



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ  
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας

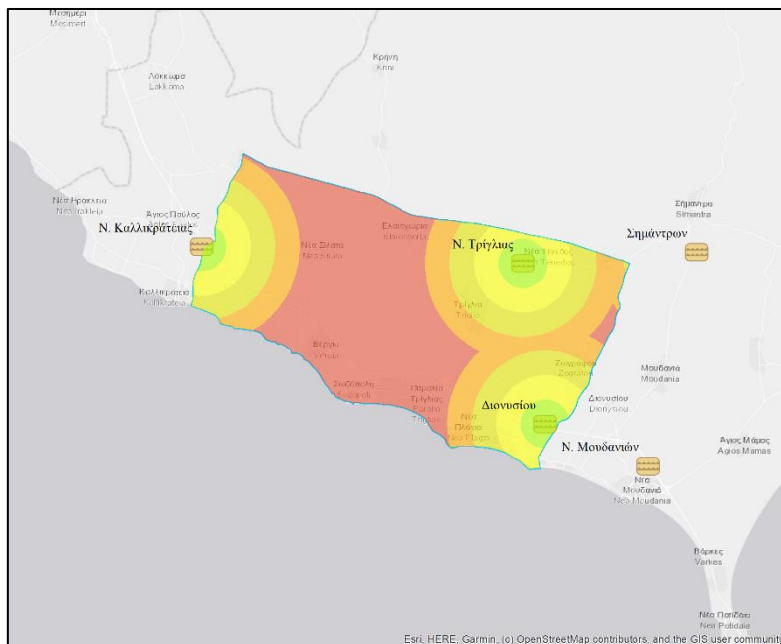


ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ Χ. ΣΩΤΗΡΗΣ  
Πτυχιούχος Γεωλόγος

## ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΖΩΝΩΝ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:  
'ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ',  
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: ΤΕΧΝΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ*



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ  
2023



[λευκή σελίδα]



ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ Χ. ΣΩΤΗΡΗΣ  
Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΖΩΝΩΝ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ  
ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών  
Σπουδών 'Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία', Κατεύθυνση 'Τεχνική  
Γεωλογία και Περιβάλλον'

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 30/10/2023

Επιβλέπων: Βουδούρης Κωνσταντίνος, Καθηγητής Υδρογεωλογίας  
Επικουρία στην επίβλεψη: Καζάκης Νεραντζής, Δρ. Υδρογεωλογίας

**Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή**

Επιβλέπων: Βουδούρης Κωνσταντίνος, Καθηγητής Υδρογεωλογίας  
Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής: Κακλής Τριαντάφυλλος, ΕΔΙΠ  
Μέλος Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής: Μάττας Χρήστος, ΕΔΙΠ



© Ευάγγελος Χ. Σωτήρης, Γεωλόγος, 2023

Με την επιφύλαξη κάποιων δικαιωμάτων

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΖΩΝΩΝ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ – *Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία*

Το έργο παρέχεται υπό τους όρους Creative Commons CC BY-NC-SA 4.0.

© Evangelos Ch. Sotiris, Geologist, 2023

Some rights reserved.

METHODOLOGY FOR DELINEATION OF MANAGED AQUIFERS' RECHARGE ZONES USING GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS – *Master Thesis*

The work is provided under the terms of Creative Commons CC BY-NC-SA 4.0.

#### Citation:

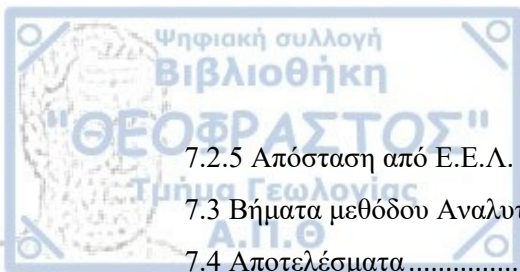
Σωτήρης Ε. Χ., 2023. – Μεθοδολογία για προσδιορισμό ζωνών τεχνητού εμπλουτισμού των υπόγειων υδροφορέων με χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., 65 σελ.

Sotiris E. Ch., 2023. – Methodology for delineation of Managed Aquifers' Recharge zones using Geographical Information Systems. Master Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 65 pp.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.  
*Εικόνα Εξωφύλλου: Απόκομμα χάρτη της περιοχής έρευνας με την εγγύτητα σε Ε.Ε.Α.*



<b>1. ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	1
1.1 Περίληψη.....	1
Abstract .....	2
<b>2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	3
2.1 Στόχος.....	3
2.2 Περιοχή έρευνας.....	3
2.3 Εργασίες που υλοποιήθηκαν .....	4
<b>3. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ</b> .....	5
3.1 Γεωγραφικά στοιχεία περιοχής έρευνας.....	5
3.2 Πληθυσμός περιοχής έρευνας .....	5
3.3 Μορφολογία .....	7
3.4 Υδρογραφικά στοιχεία .....	7
3.5 Κλίμα περιοχής έρευνας.....	8
<b>4. ΓΕΩΛΟΓΙΑ</b> .....	13
4.1 Γεωλογία ευρύτερης περιοχής.....	13
4.2 Γεωλογία περιοχής έρευνας.....	15
<b>5. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ</b> .....	19
5.1 Γενικά υδρογεωλογικά στοιχεία.....	19
5.2 Πιεζομετρία και αποθέματα .....	21
5.3. Ποιότητα υπόγειου νερού.....	23
<b>6. ΤΕΧΝΗΤΟΣ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ</b> .....	28
6.1 Μέθοδοι τεχνητού εμπλουτισμού.....	28
6.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις τεχνητού εμπλουτισμού .....	32
6.3 Εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού με επεξεργασμένα λύματα.....	36
6.4 Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων περιοχής έρευνας .....	36
6.5 Εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού στον Ελληνικό χώρο.....	39
<b>7. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ</b> .....	42
7.1 Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP) .....	42
7.2 Παραμετροποίηση τεχνητού εμπλουτισμού .....	42
7.2.1 Λιθολογία .....	45
7.2.2 Υδροπερατότητα .....	46
7.2.3 Βάθος υδροφόρου ορίζοντα .....	46
7.2.4 Τοπογραφική κλίση.....	47



7.2.5 Απόσταση από Ε.Ε.Λ.....	48
7.3 Βήματα μεθόδου Αναλυτικής Ιεράρχησης (ΑΗΡ) .....	49
7.4 Αποτελέσματα.....	52
<b>8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>54</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....</b>	<b>55</b>
<b>9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>56</b>



## 1.1 Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών «Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία», του τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτέλειου Πανεπιστήμιου Θεσσαλονίκης (Α.Π.Θ.). Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο προσδιορισμός ευνοϊκών ζωνών για την εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού σε παράκτιο υδροφορέα στην Περιφερειακή Ενότητα Χαλκιδικής και η παραγωγή ενός τελικού χάρτη καταλληλότητας που αναπαριστά τις θέσεις αυτές στην περιοχή έρευνας. Η διπλωματική εργασία βασίζεται στη χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS) και στη Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP) για την παραγωγή του χάρτη καταλληλότητας εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού στην περιοχή έρευνας.

Η διπλωματική εργασία ανά κεφάλαιο δομείται αρχικά από την περιγραφή της περιοχής έρευνας από βιβλιογραφικά στοιχεία και μελέτες, που σχετίζονται με την γεωγραφία της περιοχής, πληθυσμιακά στοιχεία, γεωμορφολογική περιγραφή του ανάγλυφου και παράθεση των κλιματικών δεδομένων από κοντινούς μετεωρολογικούς σταθμούς. Εν συνεχεία, παρατίθεται αναλυτικά η γεωλογία της ευρύτερης γεωτεκτονικής ζώνης και οι τοπικές γεωλογικές συνθήκες στην περιοχή έρευνας μέσω γεωλογικών χαρτών και τομών, καθώς και το υδρογεωλογικό καθεστώς που παρουσιάζει η ευρύτερη περιοχή του δυτικού τμήματος της Χαλκιδικής. Επιπρόσθετα, αναλύεται εκτενώς το κεφάλαιο που αφορά τη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό ζωνών για την εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού.

Εν κατακλείδι, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας και αναφέρονται αναλυτικά τα συμπεράσματα που προκύπτουν στο πλαίσιο της σωστής διαχείρισης των υδατικών πόρων μιας περιοχής.

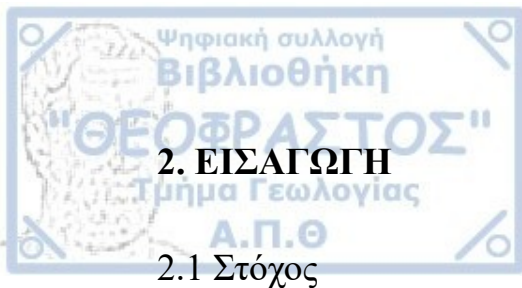


The current Master Thesis was devised in the context of the postgraduate program of «Applied and Environmental Geology» of Geology School at Aristotle University of Thessaloniki (A.U.Th). The main target of this thesis is definition of favorable zones to apply artificial recharge on coastal aquifer at Chalkidiki prefecture and then production of the suitability map for applying Managed Aquifer Recharge (MAR). Current thesis is based on Geographical Information Systems (GIS) and Analytic Hierarchy Process (AHP) in order to create the final suitability map for aquifer recharge at the area of interest.

Initially, thesis is structured with the description of the area of interest by literature studies, which are concerned with geographical and population data for the area of interest, geomorphological description of the area and climatic data from the nearby meteorological stations. Furthermore, geology of the wider and local area is presented via geological maps and lithological profiles and also the hydrogeological regime of the broader area of West Chalkidiki. Moreover, thesis's methodology will be illustrated widely, as detailed below, in order to explain the selection of the appropriate areas to apply artificial recharge of groundwater.

Lastly, results and conclusions of the current thesis are extensively described, with regard to integrated water resource management of an area.





## 2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 2.1 Στόχος

Ο σκοπός της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι ο προσδιορισμός μιας μεθοδολογίας, που θα περιγραφεί εκτενώς, για τον προσδιορισμό ζωνών όπου δύναται να εφαρμοστεί τεχνητός εμπλουτισμός υπόγειων υδροφορέων, στην περιοχή του δήμου Νέας Προποντίδας, με τη χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS). Η μεθοδολογία αυτή θα στηριχθεί στη θεωρητική μελέτη των βιβλιογραφικών δεδομένων που αφορούν την περιοχή, καθώς και στα δεδομένα που έχουν χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο ερευνητικών έργων που πραγματοποιήθηκαν στην ευρύτερη περιοχή. Τα δεδομένα αυτά αφορούν στην υδροπερατότητα, το βάθος των υδροφορέων, τη στάθμη του υπόγειου νερού, και τη λιθολογία των γεωλογικών σχηματισμών.

### 2.2 Περιοχή έρευνας

Η περιοχή έρευνας της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας αφορά την περιοχή της δυτικής Χαλκιδικής, τμήμα του δήμου Νέας Προποντίδας. Η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται ως κατοικημένη, γεωργική και έντονα τουριστική, ιδίως την θερινή περίοδο, όπου ο πληθυσμός πολλαπλασιάζεται. Επομένως, για την κάλυψη των αναγκών που προκύπτουν από την κατοίκηση, την άρδευση για τις καλλιέργειες και την κάλυψη της τουριστικής περιόδου, χρησιμοποιούνται κυρίως τα υπόγεια υδατικά αποθέματα της περιοχής αυτής, καθώς δεν υπάρχουν επαρκείς ποσότητες επιφανειακών υδάτων. Η περιοχή του δήμου Νέας Προποντίδας αντιμετωπίζει ποσοτικά και ποιοτικά προβλήματα στα υπόγεια νερά των υδροφορέων της που οφείλονται τόσο σε ανθρωπογενή όσο και σε γεωγενή αίτια. Στα ανθρωπογενή αίτια συγκαταλέγονται:

A) Οι υπεραντλήσεις στον παράκτιο υδροφορέα, με την εμφάνιση του φαινομένου της υφαλμύρισης του υδροφορέα και μείωση των αποθεμάτων νερού, και

B) Η υπέρμετρη χρήση εδαφοβελτιωτικών, με την αύξηση των νιτρικών ιόντων ( $\text{NO}_3^-$ ) στα υπόγεια ύδατα.

Από την άλλη πλευρά, τα γεωγενή αίτια αφορούν τη ρύπανση του νερού από επιβλαβή χημικά στοιχεία, όπως το βόριο, ουράνιο και το αρσενικό (B, U, As), λόγω της ύπαρξης γεωθερμικού πεδίου, χαμηλής ενθαλπίας, στην περιοχή της Νέας Τρίγλιας.



### 2.3 Εργασίες που υλοποιήθηκαν

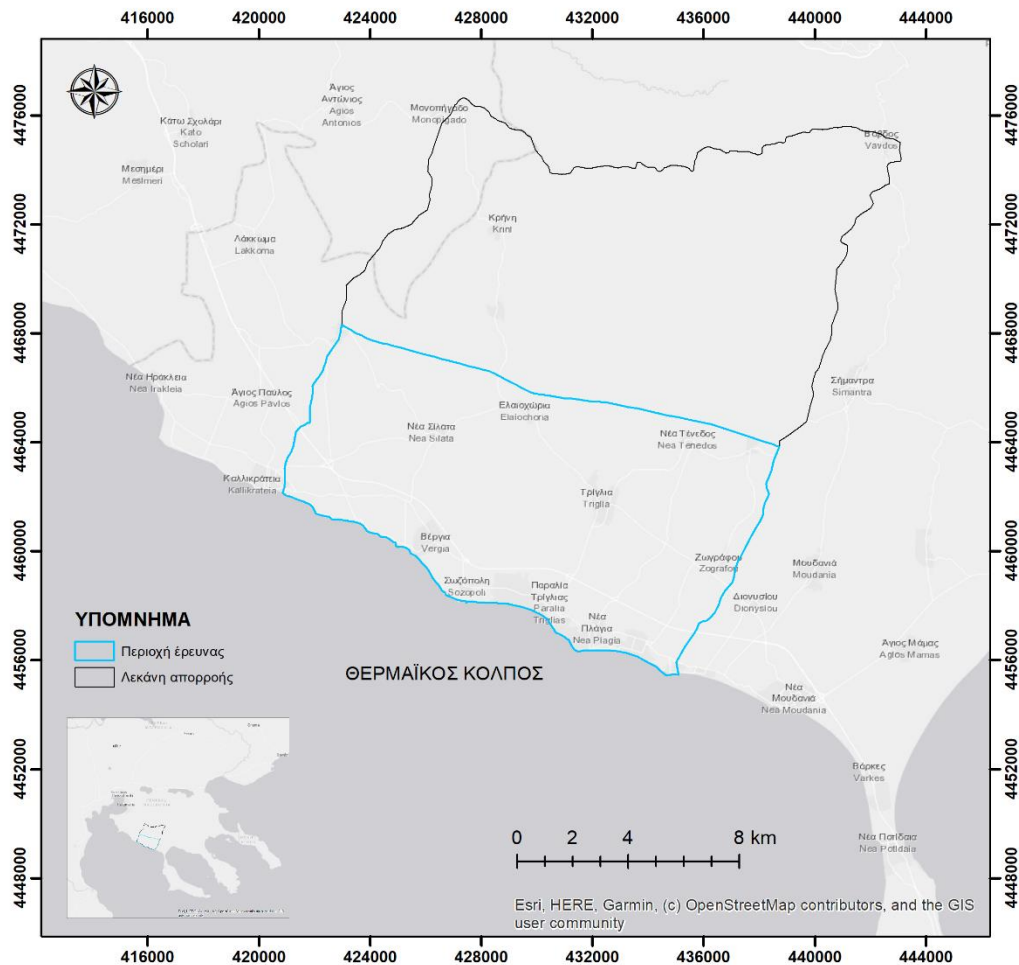
Οι εργασίες που πραγματοποιήθηκαν αναπτύσσονται σε δύο άξονες, οι οποίοι είναι η βιβλιογραφική ανασκόπηση και η επεξεργασία των δεδομένων με τελικό σκοπό την παραγωγή θεματικών χαρτών. Πιο αναλυτικά, υλοποιήθηκαν οι εξής εργασίες κατά την εκπόνηση της παρούσας διατριβής:

- Βιβλιογραφική αναζήτηση γεωλογικών και τοπογραφικών χαρτών, μελετών και επιστημονικών εργασιών για την περιοχή έρευνας.
- Αξιοποίηση δεδομένων υδρογεωλογίας, κλιματολογίας και λιθολογικών τομών.
- Ψηφιοποίηση γεωλογικών (Ε.Α.Γ.Μ.Ε., φύλλα: Πολύγυρος και Βασιλικά, 1:50000) και τοπογραφικών χαρτών (Γ.Υ.Σ., φύλλα: Πολύγυρος και Βασιλικά, 1:50000) μέσω Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (G.I.S).
- Εφαρμογή της Διαδικασίας Αναλυτικής Ιεράρχησης (Analytic Hierarchy Process, AHP) για τις πέντε υδρογεωλογικές και τοπογραφικές παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν.
- Σύνταξη θεματικών χαρτών των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εφαρμογή της Διαδικασίας Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP).
- Σύνταξη τελικού χάρτη καταλληλότητας εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού στην περιοχή έρευνας.

### 3. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

#### 3.1 Γεωγραφικά στοιχεία περιοχής έρευνας

Η περιοχή έρευνας τοποθετείται στο δυτικό τμήμα της Χαλκιδικής και βρίσκεται εντός του δήμου Νέας Προποντίδας (Σχ. 1). Η έκτασή της είναι 128,09 km<sup>2</sup> και η περίμετρός της 53,63 km. Περιλαμβάνεται το παράκτιο τμήμα του δήμου από τη Νέα Καλλικράτεια έως τον οικισμό Μουριές και από 6,5-10 km βόρεια-βορειοδυτικά έως τους οικισμούς Νέα Τένεδος και Ελαιωχώρια.



Σχήμα 1. Περιοχή έρευνας (γαλάζιο) και ευρύτερα η λεκάνη απορροής (μαύρο)

#### 3.2 Πληθυσμός περιοχής έρευνας

Η περιοχή έρευνας καταλαμβάνει μεγάλο μέρος, ήτοι 128,1 km<sup>2</sup>, του δήμου Νέας Προποντίδας, ο οποίος έχει συνολική έκταση 372,3 km<sup>2</sup>. Η περιοχή αυτή φαίνεται στον χάρτη του σχήματος 1 και περιλαμβάνει τους οικισμούς που αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα (Πίν. 1) από τα Δημοτικά Διαμερίσματα Καλλικράτειας, Τρίγλιας και Μουδανιών. Οριοθετείται από τους οικισμούς ανατολικά της Νέας Καλλικράτειας και καταλήγει στον οικισμό Μουριές της Τοπικής Κοινότητας Διονυσίου, παραλιακά. Στην ενδοχώρα οριοθετείται από τις Τοπικές Κοινότητες Νέας Γωνιάς και Αγίου

Παντελεήμωνος. Ο πληθυσμός που αναγράφεται στον παρακάτω πίνακα αφορά τον μόνιμο πληθυσμό που κατοικεί στην περιοχή έρευνας και ο οποίος παρουσιάζει αυξομείωση ανά δεκαετία απογραφής και ιδιαίτερα στην τελευταία δεκαετία. Πιο αναλυτικά, υπάρχει μείωση κατά 9,7% στους μόνιμους κάτοικους της περιοχής από την απογραφή του 2011 έως την απογραφή του 2021. Ωστόσο, κατά τους θερινούς μήνες ο πληθυσμός αυξάνεται ραγδαία, λόγω της τουριστικής ανάπτυξης που έχει η παράκτια περιοχή του δήμου Νέας Προποντίδας. Αυτό συνεπάγεται την αύξηση των υδρευτικών αλλά και συνάμα των αρδευτικών αναγκών, λόγω θέρους, και άρα αυξημένη ζήτηση σε νερό.

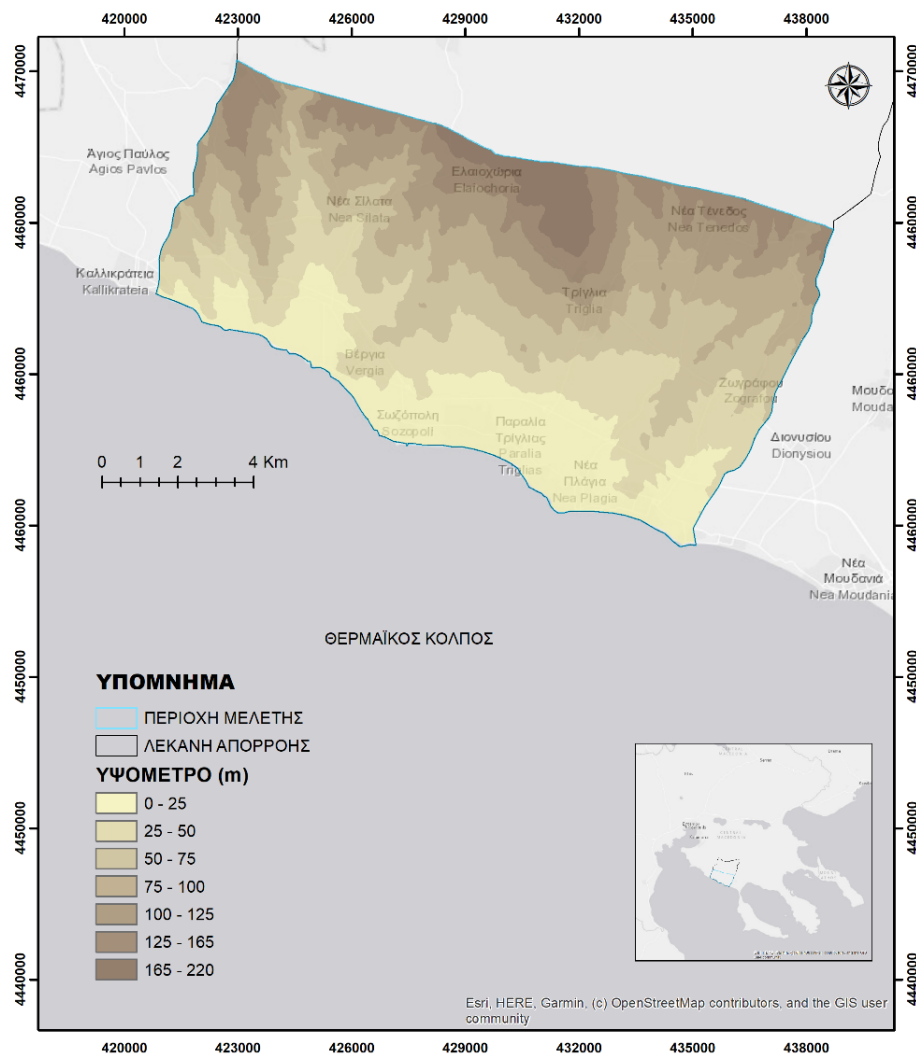
Πίνακας 1 Πληθυσμός της περιοχής έρευνας ανά Τοπική Κοινότητα (Τ.Ε.) και Δημοτική Κοινότητα (Δ.Κ.).

ΔΗΜΟΣ ΝΕΑΣ ΠΡΟΠΟΝΤΙΔΑΣ	Πληθυσμός			
	1991	2001	2011	2021
<b>ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΜΟΥΔΑΝΙΩΝ</b>				
Τ.Κ. Αγίου Παντελεήμονος	454	417	238	212
Τ.Κ. Διονυσίου (Μουριές)	-	69	76	-
Τ.Κ. Ζωγράφου	432	387	323	253
Τ.Κ. Φλογητών	1.368	1.381	1.604	1.595
<b>ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΚΑΛΛΙΚΡΑΤΕΙΑΣ</b>				
Δ.Κ. Νέας Καλλικράτειας	4.407	4.739	7.238	6.128
Τ. Κ. Νέας Γωνιάς	754	420	438	444
Τ. Κ. Νέων Σιλάτων	1.232	1.260	1.386	1.282
Σίλατα	831	756	788	-
Ροδόκηπος	52	8	61	-
Σωζόπολη	308	496	537	-
<b>ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΤΡΙΓΛΙΑΣ</b>				
Δ.Κ. Νέας Τρίγλιας	2.657	2.853	3.102	3.017
Νέα Τρίγλια	2.633	2.820	3.071	-
Παραλία Νέας Τρίγλιας	24	33	31	-
Τ.Κ. Ελαιοχωρίων	274	262	344	328
Τ. Κ. Νέας Τενέδου	368	342	312	399
Τ. Κ. Νέων Πλαγίων	1.171	1.138	1.306	1.127
Νέα Πλάγια	1.066	1.084	1.127	-
Μετόχι	105	54	179	-
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>14.308</b>	<b>13.268</b>	<b>16.367</b>	<b>14.785</b>

\* Οι παύλες «-» τοποθετήθηκαν όπου δεν υπήρχαν διαθέσιμα στοιχεία για τον πληθυσμό.

### 3.3 Μορφολογία

Η περιοχή έρευνας χαρακτηρίζεται από ομαλό ανάγλυφο με υψόμετρα που κυμαίνονται από 0 m – 220 m και χαρακτηρίζουν την περιοχή πεδινή-λοφώδη (Σχ. 2). Η κλίσεις που συναντώνται είναι από 0% - 53% με μέση κλίση το 8%. Το Ψηφιακό Μοντέλο Ανάγλυφου (DEM) που χρησιμοποιήθηκε είναι το European DEM (EU-DEM) από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος (European Environment Agency, EEA). Το συγκεκριμένο Ψηφιακό Μοντέλο Ανάγλυφου έχει χωρική ανάλυση 1 arcsec, το οποίο αντιστοιχεί σε μέγεθος pixel 25x25 m.

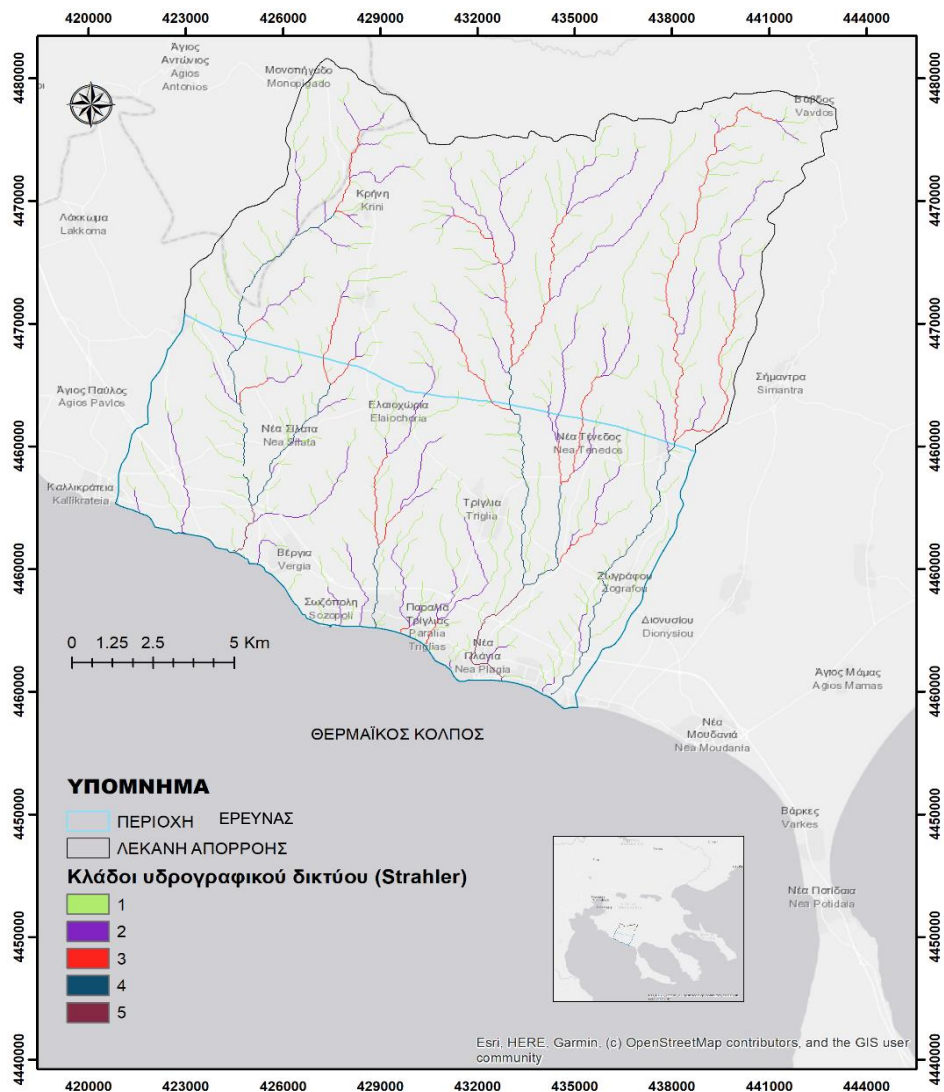


Σχήμα 2. Κατανομή υψομέτρων στην περιοχή έρευνας.

### 3.4 Υδρογραφικά στοιχεία

Η δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου πραγματοποιήθηκε για την ευρύτερη λεκάνη απορροής της περιοχής έρευνας, μέσω εργαλείων του λογισμικού ArcGIS. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκε από την εργαλειοθήκη (Arc toolbox) το εργαλείο Spatial Analyst Tools > Hydrology, όπου σύμφωνα με τα εργαλεία Fill, Flow Accumulation,

Flow Direction, Stream Order δημιουργήθηκε το υδρογραφικό δίκτυο και ταξινομήθηκε βάσει Strahler (Σχ. 3). Το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής έρευνας εκτείνεται στην ευρύτερη λεκάνη απορροής των ρεμάτων της περιοχής είναι κυρίως δενδρικού τύπου καθώς επίσης εμφανίζονται και υποπαράλληλα ρέματα διεύθυνσης BBA-NNΔ (Βεράνης κ.ά., 2010). Τα κυριότερα από αυτά είναι: το Τιγγανόρεμα, το ρέμα Χιλανδαρίου, το Κλαδόρρεμα, η Νερομάνα, η Πηγή σύμφωνα με τον τοπογραφικό χάρτη της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (Γ.Υ.Σ.). Χαρακτηριστικό των ρεμάτων είναι ότι δεν έχουν μόνιμη ροή, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει περίσσεια φυσικού νερού για τεχνητό εμπλουτισμό.

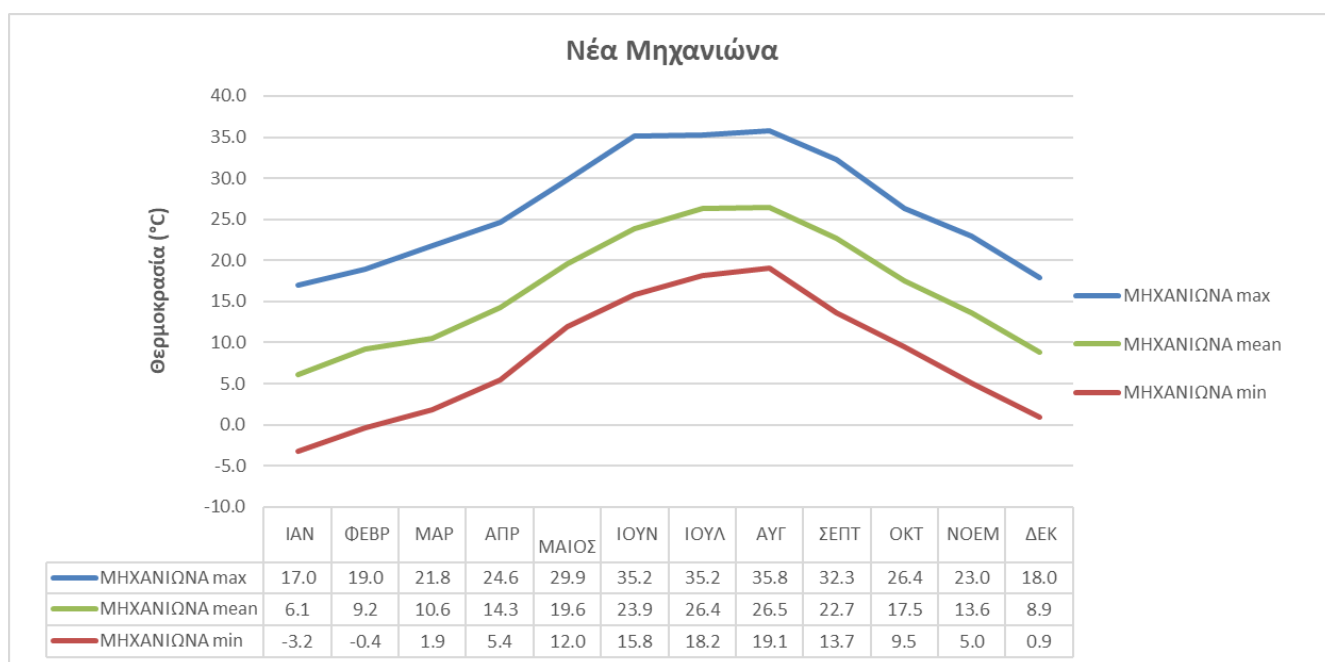


Σχήμα 3. Υδρογραφικό δίκτυο ταξινομημένο κατά Strahler για την ευρύτερη λεκάνη απορροής.

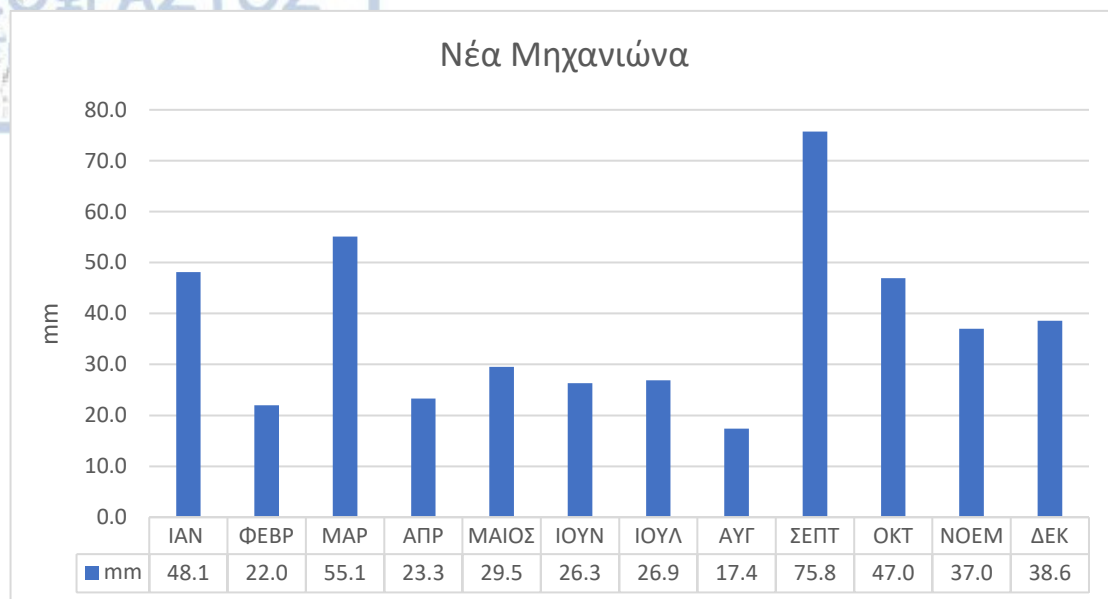
### 3.5 Κλίμα περιοχής έρευνας

Η περιοχή έρευνας εντάσσεται στις πεδινές παραθαλάσσιες περιοχές της Ελλάδας, όπου το κλίμα χαρακτηρίζεται ως εύκρατο Μεσογειακό, κατά Köppen

(1928). Το μεσογειακό κλίμα στην περιοχή έρευνας είναι το εύκρατο με ξηρό και θερμό θέρος (Csa), το οποίο έχει ήπιους και βροχερούς χειμώνες και θερμά καλοκαίρια, με περιόδους μεγάλης ηλιοφάνειας. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δύο μετεωρολογικοί σταθμοί οι οποίοι παρουσιάζουν σχετικά επαρκή δεδομένα θερμοκρασίας και κατακρημνισμάτων, καθώς δεν υπήρχε μετεωρολογικός σταθμός εντός της περιοχής έρευνας. Οι σταθμοί αυτοί είναι ο ένας στη Νέα Μηχανιώνα Θεσσαλονίκης, σε υψόμετρο 7 m, με καταγραφές από τον Μάρτιο του 2015 και ο άλλος στην Κασσάνδρεια Χαλκιδικής, σε υψόμετρο 29 m, με καταγραφές από τον Μάιο του 2011. Τα δεδομένα των δύο σταθμών ελήφθησαν από την ιστοσελίδα Meteo Gr, του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, όπου περιλαμβάνει ένα ευρύ δίκτυο μετεωρολογικών σταθμών σε όλη την επικράτεια. Οι δύο αυτοί μετεωρολογικοί σταθμοί αν και βρίσκονται εκτός της περιοχής έρευνας, είναι σε κοντινή απόσταση και θεωρούνται αξιόπιστοι διότι βρίσκονται σε παράκτιες περιοχές του Θερμαϊκού Κόλπου. Επιπρόσθετα, υπάρχουν και βιβλιογραφικά δεδομένα θερμοκρασίας και κατακρημνισμάτων για τον μετεωρολογικό σταθμό της Μίκρας Θεσσαλονίκης από το 1973-2015, τα οποία είναι πιο αντιπροσωπευτικά λόγω της μεγαλύτερης και πληρέστερης χρονοσειράς δεδομένων (Γαβριηλίδου, 2017). Ο μετεωρολογικός σταθμός στη Νέα Μηχανιώνα, έχει μια χρονοσειρά κατακρημνισμάτων από τον Μάρτιο του 2015 έως σήμερα (Σχ. 5) και επεξεργάστηκαν τα δεδομένα θερμοκρασίας για την περίοδο 2015-2022 (Σχ. 4). Τα δεδομένα αυτά συνοψίζονται στα διαγράμματα:

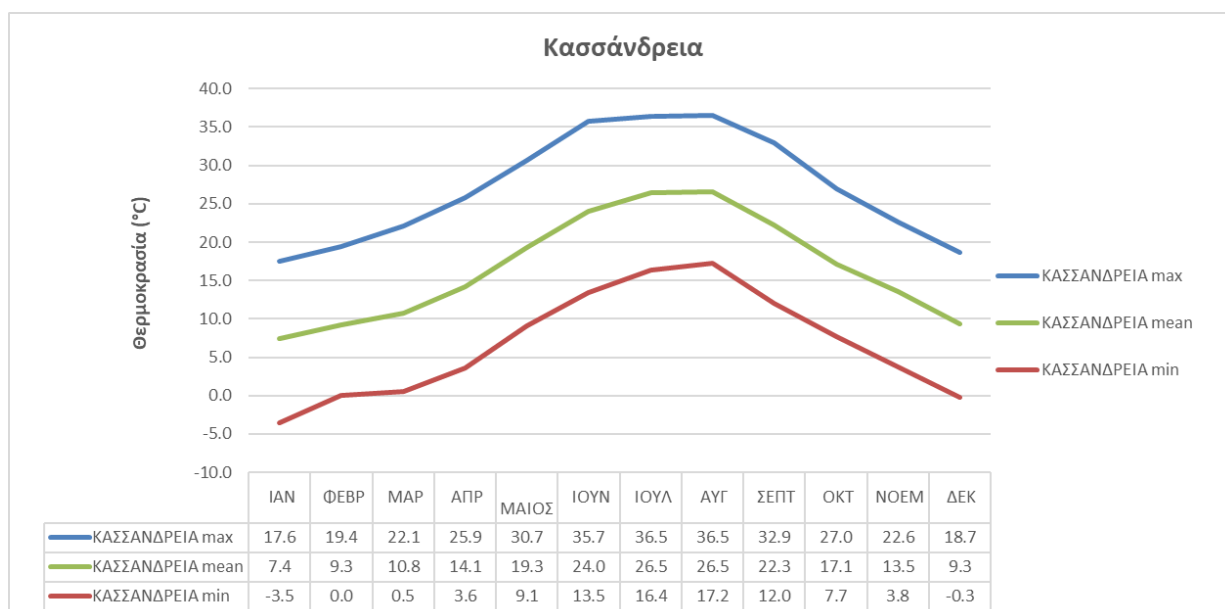


Σχήμα 4. Χρονοσειρά δεδομένων μέγιστης (μπλέ), μέσης (πράσινο), ελάχιστης (κόκκινο) θερμοκρασίας ανά μήνα για τον σταθμό της Νέας Μηχανιώνας.



Σχήμα 5. Κατανομή μηνιαίων κατακρημνισμάτων για τον σταθμό της Νέας Μηχανιώνας για την περίοδο 2015-2022.

Ο μετεωρολογικός σταθμός στη Κασσάνδρεια, έχει μια χρονοσειρά κατακρημνισμάτων από τον Απρίλιο του 2011 έως σήμερα (Σχ. 7) και επεξεργάστηκαν τα δεδομένα θερμοκρασίας για την περίοδο 2011-2022 (Σχ. 6), η οποία έχει επαρκή χρονοσειρά δεδομένων θερμοκρασίας και κατακρημνισμάτων. Τα δεδομένα αυτά συνοψίζονται στα διαγράμματα:

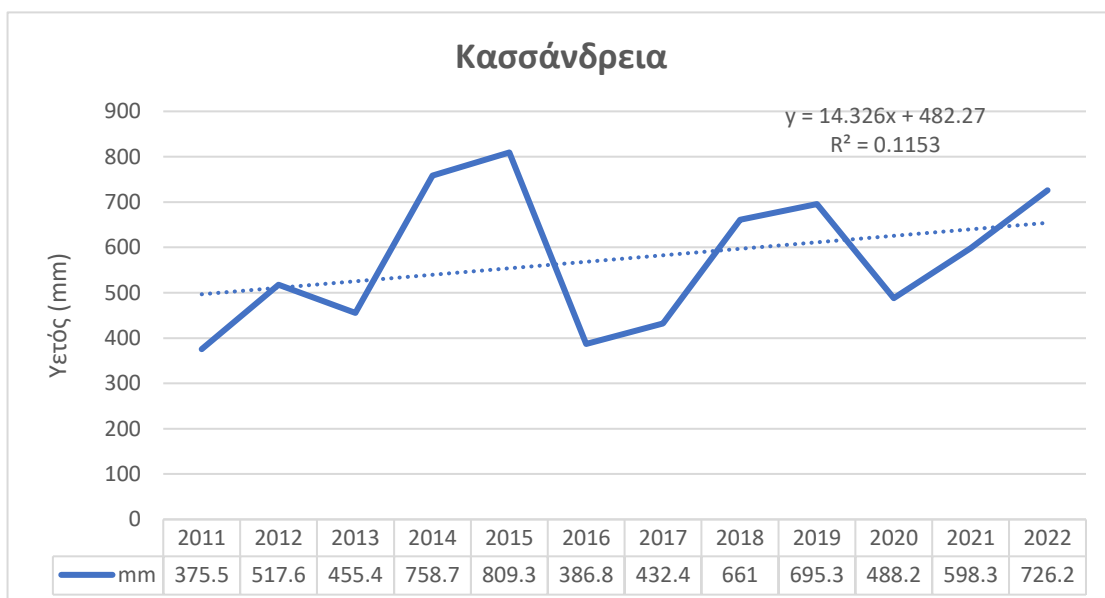


Σχήμα 6. Χρονοσειρά δεδομένων μέγιστης (μπλέ), μέσης (πράσινο), ελάχιστης (κόκκινο) θερμοκρασίας ανά μήνα για τον σταθμό της Κασσάνδρειας.





Σχήμα 7. Κατανομή μηνιαίων κατακρημισμάτων για τον σταθμό της Κασσάνδρειας για την περίοδο 2011-2022.



Σχήμα 8. Ετήσια αθροιστική κατανομή κατακρημισμάτων για τον σταθμό της Κασσάνδρειας.

Μια αδρή εκτίμηση της τάσης που έχει η βροχόπτωση για τον σταθμό της Κασσάνδρειας, είναι η ανοδική τάση που διαμορφώνεται από το 2011 έως το 2022 με μία μεση ετήσια βροχόπτωση στα 531 mm (Σχ. 8). Ωστόσο, για να χαρακτηριστεί κλιματικά μια περιοχή απαιτείται μια χρονοσειρά μετεωρολογικών δεδομένων τουλάχιστον 25 ετών, η οποία δεν ήταν διαθέσιμη από τα δεδομένα των δύο σταθμών. Επομένως, χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον μετεωρολογικά δεδομένα από τον σταθμό της Μίκρας, όπου υπάρχει μια πληρέστερη χρονοσειρά δεδομένων. Σύμφωνα με τα δεδομένα του σταθμού, η μέση ετήσια βροχόπτωση υπολογίστηκε στα 454 mm, με πτωτική τάση, για την περίοδο 1973-2015 (Γαβριηλίδου, 2017).

Το παρακάτω διάγραμμα, σε αντίθεση με το αντίστοιχο για τον σταθμό της Κασσάνδρειας, δείχνει μια πτωτική τάση για τη βροχόπτωση. Αυτό συμβαίνει σε μια σχετική συμφωνία με τις κλιματικές μεταβολές, που προκαλούν μείωση των βροχοπτώσεων σε εύκρατα κλίματα και λόγω της πληρέστερης χρονοσειράς δεδομένων. Επομένως είναι σωστότερο να λαμβάνεται υπόψη η τάση που προκύπτει από τη μεγαλύτερη χρονοσειρά, καθώς ανταποκρίνεται πιο αντιπροσωπευτικά στις μεταβολές της βροχόπτωσης στην περιοχή έρευνας. Συμπερασματικά, είναι φανερό ότι η περιοχή έρευνας επηρεάστηκε από μία μείωση των βροχοπτώσεων την περίοδο 1973-2015. Η μείωση των βροχοπτώσεων αποτελεί αίτιο για τη διαχρονική μείωση του νερού που κατεισδύει στους υπόγειους υδροφορείς, και άρα μειωμένο φυσικό εμπλουτισμό τους.

Οι κλιματικές μεταβολές χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη ξηρών και υγρών περιόδων, μαζί με ακραία επεισόδια βροχοπτώσεων ή ξηρασιών. Για τη μελέτη των κλιματικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή έρευνας, εφαρμόστηκε ο δείκτης υδρολογικής ξηρασίας του Palmer (PHDI) (Palmer, 1965), ώστε να διευκρινιστεί σε ποια φάση βρίσκεται η περιοχή έρευνας στην περίοδο 1973-2015. Τα αποτελέσματα κατά Γαβρηλίδου, 2017 δείχνουν μια μετάβαση από ήπια υγρή περίοδο (1973-1993) σε μια ήπια ξηρή περίοδο (1994-2014) (Σχ. 9).

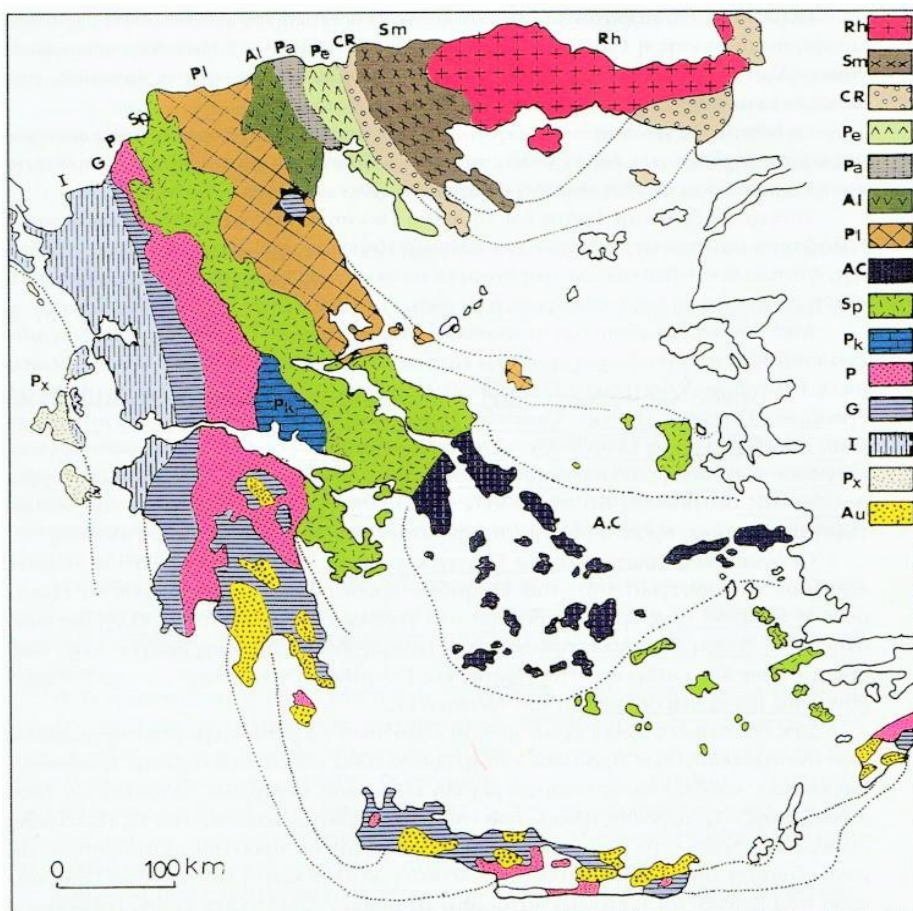


Σχήμα 9 Χρονοσειρά βροχόπτωσης από τον σταθμό της Μίκρας για τη περίοδο 1973-2015 (Γαβρηλίδου, 2017).

## 4. ΓΕΩΛΟΓΙΑ

### 4.1 Γεωλογία ευρύτερης περιοχής

Η περιοχή έρευνας ανήκει, γεωλογικά, στην υποζώνη Παιονίας της ζώνης Αξιού (Σχ. 10). Γεωτεκτονικά, η υποζώνη Παιονίας αντιπροσωπεύει το ωκεάνιο εκείνο κομμάτι του ωκεανού της Τηθύος, το οποίο δεχόταν την ιζηματογένεση της ανοιχτής βαθιάς θάλασσας και αποτελούσε μια παλαιογεωγραφική αύλακα. Στη ζώνη αυτή, εντάσσεται στην ευρύτερη ζώνη Αξιού, που μαζί με τις δύο ακόμη υποζώνες της, οι οποίες είναι οι υποζώνες Αλμωπίας και Πάικου, αποτελούν τη ζώνη από την οποία προήλθαν οι οφιόλιθοι, που της δίνουν τον ωκεάνιο παλαιογεωγραφικό χαρακτήρα (Μουντράκης, 2010).



Σχήμα 10 Γεωτεκτονική διαίρεση του Ελληνικού χώρου. Η περιοχή έρευνας διακρίνεται με κόκκινο πλαίσιο και ανήκει στην ζώνη Παιονίας, της ευρύτερης ζώνης Αξιού (Μουντράκης, 2010).

Τα πετρώματα που απαρτίζουν την γεωλογική ζώνη έχουν Μεσοζωική και Καινοζωική ηλικία. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που απαντώνται στην περιοχή έρευνας αφορούν Νεογενείς και Τεταρτογενείς σχηματισμούς, οι οποίοι υπερκαλύπτουν τα Μεσοζωικής ηλικίας πετρώματα. Εξάιρεση αποτελούν οι ασβεστολιθικοί ορεινοί όγκοι της Μεγάλης και της Μικρής Κατσίκας, που δεν περιλαμβάνονται στην περιοχή έρευνας, οι οποίοι ωστόσο αποτελούν και το βραχώδες υπόβαθρο της υποζώνης στην περιοχή έρευνας. Οι νεογενείς και τεταρτογενείς γεωλογικοί σχηματισμοί

αποτελούνται από χερσοποτάμιες, ποταμοδελταϊκές, λιμναίες κι χερσαίες αποθέσεις που σχηματίστηκαν στην αύλακα της Παιονίας (Συρίδης, 1990 από Ψιλοβίκο κ.α. 1988). Η λιθολογία της περιοχής έχει μεγάλη ποικιλία γεωλογικών σχηματισμών, όπως ερυθροστρώματα, άμμους, ψαμμίτες, αργίλους, μάργες, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους και τραβερτινοειδείς ασβεστόλιθους, αλλουβιακές αποθέσεις, παράκτιες και ολοκαινικές αποθέσεις. Οι ιζηματογενείς σχηματισμοί εμφανίζονται στην περιοχή έρευνας ελαφρώς κεκλιμένες ( $2^{\circ}$ - $5^{\circ}$ ) προς τα νότια-νοτιοδυτικά. Το πάχος των σχηματισμών ποικίλει με τις μικρότερες τιμές παρατηρούνται στις υψηλότερες τοπογραφικά περιοχές (150-500 m), ενώ οι υψηλότερες τιμές στις παράκτιες περιοχές (>1000m) (Βεράνης κ.α., 2010 από Συρίδη, 1990). Πιο συγκεκριμένα, η γεωλογική δομή της Δυτικής Χαλκιδικής ανήκει στην υποζώνη Παιονίας, της οποίας τα πετρώματα εμφανίζονται με τη μορφή τεκτονικών λεπιώσεων τα οποία καλύπτονται από τα μεταλλικά Νεογενή και Τεταρτογενή ιζήματα (Μουντράκης, 2010). Τα μεταλλικά ιζήματα καλύπτουν τους βραχώδεις σχηματισμούς με τη μορφή μιας τάφρου, η οποία δημιουργήθηκε παλαιογεωγραφικά κατά το Νεογενές (Κάτω-Μέσο Μειόκαινο), στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης Αξιού-Θερμαϊκού (Ξεφτέρης, 2000).

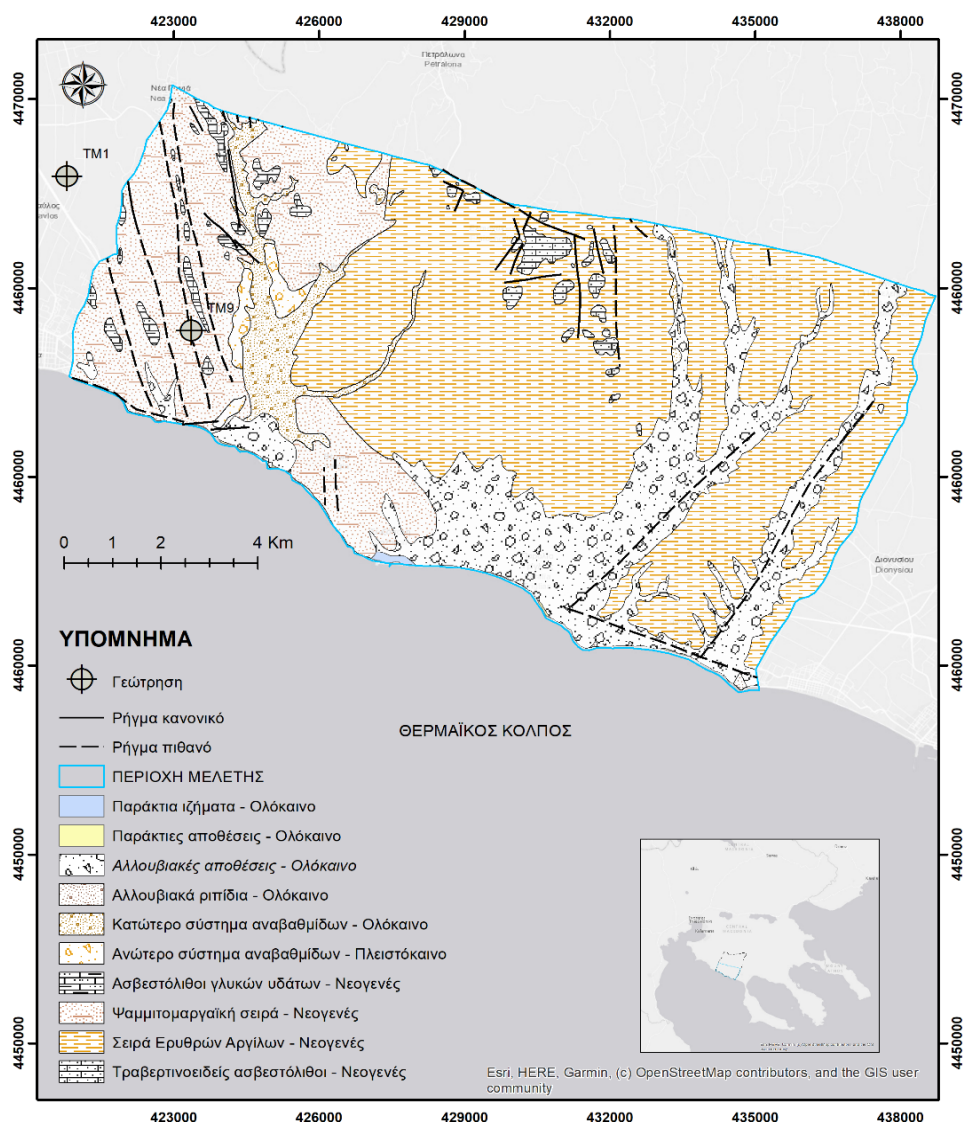
Επομένως, ξεκινώντας από το Νεογενές κατά το Κάτω-Μέσο Μειόκαινο έως το Άνω Μειόκαινο, αποτίθενται κλαστικά υλικά του σχηματισμού «Αντωνίου», όπου αποτελούνται από ποταμοχειμάρρειες αποθέσεις. Συνεχίζεται η ιζηματογένεση έως το Άνω Μειόκαινο με την απόθεση των κλαστικών υλικών του σχηματισμού «Τρίγλιας», με ερυθροστρώματα χερσαίου αποθετικού περιβάλλοντος. Κατά το Ανώτερο Μειόκαινο, αποτίθενται τα ιζήματα του σχηματισμού «Τριλόφου», με ιζηματογένεση λιμναίας προέλευσης με ποταμοχειμάρρειες αποθέσεις στα περιθώρια. Σε αυτόν τον σχηματισμό εντάσσεται οι ασβεστόλιθοι γλυκέων υδάτων, όπως αναφέρονται στον αντίστοιχο γεωλογικό χάρτη. Η ιζηματογένεση συνεχίζεται με την απόθεση των ιζημάτων του σχηματισμού «Γωνιάς» κατά το Πλειστόκαινο, με ιζήματα ποταμολιμναία αποτελούμενα από άμμους, αργίλους, ψαμμίτες, μάργες και μαργαϊκούς ασβεστόλιθους. Οι δύο τελευταίοι γεωλογικοί σχηματισμοί αναφέρονται ως «Ψαμμιτομαργαϊκή σειρά» στο αντίστοιχο φύλλο του γεωλογικού χάρτη-φύλλο Βασιλικά (ΙΓΜΕ, 1978). Στη συνέχεια, κατά το Α. Πλειόκαινο-Κ/Μ Πλειστόκαινο, αποτίθενται ιζήματα του σχηματισμού «Μουδανίων», χερσοποτάμιας-χερσαίας προέλευσης με εναλλαγές άμμων, ψαμμιτών, φακών κροκαλών και αμμοϊλνούχων αργίλων. (Ξεφτέρης, 2000, από Συρίδη, 1990). Ο γεωλογικός σχηματισμός «Μουδανίων» καλύπτει μεγάλο μέρος της περιοχής έρευνας και μαζί με τα ερυθροστρώματα του σχηματισμού «Τρίγλιας» συναποτελούν την «Σειρά Ερυθρών Αργίλων», στο αντίστοιχο φύλλο του γεωλογικού χάρτη-φύλλο Βασιλικά (ΙΓΜΕ, 1978). Κατά το Τεταρτογενές (Πλειστόκαινο-Ολόκαινο) συνέβαινε η απόθεση των εξής σχηματισμών, ξεκινώντας από τον σχηματισμό των «Ελαιοχωρίων», το κατώτερο και ανώτερο σύστημα αναβαθμίδων καθώς και οι Ολοκαινικοί σχηματισμοί.

Ο παλαιότερος τεταρτογενής σχηματισμός στην περιοχή έρευνας είναι ο σχηματισμός «Ελαιοχωρίων» (Πλειστόκαινο-σήμερα), ο οποίος ταυτίζεται με τους τραβερτινοειδείς ασβεστόλιθους στην περιοχή των Ελαιοχωρίων και του οικισμού της Ν. Τενέδου. Αποτελείται από αποθέσεις θερμών πηγών κοντά στις παρυφές του όρους Κατσίκια. Εν συνεχεία, ακολουθούν οι αποθέσεις αναβαθμίδων κατά το Πλειστόκαινο και Ολόκαινο. Οι αποθέσεις αυτές καλύπτουν σχετικά μικρή έκταση στην περιοχή

έρευνας και εμφανίζονται κυρίως στο δυτικό κομμάτι αυτής. Τέλος, στους παραπάνω γεωλογικούς σχηματισμούς υπέρκεινται στρωματογραφικά οι ολοκαινικές αποθέσεις με τη μορφή των ποταμοχειμάρρειων αποθέσεων, αλλουβιακών ριπιδίων και παράκτιων αποθέσεων (Ξεφτέρης, 2000).

#### 4.2 Γεωλογία περιοχής έρευνας

Η περιοχή έρευνας καλύπτεται από τους εξής γεωλογικούς σχηματισμούς όπως φαίνονται και στον αντίστοιχο γεωλογικό χάρτη (Σχ. 11) καθώς και στις αντίστοιχες λιθολογικές τομές (Σχ. 12). Απαντώνται σχηματισμοί Τεταρτογενούς και Νεογενούς ηλικίας, όπως αναφέρονται και στο υπόμνημα και είναι οι εξής:



Σχήμα 11 Γεωλογικός χάρτης της περιοχής έρευνας.

Πίνακας 2. Βασικά στοιχεία γεωλογικών σχηματισμών περιοχής έρευνας.

Γεωλογικός σχηματισμός	Κωδικός υπομνήματος	Ηλικία	Έκταση (km <sup>2</sup> )	Έκταση (%)
Αλλουβιακές αποθέσεις	al	Ολόκαινο	25.21	19.68
Παράκτιες αποθέσεις	cd,dn		0.065	0.05
Παράκτια ιζήματα	H.lg		0.13	0.10
Αλλουβιακά ριπίδια	ej		0.09	0.07
Κατώτερο σύστημα αναβαθμίδων	H.t.c		5.36	4.18
Ανώτερο σύστημα αναβαθμίδων	Pt.t1.c	Πλειστόκαινο	1.35	1.05
Ασβεστόλιθοι γλυκών υδάτων	M4-Pli.mk	(Νεογενές) Αν. Μειόκαινο- Πλειόκαινο	1.72	1.34
Ψαμμιτομαργαϊκή σειρά	M4-Pli.st,m		27.27	21.29
Σειρά ερυθρών αργίλων	M4-Pli.l		65.11	50.83
Τραβερτινοειδείς ασβεστόλιθοι	M4-Pli.tv		1.78	1.39
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>			<b>128.09 km<sup>2</sup></b>	<b>100 %</b>

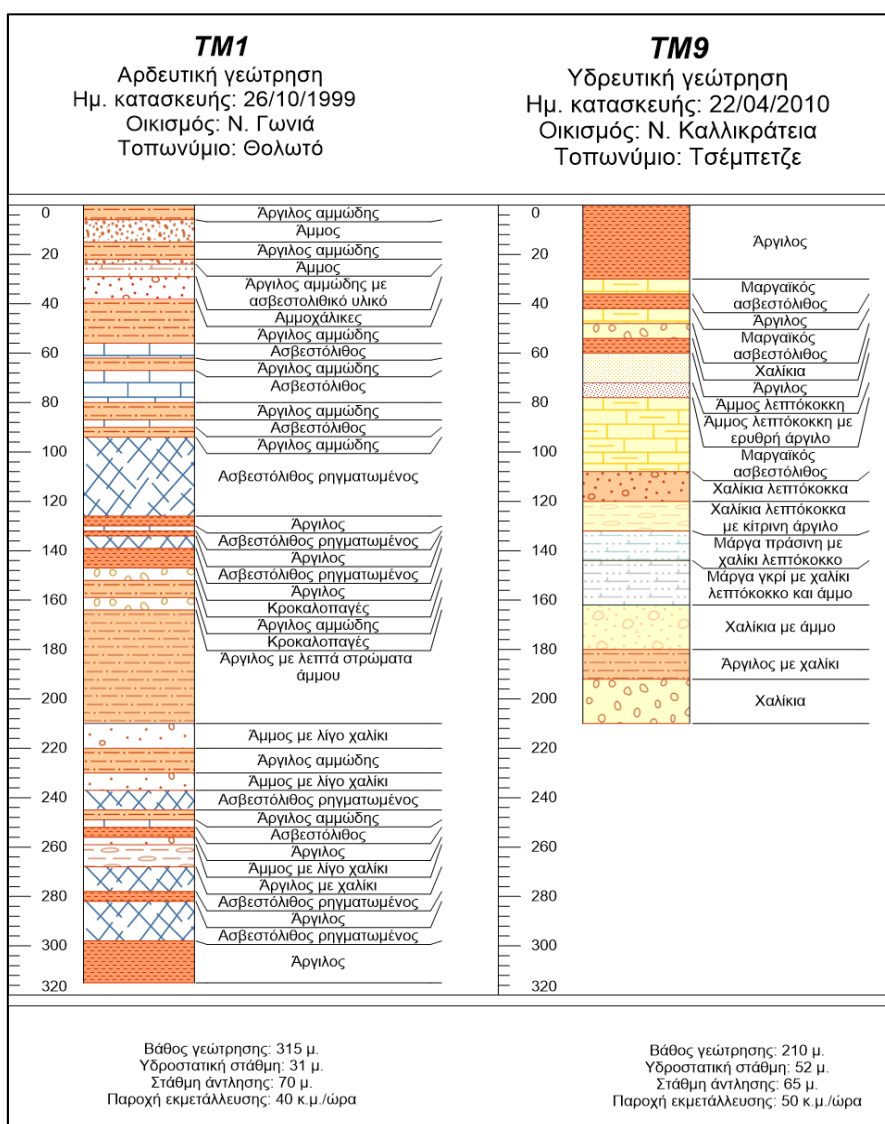
Παρατηρείται πως η μεγαλύτερη έκταση καταλαμβάνεται από τη σειρά των ερυθρών αργίλων με έκταση 65.1 km<sup>2</sup> (50.8%) , έπειτα η ψαμμιτομαργαϊκή σειρά με έκταση 27.2 km<sup>2</sup> (21.3%) και τέλος οι αλλουβιακές αποθέσεις των εφήμερων ρεμάτων της περιοχής έρευνας με έκταση 25.2 km<sup>2</sup> ήτοι (19.7%) (Πιν. 2). Η γεωλογική περιγραφή των σχηματισμών που απαντώνται στην περιοχή έρευνας, σύμφωνα με το υπόμνημα των γεωλογικών χαρτών (Σχ. 13), των φύλλων Βασιλικά και Πολύγυρος (κλίμακας 1: 50.000), είναι η εξής:

#### ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ

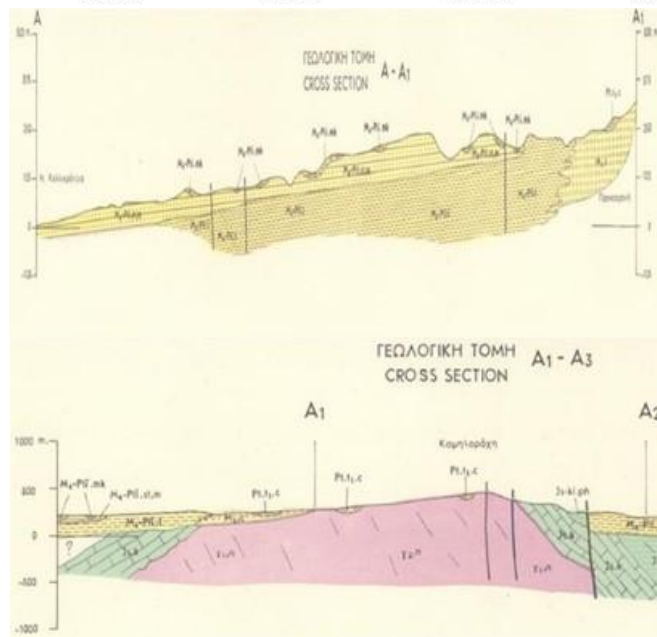
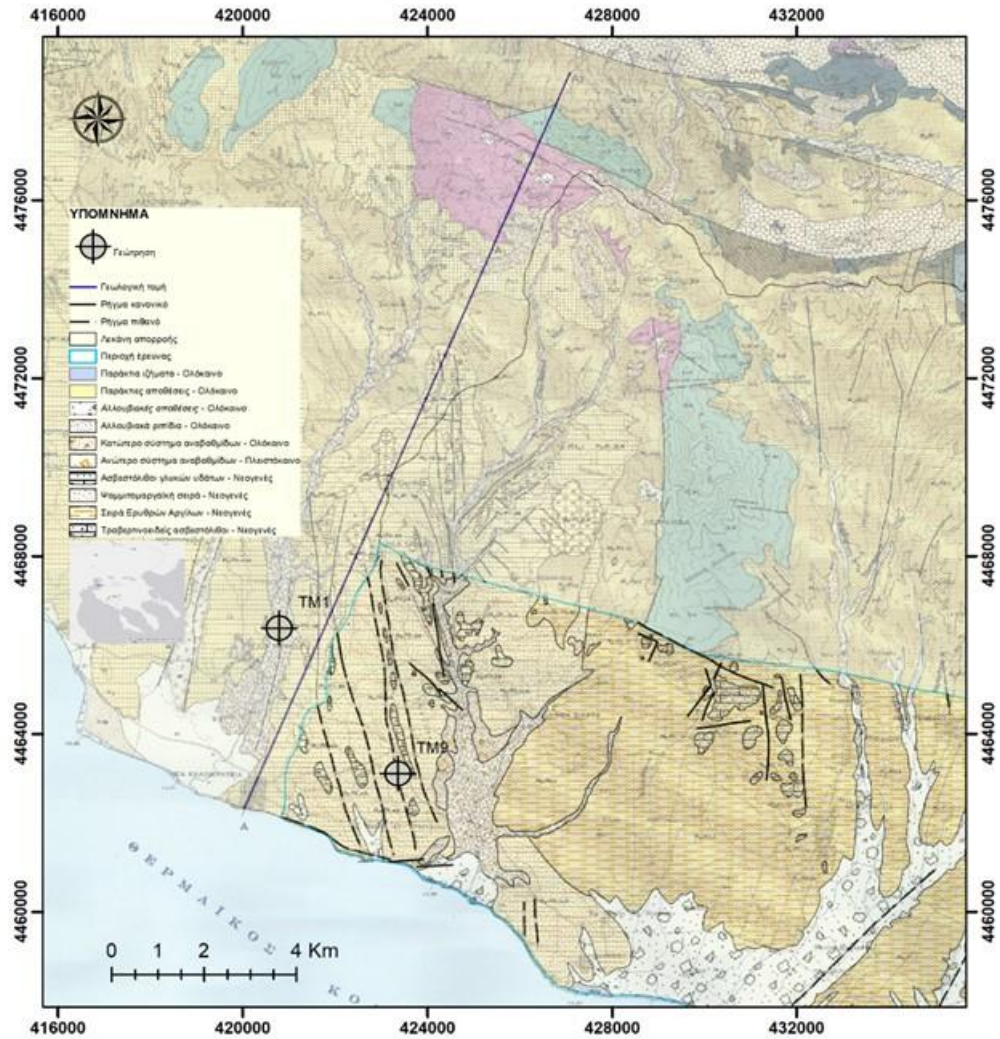
- **Αλλουβιακές αποθέσεις (Ολόκαινο):** Προϊόντα αποσάθρωσης των νεογενών σχηματισμών που αποτελούνται από άμμους, αργίλους, ψηφίδες και ερυθρογή.
- **Παράκτιες αποθέσεις (Ολόκαινο):** ιζηματογενείς αποθέσεις ακτών και θίνες μικρής έκτασης.
- **Παράκτια ιζήματα (Ολόκαινο):** σχηματισμός από άμμους και αμμούχες αργίλους.
- **Αλλουβιακά ριπίδια (Ολόκαινο):** Προϊόντα αλλουβιακών αποθέσεων.
- **Κατώτερο σύστημα αναβαθμίδων (Ολόκαινο):** Αποθέσεις ρεμάτων της περιοχής έρευνας που αποτελείται από άμμο, ψηφίδες, κροκάλες ασβεστολιθικές και σχιστολιθικές.
- **Ανώτερο σύστημα αναβαθμίδων (Πλειστόκαινο):** Αποτελείται από κροκάλες προέλευσης κυρίως χαλαζιτικής και λιγότερο ασβεστολιθικής σύστασης.

## ΝΕΟΓΕΝΕΣ

- **Ασβεστόλιθοι γλυκέων υδάτων** (Αν. Μειόκαινο-Πλειόκαινο): μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι.
- **Ψαμμιτομαργαϊκή σειρά** (Αν. Μειόκαινο-Πλειόκαινο): Σχηματισμός που αποτελείται από εναλλασσόμενα στρώματα άμμων με αργιούχες μάργες και αργίλους και παρεμβολές ψαμμιτών.
- **Σειρά ερυθρών αργίλων** (Αν. Μειόκαινο-Πλειόκαινο): Σχηματισμός που αποτελείται από ερυθρές έως κεραμόχρωμες αργίλους και κατά θέσεις με φακοειδείς ενστρώσεις άμμων, μαργών και κροκαλοπαγών.
- **Τραβερτινοειδείς ασβεστόλιθοι** (Αν. Μειόκαινο-Πλειόκαινο): Σχηματισμός αποτελούμενος από τραβερίνες και μαργαϊκούς ασβεστόλιθους.



Σχήμα 12 Λιθολογικές τομές γεωτρήσεων TM1, TM9. Τροποποιημένες με το λογισμικό Surfer23.



Σχήμα 13. Γεωλογική τομή A-A<sub>1</sub>-A<sub>2</sub>. Απόκομμα γεωλογικού χάρτη ΕΑΓΜΕ, « Φύλλο: Βασιλικά», με τροποποίηση.



## 5.1 Γενικά υδρογεωλογικά στοιχεία

Η υδρογεωλογική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών είναι συνάρτηση της σύστασης των πετρωμάτων, η κοκκομετρία, η τεκτονική καθώς και ο βαθμός διάρρηξή τους. Η κατηγοριοποίηση αυτή αναφέρεται στους δύο κύριους τύπους πετρωμάτων, στους εδαφικούς και στους βραχώδεις. Στην παρούσα εργασία, η περιοχή έρευνας δομείται από εδαφικούς σχηματισμούς, Νεογενείς και Τεταρτογενείς, οι οποίοι τοπικά μεταπίπτουν σε ημιβραχώδεις σχηματισμούς (π.χ. μάργα, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι). Η περιοχή έρευνας καλύπτεται κατά κύριο λόγο από τη σειρά των ερυθρών αργίλων, που κατέχει με ποσοστό 50,8% τη μεγαλύτερη έκταση. Δευτερευόντως, ακολουθεί σε έκταση η ψαμμιτομαργαϊκή σειρά με 21,3%.

Το σύστημα των υπόγειων υδάτων στην Δυτική Χαλκιδική είναι ένα σύστημα επάλληλων υδροφόρων στρωμάτων τα οποία είναι μη στερεοποιημένες-ημιστερεοποιημένες άμμοι, χάλικες, κροκαλοπαγή, ψαμμίτες και μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι-τραβερίνες, τα οποία είναι υδροπερατά. Εντός αυτών των σχηματισμών υπάρχουν ενστρώσεις αδιαπέρατων-ημιπερατών στρωμάτων με ερυθρές αργίλους, ιλύες, μάργες, αργιλώδεις άμμους με χάλικες, ψηφίδες και κροκαλοπαγή (Veranis et al., 2016). Η υδροφορία στους προαναφερθέντες σχηματισμούς εντοπίζεται κυρίως εντός των αδρομερών οριζόντων στους Ολοκαινικούς και Πλειστοκαινικούς σχηματισμούς, καθώς επίσης και στους Νεογενείς ασβεστόλιθους, ψαμμίτες, και τραβερτινοειδείς ασβεστόλιθους. Πιο συγκεκριμένα, η υδροφορία στην περιοχή έρευνας εντοπίζεται σε δύο τύπους υδροφορέων (ΥΠΕΝ, 2014):

- Ένας ελεύθερος υδροφορέας, και
- βαθύτεροι υδροφορείς είτε μερικώς υπό πίεση, είτε υπό πίεση.

Οι υδροφορείς στη Δυτική Χαλκιδική υφίστανται υπερεκμετάλλευση, λόγω της έντονης κατοίκησης, τους θερινούς μήνες, σε συνδυασμό με την ύπαρξη γεωργικών εκτάσεων. Οι δύο παράγοντες αυξάνουν κατακόρυφα την ζήτηση σε νερό για ύδρευση και άρδευση, ιδίως στην ξηρή περίοδο του υδρολογικού έτους. Από την περιγραφή του υδρογεωλογικού καθεστώτος της περιοχής έρευνας και από τη σχετική βιβλιογραφία, προκύπτει η κατηγοριοποίηση των γεωλογικών σχηματισμών σε τρεις (3) γενικές ομάδες βάσει υδρολιθολογικής τους συμπεριφοράς σύμφωνα με Veranis et al. (2016):

### 1. Μικροπορώδεις περατοί αλλουβιακοί σχηματισμοί

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν γεωλογικοί σχηματισμοί στην περιοχή έρευνας όπως: Ολοκαινικά αλλουβιακά ριπίδια, αποθέσεις αναβαθμίδων, καθώς και το Πλειστοκαινικό ανώτερο σύστημα αναβαθμίδων, που υπέρκειται των Νεογενών ιζηματογενών σχηματισμών. Οι αλλουβιακοί σχηματισμοί αποτελούν φακοειδείς και επιμήκεις σχηματισμούς, που είναι αποθεθειμένοι κατά μήκος των ρεμάτων. Το πάχος των σχηματισμών αυτών ποικίλει από 10-25 m και το πάχος του υδροπερατού

στρώματος μειώνεται από τα ανάντη προς τα κατόντη. Λόγω της ετερογένειας που παρουσιάζουν οι αλλουβιακές αποθέσεις η υδροπερατότητά τους ποικίλει με τιμές μεταξύ  $k=10^{-4} - 10^{-7}$  m/s. Τα υδροφόρα στρώματα έχουν τιμές ενεργού πορώδους ( $n_e$ ) που ποικίλουν από 10-20 %, τιμές οι οποίες αντιστοιχούν σε ελεύθερους υδροφορείς με αποθηκευτικότητα (S) ίση με 0,1-0,2. Η παροχή των γεωτρήσεων που υπάρχουν σε αυτούς τους σχηματισμούς ανέρχεται σε  $Q=10-30$  m<sup>3</sup>/h.

Οι σχηματισμοί αυτοί είναι οι ευνοϊκότεροι από υδρολιθολογικής άποψης για την εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού, αφενός γιατί αποθηκεύουν νερό στον φρεάτιο υδροφόρο, λόγω της υψηλής αποθηκευτικότητας και αφενός βοηθούν στον εμπλουτισμό των βαθύτερων Νεογενών υδροφόρων στρωμάτων.

### 2. Μικροπορώδεις έως πορώδεις ημιπερατοί Νεογενείς σχηματισμοί

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει την Νεογενή ψαμμιτομαργαϊκή σειρά, που αποτελείται από εναλλαγές αργίλων, άμμων-αργίλων, άμμων, μάργες με ψαμμίτες, κροκαλοπαγή και μαργαϊκούς ασβεστόλιθους. Ο σχηματισμός αυτός έχει μεγάλο πάχος και καλύπτει μεγάλη έκταση στην περιοχή έρευνας, ήτοι το 21% αυτής. Οι τιμές υδροπερατότητας στους υδροφορείς σε αυτόν τον σχηματισμό ποικίλουν από  $10^{-4} - 10^{-7}$  m/s, ανάλογα με τη λιθολογική σύσταση και το περιεχόμενο σε αργιλικό υλικό, ενώ οι υδροφορείς έχουν τιμές υδροπερατότητας της τάξης  $10^{-5} - 10^{-6}$  m/s. Οι τιμές της ειδικής αποθηκευτικότητας ποικίλουν με τιμές από  $S_e=0,5-12$  (m<sup>3</sup>/h)/m και η μέση παροχή για τις γεωτρήσεις στην ψαμμιτομαργαϊκή σειρά είναι  $Q=40$  m<sup>3</sup>/h.

Ο σχηματισμός αυτός από υδρολιθολογικής άποψης είναι μέτριας σπουδαιότητας για την εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού, λόγω μέτριας ειδικής αποθηκευτικότητας.

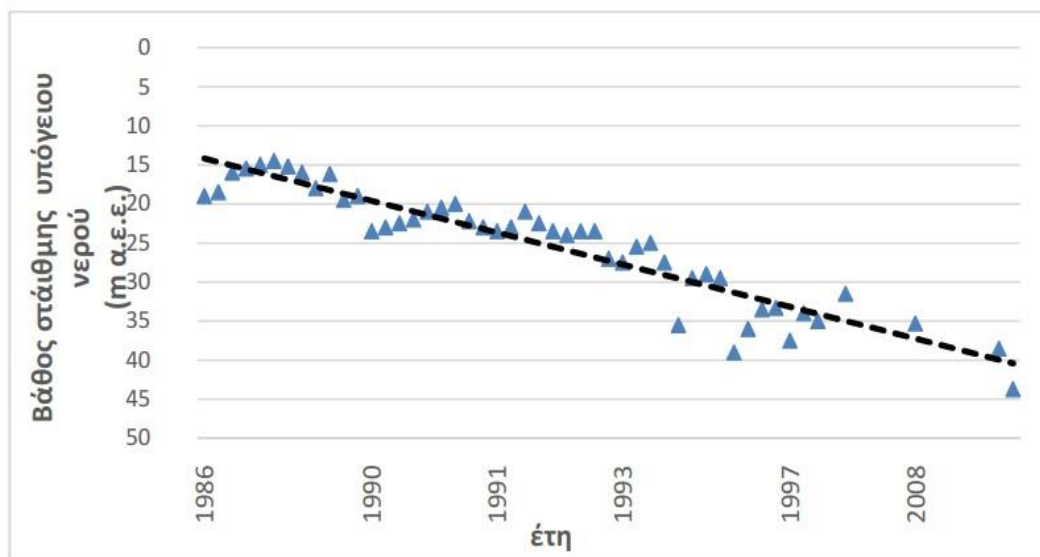
### 3. Αδιαπέρατοι έως χαμηλής υδροπερατότητας Νεογενείς και Πλειστοκαινικοί σχηματισμοί

Σε αυτή την κατηγορία συγκαταλέγεται η σειρά των ερυθρών αργίλων, που είναι ένας σχηματισμός αποτελούμενος από ερυθροκάστανες αργίλους με ενστρώσεις αμμωδών φακών, μαργών, τραβερτίνων, μαργαϊκών ασβεστολίθων και κροκαλοπαγή. Οι σειρά ερυθρών αργίλων καλύπτει το 50% της περιοχής έρευνας και έχει μεγάλο πάχος (Σχ. 12). Οι τιμές υδροπερατότητας αυτού του σχηματισμού είναι πολύ χαμηλές, ήτοι  $k=10^{-6} - 10^{-8}$  m/s, λόγω του υψηλού αργιλικού κλάσματος στα εδαφικά γεωλικά. Οι τιμές της ειδικής αποθηκευτικότητας ποικίλουν με μια μέση τιμή  $S_e=0,4$  (m<sup>3</sup>/h)/m. Επιπρόσθετα, μια μέση τιμή παροχής για τις γεωτρήσεις σε αυτόν τον γεωλογικό σχηματισμό είναι  $Q=25$  m<sup>3</sup>/h, με τις μεγαλύτερες τιμές αυτής να βρίσκονται στα κατόντη της περιοχής έρευνας και τις μικρότερες τιμές στα ανάντη αυτής.

Συμπερασματικά, ο σχηματισμός των ερυθρών αργίλων, είναι χαμηλής σπουδαιότητας για την εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού, καθώς έχει πολύ χαμηλές τιμές ειδικής αποθηκευτικότητας και απαρτίζεται κυρίως από υπό πίεση υδροφορείς.

## 5.2 Πιεζομετρία και αποθέματα

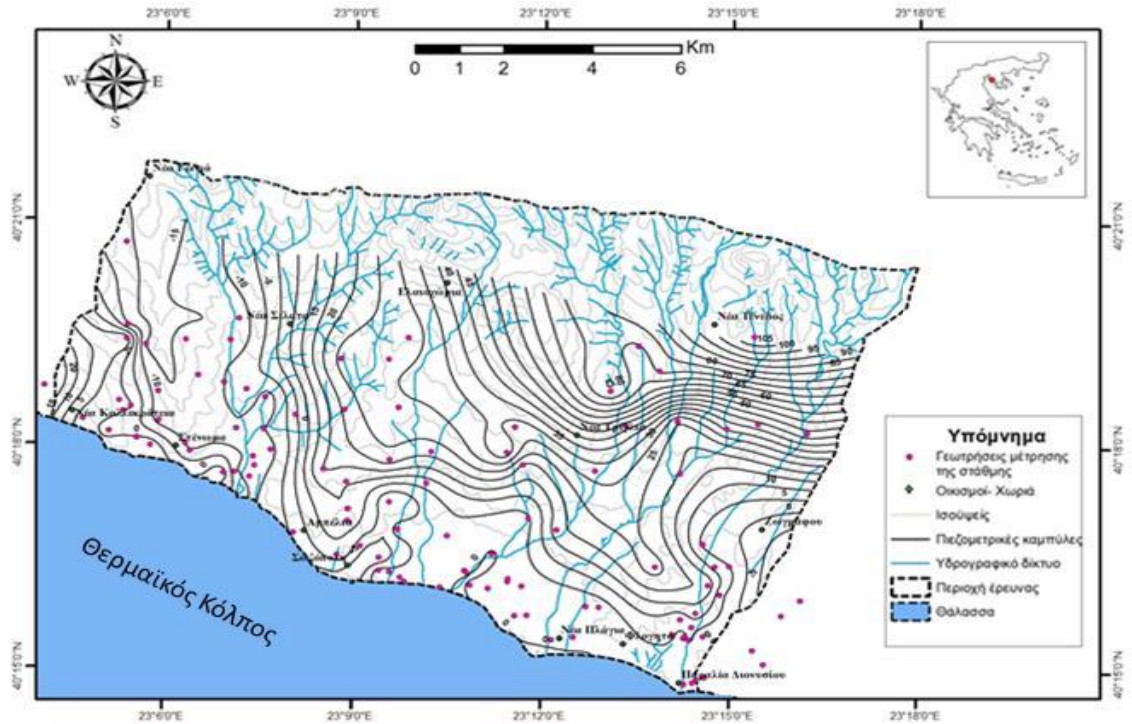
Η πιεζομετρική κατάσταση στην περιοχή της Δυτικής Χαλκιδικής εμφανίζει μεγάλες διακυμάνσεις τόσο μεταξύ της υγρής και ξηρής υδρολογικής περιόδου, όσο και κατά την διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών. Σύμφωνα με μετρήσεις στάθμης του υπόγειου νερού που έχουν γίνει από το ΕΑΓΜΕ την περίοδο 1983-2000 σε 27 γεωτρήσεις και την περίοδο 2004-2008 σε 99 γεωτρήσεις, καθώς και το 2014, δείχνουν μεγάλη διακύμανση της στάθμης. Το βάθος του υπόγειου νερού κυμαίνεται από 0,9-195 μέτρα, με μέσο όρο βάθους τα 33,6 μέτρα. Οι μεγαλύτερες τιμές παρουσιάζονται στα ανάντη τμήματα της περιοχής έρευνας γύρω από τους οικισμούς Νέας Γωνιάς και Αγίου Παντελεήμονα, ενώ οι μικρότερες τιμές (0,9-10 m) στις παράκτια τμήματα της περιοχής. Μία αδρή τάση της στάθμης των υπόγειων υδάτων, λόγω έλλειψης συνεχούς αρχείου μετρήσεων, δείχνει πτώση στάθμης για την περιοχή Αγίου Παύλου-Νέας Γωνιάς και Αγίου Παντελεήμονα-Φλογητών της τάξης των 0,2 m/έτος, στην περίοδο 2004-2008 (Veranis et al., 2016). Πιο πρόσφατες μετρήσεις, επιβεβαιώνουν την διαχρονική πτώση της στάθμης των βαθύτερων υδροφόρων στρωμάτων σε γεωτρήσεις εντός της περιοχής έρευνας. Πιο συγκεκριμένα, φαίνεται η πτώση της στάθμης ηρεμίας από τα 19 m το 1986 στα 43,71 m (Σχ. 14), βάσει μετρήσεων τον Σεπτέμβριο του 2016 (Ντώνα κ.ά., 2018). Συμπερασματικά, προκύπτει ότι η μείωση αυτή οφείλεται περισσότερο στην υπεράντληση, για την κάλυψη των υδατικών αναγκών ιδιαίτερα το θέρος, και λιγότερο στις ευρύτερες κλιματικές μεταβολές (Γαβρηλίδου, 2017).



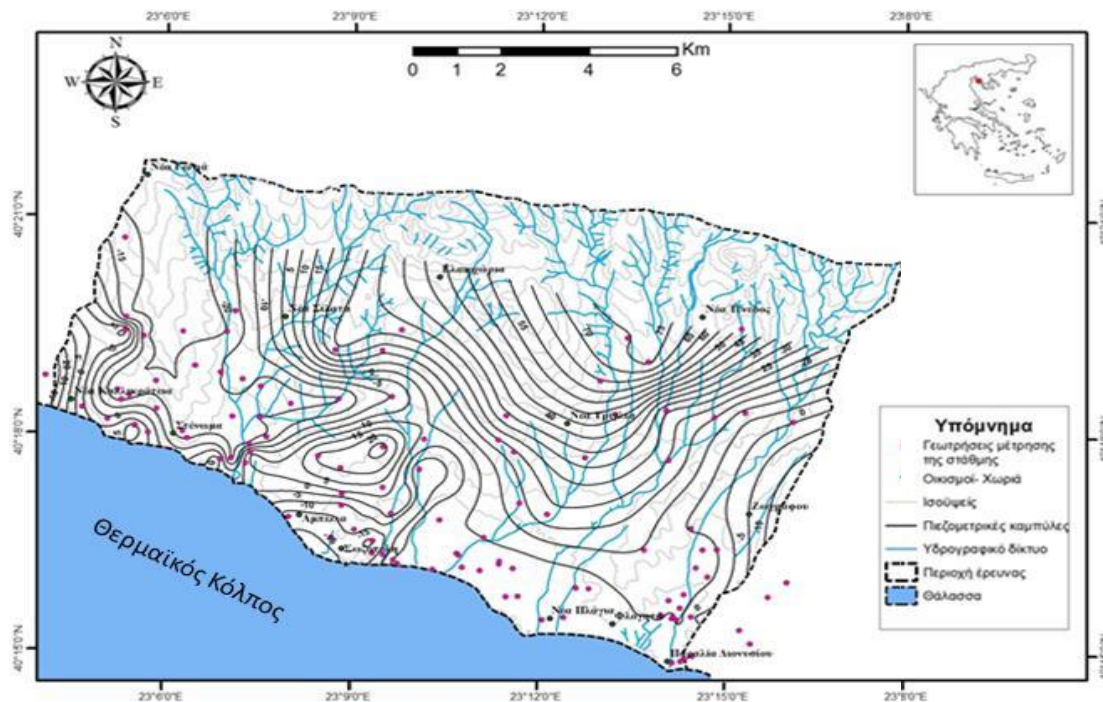
Σχήμα 14 Διακύμανση στάθμης υπόγειου νερού σε βαθύτερους γεωλογικούς σχηματισμούς στην περιοχή των Νέων Συλάτων (από Ντώνα et al., 2018)

Η ροή του υπόγειου νερού στην περιοχή έρευνας ακολουθεί κατά προσέγγιση την τοπογραφική κλίση του εδάφους με διεύθυνση ΒΑ καθώς η γεωμορφολογία της περιοχής επηρεάζει τις πιεζομετρικές καμπύλες. Επιπρόσθετα, η πιεζομετρία επηρεάζεται από την εκφόρτιση ποσότητας υπόγειου νερού από τον ασβεστολιθικό ορεινό όγκο «Κατσικά», βόρεια και εκτός της περιοχής έρευνας. Μία ακόμη παράμετρος είναι η λειτουργία γεωτρήσεων για την κάλυψη των υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών της περιοχής (Σχ. 15). Επίσης, η υδραυλική κλίση παίζει

σημαντικό ρόλο, καθώς μικρές τιμές αυτής δείχνουν ότι οι υδροφορείς είναι τρωτοί όσον αφορά την υφαλμύριση. Ειδικότερα, στην περιοχή έρευνας έχουν βρεθεί αυξημένες τιμές υδραυλικής κλίσης στην περιοχή του Αγίου Παντελεήμονα-Ζωγράφου με μέση τιμή  $i=0,01$  (1%) (Σχ. 16). Οι οικισμοί αυτοί βρίσκονται σε λοφώδη υψόμετρα (100-200 m). Στους πιο παράκτιους οικισμούς παρατηρούνται μικρότερες τιμές υδραυλικής κλίσης με μια μέση τιμή  $i=0,003$  (0,3 %) (Veranis et al., 2016).



Σχήμα 165. Πιεζομετρικός χάρτης της περιοχής έρευνας για την περίοδο Απριλίου - Μάιου 2016 από Ντώνα et al., 2018.



Σχήμα 156. Πιεζομετρικός χάρτης της περιοχής έρευνας για την περίοδο Σεπτεμβρίου - Οκτωβρίου 2016 από Ντώνα et al., 2018.

Συμπερασματικά, προκύπτει ότι το κοκκώδες υπόγειο υδατικό σύστημα Επανομής-Μουδανίων παρουσιάζει μια συνολική κακή ποσοτική κατάσταση, καθώς οι αντλούμενες ποσότητες υπόγειου νερού είναι μεγαλύτερες από τα ετήσια ανανεώσιμα αποθέματα των υδροφορέων (ΥΠΕΝ, 2017).

### 5.3. Ποιότητα υπόγειου νερού

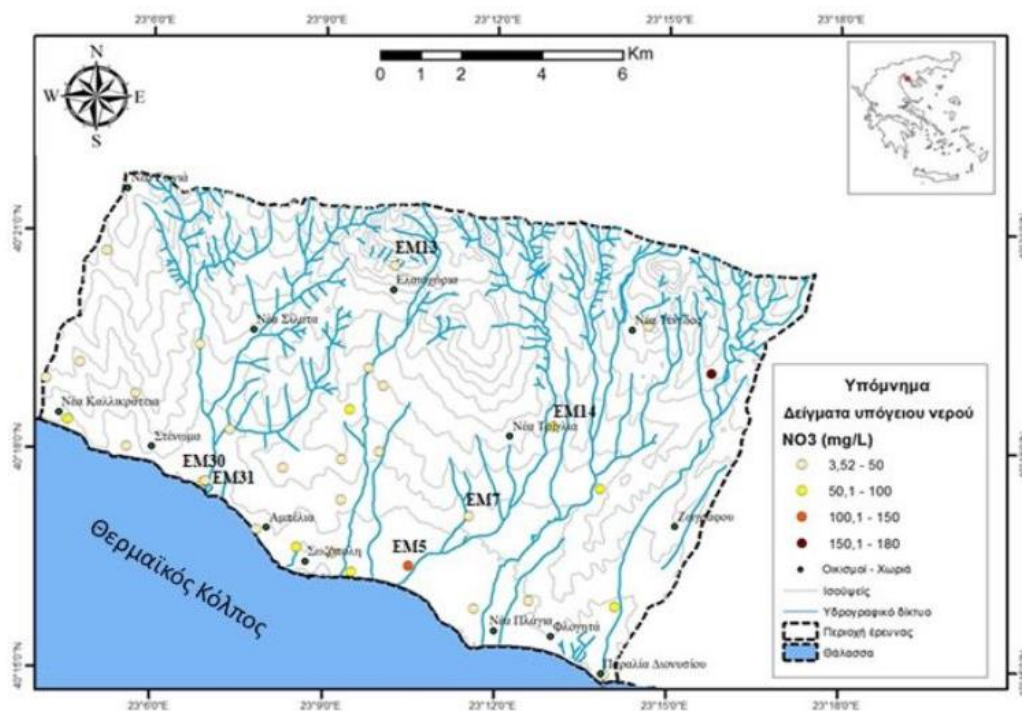
Η ποιοτική κατάσταση των υπόγειων υδάτων στο υπόγειο υδατικό υποσύστημα GR1000061, που είναι το κοκκώδες Επανομής-Μουδανίων, χαρακτηρίζεται ως κακή, όσον αφορά ορισμένα χημικά στοιχεία. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με χημικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο του Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών στην ελληνική επικράτεια, ο υδροφορέας του υποσυστήματος και ειδικότερα της περιοχής έρευνας αντιμετωπίζει προβλήματα αναφορικά με την ποιότητα του υπόγειου νερού. Τα προβλήματα αυτά αναφέρονται σε χημικές στοιχεία ή ενώσεις που αφενός έχουν ανθρωπογενή προέλευση και αφετέρου ορισμένες έχουν γεωγενή προέλευση. Στην περίπτωση που οι χημικές ουσίες βρεθούν σε υπέρμετρη ποσότητα, τότε αποτελούν ρυπαντική ουσία σε ένα οικοσύστημα.

Με βάση τη βιβλιογραφία για την παρούσα εργασία, υπάρχουν διαθέσιμες θέσεις χημικών αναλύσεων για μια πληθώρα ανόργανων χημικών στοιχείων όπως: το ασβέστιο (Ca), το μαγνήσιο (Mg), το κάλιο (K), τα οξυανθρακικά ιόντα ( $\text{HCO}_3^-$ ), το χλώριο (Cl), τα νιτρικά ιόντα ( $\text{NO}_3^-$ ), τα θειικά ιόντα ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Επιπρόσθετα, υπάρχουν μετρήσεις βασικών υδροχημικών χαρακτηριστικών του υπόγειου νερού όπως η ενεργός οξύτητα (pH), η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) και η θερμοκρασία (Ντόνα, 2017). Ακόμη, υπάρχουν μετρήσεις των ίδιων παραμέτρων και επιπλέον χημικών στοιχείων όπως: νιτρωδών ιόντων ( $\text{NO}_2^-$ ), αμμωνίου ( $\text{NH}_4^+$ ), χρωμίου (Cr), νικελίου (Ni), βαρέων μετάλλων (Pb, Cd, Hg), αργιλίου (Al) και αρσενικού (As) (κατά ΥΠΕΝ, 2017). Από τα προαναφερθέντα χημικά στοιχεία, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι υψηλές τιμές των ιόντων χλωρίου (Cl), αρσενικού (As), βορίου (B), των νιτρικών ιόντων ( $\text{NO}_3^-$ ) και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) στην περιοχή έρευνας, λόγω ανθρωπογενούς ή γεωγενούς προέλευσης.

Η πρώτη κατηγορία, οι ανθρωπογενούς προέλευσης ρύποι, περιλαμβάνει διάφορες χημικές ουσίες που προκύπτουν από την καθημερινή ανθρώπινη δραστηριότητα όπως τα αστικά λύματα, τα βιομηχανικά απόβλητα και οι γεωργικές καλλιέργειες. Ως παράδειγμα ρυπαντικής ουσίας που κυκλοφορεί στα υπόγεια νερά της περιοχής έρευνας είναι τα νιτρικά ιόντα ( $\text{NO}_3^-$ ). Η πηγή από την οποία προέρχονται τα νιτρικά ανιόντα είναι το άζωτο (N) και το οποίο στο υπέδαφος συναντάται σε τρεις μορφές: οργανικό άζωτο, αμμωνιακό άζωτο και οξειδωμένο άζωτο. Το οργανικό άζωτο είναι το παραπροϊόν βιοχημικών διεργασιών στους οργανισμούς (ούρα, κόπρανα, αποσυντεθειμένες πρωτεΐνες). Το αμμωνιακό άζωτο συναντάται με τη μορφή αμμωνίου ( $\text{NH}_4^+$ ) και αμμωνίας ( $\text{NH}_3$ ) και είναι το προϊόν μετατροπής του οργανικού αζώτου σε αμμωνιακό. Τέλος, το οξειδωμένο άζωτο αναφέρεται στα οξείδια του αζώτου στο υπέδαφος: τα νιτρικά ανιόντα ( $\text{NO}_3^-$ ) και τα νιτρώδη ανιόντα ( $\text{NO}_2^-$ ) και προέρχεται από τη μετατροπή του αμμωνιακού αζώτου σε οξειδωμένο μέσω των φυτών. Τα νιτρικά ιόντα στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιηθούν από τα φυτά είτε δεν απονιτροποιηθούν, τότε μεταναστεύουν εύκολα στο υπόγειο νερό όπου και

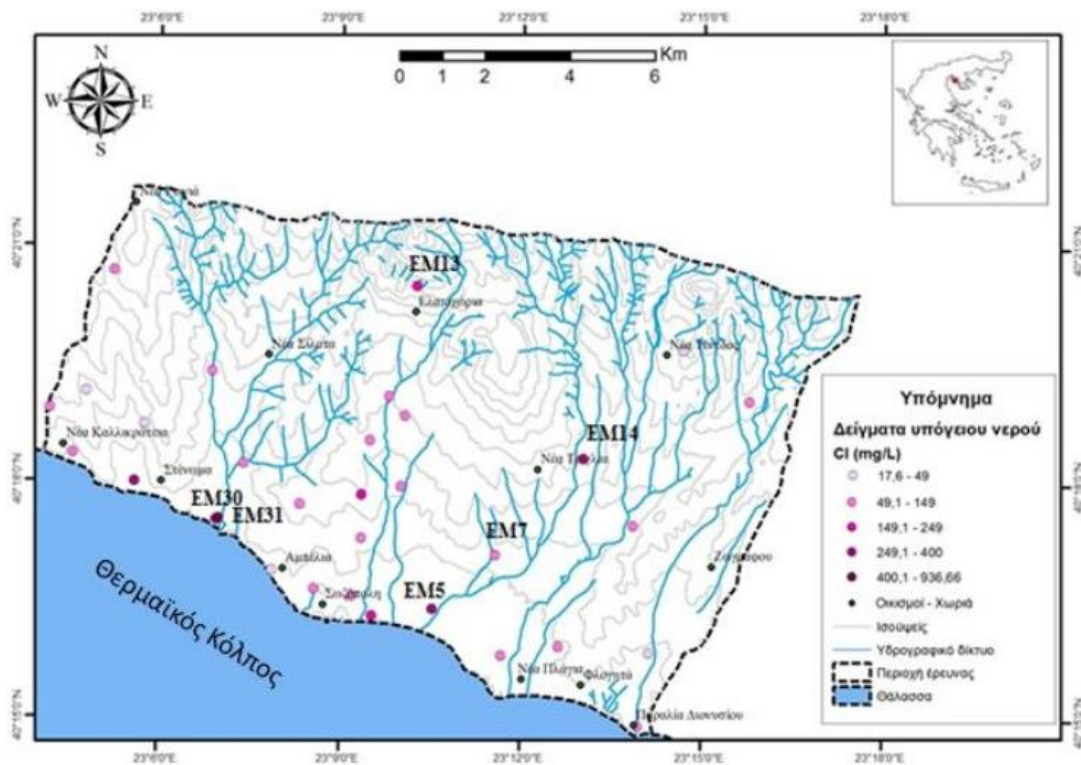
συγκεντρώνονται (Βουδούρης, 2009). Στην περιοχή έρευνας, εντοπίζονται σημειακά από γεωτρήσεις ότι υπάρχει υπέρβαση του ορίου των νιτρικών ιόντων (Σχ. 17) σε αρκετές γεωτρήσεις, από την πληθώρα όσον έχουν ορυχθεί στους υδροφορείς. Η αιτία οφείλεται στην εκτεταμένη γεωργική δραστηριότητα που λαμβάνει χώρα στην περιοχή και στην χρήση αζωτούχων λιπασμάτων. Ειδικότερα, εμφανίζονται υψηλές τιμές νιτρικών ιόντων στις γεωτρήσεις που βρίσκονται στους παράκτιους οικισμούς στα κατάντη της περιοχής έρευνας, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, διότι ακολουθούν την πορεία του υπόγειου νερού προς την θάλασσα (Ντόνα, 2017, από Stamatis et al., 2011).

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τους ρύπους γεωγενούς προέλευσης όπως το χλώριο (Cl), το βόριο (B), το αρσενικό (As), ο σίδηρος (Fe), το μαγγάνιο (Mn), και το ουράνιο (U). Οι ρυπαντικές ουσίες που προαναφέρθηκαν, υπάρχουν στα υπόγεια νερά της περιοχής έρευνας και σε αρκετές γεωτρήσεις εντοπίζονται υπερβάσεις των ορίων τους, λόγω του εμπλουτισμού τους στα υπόγεια νερά από το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής. Πιο συγκεκριμένα, στο ΒΑ/κό της περιοχής έρευνας υπάρχει ο καρστικός όγκος του όρους Κατσίκια, ο οποίος φιλοξενεί ένα γεωθερμικό πεδίο χαμηλής ενθαλπίας (32°-42°C) στην περιοχή των Ελαιοχωρίων και της Νέας Τενέδου (Τυγονία et al., 2006). Τα γεωθερμικά ρευστά κυκλοφορούν στα βαθύτερα γεωλογικά στρώματα του ασβεστολίθου και των τραβερτινοειδών ασβεστολίθων και διηθούνται στους ανώτερους υδροφορείς, λόγω της υπεράντλησής τους αλλά και της παρουσίας ρηγμάτων που αποτελούν οδούς μεταφοράς των ρευστών. Με αυτόν τον τρόπο, μεταφέρονται υψηλές περιεκτικότητες από τα προαναφερθέντα χημικά στοιχεία και ρυπαίνοντας με αυτά τους ψυχρούς υδροφορείς (Veranis et al., 2016).



Σχήμα 17 Κατανομή νιτρικών ιόντων ( $NO_3^-$ ), στην περιοχή έρευνας που αντιστοιχεί σχεδόν στο μισό της περιοχής έρευνας της παρούσας εργασίας (από Ντόνα et al., 2018).

Το χλώριο ( $Cl^-$ ), εμφανίζεται σε υψηλές περιεκτικότητες στους υδροφορείς της περιοχής έρευνας, είτε κυρίως λόγω υφαλμύρισης των παράκτιων τμημάτων (Ντώνα, 2017) είτε και λόγω αυξημένων τιμών που οφείλονται στην ύπαρξη του γεωθερμικού πεδίου στο καρστικό υποσύστημα Νέας Τρίγλιας (ΥΠΕΝ, 2014). Το όριο ποσιμότητας ορίζεται στα 250 mg/l, ενώ το κατώφλι των 100 mg/l υποδηλώνει θαλάσσια διείσδυση σε παράκτιες περιοχές (Βουδούρης, 2009). Στην πρώτη κατηγορία, η υφαλμύριση των υπόγειων υδροφορέων στις παράκτιες περιοχές, οφείλεται στην υπερεκμετάλλευσή τους για την κάλυψη κυρίως αρδευτικών, έπειτα υδρευτικών και άλλων αναγκών. Επομένως, η έμμεση αιτία είναι η πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα που προκαλείται για την κάλυψη ανθρώπινων αναγκών και η διείσδυση του θαλασσινού νερού στους υπόγειους υδροφορείς (Σχ. 18). Ωστόσο, δευτερευόντως υψηλές συγκεντρώσεις χλωρίου παρατηρούνται εντός της περιοχής έρευνας στην περιοχή Τενέδου-Τρίγλιας-Σιλιάτων (200-250 mg/l) ως αποτέλεσμα της επαφής καρστικού γεωθερμικού πεδίου χαμηλής ενθαλπίας με τους βαθύτερους γεωλογικούς σχηματισμούς της περιοχής (Veranis et al., 2016).



Σχήμα 18 Κατανομή ιόντων χλωρίου ( $Cl^-$ ), στην περιοχή έρευνας (από Ντώνα et al., 2018).

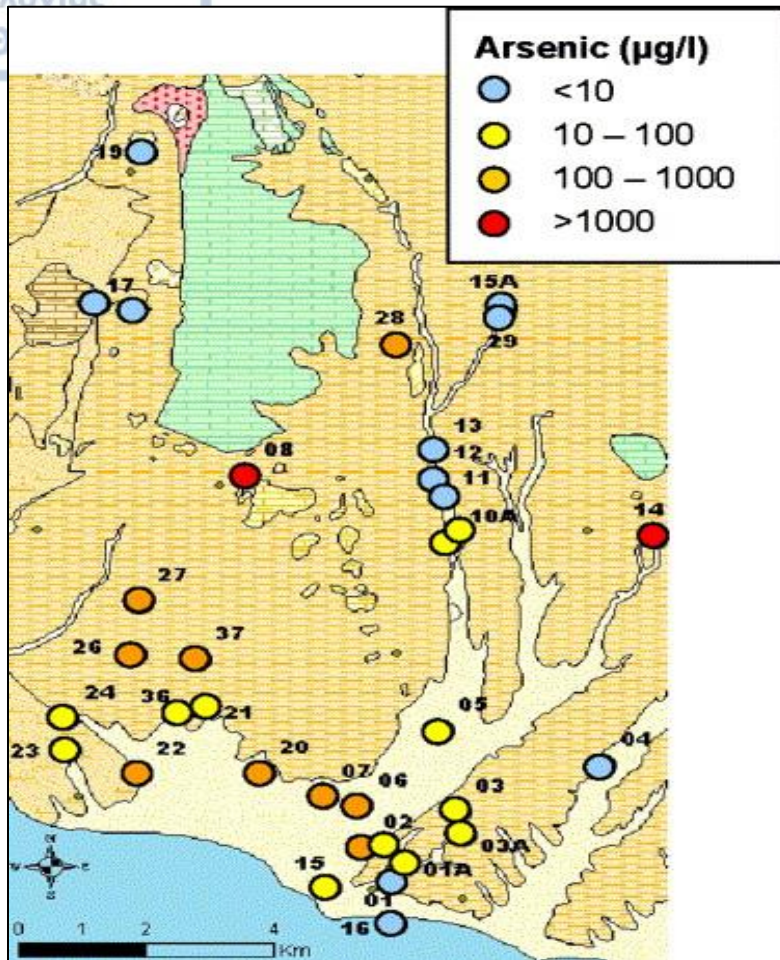
Το βόριο (B) και το αρσενικό (As) εμφανίζονται σε υψηλές περιεκτικότητες στην περιοχή Τρίγλιας-Τένεδου-Πλαγίων-Σωζόπολης και έκτασης 100 km<sup>2</sup>, λόγω της ύπαρξης του γεωθερμικού πεδίου (Σχ. 20). Οι περιεκτικότητές στους στα υπόγεια νερά της περιοχής υπερβαίνουν κατά πολύ το όριο ποσιμότητας με το As (<10 mg/l) να εμφανίζει τιμές από 10-3400 mg/l και το B (<1000 mg/l) να εμφανίζει τιμές εύρους 1500-4000 mg/l (Veranis et al., 2016). Παρατηρείται επίσης, ότι οι υψηλότερες συγκεντρώσεις βρίσκονται κοντά στο γεωθερμικό πεδίο και κατόπιν αυτού, καθώς ακολουθούν την πορεία των υπόγειων νερών προς την θάλασσα (Σχ. 19). Επίσης, το αρσενικό εντοπίζεται τόσο στους υπό πίεση υδροφορείς της περιοχής έρευνας όσο και

στις παράκτιες περιοχές (Tyrovolas et al., 2006). Παρόμοια προέλευση έχουν ο σίδηρος (Fe), το μαγγάνιο (Mn) και το ουράνιο (U) με αυξημένες περιεκτικότητες υπόγεια νερά της περιοχής, όπως ο Fe (<200 µg/l) με τιμές 210-5500 µg/l, το Mn (<50 µg/l) με τιμές 50-850 µg/l (Veranis et al., 2016). Η παρουσία τους συνδέεται άμεσα με την τροφοδοσία των γεωθερμικών ρευστών από το καρστικό σύστημα προς τους βαθύτερους υδροφορείς και συνδέονται γεωχημικά με το μαγγάνιο και τον σίδηρο, μέταλλα με τα οποία υφίσταται διεργασίες οξείδωσης. Ειδικότερα, η παρουσία ουρανίου οφείλεται στην παρουσία του γρανοδιορίτη που είναι σε επαφή με το καρστικό σύστημα Κατσίκας και εμπλουτίζει τα γεωθερμικά ρευστά και αυτά με τη σειρά τους εμπλουτίζουν τους ψυχρότερους αβαθείς υδροφορείς, διερχόμενα από ζώνες ρηγμάτων (Kazakis et al., 2021).



Σχήμα 19 Οριοθέτηση υδροφορέα που υπάρχουν εμφανίσεις αρσενικού και βορίου, λόγω του γεωθερμικού πεδίου (Tyrovolas et al., 2006)





Σχήμα 20. Απεικόνιση κατανομής της συγκέντρωσης αρσενικού στα υπόγεια νερά τμήματος της περιοχής έρευνας (Kouras, Katsoyiannis & Voutsas, 2007).

## 6. ΤΕΧΝΗΤΟΣ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ

Ο τεχνητός εμπλουτισμός των υπόγειων υδροφορέων συνιστά την τεχνητή αύξηση των αποθεμάτων υπόγειων υδάτων σε μία περιοχή, μέσω της χρήσης περισσευόμενου φυσικού ή επεξεργασμένου νερού. Ως φυσικό νερό εννοούνται τα πηγαία νερά, τα όμβρια ύδατα, το επιφανειακό τρεχούμενο νερό ή και νερό από γειτονικές υπόγειες λεκάνες. Ο εμπλουτισμός γίνεται εφικτός από την κατασκευή κατάλληλων διατάξεων όπως λεκάνες κατάκλισης-διήθησης, γεωτρήσεις εμπλουτισμού, υπόγεια φράγματα, χρησιμοποίηση κοιτών ρεμάτων, κ.ά. (Βουδούρης, 2015), που θα περιγραφούν παρακάτω.

Τα οφέλη του Τ.Ε. είναι πολλαπλά για τους υπόγειους υδροφορείς και συνοψίζονται στα εξής (Βουδούρης, 2022):

- 1) Στην αύξηση των αποθεμάτων υπόγειου νερού, λόγω υπερεκμετάλλευσης.
- 2) Στην καλύτερη διαχείριση των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων.
- 3) Στην αποθήκευση νερού για χρήση στο μέλλον.
- 4) Για την ανάσχεση της διείσδυσης του θαλασσινού νερού στους υδροφορείς.
- 5) Στη βελτίωση της ποιότητας των υπόγειων υδάτων.
- 6) Στην αντιμετώπιση εδαφικών καθιζήσεων, λόγω υπερεκμετάλλευσης.
- 7) Στον έλεγχο των πλημμυρών και των διαβρώσεων του εδάφους.
- 8) Στην επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων.

Οι κυριότερες προϋποθέσεις που απαιτούνται για την εφαρμογή του Τ.Ε. είναι οι εξής (Βουδούρης, 2022):

- 1) Η ύπαρξη της απαιτούμενης ποσότητας νερού είτε αυτό αφορά φυσικό νερό είτε επεξεργασμένο.
- 2) Η δέσμευση έκτασης γης για την εφαρμογή του.
- 3) Ήπιο γεωμορφολογικό ανάγλυφο.
- 4) Ευνοϊκές υδρογεωλογικές συνθήκες.
- 5) Η εξασφάλιση της κατάλληλης ποιότητας νερού που θα εμπλουτίσει τον υδροφόρα.
- 6) Ύπαρξη έργων υποδομής, για την πρόσβαση στις κατάλληλες περιοχές.
- 7) Η εφαρμογή του Τ.Ε. να είναι οικονομικά συμφέρουσα λύση.

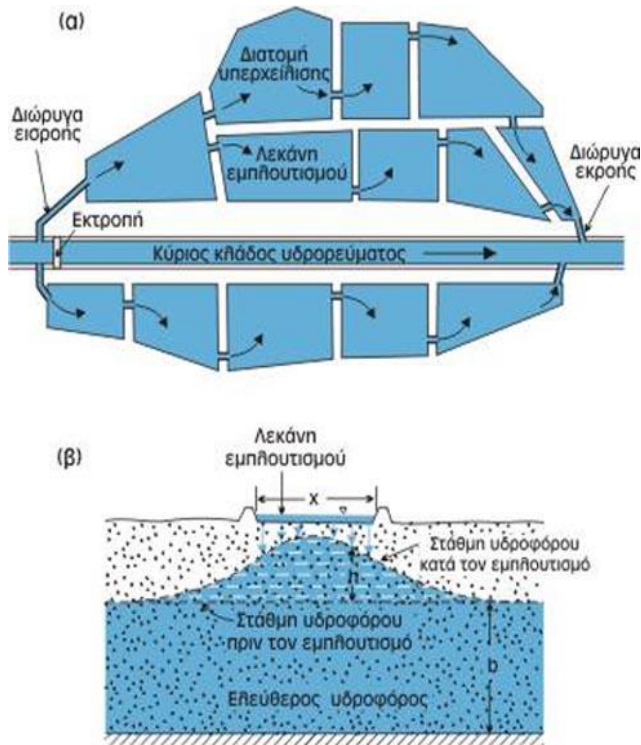
Η παρούσα διπλωματική διατριβή, θα επικεντρωθεί κυρίως στις εξής συνιστώσες: την ύπαρξη της ποσότητας νερού σε κοντινή απόσταση, την εξέταση του γεωμορφολογικού ανάγλυφου μέσω του ψηφιακού μοντέλου ανάγλυφου (DEM), και τον εντοπισμό των περιοχών με ευνοϊκές υδρογεωλογικές συνθήκες βάσει των κριτηρίων που θα χρησιμοποιηθούν.

### 6.1 Μέθοδοι τεχνητού εμπλουτισμού

Η εφαρμογή του Τ.Ε. σε μία περιοχή υπό έρευνα, δύναται να επιτευχθεί μέσω πολλών μεθόδων, οι οποίες εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του υδροφόρα που

πρόκειται να εμπλουτιστεί. Οι μέθοδοι αυτοί συνοψίζονται ως εξής (Βουδούρης, 2015, από Gale, 2005):

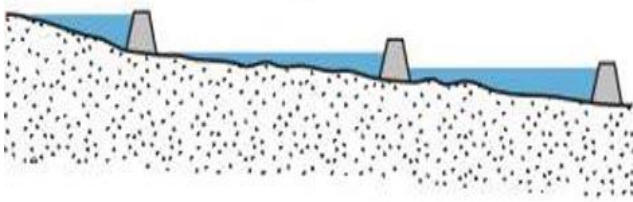
- 1) Επιφανειακές μέθοδοι: Εδώ περιλαμβάνονται η μέθοδος της κατάκλισης, της πλημμύρας, της άρδευσης, λεκάνες διήθησης και τα συστήματα εδάφους-υδροφορέα (SAT) (Σχ. 21).



Σχήμα 21. Μέθοδος κατάκλισης λεκανών (α) σε κάτοψη και (β) σε τομή. Πηγή: [http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg763e/ch7\\_files/p3.jpg](http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg763e/ch7_files/p3.jpg)

Σε αυτές τις μεθόδους επιδιώκεται η εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού σε λεκάνες που βρίσκονται διαδοχικά και οι οποίες γεμίζουν με το νερό εμπλουτισμού. Οι λεκάνες αυτές είναι διακριτές και χωρίζονται μέσω φραγμών, ώστε να συγκρατείται το λεπτόκοκκο υλικό. Για την κατασκευή τους επιλέγονται περιοχές με ομαλό ανάγλυφο και κλίση μικρότερη του 5%, καθώς και υδροπερατά υλικά στην ακόρεστη ζώνη όπως οι αλλουβιακές αποθέσεις. Επομένως, με αυτόν τον τρόπο εμπλουτίζονται ελεύθεροι υδροφορείς μέσω του τεχνητού εμπλουτισμού της υδροπερατής ακόρεστης ζώνης.

(α)



(β)



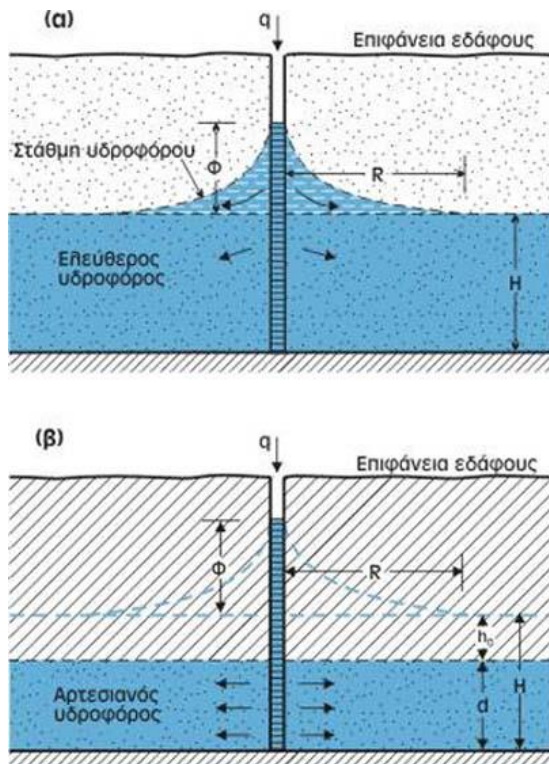
Σχήμα 22. Διευθέτηση της κοίτης ενός ρέματος (α) με φράγματα ανάσχεσης και (β) με αυλάκια. Πηγή:  
[http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg763e/ch7\\_files/p5.jpg](http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg763e/ch7_files/p5.jpg)

2) Τροποποίηση κοιτών ρεμάτων: επαναδραστηριοποίηση κοιτών ρεμάτων, φράγματα ανάσχεσης (Σχ. 22).

Σε αυτή την μέθοδο επιδιώκεται η τροποποίηση της κοίτης ποταμοχειμάρρων ή επαναδραστηριοποίηση της κοίτης τους με τρεχούμενο νερό από τεχνητό εμπλουτισμό.

3) Γεωτρήσεις και πηγάδια: Εδώ περιλαμβάνεται ο εμπλουτισμός αβαθών και βαθιών υδροφορέων μέσω πηγαδίων και γεωτρήσεων (Σχ. 23).

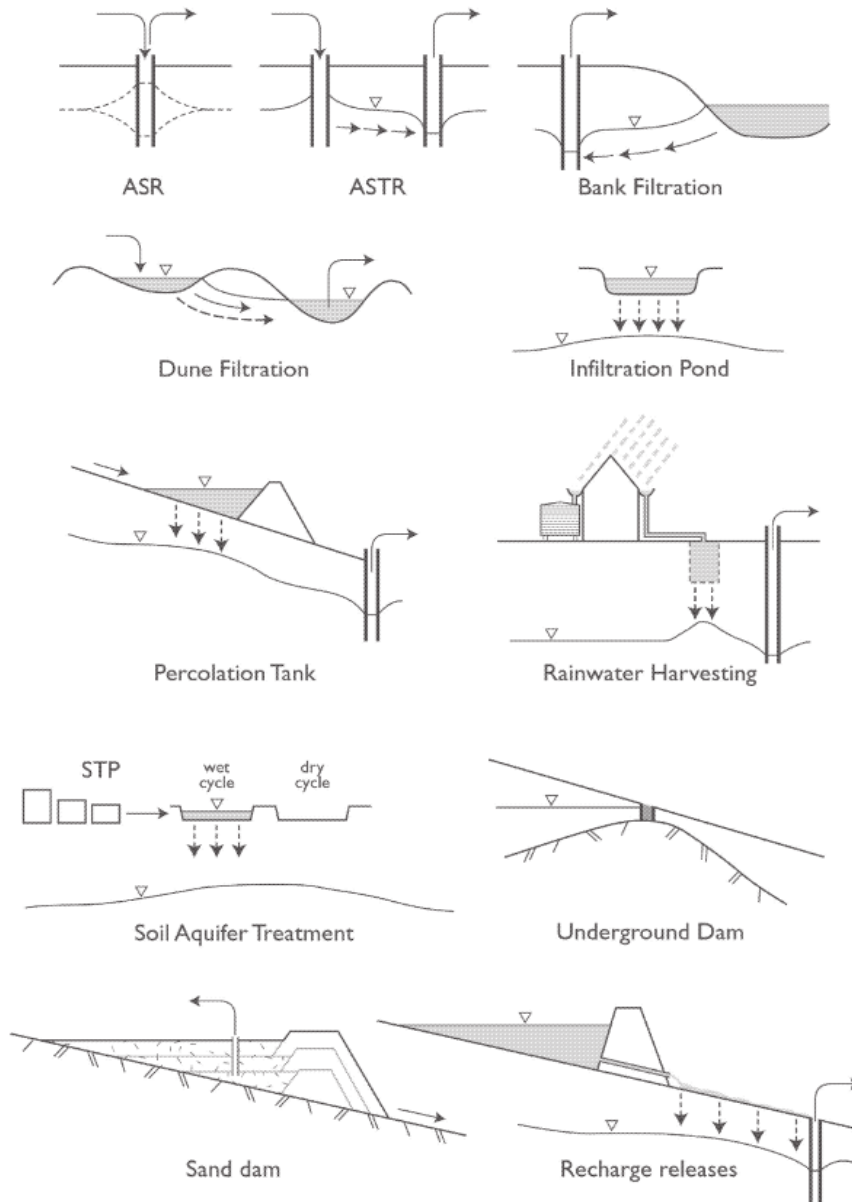
Η μέθοδος αυτή είναι η πλέον συνηθέστερη στην χρήση για τεχνητό εμπλουτισμό και συνίσταται στην επανεισαγωγή του νερού εμπλουτισμού είτε σε γεωτρήσεις είτε σε πηγάδια, με σκοπό τον εμπλουτισμό είτε της ακόρεστης ζώνης (α), είτε την εφαρμογή του σε βαθύτερα υδροφόρα στρώματα (β). Στην πρώτη περίπτωση πρόκειται για πηγάδια βάθους 10-40 m και διαμέτρου 1-2 m που θα πρέπει να είναι γεμάτα χάλικες ή αδρόκοκκη άμμο και μέσα από φίλτρα να διοχετεύεται το νερό εμπλουτισμού στην ακόρεστη ζώνη. Στη δεύτερη περίπτωση, χρησιμοποιούνται γεωτρήσεις για την εισαγωγή νερού, κυρίως σε υπό πίεση ή μερικώς υπό πίεση υδροφόρα στρώματα, που βρίσκονται βαθύτερα. Ωστόσο, θα πρέπει να προσεχθεί ιδιαίτερα η ποιότητα του νερού που εισάγεται για να αποφευχθεί ο κίνδυνος έμφραξης, όπως αναφέρεται παρακάτω.



Σχήμα 23. Εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού από γεώτρηση (α) σε ελεύθερο υδροφόρα και (β) σε υπό πίεση υδροφόρα. Πηγή:  
[http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg763e/ch7\\_files/p10.jpg](http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg763e/ch7_files/p10.jpg)

4) Επαγωγικός εμπλουτισμός: Παρατηρείται όταν τα επιφανειακά ύδατα συνδέονται υδραυλικά με τα υπόγεια ύδατα. Σε αυτόν περιλαμβάνονται οι εξής κατηγορίες (Σχ. 24) (Βουδούρης 2015, από Gale, 2005):

- i. *Αποθήκευση και επανάκτηση (Aquifer Storage and Recovery, ASR).*
- ii. *Αποθήκευση από μια γεώτρηση, αποθήκευση και επανάκτηση από άλλη γεώτρηση, σε κοντινή απόσταση (Aquifer Storage Transfer and Recovery, ASTR)*
- iii. *Εμπλουτισμός από όχθη ποταμού (Bank filtration)*
- iv. *Εμπλουτισμός μέσω μικρών λιμνών ή πηγαδιών που σχηματίζονται ανάμεσα σε παράκτιες θίνες (Dune filtration)*
- v. *Λίμνες κατεΐσδυσης (Infiltration Pond)*
- vi. *Δεξαμενές διήθησης (Percolation Tank)*
- vii. *Εμπλουτισμός από βρόχινο νερό (Rainwater Harvesting)*
- viii. *Συστήματα εδάφους-υδροφορέα (Soil Aquifer Treatment, SAT)*
- ix. *Εμπλουτισμός μέσω υπόγειων φραγμάτων (Underground dam)*
- x. *Εμπλουτισμός από την κατασκευή αμμούχων φραγμάτων για ανάσχεση πλημμυρικών ροών (Sand dam)*
- xi. *Απελευθέρωση νερού από φράγματα (Recharge releases)*



Σχήμα 24. . Απεικόνιση διαφόρων μεθόδων τεχνητού εμπλουτισμού με την αντιστοίχιση ανά μέθοδο (Dillon, 2005 με τροποποιήσεις).

## 6.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις τεχνητού εμπλουτισμού

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του τεχνητού εμπλουτισμού υδροφορέων σε μία περιοχή αφορούν αφενός στα έργα που πρέπει να γίνουν για την μετατροπή μιας έκτασης γης κατάλληλης για την εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού και αφετέρου στις επιπτώσεις που θα έχει η εφαρμογή του στο οικοσύστημα της περιοχής έρευνας. Επομένως, οι επιπτώσεις αυτές μπορούν να συνοψιστούν στα οφέλη, που προαναφέρθηκαν και στις αρνητικές επιπτώσεις του τεχνητού εμπλουτισμού για τα οικοσυστήματα. Τα μειονεκτήματα του τεχνητού εμπλουτισμού είναι (κατά Βουδούρη, 2015):

- Προβλήματα έμφραξης (clogging)

Η έμφραξη που προκαλείται τόσο στους πόρους του εδάφους όσο και στα φίλτρα των γεωτρήσεων επανεισαγωγής νερού στον τεχνητό εμπλουτισμό, είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας στη διάρκεια ζωής του έργου. Η έμφραξη αφορά το φράξιμο είτε των εδαφικών πόρων είτε των φίλτρων των γεωτρήσεων λόγω φυσικών, βιολογικών και χημικών διεργασιών (Dillon et al., 2022).

- **Φυσικές διεργασίες:** Αφορούν τη συσσώρευση οργανικού κι ανόργανου υλικού που είναι διαλυμένα στο νερό που διοχετεύεται για τεχνητό εμπλουτισμό. Παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι λεπτόκκοκα γεω-υλικά όπως άργιλος και ιλύς, υπολείμματα λυματολάσπης και μικροοργανισμών. Όλα αυτά τα υλικά έχουν την τάση να συσσωρεύονται στα κατώτερα στρώματα λόγω βαρύτητας και να δημιουργούν μικρές στρώσεις που κυμαίνονται από λίγα mm έως λίγα cm.
- **Βιολογικές διεργασίες:** που οφείλονται στη συγκέντρωση βακτηρίων στο νερό που διοχετεύεται, καθώς επίσης και στη δημιουργία βιομάζας, τα οποία με τη σειρά τους δημιουργούν φραγμό στην κατείσδυση του νερού. Αυτό συμβαίνει λόγω της δημιουργίας ενός λεπτούς βιογενούς στρώματος, λόγω της περίσσειας οργανικού άνθρακα που αφομοιώνεται από τους μικροοργανισμούς αυτούς.
- **Χημικές διεργασίες:** Σε αυτές κατατάσσονται οι χημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο νερό εμπλουτισμού που χρησιμοποιείται, αλλά και μεταξύ νερού και εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, συμβαίνουν γεωχημικές αντιδράσεις όπως η καθίζηση του ασβεστίτη, της γύψου, των οξειδίων του σιδήρου και άλλων χημικών. Οι αντιδράσεις αυτές δημιουργούν είτε ίζημα ως προϊόν, είτε αντιδρούν με το έδαφος και σχηματίζονται μικρές στρώσεις που φράσσουν την κυκλοφορία του νερού. Αντιθέτως, η χημική αντίδραση δημιουργίας του ασβεστίτη είναι αμφίδρομη και μπορεί να προκύψει διάλυση του ασβεστίτη και άρα αύξηση της υδροπερατότητας.
- **Μηχανικές διεργασίες:** Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται η έμφραξη λόγω κατάρρευσης του γεωυλικού λόγω διάβρωσης από τη διαδικασία του τεχνητού εμπλουτισμού. Επίσης, εδώ ανήκουν και οι φυσαλίδες αέρα, οι οποίες παράγονται από βιογεωχημικές διεργασίες, αλλαγές στη θερμοκρασία ή την πίεση του περιβάλλοντος εμπλουτισμού.

Επιπρόσθετα, ο ρυθμός κατείσδυσης του νερού εμπλουτισμού επηρεάζεται από το ιξώδες του και άρα από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Επομένως, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το θερμοκρασιακό εύρος χειμών-θέρους λόγω του γεγονότος ότι οι χαμηλότερες θερμοκρασίες δεν ευνοούν την κατείσδυση, αντιθέτως την μειώνουν δραστικά έως και στο μισό. Επίσης, οι βιολογικές διεργασίες από τους μικροοργανισμούς είναι εντονότερες τους θερινούς μήνες.

Συμπερασματικά, καθίσταται φανερό πως είναι δύσκολη η πρόβλεψη και αντιμετώπιση όλων των προβλημάτων που ανακύπτουν και άρα προτείνεται η εφαρμογή σε πιλοτικό στάδιο σε πρώτη φάση για ένα έτος, ώστε να είναι ευκολότερη η εποχιακή παρακολούθηση του συστήματος τεχνητού εμπλουτισμού (Bouwer, 2002).

- Κίνδυνος ρύπανσης και μόλυνσης του υπόγειου νερού

Ο τεχνητός εμπλουτισμός υδροφορέων είναι μία δίοδος στην καλύτερη διαχείριση και επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων, ωστόσο αυτό εγκυνομεί κινδύνους όσον αφορά την χημική σύσταση τους. Αυτό οφείλεται στο υψηλό οργανικό, ανόργανο και μικροβιακό φορτίο που μεταφέρουν τα επεξεργασμένα λύματα. Ως οργανικό φορτίο αναφέρονται οι βιοαποδομήσιμες (υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, λιπαρές ουσίες) και οι μη βιοαποδομήσιμες (χρώματα, βιομηχανικά απόβλητα, απορρυπαντικά, φαινόλες κ.α.). Ως ανόργανο φορτίο αναφέρονται οι ανόργανες χημικές ενώσεις όπως άλατα, τοξικά μέταλλα (αρσενικό, θείο, κυάνιο) και τα βαρέα μέταλλα (μόλυβδος, κάδμιο, υδράργυρος κ.α.). Τέλος, ως μικροβιακό φορτίο αναφέρονται οι παθογόνοι μικροοργανισμοί (κολοβακτηρίδια, ιοί, πρωτόζωα, έλμινθες) που μπορούν να βλάψουν την ανθρώπινη υγεία.

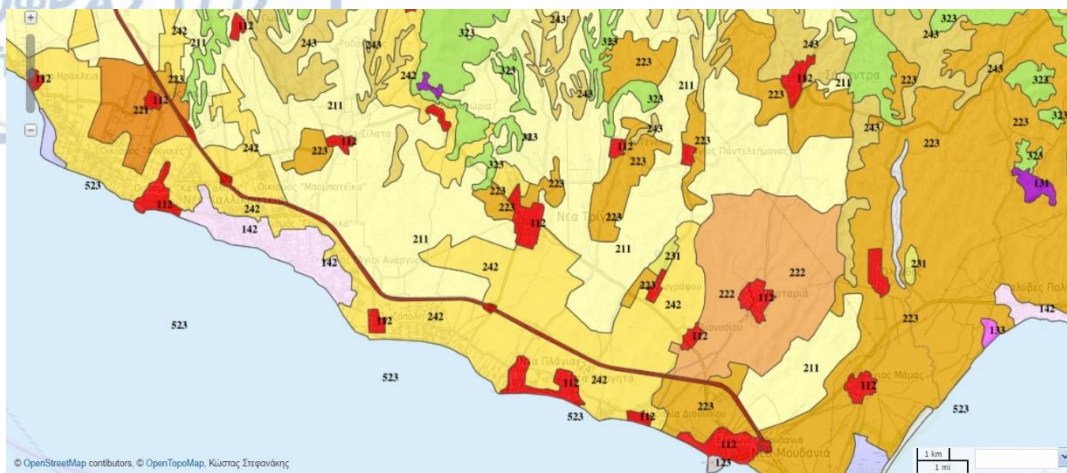
- Μεγάλη έκταση Γης

Από την περιγραφή των μεθόδων τεχνητού εμπλουτισμού, γίνεται φανερό πως χρειάζονται εκτάσεις γης, ιδίως για τις επιφανειακές στις οποίες το νερό εμπλουτίζει τον υδροφόρο ορίζοντα μέσω λεκανών διήθησης. Αυτό καθιστά προβλήματα με την ιδιοκτησία της γης, διότι η περιοχή είναι οικιστική, τουριστική και αγροτική, όπως φαίνεται και στον χάρτη κάλυψης γης – Corine Land Cover 2018 (Σχ. 25).

Στον χάρτη απεικονίζονται οι χρήσεις γης στην ευρύτερη περιοχή της Δυτικής Χαλκιδικής και περιλαμβάνεται σε αυτή η περιοχή έρευνας. Η κάλυψη γης για την περιοχή έρευνας αφορούν, σύμφωνα με τους κωδικούς του υπομνήματος:

- **1.1.2** Ασυνεχής αστικός ιστός
- **1.2.2** Οδικά δίκτυα
- **1.4.2** Εγκαταστάσεις αθλητισμού κι αναψυχής
- **2.1.1** Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη
- **2.2.3** Ελαιώνες
- **2.3.1** Λιβάδια
- **2.4.3** Γη χρησιμοποιούμενη κυρίως για γεωργία μαζί με σημαντικά τμήματα φυσικής βλάστησης
- **2.4.2** Σύνθετες καλλιέργειες
- **3.2.3** Σκληροφυλλική βλάστηση





Σχήμα 25 . Χάρτης κάλυψης Γης – CORINE Land Cover 2018 και το σχετικό υπόμνημα ([https://mapsportal.ypen.gr/layers/geonode:gr\\_clc2018](https://mapsportal.ypen.gr/layers/geonode:gr_clc2018))

Οι προαναφερθείσες χρήσεις γης είναι αυτές που συναντώνται στην περιοχή έρευνας και σχετίζονται κυρίως με κατοικημένες περιοχές (οικισμοί) και αγροτικές εκτάσεις (ελαιώνες, μη αρδευόμενη αρόσιμη γη, λιβάδια, σύνθετες καλλιέργειες). Οι επιφανειακές μέθοδοι απαιτούν μεγάλη έκταση και ορισμένες υποδομές (οδοί πρόσβασης, αναχώματα) έτσι ώστε να φιλοξενήσουν μονάδες εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού σε μακροπρόθεσμη περίοδο. Πιο συγκεκριμένα, οι λεκάνες διήθησης έχουν έκταση που κυμαίνεται από 4-80 στρέμματα και θα πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον 2 λεκάνες για την επίτευξη της μεθόδου (Βαχαβιώλος-Καπράνος, 2016).

- Ανάγκη συνεχούς παρακολούθησης του συστήματος τεχνητού εμπλουτισμού

Το σύστημα τεχνητού εμπλουτισμού που θα εφαρμόζεται σε μια περιοχή έρευνας, θα πρέπει να τίθεται υπό συνεχή παρακολούθηση έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία του. Πιο συγκεκριμένα, θα πρέπει να ελέγχονται τακτικά οι λεκάνες

δήθησης ή οι γεωτρήσεις εμπλουτισμού για την πρόληψη φαινομένων έμφραξης, έλεγχος της χημικής ποιότητας του νερού εμπλουτισμού ώστε να αποφευχθεί η ρύπανση και μόλυνση του υπόγειου υδροφορέα.

### 6.3 Εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού με επεξεργασμένα λύματα

Σε περιοχές ανά τον κόσμο όπου υπάρχει έλλειμα στους υδατικούς πόρους ή κακής ποιότητας νερά, προτείνεται ως εναλλακτική λύση ύδρευσης ή άρδευσης η χρήση των επεξεργασμένων λυμάτων, υπό προϋποθέσεις. Ως επεξεργασμένα λύματα θεωρούνται αυτά που προέρχεται από τις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (στο εξής Ε.Ε.Λ.) και το οποία μετά από κατάλληλη επεξεργασία (μετά από δευτεροβάθμιο καθαρισμό) καθίστανται κατάλληλα για επανεισαγωγή σε υδροφορείς, για άρδευση και αστική ή βιομηχανική χρήση. Τα επεξεργασμένα λύματα ανήκουν στους μη συμβατικούς υδατικούς πόρους και μελλοντικά είναι ικανά να συμβάλλουν στην καλύτερη διαχείριση των υδατικών πόρων μιας περιοχής, υπό το πρίσμα της κλιματικής μεταβολής και των έντονων ξηρών περιόδων που εκδηλώνονται. Παρόλα αυτά, θα πρέπει να μελετηθεί εκτενώς η χρήση των επεξεργασμένων λυμάτων όπως ορίζει η Κοινή Υπουργική Απόφαση (ΚΥΑ) 45116 (ΦΕΚ 354, 8-3-2011). Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με το Άρθρο 5 της ΚΥΑ, για τον εμπλουτισμό υπόγειων υδροφορέων με γεωτρήσεις ορίζονται οι εξής προϋποθέσεις:

- Ολικά κολοβακτηρίδια (TC/100 ml)  $\leq 2$  για το 80% των δειγμάτων
- Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο 5 ημερών (BOD<sub>5</sub>)  $\leq 10$  mg/l για το 80% των δειγμάτων
- Σύνολο αιωρούμενων συστατικών (SS)  $\leq 2$  mg/l για το 80% των δειγμάτων
- Θολότητα (NTU)  $\leq 2$ , διάμεση τιμή
- Κατ' ελάχιστο απαιτούμενη επεξεργασία: Δευτεροβάθμια βιολογική επεξεργασία με προχωρημένη επεξεργασία και απολύμανση

Όσον αφορά την τελευταία προϋπόθεση, τα ανακτημένα νερά θα πρέπει να έχουν υποστεί δευτεροβάθμια βιολογική επεξεργασία, στην οποία περιλαμβάνονται διάφοροι τύποι συστήματος ενεργού ιλύος, βιολογικά φίλτρα και περιστρεφόμενους βιολογικούς δίσκους. Η προχωρημένη επεξεργασία αναφέρεται στην χρήση κατάλληλου συστήματος μεμβρανών για υπερδιήθηση του ανακτημένου νερού. Τέλος, η απολύμανση αναφέρεται στην χλωρίωση, την οζόνωση και τη χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας ή άλλου είδους μέθοδος καταστροφής των παθογόνων μικροοργανισμών.

### 6.4 Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων περιοχής έρευνας

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει από το 1991 την Οδηγία 91/271/ΕΟΚ, που σχετίζεται με την επεξεργασία και την διάθεση των αστικών λυμάτων. Η Οδηγία αυτή ορίζει ότι όλοι οι οικισμοί και οι πόλεις, άνω των 2000 κατοίκων, εντός Ευρωπαϊκής Ένωσης, θα πρέπει να διαθέτουν αποχετευτικά δίκτυα και Εγκαταστάσεις

Επεξεργασίας Λυμάτων (Ε.Ε.Λ.), ανάλογα με τον πληθυσμό τους και τον αποδέκτη των επεξεργασμένων λυμάτων. Επιπρόσθετα, ορίζει τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που έχουν τα επεξεργασμένα λύματα όταν ρίπτονται σε κάποιον υδάτινο αποδέκτη (ρέμα, ποταμό, λίμνη ή θάλασσα), καθώς και τον τύπο του βιολογικού καθαρισμού που πρέπει να εφαρμοστεί ανάλογα με τον τύπο του αποδέκτη, ο οποίος υποδιαιρείται σε τρεις κατηγορίες, που είναι: κανονικός, ευαίσθητος, λιγότερο ευαίσθητος. Ως ελάχιστο επίπεδο βιολογικής επεξεργασίας των επεξεργασμένων λυμάτων καθορίζεται η δευτεροβάθμια επεξεργασία. Ωστόσο, σε ευαίσθητους αποδέκτες, απαιτείται περαιτέρω η τριτοβάθμια επεξεργασία των λυμάτων πριν την απόρριψή τους στον αποδέκτη (ΥΠΕΝ, 2017).

Οι Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (Ε.Ε.Λ.) είναι οι μονάδες βιολογικού καθαρισμού, οι οποίες έχουν ως σκοπό την επεξεργασία και τον καθαρισμό των αστικών και βιομηχανικών υγρών αποβλήτων. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται από τις μονάδες Ε.Ε.Λ. για την επεξεργασία των λυμάτων είναι οι εξής (Στάθη, 2018):

- Πρωτοβάθμια (μηχανική) επεξεργασία

Σε αυτόν τον τύπο επεξεργασίας περιλαμβάνονται η προεπεξεργασία και η πρωτοβάθμια επεξεργασία. Στην προεπεξεργασία γίνεται η απομάκρυνση στερεών υλικών από τα λύματα όπως ξύλα, χαλίκια, άμμος, υφάσματα., που μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στον μηχανολογικό εξοπλισμό. Η πρωτοβάθμια επεξεργασία αναφέρεται στην απομάκρυνση μέρους των αιωρούμενων συστατικών, των οργανικών ουσιών και θρεπτικών συστατικών. Σε αυτήν περιλαμβάνονται διεργασίες όπως η εσχάρωση-εξάμμιση της μεγάλης διαμέτρου στερεών, η αμμοσυλλογή-λιποσυλλογή και η πρωτοβάθμια καθίζηση διαφόρων στερεών χημικών ουσιών.

- Δευτεροβάθμια (βιολογική) επεξεργασία

Η δευτεροβάθμια επεξεργασία των λυμάτων είναι η ουσιαστική επεξεργασία των υγρών αποβλήτων, διότι απομακρύνεται το μεγαλύτερο μέρος του οργανικού φορτίου (BOD), σημαντικού μέρους των αζωτούχων (N) και φωσφορικών (P) συστατικών και των αιωρούμενων συστατικών (SS). Σε αυτόν τον τύπο επεξεργασίας γίνεται η αποικοδόμηση του οργανικού φορτίου, μέσω της προσφοράς οξυγόνου σε αυτό το βιοχημικό σύστημα, ώστε να οξειδωθούν οι χημικές ενώσεις του άνθρακα και του αζώτου. Περιλαμβάνονται διεργασίες όπως είναι ο αερισμός των λυμάτων, η δευτεροβάθμια καθίζηση των λοιπών οργανικών ενώσεων και η επανακυκλοφορία ενεργού ιλύος. Η δευτεροβάθμια επεξεργασία των υγρών αποβλήτων θεωρείται η ελάχιστη επεξεργασία που απαιτείται, μαζί με την απολύμανση, για την διάθεση των υγρών αποβλήτων στον αποδέκτη, όπως προαναφέρθηκε σύμφωνα με την σχετική ΚΥΑ 45116 (ΦΕΚ 354, 8-3-2011).

- Τριτοβάθμια (προχωρημένη) επεξεργασία

Η τριτοβάθμια επεξεργασία εφαρμόζεται με σκοπό την απομάκρυνση όσων ρυπογόνων ουσιών έχουν διαφύγει από το προηγούμενο στάδιο επεξεργασίας και είναι οι αζωτούχες και φωσφορικές ενώσεις και οι παθογόνοι μικροοργανισμοί. Επίσης, είναι απαραίτητη για την διάθεση των επεξεργασμένων λυμάτων σε ευαίσθητους αποδέκτες, όπως είναι οι προστατευόμενες περιοχές. Σε αυτό το στάδιο περιλαμβάνονται διεργασίες όπως είναι η διήθηση, η αντίστροφη ώσμωση, η χημική επεξεργασία

δυσδιάλυτων οργανικών ουσιών, η προσρόφηση, η ιοντοανταλλαγή και η απογύμνωση αερίου. Συμπληρωματικά, δύναται να χρησιμοποιηθεί η απολύμανση ως μέθοδος για την καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών με μεθόδους όπως: η χλωρίωση, η οζόνωση και η υπεριώδης ακτινοβολία.

Στην περιοχή έρευνας υπάρχουν τρεις (3) διαθέσιμες μονάδες επεξεργασίας λυμάτων και δύο (2) ακόμη σε κοντινή απόσταση που συμπεριλήφθηκαν στη μεθοδολογία της Διαδικασίας Αναλυτικής Ιεράρχησης, που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία. Οι μονάδες αυτές είναι οι εξής και οι θέσεις τους φαίνονται στον παρακάτω χάρτη, σχετικά με την περιοχή έρευνας (Σχ. 26):

- Ε.Ε.Λ. Νέας Καλλικράτειας

Η μονάδα αυτή εξυπηρετεί πολλούς τους οικισμούς Ν. Καλλικράτεια, Λάκκωμα, Ν. Σύλλατα, Σωζόπολη, Ν. Γωνιά, Ροδόκηπο, τη περιοχή Β' Παραθεριστικών κατοικιών, τη Βιοτεχνική ζώνη Λακκόματος, τη Βεργιά και εξυπηρετεί πληθυσμό αιχμής 19076 κατοίκων. Η μονάδα μπορεί να πραγματοποιήσει έως δευτεροβάθμιο καθαρισμό και απολύμανση μέσω χλωρίωσης. Η μέση ετήσια εισερχόμενη παροχή λυμάτων είναι  $945 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$ , με τη μέγιστη στα  $2880 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$ . Ο αποδέκτης των επεξεργασμένων λυμάτων είναι το ρέμα του Άγιου Παύλου.

- Ε.Ε.Λ. Νέας Τρίγλιας

Η μονάδα εξυπηρετεί τους οικισμούς της Ν. Τρίγλιας και των Ν. Πλαγίων με πληθυσμό αιχμής 5850 κατοίκους. Η μονάδα πραγματοποιεί έως και δευτεροβάθμιο καθαρισμό και απολύμανση μέσω χλωρίωσης. Δεν υπάρχουν στοιχεία για τη μέση ετήσια εισερχόμενη παροχή των λυμάτων και ο αποδέκτης είναι ένα παρακείμενο ρέμα.

- Ε.Ε.Λ. Διονυσίου

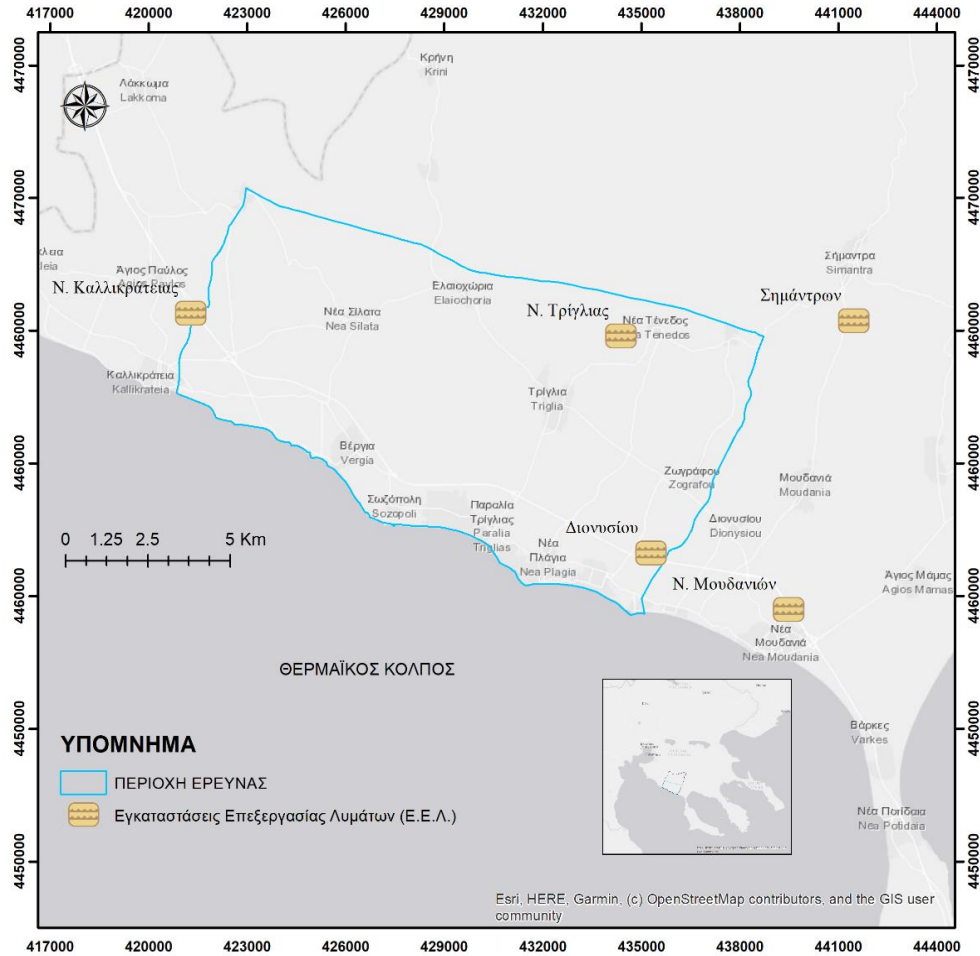
Η μονάδα εξυπηρετεί τους οικισμούς των Ν. Φλογητών και Διονυσίου με πληθυσμό αιχμής τους 11538 κατοίκους. Η μονάδα πραγματοποιεί έως και δευτεροβάθμιο καθαρισμό και απολύμανση μέσω χλωρίωσης. Η μέση ετήσια εισερχόμενη παροχή λυμάτων είναι  $380 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$  με τη μέγιστη στα  $1520 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$ . Ο αποδέκτης είναι το ρέμα Μουριών.

- Ε.Ε.Λ. Νέων Μουδανιών

Η μονάδα εξυπηρετεί τα Ν. Μουδανιά με πληθυσμό αιχμής τους 17.080 κατοίκους. Η μονάδα πραγματοποιεί έως και δευτεροβάθμιο καθαρισμό και απολύμανση μέσω χλωρίωσης. Η μέση ετήσια εισερχόμενη παροχή λυμάτων είναι  $2300 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$  με τη μέγιστη  $3000 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$ . Ο αποδέκτης είναι ο Θερμαϊκός κόλπος.

- Ε.Ε.Λ. Σημάντρων

Η μονάδα εξυπηρετεί τα Σήμαντρα με πληθυσμό αιχμής τους 2402 κατοίκους. Η μονάδα πραγματοποιεί έως και δευτεροβάθμιο καθαρισμό και απολύμανση. Η μέση ετήσια εισερχόμενη παροχή λυμάτων είναι  $772 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$  με τη μέγιστη στα  $1545 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$ . Ο αποδέκτης είναι ένα παρακείμενο ρέμα.



Σχήμα 26. Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων εντός και πέριξ της περιοχής έρευνας.

Η περιοχή έρευνας, όπως έχει ήδη προαναφερθεί, παρουσιάζει αυξημένη ζήτηση σε υδατικές ανάγκες. Ωστόσο, η περιοχή δεν παρουσιάζει πλεόνασμα στους υδατικούς πόρους, σύμφωνα με το υδρολογικό ισοζύγιο της περιοχής, καθώς δεν υπάρχουν πηγές ή ποταμοί με ικανοποιητική παροχή νερού και διότι το περισσότερο νερό είτε υφίσταται εξατμισοδιαπνοή είτε διηθείται στο υπέδαφος (Veranis et al., 2016). Επομένως η εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού συνίσταται να γίνεται με τη χρήση των επεξεργασμένων λυμάτων που προέρχονται από τους βιολογικούς καθαρισμούς, εντός και πέριξ της περιοχής έρευνας. Είναι σημαντικό να επισημανθεί πως το σύνολο των βιολογικών σταθμών στην περιοχή απορρίπτει τα επεξεργασμένα λύματα σε κοντινά ρέματα, αφενός συνεισφέροντας στον τεχνητό εμπλουτισμό των φρεάτιων υδροφορέων μέσω της κοίτης των ποταμοχειμάρρων και αφετέρου διότι τα επεξεργασμένα λύματα μένουν ένας αναξιοποίητος, μη συμβατικός, υδατικός πόρος.

## 6.5 Εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού στον Ελληνικό χώρο

Η εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται παγκοσμίως για την αντιμετώπιση προβλημάτων που σχετίζονται με την ποιότητα και

την ποσότητα των υπογείων υδάτων. Στην Ελλάδα, έχουν εφαρμοστεί πολιτικά προγράμματα εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού σε αρκετές περιοχές της χώρας, ωστόσο δεν έχει γίνει εφικτή η εφαρμογή του σε μόνιμη βάση με σκοπό την βελτίωση της διαχείρισης των υδατικών πόρων μιας περιοχής. Παραδείγματα αυτών των πιλοτικών εφαρμογών τεχνητού εμπλουτισμού ανά Περιφερειακή Ενότητα είναι τα εξής:

#### 1. Περιφερειακή Ενότητα Αργολίδας

Ο τεχνητός εμπλουτισμός εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στο Αργολικό πεδίο με τη μέθοδο των γεωτρήσεων και πηγαδιών, ήδη από τα μέσα του 1960. Αρχικά, στα μέσα του 1980 χρησιμοποιήθηκε το νερό των πηγών Κεφαλαρίου και Λέρνης, ώστε να ανασχεθεί η θαλάσσια διείσδυση. Αργότερα, στις αρχές του 1990 συνέχισε η εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού από την πηγή Αναβάλου με σκοπό τον εμπλουτισμό του υδροφορέα της πεδιάδας στην Αργολίδα. Τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά καθώς η στάθμη των υπόγειων υδάτων ανέβηκε κατά 5 m ως τις αρχές του 2000 και η ποιότητα του υπόγειου νερού βελτιώθηκε (Βουδούρης, 2022).

#### 2. Περιφερειακή Ενότητα Κορινθίας

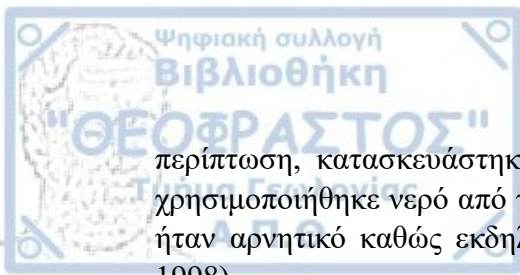
Η εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού έγινε στο βόρειο τμήμα της Κορινθίας στα τέλη του 1990 και αφορούσε την εφαρμογή του μέσω 6 αβαθών πηγαδιών, μεγάλης διαμέτρου, σε αλλουβιακές αποθέσεις με διάρκεια 15 μέρες. Οι υδροφορείς αποτελούνται από έναν ελεύθερο και επάλληλους υπό πίεση. Το νερό που χρησιμοποιήθηκε προερχόταν από τις χειμερινές απορροές του ποταμού Ασωπού και προτιμήθηκαν οι σχετικά μικρές παροχές εισαγωγής στα πηγάδια για την επίτευξη υψηλών τιμών κατείσδυσης. Τα αποτελέσματα ήταν σημαντικά καθώς η στάθμη ανέβηκε περίπου 2 m και η ακτίνα επίδρασης ήταν στα 1000 m. Ωστόσο, εμφανίστηκαν σύντομα προβλήματα έμφραξης (Βουδούρης, 2015).

#### 3. Περιφερειακή Ενότητα Λάρισας

Η εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού, σε δοκιμαστικό επίπεδο, έγινε και στον θεσσαλικό κάμπο, που αντιμετωπίζει έντονα υδατικά προβλήματα. Η πρώτη περιοχή που εφαρμόστηκε ήταν στην Χάλκη το 2006, όπου εφαρμόστηκε με την μέθοδο της γεώτρησης και τη μέθοδο της τάφρου σε τεταρτογενείς αποθέσεις. Όσον αφορά τη γεώτρηση, το πείραμα διήρκησε 7 ημέρες και το αποτέλεσμα ήταν η άνοδος της στάθμης του υπόγειου νερού κατά 3,5 m σε γεώτρηση παρατήρησης 18 m μακριά από την γεώτρηση εμπλουτισμού (Βουδούρης, 2015). Η δεύτερη περιοχή ήταν στην περιοχή του Φυλλήϊου όρους, που βρίσκεται κοντά στα Φάρσαλα. Έγινε ένα πείραμα εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού μέσα στον καρστικό όγκο μέσω διοχέτευσης νερού από γεώτρηση, αλλά δεν υλοποιήθηκε (Βαχαβιώλος-Καπράνος, 2016).

#### 4. Περιφερειακή Ενότητα Ξάνθης

Η εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού έγινε ανατολικά της Ξάνθης στο πεδινό τμήμα της και αφορούσε την επαναχρησιμοποίηση κοιτών ρεμάτων και τη μέθοδο των λεκανών κατάκλυσης στα τέλη του 1990. Στην πρώτη περίπτωση, διοχετεύτηκε νερό σε αδρανή κοίτη του ποταμού Κόσυνθου στην περιοχή του Πολυσίτου. Το αποτέλεσμα ήταν θετικό καθώς η στάθμη ανήλθε 2 m σε γεωτρήσεις περίξ της κοίτης. Στη δεύτερη



περίπτωση, κατασκευάστηκαν λεκάνες διήθησης στην περιοχή των Βαφέικων και χρησιμοποιήθηκε νερό από τον ποταμό Κόσυνθο, χωρίς επεξεργασία. Το αποτέλεσμα ήταν αρνητικό καθώς εκδηλώθηκε έμφραξη, λόγω λεπτόκοκκων υλικών (Πλιάκας, 1998).

#### 5. Περιφερειακή Ενότητα Θεσσαλονίκης

Η εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού σε αυτή την περίπτωση έγινε στις ολοκαινικές αποθέσεις στην Βιομηχανική Περιοχή (ΒΙ.ΠΕ.) της Σίνδου. Στην περιοχή έρευνας αναπτύσσονται ένας ελεύθερος και δύο υπό πίεση. Η μέθοδος αφορούσε την εισαγωγή κατάλληλα επεξεργασμένου νερού από τα αστικά λύματα της μονάδας επεξεργασίας λυμάτων Θεσσαλονίκης και εφαρμόστηκε πιλοτικά με διάρκεια δύο μηνών. Τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά καθώς ανήλθε η στάθμη των υπόγειων υδάτων κατά 0,5 m σε γειτονικές γεωτρήσεις παρακολούθησης και επιπρόσθετα βελτιώθηκε η ποιότητα νερού, όσον αφορά την ηλεκτρική αγωγιμότητα (Πεταλά, 2013).

#### 6. Περιφερειακή Ενότητα Πάτρας

Η εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού έγινε στη ΒΙ.ΠΕ. Πατρών, όπου πραγματοποιήθηκε ο εμπλουτισμός μέσω τριών (3) βαθειών γεωτρήσεων τον Μάρτιο-Απρίλιο του 2001. Στην περιοχή έρευνας αναπτύσσονται δύο υδροφόροι ορίζοντες που είναι ο ελεύθερος υδροφόρος των ποταμοχειμάρριων αποθέσεων και τα επάλληλα υπό πίεση πλειστοκαινικά υδροφόρα στρώματα. Η μέθοδος πραγματοποιήθηκε μέσω γεωτρήσεων στις οποίες χρησιμοποιήθηκε νερό από το δίκτυο ύδρευσης της ΒΙ.ΠΕ. και η μέθοδος διήρκεσε 6 ημέρες. Τα αποτελέσματα ήταν άνοδος της στάθμης του υπόγειου νερού έως και 3,8 m και υπήρξε μικρή βελτίωση της ποιότητας του υπόγειου νερού (Βουδούρης, 2015).

## 7.1 Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP)

Η Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης (Analytic Hierarchy Process/AHP) είναι μια στατιστική μέθοδος πολυκριτηριακής ανάλυσης δεδομένων που αξιοποιείται από πολλούς επιστημονικούς κλάδους, με σκοπό την επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με αποφάσεις. Η μέθοδος εισήχθη από τον Saaty (1990) και βασίζεται στην σύγκριση των παραγόντων που επιλέγονται σε ένα πρόβλημα, είτε μέσω σχετικής είτε μέσω απόλυτης μέτρησης. Αυτό καθίσταται δυνατό με τη σύγκριση των παραγόντων ανά ζεύγη (pairwise comparison), κατά την οποία γίνεται εφικτή σύγκριση του ενός παράγοντα με τον άλλον ευθέως, αντιστρόφως και με τον εαυτό του μέσω της βαθμολόγησής του σε αντίστοιχο πίνακα, που ονομάζεται θεμελιώδης κλίμακα (Πίν. 3). Η βαθμολόγηση γίνεται κατά τη μέθοδο της AHP, κατά Saaty, 1990, με τιμές από 1-9, όπου:

Πίνακας 3 Εύρος βαθμολόγησης παραγόντων της μεθόδου AHP, μέσω της θεμελιώδους κλίμακας.

Βαθμός σημαντικότητας	Ορισμός	Εξήγηση
1	Ίση σημαντικότητα	Οι παράγοντες συμβάλλουν εξίσου στην σύγκριση
3	Μέση σημαντικότητα	Ευνοείται αρκετά η μία παράμετρος έναντι της άλλης
5	Ουσιώδης ή ισχυρή σημαντικότητα	Ευνοείται σημαντικά η μία παράμετρος έναντι της άλλης
7	Πολύ ισχυρή σημαντικότητα	Ευνοείται πολύ σημαντικά η μία παράμετρος έναντι της άλλης
9	Πάρα πολύ ισχυρή σημαντικότητα	Ευνοείται εξαιρετικά η μία παράμετρος έναντι της άλλης
2, 4, 6, 8	Ενδιάμεσες τιμές	ως ένδειξη συμβιβασμού

## 7.2 Παραμετροποίηση τεχνητού εμπλουτισμού

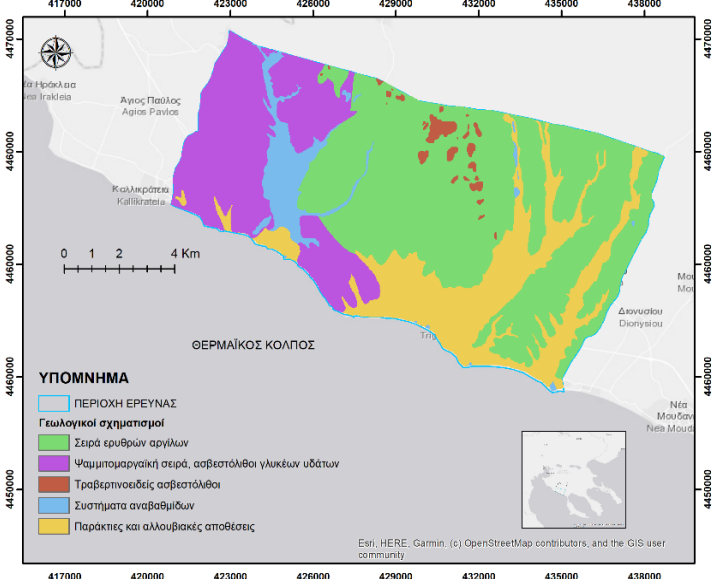
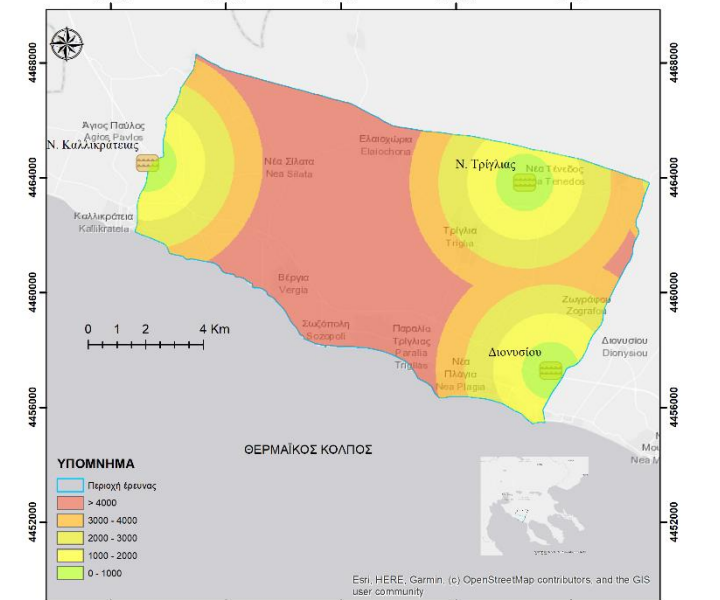
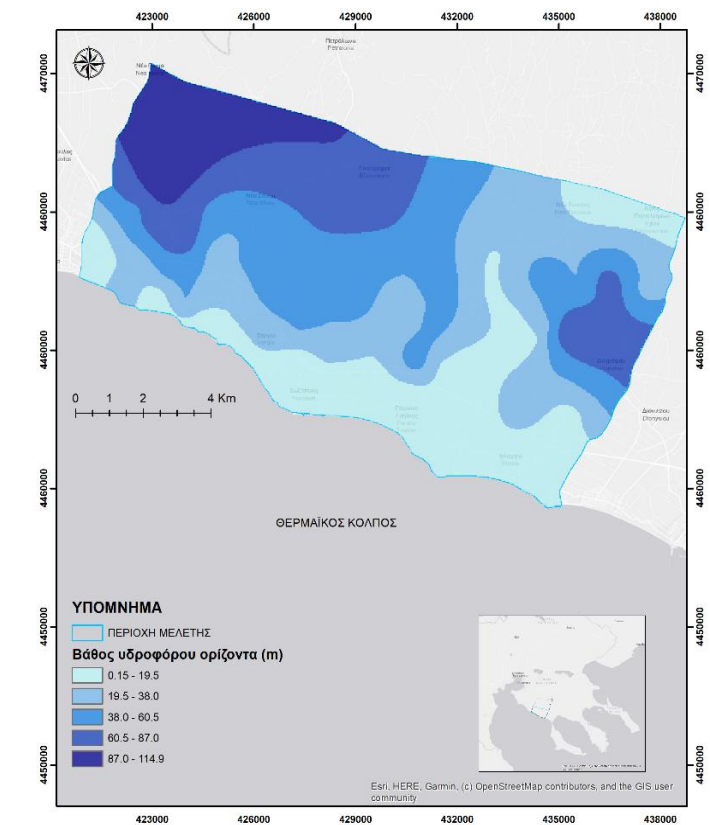
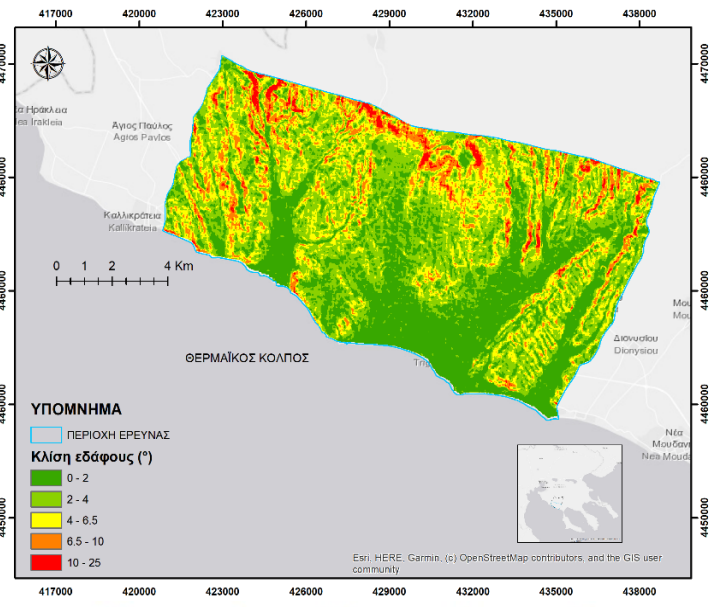
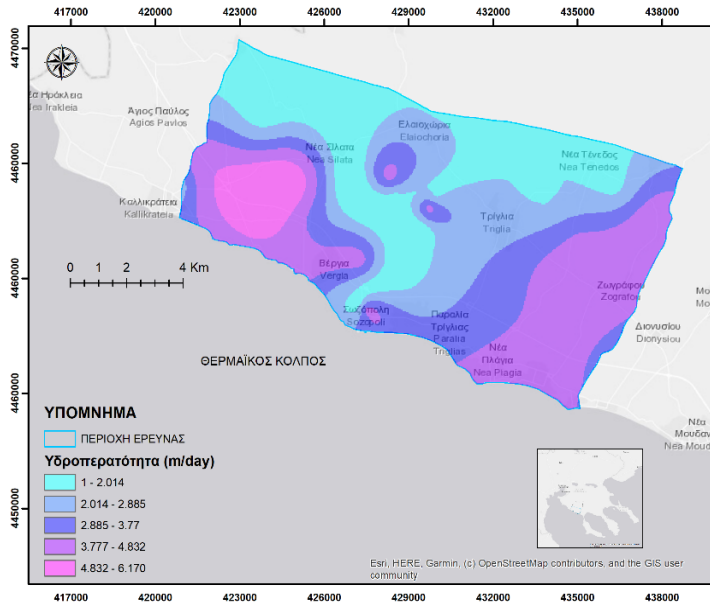
Αρχικά, θα πρέπει να επιλεγθούν οι παράγοντες που θα χρησιμοποιηθούν στην παραμετροποίηση της εφαρμογής του τεχνητού εμπλουτισμού στην περιοχή έρευνας. Επομένως, επιλέχθηκαν οι σημαντικότεροι με βάση τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής έρευνας (Πίν. 4). Οι παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν είναι (Σχ. 27):

1. Υδροπερατότητα γεωλογικών σχηματισμών (m/day)
2. Λιθολογία γεωλογικών σχηματισμών (αμμώδη, ιλυώδη, αργιλικά, χαλκώδη κ.ο.κ.)
3. Βάθος του υδροφόρου ορίζοντα (m)
4. Τοπογραφική κλίση (°)
5. Απόσταση από Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (m)



Πίνακας 4. Ταξινόμηση παραγόντων εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού για την περιοχή έρευνας.

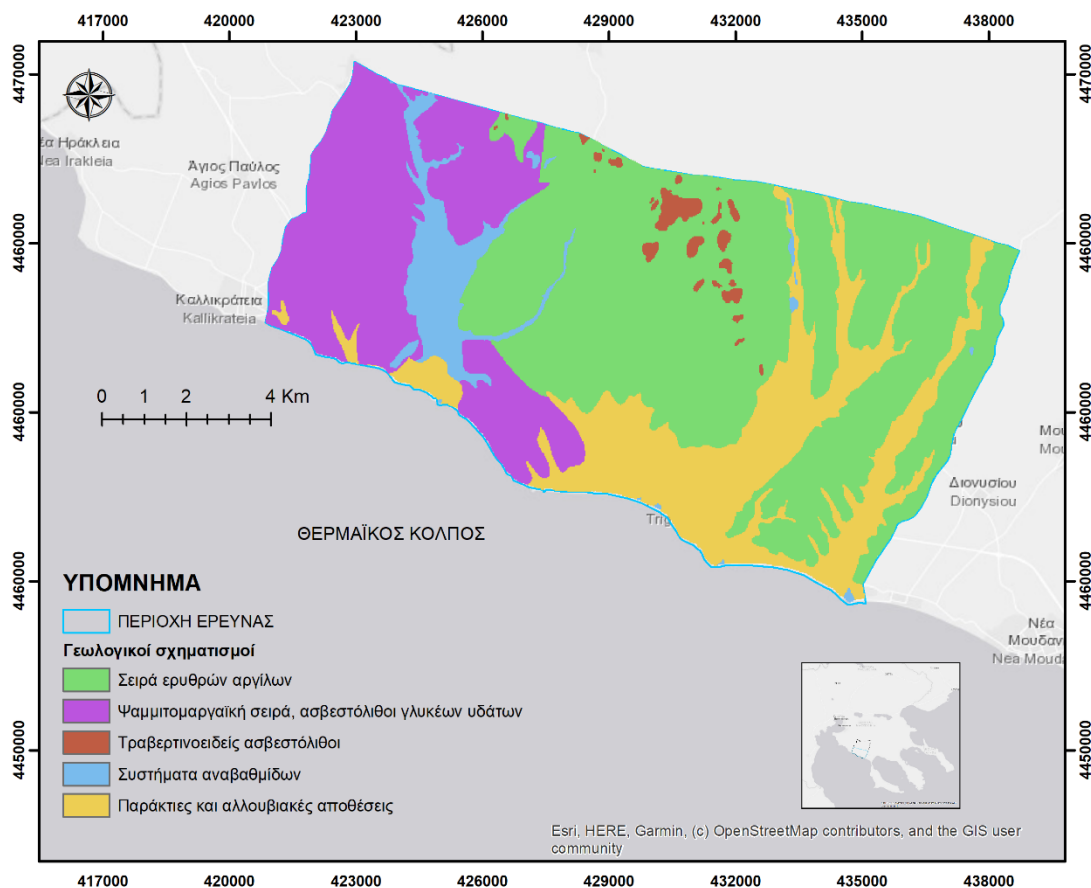
α/α	Παράμετρος	Ταξινόμηση	Εύρος	Βαθμολόγηση
1	Υδροπερατότητα (m/day)	Πολύ υψηλή	1 – 2	2
			2 – 2.89	6
			2.89 – 3.77	4
			3.77 – 4.83	8
			4.83 – 6.17	10
2	Λιθολογία	Υψηλή	Παράκτιες αποθέσεις	10
			Αλλουβιακές αποθέσεις	10
			Συστήματα αναβαθμίδων	8
			Τραβερτινοειδείς ασβεστόλιθοι	6
			Ασβεστόλιθοι λεπτόκοκκοι	4
			Ψαμιτομαργαϊκή σειρά	4
Σειρά ερυθρών αργίλων	2			
3	Βάθος υδροφόρου ορίζοντα (m)	Μέση	0.15 – 19.5	10
			19.5 – 37.95	8
			37.95 – 60.45	6
			60.45 – 87.0	4
			87.0 – 114.9	2
4	Κλίση (°)	Χαμηλή	0 – 2	10
			2 – 4	8
			4 – 6.5	6
			6.5 – 10	4
			10 – 25	2
5	Απόσταση από Ε.Ε.Λ. (m)	Πολύ χαμηλή	0 – 1000	10
			1000 – 2000	8
			2000 – 3000	6
			3000 – 4000	4
			> 4000	2



Σχήμα 27. Θεματικοί χάρτες της κάθε παραμέτρου για την εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού. Η κάθε κλάση αντιστοιχεί σε έναν βαθμό (2, 4, 6, 8, 10), όπως φαίνεται στον πίνακα 4.

### 7.2.1 Λιθολογία

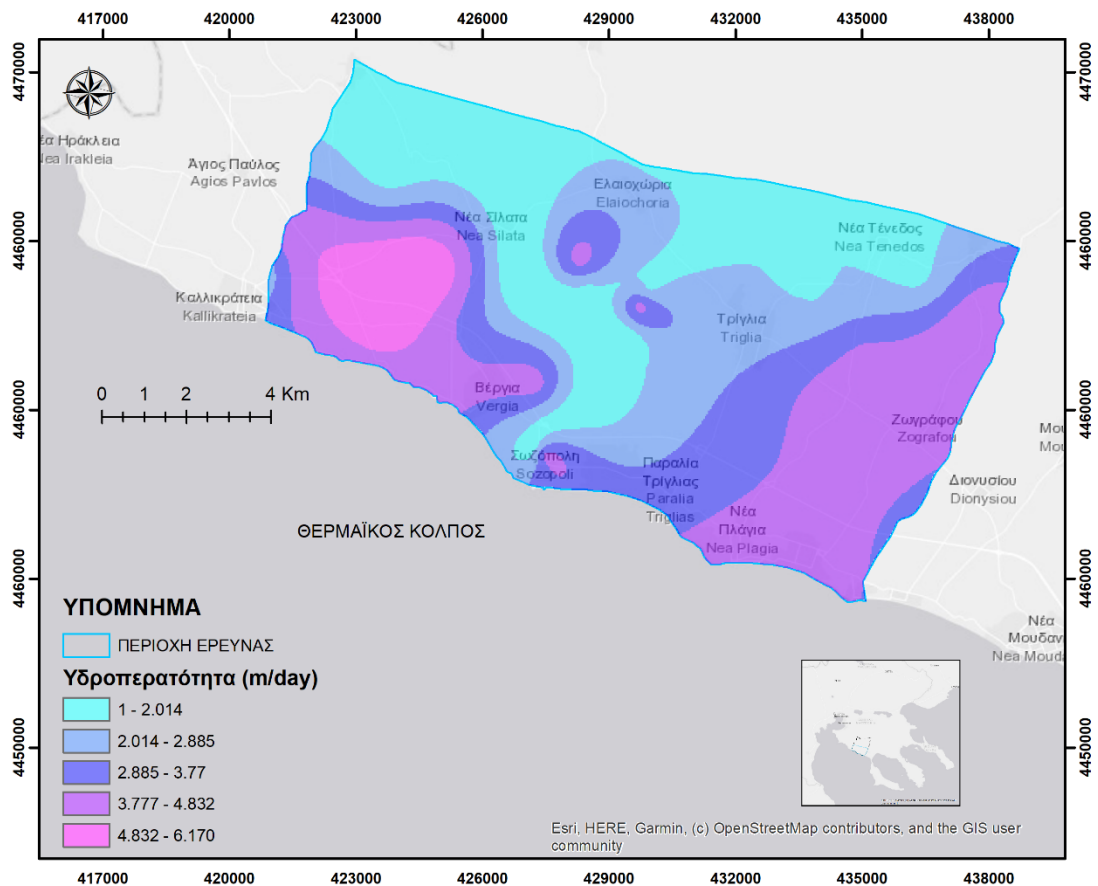
Η λιθολογική σύσταση των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής έρευνας επηρεάζει σημαντικά την επιλογή μιας θέσης για την εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού, ειδικά για όσον αφορά τις επιφανειακές μεθόδους. Ωστόσο, επειδή η περιοχή έρευνας αποτελείται από μεταλλικούς ιζηματογενείς σχηματισμούς μεγάλης ανομοιογένειας, συνίσταται η μελέτη λιθολογικών τομών από την περιοχή με σκοπό την πληρέστερη κατανόηση των τοπικών γεωλογικών συνθηκών. Αυτό συμβαίνει διότι η περιοχή έρευνας αποτελείται από εναλλαγές υδροπερατών με λιγότερο υδροπερατούς και αδιαπέρατους σχηματισμούς, με τους τελευταίους να μην ενδείκνυνται για την εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού, λόγω των μικρών τιμών αποθηκευτικότητας τους. Επομένως, οι περιοχές όπου επικρατούν τα λεπτόκοκκα γεωυλικά (άργιλος, ιλύς, μάργα) στη σύσταση των πετρωμάτων δεν είναι κατάλληλες περιοχές για την εφαρμογή (Σχ. 28). Παραδείγματα τέτοιων περιοχών είναι αυτές που βρίσκονται στην Σειρά ερυθρών αργίλων. Αντιθέτως, περιοχές που έχουν πετρώματα στα οποία επικρατούν τα αδρόκοκκα γεωυλικά, είναι περιοχές κατάλληλες για τεχνητό εμπλουτισμό. Παραδείγματα τέτοιων περιοχών είναι οι παράκτιες περιοχές κοντά στην Καλλικράτεια, και ιδιαίτερα οι αλλουβιακές αποθέσεις στην περιοχή της Σωζόπολης-Νέων Πλαγίων.



Σχήμα 28. Κατηγοριοποίηση λιθολογικών σχηματισμών βάσει της βαθμολόγησης σε 5 κλάσεις σύμφωνα πίνακα 4.

### 7.2.2 Υδροπερατότητα

Η υδροπερατότητα των γεωλογικών σχηματισμών είναι η σημαντικότερη παράμετρος που αφορά την εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού στην περιοχή έρευνας. Πιο συγκεκριμένα, η κατακόρυφη συνιστώσα της υδροπερατότητας είναι αυτή που ενδιαφέρει τον τεχνητό εμπλουτισμό, καθώς είναι αυτή που θα καθορίσει το νερό που κατεισδύει στους βαθύτερους γεωλογικούς σχηματισμούς. Αυτό συμβαίνει αφενός λόγω του μεγάλου βάθους του υδροφόρου ορίζοντα στην ενδοχώρα της περιοχής έρευνας, όπως περιγράφεται παρακάτω και αφετέρου λόγω της βαρύτητας που επιδρά κατά την κατείσδυση του υπόγειου νερού. Ιδιαίτερα για την εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού με επιφανειακή μέθοδο, όπως οι λεκάνες κατάκλυσης, είναι σημαντικό να υπάρχουν υδροπερατοί επιφανειακοί σχηματισμοί, που θα επιτρέπουν την άμεση κατείσδυση του νερού (Σχ. 29).

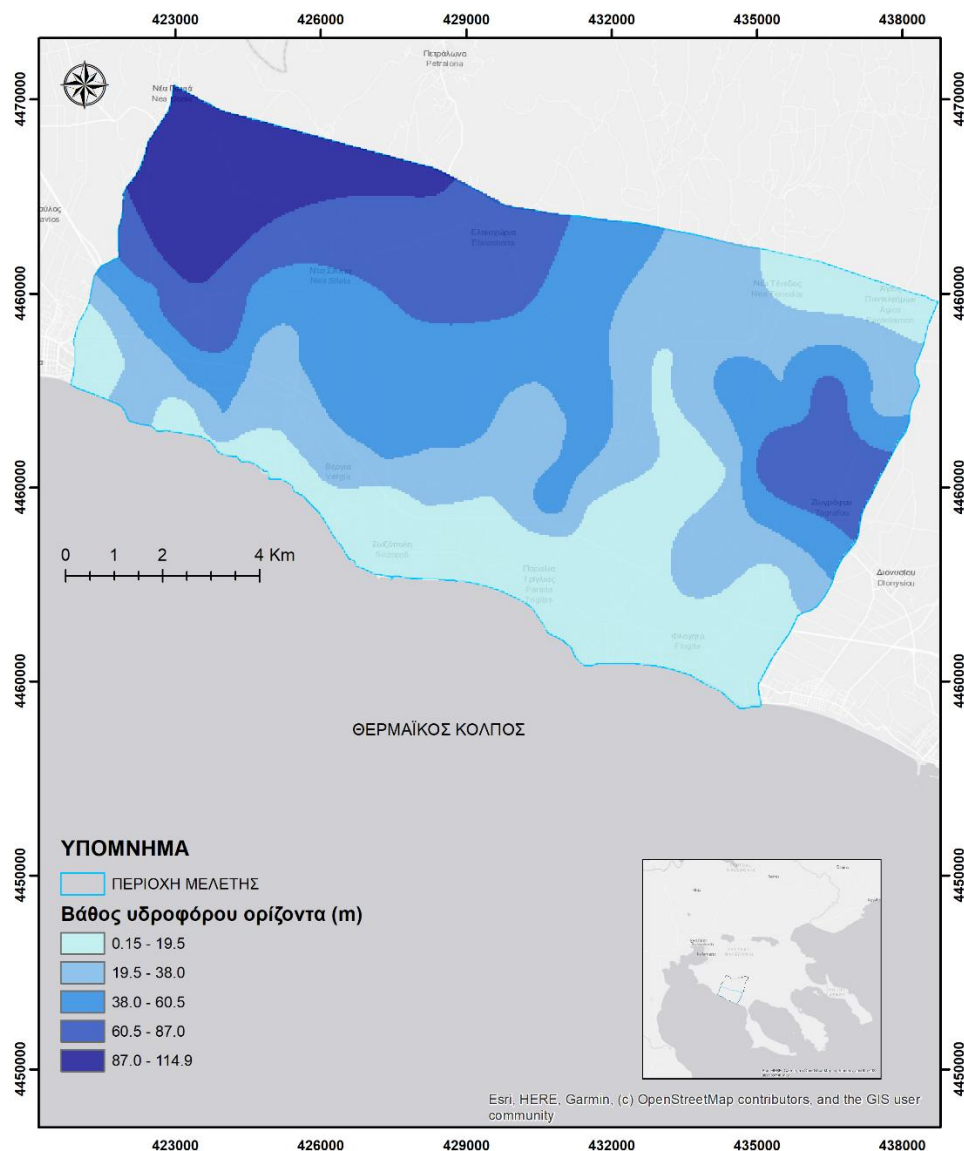


Σχήμα 29. Ταξινόμηση τιμών υδροπερατότητας σε 5 κλάσεις βάσει του πίνακα 4.

### 7.2.3 Βάθος υδροφόρου ορίζοντα

Το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα είναι μία επίσης σημαντική παράμετρος στον τεχνητό εμπλουτισμό υδροφορέων. Περιοχές όπου η στάθμη των υπόγειων υδάτων είναι υψηλή, δεν ενδείκνυνται για την εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού, εν αντιθέσει με τις περιοχές με μεγάλο βάθος του υδροφόρου ορίζοντα. Στην περιοχή έρευνας η στάθμη του υπόγειου νερού βρίσκεται κατά βάση σε μεγάλα βάθη και λιγότερο σε μικρά βάθη στις παράκτιες περιοχές (Σχ. 30). Αυτό καθιστά ευνοϊκή συνθήκη για την εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού, καθώς χρειάζεται επαρκές πάχος της

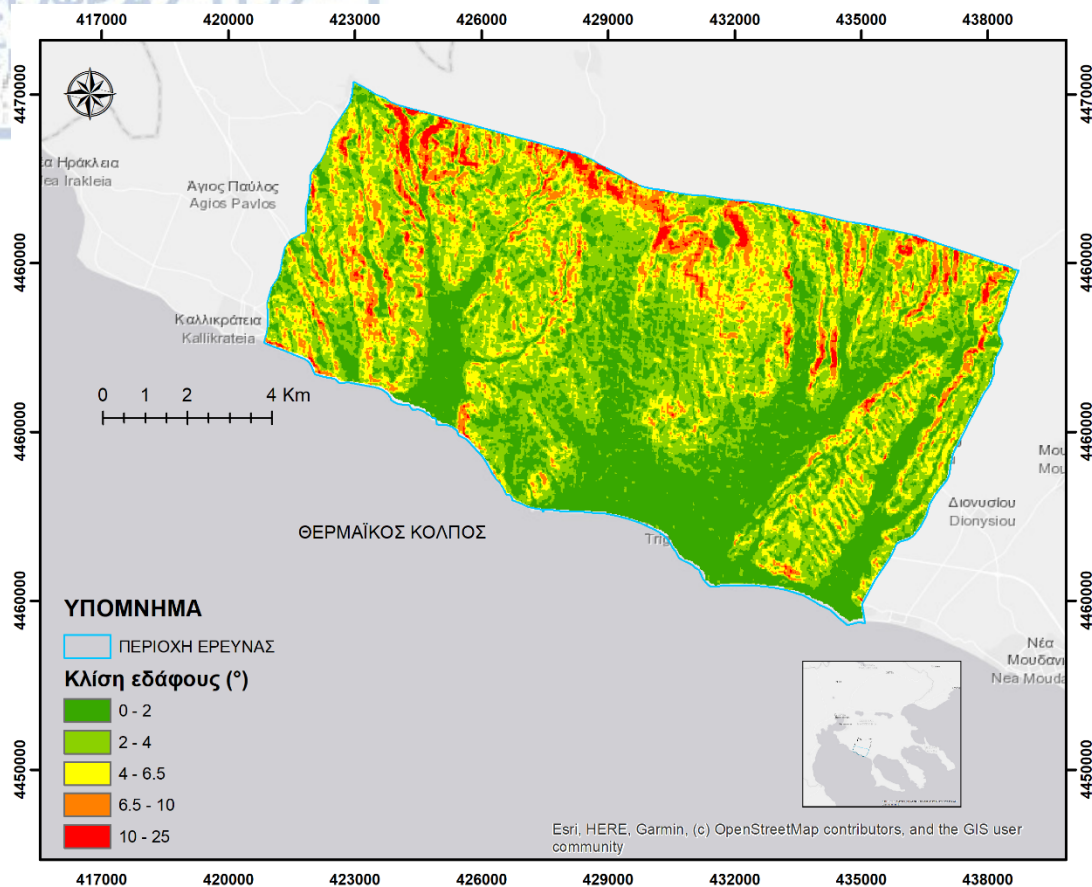
ακόρεστης ζώνης (>5 m) ώστε να γίνει εφικτός ο φυσικός καθαρισμός των επεξεργασμένων λυμάτων μέσα στην ακόρεστη ζώνη, σε περίπτωση εφαρμογής επιφανειακής μεθόδου.



Σχήμα 30. Ταξινόμηση του βάθους του υδροφόρου ορίζοντα σε 5 κλάσεις βάσει του πίνακα 4.

#### 7.2.4 Τοπογραφική κλίση

Η κλίση του εδάφους είναι και αυτή μία σημαντική προϋπόθεση για την εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού. Όπως έχει προαναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, απαιτείται ήπιο γεωμορφολογικό ανάγλυφο για να επιτευχθεί τεχνητός εμπλουτισμός υδροφορέα. Ο λόγος είναι διττός και αφορά την εύκολη συγκέντρωση του νερού προς εμπλουτισμό σε λεκάνες και όχι η ροή του με τη βαρύτητα και στην προκειμένη περίπτωση η διευκόλυνση στη μεταφορά του επεξεργασμένου νερού, μέσω δικτύου, από τις μονάδες επεξεργασίας λυμάτων της περιοχής έρευνας στις πιθανές περιοχές που θα εφαρμοστεί η μέθοδος (Σχ. 31).

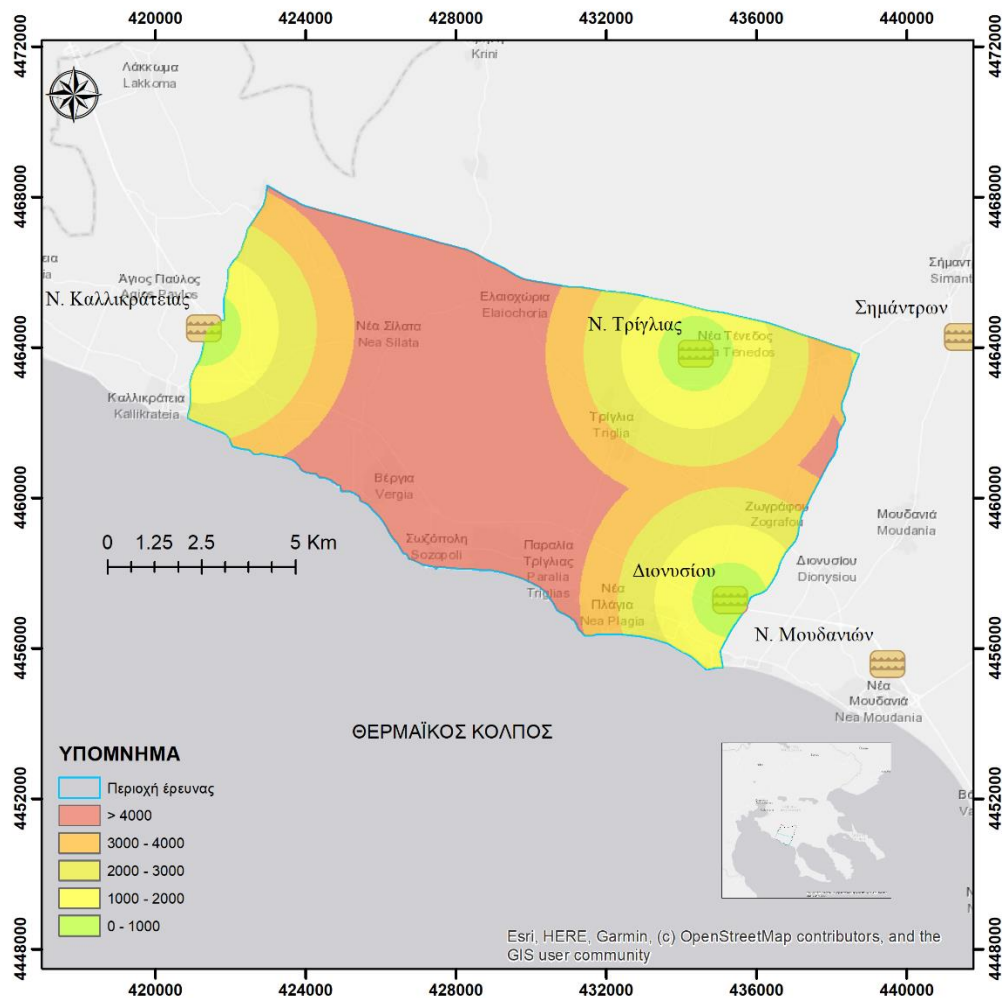


Σχήμα 31. Ταξινόμηση της τοπογραφικής κλίσης σε 5 κλάσεις βάσει του πίνακα 4.

### 7.2.5 Απόσταση από Ε.Ε.Λ.

Η παράμετρος αυτή εκφράζει την εγγύτητα στην πηγή του νερού, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για να εμπλουτιστεί ο υδροφορέας. Στην παρούσα εργασία εξετάζονται οι Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων που βρίσκονται κοντά και εντός της περιοχής έρευνας, καθώς δεν υπάρχει επαρκής πηγή φυσικού νερού για τον τεχνητό εμπλουτισμό.

Ο αντίστοιχος θεματικός χάρτης του Σχήματος 32 απεικονίζει την τις ζώνες απόστασης ανά χιλιόμετρο τριών (3) από τους πέντε (5) βιολογικούς καθαρισμούς που διαθέτει η ευρύτερη περιοχή του Δήμου Νέας Προποντίδας και οι οποίοι είναι κοντύτερα στην περιοχή έρευνας.



Σχήμα 32. Αποστάσεις από τις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (Ε.Ε.Λ.). Οι αποστάσεις ταξινομούνται σε 5 κλάσεις βάσει του πίνακα 4 και μετρούνται σε μέτρα (m).

### 7.3 Βήματα μεθόδου Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP)

#### Βήμα 1<sup>ο</sup>

Αρχικά, σχηματίζεται ο πίνακας συγκρίσεων ανά ζεύγη (pairwise comparison) των παραπάνω παραγόντων, όπως περιγράφεται παρακάτω. Ο βαθμός σημαντικότητας υποδεικνύει την σημαντικότητα του ενός παράγοντα έναντι του άλλου με τον οποίο συγκρίνεται. Ο πίνακας είναι με τέτοιο τρόπο σχεδιασμένος, ώστε στη διαγώνιο αυτού, όπου συγκρίνονται οι ίδιοι παράγοντες, να υπάρχει η τιμή 1, και κάτω από τη διαγώνιο να υπάρχουν οι αντίστροφες τιμές των αντίστοιχων συγκρίσεων πάνω από τη διαγώνιο. Επομένως, τοποθετούνται οι βαθμοί σημαντικότητας στον πίνακα 1 και δημιουργείται ένας πίνακας ίσων διαστάσεων (5x5) (Πίν. 5). Έπειτα, αθροίζεται η κάθε στήλη και το σύνολο αυτών αναγράφεται στην τελευταία σειρά (S<sub>1-5</sub>).

Σχηματισμός πίνακα ανά ζεύγη					
	Υδροπερατότητα (1)	Κλίση (2)	Γεωλογικοί σχηματισμοί (3)	Βάθος υδροφόρου ορίζοντα (4)	Εγγύτητα σε Ε.Ε.Λ. (5)
Υδροπερατότητα (1)	<b>1.00</b>	9.00	5.00	3.00	8.00
Κλίση εδάφους (2)	0.11	<b>1.00</b>	0.25	0.20	0.50
Γεωλογικοί σχηματισμοί (3)	0.20	4.00	<b>1.00</b>	0.33	3.00
Βάθος υδροφόρου ορίζοντα (4)	0.33	5.00	3.00	<b>1.00</b>	3.00
Εγγύτητα σε Ε.Ε.Λ. (5)	0.13	2.00	0.33	0.33	<b>1.00</b>
<i>ΣΥΝΟΛΟ (5)</i>	<i>S<sub>1</sub> = 1.77</i>	<i>S<sub>2</sub> = 21.00</i>	<i>S<sub>3</sub> = 9.58</i>	<i>S<sub>4</sub> = 4.87</i>	<i>S<sub>5</sub> = 15.50</i>

Ο υπολογισμός των σχετικών βαρών της κάθε παραμέτρου θα υπολογιστεί μέσω της της μεθόδου του κανονικοποιημένου μέσου όρου. Η μέθοδος αυτή αφορά την κανονικοποίηση, δηλαδή την αναγωγή των σχετικών βαρών στη μονάδα και εύρεση κανονικοποιημένων διανυσμάτων προτεραιοτήτων και αθροιστικού σταθμισμένου βάρους από τον μέσο όρο, όπως περιγράφεται παρακάτω.

## Βήμα 2<sup>ο</sup>

Έπειτα διαιρώ, το στοιχείο της κάθε στήλης με το άθροισμα αυτής ώστε να προκύψουν τα κανονικοποιημένα βάρη. Τα αποτελέσματα των παραπάνω διαιρέσεων αναγράφονται στις αντίστοιχες θέσεις στον πίνακα 2, προστίθενται κατά γραμμή και υπολογίζεται ο αριθμητικός μέσος τους. Ο μέσος όρος αυτών των τιμών, είναι τα ζητούμενα σταθμισμένα (σχετικά) βάρη ( $w_{1-5}$ ) της κάθε παραμέτρου του τεχνητού εμπλουτισμού στην περιοχή έρευνας (Πιν. 6). Ο αντίστοιχος πίνακας βρίσκεται στο παράρτημα στον πίνακα 8.



Πίνακας 6. Ταξινόμηση παραμέτρων TE κατά φθίνουσα σειρά βάσει τις τιμές των βαρών τους.

Παράμετροι	Διάνυσμα προτεραιοτήτων	Σχετικά βάρη w (%)
1) Υδροπερατότητα	$w_1 = 0.529605$	52.961
2) Βάθος Υδροφορέα	$w_2 = 0.22771$	22.771
3) Γεωλογικοί σχηματισμοί	$w_3 = 0.133979$	13.398
4) Εγγύτητα σε Ε.Ε.Α.	$w_4 = 0.066735$	6.673
5) Τοπογραφική κλίση	$w_5 = 0.041971$	4.197

Τα σχετικά βάρη υποδεικνύουν την βαρύτητα του κάθε παράγοντα στην έρευνα για τις πιθανές θέσεις τεχνητού εμπλουτισμού υδροφορέων στην περιοχή έρευνας. Επομένως, συμπεραίνεται από τον παραπάνω πίνακα ότι την μεγαλύτερη βαρύτητα έχει η υδροπερατότητα των γεωλογικών σχηματισμών, έπειτα το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα, η λιθολογία των γεωλογικών σχηματισμών, η εγγύτητα σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων και τέλος η τοπογραφική κλίση.

### Βήμα 3<sup>ο</sup>

Ωστόσο, για να γίνει εφικτός ο υπολογισμός των σταθμισμένων βαρών θα πρέπει να είναι μαθηματικά έγκυρος. Επομένως, αυτός ο έλεγχος θα πρέπει να γίνει μέσω μαθηματικών σχέσεων που να αποδεικνύουν την συνοχή και την ορθότητα των αποτελεσμάτων της μεθόδου. Πιο συγκεκριμένα, ο έλεγχος αυτός πραγματοποιείται με τον βαθμό συνέπειας, όπου το κάθε διάνυσμα προτεραιότητας πολλαπλασιάζεται με όλα τα στοιχεία του πίνακα 1, με τους βαθμούς προτεραιότητας, ανά γραμμή. Έπειτα αθροίζονται οι γραμμές του πίνακα αυτού και προκύπτουν οι αθροιστικές σταθμισμένες τιμές.

### Βήμα 4<sup>ο</sup>

Η διαδικασία υπολογισμού συνεχίζεται με την μέγιστη ιδιοτιμή ( $\lambda_{max}$ ). Ο υπολογισμός της γίνεται μέσω του λόγου της αθροιστικής σταθμισμένης τιμής προς το αντίστοιχο διάνυσμα προτεραιότητας. Το αποτέλεσμα είναι μια σειρά ιδιοτιμών, της οποίας ο μέσος όρος είναι η μέγιστη ιδιοτιμή  $\lambda_{max}$ , δηλαδή:

$$\lambda_{max} = (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5)/5 .$$

Σκοπός όλων των παραπάνω υπολογισμών είναι η εύρεση της αναλογίας συνοχής CR, που είναι ένας λόγος ο οποίος περιγράφεται παρακάτω :

- Αναλογία συνοχής (Consistency Ratio, CR):  $CR = \frac{CI}{RI}$ 
  - Όπου  $CR < 0.1$  (<10%), που σημαίνει ότι υπάρχει συνοχή και συνέπεια μεταξύ των βαρών που έχουν υπολογιστεί.



Ο λόγος αποτελείται από τους εξής όρους:

- Δείκτης συνοχής (Consistency Index, **CI**):  $CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n}$ , όπου  $n=5$  και  $\lambda_{max} = 5,17$
- Δείκτης τυχειότητας (Random Index, **RI**): Υπολογίζεται από τον παρακάτω πίνακα (Πιν. 7), για  $n=5$  (Saaty, 1980).

Πίνακας 7. Τιμές του δείκτη τυχειότητας RI, βάσει του πλήθους των παραμέτρων  $n$  (Saaty, 1990).

<b>n</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>RI</b>	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Συμπερασματικά,

- **CI** = 0.042
- **RI** = 1.12, για  $n=5$
- **CR** =  $\frac{CI}{RI} = 0.038 < 0.1$ ,

Αυτό σημαίνει ότι η ασυνέπεια είναι 3,83% (<10%), δηλαδή εντός των αποδεκτών ορίων συνέπειας και επομένως τα βάρη έχουν συνοχή.

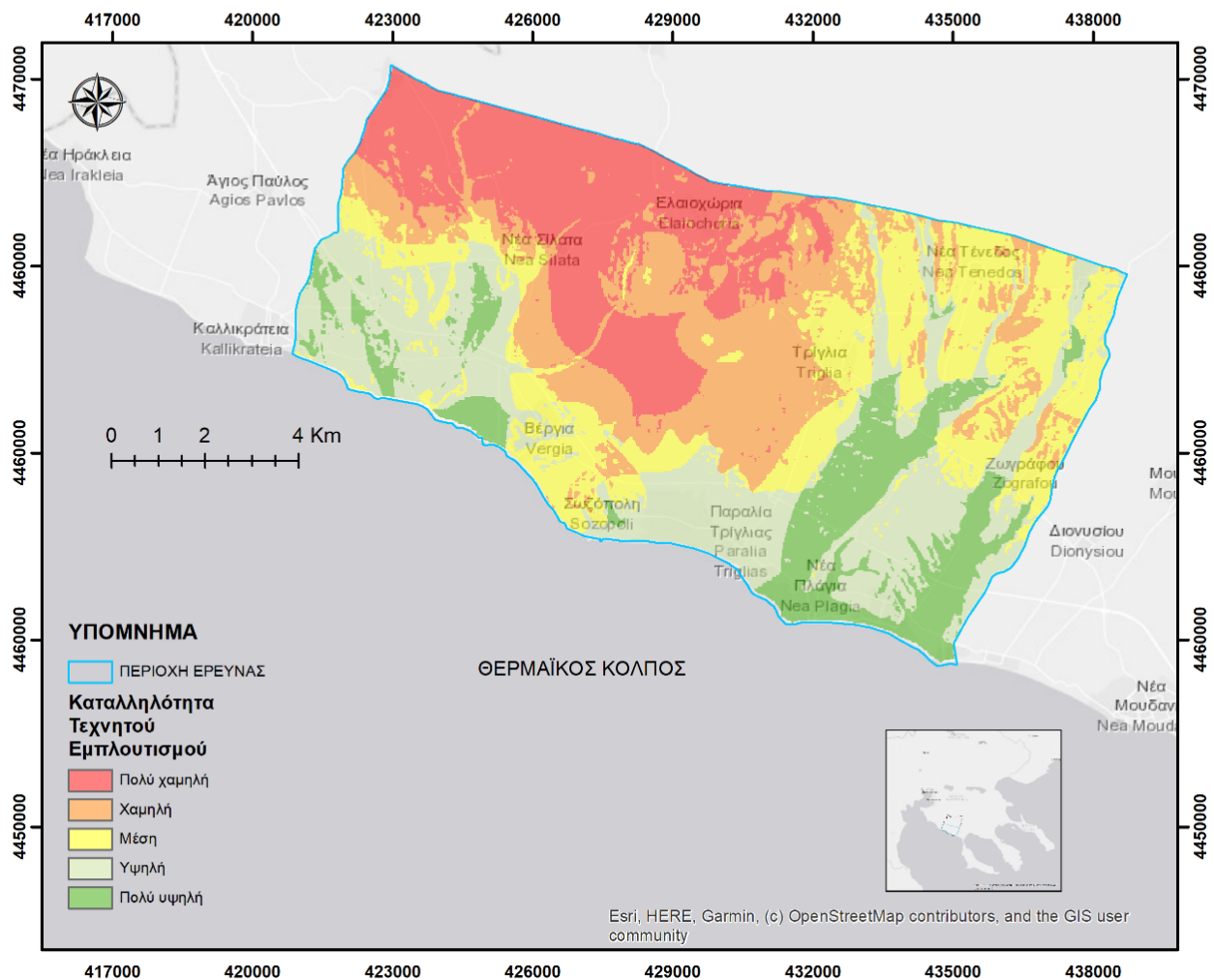
## 7.4 Αποτελέσματα

Ο τελικός χάρτης που απεικονίζει τις κατάλληλες περιοχές για την εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού, έγινε μέσω της απόδοσης σχετικών βαρυτήτων σε καθεμία από τις μελετώμενες παραμέτρους. Στην συνέχεια, συνδυάστηκαν οι παράμετροι υπερθέτοντας την καθεμία τους μέσω GIS και παράγοντας τον τελικό χάρτη, μέσω αλγεβρικών πράξεων. (Σχ. 33)

Όπως προαναφέρθηκε, η μεγαλύτερη βαρύτητα αντιστοιχεί στην υδροπερατότητα των γεωλογικών σχηματισμών, και το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα, ενώ μικρότερη βαρύτητα αντιστοιχεί στην απόσταση των μονάδων επεξεργασίας λυμάτων και η τοπογραφική κλίση. Σύμφωνα με την ανάλυση που προέκυψε, ο τελικός χάρτης χωρίστηκε σε πέντε (5) κλάσεις σχετικά με τις πιθανές κατάλληλες θέσεις (πολύ χαμηλή, χαμηλή, μέση, υψηλή, πολύ υψηλή). Επομένως, οι κατάλληλες περιοχές για την εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού ανήκουν στις υψηλές

και πολύ υψηλές πιθανές περιοχές και βρίσκονται μεταξύ των οικισμών Νέων Σιλάτων – Καλλικράτειας, στο παράκτιο τμήμα μεταξύ Σωζόπολης – Νέων Πλαγίων, καθώς και βορειοδυτικά των Νέων Πλαγίων. Οι περιοχές αυτές ταυτίζονται σε πολλές περιπτώσεις με τις περιοχές που καλύπτονται με αλλουβιακές αποθέσεις κατά μήκος των κυριότερων ρεμάτων στην περιοχή έρευνας και κατά μήκος των παράκτιων περιοχών όπου επικρατούν οι παράκτιες αποθέσεις και ιζήματα.

## ΧΑΡΤΗΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ



Σχήμα 33. Τελικός χάρτης που αναπαριστά τις καταλληλότερες θέσεις για την εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού στην περιοχή έρευνας.

## 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφική έρευνα που έγινε για τις μεθόδους τεχνητού εμπλουτισμού στην Ελλάδα, όπως αναφέρονται παρακάτω, οι περισσότερο χρησιμοποιούμενες είναι οι γεωτρήσεις-πηγάδια και οι επιφανειακές μέθοδοι. Στην περιοχή έρευνας, καταλληλότερη κρίνεται η μέθοδος μέσω γεωτρήσεων εμπλουτισμού και πηγάδια. Η επιλογή αυτή έγινε συναρτήσει του διαθέσιμου χώρου βάσει της κάλυψης γης, της γεωλογικής δομής στην περιοχή έρευνας και του σκοπού της εφαρμογής του τεχνητού εμπλουτισμού στην περιοχή. Ο διαθέσιμος χώρος αναφέρεται σε σύγκριση με μέθοδο της διήθησης μέσω λεκανών, που απαιτεί περισσότερη έκταση, λόγω του πλήθους των λεκανών διήθησης που απαιτούνται για την μέθοδο.

Αναφορικά με τη γεωλογική δομή της περιοχής έρευνας, που επιβεβαιώνεται αφενός από γεωτρητικά δεδομένα που έχουν περιγραφεί (Σχ. 12), υπάρχουν επάλληλοι υδροπερατοί με μη υδροπερατούς γεωλογικούς σχηματισμούς. Επομένως, αναπτύσσεται ένας ελεύθερος υδροφορέας και βαθύτεροι υπό πίεση ή μερικώς υπό πίεση υδροφορείς στο κοκκώδες υποσύστημα Επανομής-Μουδανιών. Το υδρογεωλογικό καθεστώς της περιοχής, σε συνδυασμό με τις κλιματικές μεταβολές που παρατηρούνται και επηρεάζουν το υδρολογικό ισοζύγιο της περιοχής, καθιστούν σημαντική και απαραίτητη τη χρήση των επεξεργασμένων λυμάτων ως μια πηγή μη συμβατικών υδατικών πόρων, που θα αποσκοπήσει στην βέλτιστη διαχείριση του υδατικού δυναμικού. Η χρήση αυτή μπορεί να ενταχθεί σε ένα ευρύτερο πλαίσιο διαχείρισης των υδατικών πόρων, καθώς επίσης και στη σωστή διαχείριση και επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων.

Εν κατακλείδι, ο σκοπός του τεχνητού εμπλουτισμού στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία ανάγεται στις παρακάτω συνιστώσες:

- Ανάσχεση της θαλάσσιας διείσδυσης και περιορισμός του φαινομένου της υφαλμύρισης των υπόγειων υδροφορέων. Όπως έχει περιγραφεί στο αντίστοιχο κεφάλαιο, το παράκτιο τμήμα από τη Νέα Καλλικράτεια έως και την Σωζόπολη είναι επηρεασμένο από την υφαλμύριση των υπόγειων υδροφορέων.
- Αποθήκευση νερού σε υπόγειους υδροφορείς με σκοπό τη χρήση σε ξηρότερες περιόδους του έτους. Όσον αφορά την αποθηκευτικότητα των υδροφορέων της περιοχής έρευνας, η αποθήκευση μπορεί να επιτευχθεί κυρίως στον φρεάτιο υδροφορέα σε προσχωματικούς υδροφορείς (αλλουβιακές αποθέσεις, συστήματα αναβαθμίδων), λόγω των υψηλών τιμών αποθηκευτικότητάς τους ( $S = 0,1 - 0,22$ ).
- Πιθανή βελτίωση της ποιότητας του υπόγειου νερού σχετικά με την υφαλμύριση των παράκτιων τμημάτων, καθώς και των φυσικά επιβαρυμένων περιοχών στο εσωτερικό της περιοχής έρευνας, λόγω της ύπαρξης του γεωθερμικού πεδίου Ν. Τρίγλιας.

Πίνακας 8. Πίνακας αριθμητικής ανάλυσης της Διαδικασίας Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP). Ο πίνακας καταλήγει στον υπολογισμό των βασικών παραμέτρων της μεθοδολογίας.

2°	Κανονικοποίηση πίνακα κατά στήλες					Μέσος όρος ανά γραμμή	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	Διάνυσμα προτεραιότητας	Σχετικά Βάρη w (*100%)
(1)	1/1.77	9.00/21	5.00/9.58	3.00/4.87	8.00/15.5		
(2)	0.11/1.77	1.00/21	0.25/9.58	0.20/4.87	0.50/15.5		
(3)	0.20/1.77	4.00/21	1.00/9.58	0.33/4.87	3.00/15.5		
(4)	0.33/1.77	5.00/21	3.00/9.58	1.00/4.87	3.00/15.5		
(5)	0.13/1.77	2.00/21	0.33/9.58	0.33/4.87	1.00/15.5		
Κανονικοποιημένος πίνακας ανάλυσης κατά ζεύγη							
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	Διάνυσμα προτεραιότητας	Σχετικά Βάρη w (*100%)
(1)	0.565149	0.428571	0.521739	0.616438	0.516129	0.529605	52.961
(2)	0.062794	0.047619	0.026087	0.041096	0.032258	0.041971	4.197
(3)	0.11303	0.190476	0.104348	0.068493	0.193548	0.133979	13.398
(4)	0.188383	0.238095	0.313043	0.205479	0.193548	0.22771	22.771
(5)	0.070644	0.095238	0.034783	0.068493	0.064516	0.066735	6.673
3°	Έλεγχος βαθμού συνέπειας					Αθροιστική σταθμισμένη τιμή	4° $\lambda = \frac{\text{Αθροιστική σταθ. τιμή}}{\text{Διάνυσμα προτεραιότητας}}$
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)		
(1)	0.529605	0.377738	0.669895	0.68313	0.533878	2.794246	$\lambda_1 = 5.27609051$
(2)	0.058845	0.041971	0.033495	0.045542	0.033367	0.21322	$\lambda_2 = 5.080191729$
(3)	0.105921	0.167883	0.133979	0.075903	0.200204	0.683891	$\lambda_3 = 5.104461881$
(4)	0.176535	0.209854	0.401937	0.22771	0.200204	1.216241	$\lambda_4 = 5.341184829$
(5)	0.066201	0.083942	0.04466	0.075903	0.066735	0.33744	$\lambda_5 = 5.056439858$
* Πολλαπλασιασμός 1ου πίνακα με το διάνυσμα προτεραιοτήτων ανά στήλη * Εύρεση λόγου αθροιστικού σταθμισμένου βάρους/διάνυσμα προτεραιοτήτων * Εύρεση μέσου όρου του λόγου αυτού						$\lambda_{\max}$	5.171673761
						CI	0.042602407
						RI	1.12
						CR	0.038320036 = 3,83%

Ελληνική

Βαχαβιώλος-Καπράνος Θ. (2016) «*Τεχνητός Εμπλουτισμός υπόγειων υδροφόρων με επεξεργασμένα λύματα μέσω συστημάτων SAT στην περιοχή του Θριάσιου πεδίου*» Διατριβή Ειδικευσης. Διατμηματικό Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων». Ε.Μ.Π.

Βουδούρης Κ., (2022) «*Εκμετάλλευση και Διαχείριση του Υπόγειου Νερού*» Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη. Κεφάλαιο 14<sup>ο</sup>, Τεχνητός εμπλουτισμός υπόγειων υδροφορέων.

Βουδούρης Κ., (2021) «*Τεχνική Υδρογεωλογία*» Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη. Σελίδες 231-234

Βουδούρης Κ., (2009) «*Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος*» Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη. Σελίδες 328-331

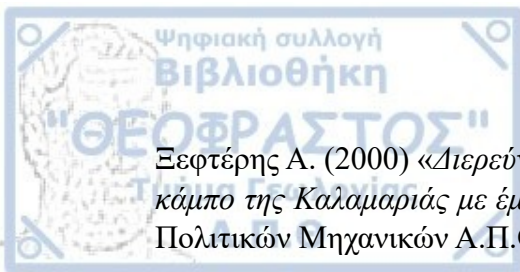
Γαβρηλίδου Ε. (2017) «*Διαχρονική μεταβλητότητα των υδρολογικών παραμέτρων και επίπτωση στα αποθέματα υπόγειου νερού σε παράκτιους υδροφορείς*». Διατριβή Ειδικευσης, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών «Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία». Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.

Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων (1991) «*Οδηγία του Συμβουλίου της 21<sup>ης</sup> Μαΐου 1991 για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων (91/271/ΕΟΚ)*»

Μουντράκης Δ., (2010) «*Γεωλογία και Γεωτεκτονική Εξέλιξη της Ελλάδας*» Εκδόσεις University Studio Press, Θεσσαλονίκη.

Ντόνα Μ. (2017) «*Διερεύνηση την υφαλμύρισης του υπόγειου νερού στο παράκτιο τμήμα της Σωζόπολης στη Βόρεια Ελλάδα*» Διατριβή Ειδικευσης, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών «Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία». Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.

Ντόνα Μ., Γαβρηλίδου Ε., Καζάκης Ν., Βουδούρης Κ., (2018) «*Διερεύνηση της ποσοτικής και ποιοτικής κατάστασης του παράκτιου υδροφορέα Καλλικράτειας – Φλογητών Χαλκιδικής, Ελλάδα*». ΥΔΡΟΤΕΧΝΙΚΑ (2018) 27: 54-67



Ξεφτέρης Α. (2000) «Διερεύνηση την ποιοτικής υποβάθμισης των υπόγειων νερών στον κάμπο της Καλαμαριάς με έμφαση στην νιτρορύπανση». Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.

Πεταλά Ζ. (2013) «Εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού με επεξεργασμένα αστικά λύματα στον υπόγειο υδροφορέα της περιοχής της Σίνδου». Διατριβή Ειδίκευσης, Διατμηματικό Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών «Οικολογική ποιότητα και διαχείριση υδάτων σε επίπεδο λεκάνης απορροής». Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.

Πλιάκας Φ. (2012) «Έρευνες και προτάσεις διαχείρισης εμπλουτισμού των υπόγειων νερών σε πεδινές περιοχές της Αν. Μακεδονίας με έμφαση στα παράκτια πεδία». Ημερίδα ΓΕΩΤΕΕ «Αειφορική διαχείριση υδατικών πόρων στην Ανατολική Μακεδονία», 2/7/2012.

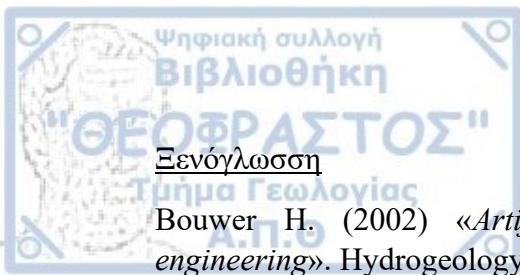
Πλιάκας Φ. (1998) «Έρευνα επί των κατάλληλων μεθόδων τεχνητού εμπλουτισμού σε ετερογενείς υδροφορείς αλλουβιακών σχηματισμών. Εφαρμογές σε υδροφορείς του πεδινού τμήματος Ξάνθης». Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Δ.Π.Θ.

Στάθη Α., (2018) «Διαχείριση λυμάτων στην Π.Ε. Χαλκιδικής. Η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης λυμάτων». Διατριβή Ειδίκευσης. Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών «Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη Ανάπτυξη», Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.

Συρίδης Γ. (1990) «Λιθοστρωματογραφική Βιοστρωματογραφική και Παλαιογεωγραφική μελέτη των Νεογενών-Τεταρτογενών ιζηματογενών σχηματισμών της χερσονήσου Χαλκιδικής» Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.

Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας/ΥΠΕΝ (2017) «1<sup>η</sup> Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού Διαμερίσματος Κεντρικής Μακεδονίας (EL 10). Χαρακτηρισμός και αξιολόγηση/ταξινόμηση της κατάστασης των Υπόγειων Υδατικών Συστημάτων». Αθήνα, Ελλάδα

Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας/ΥΠΕΝ (2014) «Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κεντρικής Μακεδονίας. Παράρτημα Α. Αξιολόγηση και ταξινόμηση της ποιοτικής και ποσοτικής κατάστασης των υπόγειων υδατικών συστημάτων» Αθήνα, Ελλάδα.



Ξενόγλωσση

Bouwer H. (2002) «*Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering*». Hydrogeology Journal volume 10: 121–142.

Dillon P., Zheng Y., Alley W., Vanderzalm J., Page D., Ward J., Megdal S., Hipke W., Thomas P., Tuthill D., Carlson R. (2022) «*Managed Aquifer Recharge: Overview and Governance*». IAH Special Publication.

Dillon P., (2005) «*Future management of aquifer recharge*». Hydrogeology Journal 13: 313–316.

Gale I. (2005) «*Strategies for Managed Aquifer Recharge in semi-arid areas*» UNESCO, Division of Water Sciences

Kazakis N., Busico G., Ntona M., Philippou K., Kaprara E., Mitrakas M., Banneberg., Ioannidou A., Pashalidis I., Colombani N., Mastrocicco M., Voudouris K. (2022) «*The origin of Uranium in groundwater of the eastern Halkidiki region, northern Greece*». Science of the Total Environment 812 (2022) 152445

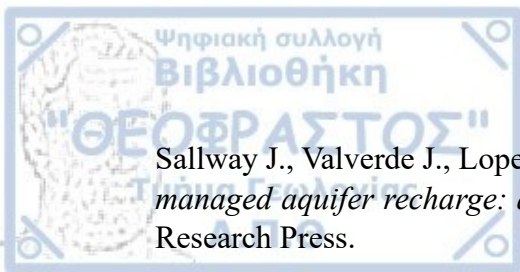
Köppen, W., Geiger, R., (1928). «*Die klimare der erde*» Wall-map 150 cm x 200 cm. Verlag Justus Perthes, Gotha

Kouras A., Katsoyiannis I., Voutsas D. (2007) «*Distribution of arsenic in groundwater in the area of Chalkidiki, Northern Greece*» Journal of Hazardous Materials 147, Issue 3: 890-899.

Saaty Th. (1990) «*How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process*» European Journal of Operational Research 48 (1990): 9-26.

Stamatis, G., Parpodis, K., Filintas, A. and Zagana, E., 2011. Groundwater quality, nitrate pollution and irrigation environmental management in the Neogene sediments of an agricultural region in central Thessaly (Greece). Environ Earth Sci (2011) 64:1081–1105





Sallway J., Valverde J., Lopez V., Junghanns R., Stefan C. (2018) «*Suitability maps for managed aquifer recharge: a review of multi-criteria decision analysis studies*» NRC Research Press.

Tyrovola K., Nikolaidis N., Veranis N., Kallithrakas-Kontos N., Koulouridakis P. (2006) «*Arsenic removal from geothermal waters with zero-valent iron—Effect of temperature, phosphate and nitrate*». Water Research 40, Issue 12: 2375-2386.

Veranis N., Nimfopoulos M., Christidis C., Chrysafi A. (2016) «*Granular aquifer system of West Chalkidiki Area, region of Central Macedonia, Northern Greece*». Bulletin of the Geological Society of Greece, 50: 1016-1026.

Voudouris, K. (2011) «*Artificial Recharge via Boreholes Using Treated Wastewater: Possibilities and Prospects*» Water, 3: 964–975

### Ιστότοποι

Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας (ΥΠΕΝ) – Διαχείριση λυμάτων

<https://ypen.gov.gr/perivallon/ydatikoi-poroi/diacheirisi-lymaton/>

Θέσεις Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων (Ε.Ε.Λ)

<http://astikalimata.ypeka.gr/Services/Pages/WtpViewApp.aspx#>

Ημερίδα ΓΕΩΤΕΕ

<https://geotee-anmak.gr/wp-content/uploads/2020/12/pliakasaeiforikh.pdf>

Μετεωρολογικά δεδομένα σταθμών

<https://penteli.meteo.gr/stations/kassandraia/>

<http://penteli.meteo.gr/stations/neamichaniona/>

Οδηγία 91/271/ΕΟΚ

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/PDF/?uri=CELEX:31991L0271>