



ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:

ΝΕΡΟ, ΒΙΟΣΦΑΙΡΑ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ

**ΣΥΖΕΥΞΗ ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ  
ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ: Η  
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΗΣ ΒΑ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ**

ΜΑΡΙΑ ΒΛΑΧΟΜΗΤΡΟΥ,

ΓΕΩΛΟΓΟΣ ΕΚΠΑ

ΑΜ.:7114142200011

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Π. ΠΑΠΑΖΩΤΟΣ, ΜΕΤΑΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΟΣ ΕΡΕΥΝΗΤΗΣ ΕΜΠ

**ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2024**

**ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ**

**ΔΙΕΘΝΕΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ**

**ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:**

**«ΝΕΡΟ, ΒΙΟΣΦΑΙΡΑ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ»**

**ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: «ΝΕΡΟ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΛΛΕΙΨΗΣ»**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΣΥΖΕΥΞΗ ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ  
ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ: Η  
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΗΣ ΒΑ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ**

**ΜΑΡΙΑ ΒΛΑΧΟΜΗΤΡΟΥ,**

**ΓΕΩΛΟΓΟΣ ΕΚΠΑ**

**Τριμελής εξεταστική επιτροπή:**

- 1. Δρ. Παναγιώτης Παπαζώτος, επιβλέπων**
- 2. Δρ. Μιχάλης Διακάκης, 1<sup>ο</sup> μέλος επιτροπής**
- 3. Δρ. Βαλασία Ιακωβόγλου, 2<sup>ο</sup> μέλος επιτροπής**

**ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2024**

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Με την περάτωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας στο πλαίσιο του Διϋδρυματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών (ΔΠΜΣ) «Νερό, Βιόσφαιρα και Κλιματική αλλαγή» θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Δρ. Παναγιώτη Παπαζώτο, μεταδιδακτορικό ερευνητή ΕΜΠ για την πολύτιμη βοήθειά του και την καθοδήγησή του όλο αυτό το χρονικό διάστημα. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα υπόλοιπα μέλη της επιτροπής επίβλεψης Δρ. Μιχάλη Διακάκη και Δρ. Βαλασία Ιακωβόγλου για τη συμμετοχή τους καθώς και για το χρόνο που διέθεσαν για τη μελέτη της μεταπτυχιακής μου εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω το σύζυγό μου και τα δύο μου παιδιά για τη στήριξη και την υπομονή τους.

## Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	8
ABSTRACT.....	9
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
1.1 Το νερό.....	10
1.2 Η χημεία του νερού.....	10
1.3 Η σημασία του νερού στην αρχαιότητα.....	10
1.4 Η σημασία του νερού σήμερα.....	11
1.5 Χρήση νερού.....	12
1.6 Ζήτηση νερού και εξάντληση υπογείων νερών .....	14
1.7 Δυνητικά τοξικά στοιχεία .....	14
1.8 Σκοπός κ αντικείμενα της διπλωματικής εργασίας.....	18
2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ .....	20
2.1 Γεωγραφία – Γεωμορφολογία.....	20
2.2 Γεωλογία.....	22
2.3 Τεκτονική.....	27
2.4 Υδρογεωλογία.....	28
2.5 Δημογραφικά περιοχής μελέτης .....	31
2.6 Κλιματολογικά στοιχεία .....	33
2.7 Χρήσεις Γης.....	39
2.8 Άλλες υδρογεωχημικές μελέτες στην περιοχή μελέτης.....	40
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	41
3.1 Συλλογή δεδομένων.....	41
3.2 Στατιστική ανάλυση.....	42
3.3 Γεωπεριβαλλοντικοί δείκτες για την αξιολόγηση της ποιότητας των υπογείων νερών.....	47

3.3.1 Γεωπεριβαλλοντικοί δείκτες για άρδευση .....	48
3.3.1.1 Συντελεστής προσρόφησης νατρίου - Sodium Adsorption Ratio (SAR) ....	48
3.3.1.2 Αναλογία Kelley (KR) .....	49
3.3.1.3 Ποσοστό νατρίου (Na%).....	49
3.3.1.4 Αλατότητα -Potential salinity (PS) .....	50
3.3.1.5 Ποσοστό μαγνησίου- Magnesium hazard (MAR).....	50
3.4.1.6 Υπόλοιπο Ανθρακικού Νατρίου - Residual Sodium Carbonate (RSC).....	50
3.3.1.7 Ποσοστό διαλυτού νατρίου - Soluble sodium percentage (SSP).....	51
3.3.1.8 Ολική σκληρότητα - Total Hardness (TH) .....	51
3.3.1.9 Δείκτης διαπερατότητας- Permeability Index (PI) .....	51
3.3.1.10 Δείκτης ποιότητας αρδευτικού νερού - Irrigation water quality index (IWQI) .....	52
3.3.1.11 Συνολικά διαλυμένα στερεά - Total dissolved solids (TDS) .....	53
3.3.2. Γεωπεριβαλλοντικοί δείκτες για ύδρευση .....	53
3.3.2.1. Δείκτης νιτρορύπανσης -Nitrate pollution index (NPI).....	53
3.3.2.2. Δείκτης Revelle - Revelle Index (RI) .....	54
3.3.2.3. Δείκτης ρύπανσης των υπόγειων υδάτων -Pollution index of groundwater (PIG) .....	54
3.3.2.4. Δείκτης ποιότητας νερού - Water quality index (WQI).....	55
3.3.2.5. Δείκτης ρύπανσης υδάτων-Water pollution index (WPI).....	56
3.3.3. Γεωπεριβαλλοντικοί δείκτες για δυνητικά τοξικά στοιχεία .....	57
3.3.3.1. Βαθμός μόλυνσης - Degree of contamination (Cd) .....	57
3.3.3.2. Δείκτης ρύπανσης από βαρέα μέταλλα - Heavy metal pollution index (HPI) .....	57
3.3.3.3. Δείκτης αξιολόγησης βαρέων μετάλλων - Heavy metal evaluation index (HEI) .....	58
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	59
4.1 Περιγραφικά στατιστικά μεγέθη.....	59

4.2 Γεωπεριβαλλοντικοί δείκτες .....	63
4.2.1 Άρδευση.....	64
4.2.1.1 SAR.....	64
4.2.1.2 KR.....	65
4.2.1.3 Na%.....	66
4.2.1.4 PS .....	67
4.2.1.5. MAR .....	68
4.2.1.6. RSC .....	69
4.2.1.7. SSP.....	70
4.2.1.8 TH .....	71
4.2.1.9 PI.....	72
4.2.1.10 IWQI.....	73
4.2.1.11 TDS .....	74
4.2.2. Ύδρευση.....	75
4.2.2.1 NPI.....	76
4.2.2.2. RI.....	77
4.2.2.3. PIG .....	78
4.2.2.4. WQI.....	79
4.2.2.5. WPI .....	80
4.2.3 Δυνητικά τοξικά στοιχεία .....	81
4.2.3.1 Cd.....	82
4.2.3.2 HEI.....	83
4.2.3.3 HPI .....	84
4.2.4 Ιοντικοί λόγοι.....	85
4.2.4.1 Ca/Mg .....	88
4.2.4.2. Ca/SO <sub>4</sub> .....	89
4.2.4.3 Ca/Na .....	89

4.2.4.3 Cl/NO <sub>3</sub> .....	90
4.2.4.5 Cl/HCO <sub>3</sub> .....	91
4.3 Συντελεστές συσχέτισης .....	92
4.3.1 Κατά Pearson .....	92
4.3.2 Κατά Spearman.....	95
4.4 Πολυκριτηριακή στατιστική ανάλυση .....	98
4.4.1 Παραγοντική ανάλυση (Factor Analysis).....	98
4.4.2 Ιεραρχική ανάλυση κατά συστάδες (Hierarchical Cluster Analysis) .....	101
5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ -ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	104
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	121
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	123
Ελληνική Βιβλιογραφία .....	123
Ξένη Βιβλιογραφία .....	124
Ισότοποι.....	130

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η σημασία του νερού από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα είναι καθοριστική για την εξέλιξη οργανισμών αλλά και των πολιτισμών. Η χρήση του δεν περιορίζεται μόνο για προσωπική ανθρώπινη χρήση αλλά και για βιομηχανικούς, αρδευτικούς, υδρευτικούς σκοπούς, κ.α. Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία με θέμα «Σύζευξη γεωπεριβαλλοντικών δεικτών για την αξιολόγηση της ποιότητας των υπόγειων νερών για διάφορες χρήσεις: Η περίπτωση μελέτης της ΒΑ Πελοποννήσου» έχει σκοπό την αξιολόγηση της ποιότητας των υπογείων νερών της περιοχής της Βόρειας Πελοποννήσου, Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων για διάφορες χρήσεις όπως η άρδευση και η ύδρευση βάσει γεωπεριβαλλοντικών δεικτών και ιοντικών λόγων. Για αυτό τον λόγο αξιοποιήθηκαν δεδομένα χημικών αναλύσεων από 68 δείγματα υπογείου νερού και υπολογίστηκαν δείκτες που αξιολογούν την ποιότητα του νερού ως προς i) την άρδευση (SAR, KR, Na%, PS, MAR, RSC, SSP, TH, PI, IWQI και TDS), ii) την ύδρευση (NPI, RI, PIG, WQI και WPI), iii) το φορτίο των δυνητικά τοξικών στοιχείων (Cd, HEI και HPI) και iv) διάφορους ιοντικούς λόγους ( $Ca^{2+}/Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}/SO_4^{2-}$ ,  $Ca^{2+}/Na^+$ ,  $Cl^-/NO_3^-$  και  $Cl^-/HCO_3^-$ ). Στο πλαίσιο της επεξεργασίας δεδομένων υπολογίστηκαν περιγραφικά στατιστικά μεγέθη, συντελεστές συσχέτισης κατά Pearson/Spearman, παραγοντική ανάλυση και ιεραρχική ανάλυση κατά συστάδες, ενώ κατασκευάστηκε πληθώρα θηκογραμμάτων, και υδρογεωχημικών διαγραμμάτων. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον υπολογισμό των δεικτών έδειξαν πως στην περιοχή μελέτης επικρατούν υπόγεια νερά καλής ποιότητας όσον αφορά τις περιοχές Λουτρακίου και Γερανείων Ορέων, ενώ τα δείγματα της περιοχής του Σχίνου εμφανίζουν νερό χειρότερης ποιότητας συγκριτικά με τις δυο προαναφερθείσες περιοχές για τις διάφορες χρήσεις που εξετάζονται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην περιοχή του Σχίνου καταγράφονται αυξημένες στοιχειακές συγκεντρώσεις  $Cl^-$ ,  $Na^+$ ,  $NO_3^-$ , As, Cr λόγω υφαλμύρισης των υπογείων νερών και ήπιων ανθρωπογενών πιέσεων. Η στατιστική επεξεργασία και ο συνδυασμός των γεωπεριβαλλοντικών δεικτών αποκάλυψε ενδιαφέροντα ευρήματα που σχετίζονται με την εφαρμογή τους για την αξιολόγηση της ποιότητας των υπογείων νερών, καθώς και τη βέλτιστη διαχείριση τους.

**Λέξεις-κλειδιά:** Υπόγεια νερά, πολυκριτηριακή στατιστική ανάλυση, δυνητικά τοξικά στοιχεία, ρύπανση, χρήση νερού, γεωπεριβαλλοντικοί δείκτες.



## ABSTRACT

The importance of water has been crucial for the evolution of both organisms and civilizations, from ancient times to the present. Water is essential not only for personal human use but also for industrial purposes, irrigation, and drinking. This master's thesis, titled "Coupling of Geo-Environmental Indices for the Evaluation of Groundwater Quality for Various Uses: A Case Study of NE Peloponnese," aims to evaluate groundwater quality in the Northern Peloponnese region, specifically Loutraki-Schinos-Geraneia Mountains. This study assesses groundwater suitability for uses such as irrigation and drinking by employing geo-environmental indices and ionic ratios. To achieve this, a total of 68 chemical analyses from groundwater samples were used, and various indices were calculated to evaluate water quality. These indices assess water quality in terms of: i) Irrigation suitability (SAR, KR, Na%, PS, MAR, RSC, SSP, TH, PI, IWQI, and TDS) ii) Drinking suitability (NPI, RI, PIG, WQI, and WPI) iii) Potentially Toxic Element (PTE) loadings (Cd, HEI, and HPI) iv) Various ionic ratios ( $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-/\text{NO}_3^-$ , and  $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ ) This comprehensive analysis ensures a thorough evaluation of groundwater quality for multiple uses. The data processing involved descriptive statistics, Pearson/Spearman correlation coefficients, factor analysis, and hierarchical cluster analysis. Additionally, numerous boxplots and hydrogeochemical diagrams were created. The results from the index calculations revealed that the groundwater samples from the Loutraki area and Geraneia Mountains are of good quality. In contrast, the samples from the Schinos area demonstrated lower quality compared to the other two areas for the various uses examined. This groundwater deterioration is attributed to the elevated concentrations of  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ , As, and Cr in the Schinos area, resulting from groundwater salinization and mild anthropogenic influences. The statistical analysis and the coupling of various geo-environmental indices revealed significant insights for assessing groundwater quality and optimizing groundwater resource management.

**Keywords:** groundwater, multivariate statistical analysis, potentially toxic elements, pollution, water use, geo-environmental indices

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Το νερό

Η Γη είναι ένας πλανήτης που καλύπτεται στο 70% από νερό. Το νερό σε ποτάμια, λίμνες, θάλασσες, παγετώνες, ωκεανούς και υδροφόρους ορίζοντες. Επομένως, το νερό εμφανίζεται στον πλανήτη και με τις τρεις καταστάσεις της ύλης, σε στερεή κατάσταση όσον αφορά το νερό των πάγων, σε υγρή κατάσταση που είναι η πιο συνηθισμένη μορφή του και σε αέρια κατάσταση με τη μορφή υδρατμών.

## 1.2 Η χημεία του νερού

Το νερό αποτελείται από δυο άτομα υδρογόνου και ένα άτομο οξυγόνου. Η χημική του ένωση είναι  $H_2O$  και έχει μοριακό βάρος 18. Οι δεσμοί που αναπτύσσονται μεταξύ των στοιχείων Η και Ο είναι ομοιοπολικοί καθώς υπάρχει αμοιβαία συνεισφορά ηλεκτρονίων και από τα δύο χημικά στοιχεία. Η στερεοχημεία του νερού γύρω από το άτομο οξυγόνου είναι τετραεδρική εξαιτίας του δεσμού υδρογόνου (Chaplin,2001)

## 1.3 Η σημασία του νερού στην αρχαιότητα

Η παρουσία του νερού στη διάρκεια της ιστορίας του ανθρώπου είναι γνωστή και μεγάλης σημασίας. Ξεκινώντας από τα αρχαία χρόνια όπου οι άνθρωποι έφτιαχναν μύθους και μυθικά πλάσματα (ο θεός Ποσειδώνας, ο Νηρέας κ.α) φτιαγμένα από νερό για να δείξουν την περίοπτη θέση που κατείχε στη ζωή τους.

Ο Θαλής ήταν αυτός που πίστευε ότι ο κόσμος είναι συνδυασμός φύσης – φωτιάς-νερού-αέρα -γης. Οι δοξασίες του Ομήρου ήταν αυτές που οδήγησαν στην “Αρχή των όντων το ύδωρ”. Επίσης το νερό χρησιμοποιείται για τελετουργικές χρήσεις για καθαρισμό καθώς και στις γεννήσεις, στους γάμους και στις βαφτίσεις.

Ένας από τους σημαντικούς τομείς που αναπτύχθηκε λόγω της χρήσης του νερού είναι η επιστήμη της μηχανικής και της τεχνολογίας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν:

Α) τα πλυντήρια στις μεταλλευτικές και μεταλλουργικές εγκαταστάσεις (ελικοειδή πλυντήρια Λαυρίου),

Β) τα αρδευτικά και αποξηραντικά έργα στην Κωπαίδα,

Γ) το Ευπαλίνειο όρυγμα στο Πυθαγόρειο της Σάμου,

Δ) ο υδραυλικός τηλέγραφος.

Το νερό λοιπόν κατείχε σημαντική θέση στην αρχαιότητα εκτός των παραπάνω και για πιο καθημερινά πράγματα. Αποτελεί στοιχείο επιβίωσης, είναι σημαντικό για την κάλυψη υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών, για τη χρήση υγιεινής καθώς και για την ιατρικής.

#### **1.4 Η σημασία του νερού σήμερα**

Το νερό είναι ζωτικής σημασίας τόσο για την ευημερία της ανθρωπότητας όσο και του περιβάλλοντος. Πιο συγκεκριμένα:

- Βασική ανάγκη για ζωή

Το νερό είναι κύριο για την επιβίωση όλων των ζωντανών οργανισμών, τόσο για τον άνθρωπο όσο και για τα φυτά, τα ζώα κ.α. Είναι απαραίτητο για τη διατήρηση της ανθρώπινης υγείας ώστε το ανθρώπινο σώμα να λειτουργεί σωστά.

- Υγεία και υγιεινή

Καθώς ο άνθρωπος αποτελείται περίπου από 60% νερό καταλαβαίνουμε πως η πρόσληψη νερού για τον άνθρωπο είναι αναγκαία. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει το πόσιμο νερό να είναι ασφαλές ώστε να αποφευχθούν σοβαρές ασθένειες που ίσως να αποβούν κ θανατηφόρες.

Επιπλέον θα πρέπει να αναφερθεί και η χρήση του νερού για τους βασικούς κανόνες υγιεινής για τον άνθρωπο και όχι μόνο ώστε να μην υπάρχει εξάπλωση μικροβίων και λοιμώξεων (πλύσιμο χεριών, πλύσιμο ρούχων, μπάνιο, καθαριότητα σπιτιού).

- Γεωργία και κτηνοτροφία

Ένα μεγάλο ποσοστό του νερού που χρησιμοποιείται σε παγκόσμια κλίμακα είναι για τη γεωργία και την κτηνοτροφία καθώς είναι απαραίτητο για την άρδευση των καλλιεργειών και την εκτροφή ζώων.

- Περιβάλλον και ενέργεια

Ποτάμια, λίμνες και υδροβιότοποι αποτελούνται από πολλά και μοναδικά είδη ζωής που τα καθιστούν σημαντικά για τη βιοποικιλότητα. Η διατήρηση της υγείας αυτών των οικοσυστημάτων είναι απαραίτητη για την καλύτερη ισορροπία της βιοποικιλότητας.

Σημαντική είναι και η χρήση του νερού στην παραγωγή ενέργειας, όπως στις υδροηλεκτρικές μονάδες καθώς και στις θερμοηλεκτρικές μονάδες για την ψύξη.

- Κλιματική Αλλαγή

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί από τους σημαντικότερους παράγοντες σήμερα καθώς επηρεάζει τον κύκλο του νερού και προκαλεί αλλαγές στο κλίμα και κατ' επέκταση τη διαθεσιμότητα σε πόσιμο και καθαρό νερό σε παγκόσμια κλίμακα.

- Οικονομική Ανάπτυξη και Πολιτισμός

Η διαχείριση των υδάτινων πόρων είναι σημαντική για την οικονομική ανάπτυξη καθώς και για την κοινωνική και πολιτική σταθερότητα της χώρας. Οι χώρες που έχουν άμεση πρόσβαση σε άφθονο, καθαρό και πόσιμο νερό ευνοούνται με οικονομική ανάπτυξη και ευημερία των πληθυσμών τους. Σε αντίθεση με τις περιοχές όπου η πρόσβαση σε νερό είναι ελλιπής ή μερική μπορεί να προκαλέσει εντάσεις μεταξύ λαών και πληθυσμών.

## 1.5 Χρήση νερού

Η χρήση νερού δεν περιορίζεται μόνο στην προσωπική ανθρώπινη χρήση αλλά ένα ποσοστό εκμεταλλεύεται από τη βιομηχανία (περίπου το 19% της παγκόσμιας κατανάλωσης νερού), τη γεωργία (περίπου το 69%), ενώ περίπου 12% από δημοτικές χρήσεις (FAO's) (Εικόνα 1).

Ένας παράγοντας που μπορεί να αλλάξει τα παραπάνω ποσοστά είναι η ανάπτυξη της χώρας. Σε χώρες με έντονη βιομηχανική δραστηριότητας, όπως η Αγγλία και η Γερμανία, ένα μεγάλο ποσοστό του διαθέσιμου νερού διοχετεύεται στη βιομηχανία, ενώ σε χώρες που υπάρχουν έντονες γεωργικές δραστηριότητες το περισσότερο νερό διοχετεύεται στην άρδευση (Εικόνα 2).

Πιο συγκεκριμένα οι χρήσεις του νερού είναι οι ακόλουθες:

A) Γεωργία και κτηνοτροφία: Η άρδευση για το πότισμα των καλλιεργειών καταναλώνει ένα μεγάλο ποσοστό του νερού καθώς η αγροτική παραγωγή έχει αυξηθεί στην Ελλάδα, Το 1929 αρδεύονταν 1.78 εκατομμύρια στρέμματα ενώ σήμερα υπολογίζεται η αρδευόμενη έκταση σε 12 εκατομμύρια στρέμματα που αντιστοιχούν στο 32% του συνόλου των καλλιεργούμενων εκτάσεων.

Β) Υδροηλεκτρική ενέργεια: Καλύπτει το 1/5 της παραγόμενης ενέργειας παγκοσμίως και βασίζεται στο νερό, μια ανανεώσιμη πηγή, και συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Τα μικρά έργα φαίνεται να καλύπτουν καλύτερα τις ενεργειακές ανάγκες, χωρίς να προκαλούν οικολογικά προβλήματα.

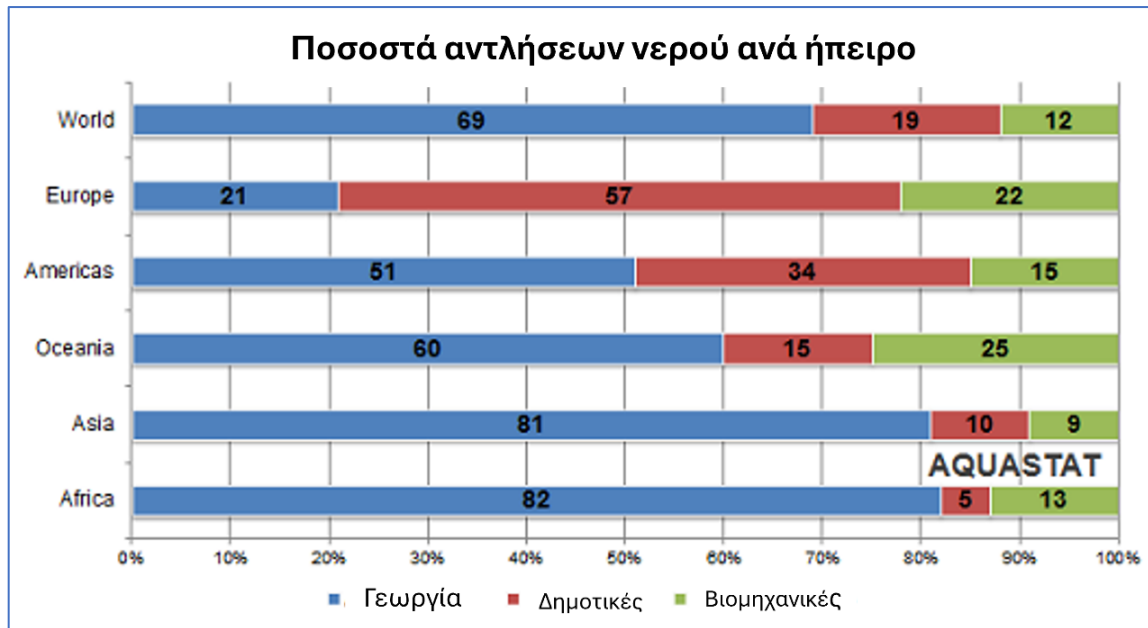
Γ) Βιομηχανία: Κάθε προϊόν που κατασκευάζεται χρησιμοποιεί νερό κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας. Η βιομηχανική χρήση νερού περιλαμβάνει το νερό που χρησιμοποιείται για σκοπούς όπως η κατασκευή, η επεξεργασία, το πλύσιμο, η αραίωση, η ψύξη ή για ανάγκες υγιεινής εντός της μονάδας παραγωγής. Ορισμένες βιομηχανίες που παράγουν προϊόντα όπως τρόφιμα, χαρτί, χημικά ή διυλισμένο πετρέλαιο χρησιμοποιούν μεγάλες ποσότητες νερού.

Δ) Οικιακή Χρήση: Η κατανάλωση νερού για τα νοικοκυριά αφορά τη χρήση νερού σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους σε κατοικίες όπως πλύσιμο, μαγείρεμα, ντους, πλύσιμο ρούχων, τουαλέτα, πότισμα του κήπου και η συντήρηση των πισινών (Abu-Bakar, et.al, 2021).

Ε) Τουρισμός: Αποτελεί έναν τομέα σημαντικό και κερδοφόρο για τη χώρα αλλά ταυτόχρονα απαιτεί και σημαντική ποσότητα νερού. Χρησιμοποιείται στα ξενοδοχεία, στις πισίνες, στην καθαριότητα, στους κήπους και φυσικά για την προσωπική υγιεινή των τουριστών.



Εικόνα 1: Διάγραμμα κατανομής με το παγκόσμιο άθροισμα αντλήσεων νερού, (www.fao.org)



*Εικόνα 2: Διάγραμμα με τα ποσοστά αντλήσεων ανά ήπειρο (www.fao.org)*

### 1.6 Ζήτηση νερού και εξάντληση υπογείων νερών

Η αύξηση του πληθυσμού, η συνεχόμενη επέκταση των γεωργικών εκτάσεων σε συνδυασμό με την ανάπτυξη της οικονομίας οδηγούν σε αύξηση της ζήτησης του νερού (Bierkens et. al. 2019). Συνεπώς, σε περιπτώσεις που η ζήτηση δεν μπορεί να καλυφθεί από τα επιφανειακά νερά (ποτάμια, λίμνες, ταμιευτήρες) τότε τα υπόγεια νερά χρησιμοποιούνται ως πηγές κάλυψης της ζήτησης. Υπάρχουν περιπτώσεις που η υπερεκμετάλλευση οδηγεί σε εξάντληση και των υπόγειων νερών. Ως εκ τούτου, αν η άντληση των υπόγειων νερών ξεπερνά τη φυσική αναπλήρωσή τους για μεγάλες περιοχές και για μεγάλο χρονικό διάστημα, τότε το ισοζύγιο των υπογείων νερών είναι ελλειμματικό και οδηγείται σε μείωση της στάθμης τους και λειψυδρία (Gleeson et al., 2010). Έτσι, η μείωση της στάθμης των υπόγειων νερών έχει καταστροφικές συνέπειες τόσο στο περιβάλλον, στα διάφορα οικοσυστήματα και στους υγροτόπους που τροφοδοτούνται με υπόγεια νερά. Συχνή συνέπεια της εξάντλησης των υπόγειων νερών είναι η καθίζηση του εδάφους λόγω της αποστράγγισης των υδροφόρων στρωμάτων, η εισχώρηση θαλασσινού νερού στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα με αποτέλεσμα της υποβάθμισης της ποιότητας του γλυκού νερού, αλλά και της μειωμένης παραγωγικότητας των καλλιεργειών (Wada et al. 2010).

### 1.7 Δυνητικά τοξικά στοιχεία

Τα δυνητικά τοξικά στοιχεία (διεθνής όρος «Potentially Toxic Elements – PTEs») αποτελούν μια ομάδα μετάλλων, μεταλλοειδών και ιχνοστοιχείων που είναι επικίνδυνα

για τον άνθρωπο λόγω της μακροζωίας τους, της τοξικότητάς τους και της ικανότητάς τους να συσσωρεύονται στο βιοτικό περιβάλλον ακόμη και όταν βρίσκονται σε μικρές συγκεντρώσεις όπως στα υδατικά διαλύματα και στα εδάφη (Nieder, R., & Benbi, 2023). Παρόλα αυτά υπάρχουν δυνητικά τοξικά στοιχεία που είναι απαραίτητα σε μικρές ποσότητες για τη φυσιολογική λειτουργία του οργανισμού των φυτών, των ζώων και των ανθρώπων.

Στην αρχή της εμφάνισής τους τα δυνητικά τοξικά στοιχεία αναφερόντουσαν στη βιβλιογραφία ως «βαρέα μέταλλα», ο οποίος είναι ένας όρος όμως ιδιαίτερα προβληματικός (Pourret and Hursthouse 2019, Papazotos, 2021) και γι'αυτό τα τελευταία χρόνια η επιστημονική κοινότητα έχει προτείνει την αντικατάσταση του όρου αυτού από τον πιο κατάλληλο και σαφή όρο των «δυνητικά τοξικών στοιχείων» (Papazotos, 2021).

Τα δυνητικά τοξικά στοιχεία με βάση τη σημασία που έχουν για την υγεία ταξινομούνται σε τέσσερις ομάδες (Bansal et al. 2020) :

- Τα απαραίτητα: Cu, Zn, Co, Cr, Mn και Fe, (μέταλλα τα οποία πέρα από το επιτρεπόμενο όριο γίνονται τοξικά),
- μη απαραίτητα: Ba, Al, Li,
- λιγότερο τοξικά: Sn
- εξαιρετικά τοξικά: Hg, Cd, Pb, As (Ali et al. 2019, Zwolak et al. 2019, Jiao et al. 2018, Nizami et al. 2018, Paul 2017).

Τα πιο σημαντικά δυνητικά τοξικά στοιχεία σύμφωνα με τις υπάρχουσες δημοσιεύσεις είναι τα As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb και Zn. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι τα τελευταία χρόνια η μελέτη των δυνητικά τοξικών στοιχείων έχει αυξηθεί καθώς εμφανίζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον τόσο στην ανάπτυξη τεχνολογικών ευρημάτων όσο και στην ιατρική. Επιπλέον, χώρες όπως η Ιαπωνία ή κάποιες χώρες της Ευρώπης χρησιμοποιούν τα δυνητικά τοξικά στοιχεία με τη μορφή της σκωρίας χάλυβα για τροποποίηση του εδάφους.

Όπως αναφέρθηκε υπάρχουν διάφορα τοξικά στοιχεία στο περιβάλλον. Κάποια από αυτά μπορούν να ρυθμίσουν τις ενζυμικές δραστηριότητες των ισοενζύμων CYP450.

Κάποια από αυτά είναι και καρκινογόνα, όπως το αρσενικό και το χρώμιο. Ο μόλυβδος και ο υδράργυρος είναι εμβρυοπαθητικά.

Η μόλυνση των εδαφών και των καλλιεργειών από δυνητικά τοξικά στοιχεία (PTEs) επηρεάζει την ποιότητα των τροφίμων και αποτελεί απειλή για την ανθρώπινη υγεία (Adibe et.al,2024).

Για κάθε δυνητικά τοξικό στοιχείο, έχει καθοριστεί ένα όριο Εβδομαδιαίας Πρόσληψης (PTWI). Έχουν ήδη θεσπιστεί αρκετοί κανονισμοί παγκοσμίως για τη χρήση τους στα καλλυντικά και τα φαρμακευτικά προϊόντα. Επιπλέον, υπάρχουν νομικά πλαίσια σε εθνικό και σε ευρωπαϊκό επίπεδο που έχουν σχεδιαστεί για να ρυθμίζουν την ποιότητα των φυτικών προϊόντων λόγω παρουσίας των δυνητικών τοξικών στοιχείων (Sarma et al., 2011). Πριν από το 1988, 14 κράτη μέλη του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (ΠΟΥ) διέθεταν κανονισμούς σχετικά με τα φυτικά φάρμακα, ενώ το 2003 αυτό είχε αυξηθεί σε 53 κράτη μέλη (37%). Υπήρχαν κράτη που δεν είχαν νόμους, το 49% δήλωσε ότι τέτοιοι κανονισμοί βρίσκονταν στο στάδιο της ανάπτυξης (WHO, 1998)

Αρκετές χώρες, όπως ο Καναδάς, η Κίνα, η Μαλαισία, η Σιγκαπούρη και η Ταϊλάνδη, έχουν αναπτύξει τις δικές τους εθνικές κατευθυντήριες γραμμές. Ο ΠΟΥ (1998) συνιστά μέγιστα επιτρεπτά επίπεδα για το Cd και το Pb που ανέρχονται σε 0,3 και 10 mg/kg, αντίστοιχα.

Αν και οι περισσότεροι από τους ρύπους των δυνητικά τοξικών στοιχείων είναι επιβλαβείς για την ανθρώπινη υγεία, ορισμένα από αυτά είναι απαραίτητα για την ανθρώπινη υγεία, όπως ο χαλκός και ο ψευδάργυρος καθώς δεν συσσωρεύονται στους ιστούς. Η περιεκτικότητα σε δυνητικά τοξικά στοιχεία υπόκειται επίσης σε περιβαλλοντικές και γεωγραφικές διακυμάνσεις. Αυτά τα μέταλλα είναι απαραίτητα για διάφορες βιοχημικές και φυσιολογικές λειτουργίες σε ζωντανούς οργανισμούς όταν βρίσκονται σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις, ωστόσο γίνονται επιβλαβή όταν υπερβαίνουν ορισμένες συγκεντρώσεις κατωφλίου (Dahiya, V.,2022). Επίσης, η μόλυνση από δυνητικά τοξικά στοιχεία ποικίλλει μεταξύ των φυτικών ειδών. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Φαρμακοποιία, υπάρχουν ορισμένα όρια για ορισμένα φαρμακευτικά φυτά που είναι γνωστό ότι συσσωρεύουν δυνητικά τοξικά στοιχεία (Kosalec et al., 2009). Ο μόλυβδος βρέθηκε να είναι ουσιαστικά αδιάλυτος στο νερό,



αν και η συγκέντρωσή του σε φυτικά υλικά ήταν υψηλότερη από αυτή του αρσενικού και του καδμίου.

Τα περισσότερα δυνητικά τοξικά στοιχεία δεν μπορούν να αποικοδομηθούν και παραμένουν στα εδάφη για μεγάλο χρονικό διάστημα. Έτσι, αποτελούν απειλή για το έδαφος, μπορούν να μεταφερθούν στα γύρω περιβάλλοντα μέσω του νερού και της ατμόσφαιρας και κατά συνέπεια να επηρεάσει την οικολογική ισορροπία. Η συσσώρευση δυνητικά τοξικών στοιχείων στα εδάφη ενέχει σοβαρούς κινδύνους για την υγεία όλων των οργανισμών και μπορούν να προκαλέσουν διάφορες ασθένειες. Στα φυσικά εδάφη, τα δυνητικά τοξικά στοιχεία συσσωρεύονται λόγω της διάβρωσης των πετρωμάτων και των μεταλλευμάτων. Επιπλέον, σημαντική συσσώρευση δυνητικά τοξικών στοιχείων στα εδάφη μπορεί να συμβεί από βιομηχανικά προϊόντα, φυτοφάρμακα και χρώματα, αστικά και βιομηχανικά απόβλητα, λιπάσματα και εξορύξεις. Για όλους τους παραπάνω λόγους έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι αποκατάστασης που χρησιμοποιούν μηχανικές, φυσικοχημικές ή βιολογικές τεχνολογίες. Ο κύριος στόχος για τους ερευνητές και τους περιβαλλοντολόγους είναι να σταματήσουν την είσοδο μετάλλων και μεταλλοειδών στην τροφική αλυσίδα για την προστασία της ανθρώπινης υγείας. Η μόλυνση του εδάφους με δυνητικά τοξικά στοιχεία έχει να κάνει με τη συσσωρευμένη εναπόθεση δυνητικά τοξικών στοιχείων λόγω ανθρωπογενών δραστηριοτήτων. Στο έδαφος οι υψηλότερες συγκεντρώσεις δυνητικά τοξικών στοιχείων αποτελούνται από κάδμιο, μόλυβδο, ψευδάργυρο, χαλκό, νικέλιο, βανάδιο και αρσενικό προερχόμενα από τη συστηματική χρήση λιπασμάτων. Τα δυνητικά τοξικά στοιχεία υψηλής κινητικότητας μπορούν εύκολα να εμπλουτίσουν την τροφική αλυσίδα και είναι εξαιρετικά επικίνδυνα για το περιβάλλον. Η αποκατάσταση του εδάφους γίνεται πολύ δύσκολη όταν ρυπαίνεται με δυνητικά τοξικά στοιχεία. Ο καθαρισμός του εδάφους είναι πιο περίπλοκος από τον καθαρισμό του αέρα και του νερού καθώς σχηματίζουν σύμπλοκα και δεσμούς με σωματίδια του αργίλου οι οποίοι διασπώνται δύσκολα. Ωστόσο, η μόλυνση του εδάφους θεωρείται σημαντικό πρόβλημα και δίνεται μεγάλη προσοχή στην αποκατάστασή της και στη δημόσια υγεία. Η εφαρμογή νανοϋλικών για την απομάκρυνση των ρύπων από το νερό έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας καθώς και η νανοτεχνολογία και η βιοστρατηγική, για τις οποίες υπάρχει ένας αριθμός ανασκοπήσεων που εστιάζουν σε συμβατικές μεθόδους, μεταβατικά νανοσωματίδια μετάλλου/οξειδίου μετάλλου, νανοσωλήνες άνθρακα, κ.λπ. (Lu, F., & Astruc, D. 2018)

## 1.8 Σκοπός κ αντικείμενα της διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση της ποιότητας των υπογείων νερών της περιοχής της Βόρειας Πελοποννήσου, Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων για διάφορες χρήσεις βάσει γεωπεριβαλλοντικών δεικτών και ιοντικών λόγων. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι το γνωστικό αντικείμενο της εργασίας σχετίζεται αμιγώς με την αξιολόγηση της ποιότητας των νερών και εμπίπτει στα επιστημονικά πεδία της περιβαλλοντικής γεωχημείας, της υδρογεωλογίας και της διαχείρισης υπογείων υδατικών πόρων.

Τα αντικείμενα της διπλωματικής εργασίας είναι: i) ο υπολογισμός δεικτών ποιότητας αρδευτικού νερού, ii) ο υπολογισμός δεικτών ποιότητας πόσιμου νερού, iii) ο υπολογισμός δεικτών που χρησιμοποιούν δυνητικά τοξικά στοιχεία, iv) η συγκριτική αξιολόγηση όλων των παραπάνω δεικτών για διάφορες χρήσεις νερού σε τρεις διαφορετικές υπο-περιοχές μελέτης και v) η συνδυαστική αξιολόγηση γεωπεριβαλλοντικών δεικτών για την ολιστική, ικανοποιητική και ασφαλή χρήση του νερού. Η σημαντικότητα της παρούσας εργασίας σχετίζεται με την αποτύπωση της καταλληλότητας του νερού με τη χρήση χημικών αναλύσεων και τον επακόλουθο υπολογισμό γεωπεριβαλλοντικών δεικτών, οι οποίοι αξιολογούν με τη χρήση μαθηματικών τύπων την καταλληλότητά του για διάφορες χρήσεις στην περιοχή της Βόρειας Πελοποννήσου, όπου η χρήση του πραγματοποιείται για διάφορους σκοπούς.

Θα πρέπει να τονισθεί η πρωτοτυπία της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας σχετίζεται με τον υπολογισμό των γεωπεριβαλλοντικών δεικτών, καθώς αποτελεί την πρώτη εργασία που υπολογίζει δείκτες καταλληλότητας νερού στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης και συνδυάζει γεωπεριβαλλοντικούς δείκτες για να αξιολογήσει σε βάθος τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του υπογείου νερού. Επιπροσθέτως, αποτελεί μια από τις πρώτες εργασίες που σχετίζονται με τη χρήση αρδευτικού και υδρευτικού νερού στην Ελλάδα βάσει δεδομένων φυσικοχημικών και χημικών παραμέτρων των δειγμάτων που έχουν συλλεχθεί από τα υπόγεια υδροφόρα συστήματα της περιοχής Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων (Papazotos et al. 2020).

Η διάρθρωση της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας αποτελείται από τα εξής έξι κεφάλαια:

Το **πρώτο κεφάλαιο** ασχολείται με την έννοια του νερού γενικότερα και τις χρήσεις του από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα, για τη ζήτηση του καθώς και την άντλησή του

από τα υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες. Επίσης πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική έρευνα για τα δυνητικά τοξικά στοιχεία, την παρουσία τους στο υδάτινο περιβάλλον και τις επιπτώσεις τους στην ανθρώπινη υγεία και γενικά στο οικοσύστημα.

Το **δεύτερο κεφάλαιο** αναφέρεται στην περιοχή μελέτης Λουτρακίου – Σχίνου – Γερανείων Ορέων και περιγράφονται η Γεωγραφία – Γεωμορφολογία, η Γεωλογία, η Τεκτονική, η Υδρογεωλογία, τα δημογραφικά στοιχεία και οι χρήσεις γης της Βόρειας Πελοποννήσου. Επίσης παρουσιάζονται κάποιες άλλες υδρογεωχημικές μελέτες που έλαβαν μέρος στην περιοχή και συντέλεσαν για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Το **τρίτο κεφάλαιο** σχετίζεται με τη συλλογή των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των γεωπεριβαλλοντικών δεικτών και αναπτύσσεται το μεθοδολογικό πλαίσιο

Το **τέταρτο κεφάλαιο** περιλαμβάνει την ανάλυση των αποτελεσμάτων στατιστικής επεξεργασίας και του υπολογισμού των γεωπεριβαλλοντικών δεικτών.

Το **πέμπτο κεφάλαιο** περιέχει στοιχεία ερμηνείας και συζήτησης των αποτελεσμάτων.

Το **έκτο κεφάλαιο** περιλαμβάνει τα τελικά συμπεράσματα της μεταπτυχιακής εργασίας και προτάσεις για μελλοντική έρευνας.

Η εργασία ολοκληρώνεται με την παράθεση εκτενών βιβλιογραφικών αναφορών που χρησιμοποιήθηκαν για την περάτωσή της

## 2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

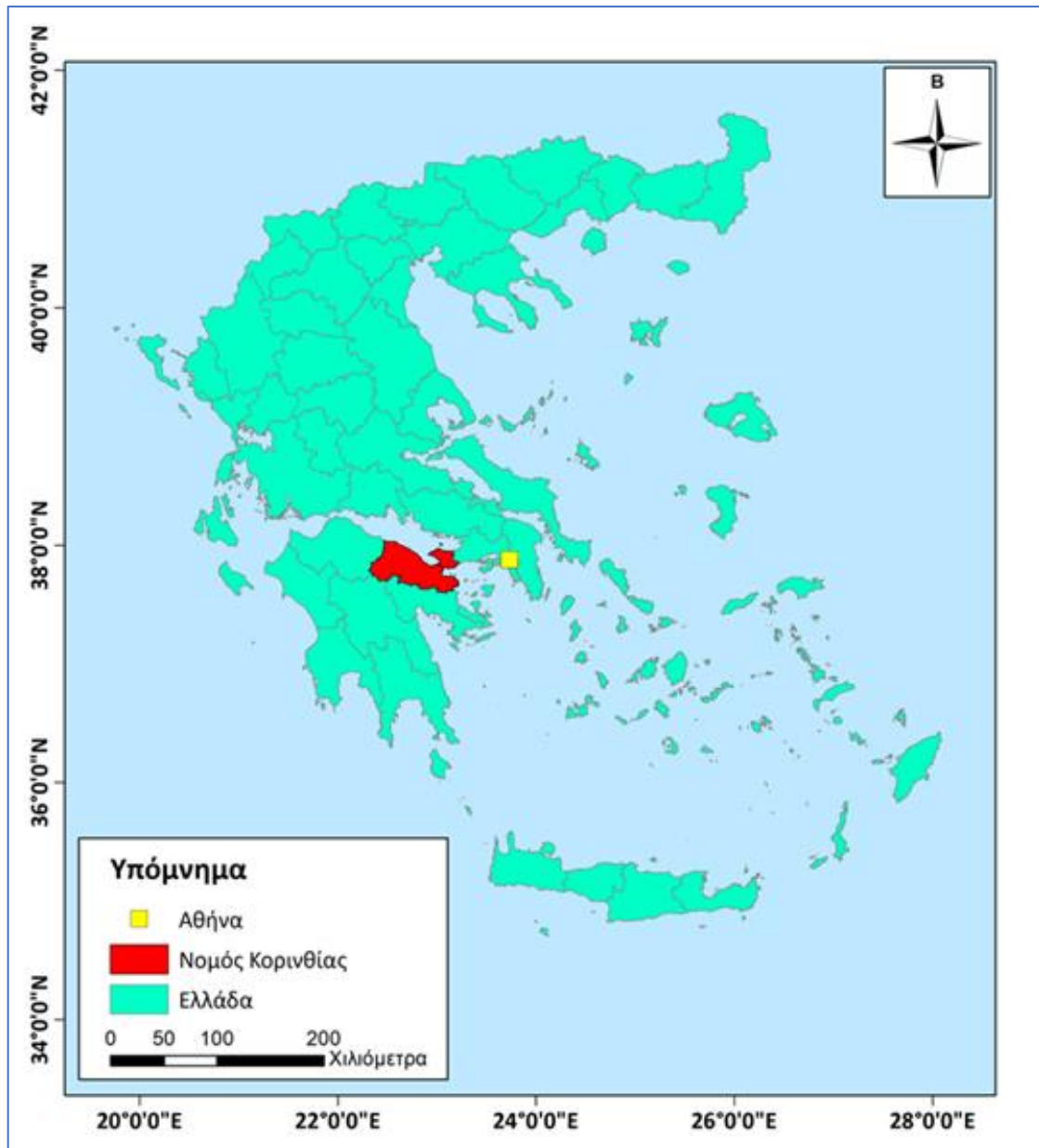
### 2.1 Γεωγραφία – Γεωμορφολογία

Η περιοχή του Λουτρακίου – Σχίνου – Γερανείων Ορέων βρίσκεται στο νομό Κορινθίας (Εικόνα 3), ο οποίος αποτελείται από έξι δήμους. Η πόλη του Λουτρακίου βρίσκεται στο ανατολικό άκρο του Κορινθιακού Κόλπου, καταλαμβάνει τμήμα και του Ισθμού της Κορίνθου, και καλύπτει έκταση περίπου 53,27km<sup>2</sup>, βρέχεται από το Σαρωνικό Κόλπο από τα ανατολικά-νοτιοανατολικά και απέχει περίπου 84 km από την Αθήνα και 4km από την Κόρινθο. Ο οικισμός του Σχίνου βρίσκεται στο βορειοανατολικό τμήμα της χερσονήσου Περαχώρας, στην Πελοπόννησο με έκταση 22,4 km<sup>2</sup>. βρίσκεται βόρεια των Γερανείων Ορέων στον κόλπο των Αλκυονίδων και απέχει περίπου 90 km από την Αθήνα. Ανάμεσα στην πόλη του Λουτρακίου και τον οικισμό του Σχίνου βρίσκονται τα Γεράνεια Όρη.

Η περιοχή με βάση το παγκόσμιο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς του 1984 (WGS'84) βρίσκεται σε:

- γεωγραφικό πλάτος 37° 56'00" και 38° 04'00"B και
- γεωγραφικό μήκος 22° 57'00" και 23° 08'00"A,

Η περιοχή υπάγεται στην κοινότητα Πισσίων, στη Δημοτική ενότητα Λουτρακίου – Περαχώρας, στον δήμο Λουτρακίου – Αγίων Θεοδώρων της περιφερειακής ενότητας Κορινθίας της Περιφέρειας Πελοποννήσου όπως διαμορφώθηκε η διοικητική διαίρεση της Ελλάδας με βάση τον «Καλλικράτη».



*Εικόνα 3: Η θέση της περιοχής Λουτρακίου – Σχίνου – Γερανείων Ορέων στον χάρτη της Ελλάδας (Παπαζώτος, 2020).*

Όσον αφορά τη γεωμορφολογία της περιοχής μελέτης χαρακτηρίζεται από έντονο και ποικιλόμορφο ανάγλυφο, με μεγάλες μορφολογικές κλίσεις που συνεπάγονται τις έντονες τεκτονικές διεργασίες που υφίσταται η περιοχή και της έχουν προσδώσει τη σημερινή μορφή της. Πρέπει να αναφερθεί και η απότομη μετάβαση από το ορεινό ανάγλυφο των Γερανείων προς το πεδινό του Λουτρακίου και του Σχίνου. Η τελευταία περιοχή βέβαια έχει υποστεί θαλάσσια διάβρωση και απόθεση δημιουργώντας παράκτιες γεωμορφές. Επίσης, κατά μήκος της ακτογραμμής υπάρχουν κατασκευές για



Οι σχηματισμοί αυτοί μπορούν να ταξινομηθούν σε :

- διαπερατούς (ασβεστόλιθος, τεταρτοταγή συσσωματώματα και αλλουβιακές αποθέσεις),
- μερικώς διαπερατούς (μαρμαρώδεις ψαμμίτες και σπασμένους οφιόλιθους)
- αδιαπέραστους (άργιλος και μάργα).

Επομένως οι ορεινές και λοφώδεις περιοχές αποτελούνται από πετρώματα του αλπικού κύκλου και οι πεδινές και παραθαλάσσιες περιοχές των λεκανών Λουτρακίου και Σχίνου καλύπτονται από μεταλικά ιζήματα πράγμα που μαρτυράει την πολυπλοκότητά της περιοχής (Μπορνόβας κ.α., 1970-1980a, Μπορνόβας κ.α., 1970-1980b, Δημητρόπουλος, 1989, Καραμπίνης κ.α., 1997, Λέκκας, 2000).

Συνεπώς οι γεωλογικοί σχηματισμοί που απαντώνται στην περιοχή μελέτης ξεκινώντας από τον παλαιότερο και προχωρώντας στον νεότερο είναι οι ανθρακικοί σχηματισμοί, οι σχιστοκερατόλιθοι, οι οφιόλιθοι, ο βοιωτικός φλύσχης και οι μεταλικοί σχηματισμοί.

Πιο συγκεκριμένα οι ανθρακικοί σχηματισμοί είναι νηριτικοί ηλικίας Τριαδικού – Ανώτερου Ιουρασικού και αποτελούνται από λευκούς – λευκότεφρους ή τεφρούς ασβεστόλιθους. Στα κατώτερα μέλη εμφανίζονται άστρωτοι ή παχυστρωματώδεις και στη συνέχεια μεταβαίνουν σε πλακώδεις ασβεστόλιθους στα ανώτερα μέλη. Πρόκειται για μια ακολουθία έντονα τεκτονισμένη και σε κάποιες θέσεις έντονα κατακερματισμένη και μετρίως έως εντόνως καρστικοποιημένη. Επίσης υπάρχει η δημιουργία μικρού πάχους εδαφικού μανδύα αποσάθρωσης που δείχνει τον μεγάλο βαθμό αποσάθρωσης.

Στη συνέχεια στη βάση του οφιολιθικού συμπλέγματος συναντώνται οι σχιστοκερατόλιθοι ηλικίας Ανώτερο Κρητιδικό και καταλαμβάνει μικρή έκταση στο ΒΔ τμήμα της λεκάνης του Λουτρακίου. Αποτελείται από αργιλικούς σχιστόλιθους σε εναλλαγές με πλακώδεις ραδιολαρίτες και ασβεστολίθους. Το μεγαλύτερο κομμάτι καλύπτεται από μεταλικούς σχηματισμούς (Νεογενείς και Τεταρτογενείς αποθέσεις) (Μπορνόβας κ.α., 1971, Γαϊτανάκης κ.α., 1985). Ακολουθούν οι οφιόλιθοι με πάχος καλύμματος στην περιοχή του Λουτρακίου περίπου 100 m, όπου σε κάποιες περιπτώσεις εμφανίζονται εξαλλοιωμένοι και αποτελούνται από περιδοτίτες και σερπεντινίτες με περιορισμένης έκτασης και σημασίας μεταταλλοφορία λευκόλιθου και καλύπτονται σε ένα μεγάλο τμήμα από Νεογενείς και Τεταρτογενείς γεωλογικούς

σχηματισμούς. Στη βάση του συμπλέγματος υπάρχουν σχιστοκερατόλιθοι, που αποτελούνται από αργιλικούς σχιστόλιθους σε εναλλαγές με ραδιολαρίτες και ασβεστόλιθους.

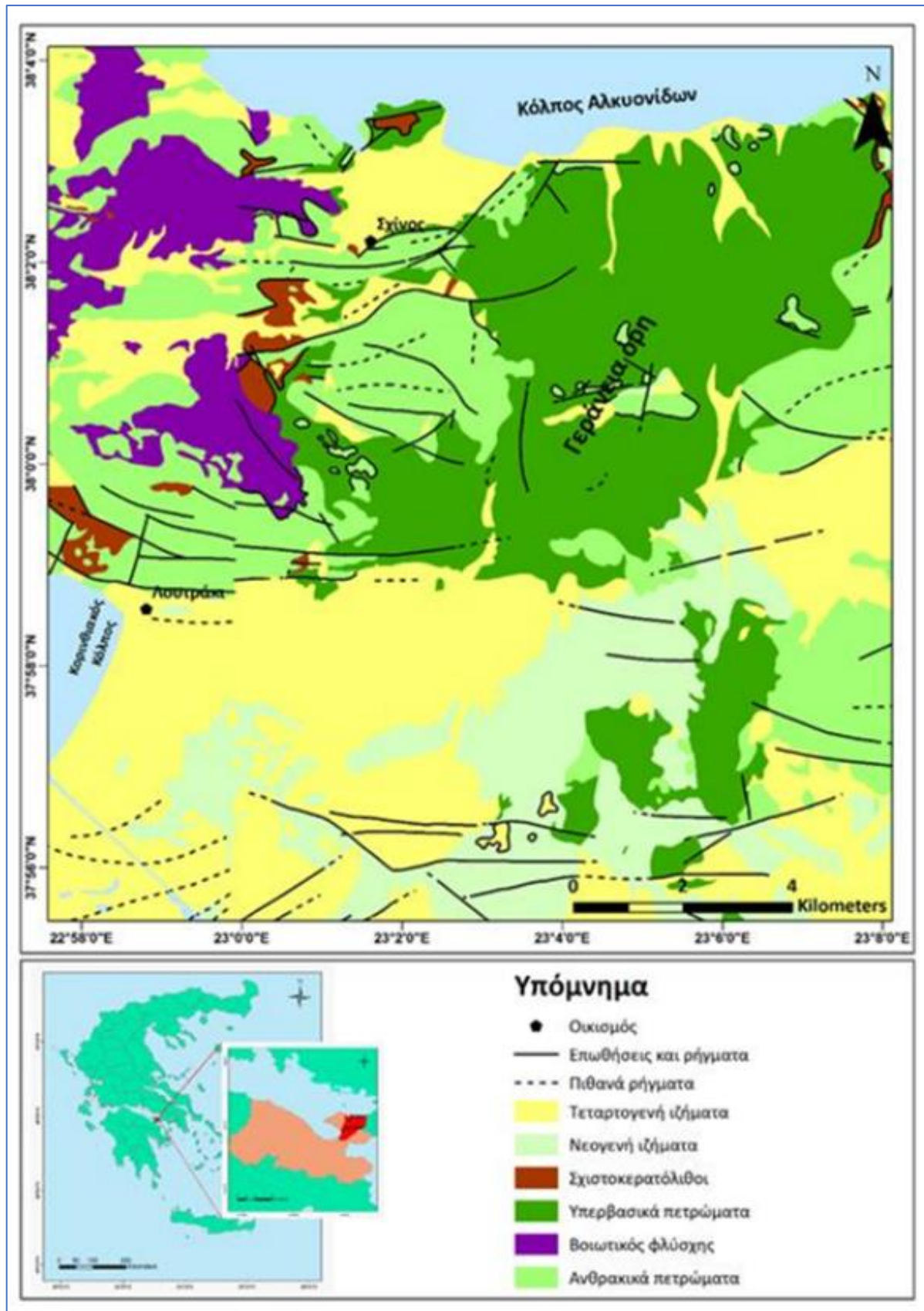
Στη συνέχεια συναντάται ο βοιωτικός φλύσχος. Πρόκειται για έναν έντονα τεκτονισμένο κλαστικό σχηματισμό, ηλικίας Ανώτερου Ιουρασικού-Κατώτερου Κρητιδικού, που είναι τεκτονικά υπερκείμενος των ανθρακικών σχηματισμών που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Το ανώτερο μέλος του αποτελείται από εναλλαγές ψαμμιτών, κλαστικών ασβεστολίθων, πηλιτών και ραδιολαριτών με θραύσματα οφιολίθων και το κατώτερο μέλος αποτελείται από ένα ηφαιστειοϊζηματογενές σύμπλεγμα με εναλλαγές αργιλικών σχιστολίθων, ραδιολαριτών και ψαμμιτών με μερικές εμφανίσεις λεπτοπλακωδών ασβεστολίθων με πυριτιόλιθους. Ο Βοιωτικός φλύσχος συνδέεται τεκτονικά με τα υπερβασικά πετρώματα τα οποία βρίσκονται είτε παρεμβαλλόμενα, είτε υπερκείμενα των προαναφερθέντων ιζηματογενών ακολουθιών.

Μεγάλη ποικιλομορφία λόγω της έντονης τεκτονικής δραστηριότητας εμφανίζουν οι επόμενοι σχηματισμοί στη σειρά, οι μεταλλικοί σχηματισμοί ηλικίας Νεογενούς και Τεταρτογενούς. Τα Νεογενή ιζήματα συνίστανται από τις μάργες του Κάτω Πλειοκαίνου πάχους 150m και ο τις μάργες Ασπροχωμάτων ηλικίας Μέσου – Ανώτερου Πλειοκαίνου πάχους που ξεπερνά τα 250 m. Οι σχηματισμοί αυτοί βρίσκονται στο ΝΑ τμήμα της λεκάνης του Λουτρακίου. Όσον αφορά τις μάργες του Πλειοκαίνου αποτελούνται από εναλλαγές υπόλευκων, μαλακών μαργών και σκληρότερων αμμούχων μαργαϊκών στρωμάτων μεταβαίνοντας σε κάποιες περιπτώσεις σε πλακώδεις μάργες, οι οποίες εναλλάσσονται με μαργαϊκούς ασβεστολίθους. Οι μάργες των Ασπροχωμάτων ηλικίας Μέσου – Ανώτερου Πλειοκαίνου είναι σχεδόν αδιατάρακτες με συνεκτικές απολιθωματοφόρες λευκές ή κιτρινωπές μάργες, αμμούχες μάργες και ψαμμίτες.

Τα Τεταρτογενή ιζήματα απαντώνται στις λεκάνες Λουτρακίου και Σχίνου. Οι σχηματισμοί που συναντώνται είναι οι Τυρρήνιες Αποθέσεις του Πλειστόκαινου που αποτελούνται από συνεκτικούς ψαμμίτες, ασβεστιτικούς ψαμμίτες, άμμους και κροκαλοπαγή και δεν υπερβαίνουν τα 10 m και σε κάποιες θέσεις (εκεί όπου επικρατούν συνεκτικά κροκαλοπαγή) εμφανίζεται πολύ συνεκτικός, ενώ σε άλλες θέσεις (εκεί όπου επικρατούν οι ασβεστιτικοί ψαμμίτες) καθίσταται λιγότερο συνεκτικός. Εν συνεχεία συναντώνται τα Κροκαλοπαγή Σκούρτιζας του



Πλειστόκαινου και πρόκειται για σχηματισμό ποταμοχειμάριας φάσης πάχους 200 m που επικρατούν τα υπερβασικά πετρώματα. Μετά έρχονται τα παλαιά συνεκτικά κορήματα που οφείλουν το σχηματισμό τους στη ρηξιγενή ζώνη του Λουτρακίου. Αποτελούνται από γωνιώδη θραύσματα ανθρακικών πετρωμάτων και ερυθρό συνδετικό υλικό και υπέρκεινται των Πλειοκαινικών μαργών Ασπροχωμάτων καθώς επίσης και των κατακερματισμένων Τριαδικών και Ιουρασικών ανθρακικών σχηματισμών. Στην πορεία απαντώνται τα σύγχρονα κορήματα και κώνοι κορημάτων του Ολόκαινου σύγχρονης διαβρωτικής δραστηριότητας που οφείλεται σε τεκτονικά αίτια. Πρόκειται για χαλαρά υλικά με γωνιώδη θραύσματα πετρωμάτων (ασβεστολιθικές και οφιολιθικές λατύπες, που μερικές φορές είναι συγκολλημένες με αργιλομαργαϊκό υλικό), τα οποία μεταφέρονται είτε μέσω υδατορεμάτων, είτε μέσω βαρύτητας. Οι κώνοι κορημάτων καλύπτουν τις μάργες και τους υπόλοιπους Νεογενείς σχηματισμούς της βόρειας και ΒΑ πλευράς της λεκάνης του Λουτρακίου και τα πλευρικά κορήματα καλύπτουν μικρή έκταση στην ίδια πλευρά της λεκάνης. Ακολουθούν οι αλλουβιακές προσχώσεις δηλαδή άργιλοι, άμμους, κροκάλες και λατύπες ασβεστολιθικής ή/και οφιολιθικής προέλευσης. Καλύπτουν χαμηλές τοπογραφικά περιοχές και μεγάλο τμήμα της πόλης του Λουτρακίου. Τέλος συναντώνται σύγχρονες παράκτιες αποθέσεις του Ολόκαινου δηλαδή ιζήματα παράκτιας φάσης, κυρίως άμμους και κροκάλες και εντοπίζονται νότια του Λουτρακίου. Στις παράκτιες αποθέσεις συμπεριλαμβάνονται αποθέσεις ακτόλιθων (beachrocks), που εντοπίζονται στη ζώνη κυματισμού, κατά μήκος της σύγχρονης παραλίας. Θα πρέπει να αναφερθούν και οι ανθρωπογενείς αποθέσεις όπου βρίσκονται διάσπαρτες σε όλη την έκταση της λεκάνης του Λουτρακίου, οι σημαντικότερες εκ των οποίων προέρχονται από τα υλικά εκσκαφής της διώρυγας στα νότια του Λουτρακίου.



Εικόνα 5: Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της περιοχής Λουτρακίου – Σχίνου – Γερανείων Ορέων (Μπορνόβας κ.α., 1970-1980α, Μπορνόβας κ.α., 1970-1980β)

### 2.3 Τεκτονική

Η περιοχή μελέτης Λουτρακίου – Σχίνου – Γερανείων Ορέων είναι μία τεκτονικά ενεργή περιοχή με έντονη σεισμική δραστηριότητα και πρόκειται για μια σύνθετη νεοτεκτονική δομή γεωδυναμικά. Ο Κορινθιακός Κόλπος ανήκει στην κεντρική ηπειρωτική Ελλάδα, συνεπώς ελέγχεται από μια σειρά κανονικών ρηγμάτων διεύθυνσης Α – Δ ή ΒΔ – ΝΑ. Το νότιο κομμάτι του Κορινθιακού Κόλπου αποτελείται από κανονικά ρήγματα με μήκη 15 – 25 km, διεύθυνση Β100 και κλίση 500 προς Βορρά. Το ΝΑ τμήμα του Λουτρακίου ανήκει στο βύθισμα της ανατολικής Κορινθίας, ενώ το ορεινό τμήμα ανήκει στο τεκτονικό κέρασ των Γερανείων (Παπανικολάου κ.α., 1998) και χωρίζονται από μια μεγάλη ρηξιγενή ζώνη διεύθυνσης Α – Δ έως ΑΝΑ – ΔΒΔ. Το κέρασ των Γερανείων οριοθετείται, στα βόρεια, από ένα σύστημα ρηγμάτων, κλιμακωτής διάταξης. Στην περιοχή του Σχίνου, οι άξονες των πτυχών, τα μέτωπα επιπέδσεων και τα ρήγματα έχουν διεύθυνση Α-Δ. χαρακτηριστικό της περιοχής είναι οι ταφροειδείς καταβυθίσεις Τριτογενούς ηλικίας με διεύθυνση Α-Δ. Το χαμηλό λοφώδες ανάγλυφο της περιοχής δημιουργήθηκε από τα ενεργά ρήγματα τα οποία δραστηριοποιήθηκαν ξανά κατά την περίοδο του Πλειόκαινου έως Πλειστόκαινου. Νέα ρήγματα δημιουργήθηκαν στην περιοχή μετά το Τυρρήνιο με διεύθυνση Βορρά-Νότο και ΒΔ-ΝΑ ενώ τα ρήγματα των Κεχραιών, Μύλου και Κατακαλίου είναι ενεργές τεκτονικές δομές της ανατολικής Κορινθίας άξιας αναφοράς (Ροντογιάννη κ.α., 2008).

Η ευρύτερη περιοχή Λουτρακίου – Σχίνου – Γερανείων Ορέων, χαρακτηρίζεται από τα εξής σημαντικά ρήγματα τα οποία συντέλεσαν στη μορφή της περιοχής:

- Η ρηξιγενής ζώνη Λουτρακίου – Αγίας Κυριακής, η οποία κυριαρχεί τεκτονικά στην περιοχή μελέτης ξεκινώντας από την Κακιά Σκάλα, στα ανατολικά, φθάνοντας τον πόδα των Γερανείων, Βόρεια του Λουτρακίου. Η ζώνη αυτή συνεχίζεται υποθαλάσσια εντός του Λέχαιου κόλπου μέχρι το ακρωτήριο Ηραίο με συνολικό μήκος περίπου 50 km.
- Το ρήγμα του Οσίου Παταπίου, με διεύθυνση ΔΒΔ – ΑΝΑ, στα ΝΔ πρηνή των Γερανείων Ορέων με μήκος στα 7 – 8 km
- Τα ρήγματα των Αγίων Θεοδώρων, όπου πρόκειται για μια ρηξιγενής ζώνη αποτελούμενη από πολλά μικρότερα κανονικά ρήγματα τα οποία σε κάποια σημεία καλύπτονται από αλλουβιακές αποθέσεις.

- Τα ρήγματα Πισσίων – Σχίνου είναι δυο παράλληλα κανονικά ρήγματα με διεύθυνση ΑΒΑ-ΔΝΔ και βόρεια κλίση με μήκος περίπου 15 km και απότομα πρανή.
- Το ρήγμα Λιβαδόστρας ανήκει στη ρηξιγενή ζώνη του Καπαρελίου που αποτελείται από τρεις ζώνες και βρίσκεται στα ΒΑ των ρηγμάτων Πισσίων – Αλεποχωρίου με μήκος 15 km, ενώ οι άλλοι δύο κλάδοι έχουν μήκος 10 km.



*Εικόνα 6: Τα σημαντικότερα ενεργά ρήγματα στην ανατολική Κορινθία. S: Σχίνου, P: Πισσίων, L: Λουτρακίου, A.T: Αγίων Θεοδώρων, K: Κεχραιών, M: Μύλου, ΚΑ: Κατακαλίου*

## 2.4 Υδρογεωλογία

Η υδρογεωλογία του Λουτρακίου είναι ιδιαίτερα σημαντική λόγω των πλούσιων υδάτινων πόρων που παρουσιάζει. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο η περιοχή μελέτης βρίσκεται στη ζώνη διάρρηξης του Κορινθιακού Κόλπου πράγμα που διευκολύνει την κίνηση των υπόγειων νερών στον υδροφόρο ορίζοντα.

Οι σχηματισμοί της περιοχής με βάση την υδρογεωλογική τους συμπεριφορά χωρίζονται σε υδροπερατούς σχηματισμούς, σε ημιπερατούς σχηματισμούς και σε υδατοστεγανούς σχηματισμούς. Πιο συγκεκριμένα στους υδροπερατούς σχηματισμούς ανήκουν τα Τεταρτογενή ιζήματα και οι ανθρακικοί Μεσοζωικοί σχηματισμοί. Στα

Τεταρτογενή ιζήματα ανήκουν οι παράκτιες και ποταμοχειμμάριες αποθέσεις, οι κώνοι κορημάτων και οι αλλουβιακές προσχώσεις οι οποίες έχουν μικρή έκταση και μικρό πάχος και γι' αυτό δε φιλοξενούν μεγάλες ποσότητες νερού. Οι κώνοι κορημάτων, τα συνεκτικά κορήματα και οι Τυρρήνιες αποθέσεις έχουν σημαντικές διαστάσεις και αποτελούν υδροπερατούς σχηματισμούς. Οι κώνοι κορημάτων και τα παλαιά συνεκτικά κορήματα εντοπίζονται στους πρόποδες των Γερανείων Ορέων, είναι αδρόκοκκοι, περατοί σχηματισμοί και λόγω της επαφής τους με τους καρστικούς ανθρακικούς σχηματισμούς απορροφούν μέρος του υπόγειου νερού, που κινείται στο εσωτερικό τους. Οι αλλουβιακές προσχώσεις καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης και αποτελούν τον πλέον υδροπερατό σχηματισμό και αυτόν τον οποίο εκμεταλλεύεται ο δήμος Λουτρακίου – Περαχώρας για να καλύψει τις υδρευτικές του ανάγκες. τα Γεράνεια Όρη επίσης αποτελούνται από ανθρακικούς σχηματισμούς οι οποίοι είναι περατοί, παρουσιάζουν σημαντικό βαθμό καρστικοποίησης που ελέγχεται άμεσα από την τεκτονική και έχουν μεγάλο συντελεστή κατείσδυσης (~60%) με αποτέλεσμα την υψηλή ταχύτητα τροφοδοσίας του καρστικού υδροφορέα με σημαντικούς όγκους νερού (Δημητρόπουλος, 1989). Η διεύθυνση της κίνησης του υπόγειου νερού στους καρστικούς σχηματισμούς είναι Α – Δ έως ΝΑ – ΒΔ, δηλαδή είναι ίδια με της τεκτονικής πράγμα που φαίνεται από την ύπαρξη θερμομεταλλικών – ιαματικών πηγών κατά μήκος της κύριας ρηξιγενούς ζώνης των Γερανείων Ορέων .

Στους ημιπερατούς σχηματισμούς ανήκουν οι Νεογενείς μάργες στο ανατολικό τμήμα της λεκάνης Λουτρακίου με μικρή εξάπλωση και οι οφιόλιθοι ( περιδοτίτες και σερπεντινίτες) στο ΒΑ τμήμα και δεν είναι υδροπερατοί. Οι μάργες χαρακτηρίζονται ως ένας σχηματισμός ημιπερατός έως σχεδόν στεγανός. Όπως αναφέρθηκε ο έντονος τεκτονισμός επιδράει στη δημιουργία δευτερογενούς πορώδους και στην ανάπτυξη ζωνών με διαβρωμένο εξαλλοιωμένο υλικό μέσα στις ρηξιγενείς ζώνες και επιτρέπει την κατείσδυση του νερού και τη δημιουργία υδροφόρου ορίζοντα και εξαιτίας αυτού θα μπορούσαν να καταταχτούν υδρολιθολογικά στους ημιπερατούς σχηματισμούς.

Τέλος στους υδατοστεγανούς σχηματισμούς απαντώνται τα νεογενή αργιλικά ιζήματα, ο βοιωτικός φλύσχος και η σχιστοκερατολιθική διάπλαση.

Ο υδροφόρος ορίζοντας του Λουτρακίου αναπτύσσεται στο Βόρειο και Κεντρικό τμήμα έως την περιοχή Σκάρπα. Στο το κεντρικό τμήμα της Σκάρπας, ο υδροφόρος

ορίζοντας βρίσκεται μέσα σε ψαμμιτικούς ορίζοντες, ενώ στα δυτικά, που οι Τεταρτογενείς ποταμοχερσαίες αποθέσεις αυξάνονται παρατηρείται υδροφορία μέσα στους Τεταρτογενείς σχηματισμούς. Ο υδροφόρος αυτός ορίζοντας είναι ανοικτός προς τη θάλασσα σε μήκος περίπου 2 km και αποστραγγίζεται υπογείως μέσω των υδροπερατών παράκτιων σχηματισμών. Σχηματίζεται στους τεταρτογενείς σχηματισμούς και στις κοκκώδεις αλλουβιακές αποθέσεις και είναι πλούσιος σε  $Mg^{2+}$ . Η τροφοδοσία του Τεταρτογενούς υδροφορέα είναι από τα Γεράνια Όρη και απαντώνται υπερβασικά πετρώματα. Οι μάργες Νεογενούς βρίσκονται στο νότιο και ανατολικό κομμάτι και οριοθετεί τον φρεάτιο αλλουβιακό υδροφορέα. Το κλαστικό υλικό του υδροφορέα, αποτελείται από άμμο, χάλικες, αργλικές ενστρώσεις και κροκάλες οφιολιθικής και ανθρακικής προέλευσης. Οι Τεταρτογενείς ποταμοχερσαίες αποθέσεις (κροκαλοπαγή Σκούρτιζας, Τυρρήνιες αποθέσεις κ.ά.), αποτελούνται από εναλλαγές κροκαλολατυποπαγών, ψαμμιτών, αργίλων και αμμούχων αργίλων. Η εναλλαγή αυτή υδροπερατών - υδατοστεγανών σχηματισμών δημιουργεί υδροφόρους ορίζοντες μικρής δυναμικότητας. Μέσα στους ασβεστολίθους δημιουργείται ο καρστικός υδροφόρος ορίζοντας που τροφοδοτεί τις ιαματικές πηγές του Λουτρακίου. Σύμφωνα με τους Σταμάτη και Βουδούρη (2000), δεν υπάρχει υδραυλική επικοινωνία μεταξύ Τεταρτογενούς (αλλουβιακού) και καρστικού υδροφορέα. ο υδροφόρος ορίζοντας οριοθετείται προς τα βόρεια από τους σχηματισμούς των μαργών και μαργαϊκών ψαμμιτών όπου βρίσκονται κάτω από τα πλευρικά κορήματα, κατά μήκος των νοτίων υπορειών των Γερανείων Ορέων. Αυτή η επιφανειακή εξάπλωση που δημιουργούν οι ανθρακικοί σχηματισμοί αποτελούν τη ζώνη διαχωρισμού του αλλουβιακού και καρστικού υδροφόρου ορίζοντα. Επίσης δεν υπάρχει υδραυλική επικοινωνία μεταξύ τους άρα δεν πραγματοποιείται τροφοδοσία ή εκφόρτιση των υπόγειων νερών των δυο υδροφορέων. Στο ΒΑ τμήμα της λεκάνης του Λουτρακίου και στο ΝΑ τμήμα του οικισμού του Σχίνου απαντώνται οφιολιθικά πετρώματα και κατά θέσεις αναπτύσσεται ένας μανδύας αποσάθρωσης με μικρής έκτασης υδροφορία (ρέμα της Αγίας Τριάδας). Η μεγάλη περιεκτικότητα του νερού του Λουτρακίου σε  $Mg^{2+}$  οφείλεται στο γεγονός ότι ένα μεγάλο ποσοστό ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που ρέει επιφανειακά γίνεται πλούσιο σε μαγνήσιο και καταλήγει στην πεδινή περιοχή, όπου και εισέρχεται στον υδροφόρο ορίζοντα.

Το μεγάλο πάχος και η ανομοιογενής δομή της ακόρεστης ζώνης αποτελούν τους σημαντικότερους παράγοντες για την ποιοτική προστασία των υπογείων νερών. Το

πάχος αυξάνει σταδιακά. Στην παράκτια δυτική περιοχή είναι πολύ μικρό (3 έως 7,5 m), στα ανατολικά, φτάνει στα 110 m και στα δυτικά, στην περιοχή του Δημοτικού Πάρκου Λουτρακίου, φτάνει περίπου τα 40 m.

Το πάχος της ακόρεστης ζώνης στον οικισμό Σκάρπας Λουτρακίου από Δυτικά προς Ανατολικά είναι 80-90 m και στο νοτιότερο τμήμα της περιοχής του οικισμού το πάχος της ακόρεστης ζώνης είναι 35 m (Σταμάτης κ.α., 1998, Σταμάτης και Βουδούρης, 2000).

Από μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί η μέση τιμή ολικού πορώδους (Pt) είναι 30% ενώ η μέση τιμή του ενεργού πορώδους (Pef) είναι 8% (Σταμάτης κ.α., 1998, Σταμάτης και Βουδούρης, 2000, Βουδούρης και Σταμάτης, 2002). Η υδραυλική αγωγιμότητα (K) κυμαίνεται μεταξύ  $2 \times 10^{-4}$  και  $5,2 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$  φανερόνοντας συνθήκες καλής μέχρι μέτρια καλής υδροπερατότητας του υδροφόρου ορίζοντα (Σταμάτης και Βουδούρης, 2000).

Ανακεφαλαιώνοντας η περιοχή αποτελείται από μεταλλικούς σχηματισμούς όπως αλλουβιακές αποθέσεις, παράκτιες και ποταμοχειμνικές αποθέσεις, κώνους κορημάτων, παλαιά συνεκτικά κορήματα, Τυρρήνιες αποθέσεις και μάργες. Επίσης συναντώνται πετρώματα του αλπικού κύκλου (ανθρακικά πετρώματα, υπερβασικά πετρώματα) με σημαντική υδροφορία. Τα υδατορέματα των Γεράνιων Όρεων κινούνται προς το πεδινό κομμάτι της λεκάνης Λουτρακίου, τροφοδοτούν τον υδροφόρο ορίζοντα άρα δεν εκβάλλουν στη θάλασσα.

## **2.5 Δημογραφικά περιοχής μελέτης**

Στους Πίνακες 1-3 παρατίθενται στοιχεία σχετικά με τη μεταβολή του πληθυσμού και την πυκνότητα για την περιφερειακή ενότητα Κορινθίας και γίνεται σύγκριση με τα αντίστοιχα στοιχεία σε επίπεδο επικράτειας (πηγή ΕΛ.ΣΤΑΤ απογραφή πληθυσμού 2021).

*Πίνακας 1: Πυκνότητα Πληθυσμού περιφερειακής ενότητας Κορινθίας (ΕΛ.ΣΤΑΤ 2021).*

Περιφερειακή Ενότητα	Μόνιμος Πληθυσμός 2021	Έκταση (km <sup>2</sup> )	Πυκνότητα
Δήμος Κορινθίων	55.941	611,02	91,55
Δήμος Βέλου-Βόχα	17.883	164,85	108,48
Δήμος Λουτρακίου-Περαχώρας-Αγίων Θεοδώρων	22.016	293,23	75,08
Δήμος Νεμέας	5.713	192,5	29,68
Δήμος Ξυλοκάστρου-Ευρωστίνης	15.570	411,52	37,84
Δήμος Σικυωνίων	21.187	12,9	1642,40
<b>Επικράτεια</b>	<b>10.482.487</b>	<b>131.957</b>	<b>79,44</b>

*Πίνακας 2: Πληθυσμιακή μεταβολή της περιφερειακής ενότητας Κορινθίας (ΕΛ.ΣΤΑΤ 2021).*

Περιφερειακή Ενότητα	1951	1961	1971	1981	1991	2001	2011	2021
Δήμος Κορινθίων	17.093	19.569	22.682	27.348	28.071	30.898	37.877	55.941
Δήμος Βέλου-Βόχα	7.000	8.000	9.000	10.000	11.000	11.000	19.027	17.883
Δήμος Λουτρακίου-Περαχώρας-Αγίων Θεοδώρων	7.300	8.700	10.300	12.000	13.100	14.200	21.221	22.016
Δήμος Νεμέας	6.100	5.900	5.600	5.800	6.100	6.483	6.483	5.713
Δήμος Ξυλοκάστρου-Ευρωστίνης	8.000	8.700	9.300	10.000	10.600	11.200	17.365	15.570
Δήμος Σικυωνίων	14.500	15.000	15.500	16.000	17.000	18.516	22.794	21.187
<b>Επικράτεια</b>	<b>7.632.801</b>	<b>8.388.553</b>	<b>8.768.641</b>	<b>9.740.417</b>	<b>10.259.900</b>	<b>10.934.097</b>	<b>10.816.286</b>	<b>10.482.487</b>



*Πίνακας 3: : Ποσοστιαία Πληθυσμιακή μεταβολή περιφερειακής ενότητας Κορινθίας και των δήμων από όπου αποτελείται.*

Περιγραφή	Μόνιμος Πληθυσμός 2011	Μόνιμος Πληθυσμός 2021	Μεταβολή (%)
<b>Δήμος Κορινθίων</b>	37.877	55.941	47,7
<b>Δήμος Βέλου-Βόχα</b>	19.027	17.883	-6,01
<b>Δήμος Λουτρακίου-Περαχώρας-Αγίων Θεοδώρων</b>	21.221	22.016	3,75
<b>Δήμος Νεμέας</b>	6.483	5.713	-11,9
<b>Δήμος Ξυλοκάστρου-Ευρωστίνης</b>	17.365	15.570	-10,3
<b>Δήμος Σικυωνίων</b>	22.794	21.187	-7,1
<b>Επικράτεια</b>	<b>124.767</b>	<b>138.310</b>	<b>10,9</b>

Αξίζει να σημειωθεί η τεράστια αύξηση των κατοίκων του δήμου Κορινθίας κατά 47,7% και τη μικρή μείωση που παρατηρείται σε κάθε δήμο ξεχωριστά, στον δήμο Βέλου-Βόχα, στον δήμο Νεμέας, στον δήμο Ξυλοκάστρου-Ευρωστίνης και στον δήμο Σικυανίων. Πάραυτα οι μειώσεις αυτές εξισορροπούνται με τη μεγάλη αύξηση του δήμου Κορινθίας και συνεπώς υπάρχει αύξηση στην επικράτεια κατά 10,9%.

## **2.6 Κλιματολογικά στοιχεία**

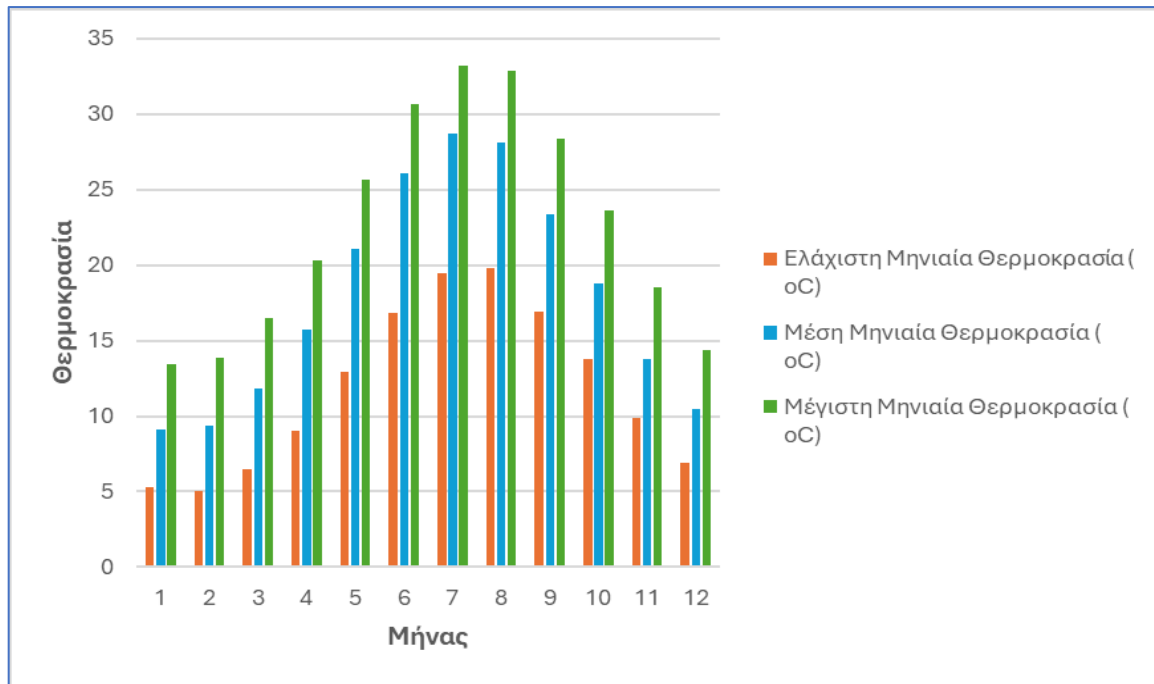
Τα κλιματολογικά στοιχεία που ακολουθούν στον Πίνακα 4 προέρχονται από δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού Βέλου Κορινθίας της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (ΕΜΥ) για τη χρονική περίοδο 1988-2010. Ο μετεωρολογικός σταθμός βρίσκεται σε υψόμετρο 19 m και έχει συντεταγμένες με γεωγραφικό μήκος 22°45'Α και γεωγραφικό πλάτος 37°58'Β στο παγκόσμιο προβολικό σύστημα WGS84. ([http://www.emy.gr/emyl/el/climatology/climatology\\_city?perifereia=Peloponnese&poli=Velos\\_Korinthia](http://www.emy.gr/emyl/el/climatology/climatology_city?perifereia=Peloponnese&poli=Velos_Korinthia))

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 4, οι μεγαλύτερες μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες παρατηρούνται τους θερινούς μήνες (Ιούνιο - Ιούλιο - Αύγουστο) με μεγαλύτερες μέσες μέγιστες θερμοκρασίες αυτές του Ιουλίου και Αυγούστου με 28,7 °C και 28,1°C, αντίστοιχα. Αντίθετα, οι ελάχιστες μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες παρατηρούνται τους χειμερινούς μήνες (Δεκέμβριο - Ιανουάριο - Φεβρουάριο) με χαμηλότερες μέσες θερμοκρασίες αυτές του Ιανουαρίου με 9,1°C. Σημειώνεται ότι η μέση μηνιαία θερμοκρασία βρίσκεται πιο κοντά στη μέση μέγιστη παρά στη μέση ελάχιστη, επιβεβαιώνοντας τον τυπικά ξηρό μεσογειακό τύπο κλίματος με θερμά καλοκαίρια και ήπιους χειμώνες. Η ετήσια διακύμανση των θερμοκρασιακών δεδομένων του Πίνακα 4 αναπαρίσταται γραφικά στην Εικόνα 7.

**Πίνακας 4: Μηνιαία κλιματικά δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού Βέλου Κορινθίας για τη χρονική περίοδο 1988-2010**

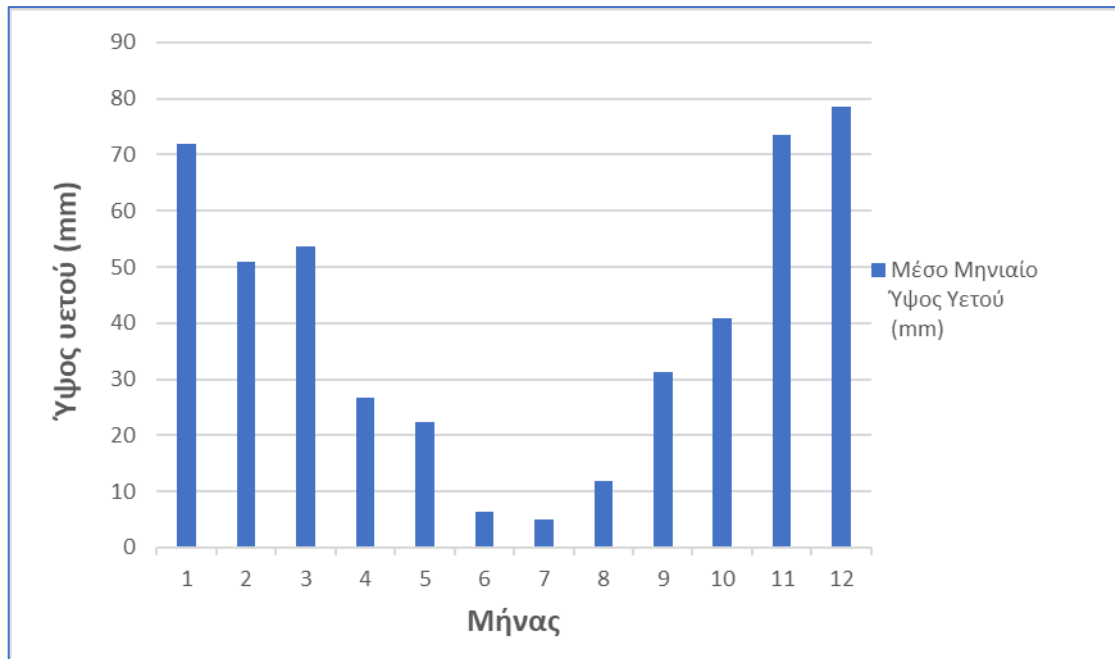
([http://www.emy.gr/emv/el/climatology/climatology\\_city?perifereia=Peloponnese&poli=Velos\\_Korinthia](http://www.emy.gr/emv/el/climatology/climatology_city?perifereia=Peloponnese&poli=Velos_Korinthia))

Παράμετρος	Μήνας											
	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Ελάχιστη Μηνιαία Θερμοκρασία ( οC)	5,3	5	6,5	9	12,9	16,8	19,5	19,8	16,9	13,8	9,9	6,9
Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία ( οC)	9,1	9,4	11,8	15,7	21,1	26,1	28,7	28,1	23,4	18,8	13,8	10,5
Μέγιστη Μηνιαία Θερμοκρασία ( οC)	13,4	13,9	16,5	20,3	25,7	30,7	33,2	32,9	28,4	23,6	18,5	14,4
Μέση Μηνιαία Σχετική Υγρασία (%)	75,2	72,1	70,9	65,9	59,7	54	53,3	56,7	63,9	70,4	76,5	77
Μέσο Μηνιαίο Ύψος Υετού (mm)	72	50,9	53,7	26,7	22,3	6,4	5	11,9	31,3	40,8	73,5	78,6
Μέσος Μηνιαίος Αριθμός Ημερών Υετού	7,7	9	8,3	6	4,1	2	1,1	1,7	4,1	5,8	8	10,3
Επικρατούσα Διεύθυνση Ανέμου	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	N
Μέση Μηνιαία Ένταση Ανέμου (Kt)	6,8	7,3	6,8	7,1	6,8	6,9	6,9	6,2	6,5	6,7	5,9	6,5



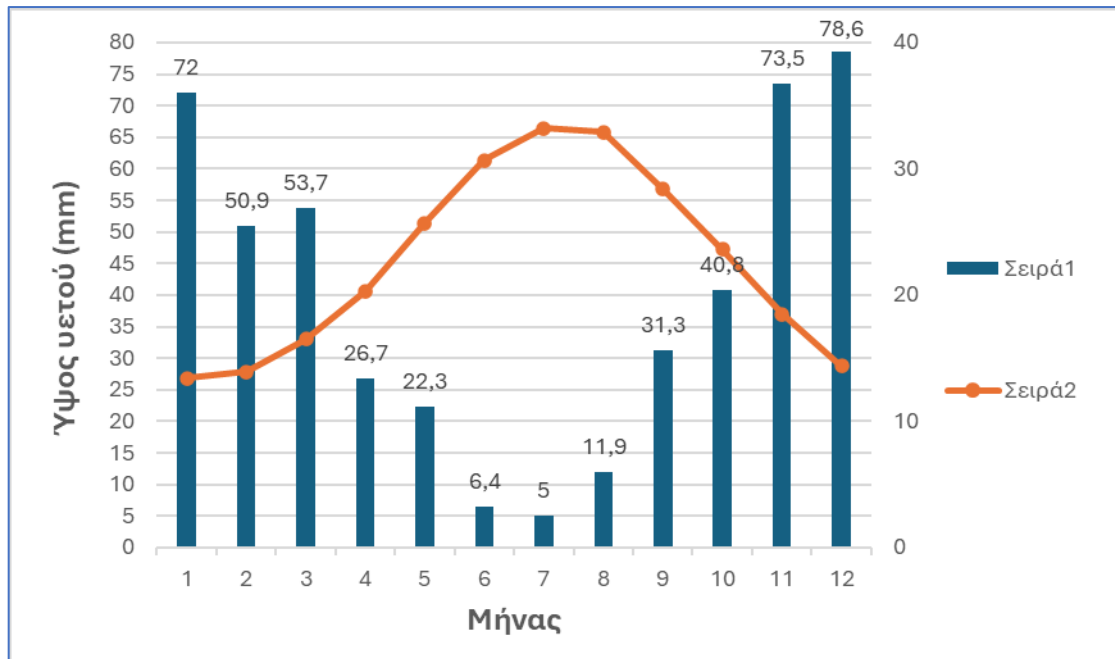
*Εικόνα 7: Μέση, ελάχιστη και μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία σύμφωνα με δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού Βέλου Κορινθίας για τη χρονική περίοδο 1988-2010.*

Επιπροσθέτως, η ετήσια πορεία του νετού στην περιοχή του Βέλου Κορινθίας ακολουθεί το Μεσογειακό τύπο κατά τον οποίον το μέγιστο και το ελάχιστο ύψος βροχής σημειώνεται τη χειμερινή και θερινή περίοδο, αντίστοιχα (Φλόκας, 1994). Ο ξηρότερος μήνας είναι ο Ιούλιος με μέσο μηνιαίο νετό 5 mm, ενώ ο υγρότερος είναι ο Δεκέμβριος με 78,6 mm. Στην Εικόνα 8 παρουσιάζεται η διακύμανση του μέσου μηνιαίου ύψους νετού.



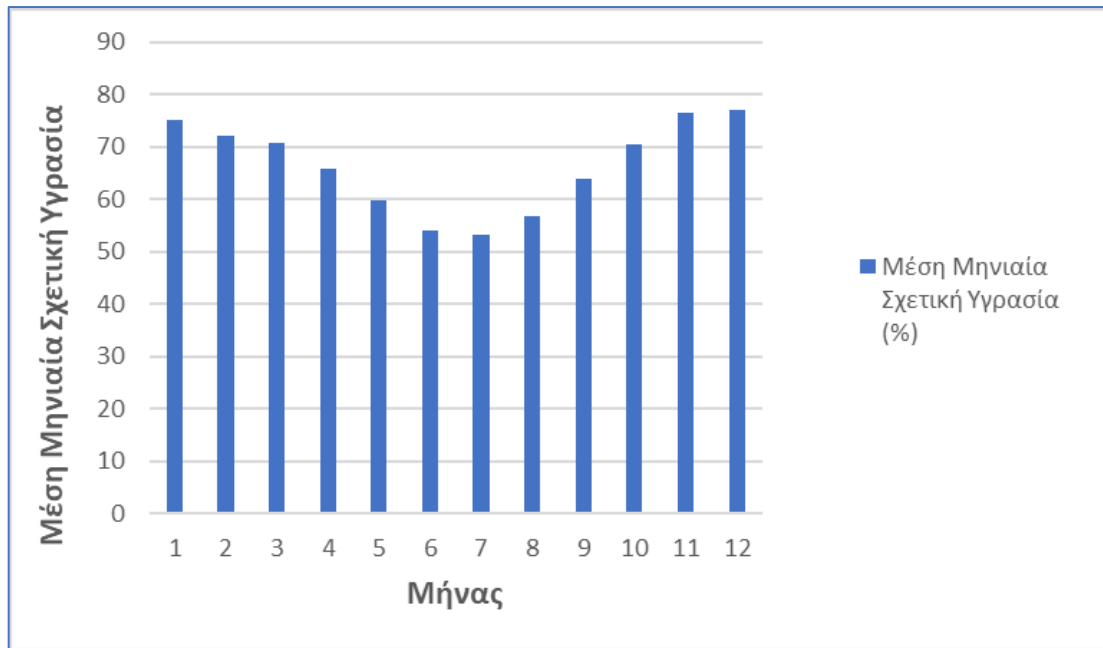
**Εικόνα 8: Μέσο μηνιαίο ύψος υετού με δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού Βέλου Κορινθίας για τη χρονική περίοδο 1988-2010**

Στην Εικόνα 9 παρουσιάζεται το θερμοϋετόγραμμα που προέκυψε από συνδυασμό των δεδομένων υετού και θερμοκρασίας. Στην τετμημένη του βρίσκονται οι μήνες του έτους, στη μία τεταγμένη οι μηνιαίες βροχοπτώσεις σε mm και στην άλλη οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες T σε °C. Η κλίμακα του άξονα των βροχοπτώσεων είναι διπλάσια από αυτή των θερμοκρασιών. Από την Εικόνα 9 διαπιστώνεται πως η υγρή περίοδος ξεκινά από τον Οκτώβριο και σταματά στα μέσα Μαρτίου, ενώ η ξηρή περίοδος ξεκινά στα μέσα Μαρτίου και σταματά στα μέσα Οκτωβρίου. Το θερμοϋετόγραμμα επιβεβαιώνει το ξηρό κλίμα της περιοχής με σχετικά λίγες βροχοπτώσεις και υψηλές θερμοκρασίες κατά την ξηρή περίοδο.



**Εικόνα 9: Θερμοϋετόγραμμα σύμφωνα με δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού Βέλου Κορινθίας για τη χρονική περίοδο 1988-2010.**

Η παράμετρος της σχετικής υγρασίας δείχνει κατά πόσο η ατμόσφαιρα πλησιάζει το σημείο κορεσμού. Η σημασία της είναι σπουδαία διότι οι διάφοροι οργανισμοί επηρεάζονται απ' τη σχετική και όχι από την απόλυτη υγρασία (Φλόκας, 1994). Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4, η μέση σχετική υγρασία στην ευρύτερη περιοχή Βέλου Κορίνθου κυμαίνεται από 53,3 % τον Ιούλιο και φτάνει έως 77 % κατά τον μήνα Δεκέμβριο. Στην Εικόνα 10 παρουσιάζεται η διακύμανση της μέσης μηνιαίας σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια του χρόνου.



**Εικόνα 10: Κατανομή της σχετικής υγρασίας σύμφωνα με δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού Βέλου Κορινθίας για τη χρονική περίοδο 1988-2010.**

Επίσης, η μέση μηνιαία ένταση ανέμου κυμαίνεται από 5,9 Kt έως 7,3 Kt, παρουσιάζοντας τη μέγιστη ένταση κατά τον μήνα Φεβρουάριο και την ελάχιστη ένταση κατά τον μήνα Νοέμβριο (Πίνακας 4). Τέλος, αξίζει να αναφερθεί πως όλους τους μήνες εκτός του Δεκέμβρη επικρατούν ανατολικής διεύθυνσης άνεμοι, ενώ τον Δεκέμβρη νότιας διεύθυνσης.

## 2.7 Χρήσεις Γης

Συμφώνα με το Corine Land Cover 2018 (CLC, 2018), στο Νομό Κορινθίας υπάρχουν τέσσερις (4) κύριες χρήσεις γης, η ποσοστιαία κατανομή των οποία δίνεται στην Εικόνα 11. Συγκεκριμένα, Οι δασικές και ημι-φυσικές περιοχές έχουν το μεγαλύτερο ποσοστό κάλυψης με 68,4%, ενώ ακολουθούν οι αγροτικές περιοχές με 21,8%, οι τεχνητές επιφάνειες με 5,8% και, τέλος, τα υδατικά συστήματα με 3,9%. Επιμέρους χρήσεις Γης καταγράφονται στις 4 κατηγορίες: i) δασικές και ημι-φυσικές περιοχές (δάση κονωφόρων, φυσικά λιβάδια, Σκληρόφυλλη βλάστηση, Μεταβατικό δάσος-θάμνοι), ii) αγροτικές περιοχές (Μη αρδευόμενες καλλιεργήσιμες εκτάσεις, οπωροφόρα δέντρα, ελαιώνες, βοσκοτόπια, Πολύπλοκα πρότυπα καλλιέργειας, Γη που καταλαμβάνεται κυρίως από τη γεωργία), iii) τεχνητές επιφάνειες (Συνεχής αστικός ιστός, Ασυνεχής αστικός ιστός, Βιομηχανικές ή εμπορικές μονάδες, Οδικά και

σιδηροδρομικά δίκτυα και συναφή γη, Αθλητικές και ψυχαγωγικές εγκαταστάσεις) και iv) υδατικά συστήματα (θαλάσσια νερά).



*Εικόνα 11: Κατανομή των επιμέρους χρήσεων Γης σύμφωνα με το Corine Land Cover (CLC, 2018)*

## 2.8 Άλλες υδρογεωχημικές μελέτες στην περιοχή μελέτης

Η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας έχει μελετηθεί από πολλούς φορείς/ερευνητές καθώς παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον τόσο γεωλογικά, ορυκτολογικά, υδρογεωλογικά όσο και για την ποιότητα των υπόγειων υδάτων. Πιο συγκεκριμένα, πρώτοι οι Papadopoulos and Lappas (2014) κατέγραψαν αυξημένες συγκεντρώσεις Cr, Cr<sup>6+</sup> και NO<sub>3</sub><sup>-</sup> στην περιοχή του Σχίνου. Στη συνέχεια οι Pyrgaki et al. (2016) ανέφερε σημαντικές συγκεντρώσεις των προαναφερθέντων στοιχείων σε Λουτράκι, Σχίνο και Γεράνεια Όρη, ενώ οι Papazotos et al. (2020) έδειξαν τη στατιστική σχέση μεταξύ Cr, Cr<sup>6+</sup> και NO<sub>3</sub><sup>-</sup> και ανέφεραν ότι υπάρχουν αυξημένες συγκεντρώσεις As. Επίσης, οι Papazotos et al. (2020) και οι Pyrgaki et al. (2021) ανέδειξαν τη γεωγενή προέλευση του Cr στην περιοχή του Λουτρακίου από τα υπερβασικά πετρώματα που δομούν τα Γεράνεια Όρη. Οι Kelepertzis et al. (2019) και Pyrgaki et al. (2022) πραγματοποίησαν την πρώτη ισοτοπική μελέτη δ<sup>18</sup>O<sub>NO3</sub> και δ<sup>15</sup>N<sub>NO3</sub> στην περιοχή του Σχίνου υποδεικνύοντας ότι πιθανές πηγές των NO<sub>3</sub><sup>-</sup> στα υπόγεια νερά είναι οι απορροφητικοί βόθροι ή/και τα αζωτούχα λιπάσματα.

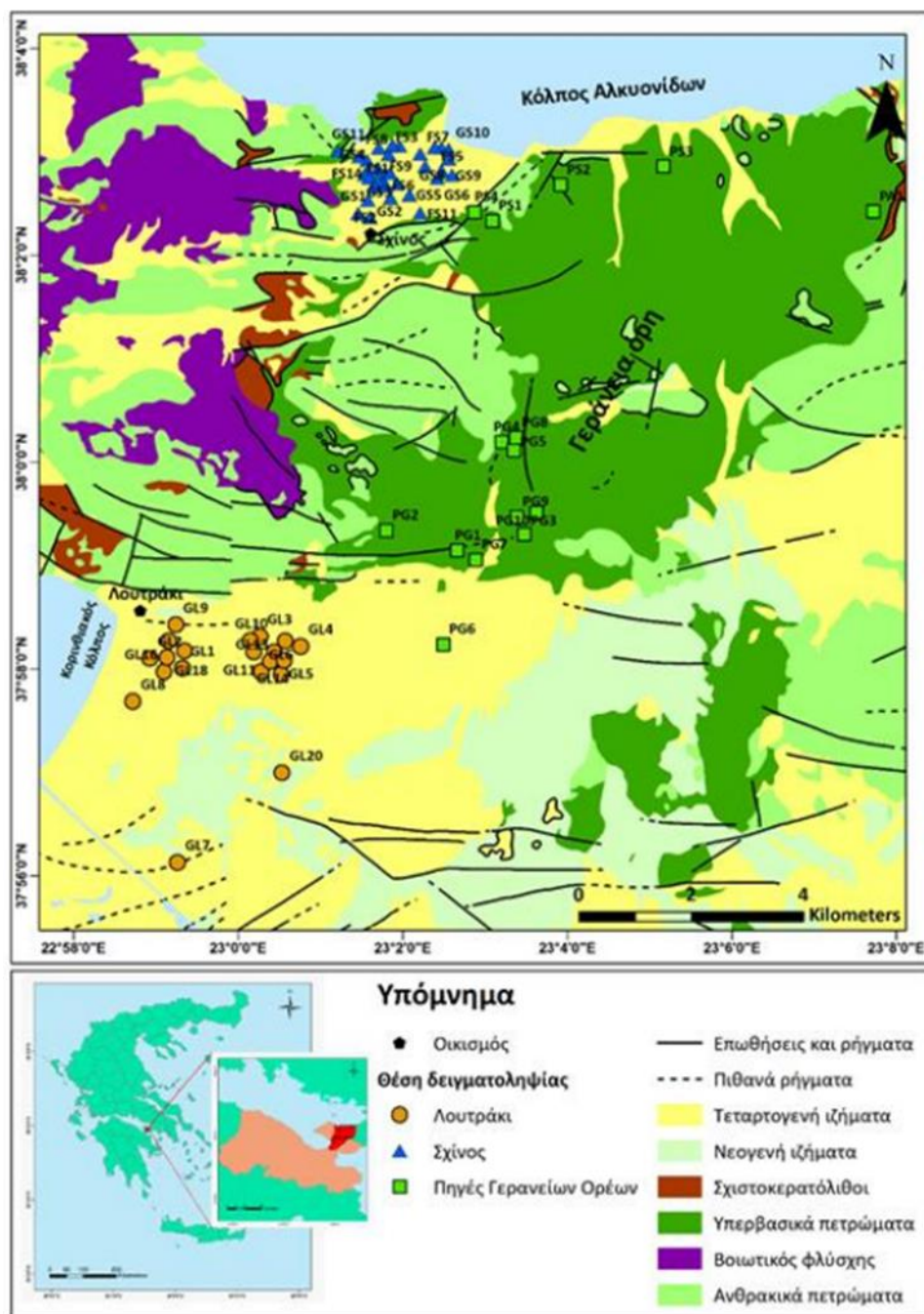


### 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

#### 3.1 Συλλογή δεδομένων

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αναζητήθηκαν επιστημονικές εργασίες και μελέτες οι οποίες αναφέρονται στην ποιότητα των υπόγειων νερών καθώς και στους διάφορους γεωπεριβαλλοντικούς δείκτες που εξετάζουν την ποιότητα τους τόσο για άρδευση και ύδρευση όσο και για την παρουσία δυνητικά τοξικών στοιχείων. Από αυτές τις μελέτες αντλήθηκαν πολύτιμες πληροφορίες για την εύρεση των κατάλληλων δεικτών αλλά και πληροφορίες για τον υπολογισμό με κατάλληλες μαθηματικές σχέσεις. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν εργασίες για τη γεωχημεία των υπόγειων υδάτων καθώς και την αξιολόγηση του φορτίου δυνητικά τοξικών στοιχείων. Επιπλέον, αξιολογήθηκαν κριτικά οι εργασίες που αναφέρονται στην ταξινόμηση των διαφόρων δεικτών σε διάφορες κατηγορίες ώστε να προκύψει μια σωστή κατηγοριοποίηση και αποτίμηση της ποιότητας των υπόγειων υδάτων για τις διάφορες χρήσεις. Οι περισσότερες εργασίες αφορούσαν πιο ευρεία περιοχή μελέτης ή και άλλες περιοχές ή ακόμη είχαν και επιπλέον θέματα άλλου ενδιαφέροντος. Επιπροσθέτως, πρέπει να αναφερθεί ότι δεν έχει υπάρξει ξανά παρόμοια μελέτη με την παρούσα διπλωματική εργασία στη περιοχή μελέτης του παρόντος τεύχους.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν 68 δείγματα (Εικόνα 12) των υπόγειων νερών από τη διδακτορική διατριβή με τίτλο «Γεωχημικό αποτύπωμα υπερβασικών περιβαλλόντων στην ποιότητα υπογείων νερών, με έμφαση στο χρώμιο και το αρσενικό» (Παπαζώτος, 2020) και την εργασία των Papazotos et al. (2020). Συλλέχθηκαν και αξιοποιήθηκαν τα αποτελέσματα των ακόλουθων φυσικοχημικών και χημικών παραμέτρων ώστε να υπολογιστούν οι γεωπεριβαλλοντικοί δείκτες και η περαιτέρω ανάλυση της εργασίας: TDS, EC, pH, Eh,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ , Ag, As, Br, Cd, Cr,  $\text{Cr}^{6+}$ , Cu, Fe, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Si, Sr, και Zn.



Εικόνα 12: Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της περιοχής Λουτρακίου – Σχίνου – Γερανείων Ορέων με τα 68 δείγματα μελέτης.

### 3.2 Στατιστική ανάλυση

Για την αριθμητική κατανόηση των μεγεθών του συνόλου των δειγμάτων και των τιμών των διαφόρων προσδιορισμένων παραμέτρων χρησιμοποιήθηκαν στατιστικά μεγέθη όπως η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση, η μέγιστη τιμή, η ελάχιστη τιμή, η διάμεσος και τα τεταρτημόρια τα οποία πρέπει να οριστούν:

- **Μέση τιμή ή μέσος όρος (Mean value):** Αποτελεί το σπουδαιότερο και χρησιμότερο μέτρο της στατιστικής και είναι ένα μέτρο θέσης, δηλαδή δείχνει σχετικά τις θέσεις των αριθμών στους οποίους αναφέρεται. Ορίζεται ως το άθροισμα των παρατηρήσεων δια του πλήθους αυτών. Συμβολίζεται με  $\bar{x}$  και ο μαθηματικός της τύπος είναι:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$$

- **Τυπική απόκλιση (Standard deviation):** Αποτελεί το μέτρο της διασποράς των τιμών σε σχέση με την τιμή του μέσου όρου. Συμβολίζεται με το  $S$  και ο μαθηματικός της τύπος είναι:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

- **Μέγιστη τιμή (Max):** Πρόκειται για τη μεγαλύτερη τιμή του δειγματικού χώρου, αποτελώντας το ανώτατο όριο των δειγματικών τιμών.
- **Ελάχιστη τιμή (Min):** Πρόκειται για τη μικρότερη τιμή του δειγματικού χώρου, αποτελώντας το κατώτατο όριο των δειγματικών τιμών.
- **Διάμεσος (Median value):** Αποτελεί το αντιπροσωπευτικότερο μέτρο της στατιστικής καθώς δεν επηρεάζεται από ακραίες τιμές. Πρόκειται για τη μεσαία παρατήρηση σε ένα δειγματικό χώρο  $n$  παρατηρήσεων οι οποίες έχουν διαταχθεί σε αύξουσα σειρά, όταν το  $n$  είναι περιττός αριθμός, ή ο μέσος όρος (ημι-άθροισμα) των δυο μεσαίων παρατηρήσεων όταν το  $n$  είναι άρτιος αριθμός.
- **Τεταρτημόρια (Quartiles):** Αποτελούν τις τιμές της παραμέτρου που χωρίζουν το σύνολο των τιμών της σε τέσσερις ισοπληθείς ομάδες. Το πρώτο τεταρτημόριο (Q1) αντιστοιχεί στο 25% των τιμών, το δεύτερο τεταρτημόριο (Q2) αντιστοιχεί στο 50% των τιμών και συμπίπτει με τη διάμεσο, το τρίτο τεταρτημόριο (Q3) αντιστοιχεί στο 75% των τιμών. Το τέταρτο τεταρτημόριο (Q4) συμπίπτει με τη μέγιστη τιμή.

Επιπροσθέτως, στο πλαίσιο της στατιστικής επεξεργασίας πραγματοποιήθηκε ανάλυση συσχετίσεων κατά Pearson και Spearman. Όσον αφορά τον συντελεστή συσχέτισης κατά Pearson (Pearson correlation coefficient) που υπολογίστηκε, είναι ένας μέγεθος που μετρά τη συσχέτιση μεταξύ δύο παραμέτρων. Οι τιμές που παίρνει είναι μεταξύ του -1 και +1. Οι αρνητικές τιμές δηλώνουν αντίστροφη συσχέτιση. Σημαντική προϋπόθεση της εφαρμογής της μεθόδου αυτής είναι οι δύο παράμετροι να κατανέμονται κανονικά και να έχουν επιλεγεί τυχαία. Η συσχέτιση χαρακτηρίζεται ως πολύ ισχυρή, ισχυρή, μέτρια, ασθενής και πολύ ασθενής, όταν οι τιμές του συντελεστή είναι  $|0,8 - 1|$ ,  $|0,6 - 0,79|$ ,  $|0,4 - 0,59|$ ,  $|0,2 - 0,39|$  και  $|0 - 0,19|$  αντίστοιχα (Evans 1996). Ο συντελεστής συσχέτισης είναι στατιστικά σημαντικός και οριακά στατιστικά σημαντικός όταν η τιμή p είναι  $p < 0,01$  και  $p < 0,05$ , αντίστοιχα. Η σχέση από την οποία υπολογίζεται ο συντελεστής συσχέτισης κατά Pearson είναι:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Όπου  $r_{xy}$  = συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των παραμέτρων x και y,

n = πλήθος δειγμάτων,

$x_i$  = μεμονωμένη τιμή της παραμέτρου x,

$\bar{x}$  = μέση τιμή της παραμέτρου x,

$y_i$  = μεμονωμένη τιμή της παραμέτρου y, και

$\bar{y}$  = μέση τιμή της παραμέτρου y.

Εν συνεχεία ο συντελεστής συσχέτισης Spearman, συμβολίζεται με το γράμμα ρ ή ως  $r_s$  είναι ένα μη-παραμετρικό μέτρο της στατιστικής εξάρτησης μεταξύ δύο παραμέτρων. Δείχνει το πόσο καλά μπορεί να περιγραφεί η σχέση μεταξύ των δύο παραμέτρων χρησιμοποιώντας μια μονότονη συνάρτηση. Εάν δεν υπάρχουν επαναλαμβανόμενες τιμές των δεδομένων, μια τέλεια συσχέτιση Spearman (δηλ. ίση με |1|) συμβαίνει όταν κάθε μία από τις παραμέτρους είναι μια τέλεια μονότονη συνάρτηση της άλλης. Ο συντελεστής συσχέτισης είναι στατιστικά σημαντικός και οριακά στατιστικά σημαντικός όταν η τιμή p είναι  $p < 0,01$ ,  $p < 0,05$ , αντίστοιχα. Ο

συντελεστής συσχέτισης Spearman, είναι κατάλληλος τόσο για συνεχείς όσο και για διακριτές μεταβλητές, συμπεριλαμβανομένων των τακτικών διακριτών μεταβλητών. Συντελεστής συσχέτισης Spearman ορίζεται όπως ο συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ των μεταβλητών κατάταξης και παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες με τη μόνη διαφορά ότι ο συντελεστής συσχέτισης Spearman λειτουργεί στις κατατάξεις των δεδομένων και όχι στα αρχικά δεδομένα. Οι  $n$  πρώτες βαθμολογίες  $X_i, Y_i$  μετατρέπονται σε κατατάξεις  $x_i, y_i$ , και ο  $\rho$  υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

Όπου  $n$ = το μέγεθος του δείγματος και

$d_i = x_i - y_i$  – ζεύγος δεδομένων  $x_i, y_i$ .

Επιπλέον χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της σχέσης μεταξύ 2 παραμέτρων όταν η μία είναι συνεχής με κανονική κατανομή και η άλλη δεν ακολουθεί την κανονική κατανομή ή είναι κατηγορική καθώς και όταν δεν ακολουθούν και οι 2 την κανονική κατανομή. Επίσης η συσχέτιση κατά Spearman εφαρμόζεται κυρίως στην περίπτωση που δεν ισχύει η προϋπόθεση της κανονικότητας των παραμέτρων.

Το πρόσημο του συντελεστή συσχέτισης Spearman δείχνει την κατεύθυνση της σχέσης μεταξύ της  $X$  (ανεξάρτητη μεταβλητή) και της  $Y$  (εξαρτημένη μεταβλητή). Πιο συγκεκριμένα όταν η  $Y$  τείνει να αυξάνεται όταν η  $X$  αυξάνει και ο συντελεστής συσχέτισης Spearman είναι θετικός ενώ αν η  $Y$  τείνει να μειώνεται όταν η  $X$  αυξάνει και ο συντελεστής συσχέτισης Spearman είναι αρνητικός. Τέλος μια μηδενική συσχέτιση Spearman δείχνει ότι δεν υπάρχει τάση για την  $Y$  είτε να αυξηθεί ή να μειωθεί, όταν η  $X$  αυξάνει.

Επιπλέον, στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας πραγματοποιήθηκε πολυκριτηριακή στατιστική ανάλυση με τις μεθόδους της παραγοντικής ανάλυσης και της ιεραρχικής ανάλυσης κατά συστάδες. Ειδικότερα, η παραγοντική ανάλυση (στα αγγλικά Factor Analysis) αποσκοπεί στην εύρεση της ύπαρξης κοινών παραγόντων ανάμεσα σε μία ομάδα παραμέτρων. Η παραγοντική ανάλυση μέσω της μεθόδου της ανάλυσης κύριων συνιστωσών (Principal Component analysis-PCA) είναι η πιο διαδομένη μέθοδος πολυκριτηριακής στατιστικής ανάλυσης (multivariate statistical

analysis). Η παραγοντική ανάλυση αποτελεί μία στατιστική διαδικασία η οποία μετατρέπει μία ομάδα παρατηρήσεων δυνητικά συσχετιζόμενων παραμέτρων σε μία ομάδα νέων τιμών μη γραμμικά συσχετιζόμενων παραμέτρων, οι οποίες καλούνται κύριες συνιστώσες. Ο αριθμός των νέων παραμέτρων που προκύπτει είναι ίσος ή/και συχνότερα πολύ μικρότερος από τον αριθμό των αρχικών παραμέτρων. Η μετάβαση αυτή πραγματοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε, η πρώτη συνιστώσα να εξηγεί τη μέγιστη δυνατή διακύμανση που αναπτύσσεται μεταξύ των αρχικών παραμέτρων, η δεύτερη, μη συσχετιζόμενη με την πρώτη, να εξηγεί ένα σημαντικό μέρος αυτής αλλά πάντα μικρότερο της πρώτης κοκ. Σκοπός της ανάλυσης των κυρίων συνιστωσών είναι να μειωθεί η διάσταση του προβλήματος και να βρεθεί η ύπαρξη κοινών παραγόντων ανάμεσα σε μια ομάδα ασυσχέτιστων παραμέτρων. Αυτή η στατιστική μέθοδος απαιτεί οι παράμετροι να ακολουθούν την κανονική κατανομή. Ως εκ τούτου, οι τιμές των παραμέτρων μετατράπηκαν σε τυπικές τιμές (z-scores), ώστε να χρησιμοποιηθούν ως τιμές εισόδου (input values) στην ανάλυση κυρίων συνιστωσών. Η συμβολή των λιγότερο σημαντικών παραμέτρων επιτυγχάνεται με την εφαρμογή της παραγοντικής ανάλυσης. Ο άξονας που ορίζεται από την ανάλυση κυρίων συνιστωσών περιστρέφεται και παράγεται μια νέα ομάδα παραμέτρων. Η περιστροφή χρησιμοποιείται για την ενίσχυση της ποιότητας και ερμηνείας των εξαγόμενων παραγόντων, ώστε τα αποτελέσματα να γίνουν πιο ερμηνεύσιμα. Η πιο διαδεδομένη τεχνική περιστροφής στις γεωχημικές επιστημονικές δημοσιεύσεις είναι η ορθογώνια περιστροφή μεγιστοποίησης της διακύμανσης (Varimax) (π.χ. Papazotos et al., 2020, Vasileiou et al., 2019, Papazotos et al., 2023) η οποία ελαχιστοποιεί τον αριθμό παραμέτρων που έχουν μεγάλες επιβαρύνσεις για κάθε παράγοντα. Η ορθογώνια περιστροφή μεγιστοποίησης της διακύμανσης (Varimax) χρησιμοποιεί τη διαδικασία κανονικοποίησης του Kaiser (Kaiser, 1958), σύμφωνα με την οποία, ο αριθμός των παραγόντων πρέπει είναι ίσος με τον αριθμό των ιδιοτιμών (eigenvalues) του πίνακα συσχέτισης που είναι μεγαλύτερες από τη μονάδα. Παράγοντες που παρουσιάζουν ιδιοτιμές μικρότερες της μονάδας αποκλείονται από την ανάλυση. Η μέθοδος Scree plot (Cattell, 1966) χρησιμοποιήθηκε για να προσδιοριστεί ο αριθμός των παραγόντων από το γράφημα των ιδιοτιμών σε φθίνουσα σειρά. Οι φορτίσεις των παραγόντων ομαδοποιούνται σε τρεις κατηγορίες:

- απόλυτες τιμές από 0,75 έως 1 χαρακτηρίζονται ως ισχυρές,
- απόλυτες τιμές από 0,5 έως 0,75 χαρακτηρίζονται ως μέτριες και

- απόλυτες τιμές από 0,3 έως 0,5 χαρακτηρίζονται ως ασθενείς (Liu et al., 2003).

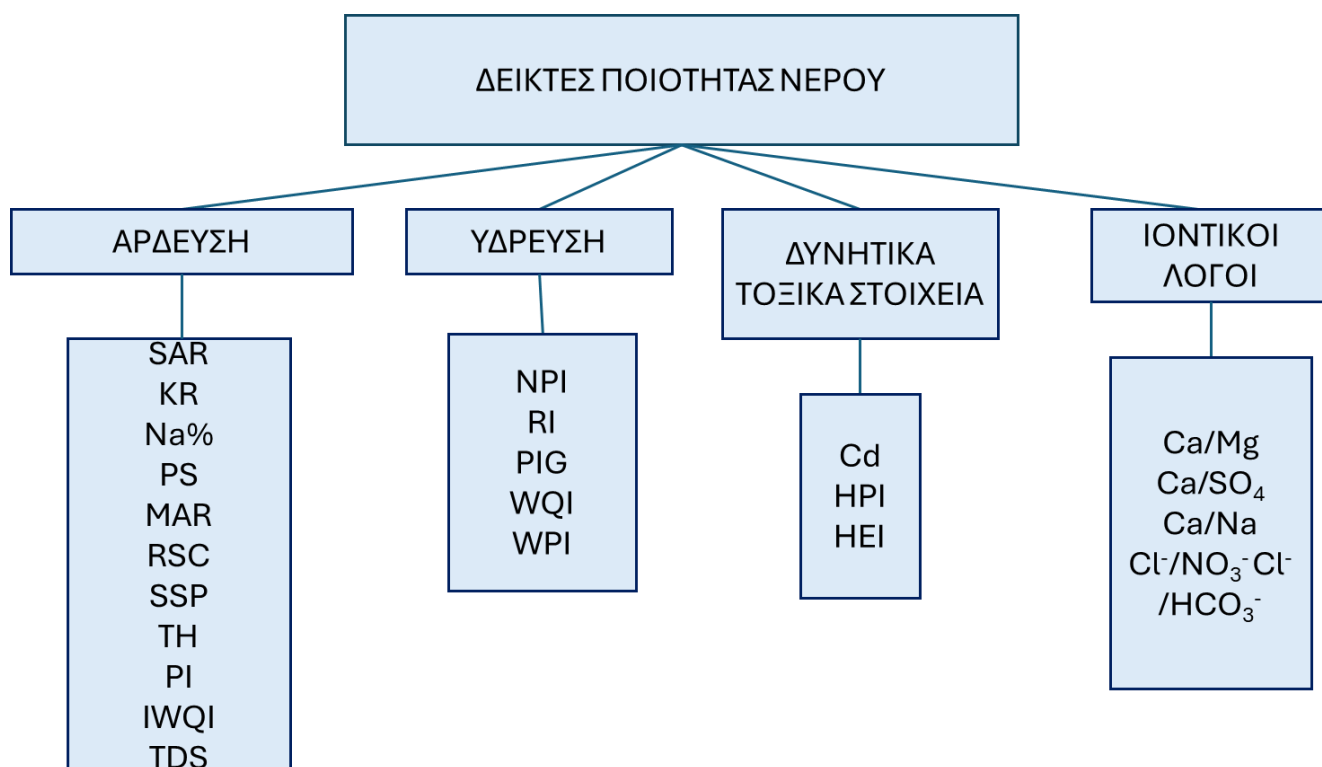
Τα βασικά κριτήρια τα οποία πρέπει να ικανοποιούνται, ώστε η επεξεργασία να είναι στατιστικά σημαντική και ικανοποιητική, είναι ο έλεγχος της υπόθεσης της σφαιρικότητας (Bartlett's test of sphericity) που πρέπει να είναι  $<0,5$  και ο στατιστικός έλεγχος των Kaiser Meyer Olkin (KMO), που παίρνει τιμές στο διάστημα  $[0,1]$  και η τιμή πρέπει να είναι  $>0,5$ . Αυτά τα δύο κριτήρια υποδεικνύουν ότι τα δεδομένα είναι κατάλληλα για παραγοντική ανάλυση (Bartlett, 1950, Armstrong and Soelberg, 1968, Kaiser, 1970).

Τέλος η ιεραρχική ανάλυση κατά συστάδες (Hierarchical Cluster Analysis - HCA) χρησιμοποιείται σε πολλές επιστήμες για να ομαδοποιήσει δεδομένα με παρόμοια χαρακτηριστικά και ανήκει στην κατηγορία των πολυκριτηριακών στατιστικών αναλύσεων. Σκοπός της μεθοδολογίας αυτής είναι ο διαχωρισμός μιας συλλογής από στοιχεία (π.χ. δεδομένα από χημικά στοιχεία) σε υποσύνολα έτσι ώστε να υπάρχει ομοιογένεια μέσα σε ένα υποσύνολο και ανομοιογένεια μεταξύ των στοιχείων που ανήκουν σε διαφορετικά υποσύνολα. Επιπροσθέτως, μπορεί να αποσκοπεί στην ιεραρχική οργάνωση των συστάδων με τη διαδοχική ομαδοποίηση αυτών, έτσι ώστε σε κάθε στάδιο της ιεραρχίας, οι συστάδες που ανήκουν στην ίδια ομάδα να είναι πιο όμοιες μεταξύ τους από αυτές που ανήκουν σε άλλη ομάδα. Μια επιτυχημένη ανάλυση θα πρέπει να καταλήξει σε ομάδες για τις οποίες οι παρατηρήσεις μέσα σε κάθε ομάδα να είναι όσο γίνεται πιο ομοιογενείς, αλλά παρατηρήσεις διαφορετικών ομάδων να διαφέρουν όσο γίνεται περισσότερο.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι συγκεντρώσεις κάποιων παραμέτρων προσδιορίστηκαν χαμηλότερες από το όριο ανιχνευσιμότητας της αναλυτικής μεθόδου και γι' αυτό το λόγο αντικαταστάθηκαν από το μηδέν, ώστε να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός των περιγραφικών στατιστικών μεγεθών. Η στατιστική ανάλυση και επεξεργασία δεδομένων πραγματοποιήθηκε συνδυαστικά με χρήση του Microsoft Excel και του λογισμικού SPSS.

### **3.3 Γεωπεριβαλλοντικοί δείκτες για την αξιολόγηση της ποιότητας των υπογείων νερών**

Στην Εικόνα 13 παρουσιάζονται οι κατηγοριοποιήσεις των γεωπεριβαλλοντικών δεικτών για την αξιολόγηση της ποιότητας των υπογείων νερών βάσει χρήσης.



*Εικόνα 13: Κατηγοριοποίηση των γεωπεριβαλλοντικών δεικτών με βάση τη χρήση των υπόγειων νερών.*

### 3.3.1 Γεωπεριβαλλοντικοί δείκτες για άρδευση

Για να εξεταστεί η καταλληλότητα των υπόγειων νερών για άρδευση, στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας υπολογίστηκαν διάφοροι γεωπεριβαλλοντικοί δείκτες όπως οι SAR, KR, Na%, PS, MAR, RSC, SSP, TH, PI, IWQI και TDS (Arslan et al. 2023, Amiri et al. 2021, Bahir et al. 2022, Jamshidzadeh et al., 2011)

#### 3.3.1.1 Συντελεστής προσρόφησης νατρίου - Sodium Adsorption Ratio (SAR)

Αποτελεί μια σημαντική παράμετρο που αντιπροσωπεύει την τοξική επίδραση των κατιόντων νατρίου. Εάν το νερό άρδευσης παρουσιάζει υψηλό ποσοστό  $\text{Na}^+$  και  $\text{Ca}^{2+}$  σημαίνει πως έχει πραγματοποιηθεί ανταλλαγή ιόντων με αποτέλεσμα το έδαφος



να εμπλουτίζεται με  $\text{Na}^+$  και να εμφανίζει χαμηλά ποσοστά  $\text{Ca}^{2+}$  κάτι που δεν είναι καλό ούτε για το έδαφος ούτε για τις καλλιέργειες. Υπολογίζεται από τη σχέση

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{2}}}$$

Η ταξινόμηση της ποιότητας του νερού με βάση το SAR είναι η εξής (Putranto et al.,2023):

A) <10 Άριστη

B) 10-18 Καλή

Γ) 18-26 Αμφίβολη ή αρκετά κακή

Δ) >26 Ακατάλληλη

### 3.3.1.2 Αναλογία Kelley (KR)

Ο δείκτης KR αποτελεί έναν σημαντικό δείκτη για άρδευση καθώς υπολογίζει την ισορροπία μεταξύ των ιόντων  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  και του  $\text{Mg}^{2+}$  στο νερό. Όταν ο δείκτης έχει τιμή > 1 υποδηλώνει μεγάλη ποσότητα  $\text{Na}^+$  στα υπόγεια νερά επομένως το νερό θεωρείται ακατάλληλο για άρδευση, ενώ όταν εμφανίζει τιμή < 1 θεωρείται κατάλληλο. Υπολογίζεται από τη σχέση  $\text{KR} = \text{Na}^+ / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$  και οι μονάδες μέτρησης του είναι meq/L.

### 3.3.1.3 Ποσοστό νατρίου (Na%)

Η μεγάλη συγκέντρωση νατρίου στο νερό επηρεάζει τόσο τα εδάφη όσο και τα φυτά και απορροφάται από αργιλικά ορυκτά, τα οποία, με τη σειρά τους, απελευθερώνουν ιόντα μαγνησίου και ασβεστίου (Abdel-Fattah et al. 2020). Έτσι, μειώνεται η διαπερατότητα του εδάφους, δημιουργείται κακή αποστράγγιση και το  $\text{Na}^+$  παραμένει στο έδαφος. Ο συγκεκριμένος δείκτης λοιπόν είναι απαραίτητος για την αξιολόγηση της καταλληλότητας των νερών για γεωργική χρήση. Υπολογίζεται από τη σχέση (Acharya et al.,2018):

$$\text{Na}\% = (\text{Na} + \text{K}) / (\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{K}) \times 100$$

Η ταξινόμηση της ποιότητας του νερού με βάση τον δείκτη Na% είναι η εξής:

A) <20 Πολύ καλή

B) 20–40 Καλή

Γ) 40-60 Μέτρια (αποδεκτή)

Δ) 60-80 Κακή (αμφίβολη)

Ε) >80 Πολύ κακή (ακατάλληλη)

#### **3.3.1.4 Αλατότητα -Potential salinity (PS)**

Ο δείκτης PS αξιολογεί τη συγκέντρωση αλάτων που δημιουργούνται από τη συσσώρευση χλωριόντων και θεικών ιόντων στο έδαφος και οδηγούν στην αύξηση της αλατότητας του (Montoroi 2018).

Το PS υπολογίζεται από τη σχέση:  $PS = Cl^- + 0,5SO_4^{2-}$  (meq/L)

Η ταξινόμηση της ποιότητας του νερού με βάση τον δείκτη PS είναι η ακόλουθη:

A) <3 Καλή

B) 3–15 Μεσαία

Γ) >15 Ακατάλληλη

#### **3.3.1.5 Ποσοστό μαγνησίου- Magnesium hazard (MAR)**

Το ποσοστό μαγνησίου MAR είναι ένας δείκτης για την αξιολόγηση της καταλληλότητας του νερού για άρδευση. Όταν η συγκέντρωση του  $Mg^{2+}$  στο νερό είναι μεγάλη επηρεάζεται η ποιότητα του εδάφους καθιστώντας το υπερβολικά αλκαλικό, μειώνοντας τις αποδόσεις των καλλιεργειών (Wang et al., 2020).

Υπολογίζεται από τη σχέση :  $MAR = Mg^{2+}/(Mg^{2+} + Ca^{2+}) \times 100$

Όταν η τιμή MAR είναι < 50 το υπόγειο νερό θεωρείται κατάλληλο για άρδευση, ενώ όταν είναι > 50 θεωρείται ως επιβλαβές και ακατάλληλο για άρδευση.

#### **3.4.1.6 Υπόλοιπο Ανθρακικού Νατρίου - Residual Sodium Carbonate (RSC)**

Ο δείκτης RSC προσδιορίζει την ύπαρξη  $Ca^{2+}$  και  $Mg^{2+}$  στην επιφάνεια του εδάφους καθώς η ύπαρξη τους στο νερό άρδευσης μειώνει την ποιότητά του καθιζάνοντας αλκαλικά μέταλλα, κυρίως  $Mg^{+2}$  και  $Ca^{+2}$ . Οι τιμές του δείκτη RSC είναι υψηλές σε περιοχές που είναι κυρίως από ξηρές έως ημίξηρες.

Υπολογίζεται από τη σχέση:  $RSC = (HCO_3^- + CO_3^{2-}) - (Ca^{2+} + Mg^{2+})$

Η ταξινόμηση της ποιότητας των υπόγειων υδάτων με βάση τον δείκτη RSC είναι:

A) <1,25 Καλή

B) 1,25–2,50 Μεσαία

Γ) >2,50 Ακατάλληλη

### 3.3.1.7 Ποσοστό διαλυτού νατρίου - Soluble sodium percentage (SSP)

Ο δείκτης SSP χρησιμοποιείται για την καταλληλότητα των υπόγειων νερών για αρδευτικούς σκοπούς. Αξιολογεί το ποσοστό του διαλυτού νατρίου στα υπόγεια ύδατα. Όταν ο δείκτης SSP είναι <50 το νερό είναι κατάλληλο για άρδευση, ενώ >50 θεωρείται ακατάλληλο.

Ο δείκτης SSP υπολογίζεται από τη σχέση ( Acharya et al.,2018):

$$SSP = (Na^+) \times 100 / (Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+)$$

### 3.3.1.8 Ολική σκληρότητα - Total Hardness (TH)

Πρόκειται για μια σημαντική παράμετρο που αντιπροσωπεύει το σύνολο των ιόντων  $Ca^{2+}$  και  $Mg^{2+}$  και χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της καταλληλότητας του νερού τόσο για οικιακή όσο και για αρδευτική χρήση.

Υπολογίζεται από τη σχέση  $TH = 2.5 \times (Ca^{2+}) + 4.1 \times (Mg^{2+})$

Όπου ( $Ca^{2+}$ ) είναι η συγκέντρωση των ιόντων ασβεστίου σε mg/L και ( $Mg^{2+}$ ) είναι η συγκέντρωση των ιόντων μαγνησίου σε mg/L.

Η σκληρότητα του νερού ταξινομείται στις εξής κατηγορίες:

A) Μαλακό νερό: 0-60 mg/L ως  $CaCO_3$

B) Μέτρια σκληρό νερό: 61-120 mg/L ως  $CaCO_3$

Γ) Σκληρό νερό: 121-180 mg/L ως  $CaCO_3$

Δ) Πολύ σκληρό νερό: >180 mg/L ως  $CaCO_3$

### 3.3.1.9 Δείκτης διαπερατότητας- Permeability Index (PI)

Πρόκειται για έναν δείκτη που εκφράζει τη διαπερατότητα του εδάφους η οποία επηρεάζεται από τη μακροχρόνια χρήση του νερού άρδευσης λόγω της ύπαρξης νατρίου, ασβεστίου, μαγνησίου και όξινων ανθρακικών.

Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$PI = \frac{(Na^+ + \sqrt{HCO_3^-})}{(Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+)} \times 100$$

Ο δείκτης PI ταξινομείται σε τρεις κατηγορίες:

A)  $PI > 75\%$  (κατηγορία I) - Κατάλληλο για άρδευση

B)  $PI = 25-75\%$  (κατηγορία II) - καλό για άρδευση

Γ)  $PI < 25\%$  (κατηγορία III) – ακατάλληλο για άρδευση

### 3.3.1.10 Δείκτης ποιότητας αρδευτικού νερού - Irrigation water quality index (IWQI)

Ο δείκτης IWQI είναι μία από τις βασικές μεθόδους ανάλυσης της ποιότητας του νερού άρδευσης καθώς κατηγοριοποιεί την ποιότητα του νερού με βάση την επίδρασή του στο έδαφος και τα φυτά.

Υπολογίζεται σε τρία βήματα: Το πρώτο βήμα περιλαμβάνει τις παραμέτρους που είναι κατάλληλες για τη χρήση της άρδευσης, το δεύτερο βήμα περιλαμβάνει τα βάρη ( $W_i$ ) και της ποιότητας των παραμέτρων ( $Q_i$ ) (Eid et.al 2023) . Τέλος, το τρίτο βήμα προσδιορίζει το  $q_i$  με την εξίσωση που ακολουθεί:

$$(Q_i) = q_i(\max) - [ (x_{ij} - x_{inf}) * q_i(\text{amp}) / x(\text{amp}) ]$$

Όπου  $q_i(\max)$ : είναι η μέγιστη τιμή του  $q_i$  για τις κλάσεις.

$x_{ij}$ : είναι η τιμή για τις διάφορες παραμέτρους.

$x_{inf}$ : είναι η τιμή που αντιστοιχεί στο ελάχιστο όριο της κατηγορίας στην οποία ανήκει κάθε παράμετρος.

$q_{iamp}$ : είναι το πλάτος της κατηγορίας.

$x_{amp}$ : είναι η πληρότητα της κατηγορίας σε κάθε παράμετρο ανήκει.

Η ταξινόμηση του δείκτη IWQI είναι η εξής:

85–100 Χωρίς περιορισμό

70–85 Χαμηλός περιορισμός

55–70 Μέτριος περιορισμός

40–55 Υψηλός περιορισμός

<40 Πολύ υψηλός περιορισμός

### **3.3.1.11 Συνολικά διαλελυμένα στερεά - Total dissolved solids (TDS)**

Ο δείκτης TDS είναι από τις πιο σημαντικές παραμέτρους για την αξιολόγηση της καταλληλότητας του νερού άρδευσης αλλά και για τη συνολική αξιολόγηση της ποιότητας των υπόγειων υδάτων. Τα επιτρεπόμενα συνολικά διαλυμένα άλατα είναι 500 mg/L. Οι υψηλές τιμές TDS στα υπόγεια ύδατα γενικά δεν είναι επιβλαβείς για τον άνθρωπο, αλλά η υψηλή συγκέντρωση αυτών μπορεί να επηρεάσει άτομα που πάσχουν από νεφρικές και καρδιακές παθήσεις.

### **3.3.2. Γεωπεριβαλλοντικοί δείκτες για ύδρευση**

Για να εξεταστεί η καταλληλότητα των υπόγειων νερών για ύδρευση, στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας υπολογίστηκαν διάφοροι γεωπεριβαλλοντικοί δείκτες όπως οι NPI, RI, PIG, WQI και WPI (Hossain et al.,2020 ,Jafari Shalamzari et al.,2018, Zhang et al.,2019).

#### **3.3.2.1. Δείκτης νιτρορύπανσης -Nitrate pollution index (NPI)**

Η νιτρορύπανση αποτελεί τη βασική ανθρωπογενή μεταβλητή που επηρεάζει την ποιότητα των υπόγειων νερών. Το νερό που περιέχει υψηλή περιεκτικότητα σε νιτρικά άλατα μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα υγείας. Ο δείκτης NPI προσδιορίστηκε με τον ακόλουθο τύπο (Egbueri et al.,2023) :

$$NPI = (C - H_{AV}) / H_{AV}$$

όπου το C είναι η τιμή των νιτρικών που μετρήθηκε σε κάθε δείγμα και το  $H_{AV}$  είναι η τιμή κατωφλίου για τα νιτρικά άλατα ανθρωπογενούς προέλευσης (δηλ. 10 mg/L, Panno et al., 2006) στα υπόγεια νερά.

Η ταξινόμηση των υπόγειων υδάτων με βάση τον δείκτη NPI είναι:

<0 Καθαρό

0–1 Ελαφρώς ρυπασμένο

1–2 Μέτρια ρυπασμένο

>2 Πολύ ρυπασμένο

### 3.3.2.2. Δείκτης Revelle - Revelle Index (RI)

Ο δείκτης Revelle RI αποτελεί έναν δείκτη προσδιορισμού της ποιότητας των υπόγειων νερών σχετικά με την αλατότητα και καθορίζεται επίσης από το ποσοστό των ανιόντων που υπάρχουν στο νερό. Γενικά όταν ο δείκτης Revelle είναι  $< 1$  υποδηλώνει καλή ποιότητα νερού (Omotoso et al., 2023)

Υπολογίζεται από τη σχέση  $RI = rCl^- / (rHCO_3^- + rCO_3^{2-})$  όπου

$r$  = milliequivalents ανά λίτρο (meq/l)

Η ταξινόμηση του δείκτη RI είναι:

RI  $< 0,5$  (δεν επηρεάζεται),

RI=0,5- 6,6 (ελαφρώς επηρεάζεται)

RI  $> 6,6$  (Επηρεάζεται έντονα) (Zaharin et al., 2009; Revelle, 1941)

### 3.3.2.3. Δείκτης ρύπανσης των υπόγειων υδάτων -Pollution index of groundwater (PIG)

Ο δείκτης PIG χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της ποιότητας των υπόγειων υδάτων για ύδρευση. Ο υπολογισμός του γίνεται σε πέντε στάδια: i) υπολογισμός του σχετικού βάρους  $R_w$  (σε μια κλίμακα από 1-5) ii) υπολογισμός του βάρους ( $W_p$ ) για καθεμία από τις μεταβλητές ποιότητας των υπόγειων υδάτων, iii) εκτίμηση της συγκέντρωσης  $S_c$ , που προκύπτει με διαίρεση καθεμιάς από τη μεταβλητή το αντίστοιχο όριο ποιοτικού προτύπου ( $D_s$ ), iv) περιλαμβάνει τον υπολογισμό της συνολικής ποιότητας των υπόγειων υδάτων ( $O_w$ ) πολλαπλασιάζοντας την παράμετρο βάρους ( $W_p$ ) με τη συγκέντρωση ( $S_c$ ) v) περιλαμβάνει το άθροισμα όλων των τιμών  $O_w$  ανά δείγμα (Akakuru et al., 2022)

$$W_p = \frac{R_w}{\sum R_w},$$

$$S_c = \frac{C}{D_c},$$

$$O_w = W_p * S_i,$$

$$PIG = \sum O_w.$$

Η ταξινόμηση των υπόγειων υδάτων με βάση τον δείκτη PIG είναι:

i) <1 Ασήμαντη ρύπανση ii) 1–1,5 Χαμηλή ρύπανση iii) 1,5–2,0 Μέτρια ρύπανση  
iv) 2,0–2,5 Υψηλή ρύπανση v) >2,5 Πολύ υψηλή ρύπανση

#### 3.3.2.4. Δείκτης ποιότητας νερού - Water quality index (WQI)

Ο δείκτης WQI χρησιμοποιείται για την παροχή βασικών πληροφοριών σχετικά με την ποιότητα του νερού μειώνοντας πολλές ιδιότητες του νερού σε μία μόνο τιμή (Naik et al., 2022). Το WQI υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την EC, pH, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>. Τιμές TDS, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, F<sup>-</sup> και NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

Το WQI προσδιορίζεται με τις παρακάτω σχέσεις:

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

$$q_i = \frac{C_i}{S_i} \times 100$$

$$WQI = \sum_{i=1}^n W_i \times q_i$$

όπου  $W_i$ =σχετικό βάρος, το  $w_i$  αναφέρεται στο βάρος της κάθε παραμέτρου και το  $n$  αντιπροσωπεύει τον αριθμό των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν, το  $q_i$  αναφέρεται στην ποιότητα των παραμέτρων, το  $C_i$  αναφέρεται στο επίπεδο του κάθε χαρακτηριστικού και το  $S_i$  δείχνει την επιτρεπόμενη τιμή για κάθε παράμετρο σύμφωνα με τον WHO (2017).

Η ταξινόμηση των νερών με βάση τον δείκτη WQI είναι:

<50: Εξαιρετικό νερό

50-100 Καλό νερό

100-200 Κακό νερό

200-300 Πολύ κακό νερό

>300 Νερό ακατάλληλο για πόση

### 3.3.2.5. Δείκτης ρύπανσης υδάτων-Water pollution index (WPI)

Ο δείκτης WPI εφαρμόζεται σε όλους τους τύπους χρήσης νερού για τον έλεγχο και τη διαχείριση της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων. Ο WPI βασίζεται στα τυπικά επιτρεπόμενα όρια της παραμέτρου των υπόγειων υδάτων που συνιστάται από τον WHO (2006).

$$WPI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n PLi$$

Υπολογίζεται από τη σχέση:

Όπου το  $PLi$  είναι 
$$PLi = 1 + \left( \frac{Ci - Si}{Si} \right)$$

Εάν, το pH είναι < 7, τότε συνιστάται η εξίσωση  $PLi=(Ci-7)/Si_a-7$

Εάν, το pH είναι >7, τότε συνιστάται η εξίσωση  $PLi=(Ci-7)/Si_b-7$

Το  $n$  εκφράζει τον αριθμό των παραμέτρων που έλαβαν μέρος για τον υπολογισμό του  $PLi$ . Στην παρούσα μελέτη δέκα παράμετροι υπολογίστηκαν για το  $PLi$  (pH,EC,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,Cl<sup>-</sup>,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>,HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>,Ca<sup>2+</sup>,Mg<sup>2+</sup>,Na<sup>+</sup> και K<sup>+</sup>)

Η ποιότητα του νερού βασίζεται κυρίως στην παρατηρούμενη συγκέντρωση ( $C_i$ ) και στην τυπική επιτρεπόμενη συγκέντρωση ( $S_i$ ). Όπου,  $S_{i_a}$  είναι ελάχιστη αποδεκτή τιμή pH και  $S_{i_b}$  είναι μέγιστη αποδεκτή τιμή pH.

Η ταξινόμηση των υδάτων με βάση τον δείκτη WPI είναι η εξής:



WPI < 0,5 σημαίνει εξαιρετική ποιότητα,

0,5 > WPI < 0,75 υποδηλώνει καλή ποιότητα,

0,75 > WPI < 1 είναι μέτριας ποιότητας νερό

WPI > 1, υποδηλώνει πολύ κακής ποιότητας νερό.

### **3.3.3. Γεωπεριβαλλοντικοί δείκτες για δυνητικά τοξικά στοιχεία**

Για να εξεταστεί η καταλληλότητα των υπόγειων νερών λόγω της παρουσίας δυνητικά τοξικών στοιχείων, στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας υπολογίσθηκαν διάφοροι γεωπεριβαλλοντικοί δείκτες όπως ο βαθμός μόλυνσης Cd (Degree of contamination), ο δείκτης ρύπανσης από βαρέα μέταλλα HPI (Heavy metal pollution index) και ο δείκτης αξιολόγησης βαρέων μετάλλων HEI (Heavy metal evaluation index) (Kumar et al., 2019)

#### **3.3.3.1. Βαθμός μόλυνσης - Degree of contamination (Cd)**

Με βάση τον δείκτη Cd, η ποιότητα του νερού αξιολογείται με τον υπολογισμό του βαθμού μόλυνσης και υπολογίζεται χωριστά για κάθε δείγμα νερού. Το Cd αποτελεί μια σχέση που συνδυάζει τις επιδράσεις πολλών παραμέτρων ποιότητας του νερού που θεωρούνται επιβλαβείς για το οικιακό. Στην παρούσα μελέτη, τα στοιχεία που εξετάστηκαν είναι το As, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Co και Zn.

Σύμφωνα με τους Backman et al. (1997) και Edet and Offiong (2002), το Cd μπορεί να χωριστεί σε τρεις κατηγορίες: χαμηλό (Cd < 1), μεσαίο (Cd = 1–3) και υψηλό (Cd > 3).

$$C_d = \sum_{i=1}^n C_{fi}$$

Το Cd υπολογίζεται ως εξής:

Όπου  $C_{fi} = (M_i/S_i) - 1$ ,  $M_i$  είναι η παράμετρος στοιχείο που έχει επιλεγεί κάθε φορά και  $S_i$  η προτεινόμενη τιμή.

#### **3.3.3.2. Δείκτης ρύπανσης από βαρέα μέταλλα - Heavy metal pollution index (HPI)**

Ο δείκτης HPI δείχνει την επίδραση των διαλυμένων βαρέων μετάλλων και αντιπροσωπεύει την ποιότητα του νερού σε σχέση με τη συγκέντρωση βαρέων μετάλλων. Υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$HPI = \frac{\sum_{i=1}^n W_i Q_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

Όπου υπολογίζονται τα βάρη ( $W_i$ ) και της ποιότητας των παραμέτρων ( $Q_i$ ),  $n$  είναι ο αριθμός των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν.

Ταξινόμηση των υπόγειων νερών με βάση τον δείκτη HPI:

HPI > 100: Ακατάλληλο για διάφορες χρήσεις

HPI < 100: Κατάλληλο για διάφορες χρήσεις

### 3.3.3.3. Δείκτης αξιολόγησης βαρέων μετάλλων - Heavy metal evaluation index (HEI)

Ο δείκτης HEI είναι παρόμοιος με τον HPI, το οποίο δίνει μια συνολική ποιότητα του νερού όσον αφορά την περιεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα. Αυτός ο δείκτης χρησιμοποιείται ευρέως για την αξιολόγηση της ποιότητας των υπόγειων υδάτων.

Το HEI υπολογίζεται ως εξής:

$$HEI = \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{S_i}$$

όπου, το  $M_i$  είναι η παρακολουθούμενη τιμή της παραμέτρου  $i$  και το  $S_i$  αντιπροσωπεύει τη μέγιστη συγκέντρωση της  $i$ th παραμέτρου. Εάν η συγκέντρωση βαρέων μετάλλων είναι υψηλότερη από την τιμή  $S_i$ , τότε η ποιότητα του νερού είναι κακή.

Η ταξινόμηση των υπόγειων υδάτων με βάση τον δείκτη HEI είναι η εξής:

HEI < 10 χαμηλή ρύπανση

HEI = 10-20 μέτρια ρύπανση

HEI > 20 υψηλή ρύπανση

## 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 4.1 Περιγραφικά στατιστικά μεγέθη

Στον Πίνακα 5 δίνονται τα περιγραφικά στατιστικά μεγέθη (δηλ. μέση τιμή, ελάχιστη τιμή, μέγιστη τιμή, διάμεσος, τυπική απόκλιση, 1ο τεταρτημόριο, 3ο τεταρτημόριο) για όλες τις φυσικοχημικές παραμέτρους που προσδιορίστηκαν για τα 68 δείγματα υπογείων νερών της περιοχής Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων. Ενδεικτικά, στη συνέχεια αναφέρονται οι σπουδαιότερες από αυτές:

- pH: Οι τιμές του pH κυμαίνονται από 7,45 έως 9,64 με μέση και ενδιάμεση τιμή 8,22 και 8,12, αντίστοιχα.
- Ca<sup>2+</sup>: Οι συγκεντρώσεις των Ca<sup>2+</sup> κυμαίνονται από 0,90 mg/L έως 101 mg/L με μέση συγκέντρωση 18,4 mg/L και ενδιάμεση 8 mg/L, αντίστοιχα.
- Mg<sup>2+</sup>: Οι συγκεντρώσεις των Mg<sup>2+</sup> κυμαίνονται από 51 mg/L έως 363 mg/L με μέση και ενδιάμεση συγκέντρωση 133,14 mg/L και 128,5 mg/L, αντίστοιχα.
- Na<sup>+</sup>: Οι συγκεντρώσεις των Na<sup>+</sup> κυμαίνονται από 10,9 mg/L έως 405 mg/L με μέση και ενδιάμεση συγκέντρωση 70,95 mg/L και 28,95 mg/L, αντίστοιχα.
- Cl<sup>-</sup>: Οι συγκεντρώσεις των Cl<sup>-</sup> κυμαίνονται από 22 mg/L έως 815 mg/L με μέση και ενδιάμεση συγκέντρωση 164,5 mg/L και η ενδιάμεση είναι 72 mg/L, αντίστοιχα.
- NO<sub>3</sub><sup>-</sup>: Οι συγκεντρώσεις των NO<sub>3</sub><sup>-</sup> κυμαίνονται από 1 mg/L έως 100 mg/L με μέση και ενδιάμεση συγκέντρωση 20 mg/L και 12mg/L, αντίστοιχα.
- HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>: Οι συγκεντρώσεις των HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> κυμαίνονται από 202 mg/L έως 672 mg/L με μέση και ενδιάμεση συγκέντρωση 432,71 mg/L και 427,5 mg/L, αντίστοιχα.
- As: Οι συγκεντρώσεις του As κυμαίνονται από 0,5 mg/L έως 20,9 mg/L με μέση και ενδιάμεση συγκέντρωση 3mg/L και 1,3 mg/L, αντίστοιχα.
- Cr: Οι συγκεντρώσεις του Cr κυμαίνονται από 1,3 mg/L έως 506,9 mg/L με μέση και ενδιάμεση συγκέντρωση 57,41 mg/L και 21,40 mg/L, αντίστοιχα.
- Ni: Οι συγκεντρώσεις του Ni κυμαίνονται από 0,20 mg/L έως 9 mg/L με μέση και ενδιάμεση συγκέντρωση 1,74 mg/L και 1,10 mg/L, αντίστοιχα.
- Cu: Οι συγκεντρώσεις του Cu κυμαίνονται από 0,10 mg/L έως 52,3 mg/L, με μέση και ενδιάμεση συγκέντρωση 4,16 mg/L και 1,55 mg/L, αντίστοιχα.
- Zn: Οι συγκεντρώσεις του Zn κυμαίνονται από 1 mg/L έως 284,1 mg/L, με μέση και ενδιάμεση συγκέντρωση 25,24 mg/L και 8,50 mg/L, αντίστοιχα.

- Si: Οι συγκεντρώσεις του Si κυμαίνονται από 263  $\mu\text{g/L}$  έως 37292  $\mu\text{g/L}$ , με μέση και ενδιάμεση συγκέντρωση 15620,3  $\mu\text{g/L}$  και 12819  $\mu\text{g/L}$ , αντίστοιχα.

Πίνακας 5: Φυσικοχημικές και χημικές παράμετροι για την περιοχή Λουτρακίου-Γερανείων Ορέων-Σχίνου.

Παράμετρος	Μονάδες μέτρησης	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΔΙΑΜΕΣΟΣ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ	3ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ
pH		8,22	7,45	9,64	8,12	0,49	7,91	8,37
EC	μS/cm	1303,46	316,30	3943	1073,00	42,38	691,00	1631,50
Eh	mV	301,19	231,00	370,6	297,15	42,38	261,93	342,23
Ca <sup>2+</sup>	mg/L	18,40	0,90	101	8,00	21,13	3,29	28,80
Mg <sup>2+</sup>	mg/L	133,14	51,00	363	128,50	54,30	90,70	162,25
Na <sup>+</sup>	mg/L	70,95	10,90	405	28,95	86,93	15,60	82,28
K <sup>+</sup>	mg/L	1,47	0,13	21,1	0,84	2,61	0,60	1,41
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	432,71	202,00	672	427,50	120,24	330,75	532,00
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/L	31,31	5,00	381	8,00	55,08	5,00	35,75
Cl <sup>-</sup>	mg/L	164,50	22,00	815	72,00	200,64	33,00	218,50
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	20,00	1,00	100	12,00	23,54	2,45	30,23
As	μg/L	3,00	0,50	20,9	1,30	4,09	0,60	2,98
Cr	μg/L	57,41	1,30	506,9	21,40	98,33	13,38	50,65
Cu	μg/L	4,16	0,10	52,3	1,55	8,52	0,88	2,40
Ni	μg/L	1,74	0,20	9	1,10	1,73	0,50	2,43
Co	μg/L	0,05	0,02	0,56	0,03	0,07	0,02	0,05
Mn	μg/L	1,82	0,05	57,05	0,32	7,47	0,17	0,73
Pb	μg/L	0,26	0,20	3,1	0,20	0,36	0,20	0,20
Sb	μg/L	0,08	0,05	0,51	0,05	0,07	0,05	0,08
Cd	μg/L	0,05	0,05	0,05	0,05	0,00	0,05	0,05
Zn	μg/L	25,24	1,00	284,1	8,50	45,05	5,70	20,23
Si	μg/L	15620,30	263,00	37292,00	12819,00	9956,29	8803,50	23759,50



## 4.2 Γεωπεριβαλλοντικοί δείκτες

Στον Πίνακα 6, παρουσιάζονται τα περιγραφικά στατιστικά των γεωπεριβαλλοντικών δεικτών που υπολογίστηκαν για την αξιολόγηση της ποιότητας νερών για αρδευτικό σκοπό. Στους Πίνακες 7-9 φαίνονται οι δείκτες άρδευσης για την κάθε περιοχή ξεχωριστά Σχίνου-Λουτρακίου-Γεραναίων Ορέων.

**Πίνακας 6: Γεωπεριβαλλοντικοί δείκτες άρδευσης για όλη την περιοχή μελέτης**

Παράμετρος	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΠΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΔΙΑΜΕΣΟΣ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ	3ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ
SAR	1,16	0,20	6,80	0,56	1,29	0,32	1,31
KR	0,23	0,04	1,41	0,13	0,23	0,08	0,25
Na%	16,32	3,95	58,20	11,16	11,56	7,29	20,23
PS	4,97	0,67	26,95	2,13	6,13	1,00	6,38
MAR	93,19	78,83	99,52	95,49	5,93	87,82	98,60
RSC	-4,78	-24,49	-0,71	-3,42	4,18	-6,65	-1,87
SSP	16,36	3,95	58,45	11,19	11,60	7,32	20,27
TH	591,90	264,85	1740,80	585,10	258,73	380,15	729,28
PI	37,64	21,45	67,82	37,44	8,41	32,94	41,98
IWQI	59,64	20,13	77,32	59,86	12,56	57,45	68,53
TDS	872,48	383,79	2532,32	786,59	459,91	491,04	1103,91

**Πίνακας 7: Γεωπεριβαλλοντικοί δείκτες άρδευσης για την περιοχή του Σχίνου**

Παράμετρος	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΠΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΔΙΑΜΕΣΟΣ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ	3ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ
SAR	0,34	0,20	0,48	0,33	0,09	0,27	0,42
KR	0,08	0,04	0,12	0,08	0,03	0,05	0,10
Na%	7,04	3,95	10,72	7,00	2,20	5,19	8,99
PS	1,10	0,67	2,11	1,04	0,33	0,94	1,17
MAR	98,48	95,63	99,52	98,99	1,24	98,69	99,13
RSC	-3,96	-8,27	-1,60	-3,50	1,87	-4,64	-2,75
SSP	7,06	3,95	10,75	7,02	2,21	5,20	9,02
TH	541,18	313,11	741,28	598,38	130,12	410,96	637,35
PI	29,86	21,45	37,92	27,96	4,79	26,61	33,70
IWQI	63,08	53,13	74,86	61,34	8,23	55,94	70,24
TDS	618,97	383,79	858,67	661,44	162,02	475,83	733,69

**Πίνακας 8: Γεωπεριβαλλοντικοί δείκτες άρδευσης για την περιοχή του Λουτρακίου**

Παράμετρος	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΠΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΔΙΑΜΕΣΟΣ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ	3ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ
SAR	2,00	0,47	6,80	1,32	1,44	1,19	2,37
KR	0,37	0,09	1,41	0,26	0,27	0,22	0,50
Na%	24,76	8,10	58,20	20,28	11,15	17,75	33,09
PS	9,02	2,14	26,95	6,44	6,72	3,78	11,14
MAR	90,34	78,83	99,23	89,37	5,79	85,65	95,75
RSC	-7,04	-24,49	-0,71	-6,42	4,82	-9,63	-3,66
SSP	24,83	8,11	58,45	20,33	11,19	17,79	33,19
TH	759,52	323,05	1740,80	728,20	255,93	587,55	853,60
PI	40,11	25,44	67,82	40,29	9,71	33,67	43,86
IWQI	55,57	20,13	74,17	60,61	15,37	49,19	64,39
TDS	1219,75	666,80	2532,32	1121,48	426,10	943,56	1357,46

**Πίνακας 9:Γεωπεριβαλλοντικοί δείκτες άρδευσης για την περιοχή Γερανείων Ορέων**

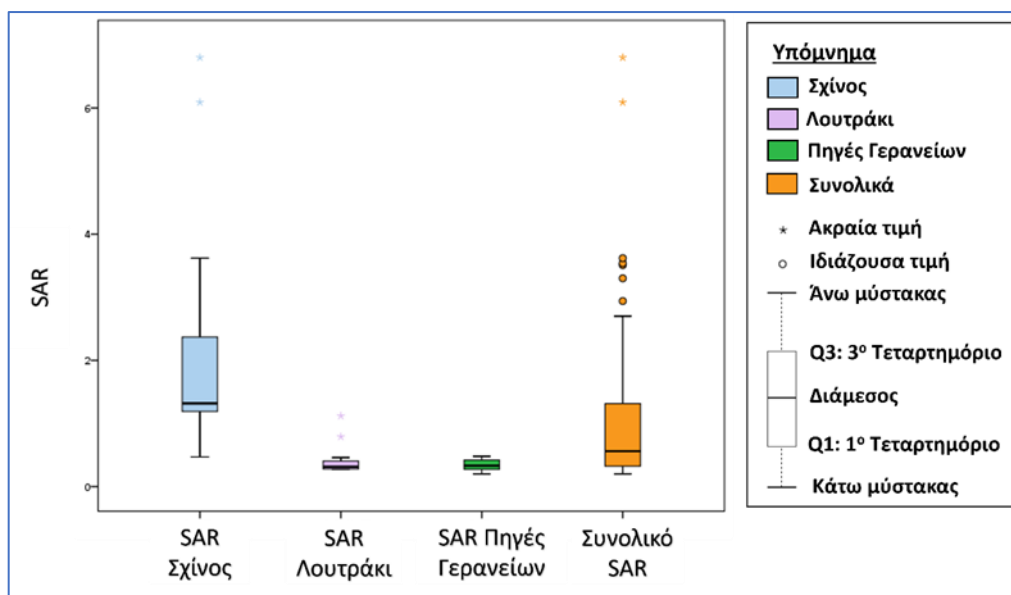
Παράμετρος	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΔΙΑΜΕΣΟΣ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ	3ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ
SAR	0,40	0,27	1,12	0,31	0,21	0,28	0,40
KR	0,11	0,07	0,25	0,08	0,05	0,07	0,12
Na%	9,33	6,47	19,93	7,78	3,87	6,78	10,38
PS	1,18	0,73	5,31	0,87	0,99	0,81	1,10
MAR	93,92	79,04	99,06	95,53	5,44	93,87	97,20
RSC	-1,68	-3,97	-1,12	-1,54	0,66	-1,84	-1,21
SSP	9,37	6,48	20,16	7,80	3,91	6,80	10,42
TH	353,36	264,85	491,57	352,70	50,37	332,29	377,18
PI	39,39	34,34	48,75	39,11	3,49	37,12	41,16
IWQI	63,79	57,95	77,32	59,64	7,26	59,03	71,40
TDS	489,63	387,15	773,57	484,28	79,05	450,61	507,39

## 4.2.1 Άρδευση

### 4.2.1.1 SAR

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς για τον δείκτη SAR, η τιμή του στην περιοχή μελέτης, σε σύνολο 68 δειγμάτων, κυμαίνεται από 0,20 έως 6,80, με μέση τιμή 1,16 και ενδιάμεση τιμή 0,56 (βλ. Πίνακα 6). Στο θηκόγραμμα της Εικόνας 14 και στους Πίνακες 7-9, παρουσιάζονται οι διαφοροποιήσεις στις τιμές του δείκτη SAR ανάμεσα στις τρεις διαφορετικές υποπεριπτώσεις. Βάσει της ενδιάμεσης τιμής, η περιοχή του Σχίνου εμφανίζει υψηλότερες τιμές SAR συγκριτικά με τις περιοχές Λουτρακίου και Γερανείων Ορέων. Ειδικότερα, στην περιοχή του Σχίνου, ο δείκτης SAR κυμαίνεται από 0,47 έως 6,80, με μέση τιμή 2 και ενδιάμεση τιμή 1,32. Συνεπώς, όλες οι τιμές του δείκτη SAR είναι <10 και η ποιότητα του νερού στο σύνολο των δειγμάτων (100%) χαρακτηρίζεται ως άριστη

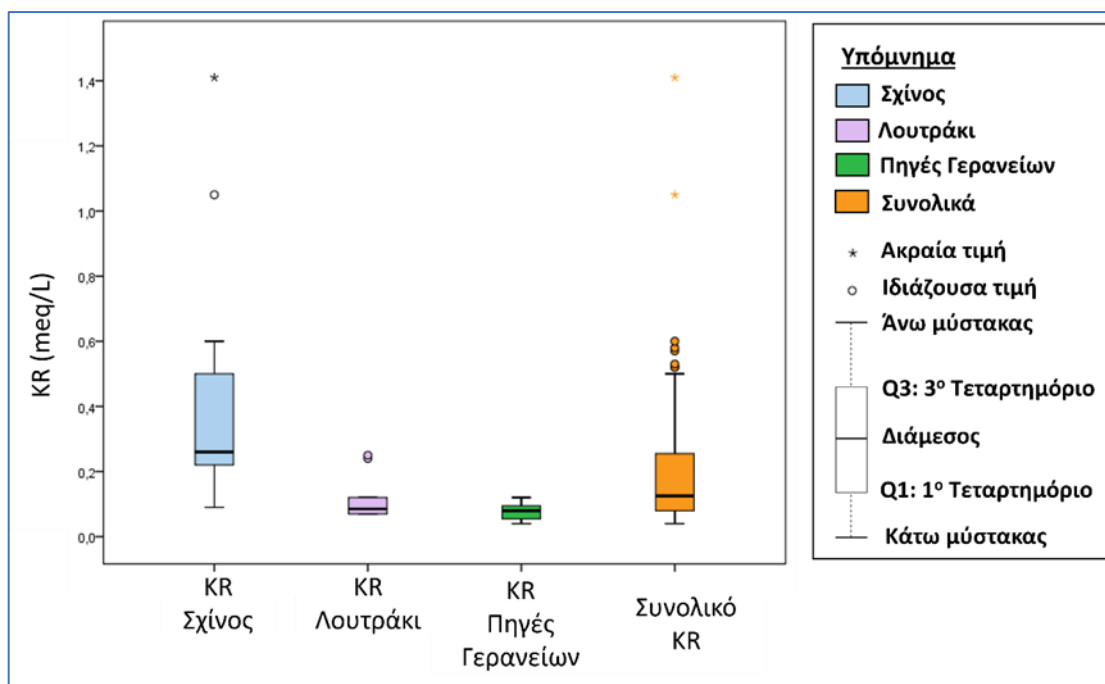




**Εικόνα 14:** Θηκόγραμμα για τον δείκτη SAR για τα 68 δείγματα της περιοχής Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Όρεων

#### 4.2.1.2 KR

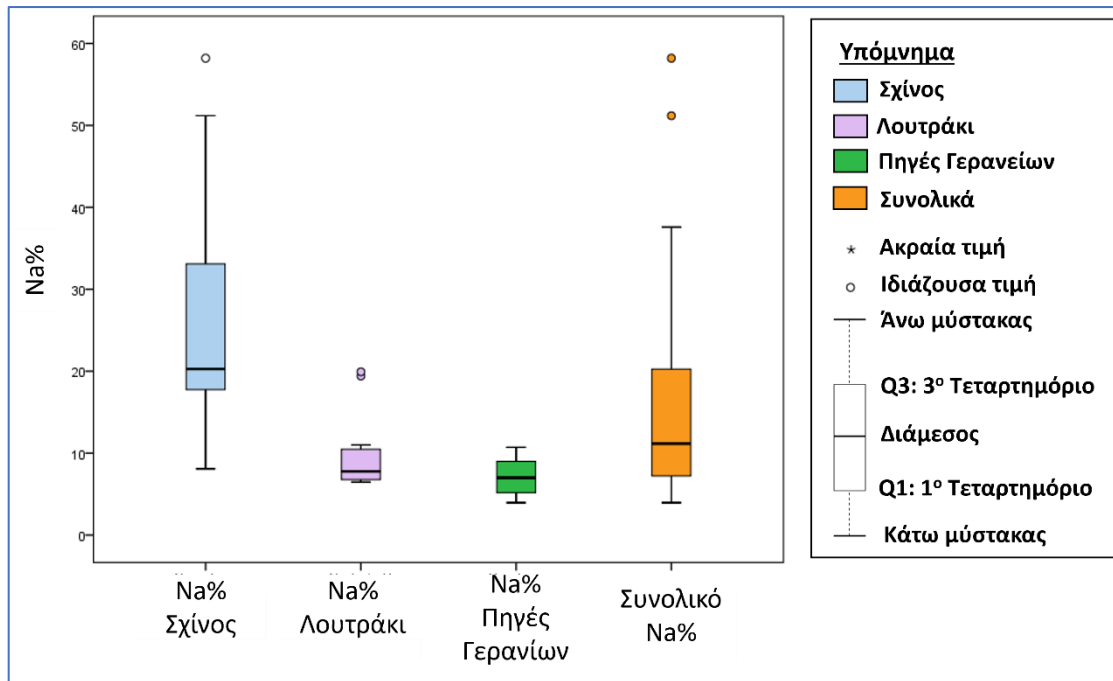
Σύμφωνα με τους υπολογισμούς για τον δείκτη KR, η τιμή του στην περιοχή μελέτης, σε σύνολο 68 δειγμάτων, κυμαίνεται από 0,04 έως 1,41, με μέση τιμή 0,23 και ενδιάμεση τιμή 0,13 (βλ. Πίνακα 6). Στο θηκόγραμμα της Εικόνας 15 και στους Πίνακες 7-9, παρουσιάζονται οι διαφοροποιήσεις στις τιμές του δείκτη KR ανάμεσα στις τρεις διαφορετικές υποπεριπτώσεις. Βάσει της ενδιάμεσης τιμής, η περιοχή του Σχίνου εμφανίζει υψηλότερες τιμές SAR συγκριτικά με τις περιοχές Λουτρακίου και Γερανείων Όρεων. Ειδικότερα, στην περιοχή του Σχίνου, ο δείκτης KR κυμαίνεται από 0,09 έως 1,41, με μέση τιμή 0,37 και ενδιάμεση τιμή 0,26. Συνεπώς, η πλειονότητα των δειγμάτων παρουσιάζει νερό κατάλληλο για άρδευση στο 97,1% (δηλ.66 από τα 68), το υπόλοιπο 2,9% (δηλ. 2 στα 68) βρίσκονται στην περιοχή του Σχίνου και χαρακτηρίζεται ως ακατάλληλο για άρδευση.



**Εικόνα 15: Θηκόγραμμα για τον δείκτη KR για τα 68 δείγματα της περιοχής Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Όρεων.**

#### 4.2.1.3 Na%

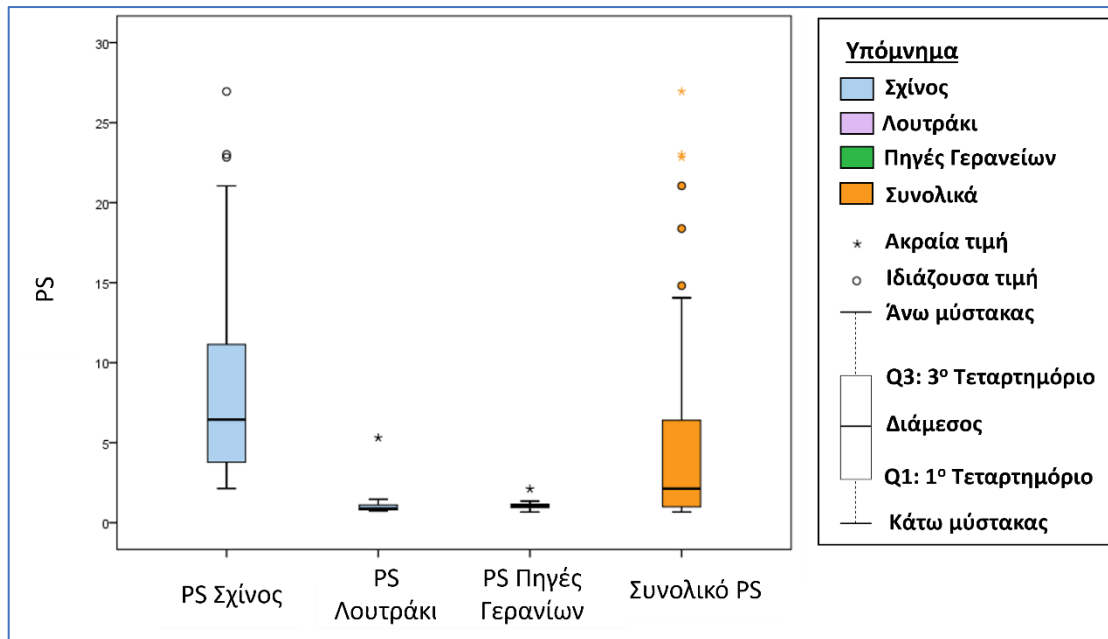
Σύμφωνα με τους υπολογισμούς για τον δείκτη Na%, η τιμή του στην περιοχή μελέτης, σε σύνολο 68 δειγμάτων, κυμαίνεται από 3,95% έως 58,20%, με μέση τιμή 16,32% και ενδιάμεση τιμή 11,16 % (βλ. Πίνακα 6). Στο θηκόγραμμα της Εικόνας 16 και στους Πίνακες 6-9 παρουσιάζονται οι διαφοροποιήσεις στις τιμές του δείκτη Na% ανάμεσα στις τρεις διαφορετικές υποπεριπτώσεις. Βάσει της ενδιάμεσης τιμής, η περιοχή του Σχίνου εμφανίζει υψηλότερες τιμές Na% συγκριτικά με τις περιοχές Λουτρακίου και Γερανείων Όρεων. Ειδικότερα, στην περιοχή του Σχίνου, ο δείκτης Na% κυμαίνεται από 8,10% έως 58,20%, με μέση τιμή 24,76% και ενδιάμεση τιμή 20,28%. Το 75% (δηλ. 51 από 68) του συνόλου των δειγμάτων έχει πολλή καλή ποιότητα νερού και το 2,9% (δηλ. 2 από 68) των δειγμάτων έχει μέτρια ποιότητα νερού και το 22,1% (δηλ. 15 από 68) χαρακτηρίζεται από καλή ποιότητα. Όσα από τα δείγματα δεν βρίσκονται στην κατηγορία πολύ καλής ποιότητας είναι στην περιοχή του Σχίνου.



**Εικόνα 16: Θηκόγραμμα για τον δείκτη Na% για τα 68 δείγματα της περιοχής Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Όρεων**

#### 4.2.1.4 PS

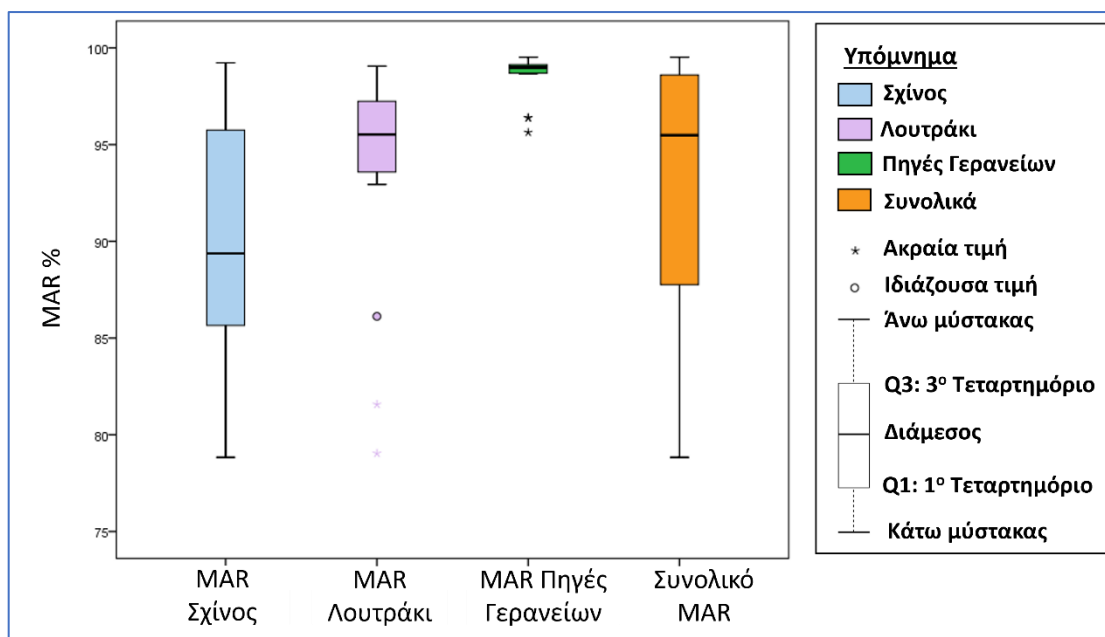
Σύμφωνα με τους υπολογισμούς για τον δείκτη PS, η τιμή του στην περιοχή μελέτης, σε σύνολο 68 δειγμάτων, κυμαίνεται από 0,67 έως 26,95, με μέση τιμή 4,97 και ενδιάμεση τιμή 2,13 (βλ. Πίνακα 6). Στο θηκόγραμμα της Εικόνας 17 και στους Πίνακες 7-9, παρουσιάζονται οι διαφοροποιήσεις στις τιμές του δείκτη PS ανάμεσα στις τρεις διαφορετικές υποπεριπτώσεις. Βάσει της ενδιάμεσης τιμής, η περιοχή του Σχίνου εμφανίζει υψηλότερες τιμές PS συγκριτικά με τις περιοχές Λουτρακίου και Γερανείων Όρεων. Ειδικότερα, στην περιοχή του Σχίνου, ο δείκτης PS κυμαίνεται από 2,14 έως 26,95, με μέση τιμή 9,02 και ενδιάμεση τιμή 6,44. Το 55,9% των δειγμάτων (δηλ. 38 από 68) παρουσιάζει καλή ποιότητα και το 7,4% (δηλ. 5 από 68) παρουσιάζει ακατάλληλη ποιότητα νερού. όλα τα δείγματα που δεν βρίσκονται στην καλή ποιότητα υπόγειων νερών βρίσκονται στην περιοχή του Σχίνου με εξαίρεση ένα που βρίσκεται στο Λουτράκι και εντάσσεται στη μεσαία ποιότητα νερού άρδευσης.



**Εικόνα 17: Θηκόγραμμα για τον δείκτη PS για τα 68 δείγματα στην περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανίων Όρεων**

#### 4.2.1.5. MAR

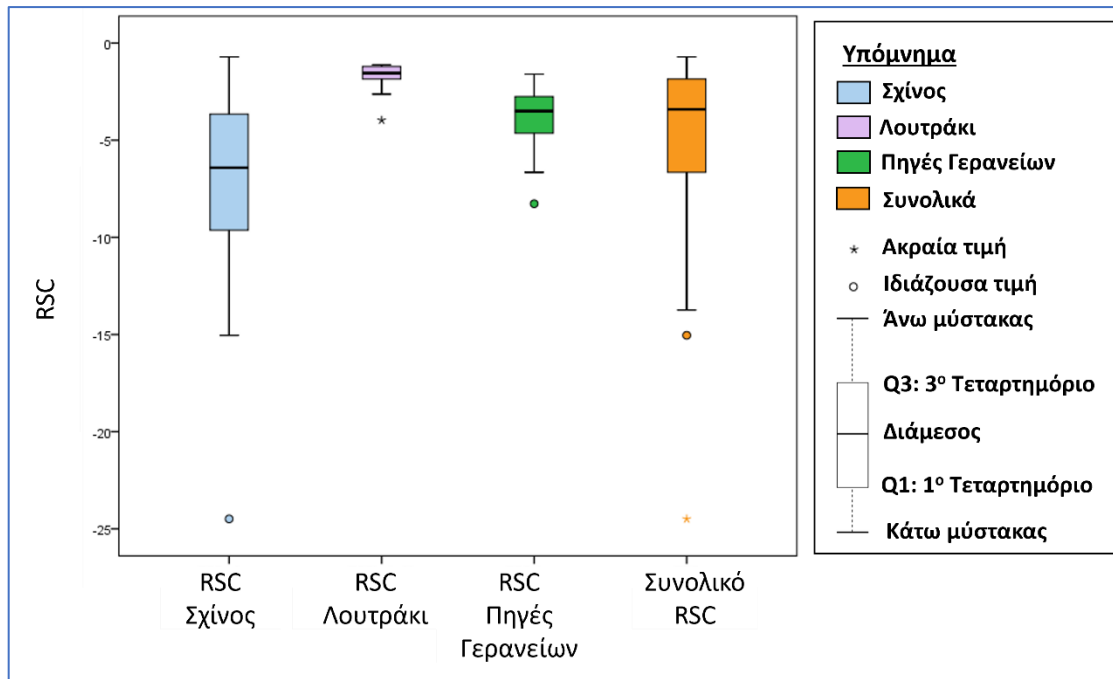
Σύμφωνα με τους υπολογισμούς για τον δείκτη MAR, η τιμή του στην περιοχή μελέτης, σε σύνολο 68 δειγμάτων, κυμαίνεται από 78,83 έως 99,52, με μέση τιμή 93,19 και ενδιάμεση τιμή 95,49 (βλ. Πίνακα 6). Στο θηκόγραμμα της Εικόνας 18 και στους Πίνακες 7-9, παρουσιάζονται οι διαφοροποιήσεις στις τιμές του δείκτη MAR ανάμεσα στις τρεις διαφορετικές υποπεριπτώσεις. Βάσει της ενδιάμεσης τιμής, η περιοχή των Γερανίων Όρεων εμφανίζει υψηλότερες τιμές MAR συγκριτικά με τις περιοχές Λουτρακίου και Σχίνου. Ειδικότερα, στην περιοχή των Γερανίων Όρεων, ο δείκτης MAR κυμαίνεται από 95,63 έως 99,52, με μέση τιμή 98,48 και ενδιάμεση τιμή 98,99. Συνεπώς, όλες οι τιμές του δείκτη MAR είναι >50 και η ποιότητα του νερού στο σύνολο των δειγμάτων (100%) χαρακτηρίζεται ως ακατάλληλη για άρδευση.



**Εικόνα 18:** Θηκόγραμμα για τον δείκτη MAR για τα 68 δείγματα της περιοχής Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Όρεων

#### 4.2.1.6. RSC

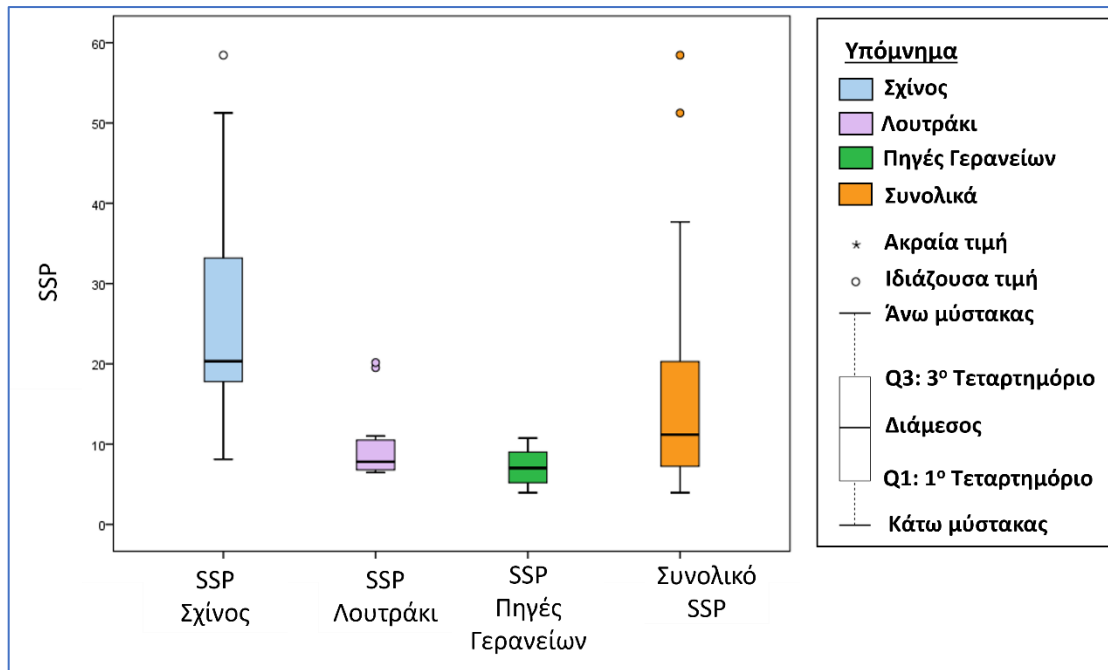
Σύμφωνα με τους υπολογισμούς για τον δείκτη RSC, η τιμή του στην περιοχή μελέτης, σε σύνολο 68 δειγμάτων, κυμαίνεται από -24,49 έως -3,42, με μέση τιμή -4,78 και ενδιάμεση τιμή -3,42 (βλ. Πίνακα 6). Στο θηκόγραμμα της Εικόνας 19 και στους Πίνακες 7-9, παρουσιάζονται οι διαφοροποιήσεις στις τιμές του δείκτη RSC ανάμεσα στις τρεις διαφορετικές υποπεριπτώσεις. Βάσει της ενδιάμεσης τιμής, η περιοχή του Λουτρακίου εμφανίζει υψηλότερες τιμές RSC συγκριτικά με τις περιοχές του Σχίνου και Γερανείων Όρεων. Ειδικότερα, στην περιοχή του Λουτρακίου, ο δείκτης RSC κυμαίνεται από -3,97 έως -1,12, με μέση τιμή -1,68 και ενδιάμεση τιμή -1,54. Συνεπώς, όλες οι τιμές του δείκτη RSC είναι <1,25 και η ποιότητα του νερού στο σύνολο των δειγμάτων (100%) χαρακτηρίζεται ως καλή.



**Εικόνα 19: Θηκόγραμμα για τον δείκτη RSC για τα 68 δείγματα της περιοχής Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Όρεων.**

#### 4.2.1.7. SSP

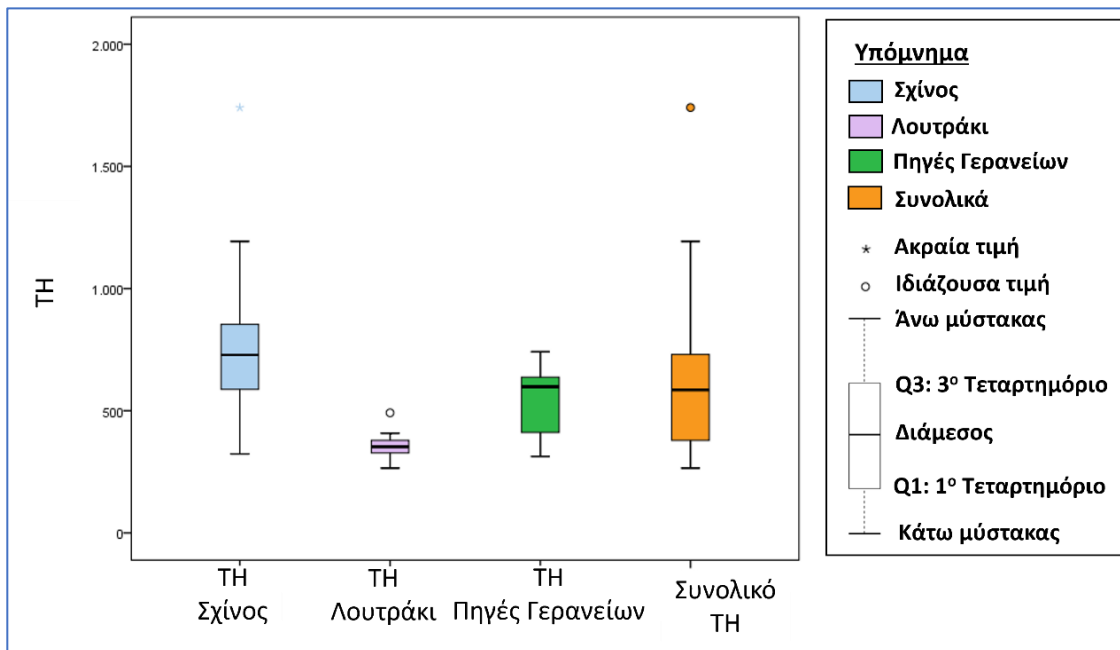
Σύμφωνα με τους υπολογισμούς για τον δείκτη SSP, η τιμή του στην περιοχή μελέτης, σε σύνολο 68 δειγμάτων, κυμαίνεται από 3,95 έως 58,45, με μέση τιμή 16,36 και ενδιάμεση τιμή 11,19 (βλ. Πίνακα 6). Στο θηκόγραμμα της Εικόνας 20 και στους Πίνακες 7-9, παρουσιάζονται οι διαφοροποιήσεις στις τιμές του δείκτη SSP ανάμεσα στις τρεις διαφορετικές υποπεριπτώσεις. Βάσει της ενδιάμεσης τιμής, η περιοχή του Σχίνου εμφανίζει υψηλότερες τιμές SSP συγκριτικά με τις περιοχές Λουτρακίου και Γερανείων Όρεων. Ειδικότερα, στην περιοχή του Σχίνου, ο δείκτης SSP κυμαίνεται από 8,11 έως 58,45, με μέση τιμή 24,83 και ενδιάμεση τιμή 20,33. Το 75% (δηλ. 51 από 68) του συνόλου των δειγμάτων έχει πολλή καλή ποιότητα νερού και το 2,9%(δηλ.2 από 68) των δειγμάτων έχει μέτρια ποιότητα νερού και το 22,1% (δηλ.15 από 68) χαρακτηρίζεται από καλή ποιότητα. όσα από τα δείγματα δεν βρίσκονται στην κατηγορία πολλή καλής ποιότητας είναι στην περιοχή του Σχίνου.



**Εικόνα 20: Θηκόγραμμα για τον δείκτη SSP για τα 68 δείγματα για την περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανίων Όρεων.**

#### 4.2.1.8 TH

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς για τον δείκτη TH, η τιμή του στην περιοχή μελέτης, σε σύνολο 68 δειγμάτων, κυμαίνεται από 264,85 έως 1740,80, με μέση τιμή 591,90 και ενδιάμεση τιμή 585,10 (βλ. Πίνακα 6). Στο θηκόγραμμα της Εικόνας 21 και στους Πίνακες 7-9, παρουσιάζονται οι διαφοροποιήσεις στις τιμές του δείκτη TH ανάμεσα στις τρεις διαφορετικές υποπεριπτώσεις. Βάσει της ενδιάμεσης τιμής, η περιοχή του Σχίνου εμφανίζει υψηλότερες τιμές TH συγκριτικά με τις περιοχές Λουτρακίου και Γερανείων Όρεων. Ειδικότερα, στην περιοχή του Σχίνου, ο δείκτης TH κυμαίνεται από 323,05 έως 1740,80, με μέση τιμή 759,52 και ενδιάμεση τιμή 728,20. Συνεπώς, όλες οι τιμές του δείκτη TH είναι >180 και η ποιότητα του νερού στο σύνολο των δειγμάτων (100%) χαρακτηρίζεται ως πολύ σκληρό νερό.

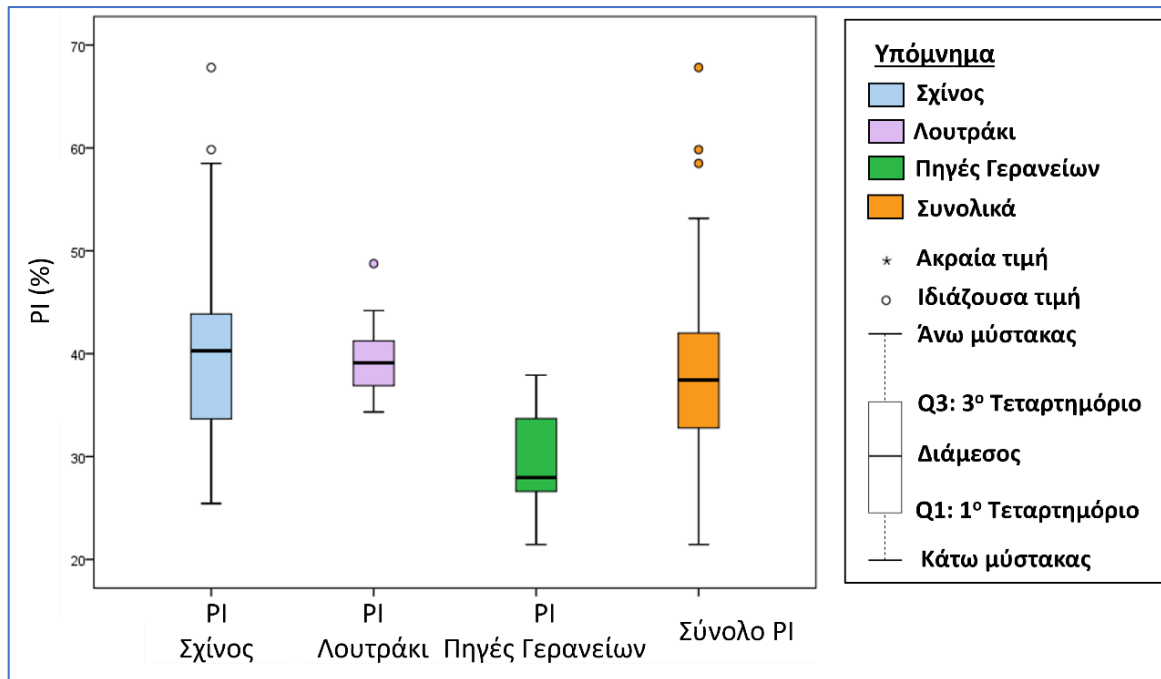


**Εικόνα 21:**Θηκόγραμμα για τον δείκτη TH των 68 δειγμάτων για την περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Όρεων.

#### 4.2.1.9 PI

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς για τον δείκτη PI, η τιμή του στην περιοχή μελέτης, σε σύνολο 68 δειγμάτων, κυμαίνεται από 21,45 έως 67,82, με μέση τιμή 37,64 και ενδιάμεση τιμή 37,44 (βλ. Πίνακα 6). Στο θηκόγραμμα της Εικόνας 22 και στους Πίνακες 7-9, παρουσιάζονται οι διαφοροποιήσεις στις τιμές του δείκτη PI ανάμεσα στις τρεις διαφορετικές υποπεριπτώσεις. Βάσει της ενδιάμεσης τιμής, η περιοχή του Σχίνου εμφανίζει υψηλότερες τιμές PI συγκριτικά με τις περιοχές Λουτρακίου και Γερανείων Όρεων. Ειδικότερα, στην περιοχή του Σχίνου, ο δείκτης PI κυμαίνεται από 25,44 έως 67,82, με μέση τιμή 40,11 και ενδιάμεση τιμή 40,29. Συνεπώς το 98,5%(δηλ.67 στα 68) των δειγμάτων αφορούν καλό νερό και μόνο ένα δείγμα είναι ακατάλληλο και βρίσκεται στα Γεράνια Όρη.

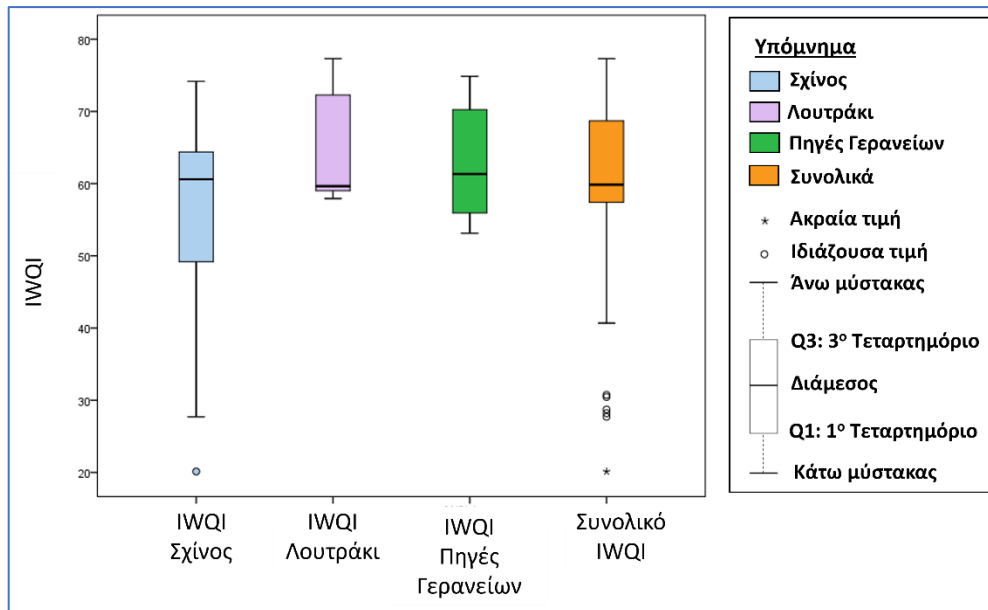




**Εικόνα 22: Θηκόγραμμα για τον δείκτη PI των 68 δειγμάτων για την περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανίων Όρεων.**

#### 4.2.1.10 IWQI

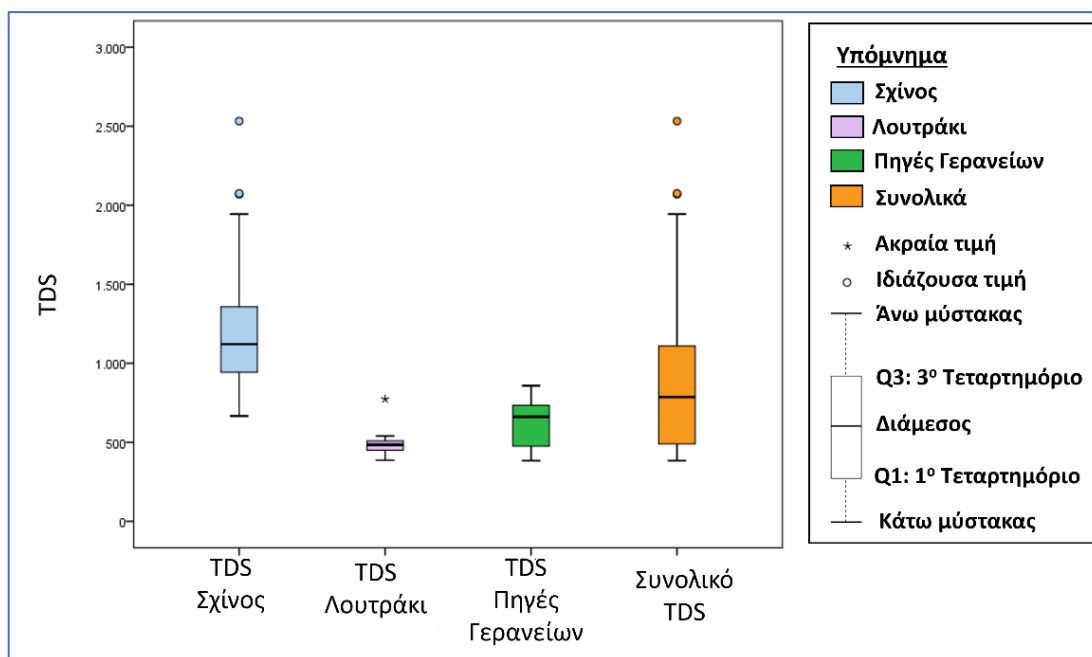
Σύμφωνα με τους υπολογισμούς για τον δείκτη IWQI, η τιμή του στην περιοχή μελέτης, σε σύνολο 68 δειγμάτων, κυμαίνεται από 20,13 έως 77,32, με μέση τιμή 59,64 και ενδιάμεση τιμή 59,86 (βλ. Πίνακα 6). Στο θηκόγραμμα της Εικόνας 23 και στους Πίνακες 7-9, παρουσιάζονται οι διαφοροποιήσεις στις τιμές του δείκτη IWQI ανάμεσα στις τρεις διαφορετικές υποπεριπτώσεις. Βάσει της ενδιάμεσης τιμής, η περιοχή των Γερανείων Όρεων εμφανίζει υψηλότερες τιμές IWQI συγκριτικά με τις περιοχές Λουτρακίου και Σχίνου. Ειδικότερα, στην περιοχή των Γερανείων Όρεων, ο δείκτης IWQI κυμαίνεται από 53,13 έως 74,86, με μέση τιμή 63,08 και ενδιάμεση τιμή 61,34. Συνεπώς το 22,1% των δειγμάτων (δηλ 15 στα 68) χαρακτηρίζονται από χαμηλό περιορισμό, με 57,4% (δηλ.39 στα 68) χαρακτηρίζονται από μέτριο περιορισμό, με 33,8% (δηλ.23 στα 68 δείγματα) υπάρχει υψηλός περιορισμός ως προς άρδευση και με 15,8% (δηλ.6 στα 68 δείγματα) υπάρχει πολύ υψηλός περιορισμός. Τα δείγματα με τον πολύ υψηλό κ υψηλό περιορισμό βρίσκονται στην περιοχή του Σχίνου.



**Εικόνα 23:** Θηκόγραμμα για τον δείκτη IWQI των 68 δειγμάτων για την περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου- Γερανίων Όρεων

#### 4.2.1.11 TDS

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς για τον δείκτη TDS, η τιμή του στην περιοχή μελέτης, σε σύνολο 68 δειγμάτων, κυμαίνεται από 383,79 έως 2532,32, με μέση τιμή 872,48 και ενδιάμεση τιμή 786,59 (βλ. Πίνακα 6). Στο θηκόγραμμα της Εικόνας 24 και στους Πίνακες 7-9, παρουσιάζονται οι διαφοροποιήσεις στις τιμές του δείκτη TDS ανάμεσα στις τρεις διαφορετικές υποπεριπτώσεις. Βάσει της ενδιάμεσης τιμής, η περιοχή του Σχίνου εμφανίζει υψηλότερες τιμές TDS συγκριτικά με τις περιοχές Λουτρακίου και των Γερανείων Όρεων. Ειδικότερα, στην περιοχή του Σχίνου, ο δείκτης TDS κυμαίνεται από 666,80 έως 2532,32, με μέση τιμή 1219,75 και ενδιάμεση τιμή 1121,48. Τα δείγματα που εμφανίζουν TDS >500 (δηλ. 48 δείγματα από 68) καλύπτουν ποσοστό 70,6%.



**Εικόνα 24: Θηκόγραμμα για τον δείκτη TDS των 68 δειγμάτων για την περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανίων Όρεων**

#### 4.2.2. Ύδρευση

Στον Πίνακα 10 δίνονται τα περιγραφικά στατιστικά για τους 5 δείκτες ύδρευσης για ολόκληρη την περιοχή μελέτης. Στους πίνακες 11-13 παρατίθενται τα αποτελέσματα αυτών των δεικτών για την κάθε υποπεριοχή ξεχωριστά.

**Πίνακας 10: Δείκτες ύδρευσης για τα 68 δείγματα των περιοχών Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανίων Όρεων**

Παράμετρος	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΔΙΑΜΕΣΟΣ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ	3ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ
NPI	1,00	-0,90	9,00	0,20	2,35	-0,76	2,02
RI	0,62	0,09	2,68	0,29	0,70	0,15	0,77
PIG	1,04	0,49	2,84	0,94	0,48	0,64	1,30
WQI	41,75	14,67	121,38	31,27	25,76	19,37	57,92
WPI	0,35	0,12	0,94	0,28	0,20	0,17	0,48

**Πίνακας 11: Δείκτες ύδρευσης για τα 68 δείγματα της περιοχής του Σχίνου**

Παράμετρος	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΔΙΑΜΕΣΟΣ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ	3ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ
NPI	2,66	-0,65	9,00	2,06	2,42	0,70	4,03
RI	1,07	0,21	2,68	0,76	0,78	0,46	1,51
PIG	1,41	0,75	2,84	1,33	0,43	1,13	1,61
WQI	62,91	29,31	121,38	58,30	21,46	46,76	72,20
WPI	0,52	0,27	0,94	0,49	0,16	0,40	0,60

*Πίνακας12: Δείκτες ύδρευσης για τα 68 δείγματα της περιοχής του Λουτρακίου*

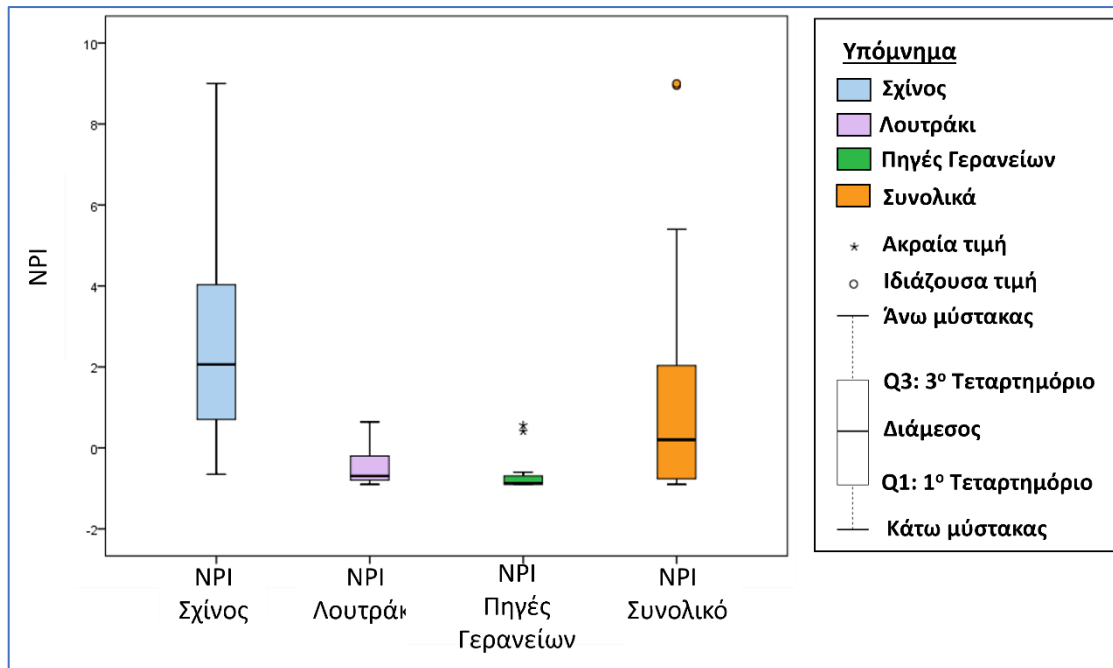
Παράμετρος	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΔΙΑΜΕΣΟΣ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ	3ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ
NPI	-0,50	-0,90	0,64	-0,70	0,44	-0,78	-0,23
RI	0,21	0,11	0,84	0,16	0,16	0,13	0,21
PIG	0,62	0,49	0,90	0,62	0,08	0,58	0,64
WQI	19,93	15,76	35,32	19,07	4,12	18,02	20,52
WPI	0,17	0,13	0,32	0,17	0,04	0,16	0,18

*Πίνακας 13: : Δείκτες ύδρευσης για τα 68 δείγματα για την περιοχή των Γερανείων Ορέων*

Παράμετρος	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΔΙΑΜΕΣΟΣ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ	3ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ
NPI	-0,65	-0,90	0,56	-0,87	0,47	-0,90	-0,70
RI	0,18	0,09	0,62	0,14	0,13	0,11	0,19
PIG	0,81	0,53	1,00	0,88	0,16	0,66	0,93
WQI	24,28	14,67	36,20	26,15	6,15	18,89	28,61
WPI	0,21	0,12	0,32	0,23	0,06	0,15	0,26

#### **4.2.2.1 NPI**

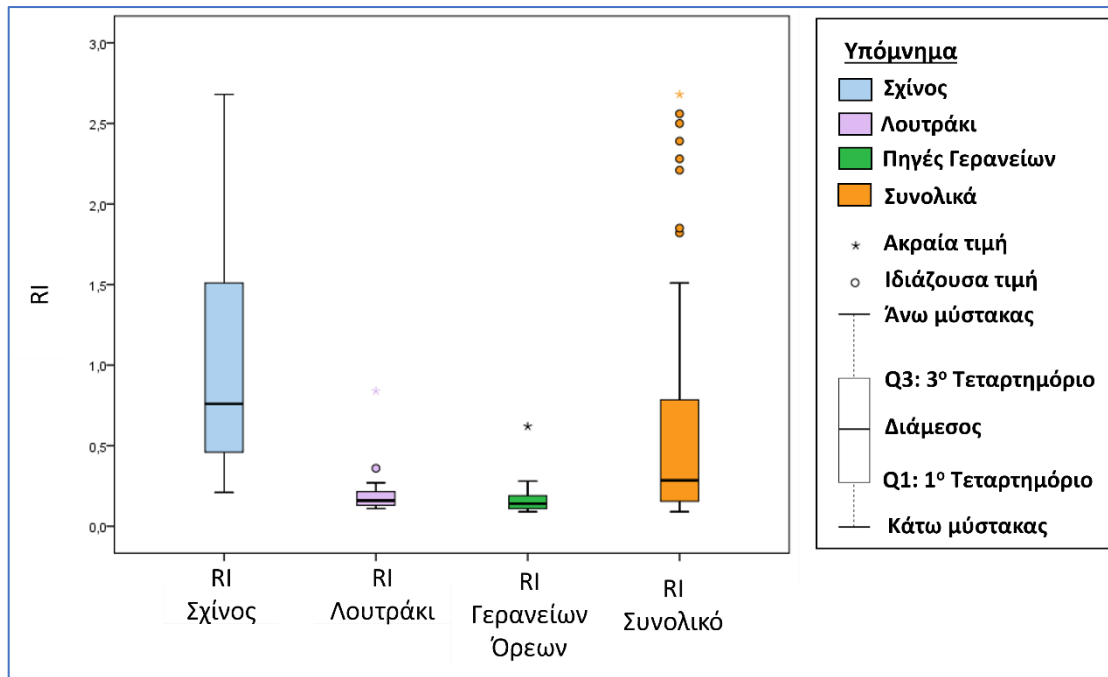
Σύμφωνα με τους υπολογισμούς για τον δείκτη NPI, η τιμή του στην περιοχή μελέτης, σε σύνολο 68 δειγμάτων, κυμαίνεται από -0,90 έως 9, με μέση τιμή 1 και ενδιάμεση τιμή 0,20 (βλ. Πίνακα10). Στο θηκόγραμμα της Εικόνας 25 και στους Πίνακες 11-13, παρουσιάζονται οι διαφοροποιήσεις στις τιμές του δείκτη NPI ανάμεσα στις τρεις διαφορετικές υποπεριπτώσεις. Βάσει της ενδιάμεσης τιμής, η περιοχή του Σχίνου εμφανίζει υψηλότερες τιμές NPI συγκριτικά με τις περιοχές Λουτρακίου και Γερανείων Ορέων. Ειδικότερα, στην περιοχή του Σχίνου, ο δείκτης NPI κυμαίνεται από -0,65 έως 9, με μέση τιμή 2,66 και ενδιάμεση τιμή 2,06. Επομένως το 48,5% (δηλ.33 από 68 δείγματα) των δειγμάτων χαρακτηρίζεται ως καθαρό νερό, το 17,6 % (δηλ.12 από 68) ως ελαφρώς ρυπασμένο το 7,35%( δηλ.5 στα 68) με μέτρια ρύπανση και με 26,5% (δηλ.18 στα 68 ) με πολύ ρύπανση. Όλα τα δείγματα που εντάσσονται στην κατηγορία πολύ μολυσμένο ανήκουν στην περιοχή του Σχίνου.



**Εικόνα 25: Θηκόγραμμα για τον δείκτη NPI των 68 δειγμάτων στην περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Όρεων**

#### 4.2.2.2. RI

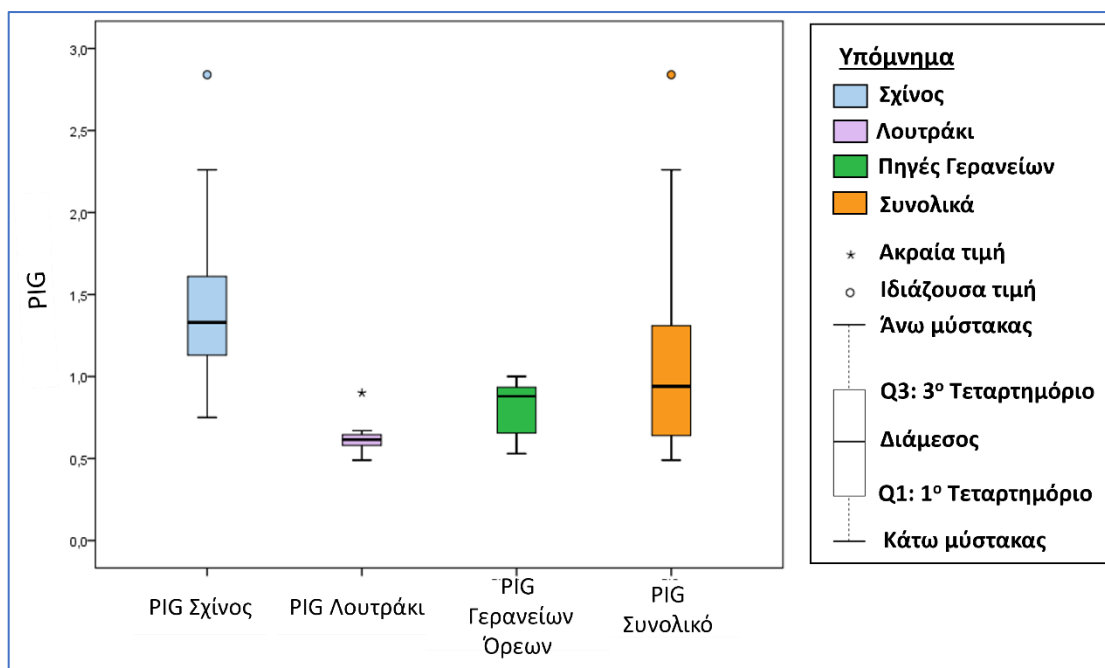
Σύμφωνα με τους υπολογισμούς για τον δείκτη RI, η τιμή του στην περιοχή μελέτης, σε σύνολο 68 δειγμάτων, κυμαίνεται από 0,09 έως 2,68, με μέση τιμή 0,62 και ενδιάμεση τιμή 0,29 (βλ. Πίνακα 10). Στο θηκόγραμμα της Εικόνας 26 και στους Πίνακες 11-13, παρουσιάζονται οι διαφοροποιήσεις στις τιμές του δείκτη RI ανάμεσα στις τρεις διαφορετικές υποπεριπτώσεις. Βάσει της ενδιάμεσης τιμής, η περιοχή του Σχίνου εμφανίζει υψηλότερες τιμές RI συγκριτικά με τις περιοχές Λουτρακίου και Γερανείων Όρεων. Ειδικότερα, στην περιοχή του Σχίνου, ο δείκτης RI κυμαίνεται από 0,21 έως 2,68, με μέση τιμή 1,07 και ενδιάμεση τιμή 0,76. Στην πρώτη κατηγορία που δεν επηρεάζεται από ανιόντα που υπάρχουν στο νερό είναι 64,7% (δηλ.44 από 68) και όλα τα υπόλοιπα δείγματα εντάσσονται σε αυτά που επηρεάζονται ελαφρώς.



**Εικόνα 26: Θηκόγραμμα για τον δείκτη RI των 68 δειγμάτων στην περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Όρεων**

#### 4.2.2.3. PIG

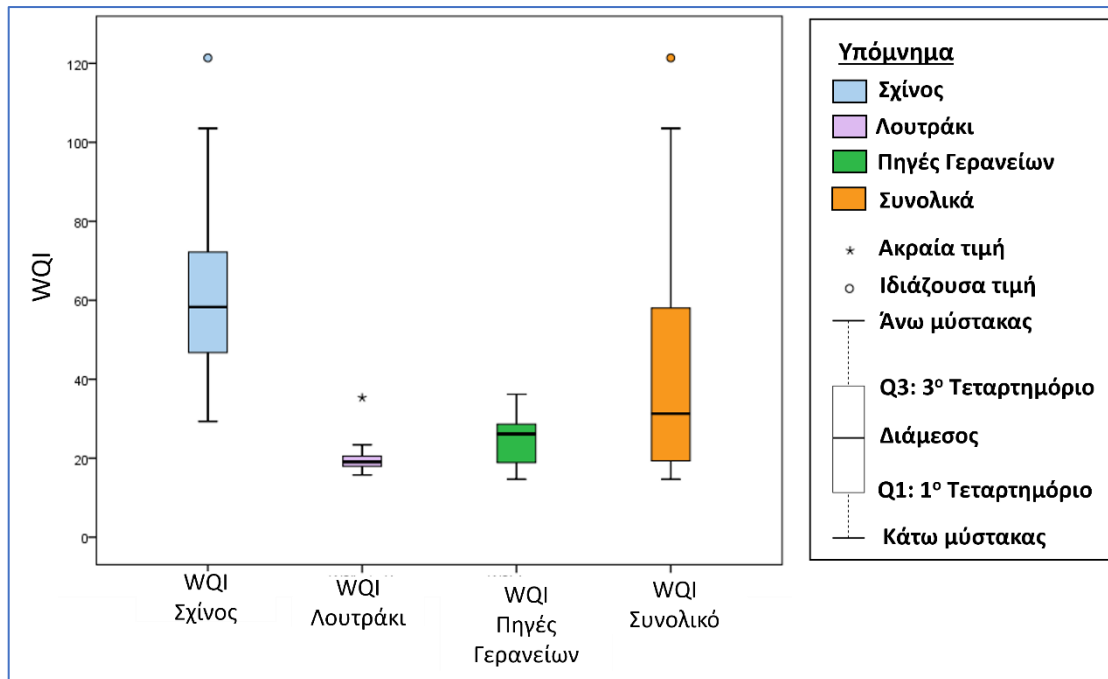
Σύμφωνα με τους υπολογισμούς για τον δείκτη PIG, η τιμή του στην περιοχή μελέτης, σε σύνολο 68 δειγμάτων, κυμαίνεται από 0,49 έως 2,84, με μέση τιμή 1,04 και ενδιάμεση τιμή 0,94 (βλ. Πίνακα 10). Στο θηκόγραμμα της Εικόνας 27 και στους Πίνακες 11-13, παρουσιάζονται οι διαφοροποιήσεις στις τιμές του δείκτη PIG ανάμεσα στις τρεις διαφορετικές υποπεριπτώσεις. Βάσει της ενδιάμεσης τιμής, η περιοχή του Σχίνου εμφανίζει υψηλότερες τιμές PIG συγκριτικά με τις περιοχές Λουτρακίου και Γερανείων Όρεων. Ειδικότερα, στην περιοχή του Σχίνου, ο δείκτης PIG κυμαίνεται από 0,75 έως 2,84, με μέση τιμή 1,41 και ενδιάμεση τιμή 1,33. Συνεπώς, στην περιοχή του Λουτρακίου και των Γερανείων Όρεων απαντάται το ποσοστό 57,4% (δηλ.39 στα 68) και τα δείγματα χαρακτηρίζονται από ασήμαντη ρύπανση. Στη συνέχεια το 25% από χαμηλή ρύπανση (δηλ.17 στα 68),το 11,8% (δηλ.8 στα 68) από μέτρια ρύπανση,το 5,88 (δηλ.4 στα 68) από υψηλή ρύπανση και ένα μόνο δείγμα με πολύ υψηλή ρύπανση το οποίο βρίσκεται στην περιοχή του Σχίνου. Όσα δείγματα έχουν ρύπανση είναι στην περιοχή του Σχίνου όπου παρατηρείται μια διαβάθμιση στην ποιότητα της περιοχής.



**Εικόνα 27: Θηκόγραμμα για τον δείκτη PIG των 68 δειγμάτων στην περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Όρεων**

#### 4.2.2.4. WQI

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς για τον δείκτη WQI, η τιμή του στην περιοχή μελέτης, σε σύνολο 68 δειγμάτων, κυμαίνεται από 14,67 έως 121,38, με μέση τιμή 41,75 και ενδιάμεση τιμή 31,27 (βλ. Πίνακα 10). Στο θηκόγραμμα της Εικόνας 28 και στους Πίνακες 11-13, παρουσιάζονται οι διαφοροποιήσεις στις τιμές του δείκτη WQI ανάμεσα στις τρεις διαφορετικές υποπεριπτώσεις. Βάσει της ενδιάμεσης τιμής, η περιοχή του Σχίνου εμφανίζει υψηλότερες τιμές WQI συγκριτικά με τις περιοχές Λουτρακίου και Γερανείων Όρεων. Ειδικότερα, στην περιοχή του Σχίνου, ο δείκτης WQI κυμαίνεται από 29,31 έως 121,38, με μέση τιμή 62,91 και ενδιάμεση τιμή 58,30. Επομένως με ποσοστό 67,7% (δηλ.46απο 68) των δειγμάτων εμφανίζουν εξαιρετικής ποιότητας νερό, το 27,9% (δηλ.19 στα 68) καλό νερό και το 4,41% (δηλ.3 στα 68) κακής ποιότητας νερό (περιοχή Σχίνου).

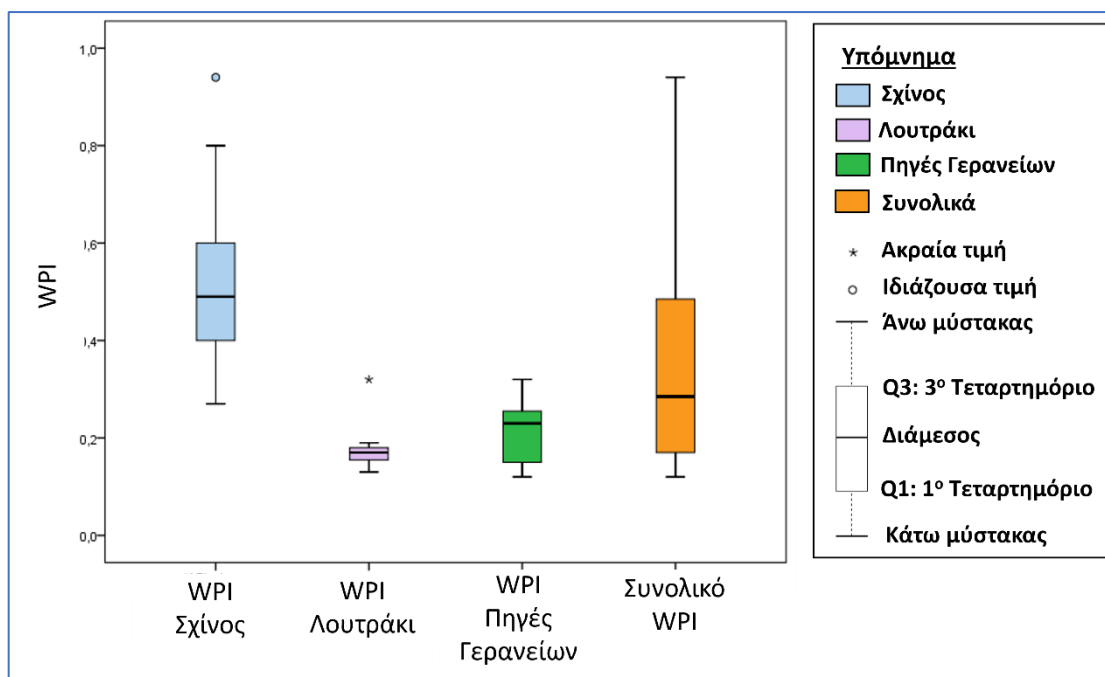


**Εικόνα 28: Θηκόγραμμα για τον δείκτη WQI των 68 δειγμάτων στην περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Όρεων**

#### 4.2.2.5. WPI

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς για τον δείκτη WPI, η τιμή του στην περιοχή μελέτης, σε σύνολο 68 δειγμάτων, κυμαίνεται από 0,12 έως 0,94, με μέση τιμή 0,35 και ενδιάμεση τιμή 0,28 (βλ. Πίνακα 10). Στο θηκόγραμμα της Εικόνας 29 και στους Πίνακες 11-13, παρουσιάζονται οι διαφοροποιήσεις στις τιμές του δείκτη WPI ανάμεσα στις τρεις διαφορετικές υποπεριπτώσεις. Βάσει της ενδιάμεσης τιμής, η περιοχή του Σχίνου εμφανίζει υψηλότερες τιμές WPI συγκριτικά με τις περιοχές Λουτρακίου και Γερανείων Όρεων. Ειδικότερα, στην περιοχή του Σχίνου, ο δείκτης WPI κυμαίνεται από 0,27 έως 0,94, με μέση τιμή 0,52 και ενδιάμεση τιμή 0,49. Συνεπώς, το 76,5% (δηλ.52 από 68) των δειγμάτων είναι εξαιρετικής ποιότητας. Στη δεύτερη κατηγορία με ποσοστό 19,1% (δηλ.13 στα 68) απαντώνται δείγματα καλής ποιότητας και με ποσοστό 4,4% (δηλ. 3 από 68) είναι τα δείγματα μετρίως μολυσμένου νερού.





**Εικόνα 29: Θηκόγραμμα για τον δείκτη WPI των 68 δειγμάτων στην περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Όρεων**

#### 4.2.3 Δυνητικά τοξικά στοιχεία

Στον Πίνακα 14 δίνονται τα περιγραφικά στατιστικά για τους γεωπεριβαλλοντικούς δείκτες για την ύπαρξη δυνητικών τοξικών στοιχείων για ολόκληρη την περιοχή μελέτης. Ενώ στους πίνακες 15-17 παρατίθεται τα αποτελέσματα αυτών των δεικτών για την κάθε υποπεριοχή ξεχωριστά.

**Πίνακας 14: Δείκτες δυνητικά τοξικών στοιχείων για τα 68 δείγματα των περιοχών Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Όρεων**

Παράμετρος	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΔΙΑΜΕΣΟΣ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ	3ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ
Cd	-8,38	-9,82	0,80	-9,25	2,09	-9,50	-8,03
HPI	95,74	62,81	144,38	93,42	12,47	90,70	95,02
HEI	1,62	0,18	10,80	0,75	2,09	0,50	1,97

**Πίνακας 15: Δείκτες δυνητικά τοξικών στοιχείων για τα 68 δείγματα την περιοχή του Σχίνου**

Παράμετρος	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΔΙΑΜΕΣΟΣ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ	3ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ
Cd	-7,24	-9,60	0,80	-8,07	2,52	-8,73	-6,83
HPI	97,50	62,81	144,38	92,59	16,53	88,38	103,20
HEI	2,77	0,40	10,80	1,93	2,52	1,27	3,17

**Πίνακας 16: Δείκτες δυνητικά τοξικών στοιχείων για τα 68 δείγματα της περιοχής του Λουτρακίου**

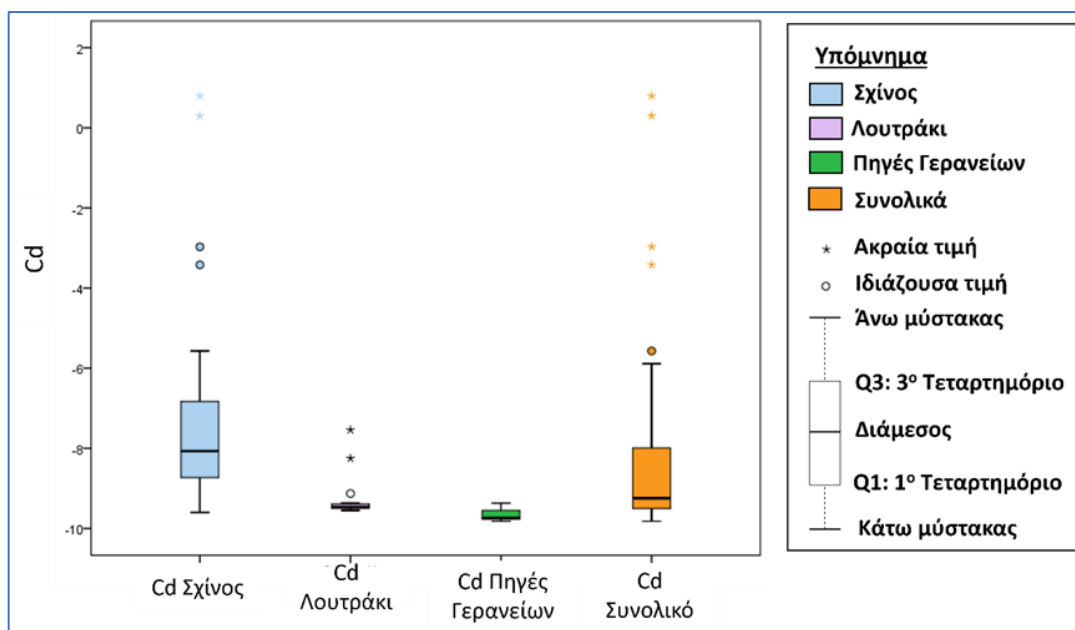
Παράμετρος	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΔΙΑΜΕΣΟΣ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ	3ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ
Cd	-9,29	-9,55	-7,54	-9,46	0,50	-9,49	-9,39
HPI	94,35	82,43	129,70	93,39	8,72	92,74	93,73
HEI	0,71	0,45	2,46	0,54	0,50	0,51	0,61

**Πίνακας 17: Δείκτες δυνητικά τοξικών στοιχείων για τα 68 δείγματα της περιοχής των Γερανίων Ορέων.**

Παράμετρος	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΔΙΑΜΕΣΟΣ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ	3ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ
Cd	-9,67	-9,82	-9,37	-9,74	0,14	-9,77	-9,55
HPI	93,75	90,47	95,84	94,19	1,52	93,28	94,55
HEI	0,33	0,18	0,63	0,26	0,14	0,23	0,45

#### 4.2.3.1 Cd

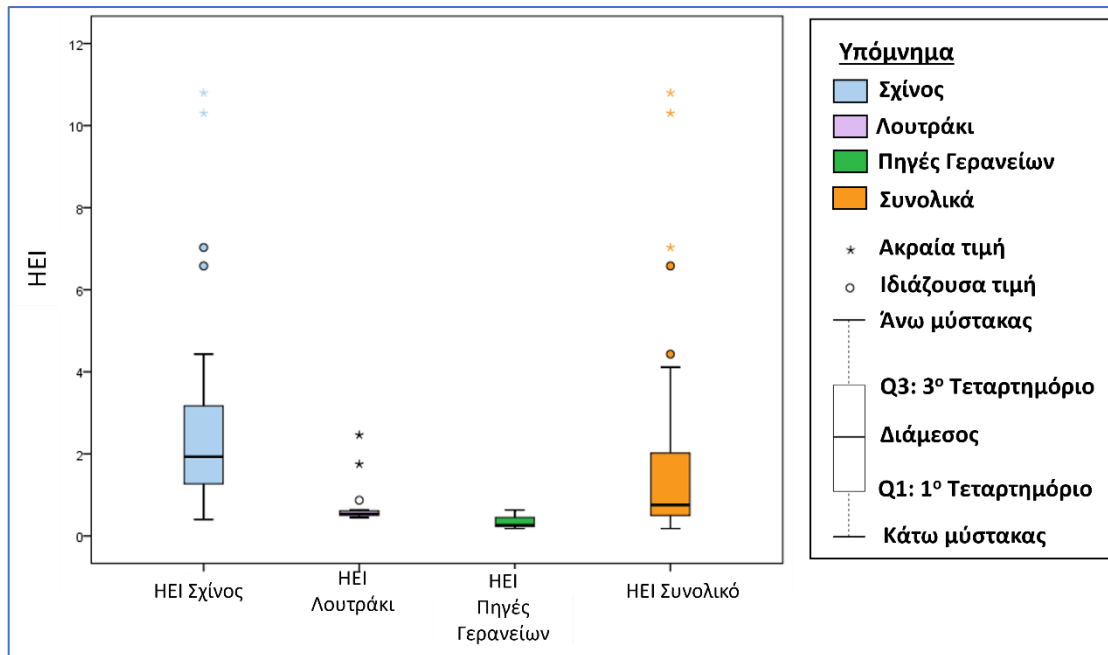
Σύμφωνα με τους υπολογισμούς για τον δείκτη Cd, η τιμή του στην περιοχή μελέτης, σε σύνολο 68 δειγμάτων, κυμαίνεται από -9,82 έως 0,80, με μέση τιμή -8,38 και ενδιάμεση τιμή -9,25 (βλ. Πίνακα 14). Στο θηκόγραμμα της Εικόνας 30 και στους Πίνακες 15-17, παρουσιάζονται οι διαφοροποιήσεις στις τιμές του δείκτη Cd ανάμεσα στις τρεις διαφορετικές υποπεριπτώσεις. Βάσει της ενδιάμεσης τιμής, η περιοχή του Σχίνου εμφανίζει υψηλότερες τιμές Cd συγκριτικά με τις περιοχές Λουτρακίου και Γερανίων Ορέων. Ειδικότερα, στην περιοχή του Σχίνου, ο δείκτης Cd κυμαίνεται από -9,60 έως 0,80, με μέση τιμή -7,24 και ενδιάμεση τιμή -8,07. Συνεπώς, όλες οι τιμές του δείκτη Cd ανήκουν στην πρώτη κατηγορία <1 και η ποιότητα του νερού στο σύνολο των δειγμάτων (100%) χαρακτηρίζεται κατάλληλο για χρήση.



**Εικόνα 30: Θηκόγραμμα για τον δείκτη CdI των 68 δειγμάτων στην περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Όρεων**

#### 4.2.3.2 HEI

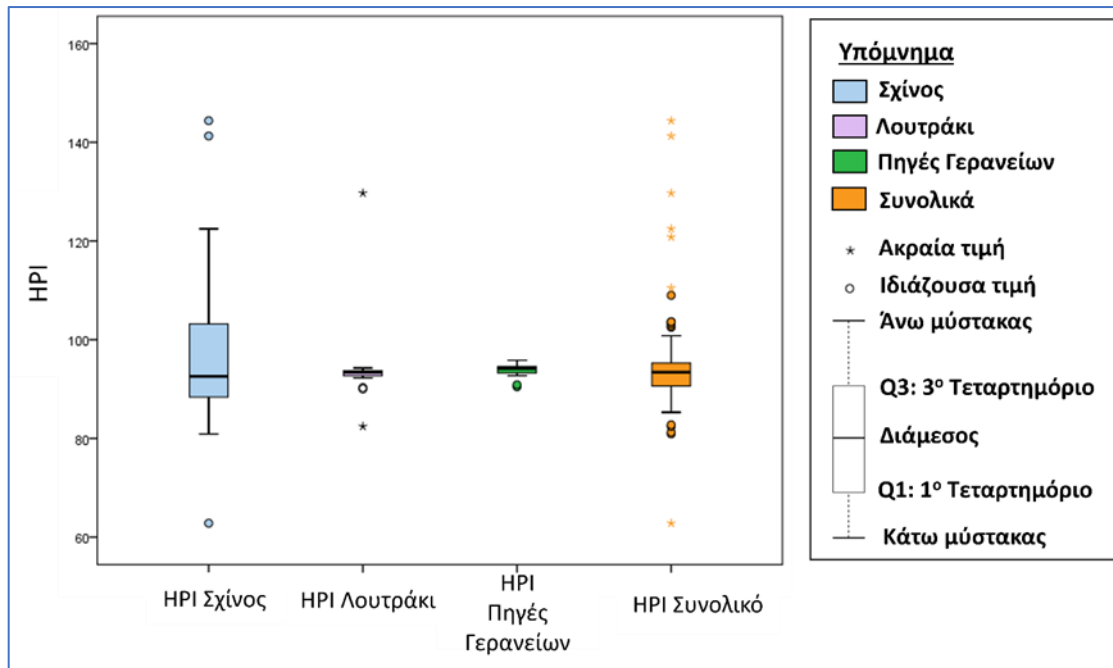
Σύμφωνα με τους υπολογισμούς για τον δείκτη HEI, η τιμή του στην περιοχή μελέτης, σε σύνολο 68 δειγμάτων, κυμαίνεται από 0,18 έως 10,80 με μέση τιμή 1,62 και ενδιάμεση τιμή 0,75 (βλ. Πίνακα 14). Στο θηκόγραμμα της Εικόνας 31 και στους Πίνακες 15-17, παρουσιάζονται οι διαφοροποιήσεις στις τιμές του δείκτη HEI ανάμεσα στις τρεις διαφορετικές υποπεριπτώσεις. Βάσει της ενδιάμεσης τιμής, η περιοχή του Σχίνου εμφανίζει υψηλότερες τιμές HEI συγκριτικά με τις περιοχές Λουτρακίου και Γερανείων Όρεων. Ειδικότερα, στην περιοχή του Σχίνου, ο δείκτης HEI κυμαίνεται από 0,40 έως 10,80, με μέση τιμή 2,77 και ενδιάμεση τιμή 0,40. Συνεπώς, το 97,1% (δηλ. 66 στα 68) των δειγμάτων χαρακτηρίζονται ως χαμηλής ρύπανσης και μόνο στο 2,9% των δειγμάτων ο δείκτης εμφανίζεται με τιμές >10 δηλαδή τα νερά είναι μέτριας ρύπανσης.



**Εικόνα 31: Θηκόγραμμα για τον δείκτη HEI των 68 δειγμάτων στην περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Όρεων**

#### 4.2.3.3 HPI

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς για τον δείκτη HPI, η τιμή του στην περιοχή μελέτης, σε σύνολο 68 δειγμάτων, κυμαίνεται από 62,81 έως 144,38, με μέση τιμή 95,74 και ενδιάμεση τιμή 93,42 (βλ. Πίνακα 14). Στο θηκόγραμμα της Εικόνας 32 και στους Πίνακες 15-17, παρουσιάζονται οι διαφοροποιήσεις στις τιμές του δείκτη HPI ανάμεσα στις τρεις διαφορετικές υποπεριπτώσεις. Βάσει της ενδιάμεσης τιμής, η περιοχή των Γερανίων Όρεων εμφανίζει υψηλότερες τιμές HPI συγκριτικά με τις περιοχές Λουτρακίου και Γερανείων Όρεων. Ειδικότερα, στην περιοχή των Γερανίων Όρεων, ο δείκτης HPI κυμαίνεται από 90,47 έως 95,84, με μέση τιμή 93,75 και ενδιάμεση τιμή 94,19. Συνεπώς, οι τιμές του δείκτη HPI ανήκουν στην πρώτη κατηγορία <100 με ποσοστό 77,9% (δηλ.53 στα 68) και η ποιότητα του νερού χαρακτηρίζεται ως κατάλληλο για χρήση ενώ το 22,1% (δηλ.15 στα 68) των δειγμάτων χαρακτηρίζεται ως ακατάλληλο.



*Εικόνα 32: Θηκόγραμμα για τον δείκτη HPI των 68 δειγμάτων στην περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Όρεων*

#### 4.2.4 Ιοντικοί λόγοι

Στον Πίνακα 18 δίνονται τα περιγραφικά στατιστικά ιοντικών λόγων για την περιοχή του Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Όρεων. Στους Πίνακες 19-21 φαίνονται οι ιοντικοί λόγοι σε κάθε υποπεριοχή αναλόγως με τα δείγματα των υπόγειων νερών.

*Πίνακας 18: Ιοντικοί λόγοι για την περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου- Γερανείων Ορέων.*

Παράμετρος	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΔΙΑΜΕΣΟΣ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ	3ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ
Ca/Mg	0,13	0,01	0,44	0,08	0,12	0,02	0,23
Ca/SO4	0,91	0,14	4,37	0,69	0,81	0,40	1,12
Ca/Na	0,35	0,03	1,20	0,27	0,28	0,11	0,52
Cl/NO3	16,45	1,68	105,84	9,08	18,27	4,43	20,98
Cl/HCO3	0,36	0,05	1,56	0,17	0,41	0,09	0,45

*Πίνακας 19: Ιοντικοί λόγοι για την περιοχή του Σχίνου.*

Παράμετρος	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΔΙΑΜΕΣΟΣ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ	3ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ
Ca/Mg	0,18	0,01	0,44	0,20	0,12	0,07	0,28
Ca/SO4	0,85	0,14	4,37	0,60	0,97	0,38	0,98
Ca/Na	0,35	0,03	1,20	0,23	0,32	0,08	0,54
Cl/NO3	15,42	1,68	105,84	5,95	21,09	3,58	17,82
Cl/HCO3	0,62	0,12	1,56	0,44	0,45	0,26	0,87

*Πίνακας 20: Ιοντικοί λόγοι για την περιοχή του Λουτρακίου.*

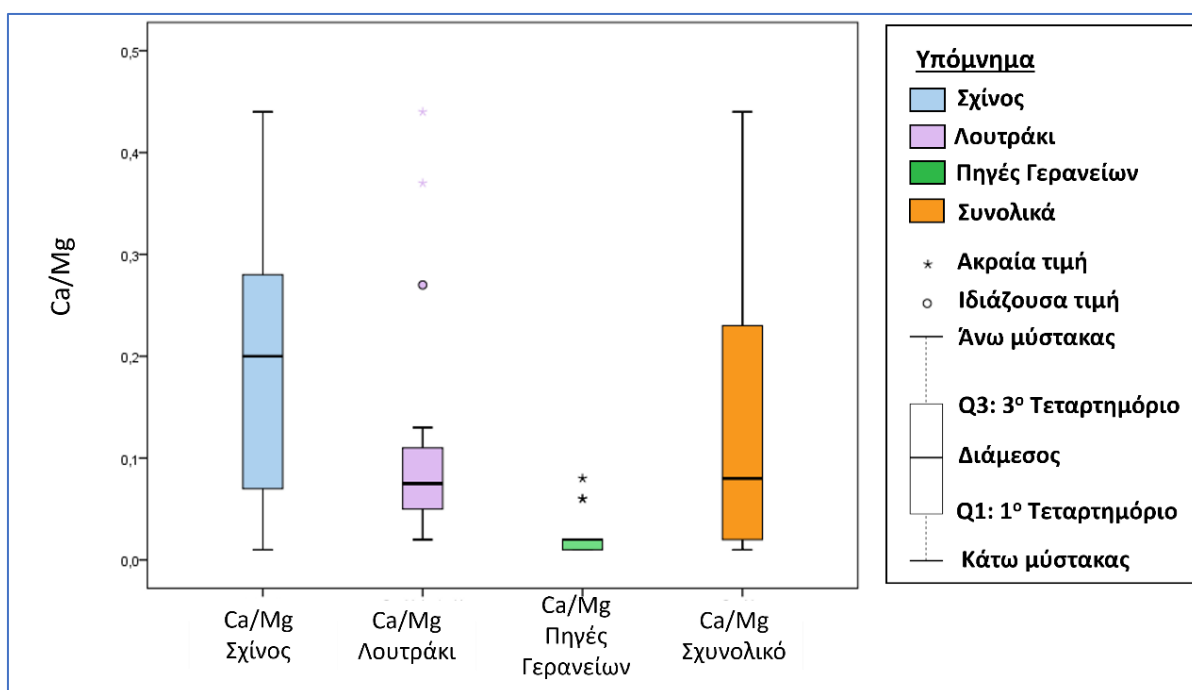
Παράμετρος	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΔΙΑΜΕΣΟΣ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ	3ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ
Ca/Mg	0,11	0,02	0,44	0,08	0,11	0,05	0,11
Ca/SO4	1,19	0,31	2,79	1,16	0,59	0,76	1,49
Ca/Na	0,46	0,11	1,00	0,41	0,23	0,30	0,59
Cl/NO3	12,47	2,76	47,00	9,03	10,75	6,18	15,22
Cl/HCO3	0,12	0,07	0,49	0,09	0,09	0,08	0,12

*Πίνακας 21: Ιοντικοί λόγοι για την περιοχή των Γερανίων Ορέων.*

Παράμετρος	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΔΙΑΜΕΣΟΣ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ	3ο ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ
Ca/Mg	0,03	0,01	0,08	0,02	0,02	0,01	0,02
Ca/SO4	0,67	0,18	2,26	0,51	0,59	0,31	0,65
Ca/Na	0,19	0,04	0,50	0,16	0,15	0,08	0,24
Cl/NO3	24,00	2,62	73,00	16,92	18,36	12,54	31,50
Cl/HCO3	0,11	0,05	0,36	0,08	0,08	0,07	0,11

#### 4.2.4.1 Ca/Mg

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς για τον ιοντικό λόγο Ca/Mg η τιμή του στην περιοχή μελέτης, σε σύνολο 68 δειγμάτων, κυμαίνεται από 0,01 έως 0,44, με μέση τιμή 0,13 και ενδιάμεση τιμή 0,08 (βλ. Πίνακα 18). Στο θηκόγραμμα της Εικόνας 33 και στους Πίνακες 19-21, παρουσιάζονται οι διαφοροποιήσεις στις τιμές του Ιοντικού λόγου Ca/Mg ανάμεσα στις τρεις διαφορετικές υποπεριπτώσεις. Βάσει της ενδιάμεσης τιμής, η περιοχή Σχίνου εμφανίζει υψηλότερες τιμές Ιοντικού λόγου Ca/Mg συγκριτικά με τις περιοχές Λουτρακίου και Γερανείων Ορέων. Ειδικότερα, στην περιοχή του Σχίνου, ο λόγος Ca/Mg κυμαίνεται από 0,01 έως 0,44, με μέση τιμή 0,18 και ενδιάμεση τιμή 0,20.

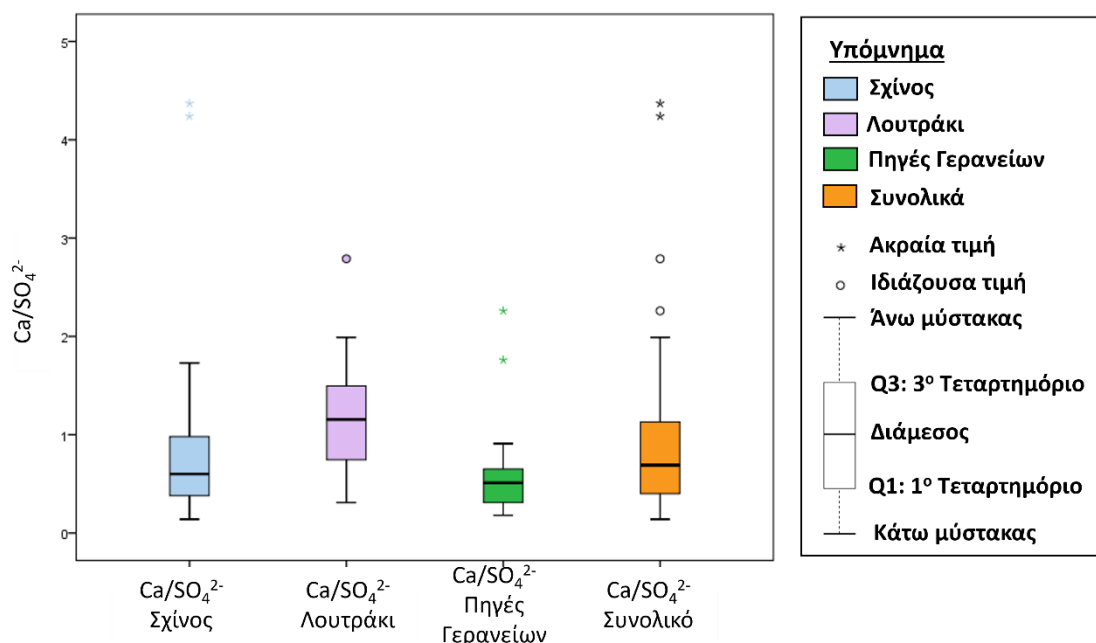


**Εικόνα 33: : Θηκόγραμμα για τον ιοντικό λόγο Ca/MgI των 68 δειγμάτων στην περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Όρεων**



#### 4.2.4.2. Ca/SO<sub>4</sub>

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς για τον ιοντικό λόγο Ca<sup>2+</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> η τιμή του στην περιοχή μελέτης, σε σύνολο 68 δειγμάτων, κυμαίνεται από 0,14 έως 4,37, με μέση τιμή 0,91 και ενδιάμεση τιμή 0,69 (βλ. Πίνακα 18). Στο θηκόγραμμα της Εικόνας 34 και στους Πίνακες 19-21, παρουσιάζονται οι διαφοροποιήσεις στις τιμές του Ιοντικού λόγου Ca<sup>2+</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ανάμεσα στις τρεις διαφορετικές υποπεριπτώσεις. Βάσει της ενδιάμεσης τιμής, η περιοχή του Λουτρακίου εμφανίζει υψηλότερες τιμές Ιοντικού λόγου Ca<sup>2+</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> συγκριτικά με τις περιοχές του Σχίνου και Γερανείων Ορέων. Ειδικότερα, στην περιοχή του Λουτρακίου, ο λόγος Ca<sup>2+</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> κυμαίνεται από 0,31 έως 2,79, με μέση τιμή 1,19 και ενδιάμεση τιμή 1,16.

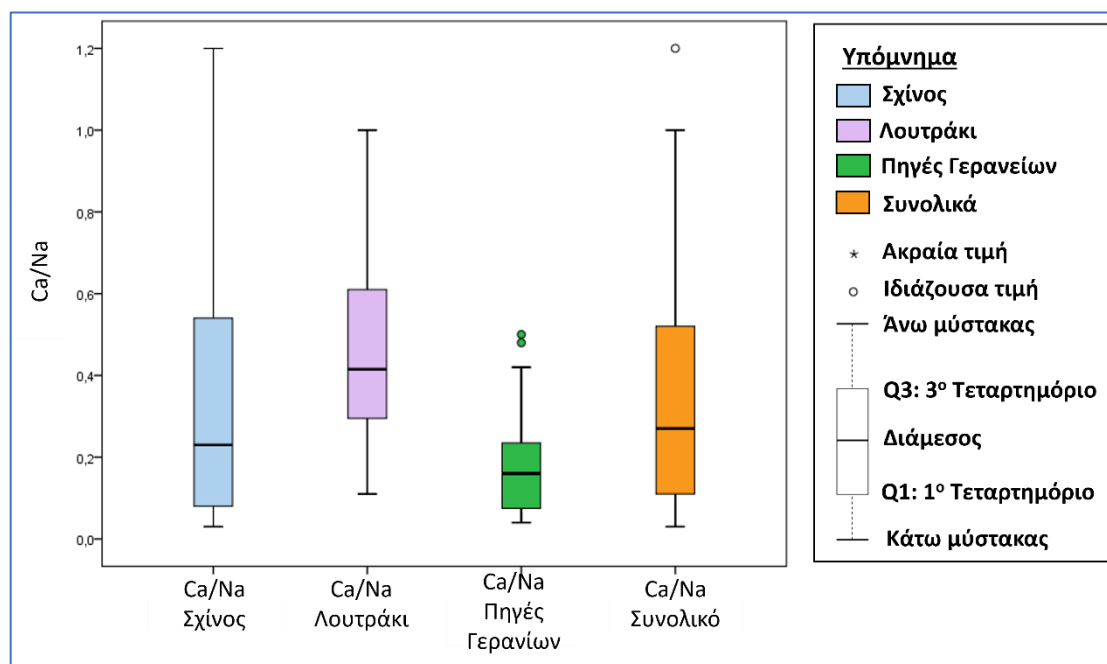


**Εικόνα 34: : Θηκόγραμμα για τον ιοντικό λόγο Ca/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> των 68 δειγμάτων στην περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Όρεων**

#### 4.2.4.3 Ca/Na

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς για τον ιοντικό λόγο Ca/Na η τιμή του στην περιοχή μελέτης, σε σύνολο 68 δειγμάτων, κυμαίνεται από 0,03 έως 1,20, με μέση τιμή 0,35 και ενδιάμεση τιμή 0,27 (βλ. Πίνακα 18). Στο θηκόγραμμα της Εικόνας 35 και στους Πίνακες 19-21, παρουσιάζονται οι διαφοροποιήσεις στις τιμές του ιοντικού λόγου

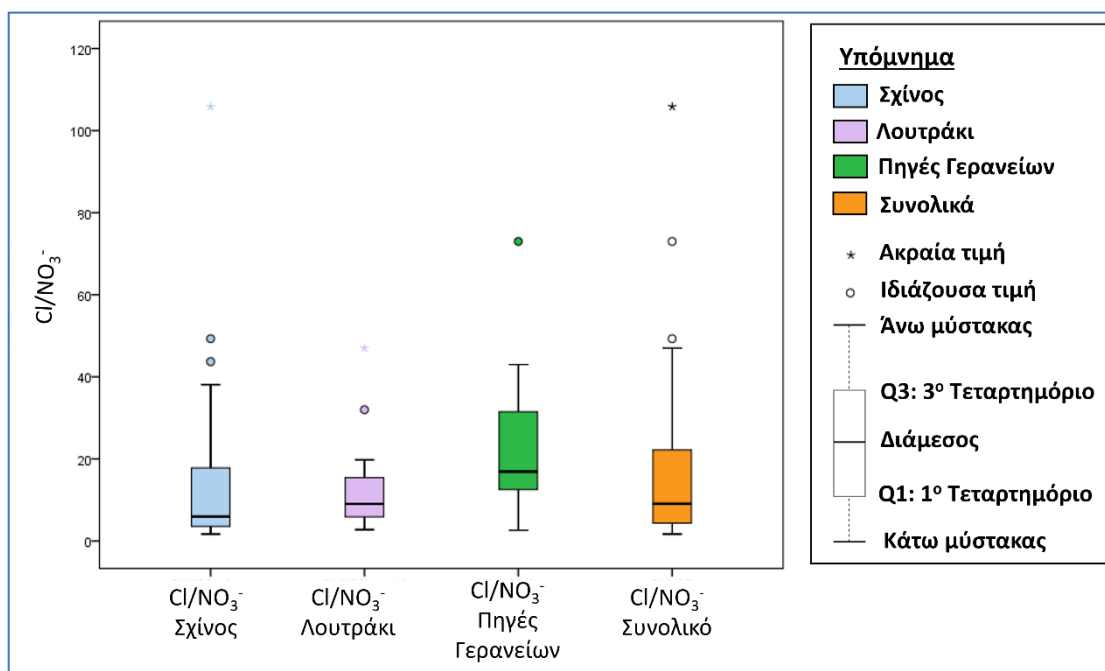
Ca/Na ανάμεσα στις τρεις διαφορετικές υποπεριπτώσεις. Βάσει της ενδιάμεσης τιμής, η περιοχή του Λουτρακίου εμφανίζει υψηλότερες τιμές Ιοντικού λόγου Ca/Na συγκριτικά με τις περιοχές του Σχίνου και Γερανείων Ορέων. Ειδικότερα, στην περιοχή του Λουτρακίου, ο λόγος Ca/Na κυμαίνεται από 0,11 έως 1, με μέση τιμή 0,46 και ενδιάμεση τιμή 0,41.



**Εικόνα 35:** : Θηκόγραμμα για τον ιοντικό λόγο Ca/Na των 68 δειγμάτων στην περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Όρεων

#### 4.2.4.3 Cl/NO<sub>3</sub>

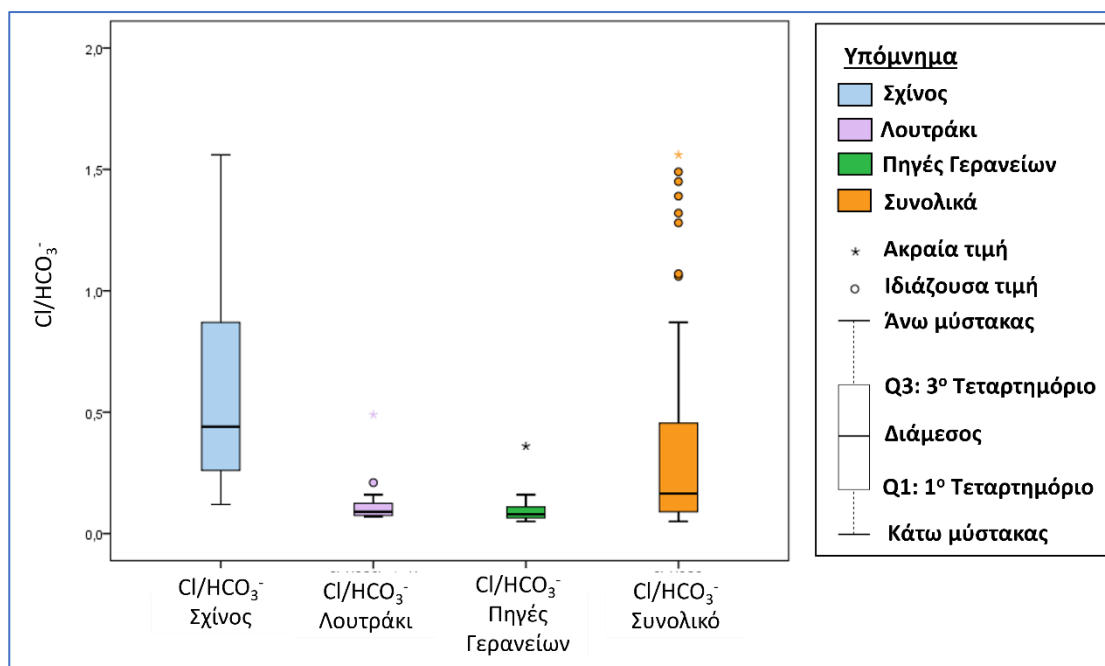
Σύμφωνα με τους υπολογισμούς για τον ιοντικό λόγο Cl/NO<sub>3</sub> η τιμή του στην περιοχή μελέτης, σε σύνολο 68 δειγμάτων, κυμαίνεται από 1,68 έως 105,84, με μέση τιμή 16,45 και ενδιάμεση τιμή 9.08 (βλ. Πίνακα 18). Στο θηκόγραμμα της Εικόνας 36 και στους Πίνακες 19-21, παρουσιάζονται οι διαφοροποιήσεις στις τιμές του ιοντικού λόγου Cl/NO<sub>3</sub> ανάμεσα στις τρεις διαφορετικές υποπεριπτώσεις. Βάσει της ενδιάμεσης τιμής, η περιοχή των Γερανείων Ορέων εμφανίζει υψηλότερες τιμές Ιοντικού λόγου Cl/NO<sub>3</sub> συγκριτικά με τις περιοχές του Σχίνου και του Λουτρακίου. Ειδικότερα, στην περιοχή των Γερανείων Ορέων, ο λόγος Cl/NO<sub>3</sub> κυμαίνεται από 2,62 έως 73, με μέση τιμή 0,11 και ενδιάμεση τιμή 0,08.



**Εικόνα 36:** : Θηκόγραμμα για τον ιοντικό λόγο  $Cl^-/NO_3^-$  των 68 δειγμάτων στην περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Όρεων

#### 4.2.4.5 $Cl^-/HCO_3^-$

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς για τον ιοντικό λόγο  $Cl^-/HCO_3^-$  η τιμή του στην περιοχή μελέτης, σε σύνολο 68 δειγμάτων, κυμαίνεται από 0,05 έως 1,56 με μέση τιμή 0,36 και ενδιάμεση τιμή 0,17 (βλ. Πίνακα 18). Στο θηκόγραμμα της Εικόνας 37 και στους Πίνακες 19-21, παρουσιάζονται οι διαφοροποιήσεις στις τιμές του ιοντικού λόγου  $Cl^-/HCO_3^-$  ανάμεσα στις τρεις διαφορετικές υποπεριπτώσεις. Βάσει της ενδιάμεσης τιμής, η περιοχή του Σχίνου εμφανίζει υψηλότερες τιμές Ιοντικού λόγου  $Cl^-/HCO_3^-$  συγκριτικά με τις περιοχές των Γερανίων Ορέων και του Λουτρακίου. Ειδικότερα, στην περιοχή του Σχίνου ο λόγος  $Cl^-/HCO_3^-$  κυμαίνεται από 0,12 έως 1,56 με μέση τιμή 0,62 και ενδιάμεση τιμή 0,44.



Εικόνα 37: : Θηκόγραμμα για τον ιοντικό λόγο  $Cl/HCO_3^-$  των 68 δειγμάτων στην περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Όρεων

### 4.3 Συντελεστές συσχέτισης

#### 4.3.1 Κατά Pearson

Στον Πίνακα 22 δίνονται οι συντελεστές συσχέτισης κατά Pearson για τα 68 δείγματα υπογείου νερού από την περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Όρεων για τις 19 παραμέτρους που υπολογίστηκαν. Οι στατιστικά σημαντικοί συντελεστές συσχέτισης σε επίπεδο εμπιστοσύνης  $p < 0,01$  δίνονται με δύο αστερίσκους, ενώ σε επίπεδο εμπιστοσύνης  $p < 0,05$  δίνονται με ένα αστερίσκο.

**Πίνακας 22: Συντελεστές συσχέτισης κατά Pearson για τα δείγματα υπόγειων νερών από την περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων.**

Συντελεστές συσχέτισης κατά Pearson																									
Παράμετρος	SAR	KR	Na%	PS	MAR	RSC	SSP	TH	PI	TDS	NPI	RI	PIG	WQI	WPI	IWQI	Cd	HPI	HEI	Ca/Mg	Ca/SO <sub>4</sub>	Ca/Na	Cl/NO <sub>3</sub>	Cl/HCO <sub>3</sub>	
SAR	1																								
KR	,977**	1																							
Na%	,959**	,965**	1																						
PS	,856**	,745**	,785**	1																					
MAR	-,264*	-,230	-,326**	-,401**	1																				
RSC	-,490**	-,335**	-,415**	-,829**	,383**	1																			
SSP	,959**	,965**	1,000**	,784**	-,326**	-,414**	1																		
TH	,488**	,331**	,410**	,805**	-,362**	-,934**	,408**	1																	
PI	,677**	,771**	,756**	,349**	-,112	,171	,757**	-,204	1																
TDS	,780**	,658**	,709**	,946**	-,405**	-,822**	,708**	,904**	,202	1															
NPI	,236	,203	,305*	,308*	-,504**	-,329**	,303*	,447**	-,040	,455**	1														
RI	,887**	,805**	,838**	,951**	-,394**	-,762**	,838**	,684**	,424**	,845**	,279*	1													
PIG	,707**	,574**	,641**	,919**	-,420**	-,875**	,640**	,949**	,083	,988**	,522**	,817**	1												
WQI	,762**	,651**	,720**	,917**	-,484**	-,807**	,718**	,882**	,203	,977**	,620**	,834**	,982**	1											
WPI	,751**	,641**	,715**	,900**	-,472**	-,806**	,714**	,888**	,181	,969**	,617**	,824**	,977**	,991**	1										
IWQI	-,712**	-,606**	-,559**	-,798**	,100	,586**	-,558**	-,584**	-,295*	-,739**	-,056	-,740**	-,688**	-,668**	-,642**	1									
Cd	,266*	,212	,287*	,390**	-,592**	-,519**	,286*	,491**	-,094	,429**	,526**	,417**	,482**	,509**	,527**	-,169	1								
HPI	,050	,024	,031	,142	-,373**	-,301*	,031	,238	-,192	,149	,206	,172	,191	,193	,199	-,035	,786**	1							
HEI	,267*	,212	,287*	,391**	-,592**	-,520**	,287*	,492**	-,094	,429**	,526**	,418**	,483**	,510**	,528**	-,170	1,000**	,785**	1						
Ca/Mg	,251*	,218	,315**	,388**	-,998**	-,378**	,314**	,354**	,101	,390**	,483**	,384**	,406**	,466**	,455**	-,088	,585**	,369**	,585**	1					

<b>Ca/SO<sub>4</sub></b>	-.277*	-.250*	-.259*	-.268*	-.358**	.247*	-.259*	-.198	-.113	-.220	.067	-.269*	-.220	-.193	-.178	.283*	-.047	-.141	-.048	.346**	1			
<b>Ca/Na</b>	-.288*	-.300*	-.286*	-.128	-.677**	-.006	-.286*	.004	-.250*	-.083	.259*	-.165	-.046	-.017	-.024	.189	.335**	.278*	.334**	.666**	.691**	1		
<b>Cl/NO<sub>3</sub></b>	.325**	.265*	.222	.455**	-.032	-.459**	.222	.376**	.048	.370**	-.388**	.393**	.339**	.248*	.228	-.432**	-.070	.013	-.070	.043	-.159	-.136	1	
<b>Cl/HCO<sub>3</sub></b>	.887**	.805**	.838**	.951**	-.394**	-.762**	.837**	.683**	.424**	.845**	.278*	1.000**	.817**	.833**	.824**	-.741**	.417**	.172	.418**	.384**	-.270*	-.165	.393**	1
** p value < 0.01																								
* P value < 0.05																								

### **4.3.2 Κατά Spearman**

Στον Πίνακα 23 δίνονται οι συντελεστές συσχέτισης κατά Spearman για τα 68 δείγματα υπογείου νερού από την περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων για τις 19 παραμέτρους που υπολογίστηκαν. Οι στατιστικά σημαντικοί συντελεστές συσχέτισης σε επίπεδο εμπιστοσύνης  $p < 0,01$  δίνονται με δύο αστερίσκους, ενώ σε επίπεδο εμπιστοσύνης  $p < 0,05$  δίνονται με ένα αστερίσκο.

**Πίνακας 23: Συντελεστές συσχέτισης κατά Spearman για τα δείγματα υπόγειων νερών στην περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων.**

Συντελεστές συσχέτισης κατά Spearman																									
Παράμετρος	SAR	KR	Na%	PS	MAR	RSC	SSP	TH	PI	TDS	NPI	RI	PIG	WQI	WPI	IWQI	Cd	HPI	HEI	Ca/Mg	Ca/SO <sub>4</sub>	Ca/Na	Cl/NO <sub>3</sub>	Cl/HCO <sub>3</sub>	
SAR	1,000																								
KR	,971**	1,000																							
Na%	,972**	,998**	1,000																						
PS	,931**	,860**	,862**	1,000																					
MAR	-,461**	-,497**	-,500**	-,536**	1,000																				
RSC	-,582**	-,444**	-,448**	-,751**	,265*	1,000																			
SSP	,971**	,998**	1,000**	,862**	-,500**	-,446**	1,000																		
TH	,529**	,374**	,375**	,723**	-,244*	-,906**	,372**	1,000																	
PI	,497**	,644**	,641**	,248*	-,239	,263*	,643**	-,317**	1,000																
TDS	,726**	,627**	,625**	,840**	-,400**	-,751**	,623**	,886**	,048	1,000															
NPI	,684**	,635**	,638**	,725**	-,509**	-,473**	,636**	,541**	,146	,692**	1,000														
RI	,938**	,909**	,915**	,945**	-,551**	-,683**	,914**	,561**	,373**	,693**	,694**	1,000													
PIG	,734**	,612**	,611**	,863**	-,350**	-,835**	,609**	,929**	-,043	,978**	,706**	,725**	1,000												
WQI	,765**	,666**	,665**	,874**	-,436**	-,750**	,664**	,864**	,072	,984**	,767**	,739**	,977**	1,000											
WPI	,756**	,659**	,659**	,868**	-,444**	-,745**	,657**	,865**	,074	,982**	,752**	,734**	,970**	,991**	1,000										
IWQI	-,152	-,114	-,116	-,187	,026	,358**	-,116	-,409**	-,025	-,429**	-,016	-,172	-,401**	-,357**	-,360**	1,000									



<b>Cd</b>	,713**	,687**	,688**	,790**	-,749**	-,587**	,688**	,622**	,200	,759**	,690**	,757**	,722**	,768**	,791**	-,211	1,000								
<b>HPI</b>	-,014	-,056	-,050	,051	-,093	-,302*	-,053	,198	-,275*	,073	-,019	,091	,110	,078	,056	-,245*	,132	1,000							
<b>HEI</b>	,713**	,687**	,688**	,790**	-,749**	-,587**	,688**	,623**	,200	,759**	,690**	,757**	,722**	,768**	,791**	-,211	1,000**	,130	1,000						
<b>Ca/Mg</b>	,462**	,495**	,500**	,537**	-,996**	-,271*	,500**	,245*	,238	,393**	,504**	,554**	,347**	,433**	,440**	-,011	,749**	,101	,749**	1,000					
<b>Ca/SO<sub>4</sub></b>	-,303*	-,248*	-,246*	-,232	-,534**	,355**	-,244*	-,304*	-,048	-,269*	-,009	-,247*	-,325**	-,245*	-,220	,309*	,075	-,212	,074	,528**	1,000				
<b>Ca/Na</b>	-,216	-,187	-,182	-,072	-,733**	,099	-,181	-,063	-,206	-,082	,102	-,078	-,128	-,070	-,053	,152	,326**	,112	,327**	,732**	,814**	1,000			
<b>Cl/NO<sub>3</sub></b>	-,005	,007	,005	-,027	,170	-,135	,007	,013	,105	-,056	-,664**	-,002	-,070	-,150	-,130	-,387**	-,129	,108	-,129	-,171	-,295*	-,258*	1,000		
<b>Cl/HCO<sub>3</sub></b>	,936**	,907**	,912**	,943**	-,554**	-,683**	,912**	,559**	,375**	,692**	,689**	,998**	,723**	,737**	,733**	-,181	,759**	,092	,759**	,555**	-,246*	-,075	,007	1,000	

\*\* . p value < 0.01

\* . P value < 0.05

---

## 4.4 Πολυκριτηριακή στατιστική ανάλυση

### 4.4.1 Παραγοντική ανάλυση (Factor Analysis)

Για να πραγματοποιηθεί η επεξεργασία της παραγοντικής ανάλυσης χρησιμοποιήθηκαν και αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από τα υπόγεια νερά της περιοχής μελέτης και τους γεωπεριβαλλοντικούς δείκτες που υπολογίστηκαν. Για τον προσδιορισμό των κυρίαρχων παραγόντων, επιλέχθηκαν οι παράμετροι (SAR, KR, Na%, PS, MAR, RSC, SSP, TH, PI, IWQI, TDS, NPI, RI, PIG, WQI, WPI, Cd, HEI, HPI)

οι οποίες αναλύθηκαν και υποβλήθηκαν σε κατάλληλη επεξεργασία για να προκύψουν οι κύριες συνιστώσες για το σύνολο των 19 δεικτών που χρησιμοποιήθηκαν στην παραγοντική ανάλυση. Η παραγοντική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της ορθογωνικής περιστροφής Varimax των παραμέτρων εισαγωγής ώστε να εξαχθούν οι κύριες συνιστώσες μέσω του λογισμικού IBM SPSS version 22. Το κρημνογράφημα (scree plot) της Εικόνας 38 έδειξε ότι πέντε συνιστώσες έχουν ιδιοτιμές μεγαλύτερες από 1, οι οποίες σύμφωνα με το κριτήριο του Kaiser (1958) αποτελούν τις κύριες συνιστώσες όπως φαίνεται και στον πίνακα 24 .

Οι πέντε παράγοντες εξηγούν το 92,603% της συνολικής διακύμανσης των δεδομένων. Ο συντελεστής KMO είναι 0,68 υποδεικνύοντας ότι τα αποτελέσματα είναι στατιστικά σημαντικά και η τιμή του ελέγχου σφαιρικότητας του Bartlett (Bartlett's test of sphericity) είναι  $< 0,05$  δείχνοντας ότι τα δεδομένα είναι έγκυρα και κατάλληλα για παραγοντική ανάλυση.

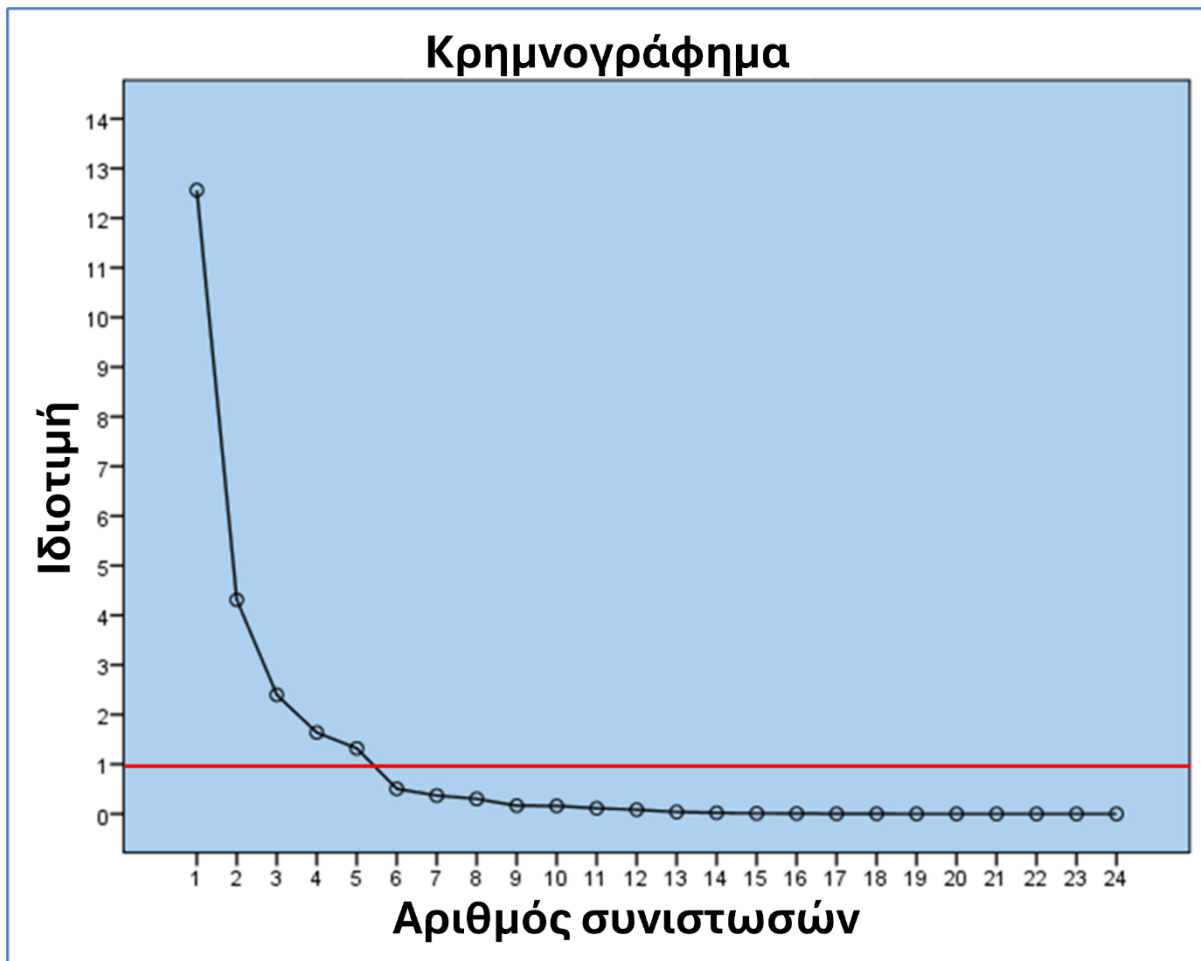
Ο πρώτος παράγοντας (FA1) εξηγεί το 52,339% της συνολικής διακύμανσης των δεδομένων και περιλαμβάνει τις θετικές φορτίσεις των TH (0,968), PIG (0,942), TDS (0,905), WQI (0,881), WPI (0,877), PS (0,825), RI (0,698),  $Cl/HCO_3$  (0,697) την αρνητική φόρτιση του RSC (-0,90) και IWQI (-0,661)

Ο δεύτερος παράγοντας (FA2) εξηγεί το 17,957 % της συνολικής διακύμανσης των δεδομένων και περιλαμβάνει τις θετικές φορτίσεις των PI (0,945), KR (0,911), SSP (0,894), Na (0,893) και SAR (0,837) .

Ο τρίτος παράγοντας (FA3) εξηγεί το 9,988% της συνολικής διακύμανσης των δεδομένων και περιλαμβάνει τις θετικές φορτίσεις των HPI (0,938), Cd (0,872) και HEI (0,871). Ο τέταρτος παράγοντας (FA4) εξηγεί το 6,823% της συνολικής διακύμανσης των δεδομένων και

περιλαμβάνει τις θετικές φορτίσεις των Ca/Na (0,878), Ca/Mg (0,8) και Ca/SO<sub>4</sub> (0,798) την αρνητική φόρτιση του MAR (-0,806)

Ο πέμπτος παράγοντας (FA5) εξηγεί το 5,495% της συνολικής διακύμανσης των δεδομένων και περιλαμβάνει τις θετικές φορτίσεις του NPI (0,722), την αρνητική φόρτιση του Cl/NO<sub>3</sub> (-0,822)

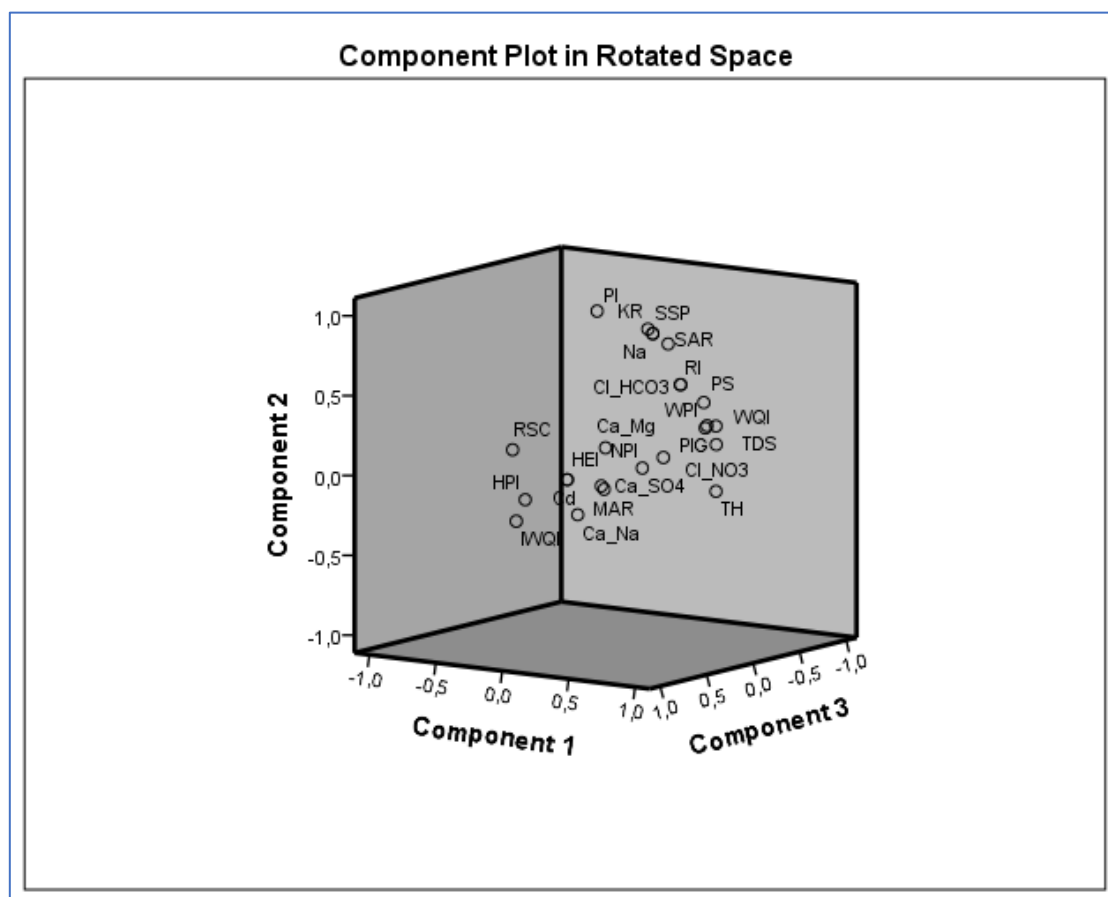


*Εικόνα 38: Ανάλυση κύριων συνιστωσών από το κρημνογράφημα των ιδιοτιμών συνιστωσών για τα δείγματα υπόγειων νερών στην περιοχή Λουτρακίου- Σχίνου-Γερανείων Ορέων*

*Πίνακας 24: Παραγοντική ανάλυση με τη μέθοδο της ανάλυσης κύριων συνιστωσών για τα δείγματα των υπόγειων νερών για την περιοχή του Λουτρακίου-Σχίνου- Γερανίων Ορέων.*

Παράμετρος	Παράγοντας				
	FA1	FA2	FA3	FA4	FA5
TH	<b>0,968</b>	-0,021	0,197	0,033	-0,001
PIG	<b>0,942</b>	0,263	0,155	0,051	0,071
TDS	<b>0,905</b>	0,369	0,107	0,048	0,023
RSC	<b>-0,904</b>	-0,021	-0,292	-0,03	0,169
WQI	<b>0,881</b>	0,377	0,167	0,102	0,177
WPI	<b>0,877</b>	0,364	0,18	0,093	0,194
PS	<b>0,825</b>	0,51	0,123	0,034	-0,145
RI	<b>0,698</b>	0,619	0,19	0,015	-0,145
Cl/HCO <sub>3</sub>	<b>0,697</b>	0,619	0,191	0,015	-0,146
IWQI	<b>-0,661</b>	-0,399	0,017	0,124	0,289
PI	-0,163	<b>0,945</b>	-0,14	0,007	-0,012
KR	0,35	<b>0,911</b>	0,044	-0,065	-0,026
SSP	0,411	<b>0,894</b>	0,08	-0,023	0,06
Na	0,412	<b>0,893</b>	0,08	-0,023	0,061
SAR	0,512	<b>0,837</b>	0,059	-0,065	-0,057
HPI	0,052	-0,059	<b>0,938</b>	0,056	-0,07
Cd	0,321	0,084	<b>0,872</b>	0,213	0,188
HEI	0,322	0,085	<b>0,871</b>	0,213	0,188
Ca/Na	-0,061	-0,269	0,213	<b>0,878</b>	0,037
MAR	-0,275	-0,216	-0,377	<b>-0,806</b>	-0,092
Ca/Mg	0,265	0,207	0,38	<b>0,8</b>	0,074
Ca/SO <sub>4</sub>	-0,199	-0,168	-0,237	<b>0,798</b>	0,055
Cl/NO <sub>3</sub>	0,395	0,097	-0,058	-0,012	<b>-0,822</b>
NPI	0,434	0,075	0,225	0,258	<b>0,772</b>
Αρχικές ιδιοτιμές της διακύμανσης σε %	<b>52,339</b>	<b>17,957</b>	<b>9,988</b>	<b>6,823</b>	<b>5,495</b>
Σωρευτική % της διακύμανσης	<b>52,339</b>	<b>70,297</b>	<b>80,285</b>	<b>87,108</b>	<b>92,603</b>

Στην Εικόνα 39 παρουσιάζονται οι τρεις (3) κύριες συνιστώσες με τη μεγαλύτερη συνεισφορά σε τρισδιάστατο διάγραμμα, όπου γίνονται σαφείς οι συσχετιζόμενες παράμετροι για τους 19 γεωπεριβαλλοντικούς δείκτες από την περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων.



*Εικόνα 39: Ανάλυση κύριων συνιστωσών (PCA) χημικών στοιχείων στα δείγματα υπόγειων νερών από την περιοχή του Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων.*

#### **4.4.2 Ιεραρχική ανάλυση κατά συστάδες (Hierarchical Cluster Analysis)**

Οι τιμές εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν στη μέθοδο αυτή ήταν οι τυπικές τιμές των παραμέτρων. Οι πιο σημαντικές επιλογές στην ιεραρχική ανάλυση κατά συστάδες είναι η επιλογή της διασύνδεσης (linkage) και της απόστασης ομοιότητας (similarity). Για τη διασύνδεση υπάρχουν διάφορες επιλογές και η πιο ευρέως χρησιμοποιημένη στη διεθνή βιβλιογραφία για τις γεωεπιστήμες είναι η μέθοδος του Ward (1963), η οποία βασίζεται στην εφαρμογή της ανάλυσης της διακύμανσης στις παρατηρήσεις των ομάδων με σκοπό την εκτίμηση των αποστάσεων μεταξύ τους. Με αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιείται η μεταβλητότητα μεταξύ δύο εξεταζόμενων ομάδων που σχηματίζονται σε κάθε διαδοχικό στάδιο της ιεραρχικής ταξινόμησης των ομάδων. Τονίζεται ότι σύμφωνα με τη διεθνή

---

βιβλιογραφία και ειδικότερα στις επιστημονικές εργασίες που άπτονται της υδρογεωχημείας (π.χ. Papazotos et al., 2020) η πιο διαδεδομένη επιλογή απόστασης ομοιότητας είναι το τετράγωνο της Ευκλείδειας απόστασης (Squared Euclidean distance), και αυτή σχετίζεται με την παρουσίαση των παρατηρήσεων στη χωροδιάσταση των παραμέτρων. Επιπροσθέτως, στις γεωχημικές μελέτες, η ιεραρχική ανάλυση κατά συστάδες χρησιμοποιείται είτε για την ομαδοποίηση δειγμάτων (Q-mode), είτε παραμέτρων (R-mode) σε συστάδες με βάση την (αν)ομοιότητά τους, με τελικό αποτέλεσμα ένα δενδρόγραμμα. Στο πλαίσιο της παρούσας δουλειάς μελετήθηκε η σχέση μεταξύ των παραμέτρων και έτσι η ιεραρχική ανάλυση κατά συστάδες πραγματοποιήθηκε για την ομαδοποίηση παραμέτρων (R-mode) και στην Εικόνα 40 παρουσιάζεται το δενδρόγραμμα της ιεραρχικής ανάλυσης κατά συστάδες για το σύνολο των 19 γεωπεριβαλλοντικών δεικτών από την περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων. Παράμετροι με απόσταση διασύνδεσης μικρότερη από οκτώ (κόκκινη γραμμή, Εικόνα 40) και πέντε (πράσινη γραμμή, Εικόνα 40) ομαδοποιήθηκαν στο ίδιο σύμπλεγμα για να σχηματίσουν διαφορετικές ομάδες παραμέτρων με παρόμοια υδρογεωχημικά μοτίβα.

Όπως φαίνεται στο δενδρόγραμμα της Εικόνας 40, οι παράμετροι χωρίστηκαν σε έξι κύριες ομάδες στη χαμηλότερη απόσταση διασύνδεσης και σε τρεις κύριες ομάδες στην υψηλότερη απόσταση διασύνδεσης. Η σχέση μεταξύ των δύο προσεγγίσεων είναι ότι οι επιπρόσθετες συστάδες που δημιουργούνται από την πράσινη διακεκομμένη γραμμή υποδεικνύουν την υδρογεωχημική εγγύτητα μεταξύ συγκεκριμένων παραμέτρων που ομαδοποιούνται σε μια μεγαλύτερη απόσταση διασύνδεσης (δηλ. κόκκινη γραμμή).

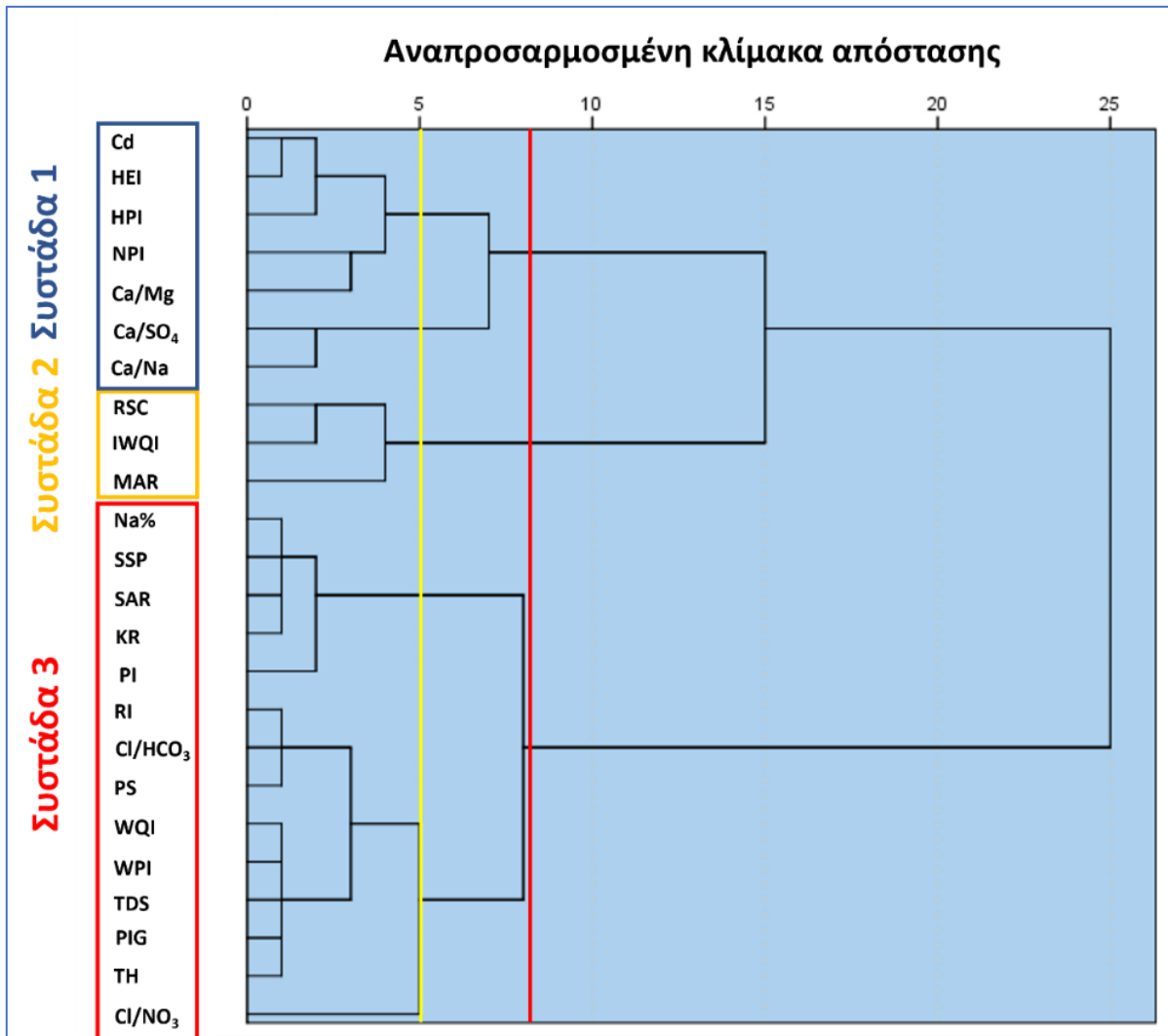
Οι τρεις (3) συστάδες που δημιουργήθηκαν από την απόσταση διασύνδεσης ίση με 8 είναι οι ακόλουθες:

- Συστάδα 1: Cd, HEI, HPI, NPI, Ca/Mg, Ca/SO<sub>4</sub> και Ca/Na.
- Συστάδα 2: RSC, IWQI και MAR.
- Συστάδα 3: Na%, SSP, SAR, KR, PI, RI, Cl/HCO<sub>3</sub>, PS, WQI, WPI, TDS, PIG, TH και Cl/NO<sub>3</sub>.

Οι έξι (6) συστάδες που δημιουργήθηκαν από την απόσταση διασύνδεσης ίση με 5 είναι οι ακόλουθες:

- Συστάδα 1a: Cd, HEI, HPI, NPI και Ca/Mg.
- Συστάδα 1b: Ca/SO<sub>4</sub> και Ca/Na.
- Συστάδα 2: RSC, IWQI και MAR.
- Συστάδα 3a: Na%, SSP, SAR, KR και PI.

- Συστάδα 3b: RI, Cl/HCO<sub>3</sub>, PS, WQI, WPI, TDS, PIG και TH.
- Συστάδα 3c: Cl/NO<sub>3</sub>.



*Εικόνα 40: Δενδρόγραμμα της ιεραρχικής ανάλυσης κατά συστάδες για το σύνολο των δειγμάτων υπόγειων νερών από την περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων.*

## 5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ -ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### *Γενικά υδροχημικά χαρακτηριστικά*

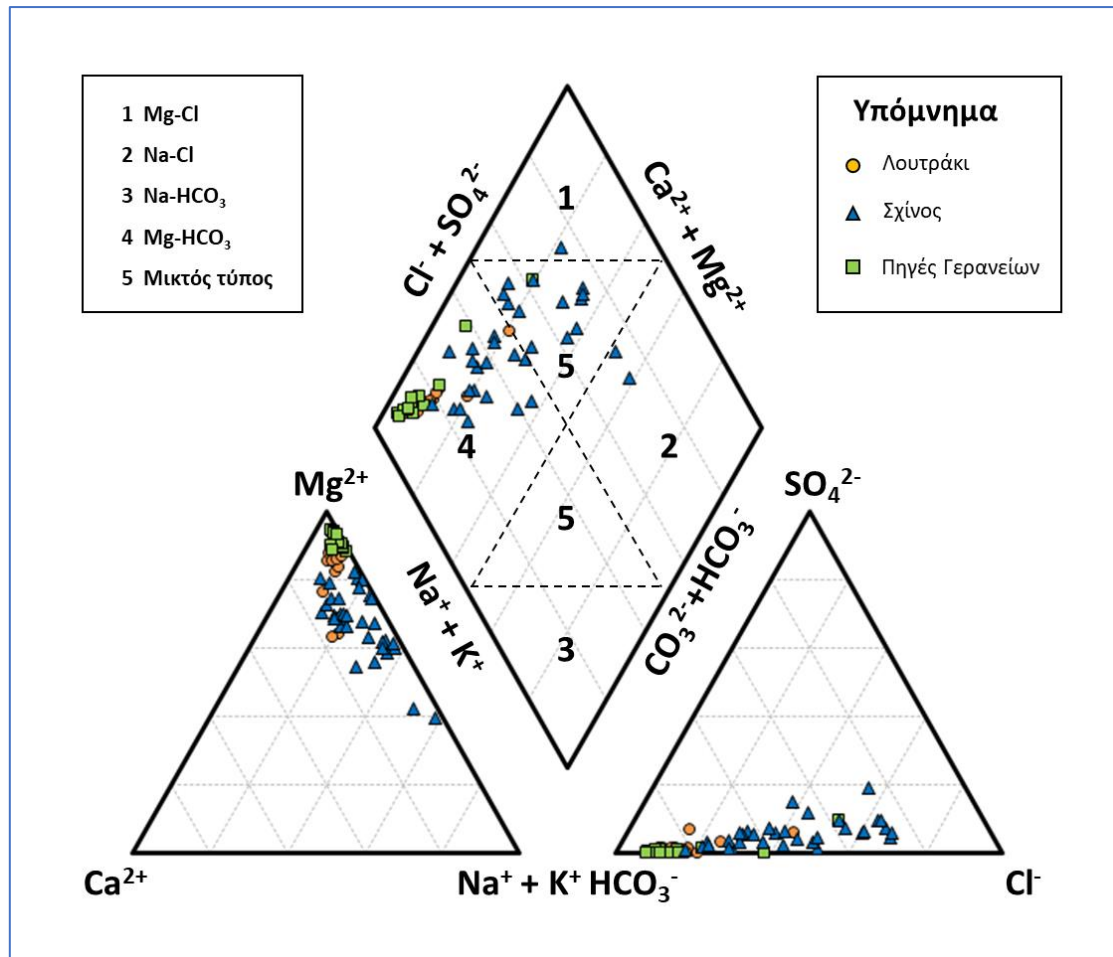
Στην περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων επικρατούν αλκαλικές και οξειδωτικές συνθήκες. Η ελάχιστη τιμή pH παρατηρείται στην περιοχή του Σχίνου, ενώ η μέγιστη τιμή παρατηρείται στην περιοχή των Γερανείων Ορέων. Ο κύριος υδροχημικός τύπος που χαρακτηρίζει τα υπόγεια νερά είναι ο  $Mg-HCO_3$ , ο οποίος αντιστοιχεί στα δείγματα νερών από τις πηγές των Γερανείων Ορέων, από την περιοχή του Λουτρακίου και σε μερικά δείγματα της περιοχής του Σχίνου σύμφωνα με την εικόνα 41 όπου παρουσιάζεται το διάγραμμα Piper το οποίο χρησιμοποιείται για την αναγνώριση των κυρίαρχων υδροχημικών φάσεων.

Ειδικότερα, στο τριγωνικό διάγραμμα κατιόντων του Piper, στο αριστερό μέρος της Εικόνας 41 φαίνεται ότι στην περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων επικρατούν τα κατιόντα Μαγνησίου ( $Mg^{2+}$ ) ακολουθούμενα από σχετικά αυξημένες συγκεντρώσεις αλκαλίων ( $Na^+ + K^+$ ). Πιο συγκεκριμένα, στην περιοχή του Λουτρακίου και των πηγών των Γερανείων Ορέων απαντώνται μεγαλύτερες συγκεντρώσεις  $Mg^{2+}$  σε σχέση με τα  $Ca^{2+}$  ή/και τα αλκάλια ( $Na^+ + K^+$ ) με αποτέλεσμα τα σημεία τους να προβάλλονται στο πάνω τμήμα του τριγωνικού διαγράμματος κατιόντων. Στην περιοχή του Σχίνου, εκτός από υψηλές συγκεντρώσεις  $Mg^{2+}$  απαντώνται και μεγάλες συγκεντρώσεις αλκαλίων ( $Na^+ + K^+$ ) με αποτέλεσμα τα σημεία τους προβάλλονται στο πάνω δεξί τμήμα του τριγωνικού διαγράμματος κατιόντων.

Στο τριγωνικό διάγραμμα ανιόντων του Piper στο δεξί μέρος της εικόνας 41, στην περιοχή μελέτης επικρατούν τα  $HCO_3^-$  ακολουθούμενα από τα  $Cl^-$ . Πιο συγκεκριμένα, στην περιοχή του Λουτρακίου και των πηγών των Γερανείων Ορέων υπάρχουν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις  $HCO_3^-$  σε σχέση με τα  $Cl^-$  ή/και  $SO_4^{2-}$ . Τα δείγματα από την περιοχή του Σχίνου, παρουσιάζουν υψηλές συγκεντρώσεις  $Cl^-$ . Το ρομβοειδές διάγραμμα αποτελεί την προβολή των τριγωνικών διαγραμμάτων κατιόντων και ανιόντων άρα οι κύριοι υδροχημικοί τύποι νερού είναι οι  $Mg-HCO_3$ ,  $Mg-Cl$ ,  $Na-Cl$ , καθώς και ένας μικτός τύπος ανάμεσα σε αυτούς. Πιο συγκεκριμένα τα δείγματα των πηγών Γερανείων Ορέων και του Λουτρακίου έχουν υδροχημικό τύπο  $Mg-HCO_3$ , ενώ τα δείγματα της περιοχής του Σχίνου έχουν υδροχημικό τύπο  $Mg-HCO_3$ ,  $Mg-Cl$ ,  $Na-Cl$  και έναν μικτό υδροχημικό τύπος ανάμεσα στους προηγούμενους. Τα δείγματα της περιοχής του Σχίνου παρουσιάζουν αύξηση στις συγκεντρώσεις  $Na^+$  και  $Cl^-$ , που ίσως να οφείλεται στη θαλάσσια διείσδυση.

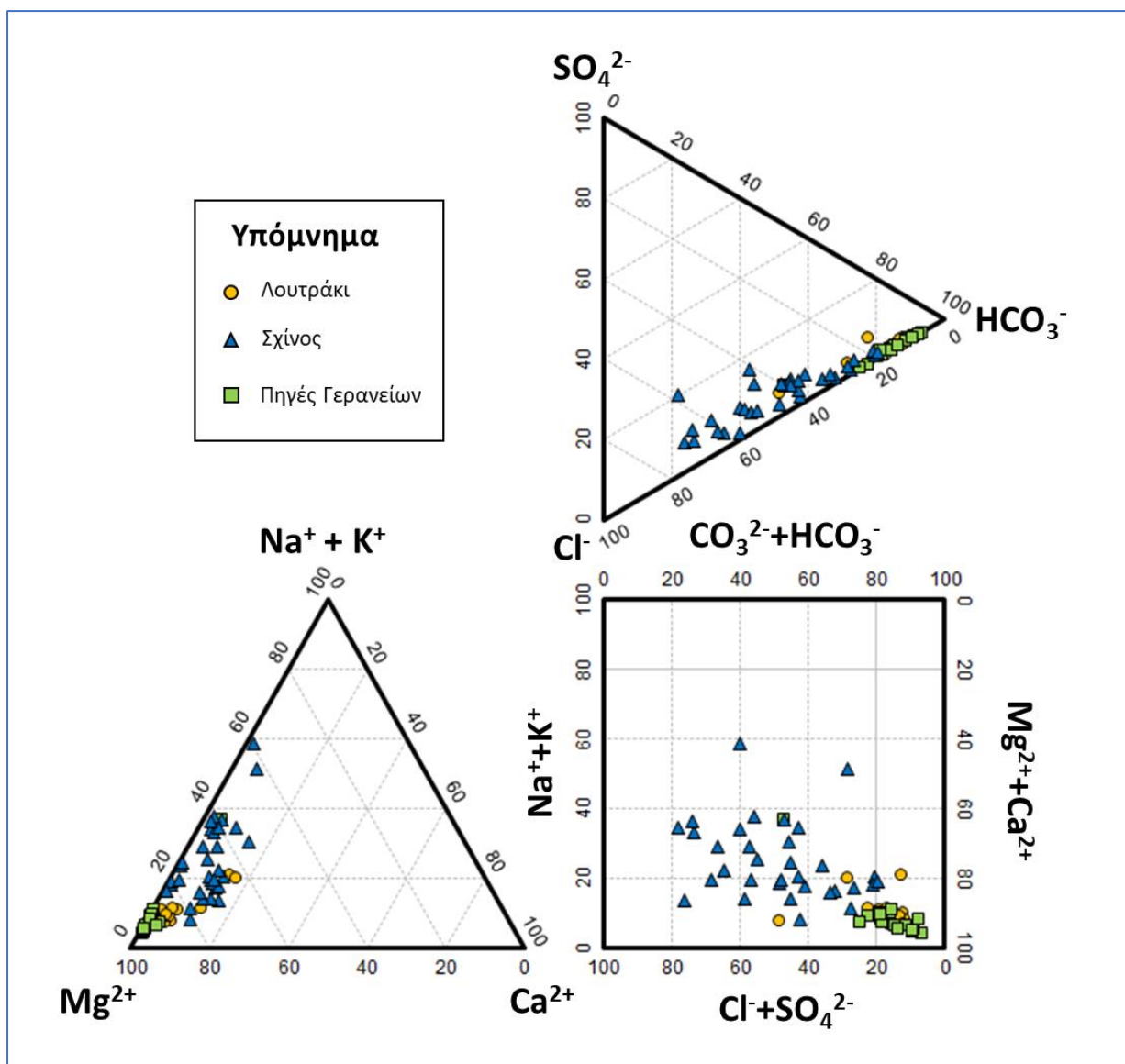


Ο τύπος νερού  $Mg-HCO_3$  χαρακτηρίζει αλκαλικά νερά λόγω της παρουσίας και αλληλεπίδρασης του νερού της βροχής με υπερβασικά πετρώματα (Barnes and O'Neil, 1969, Neal and Stanger, 1983)



**Εικόνα 41:** Διάγραμμα Piper για τα 68 δείγματα στην περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων (Παπαζώτος, 2020).

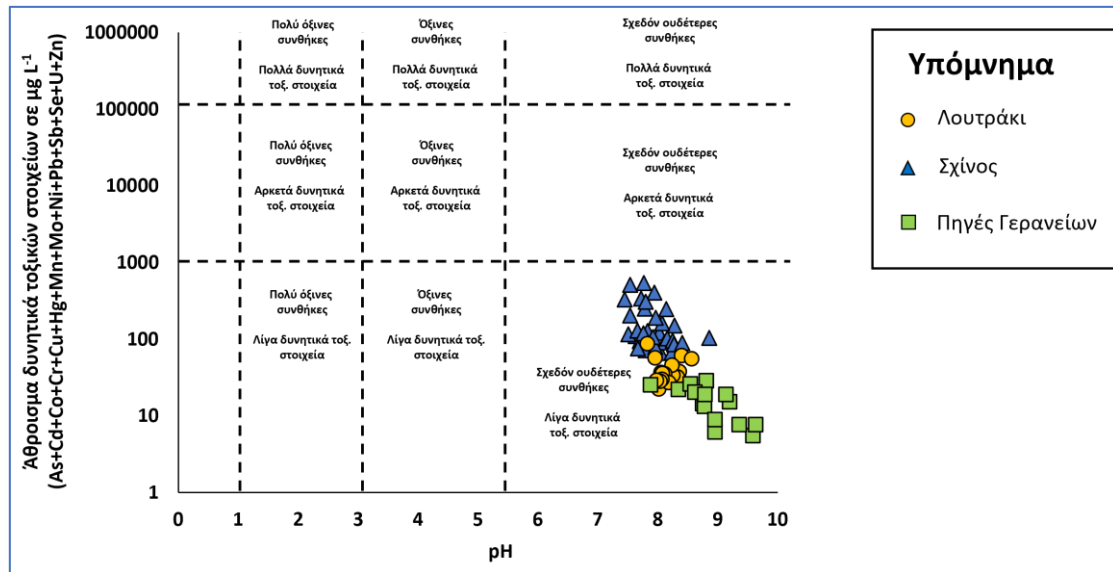
Στην εικόνα 42 δίνεται το διάγραμμα Durov, από την ίδια περιοχή, οποίο αποτελεί μια διαφορετική προσέγγιση στην ομαδοποίηση των κύριων ιόντων σε σχέση με το διάγραμμα Piper συμβάλλοντας στην ερμηνεία των υδροχημικών διεργασιών που εμφανίζονται στα υπόγεια νερά. Τα υπόγεια νερά στην περιοχή Λουτρακίου και των Γερανείων Ορέων είναι νερά τροφοδοσίας με βάση το διάγραμμα Durov καθώς επικρατούν κατιόντα των  $Mg^{2+}$  και ανιόντα  $HCO_3^-$ . επιπλέον στην περιοχή του Σχίνου τα υπόγεια νερά είναι πλούσια σε  $Cl^-$  και  $Na^+$ , γεγονός που υποδεικνύει την ύπαρξη μηχανισμού αντίστροφης κατιοντοανταλλαγής δηλ. ανταλλαγής  $Na^+$  με άλλα κατιόντα όπως  $Ca^{2+}$  και  $Mg^{2+}$  (Papazotos et al., 2020).



*Εικόνα 42: Διάγραμμα Durov για τα 68 δείγματα στην περιοχή του Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων (Παπαζώτος, 2020.)*

Όπως αναφέρθηκε στην περιοχή μελέτης Λουτράκι-Σχίνος-Γερανείων Ορέων το pH που επικρατεί είναι αλκαλικό. Στο διάγραμμα Ficklin που δίνεται στην εικόνα 43 παρατηρείται μια αύξηση του φορτίου των δυνητικά τοξικών στοιχείων που ακολουθείται από τη μείωση του pH. Γενικά, τα περισσότερα δυνητικά τοξικά στοιχεία βρίσκονται σε μορφή κατιόντων στα υπόγεια νερά και η κινητοποίησή τους απαιτεί την παρουσία όξινων συνθηκών. Ως εκ τούτου οι αλκαλικές συνθήκες που επικρατούν σε όλη την περιοχή δεν επιτρέπουν την παρουσία και κινητοποίησή τους στα υπόγεια νερά. Εντούτοις, όπως φάνηκε σε ορισμένες θέσεις και κυρίως στην περίπτωση της περιοχής του Σχίνου παρουσιάζονται αυξημένες συγκεντρώσεις σε κάποια δυνητικά τοξικά στοιχεία όπως Cr, Cr<sup>6+</sup> και As. Τα συγκεκριμένα χημικά στοιχεία παρόλο που φαινομενικά βρίσκονται σε μορφή κατιόντων, στην πραγματικότητα δημιουργούν οξυανιόντα

(ανιονικές ενώσεις με το οξυγόνο) και συμπεριφέρονται διαφορετικά από τα υπόλοιπα δυνητικά τοξικά στοιχεία και γι' αυτό εμφανίζουν κινητικότητα σε αλκαλικό pH.



**Εικόνα 43: Διάγραμμα Ficklin για τα 68 δείγματα στην περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων.**

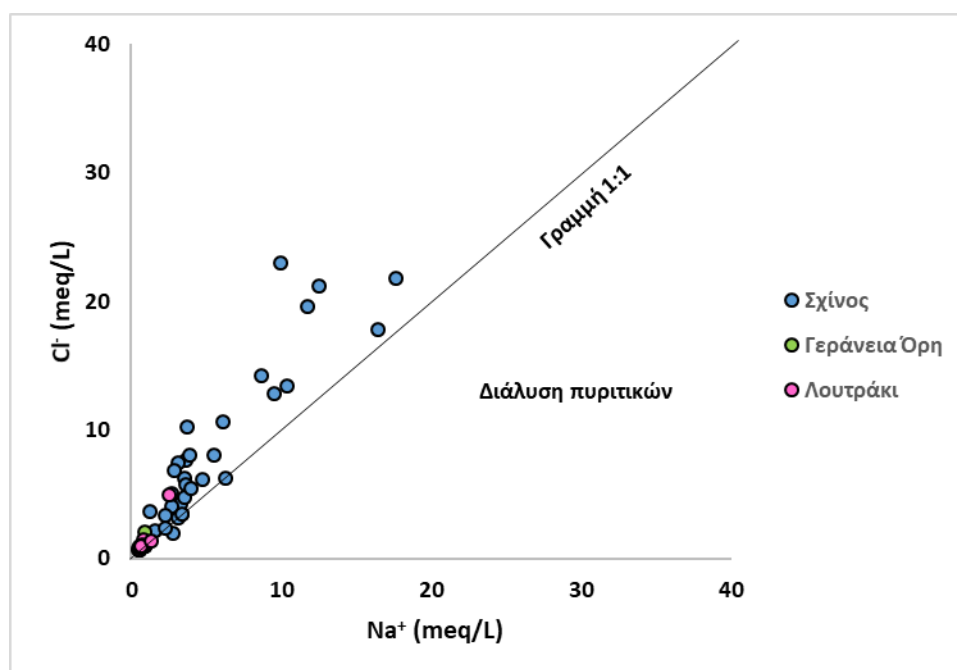
Η μελέτη των παραμέτρων βοηθά στην κατανόηση των κυρίαρχων υδρογεωχημικών διεργασιών για να προκύψουν βασικά συμπεράσματα για την περιοχή και για συνθήκες που επικρατούν.

Επιπλέον, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι στην περιοχή του Σχίνου διαπιστώνεται καθεστώς θαλάσσια διείσδυση και κατ' επέκταση υφαλμύριση των υπογείων νερών, η οποία αποτυπώνεται στις αυξημένες συγκεντρώσεις  $Cl^-$  και  $Na^+$ , στοιχεία με πολύ υψηλές συγκεντρώσεις στο θαλασσινό νερό (Parazotos et al. 2020). Στην περιοχή των Γερανίων Ορέων και του Λουτρακίου επικρατούν υπερβασικά πετρώματα, τα οποία αποτελούνται από Mg-ούχα ορυκτά, και έτσι θα εμφανίζονται υψηλές συγκεντρώσεις  $Mg^{2+}$  ενώ το  $Ca^{2+}$  παρουσιάζει πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις στην ίδια περιοχή. Τα  $NO_3^-$  καταγράφουν μικρές συγκεντρώσεις εξαιτίας της έλλειψης ανθρωπογενών δραστηριοτήτων. Από την άλλη, στην περιοχή του Σχίνου μόνο παρατηρείται συγκεντρώσεις  $NO_3^- > 50 \text{ mg/L}$ , που υπερβαίνουν τις παραμετρικές τιμές του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας και της Ελληνικής νομοθεσίας, λόγω των ήπιων ανθρωπογενών δραστηριοτήτων (χρήση λιπασμάτων, απορροφητικοί βόθροι).

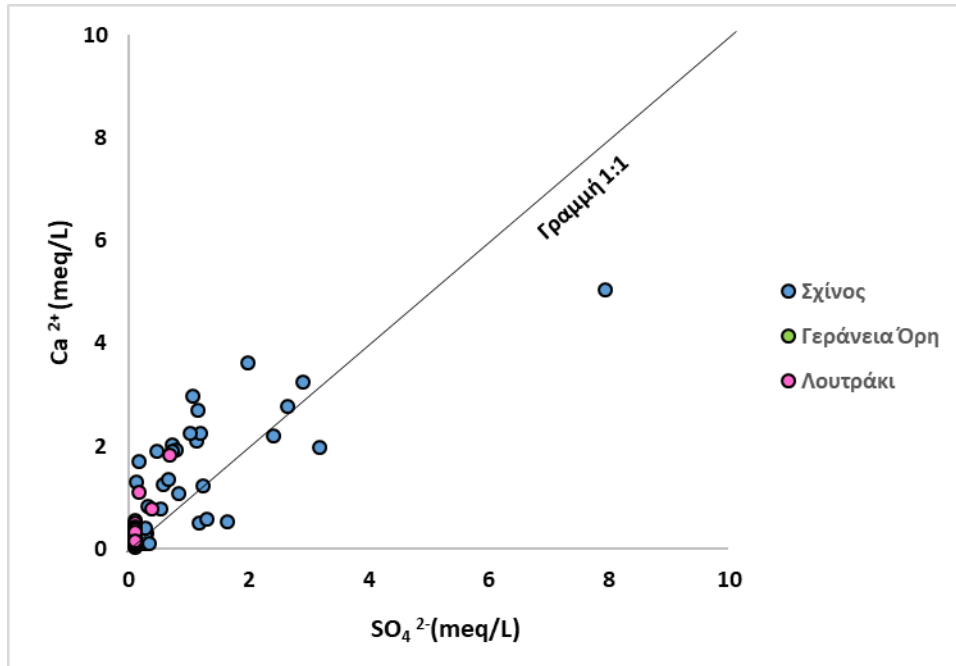
Στην περιοχή του Σχίνου τα υπόγεια νερά παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερες συγκεντρώσεις Cr και  $Cr^{6+}$ , ενώ ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι αυξημένες συγκεντρώσεις As. Όπως έχει αναφερθεί από άλλους ερευνητές που έχουν κάνει υδροχημική και ισοτοπική ανάλυση οι

αυξημένες συγκεντρώσεις Cr και Cr<sup>6+</sup> συσχετίζονται με τα NO<sub>3</sub><sup>-</sup> και μπορούν να αποδοθούν στο συνεργιστικό ρόλο των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων (λιπάσματα, απορροφητικοί βόθροι, κ.λπ.) σε περιβάλλοντα πλούσια σε Cr όπως οι περιοχές που δομούνται από υπερβασικά πετρώματα (Papazotos et al., 2019, Papazotos et al., 2020; Pyrgaki et al., 2022). Από την άλλη η παρουσία και κινητοποίηση του As φαίνεται να σχετίζεται με το υφιστάμενο καθεστώς θαλάσσιας διείσδυσης, το οποίο σε συνδυασμό με παρατηρούμενες γεωχημικές συνθήκες απονιτροποίησης δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες απελευθέρωσής τους στο περιβάλλον (Papazotos et al., 2020).

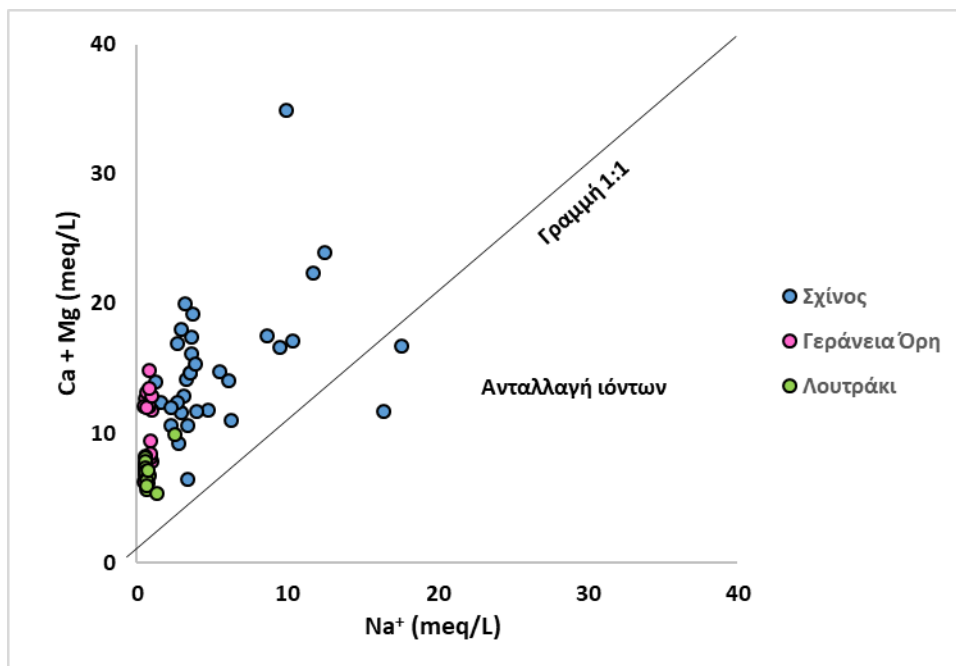
Η γραμμική σχέση που παρατηρείται μεταξύ Na<sup>+</sup> και Cl<sup>-</sup> και Ca<sup>2+</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, επιβεβαιώνουν την κοινή προέλευση των στοιχείων που ακολουθούν τη νοητή 1:1 γραμμή που αντιστοιχεί στη διάλυση των αλίτη/γύψου (Εικόνες 44-45), υποδεικνύοντας ότι η θαλάσσια διείσδυση είναι μια κυρίαρχη διεργασία. Επιπροσθέτως, όλα τα δείγματα βρίσκονται μετατοπισμένα λίγο πάνω από τη 1:1 γραμμή στο διάγραμμα Ca+Mg vs. Na (Εικόνα 46), γεγονός που υποδεικνύει ένα καθεστώς αντίστροφης κατιοανταλλαγής (μείωσης των Na<sup>+</sup> και αύξησης άλλων στοιχείων όπως Ca<sup>2+</sup>/Mg<sup>2+</sup>) (Meybeck 1987, Papazotos et al., 2019).



**Εικόνα 44:** Διάγραμμα Na<sup>+</sup>(meq/L) σε σχέση με τα κατιόντα Cl<sup>-</sup>(meq/L) στα 68 δείγματα των υπόγειων νερών της περιοχής Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων.

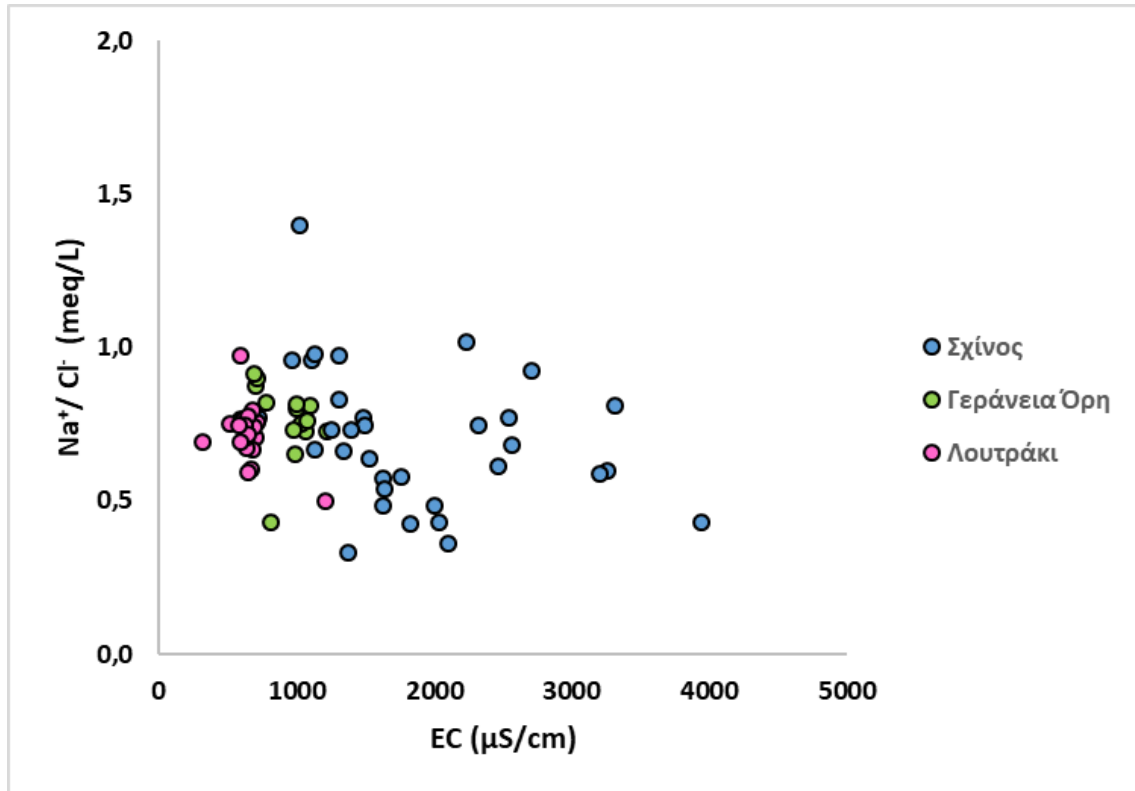


Εικόνα 45: Διάγραμμα  $SO_4^{2-}$  (meq/L) vs.  $Ca^{2+}$  (meq/L) στα 68 δείγματα των υπόγειων νερών της περιοχής Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων.



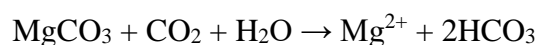
Εικόνα 46: Διάγραμμα  $Ca^{2+}+Mg^{2+}$  (meq/L) vs.  $Na^+$  (meq/L) στα 68 δείγματα των υπόγειων νερών της περιοχής Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων.

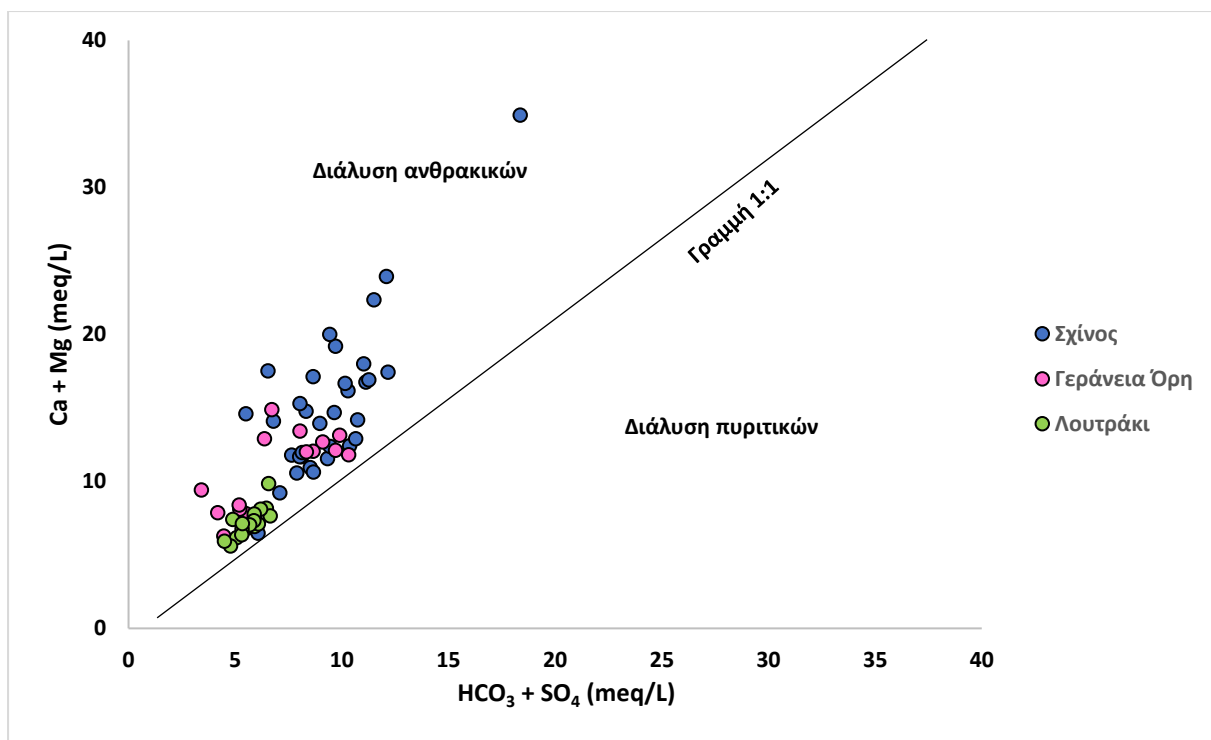
Στην εικόνα 47 παρατηρείται πως με την αύξηση της EC υπάρχει μια μικρή μείωση του λόγου  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  κάτι που υποστηρίζει το καθεστώς θαλάσσιας διείσδυσης στην περιοχή του Σχίνου όπου η EC έχει και τις υψηλότερες τιμές.



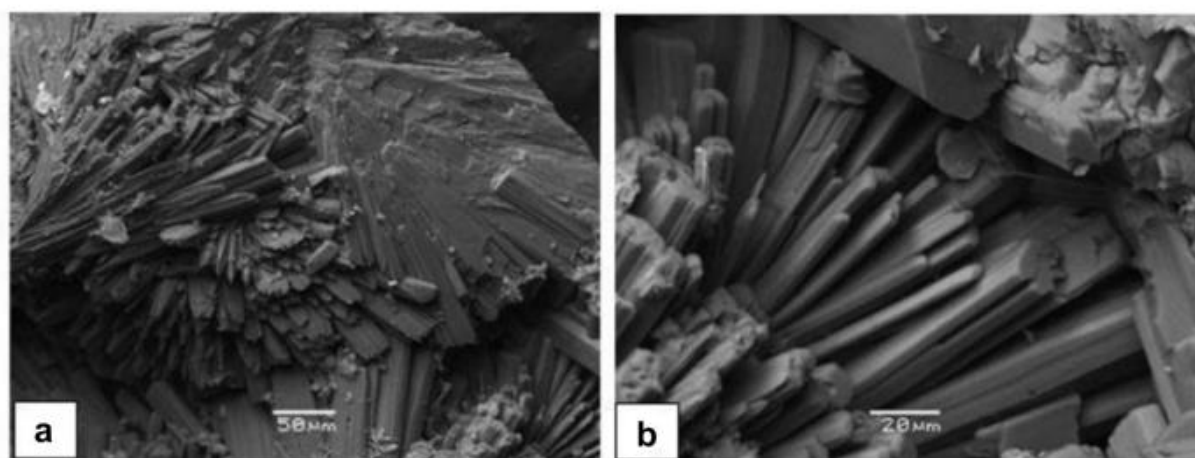
*Εικόνα 47: Διάγραμμα EC (μS/cm) vs.  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  (meq/L) στα 68 δείγματα των υπόγειων νερών της περιοχής Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων.*

Η επικράτηση των  $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$  έναντι των  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  (Εικόνα 48), υποδεικνύει ότι η υδροχημεία της περιοχής ελέγχεται περισσότερο από τη διάλυση ανθρακικών ορυκτών (π.χ. μαγνησίτης, υδρομαγνησίτης, χουντίτης, πυροαυρίτης - Stamatakis and Mitsis, 2013) (Εικόνα 49), παρά από τα πυριτικά. Ως εκ τούτου, οι αυξημένες συγκεντρώσεις Mg αποδίδεται στις ανθρακικές ορυκτολογικές φάσεις (Papazotos et al. 2020), οι οποίες δυνητικά εμπλουτίζουν τα υπόγεια νερά με  $\text{Mg}^{2+}$  και  $\text{HCO}_3^-$ , σύμφωνα με την ακόλουθη αντίδραση διάλυσης του μαγνησίτη (αντιστοίχως και για τα υπόλοιπα ανθρακικά ορυκτά):





**Εικόνα 48:** Διάγραμμα  $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$  (meq/L) vs.  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  (meq/L) στα 68 δείγματα των υπόγειων νερών της περιοχής Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων.



**Εικόνα 49:** Εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης από δείγμα υδρομαγνησίτη από την περιοχή μελέτης (Pyrgaki et al., 2021).

### Αξιολόγηση γεωπεριβαλλοντικών δεικτών

Οι γεωπεριβαλλοντικοί δείκτες που υπολογίστηκαν και αξιολογήθηκαν για την ποιότητα των υπόγειων νερών στην περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου- Γερανείων Ορέων ταξινομήθηκαν στις ακόλουθες τέσσερις βασικές κατηγορίες:

- Δείκτες άρδευσης,
- δείκτες ύδρευσης,
- δείκτες δυνητικά τοξικών στοιχείων, και
- ιοντικοί λόγοι.

Αφού πραγματοποιήθηκε μια βιβλιογραφική επισκόπηση σχετικά με τον τρόπο υπολογισμού και τις εφαρμογές των δεικτών, πραγματοποιήθηκε η διαδικασία υπολογισμού τους με τη χρήση των αντίστοιχων μαθηματικών σχέσεων και τη χρήση κατάλληλων λογισμικών πακέτων. Στο πλαίσιο της επεξεργασίας και συνολικής αξιολόγησης των δεδομένων πραγματοποιήθηκε επιπρόσθετη στατιστική ανάλυση με υπολογισμό περιγραφικών στατιστικών μεγεθών, κατασκευή θηκογραμμάτων ανά υπο-λεκάνη για συγκριτικούς σκοπούς, προσδιορισμό συντελεστών συσχέτισης κατά Pearson και Spearman, καθώς και πολυκριτηριακή στατιστική (παραγοντική ανάλυση και ιεραρχική ανάλυση κατά συστάδες) ώστε να μελετηθεί η σχέση μεταξύ των παραμέτρων και να πραγματοποιηθεί ομαδοποίηση των παραμέτρων για το σύνολο των 19 γεωπεριβαλλοντικών δεικτών από την περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων.

Όσον αφορά την αξιολόγηση δεικτών άρδευσης, μελετήθηκαν, υπολογίστηκαν και αναλύθηκαν είναι οι SAR, KR, Na%, PS, MAR, RSC, SSP, TH, PI, IWQI και TDS. Βάσει των ταξινομήσεων που προτείνονται από τη βιβλιογραφία, η πλειονότητα των αποτελεσμάτων που προέκυψαν για την ποιότητα των υπογείων νερών των περιοχών είναι πως είναι κατάλληλη για άρδευση χωρίς κάποια συνέπεια στην ανθρώπινη υγεία και κάποια επιπρόσθετη επιβάρυνση στο έδαφος. Εντούτοις, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως σε κάποιους δείκτες σε ορισμένα δείγματα από την περιοχή του Σχίνου ο χαρακτηρισμός τους ήταν μέτριας ποιότητας, όπως συνέβη για παράδειγμα στο δείκτη PS. Ο δείκτης αυτός, σύμφωνα με τον τύπο του, κάνει χρήση των ανιόντων χλωρίου. Ως εκ τούτου, σε περιπτώσεις που υπάρχει υφαλμύριση των υπογείων νερών, όπως στην περίπτωση του παράκτιου υδροφορέα του Σχίνου, η τιμή του δείκτη αυτό είναι αυξημένη. Έτσι, παρατηρείται το φαινόμενο ότι διαφορετικοί δείκτες για τα ίδια δείγματα νερού και για την ίδια περιοχή μπορεί καταγράφουν αντιφατικά αποτελέσματα και συνεπώς να καταλήξουν και σε διαφορετικά συμπεράσματα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο κάθε γεωπεριβαλλοντικός δείκτης εξετάζει διαφορετικές συγκεντρώσεις ανιόντων, κατιόντων και λοιπών στοιχείων. Επιπλέον, θα πρέπει να αναφερθεί ότι κανένας από τους παραπάνω δείκτες δεν εξετάζει την παρουσία δυνητικά τοξικών στοιχείων, παρά το γεγονός ότι αυτά αποτελούν τη σπουδαιότερη - ίσως - παράμετρο για την υγεία των ζώντων οργανισμών. Η στατιστική επεξεργασία αποκάλυψε ότι πολλοί από τους παραπάνω δείκτες



---

είναι συγγενικοί, εμφανίζοντας στοιχεία αλληλεπικάλυψης και ο υπολογισμός όλων αυτών ταυτόχρονα δεν αποτελεί μια επιπρόσθετη κοινοτυπία σε μια επιστημονική δημοσίευση. Πολύ σημαντικότερο θα ήταν να δημιουργηθεί ένας νέος ολιστικός γεωπεριβαλλοντικός δείκτης που θα περιλαμβάνει και θα αξιοποιεί εκτός από τις ποσοτικές πληροφορίες των συγκεντρώσεων χημικών στοιχείων και τις ποιοτικές (χρήση γης, γεωλογία, υδρογεωλογία), αλλά και τις βασικές φυσικοχημικές παραμέτρους (π.χ. pH, Eh, DO)

Όσον αφορά την αξιολόγηση των δεικτών ύδρευσης, μελετήθηκαν, αξιοποιήθηκαν και αναλύθηκαν είναι οι NPI, RI, PIG και WQI. Με βάση την ταξινόμηση των υπόγειων νερών για κάθε έναν από τους παραπάνω γεωπεριβαλλοντικούς δείκτες τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την περιοχή μελέτης είναι πως είναι κατάλληλα για ύδρευση. Λίγα είναι τα δείγματα νερών με βάση κάποιους δείκτες (PIG) που εμφανίζουν υψηλές συγκεντρώσεις και τα καθιστά ακατάλληλα για χρήση και αυτά βρίσκονται στην περιοχή του Σχίνου όπως αναφέρθηκε και στην περίπτωση αξιολόγησης των νερών για αρδευτικούς σκοπούς. Επιπροσθέτως, είναι σημαντικό να τονιστεί για ακόμα μια φορά η έλλειψη συγκεντρώσεων των δυνητικά τοξικών στοιχείων στους των δείκτες ύδρευσης. Το γεγονός αυτό είναι μια σημαντική παράλειψη καθώς οι συγκεντρώσεις των δυνητικά τοξικών στοιχείων πρέπει να ελέγχονται εξονυχιστικά, αφού αποτελούν σημαντικότερο επιβλαβή παράγοντα για την υγεία των ανθρώπων.

Όσον αφορά τους δείκτες για τα δυνητικά τοξικά στοιχεία που μελετήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι οι Cd, HPI και HEI. Οι τρεις προαναφερθέντες δείκτες εξετάζουν την ποιότητα των υδάτων σε κάποια βασικά στοιχεία τα οποία είναι καθοριστικής σημασίας για τη χρήση ή όχι του νερού. Τα στοιχεία τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό τους είναι τα As, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Co και Zn, τα οποία αποτελούν και τα σημαντικότερα δυνητικά τοξικά στοιχεία στο περιβάλλον σύμφωνα με τις σύγχρονες δημοσιεύσεις. Η πλειονότητα των δειγμάτων προσδιορίστηκε ως κατάλληλα για χρήση χωρίς μολύνσεις από δυνητικά τοξικά στοιχεία (Βλ. συζήτηση παραπάνω). Εντούτοις, υπάρχουν ορισμένα δείγματα υπογείων νερών στην περιοχή του Σχίνου, τα οποία εμφανίζουν μικρές ποσότητες δυνητικά τοξικών στοιχείων, καθιστώντας τα ως μέτριας ποιότητας. Όπως συζητήθηκε αναλυτικά παραπάνω τα δυνητικά τοξικά στοιχεία που παρουσιάζουν υψηλές συγκεντρώσεις είναι το Cr και το As.

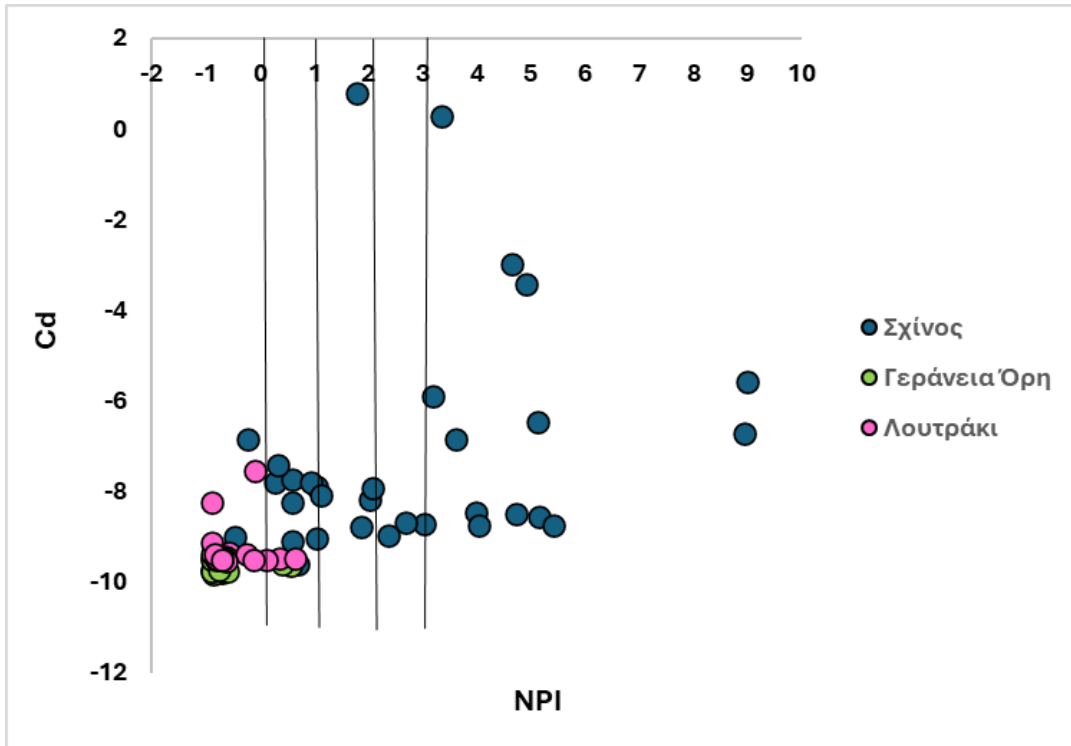
---

Τέλος, όσον αφορά τους ιοντικούς λόγους, η χρήση τους δύναται να αποκαλύψει πληροφορίες για τα υδρογεωχημικά χαρακτηριστικά των υπογείων νερά μιας περιοχής (π.χ. επικράτηση συγκεκριμένης λιθολογικής σύστασης υδροφορέων, υφαλμύριση, κ.λπ.).

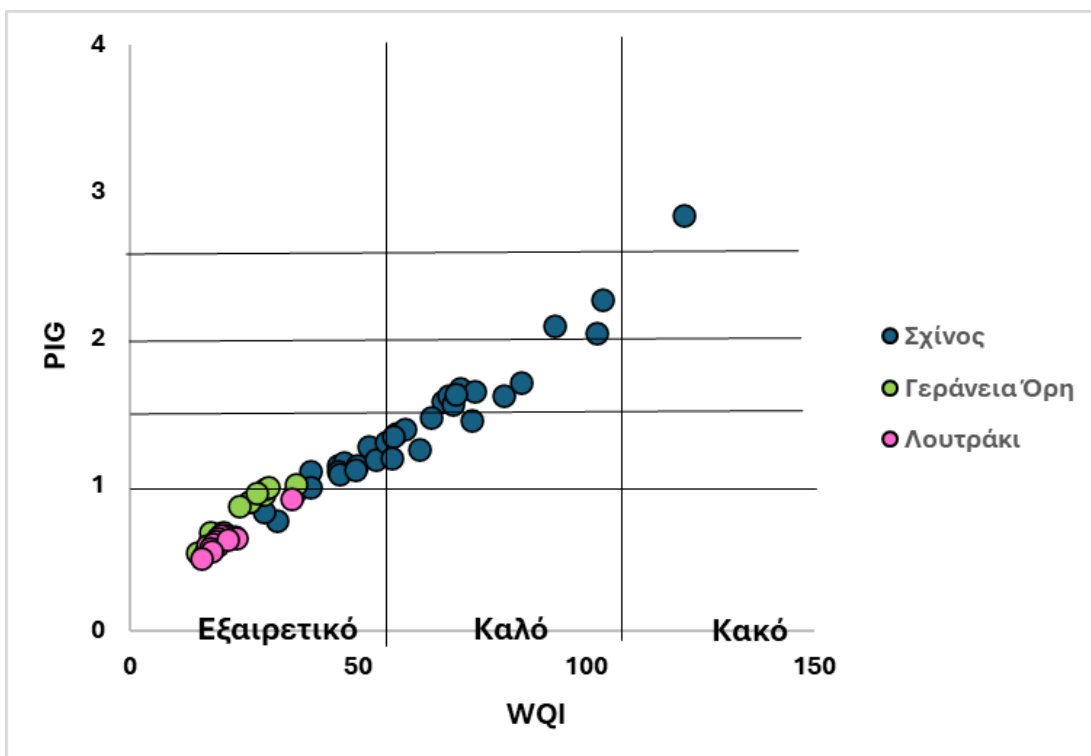
Συνοψίζοντας, οι γεωπεριβαλλοντικοί δείκτες που υπολογίσθηκαν και μελετήθηκαν μπορεί να είναι σχετικά απλοί στην εφαρμογή τους, αλλά στην πραγματικότητα δεν είναι αντιπροσωπευτικοί γιατί βασίζονται στις στοιχειακές συγκεντρώσεις συγκεκριμένων στοιχείων, αγνοώντας άλλα στοιχεία όπως τα δυνητικά τοξικά μέταλλα τα οποία είναι καθοριστικής σημασίας για την υγεία όλων των ζώντων οργανισμών.

Άξια αναφοράς είναι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις πολυκριτηριακές στατιστικές αναλύσεις (παραγοντική ανάλυση και ιεραρχική ανάλυση κατά συστάδες) όπου παρατηρείται πως πολλοί δείκτες διαφορετικών κατηγοριών π.χ δείκτης άρδευσης (SAR) κατηγοριοποιείται με δείκτη ύδρευσης (PIG) . Αυτό συμβαίνει γιατί κάποια στοιχεία συμβάλλουν σημαντικά στην τελική τιμή του δείκτη.

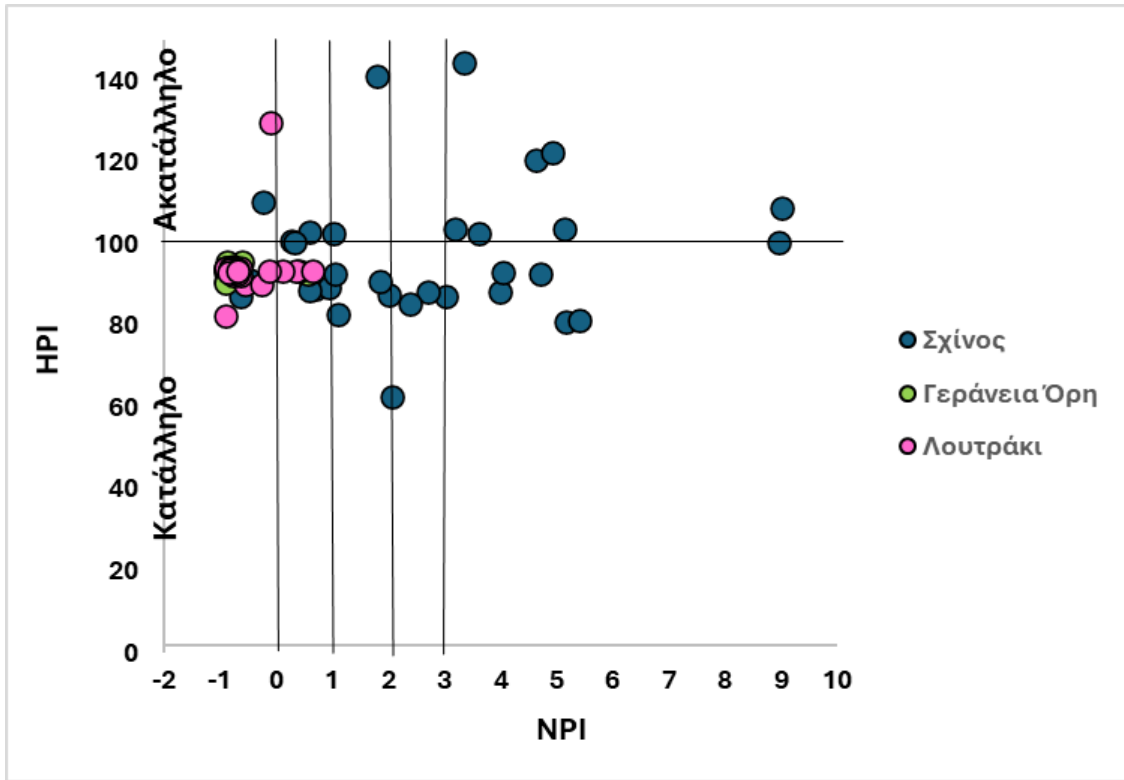
Παρόλο που αξιολογήθηκαν ο κάθε δείκτης ξεχωριστά, ακόμα μεγαλύτερη σημασία για την αξιολόγηση της ποιότητας των υπογείων νερών θα είχε ο συνδυασμός δεικτών διαφορετικών κατηγοριών. Στις Εικόνες 50-53 δίνονται κάποια συνδυαστικά διαγράμματα από διαφορετικούς δείκτες που ανήκουν σε άλλες κατηγορίες αξιολόγησης χρήσης νερού. Για παράδειγμα στην Εικόνα 51 δίνεται η συσχέτιση του δείκτη WQI με το HPI, δηλαδή ένας δείκτης που αξιολογεί την καταλληλότητα του νερού ως προς την ύδρευση και ένας δείκτης που αξιολογεί την ποιότητα νερού ως προς την παρουσία τοξικών στοιχείων. Ο συνδυασμός αυτός έχει ως αποτέλεσμα έξι διαφορετικά υπο-πεδία στα οποία έτσι μπορούν να βρεθούν δείγματα που να ικανοποιούν και τα δυο κριτήρια ως προς την καλή ποιότητα. Μια τέτοια αξιολόγηση συμβάλλει σημαντικά στη πληρέστερη ερμηνείας της ποιότητας των υπογείων νερών συγκριτικά από ότι ένας δείκτης μόνος.



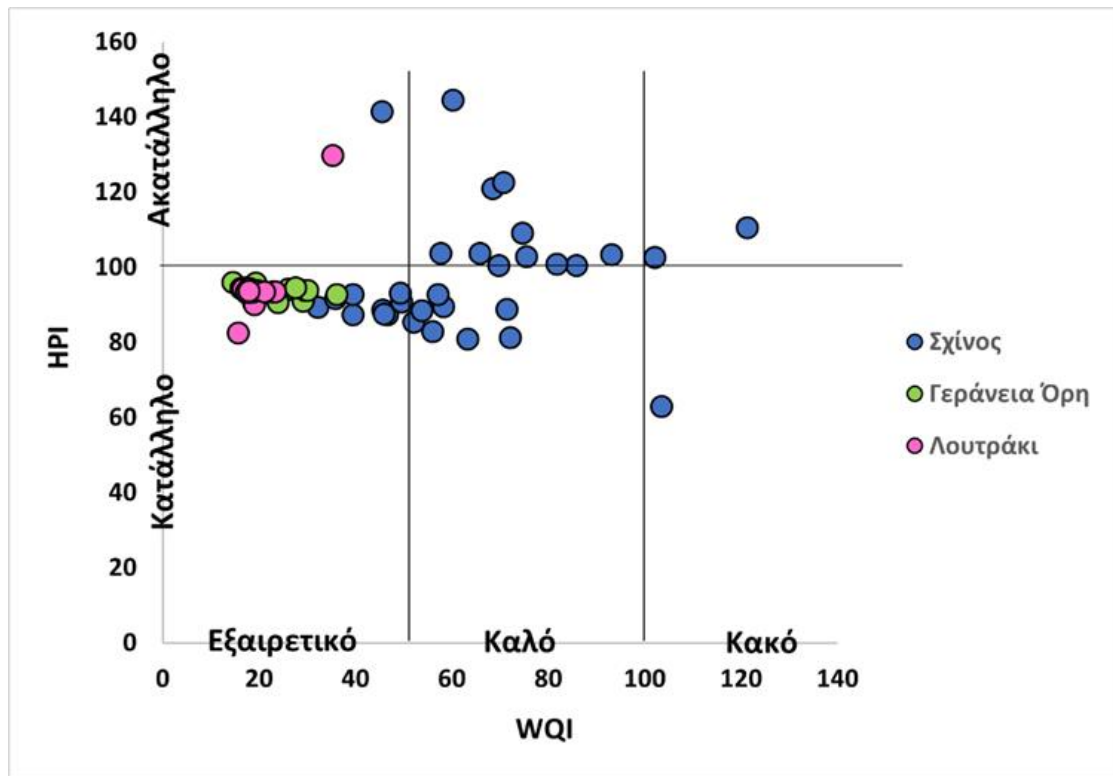
Εικόνα 50: Διάγραμμα Cd vs. NPI για τα 68 δείγματα των περιοχών Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων



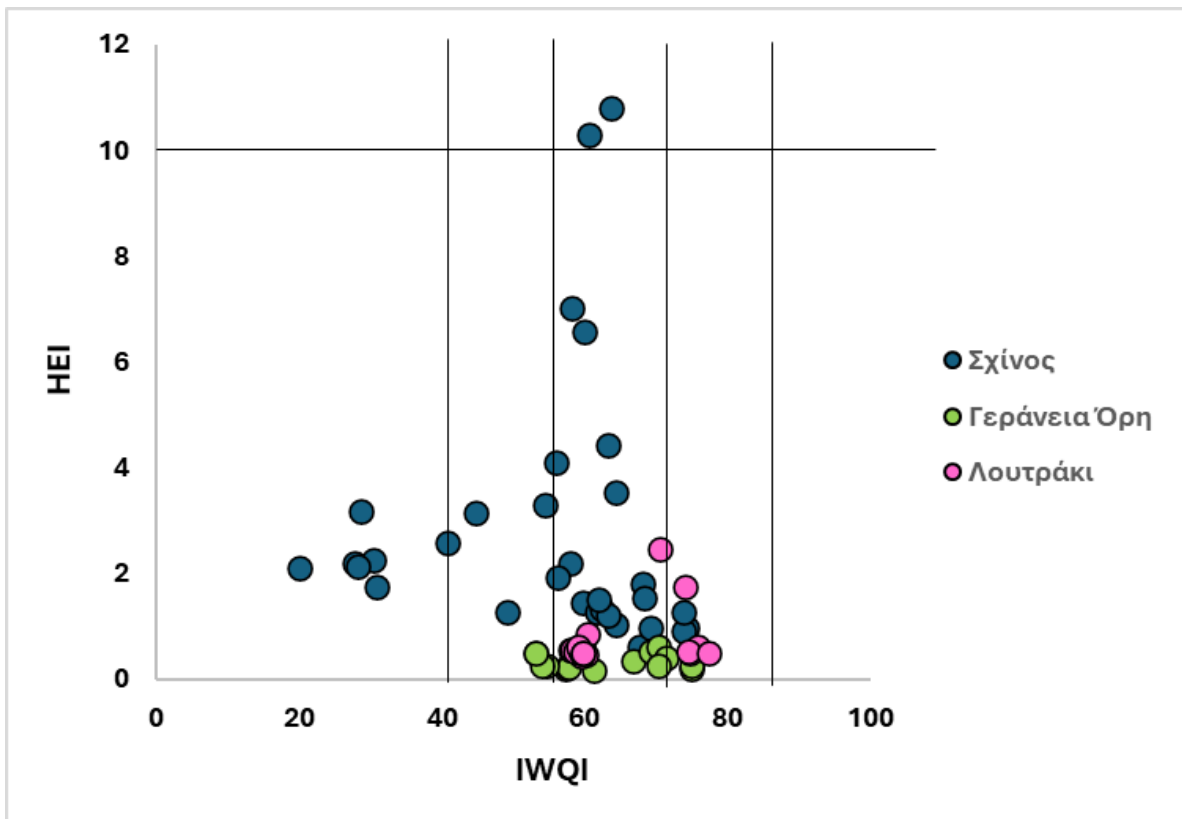
Εικόνα 51: Διάγραμμα WQI vs. PIG για τα 68 δείγματα των περιοχών Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων



Εικόνα 52: Διάγραμμα NPI vs. HPI για τα 68 δείγματα των περιοχών Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων

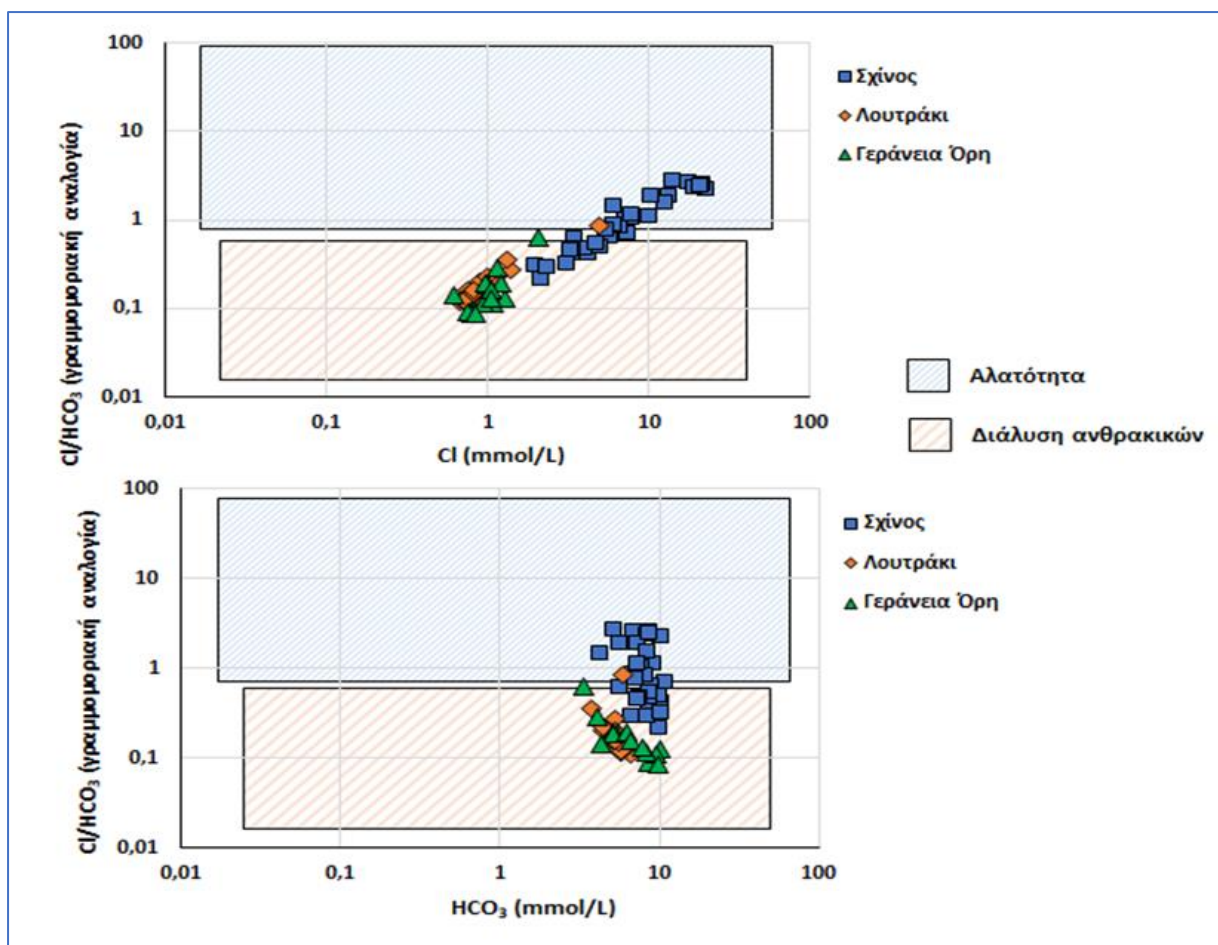


Εικόνα 53: Διάγραμμα WQI vs. HPI για τα 68 δείγματα των περιοχών Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων



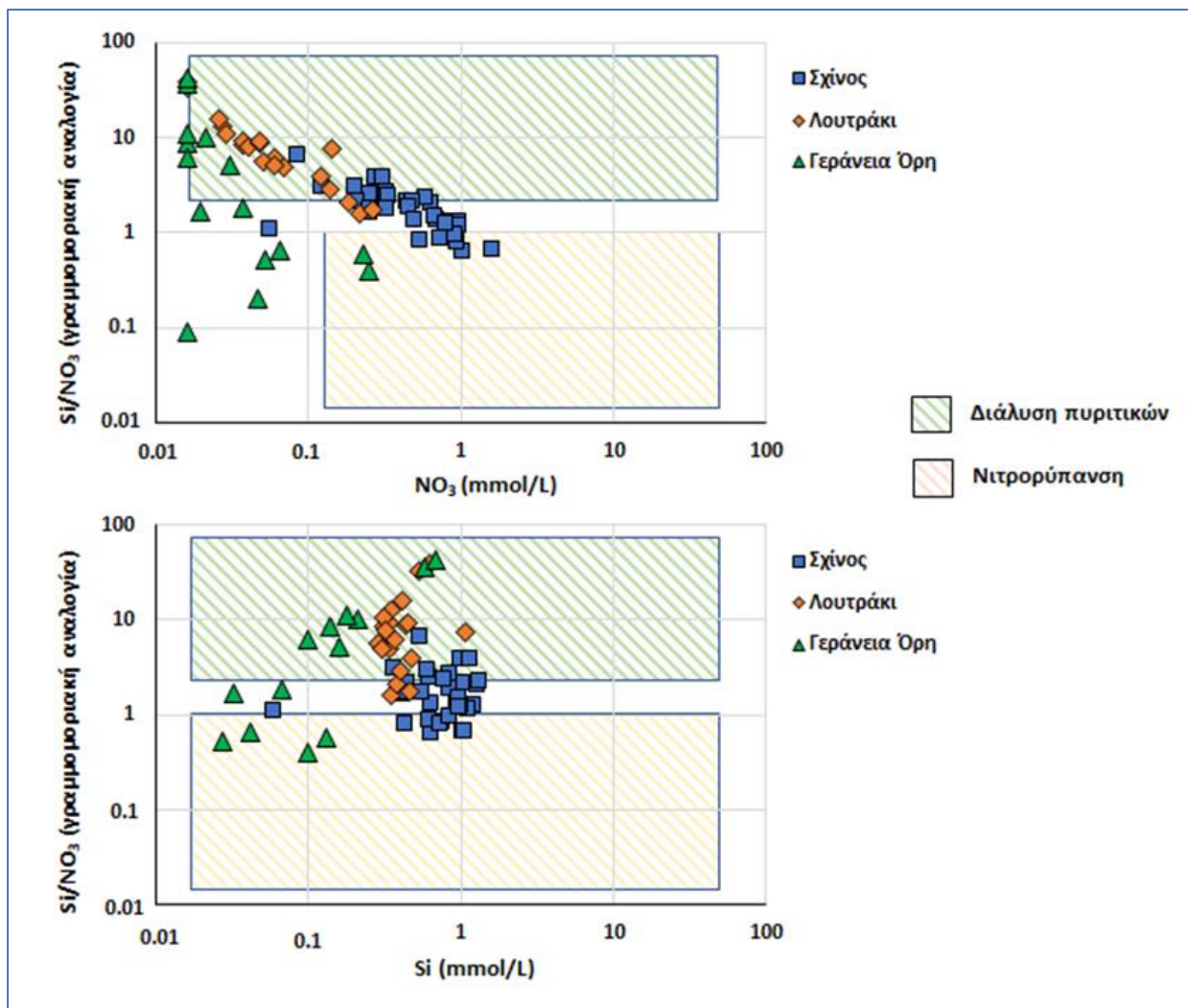
*Εικόνα 54: Διάγραμμα IWQI vs. HEI για τα 68 δείγματα των περιοχών Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων*

Τέλος, η συνδυαστική μελέτη των ιοντικών λόγων μπορεί να βοηθήσει στην κατανόηση της παρουσίας και κινητικότητας των δυνητικά τοξικών στοιχείων στο περιβάλλον. Στο πλαίσιο αυτής της διερεύνησης ακολουθήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας η μεθοδολογία των Parazotos et al. (2023) που εφαρμόστηκε για πρώτη φορά σε διάφορα δυνητικά τοξικά στοιχεία στα Ψαχνά Ευβοίας. Στις Εικόνες 55-57 δίνονται κάποια συνδυαστικά διαγράμματα ιοντικών λόγων, τα οποία αποκαλύπτουν κυρίαρχες υδροχημικές διεργασίες στην περιοχή μελέτης.



*Εικόνα 55: Διαγράμματα γραμμμομοριακού λόγου  $Cl/HCO_3$  και στοιχειακών συγκεντρώσεων  $Cl$  (σε  $mmol/L$ ) και  $HCO_3$  (σε  $mmol/L$ ), τα οποία περιλαμβάνουν τα πεδία «διαλυτοποίησης ανθρακικών» και «αλατοτητας» για την περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων*

Όπως φαίνεται στην εικόνα 55 από το διάγραμμα  $Cl/HCO_3 - HCO_3$  και  $Cl/HCO_3 - Cl$  η περιοχή των Γερανείων Ορέων χαρακτηρίζεται από σχετικά σταθερούς λόγους  $Cl/HCO_3$  και μεταβαλλόμενους λόγους  $Si/NO_3$  (Εικόνα 55). Από τον συνδυασμό των εικόνων υποδεικνύεται η επικράτηση γεωγενών παραγόντων στην ποιότητα των υπογείων νερών. Στην περιοχή του Λουτρακίου παρατηρείται η ίδια μεταβολή λόγων σε αντίθεση με την περιοχή του Σχίνου τα δείγματα έχουν μία τάση προς τα πάνω και αριστερά πράγμα που οφείλεται στην υποβάθμιση που έχει υποστεί ο υδροφόρος ορίζοντας από το θαλασσινό νερό και από την ανθρώπινη δραστηριότητα.



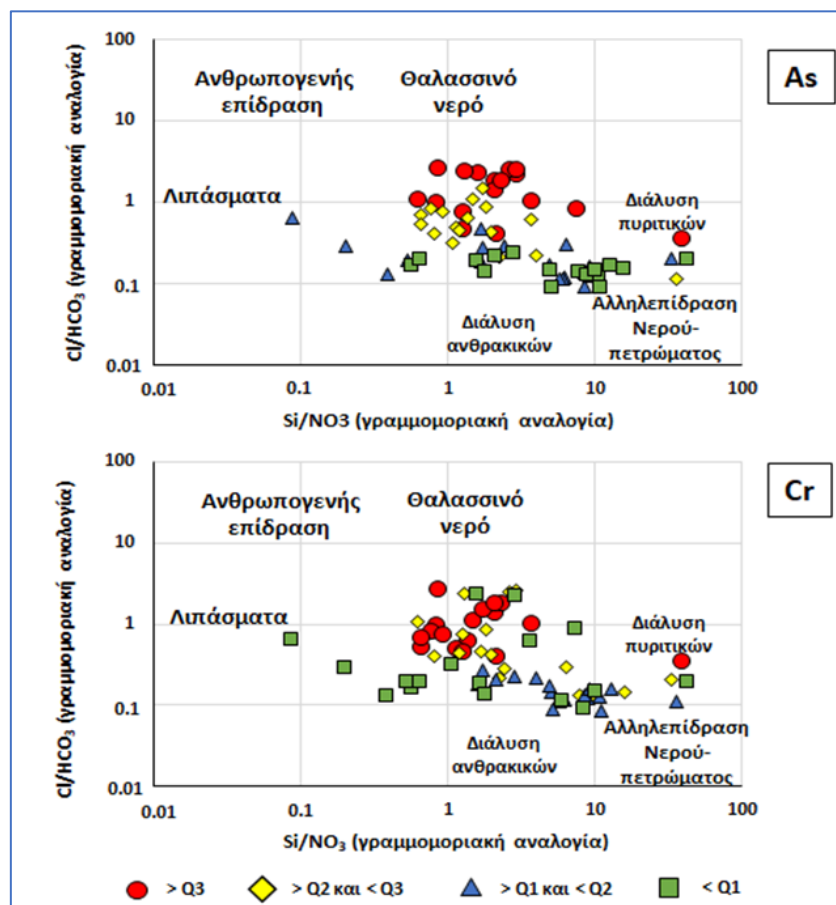
**Εικόνα 56:** Διαγράμματα γραμμομοριακού λόγου  $Si/NO_3$  και των στοιχειακών συγκεντρώσεων  $NO_3$  (σε  $mmol/L$ ) και  $Si$  (σε  $mmol/L$ ), τα οποία περιλαμβάνουν τα πεδία «διαλυτοποίησης πυριτικών» και «νιτρορύπανσης» για την περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων.

Στην Εικόνα 56 παρατίθεται ένα διάγραμμα του λόγου  $Si/NO_3-Si$  και  $Si/NO_3-NO_3$  για την περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων όπου παρατηρείται πως η πλειονότητα των δειγμάτων προβάλλεται στο πεδίο "Διαλυτοποίησης πυριτικών", ενώ κάποια δείγματα από την περιοχή του Σχίνου προβάλλονται στο πεδίο «Νιτρορύπανσης». Τα δείγματα που πέφτουν εκτός των δύο πεδίων ίσως οφείλεται σε κάποιον άλλο παράγοντα όπως η διαλυτοποίηση ανθρακικών ορυκτών.

Η υψηλή αλατότητα που προκαλείται από τη διείσδυση θαλασσινού νερού στα υπόγεια νερά σχετίζεται με τις υψηλές συγκεντρώσεις  $As$  που παρατηρούνται στην περιοχή μελέτης, καθώς παρατηρείται η τάση των χαμηλών προς τις υψηλές συγκεντρώσεις να είναι στο κεντρικό τμήμα προς τα πάνω (Εικόνα 57). Πολυκριτηριακές στατιστικές αναλύσεις (π.χ. FA, HCA) και

συντελεστές συσχέτισης από άλλες εργασίες (π.χ. Παπαζώτος 2020, Papazotos et al. 2020) έχουν αποκαλύψει τη στατιστική συσχέτιση του As με παραμέτρους που έχουν αυξημένες συγκεντρώσεις στο θαλασσινό νερό, όπως Cl<sup>-</sup>, Br, και Li.

Συγκριτικά με το As, το Cr δείχνει μια διαφορετική τάση, καθώς παρατηρείται η τάση των χαμηλών προς τις υψηλές συγκεντρώσεις να δίνεται στο κεντρικό τμήμα των διαγραμμάτων και προς τα αριστερά. Η κατηγορία με τις υψηλότερες συγκεντρώσεις (> Q3), κυριαρχείται εξ ολοκλήρου από χαμηλές τιμές του λόγου Si/NO<sub>3</sub>, υποδεικνύοντας τις γεωργικές δραστηριότητες ως τον κύριο παράγοντα της παρουσίας του Cr. Πολυκριτηριακές στατιστικές αναλύσεις (π.χ. FA, HCA), συντελεστές συσχέτισης από άλλες εργασίες (Vasileiou et al. 2014; Megremi et al. 2019, Papazotos et al. 2019, Papazotos et al. 2020, Remoundaki et al. 2016) και χάρτες χωρικής κατανομής παρέχουν πρόσθετες ενδείξεις για το ρόλο της λίπανσης στην κινητοποίηση Cr στο περιβάλλον.



**Εικόνα 57:** Διαγράμματα γραμμομοριακών αναλογιών Cl/HCO<sub>3</sub> και Si/NO<sub>3</sub> και ομαδοποίηση συγκεντρώσεων βάσει των As και Cr στην περιοχή Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων (Q1: 1ο Τεταρτημόριο, Q2: 2ο Τεταρτημόριο . Q3: 3ο Τεταρτημόριο).



---

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, αξιολογήθηκε η ποιότητα των υπογείων νερών της περιοχής της Βόρειας Πελοποννήσου, Λουτρακίου-Σχίνου-Γερανείων Ορέων για διάφορες χρήσεις βάσει γεωπεριβαλλοντικών δεικτών και ιοντικών λόγων. Αξιοποιήθηκαν δεδομένα από 68 δείγματα υπογείου νερού από προηγούμενη έρευνα στην περιοχή για τον υπολογισμό γεωπεριβαλλοντικών δεικτών και ιοντικών λόγων, πραγματοποιήθηκε κλασσική και πολυκριτηριακή στατιστική ανάλυση και συναξιολογήθηκαν γεωλογικά, υδρογεωλογικά, γεωχημικά και ορυκτολογικά, στοιχεία, ενώ – για πρώτη φορά - υπολογίστηκαν διάφοροι γεωπεριβαλλοντικοί δείκτες και ιοντικοί λόγοι. Τα *κύρια συμπεράσματα* που προέκυψαν είναι τα εξής:

- Η πλειονότητα των δειγμάτων υπογείων νερών της περιοχής παρουσιάζει καλή ποιότητα νερού για αρδευτικούς σκοπούς. Εντούτοις, στην περιοχή του Σχίνου εμφανίζονται ορισμένα δείγματα μέτριας ποιότητας εξαιτίας των αυξημένων συγκεντρώσεις  $\text{Cl}^-$  και  $\text{Na}^+$  λόγω της υφιστάμενης θαλάσσιας διείσδυσης.
- Όλα τα δείγματα από τις περιοχές Λουτρακίου και Γερανείων Ορέων παρουσιάζουν καλή ποιότητα νερού για υδρευτικούς σκοπούς. Στην περιοχή του Σχίνου υπάρχουν ορισμένα δείγματα παρουσιάζουν καλή ποιότητα για υδρευτική χρήση, ενώ άλλα μέτρια.
- Η πλειονότητα των δειγμάτων παρουσιάζει καλή ποιότητα ως προς την περιεκτικότητα των δυνητικά τοξικών στοιχείων. Εντούτοις, σε Λουτράκι και Σχίνο παρουσιάζονται δείγματα, τα οποία είναι ακατάλληλα εξαιτίας των αυξημένων συγκεντρώσεων  $\text{Cr}$ ,  $\text{Cr}^{6+}$  και  $\text{As}$ .
- Προσδιορίστηκαν ισχυρές στατιστικές σχέσεις μεταξύ δεικτών ίδιας κατηγορίας γεγονός που υποδεικνύει ότι δεν υπάρχει φυσικό νόημα του υπολογισμού όλων των δεικτών που εξαρτώνται από την ίδια παράμετρο
- Υπάρχουν δείκτες που αξιολογούν την ίδια χρήση και παρουσιάζουν αντιφατικά αποτελέσματα. Αυτό συμβαίνει γιατί η στοιχειακή συγκέντρωση είναι σημαντικότερη ως παράμετρος αξιολόγησης της ποιότητας των νερών από τον ίδιο το δείκτη.
- Ο συνδυασμός των γεωπεριβαλλοντικών δεικτών συμβάλλει σημαντικά στη πληρέστερη ερμηνείας της ποιότητας των υπογείων νερών .
- Ο συνδυασμός ιοντικών λόγων είναι χρήσιμος για τον προσδιορισμό της παρουσίας και κινητικότητας δυνητικά τοξικών στοιχείων στο περιβάλλον. Μια τέτοια

---

προσέγγιση εφαρμόστηκε επιτυχώς στην περιοχή μελέτης για το αρσενικό και το χρώμιο, δίνοντας στοιχεία για τους μηχανισμούς κινητοποίησης τους στα υπόγεια νερά.

- Σύμφωνα με όλους τους δείκτες ύδρευσης, άρδευσης και των δυνητικά τοξικών στοιχείων τα υπόγεια νερά των περιοχών Λουτρακίου και Γερανείων Ορέων παρουσιάζουν εξαιρετική ποιότητα νερών σε αντίθεση με την περιοχή του Σχίνου που εμφανίζει χειρότερης ποιότητας υπόγεια νερά.

Στη συνέχεια δίνονται ορισμένες **προτάσεις και κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα:**

- Προσδιορισμός τιμών ισοτόπων όπως  $\delta^{18}\text{O}_{\text{NO}_3}$ ,  $\delta^{15}\text{N}_{\text{NO}_3}$ ,  $\delta^{53}\text{Cr}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  σε δείγματα υπογείων νερών.
- Γεωχημική μοντελοποίηση των εξελικτικών τύπων της ποιότητας του νερού μέσω του λογισμικού PHREEQC με χρήση πιθανών σεναρίων.
- Δημιουργία ενός νέου γεωπεριβαλλοντικού δείκτη ο οποίος θα περιλαμβάνει ποιοτικά και ποσοτικά δεδομένα για τον υπολογισμό του κύρια.
- Εφαρμογή μηχανικής μάθησης στην υδρογεωχημική έρευνα και συγκεκριμένα στη χρήση γεωπεριβαλλοντικών δεικτών για την αξιολόγηση της ποιότητας του υπόγειου νερού και τη βέλτιστη διαχείρισή του.
- Διερεύνηση της παρουσίας μικρο/νανο-πλαστικών σε υπόγεια νερά και προσδιορισμός του ρόλου τους ως φορείς δυνητικά τοξικών στοιχείων στο περιβάλλον.
- Δημιουργία webGIS βάση δεδομένων για τη δημιουργία περιβαλλοντικού παρατηρητηρίου που θα περιλαμβάνει περιβαλλοντικά δεδομένα με τη μορφή γεωπεριβαλλοντικών δεικτών και θα συν αξιολογούνται με λοιπές περιβαλλοντικές πληροφορίες και κοινωνικοοικονομικά δεδομένα.
- Επιστήμη των πολιτών (citizens science) σε θέματα που αφορούν τη ρύπανση παράκτιων υδροφόρων συστημάτων.
- Χωροχρονική κατανομή και χωρική στατιστική διερεύνηση χημικών παραμέτρων, χρήσεων γης και γεωπεριβαλλοντικών δεικτών.
- Θέσπιση τιμών κατωφλίου ρύπανσης των υπόγειων υδατικών συστημάτων βάσει χρήσης νερού που θα βασίζονται σε συνδυασμό του γεωχημικού υποβάθρου, αλλά και σε επιδημιολογικές μελέτες

---

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ελληνική Βιβλιογραφία

- Βουδούρης, Κ., & Σταμάτης, Γ. (2002). Κατανομή και ανάλυση Fractal των παραμέτρων της επιφανειακής στοιβάδας της ακόρεστης ζώνης του αλλουβιακού υδροφορέα της λεκάνης Λουτρακίου-Κορινθίας. *Μεταλλειολογικά - Μεταλλουργικά Χρονικά*, τόμος 12, τεύχος 1-2, σελ. 39-54, Αθήνα.
- Γαιτανάκης, Π., Μεττος, Α., & Φυτίκας Μ. (1985). Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας, 1:50000, Φύλλο Σοφικόν, ΙΓΜΕ, Αθήνα.
- Δημητρόπουλος, Δ. (1989). Υδρογεωλογική έρευνα για τον καθορισμό των ζωνών προστασίας των υδροφόρων οριζόντων Λουτρακίου. ΙΓΜΕ, Αθήνα.
- Καραμπίνης, Κ., Αντωνάκος Α., Χριστοδουλοπούλου, Α., & Βουδούρης Κ. (1997). Υδρογεωλογική έρευνα της ευρύτερης περιοχής του οικισμού «Πούσι-Μειντανι» στο Λουτράκι Κορινθίας. Έκθεση. Καρυμπάλης, Ε., & Βερυκίου-Παπασπυριδάκου Ε. (2007). Γεωμορφολογικές παρατηρήσεις στην παράκτια ζώνη μεταξύ Σχίνου και Ψάθας (Ανατολικός Κορινθιακός Κολπος). 8ο Πανελλήνιο Γεωγραφικό Συνέδριο, τόμος Α, σελ 83-92, Αθήνα, Ελλάδα.
- Λέκκας, Ε. (2000). Ερευνητικό Πρόγραμμα "Αντισεισμικός σχεδιασμός και οργάνωση Δήμου Λουτρακίου – Περαχώρας". Τομέας Δυναμικής, Τεκτονικής Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 460 σελ., Αθήνα.
- Μπορνόβας, Ι., Γαιτανάκης, Π., Σπυριδόπουλος, Α., (1970-1980a). Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας, 1:50000, Φύλλο Περαχώρα, ΙΓΜΕ, Αθήνα.
- Μπορνόβας, Ι., Ελευθερίου, Α., Γαιτανάκης, Π., (1970-1980b). Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας, 1:50000, Φύλλο Καπαρέλλιον, ΙΓΜΕ, Αθήνα.
- Παπαζώτος, (2020). Γεωχημικό αποτύπωμα υπερβασικών περιβαλλόντων στην ποιότητα υπογείων νερών, με έμφαση στο χρώμιο και το αρσενικό, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 830
- Παπανικολάου, Δ., Σίδηρης, Χ., & Λόζιος, Σ. (1998). Νεοτεκτονικός Χάρτης της Ελλάδος. Φύλλο «ΚΟΡΙΝΘΟΣ», κλίμακας 1:100.000. Εφαρμοσμένο Ερευνητικό

---

Πρόγραμμα, Τομέας Δυναμικής, Τεκτονικής, Εφαρμοσμένης Γεωλογίας. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.

- Ροντογιάννη, Θ., Λειβαδίτη, Α., & Μέττος, Α. (2008). Ανατολική Κορινθία: Δομή και χαρακτηριστικά ενός ενεργού γεωλογικού περιβάλλοντος. Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας τομ. XXXVI
- Σταμάτης, Γ., & Βουδούρης, Κ. (2000). Καθορισμός περιμέτρου προστασίας υδροληπτικών έργων του υδροφορέα των μεταλλικών νερών της λεκάνης Λουτρακίου βάσει υδρογεωλογικών κριτηρίων. Ορυκτός Πλούτος 116, σελ. 13-36

## Ξένη Βιβλιογραφία

- Abu-Bakar, H., Williams, L., & Hallett, S. H. (2021). A review of household water demand management and consumption measurement. *Journal of Cleaner Production*, 292, 125872.
- Acharya, S., Sharma, S. K., & Khandegar, V. (2018). Assessment of groundwater quality by water quality indices for irrigation and drinking in South West Delhi, India. Data in brief, 18, 2019-2028.
- Adibe, D. O., Ekere, N. R., Ihedioha, J. N., Abugu, H. O., & Ibeto, C. N. (2024). Evaluation of potentially toxic elements within the vicinity of an integrated agro industry, Nigeria. *Scientific African*, 24, e02197.
- Akakuru, O. C., Eze, C. U., Okeke, O. C., Opara, A. I., Usman, A. O., IHEME, O., ... & Iwuoha, P. O. (2022). Hydrogeochemical evolution, water quality indices, irrigation suitability and pollution index of groundwater (PIG) around Eastern Niger Delta, Nigeria. *International Journal of Energy and Water Resources*, 1-23.
- Ali H, Khan E, Ilahi I. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*. 2019
- Amiri, V., Bhattacharya, P., & Nakhaei, M. (2021). The hydrogeochemical evaluation of groundwater resources and their suitability for agricultural and industrial uses in an arid area of Iran. *Groundwater for Sustainable Development*, 12, 100527.

- 
- Armstrong, J. S., & Soelberg, P. (1968). On the interpretation of factor analysis. *Psychological Bulletin*.
  - Arslan, H., & Çolak, M. G. (2023). The assessment of groundwater quality through the water quality and nitrate pollution indexes in northern Türkiye. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(10), 1257.
  - Bahir, M., El Mountassir, O., Chehbouni, A., Dhiba, D., El Jiar, H., & Carreira, P. M. (2022). Hydrogeochemical and isotopic assessment for characterizing groundwater quality and recharge processes in the Essaouira Basin, Northwestern Morocco. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(7), 603.
  - Bansal, O. P. (2020). Health risks of potentially toxic metals contaminated water. *Heavy metal toxicity in public health*, 63.
  - Barnes, I., & O'neil, J. R. (1969). The relationship between fluids in some fresh alpine-type ultramafics and possible modern serpentization, western United States. *Bulletin of the Geological Society of America*
  - Bartlett, M. S. (1950). Tests of Significance in Factor Analysis. *British Journal of Statistical Psychology*, 3(January), 77-85.
  - Bierkens, M. F., & Wada, Y. (2019). Non-renewable groundwater use and groundwater depletion: a review. *Environmental Research Letters*, 14(6), 063002.
  - Cattell, R. B. (1966). The scree test for the number of factors. *Multivariate Behavioral*
  - Chaplin, M. F. (2001). Water: its importance to life. *Biochemistry and molecular biology education*, 29(2), 54-59.
  - Dahiya, V. (2022). Heavy metal toxicity of drinking water: A silent killer. *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences*, 19(1), 020-025
  - Dotsika, E., Poutoukis, D., & Raco, B. (2010). Fluid geochemistry of the Methana Peninsula and Loutraki geothermal area, Greece. *Journal of Geochemical Exploration*, 104(3), 97-104.
  - Eid, M. H., Elbagory, M., Tamma, A. A., Gad, M., Elsayed, S., Hussein, H., & Péter, S. (2023). Evaluation of groundwater quality for irrigation in deep aquifers using

---

multiple graphical and indexing approaches supported with machine learning models and GIS techniques, Souf Valley, Algeria. *Water*, 15(1), 182.

- Egbueri, J. C., Agbasi, J. C., Ayejoto, D. A., Khan, M. I., & Khan, M. Y. A. (2023). Extent of anthropogenic influence on groundwater quality and human health-related risks: an integrated assessment based on selected physicochemical characteristics. *Geocarto International*, 38(1), 2210100.
- El Osta, M., Masoud, M., Alqarawy, A., Elsayed, S., & Gad, M. (2022). Groundwater suitability for drinking and irrigation using water quality indices and multivariate modeling in makkah Al-Mukarramah province, Saudi Arabia. *Water*, 14(3), 483.
- Evans, J. D. (1996). *Straightforward statistics for the behavioral sciences*. Belmont: Thomson Brooks/Cole Publishing Co.
- Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M. F., & Van Beek, L. P. (2012). Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, 488(7410), 197-200.
- Hossain, M., & Patra, P. K. (2020). Water pollution index—A new integrated approach to rank water quality. *Ecological Indicators*, 117, 106668.
- Jafari Shalamzari, M., & Zhang, W. (2018). Assessing water scarcity using the Water Poverty Index (WPI) in Golestan province of Iran. *Water*, 10(8), 1079.
- Jamshidzadeh, Z., & Mirbagheri, S. A. (2011). Evaluation of groundwater quantity and quality in the Kashan Basin, Central Iran. *Desalination*, 270(1-3), 23-30.
- Kaiser, H. F. (1958). The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika*
- Kelepertzis, E., Pyrgaki, K., Argyraki, A., Botsou, F., Boeckx, P., Megremi, I., Karavoltzos, S., & Dassenakis, M. (2019). Application of dual isotopes ( $\delta^{15}\text{N}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) to determine nitrate contamination sources in Cr(VI)-impacted groundwater of central Greece aquifers. 15th International Congress of the Geological Society of Greece, Athens, Greece
- Kosalec, I., Cvek, J., & Tomić, S. (2009). Contaminants of medicinal herbs and herbal products. *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*, 60(4), 485-501.

- 
- Kumar, V., Parihar, R. D., Sharma, A., Bakshi, P., Sidhu, G. P. S., Bali, A. S., & Rodrigo-Comino, J. (2019). Global evaluation of heavy metal content in surface water bodies: A meta-analysis using heavy metal pollution indices and multivariate statistical analyses. *Chemosphere*, 236, 124364.
  - Liu, C.W., Lin, K.H., & Kuo, Y.M., (2003). Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a blackfoot disease area in Taiwan. *Sci. Total Environ.*
  - Lu, F., & Astruc, D. (2018). Nanomaterials for removal of toxic elements from water. *Coordination Chemistry Reviews*, 356, 147-164.
  - Megremi, I., Vasilatos, C., Vassilakis, E., & Economou-Eliopoulos, M. (2019). Spatial diversity of Cr distribution in soil and groundwater sites in relation with land use management in a Mediterranean region: The case of C. Evia and Assopos-Thiva Basins, Greece. *Science of the Total Environment*
  - Meybeck, M. (1987). Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. *American Journal of Science*
  - Mukherjee, P. K. (2019). *Quality control and evaluation of herbal drugs: Evaluating natural products and traditional medicine*. Elsevier.
  - Neal, C., & Stanger, G. (1983). Hydrogen generation from mantle source rocks in Oman. *Earth and Planetary Science Letters*
  - Nieder, R., & Benbi, D. K. (2023). Potentially toxic elements in the environment—a review of sources, sinks, pathways and mitigation measures. *Reviews on Environmental Health*, (0).
  - Nizami G, Rehman S. Assessment of heavy metals and their effects on quality of water of rivers of Uttar Pradesh, India: A review. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2018
  - Omotoso, O. A., Ojo, O. J., Usman, S. G., Yakubu, H. P., Owoseni, B. O., Ikheloa, D. E., & Malachi, M. O. (2023). Groundwater Quality Assessment in Iworoko-Ekiti Environs, South-Western Nigeria Using Chemical Indices: Implications for Irrigation

- 
- Panno, S. V., Kelly, W. R., Martinsek, A. T., & Hackley, K. C. (2006). Estimating background and threshold nitrate concentrations using probability graphs. *Groundwater*, 44(5), 697-709.
  - Papadopoulou, K., & Lappas, I. (2014). Groundwater quality degradation due to Cr<sup>6+</sup> presence in Schinos area, prefecture of Corinth, Central Greece. 10th International Hydrogeological Congress of Greece, Thessaloniki.
  - Papazotos, P., Vasileiou, E., & Perraki, M. (2019). The synergistic role of agricultural activities in groundwater quality in ultramafic environments: The case of the Psachna basin, central Euboea, Greece. *Environmental monitoring and assessment*,
  - Papazotos, P., Vasileiou, E., & Perraki, M. (2020). Elevated groundwater concentrations of arsenic and chromium in ultramafic environments controlled by seawater intrusion, the nitrogen cycle, and anthropogenic activities: The case of the Gerania Mountains, NE Peloponnese, Greece. *Applied Geochemistry*, 121, 104697.
  - Papazotos, P. (2021). Potentially toxic elements in groundwater: a hotspot research topic in environmental science and pollution research. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(35), 47825-47837.
  - Papazotos, P., Vasileiou, E., Vasilakis, S., & Perraki, M. (2023). A novel hydrogeochemical approach to delineate the origin of potentially toxic elements in groundwater: Sophisticated molar ratios as environmental tracers. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(30), 74771-74790.
  - Paul D. Research on heavy metal pollution of river ganga: A review. *Annals of Agrarian Science*. 2017
  - Pourret, O., & Hursthouse, A. (2019). It's time to replace the term "heavy metals" with "potentially toxic elements" when reporting environmental research. *International journal of environmental research and public health*, 16(22), 4446.
  - Putranto, T. T., Susanto, N., & Pangestuti, D. R. Analysis of Stable Isotopes <sup>18</sup>O and <sup>2</sup>H and Sodium Adsorption Ratio (SAR) for Groundwater Studies in Coastal Area in Semarang City, Central Java Province Indonesia. *Polish Journal of Environmental Studies*.



- 
- Pyrgaki, K., Argyraki, A., Kelepertzis, E., Paraskevopoulou, V., Botsou, F., Dassenakis, E., ... & Skourtsos, E. (2016). Occurrence of hexavalent chromium in the ophiolite related aquifers of Loytraki and Schinos areas. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 50(4), 2261-2270.
  - Pyrgaki, K., Argyraki, A., Botsou, F., Kelepertzis, E., Paraskevopoulou, V., Karavoltsos, S., ... & Dassenakis, E. (2021). Hydrogeochemical investigation of Cr in the ultramafic rock-related water bodies of Loutraki basin, Northeast Peloponnese, Greece. *Environmental Earth Sciences*, 80, 1-18.
  - Pyrgaki, K., Kelepertzis, E., Argyraki, A., Boeckx, P., Botsou, F., & Dassenakis, E. (2022). Identification of sources and transformations of nitrate in Cr (VI)-impacted alluvial aquifers by a hydrogeochemical and  $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$  and  $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$  isotopes approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(38), 57703-57719.
  - Remoundaki, E., Vasileiou, E., Philippou, A., Perraki, M., Kousi, P., Hatzikioseyan, A., & Stamatis, G. (2016). Groundwater Deterioration: The Simultaneous Effects of Intense Agricultural Activity and Heavy Metals in Soil. In *Procedia Engineering*.
  - Stamatakis, M. G., & Mitsis, I. (2017). The occurrences of Mg-hydroxycarbonates in serpentinites of the western section of the South Aegean volcanic arc (West Attica peninsula-Northeastern Argolis peninsula), Greece. *Bulletin of the Geological Society of Greece*
  - Vasileiou, E., Perraki, M., Stamatis, G., & Gartzos, E. (2014). The effects of water rock interaction and the human activities on the occurrence of hexavalent chromium in waters. The case study of the Psachna basin, central Euboea, Greece.
  - Vasileiou, E., Papazotos, P., Dimitrakopoulos, D., Perraki, M. (2019). Expounding the origin of chromium in groundwater of the Sarigkiol basin, Western Macedonia, Greece: a cohesive statistical approach and hydrochemical study. *Environmental Monitoring and Assessment*,
  - Wada, Y., Van Beek, L. P., Van Kempen, C. M., Reckman, J. W., Vasak, S., & Bierkens, M. F. (2010). Global depletion of groundwater resources. *Geophysical research letters*, 37(20).

- 
- Ward, J. H. (1963). Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. Source: Journal of the American Statistical Association (
  - Zhang, Q., Yu, R., Jin, Y., Zhang, Z., Liu, X., Xue, H., ... & Wang, L. (2019). Temporal and spatial variation trends in water quality based on the WPI index in the shallow lake of an arid area: A case study of Lake Ulansuhai, China. *Water*, 11(7), 1410.
  - Zwolak A, Sarzyńska M, Szpyrka E, Stawarczyk K. Sources of soil pollution by heavy metals and their accumulation in vegetables: A review. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2019

## **Ιστότοποι**

[www.fao.org](http://www.fao.org)

[www.usgs.gov](http://www.usgs.gov)