



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Χημικών Μηχανικών και
Μηχανικών Περιβάλλοντος

Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος

Εκτίμηση τρωτότητας των υπόγειων υδάτων περιοχής Χερσονήσου, Ηρακλείου Κρήτης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΗΣ

ANNAΣ ΒΕΤΣΟΥ

ΧΑΝΙΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ, 2025



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Χημικών Μηχανικών και
Μηχανικών Περιβάλλοντος

Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος

Εκτίμηση τρωτότητας των υπόγειων υδάτων περιοχής Χερσονήσου, Ηρακλείου Κρήτης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΗΣ

ΑΝΝΑΣ ΒΕΤΣΟΥ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Καθηγητής Γεώργιος Καρατζάς

Καθηγητής Νικόλαος Νικολαΐδης

Δρ. Νεκτάριος Κουργιαλάς

“Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης”

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την εκτίμηση του κινδύνου ρύπανσης των υπογείων υδάτων της περιοχής Χερσονήσου του Ηρακλείου, Κρήτης. Για τη μελέτη αυτή έγινε χρήση πολυκριτηριακής ανάλυσης σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) όπου ελήφθησαν υπόψιν δεκαπέντε διαφορετικοί παράγοντες που δύναται να επηρεάσουν τη διαδρομή των ρύπων από την πηγή έως τα υπόγεια ύδατα. Για τη χωρική εκτίμηση επικινδυνότητας ρύπανσης του εδάφους στην περιοχή μελέτης δημιουργήθηκαν δεκαπέντε θεματικοί χάρτες καννάβου (raster) με παράγοντες σχετικούς με τις ιδιότητες του εδάφους και τις ανθρώπινες δραστηριότητες όπως: τη βροχόπτωση, τις χρήσεις γης, τη συσσώρευση απορροής, τις σημειακές πηγές ρύπανσης, την εγγύτητα σε ποτάμια, την εγγύτητα σε οδικό δίκτυο, τις κατοικημένες περιοχές, τις περιοχές οικολογικής προστασίας, τις ζώνες αλμυρού νερού του εδάφους, την τεχνητή αποστράγγιση, την υδατική χωρητικότητα του εδάφους, το βάθος εδάφους, το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα, τους γεωλογικούς σχηματισμούς του υπεδάφους και τη ταχύτητα ροής υπεδάφους. Η επικινδυνότητα ρύπανσης των υπογείων υδάτων, για κάθε μία από τις παραπάνω παραμέτρους κατηγοριοποιήθηκε σε Πολύ χαμηλή (1), Χαμηλή (2), Μέτρια (3), Υψηλή (4) και Πολύ υψηλή (5) με βάση τη μέθοδο Natural Breaks (Jenks). Οι θεματικοί χάρτες συνδυάστηκαν γραμμικά και σταθμίστηκαν αναλογικά με το βάρος επιρροής κάθε παραμέτρου για την κατασκευή του τελικού χάρτη της εδαφικής επικινδυνότητας. Ο τελικός χάρτης απεικονίζει την περιοχή μελέτης εμφανίζοντας μόνο τμήματα Χαμηλής, Μέτριας και Υψηλής επικινδυνότητας. Το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής, χαρακτηρίζεται από τμήματα μέτριας επικινδυνότητας, ενώ στο βόρειο παράκτιο τμήμα και σε κάποιες σποραδικές περιοχές της ενδοχώρας ο δείκτης επικινδυνότητας είναι υψηλός. Τέλος, στα νότια της περιοχής υπάρχουν μικρά χωρία χαμηλής επικινδυνότητας.

Abstract

This thesis examines the assessment of the risk of groundwater pollution in the area of Hersonissos near Heraklion, Crete. A multi-criteria analysis was carried out using a Geographic Information Systems (GIS), taking into account fifteen different factors that may influence the path of pollutants from the source to the groundwater. For the spatial assessment of the risk of soil pollution in the study area, fifteen thematic raster maps were created, incorporating factors related to soil characteristics and human activities, such as: rainfall, land use, runoff accumulation, point sources of pollution, proximity to rivers, proximity to road networks, inhabited areas, ecological protection zones, soil salinity zones, artificial drainage, soil water capacity, soil depth, groundwater table depth, subsurface geological formations and subsurface flow velocity. The groundwater pollution risk for each of the above parameters was categorized as Very low (1), Low (2), Moderate (3), High (4) and Very high (5) using the Natural Breaks (Jenks) method. The thematic maps were linearly combined and weighted according to the influence of each parameter to produce the final soil pollution risk map. The final map shows the study area with only the low, moderate and high risk regions identified. Most of the area is characterized by a moderate risk, while the northern coastal zone and some isolated inland areas have a high risk. Finally, in the southern part of the area there are small low-risk regions.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας εκφράζω τις θερμές ευχαριστίες μου σε όσους συνέβαλαν ουσιαστικά στην εκπόνησή της και με υποστήριξαν κατά τη διάρκεια της προσπάθειας αυτής.

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Καρατζά, για την επιστημονική του καθοδήγηση, την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και τη σταθερή υποστήριξή του σε κάθε στάδιο της εργασίας. Η πολύτιμη συμβολή του, οι εμπειριστατωμένες παρατηρήσεις και η διαρκής διαθεσιμότητά του αποτέλεσαν θεμέλιο για την ολοκλήρωση αυτής της μελέτης.

Ευχαριστώ επίσης τα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής, κ. Νικολαΐδη και κ. Κουργιαλά, για τον χρόνο τους, τις παρατηρήσεις τους και την πρόθυμη συμμετοχή τους στην αξιολόγηση της εργασίας.

Ευχαριστώ ιδιαιτέρως τον κ. Κουργιαλά για τη σημαντική συμβολή του, τόσο με την παρουσία και τις παρατηρήσεις του κατά την αξιολόγηση, όσο και με την πρακτική του υποστήριξη στην πειραματική διαδικασία. Η καθοριστική του βοήθεια στη δημιουργία των χαρτογραφικών απεικονίσεων, καθώς και η προθυμία του να προσφέρει τεχνική καθοδήγηση, συνέβαλαν σημαντικά στην πληρότητα και ποιότητα της παρούσας εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την αμέριστη στήριξη, την ενθάρρυνση και την υπομονή που επέδειξαν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών και της εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	4
Abstract	5
Ευχαριστίες.....	6
Πίνακας Εικόνων.....	8
Πίνακας Πινάκων	10
1. Εισαγωγή	11
2. Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	13
2.1 Υδατικοί πόροι	13
Εισαγωγή	13
Σημασία υδατικών πόρων	15
Κίνδυνοι υποβάθμισης υδάτων.....	16
2.2 Έδαφος.....	17
Εισαγωγή	17
Σημασία εδαφών	23
Έδαφος και νερό	24
Υποβάθμιση εδάφους	25
Διάβρωση του εδάφους	26
2.3 Ρύπανση εδαφών και υπόγειων υδάτων.....	27
Ευρωπαϊκές οδηγίες για την προστασία των εδαφών και υπόγειων υδάτων	30
Εργαλεία εκτίμησης κινδύνου υπόγειων υδάτων σε μορφές ρύπανσης.....	31
3. Παρουσίαση περιοχής μελέτης.....	34
3.1 Γεωγραφική θέση-Γενικοί Χάρτες.....	34
3.2 Φυσικό περιβάλλον	36
3.3 Ανθρωπογενές περιβάλλον	40
3.4 Πιέσεις στο φυσικό περιβάλλον	41
4. Παρουσίαση λογισμικού ArcGIS.....	43
4.1 ArcGIS Desktop.....	44
4.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ΓΠΣ.....	46
5. Μεθοδολογία.....	47

5.1	Μεθοδολογία χρήσης του λογισμικού GIS στην χωρική εκτίμηση εδαφικής επικινδυνότητας.....	47
5.2	Μεθοδολογία δημιουργίας χαρτών.....	49
5.3	Παρουσίαση δεδομένων.....	52
6.	Αποτελέσματα	72
6.1	Χάρτες εδαφικής επικινδυνότητας επιμέρους παραγόντων.....	73
6.2	Συνδυαστική Χωρική Εδαφική Επικινδυνότητα.....	88
7.	Συμπεράσματα	90
	Βιβλιογραφία.....	92
	Ξένη βιβλιογραφία.....	92
	Ελληνική Βιβλιογραφία.....	94
	Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία.....	95

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 2.1.1 – Υδρολογικός Κύκλος [Brutsaert, 2023]	14
Εικόνα 2.2.1 – Ομάδες Αναφοράς Εδαφών [Mantel et al, 2023].....	21
Εικόνα 3.1.1 – Γενικός χάρτης της Κρήτης με επισήμανση της περιοχής μελέτης. Δορυφορική απεικόνιση από το υπόβαθρο “World Imagery”, μέσω του λογισμικού ArcMap 10.5 (Esri, 2016)	34
Εικόνα 3.1.2 – Γενικός χάρτης περιοχή μελέτης 1. Δορυφορική απεικόνιση από το υπόβαθρο “World Imagery”, μέσω του λογισμικού ArcMap 10.5 (Esri, 2016)	35
Εικόνα 3.1.3 – Γενικός χάρτης περιοχής μελέτης 2. Δορυφορική απεικόνιση από το υπόβαθρο “World Imagery”, μέσω του λογισμικού ArcMap 10.5 (Esri, 2016)	35
Εικόνα 3.2.1 – Μέσες τιμές θερμοκρασίας και βροχοπτώσεων των τελευταίων 30 ετών στην περιοχή Ανατολικά του Ηρακλείου. Πηγή: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, μέσω της πλατφόρμας meteoblue (https://www.meteoblue.com/el).....	36
Εικόνα 3.2.2 – Μέσες τιμές θερμοκρασίας και βροχοπτώσεων των τελευταίων 30 ετών στην περιοχή Τζερμιάδων Λασιθίου. Πηγή: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, μέσω meteoblue (https://www.meteoblue.com/el)	37
Εικόνα 3.2.3 – Χάρτης ανάγλυφου περιοχής μελέτης. Πηγή: Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας – Geoportal (https://mapsportal.ypen.gr/maps/813).....	37
Εικόνα 3.2.4 – Χάρτης υψομετρικών ζωνών περιοχής μελέτης. Πηγή: Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας – Geoportal (https://mapsportal.ypen.gr/maps/299).....	38
Εικόνα 3.3.1 – Χάρτης χρήσεις γης της περιοχής μελέτης CORINE Land Cover 2018.....	41
Εικόνα 5.3.1 – Χωρική κατανομή της βροχόπτωσης (IDW).....	53
Εικόνα 5.3.2 – Χάρτης βροχόπτωσης της περιοχής μελέτης.....	54

Εικόνα 5.3.3 – Χάρτης χρήσεων γης της περιοχής μελέτης	55
Εικόνα 5.3.4 – Χάρτης υψομέτρου της περιοχής μελέτης	56
Εικόνα 5.3.5 – Χάρτης Κατεύθυνση Ροής της περιοχής μελέτης	57
Εικόνα 5.3.6 – Χάρτης Συσσώρευση Ροής της περιοχής μελέτης	57
Εικόνα 5.3.7 – Χάρτης σημειακών πηγών ρύπανσης της περιοχής μελέτης	58
Εικόνα 5.3.8 – Χάρτης ποταμών της περιοχής μελέτης	59
Εικόνα 5.3.9 – Ζώνες επιρροής ποταμών (Buffer).....	60
Εικόνα 5.3.10 – Χάρτης οδικού δικτύου της περιοχής μελέτης.....	61
Εικόνα 5.3.11 – Ζώνες επιρροής οδικού δικτύου (Buffer)	61
Εικόνα 5.3.12 – Χάρτης οικισμών της περιοχής μελέτης	63
Εικόνα 5.3.13 – Ζώνες εκτίμησης διεύθυνσης αλμυρού νερού στο έδαφος στην περιοχή μελέτης	64
Εικόνα 5.3.14 – Ζώνες εκτίμησης τεχνητής αποστράγγισης στην περιοχή μελέτης.....	65
Εικόνα 5.3.15 – Ζώνες εκτίμησης υδατικής χωρητικότητας του εδάφους στην περιοχή μελέτης	66
Εικόνα 5.3.16 – Ζώνες εκτίμησης βάθους εδάφους της περιοχής μελέτης	67
Εικόνα 5.3.17 – Χάρτης κατανομής βάθους υδροφόρου ορίζοντα στην περιοχή μελέτης	68
Εικόνα 5.3.18 – Χάρτης γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής μελέτης.....	71
Εικόνα 6.1.1 – Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας λόγω βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης...	73
Εικόνα 6.1.2 – Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας λόγω χρήσεων γης στην περιοχή μελέτης	74
Εικόνα 6.1.3 – Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας λόγω συσσώρευση απορροής στην περιοχή μελέτης	75
Εικόνα 6.1.4 – Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας λόγω σημειακών πηγών στην περιοχή μελέτης	76
Εικόνα 6.1.5 – Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας λόγω εγγύτητας ποταμών στην περιοχή μελέτης.....	77
Εικόνα 6.1.6 – Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας λόγω εγγύτητας οδικού δικτύου στην περιοχή μελέτης	78
Εικόνα 6.1.7 – Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας λόγω κατοικημένων περιοχών στην περιοχή μελέτης	79
Εικόνα 6.1.8 – Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας λόγω περιοχών οικολογικής προστασίας στην περιοχή μελέτης	80
Εικόνα 6.1.9 – Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας λόγω ζωνών αλμυρού νερού του εδάφους στην περιοχή μελέτης	81
Εικόνα 6.1.10 – Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας λόγω τεχνητής αποστράγγισης στην περιοχή μελέτης	82
Εικόνα 6.1.11 – Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας λόγω υδατικής χωρητικότητας του εδάφους στην περιοχή μελέτης	83
Εικόνα 6.1.12 – Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας λόγω βάθους εδάφους στην περιοχή μελέτης	84
Εικόνα 6.1.13 – Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας λόγω βάθους του υδροφόρου ορίζοντα στην περιοχή μελέτης	85

Εικόνα 6.1.14 – Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας λόγω γεωλογικών σχηματισμών του υπεδάφους στην περιοχή μελέτης.....	87
Εικόνα 6.1.15 – Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας λόγω ταχύτητας ροής υπεδάφους στην περιοχή μελέτης.....	88
Εικόνα 6.2.1 – Χάρτης συνολικής εδαφικής επικινδυνότητας της περιοχή μελέτης.....	89

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 5.2.1 – Ανάλυση των 15 παραμέτρων [Kourgialas & Karatzas, 2015].....	50
Πίνακας 5.2.2 – Ανάλυση των 15 παραμέτρων [Kourgialas & Karatzas, 2015].....	50
Πίνακας 5.3.1 – Βροχομετρικοί σταθμοί.....	52
Πίνακας 5.3.2 – Χρήσεις Γης.....	54
Πίνακας 5.3.3 – Πληθυσμιακή κατανομή οικισμών στην περιοχή μελέτης.....	62

1. Εισαγωγή

Η εδαφική επικινδυνότητα των υπογείων υδάτων όσον αφορά την ρύπανση αυτών περιλαμβάνει την εν δυνάμει χωρική κατανομή ενός ρύπου στο υπέδαφος λαμβάνοντας υπόψη διάφορους παράγοντες σχετικούς με τις ιδιότητες του εδάφους και τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Εν ολίγοις περιγράφει τη συμβατότητα μεταξύ της ανθρώπινης ανάπτυξης και του περιβαλλοντικού συστήματος και προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες για τις γεωγονικές και ανθρώπινες δραστηριότητες, προσδιορίζοντας τον αρνητικό αντίκτυπό τους στους υπόγειους υδάτινους πόρους. Η μελέτη εκτίμησης και η λεπτομερής προσέγγιση της διάπλασης ενός ρύπου στο υπέδαφος αποτελεί δύσκολο αντικείμενο έρευνας λόγω της χωρικής ετερογένειας του υπόγειου υδροφορέα, η οποία συναντάται στις ποικίλες εδαφικές διαστρωματώσεις της περιοχής μελέτης, και των φυσικοχημικών δραστηριοτήτων που διενεργούνται στο έδαφος [Civita, 2010].

Η εκτίμηση της εδαφικής επικινδυνότητας είναι σημαντική για την προστασία των φυσικών πόρων και χρήσιμο εργαλείο για την πρόληψη περιβαλλοντικών επιπτώσεων που φέρουν οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες στο οικοσύστημα. Έχοντας ως γνώμονα τέτοιου είδους μελέτες, μπορούν να ληφθούν προφυλακτικά μέτρα κατά το σχεδιασμό νέων έργων με σκοπό την αποφυγή μόνιμης ρύπανσης στους εδαφικούς πόρους, καθώς ακόμη σχέδια αντιμετώπισης μελλοντικών ατυχημάτων στα νέα ή και υπάρχοντα τεχνικά έργα [Σιούτη, 2018]. Ιδιαίτερη σημασία αποκτά η διαχείριση της διασποράς ρύπων στο υπέδαφος, καθώς η ανεξέλεγκτη ρύπανση μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, με κυριότερη τη ρύπανση του υπόγειου υδροφορέα. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερος κρίσιμος για τον ελλαδικό χώρο, όπου τα υπόγεια ύδατα αποτελούν βασική πηγή ύδρευσης και άρδευσης, τόσο σε τοπικό όσο και σε εθνικό επίπεδο [ΕΛΣΤΑΤ, 2022]. Ως εκ τούτου, η ορθολογική διαχείριση και προστασία των υπόγειων υδάτων καθίσταται ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της περιβαλλοντικής ισορροπίας και τη διασφάλιση της αειφορίας των υδατικών πόρων.

Για τον προσδιορισμό της εδαφικής επικινδυνότητας κατασκευάζονται θεματικοί χάρτες που αποτυπώνουν τα αποτελέσματα εξειδικευμένων μελετών σε περιοχές ενδιαφέροντος, δηλαδή σε περιοχές που διατρέχουν κίνδυνο ρύπανσης ή παρουσιάζουν αυξημένη ευπάθεια σε αυτή. Η μελέτη της χωρικής κατανομής του κινδύνου αποτελεί μια προτιμότερη προσέγγιση, καθώς επιτρέπει την έγκαιρη αναγνώριση και αξιολόγηση των ευάλωτων περιοχών, μειώνοντας σημαντικά τόσο τον απαιτούμενο χρόνο όσο και το χρηματικό κόστος που συνεπάγεται η εκ των υστέρων ανίχνευση και αποκατάσταση της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων [Kourgialas & Karatzas, 2015]. Η κατασκευή αυτών των χαρτών συμβάλλει ουσιαστικά στις ερευνητικές μελέτες, παρέχοντας μια ισχυρή επιστημονική βάση για την πρόληψη, διαχείριση και αντιμετώπιση ζητημάτων που σχετίζονται με τη ρύπανση των εδαφικών και υπόγειων υδάτων. Ο προσδιορισμός της εδαφικής επικινδυνότητας των υπόγειων υδάτων επιτυγχάνεται μέσω του συνδυασμού της εκτίμησης της ευπάθειας και της εκτίμησης των κινδύνων, επιτρέποντας έτσι μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στην περιβαλλοντική διαχείριση.

Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο τον προσδιορισμό της εδαφικής επικινδυνότητας των υπόγειων υδάτων στην περιοχή της Χερσονήσου, στον νομό Ηρακλείου Κρήτης. Πρόκειται για μια περιοχή ιδιαίτερης οικονομικής σημασίας, καθώς αποτελεί έναν από τους βασικούς πόλους τουριστικής ανάπτυξης του νομού, συμβάλλοντας θετικά στην τοπική και εθνική οικονομία. Η μελέτη βασίζεται στην ήδη ανεπτυγμένη μεθοδολογία των [Kourgialas & Karatzas, 2015], η οποία έχει εφαρμοστεί στο σύνολο του νησιού της Κρήτης. Η χωρική κατανομή του κινδύνου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού ArcMap GIS, μέσω της δημιουργίας 15 θεματικών χαρτών, οι οποίοι περιλαμβάνουν δεδομένα μοντελοποίησης που προέρχονται από την ερευνητική εργασία των [Kourgialas & Karatzas, 2015]. Κάθε θεματικός χάρτης αναπαριστά έναν συγκεκριμένο παράγοντα που σχετίζεται με την εδαφική επικινδυνότητα και επηρεάζει τη ρύπανση των υπόγειων υδάτων. Για τον τελικό χάρτη συνολικής κατανομής του κινδύνου οι 15 επιμέρους χάρτες συνδυάστηκαν, λαμβάνοντας υπόψη τον βαθμό επιρροής κάθε παράγοντα. Το τελικό αποτέλεσμα αποτυπώνει την εδαφική επικινδυνότητα της περιοχής σε έναν σύνθετο θεματικό χάρτη, όπου ο κίνδυνος ταξινομείται σε πέντε κατηγορίες: πολύ χαμηλή, χαμηλή, μεσαία, υψηλή και πολύ υψηλή. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει μια σαφή και τεκμηριωμένη αξιολόγηση των περιοχών με διαφορετικό βαθμό επικινδυνότητας, παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες για τη λήψη μέτρων προστασίας των υπόγειων υδάτων και τη βιώσιμη διαχείριση των φυσικών πόρων της περιοχής.

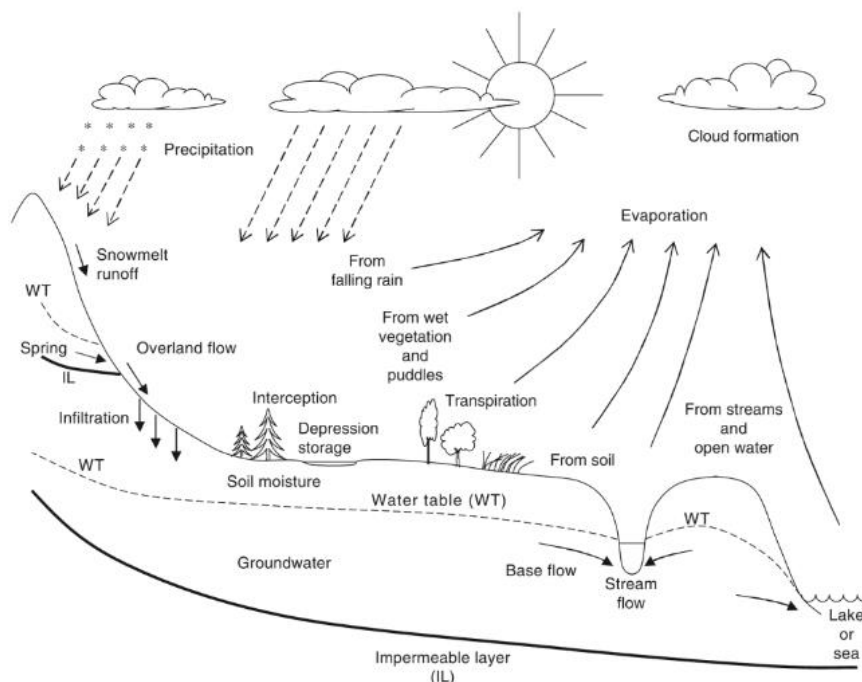
2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Υδατικοί πόροι

Εισαγωγή

Το νερό είναι ζωτικής σημασίας για τη ζωή σε όλη τη Γη. Το 71% της επιφάνειας της Γης καλύπτεται από νερό, με το αλμυρό νερό των ωκεανών να αντιπροσωπεύει περίπου το 96,6% της συνολικής διαθεσιμότητας νερού. Το γλυκό νερό που υπάρχει στη στεριά αντιπροσωπεύει μόλις το 1,8% του συνολικού νερού της Γης, ενώ το υπόλοιπο 1,6% αποτελείται κυρίως από αλμυρά υπόγεια ύδατα και αλμυρές λίμνες. Οι πάγοι, οι παγετώνες και τα χιόνια συνιστούν περίπου το 97% των πόρων γλυκού νερού, με λιγότερο από 3% να θεωρείται εύκολα προσβάσιμο και διαθέσιμο για τη λειτουργία των οικοσυστημάτων και τις ανάγκες ύδρευσης της ανθρώπινης κοινωνίας. Αυτή η πολύ μικρή ποσότητα γλυκού νερού αντιπροσωπεύει έναν συνολικό όγκο περίπου 835.000 km³, εκ των οποίων τα 630.000 km³ βρίσκονται κυρίως σε υπόγεια ύδατα, ενώ τα υπόλοιπα 205.000 km³ είναι αποθηκευμένα σε λίμνες, ποτάμια, υγρότοπους και εδάφη. Αν και ο φυσικός ρυθμός κυκλοφορίας αυτής της ποσότητας είναι θεωρητικά αρκετός για να καλύψει τις παγκόσμιες ανάγκες των ανθρώπων και των οικοσυστημάτων, υπάρχουν μεγάλες γεωγραφικές και εποχιακές διαφορές που επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα του γλυκού νερού για την κάλυψη των τοπικών αναγκών [Douville et al., 2021].

Οι υδατικοί πόροι είναι ανανεώσιμοι λόγω της κυκλικής τους φύσης, της συνεχούς εναλλαγής υγρασίας μεταξύ των ωκεανών, της ατμόσφαιρας και του εδάφους. Ο υδρολογικός κύκλος και οι υδατικοί πόροι παρουσιάζουν υψηλή ετερογένεια τόσο χωρικά όσο και χρονικά λόγω της μεταβλητότητας του κλίματος και των επιφανειών της γης. Ο υδρολογικός κύκλος περιλαμβάνει υδρολογικές διεργασίες εντός της υδρόσφαιρας και έχει κινητήρια δύναμη την ηλιακή ακτινοβολία και τη βαρύτητα [Yang et al., 2021]. Οι μελέτες δείχνουν ότι περίπου το 90% της υγρασίας στην ατμόσφαιρα προέρχεται από την εξάτμιση των ωκεανών, των θαλασσών και των υδάτινων σωμάτων, ενώ τα φυτά συνεισφέρουν στο μεγαλύτερο μέρος του υπόλοιπου 10% μέσω της διαπνοής. Μικρή ποσότητα υδρατμών εισέρχεται επίσης στην ατμόσφαιρα μέσω της εξάχνωσης από πάγο και χιόνι. Αφότου οι υδρατμοί εισέλθουν στην ατμόσφαιρα, συμπυκνώνονται σε σύννεφα και τελικά επιστρέφουν στη Γη ως κατακρημνίσματα. Το νερό αυτό ακολουθεί στη συνέχεια διάφορες διαδρομές, όπως εξάτμιση, απορροή σε ποτάμια και ωκεανούς, και απορρόφηση από τον υδροφόρο ορίζοντα, συνεχίζοντας τον υδρολογικό κύκλο [Graham et al., 2010]. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται σχέδιο ορισμένων από τις κύριες διεργασίες της χερσαίας φάσης του υδρολογικού κύκλου [Brutsaert, 2023].



Εικόνα 2.1.1 – Υδρολογικός Κύκλος [Brutsaert, 2023]

Η διαδικασία της απορρόφησης του νερού στον υδροφόρο ορίζοντα εισάγει την παράμετρο υπόγειο νερό το οποίο ορίζεται ως το νερό που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της γης και η κύρια πηγή τροφοδοσίας του είναι οι κατακρημνίσεις από βροχή, χιόνι και χαλάζι. Αυτές οι κατακρημνίσεις ένα μέρος τους εξατμίζεται, ένα μέρος του ρέει σε ρέματα και λίμνες, και το υπόλοιπο εισέρχεται στο υπέδαφος μέσω της διήθησης. Το υπόγειο νερό συνήθως γεμίζει τους πόρους μεταξύ των κόκκων ορυκτών ή πετρωμάτων σε ιζήματα και ιζηματογενή πετρώματα καθώς ακόμη υπάρχει σε ρωγμές και σχισμές κρυσταλλικών πετρωμάτων, όπως σε γρανίτη ή σε ασβεστόλιθο [Anderson & Witching]. Το υπόγειο νερό χωρίζεται σε δύο κύριες ζώνες: τη ζώνη αερισμού και τη ζώνη κορεσμού. Η ζώνη κορεσμού περιέχει χώρους πλήρως καλυμμένους με νερό και το ανώτερο μέρος της περιοχής αυτής ονομάζεται υδροφόρος ορίζοντας. Η ζώνη αερισμού αποτελεί μη κορεσμένα με νερό εδαφικά σημεία και εντός της βρίσκεται μία ζώνη εδαφικής υγρασίας, από την οποία τα φυτά αντλούν την υγρασία τους. Οι υδροφορείς μεταφέρουν το υπόγειο νερό από περιοχές εμπλουτισμού σε περιοχές εκφόρτισης και αποθηκεύουν σημαντικές ποσότητες υψηλής ποιότητας υπόγειου νερού. Ο υδροφορέας χαρακτηρίζεται ως ένας υπόγειος ταμιευτήρας νερού, με ιζήματα ή πέτρωμα κορεσμένα με νερό και επαρκώς διαπερατά. Η άντληση του νερού γίνεται με πηγάδια και γεωτρήσεις. [Anderson & Witching].

Ως η πιο εκτεταμένη πηγή γλυκού νερού στον κόσμο, οι υπόγειοι υδροφορείς εκτιμάται ότι παρέχουν περίπου το ένα τρίτο των ετήσιων γλυκών υδάτων που συλλέγονται παγκοσμίως για να καλύψουν τις αγροτικές, βιομηχανικές και οικιακές ανάγκες. Τα αίτια μεταβολής της αποθήκευσης υπόγειου νερού, οι οποίες παρατηρούνται τοπικά μέσω πιεζομετρικών μετρήσεων ή εκτιμώνται από δορυφορικά δεδομένα, συχνά είναι δύσκολο να προσδιοριστούν λόγω πολυπλοκότητας των μη κλιματικών παραγόντων, όπως αλλαγών στη χρήση γης και ανθρώπινων δραστηριοτήτων εξόρυξης νερού. Έρευνες σχετικά με τους υπόγειους υδροφορείς

και την κλιματική αλλαγή αναδεικνύουν τη στενή σχέση μεταξύ έντονων ή ακραίων βροχοπτώσεων και της ανανέωσης των υπόγειων υδάτων, ιδιαίτερα σε τροπικές και υποτροπικές περιοχές. Επιπλέον, η ανατροφοδότηση των υδάτινων αποθεμάτων μέσω έντονων βροχοπτώσεων επηρεάζεται σημαντικά από την κλιματική μεταβλητότητα, με την αύξηση των υπόγειων υδάτων να προκύπτει κυρίως από επεισοδιακές ανανεώσεις που συνδέονται με ακραίες ετήσιες βροχοπτώσεις [Douville et al., 2021].

Σημασία υδατικών πόρων

Το γλυκό νερό αποτελεί τον βασικότερο φυσικό πόρο του πλανήτη και στηρίζει σχεδόν όλους τους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης (Sustainable development goals (SDGs)), οι οποίοι απαιτούν την πρόσβαση σε επαρκείς και ασφαλείς πόρους για πόσιμο νερό και αποχέτευση, καθώς και για πολλές άλλες χρήσεις. Το γλυκό νερό συμβάλλει ενεργά σε μια ποικιλία ανθρώπινων δραστηριοτήτων, από την άρδευση μέχρι τις βιομηχανικές διαδικασίες, την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας και την ψύξη θερμικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι δραστηριότητες αυτές απαιτούν επαρκείς ποσότητες γλυκού νερού που αντλούνται από ποτάμια, λίμνες, υπόγεια αποθέματα και αφαλατωμένο θαλασσινό νερό [Douville et al., 2021].

Τα διαθέσιμα γλυκά νερά περιλαμβάνουν τα επιφανειακά ύδατα, που βρίσκονται στις λίμνες, στα ποτάμια και στα ρυάκια, και τα υπόγεια ύδατα. Αυτοί οι υδατικοί πόροι υπολογίζονται ως το άθροισμα της εσωτερικής ροής, της βροχόπτωσης μείον της πραγματική εξατμισοδιαπνοής, και της εξωτερικής εισροής. Η διαθεσιμότητα γλυκού νερού σε μια χώρα καθορίζεται κυρίως από τις κλιματικές συνθήκες και τις διασυννοριακές ροές υδάτων, ενώ παράλληλα το συνολικό ποσό εξαρτάται σημαντικά από το μέγεθος της χώρας. Σύμφωνα με το διεθνή οργανισμό της Ευρωπαϊκής Ένωσης 'Eurostat-Statistics Explained', οι υδατικοί πόροι ανά κάτοικο θεωρούνται ένας σημαντικός δείκτης για τη μέτρηση της βιωσιμότητας των υδατικών πόρων. Οι μέσοι υδατικοί πόροι ανά κάτοικο για τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) ποικίλλουν σημαντικά ανάλογα με το κλίμα, τη γεωγραφία και τους διαθέσιμους υδάτινους πόρους κάθε χώρας. Ο ευρωπαϊκός μέσος όρος των διαθέσιμων υδατικών πόρων ανά κάτοικο κυμαίνεται γύρω στα 4-5 χιλιάδες m^3 ετησίως, αλλά αυτός ο αριθμός εμπεριέχει σημαντικές διαφορές μεταξύ των κρατών μελών. Οι χώρες με υψηλές τιμές υδατικών πόρων ανά κάτοικο είναι κυρίως οι βόρειες χώρες που διαθέτουν άφθονες πηγές γλυκού νερού και η ποσότητα κυμαίνεται περίπου στα 30 χιλιάδες m^3 με 70 χιλιάδες m^3 ανά κάτοικο ετησίως, όπως παρουσιάζεται στην Κροατία και στη Νορβηγία αντίστοιχα, ενώ οι χώρες με χαμηλότερες τιμές υδατικών πόρων είναι εκείνες του νότου, όπως η Κύπρος και η Μάλτα, όπου οι ετήσιοι υδατικοί πόροι της είναι κάτω από 1.700 m^3 ανά κάτοικο.

Ακόμη, σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος, πολλά οικοσυστήματα και οικονομικοί τομείς στην Ευρώπη εξαρτώνται από τη διαθεσιμότητα νερού επαρκούς ποιότητας. Τα υπόγεια ύδατα αποτελούν έναν ασφαλή και βιώσιμο πόρο για την κάλυψη των αναγκών σε πόσιμο νερό, γεωργία, βιομηχανία και τουρισμό. Συγκεκριμένα, η κάλυψη των αναγκών σε νερό για πόση και γεωργία εξαρτάται σημαντικά από τα υπόγεια ύδατα, τα οποία αντιστοιχούν στο 65% του πόσιμου νερού και στο 25% του νερού για γεωργική άρδευση. Τα 27 κράτη μέλη της ΕΕ άντλησαν περίπου 38 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα υπόγειων υδάτων κάθε χρόνο μεταξύ 2010 και 2019, καλύπτοντας το 65% της συνολικής άντλησης νερού για δημόσια ύδρευση. Ωστόσο, τα υπόγεια ύδατα αποτελούν έναν φυσικό πόρο που πρέπει να προστατευθεί από τη ρύπανση και την υπερεκμετάλλευση, ώστε να διασφαλιστεί η

μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα χρήσης του για ανθρώπινες δραστηριότητες και τα φυσικά οικοσυστήματα.

Οι υδροφορείς δεν αποτελούν μόνο βασικές πηγές παροχής νερού, αλλά επιτελούν έναν πολυλειτουργικό ρόλο, καθιστώντας τους αναπόσπαστο στοιχείο της υδρολογικής ισορροπίας και της βιώσιμης διαχείρισης των υδάτινων πόρων. Εκτός από την άμεση χρησιμότητά τους στην ύδρευση, την άρδευση και τη βιομηχανική χρήση, τα υπόγεια ύδατα λειτουργούν ως φυσικές δεξαμενές αποθήκευσης, εξασφαλίζοντας τη σταδιακή αναπλήρωση των αποθεμάτων μέσω των κατακρημνίσεων. Παράλληλα, σε πολλές περιπτώσεις διαθέτουν τη δυνατότητα ρύθμισης των επιφανειακών υδάτων, διατηρώντας τη ροή ποταμών και πηγών ακόμα και σε περιόδους ξηρασίας. Επιπλέον, οι υδροφορείς διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη φυσική επεξεργασία των υδάτων, λειτουργώντας ως φίλτρα καθαρισμού μέσω φυσικών και βιολογικών διεργασιών, ενώ η αποθηκευτική τους ικανότητα μπορεί να ενισχυθεί με τεχνικές τεχνητού εμπλουτισμού, βελτιώνοντας την αξιοποίησή τους. Ιδιαίτερα σε περιοχές με αυξημένη υδατική ζήτηση ή κινδύνους ρύπανσης, η ορθολογική διαχείριση των υπόγειων υδάτων αποκτά ακόμα μεγαλύτερη σημασία. Συνεπώς, η αξιοποίηση των υδροφορέων δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται αποκλειστικά ως ζήτημα εκμετάλλευσης ενός φυσικού πόρου, αλλά ως μια δυναμική διαδικασία που απαιτεί ισορροπία μεταξύ χρήσης, προστασίας και ανανέωσης των υδατικών αποθεμάτων [Τσακίρης, 2013].

Κίνδυνοι υποβάθμισης υδάτων

Η ποιότητα και η διαθεσιμότητα των υδάτινων πόρων επηρεάζονται από ποικίλους φυσικούς και ανθρωπογενείς παράγοντες, καθιστώντας την προστασία τους ζήτημα υψηλής προτεραιότητας σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι υπόγειοι υδροφορείς, που αποτελούν βασική πηγή ύδρευσης και άρδευσης, απειλούνται από τη ρύπανση, την υπερεκμετάλλευση και τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, με σοβαρές συνέπειες τόσο για τα οικοσυστήματα όσο και για τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Η υποβάθμιση των υπόγειων υδάτων δεν αποτελεί μόνο περιβαλλοντικό ζήτημα, αλλά και έναν σοβαρό οικονομικό και κοινωνικό παράγοντα, καθώς επηρεάζει άμεσα τη διαθεσιμότητα και την ποιότητα των υδάτινων πόρων. Η ρύπανση και η υπερεκμετάλλευση των υδροφορέων αυξάνουν το κόστος επεξεργασίας του νερού και δημιουργούν σημαντικές προκλήσεις για τη διαχείρισή του, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου η ζήτηση είναι αυξημένη λόγω γεωργικών, βιομηχανικών και τουριστικών δραστηριοτήτων. Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος επισημαίνει ότι η ρύπανση των υπόγειων υδάτων επιφέρει σημαντικά κόστη για τις εταιρείες ύδρευσης πόσιμου νερού, όταν απαιτείται απονιτροποίηση και απομάκρυνση φυτοφαρμάκων. Παράλληλα, η υπεράντληση νερού από παράκτιους γλυκούς υδροφορείς συχνά οδηγεί σε εισροή αλμυρού νερού από το υποκείμενο θαλασσινό νερό, καθιστώντας τα υπόγεια ύδατα ακατάλληλα για δεκαετίες και αυξάνοντας σημαντικά το κόστος επεξεργασίας τους. Ιδιαίτερα σε κίνδυνο βρίσκονται οι καρστικοί υδροφορείς της μεσογειακής ακτής, που είναι εκτεταμένοι στην Κροατία, την Ελλάδα, τη Γαλλία, την Ιταλία, τη Μάλτα και την Ισπανία. Αυτοί οι υδροφορείς συνήθως υφίστανται έντονες πιέσεις από τη γεωργία και την άντληση πόσιμου νερού, λόγω της αύξησης του πληθυσμού και του τουρισμού.

Στο πλαίσιο της προστασίας των υδάτινων πόρων, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει την Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα (2000/60/ΕΚ), η οποία θέτει ως κύριο στόχο την επίτευξη καλής ποιοτικής και ποσοτικής κατάστασης όλων των υδάτων. Ωστόσο, παρά τις προσπάθειες που

έχουν καταβληθεί, τα διαθέσιμα στοιχεία καταδεικνύουν ότι σημαντικό ποσοστό των υπόγειων υδάτων εξακολουθεί να αντιμετωπίζει σοβαρά προβλήματα. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με την Οδηγία, το 24% της συνολικής έκτασης των υπόγειων υδάτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση παρουσιάζει κακή χημική σύσταση, ενώ το 9% πλήττεται από προβλήματα υπερεκμετάλλευσης. Επιπλέον, η συνολική αξιολόγηση των χημικών και υδρολογικών χαρακτηριστικών τους δείχνει ότι το 29% των υπόγειων υδάτων δεν διαθέτει επαρκή ικανότητα να καλύψει τις ανάγκες τόσο των οικοσυστημάτων όσο και της κοινωνίας. Η εικόνα αυτή συνδέεται άμεσα με τις γεωργικές δραστηριότητες, οι οποίες διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην επισιτιστική ασφάλεια, καθώς η εντατική χρήση θρεπτικών ουσιών, η εφαρμογή χημικών φυτοφαρμάκων και η αυξημένη άρδευση ασκούν σημαντικές πιέσεις στα υπόγεια ύδατα και στα υδάτινα οικοσυστήματα. Ιδιαίτερη ανησυχία προκαλεί η διάχυτη ρύπανση από γεωργικές πηγές, η οποία αποτελεί τη συχνότερη αιτία υποβάθμισης της χημικής ποιότητας των υπόγειων υδάτων, επηρεάζοντας το 19% της συνολικής τους έκτασης στην Ευρωπαϊκή Ένωση, με κυριότερους ρύπους τα νιτρικά άλατα και τα φυτοφάρμακα [Douville et al., 2021].

Ένας ακόμη κρίσιμος παράγοντας που επηρεάζει την ποιότητα των υδροφορέων είναι η κλιματική αλλαγή, η οποία μεταβάλλει τη διαθεσιμότητα και την ποιότητα των υδάτινων πόρων παγκοσμίως. Πολλές μελέτες επιβεβαιώνουν ότι η κλιματική αλλαγή επηρεάζει άμεσα τον κύκλο του νερού, καθιστώντας αναγκαία τη συνεχή αξιολόγηση και ποσοτικοποίηση των επιπτώσεών της. Η αύξηση της θερμοκρασίας συμβάλλει στην επιτάχυνση του ρυθμού εξάτμισης και διαπνοής, με αποτέλεσμα τη μείωση των αποθεμάτων νερού, ενώ παράλληλα επιδρά στη λειτουργία κρίσιμων υποδομών, όπως οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί, τα αρδευτικά συστήματα και οι υποδομές αντιπλημμυρικής προστασίας. Επιπλέον, οι αλλαγές στα υδρολογικά πρότυπα μπορούν να οδηγήσουν σε ακραία φαινόμενα, όπως ξηρασίες και πλημμύρες, επηρεάζοντας τόσο την ποιότητα όσο και τη διαθεσιμότητα των υδάτων. Σε παράκτιες περιοχές, η άνοδος της στάθμης της θάλασσας εντείνει τον κίνδυνο διείσδυσης αλμυρού νερού στους υπόγειους υδροφορείς, καθιστώντας τους ακατάλληλους για χρήση και δημιουργώντας μακροχρόνιες περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις. Παράλληλα, η υπερεκμετάλλευση των υδάτινων πόρων λόγω της αυξανόμενης ζήτησης από τη γεωργία, τη βιομηχανία και τα αστικά κέντρα ενισχύει την υποβάθμιση των υδροφορέων, οδηγώντας σε μη αναστρέψιμες καταστάσεις [Raju & Kumar, 2018]. Τέλος, εκτιμήσεις για τις παγκόσμιες υδάτινες ροές δείχνουν ότι το ήμισυ της συνολικής εκροής ποταμών αναδιανέμεται ετησίως λόγω ανθρώπινης χρήσης, υπογραμμίζοντας τη σημασία ανάλυσης τόσο των ανθρωπογενών επιπτώσεων όσο και της κλιματικής αλλαγής. Παράγοντες όπως η πληθυσμιακή αύξηση, η οικονομική ανάπτυξη, η αστικοποίηση και οι μεταβολές στη χρήση γης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στον σχεδιασμό στρατηγικών διαχείρισης υδάτινων πόρων. Η κατανόηση αυτών των παραμέτρων είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη βιώσιμων στρατηγικών μετριασμού και προσαρμογής, διασφαλίζοντας την προστασία των υδροφορέων και τη διατήρηση της υδατικής επάρκειας για το μέλλον [Douville et al., 2021].

2.2 Έδαφος

Εισαγωγή

Το έδαφος αποτελεί ένα φυσικό σώμα ανόργανων και οργανικών συστατικών, το οποίο παράγεται μέσω της ανακύκλωσης στερεών υλικών, κατά τη διάρκεια μυριάδων πολύπλοκων

διαδικασιών τροποποίησης του στερεού φλοιού, που συνδέονται άμεσα με τον υδρολογικό κύκλο. Αποτελεί τη διεπιφάνεια στην οποία συναντώνται όλες οι δυνάμεις που δρουν στον φλοιό της Γης, δημιουργώντας ένα μέσο μη συνεκτικών υλικών, που λειτουργεί ως περιβάλλον για περαιτέρω αλλαγές και εξελίξεις, συμβαδίζοντας με την εξέλιξη του συνολικού πλανητικού συστήματος της Γης. Παρέχει καταφύγιο και κατοικία σε αμέτρητους οργανισμούς, προσφέρει ένα μέσο διαβίωσης για τα φυτά, ενώ συμβάλλει ενεργά στον παγκόσμιο κύκλο ροής υλικών μεταξύ των τεσσάρων κύριων γεωσφαιρών, της ατμόσφαιρας, της λιθόσφαιρας, της υδρόσφαιρας και της βιόσφαιρας [Mirsal, 2008].

Τα εδάφη διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τα φυσικά και τα τεχνητά. Τα φυσικά εδάφη περιλαμβάνουν τόσο τα αυτόχθονα, που σχηματίστηκαν στη θέση τους, όσο και τα φερτά, που έχουν μεταφερθεί από άλλες περιοχές. Αντίθετα, τα τεχνητά εδάφη προκύπτουν από την εναπόθεση ή την απόρριψη υλικών πάνω στο φυσικό υπόστρωμα, συχνά ως αποτέλεσμα ανθρωπογενών παρεμβάσεων. Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες χαρακτηρισμού των εδαφών είναι η φύση των κόκκων τους, η οποία καθορίζεται από τα ορυκτά συστατικά, το μέγεθος και το σχήμα τους. Το μέγεθος των κόκκων, η μορφολογία και η πυκνότητά τους αποτελούν κρίσιμες ιδιότητες που επηρεάζουν τη συνολική δομή του εδάφους. Η διάταξη των κόκκων εντός του εδαφικού σχηματισμού καθορίζει τη συνοχή και τη σταθερότητά του, ενώ εξίσου σημαντική είναι η σχέση του εδάφους με το νερό. Παράγοντες όπως το ποσοστό υγρασίας, το όριο πλαστικότητας και η υδαρότητα διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην κατάταξή του [Barnes, 2010].

Λαμβάνοντας υπόψη αυτές τις ιδιότητες, το Σύστημα Ταξινόμησης Εδαφών οργανώνει τα εδάφη σε δώδεκα βασικές κατηγορίες (orders) με βάση τρεις κύριες ομάδες κριτηρίων. Αρχικά, εξετάζονται τα μορφολογικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν το προφίλ του εδάφους στο πεδίο. Στη συνέχεια, αναλύονται οι περιβαλλοντικές συνθήκες που επηρέασαν τις διαδικασίες σχηματισμού του εδάφους. Τέλος, η ταξινόμηση βασίζεται σε χημικά κριτήρια, εστιάζοντας στη χημική σύσταση του εδάφους σε όλο το προφίλ του ή σε επιμέρους τμήματά του. Ένας διαγνωστικός ορίζοντας, εντός του εδαφικού σώματος, χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένα φυσικά χαρακτηριστικά, όπως το χρώμα, η υφή, η συνεκτικότητα, η πορώδης υφή ή η υγρασία. Με βάση την παρουσία ή απουσία ενός ή περισσότερων από αυτούς τους διαγνωστικούς ορίζοντες, τα εδάφη ταξινομούνται στις δώδεκα ευρείες κατηγορίες. Κάθε μία από αυτές τις κατηγορίες χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση συγκεκριμένων οριζόντων εδάφους. Οι δώδεκα κατηγορίες της Ταξινόμησης Εδαφών ταξινομούνται περαιτέρω, βάσει ενός συνδυασμού περιβαλλοντικών και χημικών κριτηρίων, σε 47 υποκατηγορίες (suborders). Σύμφωνα με τα παραπάνω κριτήρια, η ταξινόμηση των εδαφών περιλαμβάνει τις ακόλουθες δώδεκα κατηγορίες [Mirsal, 2008]:

- Alfisols: Γόνιμα εδάφη που αναπτύσσονται κάτω από εύκρατα δάση των υγρών και υπουγρών ζωνών της Γης. Ορισμένα από αυτά μπορεί να βρεθούν και σε υγρο/ξηρά τροπικά κλίματα της Αφρικής. Κυρίως, όμως, εμφανίζονται σε περιοχές με εύρος θερμοκρασίας από κάτω από 0°C έως πάνω από 22°C.
- Andisols: εδάφη λεπτόκοκκης υφής, που έχουν αναπτυχθεί από ηφαιστειακό υλικό ηφαιστειακής προέλευσης. Εμφανίζονται κυρίως γύρω από μεμονωμένα ηφαιστειακά που δημιουργήθηκαν από μάγμα πλούσιο σε ανδεσίτη. Τα Andisols έχουν υψηλή ικανότητα ανταλλαγής ιόντων και συχνά περιέχουν σημαντικές ποσότητες οργανικής

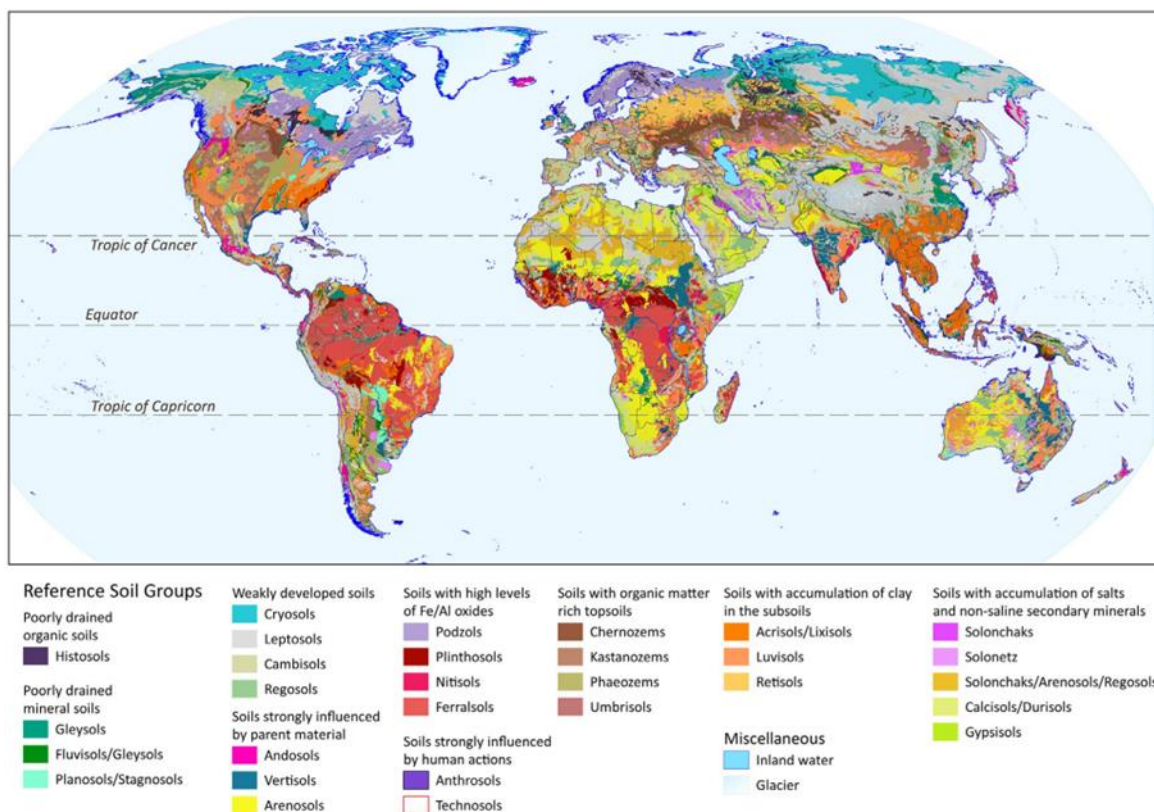
ύλης. Νέα ορυκτά, που μπορούν να διαβρωθούν από το μητρικό υλικό, είναι συνήθως άφθονα.

- **Aridisols:** Ξηρά εδάφη συνήθως σε ερημικές περιοχές. Μπορεί επίσης να εμφανιστούν σε ημιξηρές περιοχές. Το νερό του εδάφους είναι περιορισμένο (ξηρό σε όλα τα μέρη, >50% του χρόνου τα περισσότερα έτη), και η καλλιέργεια είναι αδύνατη χωρίς άρδευση. Τα εδάφη αυτά έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε νάτριο, οδηγώντας σε τοξικότητα των φυτών ή/και διάσπαση της δομής του εδάφους.
- **Entisols:** Νεαρά εδάφη με μικρή ανάπτυξη οριζόντων, συχνά σε περιοχές πρόσφατης διαταραχής. Τα Entisols είναι ρηχά, φτωχά εδάφη που αναπτύσσονται κάτω από περιορισμένες συνθήκες σχηματισμού εδάφους, όπως σε ψυχρά και εκτεθειμένα περιβάλλοντα. Είναι πρόσφατης προέλευσης, αναπτυγμένα πάνω σε ασυμπαγές μητρικό υλικό. Έχουν χαμηλή ικανότητα κατακράτησης νερού και μικρή περιεκτικότητα σε οργανική ύλη.
- **Gelisols:** Ψυχρά εδάφη με μόνιμο παγετό. Γεωγραφικά περιορίζονται στις πολικές περιοχές υψηλού γεωγραφικού πλάτους και σε ορεινές περιοχές με μεγάλο υψόμετρο. Τα Gelisols, λόγω των σκληρών κλιματικών συνθηκών, υποστηρίζουν μόνο ~0,4% του παγκόσμιου πληθυσμού. Παρόλα αυτά, εκτιμάται ότι καλύπτουν περίπου 8,6% της εκτάσεως ξηράς χωρίς πάγο. Συνήθως περιέχουν υψηλή ποσότητα οργανικής ύλης, αποτέλεσμα των αργών διαδικασιών αποσύνθεσης λόγω χαμηλών θερμοκρασιών.
- **Histosols:** Πλούσια σε οργανική ύλη, συναντώνται συνήθως σε υδροβιότοπους και έλη. Έχουν χαμηλή φαινόμενη πυκνότητα (κάτω από 0,3 g/cm³) λόγω της υψηλής οργανικής περιεκτικότητας. Τα Histosols δεν έχουν διαγνωστικούς ορίζοντες και τα χαρακτηριστικά του προφίλ τους αντανakλούν τη φύση της τύρφης από την οποία έχουν σχηματιστεί.
- **Inceptisols:** Ασθενώς ανεπτυγμένα εδάφη, συχνά σε ορεινές ή λοφώδεις περιοχές. Τα Inceptisols είναι ευρέως διαδεδομένα και μπορεί να εμφανιστούν σε ένα ευρύ φάσμα οικολογικών συνθηκών, κυρίως σε αρκετά απότομες πλαγιές, νεαρές γεωμορφολογικές επιφάνειες και σε υλικά γονέα ανθεκτικά στη διάβρωση.
- **Mollisols:** Γόνιμα, σκούρα εδάφη, χαρακτηριστικά των λιβαδιών. Τα Mollisols είναι σκούρα οργανικά εδάφη με υψηλό κορεσμό βάσεων (άνω του 50%), υψηλή ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (CEC) και μεγάλη ικανότητα κατακράτησης νερού. Χαρακτηρίζονται από αργιλικούς ή καμβικούς διαγνωστικούς ορίζοντες
- **Oxisols:** Εδάφη που εμφανίζονται κυρίως σε ισοτροπικά καθεστώτα εδαφικής θερμοκρασίας. Αναπτύσσονται σε κλιματικές ζώνες με μικρή εποχιακή διακύμανση στη θερμοκρασία του εδάφους. Τα Oxisols εμφανίζονται σε ένα ευρύ φάσμα καθεστώτων υγρασίας. Θεωρείται ότι αναπτύσσονται σε κλιματικές συνθήκες όπου οι κατακρημνίσεις υπερβαίνουν την εξατμισοδιαπνοή για ορισμένες περιόδους του έτους. Αυτή η συνθήκη ευνοεί την απομάκρυνση διαλυτών υλικών και τη συσσώρευση καολινίτη και σεσκιωξειδίων, που είναι απαραίτητα για τον σχηματισμό ενός οξικού διαγνωστικού ορίζοντα

- **Spodosols:** εδάφη χονδρόκοκκης υφής, ιδιαίτερα εκπλυμένα και όξινα, με επιφάνεια κακώς αποσυντεθειμένων φυτικών υπολειμμάτων. Είναι ευρέως διαδεδομένα σε ψυχρές εύκρατες περιοχές και σπάνια χρησιμοποιούνται για παραγωγικές γεωργικές διαδικασίες. Μπορεί να εμφανιστούν υπό όλα τα καθεστώτα θερμοκρασίας εδάφους ενώ προτιμούν να σχηματίζονται σε αμμώδη εδάφη πλούσια σε χαλαζία, που βρίσκονται πάνω από διακυμαινόμενο υδροφόρο ορίζοντα.
- **Ultisols:** Ισχυρά εκπλυμένα εδάφη, τυπικά των υγρών τροπικών ή υποτροπικών περιοχών. Έχουν χαμηλό κορεσμό βάσεων και συνήθως εμφανίζουν έντονη καιρική αποσύνθεση στους αργιλικούς ορίζοντες. Συνήθως εμφανίζονται κάτω από ξερόφυτα έως υgroφυτικά καθεστώτα υγρασίας, αλλά μπορεί να σχηματιστούν και σε ψυχρά θερμοκρασιακά καθεστώτα εδαφών.
- **Vertisols:** Εδάφη πλούσια σε άργιλο, που συστέλλονται και διαστέλλονται σημαντικά με τις αλλαγές στην υγρασία. Κατά τις ξηρές περιόδους, δημιουργούνται βαθιές ρωγμές λόγω της συστολής που ακολουθούνται από διαστολή με το βρέξιμο. Τα Vertisols έχουν συνήθως μέτρια έως χαμηλή περιεκτικότητα σε οργανική ύλη (0,5–3,0%) και μπορεί να χαρακτηρίζονται περαιτέρω από έναν ωχρό επίπεδο.

Η κατηγοριοποίηση των εδαφών σε δώδεκα βασικές τάξεις παρέχει ένα αξιόπιστο πλαίσιο για την κατανόηση των μορφολογικών, περιβαλλοντικών και χημικών χαρακτηριστικών τους. Ωστόσο, λόγω της γεωλογικής, κλιματικής και τοπογραφικής ποικιλομορφίας κάθε περιοχής, προέκυψε η ανάγκη για ένα ενιαίο, παγκοσμίως αποδεκτό σύστημα, το οποίο θα επιτρέψει τη σύγκριση και τη συσχέτιση διαφορετικών εθνικών ταξινομήσεων εδαφών. Σε αυτό το πλαίσιο, αναπτύχθηκε ο κώδικας επικοινωνίας της Παγκόσμιας Ταξινόμησης Εδαφικών Πόρων (World Reference Base for Soil Resources - WRB), ο οποίος βασίζεται στον παγκόσμιο χάρτη εδαφών FAO/Unesco και διευκολύνει την εναρμόνιση και την ανταλλαγή εδαφολογικών δεδομένων σε διεθνές επίπεδο. Το WRB δεν αποτελεί ένα νέο διεθνές σύστημα ταξινόμησης, αλλά χρησιμεύει ως βάση για την καλύτερη συσχέτιση των εθνικών συστημάτων. Ακόμη, αποτελεί ένα εργαλείο για την αναγνώριση των εδαφικών δομών και της σημασίας τους. Η ταξινόμηση των εδαφών στο WRB βασίζεται σε εδαφικές ιδιότητες που ορίζονται βάσει διαγνωστικών οριζόντων και χαρακτηριστικών, τα οποία, κατά το δυνατόν, πρέπει να είναι μετρήσιμα και παρατηρήσιμα στο πεδίο. Η επιλογή των διαγνωστικών οριζόντων και χαρακτηριστικών λαμβάνει υπόψη τη σύνδεσή τους με τις διαδικασίες σχηματισμού του εδάφους [Deckers & Nachtergaele, 1998].

Στο ανώτατο επίπεδο ταξινόμησης, η Παγκόσμια Ταξινόμηση Εδαφών (WRB) περιλαμβάνει 32 Ομάδες Αναφοράς Εδαφών (Reference Soil Groups - RSGs), οι οποίες προσδιορίζονται μέσω ενός κλειδιού ταξινόμησης. Οι Ομάδες Αναφοράς συγκεντρώνουν εδάφη με κοινές κυρίαρχες διαδικασίες σχηματισμού και είναι κατάλληλες για τη δημιουργία γενικευμένων παγκόσμιων εδαφικών χαρτών. Στο δεύτερο επίπεδο, τα ονόματα των εδαφών σχηματίζονται με την προσθήκη προσδιοριστών (qualifiers) στις Ομάδες Αναφοράς Εδαφών (RSGs). Αυτοί οι προσδιοριστές αντιπροσωπεύουν μορφολογικά, φυσικά ή χημικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν σημαντικά τη λειτουργία του εδάφους. Ορισμένοι προσδιοριστές είναι ειδικοί για μία ή λίγες Ομάδες Αναφοράς, ενώ άλλοι μπορούν να συνδυάζονται με πολλές διαφορετικές Ομάδες Αναφοράς [Mantel et al, 2023].



Εικόνα 2.2.1 – Ομάδες Αναφοράς Εδαφών [Mantel et al, 2023]

Ο Εδαφικός Άτλας της Ευρώπης, βασισμένος στην Παγκόσμια Ταξινόμηση Εδαφών (WRB), καταγράφει τις κύριες κατηγορίες εδαφών σύμφωνα με τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά τους. Στις άnuδρες και ημιάνuδρες περιοχές, τα εδάφη κατηγοριοποιούνται σε συγκεκριμένους τύπους ανάλογα με την περιεκτικότητα σε διαλυτά άλατα και άλλες ουσίες, όπως γύψος και ανθρακικά άλατα. Οι βασικές ομάδες περιλαμβάνουν τα Solonchaks, εδάφη με υψηλή περιεκτικότητα σε διαλυτά άλατα· τα Solonetz, πλούσια σε ιόντα νατρίου· τα Gypsisols, εμπλουτισμένα με γύψο· τα Durisols, που περιέχουν υλικό διοξείδιο του πυριτίου· και τα Calcisols, εμπλουτισμένα με ανθρακικά άλατα. Στις ζώνες μεταξύ ξηρών και υγρών εύκρατων κλιμάτων, τα εδάφη διακρίνονται σε Chernozems, Kastanozems και Phaeozems, που χαρακτηρίζονται από διαφορετικά επίπεδα οργανικής ύλης και εμπλουτισμού σε ανθρακικά. Τα εδάφη των υγρών εύκρατων περιοχών παρουσιάζουν έντονες διεργασίες ανακατανομής αργίλου και οργανικής ύλης, δημιουργώντας ομάδες όπως τα Podzols, Planosols, Albeluvisols, Luvisols και Umbrisols, το καθένα με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ως προς την οξύτητα και τη σύνθεση θρεπτικών στοιχείων. Τέλος, στις περιοχές μόνιμου παγετού, τα Cryosols παρουσιάζουν φαινόμενα που σχετίζονται με τους κύκλους παγετού και τήξης.

Σύμφωνα με την Παγκόσμια Ταξινόμηση Εδαφικών Πόρων (WRB), στην Ευρώπη απαντώνται 25 βασικές εδαφικές κατηγορίες πρώτου επιπέδου, με κάθε μία να καλύπτει συγκεκριμένες εκτάσεις. Οι σημαντικότερες σε έκταση κατηγορίες περιλαμβάνουν τους Albeluvisol με 1,446,668.66 km², τους Cambisol με 1,077,859.91 km², και τους Podzol με 993,180.04 km², αντανakλώντας κυρίως χαρακτηριστικά των ευρωπαϊκών εδαφών. Σημαντικές επίσης είναι οι εκτάσεις των Chernozem και Histosol, καλύπτοντας 936,238.15 και 614,901.15 km², αντίστοιχα.

Επιπλέον, οι κατηγορίες Arenosol, Fluvisol, Gleysol και Luvisol έχουν επίσης αξιοσημείωτη παρουσία, ενώ λιγότερο εκτεταμένες, αλλά περιβαλλοντικά σημαντικές είναι οι κατηγορίες όπως οι Andosol και Anthrosol. Κατηγορίες όπως οι Acrisol, Calcisol, Cryosol, Gypsisol και Solonchak απαντώνται σε μικρότερες εκτάσεις αλλά παίζουν καθοριστικό ρόλο στη συνολική εδαφική ποικιλότητα της Ευρώπης [Quantin & Spaargaren, 2007].

- Τα εδάφη Albeluvisols χαρακτηρίζονται από την παρουσία ζώνης εναπόθεσης αργίλου (illuviation), εντός του πρώτου μέτρου από την επιφάνεια, με διακριτό ακανόνιστο ή διακεκομμένο ανώτερο όριο, το οποίο δημιουργείται λόγω βαθιάς διεύδυσης αποχρωματισμένου υλικού. Συνήθως προέρχονται από μη συμπαγή υλικά, όπως παγετωνικά, λίμνια και ποτάμια ιζήματα, καθώς και αιολικά ιζήματα (loess). Αυτά τα εδάφη εντοπίζονται κυρίως σε επίπεδες έως κυματιστές πεδιάδες της βόρειας τάιγκα, σε περιοχές με κωνοφόρα και μικτά δάση, υπό εύκρατο έως βόρειο κλίμα με ψυχρούς χειμώνες, σύντομα και δροσερά καλοκαίρια και μέση ετήσια βροχόπτωση από 500 έως 1000 mm. Η σύντομη καλλιεργητική περίοδος, η οξύτητα και η χαμηλή θρεπτική κατάσταση αποτελούν περιοριστικούς παράγοντες, με αποτέλεσμα τα περισσότερα Albeluvisols να καλύπτονται από δασική βλάστηση, ενώ η κτηνοτροφία και η καλλιέργεια έχουν δευτερεύοντα ρόλο.
- Τα Cambisols αποτελούν μια σημαντική κατηγορία εδαφών που χαρακτηρίζονται από αρχικές διαδικασίες σχηματισμού. Αυτά τα εδάφη παρουσιάζουν ενδείξεις μετασχηματισμού, οι οποίες είναι εμφανείς μέσω της ήπιας, κυρίως καστανής αποχρωματισμένης περιοχής και της ανάπτυξης δομών κάτω από τον επιφανειακό ορίζοντα, γεγονός που καταδεικνύει την αρχή της διαφοροποίησης των οριζόντων. Οι Cambisols προέρχονται κυρίως από μέσα και λεπτόκοκκα υλικά που προέρχονται από μια ποικιλία βράχων, και συχνά βρίσκονται σε καταθέσεις κολυμβητικής, αλλουβιακής ή αιολικής προέλευσης. Είναι αξιοσημείωτο τα εδάφη αυτά δεν περιέχουν σημαντικές ποσότητες ελουβιασμένης αργίλου, οργανικής ύλης, καθώς και ενώσεων αλουμινίου και σιδήρου. Αυτά τα εδάφη μπορούν να βρεθούν σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές, από επίπεδες έως ορεινές εκτάσεις, και ευδοκimούν σε όλους τους τύπους κλίματος και κάτω από μια ευρεία γκάμα φυτικών ειδών. Η ικανότητά τους να προσαρμόζονται σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες ενισχύει τη σημασία τους σε ποικίλες οικολογικές ρυθμίσεις, κάνοντάς τα πολύτιμα για την γεωργία και τη διαχείριση των φυσικών πόρων.
- Τα Podzols αποτελούν έναν ειδικό τύπο εδάφους που διακρίνεται από την παρουσία ενός υποχώρου με γκρίζο χρώμα, ο οποίος έχει υποστεί λεύκανση λόγω της δράσης οργανικών οξέων. Πάνω από αυτόν τον υποχώρο υπάρχει ένας σκοτεινός ορίζοντας συγκέντρωσης που περιέχει καφέ ή μαύρη ελουβιασμένη χουμική ύλη, καθώς και κοκκινωπές ενώσεις σιδήρου. Η γονιμοποιητική τους βάση προέρχεται από μη στερεοποιημένα διαβρωτικά υλικά πυριτικών πετρωμάτων, όπως είναι οι παγετώδεις αποθέσεις, καθώς και αλλουβιακές και αιολικές αποθέσεις χαλαζιακής άμμου. Ο φυσικός τους περιβάλλοντας χώρος περιλαμβάνει κυρίως εύκρατες και βόρειες περιοχές του βόρειου ημισφαιρίου, όπου καλύπτονται από ερείκη και κωνοφόρα δάση. Ωστόσο, Η έντονη οξύτητα, τα υψηλά επίπεδα Al, η χαμηλή χημική γονιμότητα και οι δυσμενείς φυσικές ιδιότητες καθιστούν τα περισσότερα Podzols εδάφη μη ελκυστικά για γεωργικές καλλιέργειες, εκτός εάν υποβληθούν σε βελτίωση μέσω μεθόδων όπως

βαθύ όργωμα και λίπανση. Παρά τις προκλήσεις αυτές, τα Podzols προσφέρουν προοπτικές για δασοκομία και βοσκή, αξιοποιώντας τις φυσικές τους δυνατότητες.

- Η ομάδα αναφοράς εδαφών Chernozems περιλαμβάνει εδάφη που διακρίνονται από την παχιά μαύρη επιφανειακή τους στρώση, η οποία είναι πλούσια σε οργανική ύλη. Το μητρικό υλικό αυτών των εδαφών προέρχεται κυρίως από αιολικά και επανακαθαρισμένα αιολικά ιζήματα, όπως το loess. Αυτά τα εδάφη απαντώνται σε περιοχές με ηπειρωτικό κλίμα, που χαρακτηρίζονται από κρύους χειμώνες και ζεστά καλοκαίρια, σε επίπεδες έως λοφώδεις πεδιάδες με πλούσια χλωρίδα. Η υψηλή φυσική γονιμότητα των Chernozems, σε συνδυασμό με την ευνοϊκή τους τοπογραφία, καθιστά εφικτή μια ευρεία γκάμα γεωργικών χρήσεων, συμπεριλαμβανομένων των καλλιεργειών (με συμπληρωματική άρδευση σε ξηρούς καλοκαιρινούς μήνες) και της βοσκής ζώων. [Driessen & Deckers, 2001]

Σημασία εδαφών

Σύμφωνα με τη Στρατηγική της ΕΕ για τη βιοποικιλότητα με ορίζοντα το 2030, το έδαφος είναι ένα από τα πιο πολύπλοκα οικοσυστήματα. Αποτελεί ξεχωριστό οικότοπο, ο οποίος φιλοξενεί μια ιδιαίτερα σημαντική ποικιλία οργανισμών που ρυθμίζουν και ελέγχουν βασικές υπηρεσίες οικοσυστήματος, όπως η γονιμότητα του εδάφους, ο κύκλος των θρεπτικών στοιχείων και η ρύθμιση του κλίματος. Το έδαφος είναι ένας μη ανανεώσιμος πόρος, με ζωτική σημασία για την ανθρώπινη υγεία και την οικονομία, καθώς και για την παραγωγή τροφίμων και νέων φαρμάκων. Το έδαφος, ως ζωτικό συστατικό του φυσικού περιβάλλοντος, παίζει θεμελιώδη ρόλο τόσο για τη φύση όσο και για τον άνθρωπο. Ως μία από τις πιο βασικές φυσικές πηγές του πλανήτη, το έδαφος υποστηρίζει την επιβίωση και την ευημερία όλων των ζωντανών οργανισμών. Η σχέση του με το νερό, η ικανότητά του να διατηρεί τη βιοποικιλότητα και να υποστηρίζει την αγροτική παραγωγή το καθιστούν αδιαμφισβήτητο κρίκο στη διατήρηση της οικολογικής ισορροπίας και των ανθρώπινων δραστηριοτήτων.

Το έδαφος έχει καίριο ρόλο στη διατήρηση του υδρολογικού κύκλου, λειτουργώντας ως αποθηκευτικός χώρος για το νερό και επιτρέποντας την κατείσδυση και απορρόφηση του. Επιπλέον, διαδραματίζει θεμελιώδη ρόλο στην υποστήριξη της βλάστησης, αφού παρέχει τα απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία και το νερό για την ανάπτυξή της. Το έδαφος επιτρέπει τη διαχείριση του άνθρακα και της οργανικής ύλης, ανακυκλώνοντας τα θρεπτικά συστατικά μέσω μικροοργανισμών και αποσύνθεσης, ενισχύοντας έτσι τη βιοποικιλότητα. Οι μικροοργανισμοί που ζουν στο έδαφος υποστηρίζουν την ανακύκλωση θρεπτικών στοιχείων, βοηθώντας στην ανάπτυξη φυτών και υποστηρίζοντας το οικοσύστημα. Η απορρόφηση και αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα από το έδαφος συμβάλλει στην καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής, καθιστώντας το έδαφος έναν κρίσιμο παράγοντα στην ισορροπία του πλανήτη.

Για τον άνθρωπο, το έδαφος έχει εξίσου καθοριστική σημασία, καθώς είναι ο κύριος πόρος για την αγροτική παραγωγή και την παραγωγή τροφής, υποστηρίζοντας την επιβίωση της ανθρωπότητας. Η ικανότητά του να παρέχει νερό μέσω υπόγειων υδάτων και να υποστηρίζει την καλλιέργεια είναι κρίσιμη για τις γεωργικές δραστηριότητες και την ασφάλεια του νερού. Επιπλέον, το έδαφος είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση των οικοδομικών υποδομών, καθώς αποτελεί το θεμέλιο για τις πόλεις και τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Η καλή διαχείριση του εδάφους είναι καθοριστική για την αποτροπή φαινομένων όπως η διάβρωση

και η ερμημοποίηση, οι οποίες μπορεί να επηρεάσουν τη γεωργική παραγωγή και να θέσουν σε κίνδυνο τη βιωσιμότητα των ανθρώπινων κοινοτήτων [Kehew, 2021].

Έδαφος και νερό

Το έδαφος αποτελεί έναν κρίσιμο ρυθμιστή του υδρολογικού κύκλου, ελέγχοντας την κίνηση, την κατανομή και την αποθήκευση του νερού. Δέχεται τα εξωτερικά ύδατα, όπως τις βροχοπτώσεις και τις αρδεύσεις, και τα διαμοιράζει μεταξύ επιφανειακής απορροής, εξατμησοδιαπνοής και κατείσδυσης, λειτουργώντας έτσι ως φυσική δεξαμενή που τροφοδοτεί τα υπόγεια υδάτινα αποθέματα και υποστηρίζει την ανάπτυξη της βλάστησης. Η ικανότητα του εδάφους να συγκρατεί και να μετακινεί το νερό εξαρτάται από μια σειρά παραμέτρων, όπως η δομή και η σύστασή του, το πορώδες, η διαπερατότητα και οι δυνάμεις που ασκούνται στο υδάτινο δυναμικό του. Για την περιγραφή της υδρολογικής συμπεριφοράς του εδάφους, γίνεται διάκριση μεταξύ βαρυτικού νερού και νερού συγκράτησης. Το βαρυτικό νερό (ή ελεύθερο νερό) είναι η ποσότητα του νερού που κινείται μέσα στο έδαφος υπό την επίδραση της βαρύτητας. Αυτό το νερό ρέει μέσω των πόρων και των ρωγμών του εδάφους, τροφοδοτώντας τους υδροφορείς, τις φυσικές πηγές και τα έργα υδρομάστευσης. Αντίθετα, το νερό συγκράτησης (υγροσκοπικό ή προσροφημένο νερό) είναι εκείνο που δεσμεύεται στα τοιχώματα των εδαφικών πόρων και ρωγμών, λόγω ισχυρών μοριακών δυνάμεων, καθιστώντας το μη διαθέσιμο για απορροή ή εκμετάλλευση. Η κίνηση του νερού στο έδαφος διέπεται από δύο βασικές δυνάμεις: τη βαρύτητα, που ωθεί το βαρυτικό νερό προς τα κατώτερα στρώματα, και τις τριχοειδείς δυνάμεις, που καθορίζουν την κίνηση του νερού συγκράτησης μέσα στη μάζα του εδάφους. Η διαπερατότητα, δηλαδή η ικανότητα του εδάφους να επιτρέπει τη ροή του νερού υπό την επίδραση μιας υδραυλικής κλίσης, αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την κατανομή και διαθεσιμότητα του νερού. Σε συνδυασμό με το πορώδες και τη σύνθεση του εδάφους, η διαπερατότητα επηρεάζει άμεσα τη χωρητικότητα και τη λειτουργία των υδροφόρων στρωμάτων, παίζοντας καθοριστικό ρόλο στη διαχείριση των υδατικών πόρων [Κρεμμύδας, 2011].

Η κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ εδάφους και νερού είναι θεμελιώδης για την ανάλυση των υδρολογικών διεργασιών και την αποτελεσματική διαχείριση των υδάτων. Ειδικότερα, το εδαφικό διάλυμα αποτελεί ένα από τα πιο ενεργά και κρίσιμα τμήματα του εδάφους, καθώς μέσω αυτού πραγματοποιούνται διάφορες χημικές και βιολογικές διεργασίες που επηρεάζουν την ποιότητα και τη διαθεσιμότητα του νερού. Η σύσταση του εδαφικού διαλύματος, η διαλυτότητα των αλάτων και η παρουσία αερίων διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη των φυτών και στην αποθήκευση και μεταφορά των θρεπτικών συστατικών μέσα στο έδαφος. Η αλληλεπίδραση μεταξύ του νερού και των συστατικών του εδάφους, που εξαρτάται από περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως η θερμοκρασία και η πίεση, επισημαίνει την πολύπλοκη σχέση τους και τις επιπτώσεις αυτής για την υδρολογία και τη γεωργία. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, το εδαφικό διάλυμα αποτελεί ένα από τα πιο ενεργά μέρη του εδάφους, όπου πραγματοποιούνται κρίσιμες χημικές και βιολογικές διεργασίες. Η σύσταση του εδαφικού διαλύματος, το οποίο περιλαμβάνει διάφορα ιόντα και ενώσεις, επηρεάζει σημαντικά την ανάπτυξη των φυτών και τη λειτουργία του οικοσυστήματος. Η παρουσία αερίων, όπως το διοξείδιο του άνθρακα και το οξυγόνο, καθώς και η διαλυτότητα των αλάτων, καθορίζουν τη χημική αλληλεπίδραση του εδάφους με το νερό. Επιπλέον, η παρουσία κολλοειδών συστατικών στο έδαφος διαδραματίζει ρόλο στην ικανότητά του να συγκρατεί και να μεταφέρει το νερό, επηρεάζοντας έτσι την υδροδυναμική του συστήματος. Συνολικά, οι

χημικές και φυσικές διεργασίες που συντελούνται στο έδαφος καθορίζουν την ποιότητα και τη διαθεσιμότητα του νερού, καθιστώντας το κρίσιμο παράγοντα για τη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων [Σιδηροπούλου, 2012].

Υποβάθμιση εδάφους

Η υποβάθμιση του εδάφους αποτελεί έναν από τους σοβαρότερους περιβαλλοντικούς κινδύνους, με συνέπειες που επηρεάζουν όχι μόνο την ποιότητα του εδάφους αλλά και την ευημερία του ανθρώπου και των οικοσυστημάτων. Η διαδικασία της υποβάθμισης του εδάφους αναφέρεται στη μείωση της ικανότητάς του να εκτελεί τις φυσικές, βιολογικές και χημικές του λειτουργίες, με αποτέλεσμα την αποδυνάμωση της γονιμότητας και της παραγωγικότητάς του. Στη σύγχρονη εποχή, η υποβάθμιση του εδάφους εντείνεται λόγω των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, όπως η εντατική καλλιέργεια, η αποδάσωση και η υπερβόσκηση, ενώ οι επιπτώσεις της γίνονται όλο και πιο αισθητές σε παγκόσμιο επίπεδο [Μπάλια, 2009].

Η υποβάθμιση των εδαφών οφείλεται σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες και γεωργικές πρακτικές, οι οποίες προκαλούν διάβρωση, συμπίεση και απώλεια της δομής τους. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Τροφίμων και Γεωργίας των Ηνωμένων Εθνών (FAO), σε έγγραφο που δημοσιεύτηκε το 2022 με τίτλο *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at Breaking Point*, επισημαίνεται ότι οι περισσότεροι εδαφικοί πόροι παγκοσμίως βρίσκονται σε μέτρια, κακή ή πολύ κακή κατάσταση, με το 33% των εδαφών να παρουσιάζει μέτρια έως σοβαρή υποβάθμιση λόγω διάβρωσης, αλάτωσης, συμπίεσης, οξίνισης και χημικής ρύπανσης. Το έγγραφο τονίζει ότι οι δέκα κύριες απειλές του εδάφους που συμβάλλουν στην υποβάθμισή του είναι: η διάβρωση, η απώλεια οργανικού άνθρακα, η ανεπάρκεια θρεπτικών στοιχείων, η οξίνιση, η ρύπανση -μόλυνση, η υπεράρδευση, η συμπίεση, η σφράγιση, τα επίπεδα αλατώτητας και η απώλεια βιοποικιλότητας του εδάφους. Οι απειλές για τα εδάφη εμφανίζονται σε συγκεκριμένους τύπους εδαφών, ανεξαρτήτως του είδους γεωργικής χρήσης γης, συμπεριλαμβανομένων των υδροτόπων και των αστικών εδαφών. Οι μεταβολές στη χρήση γης, όπως η αποψίλωση των δασών και η αστικοποίηση, επιταχύνουν τον ρυθμό υποβάθμισης των εδαφών, ενώ η κλιματική αλλαγή συμβάλλει περαιτέρω στην επιδείνωσή τους. Οι αυξημένες θερμοκρασίες και τα ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως οι ξηρασίες, οι πλημμύρες και οι καταιγίδες, επηρεάζουν την ποσότητα και τη γονιμότητα των εδαφών, μειώνουν την υγρασία τους και εξαντλούν τα πλούσια σε θρεπτικά συστατικά στρώματα του επιφανειακού εδάφους.

Στην ΕΕ, η υποβάθμιση του εδάφους έχει σημαντικές περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις. Η κακή διαχείριση της γης, όπως η αποψίλωση των δασών, η υπερβόσκηση, οι μη βιώσιμες γεωργικές και δασοκομικές πρακτικές, οι κατασκευαστικές δραστηριότητες και η σφράγιση της γης συγκαταλέγονται μεταξύ των βασικών αιτιών αυτής της κατάστασης. Παρά τις πρόσφατες μειώσεις του ρυθμού σφράγισης του εδάφους, εξακολουθούν να χάνονται γόνιμα εδάφη λόγω της δέσμευσης γης και της άτακτης αστικής εξάπλωσης. Σε συνδυασμό με την κλιματική αλλαγή, γίνονται όλο και πιο εμφανείς οι επιπτώσεις της διάβρωσης και των απωλειών οργανικού άνθρακα του εδάφους. Είναι, επομένως, σημαντικό να ενταθούν οι προσπάθειες για την προστασία της γονιμότητας του εδάφους, τη μείωση της διάβρωσης του και την αύξηση της οργανικής ύλης του εδάφους. Αυτό θα πρέπει να γίνει με την υιοθέτηση βιώσιμων πρακτικών, τον εντοπισμό μολυσμένων εδαφών, την αποκατάσταση των

υποβαθμισμένων εδαφών, τον καθορισμό των συνθηκών για την καλή οικολογική τους κατάσταση, τη θέση στόχων αποκατάστασης και τη βελτίωση της παρακολούθησης της ποιότητας του εδάφους.

Διάβρωση του εδάφους

Η διάβρωση του εδάφους είναι μια φυσική διαδικασία κατά την οποία σωματίδια του εδάφους απομακρύνονται από τη δράση του νερού, του ανέμου, του πάγου και της βαρύτητας. Αποτελεί μία από τις σημαντικότερες μορφές υποβάθμισης του εδάφους, με σοβαρές περιβαλλοντικές και οικονομικές συνέπειες, ιδιαίτερα στις γεωργικές περιοχές. Εκτός από τις αγροτικές εκτάσεις, πηγές διάβρωσης μπορεί να αποτελέσουν και οι αναψυκτικές περιοχές, οι δρόμοι και οι εγκαταλειμμένες βιομηχανικές ζώνες [Van Beek & Tóth, 2012]. Γενικά, η διάβρωση του εδάφους είναι μια διαδικασία που εξελίσσεται σε τρία στάδια: (i) η αποκόλληση μεμονωμένων σωματιδίων από τη συνολική μάζα του εδάφους, (ii) η μεταφορά τους μέσω ενός εξωτερικού παράγοντα, όπως το νερό ή ο άνεμος, και (iii) η τελική απόθεσή τους, όταν η κινητήρια δύναμη δεν έχει πλέον επαρκή ενέργεια για να συνεχίσει τη μεταφορά [Stolte et al, 2015]. Η διάβρωση έχει επιπτώσεις τόσο "επιτόπου" όσο και "εκτός τόπου". Οι επιτόπιες επιπτώσεις περιλαμβάνουν την απώλεια γόνιμου εδάφους και θρεπτικών στοιχείων, καθώς και την υποβάθμιση της εδαφικής δομής μέσω φαινομένων όπως η διάβρωση από τον άνεμο, ο σχηματισμός ρυακιών και ρεμάτων και η διάβρωση λόγω γεωργικών δραστηριοτήτων. Οι εκτός τόπου επιπτώσεις αναφέρονται στη μεταφορά των ιζημάτων μακριά από την αρχική τους θέση, προκαλώντας ρύπανση επιφανειακών υδάτων, απόφραξη καναλιών και φραγμάτων, καθώς και ζημιές σε υποδομές και κτίρια. Οι οικονομικές συνέπειες αυτών των επιπτώσεων συχνά ξεπερνούν τις επιπτώσεις που εμφανίζονται απευθείας στην περιοχή που υφίσταται τη διάβρωση [Van Beek & Tóth, 2012]. Οι κυριότεροι παράγοντες που συμβάλλουν στη διάβρωση είναι το νερό, ο άνεμος και η απώλεια οργανικής ύλης.

Η διάβρωση των εδαφών από το νερό είναι μια δυναμική και πολύπλοκη διαδικασία, κατά την οποία τα σωματίδια του εδάφους αποκολλώνται και μεταφέρονται λόγω της δράσης της βροχής και της επιφανειακής απορροής. Ο μηχανισμός της διάβρωσης εκτυλίσσεται σε δύο βασικά στάδια. Στο αρχικό στάδιο, τα σωματίδια του εδάφους αποκολλώνται από τα εδαφικά συσσωματώματα λόγω της πρόσκρουσης των σταγόνων της βροχής ή της ροής του νερού. Στη συνέχεια, τα αποκολλημένα σωματίδια μεταφέρονται από το απορρέον νερό. Το νερό της επιφανειακής απορροής, το οποίο περιέχει αιωρούμενα σωματίδια, μπορεί επίσης να αποκολλήσει επιπλέον εδαφικά σωματίδια καθώς κινείται πάνω στην επιφάνεια του εδάφους. Η διάβρωση του εδάφους αποτελεί διαδικασία απώλειας εδάφους, κυρίως από την επιφανειακή του στρώση, αν και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να σημειωθεί απώλεια μεγάλων μαζών εδάφους, όπως συμβαίνει σε κατολισθήσεις και διάβρωση των πρανών των ποταμών. Η διάβρωση του εδάφους από το νερό ταξινομείται σε τρεις βασικές κατηγορίες: διάβρωση από λεπτό υδάτινο στρώμα (sheet erosion), εσωτερική διάβρωση (internal erosion) και διάβρωση καναλιών (channel erosion). Η ένταση της διάβρωσης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η ένταση και η διάρκεια της βροχόπτωσης, η κλίση του εδάφους, η σύσταση και η δομή του εδάφους, η βλάστηση και οι ανθρώπινες δραστηριότητες [Osman & Osman, 2014].

Η εδαφική διάβρωση από τον άνεμο αποτελεί έναν σημαντικό περιβαλλοντικό κίνδυνο, ο οποίος οδηγεί σε έντονη υποβάθμιση των εδαφών, ιδιαίτερα σε περιοχές με ξηρό ή ημιξηρό

κλίμα, καθώς και σε γεωργικές εκτάσεις. Η διαδικασία αυτή εκδηλώνεται όταν οι δυνάμεις του ανέμου υπερβαίνουν τις βαρυτικές και συνδεδεμένες δυνάμεις των εδαφικών σωματιδίων στην επιφάνεια του εδάφους. Το φαινόμενο της διάβρωσης από τον άνεμο παρατηρείται ιδιαίτερα όταν το έδαφος είναι χαλαρό, λεπτόκοκκο, και ξηρό, ενώ η επιφάνεια του εδάφους είναι γυμνή, χωρίς βλάστηση, πέτρες ή χιόνι. Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση από τον άνεμο είναι η ταχύτητα του ανέμου, η σύσταση του εδάφους και η κάλυψη της επιφάνειας από φυτά. Η διαδικασία της διάβρωσης επιταχύνεται σε τοπικό επίπεδο, κυρίως λόγω ακατάλληλης ανθρώπινης παρέμβασης και λανθασμένης διαχείρισης της γης. Για παράδειγμα, η εγκατάλειψη γεωργικών εκτάσεων για παρατεταμένα χρονικά διαστήματα, η υπερβόσκηση των βοσκοτόπων και η υπερβολική συγκομιδή των φυτών επιδεινώνουν σημαντικά το φαινόμενο. Ιδιαίτερα στις αγροτικές περιοχές, η εδαφική διάβρωση από τον άνεμο έχει σοβαρές επιπτώσεις, καθώς απομακρύνει την πιο λεπτόκοκκη και βιολογικά ενεργή στοιβάδα του εδάφους, η οποία είναι πλουσιότερη σε οργανική ύλη και θρεπτικά συστατικά. Ως αποτέλεσμα, η γονιμότητα του εδάφους μειώνεται, περιορίζοντας την ικανότητά του να υποστηρίξει γεωργικές δραστηριότητες. Η συνεχής και επαναλαμβανόμενη έκθεση του εδάφους σε διάβρωση από τον άνεμο μπορεί να έχει μόνιμες συνέπειες στην υποβάθμιση των εδαφών, δυσχεραίνοντας τη διατήρηση ευνοϊκών εδαφικών συνθηκών μακροπρόθεσμα και καθιστώντας τη φυσική αναγέννηση του εδάφους ιδιαίτερα δύσκολη [Stolte et al, 2015].

Η διάβρωση των εδαφών λόγω μείωσης της οργανικής ύλης είναι μια διαδικασία υποβάθμισης του εδάφους που συμβαίνει όταν η περιεκτικότητά του σε οργανική ύλη μειώνεται σε κρίσιμα επίπεδα, καθιστώντας το πιο ευάλωτο στις διαβρωτικές δυνάμεις του νερού και του ανέμου. Η οργανική ύλη του εδάφους, ιδιαίτερα ο χούμος, παίζει καθοριστικό ρόλο στη σταθεροποίηση της εδαφικής δομής, αυξάνοντας τη συνοχή των σωματιδίων και βελτιώνοντας τη διηθητικότητα του νερού. Όταν η οργανική ύλη μειώνεται, το έδαφος χάνει τη συνοχή του, γίνεται πιο ευαίσθητο στη διάβρωση και η επιφανειακή απορροή αυξάνεται, παρασύροντας σωματίδια του εδάφους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη σταδιακή απογύμνωση των ανώτερων και πιο γόνιμων στρωμάτων του εδάφους, μειώνοντας τη γονιμότητα και την ικανότητά του να συγκρατεί νερό. Η μείωση της οργανικής ύλης μπορεί να οφείλεται σε έντονες γεωργικές πρακτικές, υπερβόσκηση, αποδάσωση, διάβρωση από νερό και άνεμο, καθώς και σε ανεπαρκή αναπλήρωσή της μέσω οργανικών λιπασμάτων ή φυτικών υπολειμμάτων. Οι διαδικασίες αυτές έχουν ισχυρές επιπτώσεις στη δυναμική του οργανικού άνθρακα στο έδαφος, καθώς και σημαντικές επιπτώσεις που περιλαμβάνουν μείωση της γεωργικής παραγωγικότητας, απώλεια θρεπτικών στοιχείων και αυξημένη ευαισθησία του εδάφους σε ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως ξηρασία και πλημμύρες [Kabelka et al., 2019].

2.3 Ρύπανση εδαφών και υπόγειων υδάτων

Ρύπος θεωρείται οποιαδήποτε ουσία ή παράγοντας που έχει την ικανότητα να προκαλέσει αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, είτε αναστρέψιμες είτε μη. Η ουσία αυτή μπορεί να έχει διάφορες μορφές (φυσικές, χημικές ή βιολογικές) και να εισέλθει στο περιβάλλον μέσω αποβλήτων, απορριμμάτων, τυχαίων διαρροών ή υποπροϊόντων από βιομηχανικές ή παραγωγικές διαδικασίες. Ο ρύπος επηρεάζει αρνητικά την υγεία, την ασφάλεια και την ευημερία των ανθρώπων, καθώς και το περιβάλλον γενικότερα. Η ρύπανση του περιβάλλοντος, από την άλλη πλευρά, αναφέρεται στην παρουσία του ρύπου στο περιβάλλον σε μορφές και

συγκεντρώσεις που είναι ή μπορεί να είναι επιβλαβείς για το οικοσύστημα. Η ρύπανση περιλαμβάνει την ανεπιθύμητη αλλαγή των φυσικών, χημικών ή βιολογικών χαρακτηριστικών του αέρα, του νερού και του εδάφους. Αυτή η αλλαγή επηρεάζει αρνητικά τη ζωή των φυτών και των ζώων, την ανθρώπινη ζωή, τις συνθήκες διαβίωσης, τα πολιτιστικά αγαθά και τη βιομηχανική πρόοδο [Ashraf et al, 2014].

Η ρύπανση του εδάφους αποτελεί μια σοβαρή περιβαλλοντική απειλή, καθώς το έδαφος, ως «καθολικός αποδέκτης», αναλαμβάνει το μεγαλύτερο βάρος των ρύπων που εισέρχονται στο περιβάλλον. Αυτή η ρύπανση ορίζεται ως η συσσώρευση τοξικών ουσιών, χημικών ενώσεων, αλάτων, ραδιενεργών υλικών ή άλλων παραγόντων που μπορούν να προκαλέσουν ασθένειες, επηρεάζοντας αρνητικά την ανάπτυξη των φυτών και την υγεία των ζώων. Η ρύπανση του εδάφους προκαλείται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες που εισάγουν χημικές ή άλλες ανωμαλίες στο φυσικό περιβάλλον του εδάφους. Τα κύρια αίτια αυτής της ρύπανσης περιλαμβάνουν τη διαρροή τοξικών ουσιών από χώρους υγειονομικής ταφής, την απόρριψη βιομηχανικών αποβλήτων, τη διύλιση μολυσμένου νερού, τη ρήξη υπόγειων δεξαμενών αποθήκευσης, την υπερβολική χρήση φυτοφαρμάκων, ζιζανιοκτόνων και λιπασμάτων, καθώς και τη διαρροή στερεών αποβλήτων στο έδαφος. Οι πιο κοινές χημικές ουσίες που ευθύνονται για τη ρύπανση του εδάφους είναι οι υδρογονάνθρακες πετρελαίου, τα βαρέα μέταλλα, τα φυτοφάρμακα και οι διαλύτες [Ashraf et al, 2014].

Η ρύπανση του εδάφους αναφέρεται στην παρουσία ρύπων σε συγκεντρώσεις που ξεπερνούν ένα ορισμένο όριο, προκαλώντας επιδείνωση ή πλήρη απώλεια των λειτουργιών του εδάφους. Αυτή η χημική υποβάθμιση μπορεί να οδηγήσει σε μερική ή ολική απώλεια των ικανοτήτων του εδάφους, όπως η παραγωγικότητα, η οποία επηρεάζεται σημαντικά, ενώ οι οργανισμοί που διαβιούν σε αυτό επηρεάζονται αρνητικά. Όταν το έδαφος ξεπερνά την ικανότητά του να απορροφήσει και να αφομοιώσει φυσικά διάφορες ουσίες, δεν επιτελεί πλέον τον προστατευτικό του ρόλο. Αντίθετα, μετατρέπεται σε παράγοντα που προκαλεί αρνητικές επιπτώσεις στο υδατικό σύστημα, στην ατμόσφαιρα και στους οργανισμούς γενικότερα. Η ρύπανση επηρεάζει τις βιογεωχημικές ισορροπίες του εδάφους, οδηγώντας σε ανώμαλα επίπεδα ορισμένων συστατικών που προκαλούν σοβαρές αλλαγές στις φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες του εδάφους. Οι όροι «ρύπανση» και «μόλυνση» χρησιμοποιούνται συχνά εναλλακτικά, αλλά όταν γίνεται διάκριση, συνήθως εξετάζονται δύο βασικές πτυχές: η ρύπανση ως δραστηριότητα που προκαλεί μόλυνση και βλάβη, και η μόλυνση ως παρουσία μιας ξένης ουσίας, η οποία δεν είναι απαραίτητα επιβλαβής [Stolte et al, 2015].

Η ρύπανση του νερού αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους περιβαλλοντικούς κινδύνους του σύγχρονου κόσμου, με εκτεταμένες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, τα οικοσυστήματα και την παγκόσμια βιωσιμότητα. Ο φυσικός κύκλος του νερού, ο οποίος συνδέει τα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα, επηρεάζεται έντονα από την ανθρώπινη δραστηριότητα, ενώ η αλόγιστη χρήση, η εκτεταμένη ρύπανση -μόλυνση και η ανεπαρκής διαχείριση των υδάτινων πόρων δημιουργούν σημαντικά προβλήματα. Πολλοί από τους ρύπους στα υπόγεια ύδατα είναι γηγενούς προέλευσης, καθώς προκύπτουν από τη διάλυση των φυσικών αποθεμάτων ορυκτών στον φλοιό της Γης. Ωστόσο, λόγω της ταχείας αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού, της αστικοποίησης, της βιομηχανοποίησης, της γεωργικής παραγωγής και της οικονομικής ανάπτυξης παρατηρούνται πλέον σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις από ρύπους ανθρωπογενούς προέλευσης. Οι ρύποι που ανιχνεύονται στα υπόγεια ύδατα διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες: χημικούς, βιολογικούς και ραδιενεργούς ρύπους, καθένas από τους

οποίους επηρεάζει διαφορετικά την ποιότητα του υδροφόρου ορίζοντα και κατ' επέκταση την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον [Li et al, 2021].

Οι χημικοί ρύποι περιλαμβάνουν τόσο φυσικά ανόργανα συστατικά όσο και ανθρωπογενείς ενώσεις που καταλήγουν στα υπόγεια ύδατα μέσω διαφόρων διαδικασιών. Φυσικές πηγές ρύπανσης, όπως το θαλασσινό νερό, τα επιφανειακά ύδατα χαμηλής ποιότητας και τα ορυκτά κοιτάσματα, μπορούν να αυξήσουν τη συγκέντρωση αλάτων και βαρέων μετάλλων στον υδροφόρο ορίζοντα, ιδιαίτερα όταν διαταράσσεται η φυσική ισορροπία από ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως η υπεράντληση και η εξόρυξη ορυκτών. Οι ανόργανοι ρύποι αποτελούν μία σημαντική κατηγορία ρύπανσης των υπόγειων υδάτων και περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων ενώσεις που περιέχουν άζωτο, όπως το νιτρικό άλας (NO_3^-), το νιτρώδες άλας (NO_2^-) και το αμμωνιακό άζωτο (NH_4^+). Οι ενώσεις αυτές προέρχονται κυρίως από γεωργικές δραστηριότητες (π.χ. λιπάσματα και κοπριά) και από οικιακά λύματα. Τα ανιόντα, όπως το φθόριο (F^-), το χλωριούχο (Cl^-) και το θειικό άλας (SO_4^{2-}), καθώς και βασικά κατιόντα όπως το ασβέστιο (Ca^{2+}) και το μαγνήσιο (Mg^{2+}), εντοπίζονται επίσης συχνά στα υπόγεια ύδατα, επηρεάζοντας την ποιότητά τους. Μέταλλα όπως ο ψευδάργυρος (Zn), ο μόλυβδος (Pb), ο υδράργυρος (Hg), το χρώμιο (Cr) και το κάδμιο (Cd), καθώς και μεταλλοειδή όπως το σελήνιο (Se) και το αρσενικό (As), εντοπίζονται στα υπόγεια ύδατα και μπορεί να έχουν επιβλαβείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Οι οργανικοί ρύποι αποτελούν εξίσου σημαντικό μέρος της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων, και μπορεί να προέρχονται είτε από φυσικές διαδικασίες είτε από ανθρώπινες δραστηριότητες. Ορισμένοι οργανικοί ρύποι, όπως οι υδρογονάνθρακες και οι αλογονούχες ενώσεις, είναι βιοδιασπώμενοι και προέρχονται κυρίως από οικιακά λύματα και βιομηχανικά απόβλητα. Μέσω των μικροοργανισμών, αυτοί οι ρύποι μπορούν να μετατραπούν σε σταθερές ανόργανες ουσίες. Παρότι δεν έχουν άμεσες τοξικές επιπτώσεις, μπορούν να μειώσουν τα επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου στα υπόγεια ύδατα, γεγονός που επιδρά αρνητικά στα οικοσυστήματα. Οι οργανικές ουσίες που βρίσκονται συχνά στα υπόγεια ύδατα περιλαμβάνουν πλαστικοποιητές, φυτοφάρμακα, φαρμακευτικά προϊόντα, προϊόντα προσωπικής φροντίδας και φυσικά οιστρογόνα. Οι συγκεκριμένοι ρύποι είναι ανθεκτικοί στη βιοδιάσπαση και συνιστούν σοβαρό πρόβλημα λόγω της μακροχρόνιας παραμονής τους στο υδάτινο περιβάλλον, καθώς και των πιθανών επιδράσεών τους στη δημόσια υγεία και τα οικοσυστήματα [Li et al, 2021].

Οι βιολογικοί ρύποι των υπόγειων υδάτων περιλαμβάνουν μικροοργανισμούς που μπορεί να προέρχονται από ανθρώπινα ή ζωικά απόβλητα και να εισέρχονται στα υπόγεια ύδατα μέσω διαρροών ή άλλων πηγών ρύπανσης. Οι βασικές κατηγορίες βιολογικών ρυπαντών περιλαμβάνουν παθογόνα βακτήρια, ιούς και πρωτόζωα, τα οποία δύνανται να αποτελέσουν σοβαρή απειλή για τη δημόσια υγεία όταν διεισδύουν σε πόσιμες υδατικές πηγές. Η είσοδος αυτών των μικροβιολογικών ρυπαντών στο υπόγειο περιβάλλον μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω διαρροών από αποχετευτικά συστήματα, σπητικές δεξαμενές, απορροφητικούς λάκκους και ορυχεία που χρησιμοποιούνται για τη διάθεση αποβλήτων. Παράλληλα, η ρύπανση των υπόγειων υδάτων μπορεί να ενισχυθεί από τη διαρροή ρυπογόνων ουσιών από χωματερές ή από απορροές υγρών που εφαρμόζονται ως λιπάσματα [Al-Sudani, 2019].

Οι ραδιενεργοί ρύποι αποτελούν μια σπάνια, αλλά ιδιαίτερα επικίνδυνη κατηγορία ρύπανσης των υπόγειων υδάτων. Οι πιο συχνά ανιχνευόμενοι ραδιενεργοί ρύποι στα υπόγεια ύδατα είναι το ουράνιο (U) και το ράδιο (Ra), τα οποία εντοπίζονται σε πολλές περιοχές, λόγω γεωλογικών σχηματισμών ή ανθρωπογενών δραστηριοτήτων. Αυτά τα στοιχεία τείνουν να υπάρχουν σε υδροφόρους ορίζοντες όπου τα φυσικά αποθέματα ορυκτών περιέχουν ραδιενεργές ουσίες,

ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις η ρύπανση μπορεί να οφείλεται σε δραστηριότητες όπως η εξόρυξη και η επεξεργασία ραδιενεργών υλικών [Khedr, 2013]. Επιπλέον, άλλοι ραδιενεργοί ρύποι που ενδέχεται να ανιχνευθούν στα υπόγεια ύδατα περιλαμβάνουν το θόριο (Th) και άλλα ραδιενεργά ισότοπα που σχετίζονται με τη διάσπαση του ουρανίου και του θορίου, όπως το πώδιο (Po) και το ακτίνιο (Ac), τα οποία επίσης μπορούν να βρεθούν σε ορισμένα υπόγεια ύδατα [Dinh Chau et al., 2011].

Ευρωπαϊκές οδηγίες για την προστασία των εδαφών και υπόγειων υδάτων

Η ρύπανση του περιβάλλοντος αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα και πλέον ανησυχητικά ζητήματα σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι έννοιες της ρύπανσης και των ρύπων συνδέονται άμεσα με τις επιπτώσεις των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στο περιβάλλον και την ανάγκη για λήψη μέτρων προστασίας και βιώσιμης διαχείρισης των φυσικών πόρων. Η ρύπανση αποτελεί βασική αιτία για την απώλεια της βιοποικιλότητας και έχει αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία και στο περιβάλλον. Παρόλο που η Ευρωπαϊκή Ένωση διαθέτει στέρεο νομικό πλαίσιο για τη μείωση της ρύπανσης, θέτει ολοένα και καινούριους στόχους για την ανάπτυξη ενός συνόλου δεικτών που αποσκοπούν στην προοδευτική μείωση της ρύπανσης και καθορίζει γραμμές βάσης για την παρακολούθηση της προόδου. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία για την προστασία της βιοποικιλότητας με ορίζοντα το 2030 η ΕΕ θέτει νέους στόχους μηδενικής ρύπανσης από τις ροές αζώτου και φωσφόρου από τα λιπάσματα μέσω της μείωσης των απωλειών θρεπτικών ουσιών κατά τουλάχιστον 50 %, εξασφαλίζοντας παράλληλα ότι δεν θα υπάρξει υποβάθμιση της γονιμότητας του εδάφους.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει προτείνει το Ευρωπαϊκό Στρατηγικό Σχέδιο για την Πολιτική των Εδαφών (Soil Strategy), το οποίο προάγει τη βιώσιμη διαχείριση των εδαφών και τονίζει τη σημασία τους για την προστασία του περιβάλλοντος και των φυσικών πόρων, αν και δεν αποτελεί νομικά δεσμευτική οδηγία. Μέσω της στρατηγικής του 2021 για τα εδάφη, η ΕΕ προτείνει την εφαρμογή δράσεων για την προστασία των εδαφών, με έμφαση στην αναστροφή της υποβάθμισης τους και την ενίσχυση της βιωσιμότητας των γεωργικών και άλλων χρήσεων γης. Αυτές οι ενέργειες συνδυάζονται με άλλες πολιτικές, όπως η Κοινή Αγροτική Πολιτική (ΚΑΠ) και η στρατηγική προστασίας των υδάτων, ενισχύοντας τη σύνδεση των περιβαλλοντικών πολιτικών για την προστασία των εδαφών σε επίπεδο ΕΕ. Η παρακολούθηση και αξιολόγηση της κατάστασης των εδαφών από τα κράτη μέλη αποτελεί κρίσιμο βήμα για την εφαρμογή των κατάλληλων μέτρων προστασίας και αναβάθμισης. Τα δεδομένα που συλλέγονται θα συμβάλουν στην ανάπτυξη βελτιωμένων μεθόδων διαχείρισης, όπως η γεωργία ακριβείας και η ψηφιοποίηση, ώστε οι γεωργοί να αυξήσουν την παραγωγικότητα των εδαφών μειώνοντας την κατανάλωση νερού και θρεπτικών ουσιών. Επιπλέον, αυτά τα δεδομένα θα βοηθήσουν στην πρόληψη φυσικών καταστροφών, όπως η ξηρασία και η διάβρωση. Η δημιουργία υψηλής ποιότητας δεδομένων θα ενισχύσει την ανάπτυξη βιώσιμων γεωργικών πρακτικών και την αποκατάσταση των δασών. Η βιώσιμη διαχείριση του εδάφους θα εδραιωθεί ως βασική αρχή στην ΕΕ, με τα κράτη μέλη να καθορίζουν και να εφαρμόζουν κατάλληλες πρακτικές, καθώς και να λαμβάνουν μέτρα αναγέννησης για τα υποβαθμισμένα εδάφη, υποστηρίζοντας ταυτόχρονα άλλες πολιτικές της ΕΕ.

Η Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου έχει ως στόχο τη θέσπιση πλαισίου προστασίας για τα εσωτερικά, μεταβατικά, παράκτια και υπόγεια ύδατα. Κύριοι στόχοι της είναι: η αποτροπή επιδείνωσης της κατάστασης των υδάτων και η προστασία

των υδάτινων οικοσυστημάτων, καθώς και των αμέσως εξαρτώμενων από αυτά χερσαίων οικοσυστημάτων και υδροτόπων σε ό,τι αφορά τις ανάγκες τους σε νερό, η προώθηση της βιώσιμης χρήσης του νερού με βάση τη μακροπρόθεσμη προστασία των υδάτινων πόρων, και η ενίσχυση του υδάτινου περιβάλλοντος με ειδικά μέτρα για τη μείωση των απορρίψεων επικίνδυνων ουσιών. Επίσης, στοχεύει στην προστασία των υπόγειων υδάτων, στη μείωση της ρύπανσης τους και στη συμβολή στη μείωση των επιπτώσεων από πλημμύρες και ξηρασίες και στην εξασφάλιση επαρκούς παροχής επιφανειακού και υπόγειου νερού καλής ποιότητας που απαιτείται για τη βιώσιμη, ισόρροπη και δίκαιη χρήση ύδατος. Οι χώρες μέλη υποχρεούνται να λάβουν μέτρα για την προστασία των υπόγειων υδάτων και την αποκατάσταση της κατάστασής τους, διασφαλίζοντας την ισορροπία ανάμεσα στην άντληση και τη φυσική ανατροφοδότηση των υδάτων, με στόχο την επίτευξη καλής κατάστασης εντός δεκαπέντε ετών από την έναρξη ισχύος της οδηγίας. Τέλος, τα κράτη μέλη καλούνται να εφαρμόζουν τα αναγκαία μέτρα για την αναστροφή κάθε σημαντικής και έμμεσης ανοδικής τάσης συγκέντρωσης οποιουδήποτε ρύπου, η οποία οφείλεται σε ανθρώπινη δραστηριότητα προκειμένου να μειωθεί προοδευτικά η ρύπανση των υπόγειων υδάτων.

Εργαλεία εκτίμησης κινδύνου υπόγειων υδάτων σε μορφές ρύπανσης

Τα ζητήματα ρύπανσης των υπόγειων υδάτων σε διάφορες χώρες πρέπει να αντιμετωπιστούν με ένα σύνολο μέτρων, τεχνικών και πολιτικών. Παρά το γεγονός ότι η ρύπανση των υπόγειων υδάτων αποτελεί παγκόσμιο πρόβλημα, η φύση και οι παράγοντες που την επηρεάζουν διαφέρουν μεταξύ χωρών, κλιματικών περιοχών και γεωλογικών χαρακτηριστικών. Ενδέχεται να μην είναι βέλτιστο να υιοθετηθούν προσεγγίσεις αποκατάστασης που είναι επιτυχείς σε άλλες χώρες ή περιοχές. Με την ταχεία τεχνολογική ανάπτυξη, έχουν αναπτυχθεί πολλές νέες τεχνικές για τη μελέτη της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων, περιλαμβανομένων των γεωφυσικών και γεωπληροφορικών τεχνικών. Τα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS) και η τηλεπισκόπηση έχουν επιταχύνει την ανάπτυξη της επιστήμης των υπόγειων υδάτων. Στο μέλλον, η τεχνητή νοημοσύνη, η ανάλυση "big data", οι έρευνες με drones και οι τεχνολογίες ανάλυσης μοριακών και σταθερών ισotόπων θα είναι πιο ευρέως διαθέσιμες για εφαρμογές στην έρευνα των υπόγειων υδάτων [Li et al, 2021]. Η εκτίμηση του κινδύνου ρύπανσης των υπόγειων υδάτων αποτελεί σημαντικό εργαλείο για τη διαχείριση και προστασία τους. Ο κίνδυνος ρύπανσης εξαρτάται από τρία βασικά στοιχεία: την επικινδυνότητα που ενέχει μια ενδεχόμενη ρυπογόνος δραστηριότητα (δηλαδή η πηγή της ρύπανσης), την εγγενή ευπάθεια των υπόγειων υδάτων απέναντι στη ρύπανση (η διαδρομή της ρύπανσης), και τις ενδεχόμενες συνέπειες από την εκδήλωση ενός περιστατικού ρύπανσης στα υπόγεια ύδατα [Wang et al, 2012].

Το μοντέλο DRASTIC είναι μία ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την εκτίμηση του κινδύνου ρύπανσης των υπόγειων υδάτων, βασισμένο σε γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS). Το ακρωνύμιο DRASTIC προέρχεται από τους επτά παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη στο μοντέλο: Βάθος μέχρι τον υδροφόρο ορίζοντα, Επαναφόρτιση (καθαρή), Υδροφορικά μέσα (γεωλογικά χαρακτηριστικά), Εδαφικά μέσα (υφή), Τοπογραφία (κλίση), Επίδραση της βαδικής ζώνης (ακόρεστη ζώνη πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα) και Αγωγιμότητα (υδραυλική) του υδροφόρου ορίζοντα. Το μοντέλο διαμορφώνεται ως εξίσωση χρησιμοποιώντας μεθοδολογία γραμμικού συνδυασμού. Οι βαθμολογίες, που κυμαίνονται από 1 έως 10, αποσκοπούν στο να αντικατοπτρίσουν τη σχετική σημασία των κλάσεων μέσα σε κάθε παράγοντα. Η τιμή του δείκτη που υπολογίζεται από το μοντέλο θεωρείται σχετικός

δείκτης του δυναμικού ρύπανσης. Υψηλότεροι βαθμοί υποδεικνύουν μεγαλύτερη ευπάθεια. Κάθε παράμετρος αξιολογείται με μια κλίμακα τιμών και οι παράμετροι αυτές συνδυάζονται για την εκτίμηση της ενδογενούς ευπάθειας του υπόγειου υδάτινου συστήματος [Merchant, 1994].

Το MODFLOW είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο και αναγνωρισμένο αρθρωτό τριδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων διαφορών, που εφαρμόζεται σε υδροφόρους ορίζοντες με στρωματοποιημένα συστήματα. Βασισμένο σε φυσικές αρχές, συνδυάζει τον νόμο του Darcy και την αρχή του ισοζυγίου μάζας για την προσομοίωση της ροής υπόγειων υδάτων. Το MODFLOW έχει την ικανότητα να αναπαριστά διάφορους τύπους υδροφόρων οριζόντων, όπως περιορισμένους, αβαθείς, διαρροϊκούς, καθυστερημένης απόδοσης, καθώς και συνθήκες με μεταβαλλόμενους περιορισμούς. Μπορεί να προσομοιώσει τόσο στατικές όσο και δυναμικές καταστάσεις. Η δυνατότητα απενεργοποίησης περιοχών μέσα στο πεδίο καθιστά εύκολη την προσομοίωση πολύπλοκων και ακανόνιστων συστημάτων. Το μοντέλο υποστηρίζει διάφορες τυπικές συνθήκες ορίων που συναντώνται στην πράξη, όπως σταθερές ή πιεσμένες κεφαλές, μεταβλητές ή σταθερές ροές, ανανέωση/εκφόρτιση υπόγειων υδάτων, απολήψεις από σημεία και αποστραγγιστές. Επιπλέον, το MODFLOW μπορεί να προσομοιώσει επαρκώς πολλές διαδικασίες αλληλεπίδρασης επιφανειακών-υπόγειων υδάτων, όπως η εξάτμιση-διαπνοή και οι αλληλεπιδράσεις ποταμού-υδροφόρου [Kim et al, 2008].

Το μοντέλο SINTACS αποτελεί μια μέθοδο εκτίμησης της ενδογενούς ευπάθειας των υπόγειων υδάτων στη ρύπανση από νιτρικά και άλλους ρύπους, βασισμένη στην ανάλυση διαφόρων παραμέτρων που σχετίζονται με τις φυσικές και υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής. Το SINTACS περιλαμβάνει την εκτίμηση μιας σειράς παραμέτρων εισόδου, οι οποίες στη συνέχεια μετατρέπονται σε βαθμολογίες. Οι παράμετροι αυτές είναι ιδιαίτερα εξειδικευμένες και περιλαμβάνουν, εκτός από γεωλογικά χαρακτηριστικά, παραμέτρους που σχετίζονται με τη γεωργία (όπως οι καλλιεργητικές πρακτικές και η κτηνοτροφία) και τη διήθηση των νιτρικών μέσω του εδάφους. Συγκεκριμένα, υπάρχουν επτά βασικές παράμετροι που περιγράφουν τα χαρακτηριστικά του χώρου, όπως το βάθος του νερού, η ποσότητα διήθησης μέσω του εδάφους, τα φυσικά χαρακτηριστικά της αβύθου ζώνης, η υφή του εδάφους, τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του υδροφόρου ορίζοντα, η υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφορέα και η υδραυλική κλίση. Κάθε παράμετρος αξιολογείται με βαθμολογία από 1 έως 10, ανάλογα με την επιρροή της στην ευπάθεια. Τα βάρη πολλαπλασιαστών για κάθε παράμετρο προσαρμόζουν τη βαθμολογία, αναλογικά με τη συνεισφορά της κάθε παραμέτρου στον καθορισμό του συνολικού βαθμού ευπάθειας, επιτρέποντας έτσι μια πιο ακριβή εκτίμηση της σημασίας κάθε παράγοντα. Η ενδογενής ευπάθεια που προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου SINTACS υπολογίζεται μέσω χαρτογράφησης επικάλυψης επτά επιπέδων, που προκύπτουν από το άθροισμα των προϊόντων των βαθμολογιών και των βαρών. Το SINTACS είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την εκτίμηση της ευπάθειας των υπόγειων υδάτων σε ρύπανση από νιτρικά και δίνει ιδιαίτερη έμφαση στη γεωργία και τις καλλιεργητικές πρακτικές [Matzeu et al., 2017].

Το GIS χρησιμοποιείται ευρέως σε τομείς έρευνας που σχετίζονται με το έδαφος, όπως η ακριβής γεωργία, η μηχανική γεωλογία, η διάβρωση του εδάφους και η υποβάθμιση της γης. Ακόμη χρησιμοποιείται εκτενώς για την εκτίμηση κινδύνου σε περιπτώσεις ρύπανσης των υδάτων, εφαρμόζοντας γεωστατιστικές και πολυδιάστατες στατιστικές μεθόδους για την ανάλυση και την πρόβλεψη της ρύπανσης. Το GIS μπορεί να ενσωματώσει διάφορες χωρικές πληροφορίες και να βοηθήσει στην κατανόηση των παραμέτρων που επηρεάζουν τη ρύπανση

των υδάτων, όπως η χρήση γης, οι ιδιότητες του εδάφους και άλλοι περιβαλλοντικοί παράγοντες. Για παράδειγμα, μέθοδοι όπως η στάθμιση αντίστροφης απόστασης (IDW), το kriging και η συνθήκη προσομοίωσης χρησιμοποιούνται για να εκτιμήσουν άγνωστες ιδιότητες του εδάφους και της γης μεταξύ των σημείων δειγματοληψίας. Αυτές οι γεωστατιστικές μέθοδοι υπολογίζουν τις τιμές των εδαφικών ιδιοτήτων με βάση τα βάρη που αποδίδονται στις τιμές των δειγμάτων από γειτονικές θέσεις. Επιπλέον, οι συνδυασμένες πληροφορίες από το GIS και τις πολυδιάστατες στατιστικές αναλύσεις, όπως η ανάλυση κύριων συνιστωσών ή η ανάλυση συστάδων, επιτρέπουν την άμεση χωρική ανάλυση των αποτελεσμάτων και τη βαθύτερη κατανόηση των παραμέτρων που συντελούν στην ρύπανση των υδάτων. Με την ενσωμάτωση αυτών των πληροφοριών, το GIS βοηθά στην πρόβλεψη και αξιολόγηση των περιοχών που ενδέχεται να επηρεαστούν από διάφορους τύπους ρύπανσης, επιτρέποντας τη λήψη πιο στοχευμένων μέτρων για την αποφυγή και μείωση του κινδύνου [Hou et al., 2017].

3. Παρουσίαση περιοχής μελέτης

3.1 Γεωγραφική Θέση-Γενικοί Χάρτες

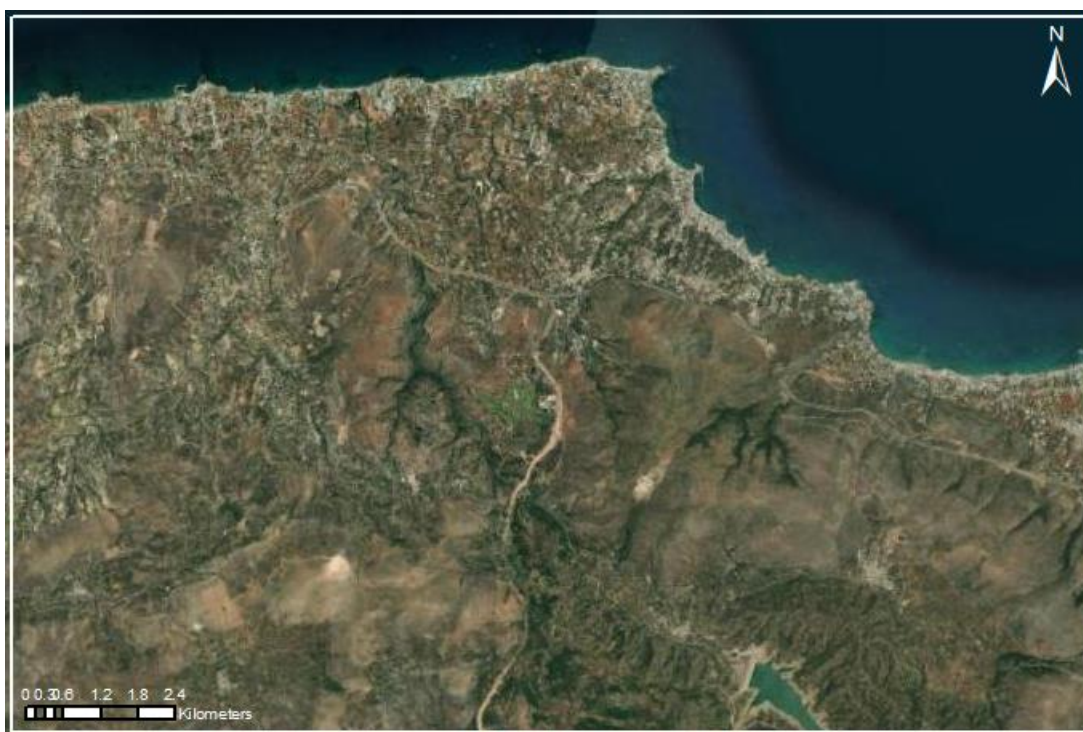
Η περιοχή μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας βρίσκεται στον νομό Ηρακλείου της νήσου Κρήτης, εντός του γεωγραφικού πλάτους 35.34040° N έως 35.24870° N και του γεωγραφικού μήκους 25.33287° E έως 25.42468° E. Η συνολική έκταση της περιοχής ανέρχεται σε $73.028.500 \text{ m}^2$ και περιλαμβάνει 11 οικισμούς, εκ των οποίων δύο παραθαλάσσιοι, καθώς και πλήθος αγροτεμαχίων και φυσικών οικοτόπων. Το κύριο αστικό κέντρο της περιοχής είναι η Χερσόνησος και ο Λιμένας Χερσονήσου. Στην περιοχή μελέτης περιλαμβάνονται οι εξής οικισμοί: Ποταμιές, Μοχός, Σταλίδα, Καλό Χωριό, Ανάληψη, Λιμένας Χερσονήσου, Ανισαράς, Αγριανά, Χερσόνησος, Πισκοπιανό και Κουτουλουφάρι. Τα χωριά και οι οικισμοί της Χερσονήσου χαρακτηρίζονται από παραδοσιακή κρητική αρχιτεκτονική, με πέτρινη κτίση και πλήρως εναρμονισμένα με το φυσικό περιβάλλον της περιοχής. Οι οικισμοί είναι ιδιαίτερα γραφικοί, με διατηρητέα παλαιά οικήματα, στενά σοκάκια και πλούσιες φυσικές εκτάσεις. Το φυσικό πράσινο τοπίο κυριαρχείται από θαμνώδης βλάστηση μεσογειακής μακκίας, όπως θάμνοι, σχίνα, κουμαριές, δάφνες και φρύγανα. Επιπλέον, η περιοχή φιλοξενεί ελαιώνες και αμπελώνες, παραδοσιακά ελαιотριβεία, ιστορικά μοναστήρια και το Μουσείο Αγροτικής Ιστορίας και Λαϊκής Τέχνης που αναδεικνύει την τοπική πολιτιστική κληρονομιά της περιοχής [Επίσημη σελίδα Δήμου Χερσονήσου].



Εικόνα 3.1.1 – Γενικός χάρτης της Κρήτης με επισήμανση της περιοχής μελέτης. Δορυφορική απεικόνιση από το υπόβαθρο “World Imagery”, μέσω του λογισμικού ArcMap 10.5 (Esri, 2016)



Εικόνα 3.1.2 – Γενικός χάρτης περιοχή μελέτης 1. Δορυφορική απεικόνιση από το υπόβαθρο “World Imagery”, μέσω του λογισμικού ArcMap 10.5 (Esri, 2016)



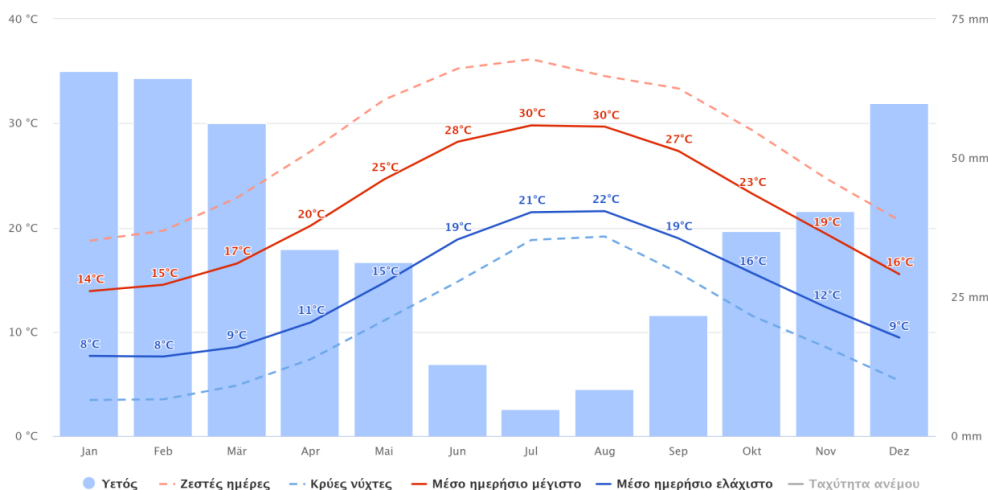
Εικόνα 3.1.3 – Γενικός χάρτης περιοχής μελέτης 2. Δορυφορική απεικόνιση από το υπόβαθρο “World Imagery”, μέσω του λογισμικού ArcMap 10.5 (Esri, 2016)

3.2 Φυσικό περιβάλλον

Η Χερσόνησος χαρακτηρίζεται από εύκρατο μεσογειακό κλίμα, με μέση ετήσια θερμοκρασία περίπου 19°C. Οι χειμώνες είναι ήπιοι, με τους ψυχρότερους μήνες να είναι ο Ιανουάριος και ο Φεβρουάριος. Η ηλιοφάνεια είναι έντονη καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, ενώ οι θερμότεροι μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος. Η περίοδος των βροχοπτώσεων εκτείνεται από τον Οκτώβριο έως τον Μάρτιο [Pappa et al., 2017].

Σύμφωνα με τα δεδομένα του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και της Μετεωρολογικής Υπηρεσίας, το κλίμα της περιοχής μελέτης χαρακτηρίζεται ως ήπιο και ξηρό μεσογειακό. Τα κύρια χαρακτηριστικά του περιλαμβάνουν χαμηλή ετήσια βροχόπτωση, υψηλές θερμοκρασίες, παρατεταμένες περιόδους ξηρασίας και υψηλά επίπεδα ηλιοφάνειας. Στα ακόλουθα διαγράμματα απεικονίζονται οι μέσες ημερήσιες θερμοκρασίες ανά μήνα και η ετήσια κατανομή του υετού. Η κόκκινη συμπαγής γραμμή αντιστοιχεί στη μέση μέγιστη θερμοκρασία μιας τυπικής ημέρας («Μέσο ημερήσιο μέγιστο»), ενώ η μπλε συμπαγής γραμμή αναπαριστά τη μέση ελάχιστη θερμοκρασία ημέρας («Μέσο ημερήσιο ελάχιστο»). Το γαλάζιο διάγραμμα αντιπροσωπεύει το ετήσιο ύψος υετού, βαθμονομημένο σε χιλιοστά (mm), όπου 1 mm αντιστοιχεί σε 1 λίτρο νερού ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας. Τα δεδομένα προέρχονται από μετεωρολογικούς σταθμούς που βρίσκονται ανατολικά του Ηρακλείου και στο οροπέδιο Τζερμιάδων Λασιθίου, στα δυτικά και ανατολικά όρια της υπό μελέτη περιοχής. Με βάση τις μετρήσεις, διαπιστώνεται ότι η περιοχή δεν καταγράφει εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες (>40°C) ή πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Ωστόσο, κατά τους θερινούς μήνες, οι μέσες θερμοκρασίες κυμαίνονται σε υψηλά επίπεδα, συχνά ξεπερνώντας τους 30°C, ενώ η μηνιαία βροχόπτωση παραμένει χαμηλή, με τις τιμές να μην υπερβαίνουν τα 65 mm.

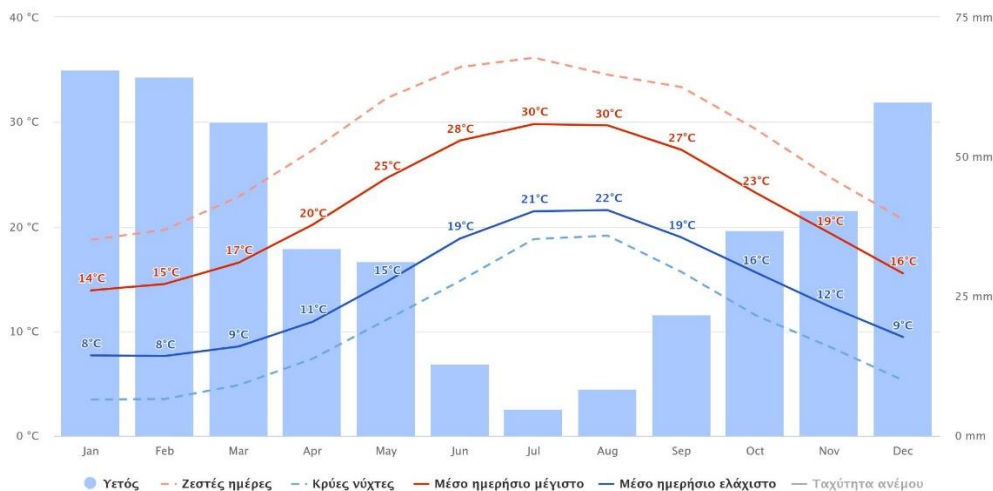
Κρατικός Αερολιμένας Ηρακλείου «Νίκος Καζαντζάκης»
35.34°N, 25.18°E (35 μ. υψ.).
Μοντέλο: ERA5T.



Εικόνα 3.2.1 – Μέσες τιμές θερμοκρασίας και βροχοπτώσεων των τελευταίων 30 ετών στην περιοχή Ανατολικά του Ηρακλείου. Πηγή: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, μέσω της πλατφόρμας meteoblue (<https://www.meteoblue.com/el>)

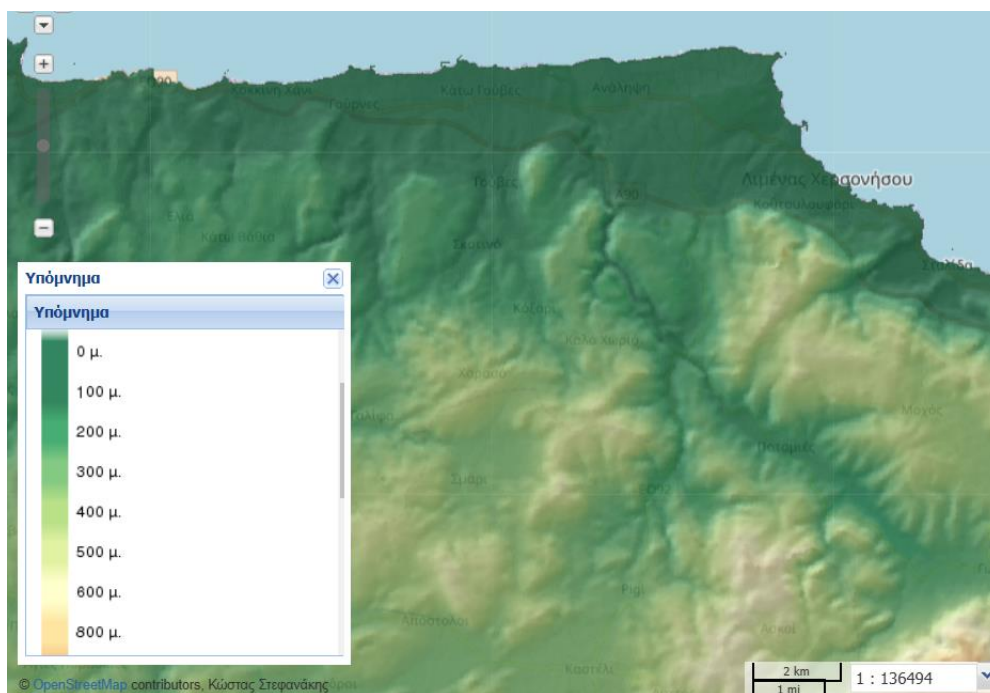
Τζερμιάδον

35.20°N, 25.49°E (829 μ. υψ.).
Μοντέλο: ERA5T.

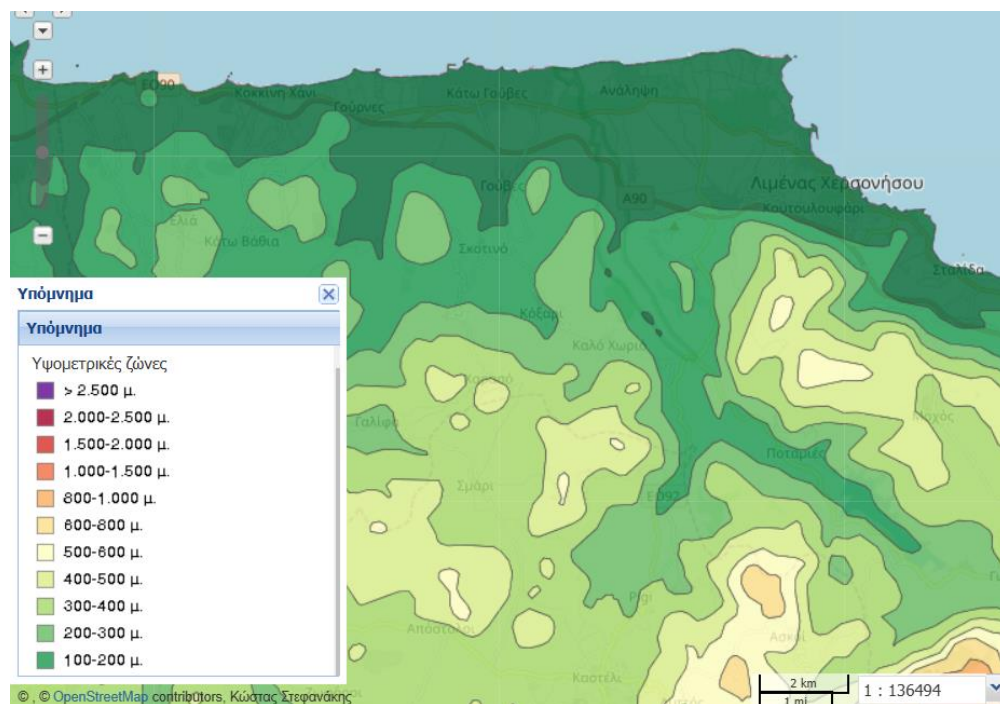


Εικόνα 3.2.2 – Μέσες τιμές θερμοκρασίας και βροχοπτώσεων των τελευταίων 30 ετών στην περιοχή Τζερμιάδον Λασιθίου. Πηγή: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, μέσω meteoblue (<https://www.meteoblue.com/el>)

Το φυσικό περιβάλλον της περιοχής μελέτης χαρακτηρίζεται από πεδινές και ημιορεινές εκτάσεις, με έντονη γεωμορφολογία ιδιαίτερα στα νοτιοανατολικά, όπου το μέγιστο υψόμετρο φτάνει περίπου τα 400 μέτρα, με λίγες βουνοκορφές να φτάνουν τα 500 μέτρα.



Εικόνα 3.2.3 – Χάρτης ανάγλυφου περιοχής μελέτης. Πηγή: Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας – Geoportal (<https://mapsportal.ypen.gr/maps/813>)



Εικόνα 3.2.4 – Χάρτης υψομετρικών ζωνών περιοχής μελέτης. Πηγή: Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας – Geoportal (<https://mapsportal.yopen.gr/maps/299>)

Στο δυτικό τμήμα της περιοχής, ο ποταμός Αποσελέμης διαδραματίζει σημαντικό ρόλο, ποτίζοντας τις γύρω εκτάσεις. Σύμφωνα με την οργάνωση WWF και το πρόγραμμα «Υγρότοποι των Νήσων», ο ποταμός Αποσελέμης, που εκβάλλει στο Κρητικό Πέλαγος, αποτελεί σημαντικό οικοσύστημα. Η εκβολή του ποταμού βρίσκεται περίπου 1,3 χιλιόμετρα δυτικά του οικισμού Ανάληψη. Ο υγρότοπος περιλαμβάνει την εκβολή του ποταμού, ένα μακρόστενο εποχικό αλμυρό/υφάλμυρο λιμνίο παράλληλο με τη θάλασσα, καθώς και εκτεταμένες περιοχές με αλμυρόβαλτους. Στον υγρότοπο έχουν καταγραφεί έξι διαφορετικοί τύποι οικοτόπων, με πλέον χαρακτηριστικό τον τύπο 1420 - Μεσογειακές και θερμοατλαντικές αλόφιλες λόχμες. Στην περιοχή έχουν καταγραφεί 208 είδη φυτών, με τα πιο αντιπροσωπευτικά υγροτοπικά είδη να περιλαμβάνουν τις αλμύρες (*Sarcocornia perennis*), τα βούρλα (*Juncus heldreichianus*), καθώς και τις λυγαριές (*Vitex agnus-castus*) που ευδοκιμούν κατά μήκος του ποταμού. Κοντά στην περιοχή μελέτης υπάρχουν δύο καταφύγια άγριας ζωής με τους ακόλουθους κωδικούς K790, ΦΕΚ 754/B/01, ονομασία Αποσελέμη Δήμου Χερσονήσου και K771, ΦΕΚ 763/B/01, ονομασία Άνω Λιμνίων Δήμου Μαλλίων.

Η γεωλογία της περιοχής μελέτης σύμφωνα με την Ελληνική Αρχή Γεωλογικών & Μεταλλευτικών Ερευνών και τον ψηφιακό χάρτη των γεωλογικών σχηματισμών όλου το ελλαδικού χώρου χαρακτηρίζεται από μια πλούσια και πολυσύνθετη γεωλογική δομή, αποτέλεσμα μακροχρόνιων τεκτονικών και ιζηματογενών διεργασιών. Τα μετατεκτονικά και βραδυτεκτονικά ιζήματα κυριαρχούν, με σύγχρονες προσχώσεις κοιλάδων, πεδιάδων και παράκτιων αποθέσεων που χρονολογούνται στο Ολόκαινο, καθώς και θαλάσσιες αποθέσεις του Μειοπλειόκαινου, οι οποίες περιλαμβάνουν κλαστικά ιζήματα, στρώματα γύψου και

υφάλμυρες φάσεις. Τα ιζήματα αυτά μαρτυρούν την εξέλιξη μεταβατικών περιβαλλόντων μεταξύ ηπειρωτικού και θαλάσσιου χώρου. Επιπλέον, η ζώνη Γαβρόβου - Τριπόλεως περιλαμβάνει ασβεστόλιθους και δολομίτες, που σχηματίστηκαν κατά το Μεσοζωϊκό και Ηώκαινο, αντιπροσωπεύοντας ρηχά θαλάσσια περιβάλλοντα. Στην περιοχή εντοπίζονται επίσης προαλπικές σειρές φυλλιτών του Περμοτριάδικου, οι οποίες φανερώνουν παλαιότερες μεταμορφικές διεργασίες. Σημαντική είναι και η παρουσία της ζώνης Πίνδου, που περιλαμβάνει φλύσχη, πηλίτες, ραδιολαρίτες, ψαμμίτες και λεπτοπλακώδεις ασβεστόλιθους από το Ιουρασικό και το Κρητιδικό, μαζί με ασβεστόλιθους Ανώτερου Κρητιδικού που συνδέονται με το κάλυμμα Άρβης. Οι γεωλογικές αυτές δομές αντικατοπτρίζουν την εξέλιξη της περιοχής από βαθιά θαλάσσια περιβάλλοντα σε σύγχρονες χερσαίες μορφές, καθιστώντας τη Χερσόνησο σημαντική για την κατανόηση της γεωλογικής ιστορίας της Κρήτης.

Η υδροπερατότητα της περιοχής της Χερσονήσου Ηρακλείου επηρεάζεται άμεσα από τη γεωλογική σύσταση και τη διάταξη των πετρωμάτων και στρωμάτων της. Σύμφωνα με τον υδρολιθολογικό χάρτη της Ελλάδος, η κεντρική περιοχή χαρακτηρίζεται από πορώδεις σχηματισμούς που περιλαμβάνουν πλειο-πλειστοκαινικές αποθέσεις και τριτογενείς γεωλογικούς σχηματισμούς, με εναλλαγές άμμων, μαργών, αργίλων και άλλων υλικών. Αυτές οι αποθέσεις παρουσιάζουν μέτρια έως πολύ χαμηλή υδροπερατότητα και συχνά φιλοξενούν επάλληλους υδροφόρους υπό πίεση. Οι κλαστικές αποθέσεις, όπως οι άμμοι και τα χαλίκια, έχουν υψηλή υδροπερατότητα, ενώ οι ιλύες και οι άργιλοι περιορίζουν τη ροή του νερού λόγω της χαμηλής διαπερατότητάς τους. Στα βόρεια της περιοχής σχηματίζονται κοκκώδεις προσχωματικές αποθέσεις με υδροπερατότητα που κυμαίνεται από πολύ υψηλή έως πολύ χαμηλή, ανάλογα με τη λιθολογική τους σύνθεση. Αντίστοιχα, στις κοιλάδες και τις πεδιάδες, οι σύγχρονες αποθέσεις εμφανίζουν υψηλή υδροπερατότητα, ιδιαίτερα στις χονδρόκοκκες φάσεις, καθιστώντας τις σημαντικές για την αποθήκευση επιφανειακών και υπόγειων υδάτων. Στα νότια, εκτεταμένοι καρστικοί σχηματισμοί, όπως ασβεστόλιθοι και μάρμαρα, εμφανίζουν μέτρια έως υψηλή υδροπερατότητα λόγω της έντονης καρστικοποίησης, της τεκτονικής καταπόνησης και της στρωματογραφικής τους δομής. Συγκεκριμένα, οι ασβεστόλιθοι και οι δολομίτες της περιοχής παρουσιάζουν υψηλή υδροπερατότητα λόγω της έντονης ρωγμάτωσης και των διαλυτικών διεργασιών (καρστικοποίηση). Αυτοί οι σχηματισμοί λειτουργούν ως κύριοι ταμιευτήρες νερού (καρστικοί υδροφόροι), σημαντικοί για την υπόγεια υδρολογία της περιοχής. Μικρά τμήματα της περιοχής που περιέχουν φυλλίτες έχουν χαμηλή υδροπερατότητα, λειτουργώντας ως υδροστεγανοί ορίζοντες και συμβάλλοντας στη δημιουργία υδροφόρων στρωμάτων πάνω από αυτά. Παράλληλα, ο φλύσχη, που αποτελείται από εναλλαγές πηλών, ψαμμιτών και λεπτοπλακωδών ασβεστόλιθων, παρουσιάζει μέτρια προς χαμηλή υδροπερατότητα, με τις πηλώδεις φάσεις να περιορίζουν τη διήθηση του νερού.

Συνολικά, η υδροπερατότητα της Χερσονήσου χαρακτηρίζεται από έντονη ετερογένεια, με τις καρστικές ζώνες να κυριαρχούν ως περιοχές υψηλής υδροπερατότητας, ενώ τα λεπτόκοκκα ιζήματα και οι φυλλίτες λειτουργούν ως φραγμοί στη ροή του νερού. Αυτή η ποικιλόμορφη γεωλογική δομή καθιστά την περιοχή εξαιρετικά ενδιαφέρουσα για τη μελέτη και τη βιώσιμη διαχείριση των υπόγειων υδάτινων πόρων.

3.3 Ανθρωπογενές περιβάλλον

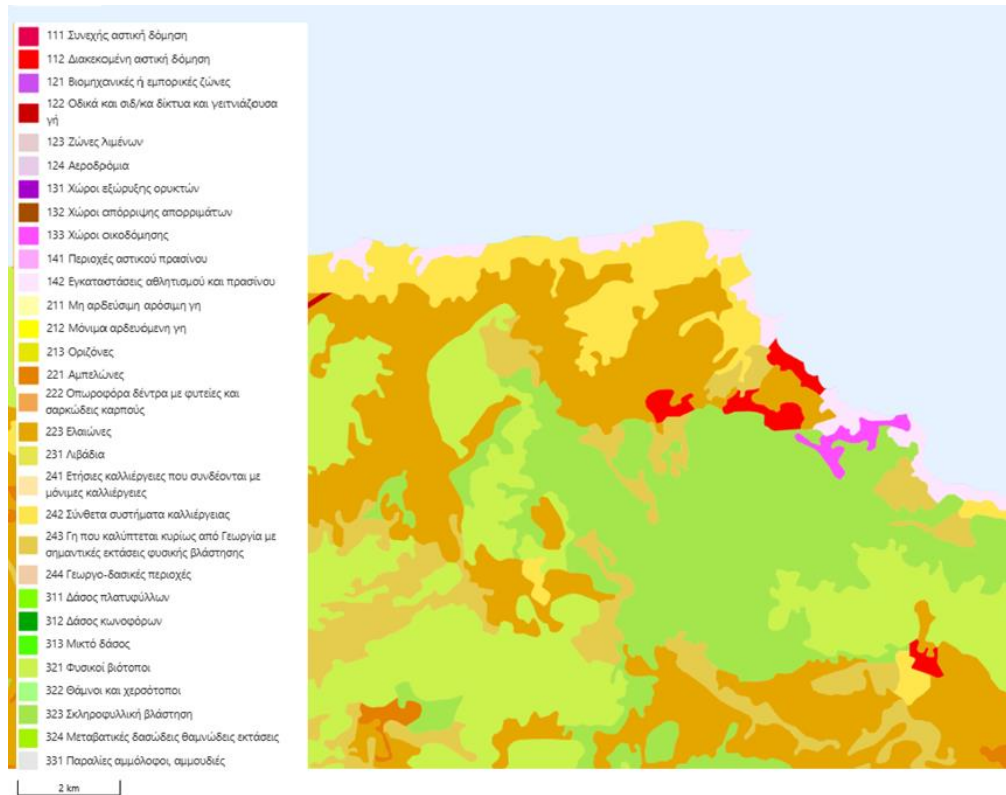
Στο βόρειο τμήμα του Νομού Ηρακλείου παρατηρείται έντονη συγκέντρωση οικιστικών δομών και τουριστικών εγκαταστάσεων, όπως ξενοδοχεία, χώροι εστίασης και αναψυχής. Οι εγκαταστάσεις αυτές εντοπίζονται σε όλους τους παράκτιους οικισμούς, με ιδιαίτερη πυκνότητα στο ανατολικό τμήμα του νομού, όπου διακρίνονται τα οικιστικά κέντρα Κάμπος, Παραλία Γουβών, παραλιακή περιοχή Ανάληψης, Ανισαράς, Λιμένας Χερσονήσου, Σταλίδα και παραλιακή περιοχή Μαλίων. Ακόμη, η περιοχή περιλαμβάνει τμήμα του Βόρειου Οδικού Άξονα Κρήτης (ΒΟΑΚ), ο οποίος αποτελεί τον κύριο μεταφορικό άξονα της περιοχής και σημαντικό άξονα σύνδεσης και εξυπηρέτησης του βόρειου τμήματος του νησιού. Στην ανατολική περιοχή του νομού, στην περιοχή της Χερσονήσου λειτουργεί μία λιμενική εγκατάσταση με τις αντίστοιχες υποδομές και πολλές παράκτιες τουριστικές εγκαταστάσεις. Στην περιοχή καταγράφονται φαινόμενα άναρχης δόμησης, ανεξέλεγκτης οικιστικής επέκτασης και αύξησης της αστικής μάζας, συχνά εις βάρος γεωργικών εκτάσεων, για την κάλυψη αναγκών του αστικού κέντρου αλλά και της αυξημένης τουριστικής δραστηριότητας [Γιαουρτά, 2013].

Η υπό μελέτη περιοχή υπάγεται στο Δήμο Χερσονήσου. Σύμφωνα με το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας ο Δήμος Χερσονήσου, με έδρα τις Γούρνες, χωροθετείται στη βόρεια ακτογραμμή του ανατολικού τμήματος της Κρήτης. Πιο συγκεκριμένα, βρίσκεται ανάμεσα στα δύο μεγάλα αστικά κέντρα του τμήματος αυτού, με την έδρα του να απέχει μέσω του βασικού οδικού άξονα 15 χλμ. από την πόλη του Ηρακλείου και 50χλμ. από την πόλη του Αγίου Νικολάου. Διοικητικά υπάγεται στην Περιφερειακή Ενότητα Ηρακλείου καταλαμβάνοντας, σύμφωνα με την απογραφή της ΕΛ.ΣΤΑΤ. το 2021, το 8,75% του συνολικού πληθυσμού της, ενώ αποτελεί παράλληλα όριο με το βόρειο τμήμα της Περιφερειακής Ενότητας Λασιθίου. Ο Δήμος Χερσονήσου συνορεύει με τον Δήμο Ηρακλείου στα δυτικά, τον Δήμο Αρχάνων-Αστερουσίων στα νοτιοδυτικά, τον Δήμο Μίνωα – Πεδιάδας στα νότια, τον Δήμο Οροπεδίου Λασιθίου στα νοτιοανατολικά, τον Δήμο Αγίου Νικολάου στα ανατολικά, ενώ, τέλος, στα βόρεια βρέχεται από το κρητικό πέλαγος.

Ο Δήμος Χερσονήσου αποτελείται από τέσσερις δημοτικές ενότητες, με συγκεκριμένη γεωγραφική θέση και πληθυσμιακά χαρακτηριστικά, σύμφωνα με την απογραφή της ΕΛ.ΣΤΑΤ. του 2021. Η Δημοτική Ενότητα Γουβών βρίσκεται στο βορειοανατολικό τμήμα του νομού Ηρακλείου, γειτνιάζει με τον Κρατικό Αερολιμένα «Νίκος Καζαντζάκης» και έχει πληθυσμό 12.095 κατοίκους. Η Δημοτική Ενότητα Επισκοπής, με πληθυσμό 2.291 κατοίκους, εκτείνεται νότια της Δημοτικής Ενότητας Γουβών, διατηρώντας έναν περισσότερο ηπειρωτικό χαρακτήρα. Η Δημοτική Ενότητα Μαλίων, που φιλοξενεί 5.501 κατοίκους, βρίσκεται στο βορειοανατολικό τμήμα του νομού και αποτελεί σημαντικό τουριστικό κέντρο της περιοχής. Τέλος, η Δημοτική Ενότητα Χερσονήσου, με πληθυσμό 7.333 κατοίκους, εκτείνεται ανατολικά των Μαλίων, αποτελώντας μία από τις πιο ανεπτυγμένες περιοχές του δήμου.

Σύμφωνα με το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, ο Δήμος Χερσονήσου χαρακτηρίζεται από εκτεταμένες εκτάσεις ελαιώνων και γεωργικής γης, οι οποίες συνυπάρχουν με σημαντικές περιοχές φυσικής βλάστησης. Στη δυτική του πλευρά, κυριαρχεί η σκληροφυλλική βλάστηση

και οι φυσικοί βοσκοτόποι, ενώ η περιοχή φιλοξενεί δύο διάσπαρτους χώρους εξόρυξης ορυκτών και το Φράγμα Αποσελέμη, που λειτουργεί ως σημαντική υποδομή για τη συλλογή υδάτων. Στην παραλιακή ζώνη στα βόρεια του δήμου, απαντώνται σύνθετα συστήματα καλλιέργειας, καθώς και εγκαταστάσεις που εξυπηρετούν αθλητικές και ψυχαγωγικές δραστηριότητες.



Εικόνα 3.3.1 – Χάρτης χρήσεις γης της περιοχής μελέτης CORINE Land Cover 2018

3.4 Πιέσεις στο φυσικό περιβάλλον

Τα τελευταία χρόνια, η άνοδος του τουρισμού στις παράκτιες περιοχές του βόρειου τμήματος του νομού Ηρακλείου, και ειδικότερα στην περιοχή της Χερσονήσου, έχει συμβάλει σημαντικά στην ανάπτυξη και αναβάθμιση της περιοχής, προσφέροντας πολλαπλά οφέλη στους κατοίκους. Ωστόσο, οι προκλήσεις και οι κίνδυνοι που συνοδεύουν αυτή την ανάπτυξη έχουν προκαλέσει το ενδιαφέρον των δημόσιων αρχών και της επιστημονικής κοινότητας για τη διατήρηση των κοινωνικών ισορροπιών και την προστασία του φυσικού περιβάλλοντος.

Οι κύριες δραστηριότητες και υποδομές της περιοχής, που σχετίζονται με τον τουρισμό, τη γεωργία και τη βιομηχανία, εντοπίζονται κυρίως κοντά στην ακτογραμμή και χαρακτηρίζονται από υψηλή κατανάλωση νερού. Η κύρια πηγή υδάτινων πόρων είναι ο παράκτιος υδροφόρος ορίζοντας, ο οποίος αξιοποιείται μέσω πηγαδιών άντλησης. Ο μόνιμος πληθυσμός της Χερσονήσου δραστηριοποιείται κυρίως στον τομέα των τουριστικών υπηρεσιών και στη

γεωργία. Λόγω της έντονης τουριστικής κίνησης και των αυξημένων γεωργικών αναγκών κατά τη θερινή περίοδο, η ζήτηση για νερό παρουσιάζει σημαντική αύξηση, ασκώντας πίεση στους διαθέσιμους υδάτινους πόρους [Pappa et al., 2017].

Ο Δήμος Χερσονήσου, προκειμένου να διασφαλίσει τη βιώσιμη ανάπτυξη και την προστασία του φυσικού περιβάλλοντος, έχει εκπονήσει μελέτη για το «Τοπικό Πολεοδομικό Σχέδιο» (ΤΠΣ). Το σχέδιο αυτό έχει ως στόχο τον καθορισμό του προτύπου χωρικής οργάνωσης και ανάπτυξης, λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες των κατοίκων και των δραστηριοτήτων στην περιοχή, όπως ο τουρισμός, η γεωργία και η βιομηχανία. Με την εφαρμογή του ΤΠΣ, επιδιώκεται η αποτελεσματική ρύθμιση των χρήσεων γης, των όρων και περιορισμών δόμησης, και των απαιτούμενων μέτρων που προάγουν την ολοκληρωμένη και ισχυρή ανάπτυξη των Δημοτικών Ενοτήτων.

Συνολικά, η παράκτια ζώνη, που φιλοξενεί μεγάλο μέρος της τουριστικής υποδομής, επηρεάζεται από τη συνεχιζόμενη κατασκευή νέων τουριστικών εγκαταστάσεων, την επέκταση των υποδομών και τις αυξημένες ανάγκες σε πόρους. Η αγροτική δραστηριότητα, επίσης, επιβαρύνει το περιβάλλον με την υπερκατανάλωση υδάτων, ενώ η εκτεταμένη γεωργία συμβάλλει στη μείωση των φυσικών οικοσυστημάτων. Επιπλέον, οι πιέσεις στο φυσικό περιβάλλον εντείνονται από την εκτεταμένη δόμηση και τις διαταραχές που προκαλούνται από τις βιομηχανικές και εξορυκτικές δραστηριότητες, ιδίως στην περιοχή των βόρειων και δυτικών ζωνών του Δήμου. Η ανάγκη προστασίας των φυσικών πόρων, η αποκατάσταση των επιβαρυνόμενων περιοχών και η δημιουργία στρατηγικών για την ενίσχυση της βιώσιμης ανάπτυξης είναι κρίσιμη για την ισόρροπη ανάπτυξη του Δήμου Χερσονήσου και τη διασφάλιση της ποιότητας του φυσικού του περιβάλλοντος.

4. Παρουσίαση λογισμικού ArcGIS

Ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (ΓΣΠ), γνωστό διεθνώς ως Geographic Information System (GIS), αποτελεί ένα προηγμένο υπολογιστικό σύστημα, σχεδιασμένο για τη χαρτογράφηση και την ανάλυση οντοτήτων που υπάρχουν στην επιφάνεια της γης, καθώς και γεγονότων που λαμβάνουν χώρα σε συγκεκριμένο χρονικό πλαίσιο και γεωγραφικό χώρο. Η μοναδική δυνατότητα των ΓΣΠ να συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των βάσεων δεδομένων με την ικανότητα ρεαλιστικής οπτικοποίησης, αξιοποιώντας την πλούσια χωρική πληροφορία που προσφέρουν οι χάρτες, είτε αυτοί είναι αναλογικοί είτε ψηφιακοί, τα καθιστά ανεκτίμητα εργαλεία για τη χωρική ανάλυση. Αυτή η ιδιαιτερότητα διαφοροποιεί τα ΓΣΠ από άλλα συναφή συστήματα διαχείρισης πληροφοριών, προσδίδοντάς τους ξεχωριστή αξία στην επιστημονική έρευνα και στις επαγγελματικές εφαρμογές [Τσουχλαράκη & Αχιλλέως, 2015].

Σε αυτό το πλαίσιο, το ArcGIS ξεχωρίζει ως μία εξαιρετικά προηγμένη και ευέλικτη γεωχωρική πλατφόρμα, ειδικά σχεδιασμένη για την υποστήριξη των αναγκών επιστημόνων και ερευνητών που δραστηριοποιούνται στην ανάλυση, διαχείριση και παρουσίαση γεωγραφικών δεδομένων. Αναπτυγμένο από την Esri, το ArcGIS ενσωματώνει και συνδέει δεδομένα μέσω του γεωγραφικού τους πλαισίου, παρέχοντας προηγμένα εργαλεία για τη χαρτογράφηση, τη χωρική ανάλυση και την επεξεργασία δεδομένων. Η πλατφόρμα υποστηρίζει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στον τομέα της επιστημονικής έρευνας, επιτρέποντας στους χρήστες να αναλύσουν πρότυπα, σχέσεις και γεωγραφικές κατανομές με υψηλή ακρίβεια. Το ArcGIS διευκολύνει τη συλλογή, οργάνωση, ανάλυση και κοινοποίηση πολυδιάστατων δεδομένων, προσφέροντας ισχυρές δυνατότητες για τη δημιουργία σύνθετων γεωχωρικών μοντέλων και τη διεξαγωγή επιστημονικών αναλύσεων. Μέσω του ArcGIS, μπορούν να συνδυαστούν δεδομένα από διάφορες πηγές, όπως δορυφορικές εικόνες, γεωφυσικά δεδομένα, μετεωρολογικά δεδομένα και κοινωνικοοικονομικές παραμέτρους, διευκολύνοντας τη σύνθεση και ανάλυση πολύπλοκων γεωχωρικών συστημάτων. Η πλατφόρμα υποστηρίζει επίσης δυναμικές εφαρμογές για την ανάλυση της χωρικής κατανομής και της χρονικής εξέλιξης δεδομένων, προσφέροντας έτσι εργαλεία για τη μοντελοποίηση και τη διαχείριση φυσικών πόρων, τη βιώσιμη ανάπτυξη, τις κλιματικές αλλαγές, την ανάλυση οικοσυστημάτων και την εκτίμηση κινδύνων. Επιπλέον, το ArcGIS παρέχει ένα σύνολο εργαλείων για τη συνεργασία μεταξύ χρηστών και την εύκολη κοινοποίηση των αποτελεσμάτων μέσω διαδραστικών χαρτών, αναφορών και ψηφιακών πλατφορμών [ESRI inc. 2025].

Το ArcGIS παρέχει ένα εκτενές σύνολο εργαλείων και εφαρμογών, σχεδιασμένων να ανταποκρίνονται σε ένα ευρύ φάσμα απαιτήσεων στον τομέα της διαχείρισης και ανάλυσης γεωχωρικών πληροφοριών. Αυτές οι εφαρμογές είναι σχεδιασμένες για να εξυπηρετούν τα διάφορα στάδια της διαδικασίας γεωχωρικής ανάλυσης, από την επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων, μέχρι την παρουσίαση και κοινοποίηση των αποτελεσμάτων. Μερικές από τις πιο σημαντικές εφαρμογές που περιλαμβάνονται στη σουίτα του ArcGIS Desktop είναι τα ArcMap, ArcGIS Pro, ArcCatalog, ArcGIS Earth και ArcToolbox.

4.1 ArcGIS Desktop

Το ArcGIS Desktop αποτελεί μέρος της ολοκληρωμένης σουίτας ArcGIS, εξασφαλίζοντας διαλειτουργικότητα με άλλες πλατφόρμες, όπως το ArcGIS Online και το ArcGIS Enterprise. Περιλαμβάνει εφαρμογές όπως το ArcMap, το ArcCatalog και το ArcGIS Pro, με το τελευταίο να αποτελεί την πλέον σύγχρονη και προηγμένη λύση της Esri για επιτραπέζια GIS εφαρμογή. Το ArcGIS Desktop είναι ένα σύστημα από τμήματα λογισμικού, τα οποία μπορούν να εγκατασταθούν σε ένα μεμονωμένο Η/Υ για να γίνεται χρήση από ένα χρήστη κάθε φορά ή να διατίθενται σε ένα ετερογενές δίκτυο προσωπικών Η/Υ (desktops) ή σταθμών εργασίας (workstations) ή εξυπηρετητών (servers). Οι χρήστες, ανάλογα με τις ανάγκες τους, μπορούν να εγκαταστήσουν συγκεκριμένα τμήματα του λογισμικού ώστε να διαμορφώσουν ένα GIS προσαρμοσμένο στις απαιτήσεις τους, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιείται είτε ατομικά είτε από πολλαπλούς χρήστες ταυτόχρονα. Κάθε έκδοση του ArcGIS Desktop περιλαμβάνει τρεις βασικές εφαρμογές: ArcMap, ArcCatalog και ArcToolBox [Τσουχλαράκη & Αχιλλέως, 2015].

Το ArcMap αποτελεί την κεντρική εφαρμογή του ArcGIS Desktop, παρέχοντας λειτουργίες δημιουργίας και επεξεργασίας χαρτών, εμφάνισης και ανάλυσης γεωγραφικών δεδομένων, αναζήτησης και επιλογής χωρικών πληροφοριών, δημιουργίας γραφημάτων και διαμόρφωσης χαρτών για εκτύπωση.

Το ArcCatalog επιτρέπει την εύκολη πρόσβαση και διαχείριση των γεωγραφικών δεδομένων, τα οποία είναι αποθηκευμένα τόσο σε τοπικούς δίσκους όσο σε προσβάσιμες βάσεις δεδομένων. Ο χρήστης μπορεί να αντιγράψει, να διαγράψει, να προβάλει και να τροποποιήσει δεδομένα, εκτελώντας λειτουργίες παρόμοιες με αυτές του Windows Explorer. Επιπλέον, το ArcCatalog παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας νέων αρχείων δεδομένων.

Το ArcToolBox περιλαμβάνει μια σειρά εργαλείων γεωεπεξεργασίας, επιτρέποντας στον χρήστη να μετατρέπει χωρικά δεδομένα από μία μορφή σε άλλη και να αλλάζει το προβολικό σύστημα των δεδομένων. Το ArcToolBox διανέμεται ως πλήρης έκδοση του Arc/Info, η οποία περιλαμβάνει 150 εργαλεία, καθώς και ως έκδοση του ArcView που περιέχει πολύ λιγότερα εργαλεία.

Τα δεδομένα που μπορούν να καταχωρηθούν σε ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (ΓΣΠ) ποικίλλουν ανάλογα με το αντικείμενο ή το φαινόμενο της εκάστοτε μελέτης. Καθώς προέρχονται από πολλαπλές πηγές, είναι πιθανό να διαφέρουν ως προς την τυποποίηση και τη δομή τους. Ωστόσο, κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες: χωρικά δεδομένα και ποιοτικά (περιγραφικά) δεδομένα. Τα χωρικά δεδομένα αφορούν στη θέση, στη μορφή των αντικειμένων, δομών ή φαινομένων που μελετώνται, αποδίδοντας τη γεωγραφική ταυτότητα κάθε στοιχείου μέσω συστημάτων συντεταγμένων ή ψηφιακών χαρτών. Αντίθετα, τα ποιοτικά ή περιγραφικά δεδομένα περιλαμβάνουν τιμές και χαρακτηριστικά στοιχείων που παρουσιάζονται σε μορφή πινάκων ή καταλόγων αναφορών, χωρίς να σχετίζονται άμεσα με τη χωρική τους θέση. Μέσω της λειτουργικής δομής των ΓΣΠ, επιτυγχάνεται η αλληλεπίδραση και συσχέτιση μεταξύ χωρικών και ποιοτικών δεδομένων, διευκολύνοντας τη δυναμική διαχείριση και ανάλυσή τους [Γκούμας, 2019].

Διαδικασίες Ανάλυσης και Επεξεργασίας Δεδομένων σε Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ)

Η εκπόνηση μελετών με τη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ΓΣΠ) ακολουθεί μια σειρά διαδικασιών, οι οποίες διασφαλίζουν την ορθή διαχείριση, ανάλυση και παρουσίαση των γεωγραφικών δεδομένων [Burrough et al., 2015]. Οι βασικές φάσεις αυτής της διαδικασίας περιλαμβάνουν:

Εισαγωγή και επαλήθευση των δεδομένων

Αποθήκευση και διαχείριση της πληροφορίας

Ανάκτηση, ανάλυση και μοντελοποίηση των δεδομένων

Απεικόνιση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων

Η εισαγωγή των δεδομένων αποτελεί το θεμέλιο για τη δημιουργία μιας γεωγραφικής βάσης δεδομένων, πάνω στην οποία βασίζονται όλα τα επόμενα στάδια ανάλυσης. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την ενσωμάτωση υφιστάμενων ψηφιακών δεδομένων, δεδομένων πεδίου, πληροφοριών από αισθητήρες, καθώς και τη μετατροπή έντυπων χαρτών και εικόνων σε ψηφιακή μορφή.

Η αποθήκευση και διαχείριση των δεδομένων αφορά τη δομή και την οργάνωση των γεωγραφικών πληροφοριών, οι οποίες σχετίζονται με τη θέση, τις συνδέσεις (τοπολογία) και τις ιδιότητες των αντικειμένων. Τα δεδομένα αυτά διαχειρίζονται μέσω Συστημάτων Διαχείρισης Βάσεων Δεδομένων (DBMS), τα οποία βασίζονται σε συγκεκριμένα μοντέλα δεδομένων για τη διατήρηση της συνέπειας και της συνοχής τους.

Η ανάλυση και μοντελοποίηση των δεδομένων περιλαμβάνει δύο βασικές κατηγορίες λειτουργιών: (α) μετασχηματισμούς που απαιτούνται για την αφαίρεση σφαλμάτων από τα δεδομένα ή για την επικαιροποίησή τους ή την αντιστοίχισή τους με άλλα σύνολα δεδομένων, και (β) εφαρμογή μεθόδων ανάλυσης για την εξαγωγή συμπερασμάτων και τη λήψη αποφάσεων. Οι μετασχηματισμοί αυτοί επηρεάζουν τόσο τις χωρικές όσο και τις τοπολογικές και μη χωρικές διαστάσεις των δεδομένων, περιλαμβάνοντας την αλλαγή κλίμακας, τη μετατροπή δεδομένων σε νέες προβολές χαρτών, τη λογική ανάκτηση δεδομένων και τον υπολογισμό χωρικών παραμέτρων, όπως εμβαδόν και περίμετρος περιοχών.

Τέλος, η παρουσίαση και απεικόνιση των αποτελεσμάτων αφορά τον τρόπο με τον οποίο τα δεδομένα και οι αναλύσεις παρουσιάζονται στους χρήστες. Η πληροφορία μπορεί να εμφανίζεται σε διάφορες μορφές, όπως ψηφιακοί χάρτες, γραφήματα, πίνακες, αναφορές και κινούμενα σχέδια, επιτρέποντας την εύκολη κατανόηση και αξιοποίησή της.

4.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ΓΠΣ

Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ) προσφέρουν πληθώρα πλεονεκτημάτων [Γκούμας, 2019]. Ένα από τα βασικά τους χαρακτηριστικά είναι η αποθήκευση δεδομένων (όπως κλίσεις, κάλυψη γης κ.λπ.) σε ψηφιακή μορφή, γεγονός που μειώνει τον απαιτούμενο αποθηκευτικό χώρο και καθιστά τα δεδομένα εύκολα προσβάσιμα και διαχειρίσιμα. Οι γεωγραφικές βάσεις δεδομένων επιτρέπουν την καταχώριση ποσοτικών πληροφοριών ανά γεωγραφική μονάδα ή διάταξη, προσφέροντας τη δυνατότητα δημιουργίας και διαχείρισης δεδομένων για οποιοδήποτε αντικείμενο, χαρακτηριστικό ή συνδυασμό αυτών. Επιπλέον, τα σύγχρονα λογισμικά GIS υποστηρίζουν διάφορες μορφές επεξεργασίας δεδομένων, εξασφαλίζοντας συμβατότητα με τους τύπους αρχείων που χρησιμοποιούνται στα ΓΣΠ. Η παραγωγή χαρτογραφικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων πραγματοποιείται ταχύτατα και μπορεί να περιλαμβάνει είτε μεμονωμένα είτε σύνθετα θεματικά επίπεδα, για οποιαδήποτε γεωγραφική τοποθεσία και σε οποιαδήποτε κλίμακα. Η βάση δεδομένων μπορεί να ενημερώνεται δυναμικά, επιτρέποντας τον αποτελεσματικό εντοπισμό και ανάλυση των μεταβολών σε διαφορετικές χρονικές περιόδους.

Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα των ΓΣΠ είναι η δυνατότητα ανάλυσης δεδομένων με σημαντικά χαμηλότερο κόστος και μεγαλύτερη ταχύτητα συγκριτικά με τις παραδοσιακές μεθόδους [Γκούμας, 2019]. Οι αναλύσεις πραγματοποιούνται με αντικειμενικό τρόπο και η αυτοματοποίηση στη διαδικασία παραγωγής αποτελεσμάτων ενισχύει την αξιοπιστία τους. Επιπλέον, τα λογισμικά GIS μπορούν να συνδυαστούν με συστήματα Τηλεπισκόπησης, επιτρέποντας τη δημιουργία επικαιροποιημένων γεωγραφικών βάσεων δεδομένων και την επεξεργασία δεδομένων διαφορετικών ειδών (π.χ. τοπογραφικών, υδρολογικών, εδαφολογικών). Παράλληλα, η δυνατότητα διασύνδεσης των GIS με δεδομένα GPS (Global Positioning System) παρέχει πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο και διαδικτυακή διασύνδεση, καθιστώντας τη χωρική πληροφορία ακόμα πιο χρήσιμη. Επιπροσθέτως, η παραγωγή χαρτών μέσω GIS μπορεί να προσαρμοστεί στις εκάστοτε ανάγκες, βελτιστοποιώντας την ανάλυση και τη λήψη αποφάσεων.

Ωστόσο, παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, τα ΓΣΠ παρουσιάζουν και ορισμένα μειονεκτήματα [Γκούμας, 2019]. Ένα από τα κυριότερα αφορά το υψηλό κόστος απόκτησης λογισμικού και ανανέωσης των αδειών χρήσης. Επίσης, η αποτελεσματική αξιοποίησή τους απαιτεί εκτεταμένη εκπαίδευση των χρηστών. Επιπλέον, συχνά προκύπτουν ζητήματα ασυμβατότητας μεταξύ διαφορετικών πακέτων λογισμικού και τύπων αρχείων, δυσχεραίνοντας την ανταλλαγή δεδομένων. Ένα ακόμα μειονέκτημα είναι η χρονοβόρα διαδικασία ψηφιοποίησης και αποθήκευσης γεωγραφικών δεδομένων από εκτυπωμένους χάρτες που διατίθενται από διάφορες υπηρεσίες και οργανισμούς. Σημαντικό πρόβλημα στην Ελλάδα αποτελεί η περιορισμένη διαθεσιμότητα επικαιροποιημένων χαρτογραφικών δεδομένων, όπως χάρτες βλάστησης, κάλυψης γης και δημογραφικών στοιχείων. Ωστόσο, η Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού έχει ξεκινήσει την παραγωγή ψηφιοποιημένων δεδομένων, όπως χάρτες ισοϋψών, χρήσεων γης και γεωλογικοί χάρτες, οι οποίοι καθίστανται σταδιακά ευρύτερα διαθέσιμοι στο κοινό. Παράλληλα, η πρόοδος στην τεχνολογία αποθήκευσης και διασύνδεσης δεδομένων

συμβάλλει στη βελτίωση της πρόσβασης σε χωρικές πληροφορίες, ενισχύοντας την αξιοποίηση των ΓΣΠ σε διάφορους τομείς.

5. Μεθοδολογία

5.1 Μεθοδολογία χρήσης του λογισμικού GIS στην χωρική εκτίμηση εδαφικής επικινδυνότητας

Η ρύπανση των υπόγειων υδάτων αποτελεί ένα πολυδιάστατο φαινόμενο που έχει χωρική διάσταση. Επομένως, το γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών (GIS) είναι εξαιρετικά κατάλληλο για εφαρμογές που αφορούν τα υπόγεια ύδατα. Η ικανότητα των GIS να παρέχουν χωρικό πλαίσιο για την αξιολόγηση κινδύνων είναι καθοριστικής σημασίας για τη μείωση των κινδύνων και τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των παρεμβάσεων. Καθώς η ορθή εφαρμογή κάθε έργου διαχείρισης κινδύνων κρίνεται αναγκαίο να αξιολογείται βάσει της συμβολής του στη βελτίωση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων, ο κύριος στόχος της μοντελοποίησης μέσω GIS είναι να ενισχύσει την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα των αποφάσεων, διασφαλίζοντας καλύτερη προστασία της δημόσιας ασφάλειας. Επιπλέον, η χρησιμότητα των αποφάσεων αποτελεί ένα αναδυόμενο θέμα στη βιβλιογραφία του GIS, που επικεντρώνεται στα γνωστικά ζητήματα του GIS και τις ανθρώπινες αλληλεπιδράσεις [Zerger, 2002].

Για την επίτευξη ενός συγκεκριμένου στόχου σε ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων, είναι απαραίτητη η αξιολόγηση πολλαπλών κριτηρίων. Αυτά τα πολλαπλά κριτήρια οδηγούν στην παραγωγή του τελικού χάρτη κινδύνου. Στο πλαίσιο της ανάλυσης πολλαπλών κριτηρίων (MCA) πρέπει να αποδοθούν συντελεστές βαρύτητας, ώστε να καθοριστεί η σχετική σημασία κάθε κριτηρίου, είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό με άλλα. Ωστόσο, η διαδικασία αυτή παρουσιάζει δύο βασικές προκλήσεις: αφενός, οι συντελεστές βαρύτητας διαμορφώνονται βάσει της υποκειμενικής κρίσης του υπεύθυνου λήψης αποφάσεων και, αφετέρου, η επιλογή των παραγόντων που εξετάζονται σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή εξαρτάται από το εκάστοτε πλαίσιο και τις προτεραιότητες που θέτει ο αναλυτής [Malczewski, 2006].

Η επιλογή των παραμέτρων για την εκτίμηση της εδαφικής επικινδυνότητας βασίζεται σε επιστημονικές μελέτες που αναδεικνύουν τη σημασία συγκεκριμένων παραγόντων στην τρωτότητα και τον κίνδυνο ρύπανσης των υπόγειων υδάτων. Σύμφωνα με τις Τεχνικές Προδιαγραφές Μελετών Τρωτότητας / Ρυπαντικής Επιδεκτικότητας Υπόγειων Υδροφορέων του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, οι κύριοι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη περιλαμβάνουν: Κλιματικές συνθήκες, όπως η βροχόπτωση και η κατανομή της που επηρεάζουν την ποσότητα νερού που διεισδύει στο έδαφος, επηρεάζοντας την τρωτότητα των υδροφορέων; Γεωλογικά χαρακτηριστικά, όπως η σύσταση και η δομή των γεωλογικών σχηματισμών που καθορίζουν τη διαπερατότητα και την ικανότητα αποθήκευσης νερού; Χρήσεις γης, όπως η γεωργία και η βιομηχανία, που μπορούν να συμβάλουν στη ρύπανση των υπόγειων υδάτων και Υδρογεωλογικές συνθήκες, όπως το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα και η υδραυλική αγωγιμότητα που επηρεάζουν την ευπάθεια των υδροφορέων. Η ενσωμάτωση αυτών των παραμέτρων σε ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (GIS) επιτρέπει τη

δημιουργία θεματικών χαρτών που αποτυπώνουν την εδαφική επικινδυνότητα με ακρίβεια. Η σταθμισμένη προσέγγιση, όπου κάθε παράμετρος λαμβάνει συγκεκριμένο βάρος ανάλογα με τη σημασία της, διευκολύνει την ολιστική εκτίμηση του κινδύνου. Αυτή η μεθοδολογία έχει εφαρμοστεί σε διάφορες περιοχές, παρέχοντας αξιόπιστα αποτελέσματα για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων και την προστασία του περιβάλλοντος.

Η παρούσα μελέτη λαμβάνει υπόψη 15 παραμέτρους και αποτελεί εφαρμογή της ερευνητικής εργασίας των [Kourgialas & Karatzas, 2015], η οποία παρουσίασε μια νέα ολοκληρωμένη μέθοδο αξιολόγησης του κινδύνου ρύπανσης των υπόγειων υδάτων, βασισμένη στην αλληλεπίδραση μεταξύ γεωγενών και ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, χρησιμοποιώντας αναλυτικά και αριθμητικά εργαλεία εντός πλαισίου GIS. Αυτή η μεθοδολογία ενσωματώνει 15 διαφορετικούς παράγοντες κατά μήκος της διαδρομής του ρυπαντικού φορτίου από την πηγή έως τα υπόγεια ύδατα σε ένα ενιαίο μοντέλο GIS που ενσωματώνει τον κίνδυνο ρύπανσης υπόγειων υδάτων και όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για τη μείωση του επιπέδου αβεβαιότητας στα αποτελέσματα. Οι 15 παράμετροι είναι η βροχόπτωση, οι χρήσεις γης, η συσσώρευση απορροής, οι σημειακές πηγές ρύπανσης, η εγγύτητα σε ποτάμια, η εγγύτητα σε οδικό δίκτυο, οι κατοικημένες περιοχές, οι περιοχές οικολογικής προστασίας, οι ζώνες αλμυρού νερού του εδάφους, η τεχνητή αποστράγγιση, η υδατική χωρητικότητα του εδάφους, το βάθος εδάφους, το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα, οι γεωλογικοί σχηματισμοί του υπεδάφους και η ταχύτητα ροής υπεδάφους.

Η επιλογή των 15 παραμέτρων που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη μεθοδολογία συνδέεται στενά με την ευπάθεια και τον κίνδυνο που παρουσιάζουν τα υπόγεια ύδατα και βασίζεται στην επιστημονική προσέγγιση των [Kourgialas & Karatzas, 2015]. Η προτεινόμενη μέθοδος συνδυάζει τους παράγοντες τρωτότητας και κινδύνου σε μία ενιαία ανάλυση, χωρίς να είναι απαραίτητη η δημιουργία δύο ξεχωριστών χαρτών για την εκτίμηση της εδαφικής επικινδυνότητας. Επιπλέον, η μεθοδολογία αυτή επιτρέπει τη δυναμική ενσωμάτωση παραμέτρων σε μια γραμμική αλγεβρική συνάρτηση, διευκολύνοντας τη δημιουργία ενός ενιαίου χάρτη επικινδυνότητας. Στην επιστημονική προσέγγιση ανέπτυξαν και εφάρμοσαν τη μεθοδολογία αυτή σε ολόκληρο το νησί της Κρήτης, παρέχοντας ένα ισχυρό επιστημονικό υπόβαθρο που υποστηρίζει τη χρήση των συγκεκριμένων παραγόντων. Παράλληλα, η μεθοδολογία αυτή επιτρέπει την ενσωμάτωση παραμέτρων που δεν μπορούν να ταξινομηθούν ξεκάθαρα στις δύο μεταβλητές της κλασικής εξίσωσης επικινδυνότητας, όπως αυτές που αφορούν πολυπαραγοντικά φαινόμενα ρύπανσης.

Στην παρούσα μελέτη εκτίμησης επικινδυνότητας η βροχόπτωση, οι μη συγκεντρωμένες χρήσεις γης, η συσσώρευση απορροής, η εγγύτητα σε ποτάμια, η υδατοϊκανότητα του εδάφους, το βάθος του εδάφους, η γεωλογία και η ταχύτητα διαρροής είναι παράγοντες που σχετίζονται με την τρωτότητα, ενώ η σημειακή ρύπανση, η εγγύτητα σε αυτοκινητοδρόμους, οι κατοικημένες περιοχές, οι προστατευόμενες περιοχές και η τεχνητή αποστράγγιση είναι παράγοντες που επηρεάζουν τον κίνδυνο των υπόγειων υδάτων.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η αξιοποίηση προηγμένων αναλυτικών και αριθμητικών εργαλείων σε περιβάλλον GIS, που επιτρέπουν μια ολοκληρωμένη και ακριβή εκτίμηση της επικινδυνότητας σε σύνθετα υδρογεωλογικά περιβάλλοντα, όπως οι Μεσογειακές ακτογραμμές. Στο πλαίσιο αυτό, αναπτύχθηκε για πρώτη φορά ένας χάρτης επικινδυνότητας υπόγειων υδάτων για την Κρήτη, λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του νησιού, καθώς και την πολυπλοκότητα των τοπικών υδροφορέων. Παράλληλα, εισήχθη για πρώτη φορά μέσω GIS ο συντελεστής ταχύτητας διήθησης του υδροφόρου ορίζοντα, ένας κρίσιμος παράγοντας για την εκτίμηση της επικινδυνότητας ρύπανσης, ο οποίος μπορεί να υπολογιστεί μέσω αριθμητικών διαδικασιών στο GIS. Επιπλέον, η μέθοδος επικυρώθηκε με δεδομένα ποιότητας υπόγειων υδάτων για διάφορους ρύπους που ανιχνεύθηκαν σε γεωτρήσεις παρακολούθησης, οι οποίες καλύπτουν ολόκληρη την Κρήτη. Η διαδικασία αυτή αποτελεί ένα ουσιαστικό στάδιο για την αξιόπιστη εκτίμηση της επικινδυνότητας ρύπανσης των υπόγειων υδάτων, παρότι δεν περιλαμβάνεται συχνά στη διεθνή βιβλιογραφία.

5.2 Μεθοδολογία δημιουργίας χαρτών

Η εκτίμηση της εδαφικής επικινδυνότητας του εδάφους πλαισιώνεται κατηγοριοποιώντας την περιοχή μελέτης σε πέντε βαθμίδες κινδύνου: πολύ χαμηλή-χαμηλή-μεσαία-υψηλή-πολύ υψηλή. Ο τελικός χάρτης διαβάθμισης της εδαφικής επικινδυνότητας βασίζεται στις 15 παραμέτρους, κάθε μία από τις οποίες λαμβάνει συγκεκριμένο βάρος ανάλογα με τη σημασία της. Για κάθε παράμετρο δημιουργείται ένας θεματικός χάρτης μέσω του Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών (GIS), αποτυπώνοντας τον αντίστοιχο βαθμό κινδύνου στα διάφορα τμήματα της περιοχής μελέτης με τη μέθοδο ταξινόμησης (classification method). Η εκτίμηση της συνολικής επικινδυνότητας απαιτεί τη συνδυαστική ανάλυση όλων των παραγόντων, καθώς η μεμονωμένη αξιολόγηση καθενός εξ αυτών δεν επαρκεί για την πλήρη αποτύπωση της χωρικής διακύμανσης του κινδύνου. Για τον λόγο αυτό, οι θεματικοί χάρτες συνδυάζονται γραμμικά και σταθμίζονται αναλογικά με το βάρος επιρροής κάθε παραμέτρου, διαμορφώνοντας τον τελικό χάρτη εδαφικής επικινδυνότητας.

Σύμφωνα με τη σταθμισμένη προσέγγιση των [Kourgialas & Karatzas, 2015], η εκτίμηση της εδαφικής επικινδυνότητας βασίζεται στη σταθμισμένη ανάλυση όλων των παραγόντων, λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση κάθε παράγοντα με όλους τους υπόλοιπους. Δεδομένου ότι η επίδραση κάθε παράγοντα διαφέρει, η συνολική εικόνα της επικινδυνότητας μπορεί να αποτυπωθεί μόνο μέσω της ολιστικής προσέγγισης, όπου η επιρροή κάθε παράγοντα σταθμίζεται κατάλληλα. Πιο αναλυτικά, η ανάλυση των [Kourgialas & Karatzas, 2015] προσδιορίζει τους συντελεστές βαρύτητας των εμπλεκόμενων παραγόντων, οι οποίοι προκύπτουν από βιβλιογραφικά δοκίμια και την προσέγγιση Delphi, διασφαλίζοντας τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια στην εκτίμηση των αριθμητικών παραμέτρων και μία λογική δομή συλλογισμού. Επιπλέον, παρουσιάζει την κύρια και τη δευτερεύουσα ή έμμεση επίδραση ενός παράγοντα σε έναν άλλο, αποδίδοντας μία τιμή επίδρασης. Για την ποσοτικοποίηση των δύο διαφορετικών τύπων επιδράσεων, αποδίδεται ένας βαθμός σε μια κύρια επίδραση και μισός βαθμός σε μια δευτερεύουσα επίδραση. Ο δείκτης ενός παράγοντα υπολογίζεται αθροίζοντας

τους βαθμούς που αντιστοιχούν στις επιδράσεις που προέρχονται από αυτόν. Για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση κάθε παράγοντα, οι δείκτες και οι συντελεστές βαρύτητας συνδυάζονται, πολλαπλασιάζοντας τον προτεινόμενο συντελεστή βαρύτητας με τον αντίστοιχο δείκτη επίδρασης, ώστε να προκύψει το συνολικό βάρος κάθε παράγοντα. Το άθροισμα όλων των επιμέρους συντελεστών βαρύτητας δίνει το συνολικό τελικό βάρος. Τέλος, η συμβολή κάθε παράγοντα στον κίνδυνο ρύπανσης των υπόγειων υδάτων υπολογίζεται ως ο λόγος του συνολικού βάρους του παράγοντα προς το συνολικό τελικό βάρος. Ο λόγος αυτός εκφράζεται ως ποσοστό και παρουσιάζεται στην τελευταία στήλη του Πίνακα 5.2.1 και 5.2.2.

Factor	Domain of effect	Descriptive level (Groundwater risk)	Proposed weight of effect (a)	Rate (b)	Weighted rating (a × b)	Total weight	Percentage (%)
(1) Rainfall (mm/year)	1.240–1.742 988–1.239 795–987 637–794 444–636	Very high High Moderate Low Very low	10 8 5 2 1	7	70 56 35 14 7	182	8.28
(2) Non-concentrated land uses	Urban & bare area Intensive agricultural land & discontinuous urban fabric Other agricultural land & cropland and pasture Woodland & natural vegetation Mixed forest land	Very high High Moderate Low Very low	10 8 5 2 1	10	100 80 50 20 10	260	11.83
(3) Runoff accumulation (pixels)	2.009–3.597 982–2.008 422–981 106–421 0–105	Very high High Moderate Low Very low	10 8 5 2 1	8.5	85 68 42.5 17 8.5	221	10.05
(4) Point source contamination	Point source contamination Non-point source contamination	Very high Very low	10 1	5	50 5	55	2.50
(5) Proximity to rivers (m); main rivers: MR, tributaries: T	<200 (MR) 200–400 (MR) 400–600 (MR) 600–800 (MR) >800 (MR)	<40 (T) 40–60 (T) 60–120 (T) 120–160 (T) >160 (T)	Very high High Moderate Low Very low	10 8 5 2 1	182 56 35 14 7	182	8.28
(6) Proximity to highways (m); national highways: NH, secondary roads: SR	<100 (NH) 100–200 (NH) 200–300 (NH) 300–400 (NH) >400 (NH)	<20 (SR) 20–40 (SR) 40–60 (SR) 60–80 (SR) >80 (SR)	Very high High Moderate Low Very low	10 8 5 2 1	104 32 20 8 4	104	4.73
(7) Residential areas (m ²)	2.7545–14.098 1.274–2.754 541–1.273 132–540 0–131	Very high High Moderate Low Very low	10 8 5 2 1	5.5	55 44 27.5 11 5.5	143	6.50
(8) Protected areas	Non-environmentally protected areas Environmentally protected areas	Very high Very low	10 1	5.5	55 5.5	60.5	2.75
(9) Saltwater zones	Saltwater intrusion zones Non-saltwater intrusion zones	Very high Very low	10 1	7	70 7	77	3.50
(10) Artificial drainage	Artificial drainage area Non-artificial drainage area	Very high Very low	10 1	6.5	65 6.5	71.5	3.25

(Continued)

Πίνακας 5.2.1 – Ανάλυση των 15 παραμέτρων [Kourgialas & Karatzas, 2015]

Factor	Domain of effect	Descriptive level (Groundwater risk)	Proposed weight of effect (a)	Rate (b)	Weighted rating (a × b)	Total weight	Percentage (%)
(11) Soil water capacity (mm/m)	140–190 100–140 >100	High Moderate Low	8 5 2	7	56 35 14	112	5.09
(12) Soil depth (cm)	<40 40–80 80–120 >120	Very low Very high High Moderate	1 10 8 5	7	7 70 56 35	171.5	7.80
(13) Depth to water table (m)	0–48 49–122 123–200 201–281 282–427	Very low – low Very high High Moderate Low	1.5 10 8 5 2	8	10.5 80 64 40 16	208	9.46
(14) Geology	Karstic area & limestones Gravels & conglomerates Sands & fine grain content Clays	Very high High Moderate Low	10 8 5 2	9.5	95 76 47.5 19	247	11.23
(15) Seepage velocity (m/s)	Impermeable layer & flysch 0.020759117–0.462658227 0.000064197–0.020759117 0.000002332–0.000064197 <0.000002332 ~0	Very low Very high High Moderate Low Very low	1 10 8 5 2 1	4	9.5 40 32 20 8 4	104	4.73
SUM						2198.5	100.00

Πίνακας 5.2.2 – Ανάλυση των 15 παραμέτρων [Kourgialas & Karatzas, 2015]

Έπειτα, οι 15 χάρτες που δημιουργήθηκαν με τη μέθοδο ταξινόμησης (classification method) συνδυάστηκαν εφαρμόζοντας την προσέγγιση της σταθμισμένης γραμμικής σύνθεσης σε περιβάλλον GIS, επιτρέποντας την αλληλουχία διαδικασιών που συνδέονται μεταξύ τους και εκτελούνται ταυτόχρονα. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, κάθε παράγοντας (θεματική στρώση) πολλαπλασιάζεται με το αντίστοιχο ποσοστό συμβολής του. Το άθροισμα όλων των παραγόντων αποδίδει το συνολικό κίνδυνο ρύπανσης των υπόγειων υδάτων (1).

$$S = \sum w_i x_i \quad (1) \text{ όπου,}$$

S = τελικός κίνδυνος ρύπανσης των υπογείων υδάτων,

w_i = ποσοστό συμβολής του παράγοντα i

x_i = ο δείκτης του παράγοντα i

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, οι συντελεστές βαρύτητας των παραγόντων, εκφρασμένοι σε ποσοστά (τελευταία στήλη του Πίνακα 1^α και 1^β), αντιστοιχήθηκαν με εκείνους της έρευνας των [Kourgialas & Karatzas, 2015]. Οι 15 χάρτες που προέκυψαν με τα δεδομένα της περιοχής μελέτης από τη μέθοδο ταξινόμησης συνδυάστηκαν στο περιβάλλον GIS χρησιμοποιώντας την εξίσωση 1. Επιπλέον, όλοι οι θεματικοί χάρτες γεωαναφέρθηκαν στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς ΕΓΣΑ '87. Στην περίπτωση των αριθμητικών παραγόντων, προσδιορίστηκαν πέντε διαφορετικές κλάσεις κινδύνου με τη μέθοδο των Natural Breaks, η οποία επιτρέπει τον στατιστικό καθορισμό των κλάσεων εντοπίζοντας τα γειτονικά ζεύγη χαρακτηριστικών μεταξύ των οποίων υπάρχει σημαντική διαφορά στις τιμές των δεδομένων. Αντίθετα, στην περίπτωση των μη αριθμητικών παραγόντων, η ταξινόμηση βασίζεται κυρίως στην επίδραση του κάθε παράγοντα στη διαδικασία ρύπανσης του υπόγειου υδροφορέα.

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό ArcMap, καθώς οι απαιτούμενες διαδικασίες επικεντρώθηκαν στη δημιουργία και επεξεργασία αρχείων τύπου Shapefile και Raster. Συγκεκριμένα, για την εισαγωγή και διαχείριση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν αρχεία Shapefile, ενώ για την ανάλυση αριθμητικών πληροφοριών αξιοποιήθηκαν αρχεία Raster. Τα αρχεία Shapefile είναι διανυσματικού τύπου και περιλαμβάνουν γεωγραφικά και περιγραφικά δεδομένα, τα οποία μπορούν να τροποποιηθούν μέσω του περιβάλλοντος ArcView. Αυτά τα αρχεία δύνανται να αποθηκεύουν είτε σημεία (points), είτε γραμμές (lines), είτε πολύγωνα (polygons). Από την άλλη, τα ψηφιδωτά δεδομένα (raster) χρησιμοποιούνται για την αποτύπωση συνθηκών και ιδιοτήτων του χώρου. Με τα raster συστήματα, η απεικόνιση των οντοτήτων και των περιγραφικών χαρακτηριστικών που τα συνοδεύουν, ενοποιούνται σε ένα αρχείο δεδομένων. Κάθε ψηφίδα παίρνει μια αριθμητική τιμή η οποία απεικονίζει είτε ένα κωδικό μιας οντότητας, είτε τον κωδικό ενός ποιοτικού χαρακτηριστικού, είτε την τιμή ενός ποσοτικού μεγέθους. Τα raster συστήματα επιτρέπουν την ανάλυση και διαχείριση δεδομένων που αφορούν συνεχή φαινόμενα στο χώρο. Στο πλαίσιο αυτής της μελέτης, η διάρθρωση των δεδομένων raster έγινε σε κάρναβο με μέγεθος κελιού 5×5 μέτρα, διασφαλίζοντας την απαιτούμενη ακρίβεια για την εκτέλεση των χωρικών αναλύσεων.

5.3 Παρουσίαση δεδομένων

Βροχόπτωση

Η βροχόπτωση αποτελεί έναν βασικό παράγοντα που επηρεάζει τη μόλυνση των υπόγειων υδάτων, καθώς το νερό που διεισδύει το έδαφος μεταφέρει υδατοδιαλυτούς ρύπους μέσω της έκπλυσης. Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η συνολική ποσότητα βροχόπτωσης που καταγράφεται στην περιοχή μελέτης. Για τη δημιουργία του χάρτη βροχόπτωσης, συλλέχθηκαν μηνιαία δεδομένα από τέσσερις βροχομετρικούς σταθμούς που βρίσκονται πλησίον της περιοχής μελέτης: Τζερμιάδων Λασιθίου, Ποταμών Λασιθίου, Πεζών Ηρακλείου και Ανατολικού Ηρακλείου. Οι σταθμοί επιλέχθηκαν λόγω της εγγύτητάς τους στην περιοχή μελέτης (με μέγιστη απόσταση 18 χιλιομέτρων) και της διαθεσιμότητας δεδομένων μηνιαίας βροχόπτωσης για τουλάχιστον τρία έτη. Οι βροχογράφοι βρίσκονται σε υψόμετρα που κυμαίνονται από 0 έως 1000 m. Η διαδικασία ανάλυσης πραγματοποιήθηκε μέσω του περιβάλλοντος GIS, όπου αρχικά εισήχθησαν τα δεδομένα των σταθμών σε μορφή σημειακού αρχείου. Το αρχείο αυτό περιείχε τη συνολική μηνιαία κατανομή της βροχόπτωσης για κάθε σταθμό σε χιλιοστά (mm). Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος IDW (Inverse Distance Weighted) για τη δημιουργία καννάβου που απεικονίζει τη χωρική διακύμανση της βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης, επιτρέποντας έτσι την οπτικοποίηση και την περαιτέρω ανάλυση της επίδρασής της στην ευπάθεια των υπόγειων υδάτων.

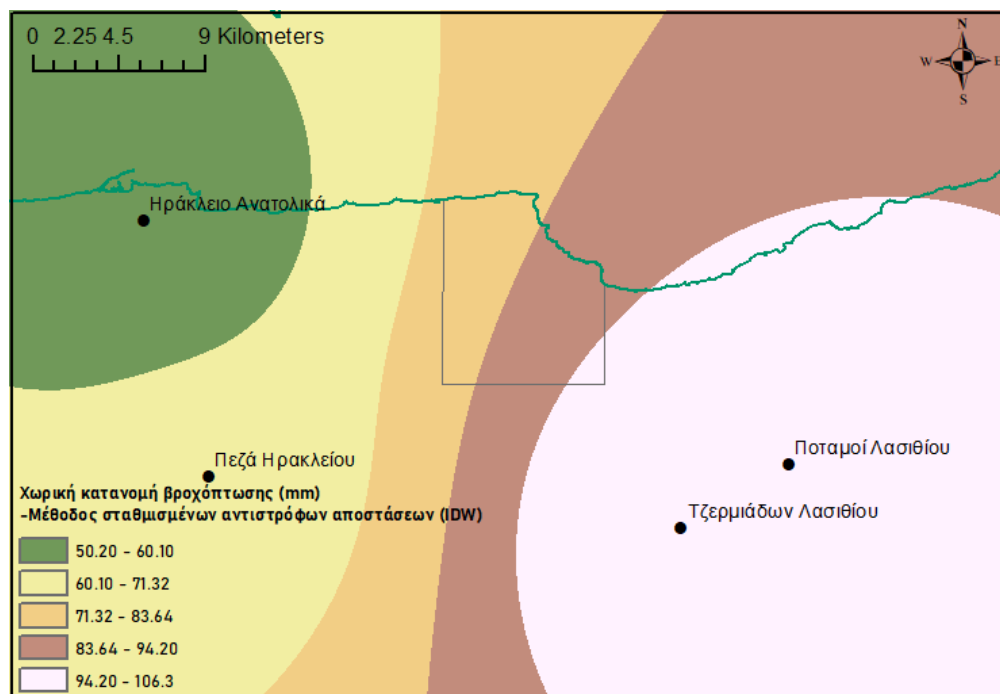
Η μέθοδος των σταθμισμένων αντιστρόφων αποστάσεων (Inverse Distance Weighting - IDW) βασίζεται στην παραδοχή ότι τα χαρακτηριστικά των σημείων που βρίσκονται κοντά μεταξύ τους παρουσιάζουν μεγαλύτερη ομοιότητα σε σύγκριση με εκείνα που απέχουν μεγαλύτερη απόσταση. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου IDW, η τιμή ενός χαρακτηριστικού σε ένα σημείο εκτός του δείγματος προβλέπεται με βάση τις τιμές των γειτονικών σημείων του δείγματος. Τα σημεία που βρίσκονται πλησιέστερα στο σημείο πρόβλεψης ασκούν μεγαλύτερη επιρροή στην υπολογιζόμενη τιμή σε σχέση με εκείνα που απέχουν περισσότερο. Με άλλα λόγια, η μέθοδος προϋποθέτει ότι η επίδραση κάθε σημείου του δείγματος μειώνεται καθώς αυξάνεται η απόστασή του από το σημείο πρόβλεψης. Έτσι, τα κοντινότερα σημεία λαμβάνουν μεγαλύτερη βαρύτητα στη διαδικασία παρεμβολής συγκριτικά με τα πιο απομακρυσμένα σημεία, διαμορφώνοντας μια προβλεπόμενη τιμή που αντανακλά την τοπική κατανομή των δεδομένων [Esri, 2022].

Βροχομετρικός σταθμός	Βροχόπτωση (mm)
Τζερμιάδων Λασιθίου	106,3
Ποταμοί Λασιθίου	98,9
Πεζά Ηρακλείου	62,8
Ηράκλειο Ανατολικά	50,2

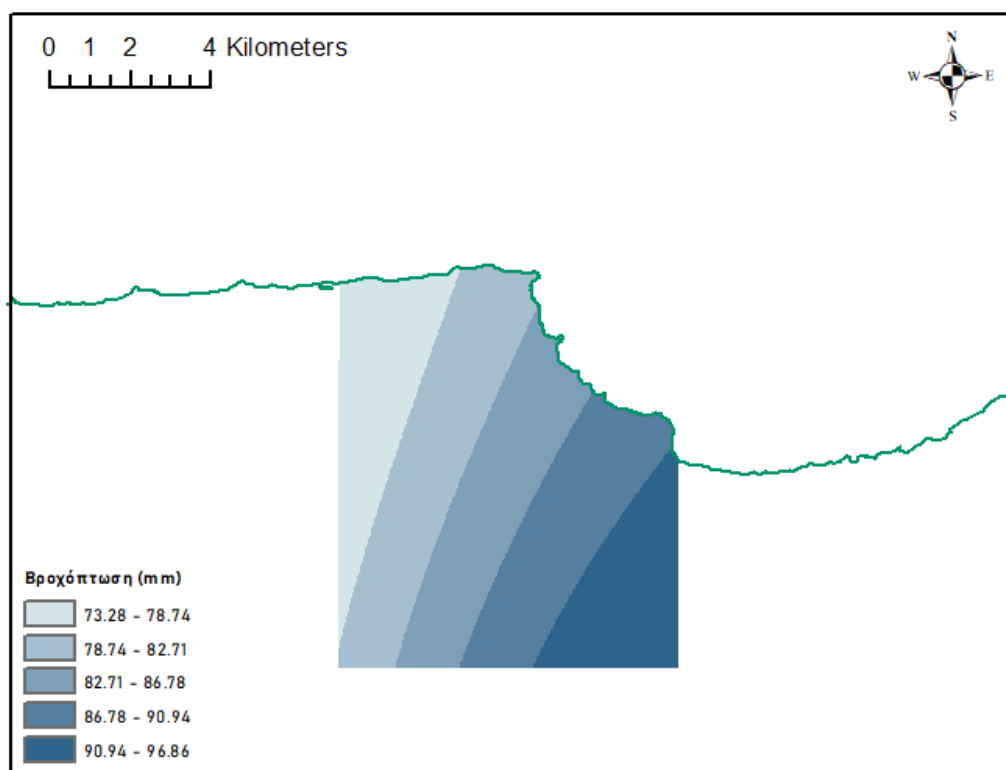
Πίνακας 5.3.1 – Βροχομετρικοί σταθμοί

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει τη χωρική κατανομή της βροχόπτωσης στην ευρύτερη περιοχή, όπως προέκυψε από τη μέθοδο των σταθμισμένων αντιστρόφων αποστάσεων (IDW),

καθώς και τις τοπογραφικές θέσεις των βροχομετρικών σταθμών. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η κατανομή της βροχόπτωσης εστιασμένη στην περιοχή μελέτης, όπου το αρχικό αρχείο προσαρμόστηκε στα όριά της με τη χρήση της λειτουργίας Clip (Analysis).



Εικόνα 5.3.1 – Χωρική κατανομή της βροχόπτωσης (IDW)



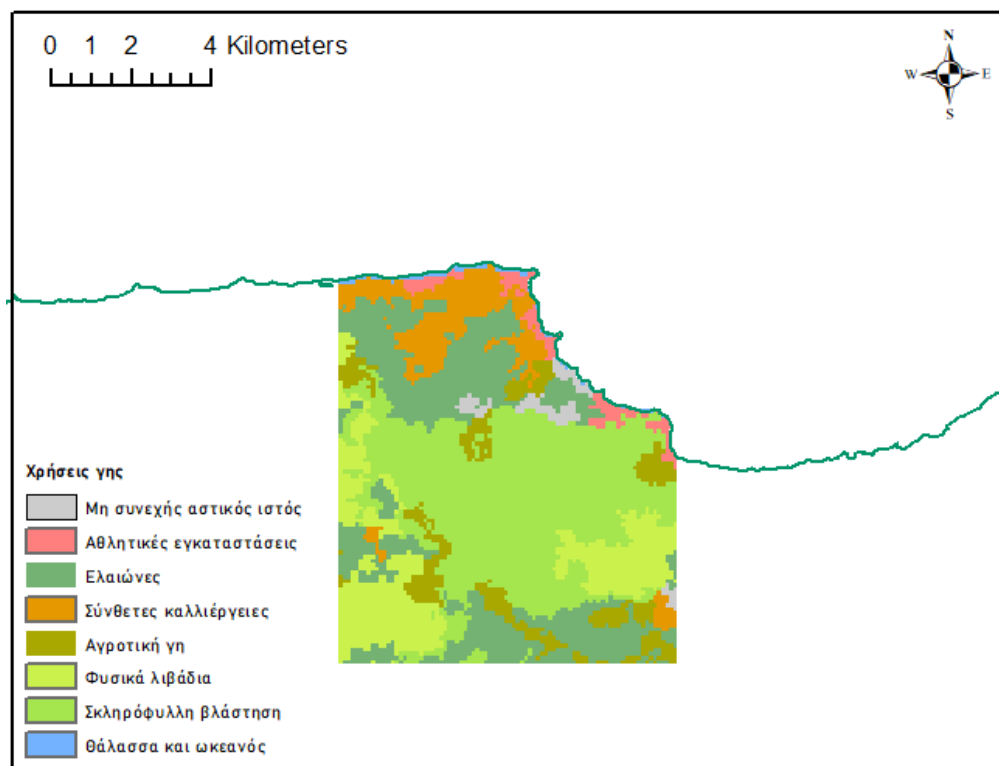
Εικόνα 5.3.2 – Χάρτης βροχόπτωσης της περιοχής μελέτης

Χρήσεις γης

Αυτός ο παράγοντας περιλαμβάνει όλους τους τύπους χρήσεων γης, με εξαίρεση τη ρύπανση από σημειακές πηγές, και συνδέεται άμεσα με τη φυτοκάλυψη. Η φυτοκάλυψη ρυθμίζει τόσο την ποσότητα των βροχοπτώσεων που απορροφάται από το έδαφος όσο και τον χρόνο που απαιτείται για να φτάσει το νερό στην επιφάνειά του, επηρεάζοντας έτσι τις οδούς μεταφοράς ρύπων. Ο θεματικός χάρτης των χρήσεων γης δημιουργήθηκε με βάση τα δεδομένα που συγκέντρωσαν οι [Kourgialas & Karatzas, 2015] στο πλαίσιο της ερευνητικής τους εργασίας, αξιοποιώντας αεροφωτογραφίες και τη βάση δεδομένων κάλυψης γης Corine, η οποία παρέχεται από την Ευρωπαϊκή Περιβαλλοντική Υπηρεσία.

Γενική Κατηγορία	Χρήσεις Γης	Κωδικός
Τεχνητές επιφάνειες	Μη συνεχής αστικός ιστός	2
Τεχνητές επιφάνειες	Αθλητικές και ψυχαγωγικές εγκαταστάσεις	11
Γεωργικές εκτάσεις	Ελαιώνες	17
Γεωργικές εκτάσεις	Πολύπλοκα πρότυπα καλλιέργειας	20
Γεωργικές εκτάσεις	Γη που καταλαμβάνεται κυρίως από τη γεωργία, με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	21
Δασικές και ημιφυσικές περιοχές	Φυσικά λιβάδια	26
Δασικές και ημιφυσικές περιοχές	Σκληρόφυλλη βλάστηση	28
Υδάτινα σώματα	Θάλασσα και ωκεανός	44

Πίνακας 5.3.2 – Χρήσεις Γης



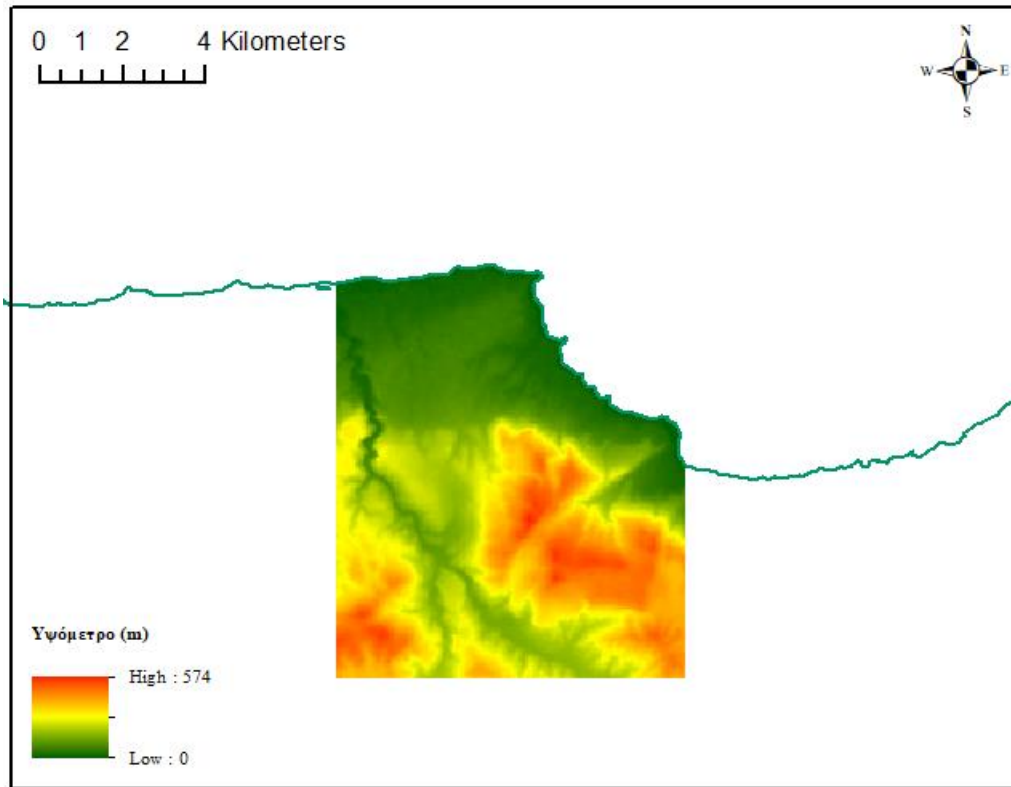
Εικόνα 5.3.3 – Χάρτης χρήσεων γης της περιοχής μελέτης

Συσσώρευση απορροής

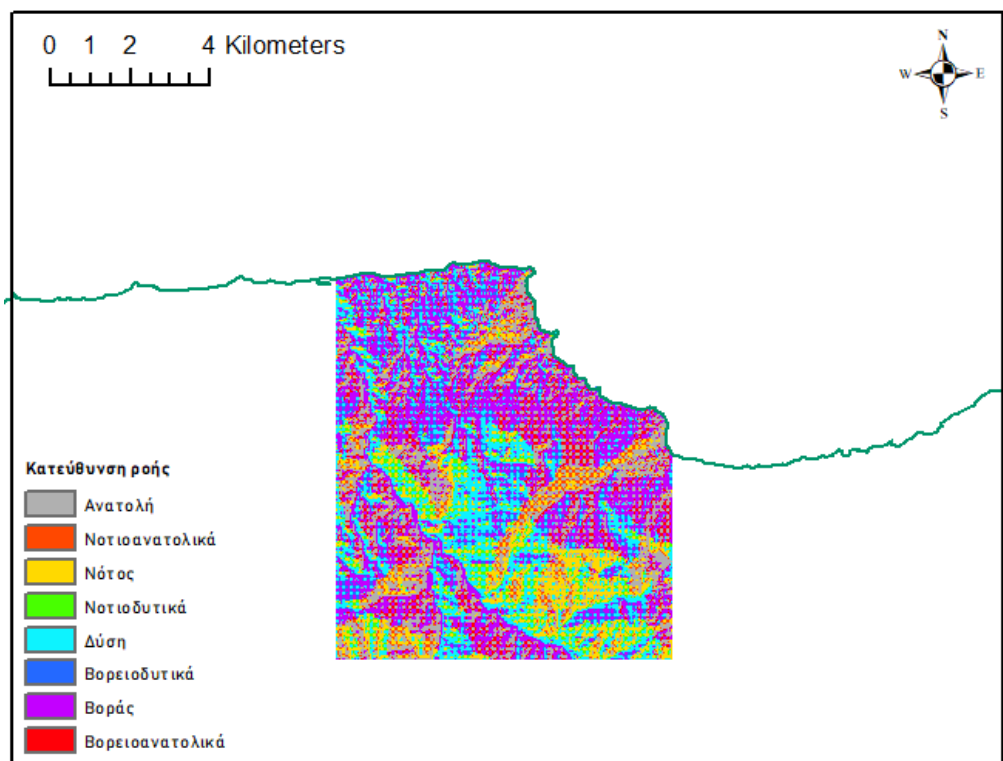
Η συσσώρευση απορροής αποτελεί βασικό παράγοντα για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς των ρύπων, καθώς καθορίζει εάν θα παραμείνουν στην επιφάνεια του εδάφους αρκετό χρόνο ώστε να διεισδύσουν στα υπόγεια ύδατα ή αν θα απομακρυνθούν μέσω της απορροής. Για τον υπολογισμό της συσσώρευσης απορροής, δημιουργήθηκε ένα Ψηφιακό Υψομετρικό Μοντέλο (DEM) με χωρική ανάλυση $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ κατά την ερευνητική εργασία των [Kourgialas & Karatzas, 2015]. Το μοντέλο αυτό βασίστηκε στον χάρτη κλίσης που προέκυψε από το εργαλείο 3D Analyst. Ο χάρτης συγκέντρωσης ροής στην παρούσα εργασία δημιουργήθηκε μέσω του χάρτη DEM με την υψομετρική κατανομή της περιοχής μελέτης και τη χρήση των εργαλείων Πλήρωσης (Fill), Κατεύθυνση Ροής (Flow Direction) και Συσσώρευση Ροής (Flow Accumulation). Ο υπολογισμός της κατεύθυνσης ροής δείχνει την πορεία που θα ακολουθήσει το νερό μετά από βροχόπτωση, με την υπόθεση ότι κινείται πάντα προς την κατεύθυνση της μεγαλύτερης κλίσης. Η συσσώρευση ροής, από την άλλη, υπολογίζει την ποσότητα του νερού που καταλήγει σε κάθε κελί, λαμβάνοντας υπόψη τη ροή από τις ανάντη περιοχές.

Το τελικό αποτέλεσμα της διαδικασίας Συσσώρευσης Ροής είναι ένα ράστερ αρχείο που απεικονίζει τη συγκέντρωση της ροής σε κάθε σημείο, βασισμένο στη συνολική ροή των κυψελών που καταλήγουν σε αυτό. Οι περιοχές με υψηλές τιμές συσσώρευσης απορροής υποδηλώνουν ζώνες συγκεντρωμένης ροής, όπου υπάρχει αυξημένος κίνδυνος ρύπανσης των υπόγειων υδάτων. Όσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση απορροής σε μια περιοχή, τόσο

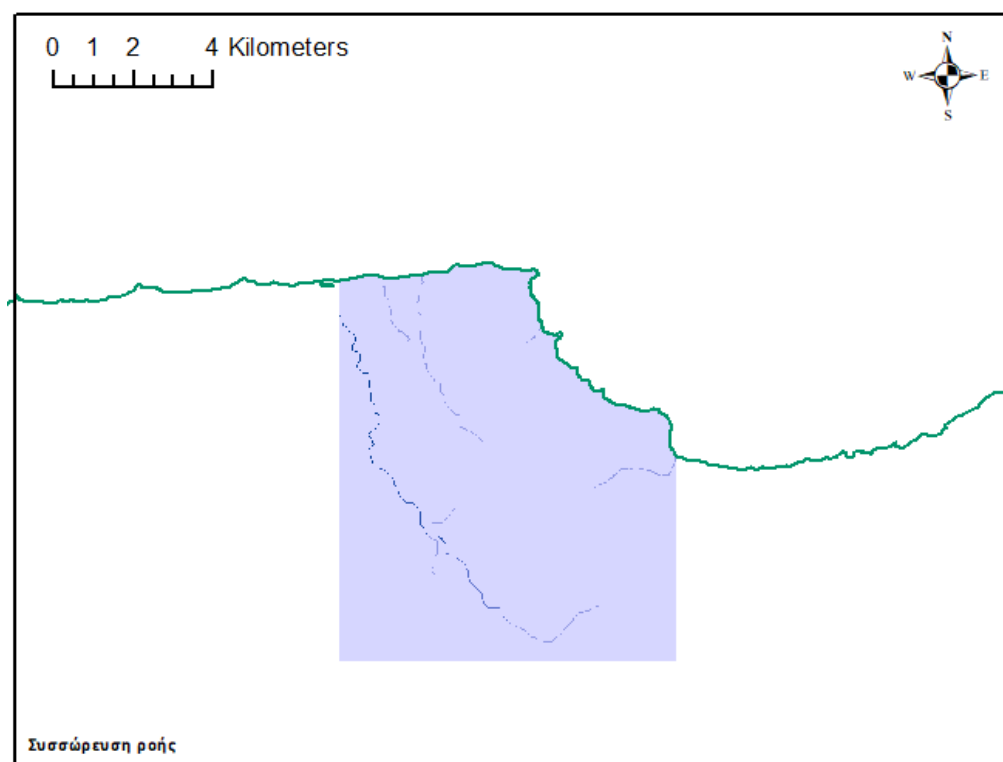
αυξάνεται η πιθανότητα οι ρύποι να παραμείνουν για επαρκή χρόνο ώστε να διαπεράσουν το έδαφος, επηρεάζοντας έτσι την ποιότητα των υπόγειων υδάτων.



Εικόνα 5.3.4 – Χάρτης υψομέτρου της περιοχής μελέτης



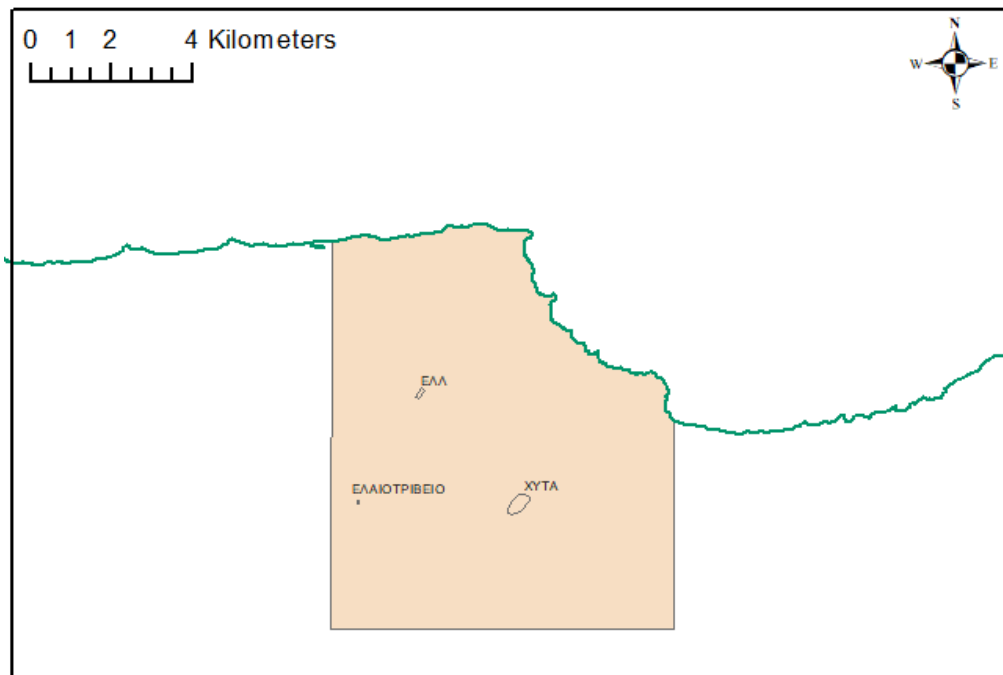
Εικόνα 5.3.5 – Χάρτης Κατεύθυνση Ροής της περιοχής μελέτης



Εικόνα 5.3.6 – Χάρτης Συσσώρευση Ροής της περιοχής μελέτης

Σημειακές πηγές ρύπανσης

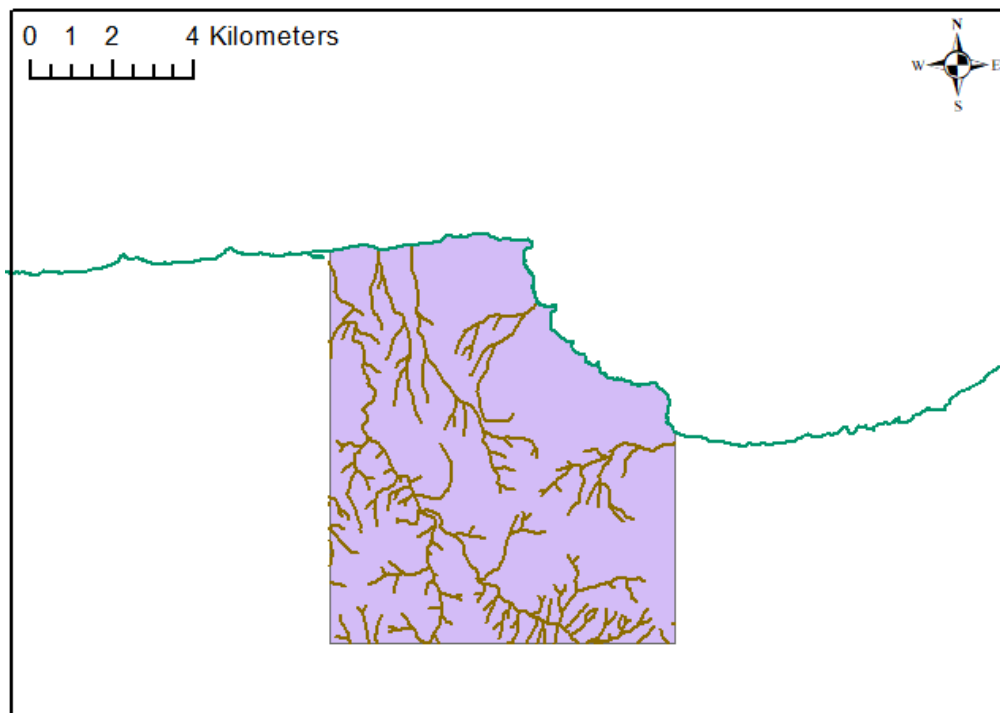
Η ρύπανση από σημειακές πηγές προέρχεται από ανθρώπινες δραστηριότητες που ενδέχεται να επιβαρύνουν τα υπόγεια ύδατα, εάν δε ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα προστασίας. Σύμφωνα με την ερευνητική εργασία των [Kourgialas & Karatzas, 2015], στην Κρήτη εντοπίζονται ορισμένες βασικές δραστηριότητες που σχετίζονται με τη ρύπανση των υπόγειων υδάτων, όπως τα θερμοκήπια, οι χώροι υγειονομικής ταφής απορριμμάτων, οι βιομηχανικές περιοχές, τα αεροδρόμια, οι δεξαμενές πετρελαίου, η κεντρική μονάδα διάθεσης αποβλήτων ελαιοτριβείων και τα λιμάνια. Στην περιοχή μελέτης, οι κύριες σημειακές πηγές ρύπανσης περιλαμβάνουν τον Χώρο Υγειονομικής Ταφής Αποβλήτων του δήμου Χερσονήσου, ένα ελαιοτριβείο κοντά στο Καλό Χωριό και μια Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων μεταξύ των χωριών Αγριανά και Χερσονήσος. Ο προσδιορισμός αυτών των περιοχών πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του εργαλείου Polygon, ενώ τα δεδομένα ενσωματώθηκαν στην περιοχή μελέτης για περαιτέρω ανάλυση. Ο υπολογισμός του συνολικού εμβαδού κάθε σημειακής πηγής πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του εργαλείου Polygon, ενώ όλες οι σημειακές πηγές συνδυάστηκαν χωρικά με την περιοχή μελέτης για την περαιτέρω ανάλυση.



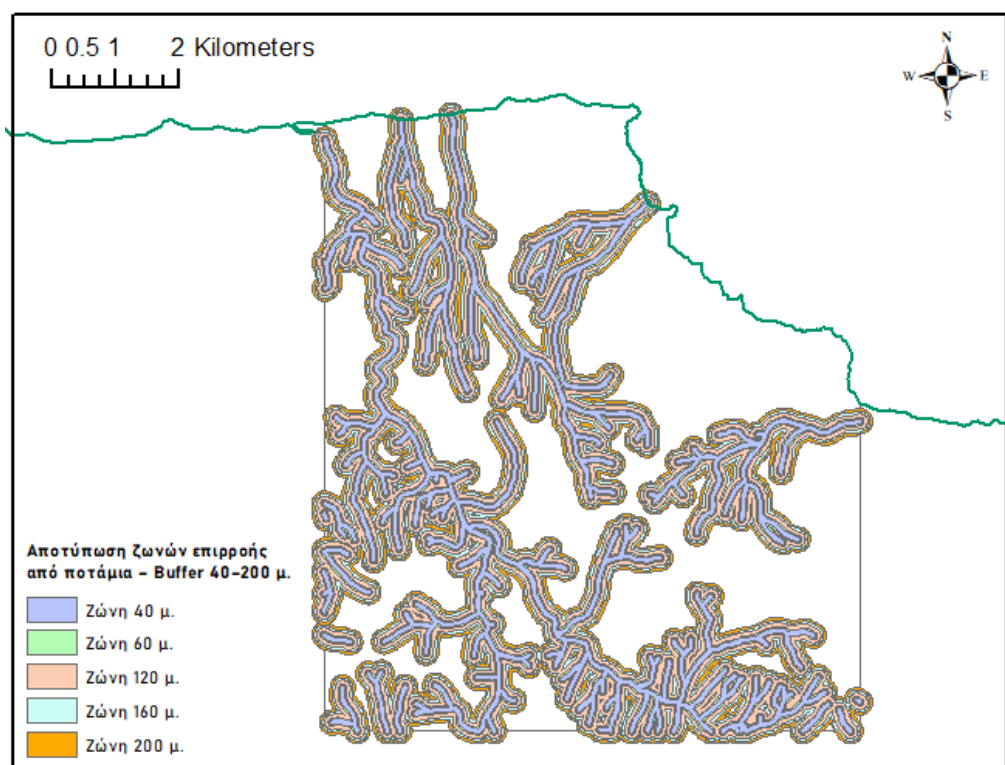
Εικόνα 5.3.7 – Χάρτης σημειακών πηγών ρύπανσης της περιοχής μελέτης

Εγγύτητα σε ποτάμια

Κάθε ποταμός μπορεί να λειτουργήσει ως τελικός αποδέκτης επεξεργασμένων ή ανεπεξέργαστων λυμάτων, γεγονός που καθιστά τους υδροφορείς κοντά στις κοίτες ιδιαίτερα ευάλωτους στη ρύπανση, ειδικά όταν υπάρχει υδραυλική σύνδεση. Για τον υπολογισμό της εγγύτητας στα ποτάμια της περιοχής μελέτης, χρησιμοποιήθηκε το αναλυτικό εργαλείο Buffer στο λογισμικό GIS, το οποίο δημιούργησε ζώνες επιρροής σε συγκεκριμένες αποστάσεις. Το εργαλείο αυτό παράγει πολύγωνα γύρω από τα επιλεγμένα υδρογραφικά στοιχεία, λαμβάνοντας υπόψη κάθε μία από τις κορυφές του χαρακτηριστικού εισόδου, δημιουργώντας ανάλογες μετατοπίσεις buffer. Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, δημιουργήθηκαν ζώνες buffer για τις ακόλουθες αποστάσεις: 0-40 m, 40-60 m, 60-120 m, 120-160 m και 160-200 m. Ο κίνδυνος ρύπανσης μειώνεται προοδευτικά καθώς αυξάνεται η απόσταση από την κοίτη του ποταμού.



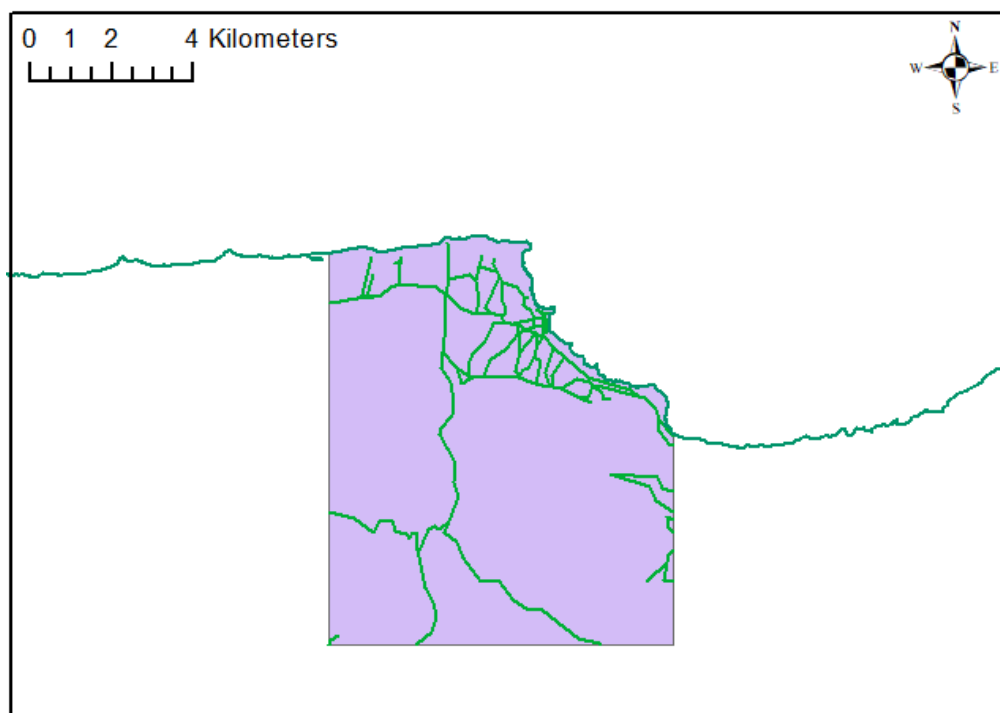
Εικόνα 5.3.8 – Χάρτης ποταμών της περιοχής μελέτης



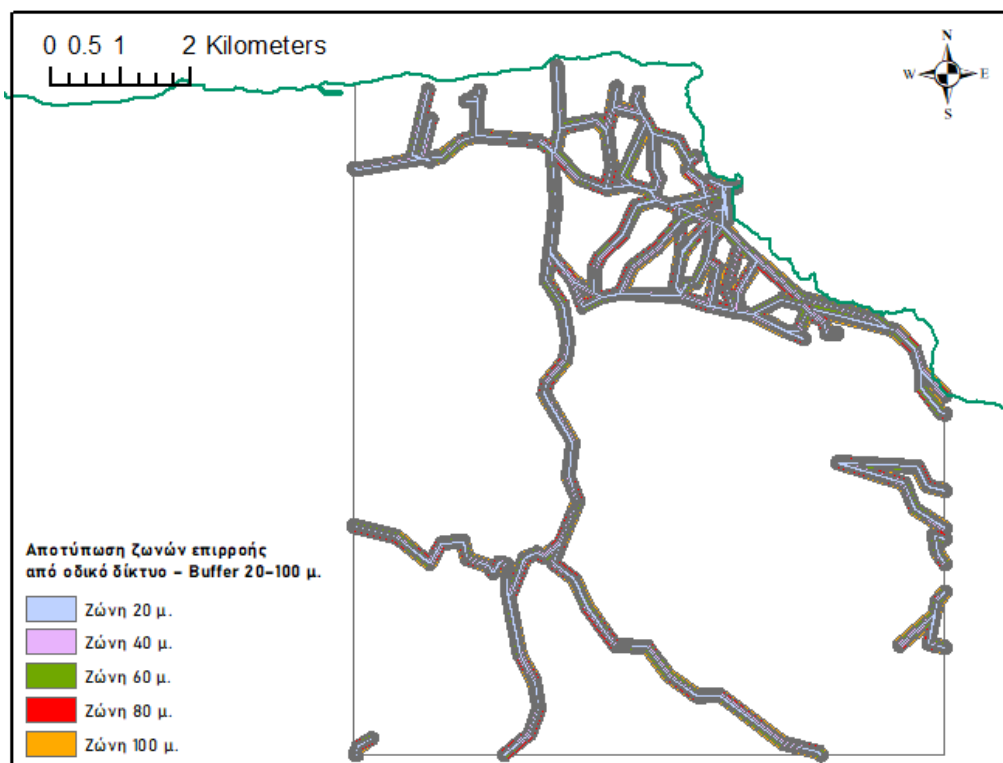
Εικόνα 5.3.9 – Ζώνες επιρροής ποταμών (Buffer)

Εγγύτητα σε οδικό δίκτυο

Η εγγύτητα στο οδικό δίκτυο μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την επικινδυνότητα ρύπανσης των υπόγειων υδάτων, καθώς οι δρόμοι λειτουργούν ως πιθανοί αγωγοί μεταφοράς ρύπων μέσω της απορροής ομβρίων υδάτων. Οι κύριοι παράγοντες που συντελούν στην επικινδυνότητα περιλαμβάνουν τις διαρροές καυσίμων και λιπαντικών από ατυχήματα, τις χημικές ουσίες και τα επικίνδυνα φορτία που μεταφέρονται από τα φορτηγά, καθώς και τα βαρέα μέταλλα που προέρχονται από τη φθορά των ελαστικών. Η βροχόπτωση παρασύρει αυτούς τους ρύπους από την επιφάνεια των δρόμων, με αποτέλεσμα τη μεταφορά τους μέσω των αποχετευτικών και στραγγιστικών δικτύων προς το έδαφος. Αντίστοιχα με την εγγύτητα σε ποτάμια, για τον υπολογισμό της εγγύτητας σε οδικό δίκτυο της περιοχής μελέτης, χρησιμοποιήθηκε το αναλυτικό εργαλείο Buffer στο λογισμικό GIS, το οποίο δημιούργησε ζώνες επιρροής σε συγκεκριμένες αποστάσεις. Το εργαλείο αυτό παράγει πολύγωνα γύρω από τα επιλεγμένα υδρογραφικά στοιχεία, λαμβάνοντας υπόψη κάθε μία από τις κορυφές του χαρακτηριστικού εισόδου, δημιουργώντας ανάλογες μετατοπίσεις buffer. Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, δημιουργήθηκαν ζώνες buffer για τις ακόλουθες αποστάσεις: 0-20 m, 20-40 m, 40-60 m, 60-80 m και 80-100 m. Ο κίνδυνος ρύπανσης μειώνεται προοδευτικά καθώς αυξάνεται η απόσταση από το οδικό δίκτυο.



Εικόνα 5.3.10 – Χάρτης οδικού δικτύου της περιοχής μελέτης



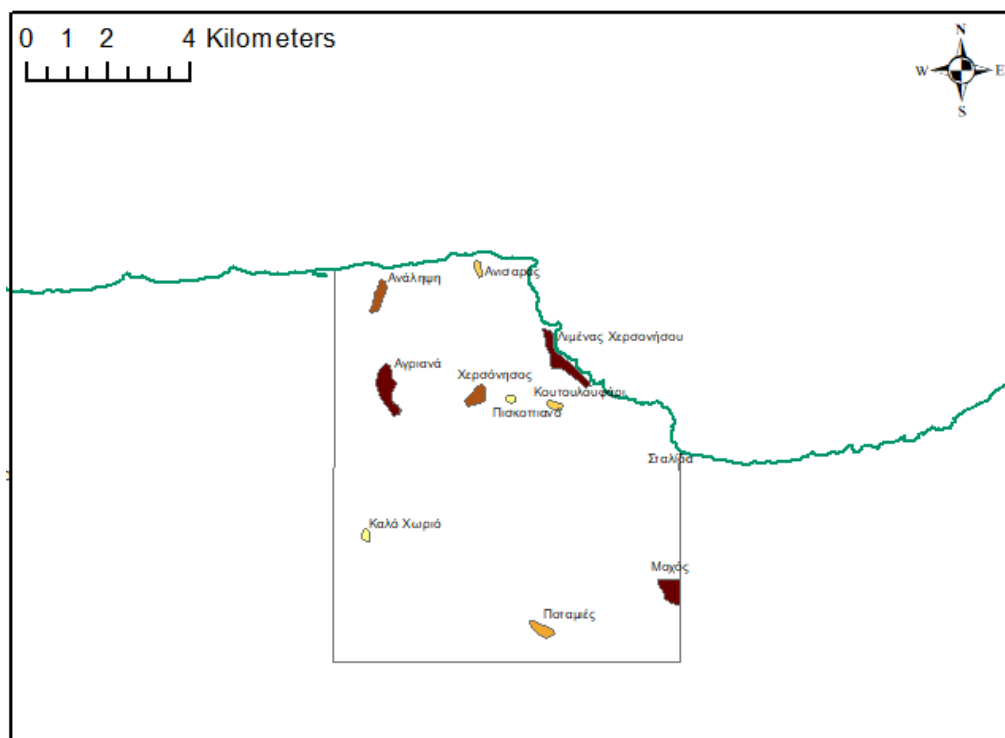
Εικόνα 5.3.11 – Ζώνες επιρροής οδικού δικτύου (Buffer)

Κατοικημένες περιοχές

Οι κατοικημένες περιοχές συμβάλλουν στην εδαφική επικινδυνότητα μέσω διαφόρων μορφών ρύπανσης, κυρίως λόγω της έντονης ανθρώπινης δραστηριότητας. Η απορροή ομβρίων υδάτων, που μεταφέρει οργανικούς και ανόργανους ρύπους, σε συνδυασμό με τη χρήση λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων και καθαριστικών από τα νοικοκυριά, καθώς και τα λύματα από οικιακούς σηπτικούς αγωγούς, ενισχύουν τον κίνδυνο ρύπανσης στις αστικές περιοχές. Επιπλέον, οι βιομηχανικές και εμπορικές ζώνες που συχνά βρίσκονται εντός αυτών των περιοχών μπορεί να αποτελέσουν πηγές ρύπανσης μέσω διαρροών χημικών ουσιών. Στην παρούσα μελέτη, η χαρτογράφηση των κατοικημένων περιοχών βασίστηκε στην ερευνητική εργασία των [Kourgialas & Karatzas, 2015] που υλοποιήθηκε με τη χρήση πρόσφατων αεροφωτογραφιών και τοπογραφικών χαρτών. Για την εκτίμηση της εδαφικής επικινδυνότητας, ελήφθη υπόψη ο πληθυσμός κάθε κατοικημένης περιοχής, καθώς η αύξηση του πληθυσμού συνεπάγεται εντονότερες δραστηριότητες που δύνανται να επιβαρύνουν το περιβάλλον.

Οικισμοί	Πληθυσμός
Ποταμιές	2630
Μοχός	6308
Σταλίδα	1283
Καλό Χωριό	886
Ανάληψη	3379
Λιμένας Χερσονήσου	8081
Ανισαράς	1081
Αγριανά	7823
Χερσόνησος	3315
Πισκοπιανό	760
Κουτουλουφάρι	1346

Πίνακας 5.3.3 – Πληθυσμιακή κατανομή οικισμών στην περιοχή μελέτης



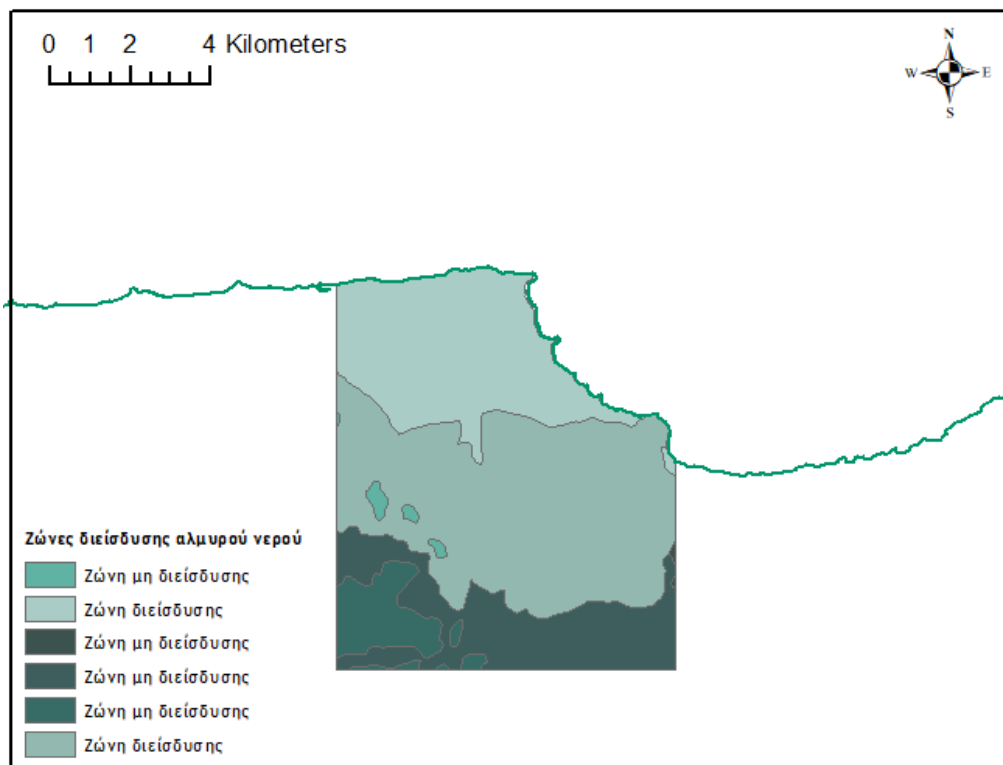
Εικόνα 5.3.12 – Χάρτης οικισμών της περιοχής μελέτης

Περιοχές οικολογικής προστασίας

Οι περιοχές οικολογικής προστασίας περιλαμβάνουν εκείνες που ανήκουν στο ευρωπαϊκό δίκτυο Natura 2000 ή σε Εθνικά Πάρκα (ΕC 1998) και υπόκεινται σε καθεστώς προστασίας σύμφωνα με την ελληνική νομοθεσία και τις πολιτικές της ΕΕ. Η περιορισμένη ανθρώπινη δραστηριότητα σε αυτές τις περιοχές συμβάλλει στη σημαντική μείωση του κινδύνου ρύπανσης των υπόγειων υδάτων, καθιστώντας τον πολύ χαμηλό. Ο εντοπισμός των προστατευόμενων περιοχών στην περιοχή μελέτης πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό GIS, με βάση δεδομένα από το δίκτυο Natura 2000.

Ζώνες υφαλμύρινης

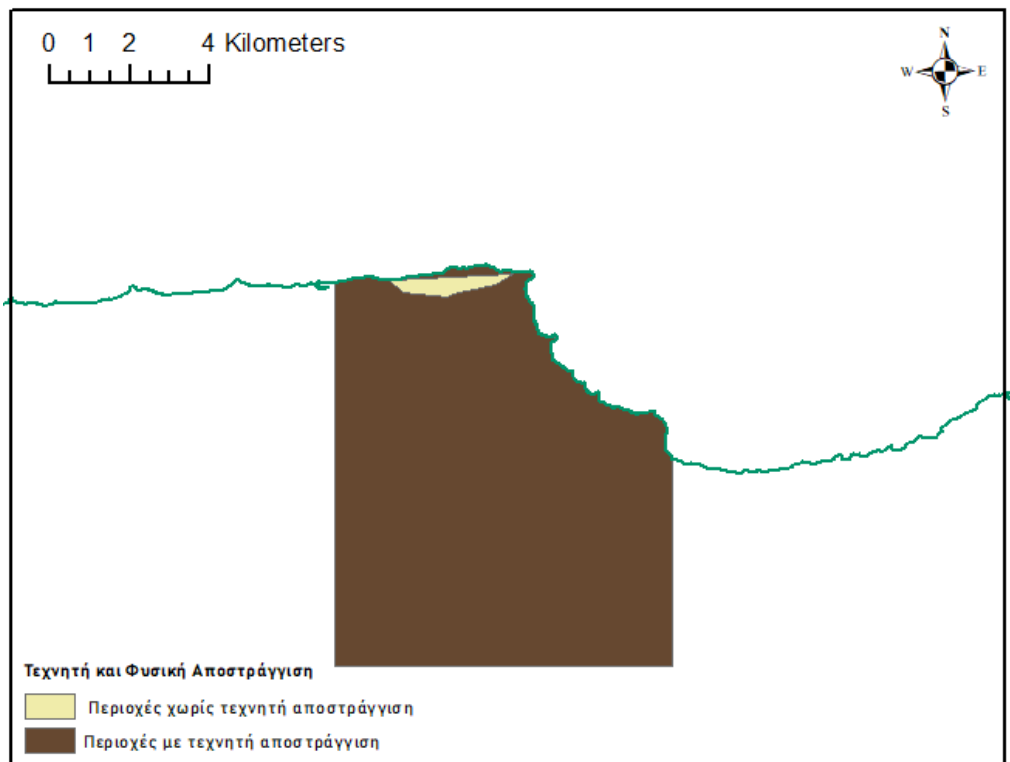
Οι ζώνες διείσδυσης θαλασσινού νερού επηρεάζουν σημαντικά την εδαφική επικινδυνότητα, καθώς η παρουσία αλμυρού νερού μπορεί να επιδεινώσει την ποιότητα των υπόγειων υδάτων, καθιστώντας τα ακατάλληλα για κατανάλωση ή γεωργική χρήση. Η διείσδυση συμβαίνει κυρίως σε παράκτιες περιοχές λόγω υπερεκμετάλλευσης των υδροφορέων, με αποτέλεσμα την ανάμειξη θαλασσινού και γλυκού νερού. Επιπλέον, οι γεωλογικές συνθήκες παίζουν καθοριστικό ρόλο, καθώς υδροφορείς με υψηλή διαπερατότητα διευκολύνουν την εξάπλωση της υφαλμύρινης. Στις περιοχές αυτές, ο κίνδυνος ρύπανσης χαρακτηρίζεται ως πολύ υψηλός, δεδομένου ότι η αλμυρότητα μπορεί να επιταχύνει χημικές αντιδράσεις και να επηρεάσει τη διαλυτότητα και τη μεταφορά ρύπων στο υπέδαφος. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τις υφάλμυρες ζώνες προήλθαν από την ερευνητική εργασία των [Kourgialas & Karatzas, 2015]. Η περιοχή μελέτης χωρίζεται σε έξι ζώνες εκτίμησης της διείσδυσης αλμυρού νερού, λαμβάνοντας υπόψη τη χημική σύσταση του εδάφους. Κάθε ζώνη αξιολογείται ως καλή ή κακή, ανάλογα με τις χημικές εκτιμήσεις.



Εικόνα 5.3.13 – Ζώνες εκτίμησης διείσδυσης αλμυρού νερού στο έδαφος στην περιοχή μελέτης

Τεχνητή αποστράγγιση

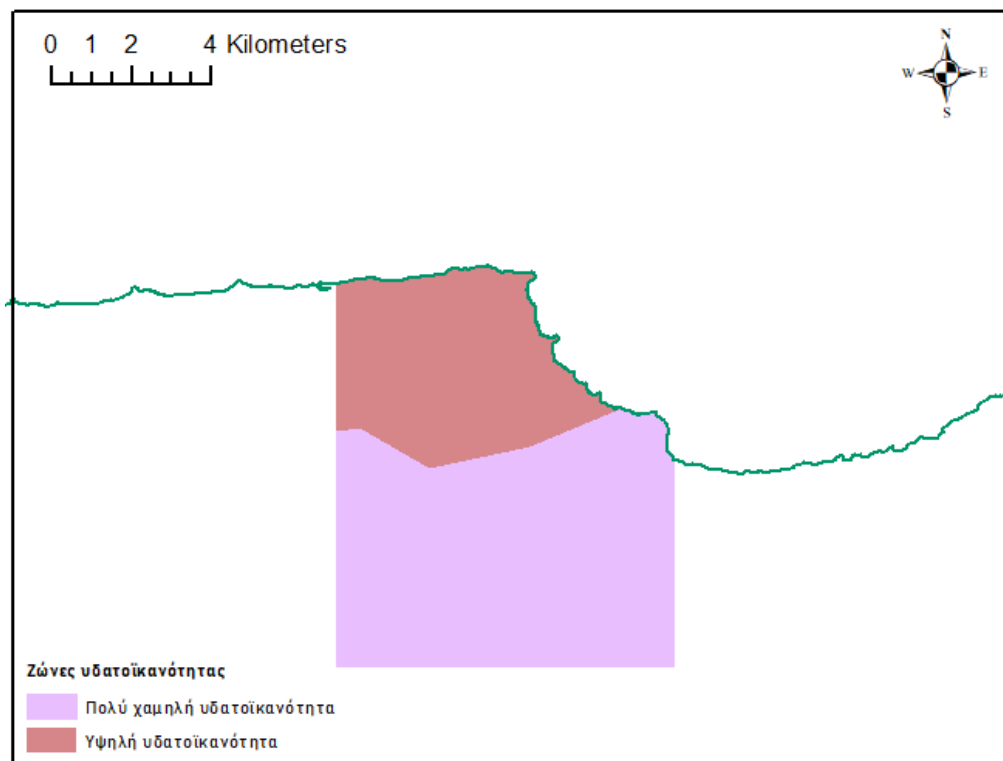
Η τεχνητή αποστράγγιση συμβάλει στην εδαφική επικινδυνότητα, καθώς επηρεάζει τη μεταφορά και συσσώρευση ρύπων στα υπόγεια ύδατα. Η εντατική γεωργική δραστηριότητα, μέσω της άρδευσης και της αποστράγγισης, διευκολύνει τη διάλυση και μεταφορά ανόργανων χημικών ουσιών, φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων, αυξάνοντας τον κίνδυνο ρύπανσης. Η παρουσία ιχνοστοιχείων στο αρδευτικό νερό μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ποιότητα του εδάφους και των υδάτινων πόρων, ιδιαίτερα σε γεωργικές περιοχές όπου η άρδευση είναι έντονη και συνεχής. Η συσσώρευση αυτών των στοιχείων μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη γονιμότητα του εδάφους, να περιορίσει την ανάπτυξη των φυτών και σε περιπτώσεις υψηλών συγκεντρώσεων να καταστήσει το νερό ακατάλληλο για ανθρώπινη κατανάλωση ή γεωργική χρήση. Για αυτό των λόγων, στην χαρτογράφηση κινδύνου, η τεχνητή αποστράγγιση θεωρείται ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει έμμεσα τη ρύπανση των υπόγειων υδάτων. Για την αποτύπωση της κατανομής και της έντασης του φαινομένου σε ολόκληρο το νησί, δημιουργήθηκαν ψηφιοποιημένοι χάρτες του περιφερειακού δικτύου αποστράγγισης. Στην παρούσα μελέτη, τα δεδομένα σχετικά με την τεχνητή αποστράγγιση αντλήθηκαν από την ερευνητική εργασία των [Kourgialas & Karatzas, 2015].



Εικόνα 5.3.14 – Ζώνες εκτίμησης τεχνητής αποστράγγισης στην περιοχή μελέτης

Υδατική χωρητικότητα του εδάφους

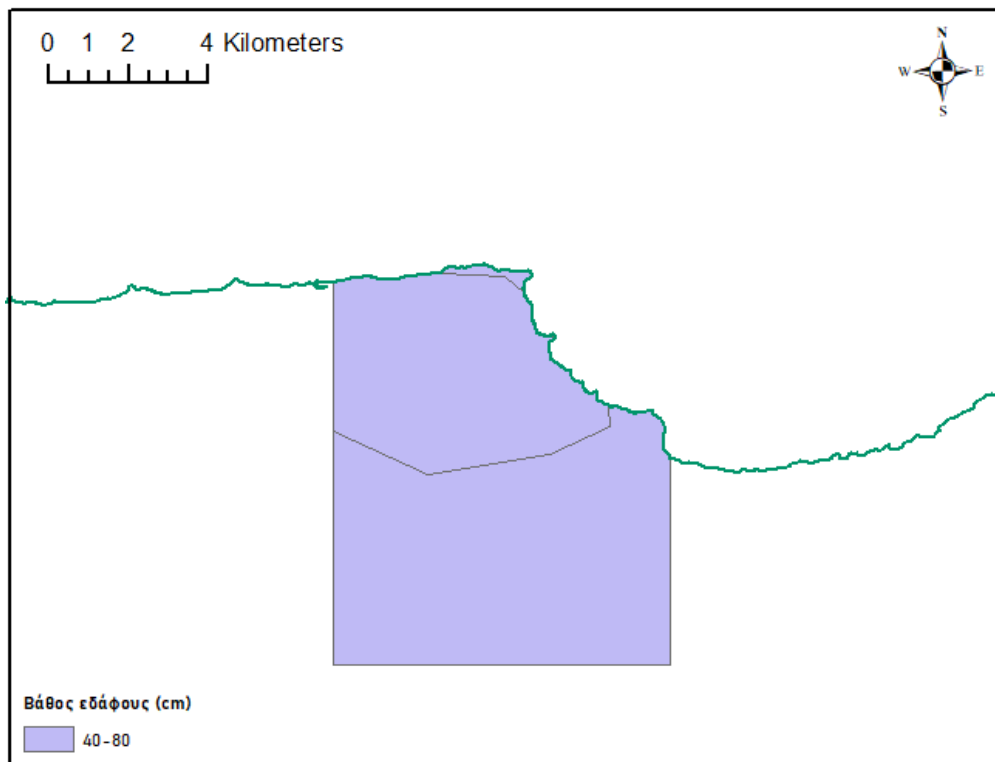
Η ικανότητα του εδάφους να συγκρατεί νερό επηρεάζει άμεσα τον κίνδυνο ρύπανσης των υπόγειων υδάτων, καθώς καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο οι ρύποι μετακινούνται και αλληλεπιδρούν με τα εδαφικά στρώματα. Σε εδάφη με υψηλή υδατοχωρητικότητα, όπως τα αργιλώδη, η κινητικότητα των επικίνδυνων χημικών ουσιών στα υπόγεια ύδατα αυξάνεται. Αντίθετα, σε αμμώδη εδάφη η κίνηση των ρύπων είναι πιο περιορισμένη. Παράλληλα, η οργανική ύλη του εδάφους δρα ως φυσικό φίλτρο, δεσμεύοντας χημικές ουσίες και βακτήρια, μειώνοντας έτσι την πιθανότητα ρύπανσης. Η προσρόφηση και η αποδόμηση των ρύπων επηρεάζονται επίσης από το βάθος του εδαφικού στρώματος, καθώς όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος, τόσο αυξάνονται οι πιθανότητες φυσικού καθαρισμού πριν αυτά φτάσουν στον υδροφόρο ορίζοντα. Επιπλέον, η υγρασία επηρεάζει τη μικροβιακή δραστηριότητα, καθώς σε συνθήκες υψηλής υγρασίας ενισχύεται η ανάπτυξη βακτηρίων, γεγονός που μπορεί να επιβαρύνει την ποιότητα των υδάτων. Τα δεδομένα σχετικά με την υδατοϊκανότητα του εδάφους στην Κρήτη προήλθαν από το δίκτυο του Ευρωπαϊκού Γραφείου Εδάφους (European Soil Bureau Network). Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από την ερευνητική εργασία των [Kourgialas & Karatzas, 2015], τα οποία κατέταξαν την περιοχή μελέτης σε δύο διακριτές ζώνες υδατοϊκανότητας.



Εικόνα 5.3.15 – Ζώνες εκτίμησης υδατικής χωρητικότητας του εδάφους στην περιοχή μελέτης

Βάθος εδάφους

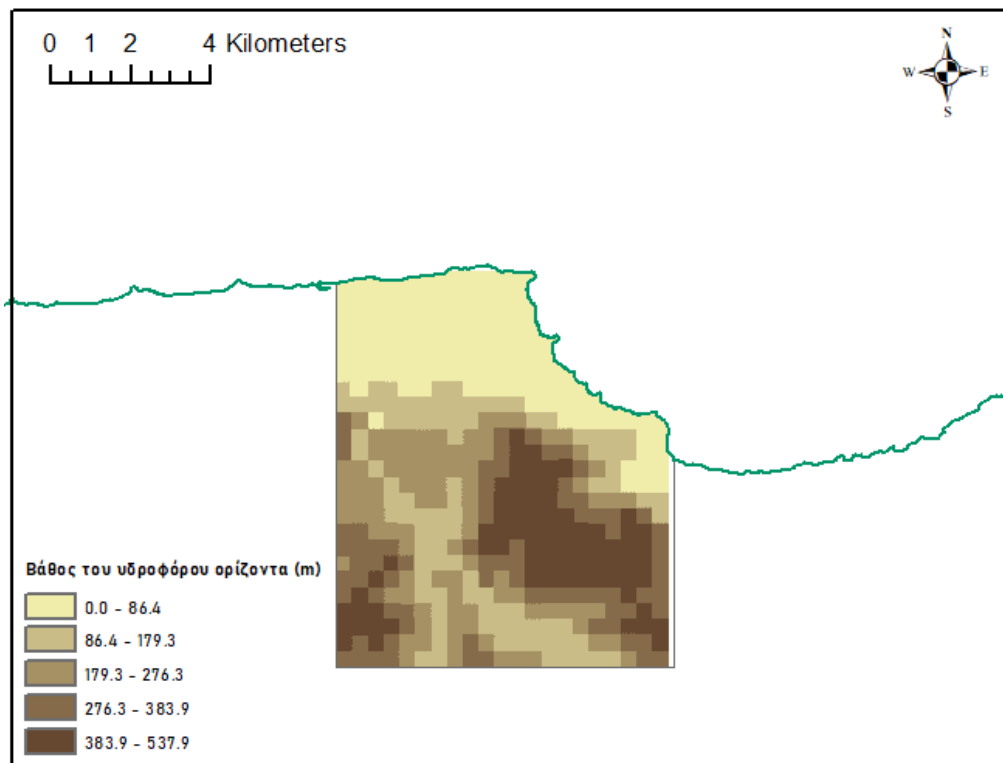
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το βάθος του εδάφους αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην αποτροπή της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων, καθώς όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος, τόσο λιγότερες είναι οι πιθανότητες οι ρύποι να φτάσουν στον υδροφόρο ορίζοντα. Η παρουσία ενός παχύ στρώματος εδάφους λειτουργεί ως φυσικό φράγμα, επιβραδύνοντας τη διάδοση των ρύπων και μειώνοντας έτσι την πιθανότητα μόλυνσης των υπόγειων υδάτων. Το έδαφος λειτουργεί ως φίλτρο μέσω διάφορων διεργασιών, όπως η προσρόφηση και η διάλυση, που περιορίζουν τη μεταφορά των επιβλαβών ουσιών. Τα δεδομένα σχετικά με το βάθος του εδάφους στην Κρήτη αντλήθηκαν από το Ευρωπαϊκό Γραφείο Εδάφους (European Soil Bureau Network). Αυτά τα δεδομένα, σε συνδυασμό με τις πληροφορίες από την ερευνητική εργασία των [Kourgialas & Karatzas, 2015], χρησιμοποιήθηκαν για την κατηγοριοποίηση της περιοχής μελέτης σε τρεις ζώνες βάθους, με εύρος 40–80 μέτρων.



Εικόνα 5.3.16 – Ζώνες εκτίμησης βάθους εδάφους της περιοχής μελέτης

Βάθος του υδροφόρου ορίζοντα

Το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα αναφέρεται στην απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους έως το σημείο όπου βρίσκονται τα υπόγεια ύδατα. Όσο μικρότερο είναι το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα, τόσο μεγαλύτερος είναι ο κίνδυνος ρύπανσης καθώς οι ρύποι έχουν μικρότερη απόσταση να διανύσουν πριν φτάσουν στο υδροφόρο σύστημα. Στη μελέτη αυτή, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από την ερευνητική εργασία των [Kourgialas & Karatzas, 2015] και περιλαμβάνουν μία σειρά από κρίσιμες πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά των υδροφόρων οριζόντων στην Κρήτη. Ειδικότερα, συλλέχθηκαν δεδομένα σχετικά με τη στάθμη των υπόγειων υδάτων, το αποτελεσματικό πορώδες, το κορεσμένο πάχος και τη διαπερατότητα των εδαφών. Επιπλέον, αξιοποιήθηκαν υδρογεωλογικές μελέτες πεδίου και δεδομένα από 312 γεωτρήσεις για την παραγωγή ενός χάρτη ραστερ, που αναπαριστά το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα σε καθένα από τα 11 κύρια υδροφόρα συστήματα της Κρήτης. Έπειτα, συντάχθηκε ένας ενιαίος χάρτης βάθους του υδροφόρου ορίζοντα για όλο το νησί, ο οποίος αποτυπώνει την κατανομή των υπόγειων υδάτων στις διάφορες περιοχές της Κρήτης.



Εικόνα 5.3.17 – Χάρτης κατανομής βάθους υδροφόρου ορίζοντα στην περιοχή μελέτης

Γεωλογικοί σχηματισμοί του υπεδάφους

Ο κίνδυνος μόλυνσης των υπόγειων υδάτων εξαρτάται άμεσα από τις γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στον κάθε υδροφορέα. Η διαπερατότητα του εδάφους, η οποία συνδέεται με την πορώδη δομή και την ύπαρξη ρωγμών, καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την ικανότητα διήθησης και την κινητικότητα των ρύπων. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαπερατότητα των πετρωμάτων, τόσο ταχύτερη είναι η κίνηση του νερού και των ρύπων προς τα υπόγεια ύδατα. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τις καρστικές περιοχές, όπου οι υδροφορείς χαρακτηρίζονται από διπλή ή τριπλή πορώδη δομή λόγω των ρωγμών, των πόρων και των φυσικών αγωγών, οι οποίοι επιτρέπουν την ταχεία μεταφορά τόσο του νερού όσο και των ρύπων. Ως εκ τούτου, οι καρστικοί υδροφορείς παρουσιάζουν αυξημένο κίνδυνο μόλυνσης των υπόγειων υδάτων, καθώς οι ρύποι μπορεί να μετακινούνται γρήγορα και να διασπείρονται σε μεγάλες περιοχές. Αντιθέτως, οι γεωλογικές δομές που χαρακτηρίζονται από αδιαπέρατα στρώματα, όπως ο φλύσχας και οι άργιλοι, προσφέρουν περιορισμένη διαπερατότητα. Αυτές οι περιοχές ενδέχεται να περιορίζουν τη μετακίνηση των ρύπων και των υδάτων, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο μόλυνσης των υπόγειων υδάτων. Επομένως, ο γεωλογικός παράγοντας έχει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της υδατικής επικινδυνότητας, καθώς οι διαφορετικοί τύποι πετρωμάτων επιδρούν στην ταχύτητα και την έκταση της διάδοσης των ρύπων.

Η υδραυλική αγωγιμότητα αποτελεί βασικό δείκτη της ικανότητας μιας γεωλογικής δομής να επιτρέπει τη ροή του νερού μέσω των πόρων και των ρωγμών της. Στις καρστικές περιοχές, όπου το έδαφος διατρέχεται από εκτεταμένα ρωγματώδη και διαυλικά συστήματα, η υδραυλική αγωγιμότητα είναι ιδιαίτερα υψηλή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ταχεία κίνηση του νερού, αλλά και των πιθανών ρύπων, αυξάνοντας έτσι τον κίνδυνο ρύπανσης των υπόγειων υδάτων. Αντίθετα, σε σχηματισμούς με χαμηλή διαπερατότητα, όπως οι άργιλοι και ο φλύσχας, η κίνηση του νερού είναι πιο περιορισμένη, λειτουργώντας ως φυσικό φραγμό στη διάχυση των ρύπων. Διαθέτοντας δεδομένα για τους γεωλογικούς σχηματισμούς ολόκληρης της Κρήτης, πραγματοποιήθηκε η εξαγωγή των απαιτούμενων πληροφοριών για την παρούσα μελέτη, ταξινομημένες στις ακόλουθες κατηγορίες [Λιονής & Περλέρης, 2001]:

A1: Πρακτικά αδιαπέρατοι σχηματισμοί μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας. Περιλαμβάνονται οι σχηματισμοί του φλύσχη και τα ελαφρώς μεταμορφωμένα αργιλικά ιζήματα των διαφόρων ζωνών. Κατά θέσεις εντός των στρωμάτων του φλύσχη αναπτύσσονται τοπικού χαρακτήρα υδροφορίες μικρού έως μέσου δυναμικού.

A2: Πρακτικά αδιαπέρατοι ή εκλεκτικής κυκλοφορίας σχηματισμοί μικρής έως πολύ μικρής διαπερατότητας. Συμμετέχουν στην κατηγορία αυτή τα μεταμορφωμένα και πυριγενή πετρώματα των διαφόρων ζωνών και καλυμμάτων. Κατά θέσεις στους σχηματισμούς αυτούς, τόσο εξαιτίας του έντονου κερματισμού τους όσο και εξαιτίας της πετρολογικής σύνθεσης τους αναπτύσσονται επιμέρους, τοπικού χαρακτήρα, υδροφορίες.

K1: Υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας. Ασβεστόλιθοι, δολομίτες, κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, μάρμαρα υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας. Περιλαμβάνονται οι έντονα καρστικοποιημένοι ανθρακικοί σχηματισμοί της ζώνης της Τρίπολης, τα ανθρακικά Τρυπαλίου

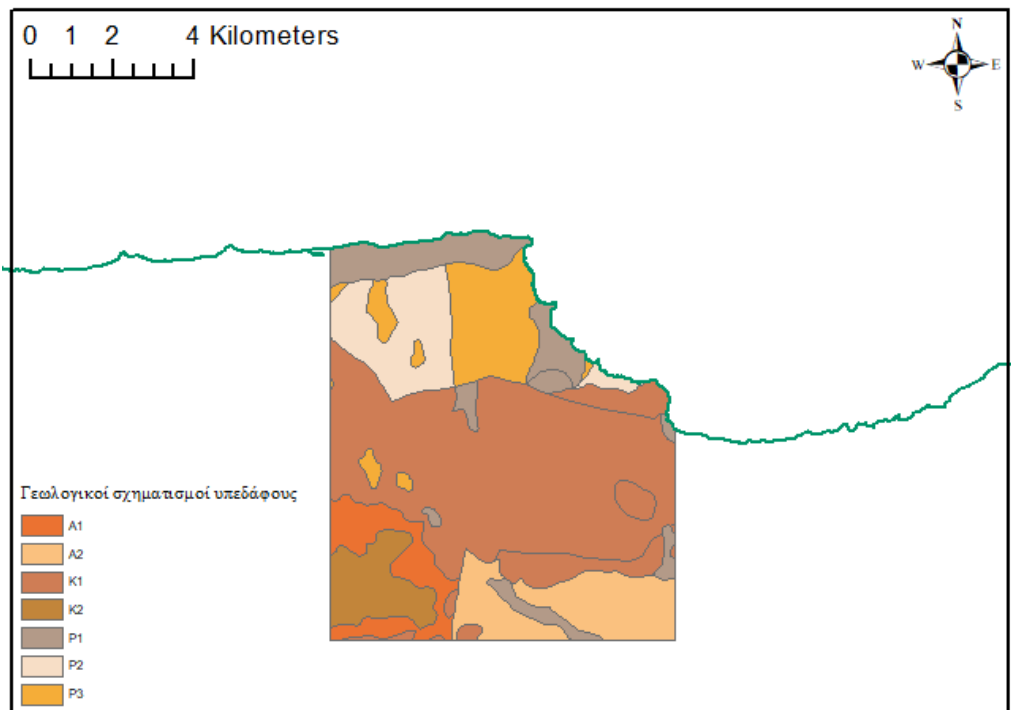
και οι Τριαδικοί κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες της Ιονίου ζώνης. Στους σχηματισμούς αυτούς αναπτύσσονται υψηλού δυναμικού υπόγειες υδροφορίες που εκφορτίζονται μέσω μεγάλων καρστικών πηγών.

K2: Μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας. Περιλαμβάνονται οι ασβεστόλιθοι της ζώνης της Πίνδου, οι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι Ιουρασικής-Ηωκαινικής ηλικίας της Ιονίου ζώνης και οι μικρότερες ανθρακικές εμφανίσεις των εσωτερικών καλυμμάτων. Η κυκλοφορία του νερού στους σχηματισμούς αυτούς ελέγχεται από τις παρεμβολές πυριτόλιθων, κερατολίθων και αργιλικών σχιστολίθων. Στους σχηματισμούς αυτούς αναπτύσσονται μέσου έως μικρού δυναμικού υπόγειες υδροφορίες. Εξαιτίας του έντονου τεκτονισμού τους στις περιπτώσεις εκείνες που παρουσιάζουν και σημαντική επιφανειακή ανάπτυξη συμμετέχουν στην τροφοδοσία σημαντικών καρστικών πηγών.

P1: Κοκκώδεις προσχωματικές κυρίως αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας. Στη κατηγορία αυτή ανήκουν οι αλλουβιακές αποθέσεις, οι ποτάμιες και θαλάσσιες αναβαθμίδες, τα κροκαλοπαγή ποτάμιας προέλευσης, τα πλευρικά κορήματα και οι κώνοι κορημάτων όταν έχουν σημαντική εξάπλωση. Αναπτύσσονται, κατά θέσεις, αξιόλογες φρεάτιες υδροφορίες. Κοντά στη θάλασσα οι υδροφορίες αυτές έχουν υποστεί κατά θέσεις, υποβάθμιση εξαιτίας της υφαλμύρισης.

P2: Μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα κροκαλοπαγή και οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι των νεογενών σχηματισμών που φιλοξενούν επιμέρους υπόγειες υδροφορίες μέσου έως μικρού δυναμικού.

P3: Κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας. Στη κατηγορία αυτή ανήκουν οι πλειοκαινικές και μειοκαινικές μάργες, καθώς και ο αδιαίρετος σχηματισμός του νεογενούς. Τοπικά στον αδιαίρετο σχηματισμό των νεογενών αναμένεται η ανάπτυξη ασθενών υδροφοριών μέσα σε παρεμβολές κροκαλοπαγών ή μαργαϊκών ασβεστόλιθων. Κατά θέσεις στις νεογενείς αποθέσεις αναπτύσσονται στρώματα γύψου που παρουσιάζουν αξιόλογη υδροφορία εντόνως όμως υποβαθμισμένη εξαιτίας των θειικών ιόντων.



Εικόνα 5.3.18 – Χάρτης γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής μελέτης

Ταχύτητα ροής υπεδάφους

Η ταχύτητα ροής των υπόγειων υδάτων στο υπέδαφος είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας για την εκτίμηση της εδαφικής επικινδυνότητας και σχετίζεται άμεσα με τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης. Σε σχηματισμούς χαμηλής διαπερατότητας, η ροή των υπόγειων υδάτων είναι εξαιρετικά αργή ή σχεδόν μηδενική, γεγονός που περιορίζει τη μεταφορά ρύπων σε μεγάλες αποστάσεις και μειώνει τον κίνδυνο περιβαλλοντικής επιβάρυνσης. Αντίθετα, σε υψηλής διαπερατότητας ή έντονα διαρρηγμένα γεωλογικά μέσα, η ροή μπορεί να είναι σημαντικά ταχύτερη, διευκολύνοντας την εξάπλωση των ρύπων. Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, βάσει των ερευνητικών δεδομένων των [Kourgialas & Karatzas, 2015] και της γεωλογικής ταξινόμησης της περιοχής, η ταχύτητα του υπόγειου νερού εκτιμήθηκε ως πολύ χαμηλή για τα αδιαπέρατα στρώματα A1 και A2, χαμηλή για τον σχηματισμό P3, μέτρια για τους P1-cd και P2, υψηλή για τον σχηματισμό P1 που περιλαμβάνει αργίλους (al), άμμους (sc), χαλίκια (cs) και κροκάλες (pt) και πολύ υψηλή για τους καρστικούς σχηματισμούς K1 και K2.

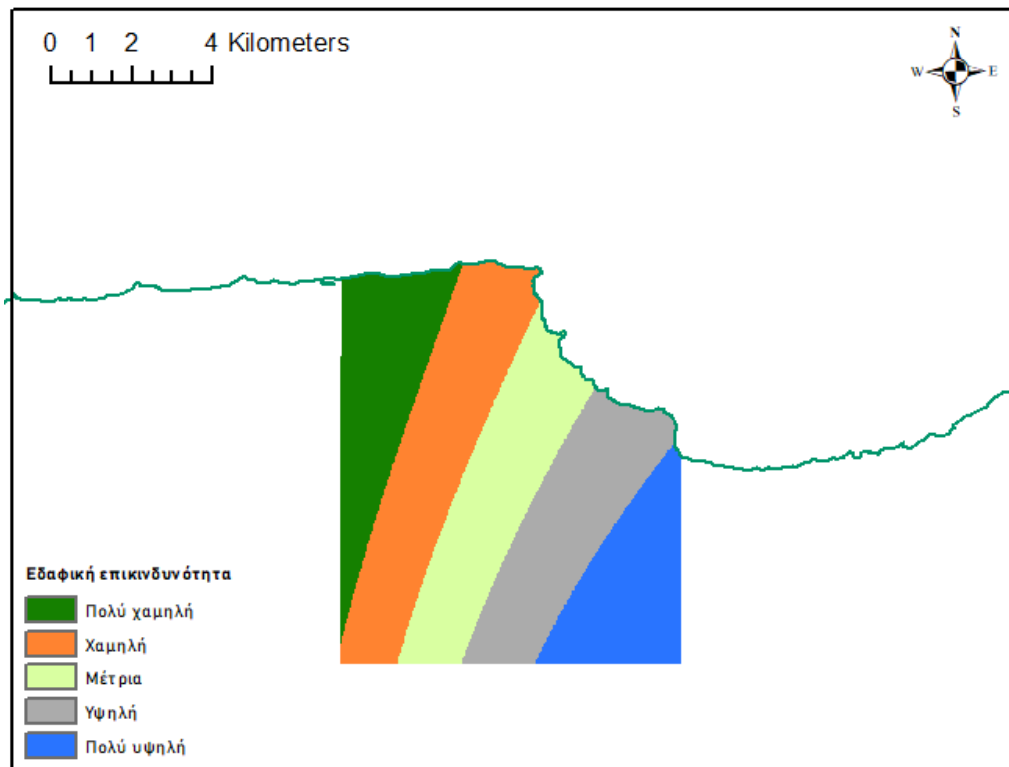
6. Αποτελέσματα

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει τα αποτελέσματα της χωρικής εκτίμησης της εδαφικής επικινδυνότητας. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού ArcGIS 10.5 και συγκεκριμένα του ArcMap, το οποίο αξιοποιήθηκε τόσο για την επεξεργασία των θεματικών χαρτών όσο και για την τελική σύνθεση του χάρτη συνολικής εδαφικής επικινδυνότητας. Ειδικότερα, για τις μεταβλητές που αφορούν τη βροχόπτωση, τις χρήσεις γης, τη συσσώρευση απορροής, τις σημειακές πηγές ρύπανσης, την εγγύτητα σε ποτάμια και οδικό δίκτυο, τις κατοικημένες περιοχές, τις ζώνες οικολογικής προστασίας, την παρουσία αλμυρού νερού στο έδαφος, την τεχνητή αποστράγγιση, την υδατική χωρητικότητα, το βάθος του εδάφους, το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα, τους γεωλογικούς σχηματισμούς και την ταχύτητα ροής των υπόγειων υδάτων, τα δεδομένα ταξινομήθηκαν σύμφωνα με τη μέθοδο Natural Breaks (Jenks). Η ταξινόμηση αυτή διαμόρφωσε πέντε κατηγορίες επικινδυνότητας, οι οποίες αποδόθηκαν με βαθμολογική κλίμακα από 1 έως 5, αντιστοιχώντας στις διαβαθμίσεις: Πολύ Μικρή, Μικρή, Μέτρια, Υψηλή και Πολύ Υψηλή. Τα δεδομένα μετατράπηκαν σε μορφή καννάβου (raster) και παρουσιάζονται παρακάτω.

6.1 Χάρτες εδαφικής επικινδυνότητας επιμέρους παραγόντων

Βροχόπτωση

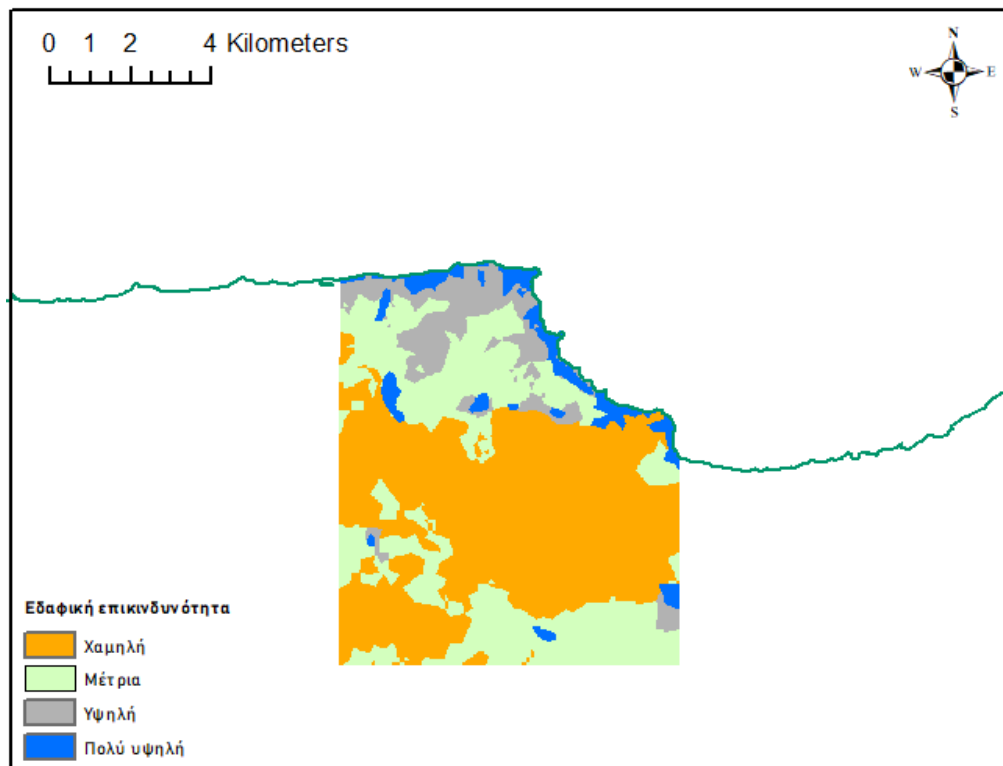
Η αυξημένη βροχόπτωση ενισχύει τη διεργασία της επιφανειακής απορροής, οδηγώντας σε υψηλότερες ταχύτητες μεταφοράς ρύπων και μειωμένους χρόνους διέλευσης. Αυτή η διαδικασία διευκολύνει τη μεταφορά μικροβιακών παθογόνων και χημικών ουσιών, οι οποίες είναι προσκολλημένες σε αιωρούμενα σωματίδια, αυξάνοντας έτσι την ευπάθεια των υπόγειων υδάτων στη ρύπανση. Επιπλέον, το επιφανειακό νερό και οι απορροές από τις βροχοπτώσεις μπορούν να εκπλύνουν και να μεταφέρουν ρύπους από ανθρωπογενείς και φυσικές πηγές, όπως χωματερές, εξορυκτικές δραστηριότητες, αστικά απόβλητα και γεωργικά λιπάσματα, ενισχύοντας τον κίνδυνο υποβάθμισης της ποιότητας των υπόγειων υδάτων. Η χωρική κατανομή της επικινδυνότητας, όπως αποτυπώνεται στον θεματικό χάρτη, παρουσιάζει μία αναλογική αύξηση κινδύνου από το δυτικό προς το ανατολικό τμήμα του νησιού και καταδεικνύει ότι το νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης εμφανίζει αυξημένο κίνδυνο ρύπανσης, ενώ το βορειοδυτικό τμήμα παρουσιάζει σημαντικά χαμηλότερη ευπάθεια.



Εικόνα 6.1.1 – Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας λόγω βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης

Χρήσεις γης

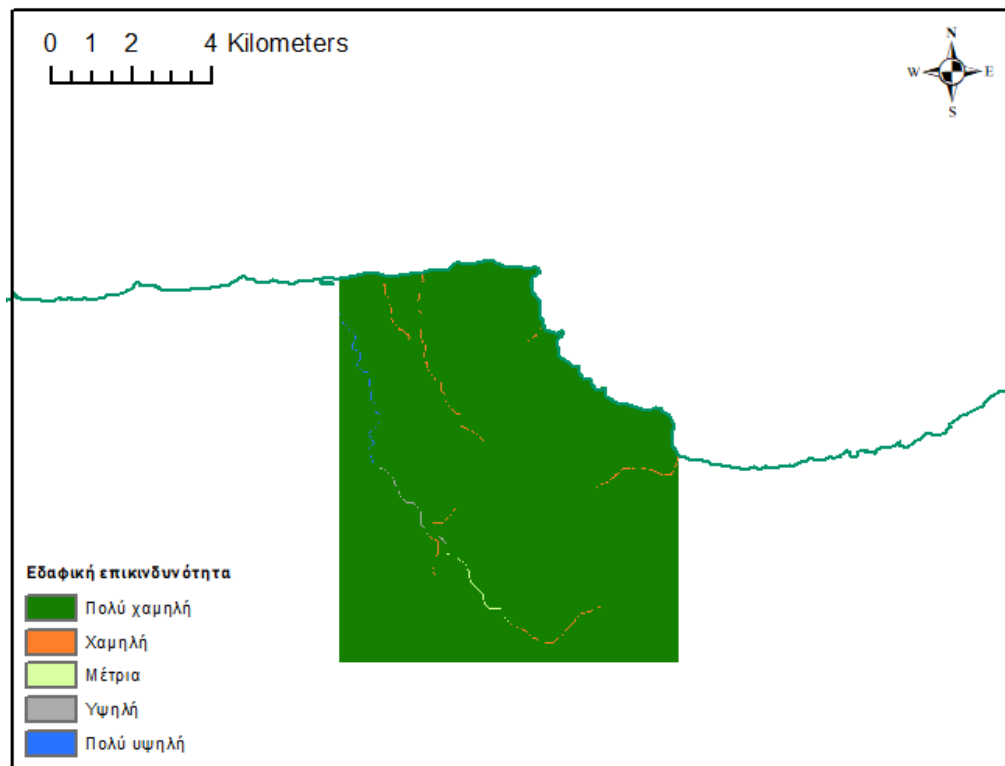
Οι χρήσεις γης αποτελούν σημαντικό παράγοντα στην εκτίμηση της εδαφικής επικινδυνότητας ως προς τη ρύπανση, καθώς οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα σε μια περιοχή επηρεάζουν τη χωρική κατανομή και την ένταση του περιβαλλοντικού κινδύνου. Ο αστικός ιστός, καθώς και οι αθλητικές και ψυχαγωγικές εγκαταστάσεις, δημιουργούν ένα σχεδόν αδιαπέρατο τεχνητό κάλυμμα, το οποίο, παρά τον περιορισμό της άμεσης διείσδυσης των ρύπων στο έδαφος, ενδέχεται να ενισχύσει τη διασπορά τους ανάλογα με τη φύση και τις ιδιότητές τους. Αντίθετα, περιοχές με έντονη φυτοκάλυψη λειτουργούν ρυθμιστικά, καθώς ελέγχουν τόσο την ποσότητα όσο και τον ρυθμό απορροής του νερού, επηρεάζοντας έτσι τις οδούς μεταφοράς των ρύπων και μειώνοντας τον συνολικό κίνδυνο. Σύμφωνα με τον θεματικό χάρτη, οι παράκτιες περιοχές που χαρακτηρίζονται από έντονη αστική και τουριστική ανάπτυξη, καθώς και ορισμένες αστικές συστάδες στο κέντρο της περιοχής μελέτης, εμφανίζουν πολύ υψηλή εδαφική επικινδυνότητα. Οι εκτάσεις με πολύπλοκα πρότυπα καλλιέργειας κατατάσσονται σε υψηλό επίπεδο κινδύνου, ενώ οι ελαιώνες και οι γεωργικές περιοχές παρουσιάζουν μέτρια επικινδυνότητα. Αντιθέτως, οι περιοχές που καλύπτονται από φυσικά λιβάδια και σκληρόφυλλη βλάστηση εμφανίζουν χαμηλό κίνδυνο ρύπανσης. Συνολικά, η πλειονότητα της περιοχής μελέτης κατατάσσεται σε χαμηλό έως μέτριο επίπεδο εδαφικής επικινδυνότητας.



Εικόνα 6.1.2 – Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας λόγω χρήσεων γης στην περιοχή μελέτης

Συσσώρευση απορροής

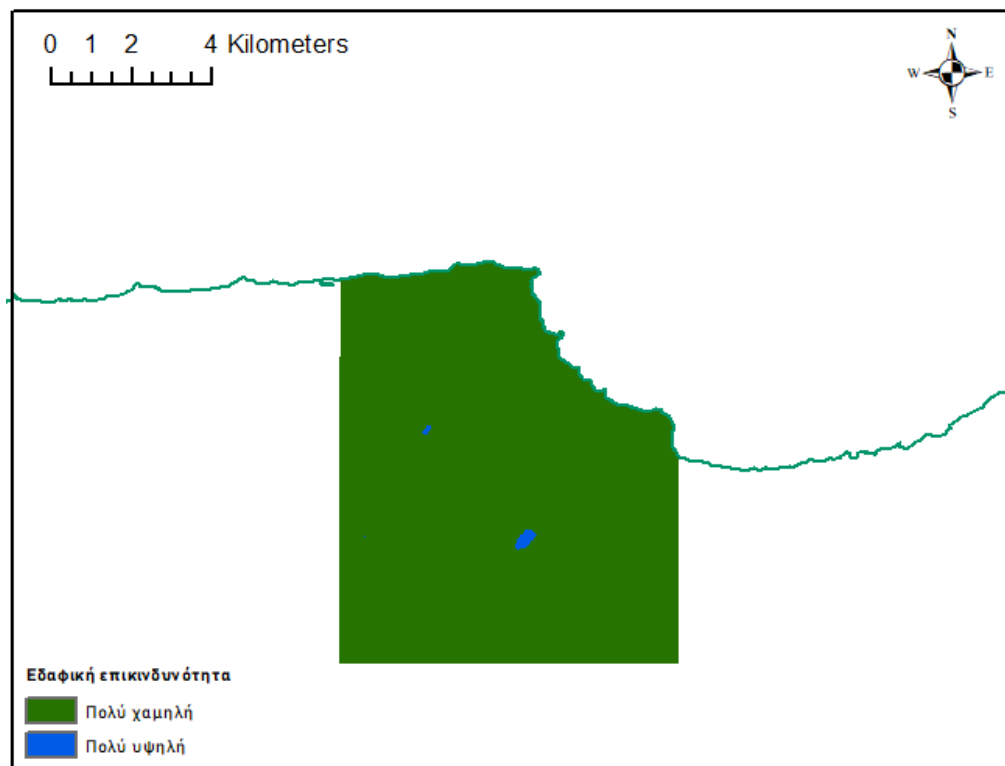
Η συσσώρευση απορροής αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την εκτίμηση της συμπεριφοράς των ρύπων στο περιβάλλον, καθώς καθορίζει εάν οι ρύποι θα παραμείνουν στην επιφάνεια του εδάφους για ικανό χρονικό διάστημα ώστε να διεισδύσουν στα υπόγεια ύδατα ή αν θα μεταφερθούν μέσω της επιφανειακής απορροής. Οι κυψέλες εξόδου με υψηλή συσσώρευση ροής υποδηλώνουν περιοχές συγκεντρωμένης απορροής και συμβάλλουν στην αναγνώριση των κύριων υδρολογικών καναλιών, ενώ οι κυψέλες εξόδου με μηδενική συσσώρευση ροής αντιστοιχούν σε τοπογραφικά υψηλά σημεία, όπως κορυφογραμμές. Στον θεματικό χάρτη της περιοχής μελέτης διακρίνονται σαφώς οι κύριες αρτηρίες απορροής, με τις περιοχές έντονης συγκέντρωσης ροής να χαρακτηρίζονται από αυξημένο κίνδυνο εδαφικής επικινδυνότητας. Η πλειονότητα της περιοχής παρουσιάζει χαμηλό έως μέτριο κίνδυνο, ενώ μόνο μία υδρολογική αρτηρία στο δυτικό τμήμα εμφανίζει υψηλή έως πολύ υψηλή επικινδυνότητα, γεγονός που υποδηλώνει τη συγκέντρωση απορροών από μικρότερες υδρολογικές διόδους. Παρόλο που παρατηρείται μία μεμονωμένη ζώνη έντονης συσσώρευσης απορροής, είναι κρίσιμο να ληφθεί υπόψη η συνολική έκτασή της, καθώς εκτείνεται σε μήκος άνω των 4 χιλιομέτρων εντός της περιοχής μελέτης, γεγονός που ενδέχεται να επηρεάζει σημαντικά τις υδρολογικές και περιβαλλοντικές διεργασίες.



Εικόνα 6.1.3 – Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας λόγω συσσώρευση απορροής στην περιοχή μελέτης

Σημειακές πηγές ρύπανσης

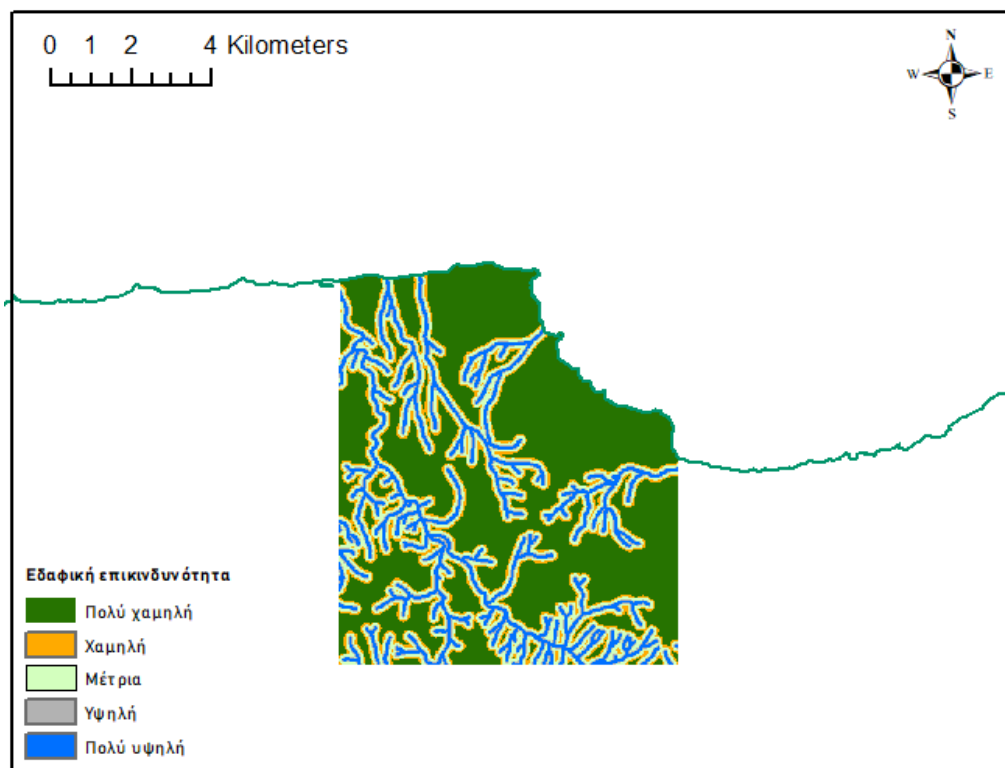
Η ρύπανση από σημειακές πηγές συνιστά βασικό παράγοντα για την εκτίμηση της εδαφικής επικινδυνότητας, καθώς οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα σε αυτές τις ζώνες ενδέχεται να επιφέρουν σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, επηρεάζοντας τόσο το έδαφος όσο και τα υπόγεια υδάτινα αποθέματα. Για τον λόγο αυτό, οι περιοχές αυτές κατατάσσονται σε υψηλό επίπεδο επικινδυνότητας. Στην περιοχή μελέτης έχουν εντοπιστεί τρεις σημειακές πηγές ρύπανσης, οι οποίες καταλαμβάνουν περιορισμένη έκταση σε σύγκριση με το συνολικό μέγεθος της υπό εξέταση περιοχής.



Εικόνα 6.1.4 – Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας λόγω σημειακών πηγών στην περιοχή μελέτης

Εγγύτητα σε ποτάμια

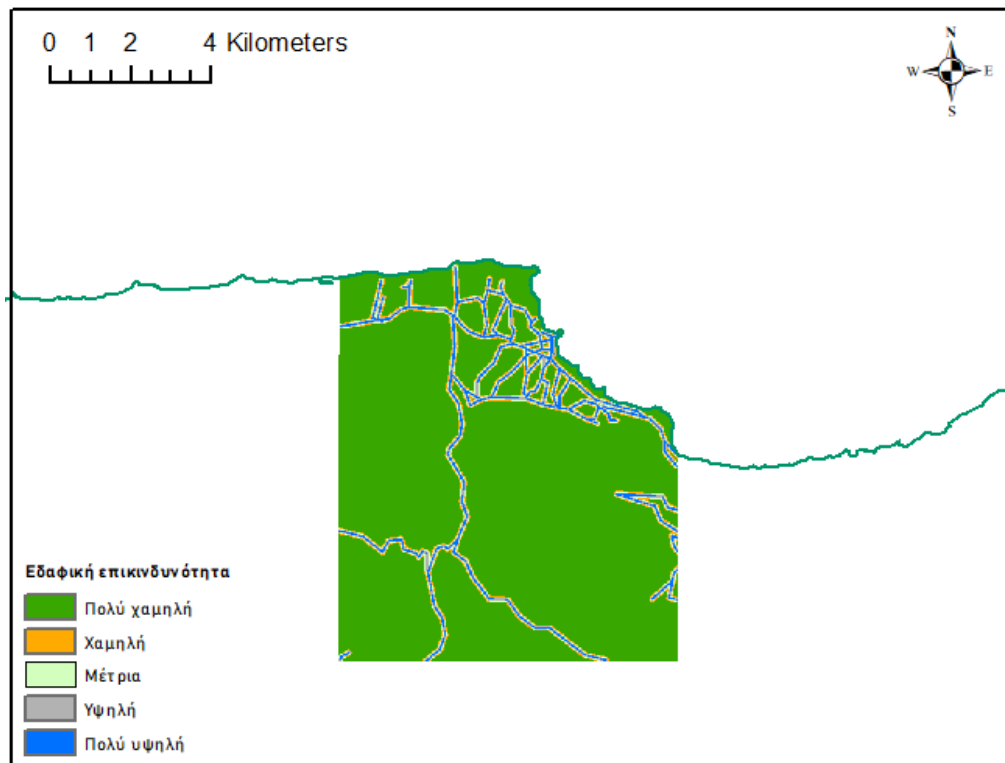
Η εγγύτητα σε ποτάμια αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την εκτίμηση της εδαφικής επικινδυνότητας, καθώς οι ποτάμιες οδοί λειτουργούν ως δυνητικοί αποδέκτες επεξεργασμένων ή ανεπεξέργαστων λυμάτων, αυξάνοντας τον κίνδυνο ρύπανσης των υδροφορέων που βρίσκονται κοντά στις κοίτες. Ο κίνδυνος ρύπανσης μειώνεται προοδευτικά καθώς αυξάνεται η απόσταση από την κοίτη του ποταμού. Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, η εκτίμηση του κινδύνου πραγματοποιήθηκε μέσω της δημιουργίας ζωνών επιρροής (buffer zones) σε διαφορετικές αποστάσεις από την κύρια ποτάμια οδό: 0–40 m (πολύ υψηλή επικινδυνότητα), 40–60 m (υψηλή επικινδυνότητα), 60–120 m (μεσαία επικινδυνότητα), 120–160 m (χαμηλή επικινδυνότητα) και 160–200 m (πολύ χαμηλή επικινδυνότητα). Η προοδευτική μείωση του κινδύνου ρύπανσης αποδίδεται στη σταδιακή διάχυση και κατακράτηση των ρύπων καθώς απομακρύνονται από την ποτάμια κοίτη. Σημειώνεται ότι η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από εκτεταμένο ποτάμιο δίκτυο, το οποίο καλύπτει μεγάλο μέρος της συνολικής της έκτασης.



Εικόνα 6.1.5 – Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας λόγω εγγύτητας ποταμών στην περιοχή μελέτης

Εγγύτητα σε οδικό δίκτυο

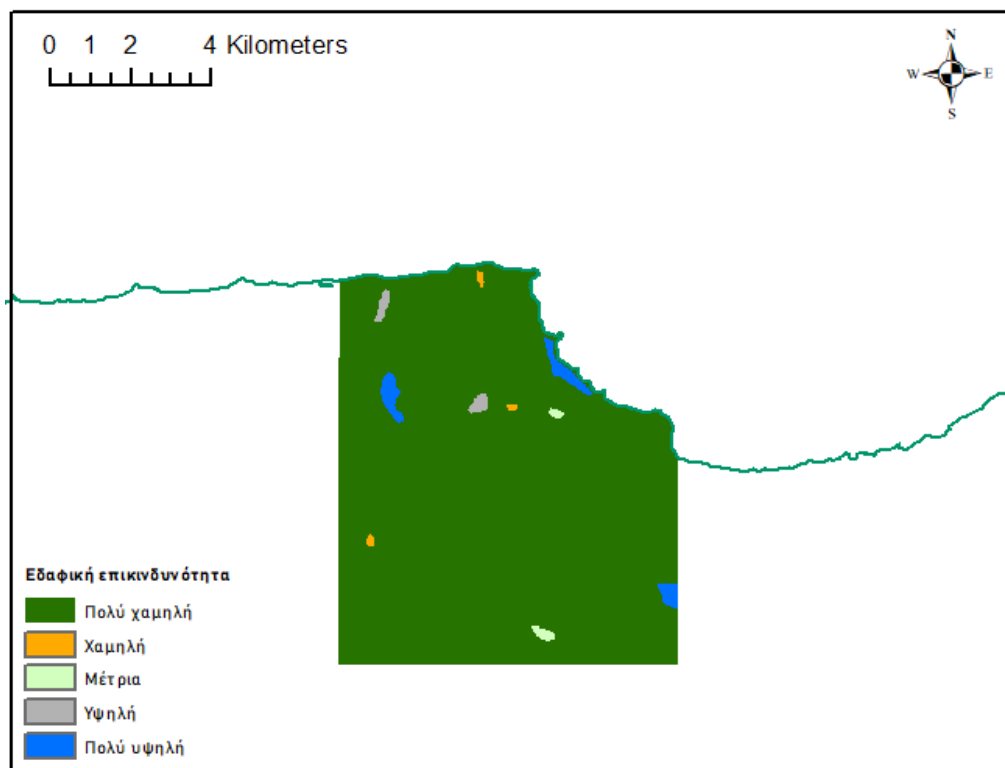
Η εγγύτητα στο οδικό δίκτυο μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την επικινδυνότητα ρύπανσης των υπόγειων υδάτων, καθώς οι οδικές αρτηρίες μπορούν να λειτουργήσουν ως αγωγοί μεταφοράς ρύπων είτε μέσω της απορροής ομβρίων υδάτων είτε λόγω διαρροών που προκύπτουν από σοβαρά ατυχήματα. Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, η εκτίμηση του κινδύνου ρύπανσης πραγματοποιήθηκε μέσω της οριοθέτησης ζωνών επιρροής (buffer zones) σε διαφορετικές αποστάσεις από την κύρια οδική αρτηρία: 0–20 m (πολύ υψηλή επικινδυνότητα), 20–40 m (υψηλή επικινδυνότητα), 40–60 m (μεσαία επικινδυνότητα), 60–80 m (χαμηλή επικινδυνότητα) και 80–100 m (πολύ χαμηλή επικινδυνότητα). Ο κίνδυνος ρύπανσης μειώνεται προοδευτικά με την αύξηση της απόστασης από το οδικό δίκτυο, καθώς μειώνεται η πιθανότητα επιφανειακής απορροής ρυπογόνων ουσιών προς τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα. Σημειώνεται ότι η περιοχή μελέτης διαθέτει εκτεταμένο οδικό δίκτυο, με αυξημένη πυκνότητα στο βόρειο τμήμα, γεγονός που αποδίδεται στην τουριστική ανάπτυξη και στη λειτουργία του Βόρειου Οδικού Άξονα του νησιού, ο οποίος διατρέχει μέρος της περιοχής. Επομένως, ο κίνδυνος εδαφικής επικινδυνότητας σε όλο το βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης είναι αυξημένος.



Εικόνα 6.1.6 – Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας λόγω εγγύτητας οδικού δικτύου στην περιοχή μελέτης

Κατοικημένες περιοχές

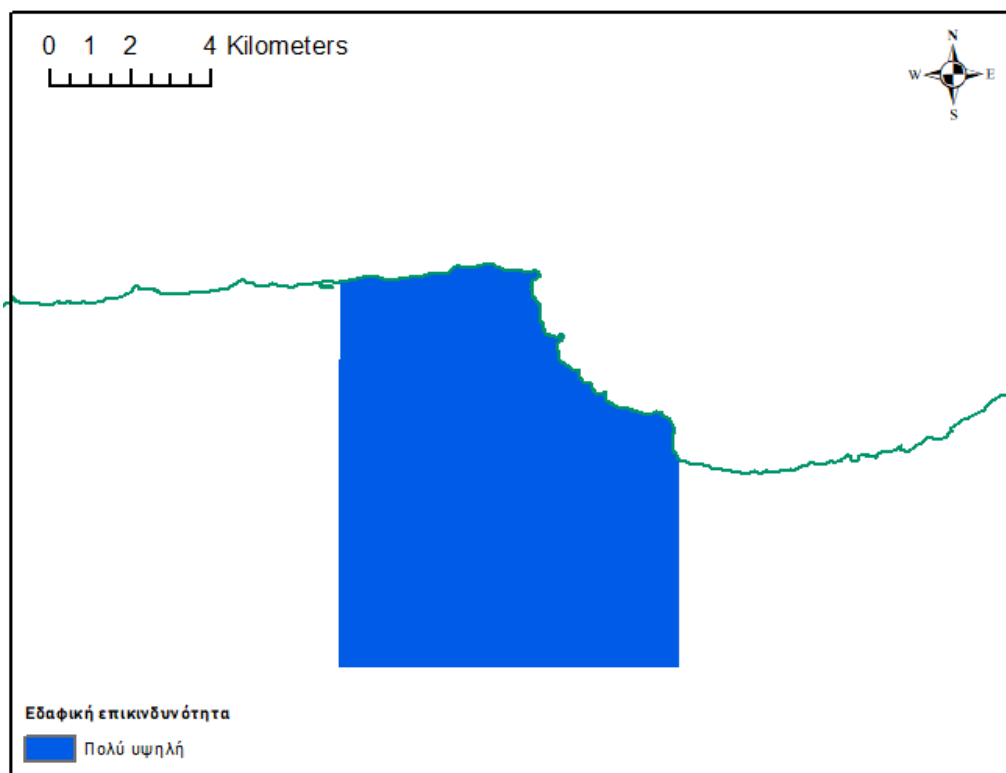
Οι κατοικημένες περιοχές συνιστούν σημαντικό παράγοντα για την εκτίμηση της εδαφικής επικινδυνότητας, καθώς συνδέονται άμεσα με διάφορες μορφές ρύπανσης, κυρίως εξαιτίας της έντονης ανθρώπινης δραστηριότητας. Για τον υπολογισμό της εδαφικής επικινδυνότητας, λήφθηκε υπόψη ο πληθυσμός κάθε οικισμού, καθώς η αύξηση του πληθυσμού συνήθως συνεπάγεται εντονότερη ανθρωπογενή δραστηριότητα, η οποία μπορεί να έχει αρνητικές συνέπειες για το περιβάλλον. Οι οικισμοί με πληθυσμό 2.754–8.081 κατοίκους κατατάσσονται σε πολύ υψηλό κίνδυνο, ενώ οι περιοχές με πληθυσμό από 1.274 έως 2.754 κατοίκους χαρακτηρίζονται ως υψηλού κινδύνου, από 541 έως 1.273 ως μεσαίας επικινδυνότητας, από 132 έως 540 ως χαμηλής και περιοχές με 0 έως 131 κατοίκους ως πολύ χαμηλού κινδύνου. Όπως φαίνεται στον παρακάτω θεματικό χάρτη, τρεις οικισμοί της περιοχής μελέτης παρουσιάζουν υψηλό κίνδυνο, δύο υψηλό, ενώ οι υπόλοιποι οικισμοί κατατάσσονται κάτω του μεσαίου επιπέδου κινδύνου.



Εικόνα 6.1.7 – Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας λόγω κατοικημένων περιοχών στην περιοχή μελέτης

Περιοχές οικολογικής προστασίας

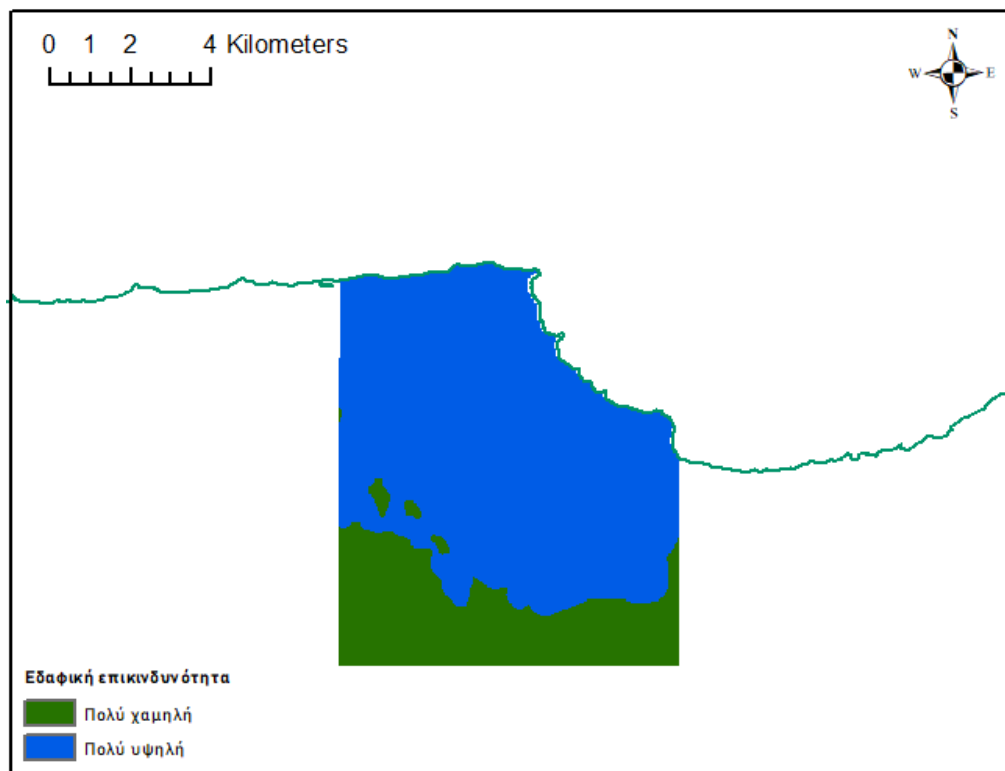
Οι περιοχές οικολογικής προστασίας συντελούν θετικά στην εκτίμηση της εδαφικής επικινδυνότητας, καθώς εντάσσονται σε καθεστώς προστασίας που περιορίζει σημαντικά τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Αυτή η μειωμένη ανθρώπινη παρέμβαση περιορίζει τις πιθανότητες ρύπανσης των υπόγειων υδάτων, συμβάλλοντας στη διατήρηση του οικοσυστήματος. Συνεπώς, οι περιοχές οικολογικής προστασίας κατατάσσονται σε πολύ χαμηλό βαθμό επικινδυνότητας. Σύμφωνα με τα δεδομένα του δικτύου Natura 2000, η περιοχή μελέτης δεν εντάσσεται σε ζώνη οικολογικής προστασίας, γεγονός που την κατατάσσει σε περιοχή με πολύ υψηλό δείκτη επικινδυνότητας.



Εικόνα 6.1.8 – Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας λόγω περιοχών οικολογικής προστασίας στην περιοχή μελέτης

Ζώνες υφαλμύρισης

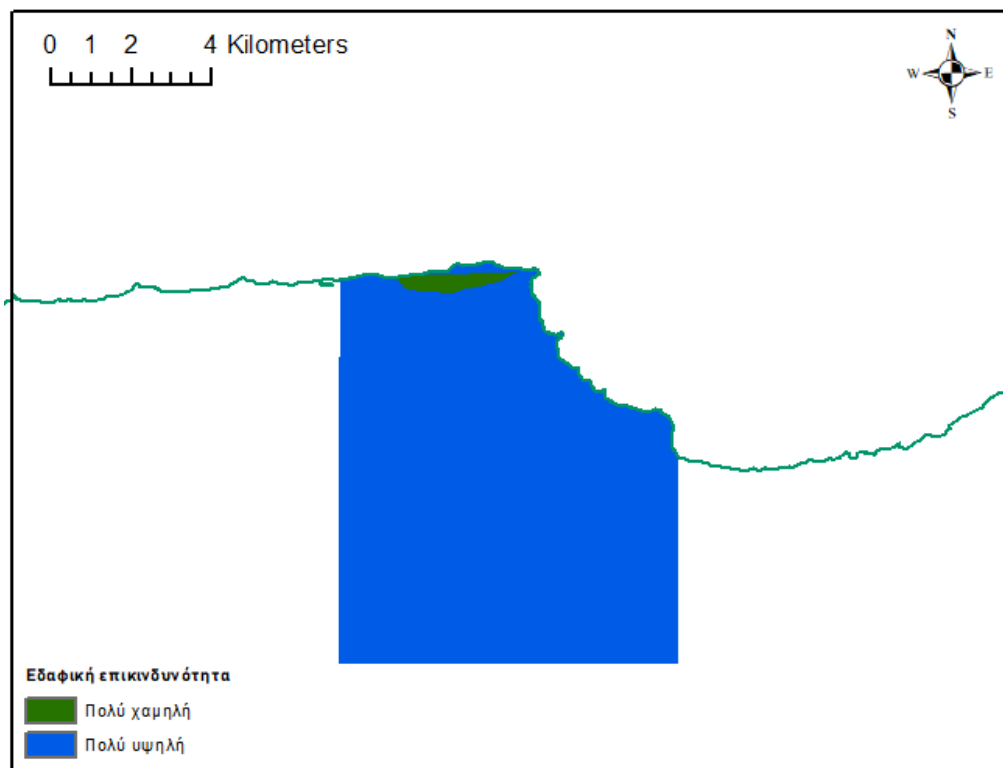
Οι ζώνες αλμυρού νερού του εδάφους αποτελούν έναν βασικό παράγοντα για τη χαρτογράφηση της εδαφικής επικινδυνότητας, καθώς υποδηλώνουν περιοχές όπου η είσοδος θαλασσινού νερού στους υδροφορείς οδηγεί σε υποβάθμιση της ποιότητάς τους. Η παρουσία αλμυρού νερού μπορεί να ενισχύσει τη μεταφορά και διασπορά ρύπων, καθιστώντας τις περιοχές με έντονη διείσδυση ιδιαίτερα ευάλωτες στη ρύπανση των υπόγειων υδάτων. Στην υπό μελέτη περιοχή, η εδαφική υποβάθμιση εκτιμάται ως ιδιαίτερα υψηλή, καθώς το 75% της συνολικής έκτασης κατατάσσεται στον δείκτη 5, ο οποίος υποδηλώνει πολύ υψηλό επίπεδο επικινδυνότητας. Δεδομένου ότι η περιοχή είναι παράκτια και βρέχεται στα βόρεια από το Κρητικό Πέλαγος, οι ζώνες αλμυρού νερού εντοπίζονται κυρίως στο βόρειο τμήμα, επεκτείνοντας σταδιακά την επιρροή τους προς το εσωτερικό. Αντίθετα, το νότιο τμήμα της περιοχής εμφανίζει πολύ χαμηλή εδαφική επικινδυνότητα, καθώς δεν παρατηρούνται ενδείξεις αλμυρού νερού στο υπέδαφος.



Εικόνα 6.1.9 – Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας λόγω ζωνών αλμυρού νερού του εδάφους στην περιοχή μελέτης

Τεχνητή αποστράγγιση

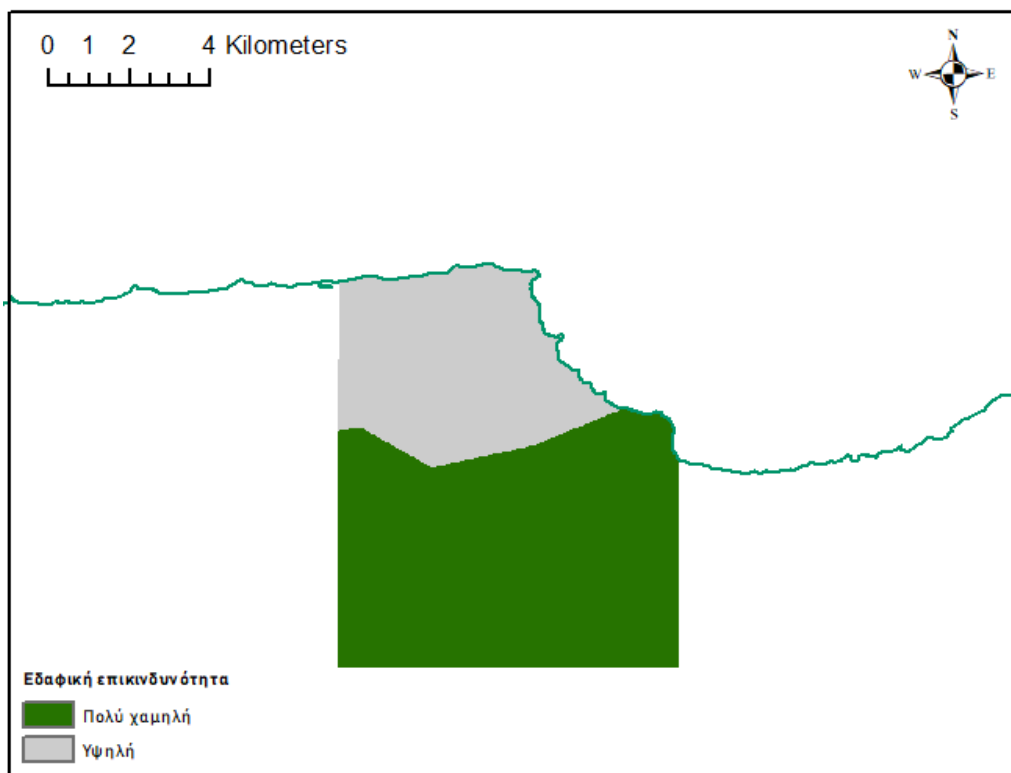
Η τεχνητή αποστράγγιση αποτελεί έναν ακόμη σημαντικό παράγοντα για την εκτίμηση της εδαφικής επικινδυνότητας, καθώς ρυθμίζει τη μεταφορά και συσσώρευση ρύπων στα υπόγεια υδάτινα συστήματα. Η έντονη γεωργική δραστηριότητα, η χρήση αρδευτικού νερού με αυξημένες συγκεντρώσεις ιχνοστοιχείων, η συνεχής έκπλυση του εδάφους και η εφαρμογή φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων συμβάλλουν στη διασπορά ρύπων και στη σταδιακή υποβάθμιση των υπόγειων υδάτων. Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, διαπιστώνεται ότι σχεδόν ολόκληρη η περιοχή, με εξαίρεση ένα περιορισμένο τμήμα στο βόρειο τμήμα της, παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλό κίνδυνο εδαφικής επικινδυνότητας, λόγω της εκτεταμένης εφαρμογής τεχνητών αποστραγγίσεων στη γεωργία.



Εικόνα 6.1.10 – Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας λόγω τεχνητής αποστράγγισης στην περιοχή μελέτης

Υδατική χωρητικότητα του εδάφους

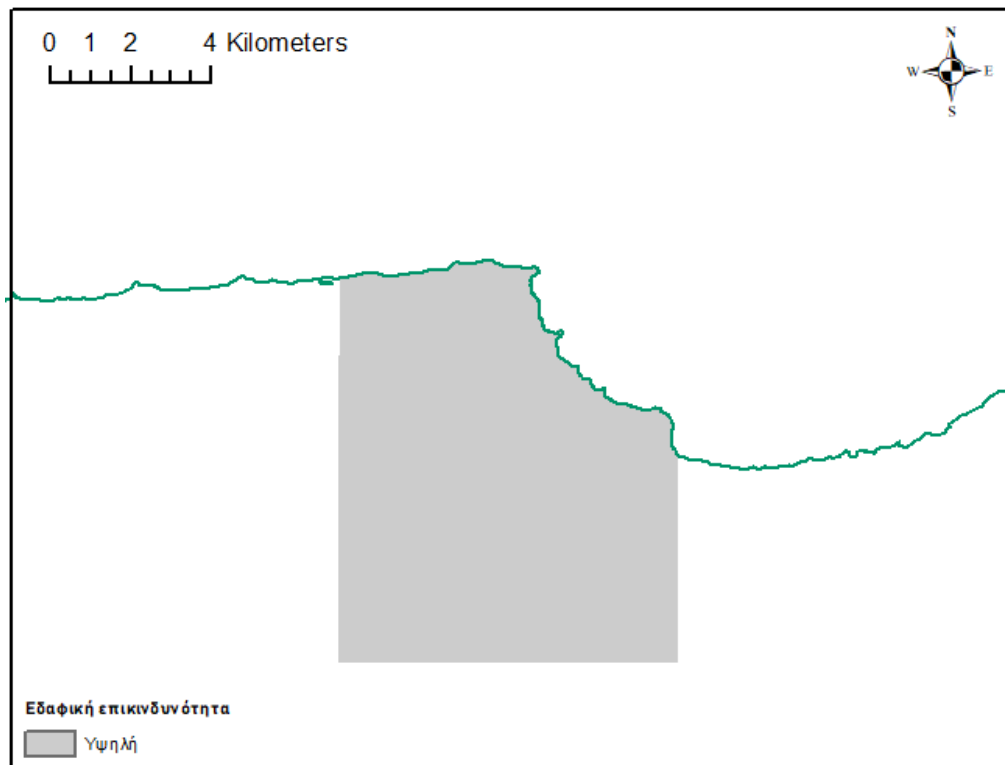
Η υδατική χωρητικότητα του εδάφους επηρεάζει σημαντικά την εδαφική επικινδυνότητα, καθώς επηρεάζει άμεσα τη μεταφορά, τη συγκράτηση και την αποικοδόμηση των ρύπων στο υπέδαφος. Σύμφωνα με τον θεματικό χάρτη, η περιοχή μελέτης κατατάσσεται σε δύο ζώνες εδαφικής επικινδυνότητας, οι οποίες καθορίζονται από την ικανότητα του εδάφους να συγκρατεί νερό σε βάθος ενός μέτρου. Το βόρειο τμήμα της περιοχής, το οποίο εμφανίζει υδατική χωρητικότητα μεταξύ 140 και 190 mm/m, παρουσιάζει αυξημένη ευαισθησία στη ρύπανση, καθώς η μεγαλύτερη συγκράτηση υγρασίας διευκολύνει τη μεταφορά ρύπων στα υπόγεια ύδατα. Για το λόγο αυτό, το βόρειο τμήμα κατατάσσεται στην κατηγορία υψηλής εδαφικής επικινδυνότητας. Αντιθέτως, το νότιο τμήμα χαρακτηρίζεται από χαμηλότερη υδατική χωρητικότητα, με μικρότερη ικανότητα συγκράτησης νερού, γεγονός που περιορίζει τη δυνατότητα μεταφοράς ρύπων και το καθιστά πολύ λιγότερο ευάλωτο στην εδαφική υποβάθμιση, κατατάσσοντας το σε ζώνη πολύ χαμηλής επικινδυνότητας.



Εικόνα 6.1.11 – Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας λόγω υδατικής χωρητικότητας του εδάφους στην περιοχή μελέτης

Βάθος εδάφους

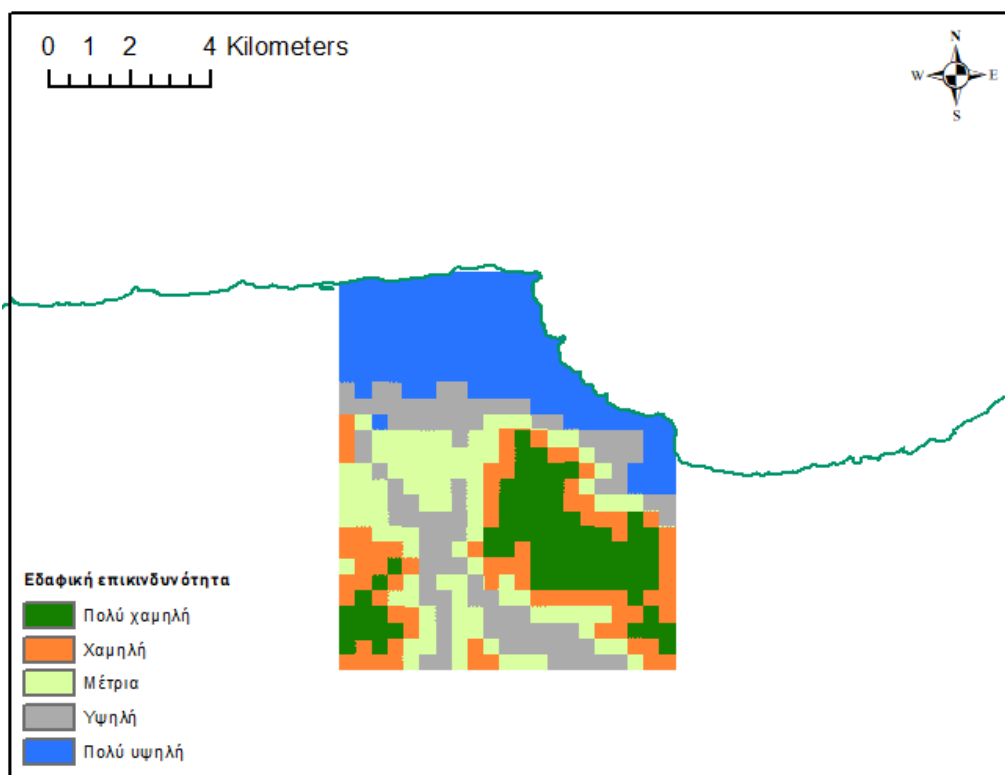
Το βάθος του εδάφους αποτελεί έναν κρίσιμο παράγοντα στην αποτροπή της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων, καθώς όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος του εδάφους, τόσο περιορίζονται οι πιθανότητες μεταφοράς των ρύπων προς τον υδροφόρο ορίζοντα. Το έδαφος λειτουργεί ως φίλτρο μέσω διάφορων διεργασιών, όπως η προσρόφηση, η διάλυση και η βιολογική αποδόμηση, οι οποίες συμβάλλουν στη μείωση της μεταφοράς επικίνδυνων ουσιών στο υπέδαφος. Ειδικότερα, όσο βαθύτερο είναι το έδαφος, τόσο μικρότερη είναι η πιθανότητα να φτάσουν οι ρύποι στον υδροφόρο ορίζοντα, και επομένως μειώνεται ο κίνδυνος μόλυνσης των υπόγειων υδάτων. Αντιθέτως, όσο πιο ρηχό είναι το έδαφος, τόσο μεγαλύτερος είναι ο κίνδυνος ρύπανσης των υπόγειων υδάτων. Στην περιοχή μελέτης, το βάθος του εδάφους κυμαίνεται μεταξύ 40 και 80 cm, γεγονός που κατατάσσει την περιοχή σε υψηλό κίνδυνο εδαφικής επικινδυνότητας.



Εικόνα 6.1.12 – Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας λόγω βάθους εδάφους στην περιοχή μελέτης

Βάθος του υδροφόρου ορίζοντα

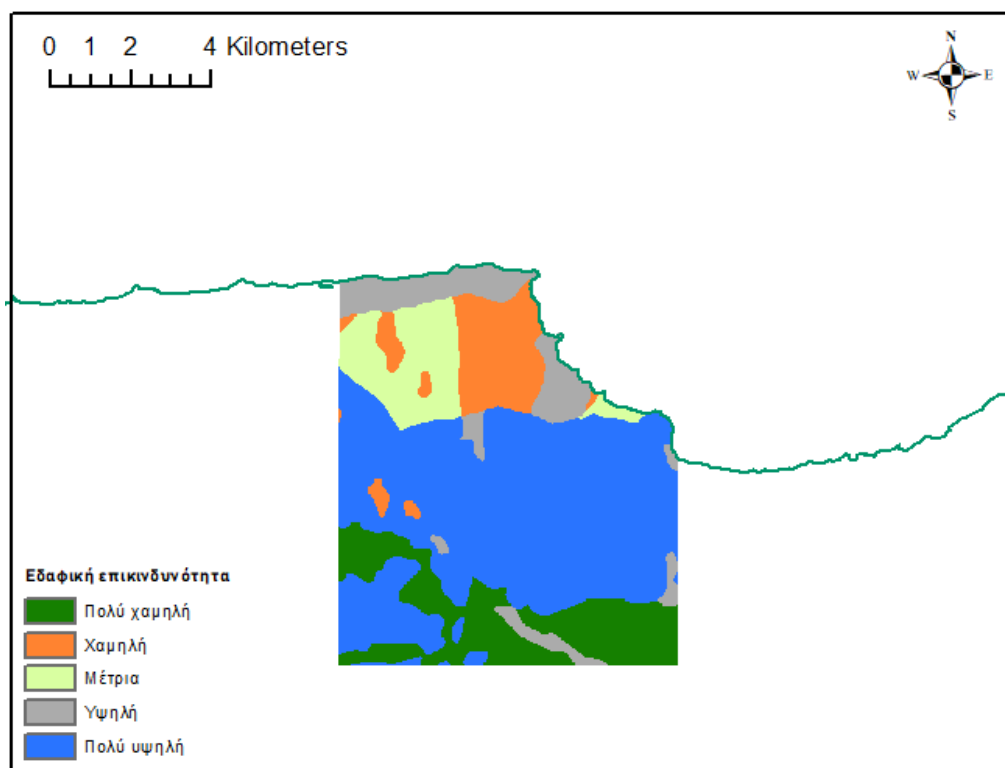
Το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα αποτελεί εξίσου κρίσιμο παράγοντα για την εκτίμηση της εδαφικής επικινδυνότητας από ρύπανση, καθώς προσδιορίζει την απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους έως το σημείο όπου εντοπίζονται τα υπόγεια ύδατα. Όσο μικρότερο είναι το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα, τόσο μεγαλύτερος είναι ο κίνδυνος μόλυνσης, καθώς οι ρύποι έχουν μικρότερη απόσταση να διανύσουν πριν φτάσουν στο υπόγειο υδατικό σύστημα και, κατά συνέπεια, είναι πιο εύκολο να το προσβάλλουν. Σύμφωνα με τον παρακάτω χάρτη, η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από όλες τις κλάσεις κινδύνου. Στο βόρειο τμήμα της περιοχής, η χωρική εκτίμηση κινδύνου είναι ομοιόμορφη, με δείκτη 5 (πολύ υψηλός), καθώς το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα κυμαίνεται μεταξύ 0 και 48 μέτρων, καθιστώντας το υπόγειο υδατικό σύστημα ιδιαίτερα ευάλωτο στη ρύπανση. Στην υπόλοιπη περιοχή, η κατανομή είναι ετερογενής, με διάσπαρτες περιοχές υψηλού και μεσαίου κινδύνου, ενώ εντοπίζονται και ζώνες με πολύ χαμηλή εκτίμηση κινδύνου, όπου το μεγαλύτερο βάθος του υδροφόρου ορίζοντα μειώνει σημαντικά την πιθανότητα ρύπανσης.



Εικόνα 6.1.13 – Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας λόγω βάθους του υδροφόρου ορίζοντα στην περιοχή μελέτης

Γεωλογικοί σχηματισμοί του υπεδάφους

Η γεωλογική σύσταση των εδαφών στην περιοχή μελέτης αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την εκτίμηση της εδαφικής επικινδυνότητας από ρύπανση, καθώς επηρεάζει το πορώδες και την υδροπερατότητα των σχηματισμών. Το πορώδες αναφέρεται στον συνολικό όγκο του εδάφους που καταλαμβάνει η αέρια και υγρή φάση, ενώ η υδροπερατότητα καθορίζει την ικανότητα των γεωλογικών σχηματισμών να επιτρέπουν τη ροή και διασπορά των ρύπων. Όσο μεγαλύτερη είναι η υδροπερατότητα, τόσο αυξάνεται η ευκολία με την οποία οι ρύποι μπορούν να μετακινηθούν και να διεισδύσουν στα υπόγεια υδατικά συστήματα. Σύμφωνα με τον θεματικό χάρτη της υδρογεωλογίας, διαπιστώνεται ότι στις περιοχές όπου κυριαρχούν αδιαπέρατοι σχηματισμοί με χαμηλή υδροπερατότητα, ο δείκτης επικινδυνότητας είναι πολύ χαμηλός. Αυτό παρατηρείται κυρίως στο νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης. Αντίθετα, στο βόρειο τμήμα εμφανίζονται εδάφη υψηλού κινδύνου, τα οποία χαρακτηρίζονται από κοκκώδεις σχηματισμούς με κυμαινόμενη υδροπερατότητα, καθώς και μεσαίου κινδύνου από μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας. Επιπλέον, στο βόρειο τμήμα εντοπίζονται και περιοχές χαμηλού κινδύνου, όπου κυριαρχούν μη προσχωματικές κοκκώδεις αποθέσεις με μικρή έως πολύ μικρή υδροπερατότητα, περιορίζοντας έτσι την πιθανή διασπορά των ρύπων. Τέλος, στις περιοχές που χαρακτηρίζονται από γεωλογικούς καρστικούς σχηματισμούς με υψηλή υδροπερατότητα, η ευπάθεια του εδάφους είναι ιδιαίτερα αυξημένη, καθιστώντας το έδαφος εξαιρετικά ευάλωτο στη ρύπανση. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται κυρίως στο κεντρικό τμήμα της περιοχής μελέτης, καταλαμβάνοντας το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής έκτασής της.

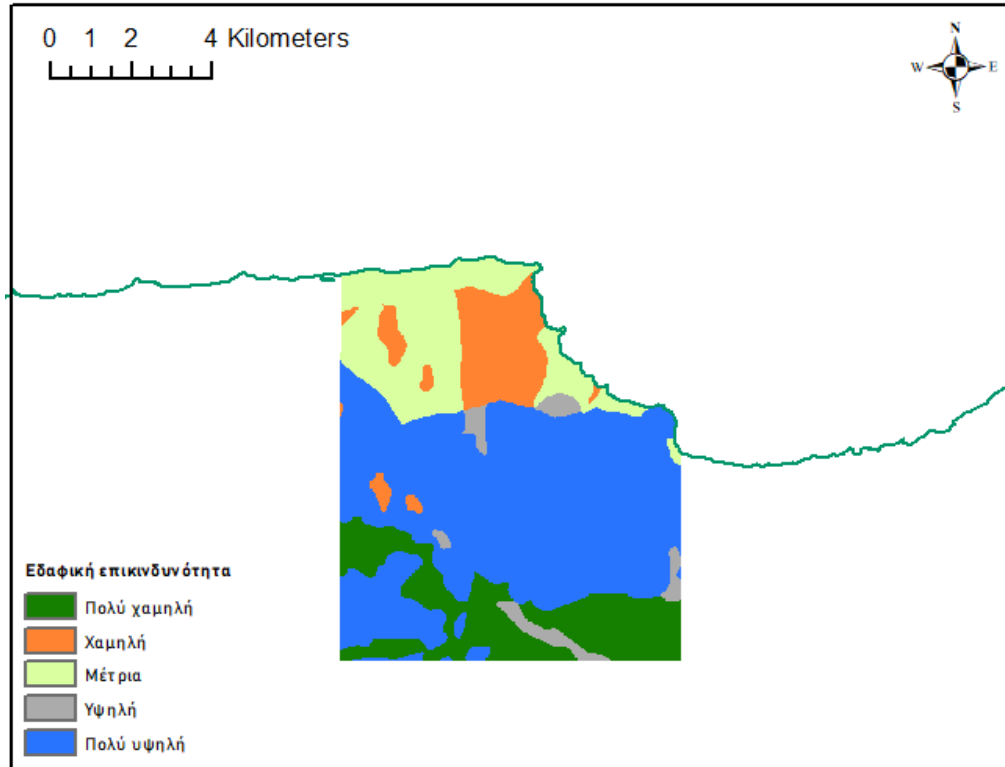


Εικόνα 6.1.14 – Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας λόγω γεωλογικών σχηματισμών του υπεδάφους στην περιοχή μελέτης

Ταχύτητα ροής υπεδάφους

Η ταχύτητα ροής των υπόγειων υδάτων αποτελεί έναν βασικό παράγοντα για την εκτίμηση της εδαφικής επικινδυνότητας, καθώς επηρεάζει άμεσα τη μεταφορά και διασπορά των ρύπων στους υδροφορείς. Σύμφωνα με τον θεματικό χάρτη της ταχύτητας ροής υπεδάφους στην περιοχή μελέτης, παρατηρείται έντονη διαφοροποίηση μεταξύ των επιμέρους ζωνών, γεγονός που συνδέεται άμεσα με τη γεωλογική σύσταση των σχηματισμών. Στα νότια της περιοχής, όπου εμφανίζονται αδιαπέρατοι σχηματισμοί (A1 και A2), η ταχύτητα ροής του υπόγειου νερού εκτιμάται ως πολύ χαμηλή, περιορίζοντας σημαντικά την κίνηση των ρύπων και μειώνοντας την εδαφική επικινδυνότητα. Αντίθετα, στο κεντρικό τμήμα, οι καρστικοί σχηματισμοί υψηλής υδροπερατότητας επιτρέπουν την ταχεία μεταφορά των ρύπων, καθιστώντας τα υπόγεια ύδατα ιδιαίτερα ευάλωτα, με την περιοχή να κατατάσσεται στον υψηλότερο δείκτη επικινδυνότητας (5). Στα βόρεια, όπου απαντώνται σχηματισμοί μέτριας και χαμηλής υδροπερατότητας (P1-cd, P2 και P3), η ταχύτητα ροής είναι μέτρια, γεγονός που αντιστοιχεί σε χαμηλότερο κίνδυνο ρύπανσης. Τέλος, σποραδικά υπάρχουν ιδιαίτερα διαπερατοί σχηματισμοί, όπως οι ιζηματογενείς σχηματισμοί (P1) στους οποίους η υψηλή ταχύτητα ροής αυξάνει σημαντικά τον κίνδυνο εδαφικής επικινδυνότητας. Συνολικά, οι ζώνες υψηλού και πολύ υψηλού κινδύνου

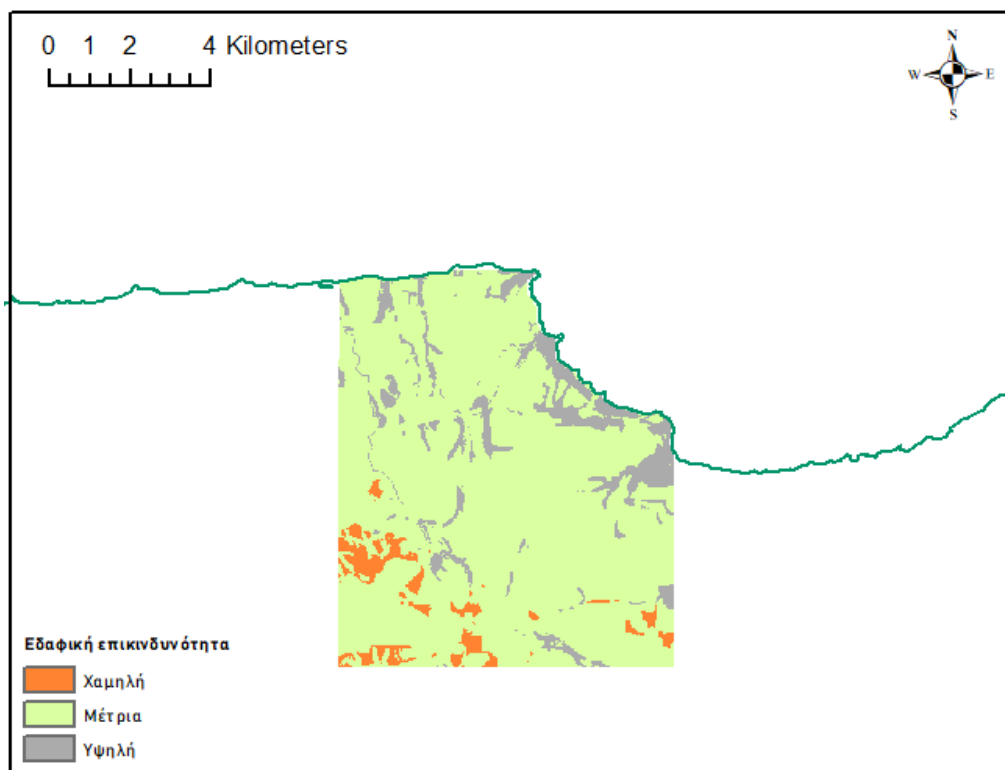
καλύπτουν το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης, γεγονός που υποδηλώνει αυξημένη ευπάθεια των υπόγειων υδάτων στη ρύπανση λόγω ταχύτητα ροής υπεδάφους.



Εικόνα 6.1.15 – Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας λόγω ταχύτητας ροής υπεδάφους στην περιοχή μελέτης

6.2 Συνδυαστική Χωρική Εδαφική Επικινδυνότητα

Για την ολοκλήρωση της παρούσας μελέτης, δημιουργήθηκε ένας συνολικός χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας, ο οποίος προέκυψε από την αλληλεπίδραση των 15 επιμέρους θεματικών χαρτών, σύμφωνα με τη μεθοδολογία των [Kourgialas & Karatzas, 2015]. Η σύνθεση του τελικού χάρτη επιτεύχθηκε μέσω της μεθόδου της σταθμισμένης αλληλοεπικάλυψης, λαμβάνοντας υπόψη τον βαθμό επιρροής κάθε παράγοντα στη συνολική εδαφική επικινδυνότητα καθώς και στην αλληλεπίδραση με τους υπόλοιπους παράγοντες. Στο πλαίσιο του συστήματος γεωγραφικών πληροφοριών (GIS) και με τη χρήση του εργαλείου Raster Calculator του λογισμικού ArcMap, πραγματοποιήθηκε η διαδικασία αλληλοεπικάλυψης, η οποία εξασφάλισε την ολοκληρωμένη εκτίμηση της εδαφικής επικινδυνότητας για την περιοχή μελέτης, όπως απεικονίζεται στον παρακάτω χάρτη.



Εικόνα 6.2.1 – Χάρτης συνολικής εδαφικής επικινδυνότητας της περιοχή μελέτης

Η συνολική εδαφική επικινδυνότητα στην περιοχή μελέτης, όπως προκύπτει από τη σταθμισμένη ανάλυση των 15 παραμέτρων, κατατάσσεται σε τρεις βαθμίδες κινδύνου: χαμηλή, μεσαία και υψηλή. Σύμφωνα με τον θεματικό χάρτη, η επικρατέστερη κατηγορία είναι η μεσαία επικινδυνότητα (δείκτης 3), η οποία καλύπτει το μεγαλύτερο ποσοστό της περιοχής και κατανέμεται ομοιόμορφα στον χώρο. Στο νότιο τμήμα εντοπίζονται σποραδικές ζώνες χαμηλού κινδύνου, ενώ αντίθετα, στα βόρεια και στα παράκτια τμήματα, ο κίνδυνος ρύπανσης είναι αυξημένος. Επιπλέον, παρατηρούνται διάσπαρτες περιοχές υψηλού κινδύνου κατά μήκος της περιοχής μελέτης.

7. Συμπεράσματα

Η εκτίμηση της εδαφικής επικινδυνότητας των υπόγειων υδάτων σε μορφές ρύπανσης αποτελεί μια πολυδιάστατη ανάλυση της συμπεριφοράς των ρύπων στο υπέδαφος, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους όσο και τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Η παρούσα διπλωματική μελέτη προσφέρει μια λεπτομερή προσέγγιση στην ευπάθεια ρύπανσης των υδροφόρων συστημάτων της περιοχής της Χερσονήσου, ενσωματώνοντας 15 παράγοντες που σχετίζονται με τη χωρική ετερογένεια του υδροφορέα, τις εδαφικές διαστρωματώσεις της περιοχής μελέτης και τις φυσικοχημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα, καθώς και με περιγραφικά δεδομένα ανθρωπογενών δραστηριοτήτων. Η αξιολόγηση της επικινδυνότητας βασίστηκε στην αλληλεπίδραση μεταξύ γεωγενών και ανθρωπογενών παραγόντων, αξιοποιώντας αναλυτικά και αριθμητικά εργαλεία εντός του πλαισίου GIS. Για τη χωρική ανάλυση δημιουργήθηκαν 15 θεματικοί χάρτες επικινδυνότητας, ένας για κάθε παράγοντα, αποτυπώνοντας τον βαθμό κινδύνου στην περιοχή μελέτης σε πέντε κλάσεις κινδύνου: πολύ χαμηλή, χαμηλή, μεσαία, υψηλή και πολύ υψηλή. Στη συνέχεια, οι θεματικοί χάρτες συνδυάστηκαν με τη μέθοδο της σταθμισμένης για την εκτίμηση της συνολικής εδαφικής επικινδυνότητας.

Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένας συνολικός χάρτης επικινδυνότητας, ο οποίος ταξινομεί την περιοχή μελέτης σε τρεις κλάσεις κινδύνου: χαμηλή, μεσαία και υψηλή. Το βόρειο τμήμα της περιοχής εμφανίζει υψηλό κίνδυνο, ενώ διάσπαρτες μικρές ζώνες αυξημένης επικινδυνότητας εντοπίζονται και σε διάφορα εσωτερικά σημεία. Στη μεγαλύτερη έκταση της περιοχής, η επικινδυνότητα χαρακτηρίζεται ως μεσαία, ενώ στο νότιο τμήμα παρατηρούνται περιοχές με χαμηλό δείκτη επικινδυνότητας. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την κατανομή της επικινδυνότητας είναι οι χρήσεις γης, το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα, οι γεωλογικοί σχηματισμοί του υπεδάφους, η συσσώρευση απορροής και η εγγύτητα σε ποτάμια. Οι θεματικοί χάρτες των χρήσεων γης, του μικρού βάθους του υδροφόρου ορίζοντα και των γεωλογικών σχηματισμών παρουσιάζουν αυξημένες πιέσεις στο βόρειο τμήμα της περιοχής, γεγονός που επιβεβαιώνει τις περιοχές υψηλού κινδύνου που παρουσιάζονται στον τελικό χάρτη. Επιπλέον, η έντονη συσσώρευση απορροής και η εγγύτητα σε ποτάμια αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες, επίσης άμεσα συνδεδεμένους με τις περιοχές υψηλού κινδύνου στα σποραδικά τμήματα στον τελικό χάρτη. Αντίθετα, στο νότιο τμήμα, όπου η επικινδυνότητα είναι χαμηλή, οι περισσότεροι θεματικοί χάρτες δείχνουν χαμηλή έως πολύ χαμηλή επικινδυνότητα, επιβεβαιώνοντας τη γενική τάση της μειωμένης ευπάθειας και κινδύνου σε αυτό το τμήμα της περιοχής μελέτης.

Η σημασία της παρούσας μελέτης έγκειται στη συμβολή της στην προστασία των υπόγειων υδάτων, τον χωροταξικό σχεδιασμό και τη διαχείριση των υδατικών πόρων, ιδιαίτερα σε περιοχές με πολύπλοκες υδρογεωλογικές συνθήκες, όπως η Κρήτη. Η αξιοποίηση προηγμένων γεωστατιστικών μεθόδων και τεχνικών GIS επιτρέπει μια πιο ακριβή εκτίμηση της ευπάθειας των υπόγειων υδάτων στη ρύπανση, παρέχοντας πολύτιμα δεδομένα για τη λήψη στοχευμένων μέτρων διαχείρισης. Τα ευρήματα της μελέτης μπορούν να αξιοποιηθούν για τη διαμόρφωση βιώσιμων στρατηγικών προστασίας, τη βελτιστοποίηση της χρήσης γης και τον περιορισμό των αρνητικών επιπτώσεων των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων στην ποιότητα των υδάτων. Παράλληλα, η μελέτη συμβάλλει στην πρόληψη και τον έγκαιρο εντοπισμό περιβαλλοντικών κινδύνων, διευκολύνοντας τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων από αρμόδιους φορείς και περιβαλλοντικές αρχές. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στον σχεδιασμό νέων υποδομών

και έργων, ειδικά στις περιοχές υψηλού κινδύνου. Προτείνεται τα νέα αναπτυξιακά σχέδια να εστιάζουν σε περιοχές με χαμηλό δείκτη επικινδυνότητας, όπως το νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης, όπου επικρατούν αδιαπέρατοι γεωλογικοί σχηματισμοί και μεγάλα βάθη υδροφόρου ορίζοντα, διασφαλίζοντας έτσι την αειφόρο διαχείριση των υδάτινων πόρων.

Παρά τη σημασία και την εφαρμοσιμότητα της παρούσας μελέτης, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας σε καρστικούς υδροφορείς ενδέχεται να αντιμετωπίσει προκλήσεις λόγω της υψηλής ετερογένειας και της μη γραμμικής συμπεριφοράς της ροής του νερού, γεγονός που απαιτεί την υιοθέτηση πιο εξειδικευμένων τεχνικών προσομοίωσης. Για μελλοντική έρευνα, προτείνεται η αξιοποίηση τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης, καθώς και η ενσωμάτωση δεδομένων από δορυφορικές τεχνολογίες για τη συνεχή παρακολούθηση των υδατικών πόρων. Η εισαγωγή παραμέτρων που σχετίζονται με πηγές και απώλειες νερού από επιφανειακά ύδατα, η αλληλεπίδραση νερού μεταξύ υπόγειου και επιφανειακού συστήματος, καθώς και η διάχυση και διασπορά ρύπων, θα προσδώσουν μεγαλύτερη ακρίβεια στην εκτίμηση της τρωτότητας. Επιπλέον, θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν πιο λεπτομερή περιγραφικά δεδομένα για τις χρήσεις γης, διαχωρίζοντας τις καλλιεργούμενες περιοχές και τη χρήση φυτοφαρμάκων, προκειμένου να επιτευχθεί μια ακριβέστερη εκτίμηση της επίδρασης αυτών των παραμέτρων στη ρύπανση των υπόγειων υδάτων.

Βιβλιογραφία

Ξένη βιβλιογραφία

- Al-Sudani, H. I. Z. (2019). A review on groundwater pollution. *International Journal of Recent Engineering Science (IJRES)*, 6(5), 14-22.
- Anderson, W. I., & Witching, W. *Geology and Water*
- Ashraf, M. A., Maah, M. J., & Yusoff, I. (2014). Soil contamination, risk assessment and remediation. *Environmental risk assessment of soil contamination*, 1, 3-56.
- Barnes G.E. 2010. *Soil Mechanics – Principles and practice*, Third edition
- Brutsaert, W. (2023). *Hydrology: an introduction*. Cambridge university press.
- Burrough, P. A., McDonnell, R. A., & Lloyd, C. D. (2015). *Principles of geographical information systems*. Oxford University Press, USA
- Civita, M. V. (2010). The combined approach when assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination. *J Water Resour Prot* 2: 14–28.
- Deckers, J. A., & Nachtergaele, F. (1998). *World reference base for soil resources: Introduction* (Vol. 1). Acco.
- Dinh Chau, N., Dulinski, M., Jodlowski, P., Nowak, J., Rozanski, K., Sleziak, M., & Wachniew, P. (2011). Natural radioactivity in groundwater—a review. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 47(4), 415-437.
- Douville, H., Raghavan, K., Renwick, J., Allan, R. P., Arias, P. A., Barlow, M., ... & Zolina, O. (2021). *Water cycle changes*.
- Europe's groundwater a key resource under pressure, European Environment Agency, 2022
- Eurostat – Statistics Explained - water
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) 2012. *Coping with water scarcity : an action framework for agriculture and food security*. Rome
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2022, *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at breaking point*. Main report. Rome.
- Hou, D., O'Connor, D., Nathanail, P., Tian, L., & Ma, Y. (2017). Integrated GIS and multivariate statistical analysis for regional scale assessment of heavy metal soil contamination: A critical review. *Environmental Pollution*, 231, 1188-1200.
- Kabelka, D., Kincl, D., Janeček, M., Vopravil, J., & Vráblík, P. (2019). Reduction in soil organic matter loss caused by water erosion in inter-rows of hop gardens. *Soil & Water Research*, 14(3).

- Kehew, A. E. (2021). *Geology for engineers and environmental scientists*. Waveland Press.
- Khedr, M. G. (2013). Radioactive contamination of groundwater, special aspects and advantages of removal by reverse osmosis and nanofiltration. *Desalination*, 321, 47-54.
- Kim, N. W., Chung, I. M., Won, Y. S., & Arnold, J. G. (2008). Development and application of the integrated SWAT–MODFLOW model. *Journal of hydrology*, 356(1-2), 1-16.
- Kourgialas, N. N., & Karatzas, G. P. (2015). Groundwater contamination risk assessment in Crete, Greece, using numerical tools within a GIS framework. *Hydrological Sciences Journal*, 60(1), 111-132.
- Li, P., Karunanidhi, D., Subramani, T., & Srinivasamoorthy, K. (2021). Sources and consequences of groundwater contamination. *Archives of environmental contamination and toxicology*, 80, 1-10.
- Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International journal of geographical information science*, 20(7), 703-726.
- Mantel, S., Dondeyne, S., & Deckers, S. (2023). World reference base for soil resources (WRB). Goss, Margaret Oliver *Encyclopedia of Soils in the Environment*, 2nd ed.; Michael, J., Ed, 206-217.
- Matzeu, A., Secci, R., & Uras, G. (2017). Methodological approach to assessment of groundwater contamination risk in an agricultural area. *Agricultural water management*, 184, 46-58.
- Merchant, J. W. (1994). GIS-based groundwater pollution hazard assessment: a critical review of the DRASTIC model. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 60, 1117-1117.
- Mirsal, I. A. (2008). *Soil pollution* (pp. 117-136). Berlin: Springer.
- Osman, K. T., & Osman, K. T. (2014). Soil erosion by water. *Soil degradation, conservation and remediation*, 69-101.
- Pappa, A., Dokou, Z., & Karatzas, G. P. (2017). Saltwater intrusion management using the SWI2 model: application in the coastal aquifer of Hersonissos, Crete, Greece. *Desalin. Water Treat*, 99, 49-58
- Paul Driessen & Jozef Deckers, (2001), *Lecture notes on the major soils of the world*, FAO
- Quantin, P., & Spaargaren, O. (2007). Classification of the reference pedons: world reference base for soil resources and soil taxonomy. In *Soils of Volcanic Regions in Europe* (pp. 231-249). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Raju, K. S., & Kumar, D. N. (2018). Impact of climate change on water resources. *Clim. Chang. Model. Plan. Policy Agric*, 219-231.

Steve Graham, Claire Parkinson, and Mous Chahine, (2010). The Water Cycle, NASA, Earth observatory

Stolte J., Tesfai M, Øygarden L, Kværnø S, Keizer J, Verheijen F, Panagos P, Ballabio C & Hessel R. (Eds.). (2015). Soil threats in Europe. Luxembourg: Publications Office.

Van Beek, C. L., & Tóth, G. (2012). Risk assessment methodologies of soil threats in Europe. JRC Scientific and Policy Reports EUR, 24097.

Wang, J., He, J., & Chen, H. (2012). Assessment of groundwater contamination risk using hazard quantification, a modified DRASTIC model and groundwater value, Beijing Plain, China. Science of the total environment, 432, 216-226.

Yang, D., Yang, Y., & Xia, J. (2021). Hydrological cycle and water resources in a changing world: A review. Geography and Sustainability, 2(2), 115-122.

Zerger, A. (2002). Examining GIS decision utility for natural hazard risk modelling. Environmental modelling & software, 17(3), 287-294.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Ανακοίνωση της Επιτροπής προς το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, το Συμβούλιο, την Ευρωπαϊκή Οικονομική και Κοινωνική Επιτροπή και την Επιτροπή των Περιφερειών. Στρατηγική της ΕΕ για τη βιοποικιλότητα για το 2030. Επαναφέροντας τη φύση στη ζωή μας, Ευρωπαϊκή Επιτροπή, Βρυξέλλες, Μάιος 2020

Γιαουρτά, Σ. Π. (2013). Χωρικός σχεδιασμός στη βόρεια παράκτια ζώνη της περιφερειακής ενότητας Ηρακλείου: αποτίμηση και προοπτικές

Ελληνική Στατιστική Αρχή; Εσωτερικά Ύδατα 2022; Πίνακας 1. Απολήψεις υδάτων κατά πηγή και κατά κλάδο

Κρεμμύδας, Η. Ν. (2011). Επίδραση επιβραδυντών δασικών πυρκαγιών στο έδαφος: μελέτη απορροής φωσφορικών ιόντων από δασικό έδαφος σε εργαστηριακή κλίμακα (Bachelor's thesis).

Λιονής Μ., Περλέρος, Β. 2001. Υδρογεωλογική Μελέτη Κάμπου Χανίων. Υπουργείο Γεωργίας.

Μπάλιας Γ. (2009) Περιβαλλοντικοί κίνδυνοι: διαπλοκή επιστήμης, δίκαιου και πολιτικής, εκδόσεις Αντ.Ν. Σάκκουλα, Αθήνα, 2009, σ. 1-24.

Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2000 για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων

Σιδηροπούλου, Ι. Π. (2012). Προσδιορισμός NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} και Mg^{2+} στο έδαφος πλησίον χοιροτροφικής μονάδας μεγάλης δυναμικότητας στη Βόρεια Κρήτη

Σιούτη Π. Γλυκερία (2018). Εγχειρίδιο Δικαίου Περιβάλλοντος

Τσακίρης Γ. (2013). Υδατικοί πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία & Εισαγωγή στη διαχείριση υδατικών πόρων.

Τσουχλαράκη Α. & Αχιλλέως Γ. (2015), Μαθαίνοντας τα GIS στην πράξη – το ArcGIS 9.3

Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία

Esri. (2016). ArcMap 10.5 [λογισμικό ΓΣΠ]. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute. Δορυφορικό υπόβαθρο: World Imagery.

Δήμος Χερσονήσου. (χ.χ.). Επίσημος ιστότοπος του Δήμου Χερσονήσου.
<https://www.hersonisos.gr/>

Meteoblue. (2024). Ιστορικά μετεωρολογικά δεδομένα – Περιοχή Ηρακλείου. Διαθέσιμο από:
<https://www.meteoblue.com/el>

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Δασικοί Χάρτες – Θεματικά Επίπεδα Χαρτογράφησης. Ανακτήθηκε 1 Ιουνίου 2025, από <https://mapsportal.ypen.gr/maps/299>