



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ- ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

<<ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ>>

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ

ΣΕ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΝΔ

ΠΕΔΙΝΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ Ν.ΡΟΔΟΠΗΣ.

ΧΑΤΖΗΤΣΑΟΥΣΗΣ ΔΗΜΟΣΘΕΝΗΣ
ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2014

Επιβλέπων: Ομότιμος Καθηγητής Ι.Κουμαντάκης

**<<ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ>>**

I. ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η μεταπτυχιακή διατριβή που ακολουθεί ασχολείται με το θέμα της θαλάσσιας διείδυσης που εμφανίζεται σε υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες οι οποίοι αναπτύσσονται κοντά στην ακτογραμμή και υφίστανται έντονες αρδευτικές πιέσεις. Τα προβλήματα που προκύπτουν από το φαινόμενο αυτό έχουν άμεσο αντίκτυπο στο περιβάλλον, ενώ μακροπρόθεσμα μπορούν να επηρεάσουν δυσμενώς την οικονομική και κατ' επέκταση κοινωνική ζωή των κατοίκων των περιοχών αυτών.

Η περιοχή μελέτης αποτελεί μια κατ' εξοχήν αγροτική περιοχή με μικρούς διάσπαρτους οικισμούς, τμήμα της πεδιάδας της Ροδόπης, που συμπεριλαμβάνει όλα εκείνα τα χαρακτηριστικά που σταδιακά μπορεί να οδηγήσουν στην εμφάνιση και εξάπλωση του φαινομένου της θαλάσσιας διείδυσης.

Η επιλογή του θέματος αλλά και της συγκεκριμένης περιοχής ως περιοχή μελέτης, ήταν αποτέλεσμα ενός συνδυασμού παραγόντων. Η ολοκλήρωση των προπτυχιακών μου σπουδών ως Μηχανικός Περιβάλλοντος στο Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, η μεγάλη οικειότητα με την περιοχή, καθώς αποτελεί τμήμα της ευρύτερης περιοχής όπου έζησα το μεγαλύτερο κομμάτι της ζωής μου, και το γεγονός ότι η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή έρχεται ως συνέχεια, και με σκοπό την επικαιροποίηση των αποτελεσμάτων της διδακτορικής διατριβής του Λέκτορα των Μεταλλειολόγων Μηχανικών, Ανδρέα Καλλιώρα που έλαβε χώρα κατά το διάστημα 2001 έως 2005 και ασχολήθηκε εκτενώς και εις βάθος με το φαινόμενο της θαλάσσιας διείδυσης είναι οι κυριότεροι λόγοι.

Η ενασχόλησή μου με το συγκεκριμένο θέμα με οδήγησε στο να ευαισθητοποιηθώ ιδιαίτερα για το πρόβλημα της θαλάσσιας διείδυσης που μπορεί να έχει ανεπανόρθωτες συνέπειες. Γνωρίζοντας την οικονομική και κοινωνική δραστηριότητα των μικρών αστικών κέντρων της περιοχής μελέτης είναι δύσκολο να φανταστώ τις συνέπειες που θα είχε η εξάπλωση και ένταση του φαινομένου αυτού, σε βαθμό καταστροφής, στο βιοπορισμό τους.

II. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η συμβολή των ανθρώπων που με στήριξαν στην προσπάθεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής αποδείχθηκε απαραίτητη και καθοριστικής σημασίας, καθώς το αντικείμενο της διαχείρισης των υπόγειων νερών αποτελεί ένα αρκετά επίπονο εγχείρημα το οποίο περιλαμβάνει κόστος χρονικό, οικονομικό και κυρίως πολύ κοπιαστικό. Ο μικρός αριθμός διαθέσιμων στοιχείων υπαίθρου και η έλλειψη ολοκληρωμένου σχεδίου διαχείρισης των υπόγειων υδατικών πόρων από το κράτος αποτελεί επιπλέον περιοριστικό παράγοντα. Για τους παραπάνω λόγους στο σημείο αυτό, θα ήθελα ειλικρινά και εγκάρδια να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στους ανθρώπους που με βοήθησαν κατά την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, με διάφορους τρόπους και σε διάφορα επίπεδα.

Κατ' αρχάς τον Ομότιμο Καθηγητή του Τμήματος Μεταλλειολόγων - Μεταλλουργών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. κ. Ι. Κουμαντάκη, κυρίως για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου η οποία εκφράστηκε με την ανάθεση του θέματος της μεταπτυχιακής διατριβής αλλά και για την αμέριστη βοήθεια και συμπαράσταση του.

Τον Λέκτορα Μεταλλειολόγων - Μεταλλουργών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. κ. Α. Καλλιώρα για την καθοριστική καθοδήγησή του σε όλα τα επίπεδα της εν λόγω μεταπτυχιακής διατριβής, τη μεγάλη προθυμία του να συνεισφέρει ουσιαστικά στην εκπόνησή της, τη συναδελφικότητα και φιλικότητα που μου έδειξε σε όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας. Ουσιαστικά η εκπόνηση αυτής της διατριβής δεν θα είχε ολοκληρωθεί χωρίς την αμέριστη βοήθειά του. Ειλικρινές και πραγματικό ευχαριστώ.

Τον Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Δ.Π.Θ. κ. Φ. Πλιάκα, για την παροχή απαραίτητου εργαστηριακού εξοπλισμού για τη διεξαγωγή των μετρήσεων υπαίθρου, τη φιλικότητά του και την διάθεση να με βοηθήσει κατά τη διάρκεια παραμονής μου στην πόλη της Ξάνθης.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον Χημικό Τεχνολόγο, Ε.Τ.Ε.Π. του Εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας του Τμήματος των Πολιτικών Μηχανικών του Δ.Π.Θ. κ. Κ. Ουζούνη, για την καθοριστικότερη βοήθεια που μου παρείχε στο εργαστηριακό κομμάτι της διατριβής, όπου αφιέρωσε προσωπικό για εκτέλεση ειδικών χημικών αναλύσεων των υδατικών δειγμάτων από την περιοχή μελέτης. Η καθοδήγηση και τη μεθοδικότητά του συντέλλεσαν τα μέγιστα σε μια γρήγορη περάτωση των εργασιών και σε μεγάλης ακρίβειας αποτελέσματα.

Τον κ. Ι. Γκιουγκή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Δ.Π.Θ. για την βοήθειά του στην παροχή απαραίτητου εξοπλισμού για τη διεξαγωγή των μετρήσεων υπαίθρου, τις συμβουλές του όσον αφορά το πρακτικό κομμάτι και τη φιλική του διάθεση.

Τις θερμές μου ευχαριστίες εκφράζω στην Τσώνου Δήμητρα συνοδοιπόρο στη ζωή μου, απόφοιτη του Τμήματος Αρχιτεκτόνων Μηχανικών του Δ.Π.Θ. και πλέον εργαζόμενη Αρχιτέκτονα Μηχανικό για την ψυχολογική συμπαράστασή της και τη διαρκή ενθάρρυνση και ώθηση που μου παρείχε στη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διατριβής.

Θερμές ευχαριστίες στους καλούς φίλους μου εκ Παλαιστίνης, Κωνσταντίνο Anchoue και Νικόλαο Mibo, στυλοβάτες στην δημιουργία της παρούσας διατριβής για την παροχή των οχημάτων τους τύπου jeep, χωρίς τα οποία η περιήγηση στους αγροτικούς δρόμους της περιοχής μελέτης θα ήταν κυριολεκτικά αδύνατη.

Τελευταία αλλά προφανώς εξίσου σημαντικά εκφράζω τις εγκάρδιες ευχαριστίες και την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου, για την υποστήριξή τους και την εμπιστοσύνη και την αγάπη τους σε όλα τα επίπεδα.

III. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εκμετάλλευση των υπόγειων νερών για άρδευση των καλλιεργούμενων εκτάσεων, έφερε από πολύ νωρίς στο προσκήνιο προβλήματα που σχετίζονται με τη σωστή διαχείριση των αποθεμάτων γλυκού νερού από ποσοτικής αλλά και από ποιοτικής άποψης. Το γεγονός ότι το μεγαλύτερο μέρος του παγκόσμιου πληθυσμού κατοικεί κοντά σε παράκτιες περιοχές, σε συνδυασμό με την εντατική καλλιέργεια των εδαφών, ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες διαβίωσης, δημιούργησε το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης στους παράκτιους υδροφόρους ορίζοντες, με συνέπειες περιβαλλοντικές αρχικά, οικονομικές και κοινωνικές έπειτα. Η εμφάνιση του φαινομένου αυτού δεν θα μπορούσε να λείπει από τον ελληνικό χώρο λόγω της μορφολογίας του, της δομής των πετρωμάτων του και τα χιλιάδες χιλιόμετρα ακτογραμμών του.

Η περιοχή μελέτης αποτελεί περίπτωση όπου ένας παράκτιος υδροφορέας, εντατικά αντλούμενος για κάλυψη των αρδεύσεων που αναπτύσσεται κοντά στην ακτογραμμή. Βρίσκεται στο νοτιοδυτικό πεδινό τμήμα του νομού Ροδόπης με όρια δυτικά τη λίμνη Βιστωνίδα και τον ποταμό Ασπροπόταμο, ανατολικά τη λίμνη Ισμαρίδα και βόρεια τον άξονα που ενώνει τους οικισμούς Αιγείρου – Παραδημής ενώ νότιο όριο αποτελούν οι λιμνοθάλασσες του Φαναρίου και Αρωγής.

Η περιοχή είναι κυρίως αγροτική με μικρούς διάσπαρτους οικισμούς, μορφολογικό ανάγλυφο ημι-λοφώδες ενώ έχει ένα πλούσιο επιφανειακό υδρολογικό καθεστώς που αποτελείται από τις λίμνες και λιμνοθάλασσες που προαναφέρθηκαν καθώς και ποταμούς αλλά και αρκετούς χείμαρρους σε όλο το μήκος και πλάτος της.

Η περιοχή γεωλογικά φιλοξενεί τεταρτογενείς, πλειοκαινικές, άνω μειοκαινικές αποθέσεις και παλαιογενείς σχηματισμούς ενώ εντάσσεται ευρύτερα, ως προς τις γεωλογικές συνθήκες, στο γεωλογικό περιβάλλον της μάζας της Ροδόπης.

ABSTRACT

Seawater intrusion phenomenon is one of most important environmental problems of coastal areas, especially at those where there is a significant amount of anthropogenic activities related to the exploitation of the groundwater resources. In such cases, the groundwater salinisation takes serious economic as well as social dimensions, except for the direct environmental ones. The majority of the coastal aquifers in Greece, appear to be quantitatively degraded due to the overpumping conditions in which they are subjected, practice which results in qualitative degradation due to the intrusion of seawater.

The area of investigation extends up to 165.1 km², which is almost exclusively used for agricultural activities, apart from a small part which refers to built-up areas. The morphological relief of the study area is mainly semi-hilly to hilly, containing a significant hydrographic network which contributes to the recharge conditions of the study aquifer system.

The investigation of the present doctoral dissertation was carried out under a both quantitative as well as qualitative approach for the characteristics of the investigated aquifer system. The main research activities of the present doctoral dissertation are classified as follows:

- Extensive bibliographical research from scientific textbooks (in Greek and in English, research and/or technical papers from international scientific journals, Collection of existing scientific data (different types of maps),, past doctoral dissertations of the study and the wider area of investigation.
- Definition of a monitoring network of groundwater wells for the quantitative and qualitative characteristics of the aquifer system
- Systematic measurements of groundwater level fluctuations through a monitoring network of approximately 52 groundwater wells, on two periods May and September 2014.
- Eight groundwater samplings from groundwater wells and chemical analyses of chemical characteristics of groundwater samples, trace elements and heavy metals which took place in the Laboratory of Engineering Geology of Civil Engineering Department of Democritus University of Thrace

More precisely, the present doctoral dissertation includes the following:

CHAPTER 1: Introduction and scheduled work on the study area.

CHAPTER 2: Theoretical approach to the phenomenon of seawater intrusion and introduction to the study area.

CHAPTER 3: Presentation and analysis of the geographical framework of the study area.

CHAPTER 4: Geological and geomorphological conditions of the study area.

CHAPTER 5: Hydrologic characteristics and climatology of the study area.

CHAPTER 6: Analysis and interpretation of the hydrogeological characteristics of the study aquifer system.

CHAPTER 7: Analysis and interpretation of the qualitative characteristics of the groundwaters of the investigated aquifer system.

CHAPTER 8: Series of conclusions

Περιεχόμενα

I. ΠΡΟΛΟΓΟΣ	1
II. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	1
III. ΠΕΡΙΛΗΨΗ	2
ABSTRACT	4
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12
1.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	12
1.2 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	12
1.2.1 Αρχική έρευνα.....	12
1.2.2 Καθορισμός και προγραμματισμός εργασιών.....	12
1.2.3 Επεξεργασία των δεδομένων.....	13
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ.....	15
2.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	15
2.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ.....	16
2.3 Η ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΓΛΥΚΟΥ ΚΑΙ ΑΛΜΥΡΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	17
2.3.1 Σχήμα και δομή της διεπιφάνειας.....	19
2.3.2 Άνοδος της διεπιφάνειας.....	21
2.4 ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ ΣΤΗ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ.....	23
2.4.1 Το φαινόμενο της θαλάσσιας διεύσδυσης στην Ελλάδα.....	23
2.4.1.1 Αργολικό πεδίο.....	23
2.4.1.2 Βόρεια Κορινθία.....	23
2.4.1.3 Ανατολική Αττική.....	23
2.4.1.4 Νησιά.....	24
2.4.1.5 Ποτάμια εκβολές.....	24
2.4.2 Περιπτώσεις στη Μεσόγειο.....	26
2.4.2.1 Ιταλία.....	26
2.4.2.2 Τουρκία.....	26
2.4.2.3 Κύπρος.....	26
2.4.2.4 Πορτογαλία.....	26
2.4.2.5 Μαρόκο.....	26
3. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	27
3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	27
3.2. ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ.....	27
3.2.1. Γενικά.....	27
3.2.2. Στοιχεία χρήσεων γης περιοχής μελέτης.....	29
3.3. ΠΛΗΘΥΣΜΙΑΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	31
3.3.1. Γενικά.....	31

3.3.2 Δημογραφικά στοιχεία περιοχής μελέτης.....	31
4. ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΕΣ ΚΑΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	33
4.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	33
4.2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	34
4.2.1. Γεωλογικό Περιβάλλον.....	34
4.2.1.1. Τεταρτογενείς Αποθέσεις	34
4.2.1.2. Πλειοκαινικές αποθέσεις	34
4.2.1.3. Άνω Μειοκαινικές αποθέσεις.....	35
4.2.1.4. Παλαιογενείς σχηματισμοί.....	36
4.2.2. Τεκτονικές συνθήκες περιοχής μελέτης	36
5. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	38
5.1. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ.....	38
5.1.1. Υδρογραφικό δίκτυο περιοχής μελέτης	38
5.1.2. Υγροβιότοπος λίμνης Ισμαρίδας	39
5.1.3. Υγροβιότοπος Ξηρολίμνης.....	40
5.1.4. Υγροβιότοποι λιμνών Καρατζά - Αλυκής.....	40
5.1.5. Υγροβιότοπος λιμνών Πτελέας – Έλους.....	40
5.2. ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	41
5.2.1. Μετεωρολογικοί σταθμοί	41
5.2.2 Βροχομετρικά στοιχεία	43
5.2.3 Υπολογισμός όγκων ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων	49
6. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ	53
6.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	53
6.1.1 Δίκτυο αρδευτικών γεωτρήσεων.....	54
6.1.2. Υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα.....	55
6.2. ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΕΔΙΟΥ	65
6.2.1. Εισαγωγή.....	65
6.2.2 Πιεζομετρικοί χάρτες	68
6.2.3 Υπερετήσεις μεταβολές της πιεζομετρικής επιφάνειας του υδροφορέα	71
6.3 ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	75
6.3.1 Εμπλουτισμός από ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα	75
6.3.2 Εμπλουτισμός από επιστροφές άρδευσης	75
6.3.3. Εμπλουτισμός από από βόρεια παράπλευρη επικοινωνία με τον αλλουβιακό κώνο του ποταμού Κομψάτου.....	76
6.3.4 Απαιτήσεις νερού στην περιοχή μελέτης	76
7. ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	77
7.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	77

7.1.1 Εισαγωγή.....	77
7.1.2 Περιοχή μελέτης.....	78
7.2. ΕΙΔΙΚΗ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΧΗΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑ ΤΟΥΣ ΒΑΣΕΙ ΤΩΝ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΕΡΟΤΥΠΩΝ	83
7.2.1 Τριγραμμικά Διαγράμματα κατά Piper	83
7.2.2 Διάγραμμα Wilcox.....	85
7.2.3 Διάγραμμα Duron.....	86
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	87
9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	92

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1. Κατανομή της έκτασης του Νομού Ροδόπης, της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας & Θράκης και του συνόλου της χώρας (σε km ²) με βάση τη μορφολογία του εδάφους.	-28-
Πίνακας 3.2. Κατανομή της έκτασης του Νομού Ροδόπης, της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας & Θράκης και του συνόλου της χώρας (σε km ²) με βάση τις χρήσεις γης.	-28-
Πίνακας 3.3. Δομημένη έκταση (εκτάσεις κύριων οικισμών) περιοχής έρευνας	-30-
Πίνακας 3.4. Πληθυσμιακή εξέλιξη κατά δήμο και κοινότητα του Νομού Ροδόπης (ΕΣΥ, 2001).	-31-
Πίνακας 5.1. Εκτάσεις κυριότερων λεκανών απορροής της στενής και της ευρύτερης περιοχής έρευνας.	-38-
Πίνακας 5.2. Επεξηγηματικός πίνακας με την αρίθμηση των βροχομετρικών και μετεωρολογικών σταθμών του Νομού Ροδόπης βάσει του σχήματος 5.1.	-42-
Πίνακας 5.3. Οι κυριότερες υδρολογικές λεκάνες του Νομού Ροδόπης.	-42-
Πίνακας 5.4. Ύψη βροχόπτωσης από το βροχομετρικό σταθμό Πόρπης για το διάστημα μεταξύ 1954 και 2013.	-43-
Πίνακας 5.5. Στατιστική επεξεργασία υψών ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (mm) καταγεγραμμένα στο βροχομετρικό σταθμό Πόρπης (Υ.ΠΕ.ΚΑ.) για την περίοδο 1954-2013.	-45-
Πίνακας 5.6. Μηνιαία ύψη βροχής (mm) και στατιστική επεξεργασία τους καταγεγραμμένα από το βροχομετρικό σταθμό Πόρπης (Υ.ΠΕ.ΚΑ.) της περιόδου 2005-2013.	-46-
Πίνακας 5.7. Μέσοι, ελάχιστοι και μέγιστοι μηνιαίοι όγκοι βροχόπτωσης κατά την περίοδο έρευνας (2005-2013).	-51-
Πίνακας 6.1. Τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας (Καλλέργης, 1999)	-56-
Πίνακας 6.2. Υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα της πρώτης ομάδας των δοκιμαστικών αντλήσεων (σύνθεση από Σταματάκη, 1992).	-58-
Πίνακας 6.3. Υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα της δεύτερης ομάδας των δοκιμαστικών αντλήσεων (Από Πεταλά, 1997).	-61-
Πίνακας 6.4. Γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκε μέτρηση στάθμης	-67-
Πίνακας 6.5. Χαρακτηριστικά μέσων μηνιαίων τιμών κατείσδυσης ($\times 10^6$ m ³) για την περίοδο 1954-2013	-75-
Πίνακας 6.6. Είδη καλλιέργειας (Σύνθεση από Ετήσια Δελτία Γεωργικής Στατιστικής, Εθνικής Στατιστικής Υπηρεσίας και μετέπειτα επεξεργασία με δορυφορικές εικόνες και αεροφωτογραφίες της περιοχής έρευνας με έτος λήψης το 2005)	-76-
Πίνακας 7.1. Φυσικοχημικές παράμετροι των υδατικών δειγμάτων	-79-
Πίνακας 7.2. Ολική Σκληρότητα των υδατικών δειγμάτων	-79-
Πίνακας 7.3. Ταξινόμηση του νερού με βάση τη σκληρότητά του.	-80-
Πίνακας 7.4. Κατιόντα των υδατικών δειγμάτων.	-80-
Πίνακας 7.5. Ανιόντα των υδατικών δειγμάτων.	-82-
Πίνακας 7.6. Χημικοί τύποι του νερού των δειγμάτων	-84-

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1. Το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης (τροποποιημένη από Βουδούρης, 2005).	-15-
Σχήμα 2.2. Σχηματική απεικόνιση των αποτελεσμάτων Ghyben-Herzberg.	-17-
Σχήμα 2.3. Το «Πόδι» τη διεπιφάνειας.	-18-
Σχήμα 2.4. Πρότυπο ροής κοντά στην ακτή κατά τον Glover (1964).	-20-
Σχήμα 2.5. Σχηματική απεικόνιση της ανόδου της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού από υπεράντληση.	-21-
Σχήμα 2.6. Άνοδος της διεπιφάνειας μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού κατά τη διάρκεια άντλησης (Essink, 2001).	-22-
Σχήμα 3.1. Ποσοστιαία κατανομή της έκτασης του Νομού Ροδόπης (σε km ²) με βάση τη μορφολογία του εδάφους.	-28-
Σχήμα 3.2. Ποσοστιαία διάρθρωση των εκτάσεων του Νομού Ροδόπης ανάλογα με τη χρήση γης.	-29-
Σχήμα 3.3. Δορυφορική εικόνα της περιοχής έρευνας (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth ©, Καλλιώρας, 2008)	-30-
Σχήμα 3.4. Μεταβολή πληθυσμών της περιοχής έρευνας κατά τα έτη 1971, 1981, 1991 και 2001.	-32-
Σχήμα 3.5. Ποσοστιαία κατανομή πληθυσμών περιοχής έρευνας για το έτος 2001.	-32-
Σχήμα 4.1. Γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης(Καλλιώρας, 2008)	-37-
Σχήμα 5.1. Θέσεις των βροχομετρικών και μετεωρολογικών σταθμών του Νομού Ροδόπης και επισήμανση του βροχομετρικού σταθμού Πόρπης, στην περιοχή έρευνας.(Καλλιώρας 2008)	-41-
Σχήμα 5.2. Διακύμανση της ετήσιας βροχόπτωσης στο βροχομετρικό σταθμό Πόρπης (Υ.ΠΕ.ΚΑ.) για την περίοδο 1954-2013.	-44-
Σχήμα 5.3. Διακύμανση της μέσης, ελάχιστης και μέγιστης μηνιαίας τιμής ύψους βροχόπτωσης (mm) στο βροχομετρικό σταθμό Πόρπης (Υ.ΠΕ.ΚΑ.) για την περίοδο 1954-2013.	-45-
Σχήμα 5.4. Διακύμανση της ετήσιας τιμής ύψους βροχόπτωσης (mm) στο βροχομετρικό σταθμό Πόρπης (Υ.ΠΕ.ΚΑ.) για την περίοδο έρευνας 2005-2013.	-47-
Σχήμα 5.5. Διακύμανση της ετήσιας τιμής ύψους βροχόπτωσης (mm) κατά τη διάρκεια της περιόδου ηρεμίας (Οκτώβριος-Μάρτιος) για την περίοδο 2005-2013.	-48-
Σχήμα 5.6. Διακύμανση της ετήσιας τιμής ύψους βροχόπτωσης (mm) κατά τη διάρκεια της αντλητικής περιόδου (Απρίλιος-Σεπτέμβριος) για την περίοδο 2005-2013.	-49-
Σχήμα 5.7. Διακύμανση μηνιαίου όγκου (m ³ x10 ⁶) βροχοπτώσεων (σταθμός Πόρπης) για την περίοδο 1954-20013.	-50-
Σχήμα 5.8. Διακύμανση ετήσιου όγκου (m ³ x10 ⁶) βροχοπτώσεων για την περίοδο 2005-2013.	-51-
Σχήμα 5.9. Διακύμανση μέσης, ελάχιστης και μέγιστης μηνιαίας τιμής όγκου (m ³) κατακρημνισμάτων για την περίοδο 2005-2013.	-52-
Σχήμα 6.1. Δίκτυο παραγωγικών γεωτρήσεων της περιοχής έρευνας βάσει πραγματικών συντεταγμένων (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth ©, Καλλιώρας, 2008).	-54-

Σχήμα 6.2. Δίκτυο εγκαταλειμμένων γεωτρήσεων της περιοχής έρευνας βάσει πραγματικών συντεταγμένων (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth ©, Καλλιώρας, 2008).	-55-
Σχήμα 6.3. Θέσεις γεωτρήσεων στις οποίες πραγματοποιήθηκαν αντλητικές δοκιμασίες (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth ©, Καλλιώρας 2008).	-57-
Σχήμα 6.4. Χωρική κατανομή τιμής υδραυλικής αγωγιμότητας K_1 ($\times 10^{-5}$ m/sec) (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth ©, Καλλιώρας 2008).	-59-
Σχήμα 6.5. Χωρική κατανομή τιμής μεταβιβαστικότητας T_1 ($\times 10^{-3}$ m ² /sec) (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth ©, Καλλιώρας, 2008).	-60-
Σχήμα 6.6. Χωρική κατανομή υδραυλικής αγωγιμότητας K_2 ($\times 10^{-5}$ m/sec) (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth ©, Καλλιώρας, 2008).	-62-
Σχήμα 6.7. Χωρική κατανομή μεταβιβαστικότητας T_2 ($\times 10^{-3}$ m ² /sec) (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth ©, Καλλιώρας, 2008).	-63-
Σχήμα 6.8. Χωρική κατανομή τιμής υδροχωρητικότητας S_2 ($\times 10^{-4}$ αδιάστατο) (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth ©, Καλλιώρας, 2008).	-64-
Σχήμα 6.9. Δίκτυο γεωτρήσεων όπου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στάθμης κατά τις περιόδους Μάιος και Σεπτέμβριος 2014	-66-
Σχήμα 6.10. Πιεζομετρικός χάρτης της περιοχής έρευνας - Μάιος 2014.	-68-
Σχήμα 6.11. Πιεζομετρικός χάρτης περιοχής έρευνας – Σεπτέμβριος 2014.	-69-
Σχήμα 6.12. Πιεζομετρικός χάρτης της περιοχής έρευνας - Οκτώβριος 2005.	-71-
Σχήμα 6.13. Πιεζομετρικός χάρτης της περιοχής έρευνας - Απρίλιος 2005.	-72-
Σχήμα 6.14 Κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας - Ιούλιος, 2003.	-73-
Σχήμα 6.15. Κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας – Ιούλιος, 2005	-74-
Σχήμα 7.1. Σημεία δειγματοληψίας υπόγειου νερού	-78-
Σχήμα 7.2. Αποτελέσματα σε διάγραμμα Piper για τα 8 σημεία δειγματοληψίας.	-83-
Σχήμα 7.3. Ταξινόμηση των δειγμάτων σε διάγραμμα Wilcox	-85-
Σχήμα 7.4. Ταξινόμηση των δειγμάτων σε διάγραμμα Durov	-86-

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1. Απαραίτητος εξοπλισμός για τις μετρήσεις πεδίου	-14-
Εικόνα 2.1. Περιοχές της Ελλάδας που υπόκεινται στο καθεστώς της θαλάσσιας διείδυσης (Σούλιος, 2004).	-25-
Εικόνα 4.1. Μορφολογικός χάρτης περιοχής έρευνας.(Καλλιώρας, 2008)	-33-
Εικόνα 5.1. Υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής έρευνας (Καλλιώρας, 2008)	-39-

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ως υπαλμύριση του υπόγειου γλυκού νερού ορίζουμε την αύξηση της αλατότητας του που μπορεί να οφείλεται σε μια σειρά παραγόντων όπως η διείσδυση του θαλασσινού νερού στους παράκτιους υδροφορείς, η ύπαρξη ορυκτού άλατος σε αλατούχους δόμους, σε στρώματα μικρού πάχους ή διεσπαρμένο σε γεωλογικούς σχηματισμούς, η συμπύκνωση του νερού λόγω εξάτμισης κυρίως σε ελώδεις παράκτιες περιοχές, οι επιστροφές άρδευσης σε υδρορεύματα και τα ανθρωπογενή αλμυρά απόβλητα ενώ σπανιότερα λόγω ύπαρξης απολιθωμένου θαλασσινού νερού από εγκλωβισμό του σε παλιές γεωλογικές περιόδους.

Η υπαλμύριση που οφείλεται στην θαλάσσια διείσδυση έχει ένα ξεχωριστό χαρακτηριστικό σε σχέση με τις υπόλοιπες, καθώς οφείλεται κατά κύριο λόγο σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες όπως οι εντατικές αντλήσεις υπόγειου νερού μέσω των αρδευτικών γεωτρήσεων που προκαλούν ή επιταχύνουν τη διείσδυση του θαλασσινού νερού μέσα στους παράκτιους υδροφορείς.

Το φαινόμενο της υπαλμύρισης μπορεί να έχει άμεσες συνέπειες, όμως μεγαλύτερο πρόβλημα θεωρούνται οι μακροχρόνιες επιπτώσεις που αργά αλλά σταθερά, οδηγούν στη συνολική αλλοίωση των ποιοτικών χαρακτηριστικών της περιοχής όπου συμβαίνει το φαινόμενο. Η μακροχρόνια χρήση του υφάλμυρου νερού για αρδεύσεις καλλιεργειών έχει ως συνέπεια τη συσσώρευση αλάτων Na^+ στο έδαφος, αποτέλεσμα ιοντοανταλλαγής μεταξύ Na^+ του υφάλμυρου νερού και του Ca^{++} του εδάφους, με τελικό αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός κρυσταλλικού πλέγματος που καθιστά τα εδάφη άγονα.

1.2 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

1.2.1 Αρχική έρευνα

Το αρχικό στάδιο έρευνας περιλαμβάνει τη συλλογή υλικού και χαρτών που αφορούν στην περιοχή μελέτης με σκοπό την καταγραφή και παρουσίαση των υδρολογικών, γεωλογικών, μορφολογικών και λοιπών χαρακτηριστικών της. Αναζητήθηκε επίσης βιβλιογραφικό υλικό, ελληνικό και ξενόγλωσσο, που ασχολείται με το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης σε παράκτια υδροφόρα συστήματα για την εξοικείωση με παρόμοιες περιπτώσεις ανά την Ελλάδα και τη Μεσόγειο αλλά και την πλήρη κατανόηση των μηχανισμών που συμβαίνουν κατά τη δημιουργία και εξάπλωση του φαινομένου αυτού.

1.2.2 Καθορισμός και προγραμματισμός εργασιών

Από το πλήρως χαρτογραφημένο δίκτυο άνω των 600 αρδευτικών γεωτρήσεων που βρίσκεται στην περιοχή μελέτης, το οποίο δημιουργήθηκε με χρήση δεδομένων GPS και συνδέθηκε με εγγεγραμμένους (register) χάρτες, και δημιουργήθηκε για τη διδακτορική διατριβή του Λέκτορα των Μεταλλειολόγων Μηχανικών Ανδρέα Καλλιώρα και έλαβε χώρα κατά το διάστημα 2001 – 2005, επιλέχθηκαν 52 γεωτρήσεις για την παρακολούθηση της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα.

Η διαδικασία της μέτρησης επιλέχθηκε να γίνει σε δύο διαστήματα εντός του έτους 2014. Ειδικότερα, η πρώτη μέτρηση το μήνα Μάιο δηλαδή την περίοδο της υψηλής στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, που οφείλεται στους χειμερινούς υγρότερους μήνες του έτους και στα έντονα ανοιξιάτικα κατακρημνίσματα και πριν την έναρξη των καλοκαιρινών αρδεύσεων των καλλιεργειών, και η δεύτερη το μήνα Σεπτέμβριο δηλαδή την περίοδο της χαμηλής στάθμης, μετά το πέρας των αρδεύσεων όταν έχει αντληθεί το μεγαλύτερο μέρος του υπόγειου νερού αλλά και του καλοκαιριού όπου επικρατούν ξηρότερες συνθήκες με μικρές ποσότητες κατακρημνισμάτων που εμπλουτίζουν τον υδροφόρο.

Ακόμη αναζητήθηκαν από τις αρμόδιες τοπικές υπηρεσίες του Υ.ΠΕ.Κ.Α στην πόλη της Κομοτηνής, κλιματολογικά δεδομένα για την περίοδο 2008 – 2013 από τους μετεωρολογικούς σταθμούς που βρίσκονται στην περιοχή μελέτης με σκοπό την ανάλυση και επεξεργασία τους, καθώς επίσης και δημογραφικά στοιχεία εξέλιξης του πληθυσμού των οικισμών που αναπτύσσονται εκεί.

Παράλληλα με τη μέτρηση της στάθμης ήταν σημαντική και η εκτίμηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του υπόγειου νερού του υδροφόρου, γεγονός το οποίο επέβαλλε μια δειγματοληψία μέσω άντλησης από αρδευτικές γεωτρήσεις της περιοχής μελέτης. Ακολούθησε η ανάλυσή τους σε εργαστήριο για τον προσδιορισμό των χημικών στοιχείων που συνδέονται με την θαλάσσια διείσδυση στον υδροφόρο όπως χλωριόντα, ιόντα νατρίου αλλά και φυσικές παραμέτρους που υποδεικνύουν το φαινόμενο όπως η ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τη διεκπεραίωση όλων των προαναφερθέντων εργασιών χορηγήθηκε από το Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης και συγκεκριμένα από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της πολυτεχνικής σχολής Ξάνθης. Ο εξοπλισμός περιλαμβάνει ένα σύστημα εντοπισμού θέσης (GPS) της εταιρείας Garmin στο οποίο ενσωματώθηκαν οι γεωγραφικές συντεταγμένες των 52 γεωτρήσεων με σκοπό την προσέγγισή τους, ένα ηλεκτρικό σταθμόμετρο για τη μέτρηση της στάθμης του υπόγειου νερού, ένα αγωγιμόμετρο της WTW για επιτόπια μέτρηση των φυσικοχημικών παραμέτρων του δείγματος και δοχεία για την δειγματοληψία. Χρειάστηκαν επίσης και δύο οχήματα τύπου τζιπ για την κίνηση μέσα σε ένα ευρύ δίκτυο αγροτικών δρόμων τα οποία παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν.

1.2.3 Επεξεργασία των δεδομένων

Ο στόχος της επεξεργασίας των δεδομένων των προαναφερθέντων εργασιών είναι η δημιουργία μιας βάσης που θα δίνει μια συνολική εικόνα της εξέλιξης του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης στην περιοχή μελέτης. Οι μετρήσεις της στάθμης του υπόγειου νερού στον υδροφόρο ορίζοντα έγιναν με σκοπό την κατασκευή ιστοπιεζομετρικών χαρτών και διαγραμμάτων απεικόνισης της πιεζομετρικής επιφάνειας σε κατά μήκος άξονες που ξεκινούν από την διεπιφάνεια στεριάς-θάλασσας και καταλήγουν στα βορειότερα τμήματα της περιοχής μελέτης ώστε για τις δύο περιόδους μέτρησης να αντληθούν συμπεράσματα για την κίνηση των υπόγειων νερών, τα σημεία εμπλουτισμού αλλά και απόληψης.

Η επεξεργασία των κλιματολογικών δεδομένων και κυρίως των κατακρημνισμάτων που δέχεται η περιοχή μελέτης, αποσκοπεί στη εκτίμηση ενός ετήσιου υδατικού ισοζυγίου καθώς αποτελούν τον κύριο τρόπο φυσικού εμπλουτισμού του υπόγειου υδροφόρου. Συνυπολογίζοντας και άλλες πηγές εμπλουτισμού όπως η επιστροφή των αρδεύσεων, οι διηθήσεις των επιφανειακών υδατικών σωμάτων (χείμαρροι) της περιοχής, η παράπλευρη επικοινωνία με τον αλλουβιακό κώνο του ποταμού Κομψάτου που αποτελεί και δυτικό

γεωγραφικό όριο της περιοχής μελέτης καθώς και το τεταρτογενές υδροφόρο σύστημα που αναπτύσσεται στα ανατολικά της περιοχής.

Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των ανωτέρω δεδομένων αποσκοπούν στην εκτίμηση της έντασης του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης, της ποιότητας του υπόγειου νερού με το οποίο τελικά αρδεύονται οι μεγάλης κλίμακας καλλιέργειες της περιοχής μελέτης καθώς και οι επιπτώσεις της υφαλμύρισης του υπόγειου υδροφορέα σε οικονομικό και κοινωνικό επίπεδο άμεσα αλλά και μακροπρόθεσμα.



Εικόνα 1.1. Απαραίτητος εξοπλισμός για τις μετρήσεις πεδίου.

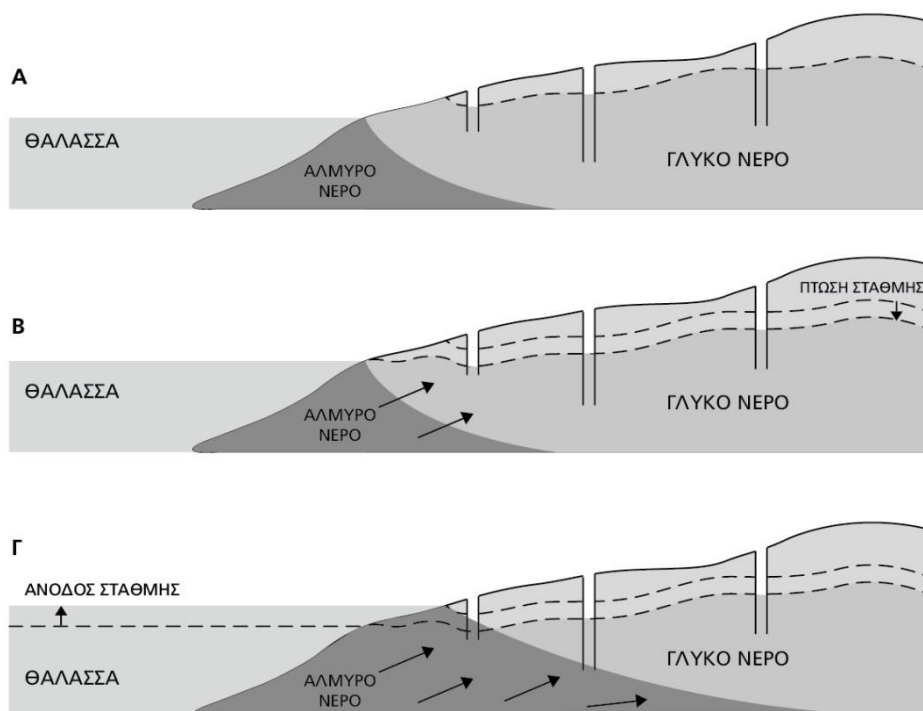
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στα αδιατάρακτα παράκτια υδροφόρα συστήματα, η συνήθης φυσική πορεία του υπόγειου νερού είναι η στράγγισή τους στη θάλασσα μέσω του υπεδάφους καθώς η κλίση του εδάφους τα οδηγεί προς τα χαμηλότερα υψόμετρα. Το γλυκό νερό συναντά το αλμυρό θαλασσινό και η αλληλεπίδρασή τους γίνεται μέσω μιας δυναμικής διεπιφάνειας η οποία έχει τη μορφή μεταβατικής ζώνης και μπορεί να έχει πλάτος της τάξης κάποιων μέτρων. Η ζώνη αυτή ονομάζεται ζώνη διάφασης ή διάχυσης και αποτελείται από υφάλμυρο νερό, αποτέλεσμα των φυσικοχημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα εκεί, όπως η μοριακή διάχυση ιόντων χλωρίου από το θαλασσινό προς το γλυκό νερό.

Η μετάβαση από το γλυκό στο αλμυρό νερό ενδέχεται να χαρακτηρίζεται ανάλογα με τις υδραυλικές συνθήκες του κάθε υδροφορέα από σχετικά απότομη μετάβαση (sharp-front) ή από μια ευρεία ζώνη υφάλμυρου νερού (dispersion zone) χαμηλών σχετικά συγκεντρώσεων που χαρακτηρίζεται ως μεταβατική ζώνη διασποράς. (Καλλιώρας, 2008)

Είναι ευνόητο πως σε παράκτια υδροφόρα συστήματα που δέχονται έντονη ανθρώπινη πίεση όπως η συστηματική υπεράντληση για άρδευση των καλλιεργειών, η ισορροπία της διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού διαταράσσεται. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι και το υπερκείμενο γλυκό νερό του υδροφορέα εμπλουτίζεται με ιόντα χλωρίου και νατρίου, μετατρέπεται σταδιακά σε υφάλμυρο και η χρήση του γίνεται αποτρεπτική αν όχι απαγορευτική όσον αφορά στην άρδευση καλλιεργειών.



Σχήμα 2.1. Το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης (τροποποιημένη από Βουδούρης, 2005)

2.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ

Οι W. Badon-Ghyben (1888) και A. Herzberg (1901) μελέτησαν το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης σε παράκτια υδροφόρα συστήματα της βόρειας Ευρώπης και ειδικότερα τη διεπιφάνεια που σχηματίζεται μεταξύ του γλυκού και αλμυρού νερού. Για την προσέγγιση του φαινομένου ακολούθησαν μια σειρά από απλοποιητικές παραδοχές όπως:

- α) Η διεπιφάνεια του γλυκού – αλμυρού νερού είναι διακριτή σαν μια λωρίδα και όχι ζώνη μετάβασης
- β) Η κατάσταση της διεπιφάνειας είναι στατική και όχι σε δυναμική ισορροπία
- γ) Ο υδροφόρος ορίζοντας είναι ομοιογενής σε όλη την επιφάνειά του
- δ) Η υδροδυναμική διασπορά είναι αμελητέα
- ε) Η ροή του νερού του υπόγειου υδροφορέα προς τη θάλασσα είναι οριζόντια ενώ η κατακόρυφη κίνηση θεωρείται αμελητέα
- στ) Η στήλη του θαλασσινού νερού είναι στάσιμη

Παραδεχόμενοι την ύπαρξη υδροστατικής ισορροπίας μεταξύ της στήλης του γλυκού και του αλμυρού νερού κατέληξαν στην παρακάτω σχέση:

$$P_1 = P_2 \rightarrow$$

$$(z + h) * \rho_\gamma = z * \rho_\theta \rightarrow$$

$$z = \left(\frac{\rho_\gamma}{\rho_\gamma - \rho_\theta} \right) * h$$

όπου:

z : το βάθος (m) της διεπιφάνειας κάτω από τη μέση στάθμη της θάλασσας

h : η ανύψωση της υδροστατικής στάθμης (m) πάνω από τη μέση στάθμη της θάλασσας

ρ_γ : η πυκνότητα του γλυκού νερού

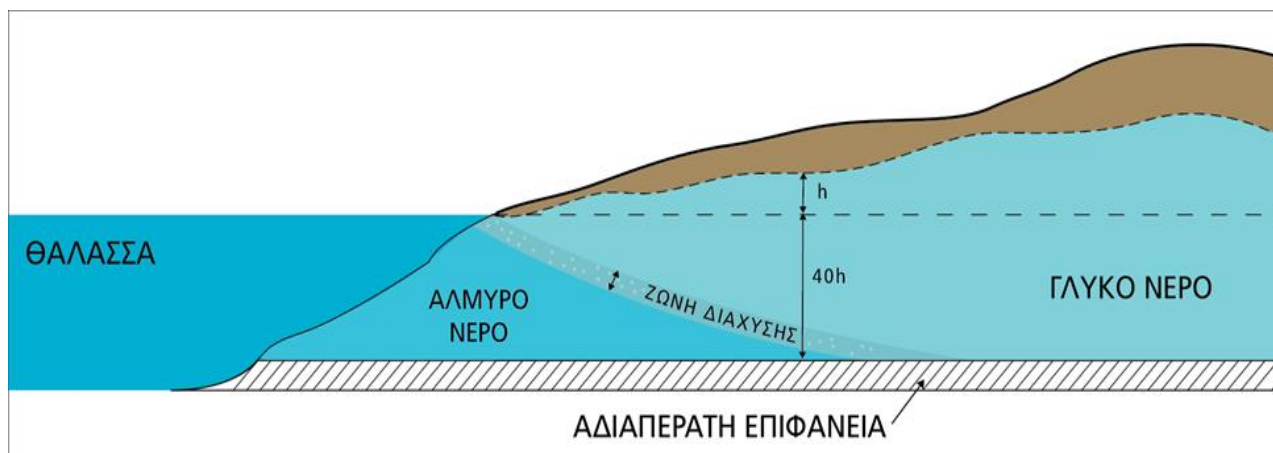
ρ_θ : η πυκνότητα του θαλασσινού νερού

Αντικαθιστώντας τυπικές τιμές της πυκνότητας του γλυκού ($\sim 1000 \text{kg/m}^3$) και θαλασσινού νερού ($\sim 1025 \text{kg/m}^3$), προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$z = 40 * h$$

Αυτό που προκύπτει από την παραπάνω ανάλυση, που αναφέρεται στην επιστημονική βιβλιογραφία ως εξίσωση Ghyben-Herzberg, είναι ότι το ύψος της στήλης νερού του υδροφορέα που βρίσκεται κάτω από τη μέση στάθμη της θάλασσας είναι 40 φορές μεγαλύτερο από το ύψος της στήλης του νερού που βρίσκεται πάνω από αυτή. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης μπορεί να γίνει πολύ έντονο, καθώς ακόμη και για πτώση στάθμης του υπόγειου υδροφορέα της τάξης του 1 m, η στήλη του νερού κάτω από τη μέση στάθμη της θάλασσας θα σημειώσει

αντίστοιχα πτώση της τάξης των 40 m ή με άλλα λόγια η διεπιφάνεια γλυκού αλμυρού νερού θα ανέβει προς την επιφάνεια κατά 40 m.



Σχήμα 2.2. Σχηματική απεικόνιση των αποτελεσμάτων Ghyben-Herzberg.

Από το σημείο τομής της διεπιφάνειας με το στεγανό τμήμα του πυθμένα και το μήκος αυτού έως το σημείο τομής της διεπιφάνειας με τη θάλασσα ονομάζεται «πόδι» της διεπιφάνειας (toe of interface). Το μήκος του «ποδιού» αυξάνεται αντίστροφα με τη στάθμη του νερού ενός υπόγειου παράκτιου υδροφόρου ορίζοντα. Η πτώση της στάθμης οδηγεί σε αύξηση του μήκους του «ποδιού» και συνεπώς στην εισχώρηση του αλμυρού νερού προς τα ανάντη της στεριάς.

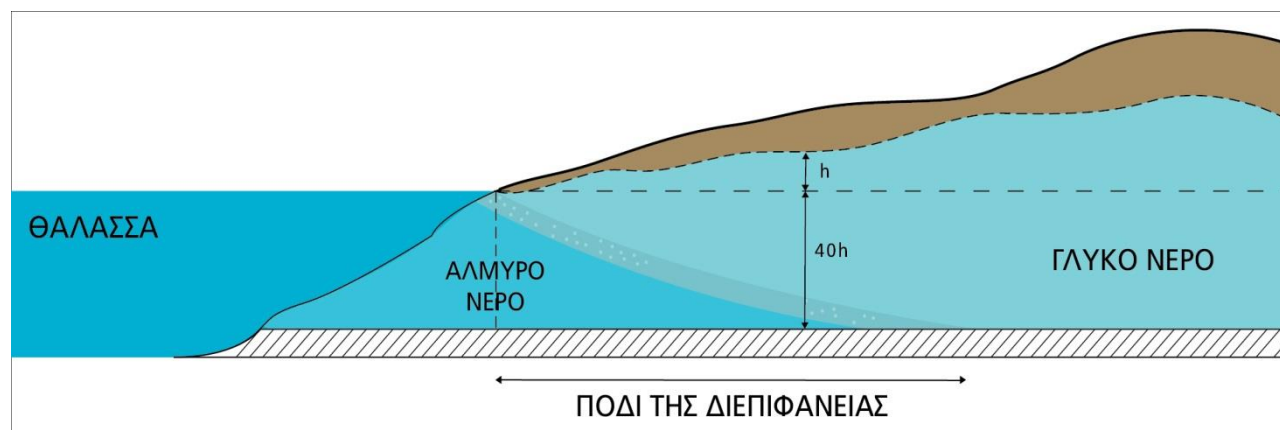
Μεταγενέστερες μελέτες πάνω στην κίνηση του υπόγειου νερού σε παράκτιους υδροφορείς και ειδικότερα στα χαρακτηριστικά της διεπιφάνειας του γλυκού – αλμυρού νερού (Hubbert, 1940) απέδειξαν ότι κάποιες από τις απλοποιητικές παραδοχές της εξίσωσης Ghyben-Herzberg δεν ισχύουν. Το γεγονός ότι η ροή του υπόγειου νερού προς τη θάλασσα δεν γίνεται μόνο κατά την οριζόντια διεύθυνση καθώς υπάρχει σημαντική κατακόρυφη κίνηση ειδικότερα κοντά στην εκβολή προς τη θάλασσα όπως επίσης ότι η διεπιφάνεια γλυκού και αλμυρού νερού δεν είναι μια διακριτή στενή λωρίδα είναι κάποιες από αυτές.

2.3 Η ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΓΛΥΚΟΥ ΚΑΙ ΑΛΜΥΡΟΥ ΝΕΡΟΥ

Ο Cooper (1959) αναφέρει ότι η στήλη του αλμυρού νερού που υπόκειται του γλυκού δεν είναι στατική αλλά ουσιαστικά ρέει από τον πυθμένα της θάλασσας διαρκώς σε αμφίδρομη κίνηση προς και από τη στεριά. Η επαφή της θάλασσας με τη στήλη του γλυκού νερού δημιουργεί τη ζώνη διάχυσης, μια μεταβατική ζώνη με υφάλμυρο νερό, η οποία κάτω από την επίδραση φυσικών και ανθρωπογενών παραγόντων μπορεί να αλλάζει έντονα τα χαρακτηριστικά της, όπως το πάχος που καταλαμβάνει και η συγκέντρωση της αλατότητάς της. Το πάχος της ζώνης διάχυσης που όπως προαναφέρθηκε ονομάζεται και ζώνη μετάβασης μπορεί να κυμαίνεται από λίγα έως και εκατοντάδες μέτρα ανάλογα με τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υπόγειου υδροφορέα.

Οι φυσικοί παράγοντες που οδηγούν στη μεταβολή των χαρακτηριστικών της ζώνης διάχυσης είναι τα παλιρροιακά φαινόμενα που αυξομειώνουν τη στάθμη της θάλασσας στις περιοχές που συμβαίνουν, οι διαδικασίες θερμικής διάχυσης όπου με την άνοδο της θερμοκρασίας προκαλείται ισχυρότερη ιοντοανταλλαγή και η μοριακή διάχυση

που συμπληρώνει τη μίξη του γλυκού και αλμυρού νερού. Οι αναθρωπογενείς παράγοντες περιορίζονται στο βαθμό χρήσης του υπόγειου νερού μέσω των αρδευτικών γεωτρήσεων. Καθώς μεταβάλλεται η στάθμη του υπόγειου νερού, οι υδροδυναμικές συνθήκες ευνοούν τη μετακίνηση της υφάλμυρης ζώνης διάχυσης προς τα ανάντη με αποτέλεσμα την επιρροή και ρύπανση περισσότερων ποσοτήτων γλυκού νερού.



Σχήμα 2.3. Το «Πόδι» τη διεπιφάνειας.

Ο Glover (1964) δημιούργησε ένα μοντέλο για να κατανοήσει την μορφή της διεπιφάνειας μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού από το οποίο μεταγενέστερα προέκυψαν από τους Todd and Mays (2005) οι παρακάτω εξισώσεις που υπολογίζουν τις συντεταγμένες (x,z) αυτής:

$$z = \sqrt{\frac{2\rho q'x}{\Delta\rho K} + \left(\frac{\rho q'}{\Delta\rho K}\right)^2}$$

Όπου:

q' : η εκροή του υδροφορέα στην ακτή, ανά μονάδα μήκους

$\Delta\rho$: η διαφορά πυκνότητας μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού

K : ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας

Το πάχος του μετώπου εκροής, X_0 μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση (Todd and Mays, 2005):

$$X_0 = \frac{\rho q'}{2\Delta\rho K}$$

Το ύψος h της υδροστατικής στάθμης του υδροφορέα σε απόσταση x από την ακτή δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$h = \sqrt{\frac{2\Delta\rho q'x}{(\rho + \Delta\rho)K}}$$

2.3.1 Σχήμα και δομή της διεπιφάνειας

Σημαντική πληροφορία σε ότι αφορά στη δομή και το σχήμα της διεπιφάνειας του γλυκού και αλμυρού νερού έδωσαν οι Rumer and Harleman (1963) που ασχολήθηκαν εκτενώς με το θέμα αυτό. Είναι οι πρώτοι που μίλησαν για παραβολική μορφή της ζώνης διάχυσης, ενώ εξήγαγαν τις παρακάτω εξισώσεις που την περιγράφουν:

$$Y = \sqrt{2\left(\frac{q'}{K'}\right)x + 0,55\left(\frac{q'}{K'}\right)^2}$$

Όπου:

$$K' = K \frac{\rho_\theta - \rho_\gamma}{\rho_\gamma}$$

Ακολουθεί η εξίσωση που δίνει το μήκος L της θαλάσσιας διείδυσης συναρτήσει του πάχους του υδροφορέα:

$$L = \frac{K'H^2}{2q}, \quad \text{όταν } L > H$$

Το (1964) ήταν ο Glover αυτός που περιέγραψε με λεπτομέρεια και σαφήνεια το σχήμα της διεπιφάνειας μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού έπειτα από έρευνα σε παράκτιους υδροφορείς της Αμερικής. Ο Glover, στην ανάλυση που παρουσίασε είχε διαφοροποίηση ως προς βασικές παραδοχές άλλων μαθηματικών σχέσεων που είχαν εξαχθεί για να περιγράψουν το φαινόμενο όπως ότι, πρώτον η διεπιφάνεια αποτελεί μια στενή λωρίδα και όχι μια ζώνη μετάβασης από το γλυκό στο αλμυρό θαλασσινό νερό, δηλαδή με αμελητέο πάχος και δεύτερον ότι η στάθμη του παράκτιου υδροφορέα και η μέση στάθμη της θάλασσας συμπίπτουν ακριβώς στην ακτογραμμή, όπου η υδροστατική πίεση και των δυο στο σημείο αυτό είναι ίση με μηδέν.

Η προσέγγιση του προβλήματος κατά το Glover (1964), έγκειται στη θεώρηση ότι κατά τη διάρκεια του φαινομένου λαμβάνει χώρα υπόγεια εκροή γλυκού νερού από τον υπόγειο παράκτιο υδροφορέα, σε σημείο κάτω από το μέσο επίπεδο της θάλασσας. (Καλλιώρας, 2008).

Η θέση της διεπιφάνειας ανάμεσα στο γλυκό και αλμυρό νερό καθορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$z^2 = \frac{2q'x\rho_\gamma}{K(\rho_\theta - \rho_\gamma)} + \left(\frac{q'\rho_\gamma}{K(\rho_\theta - \rho_\gamma)}\right)^2$$

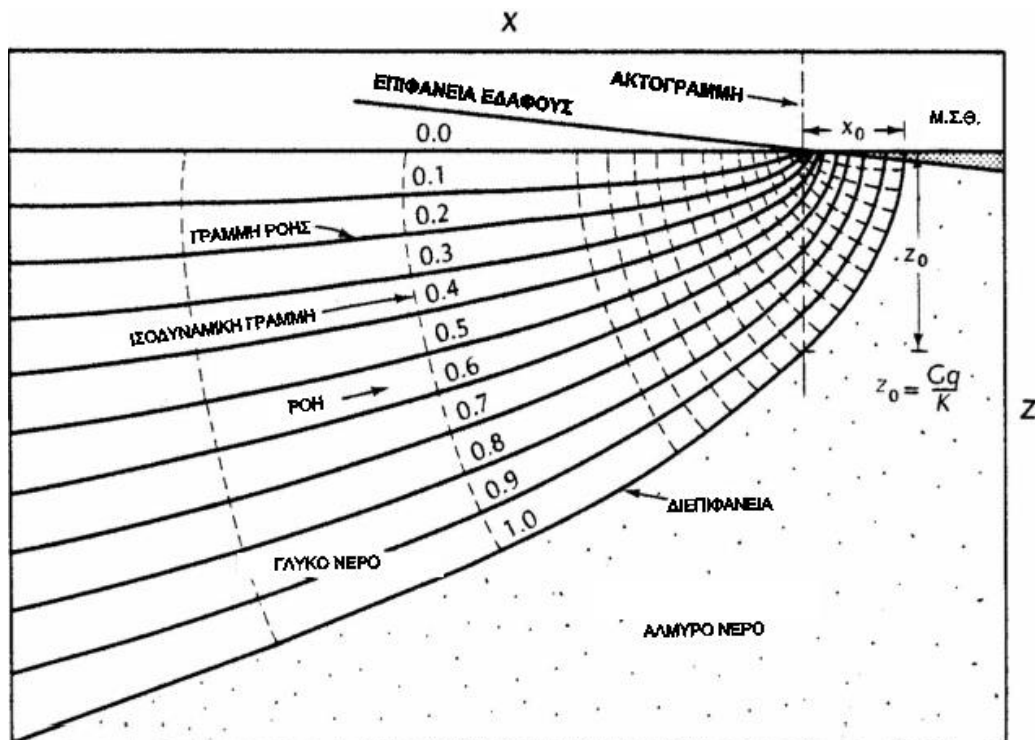
Εξίσωση (Domenico *et. al.*, 1990) που περιγράφει το βάθος που βρίσκεται η διεπιφάνεια ανάμεσα στο γλυκό και αλμυρό νερό σε σχέση με την οριζόντια απόσταση x από την ακτογραμμή.

Όπου:

z : το βάθος της διεπιφάνειας κάτω από το μέσο επίπεδο της θάλασσας

x : η οριζόντια απόσταση από την ακτογραμμή

q' : είναι η ροή του γλυκού νερού ανά μονάδα μήκους της ακτογραμμής



Σχήμα 2.4. Πρότυπο ροής κοντά στην ακτή κατά τον Glover (1964).

Η παραπάνω σχέση επεκτάθηκε ώστε μπορεί να υπολογιστεί το πλάτος του μετώπου εκροής γλυκού νερού προς τη θάλασσα θέτοντας βάθος z ίσο με μηδέν (Domenico *et. Al.*, 1990):

$$X_0 = -\frac{q'\rho_\gamma}{2K(\rho_\theta - \rho_\gamma)}$$

Αν θέσουμε την οριζόντια απόσταση $x=0$ στην αρχική σχέση μπορούμε να υπολογίσουμε το βάθος της διεπιφάνειας (από τη μέση στάθμη της θάλασσας) πάνω στην ακτογραμμή (Domenico et. al., 1990):

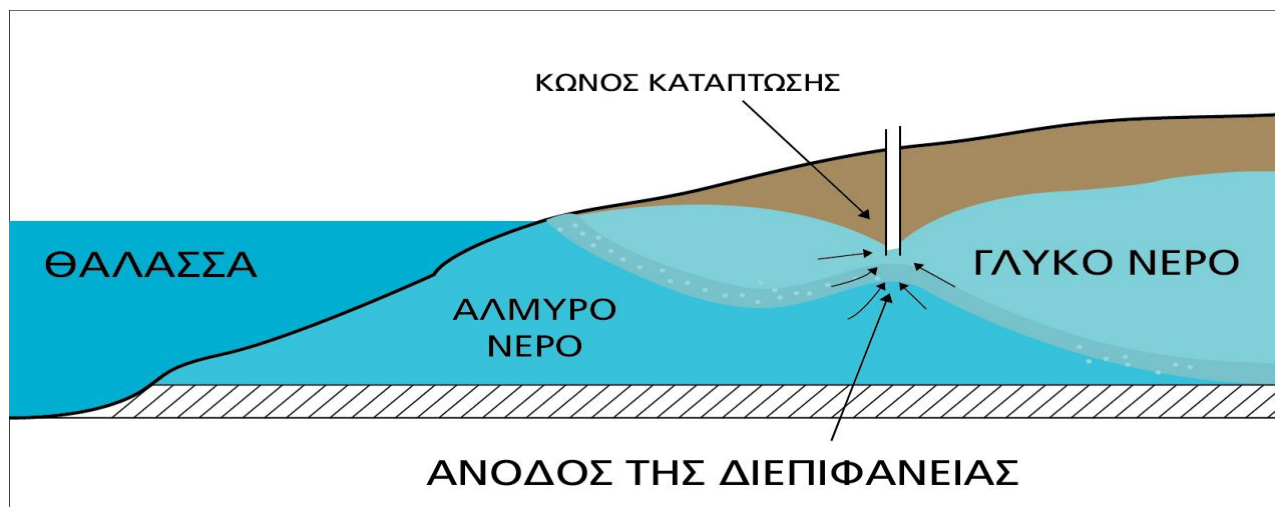
$$Z_0 = \frac{q' \rho_\gamma}{(\rho_\theta - \rho_\gamma)K}$$

Τέλος μπορούμε να υπολογίσουμε το ύψος της στήλης νερού του υδροφορέα (σε απόσταση x από την ακτή), το οποίο σε συνάρτηση με το πλάτος του μετώπου εκροής και το βάθος της διεπιφάνειας καθορίζουν και το σχήμα της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού, θα δίνεται από την εξίσωση (Domenico et. al., 1990):

$$h = \frac{2q'x(\rho_\theta - \rho_\gamma)}{\rho_\gamma K}$$

2.3.2 Άνοδος της διεπιφάνειας

Όταν το πόδι της υφαλμύρισης προχωρήσει αρκετά μέσα στην ακτή και δημιουργηθεί μια κατάσταση όπου ένα στρώμα αλμυρού νερού υπόκειται του γλυκού νερού του υπόγειου υδροφορέα, τότε παρατηρείται το φαινόμενο της κατακόρυφης ανόδου της διεπιφάνειας των δύο νερών, σε περίπτωση μεγάλης παροχής ή μεγάλης διάρκειας άντλησης μέσω γεώτρησης λόγω πτώσης του πιεζομετρικού φορτίου.



Σχήμα 2.5. Σχηματική απεικόνιση της ανόδου της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού από υπεράντληση.

Η άνοδος της διεπιφάνειας είναι μια διαδικασία που συμβαίνει σχετικά γρήγορα, ενώ η ένταση του φαινομένου πολλαπλασιάζεται από ένα κρίσιμο χρονικό σημείο συνεχούς άντλησης και πέρα. Η αντίστροφη διαδικασία, της πτώσης και επαναφοράς της στάθμης της διεπιφάνειας στο αρχικό βάθος είναι πολύ αργή καθώς εξαρτάται και απαιτεί πολλές φορές τη συμβολή φυσικών φαινομένων που θα επαναφέρουν το πιεζομετρικό φορτίο στα φυσιολογικά επίπεδα όπως η κατείσδυση του νερού των κατακρυσμημάτων.

Την άνοδο της διεπιφάνειας περιέγραψαν αναλυτικά οι Bear and Dagan (1962) οι οποίοι κατέληξαν στις εξισώσεις που ακολουθούν:

$$z(r, t) = \frac{Q}{2\pi\alpha k_x d} \left(\frac{1}{(1 + R'^1)^{1/2}} - \frac{1}{[(1 + \gamma')^2 + R'^2]^{1/2}} \right)$$

$$R' = \frac{r K_z^{1/2}}{d K_x}$$

$$\gamma' = \frac{\alpha K_z}{2n_e d} t$$

Όπου:

$z(r, t)$: η άνοδος της διεπιφάνειας σε ύψος r και χρόνο t , πάνω από την αρχική της θέση

Q : ρυθμός άντλησης της υδρογεώτρησης

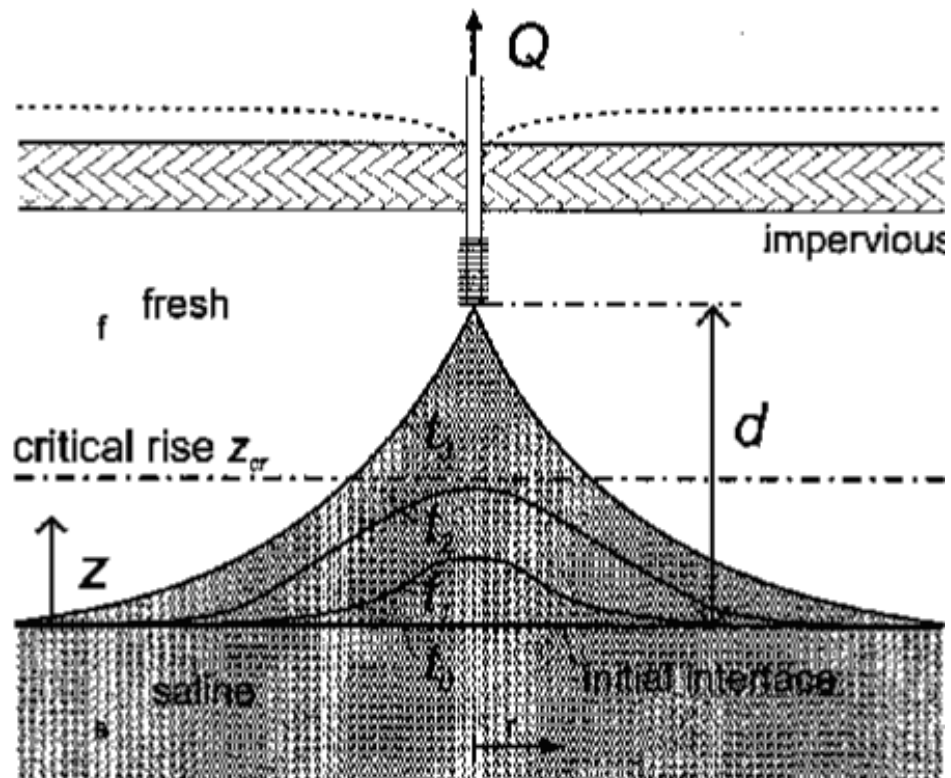
α : $(\rho_s - \rho_f) / \rho_f$, διαφορά σχετικής πυκνότητας των δυο υγρών (αλμυρού και γλυκού νερού αντίστοιχα)

d : απόσταση ανάμεσα στην άκρη της σωλήνωσης της γεώτρησης και της αρχικής θέσης της διεπιφάνειας σε χρόνο $t=0$.

K_x : οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα

K_z : κατακόρυφη υδραυλική αγωγιμότητα

$t_{(i)}$: χρονικό διάστημα από την έναρξη της άντλησης



Σχήμα 2.6. Άνοδος της διεπιφάνειας μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού κατά τη διάρκεια άντλησης (Essink, 2001).

2.4 ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ ΣΤΗ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ

2.4.1 Το φαινόμενο της θαλάσσιας διεύσδυσης στην Ελλάδα

2.4.1.1 Αργολικό πεδίο

Ίσως στη χειρότερη κατάσταση σε ολόκληρη τη χώρα βρίσκεται η περιοχή αυτή, στην οποία η θάλασσα έχει διεισδύσει προς τη στεριά έως και 6-7Km υποβαθμίζοντας τον αλλουβιακό υδροφορέα που αναπτύσσεται εκεί. Οι καλλιεργούμενες εκτάσεις του αργολικού πεδίου είναι ένα παράδειγμα μεγάλης διάρκειας κακοδιαχείρισης του υπόγειου νερού και εκδηλώθηκε με ένα μεγάλο αριθμό αρδευτικών γεωτρήσεων χωρίς καμμία προηγούμενη μελέτη για τη δυναμική του υπόγειου υδροφορέα της περιοχής. Το πρόβλημα πρωτοεμφανίστηκε και εντοπίστηκε τη δεκαετία του '60 και μέχρι στιγμής πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με τη συγκεκριμένη περιοχή, ενώ υπάρχει εκτεταμένη επιστημονική πληροφορία για τα χαρακτηριστικά και την ιδιαιτερότητα της. Η υπεράντληση του υπόγειου νερού, μέσα από τον μεγάλο αριθμό γεωτρήσεων και μια υδροβόρα καλλιέργεια όπως είναι τα εσπεριδοειδή δέντρα, είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση του προβλήματος της υφαλμύρισης, με το αλμυρό νερό να διοχετεύεται εύκολα στον υπόγειο παράκτιο υδροφορέα μέσω των αλλουβιακών σχηματισμών του πεδίου (Καλλέργης κ.α., 1997). Πέρα από τη συνήθη εμφάνιση του φαινομένου ως αυξημένα ποσοστά αλάτων στο νερό των αρδευτικών γεωτρήσεων, η περιοχή συνδέθηκε και με προβλήματα στο δίκτυο ύδρευσης του Ναυπλίου και του Άργους κατά το παρελθόν που δείχνουν το μέγεθος και την ένταση του φαινομένου. Οι Μιμίδης κ.α. (1997) τεκμηριώνουν το γεγονός της εισβολή της θάλασσας στον παράκτιο υδροφόρο ορίζοντα.

2.4.1.2 Βόρεια Κορινθία

Σημαντικό είναι το πρόβλημα καθώς έχει συμβεί θαλάσσια διείσδυση προς τα ανάντη από 1 έως και 4 Km μέσα στους υπόγειους υδροφορείς, ανάλογα με τα πετρώματα της κάθε υποπεριοχής (Γιόξας κ.α., 2002). Οι Κουμαντάκης κ.α. (1999) αναφέρουν την ποιοτική υποβάθμιση του παράκτιου υδροφόρου πεδίου της βόρειας παραλιακής και ημιλοφώδους ζώνης του Νομού Κορινθίας. Τα καρστικά πετρώματα που κυριαρχούν σε μεγάλο μέρος της βόρειας Κορινθίας και καταλήγουν πολλές φορές μέχρι τη θάλασσα ευνοούν λόγω της δομής τους τη διείσδυση του αλμυρού νερού με αποτέλεσμα την πολύ γρήγορη εξάπλωση του φαινομένου. Το πρόβλημα είναι έντονο σε μια ευρεία παραλιακή ζώνη, από το Σοφικό έως το Αίγιο, ενώ πολλές περιοχές έχουν πάψει από χρόνια να χρησιμοποιούν το νερό του δικτύου, όχι μόνο για πόση αλλά και για μαγείρεμα.

2.4.1.3 Ανατολική Αττική

Επιδεινούμενο φαίνεται να είναι το πρόβλημα στην περιοχή της ανατολικής Αττικής, ειδικότερα αν συνυπολογίσει κανείς την οικιστική ανάπτυξη που έχει λάβει χώρα εκεί τα τελευταία χρόνια. Ο κάμπος του Μαραθώνα λόγω των εντατικά καλλιεργούμενων αρδευόμενων εκτάσεων, της εγγύτητάς του με τη θάλασσα και της πτώσης της πιεζομετρικής στάθμης εμφανίζει σημάδια υφαλμύρισης. Νοτιότερα παρόμοιο πρόβλημα αντιμετωπίζει η περιοχή του Μαρκόπουλου και των Σπάτων που οφείλεται στην έντονη άντληση για κάλυψη υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών. Επίσης στην παραλιακή ζώνη από Κορωπί μέχρι και Σούνιο συμβαίνει το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης όμως και λόγω των καρστικών πετρωμάτων που εμφανίζονται στη ζώνη αυτή. Το «πόδι» της

διεπιφάνειας βρίσκεται στα όρια των 2 Km σε όλη την ζώνη, φθάνοντας ανά σημεία τα 4 ή και τα 5 Km.

2.4.1.4 Νησιά

Σε αρκετές περιπτώσεις συναντάμε αποκλειστικά υφάλμυρους υπόγειους υδροφορείς στα νησιά. Λόγω της μικρής έκτασης της ενδοχώρας, της ιδιαιτερότητας των υδροφόρων με ανάπτυξη «φακού» και των λιγοστών ετήσιων βροχοπτώσεων σε συνδυασμό με τα ασβεστολιθικά συνήθως αποκαρστωμένα πετρώματα που δεν μπορούν να συγκρατήσουν νερό και φυσικά τη μεγάλη τουριστική και οικιστική ανάπτυξη που επιφέρει μεγάλη αύξηση στην κατανάλωση νερού η υπαλμύριση του υπόγειου νερού είναι συχνό φαινόμενο. Σύμφωνα με τον Χαρμανίδη, (1999), η Σύρος, η Τήνος και Αντίπαρος, επίσης η Σαντορίνη, η Νάξος και η Σίφνος είναι μερικά από τα νησιά με οξύ πρόβλημα στην πλευρά του Αιγαίου, ενώ στη Ζάκυνθο παρατηρούνται μεταβολές στην πιεζομετρία περιοχής όπου αναπτύσσεται υπό πίεση υδροφορέας με αξιοσημείωτο το γεγονός αρνητικών τιμών στάθμης στην παράκτια ζώνη (Διαμαντοπούλου, 1999). Η Κεφαλονιά αποτελεί ένα καλό παράδειγμα αποκαρστωμένου νησιού που ευνοεί τις συνθήκες μη συγκράτησης νερού από τα κατακρυμνίσματα και θαλάσσιας διείσδυσης.

2.4.1.5 Ποτάμιες εκβολές

Το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης εμφανίζεται επίσης έντονο στα Δέλτα των ποταμών με τη μορφή της θαλάσσιας σφήνας. Οι Διαμαντής κ.α., (1994) αναφέρουν ότι το φαινόμενο εμφανίζεται και εξελίσσεται στον ποταμό Έβρο, ενώ μια σειρά από μελέτες (Πλιάκας κ.α., 2004) και (Γκιουγκής, 2006, δημοσίευτα στοιχεία) αναφέρουν το ίδιο για τους ποταμούς Λίσσο και Νέστο αντίστοιχα. Αν και υπάρχει μια ουσιώδης διαφορά στους παράγοντες που μπορεί να οδηγήσουν στην εντατικοποίηση του φαινομένου, σε σχέση με αυτούς που διέπουν την αντίστοιχη εμφάνιση σε υπόγειους υδροφορείς, εντούτοις υπάρχει πάντα ένας συνδετικός κρίκος και αυτός είναι η ανθρώπινη δραστηριότητα. Στο παρελθόν σε διάφορα ποτάμια ανά την Ελλάδα, έχουν κατασκευαστεί μια σειρά από υδροταμιετήρες (φράγματα) χωρίς πρόβλεψη για την απαιτούμενη παροχή νερού που πρέπει να συνεχίζει μέχρι τη θάλασσα. Αποτέλεσμα αυτού ήταν η εμφάνιση υποκρίσιμων ροών στις εκβολές τους που επέτρεψαν στη θάλασσα να διεισδύσει αρκετά χιλιόμετρα στα ανάντη των δέλτα ποταμών. Απόλυτα παρόμοια δράση έχει και η υπεράντληση νερού από τα ποτάμια για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών των αγροτικών περιοχών.



Εικόνα 2.1. Περιοχές της Ελλάδας που υπόκεινται στο καθεστώς της θαλάσσιας δεισδυσσης (Σούλιος, 2004).

2.4.2 Περιπτώσεις στη Μεσόγειο

2.4.2.1 Ιταλία

Σημαντικό πρόβλημα υπαλμύρισης έχει δημιουργηθεί στην κεντρική Ιταλία στην επαρχία της Τοσκάνης, και ειδικότερα την παράκτια περιοχή Venturina, πάλι από υπερεκμετάλλευση του υπόγειου νερού, σε μια περιοχή με αλλουβιακούς σχηματισμούς προϊόν του ποταμού Cornia που διαπερνά την περιοχή. Μετρήσεις από ένα δίκτυο 123 γεωτρήσεων παρατήρησης, της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας (Specific Electrical Conductivity, SEC) κυμαίνονται από 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ έως 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. (Wilcox, 1995)

2.4.2.2 Τουρκία

Στη νοτιοκεντρική Τουρκία, στην περιοχή του Tasuku εκβάλλει ο ποταμός Goksu σχηματίζοντας ένα μεγάλο Δέλτα (Goksu Delta) που έχει συνολικά δημιουργήσει ένα αλλουβιακό πεδίο το οποίο σήμερα καλλιεργείται εντατικά. Προσομοίωση του μηχανισμού της θαλάσσιας διείσδυσης στην περιοχή, καταδεικνύει τιμές συγκέντρωσης χλωριόντων εύρους από 0 έως 22.000 mg/L. (Gordu *et al.*, 2001).

2.4.2.3 Κύπρος

Ο Ergil, 2001 αναφέρει συγκεντρώσεις σε NaCl που αγγίζουν τιμές της τάξης των 7000 mg/L σε απόσταση 3,5 km από την ακτογραμμή στον παράκτιο υδροφόρο Guzelyurt στα κατεχόμενα της Κύπρου, ο οποίος αντλείται για υδρευτικούς και για αρδευτικούς σκοπούς με μεγάλη ένταση.

2.4.2.4 Πορτογαλία

Οι Salgueiro *et al.*, 2001 έπειτα από μελέτη στο νότιο τμήμα της Πορτογαλίας στα πλαίσια δράσης ερευνητικού προγράμματος από το Ίδρυμα Επιστημών και Τεχνολογίας στην περιοχή Algarve, που βρέχεται από το Ατλαντικό ωκεανό, αναφέρουν ότι εμφανίζεται το φαινόμενο της υπαλμύρισης. Στην περιοχή επικρατούν ασβεστολιθικά πετρώματα και συνολικά υπόκειται σε διαρκή υπερεκμετάλλευση όσον αφορά στα υπόγεια υδατικά αποθέματα.

2.4.2.5 Μαρόκο

Στη νοτιοδυτικό τμήμα του Μαρόκο, ο υδροφόρος Rharb αποτελεί φρεάτιο υδρογεωλογικό σχηματισμό ο οποίος βρίσκεται ανάμεσα στον ποταμό Sebou και τη λίμνη Bleu, με μήκος ακτογραμμής το οποίο ανέρχεται στα 76 km. Ο υδροφόρος παρουσιάζει δυναμικό ρύπανσης τόσο από την πλευρά της θαλάσσιας διείσδυσης όσο και από τη μεταφορά ρυπαντών γεωργικής προέλευσης (Loukili *et al.*, 2001).

3. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η περιοχή μελέτης αποτελεί ένα κλασσικό παράδειγμα περίπτωσης όπου ελλοχεύει ο κίνδυνος εμφάνισης του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης, καθώς εκτείνεται εντός μιας ζώνης μικρού εύρους από την ακτογραμμή, εκεί αναπτύσσεται φρεάπιος παράκτιος υδροφορέας ο οποίος εκμεταλλεύεται συστηματικά και εντατικά τις τελευταίες δεκαετίες.

Η έντονη αδρευτική δραστηριότητα υποδηλώνει τον κίνδυνο της έκθεσης των υπόγειων νερών σε ενδεχόμενες συνθήκες ανορθολογικής διαχείρισής του ενώ η εξέλιξη του πλυθυσμού της περιοχής, αναμένεται να παίξει σημαντικό ρόλο στη χρήση των υπόγειων νερών, καθότι στην συγκεκριμένη περιοχή υπάρχουν και γεωτρήσεις που εξηηρετούν ανάγκες ύδρευσης.

Η περιοχή μελέτης υπάγεται στην Περιφέρεια Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, στο γεωγραφικό διαμέρισμα της Θράκης και αποτελεί τμήμα του Νομού Ροδόπης. Ο Νομός Ροδόπης καταλαμβάνει το κεντρικό τμήμα του γεωγραφικού διαμερίσματος της Θράκης. Συνορεύει ανατολικά με το Νομό Έβρου, δυτικά με το Νομό Ξάνθης, βόρεια του νομού βρίσκεται η Βουλγαρία, ενώ το νότιο τμήμα του βρέχεται από το Θρακικό Πέλαγος. Καταλαμβάνει συνολική έκταση 2.543,1 km², εκ των οποίων τα 37 km² αντιστοιχούν σε υδάτινη περιοχή. Πρωτεύουσα του νομού είναι η πόλη της Κομοτηνής. Η περιοχή μελέτης τοποθετείται γεωγραφικά στο νότιοδυτικό παράκτιο τμήμα του Νομού Ροδόπης και οριοθετείται από τις λίμνες Βιστωνίδα και Ισμαρίδα (από δυτικά προς ανατολικά) και από την επαρχιακή οδό Λάγους – Κομοτηνής έως την ακτογραμμή (από βόρεια προς νότια).

3.2. ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ

3.2.1. Γενικά

Τα στοιχεία χρήσεων γης που παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 3.1), αφορούν στο Νομό Ροδόπης:

- τα 956,9 km² αντιστοιχούν σε πεδινή περιοχή,
- τα 825,6 km² αντιστοιχούν σε ημιορεινή περιοχή και
- τα 760,6 km² αντιστοιχούν σε ορεινή περιοχή (Σχήμα 3.1).

Συγκριτικά με τα 131.957 km² της έκτασης εδάφους του εθνικού χώρου και τα 14.517 km² του εδάφους της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, ο Νομός Ροδόπης καταλαμβάνει το 1,93% του εδάφους της χώρας και το 17,96% της Περιφέρειας (Πίνακας 3.1). Η κατανομή της έκτασης του Νομού Ροδόπης με βάση τις χρήσεις γης φαίνεται στον Πίνακα 3.2 και στο Σχήμα 3.1.

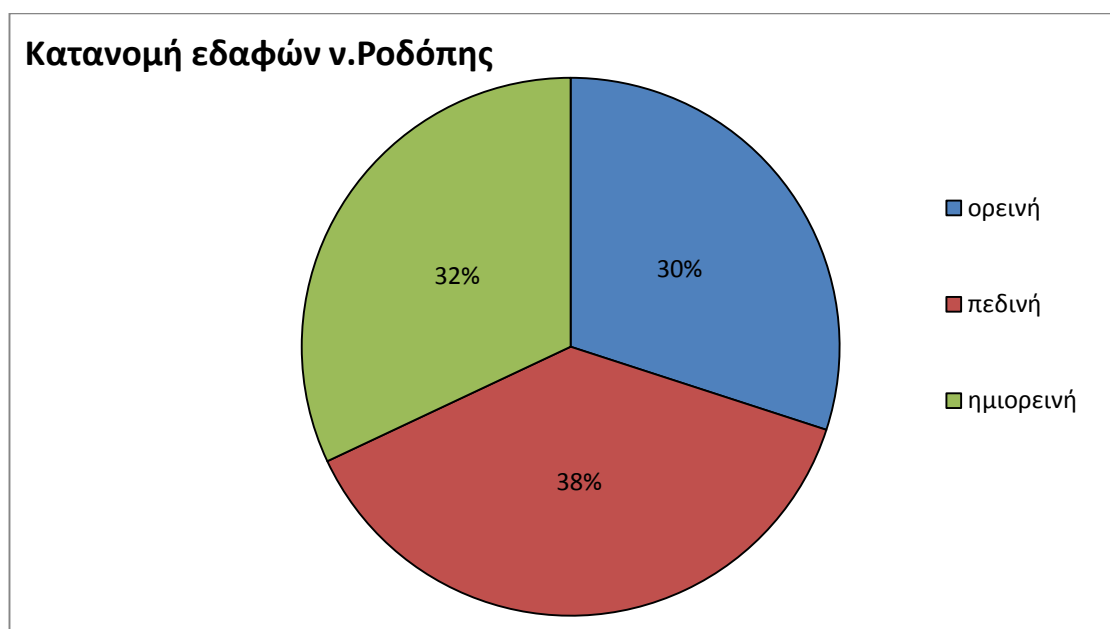
Πίνακας 3.1. Κατανομή της έκτασης του Νομού Ροδόπης, της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας & Θράκης και του συνόλου της χώρας (σε km²) με βάση τη μορφολογία του εδάφους.

Εκτάσεις (km ²)	Σύνολο Χώρας	Περιφέρεια Αν. Μακ. & Θράκη	Νομός Ροδόπης
Πεδινές	37.891,1	4.867,9	956,9
Ημιορεινές	38.271,9	3.687,7	825,6
Ορεινές	55.794,4	5.602,2	760,6
Σύνολο	131.957,4	14.157,8	2.543,1

Πίνακας 3.2. Κατανομή της έκτασης του Νομού Ροδόπης, της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας & Θράκης και του συνόλου της χώρας (σε km²) με βάση τις χρήσεις γης.

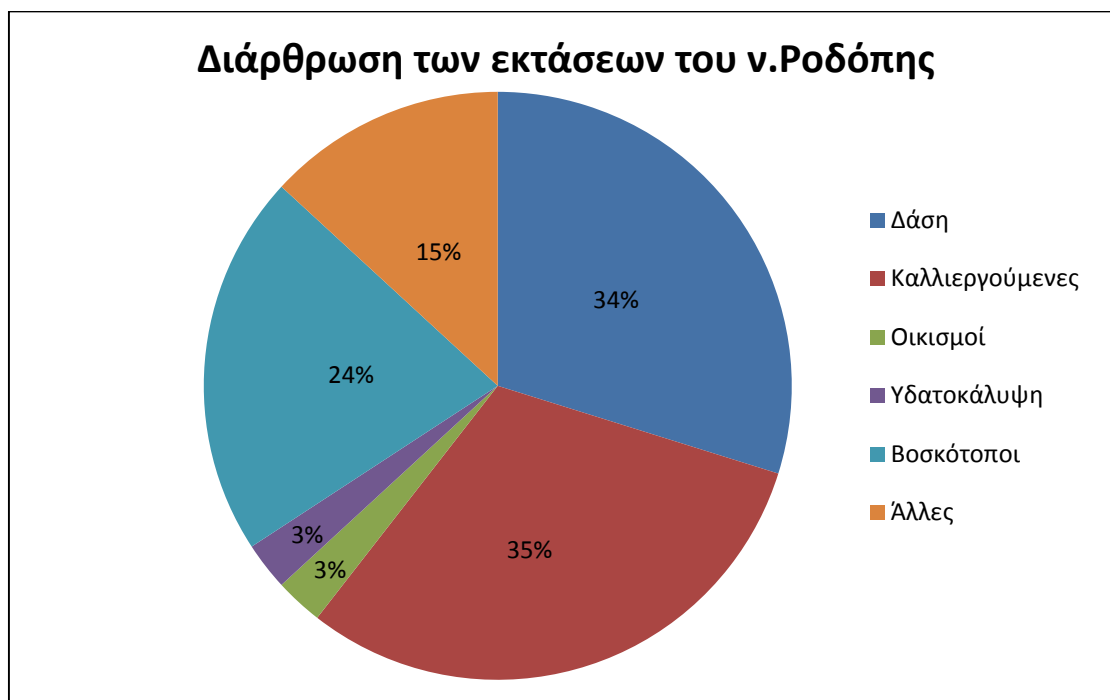
Εκτάσεις (km ²)	Σύνολο χώρας	Περιφέρεια Ανατολικής Μακεδονίας & Θράκης	Νομός Ροδόπης
Καλλιεργούμενες	39.435,9	4.169,3	870,3
Βοσκότοποι	52.191,5	4.628,1	622,1
Δάση	29.378,1	4.431,4	877,3
Υδατοκαλυμμένες	2.966,0	319,2	84,3
Οικισμοί	5.303,2	415,5	68,9
Άλλες εκτάσεις	2.652,8	194,3	20,2
Σύνολο	131.957,4	14.157,8	2.543,1

Η ποσοστιαία κατανομή της έκτασης του Νομού Ροδόπης με βάση τη μορφολογία του εδάφους παρουσιάζεται με γράφημα στο Σχήμα 3.1. που ακολουθεί.



Σχήμα 3.1. Ποσοστιαία κατανομή της έκτασης του Νομού Ροδόπης (σε km²) με βάση τη μορφολογία του εδάφους.

Η ποσοστιαία κατανομή της έκτασης του Νομού Ροδόπης με βάση τη χρήση γης απεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 3.2. που ακολουθεί.



Σχήμα 3.2. Ποσοστιαία διάρθρωση των εκτάσεων του Νομού Ροδόπης ανάλογα με τις χρήσεις γης.

Με βάση τα στοιχεία που παρατέθηκαν, προκύπτει ότι το σύνολο του εδάφους του Νομού Ροδόπης χαρακτηρίζεται από ανομοιομορφία. Προκύπτει, επίσης, ότι το μεγαλύτερο μέρος του νομού μοιράζεται κυρίως σε καλλιέργειες (35%) σε δάση (34%) και σε βοσκότοπους (24%). Η ύπαρξη επιφανειακών υδατικών αποθεμάτων στην ευρύτερη περιοχή, είναι πολύ σημαντική καθώς το ποσοστό των εκτάσεων του νομού που καλύπτονται από νερά (3,3%) είναι μεγαλύτερο από το συνολικό αντίστοιχο ποσοστό της χώρας ή της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας Θράκης (2,3%).

3.2.2. Στοιχεία χρήσεων γης περιοχής μελέτης

Το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μελέτης αποτελείται από καλλιεργούμενες εκτάσεις όπου συμβαίνει έντονη γεωργική δραστηριότητα με κύρια καλλιέργεια αυτή του βαμβακιού. Εξαιρέση αποτελούν κάποιες δομημένες εκτάσεις, κυρίως αγροτικοί οικισμοί, που βρίσκονται διάσπαρτοι σε όλη την περιοχή. Η έκταση της περιοχής μελέτης ανέρχεται στα 165,1 km², συμπεριλαμβανομένων και των δομημένων εκτάσεων οι οποίες καταλαμβάνουν ένα μικρό τμήμα της τάξης του 1,6% όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί. (Πίνακας 3.3).

Πίνακας 3.3. Δομημένη έκταση (εκτάσεις κύριων οικισμών) περιοχής μελέτης.

Οικισμός	Έκταση (km ²)	Οικισμός	Έκταση (km ²)
Φανάρι	0,1086	Νέα Καλλίστη	0,1381
Μέση	0,2591	Παλλάδιο	0,05469
Γλυφάδα	0,2324	Παραδημή	0,3518
Πόρπη	0,3329	Αίγειρος	0,5535
Γλυκονέρι	0,1200	Μεγάλο Κρανοβούνι	0,1724
Καλλίστη	0,04065	Μικρό Κρανοβούνι	0,1218
		Παγούρια	0,2163
Σύνολο 2,702 (km ²)			

Η περιοχή μελέτης αποτελεί μια αμιγώς γεωργική περιοχή, σχεδόν εξ ολοκλήρου καλυμμένη από καλλιεργημένες εκτάσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3. που ακολουθεί.



Σχήμα 3.3. Δορυφορική εικόνα της περιοχής μελέτης (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth © 2005). (Καλλιώρας, 2008)

3.3. ΠΛΗΘΥΣΜΙΑΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

3.3.1. Γενικά

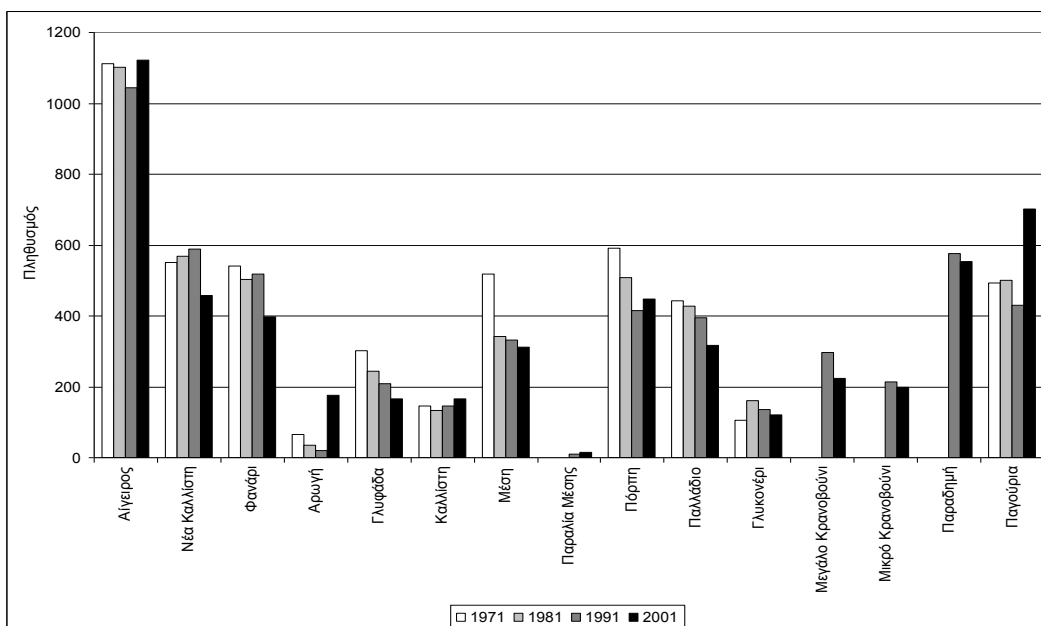
Σύμφωνα με την απογραφή του 2001 ο πληθυσμός του Νομού Ροδόπης, ανέρχεται στους 111.237 κατοίκους σημειώνοντας αύξηση περίπου 6,88% σε σχέση με τον αντίστοιχο πληθυσμό του 1991 (104.073 κάτοικοι). Στον πίνακα 3.4 που ακολουθεί παρουσιάζεται η πληθυσμιακή εξέλιξη κατά δήμο και κοινότητα του Νομού Ροδόπης.

Πίνακας 3.4. Πληθυσμιακή εξέλιξη κατά δήμο και κοινότητα του Νομού Ροδόπης (ΕΣΥ, 2001).

Δήμος ή Κοινότητα / Έτος	1971	1981	1991	2001
Δ. Κομοτηνής	36951	41865	47336	53719
Δ. Ιάσμου	7709	10212	6723	6564
Δ. Μαρώνειας	8688	7856	7519	7261
Δ. Σαπών	9023	8124	8453	9365
Δ. Φιλλύρας	8129	8005	7834	8028
Δ. Σώστου	6447	6187	6657	6657
Δ. Αρριανών	6065	5668	5450	5789
Δ. Αιγείρου	3797	3922	4334	4328
Δ. Νέου Σιδηροχωρίου	4104	3790	3305	3454
Κ. Κέχρου	2282	2225	1737	1577
Κ. Οργάνης	3350	3287	3135	2865
Κ. Αμαξάδων	1340	1493	1590	1630

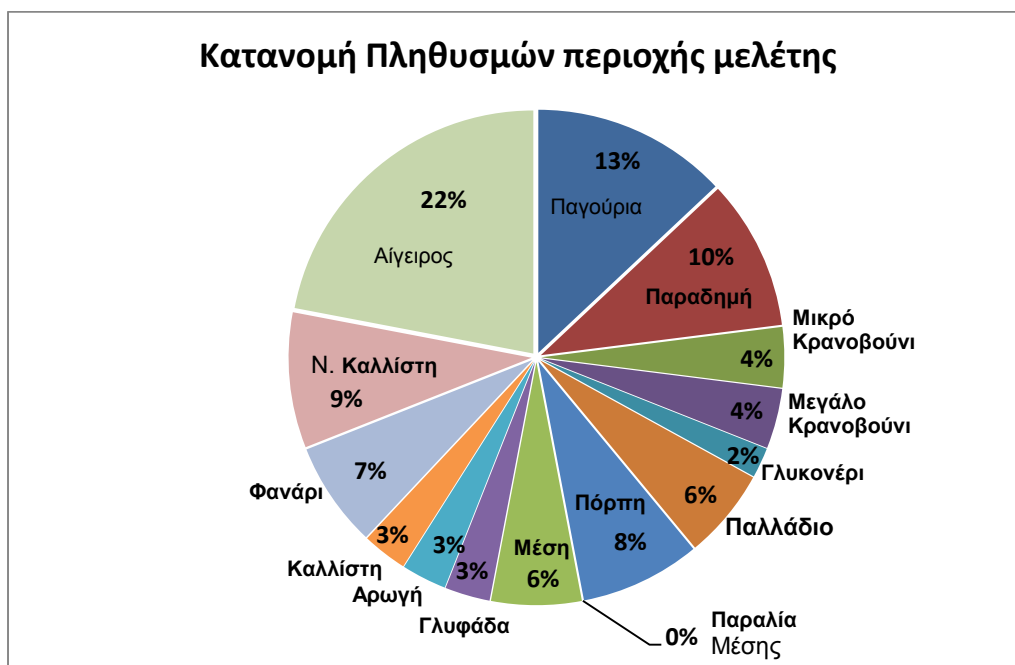
3.3.2 Δημογραφικά στοιχεία περιοχής μελέτης

Η στενή περιοχή μελέτης περιλαμβάνει τους οικισμούς: Αιγείρου, Αρωγής, Γλυκονερίου, Γλυφάδας, Καλλίστης, Μεγάλου Κρανοβουνίου, Μέσης, Μικρού Κρανοβουνίου, Νέας Καλλίστης, Παγουρίων, Παλλαδίου, Παραδημής, Φαναρίου, Πόρπης και την Παραλία της Μέσης. Ο πληθυσμός των οικισμών που περιλαμβάνονται στην υπό μελέτη περιοχή ανέρχεται στους 5.382 κατοίκους σύμφωνα με την απογραφή του 2001, εμφανίζοντας αύξηση της τάξης του 1,03% σε σχέση με τον αντίστοιχο πληθυσμό της απογραφής του 1991. Στο Σχήμα 3.5, φαίνεται η διακύμανση του πληθυσμού κάθε οικισμού της περιοχής μελέτης, όπου η έντονη μαύρη στήλη αντιστοιχεί στον πληθυσμό κατά την απογραφή του έτους 2001.



Σχήμα 3.4. Μεταβολή πληθυσμών της περιοχής μελέτης κατά τα έτη 1971, 1981, 1991 και 2001.

Ένα στοιχείο που προκύπτει είναι ότι η πλειοψηφία των οικισμών στην περιοχή μελέτης έχουν πληθυσμό που κυμαίνεται μεταξύ 400 και 600 κατοίκων με εξαίρεση κάποιους μεγάλους. Το Σχήμα 3.5 απεικονίζει την ποσοστιαία κατανομή του πληθυσμού της περιοχής μελέτης, όπου φαίνεται ότι οι οικισμοί του Αίγειρου, Παγουρίων και Παραδημής έχουν το μεγαλύτερο αριθμό κατοίκων.



Σχήμα 3.5. Ποσοστιαία κατανομή πληθυσμών περιοχής μελέτης για το έτος 2001.

4. ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΕΣ ΚΑΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

4.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Το γεωμορφολογικό ανάγλυφο της περιοχής μελέτης χαρακτηρίζεται γενικά ως ημιλοφώδες στο μεγαλύτερο τμήμα του, με εξαίρεση την εμφάνιση κάποιων πεδινών εκτάσεων οι οποίες παρεμβάλλονται σε διάφορα σημεία της περιοχής και προέκυψαν από τη συνδυασμένη δράση των χειμάρρων, του υδρογραφικού δικτύου, υποκείμενα στις συνθήκες διάβρωσης και απόθεσης. Σημαντική είναι η παρουσία των πέντε παράκτιων λιμνοθαλασσών στο νότιο όριο του νομού με τη θάλασσα καθώς και η λίμνη Ισμαρίδα με κύριο τροφοδότη τον ποταμό Βοσβόζη, όπως φαίνεται στο μορφολογικό χάρτη της Εικόνας 4.1. που ακολουθεί.



Εικόνα 4.1. Μορφολογικός χάρτης περιοχής μελέτης. (Καλλιώρας, 2008)

Στο δυτικό και ανατολικό όριο της περιοχής εμφανίζονται απότομες κλίσεις και διαφορά αναγλύφου με αποτέλεσμα να σχηματίζεται αναβαθμίδα μέσου ύψους 10-15m. Η αναβαθμίδα αυτή παρατηρείται ευδιάκριτα μεταξύ Φαναρίου - Αιγείρου και κατά μήκος της δυτικής όχθης του ποταμού Βοσβόζη και της λίμνης Ισμαρίδας. Φανερώνει πρόσφατη δημιουργία ανάγλυφου, πιθανότατα από τεκτονικά αίτια και επίσης έντονη πλευρική ποτάμια διάβρωση (Διαμαντής κ.α., 1994).

Στο νότιο παράκτιο τμήμα παρατηρούνται χαμηλού προφίλ ακτές τύπου Rias, με ακτογραμμή αποτελούμενη από εναλλαγές αμμωδών φραγμάτων και παράκτιων αναβαθμιδών. Τα εκτεταμένα αμμώδη φράγματα, απέκοψαν από τη θάλασσα και δημιούργησαν πλήθος παράκτιων λιμνών, όπως είναι η Ξηρολίμνη, η λ. Καρατζά, η Αλυκή, η λ. Πτελέα, το Έλος και η λ. Ισμαρίδα (Καλλιώρας, 2008).

4.2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

4.2.1. Γεωλογικό Περιβάλλον

Η περιοχή μελέτης εντάσσεται ευρύτερα, ως προς τις γεωλογικές συνθήκες, στο γεωλογικό περιβάλλον της μάζας της Ροδόπης. Το δυτικό όριο της μάζας της Ροδόπης είναι ο ποταμός Στρυμόνας, ο οποίος και τη διαχωρίζει από τη Σερβομακεδονική μάζα. Η μάζα της Ροδόπης εξαπλώνεται σε όλη την Ανατολική Μακεδονία και τη Θράκη. Επίσης τα τεκτονικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης συνδέονται άμεσα ή έμμεσα με την τεκτονική εξέλιξη της μάζας της Ροδόπης. Η περιοχή γεωλογικά φιλοξενεί τεταρτογενείς, πλειοκαινικές, άνω μειοκαινικές αποθέσεις και παλαιογενείς σχηματισμούς.

4.2.1.1. Τεταρτογενείς Αποθέσεις

Οι τεταρτογενείς αποθέσεις καταλαμβάνουν εκτάσεις πάχους μερικών μέτρων κυρίως στην ευρεία κοίτη των χειμάρρων και στις νοτιότερες παράκτιες περιοχές εκεί όπου βρίσκονται οι λιμνοθάλασσες. Αποτελούνται από πηλούς, ψαμμούχους πηλούς, χαλίκια, κροκάλες και άμμους (Καλλιώρας, 2008). Οι εν λόγω αποθέσεις απαντώνται σε πλήρη ανάπτυξη στην πεδινή περιοχή της Αμβροσίας, βόρεια γεινιάζουσα περιοχή. Πρόκειται κυρίως για τις αποθέσεις του κώνου του ποταμού Κομπάτου με όλα τα χαρακτηριστικά μεγέθους κροκαλών ενός τέτοιου σχηματισμού, ενώ περιφερειακά εμφανίζονται στρώσεις χονδρόκοκκων υλικών, που διακόπτονται από στρώσεις αργίλων. Ο ρόλος τους είναι εξαιρετικά σημαντικός για την τροφοδοσία των νεογενών υδροφόρων της περιοχής μελέτης, λόγω της μεγάλης διαπερατότητας των υλικών αυτών.

4.2.1.2. Πλειοκαινικές αποθέσεις

Οι αποθέσεις αυτές αφορούν κυρίως χονδρόκοκκα υλικά. Η άργιλος του Πλειοκαίνου είναι μαλακή και πλαστική, με ανοιχτό καφέ ή κίτρινο χρώμα η οποία εμφανίζεται στην περιοχή ως έντονα ερυθρωπή. Τα χονδρόκοκκα υλικά είναι χαλαρά και ποικίλου μεγέθους. Οι Διαμαντής κ.α. (1994) αναφέρουν ότι οι κύριοι σχηματισμοί από τους οποίους αποτελούνται τα πλειστοκαινικά ιζήματα είναι:

- άργιλος κιτρινωπή, ανοικτή καφέ, ιλυώδης και λεπτόκοκκη, αμμώδης, μαλακή πλαστική και ένυδρος,

- άμμος, χάλικες, κροκάλες γωνιώδεις έως στρογγυλοί που αποτελούνται από χαλαζία, θραύσματα μεταμορφωμένων πετρωμάτων, σκληρού ψαμμίτη και ηφαιστειακών πετρωμάτων,
- άμμος πολύ λεπτόκοκκη, αργιλώδης ή ιλυώδης και κατά περίπτωση άσπρη καολινιτική,
- άμμος μεσόκοκκη προς χονδρόκοκκη ή πορτοκαλόχρους υπογωνιώδης και χάλικες-κροκάλες από γνευσιακά ανδρειακά χαλαζιακά και ψαμμιτικά θραύσματα πολύ σκληρά,
- χάλικες-κροκάλες αποτελούμενες από χαλαζία ανοικτού κίτρινου χρώματος γωνιώδη και θραύσματα ηφαιστειακών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων,
- άμμος άσπρη από χαλαζία, καολινίτη, χλωρίτη και αστρίους.

4.2.1.3. Άνω Μειοκαινικές αποθέσεις

Οι άνω μειοκαινικές αποθέσεις αφορούν σχηματισμούς ηπειρωτικού χαρακτήρα οι οποίοι αποτέθηκαν σε αλλουβιακό ή λιμναίο περιβάλλον. Πρόκειται για χαλαρούς σχηματισμούς αποτελούμενοι κυρίως από χαλίκια, άμμους και κροκάλες.

Χαρακτηριστική είναι η συχνή εμφάνιση αργιλικών στρωμάτων (πλαστικής αργίλου) η οποία είναι συνήθως καολινιτικής προέλευσης με γκρι ή πράσινο χρώμα. Οι μειοκαινικοί ψαμμίτες είναι συνήθως λεπτόκοκκοι έως χονδρόκοκοι, διαβαθμισμένοι ή αδιαβάθμητοι, με υψηλό πορώδες.

Ο Πεταλάς (1997) αναφέρει ότι το πάχος τους βαθμιαία ελαττώνεται προς τα όρια, ενώ η μείωση είναι πιο δραστική στα βόρεια και ανατολικά όρια της περιοχής όπου οι νεώτερες αποθέσεις της γκριζοπράσινης αργίλου επιδεικνύουν πάχος λίγων έως δεκάδων μέτρων.

Από τα δεδομένα δειγματοληπτικών γεωτρήσεων (Διαμαντής κ.α., 1994) προέκυψε ότι οι άνω μειοκαινικές αποθέσεις της περιοχής μελέτης είναι:

- Ιζηματα που αποτέθηκαν στα πλαίσια της δράσης ενός διακλαδούμενου ποταμού και είναι χονδρόκοκκα ποικίλως διαβαθμισμένα σχετικά χαλαρά με διαγένεση σε αρχικό στάδιο και κυρίως από αργιλικά υλικά (κατά δεύτερο λόγο ασβεστιτικό) καθώς και ποικίλου βαθμού στρογγυλότητας.
- Σχηματισμοί που αποτέθηκαν σε ένα "ήρεμο περιβάλλον" εκτός των παλαιογεωγραφικών αξόνων ροής με τα εξής χαρακτηριστικά: (α) Από πλευράς μεγέθους των κόκκων πρόκειται κυρίως για λεπτόκοκκα υλικά όπως άργιλοι χρώματος γκριζού ή πορτοκαλόχρου και σπανιότερα καφέ, οι οποίοι εναλλάσσονται με μεγάλη συχνότητα κυρίως με ιλυόλιθους χαλαρούς καθώς και μετρίως ταξινομημένους ψαμμίτες λεπτόκοκκους έως μεσαίους με συνδεδετικό υλικό κυρίως αργιλικό και κατά δεύτερο λόγο ασβεστιτικό και (β) οι στρώσεις των σχηματισμών αυτών είναι συνήθως πάχους μικρότερου των 2 m.

Στην περιοχή παρατηρείται επίσης εναλλαγή λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων ιζημάτων, η οποία χρήζει ιδιαίτερης προσοχής διότι φανερώνει την ύπαρξη περιβάλλοντος ιζηματογένεσης σχετικά ήρεμο π.χ. λιμναίο. Ιδιαίτερη σημασία για τις γεωλογικές συνθήκες της περιοχής, και κατ' επέκταση για τις υδρογεωλογικές, έχει η ύπαρξη λεπτών αργιλικών ενστρωματώσεων, οι οποίες επηρεάζουν αρνητικά την κατείσδυση του νερού.

Οι Διαμαντής κ.α. (1994) κατόπιν μελέτης δεδομένων γεωλογικών τομών 400 περίπου υδρογεωτρήσεων της περιοχής, κατέληξαν στην αποδοχή της ύπαρξης διακλαδούμενου ποταμού με μεγάλες παροχές, κατά την περίοδο των εποχών του Μειόκαινου και του

Πλειόκαινου, μέρος της κοίτης του οποίου είναι σήμερα διακριτό στην παραλία της Γλυφάδας.

Υλικά όπως άμμοι, χαλίκια και κροκάλες, τα οποία αποτελούν τα αδρομερή υλικά της περιοχής, κάνουν την εμφάνισή τους σε στρώματα πάχους 50-70m, τα οποία ενίοτε διαχωρίζονται σε μικρότερες στρωματικές ομάδες (2 έως 3) μεταξύ τους από λεπτές ενστρωματώσεις αργίλου.

Η ύπαρξη αργιλικών σχηματισμών στην περιοχή μελέτης οφείλεται στη δημιουργία λιμναίου περιβάλλοντος παράλληλα με το αλλουβιακό. Στην περιοχή των Παγουριών, οι ενστρωματώσεις των αδρομερέστερων υλικών εμφανίζονται πολυπληθέστερες και διακόπτονται συνεχώς από αργιλικές ενστρωματώσεις, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την εξασθένηση της υδρογεωλογικής λεκάνης με την τοπικών ανάπτυξη οριακών συνθηκών για την περιοχή μελέτης.

4.2.1.4. Παλαιογενείς σχηματισμοί

Οι παλαιογενείς αποθέσεις σχετίζονται κυρίως με τις διάφορες εναλλαγές αργιλίτη και ψαμμίτη, ενώ απαντώνται σχεδόν αποκλειστικά στο βόρειο και ανατολικό όριο της περιοχής μελέτης. Οι Διαμαντής κ.α. (1994) αναφέρουν αναλυτικά ότι στα πρώτα 200 m περίπου επικρατούν οι ακόλουθοι σχηματισμοί:

- άργιλος καφέ, γκρί-πρασινωπή, πλαστική,
- άργιλος πράσινη πλαστική και αμμώδης κατά περίπτωση καφετίζουσα,
- άμμοι, χάλικες και κροκάλες γκρί και πράσινοι,
- λιγνίτης, σκοτεινόχρους, καφετίζον, μαύρος, μαλακός,
- χάλικες, κροκάλες και άμμος γωνιώδης, υποστρογγυλευμένη από θραύσματα μεταμορφωμένων πετρωμάτων και με αιματίτη κατά περίπτωση,
- ψαμμίτης πολύ λεπτόκοκκος, αργιλώδης, καολινιτικός, πράσινος, μαλακός, χαλαρός με ορυκτά mica,
- ιλυόλιθος, κίτρινος, καφέ, μαλακός και χωρίς ασβεστίτη κατά περίπτωση πράσινος, συμπαγής.
- άργιλος γκρι-μεσόκοκκη, κατά περίπτωση χαλικώδης χωρίς στρώσεις, γωνιώδης, συνιστάμενη από χαλαζία καθαρό ή γαλακτώδη, θραύσματα χαλαζιτών και γνευσίων, χλωρίτη, καολινίτη, γλαυκονίτη,
- άργιλος πράσινη - άσπρη, αμμώδης πολύ καολινιτική με ορυκτά mica,
- ψαμμίτης πολύ μαλακός διαβαθμισμένος ή αδιαβάθμητος και ημιγωνιώδης έως ημιστρογγυλευμένος και τέλος,
- ασβεστόλιθος - κρητίζ, άσπρος, μεσόκοκκος, σκληρός, εύθρυπτος κατά περίπτωση μαλακός κονιοποιημένος.

4.2.2. Τεκτονικές συνθήκες περιοχής μελέτης

Στην περιοχή απαντάται ένας σημαντικός αριθμός ρηγμάτων, αλλά τα σημαντικότερα θεωρούνται αυτά που αναπτύσσονται κατά μήκος των ορίων της περιοχής μελέτης και τα οποία συμβάλλουν στη δημιουργία οριακών συνθηκών. Πρόκειται για τα εξής: (α) ρήγμα παράλληλο με τον Ασπροπόταμο (άξονας Γλυκονέρι–Νέα Καλλίστη–Παλλάδιο–Αίγειρος), (β) ρήγμα παράλληλο με την κοίτη του ποταμού Βοσβόζη (άξονας Ισμαρίδα–Παγούρια–Μεγάλο Κρανοβούνι) και (γ) ρήγμα στο βόρειο-βορειοανατολικό όριο της περιοχής μελέτης (άξονας Αίγειρος–Μεγάλο Κρανοβούνι).

5. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

5.1. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ

5.1.1. Υδρογραφικό δίκτυο περιοχής μελέτης

Το μεγαλύτερο ποσοστό των επιφανειακών νερών του νομού προέρχεται από τον ορεινό όγκο της οροσειράς της Ροδόπης που αναπτύσσεται στα βόρεια. Ένα πυκνό υδρογραφικό δίκτυο μικρών ρευμάτων έχουν ως τελικούς αποδέκτες κάποιους μεγαλύτερους χείμαρρους, των οποίων η κοίτη να οδηγείται προς τον κάμπο, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται αυτοδύναμες λεκάνες απορροής ή να καταλήγουν κατά ομάδες σε διάφορους αποδέκτες.

Έτσι λοιπόν το υδρογραφικό δίκτυο του νομού μπορεί να διακριθεί σε τρεις μεγάλες ομάδες με βάση τον τελικό αποδέκτη που εκβάλλουν:

- α. στην ομάδα των κλάδων του ποταμού Λίσσου,
- β. στην ομάδα της λίμνης Βιστωνίδας (ποταμός Κομφάτος, Ασπροπόταμος κ.α.),
- γ. στην ομάδα της λίμνης Ισμαρίδας (ποταμός Βοσβόζης, Τρελοχείμαρρος κ.α.),

Πίνακας 5.1. Εκτάσεις των κυριότερων λεκανών απορροής της στενής και της ευρύτερης περιοχής μελέτης.

Λεκάνη απορροής	Υπολεκάνη	Έκταση (km ²)
Ορεινή λεκάνη ποταμού Βοσβόζη	Χιονόρεμα	57,500
	Καρυδιά	45,880
	Κάλχαντα	28,775
	Διάφορες	32,400
Ορεινή λεκάνη ποταμού Κομφάτου		556,700

Η αποστράγγιση της περιοχής λαμβάνει χώρα προς τα νότια της περιοχής. Το υδρογραφικό δίκτυο στο κέντρο της περιοχής μελέτης, όπως φαίνεται στο χάρτη της Εικόνας 5.1., έχει παράλληλη μορφή και αποτελείται κυρίως από 3 χείμαρρους (Μέσης, Πεπονότοπος, Γουρουνόρεμα). Στα όρια της κοίτης καθενός από αυτούς εμφανίζονται μικροί χείμαρροι, δενδριτικής κυρίως μορφής.

Ο ποταμός Βοσβόζης, ο οποίος μετά από τεχνητές παρεμβάσεις εκβάλλει στη λίμνη Ισμαρίδα, τροφοδοτείται επίσης από τα νερά του Τρελοχείμαρρου, με έκταση λεκάνης απορροής 25 km², και του χειμάρρου της Καρυδιάς (λεκάνη απορροής 45,880 km²). Οι διαβρώσεις όσο και οι αποθέσεις των υλικών που μεταφέρονται από την ορεινή ζώνη διαμέσου του συστήματος του χειμάρρου αυτού, έχουν παίξει σημαντικό ρόλο στη συνολική ανάπτυξη του τμήματος αυτού της περιοχής. Στην περιοχή του χειμάρρου σήμερα παρατηρείται μία πεδινή ζώνη ποικίλου πλάτους που διακόπτει το ημιλοφώδες ανάγλυφο και η οποία δομείται από τις αποθέσεις του χειμάρρου (Καλλιώρας 2008).



Εικόνα 5.1. Υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης (Καλλιώρας, 2008)

5.1.2. Υγροβιότοπος λίμνης Ισμαρίδας

Ο υγροβιότοπος της λίμνης Ισμαρίδας, η οποία καταλαμβάνει έκταση ίση με 2,543 km², περιλαμβάνει τις λιμνοθάλασσες του Νομού Ροδόπης (Ξηρολίμνη, Αλυκή, Καρατζά, Πτελέα, Ελος) καθώς και τις εκβολές των ποταμών Βοσβόζη και Λίσσου. Η λίμνη Ισμαρίδα είναι πλέον από τις τελευταίες ρηχές λίμνες γλυκού νερού στην Ελλάδα και περιβάλλεται από μεγάλης έκτασης καλαμώνες, υγρά λιβάδια και αλυμοβάλτους. Σε όλη τη διάρκεια του έτους φιλοξενεί αρκετά είδη χλωρίδας και πανίδας ωστόσο σε μικρούς αριθμούς, πολλά απ' οποία απειλούνται με εξαφάνιση. Φιλοξενεί επίσης σημαντικό αριθμό μεταναστευτικών πτηνών κυρίως τους φθινοπωρινούς μήνες που καιρό τώρα έχουν προκαλέσει το ενδιαφέρον της παγκόσμιας κοινότητας που έχει εντάξει την περιοχή στη συνθήκη RAMSAR. Η λίμνη Ισμαρίδα βρίσκεται σε απόσταση περίπου 3km από τη θάλασσα ενώ συνδέεται με αυτή διαμέσου καναλιού στο οποίο υπάρχει αλιευτική δραστηριότητα. Κύριος τροφοδότης γλυκών νερών είναι ο ποταμός Βοσβόζης ο οποίος εκβάλλει σε αυτή έπειτα από τεχνητές παρεμβάσεις στην κοίτη του.

Μορφολογικά, η ζώνη της λίμνης αποτελεί μια κοίλη επιφάνεια χαμηλότερη από την υπόλοιπη περιοχή. Για την προστασία των εδαφών που βρίσκονται βόρεια και ανατολικά της λίμνης από τις πλημμύρες έχει κατασκευαστεί ανάχωμα προστασίας που περιβάλλεται από μια τάφρο συλλογής των νερών της αποστράγγισης των περιοχών που βρίσκονται ανατολικά και βορειοανατολικά αυτής. Ο Πεταλάς (1997) αναφέρει ότι το λοφώδες περιβάλλον ήπιας μορφολογίας, χωρίς εξάρσεις και απότομες κλίσεις οφείλεται στην κατάσταση των σχηματισμών που δομούν το λοφώδες ανάγλυφο (χαλαροί, ευαποσάθρωτοι και κατά θέσεις διαπερατοί).

Τα υδάτινα σώματα που αναπτύσσονται στην παραλιακή ζώνη νοτιοδυτικά της λίμνης Ισμαρίδας είναι λιμνοθάλασσες με μικρής έκτασης αλμυρόβαλτους περιμετρικά, ενώ βρίσκονται σε πλήρη επικοινωνία με τη θάλασσα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους μέσω καναλιών επικοινωνίας. Η τροφοδοσία τους με γλυκό νερό είναι ελάχιστη και παρατηρείται μόνο τους χειμερινούς μήνες και μάλιστα μετά από έντονες βροχοπτώσεις.

5.1.3. Υγροβιότοπος Ξηρολίμνης

Η Ξηρολίμνη, με έκταση 1,759 km², είναι αλμυρή και δεν τροφοδοτείται καθόλου από επιφανειακά γλυκά νερά, ενώ επικοινωνεί με τη θάλασσα στο νοτιοανατολικό μέρος της διαμέσου καναλιού.

5.1.4. Υγροβιότοποι λιμνών Καρατζά - Αλυκής

Οι δύο αυτές λιμνοθάλασσες έχουν έκταση 1,859 km² και 3,306 km² αντίστοιχα. Η λιμνοθάλασσα Καρατζά επικοινωνεί με τη θάλασσα στο νότιο μέρος της και δέχεται επιφανειακά γλυκά νερά μόνο από τις περιμετρικές αρδευόμενες εκτάσεις. Η λ. Αλυκή δέχεται και αυτή τα νερά των αρδευόμενων καλλιεργούμενων εκτάσεων.

5.1.5. Υγροβιότοπος λιμνών Πτελέας – Έλος

Οι λίμνες Πτελέα και Έλος έχουν έκταση 2,972 km² και 2,344 km² αντίστοιχα, ενώ δεν επικοινωνούν μεταξύ τους εξαιτίας της ύπαρξης αναχώματος που τις διαχωρίζει. Η λιμνοθάλασσα Έλος επικοινωνεί με τη θάλασσα στο νότιο μέρος της. Η λιμνοθάλασσα Πτελέα επικοινωνεί με τη θάλασσα δια μέσου στομίου στο νοτιοανατολικό της μέρος. Και οι δύο λιμνοθάλασσες περιβάλλονται στο βόρειο και βορειοανατολικό τμήμα τους από αρδευόμενες καλλιεργούμενες εκτάσεις.

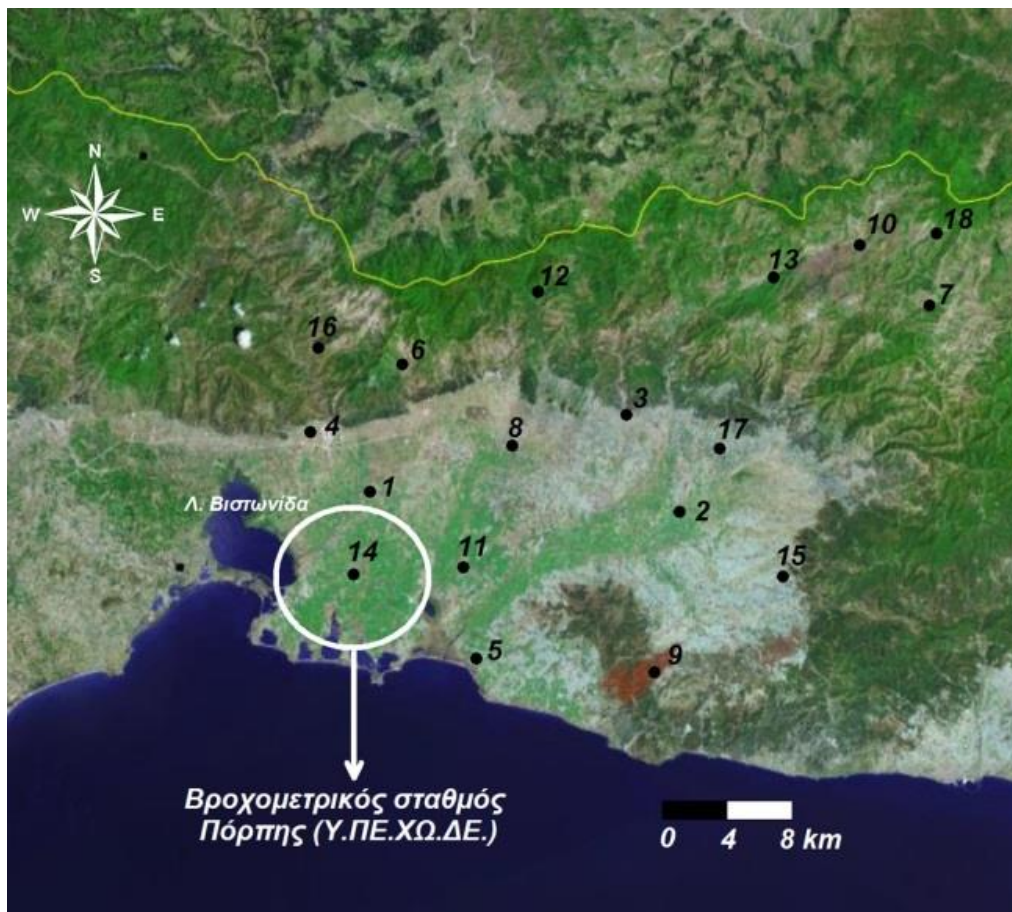
Διάφορες ανθρωπογενείς παρεμβάσεις όπως νέα κανάλια επικοινωνίας με τη θάλασσα, κατάργηση παλαιών τάφρων, εκβαθύνσεις, νεότεροι υδάτινοι χώροι πρόσβασης και αναχώματα, με σκοπό τη βελτίωση της παραγωγής σχετικών ιχθυοκαλλιεργειών της περιοχής, είχαν ως αποτέλεσμα την επιδείνωση της ποιότητας του ευρύτερου υγροβιοτόπου.

5.2. ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

5.2.1. Μετεωρολογικοί σταθμοί

Τα μετεωρολογικά δεδομένα συνολικά καταγράφονται από ένα δίκτυο 18 μετεωρολογικών και βροχομετρικών σταθμών του ν. Ροδόπης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1. που ακολουθεί, απεικονίζονται τα σημεία όπου είναι εγκατεστημένοι οι σταθμοί με πραγματικές συντεταγμένες μέσα στο νομό. Σημαντικός για την παρούσα διατριβή είναι ο βροχομετρικός σταθμός της Πόρπης (ιδιοκτησίας Υ.ΠΕ.ΚΑ.), που εμφανίζεται με τον κωδικό 14, ο οποίος αποτέλεσε την κύρια πηγή δεδομένων. Καθώς βρίσκεται στο μέσο της περιοχής μελέτης, έχει υψόμετρο +35m, σημαντικό για την περιοχή που είναι κατεξοχήν πεδινή, με υψόμετρα που δεν ξεπερνούν τα +20-30m και καλύπτει συνολικά μια έκταση περίπου 160 km².

Τα πρωτογενή δεδομένα από το βροχομετρικό σταθμό ελήφθησαν από την Υπηρεσία Δημοσίων Έργων στην πόλη της Κομοτηνής τα οποία παρουσιάζονται αρκετά ακριβή με μικρές έως και μηδενικές ελλείψεις σε μετρήσεις μηνιαία και ετήσια.



Σχήμα 5.1. Θέσεις των βροχομετρικών και μετεωρολογικών σταθμών του Νομού Ροδόπης και επισήμανση του βροχομετρικού σταθμού Πόρπης, στην περιοχή μελέτης.(Καλλιώρας 2008)

Στον Πίνακα 5.2. Που ακολουθεί αναφέρονται οι βροχομετρικοί σταθμοί του νομού Ροδόπης με τον κωδικό τους και την περιοχή όπου είναι εγκατεστημένοι. Τα σημεία αυτά σημειώνονται με τους ίδιους αριθμούς στο παραπάνω σχήμα. Στον Πίνακα 5.3 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μεγαλύτερες υδρολογικές λεκάνες του νομού και η αντίστοιχη έκταση που καταλαμβάνουν.

Πίνακας 5.2. Επεξηγηματικός πίνακας με την αρίθμηση των βροχομετρικών και μετεωρολογικών σταθμών του Νομού Ροδόπης βάσει του σχήματος 5.1.

α/α	Σταθμός	α/α	Σταθμός	α/α	Σταθμός
1	Αμπελουργικός	7	Κέχρος	13	Οργάνη
2	Αρίσβη	8	Κομοτηνή	14	Πόρπη
3	Γρατινή	9	Κρωβύλη	15	Σάπες
4	Ίασμος	10	Μυρτίσκη	16	Τρίκορφο
5	Ίμερος	11	Νέο Σιδηροχώρι	17	Φιλλύρα
6	Κερασέα	12	Νυμφαία	18	Χλόη

Πίνακας 5.3. Οι κυριότερες υδρολογικές λεκάνες του Νομού Ροδόπης.

Λεκάνη	Έκταση (km ²)
π. Λίσσου	1407,2
π. Κομφάτου	556,4
π. Βοσβόζη	164,6

5.2.2 Βροχομετρικά στοιχεία

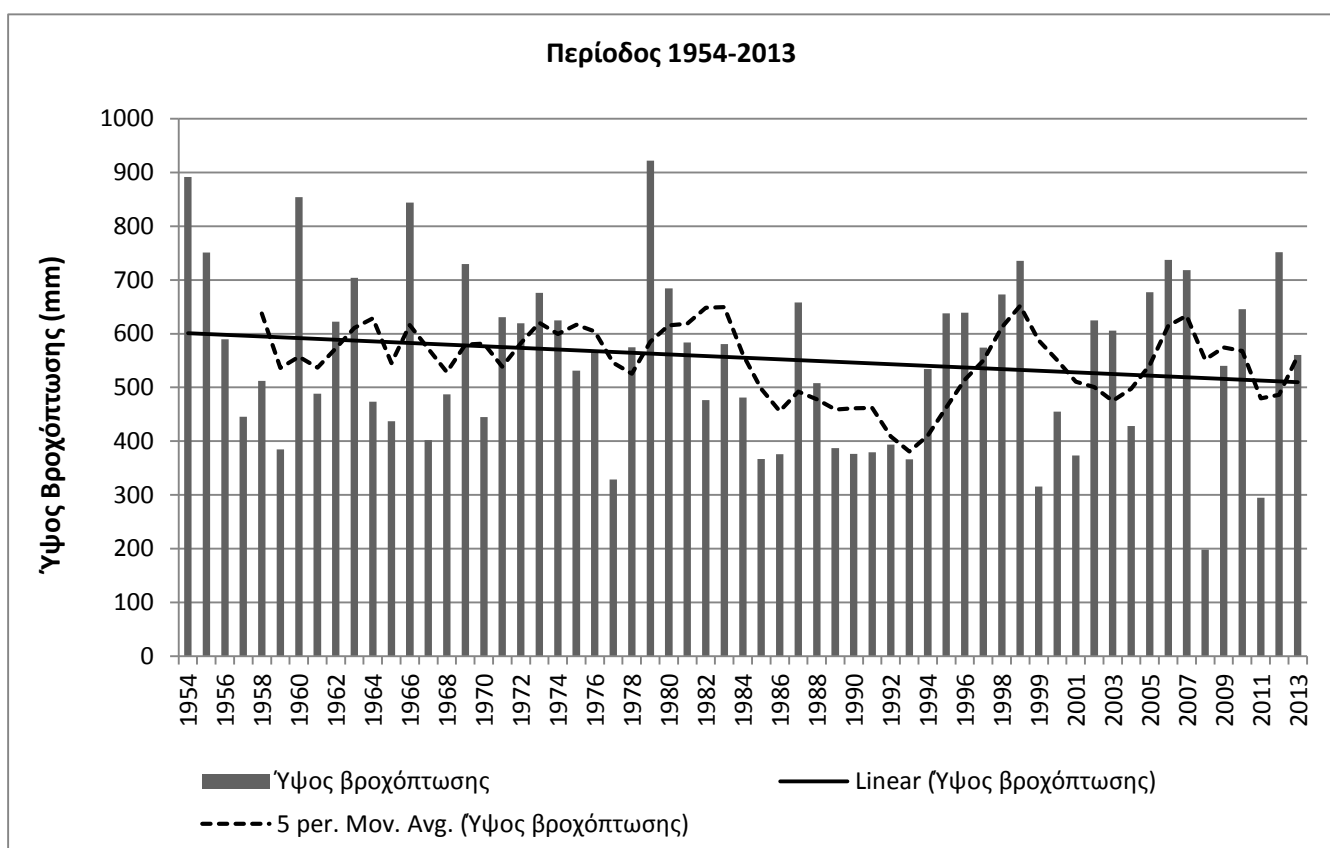
Το κλίμα της περιοχής μελέτης χαρακτηρίζεται ως τυπική πεδινή μεσογειακή περιοχή με βάση τη διακύμανση του ετήσιου και υπερετήσιου ύψους βροχόπτωσης (mm). Στην περιοχή επικρατούν γενικά θερμά και ξηρά καλοκαίρια ενώ αντίθετα υγροί και ψυχροί χειμώνες.

Πίνακας 5.4. Ύψη βροχόπτωσης από το βροχομετρικό σταθμό Πόρτης για το διάστημα μεταξύ 1954 και 2013.

ΕΤΟΣ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠΤ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	Σύνολο
1954	99,9	59,1	80,8	15,2	20,7	4,5	10,3	13,4	27,8	238,4	213,4	108	891,5
1955	113,1	34	55,5	44	26	67,8	67	16,5	66	115	90,5	55,5	750,9
1956	43,9	36	79,4	23,5	97,2	84,7	3,5	1,5	0	30,5	132	57,2	589,4
1957	41,5	21,5	22	37,5	95,5	22	8,5	0	24,3	57,8	46,2	68,4	445,2
1958	163,5	10,6	75,5	61,9	2	36,5	18	9,8	36,8	17,5	63	17,2	512,3
1959	107,3	5	15,7	39,9	15,2	15,6	20,5	2,7	23,4	18,2	54,6	66,7	384,8
1960	200,6	34,7	46,5	18,8	98,6	101,5	19	6	0	7,5	187,3	133,9	854,4
1961	102,3	16	14,9	28,5	50,9	66,5	13,8	0	7,6	0	60,4	127,5	488,4
1962	10,2	42,2	136,1	51,7	28,5	7	69,9	0	18,7	63,8	98,3	96,3	622,7
1963	85,9	106,2	79,5	24	95,1	79,8	10	0	41,1	58	53,8	70,7	704,1
1964	20,6	43,4	0	50,6	47,1	16,5	23,8	17,6	79,6	78,2	23,8	72,3	473,5
1965	39,7	124,5	24	21,3	29,4	6,9	0	0	0	0,2	74,5	116,4	436,9
1966	58,2	17,5	65,4	56	60,5	27	1,9	0	69,1	81,5	191,5	215,3	843,9
1967	39,6	24,3	32	33,4	31,1	17,7	20,8	0	9,8	39,1	64,1	89,9	401,8
1968	129,5	70,5	19,2	10,5	0,6	25,5	0,3	8,5	54,3	10,5	111,4	46,1	486,9
1969	115,2	102,5	63,8	38,7	14,4	32,5	3,7	5,5	10,1	0,2	19,5	323,4	729,5
1970	108,2	42,8	62,9	31,2	43,1	8,7	8,4	11,4	3,8	43,4	17,7	63,5	445,1
1971	45	79,9	95,9	41,8	36,6	57,8	87,6	16,4	51,9	25	32,8	60,1	630,8
1972	28,4	82,4	9,8	77,6	20,8	19,4	19,4	40,6	63	228	16,5	13,7	619,6
1973	131,2	64,3	66,4	61,1	22,6	45,7	21	0	116,6	39,1	31,1	77	676,1
1974	14,9	37,1	72,7	31,7	34,5	53,3	61,7	0	24,4	20,5	63,8	210,3	624,9
1975	52,7	23,3	10,1	57,8	69,1	109,7	9	59,2	0	37,5	39,1	63,9	531,4
1976	9,3	35,5	17,8	13,1	30,3	43,2	41,4	37,4	13,2	194,3	91,5	42,1	569,1
1977	54,5	46,1	11,3	5,9	48,3	10,9	0,5	1,4	91,9	7,5	30,4	20,3	329
1978	40,7	54,7	45	66,1	71,2	20	1,3	6,1	71,5	73,1	70,8	54,3	574,8
1979	173,1	132	14,5	87,1	56	8,6	59,5	11,8	47,7	79,6	189,6	62,5	922
1980	86,5	3	37,8	86,1	65	60,2	25,2	10,05	24,21	36,14	126,17	123,75	684,12
1981	148,2	50,8	17,2	4,5	12,3	11,2	24	23,9	3,3	87	83,5	117,7	583,6
1982	4,4	94,7	41,6	79,4	44,8	0,2	20	8,9	2,7	43,8	67,5	68,7	476,7
1983	9,4	18,4	39,6	17,9	79,4	130,2	74,1	17,5	22,3	20	92,5	59,2	580,5
1984	74,1	15,7	113,3	49,8	4,5	11,2	25,4	37,3	2,4	13,61	79,1	54,6	481,01
1985	47	59,8	44,8	12,8	7,3	14,4	2	27,2	9,7	23,8	107,3	10,6	366,7
1986	55,7	171,6	4	10,4	43,3	27,4	4	0	0	7,3	32,7	19,2	375,6
1987	22,9	44,2	46,5	98,8	14,6	95,2	6,5	10,5	0	26,7	173,3	119,2	658,4
1988	10,4	60	103,5	39,1	19,3	50,7	7,4	0	23,2	23,2	111,1	60,2	508,1
1989	0	0	69,8	14,3	22,5	62,5	8,6	5,3	66,1	41	65,1	31,9	387,1
1990	0	8,7	11,3	42,9	17,3	22,2	4	0	39,4	64,7	29,6	136,5	376,6
1991	1,8	33,1	23,4	64,4	69,8	28,6	51,3	18,6	5	26,9	40,5	16,2	379,6
1992	4,16	1,2	41,1	57	16,6	49,9	4,9	0	0,52	27,4	82,6	108,4	393,78
1993	13,2	0	31,2	29,1	26,6	20,2	4,5	6,3	4,8	16,5	133,7	80,2	366,3
1994	80,1	28,2	22,7	38,7	4,5	54,7	23,3	10,2	0	39,9	37,2	194,6	534,1
1995	76,4	19,5	132,4	35,5	9,2	9	43,2	14,6	86,3	6,9	106,7	97,9	637,7
1996	62,9	95,5	35,6	48,4	36,5	6,5	0	12,8	79,0	15,9	101,9	144,5	639,4
1997	50,8	12,9	33,2	46,1	10,0	6,0	8,3	38,2	2,5	84,2	90,5	191,6	574,1
1998	68,3	132,3	34,0	0,4	58,0	20,9	28,4	0,6	51,8	72,5	127,8	78,3	673,3
1998	57,6	157	51,5	2	50,5	5,8	37,3	0	54,9	104,2	132,8	81,8	735,4
1999				14	20,5	21	40,5	24,5	20,5	16,5	80,5	77,5	315,5
2000	56,5	49	55,5	39,5	16,5	7,5	6	0	30,5	58	65,5	70,5	455
2001	68	11	11	71	17	5	9	56	45,5	0	33,5	46,5	373,5
2002	38	25	48	7,5	0	8,5	106	8	82,5	165,5	93	43	625
2003	122	23	14	12	81	0	17	0	66	102	38	130,5	605,5
2004	59	0	42,5	22	45	20	93,5	2,5	4,5	30	27	82	428
2005	58	107	22	9	18,5	4	56	96	0	128	126	53	677,5
2006	54	74	107	22	26	18	46	6	145,5	56	129	54	737,5
2007	9	37	90	5	121	24	0	17	29	113	241	32,5	718,5
2008	31	0	3	61,5	11	10	6,5	13	4	12	8	38,5	198,5
2009	142,5	23	82	9	34	38	0	0	18	38,5	38	117	540
2010	11	155	61	19,5	10	36	57	0	15	170	42	69	645,5
2011	35,5	16	12	16,5	27,5	25,5	11	19	3	57	0	72	295
2012	82	137	27	63	114	5	0	20	0	59	27	218	752
2013	105	84	50	24	0	78	7	0	30,5	30	148	4	560,5

Στο Σχήμα 5.2 που ακολουθεί παρουσιάζεται η διακύμανση της ετήσιας βροχόπτωσης του βροχομετρικού σταθμού Πόρπης (Υ.ΠΕ.ΚΑ.) για την περίοδο 1954-2013 και στον Πίνακα 5.5 παρουσιάζεται η στατιστική επεξεργασία των υψών των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (mm) καταγεγραμμένα για τον ίδιο βροχομετρικό σταθμό και την περίοδο 1954-2013.

Από το γραμμικό μέσο (Σχήμα 5.4) προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι βροχοπτώσεις παρουσιάζουν μια πτωτική τάση στο διάστημα 1954-2013 της τάξη των 100mm, στην καρδιά της περιοχής μελέτης, όπου είναι εγκατεστημένος ο σταθμός της Πόρπης. Παρατηρούνται ακόμη ανά περίπου 4-5 χρόνια, μεταξύ 1954 και 1980, μεγάλες διακυμάνσεις στα συνολικά ύψη βροχόπτωσης με πολύ βροχερά έτη να διαδέχονται τα μεσοδιαστήματα αυτά, φαινόμενο που όπως παρατηρείται σταματά από το 1980 και έπειτα.

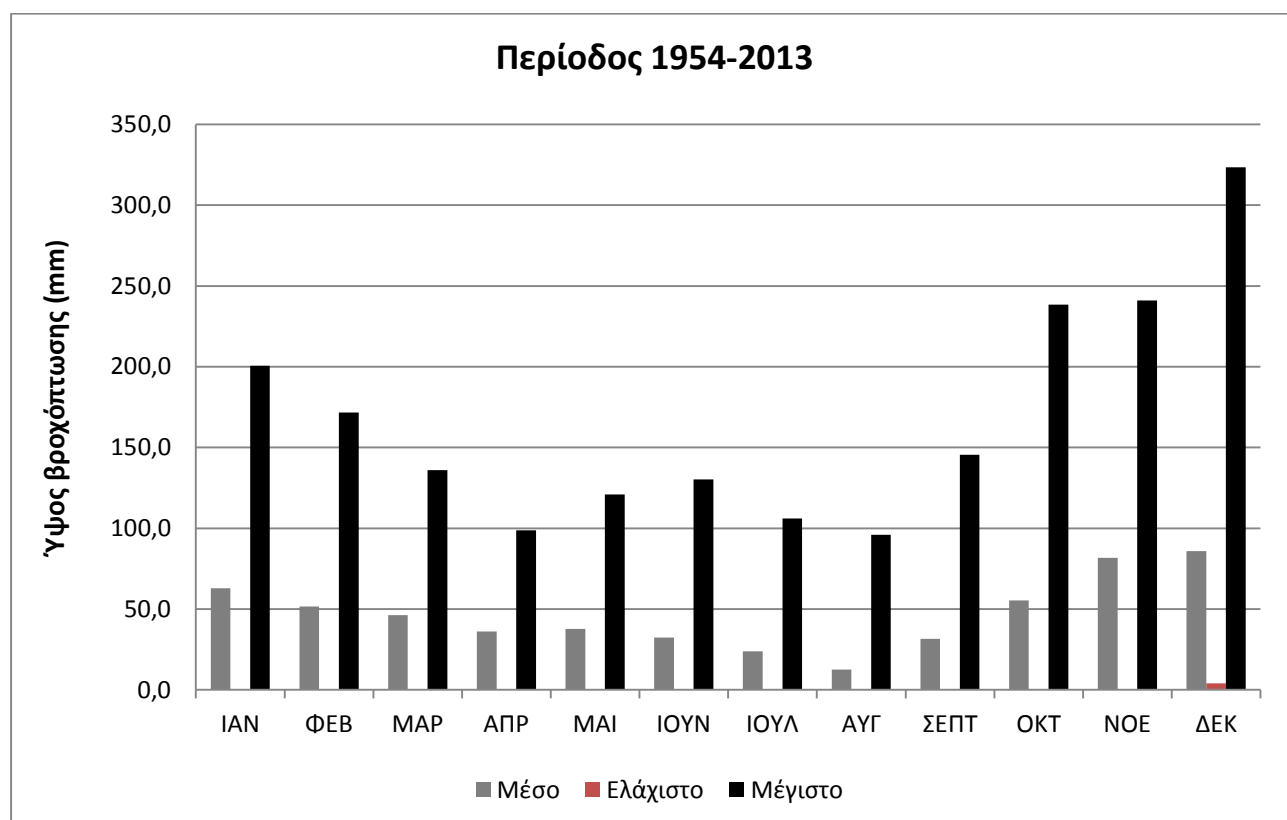


Σχήμα 5.2. Διακύμανση της ετήσιας βροχόπτωσης στο βροχομετρικό σταθμό Πόρπης (Υ.ΠΕ.ΚΑ.) για την περίοδο 1954-2013.

Πίνακας 5.5. Στατιστική επεξεργασία υψών ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (mm) καταγεγραμμένα στο βροχομετρικό σταθμό Πόρπης (Υ.ΠΕ.ΚΑ.) για την περίοδο 1954-2013.

ΕΤΟΣ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠΤ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	Σύνολο
AVE	62,9	51,6	46,3	36,1	37,7	32,4	23,9	12,6	31,6	55,4	81,7	85,8	555,4
MIN	0	0	0	0,4	0	0	0	0	0	0	0	4	198,5
MAX	200,6	171,6	136,1	98,8	121	130,2	106	96	145,5	238,4	241	323,4	922,0
SDT DEV	47,7	44,6	32,9	24,2	30,2	30,0	26,1	17,5	33,0	54,1	54,1	59,2	156,7

Στο Σχήμα 5.3, φαίνεται η διακύμανση των μέσων, ελάχιστων και μέγιστων μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης για την ευρύτερη περίοδο έρευνας (1954-2013), όπου οι πιο βροχεροί μήνες παρατηρείται πως είναι οι Οκτώβριος, Νοέμβριος και Δεκέμβριος, ενώ ο Απρίλιος φαίνεται ο ξηρότερος από τους εαρινούς. Ειδική αναφορά πρέπει να γίνει στον Ιούνιο ο οποίος όπως προαναφέρθηκε εμφανίζεται, σχετικά με τους άλλους μήνες της ξηρής περιόδου, πολύ βροχερός με μέγιστη τιμή στα επίπεδα του Μαρτίου και μέσο ύψος βροχόπτωσης παρόμοιο με τους βροχερούς ανοιξιάτικους μήνες ενώ ξεπερνά τον μήνα Απρίλιο.



Σχήμα 5.3. Διακύμανση της μέσης, ελάχιστης και μέγιστης μηνιαίας τιμής ύψους βροχόπτωσης (mm) στο βροχομετρικό σταθμό Πόρπης (Υ.ΠΕ.ΚΑ.) για την περίοδο 1954-2013.

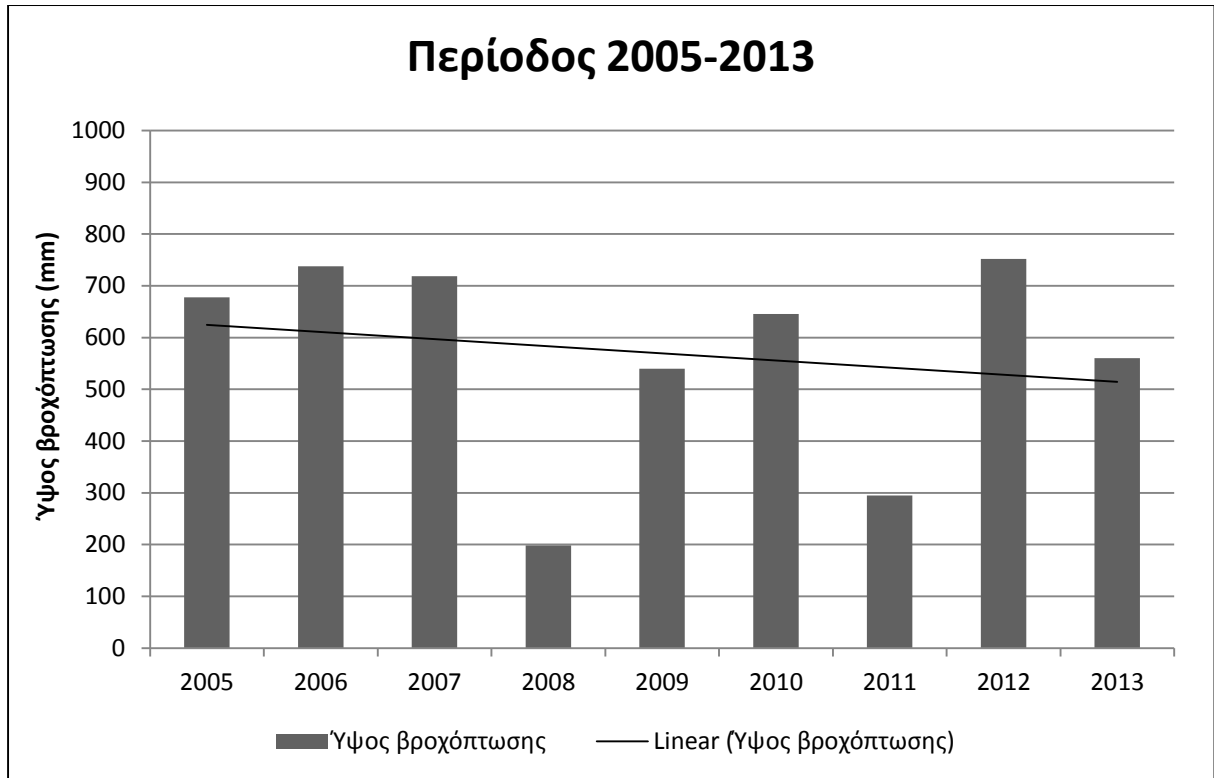
Για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής, κρίθηκε σκόπιμο να αναλυθεί η πορεία των χαρακτηριστικών των κατακρημνισμάτων για ένα μικρότερο και πιο πρόσφατο διάστημα, και ως εκ τούτου επιλέχθηκε η περίοδος μεταξύ 2005-2013, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στα σχήματα που ακολουθούν. Ειδικότερα όσον αφορά στη συγκεκριμένη περίοδο έρευνας (2005-2013), ο Πίνακας 5.6 περιέχει τα μηνιαία ύψη βροχής (mm), όπου φαίνεται ότι η βροχερότερη περίοδος είναι αυτή του διαστήματος Οκτωβρίου-Νοεμβρίου.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ο μήνας Ιούνιος αποτελεί έναν από τους βροχερότερους μήνες σε μέσο όρο ύψους βροχόπτωσης όπως προαναφέρθηκε και για το διάστημα 1954-2013. Η προηγούμενη παρατήρηση σχετίζεται άμεσα με τους ρυθμούς άντλησης και συνεπώς με τη συνολική ποσότητα απόληψης υπόγειου νερού από το υδροφόρο σύστημα της περιοχής. Επίσης αξιοσημείωτο αποτελεί το γεγονός ότι ο μήνας Αύγουστος, εμφανίζει σημαντικά ύψη βροχής στο έτος 2005. Τέλος ο μήνας Μάιος παρουσιάζει πολύ μεγάλες διακυμάνσεις μέσα στα έτη παρακολούθησης με τιμές από 121mm το 2007 σε 11mm την αμέσως επόμενη χρονιά (2008) που παράλληλα παρατηρείται ως το πιο ξηρό έτος με μόλις 198,5mm συνολικής ετήσιας βροχόπτωσης.

Πίνακας 5.6. Μηνιαία ύψη βροχής (mm) και στατιστική επεξεργασία τους καταγεγραμμένα από το βροχομετρικό σταθμό Πόρπτης (Υ.ΠΕ.ΚΑ.) της περιόδου 2005-2013.

ΕΤΟΣ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠΤ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	Σύνολο
2005	58	107	22	9	18,5	4	56	96	0	128	126	53	677,5
2006	54	74	107	22	26	18	46	6	145,5	56	129	54	737,5
2007	9	37	90	5	121	24	0	17	29	113	241	32,5	718,5
2008	31	0	3	61,5	11	10	6,5	13	4	12	8	38,5	198,5
2009	142,5	23	82	9	34	38	0	0	18	38,5	38	117	540
2010	11	155	61	19,5	10	36	57	0	15	170	42	69	645,5
2011	35,5	16	12	16,5	27,5	25,5	11	19	3	57	0	72	295
2012	82	137	27	63	114	5	0	20	0	59	27	218	752
2013	105	84	50	24	0	78	7	0	30,5	30	148	4	560,5
AVE	58,7	70,3	50,4	25,5	40,2	26,5	20,4	19,0	27,2	73,7	84,3	73,1	47,5
MIN	9	0	3	5	0	4	0	0	0	12	0	4	0
MAX	142,5	155	107	63	121	78	57	96	145,5	170	241	218	241
SDT DEV	44,4	55,2	37,0	21,8	45,0	22,9	24,9	30,0	45,9	51,9	81,0	62,6	17,7

Στο ιστόγραμμα του Σχήματος 5.4 παρουσιάζονται οι ετήσιες τιμές ύψους βροχόπτωσης (mm) για την περίοδο έρευνας 2005-2013.

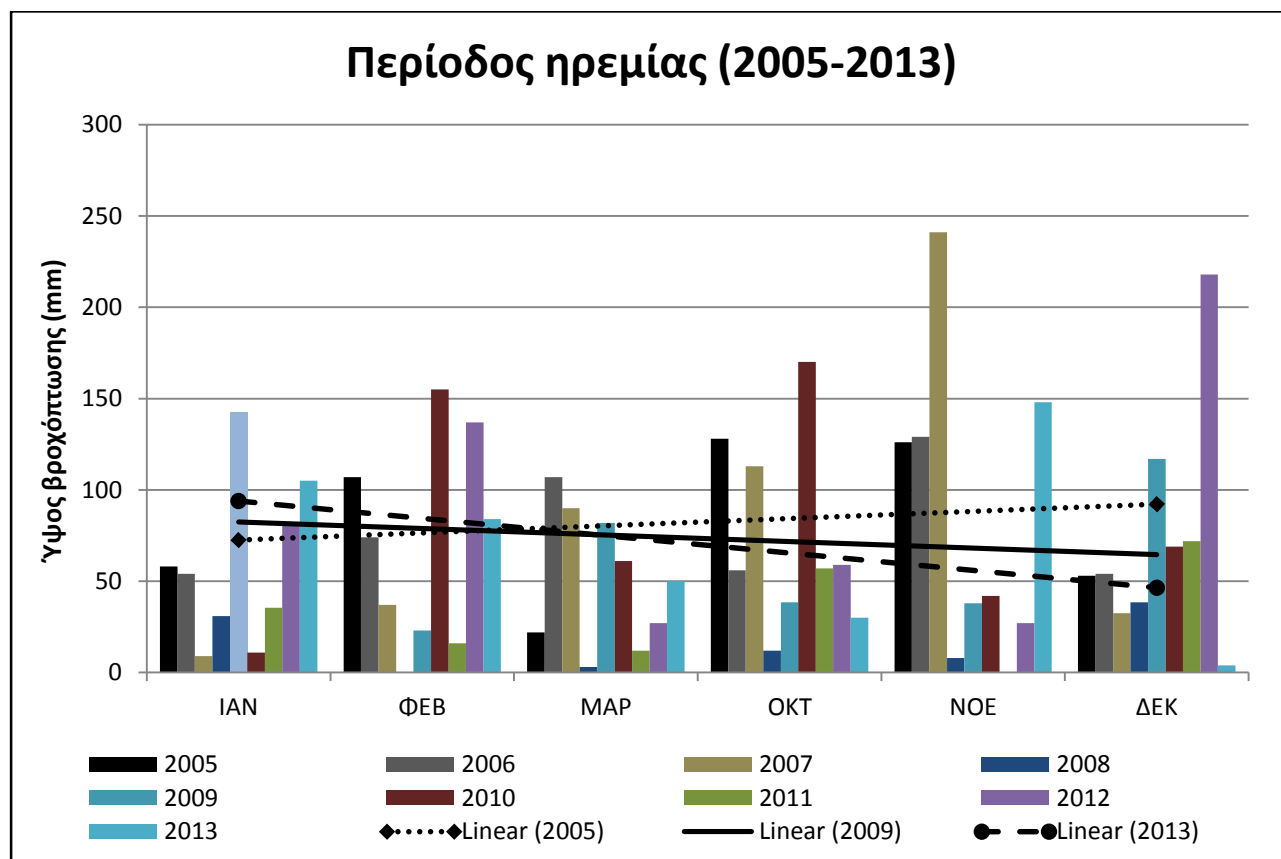


Σχήμα 5.4. Διακύμανση της ετήσιας τιμής ύψους βροχόπτωσης (mm) στο βροχομετρικό σταθμό Πόρπης (Υ.ΠΕ.ΚΑ.) για την περίοδο έρευνας 2005-2013.

Από το Σχήμα 5.4 συμπεραίνεται ότι οι βροχερότεροι μήνες είναι οι Οκτώβριος, Νοέμβριος, Δεκέμβριος και Ιανουάριος, ενώ ο πιο ξηρός μήνας για όλη την παραπάνω περίοδο είναι ο Άυγουστος. Ο μήνας Ιούνιος για τα έτη 2009, 2010 και 2013, εμφανίζεται τόσο βροχερός, σε επίπεδα που προσεγγίζουν την εικόνα των εαρινών μηνών. Η εικόνα αυτή συνεχίζεται και ίσως γίνεται πιο έντονη εντός του έτους 2014, αν και δεν υπάρχουν ολοκληρωμένα ετήσια δεδομένα βροχόπτωσης στην παραπάνω ανάλυση για το τρέχον έτος.

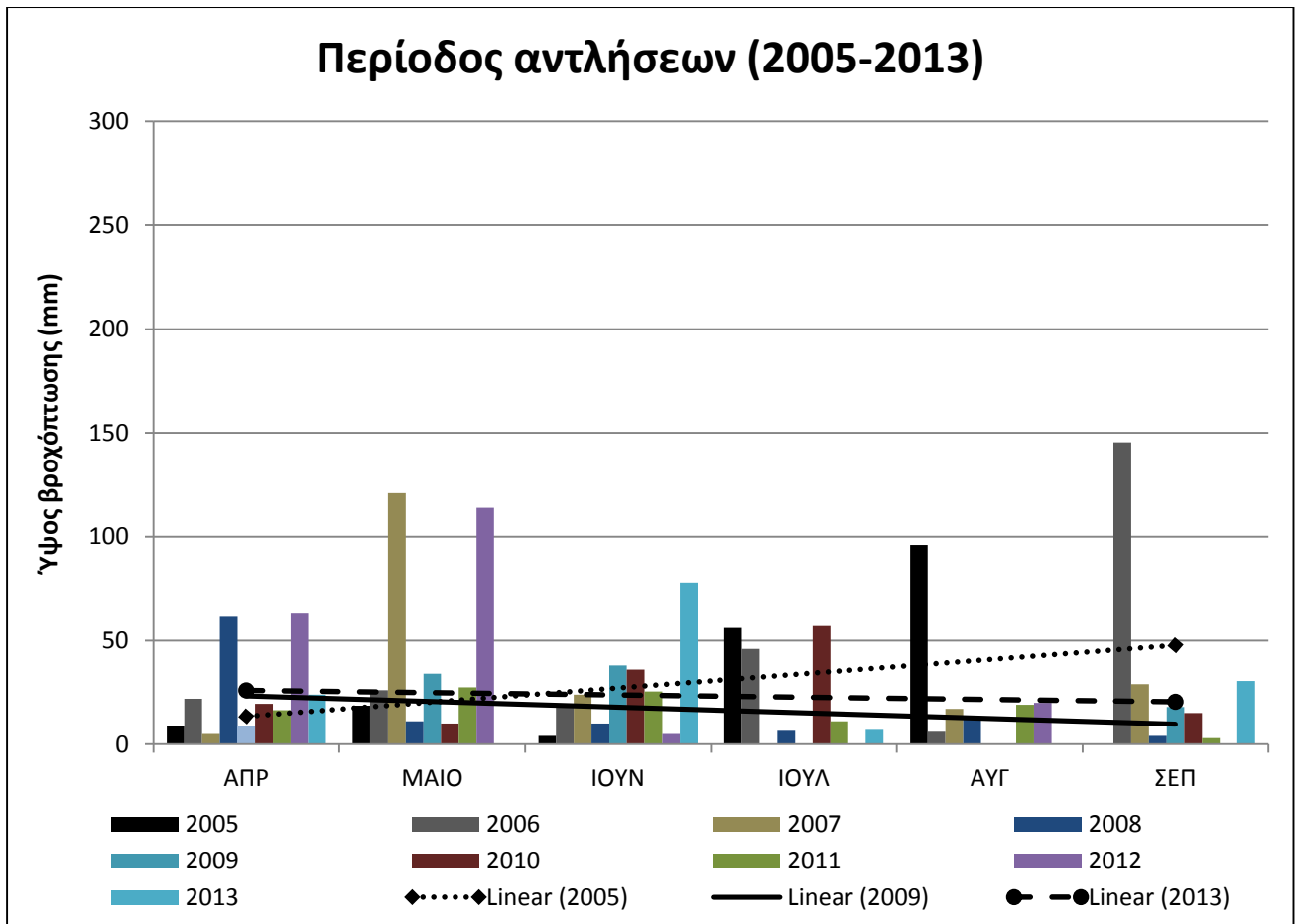
Η συχνότητα και το ύψος βροχής μίας περιοχής η οποία υπόκειται σε καλλιεργητικές δραστηριότητες και συνεπώς σε καθεστώς έντονης άντλησης είναι πολύ σημαντικές για την αύξηση των εισροών του υδατικού ισοζυγίου τη περιοχής. Βασικότερο όλων αποτελεί η διατήρηση, έστω και χαμηλών υψών βροχής, κατά τη διάρκεια των αντλητικών περιόδων, γεγονός που όχι μόνο θα διασφαλίζει ένα συνεχή εμπλουτισμό στο υδροφόρο σύστημα αλλά πιο σημαντικά, θα επιφέρει μείωση των αντλήσεων (Καλλιώρας, 2008).

Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η διακύμανση της ετήσιας τιμής ύψους βροχόπτωσης (mm) κατά τη διάρκεια της περιόδου ηρεμίας (Οκτώβριος-Μάρτιος) και το Σχήμα 5.6 της αντλητικής περιόδου (Απρίλιος-Σεπτέμβριος) για το διάστημα της βραχείας περιόδου έρευνας (2005-2013). Σημειωμένοι είναι οι γραμμικοί μέσοι των ετών 2005,2009 και 2013 όπου παρατηρείται ότι η περίοδος ηρεμίας χαρακτηρίζεται από πτωτική τάση σύμφωνα με την κλίση της γραμμής τάσης των ετών 2009 και 2013, αντίθετα από το 2005 που είναι ανοδική. Συνολικά η τάση για τα υπόπλοια έτη είτε εμφανίζεται ανοδική είτε παραμένει σταθερή.



Σχήμα 5.5. Διακύμανση της ετήσιας τιμής ύψους βροχόπτωσης (mm) κατά τη διάρκεια της περιόδου ηρεμίας (Οκτώβριος-Μάρτιος) για την περίοδο 2005-2013.

Αντίστοιχα για την αντλητική περίοδο, από το Σχήμα 5.6 που ακολουθεί παρατηρείται πτωτική τάση στο συνολικό ύψος βροχόπτωσης για τα έτη 2009 και 2013 ενώ όπως και πριν, το 2005 εμφανίζεται ανοδική. Η εικόνα της γραμμής τάσης για την περίοδο άντλησης εμφανίζει αρκετά μικρότερες κλίσεις για όλα τα έτη σε σχέση με την προηγούμενη περίοδο.



Σχήμα 5.6. Διακύμανση της ετήσιας τιμής ύψους βροχόπτωσης (mm) κατά τη διάρκεια της αντλητικής περιόδου (Απρίλιος-Σεπτέμβριος) για την περίοδο 2005-2013.

5.2.3 Υπολογισμός όγκων ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων

Καθώς αποτελούν την κύρια φυσική τροφοδοσία του υπόγειου υδροφορέα, τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα αποτελούν ένα σημαντικό στοιχείο στην έρευνα και συμβάλλουν θετικά στο υδατικό ισοζύγιο της περιοχής.

Ο Καλλέργης (1999) αναφέρει ότι ο όγκος του επιφανειακού νερού σε μια λεκάνη είναι συνάρτηση της έντασης της βροχής, της υδροπερατότητας του εδάφους, της διάρκειας της βροχής, του είδους της χλωρίδας, των φυσιογραφικών παραμέτρων της λεκάνης απορροής, της διανομής της βροχής, της γεωμετρίας του υδρογραφικού δικτύου και του βάθους της επιφάνειας του φρεάτιου υδροφόρου ορίζοντα. Ο ίδιος αναφέρει ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν την απορροή διακρίνονται σε:

Κλιματικούς:

- Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα: είδος (βροχή, χιόνι, παγετός κ.λ.π.), τύπος, ένταση, διάρκεια, χωροχρονική κατανομή, συχνότητα, κ.λ.π.
- Κατακράτηση κωμοστέγης, που είναι συνάρτηση του είδους της βλάστησης, της σύνθεσής της, της ηλικίας της, της πυκνότητάς της και της εποχής του έτους.
- Εξάτμιση, που το μέγεθός της επηρεάζεται από επί μέρους κλιματικά στοιχεία (θερμοκρασία, άνεμοι, ατμοσφαιρική πίεση) από τη μορφολογία της επιφάνειας εξάτμισης κ.λ.π.

– Διαπνοή, που επηρεάζεται ειδικότερα από πολλούς παράγοντες (θερμοκρασία, ηλιακή ακτινοβολία, άνεμοι, υγρασία του αέρα και του εδάφους, είδη βλάστησης κ.λ.π.)

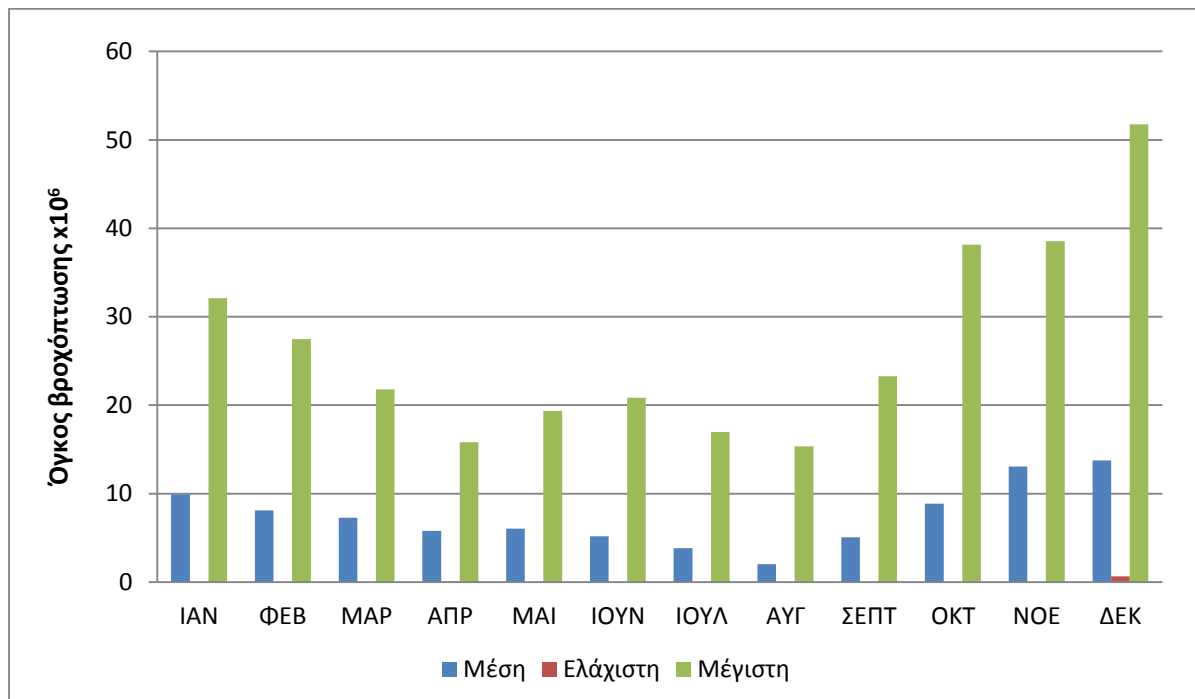
Φυσιογραφικούς:

– Τα χαρακτηριστικά της λεκάνης: γεωμετρικά χαρακτηριστικά (μέγεθος, σχήμα, κλίση, προσανατολισμός, υψόμετρο, πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου), φυσικά χαρακτηριστικά (χρήση γαιών, κατείδυση, τύπος του εδάφους, γεωλογικές συνθήκες, τοπογραφικές συνθήκες, καθώς και παρουσία λιμνών, τελμάτων, τεχνητή στράγγιση κ.λ.π.).

– Τα χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου: (μεταφορική ικανότητα, γεωμετρικά χαρακτηριστικά, κλίση, διακλάδωση, δυνατότητα αποταμίευσης κ.λ.π.).

Για τον υπολογισμό του όγκου των κατακρημνισμάτων, σε όλη την έκταση της περιοχής μελέτης, εφαρμόστηκε μια παραλλαγή της μεθόδου των ισοϋέτιων καμπυλών.

Στο Σχήμα 5.7 φαίνεται η διακύμανση των μηνιαίων όγκων βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια της περιόδου (1954-2013). Οι μεγαλύτεροι όγκοι νερού εμφανίζονται τους μήνες Οκτώβριο και Δεκέμβριο ενώ οι μήνες Νοέμβριος και Δεκέμβριος είναι οι μόνοι που δεν παρουσιάζουν μηδενικούς, ως ελάχιστους, όγκους.



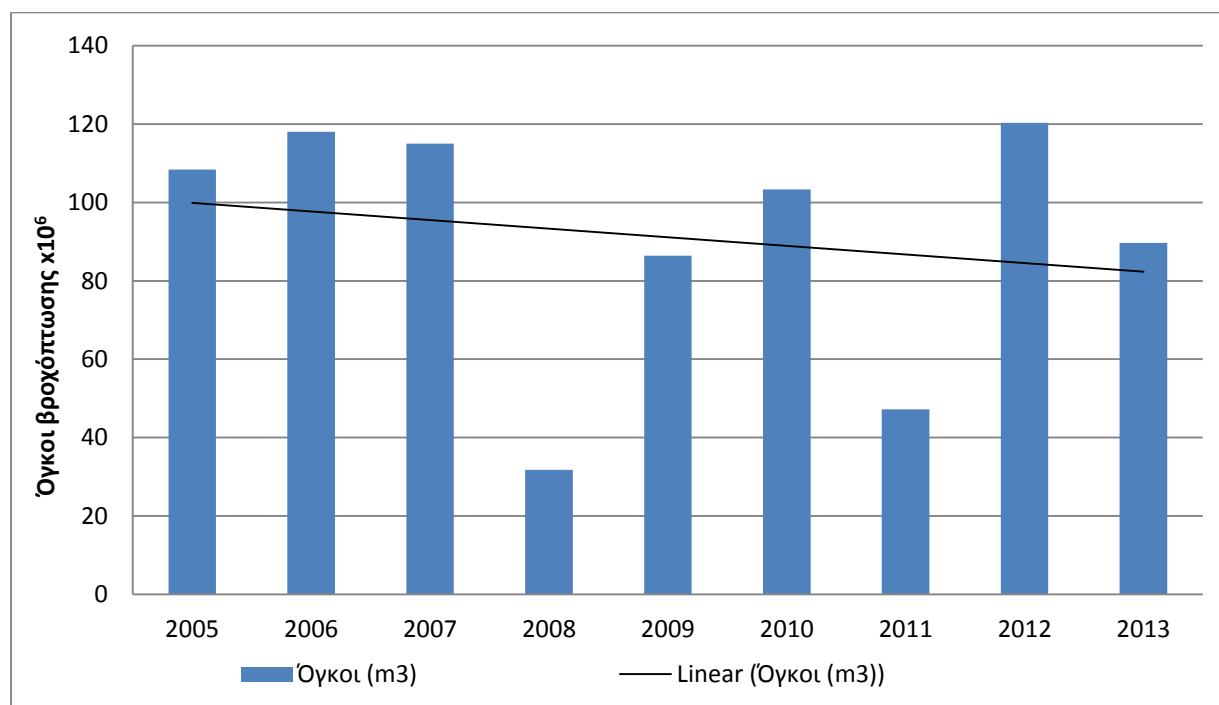
Σχήμα 5.7. Διακύμανση μηνιαίου όγκου ($m^3 \times 10^6$) βροχοπτώσεων (σταθμός Πόρπης) για την περίοδο 1954-20013.

Για τις ανάγκες της έρευνας και στο πλαίσιο εκπόνησης της παρούσας διατριβής, κρίθηκε σκόπιμο να αναλυθεί η πορεία των χαρακτηριστικών των όγκων των κατακρημνισμάτων, για την περίοδο μεταξύ (2005-2013) όπως και προηγουμένως. Στον Πίνακα 5.7, παρουσιάζονται οι μέσοι, ελάχιστοι και μέγιστοι όγκοι βροχόπτωσης (κατά την περίοδο έρευνας 2005-2013) εκφραζόμενοι σε $10^6 m^3$ νερού.

Πίνακας 5.7. Μέσοι, ελάχιστοι και μέγιστοι μηνιαίοι όγκοι βροχόπτωσης κατά την περίοδο έρευνας (2005-2013).

Όγκος βροχής (m ³ /10 ⁶)	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠΤ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
AVE	9,90	8,11	7,28	5,77	6,03	5,18	3,82	2,01	5,05	8,87	13,07	13,73
MIN	0	0	0	0,058	0	0	0	0	0	0	0	0,64
MAX	32,09	27,45	21,77	15,80	19,36	20,83	16,96	15,36	23,28	38,14	38,56	51,74

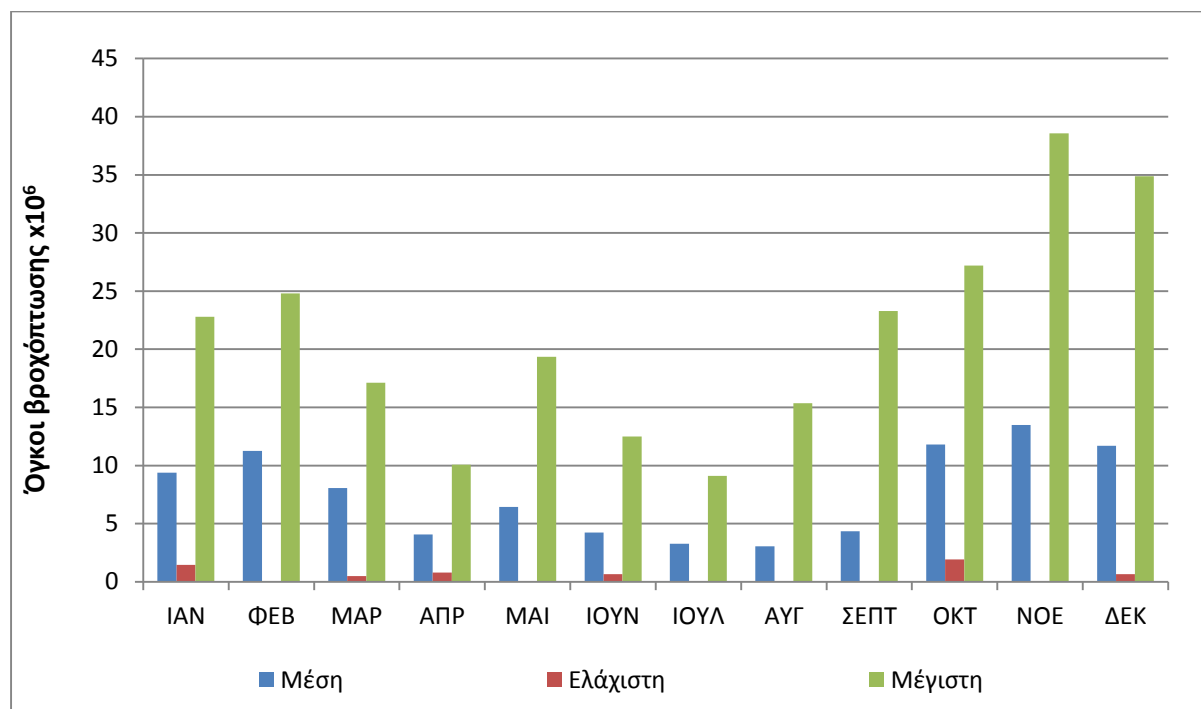
Το Σχήμα 5.8. δείχνει τη διακύμανση του ετήσιου όγκου κατακρημισμάτων για την πενταετία (2005 -2013) και τη γραμμή τάσης, η οποία υποδηλώνει αυξητική τάση των κατακρημισμάτων. Παρατηρείται ότι το έτος 2012 αφορά στους μεγαλύτερους όγκους ετήσιας βροχής ($120,32 \times 10^6 \text{ m}^3$) ενώ στον αντίποδα το 2008 έχει το μικρότερο όγκο βροχής ίσο με $31,76 \times 10^6 \text{ m}^3$.



Σχήμα 5.8. Διακύμανση ετήσιου όγκου ($\text{m}^3 \times 10^6$) βροχοπτώσεων για την περίοδο 2005-2013.

Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζονται οι μέσες, ελάχιστες και μέγιστες μηνιαίες τιμές όγκου (m^3) κατακρημισμάτων για την περίοδο 2005-2013, οι οποίες κρίνονται εξαιρετικά χρήσιμες για την περαιτέρω έρευνα του καθεστώτος των υπόγειων υδατικών πόρων της περιοχής μελέτης. Από το εν λόγω σχήμα προκύπτει ότι η μέση τιμή του όγκου βροχόπτωσης του Νοεμβρίου, αποτελεί την υψηλότερη τιμή ($13,493 \times 10^6 \text{ m}^3$) για την

περίοδο 2005-2013, γεγονός που συμπεραίνεται επίσης και από τα ύψη βροχής. Αντίθετα, ο Ιούλιος παρουσιάζεται στο σχήμα ως ξηρότερος μήνας, χαμηλή μέση τιμή όγκου βροχόπτωσης ($3,262 \times 10^6 \text{ m}^3$). Σημαντικό είναι επίσης ότι ο Απρίλιος παρουσιάζει αρκετά ξηρός μήνας με επίπεδα αυτά του Ιουλίου. Κατά την ίδια περίοδο (2005-2013) έχουν επίσης παρατηρηθεί μηδενικές τιμές όγκου βροχόπτωσης όπως τους μήνες Φεβρουάριο, Μάιο, Ιούλιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο και Νοέμβριο.



Σχήμα 5.9. Διακύμανση μέσης, ελάχιστης και μέγιστης μηνιαίας τιμής όγκου (m^3) βροχόπτωσης για την περίοδο 2005-2013.

6. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

6.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γνώση και κατανόηση της εμφάνισης και εξέλιξης του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης σε παράκτια υδροφόρα στρώματα, συνδέεται άμεσα με τα χαρακτηριστικά και τις υδραυλικές συνθήκες που επικρατούν και αντιπροσωπεύουν το στρώμα αυτό (Καλλιώρας, 2008). Τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε υδροφόρου συστήματος και ειδικότερα η κατανομή της υδραυλικής αγωγιμότητας επηρεάζει την κατανομή που θα παρουσιάζει η μεταφερόμενη μάζα νερού. Η συμπεριφορά της διεπιφάνειας του γλυκού – αλμυρού νερού που αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο και η επιρροή του υφάλμυρου νερού στο γλυκό υπόγειο νερό, εξαρτάται τόσο από την πιεζομετρική επιφάνεια του υπόγειου υδροφορέα όσο και από την ίδια τη χωρική κατανομή της υδραυλικής αγωγιμότητας.

Το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης όπως προαναφέρθηκε αφορά στη μεταφορά θαλασσινού νερού εντός του παράκτιου υδροφορέα ο οποίος αποτελείται από γλυκά υπόγεια νερά και κατά κανόνα ο ρυθμός και η διαδρομή κατά τη μεταφορά μάζας καθορίζεται, από τις εκάστοτε τοπικές υδραυλικές συνθήκες του υδροφορέα.

Για τη πληρέστερη κατανόηση της εξέλιξης του φαινομένου στην περιοχή μελέτης έλαβαν χώρα εργασίες που περιλαμβάνουν τη μέτρηση στάθμης των υπόγειων νερών μέσω των αρδευτικών γεωτρήσεων καθώς και την ανάλυση υδατικών δειγμάτων από τη συγκεκριμένη περιοχή. Όπως προαναφέρθηκε στην περιοχή μελέτης υπάρχουν εκτεταμένες καλλιέργειες και υπάρχει ένα πυκνό δίκτυο αρδευτικών γεωτρήσεων (άνω των 600), το οποίο έχει ήδη αποτύπωθεί με πραγματικές συντεταγμένες όπως επίσης και το δίκτυο των εγκαταλειμμένων γεωτρήσεων λόγω κακής ποιότητας νερού.

Όσον αφορά στα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υπό μελέτη υδροφορέα η εκτίμησή τους έγινε με δύο σειρές δοκιμαστικών αντλήσεων. Η πρώτη ομάδα αφορά στην επεξεργασία δεδομένων 34 δοκιμαστικών αντλήσεων που πραγματοποιήθηκαν από την εταιρία Υδροτεχνική Α.Ε., στοιχεία τα οποία βρίσκονται στην κατοχή του Εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας του Δ.Π.Θ., ενώ η δεύτερη ομάδα αφορά σε επιλεγμένα στοιχεία που προέκυψαν από 18 δοκιμαστικές αντλήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο ερευνητικού προγράμματος του Εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας του Δ.Π.Θ. (Διαμαντής κ.α., 1994) και επίσης στο πλαίσιο εκπόνησης παλαιότερης διδακτορικής διατριβής (Πεταλάς, 1997).

Οι έρευνες πεδίου αποτύπωσης έλαβαν χώρα κατά το διάστημα 2001-2005 και στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής, στο Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, του Λέκτορα των Μεταλλειολόγων-Μεταλλουργών Μηχανικών, Καλλιώρα Ανδρέα. Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και η επεξεργασία των άνω εργασιών τα οποία αποτελούν προίον από την ανάλυση των δεδομένων για την περίοδο έρευνας 2001-2005 το οποίο αποτελεί και το διάστημα που έλαβε χώρα η προαναφερθείσα διδακτορική διατριβή.

Οι ίδιοι (Διαμαντής κ.α., 1994, Πεταλάς, 1997) αναφέρουν ότι επί μικτού όγκου $9.424 \times 10^6 \text{ m}^3$ (υδροφόρων και στεγανών σχηματισμών) οι υδροφόροι σχηματισμοί καταλαμβάνουν περίπου $5.201 \times 10^6 \text{ m}^3$ δηλαδή ποσοστό 55.9%, ενώ το μέσο πάχος των υδροφόρων της περιοχής είναι 48,1 m.

6.1.1 Δίκτυο αρδευτικών γεωτρήσεων

Στο Σχήμα 6.1 που ακολουθεί παρουσιάζεται το δίκτυο των αρδευτικών γεωτρήσεων της περιοχής μελέτης, μετά από επεξεργασία των συντεταγμένων και τοποθέτησή τους σε χάρτη όπως αυτές καταγράφηκαν κατά τις εργασίες υπαίθρου της προαναφερθείσας διδακτορικής διατριβής.



Σχήμα 6.1. Δίκτυο παραγωγικών γεωτρήσεων της περιοχής μελέτης βάσει πραγματικών συντεταγμένων (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth ©, Καλλιώρας, 2008).

Εξαιτίας της ευρείας ποιοτικής υποβάθμισης του υδροφόρου στρώματος από τη θαλάσσια διείσδυση στην περιοχή πολλές υδρευτικές γεωτρήσεις έχουν πλέον εγκαταλειφθεί. Ο χάρτης του Σχήματος 6.2 απεικονίζει το σύνολο των εγκαταλειμμένων γεωτρήσεων, που βρίσκονται στην περιοχή μελέτης με πραγματικές συντεταγμένες. Καθώς το σύνολο των εγκαταλειμμένων γεωτρήσεων περιορίζεται σε μικρές υποομάδες που εντοπίζονται γεωγραφικά στα νότια-νοτιοδυτικά καθώς επίσης και στα ανατολικά-βορειοανατολικά όρια της περιοχής καθώς επίσης και ένας αριθμός στα νότια όρια της περιοχής εξάγεται το συμπέρασμα ότι δεν δύνανται να αντλήσουν υπόγειο νερό ικανοποιητικής ποιότητας για την άρδευση των καλλιεργειών.



Σχήμα 6.2. Δίκτυο εγκαταλειμμένων γεωτρήσεων της περιοχής μελέτης βάσει πραγματικών συντεταγμένων (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth ©, Καλλιώρας, 2008).

6.1.2. Υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα

Ο προσδιορισμός των υδραυλικών παραμέτρων ενός υδροφόρου στρώματος, ιδιαίτερα όταν αυτό υπόκειται σε συνθήκες θαλάσσιας διείσδυσης, είναι πολύ σημαντικός για την ολοκληρωμένη προσέγγιση του φαινομένου. Τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα, παρέχουν πληροφορίες για την ποσοτική προσέγγιση, αλλά δίνουν τη δυνατότητα στον ερευνητή να ερμηνεύσει και τη μεταφορά των ρυπαντών του υπόγειου νερού εντοπίζοντας την υπόγεια διαδρομή που ακολουθούν τα νερά και κατά συνέπεια οι ρύποι.

Οι βασικές υδραυλικές παράμετροι ενός γεωλογικού σχηματισμού είναι ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας ή μεταφορικότητα, T (σε m^2/sec) (Coefficient of Transmissivity), υδραυλική αγωγιμότητα ή υδροπερατότητα, K (σε m/sec) (Hydraulic Conductivity) και ο συντελεστής εναποθήκευσης ή αποθηκευτικότητας ή υδροχωρητικότητας, S (αδιάστατο μέγεθος) (Storage Coefficient ή Coefficient of Storage).

Ένα από τα γενικότερα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης αποτελεί η έντονη γεωλογική και υδρογεωλογική ετερογένεια των σχηματισμών που συνθέτουν τη στρωματογραφία της. Στην ενότητα που ακολουθεί, γίνεται αναφορά στα

αποτελέσματα των δύο σειρών δοκιμαστικών αντλήσεων που όπως προαναφέρθηκε έλαβαν χώρα για τον προσδιορισμό των ανωτέρω παραμέτρων.

Γενικά οι γεωλογικοί σχηματισμοί ανάλογα με την τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας χαρακτηρίζονται ως:

- Πολύ υδροπερατοί όταν $k \geq 10^{-12}$ m/s
- Υδροπερατοί όταν $10^{-6} < k < 10^{-1}$ m/s
- Λίγο υδροπερατοί όταν $10^{-9} < k < 10^{-6}$ m/s
- Πρακτικά στεγανοί όταν $k \leq 10^{-9}$ m/s

Ο πίνακας που ακολουθεί παρουσιάζει τυπικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας για διάφορα μεγέθη εδαφικού υλικού.

Πίνακας 6.1. Τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας (Καλλέργης, 1999).

Υλικό	k (m/s)
Μεγάλα χαλίκια	$1,7 \cdot 10^{-3}$
Χαλίκια μεσαίου μεγέθους	$3,1 \cdot 10^{-3}$
Χαλίκια μικρού μεγέθους	$5,2 \cdot 10^{-3}$
Χονδρόκοκκη άμμος	$5,2 \cdot 10^{-4}$
Μεσόκοκκη άμμος	$1,4 \cdot 10^{-4}$
Λεπτόκοκκη άμμος	$2,9 \cdot 10^{-5}$
Ιλύς	$9,2 \cdot 10^{-7}$
Άργιλος	$2,3 \cdot 10^{-9}$

Τα σημεία στα οποία πραγματοποιήθηκαν και οι δυο ομάδες δοκιμαστικών αντλήσεων κατά τα έτη 1994 και 1997 για την εκτίμηση των υδραυλικών παραμέτρων του υδροφορέα παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.3. που ακολουθεί.



Σχήμα 6.3. Θέσεις γεωτρήσεων στις οποίες πραγματοποιήθηκαν αντλητικές δοκιμασίες (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth ©, Καλλιώρας 2008).

Τα αποτελέσματα αναφέρονται στην πρώτη σειρά των 34 δοκιμαστικών αντλήσεων. Όλες οι γεωτρήσεις στις οποίες πραγματοποιήθηκε άντληση είναι βαθιές (με βάθος άνω των 120m), ενώ ο χρόνος άντλησής τους είναι 12 συνεχείς ώρες με σταθερή παροχή. Όσον αφορά στο χρόνο παρακολούθησης επαναφοράς της στάθμης, αυτός είναι 2 ώρες για κάθε δοκιμαστική άντληση. Οφείλεται να αναφερθεί ότι οι δεδομένα της πρώτης ομάδας των δοκιμαστικών αντλήσεων δεν περιλαμβάνουν μετρήσεις στάθμης από δορυφορικές γεωτρήσεις. Αυτό συνέβη είτε λόγω της απουσίας δορυφορικής γεώτρησης σε σχετικά κοντινή απόσταση από το σημείο άντλησης (όλες οι δορυφορικές γεωτρήσεις απέιχαν απόσταση μεγαλύτερη των 500m) είτε εξαιτίας της ύπαρξης τεχνικών προβλημάτων όπως η έλλειψη πιεζόμετρου.

Έτσι η πρώτη ομάδα των δοκιμαστικών αντλήσεων που ακολουθεί, αφορά στον υπολογισμό συγκεκριμένων υδραυλικών παραμέτρων του υδροφορέα όπως ο συντελεστής μεταβιβαστικότητας, T (σε m^2/sec) και η υδραυλική αγωγιμότητα, K (σε m/sec). Ο υπολογισμός του συντελεστή εναποθήκευσης, S (αδιάστατο μέγεθος) στάθηκε αδύνατος εξαιτίας αυτής ακριβώς της έλλειψης δεδομένων στάθμης κατά τη διάρκεια της άντλησης από δορυφορική γεώτρηση.

Τα δεδομένα της πρώτης ομάδας των δοκιμαστικών αντλήσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2, όπου παρέχεται το πάχος του υδροφόρου σχηματισμού, b , στο σημείο της άντλησης, η τιμή της μεταβιβαστικότητας, T_1 (σε m^2/sec) και η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας, K_1 (σε m/sec). Οι δείκτες στα σύμβολα T και K που προαναφέρθηκαν, αφορούν στην πρώτη ομάδα των δοκιμαστικών αντλήσεων.

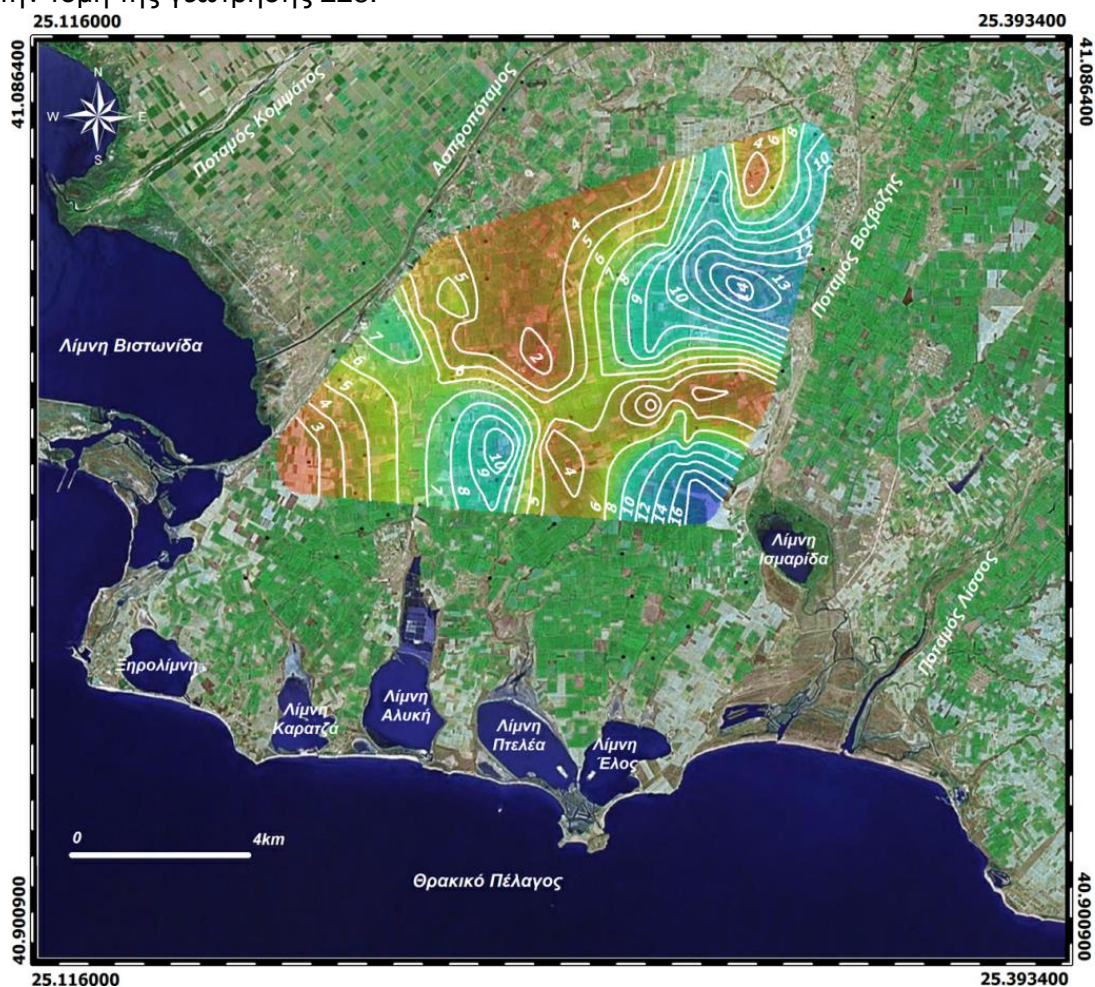
Πίνακας 6.2. Υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα της πρώτης ομάδας των δοκιμαστικών αντλήσεων (σύνθεση από Σταματάκη, 1992).

Γεώτρηση*	Πάχος υδροφορέα, b (m)	Μεταβιβαστικότητα, T_1 ($\times 10^{-3}$) (m^2/sec)	Υδραυλική αγωγιμότητα, K_1 ($\times 10^{-5}$) (m/sec)
1	90	4,30	4,77
2	27	3,01	11,16
3	88	2,50	2,84
4	26	1,85	7,11
5	38	0,50	1,33
6	54	3,24	6,00
7	43	1,17	2,72
8	71	4,24	5,96
9	42	1,24	2,95
10	26	1,77	6,80
11	27	2,98	11,03
12	19	2,87	15,10
13	38	0,72	1,89
14	77	4,50	5,84
15	25	1,04	4,16
16	82	2,84	3,46
17	100	0,92	0,92
18	57	3,52	6,17
19	33	0,73	2,20
20	53	4,99	9,41
21	11	1,38	12,54
22	52	1,80	3,46
23	71	0,85	1,20
24	83	6,67	8,04
25	39	0,90	2,30
26	11	1,03	9,36
27	117	5,28	4,51
28	10	1,78	17,8
29	29	2,78	9,58
30	13	1,17	9,00
31	21	0,98	4,67
32	57	2,82	4,94
33	39	3,84	9,84
34	83	2,54	3,06
	Μέση τιμή	2,43	6,24
	Ελάχιστη τιμή	0,50	0,92
	Μέγιστη τιμή	6,67	17,80

Τα δεδομένα των δοκιμαστικών αντλήσεων της πρώτης ομάδας έδειξαν ότι οι τιμές της μεταβιβαστικότητα, T_1 , κυμαίνονται μεταξύ των $0,50 \times 10^{-3}$ και $6,67 \times 10^{-3}$ m^2/sec , με μέση τιμή τα $2,43 \times 10^{-3}$ m^2/sec , γεγονός που υποδηλώνει πολύ καλό δυναμικό υδροφόρων στρωμάτων της περιοχής.

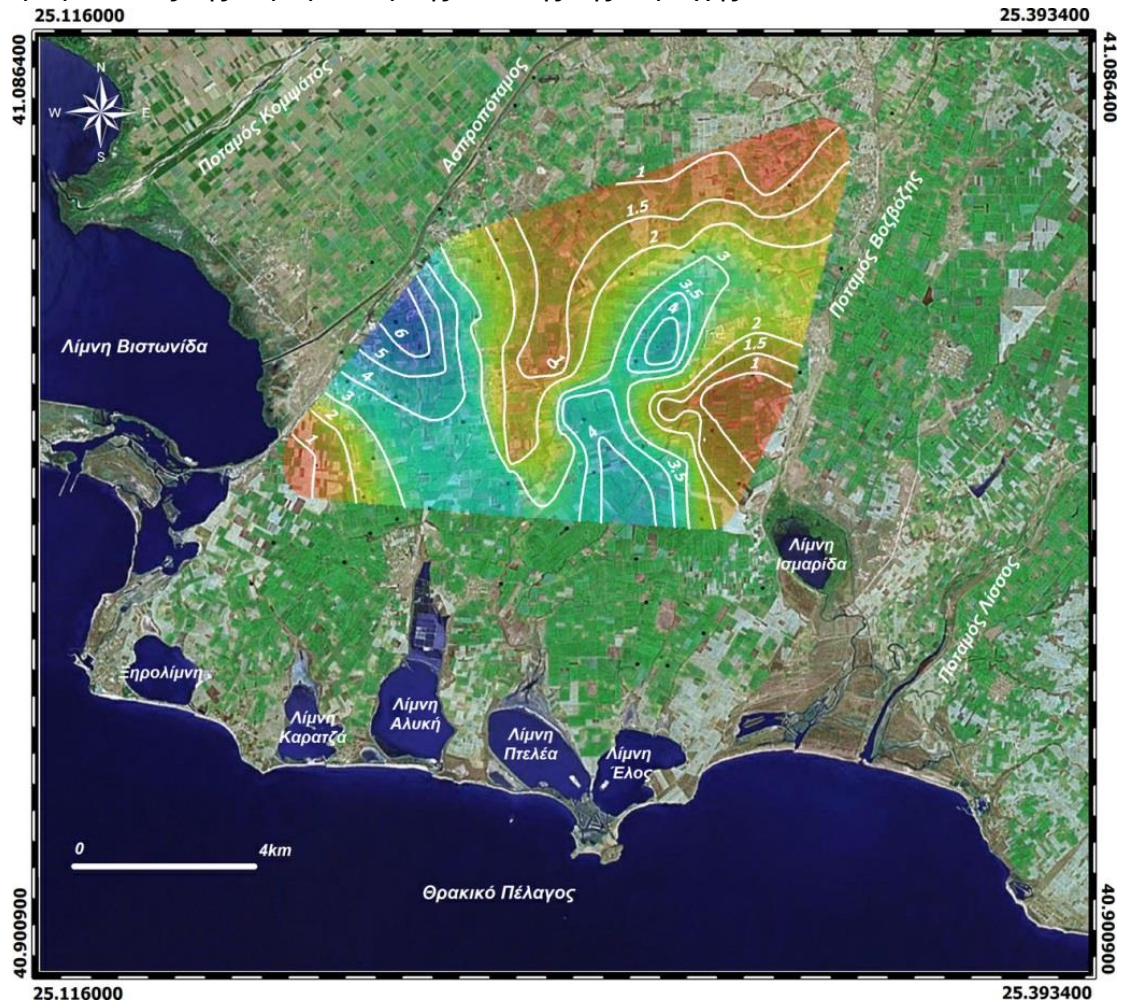
Επιπλέον οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας, K_1 , κυμαίνονται μεταξύ των $0,92 \times 10^{-5}$ και $17,80 \times 10^{-5}$ m/sec , με μέση τιμή τα $6,24 \times 10^{-5}$ m/sec . Σύμφωνα με ταξινόμηση που παρέχεται από τον Καλλέργη (1999), τα υδροφόρα στρώματα της περιοχής χαρακτηρίζονται ως *υδροπερατά πετρώματα* επειδή η τιμή της υδραυλικής τους αγωγιμότητας κυμαίνεται μεταξύ 10^{-6} και 10^{-1} m/sec , με *μεγάλη υδροπερατότητα* η οποία αφορά σε καθαρές άμμους και χαλίκια επειδή η τιμή της υδραυλικής του αγωγιμότητας κυμαίνεται μεταξύ 10^{-5} και 10^{-2} m/sec .

Στο Σχήμα 6.4, παρουσιάζεται χάρτης κατανομής της υδραυλικής αγωγιμότητας, K_1 , των υδροφόρων στρωμάτων της περιοχής, όπου παρατηρείται αύξηση των τιμών στα τμήμα του υδροφορέα το οποίο γειτνιάζει με το δυτικό όριό της, αλλά και σε τμήματα κατά μήκος του νοητού νότιο-κεντρικού άξονα της περιοχής μελέτης. Ιδιαίτερα υψηλές τιμές για την περιοχή παρατηρούνται σε σημείο πλησίον της λίμνης Ισμαρίδας, με τιμές που υπερβαίνουν τα 16×10^{-5} m/sec , γεγονός που αποδίδεται στην ύπαρξη χονδρόκοκκων υλικών, άμμων, χαλικιών και κροκάλων όπως φαίνεται και από τη γεωηλεκτρική διασκόπηση του σημείου GEO 10 καθώς επίσης και από την τομή της γεώτρησης 228.



Σχήμα 6.4. Χωρική κατανομή τιμής υδραυλικής αγωγιμότητας K_1 ($\times 10^{-5}$ m/sec) (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth ©, Καλλιώρας 2008).

Στο Σχήμα 6.5, παρουσιάζεται η κατανομή της τιμής της μεταβιβαστικότητας των δεδομένων της πρώτης ομάδας των δοκιμαστικών αντλήσεων T_1 (m^2/sec), όπου παρατηρείται αύξηση των τιμών στο βόρειο-δυτικό τμήμα της περιοχής, το οποίο όπως αναφέρεται σε σχετική ενότητα αποτελεί και έναν από τους κύριους άξονες τροφοδοσίας της υδρογεωλογικής λεκάνης της περιοχής.



Σχήμα 6.5. Χωρική κατανομή τιμής μεταβιβαστικότητας T_1 ($\times 10^{-3} m^2/sec$) (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth ©, Καλλιώρας, 2008).

Στην ενότητα αυτή εξετάζονται τα στοιχεία της δεύτερης ομάδας από δοκιμαστικές αντλήσεις 18 επιλεγμένων σημείων τα οποία βρίσκονται αρκετά ομοιόμορφα κατανομημένα στην περιοχή μελέτης με την πραγματοποίηση σειράς από δοκιμαστικές αντλήσεις με ταυτόχρονη παρακολούθηση της στάθμης γειτονικών (δορυφόρων) γεωτρήσεων (Διαμαντής κ.α., 1994). Τα δεδομένα της δεύτερης ομάδας των δοκιμαστικών αντλήσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3, όπου παρέχεται η τιμή της μεταβιβαστικότητας, T_2 (σε m^2/sec), η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας, K_2 (σε m/sec) και η τιμή του συντελεστή εναποθήκευσης, S_2 (αδιάστατο).

Πίνακας 6.3. Υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα της δεύτερης ομάδας των δοκιμαστικών αντλήσεων (Από Πεταλά, 1997).

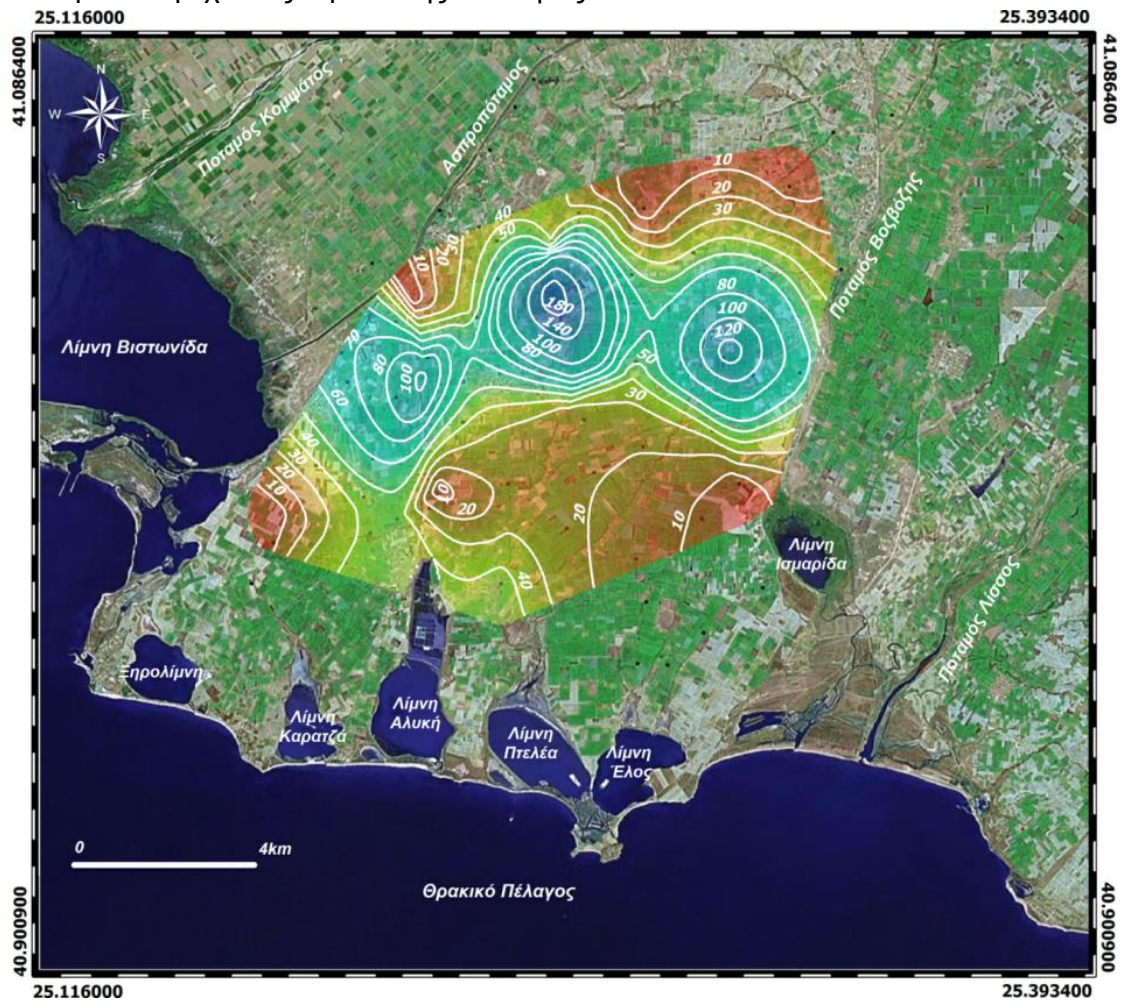
Γεώτρηση*	Πάχος υδροφορέα, b (m)	Μεταβιβαστικότητα, T_2 ($\times 10^{-3}$) (m ² /sec)	Υδραυλική αγωγιμότητα, K_2 ($\times 10^{-5}$) (m/sec)	Συντελεστής εναποθήκευσης, S_2 ($\times 10^{-3}$)
203	69	27,91	40,44	5,00
431	39	18,26	46,83	29,00
138	51	1,34	2,63	0,13
241	48	63,85	133,03	2,00
115	57	35,73	62,68	1,90
104	43	5,23	12,17	3,00
95	46	1,15	2,49	8,90
178	73,5	3,14	4,27	2,30
97	46	18,56	40,36	4,90
99	45	99,71	221,58	1,50
126	70	75,54	107,92	1,90
254	70	2,47	3,53	9,10
432	64	23,34	36,48	1,20
194	71	16,08	22,64	0,49
392	48,1	21,88	45,48	0,82
228	46	1,50	3,27	0,56
273	50	3,39	6,78	0,18
307	25,5	12,07	47,34	0,13
Μέση τιμή		23,95	46,66	5,06
Ελάχιστη τιμή		1,15	2,49	0,13
Μέγιστη τιμή		99,71	221,58	29,00

Το δεδομένα των δοκιμαστικών αντλήσεων της δεύτερης ομάδας έδειξαν ότι οι τιμές της μεταβιβαστικότητας, T_2 , κυμαίνονται μεταξύ των $1,15 \times 10^{-3}$ και $9,971 \times 10^{-2}$ m²/sec, με μέση τιμή τα $2,395 \times 10^{-2}$ m²/sec, γεγονός που υποδηλώνει πολύ καλό δυναμικό υδροφόρων στρωμάτων της περιοχής.

Επιπλέον οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας, K_2 , κυμαίνονται μεταξύ των $2,49 \times 10^{-5}$ και $2,22 \times 10^{-3}$ m/sec, με μέση τιμή τα $4,67 \times 10^{-4}$ m/sec. Σύμφωνα με ταξινόμηση που παρέχεται από τον Καλλέργη (1999), τα υδροφόρα στρώματα της περιοχής χαρακτηρίζονται ως υδροπερατά πετρώματα επειδή η τιμή της υδραυλικής τους αγωγιμότητας κυμαίνεται μεταξύ 10^{-6} και 10^{-1} m/sec, με μεγάλη υδροπερατότητα η οποία αφορά σε καθαρές άμμους και χαλίκια επειδή η τιμή της υδραυλικής του αγωγιμότητας κυμαίνεται μεταξύ 10^{-5} και 10^{-2} m/sec.

Οι τιμές του συντελεστή εναποθήκευσης, S_2 , του υπόγειου υδροφορέα κυμαίνονται μεταξύ $1,3 \times 10^{-4}$ (ή $0,13 \times 10^{-3}$) και $2,9 \times 10^{-2}$ (ή $29,00 \times 10^{-3}$) και μέση τιμή $5,06 \times 10^{-3}$. Ο Καλλέργης (1999) αναφέρει ότι στους αρτεσιανούς υδροφορείς η τιμή του συντελεστή κυμαίνεται μεταξύ 5×10^{-3} και 5×10^{-5} , γεγονός που συμφωνεί με το σύνολο των δεδομένων των αντλητικών αποτελεσμάτων του Πίνακα 6.3 (με εξαίρεση της γεώτρησης 431 η τιμή της οποίας υπερβαίνει κατά ελάχιστα την εν λόγω τιμή). Ο Driscoll (1986) αναφέρει επίσης ότι οι τιμές για τους αρτεσιανούς υδροφορείς κυμαίνονται μεταξύ 10^{-3} και 10^{-5} .

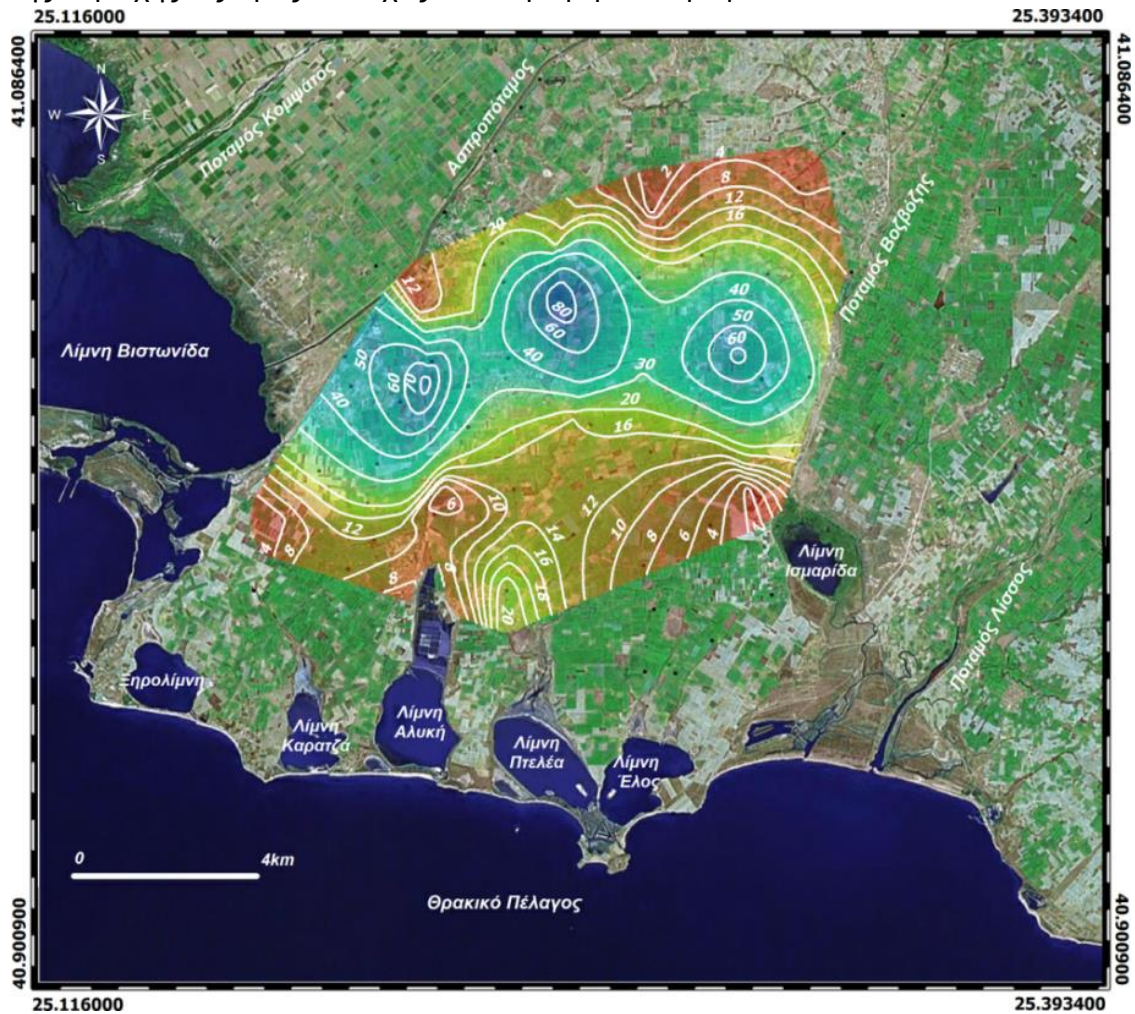
Το Σχήμα 6.6 παρουσιάζει την κατανομή των τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας, K_2 ($\times 10^{-5}$ m/sec), όπου παρατηρείται εμφανής αύξηση της τιμής αυτής στο κεντρικό τμήμα του υδροφορέα, εκεί όπου απαντάται υδροφορέας με μεγάλο δυναμικό παρέχοντας νερό καλής ποιότητας.



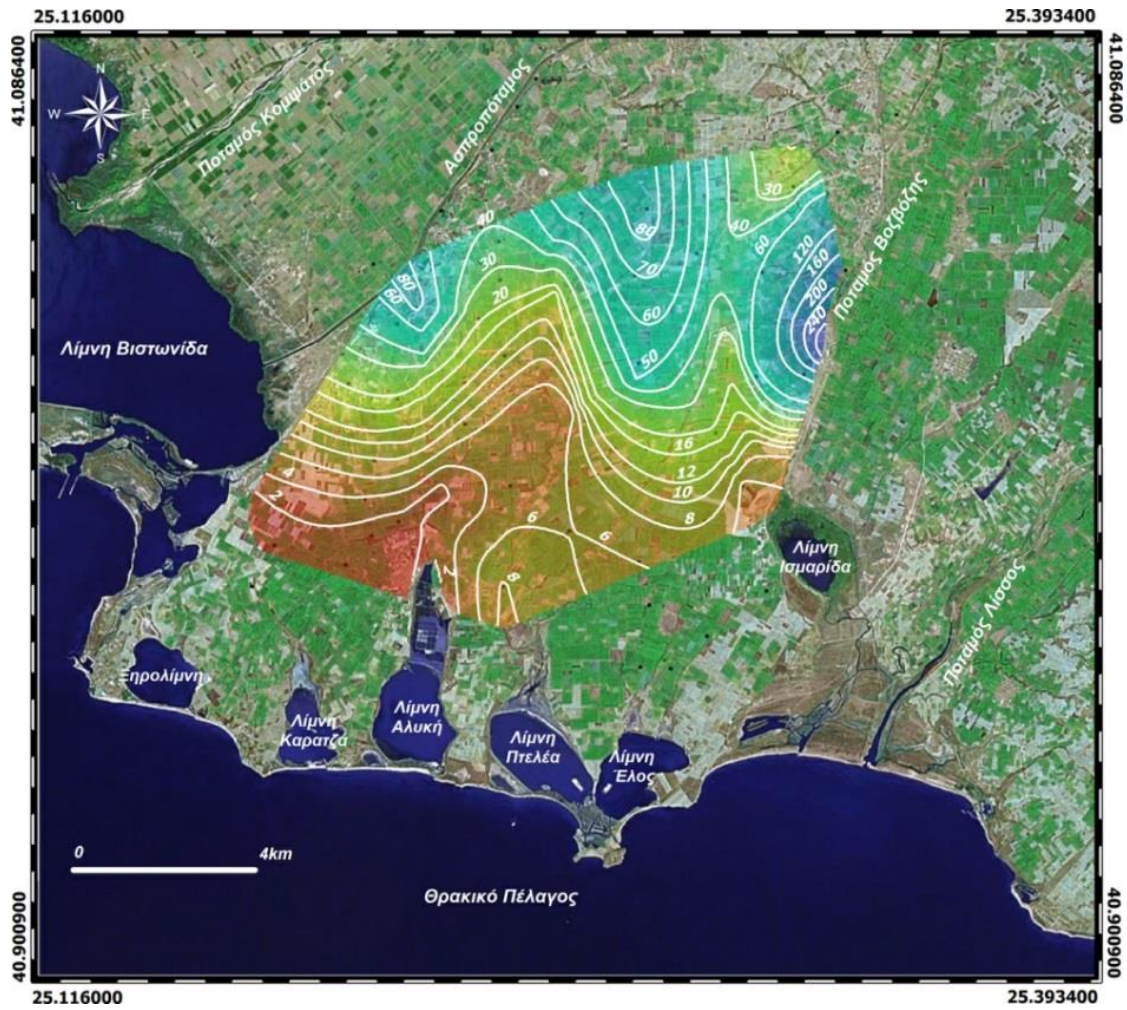
Σχήμα 6.6. Χωρική κατανομή υδραυλικής αγωγιμότητας K_2 ($\times 10^{-5}$ m/sec) (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth ©, Καλλιώρας, 2008).

Στα Σχήματα 6.7 και 6.8 παρουσιάζονται οι κατανομές των τιμών του συντελεστή μεταβιβαστικότητας T_2 και του συντελεστή εναποθήκευσης S_2 , όπως προέκυψαν από τις δοκιμαστικές αντλήσεις του Πίνακα 6.3.

Στο Σχήμα 6.7, παρατηρείται ότι η κατανομή του συντελεστή μεταβιβαστικότητας T_2 , παρουσιάζει την ίδια εικόνα σε σύγκριση με την εικόνα της κατανομής της υδραυλικής αγωγιμότητας K_2 , γεγονός που υποδηλώνει κάποια σχετική ομοιογένεια της περιοχής ως προς το πάχος των υδροφόρων στρωμάτων που απαντώνται.



Σχήμα 6.7. Χωρική κατανομή μεταβιβαστικότητας T_2 ($\times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$) (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth ©, Καλλιώρας, 2008).



Σχήμα 6.8. Χωρική κατανομή τιμής υδροχωρητικότητας S_2 ($\times 10^{-4}$ αδιάστατο) (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth ©, Καλλιώρας, 2008).

6.2. ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΕΔΙΟΥ

6.2.1. Εισαγωγή

Η παρουσίαση των δικτύων ροής σε χάρτες -πιεζομετρικοί, ισοπιεζομετρικοί, ισοσταθμικοί, χάρτες υδροϊσουψών- επιτρέπει όχι μόνο τη μελέτη της μορφολογίας της πιεζομετρικής επιφάνειας, του τύπου του υδροφορέα και της ροής του υπόγειου νερού, αλλά ακόμα και την εκτίμηση των υδραυλικών χαρακτηριστικών του υδροφορέα (Καλλέργης, 2001). Από τη μελέτη και ερμηνεία των πιεζομετρικών χαρτών διεξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα όσον αφορά στη λεγόμενη «υδατική δίαιτα» του υδροφόρου συστήματος, προσδιορίζοντας ενδεχόμενους άξονες στράγγισης ή τροφοδοσίας.

Το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης όπως προαναφέρθηκε εξαρτάται πλήρως από την ποσοτική υποβάθμιση του υπόγειου νερού του παράκτιου υδροφόρου συστήματος. Έτσι ο σχεδιασμός πιεζομετρικών χαρτών αποτελεί αναγκαίο εργαλείο για την ολοκληρωμένη διερεύνηση του φαινομένου. Η μελέτη και ερμηνεία της πιεζομετρικής επιφάνειας του υδροφορέα θα παράσχει πληροφορίες όσον αφορά στο σχηματισμό του ανεστραμμένου κώνου κατάπτωσης (urcone) και στη συνέχεια θα αποτελέσει κρίσιμο δεδομένο για τον προγραμματισμό μελλοντικών διαχειριστικών πρακτικών (Καλλιώρας, 2005).

Κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διατριβής, επιλέχθηκε συγκεκριμένο δίκτυο 52 υδρογεωτρήσεων στην περιοχή μελέτης, κατά το δυνατό ομοιόμορφα κατανεμημένων, έτσι ώστε να παρέχει ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα όσον αφορά στις μετρήσεις στάθμης του υπόγειου υδροφόρου συστήματος της περιοχής. Η επιλογή των γεωτρήσεων πραγματοποιήθηκε από το ήδη καταγεγραμμένο με τη χρήση GPS δίκτυο, άνω των 600, και η τοποθέτησή τους στο χάρτη βασίζεται στις πραγματικές συντεταγμένες αυτών. Δόθηκε ιδιαίτερη σημασία στην κρισιμότητα των οριακών συνθηκών του υδροφορέα και για το λόγο αυτό παρατηρείται συστοιχία γεωτρήσεων παρατήρησης κατά μήκος των ποταμών Βοζβόζη και Ασπροποτάμου.

Οι μετρήσεις στάθμης πραγματοποιήθηκαν σε δύο διαστήματα μέσα στο έτος 2014. Μια κατά την εποχή της υψηλής στάθμης (Μάιος 2014) μετά το πέρας της βροχερής περιόδου και μια κατά το τέλος της αρδευτικής περιόδου και του καλοκαιριού ώστε χρονικά να συμπεφτούν οι μετρήσεις με τα χαμηλότερα επίπεδα στάθμης του υδροφορέα (Σεπτέμβριος 2014). Στις ίδιες περιόδους έγινε επίσης και για δειγματοληψία υπόγειου νερού με σκοπό τη διερεύνηση της ποιοτικής κατάστασης του υδροφόρου συστήματος, η οποία αναλύεται σε επόμενη ενότητα. Οι μετρήσεις στάθμης που παρατίθενται στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν διατηρώντας κάποιες βασικές προϋποθέσεις (Καλλέργης, 2001) που επιλεκτικά είναι οι παρακάτω:

- Αδιατάρακτες σχετικά συνθήκες αντιστοιχούν στις περιόδους ανώτατης και κατώτατης στάθμης υπό καθεστώς μη άντλησης των γεωτρήσεων
- Οι χάρτες θα πρέπει να κατασκευάζονται με βάση κάποιο μήνα της περιόδου που αναφέρεται προηγούμενα



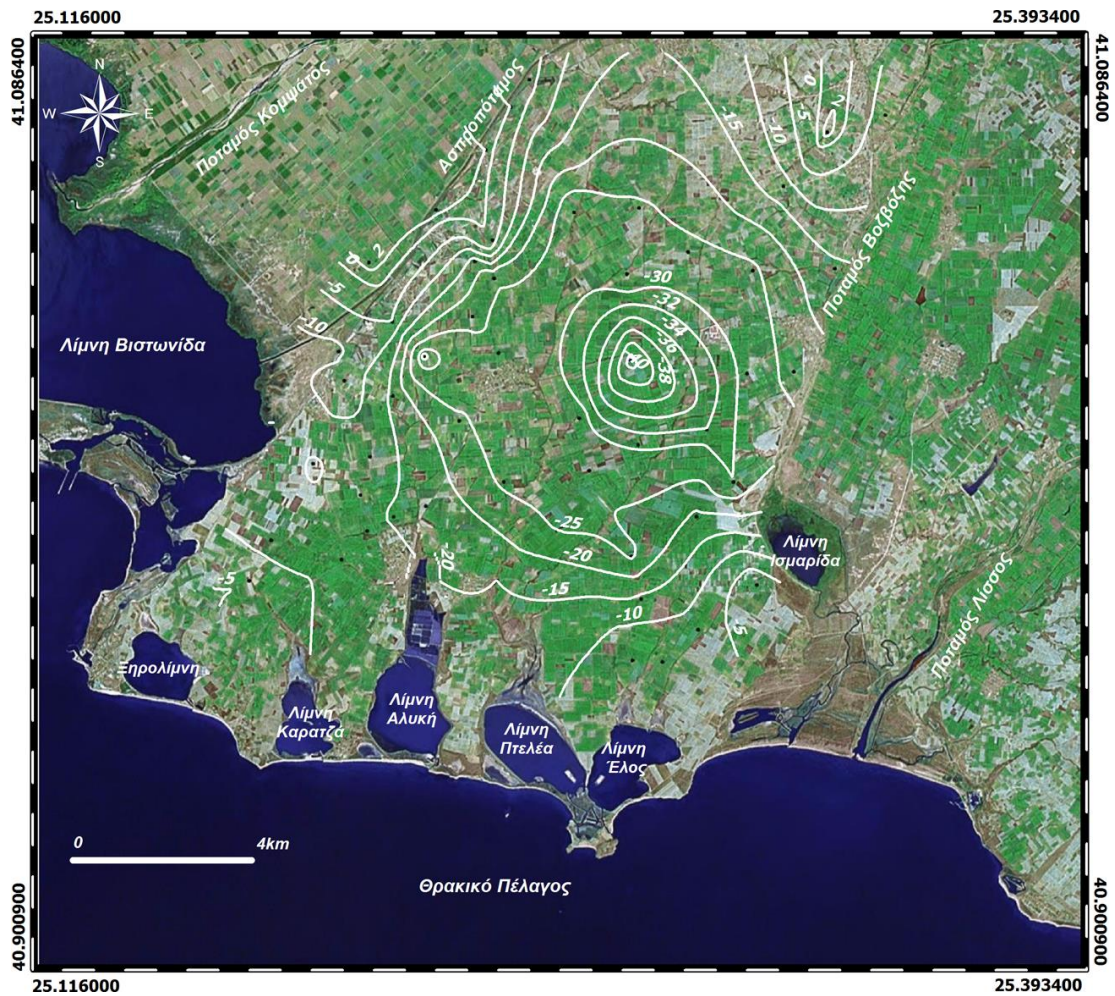
Σχήμα 6.9. Δίκτυο γεωτρήσεων όπου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στάθμης κατά τις περιόδους Μάιος και Σεπτέμβριος 2014.

Πίνακας 6.4 Γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκε μέτρηση στάθμης.

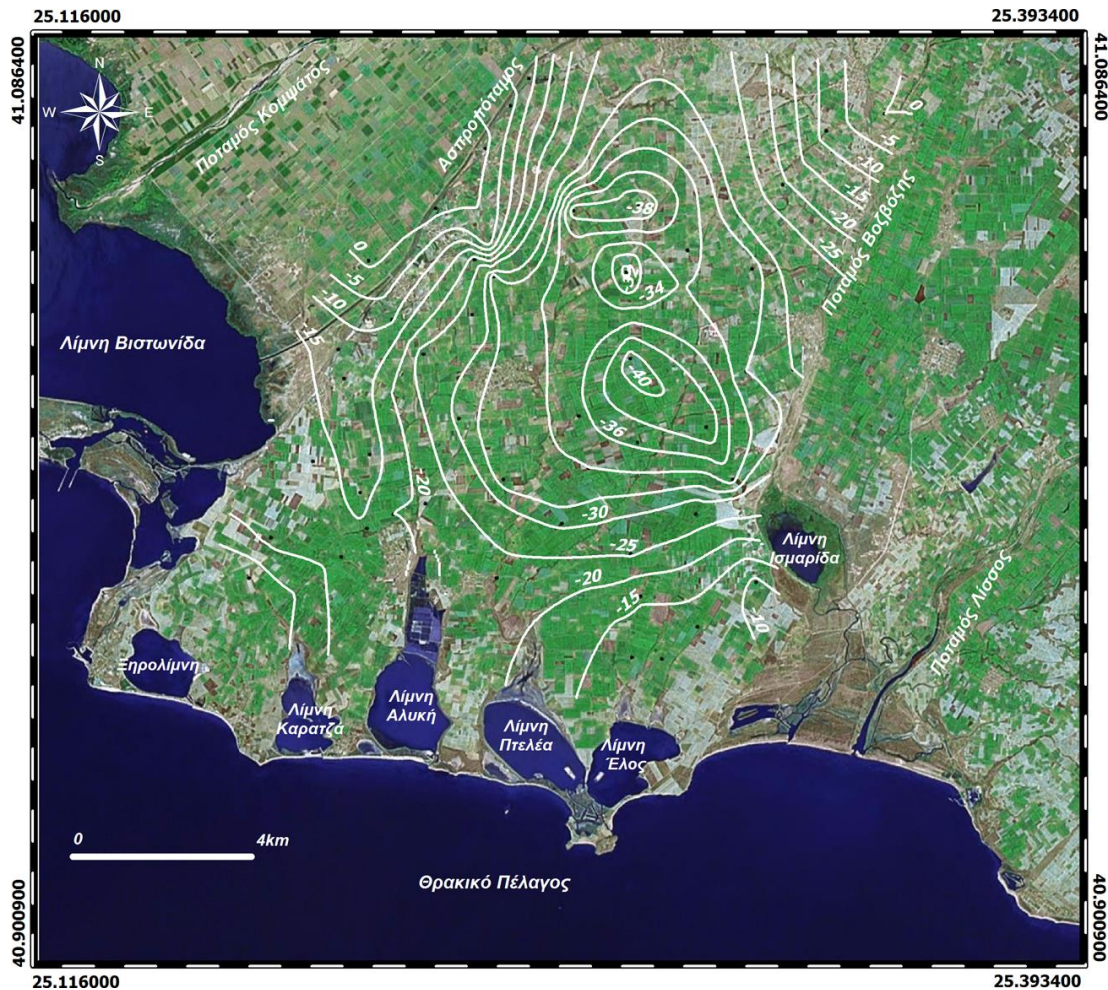
ΜΑΙΟΣ 2014		ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2014	
ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΣΤΑΘΜΗ (m)	ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΣΤΑΘΜΗ (m)
FANERO	7	FANERO	7
101	5,3	101	5,3
K33	5,6	K33	5,6
STRATO	2,15	STRATO	2,15
NKALLI	2,9	NKALLI	2,9
112	3,15	112	3,15
Bprath	3	Bprath	3
R1	3,3	R1	3,3
123	60,15	123	60,15
104	80	104	85
Georga	38,9	Georga	38,9
Rpr53	x	Rpr53	x
129	x	129	x
106	80	106	84
1396	80,5	1396	85,5
TOURKO	x	TOURKO	x
GOULAS	79	GOULAS	83
95	78,5	95	82,4
437	x	437	x
666	79	666	84
SABBAS	49	SABBAS	49
197	46	197	46
IGME	64,3	IGME	64,3
251	66	251	66
1151	46	1151	46
Ydrfan	26,5	Ydrfan	26,5
337	31,1	337	31,1
475	40,3	475	40,3
71	30,9	71	30,9
70	30,4	70	30,4
277	24,7	277	24,7
275	45,4	275	45,4
328	25	328	29
UNI	24,5	UNI	28,7
392	16,7	392	16,7
636	52	636	52
492	16,8	492	17,5
415	44,7	415	44,7
308	43	308	43,7
Triari	15,6	Triari	15,6
Mitter	15,1	Mitter	15,1
Ismari	36	Ismari	36
404	58	404	58
228	77	228	77
Rp450	39,8	Rp450	39,8
P21	41,4	P21	41,4
211	66,5	211	66,5
Rk586	77	Rk586	78
190	24,8	190	24,8
178	59	178	59
Paradi	x	Paradi	x
Parad1	27,3	Parad1	27,3

6.2.2 Πιεζομετρικοί χάρτες

Στα Σχήματα 6.10. και 6.11. που ακολουθούν παρουσιάζονται πιεζομετρικοί χάρτες της περιοχής μελέτης, για τις ανώτατες (Μάιος) και κατώτατες (Σεπτέμβριος) απόλυτες πιεζομετρικές στάθμες, για τη διεξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων όσον αφορά στις υδροδυναμικές συνθήκες που επικρατούν στο υδροφόρο σύστημα της περιοχής. Οι χάρτες προέκυψαν ύστερα από επεξεργασία των δεδομένων πεδίου και συγκεκριμένα των στάθμεων που μετρήθηκαν στις αρδευτικές γεωτρήσεις της περιοχής και παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 6.4.



Σχήμα 6.10. Πιεζομετρικός χάρτης της περιοχής μελέτης – Μάιος 2014.



Σχήμα 6.11. Πιεζομετρικός χάρτης περιοχής μελέτης - Σεπτεμβρίου 2014.

Στα προαναφερθέντα σχήματα, διακρίνονται κάποιοι βασικοί άξονες τροφοδοσίας του υπό εξέταση υδροφόρου, οι οποίοι εμφανίζονται καθ' όλη τη διάρκεια του υδρογεωλογικού έτους (Οκτώβριος-Απρίλιος). Ένας άξονας τροφοδοσίας παρατηρείται στο βόρειο-ανατολικό όριο της περιοχής μελέτης. Όσον αφορά στην τροφοδοσία της περιοχής από τον αλλουβιακό κώνο του Κομφάτου (βόρειο παρακείμενο υδροφόρο σύστημα), παρατηρούνται δυο άξονες τροφοδοσίας, οι οποίοι θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως ζεύγος αξόνων τροφοδοσίας με κοινή προέλευση. Η τροφοδοσία της περιοχής μέσω διηθήσεων από τα νερά του Ασπροποτάμου μπορεί με ασφάλεια να αποκλειστεί εξαιτίας της ύπαρξης σημαντικών αργιλικών σχηματισμών στην περιοχή, γεγονός που δημιουργεί συνθήκες υδραυλικής απομόνωσης του ποταμού και του υπό εξέταση υδροφόρου συστήματος της περιοχής μελέτης. Κατά μήκος του ίδιου ποταμού, παρατηρείται πύκνωση των καμπυλών των πιεζομετρικών χαρτών και για τις δύο περιόδους μέτρησης, γεγονός που αποδίδεται στην ύπαρξη ρήγματος (όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο Κεφάλαιο) κατά μήκος του ποταμού Ασπροποτάμου το οποίο φέρει σε υδραυλική επικοινωνία τα δύο υδροφόρα συστήματα της περιοχής -αυτό της περιοχής μελέτης και του αλλουβιακού κώνου του Κομφάτου- με το δεύτερο να τροφοδοτεί το πρώτο.

Κατά τη διερεύνηση των πιεζομετρικών χαρτών (Σχήματα 6.10. και 6.11.), παρατηρούνται επίσης 3 κύριοι άξονες τροφοδοσίας, οι οποίοι εντοπίζονται στο νότιο-δυτικό, στο νότιο και στο νότιο-ανατολικό όριο της περιοχής μελέτης. Ο πρώτος από τους προαναφερθέντες έχει διεύθυνση N-ND προς B-BA ενώ σε συνδυασμό με τα δεδομένα της ποιοτικής παρακολούθησης του υπό εξέταση υδροφόρου, πρόκειται για άξονα εμπλουτισμού από τη θάλασσα, ή άξονα θαλάσσιας διείσδυσης. Αυτό ενισχύεται και από το Σχήμα 6.2. που παρουσιάζει το δίκτυο των εγκαταλειμμένων γεωρήσεων στα σημεία εκείνα. Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης ο άξονας τροφοδοσίας που αναπτύσσεται νότιο-ανατολικά της λίμνης Ισμαρίδας με διεύθυνση N-NA προς B-BΔ, όπου επίσης παρατηρείται ποιοτική επιβάρυνση των υπόγειων νερών της περιοχής μελέτης, ενώ το ίδιο συμβαίνει επίσης και με το νότιο άξονα τροφοδοσίας της περιοχής. Η υπαλμύριση των νερών των τμημάτων των δυο τελευταίων αξόνων αποδίδεται τόσο σε συνθήκες θαλάσσιας διείσδυσης, αλλά επίσης και λόγω της επικοινωνίας των υπεραλμυρών παράκτιων λιμνών (Ξηρολίμνη, λ. Καρατζά, λ. Αλυκή, λ. Πτελέα, Έλος) της περιοχής. Ο Πεταλάς (1997) αναφέρει ότι ενδεχόμενη υπαλμύριση της νότιας περιοχής μπορεί να αποδοθεί και στην αναθόλωση του υποκείμενου αδιαπέρατου υποβάθρου της γκρι-πράσινης αργίλου, η οποία αποτελεί τον πυθμένα της υδρογεωλογικής λεκάνης της περιοχής μελέτης.

Η πύκνωση των πιεζομετρικών γραμμών η οποία εμφανίζεται κατά μήκος του ποταμού Βοζβόζη, αποδίδεται και αυτή (όμοια με την αντίστοιχη στο βόρειο-δυτικό όριο κατά μήκος του Ασπροποτάμου) στην ύπαρξη ρήγματος. Το εν λόγω ρήγμα δημιουργεί συνθήκες υδραυλικής απομόνωσης μεταξύ του ποταμού Βοζβόζη και της περιοχής μελέτης, συνθήκες οι οποίες εντείνονται και λόγω της επικράτησης των αργιλικών υλικών κατά μήκος του ποταμού. Πρόκειται δηλαδή για τεκτονικό υδρογεωλογικό όριο το οποίο φαίνεται να διαχωρίζει την περιοχή μελέτης από συνθήκες σημαντικής τροφοδοσίας μέσω του ποταμού Βοζβόζη (διηθήσεις). Το βασικό χαρακτηριστικό της συνολικής εικόνας ή μορφολογίας της πιεζομετρικής επιφάνειας του υπό εξέταση υδροφόρου είναι οι τιμές των καμπυλών ίσης πιεζομετρικής στάθμης. Πρόκειται για αποκλειστικά αρνητικές τιμές απόλυτης στάθμης (απόλυτο υψόμετρο), γεγονός το οποίο παρατηρείται αμέσως ακόμα και από μη ειδικούς. Πρόκειται για συνθήκες εντατικής υπεράντλησης οι οποίες λαμβάνουν χώρα συστηματικά στην περιοχή, τουλάχιστον κατά τη διάρκεια της τελευταίας 20-ετίας, η οποία συνοδεύεται από παντελή έλλειψη οποιουδήποτε ορθολογικού διαχειριστικού σχεδιασμού. Πρόκειται για δημιουργία τυπικού κώνου κατάπτωσης, το βάθος το οποίου κυμαίνεται κοντά στα -40m ανάλογα με την περίοδο ανώτατης ή κατώτατης στάθμης.

6.2.3 Υπερετήσιες μεταβολές της πιεζομετρικής επιφάνειας του υδροφορέα

Στα Σχήματα 6.12. και 6.13. που ακολουθούν παρουσιάζονται πιεζομετρικοί χάρτες της περιοχής μελέτης, για τις ανώτατες (Μάιος) και κατώτατες (Σεπτέμβριος) απόλυτες πιεζομετρικές στάθμες για το έτος 2005, με σκοπό την εκτίμηση των μεταβολών στην πιεζομετρία του υπόγειου υδροφορέα της περιοχής μελέτης. Σε αυτούς παρατηρείται ότι ο κώνος κατάπτωσης δημιουργείται στα ίδια σημεία ενώ το βάθος παραμένει στα ίδια επίπεδα με τα σημερινά, γεγονός που αποδεικνύει ότι ο υδροφορέας υπόκειται στις ίδιες πιέσεις και τρόπο διαχείρισης του υπόγειου υδατικού δυναμικού του. Επίσης παρατηρείται μια διαφορά στα δυτικά όρια της περιοχής με την εμφάνιση θετικής πιεζομετρικής καμπύλης ίση με +2m τόσο για τον Οκτώβριο όσο και για τον Σεπτέμβριο του 2005.



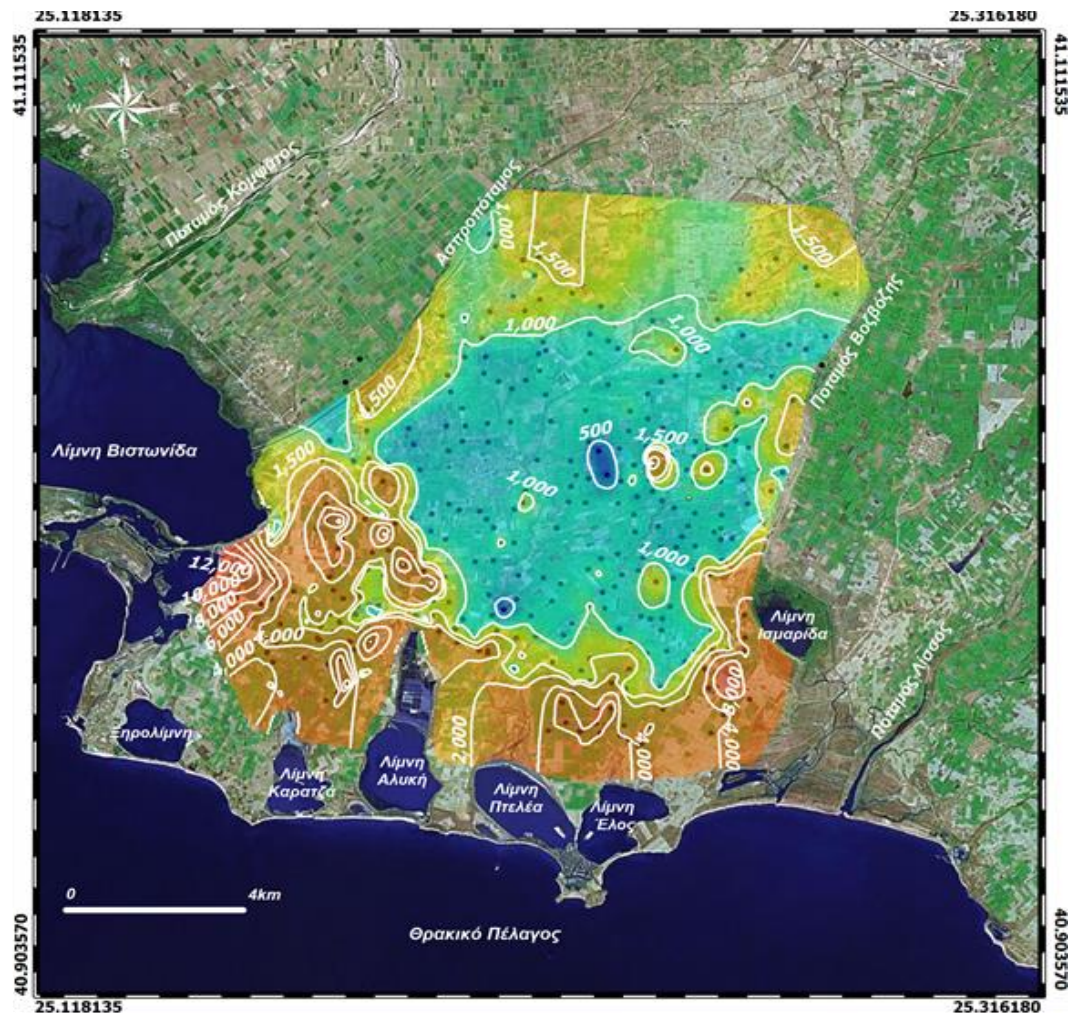
Σχήμα 6.12. Πιεζομετρικός χάρτης της περιοχής μελέτης - Οκτώβριος 2005.



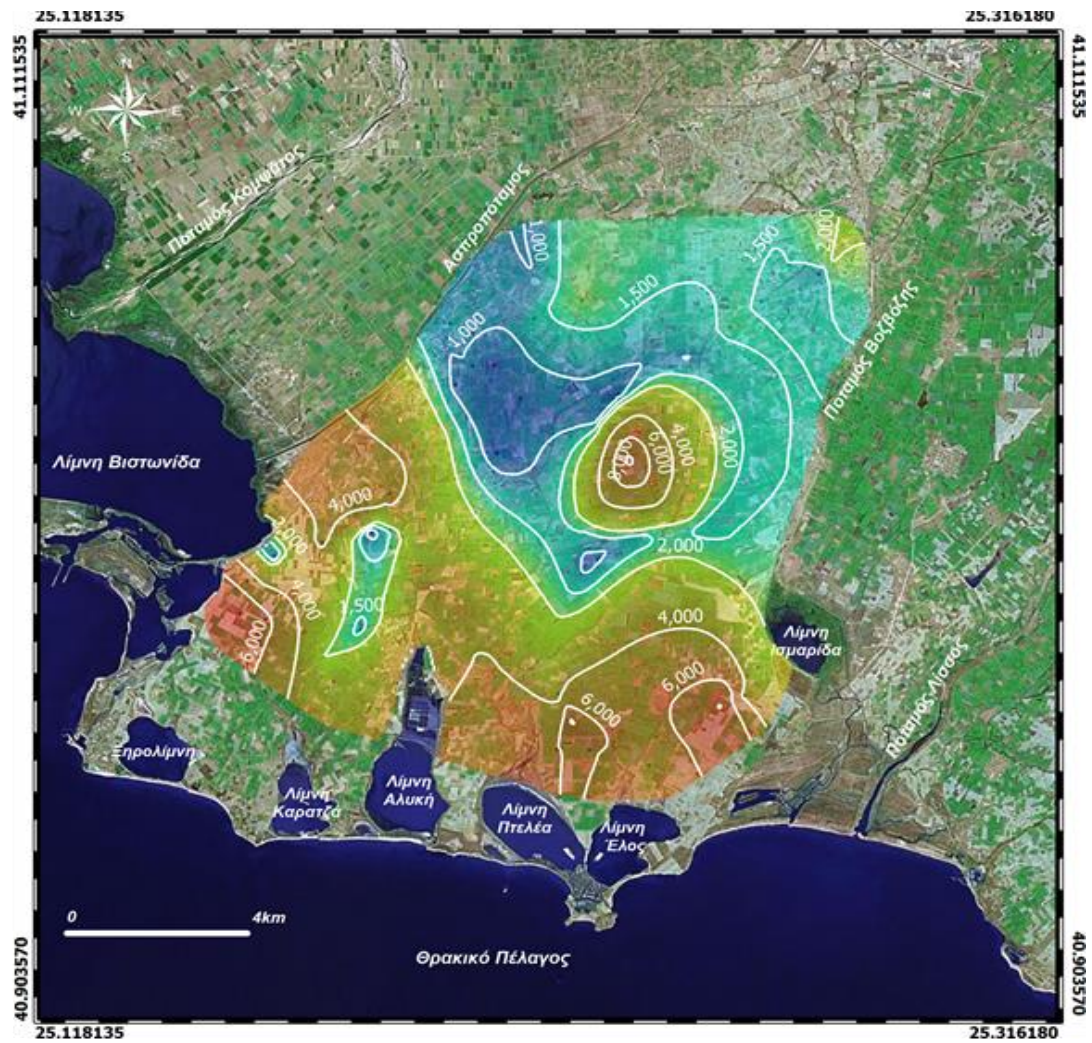
Σχήμα 6.13. Πιεζομετρικός χάρτης της περιοχής μελέτης - Απρίλιος 2005.

Στα Σχήματα 6.14 και 6.15 που ακολουθούν παρουσιάζεται η κατανομή της ειδικής υδραυλικής αγωγιμότητας του υπόγειου νερού για την περιοχή μελέτης. Αυτά τα στοιχεία προέκυψαν από αναλύσεις 375 δειγμάτων που έλαβαν χώρα κατά το έτος 2005 στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής του Λέκτορα των Μεταλλειολόγων-Μεταλλουργών Μηχανικών, Α.Καλλιώρα. Είναι προφανές ότι η κατανομή της ειδικής υδραυλικής αγωγιμότητας συνδέεται άμεσα με την πιεζομετρία της περιοχής, η οποία όπως προαναφέρθηκε, δεν παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές κατά την τελευταία δεκαετία γεγονός που προκύπτει από τις μετρήσεις στάθμης που έγιναν στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής.

Παρατηρούμε ότι οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι πολύ αυξημένες και ξεπερνούν σε περιπτώσεις τα $10.000 \mu\text{S}/\text{cm}$ γεγονός που τα κατατάσει στην ζώνη των υφάλμυρων νερών. Είναι επίσης προφανείς οι ζώνες N-ΝΔ και N-ΝΑ, που προαναφέρθηκαν κατά το σχολιασμό των πιεζομετρικών χαρτών, από όπου ουσιαστικά διεισδύει η θάλασσα λόγω διαταραχής της υδροδυναμικής ισορροπίας προς τη στεριά. Παρατηρούμε επίσης διεισδυση που ανά σημεία φτάνει έως και τα 3-4 Km ανάντη.



Σχήμα 6.14 Κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας - Ιούλιος, 2003.



Σχήμα 6.15. Κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας – Ιούλιος, 2005

6.3 ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

6.3.1 Εμπλουτισμός από ατμοσφαιρικά κατακρυμνίσματα

Οι Κωνσταντινίδης και Περγιαλιώτης (1984) ανέπτυξαν και εφάρμοσαν υδρολογικό μοντέλο στην περιοχή της Δυτικής Θεσσαλικής λεκάνης, η οποία δομείται από αλλουβιακούς σχηματισμούς, με δεδομένα κατείσδυσης από όπου προκύπτει η εξής εμπειρική σχέση που συνδέει την κατείσδυση με την βροχόπτωση και η οποία αναφέρεται και στον Πεταλά (1997).

$$R = 0,138 \times P - 1,277$$

όπου R, η κατείσδυση σε mm και P η βροχόπτωση σε mm.

Ο Πίνακας 6.5, παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά μέσων μηνιαίων τιμών κατείσδυσης ($\times 10^6$ m³) για την περίοδο 1954-2013 και το ποσοστό της κατείσδυσης (mm) επί του ετήσιου ύψους βροχόπτωσης (mm) όπως προέκυψαν από την εφαρμογή της παραπάνω εμπειρικής σχέσης. Ο κύριος λόγος χρησιμοποίησης της παραπάνω εμπειρικής σχέσης η οποία συσχετίζει την κατείσδυση με το ετήσιο ύψος βροχόπτωσης είναι οι παραπλήσιες γεωλογικές, υδρογεωλογικές και υδρολογικές συνθήκες με την αντίστοιχη περιοχή της Δυτικής Θεσσαλικής λεκάνης.

Πίνακας 6.5. Χαρακτηριστικά μέσων μηνιαίων τιμών κατείσδυσης ($\times 10^6$ m³) για την περίοδο 1954-2013

Ave	7,3	5,7	5,0	3,7	3,9	3,2	2,0	0,5	3,1	6,4	10,0	10,6	5,1
Min	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Max	26,4	22,4	17,5	12,4	15,4	16,7	13,4	12,0	18,8	31,6	32,0	43,4	43,4

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι με τη χρήση της προηγούμενης εμπειρικής σχέσης, οι ποσότητες νερού που κατεισδύουν στην περιοχή έρευνας παρουσιάζουν μέση ετήσια τιμή της τάξης των $5,1 \times 10^6$ m³.

6.3.2 Εμπλουτισμός από επιστροφές άρδευσης

Ο Πλιάκας (1998) σε έρευνες για την εφαρμογή κατάλληλης μεθόδου εμπλουτισμού σε ετερογενείς υδροφόρους αλλουβιακών σχηματισμών, σε πεδινή περιοχή της Ξάνθης εκτίμησε ότι η ποσότητα του νερού άρδευσης που επιστρέφει στον υδροφόρο προσεγγίζει το 20% περίπου της ποσότητας νερού που αντλείται. Στην περιοχή έρευνας, οι ποσότητες νερού που εμπλουτίζουν έμμεσα τον υδροφόρο, από τις επιστροφές άρδευσης εκτιμώνται στα ίδια επίπεδα με αυτές της κατείσδυσης δηλαδή ίσες με $5,1 \times 10^6$ m³.

6.3.3. Εμπλουτισμός από από βόρεια παράπλευρη επικοινωνία με τον αλλουβιακό κώνο του ποταμού Κομφάτου

Η μελέτη και ερμηνεία των πιεζομετρικών χαρτών κατέδειξε σημαντικούς άξονες τροφοδοσίας κατά μήκος του Ασπροποτάμου. Το γεγονός αυτό συνδέεται με την παρουσία πλευρικής μετάγγισης των τεταρτογενών υδροφόρων του αλλουβιακού κώνου του ποταμού Κομφάτου, προς το υδροφόρο σύστημα της περιοχής έρευνας ως αποτέλεσμα της υδραυλικής επικοινωνίας που υφίσταται μεταξύ τους. Οι Διαμαντής κ.α., 1994, αναφέρουν συνολικά $29,7 \times 10^6 \text{ m}^3$ συνεισφέρουν στον εμπλουτισμό του υδροφόρου συστήματος της περιοχής μελέτης.

6.3.4 Απαιτήσεις νερού στην περιοχή μελέτης

Στον Πίνακα 6.6 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι απαιτήσεις σε νερό για άρδευση των καλλιεργούμενων εκτάσεων της περιοχής μελέτης όπως αυτές προέκυψαν από τη στατική επεξεργασία των δεδομένων (Καλλιώρας, 2008). Όπως προκύπτει από τα στοιχεία του πίνακα οι απαιτήσεις σε νερό άρδευσης για την περιοχή μελέτης ανέρχονται σε $38,182 \times 10^6 \text{ m}^3$

Πίνακας 6.6. Είδη καλλιέργειας (Σύνθεση από Ετήσια Δελτία Γεωργικής Στατιστικής, Εθνικής Στατιστικής Υπηρεσίας και μετέπειτα επεξεργασία με δορυφορικές εικόνες και αεροφωτογραφίες της περιοχής έρευνας με έτος λήψης το 2005).

Είδος Καλλιέργειας	Έκταση (km ²)	Ποσοστό (%)	Καταναλωση νερού (m ³) ανά στρέμμα	Καταναλωση νερού (m ³) ανά km ²	Συνολική κατανάλωση νερού (m ³)	Συνολική κατανάλωση νερού (Χ10 ⁶ m ³)
Αραβόσιτος	6.88	6.91%	450	450000	3096000	3.096
Βαμβάκι	74.37	74.74%	350	350000	26029500	26.0295
Ζαχαρότευτλα	0.98	0.98%	425	425000	416500	0.4165
Λαχανόκηποι	4.2	4.22%	500	500000	2100000	2.1
Ηλίανθος	0.67	0.67%	500	500000	335000	0.335
Σιτάρι(Μαλακό)	1.12	1.13%	500	500000	560000	0.56
Σιτάρι(Σκληρό)	10.4	10.45%	500	500000	5200000	5.2
Μηδική	0.89	0.89%	500	500000	445000	0.445
Σύνολο	99.51	100.00%			Σύνολο	38.182

Όσον αφορά στο νερό που καταναλώνεται στους οικισμούς των οποίων ο πληθυσμός υδρεύεται από γεωτρήσεις οι οποίες έχουν καταγραφεί στην περιοχή μελέτης και εντοπίζονται κυρίως στο βόρειο τμήμα όπου απαντώνται νερά καλής ποιότητας, σύμφωνα με πολλαπλές σχετικές έρευνες του Εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας (Διαμαντής κ.α., 1994, Διαμαντής κ.α., 2001, Διαμαντής κ.α., 2003, Διαμαντής κ.α., 2005, Διαμαντής κ.α., 2006, Πλιάκας και Διαμαντής, 2001) αντιστοιχούν κατά μέσο όρο 375 λίτρα νερού ημερησίως ανά κάτοικο, ποσότητα που αντιστοιχεί σε $736,661 \times 10^3 \text{ m}^3$ ετησίως. Η ποσότητα των 375 λίτρων νερού ημερησίως διαμορφώνεται από το γεγονός ότι πρόκειται για αγροτικούς οικισμούς και συνεπώς οι καλλιέργειες διάφορων λαχανόκηπων αρδεύονται με νερό ύδρευσης το οποίο χρησιμοποιείται επίσης για το πότισμα οικόσιτων ζώων.

7. ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

7.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

7.1.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων πεδίου για την εκτίμηση της ποιότητας του υπόγειου νερού της περιοχής μελέτης. Όπως προαναφέρθηκε, η έρευνα περιελάμβανε επιτόπιες μετρήσεις θερμοκρασίας και ηλεκτρικής αγωγιμότητας καθώς επίσης και μια γενική χημική ανάλυση που έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Δ.Π.Θ. Τα δείγματα ελήφθησαν από δύο υποπεριοχές, η πρώτη στα όρια της περιοχής μελέτης, κοντά στον ποταμό Ασπροπόταμο και τον οικισμό της Ν. Καλλίστης, και η δεύτερη στο κέντρο της περιοχής μελέτης, Ν-ΝΑ-ΝΔ του οικισμού της Πόρπης. Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει τα τέσσερα δείγματα Δ1-Δ4 ενώ αντίστοιχα τα υπόλοιπα τέσσερα αναφέρονται στη δεύτερη υποπεριοχή. Στον Πίνακα 7.1. που ακολουθεί παρουσιάζονται οι επιτόπιες μετρήσεις καθώς και η εργαστηριακή μέτρηση του pH.

Στις περισσότερες περιπτώσεις των υπογείων νερών, γενικώς ο συντελεστής ηλεκτρικής αγωγιμότητας παίρνει τιμές από 140 $\mu\text{S}/\text{cm}$ έως 1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Τα ελαφρά νερά έχουν τιμές έως 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ενώ τα βαριά νερά πάνω από 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Τα υφάλμυρα νερά έχουν ηλεκτρική αγωγιμότητα συνήθως πάνω από 2000 – 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ έως και 30.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 300 και 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ για τα γλυκά υπόγεια νερά, ενώ σε περιπτώσεις που ο υδροφόρος έχει υποστεί ρύπανση η τιμή αυτή υπερβαίνει τα 1500-2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (όπως συμβαίνει συνήθως στην πλειοψηφία των παράκτιων ιζηματογενών υδροφόρων στρωμάτων).

Η συγκέντρωση του συνόλου των διαλυμένων στερεών, TDS, αποτελεί μια γενική μέτρηση της ποιότητας του υπόγειου νερού. Κάθε συγκεκριμένο εύρος τιμών TDS χρησιμοποιείται για να ορίσει και μια συγκεκριμένη ποιοτική κατάσταση του υπόγειου νερού. Έτσι οι τιμές του TDS καθορίζουν την ταξινόμηση του νερού σε γλυκό, υφάλμυρο, αλμυρό, ή υπεραλμυρό. Αξιοσημείωτο, αλλά φυσικά αναμενόμενο, είναι ότι ανάμεσα στο T.D.S. και την ηλεκτρική αγωγιμότητα (E.C.) υπάρχει μία περίπου γραμμική σχέση, η οποία είναι:

$$\text{T.D.S.} = 0,65 \text{ E.C.}$$

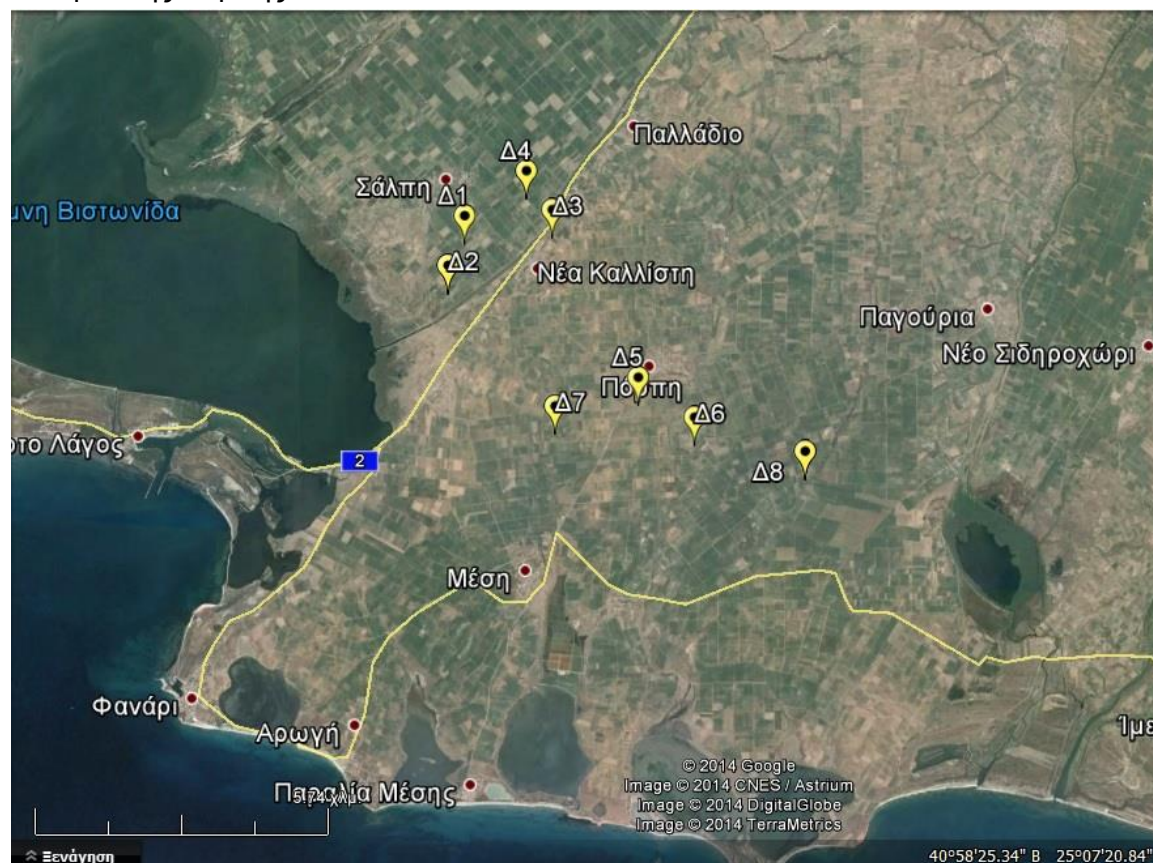
Ανάλογα με τη τιμή του T.D.S. γίνεται κατάταξη των υπογείων νερών (Davies-Dewiest, 1966).

- T.D.S. < 1000 mg/l. Γλυκό νερό.
- T.D.S. = 1000 – 10.000 mg/l. Υφάλμυρο νερό.
- T.D.S. = 10.000 – 35.000 mg/l. Αλμυρό νερό.
- T.D.S. > 35.000 mg/l. Υπεράλμυρο νερό (σαλαμούρα)

Το θαλασσινό νερό κατά μέσο όρο έχει T.D.S. = 34.000 mg/l. Τα αιωρούμενα στερεά (ή όποια άλλα υλικά) δεν συμπεριλαμβάνονται στα T.D.S., όπως τα κolloειδή και τα διαλυμένα αέρια.

7.1.2 Περιοχή μελέτης

Στον χάρτη που ακολουθεί παρουσιάζονται τα σημεία όπου έγινε δειγματοληψία υπόγειου νερού. Αυτά ελήφθησαν από δύο σημεία, η μία στα όρια της περιοχής μελέτης, κοντά στον οικισμό της Ν.Καλλίστης, ενώ η δεύτερη νότια του οικισμού της Πόρτης.



Σχήμα 7.1. Σημεία δειγματοληψίας υπόγειου νερού.

Όσον αφορά στα δείγματα που ελήφθησαν από τη Ν.Καλλίστη παρατηρούμε ομοιογένεια στη θερμοκρασία, με μια μέση τιμή κοντά στους 17 °C που μπορεί να τα χαρακτηρίσει ως κρύα (Schoeller, 1962), ενώ η τιμή του pH χαρακτηρίζει το νερό της περιοχής ως ελαφρώς αλκαλικό με μέση τιμή στα 7,51. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα των δειγμάτων παρουσιάζει μεγάλη ετερογένεια, αν συνυπολογίσει κανείς την εγγύτητα των γεωτρήσεων που έγινε η δειγματοληψία. Όλα τα δείγματα της Ν. Καλλίστης είναι μέσα στα φυσιολογικά και αναμενόμενα όρια των υπόγειων γλυκών νερών εκτός από το δείγμα Δ4 που σημειώνει τιμή ηλεκτρικής αγωγιμότητας ίση με 1436 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Μια τόσο υψηλή τιμή ηλεκτρικής αγωγιμότητας υποδεικνύει αρχικά την ύπαρξη διελυμένων αλάτων ή διελυμένων στερεών στο δείγμα.

Όσον αφορά στα δείγματα Δ5-Δ8 που ελήφθησαν κοντά στον οικισμό της Πόρπης αυτά παρουσιάζουν μεγαλύτερη θερμοκρασία με μέση τιμή 20,4 °C και χαρακτηρίζονται ως υπόθερμα (Schoeller, 1962), ενώ επίσης χαρακτηρίζονται ως ελαφρά αλκαλικά από την τιμή του pH. Εδώ οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι ελαφρώς αυξημένες με όλα τα δείγματα να είναι άνω των 700 μS/cm. Το δείγμα Δ8 ειδικά προκύπτει με πολύ μεγάλη τιμή σε σχέση με τα υπόλοιπα δείγματα της υποπεριοχής. Όσον αφορά στο χρώμα του και τα διελυμένα στερεά που περιέχει η ποσότητα αυτών που καθιζάνανε, σε φάση ηρεμίας ήταν πολύ μικρή, ενώ συνολικά το δείγμα αυτό θα χαρακτηριζόταν διαυγές συγκριτικά με τα άλλα δείγματα, γεγονός που υποδεικνύει την ύπαρξη αλάτων. Αυτό προκύπτει και από τη σχέση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με τα T.D.S που δίνει τιμή ίση με 1144mg/L, με το συγκεκριμένο δείγμα να εμπίπτει οριακά στα αρχικά στάδια της ζώνης του υφάλμυρου.

Πίνακας 7.1. Φυσικοχημικές παράμετροι των υδατικών δειγμάτων

Δείγμα	T (°C)	pH	Αγωγιμότητα (μS/cm)
Δ1	16,9	7,54	344
Δ2	17,3	7,45	412
Δ3	17,4	7,37	521
Δ4	17	7,69	1436
Δ5	22,7	7,53	915
Δ6	21,6	7,78	725
Δ7	18,5	7,61	858
Δ8	18,8	7,45	1760

Στον Πίνακα 7.2. που ακολουθεί παρουσιάζεται η ολική σκληρότητα των δειγμάτων όπως αυτή προέκυψε από τις εργαστηριακές αναλύσεις. Στον επόμενο Πίνακα 7.3. παρουσιάζονται τα όρια σύμφωνα με τα οποία χαρακτηρίζονται τα νερά με βάση τη σκληρότητά τους. Συνολικά τα δείγματα από την περιοχή της Ν.Καλλίστης χαρακτηρίζονται ως μαλακά νερά με εξαίρεση το δείγμα Δ4 που εμπίπτει στην κατηγορία των σκληρών νερών με τιμή 26,8 °F (Γαλλικοί βαθμοί σκληρότητας).

Τα δείγματα από την ευρύτερη περιοχή της Πόρπης χαρακτηρίζονται από ανομοιογένεια παρότι βρίσκονται σχετικά κοντά μεταξύ τους. Τα δείγματα Δ5 και Δ8 χαρακτηρίζονται ως πολύ σκληρά νερά με τιμή >30°F, ενώ τα δείγματα Δ6 και Δ7 βρίσκονται στα όρια μεταξύ μέτρια σκληρών και σκληρών νερών.

Πίνακας 7.2. Ολική Σκληρότητα των υδατικών δειγμάτων

Δείγμα	Ολική Σκληρότητα °F
Δ1	1,4
Δ2	4,1
Δ3	6
Δ4	26,8
Δ5	46,4
Δ6	17
Δ7	22,2
Δ8	55

Πίνακας 7.3. Ταξινόμηση του νερού με βάση τη σκληρότητά του.

Ισοδύναμο CaCO ₃ (mg/L)	Γαλλικοί Βαθμοί	Χαρακτηρισμός
0-100	0-10	Μαλακό
101-200	10-20	Μέτρια Σκληρό
201-300	20-30	Σκληρό
>300	>30	Πολύ Σκληρό

Στους πίνακες που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης των δειγμάτων με σκοπό την εκτίμηση των στοιχείων που υποδεικνύουν το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης στην περιοχή μελέτης. Στον πίνακα 7.4. παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των κατιόντων των υδατικών δειγμάτων όπως αυτά προέκυψαν από τις εργαστηριακές μετρήσεις.

Πίνακας 7.4. Κατιόντα των υδατικών δειγμάτων

Δείγμα	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ²⁺	K ⁺	Fe ²⁺
Δ1	4,81	0,48	57,2	3,4	0,39
Δ2	11,62	2,91	65,4	5,3	0,355
Δ3	8,82	9,23	73,7	9,9	0,281
Δ4	70,54	22,36	161,75	3	0,213
Δ5	64,92	17,01	87,23	3	0,591
Δ6	48,89	11,66	82,97	3,9	0,558
Δ7	64,12	15,06	74,46	2,7	1,544
Δ8	212,42	4,86	120,45	1,7	0,317

Η κύρια προέλευση του ασβεστίου (Ca²⁺) είναι τα ανθρακικά ιζηματογενή πετρώματα και τα μάρμαρα. Επίσης προέρχεται από τους ασβεστονατριούχους άστριους, τη γύψο, καθώς και από ορυκτά της ομάδας του επίδοτου.

Το μαγνήσιο (Mg²⁺) απαντάται στον ολιβίνη (Mg,Fe)SiO₄, μαγνησίτη, δολομίτη και τους χλωρίτες. Επίσης στα ανθρακικά πετρώματα, στα οποία είναι περισσότερο άφθονο όταν περιέχουν μαγνησίτη (MgCO₃) και δολομίτη (CaCO₃. MgCO₃). Προέρχεται και από τη διάλυση αργιλικών ορυκτών, όπου βρίσκεται προσροφημένο στο πλέγμα τους.

Ο λόγος Ca/Mg στο θαλασσινό νερό είναι περίπου 0,25, σε υφάλμυρα νερά 1,5-3,7 ενώ σε ασβεστολιθικά νερά 1,6 και σε δολομιτικά νερά 1,25. Ο λόγος αυτός απαντάται όσον αφορά το ασβέστιο και το μαγνήσιο στο δείγμα Δ4 που όπως προαναφέρθηκε έχει τιμή αγωγιμότητας 1436 μS/cm γεγονός που υποδεικνύει την ύπαρξη υφάλμυρου νερού. Το δείγμα Δ8 εμφανίζει πολύ μεγάλη συγκέντρωση ιόντων ασβεστίου, δεν ακολουθεί όμως την αναλογία αυτή που προαναφέρθηκε. Τα υπόπλοια δείγματα κυμαίνονται σε τιμές από 40-70mg/L με εξαίρεση τα δείγματα Δ1-Δ3 που όπως προαναφέρθηκε χαρακτηρίζονται και μαλακά νερά.

Τα αλκάλια Na και K συνδέουν την παρουσία τους γενικά με τους αστρίους. Το κάλιο σχετίζεται επίσης και με καλιούχα λιπάσματα. Η παρουσία των αλκαλίων σχετίζεται και με τη διείσδυση της θάλασσας σε παράκτιους υδροφόρους ορίζοντες ή με αερομεταφερόμενα σταγονίδια από τη θάλασσα. Το ενδεικτικό επίπεδο συγκέντρωσης νατρίου στα υπόγεια νερά είναι τα 20 mg/L. Στο θαλασσινό νερό ανέρχεται σε 10.000 mg/L.

Κανένα από τα δείγματα δεν πλησιάζει την ενδεικτική τιμή των 20mg/L και όλα παρουσιάζουν τιμές άνω των 50mg/L. Τα δύο δείγματα Δ4 και Δ8 έχουν διπλάσια συγκέντρωση που ξεπερνά τα 160mg/L και 120mg/L αντίστοιχα όπως φαίνεται στον πίνακα 7.4. Όσον αφορά τη συγκέντρωση του καλίου, το μόνο αξιοσημείωτο είναι το δείγμα Δ3 που εμφανίζει υψηλή τιμή ίση με 9,9mg/L.

Στα νερά ο σίδηρος συναντάται με τη δισθενή και την τρισθενή μορφή του. Προέρχεται από μαγματικά πετρώματα, οξειδία (αιματίτης, λειμονίτης, μαγνητίτης), σουλφίδια (σιδηροπυρίτης, FeS₂), ανθρακικά ορυκτά (σιδηρίτης, FeCO₃). Τα επιφανειακά νερά έχουν τον σίδηρο με την τρισθενή μορφή, ενώ αντίθετα μερικά υπόγεια νερά περιέχουν ιόντα δισθενούς σιδήρου, λόγω έλλειψης οξυγόνου. Όταν τα νερά αυτά οξυγονωθούν οι δισθενείς ενώσεις του σιδήρου οξειδώνονται προς τρισθενείς και κατακρημνίζονται, προσδίδοντας καφέ-κόκκινο χρώμα. Το χρώμα αυτό ανιχνεύθηκε, δια γυμνού οφθαλμού, στο δείγμα Δ7 που κατόπιν χημικής ανάλυσης επιβεβαιώθηκε η υψηλή τιμή διαλυμένου σιδήρου σε αυτό.

Το ενδεικτικό επίπεδο συγκέντρωσης ολικού σιδήρου είναι τα 0,02 mg/L. Όταν η συγκέντρωση υπερβαίνει τα 0,1 mg/L γίνεται ίζημα μετά από έκθεση στον ατμοσφαιρικό αέρα, προκαλώντας θολότητα. Τα δείγματα που αναλύθηκαν παρουσιάζουν τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 0,2-0,5mg/L με εξαίρεση το δείγμα Δ7 που έχει συγκέντρωση ίση με 1,54mg/L.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα στοιχεία για τα ανιόντα που περιέχονται στα δείγματα που αναλύθηκαν. Αυτά που ενδιαφέρουν περισσότερο είναι οι συγκεντρώσεις των χλωριόντων και των θειικών καθώς συνδέουν την ύπαρξή τους με το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης, από κάποιο όριο και πάνω. Κύρια προέλευση είναι τα ιζηματογενή πετρώματα, που περιέχουν αργιλικά ορυκτά θαλάσσιας γένεσης, καθώς και οι εβαπορίτες. Άλλη πηγή χλωριόντων όπως προαναφέρθηκε αποτελεί η διείσδυση της θάλασσας στους παράκτιους υδροφόρους.

Σε περιπτώσεις διείσδυσης θαλασσινού νερού σε παράκτιους υδροφορείς τα χλωριούχα ιόντα αποτελούν την κύρια παράμετρο υποβάθμισης της ποιότητας των υπόγειων αποθεμάτων. Σε συγκεντρώσεις άνω των 250 mg/L προσδίδουν υφάλμυρη γεύση στο νερό (Todd and Mays, 2005).

Στον Πίνακα 7.5 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων όπως αυτά προέκυψαν από τις αναλύσεις των δειγμάτων. Παρατηρούμε ότι το δείγμα Δ4 εμφανίζει συγκέντρωση ιόντων χλωρίου ίση με 300,7 mg/L, η οποία συνδέεται και με υψηλή περιεκτικότητα θειικών στο συγκεκριμένο δείγμα (99mg/L). Αντίστοιχα η συγκέντρωση σε χλώριο του δείγματος Δ8 παρουσιάζεται υψηλή με τιμή 363,46mg/L, η μεγαλύτερη μεταξύ των δειγμάτων. Τα θειικά ιόντα του δείγματος Δ8 είναι σχετικά πιο υψηλά από τα άλλα δείγματα, ενώ η παρατήρηση είναι ότι η αύξηση της συγκέντρωσης των χλωριόντων ακολουθείται από αντίστοιχη των θειικών, γεγονός που μπορεί να συνδεθεί με το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης.

Πίνακας 7.5. Ανιόντα των υδατικών δειγμάτων

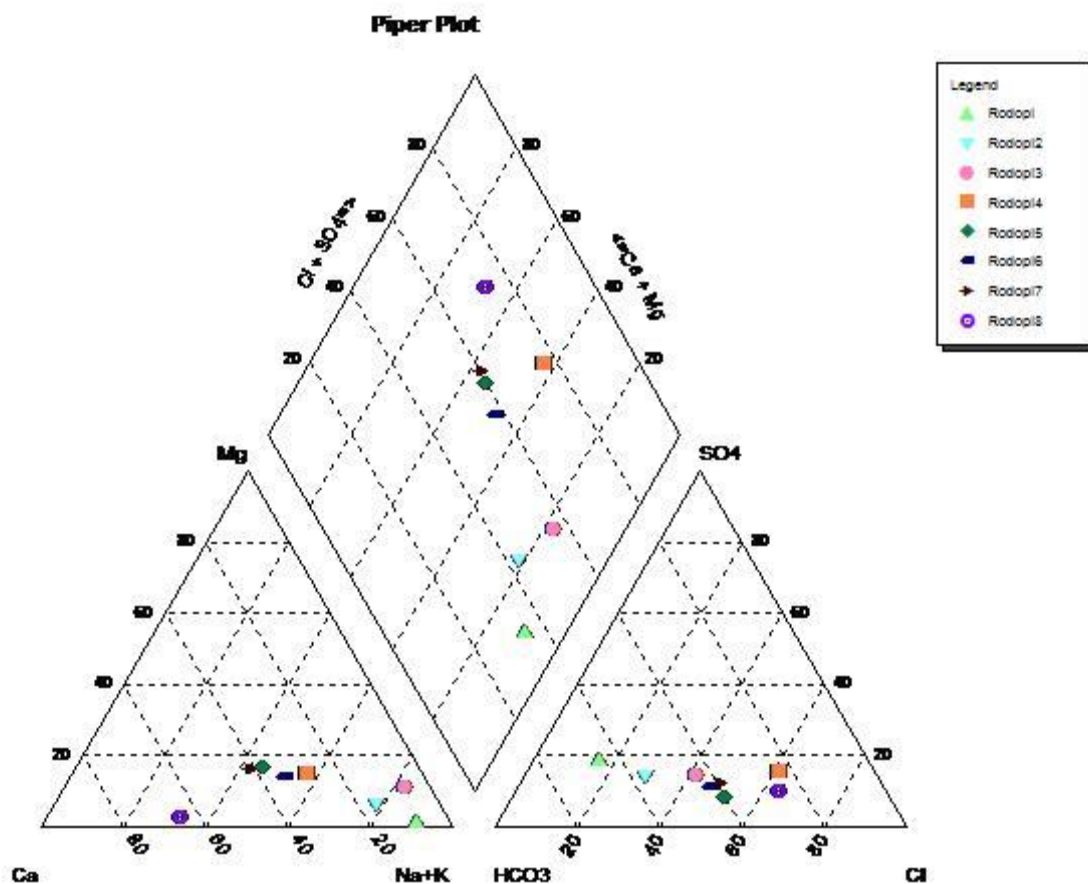
Δείγμα	HCO₃⁻	Cl⁻	SO₄²⁻	NO₃⁻	PO₄³⁻
Δ1	137,86	19,5	31,2	3	1,95
Δ2	140,3	42,55	27,3	1	0,798
Δ3	132,98	72,69	33,6	3	0,55
Δ4	192,76	300,7	99	4	0,786
Δ5	220,82	164,53	34,5	0	0
Δ6	185,44	120,56	36,5	0	0
Δ7	197,03	141,84	48	0	0
Δ8	253,76	363,46	76	0,5	42

7.2. ΕΙΔΙΚΗ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΧΗΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑ ΤΟΥΣ ΒΑΣΕΙ ΤΩΝ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΕΡΟΤΥΠΩΝ

7.2.1 Τριγραμμικά Διαγράμματα κατά Piper

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται και έχουν ιδιαίτερη σημασία αλλά και εξαιρετική χρησιμότητα ως εργαλεία στην έρευνα της υπαλμύρισης των υδροφόρων είναι τα τριγραμμικά διαγράμματα κατά Piper (1944), κατά Wilcox (1955), οι ιοντικές σχέσεις επιλεγμένων ιόντων, ο Συντελεστής Προσρόφησης Νατρίου, SAR (Sodium Absorption Ratio) και ο Συντελεστής Revelle. Επίσης εξαιρετική σημασία έχουν και οι μέθοδοι χαρτογράφησης ή απεικόνισης της κατανομής της συγκέντρωσης διαφόρων ιόντων ή της κατανομής μιας κρίσιμης παραμέτρου της ποιότητας των υπόγειων νερών.

Τα τριγραμμικά διαγράμματα κατά Piper (1944) περιλαμβάνουν τη σύνθεση των κύριων ανιόντων και κατιόντων των δειγμάτων υπόγειων νερών, τα οποία προβάλλονται σε ανεξάρτητα τρίγωνα, με αποτέλεσμα την αναγωγή της χημικής σύστασης του υπόγειου νερού σε μεμονωμένα σημεία τα οποία αντιπροσωπεύουν την ποσοστιαία συγκέντρωση (σε mg/L) κάθε ανιόντος ή κατιόντος. Αυτή η μέθοδος αποδεικνύεται πολύ χρήσιμη για τον εντοπισμό του υδροχημικού τύπου των υπόγειων νερών. Στο Σχήμα 7.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα Piper για τα 8 δείγματα νερού που αναλύθηκαν στο εργαστήριο.



Σχήμα 7.2. Αποτελέσματα σε διάγραμμα Piper για τα 8 σημεία δειγματοληψίας.

Παρατηρούμε στο διάγραμμα Piper ότι στο κάτω δεξί τριγωνικό τμήμα του διαγράμματος -το οποίο περιέχει τα ανιόντα των δειγμάτων- ότι τα περισσότερα δείγματα βρίσκονται στο τμήμα ανάμιξης ανιόντων (κάτω μεσαίο τμήμα) ενώ μόλις δύο δείγματα (Δ8 ή Rodopi8 και Δ4 ή Rodopi4) βρίσκονται στο κάτω αριστερά μέρος του διαγράμματος που υποδηλώνει ύπαρξη χλωριούχων ιόντων. Η εικόνα που παρουσιάζεται στο κάτω αριστερό τριγωνικό τμήμα του διαγράμματος Piper δείχνει συσσώρευση των σημείων στο τμήμα των νατριούχων και καλιούχων ιόντων (κάτω δεξιά) καθώς επίσης και στο τμήμα ανάμιξης κατιόντων (κάτω μεσαίο τμήμα). Όσον αφορά στα ρομβικά τμήματα του διαγράμματος Piper, εκεί παρατηρούνται κυρίως γλυκά νερά, με εξαίρεση το δείγμα Δ8 ή Rodopi8 που βρίσκεται στα όρια μεταξύ γλυκού και υφάλμυρου νερού.

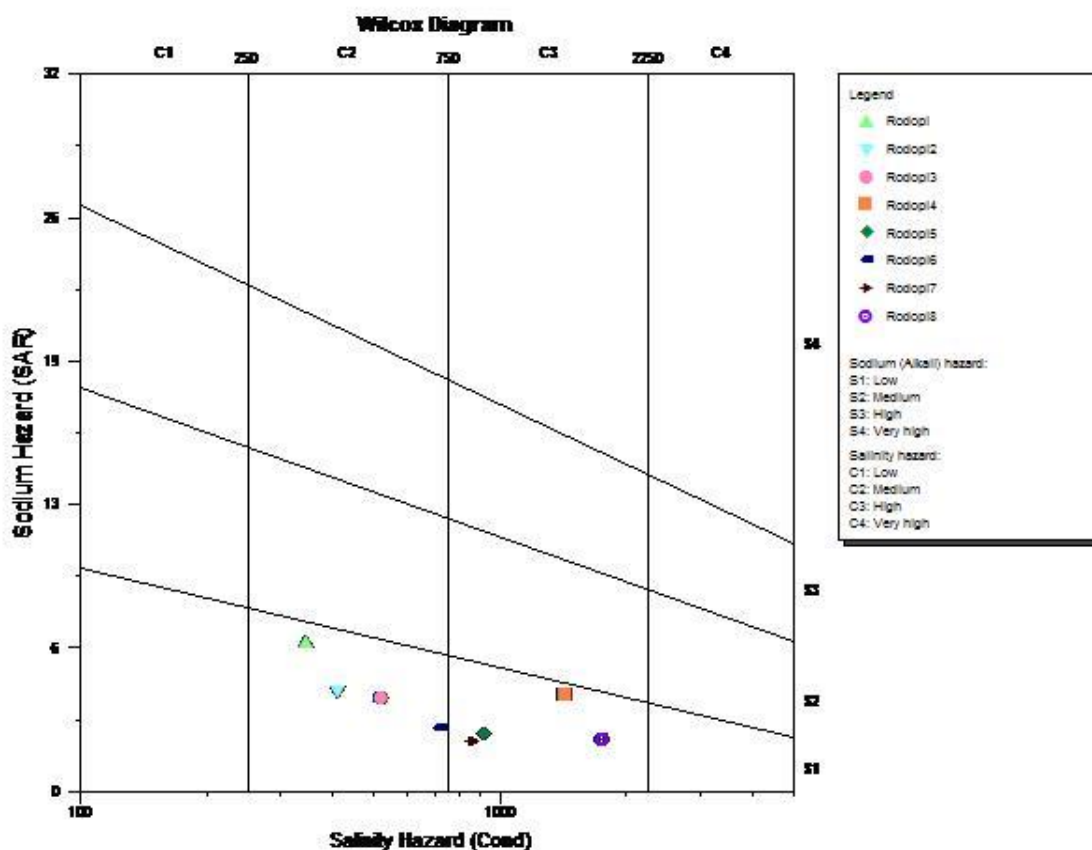
Στον Πίνακα 7.6 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι υδροχημικοί τύποι νερού των δειγμάτων. Διακρίνονται 4 διαφορετικοί τύποι με κυρίαρχα χημικά στοιχεία το νάτριο, τα όξινα ανθρακικά ιόντα και το χλώριο.

Πίνακας 7.6. Χημικοί τύποι του νερού των δειγμάτων.

Δείγμα	Τύπος νερού
Δ1	Na-HCO ₃ -SO ₄
Δ2	Na-HCO ₃ -Cl
Δ3	Na-K-HCO ₃ -Cl
Δ4	Na-Ca-Cl-HCO ₃
Δ5	Na-Ca-Cl-HCO ₃
Δ6	Na-Ca-Cl-HCO ₃
Δ7	Na-Ca-Cl-HCO ₃
Δ8	Ca-Na-Cl-HCO ₃

7.2.2 Διάγραμμα Wilcox

Το διάγραμμα Wilcox (1955) χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της καταλληλότητας του νερού όσον αφορά στη χρήση του για αρδευτικούς σκοπούς. Αποτελεί διάγραμμα διασποράς σημείων τα οποία προβάλλονται βάσει των τιμών του Συντελεστή Προσρόφησης Νατρίου, SAR, στον κατακόρυφο άξονα, και βάσει των τιμών της Ειδικής Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας (αλμυρότητα), SEC (σε $\mu\text{S}/\text{cm}$), στον οριζόντιο άξονα.



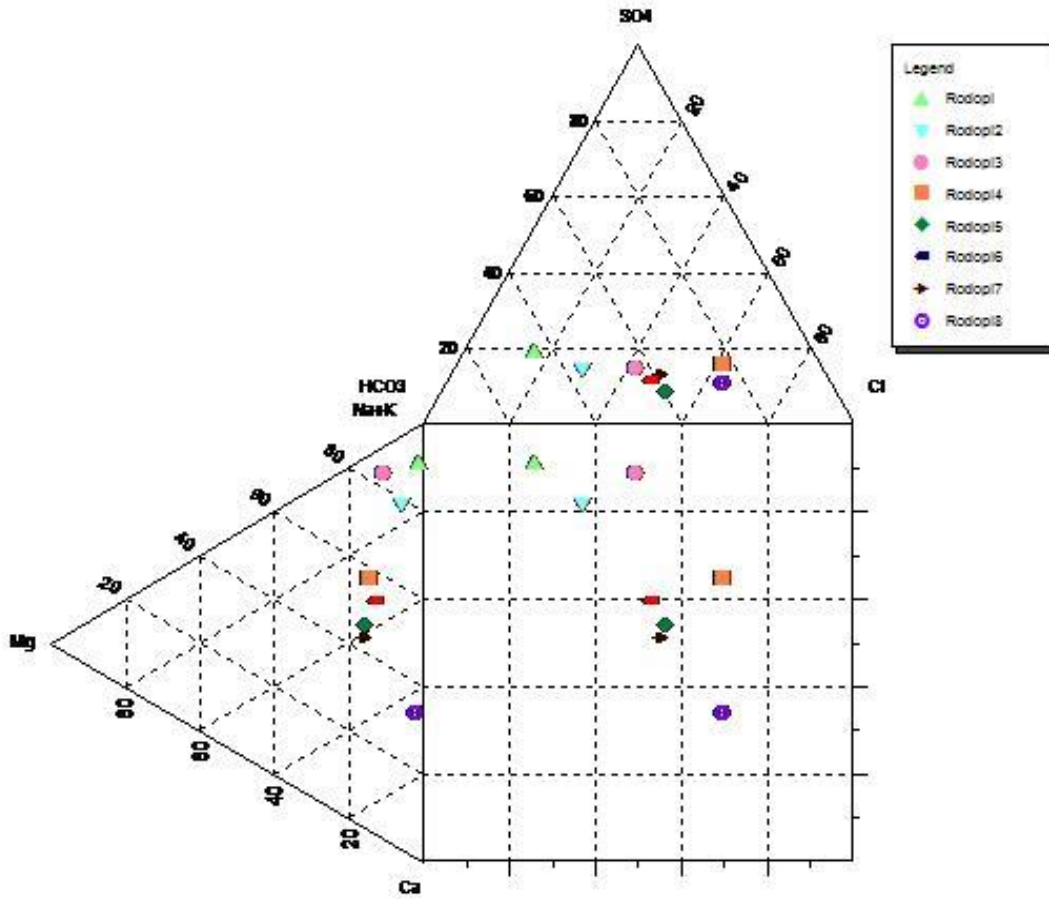
Σχήμα 7.3. Ταξινόμηση των δειγμάτων σε διάγραμμα Wilcox.

Παρατηρούμε από το διάγραμμα Wilcox ότι όλα τα δείγματα βρίσκονται εντός της κατηγορίας S1, που σημαίνει χαμηλού κινδύνου όσον αφορά στο συντελεστή προσρόφησης νατρίου (SAR). Τα δείγματα Δ1, Δ2, Δ3, και Δ6 βρίσκονται στην κατηγορία C2 που εκφράζει μέτριο κίνδυνο για άρδευση καλλιεργειών με το συγκεκριμένα νερά, όσον αφορά στην ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα που μετρήθηκε σε αυτά. Έτσι συνολικά τα προαναφερθέντα δείγματα αποτελούν καλής, οριακά καλής προς μέτριας ποιότητας (S1C1) νερά για άρδευση των καλλιεργειών της περιοχής μελέτης. Τα δείγματα Δ4, Δ5, Δ7 και Δ8 εμπίπτουν στην κατηγορία C3 που εκφράζει υψηλό κίνδυνο για τις αρδευόμενες καλλιέργειες που οφείλεται σε αυξημένες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας που όπως προαναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα είναι άνω των $700\mu\text{S}/\text{cm}$ για τα δείγματα αυτά.

7.2.3 Διάγραμμα Durov

Σύμφωνα με το διάγραμμα Durov τα περισσότερα δείγματα νερού προέρχονται από τη διαδικασία της απλής διάλυσης ή μίξης χημικών εδαφικών στοιχείων από την περιοχή μελέτης μέσα στο σώμα του υπόγειου υδροφορέα.

Durov Plot



Σχήμα 7.4. Ταξινόμηση των δειγμάτων σε διάγραμμα Durov

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη συνέχεια ακολουθούν ορισμένες γενικές παρατηρήσεις καθώς επίσης και τα γενικά συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν από την έρευνα πεδίου που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο εκπόνησης της παρούσας διατριβής.

1. Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στη βόρεια Ελλάδα, στο Νομό Ροδόπης (με πρωτεύουσα την Κομοτηνή) και συγκεκριμένα στο νότιο-δυτικό παράκτιο τμήμα της, νότιο-ανατολικά της λίμνης Βιστωνίδας. Η περιοχή επιλέχθηκε εξαιτίας της εκτεταμένης έρευνας η οποία λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια των τελευταίων 20 ετών από το Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας του Δ.Π.Θ. και συνεπώς υπήρχε το απαραίτητο γνωστικό υπόβαθρο σε διάφορα θέματα ώστε να διεξαχθεί διερεύνηση της εξέλιξης του μετώπου της θαλάσσιας διείσδυσης σε επίπεδο διδακτορικής διατριβής. Με εξαίρεση κάποιες δομημένες εκτάσεις, το σύνολο της περιοχής μελέτης χρησιμοποιείται εντατικά για γεωργικές δραστηριότητες. Η έκταση της περιοχής μελέτης ανέρχεται στα 165,1 km², συμπεριλαμβανομένων και των δομημένων εκτάσεων οι οποίες καταλαμβάνουν ένα μικρό τμήμα της.

2. Το γεωμορφολογικό ανάγλυφο της περιοχής μελέτης χαρακτηρίζεται ως ημιλοφώδες στο σύνολό του, με εξαίρεση την εμφάνιση κάποιων πεδινών εκτάσεων οι οποίες διακόπτουν τη συνέχειά του. Σημαντική είναι και η παρουσία των παράκτιων λιμνοθαλασσών που εντοπίζονται στο νότιο ανάπτυγμα της όπως και η λίμνη Ισμαρίδα στο νότιο-ανατολικό όριό της.

3. Η επιφανειακή αποστράγγιση λαμβάνει χώρα προς τα νότια της περιοχής και ακολουθεί τις κλίσεις το εδάφους. Το υδρογραφικό δίκτυο στο κέντρο της περιοχής μελέτης, έχει παράλληλη μορφή και αποτελείται κυρίως από 3 χείμαρρους, ενώ στα όρια της κοίτης καθενός από αυτούς εμφανίζονται μικρότεροι χείμαρροι δενδριτικής μορφής.

4. Οι τεταρτογενείς αποθέσεις καταλαμβάνουν εκτάσεις πάχους μερικών μέτρων, κυρίως στην ευρεία κοίτη των χείμαρρων και στις νοτιότερες παράκτιες περιοχές εκεί όπου βρίσκονται οι λιμνοθάλασσες. Οι πλειοκαινικές αποθέσεις αφορούν κυρίως στην ύπαρξη χονδρόκοκκων υλικών. Οι άνω μειοκαινικές αποθέσεις αφορούν σε υλικά όπως άμμοι, χαλίκια και κροκάλες, τα οποία αποτελούν τα αδρομερή υλικά της περιοχής, κάνουν την εμφάνισή τους σε στρώματα πάχους 50-70m και ενίοτε διαχωρίζονται σε μικρότερες στρωματικές ομάδες (2 έως 3) μεταξύ τους από λεπτές ενστρωματώσεις αργίλου. Οι παλαιογενείς αποθέσεις σχετίζονται κυρίως με τις διάφορες εναλλαγές αργίλιτη και ψαμμίτη και απαντώνται σχεδόν αποκλειστικά στο βόρειο και ανατολικό όριο της περιοχής μελέτης. Στην περιοχή απαντάται ένας σημαντικός αριθμός ρηγμάτων, με σημαντικότερα αυτά που αναπτύσσονται κατά μήκος των ορίων της περιοχής μελέτης και τα οποία συμβάλλουν στη δημιουργία οριακών συνθηκών.

5. Στο κέντρο της περιοχής μελέτης βρίσκεται βροχομετρικός σταθμός ο οποίος υπάγεται στο Υ.Π.Ε.ΚΑ. και παρέχει στοιχεία σχετικά με τα βροχομετρικά χαρακτηριστικά της για την περίοδο 1954-2013. Η περιοχή μελέτης, όσον αφορά στη χρονική διακύμανση των τιμών βροχόπτωσης σε ετήσια και υπερετήσια βάση, αποτελεί μια τυπική πεδινή ζώνη με μεσογειακό κλίμα, με σχετικά ξηρές και θερμές καλοκαιρινές και υγρές και ψυχρές χειμερινές περιόδους. Για την περίοδο 1954-2013, η μέση ετήσια βροχόπτωση ανέρχεται στα 555,4 mm, ενώ οι τιμές της ελάχιστης και της μέγιστης ετήσιας βροχόπτωσης της ίδιας περιόδου είναι 198,5 mm και 922,0 mm αντίστοιχα, οι οποίες παρατηρήθηκαν κατά τα έτη 2008 και 1979 αντίστοιχα.

6. Η περιοχή μελέτης, όσον αφορά στα κύρια υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της δομείται κυρίως από αλλουβιακές αποθέσεις οι οποίες συνίστανται από χονδρόκοκκα υλικά, άμμους, χαλίκια και κροκάλες. Τα χονδρόκοκκα υλικά αποτελούν το κυρίως υδροφόρο στρώμα της περιοχής μελέτης, του οποίου ο πυθμένας αποτελείται από στρώμα γκριζοπράσινης αργίλου. Το υδροφόρο σώμα συχνά εμφανίζεται σε δύο ή και τρεις ενστρωματώσεις οι οποίες παρουσιάζουν υδραυλική επικοινωνία μεταξύ τους, ενώ το φαινόμενο αυτό γίνεται εντονότερο στο νότιο όριο της περιοχής μελέτης. Τα στρώματα τα οποία παρεμβάλλονται ενδιάμεσα των παραπάνω ενστρωματώσεων έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ποικίλων συνθηκών υδραυλικής αγωγιμότητας του σχηματισμού τόσο στην οριζόντια όσο και στη κατακόρυφη διεύθυνση.

7. Για τη διερεύνηση της δομής και των υδρογεωλογικών συνθηκών της περιοχής μελέτης εκτελέστηκαν οι παρακάτω εργασίες:

- Συλλογή υπαρχόντων στοιχείων (γεωλογικοί χάρτες, και λοιποί χάρτες), ερευνητικές εκθέσεις, διδακτορικές διατριβές της στενής και της ευρύτερης περιοχής.
- Καθορισμός δικτύου παρακολούθησης της στάθμης και της ποιότητας των υπόγειων νερών.
- Συστηματικές μετρήσεις στάθμης σε ένα εκτεταμένο δίκτυο 52 περίπου γεωτρήσεων παρακολούθησης δύο περιόδους του έτους 2014. Συγκεκριμένα το μήνα Μάιο, δηλαδή την περίοδο της υψηλής στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, (που οφείλεται στο τέλος των χειμερινών υγρότερων μηνών του έτους, στα έντονα ανοιξιάτικα κατακρημνίσματα καθώς και πριν την έναρξη των καλοκαιρινών αρδεύσεων των καλλιεργειών) και το μήνα Σεπτέμβριο, δηλαδή την περίοδο της χαμηλής στάθμης, μετά το πέρασμα των αρδεύσεων αλλά και του ξηρού καλοκαιρινού διαστήματος.
- Αναζητήθηκαν από τις αρμόδιες τοπικές υπηρεσίες του Υ.Π.Ε.Κ.Α στην πόλη της Κομοτηνής, κλιματολογικά δεδομένα για την περίοδο 2008-2013 από τον μετεωρολογικό σταθμό που βρίσκεται στην περιοχή μελέτης, με σκοπό την ανάλυση και επεξεργασία τους, καθώς και δημογραφικά στοιχεία εξέλιξης του πληθυσμού των οικισμών που αναπτύσσονται εκεί.

- Παράλληλα με τη μέτρηση της στάθμης ήταν σημαντική η εκτίμηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του υπόγειου νερού του υδροφορέα, γεγονός το οποίο επέβαλλε μια δειγματοληψία μέσω της άντλησης νερού από γεωτρήσεις της περιοχής μελέτης καθώς και την ανάλυσή του σε εργαστήριο για τον προσδιορισμό χημικών στοιχείων που συνδέονται με την θαλάσσια διείσδυση όπως χλωρίοντα, ιόντα νατρίου αλλά και φυσικές παραμέτροι που υποδεικνύουν το φαινόμενο όπως η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

8. Στην περιοχή μελέτης υπάρχει ένας αξιόλογος αριθμός γεωλογικών τομών γεωτρήσεων, ενώ επιλέχθηκαν ορισμένες από αυτές με σκοπό τη σχηματοποιημένη απόδοση των γεωλογικών σχηματισμών οι οποίοι καθορίζουν τις υδρογεωλογικές συνθήκες του υπό εξέταση υδροφόρου συστήματος. Έτσι, χάριν απλούστευσης το ανώτερο γεωλογικό στρώμα το οποίο διαμορφώνει τις υπό πίεση συνθήκες του υδροφόρου συστήματος ως μια γεωλογική στρωματογραφική ενότητα η οποία περιλαμβάνει υλικά όπως ιλυόλιθοι, ψαμίτες, μικροκροκαλοπαγή και άργιλοι. Το ενδιάμεσο στρώμα, το οποίο αποτελεί και το κύριο υδροφόρο στρώμα της περιοχής, και λαμβάνεται ως ενιαία γεωλογική ενότητα, περιέχει αλλουβιακές αποθέσεις, χονδρόκοκκα υλικά, άμμους, χαλίκια και κροκάλες. Πρόκειται για υλικά μεγάλης περατότητας τα οποία αποτελούν το κυρίως υδροφόρο στρώμα της περιοχής. Ο πυθμένας της υδρογεωλογικής λεκάνης οριοθετείται από την παρουσία της γκριζοπράσινης αργίλου.

9. Τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα προέκυψαν τα εξής (Καλλιώρας, 2008) :

- Τιμές της μεταβιβαστικότητας, T , κυμαίνονται μεταξύ των $1,15 \times 10^{-3}$ και $99,71 \times 10^{-3}$ m^2/sec , με μέση τιμή τα $23,95 \times 10^{-3}$ m^2/sec , γεγονός που υποδηλώνει πολύ καλό δυναμικό υδροφόρων οριζόντων της περιοχής. Επιπλέον οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας, K , κυμαίνονται μεταξύ των $2,49 \times 10^{-5}$ και $221,58 \times 10^{-5}$ m/sec , με μέση τιμή τα $46,66 \times 10^{-5}$ m/sec . Οι τιμές του συντελεστή εναποθήκευσης, S , της περιοχής μελέτης κυμαίνονται μεταξύ $1,3 \times 10^{-4}$ (ή $0,13 \times 10^{-3}$) και $2,9 \times 10^{-2}$ (ή $29,00 \times 10^{-3}$) με μέση τιμή $5,06 \times 10^{-3}$.

10. Η ερμηνεία των πιεζομετρικών χαρτών που συντάχθηκαν αναδεικνύει την ύπαρξη βασικών αξόνων τροφοδοσίας του εξεταζόμενου υδροφορέα, οι οποίοι εμφανίζονται και στις δύο περιόδους μετρήσεων (Οκτώβριος και Απρίλιος). Ο πρώτος άξονα τροφοδοσίας είναι αυτός που παρατηρείται στο βόρειο-ανατολικό όριο της περιοχής μελέτης. Όσον αφορά στην τροφοδοσία της περιοχής από τον αλλουβιακό κώνο του Κομψάτου (βόρειο παρακείμενο υδροφόρο σύστημα), παρατηρούνται δυο άξονες τροφοδοσίας, οι οποίοι θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως ζεύγος αξόνων τροφοδοσίας με κοινή προέλευση. Η τροφοδοσία της περιοχής μέσω διηθήσεων από τα νερά του Ασπροποτάμου μπορεί να αποκλειστεί εξαιτίας της έντονης ύπαρξης αργιλικών σχηματισμών στην περιοχή, γεγονός που δημιουργεί συνθήκες υδραυλικής απομόνωσης του ποταμού και του υπό εξέταση υδροφόρου συστήματος της περιοχής μελέτης. Κατά μήκος του ίδιου ποταμού, παρατηρείται πύκνωση των καμπύλων των πιεζομετρικών χαρτών, γεγονός που αποδίδεται στην ύπαρξη

ρήγματος κατά μήκος του Ασπροποτάμου το οποίο φέρει σε υδραυλική επικοινωνία τα δύο υδροφόρα συστήματα της περιοχής -αυτό της περιοχής μελέτης και του αλλουβιακού κώνου του Κομψάτου- με το δεύτερο να τροφοδοτεί το πρώτο. Κατά τη διερεύνηση όλων των πιεζομετρικών χαρτών παρατηρούνται επίσης τρεις άξονες τροφοδοσίας, οι οποίοι εντοπίζονται στο νότιο-δυτικό, στο νότιο και στο νότιο-ανατολικό όριο της περιοχής μελέτης. Ο πρώτος από τους προαναφερθέντες έχει διεύθυνση N-NA προς B-BA ενώ σε συνδυασμό με τα δεδομένα της ποιοτικής παρακολούθησης του υπό εξέταση υδροφορέα, πρόκειται για άξονα εμπλουτισμού από τη θάλασσα, ή άξονα θαλάσσιας διείσδυσης. Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης ο άξονας τροφοδοσίας που αναπτύσσεται νότιο-ανατολικά της λίμνης Ισμαρίδας με διεύθυνση N-NA προς B-BA, όπου επίσης παρατηρείται ποιοτική επιβάρυνση των υπόγειων νερών της περιοχής μελέτης, ενώ το ίδιο συμβαίνει επίσης και με το νότιο άξονα τροφοδοσίας της περιοχής. Η πύκνωση των πιεζομετρικών γραμμών η οποία εμφανίζεται κατά μήκος του ποταμού Βοζβόζη, αποδίδεται και αυτή (όμοια με την αντίστοιχη στο βόρειο-δυτικό όριο κατά μήκος του Ασπροποτάμου) στην ύπαρξη ρήγματος το οποίο δημιουργεί συνθήκες υδραυλικής απομόνωσης μεταξύ του ποταμού Βοζβόζη και της περιοχής μελέτης, συνθήκες οι οποίες εντείνονται και λόγω της επικράτησης των αργιλικών υλικών κατά μήκος του ποταμού.

11. Το βασικό χαρακτηριστικό της πιεζομετρικής επιφάνειας του υπό εξέταση υδροφορέα είναι οι τιμές των καμπυλών ίσης πιεζομετρικής στάθμης, όπου πρόκειται αποκλειστικά για αρνητικές τιμές στάθμης. Οφείλεται στις συνθήκες υπεράντλησης οι οποίες λαμβάνουν χώρα συστηματικά στην περιοχή, τουλάχιστον κατά τη διάρκεια της τελευταίας 20-ετίας, η οποία αυτονόητα συνοδεύεται από παντελή έλλειψη οποιουδήποτε ορθολογικού διαχειριστικού σχεδιασμού. Πρόκειται για δημιουργία τυπικού κώνου κατάπτωσης, το βαθύτερο σημείο του οποίου κυμαίνεται μεταξύ -36 και -40m ανάλογα με την περίοδο ανώτατης ή κατώτατης στάθμης.

12. Ένα από τα σημαντικότερα συμπεράσματα είναι ότι η κατάσταση στην περιοχή όσον αφορά τις πιεζομετρικές συνθήκες του υπόγειου υδροφορέα δεν έχει αλλάξει κατά την τελευταία δεκαετία. Οι χάρτες που παρουσιάζουν την πιεζομετρία και τέθηκαν σε αντιπαραβολή με αντίστοιχους του έτους 2005, δείχνουν μηδενική πτώση της στάθμης του υδροφορέα πέρα από το όριο των -40m, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ισοροπία του υδατικού ισοζυγίου του υδροφορέα έχει αποκατασταθεί στα συγκεκριμένα επίπεδα. Το γεγονός αυτό χρήζει περαιτέρω μελέτης καθώς οι λόγοι που μπορεί να έχουν οδηγήσει σε αυτό είναι σίγουρα συνδυαστικοί και περιλαμβάνουν πληροφορίες από δεδομένα χρήσης νερού, βροχοπτώσεων, είδη καλλιεργειών ή εμπλουτισμοί που ενδέχεται να έχουν αλλάξει τα τελευταία χρόνια.

13. Οι αλλουβιακοί σχηματισμοί της περιοχής μελέτης, οι οποίοι δομούν και το κυρίως υδροφόρο στρώμα της περιοχής, καλύπτονται από συνεχείς εναλλαγές λεπτών στρώσεων αργίλων, ιλυολίθων και ψαμμιτών και σπανιότερα μικροκροκαλοπαγών, γεγονός το οποίο επηρεάζει αρνητικά την κατακόρυφη κίνηση του νερού διαμέσου των προαναφερθέντων ενστρωματώσεων και κατά συνέπεια ελαττώνει την άμεση κατείσδυση του νερού των βροχοπτώσεων. Στην περιοχή

μελέτης, οι ποσότητες νερού που εμπλουτίζουν έμμεσα τον υδροφόρο, από τις επιστροφές άρδευσης εκτιμώνται στα ίδια επίπεδα με αυτές της κατείσδυσης. Πεταλάς (1997)

15. Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από έντονες καλλιεργητικές δραστηριότητες με κύρια καλλιέργεια το βαμβάκι, ενώ σε νοτιότερα τμήματα η υποβαθμισμένη ποιότητα των νερών έχει επιβάλει την καλλιέργεια σιταριών. Η ανεξέλεγκτη ανόρυξη αρδευτικών γεωτρήσεων στην περιοχή από ανειδίκευτους γεωτρυπανιστές, χωρίς τη σύνταξη σχετικής μελέτης για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, αποτελεί πλέον πρακτική για την περιοχή και την εκμετάλλευση του υπόγειου υδατικού δυναμικού της. Οι συνθήκες άντλησης είναι εντονότατες, ενώ το γεγονός ότι αυτές συμβαίνουν καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας –χωρίς παύση κατά τις ώρες έντονης ηλιοφάνειας και υψηλής θερμοκρασίας– καταδεικνύει την έλλειψη πληροφόρησης των χρηστών (αγρότες). Ένα επίσης χαρακτηριστικό της περιοχής είναι η ελλιπής εφαρμογή κατάλληλων τεχνικών καταστροφής των εγκαταλειμμένων γεωτρήσεων οι οποίες σε συγκεκριμένα τμήματα παρέχουν τεχνητή επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών υδροφόρων στρωμάτων με αποτέλεσμα την αλμύρισή τους.

16. Το δίκτυο των εγκαταλειμμένων γεωτρήσεων οφείλεται κυρίως σε δύο παράγοντες, αφενώς στην κακή ποιότητα του υπόγειου νερού στα νοτιότερα τμήματα της περιοχής μελέτης, λόγω θαλάσσιας διείσδυσης και υφαλμύρισης τους που τα καθιστά ακατάλληλα για άρδευση των καλλιεργειών και αφετέρου στο γεγονός ότι κάποιες από αυτές στερέψαν από νερό. Το αποτέλεσμα ήταν να οδηγηθούν οι ιδιοκτήτες τους σε ανόρυξη άλλων γεωτρήσεων, πολλές φορές σε απόσταση λίγων μέτρων από την εγκαταλειμμένη παλιά γεώτρηση.

17. Σαν τελική πρόταση επιλέγεται να εξεταστεί η άρδευση της περιοχής μελέτης μέσω της κατασκευής του φράγματος στον οικισμό του Ιάσμου, η κατασκευή του οποίου έχει ήδη μελετηθεί. Η μείωση των αντλήσεων θα οδηγήσει σε άνοδο της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα και στην αναχαίτιση της θαλάσσιας διείσδυσης. Εναλλακτικό σενάριο θα ήταν η περιοχή να εμπλουτιστεί τεχνητά από την ΜΕΥΑ Κομοτηνής η οποία σήμερα διοχετεύει την επεξεργασμένη εκροή της στον ποταμό Βοσβόζη, οποίος όπως προαναφέρθηκε δεν συνεισφέρει σημαντικά στον εμπλουτισμό της περιοχής λόγω σημαντικών αργιλικών σχηματισμών κατά μήκος του. Οι παραπάνω προτάσεις θα μπορούν να επενδυθούν με ένα μελετημένο και προγραμματισμένο σχέδιο αντλήσεων από συγκεκριμένες γεωτρήσεις ώστε να αποφεύγεται η μεγάλη πτώση στάθμης και η θαλάσσια διείσδυση στα νοτιότερα τμήματα. Ο πλήρης και εις βάθος σχεδιασμός των παραπάνω προτάσεων δύναται να εξετασθεί σε εμπειρισταμένη μελέτη με στόχευση πλέον στα συγκεκριμένα αυτά θέματα.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Appelo C. A. J. and Postma A. (1993). *Geochemistry, groundwater and pollution*, A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 535.
- Banner J. L., Wasserburg G. J., Dobson P. F., Carpenter A. B, Moore C. H. (1989). - *Isotopic trace elements constraints on the origin and evolution of saline groundwaters from central Missouri*: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 53, p. 383-398.
- Bastin G. B., Lorent C., Duque & Gevers M. (1984). - *Optimal estimation of the average areal rainfall and optimal selection of rain gauge stations*. *Water resources Research*, V. 20, No. 4, pp. 463 – 470.
- Bear J. (1972) - *Dynamics of fluids in porous media*, American Elsevier Publishing Company Inc., New York, pp. 764.
- Bear J. (1979) - *Hydraulics of Groundwater*, McGraw-Hill Book Company, New York.
- Bear J., Dagan G. - *Some exact solutions of interface problems by means of the hodograph method*, *J. Geophys. Res.*, 69, 1563-1572, 1964.
- Bear J., Dagan G. (1962) - *The transition zone between fresh water and salt water in a coastal aquifer*, *Hydraulics Lab., Technion, Haifa, Israel, Prog. Rep. 1*.: The steady interface between two immiscible fluids in a two-dimensional field of flow, pp. 170.
- Bear, J., A.H.-D. Cheng, S. Sorek, D. Ouazar and I. Herrera (Eds.) (1999) - *Seawater intrusion in coastal aquifers – Concepts, Methods and Practices*. Kluwer Academic Publishers, 625 p.
- Chaudhuri S. (1978).- *Strontium isotopic composition of several oil-field brines from Cherkauer D. S., McKereghan P. F., Schalch L. H. (1992) - Delivery of chloride and nitrate by ground-water to the Great-Lakes- Case study for the Door Peninsula Wisconsin*, *Ground Water*, 30 (6), 885-894.
- Chidley T. R. E. and Lloyd J. W. (1972) - *A mathematical study of fresh-water lenses*, *Ground Water*, 15(3), p. 215-222.
- Clark I. and Fritz P. (1997). *Environmental Isotopes in Hydrogeology*, CRC Press, 352p.
- Delleur J.W. (1998). *Handbook of Groundwater Engineering*, CRC Press, 945p.
- Essink Gualbert H. P. Oude (1996) - *Impact of sea level rise on groundwater flow regimes: A sensitivity analysis for the Netherlands*, Ph. D. thesis, Delft University of Technology, p. 411.
- Essink Gualbert H. P. Oude (2000) - *Groundwater Modelling*, Academic Publishing of Utrecht University, f. 15.

- Essink Gualbert H. P. Oude (2001) - *Density Dependent Groundwater Flow*, Academic Publishing of Utrecht University, f. 12.50.
- Fetter C. W. (2001) - *Applied Hydrogeology*, Fourth Edition, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, p. 598.
- Kallioras A., Pliakas F., Diamantis I. (2006b) - *Conceptual model of a coastal aquifer system in northern Greece and assessment of saline vulnerability due to seawater intrusion conditions*, Journal of Environmental Geology, Vol. 51, n. 3, pp. 349-361.
- Kallioras A., Pliakas F., Diamantis I., Emmanouil M. (2006a) - *Application of Geographical Information Systems (GIS) for the management of coastal aquifers subjected to seawater intrusion*, Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, Taylor & Francis, Inc., Philadelphia, USA, Vol. A41, No.9, p. 2027-2044.
- Mazor E. (2003). *Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology*, 3rd Edition (Books in Soils, Plants, and the Environment), CRC Press, 352p.
- Todd David Keith (1980) - *Groundwater Hydrology*, Second Edition, John Wiley & Sons, pp. 535.
- Todd, D. K. and Mays, L. W. (2005). *Groundwater Hydrology*, John Wiley & Sons, 3rd Edition, 656 pages.
- Αντωνόπουλος Β. «*Ποιότητα Νερού και Ρύπανση Υδατικών Πόρων*». Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής, Τμήμα Γεωπονίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Διαμαντής Ι. και Τζεβελέκης Θ. (1991) «*Υδρογεωλογικές και υδροχημικές συνθήκες στις παράκτιες προσχώσεις της Νήσου Θάσου*». Πρακτικά 1ου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου (Δελτίο 6), Λευκωσία Κύπρου, 14 – 17 Οκτωβρίου 1991, σελ. 131 – 148.
- Διαμαντής Ι., Μοσκοφίδης Μ., Πλιάκας Φ., Μησαϊλίδης Π., Καλλιώρας Α., Γκιουγκής Ι. (2005) «*Επικαιροποίηση των ποσοτικών και ποιοτικών στοιχείων που αφορούν στα νερά ύδρευσης των Δήμων και της Κοινότητας του Ν. Δράμας*». Ερευνητικό Πρόγραμμα που χρηματοδοτήθηκε από την Τοπική Ένωση Δήμων και Κοινότητας Ν. Δράμας, σελ. 128
- Διαμαντής Ι., Μπέλλος Κ., Καλλιώρας Α., Διαμαντής Β. (2003). «*Διεύρυνση – Βελτίωση των συνθηκών ύδρευσης οικισμών Δήμου Μύκης (Χρυσού, Προσήλιου, Σμίνθης και λοιπών)*». Ερευνητικό Πρόγραμμα που χρηματοδοτήθηκε από το Περιφερειακό Ταμείο Ανάπτυξης Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, σελ. 49

- Διαμαντής Ι., Πεταλάς Χ., Πλιάκας Φ., Καλλιώρας Α., Δάφνης Ι. (2001). «Διερεύνηση συνθηκών ύδρευσης Δήμων Νομού Ξάνθης (από πλευράς επάρκειας ποιότητας νερού, κατάστασης δικτύου και προστασίας σημείων υδροληψίας)» Ερευνητικό Πρόγραμμα που χρηματοδοτήθηκε από την Τ.Ε.Δ.Κ. Ξάνθης, 2001 σελ. 132.
- Διαμαντής Ι., Πεταλάς Χ., Τζεβελέκης Θ., Πλιάκας Φ., κ.α. (1994). «Διερεύνηση δυνατοτήτων ύδρευσης παράκτιων οικισμών της Θράκης από παράκτιους υδροφορείς, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας Δ.Π.Θ.». Έκθεση Ερευνητικού Προγράμματος για την Περιφέρεια Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, Τεύχη 4, σελ
- Διαμαντής Ι., Πλιάκας Φ., Γκιουγκής Ι., Καλλιώρας Α. (2006). «Διερεύνηση δυνατότητας ικανοποίησης των υδρευτικών αναγκών του Δήμου Ξάνθης από την καρστική υδροφορία ανατολικά του ποταμού Νέστου, Ερευνητικό Πρόγραμμα που χρηματοδοτήθηκε από τη ΔΕΥΑ Ξάνθης», σελ. 35.
- Διαμαντοπούλου Π., (1999). «Υδρογεωλογικές συνθήκες και υδραυλικές παράμετροι του υδροφόρου ορίζοντα που αναπτύσσεται στον ανώτερο ορίζοντα των πλειοκαινικών ιζημάτων της ΒΑ Ζακύνθου». Πρακτικά 5ου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Λευκωσία, Νοέμβριος 1999, σελ. 217 – 229.
- Καλλέργης Γ. (2000). «Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία». Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, Δεύτερη Έκδοση, Τόμος Β, σελ. 345, Αθήνα.
- Καλλέργης Γ. (2001). «Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία». Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, Δεύτερη Έκδοση, Τόμος Γ, σελ. 432, Αθήνα.
- Καλλέργης Γ., Λαμπράκης Ν., Νόκας – Ζωγράφος Η. (1997). «Απαιτούμενος χρόνος για την απορρύπανση υφαλμυρισμένων υδροφόρων». Πρακτικά 4ου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Θεσσαλονίκη 14 – 16/11/1997, σελ. 97 – 103.
- Καλλιώρας Α. και Πλιάκας Φ. (2005). «Υδροχημικά χαρακτηριστικά υπόγειων νερών παράκτιου υδροφόρου Ν. Ροδόπης που υπόκειται σε καθεστώς θαλάσσιας διείσδυσης». 7ο Πανελλήνιο Υδρογεωλογικό Συνέδριο της Ελληνικής Επιτροπής Υδρογεωλογίας της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας (Ε.Γ.Ε.) και του Συνδέσμου Γεωλόγων και Μεταλλειολόγων Κύπρου και του 2nd Middle and East Mediterranean Workshop on Fissured Rocks Hydrology (IAH, International Association of Hydrogeologists), 4-6/10/2005, Αθήνα, σελ. 163-170.
- Καλλιώρας, Α., Πλιάκας Φ., Πεταλάς Χ. και Διαμαντής Ι. (2004). «Η εναρμόνιση του Εθνικού Δικαίου με την Οδηγία 2000/60/ΕΚ για την προστασία και διαχείριση των υδάτων». Περιοδικό Περιβάλλον & Δίκαιο, τεύχος 4/2004 (Οκτωβρίου-Δεκεμβρίου 2004), Νομική Βιβλιοθήκη σελ. 480 – 488.
- Κουμαντάκης Ι., Παναγόπουλος Α., Σταυρόπουλος Ξ., Βουδούρης Κ. (1999). «Εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού στο παράκτιο υδροφόρο σύστημα του

βορείου τμήματος του νομού Κορινθίας». Πρακτικά 5ου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Λευκωσία, Νοέμβριος 1999, σελ. 65 – 80.

Πεταλάς Χ. (1997). «*Ανάλυση υδροφόρων συστημάτων στο ετερογενές και παράκτιο πεδίο Ν. Ροδόπης*». Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, σελ. 288.

Πεταλάς Χ., Πλιάκας Φ. και Διαμαντής Ι. (2002). «*Το πρόβλημα της διείσδυσης της θάλασσας σε παράκτιους υδροφορείς της Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης και μέθοδοι αντιμετώπισής του*». Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση του Τ.Ε.Ε., σειρά Ι, τόμος 22, τεύχος 1-2, σελ. 31-43

Πεταλάς, Χ. , Ι. Διαμαντής, Φ. Πλιάκας. (1999). «*Συνέπειες από την έλλειψη κατάλληλης διαχείρισης των παράκτιων υδροφορέων - Η περίπτωση της Ροδόπης*». Πρακτικά 5^{ου} Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, 12-14/11/1999, Λευκωσία, Κύπρος, σελ. 19-33.

