



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΠΜΣ «ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**Υδροχημικά και ισοτοπικά χαρακτηριστικά των υπόγειων
νερών της παράκτιας περιοχής του Θορικού, Λαυρίου.**



**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ
&
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»**

**ΑΔΑΜΟΠΟΥΛΟΥ ΜΕΡΟΠΗ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Ομότιμος Καθηγητής Ι. ΚΟΥΜΑΝΤΑΚΗΣ**

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2015

Στη μικρή Χαρά

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος.....	15
Περίληψη.....	17
Abstract.....	19
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	23
1.1. ΓΕΝΙΚΑ	23
1.2. ΥΠΟΓΕΙΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ	25
1.2.1. Κύρια κατάταξη υπογείων υδροφορέων	25
1.2.1.1. Υπό πίεση υδροφορείς.....	25
1.2.1.2. Φρεάτιοι υδροφορείς	26
1.2.1.3. Ημιεγκλωβισμένοι υδροφορείς	26
1.2.1.4. Ημιελεύθεροι υδροφορείς.....	27
1.2.2. Υδροφόρες ζώνες	27
1.2.3. Λιθολογική κατάταξη υπόγειων υδροφόρων	27
1.2.3.1. Υδροφορείς σε πορώδη μέσα	27
1.2.3.2. Καρστικοί υδροφορείς	28
1.2.3.3. Υδροφορείς διαρρηγμένων πετρωμάτων	29
1.3. ΚΑΡΣΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ	29
1.3.1. Γενικά	29
1.3.2. Καρστικά πετρώματα	30
1.3.3. Καρστική διεργασία	31
1.3.4. Τύποι καρστ.....	34
1.3.5. Καρστικές γεωμορφές.....	34
1.3.5.1. Επιφανειακές καρστικές γεωμορφές.....	34
1.3.5.2. Υπόγειες καρστικές γεωμορφές.....	36
1.3.6. Ο κύκλος του καρστ.....	37
1.3.7. Υδραυλικά χαρακτηριστικά των καρστικών υδροφορέων	37
1.3.8. Η δομή του καρστ.....	38
1.4. ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΚΑΡΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	39
1.4.1. Δημιουργία παράκτιων καρστικών συστημάτων	39
1.4.2. Μορφές παράκτιου καρστ	41
1.4.3. Νόμος Ghyben – Herzberg	43
1.5. ΙΣΟΤΟΠΙΚΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ	43
1.5.1. Εισαγωγή.....	43

1.5.2.	Βασικές έννοιες.....	43
1.5.3.	Ισοτοπική σύσταση – Κλασμάτωση	45
1.5.4.	Μετεωρική ευθεία	46
1.5.5.	Υδρολογικό προφίλ ισοτόπων	47
1.5.6.	Φυσικά ισότοπα και εφαρμογές.....	48
1.5.7.	Ιχνηθετήσεις.....	49
1.5.7.1.	Ορισμός.....	49
1.5.7.2.	Ταξινόμηση ιχνηθετών	49
1.5.7.3.	Διαλυτότητα ιχνηθετών	50
1.5.7.4.	Ευστάθεια ιχνηθετών.....	50
1.5.7.5.	Ανίχνευση ιχνηθετών	50
2.	ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	55
2.1.	ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	57
2.2.	ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ.....	57
3.	ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	67
3.1.	ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	67
3.2.	ΥΠΟΓΕΙΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ – ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΑ ΠΕΔΙΝΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ Λ. ΘΟΡΙΚΟΥ	71
3.3.	ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	74
4.	ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	81
4.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	81
4.1.1.	Φυσικά χαρακτηριστικά.....	81
4.1.2.	Χημικά χαρακτηριστικά.....	81
4.1.3.	Ειδικές παράμετροι – δείκτες	82
4.1.4.	Βιολογικά χαρακτηριστικά	83
4.2.	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	83
4.2.1.	Δειγματοληψία.....	83
4.2.2.	Χημικές αναλύσεις και μετρήσεις υπαίθρου	84
4.2.3.	Επεξεργασία των χημικών αναλύσεων.....	86
4.2.3.1.	Υδροχημικοί χάρτες.....	86
4.2.3.2.	Ιοντικοί λόγοι	86
4.2.3.3.	Υδροχημικά διαγράμματα.....	87
4.3.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΘΟΡΙΚΟΥ	90
4.3.1.	Φυσικοχημικές παράμετροι δειγμάτων υπόγειων νερών της περιοχής έρευνας ..	90
4.3.1.1.	Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)	90
4.3.1.2.	Ενεργός οξύτητα pH	97

4.3.1.3.	Θερμοκρασία	102
4.3.2.	Χημική σύσταση υπογείου νερού	102
4.3.2.1.	Χλωριόντα (Cl^-).....	103
4.3.2.2.	Ασβέστιο (Ca^{2+}) – Μαγνήσιο (Mg^{2+}).....	109
4.3.2.3.	Νάτριο (Na^+) – Κάλιο (K^+).....	110
4.3.2.4.	Σίδηρος (Fe) – Μαγγάνιο (Mn) – Ψευδάργυρος (Zn).....	112
4.3.2.5.	Νιτρικά ιόντα (NO_3^-).....	113
4.3.2.6.	Όξινα ανθρακικά ιόντα (HCO_3^-).....	119
4.3.2.7.	Θειικά ιόντα (SO_4^{-2}).....	119
4.3.2.8.	Καταλληλότητα για άρδευση.....	120
4.3.2.9.	Καταλληλότητα υπόγειων νερών για ανθρώπινη κατανάλωση.....	122
4.3.3.	Χημικοί τύποι υπογείων νερών.....	134
4.3.3.1.	Εισαγωγή.....	134
4.3.4.	Ιοντικοί λόγοι	136
4.3.4.1.	Γενικά	136
4.3.4.2.	Υπολογισμός ιοντικών λόγων υπόγειων νερών Θεορικού	138
5.	ΙΣΟΤΟΠΙΚΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ Υ.Ν.	143
5.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ	143
5.2.	ΙΣΟΤΟΠΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ Υ.Ν. καρστικού και αλλουβιακού υδροφορέα Θεορικού.....	145
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	153
7.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	161
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1	169
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2	223
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3	245

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 2. 1 ΖΟΕ ΛΑΥΡΕΩΤΙΚΗΣ (ΠΕΡΔΙΚΑΚΗ 2014).....	63
ΠΙΝΑΚΑΣ 3. 1 ΣΤΑΘΜΕΣ - ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ (ΠΕΡΔΙΚΑΚΗ 2014)	73
ΠΙΝΑΚΑΣ 3. 2 Ύψη ΒΡΟΧΗΣ (ΜΜ) ΚΑΤΑΓΕΓΡΑΜΜΕΝΑ ΣΤΟ ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΟ ΣΤΑΘΜΟ ΛΑΥΡΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 1970-1978.	76
ΠΙΝΑΚΑΣ 3. 3 Ύψη ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΜΑΤΩΝ (ΜΜ) ΚΑΤΑΓΕΓΡΑΜΜΕΝΑ ΣΤΟ ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΟ ΣΤΑΘΜΟ ΛΑΥΡΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 2009-2013.	77
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. 1 ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ ΓΙΑ ΑΡΔΕΥΣΕΙΣ (ΒΟΥΔΟΥΡΗΣ 2009).....	89
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. 2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΠΕΡΙΟΔΩΝ ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ ΚΑΙ ΜΑΪΟΥ	90
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. 3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΠΕΡΙΟΔΩΝ ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ-ΜΑΪΟΥ 2015	94
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. 4 ΕΝΕΡΓΟΣ ΟΞΥΤΗΤΑ ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΥ ΚΑΙ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ – ΜΑΙΟΣ.....	97
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. 5 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΥ ΚΑΙ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ ΤΟΥ ΜΑΪΟΥ	102
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. 6 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΙΟΝΤΩΝ ΧΛΩΡΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟ ΚΑΙ ΤΟΝ ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΥΔΡΟΦΟΡΟ, ΠΕΡΙΟΔΩΝ ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ ΚΑΙ ΜΑΪΟΥ	103
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. 7 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΑΣΒΕΣΤΙΟΥ (Ca ²⁺) ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΣΙΟΥ (Mg ²⁺) ΤΩΝ ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ, ΠΕΡΙΟΔΩΝ ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ ΚΑΙ ΜΑΪΟΥ	109
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. 8 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΑΣΒΕΣΤΙΟΥ (Ca ²⁺) ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΣΙΟΥ (Mg ²⁺) ΤΩΝ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ, ΠΕΡΙΟΔΩΝ ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ ΚΑΙ ΜΑΪΟΥ	109
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. 9 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΝΑΤΡΙΟΥ ΚΑΙ ΚΑΛΙΟΥ ΤΩΝ ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ, ΠΕΡΙΟΔΩΝ ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ ΚΑΙ ΜΑΪΟΥ.....	110
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. 10 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΝΑΤΡΙΟΥ ΚΑΙ ΚΑΛΙΟΥ ΤΩΝ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ, ΠΕΡΙΟΔΩΝ ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ ΚΑΙ ΜΑΪΟΥ.	110
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. 11 ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ Fe, Mn και Zn ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ, ΠΕΡΙΟΔΩΝ ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ ΚΑΙ ΜΑΪΟΥ.....	113
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. 12 ΝΙΤΡΙΚΑ ΙΟΝΤΑ ΣΤΟΥΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ ΚΑΙ ΜΑΪΟΥ.....	114
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. 13 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΟΞΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΙΚΩΝ ΙΟΝΤΩΝ ΤΩΝ ΔΥΟ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ ΓΙΑ ΙΑΝΟΥΑΡΙΟ ΚΑΙ ΜΑΙΟ.....	119
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. 14 ΘΕΙΙΚΑ ΙΟΝΤΑ (SO ₄ ⁻²) ΤΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ, ΓΙΑ ΤΙΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ ΚΑΙ ΜΑΪΟΥ.	120
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. 15 ΧΗΜΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	123
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. 16 ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑΣ ΠΟΣΙΜΟΥ ΝΕΡΟΥ.....	124
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. 17 ΧΗΜΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ (ΧΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΟΙ) ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΝΕΡΟΥ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ	134
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. 18 ΧΗΜΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΝΕΡΟΥ ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ.....	135
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. 19 ΙΟΝΤΙΚΟΙ ΛΟΓΟΙ (ΒΟΥΔΟΥΡΗΣ 2009)	137
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. 20 ΙΟΝΤΙΚΟΙ ΛΟΓΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΘΟΡΙΚΟΥ, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2015	138
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. 21 ΙΟΝΤΙΚΟΙ ΛΟΓΟΙ ΤΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΘΟΡΙΚΟΥ, ΜΑΙΟΣ 2015.	140
ΠΙΝΑΚΑΣ 5. 1 ΙΣΟΤΟΠΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ¹⁸ O ΚΑΙ Δ ² H ΑΠΟ ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΝΕΡΟΥ ΠΟΥ ΣΥΛΛΕΧΘΗΣΑΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ.	146

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΣΧΗΜΑ 1. 1 ΥΠΟΓΕΙΟ ΝΕΡΟ & ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ (NASA GODDARD SPACE FLIGHT CENTER)	24
ΣΧΗΜΑ 1. 2 ΦΡΕΑΤΙΟΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑΣ (ΜΙΜΙΚΟΥ 2012)	25
ΣΧΗΜΑ 1. 3 ΦΡΕΑΤΙΟΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑΣ (ΜΙΜΙΚΟΥ 2012)	26
ΣΧΗΜΑ 1. 4 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ (USGS - THE WATER CYCLE - USGS WATER SCIENCE SCHOOL)	28
ΣΧΗΜΑ 1. 5 ΕΞΑΠΛΩΣΗ ΑΝΘΡΑΚΙΚΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ (ΒΟΥΔΟΥΡΗΣ 2009).	30
ΣΧΗΜΑ 1. 6 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΩΝ - ΔΟΛΟΜΙΤΙΚΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ (ΓΚΟΛΟΥΜΠΟΒΙΤΣ 2011)	31
ΣΧΗΜΑ 1. 7 ΚΑΡΣΤΙΚΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ	32
ΣΧΗΜΑ 1. 8 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ (ΒΟΥΔΟΥΡΗΣ 2006)	33
ΣΧΗΜΑ 1. 9 ΚΑΡΣΤΙΚΕΣ ΓΕΩΜΟΡΦΕΣ (ΒΟΥΒΑΛΙΔΗΣ 2011)	35
ΣΧΗΜΑ 1. 10 ΚΑΡΣΤΙΚΕΣ ΔΟΜΕΣ (ΒΟΥΒΑΛΙΔΗΣ 2011)	35
ΣΧΗΜΑ 1. 11 ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΚΑΡΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΤΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΧΩΡΟ (ΒΑΚΑΛΩΙΤΣ 2005).	39
ΣΧΗΜΑ 1. 12 ΠΑΡΑΚΤΙΟΣ ΚΑΡΣΤΙΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΣ (ΒΑΚΑΛΩΙΤΣ 2005 ΜΕΤΑΦΡΑΣΜΕΝΟ).	40
ΣΧΗΜΑ 1. 13 ΜΟΡΦΕΣ ΤΟΥ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ ΚΑΡΣΤ. 1.ΘΑΛΑΣΣΑ, 2.ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΥΔΡΟΦΟΡΟ ΣΥΣΤΗΜΑ, 3.ΖΩΝΗ ΓΛΥΚΟΥ ΝΕΡΟΥ, 4.ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΖΩΝΗ, 5.ΖΩΝΗ ΑΛΜΥΡΟΥ ΝΕΡΟΥ, 6.ΦΛΥΣΧΗΣ, 7.ΥΠΟΓΕΙΟ ΣΤΕΓΑΝΟ ΔΙΑΦΡΑΓΜΑ, 8.ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΠΗΓΗ, 9.ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΗΓΗ (ΚΑΜΠΟΛΗΣ 2007).	42
ΣΧΗΜΑ 3. 1 ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΣΤΗΛΗ (ΙΓΜΕ 2009).	69
ΣΧΗΜΑ 3. 2 ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΕΤΗΣΙΑΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΣΤΟ ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΟ ΣΤΑΘΜΟ ΛΑΥΡΙΟΥ (ΔΕΗ) ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 1970- 1978.	76
ΣΧΗΜΑ 3. 3 ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΕΤΗΣΙΑΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΣΤΟ ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΟ ΣΤΑΘΜΟ ΛΑΥΡΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 2009-2013...78	
ΣΧΗΜΑ 4. 1 ΤΡΙΓΩΝΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΑΤΑ RIPER ΓΙΑ ΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΝΕΡΑ ΤΟΥ ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ, 2015.	91
ΣΧΗΜΑ 4. 2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ SCHOELLER. ΚΑΡΣΤΙΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΣ. ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2015.	94
ΣΧΗΜΑ 4. 3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ SCHOELLER. ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΣ. ΜΑΙΟΣ 2015.	106
ΣΧΗΜΑ 4. 4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ LUDWIG-LANGELIER ΤΟΥ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ (ΜΑΙΟΣ 2015).	111
ΣΧΗΜΑ 4. 5 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ RIPER ΤΟΥ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ (ΜΑΙΟΣ 2015).	111
ΣΧΗΜΑ 4. 6 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ DUROV ΤΟΥ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ (ΜΑΙΟΣ 2015).	112
ΣΧΗΜΑ 4. 7 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΒΑΣΕΙ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΑΛΚΑΛΙΩΣΗΣ ΝΑ (ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ WILCOX) (ΒΟΥΔΟΥΡΗΣ 2009).	120
ΣΧΗΜΑ 4. 8 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ WILCOX. ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΣ. ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2015.	121
ΣΧΗΜΑ 5. 1 ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ “RAINOUT” ΒΑΣΙΣΜΕΝΟ ΣΤΟΥΣ HOEFS (2004) ΚΑΙ COPLEN ET AL. (2000) (ΜΑΤΙΑΤΟΣ 2010).	143
ΣΧΗΜΑ 5. 2 ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΙΣΟΤΟΠΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΤΩΝ ΠΑΓΚΟΣΜΙΩΝ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΩΝ (GWL) ΚΑΙ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΩΝ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ (ΑΝΤΩΝΕΛΛΟΥ 2007).	144
ΣΧΗΜΑ 5. 3 ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑΣ ΕΥΘΕΙΑΣ ΜΕΤΕΩΡΙΚΩΝ ΥΔΑΤΩΝ (GMWL) ΚΑΙ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΚΥΡΙΑΡΧΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΟ ΜΕΤΕΩΡΙΚΟ ΝΕΡΟ (ΑΝΤΩΝΕΛΛΟΥ 2007).	145
ΣΧΗΜΑ 5. 4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ $\Delta^{18}\text{O}$ ΠΡΟΣ ΔD ΑΠΟ ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΝΕΡΟΥ ΠΟΥ ΣΥΛΛΕΧΘΗΣΑΝ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΔΥΟ ΤΥΠΟΥΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ. ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΣ ΑΞΟΝΑΣ: ΔD ΚΑΘΕΤΟΣ ΑΞΟΝΑΣ: $\Delta^{18}\text{O}$, ΕΚΦΡΑΣΜΕΝΑ ΕΠΙ ΤΟΙ ΧΙΛΙΟΙΣ.	148

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΧΑΡΤΩΝ

ΧΑΡΤΗΣ 2. 1 ΧΑΡΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΖΩΝΗΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΛΑΥΡΙΟΥ.....	55
ΧΑΡΤΗΣ 2. 2 ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΛΑΥΡΙΟΥ.....	56
ΧΑΡΤΗΣ 2. 3 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΧΡΗΣΕΩΝ ΓΗΣ ΛΑΥΡΕΩΤΙΚΗΣ (ΕΘΝΙΚΗ ΥΠΟΔΟΜΗ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ, CORINE LAND COVER 2000).....	59
ΧΑΡΤΗΣ 3. 1 ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΛΑΥΡΕΩΤΙΚΗΣ (Α). ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΚΥΚΛΑΔΩΝ (Β) (BERGER 2013).....	67
ΧΑΡΤΗΣ 3. 2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΛΑΥΡΕΩΤΙΚΗΣ ΚΑΤΟΠΙΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ (Μ. ΠΕΡΔΙΚΑΚΗ) ΤΩΝ ΦΥΛΛΩΝ ΛΑΥΡΙΟΥ ΚΑΙ ΚΟΡΩΠΙ ΠΛΑΚΑ ΤΟΥ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥ ΧΑΡΤΗ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ 1:50.000 (ΙΓΜΕ, 1980, 2000).....	68
ΧΑΡΤΗΣ 3. 3 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΙΕΣΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ, ΠΕΡΙΟΔΟΥ ΜΑΪΟΥ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ (ΠΕΡΔΙΚΑΚΗ 2014).....	74
ΧΑΡΤΗΣ 3. 4 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΛΑΥΡΙΟΥ (WWW.ΜΕΤΕΟ.GR)	75
ΧΑΡΤΗΣ 4. 1 ΣΗΜΕΙΑ ΥΔΑΤΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ	85
ΧΑΡΤΗΣ 4. 2 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2015	92
ΧΑΡΤΗΣ 4. 3 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ, ΜΑΙΟΣ 2015.....	93
ΧΑΡΤΗΣ 4. 4 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2015.	95
ΧΑΡΤΗΣ 4. 5 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ, ΜΑΙΟΣ 2015	96
ΧΑΡΤΗΣ 4. 6 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΡΗ ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2015.	98
ΧΑΡΤΗΣ 4. 7 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΡΗ ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ, ΜΑΙΟΣ 2015.	99
ΧΑΡΤΗΣ 4. 8 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΡΗ ΣΤΟΝ ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ, ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015	100
ΧΑΡΤΗΣ 4. 9 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΡΗ ΣΤΟΝ ΚΑΡΣΤΙΚΟ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ, ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΜΑΪΟΥ 2015	101
ΧΑΡΤΗΣ 4. 10 ΙΣΟΚΑΤΑΝΟΜΗ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2015	104
ΧΑΡΤΗΣ 4. 11 ΙΣΟΚΑΤΑΝΟΜΗ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ, ΜΑΙΟΣ 2015	105
ΧΑΡΤΗΣ 4. 12 ΙΣΟΚΑΤΑΝΟΜΗ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ, ΠΕΡΙΟΔΟΥ ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ.....	107
ΧΑΡΤΗΣ 4. 13 ΙΣΟΚΑΤΑΝΟΜΗ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ, ΠΕΡΙΟΔΟΥ ΜΑΪΟΥ.	108
ΧΑΡΤΗΣ 4. 14 ΙΣΟΝΙΤΡΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ, ΠΕΡΙΟΔΟΥ ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015.....	115
ΧΑΡΤΗΣ 4. 15 ΙΣΟΝΙΤΡΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΠΕΡΙΟΔΟΥ ΜΑΪΟΥ.....	116
ΧΑΡΤΗΣ 4. 16 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΝΙΤΡΙΚΩΝ ΙΟΝΤΩΝ ΤΟΥ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΠΕΡΙΟΔΟΥ ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2015	117
ΧΑΡΤΗΣ 4. 17 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΝΙΤΡΙΚΩΝ ΙΟΝΤΩΝ ΤΟΥ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΠΕΡΙΟΔΟΥ ΜΑΪΟΥ 2015.	118

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΕΙΚΟΝΑ 3. 1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΔΟΜΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ. ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΕΠΑΦΗ (ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΕΠΩΘΗΣΗΣ) ΜΕΤΑΞΥ ΕΝΔΙΑΜΕΣΗΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΕΝΟΤΗΤΑΣ (ΥΠΕΡΚΕΙΜΕΝΟ) ΠΟΥ ΟΝΟΜΑΖΕΤΑΙ ΚΑΙ ΦΥΛΛΙΤΙΚΟ Η ΝΕΟΕΛΛΗΝΙΚΟ ΚΑΛΥΜΜΑ ΤΩΝ ΑΝΩΤΕΡΩΝ ΜΕΛΩΝ ΤΗΣ ΚΑΤΩΤΕΡΗΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΕΝΟΤΗΤΑΣ (ΥΠΟΚΕΙΜΕΝΟ).....	70
ΕΙΚΟΝΑ 3. 2 Η ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΤΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗΣ (DETACHMENT FAULT) ΣΤΗΝ ΠΛΑΚΑ. ΕΜΦΑΝΗ ΕΙΝΑΙ ΤΑ ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΙΚΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ (HANGING WALL), ΤΟ ΑΝΩΤΕΡΟ ΜΑΡΜΑΡΟ (FOOTWALL), ΚΑΘΩΣ ΚΑΙ Η ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΣΤΟΑ (ΠΗΛΙΧΟΣ, 2014).....	71

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ 2

ΣΧΗΜΑ 1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ DUROV. ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΣ. ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2015.	225
ΣΧΗΜΑ 2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ LUDWIG-LANGELIER. ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΣ. ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2015.	226
ΣΧΗΜΑ 3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ PIPER. ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΣ. ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2015.	227
ΣΧΗΜΑ 4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ SCHOELLER. ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΣ. ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2015.	228
ΣΧΗΜΑ 5 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ WILCOX. ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΣ. ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2015.	229
ΣΧΗΜΑ 6 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ DUROV. ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΣ. ΜΑΙΟΣ 2015.	230
ΣΧΗΜΑ 7 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ LUDWIG-LANGELIER. ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΣ. ΜΑΙΟΣ 2015.	231
ΣΧΗΜΑ 8 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ PIPER. ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΣ. ΜΑΙΟΣ 2015.	232
ΣΧΗΜΑ 9 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ SCHOELLER. ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΣ. ΜΑΙΟΣ 2015.	233
ΣΧΗΜΑ 10 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ WILCOX. ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΣ. ΜΑΙΟΣ 2015.	234
ΣΧΗΜΑ 11 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ DUROV. ΚΑΡΣΤΙΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΣ. ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2015.	235
ΣΧΗΜΑ 12 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ LUDWIG-LANGELIER. ΚΑΡΣΤΙΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΣ. ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2015.	236
ΣΧΗΜΑ 13 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ PIPER. ΚΑΡΣΤΙΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΣ. ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2015.	237
ΣΧΗΜΑ 14 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ SCHOELLER. ΚΑΡΣΤΙΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΣ. ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2015.	238
ΣΧΗΜΑ 15 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ WILCOX. ΚΑΡΣΤΙΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΣ. ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2015.	239
ΣΧΗΜΑ 16 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ DUROV. ΚΑΡΣΤΙΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΣ. ΜΑΙΟΣ 2015.	240
ΣΧΗΜΑ 17 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ LUDWIG-LANGELIER. ΚΑΡΣΤΙΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΣ. ΜΑΙΟΣ 2015.	241
ΣΧΗΜΑ 18 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ PIPER. ΚΑΡΣΤΙΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΣ. ΜΑΙΟΣ 2015.	242
ΣΧΗΜΑ 19 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ SCHOELLER. ΚΑΡΣΤΙΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΣ. ΜΑΙΟΣ 2015.	243
ΣΧΗΜΑ 20 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ WILCOX. ΚΑΡΣΤΙΚΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΣ. ΜΑΙΟΣ 2015.	244

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ 3

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΠΡΟΣΧΩΜΑΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2015.	247
ΠΙΝΑΚΑΣ 2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΠΡΟΣΧΩΜΑΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2015 (ΣΥΝΕΧΕΙΑ).	248
ΠΙΝΑΚΑΣ 3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΠΡΟΣΧΩΜΑΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ, ΜΑΙΟΣ 2015.	249
ΠΙΝΑΚΑΣ 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΠΡΟΣΧΩΜΑΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ, ΜΑΙΟΣ 2015 (ΣΥΝΕΧΕΙΑ)	250
ΠΙΝΑΚΑΣ 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2015.	251
ΠΙΝΑΚΑΣ 6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2015 (ΣΥΝΕΧΕΙΑ).	252
ΠΙΝΑΚΑΣ 7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ, ΜΑΙΟΣ 2015.	253
ΠΙΝΑΚΑΣ 8 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ, ΜΑΙΟΣ 2015 (ΣΥΝΕΧΕΙΑ).	254

Πρόλογος

Αντικείμενο της διατριβής είναι η μελέτη των υδροχημικών και ισοτοπικών χαρακτηριστικών των υπόγειων υδάτων της περιοχής του Θορικού και συγκεκριμένα των υδροφορέων (αλλουβιακού και καρστικού) που καλύπτουν τις υδατικές ανάγκες της. Η περιοχή έρευνας αντιμετωπίζει οξύ πρόβλημα ρύπανσης των υδροφόρων οριζόντων, αφενός λόγω της εκτεταμένης μεταλλευτικής και μεταλλουργικής δραστηριότητας των προγενέστερων ετών, αφετέρου λόγω του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης που λαμβάνει χώρα. Στην περιοχή μελέτης έχει διαπιστωθεί ποιοτική υποβάθμιση των υπογείων υδάτων λόγω μεταλλευτικών αποβλήτων και υφαλμύρωσης κατά κύριο λόγο και σε πολύ μικρότερο ποσοστό λόγω χρήσης λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων. Η εσφαλμένη εκμετάλλευση του υδατικού δυναμικού μέσω υπεραντλήσεων συμβάλλει αισθητά στην επιδείνωση του φαινομένου της ρύπανσης.

Εν ολίγοις, η προκείμενη περίπτωση, αποτελεί ένα παράδειγμα της ανθρώπινης επέμβασης στο φυσικό περιβάλλον, η οποία συνεπάγεται τη σταθερά εξελισσόμενη ποιοτική αλλοίωση και υποβάθμισή του. Ιδίως, καθώς πρόκειται για ένα παράκτιο οικοσύστημα, του οποίου η καταστροφή επέρχεται άμεσα από την ποιοτική υποβάθμιση των υδάτων των παράκτιων υδροφόρων οριζόντων.

Η γνωριμία μου με την περιοχή χρονολογείται την περίοδο 2014-15, στα πλαίσια της Διπλωματικής μου διατριβής, που εκπόνησα με τη μεταπτυχιακή φοιτητική ιδιότητα στο Διεπιστημονικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η διατριβή πραγματοποιήθηκε στον τομέα Υδρογεωλογίας του τμήματος Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών.

Στην ολοκλήρωση της ερευνητικής συνιστώσας της παρούσας διατριβής, αξιόλογη υπήρξε η συμβολή διαφόρων φορέων και προσώπων, τους οποίους αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω.

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον Ομότιμο Καθηγητή Υδρογεωλογίας του τομέα Γεωλογικών Επιστημών του Ε.Μ.Π. κ. Ιωάννη Κουμαντάκη, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο άτομό μου, με την ανάθεση του θέματος της διπλωματικής μου διατριβής, αλλά και για το αδιάκοπο ενδιαφέρον που επέδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου.

Θα πρέπει να ευχαριστήσω το λέκτορα κ. Ανδρέα Καλλιώρα και τη διδάκτορα Ελένη Βασιλείου για την επίβλεψη αυτής της εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον κ. Βασίλη Πρωτονοτάριο, ο οποίος διεξήγαγε τις υδροχημικές αναλύσεις στο περιβαλλοντικό εργαστήριο του Τεχνολογικού Πολιτιστικού Πάρκου Λαυρίου, και χάρη σε αυτόν κατέστη εφικτό να εξελιχθεί η πορεία της διπλωματικής μου διατριβής.

Στη συνέχεια ευχαριστώ θερμά τη μεταπτυχιακή φοιτήτρια Μάρθα Περδικάκη για την πολύτιμη βοήθειά της.

Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να ευχαριστήσω ανθρώπους, εκτός ακαδημαϊκής κοινότητας, οι οποίοι αποτέλεσαν σημείο αναφοράς για μένα, προσδίδοντάς μου την δέουσα υποστήριξη. Το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στους γονείς μου, την αδερφή μου και τη γιαγιά μου, των οποίων η πίστη στις δυνατότητές μου αποτέλεσε κινητήριο δύναμη για εμένα όσον αφορά στην υλοποίηση των στόχων μου και την πραγματοποίηση των ονείρων μου, σε όλους τους τομείς.

Περίληψη

Η Λαυρεωτική, ευρισκόμενη στη νοτιοανατολική πλευρά του νομού Αττικής, αποτελεί τμήμα της Αττικο-Κυκλαδικής ζώνης και ανήκει στην ενδιάμεση Μεταμορφική Ζώνη των Ελληνίδων. Η έντονη μεταλλουργική και μεταλλευτική δραστηριότητα του τελευταίου αιώνα ξεκίνησε ταυτόχρονα με τη γέννηση της βιομηχανίας στο Λαύριο και δημιούργησε τεράστιες ποσότητες μεταλλευτικών και μεταλλουργικών αποβλήτων, με αντίκτυπο την περιβαλλοντική υποβάθμιση της περιοχής. Ως εκ τούτου, το μεταλλευτικό δυναμικό της περιοχής έρευνας αποτέλεσε την αιτία για την ευρύτερη αλλοίωσή της.

Σκοπός της παρούσας διατριβής είναι η διερεύνηση των υδροχημικών παραμέτρων, καθώς και των ισοτοπικών χαρακτηριστικών των υπογείων νερών των υδροφόρων που αναπτύσσονται στην περιοχή έρευνας. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν υδροχημικές αναλύσεις κύριων στοιχείων και ιχνοστοιχείων. Επιπροσθέτως καταμετρήθηκαν οι λόγοι των σταθερών ισοτόπων (^{18}O , ^2H) προκειμένου να προσδιοριστεί το ισοτοπικό προφίλ των δειγμάτων νερού των υδροφόρων.

Γεωλογικά η περιοχή δομείται από δύο τεκτονικές ενότητες, την ανώτερη και την κατώτερη, ενώ χαρακτηριστικό είναι το ρήγμα επώθησης που τις ενώνει. Χαρακτηριστικοί γεωλογικοί σχηματισμοί της περιοχής είναι οι σχιστόλιθοι και τα μάρμαρα.

Στο υδατικό δυναμικό της περιοχής μελέτης ασκούνται έντονες περιβαλλοντικές πιέσεις. Παρατηρείται σημαντική ποιοτική υποβάθμιση των υπογείων νερών, λόγω του ιδιαίτερου γεωλογικού περιβάλλοντος (πλούσια μεταλλοφορία) της ευρύτερης περιοχής, της έλλειψης ορθολογικής διαχείρισης των υπόγειων υδροφόρων συστημάτων, αλλά και της εκτεταμένης μεταλλευτικής δραστηριότητας που λάμβανε χώρα από αρχαιότατους χρόνους. Η γεωγραφική θέση της περιοχής μελέτης, καθώς και το θερμό-μεσογειακό κλίμα, ευθύνονται για τον υψηλό ρυθμό εξάτμισης που παρατηρείται, στη λεκάνη του Θορικού, όπου δεν επιτρέπει την επαρκή τροφοδοσία των υπόγειων συστημάτων από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα. Επίσης, παρατηρούνται κατά θέσεις υψηλές συγκεντρώσεις χλωριόντων, λόγω θαλάσσιας διείσδυσης.

Τα υπόγεια νερά της περιοχής ομαδοποιούνται σε δύο βασικούς υδροχημικούς τύπους: Na-Cl-SO_4 και Na-Cl-HCO_3 . Τα όξινα ανθρακικά (HCO_3^-) είναι τα επικρατέστερα ανιόντα των υπογείων γλυκών νερών, ενώ τα νερά των παράκτιων υδροφορέων που δέχονται την επίδραση της θάλασσας, ανήκουν στον δεύτερο υδροχημικό τύπο. Ο παρατηρούμενος απεμπλουτισμός σε ιόντα Na υποδηλώνει την εξέλιξη διεργασιών ιοντοανταλλαγής. ενώ οι εντός λογικών πλαισίων τιμές των νιτρικών (NO_3), δείχνουν πως ο υδροφόρος δεν έχει υποστεί τις συνέπειες υπερεντατικής χρήσης αζωτούχων και νιτρικών λιπασμάτων. Εξαίρεση αποτελούν λίγα δείγματα του καρστικού υδροφορέα (δύο εκ των έξι δειγμάτων) που παρουσιάζουν αυξημένες – εκτός ορίων τιμές.

Η κατανομή του πιεζομετρικού φορτίου της περιοχής παρέχει πληροφορίες σχετικά με την κύρια διεύθυνση αποστράγγισης των υπόγειων νερών (ΒΔ-ΝΑ), ενώ σαφώς διαφαίνεται η πλευρική τροφοδοσία του αλλουβιακού υδροφόρου του Θορικού από τον καρστικό που τον περιβάλλει.

Abstract

The Lavrion area, located in the southeast of Attica, is a part of the Attic-Cycladic Belt in the Hellenides and is famous for ancient mining of argentiferous and iron ores. The intensive mining and metallurgical activities over the past 100 years for the production of lead and silver, have generated huge volumes of mining and metallurgical wastes which exhibit different chemical and mineralogical composition. These tailings act as pollution sources and contribute to the widespread soil and water pollution of the surrounding area.

In the frames of this study, the hydrochemical parameters of aquifers at Thorikos basin were investigated. Moreover, the isotopic characteristics of the groundwater were examined. Therefore, a series of water level measurements and a sampling campaign were carried out. The samples were analyzed for main and trace elements. Also, oxygen and hydrogen ratios (^{18}O , ^2H) were measured in order to express the isotopic signature of the aquifers water resources.

Regarding the area's geological setting, the Lavrion area predominantly consists of two stratigraphic units: the Basal Unit and the Blueschist Unit, which belongs to the Cycladic Blueschist Unit. The basement consists of schists and carbonate rocks.

The groundwater resources are relatively weak and there is significant quality degradation due to geological structure of the greater area, as well as the bad management of the aquifer and anthropogenic activities. Owing to its geographical position and the dominant dry-thermal climate, the evaporation rate is relatively high. Also, the groundwater deposits are characterized by high salt concentrations, due to sea intrusion, whereas they are attributed to the dissolution of minerals of the geological environment of the inland area.

According to their hydrochemical characteristics, groundwater can be divided into these two main types: Na-Cl-SO₄ and Na-Cl-HCO₃. The presence of HCO₃ is typical of the region's freshwater, while the waters of the coastal aquifers belong to the second type, due to the intrusion of seawater. There was also a depletion of certain samples in Na⁺, which was attributed to ion exchange processes. High concentrations in Fe and Mn originate from the carbonate dissolution, while normal NO₃⁻ concentrations are related the normal use of fertilizers, respectively. According to the region's piezometric map, the main water flow direction is NW-SE. Moreover it points out that the carbonate formations recharge the porous aquifer, at the eastern part of the region.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΥΠΟΓΕΙΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ | ΚΑΡΣΤ | ΙΣΟΤΟΠΙΚΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. ΓΕΝΙΚΑ

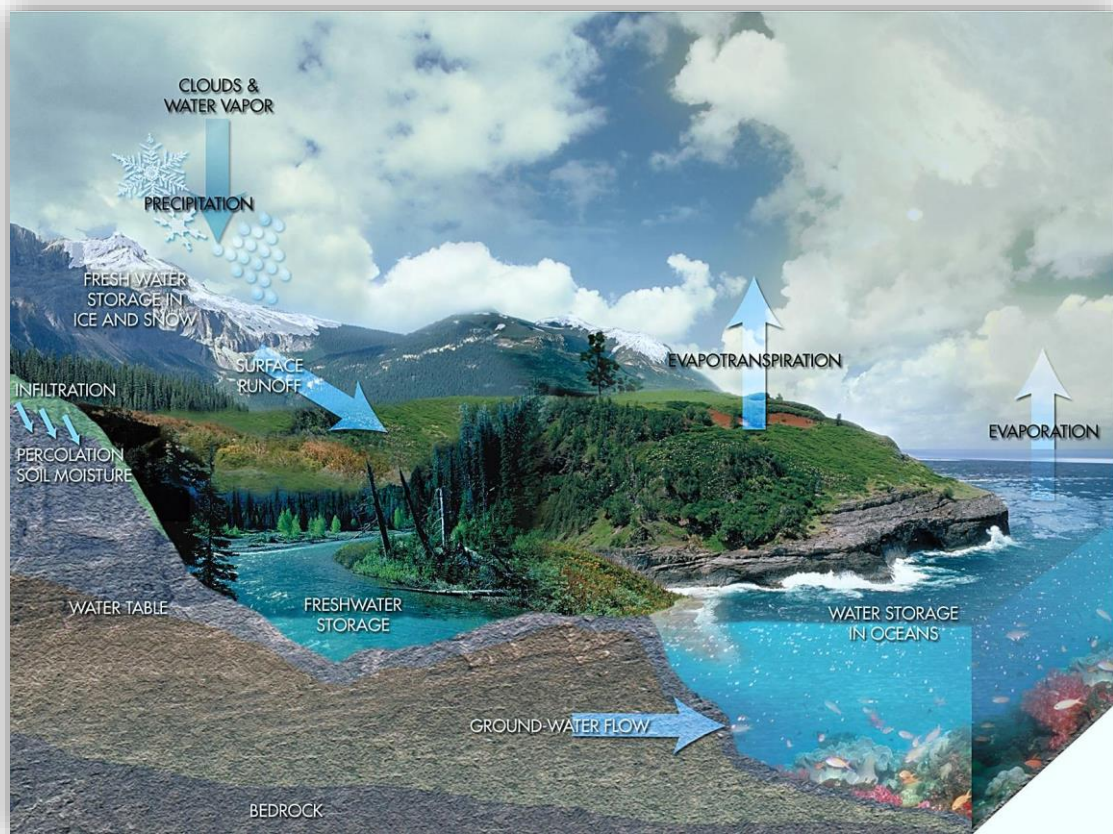
Το νερό, το ύδωρ, καταλαμβάνει σημαντικό τμήμα της επιφάνειας του πλανήτη. Η γενική υπόσταση, η ποιότητα και η διαθεσιμότητά του επηρεάζουν σημαντικά την υγεία του ανθρώπου και το περιβάλλον που γενικότερα. Η υδρόσφαιρα, το σύνολο δηλαδή του χώρου που καλύπτεται με νερό, αποτελεί σε σχέση με τις γήινες διαστάσεις, ένα πολύ λεπτό στρώμα νερού πάνω στην επιφάνεια της γης. Περισσότερο από το 97% του συνολικά υφιστάμενου στη γη ($1360 \times 10^6 \text{ m}^3$) νερού αντιστοιχεί στις ωκεάνιες λεκάνες. Οι ωκεανοί συνιστούν τον κυριότερο υδάτινο ταμειυτήρα του γήινου συστήματος.

Ως συστατικό διαθέτει κάποια χαρακτηριστικά μοναδικά και σημαντικά για όλες τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο υδάτινο οικοσύστημα, βιολογικές, γεωλογικές, χημικές και φυσικές. Σύμφωνα με τη διάταξη του μορίου του ύδατος, το οξυγόνο εμφανίζεται ελαφρά αρνητικά φορτισμένο, ενώ τα υδρογόνα ελαφρά θετικά φορτισμένα. Συνεπώς το μόριο του νερού παρουσιάζει μια πολικότητα, η οποία ερμηνεύει πολλές από τις χαρακτηριστικές ιδιότητές του.

Η διττή υπόσταση του νερού έγκειται στο γεγονός ότι αφενός, ως στοιχείο περιβάλλοντος, επηρεάζει, μέσω των μεταβολών της ποιοτικής και ποσοτικής σύστασής του, το περιβάλλον σε τοπικό αλλά και ευρύτερο επίπεδο και αφετέρου ως φυσικός πόρος, χαρακτηρίζεται ανανεώσιμος ή μη, αναλόγως τη χωροχρονική κλίμακα. Δεδομένου ότι ο πλανήτης γη είναι ένα κλειστό σύστημα, δεχόμενο μόνο την ηλιακή ενέργεια, το νερό καθίσταται πεπερασμένος φυσικός πόρος. Στην τοπική όμως κλίμακα μιας περιοχής που διανύει υγρή και ξηρή περίοδο, το νερό αποτελεί ένα φυσικό πόρο ανανεώσιμο (Αναγνώστου 2000).

Ένα μικρό ποσοστό του συνολικού όγκου του ύδατος είναι γλυκό νερό. Το 30% αυτού, υπό την επίδραση της βαρύτητας, διαπερνά το πορώδες τμήμα του ανώτερου φλοιού της γης, διηθείται και κατεισδύει αργά διασχίζοντας το υδροφόρο δίκτυο, διαπερνά τα πετρώματα του γεωλογικού υποβάθρου και τα μεταξύ των κόκκων διάκενα των προσχωσιγενών αποθέσεων, συντελώντας έτσι στην υπόγεια κυκλοφορία, ενώ καταλήγει σε έναν υπόγειο ταμειυτήρα γλυκού νερού. Η στάθμη του υπογείου νερού είναι ουσιαστικά η διεπιφάνεια μεταξύ ταμειυτήρα και υπερκείμενης ζώνης κατείσδυσης. Τελικός αποδέκτης του υπογείου νερού, μέσω πολλών διόδων, είναι η θάλασσα. Πρόκειται για ένα μέρος του ευρύτερου υδρολογικού κύκλου.

Ο υδρολογικός κύκλος (**Σχήμα 1.1**) περιγράφει την αέναη κίνηση του νερού ανάμεσα στους ωκεανούς, την ατμόσφαιρα και την ξηρά, την οποία διέπουν μεταβάσεις ανάμεσα στην υγρή, την αέρια και τη στερεή φάση του νερού. Μέσω της εξάτμισης, το νερό ανεβαίνει κατακόρυφα από τη θάλασσα στην ατμόσφαιρα, υπό μορφή υδρατμών, αλλά και οριζόντια υπό την αιολική επίδραση. Σημαντική είναι η διαπνοή του νερού από τα δέντρα και η κατ' επέκταση εισαγωγή στην ατμόσφαιρα, υπό τη μορφή υδρατμών. Εκεί, οι υδρατμοί συμπυκνώνονται σχηματίζοντας νέφη και εν συνεχεία, υπό μορφή κατακρημνισμάτων, επανεισάγεται στη



Σχήμα 1. 1 Υπόγειο νερό & Υδρολογικός κύκλος (NASA Goddard Space Flight Center)

θάλασσα και την ξηρά. Τα δέντρα, η βλάστηση και το έδαφος κατακρατούν το κατακρημνιζόμενο νερό (Μαμάσης 2009). Κάποιο ποσοστό του νερού απορρέει επιφανειακά σχηματίζοντας ποτάμια ή ρέματα, των οποίων η εκφόρτιση γίνεται στη θάλασσα, ενώ το εναπομείναν ποσοστό κατεισδύει στο υπέδαφος μέσω πολύπλοκων γεωλογικών σχηματισμών, δημιουργώντας υπόγειους σχηματισμούς διαπερατών πετρωμάτων, τους γνωστούς υδροφόρους ορίζοντες. Χάρη σε αυτούς αποθηκεύεται και διαφυλάσσεται το υδατικό απόθεμα, ενώ δημιουργούνται οι κατάλληλες προϋποθέσεις για τη διακίνησή του (Βουδούρης 2006).

Υπόγειο νερό καλείται αυτό το οποίο βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, ανεξαρτήτως σύστασης, βάθους και προέλευσης. Τα υπόγεια νερά αποτελούν το σύνολο, σχεδόν, των αποθεμάτων γλυκού νερού της Γης, εκτιμώμενα στην τάξη μεγέθους των δέκα εκατομμυρίων δισεκατομμυρίων. Συνδέονται με τα επιφανειακά, από τα οποία, άλλωστε, προέρχονται. Η σύνδεση αυτή είναι αμφίδρομη και ποικιλόμορφη.

1.2. ΥΠΟΓΕΙΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ

Ο γεωλογικός σχηματισμός που μπορεί να προσφέρει σημαντικές ποσότητες νερού, αποτελεί έναν υδροφόρο. Βασικές προϋποθέσεις που πρέπει να πληρεί ένας σχηματισμός για να θεωρείται υδροφόρος είναι η ικανότητα αποθήκευσης του νερού στα πρωτογενή ή δευτερογενή διάκενά του και η δυνατότητα μεταβίβασης του νερού προς τα υδρομαστευτικά έργα. Η πρώτη λειτουργία επιτελείται στο πρωτογενές πορώδες (χαλαροί σχηματισμοί), ενώ μόνο το αποθηκευμένο στο δευτερογενές ή ενεργό πορώδες (βαρυντικό νερό) καθίσταται ικανό να μεταβιβαστεί. Στην περίπτωση που δεν πληρούνται αυτές οι προϋποθέσεις, τα στρώματα καλούνται στεγανά (aquifuge), ενώ ημιπερατά (aquitard) λέγονται τα στρώματα που χαρακτηρίζονται από χαμηλή περατότητα και δυνατότητα αποθήκευσης και μεταφοράς νερού με σχετικά μικρό ρυθμό (Βουδούρης 2009).

1.2.1. Κύρια κατάταξη υπογείων υδροφορέων

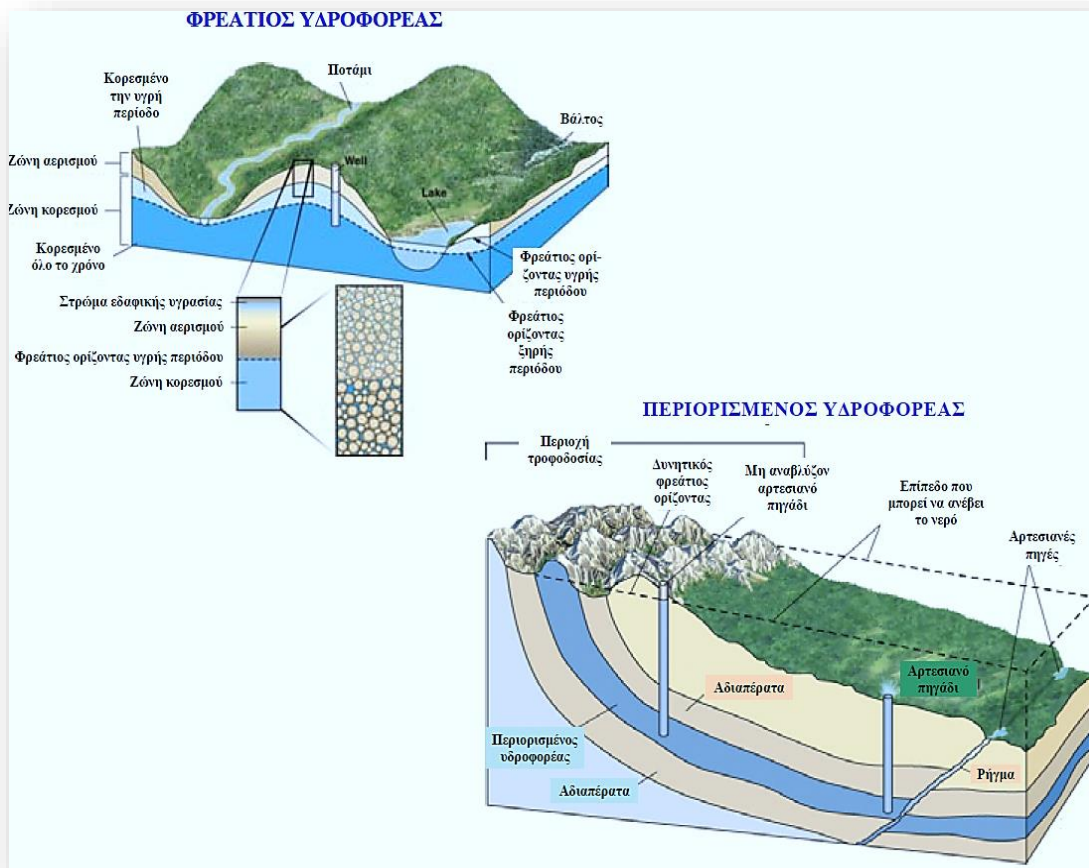
Με κριτήριο το είδος του άνω ορίου τους, οι υπόγειοι υδροφόροι διακρίνονται σε φρεάτιους, περιορισμένους, ημιεγκλωβισμένους και ημιελεύθερους (Βουδούρης 2006) (Σχήμα 1.2).

1.2.1.1. Υπό πίεση υδροφορείς

Οι υδροφορείς αυτοί πλαισιώνονται από πρακτικά αδιαπέρατους σχηματισμούς, μεταξύ των οποίων εγκλωβίζουν το νερό, ενώ η πίεση εκεί είναι μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής. Η πιεζομετρική επιφάνεια βρίσκεται σε υψηλότερο επίπεδο από τη βάση της αδιαπέρατης οροφής (Καλλέργης 2001).



Σχήμα 1.2 Φρεάτιος και Περιορισμένος υδροφορέας (Μιμίκου 2012)



Σχήμα 1.3 Φρεάτιος και περιορισμένος υδροφορέας (Μιμίκου 2012)

1.2.1.2. Φρεάτιοι υδροφορείς

Οι φρεάτιοι ή ελεύθεροι υδροφόροι είναι εκείνοι των οποίων το άνω όριο ταυτίζεται με τον φρεάτιο ορίζοντα και τροφοδοτούνται από το άμεσα εισερχόμενο, μέσω διήθησης, νερό ή από γειτονικά προερχόμενα ύδατα, μέσω βαρυτικά προκαλούμενης κατακόρυφης κίνησης. Η πίεση σε αυτούς είναι μικρότερη της ατμοσφαιρικής, ενώ η υδροστατική πίεση στην ελεύθερη επιφάνεια του υπόγειου νερού, που συμπίπτει με την επάνω επιφάνεια της ζώνης κορεσμού, είναι ίση με την ατμοσφαιρική. Στην περίπτωση των περιορισμένων υδροφόρων, τα όρια είναι σταθερά στο χρόνο, κάτι το οποίο δε συμβαίνει στους ελεύθερους υδροφόρους (Καλλέργης 2001).

1.2.1.3. Ημιεγκλωβισμένοι υδροφορείς

Παρεμφερείς με τους περιορισμένους υδροφορείς, διαφέρουν όμως στο ότι το υπερκείμενο στρώμα χαρακτηρίζεται από μικρή υδροπερατότητα (ημιπερατό) σχετικά με την υδροπερατότητα του υδροφορέα.

1.2.1.4. Ημιελεύθεροι υδροφορείς

Η υδροπερατότητα του υπερκείμενου στρώματος των υδροφόρων αυτών είναι μεγαλύτερη από εκείνη της προηγούμενης περίπτωσης, εξακολουθεί όμως να είναι μικρότερη της υδροπερατότητας του υδροφορέα.

1.2.2. Υδροφόρες ζώνες

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που χαρακτηρίζονται από υψηλή διαπερατότητα, πληρούν τις κατάλληλες προϋποθέσεις για τη ανάπτυξη ζωνών υδροφορίας. Στα πυριγενή και τα μεταμορφωμένα πετρώματα σχηματίζονται φτωχές υδροφόρες ζώνες, ενώ ιζηματογενή πετρώματα, όπως οι ψαμμίτες και οι ασβεστόλιθοι, συμβάλλουν στη δημιουργία τέτοιων ζωνών. Συγκεκριμένα, ο ασβεστόλιθος χαρακτηρίζεται υψηλή διαπερατότητα, οφειλόμενη σε ρωγματώσεις και διάκενα που δημιουργούνται εξαιτίας της διάβρωσης που υφίσταται από τη διέλευση του νερού.

1.2.3. Λιθολογική κατάταξη υπόγειων υδροφόρων

Με κριτήριο τη δομή των πετρωμάτων, οι υδροφόροι διακρίνονται σε πορώδεις, καρστικούς και υδροφόρους των ρωγμωδών πετρωμάτων και διαφέρουν ως προς τον τρόπο αποθήκευσης του νερού. Στην περίπτωση των πορώδων υδροφορέων, το νερό αποθηκεύεται στους πόρους του εδάφους και κυκλοφορεί σε όλη τη μάζα τους και αποτελεί το συνεχές μέσο. Οι καρστικοί υδροφορείς αναπτύσσονται σε ανθρακικά καρστικοποιημένα πετρώματα (ασβεστόλιθοι και μάρμαρα), στο δευτερογενές πορώδες που σχηματίζεται λόγω καρστικής διάλυσης. Τέλος, στους υδροφορείς των ρωγμωδών πετρωμάτων το νερό αποθηκεύεται σε ζώνες ασυνέχειας και αποσάθρωσης αλλά και στο διπλό πορώδες, συντελώντας το ασυνεχές μέσο (Βουδούρης 2015).

1.2.3.1. Υδροφορείς σε πορώδη μέσα

Οι πορώδεις υδροφόροι αναπτύσσονται σε αδρομερείς φάσεις των τεταρτογενών και νεογενών ιζημάτων. Η Ελλάδα είναι μια χώρα, της οποίας η έκταση καλύπτεται κατά ένα μεγάλο ποσοστό από τέτοιου είδους κοκκώδη ιζήματα. Οι συγκεκριμένοι υδροφόροι συγκεντρώνουν ένα σύνολο πλεονεκτημάτων, τα οποία και τους καθιστούν εκμεταλλεύσιμους κατά το μεγαλύτερο ποσοστό. Κάποια από αυτά είναι η εύκολη πρόσβαση σε αυτούς διότι αναπτύσσονται σε πεδινά τμήματα, συνήθως αστικοποιημένα και η στάθμη του υπογείου νερού βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, διευκολύνοντας την άντλησή του (μικρό βάθος και με μικρό κόστος) καθώς και την ανόρυξη γεωτρήσεων σε αυτούς. Τέλος, ο εμπλουτισμός τους με βρόχινο νερό είναι σχετικά εύκολος.

Αλλουβιακές αποθέσεις καλούνται εκείνες που αποτελούνται από χερσαία ιζήματα πρόσφατης ηλικίας και προϊόντα απόθεσης ποταμοχειμάρρων. Συνίστανται από κλαστικά υλικά, ενώ διάφοροι τύποι τέτοιων αποθέσεων είναι τα αλλουβιακά ριπίδια (κώννοι), τα πλευρικά κορήματα και οι αλλουβιακές πεδιάδες. Περίπου 15% της επιφάνειας της χώρας μας καλύπτεται από αλλουβιακές αποθέσεις (Βουδούρης 2015).

Σε γενικές γραμμές, τα χαρακτηριστικά των αλλουβιακών αποθέσεων είναι η ανισοτροπία και η ετερογένεια, για αυτό και στις κοίτες των ποταμοχειμάρρων επικρατούν τα αδρόκοκκα υλικά, ενώ λεπτόκοκκα απαντώνται στα κατάντη των ιζηματογενών λεκανών. Το φαινόμενο της υπαλμύρωσης είναι σύνηθες στους παράκτιους προσχωματικούς υδροφόρους. Ωστόσο, εξίσου σημαντική απειλή δέχονται από τη χρήση λιπασμάτων (νιτρορύπανση).

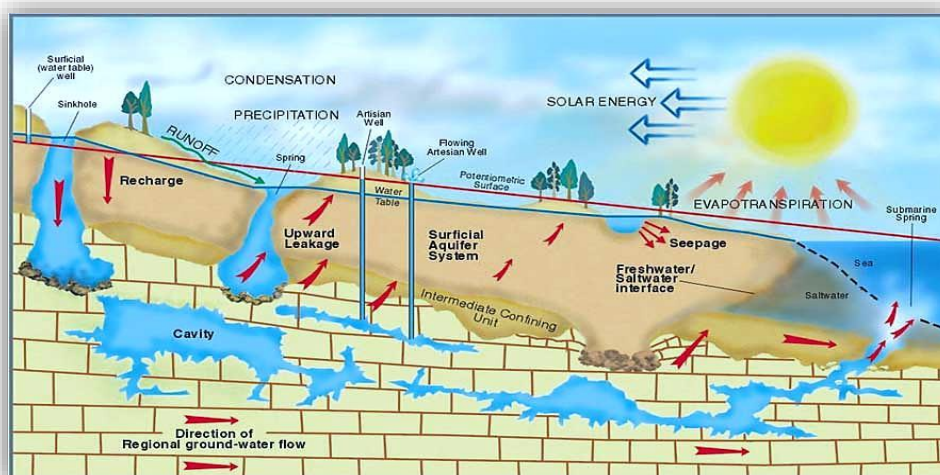
Οι αλλουβιακές αποθέσεις φιλοξενούν συνήθως υδροφόρους ελεύθερους στο ανάντη και περιορισμένους στο κατάντη τμήμα της λεκάνης, όπου σχηματίζονται υδατοστεγανοί αργιλικό σχηματισμοί οι οποίοι πλαισιώνουν επάλληλα στρώματα υδροφορίας. Το κατεισδύον νερό της βροχής και το διηθούμενο νερό των ποταμών και των χειμάρρων αποτελούν τις πηγές τροφοδοσίας των υδροφόρων αυτών. Το ενεργό πορώδες τους (10-25%) μειώνεται με το βάθος, ενώ η υδραυλική αγωγιμότητά τους κυμαίνεται μεταξύ 10^{-4} - 10^{-3} m/s.

1.2.3.2. Καρστικοί υδροφορείς

Οι καρστικοί υδροφορείς αναπτύσσονται σε ανθρακικά πετρώματα, τα οποία είναι ιζηματογενή (ασβεστόλιθοι, δολομίτες) και μεταμορφωμένα πετρώματα (μάρμαρα). Δεδομένου ότι η Ελλάδα καλύπτεται σε ποσοστό 35% από ανθρακικά πετρώματα (Σχήμα 1.5), το νερό που κυκλοφορεί στους αντίστοιχους υδροφορείς, αποτελεί βασική συνιστώσα του υδατικού δυναμικού της χώρας (Βουδούρης 2015).

Οι καρστικοί υδροφορείς εμπλουτίζονται με νερό φυσικά, μέσω άμεσης κατεισδυσσης του νερού της βροχής ή μέσω δολινών αλλά και μέσω ρωγμών και διακλάσεων (θραύση του επικάρστ) (Σχήμα 1.4). Η ανισοτροπία και η ανομοιογένεια αποτελούν χαρακτηριστικά και των καρστικών υδροφόρων, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη των κύριων αγωγών κατά μήκος των ρηγμάτων και των διαρρήξεων, ενώ οι δευτερεύοντες αγωγοί κατά μήκος των ρωγμών (Fiorillo et al. 2015).

Ο υδροχημικός τύπος των υδάτων ενός καρστικού υδροφόρου είναι $\text{Ca}(\text{Mg})\text{-HCO}_3$, και αυτό λόγω της διάλυσης των ανθρακικών πετρωμάτων.



Σχήμα 1.4 Σχηματισμός καρστικού δικτύου (USGS - The Water Cycle - USGS Water Science School)

1.2.3.3. Υδροφορείς διαρρηγμένων πετρωμάτων

Η επίδραση του τεκτονισμού και της αποσάθρωσης στα διαρρηγμένα πετρώματα αποτελούν την αιτία απουσίας πρωτογενούς και μέρους δευτερογενούς πορώδους. Στην κατηγορία των διαρρηγμένων πετρωμάτων υπάγονται τα μεταμορφωμένα (σχιστόλιθοι, γνεύσιοι, φυλίττες και χαλαζίτες) και τα μαγματικά πετρώματα (γρανίτες, διορίτες, γάββροι και περιδοίτες). Συμπεριλαμβάνονται τα κρυσταλλικά (γρανίτες, γνεύσιοι) και τα ηφαιστειακά πετρώματα (βασάλτες, ανδεσίτες). Τα διαρρηγμένα πετρώματα χαρακτηρίζονται από χαμηλή υδροπερατότητα, ωστόσο αποτελούν λύσεις περιστασιακής αποθήκευσης νερού.

1.3. ΚΑΡΣΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

1.3.1. Γενικά

Ο συνδυασμός διαφόρων ενδογενών και εξωγενών διεργασιών έχει ως αποτέλεσμα τη διαμόρφωση του γήινου αναγλύφου που μας περιβάλλει. Ενδογενείς διεργασίες είναι τα τεκτονικά, σεισμικά και τα ηφαιστειακά φαινόμενα, ενώ φαινόμενα βιολογικά, φυσικά και χημικά τα οποία συσχετίζονται με την ατμόσφαιρα, την υδρόσφαιρα και τη βιόσφαιρα, ανήκουν στις εξωγενείς διεργασίες. Αποτέλεσμα των διεργασιών αυτών είναι ο σχηματισμός γεωμορφών, των οποίων τα χαρακτηριστικά συνάδουν με τις φυσικοχημικές ιδιότητες των πετρωμάτων από τα οποία απαρτίζονται, την ένταση και τη χρονική κλίμακα εξέλιξης των διεργασιών (Bartholome et al. 2010).

Ένα καρστικό φαινόμενο είναι πάντα άμεσα συνδεδεμένο με την ύπαρξη ευδιάλυτων πετρωμάτων, τα οποία αφήνοντας το κατάλληλο υπόλειμμα, επιτρέπουν τη διεύρυνση διάκενων, μέσω διάλυσης, και τα διατηρούν ανοικτά έτσι ώστε να είναι εφικτή η διακίνηση του νερού στο υπέδαφος. Τα πετρώματα αυτά είναι γνωστά ως καρστικά πετρώματα (Καλλέργης 2001).

Οι γεωμορφές που σχηματίζονται είναι διαλυσιγενείς, απαντώνται κυρίως στους ανθρακικούς σχηματισμούς και περιγράφονται με τον όρο «καρστ». Ο όρος καρστ προέρχεται από την ομώνυμη περιοχή των Δαλματικών Άλπεων στην Κροατία και Σλοβενία (Πηλιχός 2014). Χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά στην απόπειρα μελέτης της συγκεκριμένης περιοχής από τον Cvijic και άλλους αυστριακούς γεωλόγους, το 1893. Η λέξη καρστ είναι ενδεικτική της διάλυσης πετρωμάτων, ωστόσο τυπικά, Καρστ σχηματίζεται σε περιοχές όπου κυριαρχούν τα ανθρακικά πετρώματα όπως ασβεστόλιθοι, δολομίτες, μάρμαρα και δολομιτικοί ασβεστόλιθοι. Με τον όρο αυτό, χαρακτηρίζονται οι δομές ευδιάλυτων πετρωμάτων, λόγω χημικής είτε φυσικής αποσάθρωσης. Τα δύο είδη αποσάθρωσης συνυπάρχουν, με προγενέστερη τη μηχανική αποσάθρωση, οφειλόμενη σε τεκτονικά αίτια, μεταβολή θερμοκρασίας και κρυσταλλοποίηση. Η χημική αποσάθρωση οφείλεται κατά κύριο λόγο στο νερό (Βουβαλίδης 2011).

1.3.2. Καρστικά πετρώματα

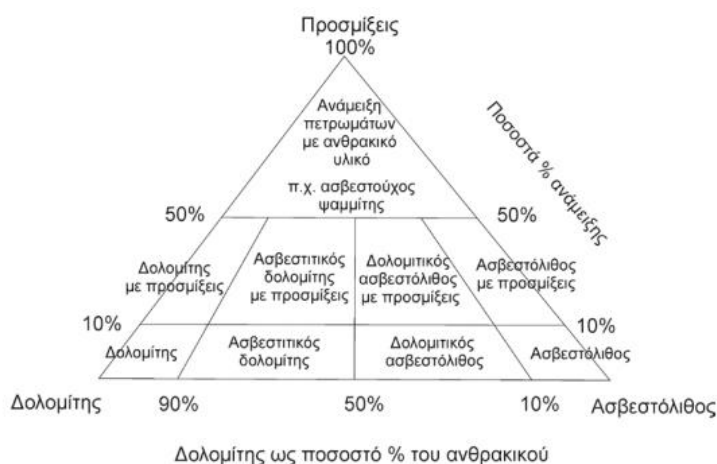
Τα καρστικά πετρώματα είναι (Καλλέργης 2001):

- Οι εβαπορίτες: γύψος, ανυδρίτης, ορυκτό αλάτι
- Τα ανθρακικά: ασβεστόλιθοι, δολομίτες
- Οι ηφαιστίτες (ηφαιστειακό καρστ)
- Οι χαλαζίτες
- Οι υπερβασίτες



Σχήμα 1.5 Εξάπλωση ανθρακικών πετρωμάτων στην Ελλάδα (Βουδούρης 2009).

Τα ανθρακικά πετρώματα καθίστανται ιδιαίτερα υδατοπερατά, κάτι το οποίο συνεπάγεται ότι η διεργασία της κατείσδυσης επικρατεί της επιφανειακής απορροής του μετεωρικού νερού. Επομένως, η ύπαρξη των καρστικών γεωμορφών σε μια περιοχή είναι ενδεικτική του βαθμού διάλυσης των ανθρακικών πετρωμάτων και κατ' επέκταση της ανάπτυξης των υπόγειων υδροφοριών (Φιλιππίδης και Μέλφος 2012).



Σχήμα 1.6 Ταξινόμηση ασβεστολιθικών - δολομιτικών πετρωμάτων (Γκολούμποβιτς 2011)

Οι ασβεστόλιθοι και οι δολομίτες είναι τα σημαντικότερα καρστικά πετρώματα από υδρογεωλογικής άποψης, για τον Μεσογειακό και ειδικότερα τον Ελλαδικό χώρο, συνεπώς, επικρατούν στο μηχανισμό της καρστικής διεργασίας (Καλλέργης 2001).

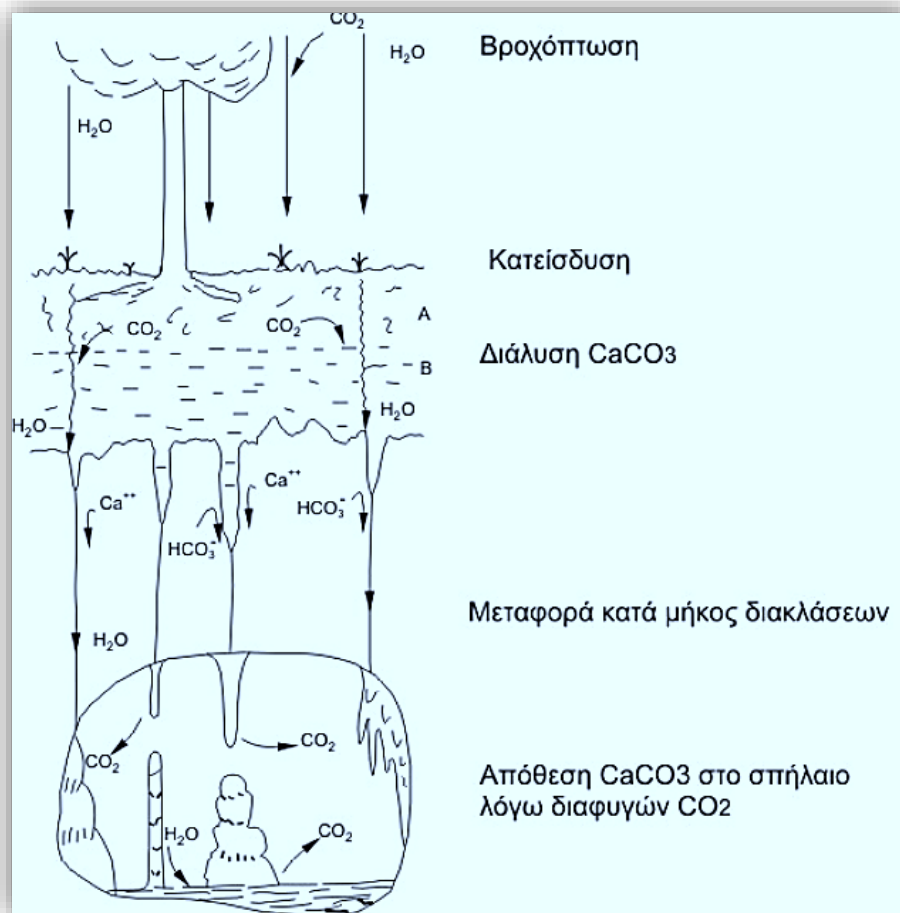
Στο θαλάσσιο περιβάλλον, σε πρώτη φάση αποτίθεται ο ασβεστόλιθος, ενώ ο δολομίτης σχηματίζεται σε μετέπειτα στάδιο, όταν τα ιόντα Mg αντικαταστήσουν τα ιόντα Ca στον κρύσταλλο του ασβεστίτη, έως ότου ο λόγος Ca/Mg γίνει 1:1. Τα πετρώματα που υφίστανται στη φύση, δεν συνίστανται αποκλειστικά από ασβεστόλιθο ή δολομίτη. Αποτελούν συνδυασμούς προσμίξεων σε ποικίλες αναλογίες και η επικρατούσα κατηγοριοποίηση έχει ως εξής (Σχήμα 1.6):

- Ασβεστόλιθος: περισσότερο από 90% CaCO_3
- Δολομιτικός ασβεστόλιθος: 50-90% CaCO_3
- Ασβεστολιθικός δολομίτης: 10-50% CaCO_3
- Δολομίτης: λιγότερο από 10% CaCO_3

Οι προαναφερθείσες προσμίξεις μειώνουν την επιδεκτικότητα των ασβεστολιθων στην καρστοποίηση. Η υδροπερατότητα των ασβεστολιθων καθορίζεται από το πρωτογενές πορώδες, τις κατατμήσεις – διαρρήξεις και τη στρώση.

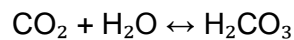
1.3.3. Καρστική διεργασία

Το νερό χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα ισχυρή διαλυτική ικανότητα. Εμπλουτίζεται κυρίως με διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα και το έδαφος και προκαλεί χημική αποσάθρωση – διάλυση σε πετρώματα επιρρεπή σε αυτή τη διεργασία. Πρόκειται για τα ανθρακικά πετρώματα τα οποία συνίστανται από άλατα ασβεστίου και μαγνησίου και μέσω της χημικής αποσάθρωσης – διάλυσης που υφίστανται, μετατρέπονται σε όξινα ανθρακικά άλατα, ιδιαίτερα διαλυτά. Η διεργασία αυτή ορίζεται ως καρστική διάβρωση ή καρστικοποίηση (Πηλιχός 2014) (Σχήμα 1.7)

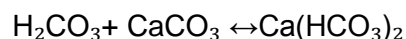


Σχήμα 1. 7 Καρστική διεργασία

Η ατμόσφαιρα και το νερό αποτελούν τις κύριες πηγές εμπλουτισμού του νερού με CO₂ μέσω της αντίδρασης διάλυσης:

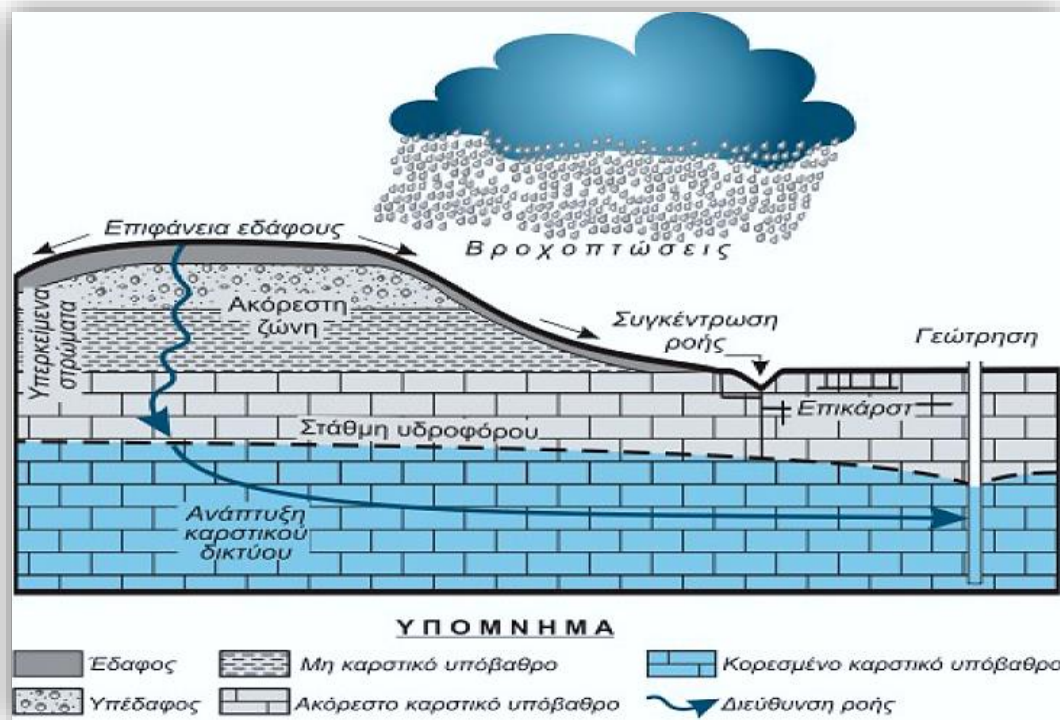


Το νερό μετατρέπεται σε ακόμα πιο ισχυρό διαλυτικό μέσο μέσω της αύξησης συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα σε αυτό. Αυτό συμβαίνει έως το σημείο κορεσμού του νερού σε CO₂. Τυπικές τιμές διαλυτικής ικανότητας του νερού είναι μεταξύ 100-200 mg/l. Ακολουθεί η αντίδραση σύμφωνα με την οποία το όξινο ανθρακικό διάλυμα μετατρέπει το ανθρακικό ασβέστιο σε διττανθρακικό ασβέστιο το οποίο είναι διαλυτό στο νερό και εξαιρετικά ασταθές.



Επί της συγκεκριμένης αντίδρασης, η μετατόπιση της ισορροπίας προς τα δεξιά σηματοδοτεί περίσσεια CO₂ στο νερό με συνεπαγόμενη αύξηση της διαλυμένης ποσότητας Ca(HCO₃)₂, ενώ η απώλεια CO₂ οδηγεί σε μετατροπή του Ca(HCO₃)₂ σε αδιάλυτο CaCO₃ (Βουδούρης 2015). Η χρονική κλίμακα στην οποία πραγματοποιείται κορεσμός των υδάτων

σε CaCO_3 είναι πολύ μικρή, ενώ απαιτείται το νερό στο οποίο θα συμβεί αυτό να κυκλοφορεί σε μικρορωγμές και πόρους. Η χωρική κλίμακα στην οποία συμβαίνει αυτό είναι εξίσου περιορισμένη, συνεπώς δεν καθίσταται δυνατή η περαιτέρω διάλυση CaCO_3 , εκτός και αν διαφοροποιηθούν κάποιοι παράγοντες.



Σχήμα 1.8 Ανάπτυξη καρστικού δικτύου (Βουδούρης 2006)

Η δημιουργία σπηλαίων και υπόγειων εγκοίλων επιτυγχάνεται μόνο αν πραγματοποιηθεί διάλυση στο εσωτερικό του ανθρακικού πετρώματος, κάτι το οποίο προϋποθέτει την ύπαρξη υδάτων ακόρεστων σε CaCO_3 . Ο τρόπος δημιουργίας των υδάτων αυτών είναι η ανάμιξη δύο κορεσμένων υδάτινων μαζών και η δημιουργία μιας, ακόρεστης προσωρινά, τρίτης υδάτινης μάζας. Καθώς λοιπόν διαλύεται το CaCO_3 μέχρι τον κορεσμό, αφαιρείται όγκος ανθρακικού πετρώματος. Σε επόμενη φάση, τα έγκοιλα που σχηματίζονται στο εσωτερικό των ανθρακικών πετρωμάτων, διευρύνονται μεν, σε μια ζώνη ανάμιξης κορεσμένων υδάτων σε CaCO_3 δε, η οποία προσεγγίζει, ίσως και ταυτίζεται δε με την επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα (Σχήμα 1.8). Ζώνες υπόγειων εγκοίλων στο ασβεστολιθικό πέτρωμα σχηματίζονται λόγω μιας ενδεχόμενης πτώσης του υδροφόρου ορίζοντα (Καλλέργης 2001).

Η θερμοκρασία και η πίεση αποτελούν μία άλλη σημαντική παράμετρο όσον αφορά στη διάλυση των ασβεστόλιθων. Η αύξηση θερμοκρασίας συνεπάγεται μείωση της διαλυτικής ικανότητας του νερού, καθώς αποτίθεται ανθρακικό ασβέστιο, ενώ η μείωση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση της διαλυτικής ικανότητας του ασβεστόλιθου. Σχετικά με τη μερική πίεση του διοξειδίου του άνθρακα, επικρατεί αναλογία με τη διαλυτική ικανότητα

του νερού και για αυτόν το λόγο η διάλυση των ασβεστόλιθων στις ψυχρές περιοχές χαρακτηρίζεται πιο έντονη από ότι στις θερμές περιοχές, λόγω του ότι τα χειμερινά κατακρημνίσματα είναι περισσότερο εμπλουτισμένα σε διοξείδιο του άνθρακα (Van Beynen 2011).

Επιπροσθέτως, η παρουσία κατιόντων Mg^+ και Na^+ αυξάνει τη διαλυτική ικανότητα του νερού ενώ η παρουσία ανιόντων SO_4^{2-} τη μειώνει.

1.3.4. Τύποι καρστ

Τα καρστ διακρίνονται σε τέσσερις τύπους, τα ολοκάρστ, τα μεροκάρστ, τα καρστ μεταβάσεως και τα ψευδοκαρστ. Κριτήριο κατηγοριοποίησης αποτελεί ο βαθμός καρστικοποίησης που έχει υποστεί το καρστ. Στην πρώτη περίπτωση πρόκειται για πλήρη, στη δεύτερη για ατελή καρστικοποίηση, η τρίτη περίπτωση είναι μια ενδιάμεση φάση ενώ η τέταρτη περιγράφεται από χαρακτηριστικές γεωμορφές παρεμφερείς με τις καρστικές, χωρίς όμως να έχει προηγηθεί διάλυση ευδιάλυτων πετρωμάτων (Μαρίνος 2008).

Μία ακόμη διάκριση των καρστ αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο εμφανίζεται στο γήινο ανάγλυφο. Πιο συγκεκριμένα, ένα καρστ μπορεί να εμφανιστεί ελεύθερο, ημιελεύθερο ή καλυμμένο, καθώς και μερικώς καλυμμένο από φυτοκάλυψη ή εδαφοκάλυψη (Καλλέργης 2001).

Το παλαιοκαρστ ή απολιθωμένο καρστ αποτελεί μια ξεχωριστή κατηγορία καρστ στην οποία η καρστική γεωμορφή έχει καλυφθεί – ενταφιαστεί από μεταγενέστερους γεωλογικούς σχηματισμούς. Η διεργασία αυτή τοποθετείται χρονικά σε κλιματολογικές συνθήκες διαφορετικές από τις παρούσες. Καρστ εκταφής είναι το καρστ ή τα τμήματα αυτού που αποκαλύπτονται λόγω διαβρωτικής δράσης.

Ακόμη, αναλόγως την περιοχή στην οποία αναπτύσσεται το καρστ, διακρίνεται στο Μεσογειακό ή Δυναρικό ή Αδριατικό καρστ (μεσογειακές περιοχές) και στο τροπικό ή κωνικό καρστ (τροπικές περιοχές).

1.3.5. Καρστικές γεωμορφές

1.3.5.1. Επιφανειακές καρστικές γεωμορφές

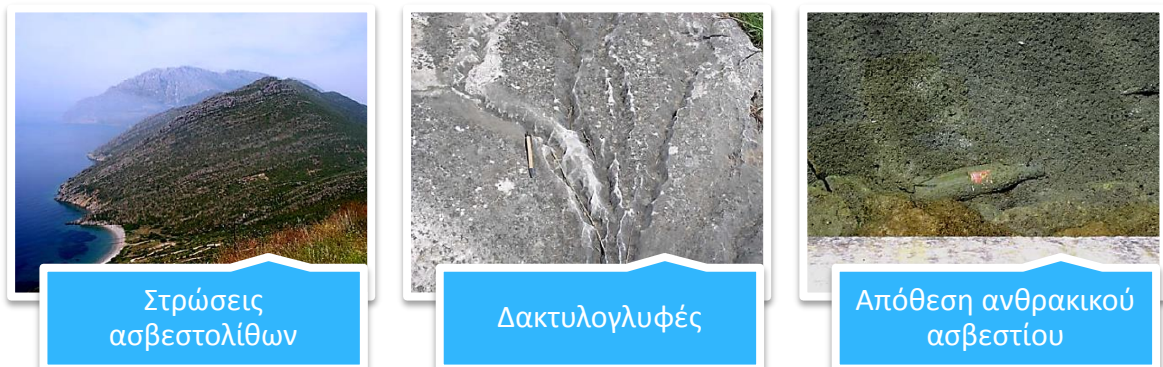
Γλύφες

Πρόκειται για τη συνηθέστερη καρστική γεωμορφή. Χαρακτηριστικές είναι οι αυλακώσεις της επιφάνειας του ασβεστόλιθου, αποτέλεσμα της διαλυτικής δράσης του νερού, με μέγεθος από μερικά χιλιοστά μέχρι μερικές δεκάδες εκατοστά. Οι γλύφες διαχωρίζονται σε δύο περαιτέρω κατηγορίες, τις δακτυλογλυφές και τις αμαξοτροχιές. Οι πρώτες, μικρού μεγέθους γεωμορφές που προσεγγίζουν σε εικόνα μικρά κανάλια, νευρώσεις ή και φύλλα, μοιάζοντας με αποτυπωμένα δάχτυλα που έχουν συρθεί επί της επιφάνειας του ασβεστόλιθου. Δημιουργούνται από την απορροή του νερού, γι' αυτό και η επιφάνεια πάνω στην οποία απαντώνται είναι κεκλιμένη. Οι αμαξοτροχιές, ελαφρώς μεγαλύτερες σε μέγεθος γεωμορφές, αναπτύσσονται κατά μήκος του δικτύου διακλάσεων, χωρίζονται μεταξύ τους

με ράχες οδοντωτής μορφής και προτιμούν μικρές κλίσεις επιφανείας για να αναπτυχθούν. Παράγοντες όπως η κλίση της επιφάνειας του εδάφους, η χημική σύσταση των ασβεστόλιθων, το κλίμα καθώς και το τεκτονικό καθεστώς που διέπει την περιοχή, συντελούν στη δημιουργία γλυφών (Καλλέργης 2001).



Σχήμα 1. 9 Καρστικές γεωμορφές (Βουβαλίδης 2011)



Σχήμα 1. 10 Καρστικές δομές (Βουβαλίδης 2011)

Καρστικά φρέατα ή χύτρες

Μικρές ή μεγάλες κοιλότητες, με σχήμα που ποικίλλει και μορφή φρεάτων εντός των οποίων συγκεντρώνονται τα εναπομείναντα αδιάλυτα υλικά της καρστικής διάβρωσης. Το εύρος τους μπορεί να υπερβεί τα 100 μέτρα, ενώ το βάθος τους μπορεί να φτάσει έως τα βαθύτερα τμήματα της ασβεστολιθικής μάζας, ώστε να υπάρχει και επικοινωνία με το υπόγειο καρστ.

1.3.5.2. Υπόγειες καρστικές γεωμορφές

Ο γενικός τρόπος σχηματισμού των υπόγειων καρστικών γεωμορφών είναι η είσοδος του επιφανειακού νερού στο εσωτερικό του πετρώματος. Το δευτερογενές πορώδες που προκύπτει είναι ουσιαστικά η υπόγεια καρστική μορφή. Η τεκτονική και οι υδραυλικές δυνάμεις καθορίζουν τη διατομή των υπόγειων καρστικών γεωμορφών, διαμορφώνοντας ανάλογο σχήμα και σχηματίζοντας ομαλά επιμήκη καρστικά έγκοιλα, αντιστοίχως. Η ταχύτητα ροής των υπόγειων υδάτων και το είδος του ασβεστόλιθου επηρεάζουν τη μορφή των καρστικών εγκοίλων, με υψηλές ταχύτητες και μεγάλο πάχους ομογενείς ασβεστόλιθους να αντιστοιχούν σε ομαλά επιμήκη έγκοιλα, ενώ χαμηλές ταχύτητες και κατακερματισμένα πετρώματα σε υπόγειους αγωγούς με πολύπλοκες μορφές (Βουβαλίδης 2011).

Καταβόθρες

Πρόκειται για ανερχόμενα μέχρι την επιφάνεια του εδάφους καρστικά έγκοιλα ή αγωγούς, μεγάλης κλίσης ή ακόμα και κατακόρυφα. Αποτελούν τμήμα των καρστικών βυθισμάτων (στα περιθώρια ή τον πυθμένα). Ροή νερού υφίσταται σε μόνιμη ή περιοδική βάση. Εισέρχονται στα ασβεστολιθικά πετρώματα διανοίγοντας ένα δίκτυο αγωγών και οχετών, με άγνωστες κατευθύνσεις.

Σπήλαια

Άλλος ένας τύπος υπόγειων καρστικών εγκοίλων, είναι ο σχηματισμός των οποίων γίνεται μέσω της διαλυτοποίησης του ανθρακικού ασβεστίου, λόγω καρστικής διάβρωσης στο εσωτερικό του ασβεστόλιθου, και της επακόλουθης απομάκρυνσής του μέσω υπόγειας κυκλοφορίας. Το νερό που κυκλοφορεί εντός του ασβεστολιθικού πετρώματος κορένεται ταχέως σε ανθρακικό ασβέστιο και έτσι η περαιτέρω διάλυση ανθρακικού ασβεστίου είναι αδύνατη. Τα σπήλαια δημιουργούνται σε βάθος της μάζας του πετρώματος, απαιτείται η ύπαρξη ακόρεστων υδάτων σε κάποιο σημείο ώστε να διαλυτοποιήσουν και στη συνέχεια να αποσπάσουν κομμάτι αυτής. Όπως έχει προαναφερθεί, προσωρινά ακόρεστη υδάτινη μάζα προκύπτει με την ανάμιξη δύο κορεσμένων διαλυμάτων, εντός των διακλάσεων του πετρώματος. Η απόσπαση τμήματος της μάζας του ασβεστολιθικού πετρώματος θα οδηγήσει στον σχηματισμό ενός υπόγειου εγκοίλου.

Σε αυτό το σημείο, απαραίτητη είναι η αναφορά στους ιδιαίτερους σχηματισμούς που παρατηρούνται μέσα στα σπήλαια, τους σταλαγμίτες και τους σταλακτίτες. Σχηματίζονται από την απόθεση ανθρακικού ασβεστίου και συντίθενται από ασβεστίτη ή αραγωνίτη. Αναλυτικότερα, υπέρκορο σε ανθρακικό ασβέστιο διάλυμα νερού φθάνει στο χώρο του σπηλαίου, όπου και γίνεται η απόθεση. Οι σταλακτίτες βρίσκονται στο έδαφος του σπηλαίου ενώ οι σταλαγμίτες στην οροφή αυτού. Ειδικά σχετικά με το σχήμα των ασβεστιτικών αυτών

σχηματισμών, οι σημαντικές συνιστώσες όπως η θερμοκρασία, η ταχύτητα ροής του νερού, το σχήμα της οπής από την οποία εξέρχεται το υπέρκορο σε ανθρακικό ασβέστιο διάλυμα, η περιεκτικότητα του αέρα σε διοξείδιο του άνθρακα αλλά και η παρουσία οξειδίων σιδήρου, τα οποία προσδίδουν ένα κόκκινο ή υποκίτρινο χρώμα στους σχηματισμούς.

1.3.6. Ο κύκλος του καρστ

Η καρστική διάβρωση σε μια ασβεστολιθική περιοχή εξελίσσεται στα παρακάτω στάδια (Λαμπρινός 2009):

- Αρχικό στάδιο
 - Σχηματισμός δολινών και γλυφών
 - Επιφανειακή απορροή νερού
 - Υπόγεια κυκλοφορία κατά μήκος των ρηγμάτων
 - Κατακρημνίσεις λόγω τεκτονικής δράσης
- Στάδιο προχωρημένης νεότητας
 - Περισσότερες δολίνες
 - Υπόγεια ροή νερού
 - Αύξηση διαστάσεων και συνένωση δολινών σε ουβάλες
- Στάδιο ωριμότητας
 - Εξαφάνιση ασβεστολιθικής μάζας
 - Αλλοίωση αναγλύφου περιοχής
 - Προχωρημένο επίπεδο καρστικής διάβρωσης
 - Πλήρης ανάπτυξη καρστικών γεωμορφών
 - Επιφανειακή και υπόγεια απορροή υδάτων
 - Πόλγες – τμήματα του καρστικού αναγλύφου στα οποία έχει προσχωθεί αργιλικό υλικό
 - Γλύφες
- Στάδιο γήρατος
 - Επιφανειακή απορροή νερού
 - Hums – λόφοι που σχηματίζονται από υπολείμματα αδιάλυτων ασβεστόλιθων
 - Πλήρης αποκάλυψη αδιαπέρατων πετρωμάτων του υποβάθρου (Milanovic 2004).

Η χρονική κλίμακα ολοκλήρωσης ενός κύκλου καρστ είναι αρκετά μεγάλη, όπως και ο χρόνος μετάβασης από το ένα στάδιο στο άλλο ποικίλλει σημαντικά. Το πιο χρονοβόρο στάδιο είναι μεταξύ νεότητας και ωριμότητας.

1.3.7. Υδραυλικά χαρακτηριστικά των καρστικών υδροφορέων

Οι καρστικοί αγωγοί χαρακτηρίζονται από μεγάλα διάκενα, κάτι που δικαιολογεί και την υψηλή ταχύτητα ροής (μέχρι και 2000 m/h) του νερού εντός αυτών, ειδικά κατά τη διάρκεια

της υγρής περιόδου της περιοχής. Σε γενικές γραμμές, οι ταχύτητες ροής στους καρστικούς υδροφορείς κυμαίνονται μεταξύ 28 m/h και 260 m/h.

Οι υδροφόροι που αναπτύσσονται σε καρστικά πετρώματα παρουσιάζουν μεγάλη μεταβιβαστικότητα και μικρό συντελεστή αποθηκευτικότητας. Ως εκ τούτου, η διακύμανση της στάθμης είναι αρκετά έντονη (Βουδούρης 2009).

Ένα χαρακτηριστικό των καρστικών υδροφόρων είναι το διπλό πορώδες, το οποίο στην ουσία αποτελείται από το πρωτογενές των ανθρακικών μαζών και το δευτερογενές των καρστικών αγωγών. Το ολικό πορώδες παίρνει συνήθως τιμές μεταξύ 8-12%, ενώ το ενεργό κυμαίνεται μεταξύ 0,5-3%. Λόγω του δευτερογενούς πορώδους, οι καρστικοί υδροφορείς εμφανίζονται ιδιαίτερα επιρρεπείς στην εξωτερική ρύπανση (Βουδούρης 2015).

Δεδομένου ότι οι καρστικοί υδροφορείς, ανταποκρίνονται άμεσα στα υδρολογικά συμβάντα, ο συντελεστής κατείσδυσης κυμαίνεται μεταξύ 35% και 68% του ετήσιου ύψους βροχόπτωσης.

1.3.8. Η δομή του καρστ

Τα επίπεδα βάσης αποτελούν τα κατώτατο όριο ενός καρστικού υδροφορέα και από αυτά ελέγχεται η υδροφορία, ωστόσο τα καρστικά πετρώματα εκτείνονται και κάτω από αυτά. Η καρστικοποίηση μειώνεται με το βάθος καθώς το δίκτυο των ρωγμών είναι πυκνότερο στο επιφανειακό παρά στο πιο βαθύ τμήμα. Ακόμη, από ένα βάθος και μετά, οι ανθρακικοί σχηματισμοί θεωρούνται πρακτικά στεγανοί, καθώς δεν παρατηρείται υδροφορία (Λαμπροπούλου 2012).

Τα επίπεδα βάσης μπορεί να είναι:

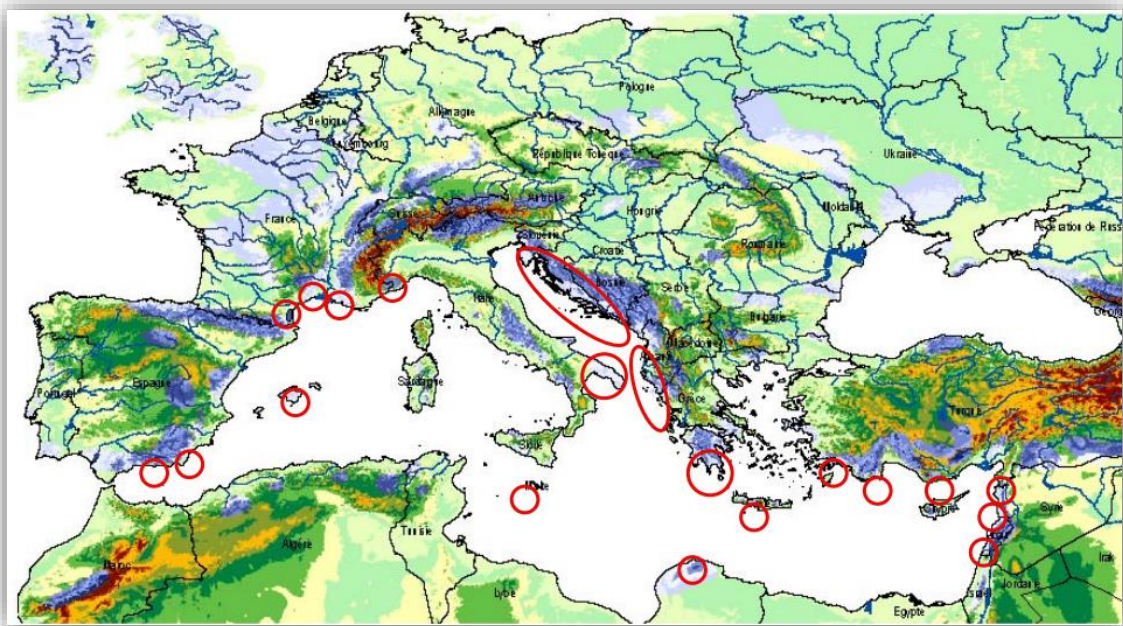
- Τοπικά – σε υποκείμενους στεγανούς σχηματισμούς
- Γενικά – όταν η στάθμη της θάλασσας ή της λίμνης βρίσκεται σε επαφή με το καρστ
- Απόλυτα – επίπεδο ανάβλυσης καρστικών υποθαλάσσιων πηγών

Ο καρστικός υδροφόρος υφίσταται γεωμετρικές μεταβολές με το χρόνο. Η συνεχής διάλυση και διάβρωση μπορεί να προκαλέσει ταπείνωση της στάθμης του νερού. Το αποτέλεσμα αυτού είναι η μετατροπή του άνω τμήματος των ανθρακικών σχηματισμών σε ακόρεστη ζώνη και του κάτω τμήματος σε καρστικό υδροφορέα. Ενίστε, υφίσταται το επικάρστ, γνωστό και ως η επιδερμίδα του καρστ, το οποίο αποτελεί ένα είδος διεπιφάνειας μεταξύ αυτού και της ατμόσφαιρας.

1.4. ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΚΑΡΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

1.4.1. Δημιουργία παράκτιων καρστικών συστημάτων

Οι κατακόρυφες τεκτονικές κινήσεις σε συνδυασμό με τις ευστατικές κινήσεις του Τεταρτογενούς έχουν κατά κάποιον τρόπο διαμορφώσει τα παράκτια καρστικά συστήματα στη χώρα μας. Η μετέπειτα εξέλιξη ενός καρστικού συστήματος εξαρτάται από τη διακύμανση της θαλάσσιας στάθμης. Οι μεσογειακές χώρες διαθέτουν παράκτιους υδροφορείς, οι οποίοι σε μεγάλο ποσοστό είναι καρστικοί (Σχήμα 1.11). Παράκτιες και υποθαλάσσιες πηγές εκφορτίζουν το υπόγειο νερό το οποίο προέρχεται από ένα δίκτυο υπόγειων καρστικών αγωγών (Καλλέργης 2001).

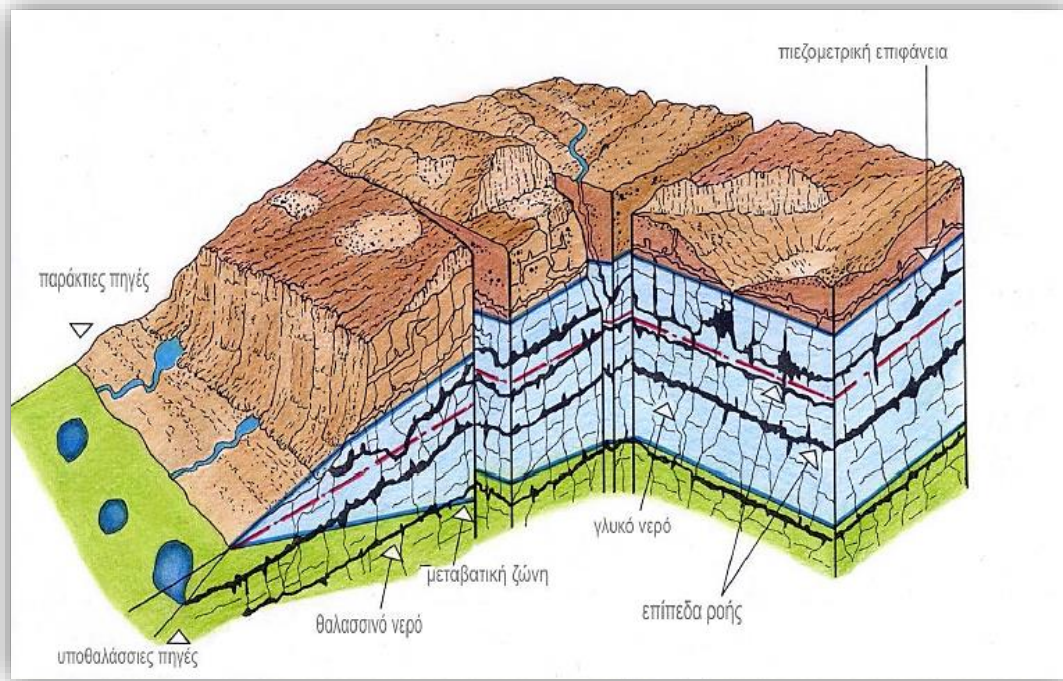


Σχήμα 1.11 Παράκτια καρστικά συστήματα στο Μεσογειακό χώρο (Bakalowicz 2005).

Το υποθαλάσσιο καρστ αποτελεί έναν ιδιαίτερο τύπο υποβρύχιας καρστικής μορφής, η οποία χαρακτηρίζεται από τη συνύπαρξη θαλασσινού και γλυκού νερού. Σήμερα, ενεργά καρστικά συστήματα απαντώνται σε βάθη μεγαλύτερα από 150 m υπό τη θαλάσσια στάθμη. Τα παράκτια και υποθαλάσσια καρστ είναι το αποτέλεσμα των κατακόρυφων ευστατικών κινήσεων του Τεταρτογενούς και των νεοτεκτονικών κινήσεων που έλαβαν χώρα στο Αιγαίο πέλαγος (Παυλόπουλος 1997).

Τα παράκτια καρστικά συστήματα είναι ουσιαστικά καρστοποιημένες μάζες πετρωμάτων, κοντά στην ακτή (Fleury et al. 2007). Συνδέονται υδραυλικά με τη θάλασσα με αποτέλεσμα την ύπαρξη διεπιφάνειας θαλασσινού – γλυκού νερού (θαλάσσια διείδυση στην ενδοχώρα). Σε ορισμένες των περιπτώσεων, προκαλείται αλμύριση του υδροφόρου ψηλότερα από τη θαλάσσια στάθμη, η οποία μπορεί να οφείλεται στην ύπαρξη αγωγών, των οποίων η απόληξη βρίσκεται στον πυθμένα της θάλασσας, μακριά από την ακτή και σε

μεγάλο βάθος αφενός, και αφετέρου σε απολιθωμένο θαλασσινό νερό, εγκλωβισμένο στους αγωγούς του καρστ, από μια άλλη γεωλογική περίοδο.



Σχήμα 1. 12 Παράκτιος καρστικός υδροφόρος (Bakalowicz 2005 μεταφρασμένο).

Ο παράκτιος καρστικός υδροφόρος συνίσταται από τρεις ζώνες (Σχήμα 1.12):

- Ζώνη γλυκού νερού
- Υφάλμυρη – μεταβατική ζώνη
- Ζώνη αλμυρού νερού

Το άνω όριο της μεταβατικής ζώνης καθορίζεται από την πιεζομετρική στάθμη, ενώ οποιαδήποτε διακύμανσή της, φυσική ή τεχνητή, οδηγεί σε μετατόπισή του, προκαλώντας μετατόπιση της μεταβατικής ζώνης.

Η θαλάσσια διείσδυση και κατ' επέκταση η υφαλμύριση του καρστικού υδροφόρου γίνεται όταν:

- Το μήκος των αγωγών του καρστ προσεγγίζουν το σημείο επαφής αυτού και της θάλασσας
- Η στεγανή διεπιφάνεια μεταξύ του καρστ και της θάλασσας υποστεί ρήξη λόγω τεκτονικής ή διάβρωσης

- Η στεγανή διεπιφάνεια μεταξύ του καρστ και της θάλασσας είναι υποκείμενη της θαλάσσιας στάθμης
- Η στεγανή διεπιφάνεια μεταξύ του καρστ και της θάλασσας βρίσκεται σε ρηχό σημείο, υπερκείμενο της κυκλοφορίας.

Η παλίρροια αποτελεί μία συνιστώσα που επηρεάζει την υφαλμύριση των καρστικών υδροφόρων, καθώς και το ρυθμό αυτής. Η περιεκτικότητα των χλωριόντων στην υφάλμυρη ζώνη υφίσταται μια κάποια διακύμανση λόγω της άμεσης επαφής των αγωγών του καρστικού συστήματος με τη θάλασσα, η οποία όταν γίνεται σε μεγάλο βαθμό συνεπάγεται μεγαλύτερο εύρος αυτής, ενώ ελάττωση του εύρους της ζώνης του γλυκού νερού. Το φαινόμενο αυτό ενισχύεται όταν η υδραυλική κλίση προς τη θάλασσα είναι μικρή.

1.4.2. Μορφές παράκτιου καρστ

Το παράκτιο καρστ μπορεί να λάβει τις εξής μορφές (**Σχήμα 1.13**) (Καλλέργης 2001):

- Ανοιχτό στη θάλασσα καρστ

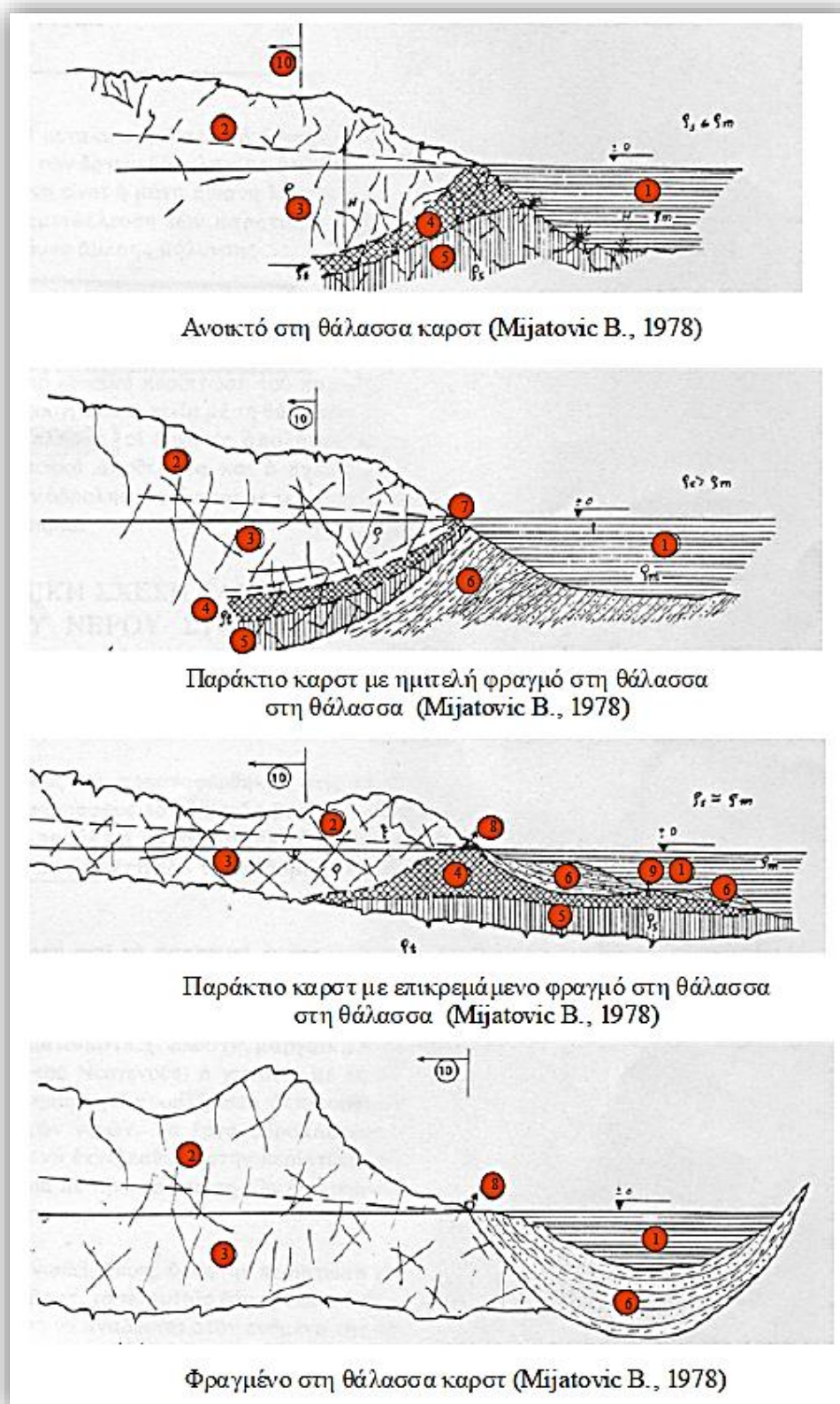
Η θάλασσα έρχεται σε επαφή με τα ανθρακικά πετρώματα του καρστικού συστήματος. Χαρακτηριστική είναι η συνεχής μεταβολή των συνθηκών ισορροπίας θαλασσινού – γλυκού νερού με συνεπαγόμενη υποχώρηση του αλμυρού μετώπου προς την ενδοχώρα, λόγω υδροληψίας ή άντλησης.

- Ατελώς φραγμένο στη θάλασσα καρστ

Υποκείμενος της θαλάσσιας στάθμης φραγμός. Στην προκείμενη περίπτωση, η αλμυρή ζώνη δημιουργήθηκε λόγω κατακόρυφων κινήσεων της θάλασσας, κατά τη διάρκεια του Τεταρτογενούς και η αλατότητά της κυμαίνεται σε υψηλότερα επίπεδα από την αλατότητα της θάλασσας. Η θέση της αλμυρής ζώνης είναι μεταξύ φραγμού και βάσης του καρστικού συστήματος.

1. Επικρεμάμενος φραγμός. Το καρστικό σύστημα έρχεται σε επαφή με τη θάλασσα σε σημείο υπό του φραγμού, η θαλάσσια διείσδυση εξελίσσεται σε κατακόρυφο άξονα ενώ παρατηρούνται οι χαρακτηριστικές υποθαλάσσιες πηγές από τις οποίες εκφορτίζεται υπόγειο νερό.

- Πλήρως φραγμένο στη θάλασσα καρστ. Δεν υφίσταται επικοινωνία μεταξύ θάλασσας και καρστ



Σχήμα 1. 13 Μορφές του παράκτιου καρστ. 1.θάλασσα, 2.καρστικό υδροφόρο σύστημα, 3.ζώνη γλυκού νερού, 4.μεταβατική ζώνη, 5.ζώνη αλμυρού νερού, 6.φλύσσης, 7.υπόγειο στεγανό διάφραγμα, 8.παράκτια πηγή, 9.υποθαλάσσια πηγή (Καμπόλης 2007).

1.4.3. Νόμος Ghyben – Herzberg

Για οποιοδήποτε πορώδες μέσο και υπό συνθήκες γραμμικής ροής, το γλυκό νερό χαρακτηρίζεται από μικρότερη πυκνότητα, συνεπώς είναι υπερκείμενο του θαλασσινού νερού μεγαλύτερης πυκνότητας. Η διαπίστωση αυτή έγινε το 1894 από τον Nordenskjold και το 1900 από τον Ghyben. Η θεμελίωση του αντίστοιχου νόμου έγινε από τους Ghyben – Herzberg (Καλλέργης 2001).

Η πραγματική κατάσταση σε ένα παράκτιο καρστ απέχει από τη θεωρία των Ghyben – Herzberg, καθότι η διεπιφάνεια μεταξύ αυτού και της θάλασσας είναι ανώμαλη και έχει μεγάλο πάχος, πρόκειται δηλαδή για μια μεταβατική/υφάλμυρη ζώνη. Εκ του αποτελέσματος, ο προαναφερθείς νόμος, παρόλο που ισχύει θεωρητικά για ένα παράκτιο καρστικό σύστημα, δεν μπορεί να εφαρμοστεί προκειμένου να υπολογιστεί το βάθος στο οποίο φτάνει η ζώνη του γλυκού νερού (Βουδούρης 2015).

Πιο συγκεκριμένα, παράγοντες όπως η ετερογένεια του πορώδους, οι υψηλές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας και μεταβιβασιμότητας προς τη θάλασσα, δημιουργούν μια ανώμαλη ζώνη υφάλμυρου νερού, έναντι μιας οριακής επιφάνειας μεταξύ γλυκού και θαλασσινού νερού.

1.5. ΙΣΟΤΟΠΙΚΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ

1.5.1. Εισαγωγή

Μία από τις παλαιότερες και υψίστης σημασίας ιδέες που έχει συλλάβει ο ανθρώπινος νους είναι εκείνη του ατόμου, πνευματική ιδιοκτησία των αρχαίων Ελλήνων φιλοσόφων. Πιο συγκεκριμένα, η γνωστή σε όλους μας ατομική θεωρία διατυπώθηκε από το Δημόκριτο, το 400 π.Χ. σύμφωνα με την οποία η ύλη συντίθεται από αδιαίρετα σωματίδια, τα «άτομα». Η ύλη αποτελείται άτομα, τα οποία συντελούν, μέσω διαφορετικών συνδυασμών, στο σχηματισμό όλων των υλικών που βλέπουμε.

Η ισοτοπική υδρολογία αποτελεί κλάδο της υδρολογίας και η βασική γραμμή επί της οποίας αναπτύσσονται οι τεχνικές της είναι ότι η ύλη συνίσταται από διαφορετικά μεταξύ τους ισότοπα και όχι απλά χημικά στοιχεία. Η Γεωχημεία των σταθερών ισότοπων αποτελεί σήμερα έναν πολύ σημαντικό κλάδο των Γεωεπιστημών με πρακτικές εφαρμογές σχεδόν σε όλες τις γεωλογικές μελέτες, από την παλαιοοικολογία-παλαιοπεριβάλλον, έως τις μελέτες της προέλευσης της Γης και το ηλιακού μας συστήματος.

1.5.2. Βασικές έννοιες

Το άτομο συντίθεται από τον πυρήνα, τα ηλεκτρόνια που τον περιβάλλουν διαγράφοντας τροχιές και τα πρωτόνια - νετρόνια που βρίσκονται εντός αυτού. Το άτομο εμφανίζεται πάντα ηλεκτρικά ουδέτερο, συνεπώς τα νετρόνια δε φέρουν ηλεκτρικό φορτίο, τα πρωτόνια είναι θετικά φορτισμένα, ενώ τα ηλεκτρόνια φέρουν αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο. Όσον αφορά στη μάζα τους, τα πρωτόνια έχουν μάζα ίση περίπου με μία ατομική μονάδα μάζας (1 amu), τα νετρόνια έχουν μάζα η οποία υπερβαίνει λίγο την ατομική μονάδα μάζας, ενώ η μάζα των

ηλεκτρονίων είναι περίπου 1836 φορές μικρότερη από την αυτή. Δεδομένου λοιπόν ότι το άτομο εμφανίζεται πάντα ηλεκτρικά ουδέτερο, εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο αριθμός των πρωτονίων ταυτίζεται με τον αριθμό των ηλεκτρονίων (Λυκούδη 2010).

Για την περιγραφή ενός ατόμου απαιτούνται δύο αριθμοί, ο ατομικός (Z) και ο μαζικός (A). Ο πρώτος αναφέρεται στον αριθμό των πρωτονίων εντός πυρήνα, χαρακτηρίζοντας μοναδικά το χημικό στοιχείο, ενώ ο δεύτερος περιγράφει τον αριθμό των πρωτονίων και νετρονίων μαζί, χαρακτηρίζοντας μοναδικά τα ισότοπα του προκείμενου χημικού στοιχείου. Ως ισότοπα ονομάζονται τα άτομα που ανήκουν στο ίδιο χημικό στοιχείο, έχουν τον ίδιο ατομικό αριθμό αλλά διαφορετικό μαζικό αριθμό. Με άλλα λόγια διαφοροποιούνται όσον αφορά στον αριθμό νετρονίων του πυρήνα τους. Σταθερά ισότοπα καλούνται τα άτομα εκείνα που ανήκουν στο ίδιο στοιχείο, των οποίων οι πυρήνες είναι αδιάσπαστοι.

Κάθε στοιχείο που διαθέτει ισότοπα, χαρακτηρίζεται από ένα επικρατές ποσοστιαία είδος ισότοπου (βαρύτερο), το οποίο αντιστοιχεί και στο μεγαλύτερο μέρος της μάζας του, και κάποια υπολειπόμενα είδη ισωτόπων (ελαφρύτερα) που απαντώνται σε μικρότερα ποσοστά της μάζας του. Πρόκειται για ένα μίγμα δηλαδή των ειδών ισωτόπων για το εκάστοτε χημικό στοιχείο, το οποίο χαρακτηρίζεται από μια συγκεκριμένη ισωτοπική σύσταση, δηλαδή από τους λόγους μεταξύ των ισωτόπων. Τα βαρύτερα ισότοπα διαφοροποιούνται από τα ελαφρύτερα όταν επέρχεται χημική ισορροπία μεταξύ των δύο φάσεων, ή λόγω κινητικών φαινομένων. Ως εκ τούτου, η αφθονία των σταθερών ισωτόπων στους γεωλογικούς σχηματισμούς (πετρώματα, ορυκτά, ρευστά, φυσικά ύδατα) υφίσταται μια διακύμανση, αντικείμενο που απασχολεί τον κλάδο της Ισωτοπικής γεωχημείας σταθερών ισωτόπων (Αντωνέλλου 2007).

Τα ισότοπα που χρησιμοποιούνται στον τομέα της Ισωτοπικής υδρολογίας είναι φυσικά ή τεχνητά. Η υδρολογία φυσικών ισωτόπων περιβάλλοντος (Environmental isotope hydrology) χρησιμοποιεί τα φυσικά ισότοπα του νερού τα οποία είναι: O, H, N, C, και S. Οι αλλαγές που σημειώνονται στην ισωτοπική σύσταση λόγω φυσικών αιτίων, αντικατοπτρίζουν τις διεργασίες που συμβαίνουν στο νερό, στο εκάστοτε στάδιο του υδρολογικού κύκλου (Αντωνέλλου 2007). Πιο συγκεκριμένα, οι μεταβολές που υφίσταται η ισωτοπική σύσταση του φυσικού νερού καθιστούν εφικτή τη φυσική ιχνηθέτηση του νερού. Κατά αυτόν τον τρόπο, μέσω ισωτοπικής ανάλυσης της σύστασης του φυσικού νερού προσδιορίζεται η πορεία των υδάτινων μαζών, στα διαφορετικά στάδια του υδρολογικού κύκλου. Τα ισότοπα του περιβάλλοντος, τα οποία χρησιμοποιούνται περισσότερο για το σκοπό αυτό, είναι τα σταθερά ισότοπα D, ^{18}O και ^{13}C . Από αυτά, το D και το ^{18}O συμμετέχουν στη δομή του μορίου του νερού, ενώ ο ^{13}C απαντάται στις ανθρακούχες ενώσεις, που βρίσκονται υπό μορφή διαλύματος στο νερό. Στην περίπτωση της υδρολογίας τεχνητών ισωτόπων (Artificial isotope hydrology), η ισωτοπική σύσταση υφίσταται τεχνητές μεταβολές, μέσω της εισαγωγής ενός ισωτόπου σε συγκεκριμένο στάδιο του υδρολογικού κύκλου. Στις μεθόδους υδρολογίας τεχνητών ισωτόπων περιλαμβάνεται και η μελέτη της πορείας της μεταβολής που προκαλείται τεχνητά και αφορά ένα επιμέρους στάδιο του υδρολογικού κύκλου.

Η μελέτη των σταθερών ισωτόπων αποσκοπεί συνήθως στο χαρακτηρισμό των πηγών και των διάφορων ταμειυτήρων, στον προσδιορισμό παλαιοθερμοκρασιών αλλά και στην ιστορική καταγραφή βιολογικών και φυσικών μεταβολών στις οποίες υπόκειντο ο ωκεανός.

Τα σταθερά ισότοπα αποτελούν ίσως το μοναδικό τρόπο ανίχνευσης βιο-γεωχημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στο γήινο περιβάλλον (Λυκούδη 2010).

1.5.3. Ισοτοπική σύσταση – Κλασμάτωση

Τα ισότοπα εμφανίζουν παρεμφερείς χημικές ιδιότητες μεταξύ τους μεν, χάρη στην ίδια ηλεκτρονιακή δομή (ηλεκτρόνια εξωτερικής στιβάδας) που εμφανίζουν, διαφορετικές φυσικές ιδιότητες δε, καθότι έχουν διαφορετικές μάζες, ιδιότητα που αξιοποιείται από την ισοτοπική γεωχημεία σταθερών ισωτόπων. Αναλυτικότερα, η διαφορά μάζας που παρατηρείται, οδηγεί σε διαφορετική συμπεριφορά των ισωτόπων, κάτι το οποίο συνεπάγεται διαφορετικές σχετικές αφθονίες σε αυτά και χαρακτηρίζεται σαν φαινόμενο κλασμάτωσης (Παπαχαραλάμπου 2012).

Κλασμάτωση ορίζεται η μεταβολή της τιμής του ισοτοπικού λόγου, τη στιγμή που τα μόρια μιας χημικής ένωσης μεταβαίνουν από μία φάση σε μία άλλη ή κατά τη διάρκεια μιας χημικής αντίδρασης (Παπαχαραλάμπου 2012). Βασική αρχή που διέπει την προαναφερθείσα διαδικασία είναι ότι οι διεργασίες της εξάτμισης και της βιολογικής πρόσληψης ευνοούν τα ισότοπα τα οποία απαντώνται σε μικρότερο ποσοστό της μάζας του χημικού στοιχείου με αποτέλεσμα να επικρατεί το βαρύτερο είδος ισωτόπου. Ο παράγοντας ισοτοπικής κλασμάτωσης α είναι το κλάσμα των ισοτοπικών λόγων δύο συστατικών (A,B), είτε στην περίπτωση ισορροπίας των δύο συστατικών ($A \leftrightarrow B$), είτε κατόπιν μιας μονόδρομης αντίδρασης ($A \rightarrow B$):

$$\alpha_{B/A} = R_{B/A}$$

Για κάθε χημικό στοιχείο, ο λόγος των δύο ισωτόπων που απαντούν σε μεγαλύτερο ποσοστό στο μίγμα των ισωτόπων του είναι ενδεικτικός των σταθερών ισωτόπων. Στην περίπτωση του οξυγόνου, υπολογίζεται ο λόγος $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, ενώ για το υδρογόνο υπολογίζεται ο λόγος $^2\text{H}/^1\text{H}$ ή D/H. Ένας ισοτοπικός λόγος προσδιορίζεται μέσω χρήσης φασματογράφου μάζας, όργανο το οποίο απαιτεί τον καθορισμό ενός ισοτοπικού λόγου αναφοράς, προς αποφυγή ετερόκλητων υπολογισμών του ίδιου δείγματος. Συνεπώς, ο εκάστοτε ισοτοπικός λόγος δ εκφράζεται ως η διαφορά μεταξύ του μετρηθέντος δείγματος και του ισοτοπικού λόγου αναφοράς, προς τον τελευταίο, δηλαδή

$$\delta^{18}\text{O} = \left(\frac{R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}}{R_{\text{standard}}} \right) \times 10^3$$

Όπου ο δείκτης sample αναφέρεται στο λόγο του δείγματος ενώ ο δείκτης standard αναφέρεται στο λόγο αναφοράς.

Η μονάδα δ αποτελεί την ταυτότητα του κάθε υλικού και εκφράζεται επί τοις χιλίοις VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water), όπου VSMOW ο διεθνώς χρησιμοποιούμενος

λόγος αναφοράς που αντιστοιχεί στη μέση ισοτοπική σύνθεση του νερού των ωκεανών, όπως έχει υπολογιστεί σε πρότυπο εργαστήριο στη Βιέννη.

Η αφθονία των ισοτόπων κάθε στοιχείου οριστικοποιήθηκε απ' όταν δημιουργήθηκε η γη και έκτοτε δεν έχει αλλάξει. Όμως μικροδιαφορές στην αρχική ισοτοπική σύσταση μπορεί να προκληθούν λόγω χημικών, βιολογικών και φυσικών διεργασιών. Οι μετεωρολογικοί παράγοντες καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την ισοτοπική σύσταση των υπογείων νερών. Ωστόσο, η αλληλεπίδραση νερού και υδροφορέων, επηρεάζει την ισοτοπική σύσταση του νερού και ενδεχομένως να την αλλάξει. Διεργασίες όπως έκλυση αερίων CO₂ ή H₂S, ενυδάτωση πυριτικών ορυκτών, ανταλλαγή μεταξύ νερού και πετρωμάτων και εξάτμιση, αποτελούν τις κυρίαρχες αιτίες αλλαγής της ισοτοπικής σύστασης του νερού. Κάθε διεργασία από τις προαναφερθείσες, οδηγούν σε διαφορετικά αποτελέσματα (Στρατικόπουλος 2007).

1.5.4. Μετεωρική ευθεία

Επειδή και το H και το O συνυπάρχουν στο μόριο του νερού, οι τιμές του $\delta^{18}\text{O}$ και $\delta^2\text{H}$ παρουσιάζουν μεγάλη συσχέτιση, δίνοντας τη «γραμμή του μετεωρικού νερού» (meteoric water line- MWL) (Λυκούδη 2010).

Οι συγκεντρώσεις ^{18}O και ^2H εμφανίζουν γραμμική συσχέτιση στο μετεωρικό νερό σύμφωνα με την «Παγκόσμια Ευθεία Μετεωρικού Νερού» (Global Meteoric Water Line, GMWL), όπως δίνεται από την εξίσωση:

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

Στη δεκαετία του '60, ο Craig, κατόπιν μελέτης των ισοτοπικών λόγων οξυγόνου υδρογόνου σε δείγματα βροχής ανά τον κόσμο, ο Craig παρατήρησε συσχέτιση μεταξύ $\delta^{18}\text{O}$ και $\delta^2\text{H}$ και συγκεκριμένα κατέληξε πως όλα τα δείγματα που είχε συλλέξει και τοποθετήσει στο διάγραμμα $\delta^{18}\text{O}$ και $\delta^2\text{H}$, βρίσκονταν επί της ίδιας ευθείας, η οποία καλείται Craig's global meteoric water line και εκφράζει τη συσχέτιση των $\delta^{18}\text{O}$ και $\delta^2\text{H}$:

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

Πρόκειται για μια ευθεία που προκύπτει από το συνδυασμό πολλών τοπικών μετεωρικών ευθειών, που αντιστοιχούν σε σημεία διαφορετικών γεωγραφικών και κλιματικών παραμέτρων, ενώ η κλίση της ευθείας είναι σταθερή και ίση με 8, διότι επέρχεται ισορροπία κατά τη συμπύκνωση. Η γενική εξίσωση στην οποία υπακούουν όλες οι μετεωρικές ευθείες είναι:

$$\delta^{18}\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + d$$

όπου d το πλεόνασμα δευτερίου (D – excess), διαφορετικό για κάθε τόπο. Συγκεκριμένα, το πλεόνασμα δευτερίου λαμβάνει την τιμή +10 για την περίπτωση κατακρημνισμάτων προερχόμενων από συμπυκνωμένους ωκεάνιους υδρατμούς, ενώ για την περίπτωση

κατακρημνισμάτων προερχόμενων από την Ανατολική Μεσόγειο, λαμβάνει την τιμή +22 (Λυκούδη 2010). Τέλος, για την περίπτωση της Ελλάδας, το μετεωρικό νερό χαρακτηρίζεται ισοτοπικά από τη σχέση:

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

και ειδικότερα για το νερό των πηγών ισχύει η σχέση:

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

Τα ισότοπα διαδραματίζουν πολύ σημαντικό ρόλο τόσο στον προσδιορισμό της ηλικίας των απολιθωμάτων όσο και σε διάφορες εφαρμογές της βιοχημείας και της διαγνωστικής ιατρικής. Ο κλάδος της ισοτοπικής υδρολογίας αναφέρεται στις τεχνητά προκαλούμενες μεταβολές στις οποίες υπόκειται η ισοτοπική σύσταση, αναλόγως με το στάδιο του υδρολογικού κύκλου. Πρακτικά εργαλεία της ισοτοπικής υδρολογίας είναι η χρήση ισοτόπων με σκοπό την ιχνηθέτηση και η χρονολόγηση των υδάτων, επιφανειακών και υπόγειων, για την επίλυση θεμάτων υδρογεωλογικής συνήθως φύσης.

1.5.5. Υδρολογικό προφίλ ισοτόπων

Οι χημικές ιδιότητες των στοιχείων είναι άμεση συνάρτηση του αριθμού των ηλεκτρονίων τους. Τα ισότοπα ενός χημικού στοιχείου χαρακτηρίζονται από τον ίδιο αριθμό ηλεκτρονίων ενώ διαφέρουν στο ατομικό βάρος.

Η ισοτοπική υδρολογία και η χρήση σταθερών ισοτόπων βασίζεται σε φυσικές διεργασίες, σύμφωνα με τις οποίες ένα τμήμα του περιβάλλοντος εμπλουτίζεται από ένα ιδιαίτερο είδος ισοτόπων, ενώ ένα άλλο είναι φτωχό στο προκείμενο είδος ισοτόπου. Η πυρηνική διάσπαση είναι μια διεργασία κατά την οποία οι πυρήνες ή τα ραδιενεργά ισότοπα διασπώνται στιγμιαία, στη συνέχεια προκύπτουν θυγατρικά στοιχεία ή ισότοπα, ενώ ταυτόχρονα εκπέμπονται ασυνεχή *quanta* ακτινοβολίας (Καλλέργης 2001). Συγκεκριμένα, υπάρχουν τρία είδη ακτινοβολίας:

- Ακτινοβολία άλφα – πυρήνες ατόμων He που έχουν τέσσερα θετικά φορτία
- Ακτινοβολία βήτα – ηλεκτρόνια με ένα αρνητικό φορτίο
- Ακτινοβολία γάμμα – ηλεκτρομαγνητικά κύματα πολύ μικρού μήκους κύματος

Ενέργεια (activity) είναι η ένταση της ακτινοβολίας, αναλυτικότερα δηλαδή ο αριθμός των *quanta* ακτινοβολίας στη μονάδα του χρόνου και εκφράζεται σε εκατομμύρια volts ηλεκτρονίων (Me V). Η ραδιενεργός διάσπαση εκφράζεται από το σχετικό νόμο,

$$C = C_0 \exp(-\lambda t) \quad \text{και} \quad t = \left(\frac{1}{\lambda}\right) \ln C_0/C,$$

όπου C_0 και C η ενέργεια στην αρχή και το τέλος του χρονικού διαστήματος t , ενώ λ είναι η σταθερά διάσπασης

σύμφωνα με τον οποίο η ενέργεια είναι ανάλογη του αριθμού των ισοτόπων που διασπώνται, αποδίδοντας ένα μοναδικό συντελεστή αναλογίας για το εκάστοτε ραδιενεργό ισότοπο.

Το χρονικό διάστημα που απαιτείται για αν μειωθεί η συγκέντρωση του ραδιενεργού ισοτόπου στο μισό της αρχικής συγκέντρωσης, μέσω ραδιενεργούς διάσπασης καλείται χρόνος υποδιπλασιασμού:

Η ραδιενέργεια εκφράζεται σε μονάδες Bq (Becquerel). 1 Bq αντιστοιχεί σε μία διάσπαση ανά δευτερόλεπτο. Η ραδιενεργή ηλικία ενός δείγματος νερού t υπολογίζεται από την εξίσωση

$$t = \left(\frac{1}{\lambda}\right) \ln C_0/C$$

και συνδέεται άμεσα με το χρόνο παραμονής (residence time) του νερού στον υδροφόρο, καθώς η μετρούμενη ενέργεια του δείγματος επηρεάζεται τόσο από την ραδιενεργό διάσπαση όσο και από τη διαδικασία ανάμιξης που εξελίσσεται την στιγμή της δειγματοληψίας.

Υπάρχουν δύο πρότυπα ροής, το πρότυπο ροής τύπου εμβόλου (piston flow model) και το πρότυπο ροής πλήρους ανάμιξης (complete mixing model). Στο πρώτο, δεν παρατηρείται καμία ανάμιξη και το νερό, αφού εισέλθει στον υδροφόρο, μεταφέρεται στα κατάντη αυτού, υπό τη μορφή εμβόλου. Σε αυτή την περίπτωση ο χρόνος παραμονής ισούται με τη ραδιενεργή ηλικία του δείγματος. Σχετικά με τον δεύτερο τύπο ροής, επικρατεί η παραδοχή ότι το εκάστοτε εισερχομένου ποσού νερού υφίσταται πλήρη στιγμιαία ανάμιξη στο σύνολο του νερού, ανάντη του σημείου της δειγματοληψίας. Το πρότυπο αυτό περιγράφεται από την εξίσωση:

$$tr = \left(\frac{1}{\lambda}\right) [\exp(\lambda ta)^{-1}]$$

1.5.6. Φυσικά ισότοπα και εφαρμογές

Το νερό παρουσιάζει μεταβολές στην ισοτοπική σύστασή του κατά την εξέλιξη του υδρολογικού κύκλου, κάτι το οποίο αποτελεί αντικείμενο της Υδρολογίας φυσικών ισοτόπων του περιβάλλοντος. Η περίπτωση των τεχνητών ισοτόπων διαφέρει στο ότι η μεταβολή στην οποία υπόκειται η ισοτοπική σύσταση του νερού γίνεται τεχνητά, σε κάποιο συγκεκριμένο στάδιο του υδρολογικού κύκλου (Καλλέργης 2001).

Τα ισότοπα άρχισαν να χρησιμοποιούνται στην υδρολογία τη δεκαετία του 1950. Ο πίνακας που ακολουθεί περιγράφει τα βασικά χαρακτηριστικά των ισοτόπων Η και Ο.

Σε γενικές γραμμές, τα σταθερά φυσικά ισότοπα που χρησιμοποιούνται είναι το υδρογόνο -2 (Δευτέριο), ο άνθρακας -13 και το οξυγόνο -18 ενώ τα ραδιενεργά φυσικά ισότοπα που χρησιμοποιούνται είναι το υδρογόνο -3 (τρίτιο) και ο άνθρακας -14. Δημιουργούνται με τη

δράση της κοσμικής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα καθώς και με θερμοπυρηνικές εκρήξεις. Τα ισότοπα υδρογόνου και οξυγόνου περιέχονται στο μόριο του νερού, ενώ τα ισότοπα του άνθρακα απαντώνται σε ενώσεις διαλυμένες στο νερό.

1.5.7. Ιχνηθετήσεις

Ένα από τα εργαλεία της καρστικής υδρογεωλογίας είναι οι ιχνηθετήσεις. Αφορούν κυρίως υπόγεια αλλά και επιφανειακά νερά. Μερικές από τις εφαρμογές στις οποίες έχει απήχηση η χρήση ιχνηθετών είναι (Καλλέργης 2001):

- Προσδιορισμός πραγματικής ταχύτητας κίνησης υπόγειου νερού και κατ' επέκταση της υδραυλικής αγωγιμότητάς του.
- Ανίχνευση της πιθανής επικοινωνίας σημείων νερού μέσω καρστικών αγωγών
- Προσδιορισμός σημείων τροφοδοσίας πεδίου ροής
- Διάδοση ρύπων στους υδροφόρους
- Αλληλεπίδραση διαφορετικών πεδίων ροής
- Μελέτη της πορείας που ακολουθεί το υπόγειο νερό.

1.5.7.1. Ορισμός

Ιχνηθέτης καλείται μια ουσία, η οποία προστιθέμενη στο νερό, προσδιορίζεται μέσω της χωροχρονικής κατανομής που ακολουθεί. Η ουσία αυτή πρέπει να πληρεί κάποιες προϋποθέσεις, όπως:

- Να είναι οικονομική και εύκολα διαθέσιμη
- Να εντοπίζεται εύκολα και να είναι μετρήσιμη σε υψηλές αραιώσεις
- Να μη ρυπαίνει το νερό, να μην αλλοιώνει τη γεύση ή να επηρεάζει την οσμή του νερού
- Να μην καταστρέφεται ή να αλληλεπιδρά με οποιοδήποτε τρόπο
- Να μην είναι δηλητηριώδης – επικίνδυνη για τον άνθρωπο
- Να μην έχει επιβλαβή παραπροϊόντα

1.5.7.2. Ταξινόμηση ιχνηθετών

Σύμφωνα με το Milanovic (1981), οι ιχνηθέτες ταξινομούνται σε διαλυτούς (ανόργανα άλατα, χρώματα και ραδιενεργοί ιχνηθέτες), αδιάλυτους (πίτουρα, πριονίδια, άχυρα, μύκητες, σπόροι λυκοπόδιου και βακτήρια) και ιθαγενείς (σταθερά/ασταθή φυσικά ισότοπα και ενδημικοί οργανισμοί). Μεταξύ των προαναφερθέντων τύπων ιχνηθετών, υπερτερούν οι διαλυτοί, καθώς η μεταφορά τους με το νερό είναι πιο εύκολη, γεγονός που καθιστά και τη δειγματοληψία πιο απλή και τον εντοπισμό πιο εύκολο. Ωστόσο, οι πρώτοι ιχνηθέτες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα πίτουρα και τα πριονίδια.

Άλλες ταξινομήσεις κατηγοριοποιούν τους ιχνηθέτες σε φυσικούς, τεχνητούς και άλλους. Στην πρώτη κατηγορία υπάγονται ουσίες οι οποίες υφίστανται στο νερό σε μικρές συγκεντρώσεις ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις, με σκοπό την ιχνηθέτηση. Στους φυσικούς ιχνηθέτες ανήκουν οι χημικοί, οι οποίοι συμμετέχουν στη χημική σύσταση του νερού του υδρολογικού κύκλου και η χρήση τους

εξαρτάται από γεωλογικές και περιβαλλοντικές συνθήκες, καθώς και τα φυσικά ισότοπα, τα οποία είναι ισότοπα του C, H, και του O.

Αντίστοιχα, τα σταθερά ισότοπα Δευτέριο και Οξυγόνο δεκαοκτώ, χρησιμοποιούνται προκειμένου να προσδιοριστεί το σημείο τροφοδοσίας των υδροφόρων και οι πηγές, ενώ χρησιμοποιούνται σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και τη συμπίκνωση των υδρατμών. Εν συνεχεία, το ισότοπο Τρίτιο, χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του μέσου χρόνου παραμονής του υπογείου νερού (σε τάξη 30 ετών). Το ισότοπο Οξυγόνο δεκατέσσερα χαρακτηρίζεται από χρόνο υποδιαπλασιασμού 5730 έτη και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό χρόνου παραμονής πολύ παλαιών νερών (Καλλέργης 2001).

Η δεύτερη κατηγορία των τεχνητών ιχνηθετών περιλαμβάνει τους σπόρους λυκοπόδιου, τους χημικούς ιχνηθέτες (διαλύματα NaCl, KCl, και LiCl), τις φθορίζουσες χρωστικές (ουρανίνη, ροδαμίνη, θειοροδαμίνη, εωσίνη και tinopal), τους ανενεργούς (ωστόσο ενεργοποιούμενοι μέσω νετρονικής ενεργοποίησης – In, Mn, Br, J) και τέλος τους ραδιενεργούς ιχνηθέτες. Τέλος, οι άλλοι ιχνηθέτες είναι συνήθως απορρυπαντικά, βακτήρια και αρωματικές ουσίες.

1.5.7.3. Διαλυτότητα ιχνηθετών

Η διαλυτότητα ενός ιχνηθέτη αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα καθώς όταν κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα, προκαλεί καθίζηση ποσοστού του ιχνηθέτη και δημιουργία ιζήματος, διεργασία που εφόσον γίνεται επί μακροπρόθεσμη βάση, επηρεάζει την καμπύλη «συγκέντρωση – χρόνος» ενώ υπεισέρχεται σφάλμα στον προσδιορισμό. Κρίνεται σκόπιμο, κατά τη διάλυση του ιχνηθέτη, η συγκέντρωσή του να μην είναι πού μεγάλη, προκειμένου να αποφευχθεί ο αποχωρισμός ενός μέρους αυτού λόγω διαφορά πυκνότητας. Η προσθήκη αμμωνίας, οδηγεί σε αύξηση του PH, κάτι που εξυπηρετεί σαν λύση για το προαναφερθέν θέμα, ωστόσο η αύξηση του PH ενδέχεται να μειώσει τη διαλυτότητα του ιχνηθέτη (Καλλέργης 2001).

1.5.7.4. Ευστάθεια ιχνηθετών

Κάποια ενδεχόμενη απώλεια του ιχνηθέτη κατά τη διαδρομή του, προκαλεί σφάλμα στον προσδιορισμό, δεδομένου ότι ο λόγος της ποσότητας αυτού προς την ποσότητα του υπογείου νερού μέσα στο οποίο εισέρχεται, είναι πολύ μικρός. Ο επισφαλής προσδιορισμός έγκειται στο γεγονός ότι ο ιχνηθέτης αντιδρά συνεχώς με το περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα, διεργασίες όπως η προσρόφηση και ανταλλαγή ιόντων, είναι υπεύθυνες για την απώλεια του μεγαλύτερου μέρους του ιχνηθέτη. Οι προαναφερθείσες διεργασίες είναι αναστρέψιμες.

1.5.7.5. Ανίχνευση ιχνηθετών

Στο στάδιο ανίχνευσης του ιχνηθέτη, ουσιαστικά αναλύονται δείγματα νερού ή καταγράφεται συνεχώς η συγκέντρωση του ιχνηθέτη στο ρέον νερό, με τη δεύτερη να υπερτερεί σημαντικά έναντι της πρώτης (συνεχής και έγκαιρη αξιολόγηση αποτελεσμάτων, παρακολούθηση από τη στιγμή της άφιξης μέχρι τη στιγμή εξάντλησης του ιχνηθέτη και εφικτή τροποποίηση πειράματος επί τούτου).

Ο ιχνηθέτης ανιχνεύεται (ποιοτικός προσδιορισμός) αλλά και προσδιορίζεται σε δεδομένο όγκο νερού (ποσοτικό προσδιορισμός). Κάποιο είδος σημείου αναφοράς αποτελεί το όριο ανίχνευσης, το οποίο είναι η μικρότερη δυνατή ανιχνεύσιμη συγκέντρωση του ιχνηθέτη.

Διείσδυση στον υδροφορέα

Η ισοτοπική ταυτότητα των υπόγειων υδάτων ενός υδροφορέα καθορίζεται ως επί το πλείστον από την ισοτοπική ταυτότητα των εισερχόμενων σε αυτόν υδάτων. Η προέλευση των υδάτων αυτών είναι κυρίως μετεωρική (υετός).

Η ισοτοπική κλασμάτωση σε χρονικό επίπεδο διείσδυσης στον υδροφορέα συνοδεύει τις εξής βασικές διεργασίες:

- Εξάτμιση και συμπύκνωση του νερού των υποεπιφανειακών στρωμάτων εδάφους (εμπλουτισμός και απεμπλουτισμός σε βαρέα ισότοπα αντίστοιχα)
- Έκλυση αερίων CO₂ (εμπλουτισμός σε ¹⁸O) ή H₂S (εμπλουτισμός σε D)
- Ενυδάτωση πυριτικών ορυκτών (απεμπλουτισμός σε ¹⁸O και εμπλουτισμός σε D)
- Ανταλλαγή ¹⁸O μεταξύ νερού και πετρώματος (απεμπλουτισμός σε ¹⁸O).

Η ισοτοπική ισορροπία μεταξύ των υπόγειων υδάτων και των πετρωμάτων που τα περιβάλλουν είναι μία σπάνια περίπτωση, καθώς η ανταλλαγή ισότοπων μεταξύ τους εξελίσσεται με αργό ρυθμό. Για το λόγο αυτό, η ισοτοπική ταυτότητα που αποδίδεται στα ψυχρά υπόγεια ύδατα από την πηγή τροφοδοσίας τους, διατηρείται σε γεωλογικές κλίμακες χρόνου. Κατ' αυτόν τον τρόπο, λειτουργούν σαν συντηρητικοί ιχνηθέτες, καθιστώντας δυνατή την ανίχνευση της προέλευσης των υδάτων ενός υδροφορέα καθώς και την ποσόστωση των διαφόρων πηγών τροφοδοσίας τους, ενώ παράλληλα επιτρέπουν τη διερεύνηση διαφόρων διεργασιών, όπως υδροχημικές, αναμίξεις υπόγειων με επιφανειακά ύδατα, θαλάσσια διείσδυση και άλλες. Η ισοτοπική ταυτότητα του υδροφόρου – συλλέκτη μονιμοποιείται μόνο όταν αυτός απομονωθεί από την τροφοδοσία με μετεωρικά ύδατα.

Σχέση μεταξύ ¹⁸O και D

Οι τιμές των συγκετρώσεων ¹⁸O και D διατάσσονται κατά μήκος της Γραμμής Μετεωρικών Υδάτων (MWL) στο γράφημα δD=f(δ¹⁸O), καθώς οι μεταβολές τους φαίνεται να έχουν καλή συσχέτιση. Ο Craig πρότεινε τη μέση παγκόσμια τιμή της Γραμμής Μετεωρικών υδάτων :

$$\delta D = 8 \oplus \delta^{18}O + 10\text{‰} \text{ (GMWL)}$$

η οποία αντιπροσωπεύει όλα τα μετεωρικά ύδατα που υπόκεινται στη διεργασία της εξάτμισης.

Ο υδρολογικός κύκλος διέπεται, όσον αφορά στην ισοτοπική κλασμάτωση, από την εξάτμιση των επιφανειακών υδάτων των ωκεανών και η βαθμιαία απομάκρυνση των υδρατμών από την ατμόσφαιρα, υπό τη μορφή υετού, προς περιοχές με χαμηλότερες θερμοκρασίες (μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη) (Στρατικόπουλος 2007).

Η κλίση της Global Mean Water Level διαμορφώνεται από τη διαδικασία απομάκρυνσης υδρατμών από την ατμόσφαιρα, η οποία αποτελεί μια διεργασία κλασμάτωσης ισορροπίας.



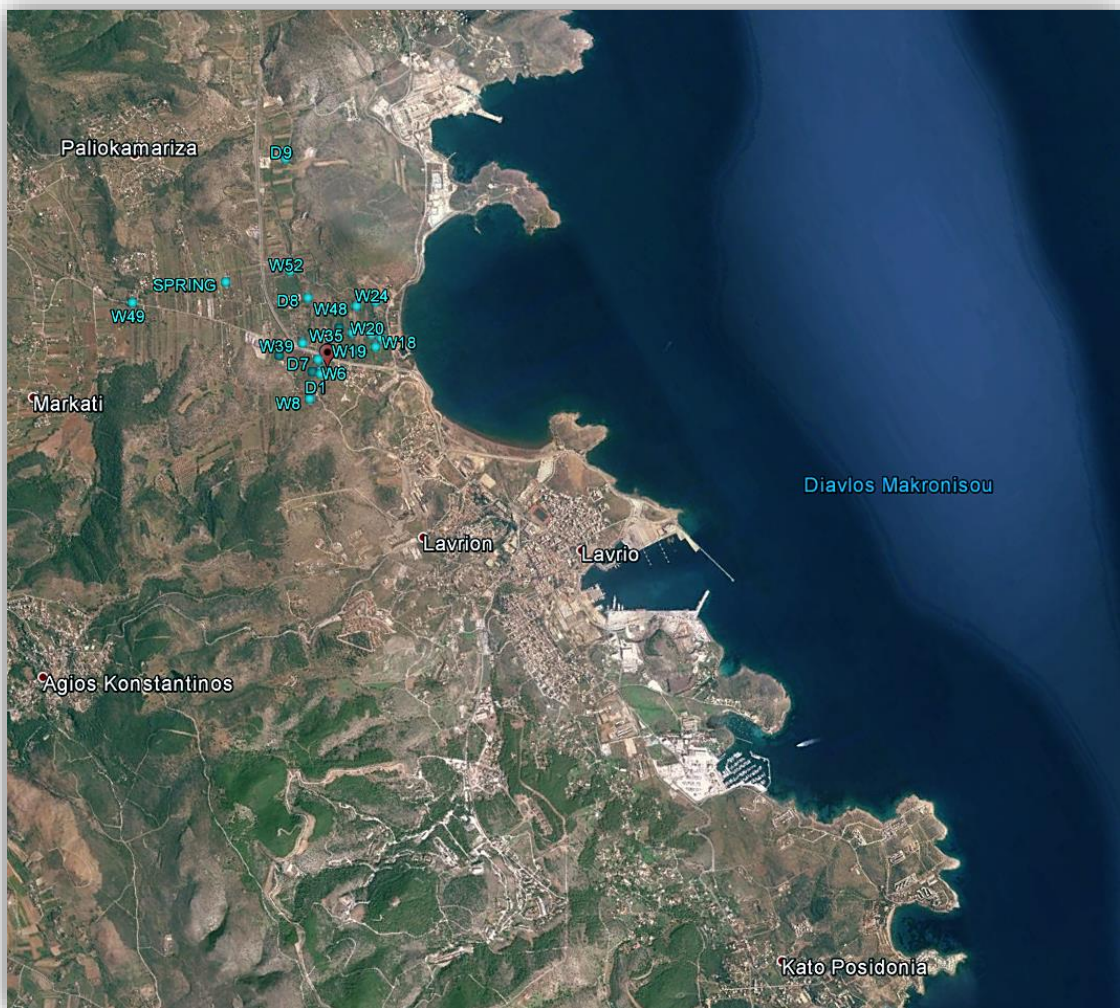
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

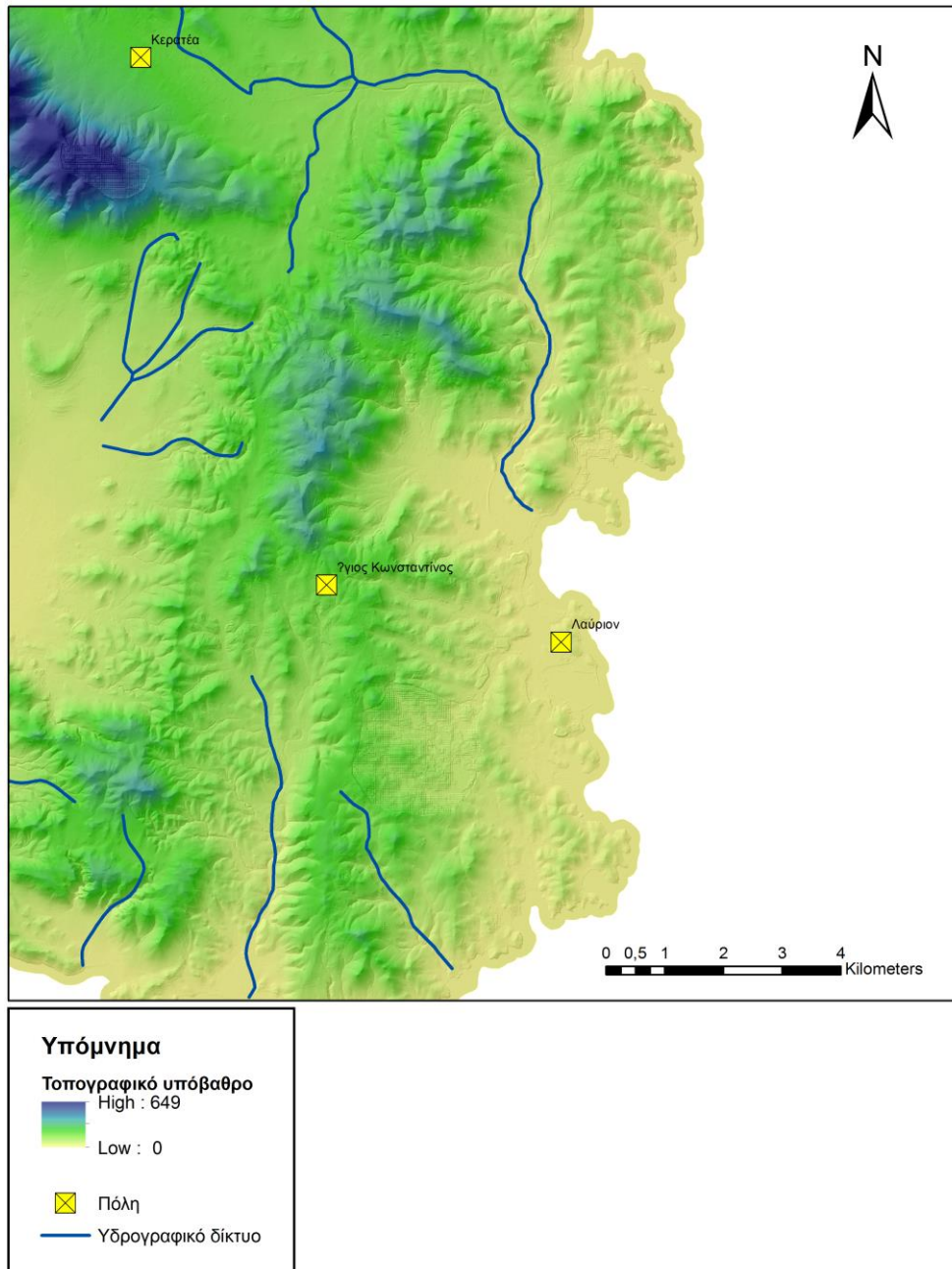
ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ | ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης της παρούσας διατριβής είναι η περιοχή του Θορικού που ανήκει στην ευρύτερη περιοχή της Λαυρεωτικής (**Χάρτης 2.1**). Η Λαυρεωτική αποτελεί μια περιοχή έκτασης 200 km², τοποθετείται ΝΑ της Αττικής και απέχει 55 km από την Αθήνα. Μορφολογικά χαρακτηρίζεται ως ημιορεινή, εμφανίζοντας το μεγαλύτερο υψόμετρο (372 m) στο σημείο Μεγάλο Ριμπάρι. Το τοπογραφικό υπόβαθρο της περιοχής μελέτης παρουσιάζεται στον **Χάρτη 2.2**. Στοιχεία όπως η ιστορία της περιοχής, το φυσικό κάλλος, η άμεση πρόσβασή της από Αθήνα καθώς και τα αξιοθέατα που διαθέτει, καθιστούν τη Λαυρεωτική έναν αναμφισβήτητα ενδιαφέροντα προορισμό.



Χάρτης 2. 1 Χάρτης ευρύτερης ζώνης της περιοχής Λαυρίου



Χάρτης 2. 2 Τοπογραφικός χάρτης και υδρογραφικού δικτύου περιοχής Λαυρίου

Υψίστης σημασίας στην περιοχή της Λαυρεωτικής αποτελεί το Τεχνολογικό – Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου (Τ.Π.Π.Λ.). Το Τ.Π.Π.Λ. ιδρύθηκε στο χώρο όπου υπήρχε η Γαλλική Εταιρεία (1992) με πρωτοβουλία του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στο οποίο και έχει παραχωρηθεί η χρήση για 100 έτη. Ο σκοπός ίδρυσής του είναι η βέλτιστη αξιοποίηση του επιστημονικού και τεχνολογικού υποβάθρου που χαρακτηρίζει το ΕΜΠ για την εξυπηρέτηση των αναγκών του σύγχρονου επιχειρηματικού τομέα. Πρόκειται για ένα μνημείο βιομηχανικής αρχαιολογίας και αρχιτεκτονικής, αποτελούμενο από 41 κτήρια – διατηρητέα μνημεία.

Η Ζώνη Οικιστικού Ελέγχου Λαυρεωτικής καταλαμβάνει έκταση 315.000 στρεμμάτων και αφορά την περιοχή της χερσονήσου της Λαυρεωτικής. Περιλαμβάνει 8 δήμους και κοινότητες (Καλυβίων - Θορικού, Κερατέας, Λαυρεωτικής, Αγ. Κωνσταντίνου, Αναβύσσου - Κουβαρά, Παλαιάς Φώκαιας και Σαρωνίδας). Η κυριότερη πόλη είναι το Λαύριο, γνωστό από την αρχαιότητα λόγω της μεταλλευτικής δραστηριότητας.

2.1. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Αρχικά, η περιοχή της Λαυρεωτικής προσέφερε στους Αρχαίους Έλληνες μεταλλεύματα για την παραγωγή αργύρου και μολύβδου, ενώ το ανασκαφικό έργο της Βέλγικης Αρχαιολογικής Σχολής και του αρχαιολόγου Β. Στάη, οδήγησε στην ανακάλυψη μιας βιομηχανικής πόλης 150.000 m², αποτελούμενη από οικισμούς, τείχη, στοές, φρεάτια, μεταλλευτικά πλυντήρια, δεξαμενές και άλλες λιμενικές εγκαταστάσεις (ΙΓΜΕ Λαύριο και Ευρύτερη περιοχή 2009).

Η βιομηχανική περιοχή του Θορικού, από τις παλαιότερες βιομηχανικές περιοχές της Ευρώπης, σηματοδοτεί την κυρίως μεταλλευτική πορεία της Λαυρεωτικής. Πρόκειται για ένα γενικά αναγνωρισμένο και αποδεκτό αρχαίο μεταλλευτικό κέντρο, στο οποίο κυριαρχούσε η οικονομική συνιστώσα συμβαδίζοντας όμως με τη θρησκευτική και καλλιτεχνική έκφραση, σύμφωνα με τα πρότυπα που επικρατούσαν εκείνη την εποχή. Χωρικά, τοποθετείται σε μια περιοχή που εκτείνεται από το λόφο Βελατούρι προς την πεδιάδα και ανατολικά προς τη θάλασσα (Κονοφάγος 1980).

Η μετέπειτα εξέλιξη της περιοχής της Λαυρεωτικής χαρακτηρίζεται από την παραγωγή αργυρούχου μολύβδου μέσω επεξεργασίας σκωριών και εκβολάδων και κατ' επέκταση τη δημιουργία της πρώτης μεταλλουργικής βιομηχανίας (1865) όλα υπό το πρίσμα της ιταλογαλλικής εταιρείας Roux – Serpieri – Eressynet C.A..Εν όψει του «Λαυρεωτικού ζητήματος» που προέκυψε, παραχωρήθηκαν τα δικαιώματα εκμετάλλευσης των αρχαίων μεταλλευτικών απορριμμάτων στην Ελληνική Εταιρεία Μεταλλουργείων Λαυρίου (1873) ενώ εκχωρήθηκαν τα δικαιώματα εκμετάλλευσης των μεταλλείων στην νέα εταιρεία του Ιταλού Ι.Β. Σερπιέρι, Compagnie Francaise (1875), η οποία και λειτούργησε έως και το 1982. Το προαναφερθέν Τεχνολογικό – Πολιτιστικό Πάρκο δημιουργήθηκε από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο όταν οι εγκαταστάσεις της Γαλλικής εταιρείας αγοράστηκαν από το ελληνικό δημόσιο (1992).

2.2. ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ

Η περιοχή της Λαυρεωτικής παρουσιάζει ενδιαφέρον λόγω των ιδιαίτερων φυσικών, αισθητικών και ιστορικών στοιχείων που τη χαρακτηρίζουν. Αναμφισβήτητα, η περιοχή της Λαυρεωτικής εμφανίζει προοπτική σημαντικής ανάπτυξης, χάρη στο λιμάνι της περιοχής αλλά και στην άμεση σύνδεσή της με τον Αερολιμένα Ελευθέριος Βενιζέλος. Ωστόσο, η περιοχή υφίσταται έντονες οικιστικές πιέσεις, οι φυσικοί πόροι υπόκεινται σε αλόγιστη

εκμετάλλευση, ο αστικός ιστός εξαπλώνεται τείνοντας να καταλάβει τον ευρύτερο εξωαστικό αυτό χώρο. Φυσικό επακόλουθο είναι να περιορίζονται οι φυσικοί πόροι και γενικότερα να υποβαθμίζεται το φυσικό περιβάλλον, με όλες τις συνακόλουθες επιπτώσεις.

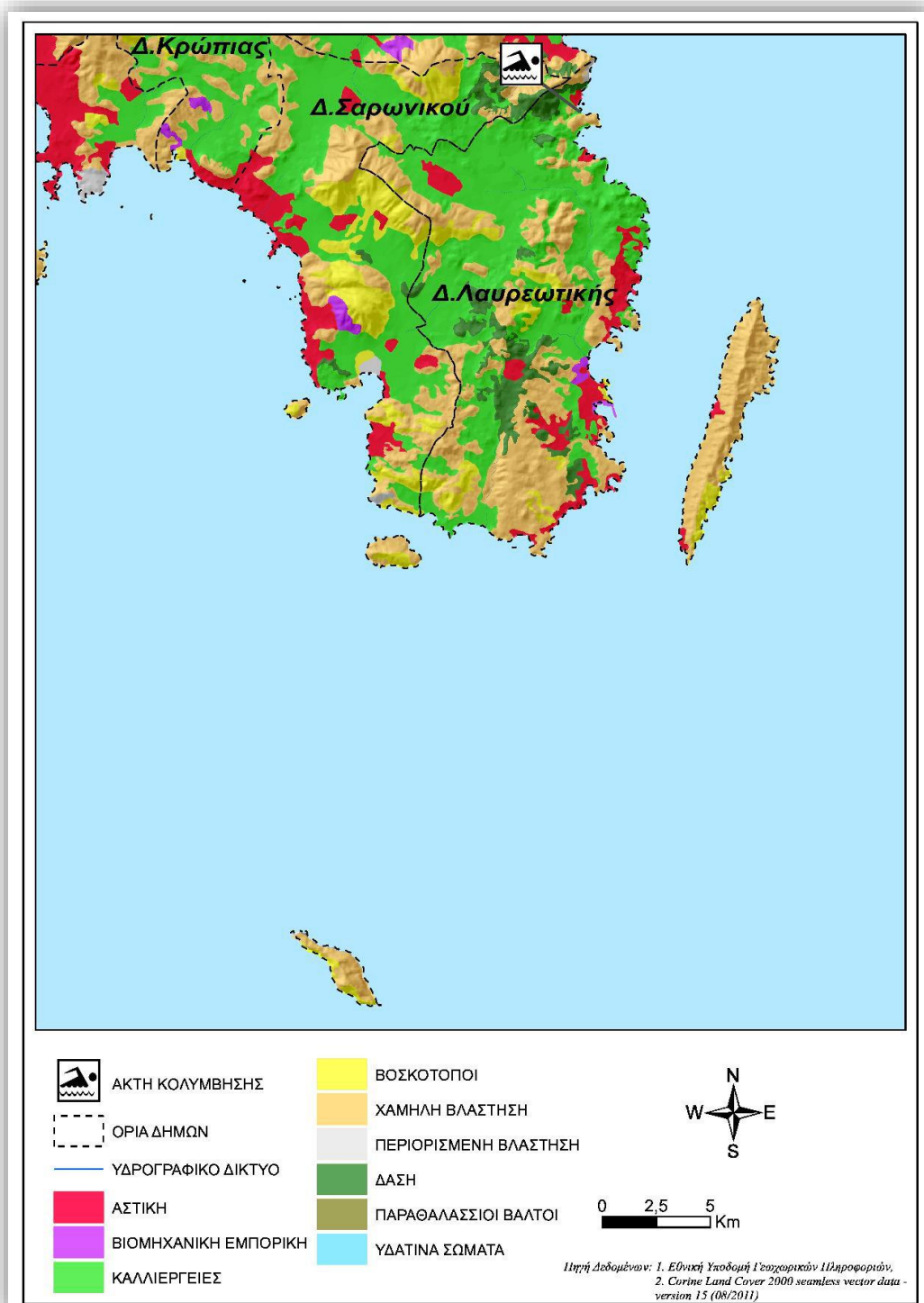
Η ευρύτερη περιοχή της Λαυρεωτικής Χερσονήσου, και ειδικότερα των Δήμων Καλυβιών Θορικού, Κερατέας, Λαυρεωτικής και των Κοινοτήτων Αγίου Κωνσταντίνου, Αναβύσσου, Κουβαρά, Παλαιάς Φώκαιας και Σαρωνίδας, αποτελεί εμπίπτουσα περιοχή στη Ζώνη Οικιστικού Ελέγχου του νομού Αττικής, για την οποία έχουν καθοριστεί οι χρήσεις γης.

Ο οικιστικός νόμος του 1983, ουσιαστικά με τα Γενικά Πολεοδομικά Σχέδια (ΓΠΣ) και τις Ζώνες Οικιστικού Ελέγχου (ΖΟΕ), καθίσταται εφικτός ο ενιαίος σχεδιασμός αστικού και εξωαστικού χώρου, όσον αφορά στον καθορισμό χρήσεων γης και όρων δόμησης, λαμβάνοντας υπ' όψη επιμέρους επιλογών χωροταξικού επιπέδου. Σε γενικές γραμμές, ο οικιστικός Νόμος του 1983 εισήγαγε ένα σαφές και συγκεκριμένο καθεστώς δόμησης που διέπει την εκάστοτε περιοχή, δυναμικά τροποποιήσιμο, σύμφωνα πάντα με τις γενικές αρχές του Ρυθμιστικού Σχεδίου Αθήνας και υπό το πρίσμα της βιώσιμης αειφόρου ανάπτυξης (Περδικάκη 2014).

Οι χρήσεις γης στη ευρύτερη περιοχή της Λαυρεωτικής Χερσονήσου, είναι κατά το πλείστο γεωργικές και αστικές, ενώ σε μικρότερο ποσοστό αφορούν στη βιομηχανία (Χάρτης 2.3). Προκειμένου να διασφαλιστεί η ιδιαίτερη υπόσταση της προκείμενης περιοχής, η ένταξή της στο πρόγραμμα «Σχεδιασμός του Εξωαστικού Χώρου και Προστασία Περιβάλλοντος» του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, ήταν απαραίτητη. Μέσω του σχεδιασμού αυτού, ο εξωαστικός χώρος οργανώθηκε μέσω της οριοθέτησης ζωνών που παρουσιάζουν προοπτική ανάπτυξης, αφενός καθορίζοντας ένα πλήρες δίκτυο παραγωγικών ζωνών και αφετέρου προστατεύοντας και διαφυλάσσοντας τις εναπομείναντες μεν, ζωτικής σημασίας δε, εκτάσεις.

Κάποιες γενικές κατευθύνσεις του σχεδιασμού εξωαστικού χώρου είναι οι ακόλουθες:

- Ο Έλεγχος και η Ρύθμιση στο χώρο των σημερινών τάσεων με τη δημιουργία οργανωμένων υποδοχέων κατοικίας για τη μελλοντική αύξηση του πληθυσμού για την επόμενη εικοσαετία.
- Η Ανάσχεση της διάσπαρτης εξάπλωσης ανεξέλεγκτων χρήσεων κατά μήκος των δρόμων και στις παρυφές των οικισμών.
- Η Επιλογή των κατάλληλων περιαστικών περιοχών για τη δυνατότητα εγκατάστασης ήπιων χρήσεων με χαμηλό συντελεστή δόμησης, όπως αθλητικές εγκαταστάσεις, αναψυκτήρια, εστιατόρια και χώροι κοινωνικής πρόνοιας.
- Η Χωροθέτηση των κατάλληλων Ζωνών γύρω από τους Οικισμούς, συνδεδεμένων με το δίκτυο μεγάλων αξόνων κυκλοφορίας, για την εγκατάσταση των συναφών, εξαρτημένων και ελκυσμένων από τις προωθητικές δραστηριότητες που θα αποτελέσουν τους πόλους ανάπτυξης κάθε περιοχής.
- Η Διασφάλιση της Γεωργικής Γης σαν οικολογικό απόθεμα των περιοχών και η ενίσχυση του Πρωτογενούς Τομέα.



Χάρτης 2. 3 Απεικόνιση χρήσεων γης Λαυρεωτικής (Εθνική Υποδομή Γεωγραφικών Πληροφοριών, Corine Land Cover 2000).

- Η Προβολή του πολιτιστικού πλούτου της περιοχής και των παραδοσιακών δραστηριοτήτων της.
- Η Προστασία και ανάδειξη των αξιόλογων στοιχείων του φυσικού και ιστορικού περιβάλλοντος.
- Η Διασφάλιση της κατασκευής των νέων έργων υποδομής, κατά τον πλέον οικονομικό και λειτουργικά αποδεκτό τρόπο, για την κάλυψη των αναγκών των κατοίκων, της παραγωγής, των τερματικών σταθμών των (χερσαίων, εναέριων και θαλάσσιων) αλλά και του συνόλου της Αττικής.

Σύμφωνα με τις μελέτες Ζωνών Οικιστικής Ανάπτυξης, υπάρχουν 3 γενικές κατηγορίες στις οποίες μπορούν να ομαδοποιηθούν οι ζώνες, αναλόγως τον προσανατολισμό τους όσον αφορά στη χρήση και στις δραστηριότητες που εξυπηρετούν (**Πίνακας 2.1**).

- Ζώνες αναπτυξιακές
Οικιστικές ζώνες προαστιακής ή παραθεριστικής κατοικίας
Ζώνες παραγωγικών δραστηριοτήτων και υπερτοπικών εξυπηρετήσεων.
- Ζώνες μέσης προστασίας και ήπιας ανάπτυξης
Προστασία και διατήρηση του εξωαστικού χαρακτήρα του χώρου σε συνδυασμό με τη δυνατότητα ανάπτυξης ήπιων δραστηριοτήτων, εναρμονισμένων με αυτόν το χαρακτήρα, με πολύ χαμηλές πυκνότητες και όρους δόμησης. Ζώνες γεωργικής γης.
- Ζώνες υψηλής προστασίας
Διαφύλαξη και προστασία των αρχαιολογικών και ιστορικών τόπων, των τοπίων ιδιαίτερου κάλλους, του περιαστικού πρασίνου, των παραρεμμάτιων περιοχών και των παραλιών και Διασφάλιση της λειτουργίας τους ως ελεύθερων χώρων που μπορούν να χρησιμοποιούνται από το κοινό.

Πιο συγκεκριμένα, στον πίνακα που ακολουθεί, αναγράφονται οι ζώνες, συμπεριλαμβανομένων των επιτρεπόμενων παρεμβάσεων, σύμφωνα με το ΦΕΚ125Δ/1998.

ΖΩΝΗ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΕΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ
Α-Περαστικό πράσινο	Υψηλής προστασίας	<ul style="list-style-type: none"> ✓ αναψυκτήρια και καθιστικά, εγκαταστάσεις πολιτιστικών εκδηλώσεων, ✓ υπαίθριες αθλητικές εγκαταστάσεις μικρής έκτασης με τα απαραίτητα για τη λειτουργία τους βοηθητικά κτίσματα(γραφεία, αποδυτήρια, ντους, W.C.) ✓ κατασκηνώσεις, οργανωμένες τουριστικές κατασκηνώσεις χωρίς οικισμούς και παιδικές κατασκηνώσεις χωρίς οικισμούς ✓ εγκαταστάσεις παραγωγής αιολικής ενέργειας ✓ εγκαταστάσεις μετεωρολογικών και γεωδυναμικών σταθμών
B1-Απολύτου Προστασίας Τοπίων/Αρχαιολογικών χώρων	Υψηλής προστασίας	<ul style="list-style-type: none"> ✓ απαγορεύεται κάθε δόμηση
B2-Μέση προστασία τοπίων και αρχαιολογικών χώρων	Μέσης προστασίας και ήπιας αναψυχής	<ul style="list-style-type: none"> ✓ κατοικία ✓ αγροτικές αποθήκες ✓ δημόσια και δημοτικά καθιστικά και αναψυκτήρια
B3-Προστασία και ήπια αναψυχή	Μέσης προστασίας και ήπιας αναψυχής	<ul style="list-style-type: none"> ✓ επιτρέπεται οι διαμορφώσεις εδάφους και οι κατασκευές εξοπλισμού υπαίθριας αναψυχής και χώροι υγιεινής
Γ-Γεωργική γη	Μέσης προστασίας και ήπιας αναψυχής	<ul style="list-style-type: none"> ✓ αγροτικές αποθήκες που εξυπηρετούν τη πρωτογενή παραγωγή ✓ κτηνοτροφικές και σταυλικές εγκαταστάσεις ✓ θερμοκήπια ✓ κατοικίες ✓ κατασκηνώσεις, οργανωμένες τουριστικές κατασκηνώσεις

		<p>χωρίς οικισμούς και παιδικές κατασκηνώσεις χωρίς οικισμούς</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ εγκαταστάσεις υδατοκαλλιεργειών ✓ εγκαταστάσεις παραγωγής αιολικής ενέργειας ✓ εγκαταστάσεις μετεωρολογικών και γεωδυναμικών σταθμών
Δ-Β' Κατοικίας	Αναπτυξιακές ζώνες	<ul style="list-style-type: none"> ✓ κατοικία ✓ εστιατόρια- αναψυκτήρια ✓ υπαίθριες αθλητικές εγκαταστάσεις με τα απαραίτητα για τη λειτουργία τους βοηθητικά κτίσματα(γραφεία, αποδυτήρια, ντους, W.C.) ✓ εγκαταστάσεις λουόμενων
Ε-Δεύτερης κατοικίας και τουριστικών εγκαταστάσεων	Αναπτυξιακές ζώνες	<ul style="list-style-type: none"> ✓ κατοικία ✓ εστιατόρια-αναψυκτήρια ✓ υπαίθριες αθλητικές εγκαταστάσεις με τα απαραίτητα για τη λειτουργία τους βοηθητικά κτίσματα(γραφεία, αποδυτήρια, ντους, W.C.) ✓ ξενοδοχεία, οργανωμένες τουριστικές κατασκηνώσεις και λοιπές τουριστικές εγκαταστάσεις ✓ χερσαίες και τουριστικές εγκαταστάσεις για την εξυπηρέτηση του ναυταθλητισμού
Z-Αναψυχή	Μέσης προστασίας και ήπιας αναψυχής	<ul style="list-style-type: none"> ✓ εστιατόρια, αναψυκτήρια, καφενεία, ζαχαροπλαστεία, ταβέρνες, κέντρα διασκέδασης ✓ πολιτιστικές εγκαταστάσεις ✓ αθλητικές εγκαταστάσεις ✓ εγκαταστάσεις υπαίθριας αναψυχής, θαλάσσιου αθλητισμού και χώροι εξυπηρέτησής τους

<p>Η-Παραλία</p>	<p>Υψηλής προστασίας</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ εγκαταστάσεις λουόμενων(αποδυτήρια, αναψυκτήρια, ντους, W.C., υπαίθρια καθιστικά, εγκαταστάσεις για θαλάσσια παιχνίδια ✓ χερσαίες και θαλάσσιες εγκαταστάσεις για την εξυπηρέτηση του ναυταθλητισμού
<p>I1-Βιοτεχνικών-βιομηχανικών εγκαταστάσεων</p>	<p>Αναπτυξιακές ζώνες</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ περιοχή βιομηχανικών-βιοτεχνικών εγκαταστάσεων όπου επιτρέπονται μη ιδιαίτερα οχλούσες επαγγελματικές εγκαταστάσεις
<p>I2-Βιοτεχνικών-βιομηχανικών εγκαταστάσεων και εγκαταστάσεων ΔΕΗ</p>	<p>Αναπτυξιακές ζώνες</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ περιοχή βιομηχανικών-βιοτεχνικών εγκαταστάσεων όπου επιτρέπονται μη ιδιαίτερα οχλούσες επαγγελματικές εγκαταστάσεις ✓ επιτρέπονται εγκαταστάσεις της ΔΕΗ

Πίνακας 2. 1 ΖΟΕ Λαυρεωτικής (Περδικάκη 2014).

Η Ζώνη Οικιστικού Ελέγχου Λαυρεωτικής περιλαμβάνει έκταση 315.000 στρεμμάτων και περιλαμβάνει 8 Δήμους – Κοινότητες, όπως προαναφέρθηκε. Το Λαύριο αποτελεί την κύρια πόλη της ευρύτερης Λαυρεωτικής.

Η ευρύτερη περιοχή της Λαυρεωτικής αποτελεί, τόσο από γεωλογική όσο και από κοιτασματολογική άποψη, μία πολύ ενδιαφέρουσα περιοχή του ελληνικού χώρου, της οποίας το ανάγλυφο χαρακτηρίζεται από ποικιλία λιθολογικών μορφών, τεκτονικών δομών και τύπων μεταλλοφορίας, καθιστώντας τη μια μοναδική περίπτωση. Πρόκειται ουσιαστικά για μια μικρογραφία ενός μεγάλου τμήματος της Αττικο-κυκλαδικής ζώνης.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

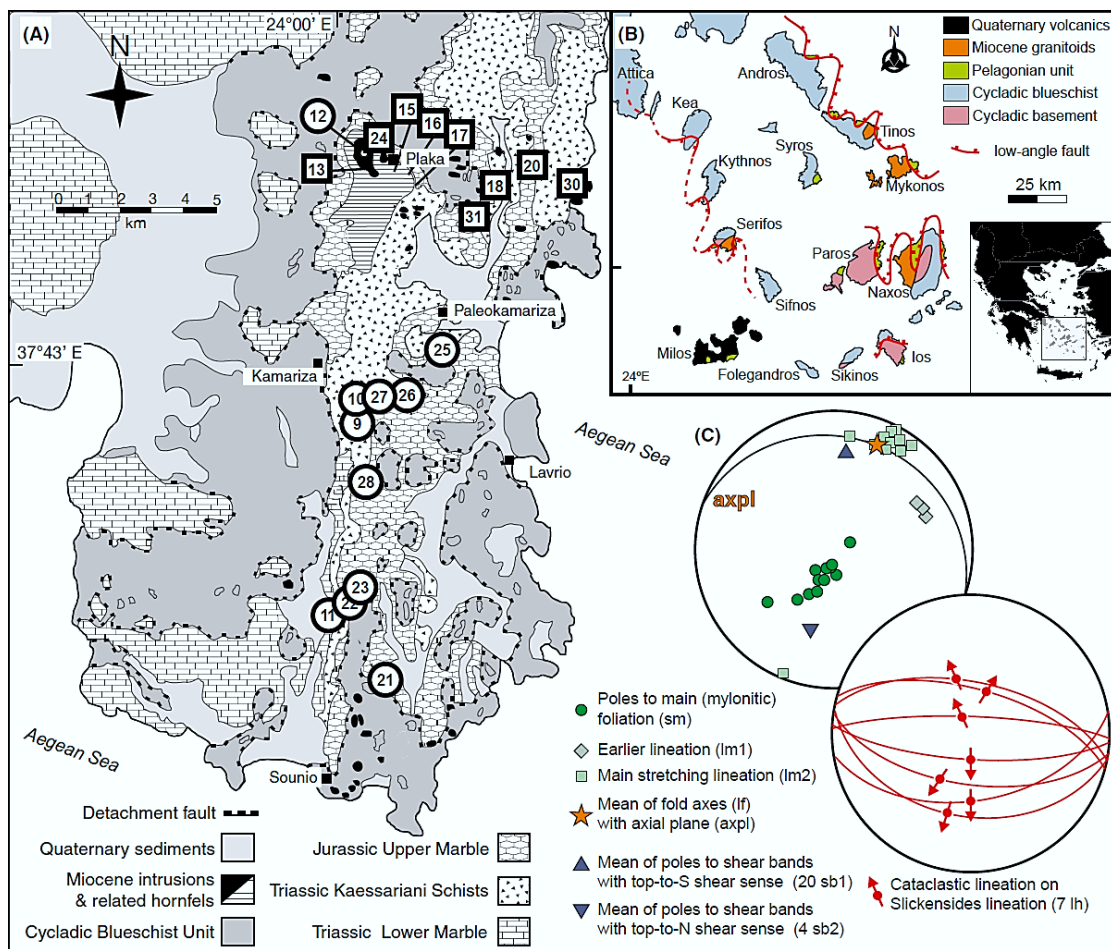
ΓΕΩΛΟΓΙΑ | ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΑ | ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ
ΣΤΟΙΧΕΙΑ

3. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

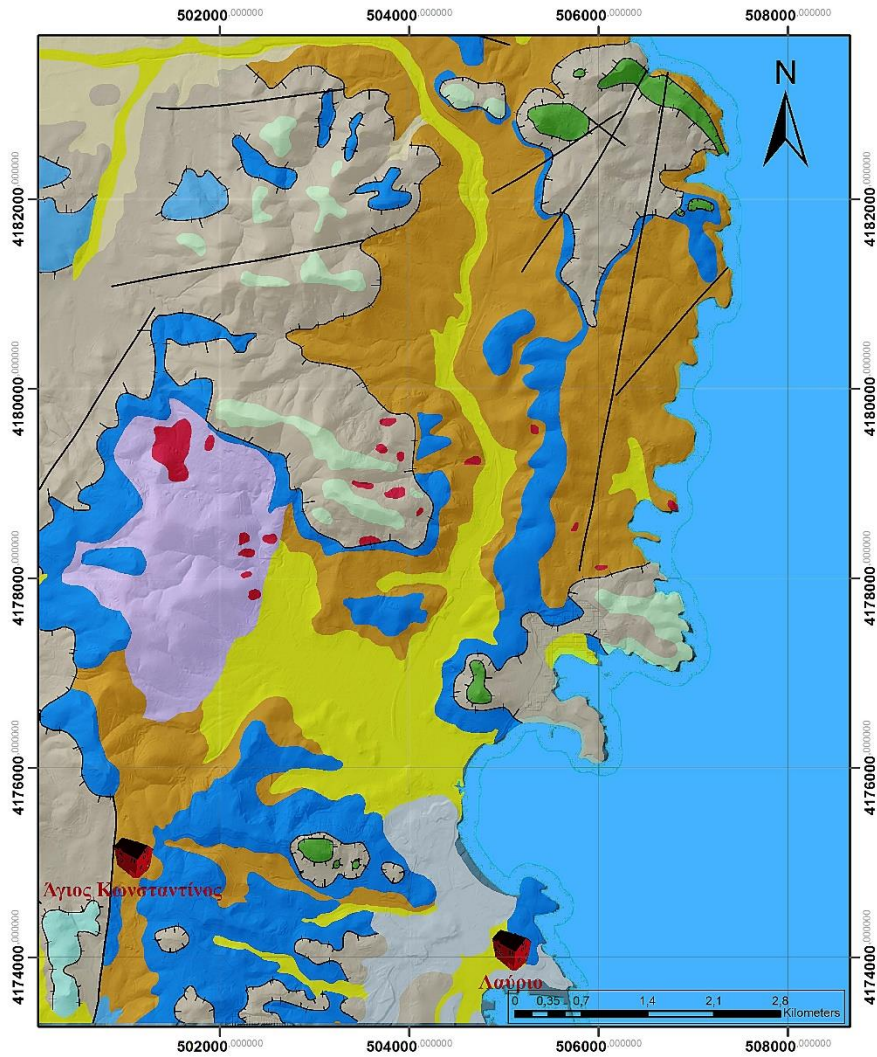
3.1. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Η δοθείσα περιοχή μελέτης αποτελείται από δύο γεωτεκτονικές ενότητες (Χάρτης 3.1 και 3.2):

- Την αυτόχθονη ενότητα Αττικής. Τη συγκεκριμένη ενότητα απαρτίζουν: το Κατώτερο Μάρμαρο, ο Κατώτερος Σχιστόλιθος (σχιστόλιθοι Καισαριανής ή Καμάριζας) και το Ανώτερο Μάρμαρο (Αντωνίου 2010).
- Το επωθημένο κάλυμμα ή ενότητα Λαυρίου, της οποίας η στρωματογραφική στήλη απαρτίζεται από ολισθόλιθους και τεκτονικές σφήνες με μεγάλη ποικιλία λιθολογιών όπως σερικιτικούς – χλωριτικούς σχιστόλιθους με κυανοσχιστολιθικού τύπου παραγενέσεις, εντός των οποίων εγκλείονται σώματα μαρμάρων και πρασινιτών (μεταβασάλτες και μεταγάβροι).

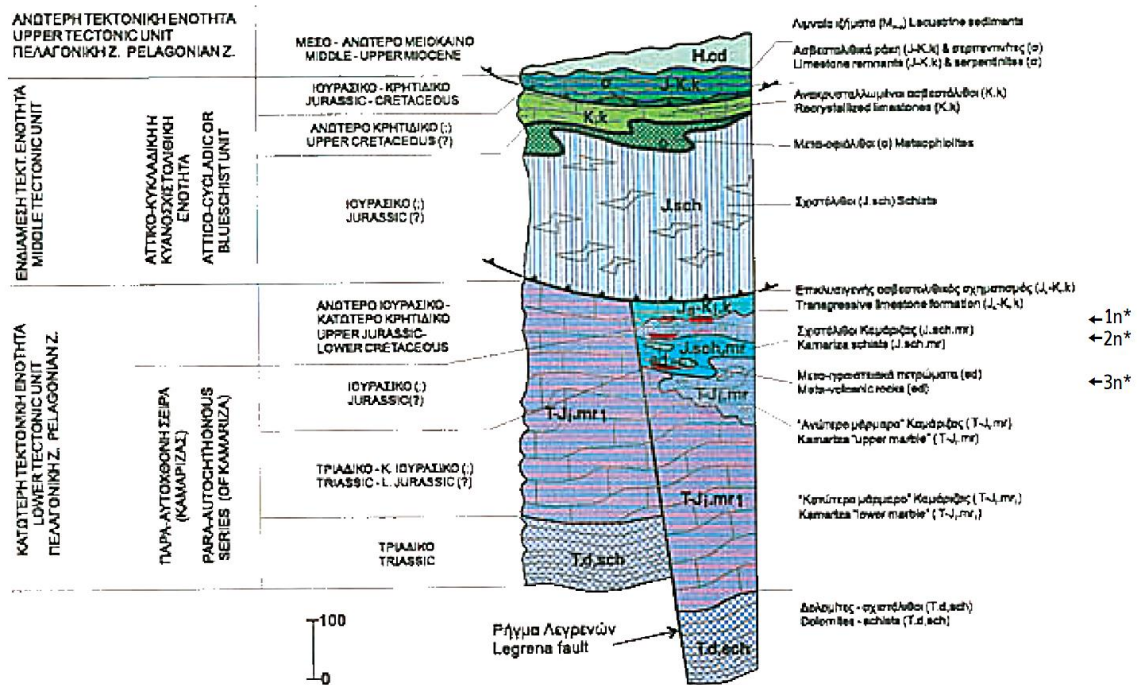


Χάρτης 3. 1 Γεωλογικός χάρτης Λαυρεωτικής (A). Γεωλογικός χάρτης Κυκλάδων (B) (Berger 2013).



Χάρτης 3. 2 Γεωλογικός χάρτης Λαυρεωτικής κατόπιν επεξεργασίας (Μ. Περδικάκη) των φύλλων Λαυρίου και Κορωπί πλάκα του γεωλογικού χάρτη της Ελλάδας κλίμακας 1:50.000 (ΙΓΜΕ, 1980, 2000).

Με κριτήριο την αυξανόμενη γεωλογική ηλικία σχηματισμού, η περιοχή της Λαυρεωτικής αποτελείται από τους ακόλουθους γεωλογικούς σχηματισμούς (Σχήμα 3.1) (ΙΓΜΕ 2009).



Σχήμα 3. 1 Στρωματογραφική στήλη (ΙΓΜΕ 2009).

- Ανώτερος Ασβεστόλιθος Πλάκας, Κρητιδικό – Κενομάνιο (πάχος 5-70 m). Λεπτοπλακώδης, λευκού χρώματος, μικριτικός ασβεστόλιθος με παρουσία Κενομάνιας ηλικίας, βενθικού τύπου μικροπανίδα
- Ανώτερος Σχιστόλιθος Πλάκας, Κρητιδικό (Πάχος 50-180 m). Σχιστοποιημένος φυλλίτης (χαλαζίας, σερίκιτης – μοσχοβίτης, χλωρίτης και οργανική ύλη), εντός του οποίου εγκλείονται σώματα μεταοφιολίθων (σερπεντινίτες, γάββροι, περιδοτίτες)
- Κατώτερος ασβεστόλιθος Πλάκας (Κρητιδικό). Λεπτοπλακώδης, μικριτικός ασβεστόλιθος.
- Μεταφαιστειοϊζηματογενής σειρά Πλάκας (πάχος 0-20 m). Σχηματισμός επιδοτίτη των μεταλλευτών του Λαυρίου.
- Ανώτερο Μάρμαρο Καμάριζας, Ιουρασικό, (πάχος 0-150 m)

Ενότητα ανώτερων μαρμάρων Υμηττού – Λαυρεωτική

Η ενότητα αυτή, σύμφωνα με τον Α. Φωτιάδη, χωρίζεται σε δύο τεκτονικές υποενότητες, την ανώτερη και την κατώτερη τεκτονική ενότητα. Η κατώτερη τεκτονική ενότητα ενώνεται με την ανώτερη μέσω του ρήγματος επώθησης που υφίσταται στην περιοχή (Εικόνες 3.1 και 3.2) Η πρώτη περιλαμβάνει ως επί το πλείστον κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους, αλλά και ασβεστολιθικούς σχιστόλιθους, με λεπτές στρώσεις οριζόντων σχιστόλιθου ανάμεσά τους. Χαρακτηρίζεται από έντονη

καρστικοποίηση, μικρές ζώνες μεταλλοφορίας, καθώς και πυκνό δίκτυο διακλάσεων. Η κατώτερη τεκτονική ενότητα χαρακτηρίζεται από την παρουσία κυρίως συμπαγών μαρμάρων, αραιό δίκτυο διακλάσεων, σχεδόν απουσία καρστικού δικτύου αγωγών και κατ' επέκταση κυκλοφορία νερού στο ανώτερο τμήμα της ενότητας.

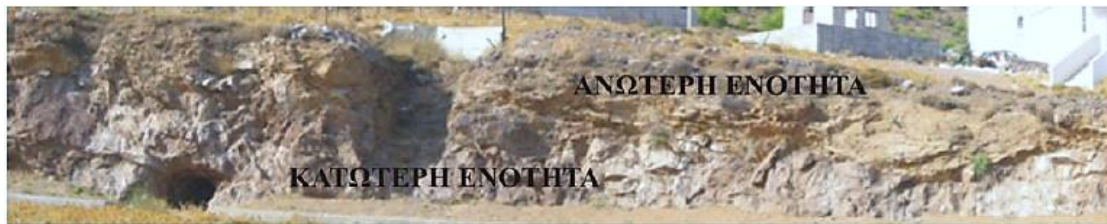


Εικόνα 3. 1 Χαρακτηριστικές γεωλογικές δομές της περιοχής έρευνας. Τεκτονική επαφή (επιφάνεια επώθησης) μεταξύ ενδιάμεσης τεκτονικής ενότητας (υπερκείμενο) που ονομάζεται και Φυλλιτικό ή Νεοελληνικό Κάλυμμα των ανώτερων μελών της Κατώτερης Τεκτονικής ενότητας (υποκείμενο).

Η ύπαρξη ενεργών καρστικών αγωγών κατακλυσμένων με νερό, αλλά και με συμπαγές αργιλικό υλικό σε διαφορετικά βάθη, μαρτυρούν την βαθμιαία ανάπτυξη του εν λόγω καρστικού συστήματος. Πρόκειται για έναν καρστικό σχηματισμό πάχους περίπου 30m, ο οποίος τείνει να βυθίζεται σε ήπιες κλίσεις προς ΒΑ διευθύνσεις και εντός αυτού αναπτύσσεται υπόγεια κυκλοφορία νερού (ΙΓΜΕ 2009, Λαύριο & ευρύτερη περιοχή).

Μεταμορφωμένο αλλόχθονο κάλυμμα

Πρόκειται για ένα σχηματισμό με ιδιαίζον λιθολογικό προφίλ, λόγω των ετερόκλητων πετρωμάτων που το συγκροτούν, τα οποία ωστόσο έχουν σαν κοινή συνιστώσα τη λιθολογική ανομοιογένεια στην κατακόρυφη διάσταση, χαρακτηριστικό που παραπέμπει σε ημιπερατό στρώμα. Το καρστικό σύστημα που υπόκειται του σχηματισμού αυτού, δέχεται το κατεισδύον από βροχόπτωση νερό.



Εικόνα 3. 2 Η χαρακτηριστική εμφάνιση του ρήγματος αποκόλλησης (detachment fault) στην Πλάκα. Εμφανή είναι τα σχιστολιθικά πετρώματα (hanging wall), το Ανώτερο Μάρμαρο (footwall), καθώς και η ερευνητική στοά (Πηλιχός, 2014).

Προσχώσεις

Το υλικό που υφίσταται στη λιθολογική αυτή ενότητα διαχωρίζεται σε αδρόκοκκο ή λεπτόκοκκο, αναλόγως της θέσης στην οποία βρίσκεται. Αδρόκοκκο υλικό απαντάται κατά μήκος των χειμάρρων, των κώνων κορημάτων μικρών διαστάσεων καθώς και των πλευρικών κορημάτων, ενώ λεπτόκοκκο υλικό υφίσταται στις υπό ανάπτυξη αποθέσεις εντός της πεδινής ζώνης. Αντίστοιχα διαφοροποιείται το περιβάλλον απόθεσης των υλικών αυτών σε ποταμοχειμαρρώδες με επικράτηση κροκαλών και λατυπών ανανθρακικού, χαλαζιτικού υλικού και πρασινοπετρωμάτων με αργιλικό έως αργιλοαμμώδες συνδετικό υλικό για την περίπτωση των αδρόκοκκων υλικών και σε θαλάσσιο με επικράτηση αμμώδους – αργιλοαμμώδους υλικού ασύνδετου έως ημισυνεκτικού. Οι συγκεκριμένες αποθέσεις χαρακτηρίζονται από μικρό πάχος, γεγονός, που περιορίζει τη δυνατότητα ανάπτυξης αξιόλογης υδροφορίας. Παρ' όλα αυτά, καθίστανται ικανές να τροφοδοτήσουν τις υποκείμενες ζώνες υδροφορίας.

Τεχνητές αποθέσεις

Οι αποθέσεις αυτές χαρακτηρίζονται από λεπτόκοκκα, αλλά και χονδρόκοκκα υλικά, με χαμηλή συνήθως ή καθόλου συνεκτικότητα. Δεν υφίσταται υπόγεια υδροφορία. Ωστόσο, οι αποθέσεις αυτές είναι ικανές να τροφοδοτήσουν σποραδικά τους υποκείμενους υδροφόρους.

3.2. ΥΠΟΓΕΙΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ – ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΑ ΠΕΔΙΝΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ Λ. ΘΟΡΙΚΟΥ

Οι υδρογεωλογικές συνθήκες της Λαυρεωτικής διαμορφώνονται ανάλογα με τους σχηματισμούς και το τεκτονισμό κάθε τοπικής ενότητας.

Ο κύριος υδροφόρος αναπτύσσεται στην αυτόχθονη ενότητα, στο ανώτερο και κατώτερο μάρμαρο. Απαντώνται δύο υδροφόροι ορίζοντες οι οποίοι χωρίζονται από τους σχιστόλιθους Καμάρizas. Πρόκειται για ένα σύστημα έντονα κατακερματισμένο και καρστικοποιημένο, με μεγάλη υδροπερατότητα (Περδικάκη, 2014).

Η διαφοροποίηση της λιθολογίας στην περιοχή μελέτης συνεπάγεται και επιμέρους υδρογεωλογικές ενότητες. Πιο συγκεκριμένα, οι τεταρτογενείς αποθέσεις αποτελούν ελεύθερο υδροφόρο γεωλογικό σχηματισμό, διαθέσιμο για άντληση από τον τοπικό πληθυσμό. Η ενότητα του ανώτερου μαρμάρου στην περιοχή τροφοδοτεί πλευρικά τον εν λόγω αλλουβιακό υδροφορέα, κάτι που προκύπτει και από την κατανομή του πιεζομετρικού φορτίου. Περιστασιακά, ο αλλουβιακός υδροφόρος τροφοδοτείται από χειμάρρους και στραγίζει προς τη θάλασσα, όπως προκύπτει από τη διεύθυνση ροής που παρατηρείται, με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ (Χάρτης 3.3).

Το κατώτερο μάρμαρο εμφανίζεται σε ευρεία κλίμακα δυτικά του Λαυρίου, συμπεριλαμβάνοντας και την παράκτια ζώνη, στο νοτιοδυτικό Λαύριο και νότια της Καμάριζας. Το νερό που κατεισδύει στο σχηματιζόμενο καρστικό υδροφορέα, απορρέει πλευρικά προς τις τεταρτογενείς αποθέσεις ή εκφορτίζεται υπογείως προς τη θάλασσα, δημιουργώντας υποθαλάσσιες πηγές. Το νερό του καρστικού υδροφόρου αντλείται μέσω γεωτρήσεων για την άρδευση γεωργικών εκτάσεων (Κουμαντάκης, 2000) καθώς και κοινόχρηστων δημοτικών χώρων (πάρκα, σχολεία) του Δ. Λαυρεωτικής.

Οι σχιστόλιθοι και το φυλλιτικό κάλυμμα αποτελούν τις αδιαπέρατες ενότητες του εξεταζόμενου υδροσυστήματος, ενώ σε συγκεκριμένα τμήματά τους αναπτύσσονται συνθήκες που ευνοούν την επιφανειακή απορροή, με τη δημιουργία υδρογραφικού δικτύου, δένδροειδούς μορφής (Van Liefferinge et al. 2013).

Στη λεκάνη του Θορικού και σε κάποιες εκτάσεις της λεκάνης του Λαυρίου, αναπτύσσονται αλλουβιακοί, ελεύθεροι υδροφορείς στις τεταρτογενείς (αλλουβιακές) αποθέσεις (Κουμαντάκης, 2000). Οι υδροφόροι αυτοί χαρακτηρίζονται από μικρή υδραυλική αγωγιμότητα και περιορισμένα υδραυλικά χαρακτηριστικά, αφού συνιστώνται από αποθέσεις μικρής κοκκομετρίας. Στο Θορικό, το αδιαπέρατο δάπεδο του αλλουβιακού υδροφόρου είναι ο σχιστόλιθος Καισαριανής (της αυτόχθονης ενότητας), ενώ στο Λαύριο το δάπεδο αποτελείται από φυλλίτες και σχιστόλιθους του Φυλλιτικού καλύμματος. Οι δύο κύριες πηγές τροφοδοσίας είναι τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, μέσω της κατείσδυσης και η πλευρική τροφοδοσία από τους καρστικούς υδροφόρους των μαρμάρων και από την υδροφορία που αναπτύσσεται στους σχιστόλιθους. Στους αλλουβιακούς υδροφόρους έχουν κατασκευαστεί αβαθή πηγάδια, που χρησιμοποιούνται για άρδευση μικρών γεωργικών μονάδων.

Στη Λαυρεωτική, λόγω των υπεραντλήσεων και της χαμηλής τροφοδοσίας από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, αλλά και εξαιτίας των ιδιαίτερων γεωτεκτονικών συνθηκών στην περιοχή, παρατηρείται διείδυση της θάλασσας στο παράκτιο υδροφορέα και μάλιστα με αυξανόμενο ρυθμό.

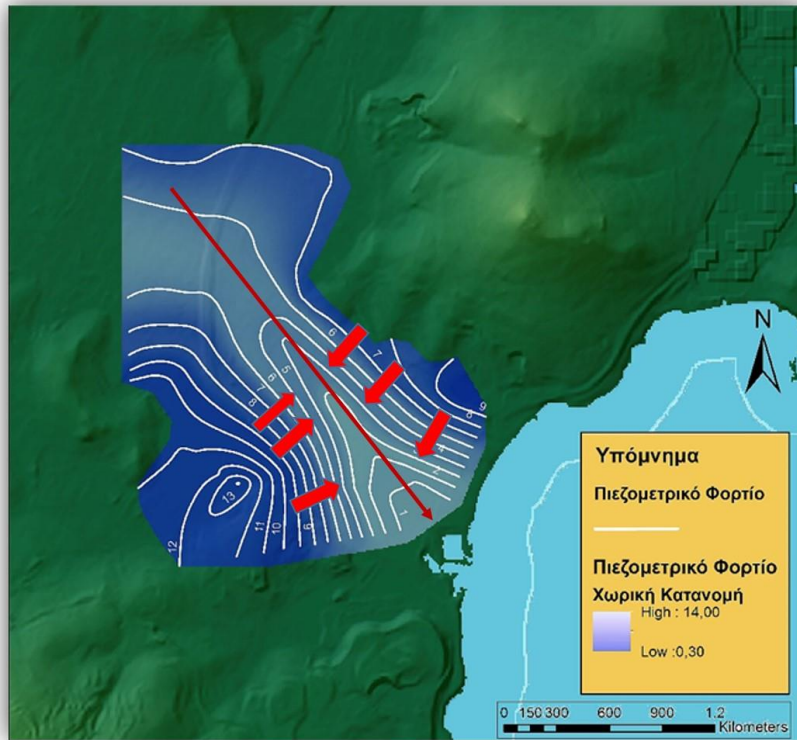
Ο ελεύθερος αλλουβιακός υδροφόρος, μέρος αυτού του παράκτιου συστήματος, εμπλουτίζεται από τη διήθηση των εποχιακών χειμάρρων που σχηματίζονται στον υδροκρίτη του Θορικού, καθώς επίσης και από τη πλευρική τροφοδοσία υπόγειου

νερού, που προέρχεται από το καρστικό υδροφόρο των μαρμάρων της περιοχής έρευνας.

Το Δεκέμβριο 2014, πραγματοποιήθηκαν σταθμημετρήσεις από τη Μάρθα Περδικάκη, προκειμένου να διαπιστωθεί το καθεστώς πιεζομετρίας στην περιοχή έρευνας. Στον **Πίνακα 3.1**, παρατίθενται οι αντίστοιχες μετρήσεις. Στον πιεζομετρικό **Χάρτη 3.3**, απεικονίζεται η πιεζομετρία της περιοχής.

ΔΕΙΓΜΑ	ΒΑΘΟΣ ΣΤΑΘΜΗΣ	ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ
W1	2.85	11.86
W3	3.2	7.18
W4	2.85	11.21
W6	2.6	14.1
W8	6.4	11.74
W10	4.25	10.68
W11	5.33	7.19
W18	1.1	0.55
W19	1	0.78
W20	1.25	1.87
W24	1.54	9.9
W26	7.75	6.94
W30	4.23	3.77
W31	1.5	1.71
W32	1.4	3.55
W35	1.8	2.62
W36	2	2.55
W37	3.1	2.22
W39	3.2	5.7
W42	6.2	5.33
U10	6.33	6.24

Πίνακας 3. 1 Στάθμες - Πιεζομετρικά φορτία (Περδικάκη 2014)



Χάρτης 3. 3 Κατανομή πιεζομετρικού φορτίου, περίοδοι Μαΐου περιοχής μελέτης (Περδικάκη 2014)

Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τη μορφή των ισοπιεζομετρικών καμπυλών, παρατηρείται τροφοδοσία του υδροφόρου των προσχώσεων από το Ανώτερο Μάρμαρο, ενώ βάσει της διεύθυνσης των γραμμών ροής διαφαίνεται η πλευρική τροφοδοσία από το Ανώτερο Μάρμαρο και η γενικότερη διεύθυνσή της (BA-ΝΔ και ΝΔ-BA). Ο υδροφόρος αποστραγγίζεται προς τη θάλασσα κατά κύριο λόγο, όπως προκύπτει από τη συγκλίνουσα ροή που παρατηρείται, με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ (Περδικάκη 2014).

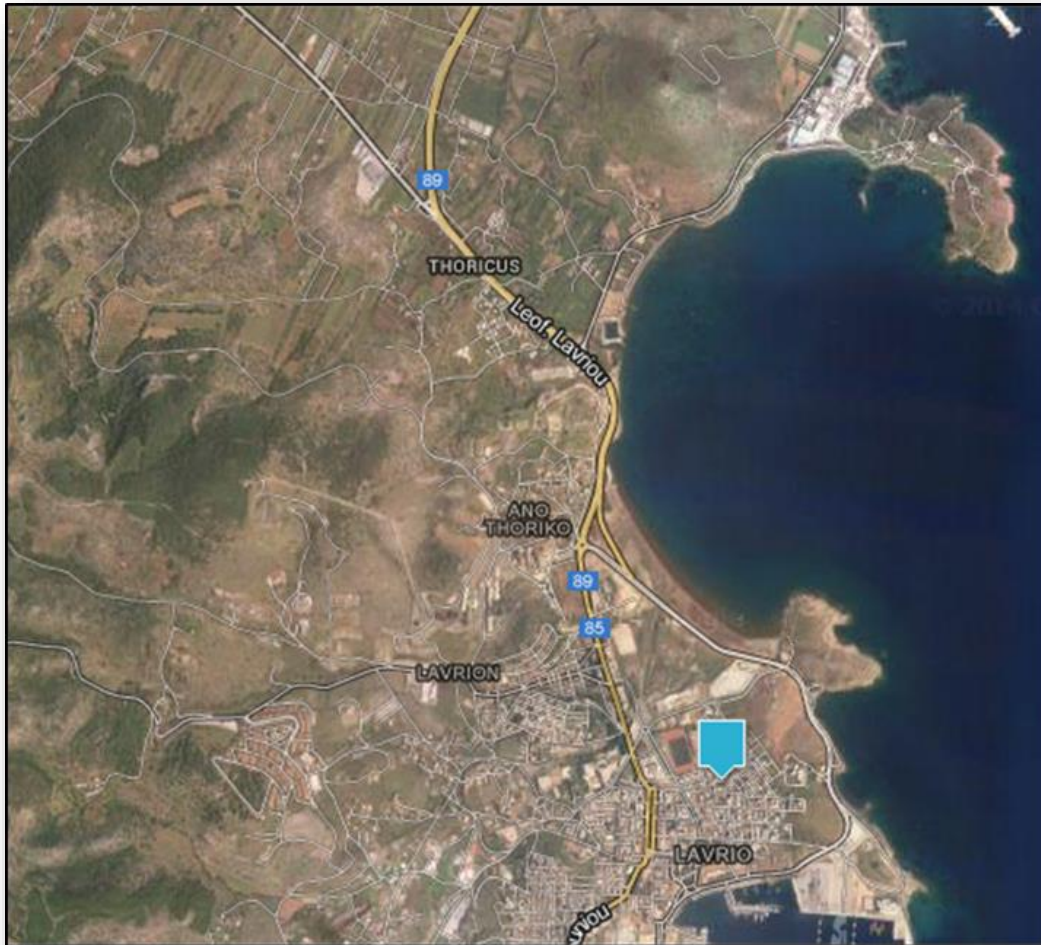
Σύμφωνα με το χάρτη, δεν παρατηρείται αναστροφή της υδραυλικής κλίσης, γεγονός που υποδηλώνει ότι πρόκειται για τυπική περίπτωση παθητικής θαλάσσιας διείσδυσης σε φρεάτιο υδροφορέα.

3.3. ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Η περιοχή έρευνας, αποτελεί μία τυπική πεδινή μεσογειακή περιοχή, με γενικά ξηρές και θερμές θερινές περιόδους και υγρές και ψυχρές χειμερινές περιόδους.

Στην περιοχή έρευνας λειτουργεί μετεωρολογικός σταθμός του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και τα πρόσφατα (2009 έως σήμερα) βροχομετρικά δεδομένα συλλέχθηκαν από τη διαδικτυακή σελίδα, της εν λόγω υπηρεσίας (www.meteo.gr). Ο συγκεκριμένος σταθμός χρησιμοποιήθηκε λόγω της εγγύτητας στη περιοχή έρευνας

(Χάρτης 3.4). Επίσης χρησιμοποιήθηκαν βροχομετρικά δεδομένα από το βροχομετρικό σταθμό της ΔΕΗ, για την περίοδο 1970-1978.



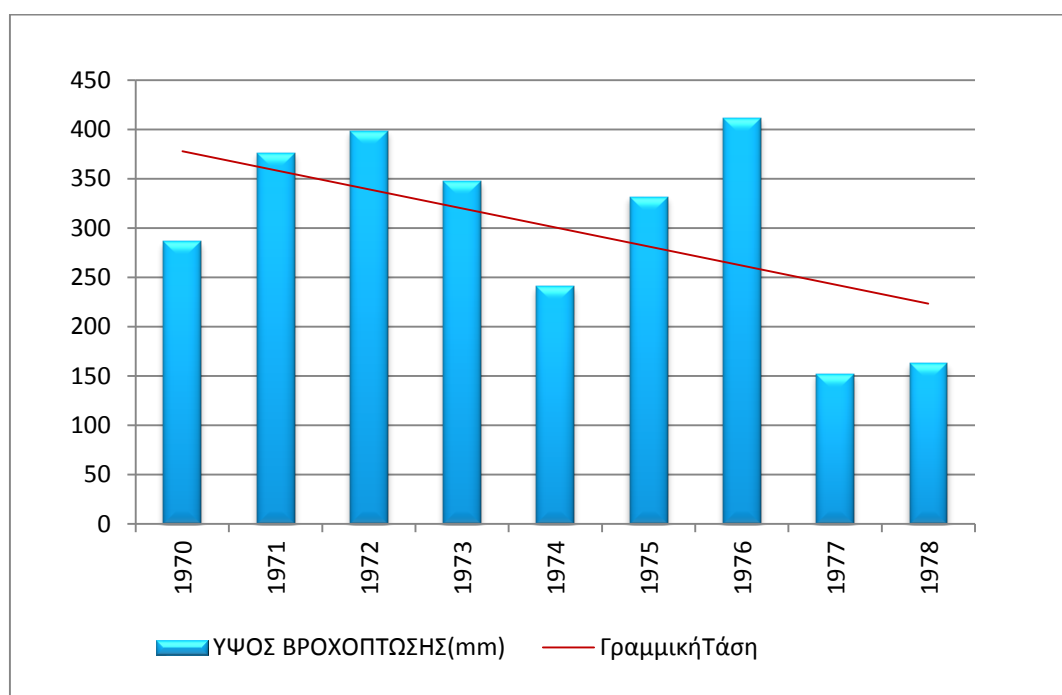
Χάρτης 3. 4 Μετεωρολογικός Σταθμός Λαυρίου (www.meteo.gr)

Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται τα διαθέσιμα δεδομένα από το σταθμό της ΔΕΗ του Λαυρίου για τη περίοδο 1970-1978. Σύμφωνα με αυτά, το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης ανέρχεται στα 300,61mm. Οι βροχοπτώσεις παρουσιάζουν υστέρηση κατά τους μήνες Μάιο-Σεπτέμβριο, με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται έντονα προβλήματα διαθεσιμότητας αποθεμάτων υπόγειου νερού κατά τους θερινούς μήνες,

Πίνακας 3. 2 Ύψη βροχής (mm) καταγεγραμμένα στο βροχομετρικό σταθμό Λαυρίου για την περίοδο 1970-1978.

ΜΗΝΑΣ	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	Μ.Ο. ¹
ΙΑΝ	39.80	67.50	95.80	95.90	30.30	27.80	51.70,	28.50	0.00	48.20
ΦΕΒ	35.80	107.20	64.20	75.40	89.00	28.60	40.90	9.40	0.00	50.06
ΜΑΡ	17.20	39.60	16.00	56.60	45.90	25.60	29.30	15.30	0.00	27.28
ΑΠΡ	1.20	4.40	34.80	19.20	5.00	9.70	83.40	25.80	0.00	20.39
ΜΑΙ	22.40	0.00	5.20	0.00	7.00	15.10	11.30	0.00	11.20	8.02
ΙΟΥΝ	2.00	3.00	0.00	0.00	3.50	15.00	11.00	0.00	0.00	3.83
ΙΟΥΛ	6.00	3.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.11
ΑΥΓ	0.00	0.00	14.20	0.00	0.00	7.00	6.60	0.00	0.00	3.09
ΣΕΠ	3.20	0.00	0.80	0.00	2.00	0.00	12.30	12.70	43.60	8.29
ΟΚΤ	54.20	15.20	104.20	44.20	5.00	18.80	100.00	7.30	81.50	47.82
ΝΟΕ	8.00	49.90	33.20	36.20	34.10	46.20	65.80	52.80	26.00	39.13
ΔΕΚ	96.45	86.20	19.80	20.00	19.00	137.40	50.80	0.00	0.00	47.74
ΣΥΝΟΛΟ²	286.25	376.00	398.20	347.50	240.80	331.20	411.40	151.80	162.30	

¹Μέσος όρος μηνιαίας βροχόπτωσης, ²Συνολική βροχόπτωση ανά έτος



Σχήμα 3. 2 Διακύμανση της ετήσιας βροχόπτωσης στο βροχομετρικό σταθμό Λαυρίου (ΔΕΗ) για την περίοδο 1970-1978.

Στο **Σχήμα 3.2** παρουσιάζεται η διακύμανση της ετήσιας βροχόπτωσης του βροχομετρικού σταθμού Λαυρίου για την περίοδο 1970-1978. Λαμβάνοντας υπόψη τη γραμμή τάσης, τη συνολική περίοδο παρατηρείται μια πτωτική τάση του συνολικού ετήσιου ύψους ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων της τάξης των 150 mm. Αυτή η πτώση στο μέσο ύψος βροχόπτωσης θεωρείται μεγάλη για το διάστημα των εννέα χρόνων που έγιναν οι μετρήσεις. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, το γεγονός αυτό

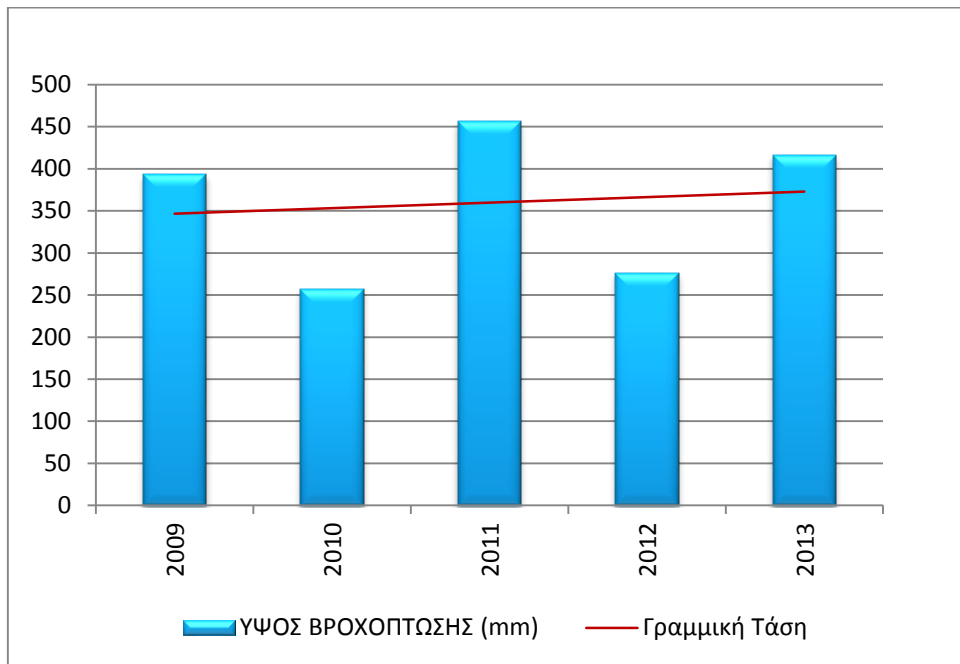
οφείλεται κυρίως στη μεγάλη μείωση της βροχόπτωσης κατά τα έτη 1977, 1978 (Περδικάκη, 2014).

Στον **Πίνακα 3.3** παρουσιάζονται τα δεδομένα βροχοπτώσεων του μετεωρολογικού σταθμού του Λαυρίου, για τα έτη 2009-2013. Για την περίοδο αυτή, το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης κυμαίνεται από τα 250 mm έως τα 450 mm, με μέση τιμή τα 360mm ανά έτος.

Πίνακας 3.3 Ύψη ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (mm) καταγεγραμμένα στο βροχομετρικό σταθμό Λαυρίου για την περίοδο 2009-2013.

ΜΗΝΑΣ	2009	2010	2011	2012	2013	Μ.Ο. ¹
ΙΑΝ	67.30	77.80	75.40	25.60	66.60	62.54
ΦΕΒ	42.80	37.80	182.80	54.80	70.20	77.68
ΜΑΡ	66.00	8.00	39.60	12.20	60.10	37.18
ΑΠΡ	45.20	2.40	63.20	23.20	3.00	27.40
ΜΑΙ	2.00	4.80	8.80	7.40	2.00	5.00
ΙΟΥΝ	0.00	9.40	1.60	0.00	4.80	3.16
ΙΟΥΛ	0.20	0.20	0.00	0.00	0.00	0.08
ΑΥΓ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ΣΕΠ	16.00	3.20	18.60	0.00	0.00	7.56
ΟΚΤ	47.20	78.80	29.20	19.40	24.40	39.80
ΝΟΕ	38.20	9.60	0.80	42.20	106.20	39.40
ΔΕΚ	68.20	25.20	36.60	91.40	79.20	60.12
ΣΥΝΟΛΟ²	393.10	257.20	456.60	276.20	416.50	

¹Μέσος όρος μηνιαίας βροχόπτωσης, ²Συνολική βροχόπτωση ανά έτος



Σχήμα 3.3 Διακύμανση της ετήσιας βροχόπτωσης στο βροχομετρικό σταθμό Λαυρίου για την περίοδο 2009-2013.

Στο παραπάνω σχήμα (**Σχήμα 3.3**) φαίνεται η κατανομή της ετήσιας βροχόπτωσης για τα έτη 2009-2013. Από τη γραμμική τάση διακρίνεται η σχετική αυξητική τάση του ύψους βροχόπτωσης, της τάξης των 60 mm στη διάρκεια των 5 ετών, αυτής της χρονικής περιόδου.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ Υ.Ν.

ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ | ΙΟΝΤΙΚΟΙ ΛΟΓΟΙ | ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ | ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΟΙ ΧΑΡΤΕΣ & ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

4. ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το ορυκτολογικό υπόβαθρο μιας περιοχής είναι παράγοντας, άρρηκτα συνδεδεμένος με τη χημική σύσταση του νερού που έρχεται σε επαφή με τους γεωλογικούς σχηματισμούς που τη χαρακτηρίζουν. Η ποιότητα νερού σχετίζεται με ένα σύνολο παραγόντων, οι οποίοι την καθορίζουν και κατανέμονται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες (Σούλιος, 2006):

- Φυσικά χαρακτηριστικά
- Χημικά χαρακτηριστικά
- Ειδικές παράμετροι
- Βιολογικά χαρακτηριστικά

Υποβάθμιση της ποιότητας του νερού επέρχεται από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες, φυσικές διεργασίες αλλά από την ανάμιξη διαφορετικής σύστασης ή/και ποιότητας νερών.

4.1.1. Φυσικά χαρακτηριστικά

Τα κυριότερα φυσικά χαρακτηριστικά είναι το χρώμα, η οσμή, η θολότητα, η θερμοκρασία (Τ), η ηλεκτρική αγωγιμότητα (E.C.), το σύνολο των διαλυμένων στερεών (TDS), η τιμή του συντελεστή ηλεκτρικής αγωγιμότητας συνδέεται με το σύνολο των διαλυμένων ουσιών και αιωρούμενων (TSS) στερεών (σχετίζονται με τη θολότητα, το χρώμα, κ.α.).

Η συνήθης διακύμανση της θερμοκρασίας του υπόγειου νερού είναι από 10°C έως 20°C, ενώ η αντίστοιχη εποχική διακύμανση των πηγών (κυρίως των καρστικών) είναι συνήθως 4 – 5°C. Στις περισσότερες περιπτώσεις των υπόγειων νερών, η ηλεκτρική αγωγιμότητα λαμβάνει τιμές μεταξύ 300 μS/cm και 700 μS/cm. Τα υφάλμυρα νερά έχουν ηλεκτρική αγωγιμότητα συνήθως άνω των 1500 μS/cm έως και 3.000 μS/cm, ενώ στα αλμυρά νερά η τιμή υπερβαίνει τις 3000 μS/cm (το θαλασσινό νερό έχει κατά μέσο όρο 34.000 μS/cm), ενώ κάποια παλιά υπεραλμυρά νερά, έχουν τιμές πάνω από 100.000 μS/cm (Σούλιος, 2006).

4.1.2. Χημικά χαρακτηριστικά

Διακρίνονται οι κατηγορίες (Σούλιος, 2006):

- Κύρια ιόντα (Ca, Mg, κτλ.)
- Δευτερεύοντα συστατικά (Al, NH₄, Br, Cu, Fe, NO₂, κτλ.)
- Ολιγοσυστατικά (Sb, Ba, Cr, κτλ.)
- Ιχνοστοιχεία (Be, Bi, Sn, Hg, κτλ.)
- Ανόργανα σε μη ιοντική μορφή (κυρίως SiO₂)
- Θρεπτικά εισαγόμενα από τον άνθρωπο (ενώσεις φωσφόρου, κλπ.)
- Ανόργανα εισαγόμενα από τον άνθρωπο (Zn, Ag, κτλ.)
- Συνθετικές οργανικές ενώσεις

Τα κύρια ιόντα (τα οποία ερευνώνται και στη παρούσα εργασία), είναι αυτά των οποίων η συνήθης περιεκτικότητα στο υπόγειο νερό είναι από 1mg/l έως 1000 mg/l. Αυτά είναι: Ca, Mg, Na, K, HCO₃, CO₃, SO₄, Cl, NO₃.

4.1.3. Ειδικές παράμετροι – δείκτες

Πρόκειται για (Σούλιος, 2006):

- Το pH
- Δυναμικό οξειδο – αναγωγής (Eh)
- Σύνολο διαλυμένων στερεών (T.D.S.)
- Αλκαλικότητα – Οξύτητα
- Δείκτης κορεσμού
- Σκληρότητα νερού
- Διαλυμένα αέρια
- Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (B.O.D.)
- Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (C.O.D.)
- Ολικά απαιτούμενο οξυγόνο (T.O.D.)
- Διαλυμένο οξυγόνο (D.O.)

Όπως είναι γνωστό, το νερό, συνήθως περιέχει σε διάσταση ίσο αριθμό ιόντων H⁺ και OH⁻ έχει δηλαδή pH = 7 (και επίσης pOH = 7, δηλαδή pH + pOH = 14). Είναι δηλαδή ηλεκτρικά ουδέτερο. Όταν pH > 7 τότε pOH < 7 και αντίστροφα.

- Όταν pH = 7 το φυσικό νερό ως διάλυμα είναι ουδέτερο
- Όταν pH < 7 το φυσικό νερό ως διάλυμα είναι αλκαλικό
- Όταν pH > 7 το φυσικό νερό ως διάλυμα είναι όξινο

Είναι αυτονόητο ότι τα υπόγεια νερά, ανάλογα με την πετρολογική σύσταση των σχηματισμών μέσα στους οποίους φιλοξενούνται και ρέουν υπογείως, μπορεί να είναι όξινα, αλκαλικά ή ουδέτερα. Ορισμένα πετρώματα όπως οι οφιόλιθοι, υπό φυσικές συνθήκες περιέχουν αλκαλικά νερά, ενώ άλλα όπως ασβεστολιθικά, αλλουβιακές αποθέσεις κλπ., περιέχουν κυρίως όξινα νερά (Σούλιος, 2006).

Το σύνολο των διαλυμένων στερεών (T.D.S.) εξαρτάται από τη διαλυτότητα των σχηματισμών οι οποίοι το φιλοξενούν. Υπάρχουν σχηματισμοί, όπως π.χ. οι γρανιτικοί, στους οποίους τα φιλοξενούμενα υπόγεια νερά, έχουν πολύ μικρή τιμή (T.D.S.) (συνήθως 200 – 300 mg/l), ενώ άλλοι π.χ. ιζηματογενείς στους οποίους το (T.D.S.) είναι αρκετά μεγάλο (1000 – 1200 mg/l), χωρίς να αναφερόμαστε στα υφάλμυρα και πολύ περισσότερο στα αλμυρά νερά, στα οποία οι τιμές του T.D.S. είναι πολύ αυξημένες (30.000 mg/l στο αλμυρό νερό, έως 100.000 mg/l στα υπεραλμυρά νερά). Γενικά το T.D.S. στα υπόγεια νερά αυξάνεται με το χρόνο παραμονής του νερού στο υπέδαφος, αλλά και με την απόσταση της υπόγειας διαδρομής υπόγειου νερού.

Έχει παρατηρηθεί ότι η τιμή του T.D.S. και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (E.C.) συσχετίζονται γραμμικά, μέσω της εμπειρικής σχέσης **T.D.S.=0,65 E.C.** (Βουδούρης, 2009).

Αλκαλικότητα είναι η ικανότητα του νερού να εξουδετερώνει οξέα. Η αλκαλικότητα πρακτικά οφείλεται στη παρουσία ανθρακικών (CO_3^{2-}) και οξυανθρακικών (HCO_3^-) ιόντων.

Οξύτητα, είναι η ικανότητα του νερού να αντιδρά με ιόντα υδροξυλίου (OH^-), δηλαδή να εξουδετερώνει βάσεις. Οξύτητα στο νερό προσδίδουν τα διαλυμένα οξέα (H_2SO_4 , HCl , κ.α.) και τα διαλυμένα αέρια (CO_2 , H_2S , κ.α.). Προέρχονται, μεταξύ άλλων, από την όξινη βροχή, από κυκλοφορία νερού σε ηφαιστειακά πετρώματα με αμιδιική δράση κλπ.

Η σκληρότητα του νερού οφείλεται στη περιεκτικότητά του σε μεταλλικά ιόντα Ca^{++} , Mg^{++} και ενίοτε Fe^{++} , Sr^{++} . Τα ως άνω μεταλλικά ιόντα είναι συνήθως ενωμένα με HCO_3^- , SO_4^{--} , Cl^- , και NO_3^- .

Η σκληρότητα ονομάζεται παροδική, όταν οφείλεται σε διάλυση από το νερό του CaCO_3 και το MgCO_3 κατά τη ροή του μέσα σε πετρώματα και μόνιμη, όταν οφείλεται στη διάλυση CaSO_4 και MgSO_4 ιδίως σε περιοχές εβαποριτών ή με σηδιροπυρίτη. Ολική σκληρότητα είναι το άθροισμα της παροδικής και της μόνιμης.

Όταν το νερό ρέει μέσα σε ένα σχηματισμό, π.χ. μέσα σε ασβεστόλιθο ή σε δολομίτη, τότε τον διαλύει αργά και εμπλουτίζεται σε ιόντα Ca^{++} και Mg^{++} μέχρι να κορεσθεί σε αυτά (δείκτης κορεσμού), δηλαδή αποκτήσει μία οριακή περιεκτικότητα, που καθορίζεται κύρια από τη θερμοκρασία, την πίεση και το σύνολο των άλλων διαλυμένων ιόντων.

4.1.4. Βιολογικά χαρακτηριστικά

Στα βιολογικά χαρακτηριστικά θα μπορούσαμε να περιλάβουμε το B.O.D., το C.O.D., αλλά κυρίως την ύπαρξη μικρο-οργανισμών, όπως παθογόνα μικρόβια, βακτήρια, μύκητες, ιοί, πρωτόζωα, φύκη, σκώληκες, τροχόζωα, καρκινοειδή κλπ. Όλα τα παραπάνω αποτελούν σημαντικούς αρνητικούς παράγοντες για την ποιότητα του νερού.

4.2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

4.2.1. Δειγματοληψία

Σκοπός της δειγματοληψίας ήταν η λήψη δειγμάτων νερού προς ανάλυση, αντιπροσωπευτικών της μέσης σύστασης του συνόλου της περιοχής. Κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας μετρήθηκαν επί τόπου στο πεδίο, παράμετροι όπως θερμοκρασία νερού, pH και ηλεκτρική αγωγιμότητα, ενώ στο εργαστήριο προσδιορίστηκαν παράμετροι όπως σκληρότητα, αλκαλικότητα, νιτρικά, θειικά, χλωριόντα, ψευδάργυρος, μόλυβδος, σίδηρος, χαλκός, κάδμιο, νικέλιο, μαγγάνιο, νάτριο, κάλιο, ασβέστιο, μαγνήσιο, μαγγάνιο και αρσενικό. Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, οι χημικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν από το Βασίλη Πρωτονοτάριο στο Περιβαλλοντικό Εργαστήριο του Τεχνολογικού και Πολιτιστικού Πάρκου Λαυρίου του Ε.Μ.Π.

Οι μετρήσεις που διεξήχθησαν, αποσκοπούσαν στον προσδιορισμό των ποιοτικών χαρακτηριστικών του υπόγειου νερού. Πραγματοποιήθηκαν δύο δειγματοληψίες, η πρώτη

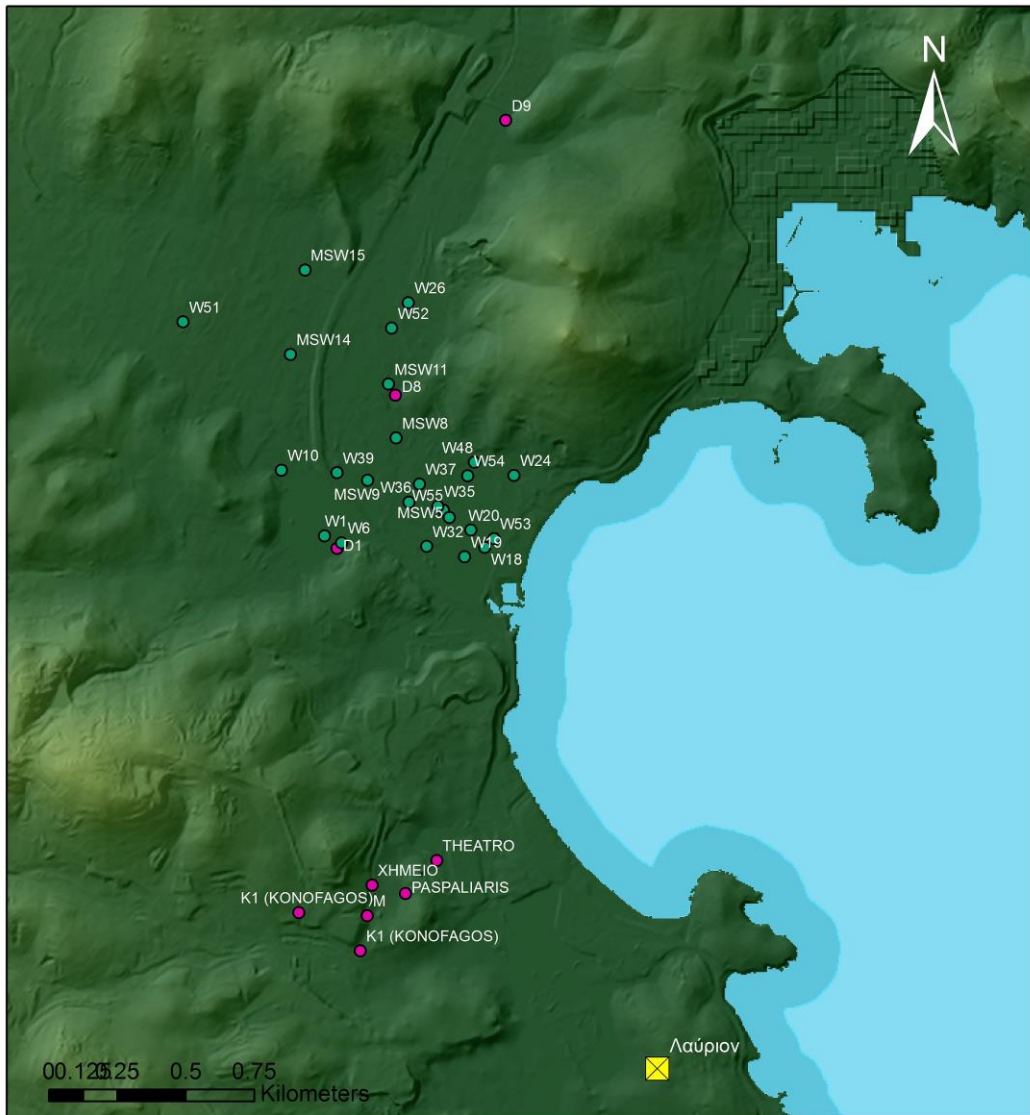
στο μέσο της υγρής περιόδου (Ιανουάριος 2015) και η δεύτερη αρχές της ξηρής (Μάιος 2015). Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν δείγματα από 37 σημεία ύδατος, 10 από τον καρστικό υδροφορέα (ανώτερο μάρμαρο) και 27 από τον αλλουβιακό υδροφορέα του Θορικού. Τα σημεία που αντιστοιχούν στον αλλουβιακό υδροφορέα είναι πηγάδια ενώ τα σημεία που αντιστοιχούν στον καρστικό υδροφορέα είναι γεωτρήσεις. Ο Χάρτης 4.1 απεικονίζει τα σημεία δειγματοληψίας νερού από τον αλλουβιακό και τον καρστικό υδροφορέα της περιοχής έρευνας, για τις δύο δειγματοληπτικές περιόδους.

Για τη δειγματοληψία των υπογείων νερών, χρησιμοποιήθηκαν δειγματολήπτες και φιαλίδια από πολυαιθυλένιο για την αποθήκευση των δειγμάτων από την κάθε θέση. Πραγματοποιήθηκε οξίνιση του δείγματος με μικρή ποσότητα πυκνού νιτρικού οξέος με σκοπό τη συντήρηση του δείγματος προς αποφυγή καταβύθισης των βαρέων μετάλλων. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα, το pH, η θερμοκρασία και το διαλυμένο οξυγόνο μετρήθηκαν επί τόπου με πολυπαραμετρικό όργανο της WTW.

4.2.2. Χημικές αναλύσεις και μετρήσεις υπαίθρου

Οι χημικές αναλύσεις περιέλαβαν τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης ιόντων ασβεστίου, μαγνησίου, νατρίου, καλίου, χλωριόντων, όξινων ανθρακικών, νιτρικών και θειικών και πραγματοποιήθηκαν με τις παρακάτω μεθόδους:

- Τα νιτρικά και θειικά ιόντα προσδιορίστηκαν με φασματοφωτόμετρο DR 2010 του οίκου HACH, σε δείγμα 25ml, με τα αντιδραστήρια Nitruver 5 και Sulfaver 4 αντίστοιχα.
- Τα χλωριόντα προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο της τιτλοδότησης, σε δείγμα 100ml με τιτλοδότη AgNO₃ 2,256N της HACH.
- Τα όξινα ανθρακικά προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο της τιτλοδότησης, σε δείγμα 100ml με τιτλοδότη H₂SO₄ 1,6 N της HACH.
- Τα ιόντα ασβεστίου και μαγνησίου προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο της τιτλοδότησης, σε δείγμα 100ml με τιτλοδότη EDTA 0,8 N.
- Με φλογοφωτόμετρο Digital Flame Analyser προσδιορίστηκαν τα ιόντα νατρίου και καλίου.



Υπόμνημα

Σημεία δειγματοληψίας

- Σημεία δειγματοληψίας αλλουβιακού υδροφορέα
- Σημεία δειγματοληψίας καρστικού υδροφορέα
- ⊗ Πόλεις

Τοπογραφικό υπόβαθρο Λαυρίου

Value

High : 649

Low : 0

Χάρτης 4. 1 Σημεία ύδατος δικτύου δειγματοληψίας

4.2.3. Επεξεργασία των χημικών αναλύσεων

Η επεξεργασία των χημικών αναλύσεων, πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού AquaChem 5.0. Δημιουργήθηκαν τέσσερις βάσεις δεδομένων χημικών αναλύσεων, για τον αλλουβιακό και τον καρστικό υδροφορέα της περιοχής έρευνας, για τις δύο χρονικές περιόδους (Ιανουάριος και Μάιος, 2015). Υπολογίστηκαν ιοντικοί λόγοι, χρήσιμοι για την εξαγωγή συμπερασμάτων και σχεδιάστηκαν γεωχημικά γραφήματα (Durov, Piper, Ludwig – Langelier, Wilcox και Schoeller), ενώ μέσω αυτοματοποιημένης στατιστικής αναφοράς (Summary Statistics) υπολογίστηκαν οι βασικές στατιστικές παράμετροι για τα δείγματα νερού (minimum, maximum, range, interquartile range, arithmetic mean, standard deviation, non parametric quantile, confidence interval, skewness, kurtosis). Εν συνεχεία σχεδιάστηκαν με τη χρήση του λογισμικού ArcMap 10.1, χάρτες κατανομής συγκέντρωσης συγκεκριμένων παραμέτρων των δειγμάτων νερού των δύο τύπων υδροφορέων της περιοχής έρευνας. Τέλος, στο Παράρτημα 1 της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής παρατίθεται μια σύντομη έκθεση των αποτελεσμάτων ανά δείγμα, ενώ το Παράρτημα 2 περιέχει όλα τα υδροχημικά διαγράμματα που εξήχθησαν από τις υδροχημικές αναλύσεις στο λογισμικό Aquachem. Τέλος στο Παράρτημα 3 παρουσιάζονται οι πίνακες των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων, για τον εκάστοτε υδροφορέα, για τις δύο περιόδους δειγματοληψίας.

4.2.3.1. Υδροχημικοί χάρτες

Η χημική σύσταση του υπόγειου νερού, εντός των υδροπερατών γεωλογικών σχηματισμών δεν παραμένει σταθερή, καθώς όσο μεγαλύτερος ο χρόνος παραμονής του, τόσο περισσότερο ενδέχεται να εμπλουτιστεί με διάφορα ιόντα αλλά και με νερά εμπλουτισμού από παρακείμενες περιοχές διαφορετικής χημικής σύστασης.

Στους ποιοτικούς χάρτες, περιγράφονται τα χημικά χαρακτηριστικά του υπόγειου νερού, μέσω της χωρικής κατανομής των διαφόρων ιόντων, που απεικονίζονται με καμπύλες όπου αντιστοιχούν σε σημεία ίσης συγκέντρωσης για το εκάστοτε ιόν (ισοχημικές καμπύλες), για δεδομένη ημερομηνία ή χρονική περίοδο (Βουδούρης 2009).

Μέσω των υδροχημικών χαρτών, εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με την έκταση και της χωρικής κατανομής της χημικής ποιότητας του υπόγειου νερού, με ενδεχόμενη δυνατότητα διερεύνησης της αιτίας αυτής (φυσικές ή ανθρωπογενείς αιτίες).

4.2.3.2. Ιοντικοί λόγοι

Οι τιμές που λαμβάνει ο εκάστοτε ιοντικός λόγος, σχετίζονται με το είδος των πετρωμάτων τα οποία φιλοξενούν το νερό, αλλά και με το βαθμό ανανέωσής του ή την ανάμιξή του με το θαλασσινό νερό. Οι σημαντικότεροι και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι ιοντικοί λόγοι είναι οι Mg/Ca, Na/Cl, Na/K, Cl/SO₄ και (Ca+Mg)/(Na+K), οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της προέλευσης του νερού (ασβεστολιθικά ή μαγνησιούχα πετρώματα), τη διερεύνηση της περίπτωσης της θαλάσσιας διείσδυσης, το χαρακτηρισμό του τύπου του νερού, τη διερεύνηση ύπαρξης υπολειμματικών αλάτων και την επισκόπηση της τροφοδοσίας του υδροφόρου, αντιστοίχως (Βουδούρης 2009).

4.2.3.3. Υδροχημικά διαγράμματα

Τα υδροχημικά διαγράμματα, χρησιμοποιούνται προκειμένου να συγκριθούν τα αποτελέσματα των δειγμάτων νερού του ίδιου σημείου σε διαφορετικές χρονικές στιγμές ή δειγμάτων νερού πολλών σημείων στην ίδια χρονική στιγμή. Συμπεράσματα σχετικά με τον χαρακτηρισμό του νερού εξάγονται από τα διαγράμματα αυτά, ενώ παρέχεται η δυνατότητα ταξινόμησης των δειγμάτων νερού και προσδιορισμού της υδροχημικής τους φάσης. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω διαγράμματα:

Διάγραμμα Durov

Τα δύο τριγωνικά διαγράμματα αντιστοιχούν στα ανιόντα και τα κατιόντα και συνδέονται σε ένα κεντρικό τετραγωνικό το οποίο απαρτίζεται από 9 επί μέρους τετράγωνα τμήματα, τα οποία αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες κατηγορίες νερού.

Διάγραμμα Ludwig Langelier

Στο διάγραμμα αυτό τα δείγματα νερού κατανέμονται αναλόγως της επικράτησης ιόντων νατρίου, καλίου, χλωρίου και θειικών. Ο αποδιδόμενος χαρακτήρας εντείνεται όταν τα δείγματα απομακρύνονται από την αρχή των αξόνων. Αναλυτικότερα, όταν τα δείγματα πλησιάζουν τον άξονα $Cl + SO_4$ επικρατεί ο χλωριο – θειικός χαρακτήρας, ενώ όταν πλησιάζουν τον άξονα $Na - K$ χαρακτηρίζονται ως καλιο – νατριούχα. Στην ειδική περίπτωση κατά την οποία τα δείγματα ισαπέχουν από τους δύο άξονες, χαρακτηρίζονται ισομερώς χλωριο – θειικά και καλιο - νατριούχα.

Το διάγραμμα αυτό μπορεί να περιλαμβάνει 4 άξονες (HCO_3 , $Na - K$, $Ca - Mg$, $Cl - SO_4$), τα δείγματα κατανέμονται στις 4 αυτές κατηγορίες. Η τομή των αξόνων σε σχέση με το κέντρο του διαγράμματος, ορίζει μια τετραγωνική περιοχή, στην οποία επικρατεί κάθε φορά 2 από τους 4 χαρακτήρες, ενώ στο κέντρο αυτής υφίσταται η μικτή περιοχή, όπου οι χαρακτήρες είναι ισομερείς.

Διάγραμμα Piper

Τα δύο τριγωνικά διαγράμματα αντιστοιχούν στα ανιόντα και τα κατιόντα, ενώ μαζί με ένα ενδιάμεσο ρομβικό αποτελούν ένα ευρύτερο διάγραμμα γνωστό ως διάγραμμα Piper. Η κατάταξη του δείγματος γίνεται τόσο ως προς τα ανιόντα/κατιόντα όσο ως προς το σύνολο, προσδιορίζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο την υδροχημική φάση του δείγματος. Το συγκεκριμένο διάγραμμα παρέχει τη δυνατότητα σύγκρισης πολλών δειγμάτων νερού αλλά και της ταξινόμησής τους σε κατηγορίες.

Διάγραμμα Schoeller

Ο κατακόρυφος άξονας αναπαριστά τις τιμές διαφόρων ιόντων σε ημιλογαριθμική κλίμακα ενώ ο οριζόντιος τα ιόντα Ca, Mg, Na + K, Cl, SO₄, HCO₃ κατά αυτή τη σειρά, σε δεκαδική κλίμακα. Η καμπύλη του διαγράμματος ενώνει τις τιμές των ιόντων του εκάστοτε δείγματος. Συγκεκριμένα, όταν τα κοίλα της καμπύλης είναι στραμμένα προς τα πάνω το νερό χαρακτηρίζεται ως γλυκό, ενώ όταν τα κοίλα είναι στραμμένα προς τα κάτω, το νερό χαρακτηρίζεται ως υφάλμυρο. Επιπροσθέτως, όσο ανώτερα βρίσκεται η ενιαία θέση της καμπύλης, τόσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα σε ιόντα.

Διάγραμμα Wilcox

Σύμφωνα με το διάγραμμα αυτό ελέγχεται η καταλληλότητα του αρδευτικού νερού σε συνάρτηση με το είδος και τις ιδιότητες του αντίστοιχου καλλιεργούμενου εδάφους. Αξιοποιεί την τιμή του συντελεστή προσρόφησης νατρίου S.A.R. (Sodium Absorption Ratio) και την ηλεκτρική αγωγιμότητα E.C., όπως αναλύονται στην επόμενη παράγραφο.

Κατάταξη των νερών άρδευσης συναρτήσει ηλεκτρικής αγωγιμότητας και του δείκτη S.A.R. (Βουδούρης 2009)

Ο συντελεστής προσρόφησης νατρίου (Sodium Absorption Ratio) εκφράζεται από τη σχέση:

$$S.A.R. = meq Na / [(Ca+Mg)/2]^{1/2}$$

Ο δείκτης αυτός εκφράζει την ιδιότητα του νερού, σύμφωνα με την οποία μέρος των κατιόντων του μπορούν να αντικατασταθούν από τα κατιόντα του εδάφους και ειδικότερα το Ca και το Mg από το Na.

Η αντικατάσταση των κατιόντων Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ από το Na⁺ οδηγεί σε ποιοτική υποβάθμιση του νερού άρδευσης, καθώς και σε μεταβολή των χαρακτηριστικών του εδάφους. Ο εμπλουτισμός του νερού με Na⁺ έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση της περατότητας του εδάφους λόγω αποκροκιδώσεως, ενώ το αντίθετο συμβαίνει στην περίπτωση του νερού πλούσιου σε ιόντα Ca⁺⁺ και Mg⁺⁺.

Ο συντελεστής S.A.R. χρησιμοποιείται σε συνάρτηση με την ηλεκτρική αγωγιμότητα για την ταξινόμηση των νερών άρδευσης. Το νερό ταξινομείται στις ακόλουθες κλάσεις ποιότητας που αναγράφονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 4.1):

A	$C_1 - S_1$	Ποιότητα καλή
B	$C_1 - S_2$	Ποιότητα μέτρια προς καλή. Το νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί αλλά με μια επιφύλαξη για τα βαριά εδάφη που δεν αποστραγγίζονται επαρκώς.
Γ	$C_1 - S_3$ $C_2 - S_2$ $C_3 - S_1$	Ποιότητα μέτρια έως πολύ μέτρια. Το νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί με προφύλαξη. Το έδαφος χρήζει αποστράγγισης ή προσθήκης γύψου.
Δ	$C_1 - S_4$ $C_2 - S_3$ $C_3 - S_2$ $C_4 - S_1$	Ποιότητα πολύ μέτρια μέχρι καλή. Ακατάλληλο νερό για ευαίσθητα φυτά ή βαριά εδάφη. Χρήση μόνο για ελαφριά εδάφη που αποστραγγίζονται επαρκώς.
E	$C_2 - S_4$ $C_4 - S_2$ $C_3 - S_3$	Ποιότητα κακή. Δεν ενδείκνυται η χρήση του παρά μόνο σε ελαφριά εδάφη, επαρκώς αποστραγγιζόμενα και για ανθεκτικά φυτά. Επικίνδυνο. Απαραίτητη η έκπλυση ή η προσθήκη γύψου.
Z	$C_3 - S_4$ $C_4 - S_3$	Ποιότητα πολύ κακή. Δεν πρέπει να χρησιμοποιείται παρά μόνο σε ειδικές περιπτώσεις.
H	$C_4 - S_4$	Δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για τις καλλιέργειες.

Πίνακας 4. 1 Καταλληλότητα νερού για αρδεύσεις (Βουδούρης 2009).

4.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΘΟΡΙΚΟΥ

Διεξήχθησαν δύο δειγματοληψίες: τον Ιανουάριο του 2015, στα μέσα της υγρής περιόδου και το Μάιο, στην αρχή της ξηρής περιόδου. Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων φαίνονται στους Πίνακες 4.2 - 4.14, ενώ οι υδροχημικοί τύποι των δειγμάτων νερού αναφέρονται στους Πίνακες 4.15 και 4.16 για τον καρστικό και αλλουβιακό υδροφορέα, αντίστοιχα. Εν συνεχεία, υπολογίστηκαν οι σχετικοί ιοντικοί λόγοι (Πίνακες 4.18 και 4.19) προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την ποιότητα των υπογείων υδάτων. Μετά το πέρας των υδροχημικών αναλύσεων, σχεδιάστηκαν στο λογισμικό ArcMap 10.1, χάρτες κατανομής ηλεκτρικής αγωγιμότητας, pH, νιτρικών ιόντων και χλωριόντων (Χάρτες 4.2 – 4.17).

4.3.1. Φυσικοχημικές παράμετροι δειγμάτων υπόγειων νερών της περιοχής έρευνας

4.3.1.1. Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα χρησιμοποιείται προκειμένου να προσδιοριστεί η ποιότητα, καθώς και η χημική σύσταση ενός δείγματος νερού. Είναι άμεσα συνδεδεμένη με την παράμετρο των συνολικά διαλυμένων στερεών (Total Dissolved Solids). Συγκεκριμένα, η αύξηση των T.D.S., αλλά και της θερμοκρασίας, συνεπάγονται αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

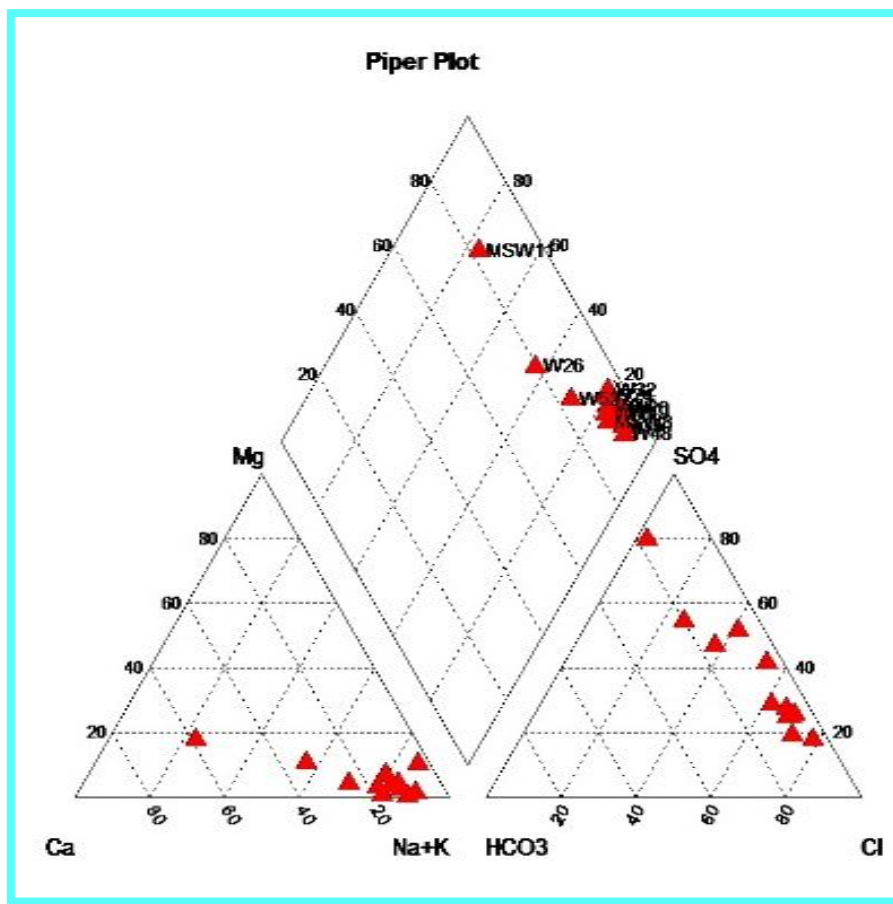
Ο Πίνακας 4.2 περιγράφει τα αποτελέσματα των επί τόπου μετρήσεων, όσον αφορά στην ηλεκτρική αγωγιμότητα των δειγμάτων υπόγειου νερού από τον προσχωματικό υδροφορέα, τον Ιανουάριο 2015. Κατά μέσο όρο, η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ήταν 7348.7 $\mu\text{S/cm}$, τιμή που υποδεικνύει την επίδραση της θάλασσας στα υπόγεια νερά του αλλουβιακού υδροφορέα.

	Ιανουάριος	Μάιος
ID	EC($\mu\text{S/cm}$)	EC($\mu\text{S/cm}$)
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	7348.7	7494.2
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	1236.0	788.0
ΜΕΓΙΣΤΟ	21900.0	30000.0
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	6820.3	8601.4

Πίνακας 4. 2 Ηλεκτρική αγωγιμότητα αλλουβιακού υδροφόρου περιόδων Ιανουαρίου και Μαΐου

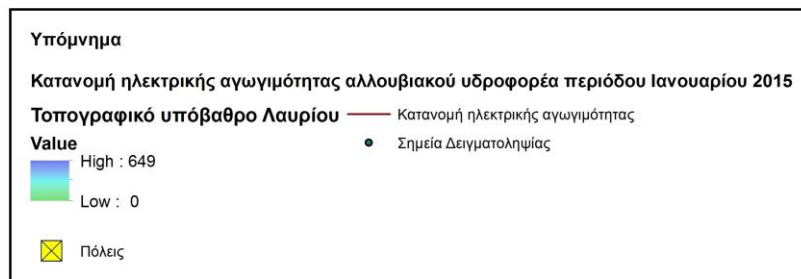
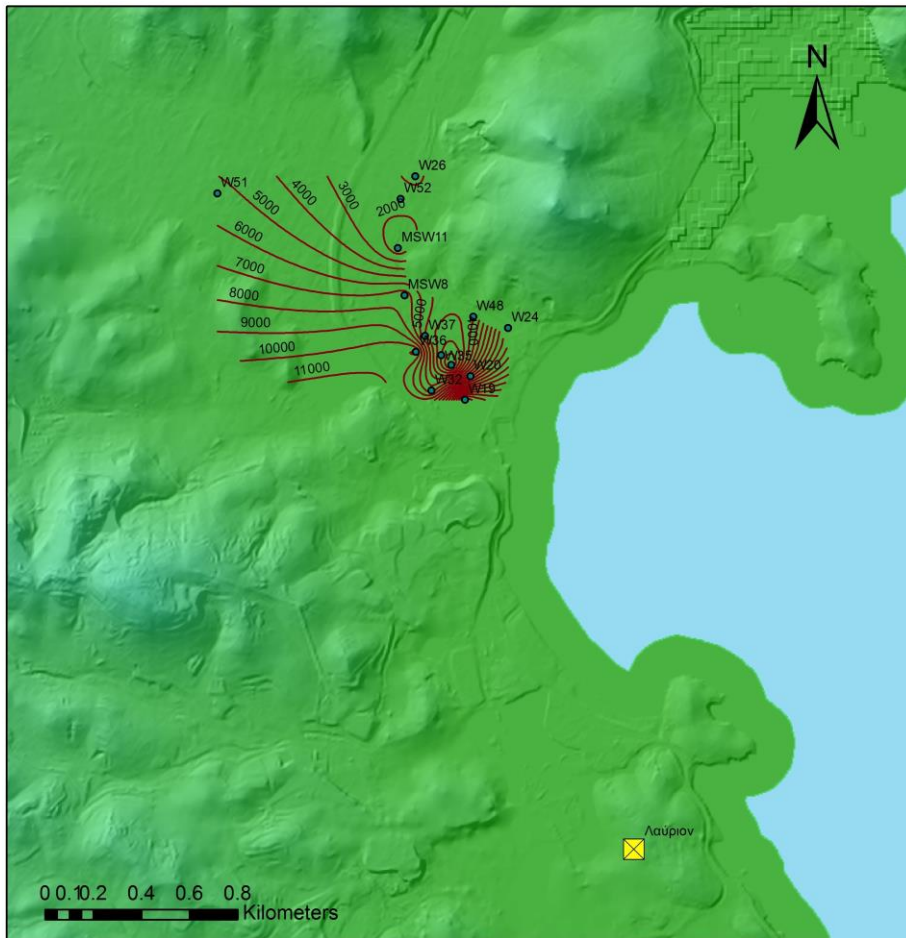
Το συμπέρασμα αυτό απεικονίζεται και στους αντίστοιχους χάρτες κατανομής ηλεκτρικής αγωγιμότητας του αλλουβιακού υδροφορέα για τις δύο περιόδους (Χάρτης 4.2 και 4.3), όπου είναι ευδιάκριτη η αύξηση των τιμών της εν λόγω παραμέτρου στα σημεία δειγματοληψίας τα οποία βρίσκονται πλησιέστερα στη θάλασσα (W24, W18, W19, W53, W32, W54, W20). Επιπροσθέτως, εμφανίζονται υψηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε σημεία δειγματοληψίας πιο απομακρυσμένα από το παράκτιο μέτωπο, γεγονός που

υποδεικνύει την τροφοδοσία του αλλουβιακού από τον καρστικό υδροφόρα στη συγκεκριμένη περιοχή. Επιπρόσθετα, στο τριγωνικό διάγραμμα Piper (Σχήμα 4.1), όπου το τριγωνικό διάγραμμα δεξιά αναπαριστά τα ανιόντα, είναι εμφανής η επικράτηση των σημείων δειγμάτων νερού του προσχωματικού υδροφόρα στην περιοχή που αντιστοιχεί στα χλωρίοντα. Κάποια δείγματα νερού επεκτείνονται και προς τη μεσαία περιοχή του διαγράμματος που αντιστοιχεί στην ανάμιξη νερού. Η θέση των σημείων στο τριγωνικό διάγραμμα στα αριστερά, εξακριβώνει τον καλιο-νατριούχο χαρακτήρα των δειγμάτων νερού. Τέλος, όσον αφορά στο ρομβικό διάγραμμα, διαπιστώνεται συσσώρευση των σημείων στην περιοχή του διαγράμματος που αντιστοιχεί σε ανάμιξη υπόγειων νερών ενώ συγκεκριμένα δείγματα προβάλλονται στην περιοχή όπου επικρατούν συνθήκες θαλάσσιας διείσδυσης.



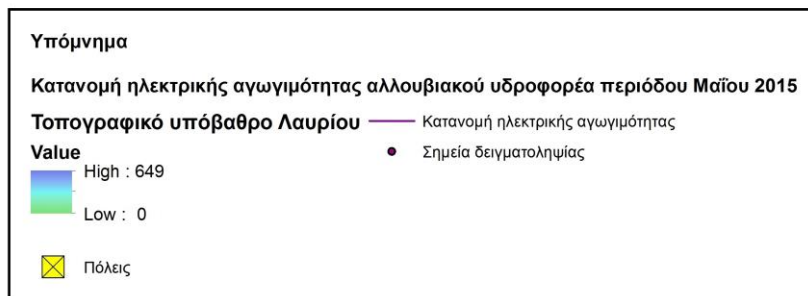
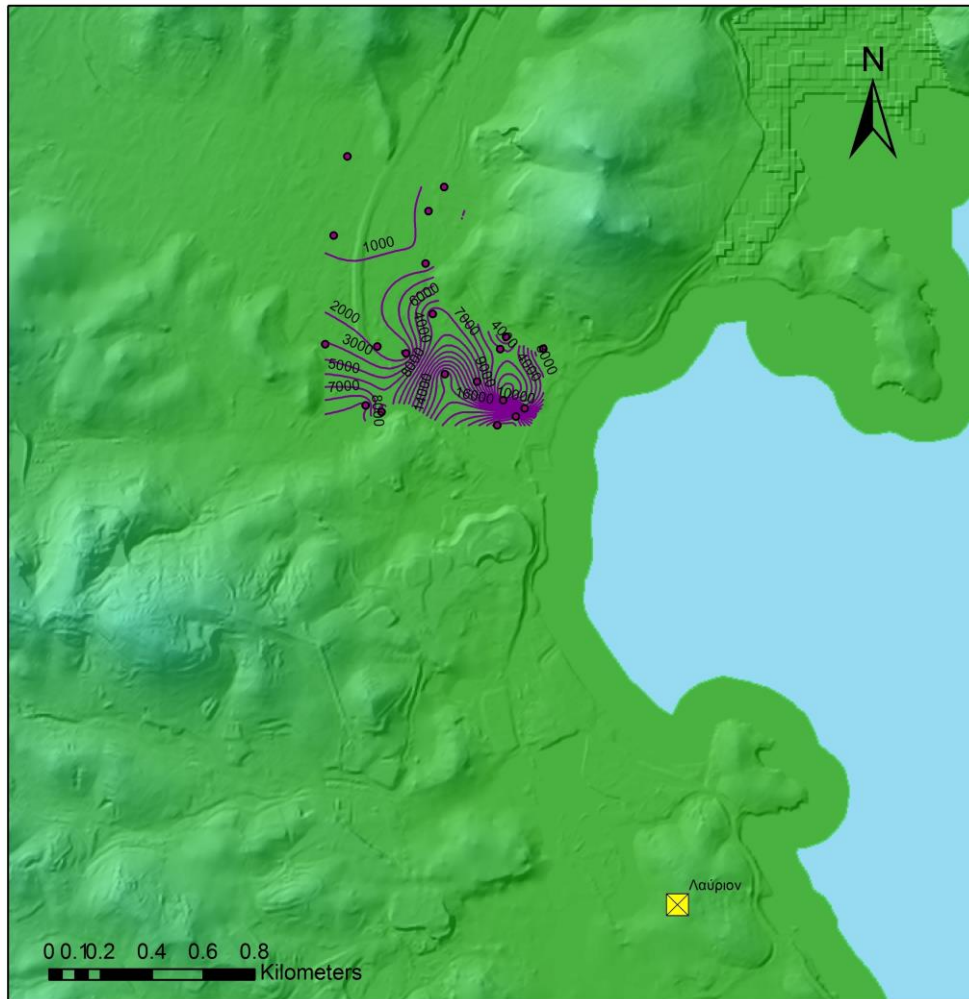
Σχήμα 4. 1 Τριγωνικό διάγραμμα κατά Piper για τα υπόγεια νερά του αλλουβιακού υδροφόρα για τη μέτρηση Ιανουαρίου, 2015.

Τα συμπεράσματα επί του χαρακτήρα που αποδίδεται στα νερά από τον αλλουβιακό υδροφόρα, την περίοδο του Μαΐου, καθώς και στα νερά από τον καρστικό υδροφόρα τις περιόδους Ιανουαρίου και Μαΐου, μέσω μελέτης του τριγωνικού διαγράμματος κατά Piper, συμπίπτουν με τα προαναφερθέντα. Εμφανής είναι η επικράτηση των ιόντων χλωρίου (δεξιό τριγωνικό διάγραμμα), καθώς και ο καλιο-νατριούχος υδροχημικός χαρακτήρας των υδάτων από τους υδροφόρους της περιοχής έρευνας. Επισυνάπτονται τα σχετικά διαγράμματα στο παράρτημα του παρόντος τεύχους.



Χάρτης 4. 2 Κατανομή ηλεκτρικής αγωγιμότητας αλλουβιακού υδροφόρου, Ιανουάριος 2015

Όσον αφορά στη δειγματοληψία του Μαΐου, η μέση τιμή της αγωγιμότητας των δειγμάτων νερού του αλλουβιακού υδροφόρου ήταν 7494.22 $\mu\text{S}/\text{cm}$, τιμή που παραπέμπει στα προαναφερθέντα συμπεράσματα και έρχεται σε συμφωνία με τον αντίστοιχο χάρτη κατανομής ηλεκτρικής αγωγιμότητας, για την περίοδο του Ιανουαρίου.



Χάρτης 4. 3 Κατανομή ηλεκτρικής αγωγιμότητας αλλουβιακού υδροφόρου, Μάιος 2015

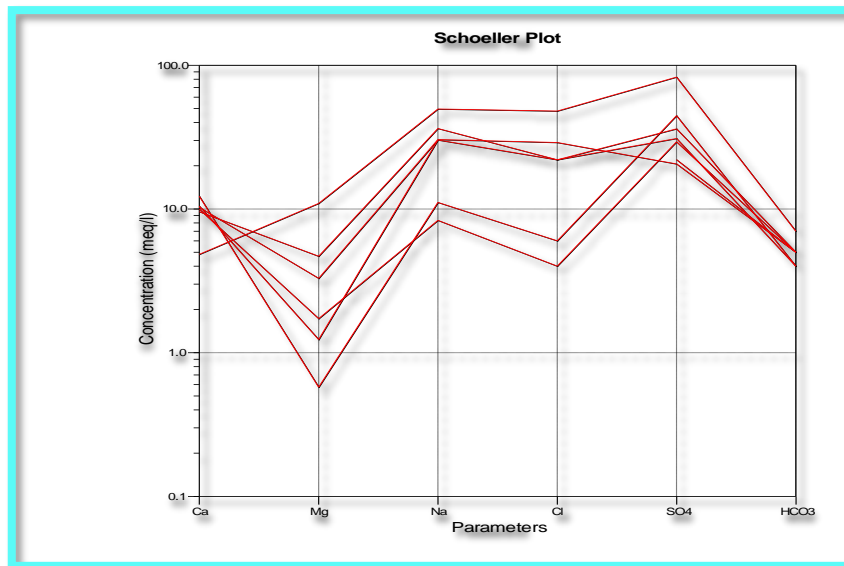
Ο καρστικός υδροφορέας παρουσίασε μέση τιμή ηλεκτρικής αγωγιμότητας 3447.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ για την περίοδο του Ιανουαρίου και 3448.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ για την περίοδο του Μαΐου, όπως φαίνεται και στον **Πίνακα 4.3**.

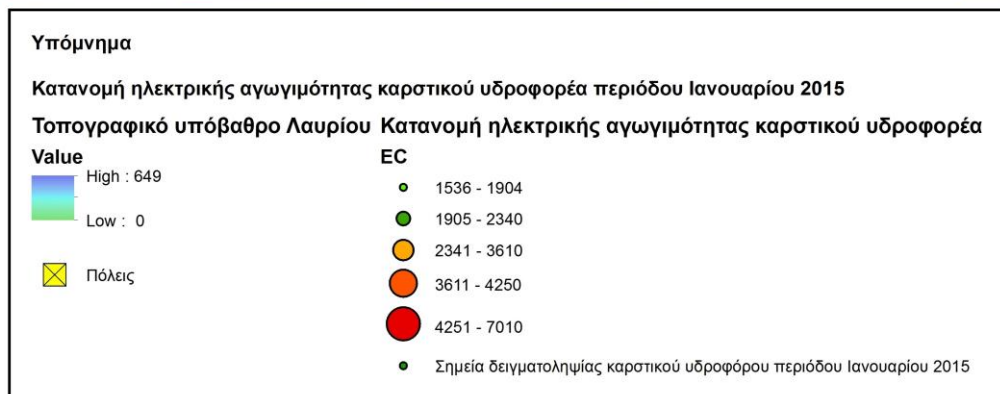
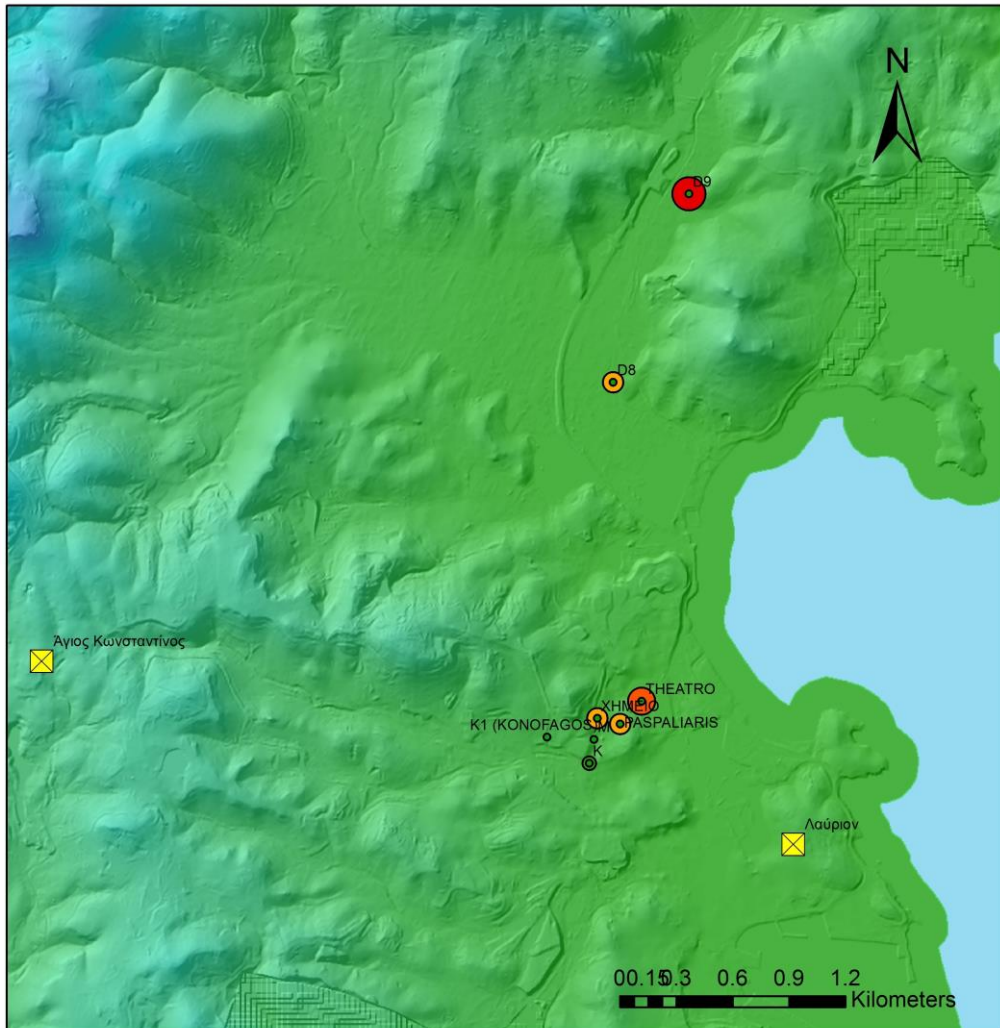
Πίνακας 4. 3 Ηλεκτρική αγωγιμότητα καρστικού υδροφόρου περιόδων Ιανουαρίου-Μαΐου 2015

	Ιανουάριος	Μάιος
ID	EC($\mu\text{S}/\text{cm}$)	EC($\mu\text{S}/\text{cm}$)
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	3447.5	3448.1
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	1536.0	1546.0
ΜΕΓΙΣΤΟ	7010.0	7940.0
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1716.8	2229.3

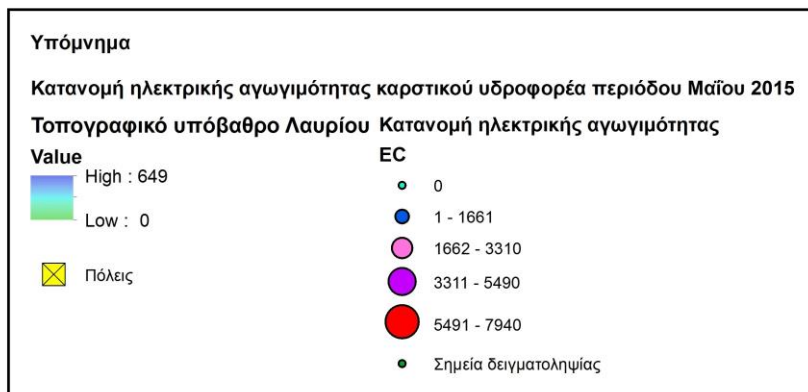
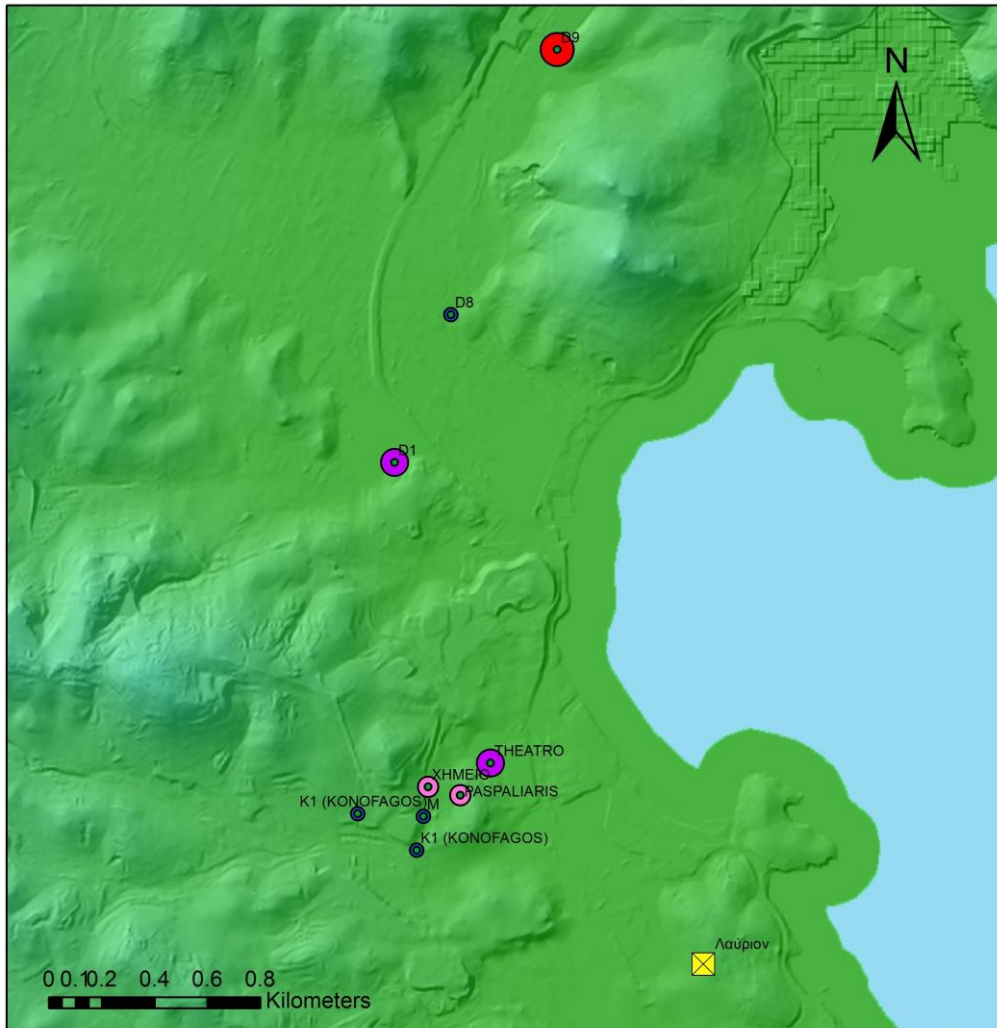
Οι τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας των νερών του καρστικού υδροφόρου είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες των νερών του αλλουβιακού, γεγονός που δείχνει πως η θαλάσσια διείσδυση επηρεάζει περισσότερο τον αλλουβιακό υδροφόρο. Τέλος, οι προκείμενες τιμές είναι αρκετά υψηλές, υποδηλώνοντας άμεσα αυξημένες ποσότητες αλάτων και ιοντικού φορτίου και έμμεσα θαλάσσια διείσδυση σε χαμηλά υψόμετρα στην παράκτια ζώνη. Ο χάρτης κατανομής ηλεκτρικής αγωγιμότητας των νερών του καρστικού υδροφόρου τον Ιανουάριο (**Χάρτης 4.4**) και το Μάιο (**Χάρτης 4.5**) δείχνει μία τάση αύξησης των τιμών αγωγιμότητας στα σημεία δειγματοληψίας που προσεγγίζουν τη θάλασσα όπως τα Κ, Κ1-ΚΟΝΟΦΑΓΟΣ, ΡΑΣΠΑΛΙΑΡΙΣ, ΤΗΑΤΡΟ, ΧΗΜΕΙΟ αλλά και το D9.

Μέσω του διαγράμματος Schoeller (**Σχήμα 4.2**), για τα νερά από τον καρστικό υδροφόρο, τον Ιανουάριο, ενισχύεται η άποψη περί θαλάσσιας διείσδυσης, καθότι τα νερά εμφανίζονται υφάλμυρα. Οι συγκεντρώσεις των ιόντων Na και Cl δικαιολογούν την αυξημένη τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει για τον αλλουβιακό υδροφόρο.

**Σχήμα 4. 2** Διάγραμμα Schoeller. Καρστικός υδροφόρος. Ιανουάριος 2015.



Χάρτης 4. 4 Κατανομή ηλεκτρικής αγωγιμότητας καρστικού υδροφόρου, Ιανουάριος 2015.



Χάρτης 4. 5 Κατανομή ηλεκτρικής αγωγιμότητας καρστικού υδροφόρου, Μάιος 2015

4.3.1.2. Ενεργός οξύτητα pH

Η εν λόγω παράμετρος αποτελεί δείκτη ποιότητας ενός δείγματος νερού. Πρόκειται για τη συγκέντρωση των ιόντων H_3O^+ που εμπεριέχονται στο διάλυμα και καθορίζεται από τις χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα, καθώς και από τις χημικές ισορροπίες που επέρχονται μεταξύ των ιόντων. Μια ενδεχόμενη μικρή μείωση της τιμής του pH πιθανώς να οφείλεται στη συγκέντρωση οργανικού υλικού, με την πάροδο των μηνών, κατά την αποσύνθεση του οποίου εκλύεται CO_2 , του οποίου η παρουσία μειώνει την τιμή του pH και κατ' επέκταση καθιστά τα υπόγειο νερό πιο όξινο.

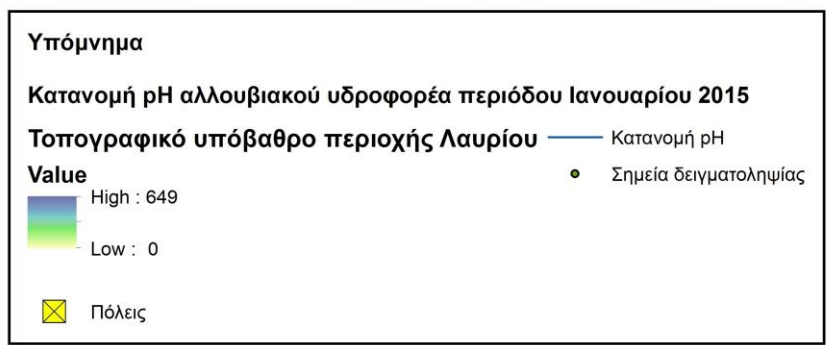
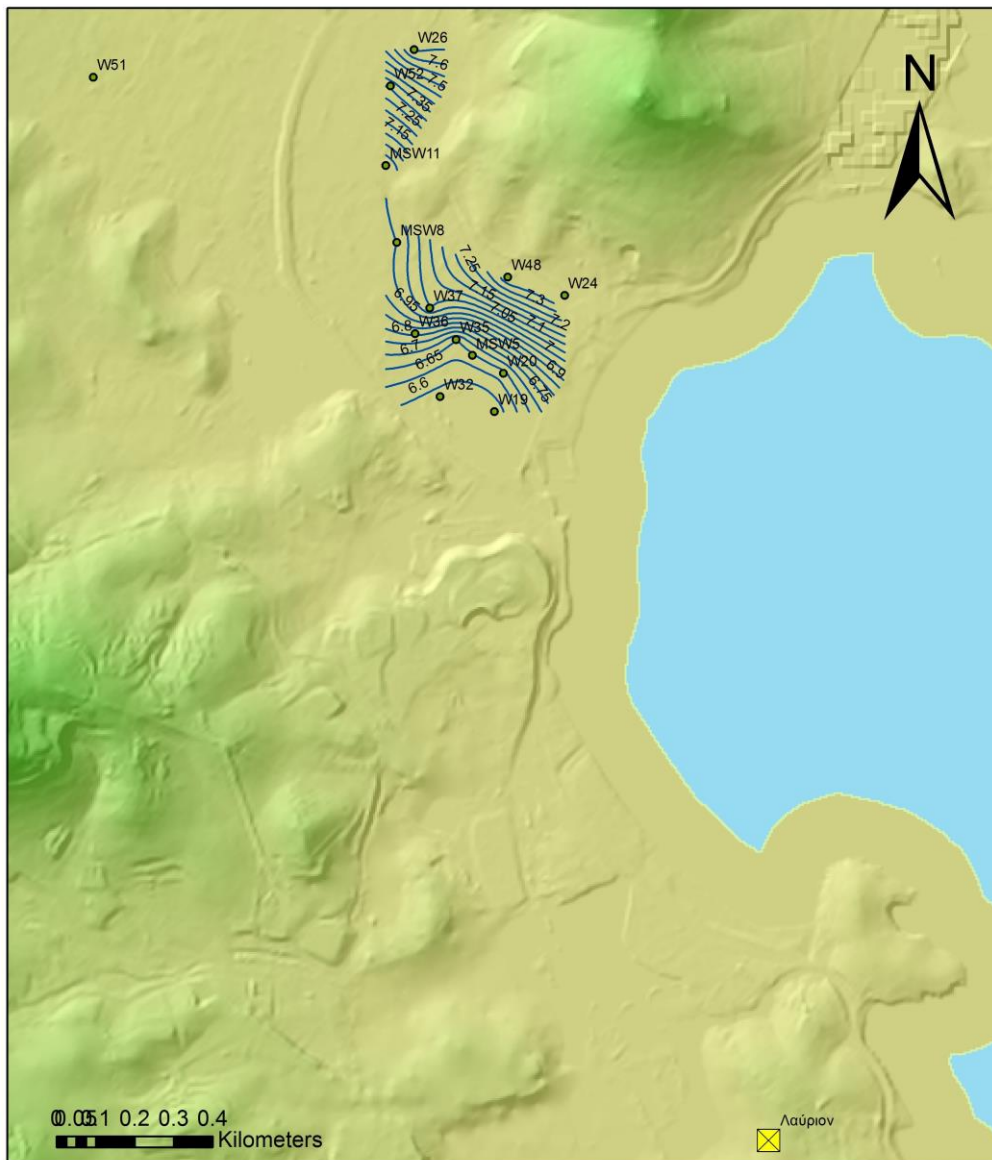
Σύμφωνα με τον **Πίνακα 4.4**, η μέση τιμή του pH του αλλουβιακού υδροφόρου ήταν 7.1 και για τις δύο περιόδους, ενώ τα νερά του καρστικού υδροφόρου παρουσίασαν τιμή pH 7, για Ιανουάριο και Μάιο.

Πίνακας 4. 4 Ενεργός οξύτητα αλλουβιακού και καρστικού υδροφορέα, Ιανουάριος – Μάιος

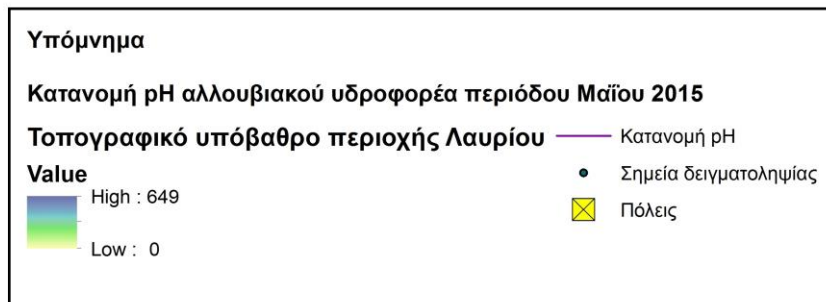
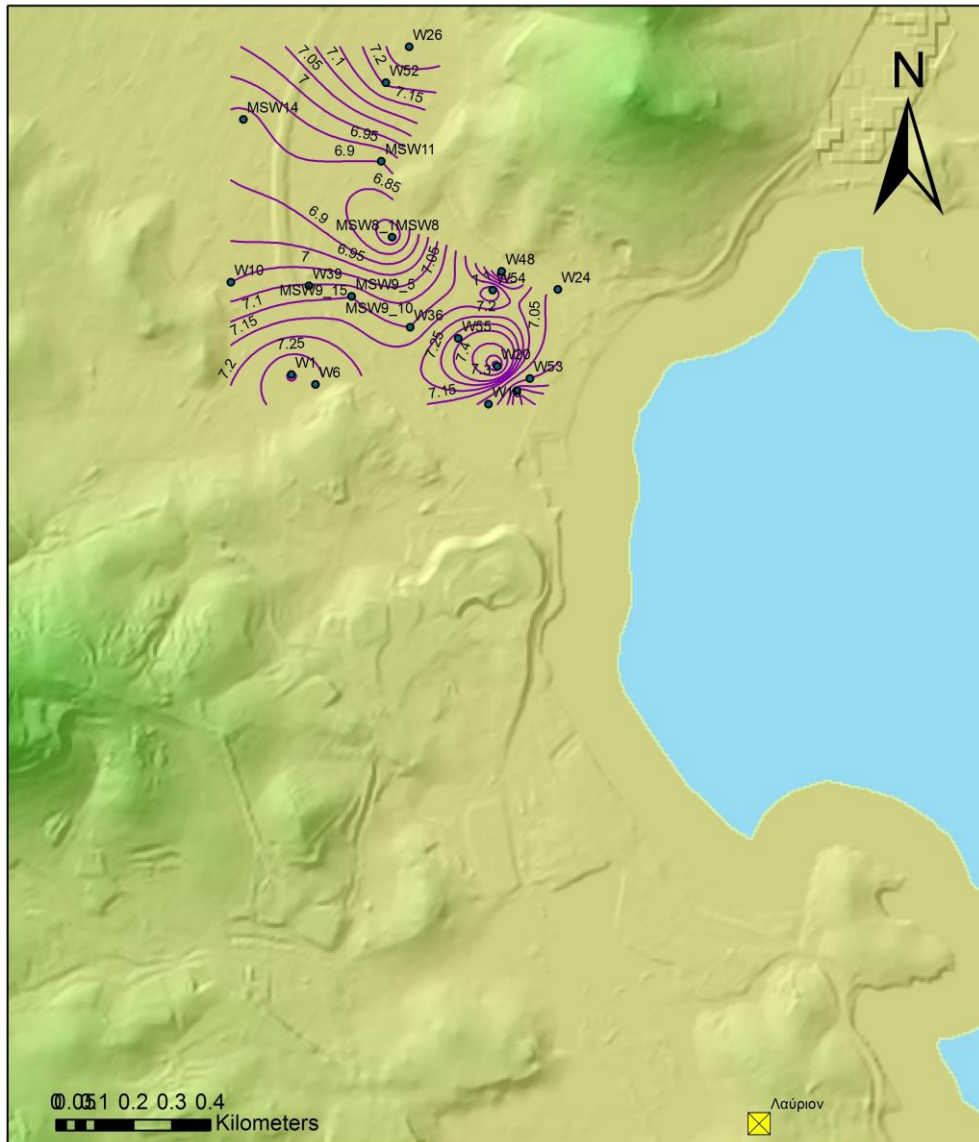
ID	Αλλουβιακός Ιανουάριος pH	Αλλουβιακός Μάιος pH	Καρστικός Ιανουάριος pH	Καρστικός Μάιος pH
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	7.1	7.1	7.0	7.0
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	6.6	6.7	6.6	6.7
ΜΕΓΙΣΤΟ	7.7	7.6	7.9	7.4
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	0.4	1.6	0.4	0.2

Ενδεικτικά, στο **Χάρτη 4.6**, παρουσιάζεται η κατανομή του pH του αλλουβιακού υδροφορέα για το μήνα Ιανουάριο, ενώ ο **Χάρτης 4.7** δείχνει την αντίστοιχη κατανομή για το μήνα Μάιο. Ακολουθούν οι αντίστοιχοι χάρτες για τον καρστικό υδροφορέα, για τις δύο δειγματοληπτικές περιόδους (**Χάρτες 4.8 και 4.9**).

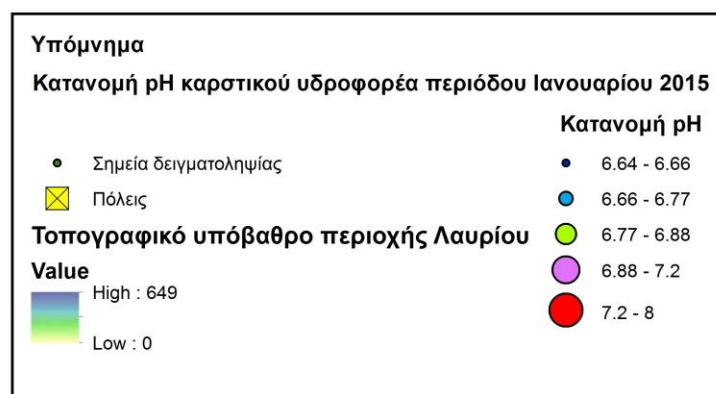
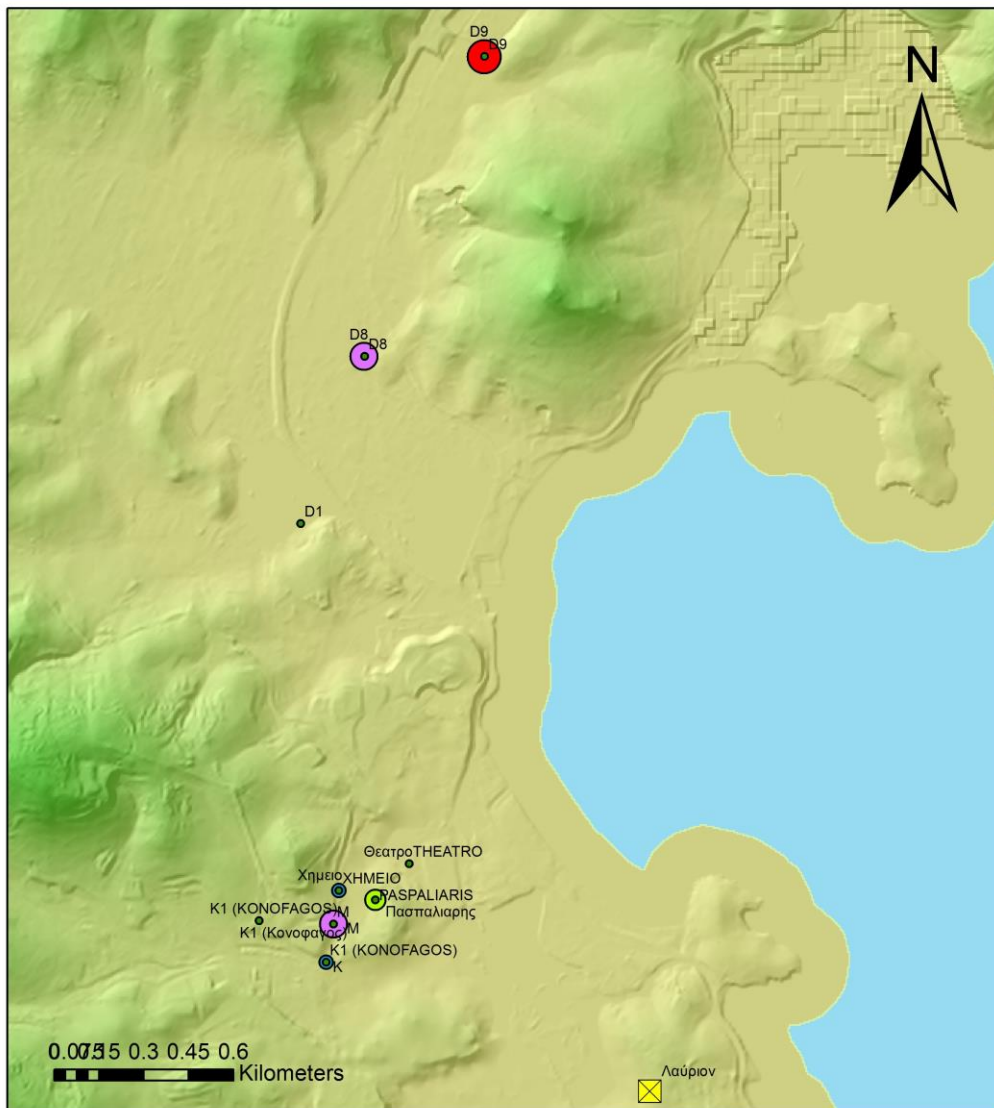
Η τυπική απόκλιση των τιμών της ενεργού οξύτητας είναι σχετικά μικρή. Μια μικρή μείωση της τιμής του pH, που παρατηρείται το Μάιο σε σχέση με τον Ιανουάριο, πιθανώς να οφείλεται στη συγκέντρωση οργανικού υλικού, με την πάροδο των μηνών, κατά την αποσύνθεση του οποίου εκλύεται CO_2 , του οποίου η παρουσία μειώνει την τιμή του pH και κατ' επέκταση καθιστά τα υπόγειο νερό πιο όξινο. Οι τιμές της ενεργού οξύτητας των νερών της περιοχής μελέτης είναι ουδέτερες.



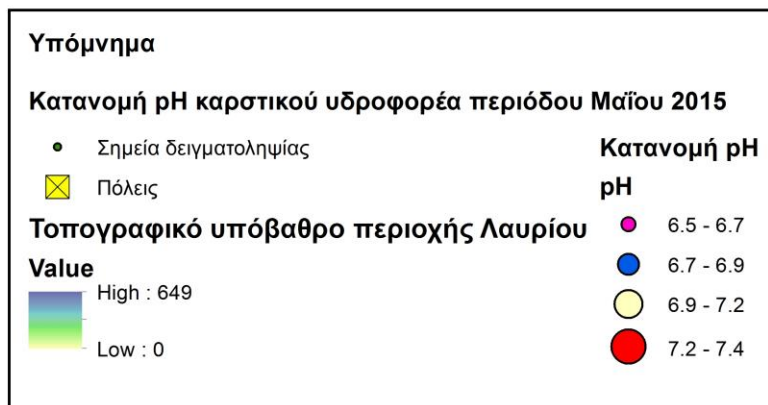
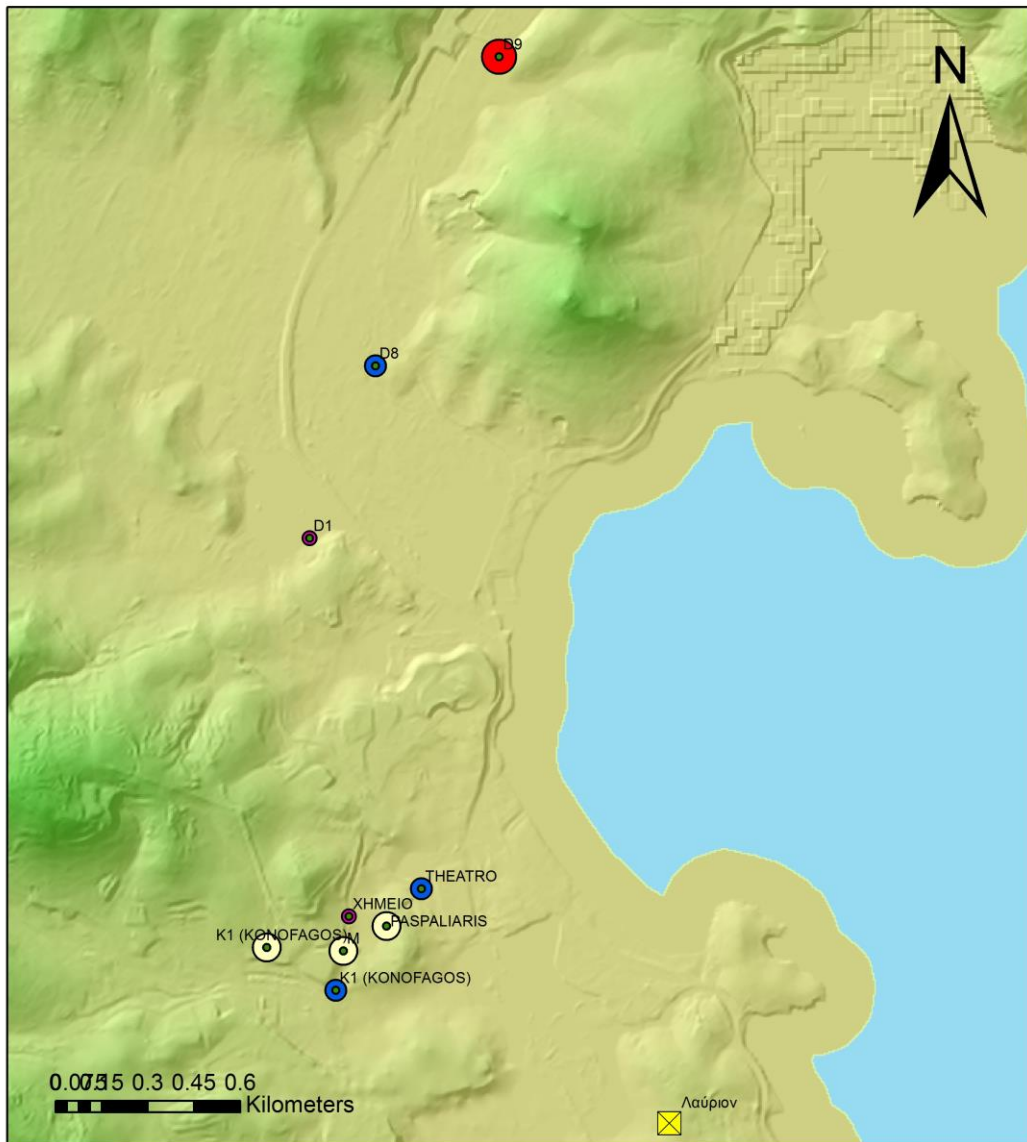
Χάρτης 4. 6 Κατανομή pH αλλουβιακού υδροφορέα, Ιανουάριος 2015.



Χάρτης 4. 7 Κατανομή pH αλλουβιακού υδροφορέα, Μάιος 2015.



Χάρτης 4. 8 Κατανομή pH στον καρστικό υδροφορέα, περίοδος Ιανουαρίου 2015



Χάρτης 4. 9 Κατανομή pH στον καρστικό υδροφορέα, περίοδος Μαΐου 2015

4.3.1.3. Θερμοκρασία

Πληροφορίες σχετικά με την προέλευση του νερού, την αλληλεπίδρασή του με το γεωλογικό υπόβαθρο μιας περιοχής καθώς και το είδος του γεωλογικού υποβάθρου που απαντάται σε μια περιοχή, προσφέρονται από τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας του υπογείου νερού. Σε γενικές γραμμές, τα υπόγεια νερά δεν υπόκεινται στην επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ως εκ τούτου, η θερμοκρασία τους τείνει να είναι σταθερή. Ακόμη, οι μεταβολές της πιεζομετρικής επιφάνειας επηρεάζουν τη θερμοκρασία των υπογείων νερών, με αποτέλεσμα, δείγματα νερού από τις αβαθείς γεωτρήσεις να έχουν χαμηλότερη θερμοκρασία από δείγματα πιο βαθιών γεωτρήσεων, λόγω της άμεσης επίδρασης των ατμοσφαιρικών συνθηκών.

Στη συγκεκριμένη μελέτη, προσδιορίστηκε η θερμοκρασία των δειγμάτων νερού από τους δύο τύπους υδροφόρων της περιοχής έρευνας, για τη δειγματοληπτική περίοδο του Μαΐου. Τα αποτελέσματα περιγράφονται στον **Πίνακα 4.5**.

Πίνακας 4. 5 Θερμοκρασία αλλουβιακού και καρστικού υδροφορέα για την περίοδο του Μαΐου

	Αλλουβιακός υδροφόρος	Καρστικός υδροφόρος
ID	T(°C)	T(°C)
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	20.2	22.4
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	17.2	18.5
ΜΕΓΙΣΤΟ	23.6	24.4
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	5.1	1.7

Σύμφωνα με τις τιμές του **Πίνακα 4.5**, τα νερά από τον αλλουβιακό υδροφόρο θεωρούνται σχετικά χαμηλής θερμοκρασίας, ενώ τα νερά από τον καρστικό υδροφόρο προσεγγίζουν τον υπόθερμο χαρακτήρα.

Οι αυξημένες θερμοκρασίες, χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης. Να εξεταστεί το ενδεχόμενο, μέσω ρηγμάτων και ασυνεχειών, της υδραυλικής επικοινωνίας με τα μάρμαρα του Υμηττού, που παρουσιάζουν αυξημένες τιμές θερμοκρασίας. Παράλληλα η πιθανή ύπαρξη γεωθερμικών ρευστών στην περιοχή, θα μπορούσε να δικαιολογήσει τις σχετικά αυξημένες μετρήσεις. Σε κάθε περίπτωση απαιτείται συστηματικός έλεγχος και χρονοσειρά μετρήσεων.

4.3.2. Χημική σύσταση υπογείου νερού

Η χημική ανάλυση της παρούσας διατριβής περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των ιόντων ασβεστίου (Ca^{2+}), μαγνησίου (Mg^{2+}), καλίου (K^+), νατρίου (Na^+), χλωρίου (Cl^-), τα θειικά (SO_4) και τα όξινα ανθρακικά ιόντα (HCO_3).

4.3.2.1. Χλωριόντα (Cl⁻)

Τα χλωριόντα προέρχονται κυρίως από ιζηματογενή πετρώματα, εντός των οποίων εμπεριέχονται αργιλικά ορυκτά θαλάσσιας γένεσης, αλλά παρατηρούνται και λόγω θαλάσσια διείσδυσης, στην περίπτωση των παράκτιων υδροφόρων. Το χλώριο χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά μεγάλο χρόνο παραμονής στο νερό και απομακρύνεται πολύ δύσκολα.

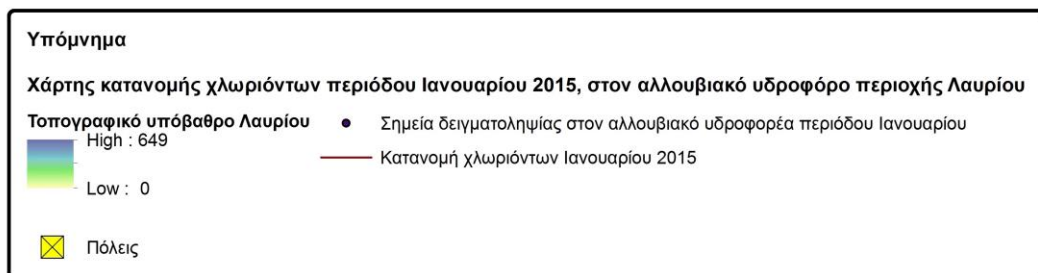
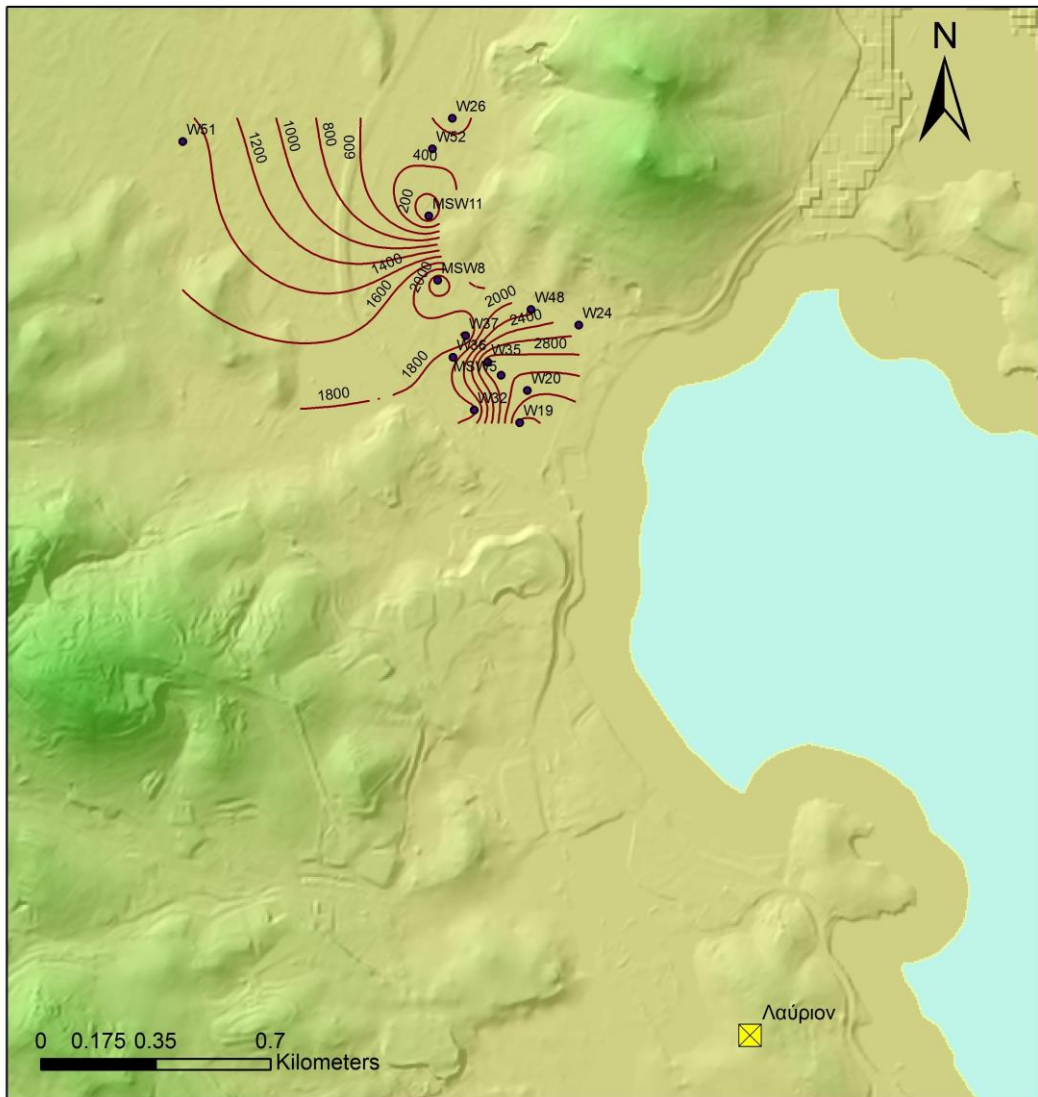
Στην περιοχή έρευνας, οι συγκεντρώσεις των χλωριόντων εμφανίζονται αρκετά υψηλές. Συγκεκριμένα, για τον προσχωματικό και τον καρστικό υδροφόρο αντίστοιχα, η μέση τιμή συγκέντρωσης χλωριόντων ήταν 1851.2 (mg/L) και 735.4 (mg/L) για το μήνα Ιανουάριο, 1498.6 (mg/L) και 1324.7 (mg/L) για το μήνα Μάιο, όπως φαίνεται και στον **Πίνακα 4.6**.

	Ιανουάριος	Μάιος	Ιανουάριος	Μάιος
ID	Cl ⁻ (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	Cl ⁻ (ppm)
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	1851.2	1498.6	735.4	1324.7
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	35.5	142.0	142.0	426.0
ΜΕΓΙΣΤΟ	3443.5	3525.2	1704.0	3479.0
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1178.3	1207.0	534.0	1051.8
	Αλλουβιακός υδροφόρος		Καρστικός υδροφόρος	

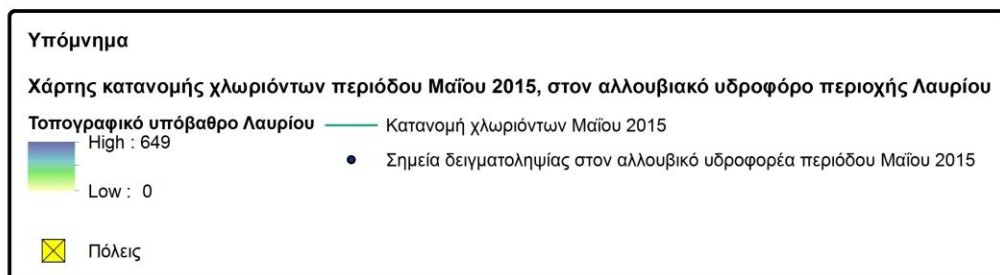
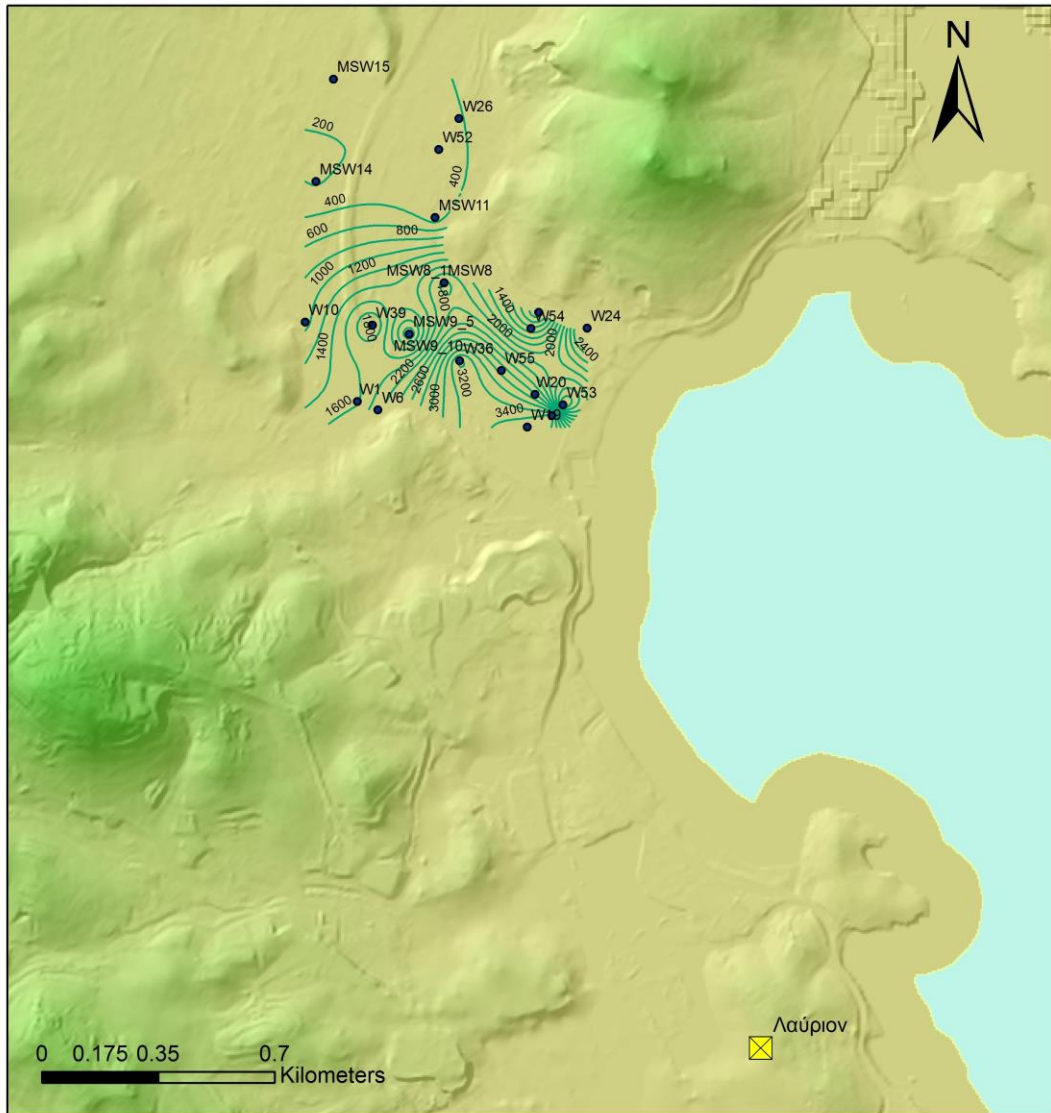
Πίνακας 4. 6 Συγκεντρώσεις ιόντων χλωρίου για τον αλλουβιακό και τον καρστικό υδροφόρο, περιόδων Ιανουαρίου και Μαΐου

Οι αυξημένες τιμές των ιόντων χλωρίου των νερών του αλλουβιακού υδροφορέα έρχονται σε συμφωνία με τις τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και οδηγούν στο ίδιο συμπέρασμα το οποίο συνοψίζεται στη θαλάσσια διείσδυση και τη συνεπακόλουθη αύξηση των τιμών των δύο αυτών παραμέτρων. Κάτι τέτοιο αποτυπώνεται και στους χάρτες κατανομής χλωριόντων (**Χάρτης 4.10** και **Χάρτης 4.11**) του αλλουβιακού υδροφορέα που ακολουθούν, καθώς και στους αντίστοιχους χάρτες του καρστικού υδροφορέα (**Χάρτης 4.12** και **Χάρτης 4.13**).

Σε ακολουθία με τα συμπεράσματα επί των χαρτών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, παρατηρούνται μεγάλες τιμές συγκέντρωσης χλωριόντων στα σημεία δειγματοληψίας που βρίσκονται κοντά στη θάλασσα (W19, W20, W35, W48, W24, W32), υποδηλώνοντας την ύπαρξη μετώπου θαλάσσιας διείσδυσης.

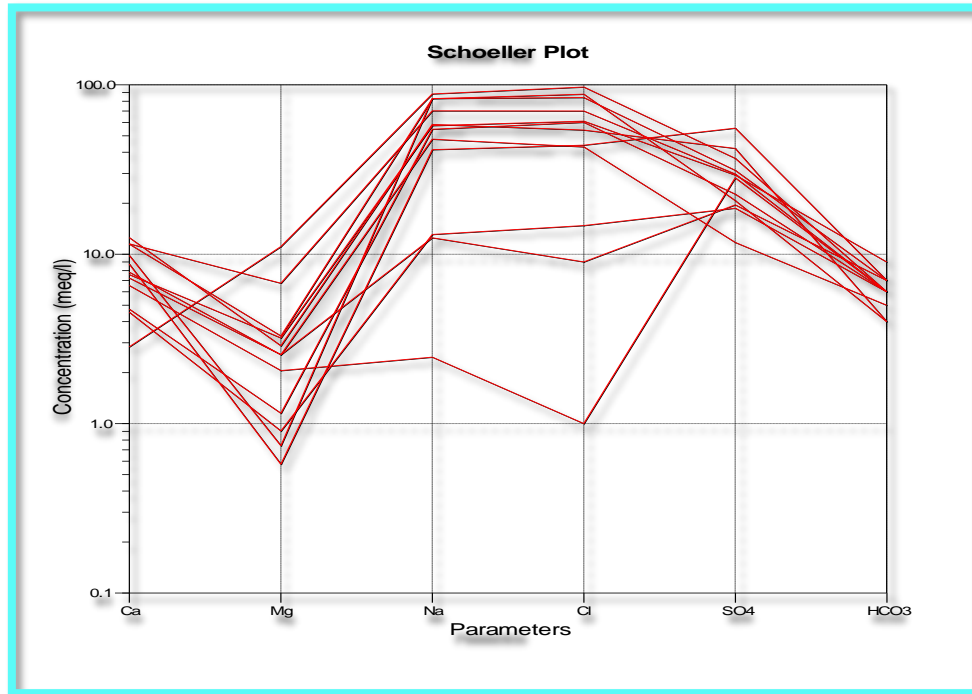


Χάρτης 4. 10 Ισοκατανομή χλωριόντων αλλουβιακού υδροφορέα, Ιανουάριος 2015



Χάρτης 4. 11 Ισοκατανομή χλωριόντων αλλουβιακού υδροφορέα, Μάιος 2015

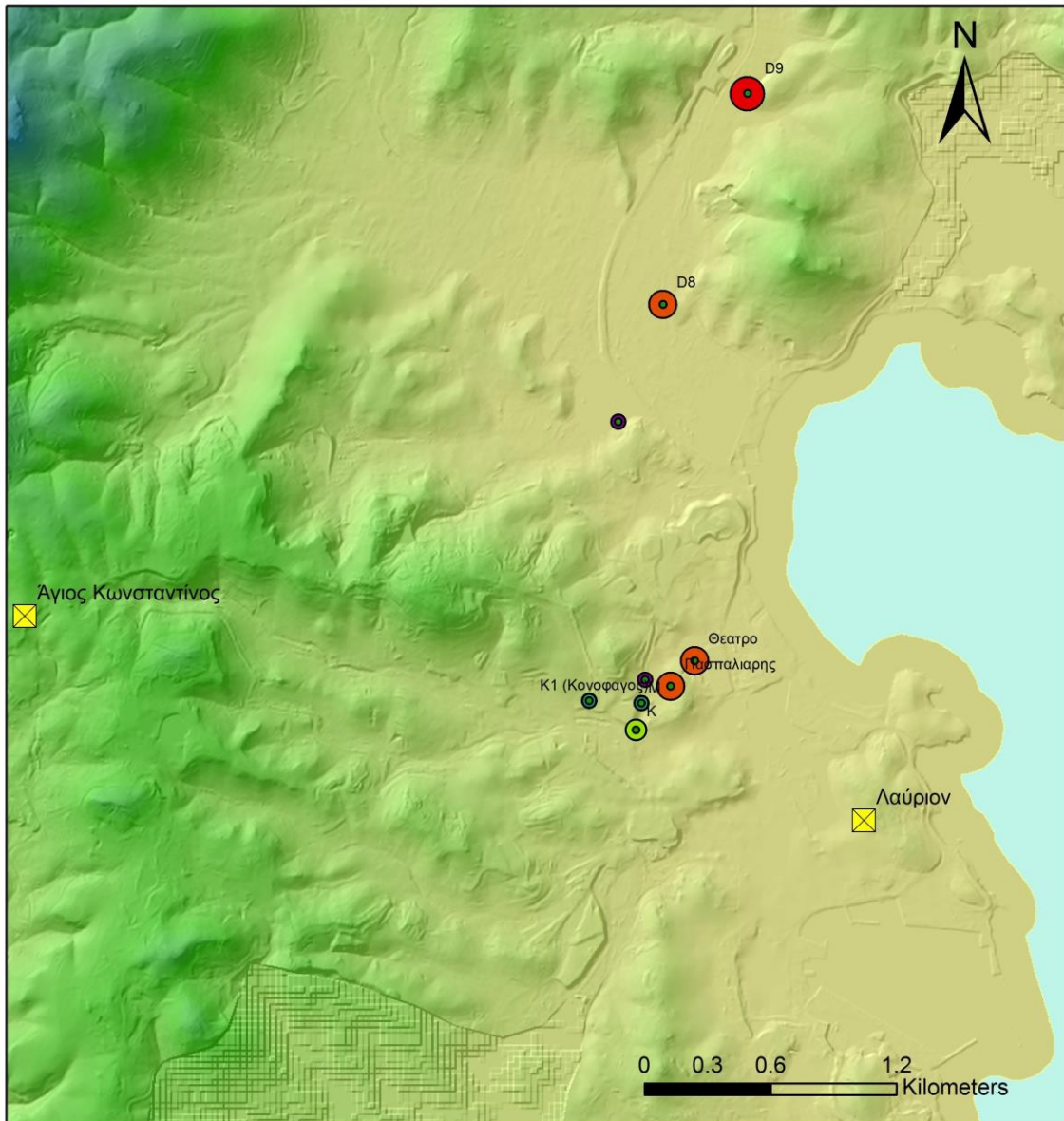
Η αυξημένες συγκεντρώσεις χλωριόντων διαφαίνονται και από τα υδροχημικά διαγράμματα Schoeller (Σχήμα 4.3), σύμφωνα με τα οποία τα νερά του αλλουβιακού υδροφόρου είναι κατά βάση υφάλμυρα.



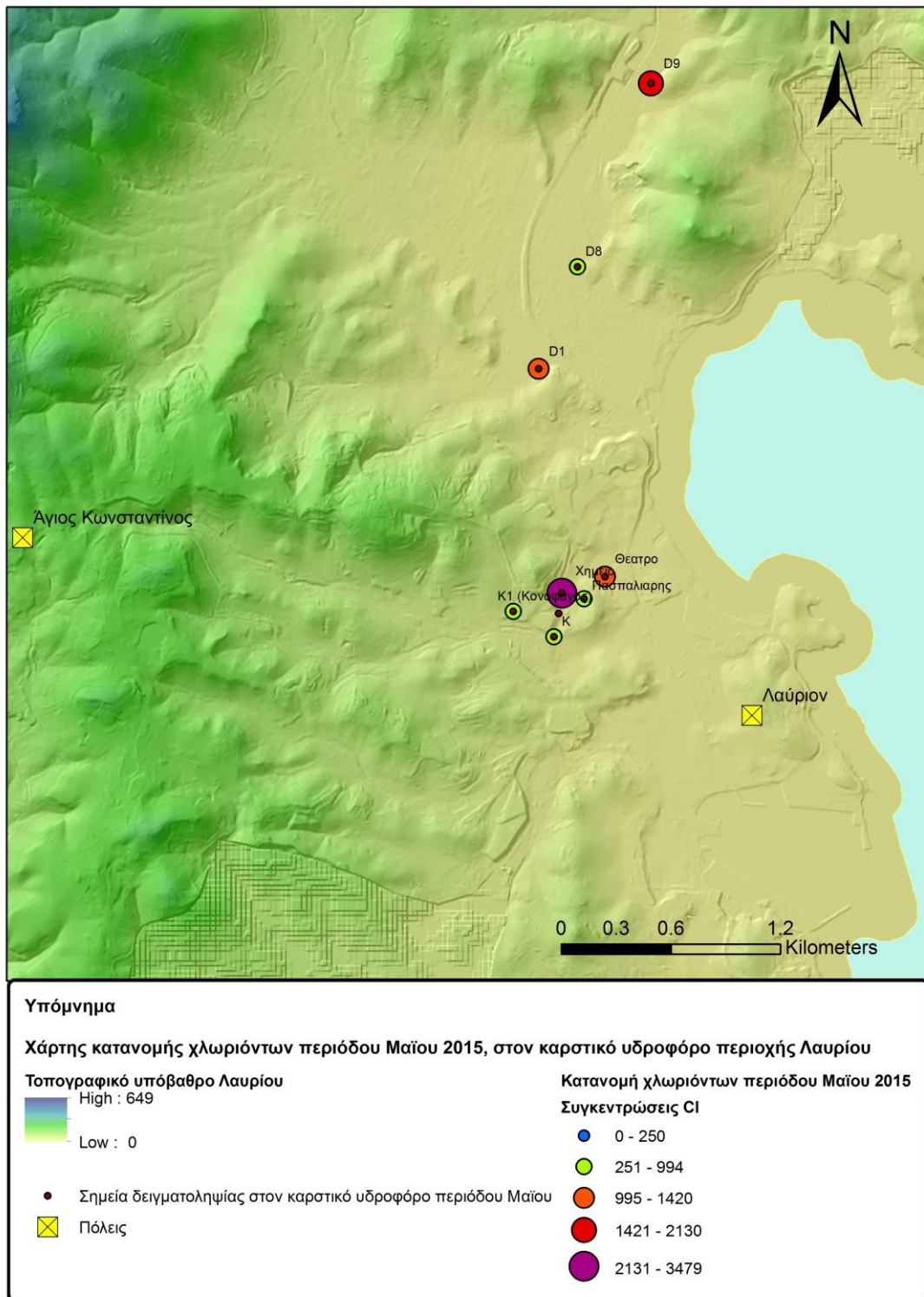
Σχήμα 4. 3 Διάγραμμα Schoeller. Αλλουβιακός υδροφόρος. Μάιος 2015.

Ανάλογα, στα διαγράμματα Schoeller για τον καρστικό υδροφόρο, για τις περιόδους Ιανουαρίου και Μαΐου, τα νερά χαρακτηρίζονται υφάλμυρα. Τα σχετικά διαγράμματα επισυνάπτονται στο παράρτημα του παρόντος τεύχους.

Σε αναλογία με τα συμπεράσματα που εξήχθησαν για τον αλλουβιακό υδροφόρο, όσον αφορά στην κατανομή των χλωριόντων και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, η διείσδυση της θάλασσας φαίνεται να έχει επηρεάσει σημαντικά και την καρστική υδροφορία της περιοχής, καθότι οι τιμές των δύο αυτών παραμέτρων κυμαίνονται σε εξίσου υψηλά επίπεδα στα νερά του καρστικού υδροφόρου, για το μήνα Ιανουάριο και Μάιο όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.6 πιο πάνω. Τα σημεία που βρίσκονται στο παράκτιο τμήμα της περιοχής έρευνας (Κ, Κ1-KONOFAGOS, PASPALIARIS, THEATRO, ΧΗΜΕΙΟ, D9), παρουσιάζουν το Μάιο μια σχετική, με τον Ιανουάριο, μείωση της τιμής συγκέντρωσης χλωριόντων, καθότι ο υδροφόρος εμπλουτίζεται κατά την υγρή περίοδο (Ιανουάριος, Φεβρουάριος και Μάρτιος) μέχρι το Μάιο, συνεπώς μειώνεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα των νερών του και παράλληλα μειώνεται η συγκέντρωση των χλωριόντων. Οι χάρτες 4.13 και 4.14 απεικονίζουν την κατανομή των χλωριόντων στον καρστικό υδροφόρο της περιοχής μελέτης.



Χάρτης 4. 12 Ισοκατανομή χλωριόντων καρστικού υδροφορέα, περιόδου Ιανουαρίου.



Χάρτης 4. 13 Ισοκατανομή χλωριόντων καρστικού υδροφορέα, περιόδου Μαΐου.

4.3.2.2. Ασβέστιο (Ca^{2+}) – Μαγνήσιο (Mg^{2+})

Τα υπόγεια νερά είναι πλούσια σε ιόντα ασβεστίου, των οποίων κύρια πηγή προέλευσης είναι τα ανθρακικά ιζηματογενή πετρώματα και τα μάρμαρα, τα οποία απαντώνται και στην προκειμένη περιοχή μελέτης. Ακόμη, αναφέρεται πως προέρχονται από τους ασβεστονατριούχους άστριους, τη γύψο, το φθορίτη, τους πυρόξενους, τους αμφιβόλους και τα ορυκτά που προέρχονται από την ομάδα του επίδοτου (Βουδούρης 2009).

Η προέλευση του μαγνησίου συνδέεται με τη διάλυση αργιλοπυριτικών ορυκτών στα μεταμορφωμένα πετρώματα, ενώ στα ανθρακικά πετρώματα είναι άφθονο όταν σε αυτά εμπεριέχεται δολομίτης και μαγνησίτης (Βουδούρης 2009).

ID	Ιανουάριος		Μάιος	
	Ca^{2+} (ppm)	Mg^{2+} (ppm)	Ca^{2+} (ppm)	Mg^{2+} (ppm)
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	159.3	38.3	196.9	44.7
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	57.0	7.0	75.0	11.0
ΜΕΓΙΣΤΟ	251.0	135.0	280.0	130.0
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	65.1	42.1	66.1	29.9
Αλλουβιακός υδροφόρος				

Πίνακας 4. 7 Συγκεντρώσεις ασβεστίου (Ca^{2+}) και μαγνησίου (Mg^{2+}) των αλλουβιακού υδροφορέα, περιόδων Ιανουαρίου και Μαΐου

Συγκεκριμένα στην περιοχή μελέτης, όπως δείχνουν και οι **Πίνακες 4.7** και **4.8**, παρατηρείται μέσος όρος συγκέντρωσης των ιόντων ασβεστίου και μαγνησίου αντίστοιχα, για τον αλλουβιακό υδροφόρο στη δειγματοληπτική περίοδο του Ιανουαρίου ήταν 159.3 (mg/L) και 38.3 (mg/L), ενώ το μήνα Μάιο αυξήθηκαν στις τιμές 196.9 (mg/L) και 44.7 (mg/L). Όσον αφορά στον καρστικό υδροφορέα, οι τιμές ιόντων ασβεστίου και μαγνησίου αντίστοιχα, για το μήνα Ιανουάριο ήταν 188 (mg/L) και 44 (mg/L), ενώ για την περίοδο του Μαΐου ήταν 194.8 (mg/L) και 40.1 (mg/L).

ID	Ιανουάριος		Μάιος	
	Ca^{2+} (ppm)	Mg^{2+} (ppm)	Ca^{2+} (ppm)	Mg^{2+} (ppm)
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	188.0	44.0	194.8	40.1
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	97.0	7.0	90.0	10.0
ΜΕΓΙΣΤΟ	246.0	133.0	291.0	97.0
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	46.8	42.7	66.1	29.4
Καρστικός υδροφόρος				

Πίνακας 4. 8 Συγκεντρώσεις ασβεστίου (Ca^{2+}) και μαγνησίου (Mg^{2+}) των καρστικού υδροφορέα, περιόδων Ιανουαρίου και Μαΐου

Οι παρατηρηθείσες υψηλές τιμές εντείνονται στα σημεία δειγματοληψίας που βρίσκονται παράκτια λόγω φαινομένων ανταλλαγής ιόντων.

4.3.2.3. Νάτριο (Na⁺) – Κάλιο (K⁺)

Η παρουσία των αλκαλίων σχετίζεται άμεσα με τη θαλάσσια διείσδυση σε παράκτιους υδροφορείς, καθώς και με τα αερομεταφερόμενα σταγονίδια από τη θάλασσα. Ενδεικτικά, το υπόγειο νερό παρουσιάζει συγκεντρώσεις νατρίου περίπου 20 mg/L, ενώ η αντίστοιχη τιμή για το θαλασσινό νερό ανέρχεται σε 10.000 mg/L. Ο λόγος Na/Cl αυξάνεται σύμφωνα με τον Custodio (1987) όταν το θαλασσινό νερό αντικαθίσταται από γλυκό.

Οι **Πίνακες 4.9** και **4.10** περιγράφουν την κατανομή των ιόντων Na⁺ και K⁺ στα νερά των δύο τύπων υδροφορέων της περιοχής μελέτης. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στον **Πίνακα 4.9** η μέση συγκέντρωση ιόντων νατρίου και καλίου αντίστοιχα για τον αλλουβιακό υδροφόρο στη δειγματοληπτική περίοδο του Ιανουαρίου ήταν 1173.2 mg/L και 38.9, ενώ τον Μάιο ήταν 1035.8 mg/L και 36.3 mg/L. Σχετικά με τον καρστικό υδροφόρο, η μέση συγκέντρωση ιόντων νατρίου και καλίου, αντίστοιχα, ήταν 589.7 mg/L και 21 mg/L για το μήνα Ιανουάριο ενώ το Μάιο αυξήθηκαν σε 806.3 mg/L και 30.1 mg/L (**Πίνακας 4.10**).

ID	Ιανουάριος		Μάιος	
	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	1173.2	38.9	1035.8	36.3
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	56.8	5.8	61.0	9.0
ΜΕΓΙΣΤΟ	2031.7	213.4	2350.0	67.0
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	701.6	68.5	741.3	21.1
Αλλουβιακός υδροφόρος				

Πίνακας 4. 9 Συγκεντρώσεις νατρίου και καλίου των αλλουβιακού υδροφορέα, περιόδων Ιανουαρίου και Μαΐου

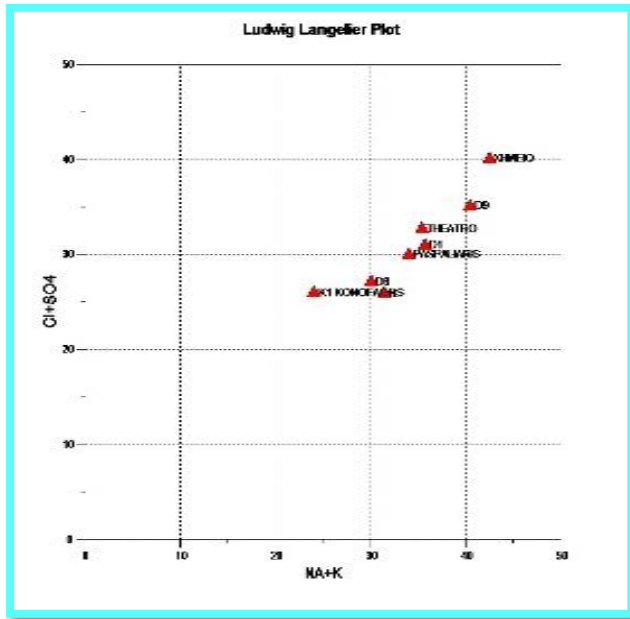
ID	Ιανουάριος		Μάιος	
	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	589.7	21.0	806.3	30.1
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	191.7	15.3	304.0	12.0
ΜΕΓΙΣΤΟ	1141.7	30.8	2121.0	52.0
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	350.7	5.4	604.7	14.5
Καρστικός υδροφόρος				

Πίνακας 4. 10 Συγκεντρώσεις νατρίου και καλίου των καρστικού υδροφορέα, περιόδων Ιανουαρίου και Μαΐου.

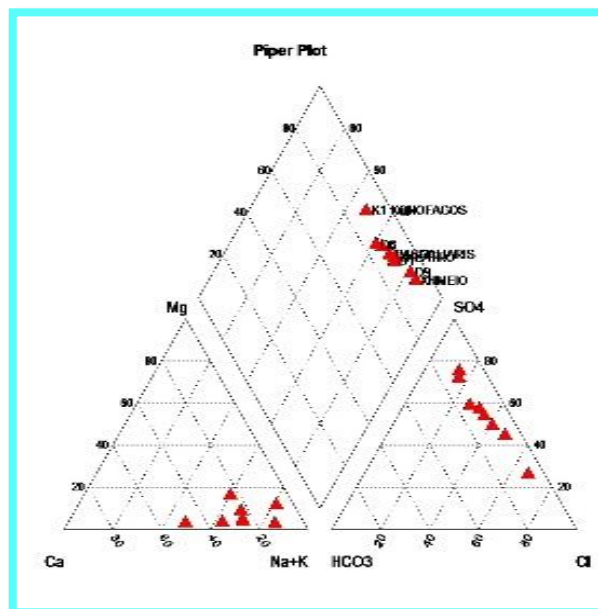
Γενικά, οι τιμές των ιόντων νατρίου και καλίου εμφανίζονται αυξημένες, κάτι το οποίο εξηγείται από τη θαλάσσια διείσδυση που έχει προαναφερθεί. Τα σημεία που

βρίσκονται σε άμεση σχεδόν επικοινωνία με τη θάλασσα W19, W20, W35, W48, W24, W32, καθώς και Κ, Κ1-KONOFAGOS, PASPALIARIS, THEATRO, ΧΗΜΕΙΟ παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές των ιόντων αυτών.

Ο καλιο-νατριούχος χαρακτήρας των δειγμάτων νερού και του καρστικού υδροφόρου για το μήνα Μάιο πιστοποιείται και από τα διαγράμματα Piper και Ludwig Langelier (Σχήμα 4.4 και Σχήμα 4.5).

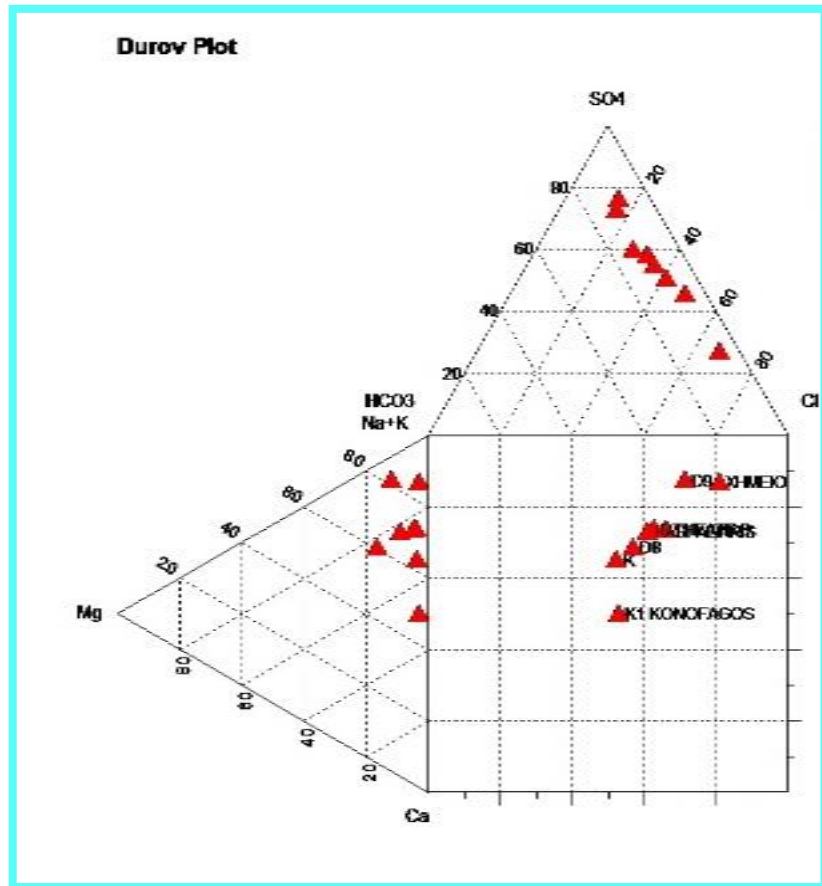


Σχήμα 4. 4 Διάγραμμα Ludwig-Langelier του καρστικού υδροφόρου (Μάιος 2015).



Σχήμα 4. 5 Διάγραμμα Piper του καρστικού υδροφόρου (Μάιος 2015).

Επιπροσθέτως, σύμφωνα με το διάγραμμα Durov (Σχήμα 4.6), η υδροχημική φάση από την οποία έχουν προέλθει τα δείγματα νερού είναι η ιοντική ανταλλαγή, γεγονός που ενισχύει την άποψη ότι στο παράκτιο τμήμα εξελίσσονται φαινόμενα ιοντικής ανταλλαγής, για τα δείγματα που αντιστοιχούν στο χαρακτηρισμό αυτό (D9, PASPALIARIS, ΧΗΜΕΙΟ, THEATRO). Τα υπόλοιπα δείγματα νερού (Κ, Κ1-KONOFAGOS, D8) φαίνεται να έχουν προέλθει από διαφορετική υδροχημική φάση, την απλή διάλυση ή μίξη.



Σχήμα 4. 6 Διάγραμμα Durov του καρστικού υδροφόρου (Μάιος 2015).

Παρεμφερή συμπεράσματα εξάγονται για το μήνα Ιανουάριο του ίδιου υδροφορέα, καθώς και για τον αλλουβιακό υδροφόρο. Τα αντίστοιχα διαγράμματα εμπεριέχονται στο παράρτημα της διατριβής.

4.3.2.4. Σίδηρος (Fe) – Μαγγάνιο (Mn) – Ψευδάργυρος (Zn)

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.11, οι μέσες συγκεντρώσεις των μετάλλων Fe, Mn και Zn για τον αλλουβιακό υδροφορέα κυμάνθηκαν στις τιμές 0.672 mg/L, 0.335 mg/L και 0.1812 mg/L, αντίστοιχα, για την δειγματοληπτική περίοδο του Ιανουαρίου, ενώ το Μάιο ο σίδηρος διαφοροποιήθηκε σημαντικά (0.7992 mg/L) και το μαγγάνιο κυμάνθηκε σε 0.4522 mg/L, ενώ ο ψευδάργυρος ήταν 0.1291 mg/L.

ID	Ιανουάριος			Μάιος		
	Fe (ppb)	Mn (ppb)	Zn (ppb)	Fe (ppb)	Mn (ppb)	Zn (ppb)
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	672.0	335.0	181.2	799.2	425.2	129.1
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	346.0	71.0	17.0	95.0	42.0	20.0
ΜΕΓΙΣΤΟ	1173.00	843.0	374.0	1624.0	2756.0	390.0
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	385.3178	335.7	142.7	558.0	708.2	112.5

Πίνακας 4. 11 Βαρέα μέταλλα Fe, Mn και Zn αλλουβιακού υδροφορέα, περιόδων Ιανουαρίου και Μαΐου

Γενικά, η αυξημένη συγκέντρωση βαρέων μετάλλων αποδεικνύει την επισταμένη μεταλλευτική και μεταλλουργική δραστηριότητα που λαμβάνει χώρα στην περιοχή μελέτης, κάτι το οποίο συνάδει με τις χρήσεις γης της Λαυρεωτικής (αστικές, γεωργικές, κτηνοτροφικές) και τις περιβαλλοντικές πιέσεις που ασκούνται στην περιοχή (Skarpelis and Argyraki 2009). Η έκπλυση των σχιστολιθικών πετρωμάτων από τη διέλευση του κατεισδύοντος νερού αποτελεί μια εξίσου σημαντική πηγή των βαρέων αυτών μετάλλων.

Το μαγγάνιο εμφανίζεται στους υδροφόρους της περιοχής έρευνας σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες των ορίων ποσιμότητας. Η παρουσία Mn αποδίδεται στα υφιστάμενα σιδηρομεταλλεύματα στην περιοχή έρευνας. Συγκεκριμένα, αποδίδεται στα μάρμαρα που απαντώνται στο γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής μελέτης.

Οι συγκεντρώσεις ψευδαργύρου (Zn) υπερβαίνουν κατά πολύ την τιμή των 100 ppb και στις δύο περιπτώσεις υδροφόρων και οφείλονται, στην περίπτωση του αλλουβιακού υδροφόρου, στην οξείδωση θεικίων ορυκτών και στην αποσάθρωση των σχιστολιθικών πετρωμάτων (Skarpelis 2007).

4.3.2.5. Νιτρικά ιόντα (NO_3^-)

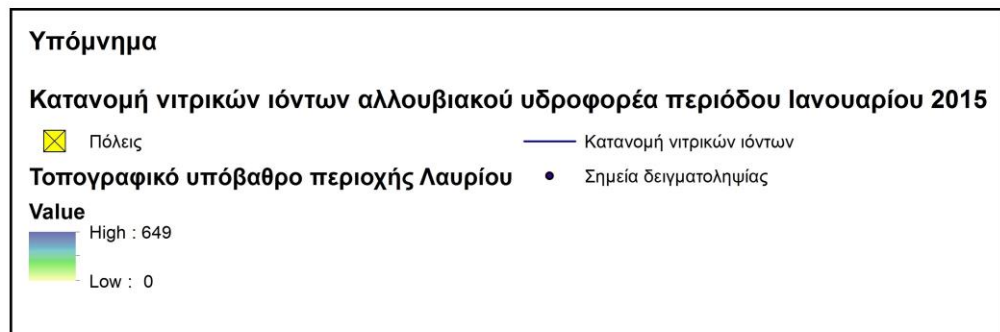
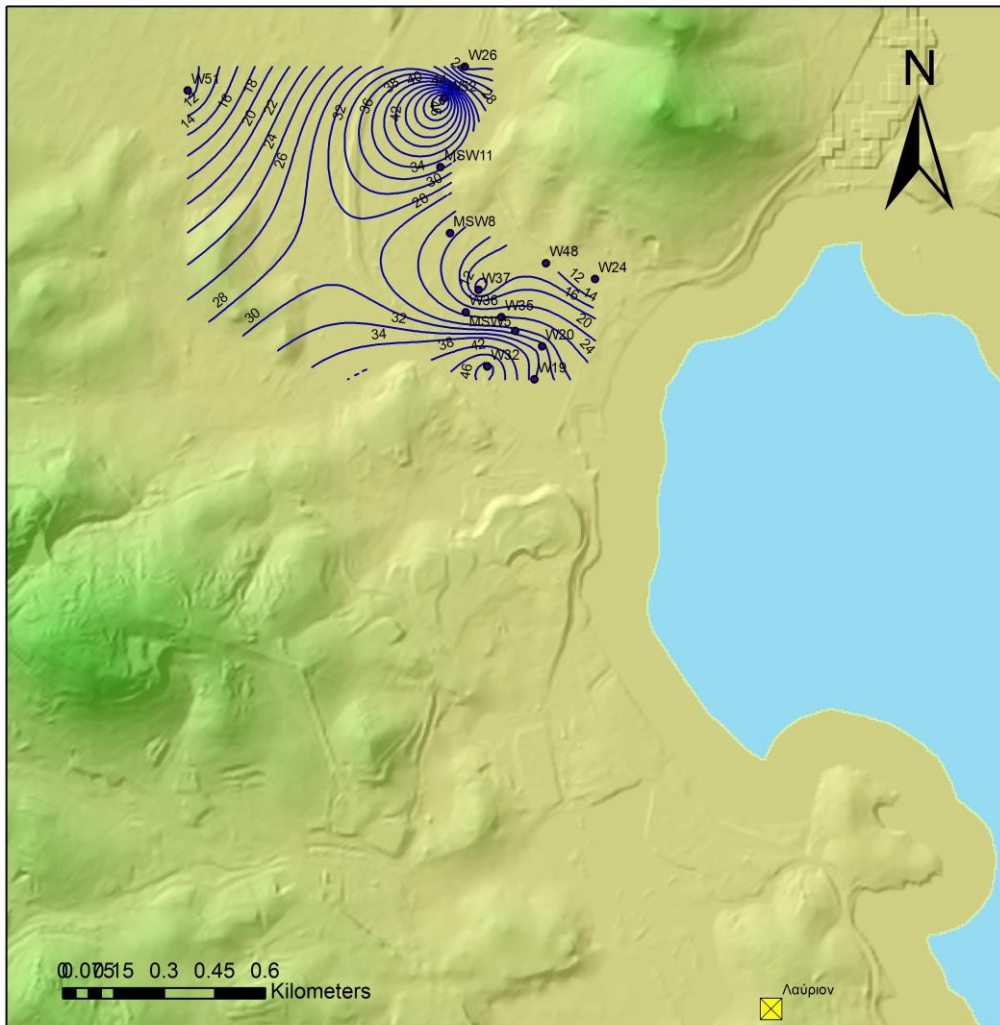
Τα νιτρικά ιόντα NO_3^- προέρχονται από την αποσύνθεση οργανικών ενώσεων, αλλά και από εντατική χρήση λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων. Όπως φαίνεται και στον **Πίνακα 4.12** το μήνα Ιανουάριο η μέση τιμή τους στα νερά του αλλουβιακού υδροφορέα ήταν 24.6 (mg/L), ενώ το Μάιο 29.8 (mg/L), εντός των αποδεκτών ορίων. Ανάλογα, στον καρστικό υδροφόρο, οι μέσες τιμές των νιτρικών ιόντων για Ιανουάριο και Μάιο αντίστοιχα, ήταν 55.9 (mg/L) και 50.1 (mg/L). Μεγαλύτερη περιεκτικότητα θα υποδήλωνε την ύπαρξη βιορύπων, ακόμα και την ανάμειξη με αρδευτικά νερά από εδάφη που έχουν λιπανθεί. Η πιο εκτεταμένη νιτρορύπανση (τιμές >30 mg/L) παρατηρήθηκε στα νερά του καρστικού υδροφορέα. Πρόκειται για έναν μη σημειακό ρύπο, εξού και η διαφοροποίηση των τιμών νιτρικών ιόντων στα διάφορα σημεία δειγματοληψίας.

	Ιανουάριος	Μάιος	Ιανουάριος	Μάιος
ID	NO ₃ ⁻ (ppm)	NO ₃ ⁻ (ppm)	NO ₃ ⁻ (ppm)	NO ₃ ⁻ (ppm)
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	24.6	29.8	55.9	50.1
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	8.0	12.0	3.1	11.0
ΜΕΓΙΣΤΟ	51.7	52.0	233.0	150.0
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	18.7	15.4	80.1	45.1
	Αλλουβιακός υδροφόρος		Καρστικός υδροφόρος	

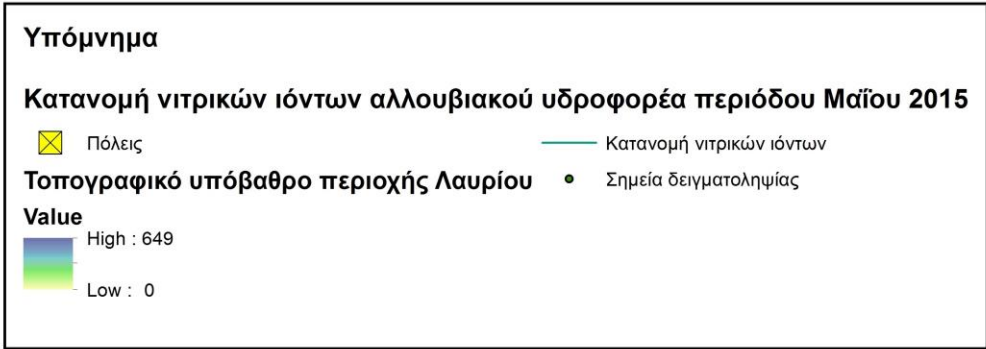
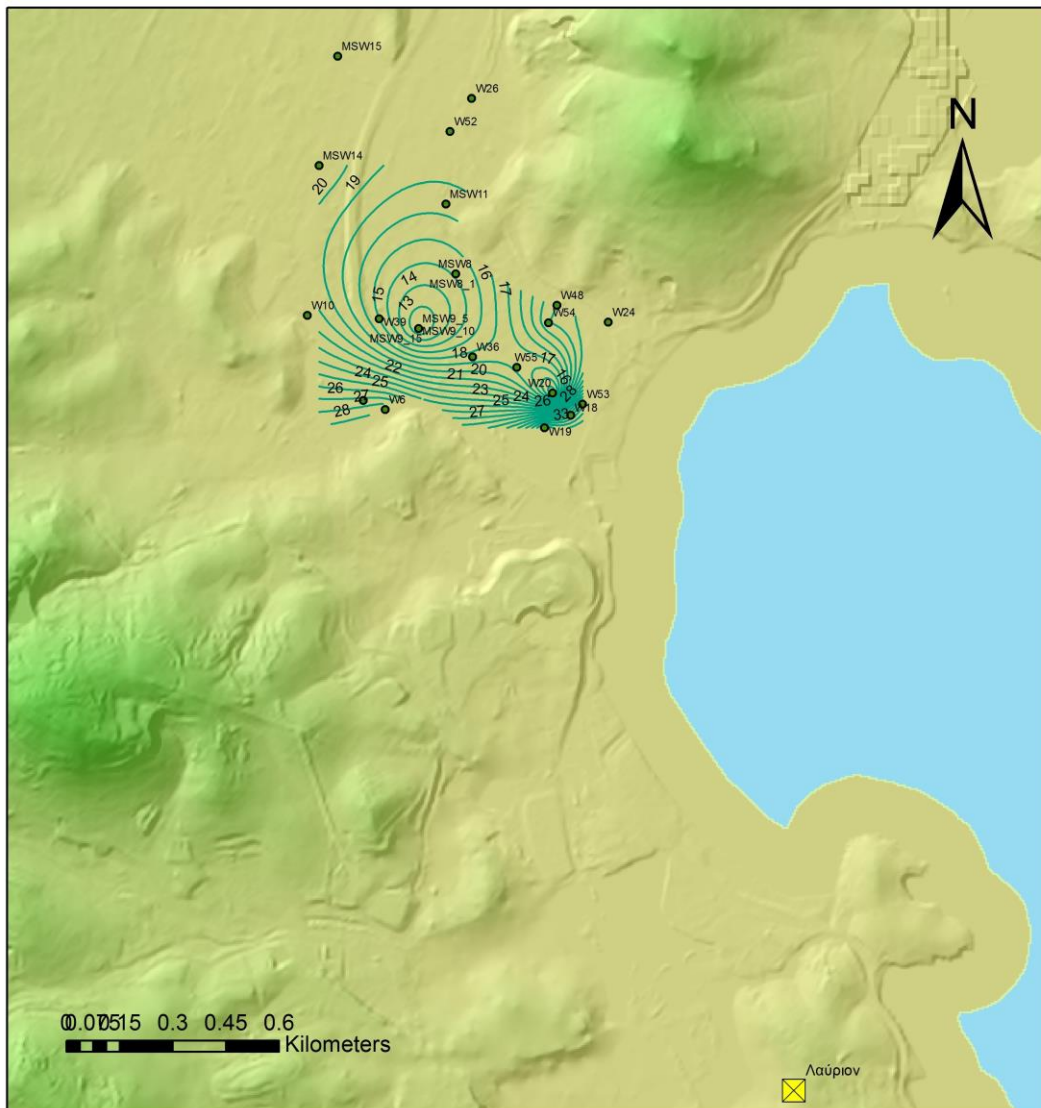
Πίνακας 4. 12 Νιτρικά ιόντα στους υδροφορείς της περιοχής μελέτης για τις περιόδους Ιανουαρίου και Μαΐου

Οι μέγιστες τιμές των δειγμάτων υπόγειου νερού στον καρστικό υδροφορέα είναι εμφανώς μεγαλύτερες των αντίστοιχων τιμών στον αλλουβιακό υδροφορέα.

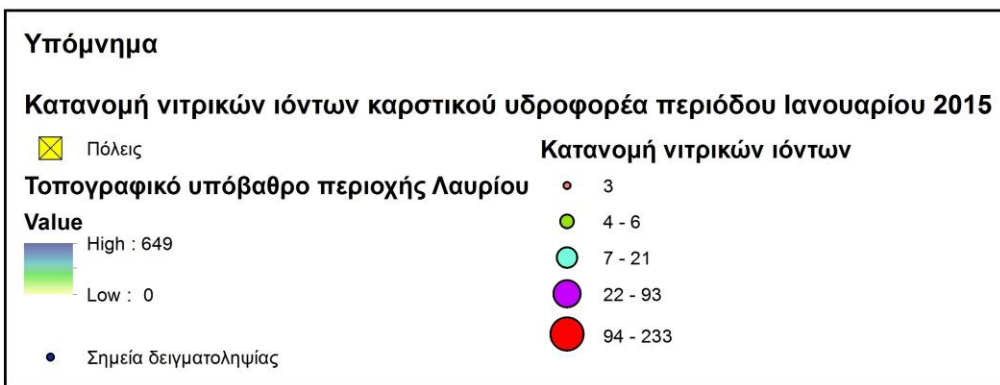
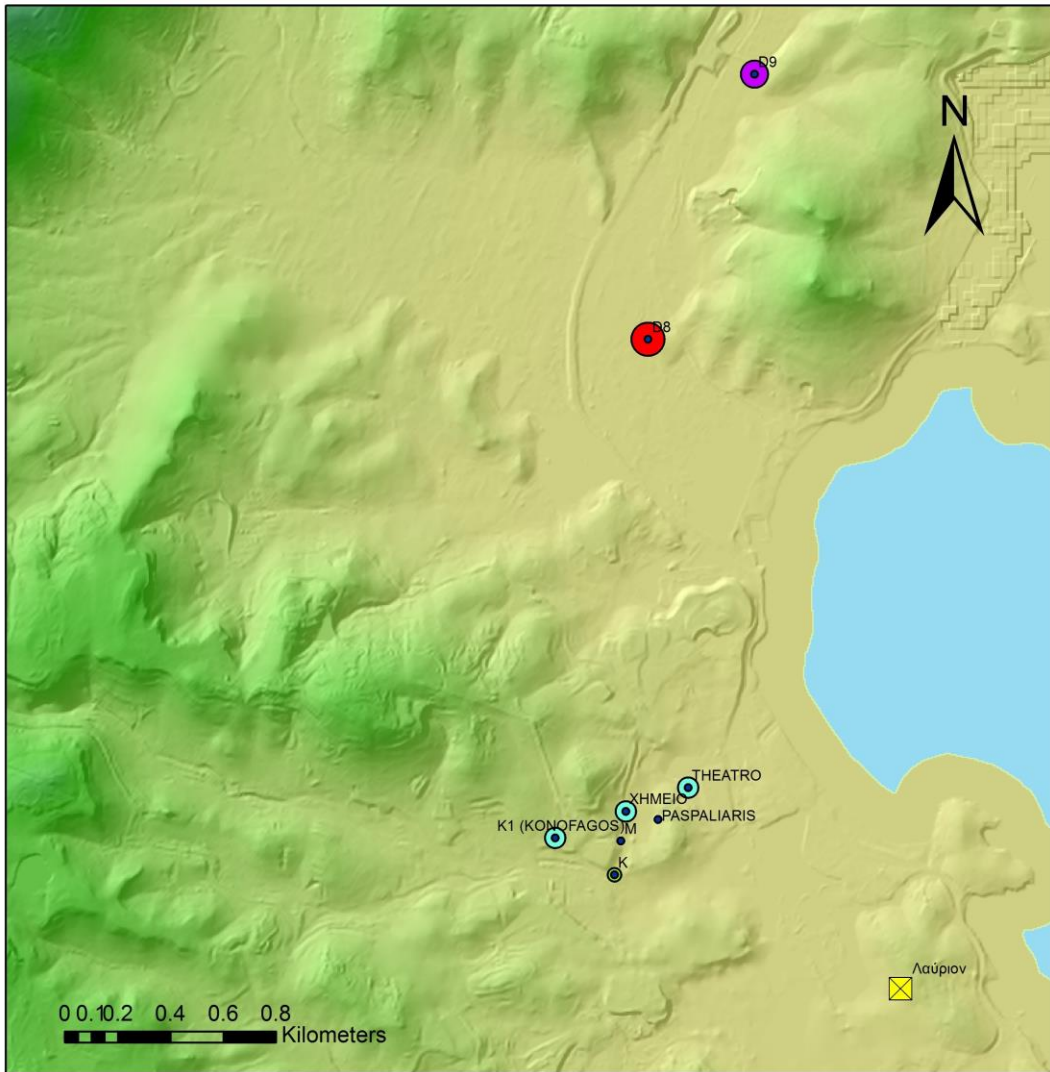
Σύμφωνα με τους χάρτες κατανομής (**Χάρτης 4.14 – 4.17**) των νιτρικών ιόντων για τους δύο τύπους υδροφορέων της περιοχής έρευνας, προκύπτει ότι παρόλο που οι τιμές των νιτρικών κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα, διαπιστώθηκαν κάποια δείγματα (D8, D9) νερών από τον καρστικό υδροφόρο τα οποία είχαν ιδιαίτερα αυξημένη συγκέντρωση νιτρικών, συγκεκριμένα 233 mg/L και 93 mg/L τον Ιανουάριο και 150 mg/L και 81 mg/L το Μάιο. Πρόκειται για επιβαρυμένα νερά σε αυτά τα σημεία, ενώ κάτι παρόμοιο δεν παρατηρείται στα δείγματα του αλλουβιακού υδροφορέα. Τα νιτρικά ιόντα σε υψηλές συγκεντρώσεις, γενικώς, υποδηλώνουν παρουσία βιολογικών ρύπων ή νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης ή ανάμειξη με νερά άρδευσης από λιπαινόμενες γαίες. Στην προκειμένη περίπτωση, τα νιτρικά ιόντα εμφανίζονται σε υψηλές συγκεντρώσεις λόγω σημειακών πηγών ρύπανσης.



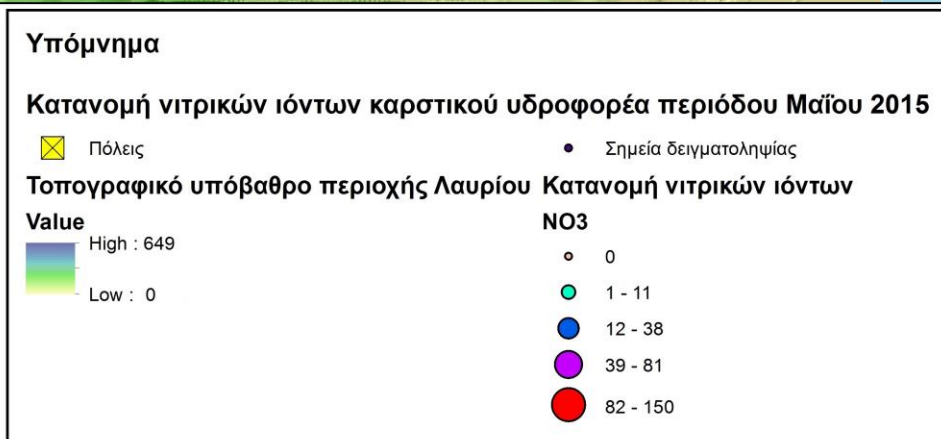
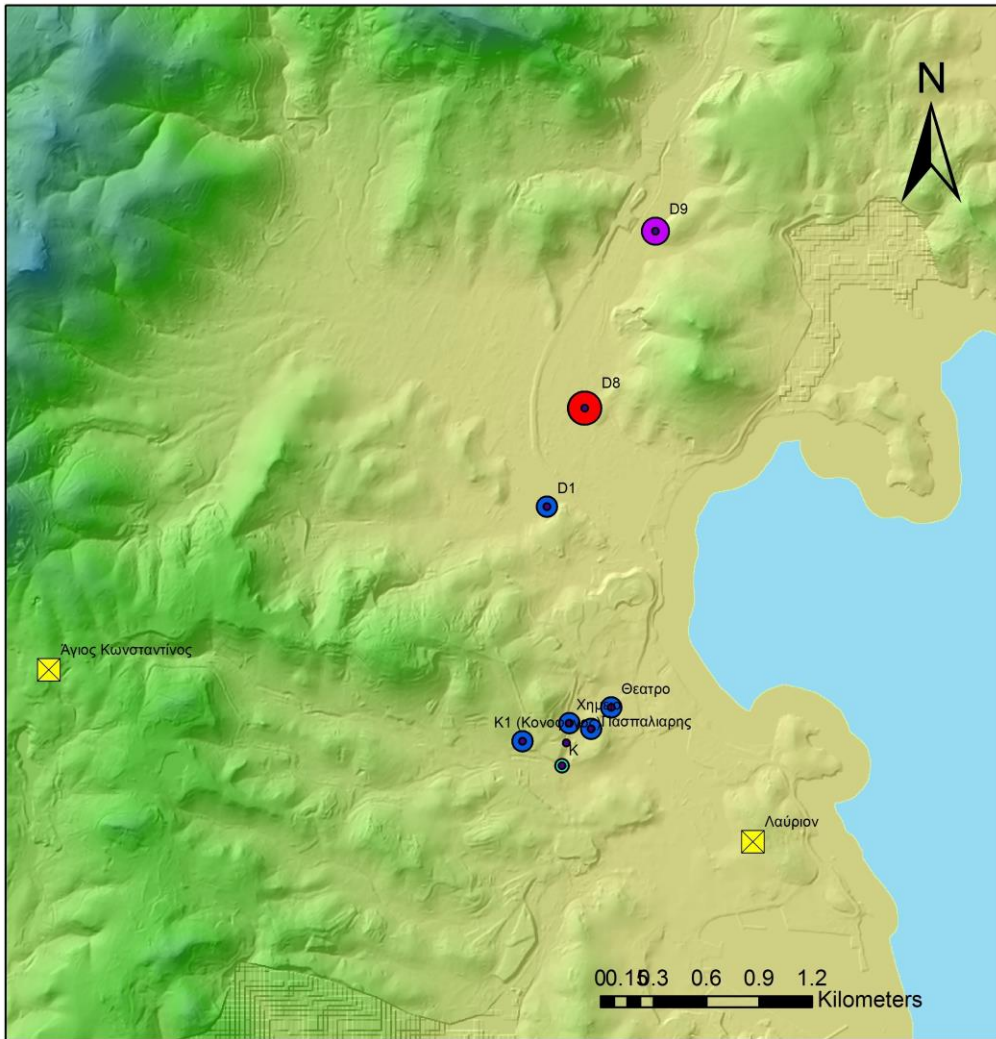
Χάρτης 4. 14 Ισονιτρικές καμπύλες αλλουβιακού υδροφορέα, περίοδο Ιανουαρίου 2015.



Χάρτης 4. 15 Ισονιτρικές καμπύλες αλλουβιακού υδροφορέα περιόδου Μαΐου 2015



Χάρτης 4. 16 Συγκέντρωση νιτρικών ιόντων του καρστικού υδροφορέα περιόδου Ιανουαρίου 2015



Χάρτης 4. 17 Συγκέντρωση νιτρικών ιόντων του καρστικού υδροφορέα περιόδου Μαΐου 2015.

4.3.2.6. Ώξινα ανθρακικά ιόντα (HCO_3^-)

Τα όξινα ανθρακικά ιόντα (HCO_3^-) αποτελούν το επικρατέστερο ανιόν στα υπόγεια νερά. Πηγές του είναι το CO_2 , αλλά και η διάλυση των ανθρακικών πετρωμάτων, τα οποία απαντώνται στην περιοχή μελέτης. Τα όξινα ανθρακικά ιόντα συνδέονται με την αλκαλικότητα των νερών, δηλαδή την ικανότητά τους να εξουδετερώνει ένα οξύ. Τα περισσότερα υπόγεια και επιφανειακά νερά η τιμή της αλκαλικότητας εκφράζεται σε συνάρτηση με την συγκέντρωση των όξινων ανθρακικών ιόντων ή ως ισοδύναμο CaCO_3 . Στο υφιστάμενο στους ανθρακικούς σχηματισμούς (π.χ. ασβεστόλιθος) νερό, διαλύεται το διοξειδίο του άνθρακα της ατμόσφαιρας και του εδάφους. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις σε ανθρακικά ιόντα συνεπάγονται αυξημένες τιμές αλκαλικότητας, ενώ το αντίθετο συμβαίνει σε σκληρά πετρώματα.

Εν προκειμένω, οι μέσες τιμές HCO_3^- για τον Ιανουάριο ήταν 371.1 (mg/L) (προσχωματικός υδροφόρος) και 297.4 (mg/L) (καρστικός υδροφόρος), ενώ για το Μάιο 501 (mg/L) (προσχωματικός υδροφόρος) και 533.8 (mg/L) (καρστικός υδροφόρος) (Πίνακας 4.13).

	Ιανουάριος	Μάιος	Ιανουάριος	Μάιος
ID	HCO_3^- (ppm)	HCO_3^- (ppm)	HCO_3^- (ppm)	HCO_3^- (ppm)
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	371.1	501.0	297.4	533.8
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	244.0	305.0	244.0	427.0
ΜΕΓΙΣΤΟ	549.0	610.0	427.0	640.5
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	94.7	87.3	60.5	65.2
	Αλλουβιακός υδροφόρος		Καρστικός υδροφόρος	

Πίνακας 4. 13 Κατανομή όξινων ανθρακικών ιόντων των δύο υδροφορέων για Ιανουάριο και Μάιο.

Φυσικό επακόλουθο είναι οι τιμές αλκαλικότητας να είναι αυξημένες. Επίσης, γίνεται εύκολα αντιληπτό πως ο αλλουβιακός υδροφόρος τροφοδοτείται από τον καρστικό, εξού και οι αυξημένες τιμές όξινων ανθρακικών ιόντων στον πρώτο.

4.3.2.7. Θειικά ιόντα (SO_4^{-2})

Η διάλυση της γύψου και των σουλφιδίων σιδήρου είναι ίσως οι σημαντικότερες πηγές προέλευσης των θειικών ιόντων (Βουδούρης 2009). Τυπικές συγκεντρώσεις αυτών στα υπόγεια ύδατα κυμαίνονται σε χαμηλότερες τιμές από 300 mg/L.

Κατόπιν μελέτης των δεδομένων, όσον αφορά στον αλλουβιακό υδροφόρο, το ποσοστό αυξημένων συγκεντρώσεων SO_4 υποδεικνύει ρύπανση της περιοχής, λόγω φυσικών διεργασιών του υπεδάφους (διάλυση αλάτων των πετρωμάτων, κατά τη διάρκεια της διέλευσης του διηθούμενου νερού). Οι τιμές που παρατηρήθηκαν συνοψίζονται ως εξής: Μέσες τιμές SO_4^{-2} Ιανουάριος: 1386.3 (mg/L) (προσχωματικός υδροφόρος) και 1712.8 (mg/L) (καρστικός υδροφόρος). Μάιος: 2116.7 (mg/L) (προσχωματικός υδροφόρος) και 2366 (mg/L) (καρστικός υδροφόρος) (Πίνακας 4.14).

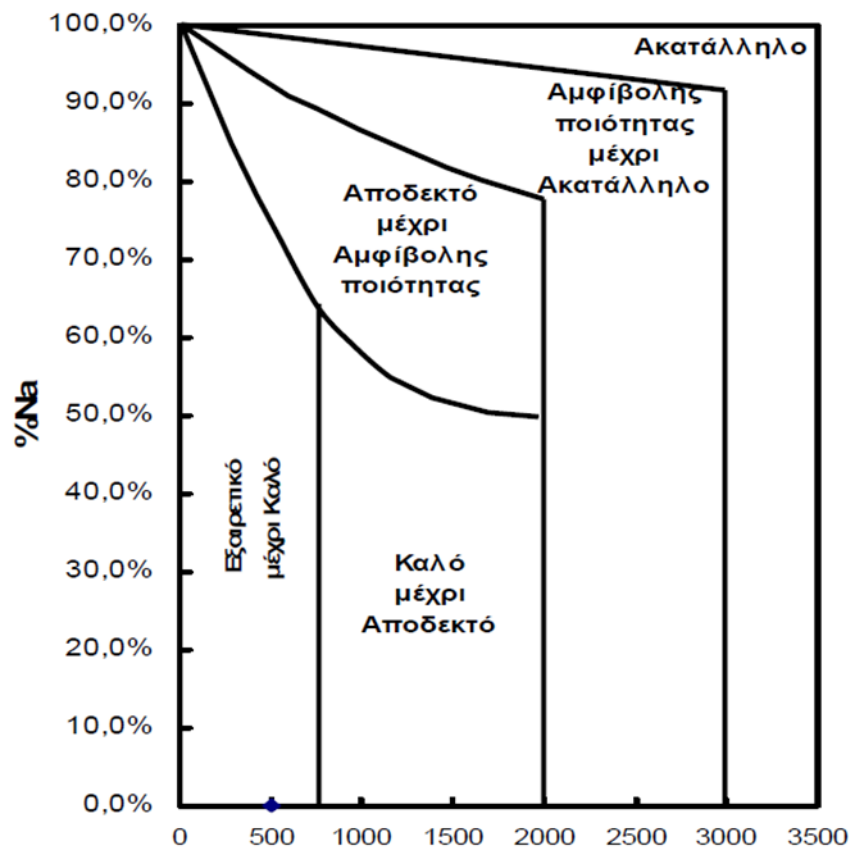
ID	Ιανουάριος	Μάιος	Ιανουάριος	Μάιος
	SO ₄ ⁻² (ppm)	SO ₄ ⁻² (ppm)	SO ₄ ⁻² (ppm)	SO ₄ ⁻² (ppm)
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	1386.3	2116.7	1712.8	2366.0
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	563.6	442.0	906.4	1426.0
ΜΕΓΙΣΤΟ	2666.6	5275.0	3978.4	3000.0
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	647.3	1220.6	1004.5	499.4
	Αλλουβιακός υδροφόρος		Καρστικός υδροφόρος	

Πίνακας 4. 14 Θειικά ιόντα (SO₄⁻²) των υδροφόρων της περιοχής μελέτης, για τις περιόδους Ιανουαρίου και Μαΐου.

Οι πολύ μεγάλες τιμές συγκεντρώσεων θειικών ιόντων ενδεχομένων να οφείλονται στα όξινα απόβλητα των μεταλλείων που λειτουργούσαν επί τόσα χρόνια (Komnitsas et al.1995).

4.3.2.8. Καταλληλότητα για άρδευση.

Τα υπόγεια νερά που παρουσιάζουν υψηλές συγκεντρώσεις αλάτων και



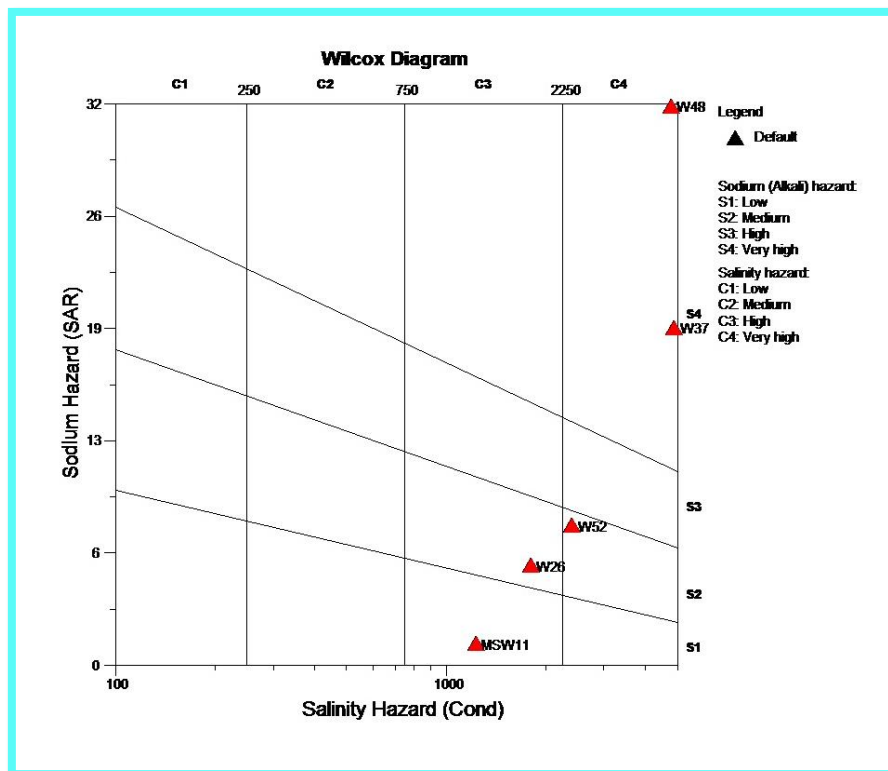
χρησιμοποιούνται για άρδευση, έχουν σαν αποτέλεσμα την αλλαγή στη δομή του εδάφους. Σύμφωνα με το διάγραμμα Wilcox (Σχήμα 4.7), τα υπόγεια νερά ταξινομούνται βάσει του βαθμού αλκαλίωσης Na. Ο συντελεστής προσρόφησης νατρίου αποτελεί ένα βασικό κριτήριο καταλληλότητας του νερού για άρδευση. Η παρουσία νατρίου στο έδαφος οδηγεί σε αποκροκίδωση

Σχήμα 4. 7 Διάγραμμα ταξινόμησης υπόγειων νερών βάσει του βαθμού αλκαλίωσης Na (Διάγραμμα Wilcox) (Βουδούρης 2009).

του, ενώ περιορίζει τη δυνατότητα αερισμού του και κατ' επέκταση μειώνει την περατότητά του. Η διαβρωτική ικανότητα του νερού, με άλλα λόγια η ικανότητα απόθεσης αλάτων, όπως CaCO₃, είναι καθοριστική όσον αφορά στις χρήσεις του και εξαρτάται από τη θερμοκρασία, το διαλυμένο οξυγόνο, την ταχύτητα ροής του νερού

και το pH. Τα βακτήρια δρουν ως καταλύτες για τις χημικές αντιδράσεις εντός του εδάφους (Βουδούρης 2006).

Κατόπιν μελέτης των διαγραμμάτων Wilcox για τις δύο περιπτώσεις των υδροφόρων οριζόντων της περιοχής έρευνας, για τις δύο δειγματοληπτικές περιόδους (Ιανουάριος και Μάιος 2015), τα υπόγεια νερά χαρακτηρίζονται πολύ κακής ποιότητας, ακατάλληλα για άρδευση, προφανώς και για ύδρευση. Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 4.8**, τα δείγματα από τον αλλουβιακό υδροφόρο, για την περίοδο του Ιανουαρίου 2015, κατατάσσονται κατά Wilcox σε ποιότητα αμφίβολη έως πολύ κακή. Οι αντίστοιχες κατηγορίες στις οποίες υπάγονται τα προκείμενα υπόγεια νερά είναι οι C₄S₄, C₄S₂, C₃S₂ και C₃S₁. Οι κατηγορίες αυτές, σύμφωνα με τον **Πίνακα 4.1**, συνεπάγονται αντιστοίχως ότι τα νερά αυτά δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται σε καμία περίπτωση, δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται παρά μόνο για ανθεκτικά φυτά σε ελαφρά εδάφη επαρκώς αποστραγγιζόμενα, με προσθήκη γύψου, συνίσταται η αποφυγή χρήσης τους σε ευαίσθητα φυτά και σε βαριά εδάφη και δεν προτείνεται η χρήση τους παρά μόνο λαμβάνοντας μέτρα προφύλαξης. Ανάλογα συμπεράσματα προκύπτουν για τη δειγματοληπτική περίοδο του Μαΐου όσον αφορά στα υπόγεια νερά του αλλουβιακού υδροφόρου, καθώς και στα δείγματα υπόγειων νερών του καρστικού υδροφόρου, για τον Ιανουάριο και το Μάιο. Τα αντίστοιχα υδροχημικά διαγράμματα παρατίθενται στο **Παράρτημα 2**.



Σχήμα 4. 8 Διάγραμμα Wilcox. Αλλουβιακός υδροφόρος. Ιανουάριος 2015.

Συμπερασματικά, υπάρχει άμεσος συσχετισμός της ποιότητας και της ποσότητας των ιόντων στα υπόγεια νερά, με το ιζηματολογικό υπόβαθρο του υδροφόρου (λεπτόκοκκος, αδρομερής κ.α.).

4.3.2.9. Καταλληλότητα υπόγειων νερών για ανθρώπινη κατανάλωση.

Ως πόσιμο νοείται το νερό που χρησιμοποιείται για ανθρώπινη κατανάλωση, είτε μετά από προηγούμενη επεξεργασία του, είτε όχι, ανεξαρτήτως προέλευσης και περιλαμβάνει το νερό που διατίθεται για ανθρώπινη κατανάλωση, το νερό που χρησιμοποιείται στις βιομηχανίες τροφίμων και ποτών για την παρασκευή, κατεργασία, συντήρηση ή διάθεση στην αγορά προϊόντων ή ουσιών που προορίζονται για ανθρώπινη κατανάλωση, καθώς και το νερό που επηρεάζει τον τελικό βαθμό υγιεινής των τροφίμων και των ποτών.

Το νερό που προορίζεται για ανθρώπινη κατανάλωση ή χρήση, δεν πρέπει να περιέχει παθογόνους μικροοργανισμούς και συγκεντρώσεις χημικών ουσιών που μπορεί να προκαλέσουν βλάβη στην υγεία του ανθρώπου. Η ισχύουσα νομοθεσία όσον αφορά στο νερό ανθρώπινης κατανάλωσης, διέπεται από την ΚΥΑ Υ2/2600/01 περι της ποιότητας νερού ανθρώπινης κατανάλωσης σε συμμόρφωση με την οδηγία 98/83/ΕΚ [ΦΕΚ892/11-7-01], την τροποποίησή της περί της ποιότητας νερού ανθρώπινης κατανάλωσης (Αριθ. ΔΥΓ2/Γ.Π. οικ 38295 [ΦΕΚ 630/26-4-07]), και την Κοινοτική οδηγία για νερό ανθρώπινης κατανάλωσης (98/83 ΕΚ). Η οδηγία αποσκοπεί στην διασφάλιση της ποιότητας του νερού που λαμβάνουν οι καταναλωτές, τόσο ως πόσιμο νερό, όσο και ως συστατικό τροφίμων.

Σύμφωνα με τη Νέα Οδηγία 98/83/ΕΚ (ΚΥΑ Υ2/2600/2001, ΦΕΚ 892/Β'/11.7.2001, «Ποιότητα του Νερού Ανθρώπινης Κατανάλωσης»), οι χημικές παράμετροι (ΜΕΡΟΣ Β) διαμορφώνονται όπως στον Πίνακα 4.15. Σύμφωνα με τις αναγραφόμενες τιμές και τις τιμές των χημικών αναλύσεων του Παραρτήματος 3 του παρόντος τεύχους, τα υπόγεια νερά της περιοχής έρευνας είναι ακατάλληλα για ανθρώπινη κατανάλωση, καθότι οι τιμές των χημικών παραμέτρων υπερβαίνουν κατά πολύ τις επιτρεπόμενες τιμές, όπως υπαγορεύονται στη σχετική Οδηγία.

Πίνακας 4. 15 Χημικές Παράμετροι (Κοινή Υπουργική Απόφαση Υ2/2600/2001)

Παράμετρος	Παραμετρική τιμή	Μονάδα
Ακρυλαμίδιο	0,10	μg/l
Αντιμόνιο	5,0	μg/l
Αρσενικό	10	μg/l
Βενζόλιο	1,0	μg/l
Βενζο-α-πυρένιο	0,010	μg/l
Βόριο	1,0	mg/l
Βρωμικά	10	μg/l
Κάδμιο	5,0	μg/l
Χρόμιο	50	μg/l
Χαλκός	2,0	mg/l
Κυανιούχα	50	μg/l
1,2 -διχλωροαιθάνιο	3,0	μg/l
Επιχλωρυδρίνη	0,10	μg/l
Φθοριούχα	1,5	mg/l
Μόλυβδος	10	μg/l
Υδράργυρος	1,0	μg/l
Νικέλιο	20	μg/l
Νιτρικά	50	mg/l
Νιτρώδη	0,50	mg/l
Παρασιτοκτόνα	0,10	μg/l
Σύνολο παρασιτοκτόνων	0,50	μg/l
Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες	0,10	μg/l
Σελήνιο	10	μg/l
Τετραχλωροαιθέριο και Τριχλωροαιθέριο	10	μg/l
Ολικά τριαλογονομεθάνια	100	μg/l
Βινυλοχλωρίδιο	0,50	μg/l

Οι επιτρεπόμενες τιμές για τις ποιοτικές παραμέτρους, που προσδιορίζουν την καταλληλότητα του πόσιμου νερού, καθορίζονται από τους πίνακες που ακολουθούν:

Πίνακας 4. 16 ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑΣ ΠΟΣΙΜΟΥ ΝΕΡΟΥ (Λαζαρίδου Μ. Ελληνική Νομοθεσία για τα νερά)

A. ΟΡΓΑΝΟΛΗΠΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

	Παράμετροι	Εκφραση των αποτελεσμάτων(1)	Ενδεικτικό επίπεδο	Ανώτατη παραδεκτή συγκέντρωση	Παρατηρήσεις
1	Χρώμα	mg/1 κλίμακα Pt/Co	1	20	
2	Θολερότητα	mg/1 SiO ₂ μονάδες Jackson	1 0,4	10 4	- Μέτρηση που έχει αντικατασταθεί σε μερικές περιπτώσεις από αυτή της διαύγειας υπολογιζόμενης σε μέτρα με το δίσκο του Secchi: Ενδεικτικό επίπεδο : 6 m Ανώτατη παραδεκτή συγκέντρωση : 2m
3	Οσμή	Ποσοστό διαλύσεως	0	2 μέχρι 12°C 3 μέχρι 25°C	-Να γίνει συσχέτιση με τις δοκιμασίες οσμής.

(1) Αν ένα Κράτος Μέλος, βασιζόμενο στην οδηγία αριθ. 71/354/ΕΟΚ όπως τροποποιήθηκε τελευταία, χρησιμοποιήσει, στη δική του νομοθεσία που θεσπίζεται σύμφωνα με την παρούσα οδηγία, μονάδες μετρήσεως που είναι διάφορες από αυτές που αναφέρονται στο παράρτημα αυτό, οι αναγραφόμενες τιμές πρέπει να έχουν τον ίδιο βαθμό ακρίβειας.

	Παράμετροι	Εκφραση των αποτελεσμάτων	Ενδεικτικό επίπεδο	Ανώτατη παραδεκτή συγκέντρωση	Παρατηρήσεις
5	Θερμοκρασία	°C	12	25	
6	Συγκέντρωση σε ιόντα υδρογόνου	Μονάδα pH	6,5≤pH≤8,5		- Το νερό δεν πρέπει να είναι δραστικό. - Οι τιμές του pH δεν έχουν εφαρμογή στα συσκευασμένα νερά. - Ανώτατη παραδεκτή τιμή: 9,5

7	Αγωγιμότητα	μS cm-1 έως 20°C	400		- Σε αντιστοιχία με την μεταλλικότητα των νερών. - Τιμές που αντιστοιχούν στην ειδική αντίσταση σε ohm/cm: 2.500
8	Χλώριο	mg/l Cl	25		- Κατά προσέγγιση συγκέντρωση πάνω από την οποία υπάρχει κίνδυνος να προκληθούν συνέπειες : 200mg/l.
9	Θειικά	mg/l SO ₄	25	250	
10	Πυρίτιο	mg/l SiO ₂			Βλ. άρθρο 6
11	Ασβέστιο	mg/l Ca	100		
12	Μαγνήσιο	mg/l Mg	30	50	
13	Νάτριο	mg/l Na	20	175 (από το 1984 και με ελάχιστο ποσοστό ανταποκρινόμενων δειγμάτων 90%)	- οι τιμές αυτής της παραμέτρου βασίζονται στις εισηγήσεις μιας Ομάδας Εργασίας του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (Χάγη, Μάιος 1978), που αφορούν μία προοδευτική μείωση της συνολικής παρούσας ημερήσιας προσλήψεως σε χλωριούχο

				<p>150 (από το 1987 και με ελάχιστο ποσοστό ανταποκρινομένων δειγμάτων 80%)</p>	<p>νάτριο στα 6 γραμμ.</p> <p>- η Επιτροπή θα υποβάλλει στο Συμβούλιο από την 1η Ιανουαρίου 1984 εκθέσεις σχετικά με την εξέλιξη που σημειώνεται στο θέμα της συνολικής ημερήσιας προσλήψεως χλωριούχου νατρίου από τον πληθυσμό.</p> <p>- Σ' αυτές τις εκθέσεις η Επιτροπή θα εξετάζει κατά ποσό η μέγιστη παραδεκτή συγκέντρωση των 120 mg/l που αναφέρεται από την Ομάδα Εργασίας του ΠΟΥ είναι αναγκαία για να επιτευχθεί ένα ικανοποιητικό επίπεδο για τη συνολική πρόσληψη του χλωριούχου νατρίου και θα προτείνει, αν είναι ανάγκη, στο Συμβούλιο</p>
--	--	--	--	---	--

				(αυτά τα ποσοστά θα υπολογίζονται για μία χρονική περίοδο αναγωγής 3 ετών)	<p>μία νέα τιμή ανώτατης παραδεκτής συγκεντρώσεως για το νάτριο και μια προθεσμία για να επιτευχθεί αυτή η τιμή.</p> <p>- Η Επιτροπή θα υποβάλει στο Συμβούλιο, πριν από την 1η Ιανουαρίου 1984, μια έκθεση σχετικά με το κατά πόσο η περίοδος αναφοράς των 3 ετών η σχετική με τον υπολογισμό των ποσοστιαίων εκατοστών είναι ή όχι επιστημονικά τεκμηριωμένη.</p>
14	Κάλιο	mg/l K	10	12	
15	Αργίλιο	mg/l Al	0,05	0,2	
16	Ολική σκληρότητα				Βλ. πίνακα ΣΤ,
17	Ξηρό υπόλειμμα	mg/l ύστερα από ξήρανση στους 180°C		1500	
18	Διαλελυμένο οξυγόνο	% O ₂ κορεσμού			- Τιμή κορεσμού > 75% των

					υπογείων νερών.
19	Ελεύθερο διοξείδιο του άνθρακος	mg/l CO ₂			- Το νερό δεν πρέπει να είναι δραστικό.
B. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΤΙΣ ΑΝΕΠΙΘΥΜΗΤΕΣ ΟΥΣΙΕΣ (υπερβολικές ποσότητες) (1)					
	Παράμετροι	Εκφραση των αποτελεσμάτων	Ενδεικτικό επίπεδο	Ανώτατη παραδεκτή συγκέντρωση	Παρατηρήσεις
20	Νιτρικά	mg/l NO ₃	25	50	
21	Νιτρώδη	mg/l NO ₂		0,1	
22	Αμμώνιο	mg/l NH ₄	0,05	0,5	
23	Άζωτο Kjeldahl (N από NO ₂ και NO ₃ εξαιρούνται)	μg/l N		ά	
24	Οξειδωσιμότης (Κ Mn O ₄)	mg/l O ₂	2	5	- Μέτρηση που γίνεται εν θερμώ και σε όξινο περιβάλλον.
25	Ολικός οργανικός άνθραξ (TOC)	mg/l C			- Κάθε αιτία αύξησης των συνηθών συγκεντρώσεων πρέπει να ερευνάται.
26	Υδρόθειο	μg/l S		μη ανιχνεύσιμο οργανοληπτικά	
27	Ύλες που εκχειλίζονται με χλωροφόρμιο	Ξηρό υπόλειμμα mg/l	0,1		
28	Υδρογονάνθρακες διαλελυμένοι ή εν γαλακτώματι (μετά από εκχύλιση με αιθέρα). Ορυκτέλαια	μg/l		10	

29	Φαινόλαι (αριθμός φαινόλης)	μg/l C ₆ H ₅ OH		0,5	- Με εξαίρεση τις φυσικές φαινόλες που δεν αντιδρούν με χλώριο
30	Βόριο	μg/l B	1 000		
31	Επιφανειοδραστικοί παράγοντες (αντιδρώντες στο κυανού του μεθυλενίου)	μg/l (lauryl sulfate)		200	
(1) Μερικές από αυτές τις ουσίες μπορούν και να είναι τοξικές όταν είναι παρούσες σε πολύ μεγάλες ποσότητες.					
32	Άλλες οργανοχλωριούχες ενώσεις που δεν υπάγονται στην παράμετρο Νο 55	μg/l	1		- Η συγκέντρωση σε αλογόνα πρέπει να ελαττωθεί όσο γίνεται περισσότερο
33	Σίδηρος	μg/l Fe	50	200	
34	Μαγγάνιο	μg/l Mn	20	50	
35	Χαλκός	μg/l Cu	100 - στην έξοδο των εγκαταστάσεων αντλήσεως και / ή παρασκευής και των βοηθητικών αυτών 3000 - ύστερα από 12 ωρών ηρεμία στις σωληνώσεις και στο σημείο		- Πάνω από 3.000 μg/l μπορεί να εμφανισθούν στυπτικές γεύσεις, χρώσεις και διαβρώσεις.

			της θέσεώς του στη διάθεση του καταναλωτού		
36	Ψευδάργυρος	μg/l Zn	100 - στην έξοδος των εγκαταστάσεων αντλήσεως και / ή παρασκευής και των βοηθητικών αυτών 5000 - ύστερα από 12 ωρών ηρεμία στις σωληνώσεις και στο σημείο της θέσεώς του στη διάθεση του καταναλωτού		- Πάνω από 5000 μg/l μπορεί να εμφανισθούν στυπτικές γεύσεις, οπαλλισμός και κοκκώδες απόθεμα.
37	Φωσφόρος	μg/l P2O5	400	5000	
38	Φθόριο	mg/l F		1500 700	- Ανώτατη παραδεκτή συγκέντρωση που ποικίλλει ανάλογα με τη μέση θερμοκρασία της υπό εξέταση γεωγραφικής περιοχής.
39	Κοβάλτιο	μg/l Co			
40	Υλεις εν αιωρήσει		Απουσία		

41	Χλώριο υπολειμματικό	μg/l Cl			- Βλ. άρθρο 6
42	Βάριο	μg/l Ba	100		
43	Άργυρος	μg/l Ag		10	Αν, σε κάποια εξαιρετική περίπτωση γίνει όχι συστηματική χρήση του αργύρου για την κατεργασία των νερών, μια τιμή ανώτατης παραδεκτής συγκεντρώσεως ίση με 80 μg/l μπορεί να γίνει δεκτή

Γ. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΤΟΞΙΚΕΣ ΟΥΣΙΕΣ

	Παράμετροι	Εκφραση των αποτελεσμάτων	Ενδεικτικό επίπεδο	Ανώτατη παραδεκτή συγκέντρωση	Παρατηρήσεις
44	Αρσενικό	μg/l As		50	
45	Βηρύλλιο	μg/l Be			
46	Κάδμιο	μg/l Cd		5	
47	Κυανιούχα άλατα	μg/l CN		50	
48	Χρώμιο	μg/l Cr		50	
49	Υδράργυρος	μg/l Hg		1	
50	Νικέλιο	μg/l Ni		50	
51	Μόλυβδος	μg/l Pb		50(στο τρεχούμενο νερό)	Σε περίπτωση διοχετεύσεως του νερού μέσα από μόλυβδο, η περιεκτικότητα σε μόλυβδο δεν θα πρέπει να

					είναι ανώτερη των 50μg/l σε ένα δείγμα που θα ληφθεί ύστερα από ροή. Αν το δείγμα ληφθεί αμέσως ή μετά από ροή και αν η περιεκτικότητα σε μόλυβδο υπερβαίνει συχνά ή αισθητά τα 100 μg/l θα πρέπει να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα για να ελαττωθούν οι κίνδυνοι εκθέσεως των καταναλωτών στον μόλυβδο.
52	Αντιμόνιο	μg/l Sb		10	
53	Σελήνιο	μg/l Se			
54	Βανάδιο	μg/l V			
55	Παρασιτοκτόνα και εξομοιούμενα προϊόντα : - ανά μεμονωμένη ουσία - Συνολικά	μg/l		0,1 0,5	Ως παρασιτοκτόνα και εξομοιούμενα προϊόντα νοούνται : - τα εντομοκτόνα : - οργανοχλωριούχες ενώσεις μεγάλου χρόνου ζωής

					<ul style="list-style-type: none"> - οργανοφωσφορικά - car bamates - ζιζανιοκτόνα - μυκητοκτόνα - τα PCB και PCT
56	Αρωματικοί πολυκυκλικοί υδρογονάνθρακες	μg/l		0,2	<ul style="list-style-type: none"> - ουσίες αναγωγής : - φθοριοανθένιο - βενζο-3,4 φθοριοανθένιο - βενζο - 11,12 φθοριοανθένιο - βενζο - 3,4 πυρένιο - βενζό - 1,12 πυρηλένιο - ινδενο (1,2,3 - cd) πυρένιο

Βάσει των ενδεικτικών τιμών των παραμέτρων που αναγράφονται στον **Πίνακα 4.16**, οι αντίστοιχες τιμές των χημικών αναλύσεων των δειγμάτων νερού της περιοχής έρευνας υπερβαίνουν σημαντικά τις ανώτατες αποδεκτές συγκεντρώσεις. Συγκεκριμένα, παράμετροι όπως η ηλεκτρική αγωγιμότητα, το χλώριο, τα νιτρικά, τα θειικά, ο ψευδάργυρος, το μαγγάνιο, ο σίδηρος, το κάλιο, το ασβέστιο και το μαγνήσιο, σημειώνουν αυξημένες συγκεντρώσεις (Παράρτημα 2), απαγορευτικές για ποσιμότητα, καθιστώντας το νερό ακατάλληλο για πόση.

4.3.3. Χημικοί τύποι υπογείων νερών

4.3.3.1. Εισαγωγή

Η ποιότητα του υπόγειου νερού καθορίζεται από τη λιθολογία των γεωλογικών σχηματισμών μεταξύ των οποίων κινείται. Ως εκ τούτου, υδροφορείς σε διαφορετικά πετρώματα αντιπροσωπεύουν νερά διαφορετικών υδροχημικών κατηγοριών.

Ο υδροχημικός χαρακτήρας των δειγμάτων νερού από τους υδροφόρους της περιοχής μελέτης προσδιορίστηκε βάσει των αποτελεσμάτων των υπαίθριων και εργαστηριακών αναλύσεων τους που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο του Τ.Π.Π.Λ.. Στη συνέχεια, παρατίθενται οι **Πίνακες 4.17** και **4.18** των αποτελεσμάτων και των τύπων του κάθε δείγματος της περιοχής μελέτης και από τους δύο υδροφορείς.

Καρστικός υδροφόρος

Ιανουάριος 2015

Μάιος 2015

Δείγμα	Τύπος νερού	Δείγμα	Τύπος νερού
D8	Na-SO4-Cl	D9	Na-SO4-Cl
D9	Na-SO4-Cl	D1	Na-SO4-Cl
K	Ca-Na-SO4	D8	Na-Cl-SO4
K1(KONOFAGOS)	Ca-Na-SO4	ΧΗΜΕΙΟ	Na-SO4-Cl
M	Na-SO4-Cl	K1 KONOFAGOS	Ca-Na-SO4-Cl
PASPALIARIS	Na-Ca-Cl-SO4	M	Na-SO4-Cl
THEATRO	SO4-HCO3	PASPALIARIS	Na-SO4-Cl
		THEATRO	Na-SO4-Cl

Πίνακας 4. 17 Χημικοί τύποι (χρωματογραφικοί) δειγμάτων νερού καρστικού υδροφόρου

Ο χαρακτήρας των δειγμάτων νερού από τον καρστικό υδροφόρο εμφανίζουν κατά βάση χαρακτήρα ασβεστούχα, χλωριούχα και θειικά (**Πίνακας 4.15**).

Σύμφωνα με τον **Πίνακα 4.16** τα δείγματα νερού από τον αλλουβιακό υδροφόρο παρουσιάζουν νατριούχο-χλωριούχο χαρακτήρα ως επί το πλείστον. Κάποια δείγματα χαρακτηρίζονται και χλωριο-θειικά (W24, W48, W20, MSW910, MSW915).

Αλλουβιακός υδροφόρος

Ιανουάριος 2015

Μάιος 2015

Δείγμα	Τύπος νερού	Δείγμα	Τύπος νερού
MSW11	Ca-SO4-HCO3	MSW14	Ca-Na-Cl
MSW5	Na-Cl-SO4	MSW9 ₁₀	Na-Ca-SO4-HCO3-Cl
MSW8	Na-Cl-SO4	MSW9 ₁₅	Na-SO4-HCO3-Cl
W19	Na-Cl	MSW9 ₅	Na-Cl
W20	Na-Cl-SO4	W18	Na-Cl
W24	Na-Ca-SO4-Cl-HCO3	W19	Na-Ca-Cl-SO4
W26	Na-Cl-SO4	W20	Na-Ca-SO4-Cl-HCO3
W32	Na-Cl-SO4	W48	Na-Ca-Cl-SO4-HCO3
w35	Na-SO4-Cl	W53	Na-SO4-Cl
W36	Na-Cl-SO4	W54	Na-SO4-Cl
W37	Na-Cl	W55	Na-SO4-Cl
W48	Na-SO4-Cl-HCO3	W6	Na-Cl-SO4
		W1	SO4-HCO3
		W10	Na-Cl-SO4
		MSW15	SO4-HCO3
		W24	Na-Cl-SO4
		MSW11	Na-Cl-SO4
		MSW8	Na-Ca-SO4
		MSW8 ₁	Na-SO4-HCO3
		W26	Na-SO4-Cl
		W52	Na-SO4-Cl
		W39	Na-SO4-Cl

Πίνακας 4. 18 Χημικοί τύποι δειγμάτων νερού αλλουβιακού υδροφόρου.

4.3.4. Ιοντικοί λόγοι

4.3.4.1. Γενικά

Στα υδατικά οικοσυστήματα, αναπτύσσονται συσχετίσεις μεταξύ των ιόντων των υπογείων νερών. Σε ιόντα ίδιου σθένους και φορτίου αναπτύσσεται μη ανταγωνιστική σχέση, σε ιόντα ίδιου φορτίου αλλά διαφορετικού σθένους αναπτύσσεται μια ισχυρά ανταγωνιστική σχέση, ενώ μεταξύ ιόντων με αντίθετα φορτία αλλά ίδιο σθένος αναπτύσσεται ισχυρή χημική συγγένεια (Βουδούρης 2009).

Οι ιοντικοί λόγοι παρέχουν πληροφορίες για την προέλευση των υπόγειων νερών. Πρόκειται για λόγους περιεκτικότητας διαφόρων ιόντων που εκφράζουν την ιοντική ισορροπία στο νερό. Οι τιμές των ιοντικών λόγων σχετίζονται με τον τύπο των περιβαλλόντων γεωλογικών σχηματισμών, ή τον τύπο των πετρωμάτων που διέσχισε το νερό, αλλά και με το βαθμό ανανέωσης του νερού ή ακόμα και με την ανάμιξή του με το θαλασσινό νερό. Ο πίνακας 4.19 αναγράφει τους σημαντικότερους ιοντικούς λόγους και παρέχει πληροφορίες σχετικά με την προέλευση των υπόγειων νερών για τα οποία ισχύουν οι τιμές των ιοντικών λόγων.

Ο λόγος Mg^{2+}/Ca^{2+} (meq/L) για το θαλασσινό νερό λαμβάνει την τιμή 5, ενώ για το γλυκό νερό κυμαίνεται μεταξύ 0,2-1,5. Σε παράκτιους καρστικούς υδροφόρους παρατηρείται μείωση του συγκεκριμένου λόγου με τη πάροδο του χρόνου (από την τιμή 5 πηγαίνει στην τιμή 2), λόγω αντικατάστασης των ιόντων Ca από ιόντα Mg (δολομιτίωση).

Ο λόγος $(Ca^{2+}+Mg^{2+})/(Na^{+}+K^{-})$ είναι μικρότερος της μονάδας σε περιοχές εκφόρτισης, ενώ είναι μεγαλύτερος της μονάδας σε περιοχές εμπλουτισμού.

Σχετικά με το λόγο Na^{+}/Cl^{-} , λαμβάνει ιδιαίτερα μικρές τιμές σε περιπτώσεις θαλάσσιας διείσδυσης. Η τιμή του ξεπερνά τη μονάδα όταν πρόκειται για υδροφορέα από αλκαλικά ή μεταμορφωμένα πετρώματα. Υψηλές τιμές του λόγου αυτού μαρτυρούν τη συσχέτιση της αποσάθρωσης Na – αστρίων, ενώ η μεγαλύτερη από τη μονάδα τιμή του σε χαμηλές τιμές αλατότητας, είναι ένδειξη ότι το μετεωρικό NaCl δεν αποτελεί τη μοναδική κύρια πηγή νατρίου.

Όσον αφορά στο λόγο Na^{+}/K^{+} , οι τιμές του κυμαίνονται μεταξύ 15-25 σε περιοχές εμπλουτισμού και μεταξύ 45-70 σε περιοχές εκφόρτισης, λόγω προσρόφησης ιόντων Na. Το νερό της βροχής έχει τιμή του λόγου Na/K ίση με 10 ενώ το θαλασσινό τιμή ίση με 46.

Τέλος, ο λόγος SO_4/Cl για το θαλασσινό νερό κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0,07-0,1. Όταν η τιμή του γίνει μικρότερη από την τιμή 0,2, πρόκειται για χλωριούχο υπόγειο νερό. Τιμές μεγαλύτερες της τιμής 5 αντιστοιχούν σε θειούχο υπόγειο νερό. Σε ενδιάμεσες καταστάσεις αποδίδεται ο χαρακτήρας χλωροθειούχος (0,2-1) και θειούχο-χλωριούχος (1-5).

Ιοντικός λόγος Mg/Ca : μας δείχνει αν το νερό προέρχεται από ασβεστολιθικά ή μαγνησιούχα πετρώματα		
Mg/Ca	< 0,5-0,7	Αντιστοιχούν σε νερό από ασβεστολιθικά υδροφόρα
Mg/Ca	= 0,7-0,9	Αντιστοιχούν σε δολομιτικά υδροφόρα στρώματα
Mg/Ca	>0,9	Αντιστοιχούν σε υδροφόρους οφιολιθικών σχηματισμών ή πυριτικών πλούσιων σε Mg
Ιοντικός λόγος Na/Cl : σχετίζεται με την υφαλμύρωση και τη διείσδυση θαλασσινού νερού		
Na/Cl	0,876±10%	Κανονικό υπόγειο νερό
Na/Cl	>1	Νερό από αλκαλικά πυριγενή ή μεταμορφωμένα πετρώματα
Na/Cl	<0,876±10%	Υφαλμύρωση υδροφορέα
Ιοντικός λόγος Na/K : σχετίζεται με το αν το νερό είναι θαλασσινό ή βρόχινο ή αν υπάρχει περιοχή εμπλουτισμού υδροφορέων		
Na/K	=47	Θαλασσινό νερό
Na/K	10	Βρόχινο νερό
Na/K	=15-25	Νερό σε περιοχή εμπλουτισμού υδροφορέων
Na/K	=50-70	Νερό σε κατάντη τμήμα του υδροφορέα σε σχέση με τη διεύθυνση ροής
Ιοντικός λόγος Cl/SO₄: σχετίζεται με την υφαλμύριση και την ύπαρξη υπολειμματικών αλάτων στους υδροφορείς		
Cl/SO ₄	=10	Θαλασσινό νερό
Cl/SO ₄	>5	Νερό χλωριούχο
Cl/SO ₄	=1-5	Νερό χλωροθειούχο
Cl/SO ₄	=0,2-1	Νερό θειούχο-χλωριούχο
Cl/SO ₄	<0,2	Νερό θειούχο
Ιοντικός λόγος (Ca+Mg)/(Na+K): σχετίζεται με την τροφοδοσία του υπόγειου νερού		
(Ca+Mg)/(Na+K)		>1, υδροφόρο στρώμα με συνεχή τροφοδοσία
(Ca+Mg)/(Na+K)		<1, παλιό νερό στα κατάντη τμήματα του υδροφορέα

Πίνακας 4. 19 Ιοντικοί λόγοι (Βουδούρης 2009)

4.3.4.2. Υπολογισμός ιοντικών λόγων υπόγειων νερών Θορικού

Οι Πίνακες 4.20 και 4.21 αναγράφουν τους ιοντικούς λόγους για τα νερά από τους δύο τύπους υδροφορέων της περιοχής μελέτης, για την εκάστοτε περίοδο δειγματοληψίας.

Παρακάτω δίδονται οι ιοντικοί λόγοι των δειγμάτων υπογείων νερών για την περιοχή μελέτης, εκφρασμένοι σε meq/l.

Αλλουβιακός υδροφόρος Ιανουάριος 2015					
ID	Mg ²⁺ /Ca ²⁺	Na ⁺ /Cl ⁻	(Ca ²⁺ +Mg ²⁺)/(Na ⁺ +K ⁺)	Na ⁺ /K ⁺	SO ₄ ⁻² /Cl ⁻
MSW11	0.2	1.6	2.5	9.1	38.2
W19	0.3	0.6	0.1	90.9	0.7
W20	2.4	0.6	0.1	71.4	0.5
W24	0.2	0.6	0.1	8.9	0.3
W26	0.4	0.7	0.2	99.0	0.6
W32	0.2	0.9	0.6	50.0	2.9
w35	0.1	0.7	0.2	43.5	1.1
W37	0.0	0.6	0.1	40.0	0.5
W51	0.0	0.6	0.2	66.7	1.7
W52	0.1	0.6	0.1	37.0	0.5
Καρστικός υδροφόρος Ιανουάριος 2015					
ID	Mg ²⁺ /Ca ²⁺	Na ⁺ /Cl ⁻	(Ca ²⁺ +Mg ²⁺)/(Na ⁺ +K ⁺)	Na ⁺ /K ⁺	SO ₄ ⁻² /Cl ⁻
D8	0.3	1.1	0.3	33.3	1.9
D9	1.4	0.7	0.2	37.0	2.3
M	0.0	1.2	0.9	14.3	10.1
K1(KONOFAGOS)	0.1	1.4	1.1	12.5	9.9
K	0.2	0.6	0.6	16.1	1.8
PASPALIARIS	0.1	0.9	0.3	40.0	2.2
THEATRO	0.2	0.7	0.3	32.3	1.0

Πίνακας 4. 20 Ιοντικοί λόγοι υδροφορέων της περιοχής Θορικού, Ιανουάριος 2015

Υφαλμύριση – Θαλάσσια διείσδυση (Na⁺/Cl⁻)

Στον αλλουβιακό υδροφόρο, τα περισσότερα δείγματα που λήφθηκαν κατά την περίοδο του Ιανουαρίου, παρουσιάζουν πολύ μικρές τιμές του λόγου αυτού, μαρτυρώντας την υφαλμύριση που υφίσταται η περιοχή στο σημείο αυτό, με εξαίρεση ένα δείγμα (MSW11) στη δειγματοληψία του Ιανουαρίου και 4 δείγματα (MSW14, W48, W10, W52) στη δειγματοληψία του Μαΐου, τα οποία δείχνουν να προέρχονται από τα μεταμορφωμένα πετρώματα της περιοχής (μάρμαρα).

Στον καρστικό υδροφόρο, παρατηρείται μια παρεμφερής κατάσταση, με εξαίρεση δύο δείγματα (D8, K1) για την περίοδο του Ιανουαρίου, ενώ για τη περίοδο του Μαΐου, όλα τα δείγματα υποδεικνύουν υφαλμύρωση.

Θαλασσινό/ Βρόχινο νερό – Περιοχή εμπλουτισμού (Na⁺/K⁺)

Όσον αφορά στη δειγματοληπτική περίοδο του Ιανουαρίου 2015, στα δείγματα M, K και K1 ΚΟΝΟΦΑΓΟΣ του καρστικού υδροφορέα, ο λόγος κυμάνθηκε μεταξύ των τιμών 15-25, γεγονός που συνεπάγεται ότι τα συγκεκριμένα δείγματα προέρχονται από περιοχή εμπλουτισμού.

Όσον αφορά στη δειγματοληψία του Μαΐου, στα δείγματα MSW14, MSW915, W53, W54, W6, W1, MSW15, MSW8, MSW81, W52 και W39 του αλλουβιακού υδροφορέα, καθώς και στα δείγματα K, K1 ΚΟΝΟΦΑΓΟΣ, THEATRO, PASPALIARIS και D1 του καρστικού υδροφορέα, παρατηρείται τιμή του λόγου μεταξύ 15-25 η οποία παραπέμπει σε περιοχή εμπλουτισμού.

Υφαλμύριση – ύπαρξη υπολειμματικών αλάτων στους υδροφορείς (SO₄/Cl)

Τα νερά του αλλουβιακού υδροφόρου, στην περίοδο του Ιανουαρίου, εμφανίζονται στην πλειονότητά τους χλωρο-θειούχα με εξαίρεση το δείγμα του σημείου W11 που χαρακτηρίζεται ως θειούχο και τα δείγματα από τα σημεία W32, W35 και W51 τα οποία είναι θειούχα-χλωριούχα. Στην περίοδο του Μαΐου, εμφανίζονται ως επί το πλείστον θειούχα-χλωριούχα εκτός από το δείγμα στο σημείο W53 που χαρακτηρίζεται ως θειούχο.

Τα νερά του καρστικού υδροφόρου χαρακτηρίζονται κυρίων θειούχα-χλωριούχα και χλωριούχα-θειούχα εκτός από τα δείγματα K1, K (για το Μάιο) και τα K1, M (για τον Ιανουάριο) που χαρακτηρίζονται ως θειούχα.

Τροφοδοσία υπόγειου νερού (Ca²⁺+Mg²⁺)/(Na⁺+K⁺)

Οι χαμηλές τιμές (<1) για τα νερά και των δύο υδροφορέων, στις δύο δειγματοληψίες, που παρουσιάζει αυτή η ιοντική σχέση, επιβεβαιώνουν ότι οι υδροφορείς βρίσκονται σε περιοχές εκφόρτισης. Εξαίρεση αποτελούν τα δείγματα νερού MSW11 (αλλουβιακός υδροφορέας) και K1 (καρστικός υδροφορέας) τα οποία βρίσκονται σε περιοχές εμπλουτισμού.

Ασβεστολιθική ή μαγνησιούχος σύσταση πετρωμάτων προέλευσης (Mg²⁺/Ca²⁺)

Τα δείγματα του αλλουβιακού υδροφορέα για την περίοδο του Ιανουαρίου, παρουσιάζουν τιμή στο λόγο Mg/Ca από 0.1-0.4, υποδηλώνοντας τον υφάλμυρο χαρακτήρα τους, κάτι το οποίο έρχεται σε συμφωνία και με προηγούμενα συμπεράσματα. Εξαίρεση αποτελεί το δείγμα W20, του οποίου η τιμή (2.4) φαίνεται να αντιστοιχεί σε υδροφόρο οφιολιθικών ή γενικά πυριτικών πετρωμάτων πλούσιων σε Mg. Όσον αφορά στην περίοδο του Μαΐου, οι λόγοι των δειγμάτων νερού κυμαίνονται

εντός των τιμών 0.1-0.4 όπως πριν, με εξαίρεση το δείγμα W10 του οποίου η τιμή (0.8), υποδηλώνει ότι πρόκειται για γλυκό νερό, κάτι το οποίο εξηγείται από την μεγάλη σχετική απόστασή του από τη θάλασσα. Παρόμοιο καθεστώς επικρατεί για τα δείγματα από τον καρστικό υδροφόρο.

Αλλουβιακός υδροφόρος Μάιος 2015					
ID	Mg ²⁺ /Ca ²⁺	Na ⁺ /Cl ⁻	(Ca ²⁺ +Mg ²⁺)/(Na ⁺ +K ⁺)	Na ⁺ /K ⁺	SO ₄ ⁻² /Cl ⁻
MSW14	0.2	1.4	0.8	17.2	2.5
MSW910	0.1	0.9	0.4	48.6	0.7
MSW915	0.1	0.9	0.5	20.3	2.2
MSW95	0.2	0.9	0.4	40.9	0.7
W18	0.1	0.6	0.1	48.9	1.5
W19	1.7	0.7	0.1	46.1	1.0
W48	0.0	1.7	0.5	43.2	6.6
W53	0.3	0.7	0.3	20.1	2.4
W54	0.3	0.7	0.3	16.6	2.7
W6	0.2	0.6	0.2	21.9	1.5
W1	0.1	0.7	0.3	22.5	1.8
W10	0.8	1.1	0.2	34.4	2.8
MSW15	0.1	0.8	0.6	21.0	6.7
W24	0.1	0.7	0.1	39.7	0.5
MSW11	0.1	0.2	2.4	6.8	0.0
MSW8	0.2	0.6	0.1	20.0	0.0
MSW81	0.2	0.6	0.1	18.7	0.3
W52	0.4	1.4	0.8	20.1	16.8
W36	0.3	0.7	0.2	36.3	0.4
W39	0.3	0.6	0.3	20.2	1.0
Καρστικός υδροφόρος Μάιος 2015					
ID	Mg ²⁺ /Ca ²⁺	Na ⁺ /Cl ⁻	(Ca ²⁺ +Mg ²⁺)/(Na ⁺ +K ⁺)	Na ⁺ /K ⁺	SO ₄ ⁻² /Cl ⁻
D9	1.1	0.6	0.2	26.7	1.3
D1	0.1	0.5	0.3	24.0	2.1
D8	0.4	0.9	0.5	35.0	3.0
ΧΗΜΕΙΟ	0.2	0.6	0.1	40.8	0.5
Κ1 ΚΟΝΟΦΑΓΟΣ	0.0	0.8	0.9	16.9	7.0
Κ	0.1	0.7	0.5	20.3	6.1
ΠΑΣΠΑΛΙΑΡΗΣ	0.2	0.7	0.4	22.2	2.5
ΘΕΑΤΡΟ	0.1	0.5	0.3	18.5	1.6

Πίνακας 4. 21 Ιοντικοί λόγοι των υδροφόρων της περιοχής Θορικού, Μάιος 2015.



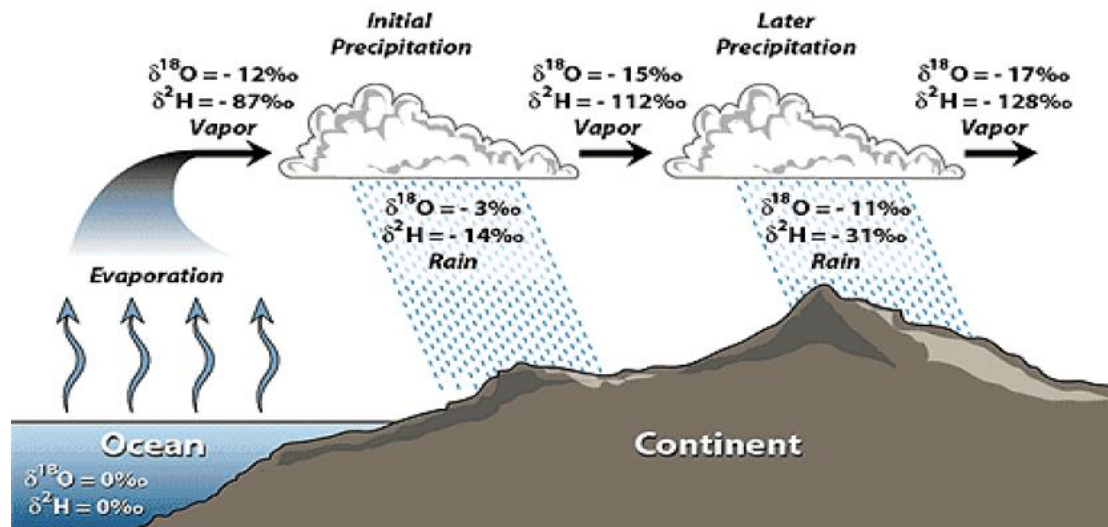
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΙΣΟΤΟΠΙΚΗ
ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ Υ.Ν.

5. ΙΣΟΤΟΠΙΚΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ Υ.Ν.

5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

Στα πλαίσια της ισοτοπικής έρευνας, οι ενδεικτικές μεταβολές που υφίσταται η ισοτοπική σύσταση του νερού, κατά τα διάφορα στάδια του υδρολογικού κύκλου, χρησιμοποιούνται για να ερμηνεύσουν τις υδρολογικές διεργασίες μέσα στους υδροφόρους σχηματισμούς (Εικόνα 5.1).



Σχήμα 5. 1 Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου “rainout” βασισμένο στους Hoefs (2004) και Coplen et al. (2000) (Ματιάτος 2010).

Τα σταθερά ισότοπα που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι αυτά του υδρογόνου (^2H) και του οξυγόνου (^{18}O) τα οποία συντελούν το μόριο του νερού και το ^{12}C το οποίο βρίσκεται στις διαλυμένες στο νερό ανθρακούχες ενώσεις. Το οξυγόνο και το υδρογόνο απαντώνται σε πολλές μορφές στην υδρόσφαιρα, τη βιόσφαιρα και τη γεώσφαιρα. Το οξυγόνο βρίσκεται σε μέγιστη αφθονία στον φλοιό της γης και μαζί με το υδρογόνο σχηματίζουν το μόριο του νερού. Η ισοτοπική τους σύσταση αποτελεί ένα εργαλείο ιχνηθέτησης για την υδρόσφαιρα (Λυκούδη 2010).

Τα σταθερά ισότοπα του υπογείου νερού $\delta^{18}\text{O}$ και $\delta^2\text{H}$ αποτελούν ένα σημαντικό εργαλείο σε υδρογεωλογικές μελέτες. Παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τις διεργασίες ανάμιξης που λαμβάνουν χώρα μεταξύ των διαφορετικών μαζών νερού, τη συνιστώσα της εξάτμισης σε υπόγεια και επιφανειακά νερά και την ισοτοπική ταυτότητα της υπόγειας επανατροφοδοσίας.

Το υψόμετρο της εκάστοτε περιοχής επηρεάζει σημαντικά την τιμή $\delta^{18}\text{O}$ του υπόγειου νερού. Πιο συγκεκριμένα, για το Μεσογειακό χώρο, η αύξηση του υψομέτρου κατά

100m συνεπάγεται ελάττωση τις τιμής $\delta^{18}\text{O}$ και $\delta^2\text{H}$ του υπόγειου νερού που τροφοδοτείται από την αντίστοιχη περιοχή, κατά 0,3-0,4 ‰ και 2 ‰ αντίστοιχα.

Η κλασμάτωση κατά τη διάρκεια της εξάτμισης είναι άμεσα συσχετιζόμενη με τις διαφορές πυρηνικών μαζών των ισωτόπων και διέπεται από διάφορες διεργασίες όπως η εξάτμιση. Σε γενικές γραμμές, το ελαφρύτερο ισότοπο αντιδρά πιο γρήγορα σε αυτή την αλλαγή (Λυκούδη 2010).

Η σχέση του νερού της βροχής στον Ελληνικό χώρο (βλ. Σχ. 5.2) είναι :

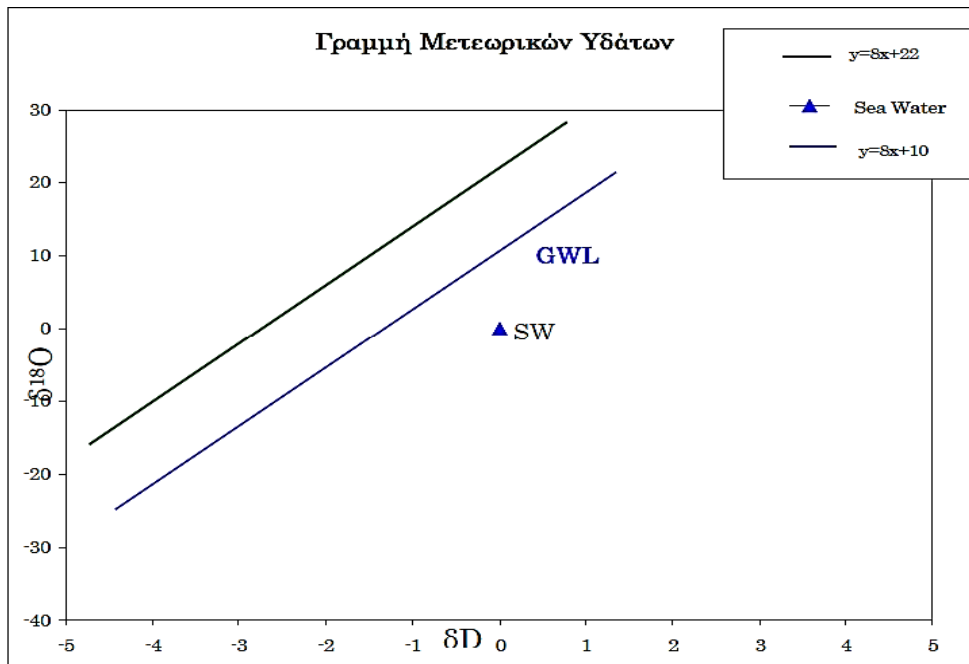
$$\delta^2\text{H} = 9.3 + 7.2 \times \delta^{18}\text{O}$$

ενώ η αντίστοιχη εξίσωση για τις παγκόσμιες βροχοπτώσεις είναι:

$$\delta^2\text{H} = 10 + 8 \times \delta^{18}\text{O}$$

Όσον αφορά στις βροχοπτώσεις της Ανατολικής Μεσογείου (Αντωνέλλου, 2007):

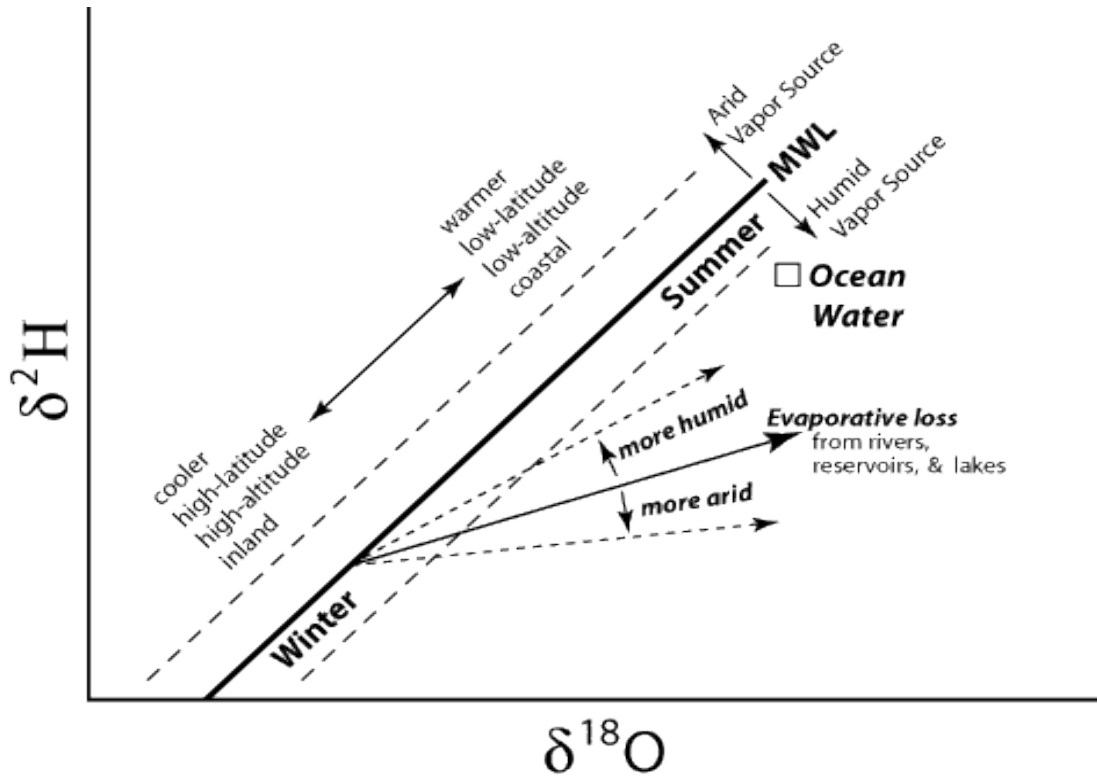
$$\delta^2\text{H} = 22 + 8 \times \delta^{18}\text{O}$$



Σχήμα 5. 2 Αναπαράσταση ισοτοπικού φορτίου των παγκόσμιων βροχοπτώσεων (GWL) και βροχοπτώσεων Ανατολικής Μεσογείου (Αντωνέλλου 2007).

Η κλίση της ευθείας είναι ενδεικτική της προέλευσης του νερού. Διαφορετικές τιμές κλίσεων εμφανίζουν για παράδειγμα πρόσφατα βρόχινα νερά ή επιφανειακά νερά που δεν έχουν υποστεί δευτερογενή εξάτμιση. Η κινητική κλασμάτωση μπορεί αν οδηγήσει σε κλίσεις ευθείας ακόμα μικρότερες, κάτι το οποίο μαρτυρά τη διαδικασία της μοριακής

διάχυσης των ατμών του νερού, μέσω του στάσιμου αέρα στους πόρους του εδάφους (Σχήμα 5.2).



Σχήμα 5.3 Σχηματική αναπαράσταση της Παγκόσμιας Ευθείας μετεωρικών υδάτων (GMWL) και της τάσης των κυρίαρχων διεργασιών που επηρεάζουν το μετεωρικό νερό (Αντωνέλλου 2007).

5.2. ΙΣΟΤΟΠΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ Υ.Ν. καρστικού και αλλουβιακού υδροφορέα Θορικού

Οι μετρήσεις των δειγμάτων πραγματοποιήθηκαν στο Laboratory of Hydrogeology, Institute of Applied Geosciences, Technical University of Darmstadt (Γερμανία) και αφορούν σε ισότοπα οξυγόνου-18 και δευτερίου, με φασματογράφο μάζας. Τα αναλυτικά αποτελέσματα από τις ισοτοπικές αναλύσεις $\delta^{18}\text{O}$ και δD των δειγμάτων της λεκάνης απορροής του Θορικού παρατίθενται στον πίνακα 5.1 που ακολουθεί.

Ιανουάριος 2015		
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	Deuterium excess
-5.82	-30.89	15.63
-6.96	-38.35	17.35
-7.00	-38.85	17.17
-4.49	-24.48	11.43
-4.05	-23.06	9.35
-7.10	-41.82	14.97
-4.76	-28.52	9.59
-7.25	-39.76	18.23
-6.01	-31.79	16.30
-5.47	-29.47	14.28
-5.29	-29.05	13.28
-6.09	-32.86	15.85
-6.61	-35.86	16.98
-6.25	-33.20	16.79
-6.26	-33.32	16.75
-6.39	-34.34	16.76
-6.80	-36.54	17.87
-6.20	-33.06	16.58
-6.18	-32.48	16.99
-5.92	-31.17	16.18
-5.89	-30.07	17.03

Πίνακας 5. 1 Ισοτοπικές αναλύσεις ^{18}O και $\delta^2\text{H}$ από δείγματα νερού που συλλέχθηκαν από την περιοχή έρευνας.

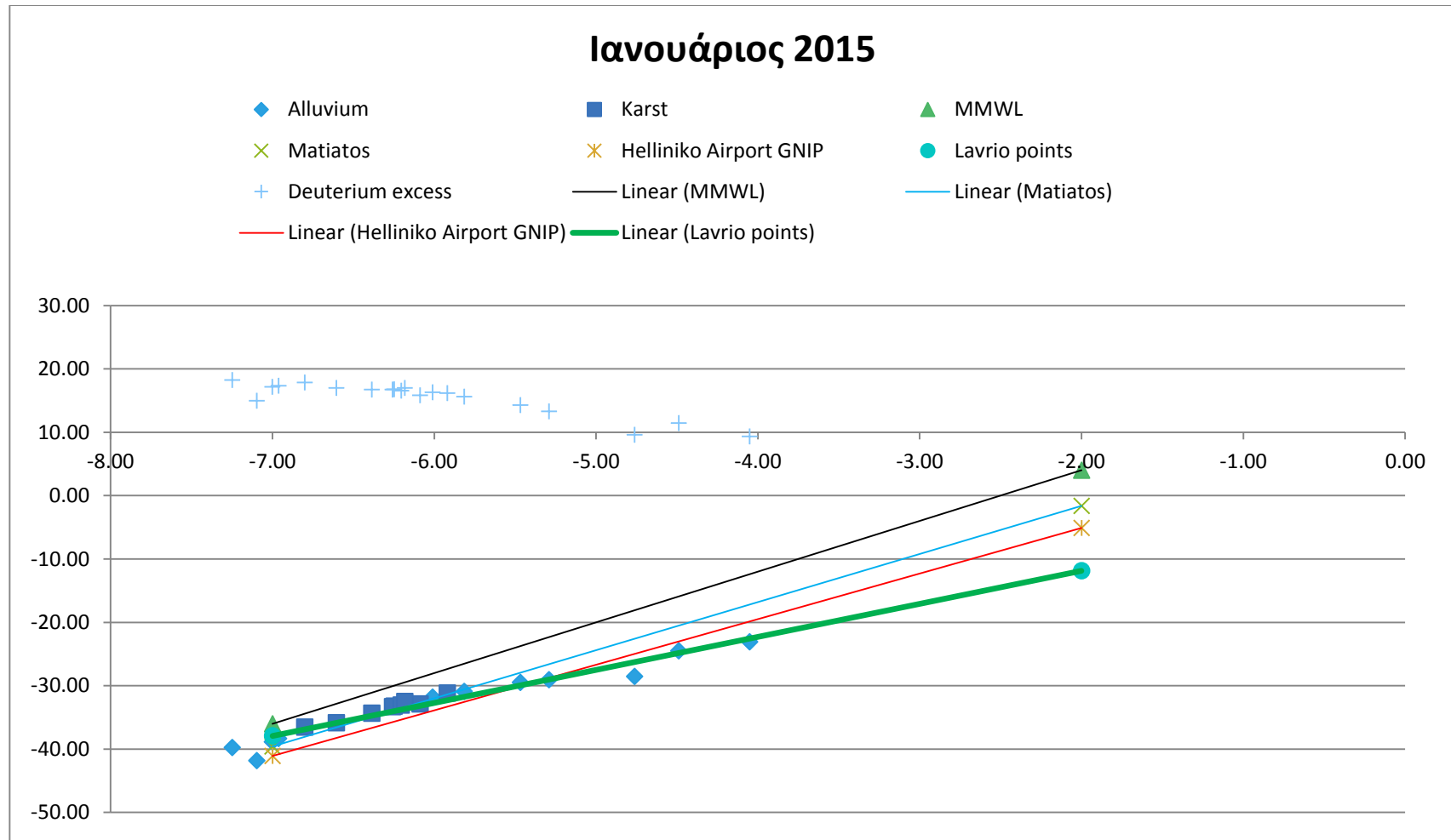
Οι τιμές του $\delta^{18}\text{O}$ για το σύνολο των δειγμάτων υπόγειου νερού κυμαίνονται από -7,25 ‰ έως -4,05 ‰, ενώ οι τιμές του $\delta^2\text{H}$ για τα ίδια δείγματα νερού παρουσιάζουν εύρος από -41,82 ‰ έως -23,06 ‰. Τα δείγματα αφορούν υπόγεια νερά από το αλλουβιακό υδροφόρο στρώμα του Θορικού και από την καρστική ενότητα του ανώτερου μαρμάρου της περιοχής έρευνας. Γενικά στις παράκτιες περιοχές, επειδή το μετεωρικό νερό κατά κανόνα προέρχεται από τις πρώτες συμπυκνώσεις, έχει περίπου την ίδια ισοτοπική σύσταση με αυτή της θάλασσας. Με αυτό τον τρόπο, μπορεί να ανακτηθεί πληροφορία σχετικά με: (α) τις διαδικασίες ανάμιξης γλυκού και αλμυρού νερού στους υπό εξέταση υδροφορείς, (β) διεργασίες εξάτμισης των υπόγειων νερών και (γ) αλληλεπίδραση υπόγειων και επιφανειακών νερών καθώς και υπόγειων νερών διαφορετικών υδροφορέων (π.χ. αλλουβιακού και καρστ).

Στο διάγραμμα που ακολουθεί (**Σχήμα 5.3**), απεικονίζονται τα σταθερά ισότοπα $\delta^{18}\text{O}$ ως προς τα σταθερά ισότοπα $\delta^2\text{H}$, ενώ έχουν προβληθεί ενδεικτικές μετεωρικές γραμμές από στοιχεία της Διεθνούς Οργάνωσης Ατομικής Ενέργειας με δείγματα υετού

από το μετεωρολογικό σταθμό Ελληνικού (πρώην διεθνές αεροδρόμιο Αθηνών) και του Ματιάτου (2010) από την περιοχή της Αργολίδας.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα και το εν λόγω διάγραμμα (Σχήμα 5.3), τα δείγματα υπόγειου νερού από τον καρστικό υδροφόρο της περιοχής μελέτης συγκεντρώνονται πολύ κοντά στις ενδεικτικές μετεωρικές γραμμές τα δείγματα υετού από το μετεωρολογικό σταθμό Ελληνικού (πρώην διεθνές αεροδρόμιο Αθηνών) και του Ματιάτου (2010) από την περιοχή της Αργολίδας. Παρατηρείται δηλαδή ότι τα δείγματα του καρστικού υδροφορέα Λαυρίου, επιδεικνύουν την τάση να είναι ελαφρύτερα ισοτοπικά σε σχέση με την πλειοψηφία των δειγμάτων του αλλουβιακού υδροφορέα. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει άμεση τροφοδοσία του καρστικού υδροφορέα από νερό μετεωρικής προέλευσης, ενώ ειδικά για τα σημεία που βρίσκονται στο αριστερό άκρο του γραφήματος, υποδηλώνεται εμπλουτισμός μετεωρικής προέλευσης μεν, μικρότερης θερμοκρασίας δε, γεγονός που ενδεχόμενα να υποδεικνύει τον άμεσο εμπλουτισμό από περιοχές ανάντι με μεγαλύτερο υψόμετρο. Χαρακτηριστικό δείγμα αποτελεί αυτό της γεώτρησης Κ1, το οποίο τοποθετείται στο ανάντι σημείο της περιοχής έρευνας (περιοχή Κονοφάγου, εντός ΤΠΠΑ).

Όσον αφορά στα δείγματα υπόγειου νερού από τον αλλουβιακό υδροφορέα, αυτά διαχωρίζονται σε τρεις βασικές ομάδες, ανάλογα με τη θέση τους στο σχετικό διάγραμμα. Η πρώτη ομάδα, στην οποία ανήκουν δείγματα με ελαφρύτερη ισοτοπική σύσταση, αφορά στο τμήμα του αλλουβιακού υδροφορέα το οποίο επικοινωνεί και εμπλουτίζεται από τον καρστικό υδροφορέα της περιοχής (άνωτερο μάρμαρο). Για τον λόγο αυτό, τα εν λόγω δείγματα παρουσιάζουν παρόμοια ισοτοπική σύσταση με αυτή των καρστικών νερών. Η δεύτερη ομάδα, αφορά στα δείγματα τα οποία βρίσκονται στην περιοχή ανάμιξης γλυκού αλμυρού νερού. Αυτά παρουσιάζονται κατά τι βαρύτερα από την προηγούμενη ομάδα, και περιλαμβάνει χαρακτηριστικά τα δείγματα MSW8, MSW10 και MSW9. Τέλος, η ομάδα των δειγμάτων των Υ.Ν. του αλλουβιακού υδροφορέα η οποία βρίσκεται σε άμεση υδραυλική επικοινωνία με τη θάλασσα, παρουσιάζει την πιο βαρέα ισοτοπική σύσταση υποδεικνύοντας την άμεση διείσδυση του θαλασσινού νερού. Χαρακτηριστικότερα της παραπάνω ομάδας είναι τα δείγματα W26 και W32, η θέση των οποίων εντοπίζεται στο ανατολικότερο τμήμα της περιοχής έρευνας, το οποίο και βρίσκεται σε άμεση υδραυλική επικοινωνία με τη θάλασσα. Επιπρόσθετα, τα δείγματα του αλλουβιακού υδροφορέα τα οποία βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση κάτω από τις ενδεικτικές μετεωρικές γραμμές του γραφήματος, υποδηλώνουν διεργασίες ισοτοπικής κλασμάτωσης, γεγονός το οποίο υδρολογικά αιτιάζεται σε διαδικασίες εξάτμισης.



Σχήμα 5. 4 Διάγραμμα συσχέτισης δ¹⁸O προς δD από δείγματα νερού που συλλέχθηκαν από τους δύο τύπους υδροφορέων της περιοχής μελέτης. Οριζόντιος άξονας: δD Κάθετος άξονας: δ¹⁸O, εκφρασμένα επί τοι χιλίσις.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η λεκάνη του Θορικού δομείται από τρεις κύριες τεκτονικές ενότητες: την Κατώτερη (Σειρά Καμάριζας), την Ενδιάμεση (Σειρά Πλάκας) και την Ανώτερη (ασβεστολιθικά ράκη). Η κατώτερη τεκτονική ενότητα ενώνεται με την ανώτερη μέσω του ρήγματος επώθησης που υφίσταται. Ως επί το πλείστον, επικρατούν γεωλογικοί σχηματισμοί όπως μάρμαρα και σχιστόλιθοι. Δευτερευόντως, παρατηρούνται φυλλίτες και γρανοδιορίτες.

Γενικά, οι γεωλογικοί σχηματισμοί της Λαυρεωτικής διακρίνονται σε δύο ομάδες:

- Το αυτόχθονο τμήμα: Περιλαμβάνει αλληπάλληλα στρώματα μαρμάρων, δολομιτών και σχιστόλιθων που αντιστοιχούν στο κρυσταλλοσχιτώδες υπόβαθρο του Lepsius (Σχιστόλιθοι Βάρης – Ανώτερο Μάρμαρο).
- Το επωθημένο κάλυμμα: Περιλαμβάνει ως επί το πλείστον φυλλίτες και χαλαζίτες με τράπεζες μαρμάρου, που αντιστοιχούν στους Σχιστόλιθους των Αθηνών και στην Ανώτερη Ασβεστολιθική βαθμίδα του Lepsius.

Η περιοχή μελέτης δομείται από τους εξής σχηματισμούς (κατανομή από τους παλαιότερους προς τους νεότερους):

Σχιστόλιθοι βάσης, Τριαδικό. Ανθρακικοί μαρμαρυγικοί σχιστόλιθοι καστανωποί, τεφροί, κιτρινωποί, λεπτοστρωματώδεις έως φυλλώδεις, με συχνές παρεμβολές ηφαιστειακών πετρωμάτων.

Μάρμαρα, Ιουρασικό. Παχυστρωματώδη, ολοκρυσταλλικά μάρμαρα, που έχουν υποστεί την έντονη τεκτονική επίδραση, καθώς και καρστικά, στα ανώτερα μέλη των οποίων παρατηρούνται μικρές φακοειδείς ενστρώσεις μοσχοβιτικών γνεύσιων και σχιστόλιθων.

Σχιστόλιθοι οροφής, Ανώτερο Ιουρασικό – Κατώτερο Κρητιδικό. Ανθρακικοί μαρμαρυγικοί σχιστόλιθοι, πρασινωποί, τεφροί, τεφρόμαυροι, ερυθροϊλώδεις και φυλλίτες. Παρεμβάλλονται στρώσεις χαλαζιτών. Γενικά, δείχνουν τεκτονισμένοι και παραμορφωμένοι κατά τόπους, ενώ παρατηρούνται στρώσεις τεφρόλευκων κρυσταλλικών ασβεστόλιθων και σώματα οφιολίθων.

Ασβεστόλιθοι, Ανώτερο Κρητιδικό. Πολύχρωμοι ανακρυσταλλωμένοι πλακώδεις με πυριτόλιθους ή καστανόχρωμοι, λευκοί τεφροί, κοκκώδεις, κιτρινωποί, άστρωτοι έως παχυστρωματώδεις, καρστικοποιημένοι και δολομιτωμένοι, έντονα διαρρηγμένοι, με παρεμβολές ασβεστίτη και οξείδια σιδήρου.

Στην περιοχή του Θορικού υπάρχει ο αλλουβιακός – προσχωματικός υδροφορέας της μικρής παραθαλάσσιας πεδινής ζώνης, δυτικά του ομώνυμου όρμου, καθώς και οι καρστικές υδροφορίες των ανθρακικών σχηματισμών των γύρω χαμηλών ορεινών μαζών. Οι τεταρτογενείς αποθέσεις της περιοχής μελέτης φιλοξενούν έναν ελεύθερο υδροφόρο, διαθέσιμο για άντληση από τον τοπικό πληθυσμό. Ο υδροφόρος, στο ανατολικό τμήμα της περιοχής, εμφανίζεται υπερκείμενος του Ανώτερου Μαρμάρου,

όπου και υφίσταται υποκείμενος ο καρστικός υδροφόρος. Ο τελευταίος τροφοδοτεί πλευρικά τον αλλουβιακό υδροφόρο, κάτι που προκύπτει και από την κατανομή του πιεζομετρικού φορτίου. Περιστασιακά, ο αλλουβιακός υδροφόρος τροφοδοτείται από χειμάρρους. Ο προσχωματικός υδροφόρος αποστραγγίζεται προς τη θάλασσα κατά κύριο λόγο, όπως προκύπτει από τη συγκλίνουσα ροή που παρατηρείται, με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ.

Η θερμοκρασία των υπογείων νερών, καθορίζεται από τα περιβάλλοντα πετρώματα. Η θερμοκρασία που μετρήθηκε στα δείγματα υπόγειου νερού, για την περίοδο του Μαΐου κυμάνθηκε μεταξύ των τιμών 20.2°C και 22.4°C, για τον αλλουβιακό και τον καρστικό υδροφόρο, αντίστοιχα. Σε γενικές γραμμές, τα υπόγεια νερά δεν υπόκεινται στην επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ωστόσο, η τιμές της θερμοκρασίας εμφανίζονται υψηλότερες των συνηθισμένων τιμών, αφενός διότι η μέτρηση έγινε σε ατμοσφαιρικές συνθήκες το μήνα Μάιο και αφετέρου διότι κάποια από τα πηγάδια και τις γεωτρήσεις έρχονται σε επαφή με την ηλιακή ακτινοβολία.

Κατά κανόνα, οι υψηλές τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας παραπέμπουν σε αυξημένη συγκέντρωση διαλυμένων αλάτων. Οι μέσες τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ήταν 7123.4 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 3447.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ για τον αλλουβιακό και τον καρστικό υδροφόρο, στη δειγματοληψία του Ιανουαρίου, αντίστοιχα. Όσον αφορά στη δειγματοληψία του Μαΐου, η μέση τιμή της αγωγιμότητας των δειγμάτων νερού του αλλουβιακού υδροφόρου ήταν 7494.22 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ενώ η αντίστοιχη τιμή για τον καρστικό ήταν 3448.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Οι προκειμένες τιμές είναι αρκετά υψηλές, υποδηλώνοντας άμεσα αυξημένες ποσότητες αλάτων και έμμεσα θαλάσσια διείσδυση. Η ποιότητα των υπόγειων νερών των προσχώσεων είναι σε γενικές γραμμές υποδεέστερη των καρστικών νερών, με λίγες εξαιρέσεις. Το παράκτιο τμήμα της περιοχής μελέτης υπόκειται στην θαλάσσια επίδραση, κάτι το οποίο γίνεται αντιληπτό από τις αυξημένες τιμές της παραμέτρου στα σημεία δειγματοληψίας που βρίσκονται κοντά στη θάλασσα, σχηματίζοντας ένα μέτωπο υφαλμύρωσης. Ακόμη, κάποιες αυξημένες τιμές σε σημεία δειγματοληψίας πιο απομακρυσμένα από τη θάλασσα, πιστοποιούν την πλευρική τροφοδοσία του προσχωματικού υδροφόρου από τον καρστικό.

Τα υπόγεια νερά, εμφανίζουν ουδέτερο pH καθώς οι μέσες τιμές του pH που μετρήθηκε ήταν 7.1, 6.99, 7.07 και 7 στον αλλουβιακό και καρστικό υδροφόρο, ανά περίοδο (Ιανουάριος-Μάιος) αντίστοιχα. Η τυπική απόκλιση των τιμών της ενεργού οξύτητας είναι σχετικά μικρή.

Η συνυφασμένη, με την ηλεκτρική αγωγιμότητα, παράμετρος των ολικών διαλυμένων στερεών (TDS), εκφράζει τη συνολική συγκέντρωση των διαλυμένων στο νερό αλάτων. Κατά μέσο όρο, η μεταλλικότητα των δειγμάτων κυμάνθηκε μεταξύ των τιμών 4776.7 mg/L και 2240.9 mg/L για τον αλλουβιακό και καρστικό υδροφόρο αντίστοιχα, στη δειγματοληψία του Ιανουαρίου. Όπως προκύπτει, τα προκειμένα υπόγεια ύδατα χαρακτηρίζονται υφάλμυρα, γεγονός το οποίο επίσης μαρτυρά τη διείσδυση του θαλασσινού νερού στους υδροφόρους. Επιπροσθέτως, ο ρυθμός εξάτμισης που επικρατεί στην περιοχή μελέτης ενδεχομένως να επηρεάζει την τιμή των συνολικών

διαλυμένων στερεών σε αυτή, δεδομένου ότι το κλίμα της είναι θερμό μεσογειακό με ελάχιστες βροχές (χαμηλός ρυθμός έκπλυσης), ήπιους χειμώνες και ζεστά καλοκαίρια. Τέλος, το θαλάσσιο spray (αερομεταφερόμενα σταγονίδια θαλασσινού νερού) στις παράκτιες περιοχές αποτελεί μια σημαντική πηγή αλάτων για τα υπόγεια νερά.

Το οξυγόνο, σχετικά δυσδιάλυτο στο νερό, σχετίζεται με την έκθεση μιας υδάτινης μάζας στην ατμόσφαιρα, τον χρόνο παραμονής και το ρυθμό ανανέωσής της. Οι μέσες τιμές DO του αλλουβιακού και του καρστικού υδροφόρου, για τη δειγματοληπτική περίοδο του Μαΐου ήταν 5.32 mg/L και 3.22 mg/L, αντίστοιχα.

Η χημική ανάλυση των δειγμάτων υπόγειου νερού όσον αφορά στις συγκεντρώσεις των κύριων ιόντων, είχε τα εξής αποτελέσματα:

Η μέση συγκέντρωση των κατιόντων ασβεστίου ήταν 159.3 mg/L, 188 mg/L, 196.90 mg/L και 194.8 mg/L στον αλλουβιακό και καρστικό υδροφόρο, στη δειγματοληπτική περίοδο του Ιανουαρίου και του Μαΐου, αντίστοιχα. Ανάλογα, η μέση τιμή της συγκέντρωσης του μαγνησίου ήταν 38.3 mg/L, 44 mg/L, 44.70 mg/L, και 40.1 mg/L. Το παράκτιο τμήμα σημείων δειγματοληψίας παρουσίασε μεγαλύτερες τιμές συγκεντρώσεων ιόντων ασβεστίου και μαγνησίου, καθότι δέχεται περισσότερο την επίδραση της θάλασσας. Γενικά, τα υπόγεια νερά της περιοχής μελέτης είναι πλούσια σε αυτά τα ιόντα, των οποίων η πηγή προέλευσης είναι τα μάρμαρα που απαντώνται σε αυτή.

Εξίσου αυξημένες συγκεντρώσεις εμφάνισαν και τα κατιόντα Na^+ και K^+ με μέσες τιμές, αφενός για τα Na^+ 1173.15 mg/L, 589.7 mg/L, 814.35 mg/L και 806 mg/L, και αφετέρου για τα K^+ 38.87 mg/L, 21 mg/L, 36.30 mg/L και 30 mg/L, για τον αλλουβιακό και καρστικό υδροφόρο, στη δειγματοληπτική περίοδο του Ιανουαρίου και του Μαΐου, αντίστοιχα. Οι προαναφερθείσες τιμές οφείλονται στη θαλάσσια διείσδυση που λαμβάνει χώρα.

Η συγκέντρωση σιδήρου είναι υψηλή. Η παρουσία σιδήρου οφείλεται στην οξειδωση των θειούχων ορυκτών που εμφανίζονται εκτεταμένα στην περιοχή. Το υδρόθειο αντιδρά με οξείδια σιδήρου εντός του υδροφορέα και έτσι σχηματίζονται σουλφίδια σιδήρου. Η αναγωγή των θειικών λόγω των επισταμένων αντλήσεων προκαλεί απόφραξη των υδρογεωτρήσεων με σουλφίδια σιδήρου.

Τα Cl^- και SO_4^- παρουσίασαν ιδιαίτερα μεγάλες τιμές συγκεντρώσεων, γεγονός που μαρτυρά τη θαλάσσια διείσδυση στην οποία υπόκειται η περιοχή έρευνας.

Τα ιόντα χλωρίου παρουσιάζουν πολύ μεγάλες τιμές που συνάδουν με τις εξίσου πολύ μεγάλες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας και συνεπάγονται θαλάσσια διείσδυση. Συγκεκριμένα, για τον προσχωματικό και τον καρστικό υδροφόρο αντίστοιχα, η μέση τιμή συγκέντρωσης χλωριόντων ήταν 1851.2 (mg/L) και 735.4 (mg/L) για το μήνα Ιανουάριο, και 1498.6 (mg/L) και 1324.7 (mg/L) για το μήνα Μάιο.

Οι μέσες τιμές HCO_3 για τον Ιανουάριο ήταν 371.1 (mg/L) (προσχωματικός υδροφόρος) και 297.4 (mg/L) (καρστικός υδροφόρος), ενώ για το Μάιο 501 (mg/L) (προσχωματικός υδροφόρος) και 533.8 (mg/L) (καρστικός υδροφόρος). Οι τιμές συγκέντρωσης των όξινων ανθρακικών παραπέμπουν σε αντίστοιχες υψηλές τιμές αλκαλικότητας.

Οι υψηλές τιμές θειικών ιόντων υποδεικνύουν ρύπανση της περιοχής, λόγω φυσικών διεργασιών του υπεδάφους (διάλυση αλάτων των πετρωμάτων, κατά τη διάρκεια της διέλευσης του διηθούμενου νερού), αλλά και στα όξινα απόβλητα των μεταλλείων που λειτουργούσαν τα προηγούμενα χρόνια (Alexakis 2010).

Τα νιτρικά ιόντα των δειγμάτων νερού του αλλουβιακού υδροφορέα, παρουσίασαν μέση τιμή 24.6 (mg/L) τον Ιανουάριο και 29.8 (mg/L) το Μάιο, ενώ τα νερά του καρστικού υδροφορέα παρουσίασαν μέση τιμή 55.9 (mg/L) και 50.1 (mg/L), τον Ιανουάριο και το Μάιο αντίστοιχα. Τα νιτρικά ιόντα σχετίζονται με την έντονη χρήση αζωτούχων και νιτρικών λιπασμάτων, συνεπώς εξάγεται το συμπέρασμα ότι το υδατικό απόθεμα της περιοχής των αλλουβίων δεν παρουσιάζει φαινόμενα έντονης νιτρορύπανσης. Ωστόσο, σε δύο σημεία δειγματοληψίας (D8, D9) διαπιστώθηκαν υψηλές τιμές συγκέντρωσης νιτρικών ιόντων, συνεπώς πρόκειται για επιβαρυμένα νερά σε αυτά τα σημεία. Τα νερά του αλλουβιακού υδροφορέα δεν παρουσιάζουν υψηλές τιμές νιτρικών ιόντων, σε αντίθεση με τα καρστικά νερά.

Κατόπιν μελέτης των υδροχημικών διαγραμμάτων, κάποια εκ των συμπερασμάτων που εξάγονται, συμφωνούν με τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων. Η υπαλμύρωση λόγω θαλάσσιας διείσδυσης πιστοποιείται από τα διαγράμματα Schoeller, ενώ στα διαγράμματα Piper είναι εμφανής η παρουσία χλωριόντων στο δεξί τριγωνικό διάγραμμα που αναπαριστά την κατανομή των ανιόντων. Επίσης, από τα διαγράμματα Piper, διαφαίνεται ο καλιο-νατριούχος χαρακτήρας των περισσότερων δειγμάτων υπόγειου νερού, κάτι που αποδεικνύεται και από τις αυξημένες συγκεντρώσεις των ιόντων νατρίου και καλίου. Επίσης, τα διαγράμματα Durov, δείχνουν πως η υδροχημική φάση από την οποία έχουν προέλθει τα δείγματα υπόγειου νερού είναι η ιοντική ανταλλαγή, κάτι που έρχεται σε συμφωνία με τις αυξημένες συγκεντρώσεις ιόντων νατρίου και καλίου. Σύμφωνα με τα διαγράμματα Wilcox, η ποιότητα των υπόγειων νερών και των δύο υδροφόρων κυμαίνεται από πολύ μέτρια έως πολύ κακή, συνεπώς το υπόγειο νερό δεν ενδείκνυται για ευαίσθητα φυτά ή βαριά εδάφη, ανεπαρκώς στραγγιζόμενα, στην καλύτερη περίπτωση. Το ίδιο συμπέρασμα εξάγεται από τις συγκεντρώσεις των θειικών ανιόντων.

Η αυξημένη συγκέντρωση βαρέων μετάλλων (Fe, Mn, Zn) αποδεικνύει την επισταμένη μεταλλευτική και μεταλλουργική δραστηριότητα που λαμβάνει χώρα στην περιοχή μελέτης, στην αποσάθρωση των σχιστολιθικών πετρωμάτων αλλά και στην οξειδωση θειικών ορυκτών.

Κατόπιν των μετρήσεων των δειγμάτων που πραγματοποιήθηκαν στο Laboratory of Hydrogeology, Institute of Applied Geosciences, Technical University of Darmstadt (Γερμανία), τα αποτελέσματα συνοψίζονται ως εξής:

Όσον αφορά στον αλλουβιακό υδροφορέα, τα δείγματα διαχωρίζονται σε τρεις ομάδες, οι οποίες αντιστοιχούν σε διαφορετικές θέσεις στο Σχήμα 5.3, καθώς και σε διαφορετική ισοτοπική σύσταση. Συγκεκριμένα, τα ισοτοπικά ελαφρύτερα δείγματα αντιστοιχούν στο τμήμα του αλλουβιακού υδροφορέα το οποίο επικοινωνεί και εμπλουτίζεται από τον καρστικό υδροφορέα της περιοχής μελέτης και παρουσιάζουν παρεμφερή ισοτοπικά χαρακτηριστικά με τα καρστικά νερά της περιοχής έρευνας. Τα δείγματα με ελαφρώς βαρύτερη ισοτοπική σύσταση από εκείνη των δειγμάτων της πρώτης ομάδας, αντιστοιχούν στην περιοχή ανάμιξης γλυκού και αλμυρού νερού (δείγματα MSW8, MSW10 και MSW9). Τα δείγματα με τη βαρύτερη ισοτοπική σύσταση αντιστοιχούν στην περιοχή πλήρους υδραυλικής επικοινωνίας μεταξύ θάλασσας και αλλουβιακού υδροφορέα, η οποία σηματοδοτεί και τη θαλάσσια διείσδυση (δείγματα W26 και W32).

Σχετικά με τα δείγματα υπόγειων νερών του καρστικού υδροφορέα της περιοχής μελέτης, χαρακτηρίζονται ελαφρύτερα ισοτοπικά από τα δείγματα υπογείων νερών του αλλουβιακού υδροφορέα, γεγονός που συνεπάγεται τροφοδοσία του πρώτου από νερό μετεωρικής προέλευσης. Ειδικά για το σημείο K1 KONOFAGOS το οποίο βρίσκεται στο αριστερό τμήμα του γραφήματος, ισχύει ότι τροφοδοτείται από νερό μετεωρικής προέλευσης χαμηλότερης θερμοκρασίας, άρα εμπλουτίζεται από περιοχές με μεγαλύτερο υψόμετρο.

Τα παραπάνω συμπεράσματα βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία με τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την πιεζομετρική και υδροχημική έρευνα της περιοχής, γεγονός που αποδεικνύει τη χρησιμότητα της ισοτοπικής σύστασης των δειγμάτων υπόγειων νερών στην υπόγεια υδρολογία και τις σχετικές υδρολογικές διεργασίες.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνόγλωσση

1. Αναγνώστου Χ., Χρόνης Γ. (2002). Το γήινο σύστημα, Εισαγωγή στις Γεωεπιστήμες.
2. Αντωνέλλου Α. (2007). Μελέτη Σπηλαιοθεμάτων από το σπήλαιο Αγίου Γεωργίου του νομού Κιλκίς: Διερεύνηση των παλαιοκλιματικών περιβαλλοντικών συνθηκών με χρήση σταθερών ισοτόπων C και O, Διπλωματική Εργασία Ειδίκευσης, Γεωεπιστήμες και Περιβάλλον, Πανεπιστήμιο Πατρών.
3. Αντωνίου Β. (2010). Ανάλυση αναγλύφου και γεωτεκτονική δομή ανατολικής Αττικής, Διδακτορική διατριβή, Γενικό τμήμα, Τομέας Γεωλογικών επιστημών και Ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος, Εργαστήριο Ορυκτολογίας και Γεωλογίας, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
4. Βασιλείου Ε. (2011). Υδρογεωλογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής της Ποταμιάς Ελασσόνας. Επιπτώσεις από τη μελλοντική εκμετάλλευση των λιγνιτικών κοιτασμάτων στο υδατικό, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Τομέας Γεωλογικών Επιστημών, ΕΜΠ.
5. Βασιλείου Ε. Σημειώσεις ασκήσεων Προχωρημένης Υδρογεωλογίας.
6. Βουβαλίδης Κ. (2011). Φυσική Γεωγραφία, Εκδόσεις ΔΙΣΙΓΜΑ.
7. Βουδούρης Κ. (2006). Θέματα υδρογεωλογίας Περιβάλλοντος, Τμήμα Γεωλογίας, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
8. Βουδούρης Κ. (2006). Θέματα Υδρογεωλογίας Περιβάλλοντος. Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας, Θεσσαλονίκη 2006.
9. Βουδούρης Κ. (2009). Υδρογεωλογία υφάλμυρων πηγών, Παρουσίαση.
10. Βουδούρης Κ., (2009). Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος, υπόγεια νερά & περιβάλλον. Εκδόσεις Τζιόλα.
11. Βουδούρης, Κ. (2015). Εκμετάλλευση και διαχείριση υπογείου νερού. Εκδόσεις Τζιόλα.
12. Γκολούκοβιτς – Δελληγιάννη Μ. (2011). Καρστική γεωμορφολογική εξέλιξη στη Δυτική Ελλάδα: Η περίπτωση της περιοχής του Ξηρόμερου, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο.

13. Ελευθερίου Γ. (2010). Ραδιολογική Εκτίμηση Υδρολογικών Χαρακτηριστικών Υποθαλάσσιας Ανάβλυσης στη Στούπα (ΝΑ Μεσσηνία, Πελοπόννησος) Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, του Διατμηματικού Προγράμματος Σπουδών «Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές», ΕΜΠ.
14. ΙΓΜΕ (2009). Λαύριο και ευρύτερη περιοχή, ΕΡΓΟ: Ανάδειξη γεωτόπων – γεωπάρκων, συμβολή στην αιεφόρο ανάπτυξη.
15. Καλλέργης Γ. (2001). Εφαρμοσμένη – Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία. Δεύτερη έκδοση. Τόμος Γ'.
16. Καλλιώρας Α. Σημειώσεις Μεταπτυχιακών Μαθημάτων Υδρογεωλογίας.
17. Καμπόλης Ι. (2007). Γεωμορφολογική μελέτη υποθαλάσσιου καρστικού συστήματος υπόγειου ποταμού Δράκος, Μεσσηνιακής Μάνης. Διπλωματική εργασία, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Τομέας Γεωγραφίας και Κλιματολογίας, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
18. Κονοφάγος, Κ. (1980). Το αρχαίο Λαύριο και η Ελληνική τεχνική παραγωγής αργύρου.
19. Κουμαντάκης Ι. (2000). Επιστημονικός υπεύθυνος στο Ερευνητικό Πρόγραμμα «Περιβαλλοντική Εξυγίανση Τεχνολογικού Πάρκου Λαυρίου», Έκθεση Ερευνητικών Εργασιών Α' Φάσης, Υπόγεια Νερά., Τομέας Γεωλογικών Επιστημών, ΕΜΠ.
20. Κουμαντάκης Ι. Σημειώσεις Μεταπτυχιακών μαθημάτων Υπογείων νερών.
21. Κυριακουλάκου Σ. (2012). Γεωφυσικές και ωκεανογραφικές έρευνες σε υποθαλάσσιες εκροές υδάτων στη Στούπα, Ν. Μεσσηνίας. Διπλωματική εργασία, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών.
22. Λαμπρινός Ν. (2009). Φυσική γεωγραφία και περιβάλλον, Παιδαγωγικό τμήμα δημοτικής εκπαίδευσης, ΑΠΘ.
23. Λαμπροπούλου Α. (2012). Υδρογεωλογική μελέτη των καρστικών πηγών της περιοχής της Οκτωνιάς, Κ. Εύβοιας. Πτυχιακή εργασία, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών.
24. Λυκούδη Σ. (2010). Σταθερά ισότοπα ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$) στον υετό: Ανάλυση των ισοτοπικών υπογραφών στην Ελλάδα και Κλιματολογική ανάλυση στην περιοχή της Κεντρικής και Ανατολικής Μεσογείου, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Φυσικής, τομέας εφαρμοσμένης φυσικής, ΜΠΣ Εφαρμοσμένη Φυσική. Πανεπιστήμιο Πατρών.
25. Μ.Α. Μιμίκου, Ε.Α. Μπαλτάς (2012) Τεχνική Υδρολογία, 5η έκδοση.

26. Λαζαρίδου Μ. Ελληνική Νομοθεσία για τα νερά, Κ.Υ.Α. Α5 288 86 - Πόσιμο Νερό. Τμήμα Βιολογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Θεσσαλονίκη.
27. Μαμάσης Ν. (2009). Υδρολογικός κύκλος, Εκπαιδευτικές Σημειώσεις, ΕΜΠ.
28. Μαρίνος Π. (2008). Σημειώσεις Προχωρημένη Υδρογεωλογία.
29. Ματιάτος Ι. (2010). Υδρογεωλογικές και ισοτοπικές έρευνες σε περιοχές της χερσονήσου της Αργολίδας. Διδακτορική διατριβή. Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
30. Παπαχαραλάμπου Χ. (2012). Μελέτη του υδρολογικού κύκλου της λεκάνης απορροής της λίμνης Κορώνειας με μεθόδους ισοτοπικής γεωχημείας, Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, ΔΠΜΣ Οικολογική ποιότητα και διαχείριση υδάτων σε επίπεδο λεκάνης απορροής, ΑΠΘ.
31. Παυλόπουλος Κ. (1997). Γεωμορφολογική εξέλιξη της Νότιας Αττικής, ΓΑΙΑ Νο2, τμήμα Γεωλογίας, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
32. Περδικάκη Μ. (2014). Εκτίμηση ρυπαντικής επικινδυνότητας παράκτιων υδροφορέων με τη χρήση του πολυκριτηριακού δείκτη Galdit, Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Τομέας Γεωλογικών Επιστημών, ΕΜΠ.
33. Πηλιχός Μ. (2014). Γεωλογική χαρτογράφηση στην περιοχή Πόρτο εννιά της ΝΑ Αττικής, Πτυχιακή εργασία, Τμήμα Γεωλογίας, τομέας Γενικής Θαλάσσιας Γεωλογίας και Γεωδυναμικής, Πανεπιστήμιο Πατρών.
34. Σούλιος Γ., (2006). Γενική Υδρογεωλογία, Ποιότητα υπογείου νερού – Ρύπανση, μόλυνση υπογείου νερού.
35. Στρατικόπουλος Κ. (2007). Υδρογεωλογική και υδροχημική μελέτη των θερμομεταλλικών πηγών της δυτικής Πελοποννήσου με τη χρήση σταθερών ισοτόπων, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωλογίας και Γεωφυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών.
36. Φιλιππίδης Α., Μέλφος Β. (2012). ΓΕΩΧΗΜΕΙΑ, Σημειώσεις, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας, ΑΠΘ.
37. Φωτιάδης Α., Λατσούδας Χ. (1980,2000). Γεωλογικός χάρτης Ελλάδας, Φύλλο Λαύριο, Φύλλο Κορωπί Πλάκα, κλίμακας 1:50.000, ΙΓΜΕ.

Νομοθεσία

- Κοινή Υπουργική Απόφαση Υ2/2600/2001 - Ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης, σε συμμόρφωση προς την οδηγία 98/83/ΕΚ του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης της 3ης Νοεμβρίου 1998.

Ξενόγλωσση

1. Alexakis D. (2010). Diagnosis of stream sediment quality and assessment of toxic element contamination sources in East Attica, Greece. *Environ Earth Sciences* (2011) 63:1369–1383. DOI 10.1007/s12665-010-0807-9.
2. Bakalowicz M., (2005), Karst Sub-Marine Springs (KSMS), Hydrosciences, CNRS and CREEN-ESIB.
3. Bartholome A., Carrasco F., Jose Duran J., W.LaMoreaux J., (2010). Advances in research in Karst Media. *Environmental Earth Sciences*
4. Berger A. et al. (2013). Footwall mineralization during late Miocene extension along the West Cycladic Detachment System, Lavrion, Greece. Department of Earth Sciences, University of Ottawa, Canada. *Terra Nova*, doi: 10.1111/ter. 12016.
5. Burnett W.C. et al. (2006). Quantifying submarine groundwater discharge in the coastal zone via multiple methods. *Science of the total environment* 31/08/2006, vol.367(2): 498-543.
6. C. Richter B. and W. Kreitler C. (1993). *Geochemical Techniques for Identifying Sources of Ground-Water Salinization*, C.K. Smoley. Boca Raton, Florida.
7. Dotsika, E., Lykoudis, S., Poutoukis, D., (2009): Spatial distribution of the isotopic composition of precipitation and spring water in Greece. *Global and Planetary Change*, 71, 141-149.
8. Fiorillo F. et al. (2015). Karst Groundwater Availability and Sustainable Development. *Environmental Earth Sciences*. Vol. 74, Issue 1, pp 227-240. Springer.
9. Fleurya P., Bakalowiczb M., Marsily G. (2007). Submarine springs and coastal karst aquifers: A review. *Journal of Hydrology (Impact Factor: 3.05)*. 06/2007; 339(1): 79-92.
10. Fleurya P., Bakalowiczb M., Marsily G., Cortes J.M. (2007). Functioning of a coastal karstic system with a submarine outlet, in southern Spain. *Hydrogeology J* 16(1):75-85.
11. Komnitsas K. et al. (1995). Oxidation of pyrite and arsenopyrite in sulphidic spoils in Lavrion, National Technical University of Athens, Laboratory of Metallurgy. *Minerals Engineering (Impact Factor: 1.6)*. 12/1005; 8(12): 1443-1454.

12. Korre A. et al. (2002). Quantitative – Spatial assessment of the risks associated with high Pb loads in soils around Lavrio, Greece. Pergamon, Applied Geochemistry 17 (2002), 1029-1045.
13. Krohe A. et al. (2009). Formation of basins and mountain ranges in Attica (Greece): The role of Miocene to Recent low-angle normal detachment faults. Elsevier, Earth Science Reviews, 98 (2010), 81-104.
14. Mijatovic B. (2007). The groundwater discharge in the Mediterranean karst coastal zones and freshwater tapping: set problems and adopted solutions. Environmental Geology, January 2007, Vol. 51, Issue 5, pp 737-742. Springer.
15. Milanovic P. (1981). Karst Hydrogeology, John Wiley & Sons, Ltd. W.R.P. Colo, USA.
16. Milanovic P., (2004). WATER RESOURCES ENGINEERING in KARST. CRC Press Taylor & Francis Group 2004.
17. MOORE W., SARMIENTO J., KEY R. (2007). Submarine groundwater discharge revealed by ²²⁸Ra distribution in the upper Atlantic Ocean. Nature Geoscience, Vol. 1, 2008, Nature Publishing Group.
18. S. Zektser I., G. Dzhamalov R., G. Everett L., (2007). Submarine Groundwater. 466 pp., CRC Press, Boca Raton, Florida.
19. Skarpelis N. (2007). The Lavrion deposit (SE Attica, Greece: geology, mineralogy and minor elements chemistry). N.Jb Miner Abh, 183(3), 2007, pp.227-249.
20. Skarpelis N., Argyraki A. (2009). The Geology and Origin of Supergene ores in Lavrion (Attica, Greece). Resource Geology, 59(1), 2009, pp.1-14.
21. Van Beynen P., (2011). Karst Management. Springer ISBN 978-94-007-1206-5. DOI 10.1007/978-94-007-1207-2.
22. Van Liefferinge K. et al. (2013). Reconsidering the role of Thorikos within the Laurion silver mining area (Attica, Greece) through hydrological analyses. JOURNAL OF ARCHAEOLOGICAL SCIENCE. 41. P. 272-284

ΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΌΠΟΙ

1. <http://water.usgs.gov/edu/watercyclesprings.html>
2. http://www.csr.utexas.edu/grace/gallery/other/misc/water_cycle_sys.html

3. <http://www.bathingwaterprofiles.gr/bathingprofiles/GRBW069219039>



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

ΠΙΝΑΚΕΣ ΧΗΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	Thoriko			
Location				
Geology				
Watertype	Ca-SO ₄ -HCO ₃			
Temperature (°C)				
pH	7.0			
Sum of Anions (meq/l)	1757.9			
Sum of Cations (meq/l)	351.8			
Balance	51.6			
Total dissolved solids	803			
Total hardness	4.3	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	6.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	56.8	2.47	2.47	
K	6.25	0.160	0.160	
Ca	131	3.27	6.54	
Mg	25	1.03	2.06	
Cl	35.5	1.00	1.00	
SO ₄	1356.36	14.13	28.26	
NO ₃	0	0.00	0.00	
HCO ₃	366	6.00	6.00	
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	5.24	3.18	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.10	0.23	0.152	0.364
Na/Cl	1.60	2.47	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	Thoriko			
Location				
Geology				
Watertype	Na-Cl-SO4			
Temperature (°C)				
pH	7.0			
Sum of Anions (meq/l)	4144.6			
Sum of Cations (meq/l)	1959.6			
Balance	18.5			
Total dissolved solids	4992			
Total hardness	5.4	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	9.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	1320.96	57.46	57.46	
K	14.53	0.372	0.372	
Ca	152	3.79	7.59	
Mg	39	1.60	3.21	
Cl	2165.5	61.08	61.08	
SO ₄	1409.1	14.68	29.36	
NO ₃	21	0.27	0.27	
HCO ₃	549	9.00	9.00	
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	3.90	2.36	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.11	0.26	0.152	0.364
Na/Cl	0.61	0.94	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	Thoriko			
Location				
Geology				
Watertype	Na-Cl-SO4			
Temperature (°C)				
pH	6.0			
Sum of Anions (meq/l)	5608.2			
Sum of Cations (meq/l)	2327.2			
Balance	15.3			
Total dissolved solids	14235			
Total hardness	7.0	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	6.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	2031.67	88.37	88.37	
K	28.44	0.727	0.727	
Ca	57	1.42	2.84	
Mg	135	5.55	11.11	
Cl	3443.5	97.13	97.13	
SO ₄	1766.73	18.40	36.81	
NO ₃	32	0.41	0.41	
HCO ₃	366	6.00	6.00	
Ratios			Comparision to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	0.42	0.26	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.03	0.08	0.152	0.364
Na/Cl	0.59	0.91	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	Thoriko			
Location				
Geology				
Watertype	Na-Cl			
Temperature (°C)				
pH	6.0			
Sum of Anions (meq/l)	4394.4			
Sum of Cations (meq/l)	2709.2			
Balance	4.7			
Total dissolved solids	6871			
Total hardness	7.4	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	4.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	1905.64	82.89	82.89	
K	213.43	5.459	5.459	
Ca	230	5.74	11.48	
Mg	40	1.65	3.29	
Cl	3124	88.12	88.12	
SO ₄	995.43	10.37	20.74	
NO ₃	31	0.40	0.40	
HCO ₃	244	4.00	4.00	
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	5.75	3.49	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.23	0.55	0.152	0.364
Na/Cl	0.61	0.94	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	Thoriko			
Location				
Geology				
Watertype	Na-Cl-SO4			
Temperature (°C)				
pH	7.5			
Sum of Anions (meq/l)	4287.9			
Sum of Cations (meq/l)	2170.7			
Balance	8.7			
Total dissolved solids	8320			
Total hardness	9.1	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	6.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	1615.25	70.26	70.26	
K	16.31	0.417	0.417	
Ca	231	5.76	11.53	
Mg	82	3.37	6.75	
Cl	2485	70.09	70.09	
SO ₄	1428.88	14.88	29.77	
NO ₃	8	0.10	0.10	
HCO ₃	366	6.00	6.00	
Ratios			Comparision to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	2.82	1.71	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.16	0.39	0.152	0.364
Na/Cl	0.65	1.00	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	Thoriko			
Location				
Geology				
Watertype	Na-Ca-SO ₄ -Cl-HCO ₃			
Temperature (°C)				
pH	7.7			
Sum of Anions (meq/l)	1695.6			
Sum of Cations (meq/l)	469.3			
Balance	22.8			
Total dissolved solids	1177			
Total hardness	4.9	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	7.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	287.55	12.51	12.51	
K	5.75	0.147	0.147	
Ca	145	3.62	7.24	
Mg	31	1.28	2.55	
Cl	319.5	9.01	9.01	
SO ₄	939.4	9.79	19.57	
NO ₃	9.67	0.12	0.12	
HCO ₃	427	7.00	7.00	
Ratios			Comparision to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	4.68	2.84	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.15	0.37	0.152	0.364
Na/Cl	0.90	1.39	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	Thoriko			
Location				
Geology				
Watertype	Na-Cl-SO4			
Temperature (°C)				
pH				
Sum of Anions (meq/l)	4232.8			
Sum of Cations (meq/l)	1914.8			
Balance	15.0			
Total dissolved solids	4771			
Total hardness	7.7	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	4.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	1341.9	58.37	58.37	
K	30.86	0.789	0.789	
Ca	251	6.26	12.53	
Mg	35	1.44	2.88	
Cl	1917	54.07	54.07	
SO ₄	2023.83	21.08	42.16	
NO ₃	48	0.62	0.62	
HCO ₃	244	4.00	4.00	
Ratios			Comparision to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	7.17	4.35	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.12	0.30	0.152	0.364
Na/Cl	0.70	1.08	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	Thoriko			
Location				
Geology				
Watertype	Na-Cl-SO4			
Temperature (°C)				
pH	6.0			
Sum of Anions (meq/l)	4910.0			
Sum of Cations (meq/l)	2193.2			
Balance	12.7			
Total dissolved solids				
Total hardness	5.3	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	7.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	1908.48	83.01	83.01	
K	47.71	1.220	1.220	
Ca	197	4.92	9.83	
Mg	9	0.37	0.74	
Cl	2982	84.11	84.11	
SO ₄	1501	15.64	31.27	
NO ₃	0	0.00	0.00	
HCO ₃	427	7.00	7.00	
Ratios			Comparision to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	21.89	13.27	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.13	0.31	0.152	0.364
Na/Cl	0.64	0.99	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	Thoriko			
Location				
Geology				
Watertype	Na-SO4-Cl			
Temperature (°C)				
pH	7.1			
Sum of Anions (meq/l)	4666.6			
Sum of Cations (meq/l)	1216.1			
Balance	35.2			
Total dissolved solids	3192			
Total hardness	4.7	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	7.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	952.82	41.45	41.45	
K	14.29	0.365	0.365	
Ca	175	4.37	8.73	
Mg	7	0.29	0.58	
Cl	1562	44.06	44.06	
SO ₄	2666.58	27.78	55.55	
NO ₃	11	0.14	0.14	
HCO ₃	427	7.00	7.00	
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	25.00	15.16	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.07	0.16	0.152	0.364
Na/Cl	0.61	0.94	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	Thoriko			
Location				
Geology				
Watertype	Na-Cl-SO4			
Temperature (°C)				
pH	7.5			
Sum of Anions (meq/l)	3582.1			
Sum of Cations (meq/l)	1760.5			
Balance	18.1			
Total dissolved solids	3120			
Total hardness	2.9	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	6.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	1256.7	54.66	54.66	
K	33.93	0.868	0.868	
Ca	95	2.37	4.74	
Mg	14	0.58	1.15	
Cl	2130	60.08	60.08	
SO ₄	1086.08	11.31	22.63	
NO ₃	0	0.00	0.00	
HCO ₃	366	6.00	6.00	
Ratios			Comparision to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	6.79	4.12	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.09	0.21	0.152	0.364
Na/Cl	0.59	0.91	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	Thoriko			
Location				
Geology				
Watertype	Na-Cl			
Temperature (°C)				
pH				
Sum of Anions (meq/l)	2404.1			
Sum of Cations (meq/l)	1331.0			
Balance	0.5			
Total dissolved solids	3497			
Total hardness	5.2	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	5.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	1099.08	47.81	47.81	
K	43.96	1.124	1.124	
Ca	157	3.92	7.83	
Mg	31	1.28	2.55	
Cl	1526.5	43.06	43.06	
SO ₄	563.64	5.87	11.74	
NO ₃	9	0.12	0.12	
HCO ₃	305	5.00	5.00	
Ratios			Comparision to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	5.06	3.07	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.28	0.67	0.152	0.364
Na/Cl	0.72	1.11	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	Thoriko			
Location				
Geology				
Watertype	Na-SO ₄ -Cl-HCO ₃			
Temperature (°C)				
pH	7.4			
Sum of Anions (meq/l)	1839.9			
Sum of Cations (meq/l)	445.0			
Balance	36.2			
Total dissolved solids	1567			
Total hardness	2.7	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	6.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	301	13.09	13.09	
K	11	0.281	0.281	
Ca	91	2.27	4.54	
Mg	11	0.45	0.91	
Cl	524	14.78	14.78	
SO ₄	898.2	9.36	18.71	
NO ₃	51.66	0.66	0.66	
HCO ₃	366	6.00	6.00	
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	8.27	5.02	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.10	0.24	0.152	0.364
Na/Cl	0.57	0.89	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	THORIKO			
Location				
Geology				
Watertype	Na-SO4-Cl			
Temperature (°C)				
pH	7.1			
Sum of Anions (meq/l)	2744.6			
Sum of Cations (meq/l)	1164.9			
Balance	7.8			
Total dissolved solids	2217			
Total hardness	7.1	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	4.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	835.67	36.35	36.35	
K	25.0701	0.641	0.641	
Ca	192	4.79	9.58	
Mg	57	2.35	4.69	
Cl	781	22.03	22.03	
SO ₄	1486.558	15.48	30.97	
NO ₃	233	2.99	2.99	
HCO ₃	244	4.00	4.00	
Ratios			Comparision to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	3.37	2.04	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.13	0.31	0.152	0.364
Na/Cl	1.07	1.65	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	THORIKO			
Location				
Geology				
Watertype	Na-SO4-Cl			
Temperature (°C)				
pH	7.9			
Sum of Anions (meq/l)	6202.4			
Sum of Cations (meq/l)	1439.5			
Balance	35.5			
Total dissolved solids	4557			
Total hardness	7.9	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	7.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	1141.68	49.66	49.66	
K	30.8254	0.788	0.788	
Ca	97	2.42	4.84	
Mg	133	5.47	10.94	
Cl	1704	48.06	48.06	
SO ₄	3978.438	41.44	82.88	
NO ₃	93	1.19	1.19	
HCO ₃	427	7.00	7.00	
Ratios			Comparision to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	0.73	0.44	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.02	0.06	0.152	0.364
Na/Cl	0.67	1.03	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	PARKO			
Location				
Geology				
Watertype	Ca-Na-SO4			
Temperature (°C)				
pH	6.0			
Sum of Anions (meq/l)	1876.1			
Sum of Cations (meq/l)	592.3			
Balance	30.8			
Total dissolved solids	998			
Total hardness	5.9	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	5.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	191.7	8.34	8.34	
K	15.336	0.392	0.392	
Ca	200	4.99	9.98	
Mg	21	0.86	1.73	
Cl	142	4.01	4.01	
SO ₄	1409.099	14.68	29.36	
NO ₃	20	0.26	0.26	
HCO ₃	305	5.00	5.00	
Ratios			Comparision to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	9.52	5.78	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.14	0.34	0.152	0.364
Na/Cl	1.35	2.08	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	PARKO			
Location				
Geology				
Watertype	Ca-Na-SO4			
Temperature (°C)				
pH	7.0			
Sum of Anions (meq/l)	2600.9			
Sum of Cations (meq/l)	3729.1			
Balance	37.9			
Total dissolved solids	1238			
Total hardness	6.4	mg/l CaCO3		
Alkalinity	4.0	mg/l CaCO3		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	255.6	11.12	11.12	
K	17.892	0.458	0.458	
Ca	246	6.14	12.28	
Mg	7	0.29	0.58	
Cl	213	6.01	6.01	
SO4	2140.841	22.30	44.60	
NO3	3.1	0.04	0.04	
HCO3	244	4.00	4.00	
Ratios			Comparision to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	35.14	21.31	0.319	0.194
Ca/SO4	0.11	0.28	0.152	0.364
Na/Cl	1.20	1.85	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	PARKO			
Location				
Geology				
Watertype	Na-SO4-Cl			
Temperature (°C)				
pH	6.0			
Sum of Anions (meq/l)	2819.8			
Sum of Cations (meq/l)	1488.8			
Balance	19.6			
Total dissolved solids	2288			
Total hardness	5.9	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	5.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	695.09	30.23	30.23	
K	17.3773	0.444	0.444	
Ca	210	5.24	10.48	
Mg	15	0.62	1.23	
Cl	781	22.03	22.03	
SO ₄	1733.768	18.06	36.12	
NO ₃	0	0.00	0.00	
HCO ₃	305	5.00	5.00	
Ratios			Comparision to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	14.00	8.49	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.12	0.29	0.152	0.364
Na/Cl	0.89	1.37	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	PARKO			
Location				
Geology				
Watertype	Na-Ca-Cl-SO4			
Temperature (°C)				
pH	6.0			
Sum of Anions (meq/l)	2338.3			
Sum of Cations (meq/l)	1993.8			
Balance	10.3			
Total dissolved solids	2763			
Total hardness	6.8	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	5.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	700.06	30.45	30.45	
K	21.7019	0.555	0.555	
Ca	206	5.14	10.28	
Mg	40	1.65	3.29	
Cl	1029.5	29.04	29.04	
SO ₄	988.8412	10.30	20.60	
NO ₃	15	0.19	0.19	
HCO ₃	305	5.00	5.00	
Ratios			Comparision to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	5.15	3.12	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.21	0.50	0.152	0.364
Na/Cl	0.68	1.05	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	PARKO			
Location				
Geology				
Watertype	SO4-HCO3			
Temperature (°C)				
pH	6.0			
Sum of Anions (meq/l)	1384.1			
Sum of Cations (meq/l)	0.0			
Balance	100.0			
Total dissolved solids	2347			
Total hardness	0.0	mg/l CaCO3		
Alkalinity	5.0	mg/l CaCO3		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na				
K				
Ca				
Mg				
Cl				
SO4	1058.06	11.02	22.04	
NO3	21	0.27	0.27	
HCO3	305	5.00	5.00	
Ratios			Comparision to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg			0.319	0.194
Ca/SO4			0.152	0.364
Na/Cl			0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	THORIKO			
Location				
Geology				
Watertype	Ca-Na-Cl			
Temperature (°C)	19.6			
pH	6.9			
Sum of Anions (meq/l)	284.0			
Sum of Cations (meq/l)	352.1			
Balance	-20.1			
Total dissolved solids				
Total hardness	4.6	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	0.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	61	2.65	2.65	
K	9	0.230	0.230	
Ca	152	3.79	7.59	
Mg	19	0.78	1.56	
Cl	284	8.01	8.01	
SO ₄				
NO ₃				
HCO ₃				
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	8.00	4.85	0.319	0.194
Ca/SO ₄			0.152	0.364
Na/Cl	0.21	0.33	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	THORIKO			
Location				
Geology				
Watertype	Na-Ca-SO ₄ -HCO ₃ -Cl			
Temperature (°C)	23.0			
pH	6.9			
Sum of Anions (meq/l)	1113.3			
Sum of Cations (meq/l)	476.2			
Balance	0.5			
Total dissolved solids				
Total hardness	5.6	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	7.7	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	241	10.48	10.48	
K	14	0.358	0.358	
Ca	161	4.02	8.03	
Mg	38	1.56	3.13	
Cl	177.5	5.01	5.01	
SO ₄	442	4.60	9.21	
NO ₃	21	0.27	0.27	
HCO ₃	472.75	7.75	7.75	
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	4.24	2.57	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.36	0.87	0.152	0.364
Na/Cl	1.36	2.09	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	THORIKO			
Location				
Geology				
Watertype	Na-SO ₄ -HCO ₃ -Cl			
Temperature (°C)	0.0			
pH	0.0			
Sum of Anions (meq/l)	3061.5			
Sum of Cations (meq/l)	551.1			
Balance	52.0			
Total dissolved solids				
Total hardness	4.4	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	10.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	252	10.96	10.96	
K	12	0.307	0.307	
Ca	152	3.79	7.59	
Mg	14	0.58	1.15	
Cl	319.5	9.01	9.01	
SO ₄	2132	22.21	44.42	
NO ₃				
HCO ₃	610	10.00	10.00	
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	10.86	6.58	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.07	0.17	0.152	0.364
Na/Cl	0.79	1.22	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	THORIKO			
Location				
Geology				
Watertype	Na-Cl			
Temperature (°C)	23.6			
pH	6.8			
Sum of Anions (meq/l)	2023.5			
Sum of Cations (meq/l)	1449.2			
Balance	-5.8			
Total dissolved solids				
Total hardness	4.8	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	0.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	1218	52.98	52.98	
K	61	1.560	1.560	
Ca	138	3.44	6.89	
Mg	32	1.32	2.63	
Cl	2023.5	57.08	57.08	
SO ₄				
NO ₃				
HCO ₃				
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	4.31	2.62	0.319	0.194
Ca/SO ₄			0.152	0.364
Na/Cl	0.60	0.93	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	THORIKO			
Location				
Geology				
Watertype	Na-Cl			
Temperature (°C)	23.6			
pH	6.8			
Sum of Anions (meq/l)	3000.0			
Sum of Cations (meq/l)	1777.4			
Balance	7.3			
Total dissolved solids				
Total hardness	4.8	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	5.5	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	1255	54.59	54.59	
K	67	1.714	1.714	
Ca	144	3.59	7.19	
Mg	29	1.19	2.39	
Cl	2094.5	59.08	59.08	
SO ₄	546	5.69	11.38	
NO ₃	24	0.31	0.31	
HCO ₃	335.5	5.50	5.50	
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	4.97	3.01	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.26	0.63	0.152	0.364
Na/Cl	0.60	0.92	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	THORIKO			
Location				
Geology				
Watertype	Na-Ca-Cl-SO4			
Temperature (°C)				
pH				
Sum of Anions (meq/l)	1849.0			
Sum of Cations (meq/l)	1061.1			
Balance	-6.5			
Total dissolved solids				
Total hardness	7.9	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	8.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	729	31.71	31.71	
K	15	0.384	0.384	
Ca	265	6.61	13.22	
Mg	32	1.32	2.63	
Cl	781	22.03	22.03	
SO ₄	580	6.04	12.08	
NO ₃	0	0.00	0.00	
HCO ₃	488	8.00	8.00	
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	8.28	5.02	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.46	1.09	0.152	0.364
Na/Cl	0.93	1.44	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	THORIKO			
Location				
Geology				
Watertype	Na-Ca-SO ₄ -Cl-HCO ₃			
Temperature (°C)	23.0			
pH	7182.0			
Sum of Anions (meq/l)	1599.5			
Sum of Cations (meq/l)	510.3			
Balance	20.4			
Total dissolved solids				
Total hardness	4.3	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	7.5	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	305	13.27	13.27	
K	15	0.384	0.384	
Ca	151	3.77	7.54	
Mg	14	0.58	1.15	
Cl	355	10.01	10.01	
SO ₄	775	8.07	16.15	
NO ₃	12	0.15	0.15	
HCO ₃	457.5	7.50	7.50	
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	10.79	6.54	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.19	0.47	0.152	0.364
Na/Cl	0.86	1.32	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	THORIKO			
Location				
Geology				
Watertype	Na-Ca-Cl-SO ₄ -HCO ₃			
Temperature (°C)				
pH				
Sum of Anions (meq/l)	1933.0			
Sum of Cations (meq/l)	1045.1			
Balance	-4.3			
Total dissolved solids				
Total hardness	8.3	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	10.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	695	30.23	30.23	
K	17	0.435	0.435	
Ca	265	6.61	13.22	
Mg	40	1.65	3.29	
Cl	781	22.03	22.03	
SO ₄	542	5.65	11.29	
NO ₃	0	0.00	0.00	
HCO ₃	610	10.00	10.00	
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	6.63	4.02	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.49	1.17	0.152	0.364
Na/Cl	0.89	1.37	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	THORIKO			
Location				
Geology				
Watertype	Na-SO4-Cl			
Temperature (°C)	20.3			
pH	7.3			
Sum of Anions (meq/l)	4975.5			
Sum of Cations (meq/l)	1704.0			
Balance	27.7			
Total dissolved solids				
Total hardness	7.8	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	8.5	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	1078	46.89	46.89	
K	48	1.228	1.228	
Ca	278	6.94	13.87	
Mg	21	0.86	1.73	
Cl	1562	44.06	44.06	
SO ₄	2858	29.77	59.54	
NO ₃	37	0.47	0.47	
HCO ₃	518.5	8.50	8.50	
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	13.24	8.03	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.10	0.23	0.152	0.364
Na/Cl	0.69	1.06	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	THORIKO			
Location				
Geology				
Watertype	Na-SO4-Cl			
Temperature (°C)	21.7			
pH	7.0			
Sum of Anions (meq/l)	4139.5			
Sum of Cations (meq/l)	1284.0			
Balance	21.6			
Total dissolved solids				
Total hardness	7.0	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	9.5	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	998	43.41	43.41	
K	29	0.742	0.742	
Ca	125	3.12	6.24	
Mg	95	3.91	7.82	
Cl	923	26.03	26.03	
SO ₄	2612	27.21	54.42	
NO ₃	25	0.32	0.32	
HCO ₃	579.5	9.50	9.50	
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	1.32	0.80	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.05	0.11	0.152	0.364
Na/Cl	1.08	1.67	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	THORIKO			
Location				
Geology				
Watertype	Na-SO4-Cl			
Temperature (°C)	17.2			
pH	6.7			
Sum of Anions (meq/l)	9400.0			
Sum of Cations (meq/l)	2643.2			
Balance	31.8			
Total dissolved solids				
Total hardness	8.2	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	9.5	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	2200	95.69	95.69	
K	45	1.151	1.151	
Ca	270	6.74	13.47	
Mg	36	1.48	2.96	
Cl	3514.5	99.13	99.13	
SO ₄	5275	54.95	109.90	
NO ₃	31	0.40	0.40	
HCO ₃	579.5	9.50	9.50	
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	7.50	4.55	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.05	0.12	0.152	0.364
Na/Cl	0.63	0.97	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	THORIKO			
Location				
Geology				
Watertype	Na-Cl-SO4			
Temperature (°C)	17.3			
pH	7.0			
Sum of Anions (meq/l)	7573.2			
Sum of Cations (meq/l)	2744.0			
Balance	21.1			
Total dissolved solids				
Total hardness	7.2	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	9.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	2350	102.22	102.22	
K	51	1.304	1.304	
Ca	75	1.87	3.74	
Mg	130	5.35	10.70	
Cl	3525.15	99.43	99.43	
SO ₄	3464	36.08	72.17	
NO ₃	35	0.45	0.45	
HCO ₃	549	9.00	9.00	
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	0.58	0.35	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.02	0.05	0.152	0.364
Na/Cl	0.67	1.03	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	THORIKO			
Location				
Geology				
Watertype	SO4-HCO3			
Temperature (°C)	17.6			
pH	7.6			
Sum of Anions (meq/l)	3726.5			
Sum of Cations (meq/l)	0.0			
Balance	100.0			
Total dissolved solids				
Total hardness	0.0	mg/l CaCO3		
Alkalinity	9.5	mg/l CaCO3		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na				
K				
Ca				
Mg				
Cl				
SO4	3132	32.63	65.25	
NO3	15	0.19	0.19	
HCO3	579.5	9.50	9.50	
Ratios			Comparision to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg			0.319	0.194
Ca/SO4			0.152	0.364
Na/Cl			0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	THORIKO			
Location				
Geology				
Watertype	Na-Cl-SO4			
Temperature (°C)	21.1			
pH	7.0			
Sum of Anions (meq/l)	5716.0			
Sum of Cations (meq/l)	2971.2			
Balance	9.2			
Total dissolved solids				
Total hardness	8.2	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	8.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	2301	100.09	100.09	
K	58	1.483	1.483	
Ca	272	6.79	13.57	
Mg	35	1.44	2.88	
Cl	3408	96.13	96.13	
SO ₄	1820	18.96	37.92	
NO ₃				
HCO ₃	488	8.00	8.00	
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	7.77	4.71	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.15	0.36	0.152	0.364
Na/Cl	0.68	1.04	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	THORIKO			
Location				
Geology				
Watertype	SO4-HCO3			
Temperature (°C)	18.1			
pH	7.3			
Sum of Anions (meq/l)	1914.5			
Sum of Cations (meq/l)	0.0			
Balance	100.0			
Total dissolved solids				
Total hardness	0.0	mg/l CaCO3		
Alkalinity	8.5	mg/l CaCO3		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na				
K				
Ca				
Mg				
Cl				
SO4	1396	14.54	29.08	
NO3				
HCO3	518.5	8.50	8.50	
Ratios			Comparision to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg			0.319	0.194
Ca/SO4			0.152	0.364
Na/Cl			0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	THORIKO			
Location				
Geology				
Watertype	Na-Cl-SO4			
Temperature (°C)	20.0			
pH	7.1			
Sum of Anions (meq/l)	5606.0			
Sum of Cations (meq/l)	2774.8			
Balance	6.1			
Total dissolved solids				
Total hardness	10.3	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	10.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	2322	101.00	101.00	
K	64	1.637	1.637	
Ca	280	6.99	13.97	
Mg	81	3.33	6.67	
Cl	3479	98.13	98.13	
SO ₄	1465	15.26	30.52	
NO ₃	52	0.67	0.67	
HCO ₃	610	10.00	10.00	
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	3.46	2.10	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.19	0.46	0.152	0.364
Na/Cl	0.67	1.03	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	THORIKO			
Location				
Geology				
Watertype	Na-Cl-SO4			
Temperature (°C)				
pH				
Sum of Anions (meq/l)	4587.5			
Sum of Cations (meq/l)	1578.2			
Balance	20.4			
Total dissolved solids				
Total hardness	9.3	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	7.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	1193	51.89	51.89	
K	59	1.509	1.509	
Ca	254	6.34	12.68	
Mg	72	2.96	5.92	
Cl	2094.5	59.08	59.08	
SO ₄	2027	21.11	42.23	
NO ₃	39	0.50	0.50	
HCO ₃	427	7.00	7.00	
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	3.53	2.14	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.13	0.30	0.152	0.364
Na/Cl	0.57	0.88	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	THORIKO			
Location				
Geology				
Watertype	Na-Ca-SO4			
Temperature (°C)	21.8			
pH	7.4			
Sum of Anions (meq/l)	3121.0			
Sum of Cations (meq/l)	922.1			
Balance	23.1			
Total dissolved solids				
Total hardness	7.2	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	7.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	605	26.32	26.32	
K	14	0.358	0.358	
Ca	271	6.76	13.52	
Mg	11	0.45	0.91	
Cl	355	10.01	10.01	
SO ₄	2339	24.36	48.73	
NO ₃	0	0.00	0.00	
HCO ₃	427	7.00	7.00	
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	24.64	14.94	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.12	0.28	0.152	0.364
Na/Cl	1.70	2.63	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	THORIKO			
Location				
Geology				
Watertype	Na-SO4-HCO3			
Temperature (°C)	8.8			
pH	7.2			
Sum of Anions (meq/l)	3118.0			
Sum of Cations (meq/l)	628.2			
Balance	52.7			
Total dissolved solids				
Total hardness	5.3	mg/l CaCO3		
Alkalinity	9.0	mg/l CaCO3		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	201	8.74	8.74	
K	10	0.256	0.256	
Ca	128	3.19	6.39	
Mg	51	2.10	4.20	
Cl	142	4.01	4.01	
SO4	2383	24.82	49.65	
NO3	44	0.56	0.56	
HCO3	549	9.00	9.00	
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	2.51	1.52	0.319	0.194
Ca/SO4	0.05	0.13	0.152	0.364
Na/Cl	1.42	2.18	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	THORIKO			
Location				
Geology				
Watertype	Na-SO4-Cl			
Temperature (°C)	18.3			
pH	6.9			
Sum of Anions (meq/l)	4438.0			
Sum of Cations (meq/l)	1262.0			
Balance	35.2			
Total dissolved solids				
Total hardness	6.1	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	8.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	782	34.02	34.02	
K	39	0.997	0.997	
Ca	165	4.12	8.23	
Mg	48	1.97	3.95	
Cl	1136	32.04	32.04	
SO ₄	2782	28.98	57.96	
NO ₃	32	0.41	0.41	
HCO ₃	488	8.00	8.00	
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	3.44	2.08	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.06	0.14	0.152	0.364
Na/Cl	0.69	1.06	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	THORIKO			
Location				
Geology				
Watertype	Na-SO4-Cl			
Temperature (°C)	17.9			
pH	7.0			
Sum of Anions (meq/l)	4359.0			
Sum of Cations (meq/l)	1208.0			
Balance	35.7			
Total dissolved solids				
Total hardness	6.1	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	7.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	745	32.41	32.41	
K	45	1.151	1.151	
Ca	173	4.32	8.63	
Mg	44	1.81	3.62	
Cl	1065	30.04	30.04	
SO ₄	2845	29.64	59.27	
NO ₃	22	0.28	0.28	
HCO ₃	427	7.00	7.00	
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	3.93	2.38	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.06	0.15	0.152	0.364
Na/Cl	0.70	1.08	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	THORIKO			
Location				
Geology				
Watertype				
Temperature (°C)				
pH				
Sum of Anions (meq/l)	0.0			
Sum of Cations (meq/l)	0.0			
Balance	0.0			
Total dissolved solids				
Total hardness	0.0	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	0.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na				
K				
Ca				
Mg				
Cl				
SO ₄				
NO ₃				
HCO ₃				
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg			0.319	0.194
Ca/SO ₄			0.152	0.364
Na/Cl			0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	THORIKO			
Location				
Geology				
Watertype	Na-SO4-Cl			
Temperature (°C)	20.5			
pH	7.3			
Sum of Anions (meq/l)	5204.5			
Sum of Cations (meq/l)	1900.0			
Balance	28.0			
Total dissolved solids				
Total hardness	7.6	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	5.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	1185	51.54	51.54	
K	54	1.381	1.381	
Ca	219	5.46	10.93	
Mg	52	2.14	4.28	
Cl	1952.5	55.07	55.07	
SO ₄	2919	30.41	60.81	
NO ₃	28	0.36	0.36	
HCO ₃	305	5.00	5.00	
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	4.21	2.55	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.08	0.18	0.152	0.364
Na/Cl	0.61	0.94	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	THORIKO			
Location				
Geology				
Watertype	Na-SO4-Cl			
Temperature (°C)	21.7			
pH	6.7			
Sum of Anions (meq/l)	4493.0			
Sum of Cations (meq/l)	1349.0			
Balance	40.9			
Total dissolved solids				
Total hardness	6.0	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	10.5	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	672	29.23	29.23	
K	28	0.716	0.716	
Ca	204	5.09	10.18	
Mg	21	0.86	1.73	
Cl	1242.5	35.05	35.05	
SO ₄	2583	26.91	53.81	
NO ₃	27	0.35	0.35	
HCO ₃	640.5	10.50	10.50	
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	9.71	5.89	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.08	0.19	0.152	0.364
Na/Cl	0.54	0.83	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	THORIKO			
Location				
Geology				
Watertype	Na-SO ₄ -Cl			
Temperature (°C)	22.8			
pH	6903.0			
Sum of Anions (meq/l)	2483.0			
Sum of Cations (meq/l)	676.1			
Balance	25.6			
Total dissolved solids				
Total hardness	6.1	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	7.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	420	18.27	18.27	
K	12	0.307	0.307	
Ca	144	3.59	7.19	
Mg	62	2.55	5.10	
Cl	480	13.54	13.54	
SO ₄	1426	14.85	29.71	
NO ₃	150	1.92	1.92	
HCO ₃	427	7.00	7.00	
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	2.32	1.41	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.10	0.24	0.152	0.364
Na/Cl	0.88	1.35	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	THORIKO			
Location				
Geology				
Watertype	Na-Cl-SO4			
Temperature (°C)	18.5			
pH	7.4			
Sum of Anions (meq/l)	5379.0			
Sum of Cations (meq/l)	1460.1			
Balance	31.0			
Total dissolved solids				
Total hardness	6.2	mg/l CaCO3		
Alkalinity	8.0	mg/l CaCO3		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	1201	52.24	52.24	
K	45	1.151	1.151	
Ca	90	2.25	4.49	
Mg	97	3.99	7.98	
Cl	2130	60.08	60.08	
SO4	2680	27.92	55.83	
NO3	81	1.04	1.04	
HCO3	488	8.00	8.00	
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	0.93	0.56	0.319	0.194
Ca/SO4	0.03	0.08	0.152	0.364
Na/Cl	0.56	0.87	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	PARKO			
Location				
Geology				
Watertype	Na-SO ₄ -Cl			
Temperature (°C)	22.9			
pH	6.9			
Sum of Anions (meq/l)	3580.0			
Sum of Cations (meq/l)	762.5			
Balance	55.4			
Total dissolved solids				
Total hardness	4.0	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	9.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	304	13.22	13.22	
K	15	0.384	0.384	
Ca	143	3.57	7.14	
Mg	10	0.41	0.82	
Cl	426	12.02	12.02	
SO ₄	2594	27.02	54.04	
NO ₃	11	0.14	0.14	
HCO ₃	549	9.00	9.00	
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	14.30	8.67	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.06	0.13	0.152	0.364
Na/Cl	0.71	1.10	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	PARKO			
Location				
Geology				
Watertype	Ca-Na-SO ₄ -Cl			
Temperature (°C)	22.0			
pH	7.1			
Sum of Anions (meq/l)	3949.0			
Sum of Cations (meq/l)	1525.0			
Balance	46.8			
Total dissolved solids				
Total hardness	7.8	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	8.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	322	14.01	14.01	
K	19	0.486	0.486	
Ca	291	7.26	14.52	
Mg	12	0.49	0.99	
Cl	426	12.02	12.02	
SO ₄	3000	31.25	62.50	
NO ₃	35	0.45	0.45	
HCO ₃	488	8.00	8.00	
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	24.25	14.71	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.10	0.23	0.152	0.364
Na/Cl	0.76	1.17	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	PARKO			
Location				
Geology				
Watertype				
Temperature (°C)	23.5			
pH	7215.0			
Sum of Anions (meq/l)	0.0			
Sum of Cations (meq/l)	0.0			
Balance	0.0			
Total dissolved solids				
Total hardness	0.0	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	0.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na				
K				
Ca				
Mg				
Cl				
SO ₄				
NO ₃				
HCO ₃				
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg			0.319	0.194
Ca/SO ₄			0.152	0.364
Na/Cl			0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	PARKO			
Location				
Geology				
Watertype	Na-SO ₄ -Cl			
Temperature (°C)	24.4			
pH	7248.0			
Sum of Anions (meq/l)	4056.5			
Sum of Cations (meq/l)	1325.0			
Balance	32.7			
Total dissolved solids				
Total hardness	7.2	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	9.5	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	689	29.97	29.97	
K	31	0.793	0.793	
Ca	205	5.12	10.23	
Mg	50	2.06	4.11	
Cl	994	28.04	28.04	
SO ₄	2449	25.51	51.02	
NO ₃	34	0.44	0.44	
HCO ₃	579.5	9.50	9.50	
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	4.10	2.49	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.08	0.20	0.152	0.364
Na/Cl	0.69	1.07	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	PARKO			
Location				
Geology				
Watertype	Na-SO ₄ -Cl			
Temperature (°C)	23.7			
pH	6894.0			
Sum of Anions (meq/l)	4342.0			
Sum of Cations (meq/l)	1653.0			
Balance	36.5			
Total dissolved solids				
Total hardness	6.6	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	9.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	721	31.36	31.36	
K	39	0.997	0.997	
Ca	221	5.51	11.03	
Mg	27	1.11	2.22	
Cl	1420	40.05	40.05	
SO ₄	2335	24.32	48.65	
NO ₃	38	0.49	0.49	
HCO ₃	549	9.00	9.00	
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	8.19	4.96	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.09	0.23	0.152	0.364
Na/Cl	0.51	0.78	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM

Sample Summary

Site	PARKO			
Location				
Geology				
Watertype	Na-Cl-SO4			
Temperature (°C)	21.7			
pH	6.8			
Sum of Anions (meq/l)	5914.0			
Sum of Cations (meq/l)	2725.2			
Balance	14.1			
Total dissolved solids				
Total hardness	8.2	mg/l CaCO ₃		
Alkalinity	9.0	mg/l CaCO ₃		
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l	
Na	2121	92.26	92.26	
K	52	1.330	1.330	
Ca	260	6.49	12.97	
Mg	42	1.73	3.46	
Cl	3479	98.13	98.13	
SO ₄	1861	19.39	38.77	
NO ₃	25	0.32	0.32	
HCO ₃	549	9.00	9.00	
Ratios			Comparison to seawater	
	mg/l	mmol/l	mg/l	mmol/l
Ca/Mg	6.19	3.75	0.319	0.194
Ca/SO ₄	0.14	0.33	0.152	0.364
Na/Cl	0.61	0.94	0.556	0.858
Cl/Br			287	648
SI Calcite				

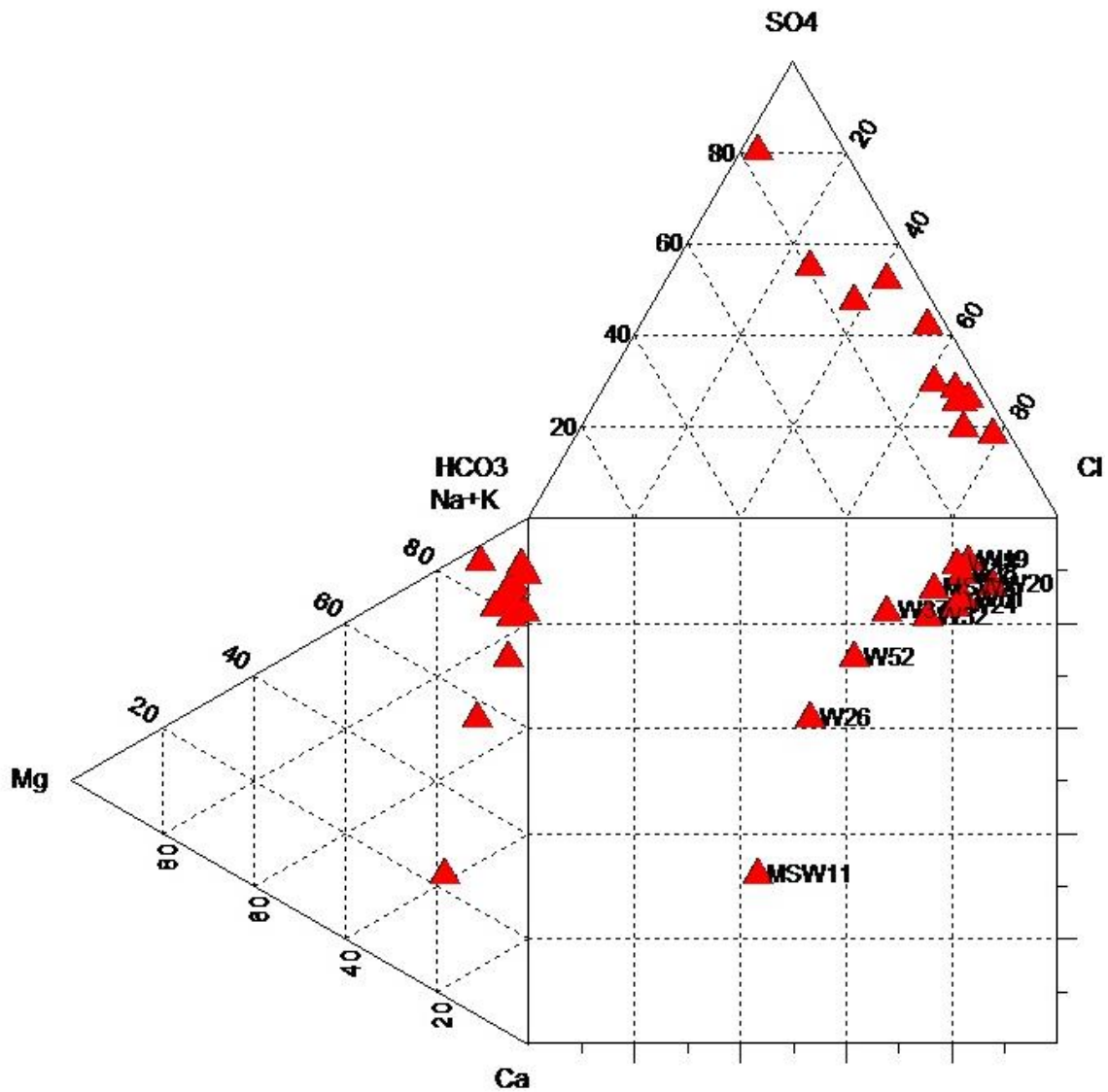
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AQUACHEM



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

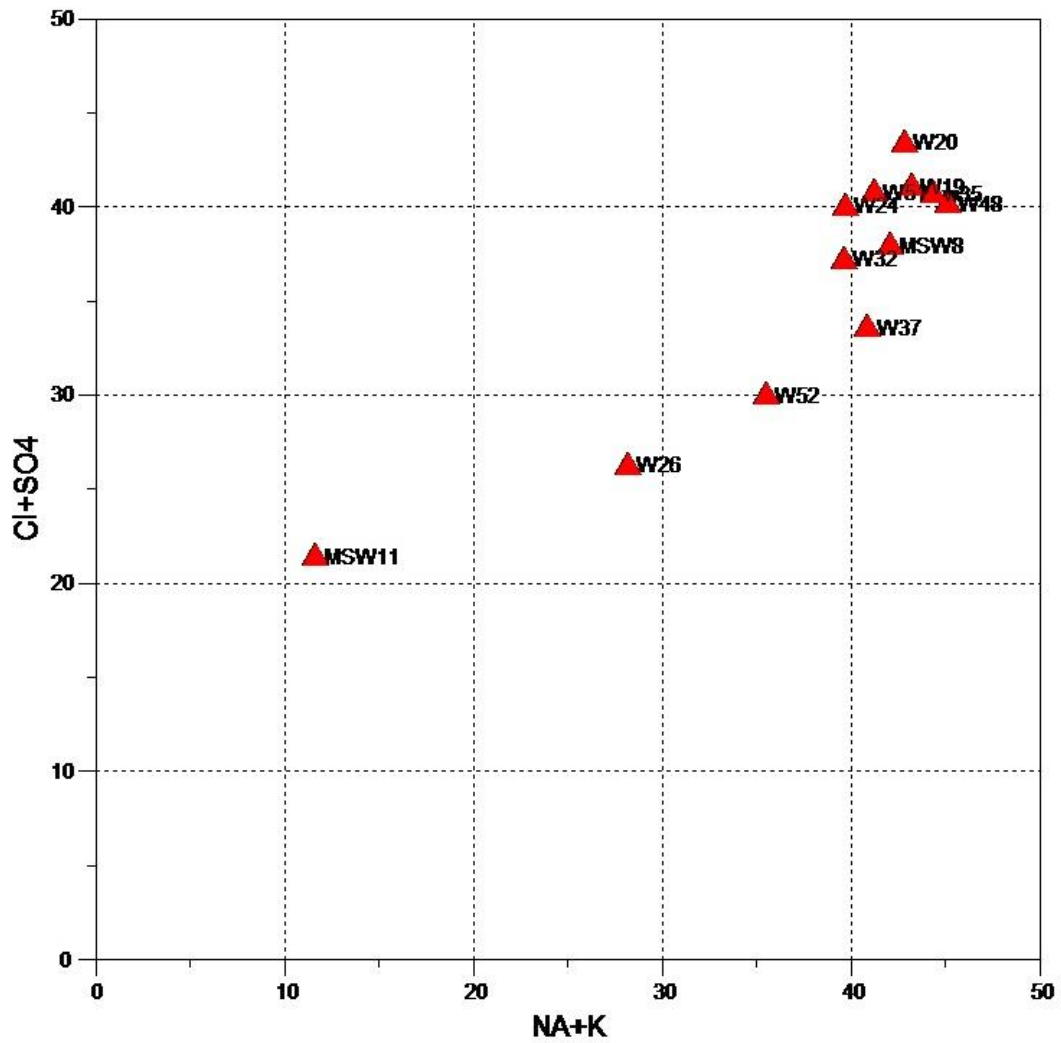
ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Durov Plot

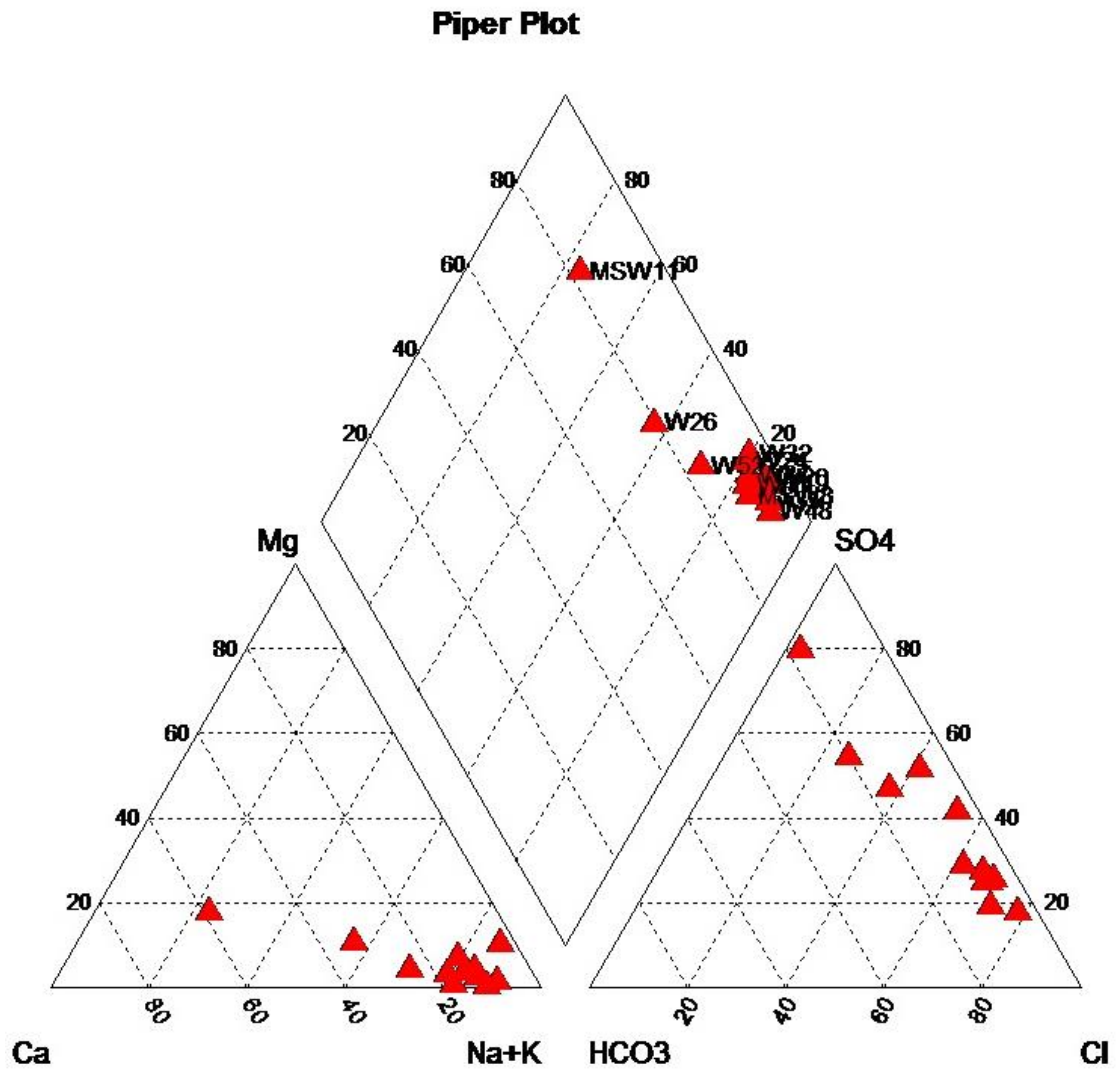


ΣΧΗΜΑ 1 Διάγραμμα Durov. Αλλουβιακός υδροφόρος, Ιανουάριος 2015.

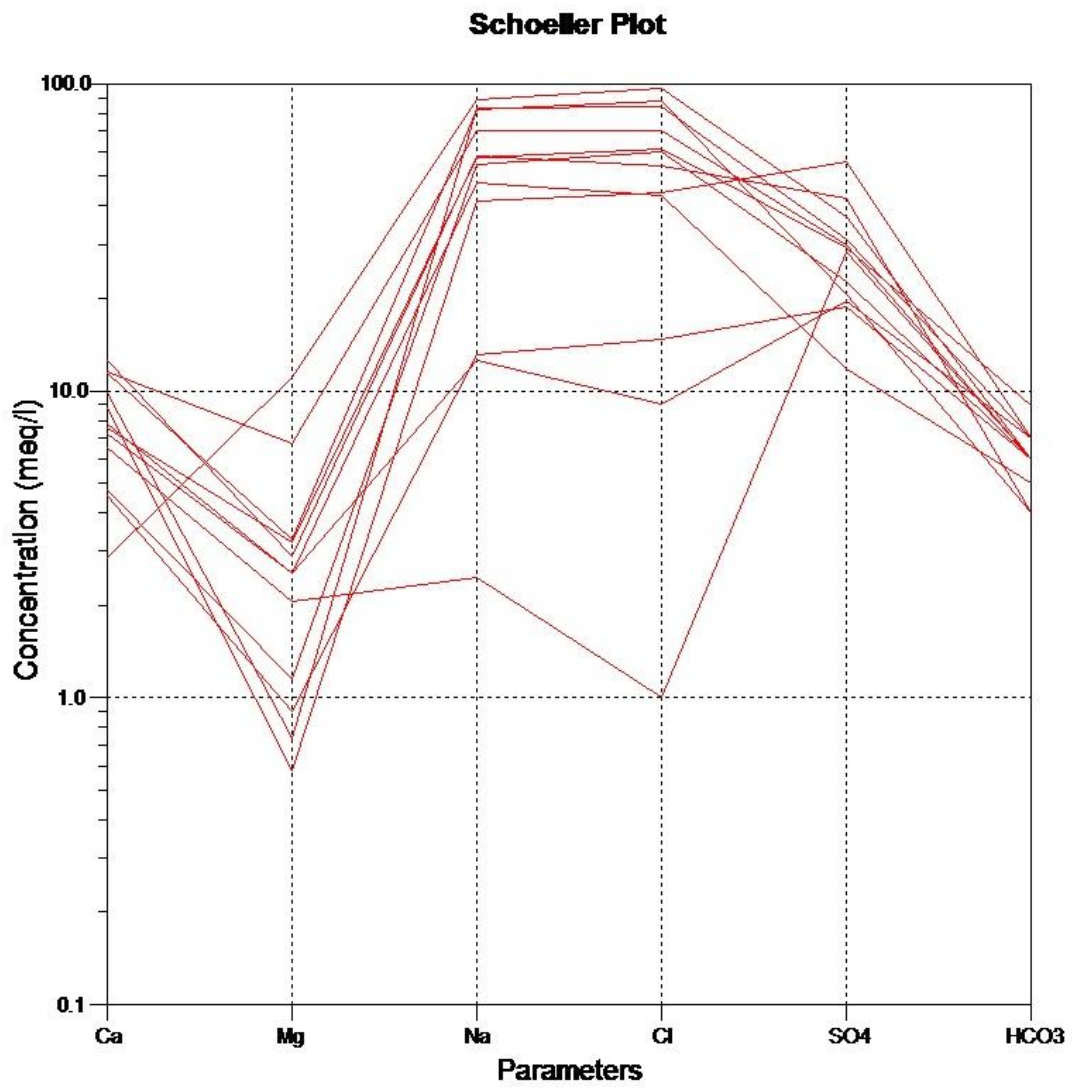
Ludwig Langelier Plot



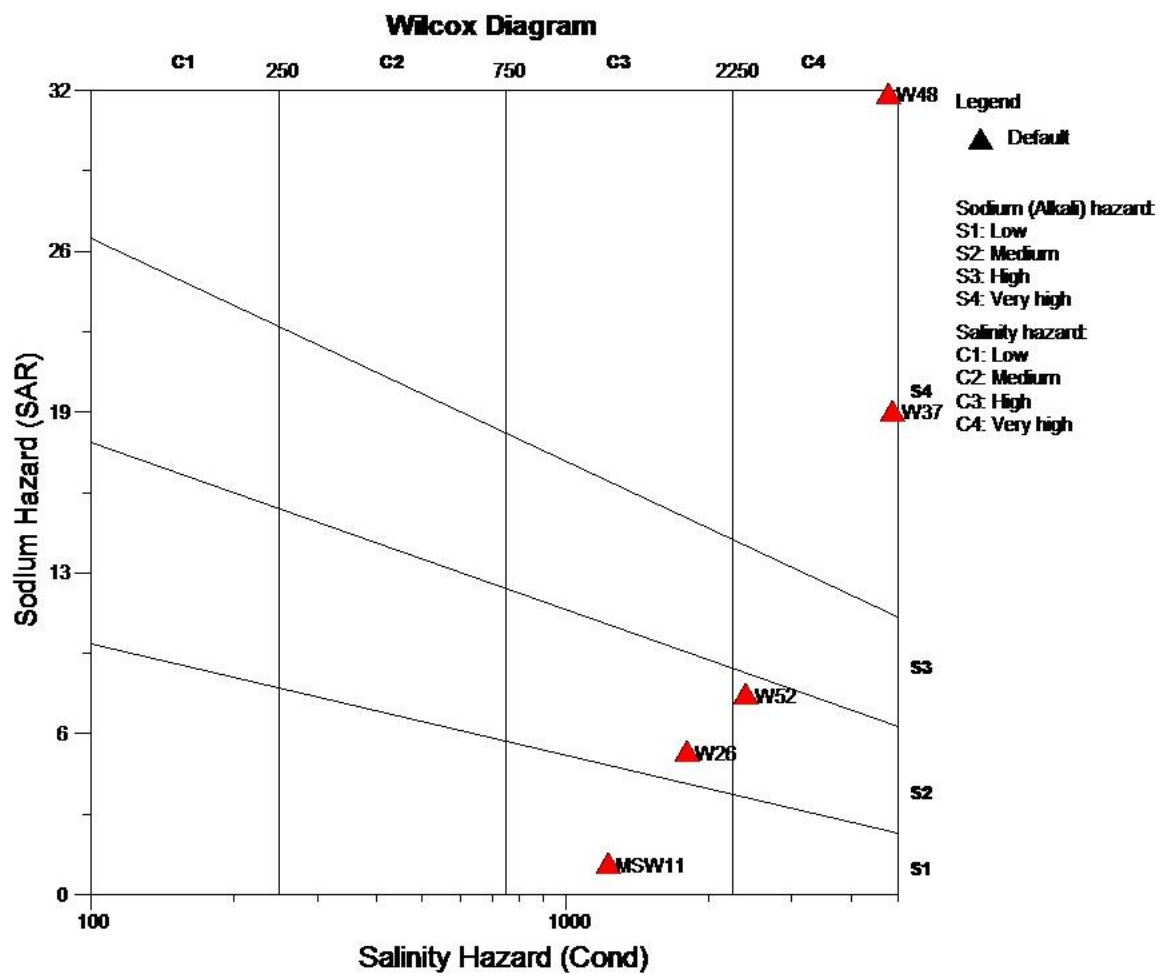
ΣΧΗΜΑ 2 Διάγραμμα Ludwig-Langelier. Αλλουβιακός υδροφόρος. Ιανουάριος 2015.



ΣΧΗΜΑ 3 Διάγραμμα Piper. Αλλουβιακός υδροφόρος. Ιανουάριος 2015.

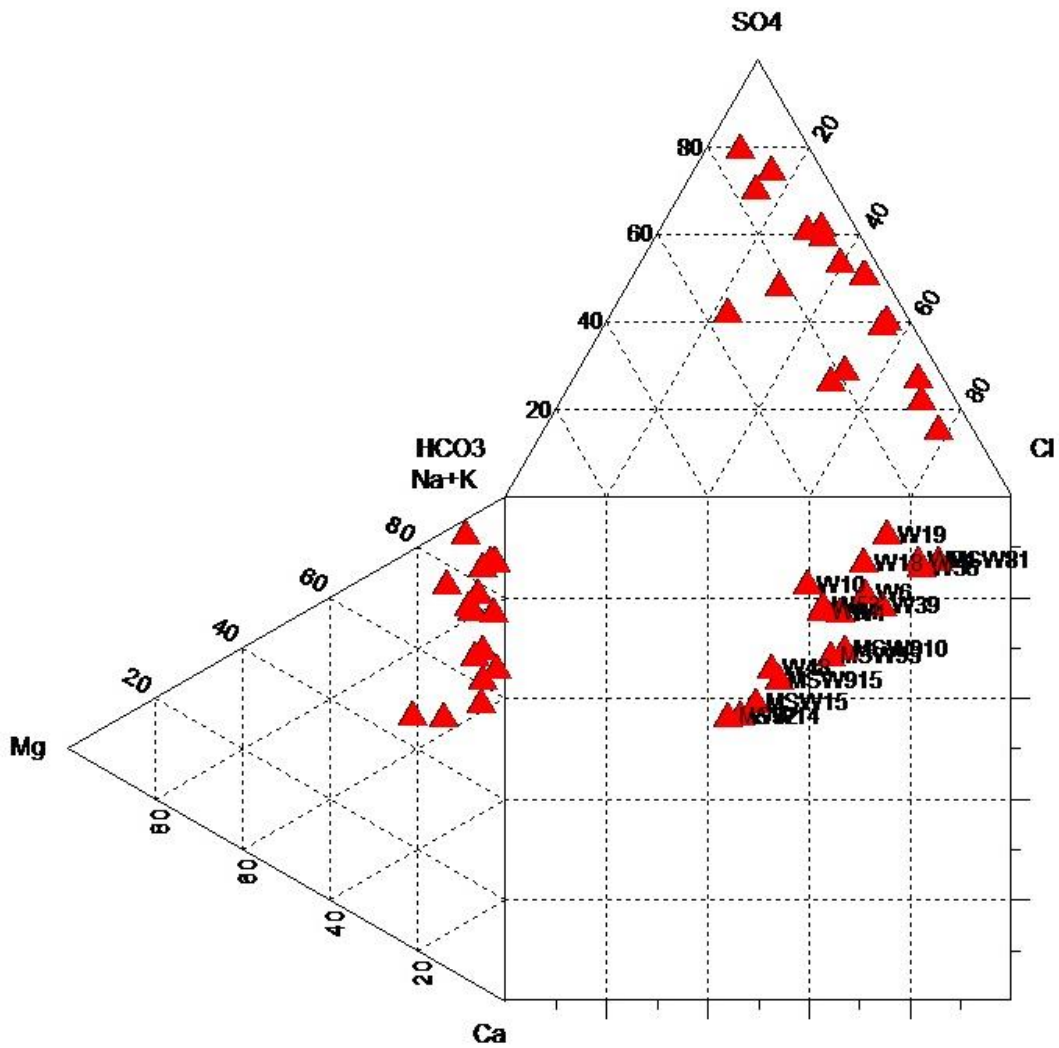


ΣΧΗΜΑ 4 Διάγραμμα Schoeller. Αλλουβιακός υδροφόρος. Ιανουάριος 2015.

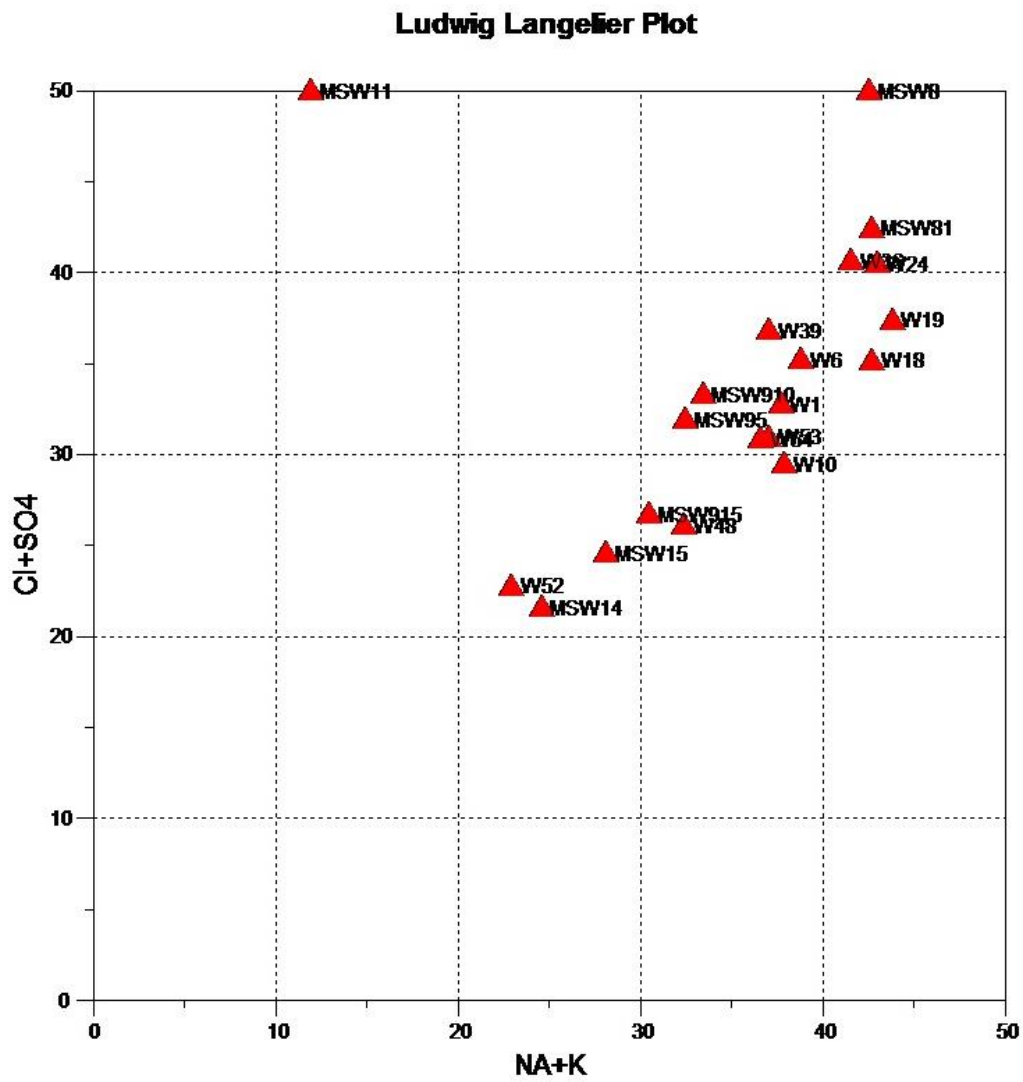


ΣΧΗΜΑ 5 Διάγραμμα Wilcox. Αλλουβιακός υδροφόρος. Ιανουάριος 2015.

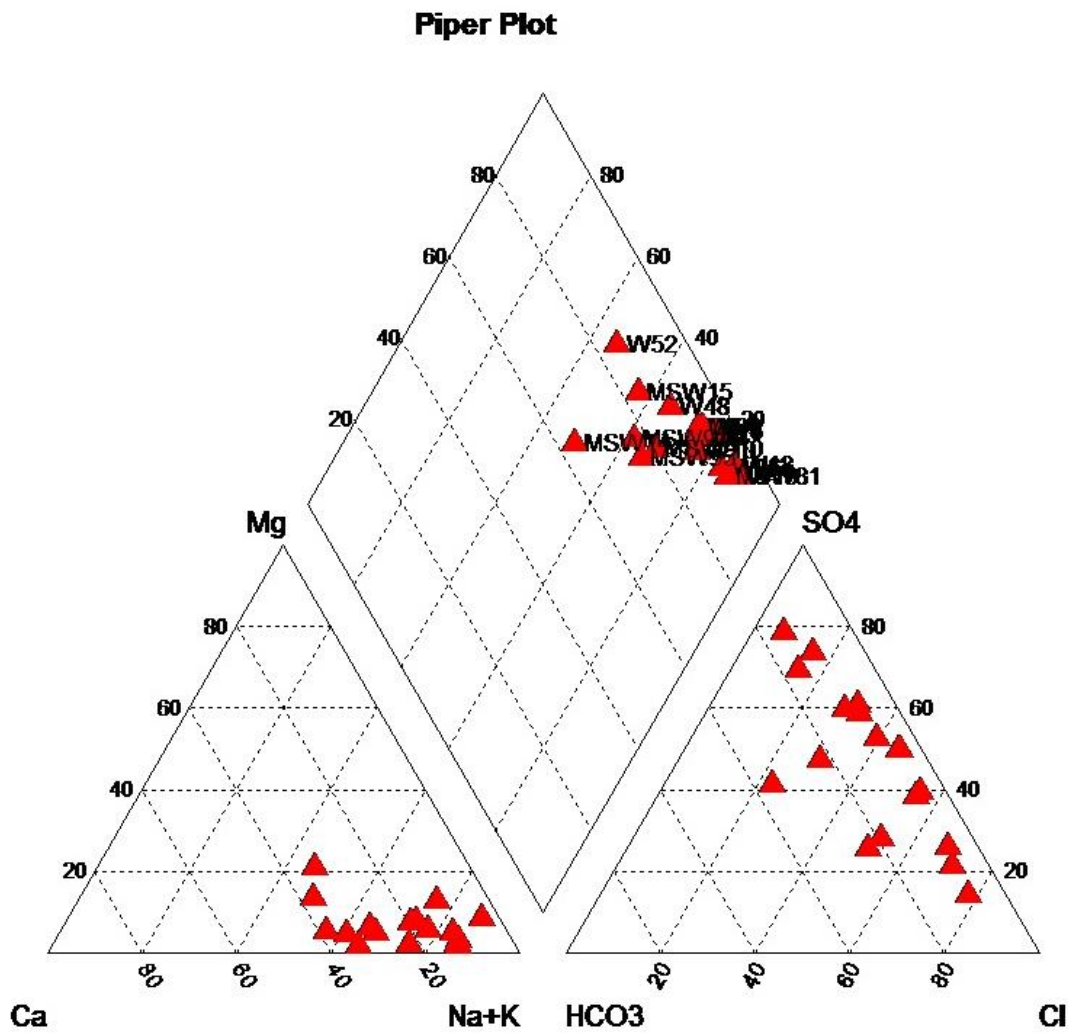
Durov Plot



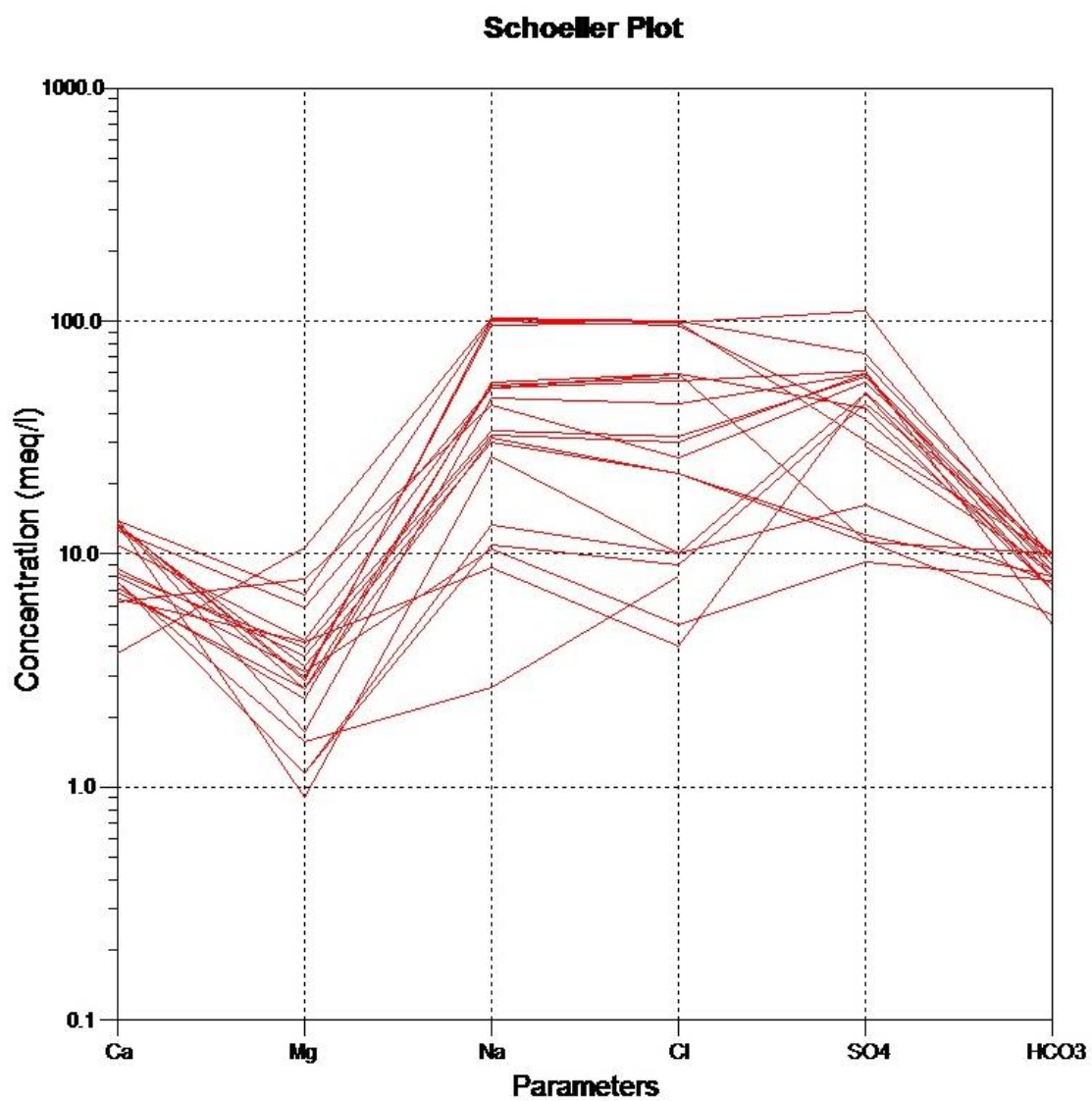
ΣΧΗΜΑ 6 Διάγραμμα Durov. Αλλουβιακός υδροφόρος. Μάιος 2015.



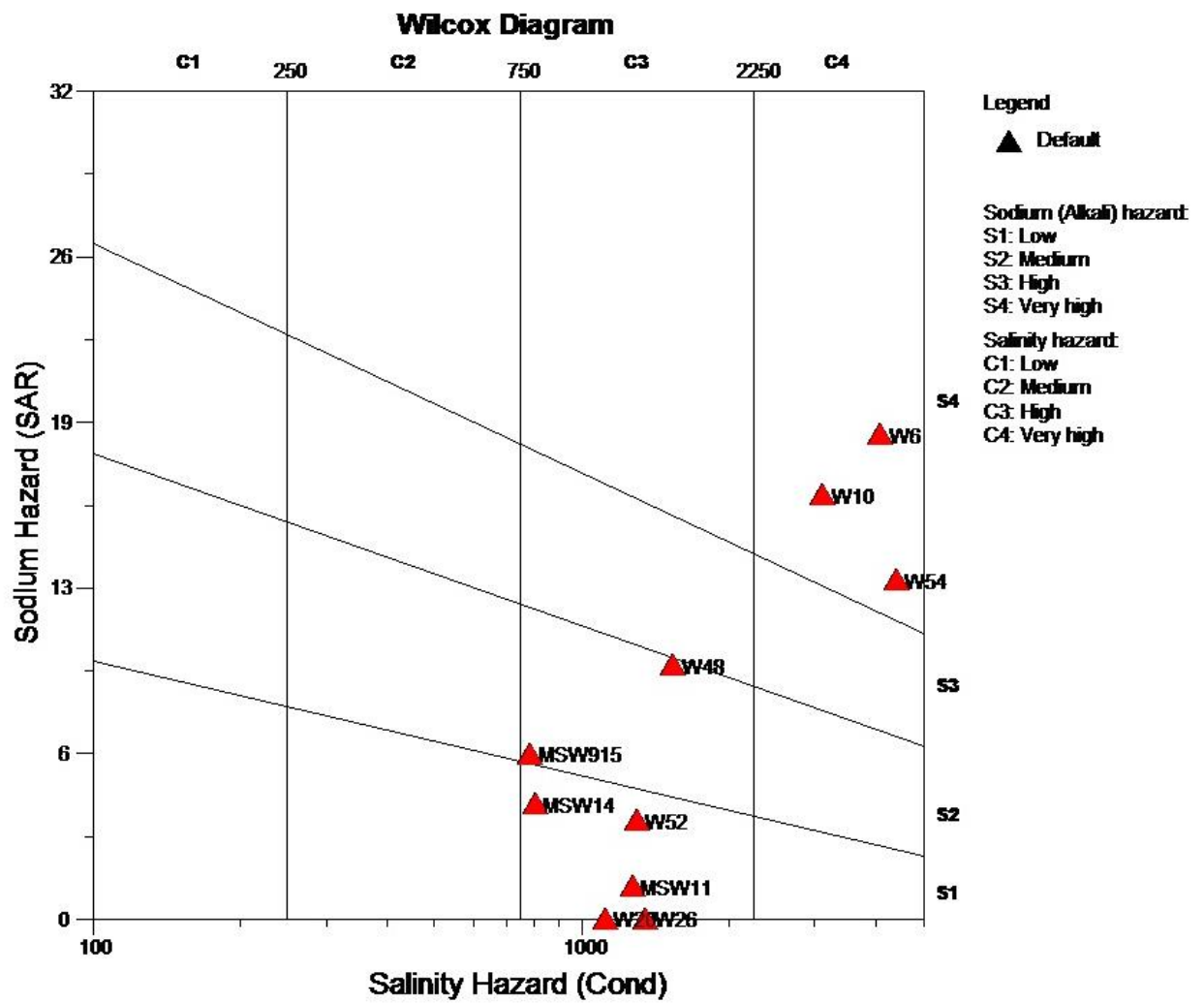
ΣΧΗΜΑ 7 Διάγραμμα Ludwig-Langelier. Αλλουβιακός υδροφόρος. Μάιος 2015.



ΣΧΗΜΑ 8 Διάγραμμα Piper. Αλλουβιακός υδροφόρος. Μάιος 2015.

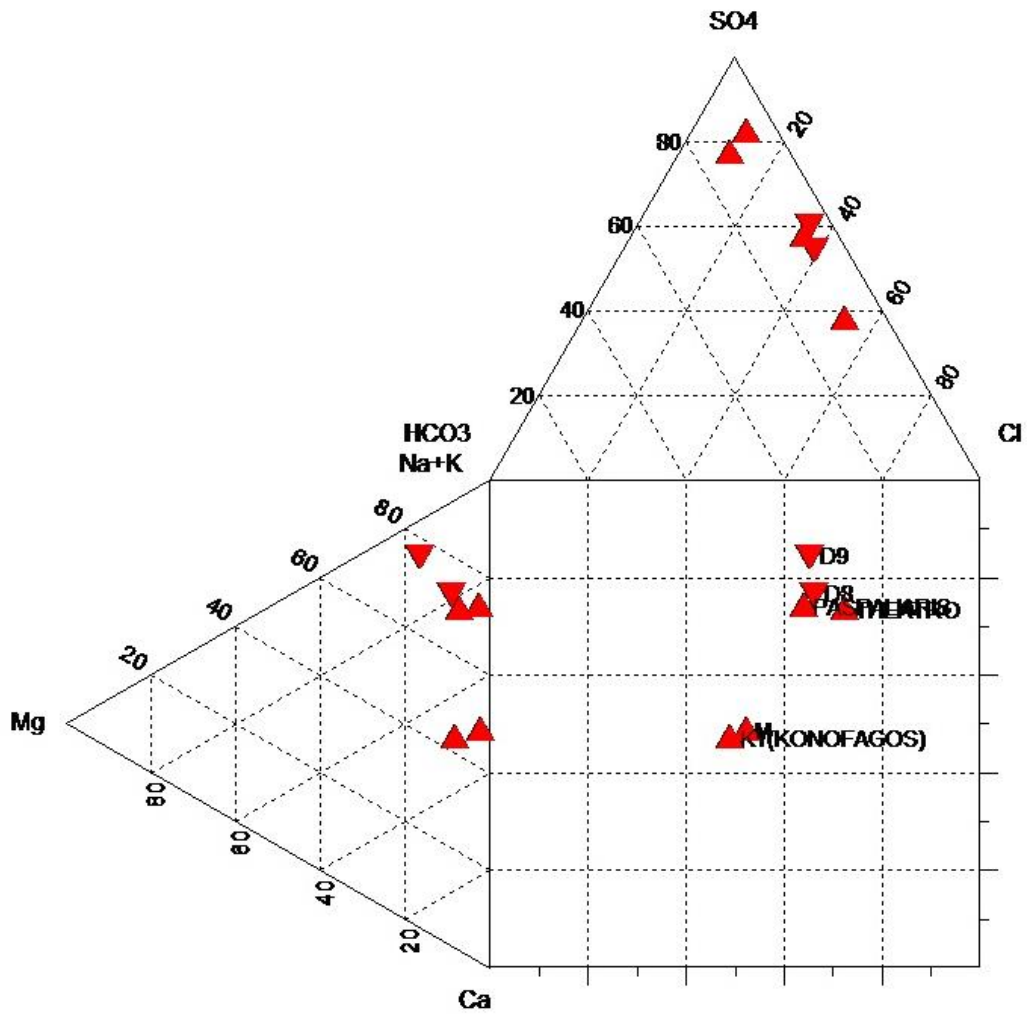


ΣΧΗΜΑ 9 Διάγραμμα Schoeller. Αλλουβιακός υδροφόρος. Μάιος 2015.



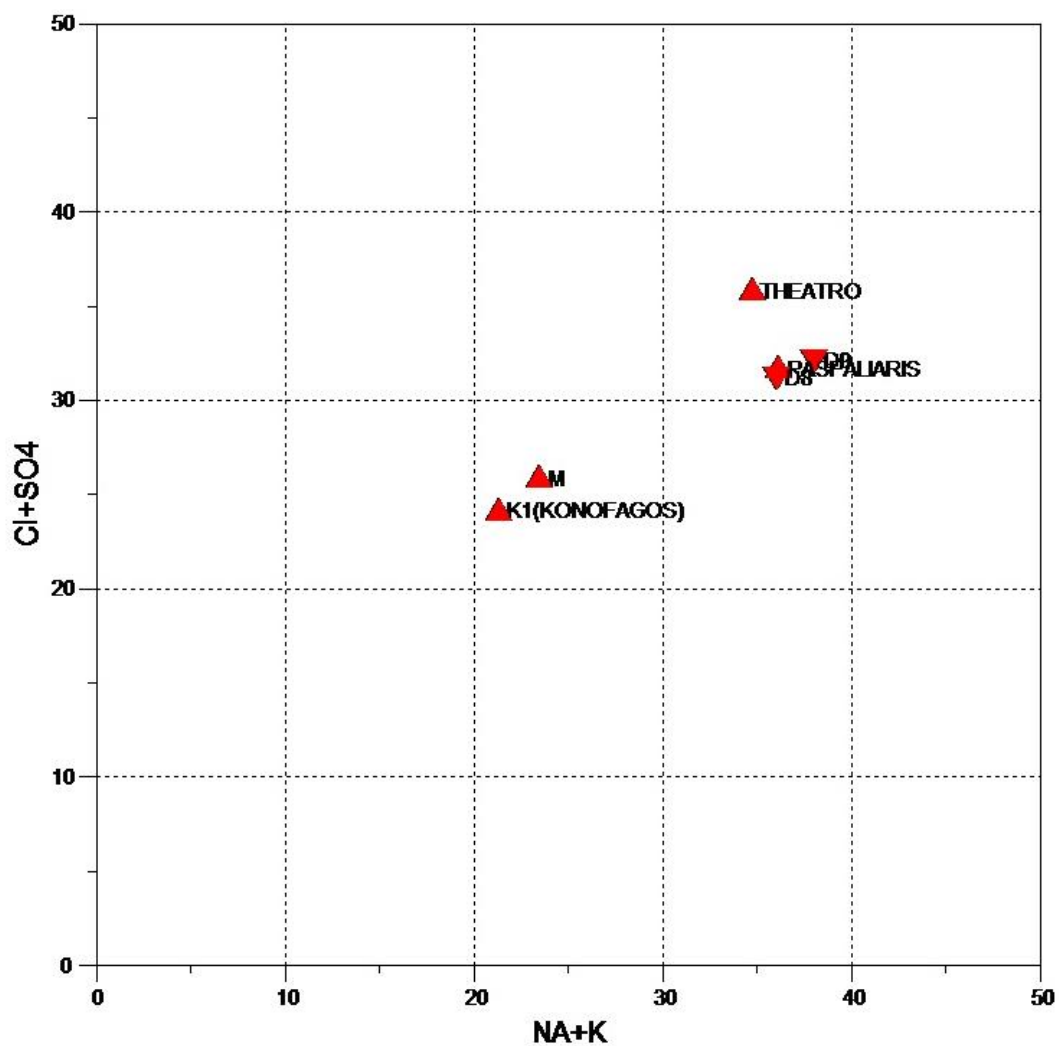
ΣΧΗΜΑ 10 Διάγραμμα Wilcox. Αλλουβιακός υδροφόρος. Μάιος 2015.

Durov Plot

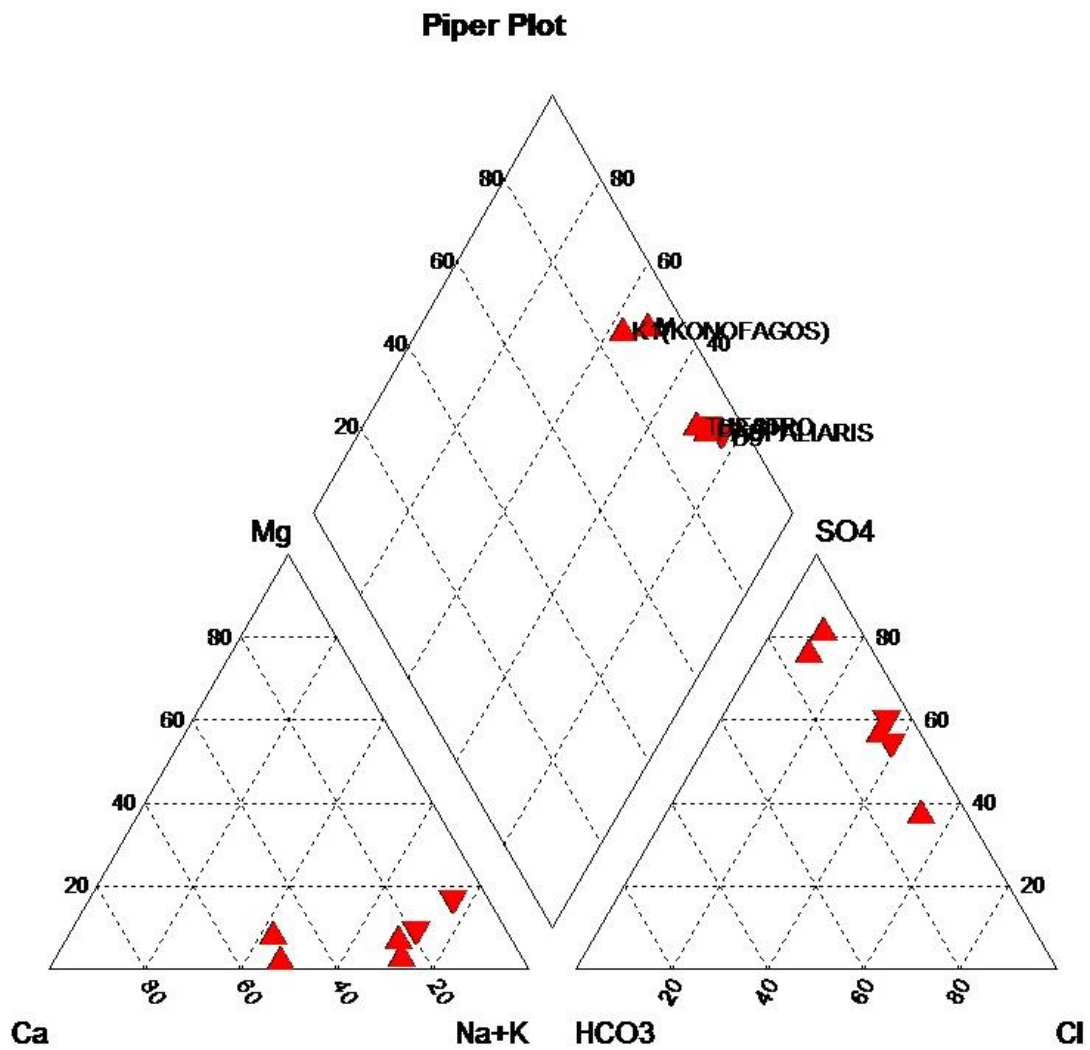


ΣΧΗΜΑ 11 Διάγραμμα Durov. Καρστικός υδροφόρος. Ιανουάριος 2015.

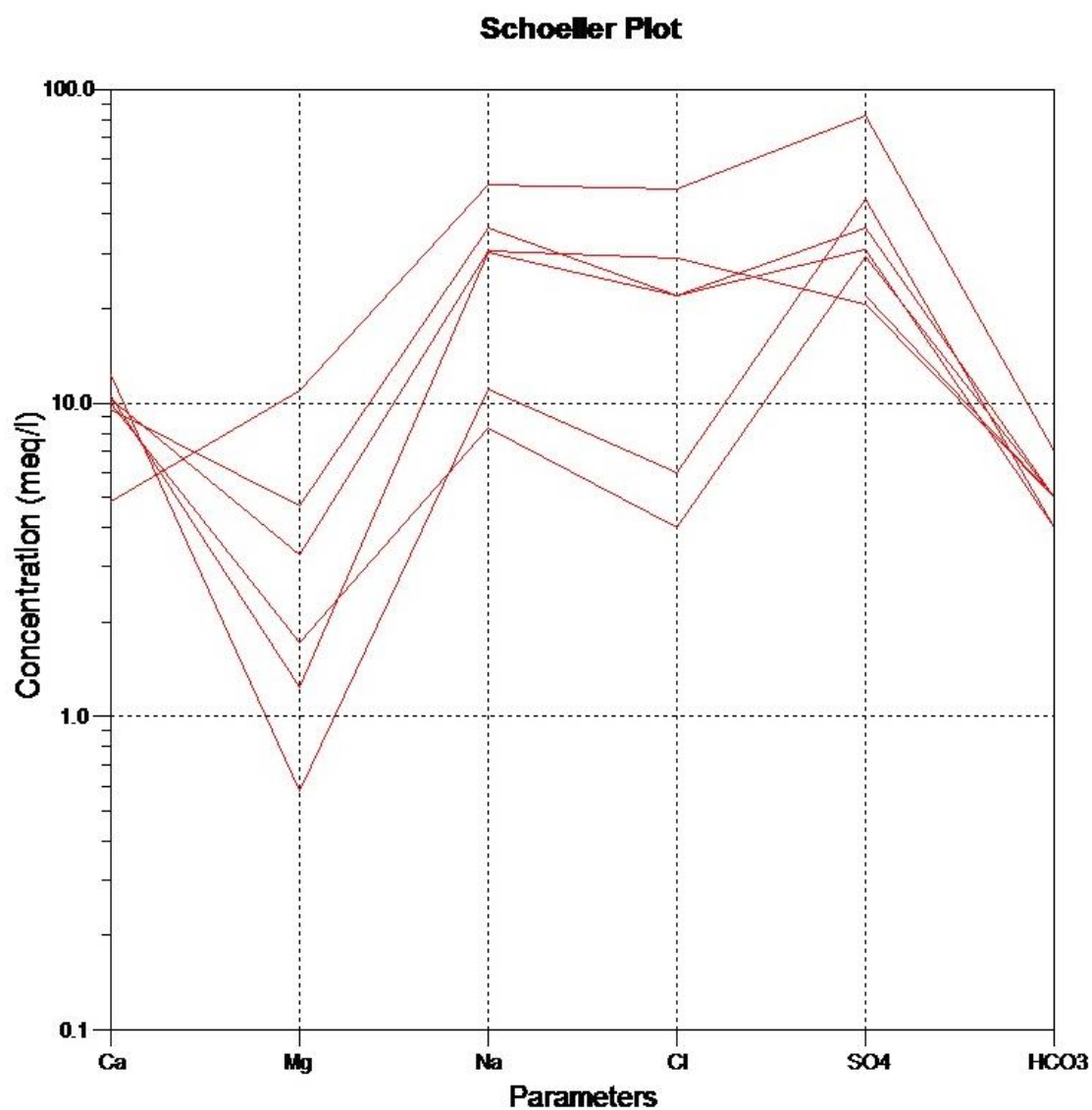
Ludwig Langelier Plot



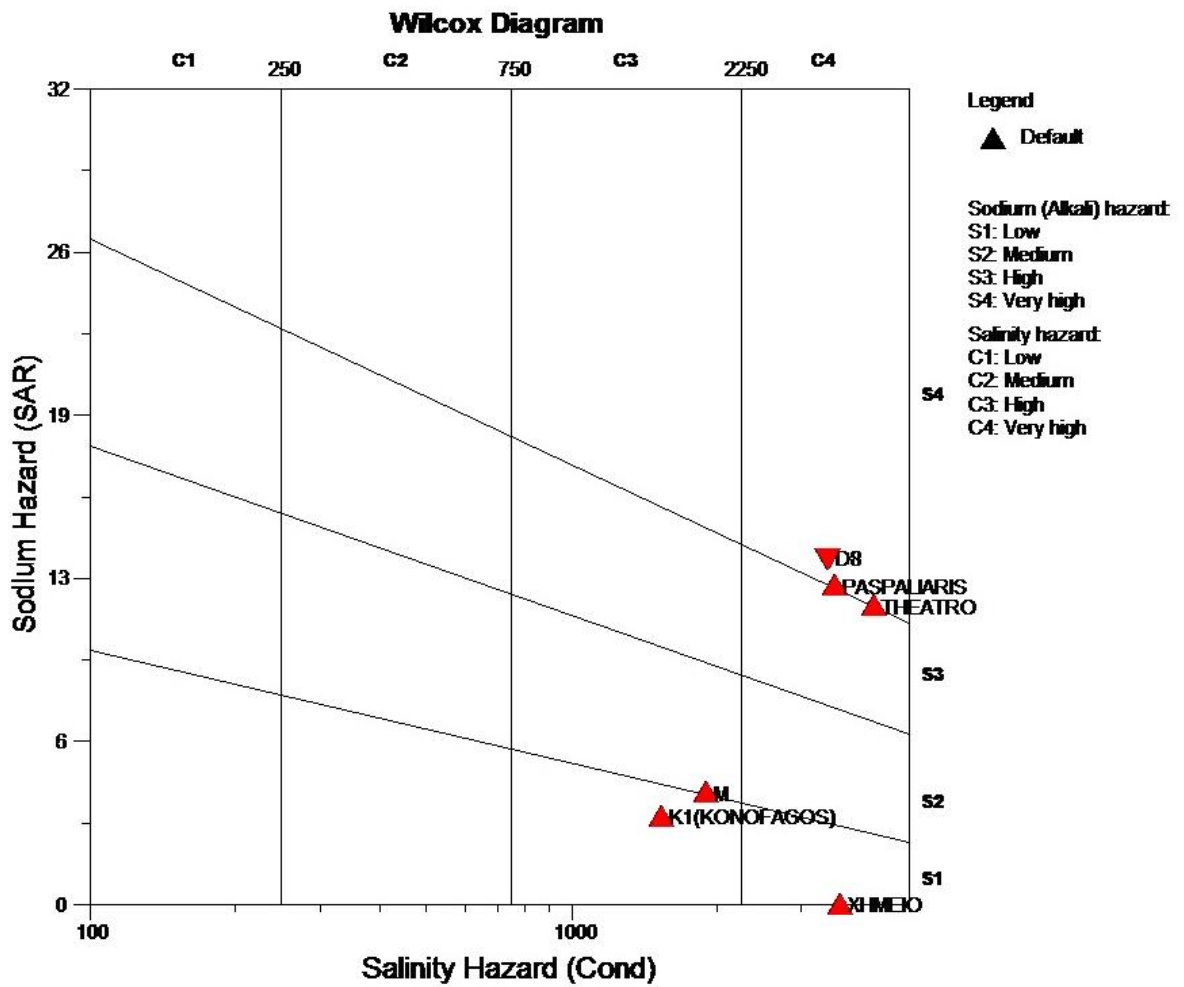
ΣΧΗΜΑ 12 Διάγραμμα Ludwig-Langelier. Καρστικός υδροφόρος, Ιανουάριος 2015.



ΣΧΗΜΑ 13 Διάγραμμα Piper. Καρστικός υδροφόρος. Ιανουάριος 2015.

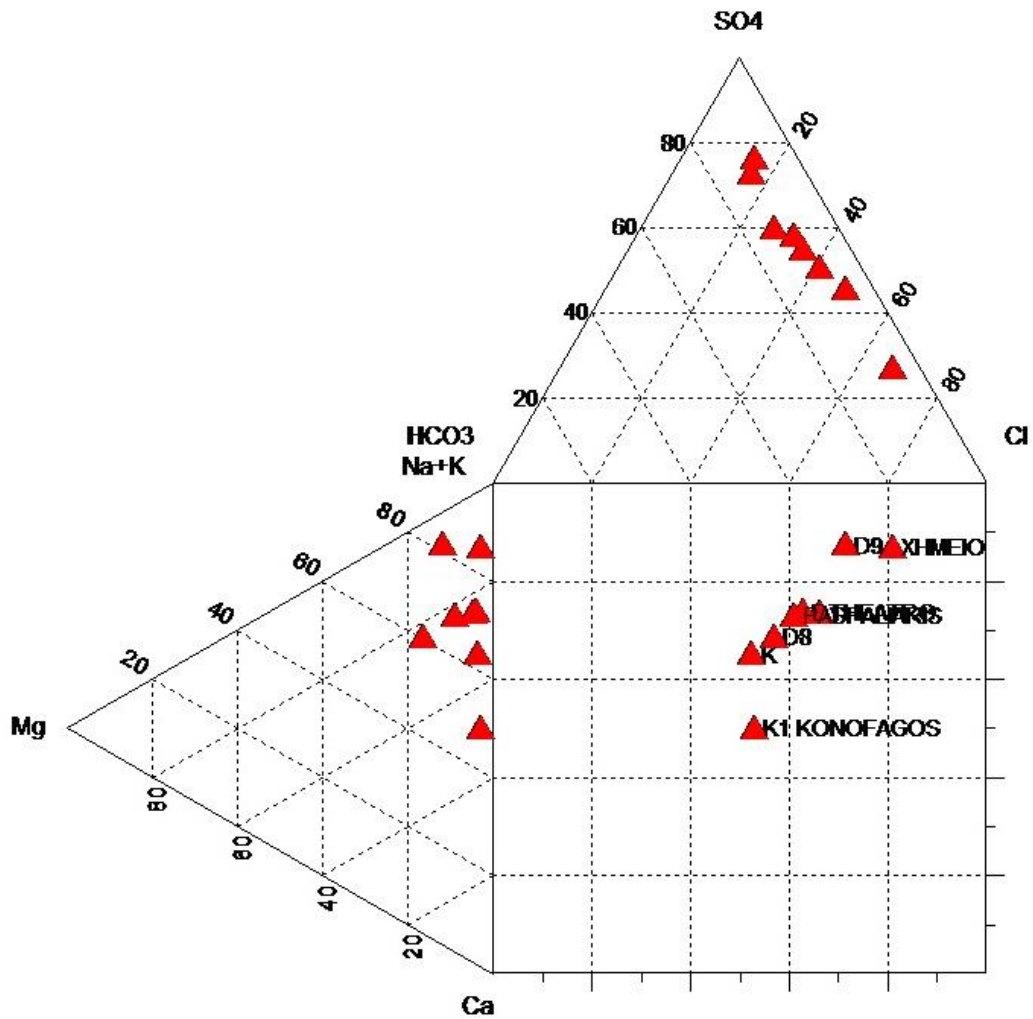


ΣΧΗΜΑ 14 Διάγραμμα Schoeller. Καρστικός υδροφόρος. Ιανουάριος 2015.



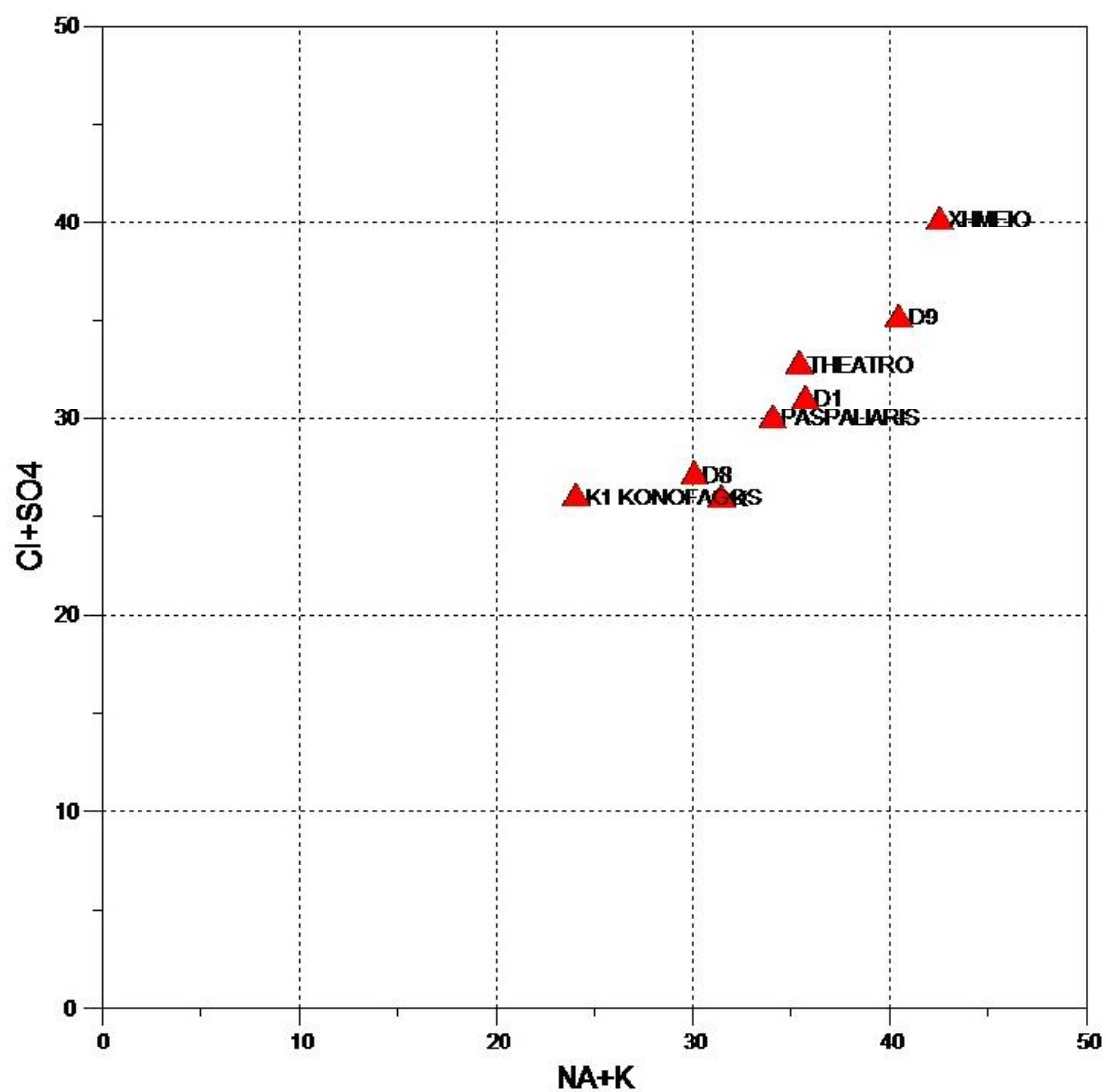
ΣΧΗΜΑ 15 Διάγραμμα Wilcox. Καρστικός υδροφόρος. Ιανουάριος 2015.

Durov Plot

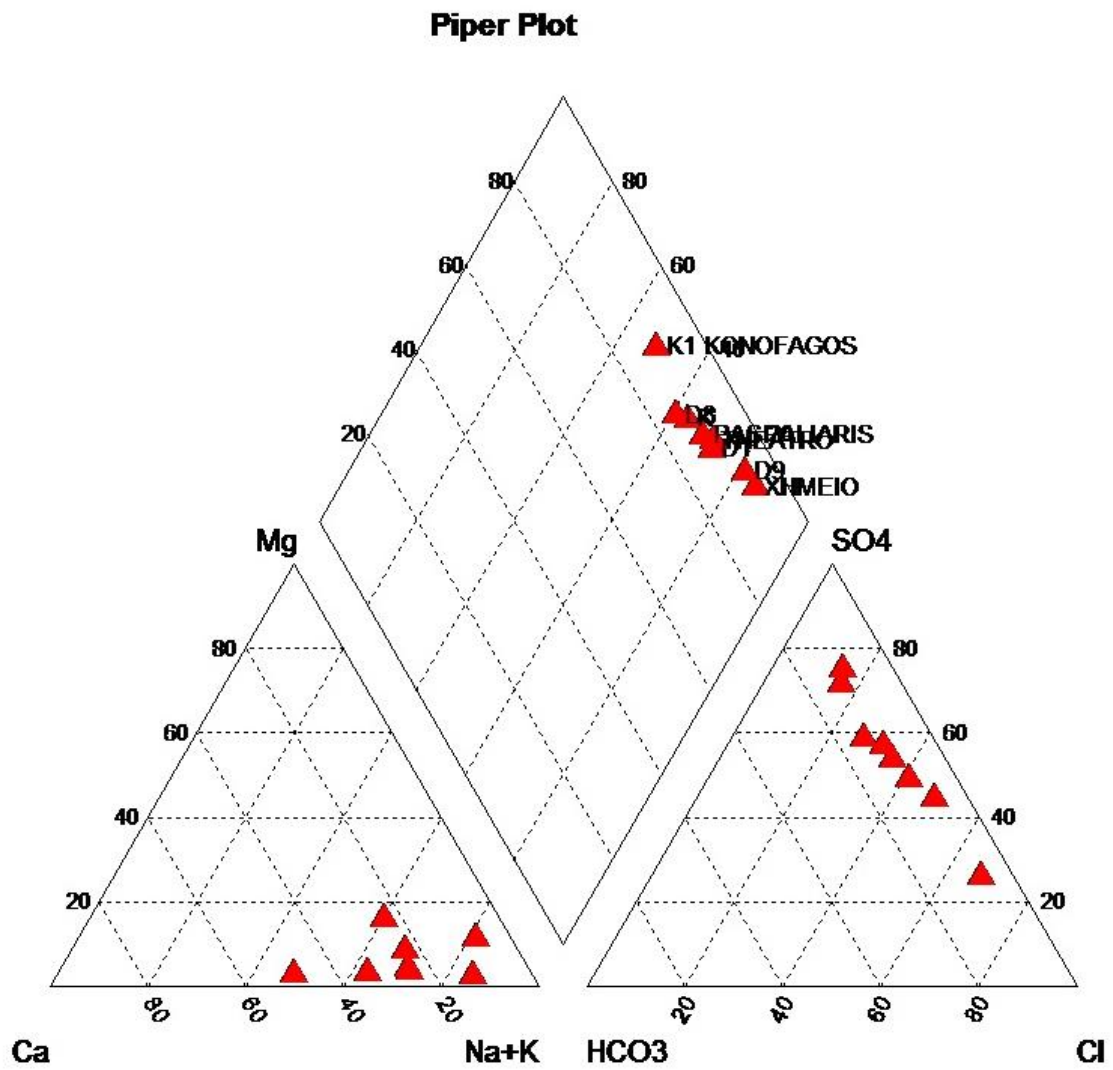


ΣΧΗΜΑ 16 Διάγραμμα Durov. Καρστικός υδροφόρος. Μάιος 2015.

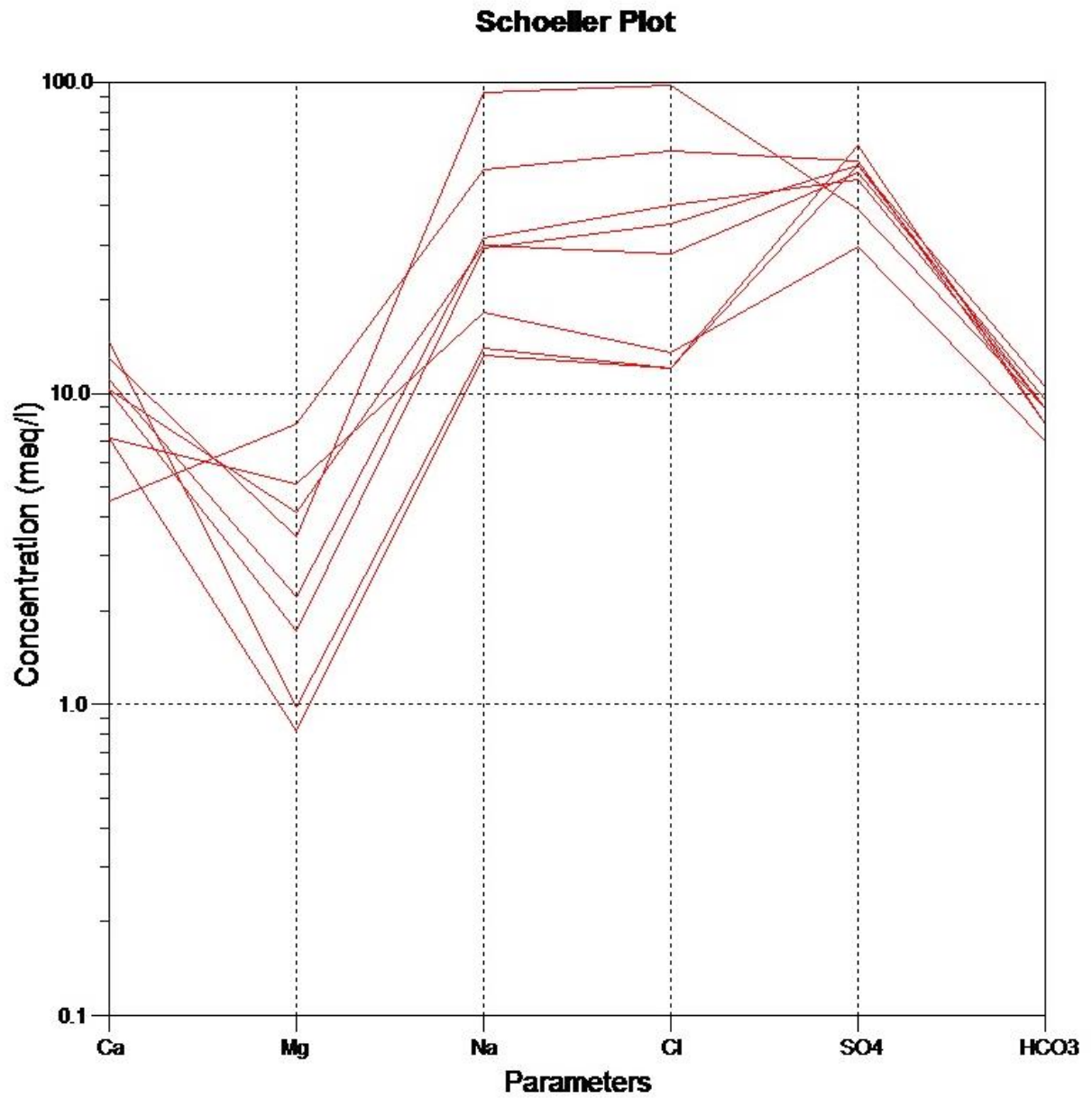
Ludwig Langelier Plot



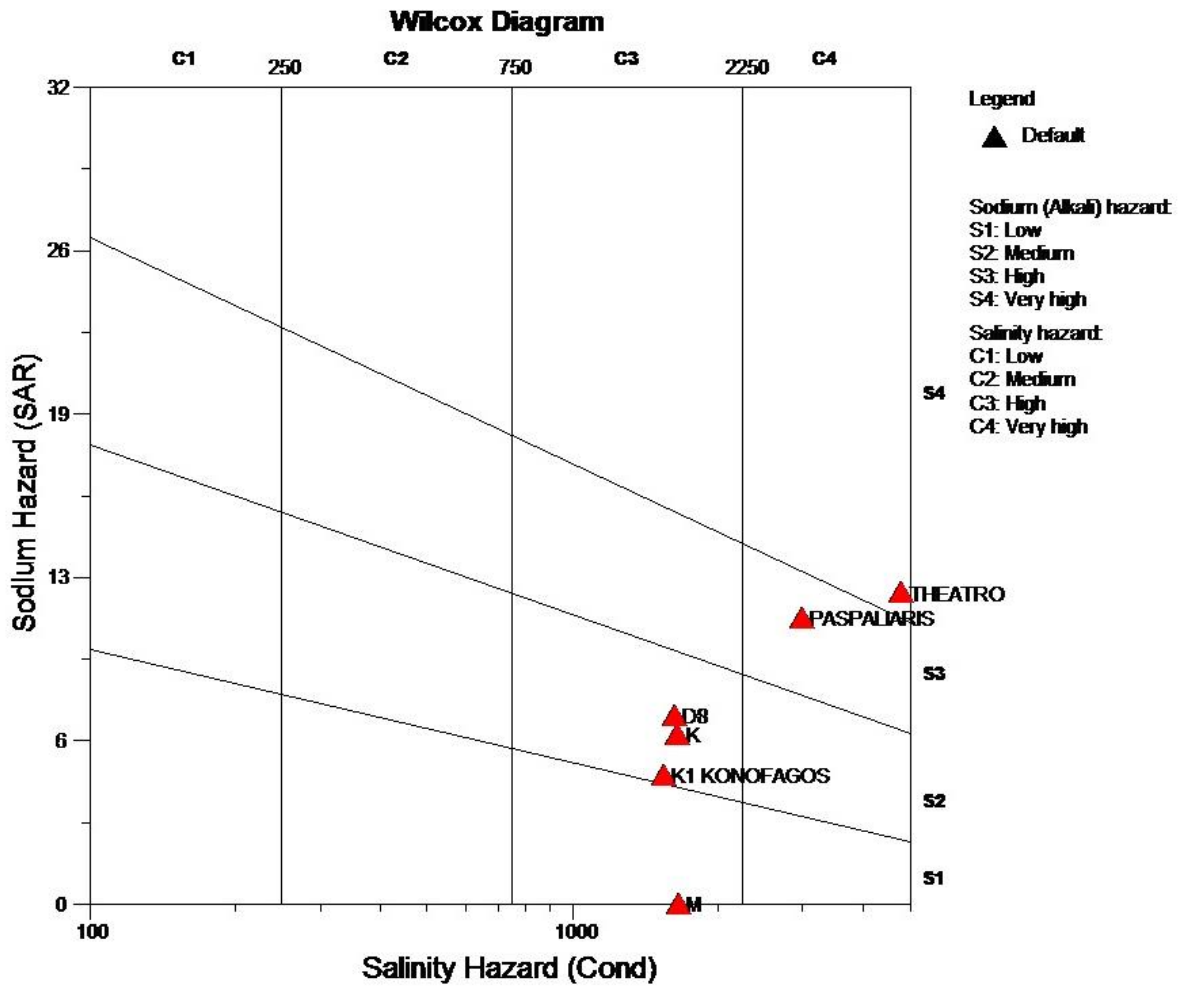
ΣΧΗΜΑ 17 Διάγραμμα Ludwig-Langelier. Καρστικός υδροφόρος. Μάιος 2015.



ΣΧΗΜΑ 18 Διάγραμμα Piper. Καρστικός υδροφόρος. Μάιος 2015.



ΣΧΗΜΑ 19 Διάγραμμα Schoeller. Καρστικός υδροφόρος. Μάιος 2015.



ΣΧΗΜΑ 20 Διάγραμμα Wilcox. Καρστικός υδροφόρος. Μάιος 2015.



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

ID	EC(μS/cm)	pH	TDS	Cl ⁻ (ppm)	SO ₄ ²⁻ (ppm)	HCO ₃ ⁻ (ppm)
MSW11	1236.0	7.0	803.4	35.5	1356.4	366.0
MSW8	7680.0	7.0	4992.0	2165.5	1409.1	549.0
W19	21900.0	6.6	14235.0	3443.5	1766.7	366.0
W20	10570.0	6.7	6870.5	3124.0	995.4	244.0
W24	12800.0	7.5	8320.0	2485.0	1428.9	366.0
W26	1810.0	7.7	1176.5	319.5	939.4	427.0
W32	7340.0		4771.0	1917.0	2023.8	244.0
w35		6.7		2982.0	1501.0	427.0
W37	4910.0	7.1	3191.5	1562.0	2666.6	427.0
W48	4800.0	7.4	3120.0	2130.0	1086.1	366.0
W51	5380.0		3497.0	1526.5	563.6	305.0
W52	2410.0	7.4	1566.5	524.0	898.2	366.0
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	7348.7	7.1	4776.7	1851.2	1386.3	371.1
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	1236.0	6.6	803.4	35.5	563.6	244.0
ΜΕΓΙΣΤΟ	21900.0	7.7	14235.0	3443.5	2666.6	549.0
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	6820.3	0.4	4433.2	1178.3	647.3	94.7

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων προσχωματικού υδροφορέα της περιοχής μελέτης, Ιανουάριος 2015.

ID	NO ₃ ⁻ (ppm)	Zn (ppb)	Mn (ppm)	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Ca ²⁺ (ppm)	Mg ²⁺ (ppm)
MSW11	-	132.0	768.0	56.8	6.2	131.0	25.0
MSW8	21.0	374.0	71.0	1321.0	14.5	152.0	39.0
W19	32.0	75.0	108.0	2031.7	28.4	57.0	135.0
W20	31.0	320.0	111.0	1905.6	213.4	230.0	40.0
W24	8.0	226.0	109.0	1615.3	16.3	231.0	82.0
W26	9.7			287.6	5.8	145.0	31.0
W32	48.0	246.0	-	1341.9	30.9	251.0	35.0
w35	-	31.0	-	1908.5	47.7	197.0	9.0
W37	11.0	17.0	-	952.8	14.3	175.0	7.0
W48	-	360.0	843.0	1256.7	33.9	95.0	14.0
W51	9.0			1099.1	44.0	157.0	31.0
W52	51.7	31.0	-	301.0	11.0	91.0	11.0
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	24.6	181.2	335.0	1173.2	38.9	159.3	38.3
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	8.0	17.0	71.0	56.8	5.8	57.0	7.0
ΜΕΓΙΣΤΟ	51.7	374.0	843.0	2031.7	213.4	251.0	135.0
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	18.7	142.7	335.7	701.6	68.5	65.1	42.1

ΠΙΝΑΚΑΣ 2 Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων προσχωματικού υδροφορέα της περιοχής μελέτης, Ιανουάριος 2015 (συνέχεια).

ID	SEC(μS/cm)	T(°C)	pH	DO (mg/l)	Αλκαλικότητα (mg/L)	Σκληρότητα	Cl ⁻ (ppm)	HCO ₃ ⁻ (ppm)
MSW14	805.0	23.0	6.9	7.1	387.7	501.2	177.5	472.8
MSW9 ₁₀					400.2	751.8	781.0	488.0
MSW9 ₁₅	788.0	23.0	7.1	6.5	375.2	465.4	355.0	457.5
MSW9 ₅					500.2	716.0	781.0	610.0
W18	26400.0	17.2	6.7	6.9	475.2	716.0	3514.5	579.5
W19	30000.0	17.3	7.0	6.6	450.2	787.6	3525.2	549.0
W20	1120.0	17.6	7.6		475.2	787.6		579.5
W48	1544.0	21.8	7.4	6.8	350.1	608.6	355.0	427.0
W53	6680.0	18.3	6.9	7.8	400.2	572.8	1136.0	488.0
W54	4410.0	17.9	7.0	4.5	350.1	572.8	1065.0	427.0
W6	4100.0	20.5	7.3	4.2	250.1	716.0	1952.5	305.0
W1	8440.0	20.3	7.3	4.6	425.2	680.2	1562.0	518.5
W10	3120.0	21.7	7.0	4.7	475.2	644.4	923.0	579.5
MSW15	-	-	-	-	500.2	465.4	319.5	610.0
W24	11840.0	21.1	7.0	2.5	400.2	751.8	3408.0	488.0
MSW11	1273.0	19.6	6.9	3.0			284.0	
MSW8	7730.0	23.6	6.8	4.0			2023.5	
MSW8 ₁	7940.0	23.6	6.8	3.7	275.1	465.4	2094.5	335.5
W26	1356.0	18.1	7.3	3.3	425.2	608.6		518.5
W52	1300.0	18.8	7.2	8.1	450.2	537.0	142.0	549.0
W36	16050.0	20.0	7.1	6.2	500.2	930.8	3479.0	610.0
W39					350.1	823.4	2094.5	427.0
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	7494.2	20.2	7.1	5.3	410.8	655.1	1498.6	501.0
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	788.0	17.2	6.7	2.5	250.1	465.4	142.0	305.0
ΜΕΓΙΣΤΟ	30000.0	23.6	7.6	8.1	500.2	930.8	3525.2	610.0
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	8601.4	5.1	1.6	2.1	71.6	132.5	1207.0	87.3

ΠΙΝΑΚΑΣ 3 Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων προσχωματικού υδροφορέα της περιοχής μελέτης, Μάιος 2015.

ID	SO ₄ ²⁻ (ppm)	NO ₃ ⁻ (ppm)	Fe (ppb)	Mn (ppm)	Zn (ppb)	Ca ²⁺ (ppm)	Mg ²⁺ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)
MSW14	442.0	21.0	1548.0	185.0	22.0	161.0	38.0	241.0	14.0
MSW9₁₀	580.0	-	-	53.0	20.0	265.0	32.0	729.0	15.0
MSW9₁₅	775.0	12.0	1337.0	290.0	25.0	151.0	14.0	305.0	15.0
MSW9₅	542.0	-	523.0	64.0	28.0	265.0	40.0	695.0	17.0
W18	5275.0	31.0	-	166.0	82.0	270.0	36.0	2200.0	45.0
W19	3464.0	35.0	1624.0	1956.0	124.0	75.0	130.0	2350.0	51.0
W20	3132.0	15.0							
W48	2339.0	-	543.0	97.0	21.0	271.0	11.0	605.0	14.0
W53	2782.0	32.0	-	42.0	228.0	165.0	48.0	782.0	39.0
W54	2845.0	22.0	-	-	201.0	173.0	44.0	745.0	45.0
W6	2919.0	28.0	-	-	390.0	219.0	52.0	1185.0	54.0
W1	2858.0	37.0	-	-	239.0	278.0	21.0	1078.0	48.0
W10	2612.0	25.0	-	-	20.0	125.0	95.0	998.0	29.0
MSW15	2132.0		-	50.0	121.0	152.0	14.0	252.0	12.0
W24	1820.0		-	176.0	146.0	272.0	35.0	2301.0	58.0
MSW11			97.0	84.0	111.0	152.0	19.0	61.0	9.0
MSW8			920.0	169.0	-	138.0	32.0	1218.0	61.0
MSW8₁	546.0	24.0	95.0	350.0	282.0	144.0	29.0	1255.0	67.0
W26	1396.0								
W52	2383.0	44.0	605.0	194.0	238.0	128.0	51.0	201.0	10.0
W36	1465.0	52.0	700.0	2756.0	25.0	280.0	81.0	2322.0	64.0
W39	2027.0	39.0	-	171.0		254.0	72.0	1193.0	59.0
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	2116.7	29.8	799.2	425.2	129.1	196.9	44.7	1035.8	36.3
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	442.0	12.0	95.0	42.0	20.0	75.0	11.0	61.0	9.0
ΜΕΓΙΣΤΟ	5275.0	52.0	1624.0	2756.0	390.0	280.0	130.0	2350.0	67.0
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1220.6	15.4	558.0	708.2	112.5	66.1	29.9	741.3	21.1

ΠΙΝΑΚΑΣ 4 Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων προσχωματικού υδροφόρου της περιοχής μελέτης, Μάιος 2015 (συνέχεια)

ID	EC(μS/cm)	pH	TDS	Cl ⁻ (ppm)	SO ₄ ⁻² (ppm)	HCO ₃ ⁻ (ppm)
D8	3410.0	7.1	2216.5	781.0	1486.6	244.0
D9	7010.0	7.9	4556.5	1704.0	3978.4	427.0
M	1904.0	7.2	1237.6	213.0	2140.8	244.0
K1(ΚΟΝΟΦΑΓΟΣ)	1536.0	6.7	998.4	142.0	1409.1	305.0
K	2340.0	6.8	1521.0	497.0	906.4	244.0
PASPALIARIS	3520.0	6.9	2288.0	781.0	1733.8	305.0
THEATRO	4250.0	6.6	2762.5	1029.5	988.8	305.0
ΧΗΜΕΙΟ	3610.0	6.8	2346.5		1058.1	305.0
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	3447.5	7.0	2240.9	735.4	1712.8	297.4
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	1536.0	6.6	998.4	142.0	906.4	244.0
ΜΕΠΙΣΤΟ	7010.0	7.9	4556.5	1704.0	3978.4	427.0
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1716.8	0.4	1115.9	534.0	1004.5	60.5

ΠΙΝΑΚΑΣ 5 Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων καρστικού υδροφορέα της περιοχής μελέτης, Ιανουάριος 2015.

ID	NO ₃ ⁻ (ppm)	Zn (ppb)	Fe (ppb)	Mn (ppm)	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Ca ²⁺ (ppm)	Mg ²⁺ (ppm)
D8	233.0	55.0	-	144.0	835.7	25.1	192.0	57.0
D9	93.0	37.0	-	-	1141.7	30.8	97.0	133.0
M	3.1	3200.0	5360.0	2562.0	255.6	17.9	246.0	7.0
K1(ΚΟΝΟΦΑΓΟΣ)	20.0	164.0	1011.0	219.0	191.7	15.3	200.0	21.0
K	6.1	641.0	6154.0	240.0	308.1	19.1	165.0	35.0
PASPALIARIS	-	551.0	5526.0	324.0	695.1	17.4	210.0	15.0
THEATRO	15.0	786.0	-	-	700.1	21.7	206.0	40.0
ΧΗΜΕΙΟ	21.0							
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	55.9	776.3	4512.8	697.8	589.7	21.0	188.0	44.0
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	3.1	37.0	1011.0	144.0	191.7	15.3	97.0	7.0
ΜΕΓΙΣΤΟ	233.0	3200.0	6154.0	2562.0	1141.7	30.8	246.0	133.0
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	80.1	1109.4	2932.9	918.0	350.7	5.4	46.8	42.7

ΠΙΝΑΚΑΣ 6 Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων καρστικού υδροφορέα της περιοχής μελέτης, Ιανουάριος 2015 (συνέχεια).

ID	SEC(μS/cm)	T(°C)	pH	DO (mg/l)	Αλκαλικότητα	Σκληρότητα	Cl ⁻ (ppm)	HCO ₃ ⁻ (ppm)
D9	7940.0	18.5	7.4	7.3	400.2	572.8	2130.0	488.0
D1	5490.0	21.7	6.7	3.6	525.2	644.4	1242.5	640.5
D8	1630.0	22.8	6.9	5.3	350.1	572.8	480.0	427.0
ΧΗΜΕΙΟ	3310.0	21.7	6.8	0.9	450.2	716.0	3479.0	549.0
Κ1 ΚΟΝΟΦΑΓΟΣ	1546.0	22.0	7.1	1.8	400.2	644.4	426.0	488.0
Κ	1656.0	22.9	6.9	1.2	450.2	429.6	426.0	549.0
Μ	1661.0	23.5	7.2	1.5				
ΠΑΣΠΑΛΙΑΡΗΣ	2990.0	24.4	7.2	1.5	475.2	680.2	994.0	579.5
ΘΕΑΤΡΟ	4810.0	23.7	6.9	6.0	450.2	716.0	1420.0	549.0
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	3448.1	22.4	7.0	3.2	437.7	622.0	1324.7	533.8
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	1546.0	18.5	6.7	0.9	350.1	429.6	426.0	427.0
ΜΕΓΙΣΤΟ	7940.0	24.4	7.4	7.3	525.2	716.0	3479.0	640.5
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	2229.3	1.7	0.2	2.4	53.5	95.6	1051.8	65.2

ΠΙΝΑΚΑΣ 7 Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων καρστικού υδροφορέα της περιοχής μελέτης, Μάιος 2015.

ID	SO ₄ ²⁻ (ppm)	NO ₃ ⁻ (ppm)	Fe (ppb)	Mn (ppm)	Pb (ppb)	Zn (ppb)	Ca ²⁺ (ppm)	Mg ²⁺ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)
D9	2680.0	81.0	-	90.0	15.0	27.0	90.0	97.0	1201.0	45.0
D1	2583.0	27.0	-	-	-	424.0	204.0	21.0	672.0	28.0
D8	1426.0	150.0	376.0	125.0	-	38.0	144.0	62.0	420.0	12.0
ΧΗΜΕΙΟ	1861.0	25.0	4041.0	175.0	40.0	250.0	260.0	42.0	2121.0	52.0
Κ1 ΚΟΝΟΦΑΓΟΣ	3000.0	35.0	4725.0	953.0	45.0	880.0	291.0	12.0	322.0	19.0
Κ	2594.0	11.0	9608.0	529.0	20.0	290.0	143.0	10.0	304.0	15.0
Μ										
ΠΑΣΠΑΛΙΑΡΗΣ	2449.0	34.0	639.0	-	-	350.0	205.0	50.0	689.0	31.0
ΘΕΑΤΡΟ	2335.0	38.0	65.0	-	-	600.0	221.0	27.0	721.0	39.0
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	2366.0	50.1	3242.3	374.4	30.0	357.4	194.8	40.1	806.3	30.1
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	1426.0	11.0	65.0	90.0	15.0	27.0	90.0	10.0	304.0	12.0
ΜΕΓΙΣΤΟ	3000.0	150.0	9608.0	953.0	45.0	880.0	291.0	97.0	2121.0	52.0
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	499.4	45.1	3468.5	339.0	18.7	283.8	66.1	29.4	604.7	14.5

ΠΙΝΑΚΑΣ 8 Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων καρστικού υδροφορέα της περιοχής μελέτης, Μάιος 2015 (συνέχεια).