



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



**ΠΕΝΤΖΙΔΟΥ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ**

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΤΟΥ  
ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΤΜΗΜΑ ΤΗΣ ΕΠΑΝΟΜΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

2019





## **ΠΕΝΤΖΙΔΟΥ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ**

Φοιτήτρια Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5173

### **ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΤΟΥ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΤΜΗΜΑ ΤΗΣ ΕΠΑΝΟΜΗΣ**

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας,  
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας

#### **Επιβλέπων καθηγητής:**

Κωνσταντίνος Βουδούρης, Αναπληρωτής Καθηγητής



© Πεντζίδου Αναστασία, Τμήμα Γεωλογίας, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας, 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΤΟΥ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΤΜΗΜΑ ΤΗΣ ΕΠΑΝΟΜΗΣ – Διπλωματική Εργασία

© Pentzidou Anastasia, School of Geology, Laboratory of Technical Geology and Hydrogeology, 2018

ASSESSING THE VULNERABILITY OF THE SEAWATER INTRUSION IN THE COASTAL AREA OF EPANOMI – Bachelor Thesis

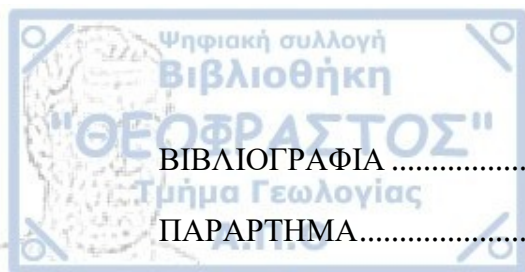
Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται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

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



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....                                                               | 7  |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....                                                               | 8  |
| ABSTRACT .....                                                               | 9  |
| 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....                                                            | 10 |
| 2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ .....                                                     | 12 |
| 2.1. ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ .....                        | 12 |
| 2.1.1. Γεωγραφικά και Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά .....                    | 12 |
| 2.1.2. Δημογραφικά χαρακτηριστικά .....                                      | 15 |
| 2.1.3. Γεωλογία-Τεκτονική .....                                              | 17 |
| 2.1.4. Κλιματολογικά χαρακτηριστικά .....                                    | 18 |
| 3. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ .....                                                        | 21 |
| 3.1. ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΛΙΘΟΛΟΓΙΑ .....                                      | 21 |
| 3.2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ-ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΑ .....                  | 22 |
| 3.3. ΥΔΡΟΧΗΜΕΙΑ .....                                                        | 24 |
| 4. ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ .....                      | 27 |
| 4.1. ΓΕΝΙΚΑ .....                                                            | 27 |
| 4.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ .....                            | 27 |
| 4.2.1. Κυριότεροι μέθοδοι εκτίμησης της τρωτότητας .....                     | 27 |
| 4.2.2. Η μέθοδος GALDIT .....                                                | 27 |
| 4.3. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΤΜΗΜΑ ΤΗΣ                          |    |
| ΕΠΑΝΟΜΗΣ .....                                                               | 28 |
| 4.3.1. G – Τύπος του υδροφόρου στρώματος .....                               | 28 |
| 4.3.2. A – Υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφόρου .....                         | 29 |
| 4.3.3. L – Το υδραυλικό φορτίο (σε m) πάνω από το επίπεδο της θάλασσας ..... | 30 |
| 4.3.4. D – Απόσταση από την ακτή .....                                       | 31 |
| 4.3.5. I – Υφιστάμενη κατάσταση της υφαλμύρισης της περιοχής .....           | 32 |
| 4.3.6. T – Πάχος του υδροφορέα .....                                         | 33 |
| 4.3.7. Εφαρμογή της μεθόδου GALDIT .....                                     | 34 |
| 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....                                                        | 36 |



|                   |    |
|-------------------|----|
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 37 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....    | 40 |



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Για την ολοκλήρωση των προπτυχιακών μου σπουδών, επέλεξα η πτυχιακή μου εργασία να έχει ως αντικείμενο την υδρογεωλογία, καθώς ο τομέας αυτός μου κίνησε το ενδιαφέρον από την αρχή των σπουδών μου.

Το νερό είναι πηγή ζωής για κάθε έμψυχο οργανισμό και αυτό καθιστά πολύτιμα τα επιφανειακά και κυρίως τα υπόγεια αποθέματα του. Όμως το υπόγειο νερό καταλαμβάνει μόνο το 0,00325% του συνολικού νερού που υπάρχει στον πλανήτη και για τους περισσότερους ανθρώπους είναι η μόνη πηγή πόσιμου νερού.

Οι αυξημένες ανθρώπινες δραστηριότητες και η έλλειψη γλυκού επιφανειακού νερού καθιστά τους υπόγειους υδροφορείς πολύ εκτεθειμένους στην ποιοτική υποβάθμιση και στη μείωση των υδάτινων αποθεμάτων τους.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία με θέμα την *«Εκτίμηση της τρωτότητας στην διείσδυση του θαλασσινού νερού στο παράκτιο τμήμα της Επανομής»* έχει ως στόχο την ανάλυση του φαινομένου της υφαλμύρισης. Συγκεκριμένα, θα γίνει η ανάλυση της θαλάσσιας διείσδυσης που είναι συχνό πρόβλημα στις παράκτιες περιοχές λόγω της υπερεκμετάλλευσης των υπόγειων υδροφορέων και θα εκτιμηθεί η τρωτότητα του παράκτιου υδροφορέα της Επανομής.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή κύριο Κωνσταντίνο Βουδούρη για τη δυνατότητα που μου έδωσε στο να ασχοληθώ, στο πλαίσιο αυτής της πτυχιακής εργασίας, με το αντικείμενο της Υδρογεωλογίας και να πάρω πολλές και χρήσιμες γνώσεις για την επιστήμη της Γεωλογίας. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τον μεταδιδάκτορα του εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας Καζάκη Νεραντζή για την πολύτιμη βοήθειά του, για την κατανόηση και την υπομονή του από την αρχή έως το τέλος της διπλωματικής μου εργασίας.

Ακόμη, ευχαριστώ τους γονείς μου για την υπομονή τους και την τεράστια αλλά και διακριτική στήριξη τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου τόσο ως φοιτήτρια όσο και σαν μαθήτρια και στην βοήθειά τους, ώστε να καταφέρω να ολοκληρώσω τη διπλωματική μου εργασία.

Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους μου που με τις γνώσεις και το χαμόγελο τους με βοήθησαν και με υποστήριξαν.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο τον υπολογισμό της διακινδύνευσης του υπόγειου υδροφορέα της Επανομής στη θαλάσσια διείσδυση με τη βοήθεια Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών / ΓΣΠ (Geographical Information Systems/GIS).

Η περιοχή έρευνας βρίσκεται στη Βόρεια Ελλάδα, ανήκει στην περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας και βρέχεται από τη θάλασσα του Θερμαϊκού Κόλπου. Το τμήμα της εξεταζόμενης περιοχής χαρακτηρίζεται ως πεδινό στη μεγαλύτερη έκτασή του.

Η ρύπανση που μπορεί να προκύψει από το φαινόμενο της υφαλμύρισης είναι πολύ κρίσιμη για την ποιότητα των παράκτιων υδροφορέων. Η μεγιστοποίηση των αναγκών σε πόσιμο νερό, λόγω της αύξησης του πληθυσμού της περιοχής, οδηγεί σε μη ορθολογική εκμετάλλευση των υπόγειων αποθεμάτων με αποτέλεσμα τη διακινδύνευση της ποιότητας τους με το πέρασμα των χρόνων.

Τα γλυκά νερά σε φυσικές συνθήκες ρέουν σύμφωνα με την κλίση και εκρέουν μέσα στη θάλασσα. Όμως λόγω της υπεράντλησης των υπόγειων νερών ο φυσικός εμπλουτισμός των υδροφορέων δεν μπορεί να αποκαταστήσει τις απώλειες. Έτσι με την αλλαγή στην ισορροπία της διεπιφάνειας γλυκού/αλμυρού νερού προκαλείται η πτώση της στάθμης ή και η αναστροφή της διεύθυνσης ροής.

Ο έγκαιρος εντοπισμός της υφαλμύρισης και υπολογισμός της έκτασης που καταλαμβάνει, όπως και άλλων παραμέτρων, βοηθά στην πρόληψη και στην αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού. Σε αυτή τη διπλωματική εργασία υπολογίστηκε η τρωτότητα του παράκτιου υδροφορέα της Επανομής σύμφωνα με τη μέθοδο GALDIT. Κατασκευάστηκαν 6 θεματικοί χάρτες και προέκυψε ο τελικός χάρτης που παρουσιάζει την τρωτότητα της περιοχής έρευνας στη θαλάσσια διείσδυση.



## ABSTRACT

The purpose of this dissertation is to estimate the vulnerability of an aquifer system from the aspect of the seawater intrusion in Epanomi, Greece, with the use of Geographic Information Systems (GIS).

To test my enquiries, I consider the geographical area of Epanomi, surrounded by the sea of Thermaikos Gulf, located in the Prefecture of Central Macedonia. The examined region is characterized, in its majority, by plains.

The assessment of pollution due to the seawater intrusion is regarded as crucial for the quality of the coastal aquifers. Considering the overall area population growth, the increasing drinking water demand had as a result the uncontrollable exploitation of the groundwater sources, which could lead, in the long-term, to a higher risk of pollution.

The freshwater would ordinarily flow with respect to the existing slope and outfalls into the sea. However, due to the groundwater over-abstraction, the recharge rate of the aquifer is not able to repair the damages caused. Thus, any change in the balance of the freshwater/seawater interface can generate drawdown and/or direction inversion.

The prompt detection of the seawater intrusion and the estimation of its extension, combined with the consideration of additional parameters, could further help the prevention and overall treatment of the regarded problem. This dissertation has performed calculations of the vulnerability of Epanomi's coastal aquifer considering the GALDIT index. Overall, 6 thematic maps were designed in order to obtain the final map presenting the aquifer's vulnerability of the region examined.

Η Ελλάδα είναι από τις χώρες με τη μεγαλύτερη ακτογραμμή που φτάνει τα 13,7 Km και έχει μεγάλο αριθμό νησιών, πολλά από τα οποία κατοικούνται. Οι παράκτιοι υδροφορείς καθίστανται πολύτιμοι διότι ένα πολύ μεγάλο ποσοστό του πληθυσμού της, ζει σε παράκτιες περιοχές και καλύπτει τις υδατικές του ανάγκες από τους αντίστοιχους υδροφορείς.

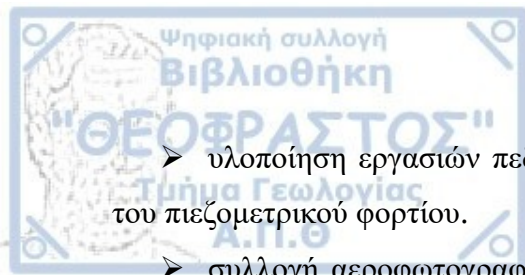
Το θαλάσσιο νερό έχει την τάση να διεισδύει προς την ενδοχώρα κάτω από το γλυκό νερό, εξαιτίας της μεγάλης πυκνότητας του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να σχηματιστεί μία ζώνη γλυκού-αλμυρού νερού που ονομάζεται διεπιφάνεια. Στην περίπτωση της υφαλμύρισης λόγω υπεράντλησης, η φυσική υδραυλική κλίση θα αναστραφεί και η διεπιφάνεια θα μετακινηθεί μέχρι, το πιο χαμηλό σημείο της υδραυλικής κλίσης φτάσει στο κέντρο της άντλησης.

Οι παράκτιοι υδροφορείς καθίστανται επιρρεπείς στην ρύπανση τους από υφαλμύριση, που οφείλεται σε ανθρώπινες δράσεις ή/και σε υδρογεωλογικούς παράγοντες (Βουδούρης 2009). Κυρίως το θαλάσσιο νερό διεισδύει όταν οι αντλούμενες ποσότητες νερού υπερβούν την ικανότητα φυσικής αποκατάστασης του ελλείματος.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο υπολογισμός της τρωτότητας του παράκτιου υδροφορέα της Επανομής με τη διεθνώς χρησιμοποιούμενη μέθοδο GALDIT σε περιβάλλον GIS.

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω εργασίες:

- συγκέντρωση ελληνικής και ξένης βιβλιογραφίας με συναφή θέματα για τη συγγραφή της διπλωματικής εργασίας.
- συλλογή ελληνικής βιβλιογραφίας και εργασιών με υδρογεωλογικές και υδροχημικές πληροφορίες τόσο για τη Δημοτική Ενότητα Επανομής, όσο και για το Δήμο Θερμαϊκού.
- συλλογή χαρτών και δεδομένων για τη γεωλογία, τοπογραφικών χαρτών και διάφορων θεματικών χαρτών χρήσιμων για την εξαγωγή συμπερασμάτων της περιοχής εργασίας.
- συλλογή λιθολογικών τομών από παλαιότερες γεωτρήσεις και δεδομένων που αφορούν τα κλιματικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά τόσο της περιοχής έρευνας όσο και της ευρύτερης περιοχής.



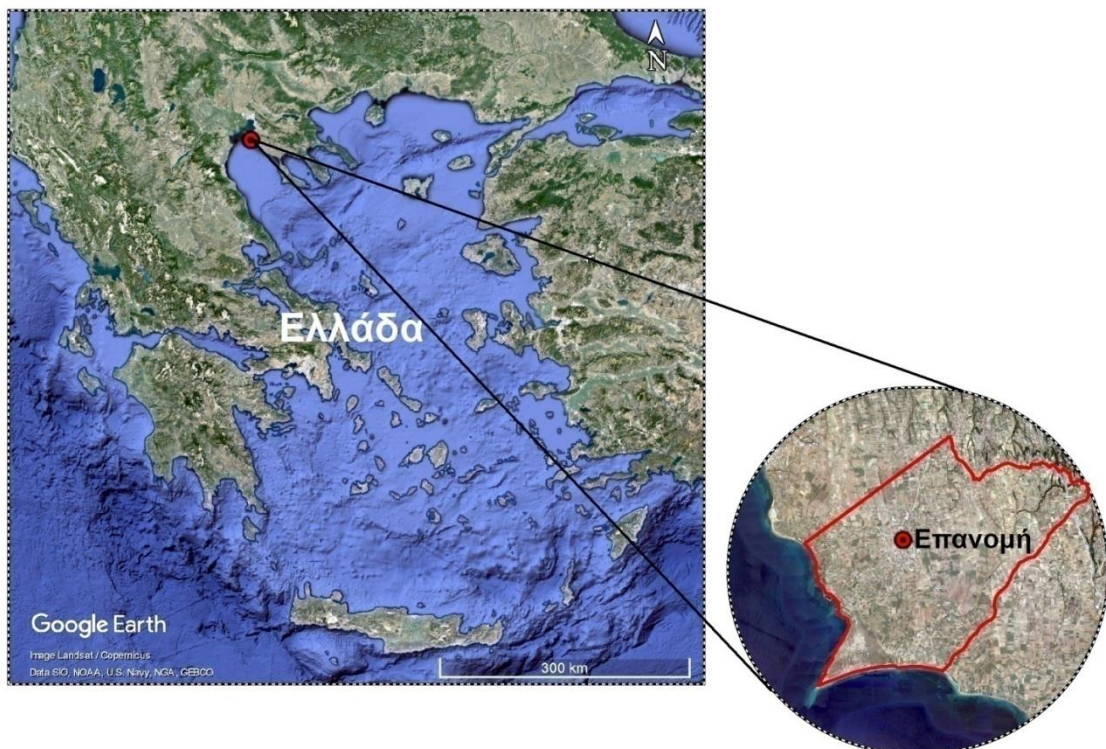
- υλοποίηση εργασιών πεδίου για τη μέτρηση της στάθμης των υδρογεωτρήσεων και του πιεζομετρικού φορτίου.
- συλλογή αεροφωτογραφιών και δορυφορικών εικόνων της περιοχής από το Google Earth Pro.
- χρήση του Google Earth Pro και του ArcMap 10.3 για την κατασκευή χαρτών που απεικονίζουν την περιοχή και την αποτύπωση των γεωτρήσεων εντός αυτής.
- ψηφιοποίηση των τοπογραφικών, γεωλογικών και υδρογεωλογικών χαρτών μέσω των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών/ΣΓΠ (G.I.S. ArcMap 10.3).
- δημιουργία θεματικών χαρτών και χαρτών τρωτότητας στη θαλάσσια διείδυση με τη μέθοδο GALDIT.
- επεξεργασία των αποτελεσμάτων και των ψηφιακών δεδομένων για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

## 2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

### 2.1. ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

#### 2.1.1. Γεωγραφικά και Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά

Η περιοχή έρευνας βρίσκεται στη Βόρεια Ελλάδα και περιορίζεται στο νότιο-ανατολικό τμήμα του Δήμου Θερμαϊκού. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνει τη Δημοτική Ενότητα Επανομής και ένα τμήμα της τοπικής Ενότητας Μεσημερίου. Ο Δήμος Θερμαϊκού ανήκει στην Περιφερειακή Ενότητα της Θεσσαλονίκης και εντάσσεται στην Περιφέρεια της Κεντρικής Μακεδονίας με έδρα την Περαιά (Σχήμα 1). Η περιοχή ανήκει στο 10<sup>ο</sup> υδατικό διαμέρισμα της Ελλάδας και στην υδρολογική λεκάνη Περαιάς-Μηχανιώνας-Επανομής. Καλύπτει μία έκταση 66,4 Km<sup>2</sup> από τα όρια Νέας Μηχανιώνας και Επανομής μέχρι το Μεσημέρι και έχει 38.9 Km περίμετρο. Οι εκτάσεις καλλιεργούνται κατά βάση από κηπευτικά, αμπέλια και ελαιόδεντρα και οι συντεταγμένες του κέντρου της είναι E 410308 – N 4475472 (ΕΓΣΑ 87).



**Σχήμα 1.** Χάρτης που υποδεικνύει την περιοχή έρευνας στην Ελλάδα (δορυφορική εικόνα από το Google Earth Pro).

Το υψόμετρο ξεκινάει από την επιφάνεια της θάλασσας και στο βόρειο-ανατολικό τμήμα της περιοχής έρευνας φτάνει έως και τα 261,95 m, ενώ το μέσο υψόμετρο είναι στα 74.65 m (Πίνακας 1, Σχήμα 2).

Η περιοχή βάσει της ταξινόμησης του Dikau (Πίνακας 2) θεωρείται πεδινή διότι το 87,1 % της έκτασης της έχει υψόμετρο κάτω από 150 m.

Η μέση κλίση είναι 2,93% και κυμαίνεται από 0 έως 20,5 % (Πίνακας 3, Σχήμα 3) και ο προσανατολισμός των κλιτύων είναι κυρίως προς το Νότο (Σχήμα 4).

**Πίνακας 1.** Μορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής έρευνας.

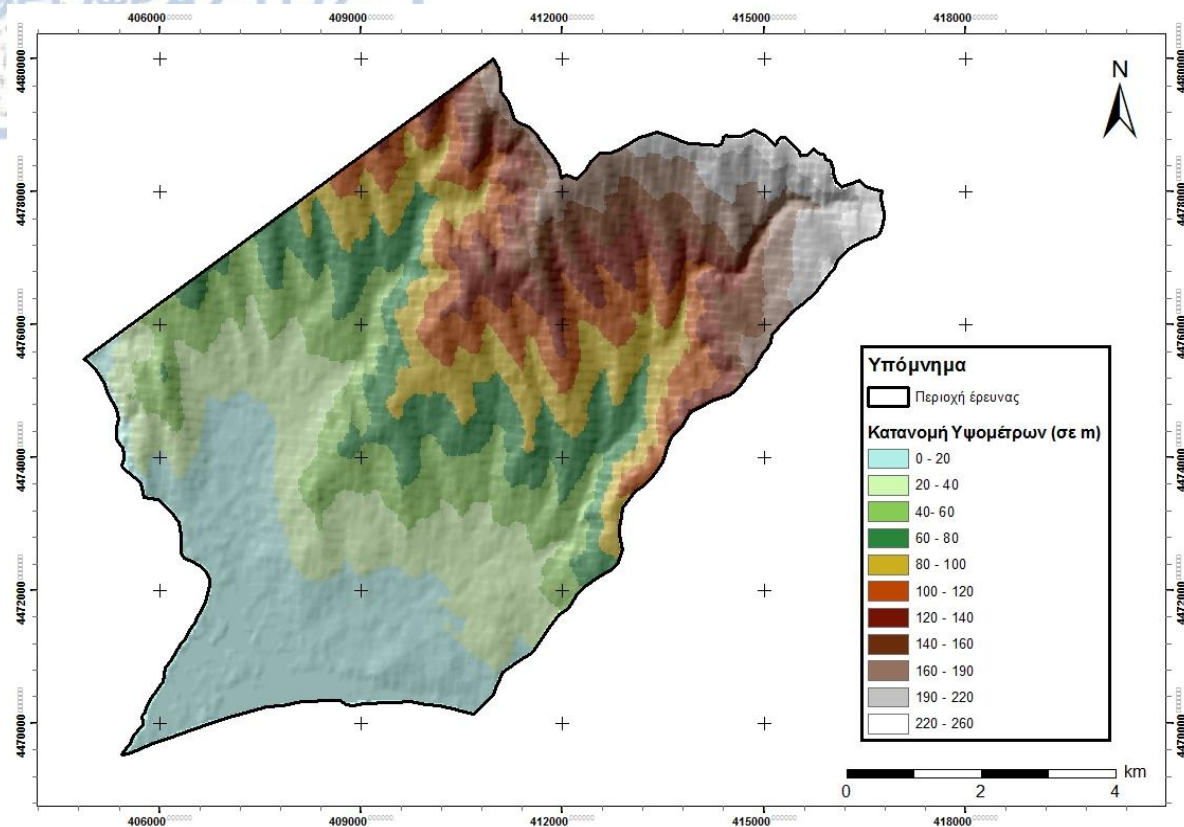
|                                    |                      |
|------------------------------------|----------------------|
| Εμβαδό (E)                         | 66,4 Km <sup>2</sup> |
| Περίμετρος (P)                     | 38,9 Km              |
| Μέγιστο υψόμετρο H <sub>max</sub>  | 261.95 m             |
| Ελάχιστο υψόμετρο H <sub>min</sub> | 0 m                  |
| Μέσο υψόμετρο H <sub>mean</sub>    | 74,65 m              |
| Μέση κλίση (S)                     | 2,93 %               |

**Πίνακας 2.** Ταξινόμηση αναγλύφου σύμφωνα με το υψόμετρο (Dikau, 1989).

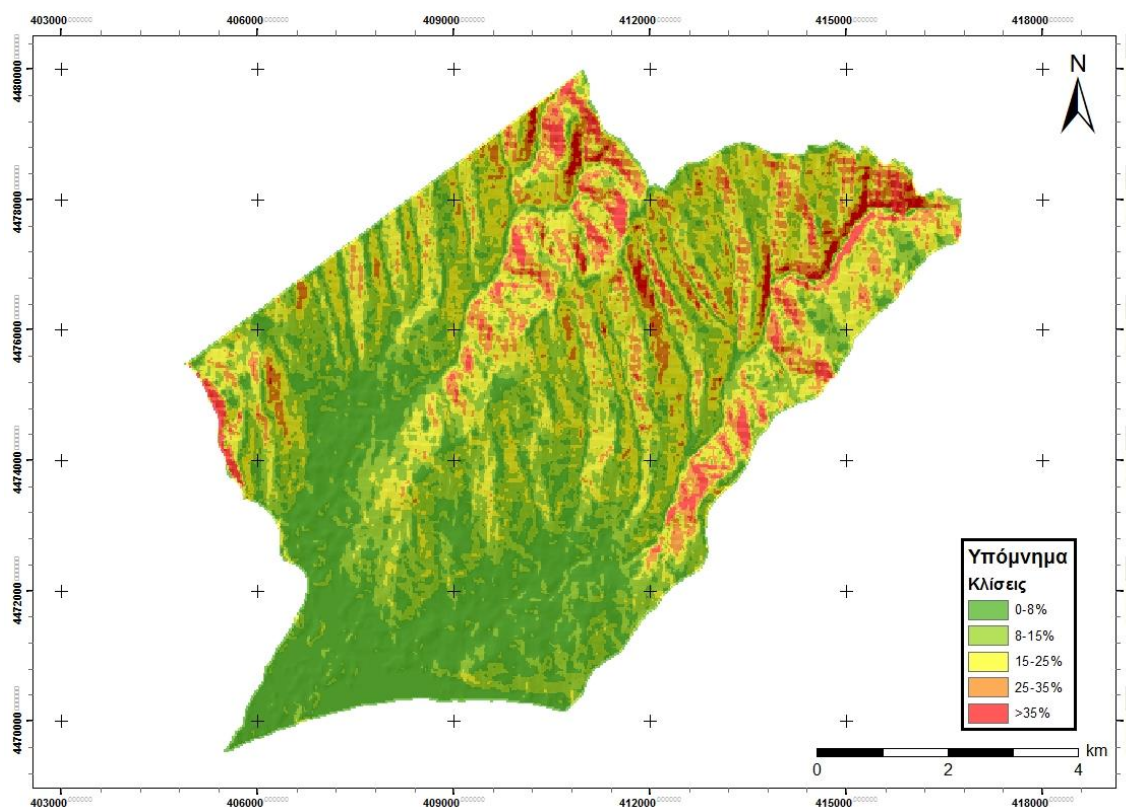
| Τύπος αναγλύφου                  | Υψόμετρο | Επιφάνεια % |
|----------------------------------|----------|-------------|
| Πεδινή περιοχή                   | <150     | 87,1        |
| Λοφώδης περιοχή                  | 150-600  | 12,9        |
| Υψηλοί λόφοι-ημιορεινές περιοχές | 600-900  | 0           |
| Ορεινές περιοχές                 | >900     | 0           |

**Πίνακας 1.** Κατανομή των κλίσεων της περιοχής και χαρακτηρισμός κατά Demek (Demek, 1972).

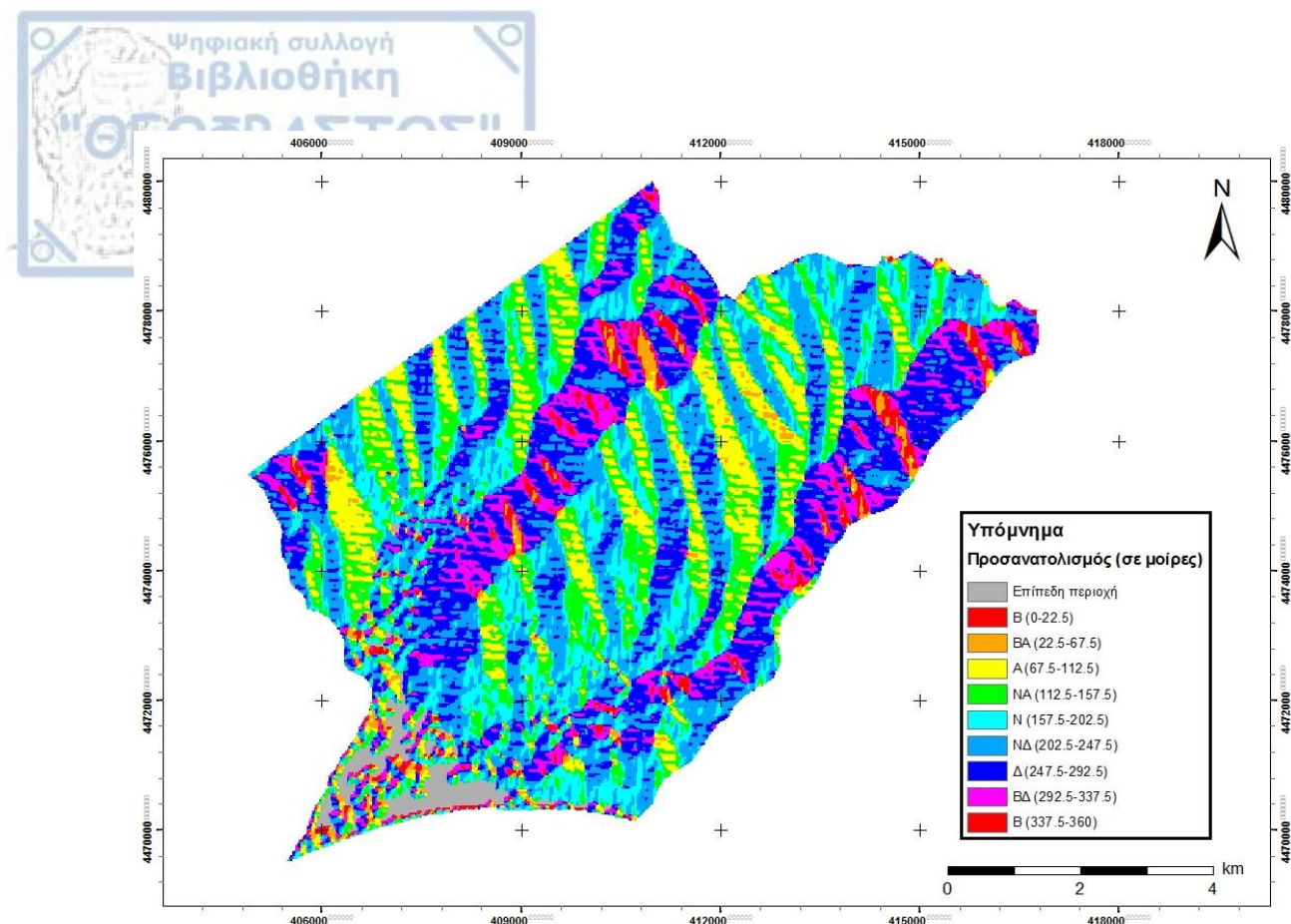
| Κλίση (%) | Κλίση (°) | Έκταση (Km <sup>2</sup> ) | Έκταση (%) | Χαρακτηρισμός    |
|-----------|-----------|---------------------------|------------|------------------|
| 0-3,5     | 0-2       | 15,59                     | 36,62      | Επίπεδο          |
| 3,5-8,7   | 2-5       | 20,50                     | 48,12      | Ελαφρά κεκλιμένο |
| 8,7-26,8  | 5-15      | 6,45                      | 15,14      | Ισχυρά κεκλιμένο |
| 26,8-70   | 5-35      | 0,013                     | 0,031      | Απότομο          |
| 70-135    | 35-55     | -                         | -          | Απόκρημνο        |
| >135      | >55       | -                         | -          | Κάθετο           |



Σχήμα 2. Μορφολογικός χάρτης της περιοχής έρευνας με την κατανομή των υψομέτρων και με σκιασμένο ανάγλυφο.



Σχήμα 3. Χάρτης κλίσεων της περιοχής έρευνας.



**Σχήμα 4.** Χάρτης προσανατολισμού των κλιτύων της περιοχής έρευνας.

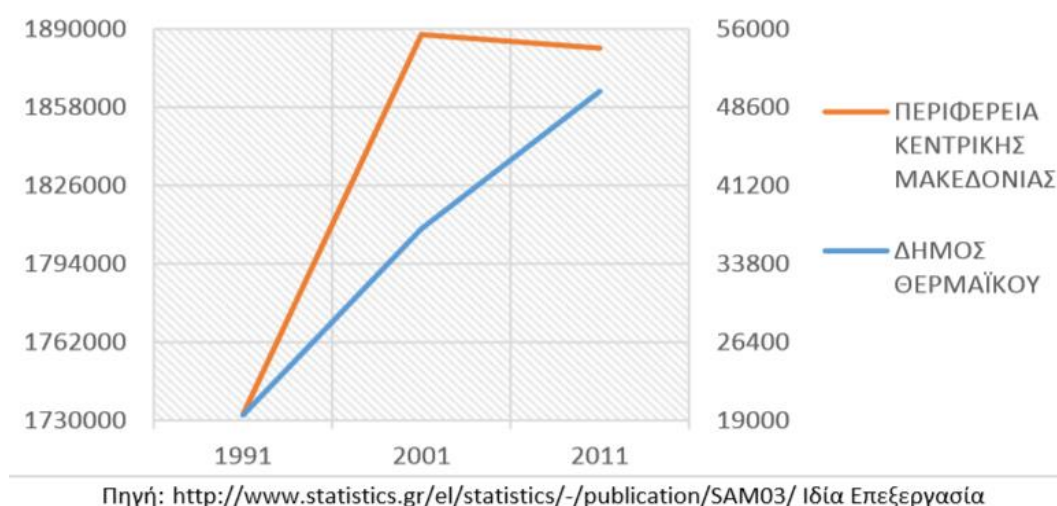
### 2.1.2. Δημογραφικά χαρακτηριστικά

Η περιοχή έρευνας (Σχήμα 5) περιλαμβάνεται στον Δήμο Θερμαϊκού μετά από τη συνένωση που προέβλεπε ο νόμος «Καλλικράτης» (Σχήμα 6). Έτσι οι μόνιμοι κάτοικοι της Δημοτικής Ενότητας Επανομής μετά από την απογραφή του 2011 είναι 10.810 (Πίνακας 4).



**Σχήμα 5.** Χάρτης με την τοποθεσία της περιοχή έρευνας στην περιφέρεια της Κεντρικής Μακεδονίας (δορυφορική εικόνα από το Google Earth Pro).

Το φαινόμενο της αποκέντρωσης που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια, έχει οδηγήσει τον πληθυσμό της Θεσσαλονίκης από την πόλη να μεταβαίνει προς τα προάστια του Νομού Θεσσαλονίκης. Η μεγαλύτερη αύξηση του πληθυσμού στην ευρύτερη περιοχή παρατηρήθηκε από το 1991 έως το 2001. Στον Δήμο Θερμαϊκού ο πληθυσμός κατά το διάστημα 2001 έως 2011 αυξήθηκε κατά 34,94% δηλαδή κατά 12.974 κατοίκους και αυτό το ποσοστό κατέταξε το δήμο στους δέκα δήμους της χώρας με τη μεγαλύτερη αύξηση πληθυσμού (Διάγραμμα 1). Πιο συγκεκριμένα στη Δημοτική Ενότητα Επανομής, ο πληθυσμός το διάστημα 1991 με 2011 αυξήθηκε κατά 4.621 κατοίκους με βάση τον πραγματικό πληθυσμό της περιοχής (Πίνακας 5). Τέλος, η ραγδαία αύξηση του πληθυσμού τόσο στην ευρύτερη περιοχή όσο και στην περιοχή έρευνας σε συνδυασμό με την αύξηση των καλλιεργούμενων εκτάσεων οδηγεί στη μεγιστοποίηση των υδατικών αναγκών και στην υπερεκμετάλλευση των υπόγειων υδάτινων πόρων.



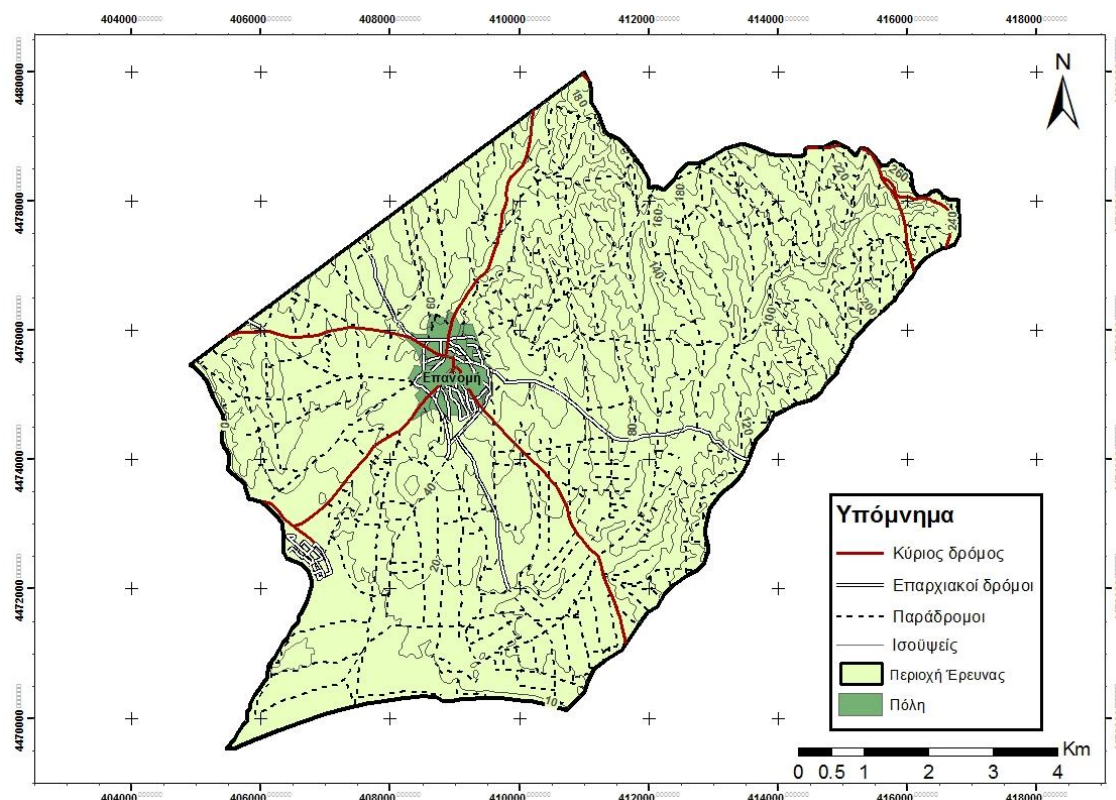
**Γράφημα 1.** Εξέλιξη του πληθυσμού του Δήμου Θερμαϊκού σε σύγκριση με τον πληθυσμό της περιφέρειας κεντρικής Μακεδονίας.

**Πίνακας 4.** Πληθυσμιακή εξέλιξη ανά Δημοτική Ενότητα του Δήμου Θερμαϊκού (πηγή: ΕΣΥΕ)

| Μόνιμος Πληθυσμός  |                |                |                |
|--------------------|----------------|----------------|----------------|
| Δημοτικές Ενότητες | Πληθυσμός 1991 | Πληθυσμός 2001 | Πληθυσμός 2011 |
| Θερμαϊκού          | 5803           | 20253          | 27553          |
| Μηχανιώνας         | 7684           | 9425           | 11901          |
| Επανομής           | 6560           | 8671           | 10810          |
| <b>Σύνολο</b>      | <b>20047</b>   | <b>38349</b>   | <b>50264</b>   |

Πίνακας 5. Πληθυσμιακή εξέλιξη του Δήμου Θερμαϊκού - Δ.Ε. Επανομής - Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας (Πηγή: ΕΣΥΕ).

| Πραγματικός Πληθυσμός           |                   |                   |                   |
|---------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                                 | Πληθυσμός<br>1991 | Πληθυσμός<br>2001 | Πληθυσμός<br>2011 |
| Δημοτική Ενότητα Επανομής       | 6276              | 8138              | 10897             |
| Δήμος Θερμαϊκού                 | 19492             | 37126             | 50107             |
| Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας | 1732445           | 1887697           | 1882108           |

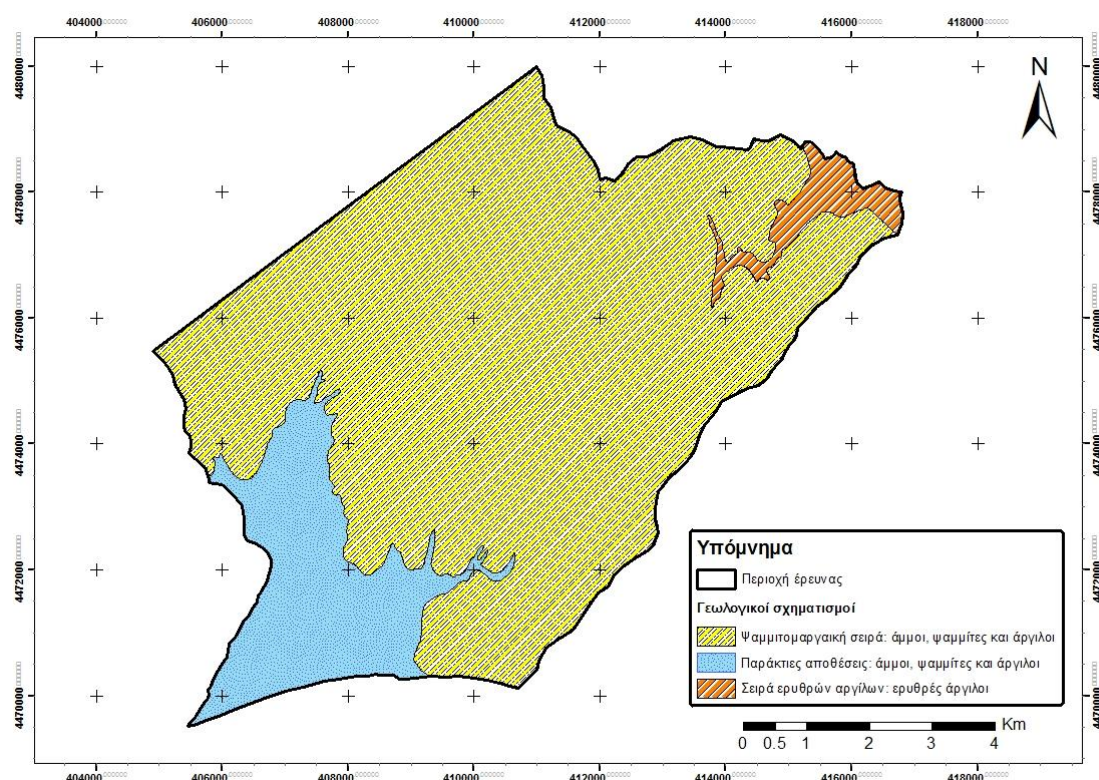


Σχήμα 6. Απλοποιημένος τοπογραφικός χάρτης της περιοχής έρευνας.

### 2.1.3. Γεωλογία-Τεκτονική

Η περιοχή που εξετάστηκε εντάσσεται στη ζώνη Αξίου των Εσωτερικών Ελληνίδων και συγκεκριμένα στην υποζώνη της Παιονίας. Το μεγαλύτερο μέρος της έκτασης της, καλύπτεται από μεταλικά ιζήματα ηλικίας Ολοκαίνου του σχηματισμού της Γωνιάς ή αλλιώς της ψαμμιτομαργαϊκής σειράς (Μουντράκης, 1985). Στο βόρειο άκρο της περιοχής αρχίζει να εμφανίζεται ο σχηματισμός της Τρίγλιας-Τριλόφου με χερσαία ερυθροστρώματα του Άνω Μειοκαίνου. Το παράκτιο τμήμα αποτελείται από αλλουβιακές αποθέσεις προϊόντα της διάβρωσης των ορεινών περιοχών, ενώ το πάχος τους κυμαίνεται από μερικά έως δεκάδες μέτρα (Σχήμα 7).

Στην περιοχή που γίνεται η έρευνα δεν παρατηρούνται επιφανειακά ρήγματα, ούτε καταγράφονται στους αντίστοιχους χάρτες του ΙΓΜΕ. Όμως στην ευρύτερη περιοχή εντοπίζεται το ρήγμα του Ανθεμούντα, που είναι μεγάλης σημασίας εξαιτίας του μεγάλου μήκους του και της ενεργότητας του (Ζερβοπούλου & Παυλίδης, 2005; Μουντράκης et al., 1996; Kockel et al., 1977). Το ρήγμα αυτό είναι ένα κανονικό ρήγμα, με μήκος περίπου 32 Km και φθάνει έως τον οικισμό του Αγγελοχωρίου, έχει διεύθυνση Α-Δ και μετάπτωση προς το Βορρά.

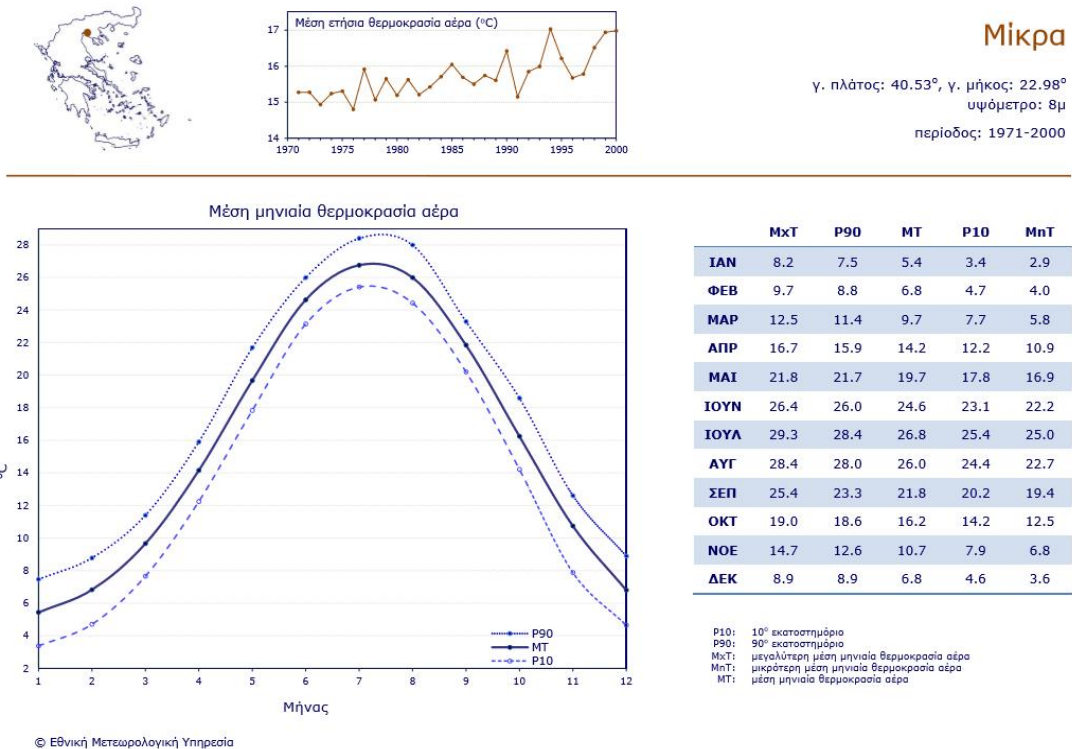


**Σχήμα 7.** Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της περιοχής έρευνας του Ι.Γ.Μ.Ε. (φύλλα Επανομής και Βασιλικών).

#### 2.1.4. Κλιματικά χαρακτηριστικά

Η περιοχή έρευνας χαρακτηρίζεται από θερμά-ξηρά καλοκαίρια και υγρούς έως σχετικά ψυχρούς χειμώνες και το κλίμα της θεωρείται εύκρατο. Πιο συγκεκριμένα η μέση ελάχιστη μηνιαία θερμοκρασία παρατηρείται κατά τους τρεις χειμερινούς μήνες (Δεκέμβριος - Ιανουάριος - Φεβρουάριος) και κυρίως τον Ιανουάριο, με μέση μηνιαία θερμοκρασία στους 5,9 °C. Η μέση μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία αυξάνει σταδιακά από το Μάρτιο και μετά. Τον Ιούλιο παρατηρείται η μέγιστη θερμοκρασία του έτους με μέση μηνιαία θερμοκρασία στους 26,8°C και έπειτα διακρίνεται σταδιακή μείωση έως και το Νοέμβριο (Σχήμα 8). Η

αύξηση της θερμοκρασίας συνδέεται με την αυξημένη ηλιοφάνεια τους θερινούς μήνες και ιδιαίτερα τον Ιούλιο (Σχήμα 9).



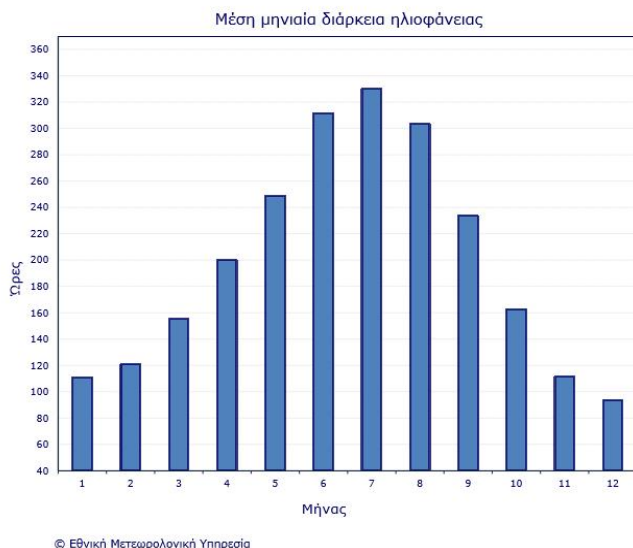
**Σχήμα 8.** Καταγραφές της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας του αέρα από τον σταθμό στη Μίκρα (πηγή: Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία).

Οι βροχοπτώσεις στην περιοχή είναι σχετικά περιορισμένες, όμως ο μέγιστος υετός παρατηρείται το Νοέμβριο με μέγιστο ύψος κατακρημνισμάτων έως τα 600 mm (Σχήμα 10). Η μέση ετήσια θερμοκρασία της περιοχής κατά τη περίοδο 1965-2011 είναι 15 °C και το μέσο ετήσιο ύψος των κατακρημνισμάτων είναι 475 mm (Βουδούρης, 2014). Είναι διακριτή η σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας με το πέρασμα των ετών καθώς επίσης και η σταδιακή μείωση των κατακρημνισμάτων. Τέλος, ο άνεμος που πνέει είναι κυρίως ο «βαρδάρης», δηλαδή βόρειο-βορειοδυτικός και προέρχεται από τη λεκάνη του Αξιού.



## Μίκρα

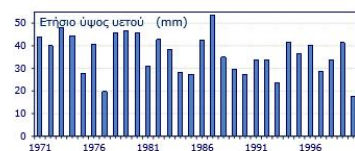
γ. πλάτος: 40.53°, γ. μήκος: 22.98°  
υψόμετρο: 8μ  
περίοδος: 1977-2002



|      | MxS   | P90   | MS    | P10   | MnS   |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ΙΑΝ  | 192.3 | 169.2 | 110.8 | 56.2  | 45.2  |
| ΦΕΒ  | 172.7 | 169.3 | 120.8 | 66.1  | 32.7  |
| ΜΑΡ  | 256.7 | 205.6 | 155.3 | 89.3  | 59.7  |
| ΑΠΡ  | 265.1 | 248.9 | 200.0 | 141.3 | 138.0 |
| ΜΑΙ  | 321.8 | 298.9 | 248.7 | 197.9 | 194.2 |
| ΙΟΥΝ | 350.9 | 345.7 | 311.4 | 273.5 | 223.5 |
| ΙΟΥΛ | 386.8 | 357.6 | 330.1 | 296.8 | 294.7 |
| ΑΥΓ  | 340.2 | 330.1 | 303.4 | 271.7 | 266.7 |
| ΣΕΠ  | 290.7 | 271.0 | 233.6 | 210.2 | 191.5 |
| ΟΚΤ  | 215.9 | 202.4 | 162.7 | 113.6 | 84.2  |
| ΝΟΕ  | 163.5 | 145.9 | 111.5 | 80.5  | 54.7  |
| ΔΕΚ  | 139.6 | 131.8 | 93.4  | 60.1  | 39.8  |

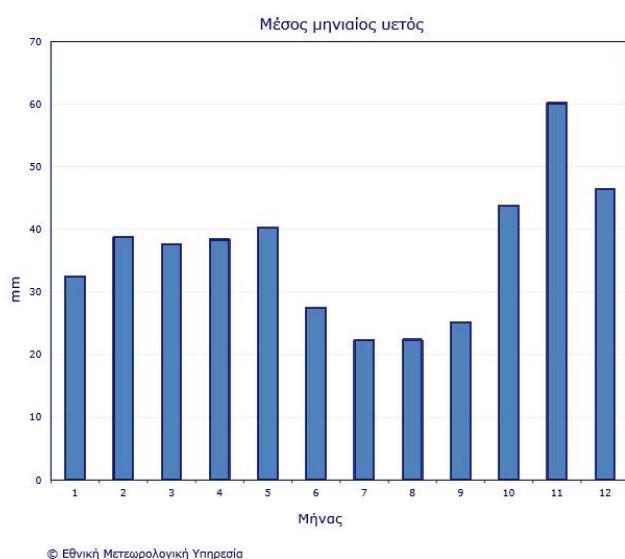
P10: 10° εκατοστημόριο  
P90: 90° εκατοστημόριο  
MxS: μεγαλύτερη μέση μηνιαία ηλιοφάνεια  
MnS: μικρότερη μέση μηνιαία ηλιοφάνεια  
MS: μέση μηνιαία ηλιοφάνεια

**Σχήμα 9.** Καταγραφή της μέσης μηνιαίας ηλιοφάνειας από το σταθμό της Μίκρας (πηγή: Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία).



## Μίκρα

γ. πλάτος: 40.53°, γ. μήκος: 22.98°  
υψόμετρο: 8μ  
περίοδος: 1971-2000



|      | MxP   | P90   | MP   | P10  | MnP |
|------|-------|-------|------|------|-----|
| ΙΑΝ  | 82.0  | 67.3  | 32.5 | 2.2  | 0.0 |
| ΦΕΒ  | 167.2 | 68.4  | 38.8 | 5.8  | 0.3 |
| ΜΑΡ  | 95.1  | 71.4  | 37.6 | 10.1 | 4.5 |
| ΑΠΡ  | 108.0 | 79.8  | 38.4 | 6.3  | 5.1 |
| ΜΑΙ  | 94.6  | 63.7  | 40.3 | 8.2  | 3.3 |
| ΙΟΥΝ | 85.6  | 66.8  | 27.5 | 1.3  | 0.0 |
| ΙΟΥΛ | 78.5  | 43.6  | 22.3 | 0.5  | 0.0 |
| ΑΥΓ  | 97.5  | 47.7  | 22.4 | 1.8  | 0.0 |
| ΣΕΠ  | 135.0 | 66.3  | 25.2 | 0.7  | 0.0 |
| ΟΚΤ  | 150.5 | 94.2  | 43.8 | 7.0  | 0.1 |
| ΝΟΕ  | 179.1 | 128.0 | 60.2 | 19.6 | 6.4 |
| ΔΕΚ  | 141.6 | 96.1  | 46.5 | 3.1  | 0.2 |

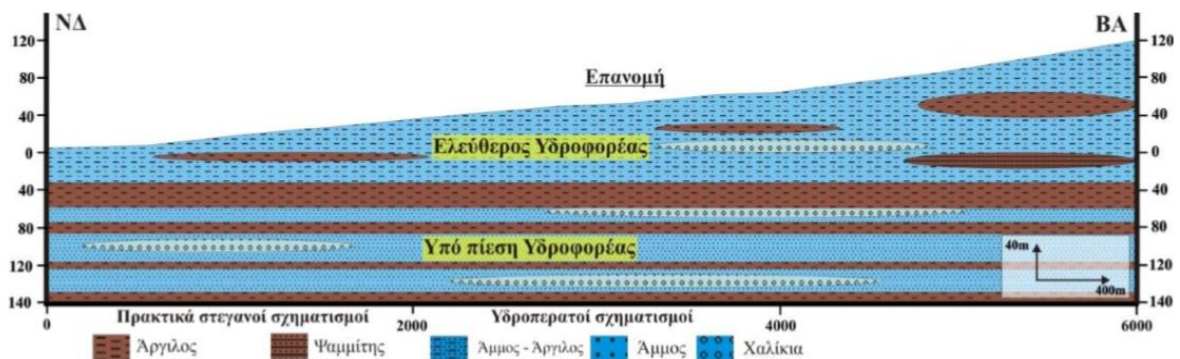
P10: 10° εκατοστημόριο  
P90: 90° εκατοστημόριο  
MxP: μεγαλύτερος μέσος μηνιαίος υετός  
MnP: μικρότερος μέσος μηνιαίος υετός  
MP: μέσος μηνιαίος υετός

**Σχήμα 10.** Καταγραφή του μέσου μηνιαίου υετού από τον σταθμό της Μίκρας (πηγή: Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία).

### 3. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ

#### 3.1. ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΛΙΘΟΛΟΓΙΑ

Η περιοχή έρευνας συντάσσεται από τους ιζηματογενείς σχηματισμούς της ψαμμιτομαργαϊκής σειράς εντός των οποίων αναπτύσσονται οι υπό πίεση και ελεύθεροι υδροφορείς. Πιο συγκεκριμένα, ο ελεύθερος υδροφορέας κυριαρχεί στην περιοχή, ενώ βαθύτερα υπάρχει και ένα υπό πίεση υδροφόρο στρώμα. Οι υδροφορείς διαχωρίζονται μεταξύ τους από ένα στρώμα αργίλου πάχους 60 m (Βουδούρης, 2014) (Σχήμα 11).

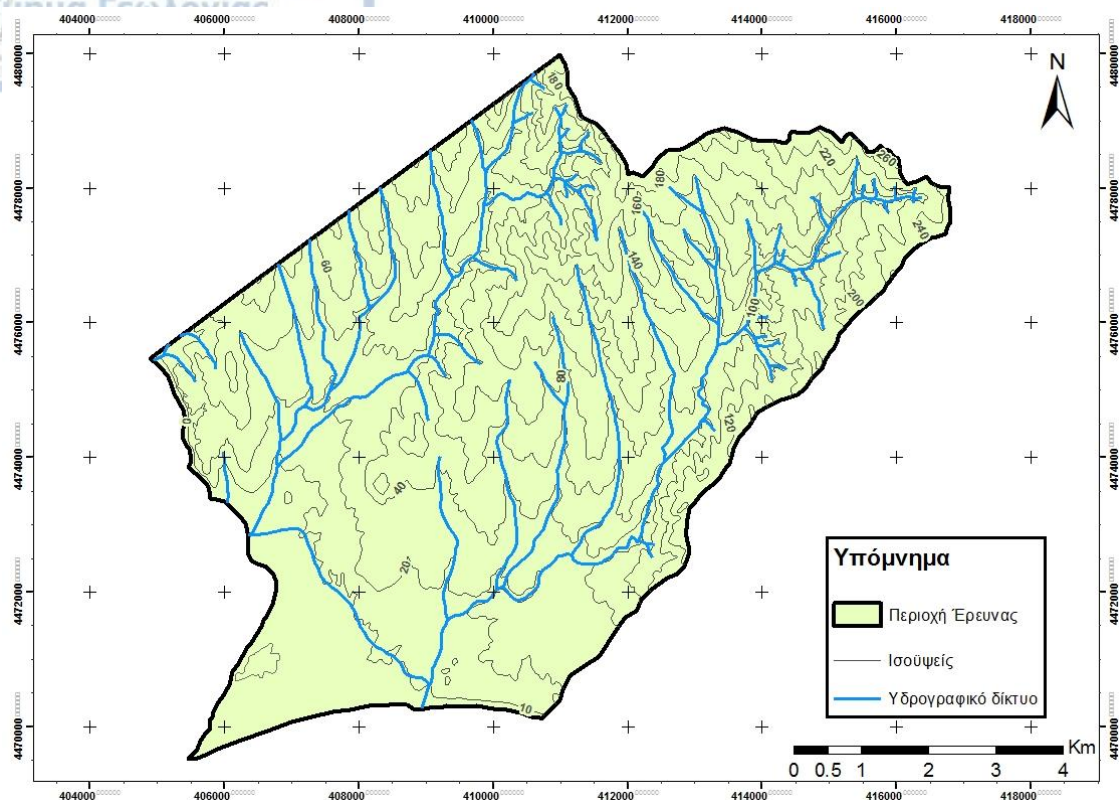


Σχήμα 11. Υδρολιθολογική τομή στην περιοχή της Επανομής.

Ο ελεύθερος υδροφορέας σχηματίζεται από ιζήματα τεταρτογενούς ηλικίας που αποτελούνται από άμμο, άμμο με άργιλο, χαλίκια και από νεογενής σχηματισμούς που συντάσσονται από ψαμμίτες και κόκκινη άργιλο. Το μέσο πάχος του υδροφορέα είναι 80 m το οποίο σταδιακά μειώνεται προς την ακτογραμμή.

Ο υπό πίεση υδροφορέας αποτελείται από εναλλαγές άμμου και χονδρόκοκκων χαλικιών και λόγω των γεωθερμικών ρευστών που υπάρχουν στην περιοχή καθίσταται ποιοτικά υποβαθμισμένος.

Τέλος, το υδρογραφικό δίκτυο είναι δεντρικής μορφής, επηρεάζει και διαμορφώνει το μορφολογικό ανάγλυφο και είναι άμεσα συνδεδεμένο με τη γεωλογία και το κλίμα της περιοχής. Τα ιζηματογενή πετρώματα, λόγω της επιδεκτικότητάς τους στη διάβρωση και της επαρκούς ποσότητας κατακρημνισμάτων, ευνοούν την καλή ανάπτυξη του δικτύου, που όμως τα τελευταία χρόνια είναι περιορισμένη λόγω των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων και της μείωσης των βροχοπτώσεων (Σχήμα 12).



Σχήμα 12. Χάρτης με το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής έρευνας.

### 3.2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ-ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΑ

Λόγω της υπερεκμετάλλευσης των υδροφορέων το πιεζομετρικό φορτίο είναι αρνητικό μέχρι και 2 Km από την ακτή, ενώ τα υδροφόρα στρώματα της περιοχής έχουν το ίδιο πιεζομετρικό φορτίο (Κουμαντάκης, 2006). Τα αποτελέσματα μιας παλαιότερης έρευνας (Βουδούρης, 2014) ευρύτερα της περιοχής της Επανομής, έδειξαν ότι η πιεζομετρική επιφάνεια κυμαίνεται από -35 m έως +45 m, ενώ εξαιτίας της υπερεκμετάλλευσης και της μικρής τροφοδοσίας του υδροφορέα με γλυκό νερό, η στάθμη του υπόγειου νερού μειώθηκε έως και 30 m κάτω από το επίπεδο της θάλασσας. Για το λόγο αυτόν, από το αρνητικό ισοζύγιο που δημιουργείται στο παράκτιο τμήμα η διεύθυνση ροής είναι από τη θάλασσα προς την ενδοχώρα (Σχήμα 14). Η κατεύθυνση ροής στην περιοχή έρευνας είναι ΝΔ-ΒΑ και το πιεζομετρικό φορτίο είναι από 0 m έως -5 m (Βουδούρης, 2014).

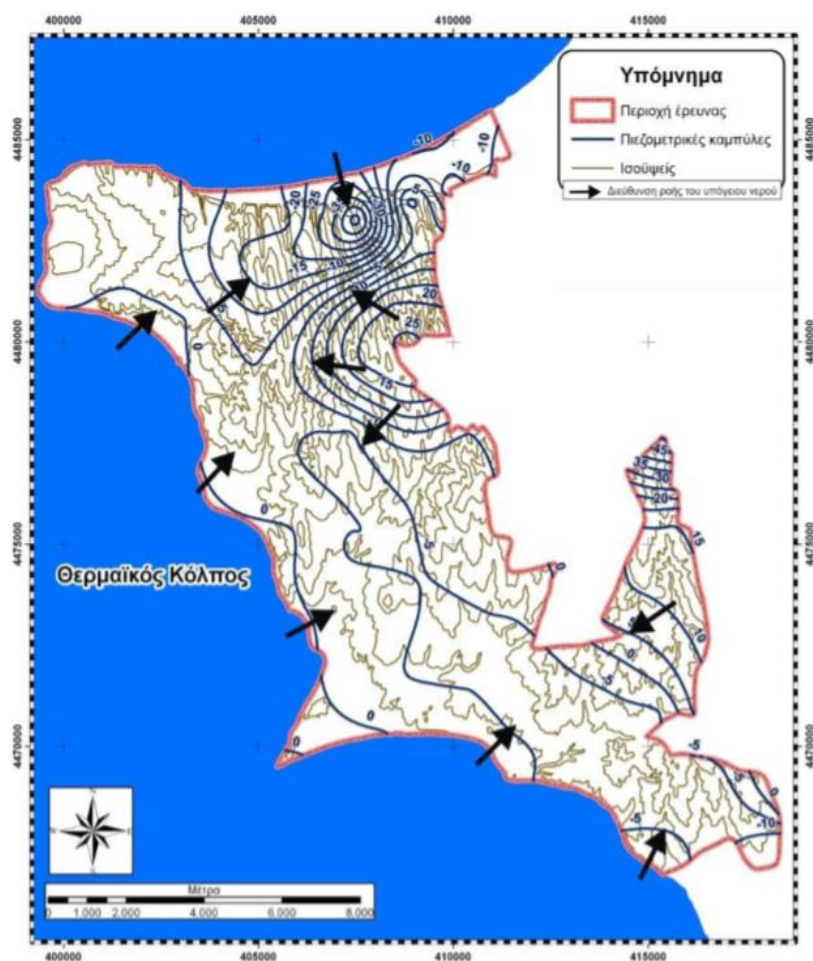
Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν το Μάιο του 2018 στις γεωτρήσεις Th\_2\_S33 και Th\_4\_S36 (Σχήμα 13) έδειξαν μια πτώση στάθμης από 29,35 m έως και 75,6 m, ενώ το πιεζομετρικό φορτίο κυμαίνεται από -4,15 m έως -7,2 m αντίστοιχα (Πίνακας 6).

**Πίνακας 2.** Μετρήσεις στάθμης και πιεζομετρικού φορτίου από γεωτρήσεις στην περιοχή έρευνας το Μάιο του 2018.

| Γεωτρήσεις | Στάθμη (m) | Πιεζομετρικό Φορτίο (m) |
|------------|------------|-------------------------|
| Th_2_S33   | 29,35      | -4,15                   |
| Th_4_S36   | 75,6       | -7,2                    |



**Σχήμα 13.** Χάρτης με τις υδρογεωτρήσεις στην περιοχή έρευνας (πηγή: δορυφορική εικόνα από το Google Earth Pro).

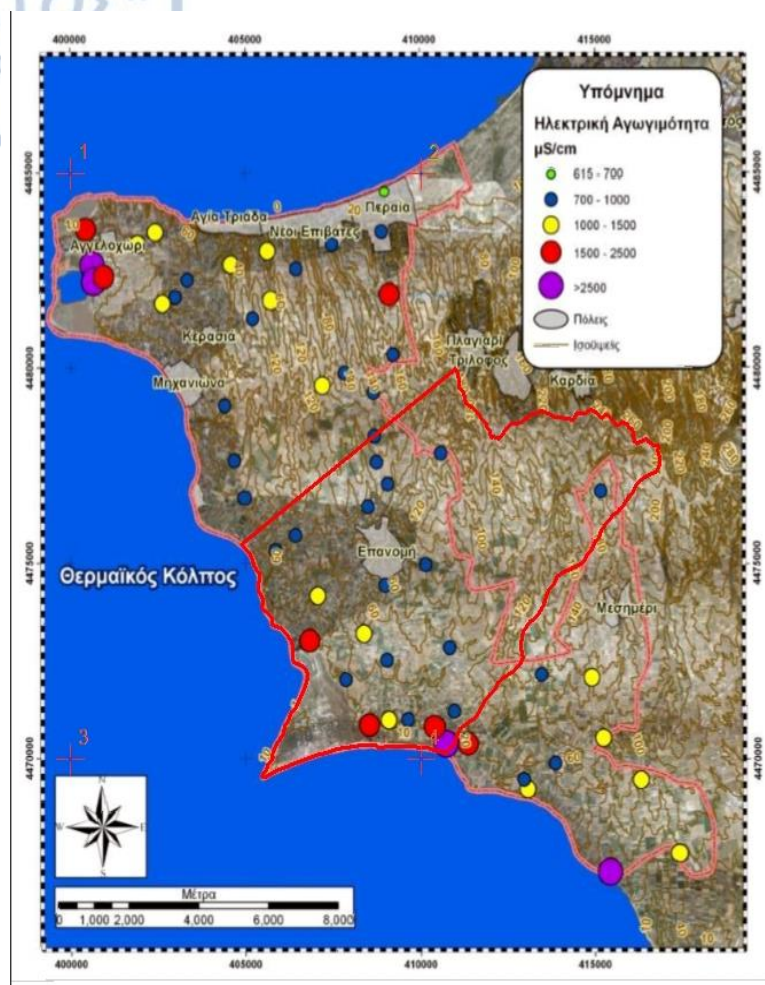


**Σχήμα 14.** Πιεζομετρικός χάρτης του Δήμου Θερμαϊκού που περιλαμβάνει και την περιοχή έρευνας (Βουδούρης, 2014).

### 3.3. ΥΔΡΟΧΗΜΕΙΑ

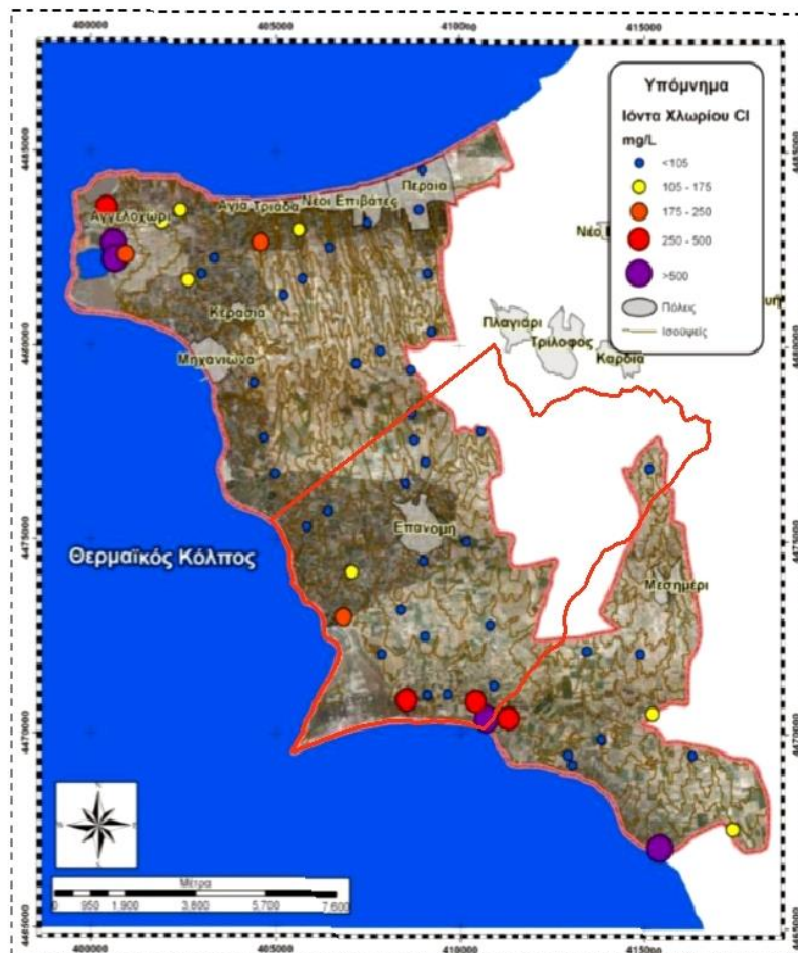
Η υδροχημική εξέταση του νερού είναι απαραίτητη, ώστε να προκύψουν συμπεράσματα για τον τύπο του υδροφόρου ορίζοντα, για την προέλευση του νερού, την ποσιμότητα του, καθώς και για τις αιτίες που μπορεί να έχουν οδηγήσει στη ρύπανση του υδροφορέα.

Στην περιοχή έρευνας η ρύπανση του νερού και η ποιοτική του υποβάθμιση οφείλεται κυρίως στην υφαλμύριση της παράκτιας ζώνης και στις υψηλές τιμές συγκέντρωσης νιτρικών ιόντων σε αυτό. Συγκεκριμένα, η θαλάσσια διείσδυση συμβαίνει λόγω της υπερεκμετάλλευσης του υπόγειου υδροφορέα για την κάλυψη των υδατικών αναγκών, ενώ η νιτρορύπανση κυρίως λόγω της χρήσης λιπασμάτων και γενικότερα της ανθρώπινης δραστηριότητας. Στην παρούσα εργασία θα δοθεί έμφαση στη ρύπανση του υδροφορέα ως αποτέλεσμα της θαλάσσιας διείσδυσης.



**Σχήμα 15.** Χάρτης με την κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στον Δήμο Θερμαϊκού και στην περιοχή έρευνας (τροποποιημένος χάρτης από Βουδούρης, 2014).

Ένας σημαντικός παράγοντας που μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό της υφαλμύρισης του υδροφορέα είναι η Ηλεκτρική Αγωγιμότητα που υποδηλώνει την ποσότητα διαλυμένων ουσιών (T.D.S) και τη θερμοκρασία του νερού. Τα ευρύτερα αποδεκτά επίπεδα του συντελεστή αυτού είναι από 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  έως 2500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  και με θερμοκρασία έως 20 °C, ενώ το ενδεικτικό επίπεδο της αγωγιμότητας στο πόσιμο νερό είναι 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , ώστε να μη δημιουργεί προβλήματα στην υγεία. Οι αυξημένες τιμές του δείκτη T.D.S. στην παράκτια περιοχή είναι αποτέλεσμα της αυξημένης ποσότητας αλάτων στο νερό, δηλαδή των χλωριόντων. Στο Σχήμα 15 είναι εμφανής η θαλάσσια διείσδυση στην παραλία της Επανομής, λόγω των αυξημένων τιμών του συντελεστή ( $> 1200 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) (Βουδούρης, 2014).



**Σχήμα 16.** Χάρτης με την κατανομή χλωριόντων στον Δήμο Θερμαϊκού και στην περιοχή έρευνας (τροποποιημένος χάρτης από Βουδούρης, 2014).

Τα ιόντα χλωρίου που εντοπίζονται στο υπόγειο νερό παρουσιάζουν υψηλές συγκεντρώσεις ( $>250$  mg/L) στην περιοχή έρευνας και κυρίως στο παράκτιο τμήμα της (Σχήμα 16). Οι τιμές αυτές οφείλονται στη διείσδυση του θαλασσινού νερού, ενώ η αυξητική τάση που παρουσιάζεται τα τελευταία χρόνια δείχνει ότι το φαινόμενο εξελίσσεται (Βουδούρης, 2014). Άλλα αίτια που επιδρούν σε μικρότερο βαθμό στην αύξηση της συγκέντρωσης των ιόντων χλωρίου, είναι τα απόβλητα των βιομηχανιών, η διάλυση των εβαποριτών καθώς και η ρίψη αλατιού στους δρόμους για την απομάκρυνση του πάγου το χειμώνα.

## 4. ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ

### 4.1. ΓΕΝΙΚΑ

Η τρωτότητα (vulnerability) είναι μια έννοια, που εκφράζει τα «εμπόδια» που συναντά ένας ρυπαντής για να διεισδύσει και να εξαπλωθεί σε ένα υδροφόρο στρώμα ή σύστημα και στηρίζεται στην παραδοχή ότι το περιβάλλον προστατεύει σε κάποιο βαθμό φυσικά, το υπόγειο νερό. Άρα, ως αποτέλεσμα έχουμε κάποιες περιοχές να είναι πιο τρωτές δηλαδή πιο ευάλωτες στη ρύπανση από κάποιες άλλες (Margat, 1968), (Vrba & Zaporozec, 1994).

Την τρωτότητα μπορούμε να τη χωρίσουμε σε ειδική (specific), που αναφέρεται σε συγκεκριμένο ρυπαντή ή ομάδα ρυπαντών και σε γενική τρωτότητα ή ιδιοτρωτότητα (intrinsic), που συνδέεται μόνο με τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα και του υπερκείμενου εδάφους, χωρίς να ειδικεύεται σε κάποιο συγκεκριμένο ρυπαντή (Βουδούρης, 2009).

### 4.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ

Για τον υπολογισμό της τρωτότητας χρησιμοποιούνται οι μέθοδοι βαθμονόμησης, προσομοίωσης και στατιστικές μέθοδοι (Βουδούρης, 2009). Οι στατιστικές μέθοδοι χρησιμοποιούν απλή περιγραφική στατιστική των συγκεντρώσεων διαφόρων επιλεγμένων ρυπαντών και απλή ή σύνθετη ανάλυση συσχέτισης. Οι μέθοδοι προσομοίωσης επιλύουν αριθμητικά τις εξισώσεις κίνησης του υπόγειου νερού, με τη χρήση των κωδίκων MADFLOW και MT3D. Τέλος, οι μέθοδοι βαθμονόμησης περιλαμβάνουν παραμέτρους με ξεχωριστή βαρύτητα, ενώ οι τιμές τους συνδυάζονται και βαθμονομούνται με τη σημαντικότητα τους.

#### 4.2.1. Κυριότεροι μέθοδοι εκτίμησης της τρωτότητας

Οι κυριότερες τεχνικές και μέθοδοι βαθμονόμησης είναι οι εξής: DRASTIC (Aller, et al., 1987), GOD (Foster., 1987), AVI (Van Stempvoort, Evert, & Wassenaar, 1992), SINTACS (Civita, 1994), ISIS (Civita & Regibus, 1995) και DASTI (Kabbour, Zouhri, Mania, & Colbeaux, 2006).

#### 4.2.2. Η μέθοδος GALDIT

Η μέθοδος GALDIT (Ferreira, et al., 2005) είναι και αυτή μια μέθοδος βαθμονόμησης, κατάλληλη για την εκτίμηση της τρωτότητας των παράκτιων υδροφόρων στη διείσδυση του θαλασσινού νερού. Κάθε γράμμα της λέξης αντιπροσωπεύει μια παράμετρο που λαμβάνει

διαφορετική βαρύτητα και είναι: Ο τύπος του υδροφόρου στρώματος (Groundwater occurrence, Aquifer type) με βαρύτητα 1, η υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφόρου (Aquifer hydraulic conductivity) με βαρύτητα 3, το υδραυλικό φορτίο (σε m) πάνω από το επίπεδο της θάλασσας (Height of groundwater Level above sea level) με βαρύτητα 4, η απόσταση από την ακτή (Distance from the shore) με βαρύτητα 4, η υφιστάμενη κατάσταση της υφαλμύρισης της περιοχής (Impact of existing status of seawater intrusion) με βαρύτητα 1 και το πάχος του υδροφόρου (Thickness of aquifer being mapped) με βαρύτητα 2.

Ο δείκτης GALDIT υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$\text{Δείκτης GALDIT index} = \frac{\sum_{i=1}^6 (w_i \times r_i)}{\sum_{i=1}^6 w_i} \quad (4.1)$$

- $w_i$ : είναι η βαρύτητα της κάθε μια παραμέτρου και
- $r_i$ : είναι η βαθμονόμηση της παραμέτρου σε συγκεκριμένα σημεία (θέση γεώτρησης).

### 4.3. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΤΜΗΜΑ ΤΗΣ ΕΠΑΝΟΜΗΣ

#### 4.3.1. G – Τύπος του υδροφόρου στρώματος

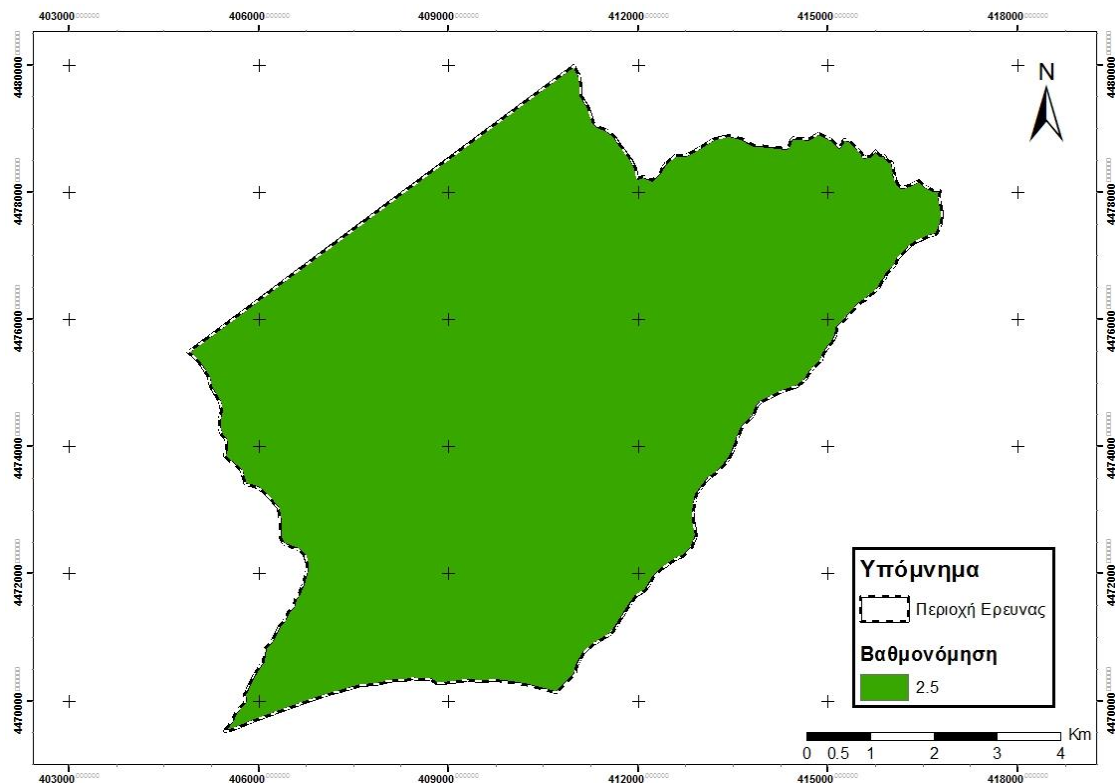
Η μέθοδος GALDIT χρησιμοποιεί για την εξαγωγή συμπερασμάτων, τους υπό πίεση υδροφορείς, τους ελεύθερους υδροφορείς, τους ημι-εγκλωβισμένους και εκείνους που περιορίζονται από ένα ή περισσότερα όρια (Πίνακας 7).

**Πίνακας 3.** Βαθμονόμηση της παραμέτρου G.

| Τύπος υδροφορέα-G                                                     |                            |                      |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| Χαρακτηρισμός                                                         | Τυπική βαθμολογία (Rating) | Χαρακτηριστικό Χρώμα |
| Υπό πίεση υδροφορέας                                                  | 10                         |                      |
| Ελεύθερος υδροφορέας                                                  | 7,5                        |                      |
| Ημι-εγκλωβισμένος υδροφορέας                                          | 5                          |                      |
| Υδροφορέας με όρια (από τροφοδοσία ή/και με όρια παράλληλα στην ακτή) | 2,5                        |                      |

Τα υπό πίεση υδροφόρα στρώματα αν και προστατεύονται από τη διείσδυση του θαλασσινού νερού λόγω του υπερκείμενου αδιαπέρατου στρώματος που τα σφραγίζει, εντούτοις παίρνουν τη μεγαλύτερη τιμή βαθμονόμησης (10), διότι δημιουργείται μεγαλύτερος κώνος πτώσης στάθμης και καθίστανται πιο επιρρεπείς στη θαλάσσια διείσδυση. Αντίθετα, τις μικρότερες τιμές βαθμονόμησης (2.5) παίρνουν οι υδροφορείς, που περιορίζονται από ένα ή περισσότερα όρια.

Στην περιοχή έρευνας με βάση τη βαθμονόμηση (2,5) διακρίνεται ο υδροφορέας με όρια, όπου είναι ένας πορώδης υδροφορέας που αποτελείται από άμμο, χαλίκια και κροκάλες και παρουσιάζεται στον παρακάτω θεματικό χάρτη της παραμέτρου G (Σχήμα 17).



Σχήμα 17. Θεματικός βαθμονομημένος χάρτης της παραμέτρου G.

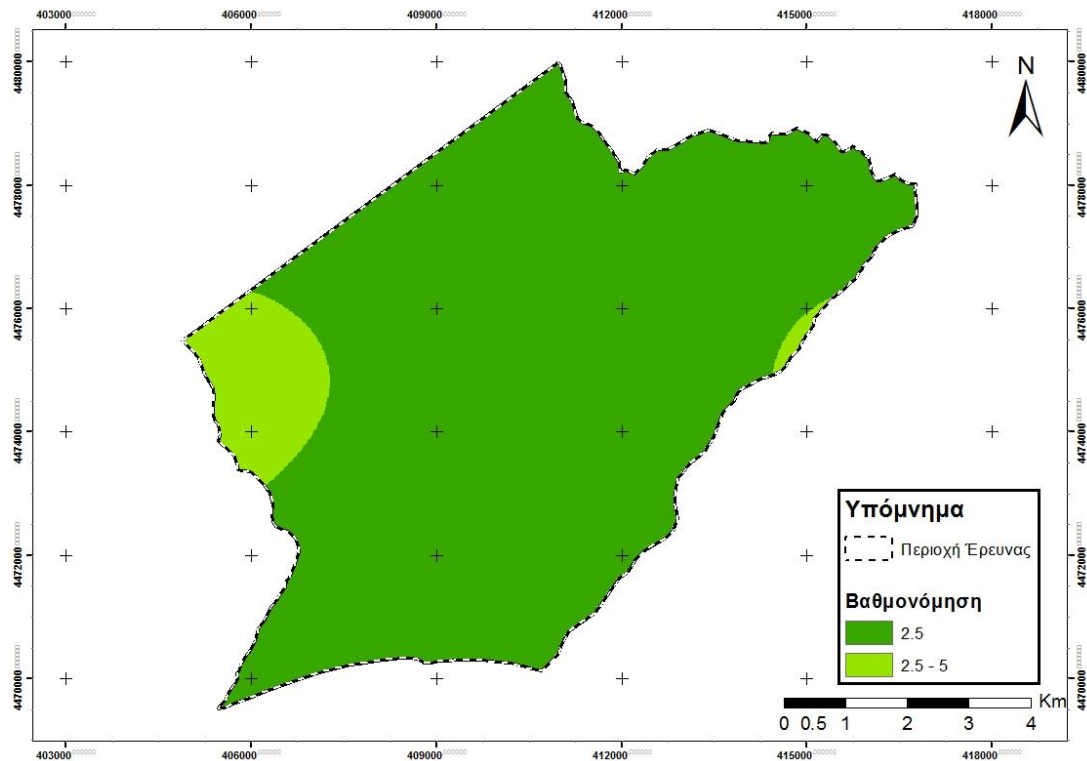
#### 4.3.2. Α – Υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφόρου

Η υδραυλική αγωγιμότητα πρόκειται για ένα μέτρο της ταχύτητας του νερού στον υδροφόρο ορίζοντα και έχει διαστάσεις m/day. Όσο υψηλότερη είναι η υδραυλική αγωγιμότητα τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα της θαλάσσιας διείσδυσης και αυξάνεται η τρωτότητα. (Πίνακα 8). Η τιμή της εξαρτάται από τις ιδιότητες του υδροφορέα (σχήμα, μέγεθος, διαστάσεις κόκκων).

Πίνακας 4. Βαθμονόμηση της παραμέτρου Α.

| Υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφορέα-Α |             |                                |                         |
|---------------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------------------|
| Χαρακτηρισμός                         |             | Τυπική βαθμολογία<br>( Rating) | Χαρακτηριστικό<br>Χρώμα |
| Κλάση                                 | Τύπος (m/d) |                                |                         |
| Υψηλή                                 | >40         | 10                             |                         |
| Μέση                                  | 10-40       | 7,5                            |                         |
| Χαμηλή                                | 5-10        | 5                              |                         |
| Πολύ χαμηλή                           | <5          | 2,5                            |                         |

Ο θεματικός χάρτης της παραμέτρου παρουσιάζεται παρακάτω (Σχήμα 18) με τις τιμές να παρουσιάζουν τη διάταξη του Πίνακα 8. Όπως φαίνεται και στο χάρτη στην περιοχή κυριαρχούν πολύ χαμηλές τιμές, ενώ κυρίως δυτικά προς την ακτή εντοπίζεται μικρή αύξηση των τιμών.



Σχήμα 18. Θεματικός βαθμονομημένος χάρτης της παραμέτρου Α.

#### 4.3.3. L – Το υδραυλικό φορτίο (σε m) πάνω από το επίπεδο της θάλασσας

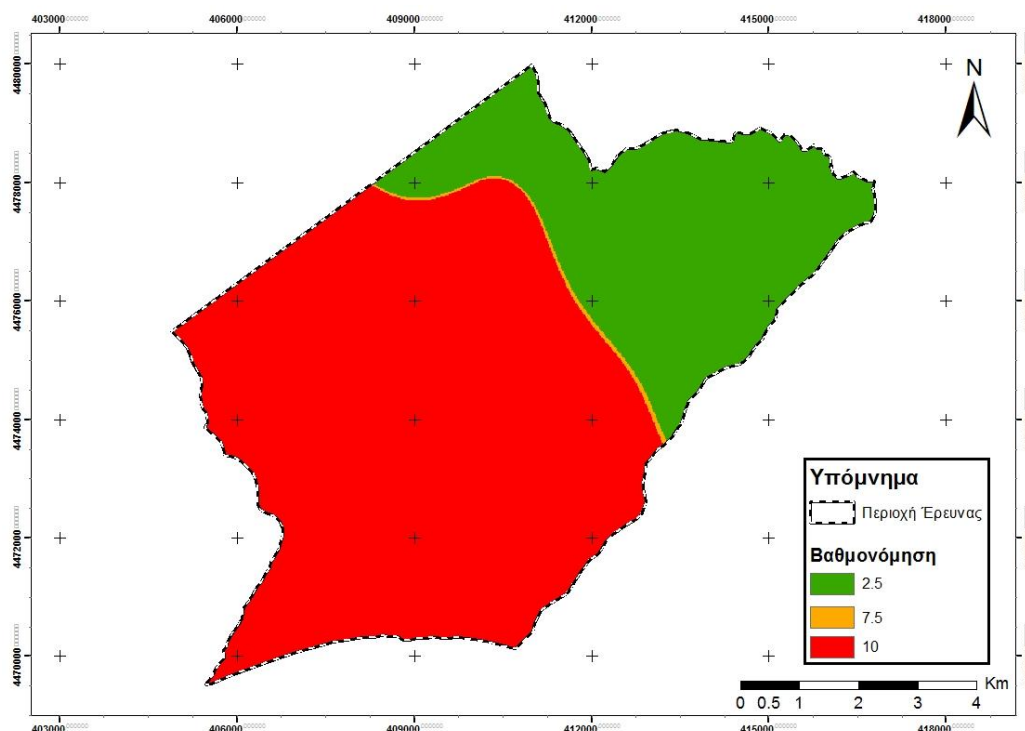
Το υδραυλικό φορτίο πρόκειται για μία παράμετρο με ιδιαίτερα μεγάλη σημασία, επειδή καθορίζει τη δυνατότητα της υδραυλικής πίεσης να ωθήσει προς τα πίσω το μέτωπο της υφαλμύρισης.

Το φορτίο ταυτίζεται με το απόλυτο υψόμετρο της στάθμης του υπόγειου νερού για τους ελεύθερους υδροφορείς και για τους υπό πίεση με το απόλυτο υψόμετρο της στάθμης του υπόγειου νερού, αν η γεώτρηση θεωρητικά ανέβαινε πιο πάνω από την επιφάνεια του εδάφους.

Στον θεματικό χάρτη της παραμέτρου L (Σχήμα 19) και με βάση τη βαθμονόμηση του Πίνακα 9 παρατηρούμε ότι οι τιμές είναι πολύ υψηλές, από 4 Km έως και 9 Km από την ακτή έως το κέντρο της περιοχής.

Πίνακας 5. Βαθμονόμηση της παραμέτρου L.

| Υδραυλικό φορτίο πάνω από το επίπεδο της θάλασσας - L |           |                                |                         |
|-------------------------------------------------------|-----------|--------------------------------|-------------------------|
| Χαρακτηρισμός                                         |           | Τυπική βαθμολογία<br>( Rating) | Χαρακτηριστικό<br>Χρώμα |
| Κλάση                                                 | Τύπος (m) |                                |                         |
| Υψηλή                                                 | <1        | 10                             |                         |
| Μέση                                                  | 1,0-1,5   | 7,5                            |                         |
| Χαμηλή                                                | 1,5-2,0   | 5                              |                         |
| Πολύ χαμηλή                                           | >2,0      | 2,5                            |                         |



Σχήμα 19. Θεματικός βαθμονομημένος χάρτης της παραμέτρου L.

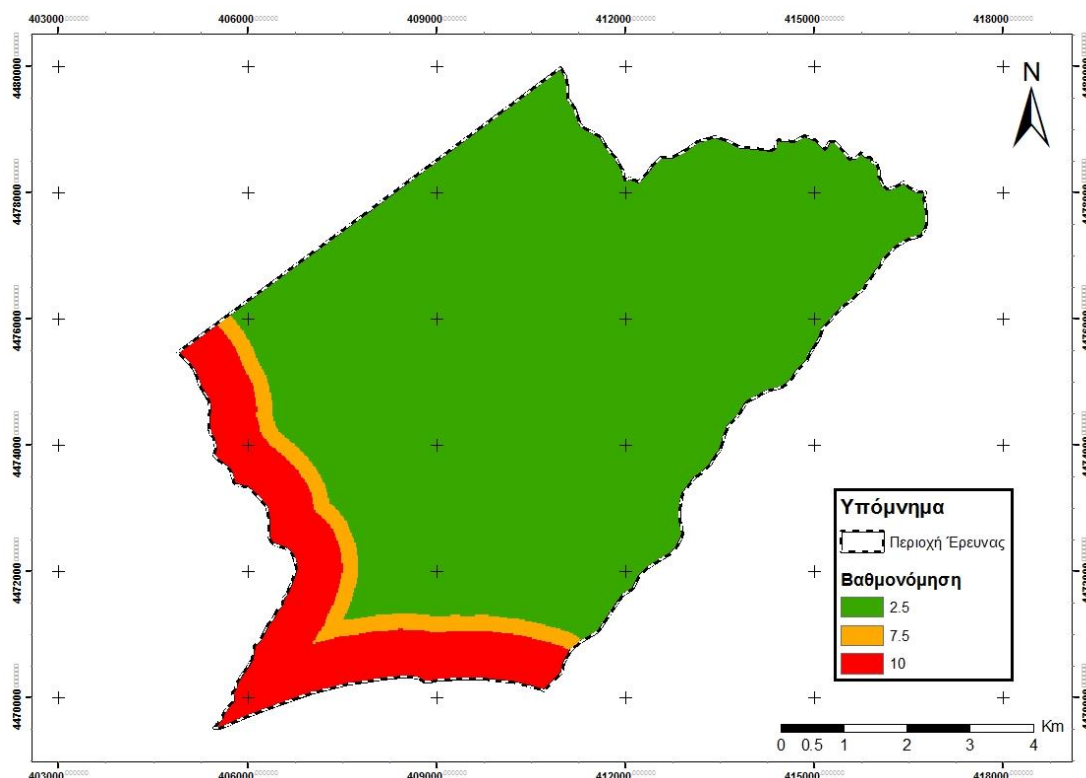
#### 4.3.4. D – Απόσταση από την ακτή

Η παράμετρος αυτή ουσιαστικά δείχνει την κάθετη της θάλασσας διεύθυνσης απόσταση από την ακτογραμμή προς την ενδοχώρα (σε m), διότι είναι αναμενόμενο να αυξάνεται όσο πλησιάζουμε στην ακτή και να μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε.

Ο θεματικός χάρτης της παραμέτρου D (Σχήμα 20) εμφανίζει μία ανομοιομορφία στις κλάσεις, διότι η ακτογραμμή δεν είναι ομαλή. Έτσι παράλληλα στην ακτογραμμή και πολύ κοντά στη θάλασσα οι τιμές είναι υψηλές, έπειτα παρατηρείται μια μεταβατική ζώνη με μέσες τιμές και τέλος προς την ενδοχώρα οι τιμές γίνονται πολύ χαμηλές (Πίνακας 10).

Πίνακας 6. Βαθμονόμηση της παραμέτρου D.

| Απόσταση από την ακτή-D |           | Τυπική βαθμολογία<br>( Rating) | Χαρακτηριστικό<br>Χρώμα |
|-------------------------|-----------|--------------------------------|-------------------------|
| Χαρακτηρισμός           | Τύπος (m) |                                |                         |
| Υψηλή                   | 500       | 10                             |                         |
| Μέση                    | 500-750   | 7,5                            |                         |
| Χαμηλή                  | 750-1000  | 5                              |                         |
| Πολύ χαμηλή             | >1000     | 2,5                            |                         |



Σχήμα 20. Θεματικός βαθμονομημένος χάρτης της παραμέτρου D.

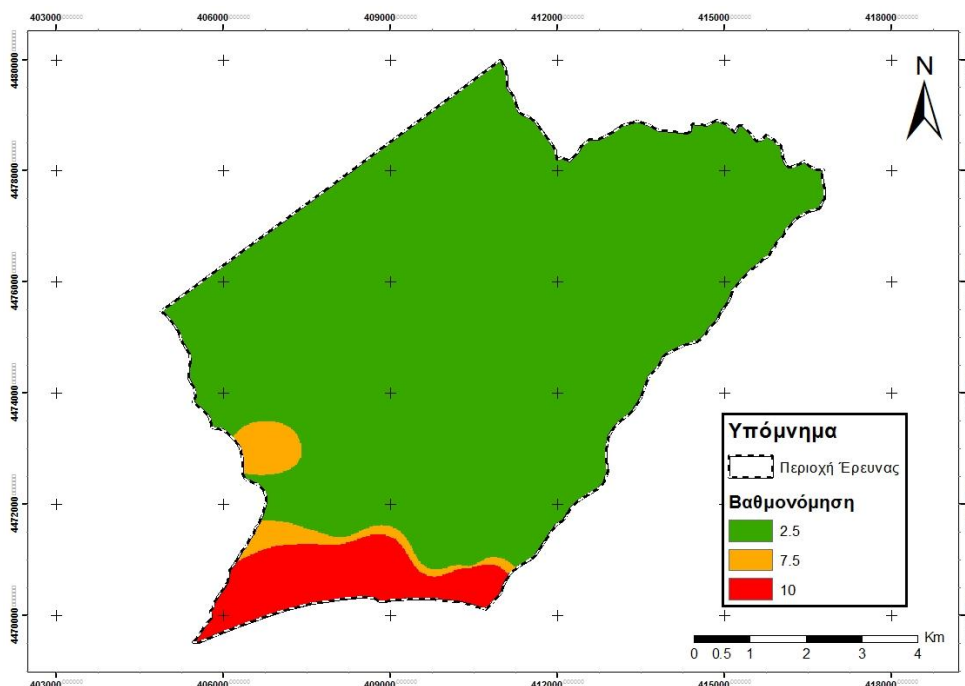
#### 4.3.5. I – Υφιστάμενη κατάσταση της υφαλμύρισης της περιοχής

Για την εκτίμηση της παραμέτρου I χρησιμοποιείται ο συντελεστής Revelle που έχει προταθεί από τους Lobo-Ferreira, Chachadi, Diamantino, & Henriques, 2005. Ο συντελεστής αυτός εκφράζεται με το λόγο  $[Cl^-] / [HCO_3^{-1} + CO_3^{2-}]$ , δηλ. το λόγο των χλωριόντων με τα όξινα ανθρακικά. Όσο πιο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής τόσο πιο τρωτός είναι ο υδροφορέας στην υφαλμύριση και αυτό γιατί τα χλωριόντα αυξάνονται στο θαλασσινό νερό, ενώ τα όξινα ανθρακικά αυξάνονται στο γλυκό νερό. Η μονάδα μέτρησης είναι  $ερμ$ .

Στον παρακάτω θεματικό χάρτη (Σχήμα 21) παρουσιάζονται υψηλές τιμές στο νότιο παράκτιο τμήμα της περιοχής έρευνας, ενώ μέσες τιμές διακρίνονται στο νότιο και κεντρικό τμήμα της ακτής. Η βαθμονόμηση των τιμών γίνεται με βάση τον Πίνακα 11.

Πίνακας 7. Βαθμονόμηση της παραμέτρου I.

| Υφιστάμενη κατάσταση της υφαλμύρισης της περιοχής-I |             |                                |                         |
|-----------------------------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------------------|
| Χαρακτηρισμός                                       |             | Τυπική βαθμολογία<br>( Rating) | Χαρακτηριστικό<br>Χρώμα |
| Κλάση                                               | Τύπος (epm) |                                |                         |
| Υψηλή                                               | >2          | 10                             |                         |
| Μέση                                                | 1,5-2,0     | 7,5                            |                         |
| Χαμηλή                                              | 1-1,5       | 5                              |                         |
| Πολύ χαμηλή                                         | <1          | 2,5                            |                         |



Σχήμα 21. Θεματικός βαθμονομημένος χάρτης της παραμέτρου I.

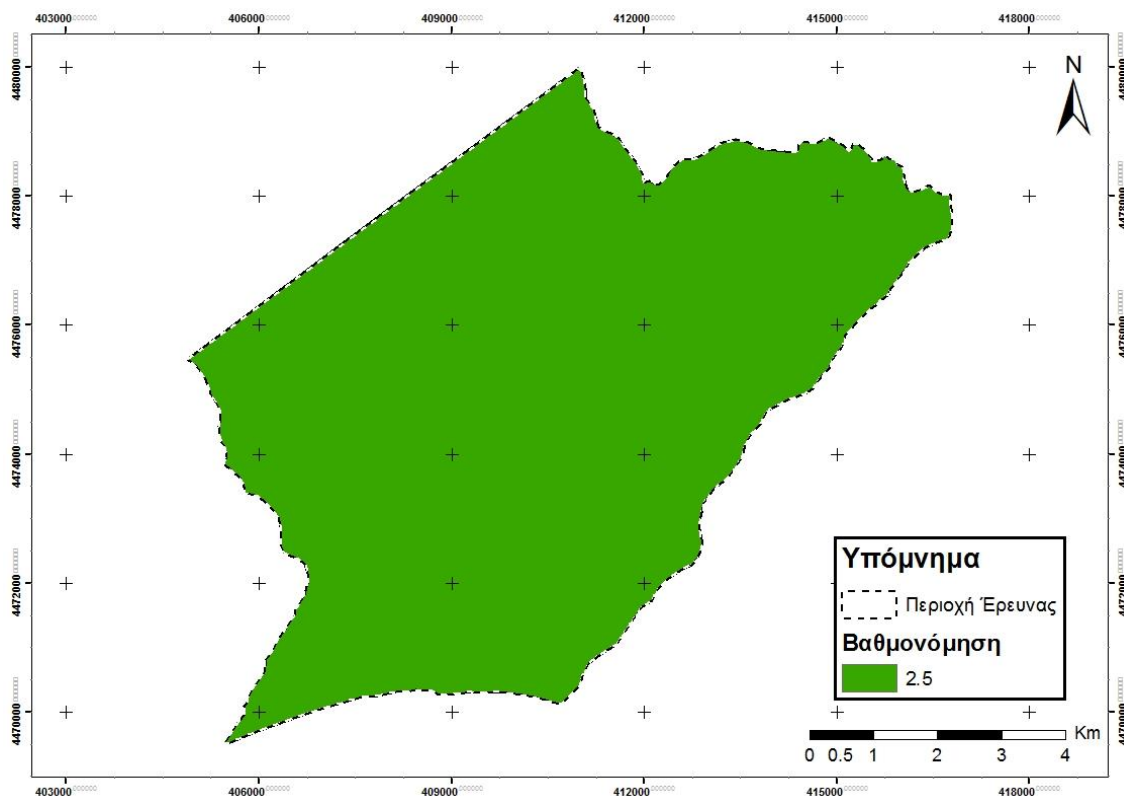
#### 4.3.6. T – Πάχος του υδροφορέα

Το πάχος του υδροφόρου ορίζοντα, καθορίζει πόση έκταση και πόσο μεγάλη θα είναι η υφαλμύριση του υδροφόρου στρώματος. Η σχέση της παραμέτρου T με την θαλάσσια διείδυση είναι ανάλογη, διότι όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος του υδροφόρου στρώματος τόσο μεγαλύτερη έκταση θα έχει η διείδυση.

Στον θεματικό χάρτη (Σχήμα 22) παρατηρείται ότι όλη η περιοχή καλύπτεται με σκούρο πράσινο χρώμα και αυτό υποδεικνύει ότι το πάχος του υδροφορέα της Επανομής είναι πολύ χαμηλό, κάτω από 5m, σε όλη την έκταση της περιοχής έρευνας (Πίνακας 12).

Πίνακας 8. Βαθμονόμηση της παραμέτρου T.

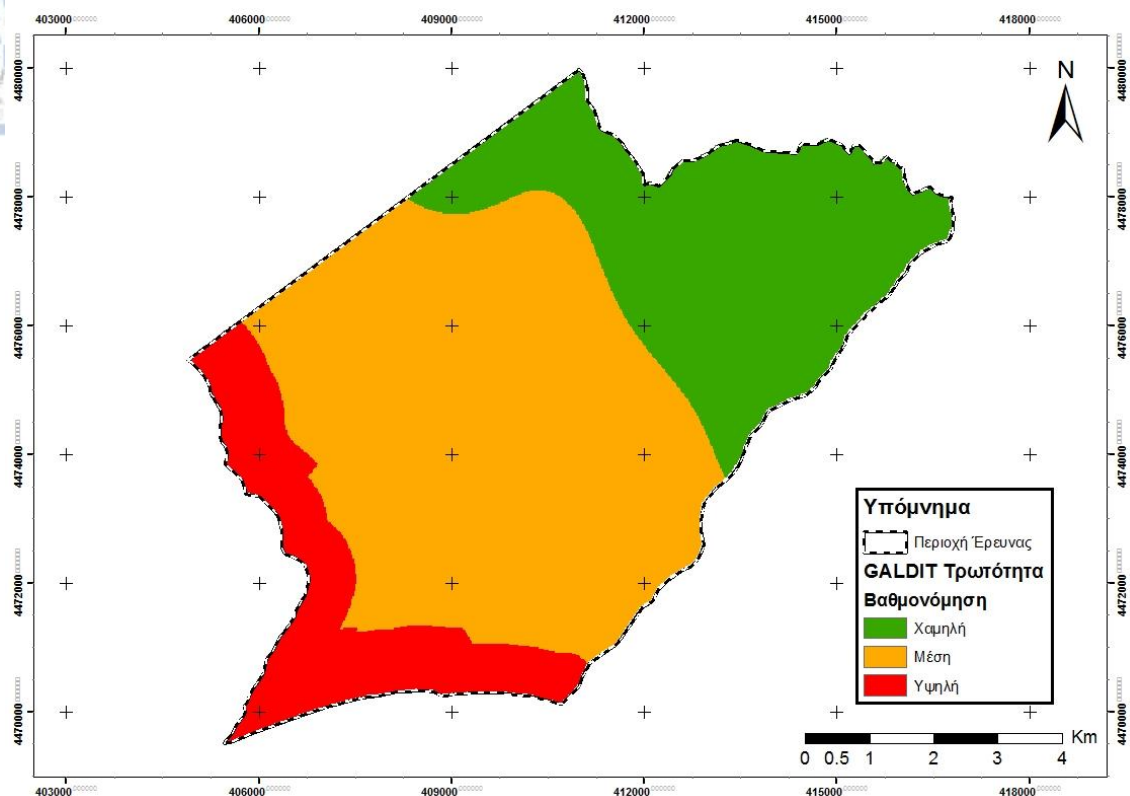
| Πάχος του υδροφορέα-T |           |                                |                         |
|-----------------------|-----------|--------------------------------|-------------------------|
| Χαρακτηρισμός         |           | Τυπική βαθμολογία<br>( Rating) | Χαρακτηριστικό<br>Χρώμα |
| Κλάση                 | Τύπος (m) |                                |                         |
| Υψηλή                 | >10       | 10                             |                         |
| Μέση                  | 7,5-10    | 7,5                            |                         |
| Χαμηλή                | 5-7,5     | 5                              |                         |
| Πολύ χαμηλή           | <5        | 2,5                            |                         |



Σχήμα 22. Θεματικός βαθμονομημένος χάρτης της παραμέτρου T.

#### 4.3.7. Εφαρμογή της μεθόδου GALDIT

Ο υπολογισμός του τελικού χάρτη της τρωτότητας στη θαλάσσια διείσδυση με την μέθοδο GALDIT υλοποιήθηκε με τη σχέση 4.1 και με το λογισμικό G.I.S. ArcMap 10.3. Στον παρακάτω χάρτη (Σχήμα 23) διακρίνεται πως η υψηλή τρωτότητα καταλαμβάνει έκταση 9,58 Km<sup>2</sup> παράλληλα στην ακτογραμμή και πιο συγκεκριμένα το 14,44 % της περιοχής έρευνας. Το 54,87%, της έκτασης χαρακτηρίζεται από μέση τρωτότητα και έχει πλάτος από 3,5 έως 5,5 Km, ενώ στην υπόλοιπη έκταση (30,69 %) η τρωτότητα είναι χαμηλή (Πίνακας 13).



**Σχήμα 23.** Χάρτης τρωτότητας του παράκτιου υδροφορέα της Επανομής στη διεύθυνση του θαλασσινού νερού με τη μέθοδο GALTIT.

**Πίνακας 9.** Συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων της μεθόδου GALTIT.

| Τιμές δείκτη GALTIT | Τρωτότητα | Έκταση (Km <sup>2</sup> ) | Ποσοστό (%) |
|---------------------|-----------|---------------------------|-------------|
| ≥7,5                | Υψηλή     | 9,58                      | 14,44       |
| 5-7,5               | Μέση      | 36,41                     | 54,87       |
| <5                  | Χαμηλή    | 20,36                     | 30,69       |
| Σύνολο              |           | 66,35                     | 100         |

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μέθοδος GALDIT που εφαρμόστηκε στον παράκτιο υδροφορέα της Επανομής, για την εκτίμηση της τρωτότητας στη θαλάσσια διείσδυση, λαμβάνει υπόψη 6 υδρογεωλογικές-χωροταξικές παραμέτρους με διαφορετική βαρύτητα η κάθε μία. Η εφαρμογή της μεθόδου έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία 6 θεματικών χαρτών από τις παραμέτρους της μεθόδου και ένα τελικό χάρτη κατανομής της τρωτότητας. Τα συμπεράσματα προέκυψαν από τη διακύμανση των τιμών και από τη χωρική κατανομή των παραμέτρων και της τρωτότητας.

Σύμφωνα με τον τελικό χάρτη, εμφανίζεται μείωση της τρωτότητας από την ακτή προς την ενδοχώρα. Οι υψηλές τιμές εμφανίζονται κατά μήκος και παράλληλα της παράκτιας ζώνης δηλαδή νοτιοδυτικά, ενώ σταδιακά η τρωτότητα μειώνεται και έπειτα παίρνει χαμηλές τιμές προς τα βορειοανατολικά της περιοχής έρευνας. Επίσης, διαπιστώνεται ότι οι ενδιάμεσες τιμές της μέσης τρωτότητας καταλαμβάνουν τη μεγαλύτερη έκταση.

Τα παραπάνω αποτελέσματα επισημαίνουν πώς ο παράκτιος υδροφορέας παρουσιάζει υψηλή τρωτότητα στο παράκτιο τμήμα του και κρίνεται απαραίτητη η λήψη μέτρων για την αποφυγή της περαιτέρω εξάπλωσης της υφαλμύρισης του υπόγειου νερού.

Γενικά, οι χάρτες τρωτότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εργαλεία και οδηγοί για την προστασία των υπόγειων υδάτων και για τον σχεδιασμό μεθόδων πρόληψης και αντιμετώπισης του φαινομένου της υφαλμύρισης, όμως πρέπει να συνοδεύονται από έρευνες πεδίου, διότι δεν μπορούν να τις αντικαταστήσουν.

- Aller, L., T., Bennet, J., Lehr, R., Petty, G., & Hackett. (1987). DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological setting. *US Environmental Protection Agency*, 163.
- Civita, M. (1994). *Le carte della vulnerabilita degli acquiferi all' inquinamento. Teoria & pratica. (Aquifer vulnerability maps to pollution)*. Bologna (in Italian): Pitarora Ed.
- Civita, M., & Regibus, C. (1995). *Sperimentazione di alcune metodologie per la valutazione della vulnerabilita degli acquiferi. Quaderni di Geologia Applicata*. Bologna (in Italian): Pitarora Ed.
- Demek, J. (1972). Manual of Daitailed Geomorphological Mapping. *Academia, Prague*, 344.
- Dikau, R. (1989). The application of a digital relief model to landform analysis. In: Reper, J. F. (ed.) 1989. *Three dimensional applications in Geographical Information Systems.*, pp. 51-77.
- Ferreira, L., Chachadi, A., Diamantino, C., & Henriques, M. (2005). Assessing aquifer vulnerability to seawater intrusion using GALDIT method: Part 1 - Application to the Portuguese Aquifer of Monte Gordo. *Proceeding of the 4th InterCeltic Colloquium on Hydrology and Management of "Water in Celtic Countries: Quantity, Quality and Climate Variability"* (pp. 161-171). Guimaraes, Portugal: eds. J.P. Lobo Ferreira and Jose M. P. Vieira, held at Universidade di Minho. Retrieved from <http://www.iahs.info/>, IAHS (International Association of Hydrological Sciences), (<http://www.aprh.pt/celtico/PAPERS/25.PDF>)
- Foster., S. (1987). Vulnerability of soil and groundwater to pollution. *Hydrol Proc Inf.* 20(17), pp. 116-21.
- Kabbour, B., Zouhri, L., Mania, J., & Colbeaux, J. (2006). Assesing groundwater contamination risk using the DASTI/IDRISI GIS method: coastal system of the western Mamora, Marocco. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* , 463-470.
- Kazakis, N., Pavlou , A., Vargmezis, G., Voudouris, K., Soulios, G., Pliakas, F., & Tsokas, G. (2016). Seawater intrusion mapping using electrical resistivity tomography and hydrochemical data. An application in the coastal area of eastern Thermaikos Gulf, Greece. *Science of the Total Environment*, pp. 373-387.

- Kazakis, N., Spiliotis, M., Voudouris, K., Pliakas, F., & Papadopoulos, B. (2018). A fuzzy multicriteria categorization of the GALDIT method to assess seawater intrusion vulnerability of coastal aquifers. *Science of the Total Environment*, pp. 524-534.
- Lobo-Ferreira, J., Chachadi, A., Diamantino, C., & Henriques, M. (2005). Assessing aquifer vulnerability to seawater intrusion using GALDIT Method. Part 1: application to the Portuguese aquifer of Monte Gordo.
- Margat, J. (1968). *Groundwater vulnerability maps, conception-estimation-mapping (in French)*. EEC Institut Europeen de l' Eau, Paris, France.
- Van Stempvoort, D., Evert, L., & Wassenaar, L. (1992). *Aquifer Vulnerability Index: A GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping*. *Canadian Water Resources Journal*.
- Van Stempvoort, D., Evert, L., & Wassenaar, L. (1992). Aquifer Vulnerability Index: A GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Canadian Water Resources Journal*, 18. pp. 25-37.
- Vrba, J., & Zaporozec, A. (1994). *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*. Int Contrib Hydrol.

#### Ελληνική Βιβλιογραφία

- Βενετσάνου, Π., Καζάκης, Ν., Αναστασοπούλου, Χ., Κολοκυθά, Ε., & Βουδούρης, Κ. (2014). Εκτίμηση των επιπτώσεων των κλιματικών αλλαγών στο ισοζύγιο των υπόγειων νερών με τη χρήση κλιματικών μοντέλων και μοντέλου υπόγειας ροής. Εφαρμογή στο παράκτιο τμήμα Περαίας-Επανομής. *Πρακτικά 10<sup>ου</sup> Διεθνές Υδρογεωλογικό Συνέδριο*. Θεσσαλονίκη.
- Βουδούρης, Κ. (2009). *Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος- Υπόγεια Νερά και Περιβάλλον*. Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Τζιόλας.
- Βουδούρης, Κ. (2014). *Ερευνα υδατικού δυναμικού Δήμου Θερμαϊκού, Νομού Θεσσαλονίκης*. Τελική έκθεση ερευνητικού προγράμματος, Θεσσαλονίκη.
- Βουδούρης, Κ. (2015). *Εκμετάλλευση και διαχείριση υπόγειων νερών*. Θεσσαλονίκη: Τζιόλας.
- Ι.Γ.Μ.Ε. (1969). «Γεωλογικός χάρτης, φύλλο Επανομής», κλίμακας 1: 50.000.
- Ι.Γ.Μ.Ε. (1978). «Γεωλογικός χάρτης, φύλλο Βασιλικών», κλίμακας 1: 50.000.
- Καζάκης, Ν. (2013). *Εκτίμηση της διακινδύνευσης της εξωτερικής ρύπανσης των υπόγειων νερών: εφαρμογή στη λεκάνη του Ανθεμούντα*. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Κουμαντάκης, Ι. (2006). *Γεωλογικά προβλήματα Δήμου Θερμαϊκού και αντιμετώπισή τους*. ΕΜΠ.

Μαρωνίδου, Ι. (2018). *Προγραμματισμός Τοπικής Ανάπτυξης: Place Branding για τον Δήμο Θερμαϊκού*. Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνική Σχολή Τμήματος Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Μουντράκης, Δ. (1985). *Γεωλογία της Ελλάδος*. University Studio Press.

Τσαρούχα, Φ. (2011). *Εκτίμηση τρωτότητας παράκτιων υπόγειων υδροφορέων στη θαλάσσια διεύθυνση. Εφαρμογή στο Δέλτα του Νέστου*. Πτυχιακή Εργασία, Σχολή Περιβάλλοντος, Τμήμα Επιστημών της Θάλασσας, Πανεπιστήμιο Αιγαίου.

#### Διαδικτυακές Πηγές

Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία. (2018, 03 15). *Κλιματικός Άτλαντας της Ελλάδας*.  
Ανάκτηση από <http://climatlas.hnms.gr/sdi/>

ΕΣΥΕ. (2018, 05 20). *Ελληνική Στατιστική Αρχή*. Ανάκτηση από <http://www.statistics.gr/>

Πανόραμα Απογραφικών Δεδομένων. (2018, 05 20). *Πανόραμα Απογραφικών Δεδομένων*.  
Ανάκτηση από <http://panorama.statistics.gr>

Τμήμα Γεωλογίας. (2018, 8 19). *Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης Σχολή Θετικών Επιστημών*. Ανάκτηση από <http://www.geo.auth.gr>

Φωτογραφίες περιοχής έρευνας και γεωτρήσεων





