



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



ΜΑΓΔΑ ΧΑΤΖΗΠΑΝΑΓΙΩΤΟΥ
Πτυχιούχος Γεωλόγος

**ΥΔΡΟΓΕΩΧΗΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ – ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ
ΙΟΝΤΩΝ ΚΑΙ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ
ΝΕΡΑ ΤΗΣ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΛΗΜΝΟΥ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2016



ΥΔΡΟΓΕΩΧΗΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ - ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΙΟΝΤΩΝ ΚΑΙ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΝΕΡΑ ΤΗΣ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΛΗΜΝΟΥ

ΜΑΓΔΑ ΧΑΤΖΗΠΑΝΑΓΙΩΤΟΥ

Πτυχιούχος Γεωλόγος

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του
Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών
"Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία"
Τομέας Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Αναπληρωτής Καθηγητής Α.Π.Θ, Κ. Βουδούρης, Επιβλέπων

Επίκουρος Καθηγητής Α.Π.Θ, Β. Μέλφος, Μέλος Τριμελούς
Εξεταστικής Επιτροπής

Επίκουρος Καθηγητής Α.Π.Θ, Ν. Καντηράνης, Μέλος Τριμελούς
Εξεταστικής Επιτροπής

© Μάγδα Χατζηπαναγιώτου, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.

ΥΔΡΟΓΕΩΧΗΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ – ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΙΟΝΤΩΝ ΚΑΙ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΑ
ΥΠΟΓΕΙΑ ΝΕΡΑ ΤΗΣ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΛΗΜΝΟΥ

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

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

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	6
ABSTRACT	8
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	12
2.1 Γεωγραφική θέση και πληθυσμιακά στοιχεία	12
2.2 Μορφολογία - Βλάστηση - Κλίμα	14
3. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ.....	19
3.1 Γεωτεκτονικό καθεστώς της ευρύτερης περιοχής.....	19
3.2 Λιθοστρωματογραφία	21
3.3 Τεκτονική	24
3.4 Το Γεωθερμικό σύστημα της Λήμνου	26
4. ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ	29
5. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ	31
5.1 Διαμόρφωση υπόγειων υδροφορέων	31
5.2 Πιεζομετρικές συνθήκες	32
6. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΥΔΑΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	40
7. ΦΥΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ	43
7.1 Ποιότητα υπόγειου νερού	43
7.2 Στατιστική επεξεργασία	55
7.3 Υδροχημικοί τύποι υπόγειου νερού – Ιοντικοί λόγοι.....	65
8. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ.....	73
9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	86
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	88
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	94

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία με τίτλο: «Υδρογεωχημική έρευνα – προέλευση ιόντων και βαρέων μετάλλων στα υπόγεια νερά της Ανατολικής Λήμνου» αποτελεί τμήμα της διπλωματικής ειδίκευσης, η οποία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2014-15 στο πλαίσιο του μεταπτυχιακού κύκλου σπουδών «Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία» του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Αντικείμενο της διατριβής αυτής αποτελεί η υδρογεωχημική μελέτη και ο προσδιορισμός της προέλευσης των ιόντων και βαρέων μετάλλων στα υπόγεια νερά του ανατολικού τμήματος της Λήμνου. Η μελέτη εστιάζει στη χρήση της πολυμεταβλητής στατιστικής ανάλυσης (παραγοντική και ανάλυση σε ομάδες) σε συνδυασμό με τη γεωστατιστική μοντελοποίηση των φυσικοχημικών δεδομένων ώστε να εντοπιστούν οι σημαντικότεροι παράγοντες που ελέγχουν την εξέλιξη των υπόγειων υδάτων, με ιδιαίτερη έμφαση στη χωρική κατανομή των ρύπων στην περιοχή έρευνας της Λήμνου.

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υλοποιήθηκε με την υποστήριξη ενός αριθμού ανθρώπων, στους οποίους θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Ανδρέα Παναγόπουλο, Γεωλόγο, Διευθυντή του Ινστιτούτου Εγγειών Βελτιώσεων (πρώην Εθνικό Ίδρυμα Αγροτικής Έρευνας – ΕΘ.Ι.Α.Γ.Ε), για τη θετική ανταπόκριση του στο αίτημα και για την παροχή των αποτελεσμάτων των φυσικοχημικών αναλύσεων.

Στην συνέχεια αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Αναπληρωτή Καθηγητή Υδρογεωλογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ, Δρ. Κωνσταντίνο Βουδούρη, τόσο για την ανάθεση της συγκεκριμένης διατριβής, όσο και για τις κατευθύνσεις που μου έδωσε για την ανάπτυξη και ολοκλήρωση της εργασίας.

Ευχαριστώ επίσης τον Επίκουρο Καθηγητή Κοιτασματολογίας-Γεωχημείας του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ και Μέλος Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής, Δρ. Βασίλη Μέλφο, για τη βοήθεια και καθοδήγηση του στο κεφάλαιο των βαρέων μετάλλων.

Επίσης θεωρώ υποχρέωση να ευχαριστήσω θερμά τον Δρ. Χρήστο Μάττα για τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσε στην παροχή βοήθειας και επιστημονικών υποδείξεων με τη γνώση του σε θέματα υδρογεωλογίας.

Ευχαριστώ επίσης την κυρία Μαρία Παπαχρήστου για την καθοδήγηση της και παροχή πληροφοριών σε θέματα γεωθερμίας της περιοχής έρευνας.

Τέλος ευχαριστώ την οικογένεια μου που με στήριξαν και εξακολουθούν να με στηρίζουν σε όλες τις προσπάθειες μου μέχρι σήμερα.

"ΥΔΡΟΓΕΩΧΗΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ - ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΙΟΝΤΩΝ ΚΑΙ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΝΕΡΑ ΤΗΣ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΛΗΜΝΟΥ"

ΧΑΤΖΗΠΑΝΑΓΙΩΤΟΥ ΜΑΓΔΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διατριβή εστιάζει στη διερεύνηση της ποιότητας του υπόγειου νερού και στις υδρογεωχημικές διεργασίες που καθορίζουν την περιοχή της Λήμνου και συγκεκριμένα το ανατολικό τμήμα της. Για τον λόγο αυτό εφαρμόστηκε η πολυμεταβλητή στατιστική ανάλυση, συμπεριλαμβανομένης της παραγοντικής ανάλυσης (Factor Analysis) και της ιεραρχικής ομαδοποίησης (Cluster Analysis), σε συνδυασμό με τη γεωστατιστική μοντελοποίηση σε 45 δείγματα υπόγειου νερού για δύο δειγματοληπτικές περιόδους, τον Μάιο και Οκτώβριο του 2001 που σχετίζονται με την υγρή περίοδο και την ξηρή περίοδο αντίστοιχα. Σκοπός της μελέτης είναι να εντοπιστούν οι σημαντικότεροι παράγοντες που ελέγχουν τη γεωχημεία των υπόγειων υδάτων και να προσδιοριστεί η χωρική κατανομή των ρύπων στην περιοχή έρευνας. Πρωτογενή και δευτερογενή γεωχημικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για να κατανοηθεί η γενική υδροχημεία, η συσχέτιση των κυρίων ιόντων και οι τύποι του υπόγειου νερού στην περιοχή.

Τα δείγματα του υπόγειου νερού συλλέχθηκαν κατά το έτος 2001 και αναλύθηκαν από το ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε με σκοπό την κατανομή των φυσικοχημικών παραμέτρων pH, EC, Ca, Mg, Na, K, HCO₃, Cl, SO₄, NO₃, NO₂, NH₄ και PO₄ καθώς επίσης και των ιχνοστοιχείων Mn, Zn, Fe, Cu, Cd, Co, Cr, Ni, Pb και B, έτσι ώστε να εκτιμηθεί ο πιθανός βαθμός ρύπανσης.

Η περιοχή έρευνας λόγω του χαμηλού της αναγλύφου περιλαμβάνει πολλές καλλιεργούμενες εκτάσεις και συγκροτείται από ηφαιστειο-ιζηματογενή πετρώματα. Διακρίνονται 3 υδροφόρες ζώνες όπου αναπτύσσονται οι υπό πίεση ηφαιστειακοί υδροφορείς πάνω στον αδιαπέρατο φλύσχη. Η βόρεια και κεντρική ζώνη εμφανίζουν φαινόμενα υφαλμύρισης λόγω των αυξημένων υδροληπτικών και αρδευτικών αναγκών, ενώ στη νότια ζώνη παρατηρείται μια υψηλού δυναμικού υδροφορία. Η ανατολική Λήμνος επιβαρύνεται από έναν μεγάλο αριθμό πηγών ρύπανσης (κτηνοτροφικές μονάδες, λιπάσματα, αστικά-βιομηχανικά λύματα, ΧΑΔΑ, στρατόπεδα), οι οποίες επιβαρύνουν το υπόγειο νερό σε νιτρικά, νιτρώδη, αμμωνιακά και φωσφορικά ιόντα. Κυρίως η ευρύτερη κεντρική περιοχή του Ρωμανού έχει

υποστεί έντονη υφαλμύριση και επιβάρυνση από ανθρωπογενείς ρύπους, ενώ στο υπόλοιπο τμήμα επικρατεί η αποσάθρωση και διάλυση των πυριτικών και ανθρακικών ορυκτών η οποία εμπλουτίζει τη σύσταση του υπόγειου νερού στα ιόντα K, Na, Ca, Mg, HCO_3 και SO_4 .

Από την παραγοντική ανάλυση και την ανάλυση σε ομάδες στα δεδομένα, προέκυψαν 4 παράγοντες-ομάδες (F1, F2, F3, F4) που περιγράφουν την εξέλιξη των υπόγειων υδάτων κατά τις δύο περιόδους Μάιο και Οκτώβριο του 2001. Οι παράγοντες αυτοί σχετίζονται κυρίως με την αλληλεπίδραση των πετρωμάτων με το υπόγειο νερό, με τη διείσδυση της θάλασσας και με τις αγροτικές-ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Ωστόσο, η κύρια υδροχημική διεργασία είναι η ιοντοανταλλαγή, λόγω της αλληλεπίδρασης θάλασσας-υδροφορέα, και η αντίστροφη ιοντοανταλλαγή, λόγω της αλληλεπίδρασης των πετρωμάτων με το νερό.

Το νερό και στις δύο περιόδους χαρακτηρίζεται ως "πολύ σκληρό" και η κατανομή των ιόντων είναι η ακόλουθη: $\text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{K}$ και $\text{Cl} > \text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{NO}_3$. Οι κύριοι τύποι του νερού είναι δύο, ο Ca-(Mg)-Cl-(SO_4) μεικτός τύπος που οφείλεται στη διάλυση και αλληλεπίδραση των πετρωμάτων με το υπόγειο νερό και ο Na-(K)-Cl-(SO_4) τύπος λόγω της αλληλεπίδρασης του υδροφορέα με το θαλασσινό νερό. Από τους ιοντικούς λόγους συμπεραίνουμε ότι στην περιοχή επικρατούν υδροφορείς πλούσιοι σε πυριτικά ορυκτά και ηφαιστειακά πετρώματα.

Από την ανάλυση των βαρέων μετάλλων προέκυψε το συμπέρασμα ότι τα μέταλλα Mn, Pb, Fe και Zn απαντώνται σχεδόν σε όλα τα δείγματα κυρίως κατά την ξηρή περίοδο και εμφανίζουν υψηλή μέση περιεκτικότητα πάνω από το επιτρεπτό όριο της Νομοθεσίας. Η παρουσία τους οφείλεται στα υδροθερμικά εξαλλοιωμένα μαγματικά πετρώματα τα οποία μέσω της διάλυσης του νερού συμβάλλουν στον εμπλουτισμό του στα συγκεκριμένα στοιχεία. Οι υψηλές συγκεντρώσεις μόνο κατά την ξηρή περίοδο (Οκτώβριος) σχετίζονται με τη χαμηλή στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Τα υπόλοιπα μέταλλα (Ni, Cr, Co, B) απαντώνται κυρίως στην κεντρική περιοχή του Ρωμανού λόγω ανθρωπογενών δραστηριοτήτων (βιομηχανικές μονάδες, λιπάσματα, αστικά λύματα, πεδία βολής).

Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι θα πρέπει να δοθεί περισσότερη προσοχή στην παρακολούθηση της υφαλμύρισης και των άλλων πηγών ρύπανσης στην περιοχή μελέτης σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο. Μελλοντικά σχέδια αειφόρου ανάπτυξης θα πρέπει να προταθούν και να εστιάσουν στην αλλαγή των γεωργικών και αρδευτικών πρακτικών διαχείρισης.

"HYDROGEOCHEMICAL INVESTIGATION OF THE POSSIBLE SOURCES OF IONS AND HEAVY METAL POLLUTION IN GROUNDWATER IN EASTERN LIMNOS ISLAND, GREECE"

CHATZIPANAGIOTOU MAGDA

ABSTRACT

This study focuses on investigating the groundwater quality and hydrogeochemical processes that characterize the Limnos Island in Greece and specifically the eastern fringe. Therefore, multivariate statistical techniques involving, factor analysis and hierarchical cluster analysis, were performed with the geostatistical modeling on 45 groundwater samples for two sample periods, May and October 2001 which are related with the wet and dry period respectively. The purpose of this study is to identify the factors that control the geochemical processes regulating groundwater geochemistry and to determine the spatial distribution of pollutants in the study area. Primary and secondary geochemical data were used to understand the general hydrochemistry, the correlation of major ions and the types of groundwater in the area.

The groundwater samples were collected during 2011 and analyzed for determination of the physicochemical parameters pH, EC, Ca, Mg, Na, K, HCO_3 , Cl, SO_4 , NO_3 , NO_2 , NH_4 and PO_4 , as well as the trace metals Zn, Fe, Cu, Cd, Co, Cr, Ni, Pb and B, in order to evaluate the possible pollution levels.

The study area consists of volcano-sedimentary rocks and because of its low elevation includes several agricultural expansions. It is divided into three confined volcanic aquifers overlying the impermeable flysch. The north and central zone showed groundwater salinization due to overexploitation of the aquifers for drinking and irrigation water supplies, while in the south zone there is a high water-supply potential aquifer. Eastern Limnos, is burdened by a large number of pollution sources (livestock farms, fertilizers, urban-industrial effluents, illegal landfills, military camps) that borne the groundwater by nitrates, nitrites, ammonium and phosphates. Especially the broader area of Romanou, at the central part of the island, has been affected by seawater intrusion in the sediments and there are significant human impacts on groundwater (intense wells' overexploitation during summer season). The rest part of the studied

area is influenced by the silicate and carbonate minerals weathering and dissolution which is the dominant hydrochemical process that contributes to enrichments of K, Na, Ca, Mg, HCO_3 and SO_4 of the groundwater.

Factor analysis and cluster analysis revealed four factors explaining the evolution of groundwater hydrochemistry in the two sampling periods. The varifactors are obtained by factor analysis indicate that the parameters responsible for groundwater quality variations are mainly related to groundwater-rock interaction (particularly weathering of silicate minerals), seawater intrusion, and anthropogenic sources (particularly agricultural activities). However, the dominant hydrochemical process is ion exchange due to seawater-aquifer material interaction, and reverse ion exchange due to water-rock interaction.

Interpretation of analytical data showed that the water in both sampling periods is characterized as "very hard", and the abundance of the major ions is as follows: $\text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{K}$ and $\text{Cl} > \text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{NO}_3$. The water quality is classified in two main types, the Ca-(Mg)-Cl-(SO_4) mixed type due to groundwater-rock interaction, and the Na-(K)-Cl-(SO_4) due to seawater intrusion. Ion ratio analysis represents aquifers enriched in silica minerals and volcanic rocks.

From the analysis of heavy metals it is concluded that Mn, Pb, Fe and Zn are found in almost all samples during the dry period and their mean concentrations were very high, in most cases, exceeded the standard limits recommended by the Greek Legislation. Their presence is due to the hydrothermally altered volcanic rocks and their dissolution from the groundwater which is enriched in these elements. These high concentrations were observed only during the dry season (October), probably due to the low level of the water table. The rest of the metals (Ni, Co, Cr, B) occur mainly in the Romanou area and they could be linked to anthropogenic sources (industrial leakage, fertilizers, municipal sewage, shooting fields).

The results of this study suggest that more attention should be paid to the rapid temporal monitoring on a local and regional scale for better control of both seawater mixing and other salinization or contamination sources in the study area. Future sustainable development plans should be proposed while focusing on altering the agricultural and irrigation management practices.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ποιότητα των υπόγειων υδάτων τείνει να υποβιβαστεί ακόμα πιο γρήγορα με τη μαζική βιομηχανοποίηση, την αστικοποίηση και τη γεωργική επέκταση με τις συναφείς δραστηριότητες τους που δημιουργούν υψηλές πιέσεις στους υπόγειους υδάτινους πόρους. Η υποβάθμιση της ποιότητας των υπογείων υδάτων συνήθως συνδέεται με πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις των διαφόρων παραγόντων, όπως με τη γεω-υδρολογία, τη σύνθεση του εδάφους, την υδρομετεωρολογία, την τοπογραφία, τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες και άλλες επιβάλλοντες συνθήκες (Kim et al., 2004).

Η αποτελεσματική και έγκαιρη παρακολούθηση και αξιολόγηση της ποιότητας των υπογείων υδάτων είναι ζωτικής σημασίας για τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα και την προληπτική διαχείριση των υπόγειων υδροφορέων. Αυτό επομένως, απαιτεί θεμελιώδη κατανόηση της χωρικής μεταβλητότητας της υδροχημείας και των παραγόντων που ελέγχουν την ποιότητα των υπόγειων υδάτων. Τα προβλήματα προέρχονται από τον τεράστιο αριθμό των μεταβλητών που εμπλέκονται στην ετερογένεια των πολύπλοκων υπόγειων συστημάτων. Οι μεταβολές αυτές μπορεί να εξετάζονται ταυτόχρονα και η μέθοδος της πολυμεταβλητής στατιστικής ανάλυσης παρέχει ισχυρές μεθόδους για την κατανόηση του συστήματος (Davis and Sampson, 1986).

Η πολυμεταβλητή στατιστική ανάλυση, δηλαδή η παραγοντική ανάλυση (factor analysis) και η ανάλυση σε ομάδες (Cluster analysis), έχουν συμβάλει σε μεγάλο βαθμό στην επίλυση των υδρογεωλογικών προβλημάτων (Locsey and Cox, 2003; Belkhir et al., 2010), προσδιορίζουν τους γεωχημικούς μηχανισμούς (Alberto et al., 2001; Lopez-Chicano et al., 2001) και ξεχωρίζουν ανωμαλίες από ανθρωπογενείς επεμβάσεις (Pereira et al., 2003). Η χρήση των πολυμεταβλητών στατιστικών μεθόδων και της γεωστατιστικής μοντελοποίησης είναι ένας πολύ καλός συνδυασμός στην υδροχημική αξιολόγηση των υδροφορέων για τη χωρική αποτύπωση των διαφόρων ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού και τη χωρική διακύμανση των παραγόντων που επηρεάζουν τα υπόγεια νερά (Dassi, 2011; Monjerezi et al., 2011).

Η παρακολούθηση της ποιότητας των υπόγειων νερών της Λήμνου είναι αναγκαία επειδή η χημική τους σύσταση παρουσιάζει εποχιακές και διαχρονικές μεταβολές, που αποδίδονται είτε σε γηγενή αίτια, όπως επίδραση γεωθερμικών ρευστών ή στη σύσταση των πετρωμάτων της

ευρύτερης περιοχής, είτε σε ανθρωπογενείς επιδράσεις όπως η υπερεκμετάλλευση των υδροφορέων ή η ρύπανση από σημειακές ή διάχυτες εστίες. Αυτό περιλαμβάνει υπολείμματα γεωργικών φαρμάκων κυρίως λιπάσματα (αζωτούχα) και ζιζανιοκτόνων, καθώς και ρύπανση από την απόρριψη στερεών ή υγρών οικιακών, κτηνοτροφικών και βιομηχανικών αποβλήτων στο περιβάλλον. Όλα αυτά είναι δυνατόν να υποβαθμίσουν σημαντικά την ποιότητα των υπόγειων νερών. Συνεπώς, η αξιολόγηση της ποιότητας του υπόγειου νερού είναι απαραίτητη στον προσδιορισμό της προέλευσής του, στις καταλληλότητάς του για άρδευση και ύδρευση, καθώς και των μέτρων που πρέπει να ληφθούν για την προστασία του.

Η υδρογεωλογική - υδροχημική έρευνα του υπόγειου νερού της Λήμνου ξεκίνησε ήδη από το 2003. Αρχικά στο πλαίσιο του Ειδικού Προγράμματος Τοπικής Αυτοδιοίκησης (Ε.Π.Τ.Α.), η Περιφέρεια Βορείου Αιγαίου και η Δημοτική Ενότητα Μούδρου της ανατολικής Λήμνου ανέθεσαν στο Ινστιτούτο Εγγειών Βελτιώσεων (ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε.) την υλοποίηση του έργου με τίτλο: «Μελέτη διαχείρισης υδάτινου δυναμικού». Για τον λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες στο ανατολικό τμήμα της Λήμνου, κατά την περίοδο του Μαΐου και του Οκτωβρίου του έτους 2001. Τα κυριότερα προβλήματα που διαπιστώθηκαν ήταν η σοβαρή υποβάθμιση της ποιότητας των υπόγειων νερών στην ανατολική Λήμνο και η παρουσία σε αυτά βαρέων μετάλλων συχνά σε συγκεντρώσεις πολλαπλάσιες των μέγιστων επιτρεπόμενων ορίων για ύδρευση (Παπαδόπουλος κ.ά., 2003).

Αρχικά, τα δεδομένα των φυσικοχημικών αναλύσεων παραχωρήθηκαν από το ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε. και στη συνέχεια, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, έγινε συλλογή και καταγραφή των υφιστάμενων υδρολογικών και υδρογεωλογικών δεδομένων. Ακολούθησε η επεξεργασία τους με τη βοήθεια του προγράμματος στατιστικής επεξεργασίας SPSS και με το λογισμικό AquaChem για την ανάλυση, την ερμηνεία και τη σύγκριση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του υπόγειου νερού. Τέλος, κατασκευάστηκαν χάρτες χωρικής κατανομής των αποτελεσμάτων σε περιβάλλον G.I.S. ώστε να πραγματοποιηθεί καλύτερη ερμηνεία και μια πιο λεπτομερή διερεύνηση της πιθανής συσχέτισης των υψηλών συγκεντρώσεων ιόντων και βαρέων μετάλλων με τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες στην περιοχή ή και την ευρύτερη γεωλογική δομή.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 Γεωγραφική θέση και πληθυσμιακά στοιχεία

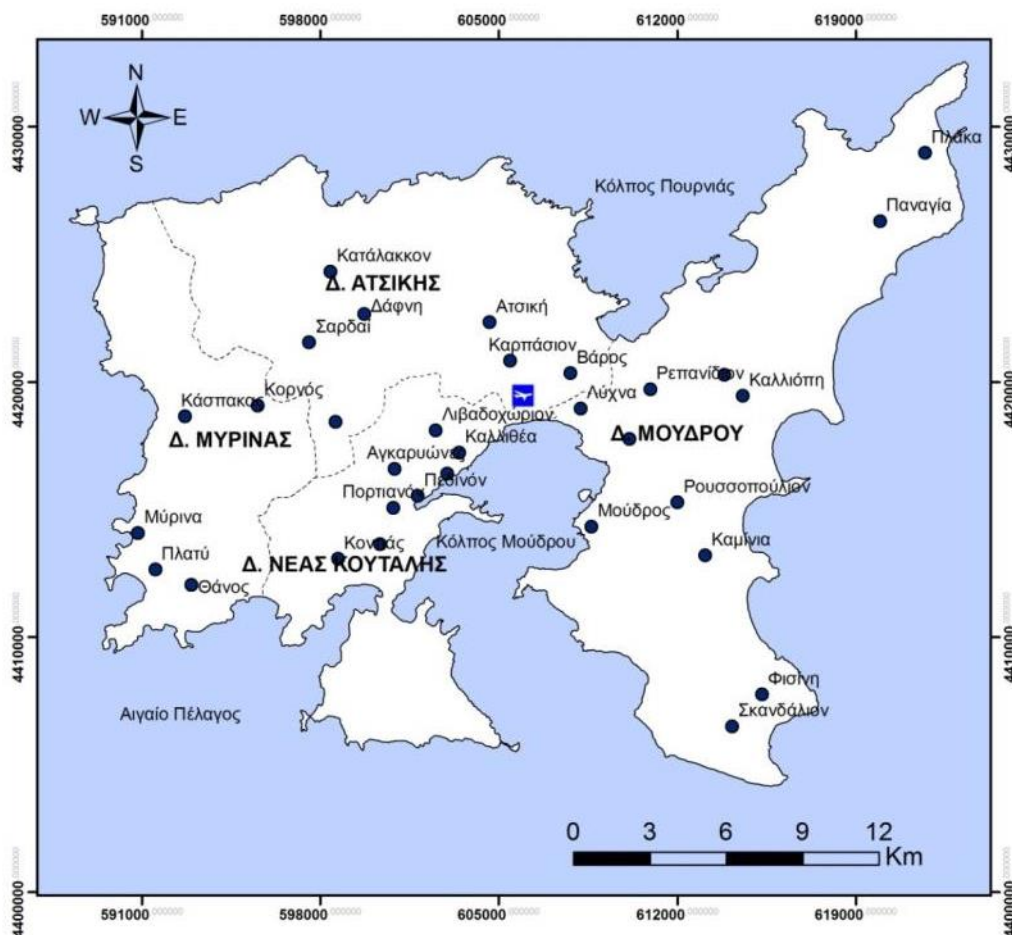
Η Λήμνος (Σχήμα 1) είναι το όγδοο μεγαλύτερο νησί της Ελλάδας, έχει έκταση 476 km² και το τέταρτο σε μήκος ακτών (260 km). Βρίσκεται στο βόρειο Αιγαίο, στο Θρακικό πέλαγος, ανάμεσα στο Άγιο Όρος, τη Σαμοθράκη, την Ίμβρο και τη Λέσβο. Μαζί με τον Άγιο Ευστράτιο αποτελούν την επαρχία Λήμνου του νομού Λέσβου. Πρωτεύουσα και κύριο λιμάνι της Λήμνου είναι η Μύρινα, η οποία έως το 1955 ονομαζόταν Κάστρο, ονομασία που επικράτησε κατά την ύστερη βυζαντινή περίοδο και ακόμα έτσι αποκαλείται από μερικούς ντόπιους του νησιού. Το όνομα Λήμνος, παρέμεινε αναλλοίωτο στους αιώνες, έχει πιθανώς ρίζα φοινικική και σημαίνει «λευκή». Οι βασικές ασχολίες των κατοίκων είναι η κτηνοτροφία, η γεωργία, η αλιεία, ο τουρισμός, το εμπόριο και τα ναυτικά επαγγέλματα.



Σχήμα 1: Δορυφορική εικόνα περιοχής μελέτης (visibleearth.nasa)

Ένα από τα φυσικά λιμάνια της Λήμνου είναι ο κόλπος του Μούδρου. Εισχωρεί από νότια στη στεριά της Λήμνου σε μήκος 14,2 km, ενώ το μεγαλύτερο βάθος του φθάνει τα 40 m. Το

μέγεθος του κόλπου, η θέση στο κέντρο του νησιού, οι πολυσχιδείς ακτές του, οι αμμώδεις παραλίες του, η ασφάλεια και η προστασία που παρέχει, από τους ανέμους και η άριστη σχεδόν κατάσταση των οικοσυστημάτων του, συνιστούν ένα σημαντικής αισθητικής και οικολογικής αξίας περιβάλλον. Αποτελεί επίσης έναν αξιόλογο βιότοπο με πλούσια ιχθυοπανίδα. Κατά μήκος των ακτών του κόλπου σχηματίζονται εκτεταμένοι αλμυροί και υφάλμυροι υγρότοποι, εποχιακές λιμνοθάλασσες και φυσικά κανάλια εισροής θαλασσινού νερού. Το μέρος αυτό αποτελεί τόπο αναπαραγωγής πολυάριθμων ενδημικών ειδών (Ρουμελιώτη, 2013).



Σχήμα 2: Τοπογραφικός χάρτης Λήμνου

Η Λήμνος από το 2011 αποτελεί έναν ενιαίο Δήμο. Έχει 32 χωριά και περίπου 17.000 μόνιμους κατοίκους βάσει της απογραφής του 2011. Η Περιφερειακή Ενότητα Λήμνου είναι μία από τις 74 περιφερειακές ενότητες τοπικής αυτοδιοίκησης και ανήκει στην Περιφέρεια Βορείου Αιγαίου και συγκροτείται από δύο δήμους. Τον Δήμο Λήμνου, με πρωτεύουσα τη Μύρινα και τον Δήμο Αγίου Ευστρατίου, με πρωτεύουσα τον Άγιο Ευστράτιο. Ο Δήμος Λήμνου αποτελείται

από τέσσερις (4) δημοτικές ενότητες: τη Δημοτική Ενότητα Μύρινας, Μούδρου, Αττικής και Νέας Κούταλης. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1) απεικονίζεται η πληθυσμιακή κατανομή του Δήμου Λήμνου και Αγίου Ευστρατίου.

Πίνακας 1: Απογραφή πληθυσμού-Δημοτικές Ενότητες (www.lemnos.gr)

Περιγραφή	Μόνιμος πληθυσμός 2011
ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΛΗΜΝΟΥ	16.376
ΔΗΜΟΣ ΛΗΜΝΟΥ	15.760
Δημοτική Ενότητα Μύρινας	7.162
Δημοτική Ενότητα Μούδρου	4.206
Δημοτική Ενότητα Αττικής	2.236
Δημοτική Ενότητα Νέας Κούταλης	2.156
ΔΗΜΟΣ ΑΓΙΟΥ ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΥ	616

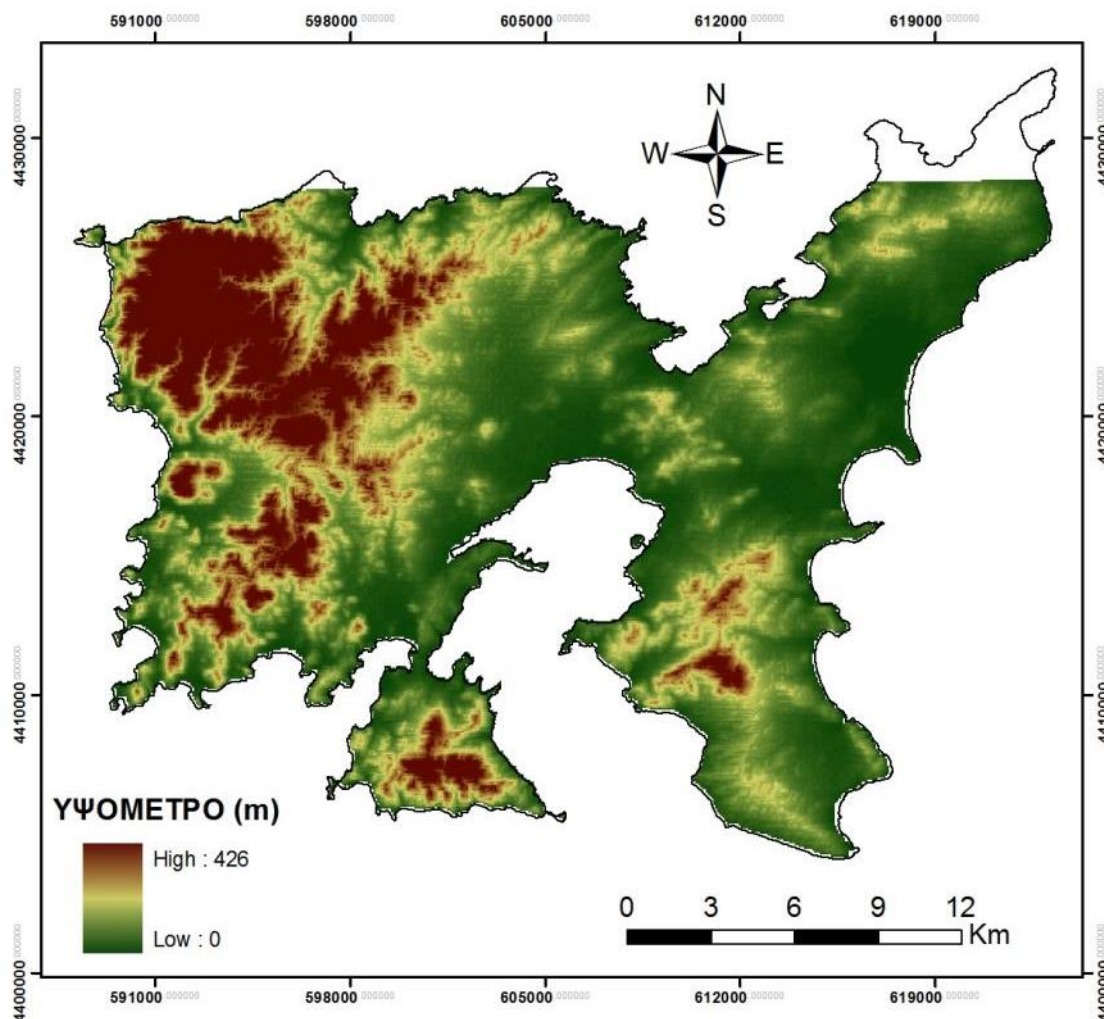
2.2 Μορφολογία - Βλάστηση - Κλίμα

Η Λήμνος έχει γενικά ήπιο ανάγλυφο χωρίς απότομες εναλλαγές στο οποίο κυριαρχούν πεδινές εκτάσεις και μικροί λόφοι, όπως φαίνονται και στα σχήματα. Οι ορεινές περιοχές βρίσκονται στο βορειοδυτικό μέρος σε μορφή μικρών λοφοσειρών με μέγιστο υψόμετρο 430 m στο οποίο βρίσκεται ο λόφος Σκοπιά. Οι πεδινές εκτάσεις καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος του νησιού, καλύπτοντας το κεντρικό και ανατολικό της τμήμα (Innocenti et al., 1994).

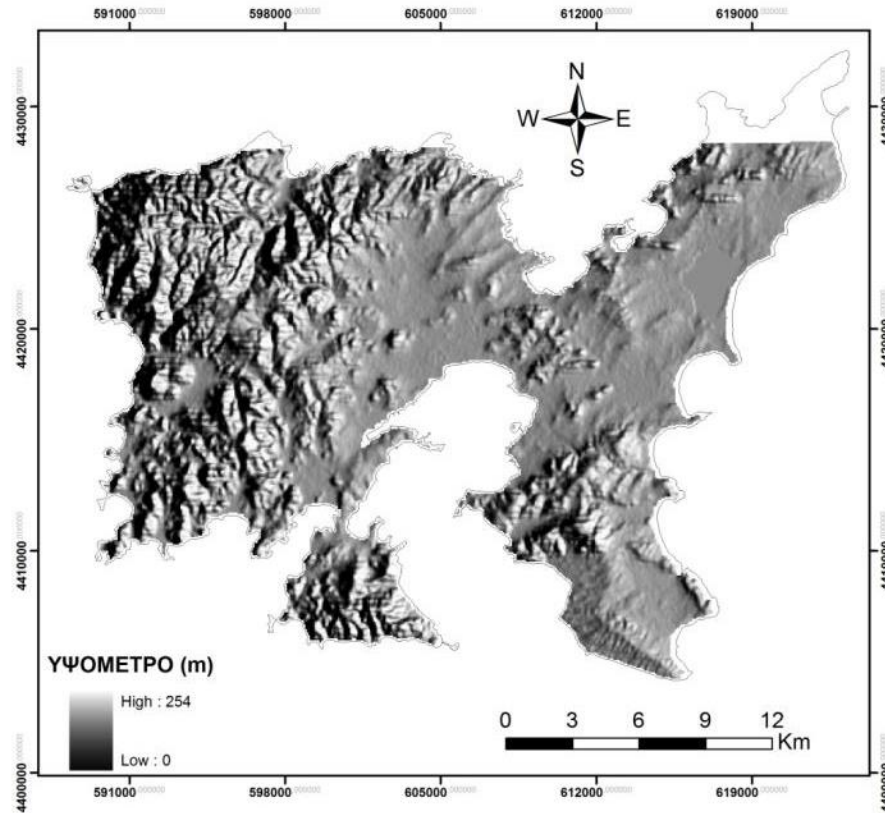
Στην ανατολική Λήμνο υπάρχουν τρεις παραθαλάσσιες λίμνες η Αλυκή, η Χορταρόλιμνη και η Ασπρολίμνη, που αποτελούν ένα μοναδικό οικοσύστημα που εντάσσεται στο δίκτυο Natura 2000 και φιλοξενούν περισσότερα από 250 είδη σπάνιων πουλιών. Κοντά στη Χορταρόλιμνη αναπτύχθηκε το Καταφύγιο Άγριας Ζωής Κώμη-Τούρλες-Χορταρόλιμνη. Στα βόρεια του νησιού κοντά στον οικισμό Παναγία υπάρχει το Καταφύγιο Άγριας Ζωής Παλαιόκαστρο-Αλεπότρυπες-

Βουτσάδικα Το έδαφος της είναι ηφαιστειογενές, άλλοτε αμμώδες, ενίοτε βραχώδες, και εναλλασσόμενο συνεχώς με εύφορα κομμάτια καλλιεργήσιμης γης. Οι κυριότερες καλλιέργειες στο νησί είναι οι αροτραίες με ποσοστό 93% και ακολουθούν τα αμπέλια, κηπευτικά, δενδρώδεις και αρδευόμενες εκτάσεις.

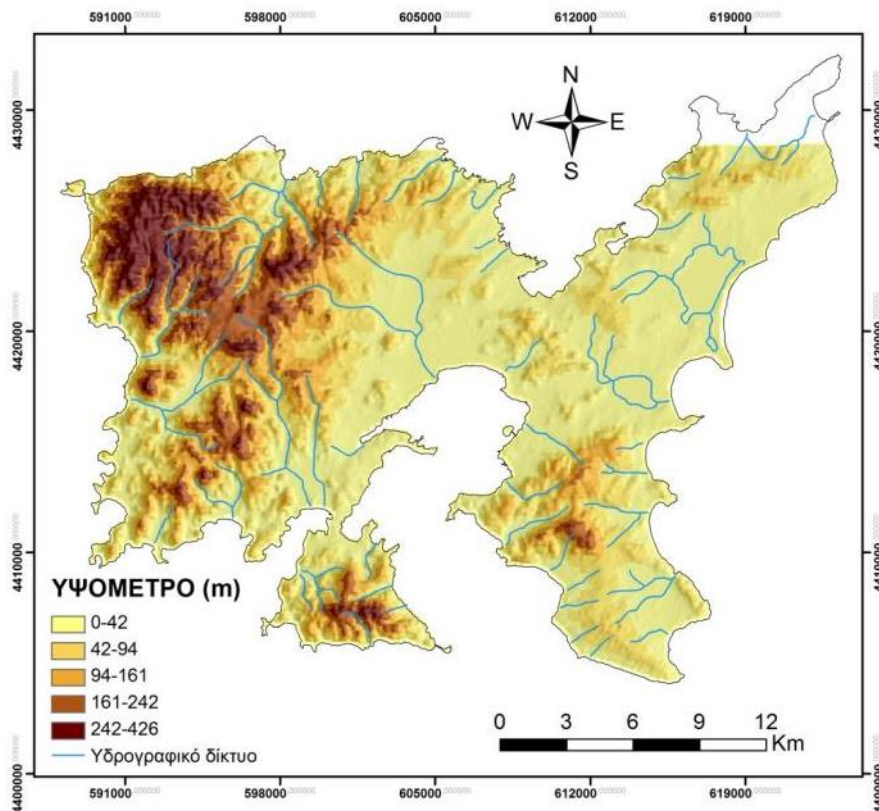
Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα διαχείρισης χωρικών δεδομένων G.I.S. για την ψηφιακή αναπαράσταση του αναγλύφου της περιοχής (DEM) (Σχήμα 3), από τον οποίο στη συνέχεια προέκυψε ο χάρτης σκιασμένου αναγλύφου (Σχήμα 4) και ο μορφολογικός χάρτης (Σχήμα 5) της περιοχής. Παρατηρούμε ότι η δυτική Λήμνος παρουσιάζει το πιο έντονο ανάγλυφο σε αντίθεση με την ανατολική και κεντρική όπου συναντάμε τις καλλιεργούμενες εκτάσεις.



Σχήμα 3: Χάρτης ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου DEM

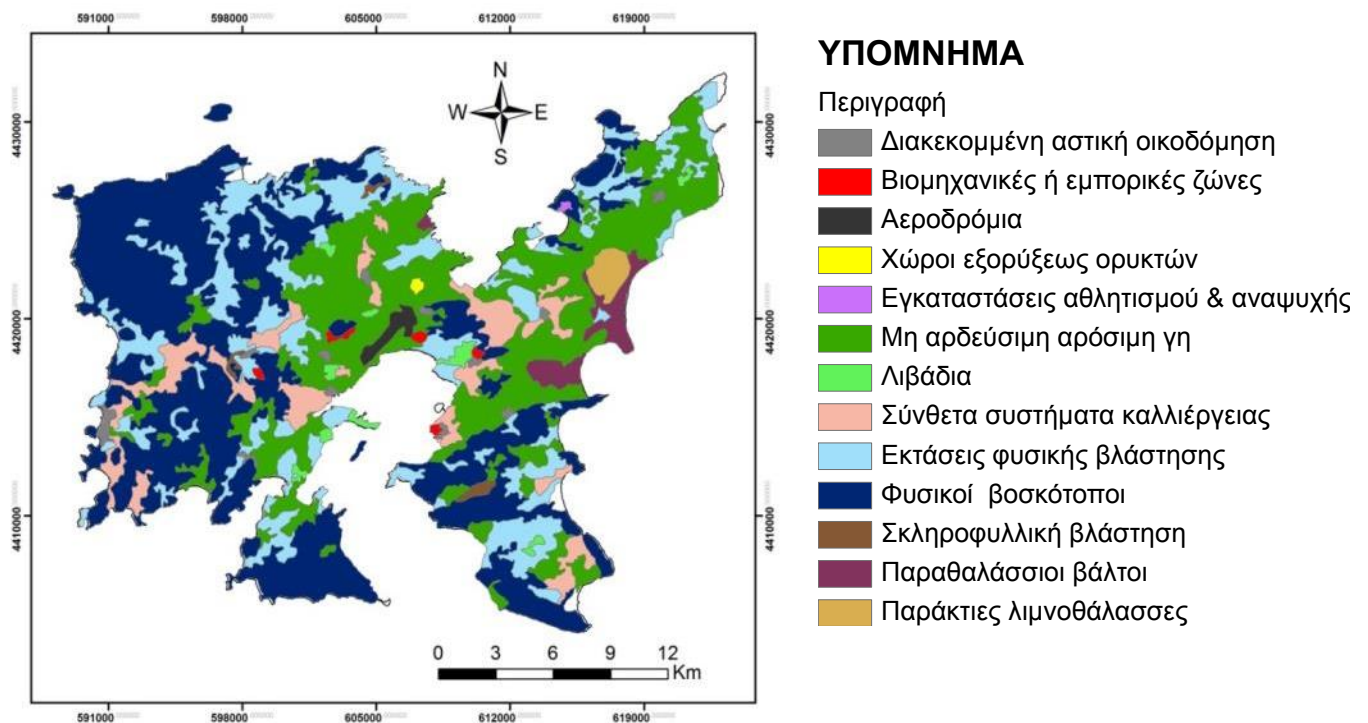


Σχήμα 4: Χάρτης σκιασμένου αναγλύφου



Σχήμα 5: Μορφολογικός χάρτης

Για την περιγραφή της χρήσης γης χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης το πρόγραμμα Corine Land Cover 2000 (COoRdination of Information on the Environment). Είναι ένα Ευρωπαϊκό πρόγραμμα όπου παρέχει δεδομένα για την εδαφική κάλυψη. Όπως φαίνεται και στον παρακάτω χάρτη κάλυψης γης (Σχήμα 6), η δυτική Λήμνος καλύπτεται κυρίως από φυσικούς βοσκοτόπους, εκτάσεις φυσικής βλάστησης και σύνθετα συστήματα καλλιέργειας. Η ανατολική Λήμνος αποτελείται από μη αρδεύσιμη αρόσιμη γη (δημητριακά, όσπρια, καλλιέργειες ζωοτροφών, βολβόφυτα, ανθοκομικές καλλιέργειες, δενδροκαλλιέργειες, οπωροκηπευτικά), λιβάδια, φυσικοί βοσκότοποι και κατά τόπους τμήματα φυσικής βλάστησης.

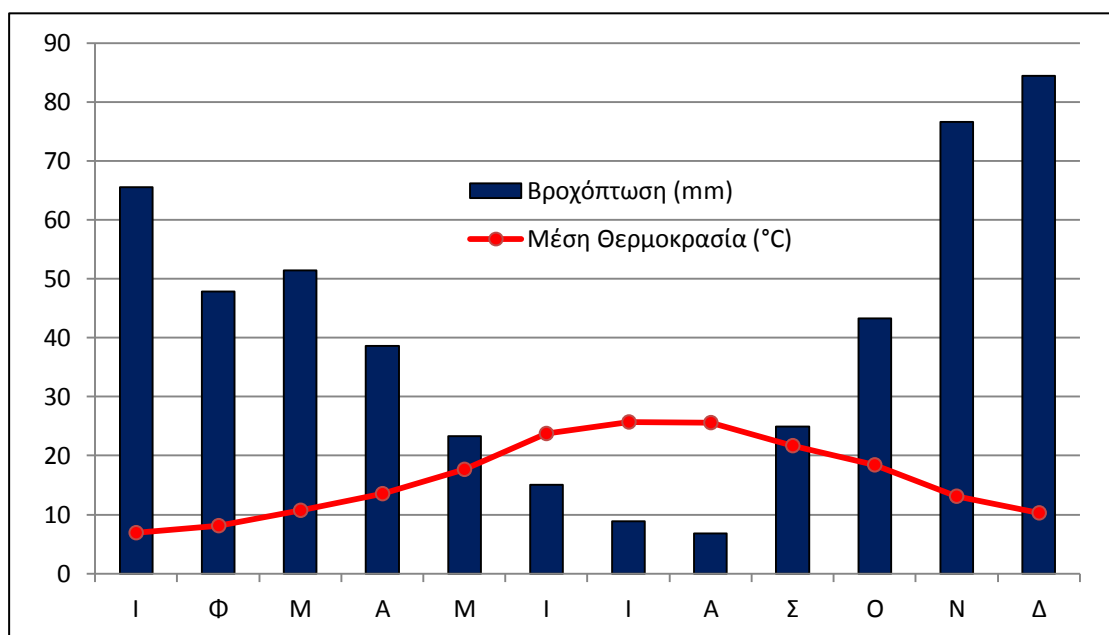


Σχήμα 6: Χάρτης κάλυψης γης Corine Land Cover 2000

Τα γεωργικά προϊόντα που παράγονται στην περιοχή μελέτης καλύπτουν πρώτιστα τις τοπικές ανάγκες ενώ ένα τμήμα τους διοχετεύεται στη Μυτιλήνη και στο Άγιο Όρος. Οι αγρότες της περιοχής εφαρμόζουν ένα σύστημα καλλιέργειας των γεωργικών εκτάσεων έτσι ώστε τα καλλιεργούμενα φυτά να προσαρμόζονται στις φυσικές, τοπογραφικές, εδαφικές και υδρολογικές συνθήκες της περιοχής. Τελευταία με την ανόρυξη των γεωτρήσεων επιχειρήθηκε η εισαγωγή δυναμικών αρδευομένων καλλιεργειών (κηπευτικά-μηδική). Ωστόσο η γεωργική ανάπτυξη της περιοχής, ιδίως στην ανατολική Λήμνο, εμποδίζεται από την έλλειψη νερού για την επέκταση των αρδεύσεων (Παπαδόπουλος κ.ά., 2003). Η έλλειψη πυκνών δασών οφείλεται κατά πολύ

στην ανθρώπινη παρέμβαση μέσω της κτηνοτροφίας και της υλοτομίας, στις γεωλογικές συνθήκες αλλά και στους δυνατούς ανέμους που δεν επιτρέπουν την ανάπτυξη τους.

Με βάση τον μετεωρολογικό σταθμό της Λήμνου (25°13'58" / 39°55'20"/ ύψος 4,81m), το κλίμα του νησιού θεωρείται ως ημίξηρο. Η μέση μηνιαία βροχόπτωση κυμαίνεται μεταξύ 6,8 mm τον μήνα Αύγουστο και 76,6 mm τον Νοέμβριο, με μέση τιμή τα 40,55 mm. Η μέση μηνιαία θερμοκρασία κυμαίνεται από 7,4°C τον Ιανουάριο σε 25,2°C τον Αύγουστο, με μέση ετήσια τιμή 16°C. Στο Σχήμα 7 δίνεται το ομβροθερμικό διάγραμμα της περιοχής για τα έτη 1974-1997 σύμφωνα με τα δεδομένα από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY). Παρατηρούμε ότι η ξηροθερμική περίοδος εντοπίζεται από τον Μάιο έως και τον Σεπτέμβριο. Η μέση ετήσια σχετική υγρασία εκτιμάται ότι είναι 70,3%. Με βάση τον υπολογισμό των παραμέτρων του υδάτινου ισοζυγίου με τη μέθοδο Thornthwaite - Mather (1955) εκτιμήθηκε ότι το 76,9% της ετήσιας βροχόπτωσης, δηλαδή $176,0 \times 10^6 \text{ m}^3$, χάνεται μέσω της εξατμισοδιαπνοής, ενώ το υπόλοιπο 23,1%, δηλαδή $52,8 \times 10^6 \text{ m}^3$, συμβάλλει στην τροφοδοσία της επιφανειακής και υπόγειας απορροής (Panagopoulos et al., 2011).

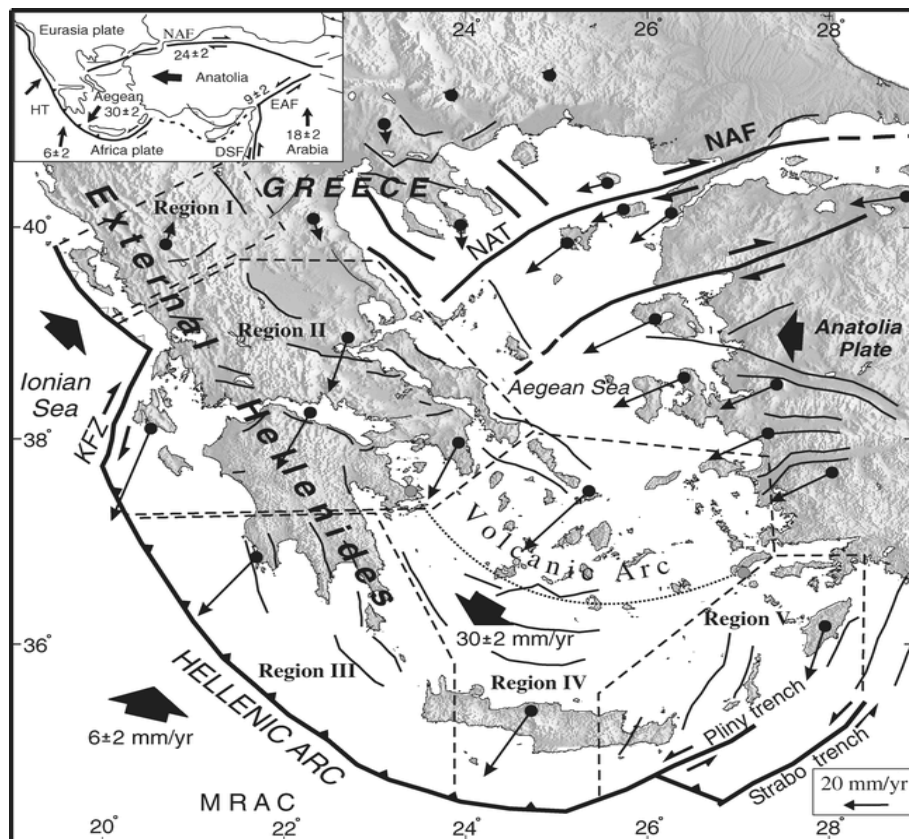


Σχήμα 7: Ομβροθερμικό διάγραμμα Μετεωρολογικού Σταθμού Λήμνου

3. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

3.1 Γεωτεκτονικό καθεστώς της ευρύτερης περιοχής

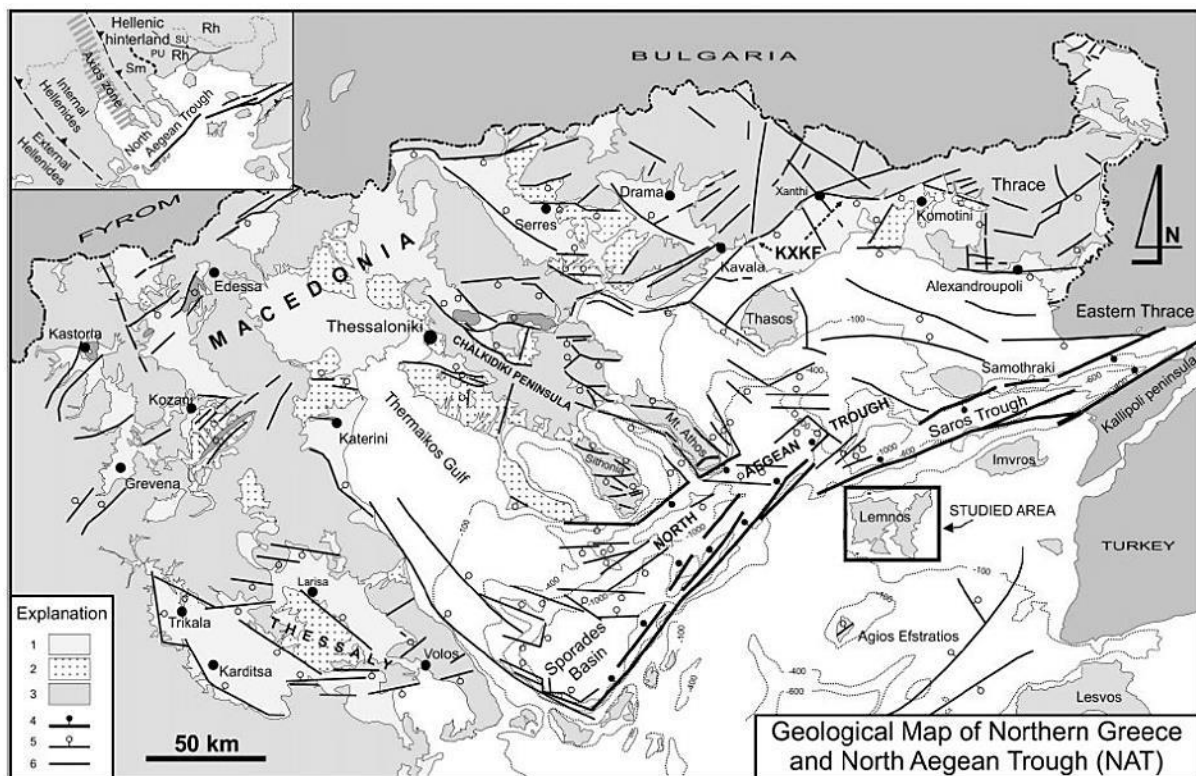
Το Ελληνικό τόξο είναι αποτέλεσμα σύνθετων φαινομένων που προέρχονται από τη σύγκλιση των λιθοσφαιρικών πλακών Ευρώπης και Αφρικής. Με τη σύγκλιση αυτή λαμβάνει χώρα βύθιση της πλάκας της Αφρικής κάτω από την Ευρώπη το ενεργό περιθώριο της οποίας αποτελεί ο Ελληνικός χώρος (Σχήμα 8). Το σημερινό γεωτεκτονικό καθεστώς του Αιγαίου και του Ελληνικού τόξου άρχισε να διαμορφώνεται στο Μέσο Μειόκαινο. Το Ελληνικό τόξο αποτελεί ένα τυπικό νησιωτικό τόξο όπου ο χώρος του Αιγαίου Πελάγους θεωρείται ότι αποτελεί μια οπισθότοξη λεκάνη (back-arc basin) με ηπειρωτικό φλοιό και ασβεσταλκαλική δραστηριότητα και δημιουργήθηκε από τις εφελκυστικές τάσεις πίσω από το νησιωτικό τόξο (Μουντράκης, 2010).



Σχήμα 8: Απλοποιημένος χάρτης που δείχνει το γεωτεκτονικό καθεστώς του Ελληνικού χώρου (Kokkalas et al., 2006)

Οι εφελκυστικές τάσεις έχουν γενική διεύθυνση Βορρά-Νότο και προκαλούν κανονικά ρήγματα, κυρίως ανατολικής-δυτικής διεύθυνσης. Εκτός όμως από τα ρήγματα γενικής διεύθυνσης Α-Δ με τις ίδιες εφελκυστικές τάσεις επαναδραστηριοποιούνται και παλιότερα ρήγματα άλλων διευθύνσεων, που είχαν δημιουργηθεί σε άλλες γεωλογικές περιόδους με διαφορετικής διεύθυνσης τάσεις. Αποτέλεσμα των ασκούμενων εφελκυστικών τάσεων και των κανονικών ρηγμάτων είναι να δημιουργηθούν αλληπάλληλοι τεκτονικοί τάφροι και τεκτονικά κέρατα τόσο κατά διεύθυνση Α-Δ, όσο και παράλληλα και ακτινωτά στο Ελληνικό τόξο.

Η Λήμνος βρίσκεται στο κεντρικό τμήμα της αύλακας του Βορείου Αιγαίου και εκεί έχουν συσσωρευτεί ιζήματα από το Ηώκαινο μέχρι σήμερα (Lalechos, 1986; Roussos, 1994). Αυτά τα ιζήματα έχουν διακοπεί από μαγματικά επεισόδια χρονολογημένα το Άνω Μειόκαινο (Fytikas et al., 1984; Innocenti et al., 1994). Η μορφολογία καθώς και η γεωλογική και τεκτονική δομή της Λήμνου είναι άμεσα συνδεδεμένες με το τεκτονικό καθεστώς του Βορείου Αιγαίου (Σχήμα 9).



Σχήμα 9: Γενικευμένος γεωτεκτονικός χάρτης που δείχνει τη θέση της Λήμνου σε σχέση με την τάφρο του Βόρειου Αιγαίου (Tranos, 2009)

3.2 Λιθοστρωματογραφία

Σύμφωνα με τους Innocenti et al. (1994), το μεγαλύτερο μέρος του νησιού της Λήμνου αποτελείται από μια ακολουθία ιζηματογενών πετρωμάτων μολασσικού τύπου και ηφαιστειακών υπερκείμενων προϊόντων (Σχήμα 10), τα οποία έχουν αποθεθεί το Άνω Ηώκαινο-Κάτω Ολιγόκαινο με ΒΑ-ΝΔ διεύθυνση (Roussos et al., 1993; Roussos et al., 1994), σε μια λεκάνη που σχηματίστηκε ως αποτέλεσμα κανονικών ρηγμάτων και εφελκυσμού κατά την κατάρρευση του Ορογενούς (Roussos et al., 1993; Innocenti et al., 1994; Tranos, 2009; Brun and Sokoutis, 2010).

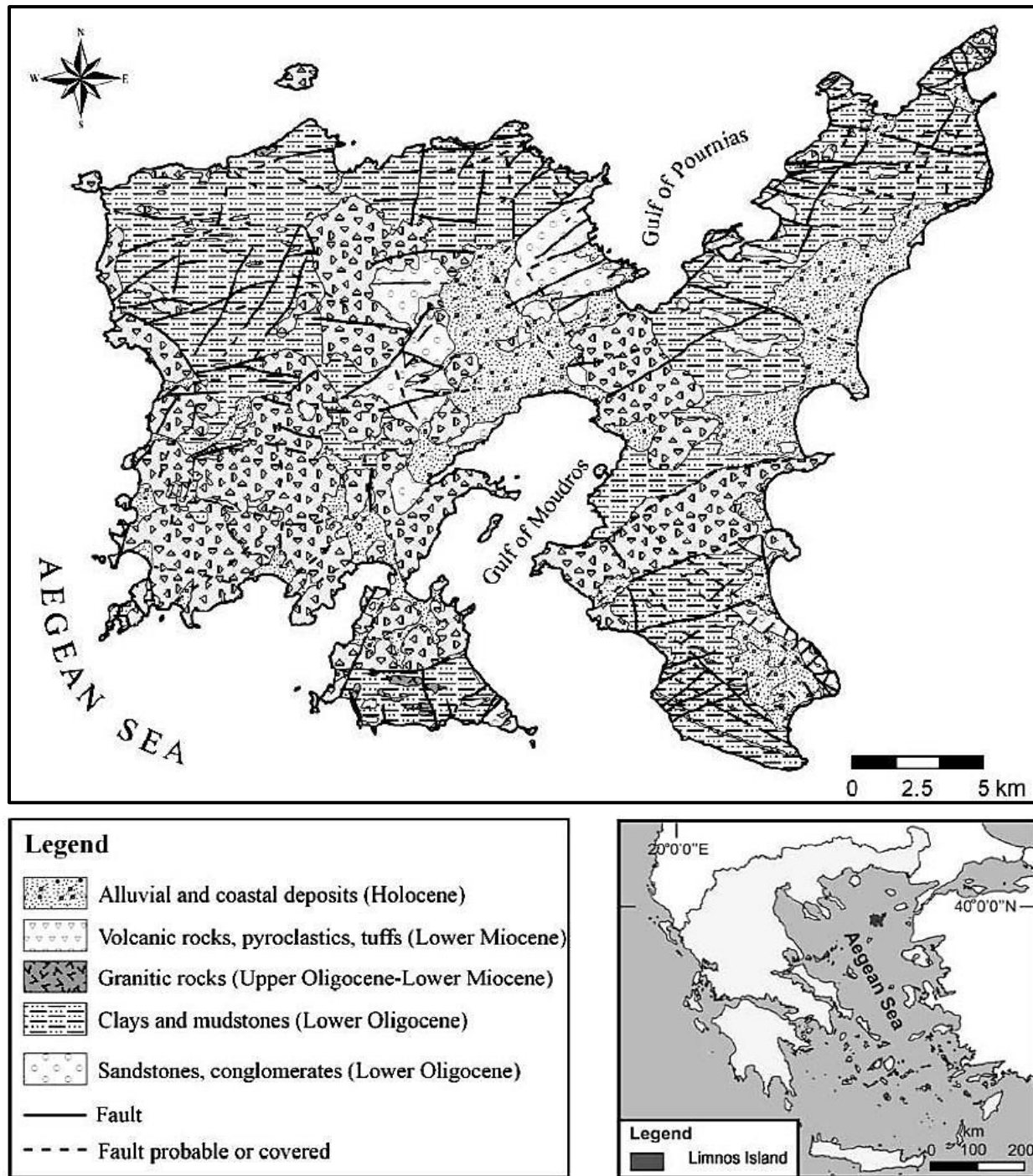
Σύμφωνα με τους Roussos et al. (1993) και Roussos et al. (1994), τα ιζήματα του νησιού μπορούν να υποδιαιρεθούν σε δύο ενότητες: την ανώτερη και την κατώτερη. **Η κατώτερη ενότητα**, είναι ηλικίας Κάτω Ηώκαινου-Άνω Ολιγοκαινού και καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος του νησιού. Αποτελείται από αποθέσεις ηπειρωτικής κατωφέρειας όπως παχυστρωματώδεις ως συμπαγείς ψαμμίτες και κροκαλοπαγή, τουρβιδίτες, ενδιαστρώσεις αργίλων και ψαμμιτών ή ιλυολίθους με λεπτές ενδιαστρώσεις ψαμμιτών-ιλυολίθων. **Η ανώτερη ενότητα** που είναι ηλικίας Κάτω Ολιγοκαινού έχει περιορισμένη έκταση. Περιέχει ιζήματα ρηχής θάλασσας ως υφάλμυρων περιβαλλόντων, δελταϊκά ιζήματα στη βάση της, εναλλαγές αργίλων και λεπτοπλακωδών ψαμμιτών και αργίλων καθώς και εναλλαγές από ψαμμίτες και αμμούχες μάργες. Στα στρωματογραφικά ανώτερα τμήματα κυριαρχούν οι μεσόκοκκοι έως χονδρόκοκοι ψαμμίτες και αμμούχα κροκαλοπαγή.

Η οροφή της ακολουθίας αποτελεί μια διαβρωσιγενή ασυμφωνία μεταξύ των ιζηματογενών πετρωμάτων και ηφαιστειακών πετρωμάτων (Fytikas et al., 1980; Innocenti et al., 1994; Pe-Piper and Piper, 2002; Pe-Piper et al., 2009) η οποία αποτελείται από Κάτω Μειοκαινικά **ηφαιστειακά πετρώματα** (Σχήμα 11). Η ηφαιστειακή αυτή δραστηριότητα άρχισε στα τέλη του Μεσοζωικού-Μέσο Καινοζωικού και σχετίζεται με την άνοδο του μανδύα λόγω των ρηγμάτων αποκόλλησης και της οπισθοχώρησης της πλάκας. (Fytikas et al., 1984; de Boorder et al., 1998; Pe-Piper et al., 1998; Kiliyas and Mountrakis, 1998; Melfos et al., 2002). Το σύστημα των πυριγενών πετρωμάτων εμφανίζεται σε μεγάλο βαθμό στο δυτικό και κεντρο-ανατολικό τμήμα του νησιού και περιλαμβάνουν υποαβυσσικές διεισδύσεις όπως δόμους λάβας και πυροκλαστικές αποθέσεις. Οι Innocenti et al. (1994) διαιρούν τα ηφαιστειακά πετρώματα σε τέσσερις ενότητες και μια υποενότητα (Σχήμα 11). Αυτές είναι, η ενότητα Κατάλακκου, Ρωμανού, Θέρμης, Μύρινας και η υποενότητα Αγίου Ιωάννη.

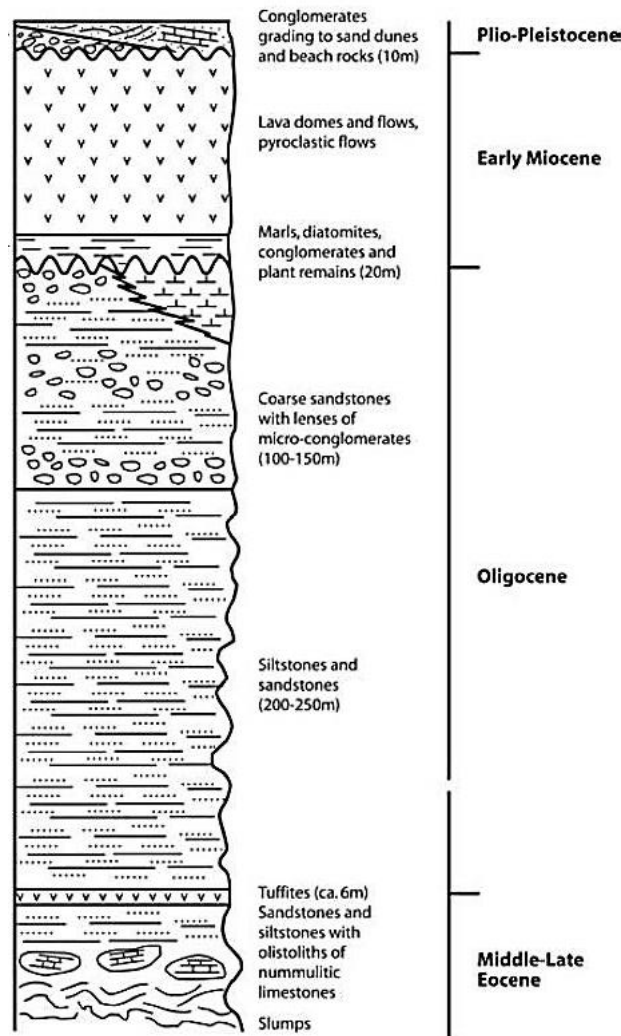
Πιο συγκεκριμένα, η ενότητα Κατάλακκου βρίσκεται στο βόρειο τμήμα της Λήμνου και ορισμένα σημεία στο νότιο τμήμα της. Σε αυτήν συναντάμε τα παλαιότερα ηφαιστειακά πετρώματα, κυρίως δόμους, φλέβες από πορφυριτικούς τραχειανδεσίτες και δακίτες που περιλαμβάνουν και τον μονζονίτη στην περιοχή "Φακός". Στην περιοχή αυτή εντοπίζεται επίσης μεταλλοφορία πορφυριτικού Cu και επιθερμικού Au-Te (Fornadel et al., 2012). Η ενότητα Ρωμανού βρίσκεται στο ανατολικό της τμήμα και αποτελείται από πυροκλαστικές και ηφαιστειοκλαστικές αποθέσεις, πάχους 160 m. Τα ηφαιστειοκλαστικά κροκαλοπαγή και λατυποπαγή, εμφανίζονται κοντά στη βάση και υπερκαλύπτονται από ιγνιμβριτικούς ορίζοντες παρενστροφμένους με τόφφους και στρώματα πυριτολίθων στα οποία αναγνωρίζονται φυτικά απολιθώματα. Οι πυριτόλιθοι κατά πάσα πιθανότητα σχετίζονται με τις θερμές πηγές. Τα πετρώματα της ενότητας αυτής ποικίλουν από τραχειανδεσιτικής έως ρυολιθικής σύστασης τα οποία είναι τα πιο πλούσια πετρώματα σε κάλιο και εμφανίζονται ως τραχειανδεσιτικές λάβες και ως μεγάλα κομμάτια μέσα στα κροκαλοπαγή. Η ενότητα Θέρμης βρίσκεται στο νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής και μοιάζει εν μέρει με την ενότητα Ρωμανού. Περιέχει μάργες και ηφαιστειακές τόφφους με απολιθώματα ηλικίας Κάτω Μειοκαίνου. Η ενότητα αυτή βρίσκεται σε επαφή με την ενότητα της Μύρινας. Η ενότητα της Μύρινας βρίσκεται κι αυτή στο νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής και αποτελείται από δόμους και λατυποπαγή. Τα ηφαιστειακά πετρώματα της ενότητας αυτής είναι πορφυριτικά, κυρίως δακίτες με τραχειανδεσίτες. Τέλος, η υποενότητα του Αγίου Ιωάννη βρίσκεται στη δυτική Λήμνο και αποτελείται από υδροθερμικά εξαλλιωμένα πετρώματα τα οποία είναι γεωχημικά ενδιάμεσα των πετρωμάτων της ενότητας του Κατάλακκου και της Μύρινας.

Επίσης στην περιοχή έχουν αναφερθεί Μειοκαινικά λιμναία ιζήματα όπως μάργες, κροκαλοπαγή και μαργόλιθοι, αλλά είναι πολύ περιορισμένης έκτασης στο νησί. Οι νεότερες Τεταρτογενείς επιφανειακές αποθέσεις περιλαμβάνουν ασβεστόλιθους, αλλουβιακές και παράκτιες αποθέσεις.

Οι ραδιοχρονολογήσεις K-Ar από τους Innocenti et al. (1994) και Fytikas et al. (1980, 1984) έδειξαν ότι αυτά τα πετρώματα σχηματίστηκαν περίπου πριν από 18-21 εκατ. χρόνια. Συγκεκριμένα, το βορειότερο τμήμα της ενότητας Κατάλακκου έδωσε ηλικίες περίπου 20-21 εκατ. χρόνια, η ενότητα Μύρινας ηλικίες 18-20 εκατ. χρόνια και η ενότητα Ρωμανού περίπου 22 εκατ. χρόνια.



Σχήμα 10: Γεωλογικός χάρτης της Λήμνου (Innocenti et al., 1994)



Σχήμα 11: Λιθοστρωματογραφική στήλη Λήμνου
(Innocenti et al., 1994)

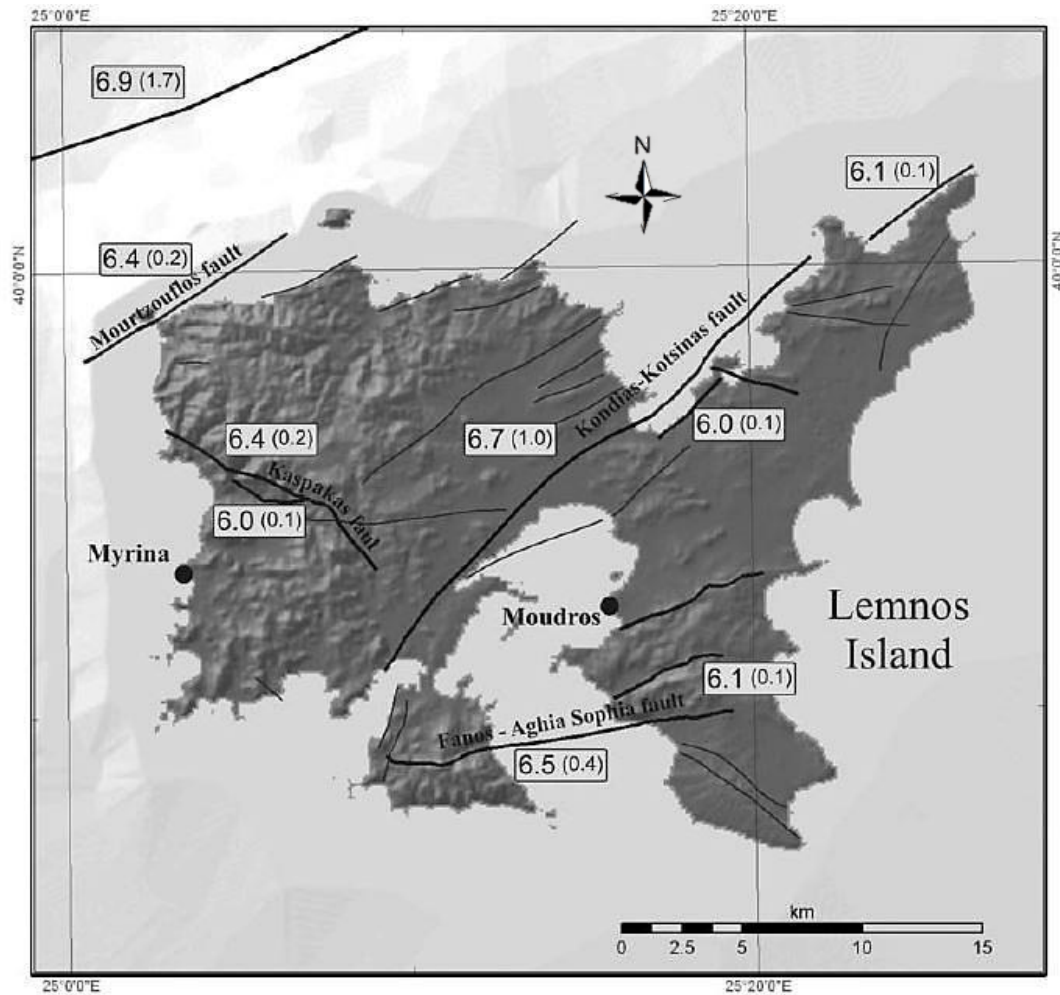
3.3 Τεκτονική

Το βόρειο Αιγαίο θεωρείται μια μεγάλη σεισμογενή δομή η οποία αποτελείται από ρήγματα με ισχυρή δεξιόστροφη οριζόντια συνιστώσα ολίσθησης τα οποία αντιπροσωπεύουν τη δυτική μετανάστευση της βόρειας Ανατολίας λόγω του οριζόντιου ρήγματος προς το Αιγαίο (McKenzie, 1972, 1978; Pavlides et al., 1990; Armijo et al., 1996). Ύστερα από αρκετές μελέτες που έγιναν θεωρήθηκε ότι το ρήγμα αυτό δημιουργήθηκε το Άνω Πλειόκαινο, ως συνέπεια της σύγκρουσης μεταξύ της Αραβικής και Ευρασιατικής πλάκας (Barka, 1992).

Όσον αφορά τη Λήμνο, τα περισσότερα ρήγματα είναι παράλληλα στην ακτή και έχουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της μορφής της. Ύστερα από πολλές μετρήσεις που έχουν γίνει τα ρήγματα χαρακτηρίζονται από μεγάλο μήκος και ο προσανατολισμός τους ποικίλει σε όλο το νησί. Το μήκος τους κυμαίνεται από 0,2 km έως και περισσότερο από 7 km. (Tranos, 2009). Σε γενικές γραμμές, τα ρήγματα στο βόρειο τμήμα του νησιού έχουν ΝΔ-ΒΑ προς ΔΝΔ-ΑΒΑ διεύθυνση και χαρακτηρίζονται ως δεξιόστροφα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης, ενώ τα ρήγματα στο νότιο τμήμα του νησιού έχουν μια πιο εμφανή ΑΒΑ-ΔΝΔ διεύθυνση (Σχήμα 12). Εξαίρεση αποτελεί το ρήγμα του Κάσπακα με ΔΒΔ-ΑΝΑ διεύθυνση και του Μούδρου με αριστερόστροφη κανονική μετατόπιση (Chatzipetros et al., 2012). Τα πολυάριθμα αυτά ρήγματα ενισχύουν την τροφοδοσία των υπόγειων υδροφορέων με βρόχινο νερό.

Τα κύρια ρήγματα που συναντώνται στο νησί σύμφωνα με τους Pavlides et al. (2009) και Chatzipetros et al. (2012) είναι τα εξής: Το ρήγμα Μούρτζουφλος χαρακτηρίζεται ενεργό και εντοπίζεται στο βορειοδυτικό τμήμα του νησιού με το μεγαλύτερο τμήμα του να βρίσκεται στη θάλασσα. Το ρήγμα του Κάσπακα αποτελεί ένα κανονικό ρήγμα που χωρίζεται σε δύο τμήματα και επηρεάζει γεωμορφολογικά το βορειοδυτικό λοφώδες τμήμα του νησιού καθώς και την πρωτεύουσα του νησιού Μύρινα. Το ρήγμα Κοντιάς - Κοτσίνας το οποίο είναι το μεγαλύτερο ρήγμα με μήκος 25 km και διασχίζει όλο το νησί. Είναι δεξιόστροφο ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης και δεν έχει σαφή γεωμορφολογική επίδραση. Ωστόσο καθορίζει την ακτογραμμή της Λήμνου, ιδιαίτερα τους δύο κόλπους που κυριαρχούν στις βόρειες και νότιες ακτές του νησιού.

Το ρήγμα του Μούδρου βρίσκεται κοντά στον οικισμό Μούδρος και έχει μήκος περίπου 7 km. Είναι ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης με αριστερόστροφη κανονική μετατόπιση και διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ. Διαιρείται σε δύο διαφορετικά τμήματα και έχει μεγάλη σεισμική επικινδυνότητα. Γεωλογικά το μεγαλύτερο μέρος του χωρίζει την ηφαιστειο-ιζηματογενή ενότητα του Ρωμανού από τον ψαμμίτη και τους ιλυολίθους του Άνω Ολιγοκαίνου. Τέλος, το ρήγμα Φανού-Αγίας Σοφίας με ζώνη διεύθυνσης ΔΝΔ-ΑΒΑ είναι ένα κανονικό ρήγμα και κλίνει προς Νότο. Θεωρείται το λιγότερο επικίνδυνο ρήγμα. Αποτελείται από δύο μέρη, του Φανού και της Αγίας Σοφίας.



Σχήμα 12: Χάρτης που απεικονίζει τα κύρια ρήγματα της Λήμνου (Pavlidis et al., 2009)

3.4 Το Γεωθερμικό σύστημα της Λήμνου

Η γεωθερμική ενέργεια είναι η φυσική θερμότητα που υπάρχει στο εσωτερικό του γήινου φλοιού και η οποία αυξάνεται με το βάθος. Αποτελεί μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και η εκμετάλλευσή της θεωρείται εφικτή μόνο υπό την προϋπόθεση ότι οι γεωλογικές συνθήκες, σε συνδυασμό με το θερμικό φορτίο, εξασφαλίζουν ένα συγκριτικό οικονομικό αποτέλεσμα (Φυτίκας και Ανδρίτσος, 2004). Σε μερικές περιοχές της γης παρατηρούνται ασυνήθιστα υψηλές τιμές της θερμικής ροής, δηλαδή της μετάδοσης της θερμότητας από το εσωτερικό προς την επιφάνεια. Αυτές οι περιοχές με θετική θερμική ανωμαλία, λόγω ύπαρξης πρόσφατης ή σχετικά

πρόσφατης ηφαιστειακής δράσης ή νεοτεκτονικής δραστηριότητας, έχουν αυξημένη γεωθερμική βαθμίδα και αποτελούν ιδανικές περιπτώσεις δημιουργίας γεωθερμικών ταμιευτήρων σε οικονομικά εκμεταλλεύσιμα βάθη. Σημειώνεται ότι η μέση γήινη γεωθερμική βαθμίδα είναι 30°C/km.

Η θερμοκρασία του υπόγειου νερού συνήθως κυμαίνεται από 10 έως 20°C (Σούλιος, 2006) ανάλογα με το βάθος του υδροφορέα και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία των πετρωμάτων που το φιλοξενούν (Βουδούρης, 2009). Ωστόσο, εξαίρεση αποτελούν οι περιοχές που παρουσιάζουν γεωθερμική ανωμαλία και οι τιμές της θερμοκρασίας του υπόγειου νερού είναι μεγαλύτερες. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία τα γεωθερμικά πεδία ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες: χαμηλής ενθαλπίας όταν τα νερά έχουν θερμοκρασία μικρότερη από 90°C, μέσης ενθαλπίας όταν έχουν θερμοκρασία μεταξύ 90°C και 150°C, και υψηλής με θερμοκρασία μεγαλύτερη των 150°C (Φυτίκας και Ανδρίτσος, 2004). Σύμφωνα με την ελληνική νομοθεσία (Νόμο Υπ' Αριθ. 3175, Αρ. Φύλλου 207, Αύγουστος 2003), τα γεωθερμικά πεδία διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: χαμηλής θερμοκρασίας όταν η θερμοκρασία του προϊόντος κυμαίνεται από 25°C έως 90°C, και υψηλής θερμοκρασίας όταν η θερμοκρασία υπερβαίνει τους 90°C.

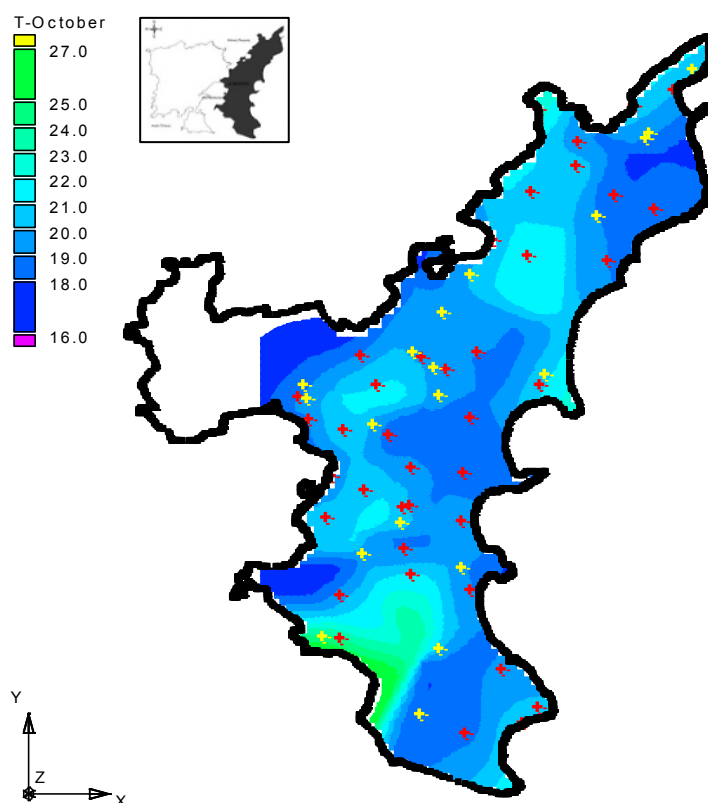
Η γεωτεκτονική θέση της Λήμνου δημιουργεί κατάλληλες και ευνοϊκές συνθήκες για την ύπαρξη ζωνών κυκλοφορίας ρευστών από μεγαλύτερα σε μικρά βάθη και τον πιθανό εγκλωβισμό αυτών σε σχετικά μικρού βάθους ταμιευτήρες. Στην ευρύτερη περιοχή του Κάσπακα-Κορνού στη δυτική Λήμνο βρίσκονται θερμές πηγές και συγκεκριμένα, η περιοχή Θερμά στο χωριό Κορνός, με τη μεγαλύτερη θερμοκρασία η οποία φτάνει τους 42,2°C.

Η ρηξιγενής ταφροειδής δομή του νησιού, η ύπαρξη μολλασικών ιζηματογενών καλυμμάτων, η ύπαρξη επιφανειακών θερμικών εκδηλώσεων σε συνδυασμό με την πιθανή αποθηκευμένη θερμική ενέργεια λόγω της ηφαιστειότητας (Παπαδόπουλος κ.ά., 2003), αποτελούν το έναυσμα για γεωθερμική έρευνα στο νησί.

Παλαιότερη έρευνα που διεξήχθη από το ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε το 2001 περιελάμβανε συστηματικές θερμομετρήσεις σε νερά υπαρχουσών γεωτρήσεων, έδειξε θερμοκρασίες της τάξης των 26°C σε βάθη έως 150 m. Η μέση γεωθερμική βαθμίδα εκτιμήθηκε στους 6,5°C/100 m (Παπαδόπουλος κ.ά., 2003), δηλαδή διπλάσια της μέσης γήινης, κυρίως στη νότια Λήμνο. Όσον αφορά τη Δημοτική Ενότητα Μούδρου (ανατολική Λήμνος), οι μέσες ετήσιες τιμές κυμαίνονται μεταξύ

15-16°C, ωστόσο αξίζει να σημειωθεί ότι σε ορισμένες γεωτρήσεις η θερμοκρασία του νερού εμφανίζεται υψηλή όλο το έτος με μέση τιμή 24,5°C (Σχήμα 13).

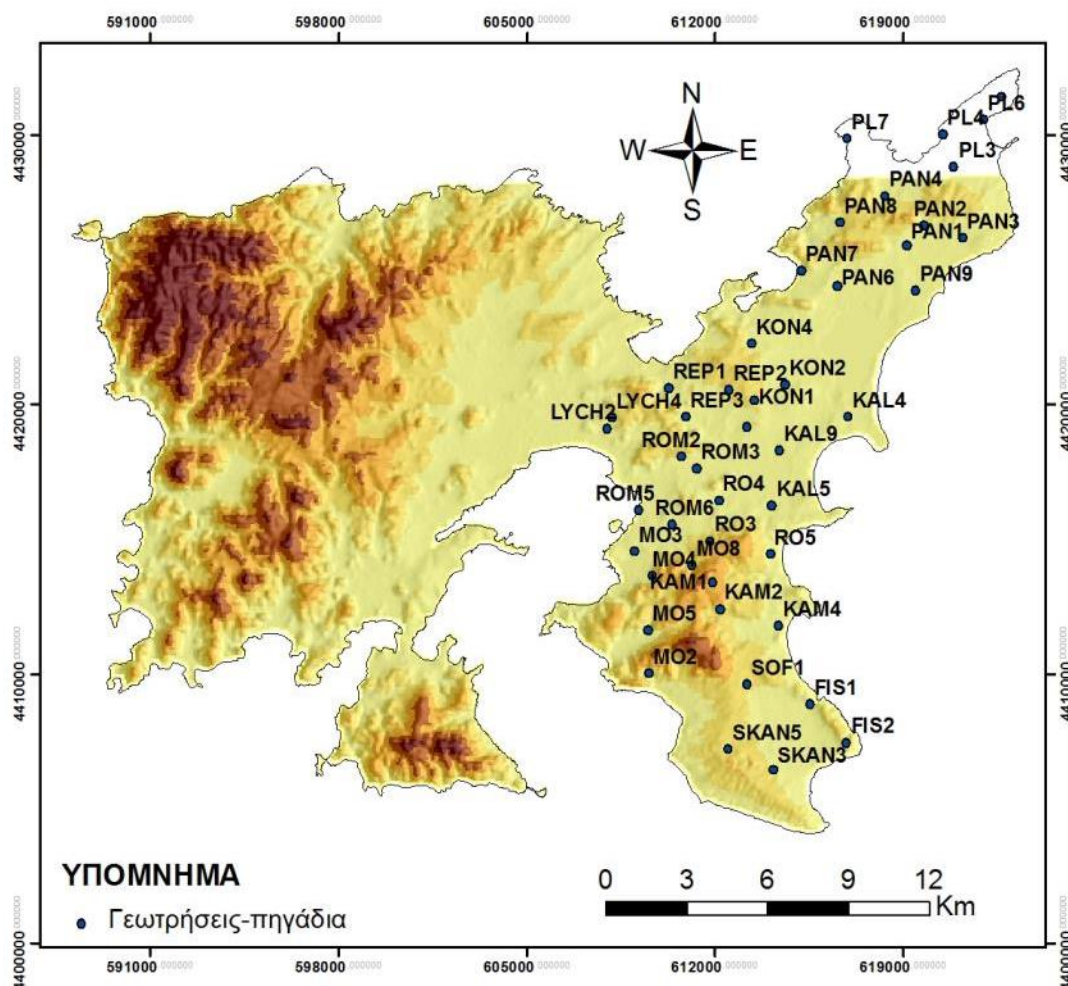
Κατά την περίοδο 2014-2015, πραγματοποιήθηκε από το ΙΓΜΕ γεωθερμική έρευνα στη Λήμνο. Η έρευνα αυτή αποτελούσε Υποέργο με τίτλο «Γεωθερμική Έρευνα στη Νήσο Λήμνο», που ήταν ενταγμένο στο «Αποτίμηση γεωθερμικού ενεργειακού δυναμικού σε επιλεγμένες περιοχές για περιορισμό της ενεργειακής εξάρτησης και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και δυναμικού θερμομεταλλικών υδάτων και ιαματικών φυσικών πόρων (ΓΕΩΘΕΝ)» και χρηματοδοτήθηκε από το Εθνικό Στρατηγικό Πλαίσιο Αναφοράς (ΕΣΠΑ) 2007-2013. Η έρευνα αυτή αποσκοπούσε στον εντοπισμό επιμέρους περιοχών με αυξημένη γεωθερμική ανωμαλία και ιδιαίτερο γεωθερμικό ενδιαφέρον. Από τα αποτελέσματα των μέχρι σήμερα ερευνών προκύπτει ότι εκτός της ανάβλυσης της γνωστής θερμής πηγής θερμοκρασίας 42,2°C, ενδιαφέρον παρουσιάζει και η περιοχή του Μούδρου (ανατολική Λήμνος) με θερμοκρασία γύρω στους 30°C (προσωπική επικοινωνία με ΙΓΜΕ). Η έκδοση της σχετικής τεχνικής – επιστημονικής έκθεσης αναμένεται στο προσεχές διάστημα και θα περιλαμβάνει τα λεπτομερή στοιχεία και δεδομένα που συγκεντρώθηκαν καθώς και εκτίμηση των γεωθερμικών συνθηκών της Λήμνου.



Σχήμα 13: Κατανομή θερμοκρασίας υπόγειων νερών τον Οκτώβριο του 2001
(Παπαδόπουλος κ.ά., 2003)

4. ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η παρούσα διατριβή βασίζεται σε στοιχεία και δεδομένα που λήφθηκαν κατά το χρονικό έτος 2001 από το ΕΘ.Ι.Α.Γ.Ε στο πλαίσιο του προγράμματος Ε.Π.Τ.Α από την Περιφέρεια Βορείου Αιγαίου και τη Δημοτική Ενότητα Μούδρου της ανατολικής Λήμνου ώστε να υλοποιηθεί το έργο με τίτλο: «Μελέτη διαχείρισης υδάτινου δυναμικού». Οι εργασίες που πραγματοποιήθηκαν από το ΕΘ.Ι.Α.Γ.Ε. για τον σκοπό αυτό ήταν η συλλογή δεδομένων και δειγματοληψίες στο ανατολικό μέρος της Λήμνου για δύο δειγματοληπτικούς μήνες, τον μήνα Μάιο και Οκτώβριο του 2001. Οι μήνες αυτοί προσδιορίζουν την υγρή και ξηρή περίοδο αντίστοιχα. Κατά την υγρή περίοδο (δειγματοληψία Μαΐου) έχουμε τις υψηλότερες στάθμες λόγω της κατείσδυσης του βρόχινου νερού από τις βροχοπτώσεις του χειμώνα και επίσης δεν έχουν ξεκινήσει ακόμα οι αντλήσεις για τις αρδευτικές ανάγκες. Τον Οκτώβριο, που αντιπροσωπεύει την ξηρή περίοδο, έχουμε τις χαμηλότερες στάθμες λόγω των αυξημένων αρδευτικών αναγκών και της ανομβρίας που επικρατούν κατά την καλοκαιρινή περίοδο.



Σχήμα 14: Χάρτης σημείων δειγματοληψίας

Οι δειγματοληψίες που πραγματοποιήθηκαν αφορούν 45 δείγματα υπόγειου νερού από γεωτρήσεις, πηγάδια και πηγές (Σχήμα 14), που προβάλλονται στο ανατολικό τμήμα της Λήμνου στη Δημοτική Ενότητα Μούδρου, και πιο συγκεκριμένα στον διερρηγμένο ηφαιστειακό υδροφορέα Ρωμανού. Το βάθος των υδροληπτικών έργων κυμαίνεται μεταξύ 30 και 110 m. Οι αναλύσεις που παραχωρήθηκαν συγκεντρώνουν όλα τα απαραίτητα στοιχεία, δηλαδή τις φυσικοχημικές παραμέτρους pH και αγωγιμότητα, καθώς και συγκεντρώσεις επιλεγμένων κατιόντων και ανιόντων (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ , NO_2^- , PO_4^{3-}) όπως επίσης και συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων και ιχνοστοιχείων (Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Cr, Ni, Co, Cd, B) με σκοπό τον ακριβή προσδιορισμό της πιθανής ρύπανσης των υπόγειων υδάτων της ανατολικής Λήμνου. Οι αναλύσεις έγιναν στο εργαστήριο του Ινστιτούτου Εγγείων Βελτιώσεων (ΕΘ.Ι.Α.Γ.Ε) και οι μεθοδολογίες που ακολουθήθηκαν ήταν σύμφωνες με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO/IEC 17025. Οι μονάδες μέτρησης της περιεκτικότητας των ιόντων είναι εκφρασμένες σε mg/L και ppm για τα μέταλλα, ενώ της αγωγιμότητας σε $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Τα δεδομένα αυτά παραχωρήθηκαν από το ΕΘ.Ι.Α.Γ.Ε για την εκπόνηση της παρούσας μελέτης. Επιπρόσθετα παραχωρήθηκαν το βάθος καταγραφής της υπόγειας στάθμης και το απόλυτο υψόμετρο της για κάθε περίοδο σε κάθε σημείο δειγματοληψίας. Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων και των χημικών αναλύσεων σε κύρια ιόντα και βαρέα μέταλλα γίνεται, στα πλαίσια της παρούσας έρευνας, μια αξιολόγηση των αποτελεσμάτων με τη χρήση της πολυμεταβλητής στατιστικής ανάλυσης (παραγοντική και ανάλυση σε ομάδες) σε συνδυασμό με τη γεωστατιστική μοντελοποίηση των χημικών δεδομένων και τη χωρική κατανομή τους. Η στατιστική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος στατιστικής επεξεργασίας SPSS από το οποίο προέκυψαν πίνακες με τις ορισμένες στατιστικές παραμέτρους. Η παράθεση των αποτελεσμάτων έγινε κυρίως με υδροχημικούς χάρτες κατανομής οι οποίοι προέκυψαν με τη χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (G.I.S.). Τέλος με τη βοήθεια του προγράμματος AquaChem έγινε ανάλυση της γεωχημείας των δειγμάτων και σύγκριση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του υπόγειου νερού. Έτσι λοιπόν με βάση τα διαγράμματα και τους πίνακες που εξήχθησαν επιχειρείται η ερμηνεία και διερεύνηση της πιθανής συσχέτισης των υψηλών συγκεντρώσεων ιόντων και βαρέων μετάλλων με τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες στην περιοχή και την ευρύτερη γεωλογική δομή της περιοχής.

5. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ

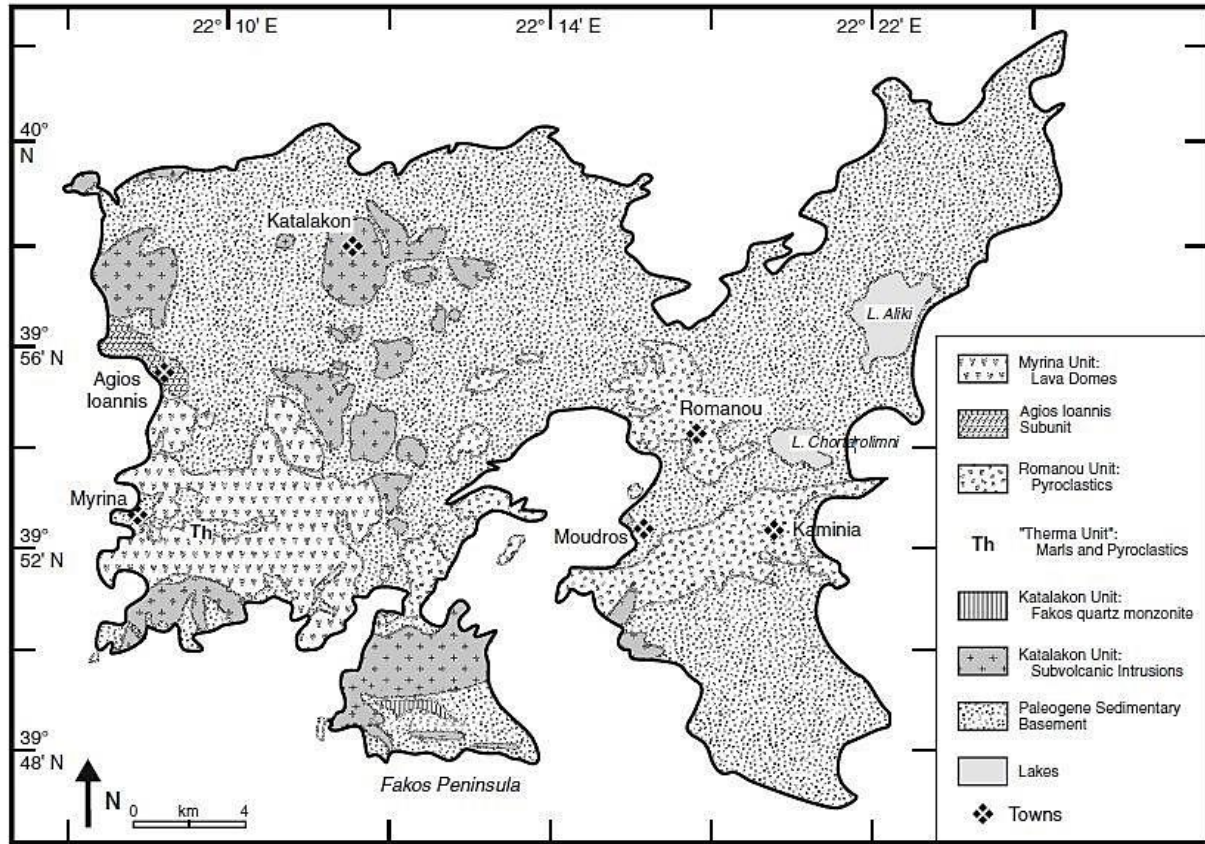
5.1 Διαμόρφωση υπόγειων υδροφορέων

Η γεωλογία, οι γεωλογικές δομές, η τοπογραφία και οι κλιματικές συνθήκες επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη λεκάνη απορροής και την ποιότητα του υπόγειου νερού στην περιοχή της Λήμνου. Σε γενικές γραμμές το υδρογεωλογικό καθεστώς της Λήμνου παρουσιάζει πολλά κοινά χαρακτηριστικά με αυτό των ηφαιστειακών περιοχών. Συγκεκριμένα όπως αναφέρθηκε προηγουμένως αποτελείται από ρωγματώδη ηφαιστειακά πετρώματα με υψηλή διαπερατότητα τα οποία εναλλάσσονται με λιγότερα περατά στρώματα, τα πυροκλαστικά, σχηματίζοντας έτσι υπό πίεση υδροφόρους. Ο αδιαπέρατος φλύσχη, ο οποίος αποτελεί την κατώτερη στρωματογραφική μονάδα, αποτελεί το υπόβαθρο των κύριων υδροφορέων της Λήμνου. Έτσι, όλες οι υδροφορίες αναπτύσσονται μεταξύ του φλύσχη και των ηφαιστειακών πετρωμάτων (Panagopoulos et al., 2011).

Επίσης καθοριστικός είναι και ο ρόλος της τεκτονικής με τα πολυάριθμα ρήγματα, η οποία ευνοεί τη διείσδυση του βρόχινου νερού μέσα από τα ρωγματώδη ηφαιστειακά πετρώματα και τα πυροκλαστικά η οποία τροφοδοτεί ένα σημαντικό μέρος των υπόγειων υδροφορέων. Ως υδροφορείς με δευτερογενές πορώδες και υδροπερατότητα θα μπορούσαν να οριστούν οι αποσαθρωμένοι και ρωγματώδεις ανδεσίτες και τραχείτες, η ρωγματωμένη τέφρα, τα ηφαιστειοκλαστικά λατυποπαγή και κροκαλοπαγή, οι ιγκνιμβρίτες και άλλα πυροκλαστικά υλικά. Ωστόσο, λόγω του χαμηλού ετήσιου ύψους βροχόπτωσης στη Λήμνο, ο φυσικός εμπλουτισμός των υδροφορέων είναι περιορισμένος, με αποτέλεσμα να περιορίζεται ο όγκος των αποθεμάτων του υπόγειου νερού.

Η παρουσία ενός αδιαπέρατου ιζηματογενούς στρώματος κάτω από τα ηφαιστειακά πετρώματα και το περιορισμένο πάχος των ηφαιστειακών αυτών πετρωμάτων έχει σαν αποτέλεσμα τον φραγμό του νερού σε μεγαλύτερα βάθη και έτσι περιορίζεται και η θέρμανση του. Σύμφωνα με υδρογεωλογικές έρευνες που έγιναν στην περιοχή από τους Panagopoulos et al. (2011), ορίστηκε η ύπαρξη τριών υπό πίεση ηφαιστειακών υδροφορέων οι οποίοι επικαλύπτουν τον αδιαπέρατο φλύσχη. Οι τρεις κύριες υδρολογικές λεκάνες είναι του Κατάλακκου, του Ρωμανού και της Μύρινας όπως φαίνονται και στο Σχήμα 15. Οι κύριοι αυτοί υδροφορείς

αναπτύσσονται στα διερρηγμένα ηφαιστειακά πετρώματα και στις ζώνες διάρρηξής τους καθώς και μέσα στις αλλουβιακές αποθέσεις του νησιού, οπότε σχηματίζονται υδροφορείς διερρηγμένων πετρωμάτων και πορώδεις υδροφορείς.



Σχήμα 15: Γεωλογικός χάρτης Λήμνου με τις κύριες υδρολογικές λεκάνες (Piper et al., 2009)

5.2 Πιεζομετρικές συνθήκες

Η Περιφέρεια Βορείου Αιγαίου και η Δημοτική Ενότητα Μούδρου της ανατολικής Λήμνου ανέθεσαν στο ΕΘΝΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ (ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε) την υλοποίηση, στα πλαίσια του Προγράμματος Ε.Π.Τ.Α., του έργου με τίτλο: «Μελέτη διαχείρισης υδάτινου δυναμικού». Ξεκινώντας τον Μάιο του 2000 και ολοκληρώνοντας τον Ιούλιο του 2003, το ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε πραγματοποίησε τη μελέτη αυτή με μια ομάδα εκπόνησης η οποία αποτελείται από ερευνητικό προσωπικό του ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε. και από εξωτερικούς συνεργάτες, που οι ειδικότητές τους καλύπτουν τις απαιτήσεις της μελέτης (Παναγόπουλος κ.ά., 2002; Παπαδόπουλος κ.ά., 2003).

Με βάση λοιπόν την τελική έκθεση, προέκυψε μια σειρά συμπερασμάτων για την ποσοτική και ποιοτική εκτίμηση του υδατικού δυναμικού της περιοχής τα οποία είναι τα εξής:

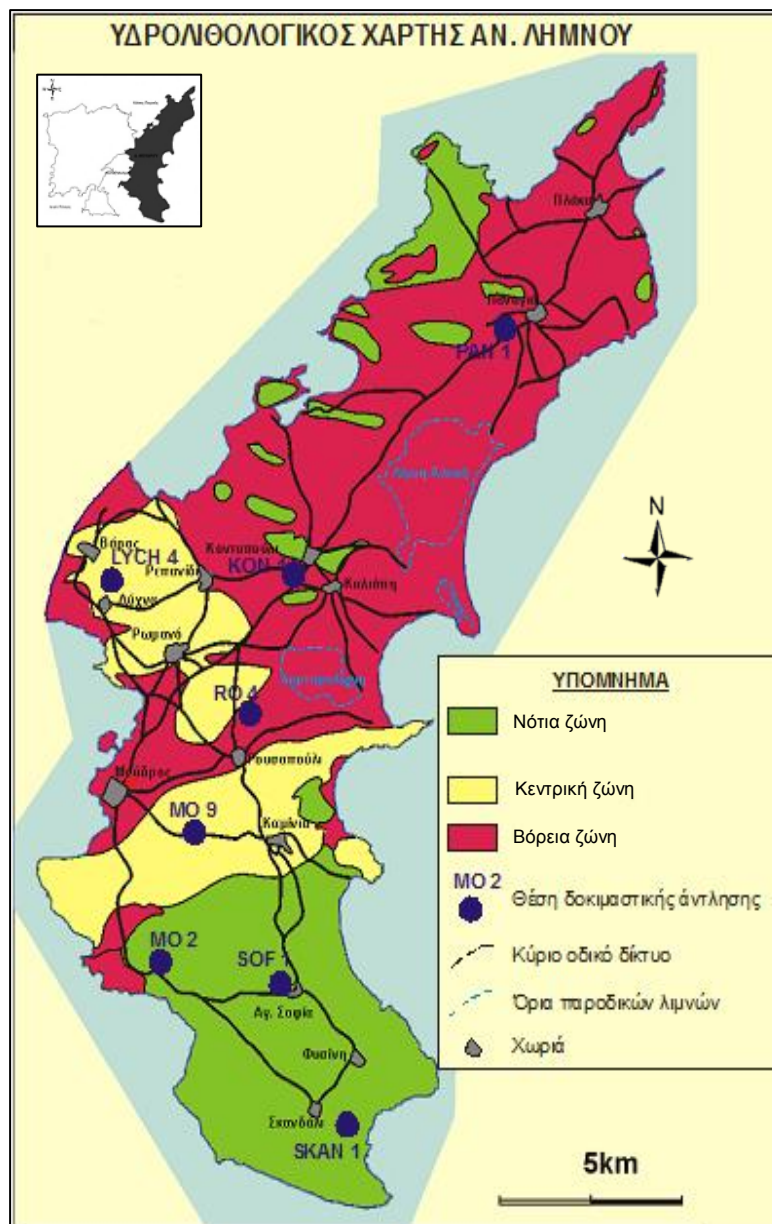
Η υδροφορία που αναπτύσσεται στην περιοχή ενδιαφέροντος είναι ενιαία. Ωστόσο, τοπικά υπάρχουν ενδείξεις ότι αναπτύσσονται και μικρότερης έκτασης και δυναμικού επάλληλοι υδροφόροι που συχνά είναι επικρεμάμενοι και στο σύνολο τους διαμορφώνουν μια ενιαία υδροφορία στην έκταση της περιοχής έρευνας. Επίσης η μελέτη του δυναμικού της Λήμνου έδειξε την ύπαρξη τριών χαρακτηριστικών ζωνών: τη βόρεια, κεντρική και νότια ζώνη (Σχήμα 16), οι οποίες αναλύονται παρακάτω. Από αυτές, το υψηλότερο δυναμικό το παρουσιάζει η νότια ζώνη.

Η **βόρεια** ζώνη, σε αυτήν οι υδροφορείς αναπτύσσονται σε αλλουβιακές – παράκτιες αποθέσεις και σε αργίλους – πηλίτες. Οι υδραυλικές κλίσεις στη ζώνη αυτή δεν είναι ιδιαίτερα υψηλές και μάλιστα παρατηρείται, όπως θα δούμε και παρακάτω από τους πιεζομετρικούς χάρτες, η εμφάνιση αρνητικών στάθμεων που φτάνουν μέχρι τα -10 m την υγρή περίοδο και -40 m κατά την ξηρή περίοδο. Το γεγονός αυτό οφείλεται στον συνδυασμό της μικρής περατότητας των σχηματισμών, στα υδροληπτικά έργα λόγω αρδευτικών – υδρευτικών αναγκών της περιοχής και στη χαμηλή τοπογραφία. Η περιοχή αυτή έχει περιορισμένη οικιστική κάλυψη και ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Οι αποδόσεις της κυμαίνονται μεταξύ 2-5 m³/h και μέση τιμή μεταβιβαστικότητας 2,4 m²/day (Παναγόπουλος κ.ά., 2002).

Στην **κεντρική** ζώνη οι υδροφορείς αναπτύσσονται στα διερρηγμένα ηφαιστειακά πετρώματα (πυροκλάστες και τόφφοι). Η οικιστική κάλυψη της περιοχής καθώς και οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες είναι εντονότερες σε σύγκριση με τη βόρεια ζώνη και επομένως οι αντλούμενες ποσότητες νερού είναι αυξημένες για την κάλυψη των τοπικών υδατικών αναγκών. Έτσι λοιπόν έχουμε την εμφάνιση αρνητικών στάθμεων και σημαντική μείωση της πιεζομετρικής επιφάνειας, οι τιμές της οποίας κυμαίνονται από -15 m έως 15 m. Οι αποδόσεις της κυμαίνονται μεταξύ 10-15 m³/h και μέση τιμή μεταβιβαστικότητας 15,6 m²/day (Παπαδόπουλος κ.ά., 2003).

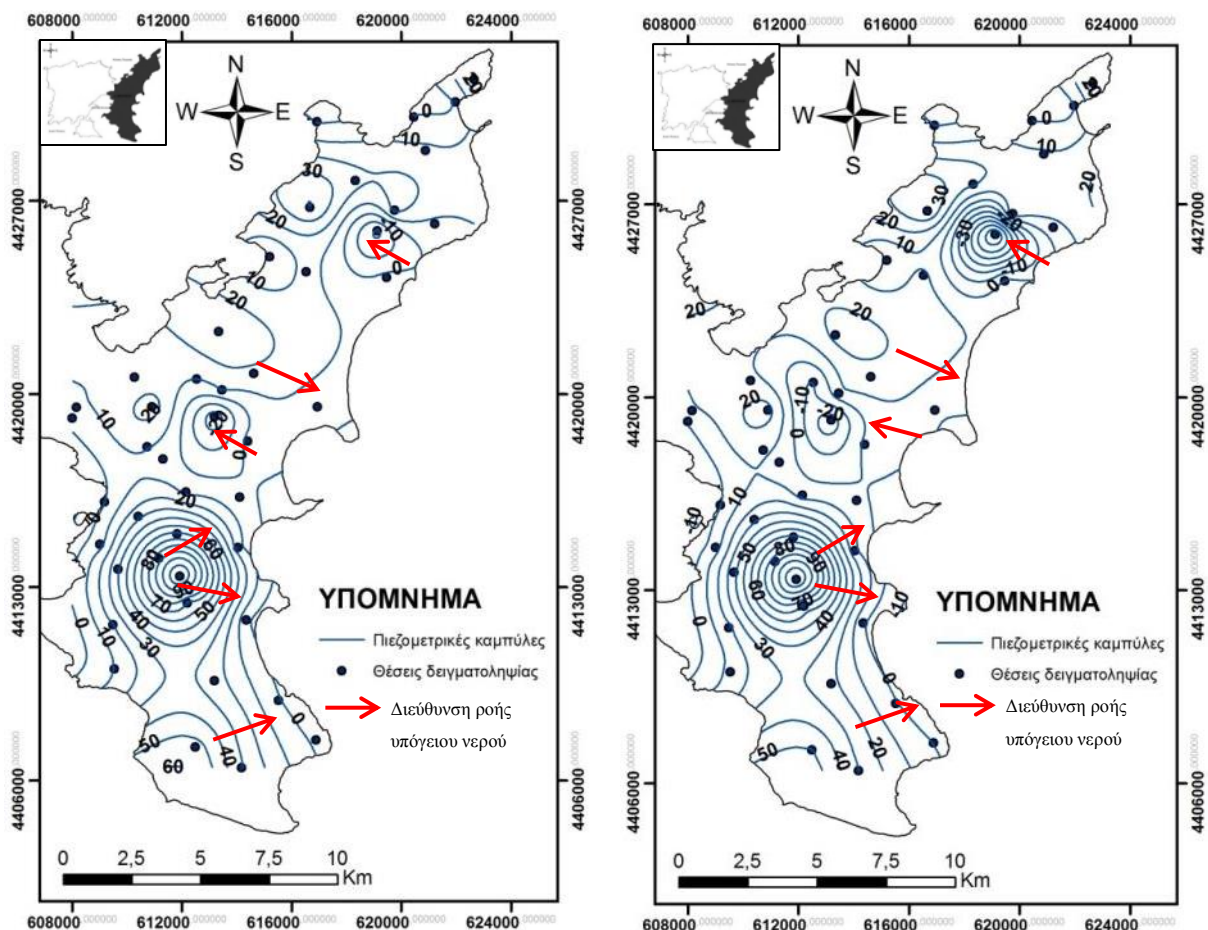
Στη **νότια** ζώνη οι υδροφορείς αναπτύσσονται σε παχυστρωματώδεις ψαμμίτες, κροκαλοπαγή, εναλλαγές αργίλων - ψαμμιτών και έτσι αναπτύσσεται εκεί το υψηλότερο δυναμικό της ευρύτερης περιοχής. Στη ζώνη αυτή παρατηρείται η υψηλότερη στάθμη της πιεζομετρικής επιφάνειας με χαρακτηριστική την ακτινωτή μορφή των πιεζομετρικών καμπυλών

επιμηκυσμένων κατά τον άξονα ανάπτυξης του νησιού. Η πιεζομετρική στάθμη στην περιοχή αυτή κυμαίνεται μεταξύ 0 – 65 m και δεν εμφανίζονται περιοχές με αρνητικά υψόμετρα. Έτσι λοιπόν στη ζώνη αυτή εντοπίζεται η κύρια τροφοδοσία των υπόγειων νερών και αναπτύσσονται οι ευνοϊκότερες συνθήκες υδροφορίας γι' αυτό και σε αυτή βρίσκονται τα κύρια υδροληπτικά έργα κάλυψης των αναγκών της Δημοτικής Ενότητας Μούδρου. Οι αποδόσεις της κυμαίνονται μεταξύ 20-30 m³/h και η μέση τιμή μεταβιβαστικότητα 240 m²/day (Παναγόπουλος κ.ά., 2002; Παπαδόπουλος κ.ά., 2003).

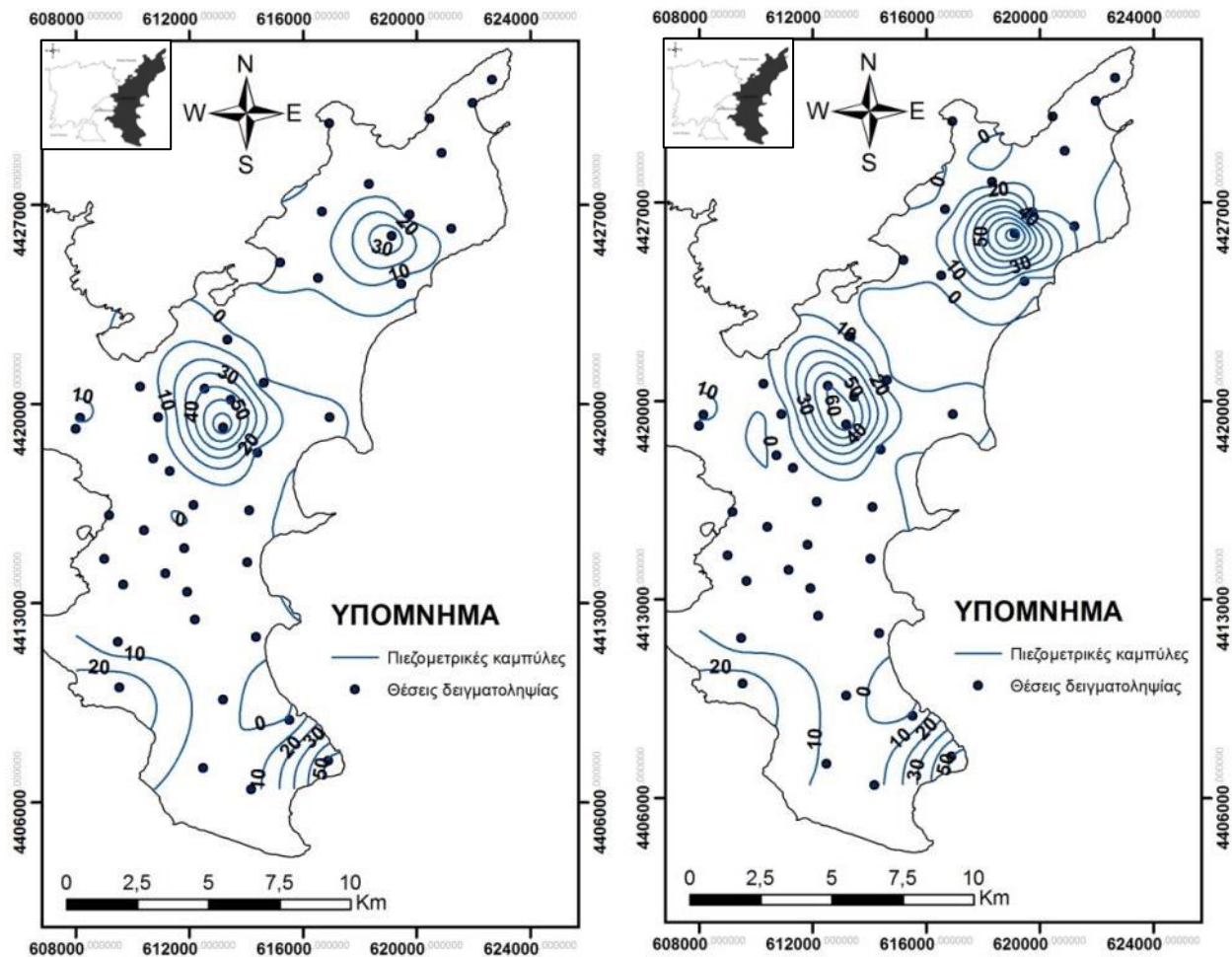


Σχήμα 16: Υδρολιθολογικός χάρτης Ανατολικής Λήμνου (Παπαδόπουλος κ.ά., 2003)

Αξιοποιώντας τα δεδομένα που παραχωρήθηκαν του βάθους καταγραφής της υπόγειας στάθμης και της απόλυτης στάθμης, κατασκευάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας μελέτης οι αντίστοιχοι πιεζομετρικοί χάρτες με το απόλυτο υψόμετρο της υπόγειας στάθμης για τους μήνες Μάιο 2001 και Οκτώβριο 2001 (Σχήμα 17) και με το βάθος της στάθμης για τους ίδιους μήνες (Σχήμα 18). Από τη σύγκριση τους, προκύπτει το συμπέρασμα ότι το νότιο τμήμα της περιοχής έρευνας συγκεντρώνει τις ευνοϊκότερες συνθήκες ανάπτυξης υδροφορίας, ενώ στο βόρειο η υδροφορία γίνεται ασθενέστερη. Χαρακτηριστική είναι επίσης η έντονη εποχιακή μεταβολή της στάθμης στο κεντρικό και βόρειο τμήμα του νησιού, όπου κατά θέσεις οι αρνητικές στάθμες υπερβαίνουν τα 10 m κάτω από το επίπεδο της θάλασσας, ενώ κατά τους καλοκαιρινούς και πρώτους φθινοπωρινούς μήνες ταπεινώνονται ακόμα περισσότερο και φτάνουν μέχρι τα -60 m. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με τους Παναγόπουλος κ.ά. (2002), Παπαδόπουλος κ.ά. (2003).



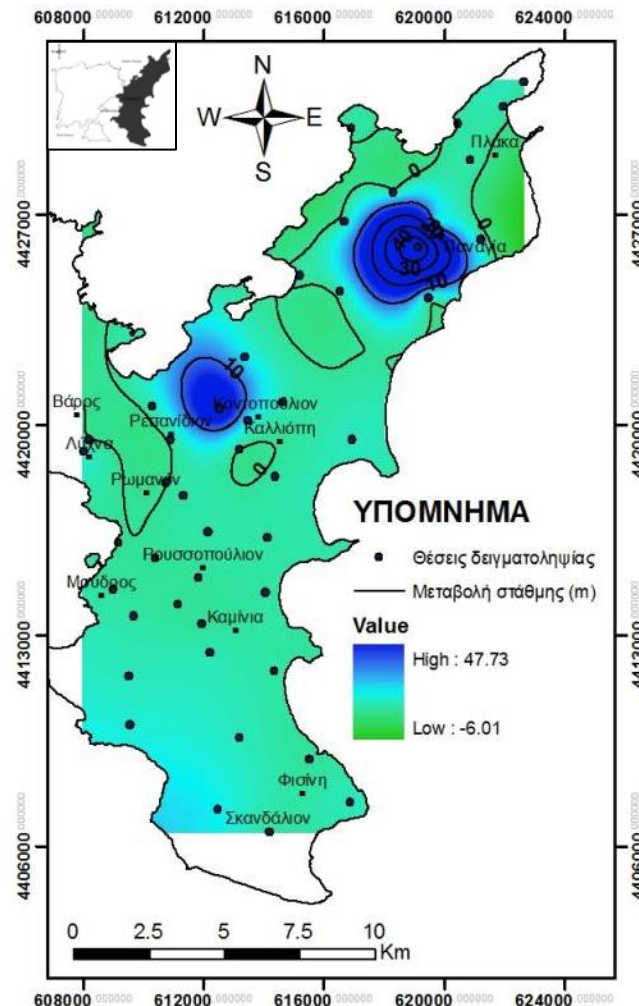
Σχήμα 17: Πιεζομετρικός χάρτης της απόλυτης στάθμης για τους μήνες Μάιο 2001 (αριστερά) και Οκτώβριο 2001 (δεξιά)



Σχήμα 18: Πιεζομετρικός χάρτης του βάθους στάθμης για τους μήνες Μάιο 2001 (αριστερά) και Οκτώβριο 2001 (δεξιά)

Η εμφάνιση των αρνητικών στάθμεων στο κεντρικό και βόρειο τμήμα του νησιού δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες για υφαλμύριση του υπόγειου υδροφόρου συστήματος και για την ποιοτική υποβάθμιση των υδατικών πόρων (Παπαδόπουλος κ.ά., 2003), όπως θα δούμε στα επόμενα κεφάλαια. Επομένως, υφίσταται μια υδραυλική επικοινωνία μεταξύ θάλασσας και υδροφόρου συστήματος και αυτή οδηγεί στην υφαλμύριση του υπόγειου υδατικού δυναμικού. Το γεγονός ότι οι αρνητικές στάθμες ανακάμπουν κατά τη χειμερινή περίοδο, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η υδραυλική επικοινωνία δεν είναι εκτεταμένη και η λιθολογία των σχηματισμών που δομούν την παράκτια ζώνη, απαγορεύει την ελεύθερη είσοδο της θάλασσας στον υδροφορέα. Έτσι, υφίσταται μια φυσική προστασία του υδροφόρου συστήματος από εκτεταμένη υφαλμύριση (Παπαδόπουλος κ.ά., 2003). Στο Σχήμα 19 απεικονίζεται η μεταβολή της στάθμης για τις δύο περιόδους, Μάιο και Οκτώβριο του 2001. Παρατηρούμε πάλι την έντονη

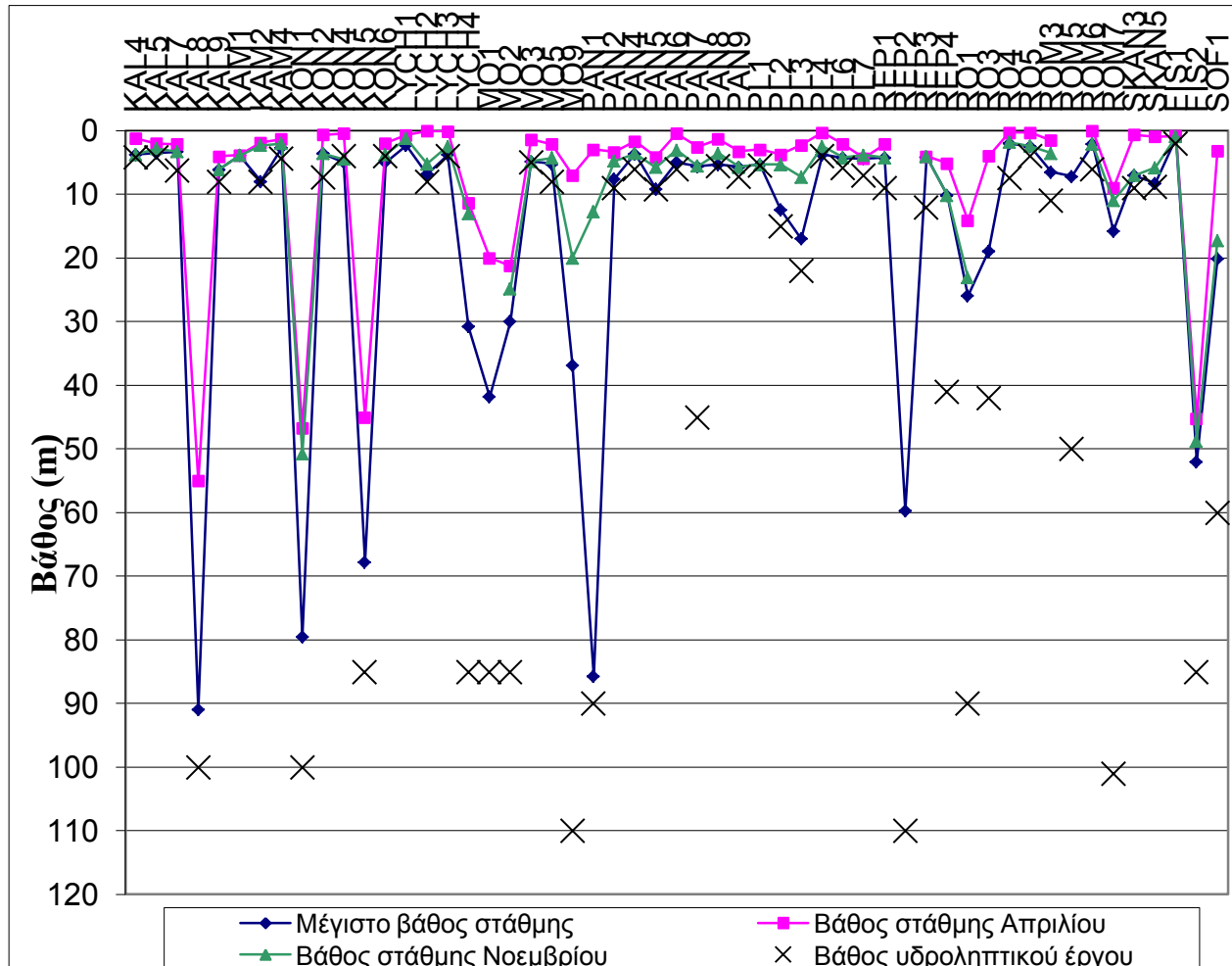
μεταβολή της στάθμης στο κεντρικό και βόρειο τμήμα του νησιού η οποία στο κεντρικό τμήμα φτάνει περίπου μέχρι τα 10 m ενώ στο βόρειο τμήμα γίνεται ακόμα πιο έντονη φτάνοντας τα 40 m.



Σχήμα 19: Χάρτης μεταβολής της στάθμης σε μέτρα για τις περιόδους Μαΐου 2001-Οκτωβρίου 2001

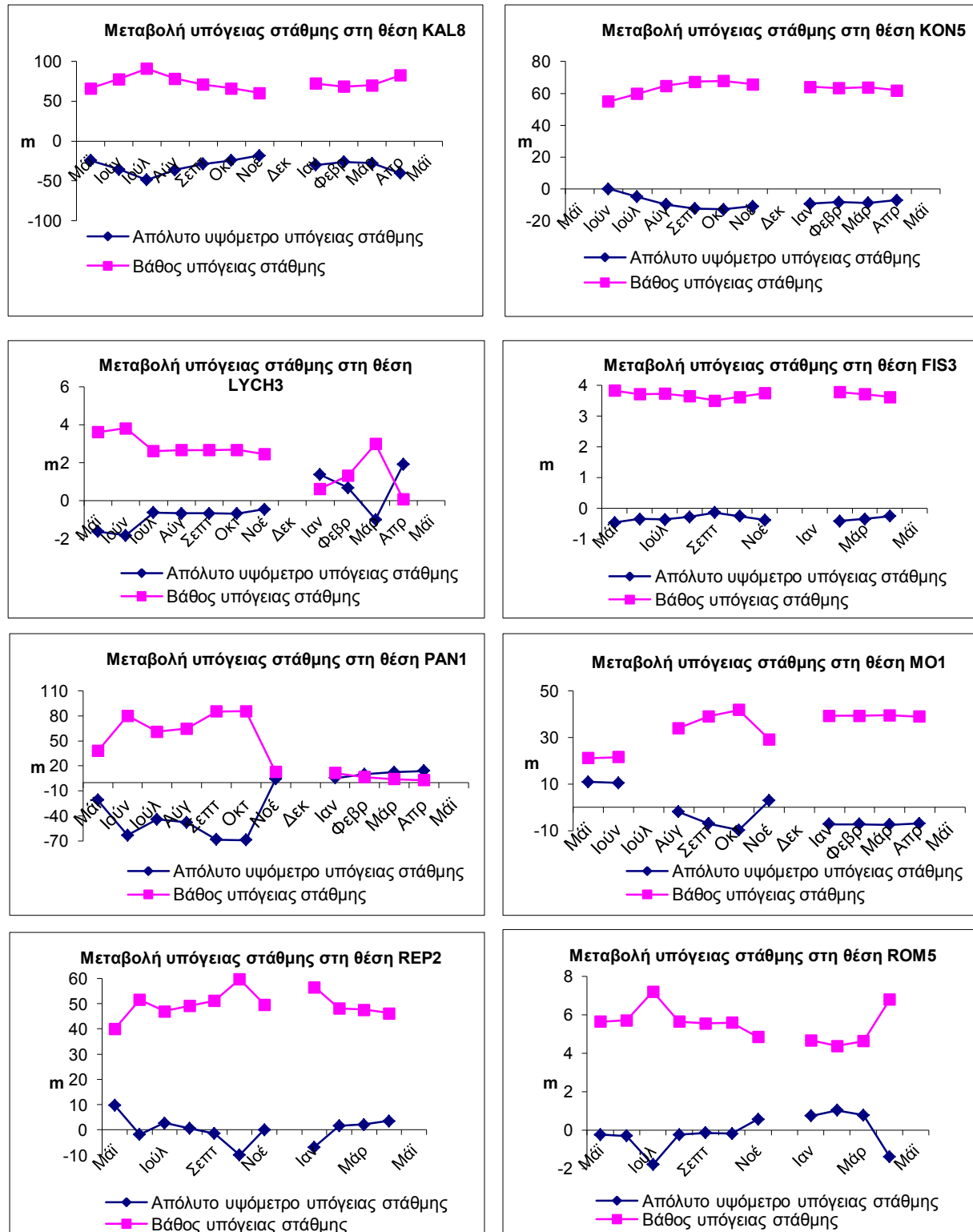
Στο διάγραμμα του Σχήματος 20, σύμφωνα με τους Παπαδόπουλος κ.ά. (2003), προβάλλεται το βάθος ανόρυξης κάθε υδροληπτικού έργου που εντάχθηκε στο δίκτυο παρατήρησης, η στάθμη ηρεμίας εντός αυτού κατά το Νοέμβριο 2001 (χαμηλή στάθμη) και τον Απρίλιο του 2002 (υψηλή στάθμη), καθώς επίσης και η μέγιστη καταγραφείσα δυναμική στάθμη άντλησης. Από αυτό προκύπτει ότι οι πηγές (πηγάδια) λειτουργούν σε οριακές συνθήκες και το μέγιστο βάθος τους είναι τα 10 m. Όσον αφορά στις γεωτρήσεις, προκύπτει ότι για τις περισσότερες οι στάθμες ηρεμίας βρίσκονται αρκετά υψηλότερα από το βάθος ανόρυξης τους.

Ωστόσο, σε αρκετές γεωτρήσεις παρατηρείται ότι οι μέγιστες καταγραφείσες στάθμες άντλησης πλησιάζουν ή και φτάνουν σχεδόν το βάθος ανόρυξης του υδροληπτικού έργου που είναι και το ανώτερο επιτρεπτό.



Σχήμα 20: Σχέση στάθμης πιεζομετρικής επιφάνειας με το βάθος των υδροληπτικών έργων (Παπαδόπουλος κ.ά., 2003)

Τέλος, επισυνάπτονται παρακάτω στο Σχήμα 21 ενδεικτικά κάποια από τα υδρογραφήματα των θέσεων παρατήρησης του δικτύου. Οι θέσεις παρατήρησης φαίνονται στον χάρτη του Σχήματος 14. Τα υδρογραφήματα αυτά δείχνουν τη μεταβολή της απόλυτης στάθμης και του βάθους της υπόγειας στάθμης για το έτος 2001. Παρατηρούμε ότι στις συγκεκριμένες θέσεις η απόλυτη στάθμη παρουσιάζει αρνητικές τιμές σχεδόν σε όλο το έτος υποδεικνύοντας έντονα το φαινόμενο της διείσδυσης θαλασσινού νερού και της πιθανής υφαλμύρισης του υδροφορέα.



Σχήμα 21: Υδρογραφήματα θέσεων παρατήρησης (Παπαδόπουλος κ.ά., 2003)

6. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΥΔΑΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Η εκτίμηση των πιέσεων στα υδατικά συστήματα βασίζεται στην καταγραφή του συνόλου των πιέσεων (πιέσεις ρύπανσης, επιπτώσεις από απόληψη ποσοτήτων υδάτων από το υδατικό σύστημα, αλλαγές στη μορφολογία του υδατικού συστήματος, κλπ.), με στόχο την κατανόηση των σημαντικότερων διαχειριστικών προβλημάτων της περιοχής και τους μηχανισμούς μέσω των οποίων επηρεάζουν το υπόγειο υδατικό σύστημα. Οι πηγές ρύπανσης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες τις σημειακές και τις διάχυτες (Βουδούρης, 2009). Από τα διαθέσιμα στοιχεία που συγκεντρώθηκαν για τις σημειακές πηγές ρύπανσης στην ανατολική Λήμνο από τους Παπαδόπουλος κ.ά., (2003) σε συνδυασμό με το Σχέδιο Διαχείρισης του Υδατικού Διαμερίσματος Νήσων Αιγαίων (GR14), σχεδιάστηκε ο χάρτης (Σχήμα 22) ο οποίος δείχνει τις κυριότερες πηγές ρύπανσης της ανατολικής Λήμνου. Καθίσταται προφανής η αυξημένη πίεση στα υπόγεια συστήματα λόγω των αποχετευτικών συστημάτων.

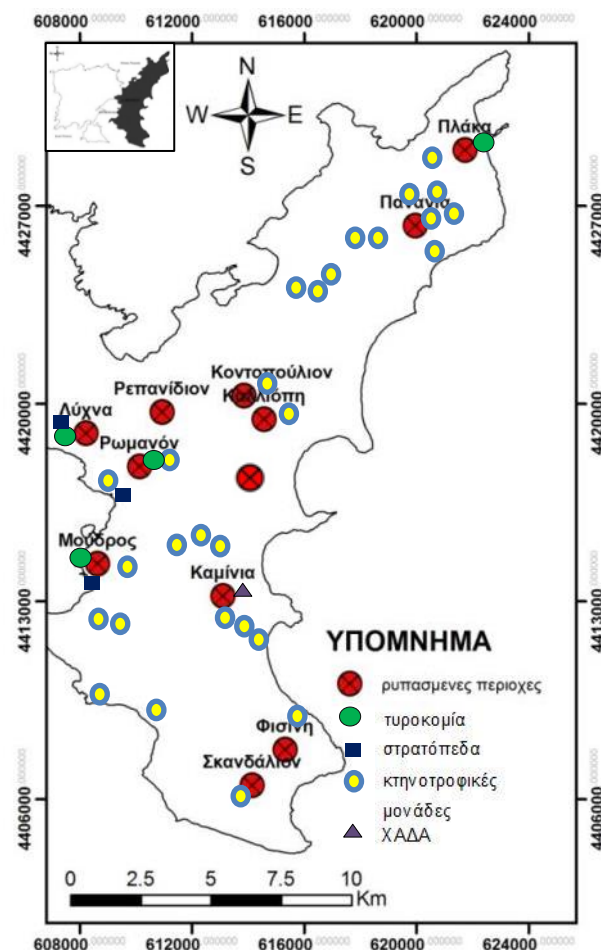
Πιο συγκεκριμένα, το **αποχετευτικό σύστημα** του νησιού χαρακτηρίζεται ως ελλιπές. Το 60% του πληθυσμού διοχετεύει τα λύματα του σε σηπτικές δεξαμενές, ενώ τα υπάρχοντα αποχετευτικά δίκτυα δεν λειτουργούν ικανοποιητικά. Σε μεγάλο ποσοστό μάλιστα συμβαίνουν συχνές διαρροές. Ο κίνδυνος μόλυνσης του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται σε ποσοστό άνω του 50% σε συνδυασμό με άλλα υγειονομικά προβλήματα όπως οσμές, έντομα κλπ. Πολλοί οικισμοί, οι οποίοι φαίνονται στο παρακάτω σχήμα, δεν έχουν δίκτυο αποχέτευσης και τα λύματα τα διαθέτουν σε χέρσα περιοχή (χωράφια και ρέματα). Για παράδειγμα τα υγρά αστικά απόβλητα του οικισμού Ρωμανού καταλήγουν σε γειτονικό ρέμα ανεπεξέργαστα και αυτό όπως θα δούμε παρακάτω από τις αναλύσεις δημιουργεί σοβαρό πρόβλημα στην ποιότητα του υπόγειου νερού. Πολλές φορές μάλιστα γύρω από τα σημεία εξόδων των λυμάτων υπάρχουν γεωτρήσεις ή πηγάδια που χρησιμοποιούνται για ύδρευση. Αποτέλεσμα όλων αυτών είναι η ρύπανση των υπόγειων νερών.

Στην ευρύτερη περιοχή μελέτης δεν υπάρχει κάποια ιδιαίτερη **βιομηχανική δραστηριότητα**. Ο μεγαλύτερος αριθμός τους αφορά βιομηχανίες μεταποίησης αγροτικών προϊόντων, σφαγεία, κτηνοτροφικές μονάδες, τυροκομεία, εγκαταστάσεις παραγωγής - επεξεργασίας - συντήρησης αλιευμάτων, γαλακτοκομικών προϊόντων, φρούτων και λαχανικών

(Σχέδιο Διαχείρισης Αιγαίου). Όλα αυτά συμβάλουν στη ρύπανση των υπόγειων νερών της περιοχής έρευνας.

Τα **στρατόπεδα** και τα **πεδία βολής** αποτελούν ένα σημαντικό φορτίο στα συνολικά βοθρολύματα του νησιού. Στο βόρειο τμήμα της περιοχής φιλοξενείται ένας σημαντικός αριθμός εκτεταμένων πεδίων βολής του στρατού που λειτουργούν εδώ και πολλές δεκαετίες. Σύμφωνα με μελέτη της αμερικανικής γεωγραφικής υπηρεσίας (USGS, 2002), τα πεδία βολής αποτελούν σημαντική πηγή ρύπανσης μολύβδου (Pb) και χρωμίου (Cr) και έτσι πιθανώς να συμβάλλουν στη ρύπανση των υδάτων σε βαρέα μέταλλα από τη ρίψη βλημάτων. Η Χορταρόλιμνη, που εκτείνεται ανάμεσα στο Ρουσσοπούλι και τη Καλλιόπη, αποτελούσε στο παρελθόν πεδίο βολής και ίσως αυτό να έχει συμβάλει στην επιβάρυνση της με βαρέα μέταλλα, όπως θα δούμε στη συνέχεια της μελέτης στο κεφάλαιο της κατανομής των βαρέων μετάλλων.

Τέλος, οι χώροι ανεξέλεγκτης διάθεσης αποβλήτων (**ΧΑΔΑ**) που είναι διάσπαρτοι σε όλη την έκταση της Λήμνου αποτελούν έναν σημαντικό ρυπαντή. Περίπου 35 ανεξέλεγκτοι χώροι διάθεσης απορριμμάτων υπήρχαν στο νησί μέχρι το 1988 (Παπαδόπουλος κ.ά., 2003).



Ο χάρτης του Σχήματος 22 απεικονίζει τις κυριότερες πηγές ρύπανσης όπως αυτές αναφέρθηκαν προηγουμένως. Παρατηρούμε ότι η πλειοψηφία των πηγών αφορά **κτηνοτροφικές μονάδες** και τοπικά **τυροκομεία** σε όλη την έκταση της περιοχής. Σημαντικός επίσης είναι και ο αριθμός των οικισμών που παρουσιάζει κίνδυνο ρύπανσης του υδροφόρου ορίζοντα λόγω των διαρροών στα **αποχετευτικά δίκτυα** και στις **σηπτικές δεξαμενές**. Στην περιοχή μελέτης βρίσκονται τρία στρατόπεδα κοντά στους κύριους οικισμούς Λύχνα, Ρωμανό και Μούδρο, ενώ υπάρχει ένας καταγεγραμμένος παλιός ΧΑΔΑ κοντά στον οικισμό Καμίνια.

Οι σημαντικότερες διάχυτες πηγές ρύπανσης των επιφανειακών υδάτων σχετίζονται με ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως η γεωργία και η κτηνοτροφία ελευθέρως βοσκής. Οι **γεωργικές δραστηριότητες** είναι έντονες σε όλο το κεντρικό και κυρίως στην ανατολική Λήμνο. Λόγω των καλλιεργειών, αυτών όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο, οι επιπτώσεις τους είναι σημαντικές στα υδατικά συστήματα, με αποτέλεσμα την επιβάρυνση των υπόγειων υδροφορέων με νιτρικά, νιτρώδη, φωσφορικά και αμμωνιακά ιόντα. Τα ρυπαντικά φορτία προέρχονται από τη χρήση αγροχημικών ανόργανων, οργανικών ή και μικτών λιπασμάτων στις καλλιεργούμενες εκτάσεις.

7. ΦΥΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ

7.1 Ποιότητα υπόγειου νερού

Με βάση τα αποτελέσματα των υδροχημικών παραμέτρων που προέκυψαν από τις 45 δειγματοληπτικές θέσεις στην περιοχή έρευνας της ανατολικής Λήμνου, πραγματοποιήθηκε μια στοιχειώδης περιγραφή των στατιστικών παραμέτρων. Η συνολική στατιστική καταγραφή των υδροχημικών αυτών παραμέτρων παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2) και περιλαμβάνει κάποια από τα σημαντικότερα μέτρα, όπως μέγιστη και ελάχιστη τιμή, αριθμητικός μέσος και την τυπική απόκλιση, για τους δύο μήνες Μάιο και Οκτώβριο 2001. Στη συνέχεια ακολουθεί σύντομη ανάλυση και ερμηνεία κάθε ιόντος ξεχωριστά με τους αντίστοιχους υδροχημικούς χάρτες χωρικής κατανομής σε περιβάλλον G.I.S.

Πίνακας 2: Στατιστική περιγραφή των υδροχημικών παραμέτρων

	pH	EC	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻
Μάιος													
Min	7,00	860	1,95	80	8	12,12	128	109,34	50,88	0	0	0	0
Max	8,54	38800	66,3	6141	785	1236	691,74	13987	2072,16	54,26	1,96	10,62	3,23
Mean	7,52	2881,2	10,41	433	129,3	84,8	339,95	781,22	241,97	20,1	0,076	0,37	0,18
Std.Dev.	0,29	5594	12,69	917,5	141,5	180,7	105,2	2100,3	302,37	17,89	0,29	1,58	0,5
Variance	0,084	31286923	161	841862	20010	32638,7	11063	4411268	91430,67	320,1	0,085	2,48	0,25
Οκτώβριος													
Min	6,68	910	1,17	80,5	8	15,6	67,1	113,6	24	0	0	0	0,005
Max	8,26	8420	58,5	6400,9	1310	1148,4	579,5	13635,5	667,2	51,79	0,52	7,85	3
Mean	7,29	2110,5	7,6	423	134,73	95,8	324,9	852,6	189,44	19,86	0,05	0,32	0,27
Std.Dev.	0,25	1133,7	10,5	944,26	199,6	194,75	102	2194,95	149,22	18,41	0,1	1,15	0,52
Variance	0,065	1285209	110	891625	39865	37927,7	10405,6	4817770	22265,7	338,8	0,01	1,34	0,28

Όλες οι τιμές είναι εκφρασμένες σε mg/L, εκτός από το pH και EC (μS/cm)

Το pH για τον μήνα Μάιο κυμαίνεται στην περιοχή μελέτης από 7 έως 8,5 mg/L με μέση τιμή 7,5 mg/L και χαρακτηρίζεται από ουδέτερο έως αλκαλικό, ενώ τον Οκτώβριο κυμαίνεται μεταξύ 6,7 και 8,3 mg/L με μέση τιμή 7,2 mg/L (Σχήμα 23). Όλες οι τιμές είναι εντός των ορίων (6,5<pH<9,5) όπως ορίζονται από τη Νομοθεσία (Κ.Υ.Α. Υ2/2600/2001). Ωστόσο τον Οκτώβριο

στις θέσεις FIS2 και ROM5 το pH γίνεται ελαφρά όξινο (6,68). Αυτό ίσως να οφείλεται σε ειδικές γεωλογικές συνθήκες, όπως στην πιθανή παρουσία θειούχων μεταλλικών ορυκτών που οξειδώνονται παρουσία νερού που τον Οκτώβριο είναι σε αφθονία και η οξείδωση των θείων προκαλεί όξυνση των υδάτων και μια σχετική μείωση του pH.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) κυμαίνεται από 860 έως 38800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ με μέση τιμή 2881 $\mu\text{S}/\text{cm}$ κατά την περίοδο του Μαΐου 2001, ενώ τον Οκτώβριο παρατηρείται μια σχετική μείωση από 910 έως 8420 $\mu\text{S}/\text{cm}$ και μέση τιμή τα 2110 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Σχήμα 24). Η ενδεικτική τιμή του στο πόσιμο νερό είναι 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ενώ η μέγιστη τα 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ στους 20°C (Κ.Υ.Α. Υ2/2600/2001). Σύμφωνα με τους Davis and DeWiest (1996) το νερό στις δύο περιόδους χαρακτηρίζεται ως υφάλμυρο. Γενικά οι αυξημένες τιμές οφείλονται στη θαλάσσια διείσδυση. Τον Μάιο η θέση όπου καταγράφηκε η μεγαλύτερη τιμή (38800 $\mu\text{S}/\text{cm}$) είναι η ROM5 που εκτός από την υφαλμύριση αποτελεί ένδειξη παρουσίας λυμάτων ή κάποιας άλλης πηγής ρύπανσης λόγω των επιπλέον Cl^- , PO_4^{3-} , NO_3^- . Κατά την ξηρή περίοδο παρατηρούμε ότι έχουμε αυξημένες τιμές ιδίως στο κεντρικό και βόρειο τμήμα λόγω των αυξημένων απαιτήσεων υδροδότησης και ποτίσματος.

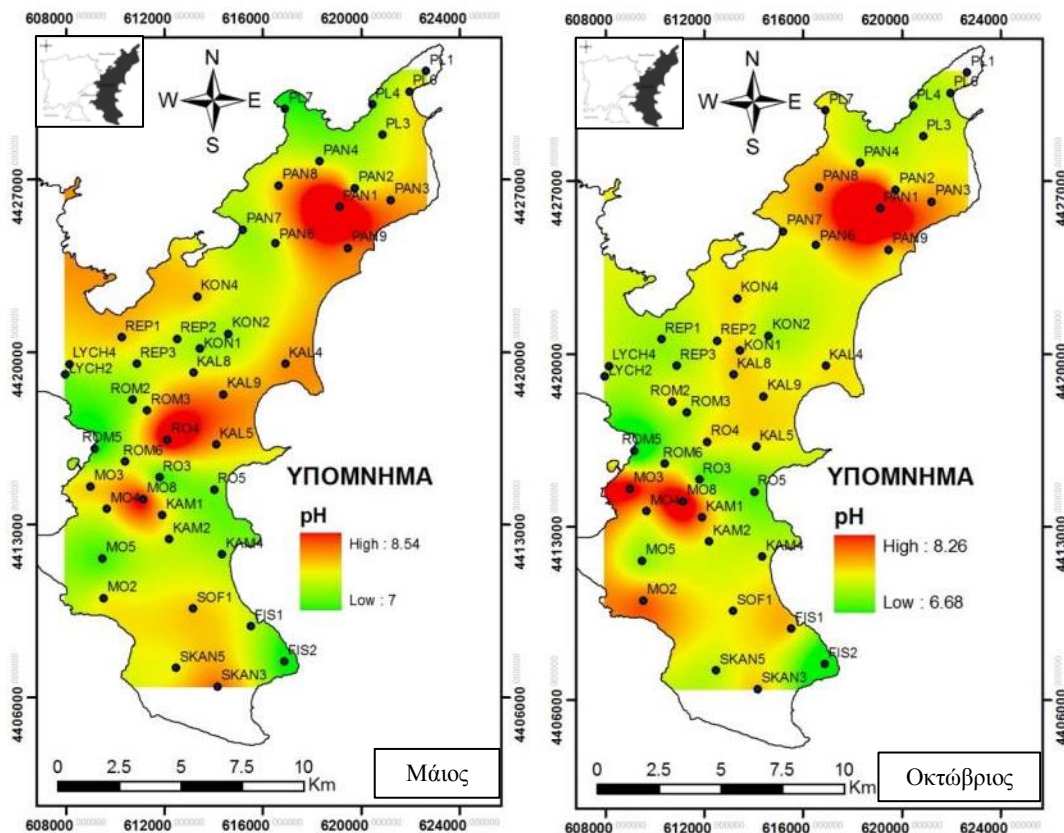
Οι συγκεντρώσεις των ιόντων καλίου (K^+) κυμαίνονται στην περιοχή από 1,95 έως 66,3 mg/L με μέση τιμή τα 10,4 mg/L κατά την περίοδο του Μαΐου. Τον Οκτώβριο παρατηρείται ελαφριά μείωση στην περιεκτικότητά του, από 1,17 έως 58,5 mg/L και μέση τιμή 7,6 mg/L (Σχήμα 25). Η παραμετρική τιμή του στο νερό είναι 12 mg/L (Κ.Υ.Α. Υ2/2600/2001). Συγκρίνοντας τις δύο περιόδους δεν παρουσιάζονται σημαντικές μεταβολές. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις στα δείγματα οφείλεται στην αποσάθρωση των πλούσιων σε κάλιο ηφαιστειακών πετρωμάτων (Pe-Piper et al., 2009), όπως ανδεσίτες, τραχειανδεσίτες, τραχείτες και δακίτες, οι οποίοι περιέχουν πλαγιόκλαστα και K-ούχους αστρίους (Roussos et al., 1993). Η χημική αντίδραση που συμβάλλει στον εμπλουτισμό του νερού σε K^+ είναι η εξής (Apello and Postma, 1993):

$$2\text{K}(\text{AlSi}_3)\text{O}_8 + 2\text{H}^+ + 9\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 2\text{K}^+ + 4\text{H}_4\text{SiO}_4$$

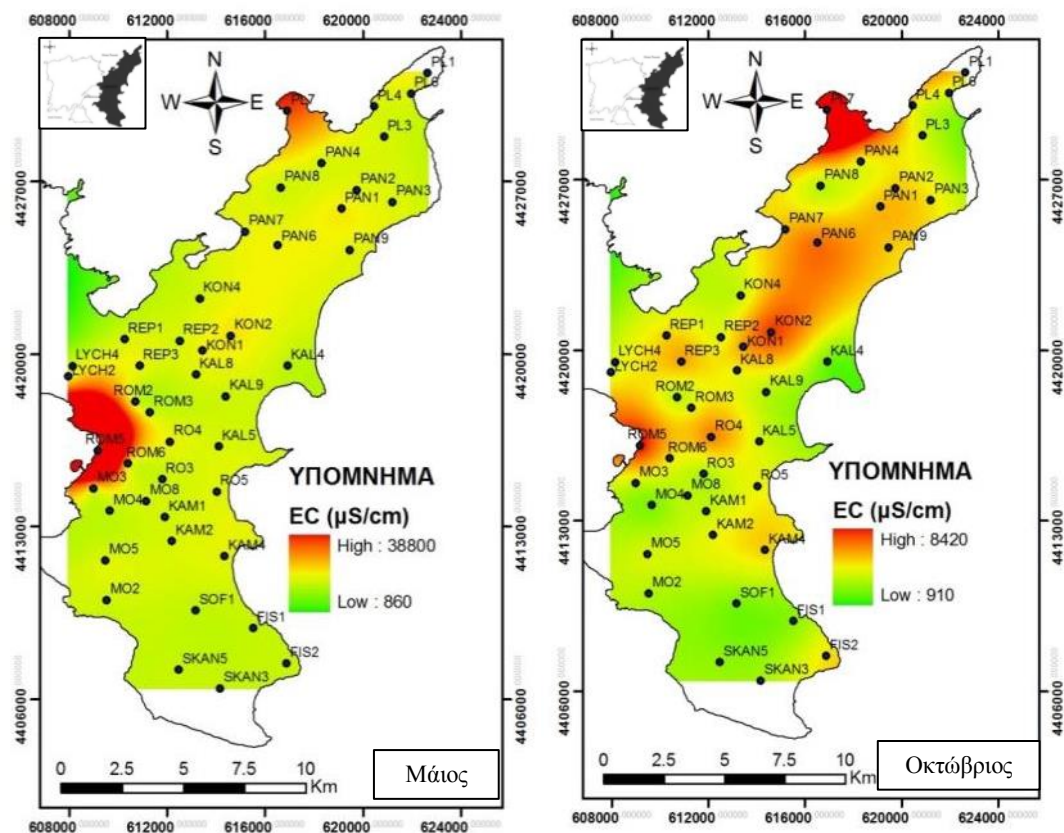
(Σανίδινο)

(Καολινίτης)

Επίσης συνδέεται με το φαινόμενο της ιοντοανταλλαγής που συμβαίνει στις παράκτιες περιοχές (Panagopoulos et al., 2013) λόγω της διείσδυσης θαλασσινού νερού στην ενδοχώρα οδηγώντας στην απελευθέρωση του K^+ . Μια άλλη πηγή ανθρωπογενούς προέλευσης είναι η χρήση λιπασμάτων στις καλλιεργούμενες εκτάσεις (Schilling and Wolter, 2001; Βουδούρης, 2009). Στη θέση ROM5 εκτός από υφαλμύριση έχουμε και ρύπανση από οικιακά λύματα τα οποία αποτελούν μια επιπλέον πηγή του καλίου (Vengosh and Keren, 1996; Jalali, 2007).



Σχήμα 23: Υδροχημικοί χάρτες κατανομής pH στην Ανατολική Λήμνο



Σχήμα 24: Υδροχημικοί χάρτες κατανομής EC στην Ανατολική Λήμνο

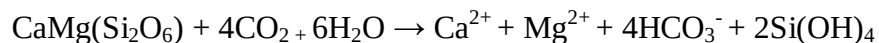
Οι τιμές των ιόντων νατρίου (Na^+) κυμαίνονται από 80 έως 6141 mg/L και μέση τιμή 433 mg/L την περίοδο του Μαΐου 2001. Από την υγρή στην ξηρή περίοδο δεν παρατηρούνται μεγάλες μεταβολές (μέση τιμή τα 423 mg/L τον Οκτώβριο) (Σχήμα 26). Η παραμετρική τιμή του στο νερό σύμφωνα με τη Νομοθεσία είναι 200 mg/L. Οι αυξημένες περιεκτικότητες στα δείγματα οφείλονται στην αποσάθρωση των νατριούχων αστρίων των ηφαιστειακών πετρωμάτων (Pe-Piper et al., 2009), σύμφωνα με τη χημική αντίδραση (Apello and Postma, 1993):

(Αλβίτης)

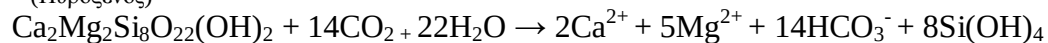
(Καολινίτης)

Επίσης συνδέεται με το φαινόμενο της ιοντοανταλλαγής που συμβαίνει (Panagopoulos et al., 2013) λόγω της διείσδυσης θαλασσινού νερού οδηγώντας στην απελευθέρωση του νατρίου: Na^+ (νερό) + $1/2\text{Ca-X}_2 \leftrightarrow \text{Na-X} + 1/2\text{Ca}^{2+}$ (νερό) (Apello and Postma, 1993). Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις εμφανίζονται στις παράκτιες θέσεις FIS2, PL7, MO5 και ROM5 λόγω υφαλμύρισης. Στη θέση ROM5 εκτός από υφαλμύριση έχουμε και ρύπανση από οικιακά ή βιομηχανικά λύματα τα οποία αποτελούν μια επιπλέον πηγή του νατρίου (Vengosh and Keren, 1996; Jalali, 2007).

Το ασβέστιο (Ca^{2+}) στην περιοχή έρευνας τον Μάιο κυμαίνεται από 8 έως 785 mg/L με μέση τιμή τα 129 mg/L. Τον Οκτώβριο φτάνει μέχρι και τα 1310 mg/L με μέση τιμή 134,7 mg/L (Σχήμα 27). Στα υπόγεια νερά το Ca^{2+} έχει συνήθως τιμές από 10 έως 100 mg/L. Η κατανομή του είναι ίδια στις δύο περιόδους δειγματοληψίας. Προέρχεται από τη διάλυση των ανθρακικών και πυριτικών ορυκτών (πλαγιόκλαστα, πυρόξενοι, αμφίβολοι) της περιοχής έρευνας (Roussos et al., 1993; Papoulis and Tsolis-Katagas, 2008; Pe-Piper et al., 2009). Οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα από τη διάλυση των ορυκτών είναι οι εξής:



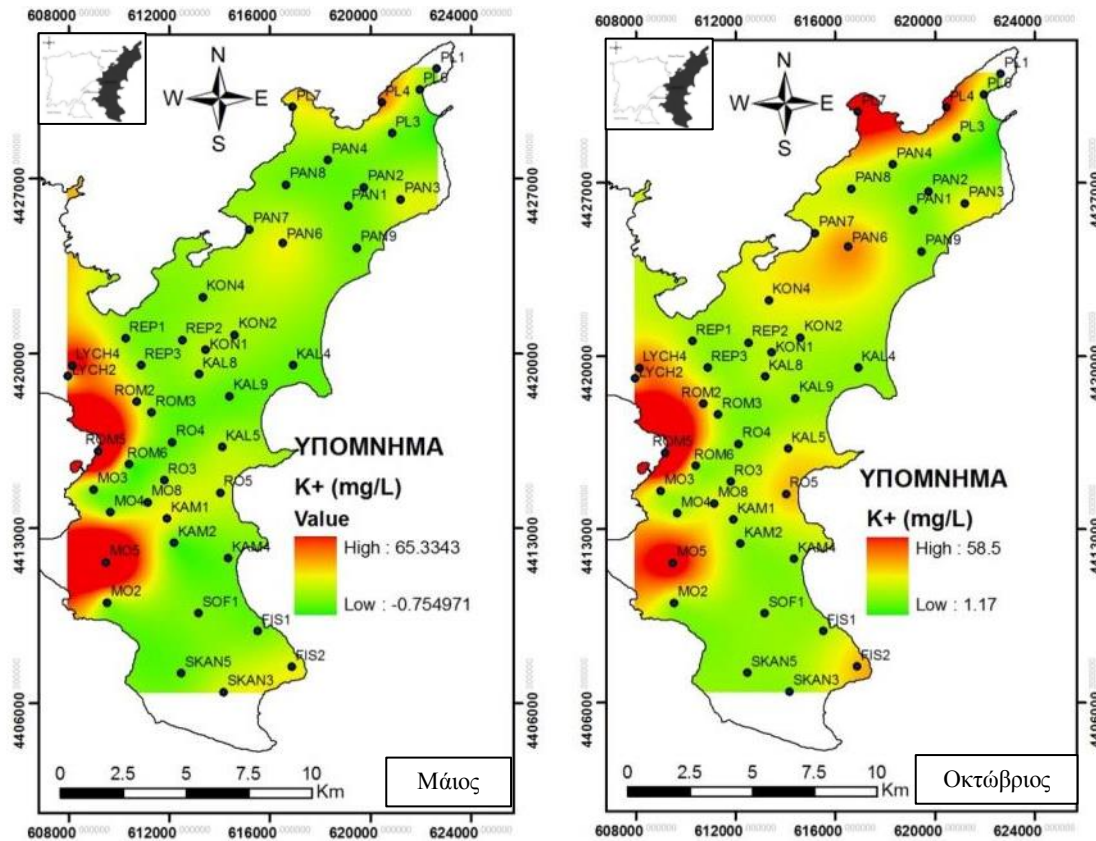
(Πυρόξενος)



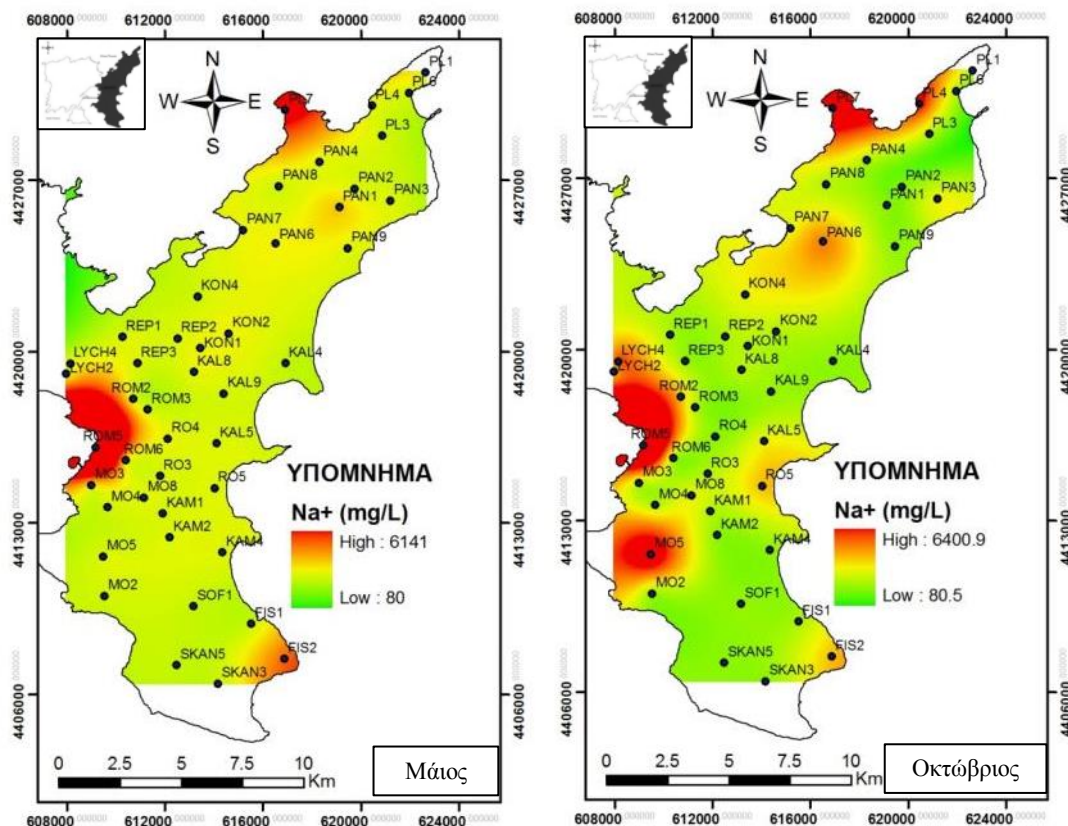
(Αμφίβολος)

Οι αυξημένες τιμές στις παράκτιες περιοχές αποτελούν ένδειξη υφαλμύρισης η οποία παρατηρείται με αύξηση των ιόντων που ακολουθείται από ανταλλαγή κατιόντων, κατά την οποία απελευθερώνονται Ca^{2+} και απορροφώνται ιόντα θαλάσσιας προέλευσης Na^+ , K^+ , Mg^{2+} σύμφωνα με την αντίδραση (Apello and Postma, 1993): Na^+ (νερό) + $1/2\text{Ca-X}_2 \leftrightarrow \text{Na-X} + 1/2\text{Ca}^{2+}$ (νερό).

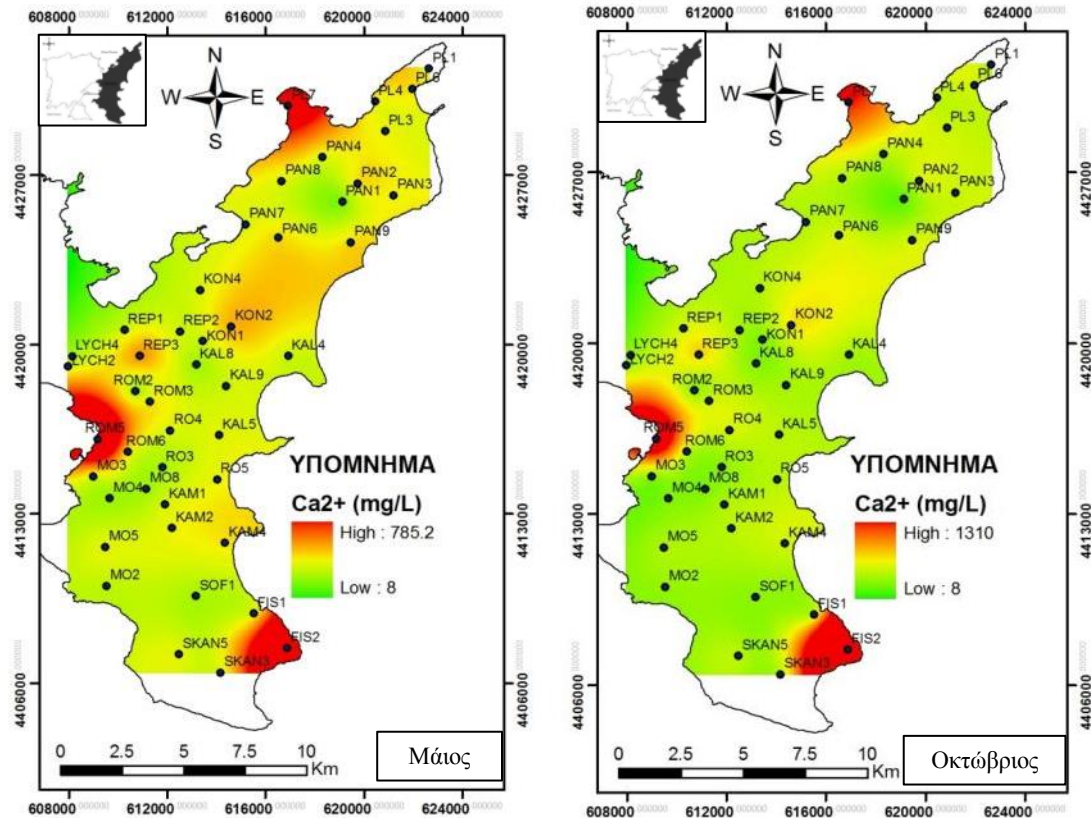
Οι τιμές των ιόντων μαγνησίου (Mg^{2+}) κυμαίνονται από 12 έως 1236 mg/L με μέση τιμή τα 84,8 mg/L για τον Μάιο. Για την ξηρή περίοδο (Οκτώβριος) οι περιεκτικότητες είναι σχεδόν



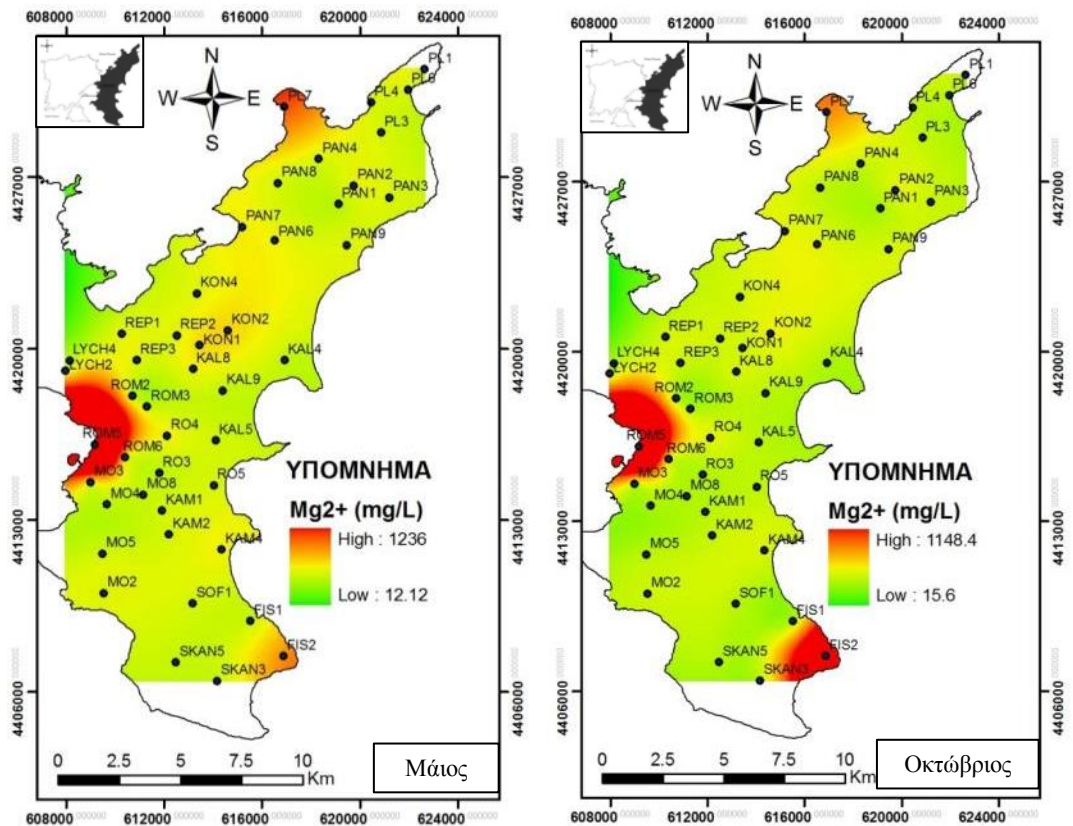
Σχήμα 25: Υδροχημικοί χάρτες κατανομής K⁺ στην Ανατολική Λήμνο



Σχήμα 26: Υδροχημικοί χάρτες κατανομής Na⁺ στην Ανατολική Λήμνο



Σχήμα 27: Υδροχημικοί χάρτες κατανομής Ca²⁺ στην Ανατολική Λήμνο

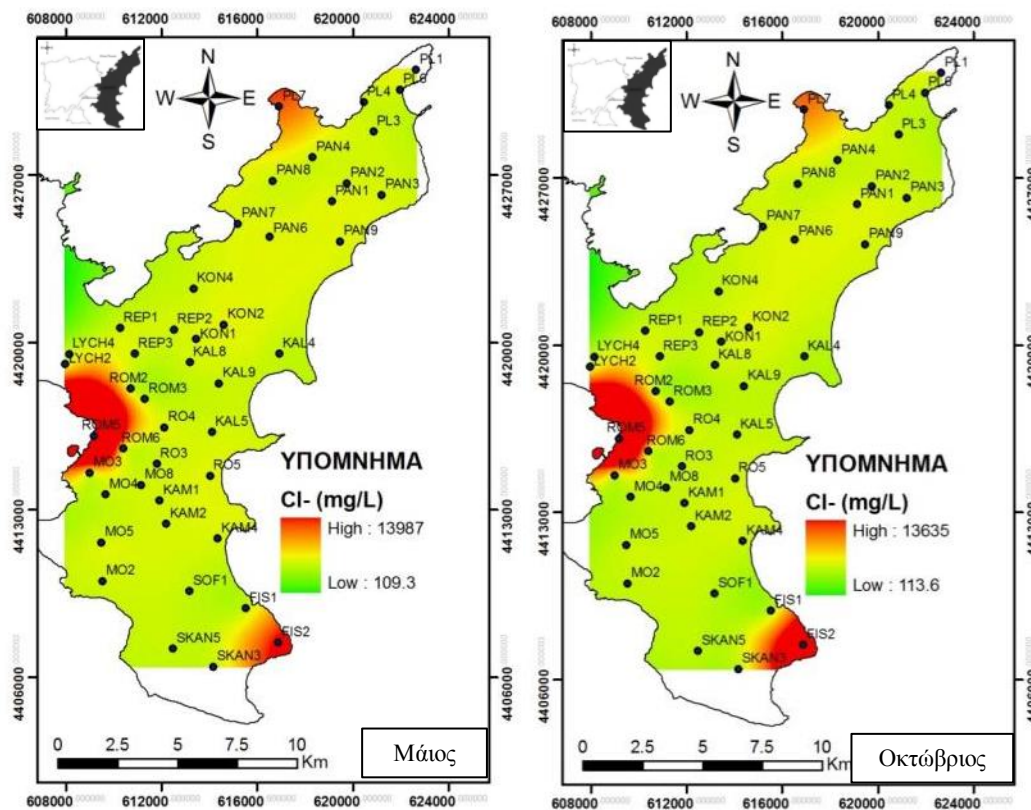


Σχήμα 28: Υδροχημικοί χάρτες κατανομής Mg²⁺ στην Ανατολική Λήμνο

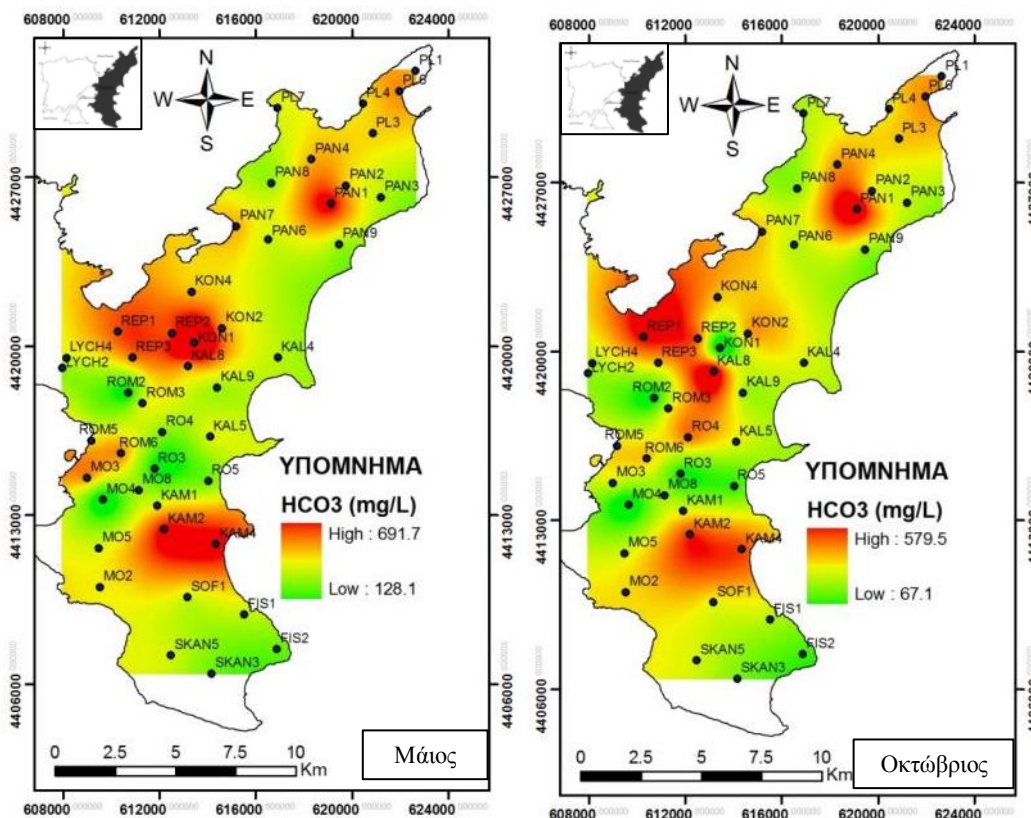
ίδιες, από 15,6 έως 1148 mg/L με μέση τιμή 95,8 mg/L (Σχήμα 28). Στα υπόγεια νερά συνήθως συναντάται σε συγκεντρώσεις <50 mg/L (Σούλιος, 2006). Η κατανομή του δεν παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές κατά τις δύο περιόδους δειγματοληψίας. Η παρουσία των ιόντων μαγνησίου, όπως και των ιόντων ασβεστίου, οφείλονται στην αποσάθρωση των μαγνησιούχων ορυκτών (πυρόξανοι, αμφιβολίτες) στα ηφαιστειακά πετρώματα (Pe-Piper et al., 2009), σύμφωνα με τις χημικές αντιδράσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Επίσης, οφείλονται στη διαδικασία της διείσδυσης του θαλασσινού νερού και την αλληλεπίδραση του με τον υδροφορέα (Panagopoulos et al., 2013) δημιουργώντας φαινόμενα ιοντοανταλλαγής μεταξύ Na^+ και K^+ του νερού με το Ca^{2+} και Mg^{2+} από τον υδροφορέα. Οι υψηλότερες τιμές στο παράκτιο κεντρικό μέρος (ROM5), στο βόρειο (PL7) και στο νότιο (FIS2) εμφανίζονται λόγω υφαλμύρισης του υδροφορέα.

Τα ιόντα χλωρίου (Cl^-) κυμαίνονται από 109,3 έως 13987 mg/L με μέση τιμή τα 781,2 mg/L για την υγρή περίοδο (Μάιος). Στην ξηρή περίοδο (Οκτώβριος) οι τιμές κυμαίνονται περίπου το ίδιο. Ελάχιστη τα 113,6 mg/L, μέγιστη τα 13635 mg/L και μέση τιμή τα 852,6 mg/L (Σχήμα 29). Η ενδεικτική παραμετρική τιμή είναι 250 mg/L (Κ.Υ.Α. Υ2/2600/2001). Συγκρίνοντας τις δύο περιόδους δειγματοληψίας παρατηρούμε ότι έχουν ίδια κατανομή, με τις μέγιστες τιμές να εμφανίζονται στο παράκτιο κεντρικό μέρος (ROM5), στο νότιο (FIS2) και στο βόρειο (PL7) και υποδεικνύουν ποιοτική υποβάθμιση του νερού λόγω θαλάσσιας διείσδυσης σε παράκτιους υδροφορείς. Στη θέση ROM5, εκτός από υφαλμύριση, η αυξημένες συγκεντρώσεις του πιθανόν δευτερογενώς να οφείλονται σε ρύπανση από βιομηχανικά απόβλητα (Vengosh and Keren, 1996; Environmental Protection Agency, 2001; Jalali, 2007).

Οι συγκεντρώσεις των όξινων ανθρακικών ιόντων (HCO_3^-) κυμαίνονται την υγρή περίοδο από 128 έως 691,7 mg/L με μέση τιμή τα 340 mg/L. Την ξηρή περίοδο οι τιμές είναι χαμηλότερες, δηλαδή κυμαίνονται από 67 έως 579 mg/L και μέση τιμή 325 mg/L (Σχήμα 30). Δεν παρουσιάζονται σημαντικές μεταβολές κατά τις δύο περιόδους δειγματοληψίας. Η φυσική προέλευση τους είναι η διάλυση των ανθρακικών ορυκτών (Maya and Loucks, 1995) σύμφωνα με την αντίδραση: $\text{CaCO}_3 + \text{H}^+ \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^-$. Σε αυτό οφείλεται και η παρουσία του Ca^{2+} . Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις εμφανίζονται στο κεντρικό (KON1, KAL8, REP2, REP), νότιο (KAM2, KAM4) και βόρειο τμήμα (PAN1) της περιοχής έρευνας. Πιθανώς να σχετίζονται και με την παρουσία των ρηγμάτων τα οποία τροφοδοτούν τον υδροφορέα με γλυκό νερό, στο οποίο επικρατέστερο ανιόν είναι τα όξινα ανθρακικά ιόντα.



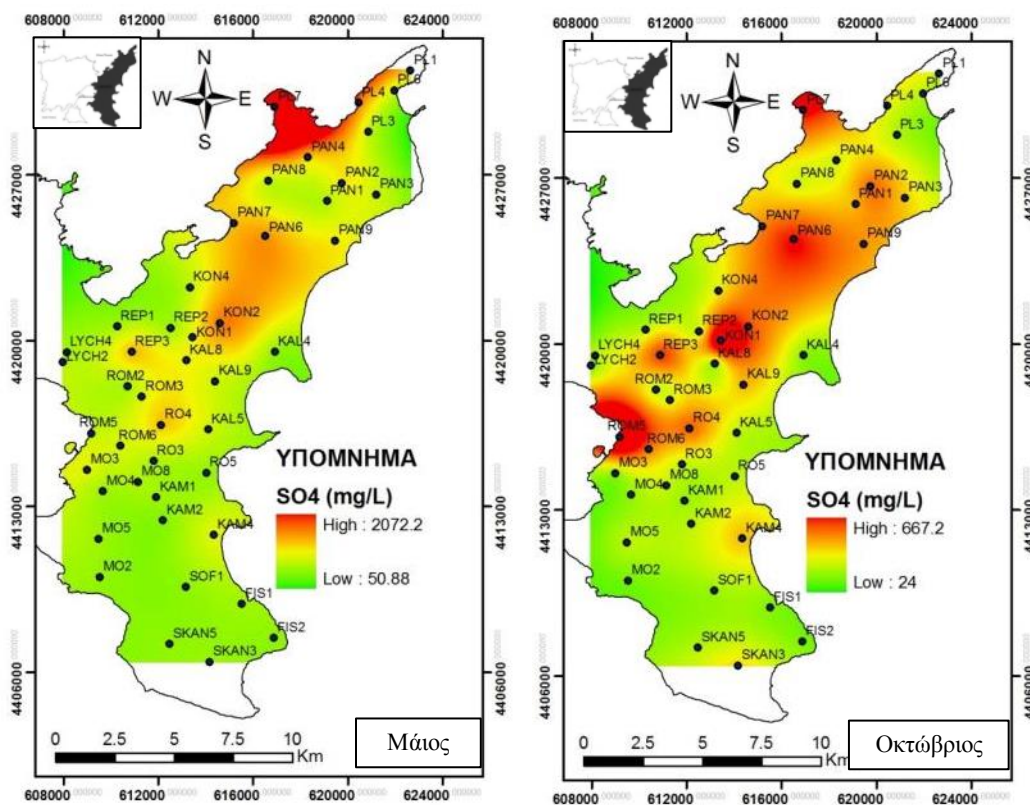
Σχήμα 29: Υδροχημικοί χάρτες κατανομής Cl^- στην Ανατολική Λήμνο



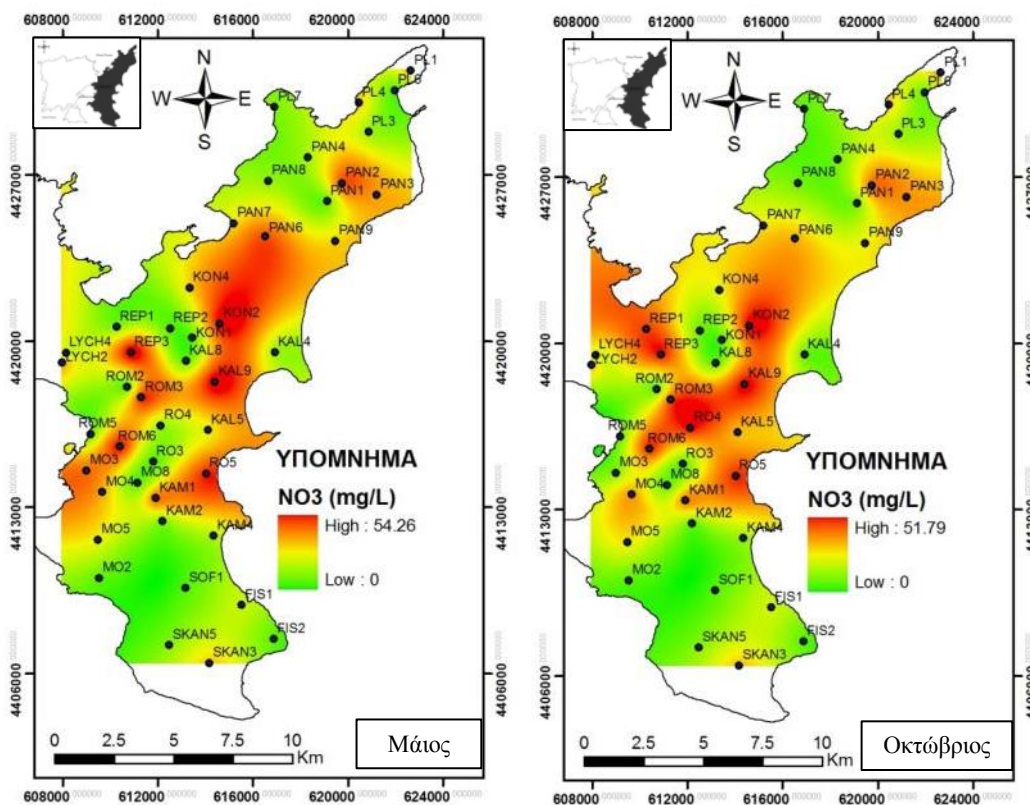
Σχήμα 30: Υδροχημικοί χάρτες κατανομής HCO_3^- στην Ανατολική Λήμνο

Τα θειϊκά ιόντα (SO_4^{2-}) κατά την περίοδο δειγματοληψίας του Μαΐου κυμαίνονται από 50,9 έως 2072,2 mg/L, με μέση τιμή 242 mg/L. Κατά τον Οκτώβριο η περιεκτικότητα των θεικών ιόντων ελαττώνεται. Η ελάχιστη είναι τα 24 mg/L, η μέγιστη τα 667,2 mg/L και η μέση 189,4 mg/L (Σχήμα 31). Η παραμετρική τιμή σύμφωνα με την ισχύουσα Νομοθεσία (Κ.Υ.Α. Υ2/2600/2001) είναι τα 250 mg/L. Οι υψηλότερες περιεκτικότητες παρατηρούνται κυρίως στο βόρειο και κεντρικό τμήμα της περιοχής έρευνας λόγω κυρίως της οξείδωσης των θειούχων ενώσεων, όπως των σουλφιδίων (Panagopoulos et al., 2011). Η παραγωγή των θεικών ιόντων γίνεται σύμφωνα με τη χημική αντίδραση: $\text{FeS}_2 + 15/4\text{O}_2 + 7/2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 2\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+$. Επίσης σχετίζονται με την υφαλμύριση του υδροφορέα η οποία οδηγεί σε αναγωγή των θεικών (Bosch and Custodio, 1993). Η αντίδραση περιλαμβάνει οξείδωση του οργανικού υλικού σε αναερόβιο περιβάλλον: $2\text{CH}_2\text{O} + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow 2\text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{S}$. Η χρήση θειούχων λιπασμάτων ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) μπορεί να συμβάλλει επίσης στη δημιουργία θεικών ιόντων (Βουδούρης, 2009) σύμφωνα με τη χημική αντίδραση: $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NH}_4\text{OH} + 2\text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-}$. Η κεντρική περιοχή πιθανώς να σχετίζεται με τη δράση των γεωθερμικών ρευστών που δημιουργούν ζώνες υδροθερμικής εξαλλοίωσης και έτσι έχουμε την οξείδωση του H_2S σε θειικά ιόντα (Pe-Piper et al., 2009), σύμφωνα με τη χημική αντίδραση: $\text{H}_2\text{S} + 2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + 2\text{HCHO}$.

Οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων (NO_3^-) για τις δύο περιόδους είναι σχεδόν ίδιες, από μηδενικές φτάνουν έως 54,3 mg/L το Μάιο, και έως 51,8 mg/L τον Οκτώβριο (Σχήμα 32). Σε φυσικές συνθήκες η συγκέντρωσή τους δεν ξεπερνά τα 10 mg/L στο νερό, ενώ η παραμετρική τιμή είναι τα 50 mg/L (Κ.Υ.Α. Υ2/2600/2001). Συγκρίνοντας τις δύο περιόδους παρατηρούμε ότι η κατανομή τους είναι σχεδόν ίδια: στο κεντρικό τμήμα της περιοχής έρευνας έχουμε την εμφάνιση των υψηλότερων συγκεντρώσεων. Οι ζώνες αυτές σχετίζονται με τις περιοχές κύριας ανάπτυξης γεωργικών - κτηνοτροφικών δραστηριοτήτων, ενώ σε αυτές εντοπίζονται και οι κύριοι οικισμοί της περιοχής μελέτης. Κύρια πηγή προέλευσης αποτελούν τα ανόργανα αζωτούχα λιπάσματα, τα ζωικά περιττώματα από τις κτηνοτροφικές μονάδες, οι διαφυγές στραγγισμάτων ΧΑΔΑ και η διάθεση των ανεπεξέργαστων οικιακών λυμάτων (Environmental Protection Agency, 2001). Η αποσύνθεση τους στο υπόγειο νερό γίνεται μέσω της χημικής αντίδρασης: $(\text{NH}_4)_2\text{NO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_4\text{OH} + \text{H}^+ + \text{NO}_3^-$. Επίσης, θα πρέπει να αναφερθεί ότι έχει παρατηρηθεί αυξημένο μικροβιολογικό φορτίο κοντά στους οικισμούς (Παπαδόπουλος κ.ά., 2003). Οι θέσεις που ξεπέρασαν το επιτρεπτό όριο είναι οι KAL9, REP3 και KON2. Οι υπόλοιπες θέσεις εμφανίζουν επιτρεπτές τιμές βάσει της ισχύουσας Νομοθεσίας.



Σχήμα 31: Υδροχημικοί χάρτες κατανομής SO_4^{2-} στην Ανατολική Λήμνο

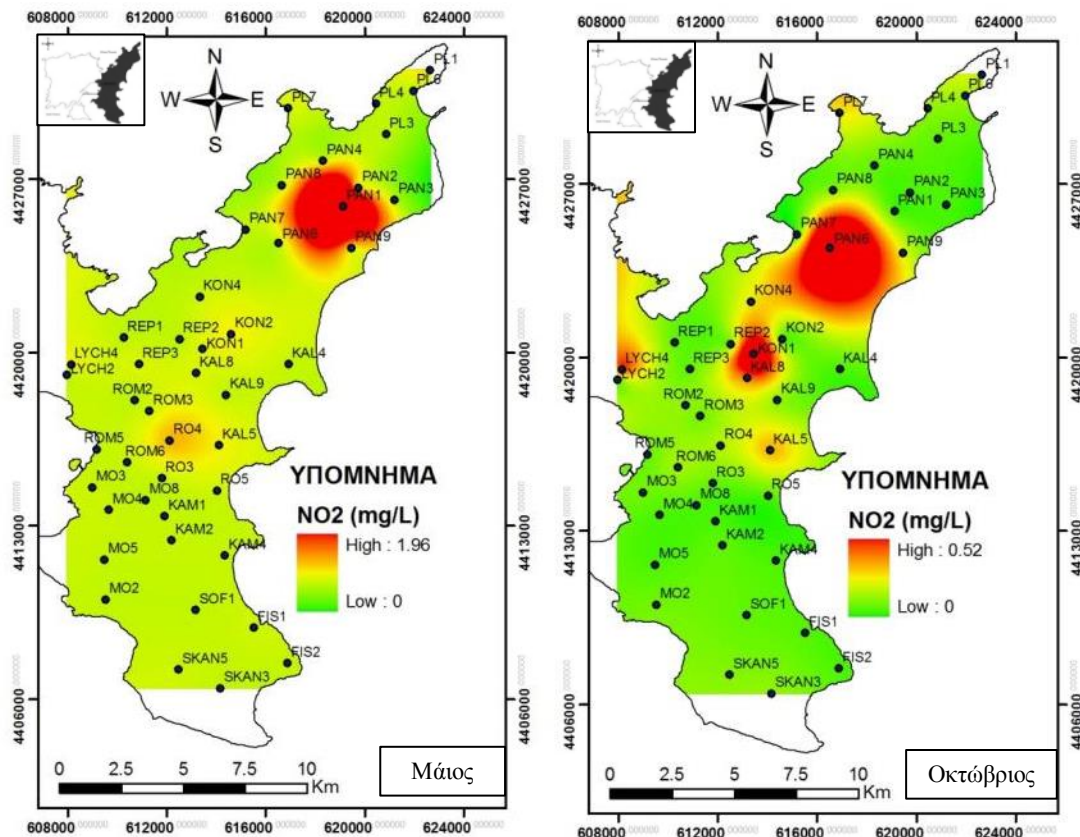


Σχήμα 32: Υδροχημικοί χάρτες κατανομής NO_3^- στην Ανατολική Λήμνο

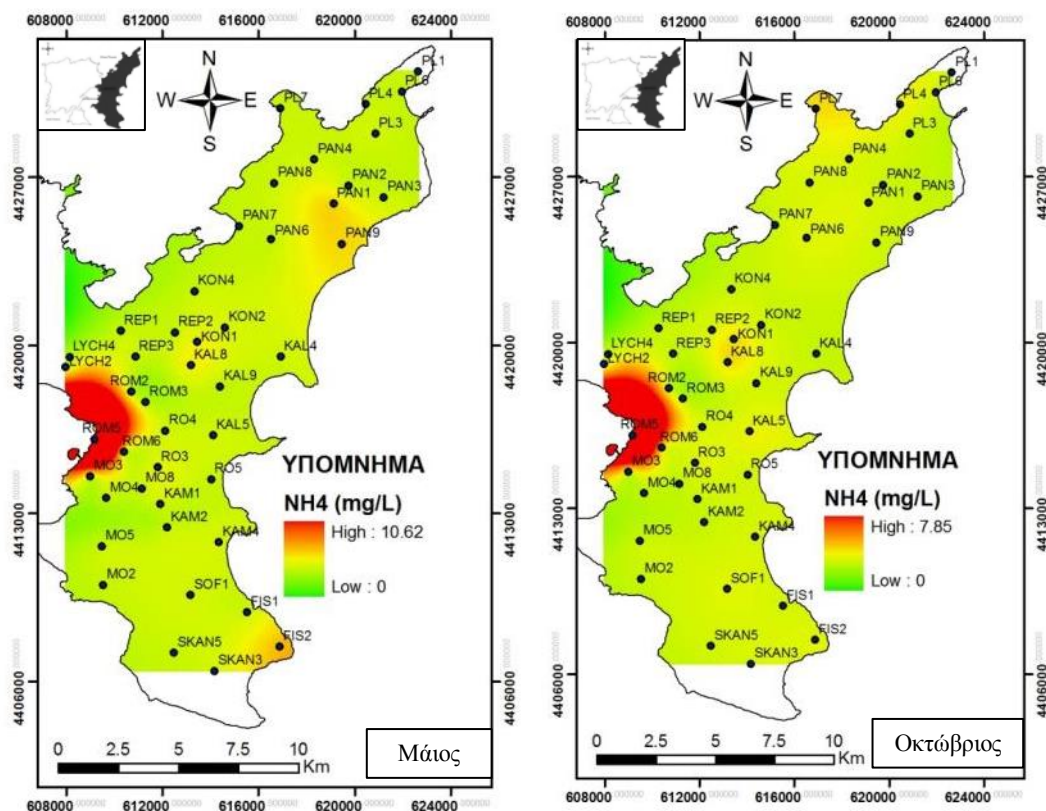
Τα νιτρώδη ιόντα (NO_2^-) τον Μάιο από μηδενικές συγκεντρώσεις φτάνουν τα 1,96 mg/L με μέση τιμή τα 0,08 mg/L. Τον Οκτώβριο οι συγκεντρώσεις ελαττώνονται ελαφρά. Η μέγιστη τιμή είναι 0,52 mg/L και η μέση 0,05 mg/L (Σχήμα 33). Η παραμετρική τιμή για τα νιτρώδη είναι 0,5 mg/L (Κ.Υ.Α. Υ2/2600/2001). Οι υψηλές συγκεντρώσεις τον Μάιο εμφανίζονται μόνο γύρω από τη θέση PAN1 (1,96 mg/L), ενώ τον Οκτώβριο η μέγιστη τιμή καταγράφεται στην PAN6 (0,52 mg/L). Οι υπόλοιπες θέσεις εμφανίζουν επιτρεπτές τιμές σύμφωνα με τη Νομοθεσία. Η παρουσία τους στο νερό αποτελεί ενδιάμεση στάδιο της βιολογικής ανασύνθεσης από ενώσεις που περιέχουν οργανικό άζωτο. Η παρουσία τους στα νερά δείχνει πρόσφατη ρύπανση από οικιακά λύματα και οργανικούς ρυπαντές (Scoulllos, 1997; Delinom et al., 2008).

Οι περιεκτικότητες του αμμωνίου (NH_4^+) για τις δύο περιόδους είναι σχεδόν ίδιες. Από μηδενικές φτάνουν μέχρι τα 10,62 mg/L με μέση τιμή τα 0,37 mg/L για την υγρή περίοδο και στην ξηρή μέχρι τα 7,85 mg/L με μέση τιμή τα 0,32 mg/L (Σχήμα 34). Η παραμετρική τιμή είναι 0,5 mg/L (Κ.Υ.Α. Υ2/2600/2001). Παρατηρούμε ότι μόνο η θέση ROM5 εμφανίζει εξαιρετικά υψηλή τιμή που ξεπερνά το επιτρεπτό όριο (10,62 mg/L και 7,85 mg/L τους μήνες Μάιο και Οκτώβριο αντίστοιχα). Οι υπόλοιπες θέσεις εμφανίζουν επιτρεπτές τιμές βάσει της Νομοθεσίας. Αυτό υποδηλώνει, όπως επιβεβαιώθηκε και από τις υπόλοιπες συγκεντρώσεις των ιόντων, την παρουσία κάποιας σημειακής πηγής ρύπανσης στη θέση αυτή, όπως η ανεξέλεγκτη διάθεση ανεπεξέργαστων βιομηχανικών ή οικιακών λυμάτων (Environmental Protection Agency, 2001).

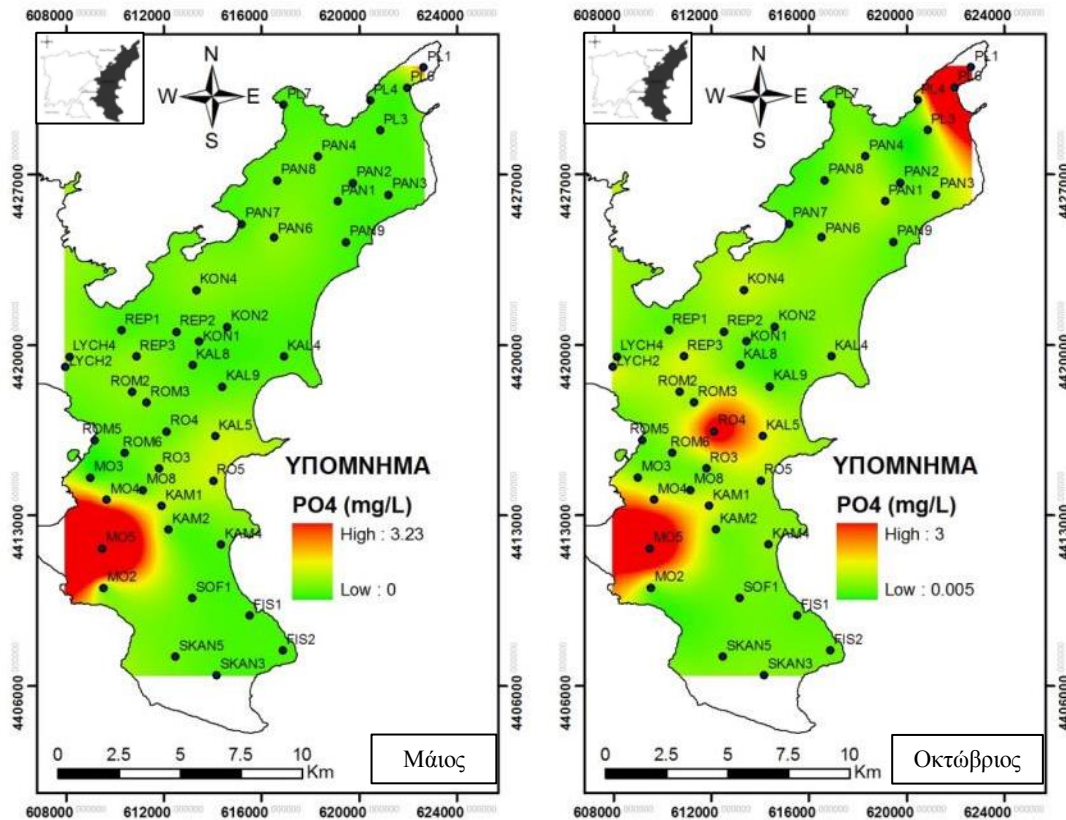
Τέλος, το φωσφορικό ιόν (PO_4^{3-}) παρουσιάζει ίδιες συγκεντρώσεις για τις δύο περιόδους δειγματοληψίας. Από μηδενικές συγκεντρώσεις κυμαίνεται έως τα 3 mg/L (Σχήμα 35), με ενδεικτική τιμή τα 0,5 mg/L, ενώ η ανώτατη επιτρεπτή είναι 3 mg/L (Κ.Υ.Α. Υ2/2600/2001). Οι υψηλές συγκεντρώσεις εμφανίζονται στο νότιο τμήμα της περιοχής έρευνας (θέση MO5), ενώ τον Οκτώβριο έχουμε επιπλέον υψηλές εμφανίσεις στο κεντρικό (θέση RO4) και βόρειο τμήμα (θέση PL4, PL6). Η παρουσία του PO_4 στο υπόγειο νερό σχετίζεται με την υπερβολική χρήση κοπριάς και χημικών λιπασμάτων στις γεωργικές καλλιέργειες (καλαμπόκι, σόγια, σιτάρι), καθώς και με τη ρύπανση από οικιακά λύματα, αφού ο φώσφορος αποτελεί κύριο συστατικό πολλών απορρυπαντικών, ιδιαίτερα εκείνων για οικιακή χρήση (Environmental Protection Agency, 2001; Domagalski and Johnson, 2012).



Σχήμα 33: Υδροχημικοί χάρτες κατανομής NO_2^- στην Ανατολική Λήμνο



Σχήμα 34: Υδροχημικοί χάρτες κατανομής NH_4^+ στην Ανατολική Λήμνο



Σχήμα 35: Υδροχημικοί χάρτες κατανομής PO_4^{3-} στην Ανατολική Λήμνο

7.2 Στατιστική επεξεργασία

Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν οι μέθοδοι της πολυμεταβλητής στατιστικής ανάλυσης στα υδροχημικά δεδομένα ώστε να εκτιμηθεί η σχετική βαρύτητα των συνδυασμών των υδροχημικών παραμέτρων. Η ανάλυση έγινε με το στατιστικό πακέτο SPSS. Εφαρμόστηκαν τρεις μέθοδοι πολυμεταβλητής στατιστικής ανάλυσης: η **ανάλυση συσχέτισης** (Correlation Analysis), η **παραγοντική ανάλυση** (Factor Analysis) και η **ανάλυση σε ομάδες** (Cluster Analysis). Η ανάλυση συσχέτισης αποτελεί μια στατιστική τεχνική που μελετά τη σχέση μεταξύ δύο παραμέτρων ή ομάδας παραμέτρων (Swan and Sandilands, 1995), χωρίς όμως η μεταξύ τους συσχέτιση να σημαίνει αιτιότητα (Βουδούρης, 2004). Ως μέτρο συσχέτισης στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής απλής γραμμικής συσχέτισης κατά Pearson. Πρόκειται για ένα μέτρο του κατά πόσο μια μεταβλητή προβλέπει μια άλλη (Davis and Sampson, 1986).

Στους Πίνακες 3 και 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης συσχέτισης με τη χρήση του συντελεστή κατά Pearson των υδροχημικών στοιχείων της περιοχής έρευνας για κάθε περίοδο δειγματοληψίας ξεχωριστά. Με βάση τις συσχετίσεις που προκύπτουν μεταξύ των υδροχημικών παραμέτρων από τους δύο πίνακες, ακολουθεί μια σύντομη ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 3: Πίνακας συντελεστών συσχέτισης για τις υδροχημικές παραμέτρους του Μαΐου 2001

	pH	EC	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻
pH	1												
EC	-0,26	1											
K ⁺	-0,38	0,67	1										
Na ⁺	-0,30	0,98	0,67	1									
Ca ²⁺	-0,49	0,59	0,41	0,71	1								
Mg ²⁺	-0,33	0,99	0,66	0,99	0,69	1							
HCO ₃ ⁻	0,01	0,07	-0,10	0,03	-0,07	0,06	1						
Cl ⁻	-0,32	0,97	0,67	0,99	0,75	0,99	-0,01	1					
SO ₄ ²⁻	-0,23	0,16	0,02	0,22	0,29	0,15	0,06	0,11	1				
NO ₃ ⁻	-0,05	-0,14	-0,08	-0,19	-0,10	-0,17	-0,10	-0,19	0,04	1			
NO ₂ ⁻	0,57	0,01	-0,09	0,03	-0,13	-0,07	0,26	-0,02	-0,01	-0,13	1		
NH ₄ ⁺	-0,22	0,97	0,66	0,96	0,59	0,97	0,04	0,97	-0,04	-0,19	0,03	1	
PO ₄ ³⁻	-0,19	-0,06	0,51	-0,08	-0,08	-0,09	-0,11	-0,07	-0,10	0,11	-0,03	-0,07	1

Πίνακας 4: Πίνακας συντελεστών συσχέτισης για τις υδροχημικές παραμέτρους του Οκτωβρίου 2001

	pH	EC	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻
pH	1												
EC	-0,12	1											
K ⁺	-0,42	0,49	1										
Na ⁺	-0,39	0,36	0,78	1									
Ca ²⁺	-0,54	0,30	0,38	0,52	1								
Mg ²⁺	-0,53	0,34	0,70	0,92	0,80	1							
HCO ₃ ⁻	0,19	0,09	-0,13	0,02	-0,13	-0,04	1						
Cl ⁻	-0,49	0,35	0,75	0,97	0,72	0,99	-0,04	1					
SO ₄ ²⁻	-0,14	0,62	0,40	0,53	0,13	0,40	-0,07	0,43	1				
NO ₃ ⁻	-0,14	0,01	-0,15	-0,20	-0,13	-0,21	0,02	-0,22	0,15	1			
NO ₂ ⁻	0,02	0,23	0,12	-0,03	-0,09	-0,06	-0,02	-0,06	0,41	-0,04	1		
NH ₄ ⁺	-0,38	0,27	0,75	0,97	0,34	0,83	0,04	0,89	0,53	-0,18	-0,01	1	
PO ₄ ³⁻	-0,06	-0,07	0,03	-0,10	-0,07	-0,11	0,12	-0,10	-0,13	0,06	-0,05	-0,08	1

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την υγρή περίοδο (**Μάιος 2001**) η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) συσχετίζεται ισχυρά με το Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- και NH_4^+ . Το νάτριο συσχετίζεται με το Ca^{2+} και Mg^{2+} και αυτό δείχνει την κοινή προέλευση των ιόντων λόγω μείξης του γλυκού με το θαλασσινό νερό. Το νάτριο συσχετίζεται επίσης ισχυρά με το Cl^- και αυτό δείχνει τη διαδικασία της υφαλμύρισης του υδροφορέα. Η σαφής σύνδεση του Ca^{2+} με το Cl^- δείχνει την ανταλλαγή Na^+ από τη θάλασσα και την απελευθέρωση Ca^{2+} στον υδροφορέα και περιγράφει τη διαδικασία της αντίστροφης ιοντοανταλλαγής. Παρόμοια διαδικασία γίνεται και με τα ιόντα Mg^{2+} και Cl^- γι' αυτό και εμφανίζουν υψηλή συσχέτιση. Τέλος, η συσχέτιση των ιόντων αμμωνίου με το Na^+ , το Mg^{2+} και το Cl^- υποδηλώνει ρύπανση λόγω ανθρωπογενών επεμβάσεων. Αυτό ίσως να οφείλεται σε κάποια σημειακή πηγή ρύπανσης, όπως η ανεξέλεγκτη διάθεση των ανεπεξέργαστων λυμάτων.

Την ξηρή περίοδο (**Οκτώβριος 2001**) το κάλιο συσχετίζεται ισχυρά με το Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- και δείχνει τη διαδικασία της θαλάσσιας διείσδυσης. Το νάτριο συνδέεται ισχυρά με το Mg^{2+} και Cl^- , που όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, περιγράφει την κοινή προέλευση των ιόντων λόγω μείξης του γλυκού με το θαλασσινό νερό. Το ασβέστιο συνδέεται με το Mg^{2+} και δείχνει την αποσάθρωση των ασβεστιτικών και μαγνησιούχων ορυκτών των πετρωμάτων. Επίσης, η σύνδεση του με το Cl^- , όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, περιγράφει τη διαδικασία της αντίστροφης ιοντοανταλλαγής, δηλαδή την έκπλυση του υδροφορέα από τα πετρώματα. Παρόμοια διαδικασία γίνεται και με τα ιόντα Mg^{2+} και Cl^- γι' αυτό και εμφανίζουν υψηλή συσχέτιση. Η συσχέτιση των ιόντων αμμωνίου με το K^+ , Na^+ , Mg^{2+} και Cl^- δείχνει επίσης πιθανή ρύπανση από ανθρωπογενείς επεμβάσεις.

Στη συνέχεια με το στατιστικό πακέτο SPSS έγινε εφαρμογή της παραγοντικής ανάλυσης R-τύπου. Η παραγοντική ανάλυση αποτελεί μια μέθοδο που συμβάλλει στην απλοποίηση πολύπλοκων προβλημάτων όπου χρησιμοποιούνται πολλές μεταβλητές χωρίς να χάνονται πληροφορίες (Qian et al., 1994). Πρόκειται για μια μέθοδο όπου μεγάλο πλήθος αλληλοεξαρτώμενων μεταβλητών περιγράφεται από ένα μικρό πλήθος παραγόντων (factors) που εκφράζουν με υψηλά ποσοστά διακύμανσης τις αρχικές μεταβλητές (Βουδούρης, 2004). Οι προκύπτοντες παράγοντες αποτελούνται από μεταβλητές ισχυρά συσχετισμένες μεταξύ τους και κάθε παράγοντας αντιπροσωπεύει μια συγκεκριμένη υδροχημική διεργασία που διαμόρφωσε τα ποσοστά διακύμανσης των μεταβλητών. Για απλούστευση της διαδικασίας και για ασφαλέστερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων εφαρμόζεται η διαδικασία της περιστροφής (rotation) με βάση το

κριτήριο της μέγιστης διακύμανσης (varimax), ώστε η συνολική διακύμανση να περιγράφεται με λιγότερους παράγοντες (Mathes and Rasmussen, 2006; Mencio and Mas-Pla, 2008). Εμφανίζονται δηλαδή σε κάθε παράγοντα οι μέγιστες και οι μικρότερες παραγοντικές τιμές των φορτίων οι οποίες δείχνουν την επίδραση κάθε παράγοντα σε κάθε δειγματοληπτική θέση. Τέλος, υπολογίζονται οι παραγοντικές τιμές ή βαθμοί (factor scores) οι οποίοι δείχνουν την επίδραση του κάθε παράγοντα στη θέση δειγματοληψίας.

Από την εφαρμογή της μεθόδου προέκυψαν 4 παράγοντες (F1, F2, F3, F4) για κάθε περίοδο που ερμηνεύουν για την υγρή περίοδο το 80% της ολικής διακύμανσης (Πίνακας 5) και για την ξηρή περίοδο το 75% (Πίνακας 6). Στη συνέχεια γίνεται περιγραφή των 4 παραγόντων κάθε περιόδου ξεχωριστά και για κάθε παράγοντα δημιουργήθηκε χάρτης βαθμονόμησης στο G.I.S. όπου δείχνει τη γεωγραφική κατανομή των παραγόντων με βάση τις παραγοντικές τιμές ώστε να εκτιμηθεί η γεωγραφική σπουδαιότητα των χημικών διεργασιών.

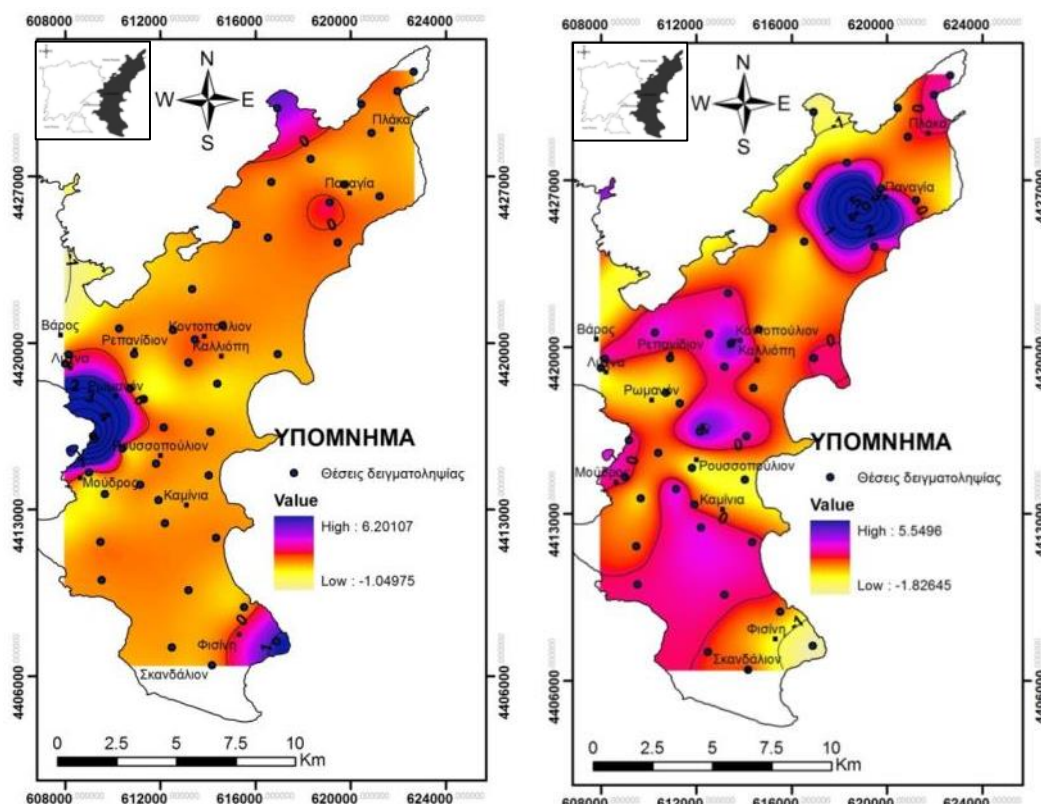
Πίνακας 5: Παραγοντικά φορτία μετά την περιστροφή των 4 παραγόντων (Varimax rotated factor loadings and communalities) για την περίοδο δειγματοληψίας του Μαΐου 2001

Παράμετρος	PC1	PC2	PC3	PC4
pH	-0,291	0,722	-0,231	-0,329
EC	0,972	0,037	0,036	0,069
K ⁺	0,687	-0,107	0,632	-0,074
Na ⁺	0,987	-0,002	0,001	0,115
Ca ²⁺	0,710	-0,329	-0,095	0,255
Mg ²⁺	0,987	-0,043	-0,005	0,072
HCO ₃ ⁻	0,009	0,493	0,017	0,578
Cl ⁻	0,996	-0,048	0,001	0,024
SO ₄ ²⁻	0,091	-0,183	-0,092	0,798
NO ₃ ⁻	-0,245	-0,274	0,202	0,121
NO ₂ ⁻	0,003	0,868	0,030	0,096
NH ₄ ⁺	0,978	0,070	0,013	-0,097
PO ₄ ³⁻	-0,074	-0,065	0,952	-0,077
Eigenvalue	5,975	1,761	1,421	1,213
% of Variance	45,959	13,544	10,929	9,332
Cumulative %	45,959	59,503	70,432	79,764

Οι ιδιοτιμές των 4 παραγόντων για την **υγρή περίοδο (Μάιος)** είναι αντίστοιχα 6, 1.8, 1.4 και 1.2. Ο πρώτος παράγοντας (F1) εκφράζει το 46% της ολικής διακύμανσης των δεδομένων και εμφανίζει θετικές φορτίσεις στις μεταβλητές EC (0,97), Na (0,99), Ca (0,71), Mg (0,99), Cl

(0,99) και NH_4 (0,98). Ο παράγοντας αυτός δείχνει ότι η διεύθυνση της θάλασσας είναι η κύρια διεργασία που ελέγχει την υδροχημική μεταβλητότητα αυξάνοντας τις τιμές των ανωτέρων παραμέτρων. Σε αυτήν συμβάλλει η διάλυση των ορυκτών και η ρύπανση από κάποια σημειακή πηγή. Από τη γεωγραφική κατανομή των παραγοντικών του τιμών φαίνεται ότι υψηλές θετικές τιμές (μεταξύ 1 και 6) παρατηρούνται κυρίως στο παράκτιο κεντρικό τμήμα της περιοχής έρευνας, κοντά στους οικισμούς Ρωμανό και Λύχνα, λόγω των υπεραντλήσεων και της έντονης ρύπανσης (Σχήμα 36). Η κατανομή της συνιστώσας αυτής οριοθετεί τη ζώνη υφαλμύρισης του υδροφόρου ορίζοντα.

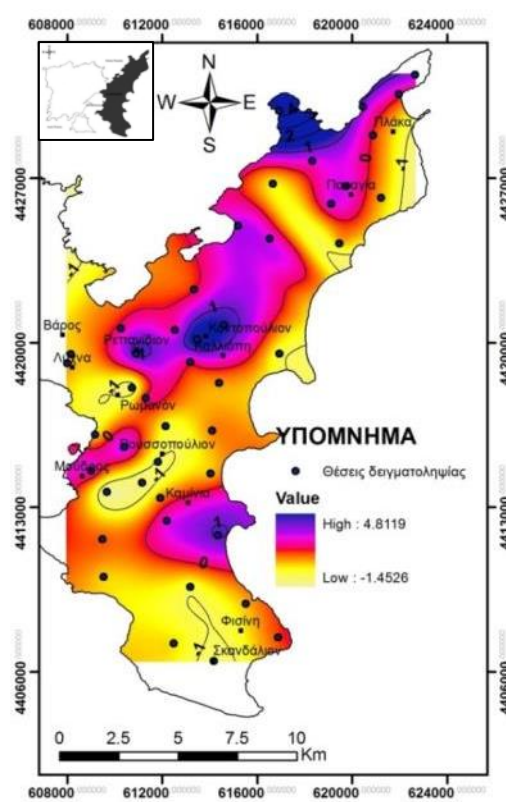
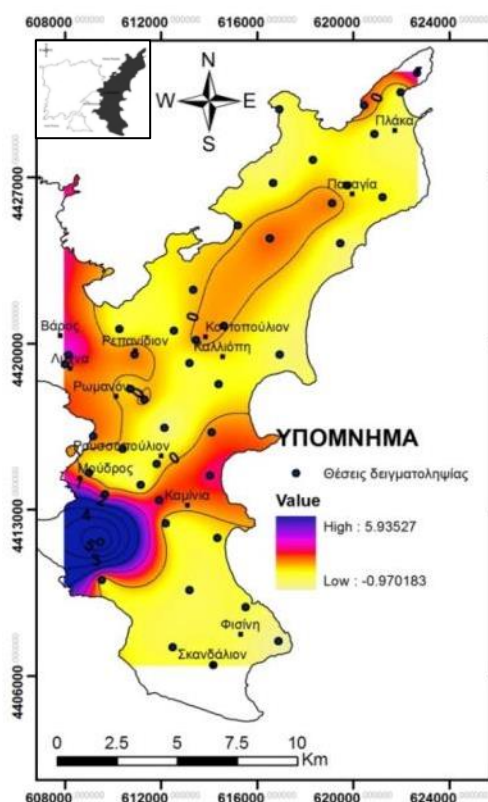
Ο δεύτερος παράγοντας (F2) εκφράζει το 13,5% της ολικής διακύμανσης των δεδομένων και παρουσιάζει υψηλές φορτίσεις στις μεταβλητές pH (0,72) και NO_2 (0,87). Ο παράγοντας αυτός μπορεί να θεωρηθεί ότι περιγράφει διαδικασίες που οφείλονται σε ανθρωπογενή δραστηριότητα. Οφείλεται στα οργανικά απόβλητα των κτηνοτροφικών και βιομηχανικών μονάδων της περιοχής, είτε σε διαρροές των δικτύων αποχέτευσης. Από τη γεωγραφική κατανομή των παραγοντικών τιμών του προκύπτει ότι οι υψηλότερες τιμές (μεταξύ 1 και 5) παρατηρούνται στο βόρειο τμήμα κοντά στον οικισμό Παναγία πιθανώς λόγω στραγγισμάτων από παλιό ΧΑΔΑ σε συνδυασμό με τις κτηνοτροφικές μονάδες. Υψηλές επίσης τιμές εμφανίζονται και κατά τόπους στην κεντρική και νότια ζώνη (Σχήμα 37) όπου συναντάμε πολυάριθμες αγροτικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες.



12/05/2016 Σχήμα 36: Γεωγραφική κατανομή του πρώτου παράγοντα (F1) Σχήμα 37: Γεωγραφική κατανομή του δεύτερου παράγοντα (F2)

Ο τρίτος παράγοντας (F3) εκφράζει το 11% της ολικής διακύμανσης των δεδομένων και παρουσιάζει υψηλή φόρτιση στη μεταβλητή PO_4 (0,95). Ο παράγοντας αυτός σχετίζεται με τη χρήση φωσφορικών λιπασμάτων στις καλλιέργειες. Στο Σχήμα 38 παρουσιάζεται η γεωγραφική κατανομή του παράγοντα αυτού, από όπου φαίνεται ότι στο νότιο τμήμα, κοντά στον οικισμό Καμίνια και δυτικότερα, η περιοχή είναι επηρεασμένη από τη χρήση φωσφορικών λιπασμάτων, ενώ αρνητικές εμφανίζονται οι περιοχές στο βόρειο τμήμα της ανατολικής Λήμνου.

Ο τέταρτος παράγοντας (F4) εκφράζει το 9,3% της ολικής διακύμανσης των δεδομένων και εμφανίζει υψηλή φόρτιση στη μεταβλητή SO_4 (0,80). Από τη γεωγραφική κατανομή των παραγοντικών τιμών προκύπτει ότι οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται στην κεντρική περιοχή, στους οικισμούς Καλλιόπη, Κοντοπούλιο, Ρεπανίδιο και βορειότερα (Σχήμα 39). Ο παράγοντας αυτός στις παράκτιες θέσεις υποδηλώνει τη διεργασία της διείσδυσης θαλασσινού νερού στην ενδοχώρα που οδηγεί στην αναγωγή των θεικών σε ορισμένα μείγματα θαλασσινού/γλυκού νερού (Bosch and Custodio, 1993). Μια επιπλέον πηγή των θεικών, ιδίως στην κεντρική ζώνη, είναι η παρουσία των σουλφιδίων στα ηφαιστειακά πετρώματα και η δράση των γεωθερμικών ρευστών που δημιουργούν ζώνες υδροθερμικής εξαλλοίωσης, με αποτέλεσμα την οξείδωση του H_2S σε θειικά ιόντα και τον εμπλουτισμό του νερού. Επίσης, μια άλλη δευτερεύουσα πηγή θα μπορούσε να είναι τα θειικά λιπάσματα, αφού στο κεντρικό τμήμα έχουμε και τις περισσότερες καλλιέργειες.



Σχήμα 38: Γεωγραφική κατανομή του τρίτου παράγοντα (F3) Σχήμα 39: Γεωγραφική κατανομή του τέταρτου παράγοντα (F4)

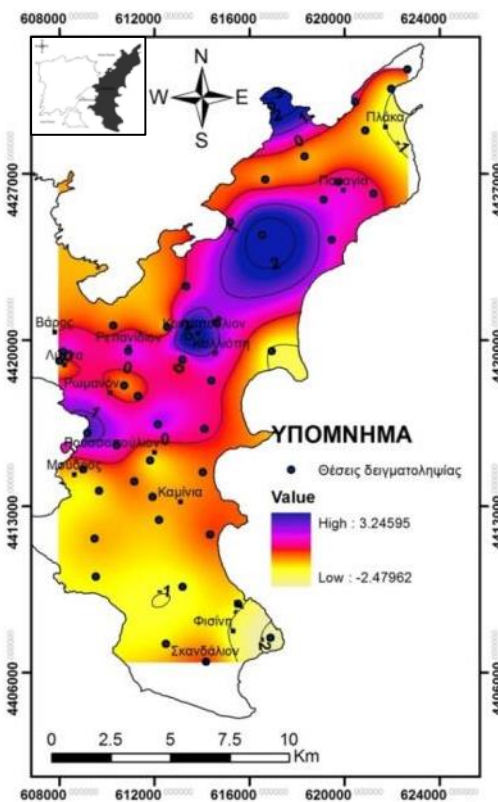
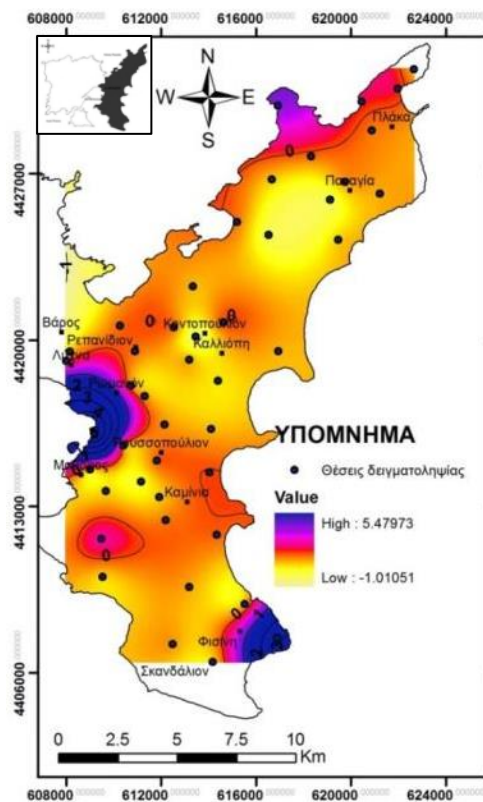
Πίνακας 6: Παραγοντικά φορτία μετά την περιστροφή των 4 παραγόντων (Varimax rotated factor loadings and communalities) για την περίοδο δειγματοληψίας του Οκτωβρίου 2001

Παράμετρος	PC1	PC2	PC3	PC4
pH	-0,603	0,085	0,413	-0,453
EC	0,315	0,692	0,127	0,084
K ⁺	0,756	0,344	-0,012	-0,033
Na ⁺	0,928	0,237	0,132	-0,136
Ca ²⁺	0,740	-0,131	-0,306	0,082
Mg ²⁺	0,974	0,079	-0,056	-0,073
HCO ₃ ⁻	-0,015	-0,055	0,863	0,105
Cl ⁻	0,978	0,118	-0,001	-0,102
SO ₄ ²⁻	0,337	0,842	0,017	0,063
NO ₃ ⁻	-0,202	0,188	-0,066	0,799
NO ₂ ⁻	-0,178	0,693	-0,323	-0,150
NH ₄ ⁺	0,857	0,253	0,177	-0,146
PO ₄ ³⁻	-0,029	-0,150	0,272	0,503
Eigenvalue	5,270	2,012	1,261	1,203
% of Variance	40,539	15,479	9,697	9,256
Cumulative %	40,539	56,017	65,714	74,970

Οι ιδιοτιμές των 4 παραγόντων για την **ξηρή περίοδο (Οκτώβριος)** είναι αντίστοιχα 5.3, 2, 1.26 και 1.2. Ο πρώτος παράγοντας (F1) εκφράζει το 40,5% της ολικής διακύμανσης των δεδομένων και χαρακτηρίζεται παράγοντας αλατότητας επειδή παρουσιάζει υψηλά φορτία στις μεταβλητές Na (0,93), Mg (0,97), Cl (0,98) και NH₄ (0,86). Ο παράγοντας αυτός δείχνει το αποτέλεσμα της μείξης του υδροφορέα με το θαλασσινό νερό όπου περιγράφεται με την γεωχημική διεργασία της κατιοανταλλαγής. Επίσης, ταυτόχρονα συνδέεται με τη διάλυση των πετρωμάτων και τη ρύπανση λυμάτων στην περιοχή. Από τη γεωγραφική κατανομή των παραγοντικών του τιμών φαίνεται ότι οι υψηλές θετικές τιμές (μεταξύ 1 και 5) παρατηρούνται, όπως και στην υγρή περίοδο, κυρίως στο παράκτιο κεντρικό τμήμα κοντά στους οικισμούς Ρωμανό και Λύχνα, όπου έχουμε υφαλμύριση του υδροφορέα και ταυτόχρονα έντονο ρυπαντικό φορτίο (Σχήμα 40). Η εικόνα της κατανομής είναι ίδια στους δύο μήνες δειγματοληψίας.

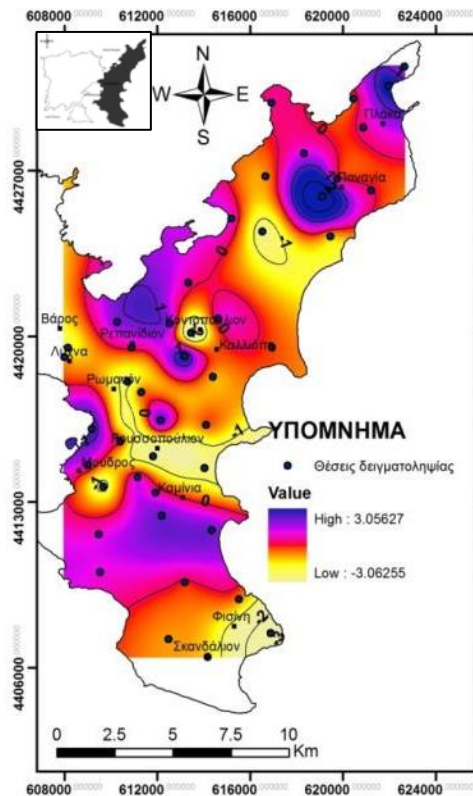
Ο δεύτερος παράγοντας (F2) εκφράζει το 15,5% της ολικής διακύμανσης των δεδομένων και παρουσιάζει υψηλή φόρτιση στη μεταβλητή SO₄ (0,84). Ο παράγοντας αυτός, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, σχετίζεται με τη θαλάσσια διείσδυση, την οξείδωση των σουλφιδίων στα ηφαιστειακά πετρώματα, την δράση των γεωθερμικών ρευστών που δημιουργούν ζώνες

υδροθερμικής εξαλλοίωσης και με τη χρήση λιπασμάτων στις καλλιέργειες. Από τη γεωγραφική κατανομή των παραγοντικών τιμών του φαίνεται ότι οι υψηλές θετικές τιμές παρατηρούνται σε όλο το βόρειο και κεντρικό τμήμα της περιοχής έρευνας, εκεί δηλαδή όπου έχουμε τα ηφαιστειακά πετρώματα και τις κυριότερες ζώνες αγροτικής ανάπτυξης (Σχήμα 41). Παρατηρούμε ότι η εικόνα της κατανομής είναι παρόμοια κατά τους δύο μήνες δειγματοληψίας.

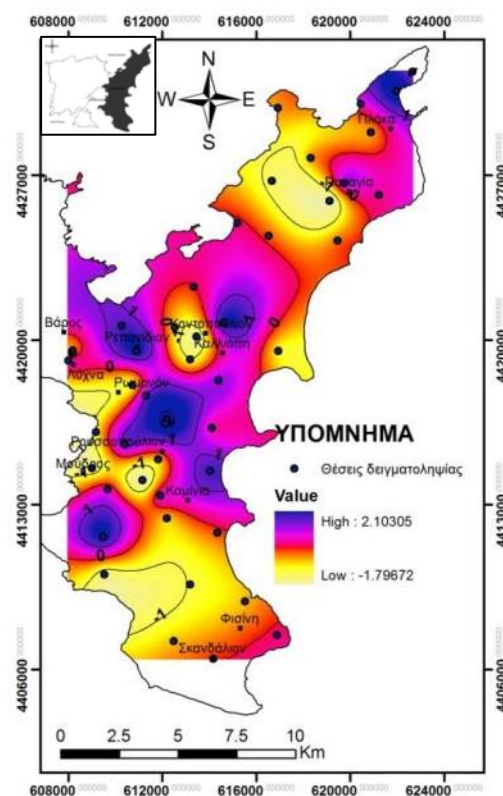


Ο τρίτος παράγοντας (F3) εκφράζει το 9,7% της ολικής διακύμανσης των δεδομένων και παρουσιάζει υψηλή φόρτιση στη μεταβλητή HCO_3^- (0,86). Ο παράγοντας αυτός εξαρτάται από την φυσική διάλυση των ανθρακικών ορυκτών και πιθανόν να σχετίζεται και την παρουσία των ρηγμάτων όπου τροφοδοτούν με γλυκό νερό τον υδροφόρα. Από τη γεωγραφική κατανομή των παραγοντικών τιμών του προκύπτει ότι σχεδόν όλη η περιοχή μελέτης είναι επηρεασμένη από τον παράγοντα αυτό, ιδίως στις περιοχές που έχουμε την εμφάνιση των ανθρακικών και άλλων ιζηματογενών πετρωμάτων (Σχήμα 42).

Ο τέταρτος παράγοντας (F4) εκφράζει το 9,2% της ολικής διακύμανσης των δεδομένων και εμφανίζει υψηλή φόρτιση μόνο στη μεταβλητή NO_3 (0,80). Τα νιτρικά συνδέονται με τις κτηνοτροφικές μονάδες που υπάρχουν στην περιοχή, με τη χρήση λιπασμάτων σε καλλιέργειες, την απόθεση οικιακών λυμάτων, τις διαρροές βόθρων και διαφυγή στραγγισμάτων ΧΑΔΑ. Στο Σχήμα 43 παρουσιάζεται η γεωγραφική κατανομή του παράγοντα αυτού, από όπου προκύπτει ότι κυρίως το κεντρικό τμήμα της περιοχής είναι επηρεασμένο. Αυτό είναι λογικό διότι εκεί συναντάμε τις περισσότερες καλλιέργειες και τους σημαντικότερους οικισμούς.



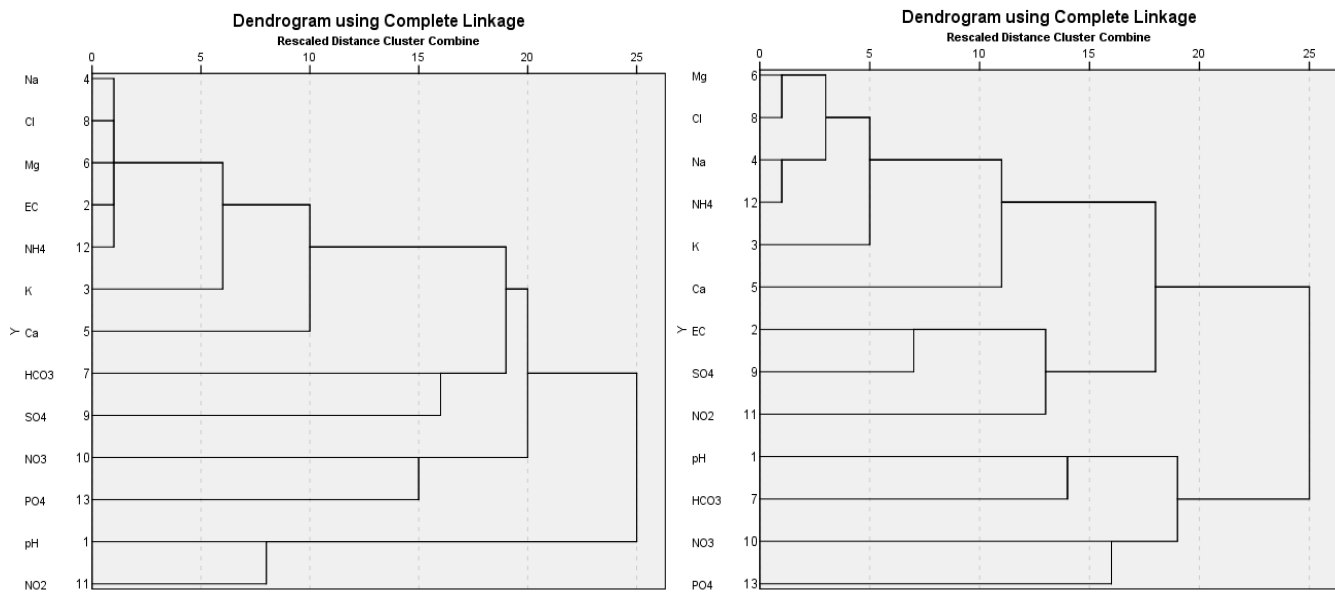
Σχήμα 42: Γεωγραφική κατανομή του τρίτου παράγοντα (F3)



Σχήμα 43: Γεωγραφική κατανομή του τέταρτου παράγοντα (F4)

Για την καλύτερη κατανόηση των πηγών των ιόντων πραγματοποιήθηκε η μέθοδος της ανάλυσης σε ομάδες (Cluster Analysis). Η μέθοδος κατατάσσει τις υδροχημικές παραμέτρους - μεταβλητές σε ομάδες με βάση τις ομοιότητές τους, ώστε να κατανοείται η σχέση μεταξύ τους (Vega et al., 1998; Davis, 2002). Η κάθε ομάδα που προκύπτει αντιπροσωπεύει μια συγκεκριμένη διεργασία στο σύστημα και έχει κοινή πηγή. Στη μελέτη αυτή εφαρμόστηκε η ιεραρχική ανάλυση (**Hierarchical Cluster Analysis - HCA**) στα δεδομένα κάθε περιόδου

χρησιμοποιώντας ως μέτρο απόστασης τον συντελεστή Pearson και για τον σχηματισμό ομάδων επιλέχτηκε στην παρούσα εργασία η μέθοδος του απώτερου γείτονα (Furthest Neighbour). Ύστερα από πολλές δοκιμές με διάφορες ομάδες, τα βέλτιστα αποτελέσματα προέκυψαν με την ταξινόμηση των δεδομένων σε 4 ομάδες (clusters). Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 44) παρουσιάζονται τα δένδρογράμματα των μεταβλητών με τις συνδυασμένες ομάδες για τους δύο μήνες. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι παρόμοια με αυτά της παραγοντικής ανάλυσης R-τύπου.



Σχήμα 44: Δενδρογράμματα μεταβλητών για τον μήνα Μάιο (αριστερά) και Οκτώβριο (δεξιά)

Στην **υγρή περίοδο (Μάιος)**, η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει τις μεταβλητές EC, K, Na, Ca, Mg, Cl, NH₄ και συμφωνεί με τον πρώτο παράγοντα (F1) ο οποίος συνδέεται με τις διεργασίες της θαλάσσιας διείδυσης, της αποσάθρωσης των πετρωμάτων και της ρύπανσης από αστικά λύματα. Η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει τις μεταβλητές pH και NO₂ και συμφωνεί με τον δεύτερο παράγοντα (F2) ο οποίος συνδέεται με κάποια μορφής οργανικής ρύπανσης (βόθροι, λύματα, ΧΑΔΑ). Η τρίτη ομάδα περιλαμβάνει τις μεταβλητές NO₃ και PO₄ η οποία εν μέρει συμφωνεί με τον τρίτο παράγοντα (F3) εκτός του NO₃. Συνδέεται με τα φωσφορικά λιπάσματα πιθανώς σε συνδυασμό με απορροές ρυπαντικών φορτίων, κυρίως από τις σταβλισμένες κτηνοτροφικές μονάδες, τους παλιούς ΧΑΔΑ και τους βόθρους. Τέλος, η τέταρτη ομάδα HCO₃ και SO₄ συμφωνεί με τον τέταρτο παράγοντα (F4) εκτός της μεταβλητής HCO₃. Η ομάδα αυτή

περιγράφει τη διεργασία της αποσάθρωσης των ανθρακικών και πυριτικών ορυκτών. Την **ξηρή περίοδο (Οκτώβριος)**, η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει τις μεταβλητές K, Na, Ca, Mg, Cl και NH_4 και συμφωνεί με τον πρώτο παράγοντα (F1) ο οποίος δείχνει το αποτέλεσμα της θαλάσσιας διείσδυσης, της αποσάθρωσης των πετρωμάτων και την παρουσία σημειακής πηγής ρύπανσης. Η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει τις μεταβλητές EC, SO_4 , NO_2 και συνδέεται με τη χρήση λιπασμάτων. Συμφωνεί με τα αποτελέσματα του δεύτερου παράγοντα (F2). Η τρίτη ομάδα περιλαμβάνει τις μεταβλητές pH, HCO_3 και αντιπροσωπεύει τη διεργασία της διάλυσης των ανθρακικών πετρωμάτων (παράγοντας F3). Τέλος, η τέταρτη ομάδα περιλαμβάνει τις μεταβλητές NO_3 και PO_4 . Συμφωνεί με τον τέταρτο παράγοντα (F4), εκτός της μεταβλητής PO_4 , και αναφέρεται σε ανθρωπογενείς πηγές ρύπανσης (λιπάσματα).

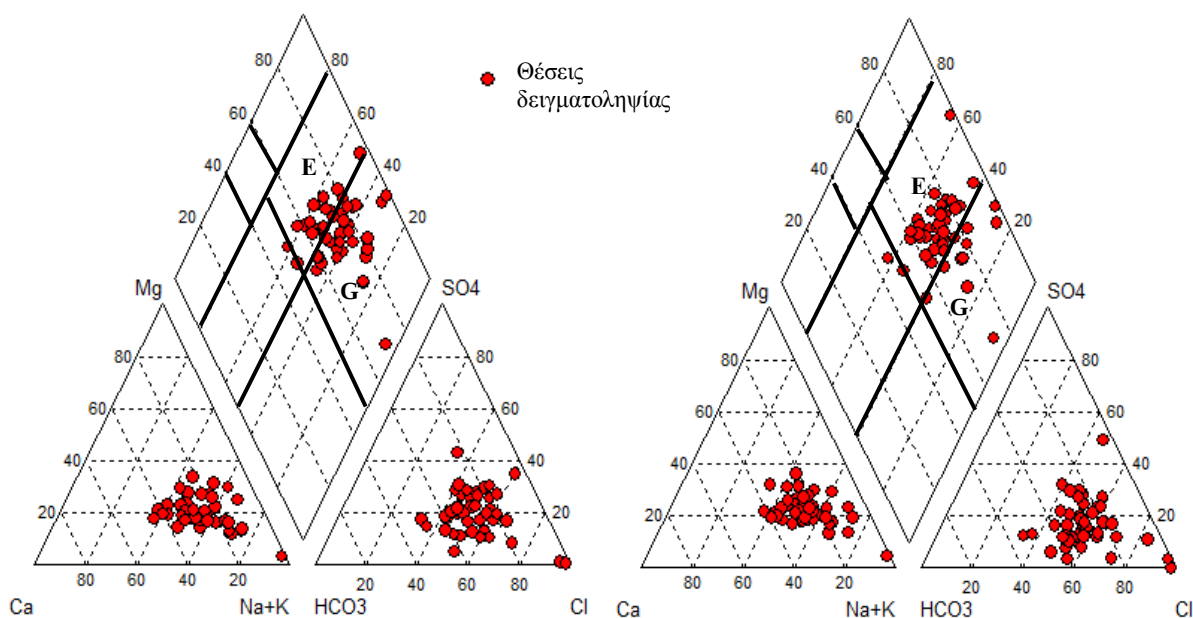
7.3 Υδροχημικοί τύποι υπόγειου νερού – Ιοντικοί λόγοι

Με βάση τις χημικές αναλύσεις προκύπτει ότι ο μέσος όρος των συγκεντρώσεων των ιόντων στα δείγματα έχει την ακόλουθη κατανομή: $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ και $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$. Οι συγκεντρώσεις τους είναι μεταβλητές, έτσι αποδεικνύεται η συμμετοχή αρκετών υδροχημικών διεργασιών που επηρεάζουν την ποιότητα των υπόγειων υδάτων.

Από τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων υπολογίστηκε η ολική σκληρότητα σε Γαλλικούς βαθμούς για τον Μάιο (υγρή περίοδος). Ο μέσος όρος από όλες τις θέσεις δειγμάτων νερού είναι 67 γαλλικοί βαθμοί ($^\circ\text{f}$), δηλαδή 670 mg/L CaCO_3 . Για τον Οκτώβριο ο μέσος όρος αντίστοιχα είναι 73 γαλλικοί βαθμοί ($^\circ\text{f}$) δηλαδή 730 mg/L CaCO_3 . Με βάση τις διεθνείς προδιαγραφές (Environmental Protection Agency, 2001) για τιμές σκληρότητας >350 mg/L CaCO_3 το νερό χαρακτηρίζεται ως **πολύ σκληρό**. Οι ενδεικτικές ωστόσο τιμές στο πόσιμο νερό είναι μεταξύ 80 και 150 mg/L CaCO_3 . Τις μεγαλύτερες τιμές σκληρότητας τις παρατηρούμε στις θέσεις FIS2, PL7 και ROM5 με τις τιμές τους να φτάνουν μέχρι και τους 600 γαλλικούς βαθμούς ($^\circ\text{f}$). Η υψηλή αυτή τιμή της ολικής σκληρότητας οφείλεται στις αυξημένες συγκεντρώσεις του Ca^{+2} (8-785 mg/L) και Mg^{+2} (12-1236 mg/L) λόγω των πετρωμάτων.

Η υδροχημική μελέτη της περιοχής μπορεί να γίνει κατανοητή με τη δημιουργία υδροχημικών διαγραμμάτων, όπως η κατασκευή των τριγωνικών διαγραμμάτων Piper (1944) και

Durov (1948). Τα διαγράμματα αυτά επιτρέπουν την άμεση ταξινόμηση των δειγμάτων σε διάφορους τύπους για κάθε περίοδο ξεχωριστά, καθώς και να γίνει η σύγκριση τους. Οι μονάδες μέτρησης είναι εκφρασμένες σε meq/L. Τα διαγράμματα προέκυψαν με τη βοήθεια του λογισμικού AquaChem. Συγκρίνοντας τα διαγράμματα για τις δύο περιόδους παρατηρούμε ότι είναι παρόμοια. Από το διάγραμμα Piper (Σχήμα 45) προκύπτουν 2 τύποι νερού για τις δύο περιόδους. Ο πρώτος τύπος (E) χαρακτηρίζεται ως **μεικτός τύπος νερού Ca-(Mg)-Cl-(SO₄)**. Σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση του Langguth (1996) αναφέρεται ως νερό αλκαλικών γαιών με αυξημένες συγκεντρώσεις αλκαλίων με επικρατούντα τα χλωριούχα (Cl⁻). Η παρουσία νερών με τον υδροχημικό τύπο Ca-Cl υποδηλώνει τη διαδικασία της αντίστροφης ιοντοανταλλαγής στα δείγματα αυτά (Βουδούρης, 2009). Αυτό οφείλεται στην αποσάθρωση και διάλυση των ορυκτών των υδροφορέων και στην αλληλεπίδραση τους με το υπόγειο νερό.

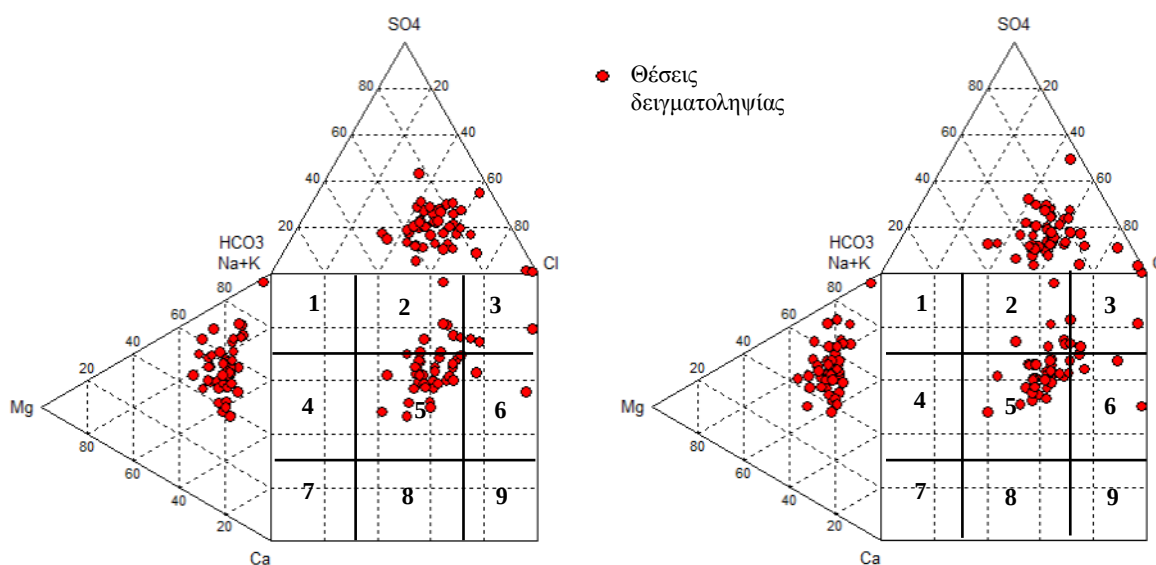


Σχήμα 45: Διάγραμμα Piper για τους μήνες Μάιο (αριστερά) και Οκτώβριο (δεξιά)

Ο δεύτερος τύπος νερού (G) χαρακτηρίζεται ως **Na-(K)-Cl-(SO₄)** τύπος. Σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση του Langguth (1996) η κατηγορία των δειγμάτων αυτών αναφέρεται σε αλκαλικό νερό με επικρατούντα τα χλωριούχα (Cl⁻). Η κυριαρχία των ιόντων Na²⁺ και Cl⁻ στα δείγματα αυτά προέρχεται από τη μείξη του γλυκού νερού με το θαλασσινό λόγω της θαλάσσιας διείσδυσης και δείχνει τη διεργασία της ιοντοανταλλαγής που γίνεται μεταξύ θάλασσας και

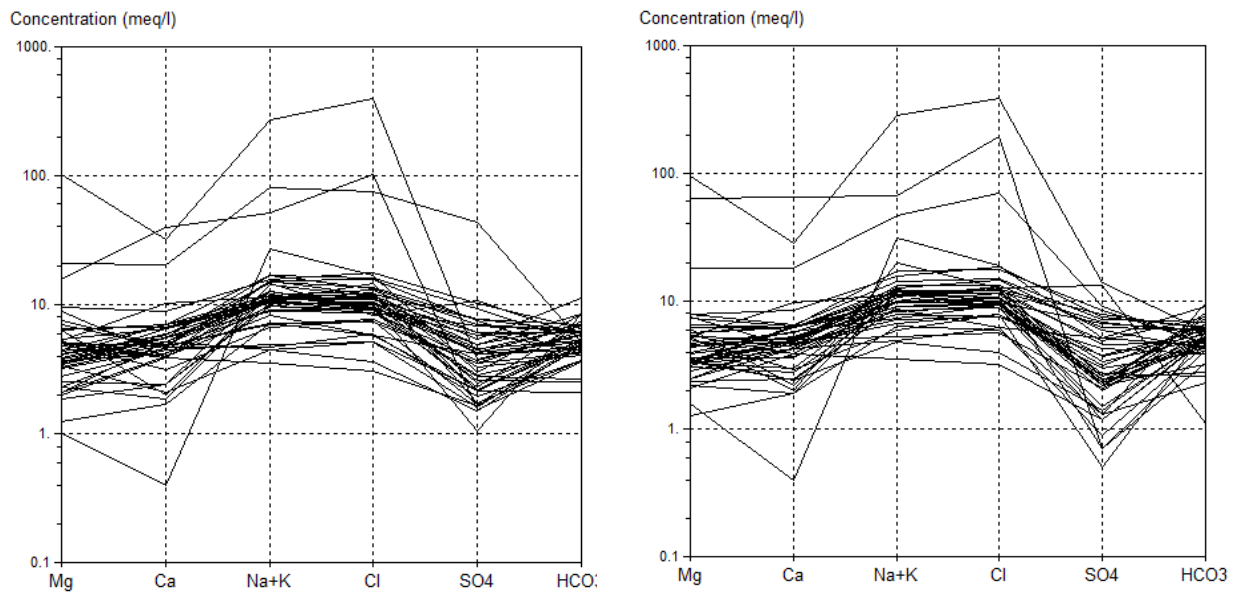
υδροφορέα. Οι θέσεις αυτές και για τις δύο περιόδους είναι παράκτιες και είναι οι εξής: PAN1, FIS2, ROM5 και PL7.

Το γεγονός ότι **μεικτού τύπου** νερά επικρατούν στην περιοχή μελέτης υποστηρίζεται από στοιχεία που απεικονίζονται στο διάγραμμα Durov (Σχήμα 46). Στο διάγραμμα τα περισσότερα δείγματα νερού βρίσκονται στην κατηγορία 5 και σύμφωνα με την ταξινόμηση των Lloyd and Heathcote (1985), η τάση αυτή μπορεί να αποδοθεί στην πρόσφατη αναπλήρωση φρέσκου νερού που παρουσιάζει **απλή διάλυση ή μείξη** χωρίς να επικρατεί κυρίαρχο ανιόν ή κατιόν. Αυτό επιβεβαιώνει τα έως τώρα συμπεράσματα ότι δηλαδή στην περιοχή επικρατούν δύο κύριες υδρογεωλογικές διεργασίες που επηρεάζουν τη χημική σύνθεση των δειγμάτων, η αποσάθρωση των ορυκτών-πετρωμάτων και η ανάμειξη με το θαλασσινό νερό λόγω της τρωτότητας του υδροφορέα στην υφαλμύριση. Εκτός από αυτή την κατηγορία, λιγότερα δείγματα βρίσκονται στην κατηγορία 2. Αυτός ο τύπος του νερού κυριαρχείται από ιόντα Ca^{2+} και HCO_3^- . Η κατηγορία των δειγμάτων αυτών οφείλεται στη διάλυση των ανθρακικών πετρωμάτων και στην υπόγεια κυκλοφορία του μετεωρικού νερού. Στην κατηγορία 3 τα ιόντα HCO_3^- και το Na^+ είναι κυρίαρχα και αυτό δείχνει την διεργασία της υφαλμύρισης. Τέλος, στην κατηγορία 6 (θέση RO5, FIS2, PL7) κυρίαρχο ιόν είναι το SO_4^{2-} και το Na^+ . Είναι ένας τύπος νερού που δεν συναντάται συχνά και υποδεικνύει πιθανή μείξη ή ασυνήθιστες επιδράσεις διάλυσης.



Σχήμα 46: Διάγραμμα Durov για τους μήνες Μάιο (αριστερά) και Οκτώβριο (δεξιά)

Το διάγραμμα Schoeller χρησιμοποιείται για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του νερού στις διάφορες δειγματοληπτικές θέσεις και για να αξιολογηθεί η ομοιογένεια ή ετερογένεια των χημικών ιδιοτήτων των υπόγειων νερών. Στο Σχήμα 47 παρατηρούμε ότι και στις δυο περιόδους οι συγκεντρώσεις των ανιόντων και κατιόντων έχουν την ίδια τάση και άρα το υπόγειο νερό έχει υποστεί παρόμοιες μορφές γεωχημικής εξέλιξης (Bajjali, 2006). Εξαίρεση στην ομοιογένεια με τα άλλα δείγματα φέρουν οι θέσεις ROM5, PL7, FIS2 και PAN1. Αυτό επαληθεύει τα προηγούμενα συμπεράσματα της έρευνας.



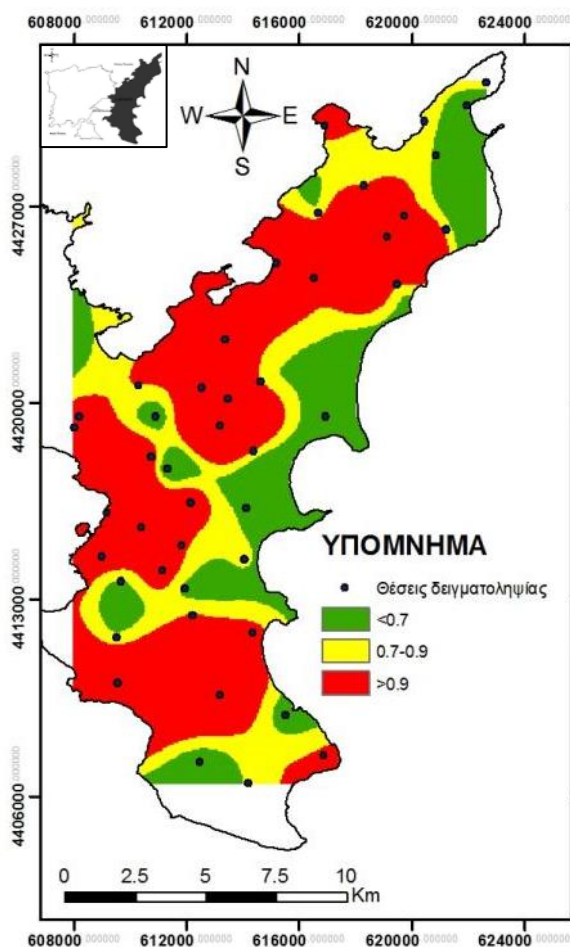
Σχήμα 47: Διάγραμμα Schoeller για τα δείγματα υπόγειου νερού του Μαΐου (αριστερά) και Οκτωβρίου (δεξιά)

Ο λόγος της περιεκτικότητας των ιόντων στο νερό μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες για τα πετρώματα που φιλοξενείται ή μέσα από τα οποία πέρασε το νερό, το βαθμό ανανέωσής τους και την ανάμειξη τους με το θαλασσινό νερό (Καλλέργης, 2000; Σούλιος, 2006; Βουδούρης 2009). Όλες οι τιμές είναι εκφρασμένες σε meq/L. Για την ερμηνεία τους και τη χωρική κατανομή παρατίθενται θεματικοί χάρτες για κάθε λόγο ξεχωριστά για την περίοδο δειγματοληψίας του Μαΐου.

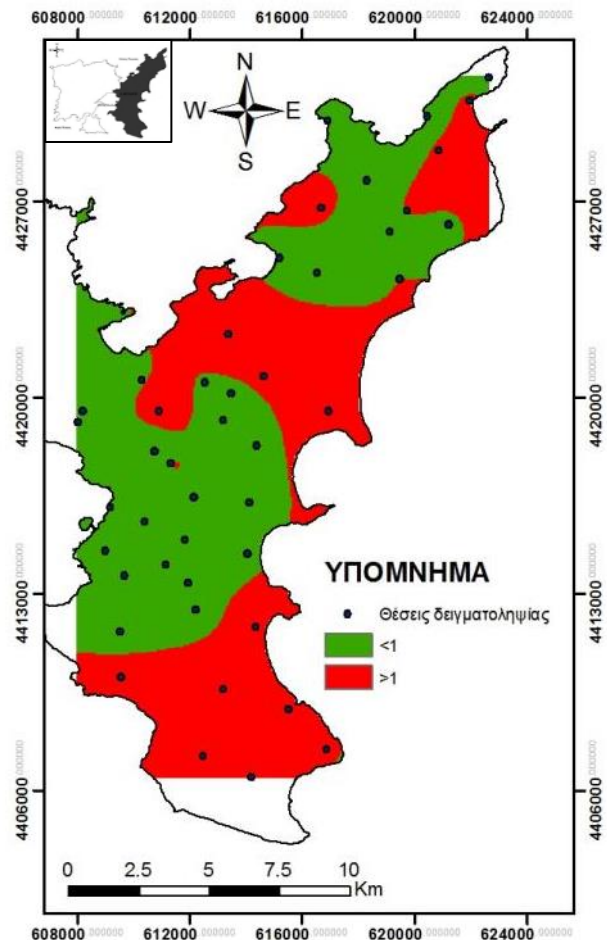
Ο ιοντικός λόγος $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ (meq/L) χρησιμοποιείται για να περιγράψει τον τύπο των πετρωμάτων από τον οποίο προέρχεται το νερό. Τιμές του λόγου μεταξύ 0,5-0,7 αντιστοιχούν σε υδροφορείς ασβεστολιθικών πετρωμάτων, από 0,7-0,9 σε δολομιτικά πετρώματα και τιμές >0,9

σε υδροφορείς οφειολιθικών και πυριτικών πετρωμάτων πλούσια σε Mg (Σούλιος, 2006; Βουδούρης, 2009). Παρατηρούμε στον χάρτη κατανομής (Σχήμα 48) ότι επικρατούν οι υδροφορείς **οφειολιθικών και πυριτικών πετρωμάτων**. Το αποτέλεσμα κρίνεται φυσιολογικό και επαληθεύεται με τα όσα έχουν προαναφερθεί σχετικά με την κατανομή και προέλευση των ιόντων του νερού στις περιοχές αυτές.

Ο ιοντικός λόγος $(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+})/(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$ (meq/L) χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει την τροφοδοσία του υπόγειου νερού. Για τιμές του λόγου τιμές <1 σχετίζεται με παλιό νερό, ενώ για τιμές >1 δείχνει υδροφόρο στρώμα με συνεχή τροφοδοσία (Σούλιος, 2006). Σύμφωνα με τον χάρτη κατανομής (Σχήμα 49) προκύπτει ότι οι υδροφορείς με παλιό νερό βρίσκονται στην κεντρική και βόρεια ζώνη ενώ στη **νότια έχουμε συνεχή τροφοδοσία**. Αυτό είναι λογικό διότι εκεί, όπως προαναφέρθηκε, συναντάμε υψηλές υδραυλικές κλίσεις και υδροφόρους σχηματισμούς που επιτρέπουν την τροφοδοσία των υπόγειων νερών.



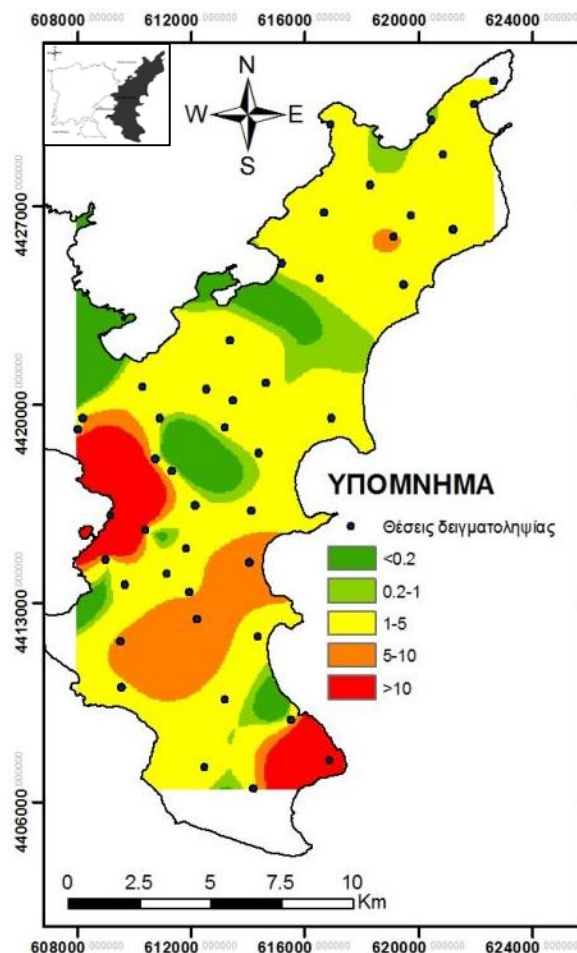
Σχήμα 48: Κατανομή του λόγου $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ στην περιοχή μελέτης για την περίοδο δειγματοληψίας του Μαΐου



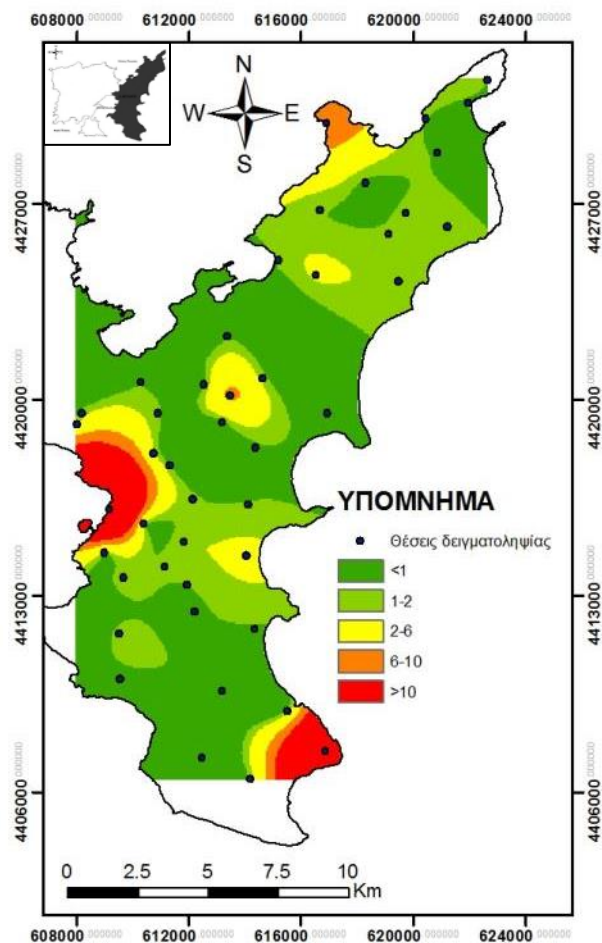
Σχήμα 49: Κατανομή του λόγου $(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+})/(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$ στην περιοχή μελέτης για την περίοδο δειγματοληψίας του Μαΐου

Ο ιοντικός λόγος $\text{Cl}/\text{SO}_4^{2-}$ (meq/L) παίρνει τιμές 10 για το θαλασσινό νερό, 5-10 για το χλωριούχο, 1-5 για το χλωροθειούχο, 0,2-1 όταν το νερό είναι θειούχο-χλωριούχο και $<0,2$ όταν είναι θειούχο (Σούλιος, 2006). Τιμές >10 παρατηρούνται στην κεντρική παράκτια και νότια ζώνη της περιοχής έρευνας λόγω της θαλάσσιας διείσδυσης, ενώ στο υπόλοιπο τμήμα το νερό χαρακτηρίζεται κυρίως ως **χλωροθειούχο** (Σχήμα 50).

Τέλος, χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης **Revelle** για την αναγνώριση της υφαλμύρισης. Για τιμές <1 το νερό χαρακτηρίζεται ως καλό, για 1-2 ελαφρά ρυπασμένο, 2-6 μέτρια ρυπασμένο, 6-10 σοβαρά ρυπασμένο, >10 ως επικίνδυνα ρυπασμένο και μπορεί να χαρακτηριστεί ως θαλασσινό νερό (Καλλέργης, 2000). Για τις δύο περιόδους ο χάρτης κατανομής είναι ίδιος. Παρακάτω παρατίθεται ο χάρτης για την υγρή περίοδο (Σχήμα 51). Συμπεραίνουμε πάλι ότι το θαλασσινό νερό έχει επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα του υπόγειου νερού στην κεντρική παράκτια ζώνη, εκεί που συναντάμε δηλαδή τη θέση ROM5, και στη νότια ζώνη της περιοχής (θέση FIS2).



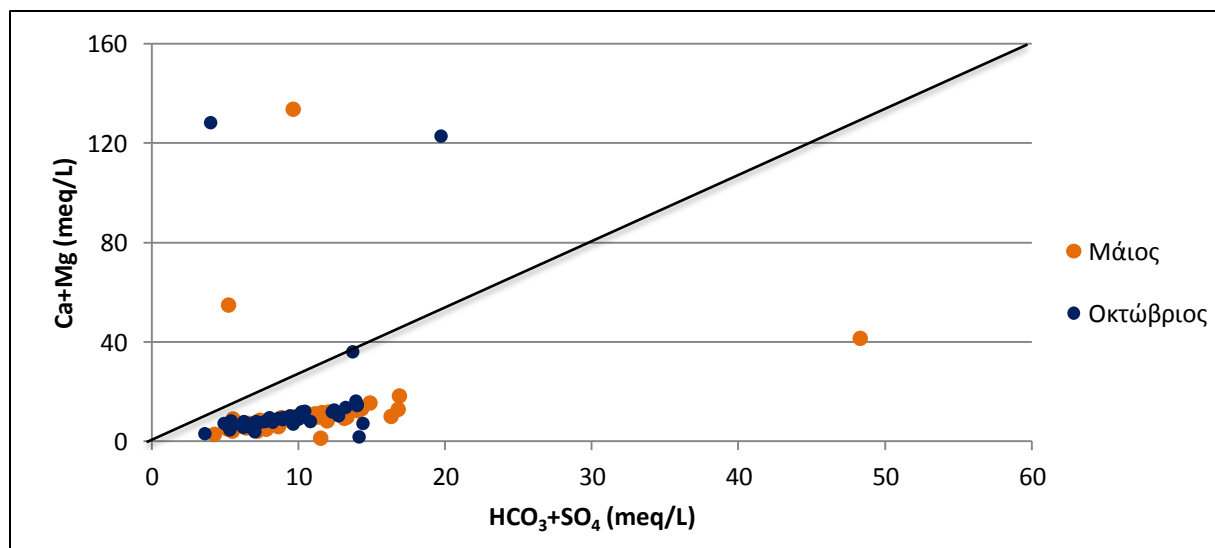
Σχήμα 50: Κατανομή του λόγου $\text{Cl}/\text{SO}_4^{2-}$ στην περιοχή μελέτης για την περίοδο δειγματοληψίας



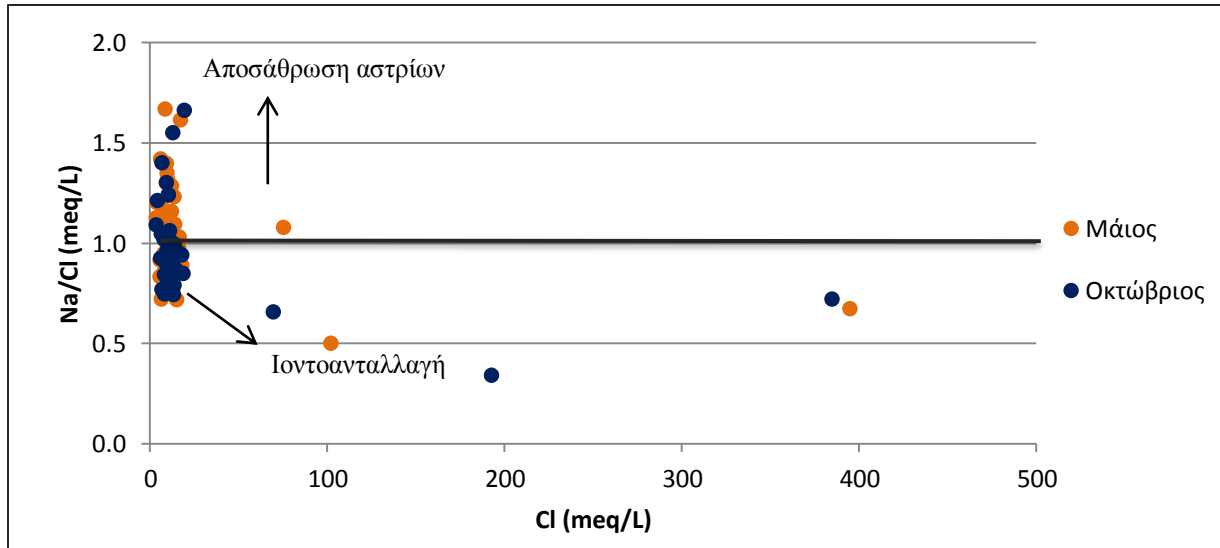
Σχήμα 51: Κατανομή του δείκτη Revelle στην περιοχή μελέτης για την περίοδο δειγματοληψίας

Για να επαληθεύσουμε το συμπέρασμα ότι το ασβέστιο, το μαγνήσιο, το θειικό και όξινο ανθρακικό ιόν προέρχονται από την απλή διάλυση των ανθρακικών και πυριτικών πετρωμάτων, τότε θα πρέπει να υπάρχει ισορροπία των φορτίων μεταξύ των ανιόντων και κατιόντων (Jalali, 2005). Όπως περιγράφεται στο Σχήμα 52, χρησιμοποιήθηκε η σχέση $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ και $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ εκφρασμένα σε mg/L για τον προσδιορισμό της αλληλεπίδρασης μεταξύ του υπόγειου νερού και των πετρωμάτων του υδροφορέα. Από το σχήμα που προέκυψε παρατηρούμε ότι το 90% των δειγμάτων βρίσκεται κάτω από τη γραμμή 1:1 και δείχνει την επιρροή της διάλυσης των πυριτικών ορυκτών και την διεργασία της ανταλλαγής ιόντων που συμβαίνει στα δείγματα (Elango and Kannan, 2007). Το υπόλοιπο 10% των δειγμάτων βρίσκεται πάνω από τη γραμμή και δείχνει την επικράτηση της διάλυσης των ανθρακικών ορυκτών σε αυτά τα δείγματα.

Το Σχήμα 53 δείχνει τη συσχέτιση μεταξύ Na^+/Cl^- και των ιόντων Cl^- εκφρασμένα σε meq/L. Από το σχήμα είναι προφανές ότι σχεδόν τα μισά δείγματα παρουσιάζουν υψηλές τιμές (>1) του λόγου Na^+/Cl^- και χαμηλή αλατότητα, που σημαίνει ότι είναι επηρεασμένα από την αποσάθρωση των Na-αστρίων (αλβίτη), ενώ τα υπόλοιπα που εμφανίζουν χαμηλές τιμές (<1) σε συνδυασμό με υψηλές συγκεντρώσεις Cl^- είναι δείκτης θαλάσσιας διείσδυσης (Bouragba et al., 2011; Khan, 2011; Kontis and Gaganis, 2012). Οι θέσεις που εμφανίζουν σε μεγάλο βαθμό την υφαλμύριση, όπως έχουν ήδη αναφερθεί, είναι οι FIS2, ROM5 και PL7.



Σχήμα 52: Σχέση των ιόντων $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ και $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$



Σχήμα 53: Σχέση του λόγου Na^+/Cl^- με Cl^-

8. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Ένα σημαντικό πρόβλημα της ποιοτικής υποβάθμισης των υπόγειων υδατικών πόρων της περιοχής έρευνας σχετίζεται με την παρουσία βαρέων μετάλλων, συχνά σε συγκεντρώσεις πολλαπλάσιες των μέγιστων επιτρεπόμενων ορίων για πόση. Τα βαρέα μέταλλα αποτελούν επικίνδυνους ρύπους αφού δεν αποικοδομούνται με φυσικές διεργασίες και έτσι παραμένουν για μεγάλο χρονικό διάστημα στο περιβάλλον. Εισέρχονται στον βιοχημικό κύκλο και συγκεντρώνονται σε οργανισμούς προκαλώντας διαταραχές στις βιολογικές δράσεις. Ένας αριθμός από φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές παράγουν τα βαρέα μέταλλα. Εισέρχονται στα υπόγεια νερά μέσω δύο φυσικών διεργασιών, της γεωλογικής αποσάθρωσης και διάλυσης από το έδαφος και τα πετρώματα, και μέσω των ανθρωπογενών επιδράσεων (Bakis and Tuncan, 2011; Haloi and Sarma, 2012; Zamani et al., 2012).

Η περιοχή μελέτης, σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, φαίνεται να επηρεάζεται ταυτόχρονα από τους δύο παραπάνω παράγοντες. Το υπόγειο νερό διεισδύει μέσα στα υδροθερμικά εξαλλοιωμένα μαγματικά πετρώματα, οξειδώνει τα ορυκτά συστατικά και διαλύει μικρές ποσότητες στοιχείων, λόγω του μικρού βαθμού διαλυτότητας αυτών των πετρωμάτων, με αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό του υπόγειου νερού σε ορισμένα ιχνοστοιχεία-βαρέα μέταλλα. Ωστόσο, ορισμένες φορές ο εμπλουτισμός αυτός υπερβαίνει το ανώτατο επιτρεπτό όριο και έτσι καθίσταται αναγκαία η συχνή παρακολούθηση της συγκέντρωσης των βαρέων μετάλλων στο υπόγειο νερό.

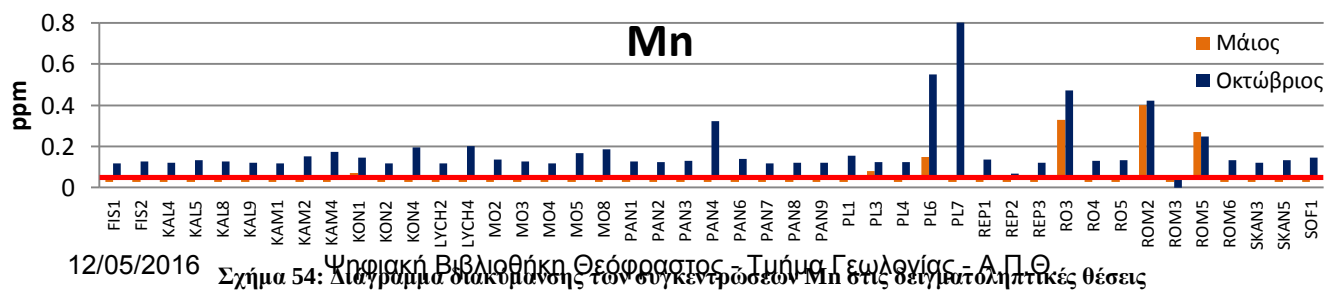
Τα εξεταζόμενα βαρέα μέταλλα είναι τα εξής: μαγγάνιο (Mn), ψευδάργυρος (Zn), σίδηρος (Fe), χαλκός (Cu), κάδμιο (Cd), κοβάλτιο (Co), χρώμιο (Cr), νικέλιο (Ni), μόλυβδος (Pb) και βόριο (B). Ο χαλκός και το κάδμιο σε όλες τις μετρήσεις των δύο περιόδων δειγματοληψίας ήταν κάτω από τα όρια ανιχνευσιμότητας. Τα κυρίαρχα βαρέα μέταλλα που απαντώνται σχεδόν σε όλα τα δείγματα που αναλύθηκαν είναι το **μαγγάνιο** (Mn), ο **μόλυβδος** (Pb), ο **σίδηρος** (Fe) και ο **ψευδάργυρος** (Zn). Οι ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις που προσδιορίστηκαν ενδέχεται να οφείλονται στη γεωλογική δομή της περιοχής, δηλαδή στην παρουσία ηφαιστειακών πετρωμάτων η οποία έχει δημιουργήσει σε πολλές θέσεις στο νησί μεταλλοφόρες εμφανίσεις Pb, Cu, και Zn στις ζώνες εξαλλοίωσης (Voudouris and Alfieris, 2005; Fornadel et al., 2012). Ωστόσο, θεωρείται σκόπιμη η διερεύνηση της πιθανής συσχέτισης των υψηλών αυτών συγκεντρώσεων με τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες στην περιοχή και ειδικότερα με τη

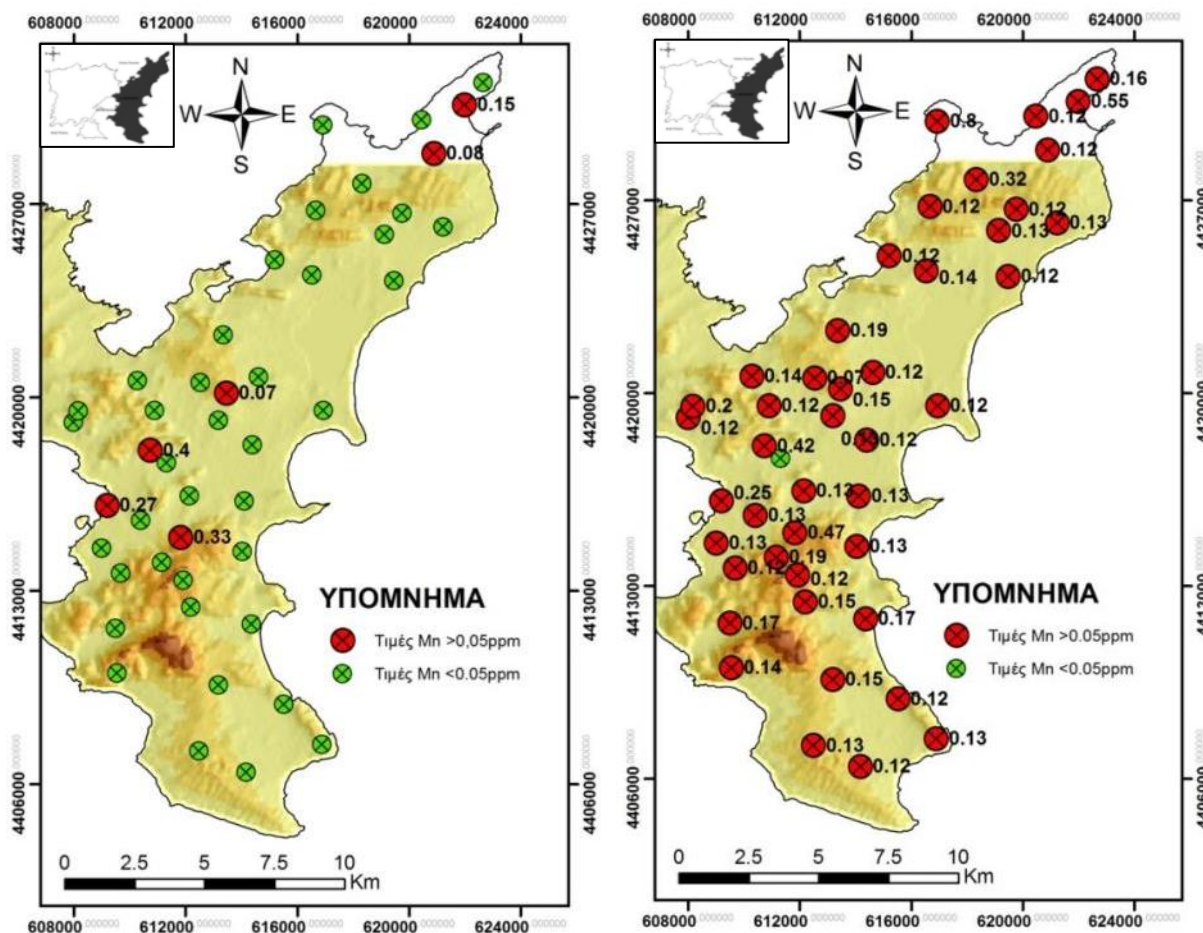
λειτουργία ανεξέλεγκτων χωματερών (ΧΑΔΑ), τη διευθέτηση των ρυπαντικών φορτίων από τα οικιακά-βιομηχανικά λύματα και τα υπολείμματα των εκρήξεων βλημάτων στα πεδία βολής του νησιού.

Τα αποτελέσματα περιγράφονται παρακάτω με διαγράμματα που δείχνουν τη διακύμανση των συγκεντρώσεων των ιχνοστοιχείων σε κάθε θέση δειγματοληψίας, με την τιμή του οριζόντιου άξονα να ξεκινάει από το επιτρεπτό όριο, βάση της ισχύουσας Νομοθεσίας (Κ.Υ.Α. Υ2/2600/2001). Έτσι, οι συγκεντρώσεις εντός των επιτρεπτών ορίων εμφανίζονται κάτω από τον οριζόντιο άξονα, ενώ αυτές που τις υπερβαίνουν εμφανίζονται πάνω από τον άξονα. Επίσης κατασκευάστηκαν γεωχημικοί χάρτες οι οποίοι παρουσιάζουν την κατανομή κάθε μετάλλου στο ανατολικό τμήμα της Λήμνου, και δείχνουν τις θέσεις με τις επιτρεπτές τιμές και αυτές που ξεπερνούν το επιτρεπτό όριο, όπως ορίζει η Νομοθεσία.

Μαγγάνιο (Mn)

Τον Μάιο, σύμφωνα με το Σχήμα 54, το 13% των δειγμάτων παρουσιάζει συγκεντρώσεις πάνω από το ανώτατο επιτρεπτό όριο τα 0,05 ppm (Κ.Υ.Α. Υ2/2600/2001). Οι υπόλοιπες τιμές εμφανίζονται κάτω από όριο ανιχνευσιμότητας του. Από τον χάρτη κατανομής (Σχήμα 55) παρατηρούμε ότι οι υψηλότερες συγκεντρώσεις εμφανίζονται στο κεντρικό και βόρειο τμήμα της περιοχής έρευνας, με μέγιστη τιμή 0,4 ppm (θέση RO3) τον Μάιο. Τον Οκτώβριο η συγκέντρωση του αυξάνεται σε όλα τα δείγματα ξεπερνώντας κατά πολύ την ανώτατη επιτρεπτή τιμή, φτάνοντας τα 0,8 ppm. Το συγκεκριμένο δείγμα βρίσκεται στη θέση PL7. Στην περιοχή έρευνας το Mn προέρχεται πιθανώς από τα ηφαιστειακά πετρώματα τα οποία περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις σε αυτό, λόγω της παρουσίας συγκεκριμένων ορυκτών πλούσια σε Mn. Επίσης οφείλεται και στην ανάμιξη του υδροφορέα με τα υδροθερμικά ρευστά που κυκλοφορούν σε μεγάλα βάθη λόγω του γεωθερμικού πεδίου, τα οποία είναι πλούσια σε Mn, με αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό του υπόγειου νερού. Η θέση PL7 συνδέεται με την παρουσία του ρήγματος Κοντιάς – Κοτσίνας, το οποίο ευνοεί στην ανάμιξη του υπόγειου νερό με τα γεωθερμικά ρευστά και τον εμπλουτισμό του σε διάφορα μέταλλα, όπως το Mn.

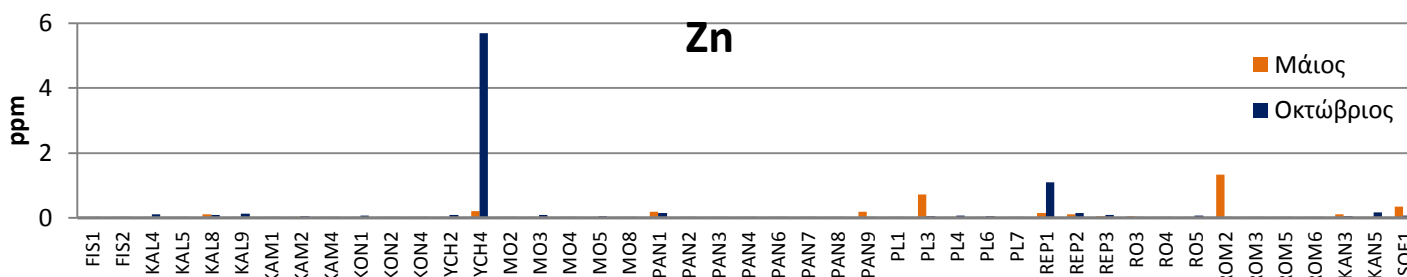




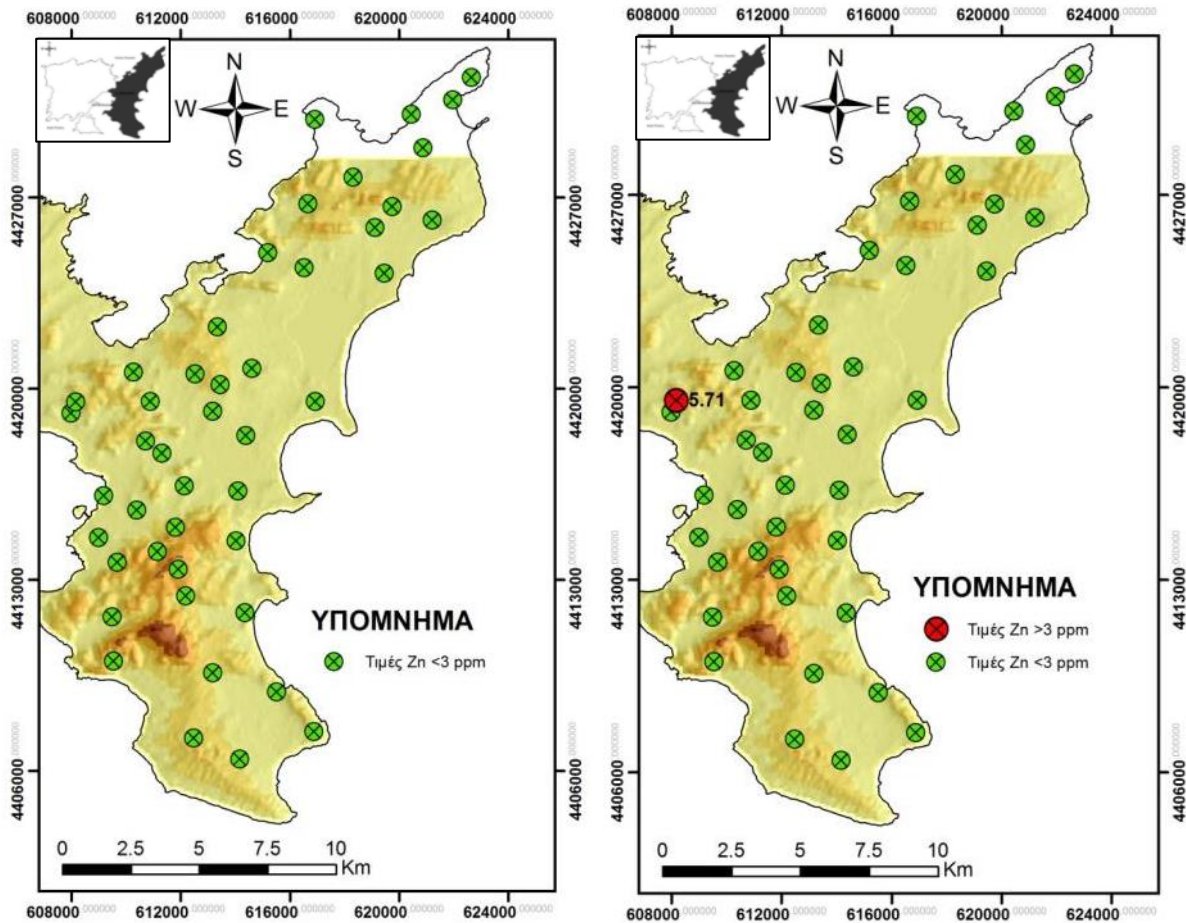
Σχήμα 55: Χάρτες κατανομής του Mn για τον μήνα Μάιο (αριστερά) και Οκτώβριο (δεξιά)

Ψευδάργυρος (Zn)

Το Mn μόνο στη θέση LYCH4 (Σχήμα 56) τον Οκτώβριο παρουσιάζει συγκεντρώση πάνω από το ανώτατο επιτρεπτό όριο τα 3 ppm (Κ.Υ.Α. Υ2/2600/2001). Οι υπόλοιπες τιμές είναι σε επιτρεπτά όρια ή κάτω από το όριο ανιχνευσιμότητας. Η θέση αυτή σύμφωνα με τον χάρτη κατανομής (Σχήμα 57) βρίσκεται κοντά στον οικισμό Λύχνα. Πιθανός η παρουσία του να οφείλεται στη διάβρωση των γαλβανισμένων σωληνώσεων της συγκεκριμένης γεώτρησης.



Σχήμα 56: Διάγραμμα διακόμανσης των συγκεντρώσεων Zn στις δειγματοληπτικές θέσεις

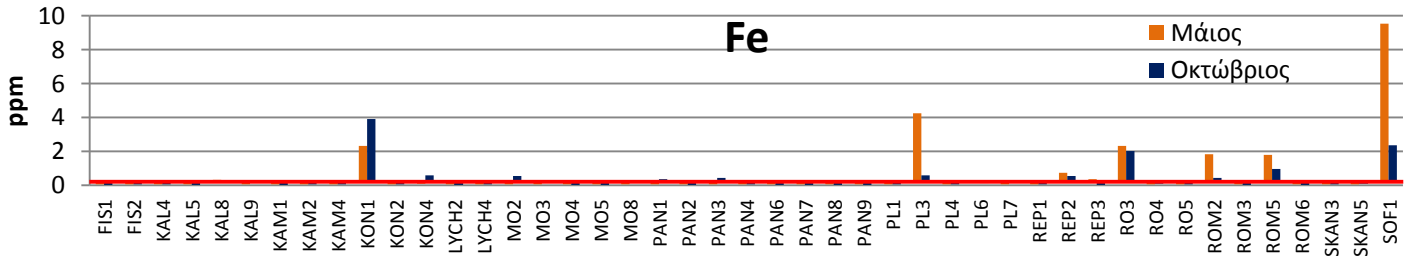


Σχήμα 57: Χάρτες κατανομής του Zn για τον μήνα Μάιο (αριστερά) και Οκτώβριο (δεξιά)

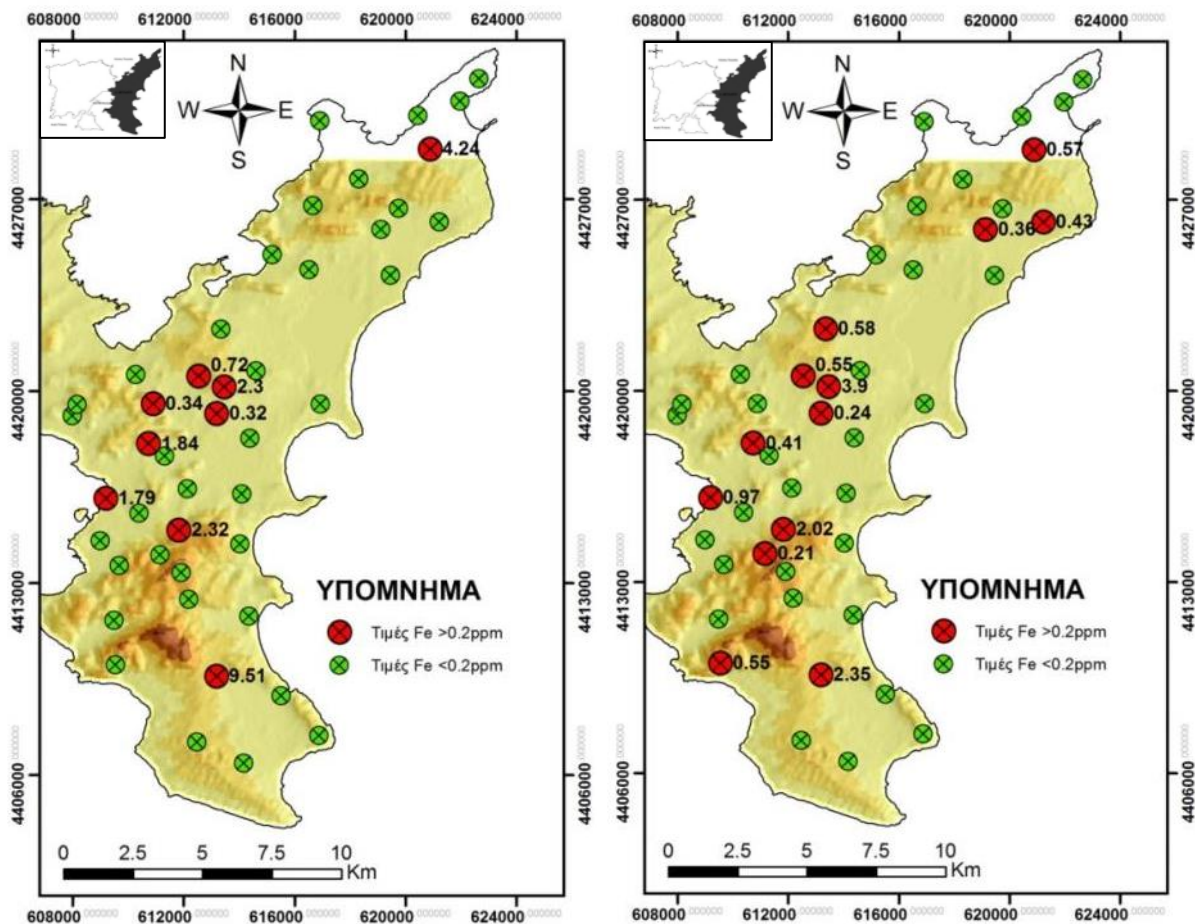
Σίδηρος (Fe)

Τον Μάιο, όπως διακρίνεται στο Σχήμα 58, το 20% των δειγμάτων παρουσιάζει συγκεντρώσεις Fe πάνω από το ανώτατο επιτρεπτό όριο που είναι τα 0,2 ppm (Κ.Υ.Α. Υ2/2600/2001), ενώ οι υπόλοιπες τιμές βρίσκονται κάτω από το όριο ανιχνευσιμότητας. Η μέγιστη τιμή είναι τα 9,51 ppm και σημειώνεται στο κεντρικό τμήμα της περιοχής έρευνας, στο δείγμα SOF1 (Σχήμα 59). Την ξηρή περίοδο (Οκτώβριος) το ποσοστό τους αυξάνεται ελαφρά (28% των δειγμάτων), με τη μέγιστη τιμή να σημειώνεται στα 3,9 ppm (δείγμα ΚΟΝ1). Η προέλευση του είναι φυσική από τα ηφαιστειακά πετρώματα που αποτελούνται από αμφιβόλους, πυρόξενους, μαρμαρυγίες, σουλφίδια ή οξείδια σιδήρου και από τα ψαμμιτικά πετρώματα (Καλλέργης, 2000). Αυτό επιβεβαιώνεται από το γεγονός ότι όλες οι θέσεις με τις αυξημένες τιμές είναι εντός των ηφαιστειακών και ψαμμιτικών-αργιλικών πετρωμάτων οι οποίες περιέχουν οξείδια-υδροξείδια Fe (Ρούσσος και Κατσαούνης, 1993). Οι υψηλές τιμές Fe στις θέσεις SOF1,

PL7, KON1 ενδεχομένως να επιβαρύνονται επιπλέον και από κάποια ανθρωπογενή πηγή, όπως στραγγίσματα παλιών ΧΑΔΑ, λιπάσματα και απορρίψεις λυμάτων (Environmental Protection Agency, 2001).



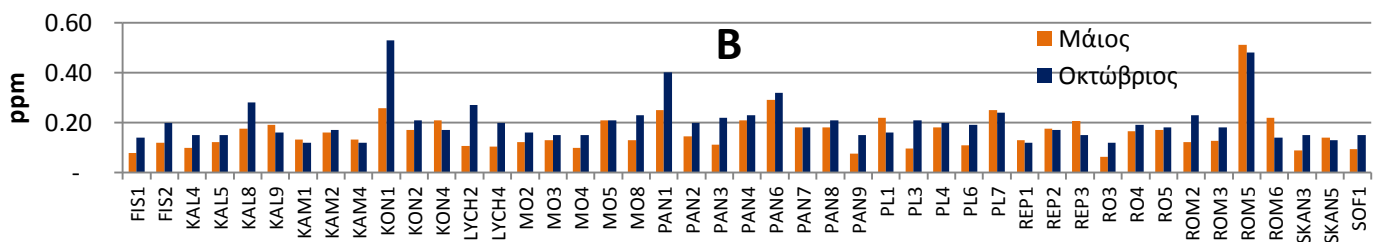
Σχήμα 58: Διάγραμμα διακύμανσης των συγκεντρώσεων Fe στις δειγματοληπτικές θέσεις



Σχήμα 59: Χάρτες κατανομής του Fe για τον μήνα Μάιο (αριστερά) και Οκτώβριο (δεξιά)

Βόριο (B)

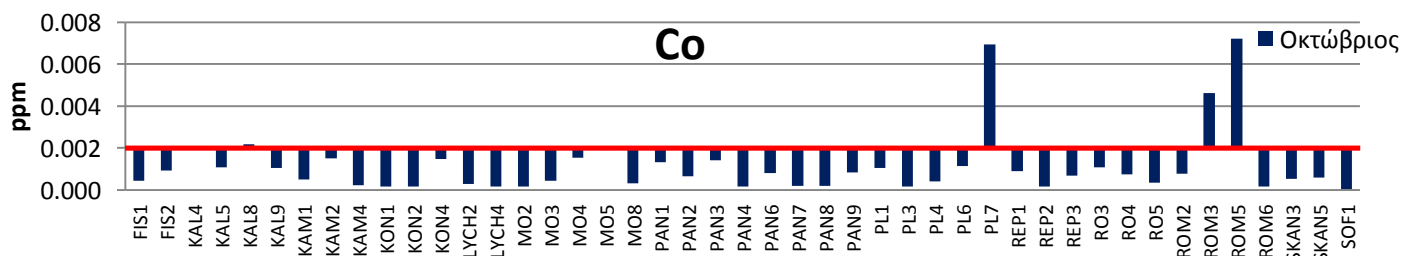
Οι τιμές του βορίου κατά την περίοδο του Μαΐου κυμαίνονται από 0,06 ppm έως 0,51 ppm με μέση τιμή τα 0,16 ppm (Σχήμα 60). Τον Οκτώβριο παρατηρείται μια ελαφριά αύξηση στις τιμές των συγκεντρώσεων του. Η ελάχιστη τιμή είναι τα 0,12 ppm, η μέγιστη τα 0,53 ppm και η μέση 0,2 ppm. Όλες οι συγκεντρώσεις ωστόσο είναι εντός της επιτρεπτής τιμής σύμφωνα με τη Νομοθεσία (Κ.Υ.Α. Υ2/2600/2001), η οποία ορίζεται 1 ppm. Οι συγκεντρώσεις του B συνδέονται με τη δράση των γεωθερμικών ρευστών στην περιοχή έρευνας (Φυτίκας και Ανδρίτσος, 2004).



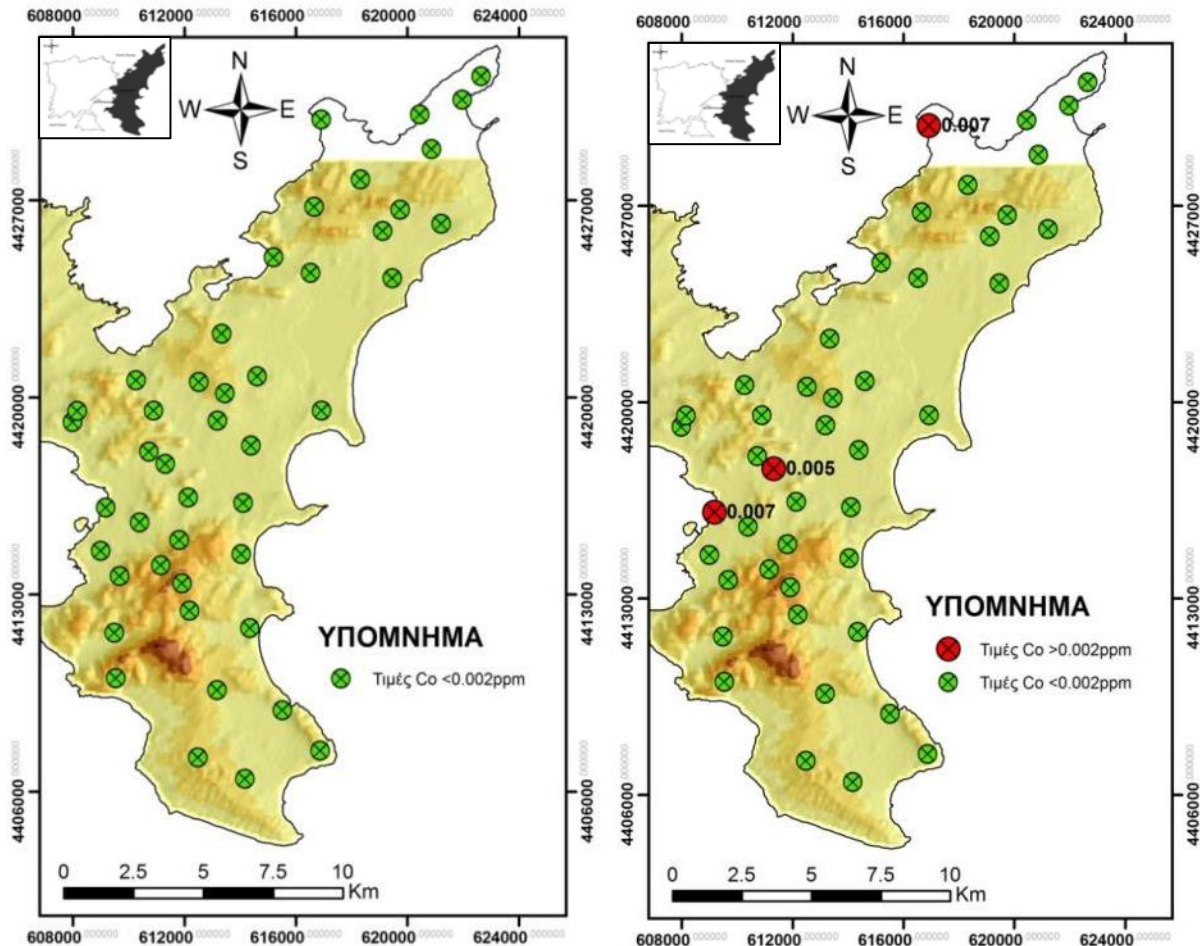
Σχήμα 60: Διάγραμμα διακύμανσης των συγκεντρώσεων B στις δειγματοληπτικές θέσεις

Κοβάλτιο (Co)

Το κοβάλτιο σε όλες τις μετρήσεις του Μαΐου εμφανίζεται κάτω από το όριο ανιχνευσιμότητας. Ωστόσο τον Οκτώβριο, σύμφωνα με το Σχήμα 61, σε τρεις θέσεις σημειώθηκαν τιμές που ξεπερνούν το επιτρεπτό όριο που είναι 0,002 ppm (Environmental Protection Agency, 2001). Οι υπόλοιπες βρίσκονται κάτω από το όριο ανιχνευσιμότητας. Οι θέσεις αυτές στον χάρτη κατανομής (Σχήμα 62) εμφανίζονται στο κεντρικό και βόρειο τμήμα της περιοχής έρευνας, με μέγιστη τιμή συγκέντρωσης 0,007 ppm (δείγμα ROM5 και PL7). Τα αυξημένα επίπεδα κοβαλτίου στις τρεις αυτές θέσεις πιθανώς να προέρχονται από την απόρριψη οικιακών ή βιομηχανικών λυμάτων (Smith and Carson, 1981).



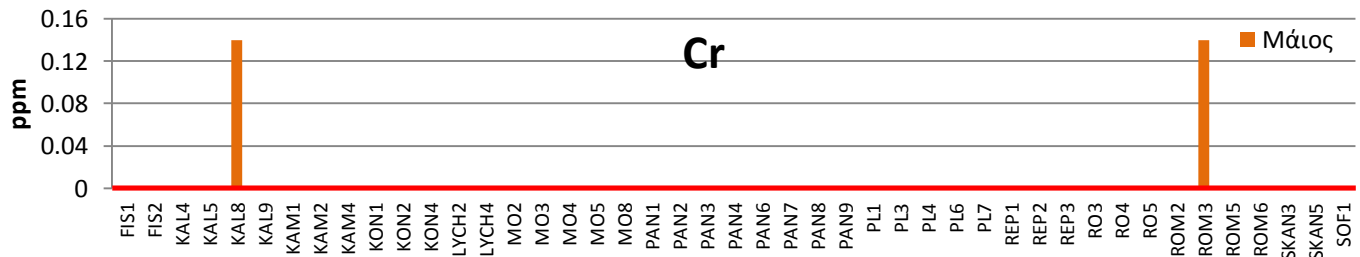
Σχήμα 61: Διάγραμμα διακύμανσης των συγκεντρώσεων Co στις δειγματοληπτικές θέσεις



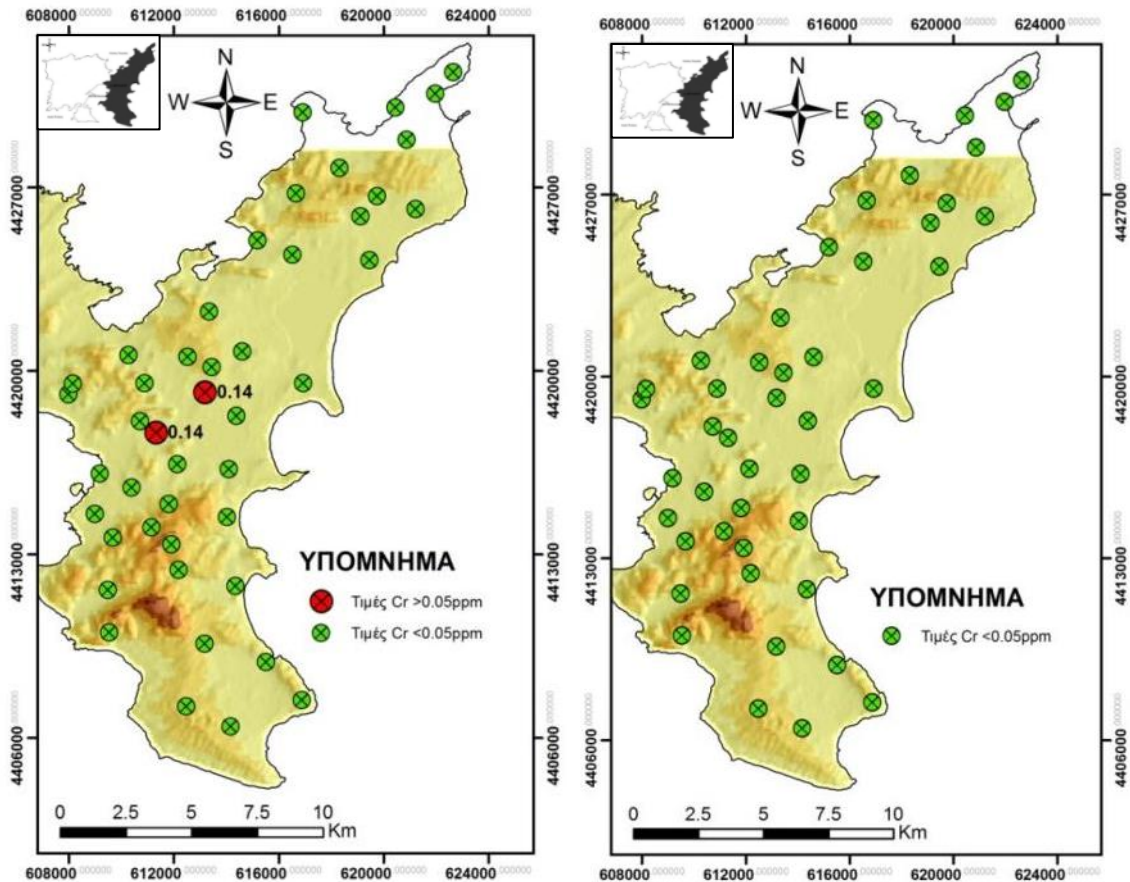
Σχήμα 62: Χάρτες κατανομής του Co για τον μήνα Μάιο (αριστερά) και Οκτώβριο (δεξιά)

Χρώμιο (Cr)

Η συγκέντρωση του χρωμίου τον Μάιο παρουσιάζει τιμές κάτω από το όριο ανιχνευσιμότητας εκτός από δύο δείγματα, τα KAL8 και ROM5, που εμφανίζουν τη μέγιστη τιμή 0,14 ppm (Σχήμα 63). Από τον χάρτη κατανομής (Σχήμα 64) παρατηρούμε ότι οι θέσεις αυτές βρίσκονται στο κεντρικό τμήμα της περιοχής έρευνας. Τον Οκτώβριο όλες οι συγκεντρώσεις του Cr κυμαίνονται μεταξύ 0,01 και 0,02 ppm, και βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων των 0,05 ppm, βάση της ισχύουσας Νομοθεσίας (Κ.Υ.Α. Υ2/2600/2001). Η παρουσία του συνδέεται πιθανώς με ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως τοπικές βιομηχανίες, είτε με τη χρήση φωσφορικών λιπασμάτων που περιέχουν Cr. Επιπλέον, η παρουσία του στις δύο αυτές θέσεις ίσως να συνδέεται με τα πεδία βολής που λειτουργούσαν κατά το παρελθόν, καθώς το Cr υπάρχει στα βλήματα.



Σχήμα 63: Διάγραμμα διακύμανσης των συγκεντρώσεων Cr στις δειγματοληπτικές θέσεις

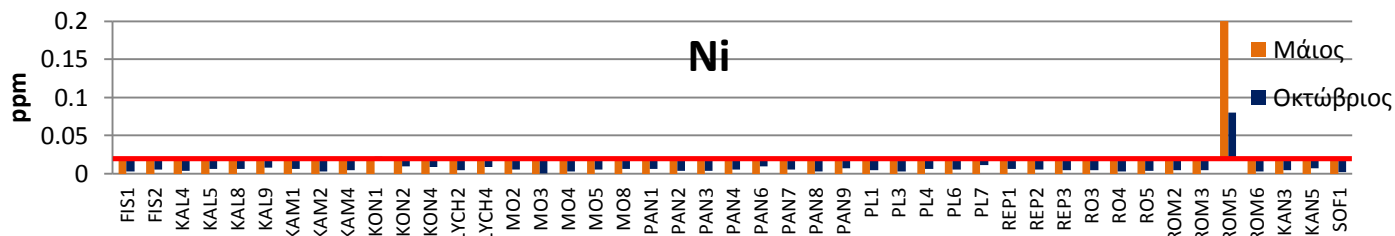


Σχήμα 64: Χάρτες κατανομής του Cr για τον μήνα Μάιο (αριστερά) και Οκτώβριο (δεξιά)

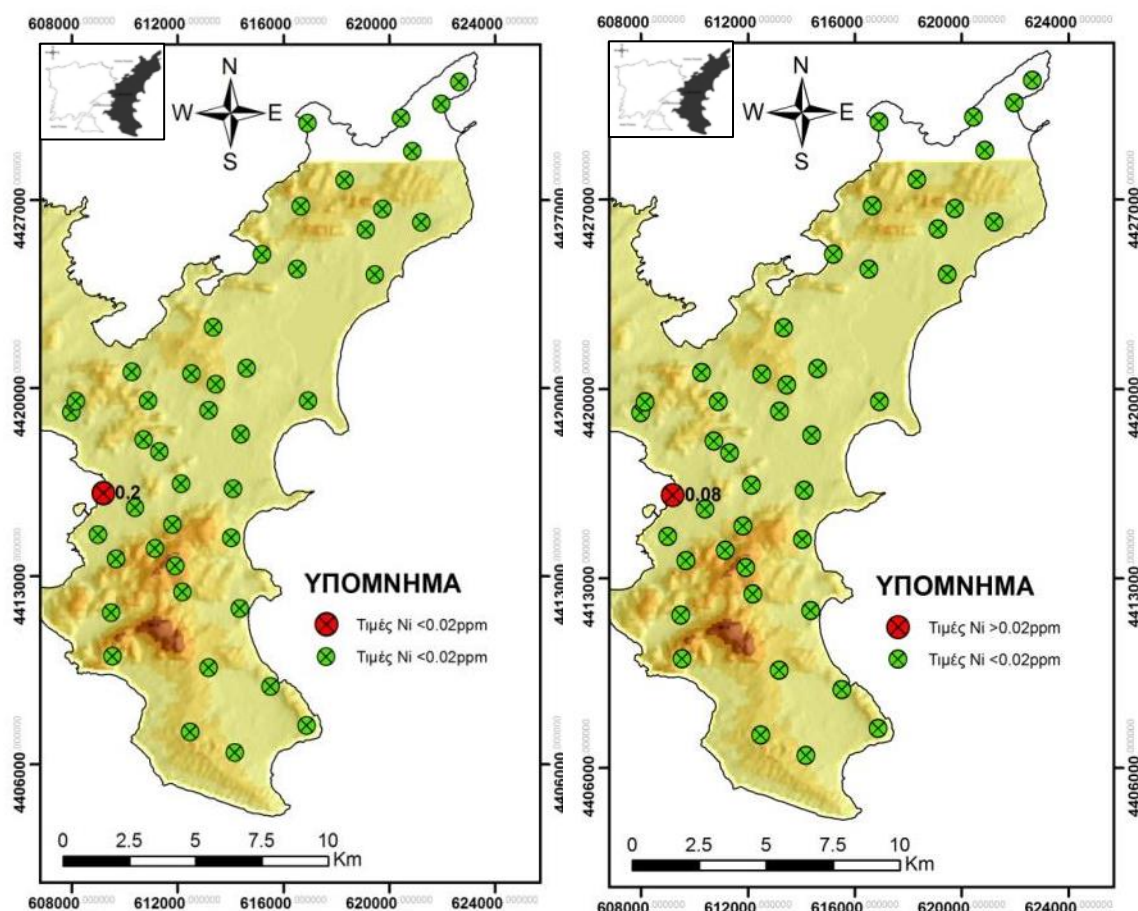
Νικέλιο (Ni)

Το νικέλιο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 65, στις δύο περιόδους εμφανίζεται σε όλα τα δείγματα σε συγκεντρώσεις κάτω από το όριο ανιχνευσιμότητας, εκτός από το δείγμα ROM5 (Σχήμα 66), του οποίου η συγκέντρωση τον Μάιο είναι δεκαπλάσια από την επιτρεπτή τιμή (0,02 ppm) βάση της Νομοθεσίας. Τον Οκτώβριο η συγκέντρωσή του μειώνεται στα 0,08 ppm. Το γεγονός ότι η ίδια θέση (ROM5) είναι επιβαρυνμένη με Ni κατά τις δύο δειγματοληπτικές

περιόδους δείχνει ότι σχετίζεται με κάποια βιομηχανική μονάδα η οποία πιθανώς να αποτελεί και την πηγή του μέσω των βιομηχανικών της αποβλήτων, κάτι που θα πρέπει να ελεγχθεί από τις αρμόδιες αρχές.



Σχήμα 65: Διάγραμμα διακύμανσης των συγκεντρώσεων Ni στις δειγματοληπτικές θέσεις

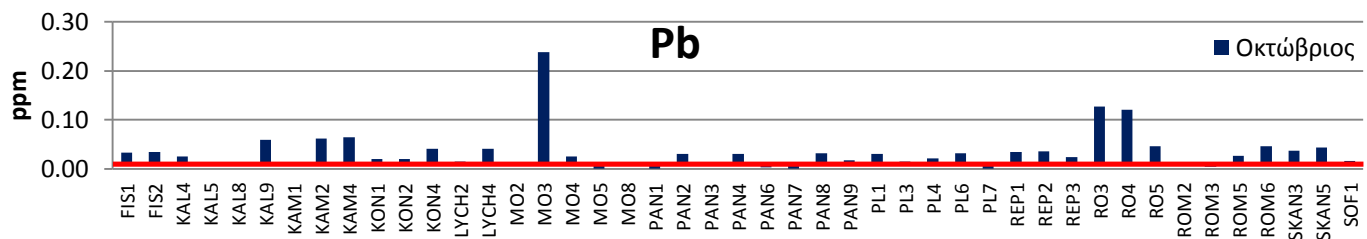


Σχήμα 66: Χάρτες κατανομής του Ni για τον μήνα Μάιο (αριστερά) και Οκτώβριο (δεξιά)

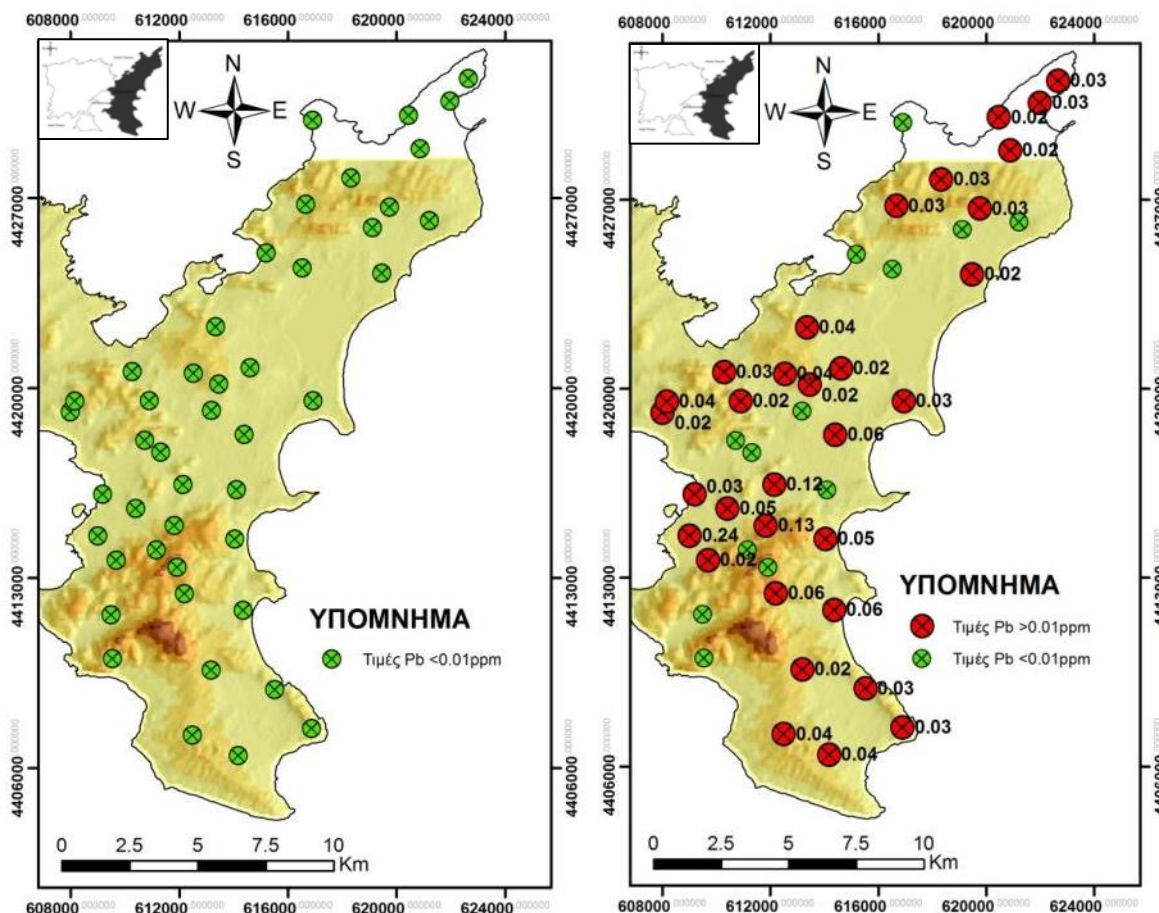
Μόλυβδος (Pb)

Ο μόλυβδος την υγρή περίοδο σε όλες τις θέσεις των δειγμάτων έχει συγκεντρώσεις κάτω από το όριο ανιχνευσιμότητας. Την ξηρή περίοδο (Οκτώβριος), όπως διακρίνεται στο Σχήμα 67,

το 71% των δειγμάτων παρουσιάζει συγκεντρώσεις πάνω από το επιτρεπτό όριο τα 0,01 ppm (Κ.Υ.Α. Υ2/2600/2001). Οι θέσεις αυτές σύμφωνα με τον χάρτη κατανομής (Σχήμα 68), βρίσκονται σχεδόν σε όλη την περιοχή έρευνας με μέγιστη τιμή 0,24 ppm (θέση ΜΟ3). Ο Pb αποτελεί τυπικό ορυκτό σε γεωθερμικά πεδία και πετρώματα ηφαιστειακής προέλευσης και τείνει να συγκαθίζανει με οξείδια του Fe και του Mn. Γενικά η Λήμνος φιλοξενεί μεταλλοφορίες επιθερμικού σταδίου που εντοπίζονται σε όλο το νησί και οι οποίες σύμφωνα με τους Fornadel et al. (2012) είναι πλούσιες σε Pb, Zn και Cu. Έτσι λοιπόν γίνεται εμπλουτισμός του υπόγειου νερού σε Pb από τα γεωθερμικά ρευστά. Επιπλέον, στο κεντρικό τμήμα κοντά στη Χορταρόλιμνη, ο Pb μπορεί να συνδεθεί με την παρουσία πεδίων βολής τα οποία επιβαρύνουν τον υδροφορέα με βαρέα μέταλλα, κυρίως με μόλυβδο (Λαμπίρη, 2008).



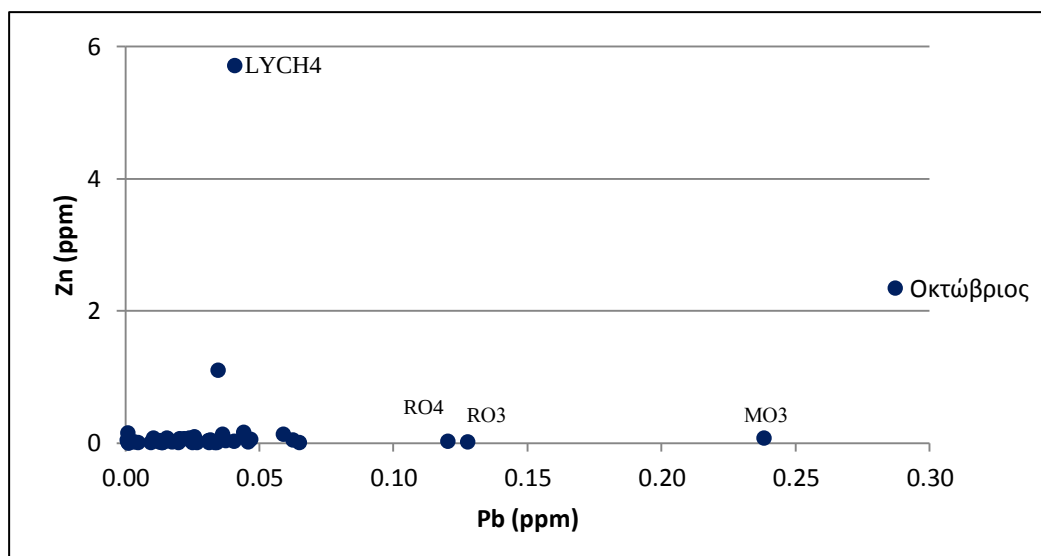
Σχήμα 67: Διάγραμμα διακύμανσης των συγκεντρώσεων Pb στις δειγματοληπτικές θέσεις



Σχήμα 68: Χάρτης κατανομής του Pb στο νησί της Λήμνου (Γεωγραφία) και Απρίλιο (δεξιά)

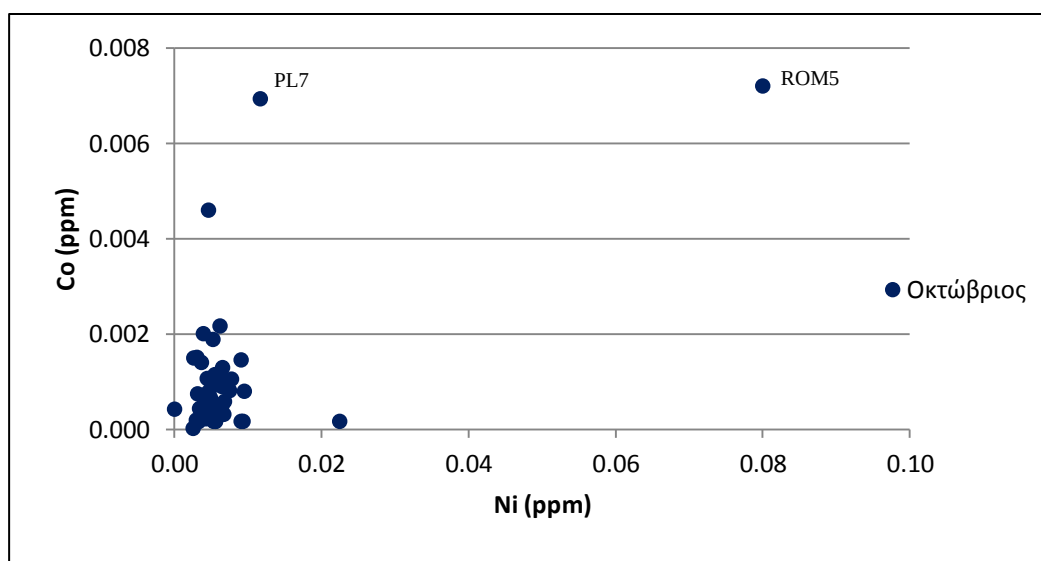
Συγκρίνοντας τις χημικές αναλύσεις των δύο περιόδων δειγματοληψίας του Μαΐου και Οκτωβρίου, παρατηρούμε ότι κατά τον Οκτώβριο έχουμε τα περισσότερα δείγματα με τις υψηλότερες συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων. Κατά την ξηρή περίοδο (Οκτώβριος) ο όγκος του υπόγειου νερού μειώνεται λόγω της ανομβρίας και των αυξημένων αρδευτικών-υδρευτικών αναγκών. Έτσι λοιπόν η συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων στο υπόγειο νερό αυξάνεται την περίοδο αυτή, με αποτέλεσμα πολλά δείγματα να εμφανίζουν συγκεντρώσεις που ξεπερνούν το επιτρεπτό όριο. Αντίθετα, κατά την υγρή περίοδο (Μάιος) οι συγκεντρώσεις των μετάλλων στα γεωθερμικά ρευστά μειώνονται λόγω της ανάμειξης/αραίωσης τους με το μετεωρικό νερό (Fornadel et al., 2012; Robb, 2013). Γι αυτόν τον λόγο κατά την περίοδο αυτή, οι περισσότερες δειγματοληπτικές θέσεις στην περιοχή έρευνας παρουσιάζουν συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων κάτω από το όριο ανιχνευσιμότητας, είτε συγκεντρώσεις οι οποίες βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων όπως ορίζονται από τη Νομοθεσία.

Παρακάτω παρουσιάζονται επιλεγμένα διαγράμματα συσχέτισης μεταξύ των μετάλλων για τους δύο μήνες, ώστε να εξαχθούν κάποια ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με τις πηγές ρύπανσης των μετάλλων. Στο διάγραμμα συσχέτισης Zn-Pb (Σχήμα 69) για τον μήνα Οκτώβριο παρατηρούμε ότι οι δειγματοληπτικές θέσεις MO3, RO3 και RO4 εμφανίζουν υψηλές συγκεντρώσεις Pb χωρίς να υπάρχει κάποια συσχέτιση με τα υπόλοιπα δείγματα. Άρα θα μπορούσαμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι η παρουσία του Pb στα συγκεκριμένα δείγματα οφείλεται σε κάποια ανθρωπογενή πηγή ρύπανσης. Το ίδιο ισχύει και για το δείγμα LYCH4 που παρουσιάζει υψηλή συγκέντρωση Zn. Τα υπόλοιπα δείγματα οφείλονται σε γηγενή αίτια, δηλαδή στις γεωλογικές συνθήκες όπως περιγράφηκαν προηγουμένως.



Σχήμα 69: Διάγραμμα συσχέτισης Zn-Pb για τον μήνα Οκτώβριο

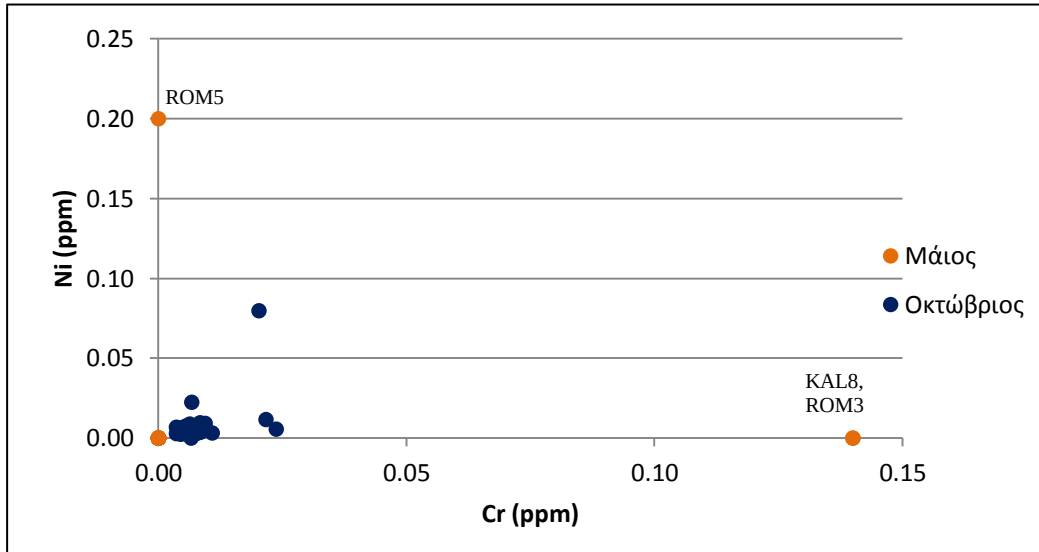
Από το διάγραμμα συσχέτισης Ni-Co (Σχήμα 70) για την ξηρή περίοδο (Οκτώβριος) διακρίνεται καθαρά η έλλειψη συσχέτισης του δείγματος ROM5 σε σχέση με τα υπόλοιπα δείγματα κατά την περίοδο αυτή. Έτσι λοιπόν μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η παρουσία του Ni και του Co στην συγκεκριμένη θέση έχουν ανθρωπογενή προέλευση, πιθανά δηλαδή να σχετίζονται με τα υγρά αστικά απόβλητα του οικισμού Ρωμανού, είτε με κάποια τοπική βιομηχανική μονάδα. Το δείγμα PL7 παρουσιάζει υψηλή συγκέντρωση σε Co χωρίς να συσχετίζεται με τα υπόλοιπα δείγματα, άρα λοιπόν η παρουσία του οφείλεται σε ανθρωπογενή παράγοντα, δηλαδή σε πιθανές απορρίψεις λυμάτων στην ευρύτερη περιοχή. Τα υπόλοιπα δείγματα παρουσιάζουν συσχέτιση μεταξύ των δύο αυτών στοιχείων, άρα μπορούμε να ερμηνεύσουμε ότι υπάρχει φυσική προέλευση των στοιχείων αυτών από γεωλογικές πηγές.



Σχήμα 70: Διάγραμμα συσχέτισης Co-Ni για τον μήνα Οκτώβριο

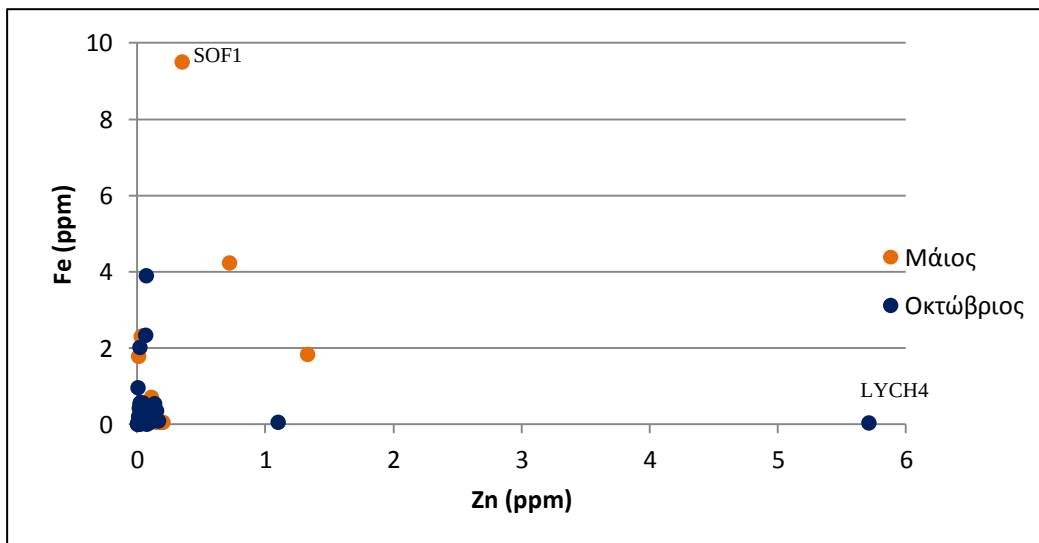
Στο διάγραμμα συσχέτισης Ni-Cr (Σχήμα 71) προβάλλονται οι συγκεντρώσεις των δύο αυτών στοιχείων για τους δύο μήνες δειγματοληψίας, Μάιο και Οκτώβριο του 2001. Παρατηρούμε ότι οι θέσεις KAL8 και ROM3 κατά την υγρή περίοδο (Μάιος) εμφανίζουν υψηλές τιμές συγκεντρώσεων Cr οι οποίες δεν σχετίζονται με τις υπόλοιπες μετρήσεις. Οπότε θα μπορούσαμε να συμπεράνουμε για τις συγκεκριμένες θέσεις αυτές ότι συνδέονται με κάποια ανθρωπογενή πηγή η οποία εμπλουτίζει τον υδροφορέα σε Cr. Το ίδιο ισχύει και για τη θέση ROM5 η οποία εμφανίζει υψηλές τιμές σε Ni χωρίς να συσχετίζεται με τα υπόλοιπα δείγματα σε αυτήν την περίοδο. Άρα λοιπόν μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι λόγω κάποιας

σημειακής πηγής ρύπανσης, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η θέση αυτή (ROM5) είναι έντονα επιβαρυνμένη σε βαρέα μέταλλα λόγω των αστικών αποβλήτων του οικισμού Ρωμανού είτε λόγω κάποιας τοπικής βιομηχανικής μονάδας.



Σχήμα 71: Διάγραμμα συσχέτισης Ni-Cr για τους μήνες Μάιο και Οκτώβριο

Τέλος, κατασκευάστηκε το διάγραμμα συσχέτισης Fe-Zn (Σχήμα 72) για τους δύο μήνες Οκτώβριο και Μάιο. Παρατηρούμε καθαρά την εμφάνιση των υψηλών συγκεντρώσεων Zn τον Οκτώβριο στη δειγματοληπτική θέση LYCH4 και Fe στη θέση SOF1 κατά τον μήνα Μάιο. Η παρουσία των στοιχείων αυτών στις δύο θέσεις, σε σχέση με τις υπόλοιπες, δεν συνδέεται με τις γεωλογικές συνθήκες, όπως αναφέραμε στην αρχή του κεφαλαίου, αλλά έχουν ανθρωπογενή προέλευση, πιθανά να σχετίζονται με τη ρίψη λιπασμάτων εφόσον οι θέσεις αυτές σχετίζονται με καλλιεργούμενες εκτάσεις.



Σχήμα 72: Διάγραμμα συσχέτισης Fe-Zn για τους μήνες Μάιο και Οκτώβριο

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Από την υδροχημική μελέτη σε 45 δειγματοληπτικές θέσεις υπόγειων υδάτων της Δημοτικής Ενότητας Μούδρου στην ανατολική Λήμνο για το έτος 2001, πραγματοποιήθηκε κατανομή και διερεύνηση των φυσικοχημικών παραμέτρων (κύρια στοιχεία και ιχνοστοιχεία) καθώς και των υδροχημικών διεργασιών. Με βάση τα αποτελέσματα καταλήγουμε στα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η περιοχή έρευνας αποτελείται από 3 ζώνες, από τις οποίες στη βόρεια και κεντρική καταγράφηκαν αρνητικές στάθμες και έτσι δημιουργείται **υφαλμύριση** του υδροφορέα λόγω των αυξημένων υδροληπτικών και αρδευτικών αναγκών.
- Η περιοχή επιβαρύνεται από έναν μεγάλο αριθμό **πηγών ρύπανσης** (κτηνοτροφικές μονάδες, λιπάσματα, αστικά-βιομηχανικά λύματα, διαφυγές ΧΑΔΑ, στρατόπεδα) που επιβαρύνουν το υπόγειο νερό σε νιτρικά, νιτρώδη, αμμωνιακά και φωσφορικά ιόντα.
- Η κεντρική περιοχή του **Ρωμανού** έχει επιβαρυνθεί από τα ιόντα K, Na, Ca, Mg, Cl και NH_4 λόγω υφαλμύρισης και **ανθρωπογενών πηγών ρύπανσης**.
- Στο υπόλοιπο τμήμα επικρατεί η **αποσάθρωση και διάλυση των πυριτικών και ανθρακικών ορυκτών** η οποία εμπλουτίζει τη σύσταση του υπόγειου νερού σε K, Na, Mg, HCO_3 και SO_4 .
- Από την εφαρμογή της παραγοντικής ανάλυσης (Factor Analysis) στα δεδομένα προέκυψαν **4 παράγοντες** που περιγράφουν την εξέλιξη των υπόγειων υδάτων στις δύο περιόδους.
- Την υγρή περίοδο: ο παράγοντας F1 (με αυξημένα φορτία στις μεταβλητές EC, Na, Ca, Mg, Cl, NH_4), ο F2 (με αυξημένα φορτία στις μεταβλητές pH, NO_2), ο F3 (με αυξημένα φορτία στη μεταβλητή PO_4), και ο F4 (με αυξημένα φορτία στη μεταβλητή SO_4).
- Την ξηρή περίοδο: ο παράγοντας F1 (με αυξημένα φορτία στις μεταβλητές Na, Mg, Cl, NH_4), ο F2 (με αυξημένα φορτία στη μεταβλητή SO_4), ο F3 (με αυξημένα φορτία στη μεταβλητή HCO_3), ο F4 (με αυξημένα φορτία στη μεταβλητή NO_3).
- Εφαρμόζοντας την ανάλυση σε ομάδες προέκυψαν **4 ομάδες** οι οποίες συμφωνούν με τα αποτελέσματα της παραγοντικής ανάλυσης.
- Το υδρογεωλογικό καθεστώς της περιοχής είναι σύνθετο και σχετίζεται με τη **διάλυση των ηφαιστειακών πετρωμάτων**, τη **διείσδυση της θάλασσας** και τη **ρύπανση από**

ανθρωπογενείς πηγές. Όλα αυτά επηρεάζουν την περιοχή έρευνας ταυτόχρονα κατά τις δύο περιόδους δειγματοληψίας.

- Οι κύριες υδροχημικές διεργασίες που ελέγχουν τη σύσταση του υπόγειου νερού είναι η **ιοντοανταλλαγή** λόγω αλληλεπίδρασης θάλασσας και υδροφορέα, και η **αντίστροφη** ιοντοανταλλαγή λόγω της αλληλεπίδρασης των πετρωμάτων με τον υδροφορέα.
- Η κατανομή των ιόντων είναι η ακόλουθη: $\text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{K}$ και $\text{Cl} > \text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{NO}_3$.
- Το νερό και στις δύο περιόδους χαρακτηρίζεται ως πολύ σκληρό λόγω των πετρωμάτων.
- Το υπόγειο νερό ταξινομείται σε δύο τύπους: τον **μεικτό Ca-(Mg)-Cl-(SO₄)** που οφείλεται στη διάλυση των πετρωμάτων και την αλληλεπίδρασή τους με το υπόγειο νερό, και τον **Na-(K)-Cl-(SO₄)** τύπο λόγω της αλληλεπίδρασης του υδροφορέα με το θαλασινό νερό.
- Από τους ιοντικούς λόγους συμπεραίνουμε ότι: στην περιοχή επικρατούν υδροφορείς οφειλιθικών-πυριτικών πετρωμάτων και ότι στη νότια ζώνη έχουμε συνεχή τροφοδοσία νερού.
- Τα κυρίαρχα βαρέα μέταλλα, που απαντώνται σχεδόν σε όλα τα δείγματα κυρίως κατά την ξηρή περίοδο είναι το **μαγγάνιο (Mn)**, ο **μόλυβδος (Pb)** και ο **σίδηρος (Fe)**.
- Οι υψηλές συγκεντρώσεις τους οφείλονται στην παρουσία των **υδροθερμικών εξαλλοιωμένων ηφαιστειακών πετρωμάτων** και των **γεωθερμικών ρευστών** τα οποία συμβάλλουν στον εμπλουτισμό του υπόγειου νερού στα συγκεκριμένα μέταλλα.
- Τα υπόλοιπα μέταλλα (Ni, Cr, Co) απαντώνται κυρίως στην κεντρική περιοχή του **Ρωμανού** και οφείλονται σε **ανθρωπογενείς** δραστηριότητες (βιομηχανικές μονάδες, λιπάσματα, αστικά λύματα, πεδία βολής).
- Συγκρίνοντας τις δύο περιόδους, κατά την ξηρή περίοδο (Οκτώβριος) παρατηρούνται οι υψηλότερες συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων λόγω της πτώσης στάθμης του υπόγειου νερού.
- Τέλος, είναι ορθό να εφαρμοστούν κάποια παρεμβατικά μέτρα ορθολογικής διαχείρισης με ταυτόχρονη προστασία του περιβάλλοντος και της αειφορίας του υδατικού συστήματος, όπως: συστηματική παρακολούθηση της ποσοτικής και ποιοτικής κατάστασης των υπόγειων υδάτων, δημιουργία συστήματος επεξεργασίας λυμάτων και επαναχρησιμοποίηση τους για άρδευση, περιορισμό των αντλήσεων στο παράκτιο τμήμα της περιοχής και τέλος, εφαρμογή ολοκληρωμένης έρευνας για αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Alberto, W.D., del Pilar, D.M., Valeria, A.M., Fabiana, P.S., Cecilia, H.A., de los Angeles, B.M., 2001. Pattern recognition techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality, a case study: Suquia river basin (Cordoba–Argentina). *Water Resour.* 35, 2881–2894.
- Appelo, C. A. J., and Postma, D., 1993. *Geochemistry, groundwater and pollution*. CRC press.
- Armijo, R., Mayer, B., King, G.C.P., Rigo, A., Papanastassiou, D., 1996. Quaternary evolution of the Corinth Rift and its implications for the Late Cenozoic evolution of the Aegean. *Geophysical Journal International* 126, 11–53.
- Bajjali, W., 2006. Recharge mechanism and Hydrochemical evaluation of groundwater in the Nuaimh area, Jordan, using environmental isotope techniques. *Hydrogeol. J.*, 14:180–191.
- Bakis, R., and Tuncan, A., 2011. An investigation of heavy metal and migration through groundwater from the landfill area of Eskisehir in Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 176 (1–4), 87–98.
- Barka, A.A., 1992. The North Anatolian fault zone. *Annales Tectonicae* 6, 164–195.
- Belkhiri, L., Boudoukha, A., Mouni, L., Baouz, T., 2010. Application of multivariate statistical methods and inverse geochemical modeling for characterization of groundwater – a case study: Ain Azel plain (Algeria). *Geoderma* 159, 390–398.
- Bosch, X., and Custodio, E., 1993. Dissolution processes in the freshwater-saltwater mixing zone in the Cala Jostel area (Tarragona). *Proc. Of the XII Salt Water Intrusion Meeting*. Barcelona, 229–244.
- Bouragba, L., Mudry, J., Bouchaou, L., Hsissou, Y., Tagma, T., 2011. Characterization of groundwater in the Souss upstream basin: Hydrochemical and environmental isotopes approaches. *African Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 5(4), 307–315.
- Brun, J-P., Sokoutis, D., 2010. 45 m.y. of Aegean crust and mantle flow driven by trench retreat. *Geology* 38:815–818.
- Chatzipetros, A., Kiratzi, A., Sboras, S., Zouros, N., Pavlides, S., 2012. Active faulting in the north-eastern Aegean Sea Islands. *Tectonophysics* 597–598, 106–122.
- Dassi, L., 2011. Investigation by multivariate analysis of groundwater composition in a multilayer aquifer system from North Africa: a multi-tracer approach. *Appl. Geochem.* 26 (8), 1386–1398.
- Davis, J. C., and Sampson, R. J., 1986. *Statistics and data analysis in geology* (Vol. 646). New York et al.: Wiley.
- Davis, J., 2002. *Statistics and data analysis in geology*. Wiley, New York.
- Davis, S.N., and DeWiest, R.J.M., 1996. *Hydrogeology*. 2nd edition, Wiley, New York, 463.

- de Boorder, H., Spakman, W., White, S.H., Wortel, M.J.R., 1998. Late Cenozoic mineralization, orogenic collapse, and slab detachment in the European Alpine belt. *Earth Plan Sci Let* 164:113–135.
- Delinom, R., Assegaf, A., Abidin, H., Taniguchi, M., Suherman, D., Lubis, R., Yulianto, E., 2008. The contribution of human activities to subsurface environment degradation in Greater Jakarta Area, Indonesia. *Sci Total Environ*.
- Domagalski, J.L., Johnson, H., 2012. Phosphorus and Groundwater: Establishing Links Between Agricultural Use and Transport to Streams. National Water-Quality Assessment Program, Agricultural Chemicals Team (ACT).
- Durov, S. A., 1948. Classification of natural waters and graphical representation of their composition. *Dokl. Akad. Nauk. USSR*. 59(1):87-90.
- Elango, L., and Kannan, R., 2007. Rock-water interaction and its control on chemical composition of groundwater, In: Sarkar, D, Datta, R. and Hannigan, R., Concepts and applications in environmental geochemistry, Elsevier, Italy: 229-243.
- Environmental Protection Agency, 2001. Parameters of Water Quality, Interpretation and Standards, Ireland.
- Fornadel, A. P., Voudouris, P. C., Spry, P. G., Melfos, V., 2012. Mineralogical, stable isotope, and fluid inclusion studies of spatially related porphyry Cu and epithermal Au-Te mineralization, Fakos Peninsula, Limnos Island, Greece. *Mineralogy and Petrology* 105.1-2 (2012): 85-111.
- Fytikas, M., Giuliani, O., Innocenti, F., Manetti, P., Mazzuoli, R., Peccerillo, A., Villari, L., 1980. Neogene volcanism of the northern and central Aegean region. *Ann Geol Pays Hell* 30:106–129.
- Fytikas, M., Innocenti, F., Manetti, P., Mazzuoli, R., Peccerillo, A., Villari, L., 1984. Tertiary to Quaternary evolution of volcanism in the Aegean region. In: Dixon, J.E., Robertson, A.H.F. (Eds.), *Geological Evolution of the Eastern Mediterranean*. Geological Society, London, Special Publications, vol. 17, 687–699.
- Haloi, N., and Sarma, H. P., 2012. Heavy metal contaminations in the groundwater of Brahmaputra flood plain: an assessment of water quality in BARPETA District, Assam (India). *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(10), 6229–6237.
- Innocenti, F., Manetti, P., Mazzouli, R., Pertusati, P., Fytikas, M., Kolios, N., 1994. The geology and geodynamic significance of the Island of Limnos, North Aegean Sea, Greece. *Neues Jahr Geol Paläont* 1994:661–691.
- Jalali, M., 2005. Major Ion Chemistry of Groundwaters in the Bahar Area, Hamadan, Western Iran. *Environmental Geology*, 47(6): 763–772, doi:10.1007/s00254-004-1200-3.
- Jalali, M., 2007. Hydrochemical Identification of Groundwater Resources and Their Changes under the Impacts of Human Activity in the Chah Basin in Western Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 130(1–3): 347–364.
- Khan, T., 2011. Multivariate analysis of hydrochemical data of the groundwater in parts of Karwan – Sengar subbasin, central Ganga basin, India. *Global NEST Journal*, Vol. 13, No3, 229-236.

- Kilias, A., and Mountrakis, D., 1998. Tertiary extension of the Rhodope massif associated with granite emplacement (Northern Greece). *Acta Vulcan* 10:331–337.
- Kim, D.W., Lee, K.H., Lee, D., 2004. On cluster validity index for estimation of the optimal number of fuzzy clusters. *Pattern Recogn.* 37 (10), 2009–2025.
- Kokkalas, S., Xypolias, P., Koukouvelas, I., Doutsos, T., 2006. Postcollisional contractional and extensional deformation in the Aegean region *Geological Society of America Special Papers*, 409:97-123.
- Kontis, E., and Gaganis, P., 2012. Hydrochemical characteristics and groundwater quality in the island of Lesbos, Greece. *Global Nest Journal*, Vol. 14, No 4, 422-430.
- Lalechos, N., 1986. Correlations and observations in molassic sediments in onshore and offshore areas of Northern Greece. *Mine Wealth* 42, 7–34.
- Langguth, H. R., 1966. Die grundwasserverhältnisse im Bereich des Velberter Sattels: Rheinisches Schiefergebirge. *Minist. Ernähr. Landw. Forst. Landes Nord. Westfa.*
- Lloyd, J. A., and Heathcote, J.A., 1985. Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater: An introduction. *Oxford Uni. Press, New York*, 296.
- Locsey, K.L., and Cox, M.E., 2003. Statistical and hydrochemical methods to compare basalt- and basement rock-hosted groundwaters: Atheron Tablelands, northeastern Australia. *Environ. Geol.* 43 (6), 698–713.
- Lopez-Chicano, M., Bouamama, M., Vallejos, A., Pulido, B.A., 2001. Factors which determine the hydrogeochemical behavior of karstic springs: a case study from the Betic Cordilleras, Spain. *Appl. Geochem.* 16 (9–10), 1179–1192.
- Mathes E.C., and Rasmussen C.T., 2006. Combining multivariate statistical analysis with geographic information systems mapping: a tool for delineating groundwater contamination. *Hydrogeology Journal* 14: 1493-1507.
- Maya, A.L., and Loucks, M. D., 1995. Solute and Isotopic Geochemistry and Groundwater Flow in the Central Wasatch Range, Utah. *J. Hydrol.*, 172 (1-4), 31-59.
- McKenzie, D.P., 1972. Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 30, 109–185.
- McKenzie, D.P., 1978. Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt: the Aegean Sea and surrounding regions. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 55, 217–254.
- Melfos, V., Vavelidis, M., Christofides, G., Seidel, E., 2002. Origin and evolution of the Tertiary Maronia porphyry copper-molybdenum deposit, Thrace, Greece. *Mineral Deposit* 37:648–668.
- Mencio A., and Mas-Pla J., 2008. Assessment by multivariate analysis of groundwater-surface water interactions in urbanized Mediterranean streams. *Journal of Hydrology* 252:255-266.
- Monjerezi, M., Vogt, R.D., Aagaard, P., Saka, J.D.K., 2011. Hydro-chemical processes in an area with saline groundwater in lower Shire River Valley, Malawi: an integrated application of hierarchical cluster and principal component analyses. *Appl. Geochem.* 26 (8), 1399–1413.

- Panagopoulos, G., Giannouloupoulos, P., Panagiotaras, D., 2011. Groundwater hydrochemistry of the volcanic aquifers of Limnos Island, Greece, *Advances in the Research of Aquatic Environment*, Vol. 2.
- Panagopoulos, G., Panagiotaras, D., Giannouloupoulos, P., 2013, *Groundwater Quality Assessment of the Limnos Island Volcanic Aquifers, Greece, Water Environment Research*, Vol. 85.
- Papoulis, D., and Tsolis-Katagas, P., 2008. Formation of alteration zones and kaolin genesis, Limnos Island, northeast Aegean sea, Greece. *Clay Minerals* 43, 631-646.
- Pavlidis, S., Mountrakis, D., Kiliass, A., Tranos, M., 1990. The role of strike-slip movements in the extensional area of the northern Aegean (Greece). In: Boccaletti, M., Nur, A. (Eds.), *Active and Recent Strike-slip Tectonics. Annales Tectonicae*, vol. 4, 196–211.
- Pavlidis, S., Tsapanos, T., Zouros, N., Sboras, S., Koravos, G., Chatzipetros, A., 2009. Using active fault data for assessing seismic hazard: a case study from aegean sea, Greece. *XVIIth International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering*, Alexandria, Egypt, Paper 3.5.20.
- Pe-Piper, G., Christofides, G., Eleftheriadis, G., 1998. Lead and neodymium isotopic composition of Tertiary igneous rocks of northern Greece and their regional significance. *Acta Vulcan* 10:255–263.
- Pe-Piper, G., and Piper, D.J.W., 2002. *The igneous rocks of Greece: the anatomy of an Orogen*. Gebrüder Borntraeger, Berlin, 645.
- Pe-Piper, G., Piper, D.J.W., Koukouvelas, I., Dolansky, L.M., Kokkalas, S., 2009. Postorogenic shoshonitic rocks and their origin by melting underplated basalts: the Miocene of Limnos Island, Greece. *Geol Soc Am Bull* 121:39–54.
- Pereira, H.G., Renca, S., Sataiva, J., 2003. A case study on geochemical anomaly identification through principal component analysis supplementary projection. *Appl. Geochem.* 18, 37–44.
- Piper, A. M., 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *American Geophysical Union Transactions*, 25, 914–928.
- Qian G., Gabor G., Gupta R.P., 1994. Principal components selection by the criterion of the minimum mean difference of complexity. *Journal of Multivariate analysis* 49, 55-75.
- Robb, L., 2013. *Introduction to ore-forming processes*. John Wiley & Sons.
- Revelle, R., 1941. Criteria for recognition of seawater in groundwaters, *Trans. Amer. Geophysical Union*, 593-597.
- Roussos, N., 1994. Stratigraphy and palaeogeographical evolution of the Paleogene molassic basins of the N. Greece. *Bulletin of the Geological Society of Greece* 30 (2), 275–294.
- Roussos, N., Katsaounis, A., Tsaila-Monopoli, S., Ioakeim, X., Karadasi, S., Davi, E., 1993. *Geological Map of Limnos Island*. Institute of Geology and Mineral Exploration of Greece, scale 1:50.000.
- Schilling K.E., and Wolter C.F., 2001. Contribution of base flow to non-point source pollution loads in an agricultural watershed. *Ground Water* 39, 49-58.

- Schoeller, H., 1962. Les eaux souterraines. Masson & Cie, Paris, 642.
- Scoullou, M., 1997. Sea pollution. Chemical Oceanography B, 3rd edition. Athens University, 194 (in Greek).
- Smith, IC., and Carson, BL., 1981. Trace metals in the environment. Ann Arbor, MI: Ann Arbor Science Publishers.
- Swan, A.R.H., and Sandilands M., 1995. Introduction to Geological Data Analysis. Blackwell, Oxford.
- Thorntwaite, C. W., Mather, J. R., 1955. The water balance. Centerton: Drexel Institute of Technology, 1955. 104p. Publications in climatology, 8(1).
- Tranos, M., 2009. Faulting of Lemnos Island; a mirror of faulting of the North Aegean Trough (Northern Greece), Tectonophysics 467 (2009), 72–88.
- USGS, 2002. Lead in December 2001, mineral industry survey. Minerals Information Publications Services, Reston, VA.
- Vega M., Pardo R., Barrado E., Deban L., 1998. Assessment of seasonal and polluting effects on the quality of river water by exploratory data analysis. Water Research 32, 3581-3592.
- Vengosh, A., and Keren, R., 1996. Chemical Modifications of Groundwater Contaminated by Recharge of Treated Sewage Effluent. Journal of Contaminant Hydrology, 23(4): 347–360.
- Voudouris, P., and Alfieris, D., 2005. New porphyry Cu±Mo occurrences in the north-eastern Aegean, Greece: Ore mineralogy and epithermal relationships. In Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge, Springer Berlin Heidelberg, Extended Abstracts, 473-476.
- Zamani, A. A., Yaftian, M. R., Parizanganeh, A., 2012. Multivariate statistical assessment of heavy metal pollution sources of groundwater around a lead and zinc plant. Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering, 9.

Ελληνόγλωσση

- Βουδούρης, Κ., 2004. Στατιστική Ανάλυση Υδρογεωλογικών Δεδομένων, Τμήμα Γεωλογίας, ΑΠΘ.
- Βουδούρης, Κ., 2009. Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος: Υπόγεια νερά και περιβάλλον. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
- Διεθνές Πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO/IEC 17025, Εθνικό Σύστημα Διαπίστευσης (Ε.ΣΥ.Δ.), Ν. 3066/2002.
- Καλλέργης, Γ., 2000. Εφαρμοσμένη – Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία, 2^η έκδοση, Τόμος Β, Τ.Ε.Ε., Αθήνα.
- Λαμπίρη, Μ., 2008. Διασπορά μολύβδου στο επιφανειακό έδαφος του άλσους σκοπευτηρίου Καισαριανής, Διπλωματική εργασία, Ε.Κ.Π.Α.
- Μάττας, Χ., 2009. Υδρογεωλογική έρευνα στη λεκάνη του Γαλλικού ποταμού, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

- Μουντράκης, Δ., 2010. Γεωλογία και γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας. Εκδόσεις University Studio Press A.E., Θεσσαλονίκη.
- Παναγόπουλος, Α., Μεταξά, Ε., Παπαδόπουλος, Α., Παπαδόπουλος, Φ., Μπλαδανοπούλου, Σ., 2002. Μελέτη διαχείρισης υδάτινου δυναμικού Δήμου Μούδρου Νήσου Λήμνου – Υπόγεια υδρολογία, στάδιο 3-τεύχος 3. ΕΘΙΑΓΕ, σ. 63, Θεσσαλονίκη.
- Παπαδόπουλος, Α., Παπαδόπουλος, Φ., Παρισόπουλος, Γ., Ναλμπάντης, Γ., Παπαγιαννοπούλου, Α., Σαπουντζάκης, Γ., Παναγόπουλος, Α., Μεταξά, Ε., Μπλαδανοπούλου, Σ., Ψωμά, Π., 2003. Μελέτη διαχείρισης υδάτινου δυναμικού Δήμου Μούδρου Νήσου Λήμνου – Τελική έκθεση. ΕΘΙΑΓΕ, σ. 94, Θεσσαλονίκη.
- Ρουμελιώτη, Π. Μ., 2013. Υδρογεωλογική μελέτη της νήσου Λήμνου με έμφαση στα υδροφόρα συστήματα των ηφαιστειακών πετρωμάτων, Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Πανεπιστήμιο Πάτρας, Τμήμα Γεωλογίας.
- Ρούσσος Ν., και Κατσαούνης Α., 1993. Φύλλο χάρτη Μούδρος. ΙΓΜΕ. 1:50.000. Αθήνα.
- Σούλιος, Γ., 2006. Γενική Υδρογεωλογία, Τέταρτος Τόμος. University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
- Σχέδιο Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Νήσων Αιγαίου, Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015.
- Φ.Ε.Κ 892/11.07.2001, τεύχος Β', «Ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης», ΚΥΑ Υ2/2600/2001.
- Φυτίκας, Μ., και Ανδρίτσος, Ν., 2004. Γεωθερμία. Εκδόσεις Τζιόλα, σ.5, 55-60.

Διαδίκτυο (πρόσβαση 30/9/2015)

<http://el.wikipedia.org>

<http://www.lemnos.gr/>

<http://www.limnos.gov.gr/>

<http://www.limnosgreece.gr/>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας 7: Τα ανώτατα επιτρεπτά όρια για τις παραμέτρους όπως ορίζονται στην υφιστάμενη νομοθεσία για την ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης (Κ.Υ.Α. Υ2/2600/2001)

Παράμετρος	Μονάδα μέτρησης	Ενδεικτικό επίπεδο	Ανώτατο επιτρεπτό όριο (Υ2/2600/2001)
pH		6.5<pH<8.5	6.5<pH<9.5
EC	(μS/cm)	<400	2500
K⁺	mg/L	<10	12
Na⁺	mg/L	<20	200
Ca²⁺	mg/L	<100	-
Mg²⁺	mg/L	<50	-
HCO₃⁻	mg/L	<500	-
Cl⁻	mg/L	<25	250
SO₄²⁻	mg/L	<25	250
NO₃⁻	mg/L	<25	50
NO₂⁻	mg/L	-	0.5
NH₄⁺	mg/L	<0.05	0.5
PO₄³⁻	mg/L	0.5	3
Mn²⁺	μg/L	-	50
Zn²⁺	μg/L	-	3000
Fe²⁺	μg/L	-	200
Cu²⁺	mg/L	<0.1	2
Cd²⁺	μg/L	-	<5
Co²⁺	μg/L	-	0.2
Cr	μg/L	-	50
Ni	μg/L	-	20
Pb	μg/L	-	10
B	mg/L	-	1

