

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

‘Οικολογική ποιότητα και διαχείριση υδάτων σε επίπεδο λεκάνης απορροής’

ΤΜΗΜΑΤΩΝ

ΒΙΟΛΟΓΙΑΣ, ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ και ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΑΠΑΧΑΡΑΛΑΜΠΟΥ ΧΡΥΣΟΥΛΑ

ΓΕΩΛΟΓΟΣ

«Μελέτη του υδρολογικού κύκλου της λεκάνης απορροής της λίμνης
Κορώνειας με μεθόδους ισοτοπικής γεωχημείας»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2012

ARISTOTLE UNIVERSITY OF THESSALONIKI

**INTERDISCIPLINARY
POSTGRADUATE MASTER PROGRAM**

‘Ecological water quality and management at a river basin level’

**BY THE SCHOOLS OF
BIOLOGY, GEOLOGY and CIVIL ENGINEERING**

PAPACHARALAMPOU CHRYSOULA

Bsc in Geology

«Study of the hydrological cycle of the Lake Koronia wetland applying
isotope geochemistry»

MASTER DISSERTATION THESIS

THESSALONIKI 2012

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

1) Ντότσικα Ελισσάβετ, Ερευνήτρια Β', Υπεύθυνη Μονάδας Σταθερών Ισοτόπων,

Ινστιτούτο Επιστήμης Υλικών, Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος», ***Επιβλέπουσα***

2) Αλμπανάκης Κωνσταντίνος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Γεωλογίας, ΑΠΘ, ***Επιβλέπων***

3) Βαφειάδης Μαργαρίτης, Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών
Μηχανικών, ΑΠΘ, ***Μέλος***

*Αφιερώνεται σ' εκείνους που αποτελούν
έμπνευση για δημιουργία και πνευματική εμβάθυνση*

ΠΡΟΛΟΓΟΣ-ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στη Μονάδα Σταθερών Ισοτόπων του Ινστιτούτου Επιστήμης Υλικών του Εθνικού Κέντρου Έρευνας Φυσικών Επιστημών «Δημόκριτος», σε συνεργασία με το Εργαστήριο Φυσικής Γεωγραφίας του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Αντικείμενο μελέτης αποτελεί ο υδρολογικός κύκλος του υγροτοπικού συστήματος της λίμνης Κορώνειας (Β.Ελλάδα).

Η λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας παρουσιάζει ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον εξαιτίας της εξαιρετικής της σημασίας ως υγρότοπος, της πολυπλοκότητας των υδρολογικών συνθηκών της, αλλά και της προβληματικής διαχείρισης των συνεχώς μειούμενων υδατικών της πόρων. Η συμβολή της παρούσας εργασίας επικεντρώνεται στη μελέτη της υδροχημείας και της ισοτοπικής σύνθεσης των υδάτινων σωμάτων (επιφανειακών και υπόγειων) που απαρτίζουν τη λεκάνη απορροής. Με τη χρήση σύγχρονων εργαλείων διαχείρισης, όπως οι μέθοδοι της ισοτοπικής γεωχημείας, επιχειρείται να απαντηθούν ερωτηματικά σχετικά με τον υδρολογικό κύκλο της περιοχής και να εγερθούν νέα, με σκοπό την πιο εμπειριστατωμένη μελέτη και γνώση του συστήματος.

Ο προσωπικός μόχθος για την πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας είναι σίγουρα μεγάλος, αλλά αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω ορισμένους ανθρώπους που συνέβαλαν ενεργά και ουσιαστικά στην ολοκλήρωση της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες της μεταπτυχιακής μου διπλωματικής εργασίας, κκ Ντότσικα και Αλμπανάκη, για ξεχωριστούς λόγους τον καθένα.

Οφείλω ένα μεγάλο «ευχαριστώ» στην Ερευνήτρια του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» κα Ελισσάβετ Ντότσικα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε από την αρχή της γνωριμίας μας, καθώς και σε όλη την πορεία της συνεργασίας μας. Επιπλέον, για την καθοριστικής σημασίας καθοδήγηση της σε όλα τα στάδια της εργασίας, αλλά κυρίως, για την ενθάρρυνση της να ασχοληθώ με καινούργια και συναρπαστικά πεδία της επιστήμης.

Ο Αναπληρωτής Καθηγητής του Τμήματος Γεωλογίας κος Κωνσταντίνος Αλμπανάκης αποτελεί τον εμπνευστή της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας και θα ήθελα να τον ευχαριστήσω θερμά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση του θέματος. Οι παρατηρήσεις, οι επισημάνσεις του και η συμβολή του στην

πρακτική μετάφραση των αποτελεσμάτων της εργασίας ήταν καθοριστικής σημασίας για την ολοκλήρωσή της.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Επίκουρο καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, κύριο Βαφειάδη Μαργαρίτη για τη συμμετοχή του στην τριμελή επιτροπή.

Εκφράζω τις ολόθερμες ευχαριστίες μου στον Καθηγητή της Γεωπονικής Σχολής, κύριο Ζαλίδη Γεώργιο, για την αμέριστη βοήθεια του σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, αλλά και για τις παρατηρήσεις του μετά τη συγγραφή της. Επίσης, τον Δρ. Αντωνιάδη Απόστολο για την επιμέλεια των χημικών αναλύσεων των δειγμάτων νερού στο Διαβαλκανικό Κέντρο Περιβάλλοντος. Θα ήθελα να ευχαριστήσω επιπλέον τον υδρογεωλόγο του ΙΓΜΕ, Δρ. Βεράνη Νικόλαο για την παραχώρηση πολύτιμου βιβλιογραφικού υλικού.

Θα ήθελα να εκφράσω τη βαθιά ευγνωμοσύνη μου και ένα τεράστιο «ευχαριστώ» στους γονείς μου, Χρήστο και Σωτηρία, αλλά και στον αδερφό μου Κωνσταντίνο, για την αμέριστη ψυχική και υλική στήριξη τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Τους ευχαριστώ που στηρίζουν τις επιλογές μου και εμπιστεύονται τις ικανότητες και την κρίση μου.

Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους που βρίσκονται δίπλα μου και μεγαλώνουμε μαζί. Ιδιαίτερα «ευχαριστώ» στις φίλες και συναδέλφους Δήμητρα και Εύη για τη βοήθεια, τη στήριξη και την υπομονή τους σε όλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Οδηγία-Πλαίσιο για τα νερά 2000/60/ΕΕ ορίζει τις αρχές παρακολούθησης των υγροτόπων και ενθαρρύνει την ανάπτυξη νέων εργαλείων για τη στοχοθετημένη μελέτη και αποκατάσταση τους. Το υγροτοπικό σύστημα της λίμνης Κορώνειας έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας κατά τις τελευταίες δεκαετίες εξαιτίας της ποσοτικής και ποιοτικής υποβάθμισης των υδατικών του πόρων.

Η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία «Μελέτη του υδρολογικού κύκλου της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας με μεθόδους ισοτοπικής γεωχημείας» προσεγγίζει με σύγχρονες μεθόδους την κίνηση του νερού και τις χημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας, με στόχο να ερμηνεύσει την υφιστάμενη κατάσταση και να δώσει απαντήσεις σε χρόνια ερωτηματικά, συμβάλλοντας στην κατανόηση του συστήματος με στοχοθετημένη παρατήρηση.

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο ανατολικό άκρο του Ν. Θεσσαλονίκης και αποτελεί το φυσικό σύνορο του με τον κορμό της Χαλκιδικής. Η λίμνη Κορώνεια τοποθετείται στο δυτικό τμήμα της Μυγδονίας λεκάνης και η λεκάνη απορροής της έχει έκταση ίση περίπου με 778Km².

Για την ολοκλήρωση της παρούσας έρευνας συλλέχθηκαν συνολικά 18 δείγματα νερού (15 δείγματα υπόγειου νερού, 2 δείγματα επιφανειακού νερού, δείγμα υδρευτικού νερού) από όλη την έκταση της λεκάνης. Στα δείγματα συγκαταλέγεται το θερμό νερό των Λουτρών Λαγκαδά, καθώς και νερό από τη λίμνη Κορώνεια. Προσδιορίστηκαν η χημική και ισοτοπική σύσταση του νερού των δειγμάτων, που αποτυπώνουν τη σύσταση του νερού και αποτελούν ιχνηθέτες της προέλευσης του.

Για τη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας συμπεραίνονται τα παρακάτω:

- Το νερό (επιφανειακό και υπόγειο) είναι μετεωρικής προέλευσης
- Αναπτύσσεται υπόγειο υδροφόρο σύστημα δύο επάλληλων υδροφόρων διαφορετικού χημισμού, που επικοινωνούν άμεσα μεταξύ τους, καθώς και με τα επιφανειακά υδάτινα σώματα
- Τα υπόγεια νερά δεν εμφανίζονται κορεσμένα σε διαλυμένα άλατα, γεγονός που υποδεικνύει μια σύντομη κυκλοφορία. Η χημική και ισοτοπική τους σύσταση δείχνουν μια σχετικά ρηχή υπόγεια κυκλοφορία

➤ Η χημική και ισοτοπική σύσταση του γεωθερμικού νερού του πεδίου Λαγκαδά δε διαφοροποιούνται από τις αντίστοιχες των «κρύων» δειγμάτων, υποδεικνύοντας τη συσχέτιση τους

➤ Η διαφοροποίηση της χημικής σύστασης του νερού της Κορώνειας αποδίδεται στην έντονη εξάτμιση

➤ Το επιφανειακό νερό του ποταμού Μπογδάνα είναι όμοιο χημικά και ισοτοπικά με το υπόγειο νερό της λεκάνης

➤ Η τροφοδοσία των υπόγειων υδροφόρων πραγματοποιείται από δύο ζώνες τροφοδοσίας διαφορετικού υψομέτρου.

Λέξεις-κλειδιά: ισοτοπική γεωχημεία Κορώνεια, υγρότοπος, Οδηγία 2000/60/ΕΕ

ABSTRACT

The European Framework Directive 2000/60/EU defines the principles for wetlands' monitoring and encourages the development of new tools for their targeted study and restoration. The Koronia wetland has been studied thoroughly during recent decades because of quantitative and qualitative degradation of its water resources.

The MSc thesis "Study of the hydrological cycle of Koronia wetland applying isotope geochemistry" approaches by contemporary methods the water movements and the chemical processes occurring in the catchment of lake Koronia, in order to interpret the current situation and answer crucial questions, contributing to the understanding of the system with targeted observation.

The study area is located on the eastern edge of Thessaloniki and constitutes the natural boundary towards the trunk of Halkidiki. The lake Koronia is located in the western part of the Mygdonia basin and its catchment covers an area equal roughly to 778Km².

A total of 18 water samples (14 boreholes, 1 hot water of Langadas field, 2 of surface water –Mpogdanas and Koronia- and 1 of irrigation water) were collected throughout the catchment. Chemical and isotopic compositions of the samples were detected, which identify the chemical water type and constitute tracers of the origin of water.

The results of the study of the Koronia wetland prove that:

- Both surface water and groundwater are of meteoric origin
- An underground water table is grown, consisting of two parallel layers of different chemical composition, interacting between them, along with surface water
- Groundwater is not saturated, a fact attributed to short circulation. Its chemical and isotopic composition show a shallow water circulation
- The differentiation of the chemical composition of lake Koronia is attributed to intense evaporation
- The chemical and isotopic composition of the thermal water of Lagkadas field are not differentiated from those of "cold" samples, indicating their communication
- The chemical and isotopic composition of the surface water of Mpogdanas river are similar to those of groundwater

➤ The alimentation of the aquifers is performed by two alimentation zones of different altitude.

Keywords: isotope geochemistry Koronia catchment, wetland, European Directive 2000/60/EU

Περιεχόμενα

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
1.1 Εισαγωγή.....	9
1.2 Ισοτοπική Υδρολογία.....	10
1.2.1. Εισαγωγή	10
1.2.2. Βασικές έννοιες	10
1.2.3. Ισοτοπική κλασμάτωση και μηχανισμοί διαφοροποίησης ισοτοπικής σύστασης.....	12
1.2.4. Μετεωρική ευθεία	15
1.2.5. Τα σταθερά ισότοπα του άνθρακα.....	16
1.3. Παλαιότερες μελέτες	17
1.4. Σκοπός.....	19
2.ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	21
2.1 Μυγδονία λεκάνη	21
2.2 Η λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας.....	25
2.3 Γεωλογική και Τεκτονική δομή	29
2.4 Υδρογεωλογικές συνθήκες και Υδρολογικό καθεστώς	33
2.5 Γεωθερμία	37
2.6 Υδροχημεία και Γεωχημεία.....	38
3.ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	40
3.1 Προέλευση δεδομένων	40
3.2 Δειγματοληψία	40
3.3 Εργαστηριακές αναλύσεις.....	43
4.ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΔΡΟΧΗΜΕΙΑΣ	47
4.1 Φυσικο-χημικές παράμετροι του νερού της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας.....	47
4.2 Χημική σύσταση του νερού της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας	50
4.3 Διεργασίες που διέπουν τη χημική σύσταση του νερού της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας	55
4.4 Συσχέτιση χημικών τύπων νερού και λιθολογίας της περιοχής μελέτης	60

4.5. Επιβάρυνση και ρύπανση του νερού της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας.....	67
5.ΙΣΟΤΟΠΙΚΗ ΓΕΩΧΗΜΕΙΑ	75
5.1 Ισοτοπική σύνθεση του νερού της περιοχής μελέτης	75
5.2 Ισότοπα του άνθρακα στο νερό της περιοχής μελέτης.....	79
6.ΤΟ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟ ΠΕΔΙΟΥ ΤΟΥ ΛΑΓΚΑΔΑ	82
7.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	85
8.ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	86
9.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	88
Ελληνόγλωσση Βιβλιογραφία	88
Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία.....	91
Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία	94
10.ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	96

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή

Η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2000/60/ΕΕ για τα Ύδατα, αναγνωρίζοντας την ιδιαίτερη σημασία των υδροτόπων, αλλά και την απαίτηση ολοκληρωμένης διαχείρισής τους για την επίτευξη των περιβαλλοντικών της στόχων («καλή» οικολογική και χημική κατάσταση των υδάτων) ορίζει τις αρχές παρακολούθησής τους (Guidance Document N° 12). Επισημαίνεται δε, ότι η εμπειριστατωμένη μελέτη των υδροτόπων αποτελεί προαπαιτούμενο για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας της λεκάνης απορροής στην οποία ανήκουν και τον επιτυχή σχεδιασμό διαχείρισής της.

Σε ξεχωριστό κεφάλαιο (section 3.3) περιγράφεται η συσχέτιση των υπόγειων υδάτινων σωμάτων με «εξαρτώμενα» χερσαία οικοσυστήματα, ενώ ορίζει επίσης ότι όλες οι προστατευόμενες περιοχές (δίκτυο 'ΦΥΣΗ 2000') είναι συστήματα άμεσα συνδεδεμένα με το υπόγειο νερό. Στους παράγοντες που προτείνει η Οδηγία για την ερμηνεία της λειτουργίας των υπόγειων υδροφόρων στρωμάτων περιλαμβάνονται η μελέτη του βάθους των υδροφόρων, της διακύμανσης της στάθμης, της υδραυλικής αγωγιμότητας και των συνθηκών τροφοδοσίας και αποφόρτισης τους (WFD CIS Technical Report 1, Annex 2, Section 6.3). Η στοχοθετημένη παρακολούθηση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών κάθε υδροτόπου με τεχνικές εύλογου κόστους προτείνεται επιπλέον, ειδικά στις περιπτώσεις ασάφειας των συνθηκών λειτουργίας του συστήματος, οπότε και ελλοχεύει ο κίνδυνος μη επίτευξης των περιβαλλοντικών στόχων.

Η ολοκληρωμένη προσέγγιση που απαιτεί η Οδηγία 2000/60/ΕΕ αποτελεί τροφή για αναζήτηση νέων, σύγχρονων και καινοτόμων μεθόδων για μία περιβαλλοντική αντιμετώπιση και διαχείριση των υδατικών πόρων. Η σύγχρονη επιστημονική έρευνα για το περιβάλλον καταδεικνύει την επιστήμη της ισοτοπικής γεωχημείας σαν την πιο πρωτοπόρα πρόταση για τη μελέτη του περιβάλλοντος και των επιμέρους στοιχείων του (νερό, αέρας, έδαφος), καθώς και για την επίτευξη της πρόκλησης της επίλυσης περιβαλλοντικών προβλημάτων. Η ισοτοπική γεωχημεία και οι εφαρμογές της αποτελούν εργαλείο για την παρακολούθηση της περιβαλλοντικής ρύπανσης και την ανάλυσή της, αλλά και για την ολοκληρωμένη μελέτη των υδάτινων συστημάτων, επιφανειακών και υπόγειων. Παράλληλα, ικανοποιεί τις απαιτήσεις της Οδηγίας για μεθόδους εύλογου κόστους και μεγάλης ακρίβειας αποτελεσμάτων.

Η λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς υδροτόπους της Ελλάδας, που βρίσκεται στο επίκεντρο επιστημονικών ερευνών λόγω των ποικίλων και σοβαρών περιβαλλοντικών προβλημάτων της. Η χρήση της ισοτοπικής γεωχημείας με σκοπό τη μελέτη του υδρολογικού κύκλου του υδροτόπου της Κορώνειας δίνει τη δυνατότητα να δοθούν απαντήσεις σε καίρια σημεία του, συμβάλλοντας στην στοχοθετημένη και αποτελεσματική σταδιακή του αποκατάσταση.

1.2 Ισοτοπική Υδρολογία

1.2.1. Εισαγωγή

Η ισοτοπική υδρολογία έχει καθιερωθεί τα τελευταία χρόνια ως ιδιαίτερος κλάδος της υδρολογίας. Περιλαμβάνει τεχνικές που στηρίζονται στο γεγονός ότι η ύλη δεν συνίσταται από απλά στοιχεία, αλλά από ισότοπα, τα οποία με τις σύγχρονες αναλυτικές μεθόδους μπορούν να ξεχωρίσουν μεταξύ τους. Διακρίνεται στην υδρολογία των φυσικών ισotόπων του περιβάλλοντος και στην υδρολογία των τεχνητών ισotόπων.

Οι μέθοδοι της υδρολογίας των τεχνητών ισotόπων στηρίζονται στη χρήση των ισotόπων αυτών για την τεχνητή πρόκληση μεταβολής στη σύσταση του νερού, σε κάποιο ορισμένο στάδιο του υδρολογικού συστήματος που μελετάται. Στη συνέχεια, μελετάται η πορεία της μεταβολής αυτής στις επόμενες φάσεις. Οι πληροφορίες που λαμβάνονται με τις μεθόδους αυτές αναφέρονται σε περιορισμένο τμήμα του υδρολογικού κύκλου.

Η τεχνική των φυσικών ισotόπων του περιβάλλοντος εκμεταλλεύεται τη φυσική ιχνηθέτηση του νερού, ως συνέπεια μεταβολών στην ισοτοπική σύστασή του, κατά τα διάφορα στάδια του υδρολογικού κύκλου. Έτσι, με αναλύσεις της ισοτοπικής σύστασης του φυσικού νερού, επιτυγχάνεται η παρακολούθηση της μετακίνησης των υδάτινων μαζών, σε ευρύτερη περιοχή του υδρολογικού κύκλου. Τα ισotόπα του περιβάλλοντος, τα οποία χρησιμοποιούνται περισσότερο για το σκοπό αυτό, είναι τα σταθερά ισotόπα D, ^{18}O και ^{13}C . Από αυτά, το D και το ^{18}O συμμετέχουν στη δομή του μορίου του νερού, ενώ ο ^{13}C απαντάται στις ανθρακούχες ενώσεις, που βρίσκονται υπό μορφή διαλύματος στο νερό.

1.2.2. Βασικές έννοιες

Η ύλη αποτελείται από στοιχεία, όπως για παράδειγμα το υδρογόνο και το οξυγόνο. Τα άτομα των χημικών στοιχείων αποτελούνται από τον πυρήνα γύρω από τον οποίο περιφέρονται τα ηλεκτρόνια. Ο πυρήνας των στοιχείων περιέχει τα πρωτόνια, θετικού φορτίου και από τα νετρόνια, ουδέτερου φορτίου. Τα ηλεκτρόνια έχουν αρνητικό φορτίο. Τα άτομα είναι

ηλεκτρικά ουδέτερα, διότι ο αριθμός των πρωτονίων σε ένα άτομο είναι ίσος με τον αριθμό των ηλεκτρονίων. Ο αριθμός των πρωτονίων κάθε ατόμου ονομάζεται ατομικός αριθμός (Z). Το άθροισμα του αριθμού των πρωτονίων και των νετρονίων αποτελεί το μαζικό αριθμό (A) του ατόμου και χαρακτηρίζει τη μάζα του.

Ισότοπα ονομάζονται τα άτομα ενός στοιχείου των οποίων ο πυρήνας έχει τον ίδιο αριθμό πρωτονίων αλλά διαφορετικό αριθμό νετρονίων, δηλαδή ισότοπα ονομάζονται τα άτομα που έχουν ίδιο ατομικό αριθμό Z και διαφορετικό μαζικό αριθμό A . *Σταθερά Ισότοπα* ονομάζονται τα ισότοπα εκείνα στα οποία ο μερικός διαχωρισμός των ισοτοπικών τους ειδών πραγματοποιείται με διάφορες φυσικές διεργασίες (π.χ. εξάτμιση), με τέτοιο τρόπο που, ένα μέρος της φύσης να εμπλουτίζεται σε ένα ισότοπο, καθώς ένα άλλο γίνεται φτωχότερο σε αυτό.

Για την έκφραση των συγκεντρώσεων των σταθερών ισοτόπων, ορίστηκε ο ισοτοπικός λόγος R (Urey 1947) ενός ισοτόπου, ο οποίος εκφράζεται από τον αριθμό του σπάνιου ισοτόπου στο δείγμα προς τον αριθμό του άφθονου ισοτόπου στο ίδιο δείγμα, όπως φαίνεται παρακάτω:

R =συγκέντρωση σπάνιου ισοτόπου/συγκέντρωση άφθονου ισοτόπου.

Τα σταθερά ισότοπα δεν αναφέρονται με την απόλυτη τιμή του ισοτοπικού λόγου R , αλλά σε κάθε μέτρηση γίνεται σύγκριση με ένα πρότυπο αναφοράς (standard). Για την έκφραση των ισοτοπικών λόγων ορίστηκε η παράμετρος δέλτα (δ) (McKinney *et al.*, 1950), η οποία εκφράζει το λόγο της διαφοράς του ισοτοπικού λόγου σε ένα δείγμα από τον ισοτοπικό λόγο του standard προς τον ισοτοπικό λόγο του προτύπου, σύμφωνα με τον τύπο:

$$\delta (\text{‰}) = (R_x / R_s - 1) 1000$$

όπου:

R : οι ισοτοπικοί λόγοι των «βαρέων» προς τα «ελαφριά ισότοπα» (π.χ. $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$)

R_x : ο ισοτοπικός λόγος του δείγματος

R_s : ο ισοτοπικός λόγος του standard

Η παράμετρος δ πολλαπλασιάζεται για πρακτικούς λόγους με το 1000, είναι αδιάστατη και εκφράζεται σε μέρη επί τοις χιλίοις (‰).

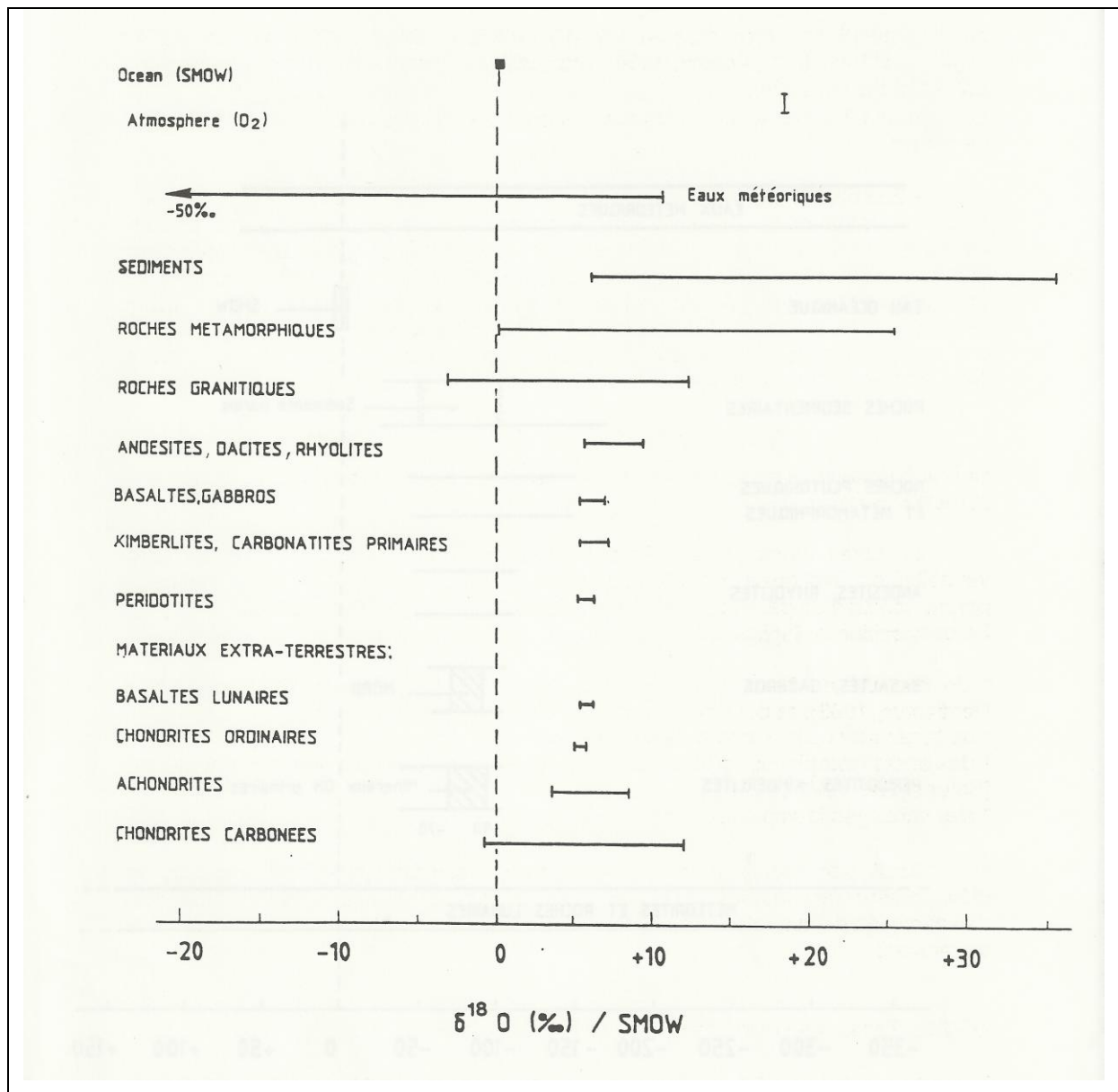
Τα πρότυπα αναφοράς διαφοροποιούνται ανάλογα με το πεδίο και την περιοχή εφαρμογής των σταθερών ισοτόπων ^{18}O και ^2H . Για την Ελλάδα χρησιμοποιούνται τα πρότυπα αναφοράς VSMOW (Standard Mean Ocean Water, Craig 1961) με ισοτοπική σύσταση $\delta^2\text{H}_{\text{SMOW}} 0\text{‰}$ και $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} 0\text{‰}$.

1.2.3. Ισοτοπική κλασμάτωση και μηχανισμοί διαφοροποίησης ισοτοπικής σύστασης

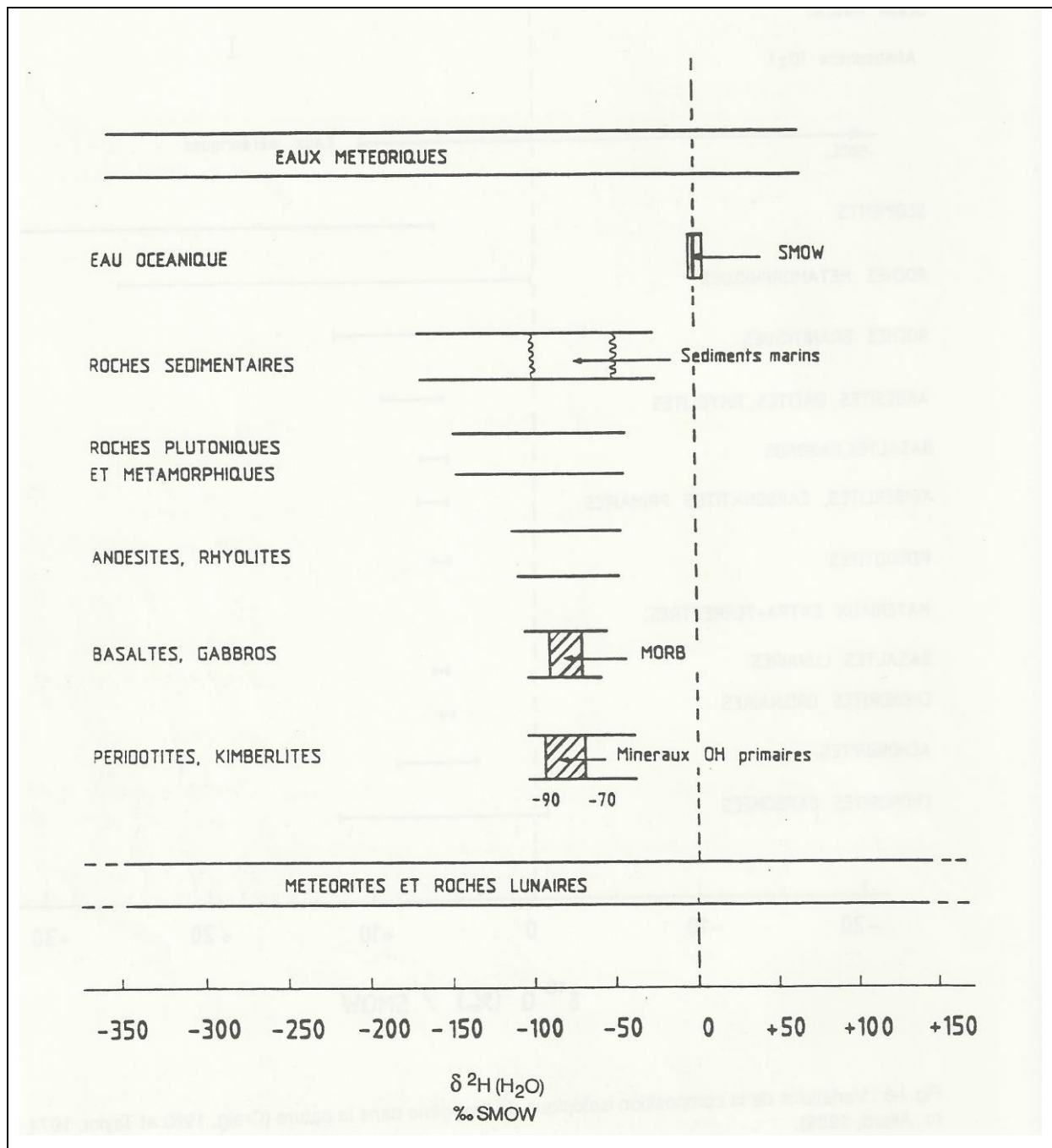
Τα σταθερά ισότοπα ενός στοιχείου παρουσιάζουν μικρές διαφοροποιήσεις στις χημικές τους ιδιότητες, εξαιτίας των διαφορών τους στη μάζα τους. Στις κατάλληλες συνθήκες, αυτές οι μικρές διαφορές τους μπορούν να χαρακτηρισθούν σαν φαινόμενα κλασμάτωσης που εξαρτώνται από τη μάζα τους. *Ισοτοπική κλασμάτωση* ορίζεται η μεταβολή της τιμής ενός ισοτοπικού λόγου κατά της μετάβαση των μορίων μιας χημικής ένωσης από τη μία φάση σε μία άλλη ή κατά τη διάρκεια μιας χημικής αντίδρασης (Urey 1947, **Εικόνα 1.2.3.1, Εικόνα 1.2.3.2.**).

Η διαδικασία της ισοτοπικής κλασμάτωσης περιγράφεται μαθηματικά από τη σύγκριση των ισοτοπικών λόγων, είτε δύο συστατικών που συμμετέχουν σε μία κατάσταση ισορροπίας ($A \leftrightarrow B$), είτε δύο συστατικών πριν και μετά από μία μη αντιστρέψιμη αντίδραση ($A \rightarrow B$). Τότε το κλάσμα των ισοτοπικών λόγων των δύο συστατικών (A,B) ονομάζεται «παράγοντας ισοτοπικής κλασμάτωσης» α , δηλαδή $\alpha_{B/A} = R_B/R_A$.

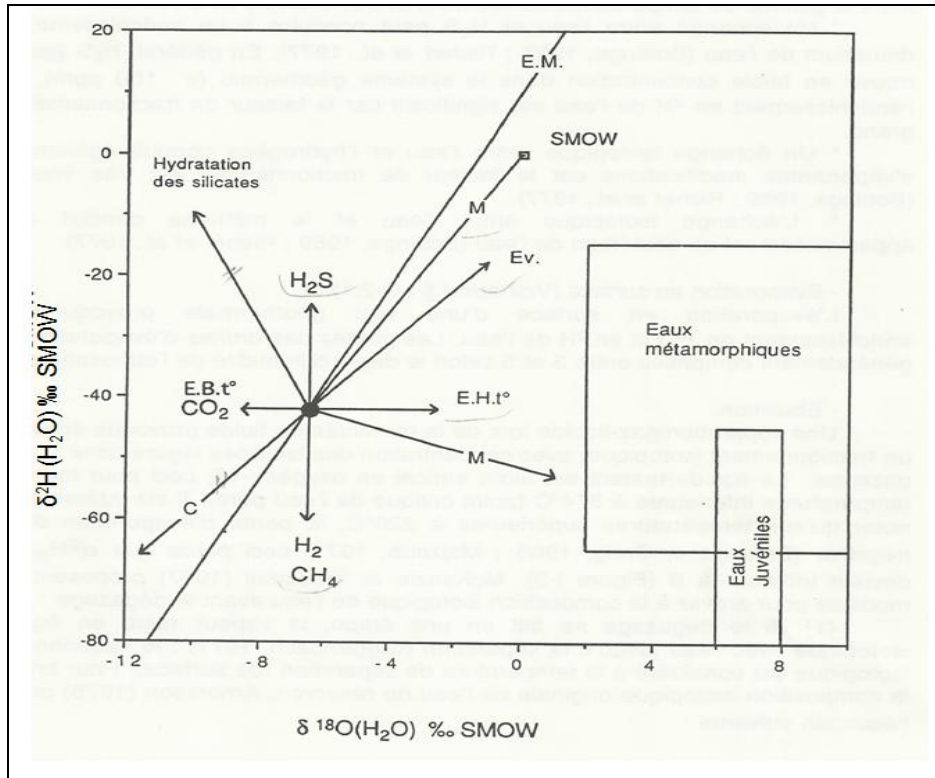
Η ισοτοπική σύσταση των υπόγειων νερών εξαρτάται κυρίως από μετεωρολογικούς παράγοντες. Παρόλα αυτά είναι δυνατό αντιδράσεις μεταξύ του νερού και του υδροφορέα ή υποεπιφανειακών νερών να αλλάξουν την ισοτοπική σύσταση του νερού. Οι αντιδράσεις αυτές περιλαμβάνουν την έκλυση αερίων όπως CO_2 ή H_2S , την ενυδάτωση πυριτικών ορυκτών, την ανταλλαγή μεταξύ νερού και πετρώματος και την εξάτμιση. Η κάθε διεργασία επιδρά διαφορετικά στην ισοτοπική σύσταση του νερού (**Εικόνα 1.2.3.3.**).



Εικόνα 1.2.3.1.: Διακυμάνσεις της ισοτοπικής σύστασης του οξυγόνου στη φύση (Craig, 1963 and Taylor, 1974; *In* Dotsika, 1991).



Εικόνα 1.2.3.2.: Διακυμάνσεις της ισοτοπικής σύστασης του υδρογόνου στη φύση (Taylor, 1974; *In* Dotsika, 1991).



Εικόνα 1.2.3.3.: Διαδικασίες ισοτοπικών ανταλλαγών που διαφοροποιούν την ισοτοπική σύσταση του νερού (Dotsika, 1991). (C: συμπύκνωση, E: ανταλλαγή, E.B.t°C: ανταλλαγή CO₂ σε χαμηλή θερμοκρασία, E.H.t°C: ανταλλαγή CO₂ με πυριτικά ή ανθρακικά πετρώματα σε υψηλή θερμοκρασία, E.M.: μετεωρικό νερό, Ev.: εξάτμιση, M: μίγμα).

1.2.4. Μετεωρική ευθεία

Παρά την πολυπλοκότητα που διέπει τις παραμέτρους του υδρολογικού κύκλου και κυρίως το σχηματισμό των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, εντούτοις, η συμπεριφορά των ισοτόπων του ¹⁸O και του ²H συσχετίζονται ισχυρά. Συγκεκριμένα, οι συγκεντρώσεις ¹⁸O και ²H εμφανίζουν γραμμική συσχέτιση στο μετεωρικό νερό σύμφωνα με την «Παγκόσμια Ευθεία Μετεωρικού Νερού» (Global Meteoric Water Line, GMWL), όπως δίνεται από την εξίσωση:

$$\delta^2\text{H}=8\delta^{18}\text{O} + 10\text{‰} \text{ (Craig, 1961).}$$

Η ευθεία του Craig είναι μία μέση κατάσταση πολλών τοπικών ή περιφερειακών γραμμών μετεωρικού νερού που διαφοροποιούνται από την παγκόσμια γραμμή λόγω κλιματικών και γεωγραφικών παραμέτρων. Η κλίση της ευθείας είναι σταθερή και ίση με 8, διότι η συμπύκνωση πραγματοποιείται σε κορεσμό, δηλαδή σε ισορροπία. Όλες οι ευθείες βασίζονται στη γενική μετεωρική εξίσωση:

$$\delta^2\text{H}=a\delta^{18}\text{O} + d.$$

Η παράμετρος d αποκαλείται «πλεόνασμα δευτερίου» (D-excess) και διαφέρει από τόπο σε τόπο (Dansgaard 1964, από Clark I. and Fritz P., 1997). Η τιμή του d ισούται με +10 για τις βροχοπτώσεις που προέρχονται από συμπύκνωση ωκεάνιων υδρατμών (GMWL) και +22 για αυτές της Ανατολικής Μεσογείου. Για την Ελλάδα η μέση ισοτοπική σύσταση του μετεωρικού νερού δίνεται από τη σχέση:

$$\delta^2\text{H}=8,7\delta^{18}\text{O} + 19,5\text{‰} \text{ (Dotsika et al., 2009).}$$

Για τον Ελλαδικό χώρο έχει οριστεί επίσης η εξίσωση της ισοτοπικής σύστασης του νερού των πηγών (Dotsika et al., 2009) που δίνεται από τη σχέση:

$$\delta^2\text{H}=7,5\delta^{18}\text{O} + 10\text{‰} \text{ (Dotsika et al., 2009).}$$

Σε περιπτώσεις πρόσφατου βρόχινου νερού, καθώς και επιφανειακών νερών, που δεν έχουν υποστεί δευτερογενή εξάτμιση, της οποίας ο ρυθμός να είναι σημαντικός σε σχέση με το ρυθμό προσαγωγής νέου φρέσκου νερού, η κλίση της αντίστοιχης ευθείας παίρνει τιμές μεταξύ 6 και 8. Τιμές κλίσεως μεταξύ 4 και 6 αποδίδονται (Graig, 1961, Graig et al., 1963 και Ehhalt et al., 1963) σε νερά που έχουν υποστεί εξάτμιση, της οποίας ο ρυθμός είναι σημαντικός, σε σχέση με το ρυθμό προσαγωγής νέου φρέσκου νερού. Μοριακή διάχυση των ατμών του νερού, μέσω του στάσιμου αέρα στους πόρους του εδάφους, προκαλεί κινητική κλασμάτωση, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε κλίσεις ακόμα μικρότερες (Fontes and Zuppi, 1976).

1.2.5. Τα σταθερά ισότοπα του άνθρακα

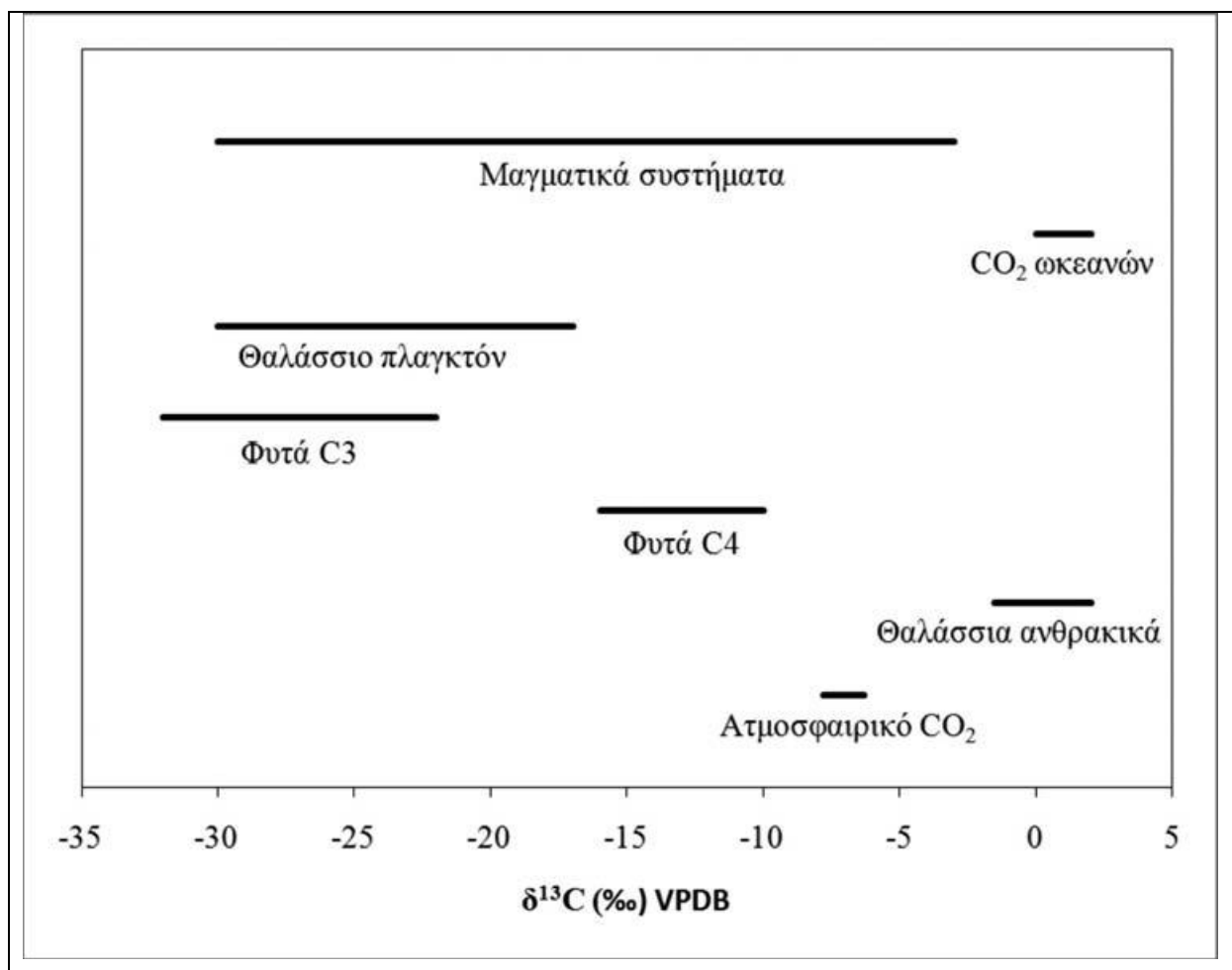
Τα σταθερά ισότοπα του άνθρακα (^{12}C και ^{13}C) εμφανίζονται στην φύση με σχετικές αφθονίες 99,89% και 1,07% αντίστοιχα (IUPAC 1998). Το πρότυπο αναφοράς για τις ισοτοπικές μετρήσεις του ^{13}C είναι το PDB (Pee Dee Belemnite), ενώ στην πράξη χρησιμοποιούνται διάφορα πρότυπα με προσδιορισμένη τιμή ως προς PDB.

Στη φύση η κύρια πηγή άνθρακα είναι τα όξινα ανθρακικά άλατα (HCO_3^-) για την υδρόσφαιρα και το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) για την ατμόσφαιρα.

Στην **Εικόνα 1.2.5.1.** δίνονται οι διακυμάνσεις των τιμών $\delta^{13}\text{C}$ ως προς PDB στη φύση (Zeebe & Wolf-Glagrow 2001, In: Ψωμιάδης 2011). Το $\delta^{13}\text{C}$ του ολικού διαλυμένου άνθρακα στη θάλασσα (ΣCO_2) παρουσιάζει ένα εύρος από 0 έως 2‰. Για τους σύγχρονους ωκεανούς έχει προσδιοριστεί ένα εύρος από +2,5‰ στο επιφανειακό νερό του Ατλαντικού μέσου γεωγραφικού πλάτους έως +0,7‰ στο επιφανειακό νερό του βόρειου Ειρηνικού (Morse & Mackenzie, 1990, In: Ψωμιάδης 2011). Στο μετεωρικό νερό η τιμή του $\delta^{13}\text{C}$ ισούται με -

5,5‰, στο ατμοσφαιρικό διοξείδιο του άνθρακα έχει μέση τιμή -7‰, ενώ στα ανθρακικά πετρώματα κυμαίνεται στο εύρος 0±5‰.

Η οργανική ύλη είναι γενικά πτωχόμενη σε ^{13}C . Ανάλογα με το είδος δέσμευσης του άνθρακα, η ισοτοπική σύνθεση της οργανικής ύλης ποικίλει. Αναφορικά με τα φυτά, ακολουθούν 3 διαφορετικούς κύκλους (C3, C4 και CAM), που διαφοροποιούν το λόγο $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ στον ιστό των φυτών. Για τα φυτά φωτοσυνθετικού κύκλου C3 κυμαίνεται μεταξύ -35‰ και -20‰, για το φωτοσυνθετικό κύκλο C4 μεταξύ -16‰ και -10‰, ενώ για τα φυτά του φωτοσυνθετικού κύκλου CAM (Crassulacean Acid Metabolism) οι τιμές $\delta^{13}\text{C}$ κυμαίνονται ανάμεσα στο εύρος των δύο παραπάνω ομάδων.



Εικόνα 1.2.5.1.: Διακύμανση των τιμών $\delta^{13}\text{C}$ στη φύση (Zeebe & Wolf-Glagrow 2001, *In*: Ψωμιάδης 2011).

1.3. Παλαιότερες μελέτες

Η λεκάνη απορροής της λίμνη Κορώνειας έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών εξαιτίας της εξαιρετικής της σημασίας ως υδατικού πύουρου για ύδρευση, άρδευση

και υδροδότηση, αλλά και ως υγροτόπου, αφού προστατεύεται από τη συνθήκη RAMSAR και ανήκει στο δίκτυο NATURA.

Για πρώτη φορά οι υδρογεωλογικές συνθήκες και η υδροχημεία της λεκάνης Μυγδονίας μελετήθηκαν από το BRGM το 1972 στα πλαίσια μελέτης για τη δυνατότητα χρήση του υδατικού δυναμικού της λεκάνης Μυγδονίας στην υδροδότηση του πολεοδομικού συγκροτήματος Θεσσαλονίκης. Κατά τα στάδια εκπόνησης της μελέτης πραγματοποιήθηκαν υδρογεωλογικές χαρτογραφήσεις, υδρολογική και υδροχημική μελέτη των επιφανειακών και υπόγειων νερών, γεωφυσικές διασκοπήσεις. Επίσης, ανορύχθηκαν 55 αβαθείς και βαθιές γεωτρήσεις και πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικές αντλήσεις για τον καθορισμό υδραυλικών παραμέτρων. Ο Ψιλοβίκος (1977) μελέτησε τη στρωματογραφική δομή και εξέλιξη της Μυγδονίας λεκάνης. Οι Mercier *et al.* (1979) και οι Chatzipetros and Pavlides (1998) πραγματοποίησαν τεκτονικές μελέτες στην περιοχή σχετικές με τα ενεργά ρήγματα στη λεκάνη Μυγδονίας, ενώ κατά το 1996 εκπονήθηκε (Μουντράκης κ.ά.) ο νεοτεκτονικός χάρτης της περιοχής από το Τμήμα Γεωλογίας του ΑΠΘ (Φ.Χ. ΛΑΓΚΑΔΑ, κλίμακα 1:100.000).

Ο Θανάσουλας (1983) πραγματοποίησε γεωφυσικές διασκοπήσεις για την κατανομή του πάχους των ιζημάτων στη Μυγδονία λεκάνη. Ο Τραγανός (1982) μελέτησε τα γεωθερμικά πεδία Λαγκαδά, Νυμφόπετρας και Απολλωνίας. Ο Vatseris (1992) μελέτησε τις υδροχημικές συνθήκες της περιοχής, καθώς και την προέλευση και ηλικία του νερού με τη χρήση σταθερών ισοτόπων $\delta^{18}\text{O}$ και $\delta^{13}\text{C}$. Οι Βαφειάδης κ.ά. (1994) διερεύνησαν την επίδραση των γεωθερμικών νερών της λεκάνης απορροής της Κορώνειας στην ποιότητα των υδροφόρων στρωμάτων της περιοχής, καθώς και τις συνθήκες ανάμιξης τους. Την ίδια χρονιά εκπονήθηκε η «Μελέτη Υδάτων της λεκάνης Μυγδονίας» από τους Δεμίρη κ.ά. (1994).

Οι Knight Piesold & Karavokyris and Partners (1998) στα πλαίσια του MASTER PLAN για την περιβαλλοντική αποκατάσταση της λίμνης Κορώνειας αναφέρονται στις υδρογεωλογικές-υδροχημικές συνθήκες της λεκάνης Μυγδονίας. Τα υδρογεωλογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν βασίζονται στις προαναφερόμενες εργασίες. Ο Κατιρτζόγλου (2001) μελέτησε τις υδρογεωλογικές-υδρολογικές συνθήκες της λεκάνης Μυγδονίας στα πλαίσια έργου του Β'ΚΠΣ στο ΙΓΜΕ. Οι Καλούση και Χατζηκύρκου (2001) κατά το διάστημα 1996-2000 στα πλαίσια του έργου «Μελέτη ποιοτικής κατάστασης νερών του Ν. Θεσσαλονίκης» πραγματοποίησαν υδροχημικές μελέτες στο Νομό. Υδροχημικές έρευνες στη λεκάνη Μυγδονίας πραγματοποιήθηκαν στο διάστημα 1998-2001 και στα πλαίσια του έργου LIFE ENV/GR/00212 (Veranis and Arvanitidis 2001). Το ΙΓΜΕ κατά το

διάστημα 1999-2001 συνέταξε μελέτη για τη «Διερεύνηση των δυνατοτήτων εκμετάλλευσης του βαθύτερου υδροφορέα της υπολεκάνης της λίμνης Κορώνειας» που ανατέθηκε στο ΙΓΜΕ από τη Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Θεσσαλονίκης. Στόχος της ήταν η γεωλογική-στρωματογραφική-τεκτονική-υδρογεωλογική ανάλυση της υπολεκάνης της λίμνης Κορώνειας, με έμφαση στο βαθύτερο υδροφορέα. Μετά από πρόταση του MASTER PLAN (1998) πραγματοποιήθηκε το 2002 μελέτη των υδρογεωλογικών συνθηκών της υπολεκάνης λίμνης Κορώνειας από τους Βεράνης και Κατιρτζόγλου. Στα πλαίσια αυτής της μελέτης αποτυπώθηκαν οι υδρογεωτρήσεις που είχαν ανορυχθεί στην περιοχή και αξιολογήθηκαν τα στρωματογραφικά δεδομένα από τις λιθολογικές τομές τους, αλλά και ανορύχθηκαν 10 βαθιές γεωτρήσεις (βάθη 200-300 μέτρα) με υδραυλική απομόνωση των ρηχών υδροφορεών για την πραγματοποίηση δοκιμαστικών αντλήσεων.

Οι Ζαλίδης και συν. (2004) εκπόνησαν το δεύτερο MASTER PLAN για την περιβαλλοντική αποκατάσταση της λίμνης Κορώνειας και προτείνουν μέτρα προστασίας λαμβάνοντας υπόψη όλες τις μελέτες που είχαν εκπονηθεί μέχρι τότε. Στα πλαίσια του MASTER PLAN κατατέθηκε μελέτη μαθηματικού υπολογισμού του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας.

Οι πιο πρόσφατες μελέτες (Myliopoulos *et al.*, 2007) θεώρησαν τη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας σαν ένα σύνθετο σύστημα υδροφόρων και λίμνης. Τα συμπεράσματα τους βρίσκονται σε αντιδιαστολή με τους προηγούμενους ερευνητές αναφορικά με το γεωλογικό υπόβαθρο της λίμνης, καθώς και την επικοινωνία των υδροφόρων μεταξύ τους. Σύμφωνα με τα συμπεράσματα στα οποία καταλήγουν, τα στρώματα αργίλων που εκτείνονται σε όλη την έκταση της λεκάνης δεν είναι ενιαία και δεν παρεμποδίζουν την επικοινωνία ρηχού και βαθέος υδροφόρου στρώματος. Σχετικά με την επικοινωνία του υπόγειου νερού με τη λίμνη της Κορώνειας, οι συγκεκριμένοι μελετητές θεωρούν την αλληλεπίδραση τους αμελητέα και αποδίδουν την πτώση στάθμης και τη συρρίκνωση της Κορώνειας στο υδατικό έλλειμμα της λεκάνης και στην απουσία επιφανειακής απορροής χειμάρρων που να τροφοδοτούν με νερό τη λίμνη. Τέλος, η Γιούρη (2010) μελέτησε στη μεταπτυχιακή της διπλωματική εργασία τη γεωχημική σύνθεση των ιζημάτων και του νερού του ποταμού Μπογδάνα, που αποτελεί το κύριο επιφανειακό υδατόρεμα που τροφοδοτεί την Κορώνεια.

1.4. Σκοπός

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του υδρολογικού κύκλου της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας. Η ερμηνεία θα επιτευχθεί μέσω των επιμέρους στόχων της μελέτης, που συνοψίζονται στα παρακάτω σημεία:

- ✓ Μελέτη του χημισμού του υπόγειου και επιφανειακού νερού
- ✓ Προσδιορισμός της προέλευσης των διαλυμένων στοιχείων του υπόγειου και επιφανειακού νερού της λεκάνης
- ✓ Προσδιορισμός της προέλευσης του νερού
- ✓ Αξιολόγηση του υψόμετρου τροφοδοσίας και των ζωνών τροφοδοσίας των υπόγειων υδροφορέων
- ✓ Διερεύνηση των χαρακτηριστικών του υπόγειου υδροφόρου συστήματος, της επικοινωνίας των διαφορετικών υδροφόρων στρωμάτων μεταξύ τους και με τα επιφανειακά υδάτινα σώματα και
- ✓ Εκτίμηση της κυκλοφορίας και του χρόνου παραμονής του νερού στους υπόγειους υδροφόρους και στα επιφανειακά υδάτινα σώματα.

2.ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 Μυγδονία λεκάνη

Σε απόσταση 12 και 39 χιλιομέτρων αντίστοιχα από την πόλη της Θεσσαλονίκης, βρίσκονται οι λίμνες Κορώνεια (Λαγκαδά) και Βόλβη, σε ένα επίμηκες τεκτονικό βύθισμα γης που διαχωρίζει τη χερσόνησο της Χαλκιδικής από τον κορμό της Μακεδονίας (Εικόνα 2.1.1.). Είναι λίμνες-υπολείμματα της παλιάς πλειοστοκαινικής Μυγδονίας λίμνης. Η ευρύτερη περιοχή στην οποία βρίσκονται ονομάζεται λεκάνη της Μυγδονίας και νοείται ως το βύθισμα που αναπτύσσεται μεταξύ του υψώματος της Καμήλας στα Δυτικά και των στενών της Ρεντίνας στα Ανατολικά (Ψιλοβίκος 1977). Η λεκάνη ορίζεται από τις κορυφογραμμές των βουνών Κερδύλλια, Βερτίσκος, Χορτιάτης και Χολομώντας. Από Βορρά προς Νότο τα βουνά έχουν ύψος από 600 έως 1200 μέτρα και από τη Δύση περίπου 550 μέτρα. Τα επιφανειακά νερά της λεκάνης στραγγίζουν σε χείμαρρους που εκβάλλουν στις λίμνες (Ζαλίδης και συν. 2004).



Εικόνα 2.1.1.: Ευρύτερη περιοχή μελέτης (Σύνθεση Χάρτων ΓΥΣ, Κλίμακα 1:50.000, Φύλλα Θέρμη, Θεσσαλονίκη, Λαχανάς, Ζαγκλιβέρι, Σοχός).

Το πεδινό τμήμα της υδρολογικής λεκάνης της Μυγδονίας καταλαμβάνει έκταση ίση με 570Km^2 και οριοθετείται περίπου από την ισοϋψή των 200m που ακολουθεί το όριο της επαφής μεταξύ των ιζηματογενών αποθέσεων και των κρυσταλλοσχιτωδών πετρωμάτων που αποτελούν το υπόβαθρο της λεκάνης της Μυγδονίας (Βεράνης και Κατιρτζόγλου 2002). Η υδρολογική λεκάνη της Μυγδονίας (**Εικόνα 2.1.2.**) θεωρείται ενιαία, παρόλα αυτά διαχωρίζεται για πρακτικούς λόγους σε δύο επιμέρους υπολεκάνες. Στο δυτικό τμήμα της λεκάνης αναπτύσσεται η υπολεκάνη της λίμνης Κορώνειας (Λαγκαδά ή Αγίου Βασιλείου) με έκταση 746Km^2 (Myloroulos *et al.*, 2007), ενώ στο ανατολικό τμήμα η υπολεκάνη της λίμνης Βόλβης με έκταση 1278 Km^2 (Βαφειάδης 1988). Το όριο μεταξύ των δύο υπολεκάνων δεν είναι σαφές, προσδιοριζόμενο από τον άξονα Στίβου-Σχολαρίου, μέσω ενός συστήματος λοφίσκων διαμέσου των οποίων διέρχεται ο ποταμός Δερβένι (Βεράνης και Κατιρτζόγλου 2002).



Εικόνα 2.1.2.: Η λεκάνη της Μυγδονίας. Διακρίνονται οι λίμνες Βόλβης (Ανατολικά) και Λαγκαδά ή Κορώνειας (Δυτικά).

Η λίμνη Κορώνεια μαζί με τη Βόλβη και τα στενά της Ρεντίνας αποτελούν ένα σύστημα υγροβιότοπου ο οποίος προστατεύεται από μια σειρά διεθνών συμβάσεων και ρυθμιστικών πράξεων, από Κοινές Υπουργικές Αποφάσεις και οδηγίες, που προσδιορίζουν το καθεστώς ανάπτυξης και διαχείρισης της περιοχής. Συγκεκριμένα, η νομοθεσία που αφορά στη λεκάνη της Μυγδονίας την καθιστά:

- α) «Υγροβιότοπο διεθνούς σημασίας» (σύμβαση Ramsar)
- β) «Ειδικά προστατευόμενη περιοχή» (SPA, Οδηγία 69/409/ΕΟΚ)
- γ) «Περιοχή κοινοτικού ενδιαφέροντος» (SCI, Οδηγία 92/43/ΕΟΚ) και
- δ) «Ειδικά προστατευόμενη περιοχή» (Σύμβαση Βαρκελώνης).

Επιπλέον, το σύστημα το λιμνών Βόλβης και Κορώνειας ανήκει στο δίκτυο ‘ΦΥΣΗ 2000’ (NATURA 2000) όπου αναφέρεται με κωδικό GR1220009 (Εικόνα 2.1.3.). Συνολικά, προστατεύεται το 76,1% της λεκάνης Μυγδονίας.

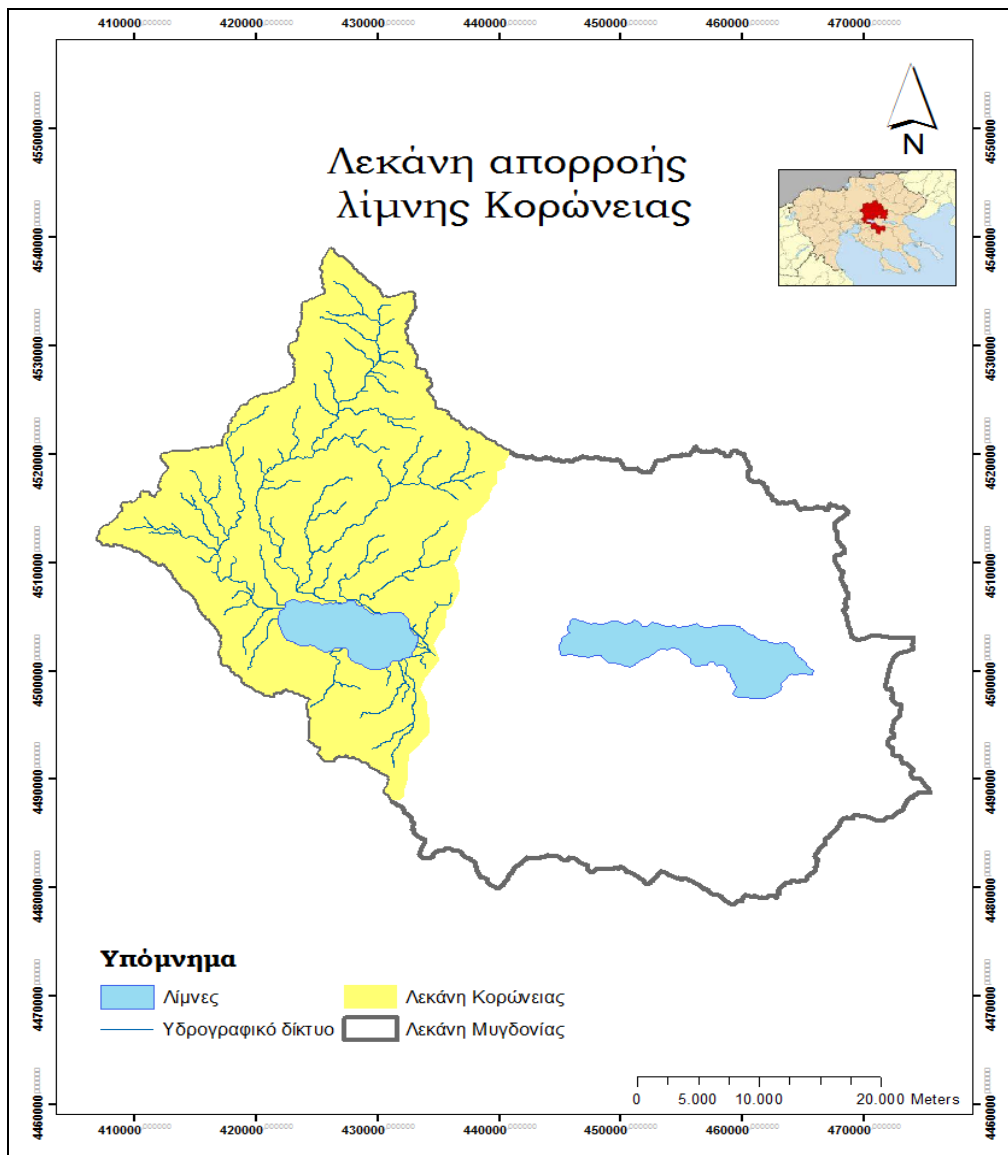
Σημειώνεται ότι με την ΚΥΑ 6919/11-2-2004 (ΦΕΚ 248/Α/5-3-2004), οι λιμναίες, χερσαίες και υδάτινες περιοχές του υδροτοπικού συστήματος των λιμνών Κορώνειας-Βόλβης και των Μακεδονικών Τεμπών χαρακτηρίστηκαν ως «Εθνικό Πάρκο», στο οποίο καθορίστηκαν οι ζώνες προστασίας, οι χρήσεις γης, οι όροι και οι περιορισμοί δόμησης. Επίσης, σύμφωνα με το ΦΕΚ 894Β/3-7-2003, έχει συγκροτηθεί ο Φορέας Διαχείρισης Λιμνών Κορώνειας-Βόλβης.



Εικόνα 2.1.3.: Προστατευόμενες περιοχές από το δίκτυο NATURA 2000 στη λεκάνη Μυγδονία.

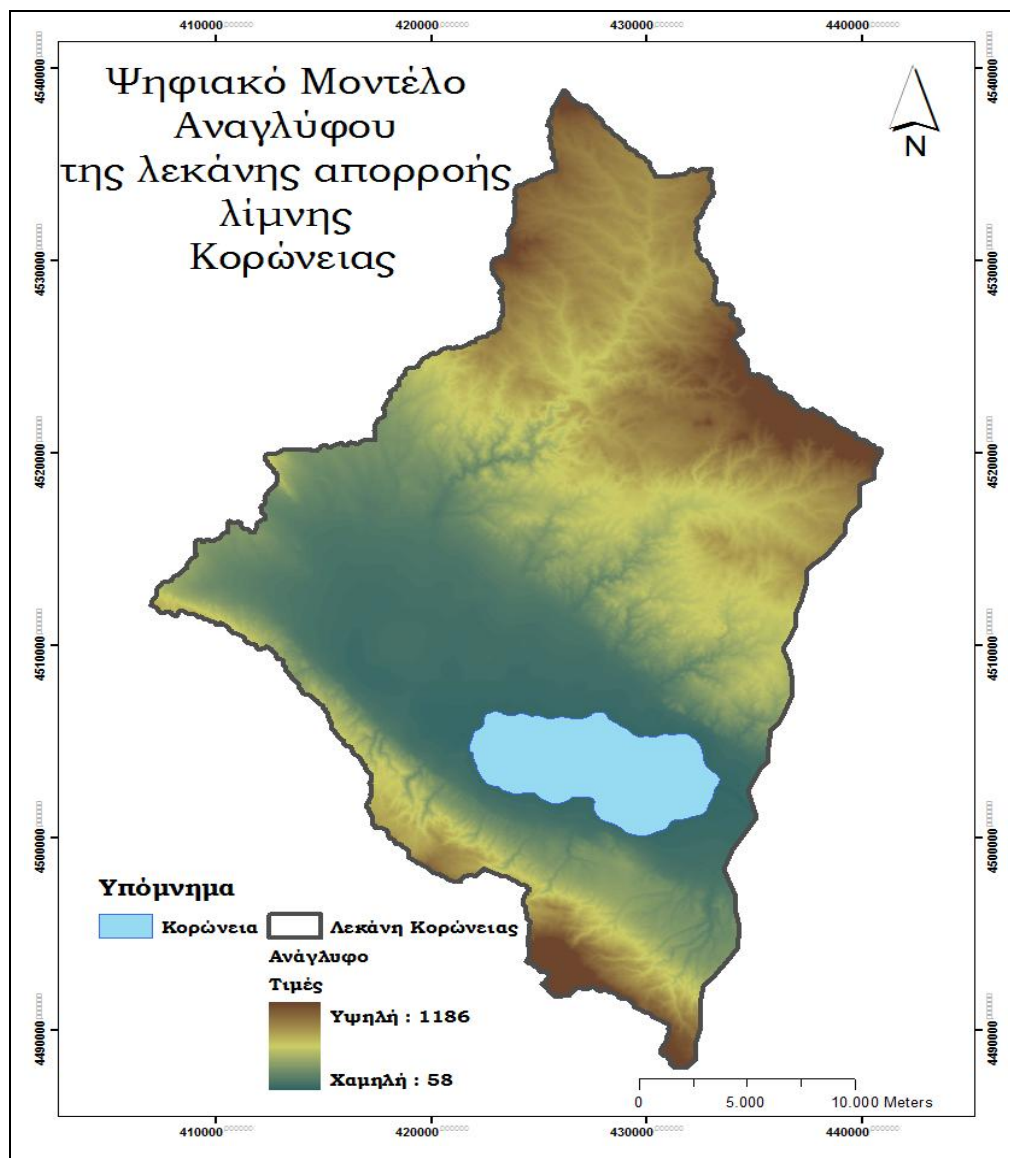
2.2 Η λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας

Η λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας ή λεκάνη του Λαγκαδά εκτείνεται στο δυτικό τμήμα της Μυγδονίας λεκάνης, καταλαμβάνοντας έκταση περίπου ίση με 746Km² (Myloroulos et al., 2007). Εξαιτίας της ασάφειας του ορίου της με τη λεκάνη απορροής της λίμνης Βόλβης, η διαστασιολόγηση της λεκάνης διαφοροποιείται και εξαρτάται από τα όρια που διαγράφει ο κάθε ερευνητής. Σύμφωνα με τη διαστασιολόγηση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η έκταση της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας ισούται με 778,3Km² (Εικόνα 2.2.1.).



Εικόνα 2.2.1.: Η λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας, στο δυτικό περιθώριο της Μυγδονίας λεκάνης.

Το δυτικό όριο της λεκάνη του Λαγκαδά απαρτίζεται από μία σειρά χαμηλών ραχών και κοιλωμάτων μέσου υψομέτρου 200 έως 300m με τον απότομα υψούμενο ορεινό όγκο της Καμήλας (569m) να δεσπόζει (**Εικόνα 2.2.2.**). Προς βορρά η λεκάνη οριοθετείται από τη ζώνη των υψηλών λόφων του Λαχανά (687m) και του Ισώματος (916m). Ανατολικά, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, υπάρχει το ασαφές όριο με τη λεκάνη της λίμνης Βόλβης. Τέλος, το νότιο τμήμα της λεκάνη Λαγκαδά οριοθετείται από τις πλαγιές και τα υψώματα του όρους Χορτιάτη (1021m) (Ψιλοβίκος 1977) (**Εικόνα 2.2.3.**).



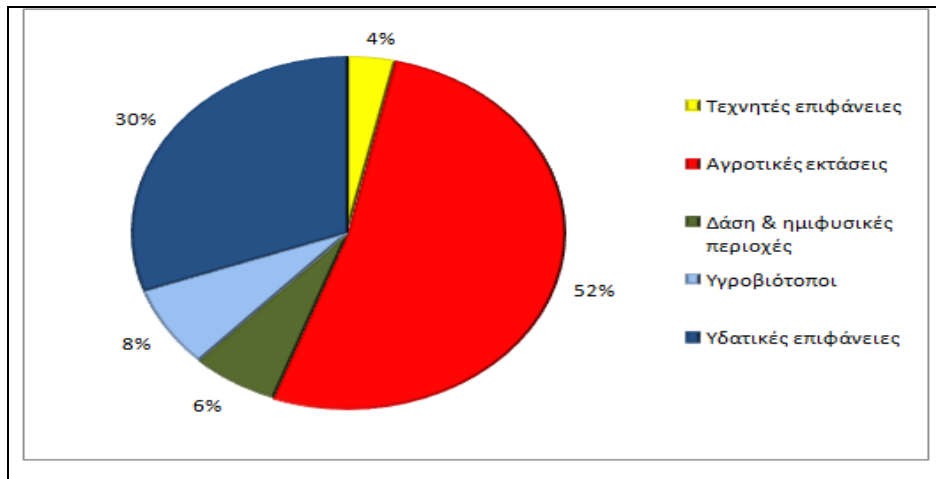
Εικόνα 2.2.2.: Ανάγλυφο της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας.

Η λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας ανήκει στο 10^ο υδατικό διαμέρισμα της Ελλάδας (υδατικό διαμέρισμα της Κεντρικής Μακεδονίας), σύμφωνα με το Νόμο 1739/1987 (ΦΕΚ 201Β/20-11-1987).

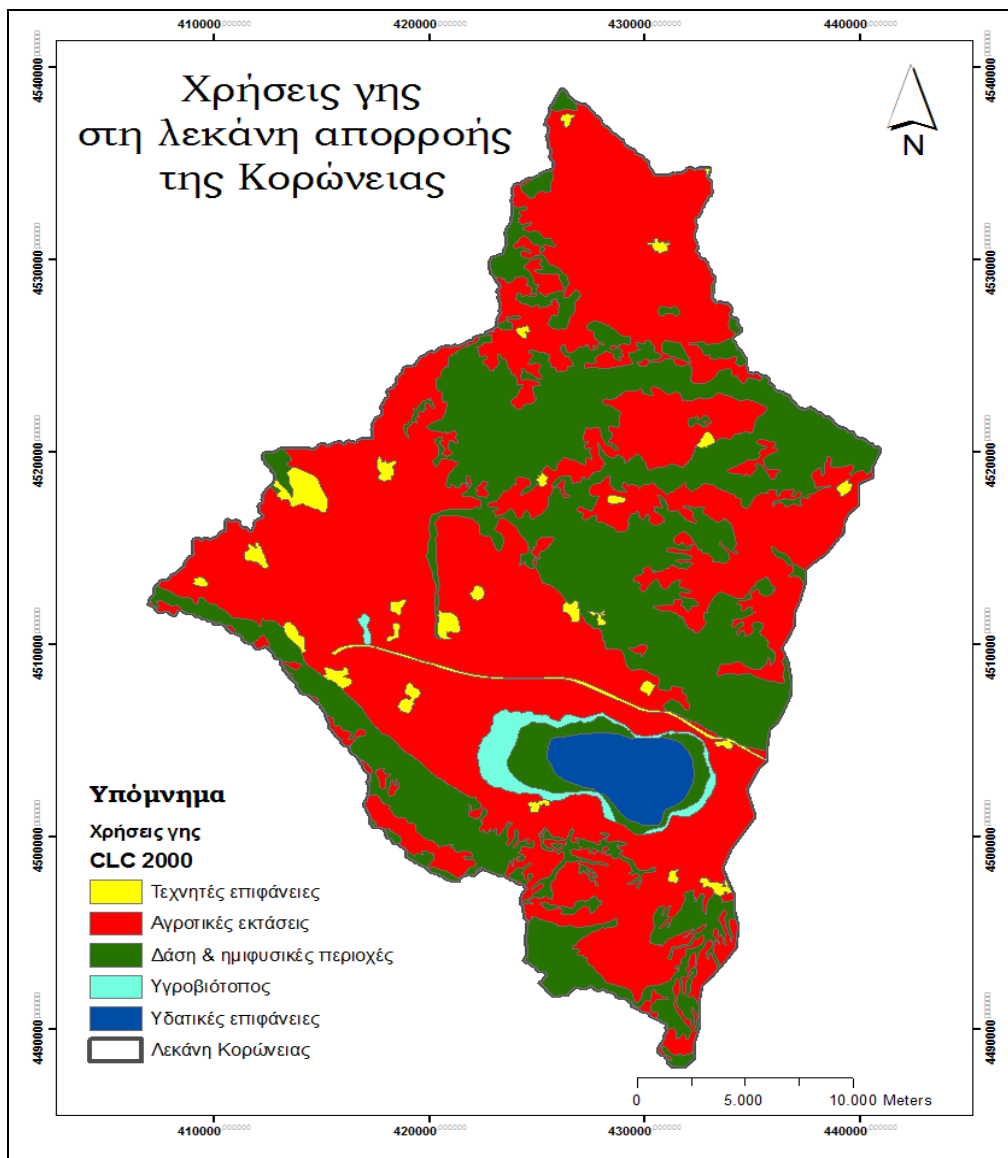


Εικόνα 2.2.3.: Μορφολογία της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας (Δορυφορική Εικόνα GoogleEarth, 13/6/2011).

Σύμφωνα με το Corine Land Cover (CLC) 2000 (**Εικόνα 2.2.4.**) για την κάλυψη χρήσης γης, το μεγαλύτερο (52%) ποσοστό της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας καλύπτεται από αγροτικές εκτάσεις (**Εικόνα 2.2.5.**). Από τις υπόλοιπες ομαδοποιημένες κατηγορίες της κάλυψης χρήσης γης (τεχνητές επιφάνειες, αγροτικές εκτάσεις, δάση και ημιφυσικές περιοχές, υγροβιότοποι, υδάτινες επιφάνειες), το μικρότερο ποσοστό (4%) καλύπτουν οι τεχνητές επιφάνειες.

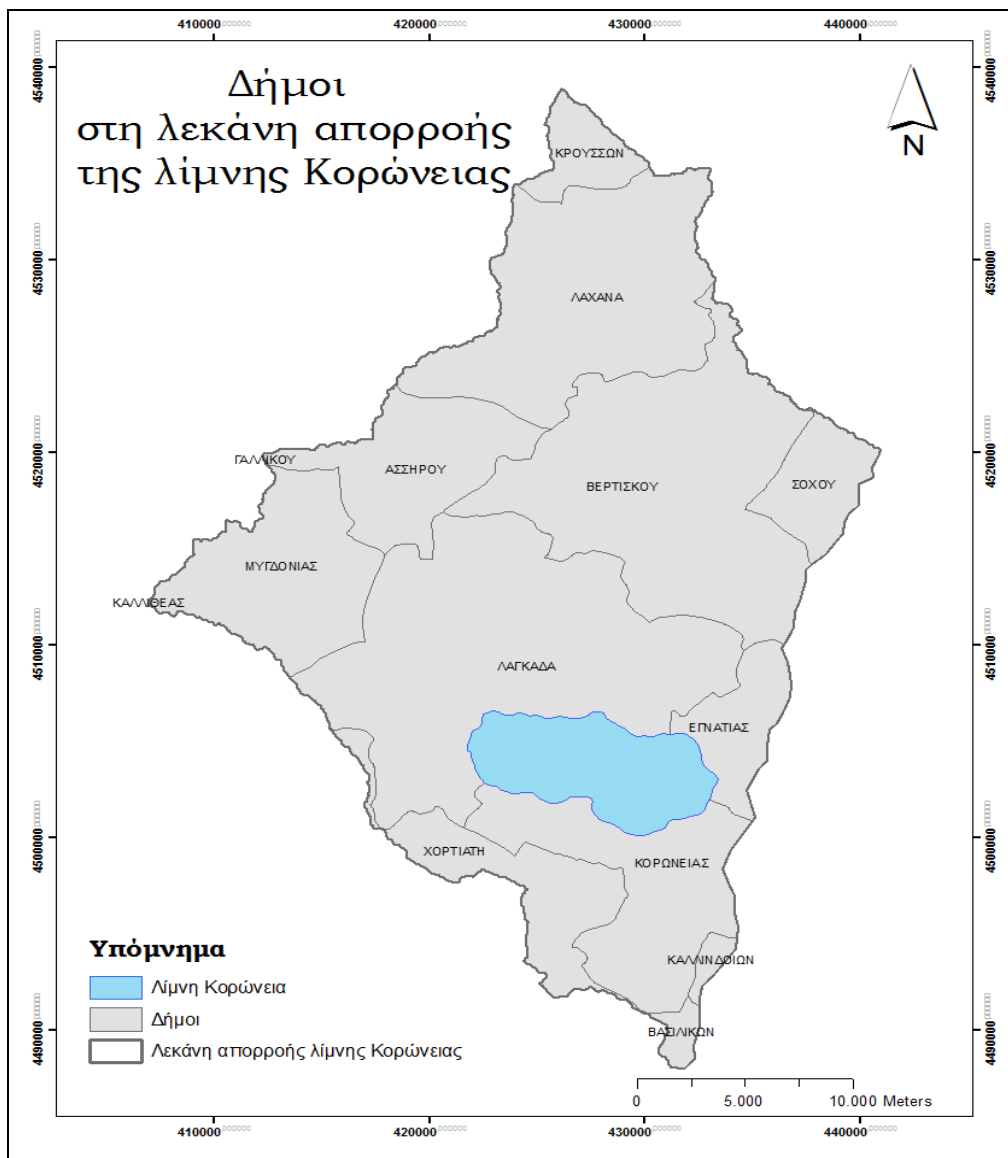


Εικόνα 2.2.4.: Ποσοστό ομαδοποιημένων χρήσεων γης από το Corine Land Cover (CLC) 2000.



Εικόνα 2.2.5.: Ομαδοποιημένη κάλυψη χρήσεων γης σύμφωνα με το Corine Land Cover (CLC) 2000 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας.

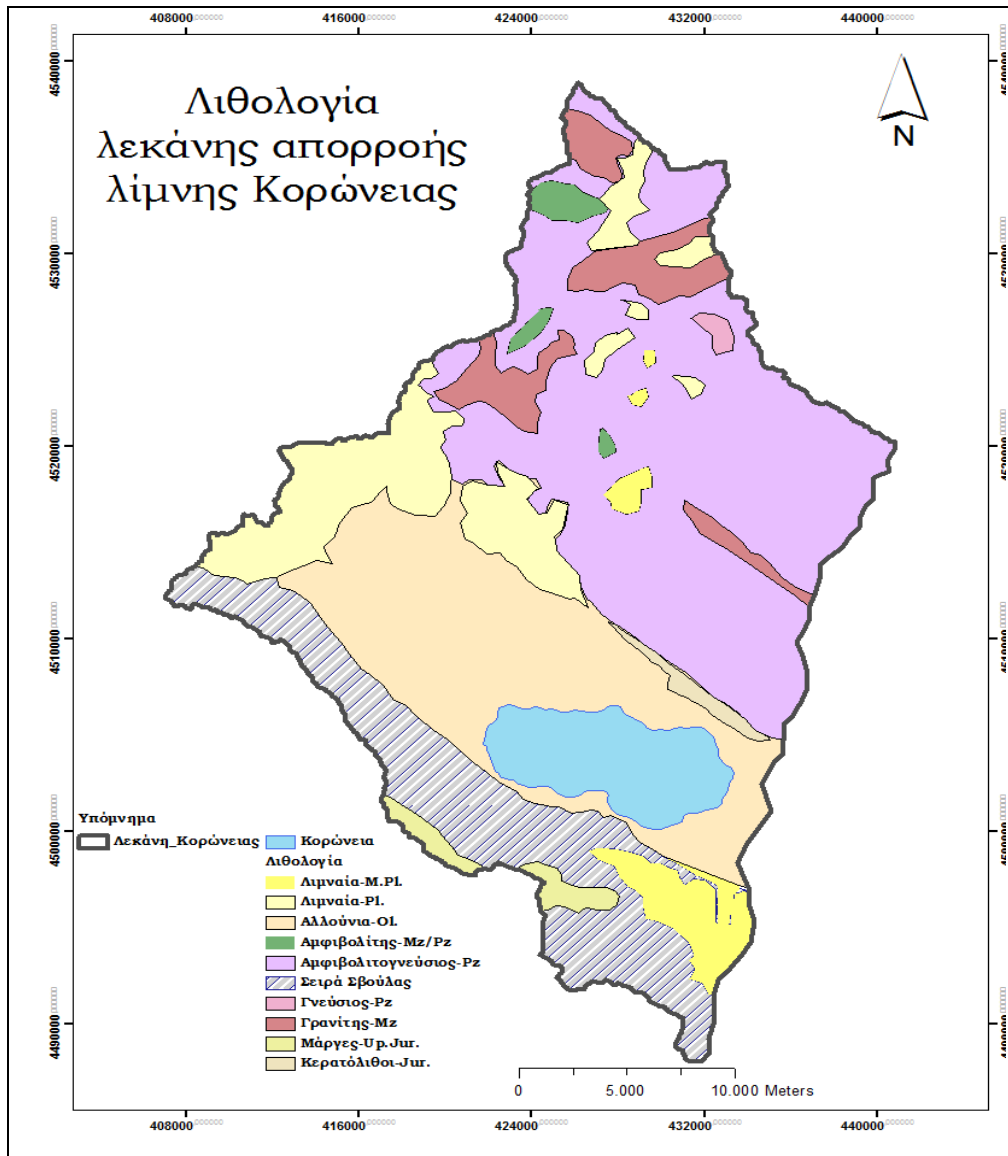
Στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας ανήκουν 14 δήμοι (**Εικόνα 2.2.6.**), από τους οποίους τη μεγαλύτερη έκταση (24,9%) καταλαμβάνει ο δήμος Λαγκαδά. Σύμφωνα με την απογραφή του 2001 (ΕΣΥΕ) ο (Καποδιστριακός) Δήμος Λαγκαδά, που απαρτίζεται από τα Δ.Δ. Λαγκαδά, Αναλήψεως, Ηρακλείου, Καβαλλαρίου, Κολχικού, Λαγυνών, Περιβολακίου και Χρυσανγής, έχει πληθυσμό που ανέρχεται σε 16.836 κατοίκους.



Εικόνα 2.2.6.: Δήμοι που ανήκουν στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας.

2.3 Γεωλογική και Τεκτονική δομή

Γεωτεκτονικά η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο όριο μεταξύ της Σερβομακεδονικής Μάζας και της Περιοδοπικής ζώνης, στο δυτικό τμήμα της λεκάνης της Μυγδονίας, όπου αναπτύσσεται η λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας (**Εικόνα 2.3.1.**).



Εικόνα 2.3.1.: Λιθολογικός χάρτης της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας (γεωλογικός χάρτης ΙΓΜΕ 1:500.000, τροποποιημένος με τη χρήση του λογισμικού ArcGIS 2009).

Το υπόβαθρο της λεκάνης αποτελείται από Προαπλικής και Αλπικής ηλικίας μεταμορφωμένα πετρώματα της Σερβομακεδονικής μάζας και της Περιοδοπικής ζώνης. Πιο αναλυτικά, αποτελείται από διμαρμαρυγικούς γνεύσιους και αμφιβολίτες της Σερβομακεδονικής μάζας (Παλαιοζωικό ή παλαιότερο), από το γρανίτη της Αρναίας-Ζαγκλιβερίου (Μεσοζωικό) και από φυλλίτες, αργλικούς σχιστόλιθους, χαλαζίτες και μάρμαρα της Περιοδοπικής ζώνης (Μεσοζωικό).

Πάνω στα πετρώματα του Αλπικού-Προαλιπού υποβάθρου επικάθονται οι Νεογενείς και Τεταρτογενείς αποθέσεις, που είναι κυρίως χερσαία και λιμναία ιζήματα. Τα ιζήματα της Μυγδονίας λεκάνης και κατ'έπекταση της υπολεκάνης της Κορώνειας, διακρίνονται σε Νεογενείς αποθέσεις, που αποτελούν το προ-Μυγδονιακό σύστημα και σε Τεταρτογενείς

αποθέσεις, που αποτελούν το Μυγδονιακό σύστημα (Ψιλοβίκος 1977). Η λεκάνη της Μυγδονίας αναπτύχθηκε με διεύθυνση ΑΒΑ-ΔΝΔ κατά το Τεταρτογενές με τη δράση εφελκυστικού πεδίου τάσεων διεύθυνσης ΒΒΔ-ΝΝΑ. Η ιζηματογένεση που ακολούθησε τη δημιουργία της λεκάνης, ουσιαστικά αποτελείται από υλικά αποσάθρωσης του υποβάθρου (Ψιλοβίκος 1977).

Το Προμυγδονιακό σύστημα (Αν.Μειόκαινο-Κάτω Πλειστόκαινο) εμφανίζεται βόρεια του χωριού Χρυσασυγή και στις περιοχές Μαραθούσας και Γερακαρούς Στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας εμφανίζεται μόνο σε τομές βαθέων υδρογεωτρήσεων που αγγίζουν το κρυσταλλικό υπόβαθρο (Βεράνης και συν. 2001). Αποτελείται από τα παλαιότερα προς τα νεότερα στρώματα από α) κροκαλοπαγή, β) ψαμμίτες, γ) αργιλοψαμμίτες (ιζήματα λιμναίας και ποταμοχειμάρειας φάσης) και δ) ερυθροστρώματα (χερσοποτάμια ιζήματα- άργιλος με άμμο και κροκάλες). Το μέγιστο πάχος των ιζημάτων του προμυγδονιακού συστήματος εκτιμάται περίπου σε 300m (Βεράνης και συν. 2001).

Το Μυγδονιακό σύστημα (Μέσο Πλειστόκαινο-Ολόκαινο) εντοπίζεται στο σύνολο της ιζηματογενούς λεκάνης της περιοχής μελέτης και αποτελείται από μια κατώτερη σειρά από στρώματα κροκαλών και άμμου, άμμου, αργιλούχων άμμων και αργίλων, καθώς και από μία ανώτερη σειρά, από αργίλους, εναλλασσόμενα στρώματα άμμου και ιλύος, άμμους, χαλίκια και τραβερτινοειδείς αποθέσεις. Το μέγιστο πάχος των Μυγδονιακών ιζημάτων ανέρχεται στα 200m και σύμφωνα με την ηλικία σχηματισμού τους διακρίνονται στις Πλειστοκαινικές αναβαθμίδες και στα Ολοκαινικά ιζήματα (αλλουβιακές αποθέσεις, κώνους κορρημάτων, ριπδοειδείς προσχώσεις χειμάρρων και λιμναία ιζήματα) (Βεράνης και Κατιρτζόγλου 2002).

Στην κοιλάδα του Αξιού (στα δυτικά της περιοχής μελέτης) έχει αποθεθεί η ομώνυμη μολασσική σειρά, που εντοπίζεται κατά κύριο λόγο στη ζώνη Παιονίας. Σύμφωνα με τους Kockel et al (1978, 1979) και Μουντράκης (1985) η Τριτογενής μολάσσα της αύλακας του Αξιού εκτείνεται μέχρι και το περιθώριο της Σερβαμακεδονικής ζώνης. Αναφέρεται εμφάνιση ιζημάτων μολασσικού τύπου ηλικίας Ηωκαίνου-Ολιγοκαίνου στην περιοχή του Λαγκαδά, που αποτελούνται από κροκαλοπαγή, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, ψαμμίτες και αργίλους θαλάσσιας, λιμναίας και χερσαίας φάσης.

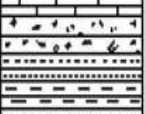
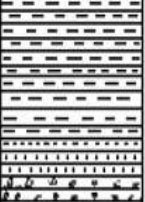


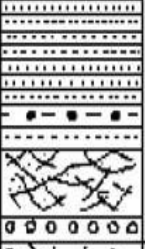
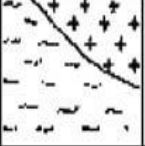
Η στρωματογραφία της λεκάνης ολοκληρώνεται με την παρουσία μαύρων και ερυθρών αργίλων. Το πρώτο στρώμα μαύρων αργίλων, με πάχος 10 έως 40m εντοπίζεται στον πυθμένα της λίμνης Κορώνειας. Το δεύτερο στρώμα αργίλων εκτείνεται από την πόλη του Λαγκαδά μέχρι και την παραλίμνια περιοχή της λίμνης Βόλβης σε βάθη από 30 έως 80m, ενώ το πάχος του κυμαίνεται από 5 έως 15m (Myliopoulos *et al.* 2007, Βεράνης και Κατιρτζόγλου

2002). Οι μαύρες άργιλοι αντιστοιχούν στον πυθμένα της παλιάς λίμνης της Μυγδονίας. Στο δυτικό περιθώριο της λεκάνης απορροής, καθώς και περιφερειακά της ιζηματογενούς λεκάνης, εμφανίζονται οι ερυθρές άργιλοι, σε ανάμειξη με κροκάλες και άμμους (Ψιλοβίκος 1977). Όλες οι φάσεις ιζηματογένεσης φαίνονται στην απλοποιημένη στρωματογραφική στήλη της λεκάνης (**Εικόνα 2.3.2.** από Ψιλοβίκος 1977).

Η περίοδος έντονου τεκτονισμού του νότιου τμήματος της Σερβομακεδονικής μάζας που διήρκησε από το Άνω Πλειόκαινο έως και το Κάτω Πλειστόκαινο δημιούργησε το τεκτονικό βύθισμα της λεκάνης της Μυγδονίας (Ψιλοβίκος 1984). Σύμφωνα με τον Arsonski (1978) η δράση του έντονου εφελκυστικού πεδίου που εκδηλώθηκε κατά το Τεταρτογενές προκάλεσε τη δημιουργία κανονικών ρηγμάτων στην ευρύτερη περιοχή μελέτης, με αποτέλεσμα το τεκτονικό βύθισμά της. Τα πιο πρόσφατα ενεργά ρήγματα βρίσκονται στο όριο της Σερβομακεδονικής μάζας με τη ζώνη της Περιοδοπικής και έχουν ως κύριες διευθύνσεις Α-Δ έως ΑΒΑ-ΔΝΔ και ΒΔ-ΝΑ, ενώ στη λεκάνη της Μυγδονίας ο εφελκυσμός έχει διεύθυνση Β-Ν έως ΒΒΑ-ΝΝΑ (Papazachos *et al.*, 1982, Pavlides and Kiliass 1987, Tranos *et al.*, 2003).

Τα κανονικά ρήγματα με διεύθυνση Α-Δ αποτελούν την αιτία εμφάνισης των θερμών πηγών στην περιοχή του Λαγκαδά (Τραγανός 1982).

Σύμφωνα με συμπεράσματα γεωφυσικών ερευνών (ΙΓΜΕ- Ατζέμογλου 2001 και Θανάσουλας 1983 και BRGM 1972) η ανύψωση του υποβάθρου που παρατηρείται σε δύο περιοχές αποδίδεται σε ρήγματα ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης. Το πρώτο ύβωμα εντοπίζεται στην περιοχή που βρίσκεται ανατολικά του Σχολαρίου (άξονας Σχολάρι-Στίβος). Το δεύτερο ύβωμα βρίσκεται στην περιοχή των Λουτρών Λαγκαδά, όπου εκατέρωθεν του τεκτονικού κέρατος του υποβάθρου σχηματίζονται δύο τεκτονικές τάφροι (Βεράνης και Κατιρτζόγλου 2002).

PERIOD	EPOCH	SYSTEM	FORMATION	DEPTH	LITHOLOGY	ROCK DESCRIPTION
QUATERNARY	HOLOCENE	MEGDONIAN	Alluvial deposits,	(m)		Travertine Conglomerate clays Fine grained sand
	PLEISTOCENE		Lacustrine sediments, Old terraces, scree, talus	100 200		Varve Fine grained sand
NEOCENE	UPPER PLIOCENE	PREMEGDONIAN	Red-beds	300		Clastic sediments with cross-bedding
	LOWER PLIOCENE		Clay-sands		400	
		Sandstone	500			Lacustrine fluviated sediments Clastic sediments with cross-bedding Conglomerates
						Granites of Mesozoic Two-mica gneisses of Paleozoic age

Εικόνα 2.3.2.: Απλοποιημένη στρωματογραφική στήλη της λεκάνης Μυγδονίας (πηγή: Ψιλοβίκος 1977).

2.4 Υδρογεωλογικές συνθήκες και Υδρολογικό καθεστώς

Η περιοχή μελέτης δομείται από δύο κύριες ομάδες πετρωμάτων, που παρουσιάζουν διαφορετική υδρογεωλογική συμπεριφορά. Πιο αναλυτικά, στις γεωμορφολογικά υψηλότερες περιοχές κυριαρχούν τα βραχώδη πετρώματα, όπου το νερό κυκλοφορεί μέσω των ασυνεχειών και η υδροπερατότητα ποικίλει σημαντικά εξαρτώμενη από την έκταση, το βαθμό ρωγμάτωσης και τον κατακερματισμό του πετρώματος. Το υπόγειο νερό των κρυσταλλοσχιστωδών πετρωμάτων της λοφώδους περιοχής κυκλοφορεί σε βάθη μικρότερα των 30m και βρίσκεται υπό πίεση (Βεράνης και Κατιρτζόγλου 2002) Η εκφόρτιση των

υπόγειων νερών από τη λοφώδη-ημιορεινή περιοχή στους υδροφορείς της ιζηματογενούς λεκάνης γίνεται μέσω πλευρικής διήθησης (Panagoroulos 1995, Γιαννόπουλος 2000).

Στην πεδινή περιοχή της λεκάνης απορροής κυριαρχούν τα χαλαρά ιζήματα. Η στρωματογραφική ακολουθία σε όλη την έκταση της λεκάνης αποτελείται από εναλλαγές αργίλων, άμμων, ψηφίδων, κροκαλών και μιγμάτων αυτών. Το ποσοστό συμμετοχής της αργίλου είναι ο κύριος παράγοντας που καθορίζει το χαρακτηρισμό ενός στρώματος στην περιοχή ως υδροφορέα. Με εξαίρεση το κεντρικό τμήμα της λεκάνης απορροής, όπου εντοπίζονται οι μαύρες άργιλοι, η υπόλοιπη έκταση της λεκάνης χαρακτηρίζεται από μεταβαλλόμενο ιζηματογενές περιβάλλον. Οι ερυθρές άργιλοι εντοπίζονται στα περιθώρια της λεκάνης, ενώ στο κεντρικό τμήμα και σε βάθη από 60 έως 80m παρεμβάλλονται μαύρες άργιλοι που μαρτυρούν την παρουσία λιμναίας φάσης (Βεράνης και Κατιρτζόγλου 2002). Σύμφωνα με τις πιο πρόσφατες μελέτες (Mylioroulos *et al.*, 2007), τα στρώματα των αργίλων σε όλη την έκταση της λεκάνης δεν είναι ενιαία και παρεμβάλλονται μόνο κατά περίπτωση στη στρωματογραφική ακολουθία.

Στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας αναπτύσσεται υδροφορία που μπορεί να διαχωριστεί σε φρεάτια και σε υπό πίεση (Karavokyris and Partners *et al.*, 1998). Ο διαχωρισμός μεταξύ των υδροφόρων οριζόντων, αντίθετα με τη θεωρία που ήταν αποδεκτή μέχρι πρόσφατα, δεν είναι σαφής. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το αργιλικό στρώμα που σύμφωνα με παλαιότερους ερευνητές διαχώριζε τα δύο υδροφόρα στρώματα, δεν είναι ενιαίο (Mylioroulos *et al.*, 2007), αλλά αναπτύσσεται κατά τόπους, στις περιοχές που κυριαρχεί ο λιμναίος χαρακτήρας των αποθέσεων. Η παρουσία των αργιλικών αυτών στρωμάτων έχει σαν αποτέλεσμα το μεγάλο βαθμό ετερογένειας και ανισοτροπίας που εμφανίζουν οι υδροφόροι ορίζοντες (Ζαλίδης και συν. 2004).

Το πάχος του υδροφόρου συστήματος είναι μικρό στα κράσπεδα της λεκάνης και αυξάνεται προοδευτικά προς το κέντρο της και προς την επιφάνεια της λίμνης Κορώνειας (**Εικόνα 2.4.1.**). Παράλληλα, παρατηρείται η ανάπτυξη υβώματος (αναθόλωση του υποβάθρου) στην περιοχή δυτικά της Κορώνειας, καθώς και στο πεδινό τμήμα ανάμεσα στις λίμνες Κορώνεια και Βόλβη (Ζαλίδης και συν. 2004). Λαμβάνοντας υπόψη ότι η κίνηση του υπόγειου νερού ακολουθεί τον επιμήκη άξονα της πεδινής περιοχής της λεκάνης απορροής της Κορώνειας και ότι τα κυριότερα ρήγματα είναι περίπου παράλληλα προς τον άξονα αυτό, συμπεραίνεται ότι δε δημιουργούνται σημαντικά εγκάρσια εμπόδια στην κίνηση του νερού που να οφείλονται στις κατακόρυφες μετατοπίσεις του υποβάθρου από τη δράση των κανονικών ρηγμάτων (Βεράνης και Κατιρτζόγλου 2002).



Εικόνα 2.4.1.: Ο υδροφόρος ορίζοντας της λεκάνης Μυγδονίας.

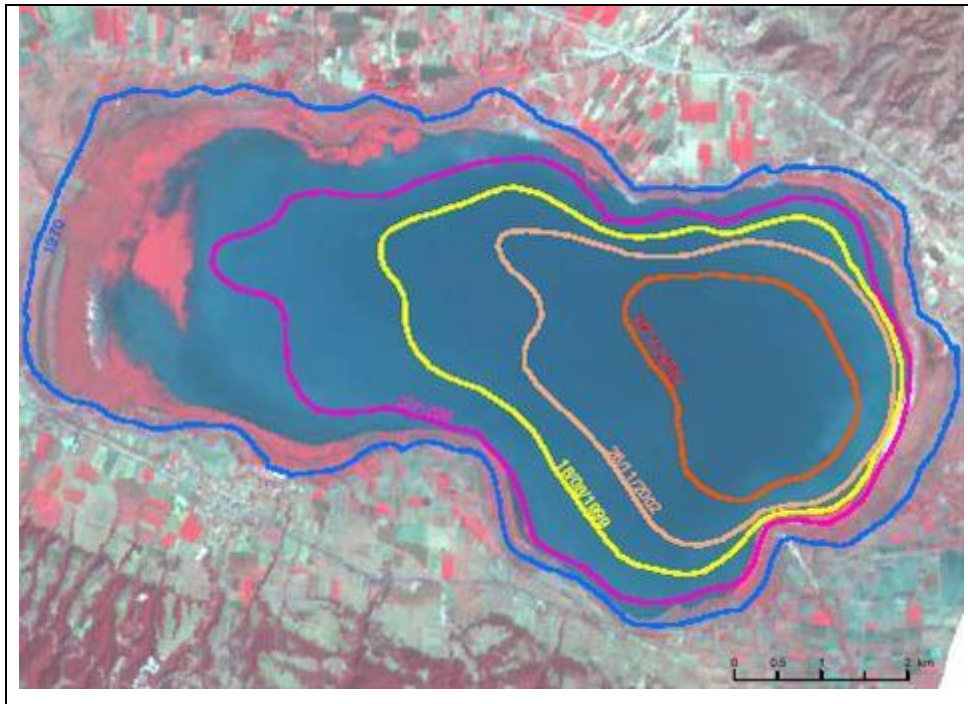
Ρηχός υδροφόρος ορίζοντας θεωρείται εκείνος που εντοπίζεται σε βάθος μέχρι 60m και είναι μερικώς ελεύθερος και μερικώς υπό πίεση. Ο πρώτος αυτός υδροφόρος ορίζοντας θεωρείται ελεύθερος και βρίσκεται κατά μήκος των μεγάλων ρεμάτων της λεκάνης απορροής (Βεράνης και Κατιρτζόγλου 2002), έχει έκταση ίση με 269Km^2 και πάχος 40-60m (Karavokyris and Partners *et al.*, 1998, Δεμίρης κ.ά. 1994). Η κατάσταση του ρηχού υδροφόρου μεταβάλλεται κατά θέσεις εποχιακά και μεταπίπτει σε υπό πίεση την υγρή περίοδο λόγω της ανύψωσης στάθμης. Ο βαθύς υδροφόρος ορίζοντας εντοπίζονται στην περιοχή της Γερακαρούς, σε βάθη από 60m περίπου μέχρι και το υπόβαθρο (βάθη από 250 έως 450m) (Βεράνης και Κατιρτζόγλου 2002). Το μέσο πάχος του είναι 150m, η επιφανειακή του εξάπλωση $5-7\text{Km}^2$ και συνίσταται από Τεταρτογενή ιζήματα και Νεογενή κλαστικά

υλικά (Karavokyris and Partners *et al.*, 1998). Ο εμπλουτισμός των ιζηματογενών προσχωματικών υδροφόρων γίνεται από την κατείσδυση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στην πεδινή περιοχή της λεκάνης απορροής της Κορώνειας, από τη διήθηση των επιφανειακών νερών των χειμάρρων και από την πλευρική υπόγεια διήθηση του νερού των βραχωδών πετρωμάτων του υποβάθρου (Βεράνης και Κατιρτζόγλου 2002). Ο κύριος άξονας του υπόγειου νερού είναι παράλληλος προς τον επιμήκη άξονα της λεκάνης και ακολουθεί διεύθυνση από ΒΒΔ προς ΝΝΑ. Το καθεστώς ροής είναι παρόμοιο και στους δύο υδροφορείς της λεκάνης (Karavokyris and Partners *et al.*, 1998, Δεμίρης κ.ά. 1994, BRGM 1972). Η έκταση του υδροφόρου συστήματος (ενοποιημένου- χωρίς το διαχωρισμό μεταξύ φρεάτιας και υπό πίεση υδροφορίας) ανέρχεται σε περίπου 260Km² (Ζαλίδης και συν. 2004).

Η κύρια μορφή επιφανειακής απορροής εμφανίζεται με χειμαρρώδη ροή, που αποστραγγίζει τα υψηλότερα σημεία της λεκάνης και τροφοδοτεί την πεδινή περιοχή (Ζαλίδης και συν. 2004).

Σύμφωνα με τις μελέτες που εκπονήθηκαν σχετικά με τα υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας με τη χρήση δεδομένων μέχρι και το 1985 (BRGM 1972, Vatseris 1992), στη λεκάνη υπήρχε πλεόνασμα νερού που υπολογιζόταν σε 37x10⁶ m³/έτος. Το σύνολο σχεδόν της επιφανειακής απορροής (R=11,7x10⁶ m³/έτος) από τα υδατορεύματα της ημιορεινής-λοφώδους περιοχής τροφοδοτούσε τη λίμνη της Κορώνειας (έκταση 45-49Km²) και συντελούσε στην υπερχειλίση της προς το ρέμα του Δερβενίου (BRGM 1972). Σε μελέτες του ΙΓΜΕ Κατιρτζόγλου 2001, Βεράνης και Κατιρτζόγλου 2001b) σχετικά με το υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης για την περίοδο 1996-2000 υπολογίζεται ότι μόλις 6x10⁶ m³/έτος νερού εμπλουτίζουν τη λίμνη, της οποίας η έκταση έχει συρρικνωθεί στα 25 Km². Για την ίδια περίοδο υπολογίζεται ότι σχεδόν το 50% το ετήσιου όγκου κατακρημνισμάτων της λεκάνης διηθείται στα χαλαρά ιζήματα κατά μήκος της κοίτης των χειμάρρων. Θεωρώντας ότι ο πυθμένας της λίμνης είναι σχεδόν αδιαπέρατος, εκτιμάται ότι η τροφοδοσία της από τους υδροφόρους ορίζοντες ανέρχεται σε 0,3x10⁶ m³/έτος για τα έτη 1996-2000. Διαπιστώνεται υδατικό έλλειμμα της τάξης των 3-4x10⁶ m³/έτος, ενώ για το υπόγειο νερό το υδατικό έλλειμμα είναι της τάξης των 11 x10⁶ m³/έτος. Εξαιτίας του αρνητικού υδατικού ισοζυγίου τα αποθέματα της λίμνης Κορώνειας μειώθηκαν από 200x10⁶ m³/έτος το 1985 σε 20x10⁶ m³/έτος το 2002 (Βεράνης και Κατιρτζόγλου 2002) (**Εικόνα 2.4.2.**). Οι Τζιμόπουλος κ.ά (2004) εκτιμούν ότι η εξατμισιοδιαπνοή που λαμβάνει χώρα στη λεκάνη είναι δυσανάλογη

προς τα κατακρημνίσματα της και ότι η πτώση στάθμης της λίμνης οφείλεται στην υπεράντληση αρδευτικού νερού.



Εικόνα 2.4.2.: Προοδευτική εξέλιξη της επιφάνειας της λίμνης Κορώνειας από το 1970 έως και το 2002 (πηγή: Ζαλίδης και συν. 2004).

2.5 Γεωθερμία

Η ευρύτερη περιοχή μελέτης (λεκάνη Μυγδονίας) παρουσιάζει σημαντικό γεωθερμικό ενδιαφέρον. Σύμφωνα με μελέτες του ΙΓΜΕ (Τραγανός 1982, Θανάσουλας 1983) στη λεκάνη Μυγδονίας υπάρχει αυξημένη θερμική ανωμαλία και τα γεωθερμικά ρευστά χαμηλής ενθαλπίας φθάνουν στους 51°C σε μικρά βάθη. Στη λεκάνη της Μυγδονίας αναπτύσσονται τα γεωθερμικά πεδία των Λουτρών Λαγκαδά, της Χρυσουγής και της περιοχής Νυμφόπετρας, από τα οποία μόνο αυτό των Λουτρών Λαγκαδά εκτείνεται στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας.

Γεωλογικές και γεωφυσικές έρευνες (Kockel *et al.*, 1977, Ψιλοβίκος 1977, Θανάσουλας 1983, Thanassoulas and Lazou 1990) έδειξαν ότι κάτω από τις χαλαρές αποθέσεις της πεδινής περιοχής των Λουτρών Λαγκαδά και με διεύθυνση Β-ΒΔ αναπτύσσεται ένα τεκτονικό κέρασ από μεταμορφωμένα πετρώματα που χωρίζει τη λεκάνη σε δύο τάφρους, μία προς βορρά με βάθη υποβάθρου της τάξης των 220m και μία προς νότο βαθύτερη με το υπόβαθρο να βρίσκεται τουλάχιστον 470m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Υπάρχουν πολλά ρήγματα στην περιοχή με κύρια διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ, που παραμένουν ακόμα ενεργά λόγω των εφελκυστικών τάσεων οριζόντιου εφελκυσμού (Mercier

1966) και στα οποία οφείλεται η γένεση και λειτουργία των θερμών νερών της περιοχής, αλλά και η κατά καιρούς εκδηλούμενη σεισμικότητα (Thanassoulas and Lazou 1990).

Η κύρια ζώνη γεωθερμικού ενδιαφέροντος στη λεκάνη της λίμνης Κορώνειας εκτείνεται σε μια περιοχή 6Km² περίπου. Αρχίζει 1,5Km νότια από την πόλη του Λαγκαδά και φθάνει μέχρι το ΒΔ τμήμα της Κορώνειας (Τραγανός 1987). Οι θερμές πηγές των λουτρών Λαγκαδά συνδέονται άμεσα με την έντονη τεκτονική της περιοχής και βρίσκονται πάνω στο τεκτονικό κέρασ και στην τομή των κύριων και των δευτερευόντων ρηγμάτων.

Η γεωθερμική βαθμίδα του πεδίου είναι αυξημένη και ισούται με 8°C/100m. Τα γεωθερμικά ρευστά που εντοπίζονται σε μικρά βάθη (100-230m) έχουν θερμοκρασίες T που κυμαίνονται από 32 έως 40 °C. Μεγάλη αύξηση της τιμής της θερμοκρασίας των ρευστών εμφανίζεται στον άξονα ανάπτυξης του γεωθερμικού πεδίου. Εκατέρωθεν αυτού του νοητού άξονα αρχίζει η πτώση των θερμοκρασιών, όπου στο ανατολικό τμήμα του εξελίσσεται απότομα, ενώ στο δυτικό του ομαλά. Η ασύμμετρη αυτή κατανομή των θερμοκρασιών οφείλεται στο διαφορετικό πάχος των ιζηματογενών σχηματισμών που πληρούν τις εκατέρωθεν τάφρους του τεκτονικού εξάρματος της περιοχής. Σύμφωνα με εκτιμήσεις οι πιθανές θερμοκρασίες των βαθιών νερών είναι περίπου 100 °C (Βεράνης και Κατιρτζόγλου 2002). Ο χημικός τύπος των γεωθερμικών νερών της περιοχής είναι του τύπου Na-HCO₃-SO₄ (Τραγανός 1991, Πουτούκης και Ντότσικα 1993).

Σύμφωνα με ισοτοπικές αναλύσεις (¹⁸O, ²H και ¹⁴C, Vatseris 1992) στα θερμά νερά της Μυγδονίας λεκάνης (Λαγκαδάς, Νυμφόπετρα, Νέας Απολλωνίας) το νερό είναι μετεωρικής προέλευσης, ενώ ο εμπλουτισμός των ταμιευτήρων γίνεται από διαφορετικές υψομετρικά περιοχές. Οι ηλικίες των θερμών νερών υπολογίζονται στην περίοδο του Πλειστοκαίνου και χαρακτηρίζονται «παλιά νερά».

2.6 Υδροχημεία και Γεωχημεία

Προγενέστερες μελέτες (Βαφειάδης κ.ά 1994) κατατάσσουν τα υπόγεια νερά της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας σε δύο υδροχημικές οικογένειες. Στην οικογένεια Α με χημισμό Ca-Na-HCO₃ ανήκουν τα υπόγεια νερά που αναπτύσσονται κυρίως στο ΝΔ και κεντρικό τμήμα της λεκάνης και στην οικογένεια Β ανήκουν τα υπόγεια νερά με χημισμό Na-SO₄-HCO₃ που αναπτύσσονται στο ΒΒΑ τμήμα της λεκάνης. Ενδιάμεσοι τύποι νερού (Ca-Na-HCO₃-SO₄, Na-Ca- HCO₃-SO₄, Na-Ca-SO₄- HCO₃) απαντώνται εξίσου σε περιοχές ανάμεσα στις νοητές ζώνες που δημιουργούν οι δύο κύριοι τύποι του νερού. Σε άλλες μελέτες (Vatseris 1992) τα νερά των «κρύων» υδροφόρων της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας κατατάσσονται στους χημικού τύπου Na-HCO₃ και Na-Ca-HCO₃.

Η σταδιακή μετάβαση και τοπική διαφοροποίηση των χημικών τύπων του νερού καταδεικνύει τη μετάβαση από κρύα σε θερμά νερά, γεγονός που μπορεί να συσχετισθεί με την παρουσία του γεωθερμικού πεδίου των λουτρών Λαγκαδά. Οι Βαφειάδης κ.ά (1994) αποδεικνύουν την ύπαρξη διπολικού συστήματος ανάμιξης ανάμεσα στα κρύα νερά και τα γεωθερμικά ρευστά της περιοχής. Το φαινόμενο ανάμιξης παρουσιάζεται έντονα κατά μήκος της ζώνης Χρυσανγή-Κολχικό-Ευαγγελισμός, η ύπαρξη της οποίας μπορεί να ερμηνευτεί με τη γεωλογική και κυρίως την τεκτονική δομή της περιοχής, αλλά και με τις υδρογεωλογικές συνθήκες που έχουν διαμορφωθεί εξ' αιτίας των γεωλογικών και τεκτονικών αιτίων. Οι πολύπλοκες διεργασίες ανάμιξης των υδάτων της λεκάνης, καθώς και η σταδιακή μεταβολή του χημισμού του νερού, επισημαίνονται και από τον Vatsiris (1992).

Στα νερά της Μυγδονίας λεκάνης έχουν πραγματοποιηθεί παλαιότερα ισοτοπικές αναλύσεις υδρογόνου (^2H και ^3H), οξυγόνου (^{18}O) και άνθρακα (^{14}C) (Vatsiris, 1992). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των ισοτοπικών αυτών αναλύσεων τα νερά (επιφανειακά και θερμά) είναι μετεωρικής προέλευσης, ενώ οι λίμνες Κορώνειας και Βόλβης επηρεάζονται αισθητά από το φαινόμενο της εξάτμισης.

3.ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

3.1 Προέλευση δεδομένων

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω πηγές:

- ✓ Τοπογραφικοί χάρτες ΓΥΣ, κλίμακας 1:50.000, φύλλα Θεσσαλονίκη, Θέρμη, Ζαγκλιβέρι, Λαχανάς και Σοχός
- ✓ Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας, κλίμακας 1:500.000, των Bormovas, Rondogianni-Tsiambaou & Papavassiliou, ΙΓΜΕ (1983)
- ✓ Στρωματογραφικές στήλες παραγωγικών και ερευνητικών γεωτρήσεων της Μυγδονίας λεκάνης από παλαιότερες μελέτες της περιοχής (ΙΓΜΕ, BRGM)
- ✓ Αρχεία (shapefiles) από την ιστοσελίδα Δημόσια Ανοιχτά Δεδομένα (geodata.gov.gr) για την καταγραφή της κάλυψης των χρήσεων γης (Corine Land Cover), τους δήμους, τους οικισμούς, τις προστατευόμενες περιοχές από το δίκτυο 'ΦΥΣΗ 2000', και τους υπόγειους υδροφορείς της Ελλάδας
- ✓ Δημογραφικά στοιχεία από την Ε.Σ.Υ.Ε. για τον πληθυσμό στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας για την περίοδο 1991-2001 (www.statistics.gr)
- ✓ Ψηφιακό Μοντέλο Ανάγλυφου (DEM) της Ελλάδας, με χωρική διακριτική ικανότητα 30x30 m προερχόμενο από το δορυφόρο TERRA/ASTER/GDEM.
- ✓ Δορυφορικές εικόνες από το Google Earth (λήψη στις 13/6/2011).

Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν το ArcGIS 9.3 για την ψηφιοποίηση των δεδομένων και τη δημιουργία των χαρτών, καθώς και το Origin.Pro.8.5 για την κατασκευή διαγραμμάτων.

3.2 Δειγματοληψία

Για την πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας συλλέχθηκαν συνολικά 18 δείγματα νερού. Πιο αναλυτικά, συγκεντρώθηκαν 15 δείγματα υπόγειου νερού από γεωτρήσεις (από τα οποία το 1 δείγμα είναι θερμού νερού από το γεωθερμικό πεδίο του Λαγκαδά), 2 δείγματα επιφανειακού νερού από τη λίμνη Κορώνεια και τον ποταμό Μπογδάνα και ένα δείγμα υδρευτικού νερού από την πόλη του Λαγκαδά. Οι γεωτρήσεις επιλέχθηκαν με χωροθετικά και υδρογεωλογικά κριτήρια: να βρίσκονται περιμετρικά γύρω από τη λίμνη, να καλύπτουν μεγάλο τμήμα της λεκάνης απορροής και να διατρύουν σε διαφορετικά βάθη τους

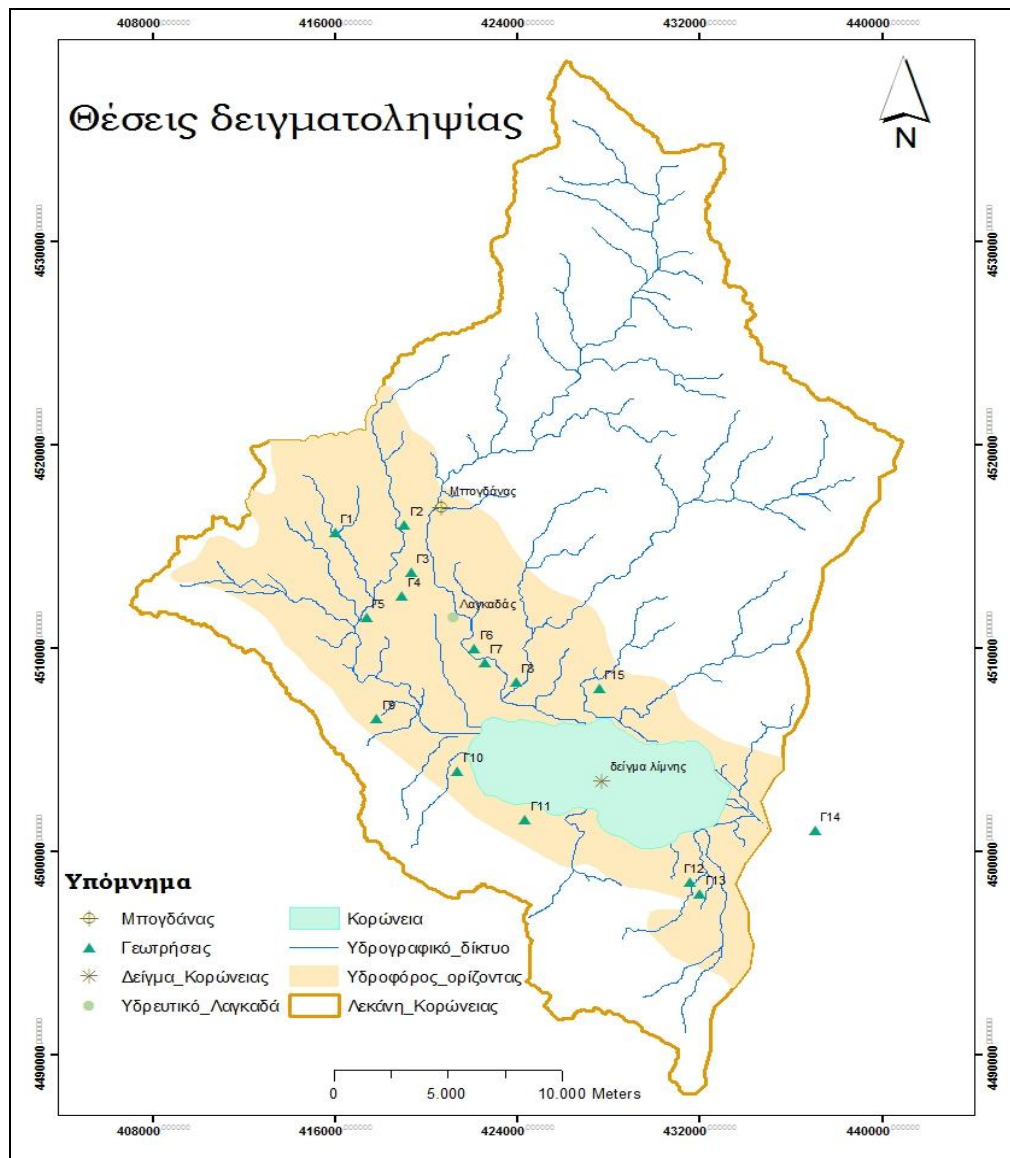
γεωλογικούς σχηματισμούς, ώστε να διερευνηθούν ο φρεάτιος και ο βαθύς υδροφορέας που αναπτύσσονται στην περιοχή (Εικόνα 3.2.1.).

Τα δείγματα υπόγειου νερού (Γ1-Γ15) που συλλέχθηκαν διαχωρίζονται σε ρηχές ($d < 60$ m) και βαθιές ($d > 60$ m) γεωτρήσεις. Πιο αναλυτικά, βαθιές είναι οι γεωτρήσεις Γ1 ($d=82$ m), Γ4 ($d=150$ m), Γ6 ($d=72$ m, δασικό φυτώριο), Γ7 ($d=100$ m, Λουτρά Λαγκαδά), Γ10 ($d=100$ m), Γ13 ($d=195$ m) και Γ15 ($d=110$ m). Οι ρηχές γεωτρήσεις περιλαμβάνουν την αρδευτική γεώτρηση της Ασσήρου (Γ2), μία πιεζομετρική ερευνητική γεώτρηση του ΙΓΜΕ (Γ3), καθώς και γεωτρήσεις που βρίσκονται κοντά στα χωριά Καβαλάρι (Γ9), Άγιος Βασίλειος (Γ11) και Βασιλούδι (Γ12).

Από κάθε θέση δειγματοληψία συλλέχθηκε ποσότητα νερού ίση με περίπου 2 lit. για χημική και ισοτοπική ανάλυση. Αναφορικά με τα δείγματα νερού προοριζόμενα για χημική ανάλυση, από κάθε σημείο δειγματοληψίας πάρθηκαν 2 πλαστικές φιάλες χωρητικότητας 500 ml. Από τα συλλεχθέντα δείγματα νερού ένα μέρος (0,5 lit) φιλτραρίστηκε (0,45 μ m) και του προστέθηκε οξύ (HNO_3 1:1) για τον προσδιορισμό των κατιόντων. Τα ανεπεξέργαστα δείγματα κάθε θέσης συλλέχθηκαν για τον προσδιορισμό των ανιόντων. Τέλος, αναφορικά με τις ισοτοπικές αναλύσεις ($\delta^{18}\text{O}$ και δD) συλλέχθηκαν ανεπεξέργαστα δείγματα νερού σε γυάλινα φιαλίδια των 50ml με διπλό πάμα, καθώς και δείγματα του 1 λίτρου (πλαστική φιάλη) για τον προσδιορισμό των διαλυμένων ανθρακικών (προσδιορισμός του $\delta^{13}\text{C}$ και του ^{18}O της ανθρακικής ρίζας).

Το pH, η θερμοκρασία και η αγωγιμότητα προσδιορίστηκαν επί τόπου κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν:

- ✓ Ψηφιακό pH-μετρο (pen type Ph-meter, ATC)
- ✓ Ρυθμιστικά διαλύματα με pH 4 και pH 7 αντίστοιχα για τη βαθμονόμηση του pH-μετρου πριν από κάθε μέτρηση
- ✓ Αυτόματο ψηφιακό αγωγιμόμετρο για τη μέτρηση της αγωγιμότητας και της θερμοκρασίας (The Dist Family, Dist 3 HANNA Instruments)
- ✓ Ρυθμιστικό διάλυμα για τη βαθμονόμηση του αγωγιμόμετρου πριν από κάθε μέτρηση
- ✓ Υψηλής καθαρότητας νιτρικό οξύ (HNO_3 65%) πυκνότητας 1,40Kg/l για την οξύνιση των δειγμάτων του νερού
- ✓ Φορητό ψυγείο για την αποθήκευση των δειγμάτων και
- ✓ Συσσκευή GPS για τον καθορισμό των συντεταγμένων των σημείων δειγματοληψίας.



Εικόνα 3.2.1.: Θέσεις δειγματοληψίας υπόγειου, επιφανειακού και υδρευτικού νερού στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας για τις περιόδους Αύγουστου και Δεκεμβρίου 2011.

Οι δειγματοληψίες του υπόγειου νερού πραγματοποιήθηκαν κατά τον Αύγουστο του 2011 και του επιφανειακού νερού κατά τον Δεκέμβριο του ίδιου έτους. Δε στάθηκε δυνατή η παράλληλη δειγματοληψία επιφανειακού και υπόγειου νερού εξαιτίας της παύσης λειτουργίας των γεωτρήσεων μετά το τέλος της αρδευτικής περιόδου, της μηδενικής επιφανειακής απορροής των χειμάρρων κατά τους θερινούς μήνες και της δραματικής μείωσης της επιφάνειας της λίμνης Κορώνειας, κυρίως την περίοδο απουσίας βροχοπτώσεων. Είναι απαραίτητο να επισημανθεί ότι για την πληρέστερη μελέτη της ισοτοπικής σύνθεσης του νερού της λίμνης απαιτούνται δειγματοληψίες ανά περίοδο και σε όλη τη διάρκεια του υδρολογικού έτους, καθώς και σε διαφορετικά βάθη, διαδικασίες που καθίστανται αδύνατες

στα περιορισμένα χρονικά πλαίσια της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας και εξαιτίας της φυσιογνωμίας της υπό μελέτη λίμνης.

3.3 Εργαστηριακές αναλύσεις

Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης πραγματοποιήθηκαν χημικές και ισοτοπικές αναλύσεις στα δείγματα του νερού που συλλέχθηκαν.

Οι χημικές αναλύσεις των δειγμάτων νερού πραγματοποιήθηκαν στο Διαβαλκανικό Κέντρο Περιβάλλοντος (Λαγκαδάς, Θεσσαλονίκη). Προσδιορίστηκαν εργαστηριακά τα κύρια ιόντα (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , F^- , Cl^- , Br^- , HCO_3^-) και τα θρεπτικά άλατα (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-}) του νερού. Τα κύρια χημικά συστατικά ανιχνεύθηκαν με τις πρότυπες μεθόδους που περιγράφονται στην ΑΡΗΑ (1989). Πιο συγκεκριμένα, οι συγκεντρώσεις των κύριων ιόντων και των θρεπτικών αλάτων προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο της ιοντικής χρωματογραφίας (4110 ΑΡΗΑ- ΑWWA-WEF,2005).

Στις χημικές αναλύσεις έγινε έμμεσος ποιοτικός έλεγχος των υδροχημικών αποτελεσμάτων, βάσει της ηλεκτρο-ουδετερότητάς τους (electroneutrality) (EN) για να διαπιστωθεί αν το συστηματικό σφάλμα των αναλύσεων των κατιόντων και των ανιόντων είναι μέσα στα όρια της αποδεκτής διαφοράς.

Ο τύπος σύμφωνα με τον οποίο υπολογίζεται το συστηματικό σφάλμα των αναλύσεων δίνεται παρακάτω:

$$\text{E.N.}(\%) = (\sum_{\text{κατιόντων}} - \sum_{\text{ανιόντων}} / \sum_{\text{κατιόντων}} + \sum_{\text{ανιόντων}}) \times 100\%$$

Οι αποδεκτές διαφορές της ηλεκτρο-ουδετερότητας (E.N. %) δεν πρέπει να ξεπερνούν το $\pm 5\%$. Βάσει των υπολογισμών του Παραρτήματος τα αποτελέσματα είναι αποδεκτά για το μεγαλύτερο μέρος των αναλύσεων. Για τα δείγματα με μεγαλύτερο λάθος του αποδεκτού τα οποιαδήποτε συμπεράσματα, που βασίζονται σε αυτές τις υδροχημικές αναλύσεις, δίνονται με μεγάλη επιφύλαξη.

Η ισοτοπική ανάλυση των δειγμάτων νερού περιελάμβανε τους ισοτοπικούς λόγους $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^2\text{H}/^1\text{H}$ και $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, ή πιο απλά $\delta^{18}\text{O}$, δD και $\delta^{13}\text{C}$. Οι ισοτοπικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στη Μονάδα Σταθερών Ισοτόπων του Ινστιτούτου Επιστήμης Υλικών του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ» με Φασματογράφο Μάζας Σταθερών Ισοτόπων (Isotope Ratio Mass Spectrometer, I.R.M.S.). Η ισοτοπική μέτρηση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση υλικών αναφοράς V-SMOW (Vienna - Standard Mean Ocean Water) και VPDB (Vienna – Pee Dee Belmemnite Standard) και συνοδεύεται από διαπίστευση εργαστηρίου EN ISO 17025:2005 (αρ.πιστ.479). Η ανάλυση κάθε δείγματος 50ml πραγματοποιήθηκε δύο φορές.

Το αναλυτικό σφάλμα των μετρήσεων είναι 0,1‰ για το ^{18}O , 1‰ για το D και 0,1‰ για τον ^{13}C . Το σύνολο των ισοτοπικών αναλύσεων των δειγμάτων παρατίθεται στο Παράρτημα.

Η περιεκτικότητα σε $\delta^{18}\text{O}$ στα δείγματα προσδιορίστηκε με τη μέθοδο εξισορρόπησης CO_2 με το νερό (Epstein and Mayeda, 1953). Η διαδικασία της ισοτοπικής ανάλυσης του νερού έχει ως προϋπόθεση την εξισορρόπηση του O_2 του νερού με το οξυγόνο του αερίου CO_2 ενός μείγματος CO_2/He 0,2% γνωστής ισοτοπικής σύστασης (Epstein & Mayeda 1953). Έπειτα, υπό μορφή CO_2 εισέρχεται στον Φασματογράφο Μάζας Σταθερών Ισοτόπων με τη βοήθεια μεταφορικού αερίου (εξαιρετικά καθαρό Ήλιο 99,999%). Το αέριο κατά την εισαγωγή του στην πηγή ιονισμού (ion source) έρχεται σε επαφή με νήμα ηλεκτρισμού το οποίο φέρει υψηλή τάση (3kV). Τα άτομα του αερίου ιονίζονται, αποκτούν ταχύτητα και εισέρχονται σε περιοχή υψηλού μαγνητικού πεδίου, όπου με βάση τη μάζα τους διαγράφουν διαφορετικές καμπυλωτές τροχιές. Τέλος, τα ιόντα κρούουν σε ειδικούς υποδοχείς (cups), οι οποίοι είναι έτσι καταναμημένοι ώστε να υποδέχονται και να καταγράφουν ιόντα συγκεκριμένης μάζας. Το σήμα που καταγράφεται αντιστοιχεί σε κάποια mV ανά μάζα ιόντος. Οι λόγοι των σημάτων αυτών με μια σειρά αριθμητικών υπολογισμών μετατρέπονται σε ισοτοπικούς λόγους. Το δείγμα νερού τοποθετείται σε γυάλινο φιαλίδιο με χρήση μικροπιπέτας, υπολογίζοντας σε κάθε φιαλίδιο 200μL νερού. Τα δείγματα εισέρχονται εις διπλούν (duplicates) για μεγαλύτερη αναλυτική ακρίβεια. Για τον καθορισμό της αέριας φάσης εντός του φιαλιδίου που βρίσκεται το δείγμα, εισάγεται μείγμα καθαρού αερίου CO_2/He (0,2%) και αποβάλλεται όλος ο όγκος του υπερκείμενου αέρα (flush fill). Η εξισορρόπηση του ισοτοπικού λόγου μεταξύ νερού και αέριας φάσης επιτυγχάνεται σε 24 ώρες σε θερμοκρασία δωματίου 24°C (equilibrium). Στη συνέχεια πραγματοποιούνται 10 αναρροφήσεις από τον αέριο χώρο του φιαλιδίου και το αναρροφώμενο αέριο εισέρχεται στην πηγή ιονισμού. Η αναλυτική διάταξη για τη μέτρηση των δειγμάτων αποτελούνταν από ένα φασματογράφο μάζας Thermo Scientific Data V Plus I.R.M.S., συνδεδεμένο με συσκευή εισαγωγής Gas Bench II (Thermo Scientific). Περισσότερα επί της αρχής λειτουργίας του Φασματογράφου Μάζας Σταθερών Ισοτόπων μπορούν να βρεθούν από τον de Groot (2004).

Η τιμή του ^2H προσδιορίστηκε με τη μέθοδο που προτείνουν οι Coleman *et al.* (1982). Η διαδικασία της ισοτοπικής ανάλυσης του νερού έχει ως προϋπόθεση την εξισορρόπηση του H_2 του νερού με το υδρογόνο του αερίου H_2 ενός μείγματος H_2/He 0,2% γνωστής ισοτοπικής σύστασης (Coleman *et al.*, 1982). Έπειτα, υπό μορφή H_2 εισέρχεται στον Φασματογράφο Μάζας Σταθερών Ισοτόπων με τη βοήθεια μεταφορικού αερίου (εξαιρετικά καθαρό Ήλιο 99,999%). Το αέριο κατά την εισαγωγή του στην πηγή ιονισμού (ion source) έρχεται σε

επαφή με νήμα ηλεκτρισμού το οποίο φέρει υψηλή τάση (3kV). Τα άτομα του αερίου ιονίζονται, αποκτούν ταχύτητα και εισέρχονται σε περιοχή υψηλού μαγνητικού πεδίου, όπου με βάση τη μάζα τους διαγράφουν διαφορετικές καμπυλωτές τροχιές. Τέλος, τα ιόντα κρούουν σε ειδικούς υποδοχείς (cups), οι οποίοι είναι έτσι κατανομημένοι ώστε να υποδέχονται και να καταγράφουν ιόντα συγκεκριμένης μάζας. Το σήμα που καταγράφεται αντιστοιχεί σε κάποια mV ανά μάζα ιόντος. Οι λόγοι των σημάτων αυτών με μια σειρά αριθμητικών υπολογισμών μετατρέπονται σε ισοτοπικούς λόγους. Το δείγμα νερού τοποθετείται σε γυάλινο φιαλίδιο με χρήση μικρο-πιπέτας, υπολογίζοντας σε κάθε φιαλίδιο 200μL νερού και προστίθενται και καταλύτες (Pt). Τα δείγματα εισέρχονται εις διπλούν (duplicates) για μεγαλύτερη αναλυτική ακρίβεια. Για τον καθορισμό της αέριας φάσης εντός του φιαλιδίου που βρίσκεται το δείγμα, εισάγεται μείγμα καθαρού αερίου H₂/He (0,2%) και αποβάλλεται όλος ο όγκος του υπερκείμενου αέρα (flush fill). Στη συνέχεια πραγματοποιούνται 10 αναρροφήσεις από τον αέριο χώρο του φιαλιδίου και το αναρροφώμενο αέριο εισέρχεται στην πηγή ιονισμού. Η αναλυτική διάταξη για τη μέτρηση των δειγμάτων αποτελούνταν από ένα φασματογράφο μάζας Thermo Scientific Data V Plus I.R.M.S., συνδεδεμένο με συσκευή εισαγωγής Gas Bench II (Thermo Scientific). Περισσότερα επί της αρχής λειτουργίας του Φασματογράφου Μάζας Σταθερών Ισοτόπων μπορούν να βρεθούν από τον de Groot (2004).

Η διαδικασία ισοτοπικής ανάλυσης ($\delta^{13}\text{C}$) ενός ανόργανου ανθρακικού υλικού έχει ως προϋπόθεση τη μετατροπή του στερεού ανθρακικού κλάσματος σε αέριο. Έπειτα, υπό μορφή CO₂ εισέρχεται στο Φασματογράφο Μάζας Σταθερών Ισοτόπων με τη βοήθεια μεταφορικού αερίου (εξαιρετικά καθαρό Ήλιο 99,999%). Το αέριο κατά την εισαγωγή του στην πηγή ιονισμού (ion source) έρχεται σε επαφή με νήμα ηλεκτρισμού το οποίο φέρει υψηλή τάση (3kV). Τα άτομα του αερίου ιονίζονται, αποκτούν ταχύτητα και εισέρχονται σε περιοχή υψηλού μαγνητικού πεδίου, όπου με βάση τη μάζα τους διαγράφουν διαφορετικές καμπυλωτές τροχιές. Τέλος, τα ιόντα κρούουν σε ειδικούς υποδοχείς (cups), οι οποίοι είναι έτσι κατανομημένοι ώστε να υποδέχονται και να καταγράφουν ιόντα συγκεκριμένης μάζας. Το σήμα που καταγράφεται αντιστοιχεί σε κάποια mV ανά μάζα ιόντος. Οι λόγοι των σημάτων αυτών με μια σειρά αριθμητικών υπολογισμών μετατρέπονται σε ισοτοπικούς λόγους. Για τον καθορισμό της αέριας φάσης εντός του φιαλιδίου που βρίσκεται το δείγμα, εισάγεται καθαρό Ήλιο (He 99,999%) και αποβάλλεται όλος ο όγκος του υπερκείμενου αέρα (flush fill). Η μετατροπή του CaCO₃ σε CO₂ γίνεται με αντίδραση 150-200 μg δείγματος με ορθοφωσφορικό οξύ (99% H₃PO₄) στους 72°C και η αντίδραση αφήνεται για 1 ώρα, ώστε το

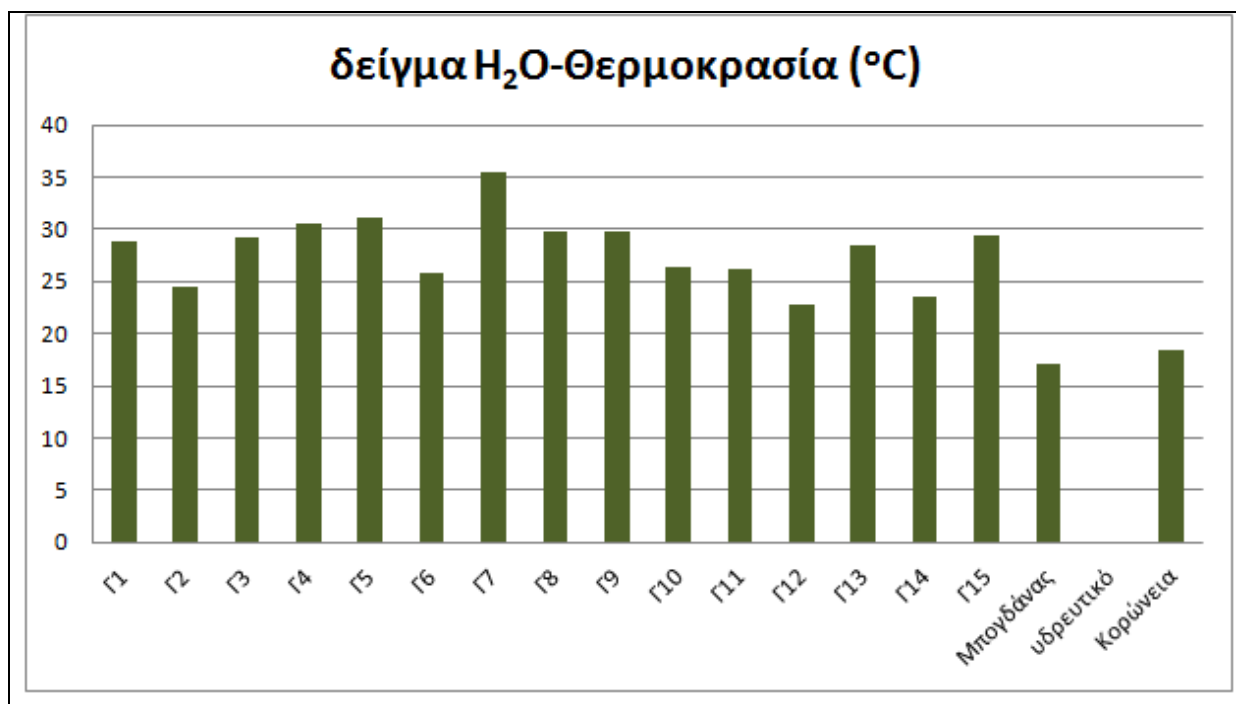
παραγόμενο CO₂ να είναι σε απόλυτη ισορροπία με την αρχική ισοτοπική σύσταση του στερεού CaCO₃ (*equilibration*). Στη συνέχεια πραγματοποιούνται 10 αναρροφήσεις από τον αέριο χώρο του φιαλιδίου και το αναρροφώμενο αέριο εισέρχεται στην πηγή ιονισμού. Η αναλυτική διάταξη για τη μέτρηση των δειγμάτων αποτελούνταν από ένα φασματογράφο μάζας Thermo Scientific Data V Plus I.R.M.S., συνδεδεμένο με συσκευή εισαγωγής Gas Bench II (Thermo Scientific). Περισσότερα επί της αρχής λειτουργίας του Φασματογράφου Μάζας Σταθερών ισοτόπων μπορούν να βρεθούν από τον de Groot (2004).

4.ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΔΡΟΧΗΜΕΙΑΣ

4.1 Φυσικο-χημικές παράμετροι του νερού της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας

Οι φυσικοχημικές παράμετροι που προσδιορίστηκαν στο πεδίο παρατίθενται στον **Πίνακα 4.1.1.**

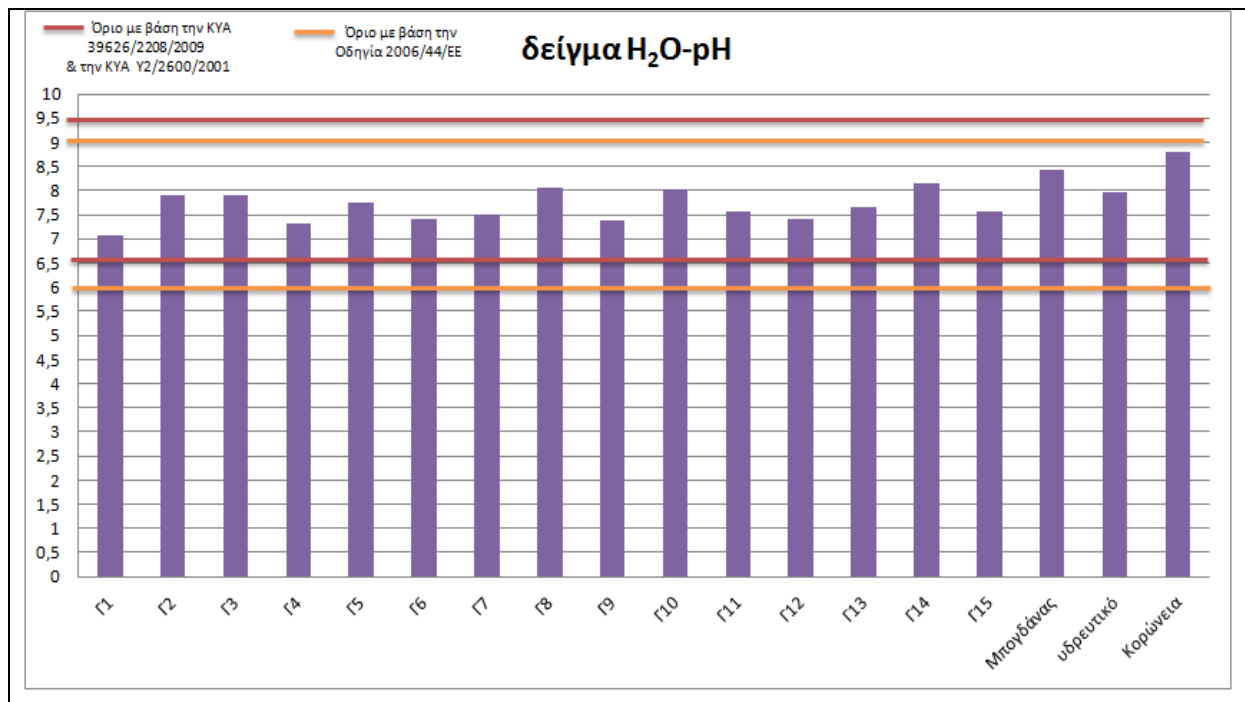
Η θερμοκρασία των δειγμάτων του υπόγειου νερού κυμαίνεται από 22,8°C (γεώτρηση Γ12) έως και 35,4°C (γεώτρηση Γ7). Η υψηλότερη θερμοκρασία μετρήθηκε στις θερμές πηγές του Λαγκαδά, ενώ οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας σχετίζονται εμφανώς με την απόσταση του σημείου δειγματοληψίας από το γεωθερμικό πεδίο της περιοχής (**Εικόνα 4.1.1.**). Η θερμοκρασία του επιφανειακού νερού δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη διαφοροποίηση για τα δείγματα του Μπογδάνα και της Κορώνειας και ισούται με 17 °C και 18,5 °C αντίστοιχα.



Εικόνα 4.1.1.: Τιμές των θερμοκρασιών για όλα τα δείγματα του νερού που συλλέχθηκαν κατά τις περιόδους δειγματοληψίας Αυγούστου (υπόγεια νερά) και Δεκεμβρίου (επιφανειακά νερά) 2011 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας.

Οι τιμές του pH δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφοροποιήσεις ανάμεσα στα δείγματα του υπόγειου νερού και κυμαίνονται από 7,07 (γεώτρηση Γ1) έως 8,16 (γεώτρηση Γ14). Οι

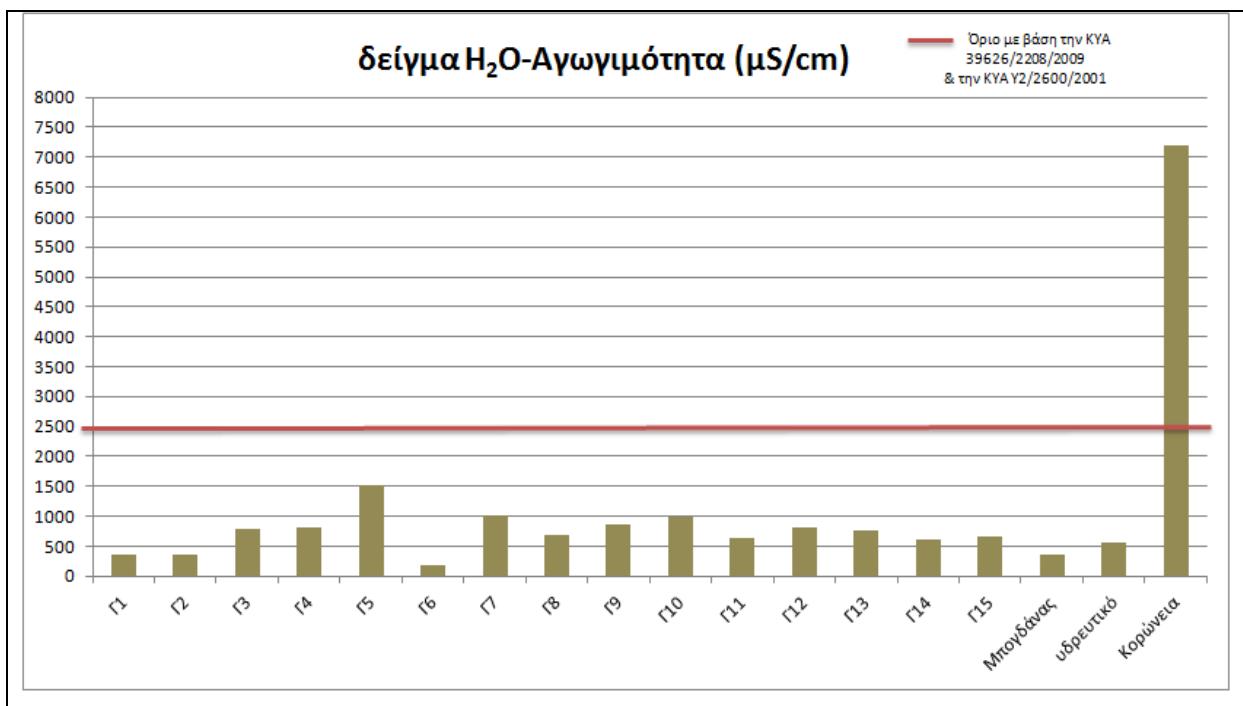
τιμές αυτές χαρακτηρίζουν το νερό από ουδέτερο έως ελαφρά αλκαλικό. Για όλα τα δείγματα υπόγειου νερού (Γ1-Γ15) η τιμή του pH βρίσκεται στα επιτρεπτά όρια όπως αυτά ορίζονται από την ΚΥΑ 39626/2208/2009 (εύρος 6,5-9,5) για την προστασία των υπόγειων υδάτων από ρύπανση και υποβάθμιση (Εικόνα 4.1.2.). Οι τιμές του pH για τα δείγματα επιφανειακού νερού καταδεικνύουν μεγαλύτερη αλκαλικότητα (Μπογδάνας 8,44 και Κορώνεια 8,81), γεγονός που θα μπορούσε να αποδοθεί στην παρουσία ποτάμιων φερτών υλών με αλκαλικό χαρακτήρα (CaCO_3 και $\text{Ca}(\text{Mg})\text{CO}_3$). Οι τιμές που καταγράφηκαν για τα επιφανειακά σώματα είναι εντός των ορίων που προτείνουν οι ΚΥΑ Υ2/2600/2001 (εύρος 6,5 – 9,5) για το πόσιμο νερό και η Οδηγία 2006/44/ΕΚ (εύρος 6-9) για τη διαβίωση των ιχθύων. Εντός των ορίων για το πόσιμο νερό βρίσκεται και η τιμή του pH για το δείγμα του υδρευτικού νερού από την πόλη του Λαγκαδά (Εικόνα 4.1.2.).



Εικόνα 4.1.2.: Τιμές pH για όλα τα δείγματα νερού που συλλέχθηκαν κατά τις περιόδους δειγματοληψίας Αυγούστου (υπόγεια νερά) και Δεκεμβρίου (επιφανειακά νερά) 2011 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας.

Οι τιμές της αγωγιμότητας του υπόγειου νερού των γεωτρήσεων στη λεκάνη απορροή της λίμνης Κορώνειας κυμαίνονται από 170 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (γεώτρηση Γ6) έως και 1530 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (γεώτρηση Γ5). Οι τιμές της αγωγιμότητας του ανάμεσα των δειγμάτων υπόγειου νερού (Γ1-Γ15) κυμαίνονται μέσα στο επιτρεπόμενο όριο (2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) που θέτει η ΚΥΑ 39626/2208/2009 για την προστασία της ποιότητας των υπόγειων υδάτων από τη ρύπανση

και την υποβάθμιση. Αναφορικά με τα δείγματα επιφανειακού νερού, η τιμή της αγωγιμότητας για τον ποταμό Μπογδάνα (365 μ S/cm) δεν ξεπερνά το όριο (2500 μ S/cm) της ΚΥΑ Υ2/2600/2001 για νερό ανθρώπινης κατανάλωσης. Όμοια, η τιμή της αγωγιμότητας για το υδρευτικό νερό της πόλης του Λαγκαδά (547 μ S/cm) βρίσκεται στις αποδεκτές τιμές της ΚΥΑ Υ2/2600/2001 για το πόσιμο νερό. Αντίθετα, η τιμή της αγωγιμότητας της λίμνης Κορώνειας (7186 μ S/cm) είναι περίπου τριπλάσια από το όριο που θέτει η ΚΥΑ Υ2/2600/2001 για το πόσιμο νερό, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στη μεγάλη συγκέντρωση χλωριούχων και διαλυμένων αλάτων στη λίμνη, παραγόντων που συνδέονται άμεσα με την αγωγιμότητα του επιφανειακού νερού.



Εικόνα 4.1.3.: Τιμές αγωγιμότητας (μS/cm) για όλα τα δείγματα νερού που συλλέχθηκαν κατά τις περιόδους δειγματοληψίας Αυγούστου (υπόγεια νερά) και Δεκεμβρίου (επιφανειακά νερά) 2011 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας.

Πίνακας 4.1.1.: Φυσικο-χημικές παράμετροι των δειγμάτων νερού.

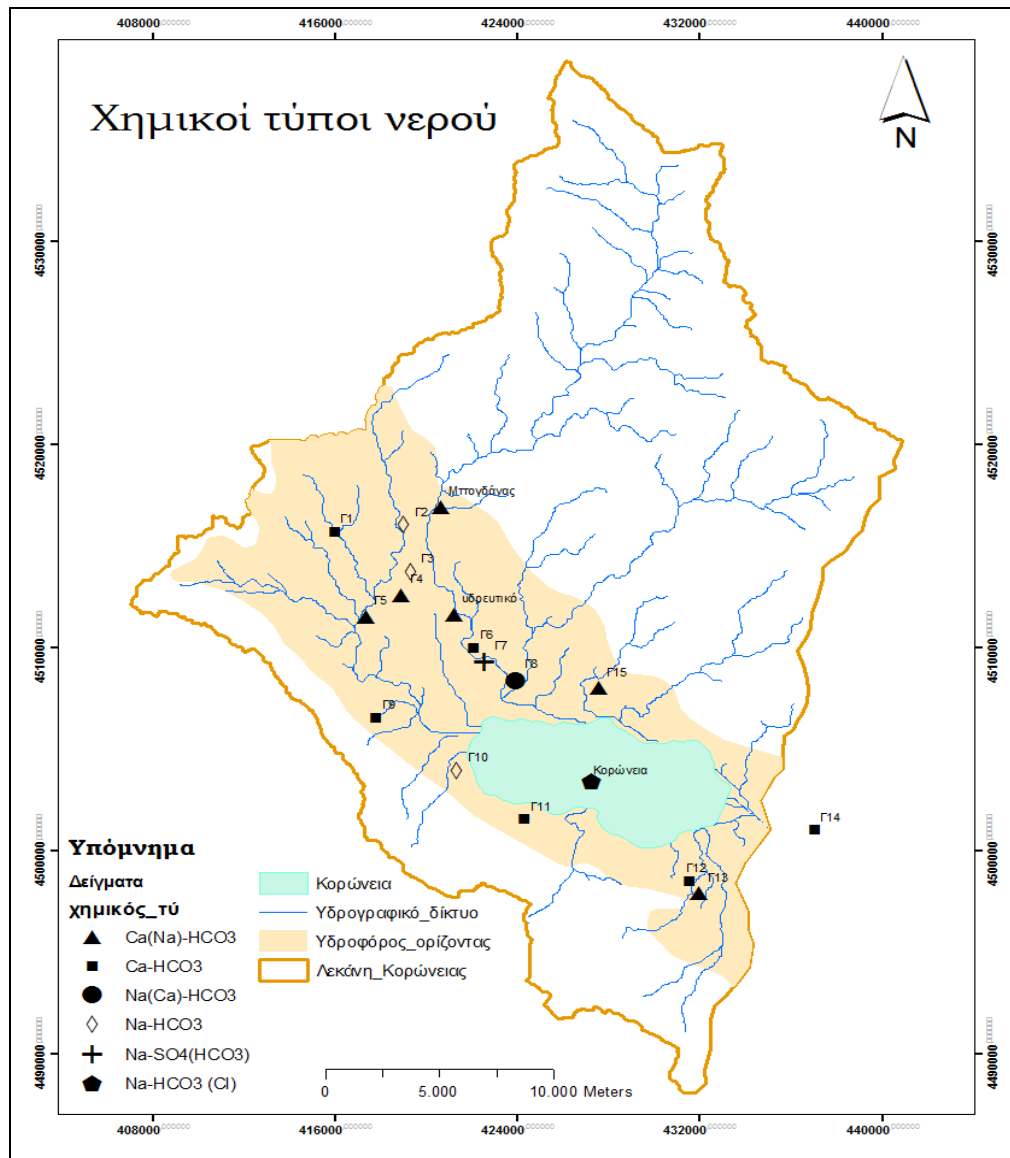
Table 4.1.1.: Physico-chemical parameters of the water samples.

Δείγμα H ₂ O	pH	t (°C)	Αγωγιμότητα (μS/cm)
Γ1	7,07	28,8	370
Γ2	7,92	24,4	350
Γ3	7,91	29,3	780
Γ4	7,31	30,5	820
Γ5	7,76	31,1	1530
Γ6	7,41	25,9	178
Γ7	7,49	35,4	1010
Γ8	8,07	29,8	680
Γ9	7,38	29,8	850
Γ10	8,03	26,3	980
Γ11	7,56	26,2	640
Γ12	7,4	22,8	810
Γ13	7,65	28,4	760
Γ14	8,16	23,5	610
Γ15	7,58	29,5	660
υδρευτικό	7,96	-	547
Μπογδάνας	8,44	17,0	365
Κορώνεια	8,81	18,5	7186

4.2 Χημική σύσταση του νερού της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων τα δείγματα του νερού που συλλέχθηκαν κατατάσσονται σε έξι (6) τύπους, που είναι οι εξής: Ca-HCO₃, Na-HCO₃, Ca(Na)-HCO₃, Na(Ca)-HCO₃, Na-SO₄(HCO₃) και Na-HCO₃(Cl). Τα νερά των γεωτρήσεων ανήκουν σε όλους τους τύπους, εκτός από τον Na-HCO₃(Cl). Το νερό της λίμνης Κορώνειας ανήκει στον τύπο Na-HCO₃(Cl), ενώ το νερό του ποταμού Μπογδάνα και το υδρευτικό νερό της πόλης του Λαγκαδά εμφανίζουν χημισμό Ca(Na)-HCO₃. Χημισμό Na-SO₄(HCO₃) παρουσιάζει το θερμό νερό των λουτρών Λαγκαδά. Στην **Εικόνα 4.2.1.** παρουσιάζονται οι

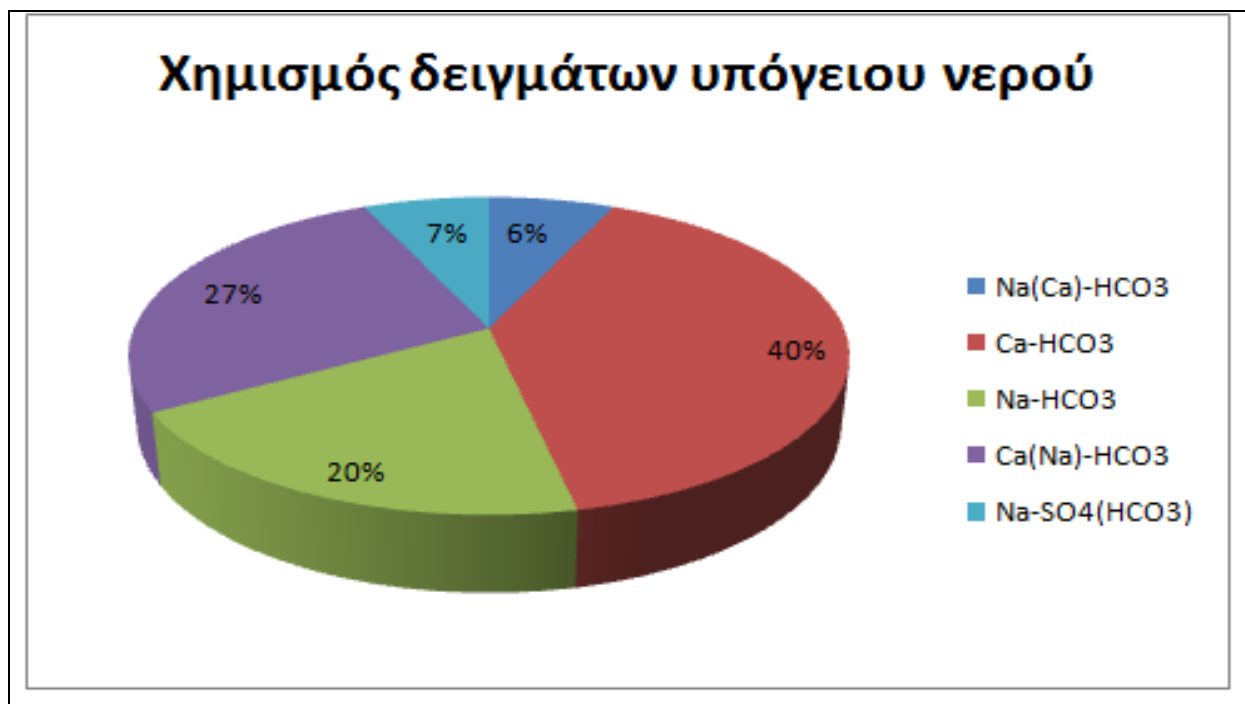
θέσεις συλλογής των δειγμάτων νερού, καθώς και ο χημισμός του νερού τους. Το σύνολο των χημικών αναλύσεων παρατίθεται στο Παράρτημα (Πίνακας 2).



Εικόνα 4.2.1.: Θέσεις δειγματοληψίας και χημικός τύπος νερού για τα δείγματα που συλλέχθηκαν τις περιόδους Αυγούστου (υπόγεια νερά) και Δεκεμβρίου (επιφανειακά νερά) 2011 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας.

Στο χημικό τύπο Ca-HCO₃ ανήκουν 6 δείγματα υπόγειου νερού (Γ1, Γ6, Γ9, Γ11, Γ12, Γ14). Το μεγαλύτερο ποσοστό (40%, **Εικόνα 4.2.2.**) των συλλεχθέντων δειγμάτων υπόγειου νερού εμφανίζουν χημισμό Ca-HCO₃. Σύμφωνα με τις χημικές αναλύσεις, για τα δείγματα αυτά η μέση τιμή της θερμοκρασίας ισούται με 26,2°C, η μέση τιμή του pH με 7,5 και η μέση τιμή του TDS με 299,46 mg/L. Το κατιοντικό φορτίο καλύπτει το Ca²⁺ με ποσοστό 59,1%, ενώ το ανιοντικό το HCO₃⁻ με ποσοστό 73,2%. Το αμέσως μεγαλύτερο ποσοστό (26,7%) των

συλλεχθέντων δειγμάτων υπόγειου νερού (Γ4, Γ5, Γ13 και Γ15) εμφανίζουν χημισμό Ca(Na)-HCO₃. Για τα δείγματα αυτά οι μέσες τιμές των παραμέτρων t(°C), pH και TDS ισούνται με 29,9°C, 7,6 και 391,5 mg/L αντίστοιχα. Το κατιοντικό φορτίο καλύπτουν αθροιστικά το Ca²⁺ και το Na⁺ σε ποσοστό 78,2% (43,3% το Ca²⁺ και 34,9% το Na⁺), ενώ το ανιοντικό φορτίο το HCO₃⁻ με ποσοστό 69,7%. Στα δείγματα αυτά συγκαταλέγονται το επιφανειακό νερό από τον ποταμό Μπογδάνα (41,7% Ca²⁺, 30,8% Na⁺ και 60,8% HCO₃⁻) και το υδρευτικό νερό της πόλης του Λαγκαδά (51% Ca²⁺, 24,4% Na⁺ και 57,4% HCO₃⁻).

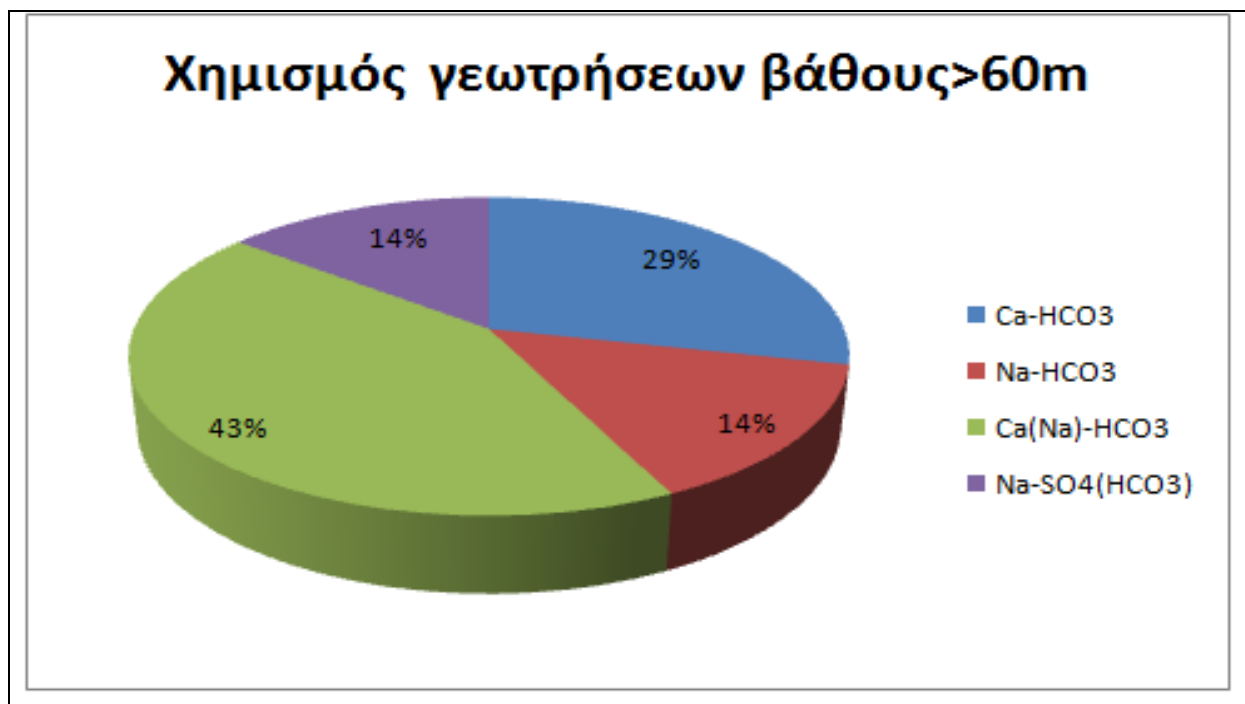


Εικόνα 4.2.2.: Ποσοστό εμφάνισης χημικών τύπων νερού στα δείγματα υπόγειου νερού που συλλέχθηκαν την περίοδο Αυγούστου 2011 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας.

Χημισμό Na-HCO₃ εμφανίζουν 3 δείγματα (Γ2, Γ3 και Γ10) νερού (ποσοστό 20%, **Εικόνα 4.2.2.**). Σύμφωνα με τις χημικές αναλύσεις η μέση θερμοκρασία των δειγμάτων ισούται με 26,7°C, η μέση τιμή του pH με 7,95 και η μέση τιμή του TDS με 368,52 mg/L. Το κατιοντικό φορτίο αντιπροσωπεύει το Na⁺ σε ποσοστό 58,7%, ενώ το ανιοντικό το HCO₃⁻ σε ποσοστό 64,7%. Στο χημικό τύπο αυτό μπορεί να ενταχθεί και το νερό της λίμνης Κορώνειας με χημισμό Na-HCO₃(Cl). Η διαφοροποίηση εντοπίζεται στη σύνθεση του ανιοντικού φορτίου, το οποίο καλύπτεται σε ποσοστό 37,6% από το HCO₃⁻ και σε ποσοστό 34,9% από το Cl⁻ (συνολικά 72,5%). Το κατιοντικό φορτίο αντιπροσωπεύει το Na⁺ με ποσοστό 78,9%. Τέλος, με ίδιο ποσοστό (6,7%) εμφανίζονται οι χημικοί τύποι Na(Ca)-HCO₃ (γεώτρηση Γ8) και Na-SO₄(HCO₃) (δείγμα θερμού νερού λουτρών Λαγκαδά, Γ7). Για το δείγμα του «κρύου»

νερού (Γ8) οι παράμετροι $t(^{\circ}\text{C})$, pH και TDS ισούνται με 29,8 $^{\circ}\text{C}$, 7,08 και 288,8 mg/L αντίστοιχα. Το κατιοντικό φορτίο αντιπροσωπεύουν τα Na^+ και Ca^{2+} σε ποσοστό 82,9% (43,1% το Na^+ και 39% το Ca^{2+}), ενώ το ανιοντικό φορτίο αντιπροσωπεύει το HCO_3^- σε ποσοστό 76,3%. Στο θερμό νερό (Γ7) μετρήθηκε η θερμοκρασία ίση με 35,4 $^{\circ}\text{C}$, το pH ίσο με 7,5, ενώ το TDS ισούται με 757,6 mg/L.

Από τα δείγματα υπόγειου νερού των βαθέων γεωτρήσεων απουσιάζει ο χημικός τύπος $\text{Na}(\text{Ca})\text{-HCO}_3$. Στις βαθιές γεωτρήσεις (Γ1, Γ4, Γ6, Γ7, Γ10, Γ13, Γ15) κυριαρχεί ο χημισμός $\text{Ca}(\text{Na})\text{-HCO}_3$ (Εικόνα 4.2.3.) με ποσοστό 43%. Για τις βαθιές γεωτρήσεις αυτές οι μέση τιμή pH, θερμοκρασίας ($t(^{\circ}\text{C})$) και TDS ισούται με 7,51, 29,5 $^{\circ}\text{C}$ και 304,5 mg/l αντίστοιχα. Το κατιοντικό φορτίο αντιπροσωπεύουν τα Ca^{2+} και Na^+ σε ποσοστό 79,9% (43,8% το Ca^{2+} και 36,1% το Na^+), ενώ το ανιοντικό φορτίο το HCO_3^- σε ποσοστό 74,1%. Με ποσοστό 29% εμφανίζεται ο χημικός τύπος $\text{Ca}\text{-HCO}_3$ στις βαθιές γεωτρήσεις Γ1 και Γ6. Τέλος, με ποσοστό 14% απατώνται οι χημικοί τύποι $\text{Ca}(\text{Na})\text{-HCO}_3$ και $\text{Na}\text{-SO}_4(\text{HCO}_3)$, αντιπροσωπεύοντας ένα δείγμα νερού ο καθένας (Γ4 και Γ7 αντίστοιχα).

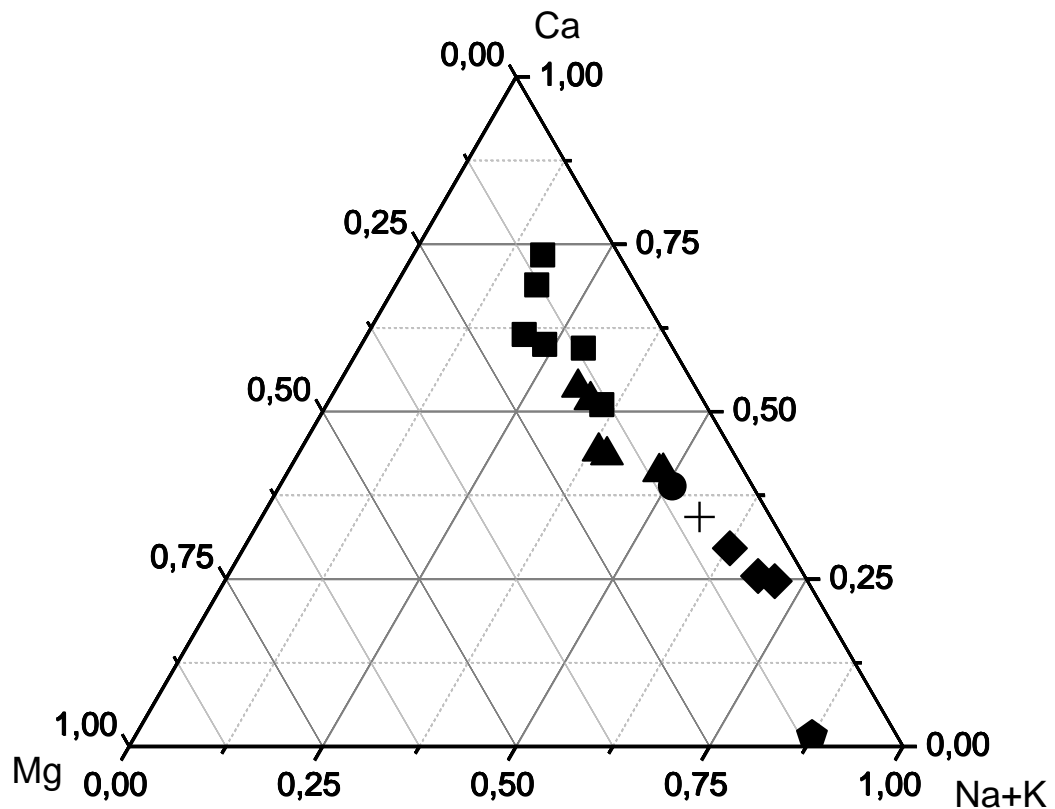


Εικόνα 4.2.3.: Ποσοστό εμφάνισης χημικών τύπων νερού στα δείγματα υπόγειου νερού βαθέων γεωτρήσεων ($d < 60\text{m}$) που συλλέχθηκαν την περίοδο Αυγούστου 2011 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας.

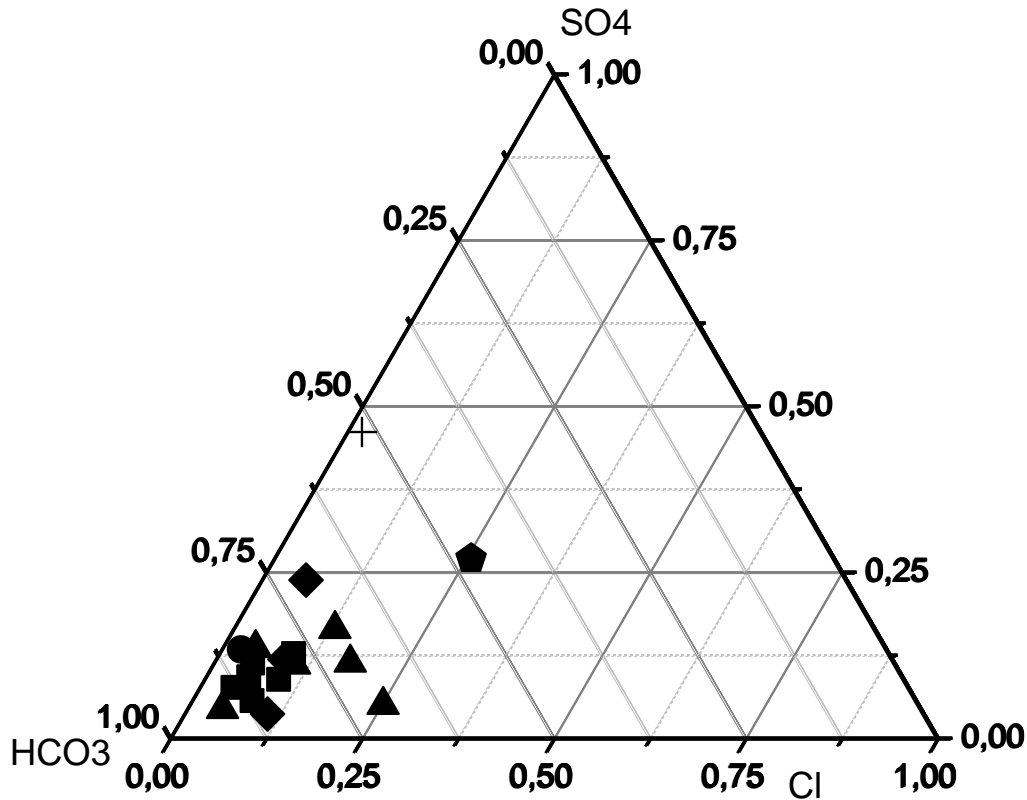
Στα τριγωνικά διαγράμματα ($\text{Na}+\text{K}\text{-Ca}\text{-Mg}$) και ($\text{Cl}\text{-SO}_4\text{-HCO}_3$) που ακολουθούν (Εικόνα 4.2.4.) παρουσιάζονται οι σχετικές αναλογίες μεταξύ των κύριων ιόντων. Σύμφωνα

με τα διαγράμματα στην περιοχή μελέτης κυριαρχούν τα νερά πλούσια σε αλκάλια (Na+K) και σε αλκαλικές γαίες (Ca^{2+}) και σε όξινα ανθρακικά (HCO_3^-). Η συγκέντρωση του Mg^{2+} και των χλωριόντων (Cl^-) και θεικών (SO_4^-) είναι περιορισμένη και επηρεάζει μικρό αριθμό δειγμάτων. Πράγματι, το μεγαλύτερο μέρος των δειγμάτων νερού «απλώνεται» ανάμεσα στους πόλους Na+K και Ca στο διάγραμμα των κατιόντων (Εικόνα 4.2.4.α). Στα παραπάνω, εξαίρεση αποτελεί το νερό της λίμνης Κορώνειας, που φαίνεται να επηρεάζεται μονομερώς από τα αλκάλια (Na+K). Αντίστοιχα, στο διάγραμμα των ανιόντων (Εικόνα 4.2.4.β) τα νερά «βρίσκονται» συγκεντρωμένα στον πόλο του HCO_3^- γεγονός που υποδηλώνει την απουσία αλληλεπίδρασης του νερού με τα περιβάλλοντα πετρώματα. Και σε αυτό το διάγραμμα, εξαίρεση αποτελεί το δείγμα νερού από τη λίμνη Κορώνεια, καθώς φαίνεται να επηρεάζεται περισσότερο από τη συγκέντρωση των χλωριόντων σε σχέση με τα υπόλοιπα δείγματα νερού, γεγονός που σχετίζεται με την έντονη εξάτμιση του νερού της λίμνης.

(α)



(β)



Εικόνα 4.2.4.: α) Τριγωνικό διάγραμμα Na+K-Ca-Mg για τα δείγματα νερού που συλλέχθηκαν κατά τις περιόδους Αυγούστου (υπόγεια νερά) και Δεκεμβρίου (επιφανειακά νερά) 2011 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας. **β)** Τριγωνικό διάγραμμα Cl-SO₄-HCO₃ για τα δείγματα νερού που συλλέχθηκαν κατά τις περιόδους Αυγούστου (υπόγεια νερά) και Δεκεμβρίου (επιφανειακά νερά) 2011 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας.

(* Τα σύμβολα των χημικών τύπων του νερού, όπως στο υπόμνημα της **Εικόνας 4.2.1.**)

4.3 Διεργασίες που διέπουν τη χημική σύσταση του νερού της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας

Στα διαγράμματα που παρατίθενται παρακάτω (**Εικόνα 5.1.1.1.**) συσχετίζονται για όλα τα δείγματα νερού οι ιοντικές συγκεντρώσεις των κατιόντων Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ με τη

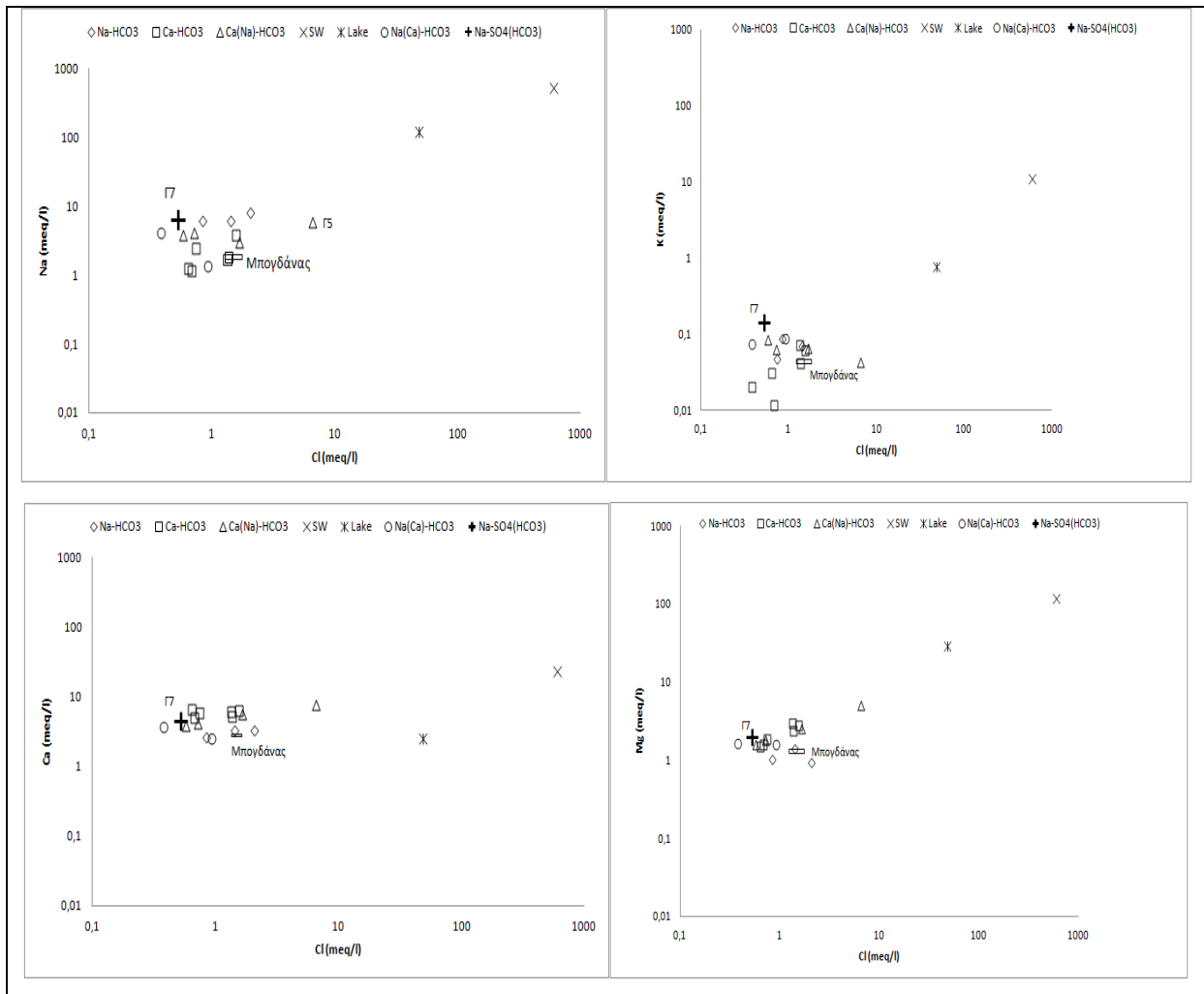
συγκέντρωση του Cl^- . Επιπλέον, συσχετίζονται οι ιοντικές συγκεντρώσεις Br^- και Cl^- (**Εικόνα 4.3.1.**) για το σύνολο των δειγμάτων. Τα ιδιαίτερα ευκίνητα ιόντα Br^- και Cl^- θεωρούνται ιόντα διατηρημένα (Fontes & Matray, 1993) δηλαδή δεν παίρνουν μέρος σε φαινόμενα διαγενετικά, ανταλλαγής με το περιβάλλον πέτρωμα ή οξειδοαναγωγής.

Οι χημικοί λόγοι των δειγμάτων του υπόγειου νερού (Γ1-Γ15) δεν παρουσιάζουν ομοιότητα με τους αντίστοιχους του νερού της θάλασσας. Η διαφοροποίηση αυτή της χημικής σύστασης του νερού των γεωτρήσεων σε σχέση με το θαλασσινό νερό αποτελεί ένδειξη μετεωρικής προέλευσης του νερού. Η πιθανότητα μετεωρικής προέλευσης του υπόγειου νερού ενισχύεται και από το λόγο Cl/Br , όπου φαίνεται η διαφοροποίηση του λόγου του υπόγειου νερού σε σχέση με τον αντίστοιχο του νερού της θάλασσας (**Εικόνα 4.3.2.**).

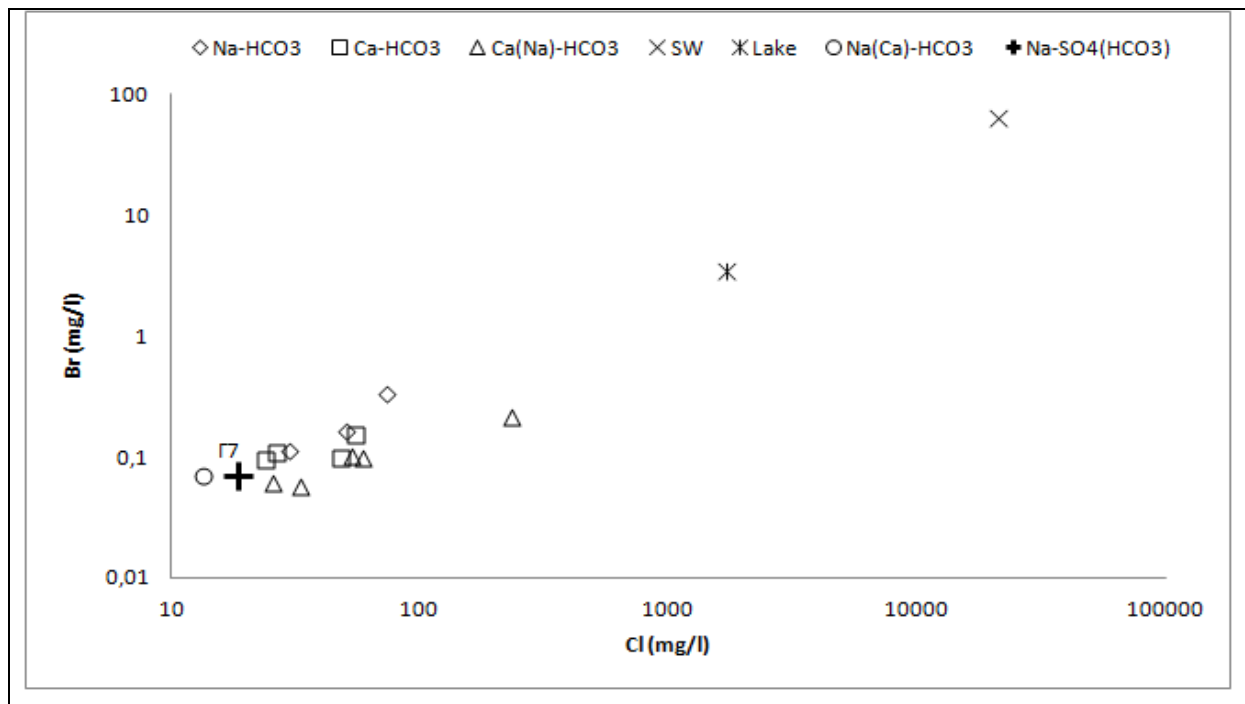
Ο χημισμός των δειγμάτων καταδεικνύει την ύπαρξη ενός ρηχού ασβεστολιθικού υδροφορέα (νερά με χημισμό Ca-HCO_3) και ενός αλκαλικού (νερά με χημισμό Na-HCO_3), σε μεγαλύτερο βάθος. Οι ενδιάμεσοι χημικοί τύποι νερού ($\text{Ca}(\text{Na})\text{-HCO}_3$ και $\text{Na}(\text{Ca})\text{-HCO}_3$) υποδεικνύουν την ανάμιξη και άμεση επικοινωνία των παραπάνω υδροφόρων στρωμάτων. Η ομοιότητα της χημικής σύστασης και των ιοντικών συγκεντρώσεων μεταξύ των δειγμάτων του υπόγειου νερού δηλώνει την άμεση επικοινωνία τους και τις διαδικασίες ανάμιξης που λαμβάνουν χώρα ανάμεσα στους δύο επάλληλους υδροφορείς της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας. Εξάιρεση δεν αποτελεί ούτε το θερμό νερό των λουτρών Λαγκαδά, του οποίου η χημική σύσταση είναι όμοια με τα δείγματα «κρύου» υπόγειου νερού. Συμπερασματικά, επιβεβαιώνεται (Myloroulos *et al.*, 2007) η παρουσία ενός ενιαίου υδροφόρου συστήματος που διακόπτεται κατά τόπους από την παρουσία αργίλων, χωρίς η παρεμβολή αυτή να επηρεάζει τις διαδικασίες ανάμιξης του υπόγειου νερού.

Αναφορικά με τα επιφανειακά νερά, οι ιοντικές συγκεντρώσεις του ποταμού Μπογδάνα δεν παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις σε σχέση με τις ιοντικές συγκεντρώσεις των γεωτρήσεων της ευρύτερης περιοχής, γεγονός που δείχνει επίσης τη μετεωρική προέλευση του νερού του ποταμού και την επικοινωνία του υπόγειου υδροφόρου με το ποτάμι.

Το νερό της λίμνης Κορώνειας είναι ιοντικά (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , Br^-) περισσότερο φορτισμένο σε σχέση με τα άλλα δείγματα νερού. Η διαφοροποίηση αυτή και η αυξημένη περιεκτικότητα του νερού της λίμνης σε χλωριόντα οφείλεται σε έντονα φαινόμενα εξάτμισης από την επιφάνεια της λίμνης.



Εικόνα 4.3.1.: Ιοντικές περιεκτικότητες (meq/l) Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} σε σχέση με τις περιεκτικότητες Cl^- (meq/l) για το σύνολο των δειγμάτων νερού που συλλέχθηκαν στις περιόδους Αυγούστου (υπόγεια νερά) και Δεκεμβρίου (επιφανειακά νερά) 2011 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας. Με ξεχωριστό σύμβολο απεικονίζονται η γεώτρηση Γ7 (θερμό νερό Λαγκαδά) και το δείγμα επιφανειακού νερού από τον ποταμό Μπογδάνα.

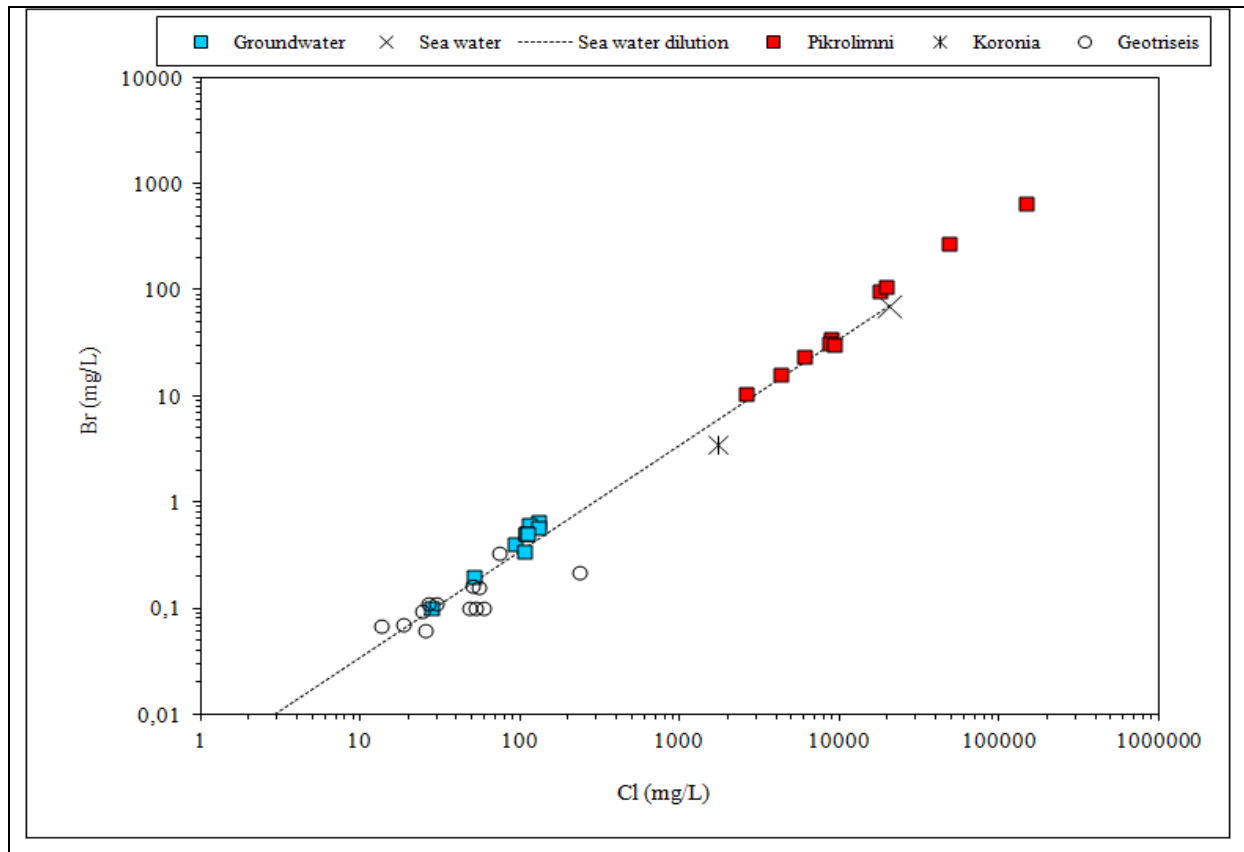


Εικόνα 4.3.2: Ιοντικός λόγος Cl/Br (mg/l) για το σύνολο των δειγμάτων του νερού που συλλέχθηκαν κατά τις περιόδους Αυγούστου (υπόγεια νερά) και Δεκεμβρίου (επιφανειακά νερά) 2011 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας.

Για να διερευνηθεί η απουσία ανάμειξης θαλάσσιου νερού στο νερό της λίμνης Κορώνειας, επιχειρείται η σύγκριση της με τη γειτονική της Πικρολίμνη. Η λίμνη Πικρολίμνη βρίσκεται στη λεκάνη της πεδιάδας του Κιλκίς σε ένα τεκτονικό βύθισμα που εκτείνεται προς τα δυτικά μέχρι το Θερμαϊκό κόλπο. Πρόκειται για μία ρηχή (βάθος~0,5m) λίμνη που συνήθως ξεραίνεται κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Χαρακτηρίζεται σαν αλμυρή λίμνη με αλκαλική απόθεση αλάτων, τα οποία και εξορύσσονταν ήδη από την αρχαιότητα (Dotsika et al., 2012). Η ισοτοπική περιεκτικότητα νερών της ευρύτερης περιοχής φανερώνει τη μετεωρική τους προέλευση. Εντούτοις, ο λόγος Cl/Br τόσο για το νερό της λίμνης, όσο και για το υπόγειο νερό της περιοχής καταδεικνύουν τη συμμετοχή θαλάσσιων στοιχείων στη σύσταση τους (**Εικόνα 4.3.3**). Η αρχική συμμετοχή των στοιχείων αυτών θεωρείται αμελητέα, αλλά η συγκέντρωσή τους κατά το πέρασμα του χρόνου, σε συνδυασμό με την έντονη εξάτμιση, δρουν αθροιστικά για την περιεκτικότητα του νερού στα στοιχεία αυτά.

Σχετικά με την προέλευση του νερού του υδροτοπικού συστήματος της Κορώνειας, η χρήση της υδροχημείας θα δώσει ενδείξεις, ενώ σε παρακάτω κεφάλαιο γίνεται ερμηνεία σύμφωνα με τη ισοτοπική περιεκτικότητα των δειγμάτων νερού.

Οι λόγοι Cl/Br που προσδιορίστηκαν για το σύνολο των δειγμάτων νερού δίνονται στο Παράρτημα (Πίνακας 1). Ορισμένα δείγματα υπόγειου νερού (Γ2, Γ3, Γ7, Γ9, Γ11) παρουσιάζουν τιμή στο λόγο Cl/Br όμοιο με τον αντίστοιχο του νερού της θάλασσας (~290). Πρόκειται για ρηχές γεωτρήσεις που ο χημισμός τους δείχνει τη μετεωρική προέλευση του νερού τους. Λιγότερα δείγματα υπόγειου νερού (Γ8, Γ10, Γ13) παρουσιάζουν λόγο χαμηλότερο από 290. Τα υπόλοιπα δείγματα (Γ1, Γ4, Γ5, Γ6, Μπογδάνας, Κορώνεια) ο λόγος Cl/Br είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο του νερού της θάλασσας (~290). Οι τιμές για τα δείγματα αυτά είναι αμφίσημες και θα μπορούσαν να συνδέονται με την ανάμιξη του νερού με στερεά άλατα πλούσια σε χλώριο. Επίσης, θα μπορούσε να αποδοθεί η διαφοροποίηση αυτή των τιμών στο αναλυτικό λάθος κατά τον προσδιορισμό των στοιχείων στο εργαστήριο.



Εικόνα 4.3.3.: Απεικόνιση και σύγκριση δειγμάτων υπόγειου και επιφανειακού νερού από τις λεκάνες της λίμνης Κορώνειας και της Πικρολίμνης. (δείγματα και δεδομένα Πικρολίμνης από Dotsika *et al.*, 2012).

Σύμφωνα με το διάγραμμα (Εικόνα 4.3.3.) σύγκρισης των νερών της ευρύτερης περιοχής της Πικρολίμνης με εκείνα της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας, φαίνεται να παρουσιάζουν ομοιότητες. Πιο αναλυτικά, τα υπόγεια νερά των δύο λεκανών «βρίσκονται»

στην ίδια περιοχή, που δηλώνει μετεωρική προέλευση του νερού. Η Κορώνεια «προβάλλεται» στην ίδια γραμμή εξάτμισης τόσο με τα δείγματα του υπόγειου νερού της λεκάνης απορροής της, όσο και με την Πικρολίμνη. Η τοποθέτηση αυτή των δειγμάτων δείχνει τα κοινά τους χαρακτηριστικά, αλλά και τη συμμετοχή διαλυμένων στοιχείων θαλάσσιου νερού στο νερό του υδροτοπικού συστήματος της Κορώνειας, με τη μορφή αερομεταφερόμενων αλάτων (θαλάσσιο αεροσόλ - marine aerosols).

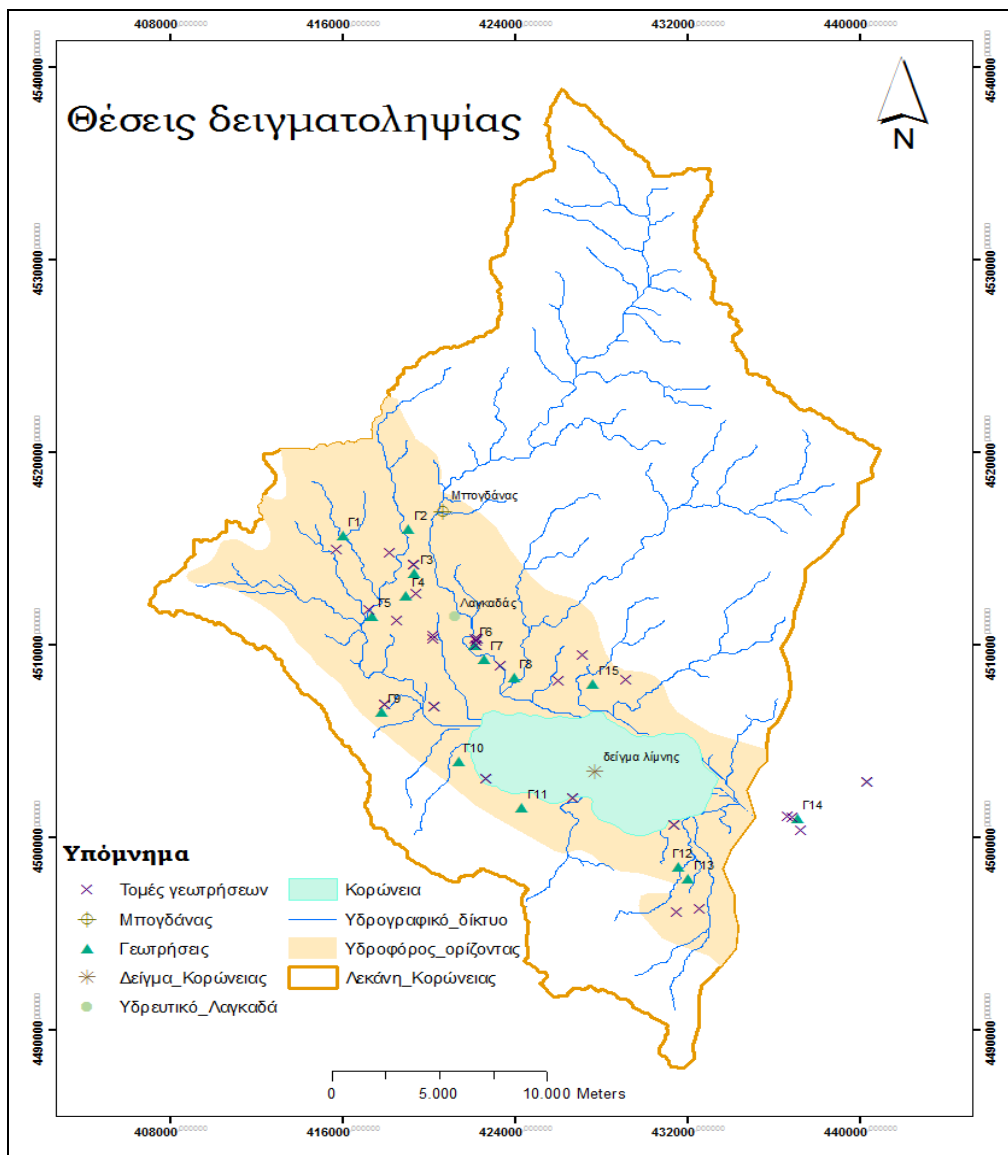
4.4 Συσχέτιση χημικών τύπων νερού και λιθολογίας της περιοχής μελέτης

Οι ιοντικές συγκεντρώσεις του υπόγειου νερού των γεωτρήσεων δείχνουν ότι πρόκειται για διαλύματα χημικά φορτισμένα σε σχέση με το μετεωρικό νερό, που αποτελεί σύμφωνα με τα αποτελέσματα της υδροχημείας, την πηγή προέλευσης του. Το χημικό φορτίο του υπόγειου νερού αποδίδεται στην κίνηση του μέσα στους γεωλογικούς σχηματισμούς που απαρτίζουν τη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας και στις διεργασίες ανταλλαγής νερού-πετρώματος που λαμβάνουν χώρα. Η αυξημένη διαλυτική ικανότητα του μετεωρικού νερού αποδίδεται στο περιεχόμενο διοξείδιο του άνθρακα (CO_2).

Ο διαφορετικός χημισμός του νερού των γεωτρήσεων μελετήθηκε σε συνδυασμό με τη γεωλογία της περιοχής και τους σχηματισμούς που διατρύει η κάθε γεώτρηση, σύμφωνα με τις λιθολογικές τομές που αξιολογήθηκαν (**Πίνακας 4.4.1**). Σημειώνεται ότι για την πληρέστερη και πιο ακριβή μελέτη των σχηματισμών που διατρύονται για κάθε θέση δειγματοληψίας αξιολογήθηκαν στρωματογραφικές στήλες (προγενέστερες μελέτες ΙΓΜΕ, BRGM) σε μικρή ακτίνα από τις θέσεις δειγματοληψίας (**Εικόνα 4.4.1**).

Οι χημικοί τύποι του νερού με βάση τα ανιόντα θα μπορούσαν να διαχωριστούν σε τρεις ομάδες: HCO_3^- , SO_4^{2-} και Cl^- . Στην ομάδα HCO_3^- ανήκουν τα νερά με χημικό τύπο Ca-HCO_3 , Na-HCO_3 , Ca (Na)-HCO_3 και Na(Ca)-HCO_3 , στην ομάδα SO_4^{2-} το γεωθερμικό νερό των λουτρών Λαγκαδά (Γ7), ενώ στην ομάδα του Cl^- το νερό της λίμνης Κορώνειας.

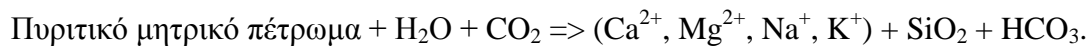
Η επικράτηση του Ca^{2+} μαζί με τα HCO_3^- και οι χαμηλές περιεκτικότητες σε αλκάλια χαρακτηρίζουν κυρίως επιφανειακά νερά που κυκλοφορούν σε ανθρακικά πετρώματα και σε μικρό βάθος. Στην περιοχή μελέτης κυριαρχούν οι μικτές λιμναίες φάσεις, ενώ παρεμβάλλονται και χερσαίες φάσεις αργίλων με ασβεστιτικά συγκρίματα. Τα ανθρακικά πετρώματα εμφανίζονται κυρίως στο νότιο τμήμα της λεκάνης. Οι διακυμάνσεις που παρουσιάζουν οι τιμές συγκέντρωσης του Ca^{2+} στα δείγματα υπόγειου νερού πιθανόν να οφείλονται στη διαφορετική υδροπερατότητα του μέσου (ψαμμίτες, ασβεστολιθικές κροκάλες), που καθορίζει το χρόνο παραμονής του νερού στο σχηματισμό και έμμεσα το βαθμός διάλυσης αυτού.



Εικόνα 4.4.1.: Θέσεις δειγματοληψίας και στρωματογραφικές τομές που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των διατρητικών στηλών των γεωτρήσεων στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας.

Όπως φαίνεται και από τις λιθολογικές στρωματογραφικές στήλες των γεωτρήσεων (**Πίνακας 4.4.1.**) τα δείγματα υπόγειου νερού πάρθηκαν από γεωτρήσεις που διατρέχουν τις λιμναίες αυτές φάσεις, οι οποίες έχουν πυριτικό χαρακτήρα. Παρόλο που η γεωλογική σύνθεση της λεκάνης θα συντελούσε σε μεγάλες συγκεντρώσεις του νερού σε αλκάλια (Na, K), εντούτοις, κυριαρχούν οι μικτοί τύποι νερού (Ca(Na)-HCO₃ και Na(Ca)-HCO₃), καθώς και τύποι με Ca²⁺. Η μεγάλη συγκέντρωση Ca²⁺ στο νερό οφείλεται στη διάλυση των ανθρακικών σχηματισμών που διατρέχει, γιατί το φαινόμενο της χημικής ανταλλαγής νερού-πετρώματος για τους πυριτικούς σχηματισμούς (άργιλοι, μάργες) ευνοείται σε συνθήκες μεγαλύτερου βάθους (υψηλότερες πιέσεις και θερμοκρασίες).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η επικράτηση του Ca^{2+} στο χημισμό του υπόγειου νερού της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας μπορεί να αποδοθεί στη γρήγορη κυκλοφορία του νερού που συντελείται κατά κύριο λόγο σε μικρά βάθη. Το υπόγειο νερό αντλείται με εντατικούς ρυθμούς με αποτέλεσμα να επιστρέφει στην επιφάνεια ύστερα από σύντομη παραμονή στο υδροφόρο στρώμα. Η γρήγορη αυτή ανανέωση του νερού δεν επιτρέπει σημαντική αλληλεπίδραση νερού-πετρώματος, σύμφωνα με την εξίσωση:



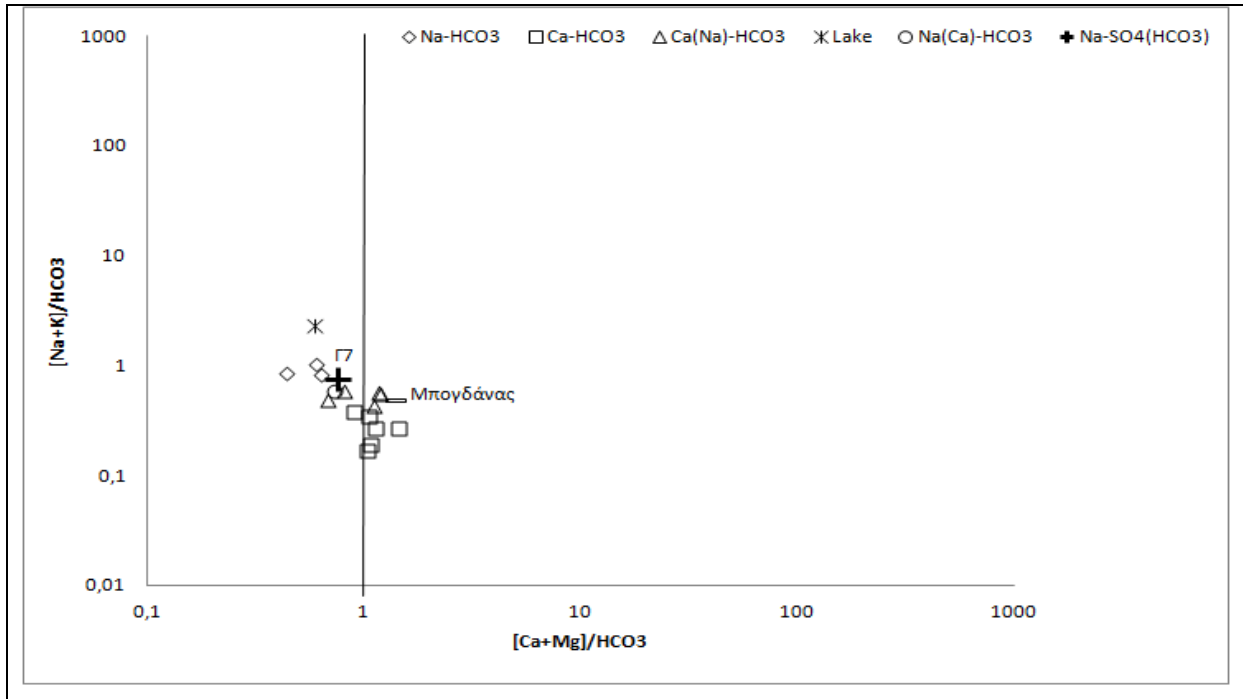
Ο πυριτικός χαρακτήρας του υπόγειου νερού που απαντάται σε ορισμένες γεωτρήσεις (Γ2, Γ3, Γ10) συνδέεται με την παρουσία πυριτικών πετρωμάτων στις διατρητικές τους στήλες. Τέλος, η επικράτηση των μικτών τύπων ($\text{Ca}(\text{Na})\text{-HCO}_3$ και $\text{Na}(\text{Ca})\text{-HCO}_3$) νερού υποδηλώνει φαινόμενα ανάμιξης των διαφορετικών τύπων νερού και την παρουσία ενός ενιαίου υδροφόρου συστήματος στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας.

Πίνακας 4.4.1.: Χημικός τύπος του νερού και γεωλογικό υπόβαθρο για τα δείγματα υπόγειου νερού από τη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας.

Table 4.4.1.: Chemical water type and geological bedrock for the groundwater samples of the Koronia lake catchment.

Δείγμα H₂O	Χημικός τύπος H₂O	Γεωλογικό υπόβαθρο
Γ1	Ca-HCO ₃	άργιλος, άμμος, ψηφίδες, ανθρακικό υπόβαθρο
Γ2	Na-HCO ₃	άργιλος, άμμος, ψηφίδες
Γ3	Na-HCO ₃	χαλίκια, καστανή & ερυθρή άργιλος
Γ4	Ca(Na)-HCO ₃	άργιλος, άμμος, χαλίκια
Γ5	Ca(Na)-HCO ₃	μικτές αργιλικές φάσεις με άμμο, χαλίκια, σχιστόλιθος
Γ6	Ca-HCO ₃	μικτές αργιλικές φάσεις, κροκάλες, άμμοι σε στρώσεις, ανθρακικό υπόβαθρο
Γ7	Na-SO ₄ (HCO ₃)	μικτές αργιλικές φάσεις, ψηφίδες, άμμος
Γ8	Na(Ca)-HCO ₃	μικτές αργιλικές φάσεις, ψηφίδες, άμμος
Γ9	Ca-HCO ₃	άργιλος, ψηφίδες, άμμος
Γ10	Na-HCO ₃	άργιλος καστανή & πράσινη, χαλίκια
Γ11	Ca-HCO ₃	άργιλος, χαλίκια
Γ12	Ca-HCO ₃	άργιλος, χαλίκια, σχιστόλιθος
Γ13	Ca (Na)-HCO ₃	άργιλος, άμμος, σχιστόλιθος
Γ14	Ca-HCO ₃	άργιλος καστανή & πράσινη, χαλίκια
Γ15	Ca (Na)-HCO ₃	άμμος, χαλίκια, καστανή άργιλος, γνεύσιος

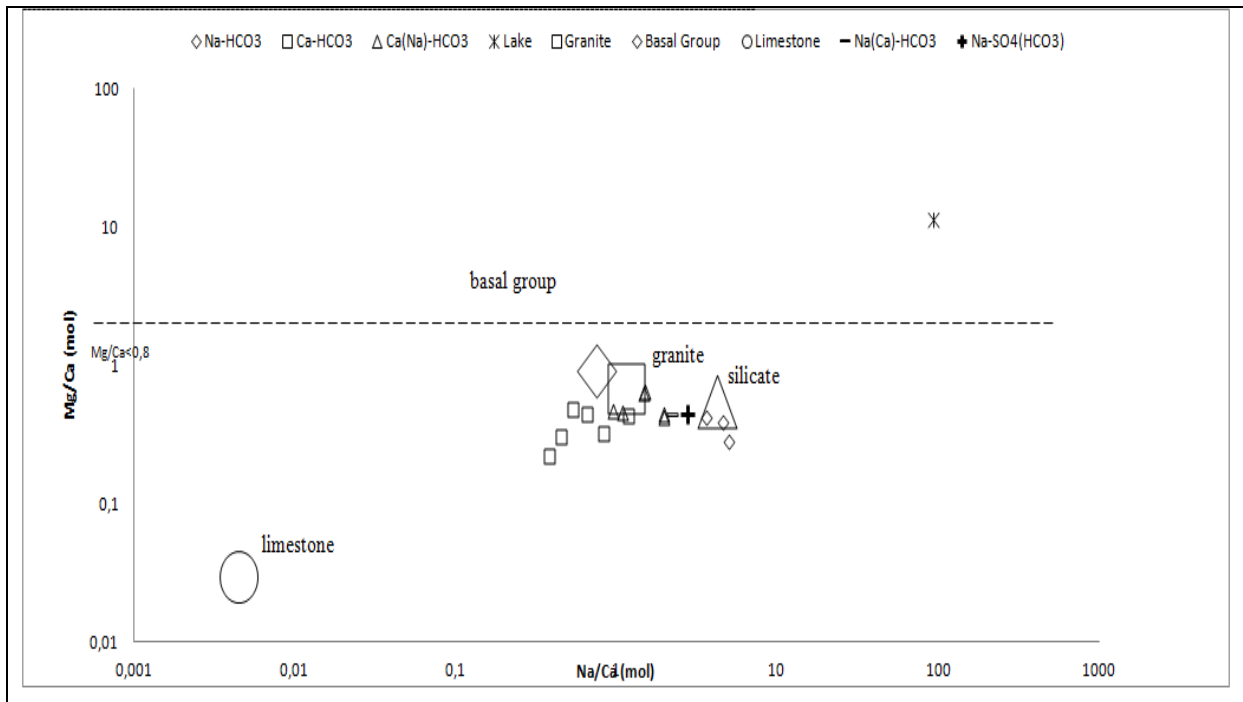
Για να διερευνηθεί όντως η συμμετοχή των πυριτικών πετρωμάτων στο χημισμό των νερών αυτών χρησιμοποιήθηκε το διάγραμμα σύγκρισης των λόγων $[Na+K]/HCO_3$ και $[Mg+Ca]/HCO_3$ (Εικόνα 4.4.2.). Η γραμμή στο διάγραμμα υποδεικνύει τη διάλυση των ανθρακικών ορυκτών.



Εικόνα 4.4.2.: Συσχέτιση $[Na+K]/HCO_3$ και $[Mg+Ca]/HCO_3$ για τα όλα τα δείγματα νερού που συλλέχθηκαν τις περιόδους Αυγούστου (υπόγεια νερά) και Δεκεμβρίου (επιφανειακά νερά) 2011 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας.

Ερμηνεύοντας το διάγραμμα (Εικόνα 4.4.2.) είναι φανερό ότι το νερό της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας επηρεάζεται από την παρουσία ανθρακικών αλλά και πυριτικών πετρωμάτων. Ο τύπος του νερού των δειγμάτων καταδεικνύει και το είδος του πετρώματος με το οποίο έρχονται σε επαφή και αλληλεπιδρούν κατά την κίνηση τους. Τα περισσότερα από τα δειγματοληφθέντα νερά τοποθετούνται γύρω από την γραμμή ($[Mg+Ca]/HCO_3 = 1$) δείχνοντας ότι η διάλυση των ανθρακικών συνησφέρει στο χημισμό του νερού τύπου $Ca-HCO_3$. Επίσης η θέση των δειγμάτων πάνω από το σημείο τομής των 2 γραμμών $\{[Mg+Ca]/HCO_3 = 1$ και $[Na+K]/HCO_3 = 0,01\}$ δείχνει ότι η αλλοίωση των πυριτικών ορυκτών επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό (νερά τύπου $Na-HCO_3$ και $Na(Ca)-HCO_3$) τη χημεία των νερών. Τα δείγματα του νερού θα «τοποθετούνταν» στην ευθεία $[Mg+Ca]/HCO_3 = 1$ στην περίπτωση που δε λάμβανε χώρα η επίδραση αυτή των πυριτικών ορυκτών στο χημισμό του νερού.

Με σκοπό την σύνδεση των νερών με πυριτικά και ανθρακικά πετρώματα χρησιμοποιήθηκε το διάγραμμα $[Na/Ca]$ σε σχέση με $[Mg/Ca]$ (Εικόνα 4.4.3.).

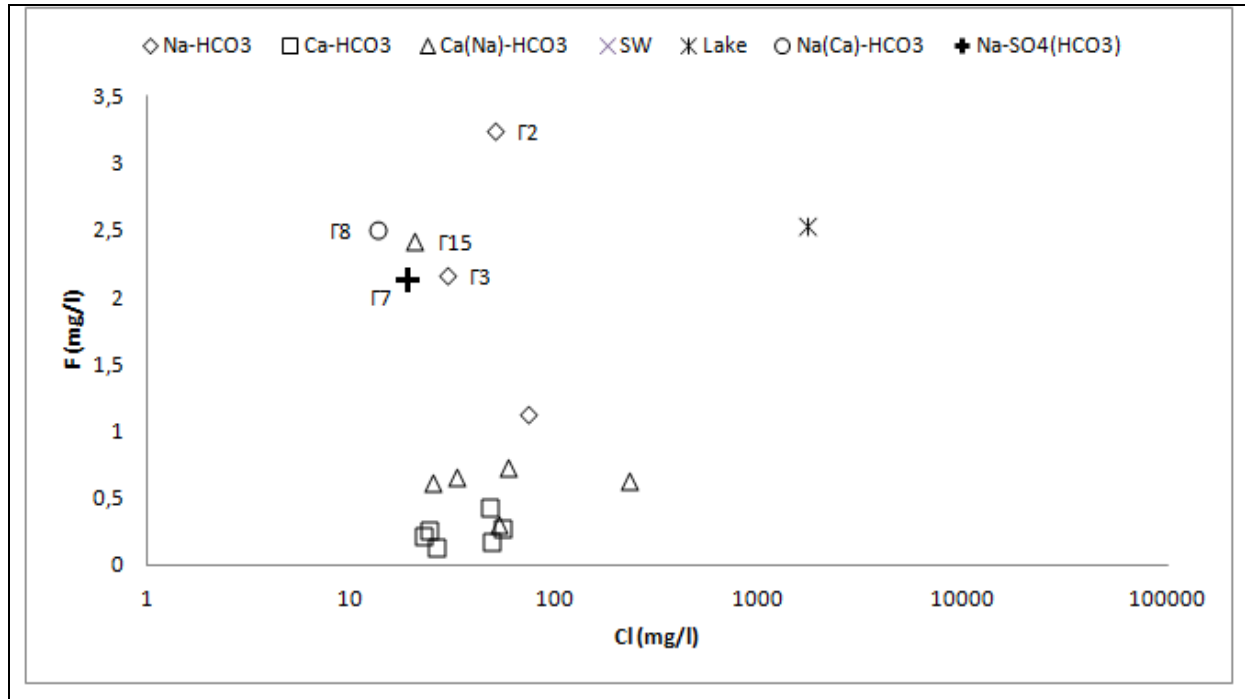


Εικόνα 4.4.3.: Σχέση $[Na/Ca]$ και $[Mg/Ca]$ εκφρασμένη σε mol για όλα τα δείγματα νερού που συλλέχθηκαν τις περιόδους Αυγούστου (υπόγεια νερά) και Δεκεμβρίου (επιφανειακά νερά) 2011 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας.

Τα νερά με τύπους $Na-HCO_3$ και $Na(Ca)-HCO_3$ δείχνουν έναν εμπλουτισμό στους λόγους Na/Ca και Mg/Ca επιβεβαιώνοντας την επαφή των νερών αυτών με πυριτικά ορυκτά. Εξάλλου, σύμφωνα με το διάγραμμα οι ιοντικοί λόγοι για τα νερά αυτά είναι όμοιοι με εκείνους των αργίλων. Τα νερά με χημισμό $Ca-HCO_3$ και $Ca(Na)-HCO_3$ τοποθετούνται κάτω από τη γραμμή $Mg/Ca=1,0$ υποδεικνύοντας την ισορροπία τους συγχρόνως ανάμεσα στις φάσεις του δολομίτη και του ασβεστίτη. Πράγματι, όταν το νερό σε θερμοκρασία δωματίου ισορροπείται με τον ασβεστίτη και τον δολομίτη δίνει ένα λόγο $Mg/Ca < 0,8$.

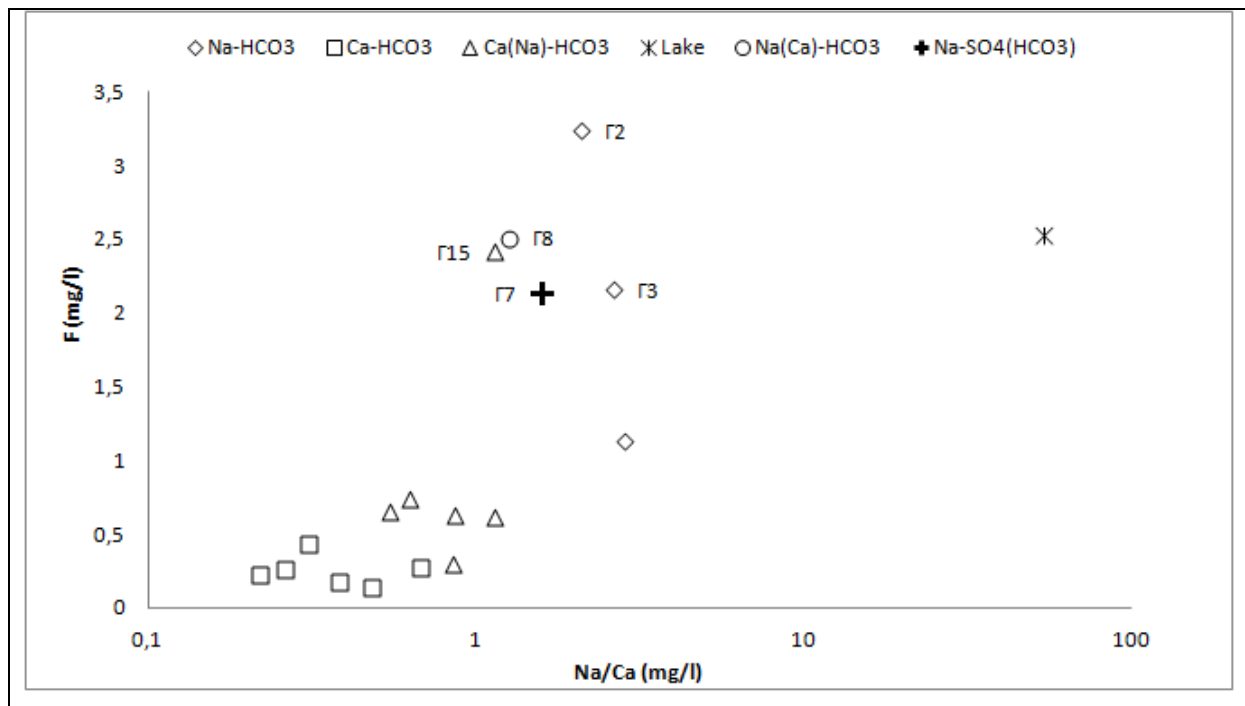
Τέλος, για να επιβεβαιωθεί η σύνδεση του χημισμού των υπόγειων νερών της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας με τους πυριτικούς σχηματισμούς που την απαρτίζουν και την αλληλεπίδρασή τους με το νερό, χρησιμοποιήθηκε η συσχέτιση του F με το ιόν του Cl^- (Εικόνα 4.4.4.) καθώς και με τον ιοντικό λόγο Na/Ca (Εικόνα 4.4.5.). Οι υψηλές περιεκτικότητες φθορίου στα υπόγεια νερά συνδέονται με την παρουσία αστριάων άμμων και σχιστόλιθων, την αποσάθρωση πυριτικών ορυκτών, τη διάλυση των αστριάων και με χημισμό νερού $Na-HCO_3$ και $Na(Ca)-HCO_3$ (Beg, 2009).

Σύμφωνα με τα διαγράμματα η αυξημένη συγκέντρωση του φθορίου συνδέεται στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας με τους χημικούς τύπους που περιέχουν νάτριο (Na-HCO_3 , Na(Ca)-HCO_3 , $\text{Na(SO}_4\text{)-HCO}_3$ και Ca(Na)-HCO_3).



Εικόνα 4.4.4.: Συσχέτιση F^- (mg/l) και Cl^- (mg/l) για το σύνολο των δειγμάτων νερού που συλλέχθηκαν κατά τον Αύγουστο (υπόγεια νερά) και το Δεκέμβριο (επιφανειακά νερά) 2011 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας.

Επιπλέον, η παρουσία F^- σχετίζεται με τους άστριους των γρανιτικών και γρανοδιοριτικών υλικών αποσάθρωσης που απαρτίζουν το σύνολο της λεκάνης, ενώ παρατηρείται ότι τα δείγματα του υπόγειου νερού «τοποθετούνται» σε παρόμοια διάταξη όπως σε προηγούμενη συσχέτιση ιοντικών λόγων (Εικόνα 5.1.2.3.), επιβεβαιώνοντας την άμεση συσχέτισή τους με την παρουσία πυριτικών ορυκτών. Τέλος, φαίνεται ότι η χημική σύσταση του νερού της λίμνης Κορώνειας εμφανίζει όμοια χαρακτηριστικά και σχετίζεται με τα υπόγεια νερά της λεκάνης. Η διαφοροποίηση της «τοποθέτησής» του στο διάγραμμα οφείλεται στην έντονη εξάτμιση που υφίσταται, αφού εκεί αποδίδεται η μεγάλη περιεκτικότητα του σε ιόντα Cl^- .



Εικόνα 4.4.5.: Συσχέτιση F^- (mg/l) και ιοντικού λόγου Na/Ca (mg/l) για το σύνολο των δειγμάτων νερού που συλλέχθηκαν κατά τον Αύγουστο (υπόγεια νερά) και το Δεκέμβριο (επιφανειακά νερά) 2011 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας.

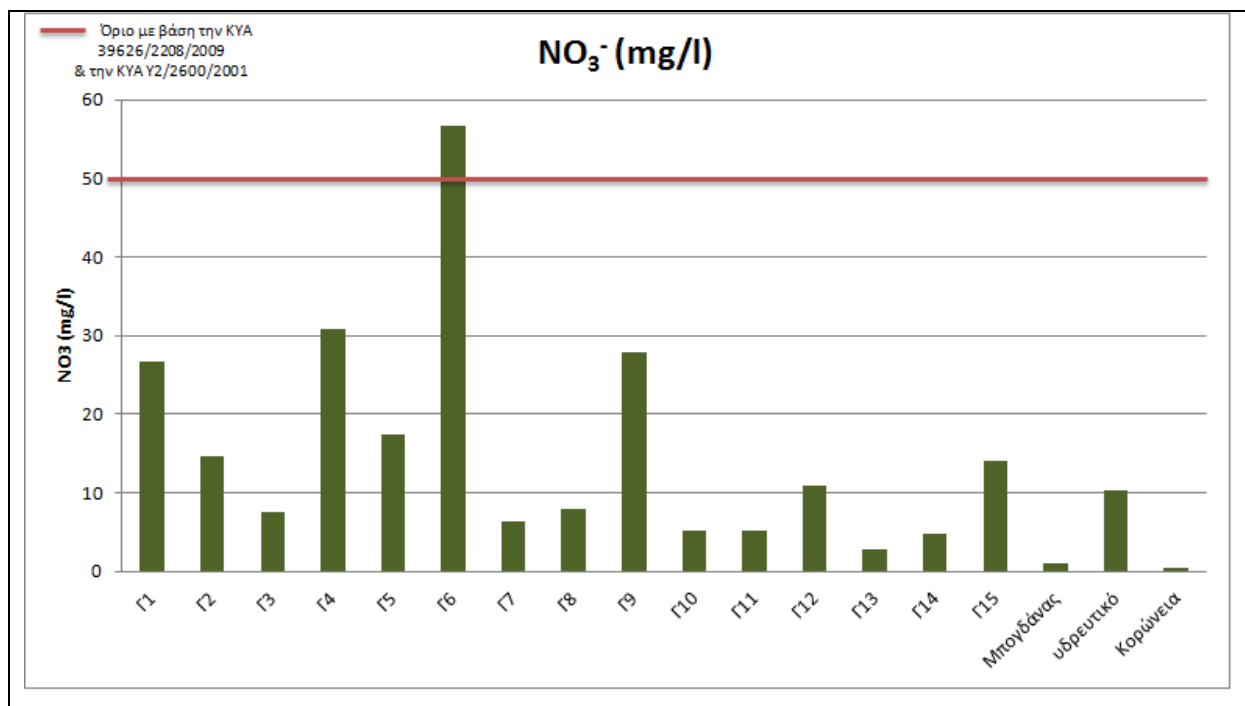
4.5. Επιβάρυνση και ρύπανση του νερού της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας

Σύμφωνα με το Corine Land Cover (CLC 2000) το 52% της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας καλύπτεται από αγροτικές εκτάσεις. Επιπλέον, βιομηχανικές και κτηνοτροφικές μονάδες λειτουργούν στην περιοχή, ενώ οικιστικές ζώνες αναπτύσσονται σε όλη την έκταση της. Στις ηπειρωτικές περιοχές, όπου η επίδραση του θαλασσινού νερού έχει αποκλειστεί, η προέλευση θρεπτικών αλάτων (όπως NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-}) προέρχονται από γεωργικά λιπάσματα, ζωικά απόβλητα και αστικά και βιομηχανικά λύματα.

Για να διερευνηθεί η επίπτωση των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στη χημική σύσταση των δειγμάτων που συλλέχθηκαν κατά τον Αύγουστο (υπόγεια νερά) και το Δεκέμβριο (επιφανειακά νερά) του 2011 στην περιοχή μελέτης, συγκρίθηκαν οι προβλεπόμενες περιεκτικότητες σε θρεπτικά άλατα και κύρια ιόντα όπως αυτές ορίζονται από τη νομοθεσία για το πόσιμο νερό και την προστασία του υπόγειου νερού από τη ρύπανση και την υποβάθμιση.

Οι τιμές των θρεπτικών αλάτων και των κύριων ιόντων που προσδιορίστηκαν στο εργαστήριο παρατίθενται στο Παράρτημα (Πίνακας 1 & Πίνακας 2).

Οι τιμές της συγκέντρωσης των νιτρικών αλάτων (NO_3^- , mg/l, **Εικόνα 4.5.1.**) για τα δείγματα νερού από τη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας κυμαίνονται από 0,36 (Κορώνεια) έως 56,8 mg/l (Γ6). Όλες οι τιμές που καταγράφηκαν δεν ξεπερνούν το όριο (50 mg/l) που θέτουν οι ΚΥΑ Υ2/2600/2001 για το πόσιμο νερό και η ΚΥΑ 39626/2208/2009 για την προστασία των υπόγειων υδάτων από τη ρύπανση και την υποβάθμιση. Εξαιρέση αποτελεί το δείγμα υπόγειου νερού από τη γεώτρηση Γ6, που ξεπερνά το παραπάνω όριο, γεγονός που συνδέεται με τη λειτουργία του παρακείμενου δασικού φυτώριου.

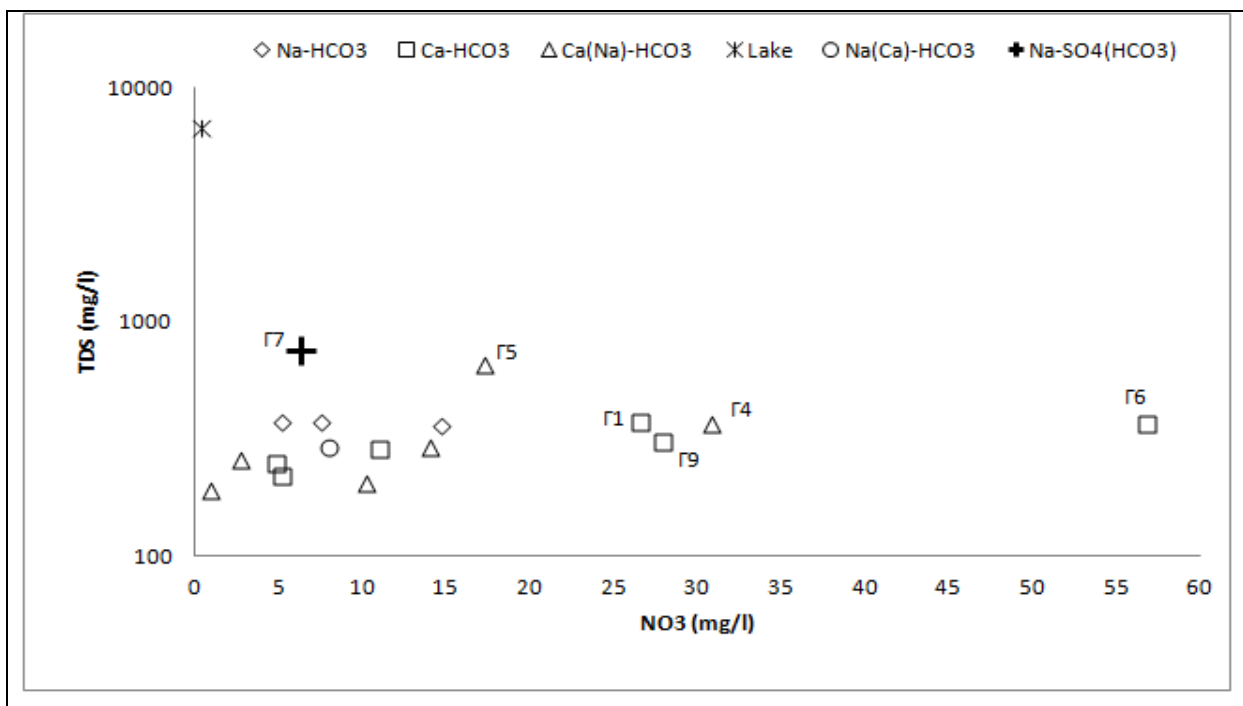


Εικόνα 4.5.1.: Συγκέντρωση νιτρικών αλάτων (NO_3^-) για το σύνολο των δειγμάτων νερού που συλλέχθηκαν κατά τις περιόδους δειγματοληψίας Αυγούστου και Δεκεμβρίου 2011 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας.

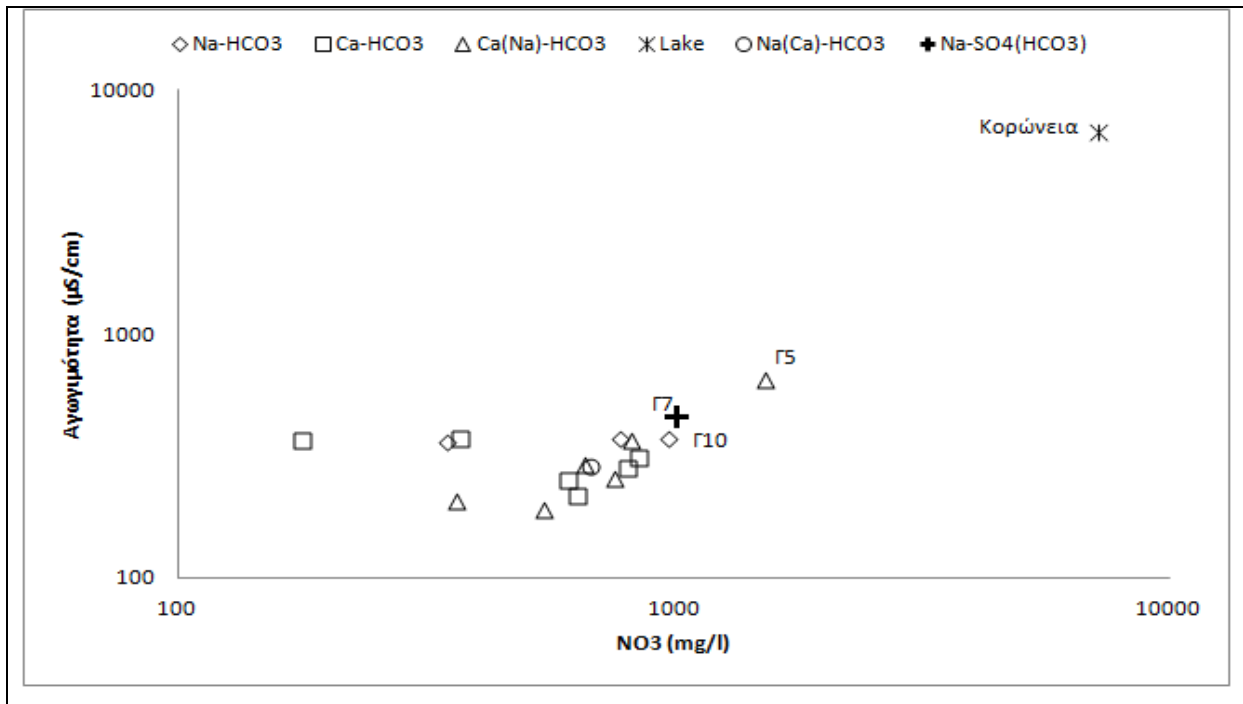
Από τη συσχέτιση των νιτρικών αλάτων NO_3^- (mg/l) με το TDS (mg/l) (**Εικόνα 4.5.2.**) γίνεται φανερή ισχυρή θετική συσχέτιση τιμών κυρίως για τα δείγματα Γ5, Γ1, Γ9, Γ4 και Γ6. Παρατηρείται ότι ενώ η τιμή της περιεκτικότητας των νιτρικών αλάτων NO_3^- είναι αυξημένη για τα παραπάνω δείγματα υπόγειου νερού, η τιμή του TDS (mg/l) παραμένει στα ίδια επίπεδα με τα υπόλοιπα δείγματα νερού. Η διαφοροποίηση αυτή δείχνει τη σημειακή επιβάρυνση του υπόγειου νερού με νιτρικά άλατα, που συνδέονται πιθανά με αγροτικές δραστηριότητες. Οι γεωτρήσεις αυτές βρίσκονται στο βόρειο-βορειοδυτικό τμήμα της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας και διατρύουν όμοια υλικά (άμμος, άργιλος, κροκάλες, σχιστόλιθος). Επίσης, εμφανίζουν κατά ομάδες ίδιο χημικό τύπο. Τέλος, σύμφωνα

με την ομαδοποιημένη κάλυψη χρήσεων γης (Corine Land Cover 2000) είναι ανορυγμένες σε αγροτική έκταση.

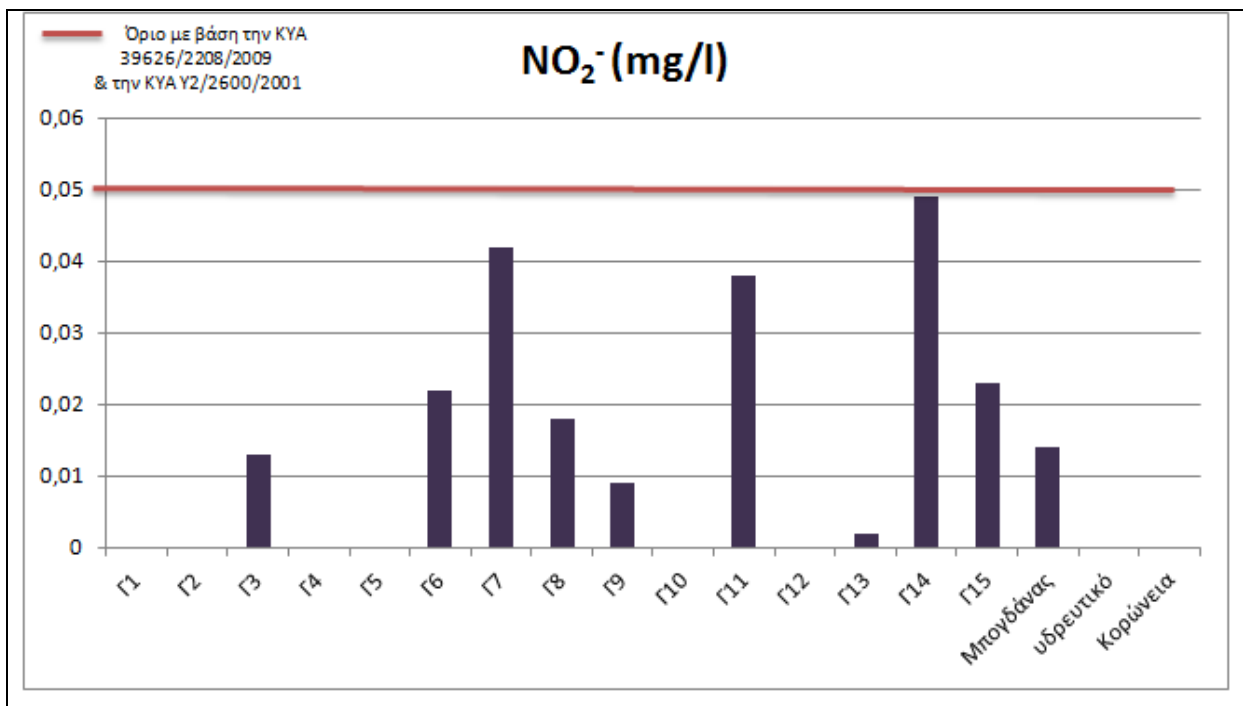
Η συσχέτιση αγωγιμότητας ($\mu\text{S}/\text{cm}$) με τα νιτρικά άλατα NO_3^- (mg/l) (**Εικόνα 4.5.3.**) καταδεικνύει μία θετική τάση ανάμεσα στα μεγέθη για το σύνολο σχεδόν των δειγμάτων, με ισχυρή συσχέτιση για τα δείγματα Γ7, Γ10, Γ5 και το δείγμα της λίμνης Κορώνειας. Είναι χαρακτηριστικό ότι για κανένα από τα παραπάνω δείγματα η συγκέντρωση των νιτρικών δεν ξεπερνά το όριο των $50\text{mg}/\text{l}$ της ΚΥΑ Υ2/2600/2001 για το πόσιμο νερό και της ΚΥΑ 39626/2208/2009 για την προστασία των υπόγειων υδάτων από τη ρύπανση και την υποβάθμιση.



Εικόνα 4.5.2.: Συσχέτιση νιτρικών αλάτων (NO_3^- , mg/l) με το σύνολο των διαλυμένων αλάτων (TDS, mg/l) για τα δείγματα νερού που συλλέχθηκαν κατά τις περιόδους δειγματοληψίας Αυγούστου (υπόγεια νερά) και Δεκεμβρίου (επιφανειακά νερά) 2011 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας.



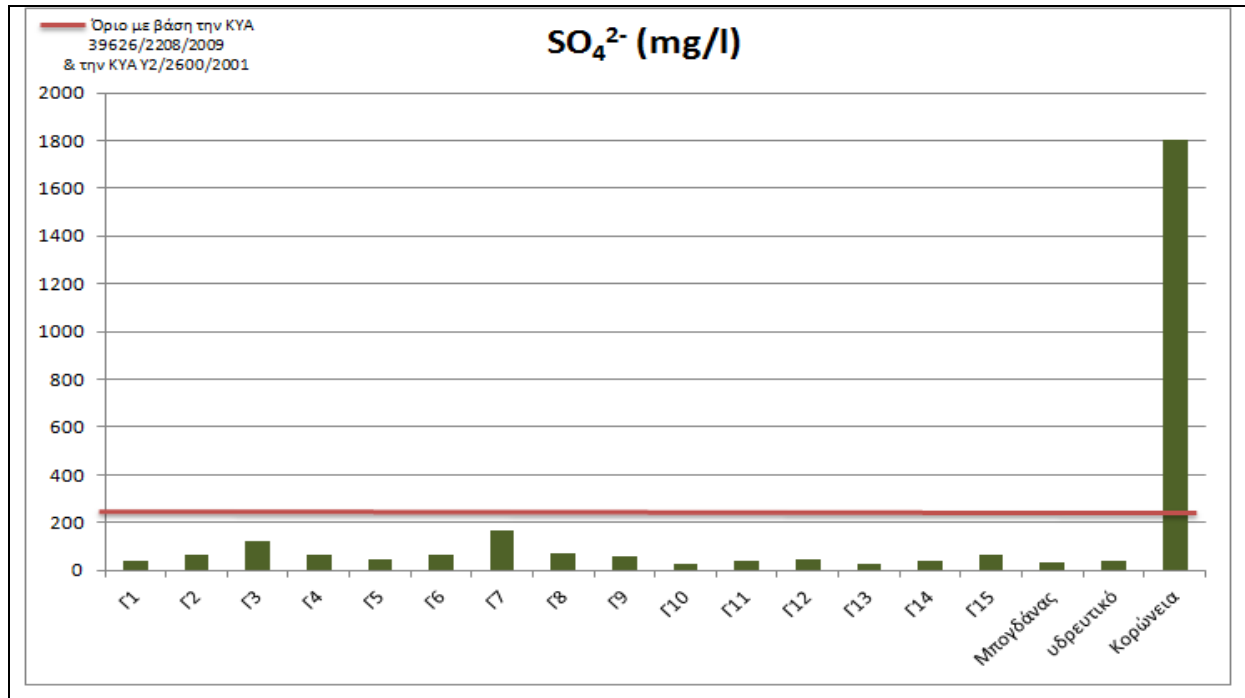
Εικόνα 4.5.3.: Συσχέτιση νιτρικών αλάτων (NO_3^- , mg/l) με την αγωγιμότητα ($\mu\text{S}/\text{cm}$) για τα δείγματα νερού που συλλέχθηκαν κατά τις περιόδους δειγματοληψίας Αυγούστου (υπόγεια νερά) και Δεκεμβρίου (επιφανειακά νερά) 2011 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας.



Εικόνα 4.5.4.: Συγκέντρωση νιτρωδών αλάτων (NO_2^- , mg/l) για το σύνολο των δειγμάτων νερού που συλλέχθηκαν κατά τις περιόδους δειγματοληψίας Αυγούστου (υπόγεια νερά) και Δεκεμβρίου (επιφανειακά νερά) 2011 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας.

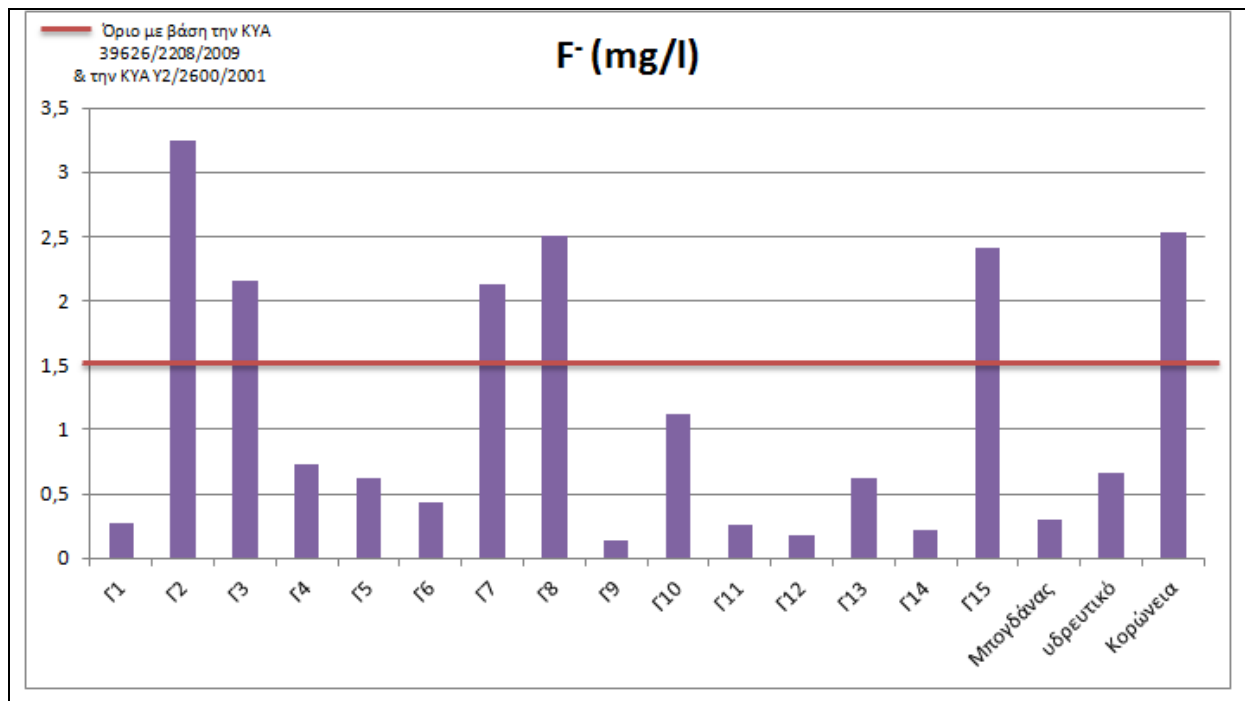
Οι τιμές της συγκέντρωσης των νιτροδών αλάτων (NO_2^- mg/l, **Εικόνα 4.5.4.**) κυμαίνονται από τιμές που δεν ανιχνεύονται (Γ1, Γ2, Γ4, Γ5, Γ10, Γ12, Μπογδάνας, Κορώνεια) έως και 0,042mg/l (Γ7). Για κανένα από τα δείγματα νερού που συλλέχθηκαν κατά τις περιόδους δειγματοληψίας Αυγούστου και Δεκεμβρίου 2011 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας η συγκέντρωση των νιτροδών αλάτων δεν ξεπέρασε το όριο (0,05mg/l) που θέτουν η ΚΥΑ Υ2/2600/2001 για το πόσιμο νερό και η ΚΥΑ 39626/2208/2009 για την προστασία των υπόγειων υδάτων από τη ρύπανση και την υποβάθμιση.

Οι τιμές των συγκεντρώσεων των θειικών αλάτων (SO_4^{2-}) (**Εικόνα 4.5.5.**) για τα δείγματα του νερού που συλλέχθηκαν κατά τις περιόδους δειγματοληψίας Αυγούστου και Δεκεμβρίου 2011 δεν ξεπερνούν το όριο (250mg/l) που θέτουν η ΚΥΑ Υ2/2600/2001 για το πόσιμο νερό και η ΚΥΑ 39626/2208/2009 για την προστασία των υπόγειων υδάτων από τη ρύπανση και την υποβάθμιση. Εξάιρεση αποτελεί το δείγμα νερού από τη λίμνη της Κορώνειας με τιμή συγκέντρωσης θειικών αλάτων ίση με 1805,7mg/l. Οι συγκεντρώσεις των υπόλοιπων δειγμάτων προσδιορίστηκαν σε ένα εύρος τιμών από 24,5 mg/l (Γ10) έως 165,8 mg/l (Γ7).



Εικόνα 4.5.5.: Συγκέντρωση θειικών αλάτων (SO_4^{2-} , mg/l) για το σύνολο των δειγμάτων νερού που συλλέχθηκαν κατά τις περιόδους δειγματοληψίας Αυγούστου (υπόγεια νερά) και Δεκεμβρίου (επιφανειακά νερά) 2011 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας.

Οι τιμές των συγκεντρώσεων των φθοριούχων ιόντων (F^- , mg/l) ανήκουν σε ένα εύρος τιμών από 0,14 mg/l (Γ9) έως 3,24 mg/l (Γ2) για τα δείγματα υπόγειου νερού που συλλέχθηκαν από τη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας. Για τα επιφανειακά νερά, οι τιμές κυμαίνονται από 0,66 mg/l (Μπογδάνας) έως 2,53 mg/l (Κορώνεια). Από τις τιμές που προσδιορίστηκαν (**Εικόνα 4.5.6.**) για τα δείγματα υπόγειου και επιφανειακού νερού, εκείνες που ξεπερνούν το όριο (1,5 mg/l) που ορίζουν η ΚΥΑ Υ2/2600/2001 για το πόσιμο νερό και η ΚΥΑ 39626/2208/2009 για την προστασία των υπόγειων υδάτων από τη ρύπανση και την υποβάθμιση είναι των δειγμάτων Γ2, Γ3, Γ7, Γ8, Γ15 και το δείγμα της λίμνης. Για τα υπόλοιπα δείγματα νερού, συμπεριλαμβανομένου και του υδρευτικού νερού της πόλης του Λαγκαδά, η συγκέντρωση του F^- δεν υπερβαίνει το παραπάνω όριο.

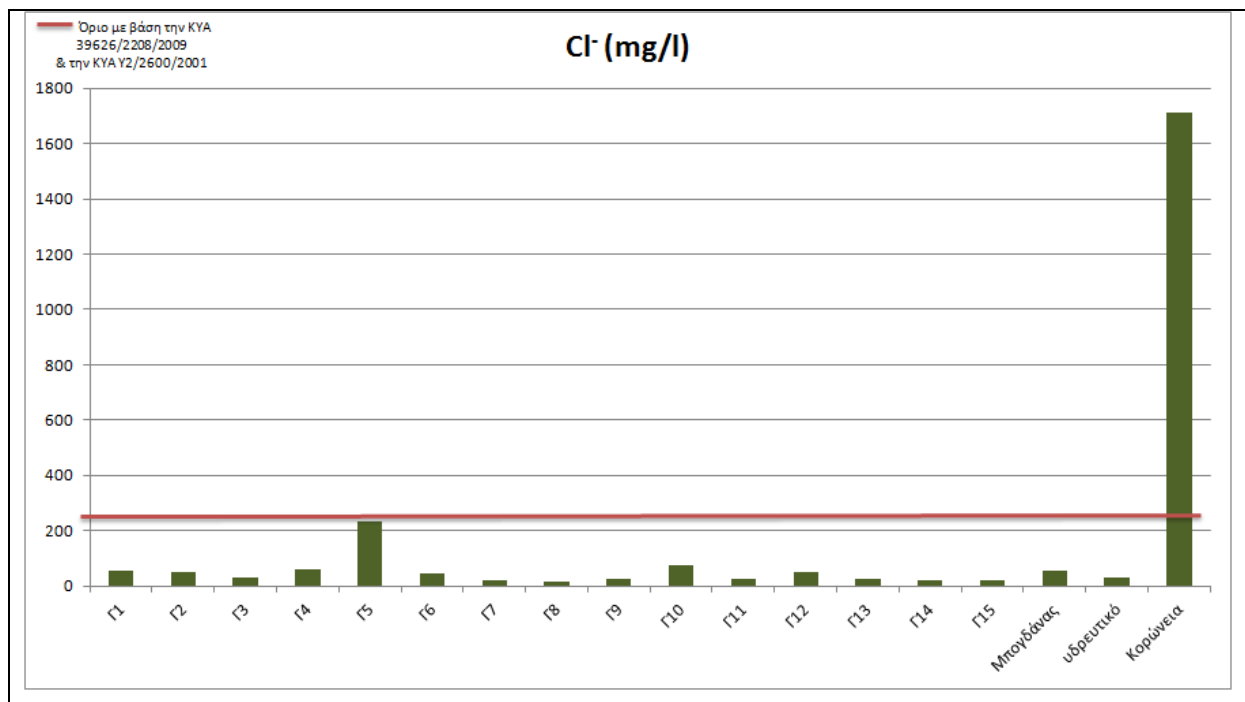


Εικόνα 4.5.6.: Συγκέντρωση φθοριούχων (F^- , mg/l) για το σύνολο των δειγμάτων νερού που συλλέχθηκαν κατά τις περιόδους δειγματοληψίας Αυγούστου (υπόγεια νερά) και Δεκεμβρίου (επιφανειακά νερά) 2011 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας.

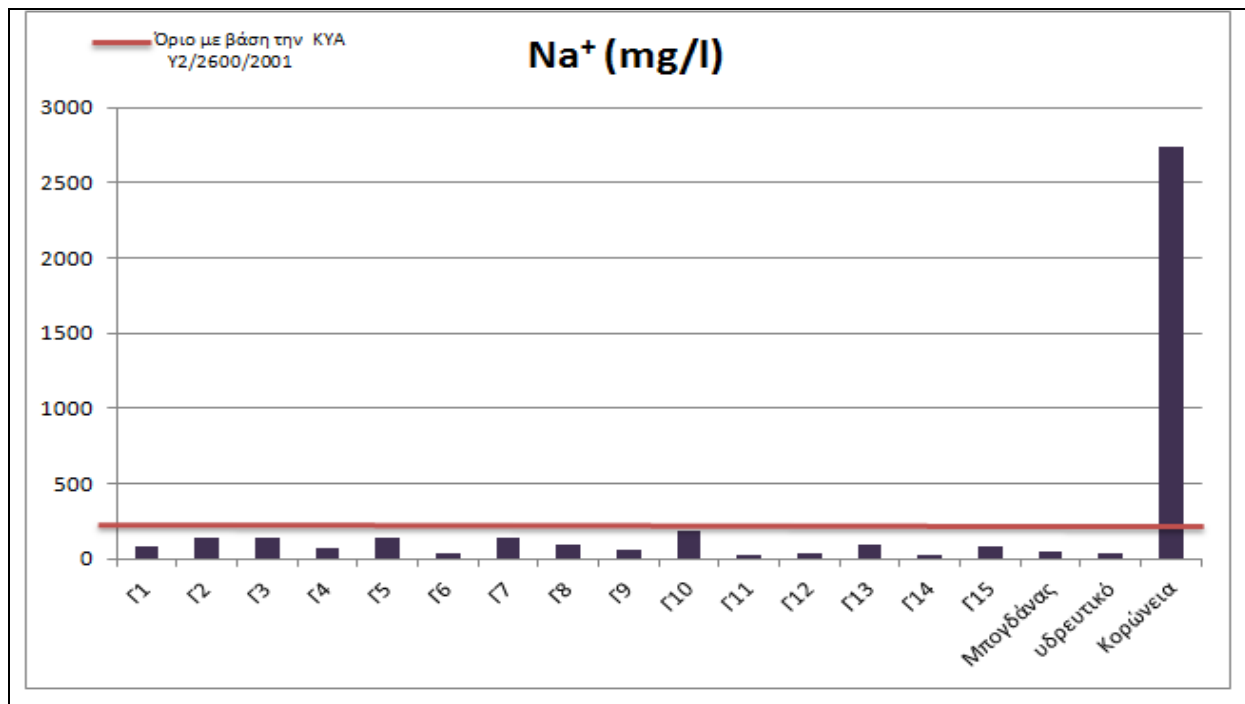
Οι τιμές της συγκέντρωσης των χλωριόντων (Cl^- , mg/l) ανήκουν σε ένα εύρος τιμών από 13,5 mg/l (Γ8) έως 1710,4 mg/l (Κορώνεια). Οι τιμές που προσδιορίστηκαν στα δείγματα υπόγειου νερού δεν ξεπερνούν το όριο (250 mg/l) της ΚΥΑ 39626/2208/2009 για την προστασία των υπόγειων υδάτων από τη ρύπανση και την υποβάθμιση (**Εικόνα 4.5.7.**). Παρόλο που αντίστοιχο όριο δεν έχει θεσπιστεί για τα επιφανειακά νερά, η άμεσα επικοινωνία υπόγειου υδροφόρου και επιφανειακών υδατικών σωμάτων στη λεκάνη

απορροής της λίμνης Κορώνειας επιτρέπει τη συσχέτιση. Η συγκέντρωση των χλωριόντων στο νερό της λίμνης είναι περίπου επτά (7) φορές μεγαλύτερη από το παραπάνω όριο.

Οι συγκεντρώσεις των ιόντων νατρίου (Na^+ , mg/l) από τα δείγματα νερού που συλλέχτηκαν από τη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας ανήκουν σε ένα εύρος τιμών από 26,5 mg/l (Γ11) έως και 2742,8 mg/l (Κορώνεια). Οι τιμές που προσδιορίστηκαν (Εικόνα 4.5.8.) δεν ξεπερνούν το όριο (200 mg/l) που ορίζει η ΚΥΑ Υ2/2600/2001 για το πόσιμο νερό. Εξαιρέση αποτελεί το δείγμα νερού από τη λίμνη της Κορώνειας, όπου προσδιορίστηκε συγκέντρωση ιόντων Na^+ περίπου δεκατρείς (13) φορές μεγαλύτερη από το παραπάνω όριο.



Εικόνα 4.5.7.: Συγκέντρωση χλωριόντων (Cl^- , mg/l) για το σύνολο των δειγμάτων νερού που συλλέχτηκαν κατά τις περιόδους δειγματοληψίας Αυγούστου (υπόγεια νερά) και Δεκεμβρίου (επιφανειακά νερά) 2011 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας.



Εικόνα 4.5.8.: Συγκέντρωση ιόντων νατρίου (Na⁺, mg/l) για το σύνολο των δειγμάτων νερού που συλλέχθηκαν κατά τις περιόδους δειγματοληψίας Αυγούστου (υπόγεια νερά) και Δεκεμβρίου (επιφανειακά νερά) 2011 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας.

5.ΙΣΟΤΟΠΙΚΗ ΓΕΩΧΗΜΕΙΑ

5.1 Ισοτοπική σύνθεση του νερού της περιοχής μελέτης

Τα αναλυτικά αποτελέσματα από τις ισοτοπικές αναλύσεις ($\delta^{18}\text{O}$ και δD) των δειγμάτων νερού της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας παρατίθενται στο Παράρτημα (Πίνακας 3).

Οι τιμές του $\delta^{18}\text{O}$ για το σύνολο των δειγμάτων υπόγειου νερού κυμαίνονται από -9 έως -7,1‰, ενώ οι τιμές του δD για τα ίδια δείγματα νερού παρουσιάζουν εύρος από -58 έως -47,5‰. Για τις βαθιές ($d>60\text{m}$) γεωτρήσεις (Γ4, Γ6, Γ7, Γ10, Γ13, Γ15) οι τιμές $\delta^{18}\text{O}$ και δD κυμαίνονται από -9‰ έως -7,1‰ και από -52‰ έως -47,5‰ αντίστοιχα.

Οι τιμές των $\delta^{18}\text{O}$ και δD για τα δείγματα επιφανειακού νερού (Μπογδάνας, Κορώνεια) δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις. Πιο αναλυτικά, οι τιμές $\delta^{18}\text{O}$ και δD για τον ποταμό Μπογδάνα ισούνται με -8,0‰ και -51‰ αντίστοιχα. Οι τιμές $\delta^{18}\text{O}$ και δD που μετρήθηκαν για τη λίμνη Κορώνειας είναι -6,6‰ και -49‰ αντίστοιχα.

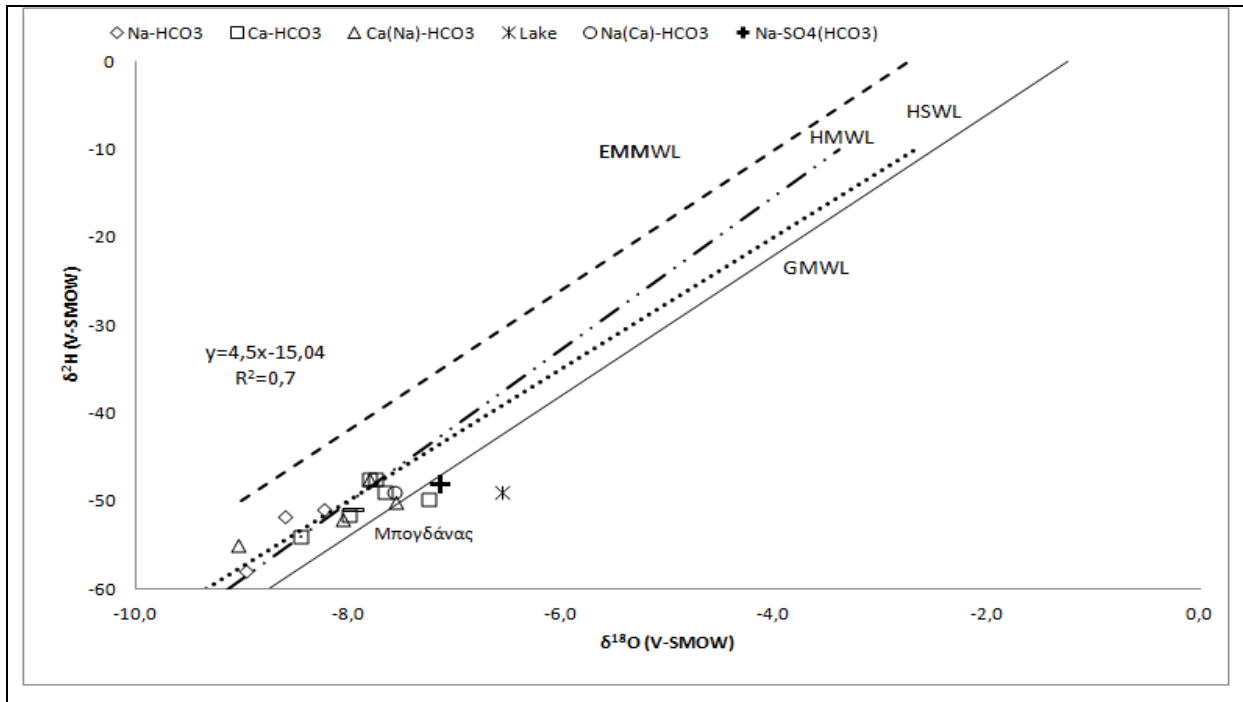
Στην **Εικόνα 5.1.1.** απεικονίζονται οι ισοτοπικές τιμές των δειγμάτων υπόγειου νερού, η ισοτοπική περιεκτικότητα ενός θαλάσσιου νερού ($\delta^{18}\text{O}=1,0\text{‰}$ και $\delta\text{D}=6,0\text{‰}$) και οι ευθείες που εκφράζουν την ισοτοπική σύσταση των παγκόσμιων βροχοπτώσεων (GMWL=Global Meteoric Water Line) και αυτές της Ανατολικής Μεσογείου (EMMWL= East Mediterranean Meteoric Water Line). Επίσης, στο ίδιο σχήμα παρουσιάζονται και οι ευθείες που εκφράζουν την ισοτοπική σύσταση του νερού της βροχής για την Ελλάδα (HMWL=Hellenic Meteoric Water Line), καθώς και την ισοτοπική σύσταση του νερού των πηγών της Ελλάδας (HSWL=Hellenic Spring Water Line) (Dotsika *et al.*, 2009).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα και το αντίστοιχο διάγραμμα (**Εικόνα 5.1.1.**) τα δείγματα υπόγειου νερού από τη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας «απλώνονται» ανάμεσα στην περιοχή που ορίζουν οι παραπάνω ευθείες, αυτές της Ανατολικής Μεσογείου και των παγκόσμιων βροχοπτώσεων. Επιπλέον, τοποθετούνται «πάνω» στις ευθείες της Ελλάδας για το νερό της βροχής και των πηγών. Εξάιρεση αποτελεί το δείγμα της λίμνης της Κορώνειας. Το φυσιολογικό αυτό γεγονός οφείλεται στην έντονη εξάτμιση από την επιφάνεια της λίμνης που παρατηρήθηκε και από τα αποτελέσματα της χημείας του νερού της.

Αναλυτικότερα, η εξίσωση που εκφράζει τη σχέση μεταξύ $\delta^{18}\text{O}$ και δD για την περιοχή μελέτης είναι η εξής:

$$\delta^2\text{H} (\text{‰})=4,47 \delta^{18}\text{O} (\text{‰}) - 15,04 (R^2=0,7).$$

Η διαφοροποίηση της εξίσωσης αυτής από τις αντίστοιχες που χρησιμοποιούνται για σύγκριση αποδίδεται αφενός στο μικρό αριθμό δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν και αφετέρου στην ανομοιογένεια των τιμών ορισμένων δειγμάτων σε σχέση με το σύνολο των τιμών.



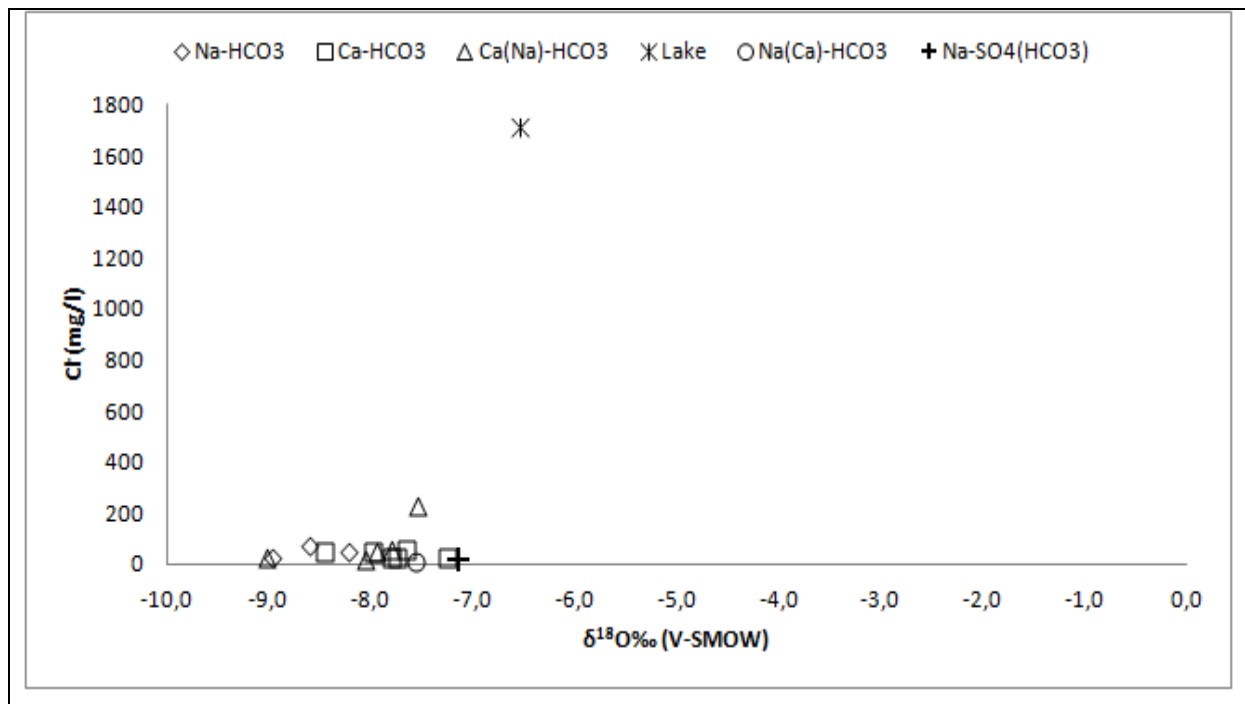
Εικόνα 5.1.1.: Συσχέτιση τιμών $\delta^{18}\text{O}$ και δD για τα δείγματα υπόγειου νερού που συλλέχθηκαν κατά τον Αύγουστο 2011 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας. *GMWL: Global Meteoric Water Line, EMMWL: East Mediterranean Meteoric Water Line, HMWL: Hellenic Meteoric Water Line, HSWL: Hellenic Spring Water Line.*

Οι τιμές $\delta^{18}\text{O}$ και δD που μετρήθηκαν για τα δείγματα υπόγειου νερού είναι ομοιογενείς, ενώ παρόμοια αποτελέσματα έδωσαν και οι μετρήσεις των δειγμάτων του επιφανειακού νερού. Η σχετική σταθερότητα των τιμών για τα δείγματα υπόγειου νερού καταδεικνύει ότι οι αντίστοιχοι ταμιευτήρες όπου φιλοξενούνται είναι καλοί αναμίκτες και η τροφοδοσία τους είναι ομοιογενής. Το νερό είναι αποκλειστικά μετεωρικής προέλευσης. Η αποκλειστική μετεωρική προέλευση του νερού επιβεβαιώθηκε και από την υδροχημεία, όπου η περιορισμένη συμμετοχή θαλάσσιου νερού αποδόθηκε σε θαλάσσια σπέρ (aerosols).

Σε ένα διάγραμμα όπως το παραπάνω (**Εικόνα 5.1.1.**) η αναμενόμενη τιμή κλίσης της ευθείας είναι περίπου 8, για νερά στα οποία το φαινόμενο της εξάτμισης δεν έχει επηρεάσει την ισοτοπική τους σύσταση. Αντίθετα, τιμές κλίσης της ευθείας από 4 έως 6 δηλώνουν ότι η εξάτμιση έχει επηρεάσει σε σημαντικό βαθμό την ισοτοπική σύνθεση του νερού (Craig 1961,

Craig *et al.*, 1963). Για τα δείγματα που εξετάστηκαν από τη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας, η κλίση της ευθείας (~4,5) καταδεικνύει τη σημαντική επίδραση της εξάτμισης στην ισοτοπική σύσταση του νερού της λεκάνης, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τη χημεία του νερού.

Για να επιβεβαιωθεί η ανάμιξη του νερού των δύο διαφορετικής χημικής σύστασης υδροφόρων στρωμάτων που αναπτύσσονται στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας, έγινε η απεικόνιση της συσχέτισης του $\delta^{18}\text{O}$ (‰) των δειγμάτων με την περιεκτικότητα τους σε χλωριόντα (Cl^- , mg/l) (**Εικόνα 5.1.2.**). Σύμφωνα με το διάγραμμα, τα δείγματα του υπόγειου νερού «τοποθετούνται» στην ίδια περιοχή παρά τη διαφορά στη χημική τους σύσταση και το γεγονός ότι τα δείγματα νερού που εξετάστηκαν προέρχονται από διαφορετικό βάθος. Συμπεραίνεται λοιπόν, η ανάμιξη των δύο διαφορετικών υδροφόρων στρωμάτων της λεκάνης απορροής, όπως είχε συζητηθεί και από τα αποτελέσματα της υδροχημείας. Επιπλέον, το δείγμα επιφανειακού νερού από τον ποταμό Μπογδάνα «βρίσκεται» στην ίδια περιοχή του διαγράμματος με τα δείγματα του υπόγειου νερού. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνει την άμεση επικοινωνία του υπόγειου υδροφόρου συστήματος με τα επιφανειακά υδάτινα σώματα. Τέλος, επιβεβαιώνοντας τις ενδείξεις από τα αποτελέσματα της υδροχημείας, η λίμνη Κορώνεια επικοινωνεί έμμεσα με τα υπόγειο υδροφόρο σύστημα της λεκάνης, όπως φαίνεται και από την «τοποθέτηση» του δείγματος νερού της λίμνης στο διάγραμμα. Η διαφοροποίηση της «τοποθέτησης» του νερού της λίμνης οφείλεται αποκλειστικά στην πολύ υψηλή συγκέντρωση χλωριόντων, γεγονός που αποδίδεται σε φαινόμενα εξάτμισης. Η ισοτοπική του σύσταση, όμως, όπως και η χημική του σύνθεση, καταδεικνύουν ότι σχετίζεται με τα υπόλοιπα δείγματα υπόγειου νερού της λεκάνης και δηλώνουν την επικοινωνία μεταξύ τους.



Εικόνα 5.1.2.: Συσχέτιση $\delta^{18}\text{O}$ (‰) και Cl^- (mg/l) για όλα τα δείγματα νερού που συλλέχθηκαν κατά τον Αύγουστο (υπόγεια νερά) και το Δεκέμβριο (επιφανειακά νερά) 2011 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας.

Οι τιμές δ των δειγμάτων (γεωτρήσεις, επιφανειακό νερό) διαγράφουν δύο ξεχωριστές ομάδες (**Εικόνα 5.1.1.**) με διαφορετική ισοτοπική σύνθεση:

- (1) $\delta^{18}\text{O}$ μικρότερο του -8‰ και
- (2) $\delta^{18}\text{O}$ μεγαλύτερο του -8‰.

Στην ομάδα με δ μεγαλύτερο του -8‰ ανήκουν τα δειγματοληφθέντα νερά από τις πιο πεδινές περιοχές της λεκάνης και αντιπροσωπεύουν κατά πλειοψηφία γεωτρήσεις μικρού βάθους ($d > 60\text{m}$, γεωτρήσεις Γ5, Γ8, Γ9, Γ11 και Γ14). Παρατηρείται ότι οι ισοτοπικές τιμές τους είναι πιο θετικές σε σχέση με τα δείγματα του νερού που συλλέχθηκαν από τις ημιορεινές περιοχές της λεκάνης και αντιπροσωπεύουν βαθιές ($d \sim 100\text{m}$) γεωτρήσεις (Γ6, Γ10 και Γ15). Οι θετικότερες τιμές των πεδινών δειγμάτων οφείλονται στη μερική εξάτμιση του νερού των γεωτρήσεων και στη διείδυση αρδευτικού νερού ανακύκλωσης. Οι πιο αρνητικές τιμές των ημιορεινών δειγμάτων μπορεί να αποδοθεί στο υψηλότερο υψόμετρο τροφοδοσίας τους.

Για να επιβεβαιωθεί η επίδραση του υψόμετρου τροφοδοσίας με την ισοτοπική σύσταση των δειγμάτων νερού της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας χρησιμοποιείται η «ισοτοπική κλίση» που αποτελεί τη σχέση που συνδέει τα «βαριά» ισότοπα του νερού με το υψόμετρο. Στην περίπτωση της παρούσας μελέτης θα γίνει χρήση του ισότοπου του οξυγόνου

^{18}O , επειδή υπάρχουν περισσότερα δεδομένα σύγκρισης για το ^{18}O για την Ελλάδα και τη Μεσόγειο από σχετικές μελέτες. Πιο συγκεκριμένα, θα χρησιμοποιηθεί η ισοτοπική κλίση της λεκάνη απορροής του ποταμού Αξιού (Dotsika *et al.*, 2009), η οποία ισούται με 0,2‰/100m. Η διαφορά των τιμών του ^{18}O από τις δύο ομάδες των δειγμάτων που συλλέχθηκαν ισούται με 2δ. Με βάση αυτά τα δεδομένα, υπολογίζεται ότι η ζώνη τροφοδοσίας της πρώτης ομάδας δειγμάτων (με τιμές δ μικρότερες του -8‰) βρίσκεται περίπου 1000m υψηλότερα σε σχέση με τη ζώνη τροφοδοσίας της δεύτερης ομάδας δειγμάτων. Λαμβάνοντας υπόψη τη μορφολογία της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας και των ορεινών όγκων που την απαρτίζουν, οι δύο διαφορετικές ζώνες τροφοδοσίας των υδροφόρων στρωμάτων θα μπορούσαν να αντιστοιχιστούν με τον πρεινό όγκο του Χορτιάτη (ΝΔ τμήμα της λεκάνης, υψόμετρο ~1200m.) και στους πρόποδες του Βερτίσκου (Β τμήμα της λεκάνης, υψόμετρα ~200-300m.).

5.2 Ισότοπα του άνθρακα στο νερό της περιοχής μελέτης

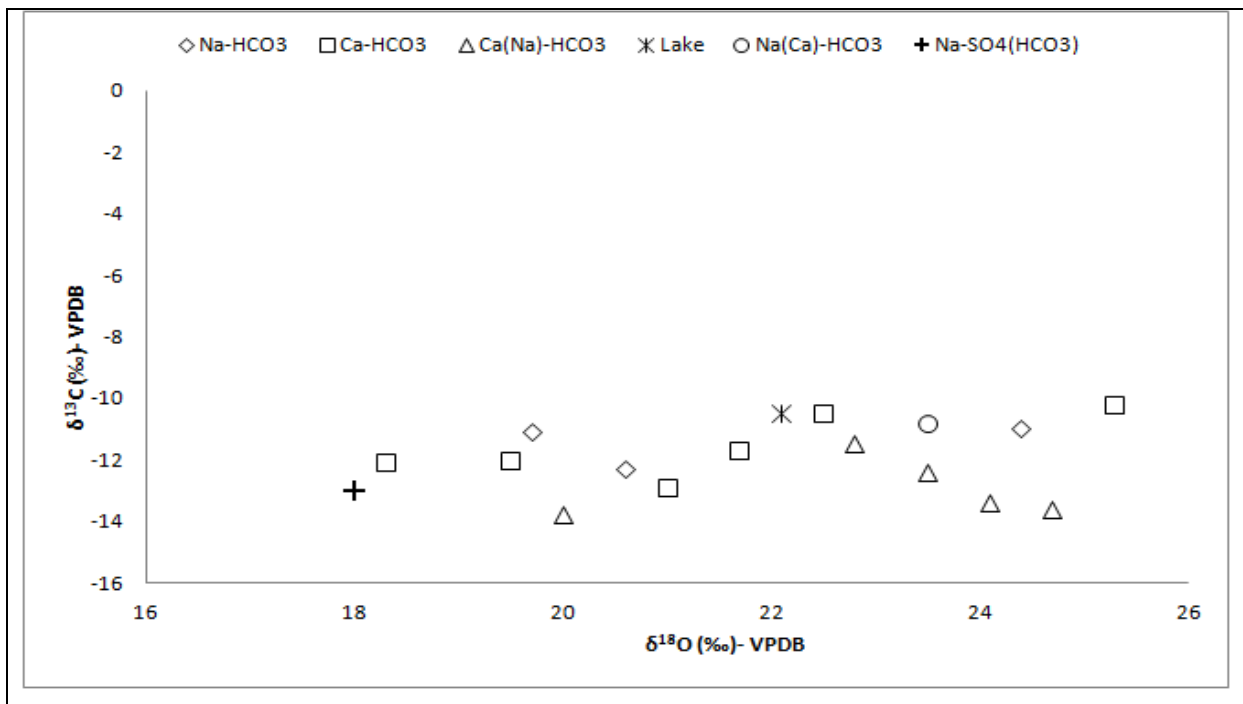
Τα αναλυτικά αποτελέσματα από τις ισοτοπικές αναλύσεις ($\delta^{13}\text{C}$ και $\delta^{18}\text{O}$) των δειγμάτων νερού της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας παρατίθενται στο Παράρτημα (Πίνακας 3).

Οι τιμές του $\delta^{13}\text{C}$ για το σύνολο των δειγμάτων υπόγειου νερού κυμαίνονται από -13,8‰ έως -10,2‰, ενώ οι τιμές του $\delta^{18}\text{O}$ για τα ίδια δείγματα νερού παρουσιάζουν εύρος από +18 έως +25,3‰. Για τις βαθιές ($d > 60\text{m}$) γεωτρήσεις (Γ4, Γ6, Γ7, Γ10, Γ13, Γ15) οι τιμές $\delta^{13}\text{C}$ και $\delta^{18}\text{O}$ κυμαίνονται από -13,8‰ έως -11‰ και από +18‰ έως +24,4‰ αντίστοιχα.

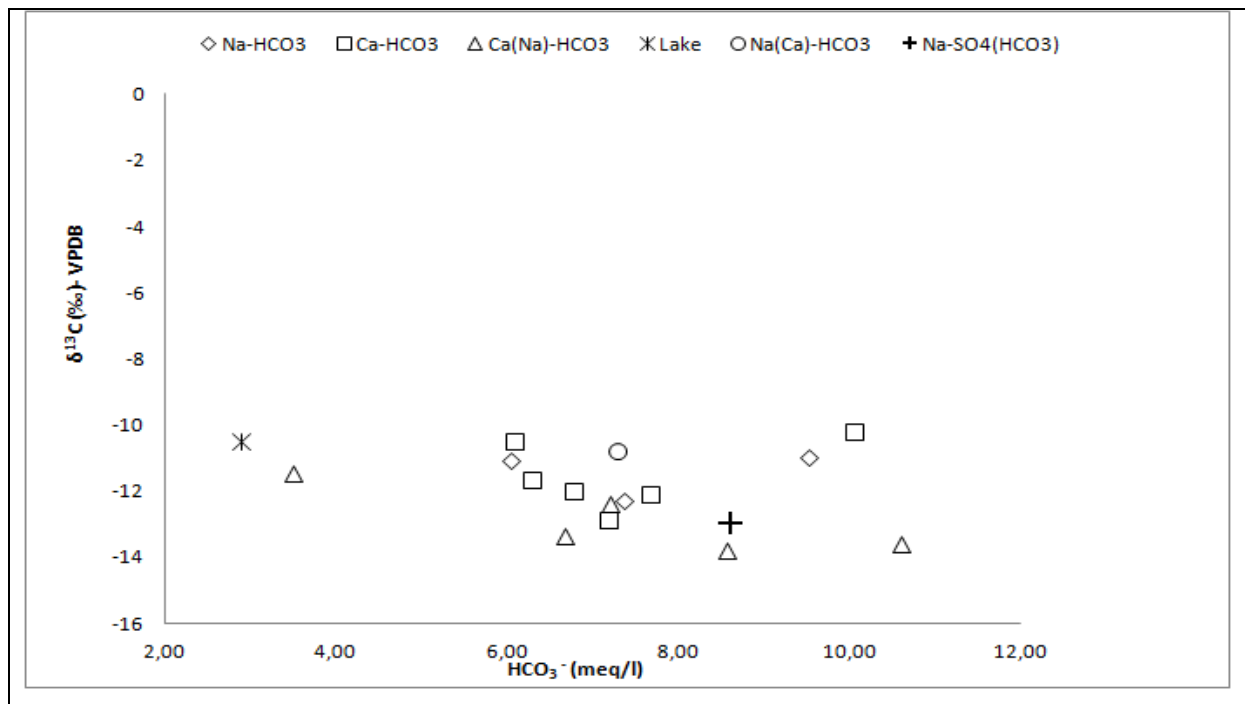
Οι τιμές των $\delta^{13}\text{C}$ και $\delta^{18}\text{O}$ για τα δείγματα επιφανειακού νερού (Μπογδάνας, Κορώνεια) δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις. Πιο αναλυτικά, οι τιμές $\delta^{13}\text{C}$ και $\delta^{18}\text{O}$ για τον ποταμό Μπογδάνα ισούνται με -11,5‰ και +22,8‰ αντίστοιχα. Οι τιμές $\delta^{13}\text{C}$ και $\delta^{18}\text{O}$ που μετρήθηκαν για τη λίμνη Κορώνειας είναι -10,5‰ και +22,1‰ αντίστοιχα. Η συσχέτιση των τιμών $\delta^{13}\text{C}$ και $\delta^{18}\text{O}$ για το σύνολο των δειγμάτων νερού που συλλέχθηκαν από τη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας παρουσιάζονται παρακάτω (**Εικόνα 5.2.1.**).

Οι δείκτες TDIC (HCO_3) και $\delta^{13}\text{C}_{\text{TDIC}}$ για το σύνολο των δειγμάτων χρησιμοποιούνται σαν ιχνηθέτες για τον προσδιορισμό της προέλευσης του άνθρακα στο υπόγειο και επιφανειακό νερό. Η συσχέτιση των παραπάνω δεικτών για τα δείγματα νερού που συλλέχθηκαν στην περιοχή μελέτης φαίνεται παρακάτω (**Εικόνα 5.2.2.**). Σύμφωνα με την εφαρμογή της εξίσωσης των μαζών και τις μέσες τιμές του ^{13}C στη φύση, ανάλογα με την

προέλευσή του, φαίνεται ότι στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας η ισοτοπική σύνθεση των ανθρακικών του νερού είναι προέρχεται από μίξη διαφορετικών πηγών άνθρακα. Πιο συγκεκριμένα, διαπιστώνεται ο εμπλουτισμός της ισοτοπικής τους σύνθεσης σε ^{13}C τόσο από τη διάλυση των ανθρακικών πετρωμάτων που απαρτίζουν τη λεκάνη (Νότιο-Νοτιοδυτικό τμήμα), όσο και από την επίδραση της οργανικής ύλης (δασικές εκτάσεις, καλλιέργειες). Μάλιστα, παρατηρείται σχεδόν ίση συμμετοχή των δύο πηγών άνθρακα (περίπου 50% η κάθε πηγή ξεχωριστά).



Εικόνα 5.2.1.: Συσχέτιση $\delta^{13}\text{C}$ και $\delta^{18}\text{O}$ για το σύνολο των δειγμάτων νερού που συλλέχθηκαν κατά τις περιόδους Αυγούστου (υπόγεια νερά) και Δεκεμβρίου (επιφανειακά νερά) 2011 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας.

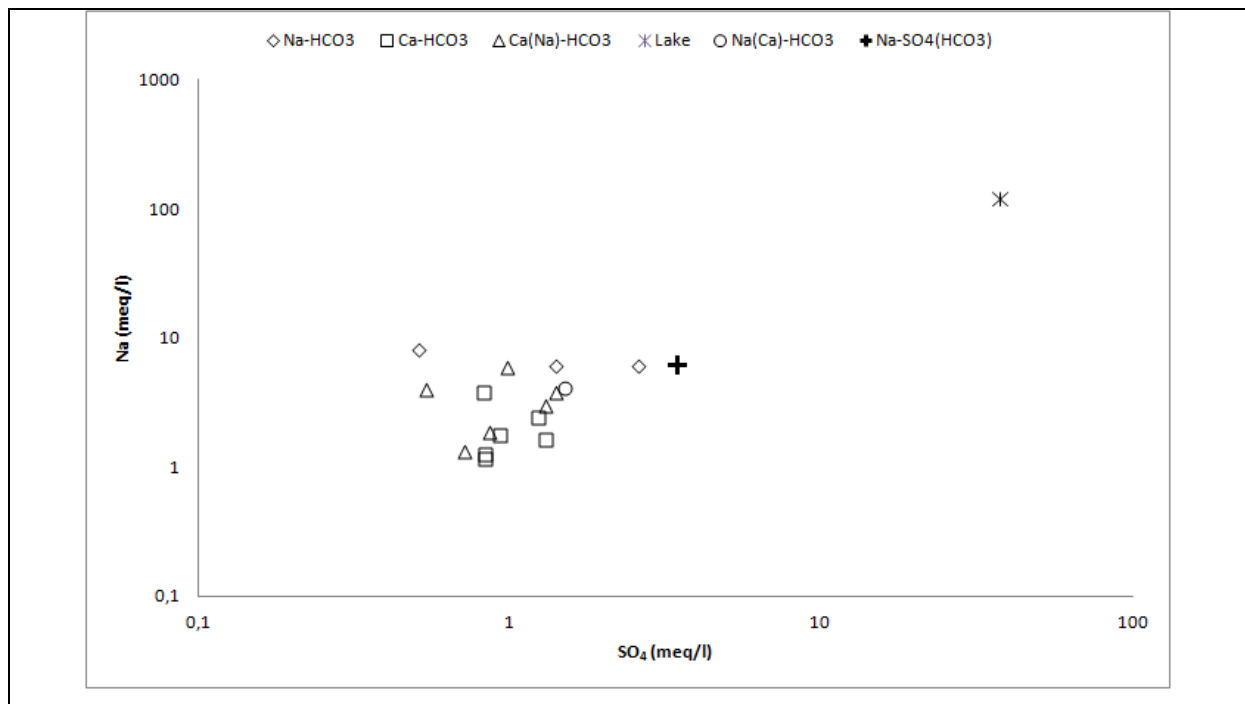


Εικόνα 5.2.2.: Συσχέτιση $\delta^{13}\text{C}$ και HCO_3^- για το σύνολο των δειγμάτων νερού που συλλέχθηκαν κατά τις περιόδους Αυγούστου (υπόγεια νερά) και Δεκεμβρίου (επιφανειακά νερά) 2011 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας.

6.ΤΟ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟ ΠΕΔΙΟΥ ΤΟΥ ΛΑΓΚΑΔΑ

Στα δείγματα υπόγειου νερού που συλλέχθηκαν συγκαταλέγεται και ένα δείγμα (Γ7) θερμού νερού από την πηγή των θερμών Λουτρών Λαγκαδά. Η θερμοκρασία που μετρήθηκε στο πεδίο ισούται με 35,4°C, επιβεβαιώνοντας ότι το πεδίο του Λαγκαδά ανήκει στα γεωθερμικά πεδία χαμηλής θερμοκρασίας και ενθαλπίας.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων το θερμό νερό εμφανίζει χημισμό $\text{Na-SO}_4(\text{HCO}_3)$. Για να διερευνηθεί η σχέση θερμών και κρύων υδροφόρων στρωμάτων χρησιμοποιούνται τα θειικά και νατριούχα ιόντα των νερών σαν ιχνηθέτες. Στο διάγραμμα απεικόνισης της συσχέτισης των θειικών με τα νατριούχα ιόντα (**Εικόνα 6.1.**) παρατηρείται μία θετική γραμμική εξέλιξη αυτού του λόγου (Na/SO_4) για τα νερά της λεκάνης απορροής, που τείνει να εξομοιωθεί με αυτόν του γεωθερμικού νερού του Λαγκαδά. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει την ανάμιξη των υδροφόρων κατά την άνοδο του θερμού νερού. Ο βαθμός ανάμιξης των υδροφόρων στρωμάτων φαίνεται να αυξάνεται από το κέντρο της λεκάνης προς τα ΒΔ, όπου υπάρχει και το υψηλότερο ποσοστό ανάμιξης με τιμές των Na^+ και SO_4^{2-} όμοιες με αυτές του θερμού νερού. Αντίθετα, ο βαθμός ανάμιξης μειώνεται αισθητά από το κέντρο της λεκάνης προς τα Ν-ΝΑ, σε γεωτρήσεις που βρίσκονται στο τμήμα της λεκάνης κατάντη της λίμνης. Επιπλέον, το γεγονός ότι το θερμό νερό έρχεται σε επαφή με τον «κρύο» υδροφόρο κατά την κίνησή του αποτελεί ένδειξη ότι το νερό θερμαίνεται δι επαγωγής κατά την άνοδό του.



Εικόνα 6.1.: Συσχέτιση Na και SO_4^{2-} (meq/l) για όλα τα δείγματα νερού που συλλέχθηκαν κατά τις περιόδους Αυγούστου (υπόγεια νερά) και Δεκεμβρίου (επιφανειακά νερά) 2011 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας. Με ξεχωριστό σύμβολο απεικονίζεται το θερμό νερό από τα Λουτρά Λαγκαδά.

Χαρακτηριστικό της χημικής σύνθεσης του θερμομεταλλικού νερού του πεδίου Λαγκαδά είναι η χαμηλή (24,3 mg/l) περιεκτικότητα του σε Mg^{2+} , σε σχέση με τα δείγματα «κρύου» νερού της λεκάνης. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει ότι το νερό κατά την κάθοδο του προς τον ταμιευτήρα φτάνει σε μεγάλο βάθος, όπου και θερμαίνεται. Η ελάττωση του Mg^{2+} στο θερμό νερό θα μπορούσε να αποδοθεί στη μετακίνηση του από την υγρή φάση προς όφελος της στερεάς (π.χ. εναπόθεση μαγνησιακού σερικίτη, χλωρίτη) (White, 1970, *In*: Φυτικά και συν., 1993). Αντίστοιχες τιμές Mg^{2+} εμφανίζουν τα δείγματα υπόγειου νερού που εκτείνονται στο ΒΔ τμήμα της λεκάνης, παρατήρηση που επιβεβαιώνει την ανάμιξη των διαφορετικών υδροφόρων στρωμάτων μεταξύ τους.

Αναφορικά με τη χημική σύσταση των γεωθερμικών ρευστών, εξαρτάται από τις αντιδράσεις μεταξύ των ρευστών και των πετρωμάτων από το βάθος του ταμιευτήρα μέχρι την επιφάνεια. Η βασική παράμετρος των αντιδράσεων αυτών είναι η θερμοκρασία, καθώς επηρεάζει τη διαλυτότητα πολλών ορυκτών και τη χημική ισορροπία των ισοτόπων. Συνεπώς, γνωρίζοντας την περιεκτικότητα διάφορων στοιχείων στην επιφάνεια είναι δυνατό να προσδιορισθεί η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού στον υπόγειο ταμιευτήρα, με τη χρήση των ανάλογων γεωθερμομέτρων.

Τα γεωθερμόμετρα ισχύουν με τις εξής προϋποθέσεις: α) η αντίδραση ρευστού-πετρώματος έχει φτάσει σε ισορροπία και β) κατά την πορεία του ρευστού από τον ταμιευτήρα προς την επιφάνεια να μην έχει λάβει χώρα νέα ισορροπία σε θερμοκρασία μικρότερη από εκείνη του ταμιευτήρα. Στην περίπτωση του θερμού νερού από τα Λουτρά του Λαγκαδά δεν ισχύει η προϋπόθεση (β), διότι, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κατά την άνοδο του γεωθερμικού ρευστού γίνεται ανάμειξη με τον «κρύο» υδροφόρο της λεκάνης απορροής, με αποτέλεσμα η ακρίβεια των γεωθερμομέτρων να είναι μικρή. Εντούτοις, μπορεί να εκτιμηθεί η θερμοκρασία του ταμιευτήρα με μικρή ακρίβεια.

Χρησιμοποιήθηκαν επτά (7) τύποι γεωθερμόμετρων, από τα οποία δεν προέκυψαν αρνητικές τιμές ή θερμοκρασίες μικρότερες από αυτή που μετρήθηκε στο πεδίο κατά τη δειγματοληψία. Τα αποτελέσματα όλων των γεωθερμόμετρων παρουσιάζονται παρακάτω (**Πίνακας 6.1.**).

Πίνακας 6.1.: Εφαρμογή γεωθερμομέτρων για τα γεωθερμικά ρευστά του πεδίου Λαγκαδά της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας.

Table 6.1.: Geothermometers on the geothermal fluids of Lagkadas field in the Koronia lake catchment.

Γεωθερμόμετρο	Τύπος Γεωθερμομέτρου	Εκτιμώμενη Θερμοκρασία
Truesdell (1976)	Na-K	102,6 °C
Tonani (1980)	Na-K	105,3 °C
Amorsson (1983)	Na-K	113,3 °C
Fournier (1981)	Na-K	146,1 °C
Giggenbach et al. (1983)	Na-K	165,2 °C
Giggenbach et al. (1983)	K-Mg	45,2 °C
Fournier and Truesdell (1983)	Na-K-Ca	52,4 °C

Παρατηρείται ότι ανάλογα με τον τύπο γεωθερμόμετρου που χρησιμοποιήθηκε, διαφοροποιείται η θερμοκρασία του ταμιευτήρα. Από τις θερμοκρασίες που υπολογίζονται, οι πιο χαμηλές τιμές (45,2 °C και 52,4 °C) του ταμιευτήρα προσεγγίζουν τη θερμοκρασία εξόδου (35,4 °C) του νερού και για το λόγο αυτό απορρίπτονται. Τα αποτελέσματα των υπόλοιπων γεωθερμόμετρων δίνουν μια παρόμοια εικόνα για τη θερμοκρασία του ταμιευτήρα του θερμού νερού των λουτρών Λαγκαδά, η οποία υπολογίζεται να είναι της τάξης των 100 °C.

7.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας και την ερμηνεία τους, συμπεραίνονται τα εξής:

✓ Το νερό (επιφανειακό και υπόγειο) του υδροτοπικού συστήματος της λίμνης Κορώνειας είναι μετεωρικής προέλευσης.

✓ Στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας αναπτύσσεται ένα ενιαία υδροφόρο σύστημα που αποτελείται από δύο υδροφόρα στρώματα, ένα ρηχό ($d > 60\text{m}$) ασβεστιτικό (calcareous aquifer) και ένα βαθύτερο ($d < 60\text{m}$) αλκαλικό υδροφόρο στρώμα (alkaline aquifer). Η στρωματογραφία της λεκάνης δεν εμποδίζει τη μεταξύ τους επικοινωνία και την ανάμιξη του υπόγειου νερού διαφορετικού χημισμού.

✓ Το υπόγειο νερό δεν εμφανίζεται κορεσμένο σε διαλυμένα άλατα, γεγονός που υποδεικνύει τη σύντομη κυκλοφορία του. Η χημική και ισοτοπική σύσταση του δείχνει μία σχετική ρηχή υπόγεια κίνηση, η οποία αποδίδεται στην εντατική άντληση του υπόγειου νερού από τις γεωτρήσεις της λεκάνης.

✓ Η χημική σύσταση του νερού της λίμνης είναι παρόμοια με εκείνη των υπόγειων υδάτων, αν και έχει επηρεασθεί σε σημαντικό βαθμό από το φαινόμενο της εξάτμισης και παρουσιάζει μεγάλη περιεκτικότητα σε χλωριόντα (Cl^-).

✓ Ο χημισμός του επιφανειακού νερού του ποταμού Μπογδάνα είναι όμοιος με αυτόν του υπόγειου νερού, γεγονός που υποδηλώνει την άμεση επικοινωνία τους.

✓ Οι ισοτοπικές συνθέσεις υπόγειων και επιφανειακών υδάτων είναι παρόμοιες, καταδεικνύοντας την κοινή τους μετεωρική προέλευση, αλλά και τη μεταξύ τους έμμεση επικοινωνία.

✓ Οι τιμές των ισοτόπων λόγων του ^{18}O για τα υπόγεια νερά κατατάσσονται σε δύο ομάδες δειγμάτων, με διαφορά τιμών 2δ . Φαίνεται ότι οι υπόγειοι υδροφόροι ορίζοντες τροφοδοτούνται από δύο διαφορετικές ζώνες που διαφέρουν μεταξύ τους υψομετρικά περίπου 1000m .

✓ Η προέλευση του ^{13}C για το σύνολο των δειγμάτων νερού είναι ισοβαρής συνιστώσα διαφορετικών πηγών άνθρακα (διάλυση ανθρακικών πετρωμάτων, οργανική ύλη).

✓ Το γεωθερμικό νερό του πεδίου χαμηλής ενθαλπίας του Λαγκαδά συμμετέχει στη διαδικασία ανάμιξης των υδροφόρων και παρουσιάζει παρόμοιο χημισμό με το υπόγειο «κρύο» νερό. Η θερμοκρασία του ταμειυτήρα του υπολογίζεται να είναι της τάξης των 100°C .

8.ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Προγενέστερες μελέτες (Vatseris, 1992, Ντότσικα & Πουτούκης 1993, Βαφειάδης και συν. 1994) διερεύνησαν το χημισμό των υπόγειων και θερμών υδάτων της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας. Οι παραπάνω ερευνητές καταλήγουν στην παρουσία αλκαλικών (Na-HCO_3) και μικτών (Na(Ca)-HCO_3) τύπων «κρύου» νερού, ενώ αναφορικά με το θερμό νερό των Λουτρών Λαγκαδά ο χημισμός μελετήθηκε να είναι $\text{Na-SO}_4(\text{HCO}_3)$. Επιπλέον, συμπεραίνεται η ανάμιξη των διαφορετικής θερμοκρασίας νερών, αλλά και η επίδραση του «θερμού» νερού στο χημισμό των «κρύων». Η χρήση σταθερών ισοτόπων σε ορισμένες από τις παραπάνω μελέτες καταλήγει στη μετεωρική προέλευση υπόγειου του νερού της λεκάνης. Πιο πρόσφατες μελέτες (Myloroulos *et al.*, 2007) υποστηρίζουν την παρουσία δύο επάλληλων υδροφόρων στρωμάτων στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας, που επικοινωνούν υδραυλικά άμεσα μεταξύ τους, χωρίς να επηρεάζονται από τη στρωματογραφία της περιοχής.

Τα συμπεράσματα της παρούσας μελέτης επιβεβαιώνουν εκείνα προγενέστερων ερευνών, σχετικά με το χημισμό των υπόγειων και θερμών υδάτων της λεκάνης, την παρουσία δύο υδροφόρων στρωμάτων με άμεση επικοινωνία και τη μετεωρική προέλευση του νερού. Η συμβολή της στην κατανόηση του υδρολογικού κύκλου του υγροτοπικού συστήματος της Κορώνειας συνοψίζεται στα εξής σημεία:

- ✓ Μελετείται ο χημισμός και των επιφανειακών υδάτινων σωμάτων (Κορώνεια, υδατόρεμα Μπογδάνα) και διερευνάται η σχέση τους με τα υπόγεια νερά
- ✓ Συμπεραίνεται η έμμεση επικοινωνία της λίμνης Κορώνειας με τους υποκείμενους υδροφόρους ορίζοντες και τέλος,
- ✓ Αποδεικνύεται η παρουσία δύο διαφορετικού υψομέτρου ζωνών τροφοδοσίας του υπόγειου νερού.

Εντούτοις, κατά την εκπόνηση της παρούσας μελέτης αναδείχθηκαν νέα πεδία αναζήτησης σχετικά με την περιοχή μελέτης. Συγκεκριμένα, η υψηλή περιεκτικότητα της λίμνης σε χλωριόντα (Cl^-) αποδόθηκε στην έντονη εξάτμιση που υφίσταται η λίμνη σε όλη την έκταση και το βάθος της. Ενδεχομένως, η απόπειρα ανάλυσης των πιέσεων που ασκούνται στη λεκάνη και ο συσχετισμός τους με τα χημικά προϊόντα που χρησιμοποιούνται κατά τις αγροτικές, αλλά και βιομηχανικές εργασίες, να απέδιδε τη συγκέντρωση αυτή των χλωριόντων σε ρυπαντικά φορτία. Επιπλέον, ο εποχικός χαρακτήρας που τείνει να αποκτήσει η λίμνη Κορώνεια θα μπορούσε να συσχετισθεί με τις μεταβολές της μορφολογίας, ενώ η

συγκριτική της μελέτη με λίμνες με παρόμοια μορφολογικά και γεωγραφικά χαρακτηριστικά (π.χ. Πικρολίμνη) θα παρουσίαζε ερευνητικό ενδιαφέρον.

9.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνόγλωσση Βιβλιογραφία

- Ατζέμογλου, Α. (2001). Γεωφυσική έρευνα επιφανείας στην υπολεκάνη Λίμνης Κορώνειας, Ν. Θεσσαλονίκης. Θεσσαλονίκη. Αδημ. μελέτη ΙΓΜΕ.
- Βαφειάδης, Π. (1988). Υδρογεωλογική προμελέτη της λεκάνης Βόλβης Ν. Θεσσαλονίκης, Υπουργείο Γεωργίας, Π.Περ/κή Δ/νση Εγγ.Βελτιώσεων, Θεσσαλονίκη.
- Βαφειάδης, Π., Πουτούκης, Δ., Ντότσικα, Ε. και Κουκουλάκης, Π. (1994). Η επίδραση των γεωθερμικών νερών της λεκάνης Λαγκαδά (Ν.Θεσ/κης) πάνω στην ποιότητα των υδροφόρων στρωμάτων της περιοχής. 5^ο Πανελλήνιο Εδαφολογικό Συνέδριο, Ξάνθη, 25-27 Μαΐου 1994.
- Βεράνης, Ν., Κατιρτζόγλου, Κ., Μελδιώτης, Ι., (2002). Υδρογεωλογικές συνθήκες της υπολεκάνης της λίμνης Κορώνειας Ν. Θεσσαλονίκης. Θεσσαλονίκη Αδημ. μελέτη ΙΓΜΕ.
- Βεράνης, Ν., Κατιρτζόγλου, Κ. (2001b). Υπολογισμός υδρολογικού ισοζυγίου στην πεδινή περιοχή υπολεκάνης Κορώνειας, Ν. Θεσσαλονίκης. Θεσσαλονίκη. Αδημ. μελέτη ΙΓΜΕ, σελ. 42.
- Βεράνης, Ν., κατιρτζόγλου, Κ. (2001) Διερεύνηση των δυνατοτήτων εκμετάλλευσης του βαθύτερου υδροφορέα της υπολεκάνης της λίμνης Κορώνειας, Ν.Θεσσαλονίκης, ΙΓΜΕ, Θεσσαλονίκη.
- Γιαννόπουλος, Π. (2000). Υπόγεια υδραυλική και μαθηματικά μοντέλα στο Αργολικό πεδίο. Διδακτορική διατριβή. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.
- Γιαννοπούλου, Ι., Παπαμιαχαήλ, Δ. (2006). Διερεύνηση της ποιοτικής κατάστασης του νερού της λίμνης Βόλβης. Πρακτικά 2^ο Συνεδρίου Συμβουλίου Περιβάλλοντος Α.Π.Θ. «Τα περιβαλλοντικά προβλήματα της Θεσσαλονίκης & της ευρύτερης περιοχής: Οι απόψεις του Α.Π.Θ.». 1-4 Ιουνίου, Θεσσαλονίκη, σελ. 289-295.
- Δεμίρης, Κ., Μελαδιώτης, Γ., Βατσέρης Χ., Παπαθεοδώρου, Κ. (1994). Έρευνα Υδάτων Λεκάνης Μυγδονίας. Θεσσαλονίκη. Αδημ. μελέτη, Επιτροπή Ερευνών ΑΠΘ, σελ.70.
- Ζαλίδης, Γ.Χ., Τακαβάκογλου, Β. και Αλεξανδρίδης, Θ. (2004) Αναθεωρημένο σχέδιο αποκατάστασης της Λίμνης Κορώνειας του Νομού Θεσσαλονίκης. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Τμήμα Γεωπονίας. Εργαστήριο Εφαρμοσμένη Εδαφολογίας. σελ.236+Παραρτήματα.
- Θανάσουλας, Κ. (1983). Γεωφυσική διασκόπηση της Μυγδονίας λεκάνης και της ευρύτερης περιοχής. Διδ. Διατ. Επιστ. ΣΘΕ ΑΠΘ. Παρ. Αριθμ. 14, 22^ος Τόμος.

Καπιρτζόγλου, Κ. (2001). Υδρογεωλογική μελέτη λεκανών Μυγδονίας-Ολύνθιου-Χαβρία των νομών Θεσσαλονίκης και Χαλκιδικής. Αδημ. μελέτη ΙΓΜΕ. Θεσσαλονίκη, σελ. 138.

Κοινή Υπουργική Απόφαση 39626/2208/2009: «Καθορισμός μέτρων για την προστασία των υπόγειων νερών από τη ρύπανση και την υποβάθμιση, σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγία 2006/118/ΕΚ «σχετικά με την προστασία των υπόγειων υδάτων από τη ρύπανση και την υποβάθμιση» του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 12^{ης} Δεκεμβρίου 2006».

Κοινή Υπουργική Απόφαση Υ2/2600/2001 - ΦΕΚ-892 Β'/11-7-01 (Διορθ. σφαλμ. στο ΦΕΚ 1082 Β'/14-8-01) : Ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης”, σε συμμόρφωση προς την οδηγία 98/83/ΕΚ του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης της 3ης Νοεμβρίου 1998.

Μουντράκης, Δ. (1985). Γεωλογία της Ελλάδας. University Studio Press, Θεσσαλονίκη, σελ. 207.

Κοινή Υπουργική Απόφαση 6919/11-2004 (ΦΕΚ248/Α/05-03-04) «Χαρακτηρισμός των λιμναίων, χερσαίων και υδάτινων περιοχών του υδροτοπικού συστήματος των λιμνών Βόλβης-Κορώνειας και Μακεδονικών Τεμπών ως «Εθνικό Πάρκο Υδροτόπων και λιμνών Κορώνειας-Βόλβης και Μακεδονικών Τεμπών» και καθορισμός ζωνών προστασίας και καθορισμός χρήσεων, όρων και περιορισμών δόμησης».

Νόμος 1751/1988. «Κύρωση πρωτοκόλλου τροποποιητικού της Σύμβασης Ραμσάρ 1971 για την προστασία των διεθνούς ενδιαφέροντος υδροτόπων ιδία ως υδροβιοτόπων» (ΦΕΚ 26/Α/1988).

Νόμος 1950/1991. «Κύρωση των τροποποιήσεων της Σύμβασης Ραμσάρ (1971) για την προστασία των διεθνούς ενδιαφέροντος υδροτόπων ιδία ως υδροβιοτόπων »(ΦΕΚ 84/Α/1991).

Νόμος 1739/1987: «Διαχείριση υδατικών πόρων και άλλες διατάξεις» (ΦΕΚ Α 201/20-11-1987).

Οδηγία 92/43/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 21^{ης} Μαΐου 1992 για τη διατήρηση των φυσικών οικοτόπων καθώς και της άγριας χλωρίδας και πανίδας. Επίσημη Εφημερίδα, L206 της 22/7/1992, Luxembourg.

Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23^{ης} Οκτωβρίου 2000 για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων. Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, L327/1, Luxembourg.

Οδηγία 2006/44/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 6^{ης} Σεπτεμβρίου 2006 περί της ποιότητας των γλυκών υδάτων που έχουν ανάγκη προστασίας ή

βελτιώσεως για τη διατήρηση της ζωής των ιχθύων. Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, L264/20, Luxembourg.

- Πουτούκης, Δ. και Ντότσικα, Ε. (1993). Υδρογεωχημική και ισοτοπική έρευνα των νερών της περιοχής των Λουτρών Λαγκαδά και Βόλβης. 2^ο Συνέδριο Υδρογεωλογίας, 24-28 Νοεμβρίου 1991, Πάτρα, Δελτίο Ελλ. Γεωλ. Εταιρείας.
- Τζιμόπουλος, Χ.Δ., Γκινίδη, Π.Δ., Πλιάτσικα, Δ.Κ. (2004). Έρευνα Διαχείρισης Υδατικών Πόρων της Υδρολογικής Λεκάνης Κορώνειας. Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων. σελ.105-109.
- Τραγανός, Γ. (1982). Πρόδρομη έκθεση επί της γεωθερμικής έρευνας στη λεκάνη Μυγδονίας. Αδημ. μελέτη. Αθήνα, σελ. 28.
- Τραγανός, Γ. (1987). Πρώτη φάση της γεωτρητικής έρευνας για την επιβεβαίωση του γεωθερμικού ενδιαφέροντος των περιοχών Λαγκαδά-Βόλβης στη λεκάνη Μυγδονίας. Έκθεση Ι.Γ.Μ.Ε, σελ.58.
- Τραγανός, Γ. (1991). Η παρούσα κατάσταση και τα αποτελέσματα της Β' φάσης γεωθερμικής έρευνας στη λεκάνη Μυγδονίας (Λαγκαδά-Βόλβη). Έκθεση Ι.Γ.Μ.Ε., σελ.62.
- Τσιούρης, Σ., Μαμώλος, Α. (2006). Σημειακή και μη σημειακή ρύπανση της λίμνης Κορώνειας. Πρακτικά 2^{ου} Συνεδρίου Συμβουλίου Περιβάλλοντος Α.Π.Θ. «Τα περιβαλλοντικά προβλήματα της Θεσσαλονίκης και της ευρύτερης περιοχής: Οι απόψεις του Α.Π.Θ.» 1-4 Ιουνίου, Θεσσαλονίκη, σελ.251-257.
- Υπουργική Απόφαση 126439/2456/2003 (ΦΕΚ 894B/3-7-2003).
- Φυτίκας, Μ., Ντότσικα, Ε. και Πουτούκης, Δ. (1993). Προκαταρκτική Υδροχημική και Θερμομετρική Έρευνα του Γεωθερμικού πεδίου ανατολικά της τεχνητής λίμνης Κερκίνης, ΕΜΠ, Ειδική Έκδοση.
- Ψιλοβίκος, Α. (1977). Παλαιογεωγραφική εξέλιξη της λεκάνης και της λίμνης της Μυγδονίας. Διδ. Διατριβή ΦΜΣ, ΑΠΘ.
- Ψωμιάδης, Δ.Δ. (2011): Παλαιοπεριβαλλοντικές και ιζηματολογικές συνθήκες σχηματισμού των ακτόλιθων (ψηφιδοπαγών αιγιαλών) του Βορειο-Αιγαιακού χώρου, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογία, ΑΠΘ, σελ. 250+Παράρτημα.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- Amorsson, S. (1983). Chemical equilibria in Icelandic geothermal systems – Implications for chemical geothermometry investigations. *Geochemics* 12, 119-128.
- APHA, AWWA and WPCF (1995). Standard Methods for the examination of water and wastewater, 18th edition, Washington DC.
- Arsovski, M. (1978). Some elements of the arrangement of seismic foci in the Balkan region. *Bull.Inst.Geol.Rep.Sot.Macedonia*, 15:261-282.
- Beg, M.K. (2009): Geospatial analysis of fluoride contamination in groundwater of Thamnar area, Raigarh District, Chhattisgarh State, Master Thesis, International Institution for Geo-Information Science and Earth Observation Enschede, Netherlands & Indian Institute of Remote Sensing, National Remote Sensing Centre, Department of Space, Dehradun, India
- BRGM (1972). Etude Hydrologique du Bassin de Mygdonia pour l' alimentation en eau de la Ville de Salonique, Grèce. 72 RME 011 FE (OYΘ).
- Clark, I. And Fritz, P. (1997). Environmental isotopes in hydrogeology. Lewis Publishers, New York, USA, p.328.
- Coleman, M.L., Shepard, T.J., Durham, J.J., Rouse, J.E., Moore, G.R., (1982). Reduction of water with zinc for hydrogen analysis. *Anal. Chem.* 54, 993–995.
- Craig, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science* 133:91-404.
- Craig, H., Gordon, L.I., Horibe, Y. (1963). Isotopic exchange effects in the evaporation of water. 1: Low temperature experimental results. *Journal of Geophysical Research* 68, 5079-5087.
- Dansgaard, W. (1964). Stable isotopes in precipitation, *Tellus* 16 (4), 437-468.
- de Groot, P. (2004). Handbook of stable isotope analytical techniques I, Elsevier, Amsterdam, pp. 1234.
- Dotsika, E. (1991): Utilisation du geothermomètre isotopique sulfate-eau en milieux de haute temperature sous influence marine potentielle: Les systèmes geothermaux de Grèce. Thèse de Docteur en Sciences.
- Dotsika, E., Lykoudis, S., Poutoukis, D., (2009): Spatial distribution of the isotopic composition of precipitation and spring water in Greece. *Global and Planetary Change*, 71, 141-149.
- Dotsika, E., Tzavidopoulos, I., Poutoukis, D., Raco, B., Maniatis, Y., Ignatiadou, D. (2012): Isotope contents, Cl/Br ratio and origin of water at Pikrolimni Lake: A natron source in

- Greece, as archive of past environment conditions. *Quaternary International* 266 (2012), pp. 74-80.
- Ehald, D., Knott, K., Nagel, J.F., Vogel, J.C.(1963). Deuterium and oxygen-18 in rainwater, *Journal of Geophysical Research* 68, 3775-3780.
- Epstein, S., Mayeda, T., (1953). Variation of ^{18}O content of waters from natural sources. *Geochim. Cosmochim. Acta* 4, 213–224.
- European Commission: Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC): The role of wetlands in the Water Framework Directive: Horizontal Guidance on the Role of Wetlands in the Water Framework Directive (November 2003), Office for Official Publications of the European Communities, L-2985, ISBN: 92-894-6967-6, ISSN: 1725-1087.
- Fontes, J., Zuppi, G. (1976). Isotopes and water chemistry in sulphide-bearing springs of central Ital. Proc. Adv.Gr. Meeting on Interpretation in Environmental Isotope and Hydrochemical data in Groundwater Hydrology. IAEA, Vienna, pp. 143-158.
- Fontes, J.C., Matray, J.M. (1993). Geochemistry and origin of formation brines from the Paris Basin, France. 1. Brines associated with Triassic salts. *Chemical Geology* 109, pp.149-177.
- Fournier, R.O. (1981). Application of water geochemistry to geothermal exploration and reservoir engineering. *in*: Rybach, L. and Muffler, L.H.P. (eds.) *Geothermal Systems: Principles and Case Histories*. J. Wiley, New York, 109-143.
- Fournier, R.O. and Truesdell, A.H. (1973). An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochim.Cosmochim.Acta* 37,515-525.
- Giggenbach, W.F., Gonfiantini, R., Jangi, B.L. and Truesdell, A.H. (1983). Isotopic and chemical composition of Parbati valley geothermal discharges, north-west Himalaya, India. *Geothermics* 12, 199-222.
- IUPAC, (1998): Isotope compositions of the elements 1997, *Pure Applied Chemistry* 70, pp.217-235.
- Knight Piesold Ltd, Karavokyris and Partners, Anelixa, Agrisystems (1998). Περιβαλλοντική αποκατάσταση της λίμνης Κορώνειας. Τελική έκθεση (Master Plan). Ευρωπαϊκή Επιτροπή, Γενική Διεύθυνση XVII, Περιφερειακή πολιτική και συνοχή, Ταμείο Συνοχής
- Kockel, F., Mollat, H. and Walther, H. (1977). Erläuterungen zur geologischen Karte der Chalkidiki and angrenzender gebiete 1:100000 (Nord-Griechenland). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover, p.119.

- Kockel, F., Αντωνιάδης, Π., Ιωαννίδης, Κ. (1978). Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας, Φύλλο Θεσσαλονίκη, Κλίμακα 1:50.000, ΙΓΜΕ, Αθήνα.
- Kockel, F., Mollat, H. (1978a). Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας, Φύλλο Θέρμη, Κλίμακα 1:50.000, ΙΓΜΕ, Αθήνα
- Kockel, F., Mollat, H. (1978b). Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας, Φύλλο Ζαγκλιβέρι, Κλίμακα 1:50.000. ΙΓΜΕ, Αθήνα
- Kockel, F., Ιωαννίδης, Κ. (1979). Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας, Φύλλο Κιλκίς, Κλίμακα 1:50.000, ΙΓΜΕ, Αθήνα
- Mandel, S., Shiftan, Z. (1981). Groundwater Resources, Investigation and Development. Academic Press, N.Y., London, pp.269.
- McKinney, C.R., McCrea, J.M., Epstein, S., Allen, H.A. and Urey, H.C. (1950). Improvements in mass spectrometers for the measurement of small differences in isotope abundance ratios, Review of Scientific Instruments, 21, pp. 724-730.
- Morse, J.W., Mackenzie, F.T. (1990): Geochemistry of sedimentary carbonates, Developments in Sedimentology, vol.48, Elsevier, Amsterdam, pp.707.
- Mylopoulos, N., Mylopoulos, Y., Veranis, N., Tolikas, D. (2007). Groundwater modeling and management in a complex lake-aquifer system. Water Resour Manage (2007) 21:469-494. DOI 10.1007/s11209-006-9025-3.
- Panagopoulos, A., Lloyd, J., Fitzsimons, V. (1995). Groundwater evolution of the Teirnavos alluvial basin, central Greece, as indicated by hydrochemistry. Πρακτικά 3^{ου} Υδρογεωλογικού Συνεδρίου της Ελληνικής Επιτροπής Υδρογεωλογίας (IAH), σελ. 332-344
- Papazachos, B.C., Tsapanos, T.M., Panagiotopoulos, D.G. (1982). A premonitory pattern of earthquakes in northern Greece. Nature 296:232-235.
- Pavlidis, S.B., Kiliadis, A.A. (1987). Neotectonic and active faults along the Serbomacedonian zone (SE Chalkidiki, northern Greece). Ann.Tectonicae, I(2):97-104.
- Taylor, H.P. (1974). The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition. *Econ.Geol.*, 69, 843-883.
- Thanassoulas, C. and Lazou, A. (1990). Application of the sp technique over Lagadas low enthalpy geothermal field, Greece. Geothermics, 19, 295-307.
- Tonani, F. (1980). Some remarks on the application of geothermal techniques in geothermal exploration, *in: Proc.Adv.Eur.Geoth.Res.Second Symp.*, Strasbourg, 428-443.

- Tranos, M., Papadimitriou, E., Kiliyas, A. (2003). Thessaloniki-Gerakarou fault Zone (TGFZ): the western extension of the 1978 Thessaloniki earthquake fault (Northern Greece) and seismicity hazard assessment. *Journal of Structural Geology*, 25:2109-2123.
- Truesdell, A.H. (1976). Summary of section III geochemical techniques in exploration. *in: Proc. Second United Nations Symp. on the Development and Use of Geothermal Resources*, San Francisco, 1975. v.1, U.S. Government Printing Office, Washington D.C., 53-89.
- Urey, H.C. (1947). The thermodynamic properties of isotopic substances, *Journal of Chemical Society*, pp. 562-581.
- Vatseris, Ch. (1992). Hydrogeologie des Mygdonias-Beckens (Nord-Griechenland) unter Berücksichtigung der hydrochemischen und isotonenphysikalischen composition den thermalwasser. Dissertation, Univ. Berlin, Germany. pp 171.
- WFD CIS Technical Report No.1 (Jan.2003). The EU Water Framework Directive: Statistical aspects of the identification of groundwater pollution trends and aggregation of monitoring results. Published by the Directorate General Environment of the European Commission, Brussels, ISBN No. 92-894-5639-6, ISSN No. 1725-5570.
- White, D.E. (1970): Geochemistry applied to the discovery, evaluation and exploitation of geothermal energy resources, *Geothermics, Spec.Iss. 2, 1*, pp.58-50.
- Zeebe, R.E., Wolf-Gladrow, D.A. (2001): *CO₂ in Seawater: Equilibrium, Kinetics, Isotopes*, Elsevier Oceanography Series 65, pp.346, Amsterdam.

Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία

- Επίσημος ιστοτόπος της Ευρωπαϊκής Ένωσης (2010). *Προστασία και διαχείριση των υδάτων (οδηγία-πλαίσιο για τα ύδατα)*. Διαθέσιμο:
http://europa.eu/legislation_summaries/agriculture/environment/128002b_el.htm
- Ηλεκτρονική βάση δεδομένων Natura 2000 (2012). *Προστατευόμενες περιοχές δικτύου*. Διαθέσιμο: <http://natura2000.eea.europa.eu>
- Ηλεκτρονική βάση δορυφορικών εικόνων Landsat (2010). Διαθέσιμο:
<http://www.landcover.org>
- Ηλεκτρονική βάση δεδομένων «Δημόσια Ανοιχτά Δεδομένα» (2011). *Αρχεία (shapefiles) για την καταγραφή της κάλυψης των χρήσεων γης*. Διαθέσιμο: <http://geodata.gov.gr/maps/>
- Ιστοτόπος Ελληνικής Στατιστικής Αρχής (2011). *Δημογραφικά στοιχεία για την περίοδο 1991-2001*. Διαθέσιμο: <http://www.statistics.gr>

Google, Inc. (2011). *Ηλεκτρονική βάση δορυφορικών δεδομένων*. Διαθέσιμο:
<http://www.google.com/earth/index.html>

10.ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας 1: Χημική ανάλυση δειγμάτων νερού που συλλέχθηκαν κατά τις περιόδους δειγματοληψίας Αυγούστου (υπόγεια νερά) και Δεκεμβρίου (επιφανειακά νερά) 2011 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας (κύρια ιόντα και θρεπτικά άλατα, mg/l).

Table 1: Chemical analyses of water samples collected during August (groundwater) and December (surface water) 2011 in Koronia lake catchment (major ions and nutrients, mg/l).

Δείγμα	Βάθος (m)	mg/l					mg/l								
		Na ⁺	NH ₄	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl/Br
Γ1	82	86,3	n.d.	2,4	126,9	33,4	0,3	55	n.d.	0,15	26,6	0,006	39,6	614,6	355,2
Γ2	-	139,2	n.d.	2,7	66,8	17,1	3,2	50,6	n.d.	0,16	14,7	0,006	67,3	450,8	312,2
Γ3	-	139,8	n.d.	3,4	53,2	12,5	2,2	29,9	0,013	0,11	7,59	0,005	124,5	369,5	269,1
Γ4	150	69,7	n.d.	2,5	111,1	31,1	0,7	58,7	n.d.	0,1	30,8	0,008	62,6	439,7	593,2
Γ5	-	135	n.d.	1,6	156,5	61,3	0,6	232,6	n.d.	0,22	17,3	0,025	47,3	648,5	1076,7
Γ6	72	37,8	n.d.	2,8	122,5	36,3	0,4	47,8	0,02	0,1	56,8	0,013	62,6	384,5	482,4
Γ7	100	144,3	n.d.	5,5	90,5	24,3	2,1	18,7	0,04	0,07	6,33	0,003	165,8	426,8	266,9
Γ8	-	94,9	n.d.	2,9	74,8	20	2,5	13,5	0,02	0,07	7,98	0,005	72,1	445,6	196,1
Γ9	-	55,8	n.d.	0,8	115,9	22,6	0,1	26,4	0,00	0,1	27,95	0,014	59,1	439,5	241,8
Γ10	100	187	n.d.	1,8	65,5	11,2	1,1	73,3	n.d.	0,33	5,15	0,566	24,5	582,6	222,1
Γ11	-	26,5	n.d.	0,5	101,6	19	0,3	24,1	0,04	0,09	5,22	0,003	39,9	372,0	256,7
Γ12	-	40,5	n.d.	1,6	106,5	28,9	0,2	48,9	n.d.	n.d.	10,98	1,171	44,7	414,1	-
Γ13	195	93	n.d.	2,4	81,8	21,9	0,6	25,5	0,00	0,06	2,77	0,861	25,8	524,1	217,5
Γ14	-	29	n.d.	1,2	132,3	17,8	0,2	22,8	0,05	n.d.	4,85	1,221	40,2	468,3	-
Γ15	110	86,7	n.d.	3,3	76,4	19,4	2,4	20,6	0,02	n.d.	13,98	0,635	67,8	407,7	-
Μπογδάνας	-	43,1	n.d.	3,4	50,8	19,2	0,3	52,9	0,01	0,06	0,96	n.d.	34,5	213,6	575,6
υδρευτικό	-	30,7	n.d.	1,7	55,8	15,8	0,7	32,8	n.d.	0,1	10,25	n.d.	41,5	176,9	523,7
Κορώνεια	-	2742,85	n.d.	30,33	50,9	347,6	2,5	1710,4	n.d.	3,5	0,36	n.d.	1805,7	3172,8	486,3

Πίνακας 2: Χημική ανάλυση δειγμάτων νερού που συλλέχθηκαν κατά τις περιόδους Αυγούστου (υπόγεια νερά) και Δεκεμβρίου (επιφανειακά νερά) 2011 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας (κύρια ιόντα και θρεπτικά άλατα, meq/l).

Table 2: Chemical analyses of water samples collected during August (groundwater) and December (surface water) 2011 in Koronia lake catchment (major ions and nutrients, meq/l).

Δείγμα	meq/l					meq/l								Σφάλμα (%)	Χημικός τύπος
	Na ⁺	NH ₄	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻		
Γ1	3,8	n.d.	0,06	6,3	2,8	0,01	1,55	n.d.	0,002	0,43	0,000	0,83	10	0,0	Ca-HCO ₃
Γ2	6	n.d.	0,07	3,3	1,4	0,17	1,43	n.d.	0,002	0,48	0,000	1,40	7,4	0,0	Na-HCO ₃
Γ3	6	n.d.	0,09	2,7	1,0	0,11	0,84	0,0003	0,001	0,25	0,000	2,59	6,0	0,0	Na-HCO ₃
Γ4	3	n.d.	0,06	5,5	2,6	0,04	1,66	n.d.	0,001	0,99	0,000	1,30	7,2	0,0	Ca(Na)-HCO ₃
Γ5	5,9	n.d.	0,04	7,8	5,0	0,03	6,56	n.d.	0,003	0,56	0,001	0,99	10,6	0,0	Ca(Na)-HCO ₃
Γ6	1,6	n.d.	0,07	6,1	3,0	0,02	1,35	0,0005	0,001	1,83	0,000	1,30	6,3	0,0	Ca-HCO ₃
Γ7	6,3	n.d.	0,14	4,5	2,0	0,11	0,53	0,0009	0,001	0,20	0,000	3,45	8,6	0,0	Na-SO ₄ (HCO ₃)
Γ8	4,1	n.d.	0,07	3,7	1,6	0,13	0,38	0,0004	0,001	0,26	0,000	1,50	7,3	0,0	Na(Ca)-HCO ₃
Γ9	2,4	n.d.	0,02	5,8	1,9	0,01	0,74	0,0002	0,001	0,90	0,000	1,23	7,2	0,0	Ca-HCO ₃
Γ10	8,1	n.d.	0,05	3,3	0,9	0,06	2,07	n.d.	0,004	0,17	0,018	0,51	9,6	0,0	Na-HCO ₃
Γ11	1,2	n.d.	0,01	5,0	1,6	0,01	0,68	0,0008	0,001	0,17	0,000	0,83	6,1	0,0	Ca-HCO ₃
Γ12	1,8	n.d.	0,04	5,3	2,4	0,01	1,38	n.d.	0,000	0,35	0,037	0,93	6,8	0,0	Ca-HCO ₃
Γ13	4	n.d.	0,06	4,0	1,8	0,03	0,72	0,0000	0,001	0,09	0,027	0,54	8,6	0,0	Ca(Na)-HCO ₃
Γ14	1,3	n.d.	0,03	6,6	1,5	0,01	0,64	0,0011	0,000	0,16	0,039	0,84	7,7	0,0	Ca-HCO ₃
Γ15	3,8	n.d.	0,08	3,8	1,6	0,13	0,58	0,0005	n.d.	0,45	0,020	1,41	6,7	0,0	Ca(Na)-HCO ₃
Μπογδάνας	1,9	n.d.	0,09	2,5	1,6	0,02	1,49	0,0003	0,001	0,03	n.d.	0,72	3,5	-2,7	Ca(Na)-HCO ₃
υδρευτικό	1,3	n.d.	0,04	2,8	1,3	0,04	0,93	n.d.	0,001	0,33	n.d.	0,86	2,9	-3,9	Ca(Na)-HCO ₃
Κορώνεια	119,3	n.d.	0,78	2,5	28,6	0,13	48,24	n.d.	0,044	0,01	n.d.	37,6	52	-4,6	Na-HCO ₃ (Cl)

Πίνακας 3: Ισοτοπική ανάλυση δειγμάτων νερού που συλλέχθηκαν κατά τις περιόδους δειγματοληψίας Αυγούστου και Δεκεμβρίου 2011 στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κορώνειας (ισοτοπικοί λόγοι $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ και $\delta^{13}\text{C}$).

Table 3: Isotopic analyses of water samples collected during August and December 2011 in Koronia lake catchment (isotope ratios $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{13}\text{C}$).

Δείγμα	Ισοτοπικοί λόγοι				
	$\delta^{18}\text{O}$	δD	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{18}\text{O}$
Γ1	-7,7	-49	-10,2		25,3
Γ2	-8,2	-51	-12,3		20,6
Γ3	-9,0	-58	-11,1		19,7
Γ4	-7,8	-47,5	-12,4		23,5
Γ5	-7,6	-50,1	-13,6		24,7
Γ6	-8,0	-51,5	-11,7		21,7
Γ7	-7,1	-48	-13,0		18,0
Γ8	-7,6	-49	-10,8		23,5
Γ9	-7,8	-47,5	-12,9		21,0
Γ10	-8,6	-51,7	-11,0		24,4
Γ11	-7,8	-47,5	-10,5		22,5
Γ12	-8,5	-54	-12,0		19,5
Γ13	-9,0	-55	-13,8		20,0
Γ14	-7,3	-49,8	-12,1		18,3
Γ15	-8,1	-52	-13,4		24,1
Μπογδάνας	-8,0	-51	-11,5		22,8
Κορώνεια	-6,6	-49	-10,5		22,1