



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Καταγραφή και μελέτη υφάλμυρων υδάτων ως προς
τη μεταλλικότητά τους κατά μήκος του νότιου παραλιακού
μετώπου της Κρήτης»**

Περδικάκης Χαράλαμπος-Χαρίλαος

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Μανούτσογλου Ε. (Επιβλέπων καθηγητής)

Καλλίθρακας-Κόντος Ν. (Καθηγητής)

Κριτωτάκης Μ. Δρ. (Γενικός Διευθυντής Βιώσιμης Ανάπτυξης,
Περιφέρειας Κρήτης)

Χανιά, Σεπτέμβριος 2024

Η έγκριση της παρούσας διπλωματικής εργασίας από το Πολυτεχνείο Κρήτης, δεν σημαίνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Νόμος 5343/1932, άρθρο 202)

Ευχαριστίες

Φτάνοντας στο τέλος της συγγραφής της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην πραγματοποίησή της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Εμμανουήλ Μανούτσογλου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου τη παρούσα εργασία και για την καθοδήγηση που μου παρείχε.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κύριο Ν. Καλλίθρακα-Κόντο, Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων και τον Δρ. Μ. Κριτσωτάκη (Γενικός Διευθυντής Βιώσιμης Ανάπτυξης, Περιφέρειας Κρήτης) για την συμμετοχή και την παρουσία τους στην εξεταστική επιτροπή της παρουσίασης μου.

Τέλος, αυτή η εργασία αφιερώνεται στην οικογένεια μου, την οποία ευχαριστώ θερμά και από καρδιάς για την αδιάκοπη υποστήριξη και αμέριστη βοήθεια που μου παρείχαν συναισθηματικά και οικονομικά, καθ' όλη την διάρκεια φοίτησης μου.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην ανάλυση των υφάλμυρων υδάτων και των μηχανισμών που τα διέπουν, σε παράκτιους υδροφορείς στη νότια ακτογραμμή της Κρήτης. Μετά από μια εισαγωγή στο φαινόμενο της υφαλμύρινσης, στο ουσιαστικό μέρος της εργασίας αυτής, γίνεται μια προσπάθεια ανάλυσης της γενικής σύνθεσης και χημείας των ανόργανων συστατικών των κύριων ιόντων και ιχνοστοιχείων της ιδιαίτερης αυτής κατηγορίας υδάτων. Εξετάζονται οι φυσικοχημικές παράμετροι, τα χαρακτηριστικά ποιότητας και η ευκινησία των χημικών στοιχείων σε διαλύματα. Επιπλέον, εξετάζονται τα μεταλλικά ύδατα, εστιάζοντας στα θερμομεταλλικά και ιαματικά νερά, αναλύοντας τον ρόλο τους στην ανθρώπινη υγεία και ευεξία..

Η μεθοδολογία της έρευνας περιλαμβάνει την επεξεργασία και παρουσίαση των αποτελεσμάτων μέσα από υδροχημικά διαγράμματα, τα οποία παρέχουν ουσιαστικές και εποπτικές πληροφορίες για τη σύνθεση των υδάτων. Τα διαγράμματα αυτά αποκαλύπτουν σημαντικά ευρήματα σχετικά με την προέλευση και την εξέλιξη της υφαλμύρινσης, ενώ παράλληλα αναδεικνύουν τις επιπτώσεις του φαινομένου στην ποιότητα των υδάτων και την καταλληλότητα τους για διάφορες χρήσεις.

Πιο συγκεκριμένα, μέσα από τα υδροχημικά διαγράμματα που αναλύθηκαν, προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα που αναδεικνύουν τη δυναμική της υφαλμύρινσης στη νότια Κρήτη. Τα διαγράμματα Piper, Schoeller και Langelier έδειξαν σαφείς ενδείξεις ανάμειξης θαλασσινού νερού στα υπόγεια ύδατα, κυρίως σε περιοχές με αυξημένες συγκεντρώσεις χλωριούχων ιόντων. Το διάγραμμα Piper κατέδειξε την ύπαρξη τριών κυρίων υδροχημικών τύπων, με σχεδόν τα μισά δείγματα να κατατάσσονται ως ασβεστομαγνησιούχα και εξίσου σημαντικό μέρος του συνόλου σε κάλιο-νατριούχο-χλώριο-θειικά, πράγμα που υποδηλώνει διάλυση ασβεστολιθικών και υπερβασικών πετρωμάτων στην σύνθεση του νερού και σημαντική επίδραση από την εισχώρηση θαλασσινού νερού, αντίστοιχα. Οι παρατηρήσεις αυτές επαληθεύτηκαν και από το διάγραμμα Schoeller, όπου παρατηρήθηκαν αντίστοιχες κατανομές ιόντων, αλλά και από το διάγραμμα Langelier. Το διάγραμμα Wilcox προσέφερε κρίσιμες πληροφορίες για την ποιότητα και καταλληλότητα του νερού για άρδευση και ανέδειξε ότι τα περισσότερα δείγματα νερού εμπίπτουν σε κατηγορίες που χαρακτηρίζονται ως «μέτριες» έως «κακές-ακατάλληλες» για άρδευση, με πολλά δείγματα να δείχνουν αυξημένη αλατότητα, γεγονός που μπορεί να περιορίσει τη χρήση τους στη γεωργία χωρίς κατάλληλη διαχείριση.

Συνολικά, τα συμπεράσματα της έρευνας υπογραμμίζουν την ανάγκη για βιώσιμη διαχείριση των υδάτινων πόρων, προκειμένου να μετριαστούν οι αρνητικές επιπτώσεις της υφαλμύρινσης στους παράκτιους υδροφορείς και να διασφαλιστεί η μακροπρόθεσμη προστασία τους.

Abstract

This thesis focuses on the analysis of brackish water and its governing mechanisms in coastal aquifers along the southern coastline of Crete. After an introduction to the phenomenon of salinization, the main part of this thesis attempts to analyze the general composition and chemistry of the inorganic components of the main ions and trace elements in this specific water category. It examines the physicochemical parameters, quality characteristics, and the mobility of chemical elements in solutions. In addition, the study explores mineral waters, focusing on thermometallic and medicinal waters, analysing their role in human health and well-being.

The research methodology includes processing and presenting results through hydrochemical diagrams, which provide essential and insightful information on the water composition. These diagrams reveal important findings regarding the origin and progression of salinization, while also highlighting the effects of the phenomenon on water quality and its suitability for various uses.

Specifically, through the hydrochemical diagrams analysed, important conclusions emerged that highlight the dynamics of salinization in southern Crete. The Piper, Schoeller and Langelier diagrams showed clear indications of seawater mixing with groundwater, particularly in areas with elevated concentrations of chloride ions. The Piper diagram indicated the existence of three main hydrochemical types, with nearly half of the samples classified as calcic-magnesian and an equally significant proportion of the total as potassium-sodium-chloride-sulphate, suggesting dissolution of calcareous and ultrabasic rocks in the water composition and a notable impact of seawater intrusion, respectively. These observations were also verified by the Schoeller diagram, where corresponding ion distributions were observed, as well as the Langelier diagram. The Wilcox diagram provided critical information on the quality and suitability for irrigation, revealing that most water samples fall into categories classified as 'moderate' to 'poor-suitable' for irrigation, with many samples showing increased salinity, which may limit their use in agriculture without proper management.

Overall, the conclusions of the study underline the need for sustainable management of water resources to mitigate the negative impacts of salinization on coastal aquifers and ensure their long-term protection.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
1.1 Γενικά	9
1.2 Σκοπός	10
2. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ	12
2.1 Γενικά	12
2.2 Σύσταση Θαλασσινού Νερού και Αλατότητα	12
2.3 Υφάλμυρα Ύδατα	14
2.4 Μηχανισμοί του Φαινομένου	16
2.4.1 Συσχέτιση Ghyben-Herzberg	17
2.4.2 Κώνος Άντλησης-Διείσδυσης	19
3. ΑΙΤΙΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΟΥΝ ΥΦΑΛΜΥΡΑ ΥΔΑΤΑ	21
3.1 Φυσικά Αίτια	21
3.1.1 Αλατούχα υπόγεια ύδατα θαλάσσιας προέλευσης	21
3.1.2 Αλατούχα υπόγεια ύδατα φυσικής ηπειρωτικής προέλευσης	23
3.2 Ανθρωπογενή Αίτια	25
3.2.1 Αλατούχα υπόγεια ύδατα από ανθρωπογενείς δραστηριότητες	25
4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ ΤΩΝ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΩΝ ΠΗΓΩΝ	27
4.1 Γενικά	27
4.2 Γεωχημικοί Ιχνηθέτες	27
4.3 Ιχνηθέτες Ισοτόπων	28
4.4 Τεχνικές Υδρογεωχημικής Μοντελοποίησης	29
4.4.1 Mass transfer models (MTM)	29
4.4.2 Διαγράμματα εξέλιξης υδρογεωχημικών όψεων	30
5. ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ	31
5.1 Γενικά	31
5.2 Μέθοδοι Αντιμετώπισης	32
5.2.1 Δημιουργία φραγμάτων	32
5.2.2 Ρύθμιση της στάθμης του υδροφορέα	33
5.2.3 Πειραματικές μέθοδοι	35
5.3 Η Τρέχουσα Κατάσταση της Ελλάδας	35
6. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΥΦΑΛΜΥΡΩΝ ΥΔΑΤΩΝ	37

6.1	Γενικά.....	37
6.2	Ευρωπαϊκή Νομοθεσία σχετικά με την υφαλμύριση	38
7.	ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΧΗΜΕΙΑ ΤΩΝ ΥΔΑΤΩΝ	40
7.1	Φυσικοχημικές Παράμετροι Υδάτων	40
7.2	Χαρακτηριστικά της Ποιότητας του Νερού	43
7.3	Ευκινησία των χημικών στοιχείων σε διαλύματα.....	46
7.3.1	Γενικά.....	46
7.3.2	Συντελεστές που επηρεάζουν την ευκινησία	47
8.	ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΡΗΤΗΣ	49
8.1	Γεωλογία.....	49
8.2	Υδρογεωλογία.....	50
8.2.1	Υδροφορείς και όρια.....	50
8.2.2	Πηγές.....	51
8.3	Φυσική Υδροχημική Εξέλιξη Υπόγειων Υδάτων.....	53
8.4	Υδατικό Δυναμικό Πρωτογενών Υδρογεωλογικών Ενοτήτων Κρήτης	54
9.	ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΝΕΡΑ	56
9.1	Θερμομεταλλικά νερά/πηγές	56
9.2	Ιαματικά νερά/πηγές	56
9.3	Φυσικοχημικά Χαρακτηριστικά Θερμομεταλλικών-Ιαματικών νερών.....	57
9.4	Ταξινομήσεις Μεταλλικών Νερών	58
9.4.1	Ταξινόμηση με βάση την προέλευση τους	58
9.4.2	Ταξινόμηση με βάση τη θερμοκρασία τους.....	58
9.4.3	Ταξινόμηση κατά χημική σύσταση.....	59
9.4.4	Γενική ταξινόμηση κατά Thurner	59
10.	Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΝΕΡΩΝ ΣΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΟ	61
10.1	Γενικά.....	61
10.2	Μορφές Υδροθεραπείας	61
10.2.1	Εσωτερική.....	61
10.2.2	Εξωτερική	62
10.3	Θεραπευτικές Ενδείξεις	63
10.4	Η Προέλευση των κύριων ιόντων στο νερό και η Επίδραση τους στον Άνθρωπο.....	64
11.	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	70
11.1	Εισαγωγή	70

11.2	Επεξεργασία.....	70
11.3	Υδροχημικά διαγράμματα και ανάλυση	74
11.3.1	Διάγραμμα Piper	74
11.3.2	Διάγραμμα Schoeller	78
11.3.3	Διάγραμμα Ludwig-Langelier	84
11.3.4	Διάγραμμα Wilcox.....	86
11.3.5	Ομαδοποίηση και σύγκριση ανά τα διαγράμματα	90
12.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	92
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	96
	ΔΙΕΘΝΗΣ	96
	ΕΛΛΗΝΙΚΗ.....	98
	Ιστότοποι.....	100

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Η ύπαρξη υφάλμυρων υδάτων σε παράκτιους υδροφορείς αποτελεί ένα κρίσιμο περιβαλλοντικό ζήτημα που επηρεάζει πολλές περιοχές παγκοσμίως, συμπεριλαμβανομένης της Ελλάδας και ειδικότερα της Κρήτης, λόγω της εκτεταμένης ακτογραμμής της και των ιδιαίτερων γεωλογικών και υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών της. Η διερεύνηση της μεταλλικότητας των υδροφορέων που έχουν επηρεαστεί από την υφαλμύριση, συμβάλλει στην κατανόηση της αιτίας που την προκάλεσε, ενώ παράλληλα μας επιτρέπει να αντιληφθούμε τους τρόπους εκμετάλλευσης των υφάλμυρων πηγών, χρησιμοποιώντας τα ευεργετικά τους στοιχεία.

Το φαινόμενο της υφαλμύρισης, που χαρακτηρίζεται από την εισροή θαλασσινού νερού στους παράκτιους υδροφόρους ορίζοντες, αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία με σημαντικές επιπτώσεις στην ποιότητα και διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων. Η εισροή αυτή δύναται να αντικαταστεί ίσες ποσότητες γλυκού νερού με αλμυρό, με αποτέλεσμα την αυξημένη ζήτηση σε νερό για την κάλυψη καθημερινών αναγκών και ποικίλων ανθρωπίνων δραστηριοτήτων. Η κατανόηση των μηχανισμών που διέπουν αυτό το φαινόμενο είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών διαχείρισης και προστασίας των υπόγειων υδάτων.

Ο κύριος παράγοντας που συμβάλλει στην εμφάνιση υφάλμυρων υδάτων είναι η διείσδυση του θαλασσινού νερού στους παράκτιους υδροφορείς. Ωστόσο, οι παράκτιες περιοχές φιλοξενούν σημαντική ποσότητα πηγών ρύπανσης των οποίων η εκδήλωσή συνδέεται είτε με φυσικές διεργασίες, όπως αλατούχα ύδατα θαλάσσια ή ηπειρωτικής προέλευσης, είτε με ανθρωπογενείς παράγοντες που επιτείνουν το πρόβλημα.

Λόγω της σημασίας των επιπτώσεων αυτών των υδάτων, μακροπρόθεσμα και μη, είναι αναμφισβήτητο πως τα τελευταία χρόνια αποτελούν αντικείμενο μίας αξιόλογης ερευνητικής προσπάθειας. Συνεπώς, για την ενδελεχή διερεύνηση ενός σύνθετου φαινομένου, είναι ζωτικής σημασίας η αναζήτηση διαφόρων μεθόδων έρευνας της υφαλμύρισης. Ο συνδυασμός ισοτοπικών και υδρογεωχημικών προσεγγίσεων είναι απαραίτητος για την ανίχνευση της πηγής και του μηχανισμού υφαλμύρισης των υπόγειων υδάτων. Έτσι, αναλύονται οι διάφορες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη και παρακολούθηση, προκειμένου να αντιμετωπισθεί το πρόβλημα.

Με βάση τα προαναφερθέντα, είναι προφανές ότι η πολυπλοκότητα και η σύνθεση του φαινομένου καθιστά δύσκολη τη ποσοτικοποίηση και επίλυση του προβλήματος. Όμως οι έρευνες έχουν οδηγήσει σε ποικίλες τεχνικές αντιμετώπισης για την μετρίαση και την καταπολέμηση των επιπτώσεων των υφάλμυρων υδάτων. Σε αυτές περιλαμβάνονται η τοποθέτηση διαφραγμάτων, η ρύθμιση της στάθμης του υδροφορέα, καθώς και πειραματικές μέθοδοι που αφορούν χρήση χημικών μέσων. Ωστόσο, η πιο ευνοϊκή προσέγγιση είναι η προληπτική διαχείριση του υδροφόρου προκειμένου να διατηρηθεί ο έλεγχος της σφήνας του θαλασσινού νερού.

Για την πλήρη κατανόηση και εμβάθυνση στις διεργασίες και επιπτώσεις των υφάλμυρων υδάτων, είναι απαραίτητη η αναφορά στα χαρακτηριστικά του νερού. Η ποιότητα των υπόγειων υδάτων καθορίζεται από διάφορες φυσικοχημικές παραμέτρους οι οποίες συμβάλλουν στην αξιολόγηση, στην κατάταξη και ομαδοποίηση των υφάλμυρων πηγών. Αξιοσημείωτος είναι και ο ρόλος της ευκινησίας των χημικών στοιχείων στα διαλύματα νερού, εφόσον συμβάλλει στην κατανόηση του βαθμού εξάπλωσης των στοιχείων σε σχέση με την κυρίαρχη μάζα των άλλων υλικών που το περιβάλλουν. Ένα σημαντικό μέρος της εργασίας αφιερώνεται στη μελέτη των μεταλλικών νερών. Πραγματοποιείται ανάλυση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων, της προέλευσής τους, των μηχανισμών εμπλουτισμού τους με μεταλλικά στοιχεία καθώς και μια εκτενή ανάλυση του ρόλου των κύριων ιόντων στο νερό και της επίδρασής τους στον ανθρώπινο οργανισμό. Εξετάζεται η σημασία των θερμομεταλλικών πηγών για την Κρήτη, τόσο από περιβαλλοντική όσο και από οικονομική άποψη, με αναφορά στη δυνατότητα αξιοποίησής τους για ιαματικούς και τουριστικούς σκοπούς.

Η γεωλογία και υδρογεωλογία της Κρήτης αποτελούν σημαντικά κομμάτια που συσχετίζονται άμεσα με την ύπαρξη υφάλμυρων υδάτων και την μεταλλικότητα των πηγών. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια λεπτομερής ανάλυση της γεωλογικής δομής του νησιού, με έμφαση στους σχηματισμούς που επηρεάζουν τη διαμόρφωση και λειτουργία των υδροφόρων οριζόντων. Εξετάζονται οι κύριες υδρογεωλογικές ενότητες της Κρήτης, οι ιδιότητές τους και η σημασία τους για την υδροδότηση του νησιού.

Το τελικό μέρος της έρευνας επικεντρώνεται στην καταγραφή και ανάλυση των υφάλμυρων υδάτων στο νότιο παραλιακό μέτωπο της Κρήτης. Η επεξεργασία και παρουσίαση των αποτελεσμάτων αποτελεί ένα κρίσιμο κεφάλαιο της εργασίας προκειμένου να μελετηθεί ο χημισμός και κατ' επέκταση η μεταλλικότητα των δεδομένων υδάτων. Περιγράφεται ο τρόπος συλλογής των ενδιαφερόμενων δειγμάτων, ο διαχωρισμός και ομαδοποίηση τους χρησιμοποιώντας γεωχωρικές συντεταγμένες και χάρτες κατά μήκος της νότιας ακτογραμμής. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από επεξεργασία μέσω του ειδικού προγράμματος παρουσιάζονται με οπτικοποίηση των δεδομένων, κάνοντας χρήση λεπτομερών υδροχημικών διαγραμμάτων, ώστε να αποδοθεί η χημική σύσταση και η ταξινόμηση των υδάτων.

Η εργασία ολοκληρώνεται με μια εκτενή συζήτηση των αποτελεσμάτων, βάση των αποτελεσμάτων των υδροχημικών διαγραμμάτων όπου τίγονται οι λόγοι και η φύση της υφαλμύρινης στους υδατικούς πόρους του νοτίου παραλιακού μετώπου της Κρήτης.

1.2 Σκοπός

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στη μελέτη του φάσματος του φαινομένου της υφαλμύρινης, καθώς και στην καταγραφή και ανάλυση του χημισμού των υφάλμυρων υδάτων κατά μήκος του νότιου παραλιακού μετώπου της Κρήτης, με

ιδιαίτερη έμφαση στη μεταλλικότητά τους. Συνεπώς, ο σκοπός της εργασίας είναι να καλύψει ενδελεχώς τις πτυχές των υφάλμυρων υδάτων, για την καλύτερη κατανόηση τους, και να μελετήσει τις ιδιότητες της μεταλλικής φύσης των δεδομένων προκειμένου να αναλογιστούν τρόποι αξιοποίησης και εκμετάλλευσης των πηγών ενδιαφέροντος.

2. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ

2.1 Γενικά

Η υφαλμύρινη είναι ένα σημαντικό φαινόμενο που προκαλείται από την εισροή θαλασσινού νερού στους υδροφόρους ορίζοντες. Συμβαίνει όταν οι απολήψιμες ποσότητες υπόγειου νερού υπερβούν την ικανότητα της ασφαλούς απόδοσης ενός παράκτιου υδροφόρου συστήματος, μετατοπίζοντας ή αναμιγνύοντας το γλυκό νερό. Αυτό οδηγεί στην υφαλμύρινη των υπογείων υδάτων, καθιστώντας τα ακατάλληλα για ύδρευση ή άρδευση, και μπορεί να προκαλέσει υποβάθμιση της ποιότητας των εδαφών καθιστώντας τη φυτική γη άγονη, σε ακραίες περιπτώσεις. Συνεπώς, το φαινόμενο αυτό αποτελεί στην πραγματικότητα μία πολύ σοβαρή μορφή ρύπανσης των υπόγειων υδάτων καθώς το υφάλμυρο νερό δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί από τον άνθρωπο και η διαδικασία απορρύπανσής του, όντας ιδιαίτερα χρονοβόρα, είναι δυνατόν να διαρκέσει έως και εκατοντάδες χρόνια.

Η εμφάνιση του φαινομένου της υφαλμύρινης είναι ιδιαίτερα έντονη στην Ελλάδα, λόγω του μεγάλου μήκους των ακτογραμμών, που ανέρχεται σε 16.000 χλμ. Οι αιτίες της υφαλμύρινης μπορεί να είναι γεωλογικές-φυσικές, όπως ο υψηλός βαθμός καρστικοποίησης του γεωλογικού υποβάθρου, η αύξηση της στάθμης της θάλασσας, η μείωση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης, ή μπορεί να αποδίδονται στον ανθρώπινο παράγοντα, όπως η υπεράντληση των υπογείων υδάτων που οδηγεί στην ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα.

Η αντιμετώπιση της υφαλμύρινης απαιτεί επιστημονική έρευνα, ανάλυση, καλή πληροφόρηση και συνεργασία μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων και του τοπικού πληθυσμού. Επιπλέον, οι ανάγκες για νερό στις παράκτιες περιοχές αυξάνονται συνεχώς, κυρίως λόγω της ανόδου του βιοτικού επιπέδου και της μεγάλης αύξησης του πληθυσμού κατά τους θερινούς μήνες λόγω του τουρισμού.

Τα μοντέλα προσομοίωσης του φαινομένου της υφαλμύρινης διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη είναι βασισμένη στη θεώρηση της διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους, όπου υπάρχουν δύο αναμίξιμα υγρά, το αλμυρό νερό της θάλασσας και το γλυκό νερό του υδροφορέα. Η δεύτερη κατηγορία βασίζεται στη θεώρηση απότομης διεπιφάνειας, όπου επικρατούν δύο μη αναμίξιμα υγρά. (Σούλιος, 2004)

Συνολικά, η υφαλμύρινη είναι ένα σύνθετο φαινόμενο που επηρεάζει την ποιότητα των υδάτων και των εδαφών, και απαιτεί συνεχή παρακολούθηση και διαχείριση για την προστασία των υδατικών πόρων.

2.2 Σύσταση Θαλασσινού Νερού και Αλατότητα

Το θαλασσινό νερό αποτελεί ένα καλά αναμεμιγμένο διάλυμα αλάτων, αερίων, συμπλόκων, χημικών ενώσεων κ.λπ. Αυτό συμβαίνει καθώς, το θαλασσινό νερό δεν έχει την ίδια ακριβώς σύσταση σε όλη του τη μάζα, με άλλα λόγια δεν είναι ισότροπο. Οι θαλασσινές μάζες, δηλαδή μεγάλοι όγκοι θαλασσινού νερού, έχουν ιδιαίτερα

χαρακτηριστικά θερμοκρασίας, πίεσης και διαλυμένων συστατικών. Στο θαλασσινό νερό μπορούν να βρεθούν σε μικρές, μεγάλες, ή μόλις ανιχνεύσιμες ποσότητες όλα τα στοιχεία του περιοδικού πίνακα. Τα διαλυμένα συστατικά του θαλασσινού νερού χωρίζονται σε κύρια, όταν η περιεκτικότητά τους είναι πάνω από 20 mg/Kg (0,02 g/Kg), σε δευτερεύοντα, όταν η περιεκτικότητά τους είναι μεταξύ 1 mg/Kg και 20 mg/Kg και σε ιχνοστοιχεία, όταν η περιεκτικότητά τους είναι κάτω από 1 mg/Kg (τα τελευταία μπορεί να μην είναι στοιχεία με τη χημική έννοια, αλλά ιόντα, σύμπλοκα, οργανικές ενώσεις κ.λπ). Τα διαλυμένα συστατικά (όπως για παράδειγμα το νάτριο) του θαλασσινού νερού είναι αυτά που του προσδίδουν την αλμυρή γεύση και το καθιστούν ακατάλληλο για ύδρευση και άρδευση, και διαβρωτικό για τις περισσότερες μεταλλικές επιφάνειες (Δασενάκης κ.α, 2015).

Δίδεται η μέση περιεκτικότητα του θαλασσινού νερού στα σημαντικότερα συστατικά του:

Συστατικό	Συγκέντρωση (g/kg)	%
Cl ⁻	19,2	55,0
Na ⁺	10,6	30,6
SO ₄ ²⁻	2,7	7,7
Mg ⁺²	1,3	3,7
Ca ⁺²	0,4	1,2
K ⁺	0,38	1,1

Πίνακας 2.1: Συγκέντρωση κυρίων συστατικών στο θαλασσινό νερό (αλατότητας 35%) (Δασενάκης κ.α, 2015)

Αλατότητα είναι το συνολικό ποσό στερεών υλικών που περιέχεται σε ένα χιλιόγραμμα θαλασσινού νερού, όταν όλες οι ανθρακικές ρίζες έχουν μετατραπεί σε οξείδια, το βρώμιο και το ιώδιο έχουν αντικατασταθεί από χλώριο και όλα τα οργανικά υλικά έχουν πλήρως οξειδωθεί. Πιο συγκεκριμένα, η αλατότητα ‰ ορίζεται ως η μάζα σε γραμμάρια διαλυμένης ανόργανης ύλης σε 1 kg θαλασσινού νερού, αφού όλα τα ανιόντα Br⁻ και I⁻ έχουν αντικατασταθεί από την ισοδύναμη ποσότητα ανιόντων Cl⁻ και όλα τα ανιόντα HCO₃⁻ και CO₃²⁻ έχουν μετατραπεί σε οξείδια. Όσον αφορά την αλατότητα, τα θαλάσσια ύδατα κυμαίνονται από 33 έως 37‰, με μέσο όρο 35‰. Αξίζει να σημειωθεί πως η μέση συγκέντρωση αλατιού στον ωκεανό είναι περίπου 3,5‰.

Η κύρια μέθοδος μέτρησης της συνολικής αλατότητας του νερού είναι η ειδική αγωγιμότητα ή η ηλεκτρική αγωγιμότητα (electrical conductivity, EC). Η αγωγιμότητα μιας ουσίας είναι ευθέως ανάλογη της συγκέντρωσης των αλάτων που περιέχει. Η μέτρηση δίνεται συνήθως σε μέτρα ηλεκτρικής αγωγιμότητας, δηλαδή σε deciSiemens ανά μέτρο (dS/m) ή millimhos ανά εκατοστό (mmhos/cm). Ενδεικτικά, το νερό της βροχής, το οποίο δεν περιέχει άλατα, έχει ηλεκτρική αγωγιμότητα 0,02 dS/m, ενώ το θαλασσινό νερό έχει αγωγιμότητα που κυμαίνεται από 50 έως 60 dS/m.

Μια εναλλακτική μέθοδος για την ποσοτικοποίηση της συνολικής συγκέντρωσης αλάτων στο νερό είναι η μέτρηση της συνολικής ποσότητας στερεών που μπορούν να διαλυθούν στο νερό (συνολικά διαλυμένα στερεά, TDS), η οποία συνήθως εκφράζεται σε μέρη ανά εκατομμύριο (ppm).

Η σχέση μεταξύ της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) και των συνολικών διαλυμένων στερεών (TDS) σε ένα διάλυμα δεν είναι γραμμική. Τόσο η συγκέντρωση όσο και ο αριθμός των διαφόρων ιόντων είναι σημαντικοί παράγοντες. Ένας τύπος βασισμένος σε παρατηρήσεις και πειράματα για τον προσδιορισμό είναι ο ακόλουθος:

$$\text{TDS (ppm)} = \text{αγωγιμότητα (dS / m)} \times 0.067$$

2.3 Υφάλμυρα Ύδατα

Το υφάλμυρο νερό είναι ένας ευρύς όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει το νερό του οποίου η αλατότητα είναι μεταξύ της αλατότητας του γλυκού και του θαλασσινού νερού, και συχνά πρόκειται για μεταβατικές περιοχές όπου τα νερά αυτά αναμειγνύονται. Το νερό με συγκέντρωση αλάτων μεγαλύτερη από 30‰ θεωρείται αλατούχο, ενώ η μέση αλατότητα του γλυκού νερού είναι 0.5‰. Συνεπώς η διακύμανση της αλατότητας στα υφάλμυρα ύδατα μπορεί να κυμαίνεται από 0.5 έως 30‰.

Αλατότητα υδάτων			
Γλυκό νερό	Υφάλμυρο νερό	Αλατούχο νερό	Αλμυρό νερό
< 0.05%	0.05 – 3%	3 – 5%	> 5%
< 0.5 ‰	0.5 – 30 ‰	30 – 50 ‰	> 50 ‰

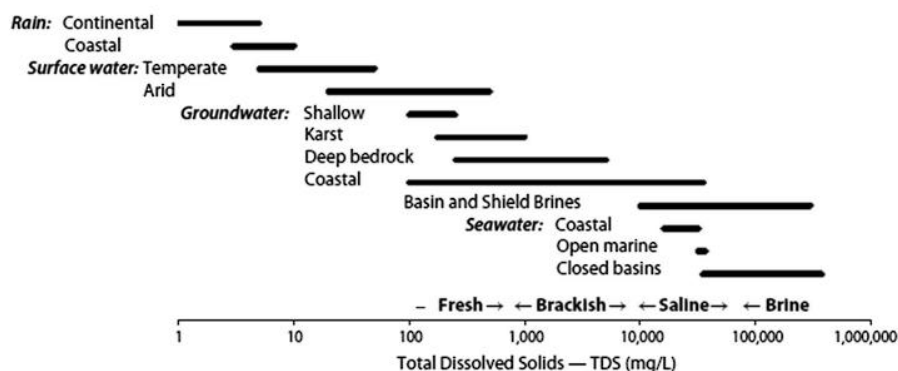
Πίνακας 2.2: Χαρακτηρισμός υδάτων με βάση την ποσοστιαία αλατότητα

Σύμφωνα με το «Σύστημα της Βενετίας» (1958), παρατίθενται παρακάτω η ομαδοποίηση των υδάτων:

Κλάση	Αλατότητα (PSU)	Χαρακτηρισμός
Υπέραλο	>40	Θαλασσινό
Εύαλο	30-40	Θαλασσινό
Πολύαλο	18-30	Υφάλμυρο
Μεσόαλο	5-18	Υφάλμυρο
Ολιγόαλο	0.5-5	Υφάλμυρο
Γλυκό	<0.5	Ποτάμιο/Λιμνάζοντα

Πίνακας 2.3: Χαρακτηρισμός υδάτων, «Σύστημα της Βενετίας» (1958)

Πιο συγκεκριμένα υφάλμυρο νερό ορίζεται το νερό με περιεκτικότητα σε TDS μεταξύ του γλυκού νερού (≤ 1000 mg/l TDS) και του θαλασσινού νερού (33,000-48,000 mg/l TDS), με περιεκτικότητα σε χλωρίοντα μεγαλύτερη από 400 mg/l ή με ηλεκτρική αγωγιμότητα μεγαλύτερη από 1.5 dS/m.



Εικόνα 2.1: Ταξινόμηση ποιότητας νερού βάση τα TDS (Amiri et al.2016b)

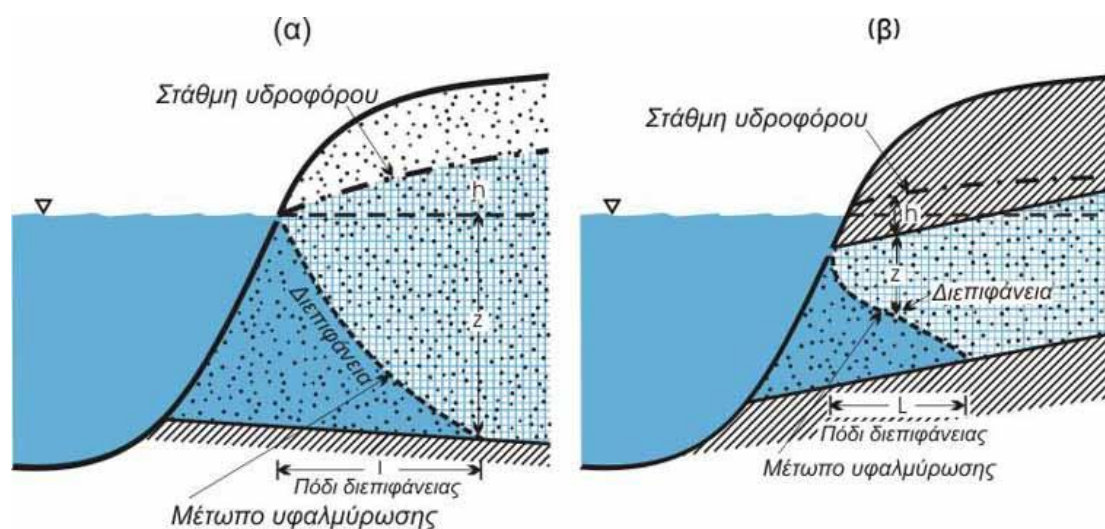
Μπορεί να εμφανιστεί φυσικά ως υφάλμυρο υπόγειο νερό σε υπόγειους αλατούχους υδροφορείς, ως επιφανειακό νερό λόγω φυσικής διάβρωσης ή ως αποτέλεσμα της ανάμιξης του θαλασσινού νερού με ποτάμια (σε εκβολές ποταμών) ή υπόγεια ύδατα (σε παράκτιους υδροφορείς). Τα φυσικά υφάλμυρα νερά, ιδίως τα υφάλμυρα υπόγεια νερά, υπάρχουν στις περισσότερες ηπείρους σε ποσότητες σχεδόν ίσες ή περισσότερες από τα γλυκά υπόγεια νερά και τα επιφανειακά νερά μαζί (Shiklomanov, 1993). Οι ανθρώπινες δραστηριότητες μπορούν επίσης να προκαλέσουν τη μετατροπή των γλυκών επιφανειακών και υπόγειων υδάτινων πόρων σε υφάλμυρους, μέσω της καταναλωτικής χρήσης και της αύξησης του αλατούχου φορτίου τους. Για παράδειγμα, η υπερβολική άντληση υπόγειων υδάτων από παράκτιους υδροφορείς μπορεί να προκαλέσει διείσδυση αλμυρού νερού που επεκτείνει τη ζώνη ανάμιξης υφάλμυρου νερού στην ενδοχώρα, ενώ οι αλμυρές ροές επιστροφής από αρδευόμενες γεωργικές εκτάσεις μπορούν να αυξήσουν την αλατούχα φόρτιση των επιφανειακών υδάτινων οδών. Επίσης, ορισμένες γεωργικές πρακτικές άρδευσης, όπως η υπόγεια αποστράγγιση με πλακίδια, συχνά παράγουν γεωργικά νερά αποστράγγισης που είναι ιδιαίτερα υφάλμυρα. Ομοίως, οι εξορυκτικές δραστηριότητες μπορούν επίσης να δημιουργήσουν νερά εξόρυξης που είναι υφάλμυρα και μολυσμένα με βαρέα μέταλλα.

Το υφάλμυρο νερό χρησιμοποιείται από τον άνθρωπο σε πολλούς διαφορετικούς τομείς. Χρησιμοποιείται συνήθως ως νερό ψύξης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και με διάφορους τρόπους στις βιομηχανίες εξόρυξης, πετρελαίου και φυσικού αερίου. Ωστόσο, το υφάλμυρο νερό μπορεί να επεξεργαστεί με αντίστροφη όσμωση, ηλεκτροδιάλυση και άλλες διεργασίες διήθησης, προκειμένου να πραγματοποιηθεί διαδικασία αφαλάτωσης και να χρησιμοποιηθεί σε γεωργικές, κτηνοτροφικές και δημοτικές χρήσεις. Στο παρελθόν, οι εφαρμογές αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού περιορίζονταν σε μικρής κλίμακας, δημοτικές και βιομηχανικές εφαρμογές. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως η αφαλάτωση είναι ιδιαίτερα δημοφιλής στις ΗΠΑ, καθώς αντιπροσωπεύει πλειοψηφία (~77%) της συνολικής ικανότητας (απευθείας) αφαλάτωσης της χώρας (Committee on Advancing Desalination Technology, 2008)

Η ποιότητα του νερού τροφοδοσίας παίζει σημαντικό ρόλο τόσο στο σχεδιασμό όσο και στη λειτουργία των διεργασιών αφαλάτωσης υφάλμυρου νερού. Τα υφάλμυρα νερά ποικίλλουν σε μεγάλο βαθμό ως προς την ιοντική σύνθεση και περιεκτικότητα, τόσο χρονικά όσο και γεωγραφικά, ανάλογα με τις υδρογεωλογικές συνθήκες και τις σχετικές ανθρώπινες δραστηριότητες (π. χ. βιομηχανικές ή γεωργικές). Οι κύριες διαλυμένες ουσίες στα υφάλμυρα νερά, όπως το νάτριο, το χλώριο, το ασβέστιο, τα θειικά και τα διττανθρακικά ιόντα, προέρχονται συνήθως από αντιδράσεις του νερού με ορυκτά όπως ο αλίτης, ο γύψος, ο ανυδρίτης, ο ασβεστίτης και ο δολομίτης. Άλλες συνήθεις δευτερεύουσες διαλυμένες ουσίες είναι τα πυριτικά άλατα, ο σίδηρος, το στρόντιο, το βάριο, το φθόριο, το σελήνιο και το βόριο.

2.4 Μηχανισμοί του Φαινομένου

Στους παράκτιους υδροφορείς, το γλυκό νερό έρχεται σε επαφή με το θαλασσινό το οποίο έχει μεγαλύτερη πυκνότητα λόγω των ιόντων χλωρίου. Το θαλασσινό νερό διεισδύει κάτω από το γλυκό νερό σχηματίζοντας έτσι μία σφήνα. Λόγω της διαφοράς πυκνότητας του γλυκού νερού με το αλμυρό, δημιουργείται μεταβατική ζώνη μεταβαλλόμενης πυκνότητας που ονομάζεται διεπιφάνεια. Η διεπιφάνεια αυτή, γλυκού - αλμυρού νερού έχει τη μορφή μίας κυρτής καμπύλης η οποία σχηματίζεται εξαιτίας της σφήνας του αλμυρού νερού και της ροής του γλυκού.



Εικόνα 2.2: Ζώνη διεπιφάνειας σε: (α)ελεύθερο και (β) σε υπό πίεση υδροφόρο στρώμα (<http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg763e/ch5.htm>)

Τα μοντέλα προσομοίωσης του φαινομένου της υφαλμύρισης διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

Η πρώτη είναι βασισμένη στη θεώρηση της διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους λόγω της ύπαρξης υδροδυναμικής διασποράς στην οποία υπάρχουν δύο αναμίξιμα υγρά, το αλμυρό νερό της θάλασσας και το γλυκό νερό του υδροφορέα. Οι διαφορικές εξισώσεις

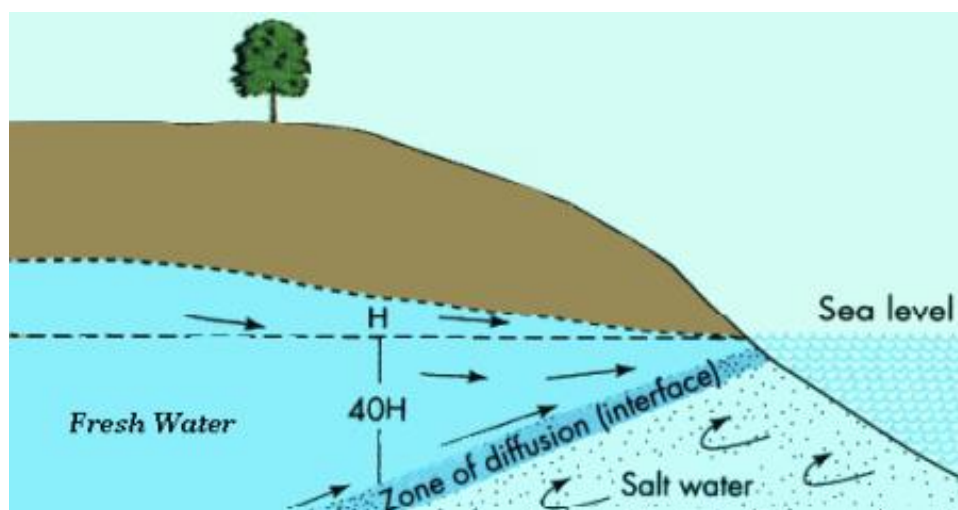
που χρησιμοποιούνται είναι πολύπλοκες και οι παράμετροι διασποράς του άλατος που απαιτούνται λόγω της πολυπλοκότητας των υδροφορέων είναι δύσκολο να επικυρωθούν (Σούλιος, 2004).

Σε αντίθεση, η δεύτερη κατηγορία βασίζεται στη θεώρηση απότομης διεπιφάνειας στην οποία επικρατούν δύο μη αναμίξιμα υγρά και οι εξισώσεις γίνονται απλούστερες. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε περιοχές στις οποίες το πραγματικό πάχος της διεπιφάνειας είναι μικρότερο σε σύγκριση με το πάχος του υδροφορέα, η προσέγγιση της απότομης διεπιφάνειας δίνει με πληρότητα τα αποτελέσματα (Σούλιος, 2004).

Σε κατάσταση φυσικής ισορροπίας, όπου υπάρχει απουσία άντλησης, η διεπιφάνεια παραμένει ακίνητη. Η εντατικοποιημένη άντληση, σε τέτοιο βαθμό ώστε η φυσική επαναπλήρωση δεν οδηγεί στην αποκατάσταση του υδροφορέα, έχει ως αποτέλεσμα την πτώση του πιεζομετρικού φορτίου και την κίνηση της διεπιφάνειας προς το εσωτερικό, έτσι ώστε να επιτευχθεί νέα κατάσταση ισορροπίας.

2.4.1 Συσχέτιση Ghyben-Herzberg

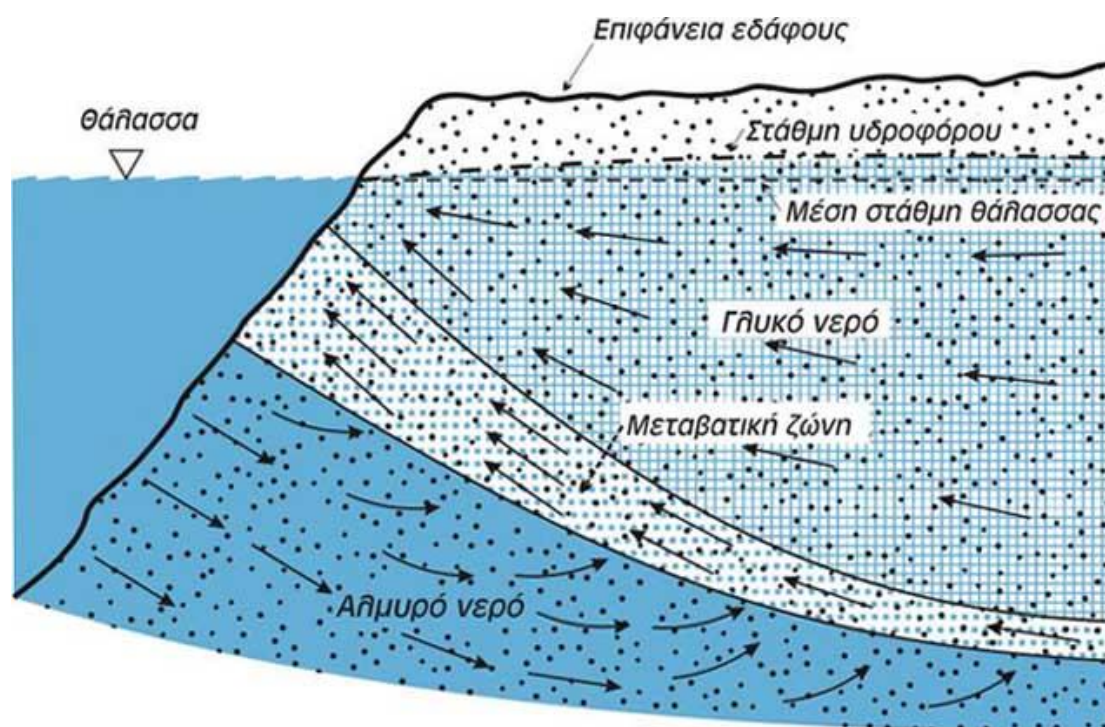
Οι Badon-Ghyben (1888) και Herzberg (1901) είναι οι πρώτοι ερευνητές που ασχολήθηκαν με το φαινόμενο της υφαλμύρινσης. Διαπίστωσαν ότι η στάθμη του θαλάσσιου νερού στο έδαφος δεν βρίσκεται στο επίπεδο της θάλασσας, αλλά κάτω από αυτό, 40 περίπου φορές τη διαφορά της στάθμης του γλυκού νερού από το επίπεδο της θάλασσας.



Εικόνα 2.3: Επίπεδο στάθμης θαλασσινού νερού (Σταμάτης, χ.η.)

Λόγω της διαφορετικής περιεκτικότητας σε άλατα, το αλμυρό νερό παρουσιάζει σημαντικά μεγαλύτερη πυκνότητα από το γλυκό νερό. Στην επαφή του αλμυρού με το γλυκό νερό σχηματίζεται μία ζώνη ανάμιξης, στην οποία υπάρχει βαθμιαία μετάβαση από το γλυκό στο αλμυρό νερό. Αυτή η διεπιφάνεια, άλλοτε μπορεί να είναι λεπτή και

άλλοτε πιο εκτεταμένη, όπως όταν το υδραυλικό φορτίο του υδροφόρου υπόκειται σε διακυμάνσεις λόγω της παλίρροιας. Ροή υπάρχει και στη ζώνη του αλμυρού και στη ζώνη του γλυκού νερού. Η ροή του αλμυρού υπόγειου νερού εκτρέπεται παράλληλα προς τη διεπιφάνεια, για να εκφορτιστεί κοντά στην ακτή.



Εικόνα 2.4: Γεωμετρικό σχήμα της ζώνης μετάβασης και υπόγειες ροές
(<http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg763e/ch5.htm>)

Η εξίσωση που περιγράφει το σχήμα και τη θέση της διεπιφάνειας είναι η εξίσωση των Ghyben – Herzberg (Fetter, 1994) και η εφαρμογή της, περιορίζεται σε περιπτώσεις κατά τις οποίες τα ρευστά βρίσκονται σε στατικές συνθήκες.:

$$z_{(x,y)} = [\rho_w / (\rho_s - \rho_w)] * h_{(x,y)}$$

όπου:

$z_{(x,y)}$: το βάθος της «διεπιφάνειας» κάτω από το επίπεδο της θάλασσας στη θέση (x,y)

ρ_w : η πυκνότητα του γλυκού νερού

ρ_s : η πυκνότητα του αλμυρού νερού

$h_{(x,y)}$: το υψόμετρο της ελεύθερης επιφάνειας του υδροφόρου από το επίπεδο της θάλασσας στη θέση (x,y).

Σύμφωνα με το νόμο Ghyben – Herzberg, η διεπιφάνεια θα πρέπει να τέμνει την υδροστατική στάθμη ακριβώς στην ακτή, κάτι το οποίο δεν είναι ακριβές. Η εμπειρία

έχει αποδείξει ότι οι υδροφόροι ορίζοντες είναι δυνατόν να εκφορτίζονται και μέσα στη θάλασσα από τον πυθμένα της, είτε μέσω ρωγμών είτε ως διάχυτη ροή.

Για υδροφόρους με μεγάλη κατακόρυφη εξάπλωση, η παραδοχή Dupuit, ότι δηλαδή οι ισοδυναμικές γραμμές είναι κατακόρυφες μπορεί να γίνει, οπότε το υδραυλικό φορτίο σε ένα σημείο της διεπιφάνειας μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ίσο με το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα σε εκείνο το σημείο. Η υπόγεια ροή σε παράκτιους υδροφόρους μπορεί να περιγραφεί με συνδυασμό των εξισώσεων Ghyben – Herzberg και Dupuit. Το μοντέλο Dupuit – Ghyben – Herzberg (Fetter, 1994) για μονοδιάστατη ροή σε παράκτιους υδροφόρους δίνει την παρακάτω έκφραση για τις x και z συντεταγμένες της διεπιφάνειας:

$$z = (2 q' x G / k)^{1/2}$$

όπου:

z : το βάθος της διεπιφάνειας κάτω από το επίπεδο της θάλασσας σε θέση που απέχει x από την ακτή προς το εσωτερικό

x : η απόσταση της θέσης από την ακτή

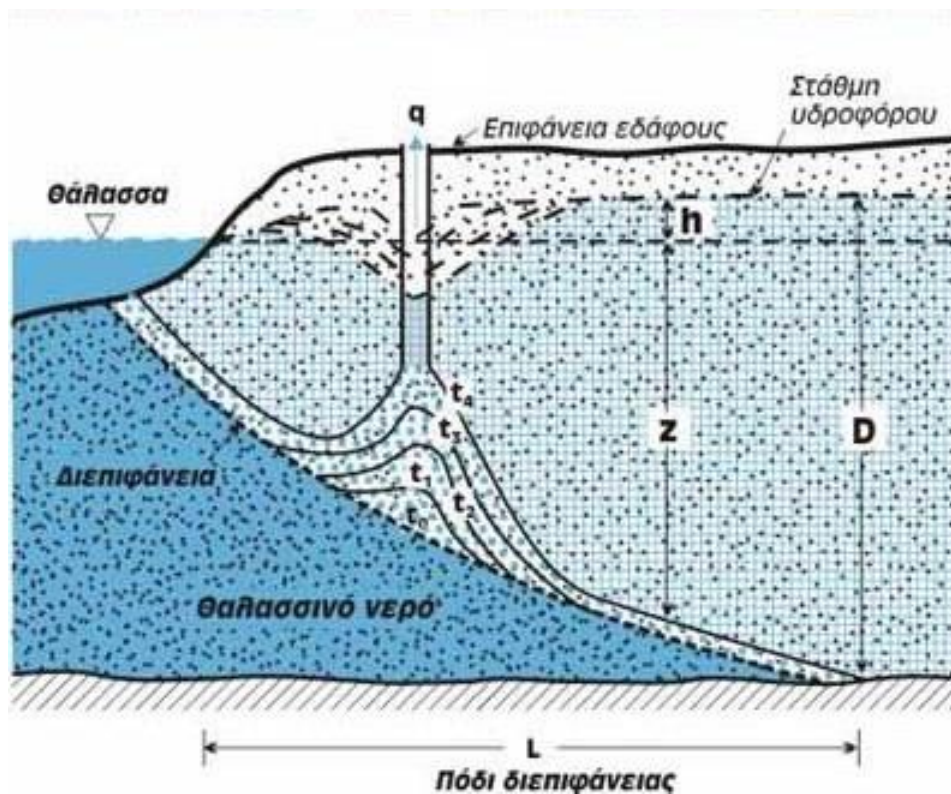
q' : η εκφόρτιση του υδροφόρου στην ακτογραμμή ανά μονάδα πλάτους

k : η υδροπερατότητα

G : ίσο με $\rho_w / (\rho_s - \rho_w)$

2.4.2 Κώνος Αντλησης-Διείσδυσης

Οι τιμές του πιεζομετρικού φορτίου καθορίζουν την ποσότητα του γλυκού νερού που εξέρχεται στη θάλασσα και του αλμυρού που εισέρχεται στον υδροφορέα. Σε περίπτωση που μία υδρογεώτρηση βρίσκεται πάνω από τη διεπιφάνεια, τότε διαμορφώνεται ένας κώνος άντλησης γύρω από αυτή. Όταν ο ρυθμός και η παροχή άντλησης δεν ελέγχονται, το αλμυρό θαλασσινό νερό εισέρχεται σε αυτή θεωρώντας ότι είναι ρυπασμένη λόγω του ότι πλέον αντλείται υφάλμυρο νερό.



Εικόνα 2.5: Κώνος άντλησης γύρω από την γεώτρηση
(<http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg763e/ch5.htm>)

Όταν αντλείται από γεώτρηση γλυκό νερό πάνω από μια διαχωριστική επιφάνεια, η τελευταία ανυψώνεται με τη μορφή κώνου με το μέγιστο ύψος κάτω από τη γεώτρηση. Όταν η απόσυρση του υπόγειου νερού κοντά στη διεπιφάνεια είναι μεγάλη, ο κώνος μπορεί να ανυψωθεί μέχρι τα φίλτρα της γεώτρησης και να αντληθεί αλμυρό νερό. Αν οι ρυθμοί άντλησης είναι μικροί, είναι δυνατό να επιτευχθεί μια νέα ισορροπία με το κωνοειδές μέρος της διεπιφάνειας να καταλαμβάνει μια ενδιάμεση θέση, μεταξύ της αρχικής θέσης και των φίλτρων της γεώτρησης χωρίς διείσδυση του αλμυρού νερού σε αυτήν.

Κατά προσέγγιση, το ύψος z του κώνου μπορεί να υπολογιστεί από την εφαρμογή του νόμου Ghyben-Herzberg:

$$Z = \frac{P_f \times S_w}{P_s - P_f}$$

όπου:

ρ_f : η πυκνότητα γλυκού νερού

ρ_s : η πυκνότητα θαλάσσιου νερού

S_w : η απόσυρση του υδροφόρου ορίζοντα.

3. ΑΙΤΙΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΟΥΝ ΥΦΑΛΜΥΡΑ ΥΔΑΤΑ

Οι κύριες αιτίες της υφαλμύρινσης των υπόγειων υδάτων, οι οποίες συχνά οδηγούν στην υποβάθμιση των γλυκών υπόγειων νερών, μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες: θαλάσσιοι παράγοντες, φυσικοί ηπειρωτικοί παράγοντες και ανθρωπογενείς δραστηριότητες (Mirzavand 2018, van Weert et al. 2009).

3.1 Φυσικά Αίτια

3.1.1 Αλατούχα υπόγεια ύδατα θαλάσσιας προέλευσης

➤ *Υπόγεια αλατούχα ύδατα (υπολειμματικά)*

Η ύπαρξη υπόγειων υφάλμυρων υδάτων σε βαθιά ιζηματογενή περιβάλλοντα μπορεί να οφείλεται σε υπολειμματικά ύδατα που αποθηκεύονται παράλληλα με την ιζηματογένεση σε ένα αλατούχο περιβάλλον. Παρ' όλα αυτά, τα αλατούχα υπόγεια ύδατα είναι εγγενώς συγγενή λόγω ενός πλήθους χημικών και φυσικών μετασχηματισμών που λαμβάνουν χώρα μετά την ιζηματογένεση. Οι υπολειμματικές άλμες μπορεί να αποτελούνται από εξατμισμένα ηπειρωτικά ή θαλάσσια ύδατα που έχουν θαφτεί ή διηθηθεί στο έδαφος. Οι κωνικές άλμες στις πολικές περιοχές μπορεί να προέρχονται από απομονωμένα ηπειρωτικά επιφανειακά ύδατα και από την ψύξη του θαλασσινού νερού. Τα ρευστά που βρίσκονται σε ιζηματογενή και κρυσταλλικά περιβάλλοντα ταξινομούνται συνήθως ως άλμες Na-Cl, Na-Ca-Cl, Ca-Na-Cl ή Ca-Cl₂. Οι υπολειμματικές άλμες συχνά απουσιάζουν στο ρηχό υπέδαφος ως αποτέλεσμα της φυσικής έκπλυσης τους στους σχηματισμούς, που προκαλείται από τις βροχοπτώσεις κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου. Συνήθως, η αλατότητα των υπόγειων υδάτων αυξάνεται φυσιολογικά καθώς βαθαίνουν, το οποίο προκαλείται από παράγοντες όπως ο χρόνος παραμονής του νερού στο έδαφος, οι χημικές αντιδράσεις και η ανάμιξη διαφορετικών πηγών νερού (Clark 2015).

➤ *Θαλάσσιες παραβάσεις*

Η διείσδυση του θαλασσινού νερού αποτελεί πρωταρχικό παράγοντα που οδηγεί στην υποβάθμιση της ποιότητας των υπόγειων υδάτων στους παράκτιους υδροφορείς. Συνήθως, στους παράκτιους υδροφορείς, το υπόγειο νερό κινείται προς τη θάλασσα ή το νερό του ωκεανού λόγω της υδραυλικής κλίσης και της δυναμικής ισορροπίας μεταξύ γλυκού και θαλασσινού νερού. Ωστόσο, οι μεταβολές στη στάθμη της θάλασσας/του ωκεανού ή η μείωση του υδροφόρου ορίζοντα μπορούν να προκαλέσουν μετατόπιση της υδραυλικής κλίσης και της δυναμικής ισορροπίας σε μεγάλες χρονικές περιόδους γεωλογικού χρόνου. Κατά συνέπεια, οι παράκτιοι υδροφορείς κατακλύζονται από την άφιξη του θαλασσινού νερού. Υπό αυτές τις συνθήκες, το αλμυρό νερό διεισδύει στο σύστημα υπόγειων υδάτων και όσο αυτό το μοτίβο παραμένει, οι παράκτιοι υδροφορείς θα συνεχίσουν να γίνονται αλμυροί (Monjerezi 2012).

➤ *Τυχαίες πλημμύρες από θαλασσινό νερό*

Το φαινόμενο αυτό, παρόμοιο με την υφαλμύριση των υπόγειων υδάτων λόγω της ανόδου της στάθμης της θάλασσας, αποδίδεται επίσης στην αύξηση της στάθμης του θαλασσινού νερού. Ωστόσο, αυτό συμβαίνει μέσα σε ένα συμπυκνωμένο χρονικό διάστημα. Σε περιόδους αυξημένης στάθμης της θάλασσας, όπως κατά τη διάρκεια ενός «τσουνάμι» ή λόγω της φθοράς των παράκτιων φραγμών που προκαλούνται από τις παλίρροιες, το αλμυρό νερό διεισδύει στις παράκτιες πεδιάδες. Αν και η διάρκεια των πλημμυρών είναι σχετικά σύντομη σε σύγκριση με τον ρυθμό με τον οποίο αυξάνεται η στάθμη του θαλασσινού νερού, μια μεγαλύτερη περιοχή των παράκτιων υδροφορέων μπορεί να επηρεαστεί από τις πλημμύρες. Ως αποτέλεσμα, ο ψεκασμός με θαλασσινό αλάτι στην επιφάνεια της χερσονήσου της γης, όπου καλλιεργούνται τρόφιμα, μπορεί να αυξήσει την αλατότητα του υπόγειου νερού στις παράκτιες περιοχές. Μέσω της επανάληψης αυτής της διαδικασίας, τόσο το επιφανειακό όσο και το θαλασσινό νερό διεισδύουν στα βαθύτερα τμήματα των υδροφορέων. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να εμφανιστεί σε παράκτιους υδροφορείς που βρίσκονται σε ξηρές και ημίξηρες περιοχές που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από εσωτερικές-αλμυρές λίμνες. Στην περίπτωση αυτή, ως αποτέλεσμα μίας ιστορικής πλημμύρας, η στάθμη του νερού της αλυκής ανεβαίνει και η ιζηματογένεση θα συμβεί σε μια ευρύτερη περιοχή. Τα εξατμιζόμενα ορυκτά μπορούν να συσσωρευτούν στις άκρες αυτών των λιμνών και να διεισδύσουν στους υποκείμενους υδροφορείς μέσω μιας διαδικασίας έκπλυσης (Mirzavand 2018).

➤ *Πλευρική διείσδυση θαλασσινού νερού*

Η παράκτια υφαλμύριση είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ της θάλασσας και ενός παράκτιου υδροφορέα. Η πλευρική διείσδυση μπορεί να ενταθεί από τη ροή των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων προς τη θάλασσα (van Weert et al., 2009).

➤ *Ψεκασμός θαλασσινού νερού*

Οι παράκτιες περιοχές μπορεί να έχουν υψηλά επίπεδα ατμοσφαιρικής υγρασίας λόγω της παρουσίας θαλάσσιων αλάτων από τους ψεκασμούς θαλασσινού νερού. Η βροχή αναμειγνύει αυτά τα αλατούχα αερολύματα, τα οποία στη συνέχεια απορροφώνται σε περιοχές εμπλουτισμού των υπόγειων υδάτων, οδηγώντας σε υφαλμύριση των υπόγειων υδάτων.

3.1.2 Αλατούχα υπόγεια ύδατα φυσικής ηπειρωτικής προέλευσης

➤ *Εξάτμιση επί ή σε κοντινή απόσταση από την επιφάνεια της γης*

Η εξάτμιση είναι ο κύριος μηχανισμός που ευθύνεται για την υφαλμύριση του εδάφους και των υπόγειων υδάτων σε περιοχές όπου ο υδροφόρος ορίζοντας είναι ρηχός (<5 m) και υπάρχει μεγάλη δυνατότητα εξάτμισης (Deverel and Gallanthine 1989). Μέσα σε κλειστές λεκάνες, οι άλμες που περιέχονται σε ορυκτά που υφίστανται εξάτμιση (όπως ο ασβεστίτης και ο αλίτης) διαλύονται στη ζώνη εμπλουτισμού, αυξάνοντας σταδιακά την αλατότητα του υπόγειου νερού. Η περιεκτικότητα σε άλατα αυξάνεται από τη ζώνη εμπλουτισμού προς τις περιοχές απόρριψης, λόγω υπερβολικής άντλησης και αρνητικού υδατικού ισοζυγίου. Ως αποτέλεσμα, παρατηρείται μετατόπιση των υδροχημικών χαρακτηριστικών από Ca-HCO_3 σε Na-Cl (Monjerezi 2012). Οι μεταβολές στη χημική σύσταση προκύπτουν κυρίως από τροποποιήσεις και αντιδράσεις που προκύπτουν από την κατεύθυνση της ροής εντός του υδροφορέα. Ωστόσο, στην πλειονότητα των περιπτώσεων, το επίπεδο των αλάτων, ιδίως των χλωριόντων, αυξάνεται έως ότου φτάσει στο σημείο του πλήρους κορεσμού με αλίτη. Αυτό συνοδεύεται από υδροχημικές συνθέσεις που αποτελούνται από Na-Mg-Cl-SO_4 .

➤ *Μείωση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων λόγω αλλαγής του κλίματος*

Είναι βέβαιο ότι μπροστά στην αλλαγή του κλίματος, το νερό και όλα τα στοιχεία του θα υποστούν σημαντικές αλλαγές τα επόμενα χρόνια. Κατά συνέπεια, θα υπάρξει αξιοσημείωτη αύξηση της μέσης βροχόπτωσης σε ορισμένες περιοχές, ιδίως στην κεντρική και βόρεια Ευρώπη, ενώ σε άλλα μέρη, όπως στις αναπτυσσόμενες χώρες, θα υπάρξει επιδείνωση των συνθηκών ξηρασίας. Οι αναμενόμενες μεταβολές στην περιοχή της Μεσογείου περιλαμβάνουν μετατοπίσεις στα πρότυπα βροχόπτωσης, με αποτέλεσμα τη συχνότερη εμφάνιση έντονων βροχοπτώσεων. Για το έθνος μας, αυτό σημαίνει ότι, παρόλο που μπορεί να λαμβάνουμε την ίδια ποσότητα βροχοπτώσεων κάθε χρόνο με το παρελθόν, η κατανομή του νερού δεν θα προάγει την αναπλήρωση των φυσικών δεξαμενών νερού, όπως συνέβαινε στο παρελθόν. Είναι ευρέως αναγνωρισμένο πως όταν τεράστιες ποσότητες νερού φτάνουν σε σύντομο χρονικό διάστημα, το έδαφος δεν έχει αρκετό χρόνο για να τις φιλτράρει. Κατά συνέπεια, ένα σημαντικό μέρος του νερού από τις έντονες βροχοπτώσεις δεν αξιοποιείται και αντ' αυτού απορρέει.

Στην Ελλάδα, το σύνολο των αποθεμάτων έχει μειωθεί κατά 700 εκατομμύρια κυβικά μέτρα, το οποίο ισοδυναμεί με αποθέματα ενάμισι έτους. Η ετήσια χρήση έχει αυξηθεί στα 450 εκατομμύρια κυβικά μέτρα. Το ζήτημα θα ενταθεί περαιτέρω λόγω της ταυτόχρονης μείωσης του βάθους των γεωτρήσεων, το οποίο έχει μειωθεί έως και κατά 20 μέτρα.

➤ *Διάλυση φυσικών διαλυτών ορυκτών*

Γενικά, τα φαινόμενα της διάλυσης των πετρωμάτων από το νερό καλούνται καρστικά φαινόμενα. Η δημιουργία καρστικών φαινομένων συνδέεται με την παρουσία πετρωμάτων τα οποία είναι ευδιάλυτα και αφήνουν ελάχιστο υπόλειμμα, με αποτέλεσμα να διευρύνονται τα διάκενα με τη διάλυσή τους και να γίνεται εφικτή η κίνηση του νερού μέσω αυτών στο υπέδαφος. Τα καρστικά πετρώματα που έχουν μεγάλη υδρογεωλογική σημασία για το Μεσογειακό χώρο, είναι κυρίως τα ανθρακικά πετρώματα (ασβεστόλιθοι και δολομίτες). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, καρστικοποιημένος υδροφόρος ονομάζεται ένας όγκος διαλυτού πετρώματος στο οποίο η ροή γίνεται κυρίως μέσα στα κανάλια διάλυσης, των οποίων το μέγεθος και η κατεύθυνση είναι ακανόνιστη. Το κύριο χαρακτηριστικό των παράκτιων καρστικοποιημένων υδροφορέων είναι η στενή υδραυλική τους σχέση με το αλμυρό νερό και η άμεση επαφή του γλυκού με αυτό. Η εμφάνιση του φαινομένου της υφαλμύρισης είναι δυνατόν να προκληθεί από κανάλια που καταλήγουν στον πυθμένα της θάλασσας ακόμα και σε μεγάλη απόσταση από την ακτή. Η άμεση σύνδεση του καρστικού συστήματος και της θάλασσας, οδηγεί σε μεγάλη διακύμανση της περιεκτικότητας των χλωριόντων στην υφάλμυρη ζώνη.

Συνεπώς, η υφαλμύριση στις ιζηματογενείς λεκάνες αποδίδεται συχνά στη διάλυση εξατμιστικών ορυκτών, όπως το αλάτι του αλογόνου, το οποίο συνήθως συναντάται ως υπόβαθρο των υδροφόρων οριζώντων σε πολλές ιζηματογενείς λεκάνες. Παρόλα αυτά, ο σχηματισμός ενός «θόλου άλατος» μπορεί να συμβεί όταν το «άλας» ανυψώνεται στην επιφάνεια του εδάφους (Richter and Kreitler 1993). Οι αποθέσεις αλογόνου μπορούν να βρεθούν μαζί με διάφορα άλλα άλατα, ανάλογα με την ημερομηνία απόθεσης τους. Σε αυτά, περιλαμβάνονται χλωριούχα άλατα όπως ο καρναλίτης ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ή ο σιλβίτης (KCl), θειικά άλατα όπως το πολυαιθυλένιο ($\text{K}_2\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{SO}_4) \cdot 4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), ο ανυδρίτης (CaSO_4), ο γύψος ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) και ανθρακικά άλατα όπως ο δολομίτης ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) και ο ασβεστίτης (CaCO_3). Η παρουσία αλίτη και άλλων ορυκτών μπορεί να μεταβάλλει τη χημική σύσταση των υπόγειων υδάτων και να οδηγήσει σε αύξηση της αλατότητας. Αυτές οι ποικιλίες αλατούχων διαλυμάτων μπορούν είτε να απελευθερωθούν στην επιφάνεια, είτε να ενσωματωθούν σε ένα υπόγειο υδατικό σύστημα. Σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από χαμηλές βροχοπτώσεις και υψηλούς ρυθμούς εξάτμισης, η διαδικασία της εξατμισοδιαπνοής οδηγεί σε αύξηση της συγκέντρωσης αλάτων των επιφανειακών υδάτινων σωμάτων και των ρηχών υπόγειων υδάτων. Κατά συνέπεια, τα άλατα μεταφέρονται στους υπόγειους υδάτινους πόρους λόγω των εποχιακών βροχοπτώσεων (Mirzavand 2018).

➤ *Φαινόμενα μεμβράνης*

Η πηγή αλατότητας των βαθιών άλμων σε ιζηματογενείς λεκάνες περιγράφηκε με τη χρήση της αρχής της επίπλευσης με μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης (Richter και Kreitler 1993). Το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής, είναι η

δημιουργία ροής υδραυλικού ρευστού από άλμες μέσω ενός ημιπερατού μέσου, όπως είναι οι σχιστόλιθοι και τα αργίλικα ιζήματα. Κατά συνέπεια, τα ουδέτερα μόρια νερού μπορούν να διασχίσουν τα στρώματα σχιστόλιθου ή αργίλου ευκολότερα από ό,τι τα διαλυμένα ιόντα. Η διαδικασία διήθησης των αλάτων συμβαίνει ως συνέπεια της ηλεκτροστατικής απώθησης μεταξύ των διαλυμένων ιόντων, η οποία προκαλείται από την παρουσία διπλών ηλεκτρικών στρωμάτων που περιβάλλουν τα σωματίδια αργίλου. Καθώς το υγρό ρέει μέσω της μεμβράνης, η διήθηση συγκεκριμένων θετικά φορτισμένων ιόντων (κατιόντων) και αρνητικά φορτισμένων ιόντων (ανιόντων) έχει ως αποτέλεσμα η μία πλευρά της μεμβράνης να γίνεται προοδευτικά πιο αλμυρή σε σύγκριση με την άλλη πλευρά (Bagheri et al., 2019- Mirzavand et al., 2018a, b). Μέσα σε βαθιές αλλουβιακές λεκάνες, τα στρώματα αργίλου ή σχιστόλιθου μπορεί να παρουσιάζουν υψηλή συμπίεση και να λειτουργούν ως ημιπερατές μεμβράνες. Ο ρόλος της αντίστροφης όσμωσης σε βαθιές αλμυρές ιζηματογενείς λεκάνες ως μηχανισμός υφαλμύρισης, έχει μελετηθεί ανά τα χρόνια. Ωστόσο, ο αντίκτυπος της διήθησης με μεμβράνες στην αλλοίωση των χημικών ενώσεων στα υπόγεια ύδατα, παραμένει αντικείμενο συζήτησης (Hanor 1987).

➤ Γεωθερμική δραστηριότητα

Σε περιοχές όπου επικρατούν πυριγενή πετρώματα, τα υπόγεια ύδατα έχουν τη δυνατότητα να μετατραπούν σε εκτεταμένη μεταλλοφορία. Υπό αυτές τις συνθήκες, αυτές οι πηγές νερού περιέχουν υψηλή συγκέντρωση ορυκτών και αναφέρονται ως θερμομεταλλικά νερά. Έτσι, αυτά τα συστήματα που βασίζονται σε γεωθερμικά νερά έχουν την ικανότητα να μεταφέρουν αλατούχα και θερμά υπόγεια ύδατα στην επιφάνεια. Οι θερμές πηγές περιέχουν συχνά υψηλά επίπεδα βρωμίου, φθορίου, νατρίου, αρσενικού και άλλων ρύπων, οι οποίοι αποτελούν κίνδυνο για την ποιότητα του γλυκού νερού, πέραν της περιεκτικότητας σε χλώριο (Edmunds et al., 2003- Vengosh et al., 2002a, b).

3.2 Ανθρωπογενή Αίτια

3.2.1 Αλατούχα υπόγεια ύδατα από ανθρωπογενείς δραστηριότητες

Αξιοσημείωτες περιπτώσεις υφαλμύρισης των υπόγειων υδάτων που προκαλούνται από ανθρώπινες δραστηριότητες, περιλαμβάνουν την απόρριψη αποβλήτων από σπίτια, αγροκτήματα και βιομηχανίες, τη λειτουργία μονάδων αφαλάτωσης, τη χρήση οδικού αλατιού και την απελευθέρωση άλμης από κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου (Clark and Fritz 1997, Hanor 1987, Mirnejad et al. 2011, Vengosh et al. 2002a,b). Οι δραστηριότητες αυτές έχουν συχνά ως αποτέλεσμα την τοπική μόλυνση των υπόγειων υδάτινων πόρων με αλάτι και πιο συγκεκριμένα, η διάλυση των χρησιμοποιούμενων αλάτων στο οδόστρωμα για την απόψυξη των δρόμων, είναι σημαντικός λόγος υφαλμύρισης των επιφανειακών υδάτων. Ένα πρόσθετο σημαντικό

ζήτημα είναι η υψηλή περιεκτικότητα σε άλατα στα οικιακά λύματα που προκύπτει από τη χρήση απορρυπαντικών και αλάτων. Επιπρόσθετα, σε περιοχές που αντιμετωπίζουν λειψυδρία, χρησιμοποιούνται συχνά μολυσμένες πηγές νερού για άρδευση, με αποτέλεσμα τη συσσώρευση αλατιού στο έδαφος και στα υπόγεια ύδατα.

Οι γεωργικές δραστηριότητες μπορεί να προκαλέσουν υφαλμύριση των υπόγειων υδάτων και του εδάφους λόγω της υποβάθμισης της φυσικής φυτοκάλυψης και της άρδευσης των γεωργικών εκμεταλλεύσεων με αλμυρό νερό. Πιο συγκεκριμένα, η υφαλμύριση του εδάφους σε αρδευόμενες και ξηρές εκτάσεις συμβαίνει όταν ο υδροφόρος ορίζοντας του αλατούχου υπόγειου νερού βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια. Ως αποτέλεσμα, λόγω της ιδιότητας της τριχοειδούς λειτουργίας, το αλάτι μεταφέρεται στην επιφάνεια και η συγκέντρωση του αυξάνεται κατά την εξάτμιση. Η αλατότητα των γεωργικών λυμάτων καθορίζεται από διάφορους παράγοντες, όπως το ισοζύγιο αλάτων μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του εδάφους, την αλατότητα του ίδιου του εδάφους, την ποιότητα του νερού άρδευσης και τον ρυθμό με τον οποίο εφαρμόζεται κοπριά και λιπάσματα σε γεωργικές εκτάσεις (Hern and Feltz, 1998).

Σε ξηρά και ημίξηρα κλίματα, η άρδευση αλατούχων εδαφών μπορεί να οδηγήσει σε έκπλυση αλάτων στα αποθέματα υπόγειων υδάτων. Η μόλυνση των υπόγειων υδάτων συμβαίνει όταν οι άλμες από τα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου αναμειγνύονται με γλυκό νερό ως αποτέλεσμα της εξόρυξης πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Μέθοδοι διάθεσης, όπως η επιφανειακή διάθεση, οι επιφανειακοί λάκκοι χωρίς επικάλυψη και τα φρεάτια έγχυσης μπορούν επίσης να οδηγήσουν σε υφαλμύριση (Richter and Kreitler 1993). Η εξόρυξη αλατιού από λάκκους και η παρατεταμένη χρήση του, έχουν ως αποτέλεσμα τη διείσδυση άλμης σε δεξαμενές υπόγειων υδάτων, προκαλώντας έτσι την υφαλμύριση των υδροφορέων. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η διαδικασία της υφαλμύρισης των υδάτινων πόρων μέσω της χρήσης ενέσιμων γεωτρήσεων σε κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου, συμβαίνει μόνο όταν υπάρχει υδραυλική σύνδεση μεταξύ του ταμιευτήρα πετρελαίου ή φυσικού αερίου και του υδροφόρου ορίζοντα (Richter and Kreitler 1993). Οι αλλαγές στις χρήσεις γης και η υπερβολική άντληση από παράκτιους υδροφορείς είναι πρόσθετες ανθρωπογενείς δραστηριότητες που επηρεάζουν την αλατότητα των υδάτινων πόρων. Με την αύξηση του βάθους των γεωργικών γεωτρήσεων και την υπερβολική άντληση υπόγειων υδατικών πόρων, μεταβάλλεται η υδραυλική κλίση μεταξύ επιφανειακών και υπόγειων υδάτων. Κατά συνέπεια, οι άλμες των βαθιών υπόγειων υδάτων θα αναμειγνύονται με το γλυκό νερό μέσω της διαδικασίας της ανοδικής ροής (Mirzavand 2018).

4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ ΤΩΝ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΩΝ ΠΗΓΩΝ

4.1 Γενικά

Η παρουσία πολλών υφάλμυρων πηγών περιπλέκει τη διαδικασία προσδιορισμού της προέλευσης και του μηχανισμού υφαλμύρινης των υπόγειων υδάτων, καθιστώντας την σύνθετη. Η ανάλυση της χωρικής και χρονικής κατανομής των σταθερών και ραδιενεργών ισοτόπων (O, H, C, S, Sr, Br, B, Sm, Nd, U, Th, Cl και I) είναι μια πολύτιμη μέθοδος για τον εντοπισμό της προέλευσης και των διεργασιών πίσω από την υφαλμύρινη των υπόγειων υδάτων. Η θεμελιώδης ιδέα που διέπει τις ισοτοπικές και χημικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό των πηγών βασίζεται στην υπόθεση ότι τα διακριτικά χαρακτηριστικά της αρχικής πηγής παραμένουν αμετάβλητα καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας υφαλμύρινης. Ωστόσο, η αρχική ισοτοπική και χημική σύσταση της πηγής μπορεί να μεταβληθεί από διαδικασίες όπως η εξάτμιση, η αλληλεπίδραση νερού-πετρώματος και η διήθηση με μεμβράνες.

Ο συνδυασμός ισοτοπικών και υδρογεωχημικών προσεγγίσεων είναι ζωτικής σημασίας για την ανίχνευση της πηγής και του μηχανισμού υφαλμύρινης των υπόγειων υδάτων (Mirzavand 2018; Vengosh et al. 2002a, b).

4.2 Γεωχημικοί Ιχνηθέτες

Η θεμελιώδης ιδέα που διέπει όλες τις υδρογεωχημικές προσεγγίσεις, είναι ότι τα χημικά χαρακτηριστικά της αιτίας υφαλμύρινης υποτίθεται ότι παραμένουν αμετάβλητα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας υφαλμύρινης των υπόγειων υδάτων. Ωστόσο, η αλληλεπίδραση μεταξύ νερού και πετρώματος έχει τη δυνατότητα να μεταβάλει τη σύνθεση της εκάστοτε αιτίας, καθιστώντας δύσκολο τον προσδιορισμό τόσο αυτής όσο και του μηχανισμού της υφαλμύρινης (Mahmoodzadeh and Karamouz 2019, Vengosh 2005). Τα σύνθετα διαγράμματα διαφόρων ζευγών ιόντων, όπως Na^+/Cl^- , Br^-/Cl^- , I^-/Cl^- , $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$, $\text{Ca}^{2+}/\text{Cl}^-$, B/Cl^- , $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$, $\text{Cl}^-/\text{NO}_3^-$, K^+/Cl^- και $(\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+})/\text{SO}_4^{2-}$, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διάκριση των πρωταρχικών αιτών και την εξακρίβωση του μηχανισμού υφαλμύρινης των υπόγειων υδάτων. Τα δευτερεύοντα και τα κύρια συστατικά είναι παρόντα σε διαφορετικές αναλογίες στις διάφορες πηγές υφαλμύρινης. Ωστόσο, αυτά τα συνδυασμένα διαγράμματα μπορούν να χρησιμεύσουν ως γεωχημικοί δείκτες όταν υπάρχει ελάχιστη επίδραση από χημικές διεργασίες μετά την ανάμιξη γλυκών υπόγειων υδάτων και συγκεκριμένων υφάλμυρων πηγών.

Ως εκ τούτου, αυτά τα σύνθετα διαγράμματα είναι πολύτιμα εργαλεία για την ανάλυση της υψηλής περιεκτικότητας σε άλατα. Εναλλακτικά, σε διαφορετικές περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται συνήθως πιο συντηρητικές χημικές παράμετροι όπως το βρωμίδιο, το λίθιο, το χλωρίδιο και το ιώδιο. Οι συνδέσεις Cl-Br χρησιμοποιούνται συνήθως για τη διάκριση μεταξύ της προέλευσης υφαλμύρινης, είτε αυτές προέρχονται από μη

θαλάσσιο, είτε από θαλάσσιο παράγοντα. Το χλώριο (Cl) κατανέμεται επιλεκτικά έναντι του βρωμίου (Br) στα άλατα αλογόνου νατρίου (Na), καλίου (K) και μαγνησίου (Mg) κατά τη διαδικασία της καταβύθισης (Siemann and Schramm 2000). Κατά συνέπεια, οι άλμες που σχηματίζονται από τη διαδικασία διάλυσης του NaCl έχουν χαμηλό λόγο Br/Cl.

Οι άλμες που προέρχονται από εξατμισμένο θαλασσινό νερό ταξινομούνται με βάση τον υψηλό λόγο Br/Cl. Η τάση εξάτμισης του θαλασσινού νερού (SET) έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για την εξακρίβωση της πηγής που προκάλεσε υφαλμύριση σε διάφορες λεκάνες. Συνήθως, τα υδάτινα σώματα που επηρεάζονται από τη διάλυση του αλίτη και την ανάμιξη της άλμης από τη διάλυση του με το γλυκό νερό, βρίσκονται πάνω από τη θερμοκρασία ισορροπίας διαλυτότητας (SET). Από την άλλη πλευρά, το υφάλμυρο νερό που προέρχεται από εξατμισμένο θαλασσινό νερό βρίσκεται στη SET και ο αναμενόμενος μοριακός λόγος Na/Cl που προκύπτει από τη διάλυση του αλατος είναι περίπου 1. Τα δείγματα νερού που μελετήθηκαν παρουσιάζουν παρόμοιες μοριακές αναλογίες Na/Cl και Na προς Cl, υποδεικνύοντας ότι η αλατότητα πιθανώς οφείλεται στη διάσπαση του αλίτη. Τα δείγματα νερού που παρουσιάζουν αυξημένη περιεκτικότητα σε χλωριούχα (Cl), αν και έχουν μοριακό λόγο νατρίου/χλωριούχων (Na/Cl) κάτω από 1, ενδέχεται να έχουν υποστεί ανταλλαγή κατιόντων (Bagheri et al. 2014).

4.3 Ιχνηθέτες Ισοτόπων

Τα σταθερά ισότοπα, που είναι ανθεκτικά στις αλλαγές με την πάροδο του χρόνου, χρησιμεύουν ως εξαιρετικοί δείκτες για τον προσδιορισμό της προέλευσης και της διαδικασίας υφαλμύρισης (Clark 2015). Για τον συγκεκριμένο στόχο περιγράφονται τα ισότοπα που χρησιμοποιούνται συχνότερα σε υδρογεωλογικές μελέτες. Οι μεταβολές $\delta^{18}\text{O}$ και δD στο νερό αξιοποιούνται για τον προσδιορισμό της προέλευσης των υδάτινων πηγών. Ωστόσο, οι αρχικές ισοτοπικές τιμές των μορίων του νερού συχνά μεταβάλλονται λόγω της αραίωσης κατά την. Επιπλέον, οι συσχετίσεις δD - $\delta^{18}\text{O}$ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της αναλογίας γλυκού υπόγειου νερού και αλατούχου ή άλμης, κατά τη διείσδυση αλμυρού νερού (Yechieli and Wood 2002) ή για την εξέταση των ροών επιστροφής αρδευτικού νερού (Mirzavand 2018-Vengosh 2014). Οι σχέσεις δD - $\delta^{18}\text{O}$ μπορούν να αξιοποιηθούν για την ανάλυση της αλληλεπίδρασης νερού-πετρώματος, τη διερεύνηση των επιπτώσεων της εξάτμισης του θαλασσινού νερού, τη μελέτη της άμεσης διείσδυσης θαλασσινού νερού και την εξέταση της διαδικασίας “upcoming”. Αυτά τα ισότοπα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη διερεύνηση της επίδρασης της εξάτμισης και της διήθησης με μεμβράνες στην υφαλμύριση των υπόγειων υδάτων.

Τα φυσικά γλυκά και αλμυρά νερά μπορούν να διακριθούν χρησιμοποιώντας τον λόγο $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$. Το βόριο παρουσιάζει την τάση να υφίσταται προσρόφηση από οξείδια και αργιλικά ορυκτά, κυρίως σε περιβάλλοντα με υψηλή αλατότητα. Το $\delta^{10}\text{B}$ ενσωματώνεται επιλεκτικά σε ρυθμίσεις προσρόφησης, ενώ το υπόλοιπο διαλυμένο

βόριο συγκεντρώνεται στο $\delta^{11}\text{B}$ (Barth 1998). Το $\delta^7\text{Li}$ είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για τη διάκριση μεταξύ φυσικών γλυκών και αλμυρών υδάτων. Ο ισοτοπικός λόγος $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ αξιοποιείται για τον προσδιορισμό των διεργασιών της αποσάθρωσης και των πηγών του στροντίου. Επιπλέον, χρησιμοποιείται για την κατανόηση της ανάμιξης των υπόγειων υδάτων σε μια λεκάνη με διαφορετικούς γεωλογικούς σχηματισμούς και διαδρομές ροής. Ο ισοτοπικός λόγος $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της διαδικασίας υφαλμύρινσης που προκαλείται από την απόρριψη γεωργικών απορροών.

Έχουν διεξαχθεί διάφορα ερευνητικά προγράμματα για τη διερεύνηση της υπογραφής $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ σε συστήματα υπόγειων υδάτων με στόχο να προσδιοριστεί η πηγή των θεικών και η διαδικασία της υφαλμύρινσης. Γενικά, η αναγωγή των θεικών οδηγεί σε αύξηση του $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$, ενώ η οξείδωση των θεικών οδηγεί σε μείωση του $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ (Deverel and Gallanthine 1989).

Το ισότοπο $\delta^{37}\text{Cl}$ προτιμά να κατανέμεται στη στερεά φάση μέσω του σχηματισμού αλίτη από την εξάτμιση του θαλασσινού νερού. Κατά συνέπεια, οι τιμές $\delta^{37}\text{Cl}$ των υπόλοιπων άλμων και του ακολούθως σχηματιζόμενου αλίτη θα είναι χαμηλότερες. Η παρουσία μετεωρικού χλωριδίου υποδεικνύεται από μια σημαντική αναλογία $^{37}\text{Cl}/\text{Cl}$, η οποία παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της εξατμιστικής συγκέντρωσης και της ανακύκλωσης των αλάτων μέσω κατακρήμνισης και διάλυσης. Αντίθετα, άλλες πηγές αλάτων και άλμης, όπως οι άλμες πετρελαιοπηγών και τα άλατα δρόμων, παρουσιάζουν αξιοσημείωτη μείωση του λόγου $^{37}\text{Cl}/\text{Cl}$. Ομοίως, το σύγχρονο μετεωρικό νερό (MMW) αναμένεται να έχει υψηλότερη συγκέντρωση $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ σε σύγκριση με τα απολιθωμένα νερά (Clark 2015, Monjerezi 2012).

Το ισότοπο $\delta^{81}\text{Br}$ χρησιμοποιείται για τη μελέτη της διαδικασίας καταβύθισης αλάτων. Τα ισότοπα $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ χρησιμοποιούνται για τη διάκριση διαφόρων πηγών υφαλμύρινσης και την ποσοτικοποίηση του μεγέθους της αλληλεπίδρασης νερού-πετρώματος, καθώς και για την αξιολόγηση των μηχανισμών και του ιστορικού ανάμιξης στους υδροφορείς.

4.4 Τεχνικές Υδρογεωχημικής Μοντελοποίησης

4.4.1 Mass transfer models (MTM)

Η θερμοδυναμική προσέγγιση για τον προσδιορισμό της διαλυτότητας των ορυκτών και των κωδικών ειδογένεσης ισορροπίας μπορεί να επεκταθεί ώστε να ενσωματώσει μοντέλα μεταφοράς μάζας (MTM). Αυτά τα μοντέλα μας επιτρέπουν να αναπαράγουμε τις επιπτώσεις των γεωχημικών διεργασιών, όπως η διάλυση και η καταβύθιση των ορυκτών, η ανάμιξη των υπόγειων υδάτων, η ανταλλαγή κατιόντων και αερίων ή η απαέρωση. Η αρχή της MTM βασίζεται σε κώδικες εξειδίκευσης, όπου η μεταβολή της μάζας ρυθμίζεται από την κατακρήμνιση ή τη διάλυση των ορυκτών μέσω της ανταλλαγής αερίων με την ανοικτή ατμόσφαιρα ή το έδαφος. Ένα από τα διαθέσιμα μοντέλα είναι το PHREEQE, το οποίο μας επιτρέπει να προσομοιώσουμε τις διαδρομές

ανάμιξης και αντίδρασης, λαμβάνοντας υπόψη τις επιδράσεις της υδροδυναμικής διασποράς. Τα προγράμματα λογισμικού SOLMINEQ. 88 δημιουργήθηκαν για την ενσωμάτωση των εξισώσεων του Pitzer (1987), οι οποίες είναι απαραίτητες για την ακριβή πρόβλεψη και για τη μοντελοποίηση των άλμων με υψηλή ιοντική δύναμη

4.4.2 Διαγράμματα εξέλιξης υδρογεωχημικών όψεων

Διάφορα μοντέλα έχουν προταθεί για την εξέλιξη των υδροχημικών όψεων, συμπεριλαμβανομένων των Piper (1944), Durov (1948), Stif (1951) και του διαγράμματος εξέλιξης των υδροχημικών όψεων (HFE-D). Τα διαγράμματα Piper και Durov σχεδιάστηκαν αρχικά ως εργαλεία για την κατηγοριοποίηση του νερού, τον εντοπισμό της πιθανής ανάμιξης αλμυρού και γλυκού νερού και την υποβοήθηση της ανάλυσης των παραγόντων που επηρεάζουν την ποιότητα του νερού (Shelton et al., 2018).

5. ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ

5.1 Γενικά

Πολυάριθμες σύνοδοι κορυφής και συνέδρια πραγματοποιούνται κάθε χρόνο σε όλο τον κόσμο για την αντιμετώπιση του προβλήματος της υφαλμύρινης των υδροφορέων, και ιδιαίτερα των παράκτιων. Η πιο σημαντική συνάντηση για την εισροή αλμυρού νερού σε συστήματα υπόγειων υδάτων ιδρύθηκε το 1968 με το όνομα «Saltwater Intrusion Meeting» (SWIMs). Πρόσφατα, τα SWIMs συζητούνται περισσότερο για τη μοντελοποίηση των υδάτινων πόρων, την υδρογεωλογία, την υδρογεωχημεία και τις ισοτοπικές μελέτες των υπόγειων υδάτων. Επίσης, το 2001 ιδρύθηκε μια ειδική ομάδα στην Καρταχένα η οποία πήρε την ονομασία της από τα αρχικά των λέξεων «Saltwater Intrusion In Coastal Aquifers» (SWICA), δηλαδή εισβολή αλμυρού νερού σε παράκτιους υδροφορείς, για να διερευνήσει το θέμα της διείσδυσης αλμυρού νερού σε παγκόσμια κλίμακα. Έτσι, όπως γίνεται αντιληπτό, το θέμα της υφαλμύρινης των υπόγειων υδάτων αποτελεί παγκόσμια ανησυχία και αποτελεί σοβαρό πρόβλημα ιδιαίτερα σε άνυδρες και ημίξηρες περιοχές, όπου τα υπόγεια ύδατα αποτελούν ζωτικό πόρο.

Για την αποτελεσματική αντιμετώπιση του ζητήματος της διείσδυσης του θαλασσινού νερού, είναι κρίσιμη η κατανόηση των πηγών και του μηχανισμού της υφαλμύρινης του συστήματος των υπόγειων υδάτων. Ως εκ τούτου, πολλοί ερευνητές σε όλο τον κόσμο χρησιμοποιούν υδρογεωχημικά διαγράμματα ανάμειξης, γεωηλεκτρικά μοντέλα και ισοτοπικές τεχνικές για τον προσδιορισμό της προέλευσης και του μηχανισμού της αλάτωσης των υπόγειων υδάτων.

Ωστόσο, η πιο ευνοϊκή προσέγγιση είναι η προληπτική διαχείριση του υδροφόρου, προκειμένου να διατηρηθεί ο έλεγχος της σφήνας του θαλασσινού νερού (το όριο μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού) εντός αποδεκτών ορίων. Παρ' όλα αυτά, σε πολλές περιπτώσεις, το ζήτημα είναι αποτέλεσμα παρελθοντικών συνθηκών και οι προσπάθειες μπορούν να επικεντρωθούν αποκλειστικά στην ελαχιστοποίηση της πρόσθετης θαλάσσιας διείσδυσης ή/και στη μείωση της έκτασης του υφιστάμενου αλμυρού νερού. Υπό ορισμένες συνθήκες, ο υδροφόρος ορίζοντας μπορεί να είναι υπερβολικά μολυσμένος σε σημείο που να μην είναι δυνατή η αποκατάστασή του μέσω μεθόδων τεχνητού εμπλουτισμού. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η μόνη βιώσιμη λύση είναι να σταματήσει η χρήση του υδάτινου πόρου για την παροχή νερού, παρόλο που μπορεί να εξακολουθεί να είναι κατάλληλος για ορισμένους βιομηχανικούς και γεωργικούς σκοπούς.

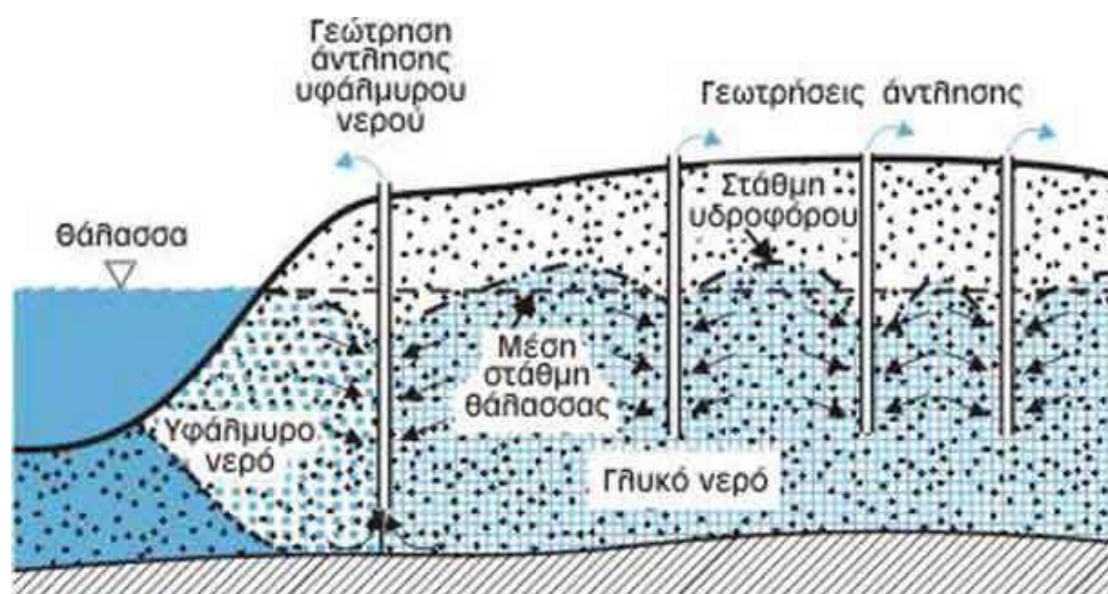
5.2 Μέθοδοι Αντιμετώπισης

5.2.1 Δημιουργία φραγμάτων

Μια συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνική για την αντιμετώπιση της υφαλμύρινσης είναι η τοποθέτηση διαφραγμάτων, τα οποία εμποδίζουν τη διείσδυση του θαλασσινού νερού στους παράκτιους υδροφορείς και κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

➤ Φράγματα άντλησης

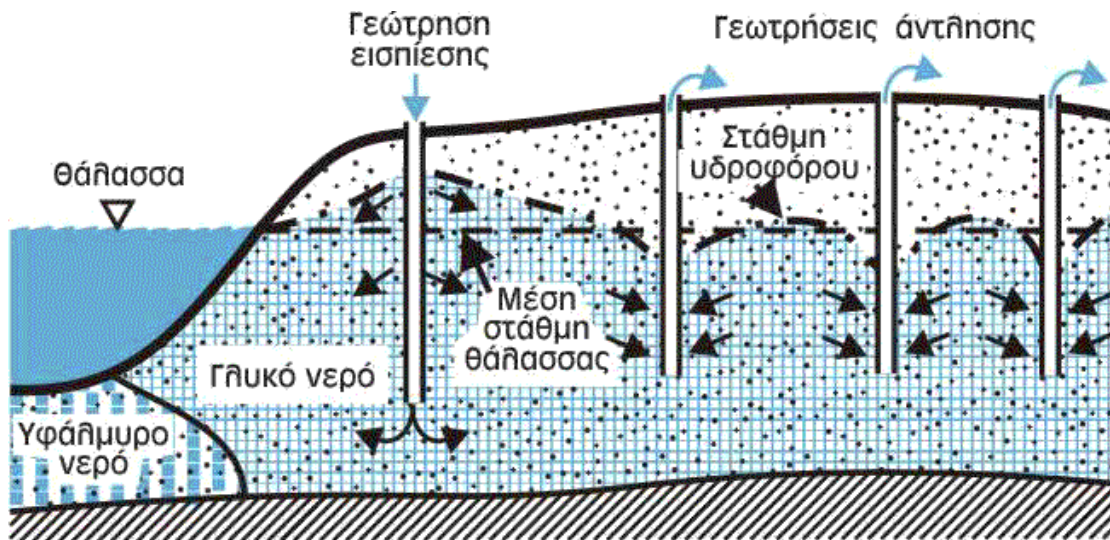
Τα διαφράγματα άντλησης σχηματίζονται από την ισχυρή άντληση γλυκού νερού σε κοντινή απόσταση από την ακτογραμμή και μέσω μιας ακολουθίας γεωτρήσεων. Έτσι, η μέθοδος αυτή εκτρέπει την κίνηση του γλυκού νερού προς τη θάλασσα, ενώ ταυτόχρονα εμποδίζει την εισροή θαλασσινού νερού στην ξηρά. Το αντλούμενο γλυκό νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη των αναγκών των παράκτιων περιοχών.



Εικόνα 5.1: Φράγμα από υπεράντληση κοντά στην ακτή
(<http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg763e/ch5.htm>)

➤ Φράγματα εμπλουτισμού

Τα πηγάδια αυτά χρησιμοποιούνται για την έγχυση γλυκού νερού, το οποίο σχηματίζει ένα φράγμα για την αποτροπή της διείσδυσης του θαλασσινού νερού. Το κόστος είναι υπέρογκο και είναι επιτακτική ανάγκη το νερό που χρησιμοποιείται να διατηρεί υψηλό επίπεδο ποιότητας, ώστε να μετριαστεί η πιθανότητα μόλυνσης του υδροφόρου ορίζοντα.



Εικόνα 5.2: Φράγμα από τεχνητό εμπλουτισμό κοντά στην ακτή
<http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg763e/ch5.htm>

➤ Τεχνητά υπόγεια φράγματα

Τα τεχνητά υπόγεια φράγματα δημιουργούνται παράλληλα στην ακτογραμμή, είτε με κατασκευή «κουρτίνας» από πασσαλοσανίδες, είτε με την κατασκευή τάφρων από άργιλο, είτε με εισπίεση μέσω γεωτρήσεων νερού και τσιμέντου ή αργίλου. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ένα στεγανό διάφραγμα μέσα στο νερό. Συχνά όμως το κόστος είναι απαγορευτικό και οι διαρροές από το φράγμα επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου.

➤ Βιολογικά φράγματα

Με τους βιολογικούς φραγμούς παρεμποδίζεται η διείσδυση της θάλασσας μέσω μικροβιακών φραγμάτων που ελέγχουν την υδραυλική αγωγιμότητα. Πρόκειται για καινοτόμες πειραματικές μεθόδους που είναι οικονομικά συμφέρουσες.

5.2.2 Ρύθμιση της στάθμης του υδροφορέα

Εκτός από την κατασκευή φραγμάτων, υπάρχουν και άλλες εναλλακτικές προσεγγίσεις για τη διατήρηση των επιπέδων του γλυκού νερού και την αποτροπή της διείσδυσης του θαλασσινού νερού.

Μέσω της αποτελεσματικής διαχείρισης των υδάτινων πόρων στις παράκτιες περιοχές, είναι εφικτό να αποτραπεί η μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και επιτυγχάνεται με τους εξής τρόπους:

1. Έλεγχος των αντλήσεων
2. Ανακατανομή-διασπορά των αντλήσεων

3. Τροποποιημένα σχέδια αντλήσεων
4. Άμεση διάθεση επιφανειακού νερού σε αντικατάσταση της χρήσης του υπόγειου νερού
5. Εγγειοβελτιωτικά έργα και αποστράγγιση
6. Εγκαταλειμμένες γεωτρήσεις
7. Χρήση πολλών μικρών αντλήσεων παρά λίγων με μεγάλη παροχή

Όσον αφορά την αντιμετώπιση της επιφανειακής διείσδυσης αλμυρού νερού στις εκβολές ποταμών, συνήθως εφαρμόζονται τα παρακάτω:

1. Η αποθήκευση του νερού των βροχοπτώσεων σε μεγάλους ταμιευτήρες, ώστε αυτό να απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια των ξηρασιών για να διατηρηθεί μια συνεχής ροή
2. Η κατασκευή επιφανειακών φραγμάτων, τα οποία παρεμποδίζουν την κίνηση του αλμυρού νερού πέραν ενός ορισμένου σημείου στην εκβολή
3. Συνδυαστικά μπορεί να εφαρμοσθεί η παραπάνω μέθοδος με υπόγειους φραγμούς εμπλουτισμού
4. Η κατασκευή καναλιών, που επιτρέπουν στο αλμυρό νερό να κινείται προς επιλεγμένες περιοχές της ενδοχώρας
5. Η εξασφάλιση εναλλακτικών πηγών διάθεσης νερού, που δεν απειλούνται από τη διείσδυση της θάλασσας

Ο τεχνητός εμπλουτισμός θεωρείται ευρέως ως μία από τις κύριες προσεγγίσεις για την αντιμετώπιση της υφαλμύρινσης. Με τον όρο αυτό, εννοείται η προσθήκη από τον άνθρωπο, επιπλέον υδατικών αποθεμάτων στα υπόγεια υδροφόρα στρώματα προκειμένου να αυξηθεί η ποσότητα του γλυκού νερού και συνεπώς να βελτιωθεί η ποιότητά του. Χρειάζεται βέβαια ιδιαίτερη προσοχή στην ποιότητα του νερού που διοχετεύεται, καθώς ρυπασμένο νερό είναι δυνατό να μολύνει σε μεγάλο βαθμό τον υδροφορέα και να μετατρέψει τις διαθέσιμες ποσότητες του νερού, σε ακατάλληλες για χρήση. Ο επιφανειακός τεχνητός εμπλουτισμός χρησιμοποιείται για την αντιστροφή της υδραυλικής κλίσης προς τη θάλασσα με πλημμύρες, όταν αυτό είναι εφικτό. Για την εφαρμογή αυτής της προσέγγισης, είναι ζωτικής σημασίας να υπάρχουν επιφανειακά ύδατα σε κοντινή απόσταση από τον υδροφόρο ορίζοντα. Με τον τρόπο αυτό εξαλείφεται η ανάγκη μεταφοράς νερού σε μεγάλες αποστάσεις, ελαχιστοποιώντας έτσι το κόστος.

Η αφαλάτωση του υφάλμυρου νερού για τη μετατροπή του σε γλυκό νερό είναι μια βιώσιμη προσέγγιση για τον μετριασμό του προβλήματος εκ των υστέρων. Με τον όρο αφαλάτωση, ονομάζεται η διαδικασία εξαγωγής των επιπλέον ιόντων από το θαλασσινό νερό προκειμένου να καταστεί κατάλληλο για ανθρώπινη κατανάλωση. Έτσι, δημιουργείται η δυνατότητα αντιμετώπισης του ζητήματος καθώς ενισχύονται οι υδάτινοι πόροι και υποστηρίζεται η μακροπρόθεσμη ανάπτυξη και πρόοδος των εν ανάγκη περιοχών. Ωστόσο, το κύριο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η υψηλή κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία των μονάδων αφαλάτωσης. Επιπλέον, οι συμβατικές πηγές ενέργειας, όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο,

εξαντλούνται και προκαλούν περιβαλλοντική ρύπανση λόγω της απελευθέρωσης πρόσθετων ρύπων.

5.2.3 Πειραματικές μέθοδοι

Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα Crystechsalin, το οποίο πήρε την ονομασία αυτή από τα αρχικά των λέξεων «Crystallisation Technologies for Prevention of Saline Water Intrusion», δηλαδή τεχνολογίες κρυσταλλοποίησης για την πρόληψη της υφαλμύρινσης, με τη χρήση χημικών μέσων μπορεί να δημιουργηθεί ένα διάφραγμα με στόχο την παρεμπόδιση της διείσδυσης της θάλασσας στο γλυκό νερό (Ziegenbalg et al, 2002).

Η τεχνολογία βασίζεται σε διεργασίες ανάλογες με αυτές που συμβαίνουν στη φύση. Οι εδαφικοί σχηματισμοί οδηγούνται τεχνητά σε διαδικασίες κρυστάλλωσης, και οι κρύσταλλοι που προκύπτουν χρησιμοποιούνται για την κατασκευή διαφραγμάτων που τοποθετούνται στην είσοδο του θαλασσινού νερού στους παράκτιους υδροφορείς. Συγκεκριμένα, για το σκοπό αυτό παράγονται υπέρκορα διαλύματα, και καθώς τα διαλύματα αυτά διέρχονται από τους υδροφορείς, παράγονται κρύσταλλοι που εμποδίζουν σημαντικά την κίνηση του θαλασσινού νερού. Συνεπώς, δημιουργείται έτσι ένα τεχνητό διάφραγμα με χημικά μέσα.

Οι βασικές πτυχές του έργου περιλαμβάνουν την πρόοδο των εγχύσεων, τις γεωφυσικές και γεωχημικές έρευνες, τον χαρακτηρισμό των αλληλεπιδράσεων αλμυρού και θαλασσινού νερού και την κατασκευή μιας μαθηματικής προσομοίωσης σε υπολογιστή για την ανάλυση της ροής και των δυνατοτήτων στεγανοποίησης των κατασκευασμένων υλικών. Ταυτόχρονα, διεξάγονται δοκιμές πεδίου σε διάφορες γεωλογικές περιοχές για να παρουσιαστεί η αποτελεσματικότητα των εγχύσεων στην αποτροπή της διείσδυσης του νερού.

Ωστόσο, η μέθοδος βρίσκεται ακόμα σε πειραματικό στάδιο, καθώς υπάρχει ανάγκη να προσδιοριστεί ο τρόπος με τον οποίο τα χημικά διαλύματα αλληλεπιδρούν με το γλυκό νερό και να αξιολογηθεί η μακροπρόθεσμη αποτελεσματικότητα της διαδικασίας σφράγισης. Τέλος, το κόστος της μεθόδου θα πρέπει να επανεκτιμηθεί για να επαληθευτεί η περιβαλλοντική και οικονομική σκοπιμότητά της.

5.3 Η Τρέχουσα Κατάσταση της Ελλάδας

Στην Ελλάδα, η διαχείριση της υφαλμύρινσης βρίσκεται ακόμη σε αρχικό στάδιο. Η ανεπάρκεια πρωτογενών δεδομένων σχετικά με την ποιότητα των υδάτων στη χώρα, η απουσία κεντρικής αρχής για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων και η μη άμεση συμμόρφωση με την οδηγία 2000/60/EK της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι μεταξύ των παραγόντων που συμβάλλουν σε αυτό.

Παρ' όλα αυτά, η πρωταρχική προσέγγιση για τον μετριασμό της υφαλμύρισης στην Ελλάδα περιλάμβανε κατά κύριο λόγο την εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού, σε αντίθεση με εναλλακτικές μεθόδους. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι έχουν αναληφθεί ορισμένες μεμονωμένες έρευνες και πρωτοβουλίες για την αντιμετώπιση του φαινομένου. Αυτές περιλαμβάνουν την εφαρμογή πειραματικών τεχνικών και την κατασκευή φραγμάτων για τον έλεγχο των επιφανειακών υδάτων και τη διατήρηση του φυσικού πόρου.

6. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΥΦΑΛΜΥΡΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

6.1 Γενικά

Τα αποτελέσματα της υφαλμύρισης είναι εξαιρετικά επιβλαβή για το φυσικό και το ανθρώπινο περιβάλλον με κυριότερες επιπτώσεις την υποβάθμιση των φυσικών και ευαίσθητων οικοσυστημάτων, την ακαταλληλότητα των υπόγειων νερών για ανθρώπινη χρήση και την ποιοτική υποβάθμιση των εδαφών από τη μακρόχρονη χρήση υφάλμυρου νερού.

Σε περιοχές όπου υπάρχουν υπόγεια ύδατα και υπάρχει υψηλή ζήτηση για ύδρευση, η υποβάθμιση των υδροφορέων δημιουργεί προκλήσεις για την κάλυψη των αναγκών ύδρευσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους ζωής ως συνέπεια των δαπανηρών εναλλακτικών λύσεων, όπως το εμφιαλωμένο νερό.

Από αρδευτικής άποψης, η ανεπάρκεια νερού και η έλλειψη υποδομών για την ανάπτυξη της άρδευσης δημιουργούν πολλαπλές προκλήσεις. Κατά συνέπεια, παρατηρείται ελλειμματική άρδευση, με αποτέλεσμα τη χρήση υφάλμυρου νερού για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών, αυξάνοντας έτσι τα επίπεδα αλατότητας του εδάφους. Το γεγονός αυτό ευθύνεται για τη μείωση της δυναμικότητάς τους, την κλιμάκωση του κόστους των παραγόμενων προϊόντων και τη μείωση του αριθμού των πωλήσεων. Οι αγρότες καταφεύγουν στην αυξημένη χρήση νερού και στην εφαρμογή πιο ισχυρών λιπασμάτων ως αποτέλεσμα της μείωσης της παραγωγικότητας του εδάφους. Κατά συνέπεια, αυτό οδηγεί σε αυξημένες δαπάνες και μειωμένα έσοδα, μαζί με μια σημαντικότερη μείωση της καλλιεργούμενης έκτασης. Επιπλέον, έχει ως αποτέλεσμα την επικράτηση της προσωρινής απασχόλησης κατά τη διάρκεια συγκεκριμένων εποχών.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά το περιβάλλον, τα υφάλμυρα ύδατα εμποδίζουν την ανάπτυξη των φυτών λόγω αφυδάτωσης, παρεμπόδισης της πρόσληψης αζώτου και δηλητηρίασης με ιόντα χλωρίου. Η αλατότητα προάγει τη συσσώρευση αιωρούμενων σωματιδίων (όπως ο άργιλος) σε μεγαλύτερα κομμάτια, επιτρέποντας τη διείσδυση αφύσικης ποσότητας ηλιακού φωτός. Αυτό μπορεί να καψαλίσει τα ενδημικά είδη φυτών και να ενθαρρύνει τον πολλαπλασιασμό τοξικών, παρασιτικών ή ιδιαίτερα ανταγωνιστικών φυκών. Επιπλέον, όταν τα αλμυρά νερά μολύνουν το έδαφος, η δομή και η ακεραιότητα του εδάφους υποβαθμίζονται, επιτρέποντας τη διάβρωση. Σύμφωνα με το Ινστιτούτο Νερού, Περιβάλλοντος και Υγείας του Πανεπιστημίου των Ηνωμένων Εθνών, τα υπερβολικά αλμυρά εδάφη επιδεινώνουν την κλιματική αλλαγή, προτρέποντας τις εκπομπές περισσότερων αερίων του θερμοκηπίου.

Επιπρόσθετα, το υφάλμυρο νερό μπορεί να παρουσιάσει συμπτώματα και στην ανθρώπινη υγεία. Το νάτριο και το κάλιο έχουν μια μοναδική σχέση που επιτρέπει, στη σωστή ισορροπία τους, να απομακρύνουν τα ανεπιθύμητα υγρά του σώματος από την κυκλοφορία του αίματος. Όταν προσλαμβάνεται πολύ αλάτι, η αρμονία μεταξύ των επιπέδων νατρίου και καλίου διαταράσσεται και τα νεφρά αδυνατούν να αποβάλουν αρκετό νερό από την κυκλοφορία του αίματος. Τα νεφρά υπερφορτώνονται, οδηγώντας

σε ανεπανόρθωτες βλάβες, συμπεριλαμβανομένων των λίθων στα νεφρά και της συνολικής ανεπάρκειας. Επιπλέον, τα μη απομακρυσμένα υγρά συσσωρεύονται και προκαλούν υψηλή αρτηριακή πίεση και καρδιακά προβλήματα.

Ακόμη, προβλήματα εμφανίζονται όταν το νερό στα δίκτυα μεταφοράς γίνεται υφάλμυρο, εξαιτίας της ιδιαίτερης διαβρωτικής του ικανότητας. Έτσι, μειώνεται η διάρκεια ζωής του δικτύου, ενισχύονται οι απώλειες λόγω διαρροών και αυξάνεται το λειτουργικό κόστος συντήρησης και διαθεσιμότητας του δικτύου.

Τέλος, σε ακραίες περιπτώσεις παρατηρούνται έμμεσες επιπτώσεις και στον τομέα της βιοποικιλότητας, αφού θα μειωθεί η ζωή λόγω της έλλειψης νερού για επιβίωση και παράλληλα αυξάνεται το ποσοστό εμφάνισης του φαινομένου της απερίημωσης σε ορισμένες περιοχές, όπου το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα έντονο.

6.2 Ευρωπαϊκή Νομοθεσία σχετικά με την υφαλμύριση

Το 2003, η Ευρωπαϊκή Ένωση εξέδωσε την οδηγία 2000/60/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 23ης Οκτωβρίου 2003, για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων. Σκοπός της οδηγίας ήταν να θεσπίσει ένα πλαίσιο για την προστασία των εσωτερικών επιφανειακών, των μεταβατικών, των παράκτιων υδάτων και των υπόγειων υδάτων.

Κύριος σκοπός του πλαισίου αυτού είναι να αποτραπεί η περαιτέρω υποβάθμιση των υδάτινων πόρων και, κατ' επέκταση, των οικοσυστημάτων των οποίων η λειτουργία εξαρτάται από τα ύδατα αυτά. Επίσης, στοχεύει στην προώθηση της βιώσιμης χρήσης των υδάτων, στην προστασία και βελτίωση του παράκτιου περιβάλλοντος, στη διασφάλιση της σταδιακής μείωσης της ρύπανσης των υδάτων και στον μετριασμό των επιπτώσεων των φυσικών κινδύνων, όπως οι πλημμύρες και οι ξηρασίες.

Με τον τρόπο αυτό θα διασφαλιστεί η ποιότητα και η ποσότητα των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, θα μειωθεί η ρύπανση, θα προστατευθούν τα χωρικά και θαλάσσια ύδατα και, τέλος, μέσω διεθνών συμφωνιών, θα ελαχιστοποιηθούν σταδιακά οι ρύποι από τα ύδατα, έως ότου τα επίπεδα των ουσιών που υπάρχουν σε αυτά να μην υπερβαίνουν τα καθορισμένα όρια.

Κάθε κράτος μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης πρέπει να συμμορφώνεται με την οδηγία 2000/60/EK και να ελέγχει την ποιότητα των υδάτων του. Στην Ελλάδα, το 2003 ψηφίστηκε ο Νόμος 3199/2003 (ΦΕΚ 280Α/9-12-2003) «Προστασία και διαχείριση των υδάτων - Εναρμόνιση με την Οδηγία 2000/60/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2003». Ο νόμος αυτός θεσπίζει τη δημιουργία ενός ενιαίου φορέα διαχείρισης.

Το μοναδικό νομικό πλαίσιο που σχετίζεται με το θέμα της υφαλμύρισης των υδάτων είναι η ισχύουσα Κοινή Υπουργική Απόφαση ΚΥΑ 15393, ΦΕΚ 1022Β/5-8-2002 και η τροποποίησή της με το ΦΕΚ 1002Β/18-7-2005, για την κατάταξη των δημόσιων και

ιδιωτικών έργων και δραστηριοτήτων σε κατηγορίες σύμφωνα με το άρθρο 3 του Ν. 1650 /1986 όπως αντικαταστάθηκε από το άρθρο 1 του Ν. 3010/2002 «Εναρμόνιση του Ν. 1650/1986 με τις Οδηγίες 97/11/ΕΕ και 96/61/ΕΕ κ.α.».

Η παρούσα κοινή υπουργική απόφαση κατηγοριοποιεί τα έργα που αποσκοπούν στην πρόληψη ή την αντιμετώπιση της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων ή του εδάφους ως υδραυλικά έργα, συγκεκριμένα στην πρώτη υποκατηγορία της κατηγορίας Α. Τα έργα αυτά ταξινομούνται ως έργα που ενδέχεται να προκαλέσουν σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω της φύσης, του μεγέθους και της έκτασής τους. Η ταξινόμηση αυτή βασίζεται στο Νόμο 1650/1986, ΦΕΚ 160Α/18-10-1986, ο οποίος έχει αντικατασταθεί από το Νόμο 3010/2002, ΦΕΚ 91Α/25/4/2002. Τα έργα αυτά υπόκεινται σε γενικούς και ειδικούς περιβαλλοντικούς όρους λόγω των επιπτώσεων τους στο περιβάλλον. Οι όροι αυτοί επιβάλλονται μετά την υποβολή Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων.

7. ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΧΗΜΕΙΑ ΤΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

7.1 Φυσικοχημικές Παράμετροι Υδάτων

Η ποιότητα των υπόγειων υδάτων καθορίζεται από διάφορες φυσικοχημικές παραμέτρους που πρέπει να εκτιμώνται επιτόπου κατά τη στιγμή της συλλογής δειγμάτων νερού στο πεδίο ή το συντομότερο δυνατόν στο εργαστήριο. Στην παρούσα εργασία θα συνυπολογιστούν συγκεκριμένες παράμετροι προκειμένου να αξιολογηθούν οι εν λόγω πηγές. Οι παράμετροι αυτές περιγράφονται κατωτέρω.

➤ *Θερμοκρασία*

Αποτελεί ιδιαίτερα σημαντική παράμετρο, μιας και η θερμοκρασία των υπόγειων νερών είναι αναγκαίο να λαμβάνεται υπόψη κατά τη μελέτη της χημείας τους διότι παρέχει πληροφορίες ακόμα και για την προέλευσή τους. Καθορίζεται από τη θερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της Γης και συσχετίζεται με τη "γεωθερμική βαθμίδα" που χαρακτηρίζει κάθε περιοχή, αυξάνοντας περίπου κατά 1°C ανά 33m βάθος από την επιφάνεια της γης. Η θερμοκρασία του υπόγειου νερού επηρεάζεται και από τις μεταβολές της πιεζομετρικής επιφάνειας του υδροφορέα (Καλλέργης, 2000).

➤ *Συγκέντρωση του ιόντος υδρογόνου (pH)*

Το pH είναι ένα ποσοτικό μέτρο της συγκέντρωσης των ιόντων υδρογόνου σε ένα διάλυμα που περιέχει νερό. Πιο συγκεκριμένα, το pH είναι ένα μέτρο του αρνητικού λογαρίθμου της συγκέντρωσης ιόντων υδρογόνου $[H^+]$ σε ένα διάλυμα. Η κλίμακα pH εκτείνεται από το 0 (πολύ όξινο) έως το 14 (πολύ αλκαλικό). Το pH επηρεάζεται από τη θερμοκρασία. Το pH των περισσότερων φυσικών νερών κυμαίνεται στο εύρος από 4 (όξινο) έως 9 (αλκαλικό). Κοντά σε οξειδωμένα θειούχα, οι συγκεντρώσεις θειικού οξέος μπορεί να φτάσουν σε επίπεδα όπου το pH είναι ίσο ή μικρότερο από 2, ενώ αλκαλικές συνθήκες με pH 9 παρατηρούνται σε εδάφη και λίμνες της ερήμου (Κελεπερτζής, 2000).

➤ *Δυναμικό οξειδοαναγωγής (Eh)*

Στις οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις, τα στοιχεία υφίστανται αλλαγή στην οξειδωτική τους κατάσταση μέσω της απόκτησης ή της απελευθέρωσης ηλεκτρονίων. Όταν αποκτάται ένα ηλεκτρόνιο, το στοιχείο υφίσταται απώλεια θετικού σθένους, με αποτέλεσμα την αναγωγή του. Εάν ένα στοιχείο χάσει ένα ηλεκτρόνιο, υφίσταται οξείδωση. Η οξείδωση και η αναγωγή συμβαίνουν ταυτόχρονα στην ίδια αντίδραση, γνωστή ως αντίδραση οξειδοαναγωγής. Κάθε διακριτή δραστηριότητα αναφέρεται ως ημιαντίδραση, οξείδωση ή αναγωγή. Όταν το δυναμικό οξειδοαναγωγής είναι 50,

υποδηλώνει οξειδωτικές συνθήκες αν έχει θετική τιμή και αναγωγικές συνθήκες αν έχει αρνητική τιμή.

➤ *Ολικά διαλυμένα στερεά (T.D.S.)*

Τα ολικά διαλυμένα στερεά (TDS) αναφέρονται στο σύνολο των αλάτων που είναι διαλυμένα στο νερό και συνήθως κυμαίνονται μεταξύ 100-100.000 mg/l (συνήθως κάτω από 500 mg/l). Εκφράζουν μια μέτρηση που δεν περιλαμβάνει τα αιωρούμενα σωματίδια, τα κολλοειδή και τα διαλυμένα αέρια και αποτελεί αξιόπιστο δείκτη της μεταλλικότητας των υπόγειων νερών. Η ποσότητα και η σύνθεση των διαλυμένων αλάτων εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά και την φύση των πετρωμάτων, την ταχύτητα ροής του νερού και τη διάρκεια που το υπόγειο νερό παραμένει σε επαφή με τα πετρώματα αυτά. Τα υπόγεια ύδατα έχουν γενικά μεγαλύτερη ποσότητα διαλυμένων αλάτων σε σύγκριση με τα επιφανειακά ύδατα, λόγω της παρατεταμένης επαφής τους με τις ευδιάλυτες ουσίες των γεωλογικών στρωμάτων (Καλλέργης, 2000).

Σύμφωνα με την ταξινόμηση Davis – De Wiest (1966):

TDS	Χαρακτηρισμός νερού
0-1,000	Γλυκό
1,000-10,000	Υφάλμυρο/γλυφό
10,000-100,000	Αλμυρό
>100,000	Άλμη/σαλαμούρα

Πίνακας 7.1: Χαρακτηρισμός των υπόγειων υδάτων βάση των ολικά διαλυμένων στερεών (T.D.S.)

➤ *Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (E.C.)*

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού αφορά την ικανότητά του να μεταφέρει ηλεκτρικά φορτία. Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (E.C.) είναι το μέτρο της αγωγιμότητας ενός κυβικού εκατοστού νερού σε θερμοκρασία 25°C. Η μονάδα μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι τα microSiemens ανά cm (μS/cm), η οποία είναι το αντίστροφο της ηλεκτρικής αντίστασης και χαρακτηρίζεται από πολύ μικρές τιμές. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της συγκέντρωσης των διαφόρων ιόντων στο νερό. Η αύξηση της συγκέντρωσης ιόντων οδηγεί σε υψηλότερη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Επιπλέον, η κινητικότητα και η ισχύς των ιόντων, καθώς και η θερμοκρασία, επηρεάζουν την αγωγιμότητα. Όσον αφορά τον τελευταίο παράγοντα, μια αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1°C οδηγεί σε αύξηση της αγωγιμότητας κατά περίπου 2% (Καλλέργης, 2000). Για την εκτίμηση των ολικών διαλυμένων στερεών (T.D.S.), μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει την εξίσωση:

$$T.D.S. = K_e \times E.C.,$$

όπου το E.C. αντιπροσωπεύει την ηλεκτρική αγωγιμότητα και το K_e είναι μια σταθερά. Η τιμή του K_e κυμαίνεται από 0,55 έως 0,80, ανάλογα με τις καταστάσεις.

➤ Σκληρότητα

Η σκληρότητα του νερού αποδίδεται στην ύπαρξη δισθενών μεταλλικών κατιόντων ασβεστίου και μαγνησίου, τα οποία υφίστανται χημική αντίδραση με το σαπούνι, με αποτέλεσμα το σχηματισμό ιζήματος (Καλλέργης, 2000). Η σκληρότητα μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε δύο τύπους: την προσωρινή σκληρότητα, που προκαλείται από τη διάλυση των διττανθρακικών αλάτων ασβεστίου και μαγνησίου, και τη μόνιμη σκληρότητα, που προκαλείται από τη διάλυση των θεικών και χλωριούχων αλάτων ασβεστίου και μαγνησίου. Η συνολική σκληρότητα είναι το άθροισμα των τιμών της παροδικής και της μόνιμης σκληρότητας. Η ολική σκληρότητα μετριέται είτε απ' ευθείας με τη μέθοδο της τιτλοδότησης, είτε υπολογίζεται σύμφωνα με τις συγκεντρώσεις των ιόντων ασβεστίου και μαγνησίου με τον ακόλουθο τύπο:

$$H\tau=2.5Ca + 4.1Mg.$$

Η σκληρότητα προσδιορίζεται ποσοτικά σε χιλιοστόγραμμα ανά λίτρο (mg/l) ισοδύναμου ανθρακικού ασβεστίου ($CaCO_3$), καθώς και σε βαθμούς σκληρότητας. Ωστόσο, λόγω των διαφορετικών επιπέδων σκληρότητας που απαντώνται σε διάφορα κράτη (όπως η Γαλλία, η Αγγλία, οι Ηνωμένες Πολιτείες, η Γερμανία και η Ρωσία), η προηγούμενη μέθοδος έκφρασης της σκληρότητας έχει απορριφθεί υπέρ της χρήσης του ισοδύναμου $CaCO_3$ mg/l ως πρότυπης μονάδας μέτρησης.

Σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά Sawyer (1994):

Ολική Σκληρότητα mg/l $CaCO_3$	Χαρακτηρισμός νερού
0-75	Μαλακό
75-100	Μέτρια σκληρό
150-300	Σκληρό
>300	Πολύ σκληρό

Πίνακας 7.2: Χαρακτηρισμός νερού βάση σκληρότητας σύμφωνα με Sawyer (1994)

➤ Αλκαλικότητα

Η αλκαλικότητα αναφέρεται στην ικανότητα του νερού να εξουδετερώνει οξέα, η οποία αποδίδεται στην ύπαρξη διττανθρακικών (HCO_3^-), ανθρακικών (CO_3^{2-}) και υδροξυλικών ιόντων (OH^-) στο νερό. Η πλειονότητα των ανθρακικών και διττανθρακικών ιόντων που βρίσκονται στα υπόγεια ύδατα προέρχεται από τη διάλυση ανθρακικών πετρωμάτων. Η διαδικασία αυτή επιταχύνεται από την απορρόφηση διοξειδίου του άνθρακα από το νερό, από την ατμόσφαιρα και το έδαφος (Καλλέργης, 2000). Κατά συνέπεια, η παρουσία όξινων ανθρακικών ιόντων είναι σημαντικά πιο έντονη σε σύγκριση με άλλα ιόντα. Λόγω των προαναφερθέντων λόγων, η μέτρηση της αλκαλικότητας αναφέρεται σε χιλιοστόγραμμα ανά λίτρο (mg/l) ισοδύναμου ανθρακικού ασβεστίου ($CaCO_3$). Το εργαστήριο προσδιορίζει την αλκαλικότητα με τιτλοδότηση χρησιμοποιώντας διάλυμα H_2SO_4 .

➤ Οξύτητα

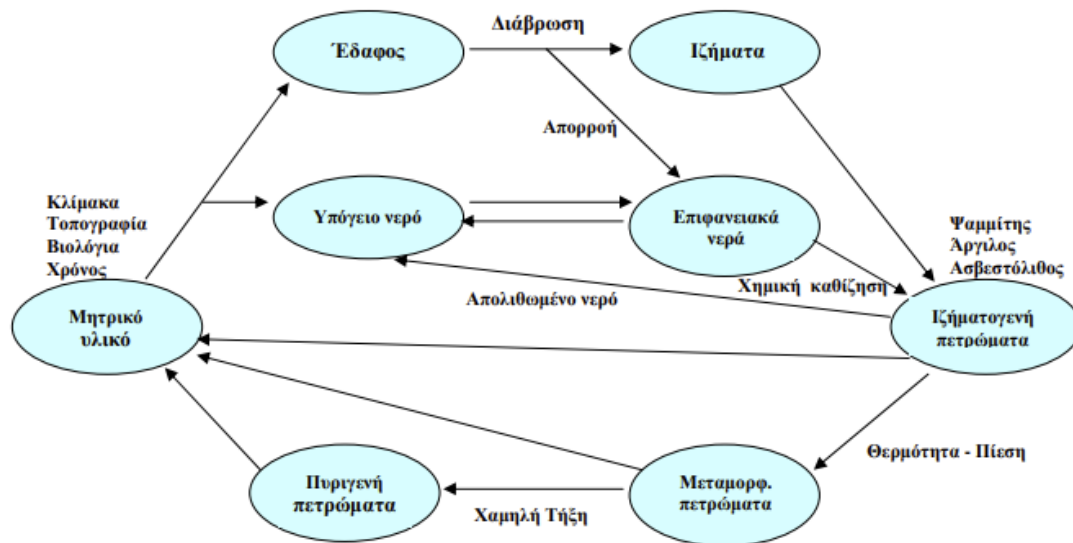
Η ικανότητα του νερού να αλληλοεπιδρά με τα ιόντα υδροξυλίου ονομάζεται οξύτητα. Το νερό γίνεται όξινο ($\text{pH} < 7$) λόγω της παρουσίας διαλυμένου CO_2 , H_2SO_4 ή HCl . Αυτό μπορεί να συμβεί όταν τα υπόγεια ύδατα ρέουν μέσα από ηφαιστειακά πετρώματα ή σε περιοχές με ηφαιστειακή ατμική δράση. Επιπλέον, το μετεωρικό νερό σε ιδιαίτερα μολυσμένες περιοχές μπορεί να περιλαμβάνει αυξημένες συγκεντρώσεις αυτών των ουσιών, με αποτέλεσμα την αύξηση της οξύτητας.

7.2 Χαρακτηριστικά της Ποιότητας του Νερού

Η σύσταση των πετρωμάτων του υδροφόρου ορίζοντα επηρεάζει άμεσα τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού, και ιδίως του υπόγειου. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη σύσταση του υπόγειου νερού μπορούν να συνοψιστούν ως εξής, σύμφωνα με τον Hounslow (2002):

1. Η **μηχανική διάβρωση** και η **χημική αποσάθρωση** είναι αποτελέσματα της αλληλεπίδρασης των πετρωμάτων με την ατμόσφαιρα και την υδρόσφαιρα. Τα προϊόντα διάβρωσης έχουν κατηγοριοποιηθεί με βάση τα χαρακτηριστικά τους στο περιβάλλον, όπως περιγράφονται από τον Hounslow (1995):
 - Τα ανθεκτικά πρωτογενή ορυκτά (resistates) εμφανίζουν αντοχή στη χημική και μηχανική διάσπαση. Οι ψαμμίτες ή τα εδάφη που σχηματίζονται, αποτελούνται από ορυκτά όπως χαλαζίας (Si), ζirkόνιο (Zr), τουρμαλίνη (B), ρουτίλιο (Ti), κασιτερίτη (Sn) και χρυσό (Au).
 - Προϊόντα ασύμπτωτης υδρόλυσης πρωτογενών πυριτικών ορυκτών (hydrolysates), τα οποία είναι δευτερεύοντα προϊόντα χημικής διάσπασης των αργιλοπυριτικών ορυκτών όπως ο άστριος. Αποτελούνται από αργιλικά ορυκτά (ένυδρα αργιλοπυριτικά ορυκτά) ή οξείδια και υδροξείδια του αργιλίου. Αυτά μπορούν να προσροφούν στοιχεία όπως το κάλιο (K).
 - Τα δευτερογενή οξείδια (oxidates), σχηματίζονται από την οξείδωση του σιδήρου και την επακόλουθη εναπόθεση του ως ένυδρο οξειδίου του Fe^{3+} . Το ένυδρο αυτό οξείδιο που εναποτίθεται, μετατρέπεται σε λειμονίτη (FeOOH). Λόγω του θετικού φορτίου του, το κολλοειδές $\text{Fe}(\text{OH})_3$ έχει την ικανότητα να απορροφά ανιόντα, ενώ το MnO_2 , ένα αρνητικά φορτισμένο κολλοειδές, απορροφά κατιόντα.
 - Προϊόντα αναγωγής (reduzates), τα οποία αποτελούνται από τα οργανικά υλικά και ιζηματογενή σουλφίδια.
 - Τα ανθρακικά ορυκτά (carbonates) σχηματίζονται μέσω της βιολογικής ή ανόργανης απόθεσης ασβεστίτη, αραγωνίτη και δολομίτη. Δημιουργούν ασβεστόλιθους, δολομίτες και τραβερτίνες.
 - Τα χημικά ιζήματα (evaporates), είναι διαλυτά άλατα που συγκεντρώνονται στους ωκεανούς και εξατμίζονται για να δημιουργήσουν εβαπορίτες. Οι ενώσεις που συναντώνται

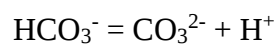
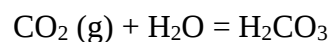
περιλαμβάνουν συνήθως αλίτη (NaCl), συλβίτη (KCl), γύψο ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{SO}_4$) και μερικές φορές καρναλλίτη ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$).



Εικόνα 7.1: Υδρολογικός και γεωλογικός κύκλος (Hounslow, 2002)

2. Η **ορυκτολογική σύνθεση** και οι **γεωχημικές ιδιότητες** των πετρωμάτων της περιοχής. Τα χημικά χαρακτηριστικά των υπόγειων υδάτων αναπτύσσονται κυρίως κατά τη ροή τους μέσω του εδάφους και της ακόρεστης ζώνης. Η γνώση των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διαδικασία αυτή είναι ζωτικής σημασίας για την υδρογεωχημική έρευνα. Ενώ τα πετρώματα στην κορεσμένη ζώνη μπορεί να μην διαφέρουν πολύ ως προς τη σύνθεση, οι αντιδράσεις ανταλλαγής και άλλες διεργασίες μεταβάλλουν σταδιακά τη χημεία του υπόγειου νερού. Επιβλαβείς ενώσεις μπορούν να απελευθερωθούν ή να μεταβληθούν στο νερό με προσρόφηση, καθίζηση και αντιδράσεις οξειδοαναγωγής. Οι αλληλεπιδράσεις που συμβαίνουν στην ακόρεστη ζώνη και επηρεάζουν τη σύσταση του υπόγειου νερού περιγράφονται από τον Mather (1997):

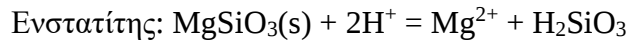
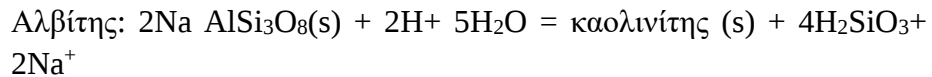
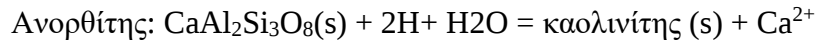
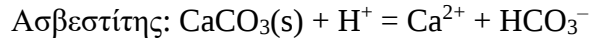
- Η αποσύνθεση και η ανακατανομή του αέριου CO_2 με βάση τις αντιδράσεις:



Άμεσο αποτέλεσμα της διάλυσης του CO_2 είναι ταχεία αύξηση της συνολικής περιεκτικότητας σε ανθρακικό οξύ και η μείωση του pH. Η

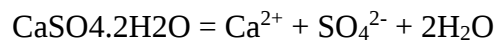
διάσπαση του O₂ είναι επίσης σημαντική. Οι ποσότητες του διαλυμένου οξυγόνου που προκύπτουν, καθορίζουν την οξειδοαναγωγική χημεία των υπόγειων υδάτων.

- Η ανθρακική και πυριτική διάλυση σύμφωνα με τις αντιδράσεις:

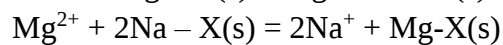
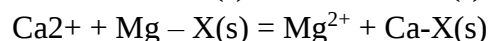
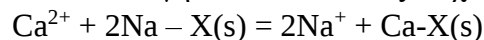


Οι συνήθεις αντιδράσεις περιλαμβάνουν ασθενή οξέα από ανθρακικά και πυριτικά συστήματα και ισχυρές βάσεις από τη διάσπαση ανθρακικών, πυριτικών και αργιλοπυριτικών πετρωμάτων. Η διάλυση του ασβεστίτη είναι πιθανότατα η σημαντικότερη αντίδραση στην ακόρεστη ζώνη.

- Η οξείδωση θειούχων ορυκτών όπως ο σιδηροπυρίτης και ο μαρκασίτης παράγουν $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s})$. Αυτού του είδους οι αντιδράσεις θεωρούνται από τις πιο σημαντικές των γεωλογικών συστημάτων γιατί συνδέονται με τη δημιουργία σοβαρών προβλημάτων ρύπανσης σε περιοχές ανάπτυξης θειούχου μεταλλοφορίας.
- Η απόθεση και διάλυση γύψου με βάση την αντίδραση:



- Οι ανταλλαγή κατιόντων όπως δείχνουν οι αντιδράσεις:



όπου $\text{Na}-\text{X}$ είναι Na προσροφημένο σε αργιλικά ορυκτά.

Οι περισσότερες σημαντικές αντιδράσεις ιοντοανταλλαγής είναι όταν το ασβέστιο και το μαγνήσιο στο νερό ανταλλάσσονται με το προσροφημένο νάτριο στα αργιλικά ορυκτά. Τα δισθενή ιόντα όπως το ασβέστιο και το μαγνήσιο αντικαθιστούν τα μονοσθενή ιόντα όπως το νάτριο και τα ιόντα με μικρότερη ακτίνα όπως το ασβέστιο αντικαθιστούν αυτά με τη μεγαλύτερη ακτίνα όπως το μαγνήσιο.

- Οι οργανικές αντιδράσεις. Η αποσύνθεση της οργανικής ύλης είναι η κύρια πηγή του διαλυμένου οργανικού άνθρακα (DOC) στα υπόγεια ύδατα. Οι πρωταρχικοί τύποι είναι τα χουμικά και φουλβικά οξέα. Η συμπλοκοποίηση του σιδήρου και του αλουμινίου με την οργανική ύλη

αποτελεί έναν κρίσιμο μηχανισμό στη μεταφορά των μετάλλων στο εδαφικό νερό. Ωστόσο, είναι λιγότερο σημαντική στα υπόγεια υδατικά συστήματα, καθώς η πλειονότητα των συμπλοκοποιημένων μετάλλων προσλαμβάνεται από τα κατώτερα στρώματα του εδάφους. Οι οργανικές ενώσεις που δημιουργούνται στο ανώτερο τμήμα του έδαφους δεν είναι ευκίνητες εξαιτίας της προσρόφησης. Η οξείδωση των διαλυμένων οργανικών υλικών συμβάλλει στην παραγωγή CO₂ στην ακόρεστη ζώνη.

Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στην κορεσμένη ζώνη είναι περισσότερο σύνθετες από αυτές της ακόρεστης ζώνης (Mather, 1997). Οι περισσότερες είναι ίδιες με της ακόρεστης ζώνης. Έτσι όσον αφορά την ανθρακική και πυριτική διάλυση, εάν στο υπόγειο νερό δεν έχει αποκατασταθεί η ισορροπία με τα ανθρακικά, πυριτικά και αργιλοπυριτικά ορυκτά, αυτά συνεχίζουν να διαλύονται στην κορεσμένη ζώνη. Επίσης πραγματοποιούνται συνηθισμένες αντιδράσεις διάλυσης αλάτων όπως γύψου, αλίτη, ανυδρίτη. Οι οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις που γίνονται σε ένα σύστημα ροής είναι σημαντικές για τον έλεγχο της υδροχημείας του σιδήρου, του μαγγανίου και του άνθρακα όπως και των ειδών του αζώτου και το θείου. Επίσης πολλές από αυτές γίνονται με την παρουσία βακτηρίων. Ακόμα, λαμβάνουν χώρα αντιδράσεις ανταλλαγής κατιόντων.

3. Ο **χρόνος παραμονής** του νερού στην ακόρεστη και στην κορεσμένη ζώνη. Η αυξημένη διάρκεια παραμονής επιτρέπει περισσότερες αλληλεπιδράσεις μεταξύ του νερού και των υλικών που συναντά. Οι κλιματολογικές συνθήκες επηρεάζουν επίσης αυτό τον παράγοντα. Οι έντονες βροχοπτώσεις έχουν ως αποτέλεσμα τη γρήγορη διείσδυση του νερού στο έδαφος, μειώνοντας έτσι τη διάρκεια της επαφής.
4. Οι **εδαφικοί πόροι** καθορίζουν τη διαδρομή της ροής του νερού και τις γεωλογικές δομές με τις οποίες θα αλληλοεπιδράσει. Εκδηλώνονται ως εδαφικοί κόκκοι (πρωτεύον πορώδες) ή ως ρωγμές, ρήγματα, σχισμές και καρστικές κοιλότητες στο εσωτερικό της μάζας των πετρωμάτων (δευτερογενές πορώδες).

7.3 Ευκίνησία των χημικών στοιχείων σε διαλύματα

7.3.1 Γενικά

Η έννοια της κινητικότητας του στοιχείου (ευκίνησία), αναφέρεται στο βαθμό στον οποίο ένα στοιχείο μπορεί να εξαπλωθεί σε σχέση με την κυρίαρχη μάζα των άλλων υλικών που το περιβάλλουν. Ο Perel'man πρωτοστάτησε στην αρχική προσέγγιση για τον υπολογισμό της κινητικότητας των στοιχείων. Υπολογίστηκε ο συντελεστής

υδάτινης μετανάστευσης K , που αντιπροσωπεύει το λόγο της συγκέντρωσης του στοιχείου στα διαλυμένα στερεά των επιφανειακών ή υπόγειων υδάτων προς τη συγκέντρωσή του στο πέτρωμα. Η σχέση μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

$$K = 100M/\alpha \cdot N$$

όπου:

M : η συγκέντρωση του στοιχείου στο νερό εκφρασμένη σε mg/l

α : το ολικό ορυκτολογικό υπόλοιπο στο νερό (%)

N : η συγκέντρωση του στοιχείου στα πετρώματα

7.3.2 Συντελεστές που επηρεάζουν την ευκινησία

Οι κύριοι παράγοντες που ελέγχουν την ευκινησία των χημικών στοιχείων στα διαλύματα είναι οι κάτωθι:

➤ Διαλυτότητα

Η ευκινησία ενός στοιχείου στο επιφανειακό περιβάλλον καθορίζεται από τη μεταφορά του σε υδατικά διαλύματα. Η ευκινησία σε τέτοια διαλύματα εξαρτάται από το ιοντικό δυναμικό, το οποίο υπολογίζεται ως ο λόγος του φορτίου του στοιχείου προς την ιοντική του ακτίνα.

Ως εκ τούτου:

- Στοιχεία με χαμηλό ιοντικό δυναμικό, όπως το ασβέστιο (Ca) και το νάτριο (Na), διαλύονται εύκολα ως απλά κατιόντα.
- Τα στοιχεία που διαθέτουν σημαντικά αυξημένο ιοντικό δυναμικό έχουν την τάση να προσελκύουν ιόντα οξυγόνου, με αποτέλεσμα το σχηματισμό διαλυτών οξυ-ανιόντων, όπως τα PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , MoO_4^{2-} .
- Τα στοιχεία που διαθέτουν μέτριο ιοντικό δυναμικό παραμένουν αδιάλυτα, λόγω της σημαντικά χαμηλής διαλυτότητας και της υψηλής προσρόφησής τους σε διάφορες επιφάνειες, όπως το αλουμίνιο, το τιτάνιο και ο κασσίτερος (Al, Ti, Sn).
- Τα στοιχεία μετάπτωσης, όπως ο σίδηρος, ο χαλκός, το χρώμιο και ο άργυρος (Fe, Cu, Cr και Ag), παρουσιάζουν χαμηλότερη διαλυτότητα και έχουν μεγαλύτερη τάση προσρόφησης σε διάφορες επιφάνειες σε σύγκριση με τα μη μεταβατικά στοιχεία που διαθέτουν όμοιο φορτίο και ιοντική ακτίνα.
- Οι ποικίλες καταστάσεις σθένους αποδίδουν διαφορετικά επίπεδα κινητικότητας, όπως τα Fe^{2+} και Fe^{3+} .

➤ *Συγκέντρωση του ιόντος υδρογόνου – pH*

Πολλά μεταλλικά στοιχεία παρουσιάζουν υψηλή διαλυτότητα σε όξινα διαλύματα και αποτίθενται ως οξείδια ή υδροξείδια όταν το pH αυξάνεται. Τα αλκάλια και οι αλκαλικές γαίες είναι ευδιάλυτες σε όλο το φάσμα των τυπικών τιμών pH (Hawkes – Webb, 1962 – Rose et al, 1979).

➤ *Δυναμικό οξειδοαναγωγής – Eh*

Η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων στο περιβάλλον διάλυμα είναι ένας άλλος καθοριστικός παράγοντας της κινητικότητας των συστατικών. Ο παράγοντας αυτός είναι εξαιρετικά σημαντικός, καθώς πολλά στοιχεία υπάρχουν σε πολλαπλές καταστάσεις σθένους, με αποτέλεσμα οι ιδιότητες τους να μεταβάλλονται τόσο στα διαλύματα όσο και στα στερεά, κατά τη μετάβαση από τη μία κατάσταση σθένους στην άλλη. Η συγκέντρωση αυτή των ηλεκτρονίων εκφράζεται και μετράται σαν δυναμικό οξειδοαναγωγής. Στον τομέα της γεωχημείας, οι αυξημένες τιμές του Eh υποδηλώνουν οξειδωτικό σύστημα, ενώ οι χαμηλές τιμές του Eh υποδηλώνουν αναγωγικό (Κελεπερτζής, 1993).

➤ *Προσρόφηση*

Η κινητικότητα των στοιχείων μπορεί να επηρεαστεί από τη διαδικασία της προσρόφησης και της ανταλλαγής ιόντων. Οι διαδικασίες αυτές περιλαμβάνουν την έλξη των στοιχείων στην επιφάνεια ή στο πλέγμα των κolloειδών σωματιδίων, η διάμετρος των οποίων κυμαίνεται από 10 έως 10000 Å (10^{-7} έως 10^{-4} cm). Τα ιόντα που είναι προσκολλημένα στις επιφάνειες βρίσκονται σε κατάσταση δυναμικής ισορροπίας με το διάλυμα που τα περιβάλλει. Ωστόσο, με την πάροδο του χρόνου, τα ιόντα αυτά μπορούν είτε να μετακινηθούν σε συγκεκριμένες θέσεις εντός του κρυσταλλικού πλέγματος είτε να αποτελέσουν μέρος της κύριας δομής του ορυκτού. Η προσρόφηση συμβαίνει στα αργιλικά ορυκτά, καθώς και στα οξείδια και υδροξείδια του Fe, του Mn, του Al, στην οργανική ύλη, στο SiO₂ και άλλες ουσίες. Σύμφωνα με τον Fergusson (1990), τα αργιλικά ορυκτά, ιδίως ο μοντοριλλονίτης, ο βερμικουλίτης και η οργανική ύλη, παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες ικανότητες ανταλλαγής ιόντων.

8. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΡΗΤΗΣ

8.1 Γεωλογία

Η Κρήτη βρίσκεται στο εξωτερικό τόξο της ζώνης καταβύθισης της αφρικανικής πλάκας. Η περιοχή έχει έντονα ορεινό ανάγλυφο που οφείλεται σε πρόσφατη και ταχεία άνοδο, επηρεασμένη από τις θαλάσσιες αποθέσεις της περιόδου του Νεογενούς και του Ανώτερου Πλειόκαινου, με αποτέλεσμα την ανύψωση αρκετών εκατοντάδων μέτρων πάνω από το σημερινό επίπεδο της θάλασσας. Ακόμη, παρατηρούνται πολυάριθμα ρήγματα λόγω της σημαντικής τεκτονικής δραστηριότητας στην περιοχή. Το εύρος της συγκροτείται από την κατώτερη τεκτονική ενότητα που περιλαμβάνει την μεταμορφωμένη Ομάδα των Πλακωδών Ασβεστόλιθων (αυτόχθονο έως παραυτόχθονο σύστημα πετρωμάτων με ηλικία από το Άνω Πέρμιο έως Ολιγόκαινο). Με τεκτονική επαφή ακολουθεί ένα σύστημα (αλλόχθονο) επωθημένο πάνω στο ήδη υπάρχον (αυτόχθονο ή παραυτόχθονο), υπό την μορφή αλληπάλληλων τεκτονικών καλυμμάτων αλπικών ενοτήτων, και με λεπιοειδή διάταξη.

Νοτιότερα στην χώρα μας, εμφανίζονται τα μεταμορφωμένα πετρώματα των Εξωτερικών Ελληνίδων. Πιο συγκεκριμένα, στη Κρήτη παρατηρείται η ακόλουθη σειρά από την κορυφή προς την βάση της τεκτονικής επαλληλίας:

- Κάλυμμα της Τρίπολης, κυρίως ρηχά ανθρακικά του Τριαδικού ως Τριτογενούς
- Το Φυλλιτικό Κάλυμμα, μια σύνθετη ενότητα που περιλαμβάνει και την Ενότητα Τρυπαλίου,
- Ομάδα Πλακωδών Ασβεστόλιθων, παραυτόχθονη ομάδα, με δύο κλαστικές ακολουθίες στην βάση και την οροφή που περικλείουν μεταμορφωμένα ανθρακικά με κερατολίθους, Πέρμιο έως Ολιγόκαινο



Εικόνα 8.1: Απόσπασμα του γεωλογικού χάρτη της Ελλάδος σε κλίμακα 1:500.000. Με κίτρινες και πράσινες αποχρώσεις απεικονίζονται οι λεκάνες Νεογενούς και του Τεταρτογενούς περιόδου (Μπορνόβας και Ροντογιάννη-Τσιαμπάου, 1983)

Οι προαναφερόμενες ενότητες καλύπτονται από καλύμματα των Εσωτερικών ενοτήτων, όπως το Οφιολιθικό σύμπλεγμα (melange), υπολείμματα του Ιουρασικού

ωκεάνιου φλοιού, ιζήματα βαθιάς θάλασσας, έντονα μεταμορφωμένα πετρώματα του Πελαγονικού καλύμματος, κυρίως πυριτικά κλαστικά και ανθρακικά ρηχής θάλασσας, ηλικίας από το Πέρμιο έως το Μεσοζωικό. Επιπλέον, υπάρχουν μερικώς ανακρυσταλλωμένα πετρώματα του καλύμματος Πίνδου-Εθιάς, που αποτελούνται κυρίως από ιζήματα βαθιάς θάλασσας από το Τριαδικό έως το Τριτογενές.

Η νεοτεκτονική δραστηριότητα στην Ελλάδα ξεκίνησε κατά το Μέσο Μειόκαινο μετά την Αλπική ορογένεση και τον σχηματισμό των Ελληνίδων ζωνών. Η σημερινή διαμόρφωση του ελληνικού χερσαίου και θαλάσσιου χώρου επηρεάστηκε από την νεοτεκτονική αυτή δραστηριότητα. Οι τεκτονικές διεργασίες συνδέονται με το σχηματισμό του ελληνικού ηφαιστειακού τόξου, το οποίο δημιουργήθηκε από τη σύγκρουση της Ευρασιατικής και της Αφρικανικής πλάκας. Η σύγκρουση των δύο πλακών έχει ως συνέπεια την πρόκληση τεκτονικών φάσεων συμπίεσης και εφελκυσμού, που οδηγούν στο σχηματισμό ενός συστήματος πολλαπλών ρηγμάτων. Τα ρήγματα έχουν ως αποτέλεσμα πολυάριθμες θαλάσσιες εισβολές και την απόθεση Νεογενών και Τεταρτογενών ιζημάτων. Ακόμη, τα χερσαία ιζήματα αποτέθηκαν στις περιοχές των Ελληνίδων όπου η θάλασσα υποχώρησε.

Τα Νεογενή και Τεταρτογενή ιζήματα παρουσιάζουν διαφορετικά περιβάλλοντα απόθεσης, όπως θαλάσσια (κροκαλοπαγή-λατυποπαγή-ψαμμίτες-μάργες), λιμναία/λιμνοθαλάσσια (οργανικές αποθέσεις που βρίσκονται στα έλη), ποτάμια και χερσαία ιζήματα (κροκαλοπαγή-ψαμμίτες). Τα πρωτογενή θαλάσσια ιζήματα του Νεογενούς-Τεταρτογενούς αποτελούνται από κροκαλοπαγή, λατυποπαγή, ψαμμίτες και μάργες. Τα λιμναία ιζήματα είναι πανομοιότυπα, διαφέροντας λόγω της ύπαρξης οργανικών ιζημάτων σε περιοχές όπου υπήρχαν έλη, όμως και οι δύο τύποι ιζημάτων αποτελούνται κυρίως από κροκαλοπαγή και ψαμμίτες (τροποποιημένα από Κουφάκη, 2018).

8.2 Υδρογεωλογία

8.2.1 Υδροφορείς και όρια

Ο υδροφορέας είναι μια γεωλογική δομή ή μια ομάδα διασυνδεδεμένων γεωλογικών δομών που μπορούν να συγκρατήσουν και να μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες νερού. Ο ρυθμός ροής παρουσιάζει χωρική μεταβλητότητα. Τα υπόγεια ύδατα κινούνται στο εσωτερικό ενός υδροφορέα και απελευθερώνονται με φυσικό τρόπο σε σημεία εκκένωσης, εκτός εάν αντληθούν μέσω γεωτρήσεων. Ως φυσικά σημεία εκκένωσης θεωρούνται οι πηγές, η διαρροή σε ρέματα και ποτάμια, και οι εκκενώσεις απευθείας στη θάλασσα. Η διαπερατότητα είναι το χαρακτηριστικό ενός υδροφορέα που επιτρέπει στο νερό να διέρχεται μέσα από αυτόν και επηρεάζεται κυρίως από γεωλογικούς παράγοντες. Όταν γίνεται αναφορά σε υπόγεια ύδατα, ο όρος "διαπερατότητα" αναφέρεται με μεγαλύτερη ακρίβεια ως "υδραυλική αγωγιμότητα".

Υπάρχουν πολλά είδη των ορίων των υδροφορέων. Το παρακάτω σχήμα δείχνει μερικά παραδείγματα με διαφορετικά όρια υδροφορέων. Το όριο ενός ρήγματος μεταξύ δύο

υδροφορέων (α) μπορεί να είναι διαπερατό και να επιτρέπει τη ροή σε αυτό, εφόσον έχει συμβεί θραύση πετρώματος που θα οδηγήσει σε τοπική αύξηση της διαπερατότητας. Εναλλακτικά, το σύνορο μπορεί να είναι αδιαπέρατο λόγω της δημιουργίας μυλονίτη που αποτίθεται κατά μήκος του ρήγματος. Ένα αδιαπέρατο σύνορο μπορεί να ανιχνευθεί από τις διαφορές στη χημεία των υπόγειων ρευστών ή από την ανάλυση των δοκιμών άντλησης. Το όριο ενός ρήγματος εικονίζεται στο (b) και είναι ουσιαστικά αδιαπέρατο, καθώς χωρίζει τον υδροφορέα από ένα αδιαπέρατο σχηματισμό. Στο παράδειγμα (c), ο υδροφόρος Α βρίσκεται ασύμφωνα πάνω από μια αλληλουχία που περιλαμβάνει δύο ξεχωριστούς υδροφορείς, τον Β και τον C. Οι καταστάσεις είναι παρόμοιες με το παράδειγμα (a), εκτός του ότι η ποιότητα των υπόγειων ρευστών μπορεί να είναι διαφορετική στους τρεις υδροφορείς. Στο παράδειγμα (d), οι συνθήκες των υπόγειων ρευστών στον υδροφορέα είναι παρόμοιες με εκείνες του (b). Στο παράδειγμα (e), ένας μη υδροφορέας σε μη συνεκτικά υλικά, όπως μια αναβαθμίδα ενός ποταμού, επικαλύπτει εν μέρει έναν υδροφορέα, στον 36 οποίο έχουν αποθεθεί ιζήματα (όπως είναι ο ασβεστόλιθος ή ψαμμίτη) που σχηματίζει ένα γκρεμό. Η ροή των υπογείων ρευστών μπορεί να είναι δυνατή μεταξύ του υδροφόρου Β στον Α, λόγω των 73 τοπογραφικών διαφορών. Στο παράδειγμα (f), ένας υδροφορέας υπέρκειται ενός σχηματισμού με χαμηλή διαπερατότητα. Η ροή των υπόγειων ρευστών δεν λαμβάνει χώρα πέρα από το όριο, αλλά ο υδροφορέας επαναφόρτισης θα ενισχυθεί σημαντικά από την επιφανειακή απορροή από την ημιορεινή περιοχή (από Μπουτσάκη, 2016).

8.2.2 Πηγές

Η πηγή είναι μια συγκεντρωμένη εκροή υπόγειων υδάτων που αναδύεται στην επιφάνεια της γης ως ελεύθερη ροή νερού. Ως ανάβλυση εννοείται κάθε εμφάνιση υπόγειων υδάτων, είτε στην επιφάνεια του εδάφους, είτε στον πυθμένα ενός υδάτινου σώματος, όπως ένας ποταμός, μια λίμνη ή μια θάλασσα. Μια πηγή σχηματίζεται μέσω της διαδικασίας της "διαρροής", η οποία αναφέρεται στη σταδιακή ροή του υπόγειου νερού προς την επιφάνεια του εδάφους. Οι διαρροές νερού μπορούν να δημιουργήσουν μικρές τοπικές κοιλάδες ή ροές, ή ακόμα και να εξατμιστούν, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα του νερού, τη γεωγραφία και το κλίμα.

Οι πηγές και οι αναβλύσεις συνδέονται στενά με τον υδρολογικό κύκλο στη φύση. Τα κατακρημνίσματα διεισδύουν στο έδαφος, τροφοδοτώντας τα υδροφόρα στρώματα, με αποτέλεσμα σταδιακά να ανεβαίνει η στάθμη τους. Έτσι, συσσωρεύονται σε υπόγειες δεξαμενές πριν αναδυθούν ξανά στην επιφάνεια μέσω των πηγών.

Συνεπώς η πηγή είναι μια θέση στην επιφάνεια της γης όπου τα υπόγεια ύδατα αναδύονται από τον υδροφόρο ορίζοντα, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια διακριτή ροή. Πιο απλά, πηγή είναι η επιφανειακή εκφόρτιση του υδροφόρου ορίζοντα από φυσικά αίτια. Το φαινόμενο αυτό δημιουργείται λόγω της διαφοράς μεταξύ του ύψους του υδραυλικού φορτίου στον υδροφόρο ορίζοντα και του ύψους της επιφάνειας της γης στο σημείο εκκένωσης. Τα ανοίγματα μέσω των οποίων το υπόγειο νερό εξέρχεται στην επιφάνεια αναφέρονται ως οπές-στόμια της πηγής. Σε αντίθεση με τις πηγές

συνεκτικών πετρωμάτων, οι οποίες συνήθως διαθέτουν ένα σαφώς καθορισμένο στόμιο, οι μη συνεκτικές ιζηματογενείς πηγές μπορεί να παρουσιάζουν μη ορατά εμφανή στόμια.

➤ *Κύρια είδη πηγών*

Ενώ όλες οι πηγές εκβάλλουν τελικά στην επιφάνεια της γης μέσω της επίδρασης της βαρύτητας, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε πέντε κύριες κατηγορίες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του υδραυλικού φορτίου και της ροής, εντός του υποκείμενου υδροφορέα στο σημείο εκκένωσης.

1. Πηγές βαρύτητας (κατιούσες ή επαφής). Δημιουργούνται από την έλξη της βαρυτικής δύναμης. Το νερό διεισδύει στο έδαφος μέχρι να συναντήσει ένα αδιαπέρατο στρώμα. Λόγω της απουσίας άλλης διαδρομής, το νερό αρχίζει να κινείται συνεχώς μέχρι να φτάσει σε ένα σημείο εξόδου-άνοιγμα, όπου αναδύεται ως πηγή. Δημιουργούνται σε σημεία όπου η τοπογραφική επιφάνεια τέμνει την πιεζομετρική επιφάνεια και όπου το ανώτερο υδροπερατό στρώμα συναντά το κατώτερο αδιαπέραστο στρώμα, υπό ελεύθερες συνθήκες. Τυπικά, αυτές οι πηγές συναντώνται συνήθως κοντά σε λόφους και γκρεμούς.
2. Αρτεσιανές πηγές. Σχηματίζονται ως αποτέλεσμα της υδραυλικής πίεσης στους υδροπερατούς υδροφόρους ορίζοντες, η οποία οδηγεί στην ανοδική κίνηση του νερού προς την επιφάνεια. Κατά συνέπεια, το νερό απελευθερώνεται υπό πίεση εξαιτίας των περιορισμένων συνθηκών στον υποκείμενο υδροφορέα. Τυχόν ρωγμές ή ασυνέχειες στην επιφάνεια της γης διευκολύνουν την «διαφυγή» νερού.
3. Πηγές σωληνοειδούς μορφής. Βρίσκονται σε υπόγεια δίκτυα σπηλαίων που μοιάζουν με τούνελ. Συνήθως αποτελούνται από ασβεστόλιθο, ο οποίος υφίστανται σημαντική αποσάθρωση καθώς το νερό ρέει διαμέσου του. Οι πηγές αυτές είναι χαρακτηριστικές των καρστικών εδαφών και είναι οι μεγαλύτερες πηγές στη Γη. Οι "σωλήνες" τους είναι συχνά τόσο μικροί που είναι δύσκολο να διακριθούν με βεβαιότητα.
4. Πηγές ρωγμών. Εκδηλώνονται κατά μήκος μεγάλων ρωγμών στην επιφάνεια της γης και χαρακτηρίζονται από την πλήρη εκροή νερού από σχισμές και ρωγμές στο έδαφος. Αυτές οι πηγές χρησιμοποιούνται συχνά ως κύρια πηγή πόσιμου νερού.
5. Πρόκειται για πηγές που σχηματίζονται όταν τα υπόγεια ύδατα ξεχειλίζουν στην επιφάνεια. Αυτές οι πηγές διευκολύνουν τη σταδιακή απελευθέρωση του νερού, επιτρέποντάς του να διεισδύσει μέσα από χαλαρά ή μη συνεκτικά εδάφη και πετρώματα.

➤ *Ταξινόμηση πηγών*

Έχουν προταθεί διάφορες ταξινομήσεις των πηγών, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικά κριτήρια. Οι πιο διαδεδομένες περιλαμβάνουν:

- Το μέγεθος της πηγής.
- Τη διακύμανση της παροχής.
- Τον ρόλο της γεωλογίας.
- Την περιοχή αποστράγγισης, επαναφόρτιση, πηγή νερού.
- Την αξιοποίηση και διατήρηση.
- Την ποιότητα του νερού.

Κατά την αξιολόγηση της διαθεσιμότητας των πηγών νερού, είναι μείζονος σημασίας να συμπεριληφθεί ένα μέτρο της μεταβλητότητας του νερού που απορρίπτεται. Η αξιολόγηση αυτή θα πρέπει να βασίζεται σε δεδομένα που συλλέγονται για περίοδο μεγαλύτερη από ένα υδρολογικό έτος. Η πιο βασική μέτρηση της μεταβλητότητας είναι ο λόγος της υψηλότερης προς τη χαμηλότερη απόρριψη:

$$IV = Q_{\max}/Q_{\min}$$

Οι πηγές με δείκτη μεταβλητότητας (IV) που υπερβαίνει το 10 χαρακτηρίζονται ως εξαιρετικά μεταβλητές, ενώ εκείνες με IV κάτω από 2 αναφέρονται περιστασιακά ως συνεχείς ή σταθερές πηγές (Meinzer 1927).

8.3 Φυσική Υδροχημική Εξέλιξη Υπόγειων Υδάτων

Η αλληλεπίδραση μεταξύ των γεωλογικών και υδρολογικών χαρακτηριστικών μιας λεκάνης απορροής ποταμού παίζει καθοριστικό ρόλο στον προσδιορισμό της σκληρότητας του νερού. Οι λεκάνες απορροής που αποτελούνται από αδιαπέρατα πετρώματα, τα οποία είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά στη διάβρωση, δημιουργούν επιφανειακή απορροή που διαρκεί ελάχιστο χρόνο και διευκολύνει τη διάβρωση. Κατά συνέπεια, η χημική σύσταση των επιφανειακών υδάτων μοιάζει πολύ με εκείνη του νερού από αραιές βροχοπτώσεις και κατηγοριοποιούνται ως μαλακά νερά. Εναντίως, οι λεκάνες απορροής των περατών πετρωμάτων επιτρέπουν στο νερό να διεισδύσει κάτω από την επιφάνεια, με αποτέλεσμα τα υπόγεια ύδατα να αλληλεπιδρούν με τα πετρώματα και να προκαλείται διάβρωση. Έτσι υπάρχει η δυνατότητα να αναπτυχθούν πηγάδια και αγωγοί. Κατά συνέπεια, το υπόγειο νερό συσσωρεύει σημαντική ποσότητα διαλυμένων ουσιών και κατηγοριοποιείται ως σκληρό νερό.

Η χημική σύσταση του νερού στα φυσικά υδατικά συστήματα υφίσταται συνεχείς διακυμάνσεις και επηρεάζεται κυρίως από γεωλογικούς παράγοντες. Η διαδικασία της αποσάθρωσης των πετρωμάτων καθορίζει την απελευθέρωση στοιχείων στο νερό. Στα υπόγεια ύδατα παρατηρείται μια φυσική εξέλιξη της χημικής σύστασης. Το αραιό νερό της βροχής, το οποίο είναι αραιωμένο και περιέχει χλωριούχο νάτριο και CO₂, εισέρχεται στη ζώνη του εδάφους και εμπλουτίζεται ακόμη περισσότερο με CO₂, το οποίο σχηματίζεται από την αποσύνθεση της οργανικής ύλης. Αυτός ο εμπλουτισμός οδηγεί στο σχηματισμό ανθρακικού οξέος. Στο έδαφος και στην ακόρεστη ζώνη των

ιζηματογενών πετρωμάτων, αυτό το ήπιο οξύ διαλύει τα ανθρακικά άλατα ασβεστίου και μαγνησίου, όπως ο ασβεστίτης και ο δολομίτης, με αποτέλεσμα αυξημένες συγκεντρώσεις ασβεστίου, μαγνησίου και όξινου ανθρακικού άλατος. Η διάβρωση των πυριτικών αλάτων στα κρυσταλλικά πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα οδηγεί στην απελευθέρωση ασβεστίου, μαγνησίου, καλίου και νατρίου σε χαμηλές συγκεντρώσεις στο εδαφικό νερό ή στα υπόγεια ύδατα, και παράλληλα σχηματίζει διττανθρακικό άλας.

Μακριά από την παροχή οξυγόνου στο υπέδαφος και την ακόρεστη ζώνη, το νερό διήθησης καθίσταται ολοένα και πιο ανοξικό ως αποτέλεσμα την προοδευτικής βακτηριακής αναγωγής του οξυγόνου (bacterial reduction of oxygen). Κάτω από το στρώμα του νερού και με αυξανόμενες αναγωγικές συνθήκες, ο σίδηρος και το μαγγάνιο κινητοποιούνται και στη συνέχεια καθιζάνουν ως μεταλλικά σουλφίδια. Με την παρουσία διάσπαρτου αργιλώδους υλικού μέσα σε υδροφόρο ορίζοντα, και λόγω της ιοντοανταλλαγής αντικαθίσταται το ασβέστιο από το νάτριο καθώς το νερό εξελίσσεται σε τύπο νερού με όξινο ανθρακικό νάτριο. Ως εκ τούτου, τα υπόγεια ύδατα μαλακώνουν φυσικά με αντιδράσεις ανταλλαγής ιόντων. Γενικά, όπου το σύστημα αποτελείται μόνο από ασβεστόλιθο, η συνολική σκληρότητα είναι ισοδύναμη με την σκληρότητα ανθρακικού ασβεστίου και είναι $<120 \text{ mg/L}$. Τα υπόγεια ύδατα με υψηλότερη συνολική σκληρότητα συνήθως προκύπτουν από τη διάλυση άλλων ορυκτών του υδροφόρου ορίζοντα, κυρίως του δολομίτη και του γύψου, την ανάμειξη γλυκού νερού με υπολειμματικά αλατούχα υπόγεια ύδατα, και ανάμειξη θαλασσινού νερού, ή τη μόλυνση. Μια αλληλουχία υδροχημικής εξέλιξης προσδιορίζεται από τον Sprinkle (1989), ο οποίος ξεκινά με τη διάλυση του ασβεστίου στις περιοχές επαναφόρτισης που παράγουν έναν τύπο ύδατος που κυριαρχείται από ασβέστιο-διττανθρακικό άλας με συνολική συγκέντρωση διαλυμένων στερεών (TDS) γενικά μικρότερη από 250 mg/L . Η διάλυση του δολομίτη οδηγεί σε έναν τύπο ασβεστίου-μαγνησίου-διττανθρακικού νερού. Όταν υπάρχει αφθονία σε γύψο, το θειικό άλας γίνεται το κυρίαρχο ανιόν. Το θαλασσινό νερό αυξάνει τη συγκέντρωση TDS και οι τύποι νερού αλλάζουν σε χλωριο-νατριούχοι. (από Καπακτσή, 2019)

8.4 Υδατικό Δυναμικό Πρωτογενών Υδρογεωλογικών Ενοτήτων Κρήτης

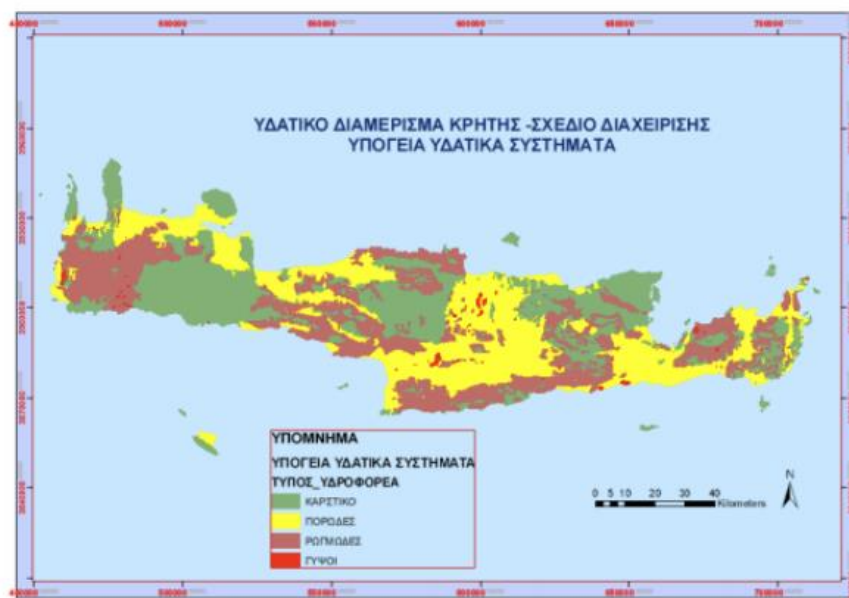
Οι υδρογεωλογικές συνθήκες της Κρήτης επηρεάζονται άμεσα από τους γεωλογικούς, τεκτονικούς και μορφολογικούς παράγοντες που υπάρχουν σε κάθε περιοχή, όπως αναφέρεται στη μελέτη της Αποκεντρωμένης Διοίκησης Κρήτης (2013). Ως εκ τούτου, η δημιουργία υπόγειων υδροφορέων σε γεωλογικούς σχηματισμούς εξαρτάται από συγκεκριμένες τοπικές συνθήκες και διαφέρει από περιοχή σε περιοχή. Οι υφιστάμενες τεκτονικές συνθήκες στην περιοχή είναι επίσης σημαντικές, και ιδίως η παρουσία ρηγμάτων που είτε διευκολύνουν τη σύνδεση μεταξύ των υδρολιθολογικών ενοτήτων είτε λειτουργούν ως εμπόδιο, αποκόπτοντας την επαφή μεταξύ τους.

Τα υδροφόρα συστήματα της Κρήτης, διακρίνονται σε καρστικά, πορώδη και ρωγμώδη. συγκεκριμένα η Κρήτη διακρίθηκε σε 91 υπόγεια υδατικά συστήματα που διακρίνονται σε 47 καρστικά, 35 πορώδη και 8 ρωγμώδη (Αποκεντρωμένη Διοίκηση Κρήτη, 2013).

Το μεγαλύτερο μέρος του νησιού αποτελείται κυρίως από ανθρακικά πετρώματα (καρστικά υδροφόρα). Τα πετρώματα αυτά σχηματίζουν τους κύριους ορεινούς όγκους των Λευκών Ορέων, του Ψηλορείτη και της Δίκτης, καθώς και μικρότερες καρστικές ορεινές ενότητες, όπως ο Όρνος, η Σητεία, τα Αστερούσια και τα Ασιτερότα. Οι σχηματισμοί αυτοί είναι καθοριστικής σημασίας για το σχηματισμό και την ανάπτυξη των υπόγειων υδροφορέων.

Οι νεογενείς-προσχωσιγενείς αποθέσεις (πορώδη υδατοφόρα συστήματα) καθίστανται υψηλής υδρογεωλογικής σημασίας όταν η δομή τους αποτελείται από ανδρομερή στοιχεία, όπως κροκάλες και άμμους στα τεταρτογενή και κροκαλοπαγή, ψαμμίτες και μαργαϊκούς ασβεστόλιθους στα νεογενή. Ένα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό του νεογενούς υδροφορέα είναι η ύπαρξη εκτεταμένων κοιτασμάτων γύψου, τα οποία έχουν υψηλό υδατικό δυναμικό αλλά κακή ποιότητα νερού.

Το υπόλοιπο τμήμα του νησιού, έκτασης περίπου 1,973 km², αποτελείται από σχηματισμούς φυλλιτών-χαλαζιτών και φλύσχη (ρωγμώδη υδροφόρα συστήματα) τα οποία εμφανίζουν ασθενείς τοπικές υδροφορίες. Ωστόσο, είναι ιδιαίτερα σημαντικοί όσον αφορά τη ζήτηση νερού, καθώς παρέχουν νερό για τους οικισμούς που βρίσκονται σε μεγάλα υψόμετρα.



Εικόνα 8.2: Διαχωρισμός υπόγειων υδατικών συστημάτων σε καρστικά, πορώδη και ρωγματούδη (Αποκεντρωμένη Διοίκηση Κρήτης, 2013)

9. ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΝΕΡΑ

9.1 Θερμομεταλλικά νερά/πηγές

Τα θερμομεταλλικά νερά χαρακτηρίζονται από περιεκτικότητα σε ολικά διαλυμένα στερεά άνω των 1000 mg/L και θερμοκρασία υψηλότερη από τη μέση ετήσια θερμοκρασία του αέρα στην επιφάνεια της Γης στη συγκεκριμένη περιοχή. Οι θερμομεταλλικές πηγές χαρακτηρίζονται από τις αυξημένες συγκεντρώσεις πολλών ιχνοστοιχείων, κάποια από τα οποία συχνά δίνουν ένα ιαματικό χαρακτήρα στις πηγές.

Καθώς ανεβαίνουν στην επιφάνεια, η θερμοκρασία τους μπορεί να πέσει λόγω της ανάμειξης με ψυχρότερα νερά υδροφόρων χαμηλής θερμοκρασίας. Τα θερμομεταλλικά νερά είναι γεωθερμικά ρευστά που προέρχονται κυρίως από μετεωρικές πηγές και περιέχουν μικρές ποσότητες νεαρών ή συγγενετικών νερών. Ο μηχανισμός σχηματισμού των θερμομεταλλικών πηγών είναι ανάλογη με εκείνη των γεωθερμικών ρευστών.

Η θερμοκρασία του νερού είναι αποτέλεσμα ενός ή περισσότερων από τους ακόλουθους παράγοντες:

- **Γηγενή θερμότητα.** Η γεωθερμική βαθμίδα στο έδαφος προκαλεί τη θέρμανση του νερού. Ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνεται η θερμοκρασία με το βάθος, είναι περίπου 3 °C κάθε 100 m.
- **Χημικές αντιδράσεις.** Οι εξώθερμες αντιδράσεις, όπως οι αντιδράσεις οξειδωσης, εκπέμπουν θερμική ενέργεια στο περιβάλλον που λαμβάνουν χώρα, δηλαδή τα πετρώματα ή το νερό.
- **Ύπαρξη αέριων σωματιδίων (ατμών).** Η διαδικασία ανάμειξης νερού από μεγάλα βάθη με θερμούς ή υπέρθερμους υδρατμούς, ενίοτε με CO₂ από μεγάλα βάθη, οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας του νερού.
- **Το φαινόμενο της ραδιενέργειας.** Η ραδιενεργός διάσπαση ισοτόπων όπως το ουράνιο, το θόριο και το κάλιο οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος χώρου, συμπεριλαμβανομένων των πετρωμάτων και του νερού.
- **Προέλευση του νερού.** Όταν το νερό έχει μαγματική προέλευση ή ηφαιστειακή έχει πρωτογενώς υψηλή θερμοκρασία.

9.2 Ιαματικά νερά/πηγές

Ιαματικό νερό, είναι το νερό, το οποίο έχει θεραπευτικές ιδιότητες, λόγω των φυσικών ή χημικών του ιδιοτήτων και αποδεικνύεται με επιστημονικό τρόπο.

Ως ιαματική πηγή νοείται η φυσική ανάβλυση ή άντληση ενός ιαματικού φυσικού πόρου με τεχνολογική παρέμβαση, όπως γεώτρηση, φρεάτιο, τάφρος ή σήραγγα (φυσική ή τεχνητή), ή ο φυσικός σχηματισμός θερμικής αργίλου (πηλός) ή ηφαιστειακών πετρωμάτων. Ως ιαματικοί φυσικοί πόροι θεωρούνται τα φυσικά νερά (ψυχρά ή θερμά), οι ατμοί, τα φυσικά αέρια, ο φυσικός πηλός ή οι ηφαιστειακοί λίθοι που διαθέτουν ιαματικές ιδιότητες, όπως ορίζονται από τις ρυθμίσεις που

περιγράφονται στον παρόντα νόμο (ΦΕΚ 603/Β'/22-2-2018). Οι ιαματικές πηγές είναι συνήθως θερμομεταλλικές πηγές, ωστόσο μπορεί να είναι και ψυχρές πηγές.

Στην ουσία, οι ιαματικές πηγές είναι φυσικές αναβλύσεις θερμών, υπόθερμων ή και ψυχρών νερών που παρέχουν ευεργετικά στοιχεία για τη θεραπεία διαφόρων παθήσεων του ανθρώπινου σώματος. Το νερό από αυτές τις πηγές πιστεύεται ότι διαθέτει ιαματικές ιδιότητες όταν χρησιμοποιείται για θεραπευτικούς σκοπούς, όπως λουτροθεραπεία ή ποσιθεραπεία. Τα χαρακτηριστικά αυτά δεν έχουν αποδειχθεί ότι σχετίζονται με κάποια χημική ή άλλη πτυχή αυτών των νερών, αλλά με τον διαπιστωμένο θεραπευτικό τους αντίκτυπο βάσει ιατρικής παρατήρησης.

Στην Ελλάδα έχουν καταγραφεί συνολικά 752 θερμομεταλλικές πηγές. Από αυτές, συνολικά 348 πηγές χρησιμοποιούνται ως ιαματικές, με τις 200 να χρησιμοποιούνται για λουτροθεραπεία και τις 148 για ποσιθεραπεία. Παρ' όλα αυτά, το Υπουργείο Τουρισμού αναγνωρίζει επίσημα μόλις 80 από αυτές (2021). Ακόμη, είναι άξιο αναφοράς ότι ορισμένα στοιχεία έχουν την ικανότητα να παρέχουν θεραπευτικά χαρακτηριστικά στο νερό, όταν υπάρχουν σε συγκεντρώσεις πάνω από ένα συγκεκριμένο όριο. Πιο συγκεκριμένα για το λίθιο $\text{Li}^+ > 1 \text{ mg/L}$, το βάριο $\text{Ba}^{2+} > 5 \text{ mg/L}$, και το στρόντιο $\text{Sr}^{2+} > 10 \text{ mg/L}$ (Αθανασούλη, και συν., 2009).

9.3 Φυτικοχημικά Χαρακτηριστικά Θερμομεταλλικών-Ιαματικών νερών

Ένα νερό μπορεί να χαρακτηριστεί ως μεταλλικό αν έχει περιεκτικότητα σε ένα ή περισσότερα από τα παρακάτω στοιχεία ως εξής: $\text{Fe}^+ > 10 \text{ mg/kg}$, $\text{As}^- > 0,7 \text{ mg/kg}$, $\text{I}^- > 1 \text{ mg/kg}$, $\text{S} > 1 \text{ mg/kg}$, $\text{CO}_2 > 250 \text{ mg/kg}$, $\text{F}^- > 2 \text{ mg/l}$, $\text{Br}^- > 5 \text{ mg/l}$ και $\text{Rn} > 18 \text{ nCi/l}$. Το χλώριο (Cl^-) είναι το κυρίαρχο ιόν που συμμετέχει στη δημιουργία των αλάτων χλωριούχου νατρίου (NaCl) και χλωριούχου καλίου (KCl). Τα κύρια κατιόντα που απαντώνται στη χημική σύνθεση των θερμομεταλλικών ρευστών είναι τα νάτριο, κάλιο και λίθιο (Na^+ , K^+ και Li^+). Το Li^+ υπάρχει σε μικρές ποσότητες, αλλά μπορεί να έχει θεραπευτικές επιδράσεις όταν η συγκέντρωσή του υπερβαίνει το 1 mg/l . Τα ιόντα ασβεστίου (Ca^{2+}) βρίσκονται συνήθως μαζί με ιόντα μαγνησίου (Mg^{2+}) και αντιδρούν κυρίως με ανθρακικά άλατα και χλώριο για την παραγωγή ενώσεων. Η παρουσία ιόντων βαρίου (Ba^{2+}) σε συγκεντρώσεις άνω των 5 mg/l και ιόντων στρόντιου (Sr^{2+}) σε συγκεντρώσεις άνω των 10 mg/l έχει επίσης θεραπευτικά αποτελέσματα. Πρόσθετα συστατικά περιλαμβάνουν το μεταβορικό οξύ (HBO_2) σε συγκεντρώσεις άνω των 5 mg/l και το H_2SiO_2 , που συνήθως συναντώνται σε θερμές ανθρακικές πηγές. Επίσης, ως κολλοειδή, μπορεί επίσης να εμπλέκονται το υδροξύλιο του σιδήρου και το πυρίτιο. Τέλος, είναι άξιο αναφοράς ότι τα θερμομεταλλικά νερά συχνά περιλαμβάνουν σε ίχνη διάφορα συστατικά, όπως καταλύτες, ολιγοστοιχεία, ορμόνες και οργανικές ενώσεις. Τα συστατικά αυτά δεν είναι πλήρως κατανοητά, αλλά πιστεύεται ότι συμβάλλουν στα μοναδικά θεραπευτικά χαρακτηριστικά των νερών (Βασιλόπουλος 2022).

9.4 Ταξινόμησης Μεταλλικών Νερών

9.4.1 Ταξινόμηση με βάση την προέλευση τους

Τα θερμομεταλλικά νερά αναλόγως τη προέλευσή τους διαχωρίζονται ως εξής:

- **Γεωθερμικά ρευστά**, τα οποία έρχονται στην επιφάνεια μέσω του μηχανισμού των γεωθερμικών νερών και προέρχονται κυρίως από μετεωρικές πηγές. Κατά την κάθοδό τους, είναι πιθανή η ανάμειξη τους είτε με μαγματικά είτε με νεαρά νερά και η μεταλλικότητά τους επηρεάζεται από τα πετρώματα που συναντούν καθώς ταξιδεύουν στο υπέδαφος. Εάν συνδυάζονται με νερό από υδροφόρους ορίζοντες χαμηλότερης θερμοκρασίας, η θερμοκρασία τους πέφτει καθώς ανεβαίνουν στην επιφάνεια.
- **Ενδογενή ή νεαρά νερά**. Η μαγματική προέλευση αυτών των ουσιών προέρχεται από τον μανδύα και διακρίνονται από αυξημένες θερμοκρασίες και σημαντική συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα.
- **Απολιθωμένα ή συγγενετικά νερά**. Αυτά έχουν σημαντικά αυξημένη περιεκτικότητα σε μέταλλα. Το αλμυρό νερό παγιδεύτηκε στα ιζήματα κατά τη διάρκεια της ανάπτυξής τους και αργότερα εισήλθε σε ένα σύστημα κυκλοφορίας μετεωρικού νερού.
- **Ανάμικτα θερμομεταλλικά νερά**. Τα ρευστά αυτά είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού νερών από τις άλλες κατηγορίες και είναι γεωθερμικά ρευστά μετεωρικής προέλευσης, με μικρές ποσότητες νεαρών ή παρόμοιων νερών.

9.4.2 Ταξινόμηση με βάση τη θερμοκρασία τους

Η ταξινόμηση των μεταλλικών πηγών ανάλογα τη θερμοκρασία τους είναι η εξής :

❖ Σύμφωνα με τον **Thurner**

Ελαφρά θερμές πηγές	Θερμοκρασία 20-25 °C
Θερμές πηγές	Θερμοκρασία 25-32 °C
Πολύ θερμές πηγές	Θερμοκρασία >32 °C

***Πίνακας 9.1:** Ταξινόμηση θερμοκρασίας, Thurner*

❖ Σύμφωνα με τον **Castany (1963)**

Υπέρθερμες πηγές	Θερμοκρασία 50-100 °C
Μεσόθερμες πηγές	Θερμοκρασία 35-50 °C
Υπόθερμες πηγές	Θερμοκρασία 20-35 °C

***Πίνακας 9.2:** Ταξινόμηση θερμοκρασίας, Castany*

❖ Σύμφωνα με τους **Kappelmeyer-Haenel (1974)**

Υπέρθερμες πηγές	Θερμοκρασία >38 °C
Μεσόθερμες πηγές	Θερμοκρασία 34-38 °C
Υπόθερμες πηγές	Θερμοκρασία 20-34 °C

***Πίνακας 9.3:** Ταξινόμηση θερμοκρασίας, Kappelmeyer-Haenel*

Όταν η θερμοκρασία των πηγών είναι μικρότερη από 20 °C, τότε οι πηγές ονομάζονται ψυχρές ή ακρατοπηγές.

9.4.3 Ταξινόμηση κατά χημική σύσταση

Οι μεταλλικές πηγές χαρακτηρίζονται με βάση τη χημική τους σύνθεση και τα ιόντα ή κατιόντα που αποτελούν πάνω από το 20% του συνόλου.

❖ Σύμφωνα με τον **Castany (1963)** ταξινομούνται ως εξής:

Ομάδα Νερών	Κύριος Τύπος	Μικτοί Τύποι
Οξυανθρακικά	Νατριούχα Ασβεστούχα	Χλωριονατριούχα Μαγνησιοασβεστούχα
Χλωριούχα, Νατριούχα	Νατριούχα Ασβεστούχα	Ανθρακονατριούχα Ανθρακοασβεστούχα
Θειικά, Θειούχα, Ραδιούχα	Νατριούχα Ασβεστούχα Χλωριοασβεστούχα	Νιτρικά

Πίνακας 9.4: Ταξινόμηση χημικής σύστασης, Castany

❖ Ανάλογα με τα **ιόντα** που επικρατούν διακρίνονται σε:

Αλκαλικά	Επικρατούν τα ιόντα Na και HCO ₃
Γαιώδη	Επικρατούν τα ιόντα Ca, Mg και HCO ₃
Μουριατικά	Επικρατούν τα ιόντα Na και Cl
Γαιωμουρατικά	Επικρατούν τα ιόντα Ca ή Mg και Cl σε σχέση με τα Na
Αλμυρά	Επικρατούν τα ιόντα Na και SO ₄
Θειικά	Επικρατούν τα ιόντα Ca και SO ₄
Πικρά	Επικρατούν τα ιόντα Mg και SO ₄

Πίνακας 9.5: Ταξινόμηση βάση κύριων ιόντων (Αθανασούλης και συν., 2009)

9.4.4 Γενική ταξινόμηση κατά Thurner

Ο Thurner (1967) προτείνει την παρακάτω ταξινόμηση:

- Νερά με TDS > 1 g/kg
 - Χλωριούχα νερά (Cl).
Νατριο-χλωριούχα, Ασβεστο-χλωριούχα, Μαγνησιο-χλωριούχα
 - Οξυανθρακικά νερά (HCO₃).
Νατριο-οξυανθρακικά (αλκαλικές πηγές), Ασβεστο-οξυανθρακικά (πηγές αλκαλικών γαιών), Μαγνησιο-ανθρακικά (πηγές αλκαλικών γαιών)
 - Ανθρακικά νερά (CO₂)

- Θεικά νερά.
Νατριο-θεικά, Μαγνησιο-θεικά, Αβεστιο-θεικά, Σιδηρο-θειικά και Αργιλιο-θειικά.
2. Νερά, τα οποία, ανεξάρτητα από το TDS, περιέχουν ιδιαίτερα δραστικά συστατικά.
 - Σιδηρούχα ($\text{Fe} > 10 \text{ mg/kg}$)
 - Ραδονούχα ($\text{Rn} > 18 \text{ nCi/kg}$)
 - Αρσενικούχα ($\text{As} > 0,7 \text{ mg/kg}$)
 - Ραδιούχα ($\text{Ra} > 10^{-7} \text{ mg/kg}$)
 - Ιωδούχα ($\text{I} > 1 \text{ mg/kg}$)
 - Ανθρακικά ($\text{CO}_2 > 100 \text{ mg/kg}$)
 - Θειούχα ($\text{S} > 1 \text{ mg/kg}$)
 3. Νερά με φυσική θερμοκρασία ψηλότερη από 20°C . Πρόκειται για τις λεγόμενες θέρμες.
 4. Νερά ολιγομεταλλικά ή νερά με χαμηλή θερμοκρασία ($\leq 20^\circ\text{C}$), τα οποία έχει αποδειχτεί κλινικά ότι έχουν θεραπευτικές ιδιότητες.

10. Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΝΕΡΩΝ ΣΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΟ

10.1 Γενικά

Οι γεωλογικές και τεκτονικές συνθήκες της Ελλάδας παρέχουν ένα ιδιαίτερα σημαντικό γεωθερμικό δυναμικό, το οποίο αξιοποιείται για θερμαλιστικούς σκοπούς. Οι θερμομεταλλικές πηγές αποτελούν κρίσιμο κομμάτι της γεωθερμικής ενέργειας και συνδέονται στενά με τον θερμαλισμό, δηλαδή τη χρήση των ιαματικών νερών από τον άνθρωπο, ο οποίος ασκείται εδώ και πολλούς αιώνες με σκοπό την ενίσχυση της υγείας και για θεραπευτικούς λόγους. Ο πρωταρχικός στόχος είναι να μετριαστεί, να διατηρηθεί ή να αποκατασταθεί η σωματική και ψυχική ευεξία.

Οι θεραπευτικές και ευεργετικές ιδιότητες των ιαματικών νερών προκύπτουν από εμπειρικές παρατηρήσεις καθώς και από επιστημονικές έρευνες και έχουν τριπλή φύση (θερμική, χημική, μηχανική). Η θερμική δράση αυτών των νερών αποδίδεται στη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ανθρώπινου σώματος και του νερού. Σε θερμοκρασίες που υπερβαίνουν τους 38-40 °C, οι μύες υφίστανται θέρμανση και χαλάρωση, με αποτέλεσμα την ενίσχυση της κινητικότητας και την ανακούφιση από τον πόνο. Σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες, το υγρό μέσα στις αρθρώσεις υφίσταται απορρόφηση, διευκολύνοντας έτσι τη διείσδυση των μεταλλικών στοιχείων. Η χημική δράση προκύπτει ως αποτέλεσμα της επαφής και της διείσδυσης των μετάλλων του ιαματικού νερού στο δέρμα. Αυτά τα στοιχεία μπορεί να υπάρχουν με τη μορφή διαλυμένων στερεών συστατικών (Na, K, Mg, Fe, Ra) ή σε αέρια κατάσταση (O, CO₂, N, H₂S). Οι νόμοι του Αρχιμήδη, οι οποίοι αφορούν το φαινόμενο της άνωσης και την υδροστατική πίεση, αποτελούν τη βάση για τη μηχανική δράση των νερών. Έτσι, όταν το ανθρώπινο σώμα είναι βυθισμένο στο νερό υφίσταται μείωση του βάρους, με αποτέλεσμα να διευκολύνει τις κινήσεις, να πραγματοποιεί μυϊκή χαλάρωση και να επιφέρει ψυχολογική ευεξία (Μπαμπάτσος 2021)

10.2 Μορφές Υδροθεραπείας

Η υδροθεραπεία είναι μια θεραπευτική αγωγή που περιλαμβάνει τη χρήση του νερού ιαματικών πηγών για θεραπευτικούς σκοπούς. Περιλαμβάνει δύο μορφές, την εσωτερική και την εξωτερική, καθεμία από τις οποίες μπορεί να ταξινομηθεί περαιτέρω σε διάφορες κατηγορίες.

10.2.1 Εσωτερική

Την εσωτερική αποτελούν:

- **Η ποσιθεραπεία.** Αυτή διεξάγεται με κατάποση ιαματικών νερών που διαθέτουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ποιότητας, ορισμένα εκ των οποίων είναι και διουρητικά. Αποτελεί ενδεδειγμένη θεραπεία για παθήσεις που

αφορούν τα νεφρά, το συκώτι, τη χοληδόχο κύστη, το ουροποιητικό και το πεπτικό σύστημα, παθήσεις του στομάχου και των εντέρων. Έχει διάρκεια εφαρμογής 3 έως 4 εβδομάδες με άμεσα ευεργετικά αποτελέσματα (Σαρακιώτης, 1999).

- **Η εισπνοθεραπεία.** Αυτή βασίζεται στη μετατροπή του ιαματικού νερού σε σταγονίδια και στην εκμετάλλευση των αερίων που εμπεριέχονται εντός αυτών. Οι εισπνοές, η νεφελοποίηση (μετατροπή του νερού σε σταγονίδια με κατάλληλες συσκευές), το αεροζόλ (χρήση συμπιεσμένου ατμού) και το humag (εισπνοές αερίων) αποτελούν τις τεχνικές της εισπνοθεραπείας. Οι εν λόγω εισπνοές ατμού ή και αερίου καθίστανται δυνατές με τη βοήθεια εξειδικευμένων συσκευών. Γενικά, η παρούσα θεραπεία κρίνεται κατάλληλη για να αντιμετωπιστούν παθήσεις σχετικές με το αναπνευστικό σύστημα (π.χ. άσθμα, χρόνια βρογχίτιδα κ.).
- **Οι πλύσεις,** οι οποίες μπορούν να είναι είτε στοματικές ή ρινικές, ακόμα και γυναικολογικές (Σαρακιώτης, 1999).

10.2.2 Εξωτερική

Την εξωτερική αποτελούν:

- **Η λουτροθεραπεία.** Διεξάγεται με την εισαγωγή του επισκέπτη σε ατομικό λουτρό. Η θεραπεία διαρκεί δύο εβδομάδες συνήθως, πραγματοποιώντας 1 λουτρό ανά ημέρα (διάρκεια ~20 λεπτά), αφού έχει παρέλθει το διάστημα της χώνεψης προσαυξημένο κατά 30 λεπτά. Η λουτροθεραπεία κρίνεται κατάλληλη για νευρολογικές, δερματολογικές (έγκαυμα, ψωρίαση, ακμή κ.ά.), χρόνιες ρευματικές (ταυτόχρονα με τη λασποθεραπεία και τη κινησιοθεραπεία), όπως επίσης και για γυναικολογικές παθήσεις (κολπίτιδες, διαταραχές εμμήνου ρύσης κ.ά.)
- **Οι καταιονήσεις.** Είναι θεραπεία κατά την οποία ο επισκέπτης δέχεται για ορισμένο χρόνο το ιαματικό νερό με πίεση και θερμοκρασία που το καθιστά κρύο, χλιαρό, θερμό ή και υπέρθερμο. Για την αντιμετώπιση ρευματικών παθήσεων γίνεται χρήση αποκλειστικά θερμών και υπέρθερμων καταιονήσεων.
- **Οι υδρομαλάξεις.** Εφαρμόζεται πίεση στο σώμα του επισκέπτη, καθώς αυτός βρίσκεται μέσα στο ιαματικό νερό, η θερμοκρασία του οποίου βρίσκεται μεταξύ 34-37 °C. Οι μαλάξεις διαρκούν είκοσι λεπτά και πραγματοποιούνται σε διαφορετικές μυϊκές ομάδες, αναλόγως της θέσεως του λουόμενου. Η θεραπεία συνίσταται για να αντιμετωπιστούν κατάγματα, κακώσεις, αρθροπάθειες, οσφυαλγία, ισχαιμία, σπονδυλαρθρίτιδα και σπαστικές παραλύσεις.

- **Η υδροκινησιοθεραπεία**, που αποτελεί συνδυασμό ανάμεσα σε λουτροθεραπεία και κινησιοθεραπεία. Ενδείκνυται για ρευματικές και μυοσκελετικές παθήσεις.
- **Η πηλοθεραπεία ή λασποθεραπεία**. Περιλαμβάνεται επάλειψη με πηλό ή λάσπη, που έχουν "ωριμάσει", σε σημεία του σώματος του επισκέπτη που πάσχουν με σκοπό τη θεραπεία δερματικών και μυοσκελετικών παθήσεων. Εφαρμόζεται 10-15 φορές για 20 λεπτά, με διακοπή για 1-2 ημέρες.
- **Η θαλασσοθεραπεία**. Χρησιμοποιείται θαλασσινό νερό (το οποίο έχει θερμανθεί στους 35-37 °C) και άλλοι φυσικοί πόροι με σκοπό τη θεραπεία και την πρόληψη. Κρίνεται κατάλληλη για καρδιαγγειακές, αναπνευστικές, ρευματικές και μυοσκελετικές παθήσεις. Πολλά θαλασσοθεραπευτικά κέντρα λειτουργούν τα τελευταία χρόνια ενταγμένα εντός πολυτελών ξενοδοχειακών μονάδων. Βασική προϋπόθεση για ένα κέντρο αποτελεί η εγκατάσταση να τοποθετείται πλησίον της θάλασσας και το νερό να αντλείται από βάθος 2.5m σε απόσταση κατ' ελάχιστο 400m από τις ακτές.
- **Η κλιματοθεραπεία**, η οποία δε συναντάται επίσημα σε κάποια περιοχή της χώρας, παρόλα αυτά, εφαρμόζεται έμμεσα σε πολλές περιοχές ιαματικών πηγών. Στην κεντρική Ευρώπη πραγματοποιείται ως αυτόνομη αγωγή από ειδικά εξειδικευμένα κέντρα. Αποτελεί γεγονός πως το κλίμα επιδρά στην ανθρώπινη υγεία και το θαλάσσιο κλίμα θεωρείται κατάλληλο για νευρολογικές παθήσεις και μεταβολικές διαταραχές. Αντίστοιχα, το ορεινό κλίμα ενδείκνυται για αναπνευστικές και καρδιαγγειακές παθήσεις (Σαρακιώτης, 1999).

10.3 Θεραπευτικές Ενδείξεις

Τα αδιαμφισβήτητα πλεονεκτήματα του θερμομεταλλικού νερού έχουν τεκμηριωθεί από ειδικούς επιστήμονες και υδρολόγους, οι οποίοι έχουν αναφέρει την αποτελεσματικότητά του στη θεραπεία ενός ευρέος φάσματος παθήσεων. Παρακάτω παρατίθεται μια συνοπτική επισκόπηση των ενδείξεων για τις κυριότερες θεραπείες.

- ❖ Ενδείξεις ποσιθεραπείας. Σχετικά με το πεπτικό σύστημα, αποδίδει ευνοϊκά αποτελέσματα σε μια σειρά δυσπεπτικών προβλημάτων, συμπεριλαμβανομένης της κολίτιδας, μεταξύ άλλων. Όσον αφορά το ήπαρ και τις χοληφόρους οδούς, συνιστάται για τη θεραπεία της χολοκυστίτιδας, της χολολιθίας και της ήπιας ηπατικής ανεπάρκειας. Αναφορικά με τη θρέψη και τις ουροφόρους οδούς, προτείνεται για τα άτομα με ουρική διάθεση, ουρολιθίαση, απλή λευκωματουρία ή χρόνια κυστίτιδα (Μπαμπάτσος 2021).
- ❖ Ενδείξεις εισπνοθεραπείας. Όσον αφορά το αναπνευστικό σύστημα, συνιστάται να εξετάζεται η εφαρμογή του σε περιπτώσεις χρόνιας βρογχίτιδας, ρινίτιδας, φαρυγγίτιδας, λαρυγγίτιδας, πνευμονικού εμφυσήματος, άσθματος και

παρόμοιων καταστάσεων. Παρ' όλα αυτά, η ανάπτυξη της θεραπείας με εισπνοές στην Ελλάδα είναι πολύ περιορισμένη.

- ❖ Ενδείξεις λουτροθεραπείας. Συνιστάται η χρήση της για την ανακούφιση από ρευματικές παθήσεις όπως η ρευματοειδής αρθρίτιδα, η αρθρίτιδα ώμων, η αρθρίτιδα γόνατος κα. Όταν πρόκειται για δερματικά προβλήματα, όπως το έκζεμα, η δερματίτιδα και η ψωρίαση, συνιστάται η χρήση κυρίως νατριούχων, μέτριας περιεκτικότητας σε νάτριο νερών. Τα άτομα που επιδίδονται σε δραστηριότητες κολύμβησης και υποφέρουν από πόνους στην πλάτη και ισχιαλγία βλέπουν μείωση των επιπέδων πόνου και βελτιωμένη κινητικότητα. Ομοίως, τα άτομα που πάσχουν από αυχενικό σύνδρομο αναφέρουν επίσης μείωση των συμπτωμάτων πονοκεφάλου, γεγονός που υποδηλώνει βελτίωση του μυοσκελετικού συστήματος. Επιπλέον, όσον αφορά το κυκλοφορικό σύστημα, έχει διαπιστωθεί ότι η λουτροθεραπεία ενισχύει την αρτηριακή υπέρταση προκαλώντας αγγειοδιαστολή, με αποτέλεσμα τη μείωση της πίεσης. Ακόμη, συμβάλλει στην καταστολή χρόνιας φλεβίτιδας και στεφανιαίας ανεπάρκειας. Τέλος, τα ιαματικά νερά θεωρούνται πλεονεκτικά για τη γυναικεία φλεγμονή, ωστόσο η έκταση αυτής της επίδρασης δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς (Μπαμπάτσος 2021).

10.4 Η Προέλευση των κύριων ιόντων στο νερό και η Επίδραση τους στον Άνθρωπο

Οι επόμενες παράγραφοι περιλαμβάνουν λεπτομέρειες σχετικά με την προέλευση των κύριων ιόντων και των ιχνοστοιχείων, καθώς και τα πιθανά πλεονεκτήματα και τους κινδύνους για την υγεία.

➤ Ασβέστιο (Ca)

Το ασβέστιο αποτελεί ένα από τα κύρια στοιχεία των ηφαιστειακών πετρωμάτων, και ιδιαίτερα της αλυσίδας των πυρόξενων, των αμφιβόλων και των αστρίων. Βρίσκεται επίσης σε πυριτικά που έχουν υποστεί μεταμόρφωση. Στα ανθρακικά πετρώματα εμφανίζεται με τη μορφή κρυσταλλικού ασβεστίτη, αραγωνίτη ή δολομίτη σε κρυσταλλική μορφή, ενώ στα ιζηματογενή πετρώματα απαντάται στο γύψο, ανυδρίτη, φθορίτη, μοντοριλλονίτη και ζεόλιθους. Ακόμη, εμφανίζεται μέσα σε ψαμμίτες και άλλα κλαστικά.

Η κατανάλωση βιοαποδομήσιμου ασβεστίου σε πόσιμο νερό σε καθημερινή βάση είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της ομοιόστασης του ασβεστίου και την ενίσχυση της μάζας των οσφυϊκών οστών (Costi et al., 1999). Διαθέτει κρίσιμο ρόλο στη διαδικασία πήξης του αίματος και είναι απαραίτητο για την ενεργοποίηση των μυϊκών συσπάσεων. Έχει βρεθεί ότι το σκληρό νερό παρέχει προστασία έναντι πολλών μορφών καρκίνου και της γνωστικής φθοράς σε ηλικιωμένα άτομα. Προφανώς, οι επιδράσεις δεν εμφανίζονται όταν οι συγκεντρώσεις ασβεστίου υπερβαίνουν τα 80 mg/L. Ασθενείς με πέτρες στα νεφρά παρουσίασαν αύξηση απέκκρισης της κρεατινίνης Ca/Mg στα

ούρα σε συσχέτιση με την αυξημένη σκληρότητα του πόσιμου νερού. Επίσης, η έλλειψη ασβεστίου μπορεί να οδηγήσει σε μυϊκές κράμπες, άγχος και διαταραχές στο σκελετικό σύστημα. Το συνιστώμενο εύρος συγκέντρωσης για την αποφυγή ανεπιθύμητων ενεργειών είναι 20-80 mg/L. Οι προτεινόμενες τιμές συγκέντρωσης για την αποφυγή παρενεργειών είναι 20-80 mg/L, Ca: Mg 2-3: 1. Τέλος το TDS δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1 g/L ως απόλυτο ανώτερο όριο, αλλά συνιστάται

➤ *Μαγνήσιο (Mg)*

Το μαγνήσιο βρίσκεται άφθονο στα ηφαιστειακά πετρώματα, ιδιαίτερα στα σιδηρομαγνησιακά ορυκτά, όπως ο ολιβίνη, οι πυρόξενοι, οι αμφίβολοι και οι μαρμαρυγίες. Στα εξαλλοιωμένα πετρώματα, εμφανίζεται στο χλωρίτη και στο σερπεντίνη ενώ στα ιζηματογενή απαντάται σαν μαγνησίτης και δολομίτης. Ακόμη, το μαγνήσιο αφθονεί στους ασβεστολίθους.

Παίζει σημαντικό ρόλο στη σκληρότητα του νερού και χρησιμεύει ως δομικό συστατικό για τα οστά και τα δόντια, αλλά και για πολλά ενζυμικά συστήματα. Επιπλέον, παίζει ρόλο στη σύνθεση πρωτεϊνών και στην ενεργοποίηση των μυών και των νευρώνων. Σύμφωνα με μελέτη που διεξήχθη από τον Schroeder (1996), οι πόλεις που είχαν πρόσβαση σε νερό με υψηλά επίπεδα μαγνησίου παρουσίασαν μείωση των πρόωρων θανάτων από όλες τις αιτίες. Συγκεκριμένα, οι πόλεις με νερό που περιείχε 20 mg/L μαγνησίου είχαν 35% χαμηλότερο ποσοστό θνησιμότητας από καρδιαγγειακά νοσήματα συγκριτικά με πόλεις που το νερό τους περιείχε περίπου 2 mg/L μαγνησίου. Η πρόσληψη μαγνησίου από το πόσιμο νερό έχει αξιοσημείωτο προληπτικό αντίκτυπο κατά του καρκίνου του παχέος εντέρου, του μαστού και του προστάτη, καθώς και του διαβήτη. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η κατανάλωση μεγαλύτερων ποσοτήτων αλάτων μαγνησίου, και πιο συγκεκριμένα του $MgSO_4$, μπορεί να οδηγήσει σε διάρροια (WHO 2011). Οι προτεινόμενες τιμές συγκέντρωσης για την αποφυγή παρενεργειών είναι 10-50 mg/L. Το συνιστώμενο ανώτατο όριο είναι 150 mg/L ενώ συνιστάται λόγος Ca: Mg 2-3: 1.

➤ *Νάτριο (Na)*

Το νάτριο είναι άφθονο σε ηφαιστειακούς, ιζηματογενείς σχηματισμούς καθώς και στους εβαπορίτες. Το νάτριο προσλαμβάνεται από τα ορυκτά που έχουν την ικανότητα ανταλλαγής ιόντων, όπως οι άργιλοι, μέσω επιφανειακής απορρόφησης. Όσον αφορά τους άστριους, οι καλιούχοι άστριοι παρουσιάζουν αντίσταση στη διάβρωση, αλλά τα ορυκτά που περιέχουν νάτριο και ασβέστιο είναι επιρρεπή. Στα ιζήματα resistate το νάτριο βρίσκεται σε μη εξαλλοιωμένους κόκκους, σαν ακαθαρσία. Τα άλατα αυτά αποσύρονται από τα ιζήματα και στη συνέχεια διαλύονται λόγω περιβαλλοντικών αλλαγών, με αποτέλεσμα την απόπλυσή τους από το νερό.

Το νάτριο, σε συνδυασμό με το κάλιο, είναι απαραίτητο για τη διατήρηση της ισορροπίας των σωματικών υγρών και του επιπέδου του pH. Βρίσκεται στο 75-98%

του αίματος, και σε άλλα εξωκυττάρια υγρά, όπως η λέμφος, και στα οστά. Η έλλειψη νατρίου μπορεί να εκδηλωθεί με συμπτώματα όπως ναυτία, εξάντληση και μυϊκές κράμπες, ενώ η υπερβολική πρόσληψη νατρίου μπορεί να οδηγήσει σε συμπτώματα όπως ναυτία, έμετο, σπασμούς, μυϊκές συσπάσεις, δυσκαμψία, καθώς και εγκεφαλικό και πνευμονικό οίδημα. Τέλος, τα αυξημένα επίπεδα νατρίου στο πόσιμο νερό μπορεί να οδηγήσουν σε αυξημένη αρτηριακή πίεση. Οι προτεινόμενες τιμές συγκέντρωσης για την αποφυγή παρενεργειών είναι 20-100 mg/L και για το λόγο Na: K, επιθυμητή αναλογία είναι 2-5: 1.

➤ *Κάλιο (K)*

Το κάλιο υπάρχει σε μικρές ποσότητες στα ηφαιστειακά και σε σημαντικές ποσότητες στα ιζηματογενή πετρώματα. Η απομάκρυνσή του από τα πυριτικά άλατα και ο σχηματισμός νέων στερεών προϊόντων αργίλου είναι σχετικά δύσκολη. Οι άστριοι, ο μαρμαρυγίας και ο λευκίτης είναι τα κύρια ορυκτά στα οποία εμφανίζεται. Στα ιζηματογενή πετρώματα εμφανίζεται σε μη εξαλλοιωμένους αστρίους, σε μαρμαρυγίες και σε άλλα αργιλικά ορυκτά. Μπορεί επίσης να βρεθεί σε ψαμμίτες και εβαπορίτες, οι οποίοι αυξάνουν την περιεκτικότητα της πετρελαϊκής άλμης. Η παρουσία αργιλοπυριτικών ορυκτών συμβάλλει στη χαμηλή συγκέντρωση καλίου στο νερό, η οποία συνήθως κυμαίνεται από μερικές δεκάδες mg/L στα υπόγεια ύδατα. Ωστόσο, στην περίπτωση ρευστών με υψηλή περιεκτικότητα σε διαλυμένα στερεά και νερών από θερμές πηγές, η συγκέντρωση καλίου μπορεί να είναι υψηλότερη.

Το κάλιο παίζει καθοριστικό ρόλο στην διέγερση των μυών και των νεύρων, επηρεάζει τη λειτουργία της καρδιάς και συμβάλλει στη ρύθμιση της αρτηριακής πίεσης. Η έλλειψη καλίου μπορεί να οδηγήσει σε μυϊκή αδυναμία και διαταραχές τόσο στη μετάδοση των νευρικών ερεθισμάτων όσο και στη λειτουργία της καρδιάς. Η συγκέντρωση καλίου στο πόσιμο νερό είναι ελάχιστη και δεν ενέχει κινδύνους σε υγιή άτομα, όμως συγκεντρώσεις που είναι κάπως αυξημένες, περίπου <10 mg/L, μπορούν επίσης να εμφανιστούν ως αποτέλεσμα της χρήσης υπερμαγγανικού καλίου, KMnO_4 , ως οξειδωτικού στην επεξεργασία του νερού. Δεδομένης της ανεπάρκειας καλίου στη δυτική διατροφή, η κατανάλωση νερού θα μπορούσε ενδεχομένως να θεωρηθεί σημαντικό μέσο πρόσληψης καλίου στο μέλλον. Το προτεινόμενο εύρος συγκέντρωσης για την αποφυγή ανεπιθύμητων ενεργειών είναι 5-10 mg/L, ενώ για την αναλογία Na:K, μια επιθυμητή τιμή είναι 2-5:1. Υπό το πρίσμα των ανησυχιών σχετικά με την ανάγκη ενίσχυσης της ανθρώπινης πρόσληψης καλίου, είναι πιθανό το συνιστώμενο εύρος συγκεντρώσεων καλίου να αυξηθεί στο μέλλον.

➤ *Χλώριο (Cl)*

Στα ηφαιστειακά πετρώματα, το χλώριο είναι παρόν σε ορυκτά όπως ο σοδαλίτης (άστριος) και ο απατίτης, αλλά η συγκέντρωσή του στο νερό είναι πολύ χαμηλή. Η σημαντικότερη πηγή χλωρίου στο νερό είναι τα ιζηματογενή πετρώματα, και ιδίως οι

εβαπορίτες. Το χλώριο εμφανίζεται είτε ως κρύσταλλοι χλωριούχου νατρίου είτε ως διάλυμα ιόντων νατρίου και χλωρίου. Οι ενώσεις του χλωρίου με αλκαλικά μέταλλα και αλκαλικές γαίες είναι διαλυτές στο νερό.

Το χλώριο υπάρχει σε μεγάλες ποσότητες στο υγρό του νωτιαίου μυελού και του εγκεφάλου και αποτελεί συστατικό του HCl στο στομάχι. Το αλάτι στη διατροφή παρέχει γενικά αρκετό χλώριο που απαιτείται για τον οργανισμό και επομένως δεν υπάρχει ανάγκη για αλάτι από το πόσιμο νερό. Γενικά η συγκέντρωση χλωρίου στο πόσιμο νερό κυμαίνεται από 30 έως 70 mg/L. Αυξημένα επίπεδα χλωρίου εντοπίζονται κατά μήκος των παράκτιων υδροφόρων οριζόντων και αποτελούν σαφή ένδειξη διείσδυσης θαλασσινού νερού, η οποία προκαλείται κυρίως από την υπερβολική χρήση των υδροφορέων πόσιμου νερού που αντλούν θαλασσινό νερό από παράκτιους υδροφορείς. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO 2011) και η Ευρωπαϊκή Ένωση έχουν θέσει ως συνιστώμενο ανώτατο όριο 250 mg/L για το Cl, κυρίως λόγω της επίδρασής του στη γεύση του νερού. Οι συνιστώμενες τιμές συγκέντρωσης για την αποφυγή παρενεργειών είναι 5-10 mg/L, ενώ για την αναλογία Na:K, μια επιθυμητή τιμή είναι 2-5:1. Τα συνιστώμενα όρια είναι 20-100 mg/L.

➤ Διττανθρακικά (HCO_3)

Τα διττανθρακικά παράγονται ως αποτέλεσμα της αντίδρασης μεταξύ του νερού και του ασβεστίτη, του δολομίτη και περιστασιακά του νακολίτη. Πρόσθετες πηγές διττανθρακικών περιλαμβάνουν την ατμόσφαιρα και τη διαδικασία αναγωγής των θεικών αλάτων. Αποτελούν συστατικά του συστήματος καρβονικών οξέων/διττανθρακικών αλάτων, το οποίο παίζει ρόλο στη ρύθμιση του pH του σώματος (Sonesson and Sonesson 2001).

Η τυπική διατροφή των ανθρώπων συχνά προκαλεί υπερβολική παραγωγή οξέων στο σώμα, οδηγώντας σε όξινο pH και προκαλώντας στη συνέχεια μεταβολικές διαταραχές. Τα νεφρά αποβάλλουν τα υπερβολικά οξέα. Η σχετιζόμενη με την ηλικία επιδείνωση της λειτουργίας των νεφρών μπορεί να οδηγήσει σε ανεπαρκή αποβολή των οξέων που παράγονται στο σώμα, οδηγώντας στη συσσώρευση περίσσειας οξέων που αντιδρούν με τα αλκαλικά αποθέματα που υπάρχουν στα οστά και το αίμα. Η αλκαλικότητα που απαιτείται για τη διατήρηση του pH του αίματος επιτυγχάνεται μέσω της σταδιακής εξάντλησης του ασβεστίου από τα οστά, η οποία θεωρείται ανεπιθύμητη. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται ως η αρχή της μεταβολικής οξέωσης. Επιστημονικές μελέτες δείχνουν ότι το ασυνήθιστα υψηλό ποσοστό πρόωρων θανάτων (αιφνίδιος θάνατος), μεταξύ νέων ατόμων από εγκεφαλικά επεισόδια, μπορεί να αποδοθεί στα εξαιρετικά χαμηλά ή ασήμαντα επίπεδα αλκαλικότητας HCO_3 στο πόσιμο νερό (Kobayashi 1957). Αντίθετα, μια υψηλότερη συγκέντρωση HCO_3 στο πόσιμο νερό μειώνει την ποσότητα του ουρικού ασβεστίου και μαγνησίου που χάνεται. Η κατανάλωση διττανθρακικού νερού έχει ως αποτέλεσμα αξιοσημείωτες μειώσεις στα επίπεδα ολικής χοληστερόλης και ως εκ τούτου, το διττανθρακικό μεταλλικό νερό έχει τη δυνατότητα να αξιοποιηθεί στη διατροφή ως μέσο μείωσης του κινδύνου καρδιαγγειακών παθήσεων και πρόληψης

της οστεοπόρωσης (Wynn et al., 2009). Το βέλτιστο εύρος συγκέντρωσης για τον μετριασμό των δυσμενών επιπτώσεων είναι 100-300 mg/L.

➤ *Θείο (S)*

Το θείο βρίσκεται σε αναγωγική κατάσταση σε ηφαιστειακά και ιζηματογενή πετρώματα, όπου σχηματίζει μεταλλικά σουλφίδια που δημιουργούν οικονομικά σημαντικά κοιτάσματα. Όταν το νερό εξαλλοιώνει τα σουλφίδια, το θείο υφίσταται οξείδωση και απελευθερώνει ιόντα SO_4^{2-} στο διάλυμα, μαζί με σημαντική ποσότητα ιόντων υδρογόνου. Οι κρύσταλλοι σιδηροπυρίτη, που βρίσκονται σε πληθώρα ιζηματογενών πετρωμάτων, χρησιμεύουν ως σημαντική πηγή Fe^{+2} και SO_4^{2-} . Το θείο βρίσκεται σε ορισμένα ηφαιστειακά πετρώματα της ομάδας των αστρίων, αλλά απαντάται πιο συχνά στα εβαποριτικά ιζήματα με τη μορφή γύψου ή ανυδρίτη. Οι θειούχες ενώσεις βαρίου και στροντίου είναι εξαιρετικά δυσδιάλυτες, γεγονός που τις καθιστά σχετικά σπάνιες.

Το θείο είναι παρόν σε όλους τους ιστούς και χρησιμεύει ως συστατικό των αμινοξέων, των ενζύμων και άλλων ενώσεων που αποθηκεύουν ενέργεια. Επιπλέον, βοηθά στη διαδικασία αποτοξίνωσης του οργανισμού αποβάλλοντας φαινόλες, αλκοόλες και στεροειδή. Σύμφωνα με τον Watts (1997), πιστεύεται ότι μειώνει τους κινδύνους για την υγεία που συνδέονται με την κατανάλωση βαρέων μετάλλων. Τα αυξημένα επίπεδα ουσιών στο πόσιμο νερό μπορεί να έχουν καθαρτική επίδραση, ιδίως στα βρέφη που καταναλώνουν βρεφικό γάλα που παρασκευάζεται από νερό που περιέχει υψηλές ποσότητες θεικών αλάτων (WHO 2011). Ως εκ τούτου, οι χαμηλές συγκεντρώσεις θεικών αλάτων μπορούν να προκαλέσουν δυσκοιλιότητα. Πόλεις με πόσιμο νερό που περιέχει χαμηλά επίπεδα SO_4 παρουσίασαν αυξημένα ποσοστά θνησιμότητας που αποδίδονται σε υψηλή αρτηριακή πίεση και αρτηριοσκλήρωση. Οι προτεινόμενες τιμές συγκέντρωσης για αποφυγή παρενεργειών είναι 50-250 mg/L. Για το εμπλουτισμένο με Mg νερό, συνιστάται ένα προσωρινό ανώτερο όριο ($\text{Mg} + \text{SO}_4$) $\approx 400 \text{ mg / L}$, με μέγιστη συγκέντρωση Mg 150 mg /L.

➤ *Φθόριο (F)*

Το φθόριο περιλαμβάνεται συνήθως στις χημικές αναλύσεις ως κύριο ιόν, παρόλο που η συγκέντρωσή του στο νερό σπάνια ξεπερνά το 1 mg/L. Ο φθορίτης είναι το κυρίαρχο ορυκτό φθορίου, που απαντάται συνήθως σε ηφαιστειακά και ιζηματογενή πετρώματα. Επίσης, φθόριο περιέχεται στο μαρμαρυγία και τον απατίτη. Η ηφαιστειακή τέφρα περιέχει υψηλή συγκέντρωση φθορίου και, όταν συνδυάζεται με άλλα ιζήματα, συμβάλλει στον εμπλουτισμό του φθορίου στο νερό. Τα αλκαλικά νερά παρουσιάζουν αυξημένα επίπεδα φθορίου, ενώ το θαλασσινό νερό περιέχει περίπου 1,3 mg/L φθορίου. Τέλος, ο ρυθμός απορρόφησης είναι μεγαλύτερος για τιμές pH άνω του 6, ενώ είναι ασήμαντος για τιμές pH κάτω του 4 και άνω του 7,5.

Περίπου το 99% του φθορίου στον οργανισμό βρίσκεται κυρίως στα δόντια και τα οστά. Ενώ χρησιμεύει ως προστατευτικό μέτρο κατά της τερηδόνας, η υπερβολική κατανάλωση φθορίου μπορεί να αποδειχθεί τοξική. Από τη δεκαετία του 1950, το φθόριο έχει εισαχθεί στα δημόσια ύδατα σε ορισμένες χώρες ως μέτρο για την πρόληψη της τερηδόνας (WHO 2011). Τα άτομα που κατοικούν σε περιοχές όπου το πόσιμο νερό περιέχει επίπεδα φθορίου που υπερβαίνουν το 1 mg/L μπορεί να εμφανίσουν ανάπτυξη οδοντικής φθορίωσης. Οι προτεινόμενες τιμές συγκέντρωσης για την αποφυγή παρενεργειών είναι 0,8-1,2 mg L.

➤ *Πυρίτιο (SiO_4^{4-})*

Η τετραεδρική δομή του πυριτίου λειτουργεί ως το θεμελιώδες δομικό στοιχείο για τη δημιουργία των ορυκτών που αποτελούν τα ηφαιστειακά και μεταμορφωμένα πετρώματα. Ο όρος *silica* αναφέρεται στη χημική ένωση SiO_2 , η οποία είναι ευρέως γνωστή ως διοξείδιο του πυριτίου, και χρησιμοποιείται για να περιγράψει την παρουσία διοξειδίου του πυριτίου σε ένα υλικό και την κατάσταση ενυδάτωσής του. Που αποτελείται από ή μοιάζει με κρυστάλλους. Ο χαλαζίας, ο οποίος αποτελείται από SiO_2 , είναι σημαντικό συστατικό των ηφαιστειακών πετρωμάτων και αποτελεί την πλειονότητα των κόκκων του ψαμμίτη. Επιπλέον, δεν είναι διαλυτός στο νερό. Η παρουσία πυριτίου στο νερό είναι αποτέλεσμα της διάβρωσης των πυριτικών ορυκτών. Το πυρίτιο είναι παρόν σε διάφορους συνδετικούς ιστούς, όπως το δέρμα, τα νύχια, τα μαλλιά, οι τένοντες και η αορτή. Η δυσλειτουργία του πυριτίου μπορεί να οδηγήσει σε βλάβες στο κεντρικό νευρικό σύστημα (ΚΝΣ) των ζώων, ιδίως στον εγκέφαλο, και να επηρεάσει την ανάπτυξη του συνδετικού και οστικού ιστού, καθώς και του δέρματος, των νυχιών και των δοντιών. Τα αυξημένα επίπεδα διοξειδίου του πυριτίου στο πόσιμο νερό μπορεί να έχουν ευεργετική επίδραση στη γνωστική λειτουργία και στην ανάπτυξη της αθηροσκλήρωσης. Το βέλτιστο εύρος συγκεντρώσεων για την πρόληψη δυσμενών επιπτώσεων είναι μεταξύ 2 και 10 χιλιοστογραμμάρια ανά λίτρο.

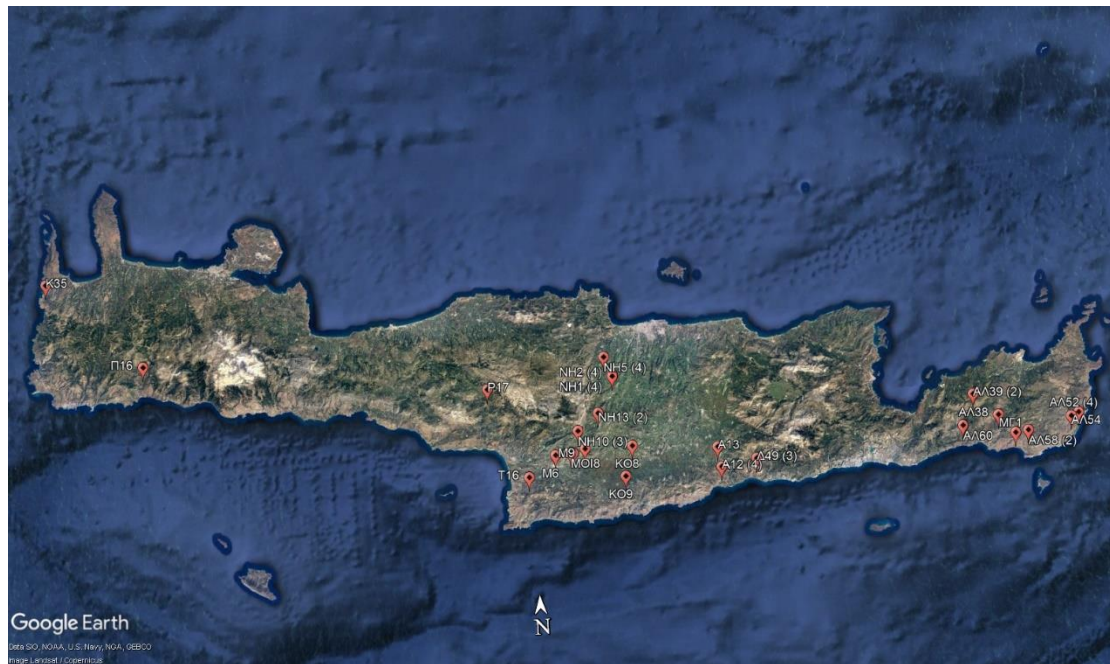
11. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

11.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό παρέχει μια επισκόπηση των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για τη συλλογή και την επεξεργασία των δεδομένων της παρούσας εργασίας, εστιάζοντας στα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά των υπόγειων υδάτων και των υδροφορέων στη νότια Κρήτη. Τα δεδομένα προήλθαν από το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ), συγκεκριμένα από τον τομέα «Υδατικών Πόρων Και Περιβάλλοντος» στο πλαίσιο του επιχειρησιακού προγράμματος «ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ». Τα στοιχεία αποτελούν μέρος του Υποέργου 1, με τίτλο «ΜΕΛΕΤΗ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ Ν.ΚΡΗΤΗΣ. ΠΗΓΕΣ, ΚΑΡΣΤΙΚΟΙ, ΠΡΟΣΧΩΜΑΤΙΚΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΟΙ. ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ (Υ.Δ. 13)», το οποίο εντάσσεται στο ευρύτερο έργο «ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΩΝ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΧΩΡΑΣ (Κ.Ε. 7.3.2.1)». Επί της ουσίας, το ΙΓΜΕ, πραγματοποίησε μια μελέτη υδροφόρων συστημάτων για την νότια Κρήτη, η οποία περιλαμβάνει την απογραφή των σημείων ύδατος, από τα οποία στην συνέχεια, δημιουργήθηκε ξεχωριστό αρχείο που διαθέτει χημικές αναλύσεις για τον καθορισμό των ποιοτικών παραμέτρων του νερού των υδροφόρων.

11.2 Επεξεργασία

Την αφετηρία της επεξεργασίας αποτέλεσε η διαλογή των υδάτων που παρουσιάζουν μεταλλικό χαρακτήρα, από το αρχείο των χημικών αναλύσεων, βάση της αγωγιμότητας τους. Στην συνέχεια, από το αρχείο της απογραφής των υδάτων, έγινε μετατροπή των συντεταγμένων των επιλεγμένων πηγών σε σύστημα "WGS84" και εισήχθησαν στο 3D πρόγραμμα απεικόνισης της Γης-Google Earth. Ακολουθώντας, με βάση τη θέση τους στο χάρτη, καταμερίστηκαν κατά προσέγγιση στο νότιο άξονα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 11.1.



***Εικόνα 11.1:.** Γεωγραφική θέση υδάτων περιοχής μελέτης, Google Earth*

Τα στοιχεία των υδάτων που καταμερίζονται στον νότιο άξονα ομαδοποιήθηκαν και παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες:

Α/Α	ΚΩΔΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΥΔΡΟΣΗΜΕΙΟΥ	ΕΙΔΟΣ ΥΔΡΟΣΗΜΕΙΟΥ	ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΟ ΦΥΛΛΟ ΧΑΡΤΗ	Χ	Υ	WGS84		ΥΨΟΜΕΤΡΟ
							Χ	Υ	
1	79	A12 (4)	Γεώτρηση	368 ΑΝΩ ΒΙΑΝΟΣ	618805	3873185	34.99689	25.30349	54
2	80	A13	Γεώτρηση	368ΑΝΩΒΙΑΝΟΣ	618105	3877887	35.03936	25.29649	217
3	115	ΑΛ38	Γεώτρηση	363ΣΗΤΕΙΑ	685136	3881686	35.06352	26.0319	211.6
4	116	ΑΛ39 (2)	Γεώτρηση	362ΚΑΤΩΧΩΡΙΟΝ	679049	3886946	35.11202	25.96632	439
5	129	ΑΛ52 (4)	Γεώτρηση	363ΣΗΤΕΙΑ	704358	3881198	35.05541	26.24244	38
6	131	ΑΛ54	Γεώτρηση	363ΣΗΤΕΙΑ	702453	3880443	35.04899	26.22138	59.6
7	135	ΑΛ58 (2)	Γεώτρηση	363ΣΗΤΕΙΑ	692039	3877687	35.02619	26.10663	74.6
8	138	ΑΛ60	Γεώτρηση	362ΚΑΤΩΧΩΡΙΟΝ	676506	3879637	35.0466	25.93688	25.1
9	174	Δ49 (3)	Γεώτρηση	368ΑΝΩΒΙΑΝΟΣ	627188.3	3874705	35.00956	25.39556	244
10	224	Κ35	Γεώτρηση	345ΚΑΣΤΕΛΛΙΟΝ	461013	3924518	35.466	23.57195	44.2
11	289	Μ6	Γεώτρηση	358ΤΥΜΠΑΚΙΟΝ	579755	3878002	35.04416	24.8761	59
12	292	Μ9	Γεώτρηση	358ΤΥΜΠΑΚΙΟΝ	586788	3879145	35.05388	24.95332	131
13	293	ΝΗ1 (4)	Γεώτρηση	359ΕΠΑΝΩΡΧΑΝΑΙ	594114	3895763	35.20305	25.03554	302
14	294	ΝΗ10 (3)	Γεώτρηση	358ΤΥΜΠΑΚΙΟΝ	585329	3883413	35.09249	24.93777	318
15	46	ΝΗ13 (2)	Πηγή	358ΤΥΜΠΑΚΙΟΝ	590304	3887344	35.12749	24.99277	560
16	300	ΝΗ2 (4)	Γεώτρηση	359ΕΠΑΝΩΡΧΑΝΑΙ	594110	3896225	35.20721	25.03555	304
17	314	ΝΗ5 (4)	Γεώτρηση	359ΕΠΑΝΩΡΧΑΝΑΙ	592322	3900397	35.24499	25.01638	185
18	323	Π6	Γεώτρηση	349ΒΑΤΟΛΑΚΟΣ	483312	3903900	35.28071	23.81813	79
19	326	Ρ17	Γεώτρηση	357ΜΕΛΑΜΠΕΣ	564538	3894302	35.19222	24.71054	196
20	-	ΚΟ8	Γεώτρηση	1_ΚΟΦΥΝΑ	597950	3879264	25.07572	35.05393	287
21	-	ΚΟ9	Γεώτρηση	2_ΚΟΦΥΝΑ	596037	3872265	25.05393	34.99101	231
22	-	ΜΟΙ7	Γεώτρηση	1_ΚΑΣΤΕΛΙ	583939	3878254	24.92199	35.04609	96
23	-	ΜΟΙ8	Γεώτρηση	2_ΚΑΣΤΕΛΙ	583381	3878341	24.91589	35.04692	95
24	-	ΜΓ1	Πηγή	ΠΕΡΙΒΟΛΑΚΙΑ	689045	3877246	26.07373	35.02278	110
25	-	Τ16	Γεώτρηση	ΣΙΒΑΣ	573259	3873133	24.80445	35.00075	124

Πίνακας 11.1: Πίνακας απογραφής επιλεγμένων σημείων ύδατος του νοτίου παραλιακού μετώπου

Α/Α	ΚΩΔΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΥΔΡΟΣΗ	ΥΔΡΟΣ/ΜΑ	ΗΜΕΡ/ΝΙΑ ΔΕΙΓΜ/ΨΙΑΣ	Ph	ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (μS/cm)	ΧΗΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (mg/l)									ΔΕΙΚΤΕΣ ΜΟΛΥΝΣΗΣ		ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ (mg/l)		
							Ca	Mg	Na	K	CO3	HCO3	Cl	SO4	NO3	NO2	NH4	Παροδική	Μόνιμη	Ολική
1	79	A12_1	GR1309	24/3/2005	7.5	1835	278	51.7	29.9	0.8	0	186	53.2	749	0	<0.05	<0.26	152	754	906
2	79	A12_2	GR1309	19/9/2005	7.5	1635	296.6	62.3	25.3	0.8	0	162	53.2	773	0	<0,5	<0,26	133	864	996
3	79	A12_3	GR1309	17/3/2006	7.4	1680	313	28.7	21.7	0.9	0	159	44.3	735	0	<0,05	<0,26	130	768	898
4	79	A12_4	GR1309	28/9/2006	8.1	1590	361	19.5	25.5	0.9	0	173	40.4	778	0	<0,05	<0,26	142	838	980
5	80	A13	GR1309	20/9/2005	7.8	1557	154	25.8	142.5	0.8	0	256	326	156	0	<0,5	<0,26	210	280	490
6	115	ΑΛ38	GR1315	21/10/2005	7.6	2400	568	35	38.3	0.4	0	134	70.9	1400	43.4	<0,05	<0,26	110	1450	1560
7	116	ΑΛ39_1	GR1313	22/4/2005	7.3	1980	539	36.1	27.6	0.8	0	128	46.1	1335	0	<0,05	<0,26	105	1389	1494
8	116	ΑΛ39_2	GR1313	18/4/2006	7.6	2500	273	214	28.1	0.9	0	114	51.8	1425	18.6	<0,05	<0,26	94	1466	1560
9	129	ΑΛ52_1	GR1315	20/4/2005	7.6	1540	63.3	41.6	184	7.8	0	261	323	76.8	15.5	<0,05	<0,26	214	115	329
10	129	ΑΛ52_2	GR1315	20/10/2005	7.8	2250	70.5	70	337	10.4	0	207	596	140	18.6	<0,05	<0,26	170	295	464
11	129	ΑΛ52_3	GR1315	27/4/2006	8.1	2660	102	47.1	556.4	12.1	0	271	837	125	31	<0,05	<0,26	222	226	448
12	129	ΑΛ52_4	GR1315	18/10/2006	8.2	3830	104	84.9	586	16.1	0	244	1003	242	24.8	<0,05	<0,26	200	409	609
13	131	ΑΛ54	GR1315	20/4/2005	7.6	1740	59.3	42.8	221	8.6	0	223	397	91.3	12.4	<0,05	<0,26	183	141	324
14	135	ΑΛ58_1	GR1315	21/10/2005	7.6	1850	115	55.4	209	3.9	0	220	496	52.4	24.8	<0,05	<0,26	180	336	516
15	135	ΑΛ58_2	GR1315	20/4/2006	7.8	1862	96.2	49.8	192	3.9	0	513	248	66.5	24.8	<0,05	<0,26	420	25	445
16	138	ΑΛ60	GR1313	20/10/2006	8	2448	558	39.1	24.8	0.4	0	155	49.6	1378	24.8	<0,05	<0,26	127	1426	1553
17	173	Δ49_1	GR1311	21/9/2005	7.6	2168	176	63.2	206.9	3.9	0	244	177	648	0	<0,5	<0,26	200	500	700
18	174	Δ49_2	GR1311	12/4/2006	7.5	2272	109	119	184	3.1	0	237	330	525	0	<0,05	<0,26	194	566	760
19	174	Δ49_3	GR1311	27/9/2006	8.4	2045	184	62.9	184	0.8	0	275	314	392	0	<0,05	<0,26	225	493	718
20	224	K35	GR1301	6/11/2007	7.6	2295	89	57.9	310	8.3	0	207	638	104	6.2	<0,05	<0,26	170	290	460
21	289	M6	GR1308	18/3/2005	7	1646	184	53.7	73.6	3.1	0	354	131	327	37.2	<0,05	<0,26	290	391	681
22	292	M9	GR1308	22/3/2005	7.4	1546	177	42.8	69	2.3	0	342	95.7	342	24.8	<0,05	<0,26	280	338	618
23	293	NH1_1	GR1307	29/3/2005	7.5	3670	537.1	66.7	41.4	2.3	0	348	70.9	1206	3.1	<0,05	<0,26	285	1330	1615
24	293	NH1_2	GR1307	22/9/2005	7.5	2500	564	83.7	32.2	3.9	0	328	78	1418	0	<0,5	<0,26	269	1483	1752
25	293	NH1_3	GR1307	13/4/2006	7.5	2713	256.5	234.4	39.6	4.3	0	236	66.7	1385	0	<0,05	<0,26	193	1411	1604
26	293	NH1_4	GR1307	14/9/2006	7.5	2558	650.9	84.6	34	3	0	361	141.8	1505	0	<0,05	<0,26	296	1677	1972
27	294	NH10_1	GR1307	29/6/2005	7.3	2958	337	130	41.4	3.1	0	299	81.5	1057	18.6	<0,05	<0,26	245	1131	1376
28	294	NH10_2	GR1307	30/3/2006	7.4	2285	438	63	46	3.5	0	199	184	1020	<5	<0,05	<0,26	163	1189	1352
29	294	NH10_3	GR1307	27/9/2006	7.5	1803	26.1	260.4	36	0.9	0	253	152	772.5	37.2	<0,05	<0,26	207	929	1136
30	46	NH13_1	GR1307	28/3/2006	7.2	2460	590	29.2	20.4	1.7	0	222	70.9	1363	3.1	<0,05	<0,26	182	1410	1592
31	46	NH13_2	GR1307	21/9/2006	8.1	2386	653	32.1	20.4	1.7	0	319	53.2	1418	0	<0,05	<0,26	261	1499	1760
32	300	NH2_1	GR1307	23/6/2005	7.3	2760	633	53.5	39.1	2.3	0	406	85.1	1364	15.5	<0,05	<0,26	333	1468	1800
33	300	NH2_2	GR1307	22/9/2005	7.4	2554	600	58.4	36.8	1.6	0	356	92.2	1288	9.3	<0,5	<0,26	292	1444	1736
34	300	NH2_3	GR1307	22/3/2006	7.2	2693	595	53.5	51.1	2.6	0	323	92.2	1283	37.2	<0,05	<0,26	265	1439	1704
35	300	NH2_4	GR1307	14/9/2006	7.4	2619	611.6	105.5	39.1	1.7	0	378	148.9	1442.5	31	<0,05	<0,26	310	1651	1960
36	314	NH5_1	GR1307	30/3/2005	7.4	3670	252	328	62.1	3.1	0	438	106	1479	49.6	<0,05	<0,26	359	1620	1978
37	314	NH5_2	GR1307	22/9/2005	7.4	2718	616	66.2	46	2.3	0	323	99.3	1388	18.6	<0,5	<0,26	265	1543	1808
38	314	NH5_3	GR1307	12/4/2006	7.5	2976	281	272	57.5	2.6	0	248	98	1500	24.8	<0,05	<0,26	203	1617	1820
39	314	NH5_4	GR1307	13/9/2006	7.6	2801	616.4	145.9	43.4	2.6	0	376	159.6	1532.5	24.8	<0,05	<0,26	308	1830	2138
40	323	Π6	GR1317	14/4/2004	7.6	1522	184.4	51.1	14.7	0.8	0	256	35.5	422.7	0	Αρν.	Αρν.	210	460	670
41	326	P17	GR1304	25/9/2006	7.8	1754	351.1	94.4	17.1	1.3	0	169	29.8	1085	0	<0,05	<0,26	139	1126	1264
42	-	KO8	-	20/11/2007	7.6	1585	160	70	103	3	0	317	143	458	12.4	<0,05	<0,26	686	260	426
43	-	KO9	-	20/11/2007	7.6	1655	142	90.2	106	3.9	0	301	139	469	12.4	<0,05	<0,26	725	247	478
44	-	MOI7	-	17/4/2007	7.5	1800	295	50.8	64.4	3.5	0	200	92.2	735	12.4	<0,05	<0,26	944	164	780
45	-	MOI8	-	17/4/2007	7.7	2100	333	43.8	69	4.8	0	206	128	745	12.4	<0,05	<0,26	1010	169	841
46	-	ΜΓ1	-	27/4/2007	7.6	1520	93	26.8	194	2.2	0	177	361	80.5	6.2	<0,05	<0,26	342	145	197
47	-	T16	-	16/4/2007	7.9	1530	85.8	71.7	135.4	5.2	0	218	227	271	0	<0,05	<0,26	509	179	330

Πίνακας 11.2: Πίνακας χημικών αναλύσεων σημείων ύδατος του νοτίου παραλιακού μετώπου

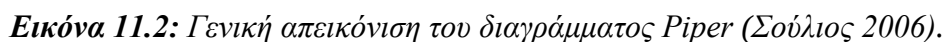
Για την μελέτη του μεταλλικού χαρακτήρα και χημισμού των υδάτων του νότιου άξονα, δημιουργήθηκε ένα σύνολο υδροχημικών διαγραμμάτων, τα οποία παρέχουν μια οπτική απεικόνιση της χημικής σύνθεσης και της ποιότητας του νερού, διευκολύνοντας τη λεπτομερή κατανόηση των εν μελέτη υδροφόρων. Πιο συγκεκριμένα, η δημιουργία των διαγραμμάτων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του εξειδικευμένου λογισμικού «AquaChem» της εταιρίας Waterloo Hydrogeologic, εφόσον έγινε επεξεργασία και παραμετροποίηση των δεδομένων προκειμένου να εισαχθούν καταλλήλως στο πρόγραμμα. Για τον σχηματισμό των διαγραμμάτων Piper, Schoeller, Langelier και Wilcox, τα οποία αναλύονται ενδελεχώς στην συνέχεια του κεφαλαίου, και τον αυτόματο υπολογισμό περαιτέρω χημικών παραμέτρων που εντάσσονται σε αυτά, εισήχθησαν οι συγκεντρώσεις των απαραίτητων κύριων ιόντων (Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Na}^+ \text{K}^+$, HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-), των διαλυμένων στερεών, η ηλεκτρική αγωγιμότητα και το pH των μελετώμενων υδάτων.

11.3 Υδροχημικά διαγράμματα και ανάλυση

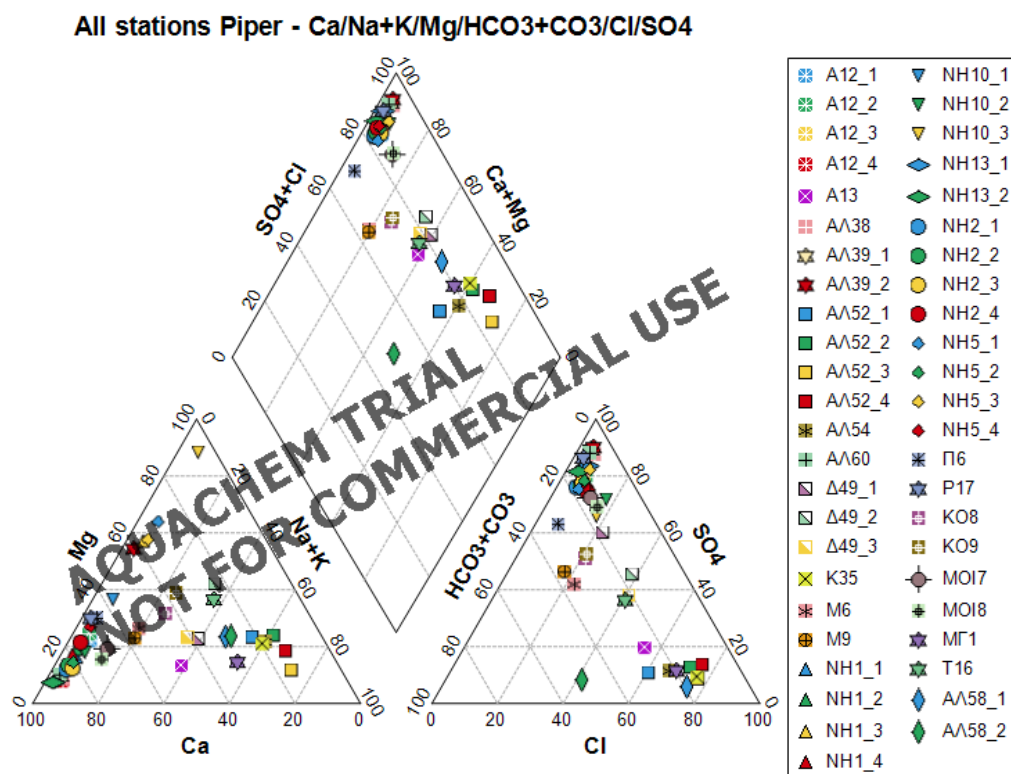
11.3.1 Διάγραμμα Piper

Το διάγραμμα Piper είναι μια γραφική απεικόνιση της χημικής σύνθεσης ενός ή πολλών δειγμάτων νερού. Σύμφωνα με τον Piper (1948), οι υδρογεωχημικές φάσεις των δειγμάτων νερού εκφράζονται μέσω των συγκεκριμένων διαγραμμάτων. Πιο συγκεκριμένα, οι υδρογεωχημικές φάσεις είναι ευδιάκριτα τμήματα ποικίλων χαρακτήρων και ανήκουν σε οποιοδήποτε γενετικά σχετικό σύστημα. Οι υδροχημικές φάσεις αναφέρονται σε συγκεκριμένες περιοχές που έχουν μοναδικές συγκεντρώσεις κατιόντων και ανιόντων (Ken-Onukuba, et al. 2021). Συνεπώς, τα διαγράμματα αυτά παρέχουν την άμεση σύγκριση πολλών δειγμάτων νερού, επιτρέποντας την κατηγοριοποίησή τους σε διακριτές φάσεις και τον προσδιορισμό της κύριας υδρογεωχημικής διεργασίας που επηρεάζει άμεσα τη χημική σύσταση κάθε δείγματος νερού, ακόμη και σε περιπτώσεις που υπάρχουν πολλά και ανόμοια δείγματα.

Ένα διάγραμμα Piper απεικονίζει έναν συνδυασμό από ισοσκελή τρίγωνα ανιόντων και κατιόντων, τα οποία μοιράζονται μια κοινή βάση. Στο αριστερό τριγωνικό διάγραμμα απεικονίζονται τα κύρια κατιόντα (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ και Na^+) και στο δεξί τα κύρια ανιόντα (Cl^- , SO_4^{2-} και HCO_3^-). Τα δεδομένα κανονικοποιούνται στο άθροισμα των 3 συνιστωσών [(π.χ. Ca , Mg και $(\text{Na}+\text{K})$] = 100. Τα σημεία που προκύπτουν προβάλλονται στο ρόμβο που βρίσκεται ανάμεσά τους. Έτσι, από τα διάγραμμα Piper προκύπτει και ο χημικός τύπος του δείγματος, καθώς το σημείο τομής των δύο προβολών υποδεικνύει την συνολική αποτύπωση της κατανομής των ιόντων (Σούλιος 2004).



75



Εικόνα 11.3: Διάγραμμα Piper των δειγμάτων νερού για τον Νότιο άξονα της Κρήτης

Μελετώντας το διάγραμμα Piper (Εικόνα 11.3), παρατηρούνται προσεγγιστικά τρεις κύριοι υδρογεωχημικοί τύποι νερού στην περιοχή μελέτης. Με βάση την ομαδοποίηση από το διάγραμμα, τα υπόγεια δείγματα νερού μπορούν να διαχωριστούν σε κάλιο-νατριούχο-χλώριο-θεικό τύπο, ασβεστο-μαγνησιούχο-χλώριο-θεικό τύπο και ασβεστο-μαγνησιούχο τύπο.

Στον κάλιο-νατριούχο-χλώριο-θεικό τύπο διακρίνεται να επικρατούν το K+Na ως κύρια κατιόντα και Cl⁻ ως κύριο ανιόν, ενώ σε μία μεμονωμένη περίπτωση παρατηρείται να επικρατεί το SO₄²⁻ ως κύριο ανιόν. Η παρουσία του Cl σε αυτά τα νερά υποδεικνύει την έντονη διεργασία ανάμειξης με θαλασσινό νερό, με το φαινόμενο της υφαλμύρινσης να είναι ευρύτερα διαδεδομένο.

Στον ασβεστο-μαγνησιούχο-χλώριο-θεικό τύπο τα δείγματα ποικίλουν ως προς τα επικρατέστερα κατιόντα και ανιόντα. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει έντονη ανάμειξη των υπόγειων νερών με θαλασσινό νερό, κυρίως λόγω της διεργασίας ανάμειξης ή των διεργασιών διαλυτοποίησης. Η παρουσία του χλωρίου σε μερικά από αυτά υποδηλώνει την έντονη πρόσμιξη του υπόγειου νερού με θαλασσινό νερό, παρά την ύπαρξη των όξινων ανθρακικών.

Πιο αναλυτικά μπορούν να υποδιαιρεθούν: 1) στα υπόγεια δείγματα νερού μικτής σύστασης τα οποία δεν παρουσιάζουν κάποιο επικρατέστερο κατιόν και ανιόν, 2) στα υπόγεια δείγματα νερού με το Ca^{2+} και το SO_4^{2-} ως επικρατέστερο κατιόν και ανιόν, αντίστοιχα, 3) στα υπόγεια δείγματα νερού με επικρατέστερο κατιόν το Ca^{2+} και μικτής σύστασης ως προς τα ανιόντα, 4) στα υπόγεια δείγματα νερού μικτής σύστασης ως προς τα κατιόντα και Cl^- ως επικρατέστερο ανιόν, 5) στα υπόγεια δείγματα νερού μικτής σύστασης ως προς τα κατιόντα και όξινα ανθρακικά HCO_3^- ως επικρατέστερο ανιόν, 6) στα υπόγεια δείγματα νερού μικτής σύστασης ως προς τα κατιόντα και SO_4^{2-} ως κύριο ανιόν, 7) στα υπόγεια δείγματα νερού με κύριο κατιόν το Ca^{2+} και κύριο ανιόν το SO_4^{2-} , και 8) ένα μεμονωμένο δείγμα νερού το οποίο έχει κύριο κατιόν το Mg^{2+} και κύριο ανιόν το SO_4^{2-} .

Τέλος, στα υπόγεια δείγματα νερού με ασβεστο-μαγνησιούχο τύπο παρατηρείται να επικρατεί ως κύριο κατιόν το Ca^{2+} ή το Mg^{2+} και ως κύριο ανιόν το SO_4^{2-} . Στα δείγματα νερού όπου επικρατεί το Ca, η σύσταση τους ελέγχεται από την διάλυση ασβεστολιθικών πετρωμάτων, ενώ στα δείγματα νερού όπου επικρατεί το Mg η σύσταση τους ελέγχεται από την διάλυση υπερβασικών πετρωμάτων (Voutsis et al. 2015).

Στον Πίνακα 11.3, διακρίνονται χρωματικά οι παραπάνω ομάδες υδρογεωχημικών τύπων ως εξής:

- Ασβεστο-μαγνησιούχο
- Ασβεστο-μαγνησιούχο-χλώριο-θειικό
- Κάλιο-νατριούχο-χλώριο-θειικό

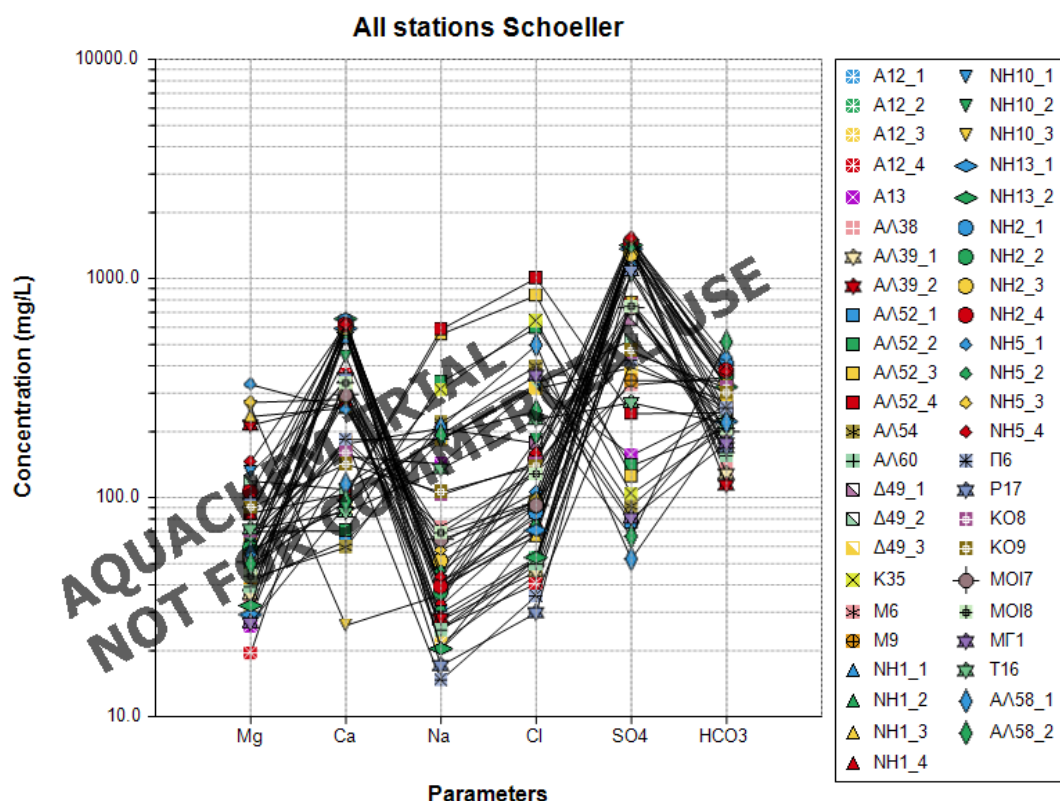
A/α	Δείγμα	Επικρατούντα Κατιόντα & Ανιόντα Νερού	Υδρογεωχημικός Τύπος
1	A12_1	Ca-SO ₄	Ασβεστο-μαγνησιούχο
2	A12_2	Ca-SO ₄	Ασβεστο-μαγνησιούχο
3	A12_3	Ca-SO ₄	Ασβεστο-μαγνησιούχο
4	A12_4	Ca-SO ₄	Ασβεστο-μαγνησιούχο
5	A13	Ca-K+Na-Mg-Cl	Ασβεστο-μαγνησιούχο-χλώριο-θειικό
6	AΛ38	Ca-SO ₄	Ασβεστο-μαγνησιούχο-χλώριο-θειικό
7	AΛ39_1	Ca-SO ₄	Ασβεστο-μαγνησιούχο
8	AΛ39_2	Mg-SO ₄	Ασβεστο-μαγνησιούχο-χλώριο-θειικό
9	AΛ52_1	K+Na-Cl	Κάλιο-νατριούχο-χλώριο-θειικό
10	AΛ52_2	K+Na-Cl	Κάλιο-νατριούχο -χλώριο-θειικό
11	AΛ52_3	K+Na-SO ₄	Κάλιο-νατριούχο -χλώριο-θειικό

12	ΑΛ52_4	K+Na-Cl	Κάλιο-νατριούχο -χλώριο-θειικό
13	ΑΛ54	K+Na-Cl	Κάλιο-νατριούχο -χλώριο-θειικό
14	ΑΛ58_1	K+Na-Mg-Ca-Cl	Ασβεστο-μαγνησιούχο-χλώριο-θειικό
15	ΑΛ58_2	K+Na-Mg-Ca-HCO ₃ +CO ₃	Ασβεστο-μαγνησιούχο-χλώριο-θειικό
16	ΑΛ60	Ca-SO ₄	Ασβεστο-μαγνησιούχο-χλώριο-θειικό
17	Δ49_1	Ca-Mg-K+Na-SO ₄	Ασβεστο-μαγνησιούχο-χλώριο-θειικό
18	Δ49_2	Ca-Mg-K+Na-SO ₄ -HCO ₃ +CO ₃ -Cl	Ασβεστο-μαγνησιούχο-χλώριο-θειικό
19	Δ49_3	Ca-Mg-K+Na-SO ₄	Ασβεστο-μαγνησιούχο-χλώριο-θειικό
20	K35	K+Na-Cl	Κάλιο-νατριούχο -χλώριο-θειικό
21	M6	Ca-SO ₄ -HCO ₃ +CO ₃ -Cl	Ασβεστο-μαγνησιούχο-χλώριο-θειικό
22	M9	Ca-SO ₄ -HCO ₃ +CO ₃ -Cl	Ασβεστο-μαγνησιούχο-χλώριο-θειικό
23	NH1_1	Ca-SO ₄	Ασβεστο-μαγνησιούχο
24	NH1_2	Ca-SO ₄	Ασβεστο-μαγνησιούχο
25	NH1_3	Mg-SO ₄	Ασβεστο-μαγνησιούχο
26	NH1_4	Ca-SO ₄	Ασβεστο-μαγνησιούχο
27	NH10_1	Ca-SO ₄	Ασβεστο-μαγνησιούχο
28	NH10_2	Ca-SO ₄	Ασβεστο-μαγνησιούχο
29	NH10_3	Mg-SO ₄	Ασβεστο-μαγνησιούχο
30	NH13_1	Ca-SO ₄	Ασβεστο-μαγνησιούχο
31	NH13_2	Ca-SO ₄	Ασβεστο-μαγνησιούχο
32	NH2_1	Ca-SO ₄	Ασβεστο-μαγνησιούχο
33	NH2_2	Ca-SO ₄	Ασβεστο-μαγνησιούχο
34	NH2_3	Ca-SO ₄	Ασβεστο-μαγνησιούχο
35	NH2_4	Ca-SO ₄	Ασβεστο-μαγνησιούχο
36	NH5_1	Mg-SO ₄	Ασβεστο-μαγνησιούχο
37	NH5_2	Ca-SO ₄	Ασβεστο-μαγνησιούχο
38	NH5_3	Mg-SO ₄	Ασβεστο-μαγνησιούχο
39	NH5_4	Ca-SO ₄	Ασβεστο-μαγνησιούχο
40	Π6	Ca-SO ₄	Ασβεστο-μαγνησιούχο
41	P17	Ca-Cl	Ασβεστο-μαγνησιούχο
43	K08	Ca-Mg-K+Na-SO ₄ -HCO ₃ +CO ₃ -Cl	Ασβεστο-μαγνησιούχο-χλώριο-θειικό
43	K09	Ca-Mg-K+Na-SO ₄ -HCO ₃ +CO ₃ -Cl	Ασβεστο-μαγνησιούχο-χλώριο-θειικό
44	ΜΟΙ7	Ca-SO ₄	Ασβεστο-μαγνησιούχο-χλώριο-θειικό
45	ΜΟΙ8	Ca-SO ₄	Ασβεστο-μαγνησιούχο-χλώριο-θειικό
46	ΜΓ1	K+Na-Cl	Κάλιο-νατριούχο -χλώριο-θειικό
47	T16	Ca-Mg-K+Na-SO ₄ -HCO ₃ +CO ₃ -Cl	Ασβεστο-μαγνησιούχο-χλώριο-θειικό

Πίνακας 11.3: Τύπος νερού ανά δείγμα υπόγειου νερού.

11.3.2 Διάγραμμα Schoeller

Απώτερος σκοπός της απεικόνισης των δειγμάτων νερού στο διάγραμμα Schoeller, είναι η ανάδειξη των μεταβολών της συγκέντρωσης των κύριων ιόντων στα δείγματα νερού. Τα κύρια ιόντα που προβάλλονται ως προς την μεταβολή των συγκεντρώσεών τους, είναι από τα κατιόντα το Mg, το Ca και το Na και από τα ανιόντα το Cl, SO₄ και HCO₃ (Εικόνα 11.4). Για καλύτερη εποπτεία και σχολιασμό των δειγμάτων διαχωρίστηκαν σε τρία κομμάτια, οι οποίες διακρίνονται στην Εικόνα 11.5, Εικόνα 11.6 και Εικόνα 11.7, αντίστοιχα.



Εικόνα 11.4: Διάγραμμα Schoeller των δειγμάτων νερού για τον Νότιο άξονα της Κρήτης.

Η πλειοψηφία των δειγμάτων υπόγειου νερού του πρώτου μέρους (Εικόνα 11.5) φαίνεται να έχουν χαμηλές συγκεντρώσεις Mg, μικρότερες των 100 mg/L, με το δείγμα AL39_2 να εμφανίζει τις υψηλότερες φθάνοντας περίπου τα 200 mg/L. Οι μικρότερες συγκεντρώσεις Mg παρατηρούνται για το δείγμα A12_4 περίπου στα 20 mg/L.

Οι συγκεντρώσεις Ca για την πλειοψηφία των δειγμάτων υπόγειου νερού είναι υψηλές, καθώς κυμαίνονται από περίπου 80 mg/L έως 700 mg/L. Τα δείγματα υπόγειου νερού AL52_4 και AL54 εμφανίζουν συγκεντρώσεις Ca ισοδύναμες των 100 mg/L, ενώ στα δείγματα υπόγειου νερού AL52_1, AL52_2 και AL52_3 οι συγκεντρώσεις Ca είναι χαμηλότερες των 100 mg/L, φθάνοντας περίπου τα 60-70 mg/L.

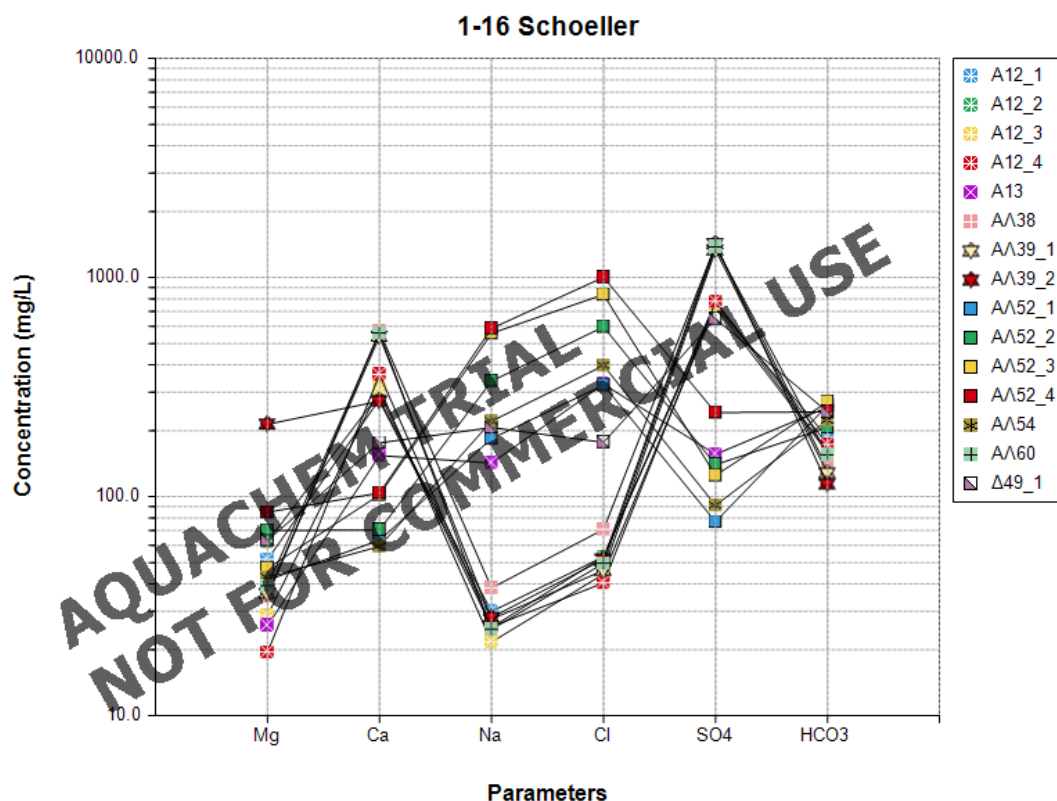
Όσον αφορά τις συγκεντρώσεις Na, παρατηρείται ότι στα μισά περίπου δείγματα υπόγειου νερού είναι μεγαλύτερες των 100 mg/L, ενώ στα άλλα μισά είναι πολύ μικρότερες. Πιο συγκεκριμένα, τα δείγματα υπόγειου νερού A13, AL52_1, AL52_2, Δ49_1 και AL54 εμφανίζουν μεσαίες συγκεντρώσεις Na (περίπου 180-200 mg/L), ενώ τα AL52_3 και AL52_4 εμφανίζουν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις Na (περίπου 600

mg/L). Τα υπόλοιπα δείγματα υπόγειου νερού της συγκεκριμένης ομάδας εμφανίζουν μικρές συγκεντρώσεις Na (περίπου από 20 έως 40 mg/L).

Μεγάλη διακύμανση παρατηρείται και στις συγκεντρώσεις Cl, με τα δείγματα υπόγειου νερού ΑΛ52_3 και ΑΛ52_4 να εμφανίζουν τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις, οι οποίες αγγίζουν τα 850 mg/L και 1000 mg/L, αντίστοιχα. Το δείγμα ΑΛ52_2 παρατηρείται με μικρότερες συγκεντρώσεις οι οποίες αγγίζουν τα 600 mg/L, ενώ τα υπόλοιπα δείγματα υπόγειου νερού φαίνεται να έχουν συγκεντρώσεις Cl μικρότερες των 80mg/L αλλά μεγαλύτερες των 40mg/L.

Οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων υπόγειου νερού σε SO₄ παρατηρούνται μεγαλύτερες σε σχέση με τα άλλα ιόντα και κυμαίνονται από 80 mg/L έως 1500 mg/L. Πιο συγκεκριμένα, από την μικρότερη και την μεγαλύτερη συγκέντρωση SO₄ έχουν τα δείγματα υπόγειου νερού ΑΛ52_1 και ΑΛ60, ΑΛ39_1 και ΑΛ39_2, αντίστοιχα. Μεγάλες συγκεντρώσεις SO₄ έχουν επίσης τα δείγματα υπόγειου νερού Δ49_1, Α12_3, Α12_2, Α12_1 και Α12_4, οι οποίες κυμαίνονται από 500 έως 700 mg/L. Μεσαίες συγκεντρώσεις SO₄ έχουν τα δείγματα υπόγειου νερού ΑΛ52_3, ΑΛ52_2, Α13 και ΑΛ52_4, οι οποίες κυμαίνονται από 120 έως 220 mg/L. Το δείγμα υπόγειου νερού ΑΛ54, εμφανίζει συγκεντρώσεις SO₄ που εκτιμώνται στα 80 mg/L.

Σχετικά με τις συγκεντρώσεις HCO₃ για όλα τα δείγματα ανεξαιρέτως, κυμαίνονται από 110 mg/L έως 300 mg/L, με το δείγμα υπόγειου νερού ΑΛ39_2 και ΑΛ52_3, να παρουσιάζουν την μικρότερη και μεγαλύτερη συγκέντρωση, αντίστοιχα.



Εικόνα 11.5: Διάγραμμα Schoeller του πρώτου μέρους δειγμάτων υπόγειου νερού της περιοχής μελέτης (Α/α: 1-16).

Η πλειοψηφία των δειγμάτων υπόγειου νερού του δεύτερου μέρους (Εικόνα 11.6) φαίνεται να έχουν χαμηλές συγκεντρώσεις Mg, μικρότερες των 100 mg/L, με τα δείγματα Δ49_2 και NH10_1 να υποδεικνύουν λίγο μεγαλύτερες συγκεντρώσεις Mg, περίπου 120 mg/L. Τα δείγματα NH1_3 και NH10_3 έχουν τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις Mg, με τις τιμές να κυμαίνονται περίπου στα 250 mg/L.

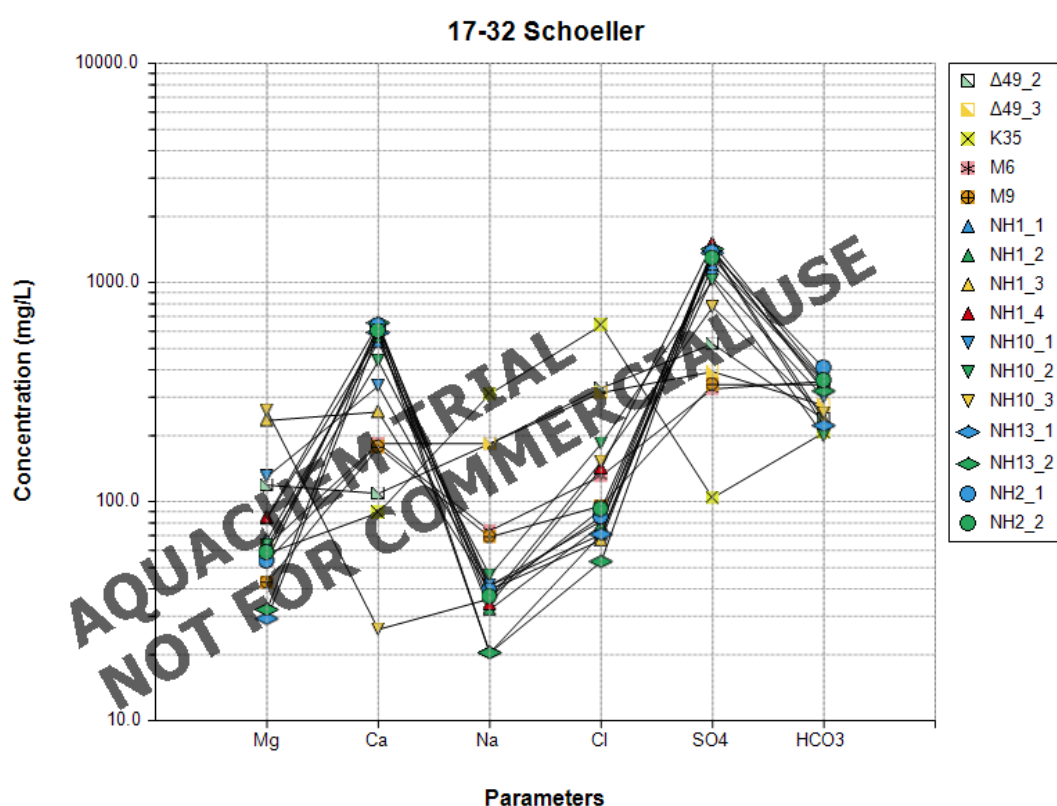
Παρομοίως με την πρώτη ομάδα, οι συγκεντρώσεις Ca για την πλειοψηφία των δειγμάτων υπόγειου νερού της δεύτερης ομάδας, παρουσιάζουν τιμές άνω των 100 mg/L, με τα δείγματα NH13_1, NH13_2, NH2_1 και NH2_2 να υποδεικνύουν τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις Ca φθάνοντας τα 600-650 mg/L. Οι μικρότερες συγκεντρώσεις Ca, παρατηρούνται για τα δείγματα K35 και NH10_3, όπου υπολογίζονται 90 mg/L και 18 mg/L, αντίστοιχα.

Όσον αφορά τις συγκεντρώσεις Na, παρατηρείται ότι σχεδόν όλα τα δείγματα εμφανίζουν μικρές συγκεντρώσεις από 10 mg/L έως 70 mg/L, ωστόσο τα δείγματα Δ49_3 και K35 παρατηρούνται με τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις Na, άνω των 100 mg/L, οι οποίες υπολογίζονται σε 200 mg/L και 300 mg/L, αντίστοιχα.

Οι συγκεντρώσεις Cl εμφανίζουν μεγάλη διασπορά, με τα δείγματα υπόγειου νερού NH13_2 (50 mg/L) και K35 (650 mg/L) να εμφανίζουν την μικρότερη και μεγαλύτερη συγκέντρωση, αντίστοιχα. Επισημαίνεται, ότι τα δείγματα υπόγειου νερού M6, NH1_4, NH10_3, NH10_2 και Δ49_3 έχουν συγκεντρώσεις Cl μεγαλύτερες των 100 mg/L, οι οποίες κυμαίνονται από 120 mg/L έως 320 mg/L. Τα υπόλοιπα δείγματα υπόγειου νερού έχουν συγκεντρώσεις Cl μικρότερες των 100 mg/L.

Τα δείγματα υπόγειου νερού του δεύτερου μέρους έχουν σημαντικές συγκεντρώσεις SO₄ οι οποίες παρατηρούνται άνω των 100 mg/L. Πιο συγκεκριμένα, το δείγμα K35 έχει συγκεντρώσεις SO₄ με τιμή 100 mg/L, τα δείγματα M6, M9, Δ49_3, Δ49_2 έχουν μεσαίες συγκεντρώσεις SO₄ με τιμές από 200 έως 400 mg/L, το δείγμα NH10_3 έχει συγκεντρώσεις SO₄ με τιμή 800 mg/L, ενώ στα υπόλοιπα δείγματα οι συγκεντρώσεις SO₄ είναι μεγαλύτερες από 1000 mg/L.

Σχετικά με τις συγκεντρώσεις HCO₃ για όλα τα δείγματα ανεξαιρέτως κυμαίνονται από 200 mg/L έως 400 mg/L, με τα δείγματα υπόγειου νερού NH10_2 και K35 να παρουσιάζουν την μικρότερη και το δείγμα υπόγειου νερού NH2_1 την μεγαλύτερη.



Εικόνα 11.6: Διάγραμμα Schoeller του δεύτερου μέρους δειγμάτων υπόγειου νερού της περιοχής μελέτης (Α/α: 17-32).

Η πλειοψηφία των δειγμάτων υπόγειου νερού του τρίτου μέρους (Εικόνα 11.7) φαίνεται να έχει χαμηλές συγκεντρώσεις Mg, μικρότερες των 100 mg/L, με τα δείγματα NH5_4, NH5_3 και NH5_1 να εμφανίζουν τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις Mg, με τιμές περίπου 170 mg/L, 290 mg/L και 320 mg/L, αντίστοιχα.

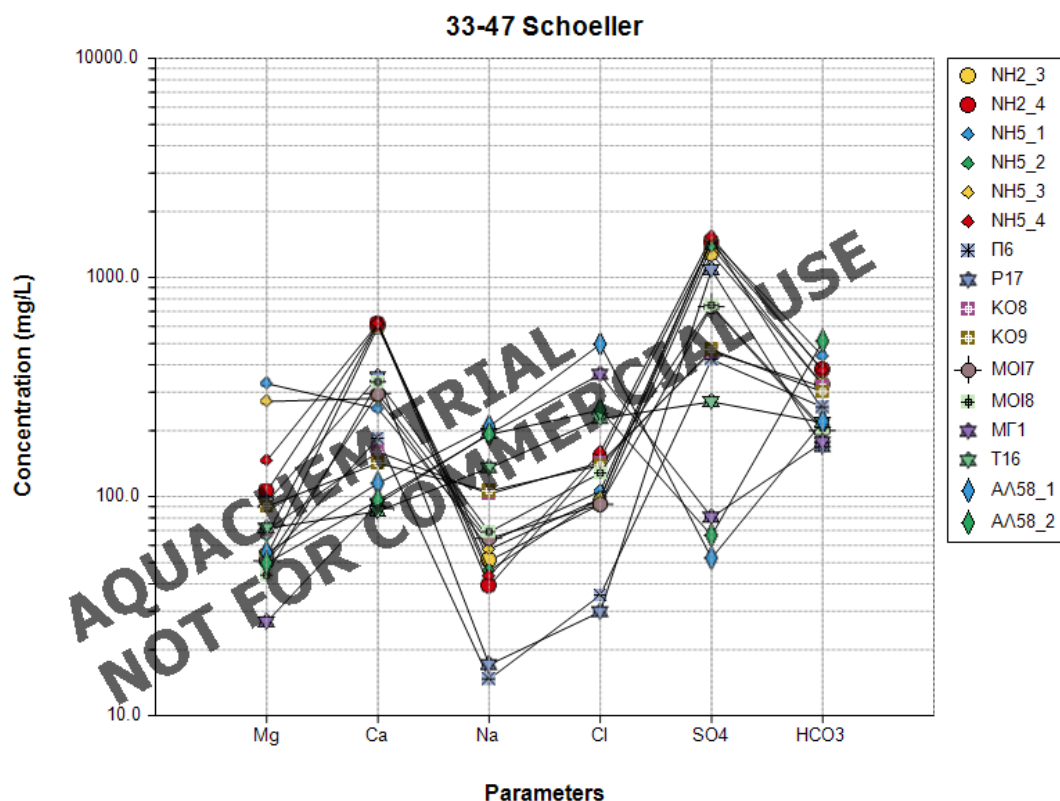
Παρομοίως με την πρώτη και δεύτερη ομάδα, οι συγκεντρώσεις Ca για την πλειοψηφία των δειγμάτων υπόγειου νερού της τρίτης ομάδας, παρουσιάζουν τιμές άνω των 100 mg/L, με μερικά δείγματα να εμφανίζουν υψηλές συγκεντρώσεις Ca φθάνοντας τα 600 mg/L. Εντούτοις, τα δείγματα T16 και AL58_2 εμφανίζουν συγκεντρώσεις Ca λίγο πιο μικρές από 100 mg/L.

Σχετικά με τις συγκεντρώσεις Na, παρατηρείται αρκετά μεγάλη διακύμανση με μερικά δείγματα να υποδεικνύουν αρκετά μικρότερες συγκεντρώσεις σε σχέση με τα δείγματα των δύο πρώτων ομάδων. Επίσης, η πλειοψηφία των δειγμάτων παρουσιάζει συγκεντρώσεις Na μικρότερες των 100 mg/L οι οποίες κυμαίνονται από 17 mg/L έως 70 mg/L. Συγκεκριμένα, τα δείγματα ΜΓ1 και Π6 έχουν τις μικρότερες συγκεντρώσεις Na. Τα υπόλοιπα δείγματα έχουν συγκεντρώσεις Na μεγαλύτερες των 100 mg/L, οι οποίες κυμαίνονται από 100 mg/L έως 200 mg/L.

Παρομοίως, οι συγκεντρώσεις Cl εμφανίζουν μεγάλη διασπορά, με τα δείγματα υπόγειου νερού ΜΓ1 και Π6 να εμφανίζουν πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις, περίπου 30 mg/L και 36 mg/L, αντίστοιχα. Τα δείγματα ΜΟΙ7, NH5_1 και NH5_3 εμφανίζουν συγκεντρώσεις Cl πολύ κοντά στα 100 mg/L, ενώ τα υπόλοιπα δείγματα έχουν συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από 100 mg/L. Το δείγμα AL58_1 εμφανίζει τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις με τιμές 400 mg/L.

Τα δείγματα υπόγειου νερού του τρίτου μέρους έχουν σημαντικές συγκεντρώσεις SO₄ οι οποίες παρατηρούνται αρκετά πάνω από 100 mg/L, οι οποίες κυμαίνονται από 300 mg/L έως 1060 mg/L. Ωστόσο τρία δείγματα (ΜΓ1, AL58_1 και AL58_2) εμφανίζουν συγκεντρώσεις SO₄ μικρότερες των 100 mg/L, με μικρότερη τιμή τα 50 mg/L.

Σχετικά με τις συγκεντρώσεις HCO₃ σε όλα τα δείγματα ανεξαιρέτως εμφανίζονται άνω των 100 mg/L, με τις μικρότερες τιμές να κυμαίνονται περίπου στα 180 mg/L και τις μεγαλύτερες στα 500 mg/L (AL58_2).



Εικόνα 11.7: Διάγραμμα Schoeller του τρίτου μέρους των δειγμάτων υπόγειου νερού της περιοχής μελέτης (Α/α: 33-47).

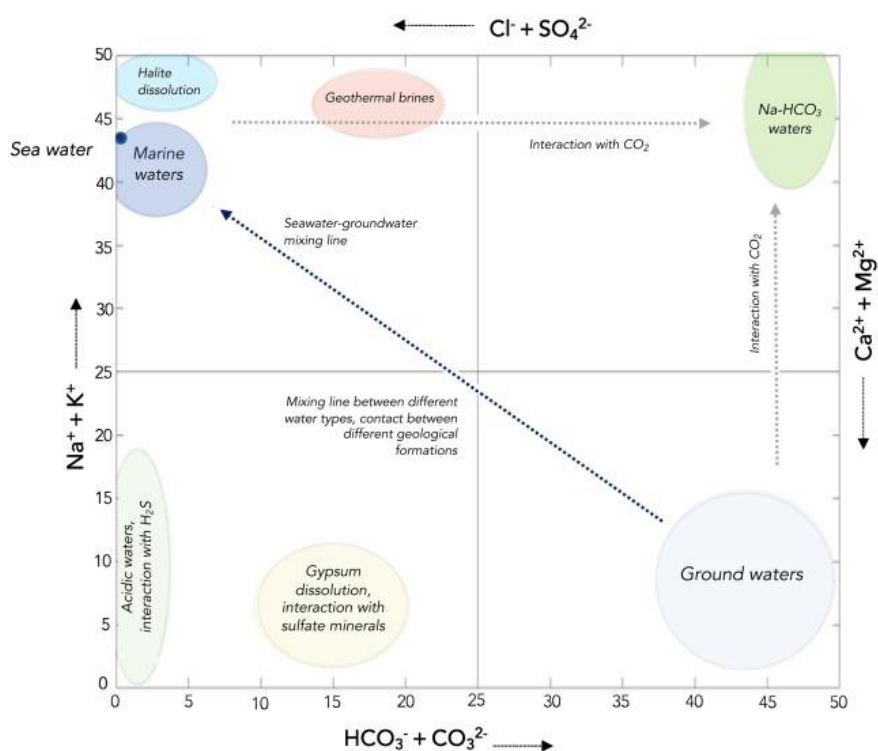
11.3.3 Διάγραμμα Ludwig-Langelier

Σε μία αρχική προσέγγιση των γεωχημικών φάσεων των υπόγειων δειγμάτων νερού, αυτές χαρακτηρίζονται από το διάγραμμα Ludwig-Langelier (Langelier & Ludwig, 1942), όπως φαίνεται στην Εικόνα 11.8. Η ταξινόμηση βασίζεται σε τέσσερα ζεύγη κύριων ιόντων, αναφέροντας στο 50% το άθροισμα των συγκεντρώσεων (εκφρασμένο ως meq L^{-1}) ανιόντων και κατιόντων, αντίστοιχα, με βάση την συνθήκη της ηλεκτρικής ουδετερότητας. Έτσι, το αρχικό διάγραμμα Ludwig-Langelier έχει και τους τέσσερις άξονες, εμφανίζοντας την ταξινόμηση των δειγμάτων και ως προς τους τέσσερις υδροχημικούς τύπους. Η ένωση των αξόνων σε σχέση με το κέντρο του διαγράμματος καθορίζει μία περιοχή τετράγωνου σχήματος, στην οποία υπερισχύουν κάθε φορά δύο από τα τέσσερα ιόντα. Μία μικτή περιοχή υπάρχει στο κέντρο του διαγράμματος στην οποία όλα τα ιόντα είναι ίσα.

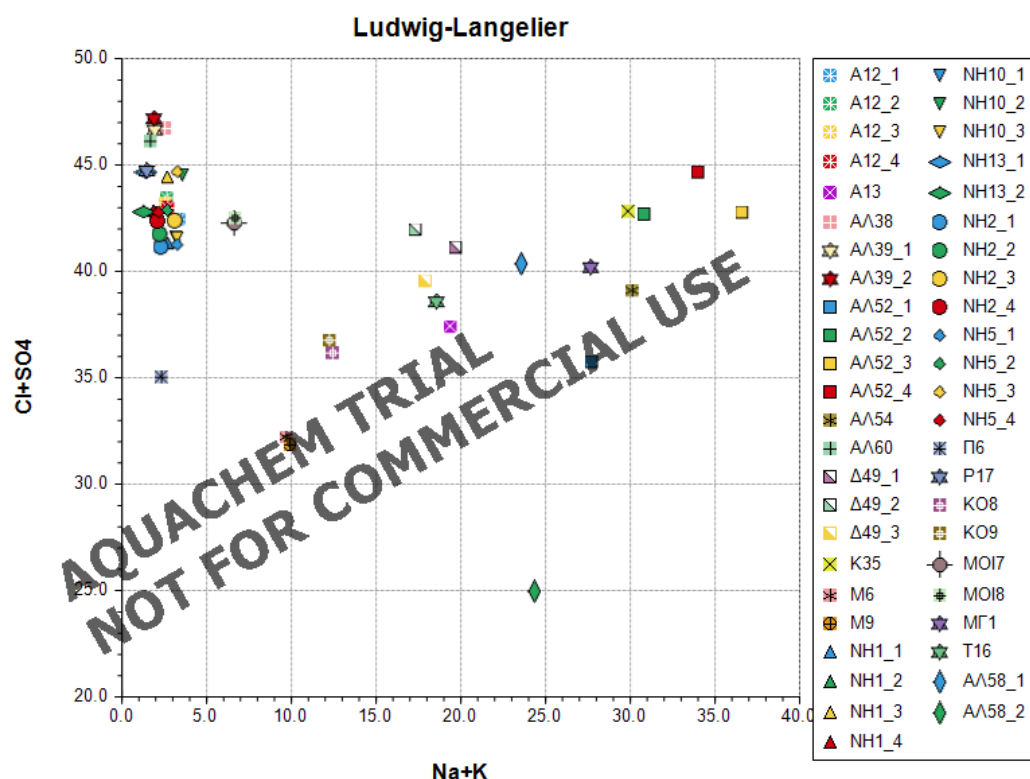
Συγκεκριμένα, το διάγραμμα Ludwig-Langelier, στην παρούσα μελέτη απεικονίζει την κατανομή των δειγμάτων συναρτήσει του χλωρίου-θεικού και νατρίου-χου-κάλιου

χαρακτήρα τους. Συνεπώς, επιλέγονται και απεικονίζονται οι καταλληλότερες ομάδες κατιόντων και ανιόντων, ως ποσοστά των συγκεντρώσεων εκφραζόμενα σε χλιοϊσοδύναμα (meq). Με βάση την συνθήκη, το άθροισμα των επιλεγμένων κατιόντων απεικονίζεται στον γ-άξονα και το άθροισμα των επιλεγμένων ανιόντων στον χ-άξονα, με τον κάθε άξονα να αριθμείται από 0 έως 50 meq%. Να σημειωθεί όμως, ότι εμφανίζονται τα ποσοστά των ιοντικών συγκεντρώσεων και όχι οι απόλυτες συγκεντρώσεις τους.

Όσον αφορά τα δείγματα υπόγειου νερού της παρούσας μελέτης, τα οποία απεικονίζονται στο διάγραμμα Ludwig-Langelier (Εικόνα 11.9), εμφανίζουν μεγάλη διακύμανση ποσοστών. Παρόλα αυτά, τα ποσοστά των ιόντων χλωρίου-θεικού είναι σχεδόν σε όλα τα δείγματα πολύ μεγάλα (4-0-45%) ενώ τα ποσοστά των ιόντων νατρίου-καλίου εμφανίζουν μεγάλη διασπορά αφού κυμαίνονται από πολύ μικρά έως πολύ μεγάλα. Τα περισσότερα όμως εμπίπτουν στην περιοχή του 5%. Ένα δείγμα (ΑΛ58_2) παρατηρείται με μεσαία ποσοστά τόσο χλωρίου-θεικού, όσο και νατρίου-καλίου. Με βάση την κύρια γραφική απεικόνιση του διαγράμματος Ludwig- Langelier, τα μεγάλα ιοντικά ποσοστά χλωρίου-θεικού και νατρίου-καλίου τα οποία εμφανίζονται στην πλειοψηφία των υπόγειων δειγμάτων νερού της παρούσας μελέτης, υποδεικνύουν την ανάμειξη τους με θαλασσίνο νερό και τον έντονο επηρεασμό τους από το φαινόμενο της υφαλμύρινσης.



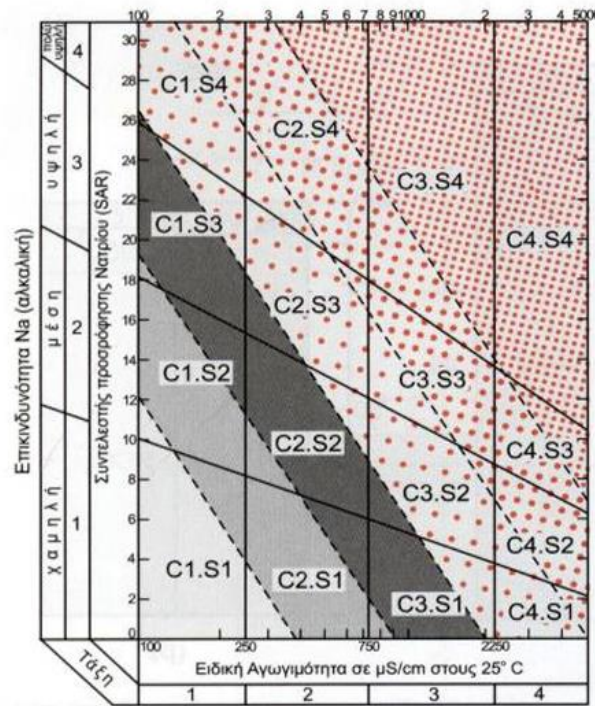
Εικόνα 11.8: Κύρια γραφική απεικόνιση του διαγράμματος Ludwig- Langelier (Templ et al., 2022).



Εικόνα 11.9: Διάγραμμα Ludwig- Langelier. Τα ποσοστά των ιοντικών συγκεντρώσεων των δειγμάτων νερού για τον Νότιο άξονα της Κρήτης.

11.3.4 Διάγραμμα Wilcox

Σύμφωνα με τον Wilcox (1955), το ομώνυμο διάγραμμα (Εικόνα 11.10) αποτελεί μία σημαντική γραφική μέθοδο ελέγχου της καταλληλότητας του αρδευτικού νερού σε σχέση με τις ιδιότητες και την φύση των καλλιεργούμενων εδαφών. Ο συντελεστής προσρόφησης Na ή κίνδυνος Na (SAR), αποτελεί το βασικό κριτήριο για την καταλληλότητα ενός αρδευτικού νερού. Το διάγραμμα χρησιμοποιεί τον συντελεστή προσρόφησης SAR σε συνάρτηση με την ηλεκτρική αγωγιμότητα E.C. Να σημειωθεί ότι το S αντικατοπτρίζει την επικινδυνότητα σε νάτριο (sodium hazard) με μέγιστη και ελάχιστη τιμή το S4 και S1, αντίστοιχα, ενώ το C αντικατοπτρίζει τον κίνδυνο αλμυρότητας (salinity hazard) με υψηλότερη και χαμηλότερη τιμή το C4 και C1, αντίστοιχα.



Εικόνα 11.10: Διάγραμμα Wilcox για την ταξινόμηση του αρδευτικού νερού ανάλογα με την καταλληλότητα του.

Από το συγκεκριμένο διάγραμμα και όσον αφορά την επίδραση της αλατότητας, το αρδευτικό νερό ταξινομείται ως εξής (Φανουράκη 2011):

- Τάξη C1: ($E.C. < 250 \mu S/cm$, $T.D.S < 200 \text{ mg l}^{-1}$) περιλαμβάνει νερά μικρής αλατότητας. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις περισσότερες καλλιέργειες και στα περισσότερα εδάφη.
- Τάξη C2: ($250 < E.C. < 750 \mu S/cm$, $200 < T.D.S < 500 \text{ mg l}^{-1}$) περιλαμβάνει νερά μέτριας αλατότητας. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις περισσότερες καλλιέργειες και στα περισσότερα εδάφη ενώ απαιτείται σε μικρό βαθμό απόπλυση των αρδευόμενων εδαφών.
- Τάξη C3: ($750 < E.C. < 2250 \mu S/cm$, $500 < T.D.S < 1500 \text{ mg l}^{-1}$) περιλαμβάνει νερά υψηλής αλατότητας, ακατάλληλα για άρδευση σε εδάφη περιορισμένης αποστράγγισης.
- Τάξη C4: ($2250 < E.C. < 5000 \mu S/cm$, $1500 < T.D.S < 3000 \text{ mg l}^{-1}$) περιλαμβάνει νερά πολύ υψηλής αλατότητας, ακατάλληλα για άρδευση σε οποιαδήποτε εδάφη.

Με βάση τον Συντελεστή Προσρόφησης Νατρίου (S.A.R.) το αρδευτικό νερό ταξινομείται ως εξής:

- ◇ Τάξη S1: περιλαμβάνει νερά χαμηλής αλκαλίσωσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα περισσότερα εδάφη.

- ◇ *Τάξη S2: περιλαμβάνει νερά μέτρια αλκαλίωσης. Μπορούν να δημιουργήσουν πρόβλημα σε λεπτόκοκκα εδάφη περιορισμένης αποστράγγισης. Συνήθως χρησιμοποιούνται σε χονδρόκοκκα εδάφη καλής διαπερατότητας.*
- ◇ *Τάξη S3: περιλαμβάνει νερά υψηλής αλκαλίωσης. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εδάφη με καλή αποστράγγιση.*
- ◇ *Τάξη S4: περιλαμβάνει νερά πολύ υψηλής αλκαλίωσης, ακατάλληλα για άρδευση.*

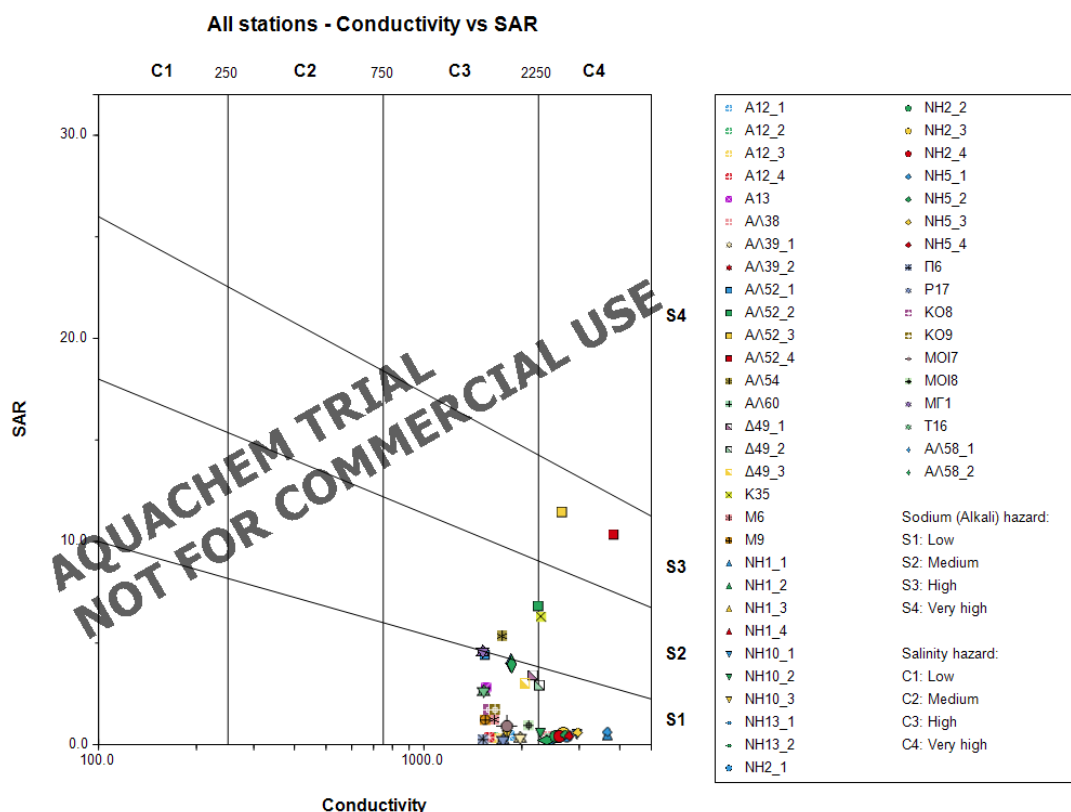
Επομένως, με βάση τα προαναφερθέντα προκύπτουν οι εξής κατηγορίες αρδευτικού νερού:

1. C1-S1: Καλή ποιότητα.
2. C1-S2, C2-S1: Καλή έως μέτρια ποιότητα, με το νερό να χρησιμοποιείται για άρδευση με προφύλαξη σε βαριά κυρίως εδάφη τα οποία δεν αποστραγγίζονται καλά, καθώς επίσης και με επιφύλαξη στα φυτά που είναι ευαίσθητα.
3. C1-S3, C2-S2, C3-S1: Μέτρια έως πολύ μέτρια ποιότητα, με το νερό να χρησιμοποιείται για άρδευση λαμβάνοντας μέτρα προφύλαξης και το έδαφος πρέπει να αποστραγγίζεται καλά, ή χρειάζεται να προστίθεται σε αυτό γύψος.
4. C1-S4, C2-S3, C3-S2, C4-S1: Πολύ μέτρια έως κακή ποιότητα, με την αποφυγή χρήσης του νερού σε φυτά που είναι ευαίσθητα, αλλά και γενικά σε βαριά εδάφη. Το νερό χρησιμοποιείται για άρδευση λαμβάνοντας μέτρα προφύλαξης σε ελαφρά εδάφη τα οποία αποστραγγίζονται καλά, ή χρειάζεται να προστίθεται σε αυτά γύψος.
5. C2-S4, C3-S3, C4-S2: Κακή ποιότητα, το νερό πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο σε ανθεκτικά φυτά τα οποία βρίσκονται σε ελαφρά εδάφη όπου αποστραγγίζονται πολύ καλά, με προσθήκη γύψου.
6. C3-S4, C4-S3, C4-S4: Πολύ κακή ποιότητα, με το νερό να μην χρησιμοποιείται σε καμία περίπτωση για αρδευτικούς σκοπούς.

Από το διάγραμμα Wilcox που κατασκευάστηκε για την περιοχή μελέτης (Εικόνας 11.11), είναι εμφανές ότι η πλειοψηφία των δειγμάτων υπόγειου νερού ταξινομείται στις περιοχές C3-S1 και C4-S1. Το δείγμα ΑΛ54 ταξινομείται στην περιοχή C3-S2, το δείγμα Κ35 ταξινομείται στην περιοχή C4-S2, ενώ το δείγμα ΑΛ52_2 βρίσκεται στην γραμμή διαχωρισμού των δύο αυτών περιοχών. Τέλος, τα δείγματα ΑΛ52_3 και ΑΛ52_4 ταξινομούνται στην περιοχή C4-S3.

Αναλυτικότερα, τα δείγματα υπόγειου νερού που συναντώνται στην περιοχή C3-S1 κατανέμονται με μέτρια έως πολύ μέτρια ποιοτική κατάσταση με το νερό να χρησιμοποιείται για άρδευση λαμβάνοντας μέτρα προφύλαξης, ενώ τα δείγματα υπόγειου νερού που συναντώνται στην περιοχή C4-S1 και το δείγμα ΑΛ54 το οποίο συναντάται στην περιοχή C3-S2, κατανέμονται με πολύ μέτρια έως κακή ποιοτική κατάσταση με το νερό να χρησιμοποιείται για άρδευση λαμβάνοντας μέτρα προφύλαξης και την αποφυγή χρήσης του σε ευαίσθητα φυτά. Όσον αφορά το δείγμα ΑΛ52_2 όπου βρίσκεται ανάμεσα στην C3-S2 και C4-S2 περιοχή, κατανέμεται από πολύ μέτρια έως κακή ποιοτική κατάσταση, ενώ το δείγμα K35 όπου βρίσκεται στην περιοχή C4-S2 κατανέμεται με κακή ποιοτική κατάσταση με το νερό να είναι κατάλληλο μόνο για ανθεκτικά φυτά. Τέλος, τα δείγματα ΑΛ52_3 και ΑΛ52_4, τα οποία συναντώνται στην C4-S3 περιοχή κατανέμονται με πολύ κακή ποιότητα, με το νερό να μην χρησιμοποιείται σε καμία περίπτωση για αρδευτικούς σκοπούς.

Συμπεραίνεται, ότι η υπόγεια δειγματοληψία από την περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας, υποδεικνύει ότι τα νερά κυμαίνονται από μέτριας έως πολύ μέτριας ποιοτικής κατάστασης μέχρι και κακής ποιοτικής κατάστασης. Τα περισσότερα δείγματα νερού ενδείκνυνται για άρδευση, ωστόσο λαμβάνοντας σημαντικά μέτρα προφύλαξης, ενώ τα δείγματα K35, ΑΛ52_3 και ΑΛ52_4, ιδανικά, πρέπει να μην χρησιμοποιούνται για αρδευτικούς σκοπούς.



***Εικόνα 11.11:** Διάγραμμα Wilcox των δειγμάτων νερού για τον Νότιο άξονα της Κρήτης.*

11.3.5 Ομαδοποίηση και σύγκριση ανά τα διαγράμματα

Συνοψίζοντας, η συμπεριφορά των τριών τύπων που αναγνωρίστηκαν στο διάγραμμα Piper παρατηρείται να ποικίλει από διάγραμμα σε διάγραμμα και η κατανομή των υπόγειων δειγμάτων νερού τους διαφοροποιείται.

Όσον αφορά τα υπόγεια δείγματα νερού του «καλιο-νατρίου-χλωρίδιο-θειικού» τύπου, όπως αυτά ταξινομήθηκαν με βάση το διάγραμμα Piper, διακρίνεται να κατανέμονται και στις ίδιες περιοχές στο διάγραμμα Schoeller, με τις συγκεντρώσεις των ιόντων να αναπτύσσουν περίπου τις ίδιες τιμές και την συμπεριφορά τους να συνάδει. Παρομοίως, η κατανομή και η συμπεριφορά των υπόγειων δειγμάτων νερού του «ασβεστο-μαγνησιούχου» τύπου του διαγράμματος Piper, είναι περίπου ίδια στο διάγραμμα Schoeller, καθώς συνπίπτουν στις ίδιες περιοχές και οι συγκεντρώσεις των ιόντων τους παρατηρούνται περίπου ίσες. Αντίθετα, τα υπόγεια δείγματα νερού του «ασβεστο-μαγνησιούχο-χλωρίδιο-θειικού» τύπου, όπως αυτά ταξινομήθηκαν με βάση το διάγραμμα Piper, παρατηρούνται με διαφορετικές ιοντικές συγκεντρώσεις στο

διάγραμμα Schoeller, με την συμπεριφορά και την κατανομή τους να ποικίλει και να διαφοροποιείται.

Τα υπόγεια δείγματα νερού του «ασβεστο-μαγνησιουχο-χλωριο-θεικού» τύπου του διαγράμματος Piper, στο διάγραμμα Ludwig-Langelier παρατηρούνται με μεγάλη διασπορά και σε διαφορετικές περιοχές, με την συμπεριφορά τους να ποικίλει. Αντίθετα, η πλειοψηφία των υπόγειων δειγμάτων νερού του «καλιο-νατρίουχο-χλωριο-θεικού» και «ασβεστο-μαγνησιούχου» τύπου του διαγράμματος Piper, στο διάγραμμα Ludwig-Langelier συναντάται στην ίδια περιοχή με την συμπεριφορά τους να ταιριάζει.

Σχετικά με το διάγραμμα Wilcox και την κατανομή των υπόγειων δειγμάτων νερού του «καλιο-νατρίουχο-χλωριο-θεικού» τύπου του διαγράμματος Piper, παρατηρείται να ποικίλει με την συμπεριφορά τους να διαφοροποιείται, καθώς κατανέμονται σε διαφορετικές περιοχές. Αποτέλεσμα αυτού είναι η ποιοτική κατάσταση των δειγμάτων να μην ταιριάζει και να κυμαίνεται σε διαφορετικά επίπεδα. Παρόλα αυτά, τα υπόγεια δείγματα νερού του «ασβεστο-μαγνησιουχο-χλωριο-θεικού» και «ασβεστο-μαγνησιούχου» τύπου του διαγράμματος Piper, στο διάγραμμα Wilcox συμπεριφέρονται περίπου με ίδιο τρόπο με την κατανομή τους να διακρίνεται στην ίδια περιοχή και την ποιοτική τους κατάσταση να συνάδει.

12. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των υδροχημικών διαγραμμάτων εξάγονται τα κάτωθι συμπεράσματα.

Το διάγραμμα Piper καταδεικνύει σαφείς υδροχημικές όψεις στα δείγματα υπόγειων υδάτων. Από τα 47 δείγματα που εξετάστηκαν, τα 7 ανήκουν στην κατηγορία κάλιο-νατριούχο-χλώριο-θεικού τύπου, ο οποίος διακρίνεται από την επικράτηση του $K+Na$ ως κύρια κατιόντα και του Cl^- ως κύριου ανιόντος, πράγμα που υποδηλώνει σημαντική επίδραση από ανάμειξη του θαλασσινού νερού, εξαιτίας της εκτεταμένης εμφάνισης υφαλμύρινσης. Ο τύπος ασβέστιο-μαγνήσιο-χλώριο-θεικά αποτελείται από 16 δείγματα και παρουσιάζει έναν ποικίλο συνδυασμό ως προς τα επικρατέστερα κατιόντα και ανιόντα, με κάποια να εμφανίζουν σημαντική ποσότητα χλωρίου. Αυτό υποδηλώνει μια ισχυρή ανάμειξη υπόγειου νερού με το θαλασσινό, που πιθανότατα προκαλείται από διεργασίες ανάμειξης ή διαλυτοποίησης. Τέλος, από το σύνολο των δειγμάτων, τα 23 μπορούν να ταξινομηθούν ως ασβεστομαγνησιούχα, που σημαίνει ότι είτε το Ca^{2+} είτε το Mg^{2+} είναι το κυρίαρχο κατιόν, ενώ το SO_4^{2-} είναι το κύριο ανιόν. Τα δείγματα στα οποία κυριαρχεί το Ca επηρεάζονται κυρίως από τη διάλυση ασβεστολιθικών πετρωμάτων, ενώ τα δείγματα στα οποία κυριαρχεί το Mg υποδηλώνουν τη διάλυση υπερβασικών πετρωμάτων.

Ως εκ τούτου, η παρουσία τριών κύριων υδρογεωχημικών τύπων, όπως προκύπτει από την εξέταση του διαγράμματος Piper, επιβεβαιώνει την περίπλοκη φύση των υδρογεωχημικών διεργασιών στην περιοχή έρευνας. Οι ύπαρξη αυτών των υδρογεωχημικών δείχνει ότι τα υφάλμυρα ύδατα της περιοχής δεν μπορούν να αποδοθούν σε έναν μόνο παράγοντα. Αντίθετα, η ύπαρξη πολλών υδρογεωχημικών συνιστωσών υποδηλώνει ότι διάφορα κριτήρια συμβάλλουν στην ανάπτυξη των υδρογεωχημικών ιδιοτήτων των υπόγειων υδάτων.

Το διάγραμμα Schoeller παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ιοντική σύνθεση του νερού, αποκαλύπτοντας διαφορετικά επίπεδα και μεταβολές στις συγκεντρώσεις των κύριων ιόντων στα δείγματα νερού, υποδεικνύοντας πιθανές πηγές ρύπανσης ή φυσικούς παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα των υπόγειων υδάτων. Συνολικά, οι συγκεντρώσεις μαγνησίου (Mg) σε όλα τα δείγματα είναι γενικά χαμηλές, με τα περισσότερα δείγματα να παρουσιάζουν επίπεδα κάτω των 100 mg/L. Ωστόσο, υπάρχουν σημαντικές περιπτώσεις στις οποίες οι συγκεντρώσεις φτάνουν στο υψηλότερο σημείο τους, περίπου στα 320 mg/L. Οι διακυμάνσεις που παρατηρούνται δείχνουν ότι η πλειονότητα των υπόγειων υδάτων στην περιοχή έρευνας έχει συγκριτικά χαμηλές ποσότητες μαγνησίου, ενώ ορισμένα δείγματα επηρεάζονται από πηγές που οδηγούν σε αυξημένες συγκεντρώσεις. Τα δείγματα παρουσιάζουν γενικά υψηλές ποσότητες ασβεστίου (Ca), με την πλειονότητα των δειγμάτων να εμφανίζει σημαντικά επίπεδα άνω των 100 mg/L. Πολλαπλά δείγματα παρουσιάζουν πολύ αυξημένες συγκεντρώσεις, με επίπεδα που φθάνουν τα 700 mg/L, γεγονός που υποδηλώνει σημαντική συνεισφορά από τη διάσπαση των ασβεστολιθικών πετρωμάτων. Ωστόσο, ένας μικρός αριθμός δειγμάτων παρουσιάζει οριακά μειωμένη

περιεκτικότητα σε ασβέστιο, που κυμαίνεται περίπου από 60-100 mg/L, υποδεικνύοντας περιφερειακές διαφορές στις γεωλογικές ή υδρογεωλογικές συνθήκες. Επιπρόσθετα, εμφανίζουν ένα ευρύ φάσμα συγκεντρώσεων νατρίου (Na). Αν και η πλειονότητα των δειγμάτων είχε μέτρια επίπεδα νατρίου, που κυμαίνονται μεταξύ 10-70 mg/L, ένα αξιοσημείωτο ποσοστό δειγμάτων παρουσιάζει μεσαίες έως υψηλές συγκεντρώσεις, με τιμές που ξεπερνούν τα 100 mg/L και μερικές φορές φτάνουν μέχρι και τα 600 mg/L. Το σημαντικό εύρος των συγκεντρώσεων νατρίου που παρατηρήθηκαν υποδεικνύει ότι διάφορες μεταβλητές, όπως η είσοδος αλμυρού νερού, οι μηχανισμοί ιοντοανταλλαγής και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ πετρωμάτων και νερού, ενδέχεται να επηρεάζουν τα επίπεδα της συγκέντρωσης τους. Οι ποσότητες χλωρίου (Cl) ποικίλλουν, επίσης, σημαντικά με την πλειονότητα των δειγμάτων να εμφανίζουν επίπεδα κάτω των 100 mg/L. Ωστόσο, μερικά δείγματα ξεχωρίζουν με πολύ υψηλότερα επίπεδα χλωριόντων, που ξεπερνούν τα 600 mg/L και προσεγγίζουν ακόμη και τα 1000 mg/L. Αυτά τα υψηλά επίπεδα είναι πιθανώς σημάδι ανάμειξης θαλασσινού νερού ή ανθρωπίνων δραστηριοτήτων, συμπεριλαμβανομένης της γεωργικής απορροής ή των βιομηχανικών δραστηριοτήτων. Ακόμη, παρουσιάζουν σημαντικά αυξημένα επίπεδα θεικών αλάτων (SO_4), με συγκεντρώσεις που συχνά κυμαίνονται μεταξύ 100-1500 mg/L. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στη διάλυση ορυκτών που περιέχουν θειικά άλατα ή στη ρύπανση από εξωτερικές πηγές. Ένα υποσύνολο δειγμάτων έχει μειωμένη περιεκτικότητα σε θειικά άλατα, που μετράται κάτω από 100 mg/L, υποδεικνύοντας ίσως ξεχωριστές γεωλογικές συνθήκες ή την επίδραση της αραίωσης. Τέλος, οι ποσότητες διττανθρακικών (HCO_3) σε όλα τα δείγματα είναι σταθερά μέτριες, κυμαινόμενες μεταξύ 100-500 mg/L. Αυτή η ομοιομορφία υποδηλώνει ότι τα επίπεδα διττανθρακικών ελέγχονται σε μεγάλο βαθμό από τη διάλυση ανθρακικών ορυκτών. Επιπρόσθετα, είναι άξιο αναφοράς πως οι αυξημένες συγκεντρώσεις θεικών ιόντων στα περισσότερα δείγματα, υποδηλώνουν ξεκάθαρα την ύπαρξη πετρωμάτων γύψου ή ανυδρίτη στη γεωλογική δομή της περιοχής. Αυτά τα ορυκτά συμβάλλουν καθοριστικά στη σύνθεση των υπόγειων υδάτων, εξηγώντας την υψηλή παρουσία θεικών ιόντων. Παράλληλα, οι μειωμένες συγκεντρώσεις Na-Cl στα ίδια δείγματα υποδεικνύουν ότι η επίδραση από θαλάσσια εισροή είναι περιορισμένη.

Σε γενικές γραμμές, το διάγραμμα Schoeller εμφανίζει ένα περίπλοκο, αλλά μάλλον συνεπές μοτίβο συγκεντρώσεων ιόντων στην πλειονότητα των δειγμάτων υπόγειων υδάτων. Αν και τα περισσότερα δείγματα παρουσιάζουν ένα σταθερό ιοντικό προφίλ, γεγονός που υποδηλώνει μια ομοιότητα στους μηχανισμούς που ελέγχουν τη χημεία του νερού σε ολόκληρη την περιοχή μελέτης, υπάρχουν ορισμένες σημαντικές αποκλίσεις. Αυτές οι ανωμαλίες, που χαρακτηρίζονται από σημαντικά αυξημένα ή μειωμένα επίπεδα ορισμένων ιόντων, υποδεικνύουν τοπικούς παράγοντες όπως η εισροή αλμυρού νερού, διαφορετικοί γεωλογικοί σχηματισμοί ή ανθρώπινη δραστηριότητα.

Το διάγραμμα Langelier παρέχει περαιτέρω στοιχεία, υποδεικνύοντας ότι σχεδόν όλα τα δείγματα έχουν μεγάλες συγκεντρώσεις χλωροθεικών ιόντων, γεγονός που επισημάνει την ουσιαστική ανάμειξη με αλμυρό νερό. Οι συγκεντρώσεις των ιόντων

νατρίου και καλίου παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις, υποδεικνύοντας ένα ευρύ φάσμα υδροχημικών συνθηκών. Βάση των ευρημάτων από το διάγραμμα Schoeller, υπήρξε προσδοκία ανακάλυψης δειγμάτων που σχετίζονται με τη διάλυση γύψου, όμως η ανάλυση του διαγράμματος Langelier δεν περιλαμβάνει διττανθρακικά στους άξονες, περιορίζοντας έτσι την ανίχνευση τέτοιων δειγμάτων. Παρ' όλα αυτά, η έρευνα αποκάλυψε τρεις βασικές ταξινομήσεις δειγμάτων. Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει δείγματα που χαρακτηρίζονται από συγκεντρώσεις χλωριόντων και θεικών πάνω από 45 meq%, οι οποίες υποδηλώνουν τη διάλυση του αλίτη. Η δεύτερη ομάδα περιλάμβανε δείγματα με συγκεντρώσεις χλωρίου και θεικών που κυμαίνονταν από 35 έως 45 meq% και επίπεδα νατρίου-καλίου κάτω από 25 meq%, που υποδηλώνουν προφανή ανάμειξη με θαλασσινό νερό. Η τρίτη ομάδα περιλαμβάνει δείγματα που βρίσκονται σε ουδέτερες περιοχές του διαγράμματος, χωρίς σαφή προέλευση, τα οποία φαίνεται να έχουν επηρεαστεί από πολλές πηγές.

Συνεπώς, το διάγραμμα Ludwig-Langelier απεικονίζει γραφικά ότι το μεγαλύτερο μέρος των δειγμάτων υπόγειων υδάτων στην περιοχή έρευνας επηρεάζεται έντονα από την ανάμειξη με αλμυρό νερό, μια διαδικασία που ενισχύεται περαιτέρω από τα φαινόμενα εμπλουτισμού. Είναι σημαντικό ότι από τα 47 δείγματα, μόνο τα 6 παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις από τα υπόλοιπα, αλλά εξακολουθούν να είναι αρκετά κοντά για να επιβεβαιώσουν το γενικό μοτίβο. Τα ευρήματα αυτά υποδεικνύουν ότι οι αναλογίες των ιόντων, δηλαδή του χλωρίου-θεικού άλατος και του νατρίου-καλίου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αξιόπιστοι δείκτες της διεύθυνσης του αλμυρού νερού και της κίνησης των υπόγειων υδάτων.

Το διάγραμμα Wilcox παρέχει μια αξιολόγηση της καταλληλότητας των υπόγειων υδάτων για αρδευτικούς σκοπούς. Η περιοχή έρευνας παρουσιάζει ένα φάσμα επιπέδων ποιότητας νερού, που κυμαίνεται από μέτρια έως κακή. Όσον αφορά την κατηγοριοποίηση, 23 δείγματα βρίσκονται εντός της περιοχής του διαγράμματος C3-S1, υποδηλώνοντας ένα υψηλό επίπεδο αλατότητας με χαμηλή απειλή νατρίου. Αυτό υποδηλώνει ότι τα δείγματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για άρδευση, αν και με την ανάγκη λήψης προληπτικών μέτρων και προϋπόθεση για καλή αποστράγγιση του εδάφους. Η περιοχή C4-S1 περιλαμβάνει 19 δείγματα, που καταδεικνύουν πολύ αυξημένα επίπεδα αλατότητας με χαμηλό κίνδυνο νατρίου. Αυτό καθιστά αναγκαία την εφαρμογή ουσιαστικότερων μεθόδων διαχείρισης για τη διασφάλιση της βέλτιστης γεωργικής παραγωγής καθώς υφίσταται αδύνατο για χρήση σε ευαίσθητα φυτά. Επιπλέον, ένα δείγμα (ΑΛ54) βρίσκεται στην περιοχή C3-S2, υποδηλώνοντας υψηλό επίπεδο αλατότητας με μεσαίο επίπεδο κινδύνου νατρίου και η δυνατότητα του για άρδευση συμπίπτει με αυτήν την προαναφερθείσας περιοχής (C4-S1). Επιπλέον, ένα άλλο δείγμα (Κ35) βρίσκεται στην περιοχή C4-S2, υποδηλώνοντας πολύ υψηλό επίπεδο αλατότητας με μεσαίο επίπεδο κινδύνου νατρίου και καθίσταται κακής ποιότητας με χρήση μόνο σε ανθεκτικά φυτά και σε συνθήκες όπου είναι δυνατή η πολύ καλή αποστράγγιση. Το δείγμα ΑΛ52_2 βρίσκεται ανάμεσα στις περιοχές C3-S2 και C4-S2, ενώ τα δείγματα ΑΛ52_3 και ΑΛ52_4 βρίσκονται στην περιοχή C4-S3. Αυτή η περιοχή υποδεικνύει ότι τα δείγματα αυτά έχουν πολύ υψηλή αλατότητα και

υψηλό επίπεδο νατρίου, γεγονός που τα καθιστά ακατάλληλα για αρδευτικούς σκοπούς σε όλες τις περιπτώσεις.

Συνοψίζοντας, η ενσωμάτωση αυτών των στοιχείων προσφέρει μια πλήρη κατανόηση της χημείας των υπόγειων υδάτων στην καθορισμένη περιοχή. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν κυρίως την ουσιαστική επίδραση της διείσδυσης αλμυρού νερού και της διάσπασης πετρωμάτων στη σύνθεση του νερού. Αυτό έχει συνέπειες για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων, ιδίως σε περιοχές όπου τα υπόγεια ύδατα διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην παροχή νερού για τη γεωργία. Οι επόμενες ερευνητικές προσπάθειες θα πρέπει να διερευνήσουν τις χρονικές διακυμάνσεις αυτών των υδροχημικών διεργασιών, προκειμένου να διαμορφωθούν βιώσιμες μέθοδοι διαχείρισης των υπόγειων υδάτινων πόρων. Η ενδεδειγμένη δειγματοληψία και ανάλυση είναι απαραίτητες για την επιτυχή διαχείριση και διατήρηση αυτών των βασικών υδάτινων πόρων, που μπορούν να αξιοποιηθούν με ποικίλους τρόπους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΔΙΕΘΝΗΣ

1. **Bagheri, R., et al.**, 2019. Overexploitation hazards and salinization risks in crucial declining aquifers, chemo-isotopic approaches. *Hazard Mater*, 369(5 May): 150–163.
2. **Castany, G.**, 1963. *Prospection et Exploitation des eaux souterraines*, Volume 1, Issue 2, Pages 99-182, Dunod, Paris.
3. **Clark, I.**, 2015. *Groundwater geochemistry and isotopes*. Taylor & Francis, London. Link.
4. **Costi, D., Calcaterra, P.G., Iori, N., Vourna, S., Nappi, G., & Passeri, M.**, 1999. Importance of bioavailable calcium in drinking water for the maintenance of bone mass in post-menopausal women. *J Endocrinol Invest*, 22: 852–856.
5. **Deverel, S., & Gallanthine, S.**, 1989. Relation of salinity and selenium in shallow groundwater to hydrologic and geochemical processes, western San Joaquin Valley, California. *J Hydrol*, 109: 125–149.
6. **Edmunds, W.M., et al.**, 2003. Groundwater evolution in the continental intercalaire aquifer of southern Algeria and Tunisia: trace element and isotopic indicators. *Appl Geochem*, 18: 805–822.
7. **Fergusson, J.E.**, 1990. *The heavy elements: Chemistry, Environmental Impact and Health Effects*. Oxford, Pergamon Press, Page 614.
8. **Hanor, J.S.**, 1987. History of thought on the origin of subsurface sedimentary brines. In: Landa E.R., Ince S. (eds) *The history of hydrology*. American Geophysical Union, Pages 81–91.
9. **Hawkes, H.E., & Webb, J.S.**, 1962. *Geochemistry in Mineral Exploration*. Harper & Row, Page 415.
10. **Hounslow, W.A.**, 1995. *Water Quality Data: Analysis and Interpretation*. Lewis Publishers, Oklahoma, USA.
11. **Hounslow, A.**, 2002. *Water Quality Data: Analysis and Interpretation*. CRC-Press, 1st edition.
12. **Ken-Onukuba, D.N., Okeke, O.C., Amadi, C.C., Akaolisa, C.C.Z., Okonkwo, S.I., Offoh, J.I., & Nwachukwu, H.G.O.**, 2021. Water quality assessment of Ekulu and Asata Rivers in Enugu Area, Southeastern Nigeria, using physico-chemical and bacteriological parameters. *Journal of Environment and Earth Science*, 11(4): 70–92.
13. **Kobayashi, J.**, 1957. On geographical relationship between the chemical nature of river water and death rate from apoplexy. *Berichte des Ohara Instituts für landwirtschaftliche Biologie Okyama University*, 11: 12–21.
14. **Langelier, W.F., & Ludwig, H.F.**, 1942. Graphical methods for indicating the mineral character of natural waters. *Journal (American Water Works Association)*, 34(3): 335–352.

15. **Mather, J.**, 1997. Relationship between rock, soil and groundwater compositions. In: Saether, O.M., & de Caritat, P. (eds) *Geochemical processes, weathering and groundwater recharge in catchments*.
16. **Meinzer, O.E.**, 1927. Large Springs in the United States. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 557, Washington, DC
17. **Mirzavand, M.**, 2018. Determine the origin and mechanism of ground-water salination in Kashan Plain using isotopic and hydro-geo-chemical methods. University of Kashan.
18. **Mirzavand, M., Ghasemieh, H., Sadatinejad, S.J., & Bagheri, R.**, 2018a. Saltwater intrusion vulnerability assessment using AHP-GALDIT Model in Kashan plain aquifer as a critical aquifer in a semi-arid region. *Desert*, 32(2): 255–264.
19. **Mirzavand, M., Ghasemieh, H., Sadatinejad, S.J., & Bagheri, R.**, 2020. An overview on source, mechanism and investigation approaches in groundwater salinization studies. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17: 2463–2476.
20. **Monjerezi, M.**, 2012. Groundwater salinity in lower Shire River Valley (Malawi): Hydro-geochemical and isotope constraints on sources and evolution. University of Oslo (June), Page 188.
21. **Piper, A.M.**, 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 25(6): 914–928.
22. **Richter, B.C., & Kreitler, C.W.**, 1993. *Geochemical techniques for identifying sources of ground-water salinization*. CRC Press, Boca Raton.
23. **Rose, A.W., Hawkes, H.E., & Webb, J.S.**, 1979. *Geochemistry in Mineral Exploration*. 2nd Ed. Academic Press. Chapters 1–2, Pages 1–43.
24. **Sonesson, B., & Sonesson, G.**, 2001. *Anatomy and Physiology* (Anatomi och fysiologi, in Swedish). LIBER, Falköping.
25. **Templ, M., Gozzi, C., & Bucciatti, A.**, 2022. A new version of the Langelier-Ludwig square diagram under a compositional perspective. *Journal of Geochemical Exploration*, 242, 107084.
26. **Thurner, A.**, 1967. *Hydrogeologie*, Mit 187 Abb. Wien, New York: Springer Verlag.
27. **US EPA**, 1989. Summary review of health effects associated with ammonia, (EPA/600/8-89/052F), US Environmental Protection Agency, Washington, DC.
28. **van Weert, F., van der Gun, J., & Reckman, J.**, 2009. Global overview of saline groundwater occurrence and genesis. *International Groundwater-Resources Assessment Center*. Utrecht, Report nr. GP 2009-1.
29. **Voutsis, N., Kelepertzis, E., Tziritis, E., & Kelepertzis, A.**, 2015. Assessing the hydrogeochemistry of groundwaters in ophiolite areas of Euboea Island, Greece, using multivariate statistical methods. *Journal of Geochemical Exploration*, 159: 79–92.
30. **Watts, D.L.**, 1997. *Trace elements and other essential elemental nutrients: Clinical application of tissue mineral analysis*. 2nd Writer's Block edition.

31. **WHO**, 2011. *Guidelines for drinking water quality*, 4th edn, Geneva, Switzerland.
32. **Wilcox, L.**, 1955. *Classification and use of irrigation waters* (No. 969). US Department of Agriculture.
33. **B., Krieg, M-A., Aeschlimann, J-M., & Burckhardt, P.**, 2009. Alkaline mineral water lowers bone resorption even in Ca sufficiency: alkaline mineral water and bone metabolism. *Bone*, 44: 120–124

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

1. **Αθανασούλης, Κ., Βακαλόπουλος, Π., Ξενάκη, Μ., Περσιανή, Δ., Τακτικός, Στ.**, 2009. Περιοδική Παρακολούθηση Ιαματικών Πηγών Ελλάδας, Ι.Γ.Μ.Ε.
2. **Αποκεντρωμένη Διοίκηση Κρήτης**, Διαθέσιμο στη σελίδα: <http://www.apdkritis.gov.gr>
3. **Βαρδαλή, Α.**, 2018. Γεωλογική και υδροχημική μελέτη των ιστορικά ιαματικών πηγών της περιοχής Τεμενίων, δυτική Κρήτη. Διπλωματική εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.
4. **Βασιλόπουλος, Α.**, 2022. Διερεύνηση κατανομής στροντίου σε ιστορικά καταγεγραμμένες ιαματικές πηγές του ελληνικού χώρου. Διπλωματική εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.
5. **Βροντάκη, Ε.**, 2001. Υφαλμύριση σε παράκτιους υδροφορείς - τρόποι ανίχνευσης με τη χρήση γεωφυσικών μεθόδων. Μεταπτυχιακή διατριβή. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος.
6. **Δήμας, Π.**, 2016. Μελέτη του μηχανισμού υφαλμύρισης της γεώτρησης Κάινας του Δήμου Αποκόρωνα. Διπλωματική εργασία. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Σχολή Εφαρμοσμένων Επιστημών, Τμήμα Μηχανικών Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος.
7. **Ευαγγελόπουλος, Ε.**, 2017-2018. Διάλεξη 1. Εισαγωγή στα μεταβατικά οικοσυστήματα, Πανεπιστήμιο Αιγαίου – Τμήμα Επιστημών της Θάλασσας.
8. **Καλλέργης, Γ.**, 2001. Εφαρμοσμένη - Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία, Έκδοση Τ.Ε.Ε., Δεύτερη Έκδοση, Αθήνα.
9. **Καλλέργης, Γ.Α.**, 2000. Εφαρμοσμένη – Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία Β' Τόμος, Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, Αθήνα.
10. **Καμίτση, Δ.**, 2017. Συγκρίσεις των πιθανών γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας της Μεσσαράς με αντίστοιχα της Δυτικής Ελλάδας. Διπλωματική εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.
11. **Καπακτσή, Σ.**, 2019. Γεωλογική και υδροχημική μελέτη σε ιστορικά καταγεγραμμένες ιαματικές πηγές εντός του Νεογενούς της Δυτικής Κρήτης. Διπλωματική εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.
12. **Κελεπερτζής, Α.Ε.**, 1993. Εφαρμοσμένη Γεωχημεία. Πανεπιστήμιο Αθηνών.
13. **Κελεπερτζής, Α.Ε.**, 2000. Εφαρμοσμένη Γεωχημεία. Μακεδονικές Εκδόσεις.

14. **Κουφάκης, Μ.**, 2018. Μελέτη γεωλογικών και γεωχημικών χαρακτηριστικών θερμομεταλλικών πηγών στην δυτική Κρήτη. Διπλωματική εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.
15. **Μιχαλοπούλου, Χ.**, 2004. Νομοθεσία για το περιβάλλον. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
16. **Μπαμπανιώτης, Γ.**, 2019. Συγκριτική μελέτη θερμομεταλλικών πηγών υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας. Παραδείγματα από Κρήτη και τον υπόλοιπο Ελλαδικό χώρο. Διπλωματική εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.
17. **Μπαμπάτσος, Α.**, 2021. Θερμομεταλλικές πηγές νομού Ξάνθης. Σημερινό καθεστώς – αξιοποίηση. Μεταπτυχιακή διατριβή. Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Πολυτεχνική Σχολή Ξάνθης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.
18. **Μπορνόβας Ι., Ροντογιάννη-Τσιαμπάου Θ.**, 1983. Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδας σε κλίμακα 1:500.000. Έκδοση ΙΓΜΕ.
19. **Μπουτσάκης, Κ.**, 2021. Γεωλογική και υδροχημική μελέτη των ιστορικά ιαματικών και θερμομεταλλικών πηγών του Φυλλιτικού Καλύμματος στην Δυτική Κρήτη. Μεταπτυχιακή διατριβή. Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.
20. **Πολυχρονάκης, Α., Κοϊνάκης, Ι., Ζαμπετάκης, Γ., Παυλίδου, Σ., Αθανασούλη, Ε.**, 2009. Καταγραφή και αποτίμηση των υδρογεωλογικών χαρακτήρων των υπόγειων νερών και των υδροφόρων συστημάτων της χώρας (Κ.Ε. 7.3.2.1). Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών. Αθήνα.
21. **Σαρακιώτης, Α.**, 1999. Ιαματικά Ύδατα της Ελλάδος: Συνέδριο Εφαρμογές στην Θεραπευτική & Κοσμητολογία, Ιαματική λουτροθεραπεία - ιατρικές παρατηρήσεις και εφαρμογές. Καμμένα Βούρλα.
22. **Σουλιός, Γ.**, 2004. Γενική Υδρογεωλογία, Τόμος Γ', Εκδόσεις Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη.
23. **Σούλιος, Γ.**, 2006. Γενική υδρογεωλογία – Τόμος Δ', Αποθέματα και διαχείριση του υπόγειου νερού, Αθήνα.
24. **Σταμάτης, Γ.**, (χ.η.). Υφαλμύρωση παράκτιων υδροφορέων και κλιματική αλλαγή: ειδικές και γενικές επιπτώσεις. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
25. **Φανουράκη, Μ.**, 2011. Μελέτη ρύπανσης υπόγειων υδάτων και εδαφών από αρσενικό και αντιμόνιο σε περιοχές εμφάνισης θειούχου μεταλλοφορίας του ΒΔ τμήματος της νήσου Χίου. Διδακτορική διατριβή. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας & Γεωπεριβάλλοντος, Τομέας Οικονομικής Γεωλογίας – Γεωχημείας.
26. **ΦΕΚ 603/Β'/22-2-2018.** Καθορισμός τεχνικών και λειτουργικών προδιαγραφών ανέγερσης, μετατροπής και επέκτασης Μονάδων Ιαματικής Θεραπείας και Κέντρων Ιαματικού Τουρισμού - Θερμαλισμού και διαδικασία χορήγησης ειδικού σήματος λειτουργίας.

Ιστότοποι

1. Αγγελάκης, Α.Ν. (2022). *Υφαλμύριση Παράκτιων Υδροφορέων*. [online] RethNea.gr. Available at: <https://rethnea.gr/yfalmyrosi-paraktion-ydroforeon/>
2. Wikipedia. (2020). *Brackish water*. [online] Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Brackish_water.
3. Water Education Foundation (2014). *Salinity - Water Education Foundation*. [online] Water Education Foundation. Available at: <https://www.watereducation.org/aquapedia-background/salinity>.
4. <http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg763e/ch5.htm>

