λειτουργία όλων των υπόλοιπων οικοσυστημικών υπηρεσιών και διαφοροποιούνται από αυτές καθώς, έχουν συνήθως έμμεση επίδραση στον άνθρωπο. Παράδειγμα υποστηρικτικής υπηρεσίας αποτελεί η φωτοσύνθεση (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Τέλος, οι **πολιτιστικές υπηρεσίες** αφορούν τα άυλα αγαθά που προσλαμβάνει ο άνθρωπος από την αλληλεπίδραση του με τα οικοσυστήματα, όπως ο οικότουρισμός ([Οικοσυστημικές υπηρεσίες](#)).



Εικόνα 1. 3 Κατηγορίες οικοσυστημικών υπηρεσιών (Πηγή: LIVING PLANET REPORT, WWF 2016)

1.2 Η σημασία της χαρτογράφησης των GDEs

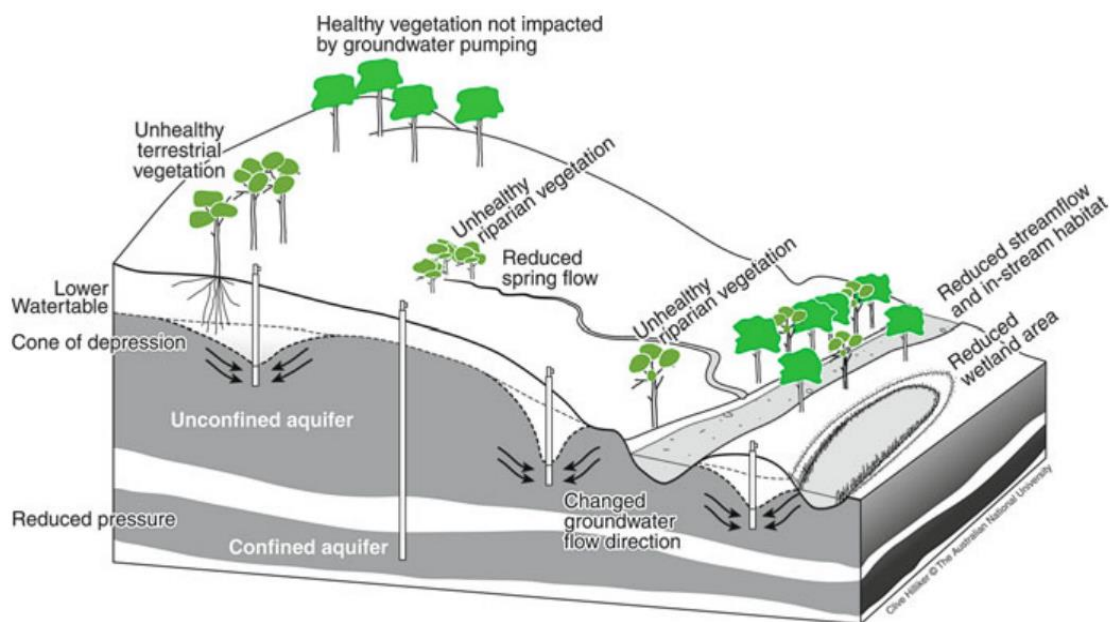
Τα οφέλη που προσφέρουν τα GDEs στους ανθρώπους επιβάλλουν την ανάγκη προστασίας τους ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να υιοθετηθούν συστήματα παρακολούθησης και σχέδια διαχείρισης τους. Η βιωσιμότητα των GDEs εξαρτάται από τον τύπο αυτών (π.χ. χερσαίο ή υδάτινο), τους εντοπισμένους κινδύνους, τον τύπο του υδροφορέα στον οποίο βασίζεται το εκάστοτε GDE και τις χρήσεις του υδροφορέα (Seron et al., 2012). Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί πως τα τελευταία 50 χρόνια η ανθρωπογενής δραστηριότητα τροποποίησε σημαντικά τις λειτουργίες και τις δομές των οικοσυστημάτων. Πιο συγκεκριμένα, υπήρξε σε αρκετές περιπτώσεις βίαιη παρέμβαση στο φυσικό περιβάλλον προκειμένου να καλύπτονται οι διαρκώς αυξανόμενες ανάγκες των ατόμων λόγω της υπερκατανάλωσης, της βιομηχανικής

ανάπτυξης και της αύξησης του πληθυσμού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο ρυθμός αναπλήρωσης των υπόγειων υδάτων να είναι μικρότερος από τον ρυθμό άντλησης τους (Hoyos et al., 2016, Danielopol et al. 2003), οδηγώντας έτσι σε υποβάθμιση των GDEs. Η ανάγκη για πόσιμο νερό όλο και αυξάνεται με αποτέλεσμα τα υπόγεια ύδατα να δέχονται όλο και μεγαλύτερες πιέσεις καθημερινά, για ύδρευση, άρδευση αλλά και για οποιαδήποτε άλλη ανάγκη κατανάλωσης γλυκού νερού (Hoyos et al., 2016). Επιπροσθέτως, η κλιματική αλλαγή αποτελεί σημαντική απειλή για τα υπόγεια ύδατα και κατ' επέκταση για τα GDEs. Η μείωση των κατακρημνίσεων, η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη με συνέπεια την αύξηση της εξατμισοδιαπνοής- έχουν επιβαρύνει τα επίπεδα του υδροφόρου ορίζοντα (Kløve et al., 2013).

Στην Εικόνα 1.4 απεικονίζονται οι πιθανές επιπτώσεις που προκαλεί η άντληση υπόγειων υδάτων, μέσω γεώτρησης, στα GDEs. Πιο συγκεκριμένα, εμφανίζεται η αλλαγή του καθεστώτος και της ποιότητας των υπογείων υδάτων ως αποτέλεσμα των γεωργικών πρακτικών, της αστικής και βιομηχανικής ανάπτυξης και της δασοκομίας. Η υπεράντληση των υπογείων υδάτων επιφέρει επιπτώσεις όπως μείωση των υδροβιότοπων, μείωση της ροής των επιφανειακών ποταμών και υποβάθμιση της χερσαίας βλάστησης που μέσω των ριζών τους απορροφούν νερό για την ανάπτυξη τους (Eamus et al., 2016). Εν κατακλείδι, οι πιέσεις στα υπόγεια ύδατα και κατά συνέπεια στα οικοσυστήματα που εξαρτώνται από αυτά (GDEs) μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως ακολούθως:

1. Παγκόσμια αύξηση του πληθυσμού, με αποτέλεσμα την αύξηση ζήτησης σε νερό
2. Γεωργική ανάπτυξη και ο υποβιβασμός του φυσικού περιβάλλοντος
3. Συνεχής αύξηση του αστικού ιστού
4. Βιομηχανική δραστηριότητα
5. Τουρισμός
6. Κλιματική αλλαγή

Η χάραξη πολιτικών για την προστασία και διατήρηση των GDEs είναι δυνατή μόνο εάν υπάρχει γνώση σχετικά με την θέση, την έκτασή και τον βαθμό εξάρτησης τους από τα υπόγεια ύδατα (Hoyos et al., 2016). Ωστόσο, σύμφωνα με τους Howard και Merrifield (2023) και Gou et al. (2015), στις περισσότερες περιπτώσεις η θέση των GDEs δεν είναι γνωστή. Για τον λόγο αυτό είναι σημαντικό να αναπτυχθούν περαιτέρω οι μέθοδοι χαρτογράφησης των GDEs.



Εικόνα 1. 4 Απεικόνιση των πιθανών επιπτώσεων από την άντληση υπογείων υδάτων στα GDEs (Πηγή: Eamus et al., 2016)

1.3 Μέθοδοι χαρτογράφησης GDEs

Πολλές μελέτες έχουν εστιάσει στον εντοπισμό των GDEs σε συγκεκριμένες περιοχές με τη χρήση επίγειων μετρήσεων. Ωστόσο, η πρόσφατη εξέλιξη στις τεχνολογίες της δορυφορικής τηλεπισκόπησης και η διασύνδεσή τους με τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS) παρέχουν εναλλακτικές μεθόδους για την χαρτογράφηση των GDEs σε εκτεταμένη γεωγραφική έκταση (Hoyos et al., 2016). Ακολουθεί βιβλιογραφική ανασκόπηση μεθόδων βασισμένων σε χρήση GIS για τη χαρτογράφηση των GDEs. Σημειώνεται ότι οι συγκεκριμένες μέθοδοι χαρτογραφούν τις περιοχές στις οποίες δυνητικά εμφανίζονται GDEs και όχι την ακριβή τους θέση. Ωστόσο, η συνδυασμένη χρήση της συλλογής δεδομένων έρευνας πεδίου και της τηλεπισκόπησης με τη χρήση GIS έχει μεγαλύτερες δυνατότητες καθώς με τον τρόπο αυτό μπορούν να αποκτηθούν λεπτομερείς παρατηρήσεις που συμβάλλουν στην κατανόηση των διαφορών μεταξύ των οικοσυστημάτων, τα οποία υποστηρίζονται από υπόγεια ύδατα, αλλά και εκείνων που δεν υποστηρίζονται (Malczewski and Rinner, 2015).

1.3.1 Ψηφιακής τηλεπισκόπησης (Remote sensing)

Το κυριότερο πλεονέκτημα της χρήσης δορυφορικών εικόνων είναι ότι προσφέρουν παγκόσμια κάλυψη, χωρικά και χρονικά συνεχή δεδομένα, με χωρική ανάλυση που πλέον φτάνει έως τα 30cm ακρίβεια (δορυφόρος World View 3). Σύμφωνα με τους Barron et al. (2014), ο προσδιορισμός δυνητικών θέσεων GDEs με τη χρήση ψηφιακής τηλεπισκόπησης βασίζεται σε 2 πολυφασματικούς δείκτες: α) ο Κανονικοποιημένος Δείκτης Βλάστησης (NDVI), ένας αδιάστατος δείκτης που περιγράφει τη διαφορά μεταξύ της ορατής και της

εγγύς υπέρυθρης ανάκλασης της φυτικής κάλυψης και ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της πυκνότητας του πράσινου σε μια περιοχή (Weier and Herring, 2000) και β) ο Κανονικοποιημένος Δείκτης Υγρασίας (NDWI), ο οποίος εκφράζει τα επίπεδα υγρασίας στη βλάστηση.

Η συνδυασμένη ανάλυση των τιμών NDVI και NDWI στην αρχή και στο τέλος μιας ξηρής περιόδου επιτρέπει τον χωρικό προσδιορισμό των GDEs και συγκεκριμένα τον καθορισμό της πιθανότητα εύρεσης GDEs σε μια περιοχή. Οι σταθερές τιμές NDVI και NDWI μεταξύ δύο ημερομηνιών υποδεικνύουν κατηγορίες κάλυψης γης για τις οποίες οι τιμές πολυφασματικού δείκτη δεν αλλάζουν κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου. Υπάρχουν τρεις τύποι θεωρούμενων κατηγοριών κάλυψης γης με βάση την ανάλυση των τιμών των δεικτών NDVI και NDWI σε μια συγκεκριμένη περιοχή και μπορεί αυτή να χαρακτηριστεί ως έκταση (Barron et al., 2014):

- 1) με βλάστηση που έχει σταθερή πρόσβαση σε νερό, δηλαδή πιθανότητα εύρεσης GDEs,
- 2) υδάτινου στοιχείου
- 3) με καμία πιθανότητα εύρεσης GDEs

Παρόλα αυτά, αυτή η μέθοδος έχει ένα σημαντικό περιορισμό, τείνει να είναι πιο ακριβείς σε περιοχές όπου το κλίμα χαρακτηρίζεται ξηρό (Eamus et al., 2015).

Εν κατακλείδι, η χρήση της τηλεπισκόπησης παρέχει σημαντικές πληροφορίες για την ανίχνευση και την αξιολόγηση των GDEs, καθώς και για την παρακολούθηση της βλάστησης και των υδρολογικών συνθηκών μιας περιοχής.

1.3.2 Πολυκριτηριακή ανάλυση (MCDA)

Τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS) διαθέτουν δυνατότητες παραγωγής, αποθήκευσης, ανάλυσης και οπτικοποίησης χωρικών δεδομένων, προσφέροντας μεγάλες δυνατότητες για την αντιμετώπιση θεμάτων διαχείρισης περιβαλλοντικών θεμάτων. Ωστόσο, στο πλαίσιο του χωροταξικού σχεδιασμού, όπως και σε κάθε άλλη χωροταξική απόφαση, προκύπτουν προβλήματα που συνήθως εμπεριέχουν ένα μεγάλο φάσμα εφικτών εναλλακτικών λύσεων, με ενίοτε πολλαπλά, αντικρουόμενα κριτήρια αξιολόγησης (Zhang et al., 2012). Οι τεχνικές Ανάλυσης Απόφασης Πολλαπλών Κριτηρίων (MCDA) προσφέρουν μια δομημένη μέθοδο για την αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων και την επιλογή της πιο ικανοποιητικής, λαμβάνοντας υπόψη τις προτεραιότητες του αρμόδιου για τη λήψη αποφάσεων. Σε σχέση με την αντιμετώπιση γεωγραφικών ζητημάτων, η MCDA αποτελεί συνήθη προσέγγιση για την ανάλυση αποφάσεων στο πλαίσιο του περιβάλλοντος GIS, καθώς συνδυάζει την ψηφιακή τηλεπισκόπηση με την χρήση συμβατικών επιπέδων GIS (Zhang et al., 2012). Εφεξής η συνδυασμένη χρήση των εργαλείων MCDA και GIS θα αναφέρεται ως GIS-MCDA. Η χρήση της μεθόδου GIS-MCDA απαιτεί τον προσδιορισμό των εξής χαρακτηριστικών (Zarghami and Szidarovszky, 2011):

1. **Υπεύθυνος Λήψης Αποφάσεων:** Το πρόσωπο ή την ομάδα που έχει το καθήκον να πάρει την τελική απόφαση. Ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων ορίζει τις προτεραιότητες, τους στόχους και τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων.

2. **Εναλλακτικές Λύσεις:** Οι πιθανές επιλογές ή διαθέσιμες δράσεις που εξετάζονται για την επίλυση του προβλήματος. Κάθε εναλλακτική λύση μπορεί να έχει διαφορετικά πλεονεκτήματα και αδυναμίες σε σχέση με τα κριτήρια αξιολόγησης.
3. **Κριτήρια:** Τα μέτρα ή οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση και σύγκριση των εναλλακτικών λύσεων, βάσει των οποίων θα γίνει η τελική επιλογή. Ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων πρέπει να εξισορροπήσει αυτά τα κριτήρια για να λάβει μια συνολική απόφαση.

Προσδιορίζοντας τα παραπάνω, η MCDA αποτελεί μια δομημένη μέθοδο για την αντιμετώπιση πολύπλοκων αποφάσεων, όπου υπάρχει παρουσία πολλαπλών εναλλακτικών και κριτηρίων. Επιπροσθέτως, η επίλυση πολυκριτηριακών προβλημάτων εισάγει τρεις βασικές διαδικασίες που αποτελούν θεμελιώδεις πυλώνες τόσο για το γενικό πλαίσιο της MCDA, όσο και για την ειδική περίπτωση της μεθόδου GIS-MCDA οι οποίες είναι:

1. **η κλιμάκωση:** Η διαδικασία μετατροπής δεδομένων σε μία κοινή κλίμακα, επιτρέποντας τη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών κριτηρίων. Αυτό είναι σημαντικό για τη σωστή αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων.
2. **η στάθμιση κριτηρίου:** Ο προσδιορισμός της σημαντικότητας ή βαρύτητας σε κάθε κριτήριο, αντικατοπτρίζοντας τη σημασία του στην τελική απόφαση.
3. **ο κανόνας συνδυασμού (Απόφαση):** Ο τρόπος συνδυασμού των δύο παραπάνω διαδικασιών για να υπάρξει μια συνολική αξιολόγηση και να ληφθεί η τελική απόφαση.

Αυτές οι διαδικασίες αποτελούν τη βάση για την αποτελεσματική υποστήριξη χωρικών αποφάσεων, εισάγοντας τη δομική συνοχή και την αξιολογική σαφήνεια στις πολύπλοκες αναλύσεις που απαιτούνται σε αυτό το πεδίο.

1.3.2.1 Κλιμάκωση

Οι μέθοδοι MCDA απαιτούν τη μετατροπή των κριτηρίων αξιολόγησης σε συγκρίσιμες μονάδες και αυτή η διαδικασία συχνά αναφέρεται ως μέθοδος κλιμάκωσης τιμών ή τυποποίησης. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την τυποποίηση πρωτογενών δεδομένων, με τη διαδικασία εύρους βαθμολογίας να ξεχωρίζει ως η πιο δημοφιλής μέθοδος βασισμένη σε GIS για την τυποποίηση των κριτηρίων αξιολόγησης (Malczewski & Rinner, 2015).

Η διαδικασία εύρους βαθμολογίας αποτελεί μια ειδική περίπτωση της πιο γενικής προσέγγισης της μεθόδου συνάρτησης τιμής/χρησιμότητας. Σε αυτήν τη μέθοδο, η συνάρτηση μονής (καθολικής) τιμής χρησιμοποιείται για τη μετατροπή των ακατέργαστων τιμών κριτηρίου σε τυποποιημένη μορφή. Οι προτιμήσεις, σε πολλές περιπτώσεις, θεωρούνται ως χωρικές μεταβλητές, και μπορεί να αναπτυχθεί μια τοπική μορφή συνάρτησης τιμής για να ληφθούν υπόψη οι χωρικές μεταβαλλόμενες προτιμήσεις.

Αυτές οι μέθοδοι κλιμάκωσης τιμών είναι ουσιώδους σημασίας για τη σωστή εφαρμογή των συμβατικών μεθόδων MCDA, διασφαλίζοντας τη χωρική ομοιογένεια των προτιμήσεων και επιτρέποντας την αξιολόγηση διαφορετικών επιπέδων τιμών κριτηρίου (Malczewski & Rinner, 2015).

1.3.2.2 Απόδοση βαρών

Ένα βάρος αναπαριστά μια τιμή που ανατίθεται σε ένα κριτήριο αξιολόγησης και δείχνει πόσο σημαντικό είναι σε σχέση με άλλα κριτήρια που εξετάζονται. Έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι για τον προσδιορισμό βαρών για τα κριτήρια. Στην περίπτωση της GIS-MCDA, αυτές οι μέθοδοι μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: τις ολικές και τις τοπικές μεθόδους (Malczewski & Rinner, 2015).

Οι ολικές τεχνικές περιλαμβάνουν: κατάταξη, βαθμολόγηση, σύγκριση ζευγών και μεθόδους εντροπίας. Βασίζονται στην υπόθεση της χωρικής ομοιογένειας των προτιμήσεων, αναθέτοντας ένα μόνο βάρος σε κάθε κριτήριο. Σε πολλές εφαρμογές GIS-MCDA χρησιμοποιούνται μία από τις τρεις ολικές μεθόδους βαρύτητας: α) η κατάταξη, β) η βαθμολόγηση και γ) η σύγκριση ζευγών (Malczewski 2006). Αυτές οι μέθοδοι απαιτούν από τους λήπτες αποφάσεων να δηλώσουν τις προτιμήσεις τους ως προς τα κριτήρια αξιολόγησης. Η μέθοδος εντροπίας αποτελεί εναλλακτική προσέγγιση, με βάση τη μέτρηση των πληροφοριών που περιέχονται στις τιμές του κριτηρίου (Nijkamp & Delft 1977, Hwang & Yoon 1981). Για να ληφθεί υπόψη η χωρική διαφοροποίηση των προτιμήσεων, έχουν προταθεί μέθοδοι καθορισμού τοπικών βαρών κριτηρίων, όπως οι προσαρμοσμένοι βαθμοί ομοιότητας, οι τοπικές μέθοδοι βαρύτητας βασισμένες σε εύρος και οι τοπικές μέθοδοι βαρύτητας βασισμένες σε εντροπία (Malczewski & Rinner, 2015).

1.3.2.3 Κανόνες Απόφασης

Σε βασικό επίπεδο, ένας κανόνας απόφασης είναι μια διαδικασία ή μέθοδος για τον προσδιορισμό (και την ταξινόμηση) ενός συνόλου εναλλακτικών αποφάσεων. Στην περίπτωση των GIS-MCDA, οι κανόνες απόφασης αναφέρονται στη βιβλιογραφία επίσης ως κανόνες συνδυασμού (rules of combination). Ένας κανόνας συνδυασμού ενσωματώνει τα δεδομένα και τις πληροφορίες σχετικά με τις εναλλακτικές αποφάσεις (χάρτες κριτηρίων) και τις προτιμήσεις του λήπτη αποφάσεων (βάρη κριτηρίων) σε μια συνολική αξιολόγηση των εναλλακτικών (Malczewski & Rinner, 2015).

1.4 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία (ΔΕ) στοχεύει στη χαρτογράφηση των GDEs στην Κρήτη και πιο συγκεκριμένα στην περιοχή των Χανίων, διερευνώντας την εφαρμοσιμότητα της μεθόδου GIS-MCDA η οποία προτείνεται από τους Duran-Llacer et al. (2021). Πρόκειται για μία προσεγγιστική μέθοδο που συνδυάζει πολλές παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένων συμβατικών επιπέδων (GIS), τοπογραφικών παραμέτρων, πολυφασματικών δεικτών και κλιματικών δεδομένων.

Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι κατά την βιβλιογραφική ανασκόπηση δεν εντοπίστηκαν περιπτώσεις χαρτογράφησης GDEs στον ελλαδικό χώρο, γεγονός που προσδίδει πρωτοτυπία στην παρούσα ΔΕ. Ταυτόχρονα, όμως, καθιστά μεγαλύτερη την δυσκολία εύρεσης κατάλληλων δεδομένων εισόδου στη μέθοδο. Σε αυτό το πλαίσιο, η ΔΕ συμβάλει στον εντοπισμό των τυχόν δυσκολιών στην πρόσβαση κατάλληλων δεδομένων για τη χαρτογράφηση των GDEs.

1.5 Διάρθρωση Διπλωματικής εργασίας

Η δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας υπακούει σε μια λογική ροή που εξυπηρετεί τη συνολική κατανόηση και ανάλυση των Γεωλογικών Πληροφοριακών Συστημάτων (GDEs). Παρουσιάζονται συνοπτικά τα κεφάλαια που ακολουθούν, επισημαίνοντας τον ρόλο και το περιεχόμενο κάθε ενότητας.

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγικά: Αναλύονται οι έννοιες «εξαρτώμενα από τα υπόγεια ύδατα οικοσυστήματα» και «οικοσυστημικές υπηρεσίες», καθώς και γιατί είναι σημαντική η προστασία τους και η χαρτογράφησή τους.

Κεφάλαιο 2 - Περιοχή Μελέτης: Αναλύεται η περιοχή μελέτης με έμφαση στα βασικά χαρακτηριστικά, όπως χρήσεις γης και πηγές, προσφέροντας ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για την εφαρμογή της μεθοδολογίας.

Κεφάλαιο 3 - Μεθοδολογία: Παρουσιάζεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για τη χαρτογράφηση των GDEs. Παρουσιάζονται οι παράμετροι που συνδέονται με την ύπαρξη των οικοσυστημάτων, αξιολογείται η συσχέτιση των παραμέτρων και ο τρόπος προσδιορισμού των ειδικών βαρών, τα οποία αποδίδονται σε κάθε παράμετρο, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της μεθόδου.

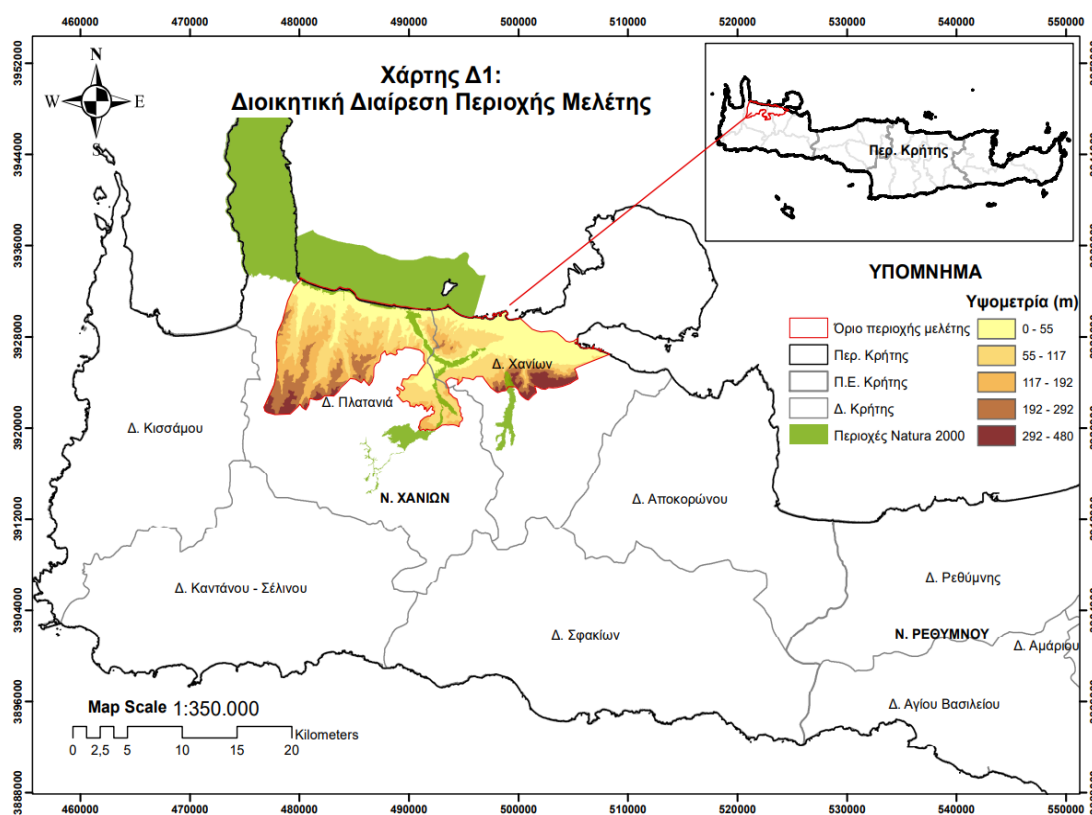
Κεφάλαιο 4 - Αποτελέσματα Εφαρμογής Μεθοδολογίας στην Περιοχή Μελέτης: Παρουσιάζονται οι χαρτογραφημένες μεταβλητές, εκτιμάται η ευαισθησία του μοντέλου και παρουσιάζεται η τελική μορφή και εφαρμογή του μοντέλου χαρτογράφησης GDEs.

Κεφάλαιο 5 - Συμπεράσματα: Παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη και διατυπώνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη.

Κεφάλαιο 2: Περιοχή μελέτης

2.1 Ορισμός περιοχής μελέτης

Η περιοχή μελέτης, ο Κάμπος Χανίων, έχει έκταση 200 τετραγωνικά χιλιόμετρα (km²) και εντοπίζεται στην περιφέρεια Κρήτης και ειδικότερα βρίσκεται στην περιφερειακή ενότητα Χανίων (Χάρτης 2.1). Η περιοχή καλύπτει μέρος των Δήμων Πλατανιά και Χανίων. Τα όρια της περιοχής μελέτης, ακολουθούν κατά προσέγγιση τα φυσικά όρια του υπόγειου υδάτινου συστήματος «Κάμπου Χανίων» (EL1300022). Στην περιοχή συναντώνται πηγές και ποταμοί που εξαρτώνται σε σημαντικό βαθμό από τα υπόγεια ύδατα και κατά συνέπεια αυξάνεται η πιθανότητα εύρεσης GDEs. Ωστόσο, η έντονη γεωργική δραστηριότητα στην περιοχή και η σημαντική εξάρτηση από τα υπόγεια ύδατα καθιστούν αναγκαία την ορθή διαχείριση των υδάτινων αποθεμάτων της περιοχής.



Χάρτης 2. 1 Διοικητική Διαίρεση Περιοχής Μελέτης (Χάρτης Δ1)

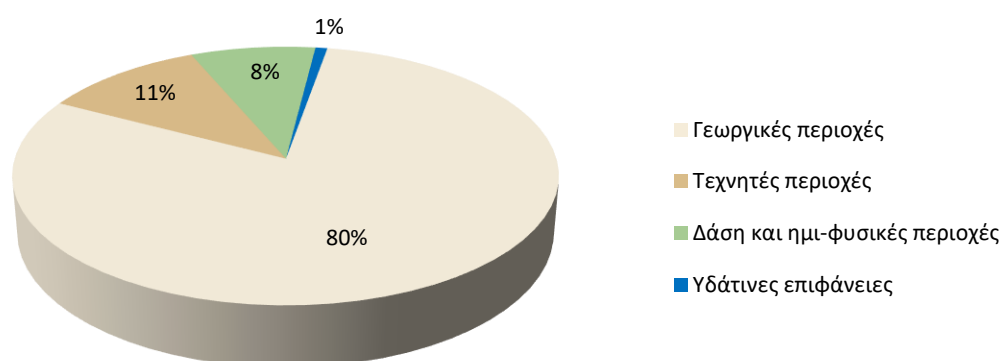
2.2 Χρήσεις γης

Οι χρήσεις γης που απαντώνται στην περιοχή μελέτης, σύμφωνα με το επίθεμα Corine Land Cover 2018 του Copernicus και συγκεκριμένα για το Επίπεδο 1, παρουσιάζονται στο Παράρτημα (Χάρτης Π.1). Οι γεωργικές καλλιέργειες αφορούν το 79,9% της έκτασης της περιοχής μελέτης (Πίνακας 2.1, Διάγραμμα 2.1). Αμέσως μετά, με ποσοστιαία επικάλυψη 10,9% λαμβάνουν θέση οι τεχνητές περιοχές, οι οποίες αφορούν κυρίως σε περιοχές οικιστικής ανάπτυξης και έργων υποδομών (λιμάνια, οδικό και σιδηροδρομικό δίκτυο κ.ά.) και εντοπίζονται οριζοντιογραφικά στο παραλιακό μέτωπο της περιοχής μελέτης. Έπειτα, η

κατηγορία δάση και ημι-φυσικές περιοχές απαντάται στο 8,4% της περιοχής μελέτης. Με ποσοστό μόλις 0,8% λαμβάνουν θέση οι υδάτινες επιφάνειες (θάλασσα, λίμνες κ.λπ.).

Πίνακας 2. 1 Ποσοστά κάλυψης χρήσεων γης που απαρτίζουν την περιοχή μελέτης (Corine Land Cover 2018)

Γεωργικές περιοχές	Τεχνητές περιοχές	Δάση και ημι-φυσικές περιοχές	Υδάτινες επιφάνειες	Γενικό άθροισμα
79,9%	10,9%	8,4%	0,8%	100,0%



Διάγραμμα 2. 1 Κατανομή χρήσεων γης που αφορούν την περιοχή μελέτης (Corine Land Cover 2018)

Για την εκπόνηση της ΔΕ έχει επιλεγθεί να γίνει χρήση πιο λεπτομερούς κατηγοριοποίησης των χρήσεων γης. Για τον λόγο αυτό ακολουθεί ανάλυση των χρήσεων γης σύμφωνα με το Επίπεδο 3 του Corine Land Cover 2018. Τα ποσοστά κάλυψης για κάθε υποκατηγορία εμφανίζονται στον Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2. 2 Εκτενής περιγραφή χρήσεων γης και ποσοστό κάλυψης τους (Corine Land Cover 2018).

Χρήσεις γης (επίπεδο 1)	Χρήσεις γης (επίπεδο 3)	Ποσοστό κάλυψης
Τεχνητές περιοχές	Ασυνεχής αστικός ιστός	8,2%
	Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα	1,5%
	Ζώνες λιμένων	0,02%
	Αεροδρόμια	0,4%
	Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	0,8%
Γεωργικές περιοχές	Οπωροφόρα δένδρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς	20,2%
	Ελαιώνες	47,9%
	Σύνθετες καλλιέργειες	5,7%

	Γη που χρησιμοποιείται κυρίως για γεωργία μαζί με σημαντικά τμήματα φυσικής βλάστησης	6,1%
Δάση και οι ημι-φυσικές περιοχές	Δάσος πλατύφυλλων	0,4%
	Φυσικοί βοσκότοποι	3,7%
	Σκληροφυλλική βλάστηση	4,3%
Υδάτινες επιφάνειες	Θάλασσες και ωκεανοί	0,8%

2.3 Επιφανειακά υδάτινα συστήματα

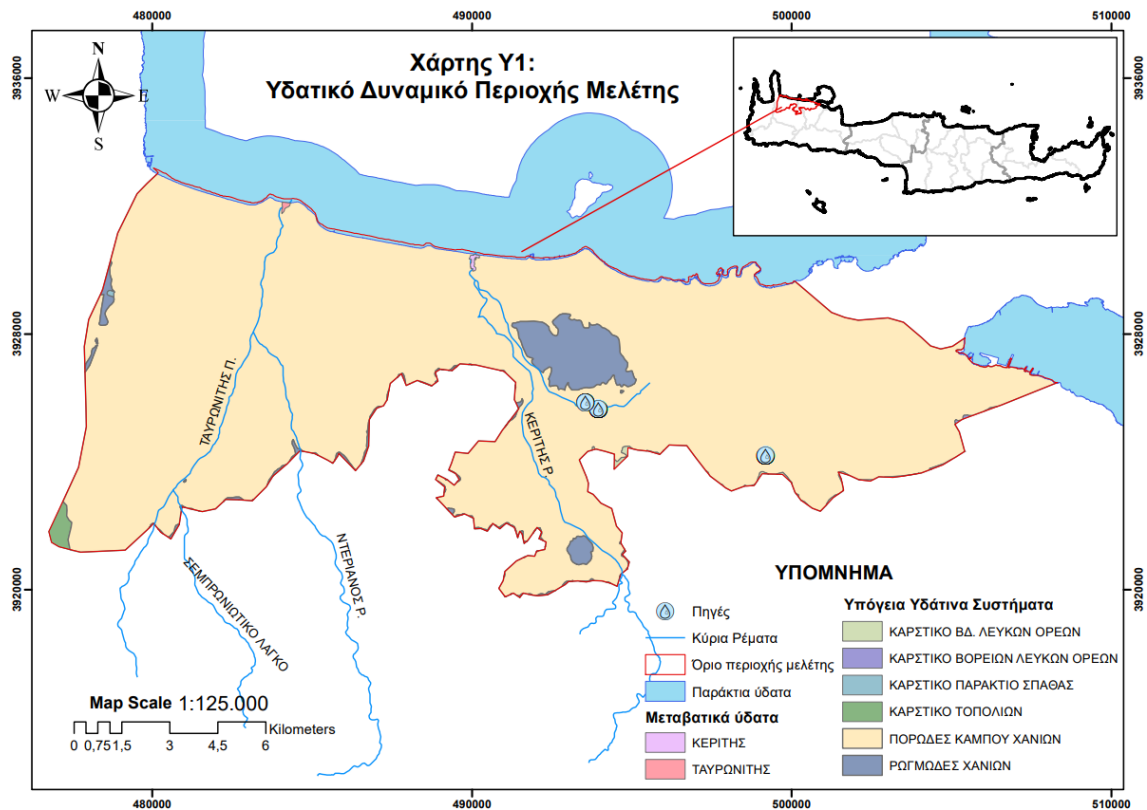
Σύμφωνα με την Οδηγία 2000/60/EK ή αλλιώς Οδηγία Πλαίσιο για τα Νερά, τα επιφανειακά υδάτινα συστήματα ορίζονται ως «διακεκριμένα και σημαντικά στοιχεία επιφανειακών υδάτων, π.χ. μια λίμνη, ένας ταμιευτήρας, ένα ρεύμα, ένας ποταμός ή μια διώρυγα, ένα τμήμα ρεύματος, ποταμού ή διώρυγας, μεταβατικά ύδατα ή ένα τμήμα παράκτιων υδάτων». Συνοψίζοντας, τα επιφανειακά υδάτινα συστήματα διαχωρίζονται σε 4 κατηγορίες:

1. Ποταμός
2. Λίμνη
3. Μεταβατικά ύδατα
4. Παράκτια ύδατα

Επιπροσθέτως, σύμφωνα με την 1^η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης (Σχέδιο Λ.Α.Π. Κρήτης, 2017), του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, τα επιφανειακά υδάτινα συστήματα διακρίνονται και ως προς το επίπεδο της ανθρώπινης επέμβασης πάνω σε αυτά και ειδικότερα σε:

1. Φυσικά υδάτινα συστήματα
2. Τεχνητά υδάτινα συστήματα (ΤΥΣ): «ένα σύστημα επιφανειακών υδάτων που δημιουργείται με δραστηριότητα του ανθρώπου» (Ορισμός σύμφωνα με Άρθρο 2, παρ. 8 Οδηγίας).
3. Ιδιαίτερος τροποποιημένα υδατικά συστήματα (ΙΤΥΣ): «ένα σύστημα επιφανειακών υδάτων του οποίου ο χαρακτήρας έχει μεταβληθεί ουσιαστικά λόγω φυσικών αλλοιώσεων από τις δραστηριότητες του ανθρώπου και το οποίο ορίζεται από το κράτος μέλος» (Ορισμός σύμφωνα με Άρθρο 2, παρ. 9 Οδηγίας).

Στην περιοχή μελέτης προσδιορίστηκαν συνολικά 12 Επιφανειακά Υδάτινα Συστήματα, των οποίων η κατανομή παρουσιάζεται στον Χάρτη 2.2.



Χάρτης 2. 2 Υδατικό Δυναμικό Περιοχής Μελέτης (Χάρτης Υ1)

2.3.1 Ποτάμια υδάτινα συστήματα

Σύμφωνα με την Οδηγία 2000/60/ΕΚ ο ορισμός του ποταμού είναι: «σύστημα εσωτερικών υδάτων το οποίο ρέει, κατά το πλείστον, στην επιφάνεια του εδάφους αλλά το οποίο μπορεί, για ένα μέρος της διαδρομής του, να ρέει και υπογείως». Η Ευρωπαϊκή Απόφαση 2013/480/ΕΚ καθορίζει τύπους για τα ποτάμια, παρέχοντας περιγραφικά δεδομένα, όπως η γεωλογία του ποταμού και το καθεστώς ροής του. Την ταξινόμηση έκανε η Μεσογειακή Γεωγραφική Ομάδα Διαβαθμονόμησης (Mediterranean Intercalibration Group, MIG) (Πίνακας 2.3), στην οποία ανήκει η Ελλάδα σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2005/646/ΕΚ.

Πίνακας 2. 3 Χαρακτηριστικά Μεσογειακού τύπου ποταμών, σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Απόφαση 2013/480/ΕΚ και την MED GIG

Τύπος	Χαρακτηρισμός Ποταμού	Λεκάνη Απορροής (km ²)	Γεωλογία	Καθεστώς ροής
R-M1	Μικρά μεσογειακά ρέματα	<100	Μικτή (εκτός από πυριτικά)	Έντονα εποχικό
R-M2	Μεσαία μεσογειακά ρέματα	100-1000	Μικτή (εκτός από πυριτικά)	Έντονα εποχικό
R-M3	Μεγάλα μεσογειακά ρέματα	1000-10000	Μικτή (εκτός από πυριτικά)	Έντονα εποχικό
R-M4	Ορεινά μεσογειακά ρέματα		Μη πυριτικό υπόβαθρο	Έντονα εποχικό
R-M5	Εποχικά ρέματα		-	Περιοδικό

Σύμφωνα με το Σχέδιο ΛΑΠ Κρήτης στην περιοχή μελέτης εντοπίζονται συνολικά 9 κύρια ποτάμια. Πιο συγκεκριμένα, ο Πίνακας 2.4, παρουσιάζει τις ονομασίες των κύριων ποταμών, όπως επίσης και σημαντικές πληροφορίες για τον τύπο του ποταμού, την κατηγορία αλλά και την αθροιστική λεκάνη απορροής (km²).

Πίνακας 2. 4 Ποτάμια υδάτινα συστήματα της περιοχής μελέτης (Πηγή: Σχέδιο ΛΑΠ Κρήτης 2017)

Όνομα ΥΣ	Κατηγορία	Μήκος (km)	Άμεση Λεκάνη Απορροής (km ²)	Αθροιστική Λεκάνη Απορροής (km ²)	Μέση Ετήσια Απορροή (hm ³)	Τύπος
ΤΑΥΡΩΝΙΤΗΣ	ΦΥΣ	3,94	7,43	130,85	23,86	R-M5
ΤΑΥΡΩΝΙΤΗΣ	ΦΥΣ	4,10	15,30	52,01	16,22	R-M5
ΤΑΥΡΩΝΙΤΗΣ	ΦΥΣ	6,72	28,43	28,43	6,50	R-M1
ΤΑΥΡΩΝΙΤΗΣ	ΦΥΣ	1,68	2,10	49,91	14,87	R-M1
ΤΑΥΡΩΝΙΤΗΣ	ΦΥΣ	9,01	21,48	21,48	8,17	R-M1
ΤΑΥΡΩΝΙΤΗΣ	ΦΥΣ	17,80	56,12	56,12	7,11	R-M1
ΚΕΡΙΤΗΣ	ΦΥΣ	4,29	17,03	180,26	84,94	R-M2
ΚΕΡΙΤΗΣ	ΙΤΥΣ	1,90	2,79	17,92	67,20	R-M1
ΚΕΡΙΤΗΣ	ΦΥΣ	10,99	80,26	145,32	16,53	R-M2
ΚΕΡΙΤΗΣ	ΦΥΣ	2,41	65,05	65,05	8,27	R-M4
ΚΕΡΙΤΗΣ	ΦΥΣ	2,25	15,12	15,12	67,00	R-M1

Τα ποτάμια υδατικά συστήματα του Πίνακα 2.4 που έχουν την ίδια ονομασία συνιστούν παραπόταμους ενός κύριου ποταμού, στην συγκεκριμένη περίπτωση των Ταυρωνίτη και Κερίτη. Παρατηρείται πως σχεδόν όλα τα ποτάμια υδατικά συστήματα ανήκουν στην κατηγορία Φυσικά Υδάτινα Συστήματα, εκτός από ένα που ανήκει στην κατηγορία Ιδιαίτερος Τροποποιημένα Υδατικά Συστήματα. Ακόμη, το μεγαλύτερο ποσοστό των ποταμών ανήκουν στον τύπο των μικρών μεσογειακών ρεμάτων με λεκάνη απορροής μικρότερη των 100 km². Ο ποταμός Ταυρωνίτης έχει παροχή τους μήνες που η βροχόπτωση είναι μεγάλη και μόλις οι βροχοπτώσεις εξασθενήσουν, αποξηραίνεται. Αντίθετα, ο ποταμός Κερίτης έχει μόνιμη ροή σχεδόν σε όλη την διάρκεια του χρόνου και τους μήνες των βροχοπτώσεων η παροχή αυξάνεται (Προύντζος, 2013).

2.3.2 Λιμναία υδάτινα συστήματα

Σύμφωνα με την Οδηγία 2000/60/ΕΚ ο ορισμός για τις λίμνες είναι: «σύστημα στάσιμων εσωτερικών επιφανειακών υδάτων». Τα λιμναία υδατικά συστήματα, σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2018/229/ΕΚ, κατηγοριοποιούνται σε τύπους λιμναίων υδατικών συστημάτων. Πιο συγκεκριμένα, η κατηγοριοποίηση πραγματοποιήθηκε από την Γεωγραφική Ομάδα Διαβαθμονόμησης «Μεσογειακές λίμνες». Οι ταμειυτήρες κατατάχθηκαν σε τύπους L-M5/7 και L-M8, με βάση την τυπολογία, το γεωλογικό υπόβαθρο και την αλκαλικότητα τους (Πίνακας 2.5).

Πίνακας 2. 5 Τύποι λιμνών (ταμιευτήρες), σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2018/229/EK

Τύπος	Χαρακτηρισμός λίμνης	Υψόμετρο (m)	Μέση ετήσια βροχόπτωση (mm) και θερμοκρασία (ο C)	Μέσο βάθος (m)	Έκταση (km ²)	Λεκάνη απορροής (km ²)	Αλκαλικότητα (meq/l)
L-M5/7	Ταμιευτήρες, βαθιές, μεγάλες, πυριτικές, «υγρότοποι»	< 1 000	> 800 και/ή < 15	> 15	0,5 — 50	< 20 000	< 1
L-M8	Ταμιευτήρες, βαθιές, μεγάλες, ασβεστολιθικές	< 1 000	—	> 15	0,5 — 50	< 20 000	> 1

Η παραπάνω κατηγοριοποίηση, σύμφωνα με το Σχέδιο ΛΑΠ Κρήτης (2017), αποτελεί κατηγοριοποίηση για τις τεχνητές λίμνες, ενώ για τις φυσικές λίμνες λαμβάνει υπόψη την βιβλιογραφία των Tsiaoussi et al. (2016) και Zervas et al. (2016) (Πίνακας 2.6).

Πίνακας 2. 6: Τύποι φυσικών λιμνών (Πηγή: Σχέδιο ΛΑΠ Κρήτης, 2017)

Τύπος	Γνωρίσματα	Λίμνης Υψόμετρο (m)	Επιφάνεια (km ²)	Μέσο Βάθος (m)	Γνωρίσματα μίξης
GR-DNL	Φυσικές λίμνες, βαθιές	0 - 1.000	> 0.5	> 9	Θερμές μονομεικτικές
GR-SNL	Φυσικές λίμνες, ρηχές	0 - 1.000	> 0.5	3 - 9	Πολυμεικτικές
GR-VSNL	Φυσικές λίμνες, πολύ ρηχές	0 - 1.000	> 0.5	< 3	Πολυμεικτικές

Στα όρια της περιοχής μελέτης, που έχει επιλεγθεί στα πλαίσια της ΔΕ, εντοπίζεται η τεχνητή λίμνη της Αγιάς, η οποία έχει χαρακτηριστεί ως προστατευόμενη περιοχή Natura 2000. Η λίμνη της Αγιάς εντάσσεται στην κατηγορία L-M5/7, ως υγρότοπος.

2.3.3 Μεταβατικά υδάτινα συστήματα

Τα μεταβατικά υδάτινα συστήματα είναι «συστήματα επιφανειακών υδάτων πλησίον του στομίου ποταμών τα οποία είναι εν μέρει αλμυρά λόγω της γειτνίασής τους με παράκτια ύδατα αλλά τα οποία επηρεάζονται ουσιαστικά από ρεύματα γλυκού νερού». Ο ορισμός δίνεται από την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2000/60/EK, άρθρο 2, παράγραφος 6. Τα μεταβατικά υδάτινα συστήματα διαχωρίστηκαν σε δύο τύπους, έχοντας ως γνώμονα τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά και την αλατότητα. Σύμφωνα με το Σχέδιο ΛΑΠ Κρήτης (2017) και τους Simboura et al. (2009), υπάρχουν 2 τύποι των μεταβατικών υδάτων, οι οποίοι είναι:

- Λιμνοθάλασσες
- Δέλτα ποταμών

Στον ακόλουθο Πίνακα 2.7 εμφανίζονται τα τυποχαρακτηριστικά των δύο κατηγοριών που προαναφέρθηκαν:

Πίνακας 2. 7: Τύποι μεταβατικών υδάτινων συστημάτων (Σχέδιο ΛΑΠ Κρήτης, 2017)

Τύπος	Όνομα	Αλατότητα	Εύρος παλίρροιας	Βαθμός Έκθεσης	Χαρακτηριστικά ανάμιξης	Βάθος
TW 1	Λιμνοθάλασσα	Ευρύαλα (5 -> 30 PSU)	Μικρο-παλίρροια (1m)	Προστατευόμενα έως πολύ προστατευόμενα	Μερικώς στρωματοποιημένα έως πλήρως αναμειγμένα	Αβαθή (<30m)
TW 2	Δέλτα / Εκβολή ποταμού	Ευρύαλα (5 -> 30 PSU)	Μικρο-παλίρροια (1m)	Προστατευόμενα έως πολύ προστατευόμενα	Μερικώς στρωματοποιημένα έως πλήρως αναμειγμένα	Αβαθή (<30m)

Βάση του Σχεδίου ΛΑΠ Κρήτης (2017), στην Κρήτη εντοπίζονται συνολικά 4 μεταβατικά υδάτινα συστήματα. Τα 2 από τα 4 βρίσκονται εντός των ορίων της περιοχής μελέτης, τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.8.

Πίνακας 2. 8: Μεταβατικά ύδατα εντός των ορίων περιοχής μελέτης (Πηγή: Σχέδιο ΛΑΠ Κρήτης, 2017)

α/α	Όνομα ΥΣ	Κατηγορία	Έκταση (km ²)	Περίμετρος (km)	Τύπος
1	ΤΑΥΡΩΝΙΤΗΣ	ΦΥΣ	0,05	1,09	TW1
2	ΚΕΡΙΤΗΣ	ΦΥΣ	0,08	1,88	TW1

Τα μεταβατικά ύδατα που απαρτίζουν την περιοχή μελέτης εντάσσονται στην κατηγορία «Λιμνοθάλασσα». Η εκβολή του ποταμού Ταυρωνίτη αποτελεί ένα αξιόλογο οικοσύστημα, ενισχύοντας την βιοποικιλότητα της περιοχής, καθώς φιλοξενεί πλούσια χλωρίδα και πανίδα (Μπούρα, 2010). Όσον αφορά τη λιμνοθάλασσα του Κερίτη διαθέτει μεγάλο όγκο νερού, καθώς η παροχή του ποταμού που το τροφοδοτεί (Κερίτης ποταμός) είναι συνεχής όλες τις εποχές.

2.3.4 Παράκτια υδάτινα συστήματα

Τα παράκτια υδάτινα συστήματα, σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2000/60/EK, ορίζονται ως τα «επιφανειακά ύδατα που βρίσκονται στην πλευρά της ξηράς μια γραμμής, κάθε σημείο της οποίας βρίσκεται σε απόσταση ενός ναυτικού μιλίου προς τη θάλασσα από το πλησιέστερο σημείο της γραμμής βάσης από την οποία μετράται το εύρος των χωρικών υδάτων και τα οποία, κατά περίπτωση, εκτείνονται μέχρι του απώτερου ορίου των μεταβατικών υδάτων». Επιπλέον, τα παράκτια ύδατα διαχωρίζονται σε τρεις κύριους τύπους (Θεοφανούδη, 2011):

- Τύπος I: Παράκτιες περιοχές με υψηλή επίδραση από εισροές γλυκού νερού
- Τύπος II: Παράκτιες περιοχές όχι άμεσα επηρεαζόμενες από εισροές γλυκού νερού

- Τύπος ΙΙΙ: Παράκτιες περιοχές που δεν επηρεάζονται από εισροές γλυκού νερού

Στην περιοχή μελέτης εντοπίζονται, στο βόρειο τμήμα της, οι ακτές κόλπου Χανίων και σύμφωνα με το Σχέδιο ΛΑΠ Κρήτης (2017), έχουν τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.9.

Πίνακας 2. 9: Παράκτια ύδατα (Πηγή: Σχέδιο ΛΑΠ Κρήτης, 2017)

Όνομα	ΥΣ Κατηγορία	Έκταση (km ²)	Περίμετρος (km)	Τύπος ΥΣ
Ακτές κόλπου Χανίων	ΦΥΣ	157,56	207,52	ΙΙΙ

2.4 Υπόγεια ύδατα

Τα υπόγεια ύδατα αποτελούν το «σύνολο των υδάτων που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους στη ζώνη κορεσμού και σε άμεση επαφή με το έδαφος ή το υπέδαφος», σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2000/60/ΕΚ. Το υπόγειο υδατικό σύστημα που εντοπίζεται εντός των ορίων της περιοχής μελέτης είναι το Πορώδες Υδροφόρο Σύστημα Κάμπου Χανίων, το οποίο σύμφωνα με το Σχέδιο ΛΑΠ χαρακτηρίζεται ως καλής ποιοτικής και ποσοτικής κατάστασης.

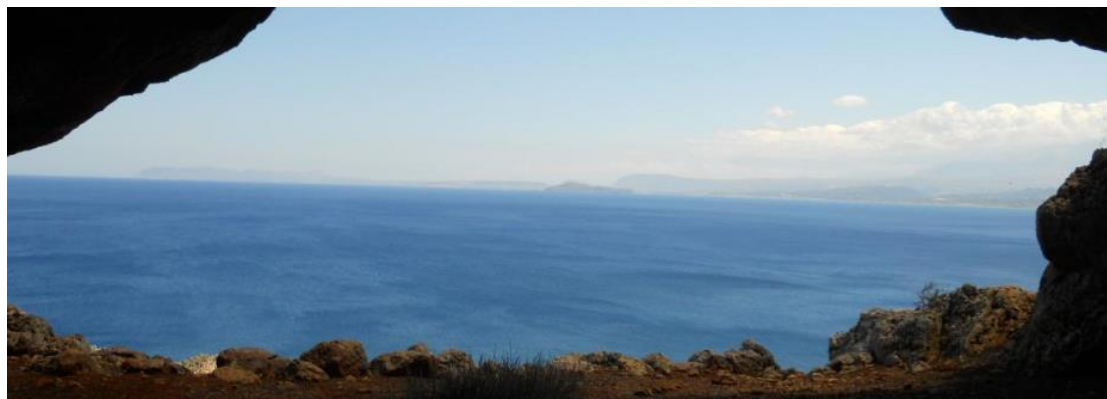
Επιπλέον, οι πηγές και αναβλύσεις συνδέονται στενά με το υδρολογικό ισοζύγιο του υπόγειου νερού. Οι πηγές εμφανίζονται όταν το υπόγειο υλικό είναι κορεσμένο με νερό, δηλαδή όταν το νερό ενός υδροφόρου ορίζοντα είναι πλήρωση με αποτέλεσμα να ξεχειλίζει στην επιφάνεια της γης ([USGS, Springs and the Water Cycle](#)). Στην περιοχή μελέτης εντοπίζονται τρεις φυσικές πηγές, οι δύο βρίσκονται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους και εντοπίζονται σε πολύ κοντινή απόσταση από την λίμνη της Αγιάς. Η πηγή που εδρεύει δυτικά της λίμνης χρησιμοποιείται για σκοπούς ύδρευσης αλλά και άρδευσης. Αντίθετα, η πηγή που βρίσκεται ανατολικά της λίμνης χρησιμοποιείται αποκλειστικά για άρδευση. Τέλος, η τρίτη πηγή εντοπίζεται νοτιοανατολικά της περιοχής μελέτης και η χρήση της προορίζεται για ύδρευση και άρδευση.

2.5 Προστατευόμενες περιοχές

Στα όρια της περιοχής μελέτης εντοπίζονται τέσσερις προστατευόμενες περιοχές (Χάρτης Π2.1), οι οποίες εντάσσονται στο ευρωπαϊκό οικολογικό δίκτυο ειδικών ζωνών, γνωστό ως «Natura 2000». Το δίκτυο αυτό δημιουργήθηκε για να εξασφαλίσει την επιβίωση των πιο πολύτιμων ειδών και οικοτόπων της Ευρώπης. Για να θεσπιστεί κάποια περιοχή ως δίκτυο Natura 2000, είτε πρέπει να πληροί τις προϋποθέσεις που αναφέρονται στην οδηγία για τους οικοτόπους (92/43/ΕΟΚ), είτε να ακολουθεί τις προϋποθέσεις της οδηγίας για τα πτηνά (79/409/ΕΚ).

Στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης, κατά μήκος της ακτογραμμής της, εντοπίζεται η προστατευόμενη περιοχή «Χερσόνησος Ροδωπού – Παραλία Μάλεμε – Κόλπος Χανίων» που ανήκει στην κατηγορία Ειδικές Ζώνες Διατήρησης (ΕΖΔ) (Εικόνα 2.1). Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται οι τόποι κοινοτικής σημασίας που έχουν χαρακτηριστεί από τα κράτη μέλη μέσω νομοθετικής πράξης (European Commission, Environment). Η προστατευόμενη αυτή περιοχή χαρακτηρίζεται από βραχώδεις ακτές και γκρεμούς, φιλοξενώντας πολλά ενδημικά είδη σε ποικίλους και καλά διατηρημένους βιότοπους (Μουσείο Φυσικής Ιστορίας Κρήτης, 2015).

Επίσης, στην περιοχή ευδοκμεί το σπάνιο είδος λιβαδιών Ποσειδωνίας στη θαλάσσια ζώνη, ενώ παράλληλα αποτελεί σημαντική τοποθεσία αναπαραγωγής της υπό προστασίας χελώνας *Caretta Caretta* (Μουσείο Φυσικής Ιστορίας Κρήτης, 2015).



Εικόνα 2. 1 Παραλία Μάλαμε όπως φαίνεται από την θέση Σπηλιαρίδια Αφράτων Πηγή: ecovalue-crete.eu/el/sites/gr4340003)

Στο κεντρικό τμήμα της περιοχής μελέτης βρίσκεται η προστατευόμενη περιοχής «Λίμνη Αγιάς – Πλατανιάς – Ρέμα και εκβολή Κερίτη – Κοιλιάδα Φασά», η οποία κατατάσσεται στην κατηγορία ΕΖΔ. Το υγρό στοιχείο της περιοχής που είναι η τεχνητή λίμνη Αγιάς (Εικόνα 2.2) και η εκβολή του Κερίτη, σε συνδυασμό με την γεωγραφική διασύνδεση με το ορεινό στοιχείο, δηλαδή τα Λευκά Όρη, δημιουργούν μεγάλη οικολογική και αισθητική αξία στην περιοχή. Επιπλέον, τα υγροτοπικά συστήματα διατηρούνται σε εξαιρετική κατάσταση με αποτέλεσμα την ανάπτυξη πλούσιας βιοποικιλότητας (Μουσείο Φυσικής Ιστορίας Κρήτης, 2015).



Εικόνα 2. 2 Λίμνη Αγιάς και στο βάθος τα Λευκά Όρη (Πηγή: <http://www.ecovalue-crete.eu/el/sites/gr4340006>)

Επιπρόσθετα, η Λίμνη Αγιάς εντάσσεται και στην κατηγορία Ζώνη Ειδικής Προστασίας (ΖΕΠ) για την ορνιθοπανίδα. Οι περιοχές ΖΕΠ έχουν χαρακτηριστεί έτσι καθώς πληρούν τις προϋποθέσεις της οδηγίας για τα πτηνά. Μια περιοχή μπορεί να κατατάσσεται και στις δύο κατηγορίες, εφόσον πληροί τις προϋποθέσεις τόσο της οδηγίας για τους οικοτόπους όσο και της οδηγίας για τα πτηνά. Η τεχνητή λίμνη της Αγιάς φιλοξενεί ποικιλία υγροτοπικών φυτοκοινοτήτων και λόγω της διασύνδεσης της με τα Λευκά Όρη αποτελεί σημαντικό μεταναστευτικό σημείο για τα παρυδάτια και υδρόβια πτηνά. Τέλος, η λίμνη τροφοδοτείται από τα υπόγεια ύδατα της περιοχής (Μουσείο Φυσικής Ιστορίας Κρήτης, 2015).

Στο Νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης συναντάται τμήμα της προστατευόμενης περιοχής «Φαράγγι Θέρισου», η οποία ανήκει στην κατηγορία ΕΖΔ (Εικόνα 2.3). Στη μικρή κοιλάδα που διαμορφώνει ευδοκιμεί πυκνή παραποτάμια βλάστηση με πλατάνια και πικροδάφνες. Παρά τη συνεχή και έντονη ανθρώπινη δραστηριότητα, οι οικότοποι της περιοχής διατηρούνται σε ικανοποιητικά επίπεδα, φιλοξενώντας σπάνια ενδημικά είδη (Μουσείο Φυσικής Ιστορίας Κρήτης, 2015). Απόρροια των παραπάνω είναι η ανάγκη για προστασία και διατήρηση της περιοχής.



Εικόνα 2. 3 Φαράγγι Θέρισου (Πηγή:<http://www.ecovalue-crete.eu/el/sites/gr4340007>)

Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία

3.1 Εισαγωγικά

Η μέθοδος χαρτογράφησης των GDEs η οποία εφαρμόζεται στο πλαίσιο της παρούσας ΔΕ προτάθηκε από τους Duran-Llacer et al. (2021) και βασίζεται στη λήψη αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων με τη χρήση GIS-MCDM. Η μέθοδος GIS-MCDM είναι μια προσέγγιση που συνδυάζει την πολυκριτηριακή ανάλυση με τη χωρική διάσταση των παραμέτρων (βλ. Ενότητα 1.3.2). Αξίζει να σημειωθεί ότι η απόδοση βαρών στα κριτήρια/παραμέτρους διαδραματίζει σημαντικό παράγοντα στην τελική μορφή του αποτελέσματος (Agulbalaji et al., 2019).

Το τελικό αποτέλεσμα της χρήσης της μεθόδου GIS-MCDM είναι η παραγωγή χάρτη. Ο χάρτης απεικονίζει την πιθανότητα εύρεσης GDEs και λαμβάνει υπόψη παραμέτρους που σχετίζονται με την ύπαρξή τους και οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στην Παράγραφο 3.2.1.

Ο τελικός χάρτης λαμβάνει τιμές με βάση την εξίσωση:

$$GDEs = (P1 * W1) + (P2 * W2) + \dots + (Pi * Wi) \quad (\text{Εξ. 1})$$

όπου P_i είναι τα εύρη κάθε αναταξινομημένης παραμέτρου που λαμβάνεται υπόψη στην πολυκριτηριακή ανάλυση και W_i τα αντίστοιχα βάρη των παραμέτρων αυτών (Duran-Llacer et al., 2021).

Ο τελικός χάρτης των GDEs ο οποίος προκύπτει από την εξίσωση (1) θα έχει ανάλυση 30m καθώς αυτή είναι η ανάλυση που υιοθετήθηκε στην παρούσα ΔΕ. Επίσης, θα περιέχει 5 κλάσεις που θα υποδεικνύουν την πιθανότητα ύπαρξης GDEs:

- “5- Very high”,
- “4- High”,
- “3- Medium”,
- “2- Low” και
- “1- Very Low”

Η πορεία παραγωγής του τελικού χάρτη παρουσιάζεται σχηματικά στο Διάγραμμα 3.1 και περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

A) Εκτίμηση/συλλογή δεδομένων για τις παραμέτρους P_i που σχετίζονται με την ύπαρξη GDEs

- Εκτίμηση/Συλλογή δεδομένων για κάθε παράμετρο στην περιοχή μελέτης
- Παραγωγή σχετικού χάρτη

B) Εκτίμηση αναταξινομημένων τιμών για κάθε παράμετρο P_i

- Προσδιορισμός του τρόπου επιρροής (θετικός/αρνητικός) κάθε παραμέτρου στην πιθανότητα εμφάνισης GDEs
- Αναταξινόμηση των τιμών της παραμέτρου με βάση 5-βάθμια κλίμακα - κλάσεις (“5- Very High”, “4- High”, “3- Medium”, “2- Low” και τέλος “1- Very Low”) η οποία εκφράζει την πιθανότητα εμφάνισης GDEs.
- Παραγωγή σχετικού χάρτη

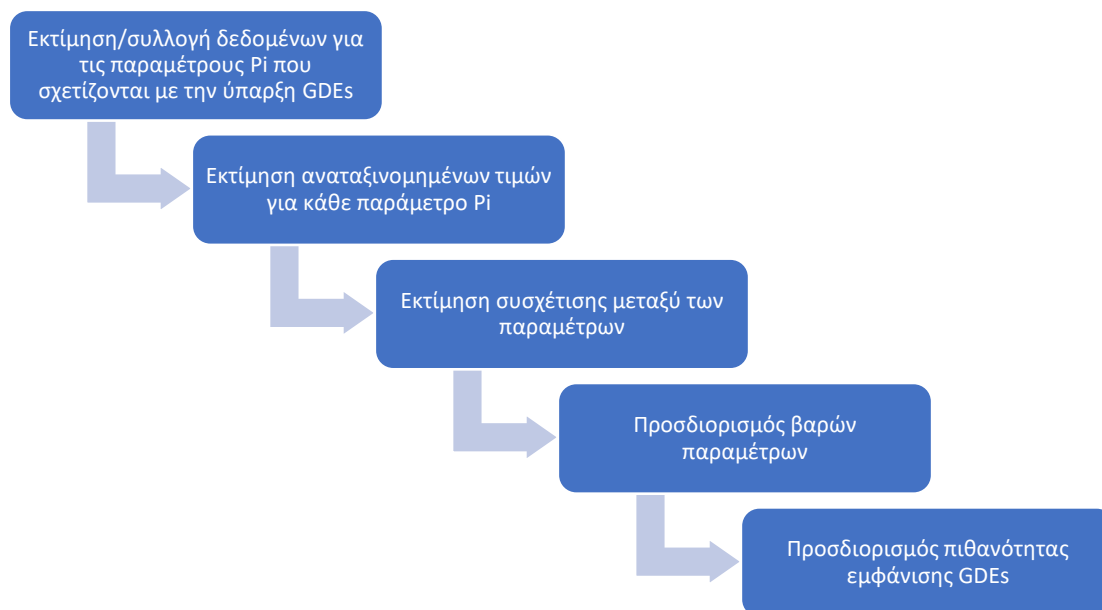
Γ) Εκτίμηση συσχέτισης μεταξύ των παραμέτρων

- Προσδιορισμός του βαθμού συσχέτισης των παραμέτρων ώστε να αποκλειστούν από το τελικό μοντέλο οι παράμετροι αυτές που εμφανίζουν υψηλή συσχέτιση

Δ) Προσδιορισμός βαρών παραμέτρων

Ε) Προσδιορισμός πιθανότητας εμφάνισης GDEs

- Παραγωγή τελικού χάρτη με βάση τη σχετική 5βάθμια κλίμακα



Διάγραμμα 3. 1 Πορεία βημάτων για τη χαρτογράφηση GDEs με βάση την προτεινόμενη μεθοδολογία των Duran-Llacer et al., 2021

Σημειώνεται ότι για την αναταξινόμηση των τιμών κάθε παραμέτρου στην 5-βαθμια κλίμακα υιοθετείται είτε η μέθοδος Natural Breaks (Jian Chen et al., 2013, Arulbalaji et al., 2019) είτε σχετική βιβλιογραφία. Η μέθοδος ταξινόμησης φυσικών διακοπών Jenks (Natural Breaks), επίσης γνωστή ως μέθοδος βελτιστοποίησης Jenks (optimization method), αναδεικνύεται ως αποτελεσματική προσέγγιση για την ομαδοποίηση δεδομένων σε διαφορετικές κλάσεις. Ο στόχος της μεθόδου είναι να πετύχει τη βέλτιστη διάταξη των τιμών, με ελαχιστοποίηση της μέσης απόκλισης κάθε τάξης από τη μέση τιμή της, ενώ ταυτόχρονα μεγιστοποιεί την απόκλιση κάθε κατηγορίας από τους μέσους όρους των άλλων ομάδων. Οι κλάσεις διαμορφώνονται με βάση τις σημαντικές αλλαγές στις τιμές των δεδομένων, ενισχύοντας την ικανότητα του συστήματος να αποτυπώνει αποτελεσματικά τη γεωγραφική ποικιλομορφία (Jian Chen et al., 2013).

3.2 Παράμετροι που σχετίζονται με την ύπαρξη GDEs

Οι παράμετροι οι οποίες σχετίζονται με την ύπαρξη GDEs σύμφωνα με τους Duran-Llacer et al. (2021) και λαμβάνονται υπόψη στην Εξ. 1 είναι στο σύνολο 18 και χωρίζονται στις εξής

τέσσερις κατηγορίες: τα Συμβατικά Επίπεδα GIS, τις Τοπογραφικές Παραμέτρους, τους Πολυφασματικούς Δείκτες και τέλος τις Κλιματικές Μεταβλητές. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή κάθε παραμέτρου και ο τρόπος επιρροής τους στην ύπαρξη GDEs. Σημειώνεται ότι οι χάρτες οι οποίοι απεικονίζουν τις τιμές των παραμέτρων για την περιοχή μελέτης βρίσκονται στο Παράρτημα της ΔΕ.

3.2.1 Συμβατικά Επίπεδα GIS

Η **Γεωλογία (Geology, Gg)** έχει καθοριστική συμβολή στην συμπεριφορά των υπόγειων υδάτων στους υπόγειους υδροφορείς. Πιο συγκεκριμένα, γεωλογικά χαρακτηριστικά, όπως η διαπερατότητα, επηρεάζουν τη ροή του νερού που διέρχεται μέσα από τους σχηματισμούς (Stringfield et al., 1979). Συνεπώς, όσο πιο υδροπερατός είναι ένας γεωλογικός σχηματισμός, τόσο περισσότερο συμβάλει στη ροή των υπόγειων υδάτων και στην ενδεχόμενη ύπαρξη GDEs. Για το λόγο αυτό, στο πλαίσιο της ΔΕ οι σχηματισμοί με μεγάλη υδατοπερατότητα κατατάσσονται στην κλάση “5- Very high” ως προς την πιθανότητα εμφάνισης GDEs, ενώ οι σχηματισμοί με μικρή υδατοπερατότητα ανήκουν στην κλάση “1- Very Low”, αντιστοιχία την οποία υιοθέτησαν επίσης οι Duran-Llacer et al. (2021). Οι γεωλογικοί σχηματισμοί της περιοχής μελέτης αντλήθηκαν από τα γεωλογικά φύλλα του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ) (βλ. Παράρτημα, Χάρτη Π.1). Τα φύλλα αυτά εμπεριέχουν μεγάλη πληροφορία σχετικά με τους σχηματισμούς και την υδατοπερατότητα τους, η οποία αξιοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της κλάσης τους.

Η **Χρήση και Κάλυψη Γης (Land use/cover, LUC)** επηρεάζουν τα υπόγεια ύδατα αφού καθορίζουν υδρολογικές διεργασίες, όπως η διήθηση και η απορροή, και επιπλέον είναι πιθανόν να έχουν επιπτώσεις και στην ποιότητά τους. Οι κατηγορίες LUC, όπως τα δάση και οι γεωργικές εκτάσεις ευνοούν την επανοτροφοδότηση των υπόγειων υδάτων σε σχέση με τις δομημένες εκτάσεις και τις βραχώδεις επιφάνειες και κατά συνέπεια σε αυτές αποδόθηκε υψηλότερη κλάση. Ομοίως υψηλότερη κλάση αποδόθηκε και στα υδάτινα σώματα τα οποία είτε αποτελούν GDEs είτε επανατροφοδοτούν τα υπόγεια ύδατα. Σημειώνεται ότι στο πλαίσιο της ΔΕ τα δεδομένα για τις χρήσεις γης (βλ. Παράρτημα, Χάρτη Π.2) προέκυψαν από το Copernicus και πιο συγκεκριμένα από αρχείο του Corine Land Cover 2018, το οποίο παρέχει συνεκτικές και θεματικά λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με την κάλυψη γης και τις αλλαγές στην κάλυψη γης σε ολόκληρη την Ευρώπη.

Η **Γεωμορφολογία (Geomorphology, Gm)** διαδραματίζει κυρίαρχο ρόλο στην κίνηση και την αποθήκευση του υπόγειου νερού (Mallik et al., 2015), καθώς επηρεάζει σημαντικά την επιφανειακή ροή και ως εκ τούτου την εμφάνιση, τη διήθηση και την επαναφόρτιση του υδροφορέα (Abijith et al., 2020). Στην παρούσα μελέτη, τα γεωμορφολογικά δεδομένα (βλ. Παράρτημα, Χάρτη Π.3) αντλήθηκαν από τον λιθολογικό χάρτη του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας του έτους 2019 ([Διαδικτυακή Πύλη Γεωχωρικών Πληροφοριών Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας](#)). Στους λιθολογικούς σχηματισμούς που απαντώνται στην περιοχή μελέτης αποδόθηκαν τιμές της 5βάθμιας κλίμακας πιθανότητας εμφάνισης GDEs με βάση την περατότητα τους (υψηλότερη περατότητα συνεπάγεται μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης GDEs).

3.2.2 Τοπογραφικές Παράμετροι

Η **Υψομετρική πληροφορία (Elevation, E)** καθορίζει σημαντικά την πιθανότητα εμφάνισης GDEs σε μια περιοχή, καθώς όσο μεγαλύτερο είναι το υψόμετρο τόσο μικρότερη είναι η πιθανότητα εμφάνισης GDEs, επειδή το δυναμικό του υπόγειου υδροφορέα μειώνεται (Duran-Llacer et al., 2021). Η υψομετρική πληροφορία της περιοχής μελέτης αντλήθηκε από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) του Copernicus και έχει ανάλυση 25m. Η κατηγοριοποίηση των τιμών της παραμέτρου πραγματοποιήθηκε μέσω της μεθόδου Natural Breaks και υψηλά βάρη δόθηκαν στις χαμηλές τιμές του υψομέτρου (βλ. Παράρτημα, Χάρτη Π.4).

Η **Κλίση (S)** της φυσικής γήινης επιφάνειας αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό για την εμφάνιση GDEs σε μια περιοχή, γιατί εκφράζει ποσοτικά πόσο απότομη είναι η επιφάνεια του εδάφους. Η κλίση μπορεί να μετρηθεί είτε ως μοίρες, είτε ως ποσοστό επί τις εκατό. Πιο συγκεκριμένα, μια επίπεδη επιφάνεια απεικονίζεται με την τιμή 0%, ενώ μια επιφάνεια σε κλίση 45 μοιρών απεικονίζεται με ποσοστό 100% και όσο η φυσική γήινη επιφάνεια γίνεται πιο κατακόρυφη, τόσο το ποσοστό απεικόνισης ανεβαίνει εκθετικά. Είναι προφανές πως η επιφανειακή απορροή και ο ρυθμός διήθησης επηρεάζονται ουσιαστικά από την τιμή της κλίσης (Duran-Llacer et al., 2021). Επιπλέον, απότομη κλίση συνεπάγεται ταχεία απορροή κατά την διάρκεια μιας βροχόπτωσης, αυξημένο ρυθμό διάβρωσης και μικρότερο δυναμικό επαναφόρτισης των υπογείων υδάτων. Κατά συνέπεια, μεγάλες κλίσεις υποδεικνύουν μικρότερη πιθανότητα εμφάνισης GDEs. Στην παρούσα ΔΕ, ο χάρτης κλίσεων δημιουργήθηκε μέσω του εργαλείου Slope (Spatial Analyst) από την εργαλειοθήκη του ArcToolBox, με μοναδικό αρχικό δεδομένο το DEM. Τέλος, η κατηγοριοποίηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο Natural Breaks (βλ. Παράρτημα, Χάρτη Π.5).

Η **Καμπυλότητα (Curvature, Ct)** είναι η ποσοτική έκφραση της φύσης του προφίλ της επιφάνειας και μπορεί να είναι κοίλη ή κυρτή. Ακολουθεί η ερμηνεία των τιμών που μπορεί να λάβει:

- **Θετική καμπυλότητα:** Αν η καμπυλότητα είναι θετική σε ένα σημείο, τότε σημαίνει ότι η επιφάνεια είναι κυρτή προς τα έξω στο συγκεκριμένο σημείο, δηλαδή εντοπίζεται λόφος ή βουνό.
- **Αρνητική καμπυλότητα:** Αν η καμπυλότητα είναι αρνητική σε ένα σημείο, τότε η επιφάνεια είναι κοίλη προς τα έξω στο συγκεκριμένο σημείο, δηλαδή στην περιοχή εκείνη εντοπίζεται κοιλάδα.
- **Μηδενική καμπυλότητα:** Όταν η καμπυλότητα είναι μηδενική, η επιφάνεια είναι επίπεδη σε αυτό το σημείο, δηλαδή υποδηλώνει πεδιάδα.

Όσο πιο κοίλη είναι η επιφάνεια τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα ύπαρξης GDEs (Duran-Llacer et al., 2021). Ο χάρτης καμπυλότητας της φυσικής γήινης επιφάνειας δημιουργήθηκε μέσω του εργαλείου Curvature (Spatial Analyst) από την εργαλειοθήκη του ArcToolBox, με μοναδικό αρχικό δεδομένο το DEM (βλ. Παράρτημα, Χάρτη Π.6). Τέλος, η κατηγοριοποίηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο Natural Breaks και την εντολή Reclassify από την εργαλειοθήκη του ArcToolBox.

Η **Εγγύτητα σε Ποτάμια και Υδάτινα Σώματα (Proximity to rivers and water bodies, Prwb)** αποτελεί σημαντική παράμετρο για τη χαρτογράφηση των GDEs, καθώς αυτά τα οικοσυστήματα εξαρτώνται από τη βασική ροή των ποταμών, ιδίως κατά τη διάρκεια των ξηρών περιόδων σε εποχικά ξηρά κλίματα ή σε μόνιμα ξηρά κλίματα σε ξηρές ζώνες (Duran-Llacer et al., 2021). Συνεπώς, ποτάμια, χείμαρροι και παρακείμενα υδάτινα και παρόχθια

οικοσυστήματα που τους ξηρούς μήνες συνεχίζουν να έχουν ροή μπορούν να ταξινομηθούν ως GDE (Duran-Llacer et al., 2021). Η μέθοδος προσδιορισμού της τιμής του δείκτη Prwb που χρησιμοποιήθηκε στην ΔΕ είναι η Ευκλείδεια απόσταση, με μέγιστη απόσταση τα 3,5χλμ για να καλύπτει όλη την περιοχή μελέτης, μέσω του εργαλείου Euclidean Distance, του ArcToolBox (βλ. Παράρτημα, Χάρτη Π.7).

Η **Συσσώρευση ροής (Flow accumulation, Fa)** εκφράζει την κίνηση/ροή του νερού σε μια επιφάνεια (απορροή) και υπολογίζεται ως ο αριθμός των κελιών ή η έκταση η οποία συνεισφέρει στην απορροή για μια ψηφίδα/εικονοστοιχείο ενός χάρτη. Τα κελιά εξόδου με υψηλή συσσώρευση ροής -αν δεν αποτελούν ήδη υδάτινα σώματα όπως ποτάμι ή ρέμα- θεωρούνται σημεία με υψηλή υγρασία και συνεπώς υπάρχει μεγάλη πιθανότητα εύρεσης GDEs (Münch and Conrad, 2006). Στην παρούσα ΔΕ, σε κάθε εικονοστοιχείο του χάρτη της περιοχής μελέτης υπολογίστηκε ο αριθμός των κελιών που ρέουν στο δεδομένο κελί μέσω της εντολής Flow Accumulation, από το ArcToolBox (βλ. Παράρτημα, Χάρτη Π.8). Για την εκτέλεση της εντολής είναι απαραίτητο να δημιουργηθεί, αρχικά, το επίθεμα κατεύθυνσης ροής των επιφανειακών υδάτων (Flow Direction). Η εντολή Flow Direction, η οποία βρίσκεται στην εργαλειοθήκη (ArcToolBox) του λογισμικού ArcMap 8.10, είναι μια συνάρτηση όπου ως δεδομένο εισόδου χρειάζεται ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους για να δημιουργήσει ένα καινούριο raster επίθεμα. Αυτό κατευθύνει την ροή από κάθε εικονοστοιχείο (pixel) προς τα χαμηλότερα υψόμετρα, σε εκείνο δηλαδή με την πιο απότομη κλίση. Τέλος, η κατηγοριοποίηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο Natural Breaks.

Η **Υδρογραφική Πυκνότητα (Drainage density, Dd)** διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη διαθεσιμότητα και τη ρύπανση των υπόγειων υδάτων. Η Dd υπολογίζεται ως το συνολικό μήκος των ρεμάτων διαιρούμενο με τη συνολική έκταση της λεκάνης απορροής, όπως αναφέρουν οι Ahmed and Pradhan (2019). Επιπλέον, οι τιμές που λαμβάνει είναι αντιστρόφως ανάλογες της διαπερατότητας, ενώ ταυτόχρονα συνιστά πολύ σημαντική υδρολογική παράμετρο για τον έλεγχο του δυναμικού των υπόγειων υδάτων. Η υψηλή υδρογραφική πυκνότητα υποδεικνύει χαμηλή διήθηση, ενώ σε περίπτωση χαμηλής πυκνότητας αποστράγγισης η απορροή είναι λιγότερη και η διήθηση μεγαλύτερη (Arulbalaji et al., 2019). Συνεπώς, στη χαμηλή πυκνότητα εντοπίζεται υψηλό δυναμικό για τα υπόγεια ύδατα και μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης GDEs. Οι υψηλές κλάσεις της 5βάθμιας κλίμακας αποδόθηκαν στις χαμηλές τιμές της πυκνότητας αποστράγγισης και τα χαμηλά βάρη στις υψηλές τιμές. Η κατηγοριοποίηση των τιμών πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο των Natural Breaks. Για τη δημιουργία του χάρτη πυκνότητας αποστράγγισης της περιοχής μελέτης αξιοποιήθηκε η παράμετρος Συσσώρευσης Ροής (Flow accumulation). Πιο συγκεκριμένα, από τον χάρτη Συσσώρευσης Ροής (βλ. Παράρτημα, Χάρτη Π.8) απομονώθηκαν οι περιοχές (κελιά) που έχουν τιμή μεγαλύτερη από 100, δηλαδή τα κελιά στα οποία απορρέουν περισσότερα από 100 ανάντη κελιά. Αυτό έγινε ώστε να ληφθούν υπόψη στον υπολογισμό της Υδρογραφικής Πυκνότητας όχι μόνο τα κύρια ρέματα/ποτάμια της περιοχής αλλά και περιοχές που σε συνθήκες βροχόπτωσης αποκτούν μικρή έως πολύ μεγάλη επιφανειακή απορροή. Η επιλογή αυτή πραγματοποιήθηκε μέσα από το Raster Calculator χρησιμοποιώντας την εξής εξίσωση:

$$\text{Flow Accumulation} > 100 \quad (\text{Εξ. 2})$$

Σημειώνεται ότι ο χάρτης Π.8 (Παράρτημα) δημιουργήθηκε με ανάλυση 30m και άρα τα 100 κελιά καλύπτουν μια έκταση συνολικά 9 εκτάρια. Συνεπώς, εφαρμόζοντας την Εξ.2 επιλέγονται τα κελιά τα οποία δέχονται την απορροή υδάτων από μία έκταση 0,09Km².

Έπειτα, αφότου απομονώθηκε το υδρογραφικό δίκτυο ($Fa > 100$) λαμβάνοντας την τιμή 1, ενώ όλα τα υπόλοιπα στοιχεία πήραν την τιμή 0, η μετατροπή τους από ψηφιδωτό σε διανυσματικό αρχείο πραγματοποιήθηκε με την εντολή «Raster to Polyline» μέσω της εργαλειοθήκης ArcToolBox. Επιπροσθέτως, με την εντολή Line Density, εισάγοντας το διανυσματικό αρχείο που δημιουργήθηκε στο προηγούμενο βήμα, δημιουργήθηκε ο τελικός χάρτης υδρογραφικής πυκνότητας (βλ. Παράρτημα, Χάρτη Π.9). Τέλος, η μέθοδος κατηγοριοποίησης των τιμών της παραμέτρου που χρησιμοποιήθηκε είναι η μέθοδος Natural Breaks.

Η Πυκνότητα φωτογράμμωσης (Lineament density, Ld) απεικονίζει την πυκνότητα των ρηγματώσεων της περιοχής μελέτης, παράμετρος η οποία σχετίζεται με την ύπαρξη GDEs καθώς τα ρήγματα και οι ζώνες διάρρηξης οδηγούν σε αυξημένη περατότητα και πορώδες. Έχει παρατηρηθεί πως όσο αυξάνεται η απόσταση από τις ρηγματώσεις τόσο μειώνεται το υπόγειο υδατικό δυναμικό (Agulbalaji et al., 2019). Συνεπώς, υψηλή πιθανότητα εμφάνισης GDEs (υψηλές κλάσεις της 5βάθμιας κλίμακας) αποδίδεται στις τιμές υψηλής πυκνότητας και χαμηλή πιθανότητα εμφάνισης GDEs (χαμηλές κλάσεις της 5βάθμιας κλίμακας) στις τιμές χαμηλής πυκνότητας. Για τη δημιουργία του χάρτη πυκνότητας φωτογράμμωσης χρησιμοποιήθηκαν τα ρήγματα της περιοχής μελέτης, τα οποία αντλήθηκαν από την ιστοσελίδα της αποκεντρωμένης διοίκησης Κρήτης. Η εντολή που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή του χάρτη αυτού είναι η εντολή Line Density με δεδομένα εισόδου τα ρήγματα της περιοχής μελέτης (βλ. Παράρτημα, Χάρτη Π.10). Τέλος, η κατηγοριοποίηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο Natural Breaks.

Ο Τοπογραφικός Δείκτης Υγρασίας (Topographic Wetness Index, TWI) βασίζεται στην ιδέα ότι το προφίλ του εδάφους ελέγχει την κατανομή του νερού και τις περιοχές όπου οι συνθήκες του ρυθμού διήθησης υπερβαίνουν την ικανότητα αποθήκευσης του εδαφικού υλικού (Qadir et al., 2020). Επομένως, οι υψηλές τιμές του δείκτη υποδηλώνουν υψηλή πιθανότητα ύπαρξης υπόγειων υδάτων και κατ' επέκταση εμφάνισης GDEs. Για την εκτίμηση της τιμής του δείκτη TWI και τη δημιουργία του σχετικού χάρτη χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση (Qadir et al., 2020):

$$TWI = \ln \left(\frac{\alpha}{\tan \beta} \right) \quad (\text{Εξ. 3})$$

Όπου α είναι η συσσωρευμένη ροή και όπου β είναι η τοπογραφική κλίση σε ακτίνια (rad). Η δημιουργία του χάρτη δεν ήταν χρονοβόρα, καθώς για την παράμετρο α χρησιμοποιήθηκε η παράμετρος Συσσώρευση Ροής που έχει υπολογιστεί ήδη (βλ. Παράρτημα, Χάρτη Π.8), ενώ η παράμετρος β αντιστοιχεί στην κλίση της περιοχής μελέτης (βλ. Παράρτημα, Χάρτη Π.5). Παρόλα αυτά, για την εκτέλεση της Εξ. 3 οι δύο παράμετροι πρέπει να ανήκουν στην ίδια μονάδα μέτρησης και για αυτόν τον λόγο η κλίση μετατράπηκε σε Ακτίνια (Rad). Η μετατροπή πραγματοποιήθηκε μέσω του Raster Calculator, όπου το επίθεμα Slope πολλαπλασιάστηκε με τον αριθμό 0,01745 διότι μία μοίρα ισοδυναμεί με αυτόν τον αριθμό. Επίσης, για την δημιουργία του χάρτη χρησιμοποιήθηκε η Εξ.3 μέσω του Raster calculator (βλ. Παράρτημα, Χάρτη Π.11). Τέλος, η κατηγοριοποίηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο Natural Breaks.

Ο Τοπογραφικός Δείκτης Θέσης (Topographic Position Index, TPI) είναι ένα πολύτιμο εργαλείο στην ανάλυση του εδάφους και την κατηγοριοποίηση της γεωμορφολογίας. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για τον χαρακτηρισμό και την αναγνώριση διάφορων γεωμορφών με βάση την τοπική τοπογραφική θέση κάθε εικονοστοιχείου στο DEM. Ο TPI χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τις γεωμορφολογικές μορφές, όπως πλαγιές, πεδιάδες, κορυφές, φαράγγια κ.ά.

(Abdullah & Abdulrahman, 2020). Ακολουθεί η ερμηνεία των τιμών που μπορεί να λάβει ο δείκτης:

- Οι αρνητικές τιμές του δείκτη υποδεικνύουν πεδιάδες
- Οι θετικές τιμές του δείκτη υποδεικνύουν κορυφογραμμές
- Τιμές κοντά στο μηδέν αναδεικνύουν είτε επίπεδη επιφάνεια είτε σταθερή κλίση του εδάφους

Σύμφωνα με τους Münch and Conrad (2006), στις επίπεδες επιφάνειες και στις κοιλάδες - δηλαδή στις αρνητικές τιμές του δείκτη- υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα εύρεσης GDEs. Σε απόρροια των παραπάνω οι χαμηλές τιμές TPI αντιστοιχούν σε υψηλότερη τιμή της 5βάθμιας κλίμακας της παραμέτρου και το αντίστροφο.

Ως κύριο δεδομένο για τη δημιουργία του χάρτη TPI χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Ο TPI υπολογίζεται με τη διαφορά μεταξύ του υψομετρικού επιπέδου ενός εστιασμένου εικονοστοιχείου και του μέσου υψομετρικού επιπέδου της γειτονιάς του. Πιο συγκεκριμένα, για την εκτίμηση του TPI εφαρμόστηκε η εξίσωση που υιοθετήθηκε από τους Duran-Llacer et al. (2021):

$$TPI = M_0 - \frac{\sum M_n}{n} \quad (\text{Εξ. 4})$$

όπου M_0 είναι το υψόμετρο του σημείου για το οποίο υπολογίζεται η τιμή TPI, ενώ το δεύτερο σκέλος της εξίσωσης εκφράζει το μέσο υψόμετρο (M_n) των γειτονικών n σημείων του (Gallant and Wilson, 2000, Weiss, 2001). Η εκτέλεση της Εξ. 4 πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού ArcMap 10.8.2. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε η εντολή Focal Statistics μέσω της οποίας υπολογίστηκε η μέση τιμή των υψομέτρων των γειτονικών σημείων κάθε εικονοστοιχείου σε μια ακτίνα 30m. Επίσης, η δημιουργία του χάρτη TPI δημιουργήθηκε εφαρμόζοντας την Εξ. 4 στο Raster Calculator (βλ. Παράρτημα, Χάρτη Π.12). Τέλος, η μέθοδος κατηγοριοποίησης των τιμών της παραμέτρου που χρησιμοποιήθηκε είναι η μέθοδος Natural Breaks.

Ο **Δείκτης Τραχύτητας Εδάφους (Topographic Roughness Index, TRI)** εκφράζει την υψομετρική διαφορά μεταξύ γειτονικών κυψελών ενός DEM. Ο δείκτης τραχύτητας γενικά εκφράζει την καμπυλότητα της τοπογραφίας. Όσο μεγαλύτερη είναι η τραχύτητα, τόσο περισσότερο ο κυματισμός και το αντίστροφο (Arulbalaji et al., 2019). Κατ' αναλογία με τον δείκτη TPI, στις χαμηλές τιμές του δείκτη υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα εύρεσης GDEs και άρα αποδίδεται μεγαλύτερη τιμή της σχετικής 5-βάθμιας κλίμακας που έχει υιοθετηθεί στην παρούσα μελέτη.

Για τη δημιουργία του χάρτη εφαρμόστηκε η εξίσωση:

$$TRI = \frac{DEM_{mean} - DEM_{min}}{DEM_{max} - DEM_{min}} \quad (\text{Εξ. 5})$$

Για την εύρεση των μέσων, ελάχιστων και μέγιστων τιμών του DEM χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Focal Statistics του ArcMap. Η εντολή εφαρμόστηκε τρεις διαδοχικές φορές, μια για τον υπολογισμό της μέσης τιμής του υψομέτρου των εικονοστοιχείων σε ακτίνα 30 μέτρων, μια για τον υπολογισμό της ελάχιστης τιμής ομοίως σε ακτίνα 30 μέτρων και μια για την μέγιστη τιμή των υψομέτρων με ακτίνα 30 μέτρων. Τέλος, για την εφαρμογή της Εξ. 5 χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Raster Calculator και ο χάρτης με τις τιμές του δείκτη TRI για την περιοχή μελέτης παρουσιάζεται στο Παράρτημα (βλ. Χάρτη Π.13). Στη συνέχεια της

ανάλυσης, οι τιμές του δείκτη αναταξινομούνται στη 5βάθμια κλίμακα με τη χρήση της μεθόδου Natural breaks.

3.2.3 Πολυφασματικοί Δείκτες

Ο **Κανονικοποιημένος Δείκτης Βλάστησης (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)** είναι ένας αδιάστατος δείκτης που περιγράφει τη διαφορά μεταξύ της ορατής και της εγγύς υπέρυθρης ανάκλασης της φυτικής κάλυψης. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της πυκνότητας του πράσινου σε μια περιοχή (Weier & Herring, 2000). Ο δείκτης NDVI αποτελεί έναν κρίσιμο παράγοντα στη χαρτογράφηση των GDEs καθώς παρέχει χρήσιμες πληροφορίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατανόηση των σχέσεων μεταξύ των υπόγειων υδάτων και της βλάστησης. Με βάση αυτές τις πληροφορίες, είναι δυνατόν να ληφθούν ενημερωμένες αποφάσεις σχετικά με τον κατάλληλο τρόπο διαχείρισης αυτών των πόρων (Pandey et al., 2023).

Στο πλαίσιο της ΔΕ, οι δορυφορικές πολυφασματικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του δείκτη προέρχονται από τον δορυφόρο Sentinel-2 ([Copernicus Browser](#)). Ο δορυφόρος Sentinel-2 είναι ένα μέρος του προγράμματος της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας (European Space Agency - ESA) για την παρακολούθηση της Γης, γνωστό ως Copernicus. Ο δορυφόρος είναι σχεδιασμένος για υπηρεσίες παρακολούθησης του περιβάλλοντος, όπως η παρακολούθηση της χρήσης του εδάφους, των υδάτων και της βλάστησης ([ESA- Introducing Sentinel-2](#)).

Για τον υπολογισμό του δείκτη χρησιμοποιήθηκαν δύο από τα δεκατρία δορυφορικά κανάλια του Sentinel 2A, το εγγύς υπέρυθρο και το κόκκινο κανάλι. Η χλωροφύλλη (βλάστηση) απορροφά σε υψηλά ποσοστά το ορατό φως για χρήση κατά τη φωτοσύνθεση, ενώ ανακλά σε μεγάλο βαθμό το εγγύς υπέρυθρο φως ([ESA – Eduspace GR – Παγκόσμια αλλαγή – Δείκτες βλάστησης](#)).

Ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του δείκτη, μέσω του Raster Calculator, είναι:

$$NDVI = \frac{Band\ 8 - Band\ 4}{Band\ 8 + Band\ 4} \quad (Εξ.6)$$

όπου Band 8 είναι το κανάλι NIR (Εγγύς υπέρυθρο) και Band 4 το κανάλι RED (Κόκκινο).

Ο δείκτης λαμβάνει τιμές από -1 έως 1. Οι αρνητικές τιμές του δείκτη αντιπροσωπεύουν υδάτινα σώματα, χιόνι, σύννεφα και επιφάνειες χωρίς βλάστηση, με την τιμή μηδέν να συνεπάγεται απουσία βλάστησης, ενώ οι θετικές τιμές υποδεικνύουν την υψηλότερη δυνατή πυκνότητα βλάστησης. Σημειώνεται ότι στην παρούσα ΔΕ αξιοποιήθηκαν, επίσης, δορυφορικές εικόνες της περιοχής μελέτης δύο ημερομηνιών (18 Αυγούστου 2017 και 25 Ιουλίου 2022), ώστε να εκτιμηθεί ο δείκτης NDVI για μία ξηρή χρονιά (2022) και για μία υγρή χρονιά (2017). Οι τιμές του δείκτη για τις δύο επιλεγμένες χρονιές παρουσιάζονται στο Παράρτημα (βλ. Χάρτες Π.14 και Π.15), ενώ στη συνέχεια οι τιμές αυτές αναταξινομούνται με τη μέθοδο natural breaks, με τις υψηλές τιμές του δείκτη να κατηγοριοποιούνται στις υψηλές τιμές της 5βάθμιας κλίμακας (πολύ υψηλή/υψηλή πιθανότητα εμφάνισης GDEs).

Ο **Κανονικοποιημένος Δείκτης Υγρασίας (Normalized Difference Moisture Index, NDMI)** εκφράζει τα επίπεδα υγρασίας στη βλάστηση. Ο δείκτης βασίζεται στην εξίσωση:

$$NDMI = \frac{Band\ 8 - Band\ 11}{Band\ 8 + Band\ 11} \quad (Εξ. 7)$$

όπου Band 8 είναι το κανάλι NIR (Εγγύς υπέρυθρο) και όπου Band 11 το κανάλι SWIR (Μέσο υπέρυθρο). Η υγιής βλάστηση έχει υψηλή ανακλαστικότητα στο φάσμα του εγγύς υπέρυθρου (NIR), ενώ στο φασματικό κανάλι, μέσο υπέρυθρο (SWIR), το έδαφος και το νερό της βλάστησης έχουν επίσης υψηλή ανακλαστικότητα. Ο δείκτης NDMI αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για την παρακολούθηση της κατάστασης της βλάστησης και των GDEs. Έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς στη χαρτογράφηση των GDEs (Barron et al., 2014) και παρέχει σημαντικές πληροφορίες για τη διαχείριση των υπογείων υδάτων, την προστασία των οικοσυστημάτων και τη διατήρηση της βιοποικιλότητας (Pandey et al., 2023). Ο δείκτης NDMI χρησιμοποιείται επίσης για την παρακολούθηση των αλλαγών στις χρήσεις γης οι οποίες επίσης επηρεάζουν τα GDEs (Pandey et al., 2023).

Ο δείκτης υπολογίστηκε με βάση δύο διαφορετικές εικόνες (18 Αυγούστου 2017 και 25 Ιουλίου 2022), κατ' αντιστοιχία με τον δείκτη NDVI και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Παράρτημα (βλ. Χάρτες Π.16 και Π.17). Στη συνέχεια, κατά την αναταξινόμηση των τιμών του δείκτη (με τη μέθοδο natural breaks), στις υψηλές τιμές του δείκτη αποδόθηκαν υψηλές τιμές της 5-βαθμιας κλίμακας (υψηλή πιθανότητα εμφάνισης GDEs) καθώς η ύπαρξη υγιούς βλάστησης υποδεικνύει σύνδεσή της με τα υπόγεια ύδατα.

Ο **Δείκτης Ενισχυμένης Βλάστησης (Enhanced Vegetation Index, EVI)** αναπτύχθηκε για τη βελτιστοποίηση του σήματος βλάστησης με βελτιωμένη ευαισθησία σε περιοχές υψηλής βιομάζας και βελτιωμένη παρακολούθηση της βλάστησης μέσω της μείωσης των επιρροών της ατμόσφαιρας (Huete et al., 2002). Ο δείκτης EVI είναι ένα σημαντικό εργαλείο για την παρακολούθηση των GDEs καθώς παρέχει σημαντικές πληροφορίες για την βλάστηση. Η παρουσία βλάστησης αντικατοπτρίζει ένα υγιεινό και λειτουργικό οικοσύστημα, στο οποίο συχνά βασίζονται τα GDEs (Pandey et al., 2023). Η εξίσωση που εφαρμόστηκε για τον υπολογισμό του Δείκτη Ενισχυμένης Βλάστησης (EVI) είναι:

$$EVI = 2,5 * \frac{NIR - RED}{NIR + C1 * RED - C2 * BLUE + 1} \quad (Εξ. 8)$$

όπου C1 και C2 είναι συντελεστές για την ατμοσφαιρική αντίσταση που για τον δορυφόρο Sentinel 2 λαμβάνουν τις τιμές 6 και 7,5 αντίστοιχα ([openEO algorithm plaza](#)).

Στην μελέτη, ο δείκτης υπολογίστηκε για μία υγρή (2017) και μια ξηρή (2022) χρονιά με βάση δύο διαφορετικές εικόνες (18 Αυγούστου 2017 και 25 Ιουλίου 2022). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Παράρτημα (βλ. Χάρτες Π.18 και Π.19).

Αξίζει να αναφερθεί ότι με βάση τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, που πραγματοποιήθηκε για την κατανόηση των ανωτέρω δεικτών, προκύπτει ότι σε αρκετές μελέτες οι δείκτες NDVI και EVI παρουσιάζουν υψηλή συσχέτιση καθώς ο τελευταίος αποτελεί τροποποίηση του πρώτου με καλύτερη απόδοση σε περιοχές με υψηλή βιομάζα (Benedetti et al., 2023, Alademomi et al., 2020). Κάτω από αυτές τις συνθήκες, ελέγχθηκε η συσχέτιση των δύο μεταβλητών για την περιοχή μελέτης και διαπιστώθηκε υψηλή συσχέτιση και για τα δύο υπό μελέτη έτη. Στη συνέχεια, επιλέχθηκε ένας δείκτης για τα επόμενα βήματα της ανάλυσης. Δεδομένης της ευρείας χρήσης του στη βιβλιογραφία (Matsushita et al., 2007) υιοθετήθηκε ο δείκτης NDVI.

3.2.4 Κλιματικές Μεταβλητές

Η **βροχόπτωση (Rain, R)** αντιπροσωπεύει τον κύριο παράγοντα παροχής νερού στον υδρολογικό κύκλο, ασκώντας κυρίαρχη επίδραση στα υπόγεια ύδατα μιας περιοχής. Η κατανομή και η ένταση της βροχόπτωσης ασκούν άμεση επίδραση στη διείσδυση του νερού απορροής, αλλά και στον έλεγχο του όγκου επαναφόρτισης. Στα άρθρα των Hoyos et al. (2015)

και Marques et al. (2019), υποστηρίζεται ότι σε ένα πιο υγρό κλίμα, όπου οι ανάγκες του οικοσυστήματος ικανοποιούνται μέσω των βροχοπτώσεων, υπάρχει χαμηλή πιθανότητα εξάρτησης των οικοσυστημάτων από τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα· συνεπώς, όσο περισσότερη βροχή, τόσο χαμηλότερη η πιθανότητα παρουσίας GDEs. Επομένως, στην ΔΕ αποδόθηκε μεγαλύτερη πιθανότητα ύπαρξης GDEs (κλάση) στις χαμηλές τιμές βροχόπτωσης. Για τη δημιουργία του χάρτη βροχόπτωσης για τα έτη 2017 (υγρή χρονιά) και 2022 (ξηρή χρονιά) πάρθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα από τέσσερις σταθμούς που βρίσκονται, είτε μέσα στην περιοχή μελέτης, είτε στα όρια της. Συγκεκριμένα συλλέχθηκαν στοιχεία από τους σταθμούς Αλικιανός, Κέντρο Χανίων, Κολυμβάρι και Πλατανιάς. Για να γίνει χωρική κατανομή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος παρεμβολής Στάθμισης Αντίστροφης Απόστασης (IDW) με τη χρήση του ArcMap (βλ. Παράρτημα, Χάρτες Π.20 και Π.21).

Ο Δείκτης Ξηρότητας (Aridity Index, AI) εκφράζει την κλιματική ξηρότητα και εκτιμάται ως το πηλίκο του ετήσιου ύψους βροχής P (σε mm) προς το ετήσιο ύψος της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής PET (σε mm):

$$AI = \frac{P}{PET} \quad (\text{Εξ. 9})$$

Με βάση την τιμή του δείκτη, μια περιοχή μπορεί να χαρακτηριστεί ως υπερβολικά ξηρή, ξηρή, ημίξηρη, ύφυγη ή υγρή και μάλιστα οι τιμές-ορόσημα για την κατηγοριοποίηση της περιοχής διαφοροποιούνται αναλόγως τη μέθοδο υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής (Πίνακας 3.1). Σε περιοχές υψηλής ξηρότητας, πολλοί βιότοποι εκδηλώνουν ευαισθησία, με αποτέλεσμα την αυξημένη εξάρτησή τους από τα υπόγεια ύδατα. Οι χαμηλές τιμές του δείκτη υποδεικνύουν άνυδρες περιοχές, με αποτέλεσμα εκεί που εντοπίζονται οι χαμηλές τιμές του δείκτη να έχουμε μεγαλύτερη πιθανότητα εύρεσης GDEs (Duran-Llacer et al., 2021).

Πίνακας 3. 1 Οι τιμές κατωφλίου Δείκτη Ανυδρίας (Aridity Index - AI) για την κατηγοριοποίηση των κλιματικών ζωνών ανυδρίας σύμφωνα με τα σχέδια κατηγοριοποίησης της UNESCO και του UNEP.

Aridity Climate Zone	UNESCO (Penman) AI values	UNEP (Thornthwaite)
Hyper-arid	<0.03	<0.05
Arid	0.03–0.2	0.05–0.2
Semi-arid	0.2–0.5	0.2–0.5
Dry sub-humid	0.5–0.75	0.5–0.65
Humid	>0.75	>0.65

Για την εκτίμηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής υπάρχουν διαθέσιμες αρκετές μέθοδοι υπολογισμού. Ωστόσο, για τον υπολογισμό του δείκτη AI χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία κυρίως η μέθοδος Penman – Monteith ή η μέθοδος Thornthwaite. Στην ΔΕ υιοθετήθηκε η μέθοδος Thornthwaite, καθώς η μέθοδος Penman απαιτεί πληθώρα κλιματικών δεδομένων. Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρειάστηκαν για τον υπολογισμό του δείκτη πάρθηκαν από τους τέσσερις σταθμούς που χρησιμοποιήθηκαν και για τον υπολογισμό της βροχόπτωσης παραπάνω. Ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής πραγματοποιήθηκε με τη χρήση κώδικα R, χρησιμοποιώντας την Εξ. 10 της μεθόδου Thornthwaite, μέσω του πακέτου SPEI.

$$PET = 1,6 * L_d * \left(\frac{10 * T_a}{I}\right)^a \quad (\text{Εξ. 10})$$

Τέλος, για την δημιουργία των χαρτών Δείκτη Ξηρότητας των περιόδων 2017 και 2022 πραγματοποιήθηκε χωρική κατανομή των δεδομένων χρησιμοποιώντας τη μέθοδο παρεμβολής Στάθμισης Αντίστροφης Απόστασης (IDW) (βλ. Παράρτημα, Χάρτες Π.22 και Π.23).

Στη συνέχεια της ανάλυσης, οι τιμές του δείκτη AI κατηγοριοποιήθηκαν στις πέντε κατηγορίες της κλίμακας εμφάνισης GDEs που αναπτύχθηκε στην συγκεκριμένη μελέτη, με βάση τις πέντε κατηγορίες κλιματικών ζωνών του Πίνακα 3.1.

3.3 Εκτίμηση βαθμού συσχέτισης παραμέτρων

Ο πίνακας συσχέτισης, γνωστός και ως Correlation Matrix, αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την κατανόηση των σχέσεων μεταξύ μεταβλητών σε ένα σύνολο δεδομένων. Κάθε στοιχείο του πίνακα αναπαριστά το επίπεδο συσχέτισης μεταξύ δύο μεταβλητών. Οι τιμές κυμαίνονται από -1 έως +1, όπου η τιμή +1 υποδηλώνει τέλεια θετική συσχέτιση, η τιμή -1 τέλεια αρνητική συσχέτιση, και η τιμή 0 ανύπαρκτη γραμμική συσχέτιση.

Ο πίνακας συσχέτισης χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση δεδομένων για τη χαρτογράφηση των GDEs. Οι τιμές του πίνακα βοήθησαν στην επιλογή των μεταβλητών που εμφάνιζαν λιγότερη συσχέτιση μεταξύ τους, προσφέροντας περισσότερη ανεξαρτησία πληροφοριών στο τελικό μοντέλο. Αυτή η διαδικασία οδήγησε στην επιλογή ενός υποσυνόλου σημαντικών μεταβλητών για την ανάλυση των GDEs, αποφεύγοντας να χάνουμε σε πληροφορία λόγω συσχετίσεων μεταξύ τους. Η τιμή του κατωφλιού για την επιλογή των παραμέτρων είναι το 0,5, που σημαίνει πως αν ένα ζεύγος παραμέτρων έχουν μεγαλύτερη συσχέτιση από 0,5 θα επιλεγεί μια από τις δύο για την παραγωγή του τελικού χάρτη των GDEs. Εφόσον η μεθοδολογία εφαρμόζεται για δύο έτη, ένα ξηρό και ένα υγρό, ως τελικά αποτελέσματα της ΔΕ θα δημιουργηθούν δύο τελικοί χάρτες. Ο πρώτος θα απεικονίζει την πιθανότητα εύρεσης GDEs για το έτος 2017 και ο δεύτερος για το έτος 2022. Παράλληλα, θα δημιουργηθούν και δύο πίνακες συσχέτισης (Πίνακες 3.2 και 3.3, αντίστοιχα).

Για τον υπολογισμό του πίνακα συσχέτισης, καταρχάς, μετατράπηκαν όλα τα δεδομένα σε μορφή Raster, έχοντας το ίδιο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς (ΕΓΣΑ '87) και επιπλέον έχοντας την ίδια χωρική ανάλυση (30 x 30m). Έπειτα, μέσω του ArcToolBox χρησιμοποιήθηκε η εντολή Band Collection Statistics η οποία αυτομάτως δημιουργεί ένα αρχείο .txt. Το αρχείο αυτό εκτός από τον πίνακα συσχέτισης απεικονίζει για κάθε παράμετρο που εισάχθηκε την μέγιστη τιμή, την ελάχιστη τιμή, τη μέση τιμή, την τυπική απόκλιση αλλά και τον πίνακα συνδιακύμανσης των παραμέτρων. Παρόλα αυτά, στην συγκεκριμένη εντολή δεν εισάχθηκαν όλες οι παράμετροι.

Πίνακας 3. 2 Πίνακας Συσχέτισης παραμέτρων για το έτος 2017

Παράμετρος	Fa	S	TRI	Dd	Ct	Ld	Gm	Gg	E	Prwb	TPI	TWI	LUC	NDMI (2017)	NDVI (2017)	R (2017)	AI (2017)
Fa	1																
S	0,0859	1															
TRI	0,0852	0,24899	1														
Dd	-0,0716	-0,41234	-0,37934	1													
Ct	0,0182	0,03053	0,04814	-0,0434	1												
Ld	-0,0174	-0,1593	-0,00956	0,07417	-0,00782	1											
Gm	0,079	0,53715	0,27697	-0,49868	0,04506	-0,07958	1										
Gg	0,0571	0,47634	0,27723	-0,43336	0,03299	-0,07961	0,7188	1									
E	0,0719	0,60309	0,4383	-0,47502	0,07292	-0,12023	0,4658	0,40186	1								
Prwb	0,0427	-0,21203	-0,04974	0,06713	-0,01051	-0,0488	-0,1929	-0,20225	-0,28126	1							
TPI	0,0326	0,03629	0,06289	-0,0391	0,85061	-0,00758	0,0562	0,04327	0,08547	0,00185	1						
TWI	0,0609	0,40693	0,11056	-0,2056	0,02194	-0,06905	0,2652	0,23848	0,25582	-0,09943	0,02758	1					
LUC	-0,0401	-0,49852	-0,27556	0,32631	-0,02636	0,20387	-0,3926	-0,35218	-0,51633	0,05335	-0,01885	-0,21992	1				
NDMI (2017)	0,031	-0,13865	0,02329	0,05541	0,02217	-0,1392	-0,2067	-0,18065	-0,09708	0,27457	0,031	-0,05369	-0,16274	1			
NDVI (2017)	0,0267	-0,12031	0,01969	0,02754	0,01674	-0,09933	-0,1801	-0,14636	-0,12796	0,29011	0,02845	-0,04238	-0,14776	0,79593	1		
R (2017)	-0,013	0,10277	0,07784	-0,04816	0,00646	-0,11764	0,1003	0,14359	0,13314	-0,18777	0,01574	0,05384	-0,03331	-0,10957	-0,08947	1	
AI (2017)	-0,0089	0,06637	0,09749	0,007	0,00075	-0,18457	0,0064	0,08107	0,10799	-0,03915	0,0091	0,03283	-0,11344	0,06224	0,06379	0,91152	1

Πίνακας 3. 3 Πίνακας Συσχέτισης παραμέτρων για το έτος 2022

Παράμετροι	Fa	S	TRI	Dd	Ct	Ld	Gm	Gg	E	Prwb	TPI	TWI	LUC	NDMI (2022)	NDVI (2022)	R (2022)	AI (2022)
Fa	1																
S	0,0859	1															
TRI	0,0852	0,24899	1														
Dd	-0,0716	-0,41234	-0,37934	1													
Ct	0,0182	0,03053	0,04814	-0,0434	1												
Ld	-0,0175	-0,1593	-0,00956	0,07417	-0,00782	1											
Gm	0,079	0,53715	0,27697	-0,49868	0,04506	-0,07958	1										
Gg	0,0571	0,47634	0,27723	-0,43336	0,03299	-0,07961	0,7188	1									
E	0,0719	0,60309	0,4383	-0,47502	0,07292	-0,12023	0,4658	0,40186	1								
Prwb	0,0427	-0,21203	-0,04974	0,06713	-0,01051	-0,0488	-0,1929	-0,20225	-0,28126	1							
TPI	0,0326	0,03629	0,06289	-0,0391	0,85061	-0,00758	0,0562	0,04327	0,08547	0,00185	1						
TWI	0,0609	0,40693	0,11056	-0,2056	0,02194	-0,06905	0,2652	0,23848	0,25582	-0,09943	0,02758	1					
LUC	-0,0401	-0,49852	-0,27556	0,32631	-0,02636	0,20387	-0,3926	-0,35218	-0,51633	0,05335	-0,01885	-0,21992	1				
NDMI (2022)	0,0112	-0,15391	-0,03445	0,09264	0,00992	-0,10731	-0,2176	-0,21893	-0,10664	0,28586	0,01868	-0,06703	-0,15935	1			
NDVI (2022)	-0,00024	-0,10939	-0,0268	0,04244	0,00874	-0,06592	-0,1753	-0,16944	-0,08746	0,26608	0,02252	-0,04748	-0,14748	0,72162	1		
R (2022)	0,0134	0,05138	-0,15042	-0,04046	0,00072	0,15585	0,133	-0,00765	0,19709	-0,18295	0,00355	-0,00126	0,14554	-0,21748	-0,22206	1	
AI (2022)	0,0177	0,07313	-0,1342	-0,0342	-0,0012	0,12637	0,1312	-0,01222	0,23847	-0,16959	0,00116	0,00553	0,09191	-0,1782	-0,19496	0,96119	1

Σύμφωνα με τους Πίνακες 3.2 και 3.3, για τις δυο χρονικές στιγμές υπάρχει πανομοιότυπη συσχέτιση στις παραμέτρους τους. Ειδικότερα, στους δύο Πίνακες απεικονίζονται με κόκκινη απόχρωση οι συσχετίσεις που είναι μεγαλύτερες από το κατώφλι 0,5. Παρατηρείται πως τη μεγαλύτερη συσχέτιση ανάμεσα στις παραμέτρους έχουν ο Δείκτης Ξηρότητας (AI) και η Βροχόπτωση (Rain) με τιμή $r=0,91$ για το έτος 2017 και $r=0,91$ για το έτος 2022. Ανάμεσα στις δύο παραμέτρους επιλέχθηκε, για την παραγωγή του τελικού χάρτη GDE, ο Δείκτης Ξηρότητας (AI). Για τον υπολογισμό του AI χρησιμοποιήθηκαν περισσότερα μετεωρολογικά δεδομένα σε σύγκριση με την ετήσια βροχόπτωση και για αυτό τον λόγο ο δείκτης AI θεωρείται πιο αξιόπιστος κι έτσι επιλέχθηκε. Το DEM παρουσιάζει υψηλή συσχέτιση τόσο με τις χρήσεις γης όσο και με την κλίση και για αυτό αποκλείεται από το τελικό μοντέλο. Επίσης, η γεωμορφολογία (Gm) παρουσιάζει υψηλή συσχέτιση με δυο παραμέτρους -την κλίση και τη γεωλογία. Συνεπώς, επιλέγεται να αφαιρεθεί η γεωμορφολογία από το τελικό μοντέλο.

Ο Δείκτης Τοπογραφικής Θέσης (TPI) έχει μεγάλη συσχέτιση με την παράμετρο Καμπυλότητα (Ct) με τιμή ίση $r=0,85$ και για τις δύο χρονολογίες. Σύμφωνα με τους Agulbalaji et al. (2019) οι δύο παράμετροι λαμβάνουν την ίδια βαρύτητα για την συμβολή τους στο τελικό αποτέλεσμα. Στο πλαίσιο της ΔΕ επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η παράμετρος Καμπυλότητα (Ct). Επιπροσθέτως, οι δείκτες NMDI και NDVI έχουν μεγάλη συσχέτιση μεταξύ τους, διότι ο δείκτης NDVI απεικονίζει την χλωροφύλλη και ο δείκτης NDMI την υγρασία στην βλάστηση. Έπειτα από οπτικό έλεγχο των δύο δεικτών αποφασίστηκε πως στην περίπτωση αυτή ο δείκτης NDMI αποτυπώνει καλύτερα την βλάστηση στην περιοχή μελέτης.

Συνεπώς, οι παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή του τελικού χάρτη GDEs για το έτος 2017 και 2022 απεικονίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 3.4.

Πίνακας 3. 4 Τελικοί παράμετροι για την παραγωγή των χαρτών GDEs

Παράμετροι για την παραγωγή του τελικού χάρτη πιθανότητας εμφάνισης GDEs
Συσσώρευση ροής (Fa)
Κλίση (S)
Δείκτης Τραχύτητας Εδάφους (TRI)
Υδρογραφική Πυκνότητα (Dd)
Καμπυλότητα (Ct)
Πυκνότητα Φωτογράμμωσης (Ld)
Γεωλογία (Gg)
Εγγύτητα σε ποτάμια και Υδάτινα Σώματα (Prwb)
Τοπογραφικός Δείκτης Υγρασίας (TWI)
Χρήσεις Γης (LUC)
Κανονικοποιημένος δείκτης Υγρασίας (NDMI)
Δείκτης Ξηρότητας (AI)

3.4 Εκτίμηση βάρους παραμέτρων

Η παραγωγή των τελικών χαρτών απεικόνισης της πιθανότητας εμφάνισης GDEs πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο GIS-MCDM, δηλαδή μια προσέγγιση που συνδυάζει την πολυκριτηριακή ανάλυση με την χωρική διάσταση των παραμέτρων. Στη μέθοδο αυτή εκτός από την επεξεργασία και διαχείριση των παραμέτρων, σημαντικό παράγοντα για την τελική μορφή του χάρτη διαδραματίζουν τα βάρη που θα αποδοθούν σε κάθε παράμετρο, καθώς στις πολυκριτηριακές αναλύσεις τα βάρη αποτελούν κρίσιμη εισροή για βέλτιστα αποτελέσματα (Mazurek & Strzałka, 2022). Με την έννοια βάρους ορίζεται η σημαντικότητα της παραμέτρου στο τελικό αποτέλεσμα και στην συγκεκριμένη περίπτωση πόσο σημαντική είναι μια παράμετρος για την πιθανότητα εύρεσης GDEs. Έχουν προταθεί πολλές μέθοδοι για τη δημιουργία συντελεστών στάθμισης κριτηρίων, όπως η άμεση κατάταξη, η κατανομή σημείων, οι συγκρίσεις κατά ζεύγη, η μέθοδος εντροπίας, η μέθοδος τυπικής απόκλισης κ.ά. Ωστόσο, παραμένει πρόβλημα ο ακριβής καθορισμός των συντελεστών στάθμισης των κριτηρίων, ιδίως όταν ο αριθμός των κριτηρίων είναι υψηλός (Mazurek & Strzałka, 2022).

Οι Duran-Llacer et al. (2021) προσέγγισαν τα βάρη των παραμέτρων με τη χρήση της γνώμης ειδικών, οι οποίοι είναι εξειδικευμένοι σε τομείς που σχετίζονται με τα GDEs (π.χ. Υδρογεωλογία, Γεωχωρικές τεχνολογίες κ.λπ.). Κάθε ειδικός ανέθεσε μια τιμή από 1 έως 10 σε κάθε γεωχωρική μεταβλητή, με την τιμή ένα να εκφράζει τη μικρότερη σημαντικότητα και την τιμή 10 την υψηλότερη, σύμφωνα με την εμπειρία του συγκεκριμένου ειδικού. Τα δεδομένα που προέκυψαν από τη βαθμολογία των ειδικών υποβλήθηκαν σε κανονικοποίηση βάσει της διαδικασίας που περιγράφεται από τους Arriagada et al. (2019) και προέκυψαν τα σχετικά βάρη (W), σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$W = \frac{of}{\sum of} \quad (\text{Εξ.11})$$

όπου W είναι το βάρος που θα αποκτήσει κάθε παράμετρος με βάση τη σειρά κατάταξης, όπου Of είναι η σειρά κατάταξης ως συνάρτηση των παραμέτρων και όπου $\sum Of$ είναι το άθροισμα όλων των τιμών σειρών κατάταξης που υπολογίζονται για κάθε παράμετρο (Duran-Llacer et al., 2021).

Στην παρούσα ΔΕ, πραγματοποιήθηκε μια προσπάθεια να εκτιμηθεί η επίδραση των βαρών στον τελικό χάρτη και έτσι υιοθετήθηκαν πέντε σενάρια/σειρές βαρών (Πίνακας 3.5), σύμφωνα με τις παρακάτω παραδοχές:

- 1) Όλες οι παράμετροι είναι ίσης σημασίας.
- 2) Οι τέσσερις κατηγορίες παραμέτρων (συμβατικά επίπεδα GIS, τοπογραφικές παράμετροι, πολυφασματικοί δείκτες, κλιματικές μεταβλητές) είναι ίσης σημασίας.
- 3) Τυχαία παραγόμενα βάρη (τρία ζεύγη τυχαίων βαρών δημιουργήθηκαν χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση του πακέτου «RandVec» της R).

Στο Σενάριο Α, οι 12 παράμετροι που επιλέχθηκαν για την παραγωγή του τελικού χάρτη (βλ. Πίνακα 3.4) λαμβάνονται υπόψη ως ίσης σημασίας, δηλαδή κάθε παράμετρος λαμβάνει το βάρος $W = \frac{1}{\sum \text{Παράμετρων}} = \frac{1}{13} \approx 0,08$ (Πίνακας 5).

Στο Σενάριο Β λαμβάνεται υπόψη, καταρχάς, πως κάθε κατηγορία (συμβατικά επίπεδα GIS, τοπογραφικές παράμετροι, πολυφασματικοί δείκτες, κλιματικές μεταβλητές) είναι ίσης σημασίας, με αποτέλεσμα κάθε κατηγορία να καλύπτει το 25% των βαρών. Η κατηγορία «Συμβατικά επίπεδα GIS» έχει δύο παραμέτρους -τη Γεωλογία και τις Χρήσεις Γης- συνεπώς κάθε μία από τις δύο παραμέτρους συμμετέχει με ποσοστό περίπου 13%. Η κατηγορία

«Τοπογραφικές παράμετροι» περιλαμβάνει στο σύνολο οκτώ παραμέτρους που συμμετέχουν στην παραγωγή του τελικού χάρτη, οι οποίες λαμβάνουν ως προς το βάρος την τιμή 3% κατά προσέγγιση. Ακόμη, στις κατηγορίες «Πολυφασματικοί Δείκτες» και «Κλιματικές Μεταβλητές», αντιστοιχούν από μια μεταβλητή, ο Κανονικοποιημένος Δείκτης Υγρασίας (NDMI) και ο Δείκτης Ξηρότητας (AI). Κάθε μια από αυτές τις δύο μεταβλητές συμμετέχει στον τελικό χάρτη με ποσοστό 25%. Τέλος, στο Σενάριο Γ τα βάρη επιλέγονται εντελώς τυχαία και απεικονίζονται στον Πίνακα 3.5.

Πίνακας 3. 5 Σενάρια απόδοσης βαρών για την παραγωγή τελικού χάρτη GDEs

Παράμετροι για την τελική παραγωγή του χάρτη GDE	Σενάριο Α - Ισοβαρή	Σενάριο Β - Ισοβαρή ανά κατηγορία	Σενάριο Γ		
			Τυχαία Βάρη 1	Τυχαία Βάρη 2	Τυχαία Βάρη 3
Συσσώρευση ροής (Fa)	8	3	17	11	5
Κλίση (S)	8	3	3	7	13
Δείκτης Τραχύτητας Εδάφους (TRI)	8	3	6	3	6
Υδρογραφική Πυκνότητα (Dd)	8	3	7	3	2
Καμπυλότητα (Ct)	8	3	15	1	20
Πυκνότητα Φωτογράμμωσης (Ld)	8	3	8	16	3
Γεωλογία (Gg)	8	13	5	3	13
Εγγύτητα σε ποτάμια και Υδάτινα Σώματα (Prwb)	8	3	3	5	3
Τοπογραφικός Δείκτης Υγρασίας (TWI)	9	3	14	15	9
Χρήσεις Γης (LUC)	9	13	8	19	17
Κανονικοποιημένος δείκτης Υγρασίας (NDMI)	9	25	6	1	6
Δείκτης Ξηρότητας (AI)	9	25	8	16	3
Σύνολο	100	100	100	100	100

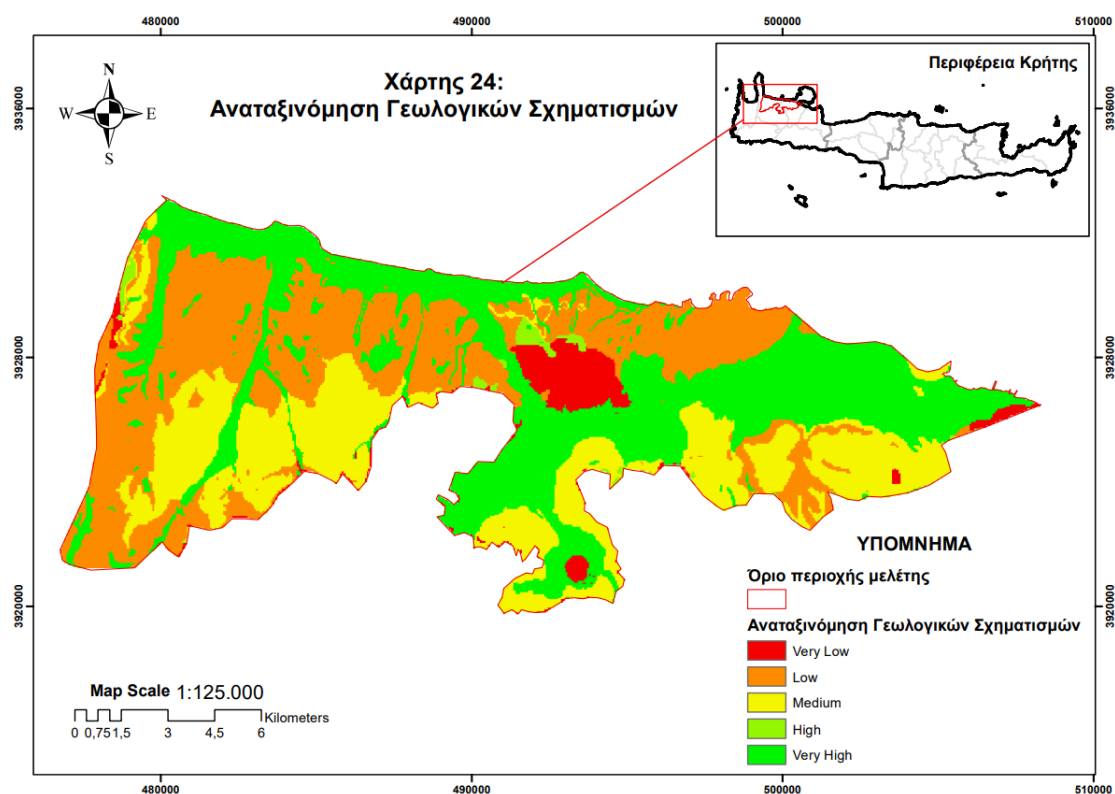
Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα Εφαρμογής Μεθοδολογίας

4.1 Χαρτογράφηση μεταβλητών

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και ερμηνεύονται οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για τη χαρτογράφηση των GDEs, οι οποίες αποτυπώνονται σε Χάρτες με βάση την 5βάθμια κλίμακα πιθανότητας εμφάνισης GDEs στην περιοχή.

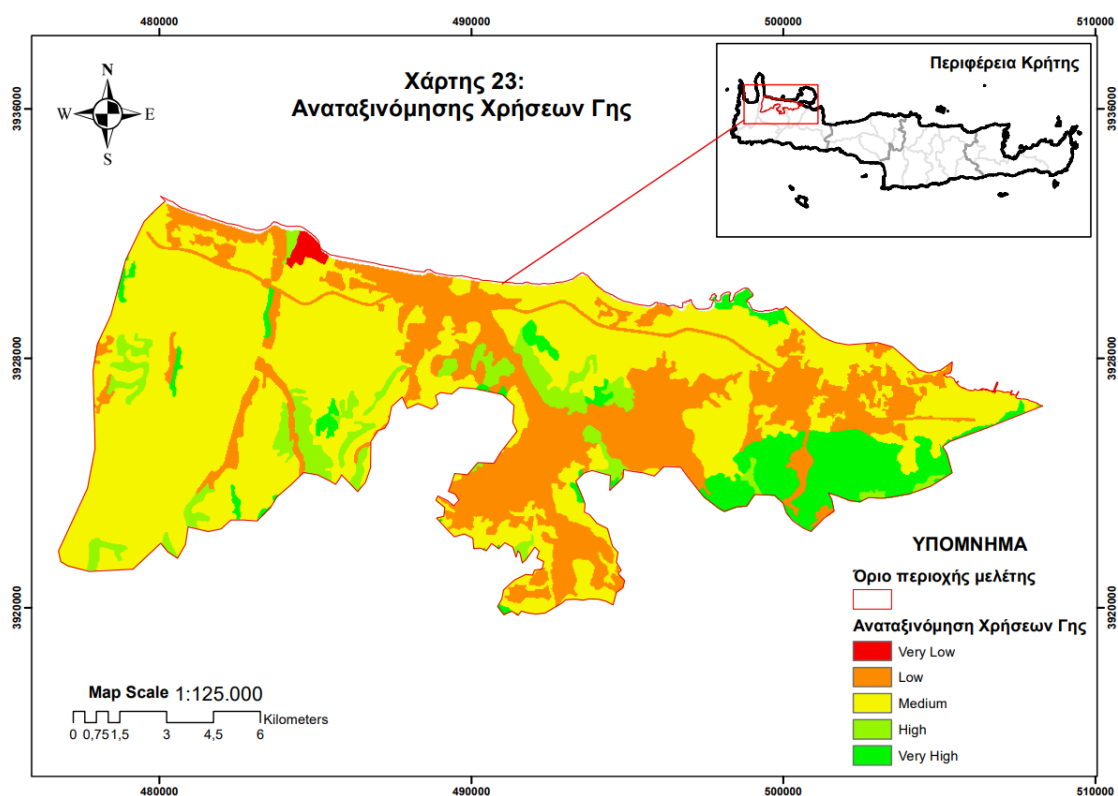
4.1.1 Συμβατικά επίπεδα GIS

Σε κάθε γεωλογικό σχηματισμό που απαντάται στην περιοχή μελέτης αποδόθηκε μια τιμή της 5βάθμιας κλίμακας, με βάση την υδροπερατότητά του (Σχήμα 4.1). Συγκεκριμένα, στην κλάση 1-very low αντιστοιχήθηκαν τα αδιαπέρατα πετρώματα, στα οποία δεν υπάρχει καμία πιθανότητα εύρεσης GDEs (π.χ. Ημιμεταμορφωμένα Πετρώματα κ.λπ.). Στην κλάση 2-low αντιστοιχήθηκαν οι σχηματισμοί με πολύ μικρή έως μικρή υδατοπερατότητα (π.χ. Μάργες, Στρώματα Τερπνής κ.λπ.). Στην κλάση 3-medium αποδόθηκαν οι σχηματισμοί μικρής έως μέτριας υδατοπερατότητας (π.χ. Συμπαγή Κροκαλοπαγή, Μαργαϊκοί Ασβεστόλιθοι κ.λπ.) και στην κλάση 4-high οι σχηματισμοί μέτριας έως υψηλής υδατοπερατότητας (π.χ. Ασβεστόλιθοι, Δολομίτες και Μάρμαρα). Τέλος, σχηματισμοί όπως οι Χερσαίες και Ποταμοχειμάρειες αποθέσεις και τα Αλλούβια αντιστοιχήθηκαν στην κλάση 5 η οποία υποδεικνύει πολύ μεγάλη πιθανότητα εύρεσης GDEs. Οι πληροφορίες για την υδροπερατότητα των γεωλογικών σχηματισμών αντλήθηκαν από τα σχετικά φύλλα του ΙΓΜΕ, καθώς και από βιβλιογραφικές αναφορές για την περιοχή μελέτης (Goumas et al., 2017).



Χάρτης 4. 1 Ταξινόμηση Γεωλογικών Σχηματισμών στην 5βάθμια κλίμακα πιθανότητας εύρεσης GDEs

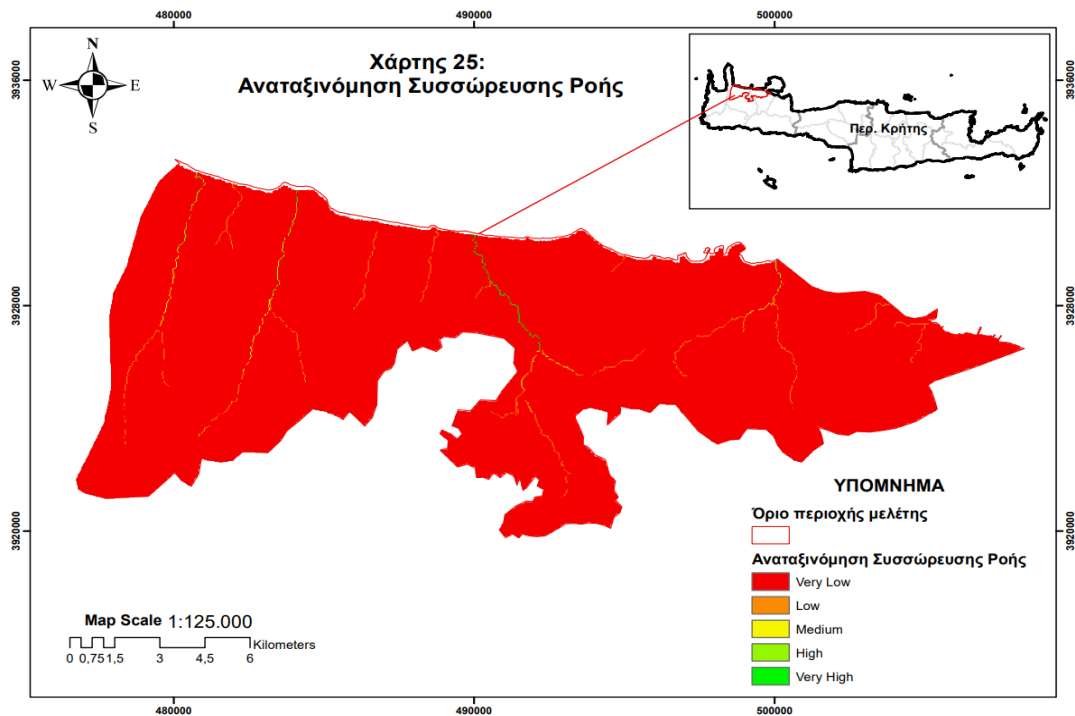
Στον Χάρτη 4.2 παρουσιάζεται η ταξινόμηση των χρήσεων γης της περιοχής μελέτης στις κλάσεις της 5βάθμιας κλίμακας χαρτογράφησης των GDEs. Στην κλάση 5 (πολύ υψηλή πιθανότητα εμφάνισης GDEs) αντιστοιχήθηκαν περιοχές με φυσική βλάστηση, όπως οι θαμνώδεις εκτάσεις και η σκληρόφυλλη βλάστηση. Αντιθέτως, στην κλάση 1 (πολύ μικρή πιθανότητα εύρεσης GDEs) αντιστοιχήθηκαν οι τεχνητές επιφάνειες, όπως τα αεροδρόμια και τα λιμάνια. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι οι αρδευόμενες εκτάσεις -ενώ δεν λαμβάνονται υπόψη στο τελικό αποτέλεσμα, καθώς δεν θεωρούνται GDEs- λάβανε την τιμή 3 (μεσαία πιθανότητα εύρεσης GDEs).



Χάρτης 4. 2 Ταξινόμηση Χρήσεων Γης στην 5βάθμια κλίμακα πιθανότητας εύρεσης GDEs

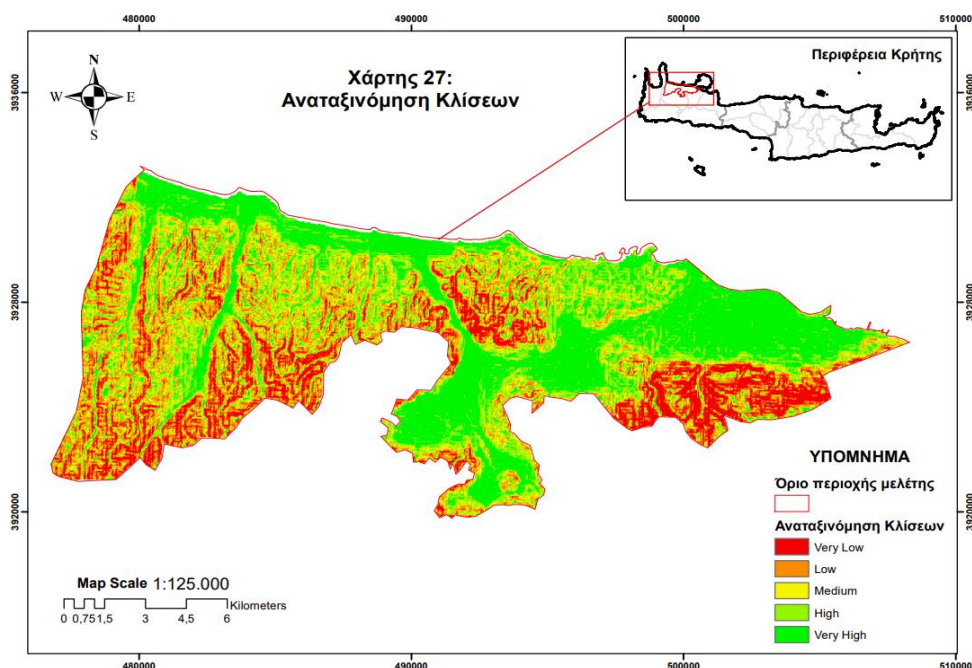
4.1.2 Τοπογραφικές παράμετροι

Η παράμετρος Συσσώρευση Ροής έλαβε τιμές από 0 έως ~70,6 οι οποίες αντιστοιχήθηκαν στην 5βάθμια κλίμακα πιθανότητας εύρεσης GDEs μέσω της μεθόδου Natural Breaks (Χάρτης 4.3). Παρατηρείται ότι κατά μήκος των ποταμών της περιοχής αποδίδονται υψηλότερες κλάσεις της 5βάθμιας κλίμακας σε σχέση με την περιοχή του κάμπου, όπως ήταν αναμενόμενο, διότι υψηλή Συσσώρευση Ροής αντιστοιχεί σε κανάλια ροής.



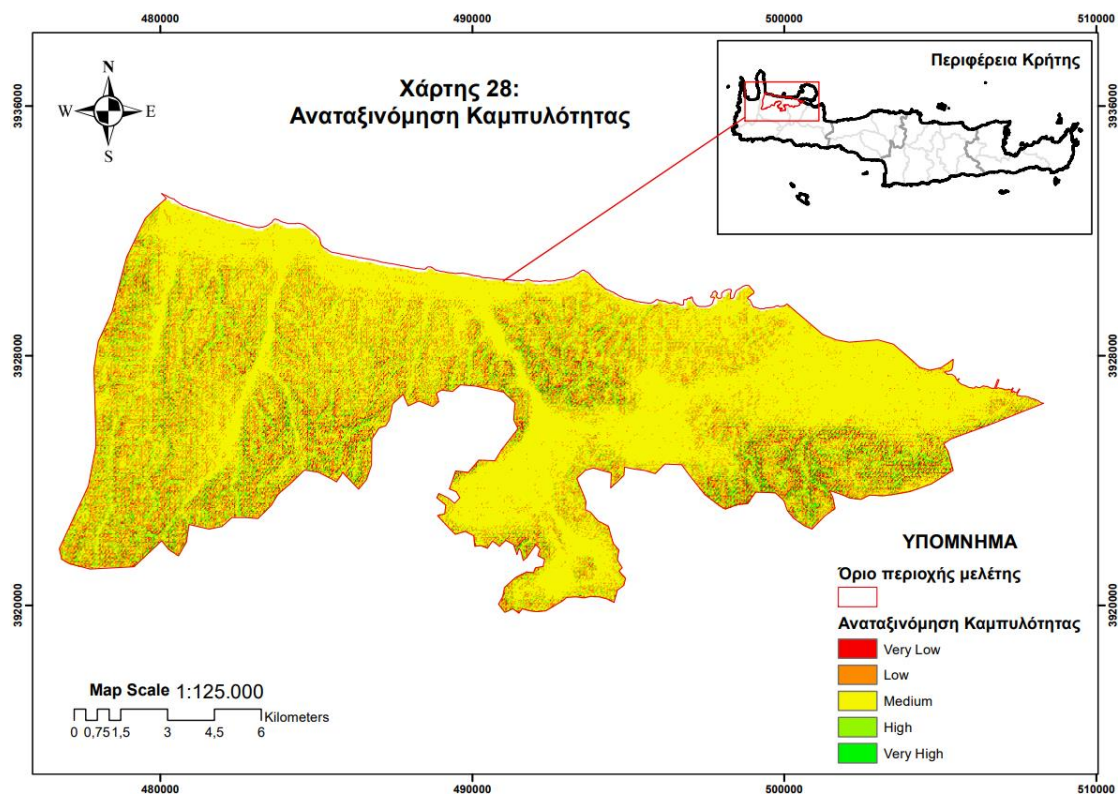
Χάρτης 4. 3: Ταξινόμηση Συσσώρευσης Ροής στην 5βάθμια κλίμακα πιθανότητας εύρεσης GDEs

Η κατηγοριοποίηση των κλίσεων της περιοχής στις 5 κλάσεις της υιοθετούμενης κλίμακας (Χάρτης 4.4) πραγματοποιήθηκε με βάση τη θεώρηση ότι -συνήθως- τα GDEs εντοπίζονται εκεί όπου ο υδροφόρος ορίζοντας συναντά την τοπογραφική επιφάνεια, σύμφωνα με τους Martínez-Santos et al. (2021). Η πρώτη κατηγορία κλίσεων -η οποία καλύπτει κλίσεις από 0 έως και 7,7%- αποδίδεται στην κλάση 5 της σχετικής κλίμακας, αφού σε αυτές τις ήπιες κλίσεις υπάρχει μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης GDEs. Οι μεγάλες κλίσεις οδηγούν σε μικρότερη επαναφόρτιση, καθώς το νερό που προέρχεται από τις βροχοπτώσεις ρέει γρήγορα κατά μήκος μιας απότομης κλίσης (Arulbalaji et al., 2019). Συνεπώς, πολύ μικρή πιθανότητα εύρεσης GDEs (κλάση 1) εντοπίζεται στις περιοχές με κλίση 48,5 έως 162,8% οι οποίες εντοπίζονται κατά μήκος της νότιας πλευράς της περιοχής μελέτης.



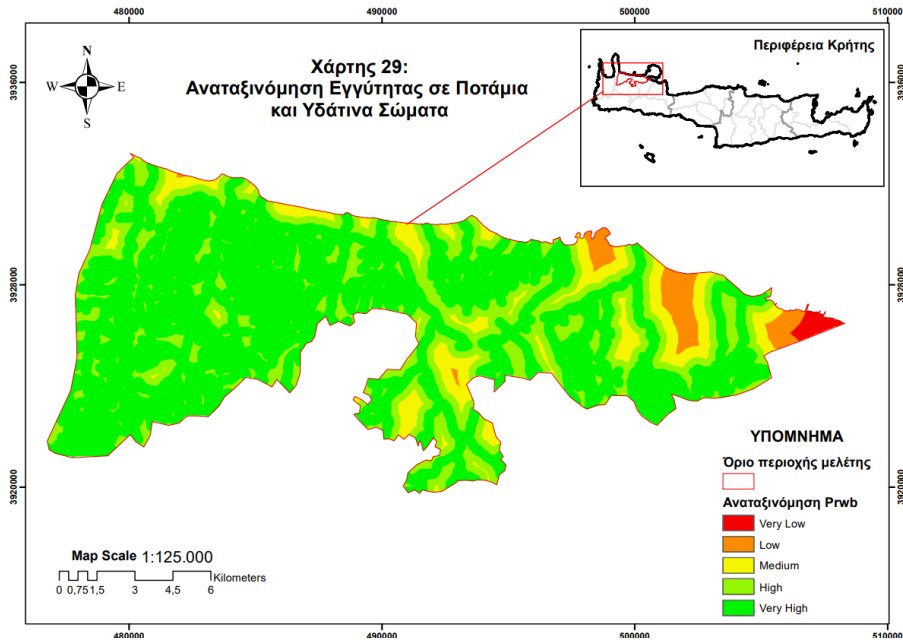
Χάρτης 4. 4 Ταξινόμηση Κλίσεων στην 5βάθμια κλίμακα πιθανότητας εύρεσης GDEs

Η παράμετρος Καμπυλότητα (Χάρτης 4.5) κατηγοριοποιήθηκε σύμφωνα με την θεώρηση ότι το νερό έχει την τάση να επιβραδύνεται σε ένα κυρτό προφίλ και να συσσωρεύεται σε ένα κοίλο προφίλ. Σε κοίλο προφίλ του εδάφους η πιθανότητα εύρεσης GDEs είναι πολύ μεγάλη σύμφωνα με τους Duran-Llacer et al. (2022). Συνεπώς, αρνητικές τιμές αντιστοιχούν σε κατηγορίες "υψηλού" και "πολύ υψηλού" GDEs, δεδομένου ότι αντιπροσωπεύουν κοίλες περιοχές. Σε αντίθεση, οι θετικές τιμές της παραμέτρου υποδεικνύουν μια κυρτή επιφάνεια, με απόρροια μικρή πιθανότητα ύπαρξης GDE. Η τιμή μηδέν υποδηλώνει ότι η επιφάνεια είναι επίπεδη (Dural-Llacer et al., 2021).



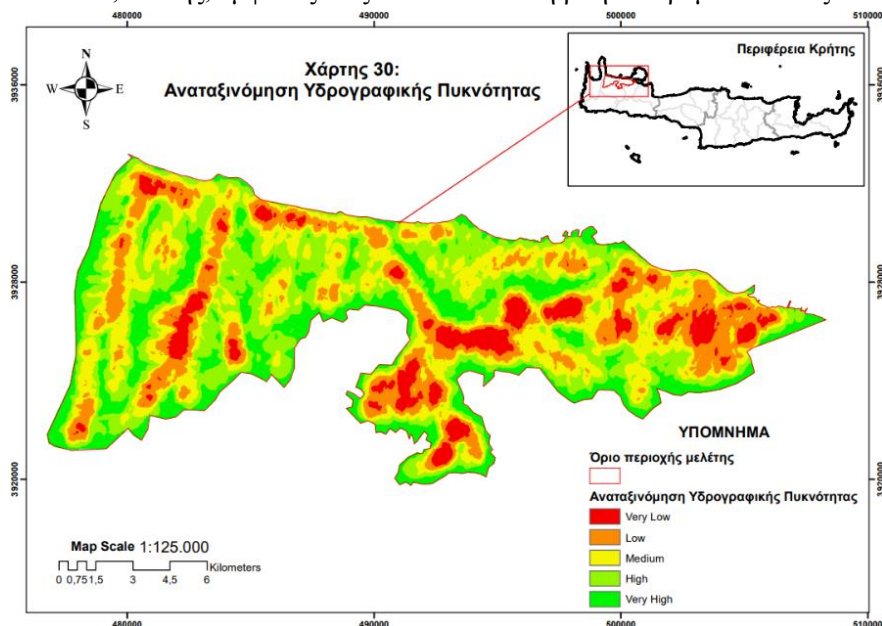
Χάρτης 4. 5: Ταξινόμηση Καμπυλότητας στην 5βάθμια κλίμακα πιθανότητας εύρεσης GDEs

Οι ποταμοί, τα ρέματα και τα παρακείμενα υδατικά οικοσυστήματα μπορούν να κατηγορηθούν ως GDEs (Eamus et al., 2016). Αυτά τα οικοσυστήματα εξαρτώνται από τα υπόγεια ύδατα, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των ξηρών εποχών σε περιοχές με εποχιακά ξηρά κλίματα ή μόνιμα ξηρά κλίματα (Duran-Llacer et al., 2021). Επομένως, όσο υψηλότερη τιμή λαμβάνει η παράμετρος Εγγύτητα σε Ποτάμια και Υδάτινα Σώματα τόσο μειώνεται η πιθανότητα εύρεσης GDEs (Χάρτης 4.6). Την υψηλότερη κατηγορία, τιμή 5 (πολύ μεγάλη πιθανότητα ύπαρξης GDE) λαμβάνουν τα εικονοστοιχεία με τιμές εγγύτητας από 0 έως 180m και έπειτα ακολουθούν οι τιμές, 180 έως 476m με υψηλή πιθανότητα ύπαρξης GDEs. Έπονται οι κατηγορίες 476 έως 927m με μεσαία πιθανότητα, 927-1738m με χαμηλή πιθανότητα και 1.738 έως 3.282, όπου η πιθανότητα εύρεσης GDEs είναι εξαιρετικά χαμηλή. Η περιοχή μελέτης έχει αρκετά πυκνό υδρογραφικό δίκτυο, με αποτέλεσμα σχεδόν όλο το κεντρικό και δυτικό τμήμα της περιοχής να ταξινομείται ως πολύ υψηλής και υψηλής πιθανότητας εύρεσης.



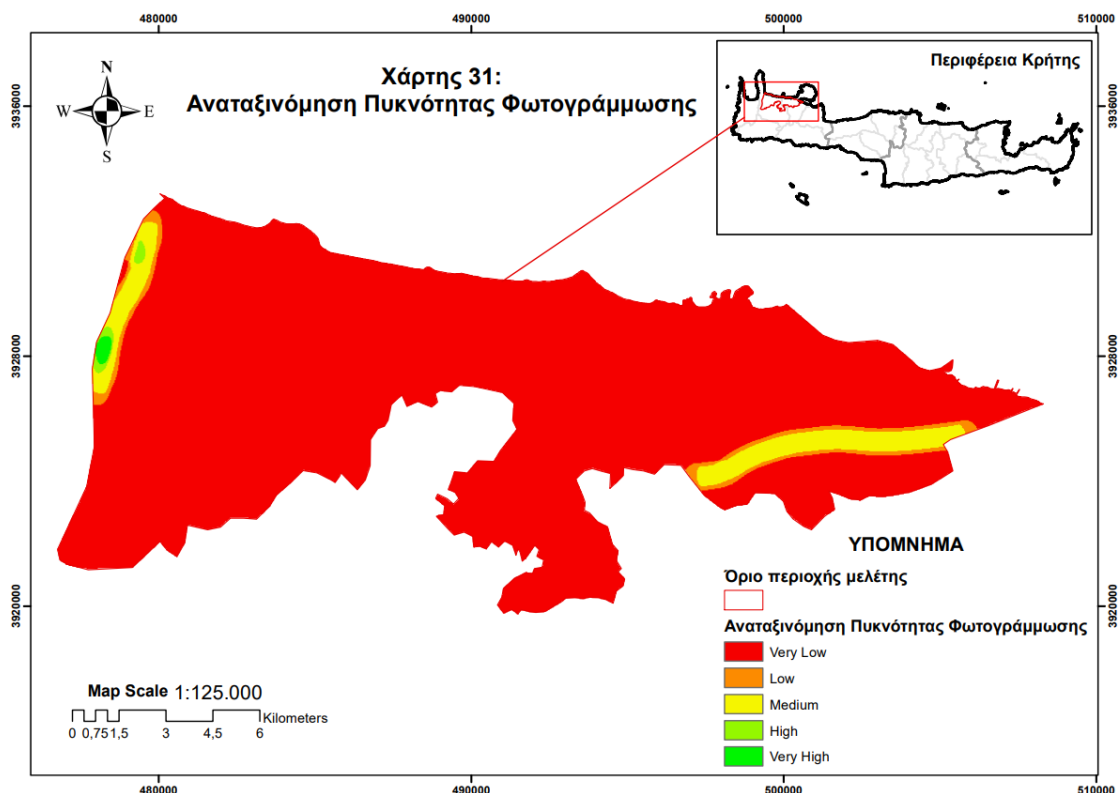
Χάρτης 4. 6: Ταξινόμηση Εγγύτητας σε ποτάμια και υδάτινα σώματα στην 5βάθμια κλίμακα πιθανότητας εύρεσης GDEs

Ο Χάρτης 4.7 απεικονίζει την Υδρογραφική Πυκνότητα, η οποία χωρίζεται σε πέντε κατηγορίες. Η χαμηλή υδρογραφική πυκνότητα οδηγεί σε υψηλότερη διείσδυση και άρα σε μεγαλύτερη αποθήκευση υπόγειου νερού που τελικά οδηγεί σε αύξηση της εξάρτησης από το επίπεδο του υπόγειου νερού (Pandey et al., 2023). Οι περιοχές, δηλαδή, χαμηλής υδρογραφικής πυκνότητας αντιστοιχούν σε υψηλές κλάσεις της 5βάθμιας κλίμακας εμφάνισης GDEs και αντίστροφα. Πιο συγκεκριμένα, για την περιοχή μελέτης οι τιμές υδρογραφικής πυκνότητας 0 έως 1,54 Km/Km² έχουν αποδοθεί σε πολύ υψηλή πιθανότητα εύρεσης GDEs, οι τιμές 1,54 έως 2,60 Km/Km² σε υψηλή πιθανότητα, οι τιμές 2,60 έως 3,69 Km/Km² σε μέτρια πιθανότητα, οι τιμές 3,69 έως 4,95 Km/Km² σε χαμηλή πιθανότητα και τέλος οι τιμές από 4,95 έως 8,19 σε πολύ χαμηλή πιθανότητα. Καταληκτικά, όπως παρατηρείται και από τον Χάρτη 4.7 οι κλάσεις 1 και 2 (πολύ χαμηλή και χαμηλή πιθανότητα) καλύπτουν ένα μεγάλο ποσοστό της περιοχής μελέτης, ενώ είναι, επίσης, εμφανές πως ακολουθούν τη ροή των ρεμάτων τους.



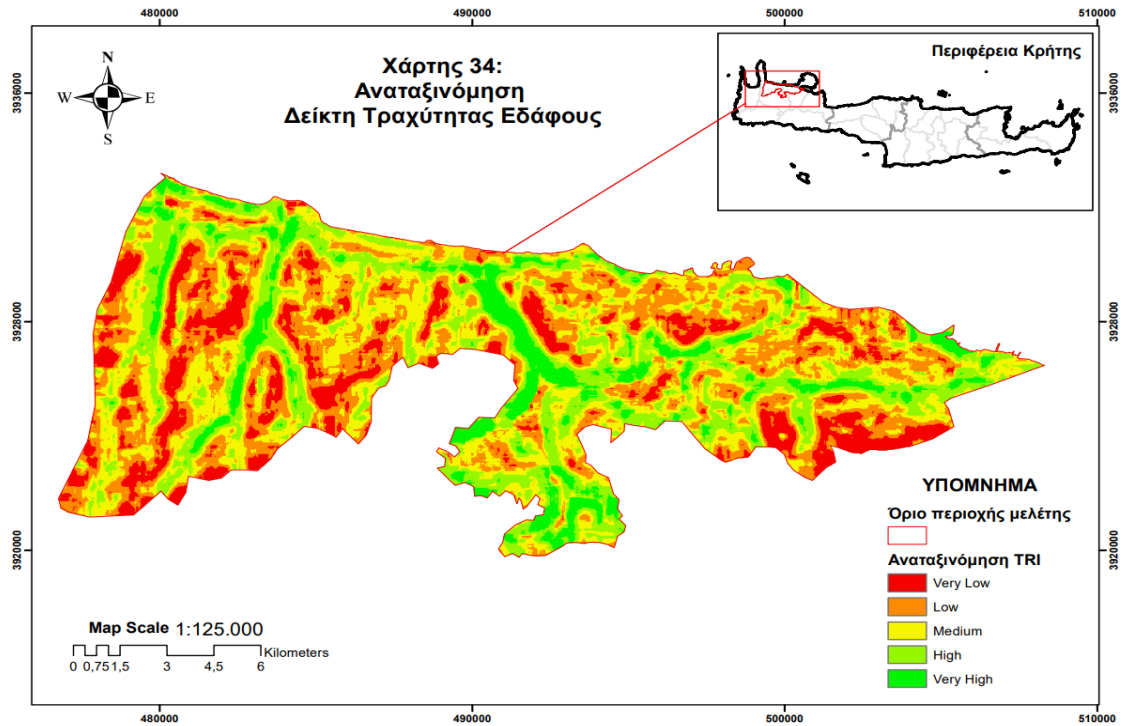
Χάρτης 4. 7: Ταξινόμηση Υδρογραφικής πυκνότητας στην 5βάθμια κλίμακα πιθανότητας εύρεσης GDEs

Η Πυκνότητα φωτογράμμωσης (Χάρτης 4.8) ανακατατάχθηκε σε πέντε κατηγορίες, με τις υψηλότερες κλάσεις να αντιστοιχούν στις μεγαλύτερες πυκνότητες φωτογράμμωσης. Οι ζώνες ρωγμών χρησιμοποιούνται για την ανάλυση του δυναμικού σχιστού υδροφορέα και, συνεπώς, συσχετίζονται με την παρουσία των GDEs (Duran-Llacer et al., 2021). Στην περιοχή μελέτης όπως φαίνεται και στον Χάρτη 4.8 δεν εντοπίζονται πολλές ρωγμώσεις. Πιο συγκεκριμένα, εντοπίζονται μόνο δύο, μία στο δυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης και μία στο ανατολικό της τμήμα.



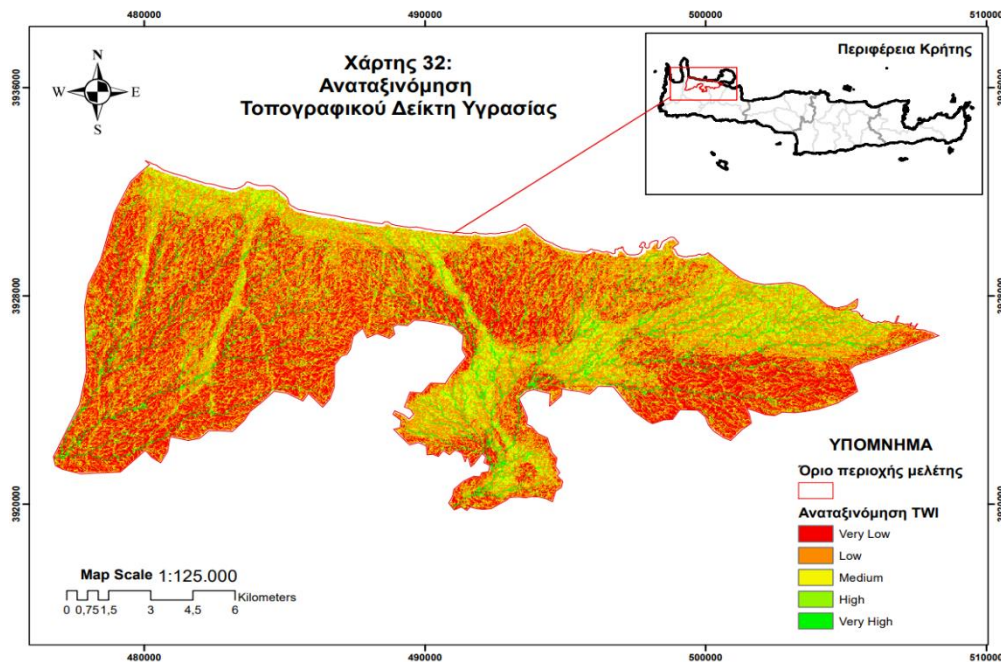
Χάρτης 4. 8: Ταξινόμηση Πυκνότητας Φωτογράμμωσης στην 5βάθμια κλίμακα πιθανότητας εύρεσης GDEs

Ο Δείκτης Τραχύτητας Εδάφους (Χάρτης 4.9) αποτελεί κλειδί για την κατανόηση της πολυπλοκότητας της επιφάνειας της γης. Οι υψηλότερες τιμές ραβδώσεων αντιστοιχούν σε περιοχές με πιο κυματιστή τοπογραφία, όπως αυξημένη ανώμαλη έκταση, κορυφές και ρέματα. Αντίθετα, χαμηλότερες τιμές υποδεικνύουν λεία επιφάνεια, πιθανότατα πεδινές περιοχές. Σε πεδινές περιοχές με χαμηλή ράβδωση, τα GDEs ενδέχεται να εξαρτώνται από υπόγειες ροές και υδρολογικά φαινόμενα που επηρεάζουν τη βιοποικιλότητα και το οικοσύστημα της περιοχής (Agulbalaji et al., 2019). Συνεπώς, οι χαμηλότερες τιμές του δείκτη -από 0,07 έως 0,29- αντιστοιχούν σε πολύ υψηλή πιθανότητα εύρεσης GDEs, ενώ οι υψηλότερες τιμές -από 0,57 έως 0,77- σε πολύ χαμηλή πιθανότητα εύρεσης GDEs. Τέλος, οι ενδιάμεσες τιμές, 0,29-0,39, αποδίδονται σε υψηλή πιθανότητα, οι τιμές 0,39-0,47 σε μέτρια πιθανότητα και οι τιμές 0,47-0,56 σε χαμηλή πιθανότητα.



Χάρτης 4. 9: Ταξινόμηση Δείκτη Τραχύτητας Εδάφους (TRI) στην 5βάθμια κλίμακα πιθανότητας εύρεσης GDEs, 2017

Οι περιοχές όπου η πιθανότητα εύρεσης GDEs είναι "Πολύ Υψηλή", σύμφωνα με τον Δείκτη Τοπογραφικής Υγρασίας (TWI), εντοπίζονται στο παράκτιο μέτωπο της περιοχής μελέτης και σε περιοχές όπου το υψόμετρο είναι χαμηλό (π.χ. κοιλάδες). Επιπροσθέτως, εμφανίζονται σε περιοχές όπως ρυάκια, χείμαρροι και ποτάμια, τα οποία -πιθανόν- να έχουν ροή μόνο σε περιόδους κατακρημνίσεων. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς ο Δείκτης Τοπογραφικής Υγρασίας (Χάρτης 4.10) αντιπροσωπεύει ένα υδρολογικό δείκτη που συνδυάζει τις επιδράσεις της κλίσης και της συσσώρευσης ροής για να αναδείξει το υδρολογικό καθεστώς της περιοχής. Τέλος, οι υψηλές τιμές του δείκτη -από 15,7 έως 24,2- ανήκουν στην κλάση 5- Πολύ μεγάλη πιθανότητα εύρεσης GDEs σε αντίθεση με τις χαμηλές τιμές -από 6,1 έως 9,2- που ανήκουν στην κλάση 1- Πολύ μικρή πιθανότητα εύρεσης GDEs.

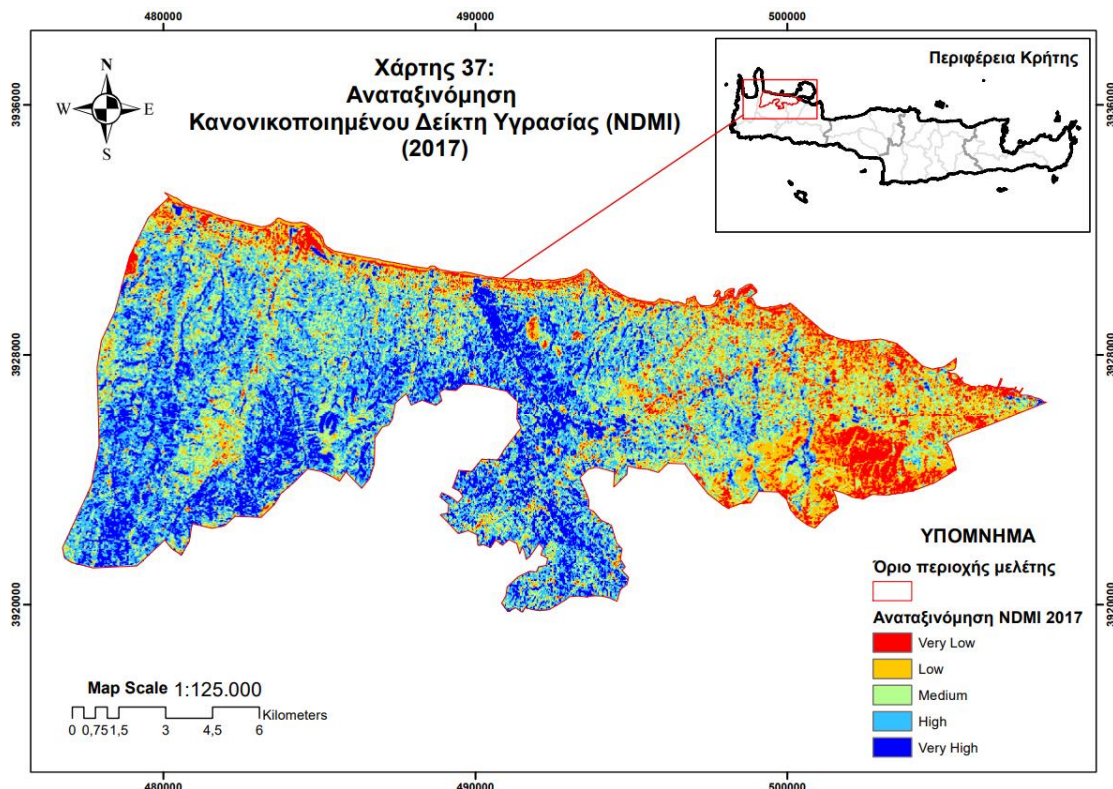


Χάρτης 4. 10: Ταξινόμηση Τοπογραφικού Δείκτη Υγρασίας (TWI) στην 5βάθμια κλίμακα πιθανότητας εύρεσης GDEs,

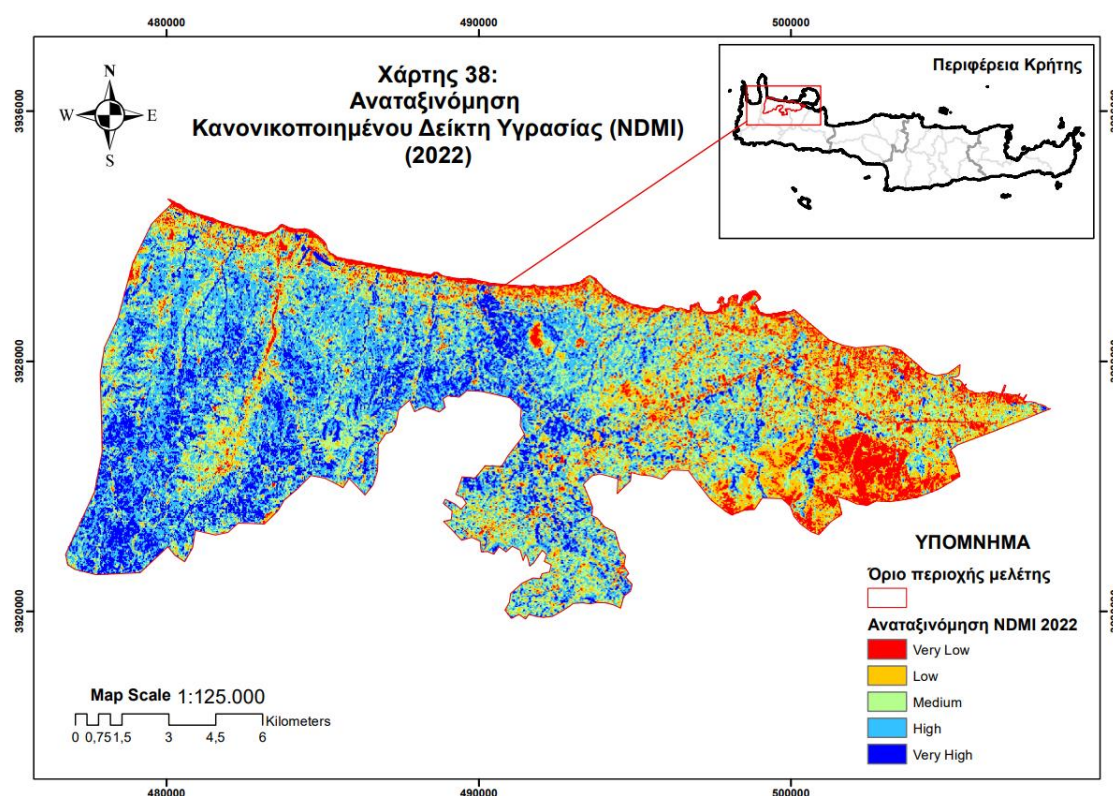
4.1.3 Πολυφασματικοί Παράμετροι

Ο Κανονικοποιημένος Δείκτης Υγρασίας (NDMI) (Σχήμα 4.11, Σχήμα 4.12) αναδεικνύεται ως ένα πολύτιμο εργαλείο για την παρακολούθηση της βλάστησης και των GDEs, παρέχοντας κρίσιμες πληροφορίες σχετικά με το περιεχόμενο νερού στη βλάστηση, όπως τονίζεται κι από τους Fontana και Collischonn (2019). Δεδομένου ότι η βλάστηση σε αυτά τα οικοσυστήματα είναι στενά συνδεδεμένη με το υπόγειο νερό, οι μεταβολές στη διαθεσιμότητα του υπόγειου νερού επηρεάζουν άμεσα την υγεία της βλάστησης (Pandey et al., 2020). Όπως παρατηρείται από το Σχήμα 4.11 και το Σχήμα 4.12, η υγρή χρονιά καλύπτει μεγαλύτερο εύρος τιμών από την ξηρή χρονιά, της οποίας το εύρος περιορίζεται σε χαμηλότερες τιμές. Αυτό συμβαίνει, γιατί κατά την ξηρή χρονιά 2022 η υγρασία στα φύλλα των δέντρων και γενικά στη βλάστηση είναι αναμενόμενα χαμηλότερη σε αντίθεση με το έτος 2017 το οποίο θεωρείται ως υγρή χρονιά. Αξιοσημείωτη διαφοροποίηση μεταξύ των δύο ετών φαίνεται πως υπάρχει στα νοτιοκεντρικά της περιοχής μελέτης. Παρόλα αυτά, η συγκεκριμένη έκταση χαρακτηρίζεται ως καλλιεργήσιμη γη, όπου αρχικά να μην λήφθηκαν υπόψη στην κατηγοριοποίηση των χρήσεων γης αλλά στην πραγματικότητα δεν αποτελούν GDEs.

Για το έτος 2017, οι τιμές του δείκτη κυμαίνονται από -0,43 έως 0,71, ενώ για το έτος 2022 από -0,34 έως 0,57. Οι υψηλές τιμές του δείκτη έλαβαν το μεγαλύτερο βάρος. Οι τιμές του δείκτη κυμαίνονται από το -1 έως το 1. Μια περιοχή χαρακτηρίζεται ως ξηρή ή πολύ χαμηλή κάλυψη φυλλώματος όταν η τιμή του δείκτη είναι μικρότερη του μηδενός. Η φράση "ξηρή ή πολύ χαμηλή κάλυψη φυλλώματος" προσδιορίζει περαιτέρω την κατάσταση, υποδεικνύοντας ότι όχι μόνο η κάλυψη του φυλλώματος είναι ελάχιστη, αλλά και η φυτεία που υπάρχει ενδέχεται να είναι ελλιπής σε υγρασία. Αυτό υποδηλώνει ένα επιρρεπές σε ξηρασία περιβάλλον, όπου η βλάστηση δυσκολεύεται να διατηρήσει επαρκή περιεχόμενο νερού, συμβάλλοντας στη συνολική ξηρότητα ([NDMI: Vegetation Index Equation And Values Interpretation](#)). Αντίθετα, οι τιμές πάνω από το μηδέν υποδηλώνουν περιοχές με υψηλή πυκνότητα φυλλωμάτων, όπου η βλάστηση είναι παρούσα.



Χάρτης 4. 11: Ταξινόμηση Κανονικοποιημένου Δείκτη Υγρασίας (NDMI) στην 5βάθμια κλίμακα πιθανότητας εύρεσης GDEs, 2017

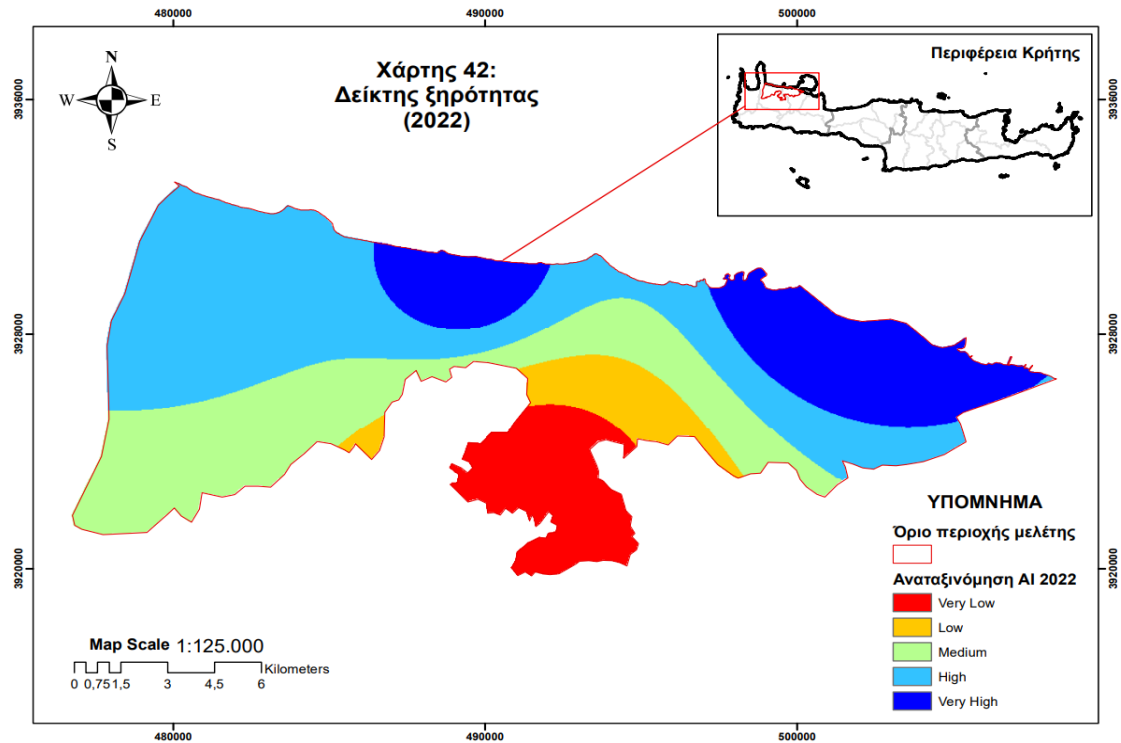


Χάρτης 4. 12: Ταξινόμηση Κανονικοποιημένου Δείκτη Υγρασίας (NDMI) στην 5βάθμια κλίμακα πιθανότητας εύρεσης GDEs, 2022

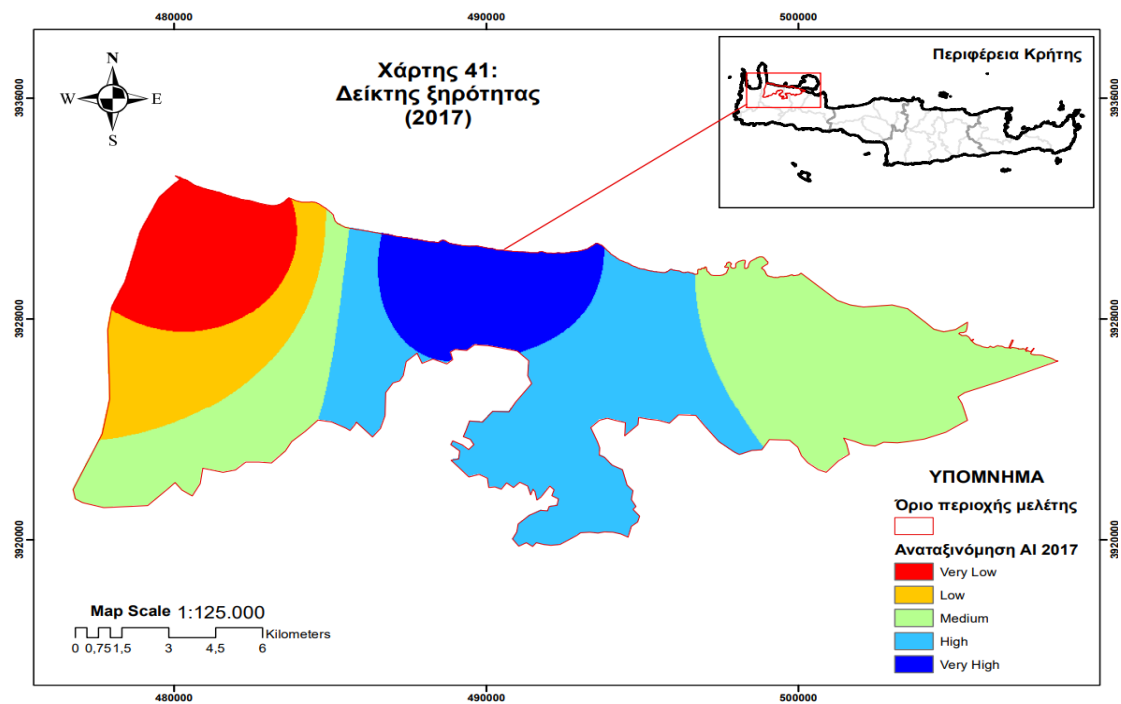
4.1.4 Κλιματικές Παράμετροι

Ο Δείκτης Ξηρασίας του UNEP παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις διεργασίες εξατμισοδιαπνοής και το έλλειμα βροχής για τη δυνητική ανάπτυξη της βλάστησης (Duran-

Llacer et al., 2022). Οι τιμές για το έτος 2017 (υγρή χρονιά) κυμαίνονται από 0,80 έως 1, ενώ για το έτος 2022 (ξηρή χρονιά) κυμαίνονται από 0,59 έως 0,91. Οι χαμηλές τιμές του δείκτη υποδεικνύουν άνυδρες περιοχές. Οι υψηλές κλάσεις της 5βάθμιας κλίμακας πιθανότητας εύρεσης GDEs αντιστοιχούν στις χαμηλές τιμές του δείκτη, όπου η ανάγκη της βλάστησης για υπόγεια ύδατα είναι μεγάλη (Χάρτης 4.13, Χάρτης 4.14)..



Χάρτης 4. 13: Ταξινόμηση Δείκτη Ξηρότητας (AI) στην 5βάθμια κλίμακα πιθανότητας εύρεσης GDEs, 2017



Χάρτης 4. 14: Ταξινόμηση Δείκτη Ξηρότητας (AI) στην 5βάθμια κλίμακα πιθανότητας εύρεσης GDEs, 2022

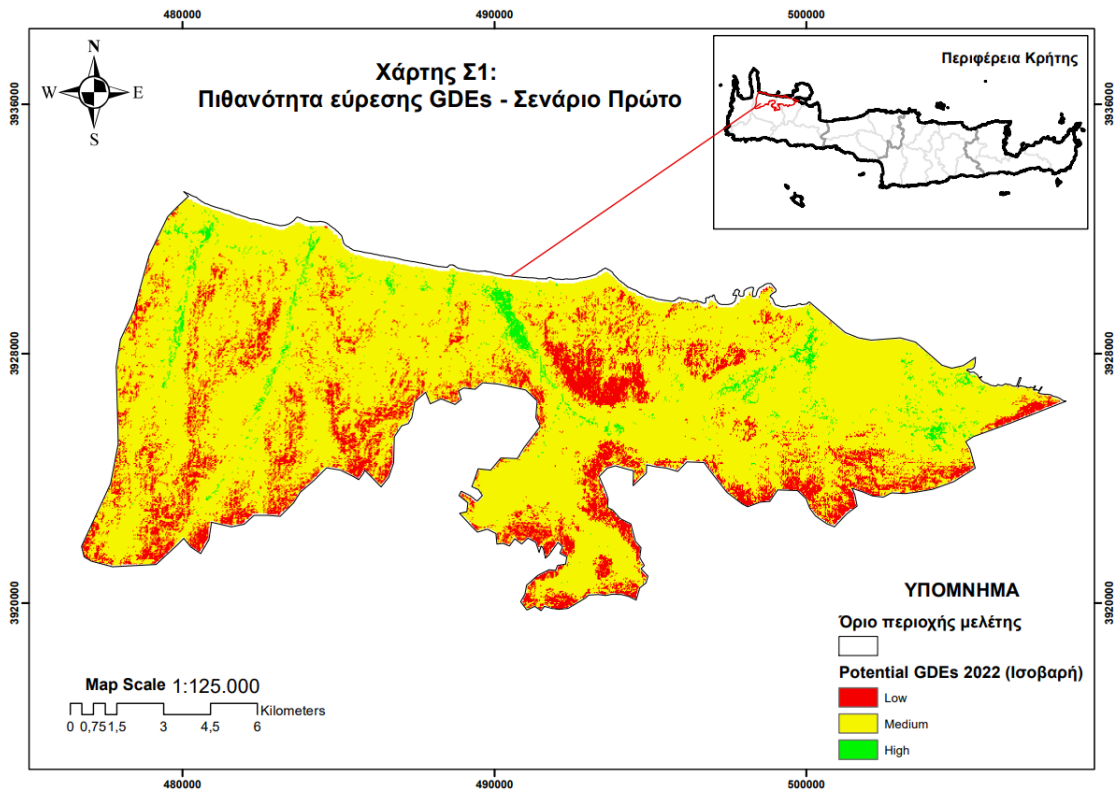
4.2 Τελικά αποτελέσματα χαρτογράφησης GDEs

Η προτεινόμενη μέθοδος χαρτογράφησης των οικοσυστημάτων που εξαρτώνται από τα υπόγεια ύδατα (GDEs) -η οποία και εφαρμόζεται στο πλαίσιο της παρούσας ΔΕ- προτάθηκε από τους Duran-Llacer et al. (2021). Βασίζεται στη λήψη αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων με τη χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS-based Multi-criteria Decision Making - MCDM-GIS). Οι τελικοί χάρτες των GDEs που προέκυψαν έχουν ανάλυση 30 μέτρων (resolution) και περιλαμβάνουν έως 5 κλάσεις που υποδεικνύουν την πιθανότητα ύπαρξης GDEs ("5- Πολύ Υψηλή", "4- Υψηλή", "3- Μέτρια", "2- Χαμηλή" και "1- Πολύ Χαμηλή").

Στο σύνολο δημιουργήθηκαν πέντε χάρτες που απεικονίζουν την πιθανότητα εύρεσης GDEs. Η διαφοροποίηση μεταξύ των πέντε χαρτών οφείλεται στη χρήση διαφορετικών σεναρίων για την απόδοση των βαρών κάθε παραμέτρου εισόδου, όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 3.4.

4.2.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων για το έτος 2022 – Σύγκριση 5 σεναρίων βαρών

Στο **Σενάριο 1^ο** (Χάρτης 4.15) οι 12 παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του χάρτη πιθανότητας εύρεσης GDEs έλαβαν ίσα βάρη (Βλ. Πίνακα 3.5). Το τελικό αποτέλεσμα της χαρτογράφησης απεικονίζει την περιοχή μελέτης να λαμβάνει τιμές τριών κλάσεων πιθανότητας εύρεσης GDEs (κλάση 2-μικρή πιθανότητα, κλάση 3-μεσαία πιθανότητα και κλάση 4-υψηλή πιθανότητα). Όπως προκύπτει από τον Χάρτη 4.15 η ζώνη που χαρακτηρίζεται ως "υψηλή πιθανότητα εμφάνισης GDEs" παρατηρήθηκε κυρίως στις κοιλάδες των ποταμών και σε επίπεδες περιοχές, όπου υπάρχει σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ των επιφανειακών υδάτων και του υπόγειου υδροφορέα. Επίσης, ανιχνεύθηκε σε περιοχές κοντά στις εκβολές των ποταμών Κερίτη και Ταυρωνίτη και χαρακτηρίζεται από επίπεδο έδαφος, μεγαλύτερη υγρασία του εδάφους και πυκνότερη βλάστηση. Μεγαλύτερη έκταση καταλαμβάνει η κλάση 3-Μεσαία πιθανότητα εύρεσης GDEs. Η χωρική της κατανομή ακολουθεί σχετικά ήπιες κλίσεις με μικρό ποσοστό φυτικής κάλυψης, όπως για παράδειγμα καλλιέργειες. Αξίζει να σημειωθεί πως στην κατηγορία 3 κατατάσσεται όλο το ασυνεχές αστικό δίκτυο της περιοχής μελέτης, όπως για παράδειγμα το Νότιο τμήμα της πόλης των Χανίων. Τέλος, η κλάση 2-Χαμηλή πιθανότητα ύπαρξης GDEs φαίνεται να εντοπίζεται σε περιοχές όπου η κλίση είναι πολύ απότομη και το υψόμετρο πολύ υψηλό, της τάξης των 292 έως 480m.

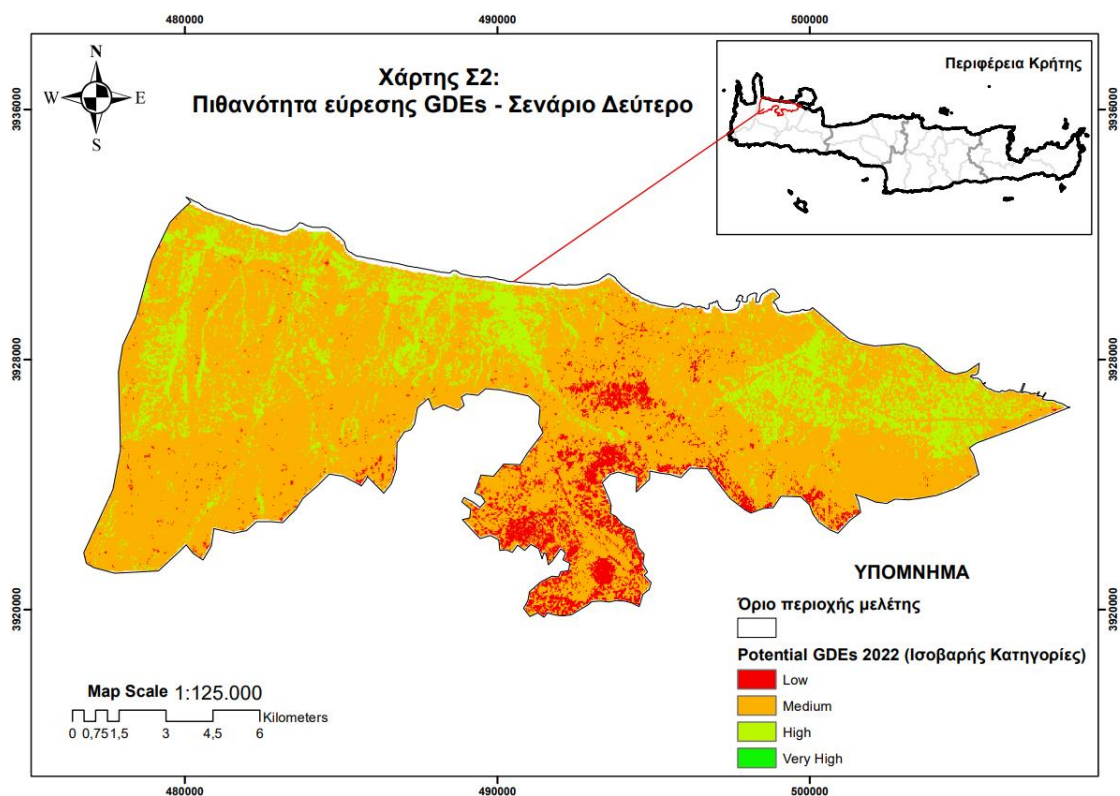


Χάρτης 4. 15: Πιθανότητα εύρεσης GDEs (1ο σενάριο απόδοσης βαρών – όλες οι παράμετροι ισοβαρείς)

Όσον αφορά το **Σενάριο 2** (Χάρτης 4.16), το τελικό αποτέλεσμα που προέκυψε κατηγοριοποιήθηκε σε τέσσερις ζώνες, 2-Χαμηλή πιθανότητα, 3-Μεσαία πιθανότητα, 4-Υψηλή πιθανότητα και 5-Πολύ υψηλή πιθανότητα, ενώ τα βάρη που δόθηκαν στις παραμέτρους εμφανίζονται στον Πίνακα 3.5.

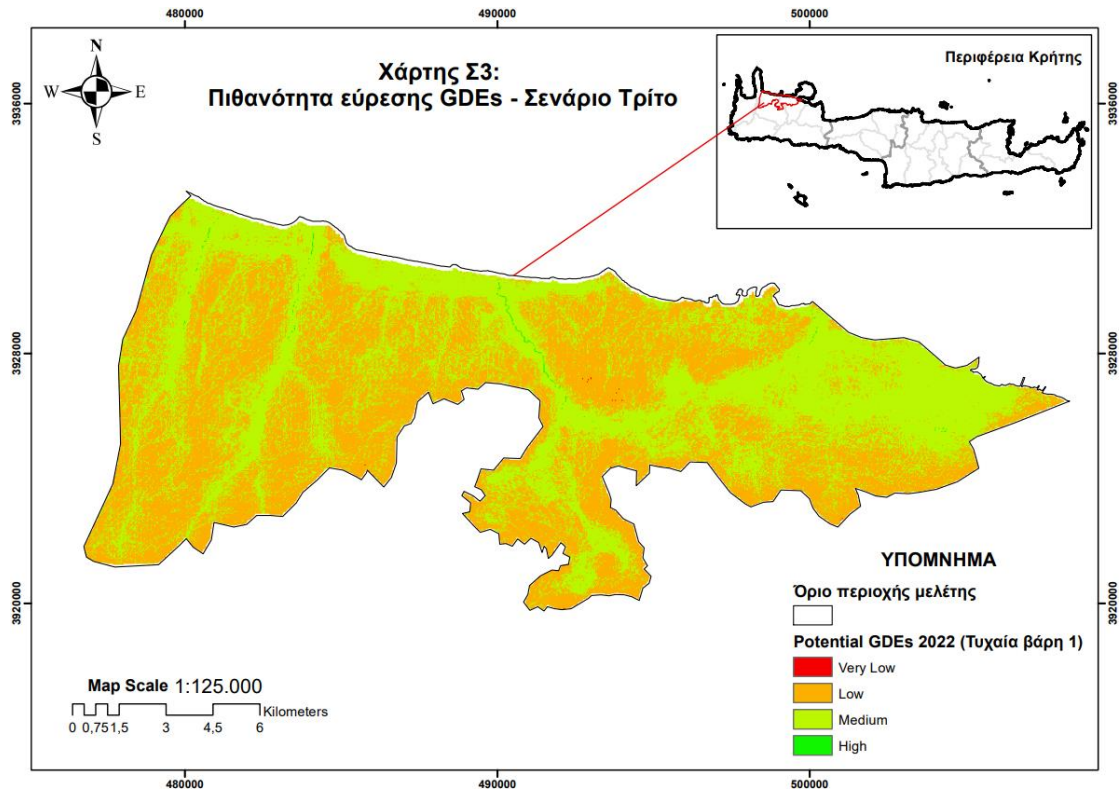
Όπως απεικονίζεται στον Χάρτη 4.16, η ζώνη που χαρακτηρίζεται ως "πολύ υψηλή" είναι τελείως δυσεύρετη, καθώς καλύπτει έκταση ίση με 900m², δηλαδή αντιστοιχεί ακριβώς σε ένα μόνο εικονοστοιχείο σε όλη την έκταση της περιοχής μελέτης. Εξετάζοντας το εικονοστοιχείο αυτό μέσω του προγράμματος ArcMap παρατηρήθηκε πως στην περιοχή εκείνη εντοπίζονται υψηλά ποσοστά βλάστησης Ακόμη, το υψόμετρο στην περιοχή εκείνη είναι ίσο με 88 μέτρα και η κλίση ίση με 5%. Συνεπώς, στο συγκεκριμένο εικονοστοιχείο έχουμε σχετικά χαμηλό υψόμετρο με χαμηλή κλίση και υψηλή υγρασία στην βλάστηση. Επιπλέον, πρόκειται για σχετικά ξηρή περιοχή σύμφωνα με τον δείκτη AI. Ο γεωλογικός σχηματισμός που επικρατεί είναι τα Αλλούβια, τα οποία αντιστοιχούν σε Υψηλή πιθανότητα. Τέλος, οι χρήσεις γης που εντοπίζονται σε αυτό το τμήμα είναι η σκληρόφυλλη βλάστηση, η οποία επίσης αντιστοιχεί σε υψηλή πιθανότητα εύρεσης GDEs. Αξίζει να σημειωθεί πως τα υψηλότερα βάρη στο υπό μελέτη σενάριο δόθηκαν στις παραμέτρους NDMI και AI (με ποσοστό 25% η κάθε μια). Καθώς οι παράμετροι αυτοί στο συγκεκριμένο σημείο έλαβαν ιδιαίτερα υψηλή και ιδιαίτερα χαμηλή τιμή-κλάση, είναι αναμενόμενος ο χαρακτηρισμός του σημείου ως υψηλής πιθανότητας εμφάνισης GDEs. Έπειτα, στην κατηγορία 4-υψηλή πιθανότητα φαίνεται πως η χωρική κατανομή συμβαδίζει με τις υψηλές τιμές της παραμέτρου NDMI και αντίστοιχα με τις χαμηλές τιμές της παραμέτρου AI, καθώς όπου υπάρχει μεγάλο ποσοστό βλάστησης και σχετικά ξηρή περίοδος, η πιθανότητα εύρεσης GDE είναι υψηλή. Αυτό είναι απολύτως λογικό δεδομένης της κατάστασης των βαρών που δόθηκαν. Αντίθετα, η ζώνη 2-χαμηλή πιθανότητα έχει μειωθεί σε μεγάλο βαθμό σε σύγκριση με το Σενάριο 1. Επίσης, έχει συγκεντρωθεί βορειοκεντρικά της περιοχής μελέτης και ειδικότερα εμφανίζεται στα τμήματα όπου το γυμνό έδαφος επικρατεί,

όπως για παράδειγμα στα βράχια και στον ασυνεγή αστικό ιστό. Τέλος, το υπόλοιπο τμήμα της περιοχής μελέτης κατατάσσεται στην ζώνη 3-μεσαία πιθανότητα εύρεσης GDEs.



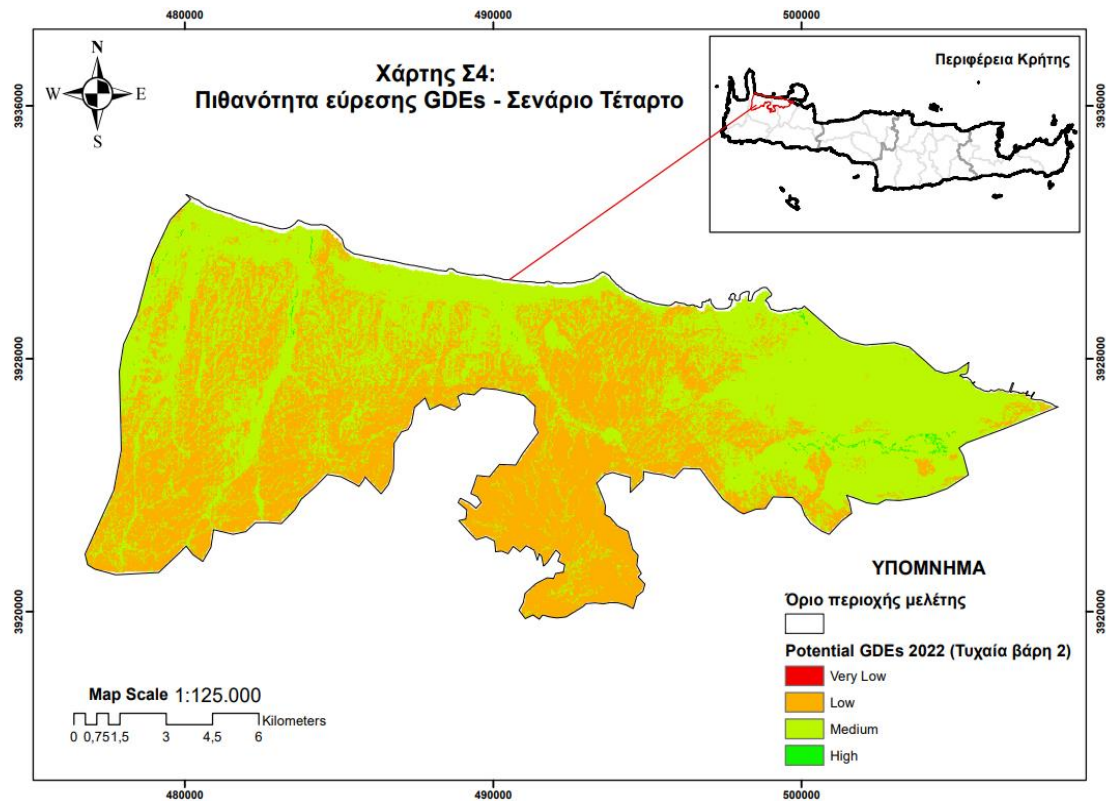
Χάρτης 4. 16 Πιθανότητα εύρεσης GDEs (2ο σενάριο απόδοσης βαρών – ισοβαρές κατηγορίες παραμέτρων – συμβατικές, τοπογραφικές, πολυφασματικές, κλιματικές)

Στο **Σενάριο 3** δόθηκαν τυχαία βάρη στις παραμέτρους (βλ. Πίνακα 3.5). Συγκεκριμένα, το μεγαλύτερο βάρος με ποσοστό 17% δόθηκε στην παράμετρο Συσσώρευση ροής (Fa), η οποία εκφράζει την κατεύθυνση της ροής των υδάτων. Στην συνέχεια, με βάρος 15% ακολουθεί η παράμετρος της καμπυλότητας (Ci), η οποία εκφράζει το προφίλ της γήινης επιφάνειας, εάν είναι κυρτή ή κοίλη. Επιπλέον, υψηλό βάρος αποδόθηκε και στον τοπογραφικό δείκτη υγρασίας (TWI), ο οποίος εκφράζει την υγρασία στο έδαφος. Όπως παρατηρείται στον Χάρτη 4.17, η έκταση της περιοχής μελέτης κατηγοριοποιείται σε τέσσερις ζώνες. Η ζώνη 5-Πολύ υψηλή πιθανότητα εμφάνισης GDEs, απεικονίζεται κατά μήκος των δύο κύριων ποταμών, του Κερίτη και του Ταυρωνίτη. Η ζώνη 4-υψηλή πιθανότητα, η οποία καλύπτει μεγάλη έκταση, χαρακτηρίζεται από κοιλάδες με υψηλό δείκτη υγρασίας. Πιο συγκεκριμένα, στην ζώνη 4 εμφανίζονται σε μεγάλη συχνότητα οι καλλιέργειες, οι οποίες κατά την περίοδο του καλοκαιριού είναι τα μοναδικά σημεία με περισσότερη υγρασία σε σχέση με τις υπόλοιπες χρήσεις γης. Επιπροσθέτως, η "μεσαία" ζώνη αποτελείται από τις διακοπτόμενες κορυφές και τα πιο υψηλά μέρη των λεκανών απορροής. Τέλος, κεντρικά της περιοχής μελέτης αποτυπώνονται κάποια εικονοστοιχεία ως ζώνη 1-πολύ χαμηλή πιθανότητα εύρεσης GDEs, τα οποία χαρακτηρίζονται ως περιοχές με υψηλό υψόμετρο και απότομη κλίση.



Χάρτης 4. 17 Πιθανότητα εύρεσης GDEs (3ο σενάριο απόδοσης βαρών - Τυχαία βάρη)

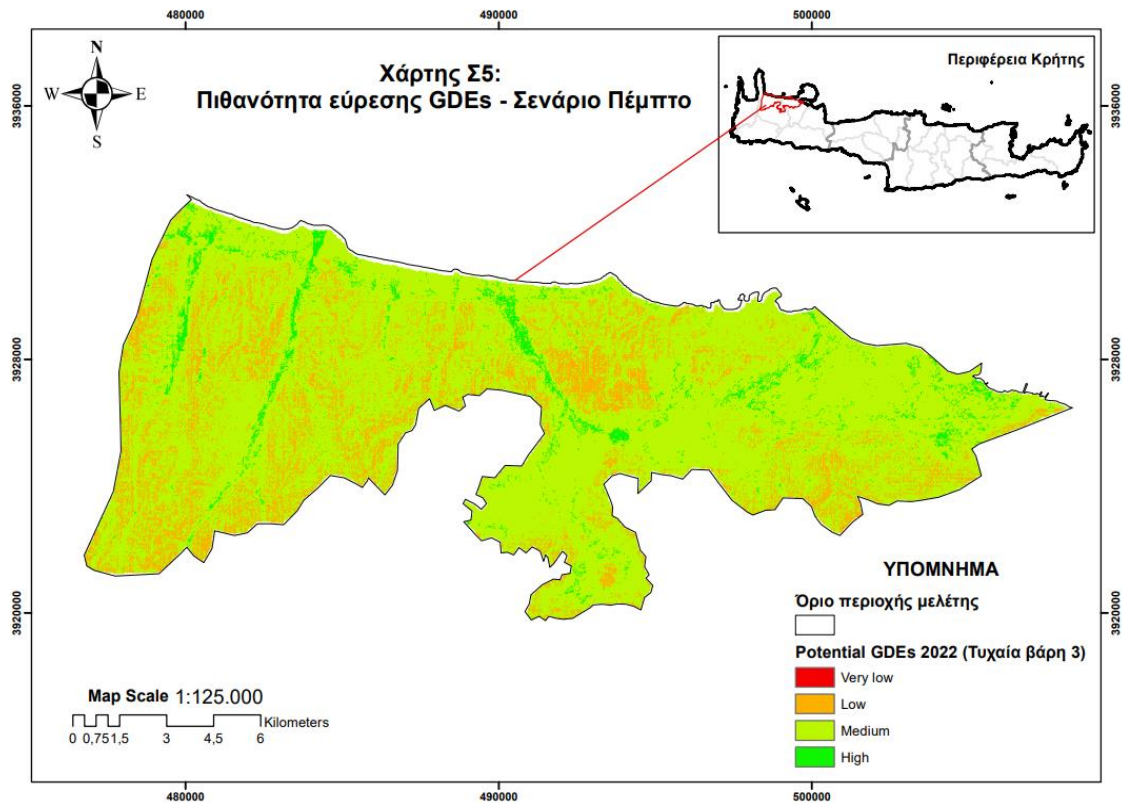
Στο **Σενάριο 4** τα βάρη στις παραμέτρους αποδόθηκαν επίσης τυχαία, με τα υψηλότερα να αντιστοιχούν στις παραμέτρους Χρήσεις Γης (19%), Πυκνότητα Φωτογράμμωσης (16%), Δείκτης Ξηρότητας (16%) και Τοπογραφικός Δείκτης Υγρασίας (15%) (βλ. Πίνακα 3.5). Όπως παρατηρείται στον Χάρτη 4.18, η περιοχή μελέτης έχει κατηγοριοποιηθεί σε τέσσερις ζώνες πιθανότητας εύρεσης GDEs: 1-Πολύ χαμηλή πιθανότητα, 2-Χαμηλή πιθανότητα, 3-Μεσαία πιθανότητα και 4-Υψηλή πιθανότητα. Η ζώνη 4 εντοπίζεται σε μεγάλη πυκνότητα στο ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης, καθώς στο σημείο αυτό οι χρήσεις γης που εντοπίζονται είναι η σκληρόφυλλη βλάστηση, η οποία αντιστοιχεί σε κλάση υψηλής πιθανότητας ύπαρξης GDEs. Επιπλέον, στο σημείο αυτό εντοπίζεται ρήγμα, με αποτέλεσμα οι τιμές της παραμέτρου Πυκνότητα Φωτογράμμωσης να είναι μεγάλες. Επίσης, η περιοχή εκείνη σύμφωνα με τον δείκτη AI χαρακτηρίζεται ως ιδιαίτερα ξηρή. Ακόμη, παρατηρείται πως η κατηγορία 3-μεσαία πιθανότητα εύρεσης GDEs καταλαμβάνει μεγάλη έκταση της περιοχής μελέτης και εντοπίζεται σε περιοχές όπου τα επίπεδα υγρασίας στο έδαφος είναι υψηλά, δηλαδή εκεί που ο Τοπογραφικός Δείκτης Υγρασίας παρουσιάζει υψηλές τιμές. Τέλος, η κατηγορία 2-Χαμηλή πιθανότητα εμφανίζεται σε περιοχές, όπου τα ποσοστά ξηρασίας είναι χαμηλά, οι χρήσεις γης στο μεγαλύτερο μέρος περιορίζονται σε ελαιώνες και τα ποσοστά υγρασίας στο έδαφος είναι χαμηλά.



Χάρτης 4. 18 Πιθανότητα εύρεσης GDEs (4ο σενάριο απόδοσης βαρών - Τυχαία βάρη)

Όσον αφορά το **Σενάριο 5**, η τυχαία επιλογή των βαρών κατέστησε την παράμετρο Curvature (Ct) να συνεισφέρει στη χαρτογράφηση των GDEs με ποσοστό 20%. Έπειτα, ακολουθούν οι παράμετροι: Χρήσεις γης (LUC) με βάρος 17%, η Γεωλογία (Gg) με βάρος 13% και η Κλίση (S), επίσης με βάρος 13%.

Όπως εμφανίζεται στον Χάρτη 4.19, η περιοχή μελέτης έχει κατηγοριοποιηθεί στις εξής τέσσερις ζώνες: 1-Πολύ χαμηλή πιθανότητα, 2-Χαμηλή πιθανότητα, 3-Μεσαία πιθανότητα και 4-Υψηλή πιθανότητα εύρεσης GDEs. Η ζώνη 1-Πολύ χαμηλή πιθανότητα είναι εξαιρετικά δυσεύρετη, καθώς καλύπτει έκταση ίση με 900m², δηλαδή ακριβώς όσο είναι η ανάλυση του χάρτη (30x30). Στη συνέχεια, η ζώνη 2-Χαμηλή πιθανότητα έχει μειώσει δραματικά το ποσοστό κάλυψης της σε σύγκριση με τα υπόλοιπα τέσσερα σενάρια. Αυτό συμβαίνει, γιατί οι τέσσερις παράμετροι που πήραν τα μεγαλύτερα βάρη έχουν πολύ παρόμοια χωρική κατανομή, με αποτέλεσμα η κατηγοριοποίηση των τιμών τους να είναι ομοίως παρόμοια μεταξύ τους. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, όταν πραγματοποιείται η μέθοδος του Overlay Analysis δημιουργείται ένα ομοιόμορφο αποτέλεσμα ίδιο με τις παραμέτρους. Η ζώνη 3-μεσαία πιθανότητα εντοπίζεται σχεδόν σε όλη την έκταση της περιοχής μελέτης και αντικατοπτρίζει κοιλάδες με ήπια κλίση και γεωλογικούς σχηματισμούς, όπου η υδατοπερατότητα είναι σχετικά υψηλή. Επιπροσθέτως, στη ζώνη 4-Πολύ υψηλή πιθανότητα εύρεσης GDEs, παρατηρείται στο Σχήμα 19 ότι τα κύρια ρέματα της περιοχής μελέτης, δηλαδή ο Ταυρωνίτης και ο Κερίτης, έχουν ενταχθεί στην ζώνη αυτή. Επιπλέον, δυτικά της περιοχής εντοπίζεται ένα μικρό ρέμα, το οποίο περιβάλλεται από καλαμιές. Από το Σχήμα 19 προκύπτει ότι το ρέμα αυτό έχει χαρακτηριστεί επίσης ως ζώνη 4. Τέλος, στο ανατολικό τμήμα εντοπίζονται κάποιες περιοχές, οι οποίες ανήκουν στην ζώνη 4, καθώς σε αυτά τα τμήματα εντοπίζονται τα εξής χαρακτηριστικά: χρήσεις γης όπως ελαιώνες, το φυσικό έδαφος χαρακτηρίζεται από χαμηλά υψόμετρα (πεδιάδες) με πολύ ήπια κλίση και γεωλογικοί σχηματισμοί που ευνοούν την μετακίνηση των υπογείων υδάτων.



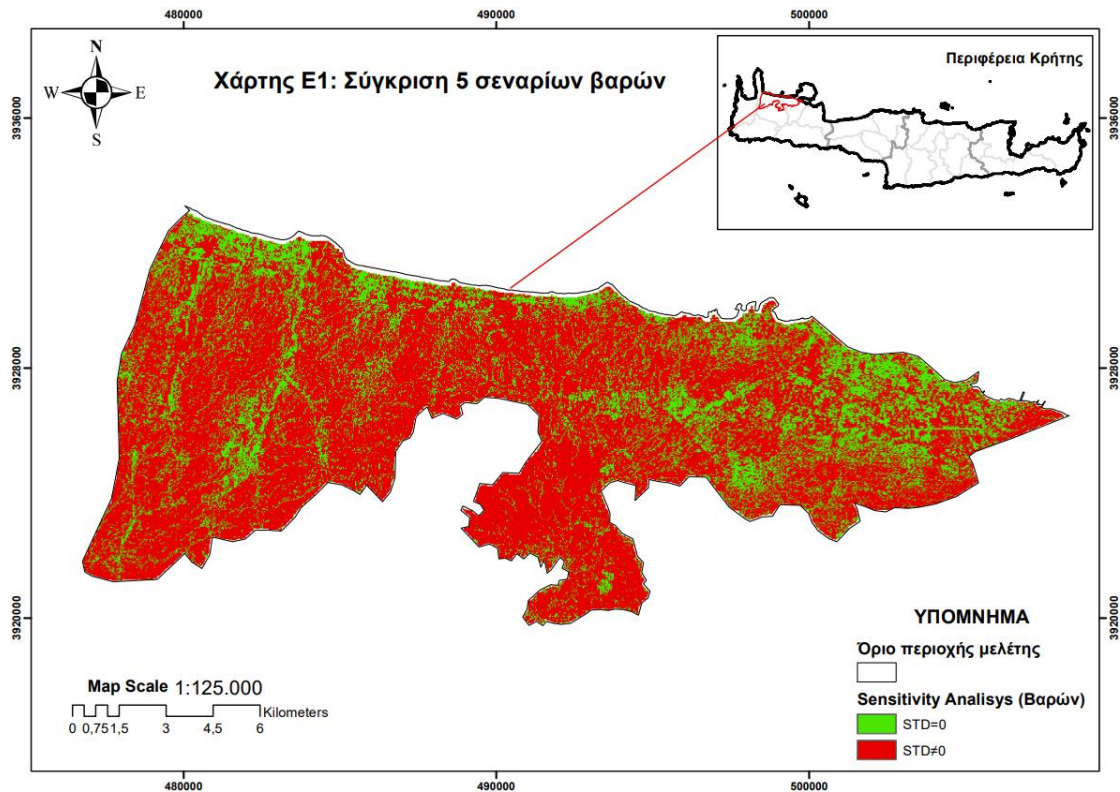
Χάρτης 4. 19 Πιθανότητα εύρεσης GDEs (Τυχαία βάρη 3)

4.2.1.1 Ανάλυση Ευαισθησίας

Στην ΔΕ επικεντρωνόμαστε στην ανάλυση ευαισθησίας σχετικά με την επίδραση των σχετικών βαρών (W_i) στο GDEz. Σε προσεγγίσεις πολλαπλών κριτηρίων, τα βάρη αποτελούν κρίσιμη παράμετρο για την επίτευξη βέλτιστων αποτελεσμάτων (Mazurek & Strzałka, 2022). Προκειμένου να εκτιμηθεί η επίδραση των βαρών στον τελικό χάρτη, υιοθετούμε πέντε σενάρια στάθμισης:

- α) Όλες οι παράμετροι έχουν ίση σημασία.
- β) Οι κατηγορίες των τεσσάρων παραμέτρων (συμβατικά στρώματα GIS, τοπογραφικές παράμετροι, πολυφασματικοί δείκτες, κλιματικές μεταβλητές) έχουν ίση σημασία.
- γ) Τυχαία παραγόμενα βάρη (δημιουργούνται τρία ζεύγη τυχαιών βαρών χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση R «RandVec»).

Προκειμένου να εξεταστεί ο βαθμός συμφωνίας μεταξύ των αποτελεσμάτων GDEs που προκύπτουν από την υιοθέτηση των πέντε προαναφερθέντων σεναρίων στάθμισης, διενεργείται η εκτίμηση της τυπικής απόκλισης GDEs για κάθε κελί του χάρτη, χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση "Cell Statistics" του ArcMap. Όπως φαίνεται στον Χάρτη 4.20, οι πράσινες ζώνες δείχνουν συμφωνία ($STD=0$) σχετικά με το δυναμικό GDEs, ενώ οι περιοχές με κόκκινο χρώμα υποδεικνύουν ασυνέπεια ($STD \neq 0$) μεταξύ του δυναμικού GDE που εντοπίστηκε στα πέντε σενάρια. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων καταλήγει σε συμφωνία 25% για τα GDEs. Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι τα βάρη παίζουν καίριο ρόλο στην τελική χαρτογράφηση, επισημαίνοντας την ανάγκη επικύρωσης των αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα, η πλειονότητα των μεθοδολογιών χαρτογράφησης GDEs στη βιβλιογραφία δεν υποβάλλεται σε επικύρωση πεδίου, επισημαίνοντας τη σημασία μιας καλά σχεδιασμένης διαδικασίας επικύρωσης για την αξιοπιστία της μεθοδολογίας (Duran-Llacer et al., 2022).

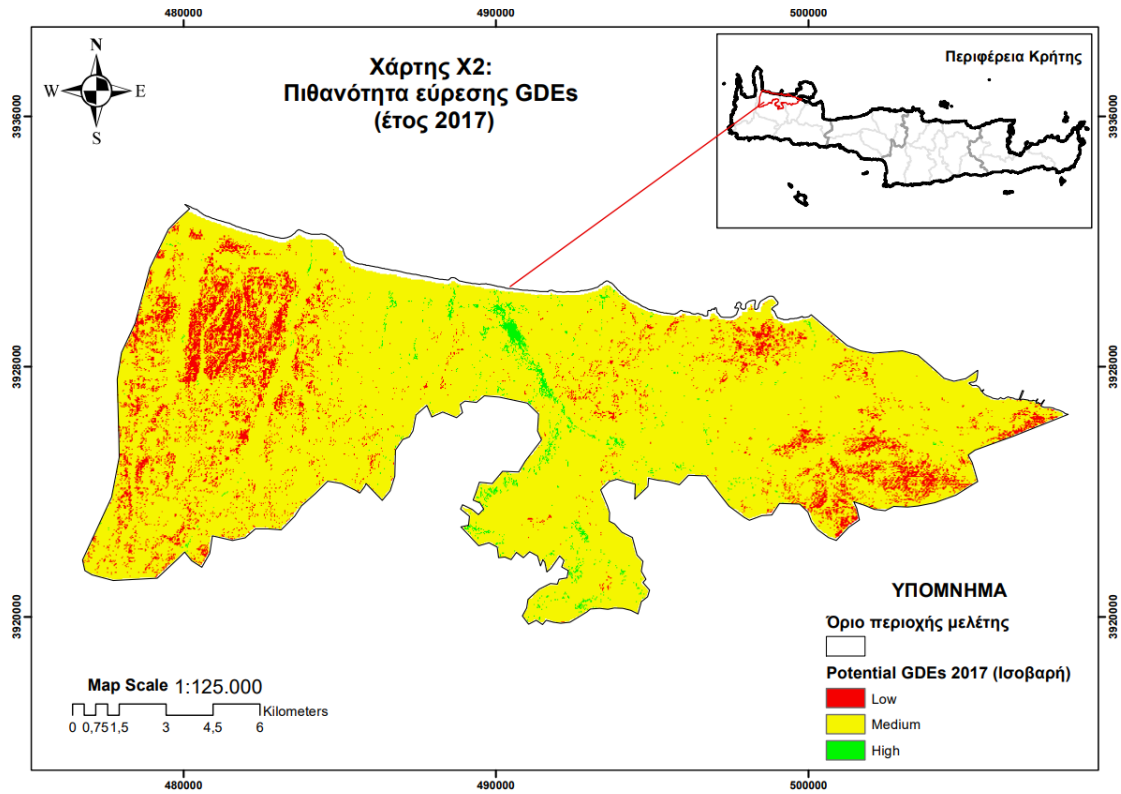


Χάρτης 4. 20 Επιπτώσεις των σταθμίσεων στα GDEs: Ζώνες με δυναμικό GDEs μεταξύ των 5 σεναρίων σε συμφωνία (με πράσινο χρώμα). Στο κόκκινο, περιοχές όπου τα σενάρια των 5 σταθμίσεων οδηγούν σε διαφοροποιημένα αποτελέσματα.

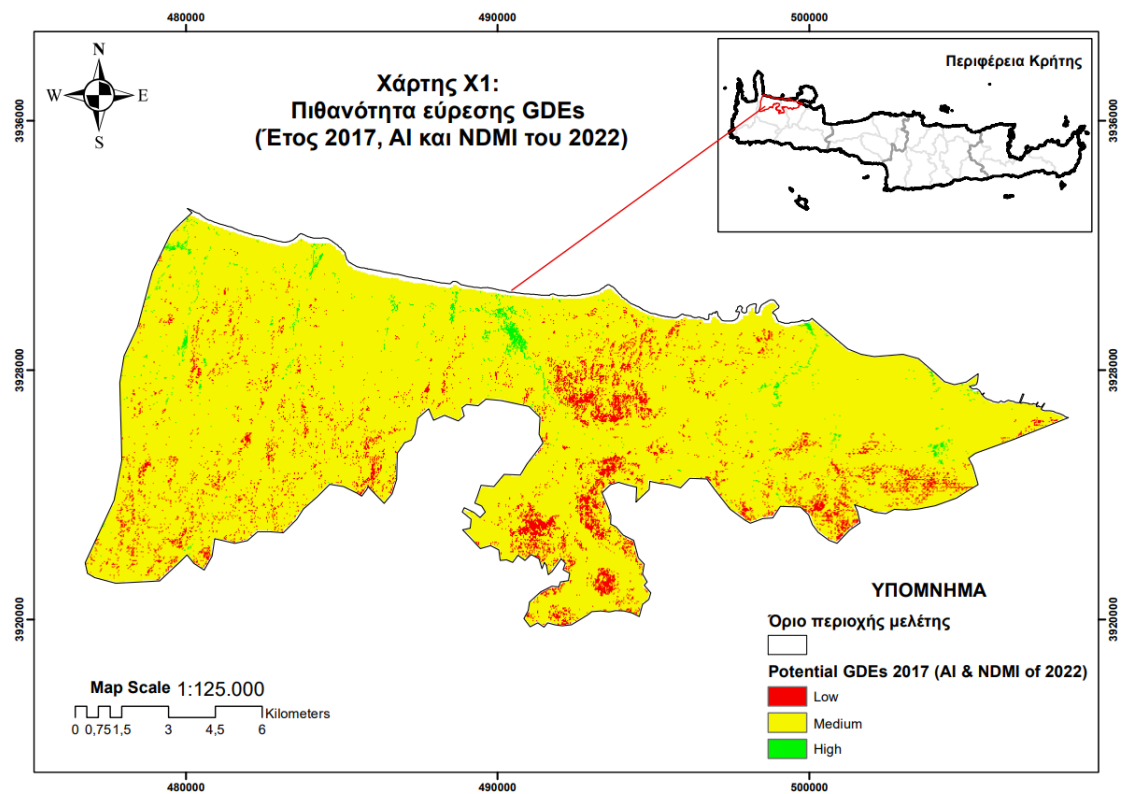
4.2.2 Ανάλυση επιρροής κλιματικών δεδομένων στη χαρτογράφηση των GDEs

Στο υποκεφάλαιο αυτό μελετάται η επιρροή των κλιματικών συνθηκών στην εμφάνιση GDEs. Για τον σκοπό αυτό, συγκρίνονται οι χάρτες GDEs για την υπό μελέτη υγρή (2017) και ξηρή (2022) χρονιά. Οι παράμετροι οι οποίες διαφοροποιούν τις ζώνες εμφάνισης GDEs ανά χρονιά είναι ο Δείκτης ξηρότητας AI και ο Κανονικοποιημένος δείκτης Υγρασίας (NDMI).

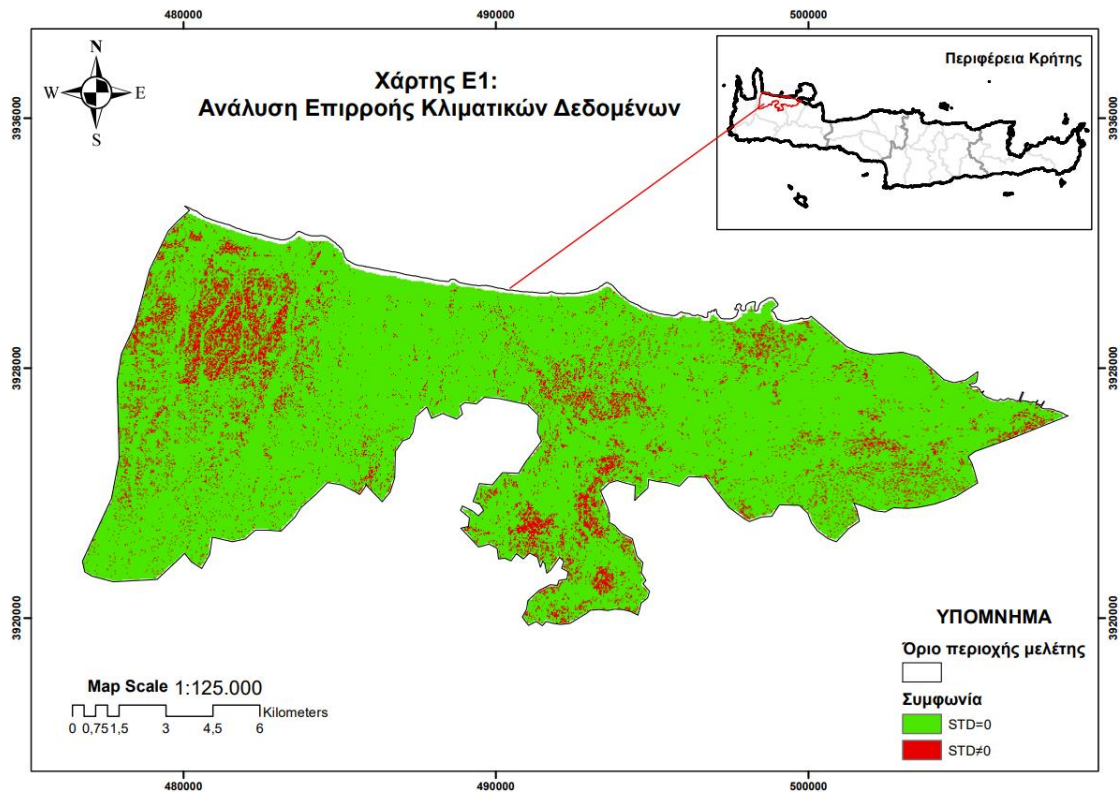
Για να μελετηθεί η επίδραση του δείκτη ξηρότητας και του δείκτη NDMI στο τελικό αποτέλεσμα χρησιμοποιήθηκε η εξής μέθοδος. Αρχικά, δημιουργήθηκε ένας χάρτης για την πιθανότητα εύρεσης GDEs με τα δεδομένα του έτους 2017, με ισοβαρή κατηγοριοποίηση των παραμέτρων (Χάρτης 4.21). Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε με τον ίδιο τρόπο ένας χάρτης απεικόνισης της πιθανότητας εύρεσης GDEs με τα δεδομένα του 2017 με ισοβαρή κατηγοριοποίηση των παραμέτρων, αλλά στη θέση του δείκτη ξηρότητας και του δείκτη NDMI που υπολογίστηκαν για το έτος 2017 χρησιμοποιήθηκαν οι αντίστοιχοι δείκτες του έτους 2022 (Χάρτης 4.22). Τέλος, για να υπολογιστεί ο βαθμός συμφωνίας μεταξύ των δύο αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση της τυπικής απόκλισης GDEs για κάθε κελί του χάρτη με τη χρήση της λειτουργίας "Cell Statistics" του ArcMap (Χάρτης 4.23).



Χάρτης 4. 21: Πιθανότητα εύρεσης GDEs, με τις παραμέτρους του έτους 2017



Χάρτης 4. 22: Πιθανότητα εύρεσης GDEs για την χρονολογία του 2017 αλλά με τον δείκτη ξηρότητας και τον δείκτη NDMI του 2022



Χάρτης 4. 23: Ανάλυση επιρροής κλιματικών δεδομένων μέσω του Δείκτη Ξηρότητας (AI) και του Δείκτη NDMI. Οι περιοχές σε συμφωνία απεικονίζονται με πράσινο χρώμα και αντίθετα οι περιοχές που δεν είναι σε συμφωνία με κόκκινο χρώμα

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων καταλήγει σε συμφωνία 89% για το GDEs (Χάρτης 4.23). Δεδομένων των συνθηκών -ότι δηλαδή αρχικά τα βάρη που δόθηκαν στις παραμέτρους και στις δύο περιπτώσεις είναι ίδιες και ότι δεύτερον οι μοναδικές παράμετροι που τροποποιήθηκαν είναι ο Δείκτης Ξηρότητας (AI) και ο Κανονικοποιημένος Δείκτης Υγρασίας (NDMI)- η μεταβολή της συμφωνίας (μείωση κατά 11%) είναι αξιοσημείωτη. Εν κατακλείδι, ανάγεται το συμπέρασμα πως οι κλιματολογικές συνθήκες επηρεάζουν αρκετά τα οικοσυστήματα που εξαρτώνται από τα υπόγεια ύδατα (GDEs).

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

5.1 Γενικά Συμπεράσματα

Στην παρούσα ΔΕ μελετήθηκε μια γεωχωρική μέθοδος χαρτογράφησης GDEs, σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία των Duran Llacer et al. (2022), στην οποία εφαρμόστηκε η προτεινόμενη μεθοδολογία στον Κάμπο Χανίων. Βασικό βήμα για τη χαρτογράφηση των GDEs αποτέλεσε ο προσδιορισμός των 17 παραμέτρων που προτάθηκαν από τους Duran Llacer et al. (2022) ως σχετιζόμενες με την ύπαρξη των GDEs. Οι παράμετροι αυτές προσιδιάστηκαν για την περιοχή μελέτης μέσω μεθόδων τηλεπισκόπησης, βιβλιογραφικών αναφορών και ανοιχτών γεωχωρικών δεδομένων από πηγές όπως CORINE, geodata κ.ά.. Στη συνέχεια, ελέγχθηκε η συσχέτιση των 17 αυτών παραμέτρων, προκειμένου να αποκλειστούν από το τελικό μοντέλο που οδηγεί στη χαρτογράφηση των GDEs παράμετροι με υψηλή συσχέτιση μεταξύ τους, καθώς η χρήση σχετιζόμενων παραμέτρων στο τελικό μοντέλο θα μπορούσε να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα. Μέσω της ποσοτικοποίησης του βαθμού συσχέτισης των παραμέτρων, επιλέχθηκαν 12 παράμετροι οι οποίες εισήχθησαν στο τελικό μοντέλο χαρτογράφησης. Σημειώνεται ότι οι τιμές των παραμέτρων αυτών ταξινομήθηκαν σε 5βάθμια κλίμακα η οποία εκφράζει την πιθανότητα εμφάνισης GDEs σε μια περιοχή.

Το τελικό βήμα για τη χαρτογράφηση των GDEs σύμφωνα με την μεθοδολογία των Duran Llacer et al. (2022) είναι ο προσδιορισμός της βαρύτητας κάθε παραμέτρου, ώστε να ληφθεί υπόψη στο τελικό μοντέλο. Οι Duran Llacer et al. (2022) προσδιόρισαν τα βάρη μέσω εμπειρογνομόνων. Παρόλα αυτά, στο πλαίσιο της παρούσας ΔΕ, μελετήθηκαν πέντε σενάρια βαρών -για το έτος 2022- ώστε να προσδιορισθεί η επίδραση τους στο τελικό αποτέλεσμα (χαρτογράφηση GDEs).

Η εφαρμογή των πέντε σεναρίων για την εκτίμηση των βαρών των παραμέτρων που εισάγονται στο μοντέλο χαρτογράφησης οδήγησε στο συμπέρασμα ότι μόνο το 25% των εικονοστοιχείων του τελικού χάρτη συγκλίνει ως προς την πιθανότητα εμφάνισης GDEs. Το επίπεδο συμφωνίας αυτό υπογραμμίζει τη σημασία των βαρών κατά την τελική χαρτογράφηση, καθώς και την αναγκαιότητα επαλήθευσης των αποτελεσμάτων. Σημειώνεται ότι η πλειονότητα των υφιστάμενων μεθοδολογιών χαρτογράφησης GDEs με χρήση GIS, όπως αναφέρεται από τους Duran-Llacer et al. (2022), συχνά δεν υποβάλλεται σε επικύρωση πεδίου. Μάλιστα, οι ίδιοι πραγματοποιούν έρευνα πεδίου σε 100 τυχαία επιλεγμένα σημεία για να επαληθεύσουν τη μεθοδολογία τους.

Στη συνέχεια, μελετήθηκε η επίδραση των κλιματολογικών συνθηκών στην παρουσία των GDEs, συγκρίνοντας τους τελικούς χάρτες πιθανότητας εύρεσης GDEs για δύο χρονιές: α) για το έτος 2017, η οποία έχει χαρακτηριστεί ως υγρή χρονιά και β) για το έτος 2022, η οποία έχει χαρακτηριστεί ως ξηρή χρονιά για την περιοχή μελέτης. Οι παράμετροι εισόδου οι οποίες διαφοροποιούνται ανά έτος είναι οι εξής: Δείκτης Ξηρότητας (AI) και Κανονικοποιημένος Δείκτης Υγρασίας (NDMI). Το αποτέλεσμα έδειξε πως το έτος 2022 η έκταση των ζωνών οι οποίες χαρακτηρίζονται ως μεγάλης πιθανότητας εύρεσης GDEs είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του έτους 2017 κατά ~ 11%, δηλαδή κατά 20 τετραγωνικά χιλιόμετρα (Km²). Η διαφοροποίηση αυτή είναι σχετικά αναμενόμενη, αφού τις ξηρές χρονιές (π.χ. 2022), η εξάρτηση των οικοσυστημάτων από τα υπόγεια ύδατα είναι μεγαλύτερη. Εν κατακλείδι, ανάγεται το συμπέρασμα πως οι κλιματολογικές συνθήκες επηρεάζουν σημαντικά την εμφάνιση GDEs και είναι σημαντικό να επιλέγονται με προσοχή οι χρονιές για τις οποίες προσδιορίζεται ο χάρτης εύρεσης GDEs για την ορθότερη διαχείριση τους.

5.2 Επόμενα βήματα - Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η εφαρμογή της μεθόδου χαρτογράφησης GDEs των Duran-Llacer et al. (2022) στην περιοχή μελέτης ανέδειξε τα παρακάτω ζητήματα προς περαιτέρω έρευνα:

- Την ανάγκη προσδιορισμού των βαρών των παραμέτρων εισόδου στο μοντέλο -κατά το δυνατόν- καθώς η χρήση εμπειρογνομόνων είναι μία χρονοβόρα διαδικασία.
- Την ανάγκη επικύρωσης των αποτελεσμάτων με επί τόπου επίσκεψη ή με τηλεσκοπικές μεθόδους. Συγκεκριμένα, είναι σημαντικό να προσδιοριστεί μεθοδολογία επικύρωσης η οποία θα καθορίζει -πέραν του τρόπου επικύρωσης- τον απαιτούμενο αριθμό σημείων επικύρωσης και τη διασπορά τους στην περιοχή μελέτης.
- Τη σύγκριση της μεθοδολογίας με άλλες προτεινόμενες (π.χ. η μέθοδος των Martínez-Santos et al., 2021) που λαμβάνουν υπόψη λιγότερες παραμέτρους εισόδου οι οποίες κατ' επέκταση έχουν ευκολότερη και ταχύτερη εφαρμογή. Ωστόσο, είναι σημαντικό να συγκριθεί η εγκυρότητα των μεθόδων ώστε να ελεγχθεί αν η επιλογή λιγότερων παραμέτρων εισόδου οδηγεί -πέρα από τον ταχύτερο υπολογισμό της πιθανότητας εύρεσης GDEs- σε αξιόπιστα αποτελέσματα.

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- Ahmed II, J. B., & Pradhan, B. (2019). Spatial assessment of termites interaction with groundwater potential conditioning parameters in Keffi, Nigeria. *Journal of Hydrology*, 578, 124012. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124012>
- Ahmed, A., Ranasinghe-Arachchilage, C., Alrajhi, A., & Hewa, G. (2021). Comparison of multicriteria decision-making techniques for groundwater recharge potential zonation: Case study of the Willochra Basin, South Australia. *Water*, 13(4), 525. doi:<https://doi.org/10.3390/w13040525>
- Alademomi, A. S., Okolie, C. J., Daramola, O. E., Agboola, R. O., & Salami, T. J. (2020). Assessing the relationship of LST, NDVI and EVI with land cover changes in the Lagos Lagoon environment. *Quaestiones Geographicae*, 39(3), 111-123. doi:<https://doi.org/10.2478/quageo-2020-0025>
- Arulbalaji, P., Padmalal, D., & Sreelash, K. (2019). GIS and AHP techniques based delineation of groundwater potential zones: a case study from southern Western Ghats, India. *Scientific reports*, 9(1), 2082. doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-019-38567-x>
- Barron, O. V., Emelyanova, I., Van Niel, T. G., Pollock, D., & Hodgson, G. (2014). Mapping groundwater-dependent ecosystems using remote sensing measures of vegetation and moisture dynamics. *Hydrological Processes*, 28(2), 372-385. doi:<https://doi.org/10.1002/hyp.9609>
- Benedetti, Y., Callaghan, C. T., Ulbrichová, I., Galanaki, A., Kominos, T., Abou Zeid, F., ... & Morelli, F. (2023). EVI and NDVI as proxies for multifaceted avian diversity in urban areas. *Ecological Applications*, 33(3), e2808. doi:<https://doi.org/10.1002/eap.2808>
- Chen, J., Yang, S. T., Li, H. W., Zhang, B., & Lv, J. R. (2013). Research on geographical environment unit division based on the method of natural breaks (Jenks). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40, 47-50. doi:<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-4-W3-47-2013>
- D. C. Jhariya, Rubia Khan, K. C. Mondal, Tarun Kumar, Indhulekha K., Vikal K. Singh. (2021). Assessment of groundwater potential zone using GIS-based multi-influencing factor (MIF), multi-criteria decision analysis (MCDA) and electrical resistivity survey techniques in Raipur city, Chhattisgarh, India. *AQUA - Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 375-400. doi:<https://doi.org/10.2166/aqua.2021.129>
- Danielopol, D. L., Griebler, C., Gunatilaka, A., & Notenboom, J. (2003). Present state and future prospects for groundwater ecosystems. *Environmental conservation*, 30(2), 104-130. doi:[10.1017/S0376892903000109](https://doi.org/10.1017/S0376892903000109)
- Devanantham Abijith, Subbarayan Saravanan, Leelambar Singh, Jesudasan Jacinth Jennifer, Thiyagarajan Saranya, K.S.S. Parthasarathy. (2020). GIS-based multi-criteria analysis for identification of potential groundwater recharge zones - a case study from Ponnaniyar watershed, Tamil Nadu, India. *HydroResearch*, 1-14. doi:<https://doi.org/10.1016/j.hydres.2020.02.002>

- Duran-Llacer, I., Arumí, J. L., Arriagada, L., Aguayo, M., Rojas, O., González-Rodríguez, L., ... & Singh, S. K. (2022). A new method to map groundwater-dependent ecosystem zones in semi-arid environments: A case study in Chile. *Science of The Total Environment*, 816, 151528. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151528>
- Eamus, D., & Froend, R. (2006). Groundwater-dependent ecosystems: the where, what and why of GDEs. *Australian Journal of Botany*, 54(2), 91-96. doi:10.1071/BT06029
- Eamus, D., Fu, B. (2016). Groundwater dependent ecosystems: classification, identification techniques and threats. Integrated groundwater management: concepts, approaches and challenges. *Springer, A. E., & Stevens, L. E.*, 313-346. doi:10.1007/978-3-319-23576-9_13
- Eamus, D., Zolfaghar, S., Villalobos-Vega, R., Cleverly, J., and Huete, A. (2015). Groundwater-dependent ecosystems: recent insights from satellite and field-based studies, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 4229–4256. doi:<https://doi.org/10.5194/hess-19-4229-2015>
- Fontana, R. B., & Collischonn, W. (2019). Remote sensing and GIS based analysis of groundwater dependent ecosystems in the Brazilian Cerrado. *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*.
- Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M. F., & Van Beek, L. P. (2012). Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, 488(7410), 197-200. doi:<https://doi.org/10.1038/nature11295>
- Gou, S., Gonzales, S., & Miller, G. R. (2015). Mapping potential groundwater-dependent ecosystems for sustainable management. *Groundwater*, 53(1), 99-110. doi:<https://doi.org/10.1111/gwat.12169>
- Goumas, C., Dokou, Z., Morianou, G. G., Kourgialas, N. N., & Karatzas, G. P. (2017). Using groundwater flow simulation of the Chania Plain area to propose a proper irrigation plan. *European Water*, 57, 467-473.
- Government, Q. (2017). Groundwater dependent ecosystem mapping on the Queensland Globe frequently asked questions. *Queensland Governmentt, Brisbane, version 1.5*.
- Griebler, C., & Avramov, M. (2015). Groundwater ecosystem services: a review. *Freshwater Science*, 34(1), 355-367. doi:<https://doi.org/10.1086/679903>
- Harrison, P. A., Dunford, R., Barton, D. N., Kelemen, E., Martín-López, B., Norton, L., ... & Zulian, G. (2018). Selecting methods for ecosystem service assessment: A decision tree approach. *Ecosystem services*, 29, 481-498. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.09.016>
- Hoogland, T., Heuvelink, G. B., & Knotters, M. (2010). Mapping water-table depths over time to assess desiccation of groundwater-dependent ecosystems in the Netherlands. *Wetlands*, 30, 137-147. doi:<https://doi.org/10.1007/s13157-009-0011-4>
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote sensing of environment*, 83(1-2), 195-213. doi:[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Imran A. Dar, K. Sankar, Mithas A. Dar. (2010). Remote sensing technology and geographic information system modeling: An integrated approach towards the mapping of

- groundwater potential zones in Hardrock terrain, Mamundiyar basin. *Journal of Hydrology*, 285-295. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.08.022>
- Jakeman, A. J., Barreteau, O., Hunt, R. J., Rinaudo, J. D., & Ross, A. (2016). *Integrated groundwater management*. Springer Nature. doi:10.1007/978-3-319-23576-9
- Jayawardhana, W. G. N. N., & Chathuranga, V. M. I. (2020). Investigate The Sensitivity Of The Satellite-Based Agricultural Drought Indices To Monitor The Drought Condition Of Paddy And Introduction To Enhanced Multi-Temporal Agricultural Drought Indices. *Journal of Remote Sensing and GIS*.
- Kløve, B., Ala-Aho, P., Bertrand, G., Gurdak, J. J., Kupfersberger, H., Kværner, J., ... & Pulido-Velazquez, M. (2014). Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. *Journal of Hydrology*, 518 (B), 250-266. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.037>
- Kuginis, L., Dabovic, J., Byrne, G., Raine, A., & Hemakumara, H. (2016). Methods for the identification of high probability groundwater dependent vegetation ecosystems. *DPI Water: Sydney, NSW*.
- Laura Kuginis, Dr Jodie Dabovic, Glenn Byrne, Allan Raine and Herbert Hemakumara. (2016). Methods for the identification of high probability groundwater dependent vegetation ecosystems. *e Department of Primary Industries, a Division of NSW Department of Industry, Skills and Regional*. Ανάκτηση από <http://www.dpi.nsw.gov.au/>
- Liu, C., Liu, H., Yu, Y., Zhao, W., Zhang, Z., Guo, L., & Yetemen, O. (2021). Mapping groundwater-dependent ecosystems in arid Central Asia: Implications for controlling regional land degradation. *Science of The Total Environment*, 797, 149027. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149027>
- López-Vicente, M., Pérez-Bielsa, C., López-Montero, T., Lambán, L. J., & Navas, A. (2014). Runoff simulation with eight different flow accumulation algorithms: Recommendations using a spatially distributed and open-source model. *Environmental Modelling & Software*, 62, 11-21. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.08.025>
- Malczewski, J., & Rinner, C. (2015). *Multicriteria decision analysis in geographic information science*. New York: Springer.
- Mallick, J., Singh, C. K., Al-Wadi, H., Ahmed, M., Rahman, A., Shashtri, S., & Mukherjee, S. (2015). Geospatial and geostatistical approach for groundwater potential zone delineation. *Hydrological Processes*, 29(3), 395-418. doi:<https://doi.org/10.1002/hyp.10153>
- Mallick, J., Singh, C. K., Al-Wadi, H., Ahmed, M., Rahman, A., Shashtri, S., & Mukherjee, S. (2015). Geospatial and geostatistical approach for groundwater potential zone delineation. *Hydrological Processes*, 29(3), 395-418. doi:<https://doi.org/10.1002/hyp.10153>
- Martínez-Santos, P., Díaz-Alcaide, S., De la Hera-Portillo, A., & Gómez-Escalonilla, V. (2021). Mapping groundwater-dependent ecosystems by means of multi-layer supervised classification. *Journal of Hydrology*, 603, 126873. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126873>
- Martínez-Santos, P., Díaz-Alcaide, S., De la Hera-Portillo, A., & Gómez-Escalonilla, V. (2021). Mapping groundwater-dependent ecosystems by means of multi-layer supervised

- classification. *Journal of Hydrology*, 603, 126873. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126873>
- Matsushita, B., Yang, W., Chen, J., Onda, Y., & Qiu, G. (2007). Sensitivity of the enhanced vegetation index (EVI) and normalized difference vegetation index (NDVI) to topographic effects: a case study in high-density cypress forest. *Sensors*, 7(11), 2636-2651. doi:<https://doi.org/10.3390/s7112636>
- Mazurek, J., & Strzałka, D. (2022). On the Monte Carlo weights in multiple criteria decision analysis. *Plos one*, 17(10). doi:<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268950>
- Mitina Upwanshi, Kunal Damry, Darshana Pathak, Suvarna Tikle, Sandipan Das. (2023). Delineation of potential groundwater recharge zones using remote sensing, GIS, and AHP approaches. *Urban Climate*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101415>
- Morell-Monzó, S., Sebastiá-Frasquet, M. T., Estornell, J., & Moltó, E. (2023). Detecting abandoned citrus crops using Sentinel-2 time series. A case study in the Comunitat Valenciana region (Spain). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 201, 54-66. doi:<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.05.003>
- Münch, Z., & Conrad, J. (2007). Remote sensing and GIS based determination of groundwater dependent ecosystems in the Western Cape, South Africa. *Hydrogeology Journal*, 19-28. doi:<https://doi.org/10.1007/s10040-006-0125-1>
- Münch, Z., & Conrad, J. (2007). Remote sensing and GIS based determination of groundwater dependent ecosystems in the Western Cape, South Africa. *Hydrogeology Journal*, 15, 19-28. doi:<https://doi.org/10.1007/s10040-006-0125-1>
- Nastos, P. T., Politi, N., & Kapsomenakis, J. (2013). Spatial and temporal variability of the Aridity Index in Greece. *Atmospheric Research*, 119, 140-152. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.06.017>
- Nijkamp, P., & van Delft, A. (1977). *Multi-criteria analysis and regional decision-making*. Leiden: Springer Science & Business Media.
- Otgonbayar, M., Atzberger, C., Chambers, J., Amarsaikhan, D., Böck, S., & Tsogtbayar, J. (2017). Land suitability evaluation for agricultural cropland in Mongolia using the spatial MCDM method and AHP based GIS. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 5(9), 238-263. doi:<https://doi.org/10.4236/gep.2017.59017>
- Pandey, H. K., Singh, V. K., Singh, S. K., & Sharma, S. K. (2023). Mapping and validation of groundwater dependent ecosystems (GDEs) in drought-affected part of Bundelkhand region, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 23, 100979. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100979>
- Pérez Hoyos, I. C., Krakauer, N. Y., Khanbilvardi, R., & Armstrong, R. A. (2016). A review of advances in the identification and characterization of groundwater dependent ecosystems using geospatial technologies. *Geosciences*, 6(2), 17. doi:<https://doi.org/10.3390/geosciences6020017>
- Pérez Hoyos, I. C., Krakauer, N. Y., Khanbilvardi, R., & Armstrong, R. A. (2016). A review of advances in the identification and characterization of groundwater dependent ecosystems using geospatial technologies. *Geosciences*, 6(2), 17. doi:<https://doi.org/10.3390/geosciences6020017>

- Pérez Hoyos, I.C., Krakauer, N.Y., Khanbilvardi, R. (2016). Estimating the Probability of Vegetation to Be Groundwater Dependent Based on the Evaluation of Tree Models. *Environments*, 3(2), 9. doi:<https://doi.org/10.3390/environments3020009>
- Qadir, J., Bhat, M. S., Alam, A., & Rashid, I. (2020). Mapping groundwater potential zones using remote sensing and GIS approach in Jammu Himalaya, Jammu and Kashmir. *GeoJournal*, 85, 487-504. doi:<https://doi.org/10.1007/s10708-019-09981-5>
- Rampheri, M. B., Dube, T., Dondofema, F., & Dalu, T. (2023). Identification and delineation of groundwater-dependent ecosystems (GDEs) in the Khakea–Bray transboundary aquifer region using geospatial techniques. *Geocarto International*, 38(1), 2172217. doi:<https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2172217>
- Ravichandran, R., Ayyavoo, R., Rajangam, L., Madasamy, N., Murugaiyan, B., & Shanmugam, S. (2022). Identification of groundwater potential zone using analytical hierarchical process (AHP) and multi-criteria decision analysis (MCDA) for Bhavani river basin, Tamil Nadu, southern India. *Groundwater for Sustainable Development*, 18, 100806. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100806>
- Samuel Yaw Danso, Yi Ma. (2023). Geospatial techniques for groundwater potential zones delineation in a coastal municipality, Ghana. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 75-84. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2022.12.004>
- Schröter, M., Bonn, A., Klotz, S., Seppelt, R., & Baessler, C. (2019). *Atlas of ecosystem services: drivers, risks, and societal responses*. Springer. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-319-96229-0>
- Serov P, Kuginis L, Williams J.P. (2012). Risk assessment guidelines for groundwater dependent ecosystems. *The conceptual framework, NSW Department of Primary Industries, Office of Water, Sydney, 1*.
- Stringfield, V. T., Rapp, J. R., & Anders, R. B. (1979). Effects of karst and geologic structure on the circulation of water and permeability in carbonate aquifers. *Developments in Water Science*, 12, 313-332. doi:[https://doi.org/10.1016/S0167-5648\(09\)70023-1](https://doi.org/10.1016/S0167-5648(09)70023-1)
- Tegos, A., Stefanidis, S., Cody, J., & Koutsoyiannis, D. (2023). On the Sensitivity of Standardized-Precipitation-Evapotranspiration and Aridity Indexes Using Alternative Potential Evapotranspiration Models. *Hydrology*, 10(3), 64. doi:<https://doi.org/10.3390/hydrology10030064>
- Tsiaoussi V., E. Mavromati, and D. Kemitzoglou. (2016). Report on the development of the national method for the assessment of the ecological status of natural lakes in Greece, using the biological quality element “phytoplankton”. *Greek*, 16.
- Tzeng, G. H., & Huang, J. J. (2011). *Multiple attribute decision making: methods and applications*. Springer Berlin, Heidelberg. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>
- Weier, J., & Herring, D. (2000). Measuring vegetation (ndvi & evi). *NASA Earth Observatory, Washington DC*.
- Y.J. Zhang, A.J. Li, T. Fung,. (2012). Using GIS and Multi-criteria Decision Analysis for Conflict Resolution in Land Use Planning. *Procedia Environmental Sciences*, 13, 2264-2273. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.215>

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- Αγγελική, Μ. (2016). ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΑΥΤΩΝ ΜΕ ΔΕΙΚΤΕΣ ΞΗΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΗΣ ΝΟΤΙΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ, Μεταπτυχιακή Εργασία. *ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ*.
- ΑΓΛΑΙΑ, Θ. (2011). Εκτίμηση της Οικολογικής Ποιότητας των Υδάτων της Παράκτιας Ζώνης της Αλεξανδρούπολης (με Βάση το Φυτοπλαγκτό). *Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης*, 81.
- ΓΟΥΛΑ, Α. (2021). ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΙΚΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ, ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ. *Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*.
- ΜΑΡΙΝΟΣ ΚΡΙΤΣΩΤΑΚΗΣ, ΣΑΙΑ ΠΑΥΛΙΔΟΥ. (2013). ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ ΚΡΗΤΗΣ. *ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΥΔΑΤΩΝ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΚΡΗΤΗΣ*.
- ΜΠΟΥΡΑ, Β. (2010). Προσδιορισμός Συστημάτων Διαχείρισης Υδατικών Πόρων στην Κρήτη. *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*, 167.
- ΜΠΟΥΡΑ, Β. (2010). Προσδιορισμός Συστημάτων Διαχείρισης Υδατικών Πόρων στην Κρήτη, ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ. *ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ*.
- Περλέρος, Β. Κ., Παπαμαστοράκης, Δ., Κριτσωτάκης, Μ., Δρακοπούλου, Ε., & Παναγόπουλος, Α. (2004). Υπόγειο υδατικό δυναμικό Κρήτης. Προβλήματα και προοπτικές. *Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας*, 36(4), 2048-2056.
- Σύμπουρα, Ν., Ρεϊζοπούλου, Σ., Παναγιωτίδης, Π., & Ορφανίδης, Σ. (2016). Τύποι παράκτιων και μεταβατικών υδάτων σύμφωνα με την Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα και βιοκοινωνίες που απαντούν σε συνθήκες αναφοράς. *9ο Πανελλήνιο Συμπόσιο Ωκεανογραφίας & Αλιείας*.
- ΥΔΑΤΩΝ, Ε. Γ. (2017). 1η Αναθεώρηση σχεδίου διαχείρισης λεκανών απορροής ποταμών υδατικού διαμερίσματος Θεσσαλίας (EL08). *ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ*.
- Υπουργείο Εσωτερικών. (2023, 15 Ιανουαρίου). Εφημερίδα της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, Αρ. ΦΕΚ 123/2023
- Ευρωπαϊκή Επιτροπή. (2013). Οδηγία 2019/480 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και της Απόφασης της Επιτροπής της 20ης Σεπτεμβρίου 2013 για τον καθορισμό, σύμφωνα με την οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, των τιμών των ταξινομήσεων στα συστήματα παρακολούθησης των κρατών μελών, βάσει των αποτελεσμάτων της διαβαθμονόμησης και την κατάργηση της απόφασης 2008/915/ΕΚ. Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης.
- Ευρωπαϊκή Επιτροπή. (2000). Οδηγία 2000/60 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2000 για την θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων. Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης.
- Ευρωπαϊκή Επιτροπή. (2005). Οδηγία 2005/646 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και της Απόφασης της Επιτροπής της 17ης Αυγούστου 2005 για την κατάρτιση πίνακα καταγραφής των τόπων που θα σχηματίσουν το δίκτυο διαβαθμονόμησης σύμφωνα με

την οδηγία 2000/60/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου. Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Διαδικτυακές Πηγές

Millennium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Island Press, Washington, DC. Διαθέσιμο διαδικτυακά: <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf> (Τελευταία πρόσβαση: 12 Φεβρουαρίου 2024).

Οικοσυστημικές υπηρεσίες. Διαθέσιμο διαδικτυακά: [LIFE-IP-4-NATURA-Del.E.1.11-factsheet-3-ecosystem-services-updated.pdf](https://www.edozoume.gr/LIFE-IP-4-NATURA-Del.E.1.11-factsheet-3-ecosystem-services-updated.pdf) (edozoume.gr) (Τελευταία πρόσβαση: 12 Φεβρουαρίου 2024).

LIVING PLANET REPORT. Διαθέσιμο διαδικτυακά: https://c402277.ssl.cf1.rackcdn.com/publications/964/files/original/lpr_living_planet_report_2016.pdf?1477582118&_ga=1.148678772.2122160181.1464121326 (Τελευταία προβολή: 12 Φεβρουαρίου 2024).

Groundwater dependent ecosystems (GDEs). Διαθέσιμο διαδικτυακά: <https://water.dpie.nsw.gov.au/science-data-and-modelling/surface-water/environmental-outcomes-monitoring-and-research-program/groundwater-dependent-ecosystems>. (Τελευταία προβολή 12 Φεβρουαρίου 2024).

LIFE Natura 2000 Value Crete. Διαθέσιμο διαδικτυακά: <http://www.ecovalue-crete.eu/> (Τελευταία προβολή: 12 Φεβρουαρίου 2024).

Διαδικτυακή Πύλη Γεωχωρικών Πληροφοριών Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Διαθέσιμο διαδικτυακά: [Εδαφολογικός χάρτης - Γεωμορφολογία — ΥΠΙΕΝ - Γεωχωρικές Πληροφορίες & Χάρτες \(ypen.gr\)](http://www.ypien.gr/) (Τελευταία πρόσβαση: 12 Φεβρουαρίου 2024).

Copernicus Browser. Διαθέσιμο διαδικτυακά: https://dataspace.copernicus.eu/browser/?zoom=9&lat=35.58473&lng=24.59839&themeId=DEFAULT-THEME&visualizationUrl=https%3A%2F%2Fsh.dataspace.copernicus.eu%2Fogc%2Fwms%2F274a990e-7090-4676-8f7d-f1867e8474a7&datasetId=S2_L1C_CDAS&fromTime=2023-08-23T00%3A00%3A00.000Z&toTime=2023-08-23T23%3A59%3A59.999Z&layerId=1_TRUE_COLOR&demSource3D=%22MAPZEN%22&cloudCoverage=30 (Τελευταία πρόσβαση 12 Φεβρουαρίου 2024).

ESA- Introducing Sentinel-2. Διαθέσιμο διαδικτυακά: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Introducing_Sentinel-2 (Τελευταία πρόσβαση: 12 Φεβρουαρίου 2024).

ESA – Eduspace GR – Παγκόσμια αλλαγή – Δείκτες βλάστησης. Διαθέσιμο διαδικτυακά: https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Global_GR/SEMRTITWTIH_0.html (Τελευταία πρόσβαση 12 Φεβρουαρίου 2024).

openEO algorithm plaza. Διαθέσιμο διαδικτυακά: <https://marketplace-portal.dataspace.copernicus.eu/catalogue/app-details/7> (Τελευταία πρόσβαση: 12 Φεβρουαρίου 2024).

*NDMI: Vegetation Index Equation And Values Interpretation. Διαθέσιμο διαδικτυακά:
<https://eos.com/make-an-analysis/ndmi/> (Τελευταία πρόσβαση: 12 Φεβρουαρίου 2024).*

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας Π. 1: Εύρος και βάρος κάθε γεωχωρικής μεταβλητής κατηγοριοποιημένα σύμφωνα με την πιθανότητα παρουσίας της GDEZ για το έτος 2017

Parameter	Weight (%)	Class	Rank	Scale
Flow Accumulation	8	0 - 4.152	1	Very Low
		4.152 - 16.330	2	Low
		16.330 - 32.384	3	Medium
		32.384 - 50.098	4	High
		50.098 - 70.580	5	Very High
Slope	8	0 - 7,7 %	5	Very High
		7,7 - 17,2 %	4	High
		17,2 - 30 %	3	Medium
		30 - 48,5 %	2	Low
		48,5 - 162,8%	1	Very Low
TRI	8	0,07 - 0,29	5	Very High
		0,29 - 0,39	4	High
		0,39 - 0,47	3	Medium
		0,47 - 0,56	2	Low
		0,56 - 0,77	1	Very Low
Dd	7	0 - 1,54	5	Very High
		1,54 - 2,60	4	High
		2,60 - 3,69	3	Medium
		3,69 - 4,95	2	Low
		4,95 - 8,19	1	Very Low
Curvature	7	-12,98 - -1,7	5	Very High
		-1,70 - -0,50	4	High
		-0,50 - 0,36	3	Medium
		0,36 - 1,56	2	Low
		1,56 - 8,96	1	Very Low
Lineament dens	7	0 - 0,38	1	Very Low
		0,38 - 1,03	2	Low
		1,036 - 1,50	3	Medium
		1,50 - 1,99	4	High
		1,998 - 2,63	5	Very High
Geology	8	Ημμεταμορφωμένα πετρώματα	1	Very Low
		Ιζηματογενείς σχηματ. Αργιλομαργαϊκός σχηματ. Μάργες Σρώματα Τερπνής	2	Low
		Μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι Συμπαγή κροκαλοπαγή	3	Medium
		Ασβεστόλιθοι και δολομίτες Μάρμαρα	4	High

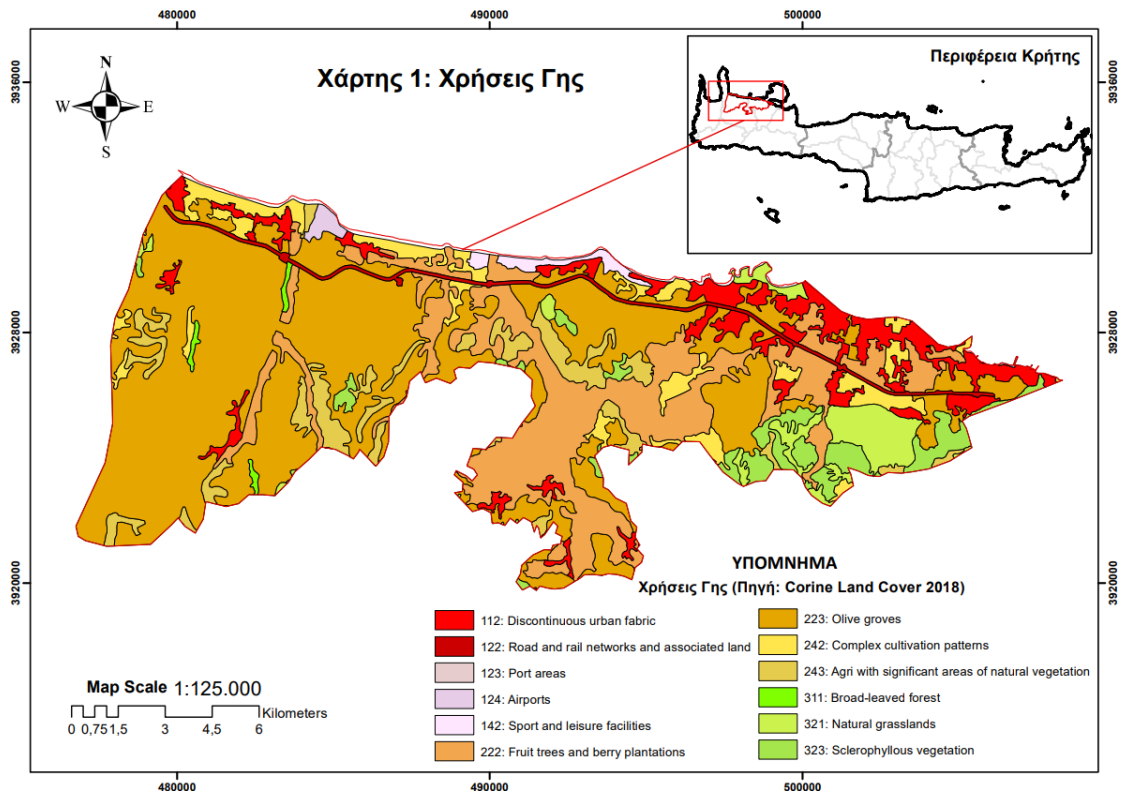
		Αλλούβια Χερσαίες, ποταμοχειμάρριες αποθ. Πλευρικά κορήματα και κόμοι κορη Άμμοι, Άργιλοι, Πηλοί Αποθέσεις πόλγης	5	Very High
Prwb	7	0 - 180	5	Very High
		180 - 476	4	High
		476 - 927	3	Medium
		927 - 1.738	2	Low
		1.738 - 3.282	1	Very Low
TWI	8	6,1 - 9,2	1	Very Low
		9,2 - 10,9	2	Low
		10,9 - 12,9	3	Medium
		12,9 - 15,7	4	High
		15,7 - 24,2	5	Very High
LUC	8	Αεροδρόμιο, Λιμάνι	1	Very Low
		Σύνθετα πρότυπα καλλιέργειας, Οπωροφόρα δέντρα και φυτείες μούρων, Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα και συναφή γη	2	Low
		Αθλητικές και ψυχαγωγικές εγκαταστάσεις, Ασυνεχής αστικός ιστός, Ελαιώνες	3	Medium
		Γεωργία με σημαντικές περιοχές φυσικής βλάστησης	4	High
		Πλατύφυλλα δάση, Σκληρόφυλλη βλάστηση, Φυσικά λιβάδια	5	Very High
NDMI_2017	8	- 0,43 - 0,14	1	Very Low
		0,14 - 0,25	2	Low
		0,25 - 0,35	3	Medium
		0,35 - 0,45	4	High
		0,45 - 0,71	5	Very High
AI_2017	8	0,80 - 0,86	5	Very High
		0,86 - 0,92	4	High
		0,92 - 0,96	3	Medium
		0,96 - 0,99	2	Low
		0,99 - 1,03	1	Very Low

Πίνακας Π. 2: Εύρος και βάρος κάθε γεωχωρικής μεταβλητής κατηγοριοποιημένα σύμφωνα με την πιθανότητα παρουσίας της GDEZ για το έτος 2022.

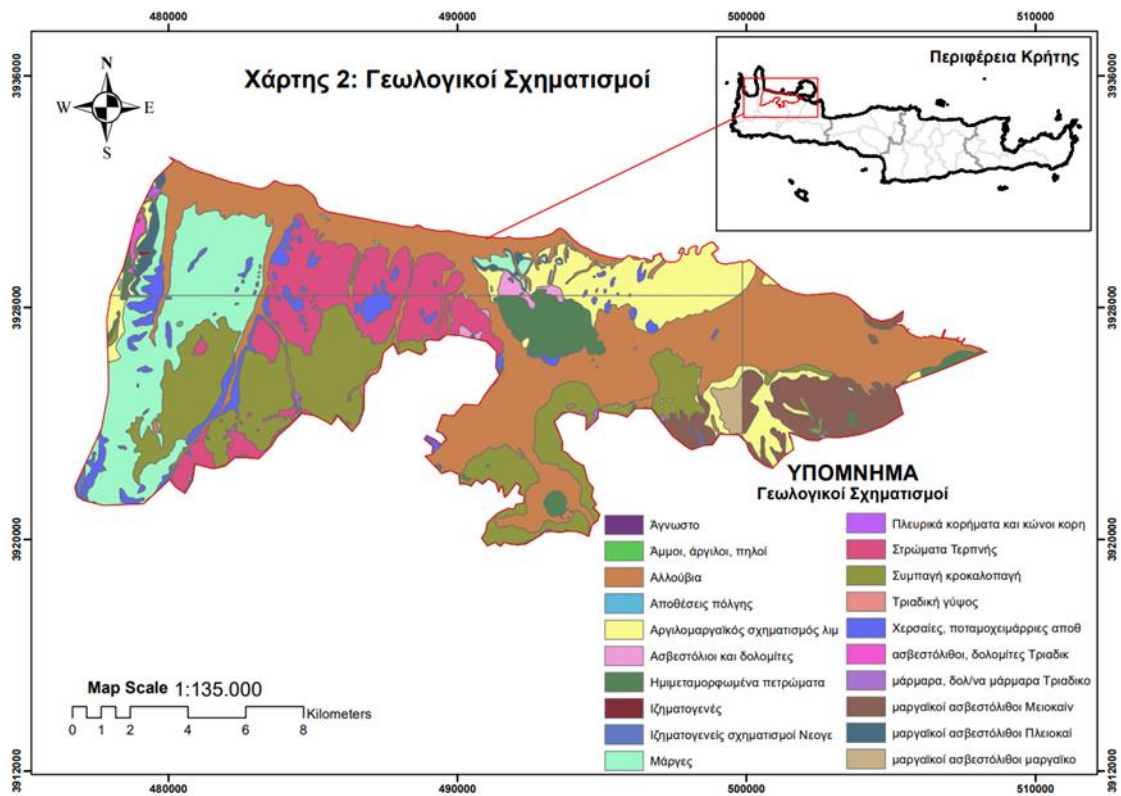
Parameter	Weight (%)	Class	Rank	Scale
Flow Accumulation	8	0 - 4.152	1	Very Low
		4.152 - 16.330	2	Low
		16.330 - 32.384	3	Medium
		32.384 - 50.098	4	High
		50.098 - 70.580	5	Very High
Slope	8	0 - 7,7 %	5	Very High
		7,7 - 17,2 %	4	High
		17,2 - 30 %	3	Medium
		30 - 48,5 %	2	Low
		48,5 - 162,8%	1	Very Low
TRI	8	0,07 - 0,29	5	Very High
		0,29 - 0,39	4	High
		0,39 - 0,47	3	Medium
		0,47 - 0,56	2	Low
		0,56 - 0,77	1	Very Low
Dd	7	0 - 1,54	5	Very High
		1,54 - 2,60	4	High
		2,60 - 3,69	3	Medium
		3,69 - 4,95	2	Low
		4,95 - 8,19	1	Very Low
Curvature	7	-12,98 - -1,7	5	Very High
		-1,70 - -0,50	4	High
		-0,50 - 0,36	3	Medium
		0,36 - 1,56	2	Low
		1,56 - 8,96	1	Very Low
Lineament dens	7	0 - 0,38	1	Very Low
		0,38 - 1,03	2	Low
		1,036 - 1,50	3	Medium
		1,50 - 1,99	4	High
		1,998 - 2,63	5	Very High
Geology	8	Ημιμεταμορφωμένα πετρώματα	1	Very Low
		Ιζηματογενείς σχηματ. Αργιλομαργαϊκός σχηματ. Μάργες Σρώματα Τερπνής	2	Low

		Μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι Συμπαγή κροκαλοπαγή	3	Medium
		Ασβεστόλιθοι και δολομίτες Μάρμαρα	4	High
		Αλλούβια Χερσαίες, ποταμοχειμάρριες αποθ. Πλευρικά κορήματα και κόμμοι κορη Άμμοι, Άργιλοι, Πηλοί Αποθέσεις πόλγης	5	Very High
Prwb	7	0 - 180	5	Very High
		180 - 476	4	High
		476 - 927	3	Medium
		927 - 1.738	2	Low
		1.738 - 3.282	1	Very Low
TWI	8	6,1 - 9,2	1	Very Low
		9,2 - 10,9	2	Low
		10,9 - 12,9	3	Medium
		12,9 - 15,7	4	High
		15,7 - 24,2	5	Very High
LUC	8	Αεροδρόμιο, Λιμάνι	1	Very Low
		Σύνθετα πρότυπα καλλιέργειας, Οπωροφόρα δέντρα και φυτείες μούρων, Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα και συναφή γη	2	Low
		Αθλητικές και ψυχαγωγικές εγκαταστάσεις, Ασυνεχής αστικός ιστός, Ελαιώνες	3	Medium
		Γεωργία με σημαντικές περιοχές φυσικής βλάστησης	4	High
		Πλατύφυλλα δάση, Σκληρόφυλλη βλάστηση, Φυσικά λιβάδια	5	Very High
NDMI_2022	8	- 0,34 - 0,09	1	Very Low
		0,09 - 0,18	2	Low
		0,18 - 0,25	3	Medium
		0,25 - 0,33	4	High
		0,33 - 0,57	5	Very High
AI_2022	8	0,59 - 0,64	5	Very High

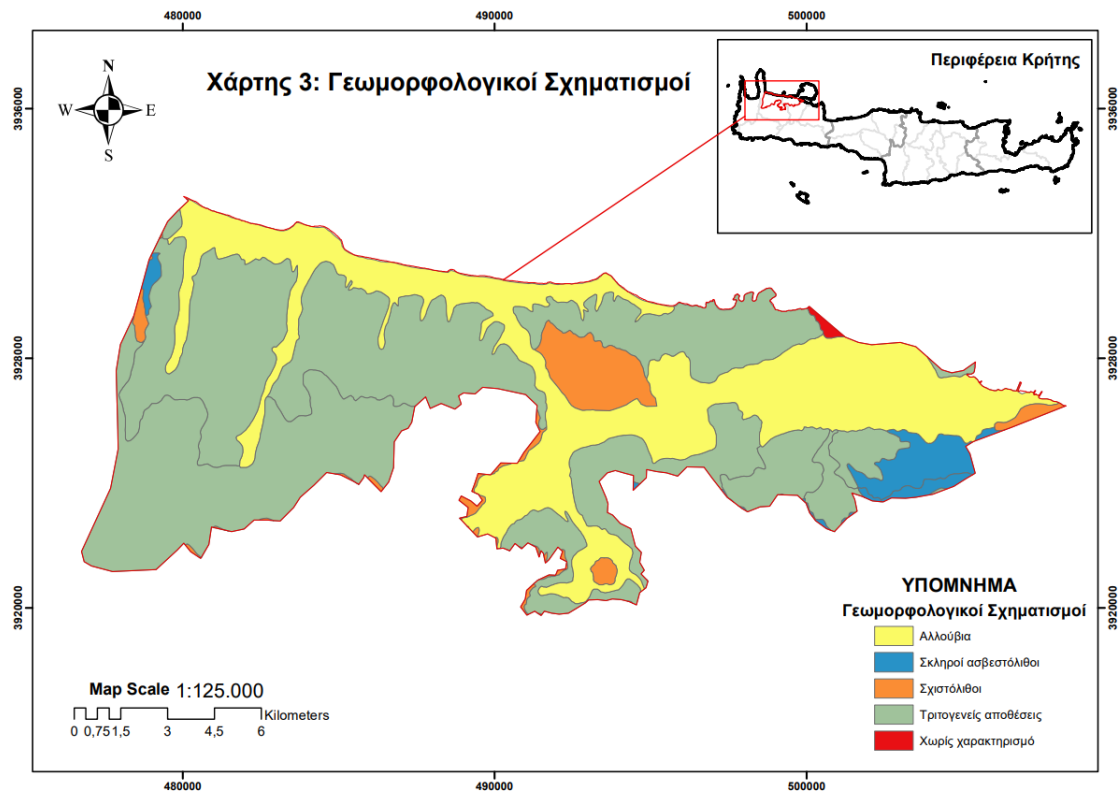
		0,64 - 0,68	4	High
		0,68 - 0,73	3	Medium
		0,73 - 0,82	2	Low
		0,82 - 0,91	1	Very Low



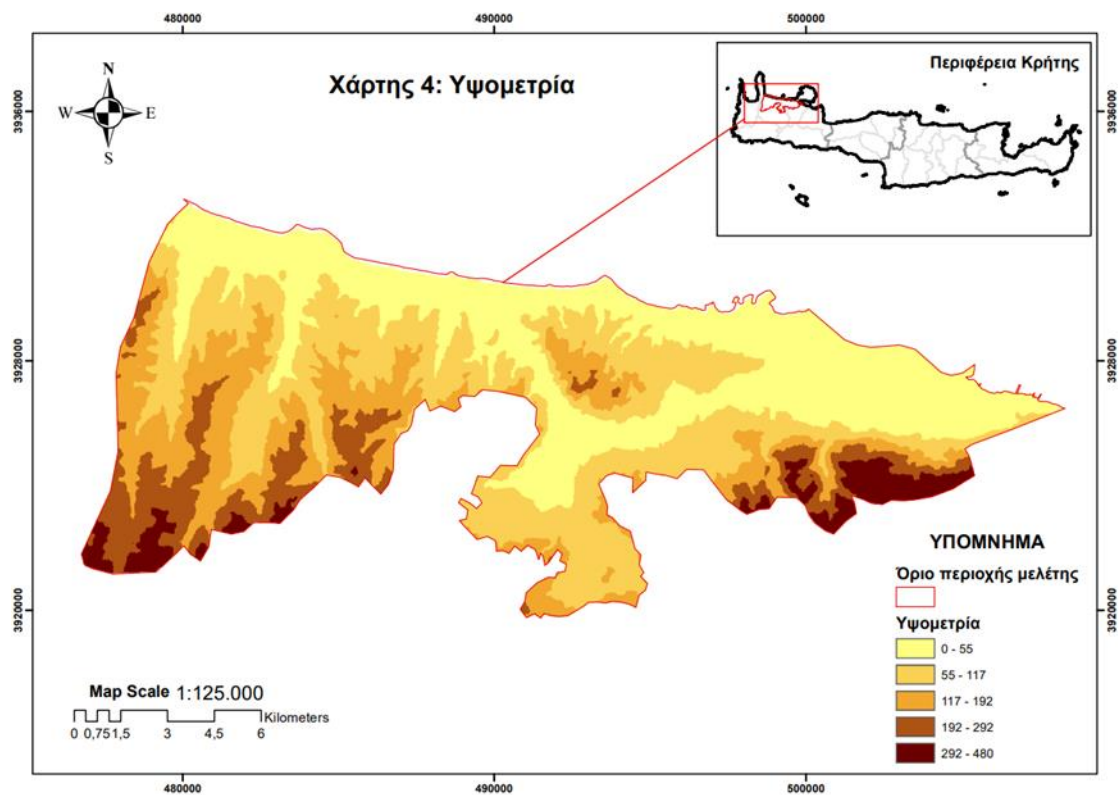
Χάρτης Π. 1 Απεικόνιση Χρήσεων Γης μέσω του Corine Land Cover



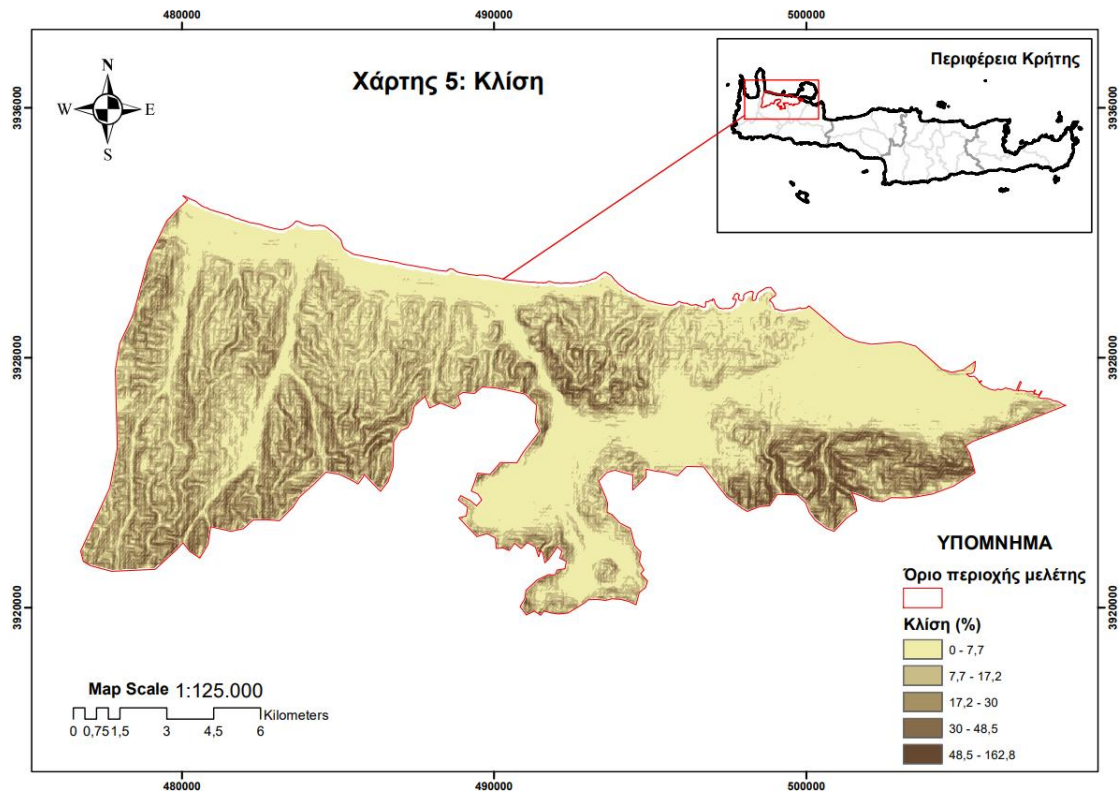
Χάρτης Π. 2 Γεωλογικοί Σχηματισμοί



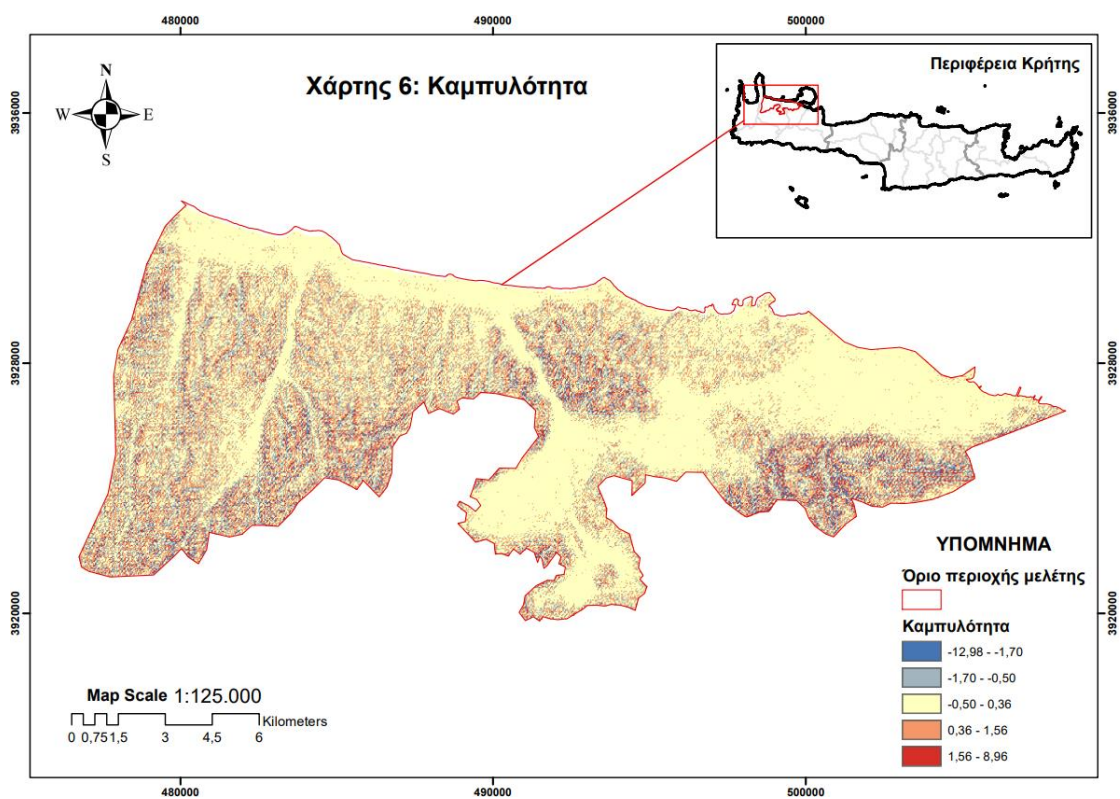
Χάρτης Π. 3 Γεωμορφολογικοί Σχηματισμοί



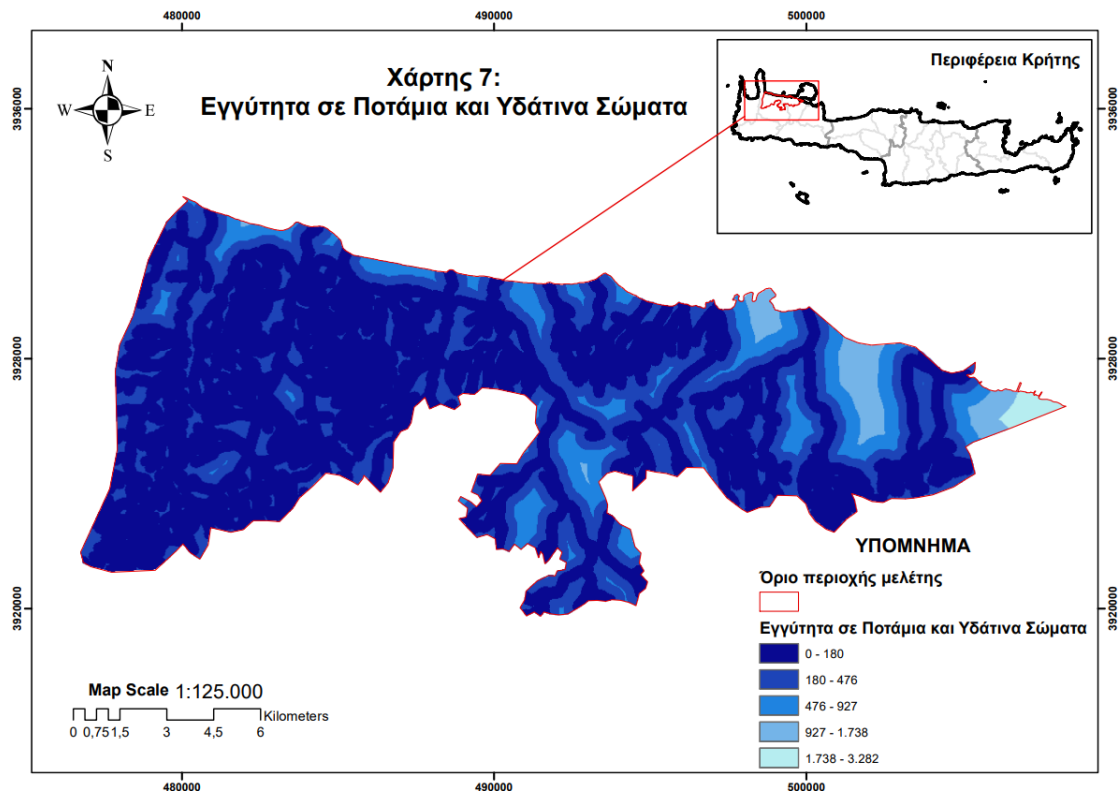
Χάρτης Π. 4 Υψομετρία (σε m)



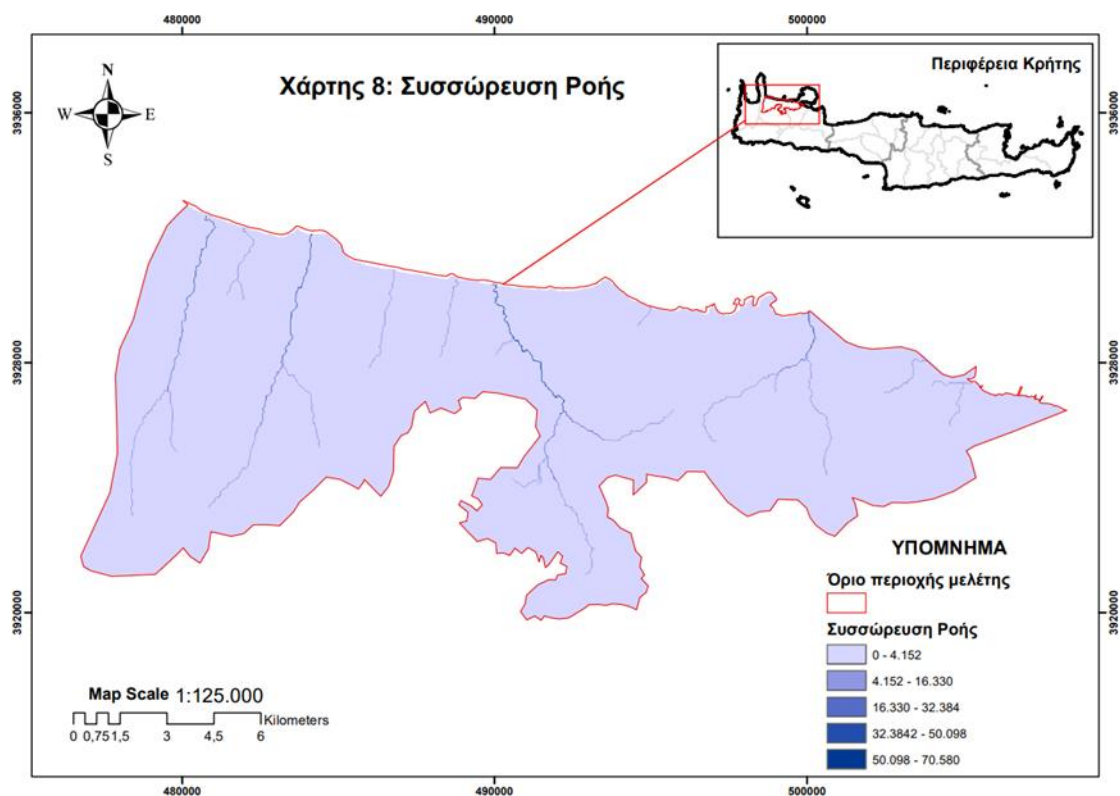
Χάρτης Π. 5 Κλίση (S)



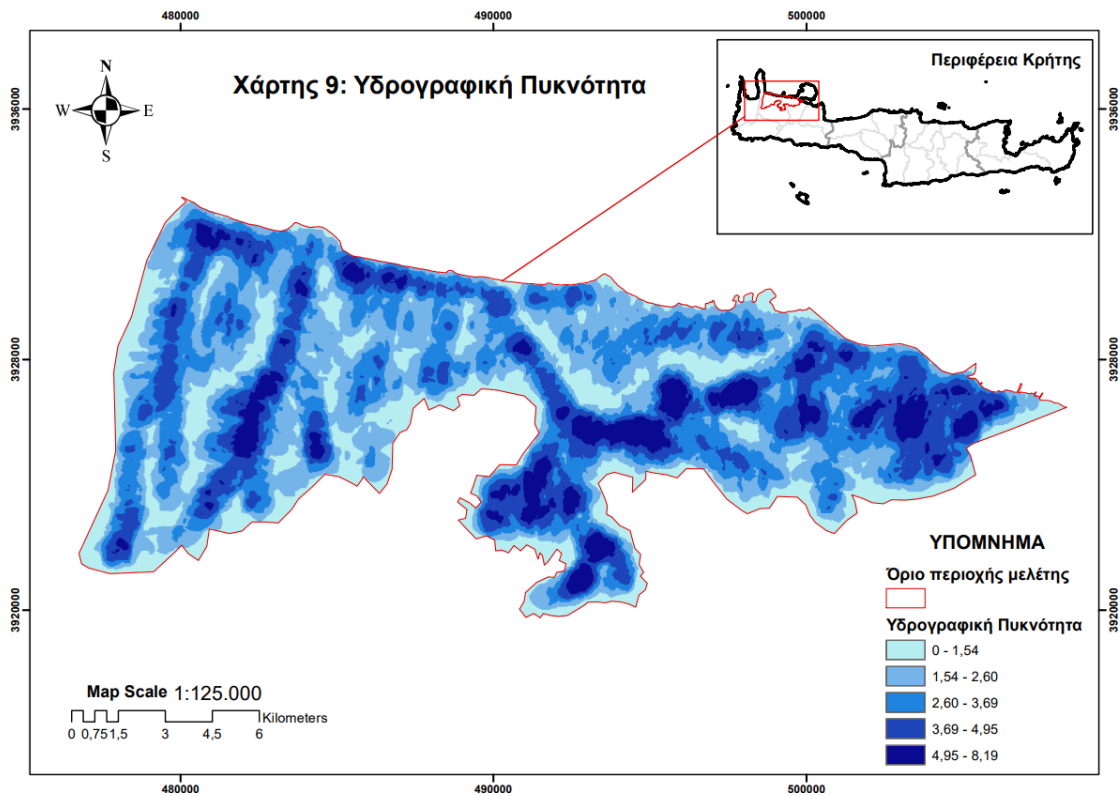
Χάρτης Π. 6 Καμπυλότητα (Ct)



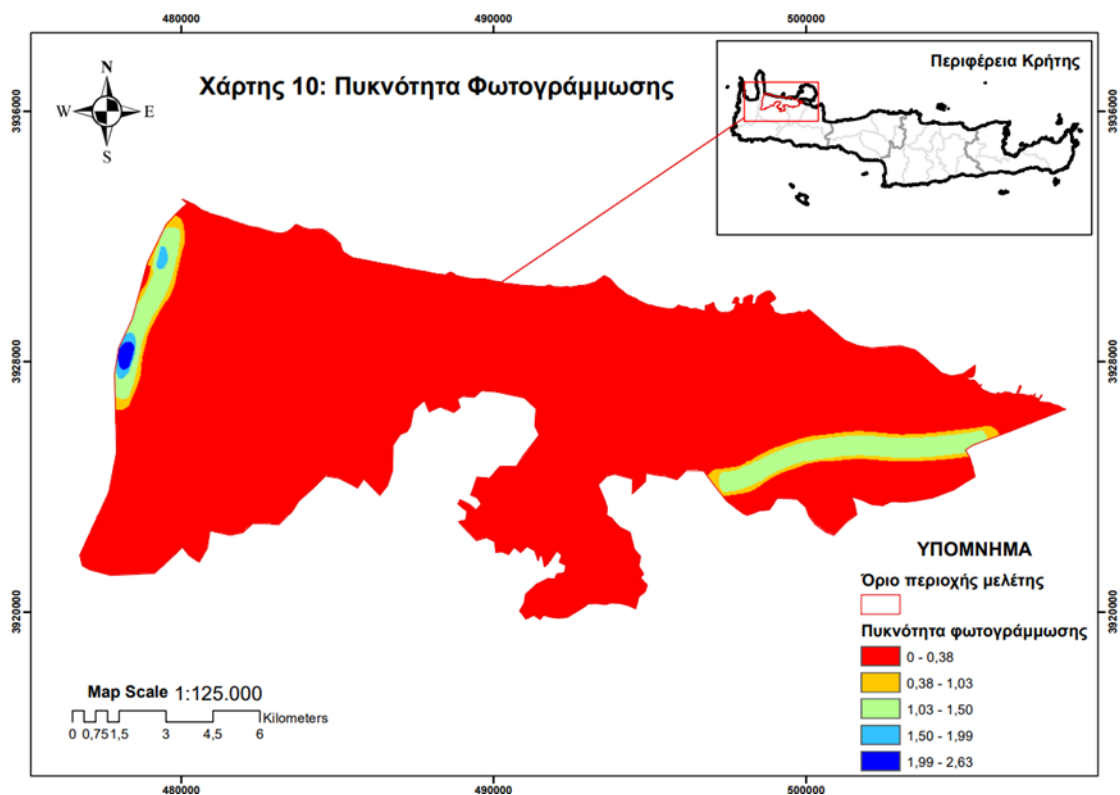
Χάρτης Π. 7 Εγγύτητα σε Ποτάμια και Υδάτινα Σώματα (Prwb)



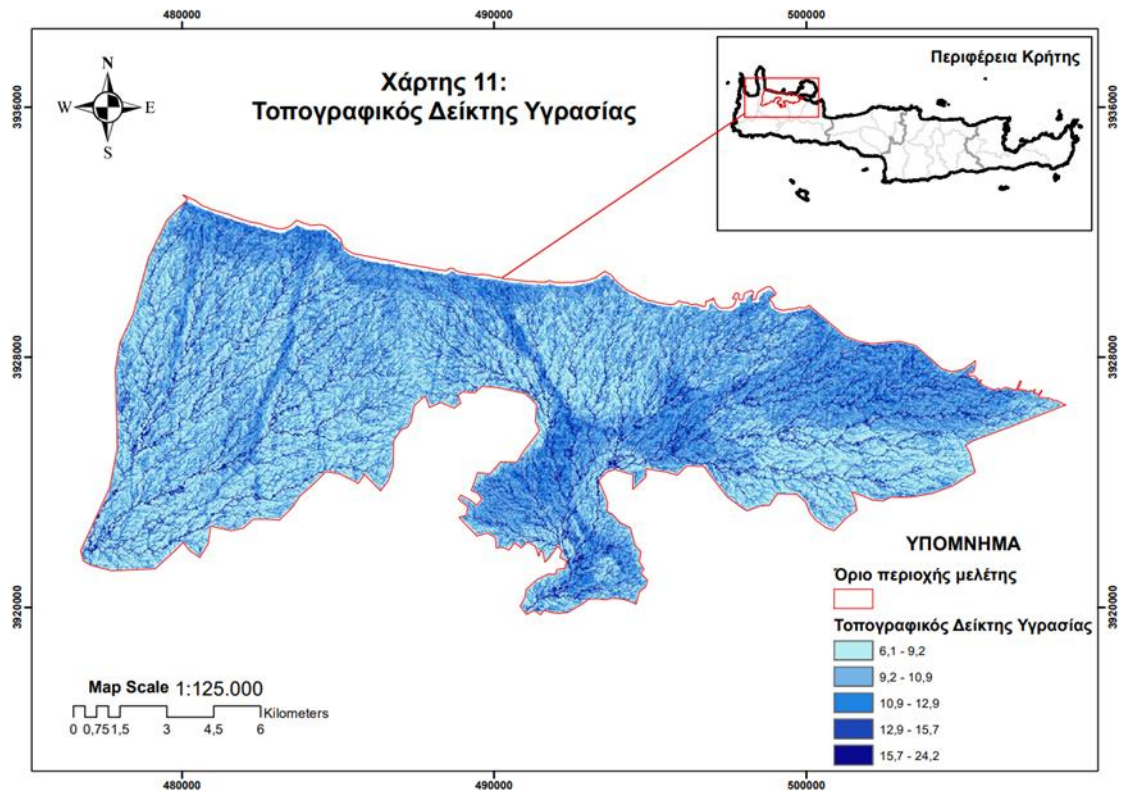
Χάρτης Π. 8 Συσσώρευση Ροής (Fa)



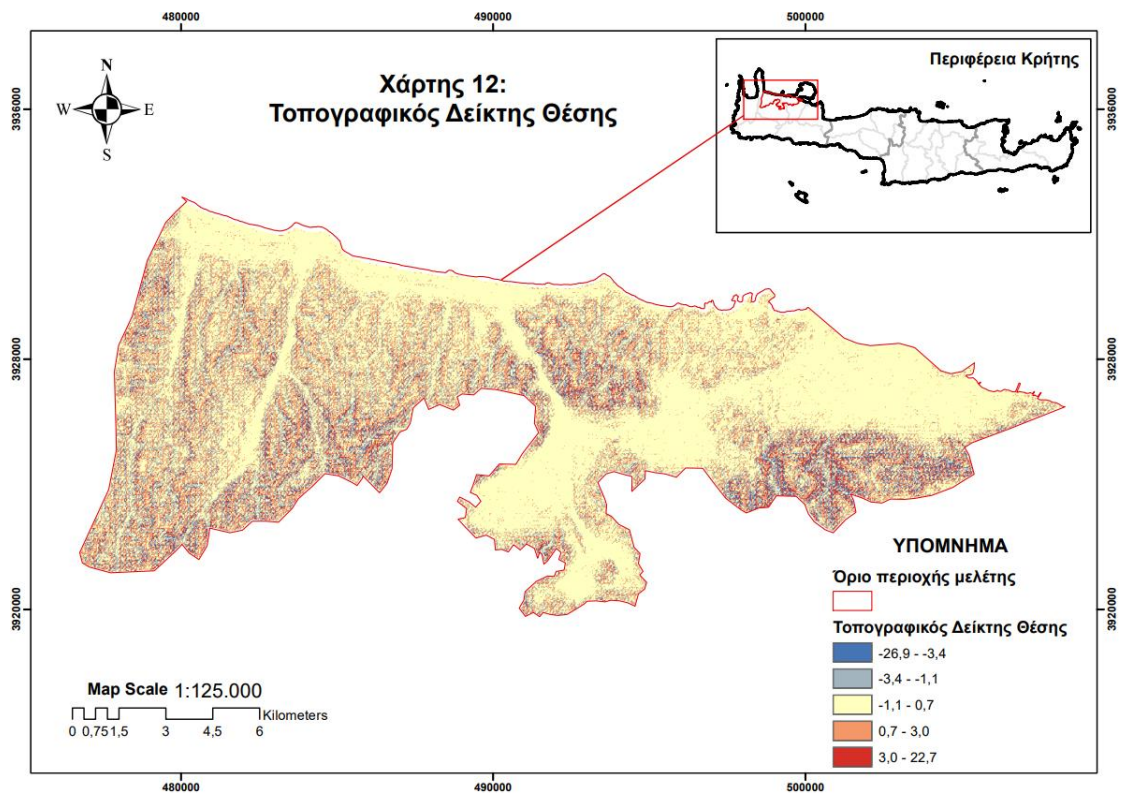
Χάρτης Π. 9 Υδρογραφική Πικνότητα (Dd)



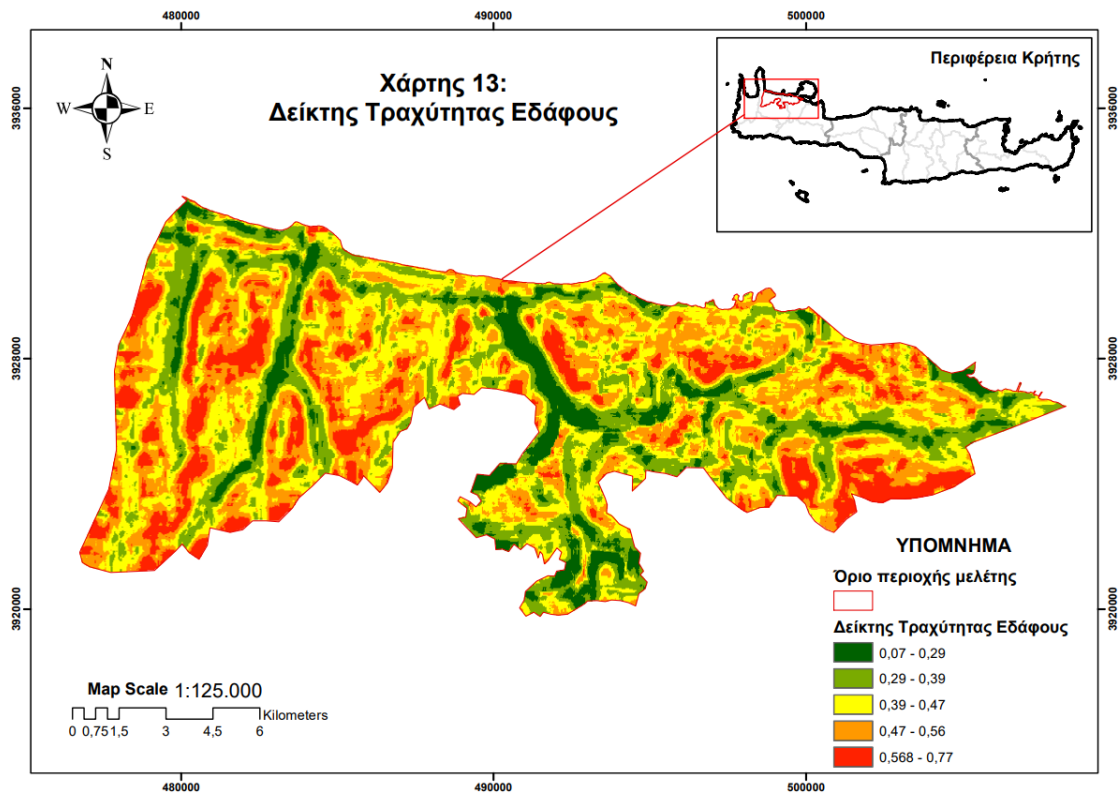
Χάρτης Π. 10 Πικνότητα Φωτογράμμωσης (Ld)



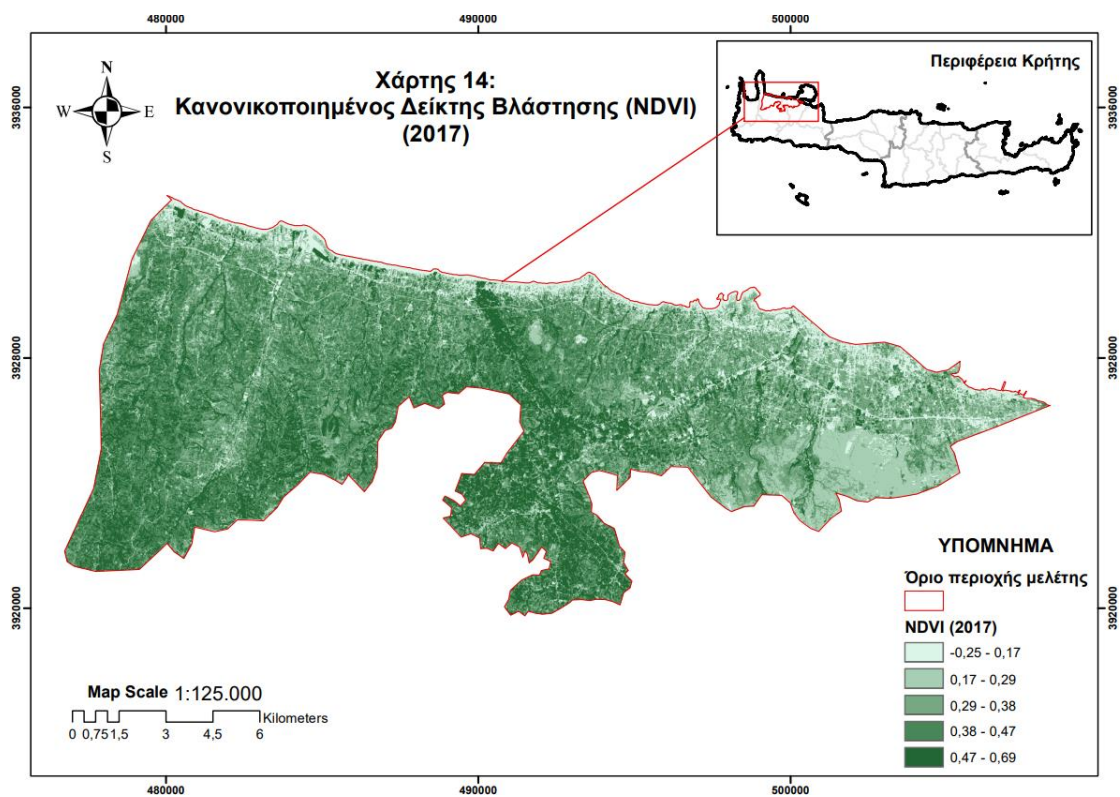
Χάρτης Π. 11 Τοπογραφικός Δείκτης Υγρασίας (TWI)



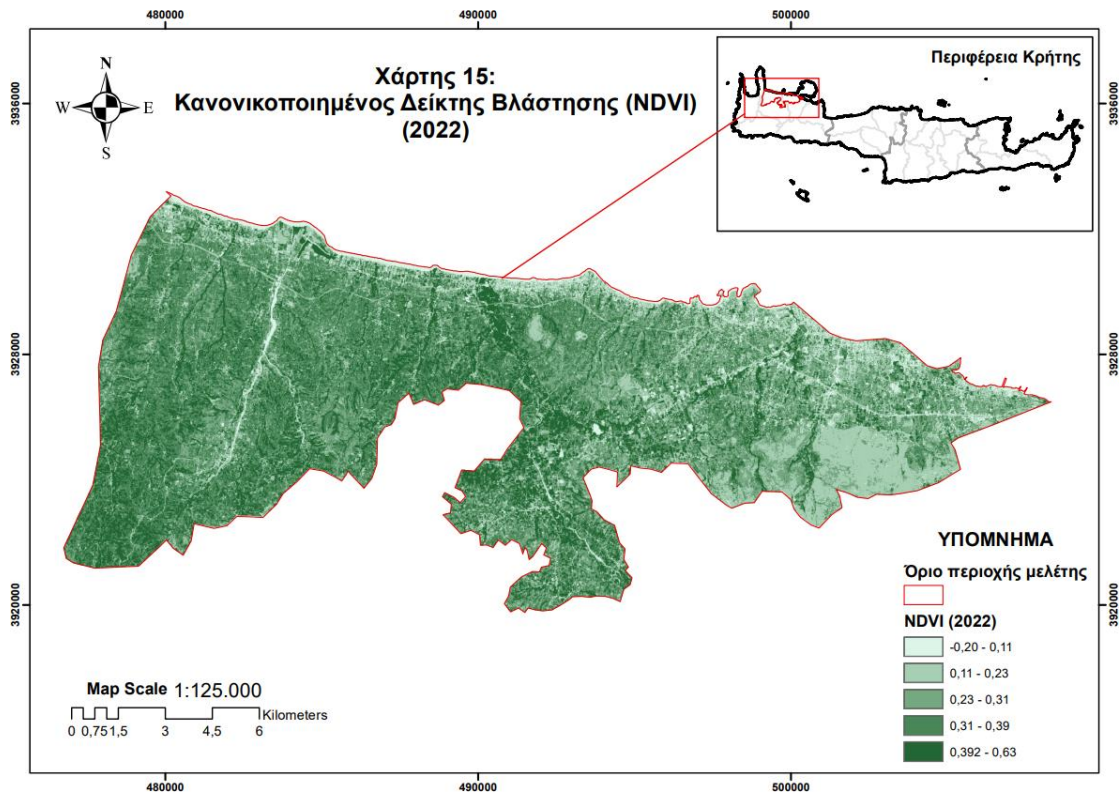
Χάρτης Π. 12 Τοπογραφικός Δείκτης Θέσης (TPI)



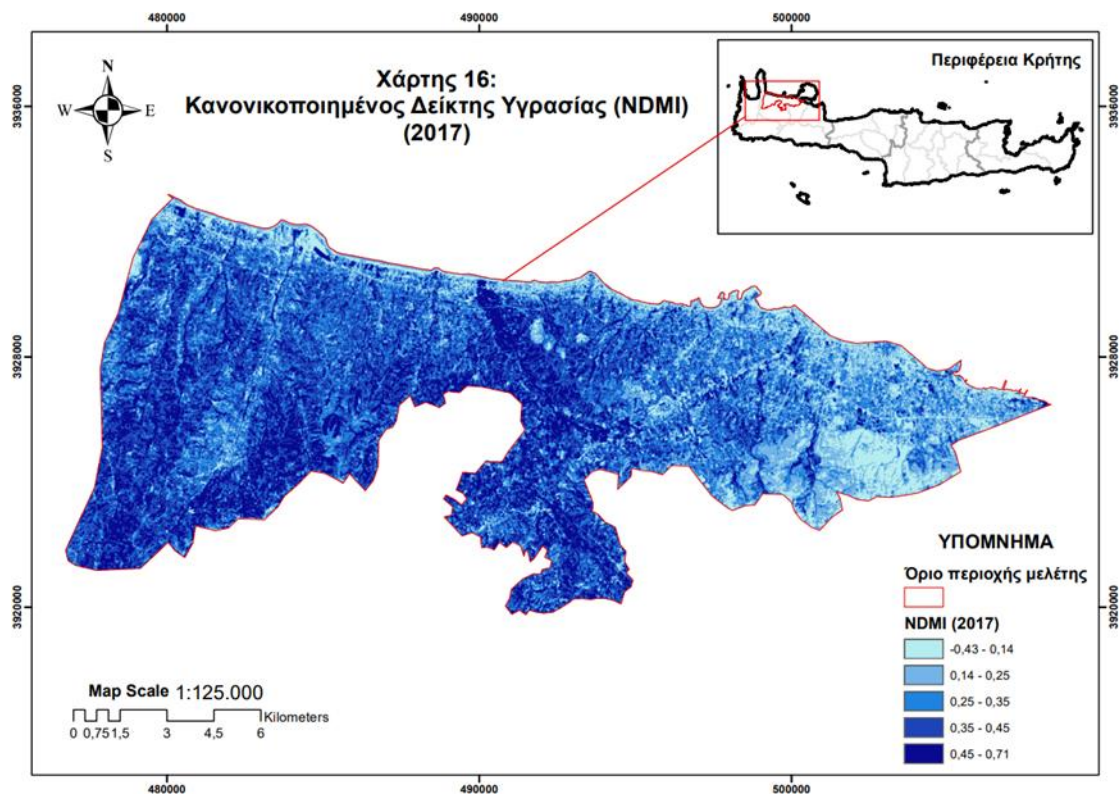
Χάρτης Π. 13 Δείκτης Τραχύτητας Εδάφους (TRI)



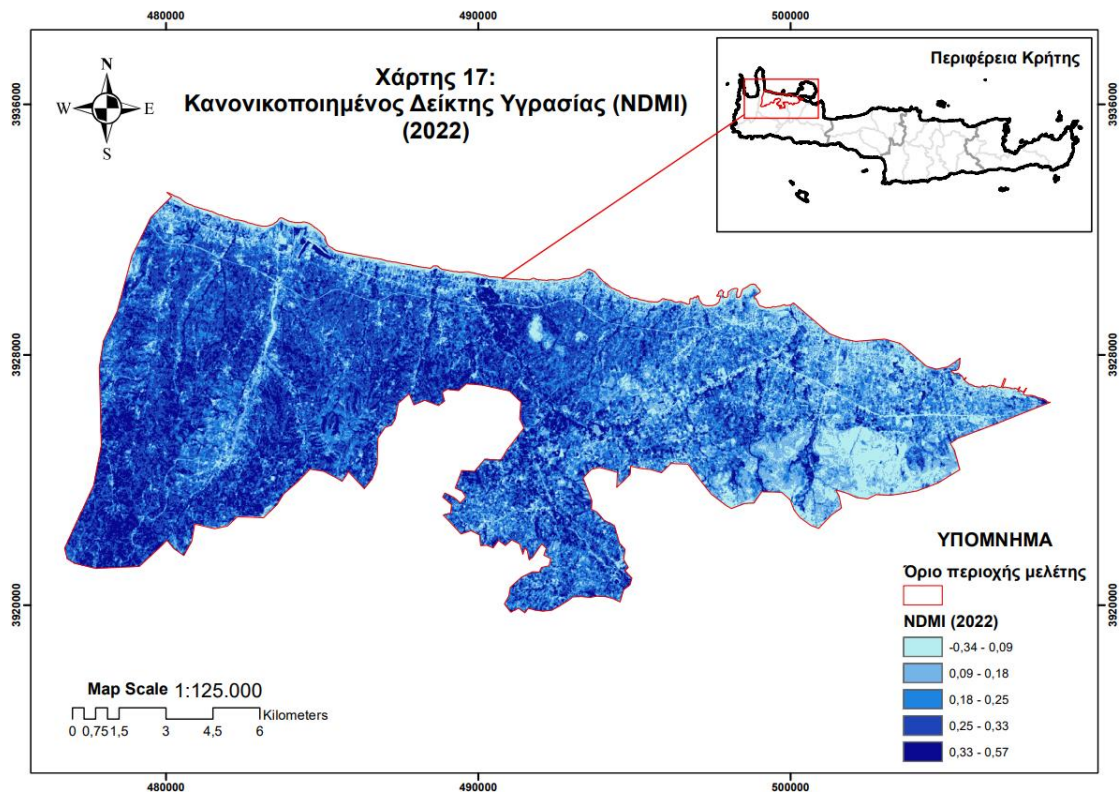
Χάρτης Π. 14 Κανονικοποιημένος Δείκτης Βλάστησης (NDVI) για το έτος 2017



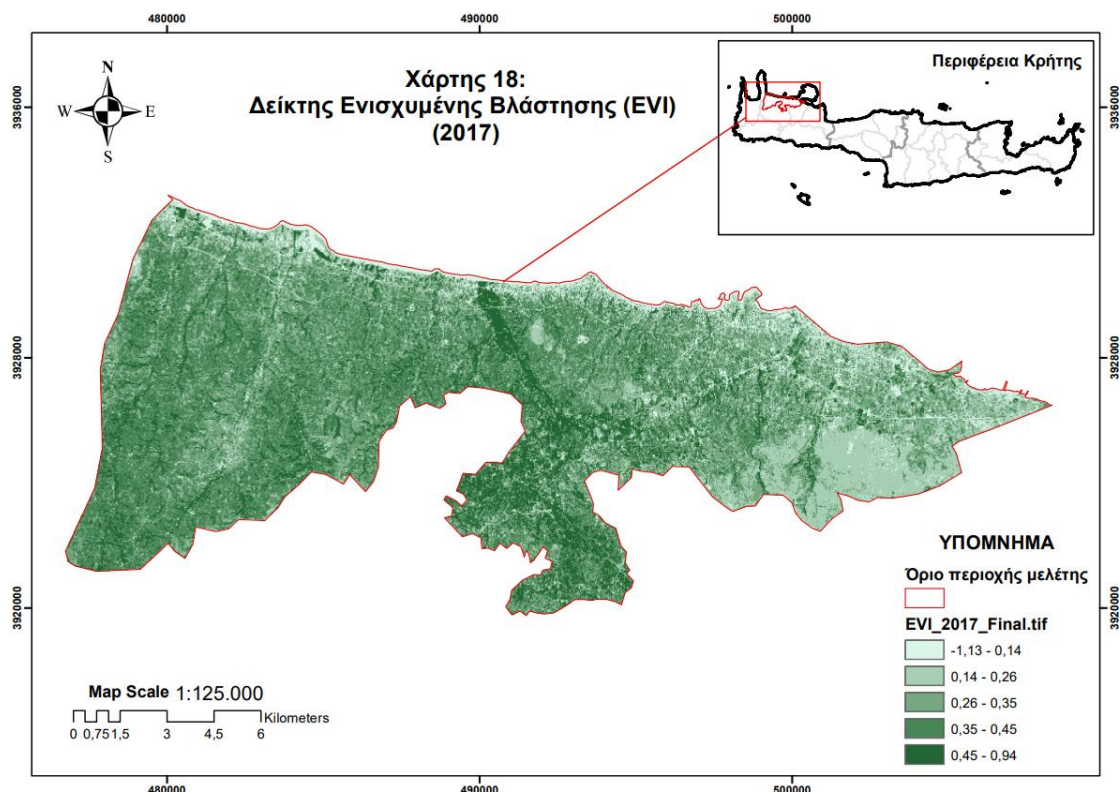
Χάρτης Π. 15 Κανονικοποιημένος Δείκτης Βλάστησης (NDVI) για το έτος 2022



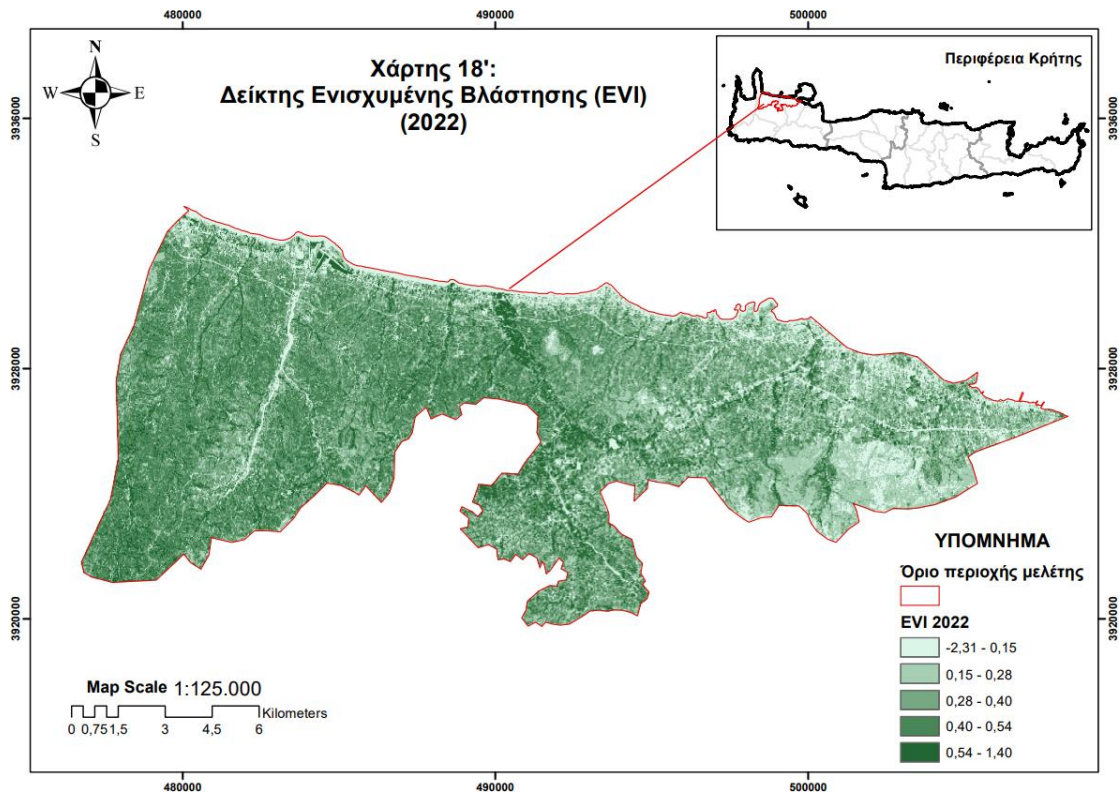
Χάρτης Π. 16 Κανονικοποιημένος Δείκτης Υγρασίας (NDMI) για το έτος 2017



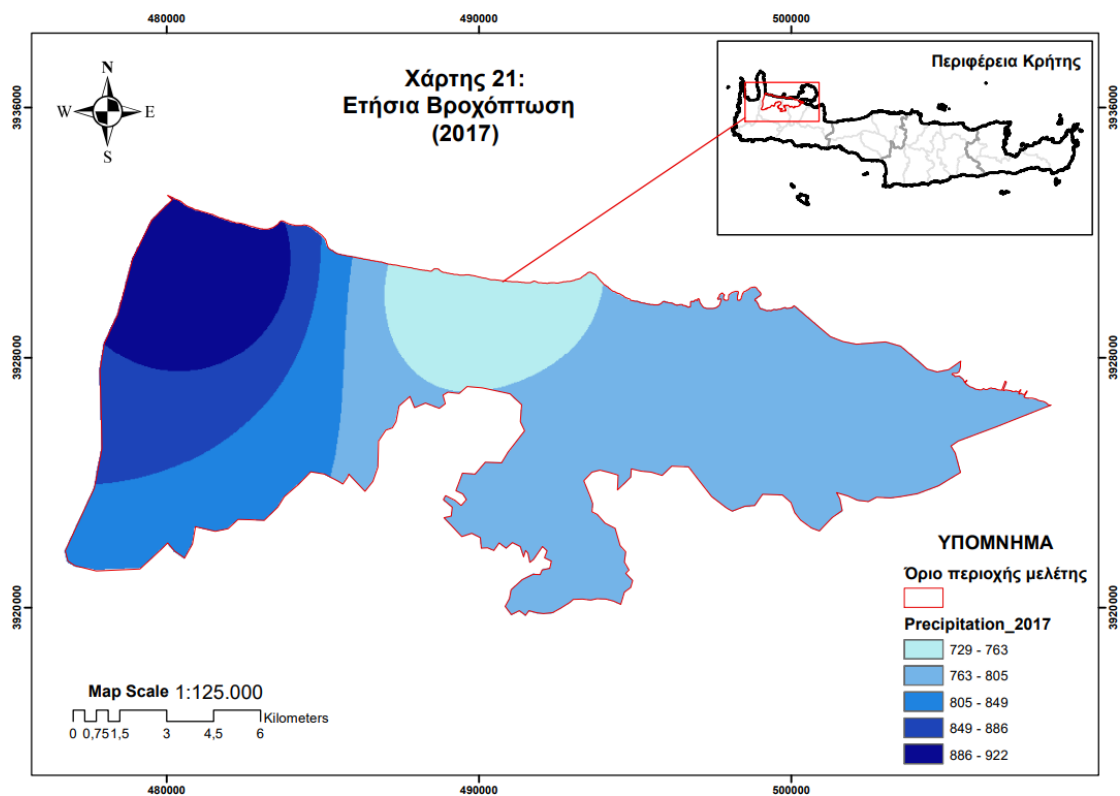
Χάρτης Π. 17 Κανονικοποιημένος Δείκτης Υγρασίας (NDMI) για το έτος 2022



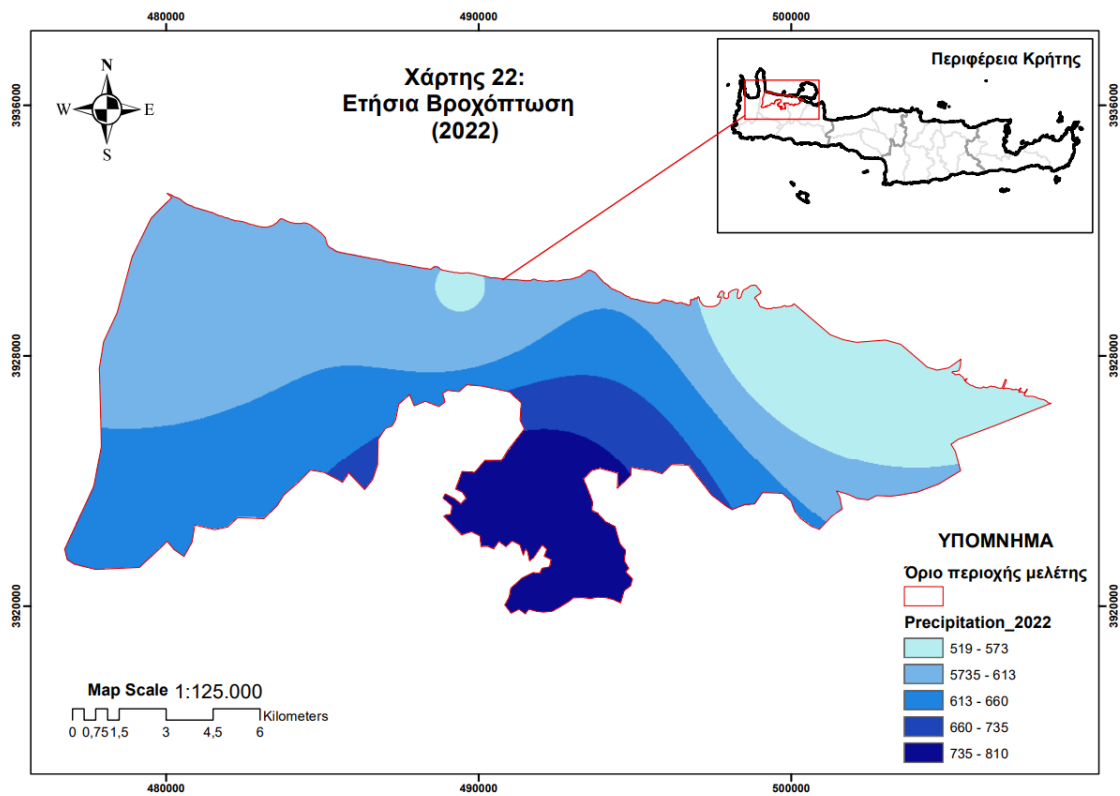
Χάρτης Π. 18 Δείκτης Ενισχυμένης Βλάστησης (EVI) για το έτος 2017



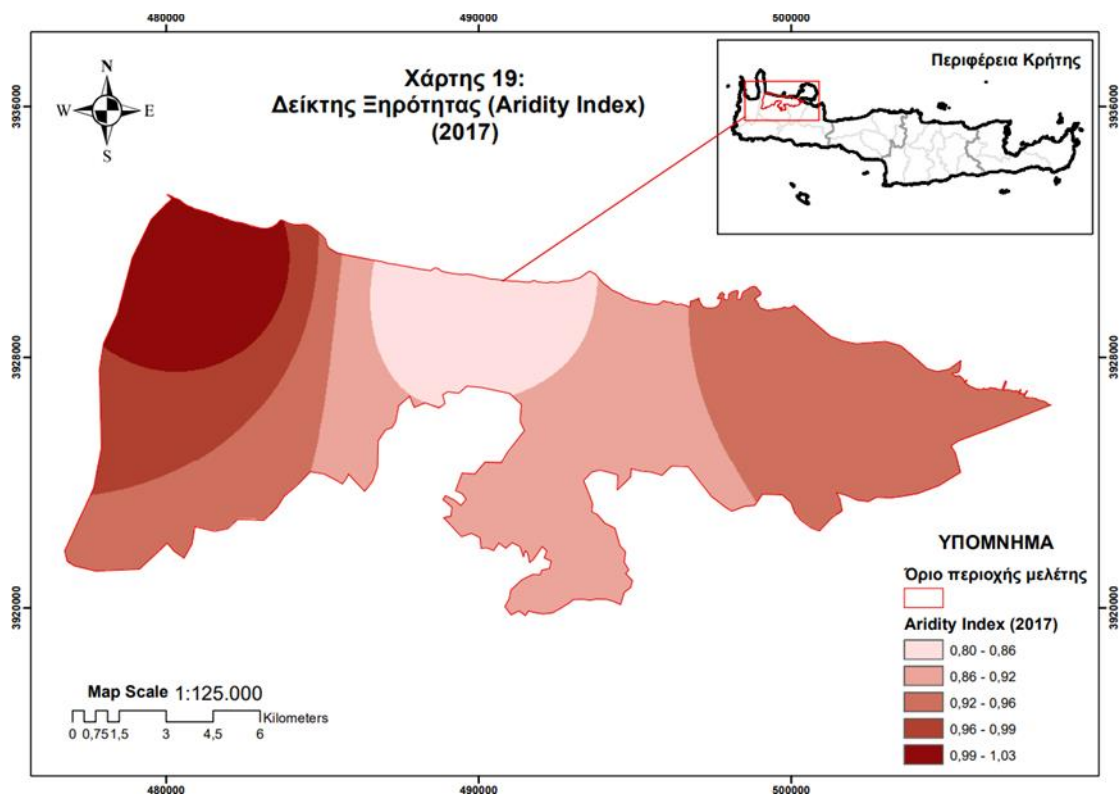
Χάρτης Π. 19 Δείκτης Ενισχυμένης Βλάστησης (EVI) για το έτος 2022



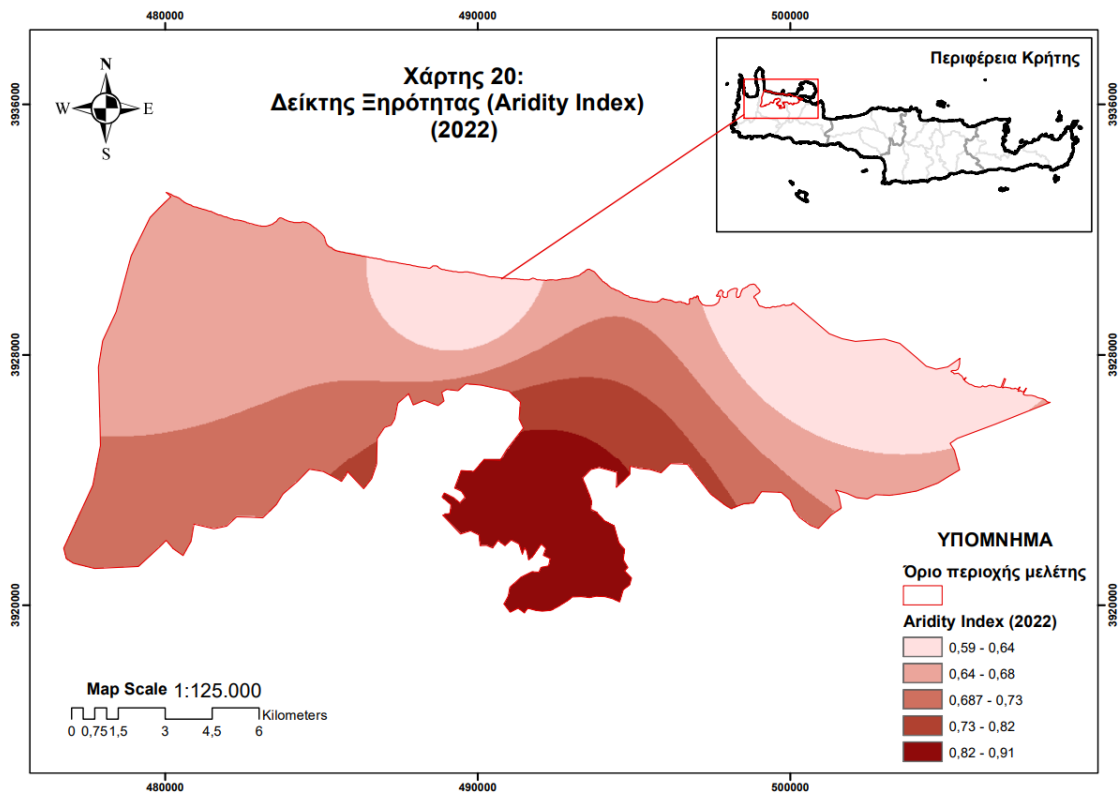
Χάρτης Π. 20 Ετήσια Βροχόπτωση για το έτος 2017 (σε mm/έτος)



Χάρτης Π. 21 Ετήσια Βροχόπτωση για το έτος 2022 (σε mm/έτος)



Χάρτης Π. 22 Δείκτης Ξηρότητας (Aridity Index) για το έτος 2017



Χάρτης Π. 23 Δείκτης Ξηρότητας (Aridity Index) για το έτος 2022