

ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ



ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

με τίτλο:

**«ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ, ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ
ΥΠΕΡΒΑΣΙΚΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ.
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΑΝΤΟΥΔΙΟΥ – ΕΥΒΟΙΑΣ»**



ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ Γ. ΓΙΟΞΑΣ
Γεωλόγος
MSc ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ

ΑΘΗΝΑ 2011

ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ



ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

με τίτλο:

**«ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ, ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ
ΥΠΕΡΒΑΣΙΚΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ.
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΑΝΤΟΥΔΙΟΥ – ΕΥΒΟΙΑΣ»**

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΣΤΟΥΡΝΑΡΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΚΠΑ - ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

ΜΙΓΚΙΡΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΓΠΑ)

ΛΕΚΚΑΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ (ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΚΠΑ)

ΣΟΥΛΙΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (ΟΜΟΤ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΑΠΘ)

ΛΑΜΠΡΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ (ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΠΑΝ/ΜΙΟΥ ΠΑΤΡΩΝ)

ΣΤΑΜΑΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΓΠΑ)

ΑΛΕΞΟΠΟΥΛΟΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ (ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΚΠΑ)

«Η έγκριση της παρούσας διατριβής από την Εξεταστική Επιτροπή και το Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος της Σχολής Θετικών Επιστημών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, δεν προϋποθέτει και την αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα» (Νόμος 5343/1932, Άρθρο 202).

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	i
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	1
1. ΓΕΝΙΚΑ ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	5
1.1 Γενικά.....	5
1.2 Σκληρά Διερρηγμένα Πετρώματα.....	6
1.3 Περιγραφή της ευρύτερης περιοχής μελέτης.....	12
1.4 Μεθοδολογία.....	13
2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ.....	15
2.1 Γεωγραφική οριοθέτηση.....	15
2.2 Γεωλογική επισκόπηση.....	15
2.3 Γεωτεκτονική εξέλιξη της ευρύτερης περιοχής.....	17
2.4 Στρωματογραφική διάρθρωση Κεντρικής και Βόρειας Εύβοιας.....	19
2.5 Γεωλογία της περιοχής μελέτης.....	31
2.6 Ρηγματογόνος Τεκτονική.....	34
2.7 Μελέτη Ασυνχειών.....	37
2.8 Συμπεράσματα.....	39
3. ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	41
3.1 Ποσοτική ανάλυση μορφολογικού αναγλύφου.....	41
3.1.1 Μεθοδολογία έρευνας.....	41
3.1.2 Υψομετρική ανάλυση της λεκάνης απορροής του ποταμού Κυμάσι.....	42
3.1.3 Υψομετρική ανάλυση της λεκάνης απορροής του ποταμού Δαφνοπόταμος.....	45
3.1.4 Υψομετρική ανάλυση της λεκάνης απορροής του ποταμού Πήλι.....	47
3.2 Ποσοτική ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής μελέτης.....	49
3.2.1 Μεθοδολογία.....	49
3.2.2 Υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κυμάσι.....	51
3.2.3 Υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής του ποταμού Δαφνοπόταμος.....	54
3.2.4 Υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής του ποταμού Πήλι.....	57
3.3 Ανάλυση των διαστάσεων των λεκανών μελέτης.....	60
3.3.1 Μεθοδολογία.....	60
3.3.2 Αποτελέσματα ανάλυσης υδρογραφικής υψής.....	61
3.4 Τοπογραφική Κλίση.....	65
3.5 Γεωμορφολογικοί Παράγοντες που επιδρούν στην Τρωτότητα.....	67
3.6 Συμπεράσματα.....	68
4. ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ.....	70
4.1 Γενικά.....	70
4.2 Μεθοδολογία έρευνας.....	71
4.3 Κλιματικά στοιχεία.....	71
4.4 Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα.....	73
4.5 Όγκος νερού από βροχόπτωση.....	75
4.6 Εξατμισιοδιαπνοή.....	76
4.7 Επιφανειακή Απορροή.....	79
4.7.1 Γενικά.....	79
4.7.2 Μεθοδολογία έρευνας.....	80
4.7.3 Μετρήσεις επιφανειακών απορροών στην περιοχή μελέτης.....	81

4.8 Κατείδουση.....	81
4.9 Υδρολογικό Ισοζύγιο.....	82
4.10 Συμπεράσματα.....	84
5. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	85
5.1 Μεθοδολογία έρευνας.....	85
5.2 Απογραφή σημείων ύδατος.....	86
5.3 Υδρολιθολογική κατάταξη των σχηματισμών.....	88
5.4 Στοιχεία από γεωτρητικά δεδομένα.....	90
5.5 Τύποι υδροφόρων σχηματισμών και συνθήκες τροφοδοσίας τους.....	90
5.5.1 Τεταρτογενείς αποθέσεις.....	90
5.5.2 Νεογενείς σχηματισμοί.....	92
5.5.3 Ανθρακικοί αλπικοί σχηματισμοί.....	92
5.5.4 Σχιστοκερατολιθική διάπλαση.....	96
5.5.5 Οφιολιθικό κάλυμμα.....	96
5.6 Υδραυλική θεώρηση του μέσου ασυνεχειών.....	100
5.6.1 Στατιστική επεξεργασία του μέσου ασυνεχειών.....	101
5.6.1.1 Κατανομή του τύπου ασυνεχειών.....	102
5.6.1.2 Προσανατολισμός.....	102
5.6.1.3 Χωρική Πυκνότητα.....	103
5.6.1.4 Βαθμός Διασύνδεσης των Ασυνεχειών.....	108
5.6.2 Συσχετισμός των πηγών με τις ασυνέχειες.....	110
5.6.3 Η επίδραση των ρηγμάτων και των ρωγμών στην υπόγεια ροή.....	113
5.6.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας.....	114
5.7 Συμπεράσματα.....	115
6. ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΗΓΩΝ.....	116
6.1 Εισαγωγή.....	116
6.2 Γενική Υδραυλική Θεώρηση.....	117
6.2.1 Ροή σε πορώδη μέσα.....	117
6.2.2 Ροή σε μέσο ασυνεχειών.....	117
6.3 Υδρογράμματα πηγών.....	118
6.4 Υδρογράμματα πηγών μελέτης.....	120
6.4.1 Μετρήσεις της παροχής των πηγών.....	120
6.4.2 Σημεία ύδατος στην περιοχή μελέτης.....	121
6.4.2.1 Πηγή επαφής SM1.....	123
6.4.2.2 Πηγές ρηξιγενείς – υπερπλήρωσης SM2, SM3, SP2, SPR1.....	123
6.5 Συσχετίσεις παροχών των υπό μελέτη πηγών.....	124
6.6 Αποτελέσματα της συσχέτισης των παροχών και συμπεράσματα.....	125
6.7 Καμπύλες και συντελεστές στείρευσης	127
6.7.1 Γενικά.....	127
6.7.2 Εξισώσεις που έχουν προταθεί.....	128
6.7.2.1 Εξίσωση Maillet.....	128
6.7.2.2 Εξίσωση Tison.....	129
6.7.2.3 Εξίσωση Forkasiewicz και Paloc.....	129
6.7.2.4 Εξίσωση Drogue.....	130
6.7.2.5 Εξίσωση Schoeller.....	130
6.7.2.6 Εξίσωση Μαρίνου.....	131

6.8 Υπολογισμός του συντελεστή στείρευσης.....	131
6.8.1 Ερμηνεία και χρησιμότητα του συντελεστή στείρευσης.....	132
6.9 Εφαρμογή της εξίσωσης <i>Maillet</i>	133
6.10 Εφαρμογή της εξίσωσης <i>Drogué</i>	133
6.11 Αποτελέσματα υπολογισμού συντελεστή στείρευσης - Διαγράμματα.....	135
6.11.1 Πηγή <i>SM1</i>	135
6.11.2 Πηγή <i>SP2</i>	136
6.11.3 Πηγή <i>SPR1</i>	137
6.11.4 Πηγή <i>SM4</i>	138
6.11.5 Πηγή <i>SM2</i>	138
6.12 Αθροιστικό διάγραμμα πηγών με ισχυρή συσχέτιση στην περιοχή μελέτης.....	139
6.12.1 Πηγές <i>SP2</i> και <i>SPR1</i>	139
6.13 Συμπεράσματα.....	140
7. ΥΔΡΟΧΗΜΕΙΑ.....	142
7.1 Γενικά.....	142
7.2 Δειγματοληψία – Χημικές Αναλύσεις.....	142
7.2.1 Επιτόπιες μετρήσεις.....	142
7.2.2 Εργαστηριακές αναλύσεις.....	143
7.3 Επεξεργασία των δεδομένων των χημικών αναλύσεων.....	143
7.4 Φυσικοχημικές παράμετροι του υπόγειου νερού.....	147
7.4.1 Θερμοκρασία (T_{wa}).....	147
7.4.2 pH.....	147
7.4.3 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση (<i>E.C.</i>).....	147
7.4.4 Διαλυμένο οξυγόνο (DO_2).....	152
7.5 Χημικές παράμετροι του υπόγειου νερού.....	153
7.5.1 Σκληρότητα.....	153
7.5.2 Ασβέστιο (Ca^+).....	157
7.5.3 Μαγνήσιο (Mg^{2+}).....	159
7.5.4 Νάτριο (Na^+).....	161
7.5.5 Κάλιο (K^+).....	162
7.5.6 Όξινα ανθρακικά ιόντα (HCO_3^-).....	164
7.5.7 Χλώριο (Cl^-).....	165
7.5.8 Θειικά (SO_4^{2-}).....	167
7.5.9 Φωσφορικά (PO_4^{-3}).....	168
7.5.10 Άζωτο (<i>N</i>).....	170
7.6 Μεταλλικά ιχνοστοιχεία.....	171
7.6.1 Σίδηρος και Μαγγάνιο (<i>Fe-total</i> , Mn^{2+}).....	171
7.6.2 Ψευδάργυρος και Χαλκός (Zn^{2+} , Cu^{2+}).....	176
7.6.3 Χρώμιο ολικό (<i>Cr-total</i>).....	179
7.7 Διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2).....	180
7.7.1 Μοντέλο Θερμοδυναμικών εκτιμήσεων και συνθηκών κορεσμού.....	181
7.8 Ταξινόμηση των υπόγειων νερών.....	183
7.9 Ποιοτική σύσταση των επιφανειακών υδάτων της περιοχής έρευνας.....	184
7.9.1 Φυσικοχημικοί παράμετροι των επιφανειακών νερών.....	186
7.9.1.1 Ανάλυση.....	186
7.9.1.2 Ποιοτικά χαρακτηριστικά.....	189

7.10	Ιοντικά Διαγράμματα.....	189
7.11	Συσχέτιση υδροχημικών παραμέτρων με τεκτονικά στοιχεία.....	190
7.12	Συμπεράσματα.....	191
8.	ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ.....	192
8.1	Ιστορική αναδρομή της έννοιας της τρωτότητας.....	192
8.2	Η έννοια της τρωτότητας.....	194
8.3	Εκτίμηση και χαρτογράφηση της τρωτότητας.....	194
8.4	Χάρτης Τρωτότητας.....	194
8.4.1	Γενικά.....	194
8.4.2	Περιορισμοί των χαρτών τρωτότητας.....	196
8.5	Μεθοδολογία.....	197
8.5.1	Δημιουργία βάσης δεδομένων και θεματικών επιπέδων για την εκτίμηση και χαρτογράφηση της τρωτότητας.....	197
8.5.2	Πολυκριτηριακή μέθοδος SCALDI.....	197
8.5.3	Μεθοδολογία εργασίας.....	199
8.5.4	Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (Analytical Hierarchy Process – AHP).....	200
8.6	Ανάλυση των κριτηρίων S, C, A, L, DI.....	203
8.6.1	Κριτήριο S.....	203
8.6.2	Κριτήριο C.....	205
8.6.3	Κριτήριο A.....	208
8.6.4	Κριτήριο L.....	210
8.6.5	Κριτήριο DI.....	213
8.7	Χάρτης Δείκτη Τρωτότητας Ig.....	218
8.7.1	Γενικά.....	218
8.7.2	Εφαρμογή της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας (AHP).....	218
8.7.3	Δείκτης Τρωτότητας Ig.....	220
8.7.4	Σύνταξη Χάρτη Τρωτότητας.....	221
8.8	Εκτίμηση Εντάσεως Επικινδυνότητας (Risk Intensity Index).....	224
8.8.1	Γενικά.....	224
8.8.2	Δείκτης Κινδύνου (Hazard Index).....	225
8.8.3	Δείκτης Εντάσεως Επικινδυνότητας (Risk Intensity Index).....	226
8.9	Έλεγχος των αποτελεσμάτων.....	229
9.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	231
10.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	241
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	Π-1

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

- Σχήμα 1.1:** Κατανομή του υπόγειου νερού στη Γη.
- Σχήμα 1.2:** Σχηματική αναπαράσταση του υδρολογικού κύκλου.
- Σχήμα 1.3:** Παγκόσμια εξάπλωση των σκληρών διερρηγμένων πετρωμάτων.
- Σχήμα 1.4:** Τα σκληρά διερρηγμένα πετρώματα στην Ελλάδα.
- Σχήμα 1.5:** Τυπικό προφίλ αποσάθρωσης στα μεταμορφωμένα και πυριγενή πετρώματα.
- Σχήμα 1.6:** Υβριδικός χάρτης ευρύτερης περιοχής του Δήμου Κηρέως
- Σχήμα 1.7:** Διάγραμμα Μεθοδολογίας έρευνας.
- Σχήμα 2.1:** Δορυφορική εικόνα της κεντρικής Εύβοιας όπου φαίνεται η περιοχή μελέτης (από δορυφορική εικόνα του προγράμματος Google Earth).
- Σχήμα 2.2:** Χάρτης γεωτεκτονικών ζωνών των Ελληνίδων (Μουντράκης, 1985).
- Σχήμα 2.3:** Σκαρίφημα που δείχνει τις παλαιογεωγραφικές συνθήκες της Μέσο – Άνω Κρητιδικής επίκλυσης στο χώρο της Υποπελαγονικής (Δούτσος, 2002).
- Σχήμα 2.4:** Στρωματογραφική στήλη της Πελαγονικής ζώνης μη μεταμορφωμένων σχηματισμών της Κεντρικής και Βόρειας Εύβοιας (Katsikatsos et al, 1986).
- Σχήμα 2.5:** Γεωλογικός χάρτης της Εύβοιας, της Αττικής και των Βόρειων Κυκλάδων. (Katsikatsos et al., 1986).
- Σχήμα 2.6:** Γεωλογικός χάρτης της περιοχής Μαντουδίου, Βόρειας Εύβοιας, στην οποία απαντώνται σε μεγάλη έκταση σχηματισμοί του Ηωελληνικού καλύμματος, και γεωλογική τομή Α-Α' δια των σχηματισμών αυτών. (Katsikatsos, 1977).
- Σχήμα 2.7:** Σχηματικές στρωματογραφικές στήλες στην Κεντρική και Βόρεια Εύβοια ενδεικτικές των μεταβολών πάχους των διαφόρων σχηματισμών (Δούτσος, 2002).
- Σχήμα 2.8:** Σχηματική τομή του κοιτάσματος σιδηρονικελιούχου μεταλλεύματος «Κατάβολος» της Κεντρικής Εύβοιας. (Κατσικάτσος κ.ά., 1992).
- Σχήμα 2.9:** Σκαρίφημα υδραυλικής και μηχανικής συμπεριφοράς των μεταμορφωμένων πετρωμάτων εξαιτίας του φαινομένου της ανισοτροπίας.
- Σχήμα 2.10:** Τα σκληρά διερρηγμένα πετρώματα στην Ελλάδα (Στουρνάρας κ. ά. 2003).
- Σχήμα 2.11:** Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής μελέτης (Κατσικάτσος κ α., 1978, 1980, 1981, με τροποποιήσεις).
- Σχήμα 2.12:** Στρωματογραφική στήλη των σχηματισμών της Υποπελαγονικής Ζώνης (από Κατσικάτσο, 1992).
- Σχήμα 2.13:** Χάρτης κυριότερων φωτογραμμώσεων της περιοχής μελέτης.
- Σχήμα 2.14:** Ροδόγραμμα διευθύνσεων ασυνεχειών (α), Ροδόγραμμα διευθύνσεων ρηγμάτων (b) της περιοχής μελέτης.
- Σχήμα 2.15:** Επιλεγμένες Θέσεις καταγραφής ασυνεχειών στην περιοχή μελέτης και ροδογράμματα διεύθυνσης των ασυνεχειών.

- Σχήμα 3.1:** Χάρτης υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής του ποταμού Κυμάσι.
- Σχήμα 3.2:** Υψομετρική καμπύλη της λεκάνης απορροής του ποταμού Κυμάσι.
- Σχήμα 3.3:** Χάρτης υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής του ποταμού Δαφνοπόταμος.
- Σχήμα 3.4:** Υψομετρική καμπύλη της λεκάνης απορροής του ποταμού Δαφνοπόταμος.
- Σχήμα 3.5:** Χάρτης υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής του ποταμού Πήλι.
- Σχήμα 3.6:** Υψομετρική καμπύλη της λεκάνης απορροής του ποταμού Πήλι.
- Σχήμα 3.7:** Διάγραμμα εφαρμογής 1^{ου} νόμου του Horton.
- Σχήμα 3.8:** Διάγραμμα εφαρμογής 2^{ου} νόμου του Horton.
- Σχήμα 3.9:** Διάγραμμα εφαρμογής 3^{ου} νόμου Horton.
- Σχήμα 3.10:** Διάγραμμα εφαρμογής 1^{ου} νόμου του Horton.
- Σχήμα 3.11:** Διάγραμμα εφαρμογής 2^{ου} νόμου του Horton.
- Σχήμα 3.12:** Διάγραμμα εφαρμογής 3^{ου} νόμου Horton.
- Σχήμα 3.13:** Διάγραμμα εφαρμογής 1^{ου} νόμου του Horton.
- Σχήμα 3.14:** Διάγραμμα εφαρμογής 2^{ου} νόμου του Horton.
- Σχήμα 3.15:** Διάγραμμα εφαρμογής 3^{ου} νόμου Horton.
- Σχήμα 3.16:** Χάρτης κατανομής της υδρογραφικής πυκνότητας της περιοχής μελέτης.
- Σχήμα 3.17:** Διάγραμμα υδρογραφικής συχνότητας – πυκνότητας.
- Σχήμα 3.18:** Χάρτης υδρογραφικού δικτύου της περιοχής μελέτης.
- Σχήμα 3.19:** Χάρτης μορφολογικών κλίσεων στην περιοχή μελέτης.
- Σχήμα 3.20:** Ιστόγραμμα κατανομής συχνότητας τοπογραφικών κλίσεων στην περιοχή μελέτης.
- Σχήμα 4.1:** Μηνιαία κατανομή της θερμοκρασίας στο Μετεωρολογικό σταθμό Κύμης.
- Σχήμα 4.2:** Μηνιαία κατανομή της θερμοκρασίας στο Μετεωρολογικό σταθμό Χαλκίδας.
- Σχήμα 4.3:** Σχέση μέσης ετήσιας θερμοκρασίας – υψομέτρου για την περιοχή έρευνας.
- Σχήμα 4.4:** Ιστόγραμμα μέσης μηνιαίας κατανομής των βροχοπτώσεων στο σταθμό Κύμης.
- Σχήμα 4.5:** Ιστόγραμμα μέσης μηνιαίας κατανομής των βροχοπτώσεων στο σταθμό Προκόπι.
- Σχήμα 4.6:** Ιστόγραμμα μέσης μηνιαίας κατανομής των βροχοπτώσεων στο σταθμό Χαλκίδας.
- Σχήμα 4.7:** Διάγραμμα κατανομής εξατμισιοδιαπνοής (mm) – Εφαρμογή μεθόδου Turc και Thornthwaite.
- Σχήμα 4.8:** Χάρτης των σημείων μέτρησης της επιφανειακής απορροής στην περιοχή μελέτης.
- Σχήμα 4.9:** Απεικόνιση τρόπου μέτρησης επιφανειακής απορροής με τη μέθοδο του μιλίσκου (Σακκάς, 1985).
- Σχήμα 4.10:** Διαγράμματα του υδρολογικού ισοζυγίου της περιοχής έρευνας ανά λεκάνη απορροής μελέτης (α) Λεκάνη απορροής π. Κυμάσι, (β) Λ. απορροής π. Δαφνοπόταμος, (γ) Λ. απορροής π. Πήλι, (δ) Υδρολογικό Ισοζύγιο των οφιολίθων.
- Σχήμα 5.1:** Περιοχή μελέτης και ζώνες προστασίας (Βάση Δεδομένων Φιλότης, ΕΜΠ).
- Σχήμα 5.2:** Απογραφέντα σημεία ύδατος στην ευρύτερη περιοχή μελέτης.

- Σχήμα 5.3:** Εικόνα (Landsat 7 – αριστερά) φωτογραμμώσεων και τομές όπου παρατηρούνται υποθαλάσσιες εκροές (δεξιά) κατά μήκος της ακτογραμμής. 1. Υποθαλάσσιες εκφορτίσεις νερού σύμφωνα με εικόνα του 1999, 2. εκροές νερού χαρτογραφημένες από εικόνες του 1988 3. εκροές νερού χαρτογραφημένες από εικόνες του 1994 (Stefouli & Tsombos, 2004).
- Σχήμα 5.4:** Υδρολιθολογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής μελέτης.
- Σχήμα 5.5:** Σκαριφηματική γεωλογική τομή της ευρύτερης περιοχής έρευνας (Louis et al., 2002).
- Σχήμα 5.6:** Χάρτης φωτογραμμώσεων της περιοχής μελέτης.
- Σχήμα 5.7:** Χάρτης φωτογραμμώσεων/ διαρρήξεων και ρηγμάτων της περιοχής μελέτης.
- Σχήμα 5.8:** Κατανομή της συχνότητας του τύπου ασυνεχειών.
- Σχήμα 5.9:** (α) Ροδοδιάγραμμα συχνότητας διεύθυνσης των ρηγμάτων, (β) Ροδοδιάγραμμα συχνότητας διεύθυνσης των γραμμώσεων – διαρρήξεων.
- Σχήμα 5.10:** Κατανομή χωρικής πυκνότητας των ασυνεχειών στην περιοχή μελέτης.
- Σχήμα 5.11:** Κατανομή χωρικής πυκνότητας των ρηγμάτων στην περιοχή μελέτης.
- Σχήμα 5.12:** Κατανομή χωρικής πυκνότητας των φωτογραμμώσεων/ διαρρήξεων στην περιοχή μελέτης.
- Σχήμα 5.13:** Χωρική κατανομή του βαθμού διασύνδεσης των ασυνεχειών στην περιοχή μελέτης.
- Σχήμα 5.14:** Χωρική Κατανομή Πυκνότητας των πηγών (χλμ./ τετρ. χλμ.).
- Σχήμα 5.15:** Χωρική κατανομή των πηγών σε σχέση με την απόστασή τους από τις ασυνέχειες.
- Σχήμα 5.16:** Η μεταβολή της υδραυλικής κλίσης σε ορεινές περιοχές (Krasny, 1996).
- Σχήμα 6.1:** Σκαριφηματική απεικόνιση πηγής επαφής (αριστερά) και υπερπλήρωσης (δεξιά).
- Σχήμα 6.2:** Γενική μορφή και στοιχεία μοναδιαίου υδρογράμματος πηγής (Στουρνάρας, 2007).
- Σχήμα 6.3α:** Σκαριφηματική απεικόνιση της πηγής SM1.
- Σχήμα 6.3β:** Χρονική διακύμανση (υδρόγραμμα) της πηγής SM1.
- Σχήμα 6.4α:** Σκαριφηματική απεικόνιση της πηγής SSPR1.
- Σχήμα 6.4β:** Χρονική διακύμανση (υδρόγραμμα) των πηγών της οφιολιθικής σειράς Μαντουδίου.
- Σχήμα 6.5:** Γραφική απεικόνιση των πηγαίων εκφορτίσεων SP2 – SPR1.
- Σχήμα 6.6:** Γραφική απεικόνιση των πηγαίων εκφορτίσεων SM3 – SPR1.
- Σχήμα 6.7:** Γραφική απεικόνιση των πηγαίων εκφορτίσεων SPR1 – SM1.
- Σχήμα 6.8:** Υδρόγραμμα της πηγής SM1, στο οποίο σημειώνεται η καμπύλη στέρειυσης (κόκκινο πλαίσιο) και ο αντίστοιχος συντελεστής α της πηγής.
- Σχήμα 6.9:** Υδρόγραμμα της πηγής SP2, στο οποίο σημειώνεται η καμπύλη στέρειυσης (κόκκινο πλαίσιο) και ο αντίστοιχος συντελεστής α της πηγής.
- Σχήμα 6.10:** Υδρόγραμμα της πηγής SPR1, στο οποίο σημειώνεται η καμπύλη στέρειυσης (κόκκινο πλαίσιο) και ο αντίστοιχος συντελεστής α της πηγής.
- Σχήμα 6.11:** Υδρόγραμμα της πηγής SM3, στο οποίο σημειώνεται η καμπύλη στέρειυσης (κόκκινο πλαίσιο) και ο αντίστοιχος συντελεστής α της πηγής.
- Σχήμα 6.12:** Υδρόγραμμα της πηγής SM2, στο οποίο σημειώνεται η καμπύλη στέρειυσης

(κόκκινο πλαίσιο) και ο αντίστοιχος συντελεστής α της πηγής.

Σχήμα 6.13: Αθροιστικό διάγραμμα πηγών SP2 και SPR1.

Σχήμα 7.1: Ποιοτικά χαρακτηριστικά των υπόγειων νερών στην περιοχή μελέτης.

Σχήμα 7.2: Υδροχημικός χάρτης διαβαθμίσεων των τιμών της θερμοκρασίας των υπόγειων νερών της περιοχής έρευνας.

Σχήμα 7.3: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής του pH των υπόγειων νερών της περιοχής έρευνας.

Σχήμα 7.4: Σχέση TDS – E.C των υπογείων υδάτων της περιοχής έρευνας.

Σχήμα 7.5: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας E.C. ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

Σχήμα 7.6: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής των συνολικά διαλυμένων στερεών (TDS).

Σχήμα 7.7: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής του διαλυμένου οξυγόνου DO_2 (mg/l).

Σχήμα 7.8: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής της ολικής σκληρότητας.

Σχήμα 7.9: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής της μόνιμης σκληρότητας.

Σχήμα 7.10: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής της παροδικής σκληρότητας.

Σχήμα 7.11: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής των ιόντων ασβεστίου.

Σχήμα 7.12: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής των ιόντων μαγνησίου.

Σχήμα 7.13: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής των ιόντων νατρίου.

Σχήμα 7.14: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής των ιόντων καλίου.

Σχήμα 7.15: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής των οξυανθρακικών ιόντων.

Σχήμα 7.16: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής των ιόντων χλωρίου.

Σχήμα 7.17: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής των θειϊκών ιόντων.

Σχήμα 7.18: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής των φωσφορικών ιόντων.

Σχήμα 7.19: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής των νιτρικών ιόντων.

Σχήμα 7.20: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής των ιόντων μαγγανίου.

Σχήμα 7.21: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής των ιόντων σιδήρου.

Σχήμα 7.22: Εντοπισμός θέσης ΧΑΔΑ εντός του οικιστικού ιστού Μαντουδίου.

Σχήμα 7.23: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής των ιόντων ψευδαργύρου.

Σχήμα 7.24: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής των ιόντων χαλκού.

Σχήμα 7.25: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής των ιόντων χρωμίου.

Σχήμα 7.26: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής του SiO_2 , Οκτώβριος 2007.

Σχήμα 7.27: Λογαριθμικό διάγραμμα: $\log a_{\text{Mg}^{2+}} / a_{\text{H}^+}^2 - \log a_{\text{SiO}_2}$.

Σχήμα 7.28: Διάγραμμα Ταξινόμησης νερών κατά Piper.

Σχήμα 7.29: Ταξινόμηση των υπόγειων νερών στο διάγραμμα Piper.

Σχήμα 7.30: Ποιοτικά χαρακτηριστικά του ποταμού Κυμάσι.

Σχήμα 7.31: Διάγραμμα ταξινόμησης των επιφανειακών νερών του π. Κυμάσι.

Σχήμα 7.32: Διάγραμμα ιοντικών συγκεντρώσεων $\text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^-$.

- Σχήμα 7.33:** Χάρτης συσχέτισης χωρικής κατανομής βαθμού διασύνδεσης ασυνεχειών με τη συγκέντρωση NO_3^- (mg/l) στην περιοχή μελέτης.
- Σχήμα 8.1:** Ιεραρχική Ανάλυση του σκοπού/προβλήματος με τη χρήση επιπέδων ιεραρχικής δόμησης.
- Σχήμα 8.2:** Χάρτης μορφολογικών κλίσεων περιοχής μελέτης.
- Σχήμα 8.3:** Χάρτης δεικτών κριτηρίου μορφολογικών κλίσεων.
- Σχήμα 8.4:** Σκαρίφημα της δυνατότητας παρακάμψεως (by pass) της επιφανειακής υδροφορίας και μεταφορά του ρύπου σε βαθύτερα υδατικά σώματα (COST 620).
- Σχήμα 8.5:** Χάρτης κατανομής εδαφικού καλύμματος.
- Σχήμα 8.6:** Χάρτης δεικτών κριτηρίου εδαφικού καλύμματος.
- Σχήμα 8.7:** Χάρτης της γεωλογίας της περιοχής μελέτης.
- Σχήμα 8.8:** Χάρτης δεικτών κριτηρίου υδροφόρου πετρώματος.
- Σχήμα 8.9:** Χάρτης Χρήσεων Γης (Corine Landcover, 2004).
- Σχήμα 8.10:** Χάρτης δεικτών κριτηρίου χρήσεων γης.
- Σχήμα 8.11:** Διάγραμμα κατανομής του τύπου ασυνεχειών.
- Σχήμα 8.12:** Χάρτης κατανομής πυκνότητας φωτογραμμώσεων/διαρρήξεων (χλμ./τετρ. χλμ.).
- Σχήμα 8.13:** Χάρτης κατανομής της πυκνότητας των ρηγμάτων (χλμ. τετρ. χλμ.).
- Σχήμα 8.14:** Χάρτης κατανομής της πυκνότητας των ασυνεχειών (χλμ./τετρ. χλμ.).
- Σχήμα 8.15:** Χάρτης δεικτών κριτηρίου βαθμού διασύνδεσης ασυνεχειών.
- Σχήμα 8.16:** Ιεραρχική Ανάλυση του προβλήματος με χρήση δύο επιπέδων ανάλυσης.
- Σχήμα 8.17:** Ταξινόμηση των κριτηρίων με βάση το συντελεστή βαρύτητάς τους.
- Σχήμα 8.18:** Χάρτης κατανομής του δείκτη τρωτότητας στην περιοχή μελέτης.
- Σχήμα 8.19:** Χάρτης κατανομής του δείκτη κινδύνου στην περιοχή μελέτης.
- Σχήμα 8.20:** Εκτίμηση Επικινδυνότητας στην περιοχή μελέτης.
- Σχήμα 8.21:** Χάρτης κατανομής του δείκτη εντάσεως επικινδυνότητας στην περιοχή μελέτης.
- Σχήμα 8.22:** Συσχέτιση του δείκτη επικινδυνότητα με τη συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων.
- Σχήμα 8.23:** Συσχέτιση του κριτηρίου DI με τις συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων.

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

- Πίνακας 3.1:** Υψομετρική ανάλυση της λεκάνης απορροής του ποταμού Κυμάσι
- Πίνακας 3.2:** Οι κυριότερες μορφολογικές παράμετροι της λεκάνης απορροής του π. Κυμάσι
- Πίνακας 3.3:** Υψομετρική ανάλυση της λεκάνης απορροής του ποταμού Δαφνοπόταμος
- Πίνακας 3.4:** Οι κυριότερες μορφολογικές παράμετροι της λεκάνης απορροής του π. Δαφνοπόταμος
- Πίνακας 3.5:** Υψομετρική ανάλυση της λεκάνης απορροής του ποταμού Πήλι
- Πίνακας 3.6:** Οι κυριότερες μορφολογικές παράμετροι της λεκάνης απορροής του π. Πήλι
- Πίνακας 3.7:** Ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου του π. Κυμάσι, σύμφωνα με τον 1^ο νόμο του Horton
- Πίνακας 3.8:** Ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου του π. Κυμάσι, σύμφωνα με τον 2^ο νόμο του Horton
- Πίνακας 3.9:** Ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου του π. Δαφνοπόταμος, σύμφωνα με τον 1^ο νόμο του Horton
- Πίνακας 3.10:** Ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου του π. Δαφνοπόταμος, σύμφωνα με τον 2^ο νόμο του Horton.
- Πίνακας 3.11:** Ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου του π. Πήλι, σύμφωνα με τον 1^ο νόμο του Horton
- Πίνακας 3.12:** Ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου του π. Πήλι, σύμφωνα με τον 2^ο νόμο του Horton
- Πίνακας 3.13:** Αποτελέσματα προσδιορισμού παραμέτρων υδρογραφικής υφής στην περιοχή μελέτης
- Πίνακας 4.1:** Χαρακτηριστικά στοιχεία των βροχομετρικών σταθμών της περιοχής έρευνας
- Πίνακας 4.2:** Συντελεστές συσχέτισης των βροχομετρικών σταθμών της περιοχής έρευνας
- Πίνακας 4.3:** Μέσος ετήσιος όγκος νερού ($\times 10^6 \text{m}^3$) από βροχόπτωση ανά λεκάνη απορροής στην περιοχή μελέτης
- Πίνακας 4.4:** Μέσος ετήσιος όγκος νερού που δέχεται κάθε γεωλογικός σχηματισμός
- Πίνακας 4.5:** Μέση μηνιαία πραγματική εξατμισιοδιαπνοή υπολογισμένη σε mm
- Πίνακας 4.6:** Μέση ετήσια απώλεια νερού ($\times 10^6 \text{m}^3$) λόγω της εξατμισιοδιαπνοής σε κάθε γεωλογικό σχηματισμό
- Πίνακας 4.7:** Μέσες μηνιαίες μετρήσεις της επιφανειακής απορροής (υδρολογικά έτη 2008 – 2010)
- Πίνακας 4.8:** Προσεγγιστικό υδρολογικό ισοζύγιο ανά λεκάνη απορροής μελέτης
- Πίνακας 6.1:** Περιγραφική στατιστική της παροχής (m^3/h) των πηγών μελέτης
- Πίνακας 6.2:** Χαρακτηριστικά πηγαίων εκφορτίσεων της περιοχής μελέτης
- Πίνακας 6.3:** Προσδιορισμός συντελεστή στείρευσης α , με την εξίσωση Maillet
- Πίνακας 6.4:** Προσδιορισμός συντελεστή στείρευσης α , με την εξίσωση Drogue
- Πίνακας 6.5:** Συγκριτικός πίνακας προσδιορισμού συντελεστή στείρευσης α κατά Maillet και Drogue
- Πίνακας 7.1:** Στατιστική ανάλυση των κυριότερων φυσικοχημικών παραμέτρων των πηγών της περιοχής έρευνας, οι συγκεντρώσεις των ιόντων δίδονται σε mg/l (Οκτώβριος 2007)

Πίνακας 7.2: Στατιστική ανάλυση των κυριότερων φυσικοχημικών παραμέτρων των γεωτρήσεων και των πηγαδιών της περιοχής έρευνας, οι συγκεντρώσεις των ιόντων δίδονται σε mg/l

Πίνακας 7.3: Αξιολόγηση των υδάτων βάσει της σκληρότητας σε °dH (Hoell, 1979)

Πίνακας 7.4: Στατιστική ανάλυση των κυριότερων φυσικοχημικών παραμέτρων των επιφανειακών νερών της περιοχής έρευνας, οι συγκεντρώσεις των ιόντων δίδονται σε mg/l

Πίνακας 8.1: Κλίμακα συγκριτικών παρατηρήσεων

Πίνακας 8.2: Παράδειγμα 4 x 4 συγκριτικού πίνακα

Πίνακας 8.3: Γενική μορφή τετραγωνικού συγκριτικού πίνακα n x n

Πίνακας 8.4: Τιμές του δείκτη RI συναρτήσει της τάξης του πίνακα

Πίνακας 8.5: Τάξεις, χαρακτηριστικά, δείκτης τρωτότητας, συντελεστής βαρύτητας του κριτηρίου **S**

Πίνακας 8.6: Τάξεις, χαρακτηριστικά, δείκτης τρωτότητας, συντελεστής βαρύτητας του κριτηρίου **C**

Πίνακας 8.7: Τάξεις, χαρακτηριστικά, δείκτης τρωτότητας, συντελεστής βαρύτητας του κριτηρίου **A**

Πίνακας 8.8: Τάξεις, χαρακτηριστικά, δείκτης τρωτότητας, συντελεστής βαρύτητας του κριτηρίου **L**

Πίνακας 8.9: Τάξεις, χαρακτηριστικά, δείκτης τρωτότητας, συντελεστής βαρύτητας του κριτηρίου **DI**

Πίνακας 8.10: Εφαρμογή της AHP και οι συντελεστές βαρύτητας για κάθε κριτήριο/παραμέτρο.

Πίνακας 8.11: Συντελεστές βαρύτητας κάθε κριτηρίου της μεθόδου **SCALDI**

Πίνακας 8.12: Αντιστοιχία τάξεων δείκτη τρωτότητας με τις τάξεις τρωτότητας στην περιοχή μελέτης

Πίνακας 8.13: Αντιστοιχία τάξεων δείκτη κινδύνου στην περιοχή μελέτης

Πίνακας 8.14: Αντιστοιχία τάξεων δείκτη εντάσεως επικινδυνότητας στην περιοχή μελέτης

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα προσπάθεια αποτελεί τη Διδακτορική Διατριβή, με θέμα «Υδρογεωλογική, Υδραυλική και Μελέτη Τρωτότητας Υπερβασικών Πετρωμάτων. Εφαρμογή στην ευρύτερη περιοχή Μαντουδίου – Εύβοιας». Το θέμα δηλώθηκε στη Γενική Συνέλευση Ειδικής Σύνοψης (Συνεδρία 22-10-2007) του Τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών.

Η ανάθεση και επίβλεψη του θέματος έγινε από τον Καθηγητή Υδρογεωλογίας και Τεχνικής Γεωλογίας **κ. Γεώργιο Στουρνάρα**, τον οποίο ευχαριστώ θερμά για την επιστημονική καθοδήγηση αλλά και την ηθική συμπαράσταση καθώς επίσης και για τη διάθεση του επιστημονικού εξοπλισμού που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια της έρευνας. Οι υποδείξεις και οι παρατηρήσεις του υπήρξαν ουσιαστικές τόσο για την ολοκλήρωση της εργασίας όσο και για την απόκτηση εξειδικευμένων γνώσεων σε θέματα Υδρογεωλογίας. Σε αυτό το σημείο θεωρείται επιτακτική ανάγκη να αναφέρω το γεγονός ότι καθόλη τη διάρκεια της παρούσας έρευνας με δική του πρωτοβουλία με ενέταξε σε επιμέρους χρηματοδοτούμενα ερευνητικά προγράμματα και εκπαιδευτικά σεμινάρια δίνοντάς μου την ευκαιρία της απόκτησης επιπλέον γνώσεων και εμπειρίας σε θέματα υδρογεωλογίας, ενώ ταυτόχρονα ενισχύθηκαν οικονομικά λύνοντας τόσο τα προβλήματα εξόδων μετακινήσεων για τις εργασίες υπαίθρου όσο και τα προβλήματα διαβίωσης. Επιπλέον θεωρώ υποχρέωση να αναφέρω το γεγονός ότι η παρουσία του ήταν καταλυτική στην προσπάθεια ολοκλήρωσης αυτής της διατριβής καθώς στάθηκε δίπλα μου ως πραγματικός δάσκαλος. Τον ευχαριστώ πολύ.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθώ επίσης και σε όλους όσους βοήθησαν για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας:

➤ Τον Ομότιμο Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης **κ. Γεώργιο Σούλιο**, για το γεγονός ότι αποδέχτηκε να εξετάσει και να κρίνει τη διατριβή μου. Οι εύστοχες παρατηρήσεις και υποδείξεις του ήταν ουσιαστικές και οδήγησαν στη βελτίωση παρουσίασης των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας.

➤ Τον Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, τέως Διευθυντή του Τομέα Δυναμικής Τεκτονικής και Εφαρμοσμένης Γεωλογίας **κ. Σπύρο Λέκκα**, μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής της διατριβής μου, για τις σημαντικές παρατηρήσεις και διορθώσεις κατά το τελικό στάδιο της συγγραφής της οι οποίες ήταν καταλυτικές.

➤ Τον Καθηγητή και Διευθυντή του Εργαστηρίου Γεωλογίας – Ορυκτολογίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών **κ. Γεώργιο Μιγκίρο**, μέλος της επταμελούς

εξεταστικής επιτροπής της διατριβής μου, για τις υποδείξεις και παρατηρήσεις που μου επισήμανε κατά τη διάρκεια της έρευνας σε θέματα εργασιών γραφείου και υπαίθρου. Η υποστήριξή του ήταν συνεχής σε όλα τα στάδια της διατριβής, ενώ παράλληλα μου παρείχε και οικονομική υποστήριξη μέσω ερευνητικών προγραμμάτων στα οποία με ενέταξε και μέσα από τα οποία είχα τη δυνατότητα να αντιμετωπίσω διάφορα και πολύπλευρα θέματα υδρογεωλογίας.

➤ Τον Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας του Πανεπιστημίου Πατρών **κ. Νικόλαο Λαμπράκη**, μέλος της επταμελούς επιτροπής της διατριβής μου, ο οποίος υπήρξε ο πρώτος μου δάσκαλος στα θέματα υδρογεωλογίας και ο ρόλος του τόσο στα πρώτα στάδια μου ως φοιτητής αλλά και στα πλαίσια της ολοκλήρωσης αυτής της διδακτορικής διατριβής ήταν καταλυτικός για να αγαπήσω την υδρογεωλογία, τα υπόγεια νερά και την προστασία τους.

➤ Τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών **κ. Γεώργιο Σταμάτη**, μέλος της επταμελούς επιτροπής, για τις συμβουλές που μου παρείχε σε θέματα Υδροχημείας. Η βοήθειά του υπήρξε ουσιαστική ενώ οι ατελείωτες ώρες διδασκαλίας καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας με παρότρυναν συνεχώς να προχωρώ με αισιοδοξία προς την ολοκλήρωσή της.

➤ Τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Διευθυντή του εργαστηρίου Υδροχημείας και Πρόεδρο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας **κ. Απόστολο Αλεξόπουλο**, για τη στήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια της παρουσίας μου στο Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος.

➤ Τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος **κ. Στυλιανό Λόζιο** για τη διάθεση βιβλιογραφίας και επιστημονικού υλικού.

➤ Τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος **κ. Παναγιώτη Νάστο** για τη χορήγηση μετεωρολογικών στοιχείων των σταθμών που ανήκουν στο Αστεροσκοπείο Αθηνών.

➤ Την Επίκουρη Καθηγήτρια του Τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος **κ. Μαρία Σταυροπούλου** για την αμέριστη ηθική συμπαράσταση και στήριξη που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της παρούσας έρευνας, αλλά και καθ' όλη τη διάρκεια της παρουσίας μου στο Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος..

➤ Τη **Δρ. Αντωνίου Βαρβέρα** για τη βοήθεια που μου παρείχε καθόλη τη διάρκεια της έρευνας σε θέματα Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφορικής.

➤ Το **Δρ. Εμμανουήλ Βασιλάκη** για τη βοήθειά του και την υποστήριξη που μου παρείχε σε επιμέρους λογισμικά πακέτα των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφορικής.

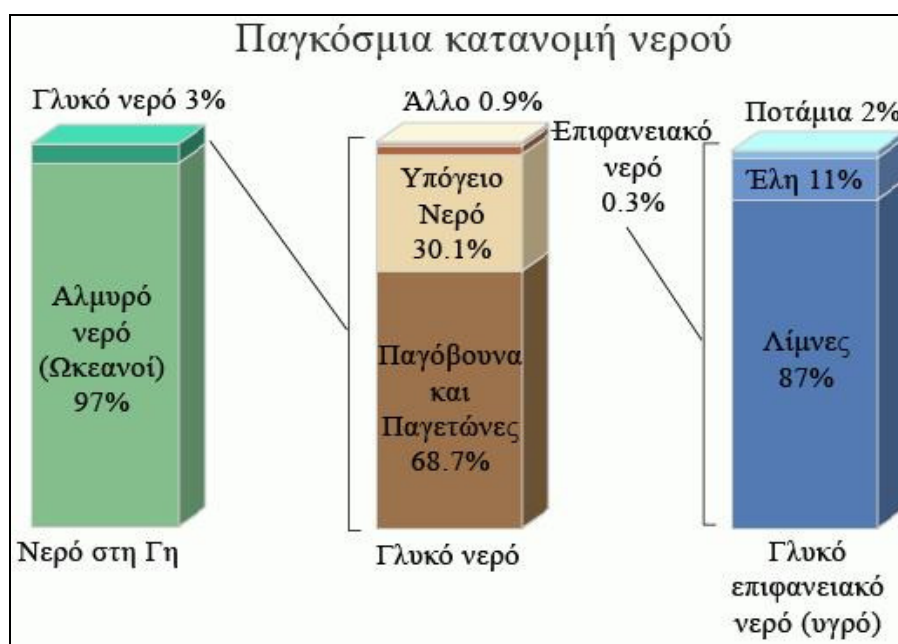
- Το συνάδελφο και φίλο **Εμμανουήλ Ανδρεαδάκη** για τις καθημερινές συζητήσεις μας και βοήθεια που μου παρείχε σε διάφορα θέματα.
- Τους **Συναδέλφους** μου στον Τομέα Δυναμικής Τεκτονικής και Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, για την ηθική και αμέριστη συμπαράστασή τους εκφρασμένο μέσα από ένα καθημερινό χαμόγελο και υποστήριξη σε διάφορα τεχνικά και μη θέματα.
- Ιδιαίτερες ευχαριστίες στο **Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ)** για τη σημαντικότερη οικονομική υποστήριξη που μου πρόσφερε κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών, χορηγώντας μου υποτροφία τριετούς διάρκειας.
- Τέλος θέλω να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου, τον **Πατέρα μου Γεώργιο, τη Μητέρα μου Όλγα και τον Αδελφό μου Λεωνίδα**, για την αμέριστη ηθική συμπαράσταση και οικονομική υποστήριξη που μου παρέχουν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Είναι σίγουρο ότι χωρίς της αγάπη τους, την υπομονή τους και την υποστήριξή τους θα ήταν αδύνατο να ολοκληρώσω τις σπουδές μου για τόσο μεγάλο χρονικό διάστημα.

αφιερώνεται στον αδερφό μου

1. ΓΕΝΙΚΑ ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

1.1 Γενικά

Το νερό είναι η βάση της ζωής στον πλανήτη. Περίπου το 70% της επιφάνειας της γης καλύπτεται από νερό. Οι ωκεανοί ρυθμίζουν το κλίμα και είναι ο βιότοπος πολλών ζωντανών οργανισμών, οι οποίοι αποτελούνται σε μεγάλο βαθμό από νερό. Το νερό συνιστά το 50 – 65% του βάρους των ζωικών οργανισμών, συμπεριλαμβανομένου και του ανθρώπου ενώ ταυτόχρονα αποτελεί ζωτικό παράγοντα για τη γεωργία, τη βιοτεχνία, τις μεταφορές και άλλες αμέτρητες ανθρώπινες δραστηριότητες. από το συνολικό διαθέσιμο νερό στη Γη, το 97% βρίσκεται στους ωκεανούς, ενώ από το υπόλοιπο 3%, το 2,997% είναι παγιδευμένο σε παγετώνες και παγόβουνα ή βρίσκεται βαθιά στη Γη (Σχ. 1.1), ώστε είναι πρακτικά απροσπέλαστο. Επομένως μόλις το 0,003% του συνόλου είναι άμεσα διαθέσιμο υπό μορφή υγρασίας στο έδαφος, εκμεταλλεύσιμου υπόγειου νερού, υδρατμών, λιμνών και υδατορεμάτων (<http://ga.water.usgs.gov>, <http://health.in.gr/environ>).



Σχήμα 1.1: Κατανομή του υπόγειου νερού στη Γη (<http://ga.water.usgs.gov>)

Το διαθέσιμο νερό συνεχώς συγκεντρώνεται, καθαρίζεται και ανακυκλώνεται κατά τον υδρολογικό κύκλο (Σχ. 1.2). Η διαδικασία αυτή παρέχει αρκετές ποσότητες νερού, υπό τις προϋποθέσεις ότι δε φορτώνεται με μη αποικοδομήσιμες ή με βραδέως αποικοδομήσιμες ενώσεις, οι οποίες βαθμιαία θα συγκεντρώνονται και κάποτε θα φτάσουν σε απαγορευτικά επίπεδα και επιπλέον δεν αντλείται νερό από τα υπόγεια αποθέματα με ρυθμό μεγαλύτερο από όσα αυτά επαναφορτίζονται. δυστυχώς, σήμερα συμβαίνουν και τα δύο, με αποτέλεσμα

τη συνεχή υποβάθμιση των ποιοτικών και ποσοτικών συνθηκών ανά την υφήλιο με δυσμενείς επιπτώσεις καθώς σχεδόν ο μισός πληθυσμός της Γης δεν έχει πρόσβαση σε πόσιμο νερό (<http://health.in.gr/environ>).



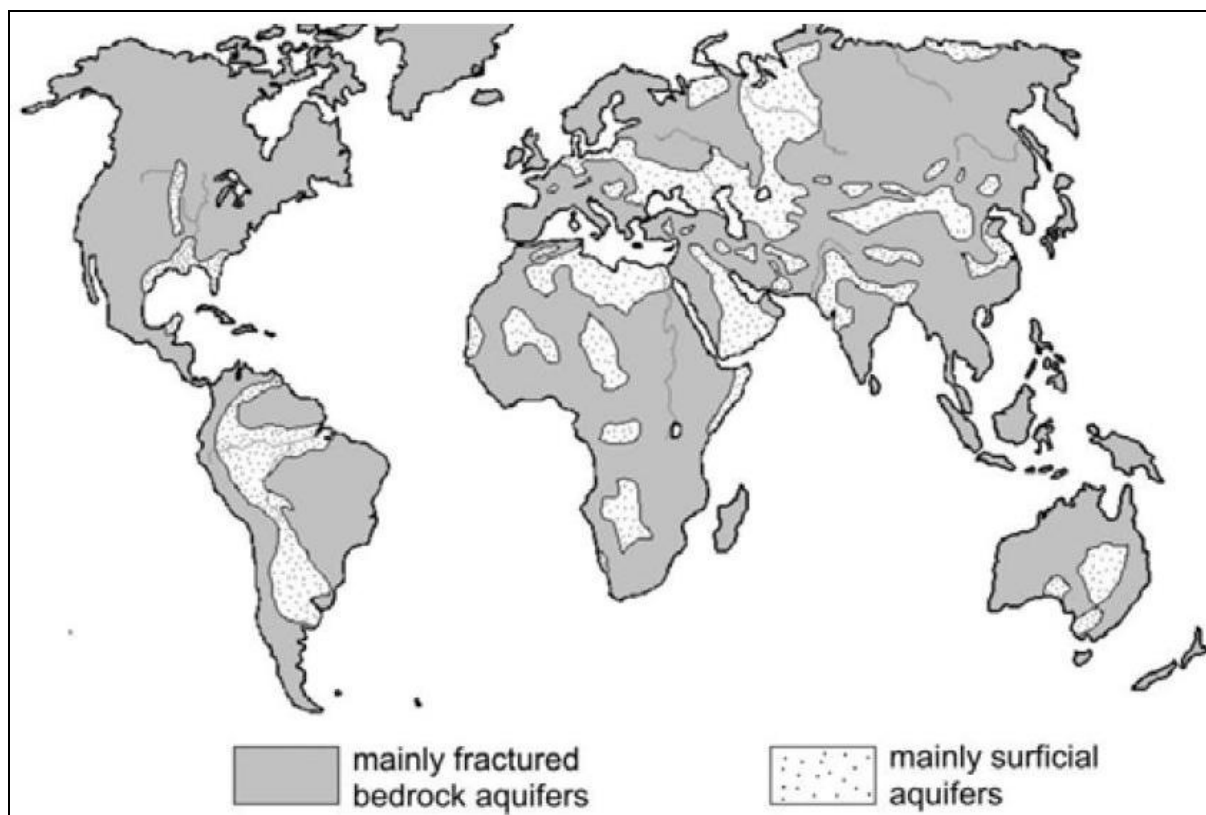
Σχήμα 1.2: Σχηματική αναπαράσταση του υδρολογικού κύκλου (<http://ga.water.usgs.gov>)

1.2 Σκληρά Διερρηγμένα Πετρώματα

Τα σκληρά διερρηγμένα πετρώματα καταλαμβάνουν ένα σημαντικό μέρος της επιφανειακής έκτασης τόσο σε παγκόσμιο όσο και σε εθνικό επίπεδο. Η παγκόσμια εξάπλωσή τους λαμβάνει χώρα σε ερημικές και ημί – ερημικές περιοχές όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.3. Ως σκληρά διερρηγμένα πετρώματα ορίζονται τα μεταμορφωμένα, τα πυριγενή, τα ανθρακικά μη καρστικοποιημένα και τέλος τα συμπαγή ιζηματογενή πετρώματα.

Στην Ελλάδα εμφανίζονται κυρίως στο γεωτεκτονικό χώρο των Εσωτερικών Ελληνίδων όπου σχετίζονται κυρίως με τα μεταμορφωμένα πετρώματα και τους οφιολίθους. Επειδή όμως η σύγχρονη λογική αναφορικά με τον ορισμό των σκληρών διερρηγμένων πετρωμάτων, έχει συμπεριλάβει και ισχυρώς συγκολλημένα και πολυπτυχωμένα ιζηματογενή πετρώματα, στο παρακάτω σχήμα έχουν συμπεριληφθεί και λιθολογικές ενότητες οι οποίες αντιστοιχούν σε γεωτεκτονικές ενότητες των Εξωτερικών Ελληνίδων (π.χ. οι πολυπτυχωμένοι, λεπτοπλακώδεις ασβεστόλιθοι της ζώνης Ωλονού – Πίνδου).

Μαζί με τους υπόλοιπους λιθολογικούς τύπους του γεωλογικού περιβάλλοντος παίζουν ένα σημαντικό ρόλο τόσο έμμεσα όσο και άμεσα, στην οικονομική ανάπτυξη των χωρών και κατά συνέπεια έχουν σημαντική κοινωνική επίδραση (Lloyd, 1999).



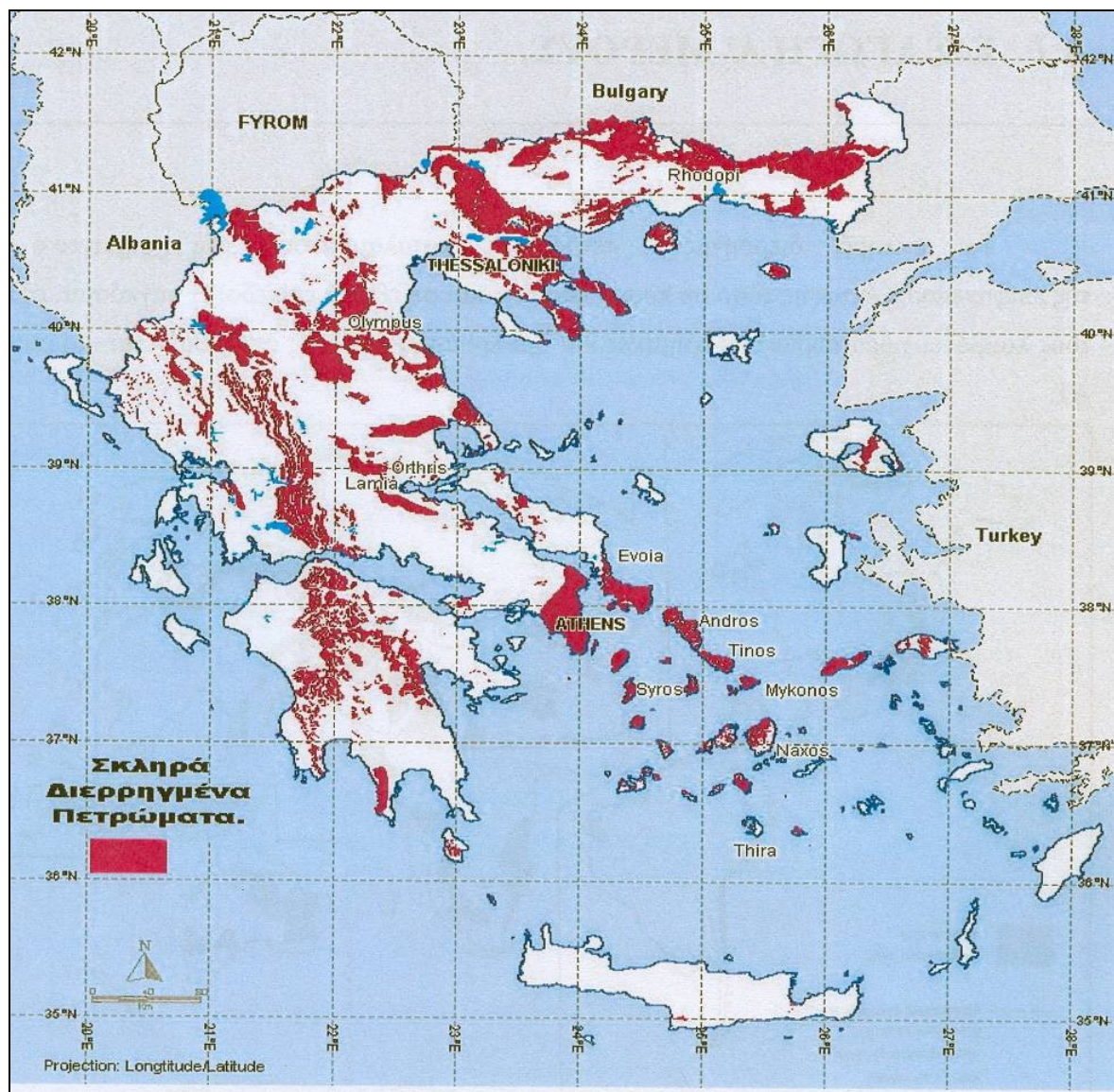
Σχήμα 1.3: Παγκόσμια εξάπλωση των σκληρών διερρηγμένων πετρωμάτων (Dietrich et al. 2005)

Παρόλο που τα σκληρά πετρώματα, δεν είναι οι κύριοι ξενιστές των τόσο οικονομικά επιθυμητών υδρογονανθράκων, σχετίζονται με τον ορυκτό πλούτο, και παράγουν εξαιρετικά δομικά και άλλα υλικά. Επιπροσθέτως, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες αποσάθρωσης, τα παραγόμενα εδάφη μπορούν να φιλοξενήσουν ιδιαίτερες παραγωγικές γεωργικές καλλιέργειες.

Πέρα όμως από τις κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις, τα σκληρά διερρηγμένα πετρώματα, εμπλέκονται ισχυρώς στη διαμόρφωση του υδρογεωλογικού περιβάλλοντος.

Τα κυρίαρχα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά τους, ανεξαρτήτως της λιθολογίας, είναι η επικράτηση του δευτερογενούς πορώδους έναντι του πρωτογενούς, και οι γενικά χαμηλές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας. Συνέπεια αυτών των χαρακτήρων είναι η γενικά χαμηλή ικανότητά τους να μεταβιβάζουν και να αποθηκεύουν νερό σε σχέση με άλλους τύπους πετρωμάτων όπως είναι οι καρστικοποιημένοι ασβεστόλιθοι.

Παρόλα αυτά οι ανάγκες για νερό παραμένουν, ανεξαρτήτως του υδρογεωλογικού περιβάλλοντος, και ιδιαίτερος σε περιοχές όπου η μέση ετήσια βροχόπτωση είναι χαμηλή.



Σχήμα 1.4: Τα σκληρά διερρηγμένα πετρώματα στην Ελλάδα (Στουρνάρας κ. ά, 2003)

Γίνεται επομένως κατανοητό, ο λόγος για τον οποίο η παγκόσμια επιστημονική κοινότητα (*International Association of Hydrogeologists – IAH HyRoc Commission*, www.hyroc.geol.uoa.gr) έχει στρέψει το ενδιαφέρον της στα σκληρά διερρηγμένα πετρώματα με έμφαση στην περιγραφή, στη μελέτη και ανάλυση του μέσου ασυνεχειών.

Ο όρος σκληρό διερρηγμένο πέτρωμα έρχεται σε άμεση σύνδεση με την εικόνα των κρυσταλλικών πετρωμάτων (πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα). Παρόλα αυτά, ενώ για ένα γεωλόγο η σύνδεση αυτή φαίνεται να είναι επαρκής, στην περίπτωση της υδρογεωλογικής θεώρησης εμπεριέχεται ένας μεγάλος βαθμός ασάφειας, αφού οι υδρογεωλογικοί χαρακτήρες οι οποίοι λαμβάνουν χώρα στα κρυσταλλικά πετρώματα, είναι δυνατόν να συναντώνται και σε ισχυρώς συγκολλημένα ιζηματογενή πετρώματα.

Σύμφωνα με τον Krasny (1996) το γεωλογικό περιβάλλον μιας περιοχής καθορίζεται επαρκώς τόσο από τις λιθολογικές όσο και από τις στρωματογραφικές ενότητες. Το

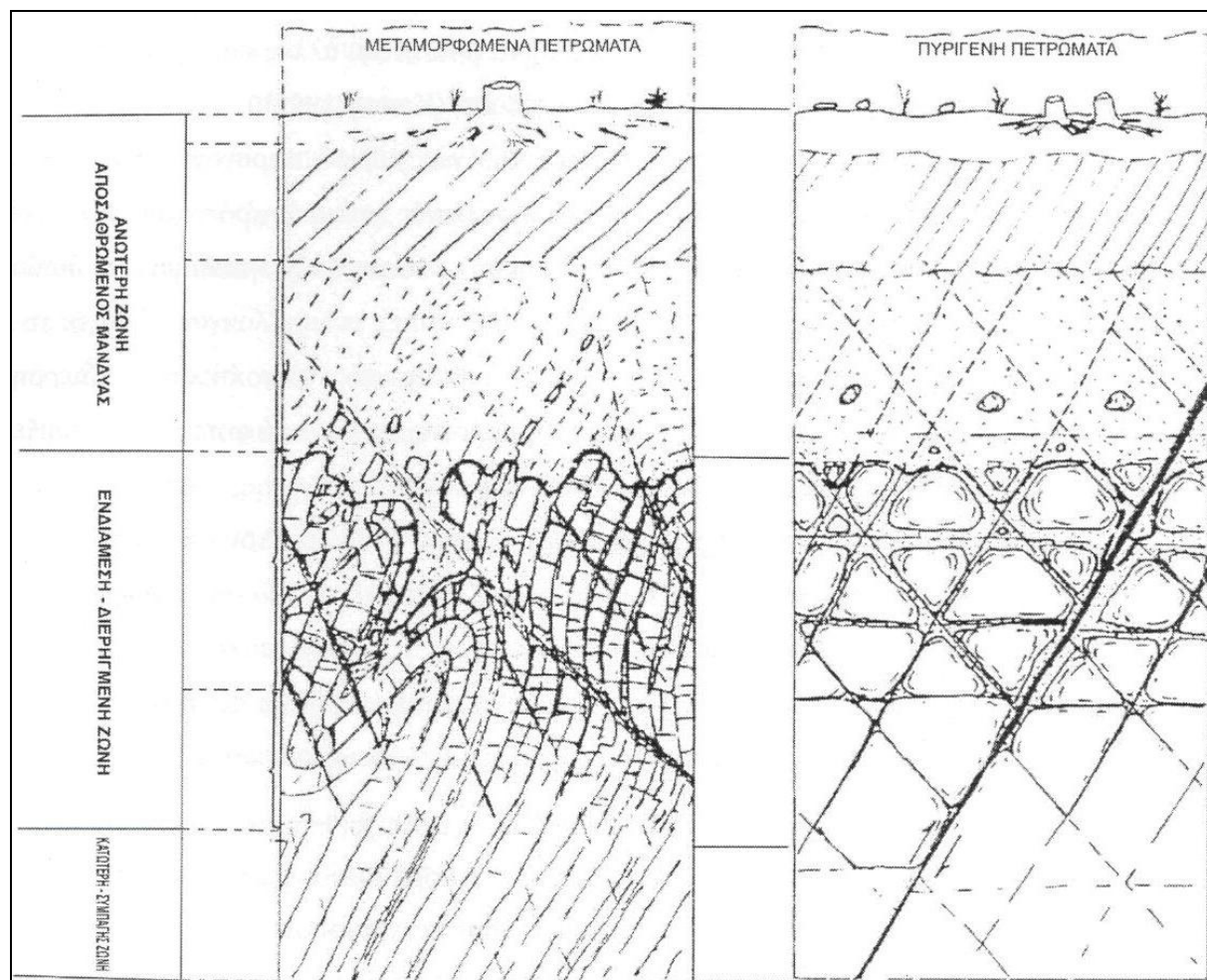
υδρογεωλογικό όμως περιβάλλον το οποίο ελέγχει την ύπαρξη και κίνηση του υπεδαφικού νερού καθορίζεται κατά κύριο λόγο από τον ίδιο τον εσωτερικό του χαρακτήρα. Επομένως, η χωρική κατανομή και γεωμετρία των υδροφόρων οριζόντων εξαρτάται ισχυρώς από την δομή τους. Προφανώς, δε η γεωμετρία και η δομή των υδρογεωλογικών σωμάτων καθορίζεται και από την λιθολογία ή τη στρωματογραφική ακολουθία, αλλά υπάρχουν περιπτώσεις κατά τις οποίες ο τύπος του υδρογεωλογικού περιβάλλοντος είναι σχεδόν ανεξάρτητος από τα γεωλογικά αυτά χαρακτηριστικά.

Η ανεξαρτησία μεταξύ υπόγειας ροής και λιθολογίας – στρωματογραφίας, είναι το βασικό χαρακτηριστικό του υδρογεωλογικού περιβάλλοντος των σκληρών διερρηγμένων πετρωμάτων. Επιπλέον η σχέση μεταξύ του βαθμού διαγένεσης και του τεκτονικού ελέγχου επί του πετρώματος αντικατοπτρίζεται από τη σχέση μεταξύ πρωτογενούς και δευτερογενούς πορώδους.

Επομένως το υδρογεωλογικό περιβάλλον των πετρωμάτων αυτών είναι ανεξάρτητο ως ένα βαθμό της λιθολογίας και χαρακτηρίζεται πολλές φορές από υδροφορίες τοπικής έκτασης, αναπτυσσόμενες σε μικρό βάθος από την επιφάνεια, με την υδραυλική κλίση να βρίσκεται άλλες φορές περισσότερο, άλλες λιγότερο σε γενική συμφωνία με την τοπογραφική κλίση, περιλαμβάνοντας τρεις κατακόρυφες ζώνες όπου κάθε μία από αυτές χαρακτηρίζεται από διακριτές υδρογεωλογικές συνθήκες (Σχ. 1.5):

- *την ανώτερη ή αποσαθρωμένη ζώνη*, η οποία αντιστοιχεί στον αποσαθρωμένο μανδύα του πετρώματος αλλά και σε νεότερες αποθέσεις του Τεταρτογενούς. Ο αποσαθρωμένος μανδύας είναι αποτέλεσμα της συνδυασμένης επίδρασης της ατμόσφαιρας, της υδρόσφαιρας και της βιόσφαιρας επί του πετρώματος.
- *την ενδιάμεση ή διερρηγμένη ζώνη*, η οποία αντιστοιχεί στο φάσμα της βραχομάζας. Το δευτερογενές πορώδες είναι αυτό που επικρατεί, εκφρασμένο μέσω των διαρρήξεων και διακλάσεων αλλά και πρωτογενών ασυνεχειών που αναπτύσσονται, εντός της μάζας του πετρώματος. Σε αυτόν τον ορίζοντα οι ασυνέχειες μαζί με το υλικό του πετρώματος δημιουργούν ένα σύνολο, του οποίου τόσο η υδραυλική όσο και η μηχανική συμπεριφορά, εκατέρωθεν των ασυνεχειών είναι τροποποιημένη και ανισότροπη. Χαρακτηριστικές παράμετροι όπως είναι ο βαθμός διασύνδεσης των ασυνεχειών, το μήκος τους, το υλικό πληρώσεως, η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών, πυκνότητα των ασυνεχειών και ο προσανατολισμός καθορίζουν τη συνολική υδραυλική συμπεριφορά του πετρώματος. Το πάχος αυτής της ζώνης φτάνει τα μερικά δεκάδες έως εκατοντάδες μέτρα.

- την κατώτερη ή συμπαγής ζώνη, η οποία αντιστοιχεί στην έννοια του άρρηκτου πετρώματος αφού οι πρωτογενείς ασυνέχειες (π.χ. σχιστότητα) είναι αυτές οι οποίες επικρατούν με τις δευτερογενείς να εκφράζονται μέσω απομονωμένων ρηγμάτων ή ρηξιγενών επιφανειών μεγάλου βάθους. Το πάχος αυτής της ζώνης μπορεί να φτάσει μέχρι και μερικές εκατοντάδες ή χιλιάδες μέτρα.



Σχήμα 1.5: Τυπικό προφίλ αποσάθρωσης στα μεταμορφωμένα και πυριγενή πετρώματα (Deere & Patton, 1971)

Στα πλαίσια διερεύνησης του υδρογεωλογικού περιβάλλοντος του μέσου ασυνεχειών προστίθεται, πλέον, και η μελέτη της τρωτότητας του υπόγειου νερού που φιλοξενείται σε αυτούς τους τύπους πετρωμάτων, καθώς αυτού του τύπου οι υδροφόροι ορίζοντες που τείνουν ή ήδη έχουν υποβαθμιστεί ποιοτικά (ρύπανση) αποτελούν την πλέον ενδεδειγμένη «τελευταία υπόγεια λύση» για πολλές περιοχές της Μεσογείου και της Ελλάδας (π.χ. νησιά Αιγαίου).

Ρύπανση υδάτων ονομάζεται οιαδήποτε μεταβολή των φυσικών, χημικών και βιολογικών παραμέτρων του νερού (θαλασσών, ποταμών, λιμνών) λόγω της παρουσίας σε αυτό ουσιών σε ποσότητα που υπερβαίνει τα φυσιολογικά όρια. Η μεταβολή αυτή μπορεί να έχει

αρνητικές επιπτώσεις στον άνθρωπο, σε άλλους ζωικούς ή φυτικούς οργανισμούς και γενικότερα να διαταράξει την ισορροπία των οικοσυστημάτων σε μικρή ή μεγάλη γεωγραφική κλίμακα. Η ρύπανση των υδάτων μπορεί να οφείλεται τόσο σε ανθρωπογενή όσο και σε φυσικά αίτια. Τα ανθρωπογενή αίτια αναφέρονται στη ρύπανση των υδάτων από αστικά λύματα, βιομηχανικά απόβλητα, στερεά απόβλητα, αγροτικές χρήσεις, μεταλλευτικές δραστηριότητες και τη διείσδυση της θάλασσας στους υπόγειους υδροφόρους λόγω υπεραντλήσεων. Τα φυσικά αίτια (γηγενής προέλευση) αφορούν τη ρύπανση του υπόγειου νερού εξαιτίας της παρουσίας κάποιων ορυκτών ή πετρωμάτων με αυξημένες συγκεντρώσεις σε κάποια στοιχεία, ή ειδικότερα της παρουσίας κάποιων κοιτασμάτων, ή θερμών μεταλλικών νερών.

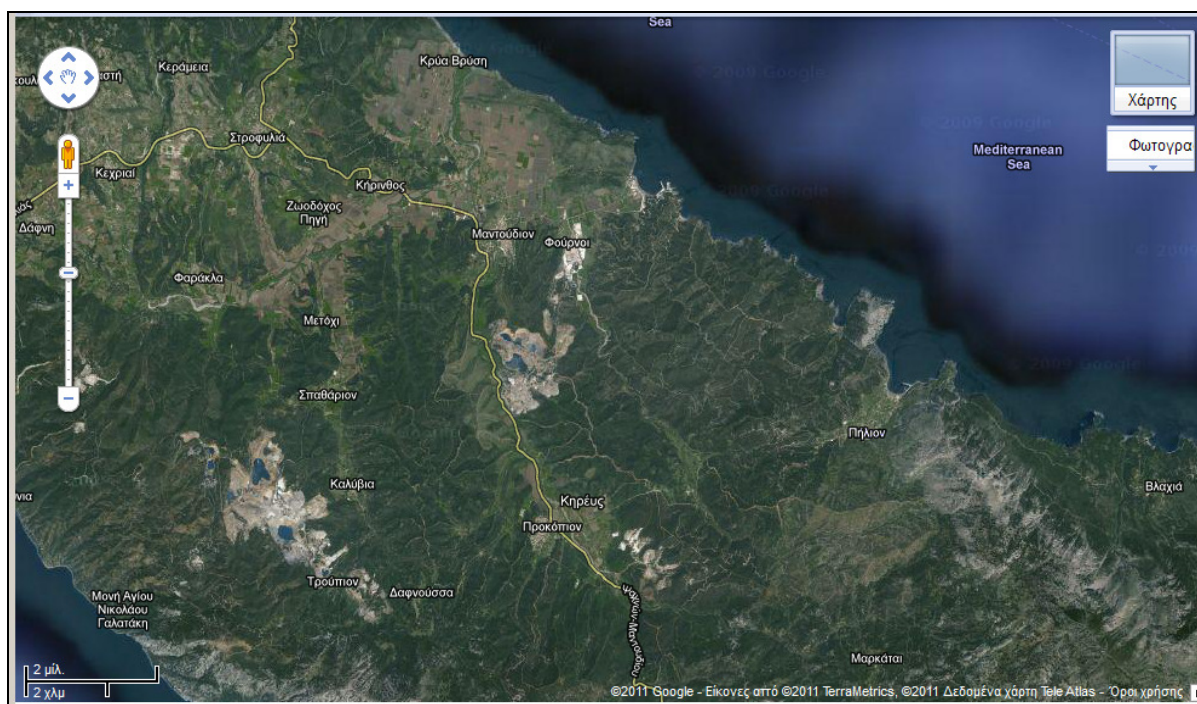
Η έννοια της τρωτότητας (vulnerability) στηρίζεται στην παραδοχή ότι το φυσικό περιβάλλον έχει τη δυνατότητα να προσφέρει προστασία, ως ένα βαθμό, στους υπόγειους υδροφορείς, από τους ρυπαντές που εισέρχονται στο υπέδαφος, από φυσικά ή ανθρωπογενή αίτια (Στουρνάρας, 2007). Οι γεωλογικοί σχηματισμοί μπορεί να δρουν σαν φυσικά φίλτρα για κάποιους ρυπαντές. Το νερό που διεισδύει από την επιφάνεια του εδάφους μπορεί να είναι μολυσμένο αλλά απορυπαίνεται φυσικά σε κάποιο βαθμό καθώς φιλτράρεται από το έδαφος στην ακόρεστη ζώνη (Zaporozec, 1994). Η δυνητική φυσική προστασία είναι περιορισμένη και ποικίλει εξαιρετικά. Διαφορετικά τμήματα του φυσικού περιβάλλοντος έχουν μεταβαλλόμενες ικανότητες εξασθένησης των ρυπαντών ή μολυντών. Χαρτογραφώντας την τρωτότητα ή την ευαισθησία του φυσικού περιβάλλοντος καθίσταται δυνατή η αναγνώριση περιοχών που είναι περισσότερο ή λιγότερο ευαίσθητες στη ρύπανση λόγω των σχηματισμών που υπέρκειται του υδροφόρου ορίζοντα (Zaporozec, 1994). Ο όρος τρωτότητα των υδροφόρων οριζόντων χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Margat (1968). Η άποψη της περιγραφής των βαθμίδων της τρωτότητας μέσω χαρτών επινοήθηκε κατά τη διάρκεια μιας προσπάθειας δημιουργίας πλήρους πληροφόρησης του κινδύνου ρύπανσης του υπόγειου νερού (Margat 1968, Albinet & Margat, 1970). Σκοπός αυτών των χαρτών ήταν, πρώτον, να δείξουν ότι η προστασία που προσφέρεται από το φυσικό περιβάλλον διέφερε από περιοχή σε περιοχή και δεύτερον, να εντοπίσουν περιοχές όπου τα έργα προστασίας ήταν περισσότερο αναγκαία (Margat & Suais-Parascandola, 1987).

Προκειμένου να επιτευχθεί ο σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής (χαρτογράφηση της εσωτερικής τρωτότητας), ακολουθήθηκε μία σειρά μεθοδολογιών και εργασιών, οι οποίες περιλαμβάνουν συλλογή δεδομένων με τεχνικές τηλεπισκόπησης και εργασίες υπαίθρου, ανάλυση δεδομένων με τη χρήση γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών καθώς και εξαγωγή συμπερασμάτων με την εφαρμογή μεθόδων στατιστικής και μαθηματικών

αλγορίθμων. Τέλος επιχειρείται η συσχέτιση των επιμέρους παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στη χαρτογράφηση της τρωτότητας με ποιοτικά στοιχεία προς επαλήθευση της μεθοδολογίας.

1.3 Περιγραφή της ευρύτερης περιοχής μελέτης

Η ευρύτερη περιοχή μελέτης εντάσσεται διοικητικά στην Περιφέρεια Στερεάς Ελλάδας με έδρα τη Λαμία. Παρόλο τον ιδιαίτερο χαρακτήρα της περιοχής, η πρόσβαση προς το κέντρο της Περιφέρειας και η χρονοαπόσταση από αυτό θεωρείται ικανοποιητική. Η υπό μελέτη περιοχή υπάγεται στο Δήμο Μαντουδίου – Λίμνης με έδρα τη Λίμνη Ευβοίας και περιλαμβάνει τα Δημοτικά Διαμερίσματα Νηλέως, Ελυμνίων και Κηρέως. Στο Δημοτικό Διαμέρισμα Κηρέως εντάσσονται οι οικισμοί Βλαχιάς, Δαφνούσης, Κηρίνθου, Μαντουδίου, Μετοχίου Κηρέως, Πηλίου, Προκοπίου, Σπαθαρίου, Στροφυλιάς και Φαράκλας (Σχ. 1.6).



Σχήμα 1.6: Υβριδικός χάρτης ευρύτερης περιοχής του Δήμου Κηρέως (περιοχή μελέτης)

Η περιοχή έρευνας εντοπίζεται 60 km βόρειο – ανατολικά της πόλης της Χαλκίδας. Το βόρειο όριο αποτελεί το δέλτα της λεκάνης του ποταμού Βούδουρου, ενώ το νότιο όριο αποτελεί ο ορεινός όγκος «Δίρφυς». Προς τα δυτικά οριοθετείται από την κοινότητα Προκόπι και προς τα ανατολικά από την κοινότητα Πήλι Ευβοίας.

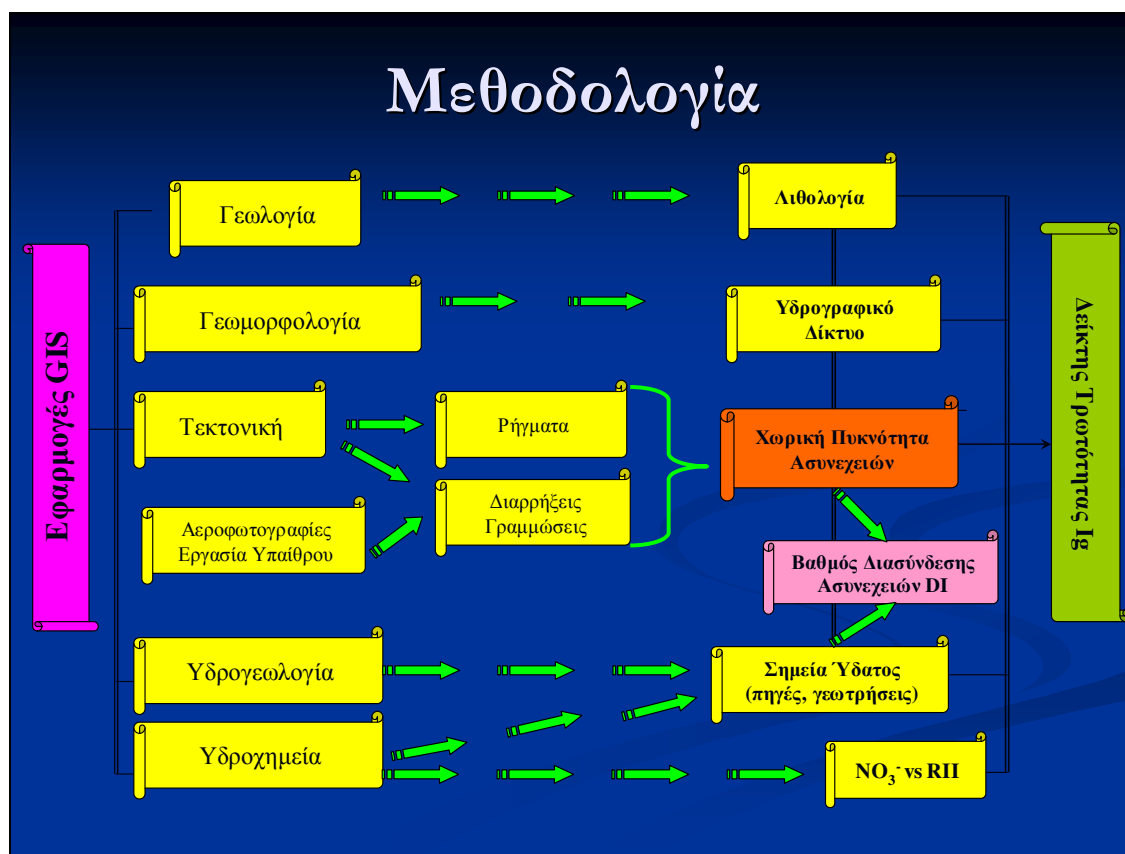
1.4 Μεθοδολογία έρευνας

Αντικείμενο της εργασίας είναι τόσο η περιγραφή, ανάλυση και ερμηνεία των υδρογεωλογικών και υδροχημικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή μελέτης, δίνοντας έμφαση στον υδροφόρο ορίζοντα που αναπτύσσεται στο εσωτερικό των διαρρηγμένων πετρωμάτων του οφιολιθικού συμπλέγματος Μαντουδίου, όσο και η αποσαφήνιση και διάκριση των υδραυλικών και υδροχημικών μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή μελέτης με κατάλληλες τεχνικές και μεθόδους που βασίζονται σε ακριβείς και λεπτομερείς μετρήσεις, προκειμένου να αναγνωριστούν περιοχές περισσότερο ή λιγότερο ευαίσθητες σε ρυπαντές. Ο κύριος στόχος ήταν ο προσδιορισμός των παραμέτρων εκείνων που θα περιέγραφαν συνολικότερα το μέσο ασυνεχειών προκειμένου να καταρτιστεί μία μεθοδολογία εκτίμησης και χαρτογράφησης της τρωτότητας στο μέσο ασυνεχειών μικρής κλίμακας.

Για την ολοκλήρωση των παραπάνω πραγματοποιήθηκαν τα ακόλουθα στάδια (Σχ. 1.7):

- Συλλογή και αξιολόγηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας, προκειμένου να μελετηθεί η γεωλογική δομή της περιοχής έρευνας και να επιβεβαιωθεί από εκτεταμένες εργασίες υπαίθρου.
- Μελέτη αεροφωτογραφιών και δορυφορικών εικόνων, για την εξαγωγή και χωρική αποτύπωση των τεκτονικών στοιχείων της περιοχής μελέτης με τη χρήση μεθόδων τηλεπισκόπησης. Ταυτοποίηση της προηγούμενης εργασίας με τη συνδυασμένη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών και εργασιών υπαίθρου.
- Ανάλυση των γεωμορφολογικών συνθηκών και διαχωρισμό των ζωνών διαφορετικού μορφολογικού αναγλύφου, στις οποίες έγινε ποσοτική ανάλυση των κυριότερων γεωμορφολογικών τους παραμέτρων.
- Συλλογή και αξιολόγηση των υφιστάμενων μετεωρολογικών δεδομένων για τον προσδιορισμό των κλιματικών συνθηκών που επικρατούν στην ευρύτερη περιοχή μελέτης.
- Εκτέλεση μηνιαίων μετρήσεων της επιφανειακής απορροής του ποταμού Κυμάσι, Δαφνοπόταμος και Πήλι στην έξοδο της λεκάνης απορροής, από τις οποίες υπολογίστηκε ο συντελεστής κατείσδυσης τόσο της ευρύτερης λεκάνης απορροής όσο και των οφιολίθων και κατέστη δυνατή η κατάρτιση ενός αξιόπιστου υδρολογικού ισοζυγίου της περιοχής έρευνας.
- Απογραφή με ακρίβεια και λεπτομέρεια του συνόλου των σημείων ύδατος (πηγές, γεωτρήσεις, πηγάδια) που εκμεταλλεύονται το νερό του υδροφόρου ορίζοντα.

- Συνολική περιγραφή του μέσου ασυνεχειών, όπου περιγράφονται και αναλύονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι του μέσου ασυνεχειών της περιοχής μελέτης (τύπος ασυνεχειών, προσανατολισμός, χωρική πυκνότητα, βαθμός διασύνδεσης). Η στατιστική επεξεργασία των χαρακτηριστικών του μέσου ασυνεχειών με σκοπό τον προσδιορισμό και τη συσχέτισή τους με τις πηγές που εμφανίζονται στην περιοχή έρευνας αποτέλεσε βασικό κριτήριο στην περιγραφή των υδρογεωλογικών συνθηκών. Με τη χρήση μεθόδων στατιστικής και μαθηματικών επιχειρείται η γεωμετρική και χωρική συσχέτιση των παραμέτρων των ασυνεχειών με την κατανομή των πηγών.
- Προσδιορισμός με επιτόπιες μετρήσεις και εργαστηριακές αναλύσεις των φυσικοχημικών παραμέτρων του υπόγειου νερού και κατασκευάστηκαν οι αντίστοιχοι υδροχημικοί χάρτες. Κατασκευάστηκαν διάφορα ιοντικά διαγράμματα (cross – plots). Στόχος ήταν η διάκριση περιοχών στις οποίες κυριαρχούν διαφορετικές υδροχημικές διεργασίες, οι οποίες και συμβάλλουν στη διαμόρφωση του υδροχημικού χαρακτήρα του υδροφόρου ορίζοντα. Τα επιμέρους κριτήρια που δημιουργήθηκαν στην προσπάθεια εκτιμήσεως και χαρτογράφησης της τρωτότητας, επιβεβαιώθηκαν από τις χωρικές κατανομές διαφόρων χημικών και φυσικών παραμέτρων, γεγονός ενδεικτικό της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της έρευνας.



Σχήμα 1.7: Διάγραμμα Μεθοδολογίας έρευνας

2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ

2.1 Γεωγραφική οριοθέτηση

Η περιοχή που μελετήθηκε περιλαμβάνει τη λεκάνη απορροής τριών κύριων λεκανών απορροής, του ποταμού Κυμάσι, του ποταμού Δαφνοπόταμος και του ποταμού Πήλι. Ορίζεται από τις συντεταγμένες γεωγραφικού μήκους 23° 30' έως 23° 35' και γεωγραφικού πλάτους 38° 50' έως 38° 45'. Η έκταση που καλύπτεται είναι περίπου 71,40 km² (Σχ. 2.1).



Σχήμα 2.1: Δορυφορική εικόνα της κεντρικής Εύβοιας όπου φαίνεται η περιοχή μελέτης (από δορυφορική εικόνα του προγράμματος Google Earth)

2.2 Γεωλογική επισκόπηση

Για την ένταξη της ευρύτερης περιοχής μελέτης σε κάποια από τις γεωτεκτονικές ζώνες στις οποίες έχει διακριθεί ο ελληνικός χώρος έχουν διατυπωθεί κατά καιρούς διαφορετικές απόψεις.

Αρχικά ο Renz (1955) την είχε εντάξει στη ζώνη «Ανατολικής Ελλάδας», άποψη που αποδέχεται και ο Μαράτος (1972). Σύμφωνα με τον Aubouin (1959) διακρίνονται στον

παλαιογεωγραφικό χώρο της Ανατολικής Ελλάδας η Υποπελαγονική και η Πελαγονική Ζώνη βάση των οποίων η περιοχή μελέτης εντάσσεται στην Υποπελαγονική Ζώνη.

Ο Ferrier (1976) προτείνει την εγκατάλειψη του όρου Υποπελαγονική δεδομένου ότι αυτή και η Πελαγονική Ζώνη διαφέρουν μεταξύ τους μόνο ως προς τη μεταμόρφωση.

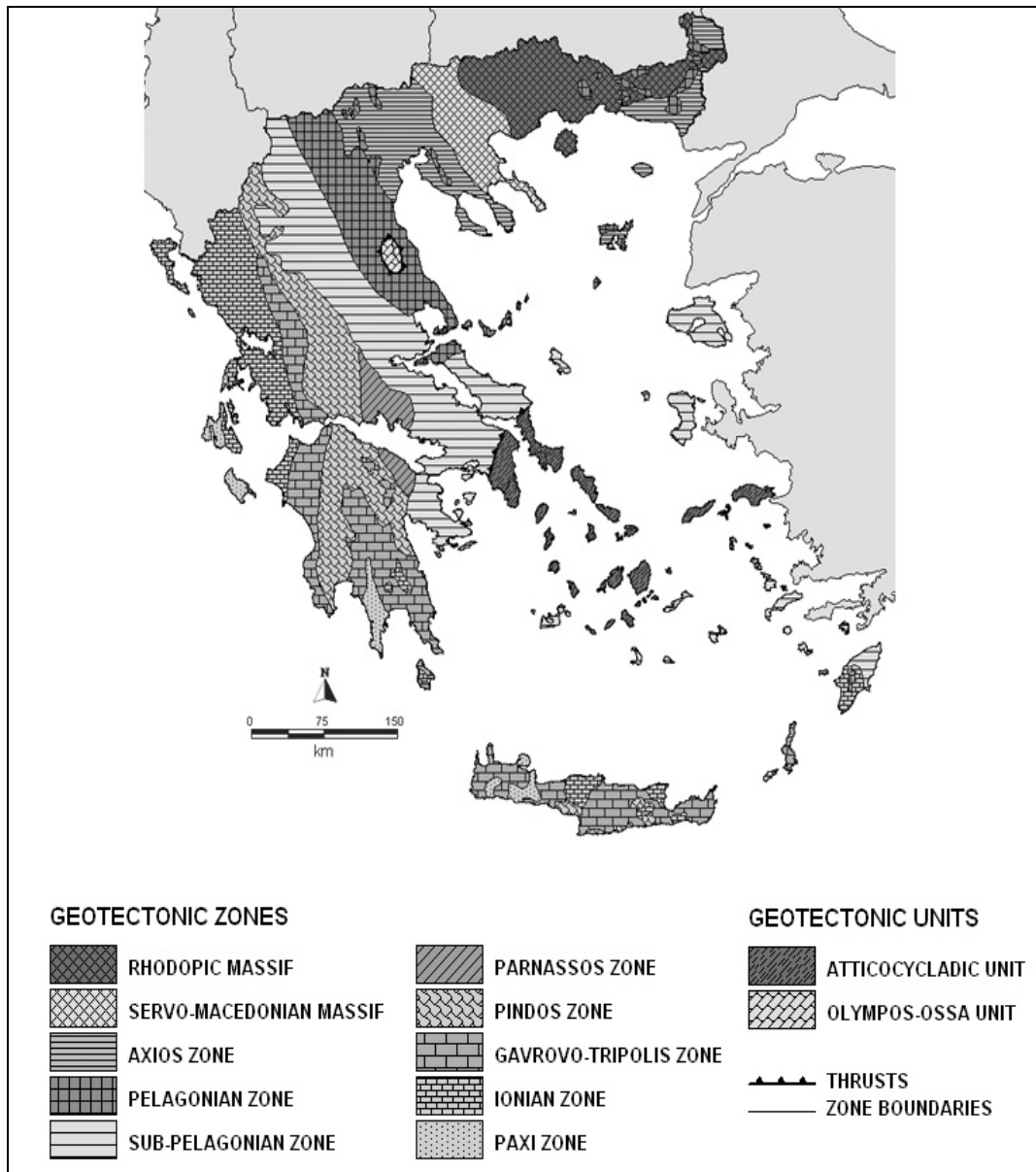
Ο Κατσικάτσος (1992) προτείνει και χρησιμοποιεί τους όρους «Πελαγονική ζώνη μη μεταμορφωμένων σχηματισμών», που γεωγραφικά συμπίπτει με την άλλοτε Πελαγονική Ζώνη.

Η ζώνη αυτή μαζί με τις ζώνες Βοιωτίας, Πελαγονική, Ροδόπης, Περιοδοπική, Σερβομακεδονική, το οφιολιθικό σύμπλεγμα και την Αττικοκυκλαδική μάζα αποτελούν τις εσωτερικές Ελληνίδες.

Οι ισοπικές ζώνες που περιλαμβάνονται στις εσωτερικές Ελληνίδες στα ανατολικά της Απούλιας πλατφόρμας έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό ότι έχουν επηρεαστεί από δύο ορογενετικά φαινόμενα, το Παλαιοαλπικό κατά το Κατώτερο Κρητιδικό και το Μεσοαλπικό κατά το τέλος του Ηωκαίνου.

Κύριο χαρακτηριστικό γνώρισμα της ζώνης αυτής είναι οι μεγάλες οφιολιθικές μάζες και η συνοδεύουσα σχιστοκερατολιθική διάπλαση. Οι οφιόλιθοι της **Υποπελαγονικής Ζώνης ή Πελαγονικής ζώνης μη μεταμορφωμένων σχηματισμών** συνιστούν την εξωτερική οφιολιθική λωρίδα (ERO) και η ζώνη θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει την οφιολιθική συρραφή της παλαιάς ωκεάνιας περιοχής δυτικά του Πελαγονικού ηπειρωτικού τεμάχους (Μουντράκης, 1985).

Στο σχήμα 2.2 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι γεωτεκτονικές ζώνες που απαντούν στον Ελλαδικό χώρο (Μουντράκης, 1985).



Σχήμα 2.2: Χάρτης γεωτεκτονικών ζωνών των Ελληνίδων (Μουντράκης, 1985)

2.3 Γεωτεκτονική εξέλιξη της ευρύτερης περιοχής

Η Υποπελαγονική Ζώνη ή Πελαγονική ζώνη μη μεταμορφωμένων σχηματισμών καθορίστηκε ως η δυτική κατωφέρεια του υβώματος της Πελαγονικής προς την αύλακα της ζώνης της Πίνδου και αποτελείται από νηριτικής φάσεως ασβεστολίθους που συνιστούν μετάβαση από τη νηριτική φάση επί της Πελαγονικής ζώνης προς την πελαγική φάση επί της ζώνης της Πίνδου.

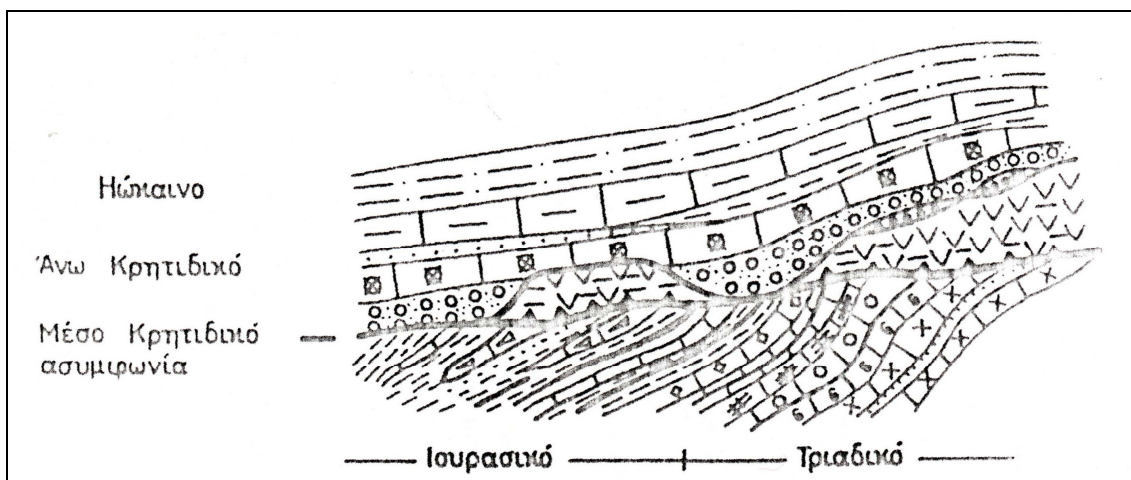
Το υπόβαθρο της συνιστούν ανωπαλαιοζωικοί σχηματισμοί πάνω στους οποίους τοποθετούνται επικλυσιογενώς οι Τριαδικοί ασβεστόλιθοι (Μουντράκης, 1985, Δούτσος, 2002). Το Πέρμιο αντιπροσωπεύεται με ασβεστολιθική φάση ενώ το Λιθανθρακοφόρο από σχιστόλιθους και ψαμμίτες μέσα στους οποίους εγκλείονται ασβεστολιθικοί φακοί.

Τα αρχαιότερα στρώματα της ζώνης απαντούν στη νήσο Κω όπου μαύροι σχιστοποιημένοι ασβεστόλιθοι και αργιλικόι σχιστόλιθοι χρονολογήθηκαν με βάση χαρακτηριστικά απολιθώματα ως Σιλούριοι. Άνω Παλαιοζωϊκοί σχηματισμοί απαντούν επίσης στη Χίο, Στερεά Ελλάδα, Εύβοια και Σαλαμίνα.

Τα Τριαδικά ιζήματα στη βάση της ζώνης απαντούν σε δύο διαφορετικές φάσεις. Η πρώτη αντιπροσωπεύει ιζήματα βαθιάς φάσης όπως ερυθρούς ασβεστολίθους και Κεφαλόποδα «*φάση Hallstatt*» ενώ η δεύτερη φάση αντιπροσωπεύει ασβεστόλιθους, κατά θέσεις δολομιτοποιημένους ρηχότερης φάσεως. Η βάση και των δύο φάσεων συνίσταται από κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, ασβεστολίθους με παρεμβολές τοφφιτικών υλικών ηλικίας Βερφενίου (Δούτσος, 2002).

Καθόλη τη διάρκεια του Ιουρασικού αποτίθεται η χαρακτηριστική για τη ζώνη «σχιστοκερατολιθική διάπλαση» από αργιλικούς σχιστόλιθους, ραδιολαρίτες, μάργες, ψαμμίτες και πηλίτες με ασβεστολιθικές παρενστρώσεις. Συχνά στη διάπλαση αυτή παρεμβάλλονται οφιολιθικά σώματα ενώ σε άλλες θέσεις έχουν παρατηρηθεί βασικές διεισδύσεις και τόφφοι. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά υποδηλώνουν πελαγική ιζηματογένεση. Στα ανώτερα τμήματά της η διάπλαση γίνεται φλυσχοειδής με τουρβιδικές αποθέσεις σαν πιθανό αποτέλεσμα της Παλαιοελληνικής ορογενετικής φάσης στο Κάτω Κρητιδικό (Δούτσος, 2002).

Μετά τη μεσολάβηση ενός στρωματογραφικού κενού κατά τη διάρκεια του οποίου η Υποπελαγονική ζώνη εχέρσευσε, επακολούθησε η Κενομάνια επίκλυση κατά την οποία αποτέθηκαν κροκαλοπαγή βάσεως καθώς επίσης και Άνω Κρητιδικόι ασβεστόλιθοι νηριτικής φάσεως (Σχ. 2.3).



Σχήμα 2.3: Σκαρίφημα που δείχνει τις παλαιογεωγραφικές συνθήκες της Μέσο – Άνω Κρητιδικής επίκλυσης στο χώρο της Υποπελαγονικής (από πανεπιστημιακές σημειώσεις Θ. Δούτσος, 2002)

Επί της ασυμφωνίας και σαν αποτέλεσμα εκτεταμένης διάβρωσης των οφιολίθων σχηματίστηκαν σιδηρονικελιούχα και λατεριτικά κοιτάσματα (πχ. περιοχή Λάρυμνα) τα οποία στη συνέχεια καλύφθηκαν από τα Άνω Κρητιδικά ιζήματα. Στο Άνω Μαιστρίχτιο άρχισε η ιζηματογένεση του φλύσχη η οποία τελείωσε στο Άνω Ηώκαινο κατά τη Μεσοαλπική φάση.

Οι δύο τεκτονικές φάσεις της Αλπικής ορογένεσης προκάλεσαν το σχηματισμό ΒΒΔ – διευθυνομένων πτυχών με ροπή και επωθήσεις που διευθύνονταν κυρίως προς την Ανατολή.

Συνοψίζοντας τη στρωματογραφική εξέλιξη της ζώνης αναγνωρίζουμε ότι η διαφοροποίηση της ζώνης σε βαθιά αύλακα άρχισε από το Κάτω Ιουρασικό και τελείωσε με την εκδήλωση της Παλαιοαλπικής φάσης όταν η ζώνη εχέρσευσε. Στο Μέσο – Άνω Κρητιδικό η ζώνη βυθίζεται και σαν συνέπεια της Μεσοαλπικής φάσης του Άνω Ηωκαίνου επαναχερσεύει.

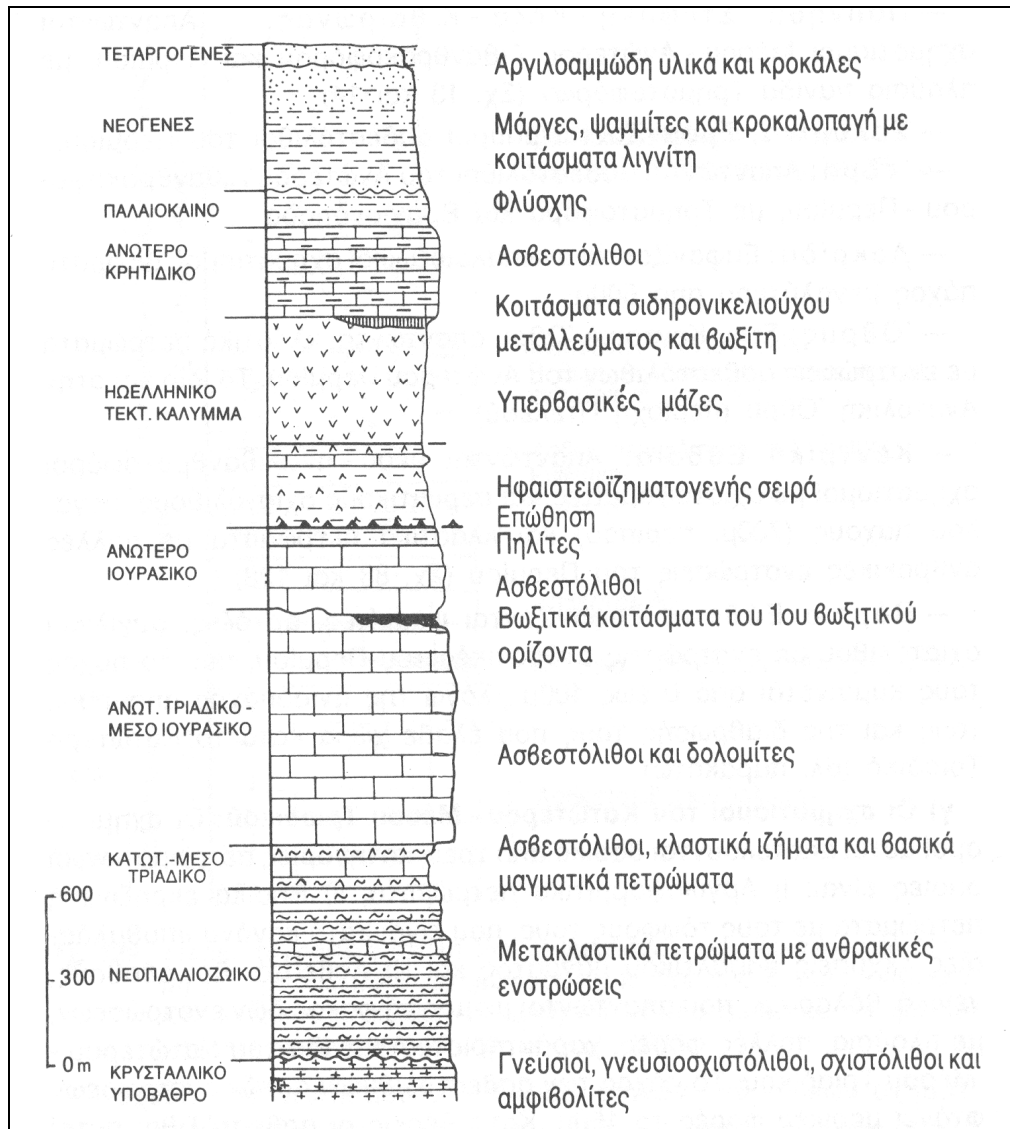
Στη σχιστοκερατολιθική διάπλαση συγκαταλέγονται και οι σχιστόλιθοι της Αθήνας πάνω στους οποίους επικάθονται ασυμφώνως οι ασβεστόλιθοι του Άνω Κρητιδικού στην Ακρόπολη, Λυκαβηττό, Τουρκοβούνια και Φιλοπάππου.

2.4 Στρωματογραφική διάρθρωση Κεντρικής και Βόρειας Εύβοιας

Η περιοχή της Κεντρικής και Βόρειας Εύβοιας αποτελείται από ένα παλαιοζωικό υπόβαθρο εν μέρει μεταμορφωμένο και από μια μεσοζωϊκή σειρά μη μεταμορφωμένων σχηματισμών στην οποία παρεμβάλλονται, τεκτονικά, τεράστιες μάζες οφιολιθικών πετρωμάτων.

Η Υποπελαγονική ζώνη ή Πελαγονική ζώνη μη μεταμορφωμένων σχηματισμών από τα κάτω προς τα πάνω, αποτελείται από (Σχ. 2.4):

- Ένα παλαιοζωικό κρυσταλλικό υπόβαθρο.
- Νεοπαλαιοζωικούς ημιμεταμορφωμένους, κυρίως κλαστικούς, σχηματισμούς.
- Σχηματισμούς του Κατώτερου – Μέσου Τριαδικού (κλαστικούς σχηματισμούς, εκρηξιγενή πετρώματα και ασβεστόλιθους).
- Μη μεταμορφωμένους ανθρακικούς σχηματισμούς του Μέσου – Ανώτερου Τριαδικού – Ανώτερου Ιουρασικού.
- Επωθημένες μεγάλες μάζες οφιολιθικών πετρωμάτων, πάνω στους προηγούμενους σχηματισμούς, που συνοδεύονται από ιζήματα βαθιάς θάλασσας, συμπεριλαμβανομένων και των σχηματισμών της Μαλιακής ζώνης και γενικότερα του Ηωελληνικού τεκτονικού καλύμματος.
- Επικλυσιγενείς ανωκρητιδικούς ασβεστόλιθους.
- Ιζήματα φλύσχη.

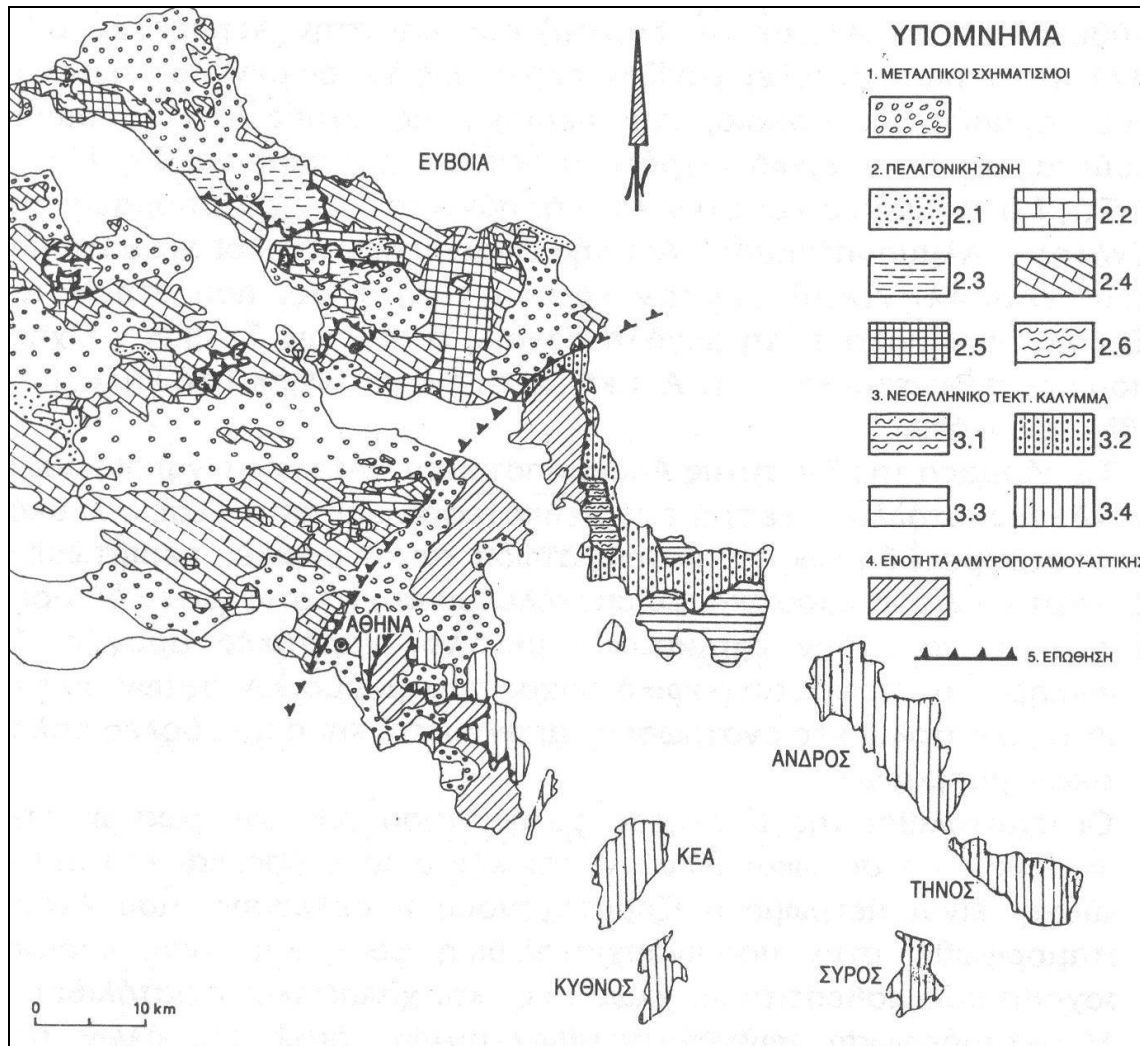


Σχήμα 2.4: Στρωματογραφική στήλη της Πελαγονικής ζώνης μη μεταμορφωμένων σχηματισμών της Κεντρικής και Βόρειας Εύβοιας (Katsikatsos et al, 1986)

Αναλυτικότερα, οι σχηματισμοί της Πελαγονικής ζώνης μη μεταμορφωμένων σχηματισμών έχουν ως παρακάτω:

✚ Το κρυσταλλικό υπόβαθρο

Εμφανίζεται στις περιοχές Γαλιτσάδων – Αιδηψού, της Βόρειας Εύβοιας και Στροπώνων – Μετοχίου, της Κεντρικής Εύβοιας (Σχ. 2.5). Η ηλικία των αρχικών σχηματισμών του υποβάθρου αυτού και της μεταμόρφωσης τους είναι προ – μεσολιθανθρακοφόρα.



Σχήμα 2.5: Γεωλογικός χάρτης της Εύβοιας, της Αττικής και των Βόρειων Κυκλάδων. (Katsikatsos et al., 1986). (2.1: Φλύσσης, 2.2: Ασβεστόλιθοι του Ανώτερου Κρητιδικού, 2.3: Σχηματισμοί του Ηωελληνικού τεκτονικού καλύμματος, 2.4: Ασβεστόλιθοι και δολομίτες του Μέσου - Ανώτερου Τριαδικού έως και του Ανώτερου Ιουρασικού, 2.5: Σχηματισμοί του Νεοπαλαιozoικού - Μέσου Τριαδικού, 2.6: Κρυσταλλικό υπόβαθρο, 3.1: Σχιστόλιθοι Τσακαίων, 3.2: Μάρμαρα και Σιπολίνας Στύρων, 3.3: Σχηματισμοί Όχης, 3.4: Ενοποιημένοι σχηματισμοί του Νεοελληνικού τεκτονικού καλύμματος)

Οι σχηματισμοί του κρυσταλλικού υποβάθρου έχουν σημαντική εξάπλωση στη Βόρεια Εύβοια, όπου το ορατό τους πάχος φτάνει τα 800m. Είναι κυρίως βιοτιτικοί και διμαρμαρυγικοί γενέσιοι και γενευσιοσχιστόλιθοι, που κατά θέσεις μεταπίπτουν σε μειγματίτες. Στα ανώτερα μέλη του κρυσταλλικού αυτού υποβάθρου απαντώνται, με μορφή ενστρώσεων ποικίλου πάχους, μαρμαρυγικοί και αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι και μερικές φορές αμφιβολίτες. Από το κρυσταλλικό υπόβαθρο της Βόρειας Εύβοιας απουσιάζουν παντελώς τα ανθρακικά πετρώματα. Απεναντίας, στην Κεντρική Εύβοια απαντώνται σ' αυτό ενστρώσεις λευκών μαρμάρων (Katsikatsos et al, 1986).

Οι νεοπαλαιζωικοί σχηματισμοί

Είναι λίγο ή καθόλου μεταμορφωμένοι και βρίσκονται με ασυμφωνία επίκλυσης πάνω στο κρυσταλλικό υπόβαθρο. Στην Κεντρική Εύβοια το πάχος τους φτάνει σε μερικές εκατοντάδες μέτρα. Είναι κλαστικά πετρώματα, με ενστρώσεις ασβεστόλιθων, κυρίως στα ανώτερα μέλη τους (στο Πέρμιο). Η επίκλυση των κλαστικών αυτών πετρωμάτων, που στο σύνολο τους αποτελούν μια σειρά σχηματισμών, γίνεται άλλοτε στο Λιθανθρακοφόρο (Κεντρική Εύβοια) και άλλοτε στο Πέρμιο (Βόρεια Εύβοια).

Η νεοπαλαιζωική αυτή σειρά σχηματισμών αποτελείται από λεπτόκοκκους και χονδρόκοκκους ψαμμίτες και σχιστοψαμμίτες, τυπικούς αρκόζες και γραουβάκες και κατά θέσεις αργιλικούς σχιστόλιθους και φυλλίτες, σε εναλλαγές μεταξύ τους. Τοπικά απαντώνται, επίσης, παρεμβολές, μικρού πάχους, μικροκροκαλολατυποπαγών, που αποτελούνται κυρίως από κροκαλολατύπες γνευσιακές – γνευσιοσχιστολιθικές και σχιστολιθικές. Επίσης, στη σειρά αυτή, και κυρίως στο ανώτερο τμήμα της, παρεμβάλλονται με μορφή ενστρώσεων απολιθωματοφόροι ασβεστόλιθοι, κατά κανόνα σκοτεινόχρωμοι και λιγότεροι ανοικτότεφροι. Το πάχος των ενστρώσεων αυτών κυμαίνεται από λίγα έως 50μ. και σε μερικές περιπτώσεις μέχρι και 100μ.

Οι σχηματισμοί του Κατώτερου – Μέσου Τριαδικού

Οι σχηματισμοί αυτοί αποτελούνται βασικά από τρεις κατηγορίες πετρωμάτων, οι οποίες είναι:

- i) Αργιλοψαμμιτικά πετρώματα,
- ii) Βασικά εκρηξιγενή πετρώματα με τους τόφφους τους, που είναι κατά κανόνα υποθαλάσσιες εκχύσεις βασαλτικού μάγματος και
- iii) Ασβεστόλιθοι αβαθούς, γενικά, θάλασσας, που απαντώνται με μορφή φακοειδών ενστρώσεων, με πλούσια, πολλές φορές, χαρακτηριστική πανίδα του Κατώτερου – Μέσου Τριαδικού.

Το πάχος των ασβεστολιθικών αυτών ενστρώσεων φτάνει μερικές φορές τα 150μ. Κατά κανόνα οι κάτω – μεσοτριαδικοί αυτοί σχηματισμοί, που το πάχος τους σε πολλές περιπτώσεις υπερβαίνει τα 500m, βρίσκονται με συμφωνία επίκλυσης πάνω στους παλιότερους σχηματισμούς.

Οι ανωτριάδικοί – ανωιουρασικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες

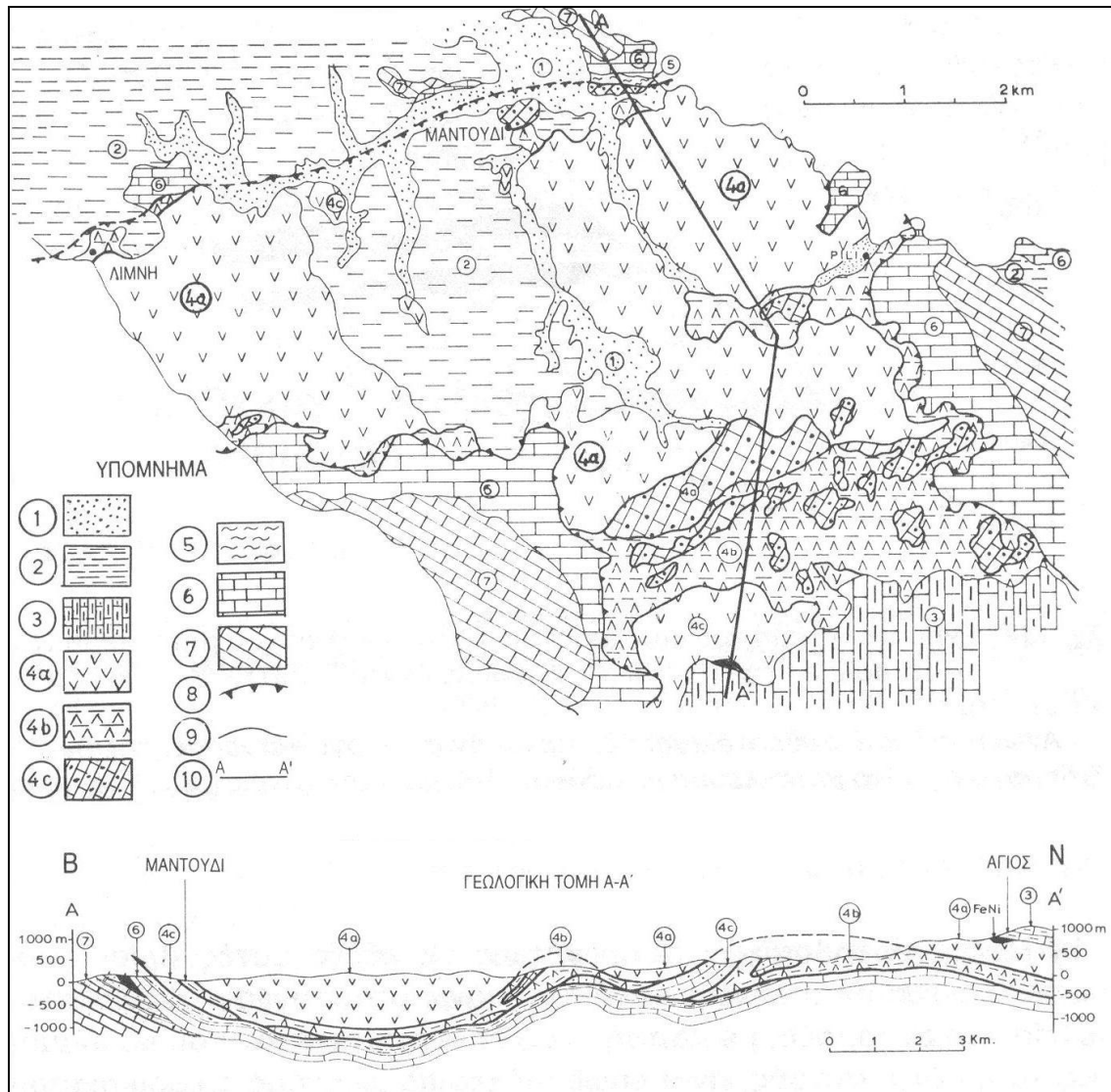
Πρόκειται για ανθρακικά ιζήματα μεγάλου πάχους, πολλές φορές περισσότερο από 1.000μ., που έχουν αποθεθεί σε αβαθή θάλασσα, η περιοχή της οποίας αποτελούσε μια εκτεταμένη υποθαλάσσια τράπεζα (plateforme). Η σχέση των ανωτριάδικών – ανωιουρασικών ανθρακικών σχηματισμών με τους υποκείμενους σ' αυτούς κάτω – μεσοτριάδικούς σχηματισμούς είναι κατά κανόνα σχέση συμφωνίας. Υπάρχουν, όμως, και περιοχές στις οποίες αυτοί βρίσκονται σε στρωματογραφική ασυμφωνία. Η έναρξη των ανωτριάδικών – ανωιουρασικών ασβεστόλιθων και δολομιτών γίνεται κατά κανόνα με ασβεστόλιθους αβαθούς θάλασσας. Σε μερικές, όμως, περιοχές, η έναρξη τους γίνεται με ασβεστόλιθους που φέρουν διαστρώσεις ή βολβούς πυριτόλιθων, σχετικά βαθιάς θάλασσας, που περιέχουν *Filaments* και εναλλάσσονται με κερατόλιθους.

Η προς τα πάνω εξέλιξη των ανθρακικών αυτών ιζημάτων είναι συνεχής μέχρι και το Ανώτερο Ιουρασικό, με μια μόνο διακοπή της ιζηματογένεσης, μεταξύ του Μέσου και του Ανώτερου Ιουρασικού (του Κιμμεριδίου), λόγω ανάδυσης της περιοχής. Στη βάση των επικλυσιγενών ανωιουρασικών ασβεστόλιθων του Κιμμεριδίου της ασυμφωνίας αυτής απαντώνται βωξιτικά κοιτάσματα, μικρών συνήθως διαστάσεων, τα οποία ταυτίζονται με τα κοιτάσματα του 1ου βωξιτικού ορίζοντα (B1) της ζώνης Παρνασσού. Η ανάδυση αυτή της περιοχής φαίνεται ότι οφείλεται στην πρώιμη ορογενετική φάση JE1, η οποία βορειοανατολικότερα, στον εσωτερικό ελλαδικό χώρο, ήταν η αιτία του «κλεισίματος» του ωκεανού της Αλμωπίας και των άλλων μικρών ωκεάνιων λεκανών της παιονικής περιοχής.

Οι σχηματισμοί του οφιολιθικού τεκτονικού καλύμματος

Το τεκτονικό αυτό κάλυμμα, που έχει ονομαστεί και Ηωελληνικό τεκτονικό κάλυμμα, περιλαμβάνει σχηματισμούς ωκεάνιας προέλευσης. Ο ωκεανός αυτός υπήρχε κατά το Τριαδικό – Ιουρασικό ανατολικά του πελαγονικού υβώματος και «έκλεισε» στις αρχές του Κατώτερου Κρητιδικού, με αποτέλεσμα την «εκβολή» απ' αυτόν των εν λόγω σχηματισμών και την προώθηση και τοποθέτηση τους πάνω στην τριαδικό – ιουρασική υποθαλάσσια ανθρακική τράπεζα της Πελαγονικής ζώνης. Πρόκειται δηλαδή για σχηματισμούς ωκεάνιας περιοχής, από οφιολιθικά πετρώματα και βαθιάς θάλασσας ιζήματα, που στο σύνολο τους αποτελούν ένα πρώιμο τεκτονικό κάλυμμα επωθημένο πάνω στην ανθρακική τράπεζα της Πελαγονικής ζώνης. Η έκταση του Ηωελληνικού τεκτονικού καλύμματος είναι πολύ μεγάλη και παρά την προανωκρητιδική διάβρωση

του ένα σημαντικό τμήμα της προανωκρητιδικής πελαγονικής σειράς καλύπτεται από τους σχηματισμούς του καλύμματος αυτού. Εκτεταμένες εμφανίσεις σχηματισμών του Ηωελληνικού τεκτονικού καλύμματος απαντώνται σε πολλές περιοχές της Κεντρικής και Βόρειας Εύβοιας (Σχ. 2.6). Οι παραπάνω ωκεάνιας προέλευσης επωθημένοι σχηματισμοί στο χώρο της Πελαγονικής ζώνης μη μεταμορφωμένων σχηματισμών, οι οποίοι συνιστούν το Ηωελληνικό τεκτονικό κάλυμμα (ονομάζεται και «Προανωκρητιδικό»), διακρίνονται στα εξής κύρια σύνολα σχηματισμών (Σχ. 2.6):



Σχήμα 2.6: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής Μαντουδίου, Βόρειας Εύβοιας, στην οποία απαντώνται σε μεγάλη έκταση σχηματισμοί του Ηωελληνικού καλύμματος, και γεωλογική τομή Α-Α' δια των σχηματισμών αυτών. (Katsikatsos, 1977).

Υπόμνημα: 1: Τεταρτογενείς αποθέσεις, 2: Νεογενείς σχηματισμοί, 3: Ανωκρητιδικό ασβεστόλιθοι, 4: Σχηματισμοί του Ηωελληνικού τεκτονικού καλύμματος (4a: Περιδοτίτες, 4b: Βαθιάς θάλασσας συνοδά ιζήματα με βασικά εκρηξιγενή πετρώματα, 4c: Ασβεστολιθικά τεκτονικά τεμάχια στη βάση του καλύμματος), 5: Πηλίτες, 6: Ανωιουρασικό ασβεστόλιθοι, 7: Ασβεστόλιθοι και δολομίτες του Ανώτερου Τριαδικού-Μέσου Ιουρασικού, 8: Γραμμή επώθησης προανωκρητιδική, 9: Ανώμαλη τεκτονική επαφή, 10: Γεωλογική τομή

✚ Ηφαιστειοϊζηματογενείς σχηματισμοί:

Πρόκειται για σχηματισμούς οι οποίοι συνίστανται: α) Από ιζήματα βαθιάς θάλασσας (ωκεανού) και των παρυφών της, όπως ραδιολαρίτες, πηλίτες και λεπτοπλακώδεις ασβεστολίθους με διαστρώσεις πυριτόλιθων, και β) Από υποθαλάσσιες εκχύσεις βασικών εκρηξιγενών πετρωμάτων, όπως βασαλτών και διαβασών, οι οποίοι έχουν υποστεί έντονη σπλιτίωση και εμφανίζονται, γενικά, με μορφή pillow – lavas.

Οι ηφαιστειοϊζηματογενείς αυτοί σχηματισμοί βαθιάς θάλασσας συνήθως υπόκεινται των υπερβασικών μαζών, και μαζί με τις υπερκείμενες αυτές μάζες είναι επωθημένοι πάνω σε τριαδικοϊουρασικά ανθρακικά πετρώματα της Πελαγονικής ζώνης μη μεταμορφωμένων σχηματισμών, που είναι κυρίως ανωϊουρασικής ηλικίας. Στη βάση τους οι σχηματισμοί αυτοί, των οποίων το πάχος, συνήθως, υπερβαίνει τα 300μ., είναι έντονα τεκτονισμένοι και συνιστούν ένα τυπικό mélange σχηματισμών.

Πολλές φορές, στη βάση των ηφαιστειοϊζηματογενών αυτών σχηματισμών έχουν τεκτονικά παρεισφρήσει και άλλοι σχηματισμοί, οι οποίοι δεν προέρχονται από τη βαθιά ωκεάνια θάλασσα ή από τις παρυφές της, αλλά έχουν ξεριζωθεί από το υποκείμενο πελαγονικό ύβωμα και έχουν παρασυρθεί από το Ηωελληνικό τεκτονικό κάλυμμα κατά την προώθηση του πάνω στους σχηματισμούς του υβώματος αυτού.

✚ Μάζες υπερβασικών πετρωμάτων:

Οι μάζες αυτές βρίσκονται τεκτονικά τοποθετημένες, συνήθως, πάνω στους ηφαιστειοϊζηματογενείς σχηματισμούς, με μορφή ενός δεύτερου τεκτονικού καλύμματος και μαζί με αυτούς είναι επωθημένες πάνω στους τριαδικοϊουρασικούς σχηματισμούς της Πελαγονικής ζώνης. Η έκταση του οφιολιθικού αυτού καλύμματος, παρά την προανωκρητιδική διάβρωση του, είναι μεγάλη. Οι σημαντικότερες εμφανίσεις του καλύμματος αυτού απαντώνται σε πολλές περιοχές της Εύβοιας, της Αττικής, της Βοιωτίας, της Λοκρίδας, της Όθρυος, της Πίνδου κ.α.. Οι οφιολιθικές αυτές μάζες συνίστανται κυρίως από σερπεντινωμένους περιδοτίτες, οι οποίοι εγκλείουν κοιτάσματα λευκόλιθου και μερικές φορές κοιτάσματα χρωμίτη, με εξαίρεση τα υπερβασικά της Πίνδου (ζώνη θετικών ανωμαλιών θερμοκρασίας και ροής θερμότητας) όπου δεν φιλοξενούνται κοιτάσματα μαγνησίτη (Σερέλης κ ά. 2004).

Οφιολιθική σειρά «Παγώντα»

➤ **α. Σερπεντινωμένοι περιδοτίτες (χαρτσβουργίτες)**

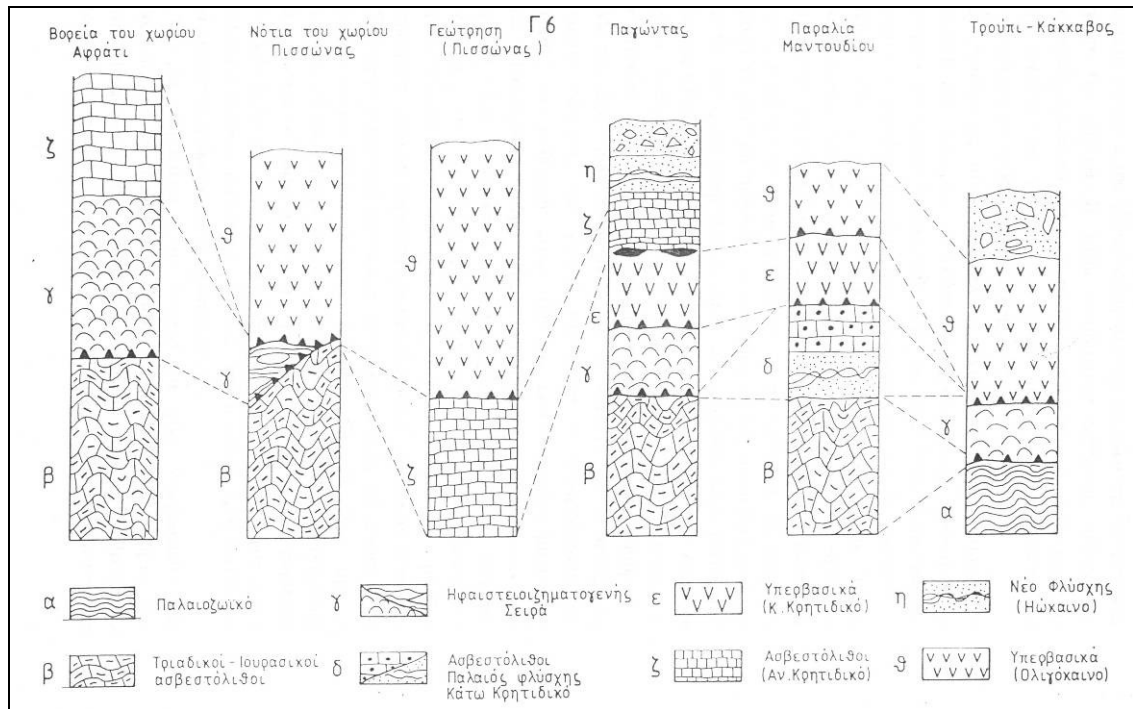
Τα κύρια χαρακτηριστικά τους είναι, αφενός μεν η ισχυρή τεκτονική παραμόρφωση, αφετέρου δε η προχωρημένη εξαλλοίωση, η οποία εκδηλώνεται με αυξημένη σερπεντινώση, κυρίως του ολιβίνη, και με μερική μετατροπή των πυροξένων σε ακτινόλιθο, ο οποίος σε ορισμένες θέσεις μετατρέπεται σε αμίαντο. Σε μικροσκοπικό επίπεδο είναι δυνατό να διακριθούν εναλλαγές δουνίτη – χαρτσβουργίτη. Τα χαρτσβουργιτικά τμήματα παρουσιάζουν μεγαλύτερο πάχος και αποτελούνται κυρίως από ορθοπυρόξενο. Σαν συμπληρωματικά ορυκτά των χαρτσβουργιτικών εναλλαγών αναφέρονται ο χρωμίτης και ο γλωρίτης σαν προϊόν περαιτέρω εξαλλοίωσης από σερπεντίνη και ακτινόλιθο. Οι ολιβινικές εναλλαγές είναι λεπτές και αποτελούνται από κυψελώδη σερπεντίνη, υπολλειματικές νησίδες ολιβίνη, λίγους κρυστάλλους πυρόξενων, λεπτόκοκκο μαγνητίτη εξαλλοιωμένο κατά θέσεις σε υδροξειδία του σιδήρου, μερικούς κόκκους χρωμίτη και λίγο τάλκη. Στα ολιβινικά λείψανα είναι εμφανή τα στοιχεία της τεκτονικής παραμόρφωσης.

➤ **β. Γάββρος (Ροδινγιτιωμένος γάββρος).**

Η μάζα του πετρώματος συνίσταται από ορυκτά πρωτογενή και από παράγωγα εξαλλοίωσης. Τα πρώτα αντιπροσωπεύονται από κλινοπυρόξενο, οι κρύσταλλοι του οποίου, μεμονωμένοι ή σε συναθροίσματα, είναι υγιείς ή ελαφρά εξαλλοιωμένοι, ακέραιοι ή σε λείψανα παρουσιάζουν σωρευτικό ιστολογικό χαρακτήρα και περιβάλλονται από μια ισότροπη μάζα. Η ισότροπη μάζα αποτελείται από γρανάτη, μαζί με λίγο σερπεντίνη, γλωρίτη και ακτινόλιθο, και αποτελεί το προϊόν της εξαλλοίωσης, η οποία έχει προσβάλλει το πέτρωμα και λόγω των παραπάνω προϊόντων χαρακτηρίζεται σαν ροδινγκιτίωση. Η ροδινγκιτίωση, σαν είδος εξαλλοίωσης, είναι πολύ διαδεδομένη στα γαββρικά κυρίως πετρώματα οφιολιθικών σειρών και είναι αποτέλεσμα της υδροθερμικής μετενσωμάτωσης η οποία παρουσιάζεται σε τέτοιες σειρές.

➤ **γ. Αμφιβολίτης.**

Πρόκειται για βασικό μεταμορφωμένο πέτρωμα, στην σύσταση του οποίου συμμετέχουν, σαν κύριες ορυκτολογικές φάσεις, ο αμφίβολος και το βασικό πλαγιόκλαστο.



Σχήμα 2.7: Σχηματικές στρωματογραφικές στήλες στην Κεντρική και Βόρεια Εύβοια ενδεικτικές των μεταβολών πάχους των διαφόρων σχηματισμών (Δούτσος, 2002)

Η παραπάνω παραγένεση δηλώνει ότι το συγκεκριμένο πέτρωμα έχει μεταμορφωθεί σε συνθήκες κατώτερης αμφιβολιτικής φάσης, η οποία σημειώνεται στο όριο φλοιού μανδύα. Στη συνέχεια, από υδροθερμική εξαλλοίωση, μετασχηματίστηκε ο αρχικός αμφίβολος και τα πλαγιόκλαστα. Έτσι ο αμφίβολος, ο οποίος αρχικά ήταν κεροστίλβη, μετατρέπεται σε ακτινόλιθο και τα πλαγιόκλαστα αντικαθίστανται από πρενίτη και επίδοτο. Σαν συμπληρωματικά ορυκτολογικά συστατικά απαντώνται τιτανίτης, ρουτίλιο, υδροξείδια του σιδήρου και χλωρίτης.

➤ δ. Διαβάσες, Βασάλτες (Pillow lavas).

Τα παραπάνω πετρώματα αντιπροσωπεύουν τα ηφαιστειακά μέλη της οφιολιθικής σειράς και, παρά τις επιμέρους διαφορές που παρουσιάζουν, ανήκουν στην κατηγορία των βασαλτών. Ο ιστός είναι πορφυριτικός και οι φαινοκρύσταλλοι αντιπροσωπεύονται κύρια από βασικά πλαγιόκλαστα και από κλινοπυρόξενο. Η θεμελιώδης μάζα των *pillow lavas* αποτελείται από αστριούχο υλικό. Άφθονος αιματίτης συμμετέχει σ' όλη την έκταση του πετρώματος και σ' αυτό οφείλεται το χαρακτηριστικό καστανέρυθρο χρώμα.

Η υδροθερμική δραστηριότητα έχει επιφέρει σημαντικές αλλαγές στο πέτρωμα, όπως εξαλλοίωση των πλαγιόκλαστων σε αργιλικά, χλωρίτη και ασβεστίτη και πλήρωση

πόρων και διακλάσεων από ασβεστίτη. Γενικά οι διαβάσεις (pillow lavas) είναι τεκτονικά παραμορφωμένοι και υδροθερμικά εξαλλοιωμένοι σε διάφορες φάσεις.

✚ **Υπερβασική σειρά «Μαντουδίου – Πισώνα»**

➤ **α. Χαρτσβουργίτες**

Το πέτρωμα ανήκει χημικά και ορυκτολογικά στους τεκτονίτες και έχει πορφυροκλαστικό ιστό με αρκετό νεοβλαστικό υλικό. Ο ολιβίνης και οι ορθοπυρόξενιοι παρουσιάζουν ισχυρή τεκτονική παραμόρφωση και πολύ ελαφρά σερπεντινίωση. Περιέχει λίγο χρωμίτη.

Ως κυρίαρχα χαρακτηριστικά των υπερβασικών της «σειράς Μαντουδίου» θεωρούνται η πολύ ελαφρά σερπεντινίωση και η έλλειψη δομών ημιπλαστικής (ductile) παραμόρφωσης. Η σερπεντινίωση στην εν λόγω σειρά είναι επιφανειακή και οφείλεται στα υδροθερμικά διαλύματα που δημιούργησαν τα κοιτάσματα, μαγνησίτη και δεν οφείλεται σε αυτοϋδρόλυση του υπερβασικού, όπως στην «σειρά Παγώντα». Πέρα από τη μεταμόρφωση βάθους παρατηρείται και μεταμόρφωση επιφανείας μέσα σε τεκτονικές ζώνες (Ρήγμα Νέου Παγώντα) όπου η παραμόρφωση είναι πολύ ισχυρή και η παρουσία διαλυμάτων προφανής. Τέτοιοι σχηματισμοί παρατηρούνται μέσα στο τεκτονικό mélange, που παρατηρείται κατά μήκος του παραπάνω ρήγματος, όπου η μεταμόρφωση συνοδεύεται και από φαινόμενα μετενσωμάτωσης. Παράγωγα των παραπάνω διαδικασιών, λόγω δυναμικής ολίσθησης στην ρηξιγενή ζώνη, είναι αμφιβολίτες από βασάλτες, οφιτοασβεστίτες από υπερβασικά καθώς δολομίτες από μετενσωμάτωση ανθρακικών σε σερπεντίνες.

✚ **Τεκτονικό mélange «Νέου Παγώντα»**

➤ **α. Αμφιβολίτες από βασάλτες (pillow)**

Στην σύσταση του πετρώματος συμμετέχουν δύο κύρια ορυκτολογικά συστατικά. Ένας πράσινος αμφίβολος που κυριαρχεί ποσοτικά και ο πρενίτης, ο οποίος είναι δευτερογενής και καταλαμβάνει τις κατακλαστικές επιφάνειες του πετρώματος και τους μεταξύ των αμφιβόλων υπάρχοντες χώρους. Ο πρενίτης αποτελεί προϊόν εξαλλοίωσης αρχικών πλαγιοκλάστων από υδροθερμικά διαλύματα, υπόλοιπα των οποίων όμως δεν σώζονται για να αποδειχθεί η γενετική σχέση των δύο ορυκτών. Σαν επουσιώδη ορυκτολογικά συστατικά συναντώνται ελάχιστος τιτανίτης και επίδοτο, κόκκοι

υδροξειδίων του σιδήρου και λίγο άμορφο οξείδιο του πυριτίου σε μικροφλεβίδια (SiO_2).

➤ β. Οφιτοασβεστίτες

Το πέτρωμα αποτελείται από μια κατακλαστική ασβεστιτική μάζα η οποία περιέχει εγκλωβισμένα λείψανα σερπεντινίτη, διάσπαρτους κόκκους χρωμίτη και μαγνησίτη, καθώς και χαλαζία (SiO_2) σε διάσπαρτα συσσωματώματα. Η γένεση του πετρώματος είναι αποτέλεσμα μιας σύνθετης διαδικασίας, η οποία περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

Τεκτονισμός αρχικού υπερβασικού, κυκλοφορία ανθρακικών διαλυμάτων, ασβεστιτική μετενσωμάτωση του σερπεντινίτη, κυκλοφορία πυριτικών διαλυμάτων και εκ νέου κατάκλαση. Οι αρχικοί σερπεντινίτες από τους οποίους προέρχονται οι οφιτοασβεστίτες είναι πετρώματα που ανήκουν στα υπερβασικά της «σειράς Παγώντα».

🚧 *Μεταλλοφορία των υπερβασικών σε Μαγνησίτη*

Ο μαγνησίτης μπορεί να σχηματιστεί υδροθερμικά σαν παραπροϊόν κατά την σερπεντινίωση πυριτικών του μαγνησίου, ιδιαίτερα ολιβινικών μεταμορφιτών, και κατά την αυτουδροθερμική μετατροπή μαγνησιούχων μαγματιτών. Κατά την καταστροφή σερπεντινιτών σε συμπαγείς μεταμορφίτες λόγω υδατικής προσβολής αποχωρίζεται συχνά σε κοιλάτητες και σε κομμάτια (λείψανα) ένας σχετικά καθαρός γελοειδής μαγνησίτης ο οποίος είναι αρχικά άμορφος και συχνά συνοδεύεται από οπάλιο.

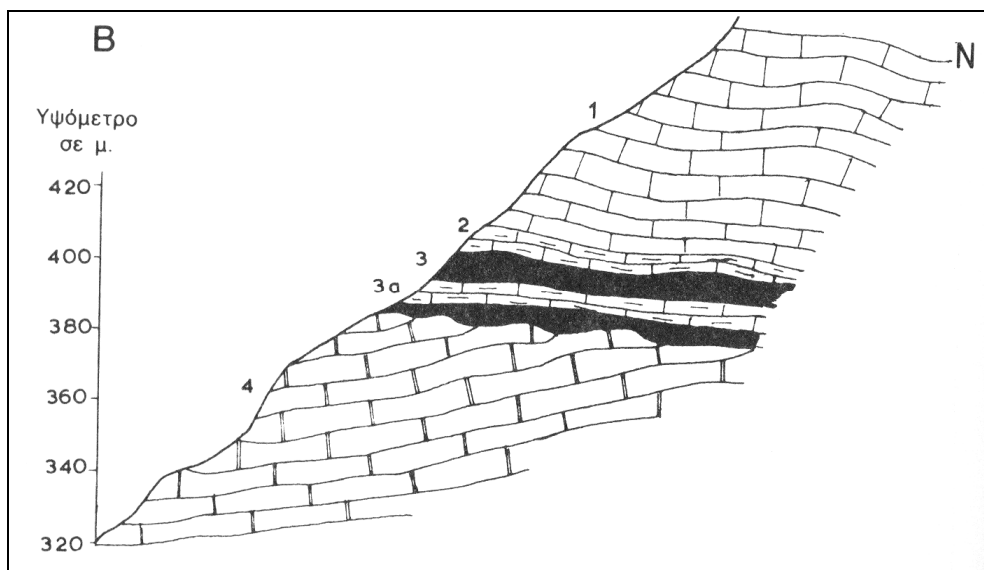
Τα υδατικά διαλύματα που δημιούργησαν τα κοιτάσματα μαγνησίτη στη Β. Εύβοια προξένησαν και εξαλλοιώσεις στα περιβάλλοντα υπερβασικά πετρώματα (Gartzos 1986, Σερέλης 1989). Τα κοιτάσματα αυτά και οι συνδεδεμένες με αυτά εξαλλοιώσεις καθορίζονται από τα κανονικά ρήγματα και τις αντίστοιχες ρηξιγενείς ζώνες της περιοχής. Τα μεταλλεύματα λευκόλιθου της ευρύτερης περιοχής Μαντουδίου – Προκοπίου οφείλουν τη γένεσή τους σε επιθερμικά διαλύματα πλούσια σε MgO και CO_2 . Τα ένυδρα αυτά διαλύματα, μέσων έως χαμηλών θερμοκρασιών ($250^\circ - 350^\circ \text{C}$) και χαμηλής αλατότητας κατέρχονται δια μέσου των ασυνεχειών του κατακλαστικού δικτύου των διαφόρων λιθολογικών τύπων. Κατά την κάθοδο τους αυξάνεται η εσωτερική τους ενέργεια λόγω αύξησης της πίεσης και της θερμοκρασίας, και προσβάλλονται οι ανθρακικοί σχηματισμοί του υποβάθρου και οι κατώτεροι χώροι του υπερβασικού μέσω των ζωνών υψηλής παραμόρφωσης (Gartzos 1986, Σερέλης 1989).

Η διάλυση του ασβεστίτη (CaCO_3) και του ολιβίνη ($\text{Mg}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{Fe}_2\text{SiO}_4$) εμπλουτίζει το σύστημα με μεταλλικές και μη μεταλλικές φάσεις οι οποίες παραμένουν κατ' αρχήν εν

διαλύσει. Καθώς τα διαλύματα, αρχίζουν να ανέρχονται ψύχονται και αποσυμπιέζονται, χάνουν την εσωτερική τους ενέργεια και αρχίζουν να αποβάλλουν το φορτίο τους εκλεκτικά και ανάλογα με τη διαλυτότητα των διαφόρων φάσεων σε ανώτερους στρωματογραφικά χώρους του υπερβασικού. Ταυτόχρονα, λόγω πτώσης της πίεσης τα διαλύματα αποσυμπιέζονται και αναβράζουν, διαβρώνουν το πέτρωμα (υδροθερμική διάβρωση) και ελευθερώνουν τις πιο πτητικές φάσεις (CO₂ και υδρατμούς).

🚩 Οι ανωκρητιδικοί επικλυσιογενείς ασβεστόλιθοι

Έχουν πάχος που κυμαίνεται από 150 έως και 600μ. Η έναρξη της απόθεσης τους γίνεται συνήθως στο Κενομάνιο και συνεχίζονται μέχρι και το Μαιστρίχτιο. Στην Κεντρική Εύβοια, Βόρεια Αττική, Βοιωτία, Σκύρο και Σκόπελο, στη βάση των ασβεστόλιθων αυτών απαντώνται πολλά μεγάλα κοιτάσματα σιδηρονικελιούχου μεταλλεύματος (Σχ. 2.8). Επίσης, μερικές φορές στη βάση των ασβεστόλιθων αυτών απαντώνται βωξιτικά κοιτάσματα. Οι ασβεστόλιθοι του ορίζοντα αυτού είναι πάντοτε νηριτικοί εκτός από τους ασβεστόλιθους του Μαιστριχτίου που είναι πελαγικοί.



Σχήμα 2.8: Σχηματική τομή του κοιτάσματος σιδηρονικελιούχου μεταλλεύματος «Κατάβολος» της Κεντρικής Εύβοιας. (Κατσικάτσος κ.ά., 1992). 1: Ανωκρητιδικοί ασβεστόλιθοι, 2: Κενομάνιοι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, 3: Σιδηρονικελιούχο μέταλλευμα με ασβεστολιθικές ενστρώσεις (3α) 4: Ιουρασικοί ασβεστόλιθοι

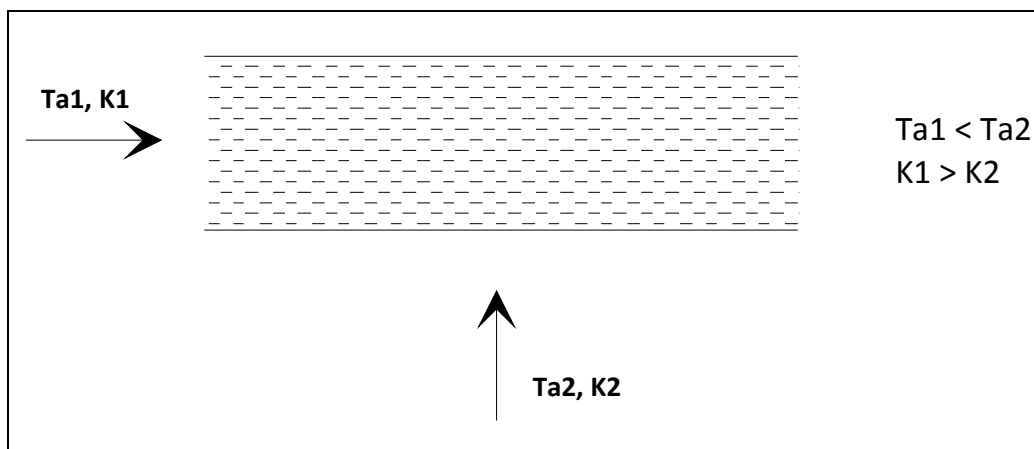
🚩 Ο Φλύσσης

Οι μαιστρίχτιοι ασβεστόλιθοι μεταβαίνουν βαθμιαία προς τα πάνω σε ιζήματα του φλύσσης, που συνίστανται κυρίως από ψαμμίτες και αργιλικούς σχιστόλιθους.

2.5 Γεωλογία της περιοχής μελέτης

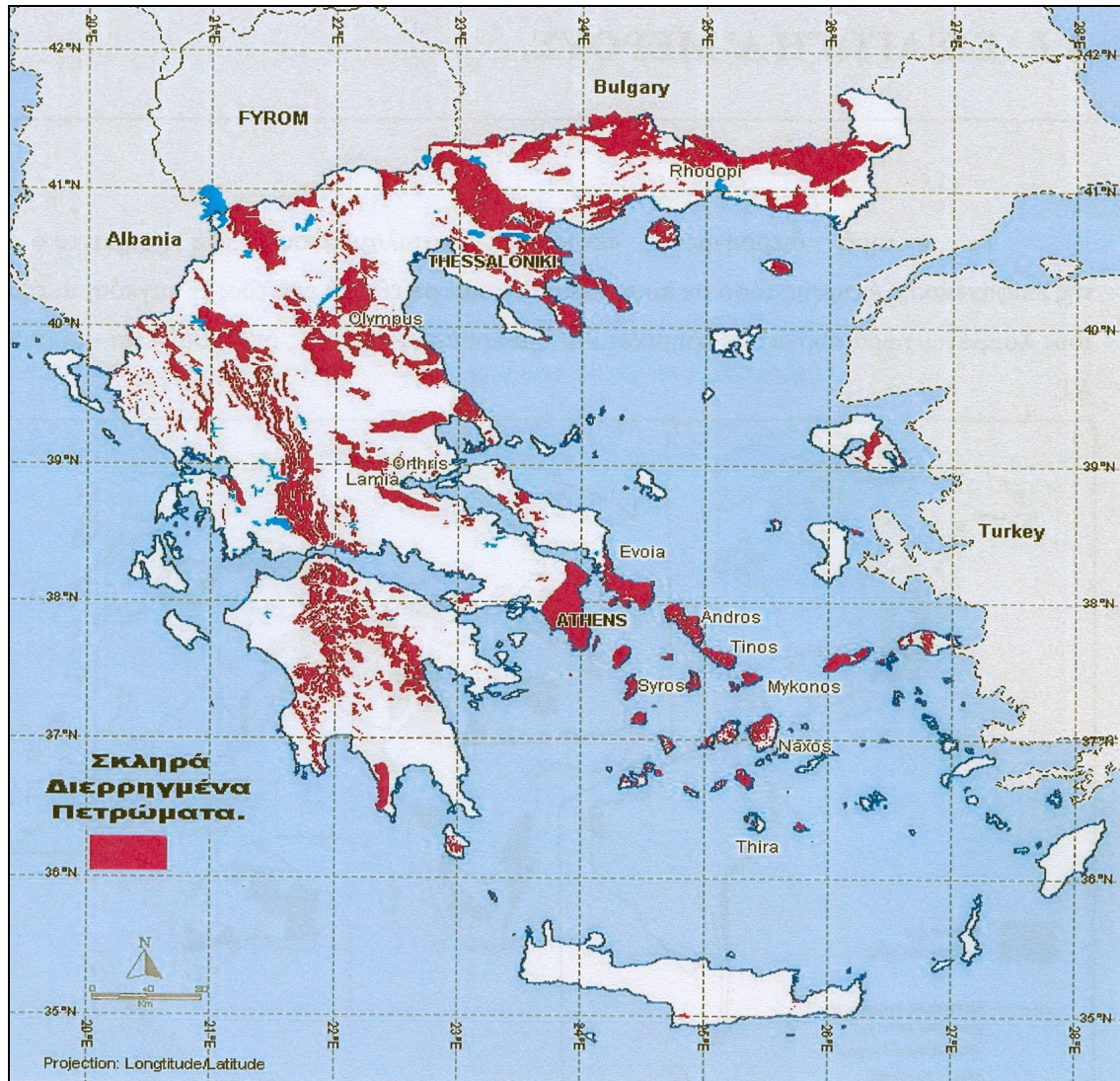
Στην περιοχή έρευνας τα πετρώματα τα οποία απαντώνται ανήκουν στην ευρύτερη οικογένεια των βασικών και υπερβασικών πετρωμάτων. Πρόκειται για το σύνολο των οφιολίθων και των διαβάσεων που σε υγιή κατάσταση εμφανίζουν μεγάλες αντοχές και έχουν την ικανότητα να δεχτούν οποιοδήποτε τεχνικό έργο, κάτι που όμως δεν αποτελεί συνηθισμένη κατάσταση καθώς λόγω της σκληρότητάς τους και των ρωγματώσεων που εμφανίζουν, εύκολα, αποσυμπιέζονται οι γεωστατικές τάσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ρωγμάτωσή τους να φτάνει στη δημιουργία ενός σημαντικού δευτερογενούς πορώδους με υδρογεωλογικό ενδιαφέρον. Όσον αφορά τα ηφαιστειακά πετρώματα, γενικά, παρουσιάζουν μεγάλες αντοχές, αποτελώντας πετρώματα πολύ καλής θεμελίωσης και αντοχής και καλής παραμονής σε ψηλά πρηνή. Το πρόβλημα που παρουσιάζουν, όσον αφορά τα τεχνικά έργα, είναι ότι εμφανίζουν σημαντικό δευτερογενές πορώδες (ασυνέχειες) που έχει πρωτογενή και δευτερογενή προέλευση. Οι ασυνέχειες δημιουργούνται σε πρώτη φάση από την απότομη ψύξη του μάγματος, ενώ ο επακόλουθος τεκτονισμός τους οδηγεί στην ανάπτυξη δευτερογενούς πορώδους σε μεγάλη έκταση, βάθος και πυκνότητα, ώστε ο σχηματισμός να αποκτά ουσιαστικό υδρογεωλογικό ενδιαφέρον.

Τέλος γενικά τα μεταμορφωμένα πετρώματα έχουν ως βασικό χαρακτηριστικό τους γνώρισμα την ύπαρξη ανισοτροπίας (Σχ. 2.9). Τα επίπεδα που σχηματίζονται με την παράλληλη διάταξη των ορυκτών αντιπροσωπεύουν επίπεδα αδυναμίας, ιδιαίτερα αν συγκεντρώνονται ορυκτά μειωμένης αντοχής ή αν η αποσάθρωση ευνοείται κατά μήκος των επιπέδων αυτών.



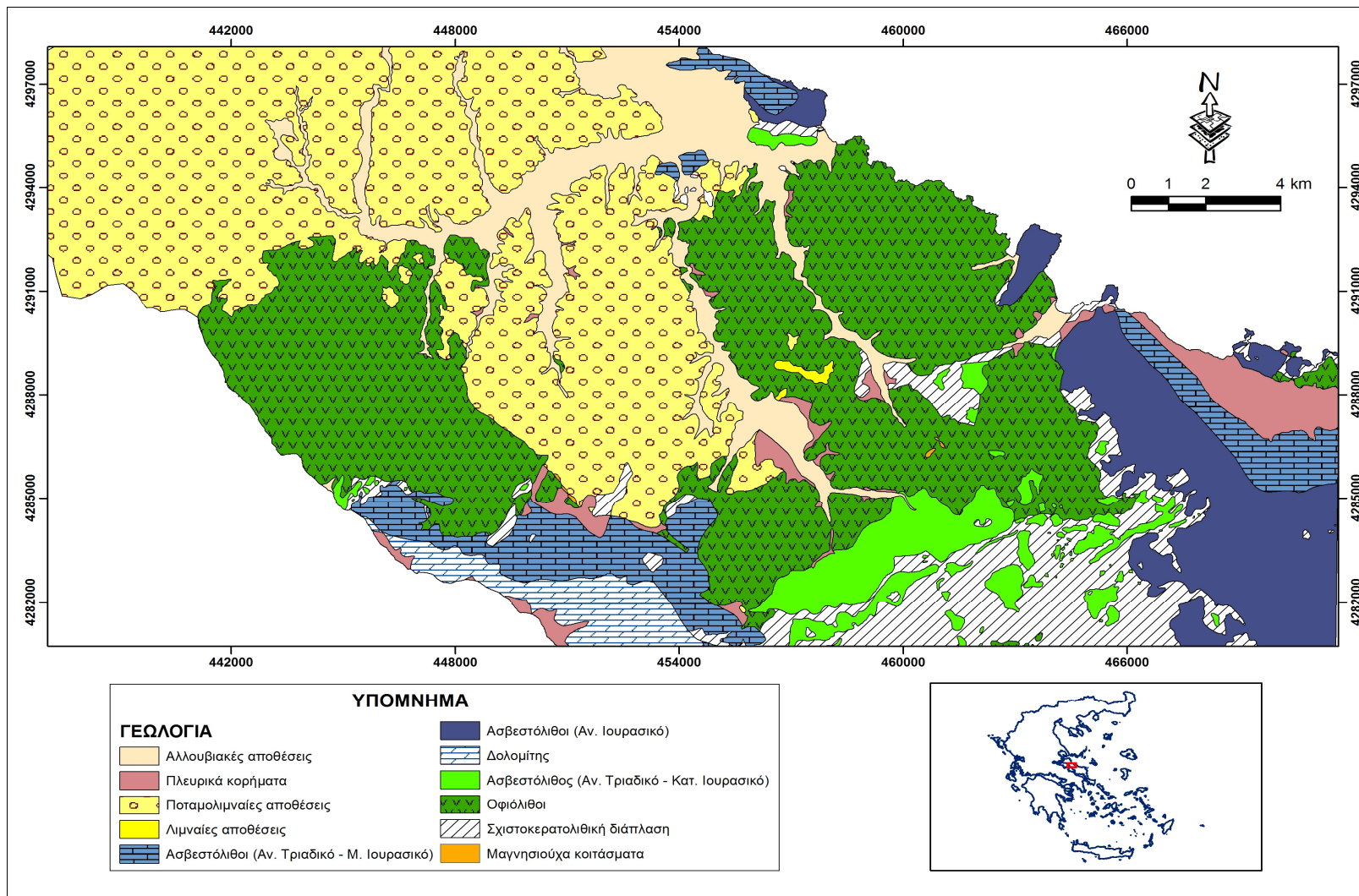
Σχήμα 2.9: Σκαρίφημα υδραυλικής και μηχανικής συμπεριφοράς των μεταμορφωμένων πετρωμάτων εξαιτίας του φαινομένου της ανισοτροπίας (Ta : διατμητική τάση, K : υδραυλική αγωγιμότητα)

Επομένως ότι τα κυρίαρχα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά των διερρηγμένων πετρωμάτων ανεξαρτήτως της λιθολογίας, είναι η επικράτηση του δευτερογενούς πορώδους έναντι του πρωτογενούς, και οι γενικά χαμηλότερες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας σε σχέση με άλλους τύπους πετρωμάτων όπως είναι για παράδειγμα οι καρστικοποιημένοι ασβεστόλιθοι.

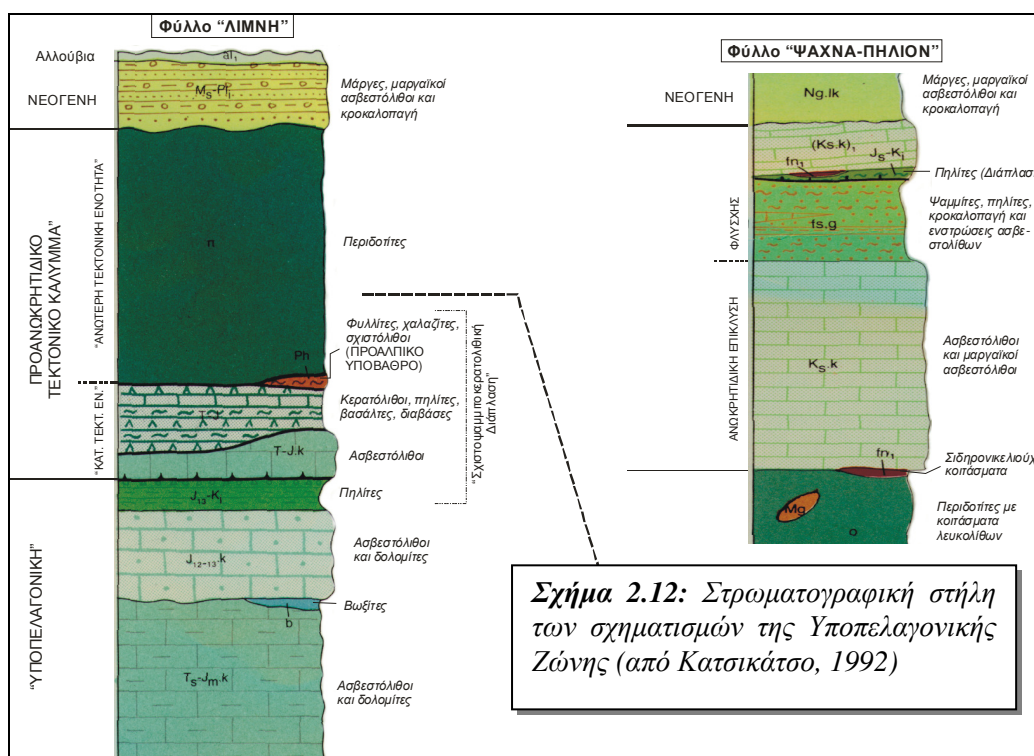


Σχήμα 2.10: Τα σκληρά διερρηγμένα πετρώματα στην Ελλάδα (Στουρνάρας κ. ά. 2003)

Αναλυτικά η στρωματογραφία των σχηματισμών της Υποπελαγονικής ζώνης στην περιοχή έρευνας σύμφωνα με τους γεωλογικούς χάρτες του Ι.Γ.Μ.Ε. κλίμακας 1:50.000 (Φύλλο Λάρυμνα (Κατσικάτσος κ. ά. 1978), φύλλο Λίμνη (Κατσικάτσος κ. ά. 1980) και φύλλο Ψαχνά – Πήλιον (Κατσικάτσος κ. ά. 1981), σε συνδυασμό με υπαίθριες παρατηρήσεις) έχει ως ακολούθως (Σχ. 2.11):



Σχήμα 2.11: Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής μελέτης (Κατσικάτσος κ α., 1978, 1980, 1981, με τροποποιήσεις)



2.6 Ρηγματογόνος τεκτονική

Συστηματική τεκτονική μελέτη (καταγραφή και χαρτογράφηση των ασυνεχειών, διαρρήξεων) της περιοχής ενδιαφέροντος έδειξε ότι πρόκειται κυρίως για τεκτονικές επιφάνειες, τόσο συμπίεσης όσο και εφελκυσμού, με ποικίλα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά, οι οποίες σχετίζονται με διαφορετικές φάσεις και στάδια παραμόρφωσης.

Από τις παρατηρήσεις υπαίθρου, τις αναλύσεις δορυφορικών εικόνων και αεροφωτογραφιών έγινε αναγνώριση των εξής τεκτονικών δομών:

Τα ρήγματα που απαντούν στην περιοχή μελέτης αναπτύσσονται κυρίως κατά μήκος δύο διευθύνσεων, μιας ΒΑ – ΝΔ και μιας ΒΒΔ – ΝΝΑ έως ΒΔ – ΝΑ. Τα πρώτα ρήγματα έχουν παρατηρηθεί και σε πλειστοκαινικούς σχηματισμούς (Φυτρολάκης, 1986) γεγονός που δείχνει ότι αυτά πιθανόν να είναι και τα νεότερα. Τα κύρια ρήγματα (μεγάλα) άρχισαν να σχηματίζονται από την αρχή του Νεογενούς. Είναι πολυάριθμα και γενικώς μεγάλου άλματος. Πολλές φορές συμπίπτουν με τους άξονες των χαραδρώσεων της περιοχής. Οι απόκρημνες ακτές του Αιγαίου πελάγους και του Ευβοϊκού κόλπου οφείλονται στα εν λόγω ρήγματα.

Βέβαια στην περιοχή μελέτης απαντούν και παλαιότερες δομές δεδομένου ότι η Υποπελαγονική ζώνη δέχτηκε μια πρώιμη ορογένεση κατά Αν. Ιουρασικό – Κάτω Κρητιδικό που προκάλεσε τότε την πρώτη σημαντική ανάδυσή της και την τεκτονική

τοποθέτηση των οφιολίθων. Μια τέτοια παλαιότερη δομή είναι η προανανωκρητιδική επωθητική γραμμή που από την Λίμνη καταλήγει στον όρμο του Μαντουδίου.

Η ρηγματογόνος τεκτονική, ελέγχει σε μεγάλο βαθμό την ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου (Σχ. 2.13). Παρατηρώντας το σχήμα 2.13 διαπιστώνεται η συσχέτιση των ρηξιγενών ζωνών με την ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου. Η διαπίστωση αυτή επιβεβαιώνεται και με το γεγονός ότι το υδρογραφικό δίκτυο είναι κατά κύριο λόγο πολύ περισσότερο ανεπτυγμένο στο ΒΑ/κό του τμήμα, όπου η εμφάνιση διαρρήξεων είναι πολύ πιο έντονη.

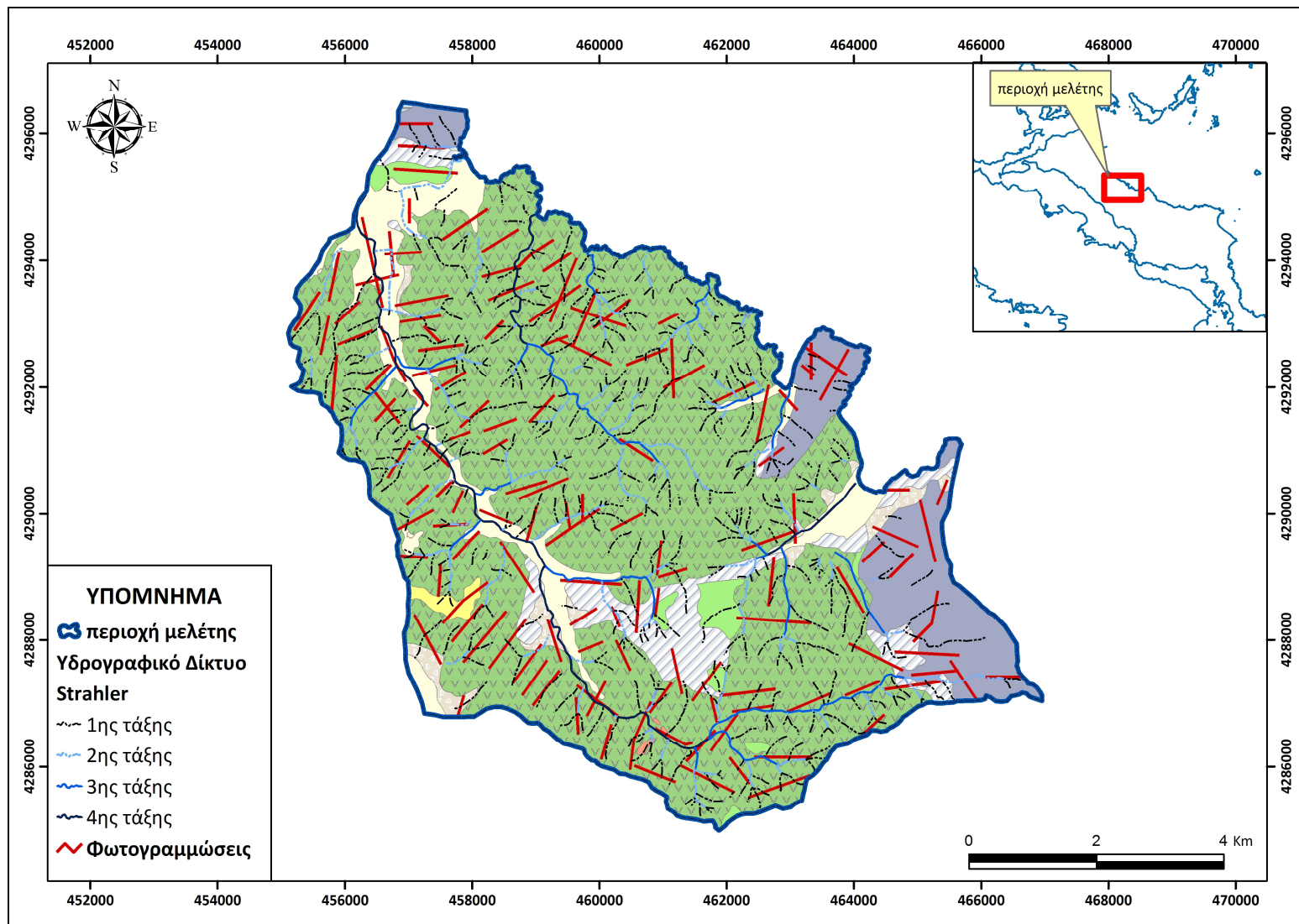
Οι πτυχές που συναντάμε στην περιοχή ανήκουν σε δύο συστήματα, το ένα με διεύθυνση Α – Δ και το άλλο με ΒΔ – ΝΑ διεύθυνση.

ο Σύστημα πτυχών Α – Δ: Πρόκειται για πτυχές, που παρατηρούνται κυρίως στο νότιο τμήμα της εξετασθείσας περιοχής. Παραδείγματα τέτοιων πτυχών αποτελούν το αντίκλινο του φαραγγιού του Προκοπίου και το αντίκλινο Πηλίου – Αγ. Τρίτης, στον πυρήνα του οποίου αποκαλύπτονται οι υποκείμενοι των οφιολίθων, σχιστοκερατόλιθοι.

ο Σύστημα πτυχών ΒΔ – ΝΑ: Οι πτυχές αυτές επικρατούν στην περιοχή και αντιπροσωπευτικότερα παραδείγματα αυτών είναι τα αντίκλινα του Πυξάρια και του Κανδηλίου, καθώς και το μεταξύ αυτών διαμορφωμένο σύγκλινο.

Η ανάπτυξη συμπίπτει κατά κανόνα με τις κυρίαρχες επιφάνειες που διαχωρίζουν τις τεκτονικές ενότητες (επωθήσεις και επιπτεύσεις).

Η αλπική τεκτονική δομή είναι πολύπλοκη, όπου εκτός από τη μεγάλη τεκτονική γραμμή της επώθησης των οφιολίθων εντοπίζονται και άλλες τέτοιες ζώνες μεγάλης κλίμακας ανάμεσα στους αλπικούς σχηματισμούς, δημιουργώντας αρκετές λεπιώσεις, με χαρακτηριστικότερη περίπτωση τη μεγάλη τεκτονική επαφή που αναπτύσσεται παράλληλα με το Νηλέα ποταμό φέρνοντας το νότιο τμήμα της περιοχής να επωθείται πάνω στο βόρειο. Οι επιφάνειες αυτές διακόπτονται και τεμαχίζονται επίσης από ένα μεγάλο πλήθος ρηγμάτων μικρής αλλά και μεγάλης κλίμακας. Η συνολική δομή που προκύπτει, καθορίζει δραματικά την υδροφορία των σχηματισμών (Λέκκας κ ά. 1998).



Σχήμα 2.13: Χάρτης κυριότερων φωτογραμμώσεων της περιοχής μελέτης

2.7 Μελέτη ασυνεχειών

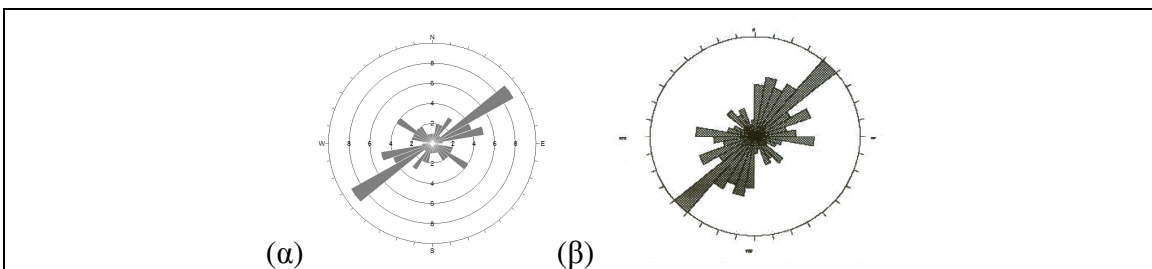
Από τη γεωλογική και τεκτονική μελέτη της περιοχής σε συνδυασμό με τις υπαίθριες εργασίες που πραγματοποιήθηκαν έγινε μια αποτύπωση των χαρακτηριστικών των ασυνεχειών που εντοπίζονται στο σύνολο της οφιολιθικής μάζας (Σχ. 2.14).

Τα στοιχεία και τα συμπεράσματα στηρίχθηκαν στις υπαίθριες παρατηρήσεις και στις μετρήσεις 100 επιλεγμένων θέσεων καταγραφής (in situ) καθώς επίσης και στη μελέτη αεροφωτογραφιών. Όλες οι επιφάνειες των ασυνεχειών είναι κατά βάση κλειστές (πληρωμένες), παρά το γεγονός ότι εμφανίζονται σε περιοχές με έντονο κερματισμό (κατακλαστικές ζώνες). Το φαινόμενο αυτό συσχετίζεται άμεσα με την ύπαρξη ήπιου αναγλύφου (μικρές μορφολογικές κλίσεις) που επιτρέπουν την απόθεση αργιλικού υλικού στην επιφάνεια των ασυνεχειών και για αυτό σε κάποιο βαθμό χαρακτηρίζονται εν μέρει ανενεργές.

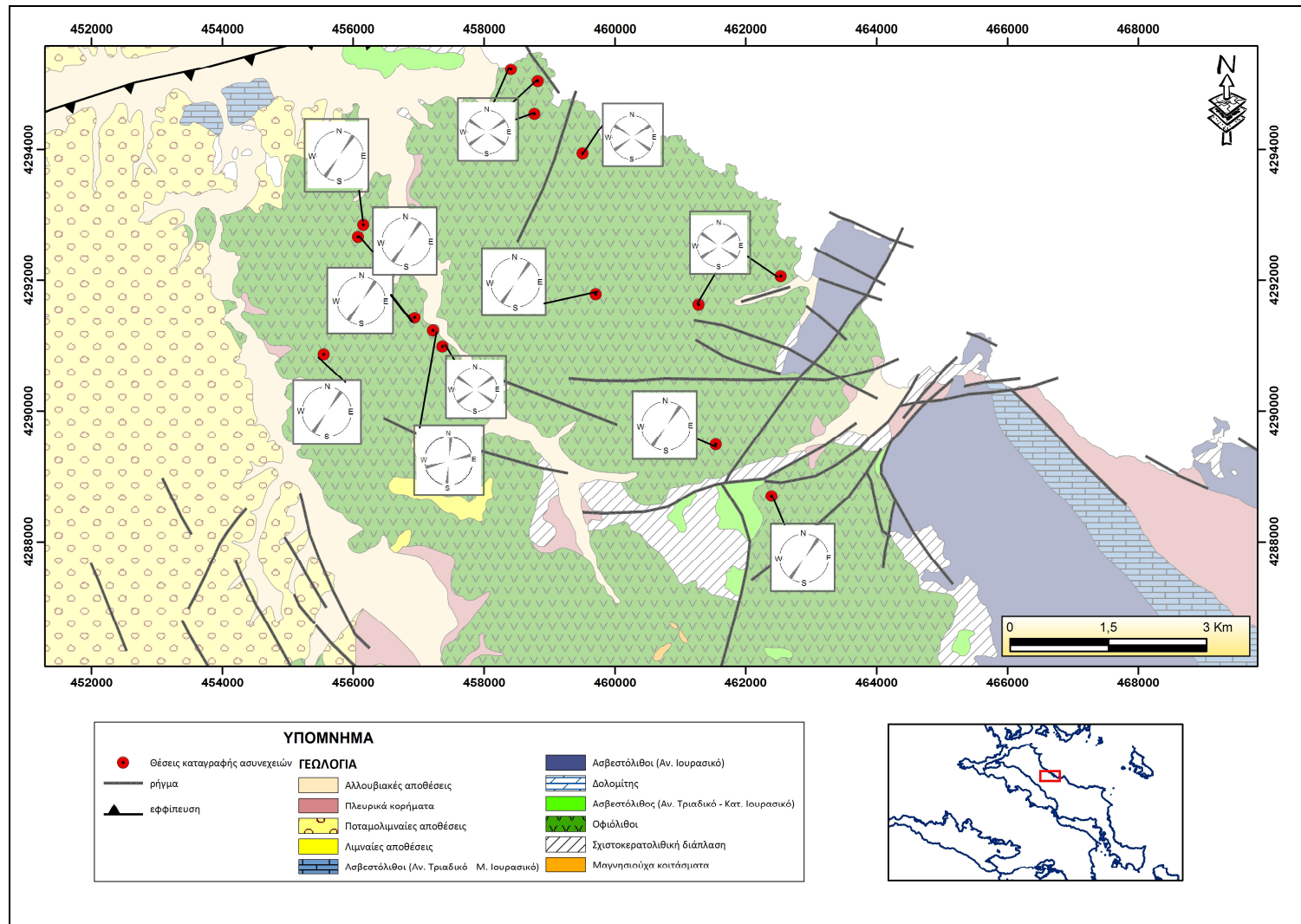
Παρόλα αυτά εντοπίζονται και επιφάνειες, κατά κανόνα στο ΒΒΔ/κό τμήμα της περιοχής μελέτης, οι οποίες είναι σαφείς, διαμπερείς και ακολουθούν την ίδια διεύθυνση με τη διεύθυνση των κυρίων ρηγμάτων (Σχ. 2.15).

Η επεξεργασία των μετρήσεων έγινε με τη βοήθεια Η/Υ (Rockscience – Dips v.5.02) και τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι ο διαχωρισμός τριών κύριων οικογενειών ασυνέχειας με διευθύνσεις:

- ΒΑ – ΝΔ
- ΒΔ – ΝΑ και
- ΒΒΔ – ΝΝΑ



Σχήμα 2.14: Ροδόγραμμα διευθύνσεων ασυνεχειών (α), Ροδόγραμμα διευθύνσεων ρηγμάτων (β) της περιοχής μελέτης



Σχήμα 2.15: Επιλεγμένες Θέσεις καταγραφής ασυνεχιών στην περιοχή μελέτης και ροδογράμματα διεύθυνσης των ασυνεχιών της περιοχής μελέτης

Οι περιοχές που εντοπίζονται ασυνέχειες κλειστές χαρακτηρίζονται από την παρουσία του σερπεντίνη (προϊόν εξαλλοίωσης ολιβίνη), οποίος πληρώνει τις ασυνέχειες με υλικό μη δίνοντας τη δυνατότητα της εύκολης κίνησης του νερού σε μεγαλύτερα βάθη. Αντιθέτως, στο ΒΒΔ/κό τμήμα της περιοχής μελέτης οι ασυνέχειες χαρακτηρίζονται ως ανοιχτές και υδραυλικά ενεργές, κάτι που σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές η εναπόθεση μαγνησίτη, ενδεχομένως να συνοδεύεται και από ταυτόχρονη διεύρυνση των ρωγμών λόγω απελευθέρωσης CO₂. Η πίεση των ατμών και κυρίως η επιμέρους πίεση του CO₂ ενός πλούσιου σε CO₂ διαλύματος είναι τεράστια και προτάθηκε πολλές φορές ως ο υπεύθυνος μηχανισμός διεύρυνσης ρωγμών και σε άλλους τύπους κοιτασμάτων. Στην προκειμένη περίπτωση πιθανολογείται ότι όταν τα μεταλλοφόρα διαλύματα έφθασαν σε ένα τέτοιο επίπεδο από την επιφάνεια όπου η πίεση των ατμών έγινε μεγαλύτερη από το άθροισμα της λιθοστατικής πίεσης και της αντοχής του ξενιστή σε εφελκυσμό (tensile strength) άρχισαν να δημιουργούνται χώροι στους οποίους αποτέθηκε ο μαγνησίτης, κατά ανάλογη περίπτωση αυτής των κοιτασμάτων μαγνησίτη στην περιοχή της Βάβδου Χαλκιδικής (Νταμπίτζιας, 2005).

2.8 Συμπεράσματα

Η περιοχή έρευνας καλύπτεται κυρίως από σχηματισμούς που ανήκουν στην Υποπελαγονική Ζώνη ή Πελαγονική ζώνη μη μεταμορφωμένων σχηματισμών, στην οποία παρεμβάλλονται, τεκτονικά, τεράστιες μάζες οφιολιθικών πετρωμάτων.

Η αλπική τεκτονική δομή είναι πολύπλοκη, όπου εκτός από τη μεγάλη τεκτονική γραμμή της επώθησης των οφιολίθων εντοπίζονται και άλλες τέτοιες ζώνες μεγάλης κλίμακας ανάμεσα στους αλπικούς σχηματισμούς, δημιουργώντας αρκετές λεπιώσεις, με χαρακτηριστικότερη περίπτωση τη μεγάλη τεκτονική επαφή που αναπτύσσεται παράλληλα με το Νηλέα ποταμό φέρνοντας το νότιο τμήμα της περιοχής να επωθείται πάνω στο βόρειο. Οι επιφάνειες αυτές διακόπτονται και τεμαχίζονται επίσης από ένα μεγάλο πλήθος ρηγμάτων μικρής αλλά και μεγάλης κλίμακας.

Η συνολική δομή που προκύπτει από τη στατιστική επεξεργασία των τεκτονικών στοιχείων που αναγνωρίστηκαν από τις εργασίες υπαίθρου χαρακτηρίζεται από πλήθος ασυνεχειών με κύριες διευθύνσεις ΒΑ/κή – ΝΔ/κή και ΒΔ/κή – ΝΑ/κή, καθορίζοντας με αυτόν τον τρόπο σημαντικά την υδροφορία των σχηματισμών.

Το μέσο ασυνεχειών μπορεί να εξετασθεί με διάφορες μεθοδολογίες. Ανάμεσα στο πλήθος αυτών των μεθοδολογιών, οι υδρογεωλογικές και υδροχημικές συνθήκες,

περιλαμβάνονται στα πλαίσια διερεύνησης των μηχανισμών εξασθένησης των ρύπων στην παρούσα διατριβή. Παρόλα αυτά, αποδεικνύεται ότι η συστηματική μελέτη των τεκτονικών χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης συμβάλλει προσθετικά στην ολοκληρωμένη προσέγγιση της μελέτης τρωτότητας του μέσου ασυνεχειών. Ο υψηλός βαθμός κατακερματισμού του οφιολιθικού συμπλέγματος, σε συνδυασμό με την παρουσία ασυνεχειών, όπου κατά τύπους χαρακτηρίζονται είτε ως κλειστές είτε ως ανοιχτές, επιβεβαιώνουν την εκτίμηση ότι για τον προσδιορισμό των κατάλληλων παραμέτρων που περιγράφουν την τρωτότητα στην περιοχή μελέτης, θα πρέπει να εντάσσεται στην τάξη με τον μεγαλύτερο βαθμό τρωτότητας, ως κριτήριο.

3. ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

3.1 Ποσοτική ανάλυση του μορφολογικού αναγλύφου

3.1.1 Μεθοδολογία Έρευνας

Η περιγραφή του μορφολογικού αναγλύφου πραγματοποιήθηκε με τον προσδιορισμό των κυριότερων γεωμορφολογικών παραμέτρων αφού πρώτα έγινε ψηφιοποίηση και εμβαδομέτρηση σε κλίμακα 1:50.000, από τον τοπογραφικό χάρτη της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφορικής (Geographical Information System). Από τα δεδομένα κατασκευάστηκε το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου (DEM, Digital Elevation Model) της περιοχής. Από το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου και με τη χρήση λογισμικού πακέτου Arc – GIS κατασκευάστηκε ο χάρτης μορφολογικών κλίσεων. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι όλοι οι χάρτες που κατασκευάστηκαν στην παρούσα εργασία έχουν γεωαναφερθεί στο Ελληνικό Σύστημα Προβολής ΕΓΣΑ '87.

Η ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου πραγματοποιήθηκε στην λεκάνη απορροής των ποταμών Κυμάσι (Σχ. 3.1), Δαφνοπόταμος (Σχ. 3.3) και Πήλι (η ονομασία προσδιορίστηκε σύμφωνα με το τοπωνύμιο της περιοχής – Σχ. 3.5). Προκειμένου να γίνει περιγραφή της ποσοστιαίας κατανομής της λεκάνης απορροής μετά υψομέτρου, κατασκευάστηκε η υψομετρική καμπύλη για κάθε μία λεκάνη απορροής. Οι μορφομετρικές παράμετροι υπολογίστηκαν με διάφορους μαθηματικούς τύπους. Αναλυτικότερα:

Το **μέσο υψόμετρο** H_{μ} μίας λεκάνης απορροής δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$H_{\mu} = \sum \frac{\alpha \cdot \varepsilon}{E}$$

όπου:

α = εμβαδόν μεταξύ δύο διαδοχικών ισοϋψών

ε = μέσο υψόμετρο της επιφάνειας α

E = συνολική έκταση της περιοχής

Το **υψόμετρο μέγιστης συχνότητας** $H_{\mu.σ}$ ισούται με τη μεγαλύτερη τιμή της υψογραφικής καμπύλης ενώ το υψόμετρο 50% ($H_{50\%}$) με το σημείο τετμημένης 50% αυτής της καμπύλης.

Η μέση κλίση της περιοχής προσδιορίστηκε με τη μέθοδο J. W. Alvord, η οποία υιοθετήθηκε από τον Horton (1945). Κατά αυτή τη μέθοδο:

$$p = \frac{D \times L}{E}$$

όπου:

p = η μέση κλίση

D = η ισοδιάσταση του χάρτη

L = το συνολικό μήκος των ισοϋψών της περιοχής

E = συνολική έκταση της περιοχής

Το **μέγιστο ανάγλυφο H_b (Maximum Basin Relief)** ορίζεται ως η υψομετρική διαφορά μεταξύ του στομίου της λεκάνης και του υψηλότερου σημείου της περιμέτρου (Π) αυτής και είναι ενδεικτικό του ενεργειακού δυναμικού του υδρογραφικού δικτύου.

Ο δείκτης **αναγλύφου (Relief Ratio)** ορίζεται ως το πηλίκο του H_b δια της οριζόντιας απόστασης επί της οποίας μετρήθηκε αυτό. Ο δείκτης αυτός συμπίπτει με την εφαπτομένη της γωνίας κλίσεως του πρανούς και είναι ενδεικτικός της εντάσεως της διαβρωτικής ενέργειας στις κλιτείες της λεκάνης.

Ο Melton εισήγαγε το **σχετικό ανάγλυφο, R_{hp} (Relative Relief)**, εκπεφρασμένο επί τοις % και δίνεται από τη σχέση:

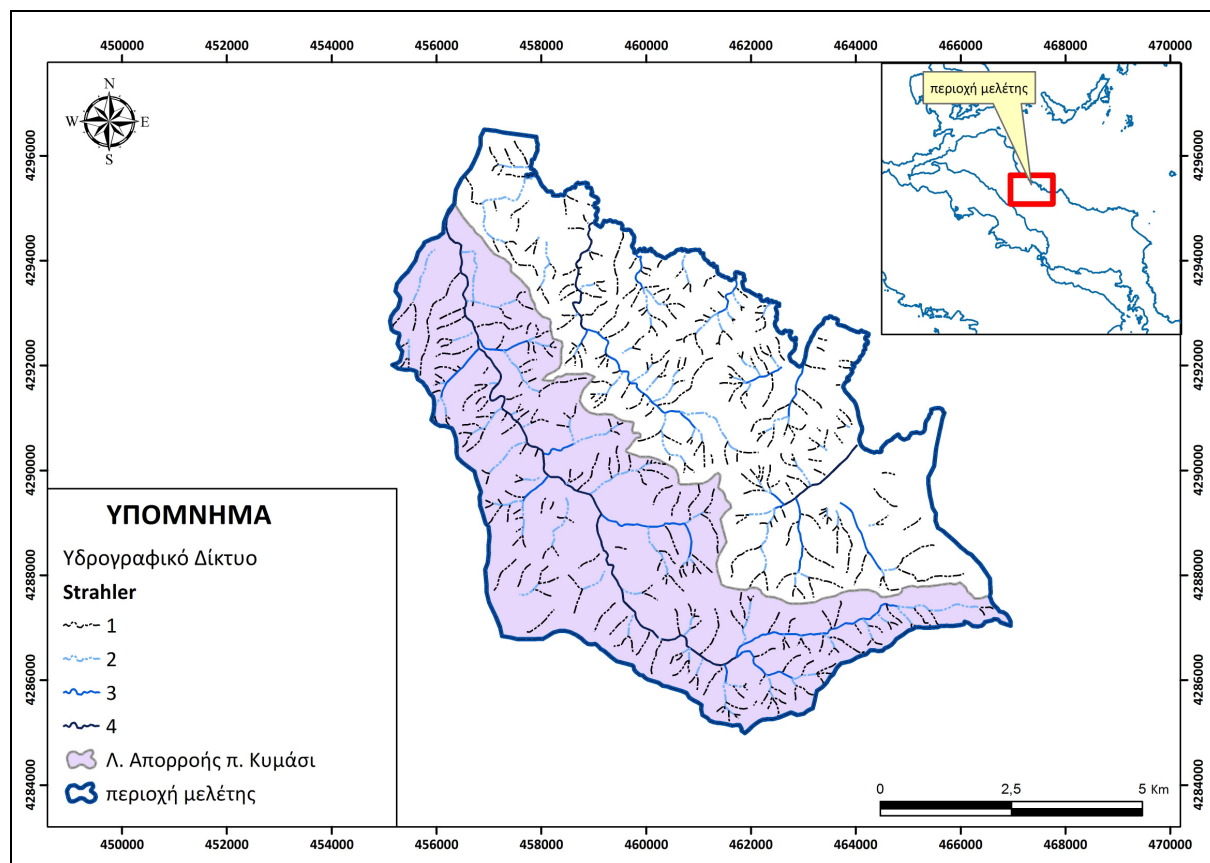
$$R_{hp} = \frac{100H_b}{5280\Pi}$$

Ο **συντελεστής κυκλικότητας C.R.** δείχνει το βαθμό προσέγγισης της λεκάνης απορροής στο σχήμα του κύκλου και ισούται με:

$$C.R. = \frac{4\pi E}{\Pi^2}$$

3.1.2 Υψομετρική ανάλυση της λεκάνης απορροής του ποταμού Κυμάσι

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Κυμάσι (Σχ. 3.1) έχει ΒΔ/κή διεύθυνση και καταλαμβάνει συνολική έκταση 34,76 km². Η λεκάνη αυτή αποστραγγίζει τις επιφανειακές απορροές του ποταμού Κυμάσι, το οποίο πηγάζει από το όρος Δίρφυ και καταλήγει στη θαλάσσια περιοχή του Αιγαίου Πελάγους ΒΑ/κά του όρμου Μαντουδίου.

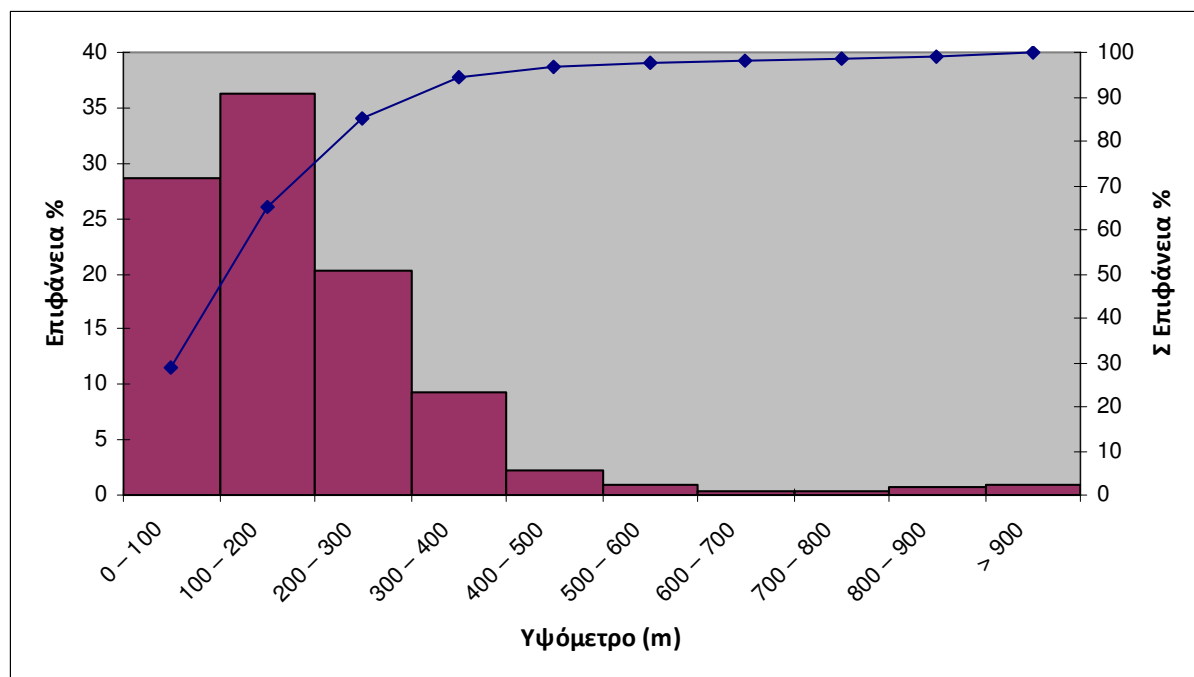


Σχήμα 3.1: Χάρτης υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής του ποταμού Κυμάσι

Από τα στοιχεία του πίνακα 3.1 κατασκευάστηκε η υψομετρική καμπύλη της λεκάνης απορροής του ποταμού Κυμάσι (Σχ. 3.2).

Πίνακας 3.1: Υψομετρική ανάλυση της λεκάνης απορροής του ποταμού Κυμάσι

Υψόμετρο	Ε (km) ²	Ε(%)	ΣΕ (%)
0 – 100	9.945	28.61	28.61
100 – 200	12.625	36.32	64.93
200 – 300	7.063	20.32	85.25
300 – 400	3.218	9.26	94.51
400 – 500	0.806	2.32	96.83
500 – 600	0.308	0.89	97.72
600 – 700	0.116	0.34	98.06
700 – 800	0.138	0.40	98.46
800 – 900	0.239	0.69	99.15
> 900	0.302	0.87	100,00



Σχήμα 3.2: Υψομετρική καμπύλη της λεκάνης απορροής του ποταμού Κυμάσι

Σύμφωνα με την υψομετρική ανάλυση της λεκάνης απορροής του ποταμού Κυμάσι υπολογίζεται ότι το μέσο υψόμετρο είναι 187 m, το υψόμετρο μέγιστης συχνότητας είναι 150 m, ενώ το υψόμετρο 50% είναι 109 m.

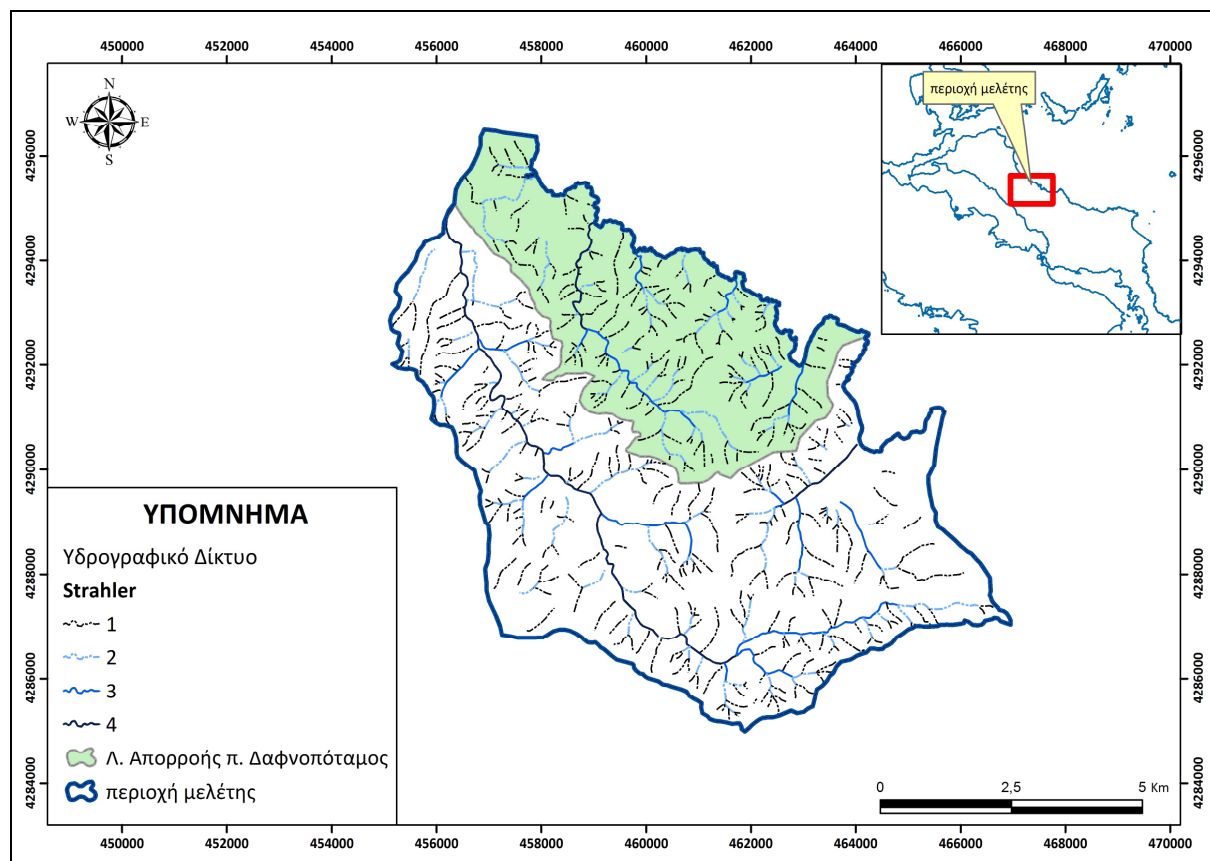
Στον Πίνακα 3.2 συνοψίζονται οι μορφολογικές παράμετροι που υπολογίστηκαν για την υπό μελέτη λεκάνη απορροής με βάση τις παραπάνω σχέσεις και την υψομετρική καμπύλη του σχήματος 3.2.

Πίνακας 3.2: Οι κυριότερες μορφολογικές παράμετροι της λεκάνης απορροής του π. Κυμάσι

Παράμετρος	Κυμάσι
Συνολική έκταση λεκάνης (km ²)	34,76
Περίμετρος λεκάνης (km)	39,67
Μέσο υψόμετρο H_{μ} (m)	187
Υψόμετρο μέγιστης συχνότητας $H_{\mu.σ.}$ (m)	150
Μέση κλίση p (%)	12,19
Υψόμετρο 50% (m)	109
Μέγιστο ανάγλυφο H_b (m)	1034
Δείκτης αναγλύφου R_h	0,078
Σχετικό ανάγλυφο R_{hp} (%)	0,049
Συντελεστής κυκλικότητας C.R.	0,277

3.1.3 Υψομετρική ανάλυση της λεκάνης απορροής του ποταμού Δαφνοπόταμος

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Δαφνοπόταμος (Σχ. 3.3) έχει ΒΔ/κή διεύθυνση και καταλαμβάνει συνολική έκταση 22,25 km². Η λεκάνη αυτή αποστραγγίζει τις επιφανειακές απορροές του ποταμού Δαφνοπόταμος, καθώς επίσης και χειμάρρους μη μόνιμης ροής, ο οποίος πηγάζει από το όρος Χονδρή Ράχη και καταλήγει στη θαλάσσια περιοχή του Αιγαίου Πελάγους ΒΑ/κά του όρμου Μαντουδίου.



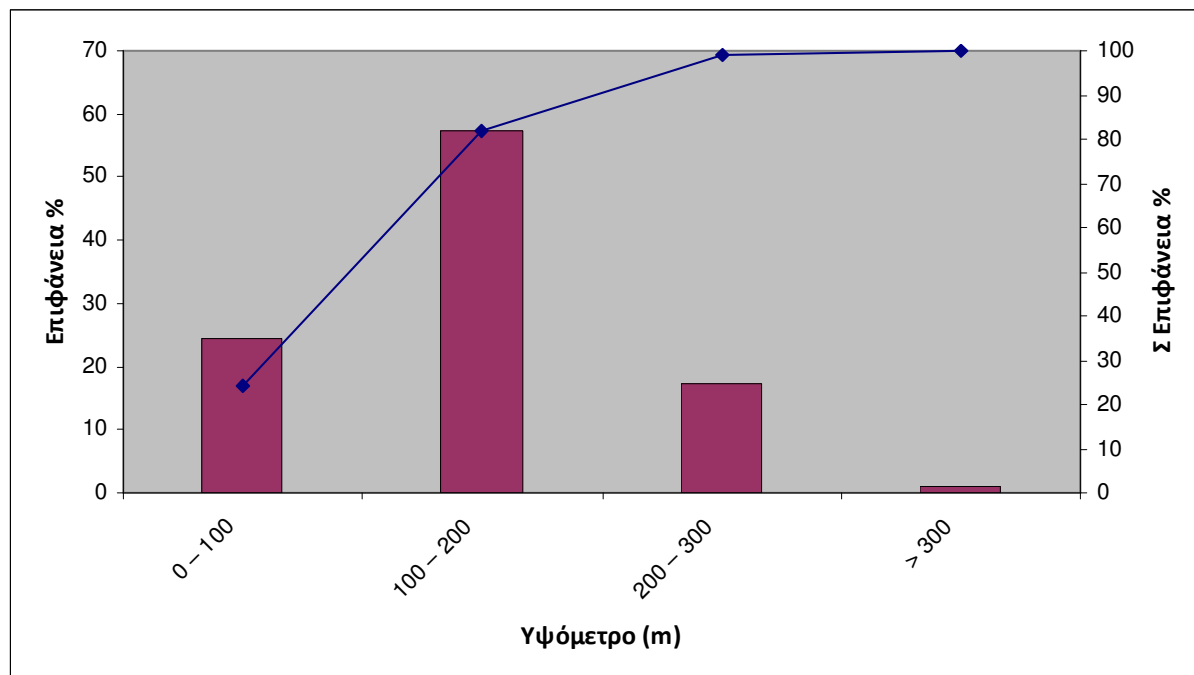
Σχήμα 3.3: Χάρτης υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής του ποταμού Δαφνοπόταμος

Από τα στοιχεία του πίνακα 3.3 κατασκευάστηκε η υψομετρική καμπύλη της λεκάνης απορροής του ποταμού Δαφνοπόταμος (Σχ. 3.4).

Πίνακας 3.3: Υψομετρική ανάλυση της λεκάνης απορροής του ποταμού Δαφνοπόταμος

Υψόμετρο	Ε (km) ²	Ε(%)	ΣΕ (%)
0 – 100	5.403	24.28	24.28
100 – 200	12.779	57.44	81.72
200 – 300	3.854	17.32	99.04
> 300	0.213	0.96	100.00

Σύμφωνα με τα στοιχεία του σχήματος 3.4 υπολογίζεται ότι το μέσο υψόμετρο είναι 145 m, το υψόμετρο μέγιστης συχνότητας είναι 150 m, ενώ το υψόμετρο 50% είναι 95 m.



Σχήμα 3.4: Υψομετρική καμπύλη της λεκάνης απορροής του ποταμού Δαφνοπόταμος

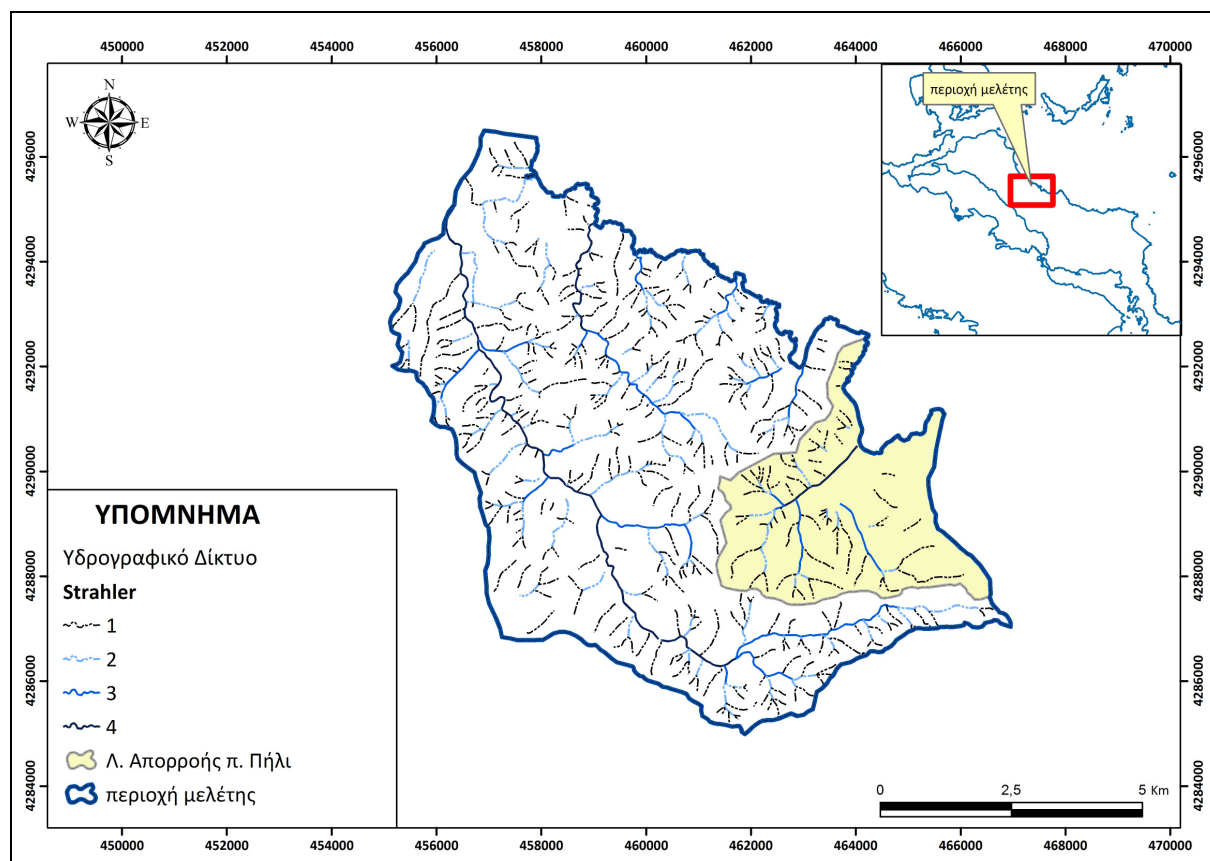
Στον Πίνακα 3.4 συνοψίζονται οι μορφολογικές παράμετροι που υπολογίστηκαν για την υπό μελέτη λεκάνη απορροής με βάση τις παραπάνω σχέσεις και την υψομετρική καμπύλη του σχήματος 3.4.

Πίνακας 3.4: Οι κυριότερες μορφολογικές παράμετροι της λεκάνης απορροής του π. Δαφνοπόταμος

Παράμετρος	Δαφνοπόταμος
Συνολική έκταση λεκάνης (km ²)	22,25
Περίμετρος λεκάνης (km)	30,62
Μέσο υψόμετρο H_{μ} (m)	145
Υψόμετρο μέγιστης συχνότητας $H_{\mu.σ}$ (m)	150
Μέση κλίση p (%)	23,76
Υψόμετρο 50% (m)	95
Μέγιστο ανάγλυφο H_b (m)	336
Δείκτης αναγλύφου R_h	0,006
Σχετικό ανάγλυφο R_{hp} (%)	0,021
Συντελεστής κυκλικότητας C.R.	0,41

3.1.4 Υψομετρική ανάλυση της λεκάνης απορροής του ποταμού Πήλι

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Πήλι (Σχ. 3.5) έχει ΒΑ/κή διεύθυνση και καταλαμβάνει συνολική έκταση 13,21 km². Η λεκάνη αυτή αποστραγγίζει τις επιφανειακές απορροές του ποταμού Πήλι, ο οποίος πηγάζει από το όρος Χονδρή Ράχη και καταλήγει στη θάλασσα περιοχή του Αιγαίου Πελάγους ΒΑ/κά του όρμου Πηλίου.



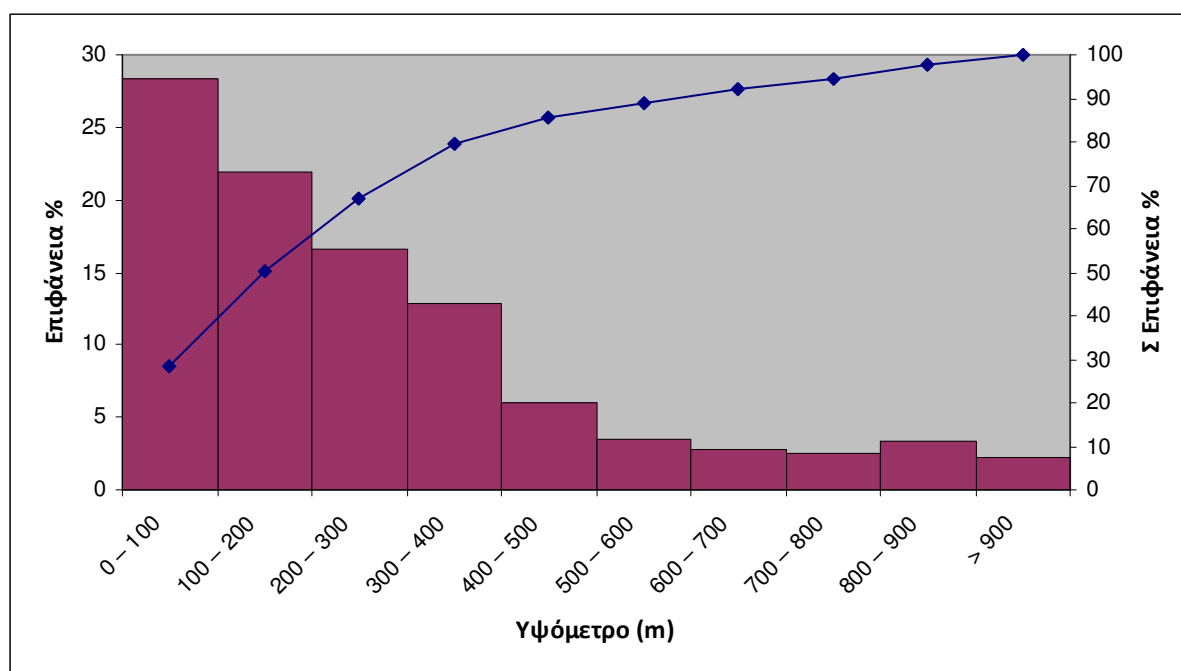
Σχήμα 3.5: Χάρτης υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής του ποταμού Πήλι

Από τα στοιχεία του πίνακα 3.5 κατασκευάστηκε η υψομετρική καμπύλη της λεκάνης απορροής του ποταμού Πήλι (Σχ. 3.6).

Σύμφωνα με τα στοιχεία του σχήματος 3.6 υπολογίζεται ότι το μέσο υψόμετρο είναι 267 m, το υψόμετρο μέγιστης συχνότητας είναι 50 m, ενώ το υψόμετρο 50% είναι 150 m.

Πίνακας 3.5: Υψομετρική ανάλυση της λεκάνης απορροής του ποταμού Πήλι

Υψόμετρο	Ε (km) ²	Ε(%)	ΣΕ (%)
0 – 100	3.732	28.26	28.26
100 – 200	2.894	21.91	50.17
200 – 300	2.195	16.62	66.79
300 – 400	1.689	12.79	79.58
400 – 500	0.789	5.97	85.55
500 – 600	0.460	3.48	89.04
600 – 700	0.377	2.85	91.89
700 – 800	0.335	2.54	94.43
800 – 900	0.435	3.29	97.72
> 900	0.301	2.28	100.00

**Σχήμα 3.6:** Υψομετρική καμπύλη της λεκάνης απορροής του ποταμού Πήλι

Στον Πίνακα 3.6 συνοψίζονται οι μορφολογικές παράμετροι που υπολογίστηκαν για την υπό μελέτη λεκάνη απορροής με βάση τις παραπάνω σχέσεις και την υψομετρική καμπύλη του σχήματος 3.6.

Πίνακας 3.6: Οι κυριότερες μορφολογικές παράμετροι της λεκάνης απορροής του π. Πήλι

Παράμετρος	Πήλι
Συνολική έκταση λεκάνης (km ²)	13,21
Περίμετρος λεκάνης (km)	21,25
Μέσο υψόμετρο H _μ (m)	267
Υψόμετρο μέγιστης συχνότητας H _{μ.σ.} (m)	50
Μέση κλίση ρ (%)	30,97
Υψόμετρο 50% (m)	150
Μέγιστο ανάγλυφο H _b (m)	960
Δείκτης αναγλύφου R _h	0,294
Σχετικό ανάγλυφο R _{hp} (%)	0,086
Συντελεστής κυκλικότητας C.R.	0,367

3.2 Ποσοτική ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής μελέτης

3.2.1 Μεθοδολογία

Η μορφή του υδρογραφικού δικτύου κάθε λεκάνης απορροής είναι μια συνάρτηση της λιθολογικής της σύστασης, του μορφολογικού αναγλύφου, του βροχομετρικού ύψους, της εποχιακής κατανομής των βροχοπτώσεων και τέλος της σχέσεως διάβρωσης προς αποσάθρωση. Οι υδρολογικές λεκάνες δίνουν πληροφορίες για την μακροχρόνια εξέλιξη του τοπίου, δεδομένου ότι αποτελούν πολύ ανθεκτικές γεωμορφές. Η γεωμετρία τους αναπτύσσεται σε συνάρτηση με την φύση και την κατανομή των ανοδικών και καθοδικών κινήσεων, τη διάταξη των ρηγμάτων και των διακλάσεων στο χώρο, την σχετική αντίσταση των διαφορετικών τύπων πετρωμάτων και τις υδρολογικές παραμέτρους που επηρεάζονται από τις κλιματικές συνθήκες (Burbank and Anderson, 2001).

Τα υδρογραφικά δίκτυα όχι μόνο βοηθούν στην αναγνώριση πρόσφατων ενεργών δομών, αλλά ακριβώς λόγω της ανθεκτικότητάς τους ως γεωμορφές, παρουσιάζουν και πολλά δεδομένα της πρόσφατης ιστορίας.

Τα διαφορετικά επιμήκη προφίλ των ρεμάτων μπορούν να ερμηνευτούν σε σχέση με την ισορροπία μεταξύ της ανοδικής κίνησης και της διάβρωσης που προκαλεί το ίδιο το ρέμα και σχετίζεται με τα διαφορετικά στάδια ανάπτυξης των προφίλ αυτών.

Για τη διεξαγωγή της ποσοτικής ανάλυσης στα υδρογραφικά δίκτυα των ποταμοχειμάρρων της περιοχής έρευνας, πρώτα καθορίστηκαν οι σχέσεις μεταξύ των κλάδων με βάση την

αρίθμηση κατά *Strahler* (1957). Σύμφωνα με αυτήν, κάθε κλάδος που δε δέχεται νερά άλλων μικρότερων ρευμάτων ονομάζεται κλάδος 1^{ης} τάξης. Ο κλάδος που προκύπτει από τη σύνδεση δύο κλάδων 1^{ης} τάξης ονομάζεται 2^{ης} τάξης κ.ο.κ. Στην περίπτωση που συνδέονται δύο κλάδοι διαφορετικής τάξης, ο νέος κλάδος που προκύπτει εξακολουθεί να έχει την αρίθμηση της μεγαλύτερης τάξης του ενός από τους δύο συνδεόμενους κλάδους.

Εν συνεχεία διερευνήθηκε εάν το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης διέπεται από τους νόμους που διατυπώθηκαν από τον *Horton*.

Ο πρώτος νόμος μπορεί να διατυπωθεί ως εξής: «Ο αριθμός των διαδοχικών μικρότερης τάξεως κλάδων ενός υδρογραφικού δικτύου τείνει να σχηματίζει μία αύξουσα γεωμετρική ακολουθία, της οποίας ο πρώτος όρος είναι η μονάδα και έχει για λόγο το συντελεστή διακλάδωσης Rb ». Η μαθηματική έκφραση του νόμου έχει ως εξής:

$$Nu = Rb^{(k-u)}$$

όπου:

k = η μέγιστη τάξη

u = η ζητούμενη τάξη

Rb = συντελεστής διακλάδωσης

Nu = αριθμός κλάδων

Για να ισχύει ο πρώτος νόμος του *Horton* θα πρέπει η προβολή των σημείων στο ημιλογαριθμικό διάγραμμα $u = f(\log Nu)$ να είναι συνευθειακή.

Σύμφωνα με το 2^ο νόμο του *Horton* «τα μέσα μήκη των διαδοχικά μεγαλύτερης τάξης κλάδων ενός υδρογραφικού δικτύου, τείνουν να σχηματίσουν μια αύξουσα γεωμετρική ακολουθία της οποίας ο πρώτος όρος είναι το μέσο μήκος των κλάδων πρώτης τάξης και λόγος, ο λόγος του μήκους R_L ». Η μαθηματική έκφραση του νόμου έχει ως εξής:

$$\bar{L}_u = \bar{L}_1 R_L^{(u-1)}$$

όπου:

\bar{L}_u = το μέσο μήκος των κλάδων τάξης u

\bar{L}_1 = το μέσο μήκος του κλάδου 1^{ης} τάξης

R_L = ο λόγος του μήκους

Σύμφωνα με το 3^ο νόμο του Horton «τα μέσα εμβαδά των διαδοχικά μεγαλύτερης τάξης λεκανών απορροής ενός υδρογραφικού δικτύου, τείνουν να σχηματίσουν μία αύξουσα γεωμετρική ακολουθία, της οποίας ο πρώτος όρος είναι το μέσο εμβαδόν των λεκανών των κλάδων 1^{ης} τάξης και λόγος, ο λόγος του εμβαδού R_A ». Η μαθηματική έκφραση του νόμου έχει ως εξής:

$$\bar{A}_u = A_1 R_A^{(u-1)}$$

όπου:

\bar{A}_u = το μέσο εμβαδό των λεκανών τάξης u

\bar{A}_1 = το μέσο εμβαδό των λεκανών 1^{ης} τάξης

R_A = ο λόγος του εμβαδού

3.2.2 Υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κυμάσι

Το υδρογραφικό δίκτυο του ποταμού Κυμάσι, ανήκει στην κατηγορία του δενδριτικού τύπου. Χαρακτηρίζεται από ακανόνιστη διακλάδωση των παραποτάμων του προς διάφορες κατευθύνσεις με διαφορετικές οξείες γωνίες.

Ο κορμός του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής του ποταμού Κυμάσι, σύμφωνα με την αρίθμηση κατά Strahler, είναι ρεύμα 4^{ης} τάξεως και περιλαμβάνει 173 ρεύματα 1^{ης} τάξης, 42 ρεύματα 2^{ης} τάξης, 8 ρεύματα 3^{ης} τάξης και 1 ρεύμα 4^{ης} τάξης (Πίν. 3.7).

Πίνακας 3.7: Ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου του π. Κυμάσι, σύμφωνα με τον 1^ο νόμο του Horton

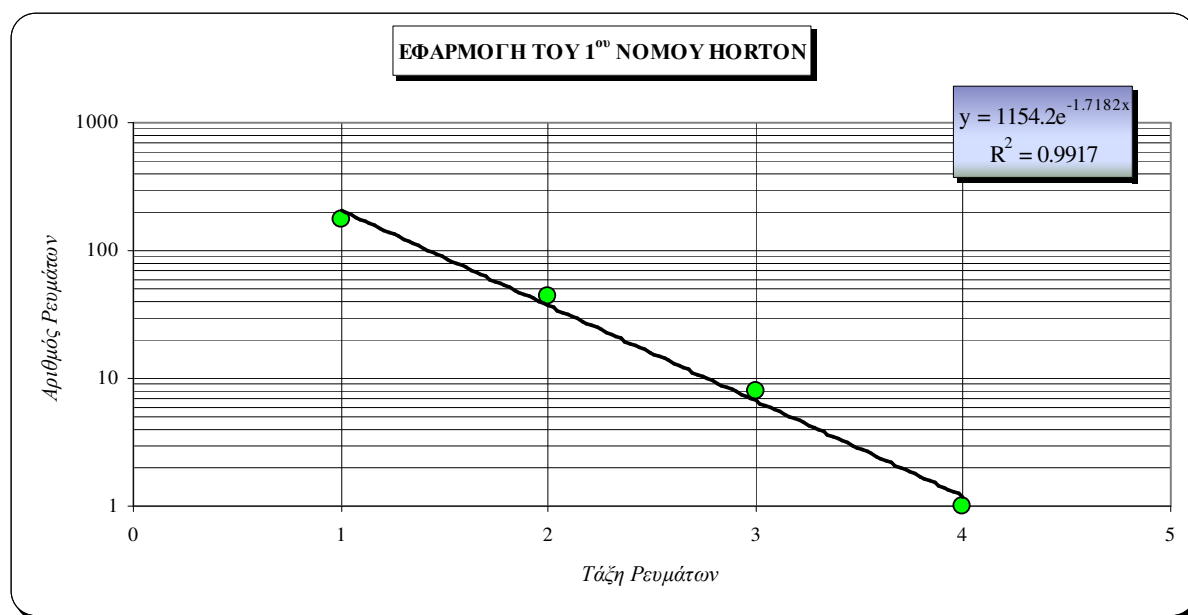
Τάξη Ρευμάτων (u)	Αριθμός Ρευμάτων (Nu)	Συντελεστής Διακλάδωσης (Rb)
1 ^{ης}	173	
		3.58
2 ^{ης}	42	
		5.14
3 ^{ης}	8	
		7.00
4 ^{ης}	1	
		$\bar{R}_b = 5.24$

Για να βρεθεί αν ισχύει ο πρώτος νόμος του Horton, στην περιοχή μελέτης, κατασκευάστηκε το διάγραμμα u vs Nu (Σχ. 3.7). Από αυτό το σχήμα προκύπτει ότι η γραφική παράσταση

αποτελεί ευθεία γραμμή και συνεπώς μπορεί να γίνει κατανοητό ότι ισχύει ο 1^{ος} νόμος του Horton.

Η εξίσωση που εκφράζει το νόμο του Horton στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κυμάσι δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\log Nu = 3.06 - 0.75u$$



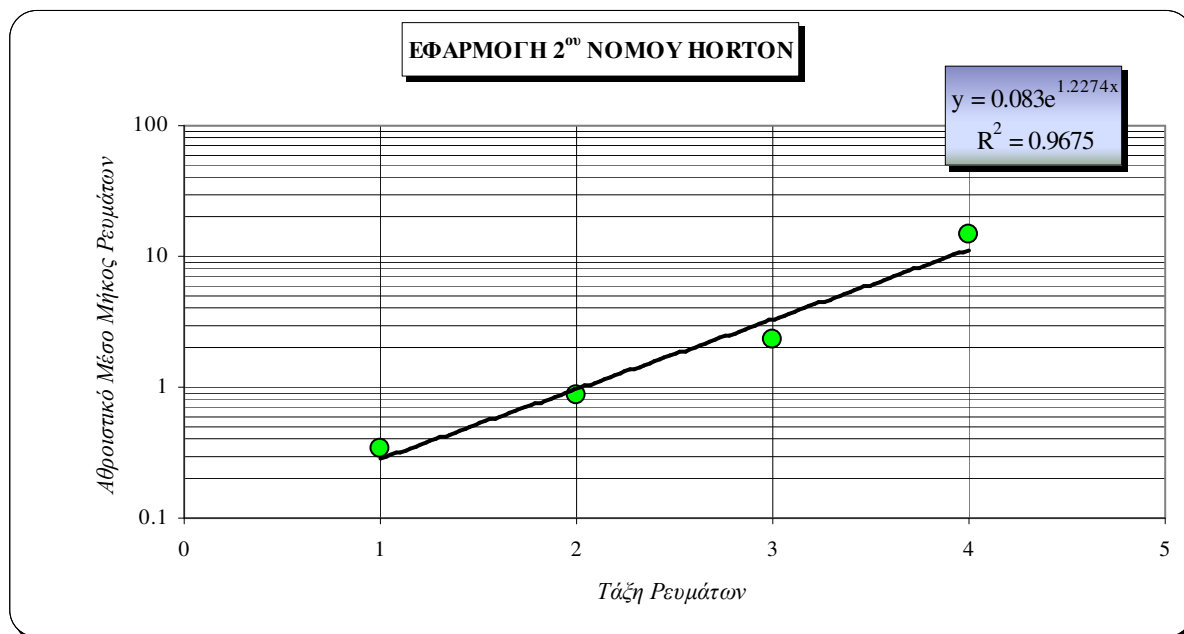
Σχήμα 3.7: Διάγραμμα εφαρμογής 1^{ου} νόμου του Horton

Ο δεύτερος νόμος του Horton απεικονίζεται στο σχήμα 3.8. Η εξίσωση που εκφράζει το νόμο του Horton στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κυμάσι δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\log(\Sigma L_u) = 0.53u - 1.08$$

Πίνακας 3.8: Ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου του π. Κυμάσι, σύμφωνα με τον 2^ο νόμο του Horton

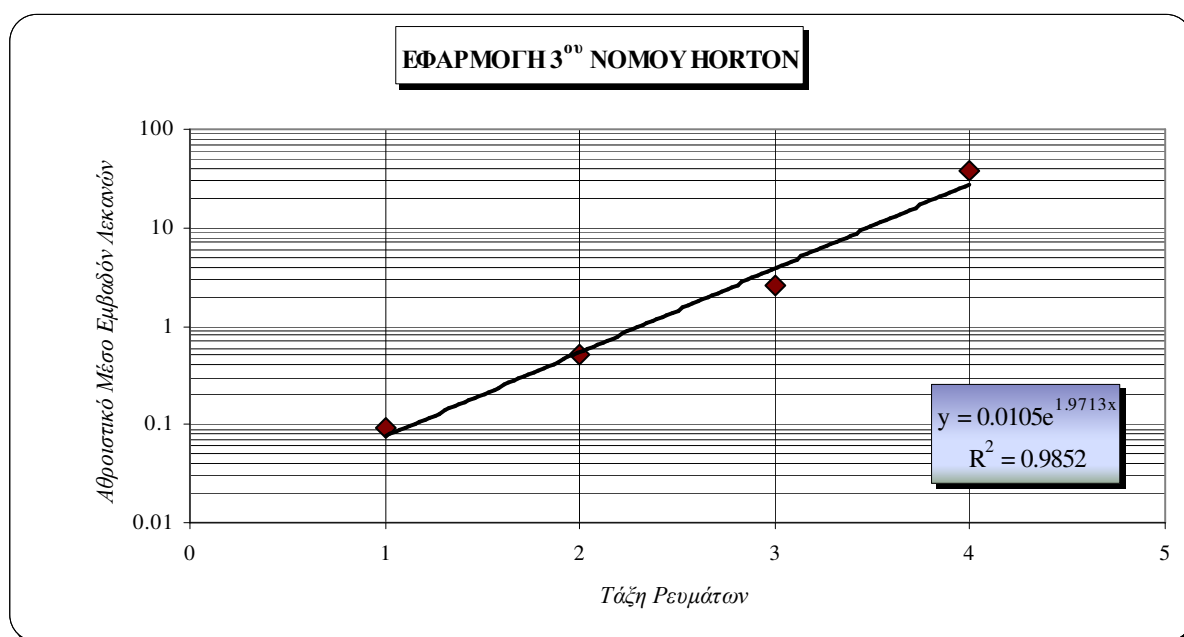
Τάξη Ρευμάτων (u)	Αθροιστικό Μέσο Μήκος (ΣL _u)	Λόγος Μήκους R _L
1 ^{ης}	0.34	
2 ^{ης}	0.88	2.60
3 ^{ης}	2.28	2.58
4 ^{ης}	14.82	6.50
		$\bar{R}_L = 3.89$



Σχήμα 3.8: Διάγραμμα εφαρμογής 2^{ου} νόμου του Horton

Σύμφωνα με τον τρίτο νόμο του Horton (Σχ. 3.9), παρατηρείται μια συσχέτιση αρκετά καλή μεταξύ του αθροιστικού μέσου εμβαδού λεκανών ανά τάξη. Η εξίσωση που εκφράζει τον τρίτο νόμο του Horton δίνεται από τη σχέση:

$$\log(\Sigma A_u) = 0,86u - 1.98$$



Σχήμα 3.9: Διάγραμμα εφαρμογής 3^{ου} νόμου Horton

3.2.3 Υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής του ποταμού Δαφνοπόταμος

Το υδρογραφικό δίκτυο του ποταμού Δαφνοπόταμος, ανήκει στην κατηγορία του δενδριτικού τύπου. Χαρακτηρίζεται από ακανόνιστη διακλάδωση των παραποτάμων του προς διάφορες κατευθύνσεις με διαφορετικές οξείες γωνίες ακολουθώντας όμοια εικόνα με τον ποταμό Κυμάσι.

Ο κορμός του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής του ποταμού Δαφνοπόταμος, σύμφωνα με την αρίθμηση κατά Strahler, είναι ρεύμα 4^{ης} τάξεως και περιλαμβάνει 144 ρεύματα 1^{ης} τάξης, 31 ρεύματα 2^{ης} τάξης, 6 ρεύματα 3^{ης} τάξης και 1 ρεύμα 4^{ης} τάξης (Πίν. 3.9).

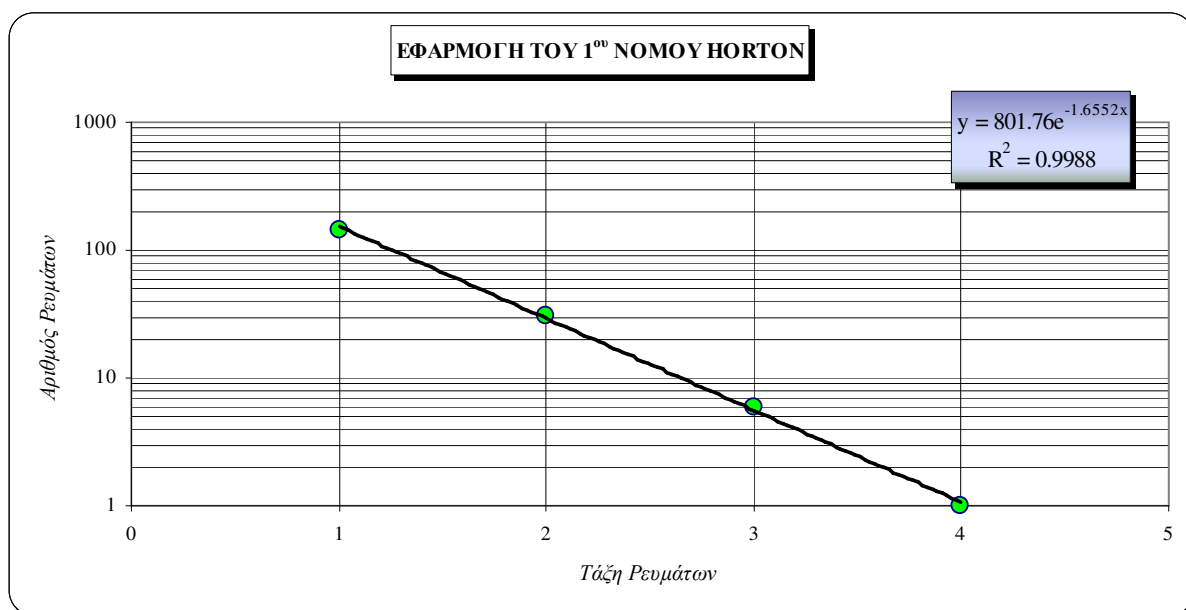
Πίνακας 3.9: Ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου του π. Δαφνοπόταμος, σύμφωνα με τον 1^ο νόμο του Horton

Τάξη Ρευμάτων (<i>u</i>)	Αριθμός Ρευμάτων (<i>Nu</i>)	Συντελεστής Διακλάδωσης <i>Rb</i>
1 ^{ης}	144	
		4.65
2 ^{ης}	31	
		5.17
3 ^{ης}	6	
		6.00
4 ^{ης}	1	
		$\bar{R}_b = 5.82$

Για να βρεθεί αν ισχύει ο πρώτος νόμος του Horton, στην περιοχή μελέτης, κατασκευάστηκε το διάγραμμα *u* vs *Nu* (Σχ. 3.10). Από αυτό το σχήμα προκύπτει ότι η γραφική παράσταση αποτελεί ευθεία γραμμή με πολύ ισχυρό συντελεστή συσχέτισης των σημείων της τάξεως του 99,9% και συνεπώς μπορεί να γίνει κατανοητό ότι ισχύει ο 1^{ος} νόμος του Horton.

Η εξίσωση που εκφράζει το νόμο του Horton στην περιοχή μελέτης δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\log Nu = 2.91 - 0.72u$$



Σχήμα 3.10: Διάγραμμα εφαρμογής 1^{ου} νόμου του Horton

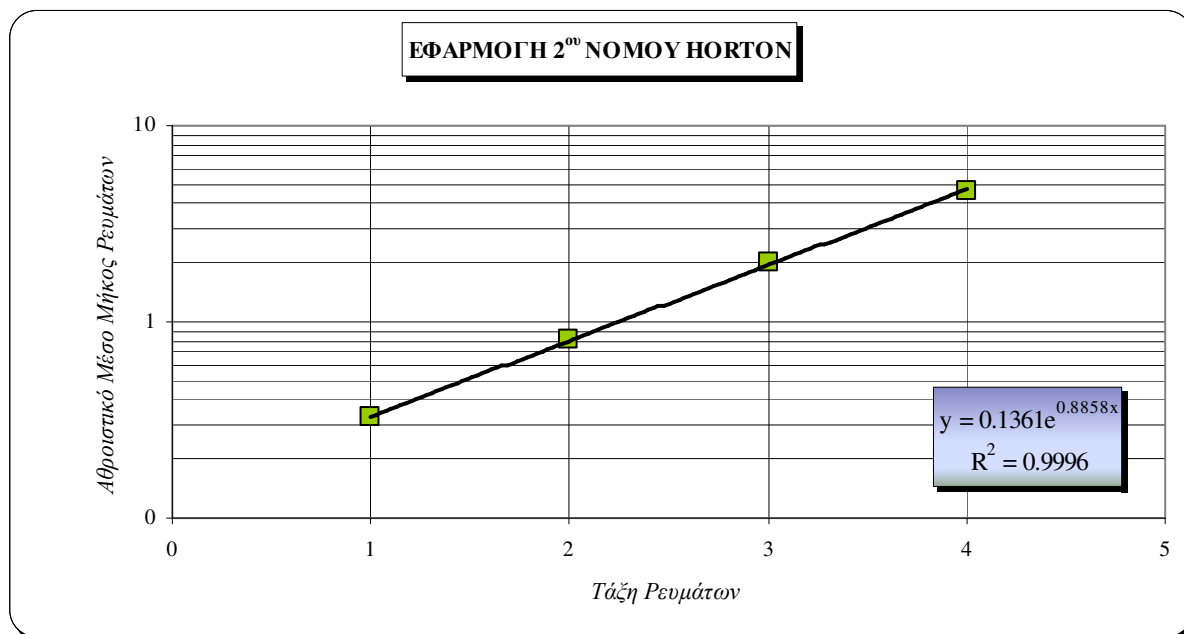
Ο δεύτερος νόμος του Horton απεικονίζεται στο σχήμα 3.11. Η εξίσωση που εκφράζει το νόμο του Horton στη λεκάνη απορροής του ποταμού Δαφνοπόταμος δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\log(\Sigma L_u) = 0.38u - 0.87$$

Στον πίνακα 3.10 παρουσιάζονται τα στοιχεία της ανάλυσης του υδρογραφικού δικτύου του εν λόγω ποταμού σύμφωνα με το 2^ο νόμο του Horton.

Πίνακας 3.10: Ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου του π. Δαφνοπόταμος, σύμφωνα με τον 2^ο νόμο του Horton

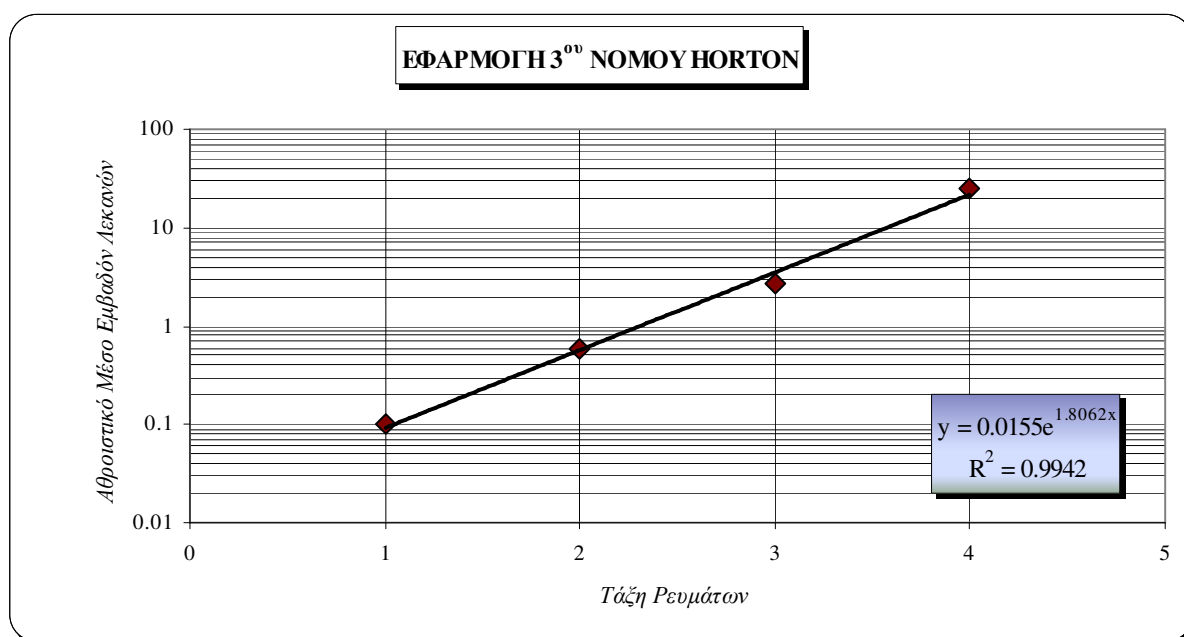
Τάξη Ρευμάτων <i>u</i>	Αθροιστικό Μέσο Μήκος ΣL_u	Λόγος Μήκους R_L
1 ^{ης}	0.33	
		2.46
2 ^{ης}	0.80	
		2.50
3 ^{ης}	2.00	
		2.29
4 ^{ης}	4.60	
		$\bar{R}_L = 2.42$



Σχήμα 3.11: Διάγραμμα εφαρμογής 2^{ου} νόμου του Horton

Σύμφωνα με τον τρίτο νόμο του Horton (Σχ. 3.12), παρατηρείται μια συσχέτιση αρκετά καλή μεταξύ του αθροιστικού μέσου εμβαδού λεκανών ανά τάξη. Η εξίσωση που εκφράζει τον τρίτο νόμο του Horton δίνεται από τη σχέση:

$$\log(\Sigma A_u) = 0.78u - 1.809$$



Σχήμα 3.12: Διάγραμμα εφαρμογής 3^{ου} νόμου Horton

3.2.4 Υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής του ποταμού Πήλι

Το υδρογραφικό δίκτυο του ποταμού Πήλι, ανήκει στην κατηγορία του δενδριτικού τύπου. Χαρακτηρίζεται από ακανόνιστη διακλάδωση των παραποτάμων του προς διάφορες κατευθύνσεις με διαφορετικές οξείες γωνίες.

Ο κορμός του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής του ποταμού Πήλι, σύμφωνα με την αρίθμηση κατά Strahler, είναι ρεύμα 4^{ης} τάξεως και περιλαμβάνει 60 ρεύματα 1^{ης} τάξης, 14 ρεύματα 2^{ης} τάξης, 4 ρεύματα 3^{ης} τάξης και 1 ρεύμα 4^{ης} τάξης (Πίν. 3.11).

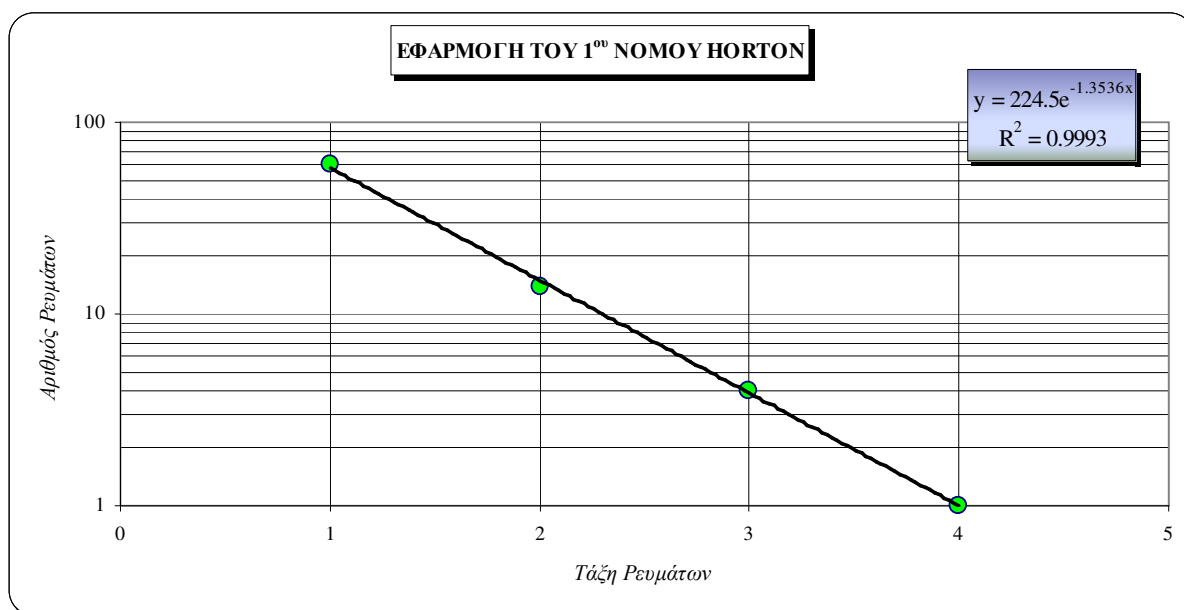
Πίνακας 3.11: Ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου του π. Πήλι, σύμφωνα με τον 1^ο νόμο του Horton

Τάξη Ρευμάτων <i>u</i>	Αριθμός Ρευμάτων <i>Nu</i>	Συντελεστής Διακλάδωσης <i>Rb</i>
1 ^{ης}	60	
		4.29
2 ^{ης}	14	
		3.50
3 ^{ης}	4	
		4.00
4 ^{ης}	1	
		$\bar{R}_b = 5.82$

Για να βρεθεί αν ισχύει ο πρώτος νόμος του Horton, στην περιοχή μελέτης, κατασκευάστηκε το διάγραμμα *u* vs *Nu* (Σχ. 3.13). Από αυτό το σχήμα προκύπτει ότι η γραφική παράσταση αποτελεί ευθεία γραμμή και συνεπώς μπορεί να γίνει κατανοητό ότι ισχύει ο 1^{ος} νόμος του Horton.

Η εξίσωση που εκφράζει το νόμο του Horton στην περιοχή μελέτης δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\log Nu = 2.35 - 0.59u$$



Σχήμα 3.13: Διάγραμμα εφαρμογής 1^{ου} νόμου του Horton

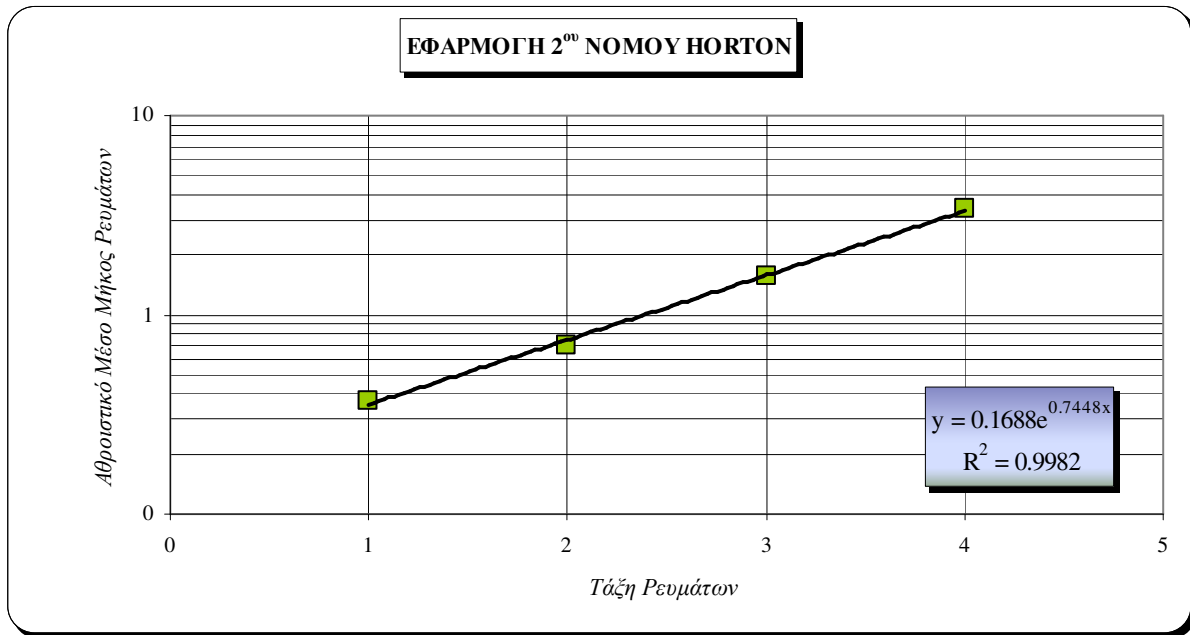
Ο δεύτερος νόμος του Horton απεικονίζεται στο σχήμα 3.14. Η εξίσωση που εκφράζει το νόμο του Horton στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κυμάσι δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\log(\Sigma L_u) = 0.32u - 0.77$$

Στον πίνακα 3.12 παρουσιάζονται τα στοιχεία της ανάλυσης του υδρογραφικού δικτύου του εν λόγω ποταμού σύμφωνα με το 2^ο νόμο του Horton.

Πίνακας 3.12: Ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου του π. Πήλι, σύμφωνα με τον 2^ο νόμο του Horton

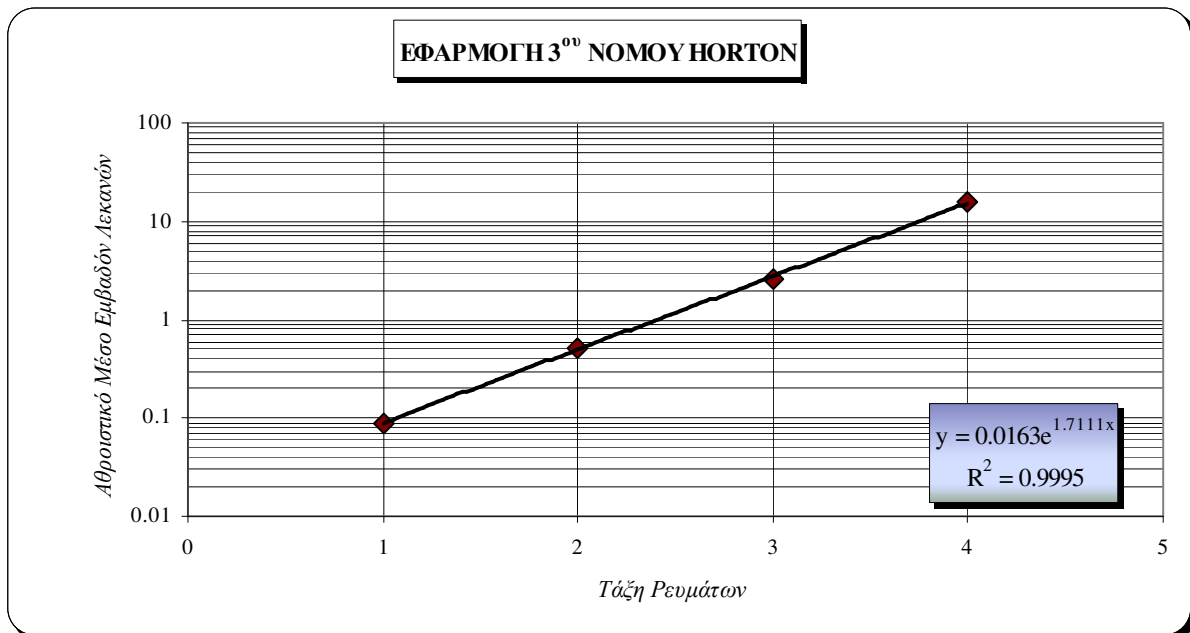
Τάξη Ρευμάτων <i>u</i>	Αθροιστικό Μέσο Μήκος ΣL_u	Λόγος Μήκους R_L
1 ^{ης}	0.37	
		1.92
2 ^{ης}	0.71	
		2.21
3 ^{ης}	1.57	
		2.17
4 ^{ης}	3.40	
		$\bar{R}_L = 2.10$



Σχήμα 3.14: Διάγραμμα εφαρμογής 2^{ου} νόμου του Horton

Σύμφωνα με τον τρίτο νόμο του Horton (Σχ. 3.15), παρατηρείται μια συσχέτιση αρκετά καλή μεταξύ του αθροιστικού μέσου εμβαδού λεκανών ανά τάξη. Η εξίσωση που εκφράζει τον τρίτο νόμο του Horton δίνεται από τη σχέση:

$$\log(\Sigma A_u) = 0.74u - 1.79$$



Σχήμα 3.15: Διάγραμμα εφαρμογής 3^{ου} νόμου Horton

3.3 Ανάλυση των διαστάσεων των λεκανών μελέτης

3.3.1 Μεθοδολογία

Μία ακόμη έννοια που προτάθηκε από το Horton (1945) ήταν ο προσδιορισμός της υδρογραφικής υφής, η οποία περιλαμβάνει την υδρογραφική πυκνότητα και την υδρογραφική συχνότητα. Η υδρογραφική υφή μπορεί να είναι λεπτή, όταν το υδρογραφικό δίκτυο είναι πυκνό και με μεγάλη συχνότητα κλάδων ή τραχεία, όταν το υδρογραφικό δίκτυο είναι αραιό και με μικρή συχνότητα κλάδων (Ζαμάνη, 1995). Η υδρογραφική υφή αντανακλά, κατά μία έννοια, την αλληλεπίδραση μεταξύ των διεργασιών εκβάθυνσης και επιφανειακής αντίστασης, ενώ κατά μία άλλη έννοια, επηρεάζει την ικανότητα απορροής του νερού σε μία περιοχή κατά τη διάρκεια έντονων πλημμυρικών γεγονότων (Knighton, 1998). Δύο ομάδες παραγόντων επηρεάζουν την υδρογραφική υφή: οι παράγοντες που ελέγχουν την ποσότητα και ποιότητα του νερού που παραμένει στην επιφάνεια και οι παράγοντες που ελέγχουν την μετέπειτα κατανομή του και την ικανότητά του να διαβρώνει. Η πρώτη ομάδα σχετίζεται με το κλίμα, ενώ η δεύτερη με τη λιθολογία, τη βλάστηση, το έδαφος και την τοπογραφία.

Το κλίμα επιδρά άμεσα και έμμεσα επί της υδρογραφικής υφής (Ζαμάνη, 1995). Συγκεκριμένα, η ποσότητα και το είδος των βροχοπτώσεων επηρεάζουν την υφή άμεσα, ενώ η ποσότητα και το είδος της βλαστήσεως, που ελέγχεται από τους κλιματικούς παράγοντες, και ελέγχει την διήθηση και την απορροή, επηρεάζει την υφή έμμεσα. Η διαπερατότητα του πετρώματος ή του αποσαθρωμένου υλικού είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την υδρογραφική υφή. Η διαπερατότητα επηρεάζει την σχετική ποσότητα επιφανειακής και υποεπιφανειακής ροής, με αποτέλεσμα περιοχές με λιγότερο διαπερατά πετρώματα να έχουν λεπτή υφή (Gregory & Gardiner, 1975, Walsh, 1985). Επίσης, άμεση εξάρτηση υπάρχει με το αρχικό ανάγλυφο. Η υδρογραφική υφή θα είναι μεγαλύτερη σε ένα ανώμαλο ανάγλυφο παρά σε ένα ομαλό (Ζαμάνη, 1995). Τέλος, σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της υδρογραφικής υφής παίζει η δομή του πετρώματος.

Οι δύο αυτές βασικές έννοιες ανάλυσης των διαστάσεων μιας υδρολογικής λεκάνης βασίζονται σε διάφορους μαθηματικούς τύπους. Αναλυτικότερα:

Η **υδρογραφική πυκνότητα (R_D)**, ορίζεται ως ο λόγος του συνολικού μήκους όλων των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου προς τη συνολική έκταση της λεκάνης απορροής, δηλαδή:

$$R_D = \frac{\sum L}{A} \text{ σε km}^{-1}$$

Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου εξαρτάται από τον κλιματικό τύπο, τις γεωλογικές συνθήκες, τον εδαφικό μανδύα και τη φυτοκάλυψη της λεκάνης απορροής. Οι τιμές που μπορεί να λάβει η υδρογραφική πυκνότητα ποικίλουν, έτσι ανάλογα με αυτές διακρίνουμε (Reddy *et al*, 2004):

- **Χαμηλή υδρογραφική πυκνότητα**, με τιμές από 3 έως 4 (π.χ. σε περιοχές με σκληρά πετρώματα και πυκνή βλάστηση).
- **Μέση υδρογραφική πυκνότητα**, με τιμές από 8 έως 16 (π.χ. σε περιοχές με μαλακά πετρώματα και πυκνή βλάστηση).
- **Υψηλή υδρογραφική πυκνότητα**, με τιμές από 30 έως 50 (π.χ. σε περιοχές με μαλακά πετρώματα και υψηλό ανάγλυφο, χωρίς βλάστηση).

Η υδρογραφική συχνότητα (R_F), ισούται με το πηλίκο του συνολικού αριθμού των κλάδων προς τη συνολική έκταση της υδρολογικής λεκάνης, δηλαδή:

$$R_F = \frac{\sum N}{A} \text{ σε km}^{-2}$$

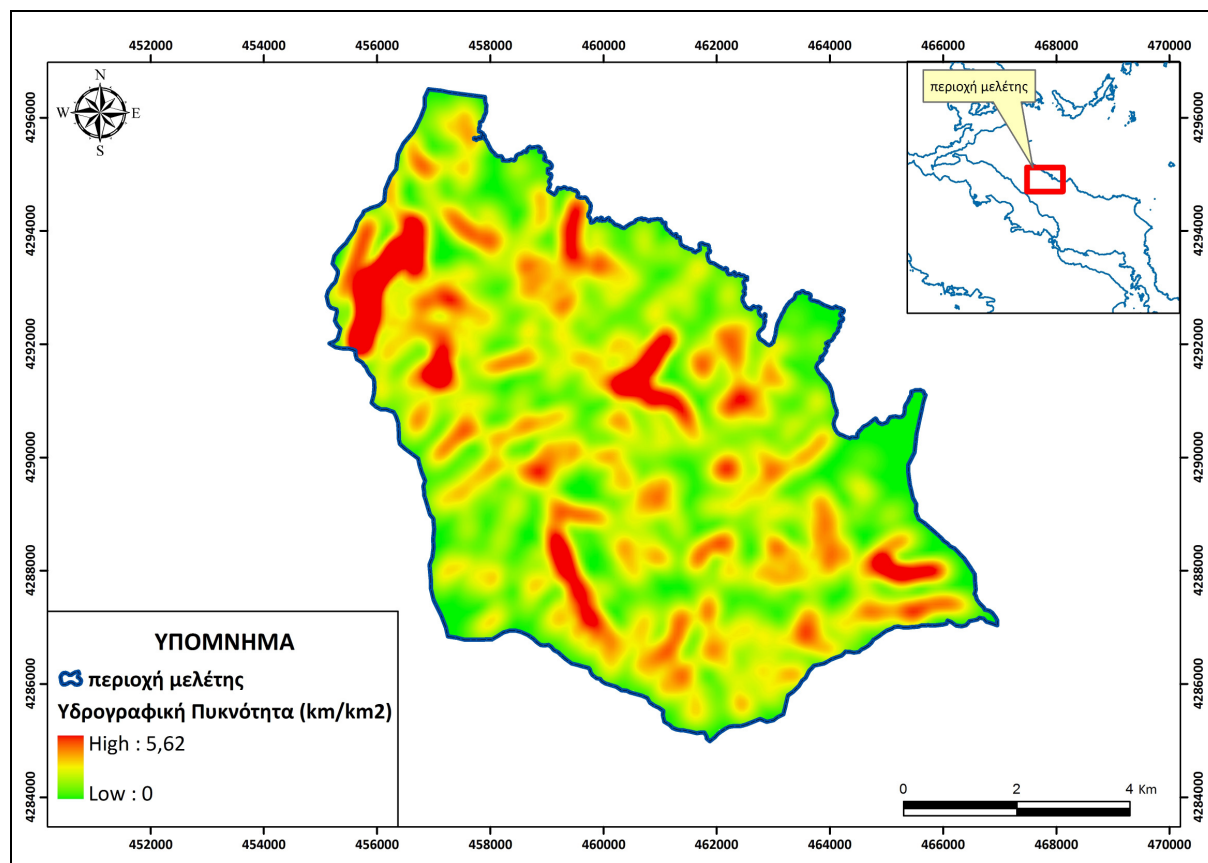
Το πλήθος των κλάδων, το οποίο αποτελεί τον καθοριστικό παράγοντα της συχνότητας, εξαρτάται από τους ίδιους παράγοντες από τους οποίους εξαρτώνται οι τιμές της υδρογραφικής πυκνότητας, δηλαδή την σκληρότητα των πετρωμάτων που συνιστούν τη λεκάνη απορροής, τη βλάστηση και το ανάγλυφο (Λεωνιδοπούλου, 2007).

3.3.2 Αποτελέσματα ανάλυσης υδρογραφικής υφής

Με βάση τα αποτελέσματα της ποσοτικής ανάλυσης του υδρογραφικού δικτύου για κάθε λεκάνη απορροής μελέτης υπολογίστηκαν οι κυριότερες μορφολογικές παράμετροι που περιγράφουν την υδρογραφική υφή της περιοχής μελέτης (Πίν. 3.13), βάση των οποίων κατασκευάστηκε και ο χάρτης κατανομής της υδρογραφικής πυκνότητας (Σχ. 3.16).

Πίνακας 3.13: Αποτελέσματα προσδιορισμού παραμέτρων υδρογραφικής υφής στην περιοχή μελέτης

Μορφολογικές παράμετροι	Κυμάσι	Δαφνοπόταμος	Πήλι
Συνολικό μήκος κλάδων (Km)	106,06	71,50	32,19
Συντελεστής διακλάδωσης R_b	5,24	5,27	3,93
Υδρογραφική πυκνότητα R_D (km^{-1})	3,05	3,21	2,44
Υδρογραφική συχνότητα R_F (km^{-2})	6,53	8,18	5,98

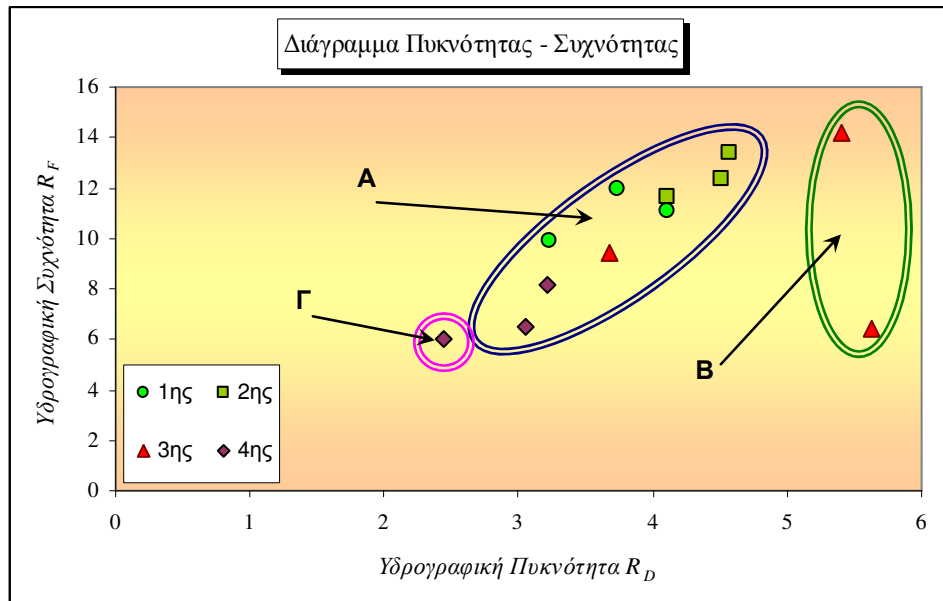


Σχήμα 3.16: Χάρτης κατανομής της υδρογραφικής πυκνότητας της περιοχής μελέτης

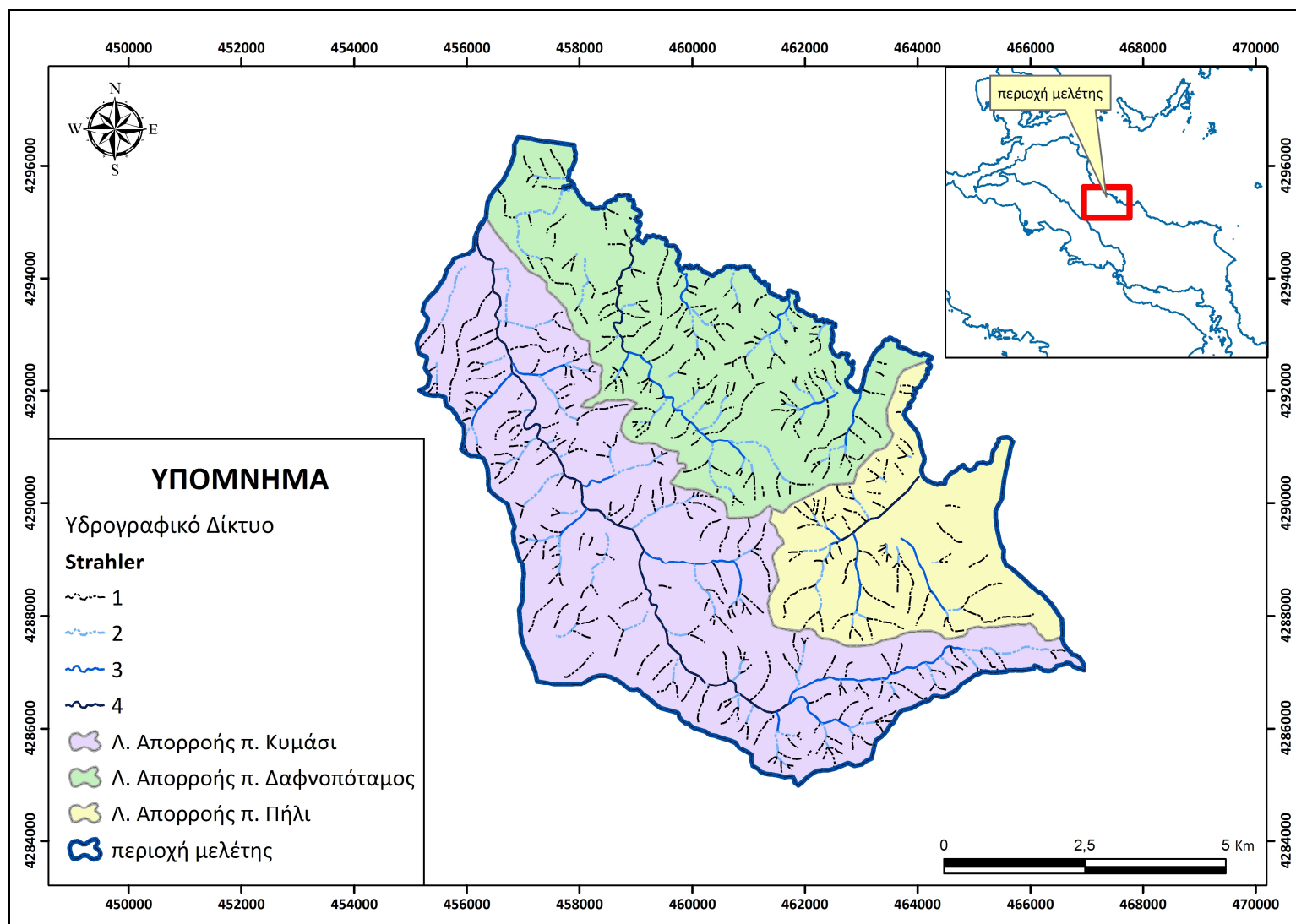
Κατά κανόνα οι τιμές της υδρογραφικής συχνότητας είναι μεγαλύτερες από τις τιμές της υδρογραφικής πυκνότητας, ιδιαίτερα στις μικρότερες τάξεις.

Σύμφωνα με την ποσοτική ανάλυση προέκυψε ότι ο συντελεστής διακλάδωσης R_b για την περιοχή μελέτης κυμαίνεται από **3,93** έως **5,27**, η υδρογραφική πυκνότητα R_D κυμαίνεται από **2,44** έως **3,21 km/km²** και η υδρογραφική συχνότητα R_F από **5,98** έως **8,18 ανά km²** (Πίν. 3.13).

Σύμφωνα με το διάγραμμα υδρογραφικής πυκνότητας – συχνότητας (Σχ. 3.17), παρατηρείται συγκέντρωση μεταξύ των τιμών 3 ως 5 km/km² για την πυκνότητα και 6,5 έως 13,4 km⁻² για τη συχνότητα (ομάδα Α). Αποκλίσεις παρατηρούνται στους κλάδους 3^{ης} τάξης του ποταμού Δαφνοπόταμος (ομάδα Β), όπου παρατηρούνται υψηλές τιμές τόσο της υδρογραφικής πυκνότητας όσο και συχνότητας εξαιτίας της απουσίας βλάστησης και της παρουσίας πυκνού δικτύου ασυνεχειών που επιτρέπει την κατείσδυση του επιφανειακού νερού. Αντιστοίχως, οι κλάδοι 3^{ης} τάξης του ποταμού Κυμάσι βρίσκονται σε περιοχές επίσης με πυκνό δίκτυο ασυνεχειών αλλά η παρουσία πυκνής βλάστησης επηρεάζει την υδρογραφική συχνότητα σε μεγαλύτερο βαθμό (ομάδα Β). Τέλος αποκλίσεις παρατηρούνται στη λεκάνη απορροής του ποταμού Πήλι (ομάδα Γ), όπου ο 4^{ης} τάξης κλάδος εμφανίζει αρκετά χαμηλές τιμές υδρογραφικής πυκνότητας και συχνότητας.



Σχήμα 3.17: Διάγραμμα υδρογραφικής συχνότητας – πυκνότητας



Σχήμα 3.18: Χάρτης υδρογραφικού δικτύου της περιοχής μελέτης

3.4 Τοπογραφική Κλίση

Οι πλαγιές (κλιτύες) και τα ρέματα (χείμαρροι, κλάδοι) αποτελούν στοιχεία που απαρτίζουν μια υδρογραφική λεκάνη. Σύμφωνα με τον Chorley (1969) τυπικά μία υδρογραφική λεκάνη απορροής είναι μία καλά ορισμένη τοπογραφική και υδρολογική οντότητα που θεωρείται θεμελιώδης χωρική ενότητα. Κατά τη Ζαμάνη (1995) οι υδρογραφικές λεκάνες είναι τοπογραφικές – μορφολογικές ταπεινώσεις διαφορετικής μορφής και μεγέθους που διελαύνονται από ποταμούς συνεχούς, περιοδικής ή διακεκομμένης ροής. Σχηματίζονται από την επιφανειακή ροή και μέσω της δράσεως τριών διεργασιών (Ζαμάνη, 1995):

- της εκβάθυνσης
- της διαπλάτυνσης και
- της επιμήκυνσης

Κατά τις διάφορες φάσεις δημιουργίας και εξέλιξης των κοιλάδων, τα διάφορα τμήματα τους αυξομειώνονται και οι κλίσεις τους διαφοροποιούνται. Έτσι οι κλιτύες μιας υδρογραφικής λεκάνης στο στάδιο νεότητας έχουν μεγάλες κλίσεις και είναι στενές, που όμως με την πάροδο του χρόνου μειώνονται και διαπλατώνονται. Με άλλα λόγια οι κλίσεις των κλιτύων συχνά μαρτυρούν το στάδιο εξέλιξης στο οποίο βρίσκεται η περιοχή. Ένας τρόπος προσδιορισμού της υδρογραφικής κλίσεως S_u μιας λεκάνης είναι η μέτρηση του συνολικού μήκους των ισοϋψών μιας συγκεκριμένης υδρογραφικής λεκάνης επί της χρησιμοποιούμενης ισοδιάστασης προς τη συνολική επιφάνεια της λεκάνης αυτής.

$$S_u = 100 \times \frac{\sum L_c \times i}{A}$$

όπου:

$\sum L_c$ = το συνολικό μήκος των ισοϋψών μιας συγκεκριμένης υδρολογικής λεκάνης,

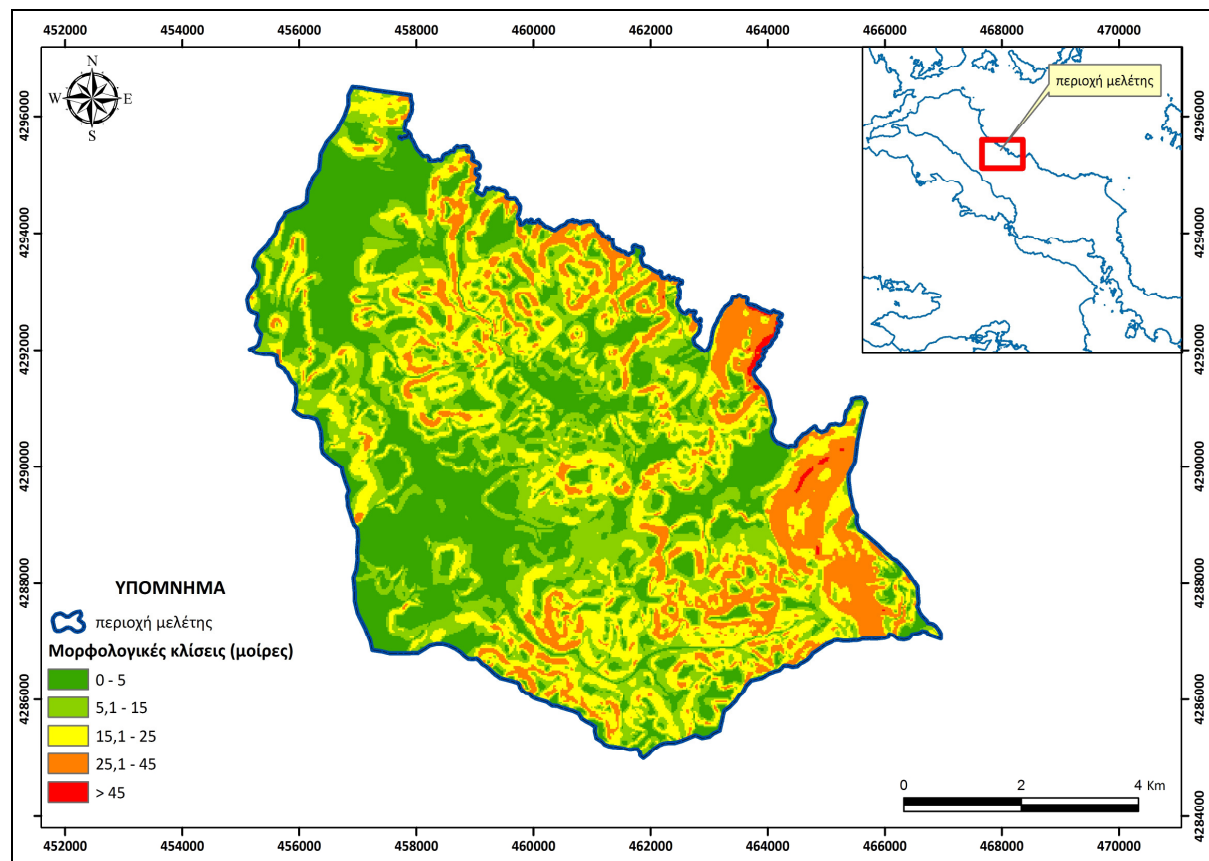
i = η χρησιμοποιούμενη ισοδιάσταση και

A = η συνολική επιφάνεια της λεκάνης

Η μορφολογική κλίση εκτός από την επιφανειακή απορροή καθορίζει ως ένα βαθμό το είδος και την ανάπτυξη των φυτών. Όταν σε μια περιοχή κυριαρχούν οι απότομες κλίσεις, τότε η επιφανειακή απορροή συντελείται με ταχείς ρυθμούς, με αποτέλεσμα να μην παραμένει διαθέσιμο το νερό για τα φυτά. Ακόμα στις περιπτώσεις αποσάθρωσης και σχηματισμού

αποσαθρωμένου μανδύα, όταν οι κλίσεις είναι απότομες, λόγω βαρύτητας το υλικό του μανδύα δεν συγκρατείται στις κλιτύες.

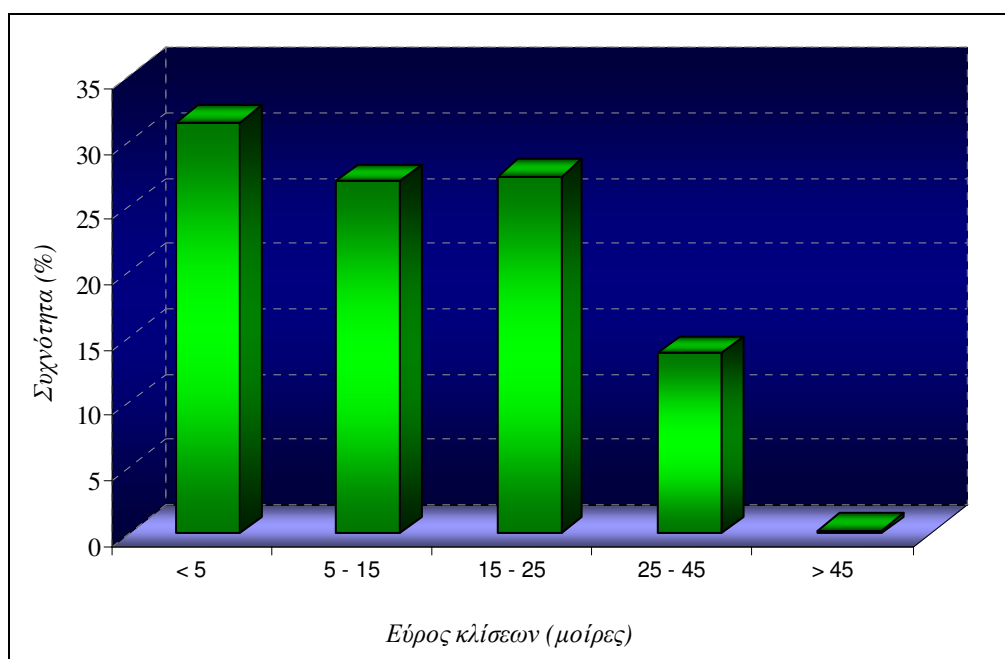
Οι τοπογραφικές κλίσεις στην περιοχή μελέτης (Σχ. 3.19) υπολογίστηκαν με τη βοήθεια των ΓΣΠ (GIS), σε συνδυασμό με την φωτοερμηνεία των αεροφωτογραφιών και την εργασία υπαίθρου κατά την οποία επιβεβαιώθηκαν τα αποτελέσματα της ποσοτικής ανάλυσης.



Σχήμα 3.19: Χάρτης μορφολογικών κλίσεων στην περιοχή μελέτης

Από τη στατιστική ανάλυση των τοπογραφικών κλίσεων διαπιστώνεται πως το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης σε ποσοστό 86% εμφανίζει τοπογραφικές κλίσεις μικρότερες από 25°. Από 25° – 45° παρατηρούνται σε ποσοστό 13,85% και ακολουθούν οι πολύ μεγάλες κλίσεις (> 45°) σε ποσοστό 0,26% (Σχ. 3.20).

Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις μορφολογικές κλίσεις και όχι την λιθολογία ή τους άλλους παράγοντες που επιδρούν στον συντελεστή κατείσδυσης και επιφανειακής απορροής συνάγεται το συμπέρασμα ότι στην περιοχή μελέτης φαίνεται να είναι αυξημένη η επιφανειακή απορροή.



Σχήμα 3.20: Ιστόγραμμα κατανομής συχνότητας τοπογραφικών κλίσεων στην περιοχή μελέτης

3.5 Γεωμορφολογικοί Παράγοντες που επιδρούν στην Τρωτότητα

Η γεωμορφολογική ανάλυση τόσο σε πεδινές, όσο και σε ορεινές συνθήκες, προσφέρει πολύτιμα στοιχεία για την κυκλοφορία του επιφανειακού και υπόγειου νερού καθώς επίσης και τις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις. Η αναγέννηση των υδρογραφικών δικτύων σε σχέση με τα παλαιά ίχνη τους είναι καθοδηγητική σε όλες τις κλίμακες θεώρησης και εφαρμογής, ως βασικό στοιχείο αναφοράς (Στουρνάρας, 2007). Επίσης, από τη μελέτη των ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών μιας υδρογραφικής λεκάνης μπορούν να εκτιμηθούν οι υδρογεωλογικές συνθήκες μιας περιοχής που θα οδηγήσει στην κατανόηση των μηχανισμών λειτουργίας αντιμετώπισης του ρύπου (π.χ. αραίωση, διήθηση) και άρα στην εκτίμηση της τρωτότητας του μέσου ασυνεχειών (Singhal & Gupta, 1999).

Πέρα από την τοπογραφική κλίση που αποτελεί καταλυτικό παράγοντα στη διαμόρφωση ενός πλαισίου προστασίας του υδροφόρου ορίζοντα, εξίσου σημαντικό ρόλο αποτελεί και ο παράγοντας της υδρογραφικής υφής. Ο παράγοντας αυτός εξαρτάται από το ποσοστό της επιφανειακής απορροής αλλά και από την διαπερατότητα των πετρωμάτων. Έτσι, σε όμοιες λιθολογικές συνθήκες και γεωλογική δομή, όταν η υφή είναι λεπτή, δηλαδή οι τιμές της πυκνότητας και συχνότητας αυξημένες, η επιφανειακή απορροή είναι μεγάλη και άρα η διαπερατότητα των πετρωμάτων μικρή και επομένως ο κίνδυνος έκθεσης του υδροφόρου συστήματος σε ρυπαντικό φορτίο μειωμένος. Αντίθετα, όταν η υφή είναι τραχεία, δηλαδή οι τιμές της πυκνότητας και συχνότητας είναι μικρές, η επιφανειακή απορροή είναι

περιορισμένη και άρα η διαπερατότητα των πετρωμάτων μεγαλύτερη και κατ' επέκταση μεγαλύτερος ο κίνδυνος έκθεσης του υδροφόρου συστήματος σε ρυπαντικό φορτίο.

3.6 Συμπεράσματα

Το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης αποτελείται από 485 κλάδους, εκ των οποίων οι 377 είναι 1^{ης} τάξης, οι 87 είναι 2^{ης} τάξης, οι 18 είναι 3^{ης} τάξης, και οι 3 είναι 4^{ης} τάξης, οι οποίοι είναι και μόνιμης ροής. Τα δίκτυα μεγαλύτερης τάξης συγκεντρώνονται κυρίως στο ΝΑ/κό τμήμα, αλλά και στο ΒΑ/κό τμήμα της περιοχής μελέτης αντίστοιχα. Χαρακτηριστικό του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής μελέτης είναι ότι η μεγαλύτερη σε έκταση λεκάνη απορροής του ποταμού Κυμάσι, έχει διεύθυνση σχεδόν Α – Δ, η οποία εν συνεχεία, εξαιτίας ενδεχομένως της τεκτονικής επίδρασης, αλλάζει διεύθυνση και γίνεται ΒΑ – ΝΔ, η οποία και αποτελεί τον κύριο άξονα διεύθυνσης των ρηγμάτων της περιοχής μελέτης.

Η ανάλυση των υδρογραφικών δικτύων της περιοχής μελέτης έδειξε ότι ο τύπος που επικρατεί είναι δενδριτικού ή επιμηκυμένου δενδριτικού. Ο δενδριτικός τύπος υδρογραφικού δικτύου υποδηλώνει μια ομοιομορφία στην εξέλιξη του δικτύου χωρίς να επηρεάζεται από μεγάλα τεκτονικά γεγονότα. Φυσικά, κάτι τέτοιο δεν σημαίνει ότι το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης δεν έχει επηρεαστεί από τα τεκτονικά γεγονότα που έχουν λάβει χώρα. Αντιθέτως, από τη λεπτομερή υδρογραφική ανάλυση, παρατηρείται ότι κλάδοι μεγάλου μήκους αναπτύσσονται κατά μήκος ρηξιγενών ζωνών ή κλάδοι συγκεκριμένης διεύθυνσης ροής αλλάζουν διεύθυνση ροής κατά 45° (Υ.Δ. Κυμάσι) περίπου λόγω κάποιου ρήγματος, ενώ επιπροσθέτως το δενδριτικό σχήμα των υδρογραφικών δικτύων έχει παραμορφωθεί σε επιμηκυμένου δενδριτικού λόγω ρηξιγενών και τεκτονικών επαφών (Υ.Δ. Δαφνοπόταμος και Υ.Δ. Κυμασίου). Από τη λεπτομερή υδρογραφική ανάλυση προέκυψε ότι ο μεγαλύτερος αριθμός κλάδων 1^{ης} τάξης, καθώς επίσης και μεγάλος αριθμός κλάδων μικρού μήκους, αναπτύσσονται σε υδρογραφικές υπολεκάνες μικρής έκτασης. Πρόκειται για πολύ νέους κλάδους, οι οποίοι δεν έχουν προλάβει να αναπτυχθούν και να προσαρμοστούν στις γεωλογικές συνθήκες της περιοχής, κάτι που αντικατοπτρίζεται και από τις τιμές της υδρογραφικής υφής.

Από τον χάρτη της κατανομής της υδρογραφικής πυκνότητας φαίνεται ότι οι μεγαλύτερες τιμές υδρογραφικής πυκνότητας συγκεντρώνονται κυρίως εντός της λεκάνης απορροής του ποταμού Κυμάσι, που σημαίνει ότι στην περιοχή αυτή αποστραγγίζεται μεγάλο μήκος κλάδων σε σχέση με την έκταση που καταλαμβάνουν οι υπολεκάνες απορροής.

Η συσχέτιση των περιοχών που εμφανίζουν υψηλές τιμές υδρογραφικής υφής με τις υψηλές τιμές των τοπογραφικών κλίσεων είναι σχεδόν όμοιες. Επομένως, στις περιοχές αυτές οι

συνθήκες δεν είναι ευνοϊκές, όσον αφορά την κατείδυση του επιφανειακού νερού σε μεγαλύτερα βάθη, κυρίως λόγω της απουσίας βλάστησης. Αυτό ταυτόχρονα αποτελεί σημαντικό παράγοντα στη διαμόρφωση της εσωτερικής τρωτότητας και θα πρέπει να συμπεριλαμβάνεται στα κριτήρια εκτίμησης με συντελεστή βαρύτητας υψηλό.

4. ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ

4.1 Γενικά

Η υδρολογία των υπόγειων νερών δεν είναι ανεξάρτητη εκείνης των επιφανειακών. Η δίατα των υπόγειων υδροφόρων οριζόντων βρίσκεται σε πολύ στενή σχέση με την αντίστοιχη των επιφανειακών νερών. Επομένως για την εκτίμηση ενός ισοζυγίου του υπόγειου δυναμικού είναι απαραίτητη η γνώση του αντίστοιχου ισοζυγίου των επιφανειακών νερών.

Είναι γνωστό ότι το υδρολογικό ισοζύγιο μιας περιοχής εκφράζεται από τη σχέση:

$$P = R + E + I + \Delta W + \Delta q + q \text{ (Castany, 1967)}$$

όπου:

P = το ποσό των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που δέχεται ετησίως η περιοχή

R = το ετήσιο ποσό του νερού που απορρέει επιφανειακά από την περιοχή

E = το ετήσιο ποσό νερού που εξατμίζεται και εκείνο που χρησιμοποιείται από τα φυτά για τη διεργασία της διαπνοής

I = το ποσό του νερού που κατεισδύει ετησίως στα υδροφόρα στρώματα και τροφοδοτεί τους υπόγειους ταμιευτήρες

ΔW = η διαφορική αλλαγή στην αποθήκευση νερού στη γή

Δq = το αποτέλεσμα της ανθρώπινης επέμβασης

q = η εξωτερική τροφοδοσία

Με την προϋπόθεση ότι η περιοχή αποτελεί ένα αυτοτελές σύστημα και ότι οι ανθρώπινες επεμβάσεις και οι μεταβολές στα υπόγεια αποθέματα θεωρούνται αμελητέες, οι παράγοντες ΔW , ΔQ και q της παραπάνω εξίσωσης παραλείπονται και παίρνει τη μορφή:

$$P = R + E + I$$

Τα παραπάνω μεγέθη μπορούν να εκφραστούν είτε σε ύψος νερού (mm) είτε σε όγκο νερού (m^3) ή σε ποσοστό επί τοις εκατό (%).

4.2 Μεθοδολογία έρευνας

Προκειμένου να μελετηθούν οι κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή έρευνας συγκεντρώθηκαν, αξιολογήθηκαν και επεξεργάστηκαν όλα τα μετεωρολογικά δεδομένα των σταθμών που λειτουργούν σήμερα στην περιοχή. Βέβαια πρέπει να σημειωθεί ότι η τόσο η πυκνότητα όσο και η κατανομή των σταθμών στην περιοχή έρευνας δυσχεραίνουν την κατάρτιση ενός ολοκληρωμένου και αξιόπιστου ποσοτικού υδρολογικού ισοζυγίου.

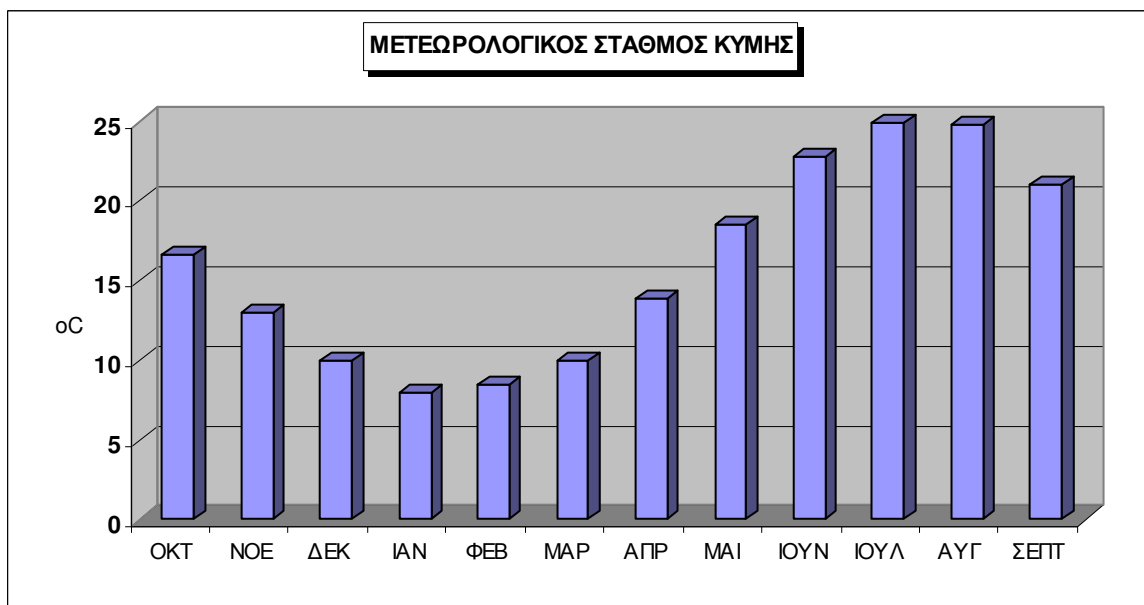
Σημαντικός παράγοντας του υδρολογικού ισοζυγίου είναι η επιφανειακή απορροή. Στην περιοχή έρευνας δεν υπάρχουν σταθμοί που να λαμβάνουν συστηματικές μετρήσεις της απορροής στην περιοχή μελέτης, για αυτό το λόγο οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε μηνιαία βάση με φορητό μικρομυλίσκο της εταιρείας SEBA στο ανάντι και κατάντι του κάθε ποταμού της περιοχής μελέτης.

4.3 Κλιματικά στοιχεία

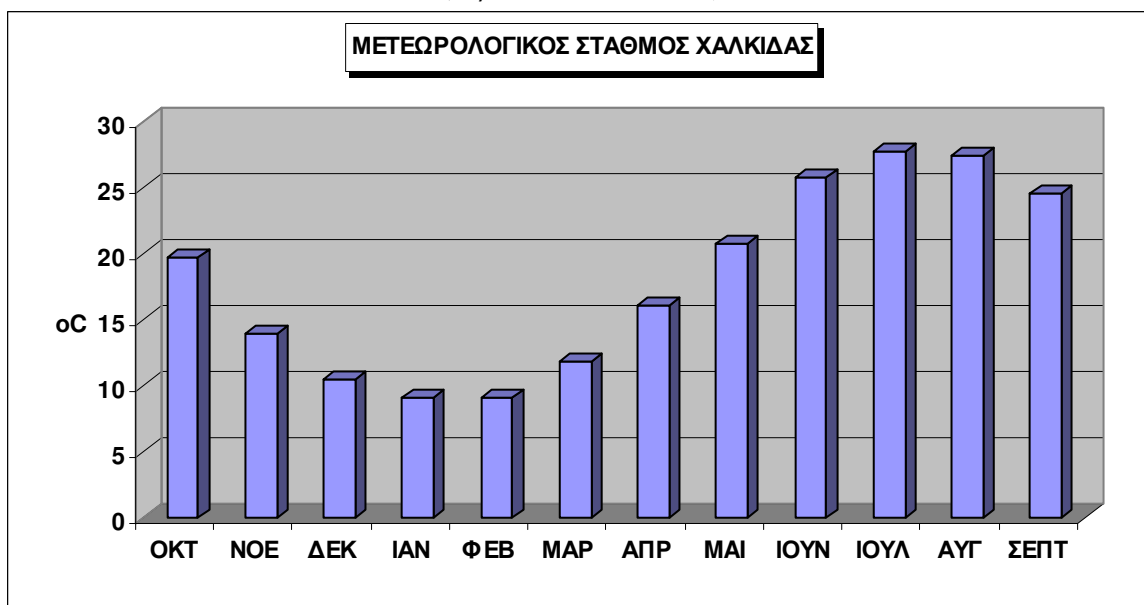
Το κύριο κλιματικό στοιχείο της περιοχής είναι η ετήσια εναλλαγή μιας ψυχρής – υγρής και μίας θερμής – ξηρής περιόδου. Αυτό διαπιστώνεται και από το γεγονός ότι η έναρξη του υδρολογικού έτους γίνεται τον μήνα Οκτώβριο, όπου αρχίζει και η υγρή περίοδος, η οποία σταματάει το μήνα Απρίλιο οπότε και αρχίζει η ξηρή περίοδος.

Γενικά το κλίμα της περιοχής χαρακτηρίζεται από την επικράτηση ανέμων μέσης διεύθυνσης ΒΔ – ΝΑ (σταθμοί Κύμης και Χαλκίδας).

Από τα δεδομένα των μετεωρολογικών σταθμών της Κύμης, Χαλκίδας και Προκοπίου προέκυψε ότι η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται γύρω στους 17.02 °C, με μέγιστη μέση μηνιαία τιμή της θερμοκρασίας να παρατηρείται κατά το μήνα Ιούλιο περίπου 26.4 °C και ελάχιστη μέση μηνιαία τιμή κατά το μήνα Ιανουάριο με τιμή 8.6 °C. Στα σχήματα 4.1 και 4.2 παρουσιάζεται η μέση μηνιαία κατανομή της θερμοκρασίας στους δύο σταθμούς.



Σχήμα 4.1: Μηνιαία κατανομή της θερμοκρασίας στο Μετεωρολογικό σταθμό Κύμης (περίοδος 1956 – 1990)



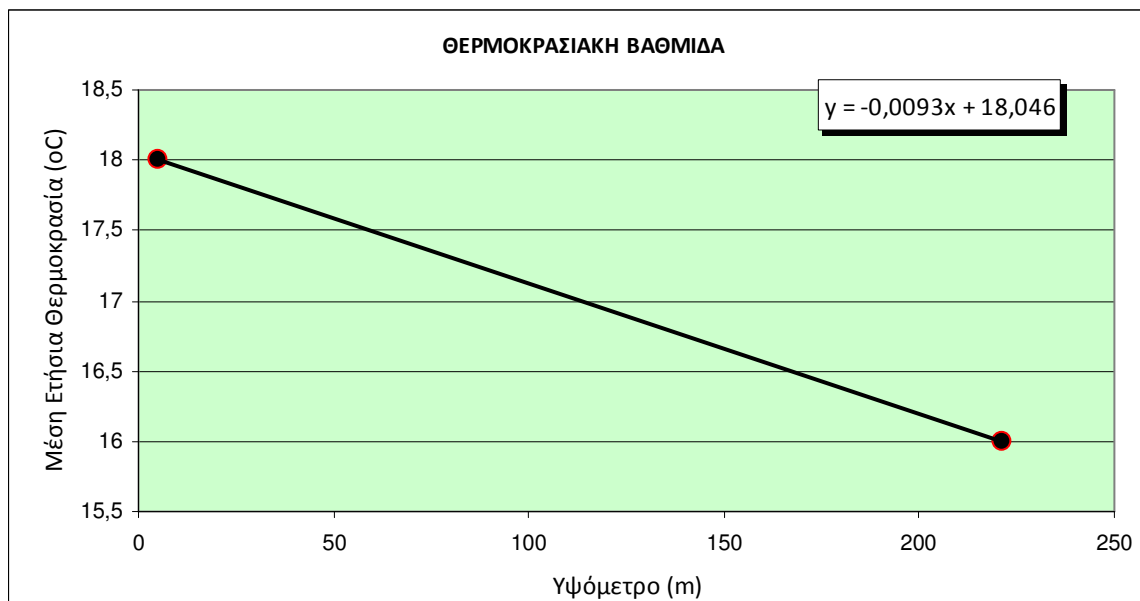
Σχήμα 4.2: Μηνιαία κατανομή της θερμοκρασίας στο Μετεωρολογικό σταθμό Χαλκίδας (περίοδος 1974 – 1994)

Η συσχέτιση της θερμοκρασίας με το υψόμετρο αναλύθηκε ποσοτικά με τη χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων και προέκυψε η εξίσωση:

$$y = -0,0093x + 18,046$$

$$y = -0,0093 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{m}$$

Φαίνεται επομένως ότι η τιμή της θερμοκρασίας αυξάνεται κατά 0,93 °C ανά 100 m υψομετρικής διαφοράς ενώ η θερμοκρασία που αντιστοιχεί στο υψόμετρο της θάλασσας ανέρχεται σε 18,046 °C. Στο σχήμα 4.3 απεικονίζεται η ευθεία μεταβολής της θερμοκρασίας συναρτήσει του υψομέτρου για την περιοχή έρευνας.



Σχήμα 4.3: Σχέση μέσης ετήσιας θερμοκρασίας – υψομέτρου για την περιοχή έρευνας

4.4 Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα

Όπως ήδη αναφέρθηκε στην περιοχή έρευνας δε λειτουργεί κανένας βροχομετρικός σταθμός. Είναι κατανοητό επομένως, πως η εγκατάσταση σταθμών στην υπό μελέτη λεκάνη κρίνεται αναγκαία.

Για τον υπολογισμό του όγκου των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, τα οποία δέχεται ετησίως η υπό μελέτη λεκάνη, συγκεντρώθηκαν και αξιολογήθηκαν τα δεδομένα των σταθμών Κύμης, Χαλκίδας και Προκοπίου.

Στον πίνακα 4.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά στοιχεία των τριών βροχομετρικών σταθμών.

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά στοιχεία των βροχομετρικών σταθμών της περιοχής έρευνας

Σταθμός	Φορέας Διαχείρισης	Υψόμετρο (m)	Ύψος βροχής (mm)	Περίοδος Λειτουργίας
Κύμη	Ε.Μ.Υ.	221,1	1031,9	1956 – 1990
Προκόπι	ΥΠ.ΔΕ.	60	1031,9	1960 – 1987
Χαλκίδα	Ε.Μ.Υ.	5	390,2	1974 – 1994

Η χρήση των δεδομένων ενός σταθμού στην κατάρτιση του υδρολογικού ισοζυγίου μιας περιοχής προϋποθέτει την ισχυρή συσχέτισή τους με τα αντίστοιχα των γειτονικών σταθμών. Για αυτό το λόγο κρίθηκε απαραίτητος ο υπολογισμός του συντελεστή συσχέτισης των ετησίων υψών βροχής κάθε βροχομετρικού σταθμού με τα αντίστοιχα των υπολοίπων και τα αποτελέσματα παρατίθενται στον πίνακα 4.2.

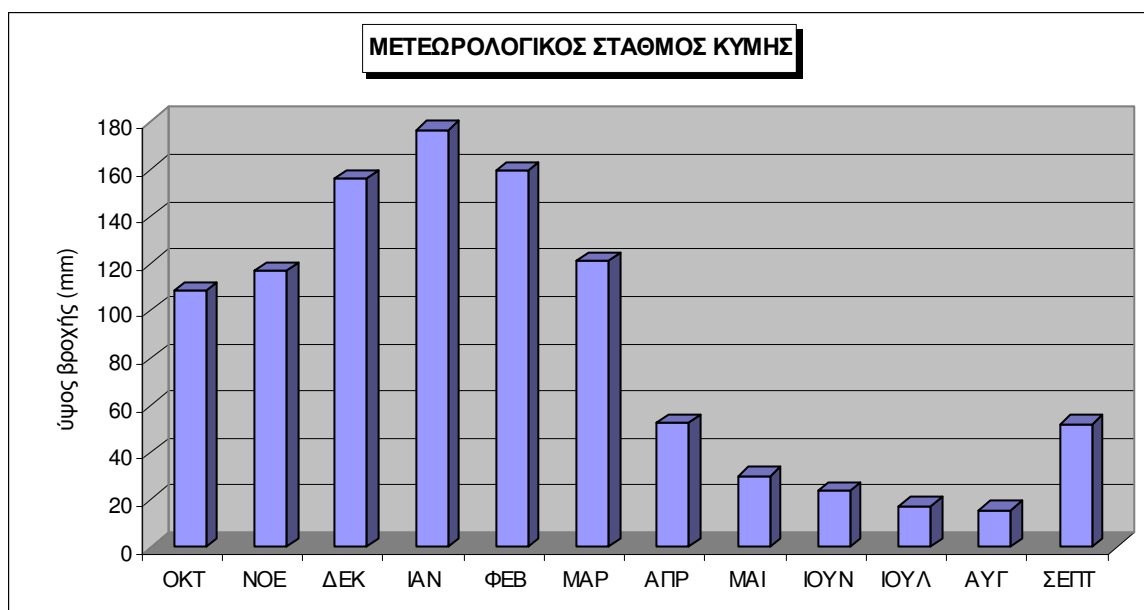
Πίνακας 4.2: Συντελεστές συσχέτισης των βροχομετρικών σταθμών της περιοχής έρευνας

Β.Σ.	Κύμη	Προκόπι	Χαλκίδα
Κύμη	1,00	0,94	0,85
Προκόπι	0,94	1,00	0,81
Χαλκίδα	0,85	0,81	1,00

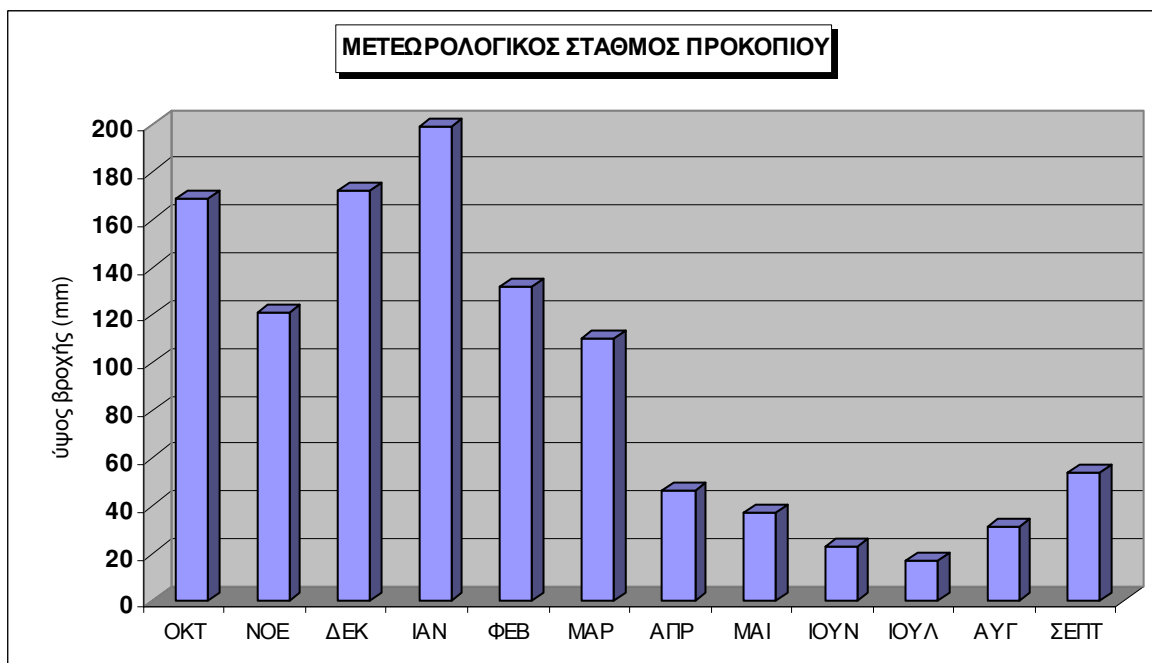
Από τον παραπάνω πίνακα διαπιστώνεται ότι αν και τα δεδομένα των τριών σταθμών παρουσιάζουν πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ τους, εντούτοις τα δεδομένα του σταθμού Χαλκίδας (ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα) δεν ελήφθησαν υπόψη, καθώς βρίσκεται σε πολύ χαμηλότερο υψόμετρο με διαφορετικό προσανατολισμό, σε σχέση με τους υπόλοιπους σταθμούς (Πίν. 4.1), κάτι που θα οδηγούσε σε λιγότερο ασφαλή συμπεράσματα.

Στα σχήματα 4.4 – 4.6 παρουσιάζεται η μέση μηνιαία πορεία των βροχοπτώσεων στους σταθμούς της περιοχής έρευνας.

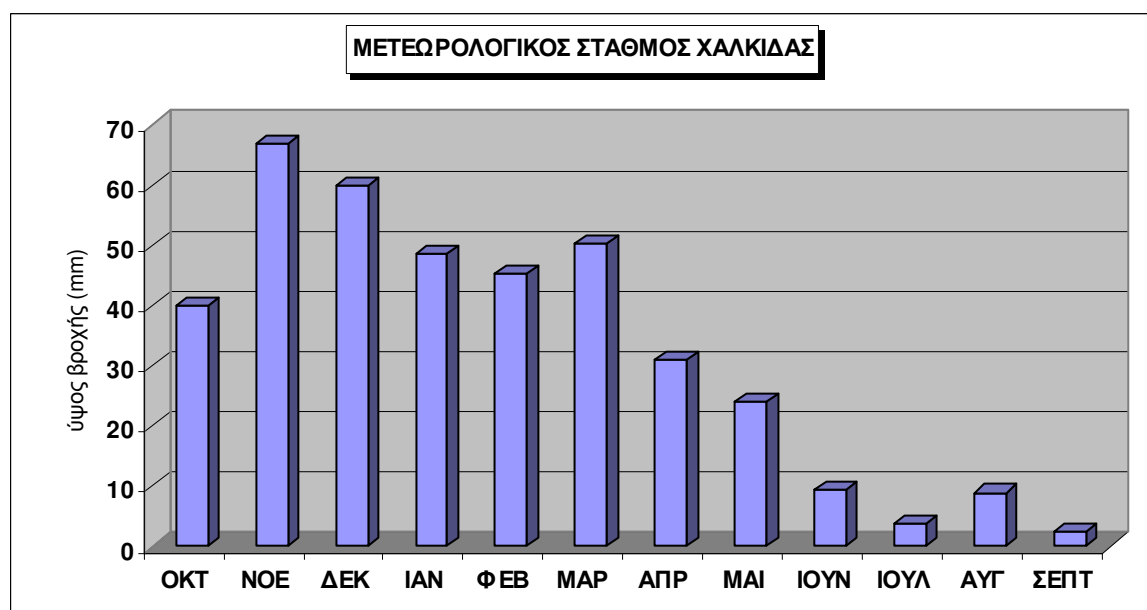
Από τη μελέτη δε των μέσων μηνιαίων υψών βροχόπτωσης για την ίδια περίοδο διαπιστώνεται ότι το μέγιστο ύψος ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων παρατηρείται το μήνα Ιανουάριο (μέσο ύψος βροχής 187,9 mm) ενώ τα ελάχιστα κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



Σχήμα 4.4: Ιστόγραμμα μέσης μηνιαίας κατανομής των βροχοπτώσεων στο σταθμό Κύμης



Σχήμα 4.5: Ιστόγραμμα μέσης μηνιαίας κατανομής των βροχοπτώσεων στο σταθμό Προκόπι



Σχήμα 4.6: Ιστόγραμμα μέσης μηνιαίας κατανομής των βροχοπτώσεων στο σταθμό Χαλκίδας

4.5 Όγκος νερού από βροχόπτωση

Για τον υπολογισμό του όγκου νερού που δέχεται η περιοχή έρευνας χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από τους δύο μετεωρολογικούς σταθμούς της περιοχής έρευνας. Τα στοιχεία παρουσιάζονται στον πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: Μέσος ετήσιος όγκος νερού ($\times 10^6 \text{m}^3$) από βροχόπτωση ανά λεκάνη απορροής στην περιοχή μελέτης

Λεκάνη Απορροής	Επιφάνεια (km^2)	Όγκος νερού ($\times 10^6 \text{m}^3$)	Μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης (mm)
Κυμάσι	34,76	35,87	1031,9
Δαφνοπόταμος	22,25	22,96	1031,9
Πήλι	13,21	13,63	1031,9

Με βάση τα στοιχεία της ίδιας μελέτης παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό νερού από βροχόπτωση αντιστοιχεί, σύμφωνα με την έκτασή τους, στους οφιολίθους ενώ το μικρότερο στους κώνους κορημάτων αντίστοιχα. Στον πίνακα 4.4 που ακολουθεί δίνονται αναλυτικά τα ποσοστά βροχόπτωσης που αντιστοιχούν στους διάφορους σχηματισμούς.

Πίνακας 4.4: Μέσος ετήσιος όγκος νερού που δέχεται κάθε γεωλογικός σχηματισμός

Λεκάνη Απορροής	Αλλουβιακές προσχώσεις ($\times 10^6 \text{m}^3$)	Κώνοι κορημάτων ($\times 10^6 \text{m}^3$)	Σχιστόλιθος ($\times 10^6 \text{m}^3$)	Οφιολίθοι ($\times 10^6 \text{m}^3$)	Ασβεστόλιθοι ($\times 10^6 \text{m}^3$)	Σύνολο ($\times 10^6 \text{m}^3$)
Κυμάσι	3,77	0,53	2,66	27,50	1,41	35,87
Δαφνοπόταμος	1,40	---	0,51	18,65	2,40	22,96
Πήλι	0,75	0,49	1,48	6,21	4,71	13,64

4.6 Εξατμισοδιαπνοή

Για την κατάρτιση του υδρολογικού ισοζυγίου μιας περιοχής απαιτείται η γνώση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής (Eg).

Η εξατμισοδιαπνοή είναι συνάρτηση της υγρασίας του εδάφους και επηρεάζεται από τους παράγοντες που λειτουργούν ρυθμιστικά επί της εξάτμισης και της διαπνοής. Αυτοί οι παράγοντες είναι:

- ατμοσφαιρικοί όπως η υγρομετρική κατάσταση της ατμόσφαιρας, η θερμοκρασία, η ταχύτητα του ανέμου, η βροχομετρική πίεση κλπ.
- υδρογεωλογικοί παράγοντες όπως η κοκκομετρία, το πορώδες, η λιθολογία και η υγρασία του εδάφους.
- γεωγραφικοί παράγοντες όπως είναι το υψόμετρο, οι κλιματικές ζώνες κλπ.
- φυσιογραφικοί παράγοντες που επιδρούν κυρίως επί της διαπνοής όπως το είδος της χλωρίδας, η ανάπτυξη του φυλλώματος, το βάθος των ριζών κλπ.

Σημαντικότεροι όμως παράγοντες θεωρούνται η μέση ετήσια θερμοκρασία και η υγρασία. Για τον υπολογισμό της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα i) της μεθόδου **Turc** (1954), συναρτήσει της μηνιαίας τιμής θερμοκρασίας και βροχόπτωσης, από τη σχέση:

$$Er = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}}$$

όπου:

E: η πραγματική μηνιαία εξατμισοδιαπνοή σε mm,

P: το μέσο μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης σε mm,

L: $300 + 25T + 0.05 T^3$ και

T: η μηνιαία θερμοκρασία του αέρα σε °C, που αντιστοιχεί στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης (H_{μ})

ii) της μεθόδου **Thornthwaite – Matther** (1955), συναρτήσει της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας και του ετήσιου θερμικού δείκτη του Thornthwaite, από τη σχέση:

$$Ep = 1,62 \left(\frac{10T}{I} \right)^{\alpha}$$

όπου:

Ep: παριστάνει την δυνητική μηνιαία εξατμισοδιαπνοή,

T : είναι η μέση θερμοκρασία για το μήνα που εξετάζουμε,

α : $0,49239 + 1792 * 10^{-5} * I - 771 * 10^{-7} * I^2 + 675 * 10^{-9} * I^3$

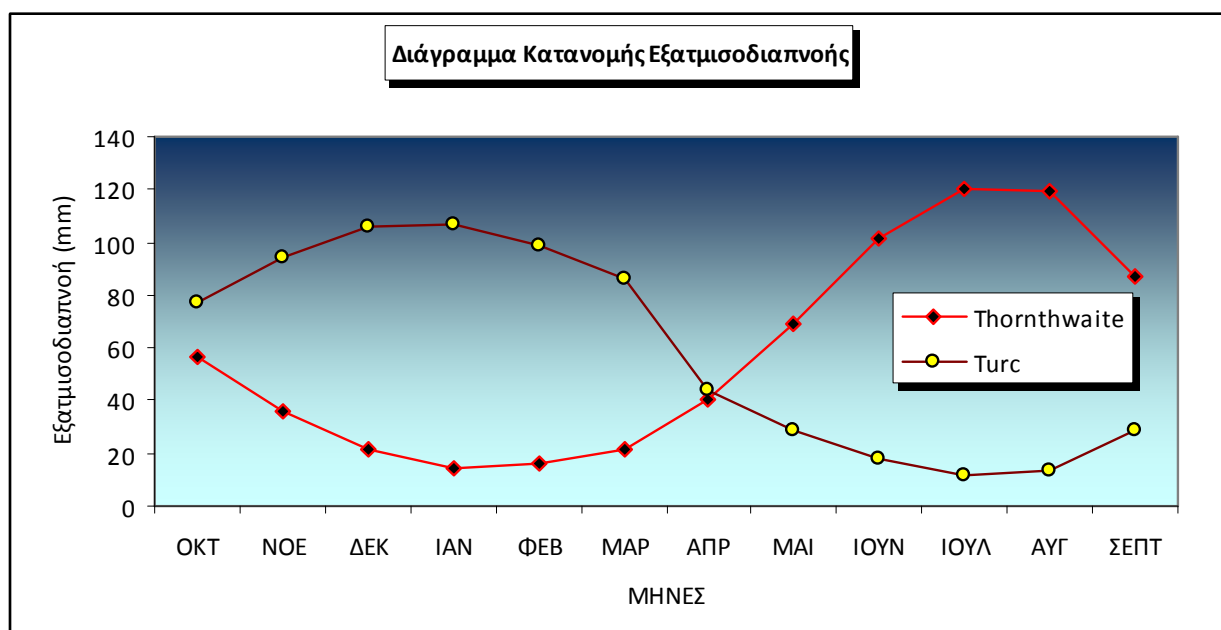
I : το άθροισμα των μηνιαίων δεικτών της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (*i*). Οι δείκτες αυτοί μπορούν να υπολογιστούν με τη σχέση:

$$i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1,514}$$

Πίνακας 4.5: Μέση μηνιαία πραγματική εξατμισοδιαπνοή υπολογισμένη σε mm

Μέθοδος	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	Ετήσια
Turc	76.9	94.2	105.9	106.7	98.9	86.4	43.8	28.6	17.8	11.3	13.1	28.8	712.4
Thornthw.	56.2	35.6	21.8	14.4	16.1	21.8	40.3	68.8	101.6	119.8	118.9	87.2	702.4

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία για την περιοχή έρευνας προέκυψε ότι η μέθοδος κατά Thornthwaite – Matter δίνει μια μέση ετήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή της τάξεως των **702,4 mm** ύψους βροχόπτωσης σε αντίθεση με τη μέθοδο κατά Turc όπου η μέση ετήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή ανέρχεται σε **712,4 mm** ύψους βροχόπτωσης. Η μέθοδος που γίνεται δεκτή είναι αυτή του Thornthwaite η οποία έχει συντελεστή **68,07%** του μέσου ετήσιου ύψους βροχόπτωσης και προσεγγίζει τη μέση τιμή εξατμισοδιαπνοής της κεντρικής Ελλάδας, καθώς η μέθοδος Turc, έχει διαπιστωθεί, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα του σχήματος 4.7, ότι δε δίνει καλά αποτελέσματα σε στενές περιοχές μικρού εύρους διακύμανσης των θερμοκρασιακών συνθηκών.



Σχήμα 4.7: Διάγραμμα κατανομής εξατμισοδιαπνοής (mm) – Εφαρμογή μεθόδου Turc και Thornthwaite

Για την περιοχή έρευνας, με βάση τα ανωτέρω καθώς και τις θερμοκρασίες που επικρατούν, εκτιμήθηκε ότι η πραγματική εξατμισοδιαπνοή αντιπροσωπεύει το 69,28% της βροχόπτωσης. Η μέση ετήσια απώλεια νερού σε 10^6 m^3 λόγω εξατμισοδιαπνοής για κάθε γεωλογικό σχηματισμό παρουσιάζεται στον πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.6: Μέση ετήσια απώλεια νερού (10^6 m^3) λόγω της εξατμισοδιαπνοής σε κάθε γεωλογικό σχηματισμό

Λεκάνη Απορροής	Αλλουβιακές προσχώσεις ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Κώνιοι κορημάτων ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Σχιστόλιθος ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Οφιόλιθοι ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Ασβεστόλιθοι ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Σύνολο ($\times 10^6 \text{ m}^3$)
Κυμάσι	2,57	0,36	1,81	18,72	0,96	24,42
Δαφνοπόταμος	0,96	---	0,49	12,69	2,33	16,47
Πήλι	0,51	0,33	1,05	4,23	3,20	9,32

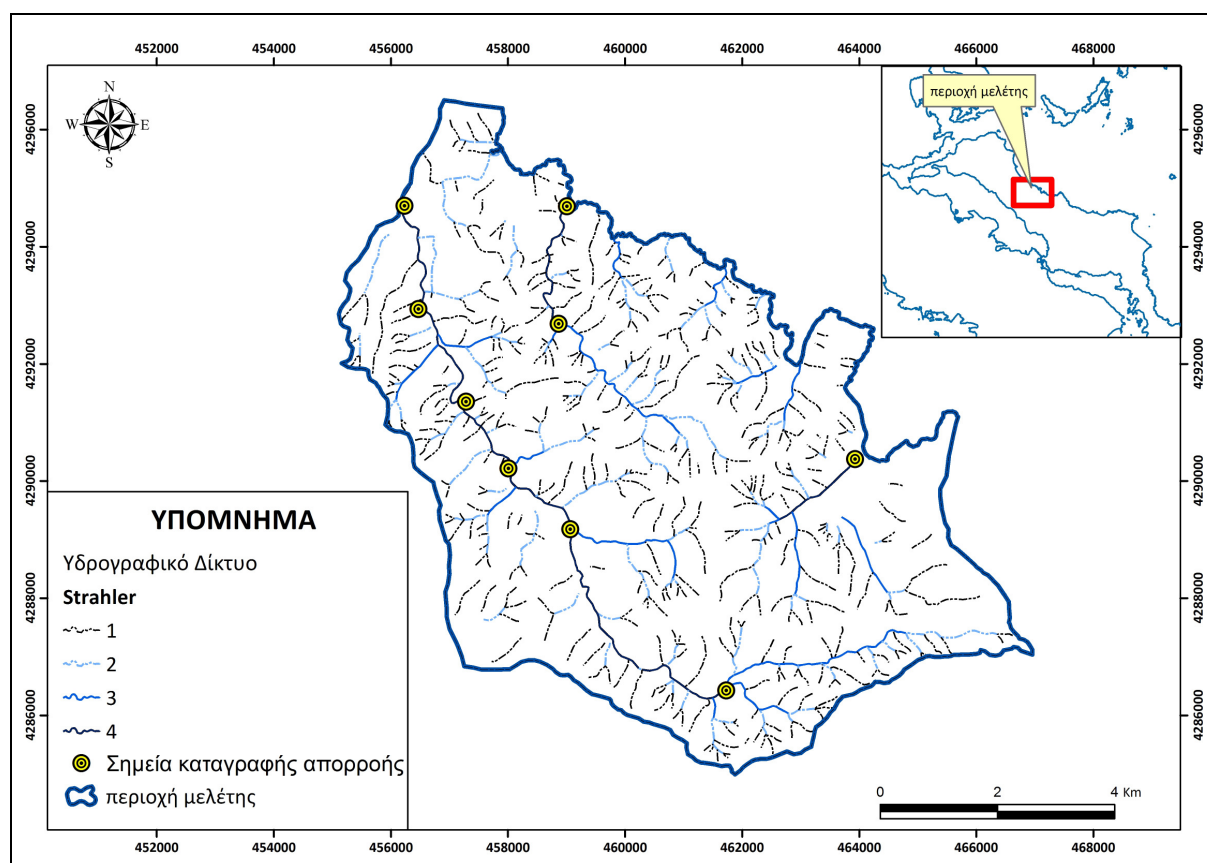
4.7 Επιφανειακή απορροή

4.7.1 Γενικά

Η επιφανειακή απορροή στην περιοχή έρευνας αντιστοιχεί στις ποσότητες νερού, τις οποίες συλλέγει το υδρογραφικό δίκτυο των τριών κύριων ποταμών (Κυμάσι, Δαφνοπόταμος, Πήλι) από την επιφάνεια της λεκάνης απορροής του και οι οποίες εμφανίζονται με τη μορφή ποταμού στην έξοδο της λεκάνης.

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την επιφανειακή απορροή, κατατάσσονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- τους κλιματικούς, που περιλαμβάνουν την εξατμισοδιαπνοή, την εποχιακή κατανομή των βροχοπτώσεων, την έντασή τους κλπ.
- Τους φυσιογραφικούς, που περιλαμβάνουν τους μορφολογικούς χαρακτήρες της λεκάνης απορροής και εκείνους του υδρογραφικού δικτύου.



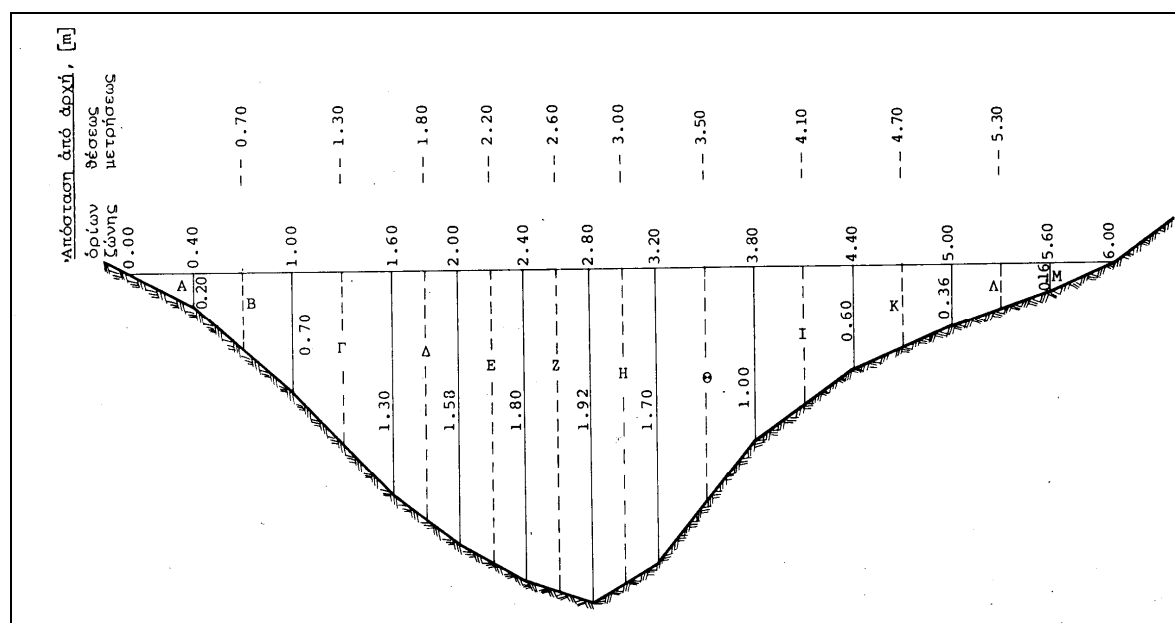
Σχήμα 4.8: Χάρτης των σημείων μέτρησης της επιφανειακής απορροής στην περιοχή μελέτης

4.7.2 Μεθοδολογία έρευνας

Η μέτρηση της παροχής στην έξοδο της κοίτης του κάθε ποταμού πραγματοποιήθηκε σε μηνιαία βάση. Μια από τις μεθόδους για τη μέτρηση της παροχής ενός χειμάρρου είναι και αυτή της συσκευής του μωλίσκου. Η μέτρηση με μωλίσκο έγινε ως εξής :

Η γωνιακή ταχύτητα της προπέλας του, όπως αυτός είναι βυθισμένος σε μία θέση της διατομής του ποταμού, μετατρέπεται σε γραμμική (ταχύτητα του νερού) με τη βοήθεια κάποιας εμπειρικής σχέσης που συνοδεύει το κάθε όργανο¹. Έτσι η υγρή διατομή χωρίζεται σε τμήματα (Σχ. 4.9) και σε κάθε τμήμα τοποθετείται ο μωλίσκος σε δύο ή τρία σημεία της κατακορύφου στο μέσο του κάθε τμήματος.

Από τις σημειακές αυτές ταχύτητες υπολογίζεται η μέση ταχύτητα του τμήματος, που το άθροισμά τους για όλα τα τμήματα ζυγισμένα με το βάρος του κάθε τμήματος (λόγος του εμβαδού του προς το συνολικό της υγρής διατομής) δίνει τη μέση ταχύτητα της διατομής. Το γινόμενο της τελευταίας με την υγρή διατομή τη στιγμή της μέτρησης δίνει τη μέση παροχή Q στη θέση. Είναι φανερό ότι κατά τη διάρκεια της μέτρησης, η στάθμη h του νερού θα πρέπει να παραμείνει περίπου σταθερή. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για ρεύματα ποταμού με μέσες - μεγάλες παροχές.



Σχήμα 4.9: Απεικόνιση τρόπου μέτρησης επιφανειακής απορροής με τη μέθοδο του μωλίσκου (Σακκάς, 1985)

¹Για τη συγκεκριμένη συσκευή η εμπειρική σχέση που συνοδεύει το όργανο είναι:

i) $u = 1.9 + 10.57 \times N$, για $N < 1.16$

ii) $u = 2.26 + 10.26 \times N$, για $1.16 < N < 10$

όπου: $N = \text{στροφές}/30''$

4.7.3 Μετρήσεις επιφανειακών απορροών στην περιοχή μελέτης

Κατά την περίοδο 2008 – 2010 πραγματοποιήθηκαν μηνιαίες μετρήσεις της παροχής των τριών ποταμών της περιοχής μελέτης, σε διάφορα σημεία κατά μήκος της διαδρομής του υδρορεύματος, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.8. Από τις μετρήσεις που έγιναν με τη βοήθεια του μιλίσκου προέκυψε ότι ο μέσος ετήσιος όγκος νερού για τα υδρολογικά έτη 2008 – 2010 που απορρέει επιφανειακά συνολικά ανήλθε για τη λεκάνη του ποταμού Κυμάσι σε $8.93 \times 10^6 \text{ m}^3$ (256.91 mm ισοδύναμο ύψος βροχόπτωσης), για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Δαφνοπόταμος $3.86 \times 10^6 \text{ m}^3$ (173.48 mm ισοδύναμο ύψος βροχόπτωσης) και για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Πήλι $1.66 \times 10^6 \text{ m}^3$ (125.67 mm ισοδύναμο ύψος βροχόπτωσης) που αντιστοιχεί περίπου στο 20% του συνολικού ύψους βροχής που δέχεται η περιοχή μελέτης.

Πίνακας 4.7: Μέσες μηνιαίες μετρήσεις της επιφανειακής απορροής (υδρολογικά έτη 2008 – 2010)

Ημερομηνία	Επιφανειακή απορροή ($\times 10^6 \text{ m}^3$)		
	Λεκάνη Απορροής π. Κυμάσι	Λεκάνη Απορροής π. Δαφνοπόταμος	Λεκάνη Απορροής π. Πήλι
Οκτώβριος	0.79	0.22	0.12
Νοέμβριος	0.95	0.47	0.14
Δεκέμβριος	1.02	0.66	0.23
Ιανουάριος	1.28	0.79	0.35
Φεβρουάριος	1.22	0.84	0.31
Μάρτιος	0.88	0.31	0.20
Απρίλιος	0.56	0.19	0.16
Μάιος	0.41	0.09	0.05
Ιούνιος	0.45	0.06	0.01
Ιούλιος	0.39	0.05	0
Αύγουστος	0.31	0.02	0
Σεπτέμβριος	0.67	0.16	0.09
Σύνολο	8.93	3.86	1.66

4.8 Κατείσδυση

Η κατείσδυση είναι η διαδικασία κατά την οποία το νερό εισέρχεται στα επιφανειακά στρώματα του εδάφους και κατόπιν κινείται προς τα βαθύτερα στρώματα.

Το ποσό αυτό του νερού κατά πρώτο λόγο συμπληρώνει το έλλειμμα υγρασίας του εδάφους ενώ αυτό που πλεονάζει κινείται βαθύτερα και τροφοδοτεί τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την κατείσδυση είναι η υγρασία του εδάφους, η ένταση και κατανομή της βροχόπτωσης, η λιθολογία και η βλάστηση.

Μέτρο της ικανότητας για κατείδυση αποτελεί ο συντελεστής κατείδυσης (i) που εκφράζεται από τη σχέση:

$$i = \frac{I}{P} \times 100\%$$

όπου:

I : η συνολική ποσότητα του νερού σε mm που κατείδυει σε δοσμένο χρόνο και τόπο

P : το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης σε mm

Στην περιοχή έρευνας δε λειτουργούν λυσιμέτρα και συνεπώς ο υπολογισμός του συντελεστή κατείδυσης βασίστηκε στα δεδομένα που προέκυψαν από τις παραμέτρους του υδρολογικού ισοζυγίου. Για την περιοχή έρευνας επομένως ο μέσος ετήσιος όγκος κατείδυσης υπολογίστηκε σε 385,43 mm ($7,8 \times 10^6 \text{ m}^3$). Ειδικότερα, όσον αφορά τους οφιολίθους ο συντελεστής κατείδυσης υπολογίστηκε με βάση ετήσιες μετρήσεις επιφανειακής απορροής σε υπολεκάνες, οι οποίες συνίστανται μόνο από οφιολίθους. Σύμφωνα με τα παραπάνω ο συντελεστής κατείδυσης υπολογίστηκε ίσος με **4,24%**.

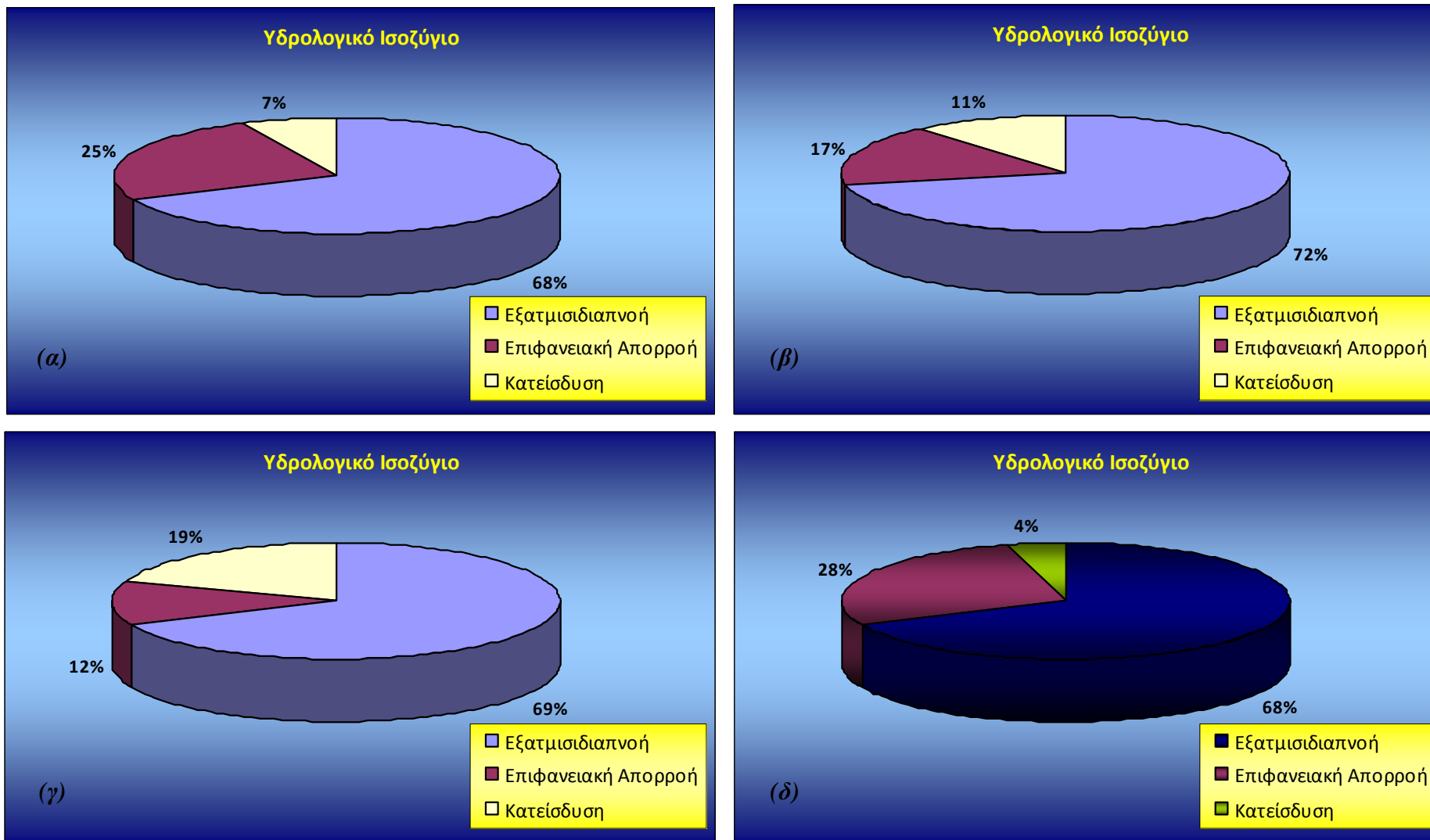
Γνωρίζοντας για κάθε λεκάνη απορροής μελέτης της περιοχής έρευνας την επιφάνεια που καταλαμβάνουν οι οφιολίθοι στην περιοχή μελέτης σε συνδυασμό με τις υπολογισμένες παραμέτρους του υδρολογικού ισοζυγίου, εκτιμήθηκε ο μέσος ετήσιος όγκος νερού κατείδυσης των οφιολίθων ίσος με **$0,709 \times 10^6 \text{ m}^3$** .

4.9 Υδρολογικό ισοζύγιο

Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς των παραμέτρων της βροχόπτωσης, της εξατμισοδιαπνοής, της επιφανειακής απορροής και σύμφωνα με την απλοποιημένη έκφραση της εξίσωσης του υδρολογικού ισοζυγίου, καταρτίστηκε το προσεγγιστικό υδρολογικό ισοζύγιο της περιοχής μελέτης (Πίν. 4.8), το οποίο αντιπροσωπεύει σε ικανοποιητικό βαθμό τις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή (Σχ. 4.10).

Πίνακας 4.8: Προσεγγιστικό υδρολογικό ισοζύγιο ανά λεκάνη απορροής μελέτης

Λεκάνη Απορροής	Όγκος βροχόπτωσης ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Εξατμισοδιαπνοή ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Επιφανειακή Απορροή ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Κατείδυση ($\times 10^6 \text{ m}^3$)
Κυμάσι	35,87	24,42 (68,07 %)	8,93 (24,9 %)	2,51 (7 %)
Δαφνοπόταμος	22,96	16,47 (71,73 %)	3,86 (16,8 %)	2,63 (11%)
Πήλι	13,64	9,32 (68,33 %)	1,66 (12,2 %)	2,66 (19,5 %)



Σχήμα 4.10: Διαγράμματα του υδρολογικού ισοζυγίου της περιοχής έρευνας ανά λεκάνη απορροής μελέτης
 (α) Λεκάνη απορροής π. Κυμάσι, (β) Λ. απορροής π. Δαφνοπόταμος, (γ) Λ. απορροής π. Πήλι, (δ) Υδρολογικό Ισοζύγιο των οφιολίθων

4.10 Συμπεράσματα

Ο κλιματικός χαρακτήρας μιας περιοχής είναι ένας σημαντικός παράγοντας, που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην μελέτη της υδρογεωλογίας και της γεωμορφολογίας. Η θερμοκρασία μιας περιοχής, τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και το καθεστώς της εξάτμισης επηρεάζουν τον συντελεστή κατείδυσης σε μια περιοχή και κατ' επέκταση το ποσοστό εμπλουτισμού του υδροφόρου ορίζοντα. Τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό το είδος και την πυκνότητα της φυτοκάλυψης, που επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τον συντελεστή κατείδυσης. Βέβαια, το αποτέλεσμα της φυτοκάλυψης στην ικανότητα κατείδυσης είναι δύσκολο να προσδιοριστεί διότι μέσω των φυτών κατακρατείται ένα τμήμα των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Χωρίς αμφιβολία όμως, η ικανότητα κατείδυσης σε έδαφος με φυτοκάλυψη είναι μεγαλύτερη από αυτή που παρατηρείται στο ίδιο έδαφος χωρίς φυτοκάλυψη. Ακόμα, η ένταση και η διάρκεια των βροχοπτώσεων επηρεάζουν την ικανότητα κατείδυσης αφού είναι αντιστρόφως ανάλογη της έντασης των βροχοπτώσεων. Η επιμέρους ανάλυση των παραμέτρων του γενικευμένου υδρολογικού ισοζυγίου οδήγησε στα εξής συμπεράσματα:

1. Η μέση ετήσια θερμοκρασία του αέρα κυμαίνεται στους 17°C, με μέγιστη μέση μηνιαία τιμή να παρατηρείται κατά το μήνα Ιούλιο (26,4°C) και ελάχιστη μέση μηνιαία τιμή κατά το μήνα Ιανουάριο (8,6°C). Από τη συσχέτιση της θερμοκρασίας με το υψόμετρο διαπιστώνεται ότι ανά 100m η τιμή της θερμοκρασίας αυξάνεται κατά 0,93°C.
2. Το μέσο ύψος βροχής ανέρχεται σε 1031,9 mm και από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων με τη μέθοδο κατά Thornthwaite – Matter, υπολογίστηκε ότι η μέση ετήσια πραγματική εξατμισιοδιαπνοή ανέρχεται σε 702,4mm (68,07% του μέσου ετησίου ύψους βροχής). Η μέση ετήσια βροχόπτωση επηρεάζει τον τύπο, αλλά και τα χαρακτηριστικά των υδρογραφικών δικτύων, δημιουργώντας μικρής έκτασης υδρογραφικές λεκάνες και πολυάριθμους κλάδους μικρού μήκους και μη μόνιμης ροής.
3. Ο όγκος νερού κατείδυσης των οφιολίθων ίσος με $0,709 \times 10^6 \text{ m}^3$ ($\approx 4,24\%$).
4. Τέλος από το προσεγγιστικό υδρολογικό ισοζύγιο διαχωρίστηκαν περιοχές με κύριο γνώρισμα τον όγκο νερού που ρέει επιφανειακά και τον όγκο νερού που κατεισδύει. Οι περιοχές με υψηλές τιμές κατεισδύομένου νερού παρατηρούνται σε ημιπεδινές κυρίως περιοχές, με έντονη φυτοκάλυψη και παρουσία πυκνού δικτύου των ασυνεχειών (ΒΒΔ/κά).

5. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

5.1 Μεθοδολογία έρευνας

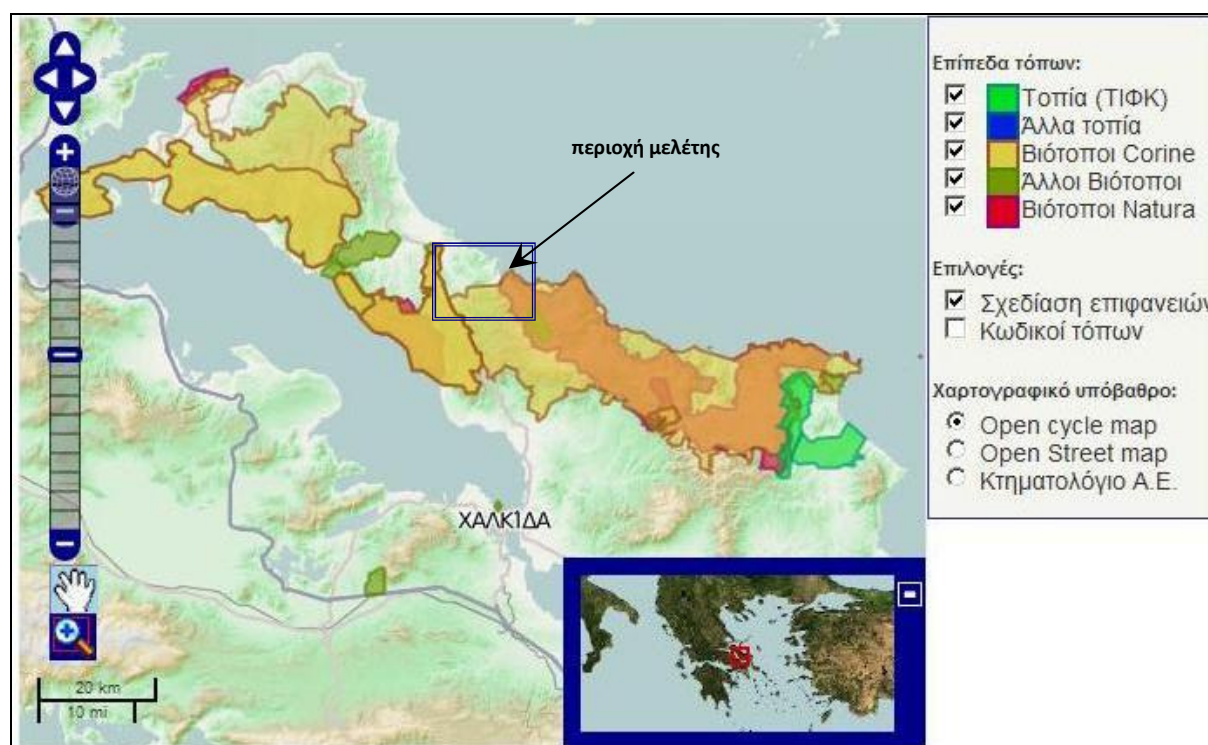
Προκειμένου να διερευνηθούν οι υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή έρευνας, συλλέχθηκε σε πρώτη φάση η υπάρχουσα σχετική βιβλιογραφία. Εξαιτίας του γεγονότος ότι ο αριθμός των εργασιών αυτών είναι πολύ μικρός και δεν καλύπτει τις ανάγκες της έρευνας, συλλέχθηκαν και αξιοποιήθηκαν δεδομένα από τη διεθνή βιβλιογραφία, που στην πλειοψηφία τους παρουσιάζουν παρόμοια υδρογεωλογικά προβλήματα με τον Ελληνικό χώρο.

Ακολούθως έγινε επί τόπου αναγνώριση της περιοχής και τοποθετήθηκε στον τοπογραφικό χάρτη 1: 25000 της ΓΥΣ με τη βοήθεια GPS (**G**lobal **P**ositioning **S**ystem) το μεγαλύτερο μέρος των σημείων ύδατος (πηγές, γεωτρήσεις και φρέατα) που εκμεταλλεύονται τους υδροφόρους ορίζοντες της περιοχής.

Στο δεύτερο στάδιο της υδρογεωλογικής μελέτης προσδιορίστηκε η γενική εικόνα των υπόγειων υδροφόρων οριζόντων με τη σύνταξη χάρτη κατανομής της υδραυλικής αγωγιμότητας.

Στο τελικό στάδιο της μελέτης έγινε μια στατιστική ανάλυση του μέσου ασυνεχειών με σκοπό τη διερεύνηση των συνθηκών που επικρατούν όσον αφορά τον προσανατολισμό τους, τη χωρική κατανομή της πυκνότητάς τους καθώς και το βαθμό διασύνδεσής τους. Τέλος έγινε μια προσπάθεια συσχέτισης του μέσου ασυνεχειών με τις πηγές που παρουσιάζονται στην περιοχή.

Πρέπει να σημειωθεί ότι πρόκειται για μία περιοχή, της οποίας όμως το μεγαλύτερο τμήμα της εντάσσεται σε περιοχές προστασίας (Σχ. 5.1. – περιοχές Natura, Φιλότης, ΕΜΠ). Στην περιοχή έρευνας δεν εντοπίστηκαν εντατικές καλλιέργειες παρά μόνο στην πεδιάδα του Δημοτικού Διαμερίσματος Μαντουδίου (π.χ. εσπεριδοειδή, ελαιόδεντρα, βαμβάκι κ.α.). Αυτό έχει ως συνέπεια να απαιτούνται μεγάλες ποσότητες νερού για την κάλυψη των υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών. Κατά το παρελθόν στις απαιτήσεις αυτές προστίθενταν και οι υδατικές ανάγκες της βιομηχανικής μονάδας της BIOMAGN (εργοστάσιο εξόρυξης λευκόλιθου).



Σχήμα 5.1: Περιοχή μελέτης και ζώνες προστασίας (Βάση Δεδομένων Φιλότης, ΕΜΠ)

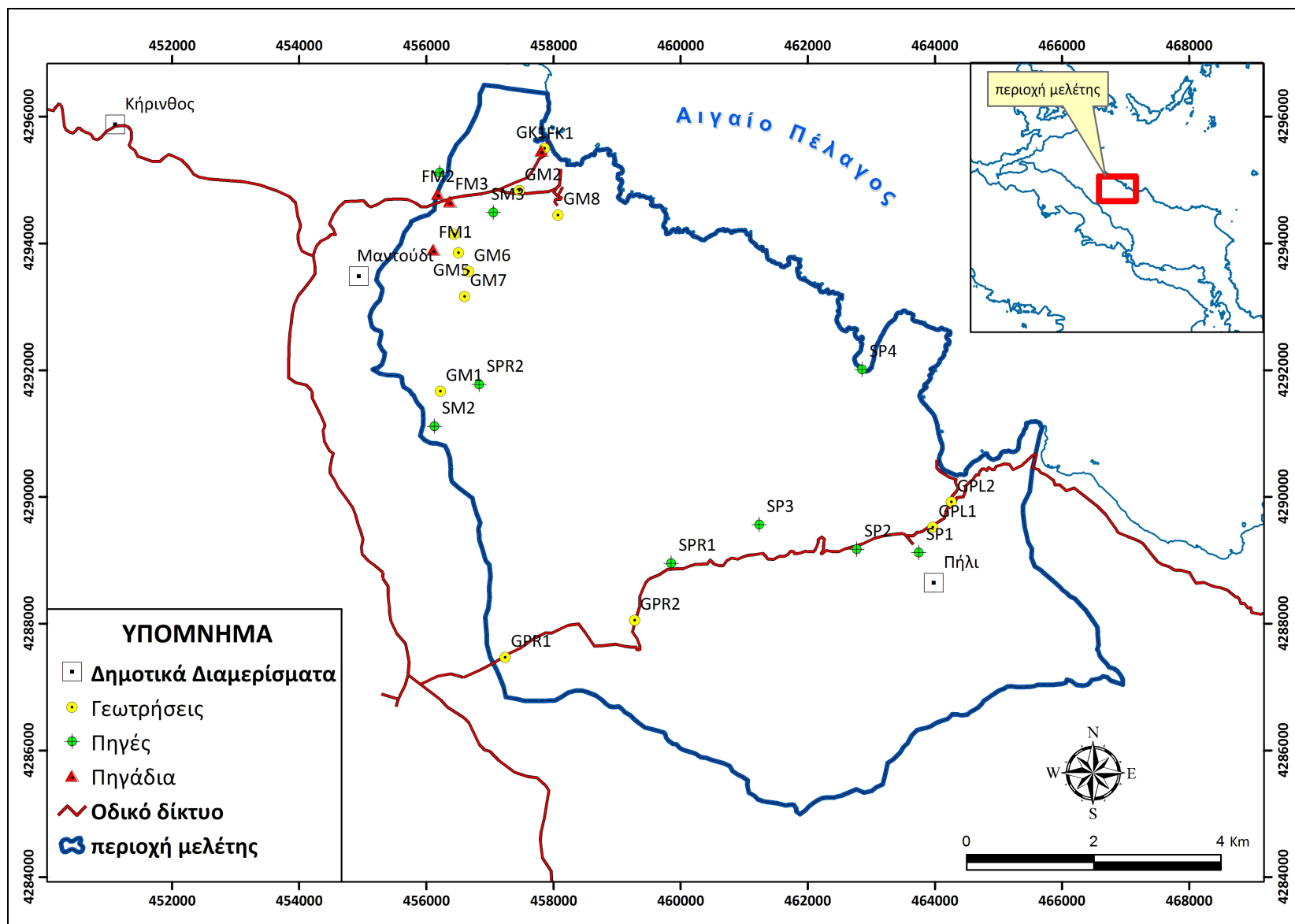
Στην ευρύτερη περιοχή μελέτης εντοπίστηκαν πηγές, όπου η φυσική τους ανάβλυση λαμβάνει χώρα και κοντά στην παράκτια περιοχή. Παρόλα αυτά δεν προσδιορίστηκε, από τις χημικές αναλύσεις, κάποιο μέτωπο υφαλμύρινσης.

5.2 Απογραφή σημείων ύδατος

Οι προκαταρκτικές εργασίες υπαίθρου της περιοχής μελέτης ξεκίνησαν με την λεπτομερή απογραφή των σημείων ύδατος (πηγές, γεωτρήσεις, πηγάδια) της ευρύτερης περιοχής σε τοπογραφικό χάρτη 1:5.000 με τη βοήθεια GPS. Εν συνεχεία έγινε μεταφορά των δεδομένων σε τοπογραφικό χάρτη 1:25.000 με τη βοήθεια του Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών Arc-View GIS v 9.2 (Σχ. 5.2).

Η απογραφή των σημείων ύδατος περιελάμβανε ταυτόχρονα και συλλογή πληροφοριών για τις περισσότερες γεωτρήσεις, πηγάδια, πηγές της περιοχής από τους φορείς διαχείρισης αυτών, ενώ παράλληλα πραγματοποιήθηκε και μέτρηση της στάθμης του υπόγειου ύδατος με φορητά σταθμήμετρα.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όσον αφορά την περιοχή έρευνας οι βασικοί παράγοντες που διαμορφώνουν το υδρογεωλογικό περιβάλλον είναι ο υδρολιθολογικός χαρακτήρας των γεωλογικών σχηματισμών, ο τεκτονισμός, ο βαθμός διάρρηξης και ο βαθμός αποσάθρωσης των σχηματισμών.

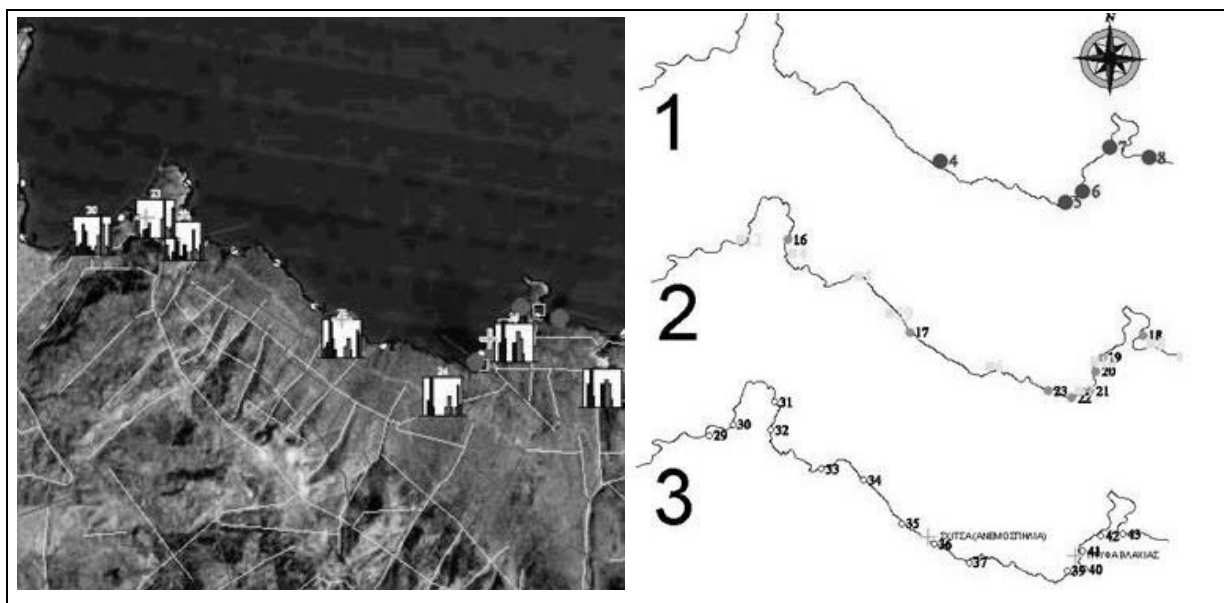


Σχήμα 5.2: Απογραφέντα σημεία ύδατος στην ευρύτερη περιοχή μελέτης

5.3. Υδρολιθολογική κατάταξη των σχηματισμών.

A) Υδροπερατοί υψηλής υδροπερατότητας

Τα ανθρακικά πετρώματα: Στους υδροπερατούς σχηματισμούς ανήκουν οι υδροφόροι των ανθρακικών πετρωμάτων (ασβεστόλιθοι και δολομίτες). Πρόκειται για έντονα καρστικοποιημένους σχηματισμούς, επιτρέποντας την κατείδυση μεγάλων ποσοτήτων νερού, τροφοδοτώντας κυρίως τον υδροφόρο ορίζοντα που αναπτύσσεται στο εσωτερικό τους. Ανάλογα με το βάθος του επιπέδου βάσης τόσο του καρστ όσο και των υποκείμενων αδιαπέρατων σχηματισμών και της γενικότερης γεωλογικής δομής δημιουργούνται αξιόλογα υδροφόρα συστήματα (Μαντουδίου). Κατά τόπους υπάρχει επαφή των ανθρακικών σχηματισμών με τη θάλασσα με αποτέλεσμα να λαμβάνει χώρα η εκφόρτιση του καρστικού συστήματος μέσω υποθαλάσσιων πηγών (Σχ. 5.3). Οι εικόνες Landsat 7 αναλύθηκαν με σκοπό τον προσδιορισμό των μεταβολών της θερμοκρασίας του επιφανειακού νερού (Στεφούλη και Τσόμπος, 2004). Από την ανάλυση προέκυψε ο εντοπισμός εκροών νερού εξαιτίας υποθαλάσσιων πηγών.



Σχήμα 5.3: Εικόνα (Landsat 7 – αριστερά) φωτογραμμώσεων και τομές όπου παρατηρούνται υποθαλάσσιες εκροές (δεξιά) κατά μήκος της ακτογραμμής. 1. Υποθαλάσσιες εκφορτίσεις νερού σύμφωνα με εικόνα του 1999, 2. εκροές νερού χαρτογραφημένες από εικόνες του 1988 3. εκροές νερού χαρτογραφημένες από εικόνες του 1994 (Stefouli & Tsombos, 2004).

Δολομίτες – δολομιτικοί ασβεστόλιθοι: Πρόκειται για πετρώματα με σαφώς μικρότερη υδροπερατότητα σε σχέση με τους ασβεστόλιθους και που σε ορισμένες θέσεις, παρά τον έντονο κατακερματισμό τους (π.χ. μάζα ανάμεσα σε Αμέλαντες και Παλαιόβρυση), η

παρουσία μεγάλου πάχους τεκτονικών πετρωμάτων και δολομιτικής άμμου τα καθιστούν αδιαπέρατα. Ως εκ τούτου εκτιμάται ότι η υδροφορία τους είναι περιορισμένη.

Β) Υδροπερατοί μέσης υδροπερατότητας

Ιζηματογενείς σχηματισμοί Νεογενούς: Από τους νεογενείς σχηματισμούς τα μέλη των κροκαλοπαγών οριζόντων και των τραβερτινών και μαργαϊκών ασβεστολίθων παρουσιάζουν περιορισμένη υδροφορία, αρκετή όμως για να καλυφθούν τοπικές υδρευτικές και αρδευτικές ανάγκες. Οι απότομες φασικές μεταβολές και μεταβάσεις, από περατούς σε αδιαπέρατους σχηματισμούς, τόσο κατά την κατακόρυφη όσο και κατά την οριζόντια έννοια, δεν επιτρέπουν μια ακριβή εκτίμηση των αποθεμάτων τους. Η παρουσία αδιαπέρατων μαργαϊκών στρωμάτων είναι υπεύθυνη για την εκδήλωση, σε διάφορες θέσεις, μικροπηγών (π.χ. βόρεια των Κεχριών, ΒΔ της Κηρίνου κλπ.).

Προσχωματικοί σχηματισμοί Τεταρτογενούς: Στις περιοχές όπου εντοπίζονται εκτεταμένες αλλουβιακές αποθέσεις (π.χ. πεδινές εκτάσεις Μαντουδίου, Κρύας Βρύσης κλπ.) ή ποταμοχειμάρρειες αποθέσεις (π.χ. κατά μήκος των ποταμών Νηλέα και Κηρέα) αναπτύσσονται αξιόλογοι φρεάτιοι υδροφόροι οριζόντες οι οποίοι μαζί με τα νερά των δύο ποταμών χρησιμοποιούνται για την άρδευση των αντίστοιχων περιοχών.

Γ) Υδροφορία μέσου ασυνεχειών

Σχιστοκερατολιθική διάπλαση: Στο σύνολό της συμπεριφέρεται ως αδιαπέρατος σχηματισμός. Μικρές υδροφορίες αναπτύσσονται στον αποσαθρωμένο μανδύα ή στις περιοχές όπου επικρατούν οι κερατόλιθοι ή οι ασβεστόλιθοι.

Οφιόλιθοι (περιδοτίτες, σερπεντινίτες): Το οφιολιθικό σύμπλεγμα μπορεί ν' αποτελέσει υδροφορέα αξιόλογης απόδοσης, όταν παρουσιάζει έντονη διάρρηξη και όταν αποσαθρούμενος δεν δημιουργεί προϊόντα πολύ πλούσια σε αργιλικά υλικά.

Η υδρογεωλογική συμπεριφορά των επωθημένων στο ανθρακικό υπόβαθρο κυρίως υπερβασικών οφιολιθικών μαζών παρουσιάζει έντονη τοπική διαφοροποίηση, η οποία σχετίζεται με τη λιθολογία, τη γεωλογική δομή και την τεκτονική καταπόνηση των πετρωμάτων. Γενικά, οι οφιολιθικές μάζες φιλοξενούν ποσότητες υπόγειων νερών, οι οποίες διακινούνται μέσα κυρίως από ζώνες εντατικών διαρρήξεων. Η κατείσδυση του νερού στα πετρώματα αυτά καθορίζεται από το εύρος των τεκτονικών ασυνεχειών, αλλά και από το μέγεθος των υλικών που τις έχουν πληρώσει.

- γ) οι αλλουβιακοί σχηματισμοί που καλύπτουν τις πεδινές εκτάσεις βόρεια του Μαντουδίου,
- δ) τα πλευρικά κορήματα και οι κώνοι κορημάτων και
- ε) οι ελώδεις αποθέσεις.

Από αυτές, ενδιαφέρον από υδρογεωλογική άποψη παρουσιάζουν μόνο οι τρεις πρώτες περιπτώσεις, αφού οι υπόλοιπες αφενός μεν καταλαμβάνουν πολύ μικρές εκτάσεις, αφ' ετέρου δε το πάχος τους είναι ελάχιστο.

α) Παράκτιες αποθέσεις

Συνίστανται από άμμους και κροκάλες που αναπτύσσονται σε πολύ μικρό πλάτος παράλληλα με τις ακτογραμμές των όρμων Πήλι και Μαντουδίου. Αντιπροσωπεύουν μικροπερατούς σχηματισμούς με σημαντική περατότητα, αλλά το πολύ μικρό πάχος τους και η περιορισμένη επιφανειακή εξάπλωσή τους, δεν επιτρέπουν την αποθήκευση αξιόλογων και εκμεταλλεύσιμων ποσοτήτων ύδατος. Εξάλλου, η γειτνίασή τους με τη θάλασσα υποβαθμίζει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα του νερού (υπό προϋποθέσεις).

β) Αλλουβιακές αποθέσεις στις κοίτες των ποταμών

Αντιπροσωπεύουν τους μικροπερατούς σχηματισμούς που αναπτύσσονται παράλληλα με τις κοίτες των ποταμών Νηλέα και Κηρέα και οι οποίοι συνίστανται από ασύνδετα υλικά, άμμους και κροκαλολατύπες. Το μεγαλύτερο πάχος τους εντοπίζεται πλησίον της κοίτης των ποταμών, όπου και αναπτύσσεται σημαντικός φρεάτιος υδροφόρος ορίζοντας που τροφοδοτείται από τα νερά των ποταμών. Ο υδροφόρος αυτός ορίζοντας τυγχάνει σημαντικής εκμετάλλευσης που πραγματοποιείται μέσα από πολυάριθμα ιδιωτικά αβαθή φρέατα.

γ) Αλλουβιακές αποθέσεις πεδινών εκτάσεων

Αποτελούνται, όπως προαναφέρθηκε, από αδρομερή ασύνδετα υλικά, όπως κροκάλες, λατύπες και ερυθρογή, και εντοπίζονται στις πεδινές εκτάσεις του Μαντουδίου και της Κρύας Βρύσης, όπου καλύπτουν σημαντικές εκτάσεις.

Όλοι οι ανωτέρω σχηματισμοί είναι μικροπερατοί, με μεταβαλλόμενο πάχος και περατότητα, παράγοντες που σε μεγάλο βαθμό καθορίζουν και την αποδοτικότητα των υδροληπτικών έργων.

Στην περιοχή μελέτης οι σχηματισμοί αυτοί χαρακτηρίζονται από μεγάλη ετερογένεια σε ότι αφορά στα lithολογικά χαρακτηριστικά τους. Έτσι στα κρᾶσπεδα των λεκανών απαντούν

αδρομερέστερα στοιχεία, σε αντίθεση με το κέντρο όπου επικρατούν πιο λεπτομερή συστατικά. Η σύσταση των στοιχείων αυτών μεταβάλλεται επίσης ανάλογα με τη λιθολογία των κρασπέδων της λεκάνης. Έτσι στις περιοχές όπου επικρατούν οι ασβεστόλιθοι το κλαστικό υλικό είναι ανθρακικό, ενώ στις περιοχές όπου επικρατούν οι οφιόλιθοι ή οι νεογενείς σχηματισμοί το κλαστικό υλικό είναι πιο λεπτομερές και αργιλικής σύστασης.

Επίσης, οι χρονικές και γεωγραφικές μεταβολές της ροής των ποταμών και των χειμάρρων, επιδρούν καθοριστικά στις λιθολογικές φάσεις που αναπτύσσονται. Έτσι στην ευρύτερη περιοχή του κάμπου του Μαντουδίου, που αντιπροσωπεύει και τη μεγαλύτερη έκταση των αλλουβιακών αποθέσεων, απαντάται μια ποικιλία λιθολογικών φάσεων που μεταβαίνουν η μία στην άλλη τόσο πλευρικά όσο και κατακόρυφα. Η ετερογένεια αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία τόσο ελεύθερων υδροφόρων οριζόντων, όσο και υδροφόρων οριζόντων υπό πίεση ή μερικώς υπό πίεση (ημιελεύθεροι). Στον ίδιο λόγο άλλωστε οφείλεται και η διακύμανση στην απόδοση των υδροληπτικών έργων.

Όλοι οι λιθολογικοί τύποι που απαντώνται στις αλλουβιακές αποθέσεις συνιστούν μικροπερατούς σχηματισμούς, που χαρακτηρίζονται από σημαντική περατότητα κυρίως στα βαθύτερα στρώματα (επικρατούν τα αδρομερή υλικά), σε αντίθεση με τα επιφανειακά όπου αυτή παρουσιάζεται περιορισμένη ή και κατά θέσεις ασήμαντη (επικρατούν τα αργιλικά υλικά). Χαρακτηριστικό παράδειγμα τις τελευταίας διαπίστωσης αποτελεί το φαινόμενο των λιμναζόντων υδάτων στο μεγαλύτερο τμήμα της πεδινής έκτασης κατά τη χειμερινή περίοδο.

5.5.2 Νεογενείς σχηματισμοί

Οι νεογενείς σχηματισμοί που απαντώνται στην ευρύτερη περιοχή μελέτης έχουν μεγάλο πάχος, το οποίο σε ορισμένες θέσεις φθάνει τα 1.000 μέτρα. Όπως αναφέρθηκε αντιπροσωπεύουν κυρίως ποταμολιμναίες αποθέσεις με πολλές λιθοφασικές μεταβολές, τόσο κατά την κατακόρυφη, όσο και κατά την οριζόντια έννοια. Οι επικρατέστεροι σχηματισμοί, με υδρογεωλογικό ενδιαφέρον που ποικίλλει κατά περίπτωση, είναι οι α) μαργαϊκοί τραβερτινώδεις ασβεστόλιθοι, β) κροκαλοπαγή και τέλος γ) οι λεπτομερέστεροι κλαστικοί σχηματισμοί.

5.5.3 Ανθρακικοί αλπικοί σχηματισμοί

Τα ανθρακικά πετρώματα που απαντούν στην περιοχή μελέτης, παρότι καταλαμβάνουν μικρή επιφανειακή έκταση σχετικά με αυτή των νεογενών σχηματισμών, παρουσιάζουν ιδιαίτερο υδρογεωλογικό ενδιαφέρον. Το πιο χαρακτηριστικό γνώρισμά τους είναι η διάλυση που

υφίστανται από το νερό της βροχής που είναι εμπλουτισμένο σε CO₂. Έτσι οι πάσης φύσεως ασυνέχειες που διασχίζουν την ανθρακική μάζα, διευρύνονται και δημιουργούν με την πάροδο του χρόνου ένα πολύπλοκο και δαιδαλώδες σύστημα καρστικών αγωγών και σπηλαίων. Η έντονη αυτή καρστικοποίηση έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της περατότητας και της αποθηκευτικής ικανότητας των πετρωμάτων αυτών.

Ο τεκτονισμός είναι ένας από τους καθοριστικούς παράγοντες της καρστικοποίησης και της υδροφορίας των ανθρακικών πετρωμάτων. Οι αγωγοί μέσα από τους οποίους κυκλοφορεί το νερό ελέγχονται κατά κύριο λόγο τεκτονικά, αφού δημιουργούνται από τη διάλυση και τη διεύρυνση των πάσης φύσεως ασυνεχειών (ρήγματα, διακλάσεις κλπ.) που δημιουργούνται εξαιτίας των τεκτονικών τάσεων.

Εξάλλου και η δομή (γεωμετρία) των ανθρακικών μαζών καθορίζεται από τον τεκτονισμό (σύγκλινα, αντίκλινα, μονόκλινα κλπ.) αλλά και η σχέση τους με τους άλλους σχηματισμούς (επώθηση, εφίπτευση, ρήγμα κλπ.), παράγοντες οι οποίοι είναι καθοριστικοί για τα χαρακτηριστικά και τις παραμέτρους της υδροφορίας τους.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των καρστικών αγωγών και η βάση του επιπέδου της βάσης του κάρστ, ελέγχονται επίσης από τον τεκτονισμό. Η παροξυσμική φάση των πτυχώσεων που έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία των καλυμμάτων και των εφίπτευσων, δίνει μια νέα διάταξη στα προϋπάρχοντα καρστικά συστήματα.

Έτσι μεγάλες ανθρακικές μάζες τοποθετούνται πάνω σε αδιαπέρατους σχηματισμούς (π.χ. σχιστοψαμμιτοκερατολιθική διάπλαση), περιπτώσεις δηλαδή όπου η γεωμετρία του στεγανού υποβάθρου, που ρυθμίζει την υπόγεια κυκλοφορία του νερού, καθορίζεται από τον τεκτονισμό, δηλαδή τις πτυχές και τα ρήγματα που δημιουργούνται κατά ή μετά την τοποθέτηση των καλυμμάτων.

Τα ανθρακικά πετρώματα που απαντώνται στην περιοχή μελέτης μπορούν να διακριθούν, από υδρογεωλογική σκοπιά, σε τρεις επιμέρους ενότητες:

- α) στα ανθρακικά πετρώματα της ανω-κρητιδικής επίκλυσης,*
- β) στα ανθρακικά πετρώματα της Υποπελαγονικής που αναπτύσσονται στο νότιο τμήμα της περιοχής και*
- γ) στα ανθρακικά πετρώματα της Υποπελαγονικής που αναπτύσσονται στο βόρειο τμήμα της περιοχής και χωρίζονται από τα προηγούμενα από μια μεγάλη και σαφή τεκτονική επαφή που είναι ορατή στην περιοχή του όρμου του Μαντουδίου, ενώ δυτικότερα καλύπτεται κάτω από τις τεταρτογενείς αποθέσεις.*

α) Ανθρακικά πετρώματα ανω-κρητιδικής επίκλυσης

Αναπτύσσονται στο νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης και καταλαμβάνουν πολύ περιορισμένες εκτάσεις. Ως εκ τούτου λοιπόν δεν παρουσιάζουν αξιόλογο υδρογεωλογικό ενδιαφέρον για την προκειμένη περίπτωση.

β) Ανθρακικά πετρώματα νοτίου τμήματος περιοχής μελέτης

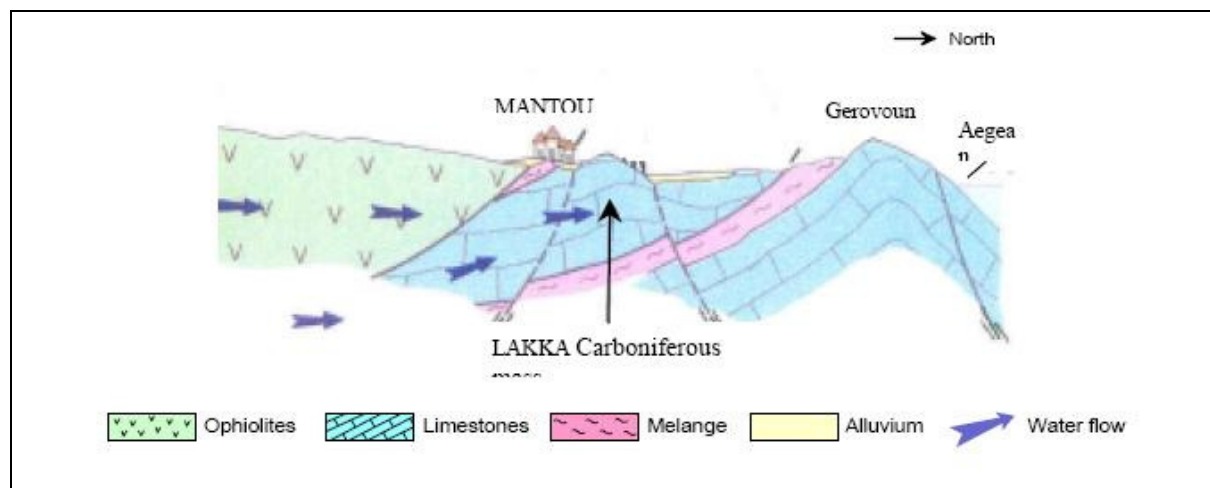
Η μεγαλύτερη μάζα των ανθρακικών πετρωμάτων του νοτίου τμήματος αναπτύσσεται στο νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης, στην περιοχή του Κανδηλίου όρους, και έρχεται απ' ευθείας σε επαφή με τη θάλασσα (Βόρειος Ευβοϊκός), με αποτέλεσμα να αποστραγγίζεται σε αυτή.

Ανατολικότερα, μια άλλη αξιόλογη ανθρακική μάζα, που αναπτύσσεται νότια του Προκοπίου (περιοχή Κλεισούρα – Δερβένη), βρίσκεται με το νότιο περιθώριό της εφιππευμένη πάνω στη σχιστοκερατολιθική διάπλαση, ενώ στα βόρεια έρχεται πλευρικά σε επαφή, μέσω κανονικού ρήγματος, με τους οφιολίθους.

Το νερό που συγκεντρώνεται στους έντονα καρστικοποιημένους αυτούς ασβεστολίθους, κινείται προς Βορρά, όπως αποδεικνύεται από την κλίση της τεκτονικής επαφής του υποκείμενου αδιαπέρατου σχιστοκερατολιθικού υποβάθρου.

Στα χαμηλότερα υψομετρικά σημεία της ρηξιγενούς επαφής με τους οφιολίθους δεν παρατηρούνται πηγές που να εκφορτίζουν την ασβεστολιθική μάζα. Έτσι το νερό των ασβεστολίθων (και ανάλογα με το αναμενόμενο πάχος του οφιολιθικού καλύμματος στην περιοχή αυτή) θα κινείται υπόγεια είτε κάτω από τους οφιολίθους, αφού το υπόβαθρό τους στην περιοχή αυτή αναμένεται να είναι ανθρακικό, είτε και μέσα από αυτούς (τους οφιολίθους) αφού παρουσιάζονται έντονα κατακερματισμένοι.

Και στις δύο περιπτώσεις το νερό αυτό φαίνεται να καταλήγει στη μικρή ανθρακική μάζα που αναπτύσσεται βορειότερα στην ευρύτερη περιοχή του Μαντουδίου (περιοχή Λάκκας) και η οποία έρχεται σε επαφή, είτε μέσω των οφιολίθων είτε και απ' ευθείας, με την προηγούμενη ανθρακική μάζα που αναπτύσσεται νότια του Προκοπίου (Σχ. 5.5).



Σχήμα 5.5: Σκαριφηματική γεωλογική τομή της ευρύτερης περιοχής έρευνας (Λέκκας κ.ά. 1995, Louis et al., 2002)

Η ανθρακική μάζα της Λάκκας Μαντουδίου φαίνεται να είναι συνέχεια και ομόλογη με την επίσης μικρή ανθρακική μάζα που αναπτύσσεται βόρεια από τις προσχώσεις του ρέματος Κυμάσι και αμέσως δυτικά του όρμου του Μαντουδίου (περιοχή Αγίων Αποστόλων). Η μάζα αυτή είναι επιπυεμένη πάνω στη σχιστοψαμμιτοκερατολιθική διάπλαση η οποία δημιουργεί ένα φράγμα για το νερό που έτσι δεν μπορεί να εκφορτισθεί προς τη θάλασσα (Σχ. 5.5). Η συνέχεια της ανθρακικής αυτής μάζας με αυτή του Μαντουδίου αλλά και η επικοινωνία της με τις παρακείμενες μάζες των οφιολιθικών πετρωμάτων, κάτω από τα αλλούβια (με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ενιαίου υδροφόρου ορίζοντα), τεκμηριώνεται και δικαιολογεί τις μεγάλες ποσότητες νερού που εκφορτίζονται από την πηγή των Αγίων Αποστόλων και αντλούνται από την παρακείμενη γεώτρηση.

γ) Ανθρακικά πετρώματα βορείου τμήματος περιοχής μελέτης

Τα ανθρακικά πετρώματα του βορείου τμήματος της περιοχής μελέτης αντιπροσωπεύονται από τις μικρότερης ή μεγαλύτερης έκτασης ανθρακικές μάζες που αναδύονται κάτω από τους νεογενείς σχηματισμούς και απαντώνται σε διάφορες περιοχές όπως βόρεια του Μαντουδίου και στην Κρύα Βρύση (Γεροβουνό), ανατολικά του όρμου Πελί (ή Πελέκι), στην Κήρινθο, ανάμεσα σε Δάφνη και Λίμνη (Κάστρο), ανατολικά του όρμου του Αγίου Βασιλείου και ανατολικά της Αγίας Άννας στην ευρύτερη περιοχή των κοινοτήτων Σκεπαστή, Κουρκουλοί, Αμέλαντες, της Παλαιόβρυσης και του Ξηρού όρους, όπου και οι μεγαλύτερες εμφανίσεις.

Το κύριο χαρακτηριστικό των μαζών αυτών είναι ότι αποτελούν ανεξάρτητη υδρογεωλογική ενότητα αφού απομονώνονται από τις ανθρακικές μάζες του νοτίου τμήματος μέσα από τη μεγάλη τεκτονική γραμμή – εφίπευση «Μαντούδι – Λίμνη» κατά μήκος της οποίας αναπτύσσεται μια μικρού πάχους ζώνη από τους αδιαπέρατους σχηματισμούς της

σχιστοψαμμιτοκερατολιθικής διάπλασης, όπως τεκμηριώνεται τόσο στο ανατολικό (όρμος Μαντουδίου) όσο και στο δυτικό (περιοχή ανάμεσα Δάφνη και Λίμνη) τμήμα της ζώνης, δηλαδή όπου αυτό δεν καλύπτεται από τις προσχώσεις του Νηλέα ποταμού (Λέκκας κ ά, 1998).

Στις ανθρακικές μάζες που αναπτύσσονται στις γειτονικές με τη θάλασσα περιοχές, όπως ανατολικά του όρμου του Μαντουδίου, ανατολικά του όρμου Πελέκι (Γεροβουνό), στην Κρύα Βρύση, στην Κήρινθο και ανατολικά του όρμου του Αγ. Βασιλείου, το νερό τους είναι υφάλμυρο, τόσο στις μάζες που έρχονται απ' ευθείας σε επαφή με το θαλασσινό νερό, όσο και σε αυτές που βρίσκονται εσωτερικότερα (Κήρινθος).

5.5.4 Σχιστοκερατολιθική διάπλαση

Παρουσιάζεται σε μικρές σχετικά εμφανίσεις και αντιπροσωπεύει είτε την προς τα πάνω εξέλιξη των Ιουρασικών ασβεστολίθων είτε τους σχηματισμούς ωκεάνιου πυθμένα που συνοδεύουν τα οφιολιθικά πετρώματα. Συνίσταται κυρίως από πηλίτες, εκρηξιγενή πετρώματα, κερατολίθους και ασβεστολιθικές ενδιαστρώσεις. Ο σχηματισμός στο σύνολό του, λόγω της παρουσίας των πηλιτών, συμπεριφέρεται ως αδιαπέρατος και διαδραματίζει ουσιαστικό ρόλο στη διαμόρφωση των υδρογεωλογικών λεκανών και την κίνηση των υπογείων υδάτων.

Την πιο χαρακτηριστική περίπτωση αποτελούν οι ανθρακικές μάζες του νοτίου τμήματος της περιοχής μελέτης (και ιδίως αυτές της περιοχής Μαντουδίου, Αγίας Παρασκευής και Γεροβουνού) που απομονώνονται από τις υποκείμενες ανθρακικές μάζες του βορείου τμήματος μέσα από μια μικρού σχετικά πάχους ζώνη από πηλιτικά κυρίως πετρώματα της διάπλασης που ακολουθούν την μεγάλη τεκτονική γραμμή – εφίπλευση Μαντουδίου – Λίμνης.

5.5.5 Οφιολιθικό κάλυμμα

Σε πολλές περιπτώσεις, υπάρχουν συνθήκες οι οποίες ευνοούν τη διαμόρφωση υδροφόρων οριζόντων. Το βάθος της υδροφορίας ποικίλει κατά θέσεις, ανάλογα με το πάχος του μανδύα αποσάθρωσης του πετρώματος και του βάθους διάρρηξής του. Γενικά πάντως δεν είναι μεγάλο και σπάνια υπερβαίνει τα 100m.

Στις κοιλάδες πολλά από τα πηγάδια και τις γεωτρήσεις που έχουν διανοιχτεί εκμεταλλεύονται υδροφόρους ορίζοντες οι οποίοι σχηματίζονται μέσα σε οφιολίθους και νεώτερους σχηματισμούς οι οποίοι έχουν προέλθει απ' αυτούς.

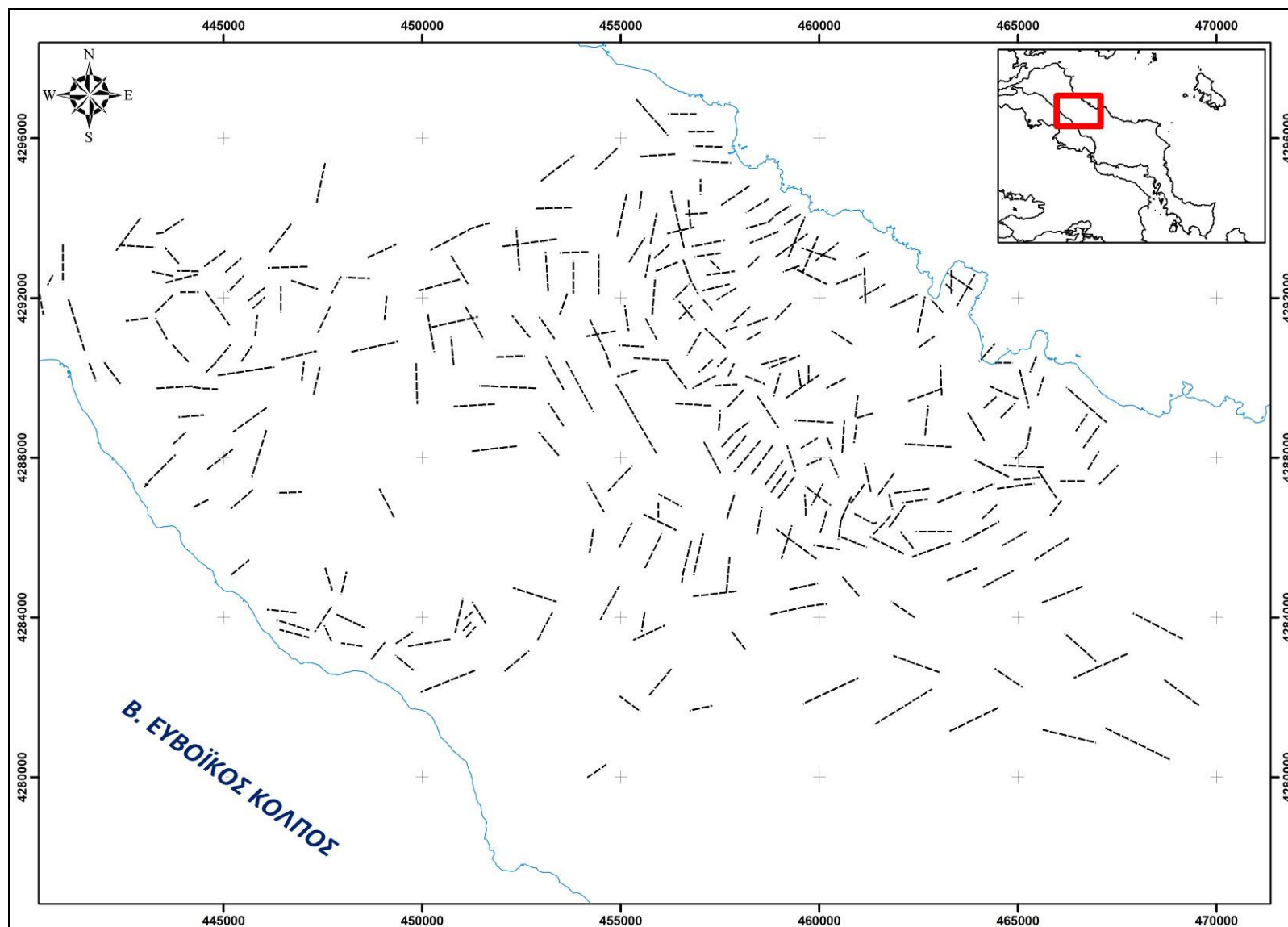
Το υδρογεωλογικό καθεστώς στα πετρώματα αυτά εκφράζεται με διάσπαρτες πηγές μικρών παροχών και εποχικών μεταβολών. Στην περιοχή ανάπτυξης των οφιολίθων οι πηγές νερού εμφανίζουν μεγάλη διασπορά και σχετικά μικρές παροχές και απαντώνται στο μεγαλύτερο ποσοστό τους στους σερπεντινωμένους χαρτζβουργίτες, καθώς και στην επαφή τους με τους υποκείμενους σερπεντινίτες.

Μεγάλος αριθμός πηγών συγκεντρώνεται στο δυτικό τμήμα της περιοχής έρευνας, από όπου και θα πρέπει να εκτονώνεται η κύρια μάζα του νερού που κατεισδύει στα περισσότερα περατά ανώτερα μέλη της οφιολιθικής μάζας των σερπεντινωμένων χαρτζβουργιτών. Η γενική δομή της οφιολιθικής μάζας και οι ζώνες διάρρηξης διαμορφώνουν καθοριστικά τις διευθύνσεις κίνησης και συγκέντρωσης των υπόγειων ροών.

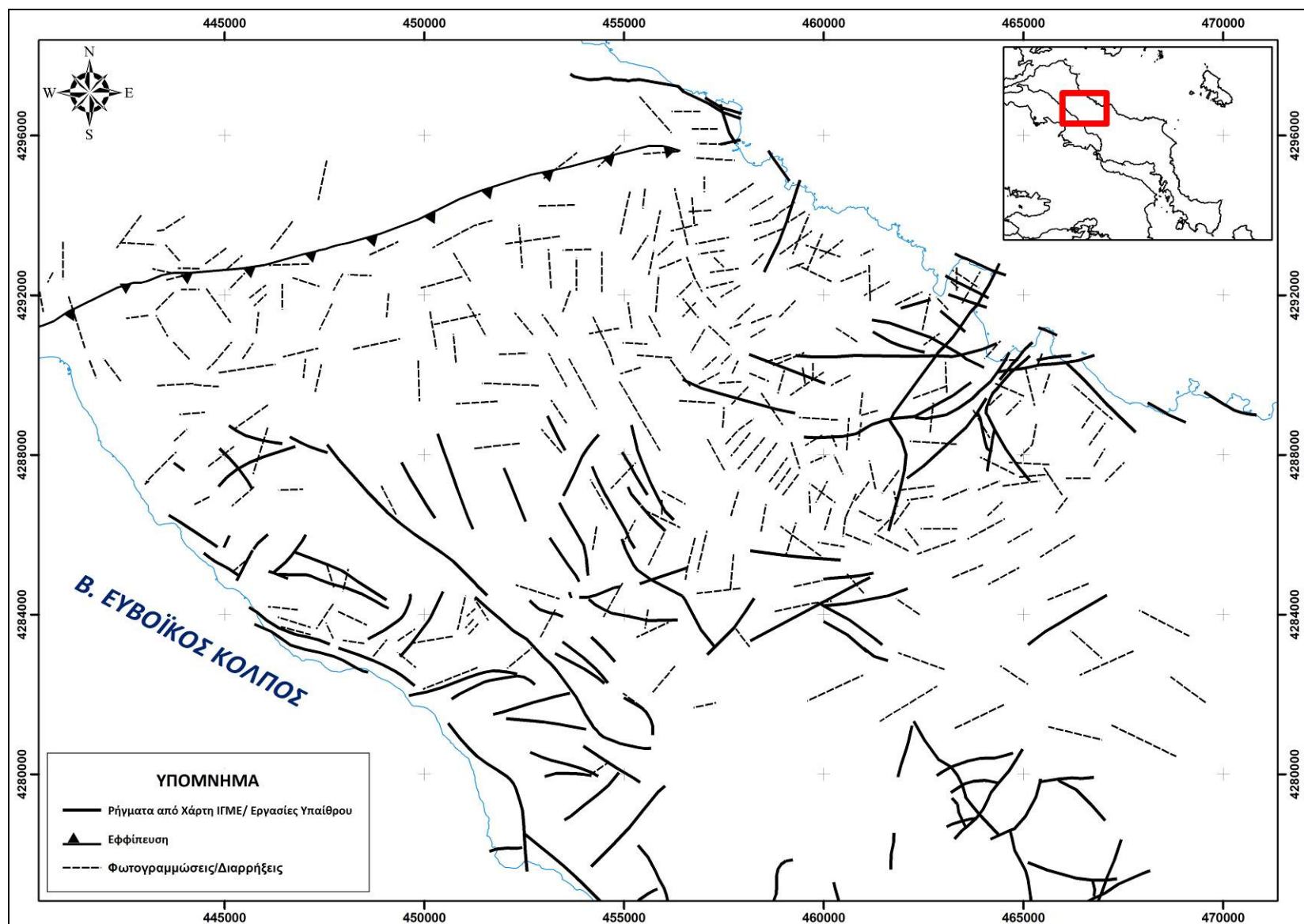
Στις περιοχές ανάπτυξης των οφιολιθικών υπερβασικών σχηματισμών, κυρίως περιδοτίτες, σερπεντινίτες και διαβάσεις, Κεντρικής και Βόρειας Εύβοιας εντοπίζονται πηγές, οι οποίες αναβλύζουν με σχεδόν μόνιμη ροή σε χαμηλές σχετικά μορφολογικά θέσεις. Σχεδόν στο σύνολό τους έχουν παροχές, με τιμές που κυμαίνονται από 0,1 l/s έως και 1,5 l/s, πλην ορισμένων εξαιρέσεων που είναι εκροές μεταλλείων μαγνησίτη και παρουσιάζουν υψηλότερες παροχές από 2,5 l/s έως 8,5 l/s.

Γενικά οι πηγές που προέρχονται από τους οφιολιθικούς σχηματισμούς αποτελούν πηγές που αναβλύζουν μέσα στους σερπεντινωμένους χαρτζβουργίτες, γεγονός που οφείλεται στο συνδυασμό της θέσης εκροής αδιαπέρατης ζώνης διάτμησης, με την παρουσία της υπερκείμενης μάζας ανοικτών διαρρήξεων και ρήγματος που υποβιβάζει το ανάγλυφο.

Η υδροπερατότητα των σχηματισμών αυτών οφείλεται κυρίως στο δευτερογενές πορώδες το οποίο έχει δημιουργηθεί από τη δράση των τεκτονικών τάσεων εφελκυσμού και διάτμησης που έχουν προκαλέσει κατακερματισμό των πετρωμάτων. Τα τελευταία χαρακτηρίζονται από πυκνά δίκτυα ρωγμών και διακλάσεων (Σχ. 5.6 και 5.7) διαφόρων διευθύνσεων ενώ παρουσιάζονται και πρωτογενείς ασυνέχειες.



Σχήμα 5.6: Χάρτης φωτογραμμώσεων της περιοχής μελέτης



Σχήμα 5.7: Χάρτης φωτογραμμώσεων/ διαρρήξεων και ρηγμάτων της περιοχής μελέτης

5.6 Υδραυλική θεώρηση του μέσου ασυνεχειών

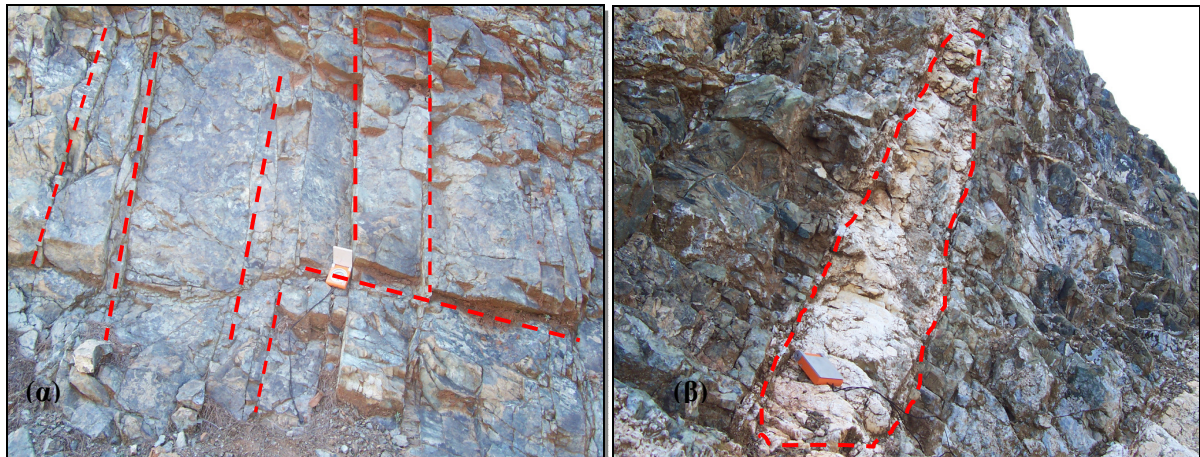
Η υδραυλική θεώρηση του μέσου ασυνεχειών αποτελεί μια ειδική περίπτωση της υπόγειας υδραυλικής. Το μέσο αυτό εμφανίζει πολλές ιδιαιτερότητες και πολλές διαφορές, κυρίως, με το πορώδες μέσο. Το μέσο ασυνεχειών αναφέρεται σε αντιδιαστολή με το πορώδες μέσο, η οποία συγκεκριμενοποιείται στο συνεχή χαρακτήρα του πορώδους μέσου και στον ασυνεχή του μέσου ασυνεχειών.

Βραχώδεις σχηματισμοί, που η εντατική και πυκνή διάρρηξή τους, τους κάνει να συμπεριφέρονται ως εδάφη χονδρόκοκκα ή σε μεγέθυνση, εμφανίζοντας ένα χαρακτήρα συνεχή. Συνεχή, όμως, χαρακτήρα εμφανίζουν και τυπικές βραχομάζες σε συνάρτηση με την κλίμακα θεώρησης. Επομένως ένας αντιπροσωπευτικός ορισμός των υδραυλικών μέσων ασυνεχειών είναι «εκείνο που εμφανίζει διαδρομές κίνησης νερού εντελώς διακεκριμένες και συγκεκριμένες, τις ασυνέχειες κάθε μορφής και προελεύσεως» (Στουρνάρας, 2007).

Οι ασυνέχειες της βραχομάζας αντανακλούν τα πεδία των τάσεων, τις οποίες δέχτηκε στο παρελθόν ή δέχεται ακόμα το πέτρωμα. Ωστόσο οι ασυνέχειες μπορούν να διακριθούν σε πρωτογενείς διακλάσεις (σχιστότητα), σε δευτερογενείς ή επιγενετικές (εφελκυσμού, αποσυμπιέσεως), συνεξελικτικές (αποσαθρώσεως) και ανθρωπογενείς (εκσκαφές). Τα βασικότερα χαρακτηριστικά και παράμετροι των ασυνεχειών που καθορίζουν το μέσο ασυνεχειών είναι τα ακόλουθα:

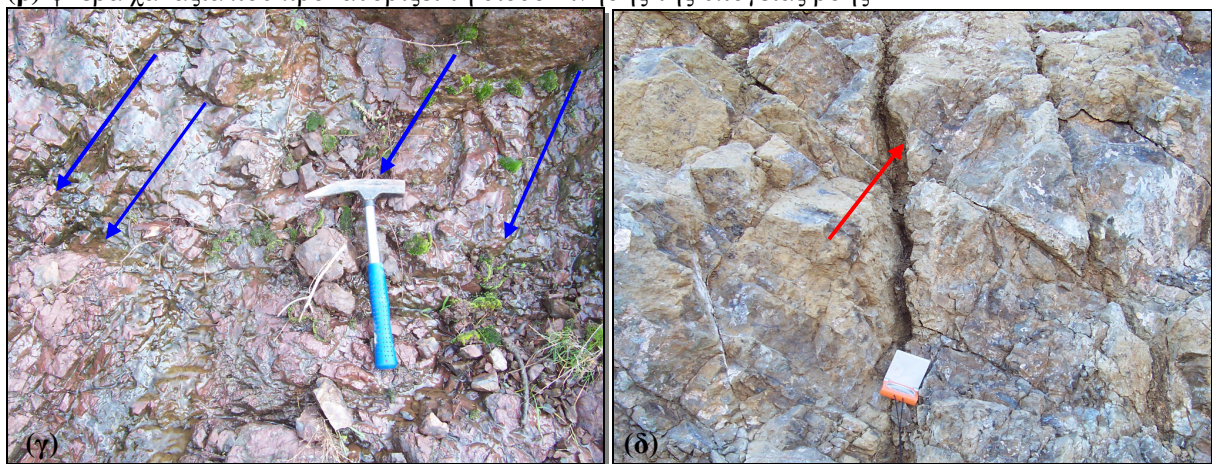
- *προσανατολισμός*
- *«οικογένειες»*
- *έκταση*
- *βαθμός διασύνδεσης*
- *σχετική ηλικία*
- *«ενεργότητα»*
- *φαινόμενο άνοιγμα*
- *συχνότητα και πυκνότητα*
- *διαστάσεις*
- *επίδραση του βάθους*
- *τραχύτητα*
- *όγκος*
- *ύπαρξη ή μη υλικού πλήρωσης*

Είναι επομένως κατανοητό πως η προσέγγιση στη γεωμετρία τους αποτελεί μελέτη πρόωμη της υδρογεωλογικής και υδραυλικής μελέτης του μέσου.



(α) διακλάσεις στους περιδοτίτες

(β) φλέβα χαλαζία που προκαθορίζει τη δίοδο κίνησης της υπόγειας ροής



(γ) παράδειγμα της υπόγειας ροής διά μέσου ασυνεχειών

(δ) χαρακτηριστική ανοιχτή ρωγμή με υλικό πλήρωσης (αργιλικής σύστασης) στο εσωτερικό

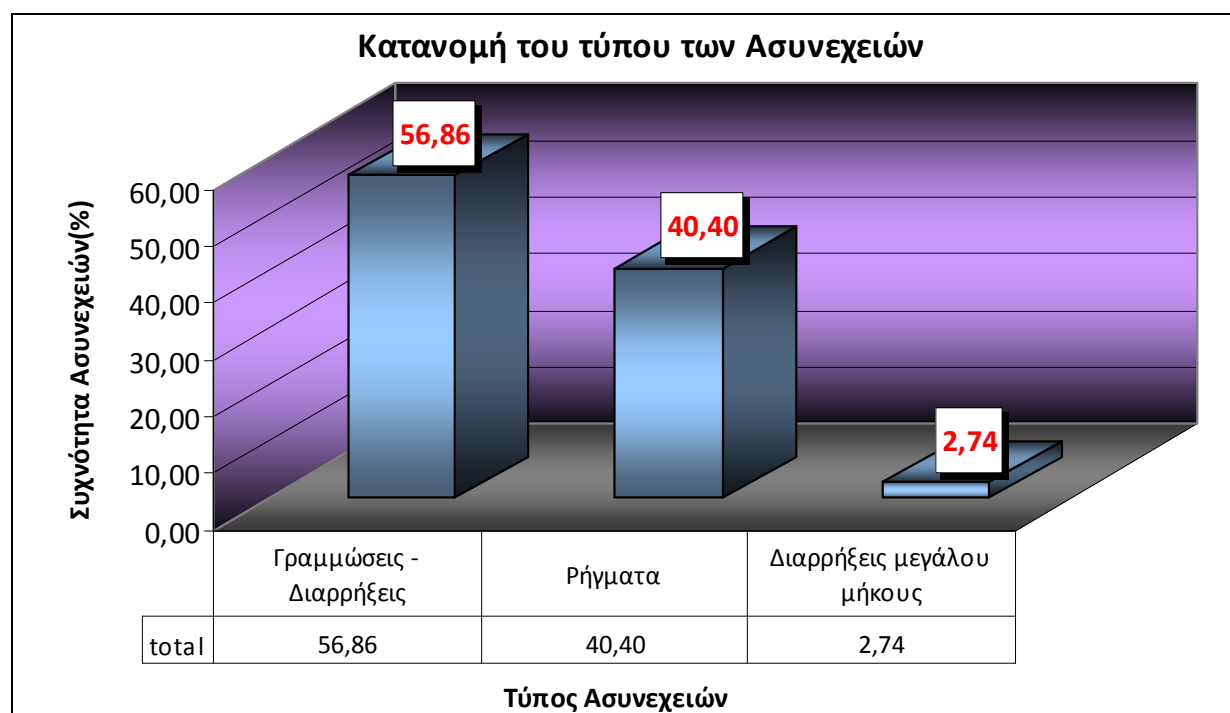
5.6.1 Στατιστική επεξεργασία του μέσου ασυνεχειών

Το επόμενο στάδιο στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής ήταν η ανάλυση των παραμέτρων που ορίζουν το καθεστώς της υπόγειας ροής του νερού στο μέσο ασυνεχειών. Η διαδικασία αυτή είναι κριτικής σημασίας και οι παράμετροι, οι οποίες παίζουν ρόλο συνισταμένων στον καθορισμό της τελικής υδρογεωλογικής συνιστώσας είναι οι εξής (Krasny, 1996, Μποτσιαλάς, 2007, Botsialas et al. 2010):

- ✚ Κατανομή του τύπου ασυνεχειών
- ✚ Προσανατολισμός
- ✚ Διαστάσεις
- ✚ Χωρική πυκνότητα
- ✚ Βαθμός διασύνδεσης των ασυνεχειών

5.6.1.1 Κατανομή του τύπου ασυνεχειών

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχ. 5.8), φαίνεται η κατανομή του τύπου ασυνεχειών, όπου το 56,86% αντιστοιχεί σε γραμμώσεις – διαρρήξεις, ενώ το 40,40% αντιστοιχεί σε ρήγματα ορατά τα οποία προήλθαν από τη συνδυασμένη εφαρμογή τεχνικών τηλεπισκόπησης και εργασιών υπαίθρου. Τέλος το 2,74% αντιστοιχεί σε διαρρήξεις μεγάλου μήκους, οι οποίες αρχικά είχαν θεωρηθεί ως ρήγματα. Από τις εργασίες υπαίθρου διαπιστώθηκε ότι πρόκειται για διαρρήξεις μεγάλου μήκους.

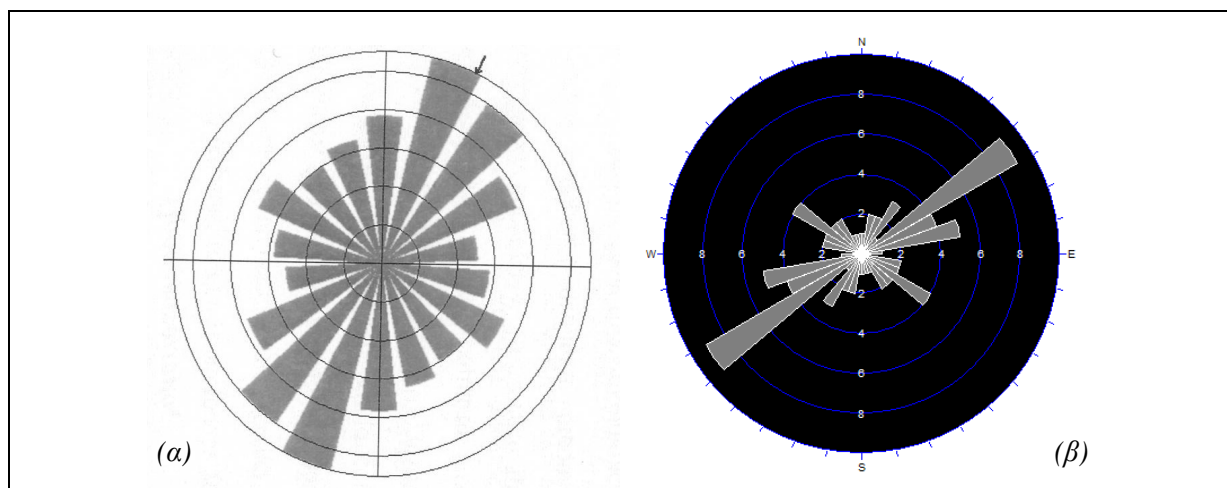


Σχήμα 5.8: Κατανομή της συχνότητας του τύπου ασυνεχειών στους περιδοτίτες

5.6.1.2 Προσανατολισμός

Η διερεύνηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των κάθε λογής ασυνεχειών αφορά τη μέτρηση της διεύθυνσης, της κλίσης και της φοράς μέγιστης κλίσης των επιπέδων των ασυνεχειών. Ο προσανατολισμός είναι ιδιαίτερα κρίσιμη παράμετρος αφού σχετίζεται άμεσα με τη διεύθυνση της εκλεκτικής κίνησης του υπόγειου νερού εντός των ασυνεχειών (Botsialas *et al*, 2010). Ο πλήρης καθορισμός της παραμέτρου, επιτυγχάνεται με τη χρήση στατιστικών μεθόδων όπως είναι τα ροδογράμματα, τα ιστογράμματα διεύθυνσης και οι σφαιρικές προβολές των πόλων των επιπέδων των ασυνεχειών. Τα στοιχεία προσανατολισμού είναι δυνατόν να μετρηθούν τόσο μέσω εργασιών υπαίθρου, όσο και σε κλίμακα περιοχής μέσω μεθόδων τηλεπισκόπησης. Σύμφωνα με τα ροδογράμματα του σχήματος 5.9 τα ρήγματα –

διαρρήξεις εμφανίζουν ως κύρια συχνότητα διεύθυνσης τη B45°A και ως δευτερεύουσα τη B120°A, ενώ η κύρια συχνότητα διεύθυνσης των ρηγμάτων είναι B15°A και δευτερεύουσα διεύθυνση B35°A. Στην περιοχή απαντώνται και ρήγματα που έχουν ως συχνότητα διεύθυνσης τη B65°A.



Σχήμα 5.9: (α) Ροδοδιάγραμμα συχνότητας διεύθυνσης των ρηγμάτων, (β) Ροδοδιάγραμμα συχνότητας διεύθυνσης των γραμμώσεων - διαρρήξεων

5.6.1.3 Χωρική Πυκνότητα

Η χωρική πυκνότητα αναφέρεται στην κλίμακα περιοχής και μπορεί να εκφραστεί ως το μέσο συνολικό μήκος των ασυνεχειών ανά μονάδα επιφάνειας. Είναι ένας τρόπος ποσοτικοποίησης της εμμονής των ασυνεχειών σε κλίμακα περιοχής. Στο χάρτη του σχήματος 5.10 που ακολουθεί η πυκνότητα των ασυνεχειών (γραμμώσεις – διαρρήξεις και ρήγματα) είναι εκφρασμένη σε συνολικό μήκος ασυνεχειών ανά μονάδα επιφάνειας. Ο καθορισμός αυτού του μεγέθους, γίνεται με τη βοήθεια αλγορίθμου, ενσωματωμένου σε σύστημα γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών, όπου ο χάρτης ασυνεχειών χωρίζεται σε τετραγωνικό κανάβο. Στη συνέχεια, σε κάθε σημείο του κανάβου ορίζεται κύκλος συγκεκριμένης ακτίνας, όπου μετρείται το συνολικό μήκος των ασυνεχειών που βρίσκονται εντός του κύκλου και το τελικό άθροισμα των μηκών των ασυνεχειών διαιρείται με την επιφάνειά του. Στην περίπτωση που μία ασυνέχεια τέμνει τον κύκλο, τότε ως μήκος ασυνέχειας υπολογίζεται η απόσταση από το ένα άκρο της ασυνέχειας έως το σημείο τομής κύκλου και ασυνέχειας. Επομένως σε κάθε σημείο του κανάβου, αντιστοιχεί μία τιμή πυκνότητας. Στο τελικό στάδιο υπολογίζεται η χωρική κατανομή της πυκνότητας στην περιοχή μελέτης και κατασκευάζεται ο χάρτης του σχήματος 5.10, με τη χρήση αλγορίθμου χωρικής ανάλυσης (Spatial Analyst). Το μήκος της πλευράς του κελιού του κανάβου ορίστηκε στα 20 m και η ακτίνα του κύκλου ορίστηκε στα 500 m.

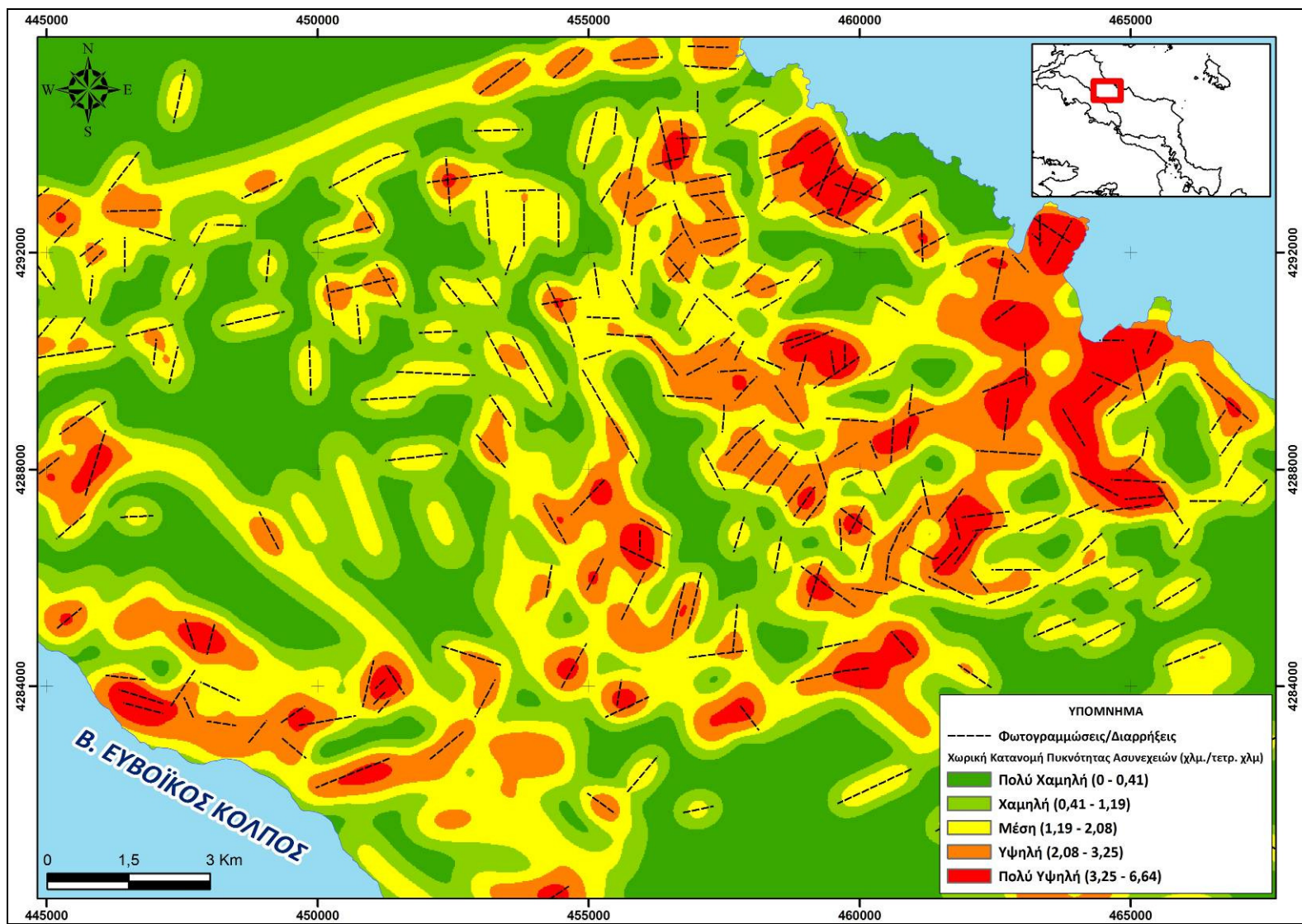
Από την ανάγνωση του χάρτη διαπιστώθηκαν περιοχές με υψηλή τιμή χωρικής πυκνότητας ($3,25 - 6,64 \text{ km/km}^2$). Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι περιοχές αυτές αποτελούνται από διαφορετικής λιθολογικής σύστασης χαρακτηριστικά. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση του βορειοανατολικού τμήματος της περιοχής μελέτης (περιοχή Κυμάσι) όπου απαντώνται περιδοτίτες, και στα ανατολικά της περιοχής μελέτης (Όρος Δίρφου) όπου εκφράζεται από ανθρακικούς σχηματισμούς του Αν. Ιουρασικού.

Στις περιοχές που απαντώνται κυρίως ποταμολιμναίες αποθέσεις η χωρική πυκνότητα των ασυνεχειών κυμαίνεται σε πολύ χαμηλές έως χαμηλές τιμές. Το γεγονός αυτό δεν υποδεικνύει ότι ο βαθμός διάρρηξης στο βάθος συνεχίζεται να είναι χαμηλός, αφού τα αποτελέσματα στηρίζονται σε παρατηρήσεις επιφάνειας και τηλεπισκόπησης. Ταυτόχρονα όμως στις περιοχές αυτές η παρουσία πλαστικών δομών είναι περιορισμένη.

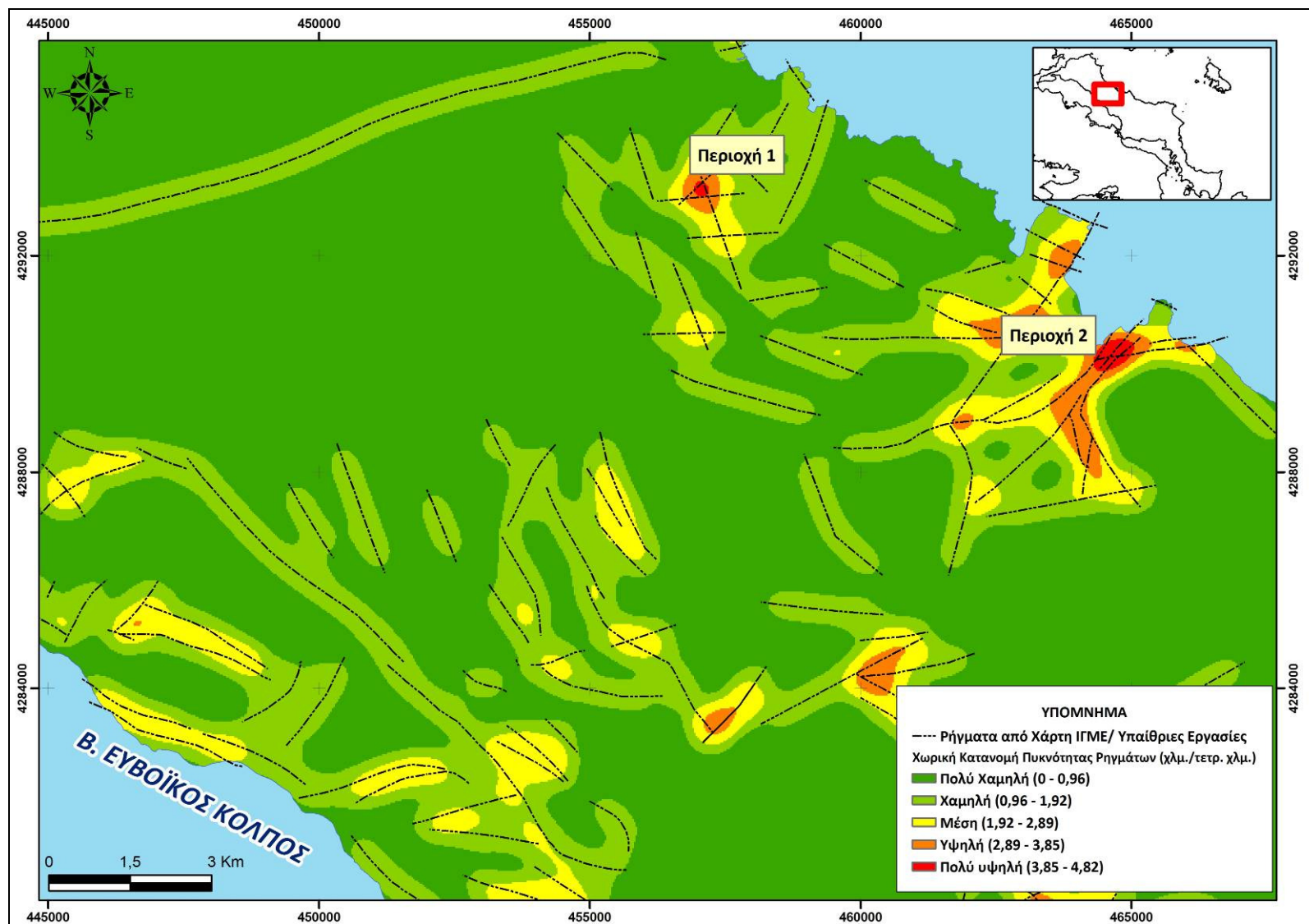
Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν δύο επιπλέον χάρτες χωρικής κατανομής της πυκνότητας. Ο πρώτος αφορά την κατανομή της χωρικής πυκνότητας των ρηγμάτων (Σχ. 5.11) και ο δεύτερος τη χωρική κατανομή της πυκνότητας των γραμμώσεων – διαρρήξεων (Σχ. 5.12).

Από την επεξεργασία των χαρτών διαπιστώθηκε ότι εμφανίζουν στην περιοχή 1 (περιοχή Κυμάσι) πανομοιότυπη χωρική κατανομή της πυκνότητας με τιμές από υψηλές έως πολύ υψηλές, ενώ στην περιοχή 2 η κατανομή είναι ανομοιογενής και οι τιμές της πυκνότητας κυμαίνονται από πολύ υψηλές έως υψηλές για την περίπτωση των ρηγμάτων και χαμηλές έως πολύ χαμηλές για την περίπτωση των φωτογραμμώσεων – διαρρήξεων.

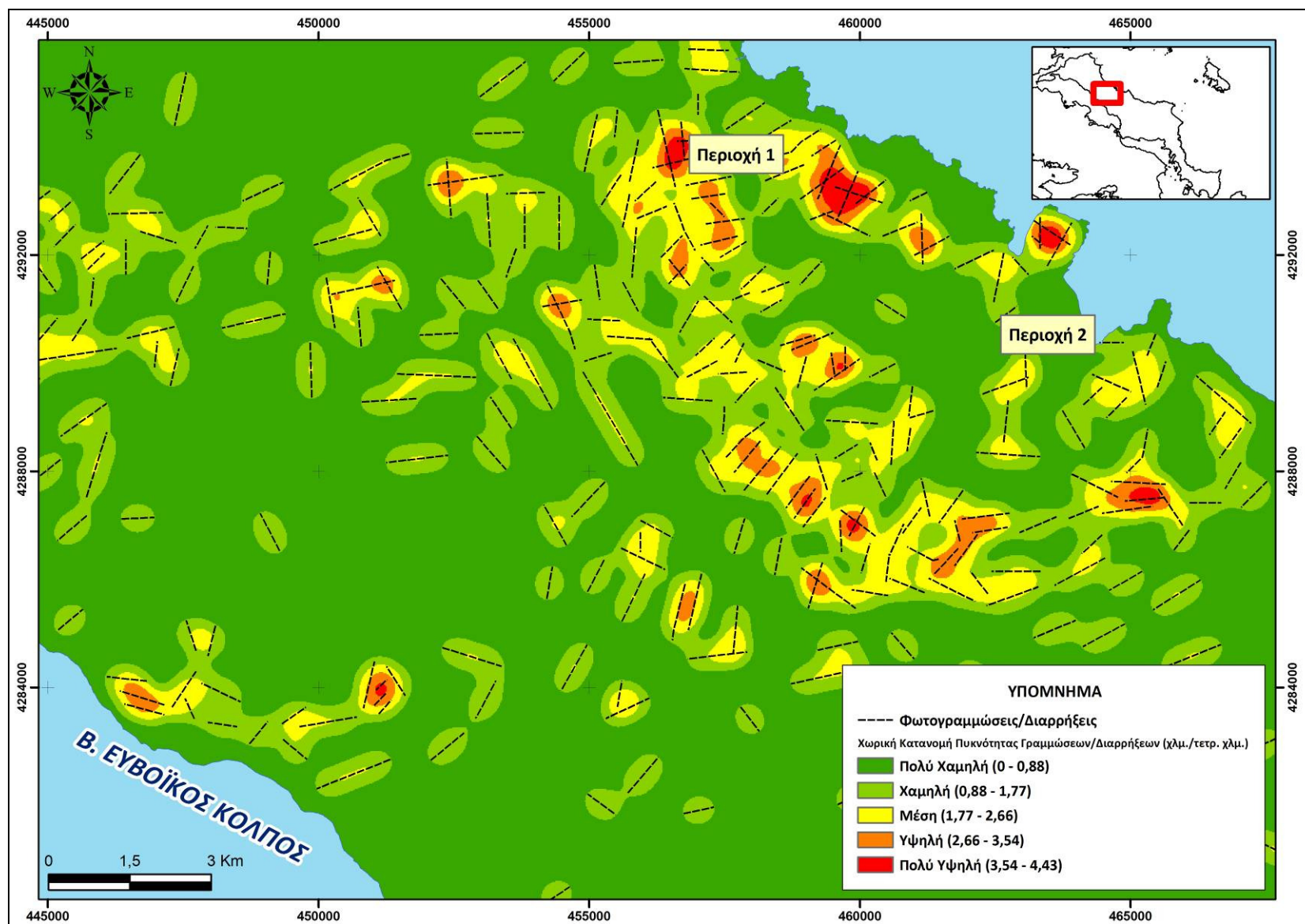
Εν αντιθέσει με τα παραπάνω στην υπόλοιπη περιοχή μελέτης η χωρική κατανομή της πυκνότητας παρουσιάζει μία ομοιογένεια με τιμές που κυμαίνονται από πολύ χαμηλές έως χαμηλές.



Σχήμα 5.10: Κατανομή χωρικής πυκνότητας των ασυνεχειών στην περιοχή μελέτης



Σχήμα 5.11: Κατανομή χωρικής πυκνότητας των ρηγμάτων στην περιοχή μελέτης



Σχήμα 5.12: Κατανομή χωρικής πυκνότητας των φωτογραμμώσεων/ διαρρήξεων στην περιοχή μελέτης

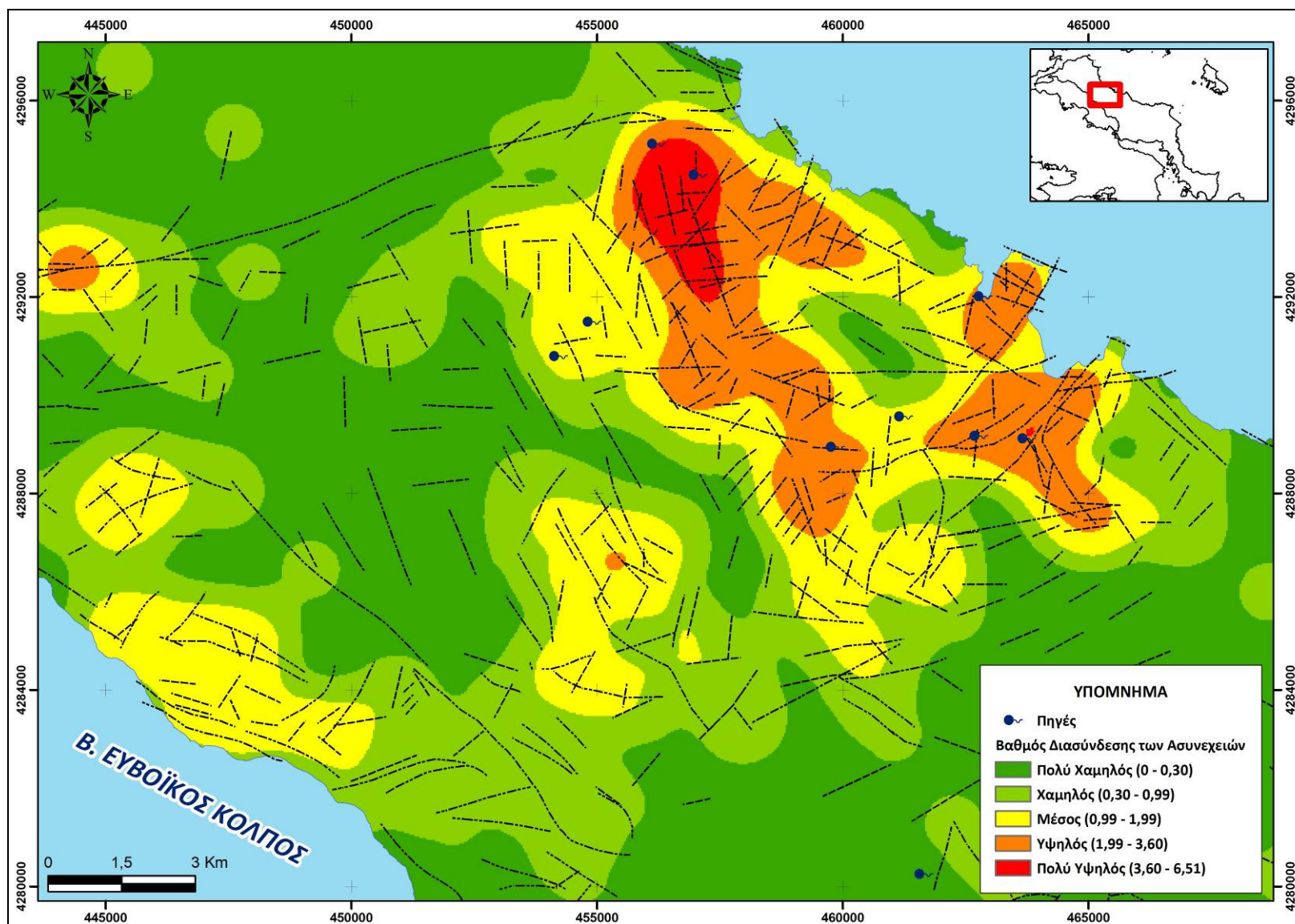
5.6.1.4 Βαθμός Διασύνδεσης των Ασυνεχειών

Ο βαθμός διασύνδεσης των ασυνεχειών είναι μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους που καθορίζουν την υδραυλική συμπεριφορά του μέσου ασυνεχειών, αφού όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός διασύνδεσης τόσο η ροή του νερού εντός του πετρώματος είναι ομαλή και ενιαία. Είναι τέτοια η επίδραση της παραμέτρου, που στην ακραία περίπτωση του πολύ υψηλού βαθμού διασύνδεσης, το μέσο ασυνεχειών είναι δυνατόν να συμπεριφέρεται ως ομοιογενές και ισότροπο μέσο (Στουρνάρας, 2005).

Στο σχήμα 5.13 παρουσιάζεται ο χάρτης κατανομής του βαθμού διασύνδεσης, ο οποίος κατασκευάστηκε με την εξής διαδικασία:

- ✚ Στο πρώτο στάδιο ψηφιοποιήθηκαν τα σημεία τομής δύο ή περισσότερων ασυνεχειών
- ✚ Στη συνέχεια με τρόπο αντίστοιχο του υπολογισμού της χωρικής πυκνότητας υπολογίζεται ο βαθμός των σημείων τομής ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο.

Η πρώτη παρατήρηση από την ανάγνωση του χάρτη, αναδεικνύει μια εικόνα παρόμοια με αυτή της χωρικής κατανομής της πυκνότητας των ασυνεχειών. Η περιοχή του Κυμασίου εμφανίζει τις υψηλότερες τιμές χωρικής κατανομής του βαθμού διασύνδεσης με κύρια διεύθυνση των ασυνεχειών ΝΔ – ΒΑ. Συγκρίνοντας τη χωρική κατανομή πυκνότητας και βαθμού διασύνδεσης, διαπιστώνεται ότι εμφανίζουν πανομοιότυπα χαρακτηριστικά στις περιοχές με υψηλές τιμές πυκνότητας και βαθμού διασύνδεσης αντίστοιχα. Αντίθετα σε περιοχές με διαφορετική λιθολογική σύσταση παρατηρείται ότι ο βαθμός διασύνδεσης κυμαίνεται σε χαμηλές έως πολύ χαμηλές τιμές, και οι τιμές χωρικής κατανομής της πυκνότητας στις αντίστοιχες περιοχές διαφοροποιείται.



Σχήμα 5.13: Χωρική κατανομή του βαθμού διασύνδεσης των ασυνεχειών στην περιοχή μελέτης

5.6.2 Συσχετισμός των πηγών με τις ασυνέχειες

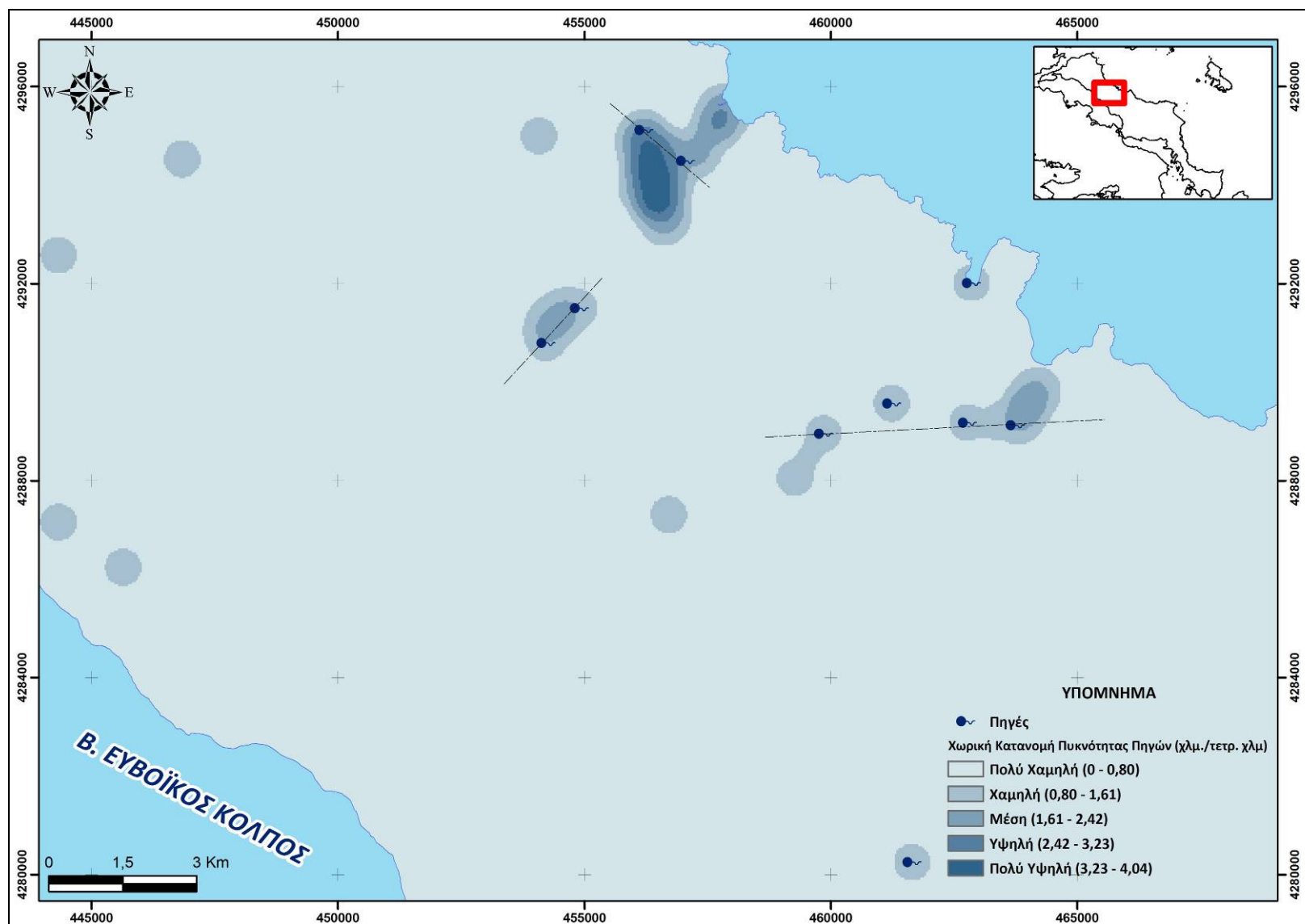
Κατά το στάδιο της ενότητας αυτής γίνεται μία προσπάθεια συσχετισμού των ασυνεχειών με τις πηγές που καταγράφηκαν στην περιοχή μελέτης. Σκοπός είναι να διαπιστωθεί κατά πόσο η εκφόρτιση και παρουσία αυτών των πηγών οφείλεται στην έντονη τεκτονική καταπόνηση του οφιολιθικού καλύμματος.

Στο πρώτο στάδιο έγινε εκτίμηση της απόστασης των πηγών από τις ασυνέχειες. Προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η παραπάνω παρατήρηση, αλλά και να ελεγχθεί η χωρική κατανομή των πηγών (Σχ. 5.14) σε σχέση με την αντίστοιχη χωρική κατανομή των ασυνεχειών, ορίστηκε μία ζώνη επίδρασης (buffer zones), γύρω από κάθε ασυνέχεια, με μέγιστο εύρος τα 120 μέτρα (Σχ. 5.15). Η ζώνη αυτή χωρίζεται σε πέντε τάξεις των 30 μέτρων. Η επιλογή των συγκεκριμένων τάξεων προήλθε από την ανάγκη να οριστεί μια απόσταση τέτοια ούτως ώστε να υπάρχει σχετικά μεγάλη βεβαιότητα αναφορικά με το εάν μία πηγή οφείλει την ύπαρξή της στην παρουσία των παρακείμενων ασυνεχειών.

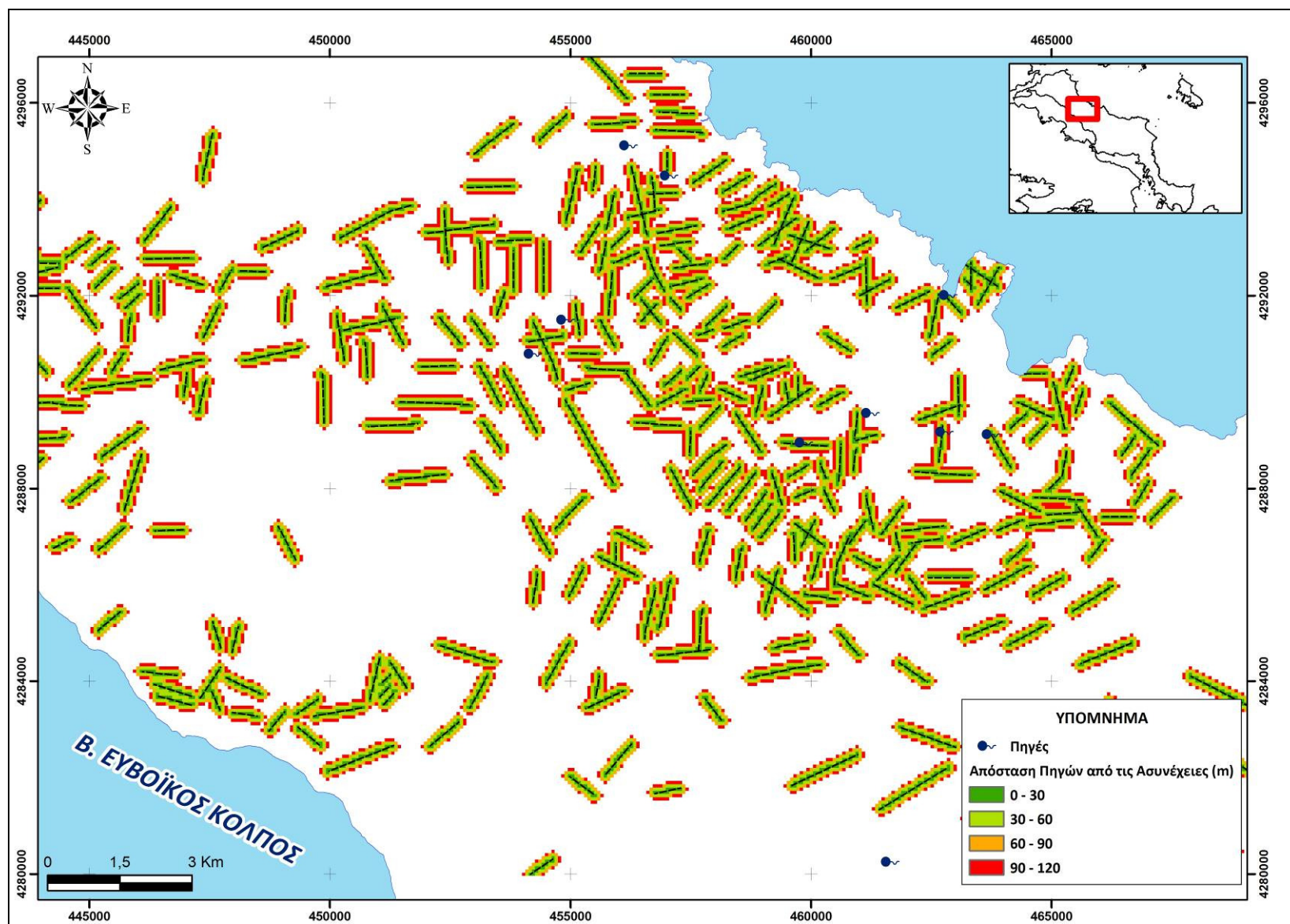
Σύμφωνα με το χάρτη του σχήματος 5.15 διαπιστώνεται ότι όσο απομακρυνόμαστε από τις παρακείμενες ασυνέχειες, όπου τόσο ο βαθμός διασύνδεσης όσο και κατ' επέκταση η χωρική κατανομή πυκνότητας των ασυνεχειών μειώνεται, τόσο μειώνεται και ο αριθμός των πηγών που λαμβάνουν χώρα (Γιόζας, 2009). Στις περιοχές όπου η απόσταση από τις ασυνέχειες υπερβαίνει τα 120 μέτρα δε σημαίνει απαραίτητα ότι οι συγκεκριμένες πηγές δε σχετίζονται με το μέσο ασυνεχειών, αλλά ο βαθμός αβεβαιότητας είναι πολύ μεγαλύτερος από ότι στις πηγές που βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη των 120 μέτρων.

Από τη χωρική κατανομή των πηγών εντοπίστηκαν γραμμικές συσχετίσεις με τις τεκτονικές δομές που απαντούν στην περιοχή. Συγκεκριμένα παρατηρούνται ομάδες με διευθύνσεις εγκάρσιες μεταξύ τους, μία ΒΑ – ΝΔ, μία ΒΔ – ΝΑ και μία Α - Δ.

Τα παραπάνω ευρήματα ενισχύουν την άποψη ότι το σύνολο των πηγών που εμφανίζονται στην περιοχή μελέτης σχετίζονται ισχυρώς με το πλήθος των ασυνεχειών (Γιόζας, 2009).



Σχήμα 5.14: Χωρική Κατανομή Πυκνότητας των πηγών (χλμ./ τετρ. χλμ.)



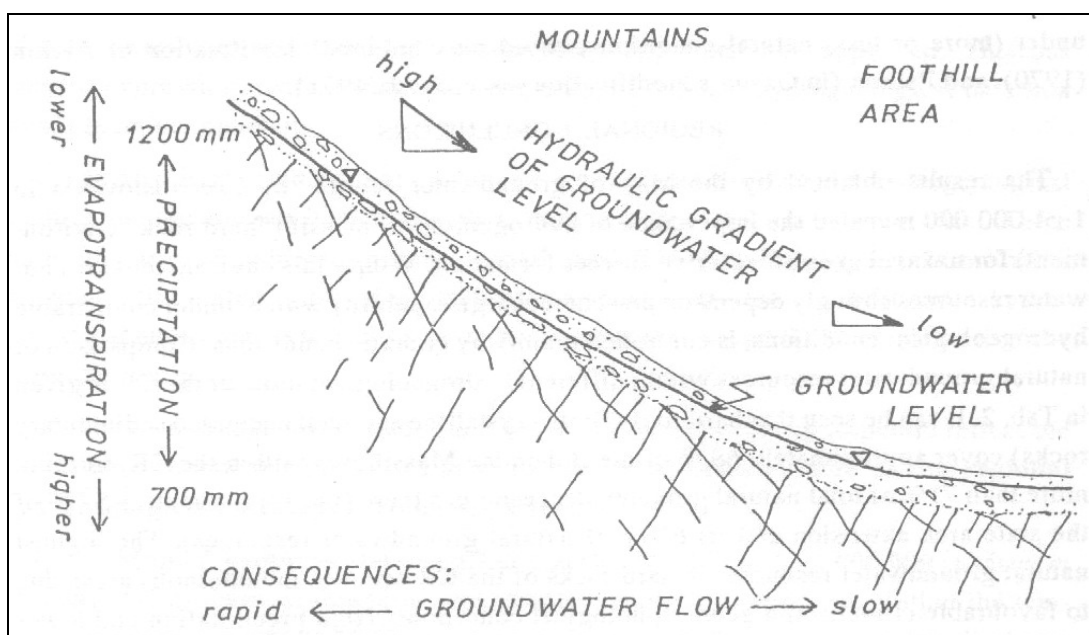
Σχήμα 5.15: Χωρική κατανομή των πηγών σε σχέση με την απόστασή τους από τις ασυνέχειες

5.6.3 Η επίδραση των ρηγμάτων και των ρωγμών στην υπόγεια ροή

Η διερεύνηση των παραγόντων της πυκνότητας των ασυνεχειών, του βαθμού διασύνδεσης και του προσανατολισμού των ασυνεχειών, έδωσε μόνο ένα κλάσμα από το συνολικό μηχανισμό παρουσίας πηγών στην περιοχή μελέτης.

Σύμφωνα με τον Krasny (1996), σε ορεινές περιοχές, η μεγάλη μεταβολή της τοπογραφικής κλίσης, με μικρό πάχος αποσαθρωμένου μανδύα και με έντονο βαθμό διάρρηξης, έχει ως αποτέλεσμα την υψηλή κατείσδυση στα υψηλότερα υψόμετρα. Παρά το γεγονός ότι η υδραυλική αγωγιμότητα των πετρωμάτων αυτών είναι χαμηλή, η έντονα διερρηγμένη ζώνη και η υψηλή υδραυλική κλίση έχει ως αποτέλεσμα τη μεταφορά προς τα κατόντη μεγάλων ποσοτήτων νερού. Με τη μείωση του υψόμετρου, μειώνεται αντίστοιχα και η υδραυλική κλίση (Σχ. 5.16).

Σύμφωνα με τον Philips (1991), η διεύθυνση του ρήγματος πρέπει να είναι τέτοια που να μεγιστοποιεί την επίδρασή του επί της υπόγειας ροής, και συγκεκριμένα να είναι ικανώς παράλληλη με τη διεύθυνση της υδραυλικής κλίσης. Έτσι, εάν ένα ρήγμα έχει διεύθυνση κάθετη σε σχέση με αυτή της υδραυλικής κλίσης, η επίδρασή του στην ροή του υπόγειου νερού είναι μικρή. Αντίθετα μία ζώνη υψηλής περατότητας, η οποία διευθύνεται παράλληλα με την υδραυλική κλίση, εμφανίζει μέγιστη επίδραση επί της υπόγειας ροής. Είναι προφανές ότι μεταξύ των δύο αυτών ακραίων καταστάσεων υπάρχουν ενδιάμεσες περιπτώσεις όπου η γωνιακή σχέση μεταξύ ρήγματος και υδραυλικής κλίσης διαφοροποιεί ανάλογα το καθεστώς της υπόγειας ροής.



Σχήμα 5.16: Η μεταβολή της υδραυλικής κλίσης σε ορεινές περιοχές (Krasny, 1996)

5.6.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας

Συμφώνως με τις βασικές και αποδεκτές αρχές συμπεριφοράς της βραχομάζας κάθε μηχανική δράση, που εφαρμόζεται στο πέτρωμα, επιφέρει μια τροποποίηση της γεωμετρίας του μέσου, των κενών του και ιδιαιτέρως των ασυνεχειών του (Feuga, 1984). Με τον τρόπο αυτό προκύπτει μια διαφοροποίηση των υδραυλικών χαρακτηριστικών. Η παραμορφωσιμότητα των διακλασμένων μέσων είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη του ακέραιου πετρώματος. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη συγκέντρωση των παραμορφώσεων στις ασυνέχειες του πετρώματος, σε κάθε εξωτερική μηχανική δράση πάνω στο πέτρωμα. Αντιθέτως κάθε μεταβολή της πίεσης του υγρού μέσα στις ασυνέχειες επηρεάζει τα υδραυλικά χαρακτηριστικά, εξαιτίας της διατάραξης που επιφέρει. Στην περίπτωση ομογενών σχηματισμών, συγκεκριμένου πάχους, η δημιουργία ασυνεχειών αναπτύσσεται στην επιφάνεια λόγω του ασθενούς πεδίου τάσεων, παρά το γεγονός ότι η δημιουργία αυτή, έχει, γενικώς, την ίδια γενετική συγγένεια σε βάθος όσο και στην επιφάνεια. Επομένως η πυκνότητα των ασυνεχειών μειώνεται με το βάθος.

Μία από τις στατιστικές αναλύσεις δείχνει ότι ο εμπειρικός νόμος που εξηγεί το φαινόμενο έχει τη μορφή:

$$k = k_0 \exp(-\alpha\sigma) \text{ με } \sigma = \gamma - p$$

όπου:

k = υδραυλική αγωγιμότητα

σ = ενεργή τάση, κάθετη στην εξεταζόμενη διεύθυνση

α = συντελεστής που εξαρτάται από τη φύση του πετρώματος και της ασυνέχειας

k_0 = η υδραυλική αγωγιμότητα στο ανώτερο τμήμα του σχηματισμού

Στο παραπάνω ο Feuga (1984) προσθέτει ότι η παραμορφωσιμότητα των ασυνεχειών, των οποίων η υδραυλική αγωγιμότητα είναι ανάλογη του τετραγώνου του ανοίγματός τους, εισάγει μια οριακή ευαισθησία της συνολικής περατότητας του μέσου ασυνεχειών στις παραμορφώσεις που αυτό υφίσταται. Όσο λοιπόν μεγαλύτερος είναι ο όγκος που λαμβάνεται υπόψη για τον προσδιορισμό της περατότητας τόσο η ίδια η περατότητα είναι μεγαλύτερη (Snow, 1969). Η τελευταία διατύπωση έρχεται να υπογραμμίσει την υπερέχουσα επίδραση των μεγάλων τεκτονικών διαρρήξεων που παρεμβαίνουν στη διαμόρφωση της συνολικής περατότητας του μέσου.

5.7 Συμπεράσματα

Η υδρογεωλογική συμπεριφορά των επωθημένων στο ανθρακικό υπόβαθρο κυρίως υπερβασικών οφιολιθικών μαζών οφείλεται στην έντονη διαφοροποίησης που παρουσιάζουν και η οποία σχετίζεται με τη λιθολογία, τη γεωλογική δομή και την τεκτονική καταπόνηση των πετρωμάτων. Γενικά, οι οφιολιθικές μάζες φιλοξενούν ποσότητες υπόγειων νερών, οι οποίες διακινούνται μέσα κυρίως από ζώνες εντατικών διαρρήξεων. Η κατείδυση του νερού στα πετρώματα αυτά καθορίζεται από το εύρος των τεκτονικών ασυνεχειών, αλλά και από το μέγεθος των υλικών που τις έχουν πληρώσει. Το υδρογεωλογικό καθεστώς στα πετρώματα αυτά εκφράζεται με διάσπαρτες πηγές μικρών παροχών και εποχικών μεταβολών, οι οποίες αναβλύζουν με σχεδόν μόνιμη ροή σε χαμηλές σχετικά μορφολογικά θέσεις. Στην περιοχή ανάπτυξης των οφιολίθων οι πηγές νερού απαντώνται στο μεγαλύτερο ποσοστό τους στους σερπεντινωμένους χαρτζβουργίτες, καθώς και στην επαφή τους με τους υποκείμενους σερπεντινίτες.

Από την ανάλυση των παραμέτρων που ορίζουν το καθεστώς της υπόγειας ροής του νερού στο μέσο ασυνεχειών, φαίνεται ότι η κίνηση του υπόγειου νερού καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την παρουσία ασυνεχειών (διαρρήξεις, ρωγματώσεις, ρήγματα) που εμφανίζουν ως κύρια συχνότητα διεύθυνσης τη B45°A και ως δευτερεύουσα τη B120°A, ενώ η κύρια συχνότητα διεύθυνσης των ρηγμάτων είναι B15°A και δευτερεύουσα διεύθυνση B35°A.

Από την επεξεργασία των χαρτών χωρικής κατανομής της πυκνότητας των ρηγμάτων και χωρικής κατανομής της πυκνότητας των γραμμώσεων – διαρρήξεων διαπιστώθηκε ότι εμφανίζουν στην περιοχή Κυμάσι πανομοιότυπη εικόνα με τιμές από υψηλές έως πολύ υψηλές, ενώ προς τα νότια η κατανομή είναι ανομοιογενής και οι τιμές της πυκνότητας κυμαίνονται από πολύ υψηλές έως υψηλές για την περίπτωση των ρηγμάτων και χαμηλές έως πολύ χαμηλές για την περίπτωση των φωτογραμμώσεων – διαρρήξεων. Η συσχέτιση της πυκνότητας ασυνεχειών οδήγησε στην κατασκευή του χάρτη απεικόνισης του βαθμού διασύνδεσης των ασυνεχειών. Συγκρίνοντας τη χωρική κατανομή πυκνότητας και βαθμού διασύνδεσης, διαπιστώνεται ότι εμφανίζουν πανομοιότυπα χαρακτηριστικά στις περιοχές με υψηλές τιμές πυκνότητας και βαθμού διασύνδεσης αντίστοιχα. Αντίθετα σε περιοχές με διαφορετική λιθολογική σύσταση παρατηρείται ότι ο βαθμός διασύνδεσης κυμαίνεται σε χαμηλές έως πολύ χαμηλές τιμές, και οι τιμές χωρικής κατανομής της πυκνότητας στις αντίστοιχες περιοχές διαφοροποιείται.

6. ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΗΓΩΝ

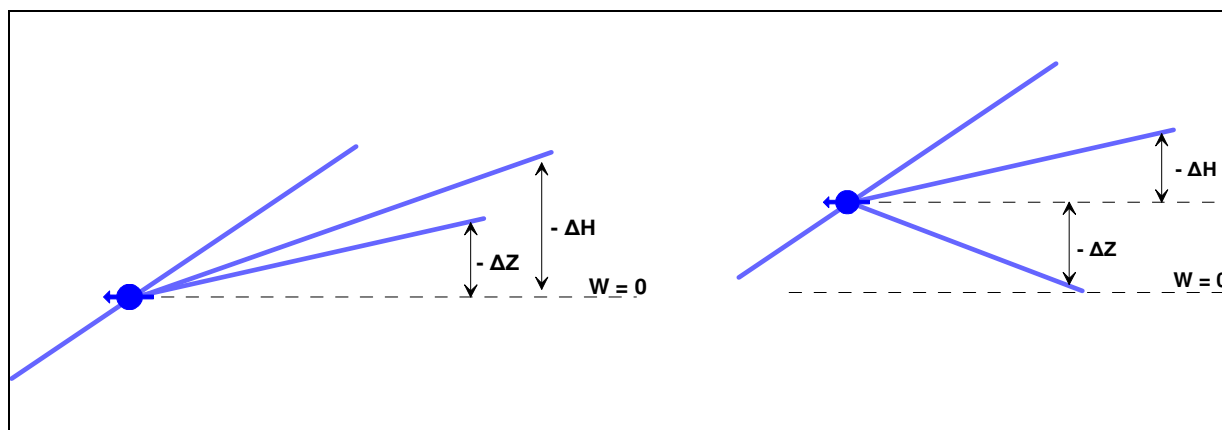
6.1 Εισαγωγή

Η πηγή είναι μία φυσική επιφανειακή εκφόρτιση ενός υδροφόρου συστήματος. Η Υδροδυναμική ανάλυση των πηγαίων εκφορτίσεων υπόγειου νερού αποτελεί μία βασική μεθοδολογία υδρογεωλογικής (ποιοτικής) και υδραυλικής (ποσοτικής) μελέτης των υδροφόρων συστημάτων.

Η πηγαία εκφόρτιση είναι κίνηση (ροή) υπόγειου νερού και ως ροή προϋποθέτει την κατανάλωση κάποιου διαθέσιμου υδραυλικού δυναμικού (φορτίου), που με τη σειρά του έχει διαμορφωθεί στο εσωτερικό του υδροφόρου ορίζοντα. Παράλληλα, η ίδια εκφόρτιση και τα χαρακτηριστικά της (σημεία εκφόρτισης, μεταβολή της παροχής, μεταβολή του χημισμού), εξαρτώνται άμεσα από τις γεωλογικές συνθήκες (λιθολογικές φάσεις, γεωλογική δομή) και τις υδρογεωλογικές συνθήκες του υδροφόρου συστήματος.

Ως υδροφόρο σύστημα, ορίζεται υδροφορέας ή σύνολο υδροφορέων, που καθορίζονται από υδρογεωλογικά όρια. Όλα τα σημεία του συστήματος βρίσκονται σε συνθήκες υδραυλικής εξάρτησης, οποιασδήποτε, επομένως, μεταβολή, επηρεάζει το σύνολο του συστήματος, χωρίς να επιφέρει καμία επίπτωση έξω από αυτό (Margat, 1968). Σε όλα τα υδροφόρα συστήματα που συνδέονται άμεσα με πηγαίες εκφορτίσεις, καθοριστική σημασία έχει η διάκριση ανάμεσα στην ακόρεστη ζώνη και στην κορεσμένη και στις μεταβολές τους. Η σχέση της κορεσμένης ζώνης και του υψόμετρου της πηγαίας εκφόρτισης καθορίζει το μηχανισμό λειτουργίας της πηγής. Επομένως, για πηγές που το νερό κινείται αποκλειστικά λόγω βαρύτητας, πέρα από τις επί μέρους περιγραφές και κατατάξεις των πηγών σε κατηγορίες, η παραπάνω σχέση δημιουργεί δύο κύριους υδροδυναμικούς τύπους πηγών (Σχ. 6.1):

- *πηγές επαφής* όταν το υπόγειο νερό βρίσκεται μόνο σε μεγαλύτερα υψόμετρα από το υψόμετρο του σημείου της πηγής. Πρόκειται για πηγές που δεν επιδέχονται υδρομαστεύσεις ή καλλιέργειες, δεδομένου ότι κάθε τέτοια διαδικασία οδηγεί στην ταχύτερη εκκένωση της λεκάνης της πηγής.
- *πηγές υπερπλήρωσης* όταν το υπόγειο νερό βρίσκεται σε μεγαλύτερα υψόμετρα, αλλά και σε μικρότερα, από το υψόμετρο του σημείου της πηγής. Πρόκειται για την κατ' εξοχή μορφή των πηγών, που επιδέχονται υδρομάστευση, με αναρρύθμιση της υπερετήσιας λειτουργίας του υδατικού συστήματος.



Σχήμα 6.1: Σκαριφηματική απεικόνιση πηγής επαφής (αριστερά) και υπερπλήρωσης (δεξιά)

6.2 Γενική Υδραυλική Θεώρηση

Η υδραυλική θεώρηση του μέσου ασυνεχειών αποτελεί μία ειδική περίπτωση της υπόγειας υδραυλικής. Το μέσο αυτό εμφανίζει πολλές ιδιαιτερότητες και κυρίως πολλές διαφορές με το κλασικό πορώδες μέσο, το οποίο έχει μελετηθεί εξαντλητικά και για το οποίο ισχύουν οι γνωστές εξισώσεις ροής. Για το πορώδες μέσο, τόσο στο επίπεδο ροής «ως έχει» (Νόμος Darcy, εξίσωση συνέχειας Laplace), όσο και σε επίπεδο ροής προς το υδροληπτικό έργο (πρότυπα Dupuit, Thiem, Theis, Jacob κλπ), η ροή έχει περιγραφεί με τρόπο ικανοποιητικό, κυρίως σε επίπεδο πρακτικών εφαρμογών, όπου αντιμετωπίζονται και οι ιδιαιτερότητες και οι οριακές συνθήκες των υδροφορέων.

6.2.1 Ροή σε πορώδη μέσα

Η περιγραφή αυτής της ροής, βασίζεται σε μία σειρά από παραδοχές, προσεγγίσεις, γενικεύσεις ή απλουστεύσεις, που δε μεταβάλλουν σημαντικά τα αποτελέσματα. Κυριότερες από αυτές είναι η χρήση των εννοιών της ισοτροπίας, ομοιογένειας, της άπειρης έκτασης του υδροφορέα, της οριζόντιας θέσης του, του τέλει υδροληπτικού έργου, της σταθερής παροχής άντλησης κλπ. Η ροή στο πορώδες μέσο βασίζεται, επιπλέον, σε μία σειρά θεωρήσεων, όπως είναι η γραμμικότητα της ροής, η τριβή σαν μοναδική αντίσταση στη ροή, η βαρύτητα ως μοναδική κινούσα δύναμη.

6.2.2 Ροή σε μέσο ασυνεχειών

Στο μέσο ασυνεχειών, η τριβή περιορίζεται στα τοιχώματα των ασυνεχειών ή των καρστικών αγωγών (στην οριακή περίπτωση των καρστικών υδροφορέων), ενώ εμφανίζονται δυνάμεις

αδράνειας, που αντιστέκονται στην κίνηση. Η βαρύτητα συμπληρώνεται από φαινόμενα ανοδικών κινήσεων, που συνδέονται με άλλα φαινόμενα, όπως θερμά νερά ή αέρια.

Η επέκταση της υδραυλικής θεώρησης του πορώδους μέσου στο μέσο ασυνεχειών, φαίνεται να είναι δύσκολη και προϋποθέτει κάποιες συγκεκριμένες και αναγκαίες διευθετήσεις. Ως εκ τούτου οι βασικές αντιμετώπισεις του θέματος στηρίζονται σε προσομοιώσεις του μέσου ασυνεχειών προς ένα πορώδες μέσο.

Συνοψίζοντας η υδραυλική θεώρηση του μέσου ασυνεχειών εξαρτάται και συγχρόνως διενεργείται μέσα σε διαφορετικά πλαίσια, που είναι:

- η διερεύνηση του των συνθηκών του μέσου
- ο εξοπλισμός και η διαδικασία μετρήσεων
- η ερμηνεία των μετρήσεων και ο προσδιορισμός του υδροδυναμικού πλαισίου
- η δομή του μέσου και η αναπαράστασή του
- η συμπεριφορά του συνόλου και οι προσομοιώσεις του

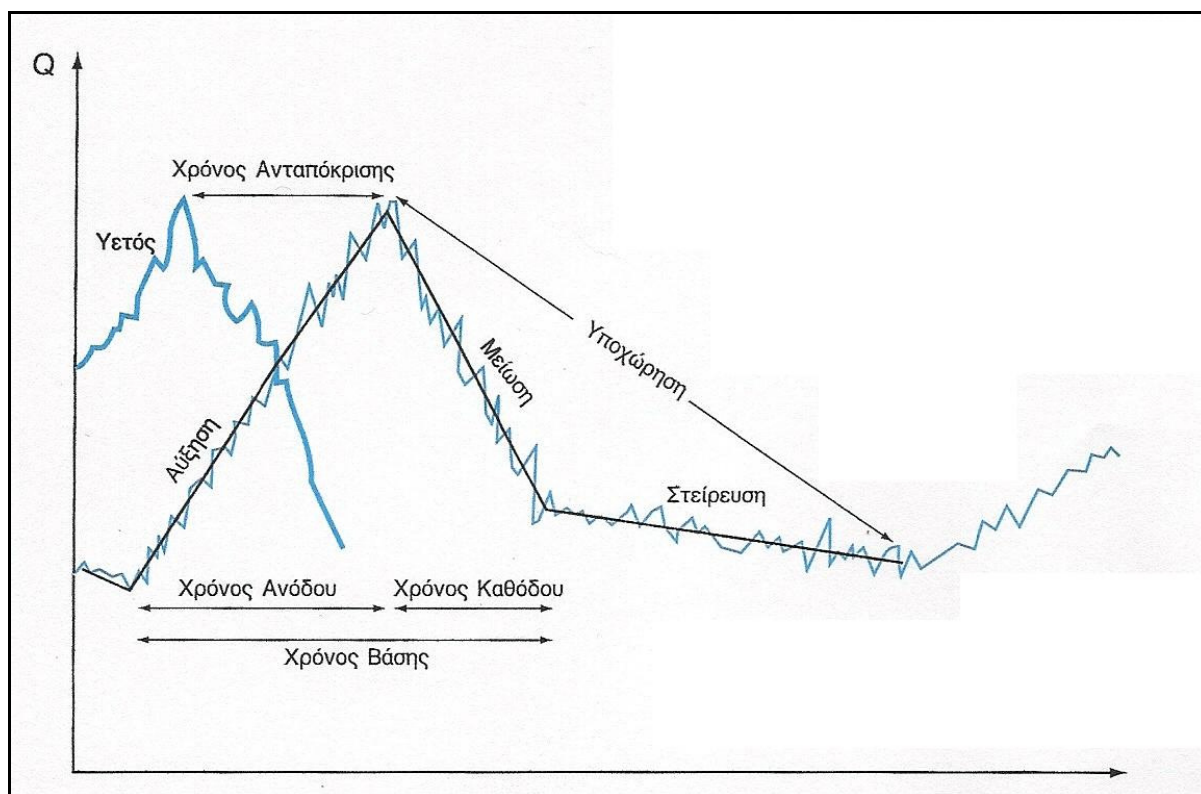
Η γενική γεωλογική και υδρογεωλογική γνώση και εμπειρία υπογραμμίζουν, εκ προοιμίου, το γεγονός ότι δεν υπάρχει ένας συγκεκριμένος τύπος μέσου ασυνεχειών, αλλά διάφοροι τύποι των οποίων οι τεχνικές και διαδικασίες μελέτης και εκμετάλλευσης είναι, πολλές φορές, εντελώς εξειδικευμένες (Στουρνάρας, 2000).

6.3 Υδρογράμματα πηγών

Υδρογράμμα μιας πηγής ή ενός υδάτινου ρεύματος, γενικότερα, είναι η γραφική απεικόνιση της μεταβολής της παροχής q σε συνάρτηση με το χρόνο t (Σχ. 6.2). Υπό την προϋπόθεση ότι σε ολόκληρη την περιοχή τροφοδοσίας μιας πηγής ή τη λεκάνη απορροής ενός υδάτινου ρεύματος, οι βροχοπτώσεις είναι ενιαίες και ομοιόμορφες, με σταθερή μοναδιαία ένταση P_i και για μοναδιαίο και ενιαίο χρόνο t_i , τότε το διάγραμμα, που θα προκύψει από την απεικόνιση αυτή, ονομάζεται μοναδιαίο υδρογράμμα. Σε αυτό διακρίνονται τρία βασικά τμήματα, αυτά που διακρίνονται και σε ένα διάγραμμα εξομάλυνσης, που προκύπτει από την επεξεργασία των ημερησίων καταγραφών και είναι:

- στον ανοδικό κλάδο της καμπύλης, *καμπύλη συγκέντρωσης ή αύξησης*, που αντιπροσωπεύει το χρονικό διάστημα, μέσα στο υδρολογικό έτος, στο οποίο οι παροχές αυξάνουν γενικά, ανεξάρτητα από επί μέρους προσωρινές μειώσεις και

- στα δύο τμήματα του καθοδικού κλάδου δηλαδή, στο τμήμα ταχείας εκφόρτισης που έχει μεγάλη κλίση, *καμπύλη μείωσης ή πτώσης*, που αντιπροσωπεύει το αντίστοιχο διάστημα μείωσης των παροχών, ανεξάρτητα από επί μέρους προσωρινές αυξήσεις και το τμήμα βραδείας εκφόρτισης με την πιο μικρή κλίση, *καμπύλη στείρευσης ή εξάντλησης*, που αρχίζει από το τέλος της προηγούμενης και τελειώνει στην αρχή της επόμενης καμπύλης αύξησης. Ο καθοδικός κλάδος του υδρογράμματος (καμπύλη μείωσης και καμπύλη στείρευσης) ονομάζεται *ενιαία καμπύλη υποχώρησης*.



Σχήμα 6.2: Γενική μορφή και στοιχεία μοναδιαίου υδρογράμματος πηγής (Στουρνάρας, 2007)

Οι χαρακτηριστικοί χρόνοι που διακρίνονται στο παραπάνω μοναδιαίο υδρόγραμμα είναι:

- ο χρόνος ανταπόκρισης, που είναι το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από το «μέσο» ή «κέντρο βάρους» της βροχόπτωσης μέχρι τη στιγμή της εμφάνισης της μέγιστης παροχής εκφόρτισης.
- ο χρόνος ανόδου, που αντιπροσωπεύει τη χρονική διάρκεια της καμπύλης συγκέντρωσης
- ο χρόνος καθόδου, που αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα της καμπύλης μείωσης
- ο χρόνος βάσης, που είναι το άθροισμα των δύο προηγούμενων χρόνων.

Τα χαρακτηριστικά αυτά του υδρογράμματος μιας πηγής είναι αποτέλεσμα της γεωλογίας, γεωμετρίας, υδρογεωλογίας και υδραυλικών συνθηκών και παραμέτρων μέσα στο υδροφόρο

σύστημα. Επειδή, αφενός μεν οι βροχοπτώσεις δεν έχουν σταθερή, αλλά μεταβαλλόμενη ένταση, αφετέρου δεν κατανέμονται ομοιόμορφα στη λεκάνη τροφοδοσίας της πηγής, το υδρόγραμμα που προκύπτει, συνήθως, είναι ένα σύνθετο υδρόγραμμα, από τις μεταβολές που υφίσταται το θεωρητικό μοναδιαίο υδρόγραμμα.

Από το υδρόγραμμα των πηγών, το πιο ενδιαφέρον τμήμα είναι η καμπύλη υποχώρησης, ειδικά θεωρώντας την ίδια τη διάρκεια της υποχώρησης. Στη διάρκεια αυτή διατυπώνονται τα στοιχεία λειτουργίας του συστήματος, προσδιορίζονται οι ελάχιστες παροχές και τα προς εκφόρτιση αποθέματα. Έτσι, η πλειοψηφία των ερευνητών ασχολείται με το τμήμα αυτού του υδρογράμματος, με διάφορες προτάσεις, που αφορούν ολόκληρη την καμπύλη υποχώρησης ή αποκλειστικά την καμπύλη στείρευσης, που εμφανίζουν μία λιγότερη ή περισσότερο γενική εφαρμογή και που έχουν την αφετηρία τους σε διαφορετικά πρότυπα. Στα πλαίσια αυτά, διατυπώθηκαν προτάσεις στηριζόμενες σε νοητικά πρότυπα (Maillet, Tison κλπ), σε εμπειρικές προσεγγίσεις (Forkasiewicz, Paloc κλπ), στην υδροδυναμική, που αφορά τα υδροφόρα στρώματα και τις οριακές συνθήκες (Berkaloff κλπ).

6.4 Υδρογράμματα πηγών μελέτης

6.4.1 Μετρήσεις της παροχής των πηγών

Οι μετρήσεις της παροχής των υπό παρακολούθηση πηγών πραγματοποιήθηκαν κατά το ημερολογιακό έτος 2010, με συχνότητα σχεδόν μία φορά τον μήνα, από τον Ιανουάριο μέχρι τον Δεκέμβριο του ίδιου έτους.

Ο κύριος σκοπός των μετρήσεων αυτών ήταν η συλλογή των κατάλληλων εκείνων δεδομένων για την κατασκευή των υδρογραμμάτων των πηγών από τα οποία αρχικά θα εξαχθούν γενικά συμπεράσματα για τις πηγές. Στη συνέχεια και με την βοήθεια των τμημάτων της καμπύλης στείρευσης των υδρογραμμάτων, έγινε ο υπολογισμός του συντελεστή στείρευσης της κάθε πηγής με αποτέλεσμα την καλύτερη προσέγγιση και κατανόηση της υδραυλικής συμπεριφοράς του μέσου ασυνεχειών.

Οι διευθετήσεις αλλά και οι ίδιες οι παροχές των πηγών επέτρεψαν την μέτρησή τους με τη βοήθεια ογκομετρημένου δοχείου, γνωστού όγκου. Ανάλογα με την παροχή αλλά και την διευθέτηση της κάθε πηγής, επιλέχθηκε και διαφορετικό ογκομετρικό δοχείο. Μετρήθηκε κάθε φορά, ο απαιτούμενος χρόνος κατά τον οποίο γέμιζε το δοχείο από όλη την ποσότητα του νερού της πηγής, μέχρι την ένδειξη της συγκεκριμένης ογκομετρημένης ποσότητας. Για την μέτρηση του χρόνου χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονικό χρονόμετρο με ακρίβεια εκατοστού του δευτερολέπτου.

Για πηγές με μικρή παροχή, στις οποίες το νερό διευθετείται και εξέρχεται από κρήνες ή από σωλήνα, χρησιμοποιήθηκε ογκομετρημένο δοχείο χωρητικότητας 6 λίτρων. Αντίθετα για πηγές με μεγαλύτερη παροχή, κρίθηκε αναγκαία η χρησιμοποίηση μεγαλύτερου δοχείου των 10 lt. Ορισμένες φορές όπου η παροχή των πηγών αυξανόταν αρκετά, λόγω υγρής περιόδου, χρησιμοποιήθηκε ογκομετρημένο δοχείο 20 lt.

Στον πίνακα 6.1 δίνονται τα στατιστικά αποτελέσματα των μετρήσεων των παροχών των υπό μελέτη πηγών στην περιοχή μελέτης. Οι παροχές έχουν μετατραπεί σε m^3/h και δίνονται μέχρι ακρίβεια δευτέρου δεκαδικού ψηφίου. Μηδενικές τιμές παροχής σημειώνονται για τις πηγές που είχαν στερέψει κατά τη διάρκεια μετρήσεων της ξηρής περιόδου.

Πίνακας 6.1: Περιγραφική στατιστική της παροχής (m^3/h) των πηγών μελέτης

	<i>SM1</i>	<i>SP2</i>	<i>SPR1</i>	<i>SM3</i>	<i>SM2</i>
<i>min</i>	0.108	0.039	0.216	0.712	1.681
<i>max</i>	0.245	0.205	0.360	1.307	4.154
<i>avg</i>	0.167	0.101	0.279	0.900	2.530
<i>median</i>	0.158	0.076	0.289	0.841	2.500

Από τα στατιστικά περιγραφικά στοιχεία των πηγαίων εκφορτίσεων παρατηρείται ότι η πηγή SM2 εμφανίζει τη μεγαλύτερη τιμή παροχής. Χαρακτηριστικό των πηγών που μελετήθηκαν είναι ότι καμία πηγή δεν κατέγραψε μηδενική τιμή, κάτι που αποδεικνύει τη σημαντικότητα αυτών των πηγών που αναπτύσσονται μέσα στην οφιολιθική μάζα.

6.4.2 Σημεία ύδατος στην περιοχή μελέτης

Οι πηγές που μελετήθηκαν συνολικά ήταν εννέα, εκ των οποίων οι 5 εξετάστηκαν τόσο ως προς την παροχή τους όσο και ως προς τα φυσικοχημικά τους χαρακτηριστικά, ενώ οι υπόλοιπες εξετάστηκαν μόνο ως προς τα φυσικοχημικά τους χαρακτηριστικά. Η επιλογή των συγκεκριμένων πηγαίων εκφορτίσεων έγινε αφενός με βάση την προσβασιμότητα της πηγής, αφετέρου με την αντιπροσωπευτικότητα των αποτελεσμάτων, καθώς το σύνολο των πηγών της περιοχής μελέτης έχουν ελεγχόμενη ροή από το Δ.Δ. Μαντουδίου και ως εκ τούτου τα αποτελέσματα δεν θα ήταν αντιπροσωπευτικά αναφορικά με την ποσοτική εκτίμηση. Για κάθε πηγαία εκφόρτιση δημιουργήθηκε μία βάση δεδομένων με τα χαρακτηριστικά της κάθε πηγής (θέση, υψόμετρο, προσανατολισμός εκροής, τύπος πηγής) από υπαίθριες παρατηρήσεις, ενώ παράλληλα έγινε συλλογή πληροφοριών χρήσης τους από τους αρμόδιους φορείς του Δ.Δ. Μαντουδίου (Πίν. 6.2). Το σύνολο των πηγών που μελετήθηκαν εκφορτίζουν

την οφιολιθική μάζα Μαντουδίου – Πισώνα, ενώ έγινε και απογραφή της πηγής SM1, η οποία εκφορτίζει την οφιολιθική μάζα του Παγώντα.

Σχεδόν στο σύνολό τους έχουν παροχές, με τιμές που κυμαίνονται από 0,04 m³/h έως 4,15 m³/h. Γενικά οι πηγές που προέρχονται από τους οφιολιθικούς σχηματισμούς με βάση τη γεωλογική δομή της θέσης ανάβλυσής τους μπορούν να ομαδοποιηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Πηγές που αναβλύζουν μέσα στους σερπεντινωμένους χαρτζβουργίτες, γεγονός που οφείλεται σε συνδυασμό της θέσης εκροής αδιαπέρατης ζώνης διάτμησης, με την παρουσία της υπερκείμενης μάζας ανοικτών διαρρήξεων και ρήγματος που υποβιβάζει το ανάγλυφο (πηγές SM2, SM3, SPR1).
- Πηγές που εκρέουν στη μάζα των σχιστωδών σερπεντινιτών. Κατά κανόνα οι αναβλύσεις αυτές πραγματοποιούνται σε θέσεις εντατικής διάρρηξης με παράλληλη υποβάθμιση της μορφολογίας από ρήγμα ή και ρήγματα και συνδέονται με ζώνες διάρρηξης (πηγή SP2).
- Πηγές που εκρέουν στην επαφή των υπερβασικών μαζών με τους υποκείμενους κατά κανόνα υδατοστεγείς ηφαιστειοϊζηματογενείς σχηματισμούς (πηγή SM1).

Από την ευρύτερη περιοχή ανάπτυξης των οφιολιθικών σχηματισμών οι πηγές που μελετήθηκαν διαχωρίστηκαν με βάση τη γεωλογία της περιοχής τροφοδοσίας και την θέση εμφάνισής τους και ομαδοποιήθηκαν στις ακόλουθες δύο κατηγορίες βαρυτικών πηγών:

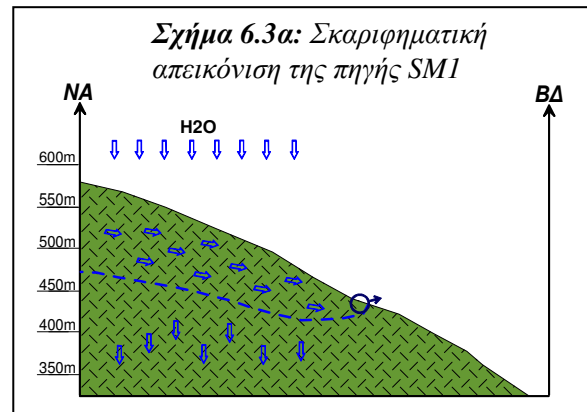
- α) πηγές που αναβλύζουν στην επιφάνεια και είναι κυρίως πηγές επαφής ή ψευδοεπαφής και
β) πηγές ρηξιγενείς – υπερπλήρωσης.

Πίνακας 6.2: Χαρακτηριστικά πηγαίων εκφορτίσεων της περιοχής μελέτης

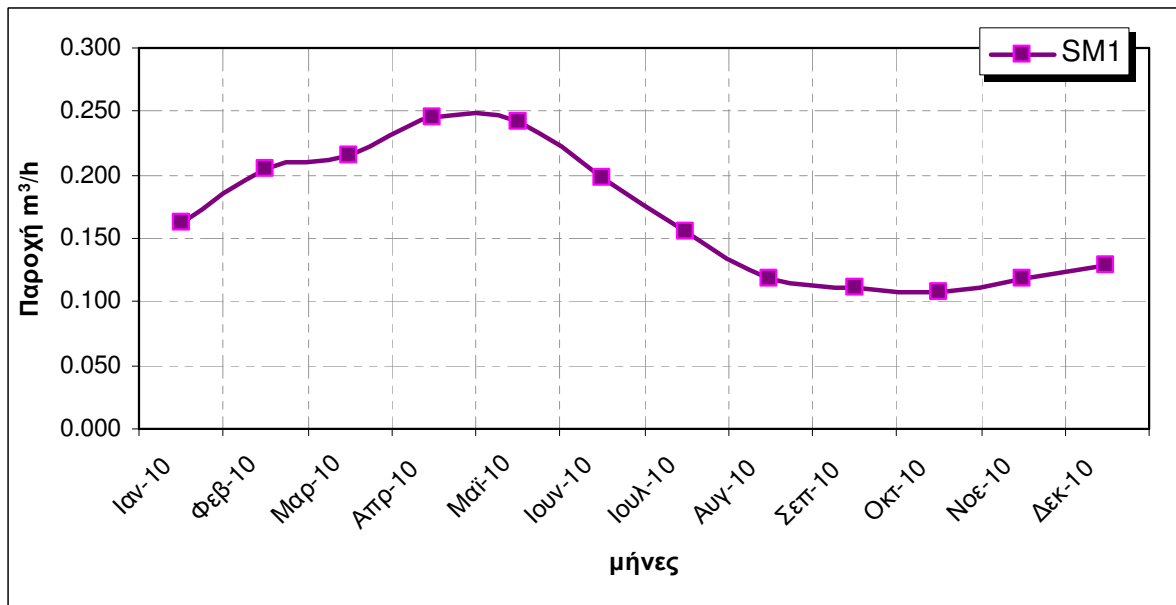
Πηγή	Υψόμετρο	Γεωλογία περιοχής τροφοδοσίας	Είδος πηγής	Παρατηρήσεις
α. Πηγές επαφής ή ψευδοεπαφής				
SM 1	399	Περιδοτίτες, Σερπεντινίτες, αποσαθρωμένος μανδύας, ηφαιστειοϊζηματογενείς σχηματισμοί	Επαφής	Ελεύθερη εκροή, συλλογή σε φρεάτιο
β. Πηγές ρηξιγενείς – υπερπλήρωσης				
SPR 1	100	Περιδοτίτες, Σερπεντινίτες, αποσαθρωμένος μανδύας	Ρηξιγενής	Εκροή από σημείο τοιχώματος υδρομάστευσης
SP 2	70	»» »» »»	Ρηξιγενής	Ελεύθερη εκροή
SM 3	30	Περιδοτίτες, Σερπεντινίτες, Μαγνησίτης, αποσαθρωμένος μανδύας	Ρηξιγενής	Ελεύθερη εκροή
SM 2	36	Περιδοτίτες, Σερπεντινίτες, Μαγνησίτης, νεογενείς αποθέσεις	Ρηξιγενής	Ελεύθερη εκροή

6.4.2.1 Πηγή επαφής SM1

Η πηγή εντοπίζεται στην περιοχή «Νέος Παγώντας» σε απόσταση 400m περίπου από τον ομώνυμο οικισμό. Πρόκειται για μία πηγή ψευδοεπαφής (Σχ. 6.3α) εντός του αποσαθρωμένου μανδύα των σερπεντινιτών. Η παροχή της φτάνει τα $0,25 \text{ m}^3/\text{h}$, την υγρή περίοδο, με απότομη όμως μείωση της παροχής της κατά τους θερινούς μήνες.



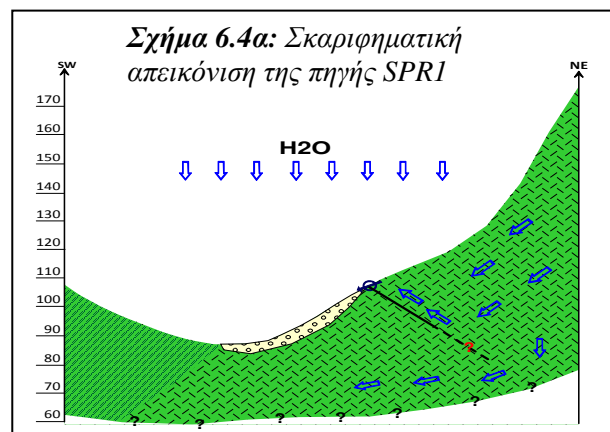
Σύμφωνα με το διάγραμμα του σχήματος 6.3β ο χρόνος στέρειυσης διαρκεί μέχρι και τον Οκτώβριο, όπου πλέον έχουν αρχίσει να ενσωματώνονται τα κατακρημνίσματα στον υδροφόρο ορίζοντα.



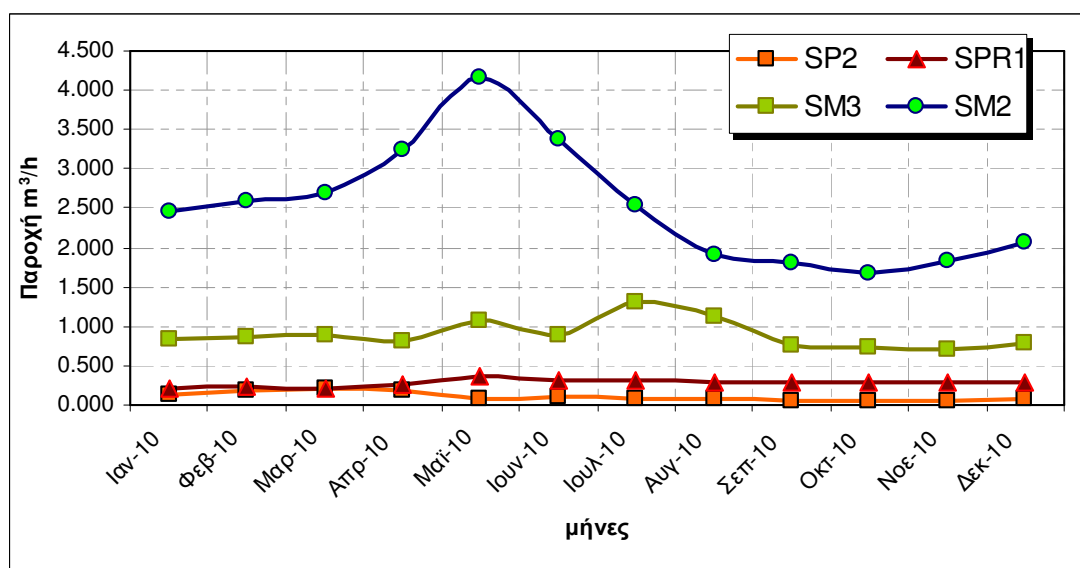
Σχήμα 6.3β: Χρονική διακύμανση (υδρόγραμμα) της πηγής SM1

6.4.2.2 Πηγές ρηξιγενείς SM2, SM3, SP2, SPR1

Οι πηγές SM2, SM3, SP2 και SPR1 εκφορτίζουν την οφιολιθική σειρά του Μαντουδίου. Ο κύριος προσανατολισμός εκροής των πηγών είναι ΒΒΑ/κός – ΝΝΔ/κός, το οποίο αποτελεί τον κύριο άξονα διεύθυνσης των ασυνεχειών που



απαντώνται στην περιοχή μελέτης. Από το σύνολο των πηγών αυτών, η πηγή SM2 παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές παροχής (4,15 m³/h, περίοδος Μαΐου), ενώ καμπύλη στέρεισης ξεκινά τον Αύγουστο και διαρκεί μέχρι τον Οκτώβριο (Σχ. 6.4β).



Σχήμα 6.4β: Χρονική διακύμανση (υδρογράμματα) των πηγών της οφιολιθικής σειράς Μαντουδίου

6.5 Συσχετίσεις παροχών των υπό μελέτη πηγών

Η Μέθοδος της Συσχέτισης Παροχών εφαρμόστηκε επιτυχώς για πρώτη φορά την δεκαετία του '70 (Chemin, 1974, Mangin, 1975). Με τον όρο υψηλή συσχέτιση παροχών εκφράζεται το γεγονός ότι δύο πηγές αποστραγγίζουν το ίδιο υδροφόρο σύστημα. Αυτό σημαίνει ότι όταν οι ποσότητες νερού που τις τροφοδοτούν εμφανίζουν ορισμένες κοινές οριακές συνθήκες (π.χ. κοινή στάθμη υδροφόρου ορίζοντα, κοινή υδραυλική «κορυφή», κοινή «χρονοσειρά τροφοδοσίας» κ.α.), αυτό αντανακλάται άμεσα και στις παροχές τους. Όσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές των οριακών αυτών συνθηκών τόσο πιο πολύ συσχετίζονται οι παροχές των δύο εξεταζόμενων πηγών. Μόνο κατά σύμπτωση υπάρχει περίπτωση να υπάρξει συσχέτιση μεταξύ πηγών, οι οποίες ανήκουν σε διαφορετικά συστήματα.

Γίνεται φανερό ότι η μέθοδος της συσχέτισης παροχών βοηθάει ουσιαστικά στην κατανόηση του αν δύο πηγές αποστραγγίζουν το ίδιο σύστημα ή όχι. Για να εφαρμοστεί στην πράξη η μέθοδος αυτή, αρκούν οι μετρήσεις διαδοχικών παροχών των δύο πηγών, με τη μεσολάβηση ικανού χρονικού διαστήματος μεταξύ τους, έτσι ώστε να θεωρηθούν ανεξάρτητες μεταβλητές. Για τον Σούλιο (1985), ως ελάχιστος ικανός χρόνος θεωρήθηκαν οι 20 μέρες, ενώ σαν τιμές παροχής χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές άμεσης μέτρησης. Και ο Στουρνάρας (2000) δίνει περισσότερες λεπτομέρειες για την ανάλυση των υδρογραμμάτων και των παροχών.

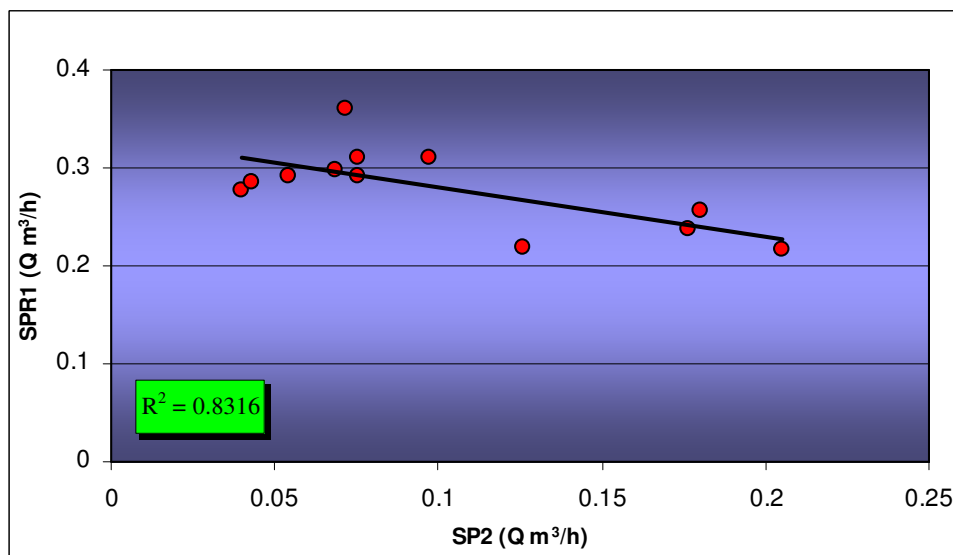
Οι τιμές των συντελεστών συσχέτισης, έως έναν βαθμό είναι ενδεικτικές, των συστημάτων που αντιπροσωπεύουν. Βέβαια η ίδια τιμή συντελεστή, για δύο διαφορετικά συστήματα, μπορεί να δίνει διαφορετικά αποτελέσματα και επομένως και συμπεράσματα για το καθένα από αυτά. Σε γενικές γραμμές όμως, ο συντελεστής συσχέτισης βοηθά στην προσέγγιση και την εκτίμηση της κατάστασης και της ενότητας που επικρατεί σε ένα υδατικό σύστημα.

Η μέθοδος της συσχέτισης παροχών εφαρμόστηκε στην περιοχή μελέτης προκειμένου να διαπιστωθεί αν ανήκουν ή όχι στο ίδιο σύστημα. Η συσχέτιση που πραγματοποιήθηκε, βασίστηκε στις μηνιαίες μετρήσεις των παροχών των πηγών και έγινε προσπάθεια, οι διαδοχικές μετρήσεις να μην απέχουν μεταξύ τους περισσότερο από ένα μήνα. Ο υπολογισμός του συντελεστή συσχέτισης πραγματοποιήθηκε με βάση τις 12 μετρήσεις μηνιαίων παροχών των εξεταζόμενων πηγών. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των μηνιαίων παροχών των πηγών παρατίθενται στον Πίνακα II του Παραρτήματος.

6.6 Αποτελέσματα της συσχέτισης των παροχών και συμπεράσματα

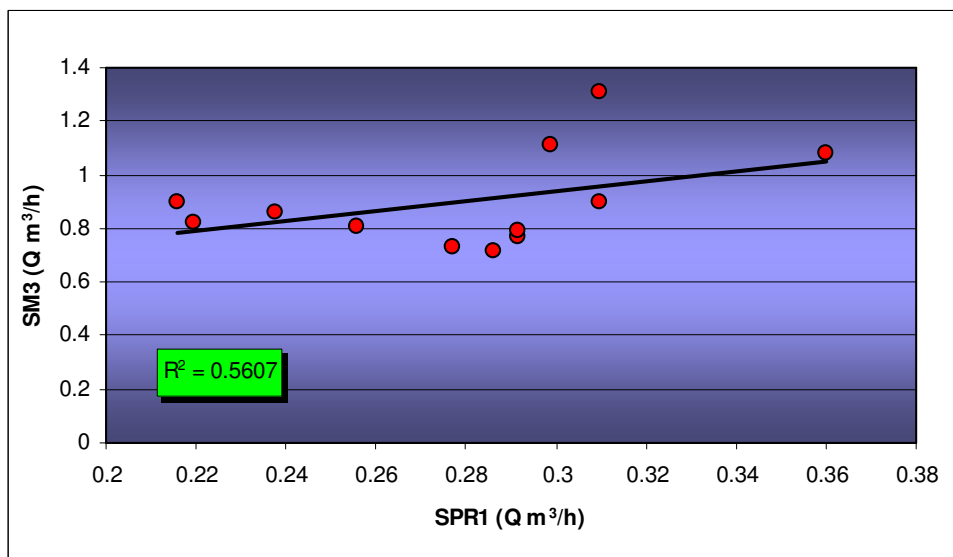
Εφαρμόζοντας το βαθμό συνάφειας – αλληλεπίδρασης ανάμεσα στις πηγαίες εκφορτίσεις των πηγών που μελετήθηκαν προέκυψε ότι οι πηγές που εκφορτίζουν το οφιολιθικό σύστημα του Μαντουδίου χαρακτηρίζονται από τιμές συντελεστή συσχέτισης που κυμαίνονται από 0,56 (μέση γραμμική συσχέτιση) έως 0,83 (ισχυρή γραμμική συσχέτιση). Η διακύμανση του συντελεστή οφείλεται στην διασπορά των τιμών παροχής των πηγαίων εκφορτίσεων, η οποία παρατηρείται πολύ μικρή όταν η προβολή των σημείων αφορά τις μικρές τιμές παροχής και μεγάλη, όταν οι παροχές των πηγών αυξάνονται.

Εξετάζοντας τη γραφική απεικόνιση των πηγαίων εκφορτίσεων κατά ζεύγη διαπιστώνεται ισχυρή συσχέτιση της τάξεως του 83% μεταξύ των πηγών (SP2 – SPR1), κάτι που υποδηλώνει την εκφόρτιση του ίδιου συστήματος ασυνεχειών. Σύμφωνα με το διάγραμμα του σχήματος 6.5, παρατηρείται ότι ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των δύο πηγών είναι αρνητικός και επομένως οι δύο πηγές εμφανίζουν αντιστρόφως ανάλογη υδραυλική συμπεριφορά, το οποίο όμως οφείλεται στην ενδεχόμενη υδραυλική επικοινωνία της πηγής SP2 με επιφανειακό υδροφόρο ορίζοντα που την τροφοδοτεί με αφίξεις νέων κατακρημνισμάτων.



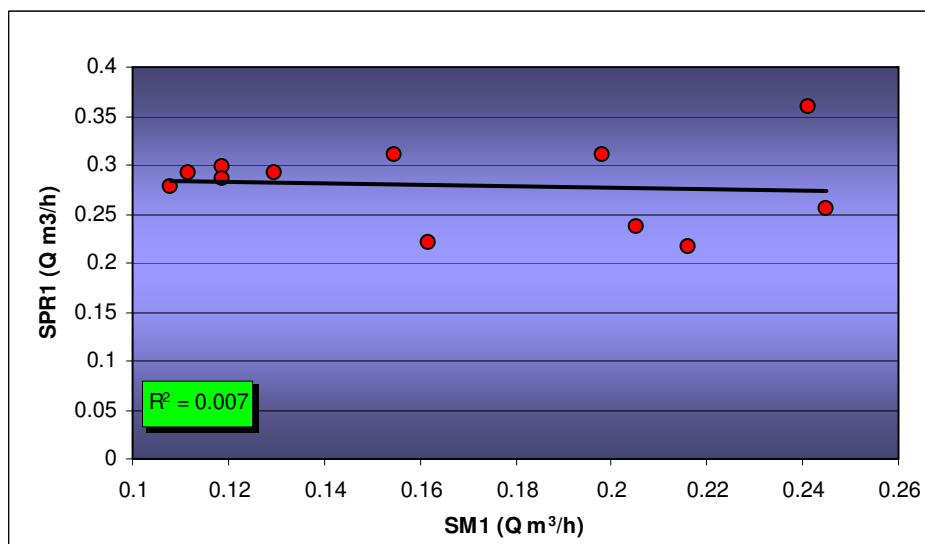
Σχήμα 6.5: Γραφική απεικόνιση των πηγαίων εκφορτίσεων SP2 – SPR1

Αντιθέτως η μικρότερη συσχέτιση παρατηρείται μεταξύ των πηγαίων εκφορτίσεων SM3 με την πηγή SPR1 (Σχ. 6.6). Η ανωμαλία στη συσχέτιση των επιμέρους ζευγών δεν αποτελεί ταυτόχρονα και απουσία υδραυλικής επικοινωνία, αλλά ενδεχομένως την ύπαρξη διαφορετικού συστήματος τροφοδοσίας, αφού οι πηγές αυτές βρίσκονται σε διαφορετικά υψόμετρα.



Σχήμα 6.6: Γραφική απεικόνιση των πηγαίων εκφορτίσεων SM3 – SPR1

Τέλος η συσχέτιση μεταξύ των πηγαίων εκφορτίσεων του οφιολιθικού συστήματος Μαντουδίου με την πηγαία εκφόρτιση του οφιολιθικού συστήματος Παγώντα οδήγησε στο συμπέρασμα ότι τα δύο συστήματα δεν έχουν καμία υδραυλική επικοινωνία εκφορτίζοντας διαφορετικά συστήματα τροφοδοσίας (Σχ. 6.7).



Σχήμα 6.7: Γραφική απεικόνιση των πηγαίων εκφορτίσεων SPR1 – SM1

6.7 Καμπύλες και συντελεστές στέρειυσης

6.7.1 Γενικά

Καμπύλη στέρειυσης ονομάζεται το τελευταίο τμήμα του καθοδικού κλάδου του υδρογράμματος μιας πηγής. Στο τμήμα αυτό, η καμπύλη μειώνει κατά πολύ την κλίση της και τείνει ασυμπτωτικώς να οριζοντιωθεί, δηλαδή να σταθεροποιηθεί η παροχή με την πάροδο του χρόνου. Γίνεται δεκτό ότι, στο διάστημα αυτό, η παροχή της πηγής δεν επηρεάζεται από νέες αφίξεις νερού. Το νερό που έχει κατεισδύσει, έχει πλήρως ενσωματωθεί στον υδροφόρο ορίζοντα, ο οποίος ρυθμισμένος πλέον, εκφορτίζεται από την πηγή με αντίστοιχη μείωση του υδραυλικού φορτίου. Η έναρξη της στειρεύσεως, για κάθε πηγή, μεταβάλλεται κάθε υδρολογικό έτος, ανάλογα με το καθεστώς των κατακρημνισμάτων που έχουν προηγηθεί, το ίδιο και η λήξη της, που σημαδεύεται από την άφιξη νέων ποσοτήτων νερού στον υδροφόρο ορίζοντα, με την έναρξη των κατακρημνισμάτων του νέου υδρολογικού έτους. Αντιλαμβάνεται κανείς, ότι η μορφή της καμπύλης στειρεύσεως και η θέση της στο διάγραμμα παροχής – χρόνου εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα, τα χαρακτηριστικά της ροής και το καθεστώς των προηγηθέντων κατακρημνισμάτων. Οι βασικές εξισώσεις που έχουν προταθεί και ισχύουν, κυρίως για το τμήμα στειρεύσεως της καμπύλης υποχωρήσεως, βασίζονται στις κλασικές εργασίες του Boussinesq (1903, 1904), όπου διατυπώνεται η αρχή: «κατά τη διάρκεια της στειρεύσεως, όταν η πηγή λειτουργεί χωρίς επηρεασμό από νέες εξωτερικές αφίξεις και τροφοδοσίες, η μεταβολή της παροχής συνδέεται με εκθετική συνάρτηση με το χρόνο ($dq = e^{f(t)}$)».

Η έναρξη της καμπύλης στειρεύσεως σημειώνεται στο χρόνο t_0 , που αντιστοιχεί σε μία παροχή Q_0 . Όσο πιο μεγάλη είναι η ξηρά περίοδος, δηλαδή η περίοδος χωρίς βροχοπτώσεις, τόσο πιο χαρακτηριστική είναι η καμπύλη στειρεύσεως και αποτελεί το βασικότερο εργαλείο για τη μελέτη της δίαιτας των πηγών. Η καμπύλη, επιπλέον, χαρακτηρίζεται από το συντελεστή στειρεύσεως α , ο οποίος δεν αντιπροσωπεύει την κλίση της καμπύλης, αλλά εξαρτάται η αριθμητική τιμή της από αυτόν. Ο υπολογισμός του συντελεστή στειρεύσεως του υδρογράμματος μιας πηγής, είναι επίσης μία σημαντική παράμετρος η οποία χαρακτηρίζει συνολικά το σύστημα τροφοδοσίας και από την οποία είναι δυνατόν να εξαχθούν συμπεράσματα που αφορούν τα υδραυλικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των υδατικών συστημάτων.

6.7.2 Εξισώσεις που έχουν προταθεί

Η καμπύλη στειρεύσεως ή αλλιώς «καμπύλη ξηράς περιόδου» της παροχής των πηγών έχει αποτελέσει το αντικείμενο αρκετών εργασιών οι οποίες ασχολούνται με το υδρογράμμα των πηγών και τη μελέτη της υδραυλικής συμπεριφοράς συγκεκριμένων υδροφόρων μαζών. Οι περισσότερες εργασίες αφορούν κυρίως πορώδη και καρστικά μέσα.

Ο Boussinesq (1877), παρουσίασε τη βασική εξίσωση που διέπει τη ροή του υπόγειου νερού στους υδροφόρους και η οποία έχει τη μορφή:

$$(J^2 \Phi / JX^2) + (J^2 \Phi / J\Psi^2) = (S/k) + (J\Phi / JE)$$

Η εξίσωση αυτή είναι μη γραμμική. Ο Boussinesq στην προσπάθειά του να την μετατρέψει σε γραμμική προέβη σε παραδοχές απλούστευσης, καταλήγοντας στην εκθετική εξίσωση της μορφής $dq = e^{f(t)}$. Εν συνεχεία, διατύπωσε την εξίσωση της μορφής $Q = Q_0 / (1 + \sigma t)^2$, η οποία χρησιμοποιήθηκε ευρέως στην Ευρώπη για τον υπολογισμό των παροχών των πηγών.

6.7.2.1 Εξίσωση Maillet

Ο πρώτος που χρησιμοποίησε τη γραμμική μορφή της εξίσωσης Boussinesq είναι ο Maillet (1902, 1903, 1905), ο οποίος το 1905 απέδειξε και μαθηματικά την εφαρμοσιμότητά της (Καλλέργης, 2000).

$$Q = Q_0 e^{-\alpha t}$$

όπου:

Q : η παροχή σε χρονική στιγμή t , σε m^3/s ,

Q_0 : η παροχή στην έναρξη στείρευσης, $e = 2.718$ και

α : ο συντελεστής στείρευσης, ίσος με $1/T$, όπου T είναι ο αναγκαίος χρόνος, ώστε η αρχική παροχή να μειωθεί από 1 σε $1/e = 0.368$ (τιμήμα της αρχικής παροχής).

Στην εξίσωση Maillet, η παροχή Q μειώνεται εκθετικά με το χρόνο t κατά την περίοδο της στείρευσης. Ο προσδιορισμός της βασίστηκε στην παρατήρηση της σημειακής εκκένωσης από πορώδες πώμα μιας δεξαμενής γεμάτης με πορώδες υλικό. Η εξίσωση είναι αξιόπιστη για μικρές γενικά παροχές ενώ για μεγαλύτερες παροχές παρατηρείται απόκλιση στις τιμές. Ο συντελεστής στείρευσης α δεν είναι σταθερός, λόγω της ανομοιόμορφης τροφοδοσίας του υδροφόρου μέσου. Ο Castany (1967) αναφέρει για τον συντελεστή στείρευσης α ότι είναι:

- i) ανάλογος με την ενεργό κατείσδυση
- ii) αντιστρόφως ανάλογος των διαστάσεων του υδροφόρου μέσου
- iii) αντιστρόφως ανάλογος του ενεργού πορώδους και
- iv) ανάλογος του συντελεστή περατότητας

6.7.2.2 Εξίσωση Tison

Στην εξίσωση του Tison (1960), η σχέση μεταξύ παροχής και χρόνου είναι σχέση υπερβολής.

$$Q = \frac{Q_0}{(1 + at)^2}$$

όπου Q , Q_0 και α , έχουν την ίδια έννοια όπως και προηγουμένως.

Ο προσδιορισμός της βασίστηκε στην παρατήρηση μη σημειακής εκκένωσης μιας δεξαμενής γεμάτης άμμο, από μία πορώδη πλευρά της.

Ο τύπος του Tison αφορά κυρίως ρωγμογενείς υδροφόρους. Γενικά η εξίσωση θεωρείται ότι αποκλίνει από την πραγματικότητα. Παρόλα αυτά ανταποκρίνεται ικανοποιητικά σε παραδείγματα πολλαπλών εκφορτίσεων του ίδιου υδροφορέα σε διαφορετικά υψόμετρα.

6.7.2.3 Εξίσωση Forkasiewicz και Paloc

Οι Forkasiewicz και Paloc (1967) προσπάθησαν να καθορίσουν μία αντιπροσωπευτική τιμή του α όταν αυτός παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση από χρόνο σε χρόνο. Διαπίστωσαν ότι η εξίσωση Maillet, στο υδρόγραμμα της πηγής που μελέτησαν, ίσχυε μόνο στο τελευταίο

τιμήμα της καμπύλης στείρευσης. Ακόμα, διέκριναν ολόκληρο το καθοδικό τιμήμα του υδρογράμματος σε περισσότερες ευθείες, θεωρώντας ότι εκφράζουν περισσότερα τιμήματα του υδροφορέα που εκφορτίζονται διαδοχικά πριν το τελευταίο τιμήμα του. Για την πρόγνωση της παροχής πρότειναν τον τύπο:

$$Q = \frac{Q_0}{(1 + Q_0^2 \beta t)^{\frac{1}{2}}}$$

6.7.2.4 Εξίσωση Drogue

Ο Drogue (1972) γενίκευσε τον παραπάνω τύπο σε:

$$Q = \frac{Q_0}{(1 + \beta t Q_0^{1/n})^n}$$

Ο συντελεστής β προσδιορίζεται για την περίοδο στείρευσης, από την κλίση της ευθείας σε δεκαδικό διάγραμμα ($1/Q^2, t$).

Ο ερευνητής συνέκρινε τις πειραματικές καμπύλες με την καμπύλη που θα προέκυπτε αν η εκφόρτιση ακολουθούσε συγκεκριμένη θεωρητική καμπύλη. Σύμφωνα με τα αποτελέσματά του, κατέληξε στις εξισώσεις εκείνες με τη συχνότερη ισχύ, της μορφής

$$Q_t = \frac{Q_0}{(1 + at)^n}$$

με $n = 1/2, 3/2, 2$ ανάλογα με την απόκλιση της αρχικής από την τελική τιμή.

6.7.2.5 Εξίσωση Schoeller

Ο Schoeller (1967) διέκρινε και αυτός το καθοδικό τιμήμα του υδρογράμματος σε επιμέρους ευθύγραμμα τιμήματα, που εκφράζουν την εκφόρτιση διαφορετικών τμημάτων καρστ, με κλιμακωτά μειούμενο άνοιγμα διακένων, δηλαδή αγωγοί μεγάλου, ενδιάμεσου και μικρού ανοίγματος, οι οποίοι συνήθως συνυπάρχουν σε έναν εκτεταμένο καρστικό υδροφόρο. Συμπέρανε ότι οι πιο σημαντικοί όγκοι νερού προέρχονται από την εκφόρτιση των διακένων μικρότερης διαμέτρου (75% έως 80% του συνολικού όγκου νερού που εκφορτίζεται). Απέδειξε ότι ολόκληρη η καμπύλη στείρευσης μπορεί να εκφρασθεί τελικά από τρεις παράγοντες:

$$q = q_{01}e^{-a_1t} + q_{02}e^{-a_2t} + q_{03}e^{-a_3t}$$

δεχόμενος ότι μόνο ο τελευταίος όρος ανταποκρίνεται στο πρότυπο ροής του Maillet. Κατάφερε παράλληλα να μετασχηματίσει τις κλασικές εξισώσεις των Maillet και Tison ώστε να ισχύουν και για τυρβώδεις ροές. Έτσι ο τύπος $Q = Q_0 - \beta (t - t_0)$ είναι ισοδύναμος του Maillet για τυρβώδη ροή, ενώ ο αντίστοιχος του Tison είναι ο $Q_t = \frac{Q_0}{(1 - \beta t)^3}$. Οι προτεινόμενες εξισώσεις αφορούν την κορεσμένη ζώνη καρστικού υδροφορέα.

6.7.2.6 Εξίσωση Μαρίνου

Ο Μαρίνος (1975) προσπάθησε να βρει μία μαθηματική εξίσωση πρόγνωσης της παροχής των πηγών βασιζόμενος στο μέγιστο της υγρής περιόδου. Συνδυάζοντας την εξίσωση του Maillet με εκείνη των Forkasiewicz και Paloc, πρότεινε την εξίσωση:

$$Q_t = \frac{Q_0}{\left(1 + \beta Q_0^{1/\mu} T\right)^\mu} e^{-a(t-T)}$$

με τιμές β και μ ανάλογες με το μέγιστο της υγρής περιόδου και T , το χρόνο επικάλυψης των δύο αρχικών μεθόδων. Η γενικευμένη μορφή της εξίσωσης είναι:

$$\frac{1}{Q^2} = \frac{1}{Q_0^2} + \beta t$$

6.8 Υπολογισμός του συντελεστή στείρευσης

Προκειμένου να υπολογισθεί ο συντελεστής στείρευσης α από κάθε πηγή της υπό μελέτης περιοχής, σχεδιάστηκαν σε διαγράμματα τα υδρογράμματα των πηγών με βάσει τις μετρήσεις των παροχών κατά τη διάρκεια του ημερολογιακού έτους 2010. Για την δημιουργία των διαγραμμάτων χρησιμοποιήθηκε το λογιστικό πρόγραμμα της Microsoft Excel v.2003. Σε ημιλογαριθμικό χαρτί και στον άξονα των τετμημένων (λογαριθμική κλίμακα) προβλήθηκαν οι τιμές της παροχής Q που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου, και στον άξονα των τεταγμένων (δεκαδική κλίμακα) προβλήθηκαν οι τιμές των χρονικών στιγμών κατά τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις των αντίστοιχων παροχών Q .

Για την κατασκευή των διαγραμμάτων ελήφθησαν υπόψη τα συγκεκριμένα κριτήρια:

- η καμπύλη στείρευσης να περιέχει τουλάχιστον τρία σημεία, ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη αξιοπιστία στην καμπύλη.
- η καμπύλη να μην εμφανίζει, όπου είναι δυνατόν, αντιστροφή κλίσης.

- η κλίση της καμπύλης να είναι μεγαλύτερη στην αρχή και μικρότερη στο τέλος της περιόδου στέρησης.

6.8.1 Ερμηνεία και χρησιμότητα του συντελεστή στέρησης

Η τιμή του συντελεστή στέρησης (Στουρνάρας, 2007) είναι συνάρτηση του ενεργού πορώδους, της υδραυλικής αγωγιμότητας, της κατείδυσης και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του μέσου, δείχνει δε την ταχύτητα εκκένωσης του μέσου. Τιμές του α της τάξης του από 10^{-1} έως 10^{-2} δείχνουν ροή μέσω καλώς αναπτυγμένων καρστικών αγωγών, ενώ τιμές της τάξης του 10^{-3} δείχνουν εκκένωση μέσω τριχοειδών ρωγμών ή μέσω ασυνεχειών (Σούλιος, 1985).

Από την καμπύλη στέρησης μπορούν βρεθούν τα εξής :

- υπολογισμός του χρόνου στέρησης από το ημιλογαριθμικό διάγραμμα, όταν βέβαια κατασκευαστεί με τις τιμές Q της ξηράς περιόδου.
- να προβλεφθούν οι μελλοντικές παροχές $Q(t)$ ξηρασίας, αν είναι γνωστή η παροχή Q_0 για οποιαδήποτε χρονική στιγμή (ξηρά) t_0 , από τη σχέση:

$$\log Q_t = \log Q_0 - \frac{1}{2.3} \frac{t}{t_d}$$

γ) Το υδρογεωλογικό σύστημα που τροφοδοτεί μια πηγή μπορεί να χαρακτηριστεί από την κλίση της καμπύλης στέρησης ανάμεσα σε δύο δεδομένες παροχές Q_1 και Q_2 . Η μεταβολή της κλίσης από μία χρονιά στην άλλη δείχνει είτε απολήψεις νερού από τον υδροφόρο (αύξηση της κλίσης), είτε εμπλουτισμό του υδροφόρου στην ξηρά περίοδο από τις επιστροφές άρδευσης κλπ. (μείωση της κλίσης), είτε μεταβολές της δομής του υδροφόρου λόγω π.χ. σεισμικών δονήσεων.

δ) Τα αποθέματα του νερού στο σύστημα, που βρίσκονται ψηλότερα από την εκροή (σημείο εκφόρτισης) σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή είναι ίσα με $Q_t t_d$.

Στην περίπτωση που η καμπύλη στέρησης αποτελείται από δύο ευθύγραμμα τμήματα διαφορετικής κλίσης, μπορεί να συμβαίνουν τα εξής:

- εκτροπή της ροής, ανάντη από το σταθμό υδρομετρήσεων
- μεταβολή της αποθηκευτικότητας της υδρογεωλογικής λεκάνης κατά την κατακόρυφο
- τροφοδοσίας της πηγής από άλλο δρόμο
- η πηγή εκφορτίζει δύο διαφορετικές λεκάνες

6.9 Εφαρμογή της εξίσωσης Maillet

Ο συντελεστής στείρευσης της κάθε πηγής είχε υπολογιστεί σε μία πρώτη φάση με βάση τον τύπο του Maillet, $Q = Q_0 e^{-at}$. Για τον υπολογισμό, χρησιμοποιήθηκαν τα σημεία έναρξης και τέλους της κάθε καμπύλης στείρευσης, τα οποία κατ' ανάγκη αντιπροσωπεύουν κάποιες από τις μετρήσεις παροχών που έχουν πραγματοποιηθεί. Στον πίνακα 6.3 δίνονται όλα τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του συντελεστή στείρευσης κατά Maillet, καθώς και ο αντίστοιχος συντελεστής στείρευσης που υπολογίστηκε.

Πίνακας 6.3: Προσδιορισμός συντελεστή στείρευσης a , με την εξίσωση Maillet

Πηγή	Q_0 (m ³ /h)	Q_t (m ³ /h)	t (ημέρες)	a (ημέρες ⁻¹)
SM1	0,119	0,108	47	$2,03 \times 10^{-3}$
SP2	0,076	0,040	61	$1,06 \times 10^{-2}$
SPR1	0,310	0,277	61	$1,81 \times 10^{-3}$
SM3	0,770	0,712	47	$1,68 \times 10^{-3}$
SM2	1,915	1,681	47	$2,77 \times 10^{-3}$

6.10 Εφαρμογή της εξίσωσης Drogue

Ο Drogue (1972), χρησιμοποιώντας τις κλασσικές εξισώσεις Maillet και Tison, επεξεργάστηκε πραγματικά στοιχεία μετρήσεων παροχών καρστικών πηγών και συνέκρινε τις πειραματικές καμπύλες με την καμπύλη που θα προέκυπτε αν η εκφόρτιση ακολουθούσε συγκεκριμένη μαθηματική εξίσωση. Για κάθε μία από τις πειραματικές καμπύλες κατασκεύασε μία θεωρητική. Βάσει στατιστικών μεθόδων απέδειξε ότι η ταύτιση της καμπύλης δεν εξαρτάται από τις τιμές των παροχών αρχής και τέλους της καμπύλης, ούτε από την περίοδο μείωσης της παροχής.

Οι εξισώσεις που έγιναν αντικείμενο σύγκρισης ήταν:

i. $Q_t = Q_0 e^{-at}$ (Maillet)

ii. $Q_t = \frac{Q_0}{(1+at)^3}$

iii. $Q_t = \frac{Q_0}{(1+at)^{\frac{1}{2}}}$

iv. $Q_t = \frac{Q_0}{(1+at)^2}$ (Tison)

$$\text{v. } Q_t = \frac{Q_0}{(1+at)^3} \quad (\text{Schoeller})$$

$$\text{vi. } Q_t = \frac{Q_0}{(1+at)^5}$$

Η εξίσωση (iii), όπου χρησιμοποιείται ο εκθέτης 1/2, προέκυψε από τη σχέση των Forkasiewicz – Paloc, της οποίας η μαθηματική έκφραση είναι:

$$Q_t = \frac{1}{\left(\frac{1}{Q_0^2} + \beta t\right)^{\frac{1}{2}}}, \text{ στην οποία με } \alpha = \beta Q_0^2, \text{ προκύπτει η εξίσωση (iii).}$$

Οι εξισώσεις (v και vi) με εκθέτες 3 και 5, προέκυψαν από τις εξισώσεις του Dauty.

Στις περιπτώσεις όπου δεν υπήρξε ταύτιση με καμία από τις θεωρητικές καμπύλες, ο Drogue θεώρησε τον τύπο:

$$Q_t = \frac{Q_0}{(1+at)^n}$$

στον οποίο ο εκθέτης n προσδιορίζεται μέσω γραφικής και υπολογιστικής μεθόδου και εκφράζει τη σχέση μεταξύ των παροχών Q_0 και Q_t για το χρονικό διάστημα t_0 και t_t αντίστοιχα.

Στην παρούσα εργασία, για τον προσδιορισμό του συντελεστή στείρευσης, χρησιμοποιήθηκαν οι θεωρητικές εξισώσεις του Drogue (1972), με εκθέτη $n = 1/2, 3/2, 2, 3$ και 5. Παράλληλα έγινε προσέγγιση των θεωρητικών εξισώσεων του Drogue με εκθέτη τους λόγους $n = 4/3, 5/4, 6/5$ και Q_0/Q_t .

Σύμφωνα με τα παραπάνω επιλύοντας ως προς το συντελεστή στείρευσης, a , προέκυψε η σχέση της οποίας η μαθηματική έκφραση είναι η εξής:

$$a = \frac{\sqrt[n]{Q_0} - \sqrt[n]{Q_t}}{t \times \sqrt[n]{Q_t}}$$

Από την παραπάνω σχέση κατασκευάστηκε ο πίνακας 6.4, στον οποίο παρουσιάζονται οι εναλλακτικές τιμές του συντελεστή στείρευσης για κάθε μία περίπτωση του n .

Πίνακας 6.4: Προσδιορισμός συντελεστή στείρευσης α , με την εξίσωση Drogue

Πηγή	Q_0 m ³ /h	Q_t m ³ /h	t ημέρες	a Drogue								
				n = 6/5	n = Q_0/Q_t	n = 5/4	n = 4/3	n = 2	n = 3	n = 1/2	n = 3/2	n = 5
SM1	0.119	0.108	47	0.001759	0.001926	0.001686	0.001577	0.001038	0.000687	0.004468	0.001396	0.000409
SP2	0.076	0.040	61	0.011706	0.006609	0.011106	0.010232	0.006257	0.003943	0.043355	0.008835	0.002263
SPR1	0.310	0.277	61	0.001582	0.001706	0.001516	0.001417	0.000932	0.000615	0.004056	0.001254	0.000366
SM3	0.770	0.712	47	0.001445	0.001608	0.001385	0.001296	0.000855	0.000567	0.003633	0.001148	0.000338
SM2	1.915	1.681	47	0.002439	0.002577	0.002336	0.002183	0.001431	0.000944	0.006329	0.001929	0.000561

Συγκρίνοντας τις τιμές του πίνακα 6.4 με βάση την εξίσωση Drogue και τις τιμές του πίνακα 6.3 με βάση την εξίσωση Maillet, παρατηρήθηκαν παρόμοιες τιμές συντελεστή στείρευσης α , για εκθέτη $n = Q_0/Q_t$, στο πλήθος των πηγών με εξαίρεση την πηγή SP2, της οποίας η τιμή του Maillet είναι συγκρίσιμη με την αντίστοιχη τιμή για $n = 4/3$. (Πίν. 6.5). Επισημαίνεται δε ότι ο λόγος Q_0/Q_t αναφέρεται σε επιμέρους διδακτορικές διατριβές (Γιννάτος, 1998) αποτελώντας χαρακτηριστικό λειτουργίας της πηγής.

Πίνακας 6.5: Συγκριτικός πίνακας προσδιορισμού συντελεστή στείρευσης α κατά Maillet και Drogue

Πηγή	a Maillet	a Drogue								
		n = 6/5	n = Q_0/Q_t	n = 5/4	n = 4/3	n = 2	n = 3	n = 1/2	n = 3/2	n = 5
SM1	0.002028	0.001759	0.001926	0.001686	0.001577	0.001038	0.000687	0.004468	0.001396	0.000409
SP2	0.0106	0.011706	0.006609	0.011106	0.010232	0.006257	0.003943	0.043355	0.008835	0.002263
SPR1	0.001812	0.001582	0.001706	0.001516	0.001417	0.000932	0.000615	0.004056	0.001254	0.000366
SM3	0.001677	0.001445	0.001608	0.001385	0.001296	0.000855	0.000567	0.003633	0.001148	0.000338
SM2	0.00277	0.002439	0.002577	0.002336	0.002183	0.001431	0.000944	0.006329	0.001929	0.000561

6.11 Αποτελέσματα υπολογισμού συντελεστή στείρευσης – Διαγράμματα

Το σύνολο των πηγών που μετρήθηκαν παρουσιάζουν συντελεστή στείρευσης της τάξης του 10^{-3} με εξαίρεση την πηγή SP2, η οποία χαρακτηρίζεται από συντελεστή στείρευσης της τάξεως του 10^{-2} . Το χρονικό εύρος στείρευσης επί του συνόλου των πηγών κυμαίνεται από 47 ημέρες έως 83 ημέρες (SPR1).

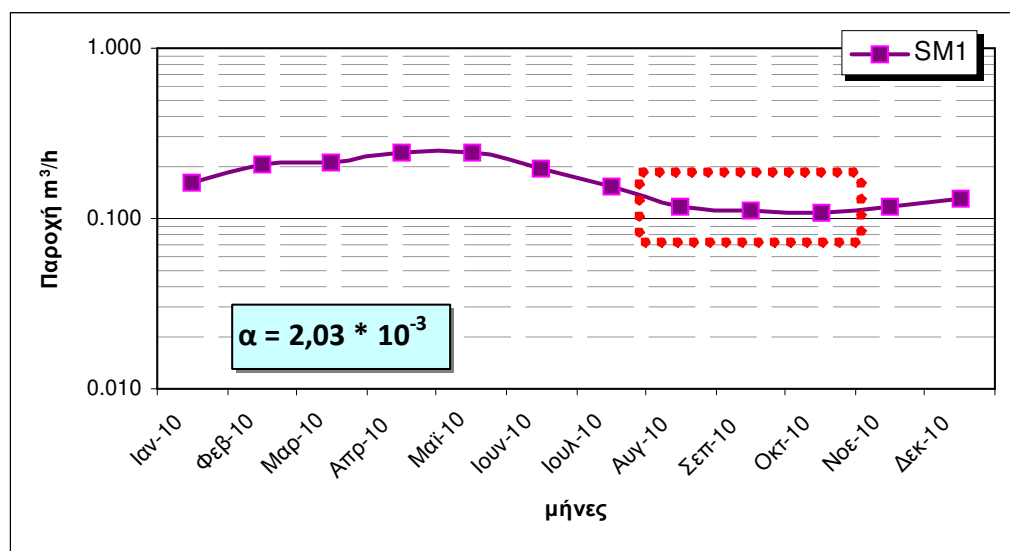
Οι πηγές με συντελεστή στείρευσης 10^{-3} , αντιπροσωπεύουν ένα υδροφόρο σύστημα, το οποίο αποτελείται από ένα καλά ανεπτυγμένο δίκτυο ρωγμών, διαρρηξέων και ενδιαστρωσιγενών κενών μικρού εύρους (Σούλιος, 1985).

6.11.1 Πηγή SM1

Από τις μετρήσεις της παροχής της πηγής SM1, για τον προσδιορισμό του συντελεστή στείρευσης χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις του έτους 2010. Η συνολική διάρκεια της στείρευσης είναι **47 ημέρες**, από τον Αύγουστο μέχρι τον Οκτώβριο του ίδιου έτους. Με

βάση τα δεδομένα αυτά και σύμφωνα με την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για τον υπολογισμό των παραμέτρων της Καμπύλης Στείρευσης, υπολογίστηκε ο συντελεστής στείρευσης, ο οποίος βρέθηκε ίσος με $2,03 \times 10^{-3}$ ημέρες⁻¹ (Σχ. 6.8).

Η τιμή αυτή του α δείχνει ότι πρόκειται για ένα υδροφόρο σύστημα, όπου η κίνηση του υπόγειου νερού πραγματοποιείται δια μέσου διακλάσεων, διαρρήξεων και ενδιαστρωσιγενών κενών μικρού εύρους (Σούλιος, 1985).

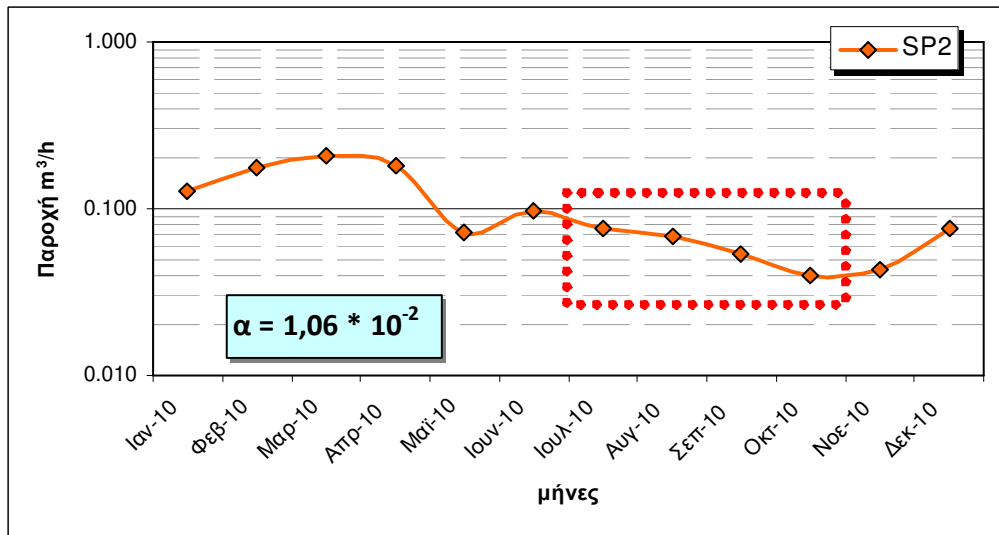


Σχήμα 6.8: Υδρόγραμμα της πηγής SM1, στο οποίο σημειώνεται η καμπύλη στείρευσης (κόκκινο πλαίσιο) και ο αντίστοιχος συντελεστής α της πηγής

6.11.2 Πηγή SP2

Από τις μετρήσεις της παροχής της πηγής SP2, για τον προσδιορισμό του συντελεστή στείρευσης χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις του έτους 2010. Η συνολική διάρκεια της στείρευσης είναι **61 ημέρες**, από τον Ιούλιο μέχρι τον Οκτώβριο του ίδιου έτους. Με βάση τα δεδομένα αυτά και σύμφωνα με την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για τον υπολογισμό των παραμέτρων της Καμπύλης Στείρευσης, υπολογίστηκε ο συντελεστής στείρευσης, ο οποίος βρέθηκε ίσος με $1,06 \times 10^{-2}$ ημέρες⁻¹ (Σχ. 6.9).

Η σχετικά υψηλή τιμή αυτή του α δείχνει ότι πρόκειται για ένα υδροφόρο σύστημα, το οποίο δεν χαρακτηρίζεται μόνο από ανεπτυγμένο δίκτυο ασυνεχειών, αλλά παράλληλα η υδροφορία της συγκεκριμένης περιοχής συνδέεται με την παρουσία ενός επιφανειακού υδροφορέα που την τροφοδοτεί με τα μετεωρικά νερά.

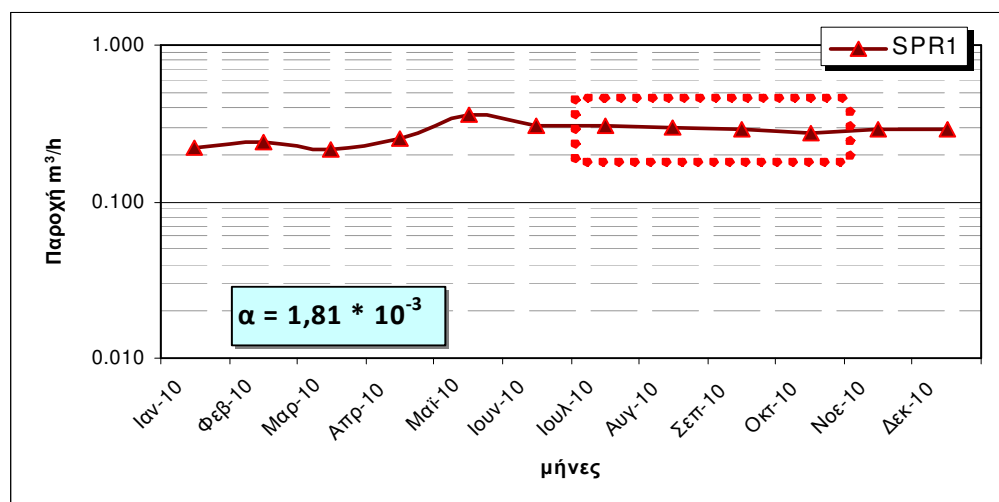


Σχήμα 6.9: Υδρόγραμμα της πηγής SP2, στο οποίο σημειώνεται η καμπύλη στείρευσης (κόκκινο πλαίσιο) και ο αντίστοιχος συντελεστής α της πηγής

6.11.3 Πηγή SPR1

Από τις μετρήσεις της παροχής της πηγής SPR1, για τον προσδιορισμό του συντελεστή στείρευσης χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις του έτους 2010. Η συνολική διάρκεια της στείρευσης είναι **83 ημέρες**, από τον Ιούλιο μέχρι τον Οκτώβριο του ίδιου έτους. Με βάση τα δεδομένα αυτά και σύμφωνα με την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για τον υπολογισμό των παραμέτρων της Καμπύλης Στείρευσης, υπολογίστηκε ο συντελεστής στείρευσης, ο οποίος βρέθηκε ίσος με $1,81 \times 10^{-3} \text{ ημέρες}^{-1}$ (Σχ. 6.10).

Η τιμή αυτή του α δείχνει ότι πρόκειται για ένα υδροφόρο σύστημα, όπου η κίνηση του υπόγειου νερού πραγματοποιείται δια μέσου διακλάσεων, διαρρηξέων και ενδιαστρωσιγενών κενών μικρού εύρους (Σούλιος, 1985).

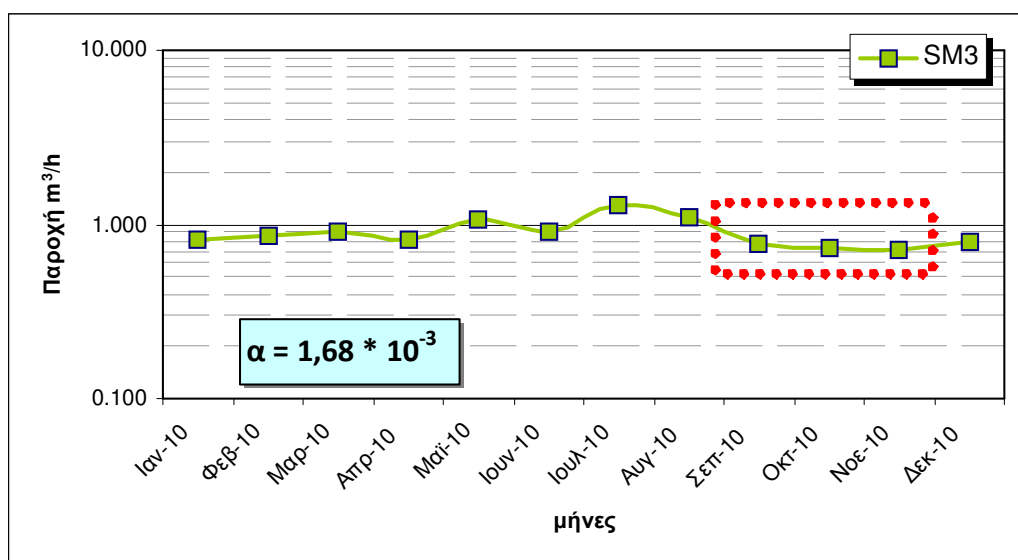


Σχήμα 6.10: Υδρόγραμμα της πηγής SPR1, στο οποίο σημειώνεται η καμπύλη στείρευσης (κόκκινο πλαίσιο) και ο αντίστοιχος συντελεστής α της πηγής

6.11.4 Πηγή SM3

Από τις μετρήσεις της παροχής της πηγής SM3, για τον προσδιορισμό του συντελεστή στείρευσης χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις του έτους 2010. Η συνολική διάρκεια της στείρευσης είναι **47 ημέρες**, από το Σεπτέμβριο μέχρι το Νοέμβριο του ίδιου έτους. Με βάση τα δεδομένα αυτά και σύμφωνα με την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για τον υπολογισμό των παραμέτρων της Καμπύλης Στείρευσης, υπολογίστηκε ο συντελεστής στείρευσης, ο οποίος βρέθηκε ίσος με $1,68 \times 10^{-3}$ **ημέρες⁻¹** (Σχ. 6.11).

Η τιμή αυτή του α δείχνει ότι πρόκειται για ένα υδροφόρο σύστημα, όπου η κίνηση του υπόγειου νερού πραγματοποιείται δια μέσου διακλάσεων, διαρρήξεων και ενδιαστρωσιγενών κενών μικρού εύρους (Σούλιος, 1985).

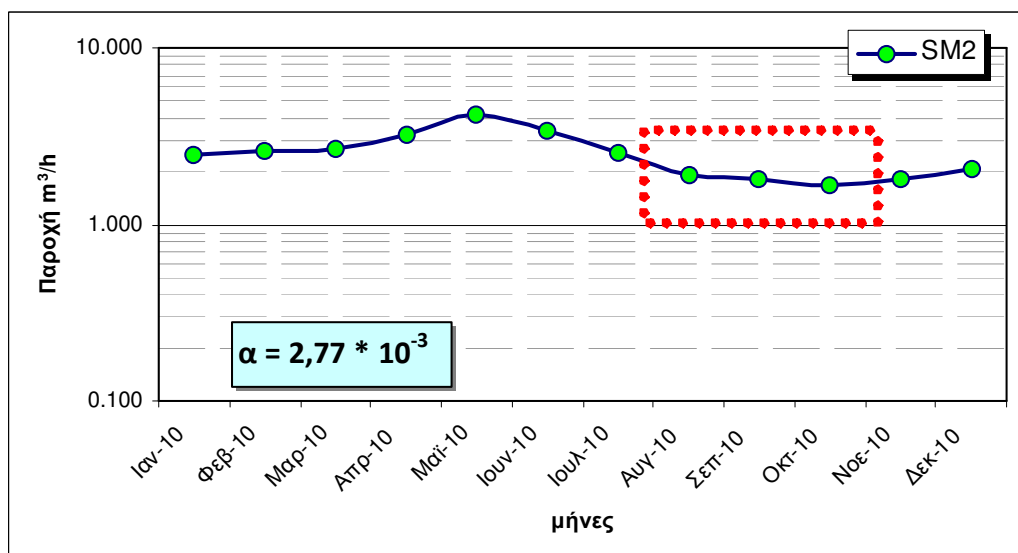


Σχήμα 6.11: Υδρόγραμμα της πηγής SM3, στο οποίο σημειώνεται η καμπύλη στείρευσης (κόκκινο πλαίσιο) και ο αντίστοιχος συντελεστής α της πηγής

6.11.5 Πηγή SM2

Από τις μετρήσεις της παροχής της πηγής SM2, για τον προσδιορισμό του συντελεστή στείρευσης χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις του έτους 2010. Η συνολική διάρκεια της στείρευσης είναι **47 ημέρες**, από τον Αύγουστο μέχρι τον Οκτώβριο του ίδιου έτους. Με βάση τα δεδομένα αυτά και σύμφωνα με την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για τον υπολογισμό των παραμέτρων της Καμπύλης Στείρευσης, υπολογίστηκε ο συντελεστής στείρευσης, ο οποίος βρέθηκε ίσος με $2,77 \times 10^{-3}$ **ημέρες⁻¹** (Σχ. 6.12).

Η τιμή αυτή του α δείχνει ότι πρόκειται για ένα υδροφόρο σύστημα, όπου η κίνηση του υπόγειου νερού πραγματοποιείται δια μέσου διακλάσεων, διαρρήξεων και ενδιαστρωσιγενών κενών μικρού εύρους (Σούλιος, 1985).



Σχήμα 6.12: Υδρόγραμμα της πηγής SM2, στο οποίο σημειώνεται η καμπύλη στέρησης (κόκκινο πλαίσιο) και ο αντίστοιχος συντελεστής α της πηγής

6.12 Αθροιστικό διάγραμμα πηγών με ισχυρή συσχέτιση στην περιοχή μελέτης

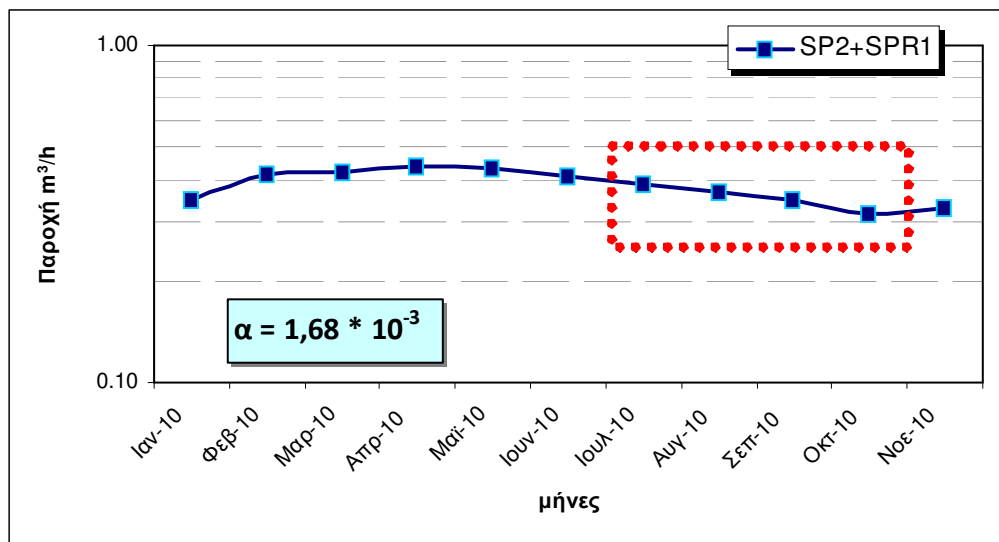
6.12.1 Πηγές SP2 και SPR1

Με βάση τα αποτελέσματα της συσχέτισης παροχών, η οποία πραγματοποιήθηκε για τις υπό παρακολούθηση πηγές στην περιοχή μελέτης, βρέθηκε ότι μόνο οι πηγές SP2 και SPR1 παρουσιάζουν ισχυρό συντελεστή συσχέτισης και επομένως, πολύ πιθανόν να εκφορτίζουν τον ίδιο υδροφόρο ορίζοντα. Για τις συγκεκριμένες πηγές κατασκευάστηκε το αθροιστικό υδρόγραμμα παροχών τους, με βάση το οποίο πραγματοποιήθηκε ανάλυση με βάση την εξίσωση Tison, προκειμένου να βρεθεί ο συντελεστής στέρησης α .

Στην εξίσωση Tison, η σχέση μεταξύ παροχής και χρόνου είναι μορφής υπερβολής. Το πειραματικό αυτό πρότυπο, αν και δεν θεωρείται εντελώς αξιόπιστο, εντούτοις ανταποκρίνεται καλύτερα σε περιπτώσεις πολλαπλών εκφορτίσεων σε διαφορετικά υψόμετρα, του ίδιου υδροφορέα, απ' ό,τι εκείνο του Mailliet (Γιαννάτος, 1999). Η εξίσωση Tison, όπως έχει ήδη ειπωθεί δίνεται από το μαθηματικό τύπο $Q_t = \frac{Q_0}{(1 + \alpha t)^2}$. Από το

διάγραμμα της αθροιστικής καμπύλης των πηγών SP2 & SPR1 προέκυψε ότι η καμπύλη στέρησης ξεκινά τον Ιούλιο και ολοκληρώνεται τον Οκτώβριο, οπότε και η καμπύλη του

υδρογράμματος αρχίζει να αυξάνεται πάλι λόγω της επίδρασης του νερού των βροχοπτώσεων στην παροχή των πηγών. Η διάρκεια στείρευσης είναι **61 ημέρες** και σύμφωνα με τα στοιχεία του υδρογράμματος ο συντελεστής στείρευσης α για το έτος 2010 βρέθηκε ίσος με 1.68×10^{-3} **ημέρες⁻¹** (Σχ. 6.13).



Σχήμα 6.13: Αθροιστικό διάγραμμα πηγών SP2 και SPR1

6.13 Συμπεράσματα

Οι μετρήσεις των παροχών των πηγών στην περιοχή μελέτης έδειξαν τα εξής:

- i) πρόκειται για πηγές των οποίων οι παροχές δεν είναι πολύ μεγάλες. Η μέγιστη παροχή που μετρήθηκε ήταν εκείνη της SM2, η διάμεσος της οποίας υπολογίστηκε ίση με $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$. Οι περισσότερες όμως πηγές έχουν πολύ μικρότερες τιμές παροχών από τη συγκεκριμένη πηγή, ίσες τουλάχιστον με το μισό ή ακόμα και με το ένα δέκατο της συγκεκριμένης τιμής.
- ii) η ποσότητα του νερού που εκφορτίζεται από τις πηγές αυξάνεται κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου, όπως είναι άλλωστε αναμενόμενο, ενώ μειώνεται σημαντικά κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών και κυρίως κατά το τέλος του καλοκαιριού.
- iii) τα υδρογράμματα των πηγών δείχνουν ότι οι περισσότερες στερεύουν σε μικρή χρονική περίοδο, πράγμα το οποίο πολύ πιθανόν να οφείλεται σε ένα σχετικά καλό επιφανειακό σύστημα εκφόρτισης, μέσα στο οποίο η κίνηση του νερού είναι γρήγορη.
- iv) οι υδρογεωλογικές λεκάνες, από την ποσότητα και μόνο του νερού που εκφορτίζουν οι πηγές αυτές, είναι επί το πλείστον μικρές και τοπικού χαρακτήρα.
- v) Η κατασκευή των ημιλογαριθμικών διαγραμμάτων παροχής (m^3/h) – χρόνου (μήνες) των υπό μελέτη πηγών, έδωσε τη δυνατότητα να προσδιοριστεί σε κάθε περίπτωση

όπου ήταν δυνατόν, η περίοδος στείρευσης, και να υπολογιστεί ο αντίστοιχος συντελεστής στείρευσης a . Ο συγκεκριμένος συντελεστής έδωσε σημαντικά στοιχεία για το βαθμό διάρρηξης του οφιολιθικού συστήματος Μαντουδίου που εκφορτίζεται κάθε φορά, από την αντίστοιχη πηγή, της οποίας ο συντελεστής μελετάται. Όλες οι τιμές του a που υπολογίστηκαν είναι της τάξεως του 10^{-3} και είναι χαρακτηριστικές για υδροφόρα συστήματα μέσου ασυνεχειών. Η τάξη αυτή των τιμών αντιπροσωπεύουν συστήματα τα οποία είναι ασυνεχή και στα οποία η κίνηση του νερού πραγματοποιείται δια μέσου διακλάσεων, ρωγμών και διαρρήξεων μικρής διαμέτρου που αντιπροσωπεύουν χαρακτηριστικά δευτερογενούς πορώδους.

- vi) Μόνο στην πηγή SP2 υπολογίστηκε μεγαλύτερη τιμή συντελεστή στείρευσης, ίση με $1,06 \cdot 10^{-2}$, η οποία χαρακτηρίζεται όχι μόνο από ανεπτυγμένο δίκτυο ασυνεχειών, αλλά παράλληλα η υδροφορία της συγκεκριμένης περιοχής συνδέεται με την παρουσία ενός επιφανειακού υδροφορέα που την τροφοδοτεί με τα μετεωρικά νερά.
- vii) Από τον υπολογισμό του συντελεστή στείρευσης της κάθε πηγής με τη βοήθεια των εξισώσεων Maillet και Drogue προέκυψε ικανοποιητική προσέγγιση υπολογισμού του συντελεστή στείρευσης με τη μέθοδο Drogue για $n = Q_0/Q_t$ ως προς το Maillet.

7. ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

7.1 Γενικά

Η χημική σύσταση του υπόγειου νερού καθορίζεται από τη φύση των πετρωμάτων διά μέσου των οποίων κινείται, από το χρόνο επαφής και από τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Είναι φανερό λοιπόν ότι η υδροχημική έρευνα αποτελεί αναπόσπαστο και σημαντικό κομμάτι μιας ολοκληρωμένης υδρογεωλογικής έρευνας.

7.2 Δειγματοληψία – Χημικές Αναλύσεις.

Για τη διερεύνηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του υδροφόρου ορίζοντα και των κυρίαρχων υδροχημικών μηχανισμών πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία νερού στην ξηρή υδρολογική περίοδο (Οκτώβριος 2007).

Η δειγματοληψία έγινε σύμφωνα με τους κανόνες που ορίζει η Υπηρεσία Περιβαλλοντικής Προστασίας των Η.Π.Α. (U.S.E.P.A., 1976), ώστε να εξαχθούν ορθά συμπεράσματα για τον υδροχημικό χαρακτήρα των υδροφόρων οριζόντων.

Τα δείγματα του νερού ελήφθησαν από την έξοδο της σωλήνας του αντλητικού συγκροτήματος των γεωτρήσεων ή πηγαδιών, αφού είχε προηγηθεί άντληση μίας ώρας, και εφόσον οι φιάλες είχαν προηγουμένως πλυθεί καλά με υδροχλωρικό οξύ (HCl) 5% κ.β.. Παράλληλα πριν τη συλλογή του δείγματος γινόταν πλύση με το νερό της δειγματοληψίας. Συνολικά πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία σε 26 υδροσημεία (8 πηγές, 4 πηγάδια, 10 γεωτρήσεις, 4 επιφανειακά).

7.2.1 Επιτόπιες μετρήσεις

Κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας μετρήθηκαν επι τόπου οι ασταθείς φυσικές παράμετροι του υπόγειου νερού. Η θερμοκρασία (T_{wa}) και η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (E.C) μετρήθηκε με φορητό αγωγιμόμετρο τύπου WTW LF 340 – A/SET, το pH, με φορητό ιοντόμετρο της WTW pH 340 – A/SET 2 και το διαλυμένο οξυγόνο (DO_2) με συσκευή τιτλοδότησης της MERCK. Ακολούθησε δειγματοληψία των δειγμάτων όπου το κάθε δείγμα νερού κατόπιν τοποθετήθηκε σε δύο ειδικές φιάλες πολυαιθυλαινίου (PVC), αφού προηγουμένως διηθήθηκε μέσα από ηθμό διαμέτρου πόρων 0.45 mm. Στη μία φιάλη των 0.5 l, που προοριζόταν για την ανάλυση των κατιόντων, προστέθηκαν 3.5 ml πυκνού (65%) HNO_3 (Carlo Erba), ώστε το pH να γίνει μικρότερο από 2 (Appelo and Postma, 1994) με

σκοπό να αποτραπούν η ανάπτυξη βακτηρίων, οι οξειδωτικές αντιδράσεις και η προσρόφηση ή καθίζηση των κατιόντων (Lloyd and Heathcote, 1985). Κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας τα δείγματα φυλάσσονταν σε φορητά ψυγεία προσωρινά, μέχρι τη μεταφορά τους στο Εργαστήριο, όπου και τοποθετήθηκαν αμέσως στο ψυγείο σε θερμοκρασία 4 °C.

7.2.2 Εργαστηριακές αναλύσεις

Η συνολική διάρκεια της δειγματοληψίας δεν ξεπέρασε τις 48 ώρες, ενώ ο χρόνος που μεσολάβησε ανάμεσα στη δειγματοληψία και την ολοκλήρωση των χημικών αναλύσεων ήταν μικρότερος από μία εβδομάδα.

Ο προσδιορισμός της ολικής και ανθρακικής σκληρότητας πραγματοποιήθηκε με μεθόδους τιτλοδότησης, χρησιμοποιώντας την Triplex Lezung A και HCl 0.1N (Höell, 1979).

Ο προσδιορισμός των NO₃⁻ και SO₄²⁻ ιόντων πραγματοποιήθηκε με φασματοφωτόμετρο DR/3000 της HACH. Τα ιόντα Cl⁻ και HCO₃⁻ προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο τιτλοδότησης της HACH. Η ανάλυση των κατιόντων Ca²⁺ και Mg²⁺, μετρήθηκαν με τη μέθοδο τιτλοδότησης της HACH, ενώ τα κατιόντα K⁺ και Na⁺ έγινε φλωγοφωτομετρικά.

Σε φούρνο γραφίτη ατομικής απορρόφησης της GPC προσδιορίστηκαν τα ακόλουθα βαρέα μέταλλα: χρώμιο ολικό (Cr – total), ψευδάργυρος (Zn²⁺), χαλκός (Cu²⁺), μαγγάνιο (Mn²⁺) και σίδηρος ολικός (Fe - total).

Οι χημικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Γεωχημείας του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών του Τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος και στο Εργαστήριο Ορυκτολογίας – Γεωλογίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών.

7.3 Επεξεργασία των δεδομένων των χημικών αναλύσεων

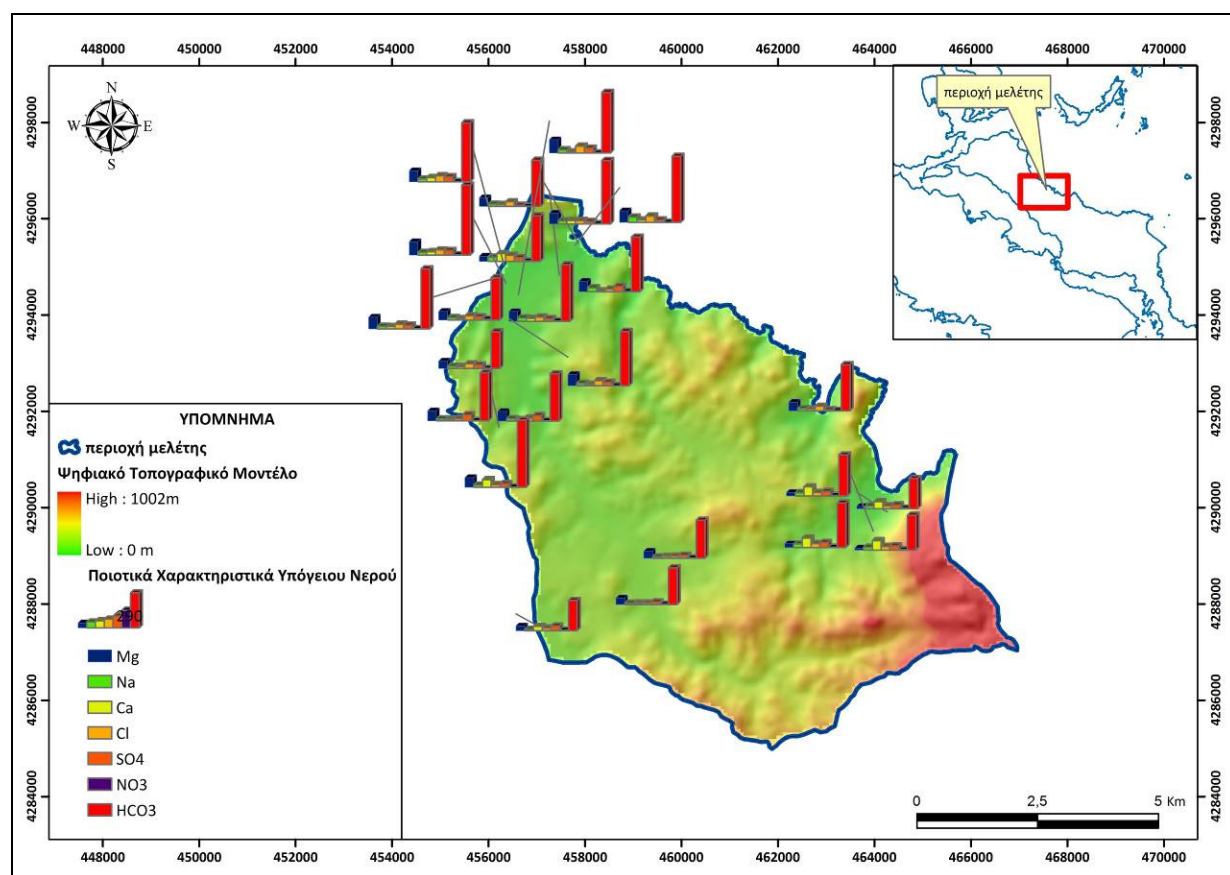
Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων και ο προσδιορισμός των διαφόρων υδροχημικών συντελεστών, πραγματοποιήθηκε με το υδροχημικό πρόγραμμα CH45 (Λαμπράκης, 1991). Το σφάλμα του ιοντικού ισοζυγίου προσδιορίστηκε με τη βοήθεια της σχέσης:

$$\text{Σφάλμα (\%)} = 100 \times (\text{Σκατιόντων} - \text{Σανιόντων}) / (\text{Σκατιόντων} + \text{Σανιόντων})$$

Από την επεξεργασία των δεδομένων διαπιστώθηκε ότι το σφάλμα της ανάλυσης δεν ξεπέρασε το 5 %. Επιπλέον στα δεδομένα των αναλύσεων έγινε επεξεργασία με τη βοήθεια λογισμικού υδροχημικού πακέτου Aquachem v. 3.7 της εταιρείας Waterloo.

Η κατασκευή των υδροχημικών χαρτών έγινε με τη χρήση λογισμικού προγράμματος ARCVIEW – GIS 9.2, όπου προβάλλονται οι ποιοτικές διαβαθμίσεις των στοιχείων των υπόγειων νερών της περιοχής μελέτης. Τέλος κατασκευάστηκαν διαγράμματα ιοντικών συγκεντρώσεων (cross – plots) ενώ επιπλέον τα αποτελέσματα τοποθετήθηκαν σε διαγράμματα Piper για τον προσδιορισμό των υδροχημικών συνθηκών που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή έρευνας.

Τα στατιστικά υδροχημικά χαρακτηριστικά των υπόγειων νερών (Σχ. 7.1) για την προαναφερόμενη υδρολογική περίοδο (πηγές, γεωτρήσεις, πηγάδια) παρουσιάζονται στους Πίνακες 7.1 και 7.2 που ακολουθούν.



Σχήμα 7.1: Ποιοτικά χαρακτηριστικά των υπόγειων νερών στην περιοχή μελέτης

Πίνακας 7.1: Στατιστική ανάλυση των κυριότερων φυσικοχημικών παραμέτρων των πηγών της περιοχής έρευνας, οι συγκεντρώσεις των ιόντων δίδονται σε mg/l (Οκτώβριος 2007)

Παράμετρος (mg/L)	Ελάχιστη	Μέγιστη	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	
pH	6,85	8,6	8,1	0,555	
T _{air} (°C)	16,2	25,2	20,9	3,241	
T _w (°C)	15,3	17,6	16,5	0,877	
E.C. (μS/cm)	307	872	586,3	198,933	
Na ⁺	12,8	35	22,8	7,693	
K ⁺	0,4	8	1,8	2,560	
Mg ²⁺	10,2	82	50,5	29,327	
Ca ²⁺	11,2	79	49	27,573	
NH ₄ ⁺	0	0	0	0	
Cl ⁻	10,2	49	27,7	11,862	
SO ₄ ²⁻	13	46,5	30,3	10,610	
NO ₃ ⁻	1,8	3,9	2,83	0,727	
HCO ₃ ⁻	233	557	376,1	102,667	
PO ₄ ²⁻	0,07	1,15	0,27	0,359	
DO ₂	7,8	11,5	9,9	1,137	
SiO ₂	23,8	73	40,9	11,954	
Σκληρότητα (°dH)	Ολική	10,4	26,9	18,5	4,994
	Παροδική	10,39	25,56	17,20	4,772
	Μόνιμη	0,01	2,33	1,20	0,673
Βαρέα μέταλλα (ppb)	Cr – total	1	8	5	3,117
	Zn ²⁺	4	12	7,75	3,196
	Cu ²⁺	1	3	1,25	0,707
	Fe – total	2	10	4,375	2,669
	Mn ²⁺	2	24	10	8,194
TDS	244	567	442,8	114,864	

Πίνακας 7.2: Στατιστική ανάλυση των κυριότερων φυσικοχημικών παραμέτρων των γεωτρήσεων και των πηγαδιών της περιοχής έρευνας, οι συγκεντρώσεις των ιόντων δίδονται σε mg/l (Οκτώβριος 2007)

Παράμετρος (mg/L)	Ελάχιστη	Μέγιστη	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	
pH	7,3	8,1	7,7	0,294	
T _{air} (°C)	18,7	27,3	23,6	3,025	
T _w (°C)	14,8	21,7	17,1	2,028	
E.C. (μS/cm)	457	910	669,9	165,032	
Na ⁺	10,3	44	21,9	8,314	
K ⁺	0,5	1,8	1,1	0,424	
Mg ²⁺	19	110,4	69,9	26,084	
Ca ²⁺	8	74,4	27	19,075	
NH ₄ ⁺	0	0	0	-	
Cl ⁻	15	53,2	31,7	10,498	
SO ₄ ²⁻	10	49	30,2	12,150	
NO ₃ ⁻	1,2	16	4,21	4,346	
HCO ₃ ⁻	251	580	397,3	104,226	
PO ₄ ²⁻	0,06	0,28	0,14	0,044	
DO ₂	5,3	12,9	9	1,930	
SiO ₂	19	56	36,7	11,220	
Σκληρότητα (°dH)	Ολική	12,42	29,4	19,9	4,671
	Παροδική	11,52	26,62	18,2	4,784
	Μόνιμη	0,01	3,29	1,6	1,041
Βαρέα μέταλλα (ppb)	Cr – total	0	13	5,33	3,539
	Zn ²⁺	0	15	6,73	4,495
	Cu ²⁺	0	3	1,166	0,834
	Fe – total	2	13	5,13	3,622
	Mn ²⁺	1	89	14,3	23,691
TDS	301	796	526,9	147,696	

7.4 Φυσικοχημικές παράμετροι του υπόγειου νερού

7.4.1 Θερμοκρασία (T_{wa})

Η θερμοκρασία είναι μια σπουδαία παράμετρος που πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη κατά τη μελέτη της χημείας των υπόγειων νερών. Η θερμοκρασία του υπόγειου νερού είναι το αποτέλεσμα της θερμικής ισορροπίας σε αυτό και το έδαφος.

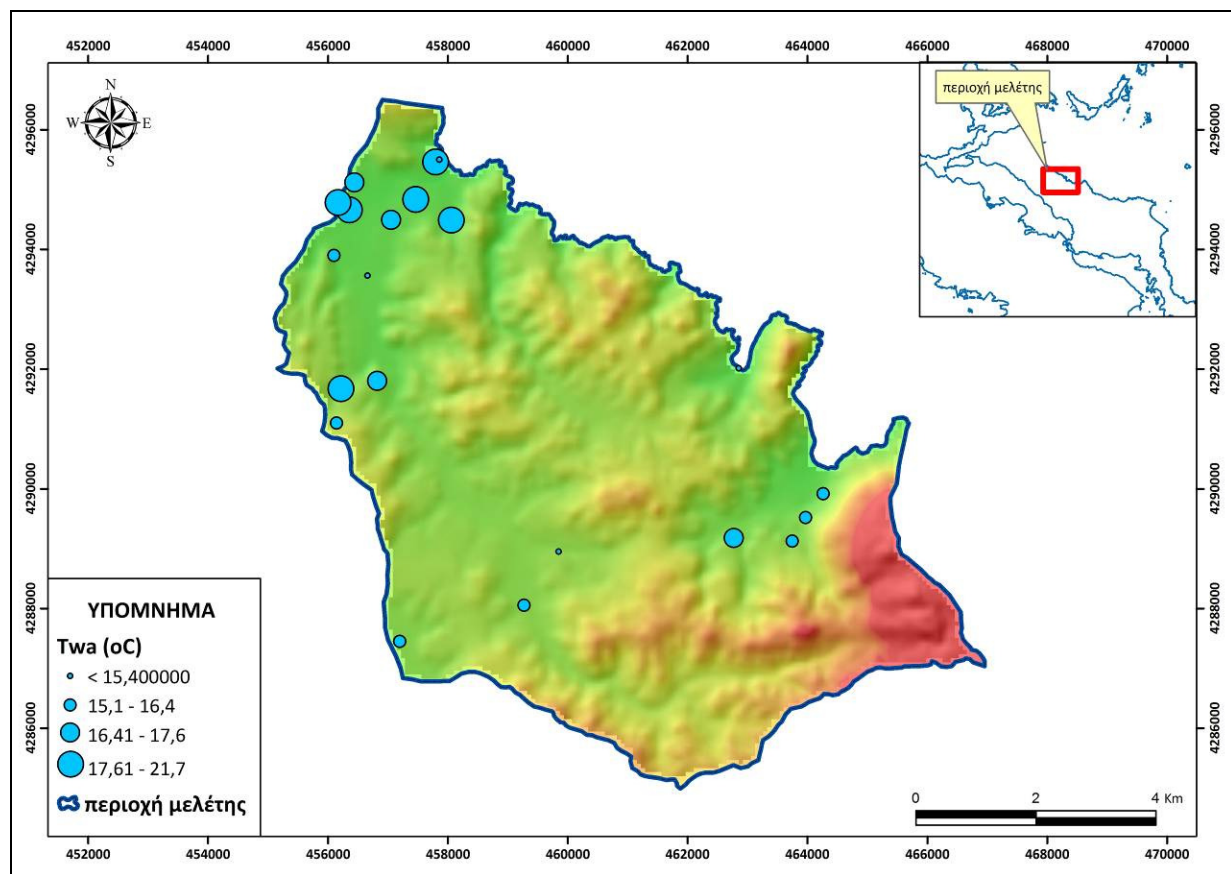
Σύμφωνα με την οδηγία της Ε.Ε. για τα πόσιμα νερά, η ενδεικτική τιμή κυμαίνεται στους 12°C. Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία εκδιώκονται τα διαλυμένα αέρια και το νερό γίνεται λιγότερο εύγεστο. Όταν η θερμοκρασία υπερβαίνει τους 15°C πολλαπλασιάζονται τα τυχόν υπάρχοντα σε αυτό μικρόβια κι ευνοείται η ανάπτυξη αλγών με άμεση συνέπεια την εμφάνιση δυσάρεστων οσμών και γεύσεων (Παππά, 2001). Σαν μέγιστο επιτρεπτό όριο θερμοκρασίας για τα πόσιμα νερά τίθεται από την Ε.Ε. η τιμή 25°C.

Τα επιφανειακά νερά επηρεάζονται άμεσα από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου με αποτέλεσμα να έχουν ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες κατά την θερινή περίοδο και χαμηλές κατά τη χειμερινή περίοδο.

Ο φλοιός της γης, λόγω των θερμομονωτικών του ιδιοτήτων, μετριάζει τις μεγάλες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας της επιφάνειας του εδάφους, διατηρώντας τα βαθιά υπόγεια νερά σε θερμοκρασίες σχετικά σταθερές. Αντίθετα, τα υπόγεια νερά μικρού βάθους επηρεάζονται από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας στην ατμόσφαιρα, ενώ τα επιφανειακά νερά ακολουθούν πιστά τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας αέρος (Heath, 1964).

Η θερμοκρασία των πηγών κυμαίνεται από 15,3°C έως 17,6°C (Πίν. 7.1). Η θερμοκρασία των πηγαδιών και των γεωτρήσεων κυμαίνεται από 14,8°C έως 21,7°C (Πίν. 7.2).

Οι υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας καταγράφηκαν πλησίον του οικισμού Μαντουδίου στους χαλαρούς σχηματισμούς, ενώ στην υπόλοιπη περιοχή μελέτης οι τιμές της θερμοκρασίας βρίσκονται σε χαμηλότερα επίπεδα, όπως φαίνεται από τον υδροχημικό χάρτη διαβαθμίσεων των τιμών της θερμοκρασίας (Σχ. 7.2).



Σχήμα 7.2: Υδροχημικός χάρτης διαβαθμίσεων των τιμών της θερμοκρασίας των υπόγειων νερών της περιοχής έρευνας

7.4.2 pH

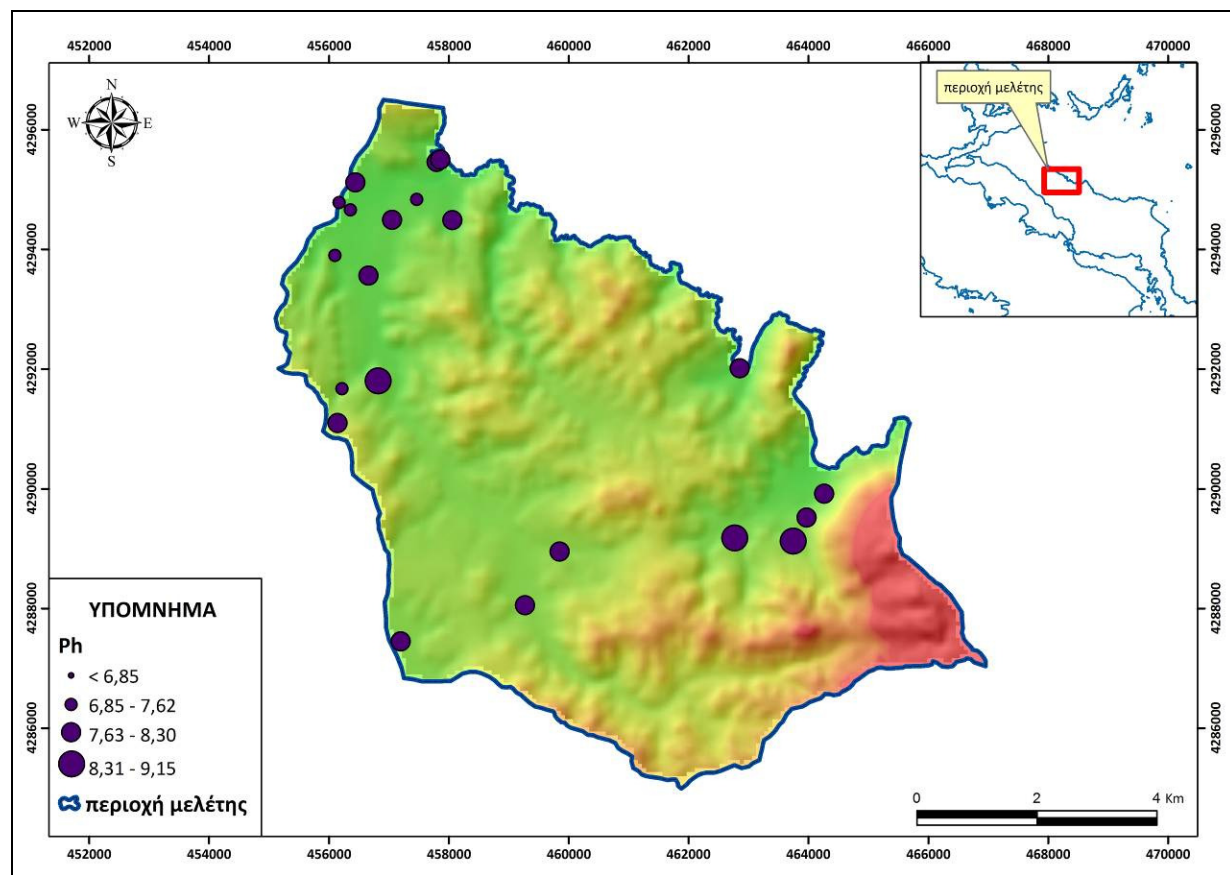
Για τη μελέτη της χημείας των υπόγειων νερών το pH, δηλαδή ο αρνητικός λογάριθμος της ενεργότητας των ιόντων υδρογόνου αποτελεί καθοριστικής σημασίας παράμετρος και ως εκ τούτου η μέτρησή του είναι απαραίτητη. Το χαμηλό pH καθιστά τα βαρέα μέταλλα όπως το αλουμίνιο κινητά και κατ' επέκταση ιδιαίτερα τοξικά για τα είδη της τροφικής αλυσίδας.

Το ενδεικτικό επίπεδο του pH στα πόσιμα νερά είναι, σύμφωνα με την οδηγία της Ε.Ε., μεταξύ 6,5 και 8,5 αλλά με επεξεργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και νερό με pH μεταξύ 5 και 9. Για τιμές pH πέρα απ' τα όρια αυτά, καθίσταται αντιοικονομική η επεξεργασία του νερού για την ουδετεροποίηση του pH (Παππά, 2001).

Επειδή οι φυσικοί παράγοντες που ρυθμίζουν την ενεργότητα των ιόντων υδρογόνου αλλάζουν όταν ένα δείγμα υπόγειου νερού απομακρυνθεί από τον υδροφόρο ορίζοντα, η μέτρηση του pH έγινε επι τόπου στα σημεία εξόδου του νερού.

Από τις μετρήσεις προέκυψε ότι οι τιμές του pH των υπόγειων νερών (πηγές) κυμαίνεται από 6,85 έως 8,6, με μέση τιμή 8,1 (Πίν. 7.1) και για τις γεωτρήσεις και τα πηγάδια οι τιμές του pH κυμαίνονται από 7,3 έως 8,1, με μέση τιμή 7,7 (Πίν. 7.2).

Οι υψηλές τιμές του pH σχετίζονται με τη λιθολογία της περιοχής τροφοδοσίας τους που είναι κυρίως οφιολιθικά πετρώματα. Οι τιμές είναι συγκρίσιμες με παλαιότερες μελέτες στην περιοχή (Stamatis & Gartzos, 1999). Οι αλκαλικές συνθήκες στα υπόγεια νερά οφείλονται κυρίως στη διάσπαση της οργανικής ύλης με παραγωγή CO₂ που συμβάλλει στην αύξηση της ανθρακικής σκληρότητας.



Σχήμα 7.3: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής του pH των υπόγειων νερών της περιοχής έρευνας

7.4.3 Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (E.C.)

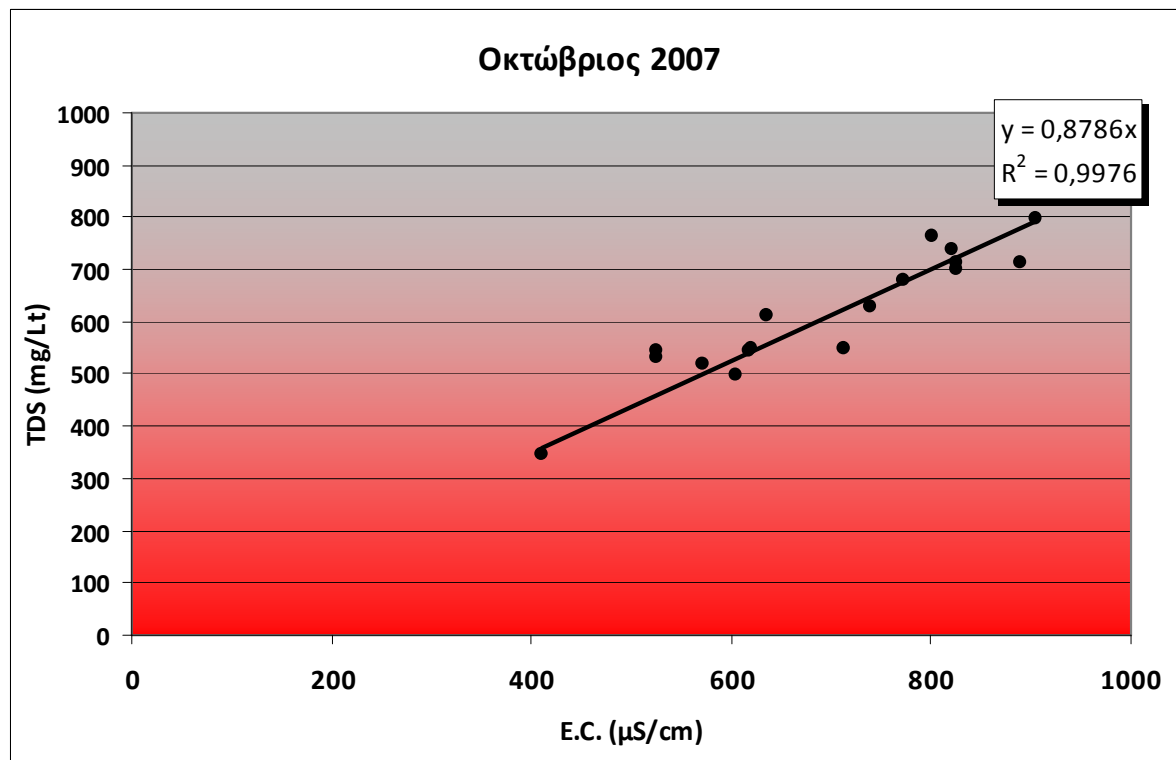
Η ηλεκτρική αγωγιμότητα αποτελεί επίσης μια σπουδαία υδροχημική παράμετρος. Είναι το αντίστροφο της ηλεκτρικής αντίστασης και σαν μονάδα μέτρησης χρησιμοποιείται το μικροSiemens ανά cm (μS/cm). Σύμφωνα με την οδηγία της Ε.Ε., το ενδεικτικό επίπεδο της E.C. για τα πόσιμα νερά είναι 400 μS/cm (στους 20 °C).

Είναι γνωστό ότι οι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος είναι τα διαλυμένα στο νερό ιόντα και για αυτό το λόγο η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι άμεσα συνδεδεμένη με τα συνολικά διαλυμένα στερεά (TDS) στο νερό (Mandel & Shiftan, 1981). Η σχέση αυτή έχει τη γενική μορφή:

$$TDS = k \times E.C$$

όπου τα TDS εκφράζονται σε mg/l και η E.C μS/cm στους 25°C. Ο παράγοντας k είναι ο συντελεστής διόρθωσης και κυμαίνεται συνήθως από 0,55 μέχρι 0,90.

Στο σχήμα 7.4 που ακολουθεί φαίνεται η σχέση TDS και E.C για την περίοδο δειγματοληψίας για την περιοχή έρευνας.



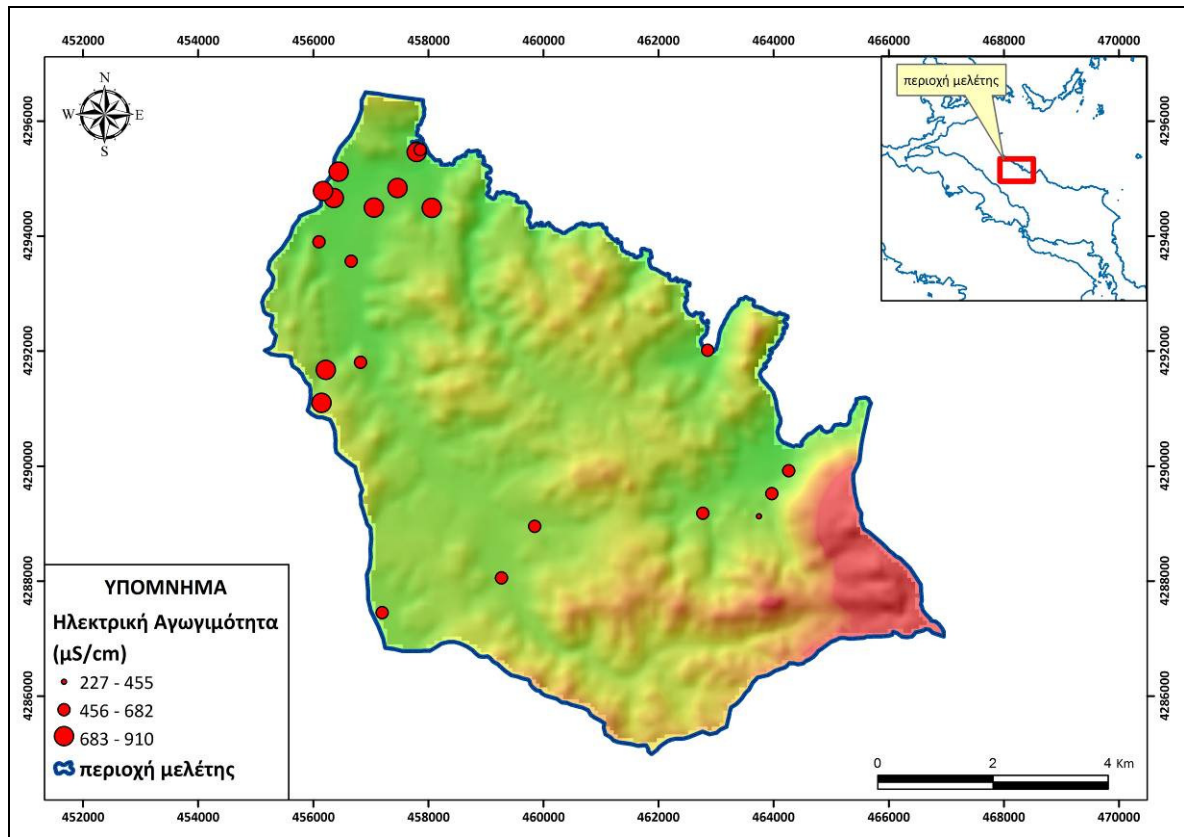
Σχήμα 7.4: Σχέση TDS – E.C των υπογείων υδάτων της περιοχής έρευνας

Η μέση τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας της περιόδου δειγματοληψίας ανήλθε σε 586,3μS/cm για τις πηγές, με εύρος τιμών από 307 έως 872 μS/cm (Πίν. 7.1) και 669,9 μS/cm για τα πηγάδια και τις γεωτρήσεις με διακύμανση τιμών από 457 έως 910 μS/cm (Πίν. 7.2) αντίστοιχα.

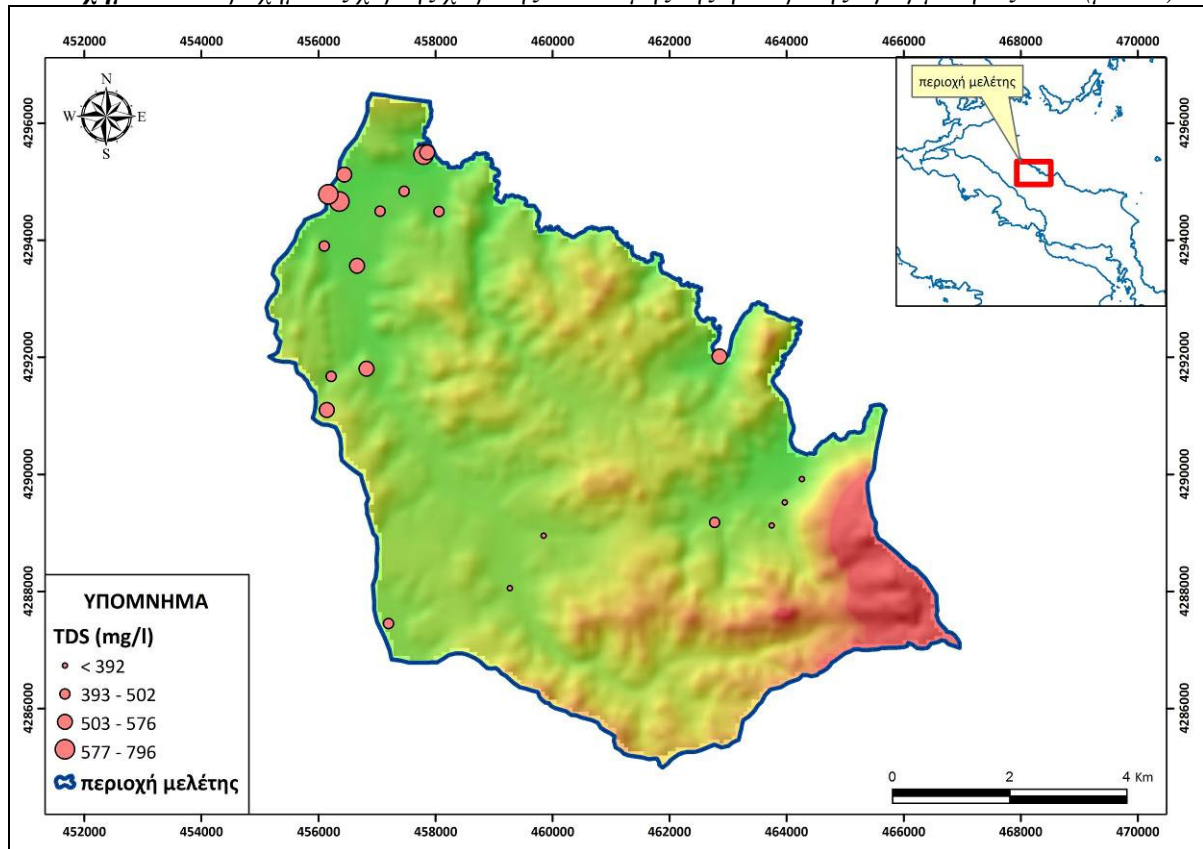
Οι υψηλότερες τιμές παρουσιάζονται εντός των χαλαρών σχηματισμών (Σχ. 7.5) πλησίον του Δημοτικού Διαμερίσματος Μαντουδίου και στην καλλιεργούμενη περιοχή του Κηρέα.

Χαρακτηριστικό αποτελεί στην περιοχή του Κυμασίου όπου παρά το γεγονός ότι τα πηγάδια βρίσκονται πλησίον της ακτογραμμής δεν έχουν υποστεί το φαινόμενο της υφαλμύρισης και ως εκ τούτου είναι απαλλαγμένα από υψηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Προφανώς αυτό σχετίζεται με την ύπαρξη στο υπόβαθρο αργιλικού σχηματισμού που εμποδίζει τη διείσδυση του θαλασσινού νερού προς την ενδοχώρα. Προς τούτο συνηγορεί επίσης και το φαινόμενο του αρτεσιανισμού που παρατηρείται σε γεωτρήσεις (GK1 και GK2) της περιοχής. Συγκρίνοντας τη χωρική κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και της χωρικής κατανομής

των διαλυμένων στερεών TDS (Σχ. 7.6) παρατηρείται πανομοιότυπη εικόνα με αυτή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (Σχ. 7.5).



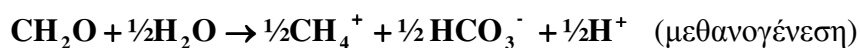
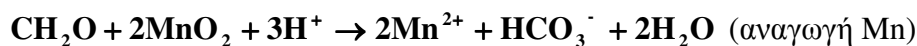
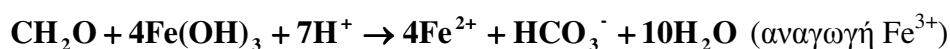
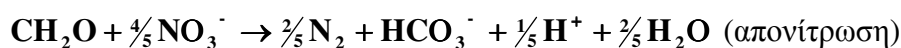
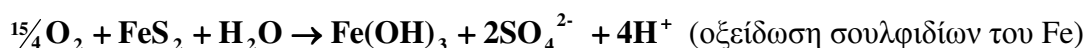
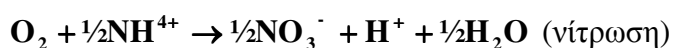
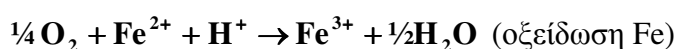
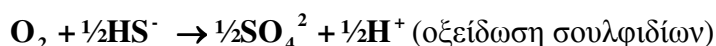
Σχήμα 7.5: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας E.C. (μS/cm)



Σχήμα 7.6: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής των συνολικά διαλυμένων στερεών (TDS)

7.4.4 Διαλυμένο οξυγόνο (DO₂)

Είναι η ποσότητα του μοριακού οξυγόνου που βρίσκεται διαλυμένο στο νερό. Είναι απαραίτητο για την υδρόβια ζωή κι αποτελεί δείκτη της μόλυνσης του νερού με απόβλητα. Η απόρριψη αποβλήτων σ' έναν υδάτινο αποδέκτη, προκαλεί τη σταδιακή μείωση του εν διαλύσει οξυγόνου λόγω της κατανάλωσής του από αερόβιους οργανισμούς που το χρησιμοποιούν για την οξείδωση των βιοαποικοδομήσιμων ουσιών των αποβλήτων. Οι κυριότερες αντιδράσεις που για την πραγματοποίησή τους καταναλίσκεται οξυγόνο είναι σύμφωνα με τους Freeze και Cherry (1979) οι εξής:



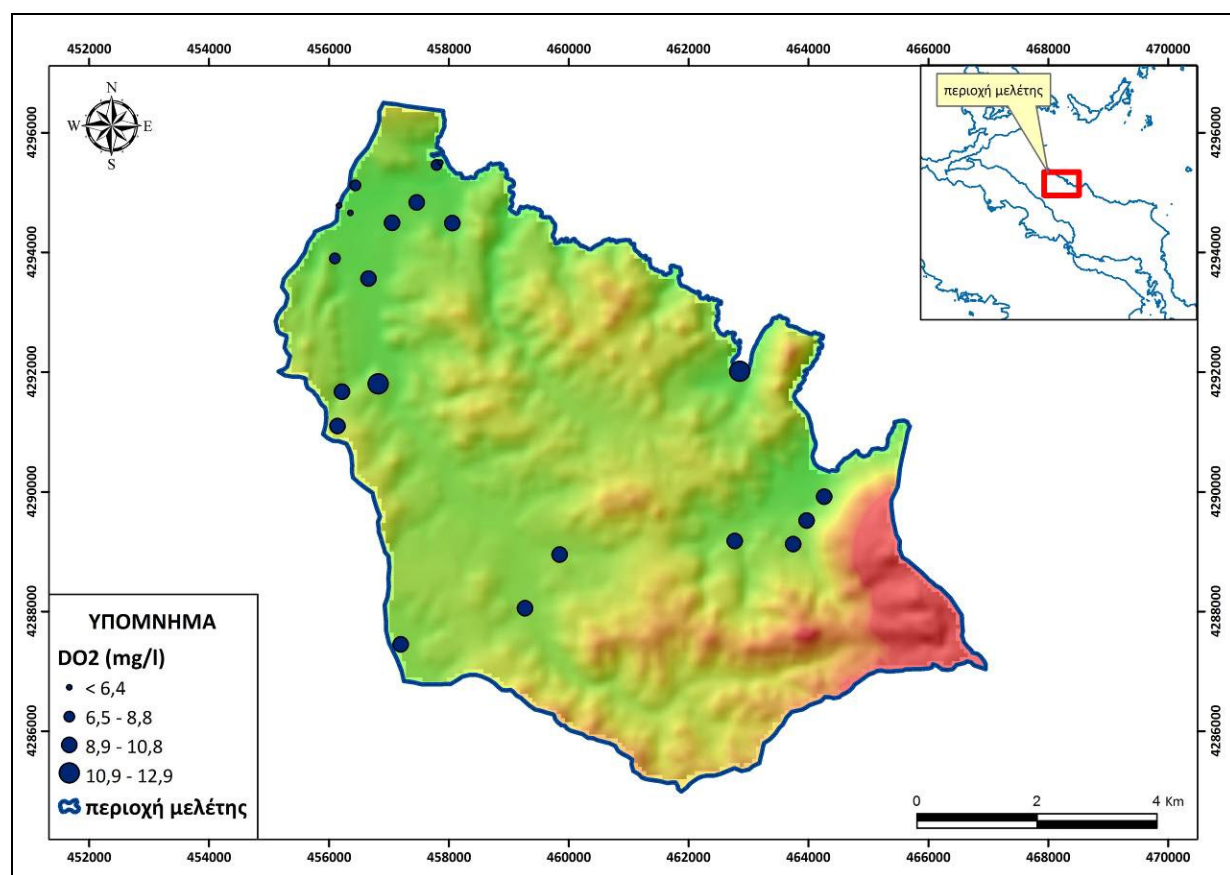
Η χαμηλή τιμή του διαλυμένου οξυγόνου (DO₂) στα φυσικά νερά φανερώνει την ύπαρξη ρύπανσης ή μόλυνσης. Ωστόσο, αυτό δεν ισχύει πάντα για τα υπόγεια νερά, εφόσον οι μόνοι τρόποι εμπλουτισμού τους με οξυγόνο είναι τα κατακρημνίσματα και το πορώδες του εδάφους. Η υψηλή θερμοκρασία μειώνει τις τιμές του DO₂ και δυσκολεύει τη διαδικασία του επαναερισμού.

Το DO₂ ελαττώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και της αλατότητας. Η ιδανική περιεκτικότητα του νερού σε διαλυμένο οξυγόνο πρέπει να είναι στο σημείο κορεσμού (δηλ. στο 100%) αλλά τιμές μεγαλύτερες του 75% θεωρούνται ικανοποιητικές.

Η έλλειψη DO₂ στα ύδατα προκαλεί αναερόβιες συνθήκες που βοηθούν την αναγωγή των νιτρικών σε νιτρώδη και των θεικών σε θειούχα με συνέπεια τη δημιουργία ανεπιθύμητων και δυσάρεστων οσμών (Παππά 2001, Κερκίδης, 2004).

Η μέτρηση του διαλυμένου οξυγόνου έγινε με επί τόπου μετρήσεις και σύμφωνα με αυτές προέκυψε ότι οι τιμές για τις πηγές κυμαίνονται από 7,8 mg/l μέχρι 11,5 mg/l (Πίν. 7.1) και για τις γεωτρήσεις και τα πηγάδια κυμαίνονται από 5,3 mg/l έως 12,9 mg/l (Πίν. 7.2).

Η χαμηλότερη τιμή στην παρουσία οξυγόνου εντοπίζεται στα πηγάδια που βρίσκονται πλησίον του οικισμού Μαντουδίου, εντός των χαλαρών σχηματισμών (Σχ. 7.7). Το γεγονός αυτό συνδέεται πιθανά με την παρουσία οργανικής ύλης που συμβάλλει στην αφομοίωση του οξυγόνου από διάφορες βιο – γεωχημικές διεργασίες (οξειδωτικές διεργασίες), ενώ οι υψηλότερες τιμές εντοπίζονται στα νερά των πηγών που φανερώνουν το μικρό χρόνο παραμονής εντός της περιοχής τροφοδοσίας τους.



Σχήμα 7.7: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής του διαλυμένου οξυγόνου DO_2 (mg/l)

7.5 Χημικές παράμετροι του υπόγειου νερού

7.5.1 Σκληρότητα

Η σκληρότητα του νερού αποτελεί την παράμετρο προσδιορισμού της συγκέντρωσης κυρίως των αλάτων ασβεστίου και μαγνησίου και είναι συνάρτηση της φύσης και της σύστασης των γεωλογικών σχηματισμών με τους οποίους έχει έρθει σε επαφή το νερό κατά την κίνησή του.

Ανάλογα με τη μορφή στην οποία βρίσκονται τα άλατα ασβεστίου και μαγνησίου, η σκληρότητα του νερού διακρίνεται σε παροδική και μόνιμη.

Η παροδική σκληρότητα οφείλεται στην παρουσία ευδιάλυτων ανθρακικών αλάτων του ασβεστίου και του μαγνησίου και αίρεται με το βρασμό του νερού, αφού κατά τη διεργασία αυτή, τα διαλυμένα όξινα ανθρακικά άλατα των δύο μετάλλων καταβυθίζονται ως αδιάλυτα ανθρακικά άλατα, με παράλληλη αποδέσμευση διοξειδίου του άνθρακα, κατά τις αντιδράσεις:



Η μόνιμη σκληρότητα οφείλεται στην παρουσία χλωριούχων και θεικών αλάτων του ασβεστίου και του μαγνησίου και δεν αίρεται με το βρασμό, αφού κατά τη διεργασία αυτή δεν είναι δυνατόν να καταβυθισθούν τα αντίστοιχα άλατα των δύο μετάλλων.

Το σύνολο της παροδικής και μόνιμης σκληρότητας αποτελεί την ολική σκληρότητα του νερού. Η τιμή της σκληρότητας εκφράζεται σε:

- ppm (μέρη διαλυμένης ουσίας ανά εκατομμύριο μερών του διαλύματος) ισοδύναμης ποσότητας CaCO_3 , δηλαδή σε mg CaCO_3 /l νερού
- ειδικές μονάδες μέτρησης που καλούνται σκληρομετρικοί βαθμοί που ορίζονται ως εξής:

ι) γερμανικός βαθμός σκληρότητας (1 °dH): αντιπροσωπεύει 17,89 mg CaCO_3 /l νερού

ιι) γαλλικός βαθμός σκληρότητας (1 °f): αντιπροσωπεύει 10 mg CaCO_3 /l νερού

Νερό με βαθμούς σκληρότητας από 30 – 50, θεωρείται πολύ σκληρό και χρησιμοποιείται ως πόσιμο μόνο σε εξαιρετικές περιπτώσεις, ενώ είναι ακατάλληλο για πλύσιμο με χρήση των κοινών σαπουνιών. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι τα διαλυμένα όξινα ανθρακικά ή θειικά άλατα του ασβεστίου και του μαγνησίου σχηματίζουν αδιάλυτα άλατα με τα οργανικά ανιόντα των λιπαρών οξέων που περιέχονται στα κοινά σαπούνια (παλμιτικού, στεατικού και ελαϊκού), με αποτέλεσμα την αναστολή της απορρυπαντικής τους δράσης. Επίσης, το σκληρό νερό είναι ακατάλληλο για την τροφοδοσία ατμολεβήτων, θερμαντικών σωμάτων και σωλήνων μεταφοράς θερμού νερού επειδή κατά τη θέρμανση αποτίθενται στα τοιχώματα τους ανθρακικά άλατα του ασβεστίου και του μαγνησίου. Για τους λόγους αυτούς επιβάλλεται ο προσδιορισμός της σκληρότητας του νερού και όπου είναι απαραίτητο να λαμβάνονται μέτρα για την αποσκλήρυνσή του.

Τα νερά της περιοχής μελέτης είναι στην πλειοψηφία τους σκληρά έως πολύ σκληρά, σύμφωνα με την κλίμακα αξιολόγησης σε Γερμανικούς βαθμούς °dH (Hoell, 1979).

Πίνακας 7.3: Αξιολόγηση των υδάτων βάσει της σκληρότητας σε °dH (Hoell, 1979)

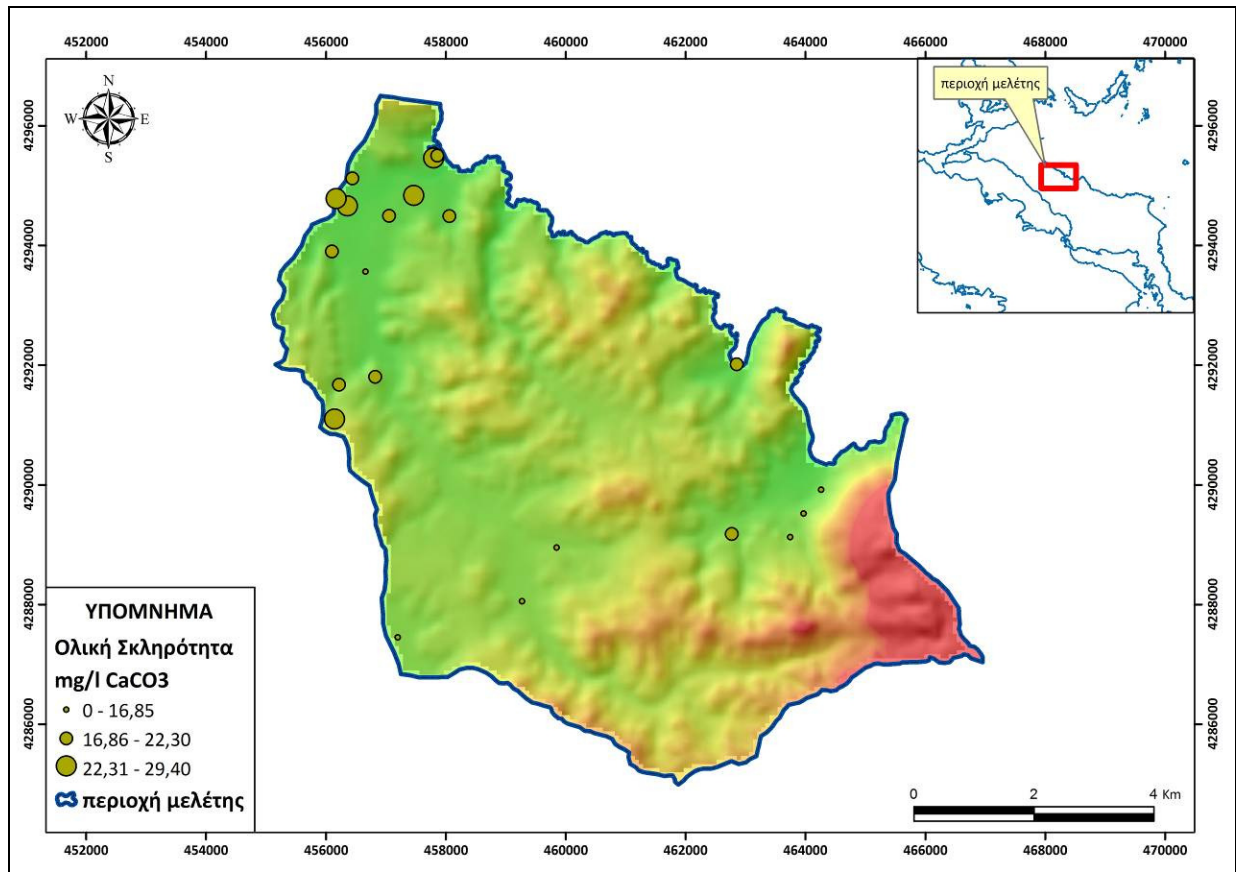
Ολική σκληρότητα (Γερμ. βαθμοί °dH)	Χαρακτηρισμός
0 – 4	Πολύ μαλακό
4 – 8	Μαλακό
8 – 18	Μέτρια σκληρό
18 – 30	Σκληρό
> 30	Πολύ σκληρό

Για την απεικόνιση της κατανομής της ολικής, μόνιμης και παροδικής σκληρότητας στο χώρο δημιουργήθηκαν οι υδροχημικοί χάρτες των σχημάτων 7.8 – 7.10 από τα οποία φαίνεται η τάση αύξησης των τιμών στην περιοχή κοντά στον οικισμό του Μαντουδίου.

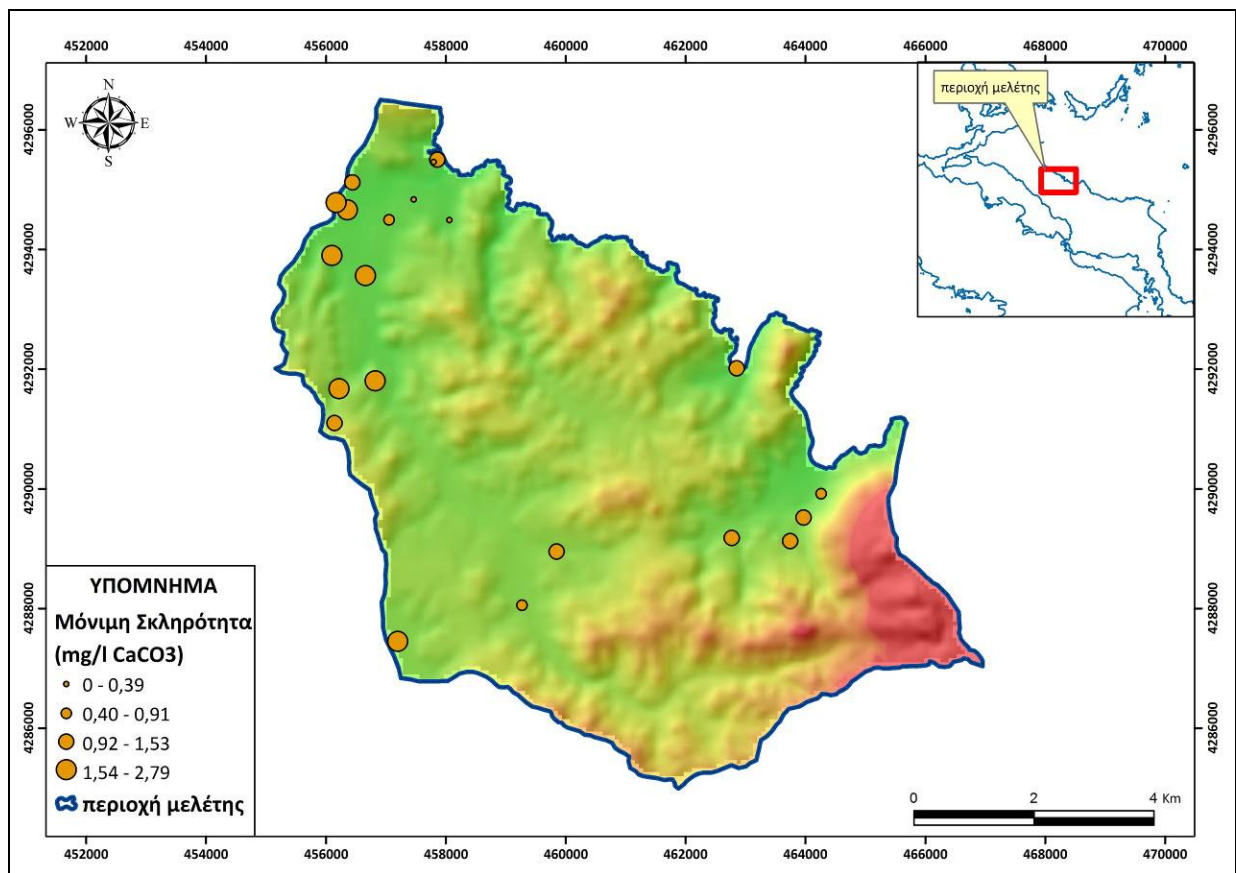
Στην περιοχή έρευνας η ολική σκληρότητα των πηγών κυμαίνεται από 10,4 έως 26,9 °dH αντίστοιχα (Πίν. 7.1), με μέση τιμή στους 18,5 °dH και των πηγαδιών και των γεωτρήσεων κυμαίνεται από 12,42 έως 29,4 °dH αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές οφείλονται στην παρουσία των υψηλών συγκεντρώσεων του μαγνησίου, καθώς στην περιοχή έρευνας έχουμε την εμφάνιση του οφιολιθικού συμπλέγματος παρουσία μαγνησιούχων κοιτασμάτων λευκολίθου.

Η ανθρακική (παροδική) σκληρότητα κυμαίνεται από 10,4 έως 25,56 °dH στις πηγές και στις γεωτρήσεις και στα πηγάδια κυμαίνονται από 11,5 έως 26,6 °dH αντίστοιχα. Οι υψηλές τιμές σχετίζονται με την ύπαρξη των οξυανθρακικών ριζών.

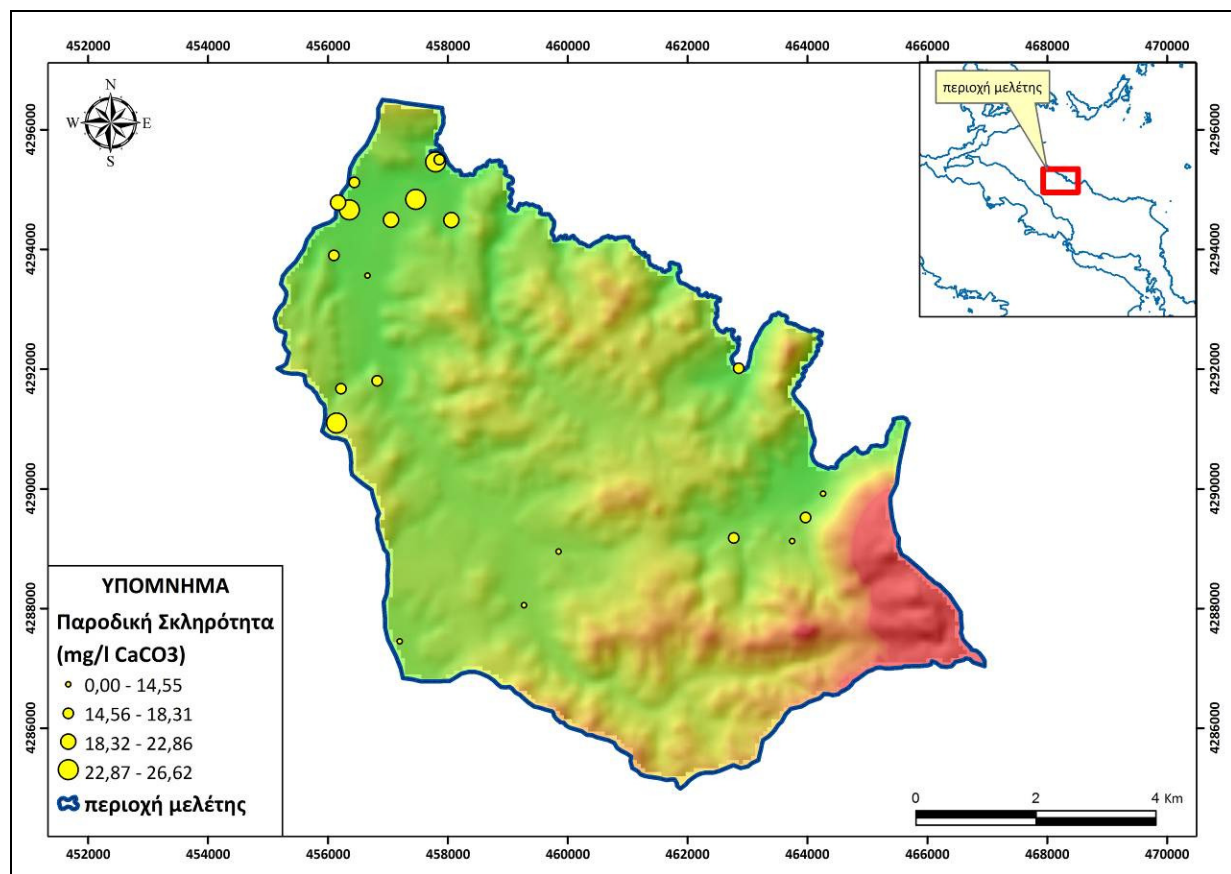
Η μόνιμη σκληρότητα εμφανίζει χαμηλές τιμές που κυμαίνονται από 0,01 έως 2,3 °dH αντίστοιχα για τις πηγές με μέση τιμή 1,2 °dH και για τις γεωτρήσεις και τα πηγάδια από 0,01 έως 3,29 °dH αντίστοιχα και συνδέεται με την περιορισμένη παρουσία των θεικών ιόντων στα υπόγεια νερά της περιοχής.



Σχήμα 7.8: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής της ολικής σκληρότητας



Σχήμα 7.9: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής της μόνιμης σκληρότητας



Σχήμα 7.10: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής της παροδικής σκληρότητας

7.5.2 Ασβέστιο (Ca²⁺)

Η ύπαρξη ασβεστίου στα υπόγεια νερά οφείλεται στη διάλυση ορυκτών, πλούσια σε Ca²⁺ όπως ο ασβεστίτης (CaCO₃), το επίδοτο [Ca₂(FeAl)Al₂(SiO₄)(SiO₇)O(OH)], ο δολομίτης, το ολιγόκλαστο, η γύψος (CaSO₄·2H₂O), ο ανυδρίτης (CaSO₄), ο ανορθίτης (CaAl₂Si₂O₈), οι αμφίβολοι, οι πυρόξενοι, οι άστριοι, οι αραγωνίτες και τα αργιλικά ορυκτά ή σε διάλυση πετρωμάτων όπως ο ασβεστόλιθος, τα κροκαλοπαγή, οι ασβεστολιθικοί ψαμμίτες κι οι ασβεστολιθικές μάργες (Appelo & Postma, 1996). Οι συνήθεις συγκεντρώσεις του ασβεστίου σε φυσικά νερά κυμαίνονται μεταξύ 0,05 mmol/l και 5 mmol/l (Appelo & Postma, 1996).

Το ασβέστιο αποτελεί βασικό στοιχείο του ανθρώπινου σώματος, απαραίτητο για την υγεία των οστών. Το 99% του ολικού ασβεστίου που υπάρχει στο ανθρώπινο σώμα βρίσκεται στον σκελετό και τα δόντια ενώ το υπόλοιπο 1% βρίσκεται στο αίμα και σε άλλους ιστούς. Η αναλογία Ca προς P στα οστά είναι λίγο μεγαλύτερη από 2:1 και είναι πάντα σταθερή.

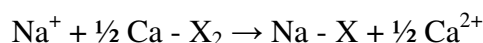
Η σημαντικότητα του ασβεστίου για τον ανθρώπινο οργανισμό έγκειται στο γεγονός ότι κρατά σε καλή κατάσταση τα οστά και τα δόντια, ρυθμίζει την λειτουργία της καρδιάς, ελέγχει την αϋπνία, μειώνει την αρτηριακή πίεση, βοηθά στην κατάλληλη λειτουργία των μυών και των

νεύρων, μειώνει τη χοληστερίνη και μειώνει τις πιθανότητες εμφάνισης καρκίνου του παχέος εντέρου (Σιμώνης, 1998).

Η έλλειψη ασβεστίου στην ανθρώπινη διατροφή μπορεί να προκαλέσει διάφορες ασθένειες όπως οστεοπόρωση, πρόωρες γεννήσεις, υπέρταση και ανάπτυξη πέτρας στα νεφρά. Ο συνδυασμός έλλειψης Ca και P μπορεί να προκαλέσει ραχίτιδα, μια παιδική ασθένεια που χαρακτηρίζεται από μαλακά οστά αδύναμα ν' αντέξουν το σωματικό βάρος, στραβά πόδια, βαθουλωμένα γόνατα και προτεταμένο στήθος (McDonnell, 1992). Η αντίστοιχη ασθένεια στους ενήλικες ονομάζεται οστεομαλάκυνση παρουσιάζοντας πόνους στα οστά, μυϊκή αδυναμία και αργή αποθεραπεία των καταγμάτων.

Η συνιστώμενη ημερήσια δόση ασβεστίου στην ανθρώπινη διατροφή δεν ξεπερνά τα 2,5 gr (www.tjclarkinc.com/minerals). Το ενδεικτικό επίπεδο της συγκέντρωσης Ca⁺² στα πόσιμα νερά σύμφωνα με την οδηγία 80/778/EE είναι 100 mg/l.

Τα ιόντα ασβεστίου στον υδροφόρο ορίζοντα της περιοχής μελέτης προέρχονται κυρίως από τη διάλυση του ασβεστίτη και ενδεχόμενα από φαινόμενα ιοντανταλλαγής με την επίδραση του θαλασσινού νερού. Ο τρόπος με τον οποίο εισέρχονται τα ιόντα ασβεστίου στον υδροφόρο ορίζοντα είναι η διαδικασία της ανάμιξης αλλά και της ιοντανταλλαγής, η οποία σύμφωνα με τους Appelo και Postma (1994) λαμβάνει χώρα σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:

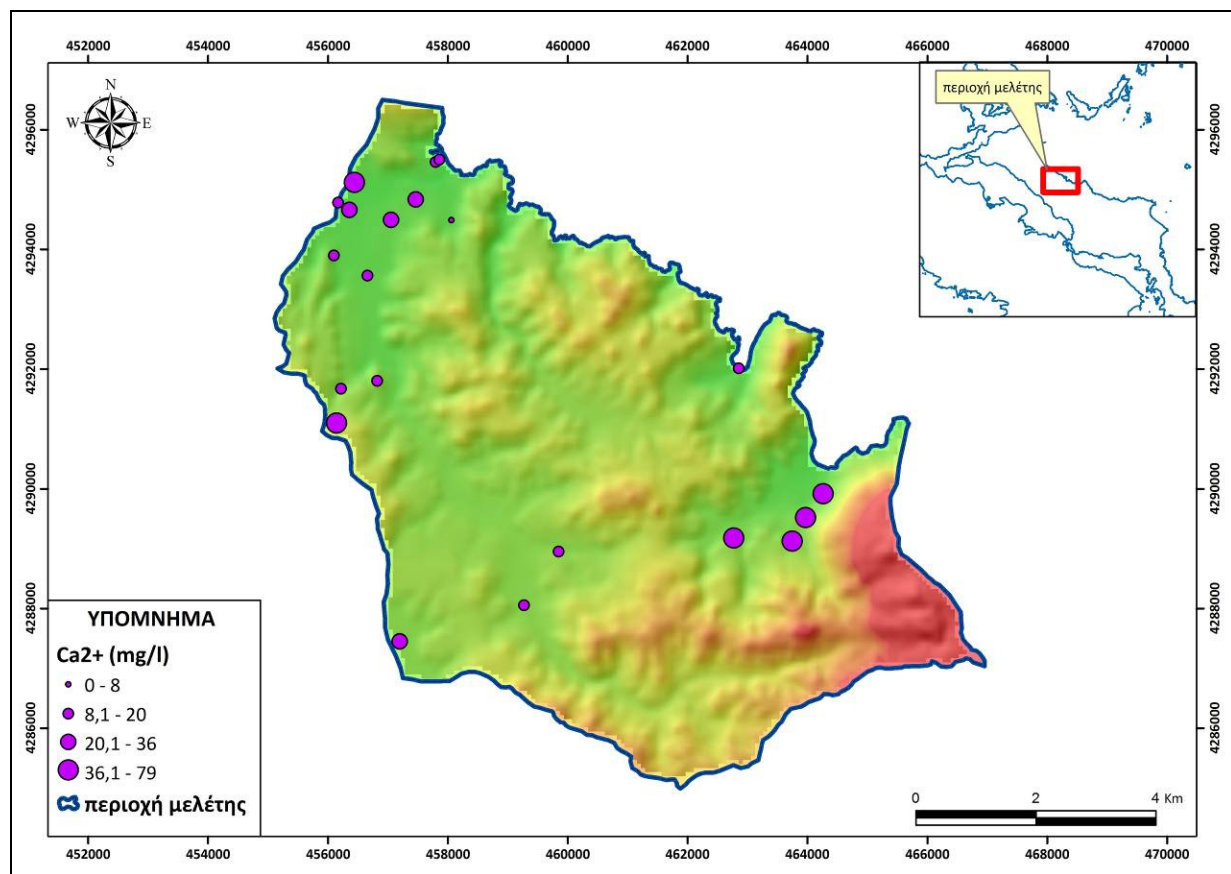


όπου: X ο ιονταντάλακτης

δηλαδή όταν υπάρξει μια προσφορά ιόντων στο υπόγειο νερό (όπως για παράδειγμα στην περίπτωση του θαλασσινού νερού), τότε τα ιόντα αυτά προσλαμβάνονται από το σκελετό του υδροφορέα, ο οποίος και απελευθερώνει τότε στο διάλυμα τα ιόντα του ασβεστίου. Η διαδικασία αυτή της ανταλλαγής ιόντων μπορεί να πραγματοποιηθεί με όλα τα ιόντα που έχουν παρόμοια ιοντική ακτίνα. Έτσι γενικά, τα ιόντα ασβεστίου ανταλλάσσονται κυρίως με τα ιόντα Na⁺ και K⁺ αλλά και με τα ιόντα Mg²⁺ καθώς επίσης και με τα ιόντα NH₄⁺.

Η μέση τιμή της συγκέντρωσης των ιόντων ασβεστίου (πηγές) κυμαίνεται από 11,2 έως 79 mg/L (Πίν. 7.1) και από 8 έως 74,4 mg/L (γεωτρήσεις και πηγάδια) για την ξηρή περίοδο, Οκτώβριος 2007 (Πίν. 7.2).

Παρατηρώντας το σχήμα 7.11, προκύπτει ότι οι υψηλές συγκεντρώσεις ιόντων Ca²⁺, οφείλονται κατά κύριο λόγο στην παρουσία των ανθρακικών σχηματισμών.



Σχήμα 7.11: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής των ιόντων ασβεστίου

7.5.3 Μαγνήσιο (Mg^{2+})

Κύριες πηγές προέλευσης του μαγνησίου στα υπόγεια νερά είναι τα μαγνησιούχα ορυκτά όπως ο δολομίτης ($CaCO_3 \cdot MgCO_3$), ο μαγνησίτης ($MgCO_3$), ο ολιβίνης ($Mg, Fe)_2SiO_4$, ο καρναλίτης ($KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$), ο πολυαλίτης [$K_2Ca_2Mg(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$], οι αμφίβολοι, οι πυρόξενοι, οι μαγνησίτες, οι σερπεντίνες, οι μαρμαρυγίες και τα αργιλικά ορυκτά. Τα πετρώματα που διακρίνονται για την υψηλή περιεκτικότητά τους σε μαγνήσιο είναι οι δολομιτικοί ψαμμίτες, οι δολομιτικές κι οι μαγνησιούχες μάργες (Καλλέργης, 2000, Appelo & Postma, 1996) και οι περιδοτίτες.

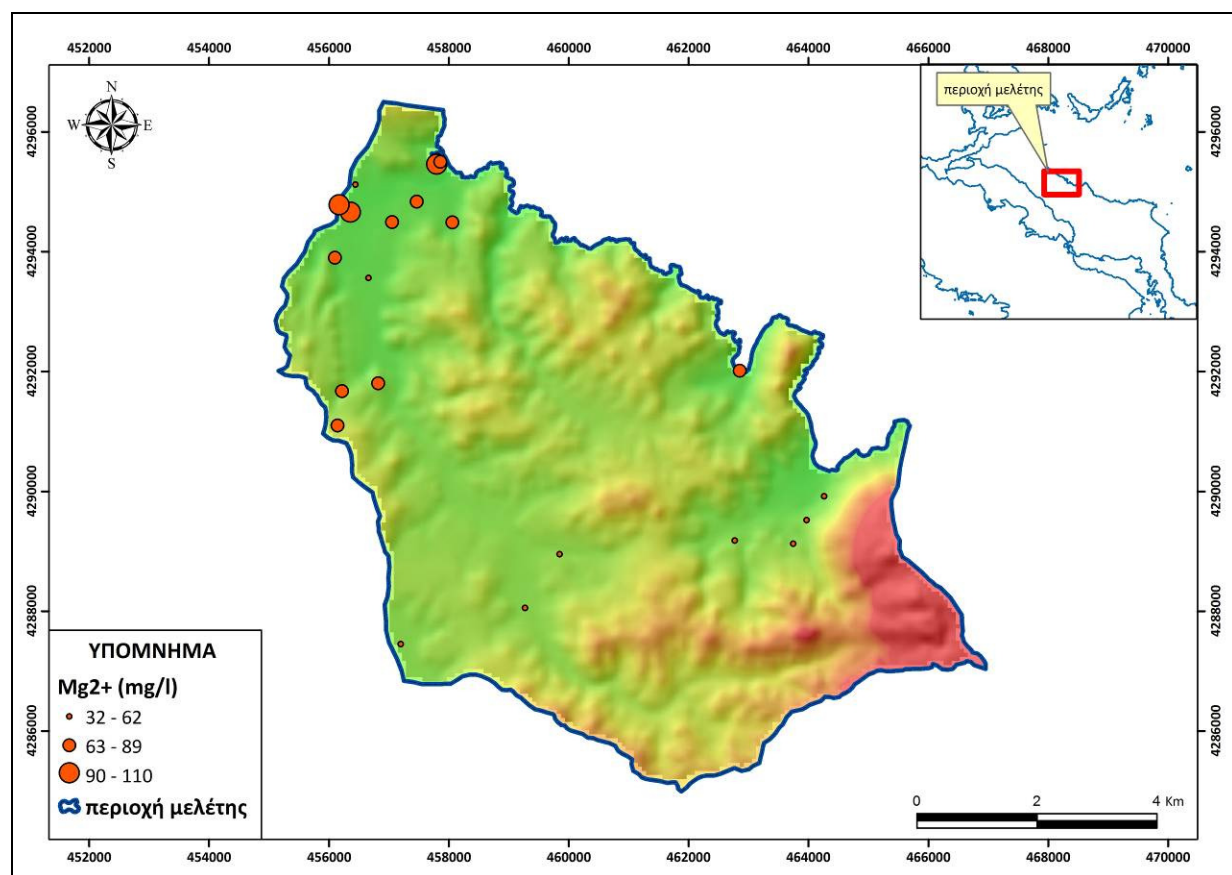
Είναι το τέταρτο σε σειρά αφθονίας κατιόν στο ανθρώπινο σώμα με το 60% να βρίσκεται στα οστά και το υπόλοιπο 40% να κατανέμεται ισομερώς μεταξύ των μυϊκών και των μη μυϊκών ιστών. Παίζει σημαντικό ρόλο στη ρύθμιση της λειτουργίας της καρδιάς, στο μεταβολισμό του ασβεστίου και της βιταμίνης C καθώς επίσης και στη μετατροπή των σακχάρων του αίματος σε ενέργεια.

Συνδέεται με διεργασίες που χρειάζονται ενέργεια όπως η μεταβίβαση, η μυϊκή συστολή, η σύνθεση πρωτεϊνών, λιπών και νουκλεϊνικών οξέων (www.tjclarkinc.com/minerals).

Τα ιόντα μαγνησίου στην περιοχή έρευνας προέρχονται από την ίδια πηγή προέλευσης, δηλαδή από την διάλυση του ασβεστίτη, αλλά κυρίως από τα υπερβασικά πετρώματα που εμφανίζονται στην περιοχή μελέτης. Επιπλέον στην περιοχή υπάρχουν κοιτάσματα λευκόλιθου (πλούσιο σε μαγνήσιο) κάτι που έχει ως αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό του υπόγειου νερού σε ιόντα μαγνησίου. Στο σχήμα 7.12 που ακολουθεί διαπιστώνεται ότι στην περιοχή των υπερβασικών πετρωμάτων εμφανίζονται υψηλές συγκεντρώσεις σε ιόντα μαγνησίου με τις υψηλότερες τιμές να εντοπίζονται στους χαλαρούς σχηματισμούς του οικισμού Κυμάσι. Όπως με τα ιόντα ασβεστίου έτσι και με τα ιόντα μαγνησίου πραγματοποιείται η ίδια υδροχημική διαδικασία της ιοντοανταλλαγής.

Το ενδεικτικό επίπεδο της συγκέντρωσης ιόντων Mg^{2+} στα πόσιμα νερά είναι σύμφωνα με την οδηγία της ΕΕ 30 mg/l και το μέγιστο επιτρεπτό όριο είναι 50 mg/l.

Η μέση τιμή της συγκέντρωσης μαγνησίου (πηγές) κατά την περίοδο δειγματοληψίας (Πίν. 7.1) ανέρχεται σε 50,5 mg/l, με εύρος τιμών από 10,2 mg/l έως 82 mg/l αντίστοιχα και από 19 mg/l έως 110,4 mg/l αντίστοιχα για τις γεωτρήσεις και τα πηγάδια με μέση τιμή 69,9 mg/l (Πίν. 7.2).



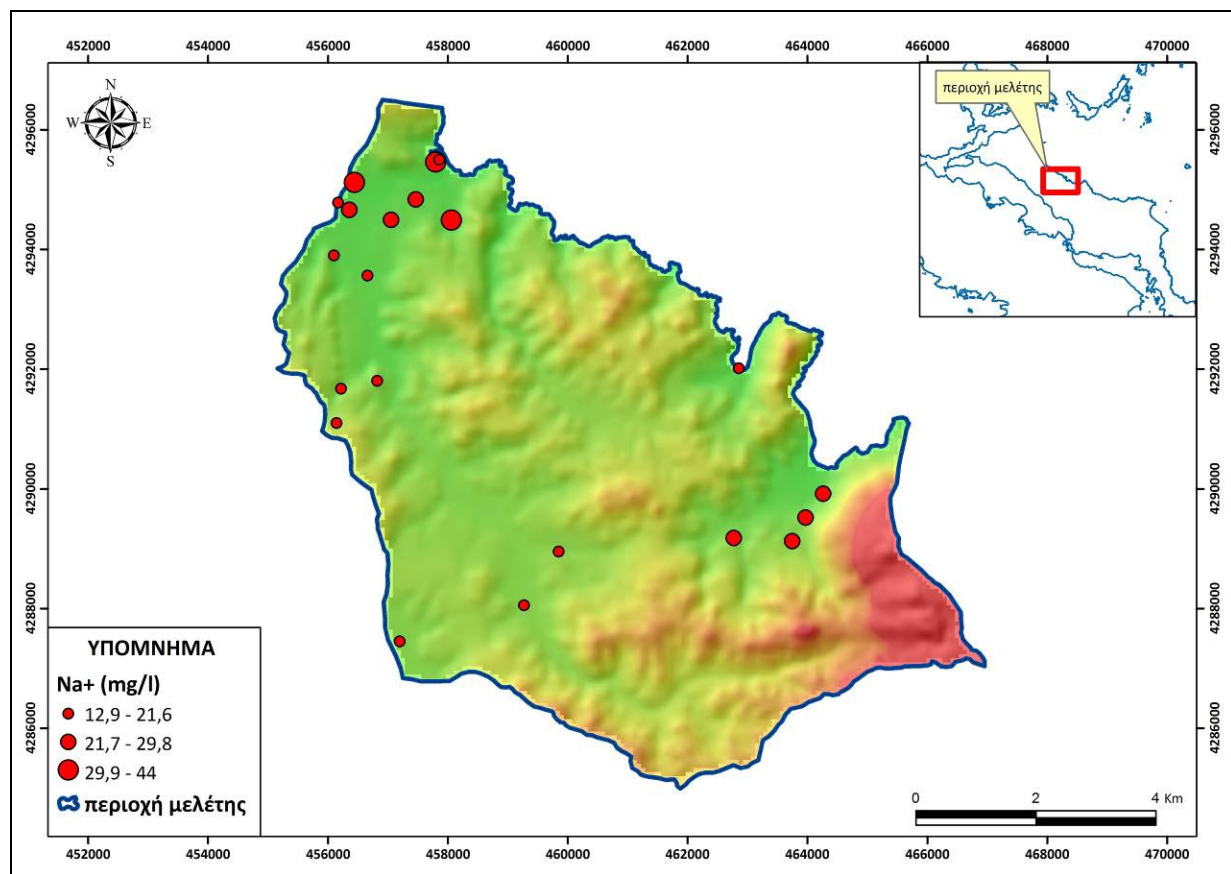
Σχήμα 7.12: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής των ιόντων μαγνησίου

7.5.4 Νάτριο (Na⁺)

Η παρουσία των ιόντων νατρίου στα υπόγεια νερά των σχηματισμών της περιοχής μελέτης σχετίζονται με δύο βασικούς παράγοντες, τη λιθολογία και την θαλάσσια επίδραση. Στην περιοχή μελέτης αναπτύσσονται τα κατώτερα μέλη της οφιολιθικής σειράς που αποτελούνται κυρίως από pillow lavas οι οποίες χαρακτηρίζονται από ορυκτά πλούσια σε νάτριο. Η διάλυση των ορυκτών σε συνδυασμό με τη διείσδυση του θαλασσινού νερού προς την ενδοχώρα συμβάλουν στον εμπλουτισμό των υπόγειων νερών σε νάτριο. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι τα υπόγεια νερά να παρουσιάζουν αυξημένες τιμές συγκέντρωσης Na⁺. Στην περιοχή παρατηρούνται οι υψηλότερες συγκεντρώσεις στην παράκτια ζώνη τόσο προς την περιοχή των αλλουβιακών αποθέσεων, πλησίον του οικισμού Κυμάσι, όσο και στον κόλπο του Κυμασίου, όπου είναι προφανές ότι υφίστανται την άμεση επίδραση της θάλασσας. Στις περιοχές αυτές, εμφανίζεται το φαινόμενο της υδροχημικής διαδικασίας της ιοανταλλαγής, όπου τα ιόντα νατρίου κατά την είσοδό τους από τη διείσδυση του θαλασσινού νερού προσροφούνται από το σκελετό του υδροφορέα και εν συνεχεία απελευθερώνονται ιόντα Ca²⁺ ή Mg²⁺ σύμφωνα με την αντίδραση ιοντοανταλλαγής.

Αντίθετα στη δυτική περιοχή όπου αναπτύσσονται οι pillow lavas και δεν επέρχεται επίδραση του θαλασσινού νερού τα υπόγεια νερά χαρακτηρίζονται από χαμηλότερες συγκεντρώσεις νατρίου που οφείλουν όμως την παρουσία τους στη διάλυση των νατριούχων ορυκτών.

Η μέση τιμή των ιόντων νατρίου για τις πηγές ανήλθε σε 22,8 mg/l, με εύρος τιμών από 12,8 mg/l έως 35 mg/l (Πίν. 7.1) και για τις γεωτρήσεις και τα πηγάδια από 10,3 mg/l έως 44 mg/l, με μέση τιμή 21,9 mg/l (Πίν. 7.2). Οι τιμές των ιόντων νατρίου αυξάνονται κατά τη διεύθυνση ΝΔ – ΒΑ, όπως προκύπτει από τον υδροχημικό χάρτη χωρικής κατανομής (Σχ. 7.13).



Σχήμα 7.13: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής των ιόντων νατρίου

7.5.5 Κάλιο (K⁺)

Πηγή προέλευσης του καλίου στα υπόγεια νερά αποτελούν τα πλούσια σε K⁺ ορυκτά όπως είναι ο μοσχοβίτης ($H_2KA_3Si_3O_{12}$), το ορθόκλαστο ($[SiO_4 \cdot SiO_2 \cdot SiO_2]Al,K$), ο καρναλίτης ($KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$) κι ο πολυαλίτης ($[K_2Ca_2Mg(SO_4)_4 \cdot 2H_2O]$). Η κύρια πηγή προέλευσης των ιόντων καλίου στα υπόγεια νερά της περιοχής έρευνας είναι ίδια με αυτή των ιόντων νατρίου.

Το κάλιο θεωρείται το πιο απαραίτητο κατιόν των κυττάρων στον ανθρώπινο οργανισμό. Το μεγαλύτερο μέρος βρίσκεται στα μυϊκά κύτταρα παίζοντας σπουδαίο ρόλο στη μετάδοση της νευρικής ώσης και τη συσταλτικότητα των μυών. Η ποσότητά του είναι ενδεικτική της μυώδους μάζας. Αποτελεί την κύρια βάση για τους ιστούς και τα αιμοσφαίρια και μετέχει στη ρύθμιση της οξοβασικής ισορροπίας (Σιμώνης, 1998).

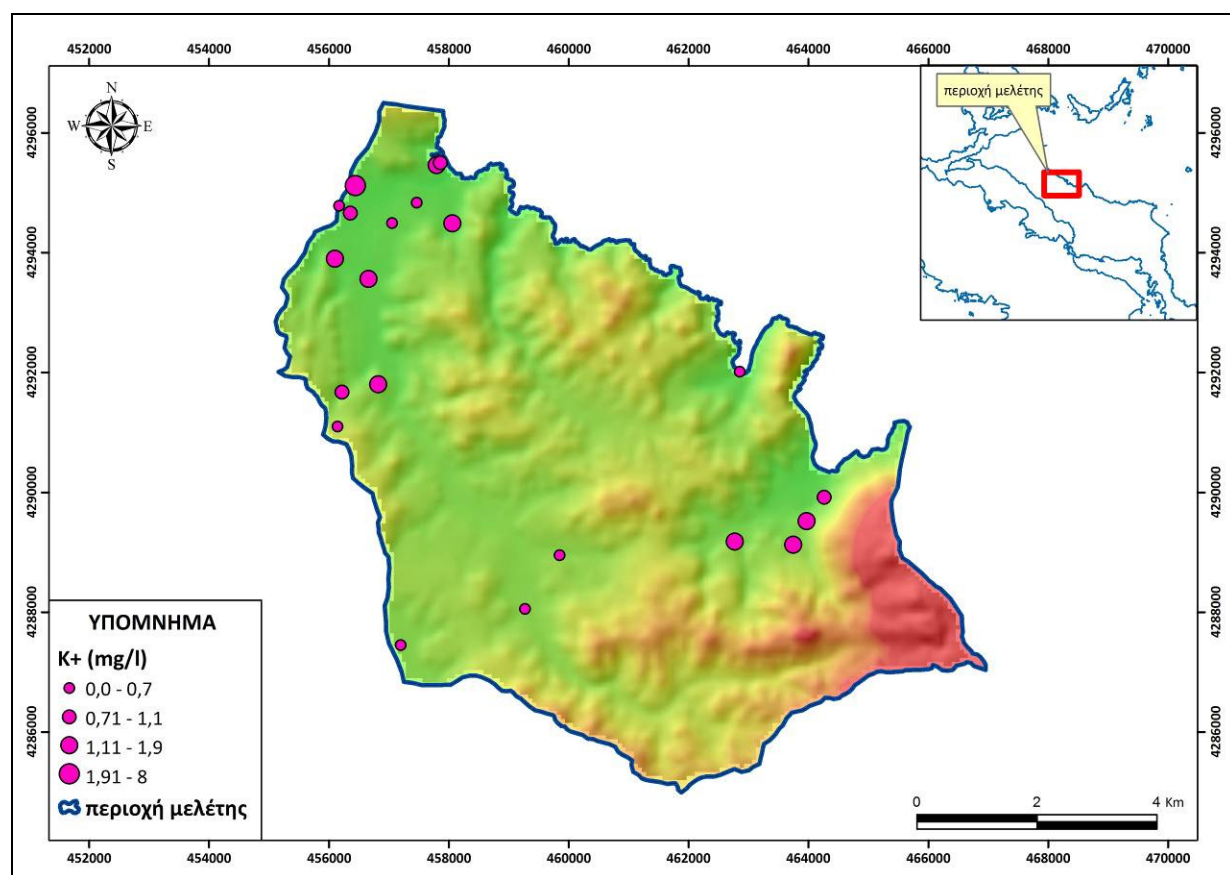
Το κάλιο ρυθμίζει τη λειτουργία της καρδιάς και της αρτηριακής πίεσης και συνεισφέρει στην υγεία του δέρματος. Βρίσκεται άφθονο σε φρούτα και λαχανικά καθώς επίσης στο κρέας και τα δημητριακά.

Η ενδεικτική κατανάλωση καλίου για έναν ενήλικα είναι γύρω στα 100 meq/day. Η ενδεικτική συγκέντρωση στα πόσιμα νερά σύμφωνα με την οδηγία της Ε.Ε. είναι 10 mg/l με ανώτατο όριο

τα 12mg/l. Η αφθονία καλίου στην ανθρώπινη διατροφή θεωρείται ευεργετική και συμβάλλει στη μείωση των αγγειακών επεισοδίων (www.tjclarkinc.com/minerals).

Η πλειοψηφία των δειγμάτων νερού από τις πηγές που ελήφθησαν στην περιοχή μελέτης παρουσιάζει συγκεντρώσεις καλίου που κυμαίνονται από 0,4 mg/l έως 8 mg/l (Πίν. 7.1). Τα δείγματα νερού που ελήφθησαν από τις γεωτρήσεις και τα πηγάδια παρουσιάζουν ελαφρώς πιο μειωμένες τιμές συγκέντρωσης καλίου, με μέση τιμή 1,8 mg/l και εύρος τιμών από 0,5 mg/l έως 1,8 mg/l (Πίν. 7.2).

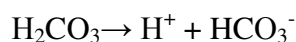
Στο σχήμα 7.14 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή της συγκέντρωσης καλίου στα υπόγεια νερά της περιοχής. Οι υψηλότερες τιμές εντοπίζονται κυρίως σε πηγάδια των καλλιεργούμενων περιοχών του κάμπου Μαντουδίου και πιθανόν οι υψηλές τιμές συγκεντρώσεων καλίου μπορεί να οφείλονται και σε καλιούχα λιπάσματα.



Σχήμα 7.14: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής των ιόντων καλίου

7.5.6 Όξινα ανθρακικά ιόντα (HCO₃⁻)

Τα οξυανθρακικά ή όξινα διττανθρακικά HCO₃⁻ αποτελούν δείκτη για την ύπαρξη οργανικών ουσιών στα νερά. Το H₂CO₃, προέρχεται απ' την οργανική ύλη και διίσταται σε πρωτόνια και οξυανθρακικά σύμφωνα με την αντίδραση:



και τα οξυανθρακικά με τη σειρά τους διίστανται σε άτομα υδρογόνου και ανθρακική ρίζα:

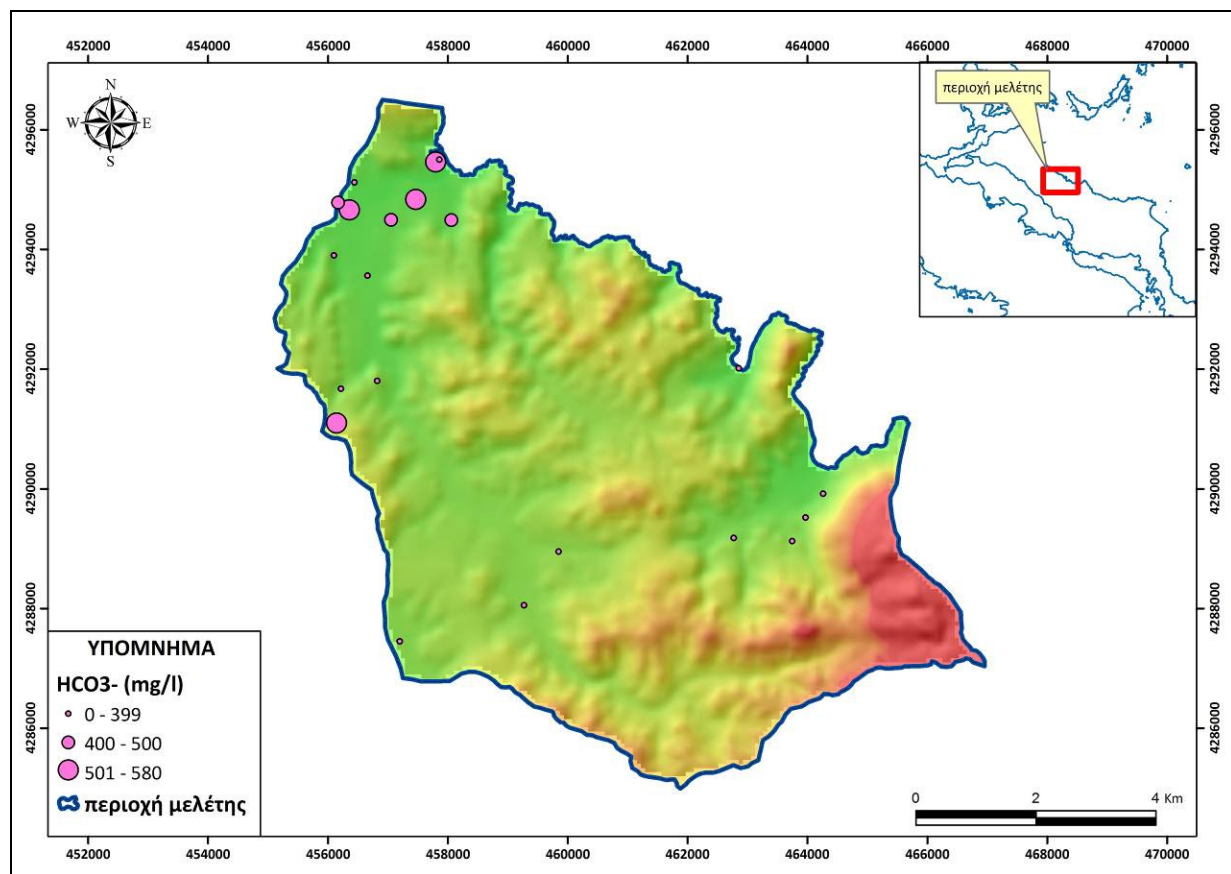


Τα πρωτόνια (H⁺) που προέρχονται από τα H₂CO₃ και HCO₃⁻ παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαδικασία αποσάθρωσης των ορυκτών. Η συγκέντρωση των οξυανθρακικών στα ύδατα μπορεί να οφείλεται και στη διάλυση του ασβεστίτη προς Ca²⁺ και HCO₃⁻ (Appello & Postma, 1994, Καλλέργης 2000). Λόγω αυτού του γεγονότος το ιόν αυτό βρίσκεται σε αφθονία στα υπόγεια νερά της περιοχής μελέτης και αποτελεί το ένα από τα κύρια ιόντα που χαρακτηρίζουν το χημικό τύπο νερού της περιοχής.

Είναι γνωστό ότι σε διαλύματα που το pH τους κυμαίνεται από 4,5 μέχρι 8,3 παρατηρείται μείωση του CO₂ και συγχρόνως αύξηση των ιόντων HCO₃⁻, οπότε η αλκαλικότητα βασίζεται σχεδόν αποκλειστικά στα ιόντα αυτά και ονομάζεται αλκαλικότητα οξυανθρακικών (Λαμπράκης, 1991). Με βάση το παραπάνω αφού έγινε προσδιορισμός της αλκαλικότητας και του pH των δειγμάτων προσδιορίστηκε η συγκέντρωση των ιόντων HCO₃⁻.

Οι συγκεντρώσεις των οξυανθρακικών στα υπόγεια νερά της περιοχής κυμαίνονται για τις πηγές από 233 mg/l έως 557 mg/l με μέση τιμή να ανέρχεται σε 376 mg/l (Πίν. 7.1) και από 251 mg/l έως 580 mg/l με μέση τιμή 397 mg/l για τις γεωτρήσεις και τα πηγάδια (Πίν. 7.2).

Στο σχήμα 7.15 που ακολουθεί παρουσιάζεται η κατανομή των οξυανθρακικών της περιοχής. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις εμφανίζονται στα πηγάδια και γεωτρήσεις των χαλαρών ιζημάτων των λεκανών που συσχετίζονται με την παρουσία οργανικής ύλης και ανθρώπινης δραστηριότητας.



Σχήμα 7.15: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής των οξυανθρακικών ιόντων

7.5.7 Χλώριο (Cl⁻)

Το χλώριο (όπως και το νάτριο) εμπεριέχονται στα ορυκτά καρναλίτη ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), χλωρίτη και αλίτη (NaCl). Η ύπαρξή του παρατηρείται επίσης σε απόβλητα βιομηχανικής, αστικής και γεωργικής προέλευσης. Οι συνήθεις ιοντικές συγκεντρώσεις σε μη ρυπασμένα νερά είναι $0,05 \text{ mmol/l} - 2 \text{ mmol/l}$ (Appelo & Postma, 1996).

Η ύπαρξη πολλών ιόντων χλωρίου φανερώνει συνήθως διείσδυση θαλασσινού νερού στον υδροφόρο και συνδέεται άμεσα με υψηλή αλατότητα κι αγωγιμότητα. Η διασπορά άλατος στους δρόμους για το λιώσιμο των πάγων κατά τη διάρκεια του χειμώνα μπορεί επίσης να αυξήσει τη συγκέντρωση του υδροφόρου σε ιόντα Cl⁻ (www.tjclarkinc.com/minerals).

Το Cl⁻ στα πόσιμα χλωριωμένα νερά, μπορεί να αντιδράσει με οργανικές ουσίες που βρίσκονται σε αυτά και να παραχθεί το χλωροφόρμιο CHCl_3 (Μιμίδης, 2004). Το χλωροφόρμιο, το οποίο θεωρείται καρκινογόνος ουσία, βρίσκεται στο χλωριωμένο νερό της βρύσης σε μια μέση τιμή των $82 \mu\text{g/l}$, ποσότητα που δεν θεωρείται επικίνδυνη για την ανθρώπινη υγεία.

Σύμφωνα με την οδηγία 80/778/EE τα ενδεικτικά επίπεδα για τα ιόντα Cl⁻ είναι τα 25 mg/l . Τιμές Cl⁻ μεγαλύτερες των 600 mg/l θεωρούνται τοξικές για την ανθρώπινη υγεία.

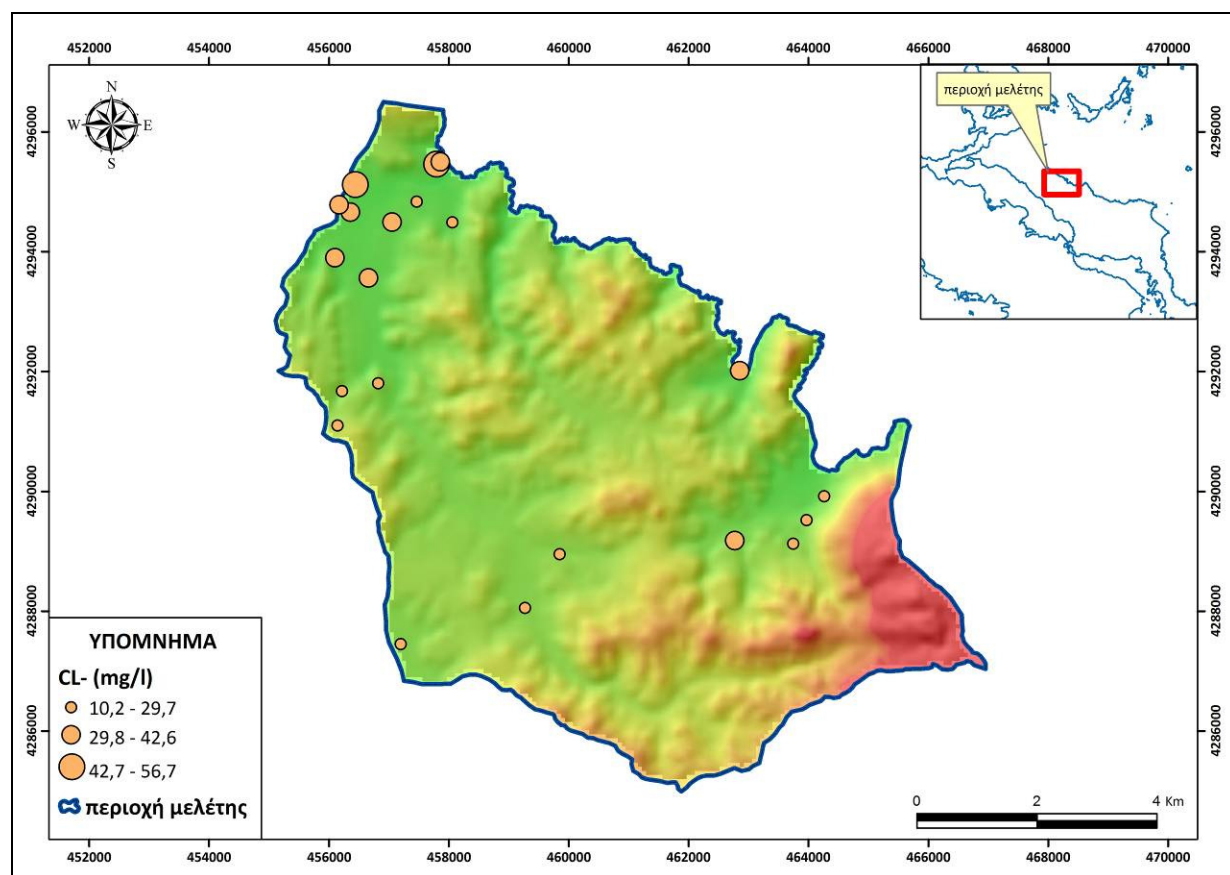
Συγκέντρωση ιόντων χλωρίου πάνω από 100 mg/l δίνει αλμυρή γεύση στο νερό, το καθιστά διαβρωτικό κι ανεπιθύμητο στη βιομηχανική χρήση (Καλλέργης, 2000).

Τα ιόντα χλωρίου οφείλουν την παρουσία τους, εκτός από τη διείσδυση του θαλασσινού νερού προς την ενδοχώρα και από άλλες πηγές ρύπανσης, όπως οι διαρροές υπονόμων, οι αποθέσεις στερεών αποβλήτων σε «χώρους ταφής» και τα νεκροταφεία, όπου το Cl⁻ είναι ο καλύτερος δείκτης τέτοιων ρυπάνσεων (Καλλέργης, 2000).

Στην περιοχή έρευνας οι συγκεντρώσεις των ιόντων χλωρίου κυμαίνονται σε χαμηλά και φυσιολογικά επίπεδα, με βάση τη γεωλογία και τη γεωγραφία της περιοχής.

Κατά την ξηρή περίοδο δειγματοληψίας οι συγκεντρώσεις των ιόντων χλωρίου κυμάνθηκε από 10,2 mg/l έως 49 mg/l, με μέση τιμή 27,7 mg/l για τις πηγές (Πίν. 7.1) και από 15 mg/l έως 53,2 mg/l, με μέση τιμή 31,7 mg/l (Πίν. 7.2) για τις γεωτρήσεις και τα πηγάδια.

Στο σχήμα 7.16 που ακολουθεί οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις παρατηρούνται στα δυτικά της περιοχής μελέτης όπου εντοπίζεται και η παρουσία των οφιολίθων. Αντίθετα οι υψηλότερες συγκεντρώσεις εντοπίζονται στις λεκάνες Κυμασίου και Μαντουδίου που υφίστανται την άμεση επίδραση της θάλασσας.



Σχήμα 7.16: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής των ιόντων χλωρίου

7.5.8 Θειικά (SO₄²⁻)

Τα θειικά ιόντα στα υπόγεια νερά προέρχονται κυρίως από τη διάλυση των ορυκτών όπως ο σιδηροπυρίτης (FeS₂), η γύψος (CaSO₄·2H₂O), ο ανυδρίτης (CaSO₄) κι ο πολυαλίτης [K₂Ca₂Mg(SO₄)₄·2H₂O]. Ανθρωπογενείς παράγοντες όπως η προσθήκη λιπασμάτων, οι εκπομπές καυσαερίων από οχήματα κι εργοστάσια και η οικιακή θέρμανση ή φυσικές δραστηριότητες στην επιφάνεια της γης όπως οι πυρκαγιές δασών και τα ηφαίστεια συμβάλλουν στην αύξηση των θεικών στα υπόγεια νερά.

Γενικά στα φυσικά νερά τα θειικά ιόντα δεν ξεπερνούν τα 300 mg/l. Η υπέρβαση αυτής της συγκέντρωσης οφείλεται είτε στην ύπαρξη γύψου και ανυδρίτη είτε σε φαινόμενα ρύπανσης (Καλλέργης, 2000). Το νερό της βροχής, καθώς κατέρχεται μέσω της ατμόσφαιρας, πέραν του διοξειδίου του άνθρακα CO₂ και του οξυγόνου O₂ εμπλουτίζεται και με άλλα στοιχεία της ατμόσφαιρας όπως τα οξείδια του θείου που προέρχονται απ' τις προαναφερθείσες δραστηριότητες και τελικά απολήγει σε κάποιον υδάτινο αποδέκτη (επιφανειακό ή υπόγειο) αυξάνοντας έτσι τη συγκέντρωση των θεικών ιόντων. Τα θειικά ιόντα απαντώνται στα φυσικά υπόγεια νερά σε συγκεντρώσεις που κυμαίνονται από 0,01 – 1mmol/l (Appelo & Postma, 1996).

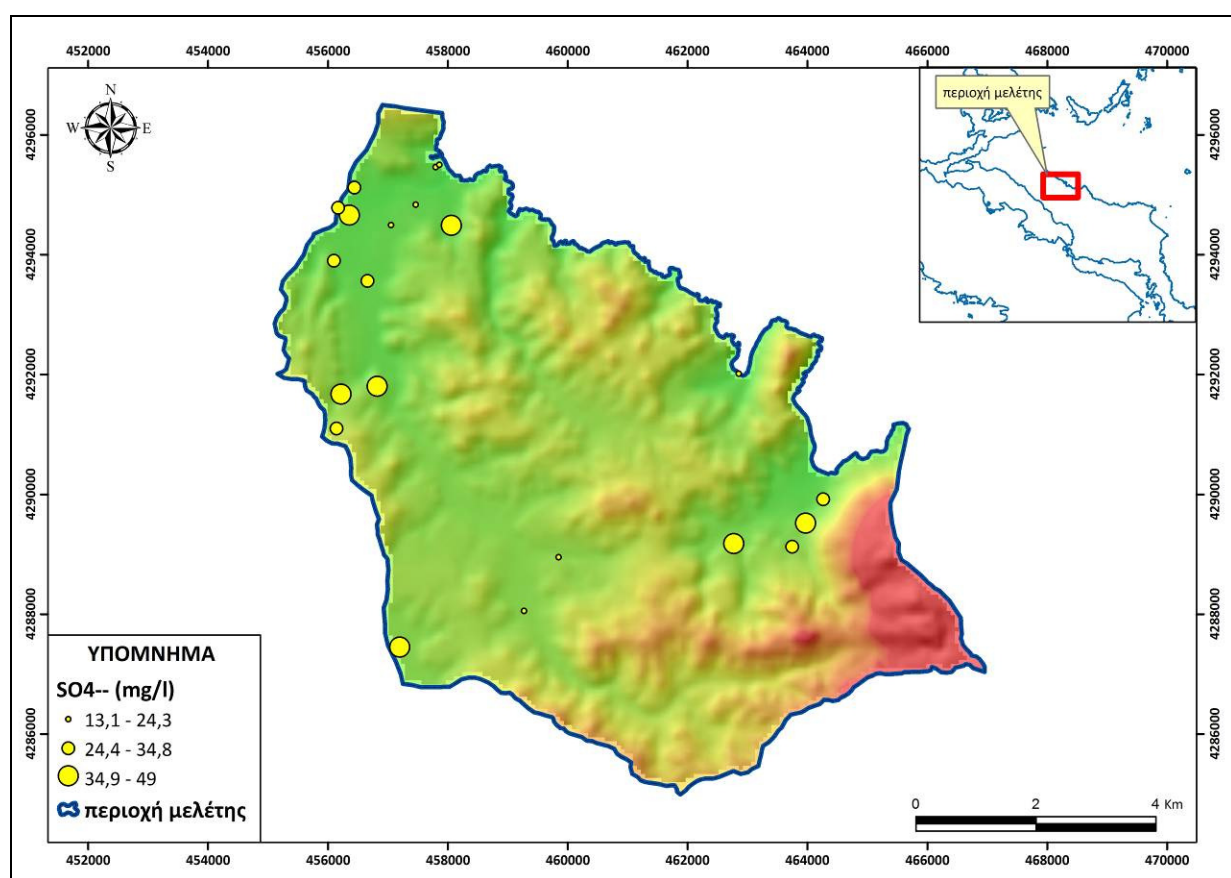
Το θείο είναι ένα αμέταλλο στοιχείο, αρκετά σημαντικό για τον ανθρώπινο οργανισμό εφόσον επιτελεί έναν μεγάλο αριθμό λειτουργιών σχετικά με τις μετατροπές των ενζύμων και τις συνθέσεις των πρωτεϊνών. Το θείο περιέχεται επίσης στην κερατίνη, που είναι απαραίτητη για τη διατήρηση των τριχών και του δέρματος καθώς δίνει δύναμη, σχήμα κι ανθεκτικότητα στα αντίστοιχα κύτταρα (www.tjclarkinc.com/minerals).

Στα πόσιμα νερά, το ενδεικτικό επίπεδο συγκέντρωσης θεικών ιόντων (SO₄²⁻) σύμφωνα με την οδηγία της Ε.Ε. είναι 25 mg/l με ανώτατο όριο τα 250 mg/l. Η Environmental Protection Agency (E.P.A.) δίνει ανώτατο επιτρεπτό όριο πόσιμου νερού τα 400 mg/l. Συγκέντρωση θεικών ιόντων μεγαλύτερη των 250 mg/l κάνει τη χρήση του νερού προβληματική για πόση και βιομηχανική χρήση, ιδιαίτερα για τις βιομηχανίες γάλακτος, πάγου και ζάχαρης. Συγκεντρώσεις μεγαλύτερες των 500 mg/l προσδίδουν πικρή γεύση στο νερό ενώ μεγαλύτερες των 1000 mg/l του δίνουν καθαρικές ιδιότητες (Καλλέργης, 2000).

Η παρουσία θεικών ριζών στα υπόγεια νερά, πολύ πιθανά να προέρχονται εξαιτίας οξειδωτικών φαινομένων, είτε των θειούχων ορυκτών που εμπεριέχονται στα υπερβασικά πετρώματα ή επίσης και με οξειδοαναγωγικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην εδαφική ζώνη από τους μικροοργανισμούς κατά τη διάσπαση της οργανικής ύλης.

Η μέση τιμή της συγκέντρωσης των θειϊκών ιόντων στα υπόγεια νερά (πηγές) ανέρχεται σε 30,3 mg/l, με ελάχιστη τιμή 13 mg/l και μέγιστη 46,5 mg/l, ενώ για τις γεωτρήσεις και τα πηγάδια, η μέση τιμή συγκέντρωσης των θειϊκών ιόντων ανέρχεται σε 30,2 mg/l με εύρος τιμών από 10 mg/l έως 49 mg/l.

Στο σχήματα 7.17 προκύπτει ότι η χωρική κατανομή των θειϊκών ιόντων παρουσιάζει αιχμή τιμών στις καλλιεργούμενες περιοχές του κάμπου Μαντουδίου και Κηρέα. Η παρουσία τους σχετίζεται με την έντονη ανθρωπογενή δραστηριότητα με υψηλότερη τιμή (49 mg/l) να εντοπίζεται στο δείγμα GM1 που βρίσκεται στη λεκάνη του Κηρέα πλησίον του οικισμού Μαντουδίου που φανερώνει τη χρήση λιπασμάτων (θειϊκής αμμωνίας) και στο δείγμα GM8 εντός του οικισμού Μαντουδίου που φανερώνει την ύπαρξη σηπτικών βόθρων.



Σχήμα 7.17: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής των θειϊκών ιόντων

7.5.9 Φωσφορικά (PO_4^{-3})

Η ύπαρξη μεγάλης συγκέντρωσης φωσφόρου στα φυσικά νερά αποδίδεται σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες και μπορεί να προέρχεται από προσθήκη λιπασμάτων στους αγρούς, προσθήκη φυτοφαρμάκων στους αγρούς, διαβρωμένο έδαφος, ελαιοχρωματισμούς, σηπτικούς βόθρους, σκουπίδια, σαπούνια κι απορρυπαντικά, λάδια μηχανών και λοιπά λιπαντικά, κτηνοτροφικά απόβλητα (www.nhlakes.org/edbrochures/phosphoruspollution.htm).

Η τροφοδότηση των υπόγειων νερών με λύματα μη στεγανών σηπτικών βόθρων θεωρείται η κύρια αιτία ρύπανσης των υπόγειων νερών με υπερβολική ποσότητα φωσφόρου. Τα λύματα των σηπτικών βόθρων θεωρούνται ότι περιέχουν 10 – 30 mg/l PO_4^{3-} (Sikora *et al*, 1976). Η προσθήκη υπερβολικών ποσοτήτων φωσφορικών λιπασμάτων δεν θεωρείται ότι συμβάλλει σημαντικά στην ρύπανση του υδροφόρου με φωσφορικά ιόντα, καθώς ο φώσφορος είναι επιρρεπής στην απώλεια μέσω επιφανειακής απορροής κι όχι μέσω έκπλυσης προς τα κατώτερα στρώματα (Κερκίδης, 2004, www.extension.umn.edu/environment/BD282.html).

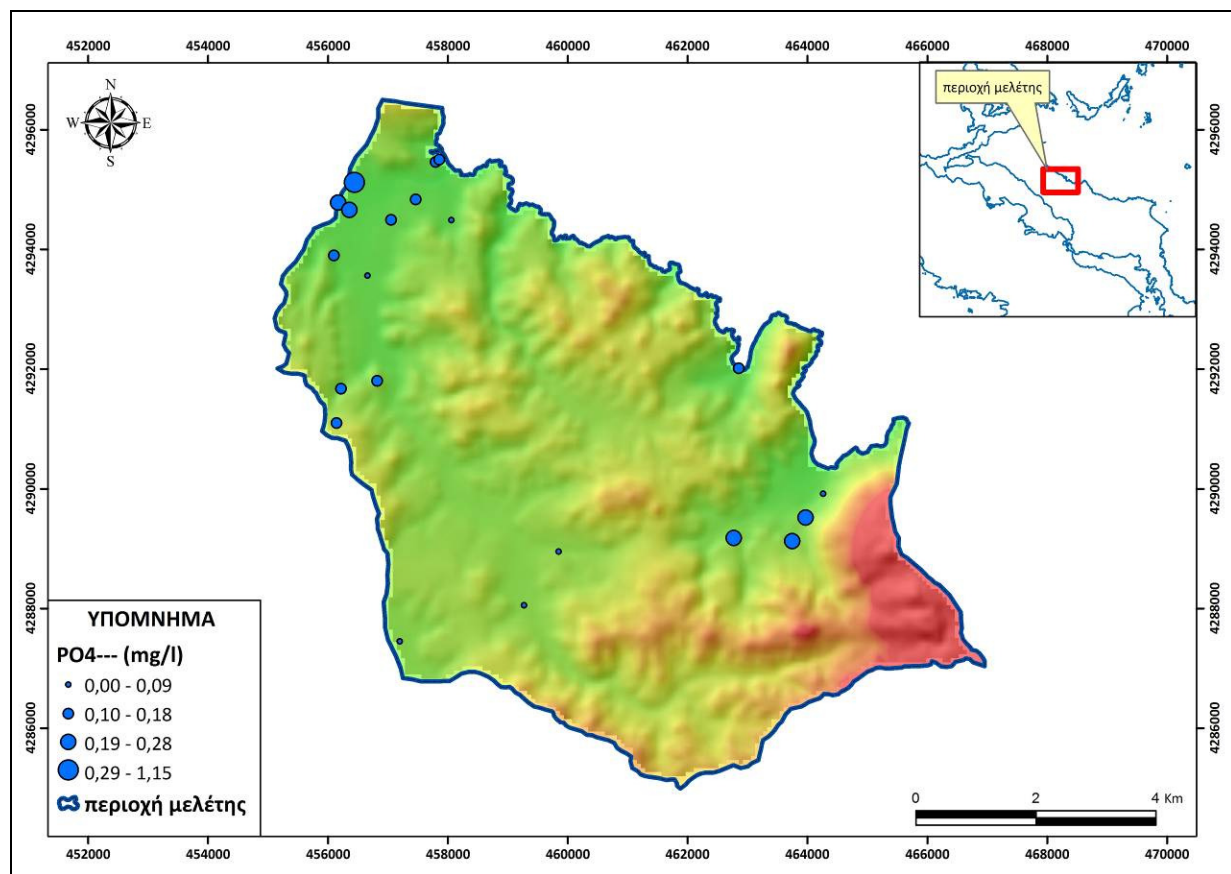
Οι συνήθεις ιοντικές συγκεντρώσεις PO_4^{3-} που απαντώνται στα φυσικά υπόγεια νερά κυμαίνονται από 0 – 0,02 mmol/l, προερχόμενες κυρίως από οργανική ύλη ή φωσφορικά πετρώματα (Appelo & Postma, 1996). Ο φώσφορος είναι ένα απαραίτητο στοιχείο που βρίσκεται σε όλα τα κύτταρα στο ανθρώπινο σώμα. Περιέχεται κατά κύριο λόγο στα κόκαλα (σε ποσοστό 85%), στους μύες σε ποσοστό 14% καθώς επίσης και στις κυτταρικές μεμβράνες (www.tjelarkinc.com/minerals). Η έλλειψη φώσφορου αν και σπάνια υφίσταται στην ανθρώπινη διατροφή, προκαλεί αναπνευστικές, μυϊκές, αιματολογικές, νευρολογικές, καρδιακές και νεφρικές δυσλειτουργίες (Allen and Wood, 1994).

Σύμφωνα με την οδηγία της Ε.Ε. το ανώτατο όριο της συγκέντρωσης του P_2O_5 είναι 5 mg/l ($\approx 6,69$ mg/l PO_4^{3-}) με ενδεικτική τιμή γύρω στα 0,4 mg/l ($\approx 0,54$ mg/l PO_4^{3-}).

Στην υπό μελέτη περιοχή οι τιμές των φωσφορικών ιόντων κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα, η παρουσία τους σχετίζεται με την έντονη γεωργική δραστηριότητα στη λεκάνη Μαντουδίου και τη χρήση λιπασμάτων καθώς επίσης με την ύπαρξη σηπτικών βόθρων της κατοικημένης περιοχής (Σχ. 7.18).

Η μέση τιμή των ιόντων φωσφόρου ανέρχεται σε 0,27 mg/l με εύρος τιμών να κυμαίνεται από 0,07 mg/l έως 1,15 mg/l (πηγές) και για τις γεωτρήσεις και τα πηγάδια η αντίστοιχες τιμές κυμαίνονται από 0,06 mg/l έως 0,28 mg/l.

Σύμφωνα με τη χωρική κατανομή των φωσφορικών ιόντων (Σχ. 7.18) διαπιστώνεται ότι αιχμή των τιμών συγκέντρωσης φωσφορικών ιόντων εντοπίζονται κυρίως στις καλλιεργούμενες περιοχές του κάμπου Μαντουδίου.



Σχήμα 7.18: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής των φωσφορικών ιόντων

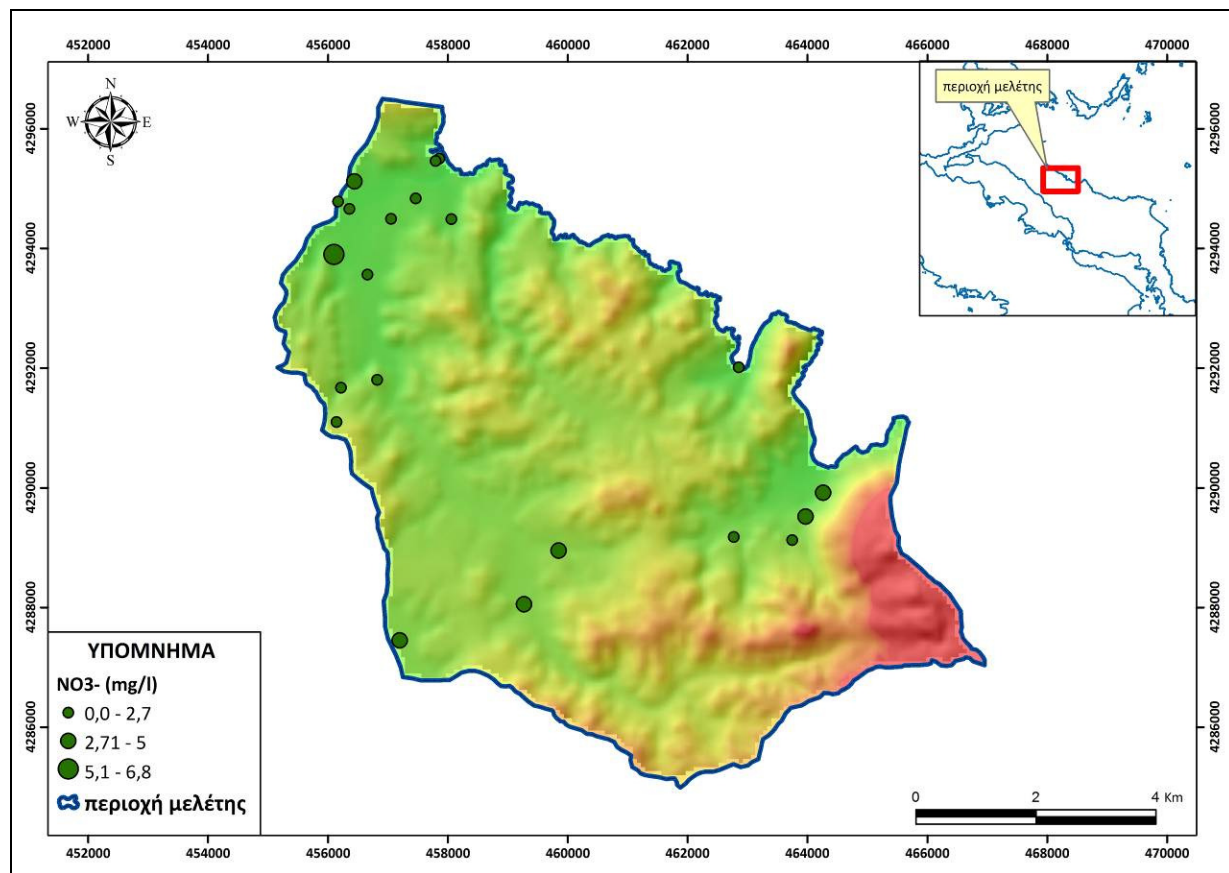
7.5.10 Άζωτο (N)

Στα υπόγεια νερά το άζωτο απαντάται με τη μορφή νιτρικών ιόντων (NO_3^-), νιτρωδών ιόντων (NO_2^-) και αμμωνία (NH_3^+) ή αμμώνιο (NH_4^+). Όταν η συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων υπερβεί τα 45 mg/l, τότε μπορεί να προκαλέσει μεθαιμοσφαιρινεμία στα βρέφη, ενώ περιεκτικότητα πάνω από 100 mg/l έχει αναφερθεί ότι δημιουργεί διαταραχές στη φυσιολογία του οργανισμού (Καλλέργης, 1986). Η κύρια πηγή προέλευσης του αζώτου είναι από εντατικές εφαρμογές αζωτούχων λιπασμάτων, εντούτοις, πηγές ρύπανσης θεωρούνται οι διαρροές από σηπτικούς βόθρους ή νεκροταφεία με τη μορφή κυρίως του αμμώνιου (NH_4^+).

Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO) η ανώτατη αποδεκτή συγκέντρωση αμμωνιακών ιόντων στα πόσιμα νερά είναι 0,05 mg/l, ενώ η ΕΕ θέτει σαν ανώτατο όριο τα 0,5 mg/l.

Στο σχήμα 7.19 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των νιτρικών ιόντων όπου διαπιστώνουμε ότι οι αιχμές των τιμών των νιτρικών ιόντων εντοπίζονται στα βορειοδυτικά της περιοχής έρευνας πλησίον του οικισμού Μαντουδίου, όπου αναπτύσσεται ο κύριος οικιστικός και αγροτικός ιστός της περιοχής. Αντίστοιχα οι μικρότερες τιμές συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων παρατηρούνται κυρίως στα νοτιοδυτικά της περιοχής μελέτης, κάτι που είναι

φυσιολογικό αφού στην περιοχή αυτή αναπτύσσεται το φυσικό περιβάλλον χωρίς κάποια ιδιαίτερη ανθρώπινη δραστηριότητα. Οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων κυμαίνονται από 1,8 mg/l έως 3,9 mg/l, με μέση τιμή 2,83 mg/l (Πίν. 7.1) και από 1,23 mg/l έως 15,97 mg/l, με μέση τιμή 4,21 mg/l για τις γεωτρήσεις και τα πηγάδια (Πίν. 7.2).



Σχήμα 7.19: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής των νιτρικών ιόντων

7.6 Μεταλλικά ιχνοστοιχεία

7.6.1 Σίδηρος και μαγγάνιο (Fe - total, Mn²⁺)

Ο σίδηρος και το μαγγάνιο είναι δύο κατιόντα που συσχετίζονται μεταξύ τους, λόγω της κοινής τους προέλευσης. Προέρχονται κυρίως από ιζήματα που περιέχουν οξειδία και υδροξειδία των στοιχείων αυτών. Επίσης μπορεί να έχουν ανθρωπογενή προέλευση, αφού έχει αναφερθεί ρύπανση, με αυτά τα ιόντα από σκουπιδότοπους (Γεωργαλάς, 1996). Συγκεκριμένα, ο ερευνητής αναφέρει ότι απόβλητα που προέρχονται από ξύλινα κιβώτια ή γενικά από ξύλο, εμπλουτίζουν τα «εκκρίματα» σε Fe και Mn (Sweet – Fetrow, 1975). Η υπερβολική λήψη Mn²⁺ δεν οφείλεται τόσο στη διατροφή όσο σε έκθεση σε βιομηχανικά απόβλητα (για παράδειγμα εισπνοή σκόνης Mn²⁺ από μεταλλωρύχους) ή από κατανάλωση ρυπασμένου νερού

πηγής. Τα συμπτώματα της τοξικότητας του Mn^{+2} αφορούν νευρικές διαταραχές και πρόκληση σχιζοφρένειας (www.tjclarkinc.com/minerals).

Γενικά πάντως, τα ιόντα αυτά απαντούν σε κλειστές λεκάνες, όπου ο χρόνος παραμονής του νερού μέσα στα ιζήματα είναι αρκετά μεγάλος. Η παρουσία τους γίνεται αισθητή σε αναγωγικά, κυρίως, περιβάλλοντα όπου το δυναμικό οξειδοαναγωγής είναι χαμηλό έως και αρνητικό.

Το Mn^{+2} είναι ένα απαραίτητο ιχνοστοιχείο τόσο στην ανάπτυξη του ανθρώπου όσο και στην ανάπτυξη των φυτών. Σε μεγάλες συγκεντρώσεις παρουσιάζει τοξικότητα γι αυτό κι η ΕΕ το συγκαταλέγει στις ανεπιθύμητες ουσίες.

Στον ανθρώπινο οργανισμό το μαγγάνιο διασπά τα αμινοξέα για την παραγωγή ενέργειας απαραίτητης για το μεταβολισμό της βιταμίνης Β1 και της βιταμίνης Ε, παίζει καταλυτικό ρόλο στη διάσπαση των λιπών και της χοληστερίνης, βοηθά στην καταπράυνση των νεύρων και του εγκεφάλου και θεωρείται απαραίτητο στην ανάπτυξη των οστών. Η μέση συνιστώμενη δόση είναι 2 – 5 mg/day για ενήλικες αλλά μια διατροφή βασισμένη σε λαχανικά ξεπερνά αυτά τα όρια αγγίζοντας τα 10 – 18 mg ημερησίως.

Η ανεπάρκεια μαγγανίου προκαλεί ανωμαλίες στη λειτουργία του εγκεφάλου και στην ανάπτυξη των οστών, ενώ σε ακραίες περιπτώσεις μπορεί να οδηγήσει σε οστεοπόρωση, κώφωση, παράλυση και πεπτικά προβλήματα.

Το μαγγάνιο είναι σημαντικό στοιχείο των φυτών και βρίσκεται στην οργανική ύλη σε υψηλές συγκεντρώσεις. Οι μικροοργανισμοί αναλαμβάνουν τον καταλυτικό ρόλο κατά την διάλυση της οργανικής ύλης, συμβάλλοντας στην οξείδωση και αναγωγή του μαγγανίου. Στα υπόγεια φυσικά νερά οι συγκεντρώσεις του μαγγανίου είναι πολύ χαμηλές, συνήθως σε ίχνη <0,05 mg/l και γενικά δεν ξεπερνούν τα 0,2 mg/l. Η ΕΕ καθορίζει σαν ενδεικτικό επίπεδο παρουσίας του στο πόσιμο νερό τα 20 μg/l, ενώ σαν ανώτατη παραδεκτή συγκέντρωση είναι τα 50 μg/l.

Στο σχήμα 7.20 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των ιόντων μαγγανίου. Διαπιστώνεται ότι η παρουσία αυτών των μεταλλικών ιχνοστοιχείων εμφανίζεται κυρίως εντός της κύριας ανάπτυξης του οικιστικού ιστού της περιοχής Μαντουδίου (Σχ. 7.20) με διάχυση του ρύπου κατά μήκος των υπόγειων νερών των χαλαρών σχηματισμών της βιομηχανικής ζώνης του Μαντουδίου (ορυχεία λευκόλιθου). Στατιστικά η μέση τιμή συγκέντρωσης μαγγανίου στις πηγές ανέρχεται σε 10 μg/l, με εύρος τιμών από 2 μg/l έως 24 μg/l (Πίν. 7.1). Στα πηγάδια και στις γεωτρήσεις η μέση τιμή συγκέντρωσης του μαγγανίου ανέρχεται σε 14 μg/l, με διακύμανση τιμών από 1 μg/l έως 89 μg/l. Από υπαίθρια παρατήρηση εντοπίστηκε πλησίον των σημείων που εμφανίζουν τις υψηλές συγκεντρώσεις, η λειτουργία Χώρου Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Απορριμμάτων (Σχ. 7.22).

Ο σίδηρος είναι το τέταρτο πιο άφθονο κατά βάρος στοιχείο που απαντάται στα πετρώματα και τα εδάφη του στερεού φλοιού της γης. Βρίσκεται κυρίως στα σκουρόχρωμα ορυκτά, όπως στους πυρόξενους, αμφιβόλους, βιοτίτη, μαγνητίτη Fe_3O_4 , σιδηροπυρίτη FeS_2 , στους γρανάτες, ολιβίνες, στο επίδοτο κλπ.

Στα φυσικά νερά, οι συνήθεις συγκεντρώσεις στις οποίες απαντάται ο Fe^{2+} είναι 0 - 0,5 mmol/l, προερχόμενες από διάλυση πυριτικών πετρωμάτων, σιδηρίτων, υδροξειδίων και σουλφιδίων (Appelo & Postma, 1996). Ο σίδηρος είναι πιο ευδιάλυτος σε όξινα νερά με $\text{pH} < 4$, και αν ξεπεραστεί το όριο 0,2 mg/l που θέτει η ΕΕ για τα πόσιμα νερά, το νερό γίνεται ακατάλληλο όχι μόνο για πόση αλλά και για τις περισσότερες βιομηχανικές χρήσεις (Καλλέργης, 2000).

Στα φυσικά νερά απαντάται κυρίως στην δισθενή μορφή του και λιγότερο στην τρισθενή μορφή. Διαλυτές μορφές σιδήρου εμφανίζονται στα φυσικά νερά με χαμηλό pH. Σε ορισμένες περιπτώσεις τα υπόγεια φυσικά νερά, νερά λιμνών και βαλτώδη νερά στερούνται οξυγόνου και επομένως μπορούν να περιέχουν ιόντα Fe^{2+} . Όταν τα νερά αυτά οξυγονωθούν, ο δισθενής σίδηρος οξειδώνεται προς τρισθενείς ενώσεις και κατακρημνίζεται. Γενικά στα επιφανειακά νερά ο σίδηρος βρίσκεται στην τρισθενή μορφή του.

Στα καλά αεριζόμενα νερά παρουσιάζονται σπάνια υψηλές συγκεντρώσεις. Όταν όμως επικρατούν αναγωγικές συνθήκες καθώς και με απουσία ανθρακικών και θειούχων αλάτων, μπορούν να εμφανιστούν υψηλές συγκεντρώσεις ενώσεων δισθενούς σιδήρου. Η παρουσία του σιδήρου στα υπόγεια φυσικά νερά που σπάνια ξεπερνά τα 1 mg/l, αποδίδεται στην διάλυση των πετρωμάτων και μεταλλευμάτων που περιέχουν σίδηρο, σε επιφανειακές ανθρωπογενείς επιδράσεις κλπ.

Η κύρια πηγή ρύπανσης του πόσιμου νερού από τον σίδηρο, είναι η διάβρωση σιδήρου που απαιτεί πολύ μικρό ποσό οξυγόνου. Εξαιτίας αυτής της εύκολης διάβρωσης του σιδήρου, κατά την οποία ιόντα σιδήρου ελευθερώνονται στο νερό, αποφεύγεται η χρήση σιδηροσωλήνων στο δίκτυο παροχής πόσιμου νερού.

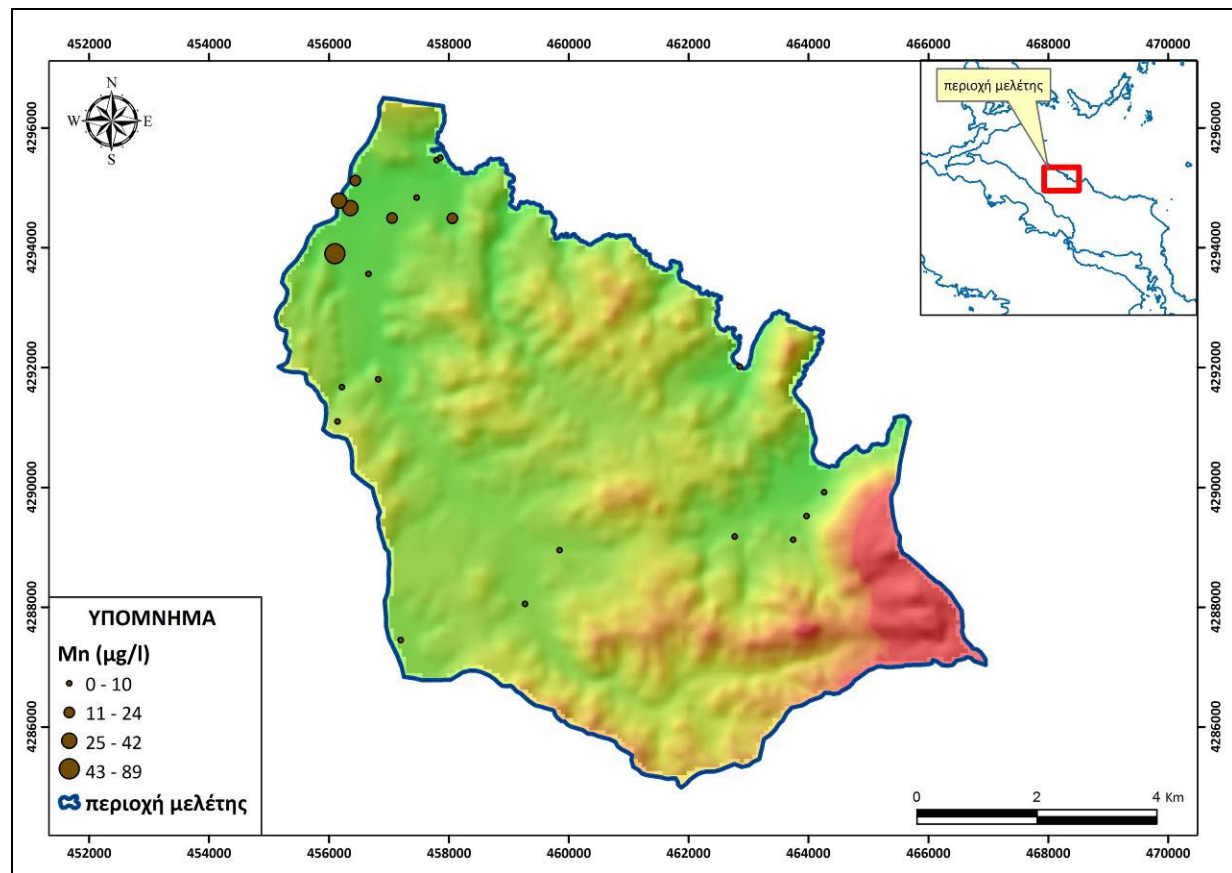
Ο σίδηρος είναι ένα απαραίτητο ιχνοστοιχείο για τον ανθρώπινο οργανισμό με βασική λειτουργία τη μεταφορά οξυγόνου και τη συμμετοχή στη δημιουργία πρωτεϊνών που μεταφέρουν οξυγόνο, όπως η αιμογλοβίνη στο αίμα κι η μυογλοβίνη στους μύες. Ο σίδηρος συγκεντρώνεται σε συγκεκριμένα όργανα του σώματος όπως στο μυελό των οστών, το ήπαρ και το σπλάι (www.tjclarkinc.com/minerals).

Η συνιστώμενη δόση σιδήρου ανέρχεται σε 7 – 14 mg/day. Το μέγιστο ποσοστό του εισερχόμενου σιδήρου στον οργανισμό αποβάλλεται και μόνο περίπου 10% αφομοιώνεται. Ωστόσο, η υπερβολική κατανάλωση σιδήρου μπορεί να οδηγήσει στην ασθένεια της

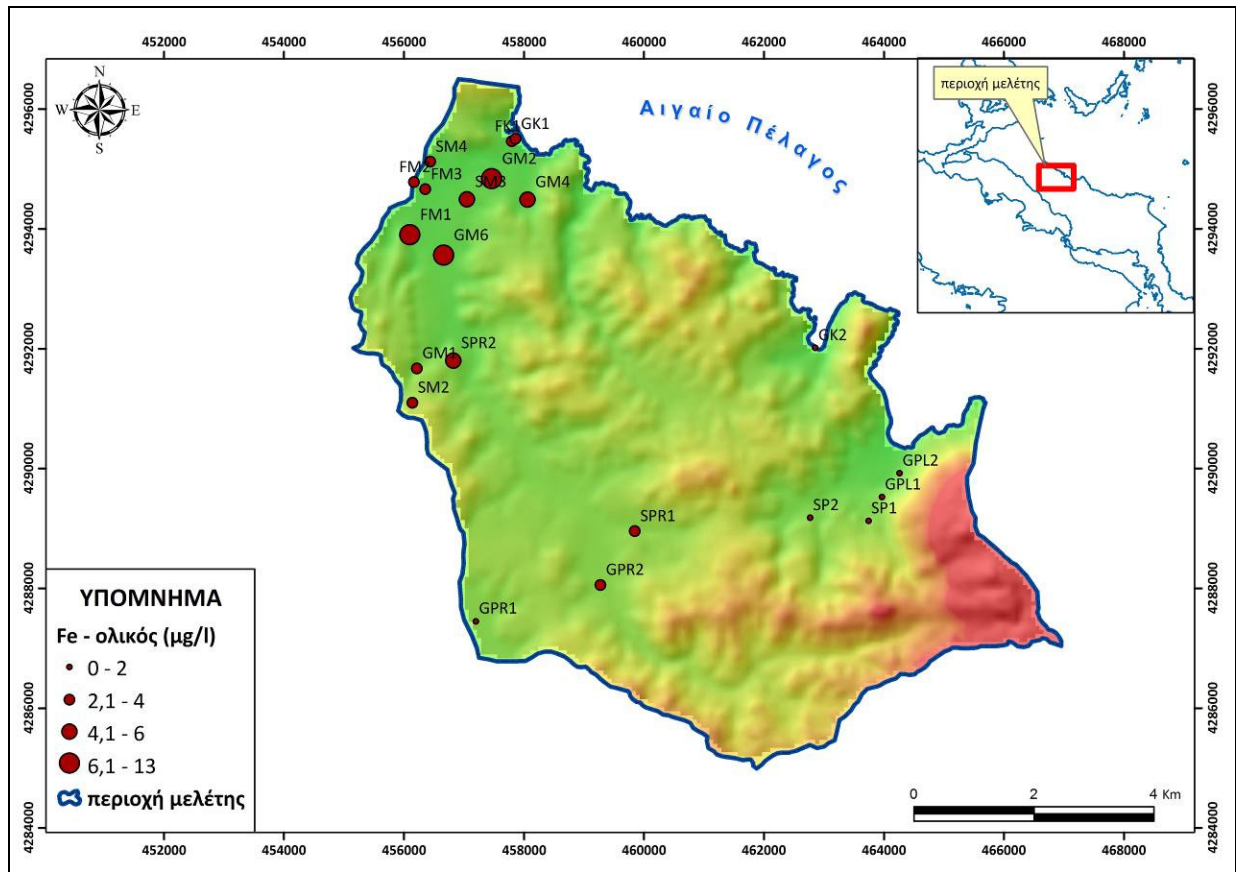
αιμοχρωμάτωσης η οποία προσβάλλει 1 στους 300 Ευρωπαίους. Επίσης, εξετάζεται από επιστήμονες η υπόθεση να συνδέονται τα υψηλά αποθέματα σιδήρου με χρόνιες ασθένειες όπως ο καρκίνος κι η καρδιακή ανεπάρκεια (www.tjclarkinc.com/minerals). Η έλλειψη σιδήρου κάνει τον ανθρώπινο οργανισμό αδύναμο να παράγει νέα ερυθρά αιμοσφαίρια με συνέπεια τη δημιουργία σιδηροπενικής αναιμίας.

Συνήθως οι συγκεντρώσεις του σιδήρου στο πόσιμο νερό δεν ξεπερνούν τα 0,3 mg/l. Η ποσότητα αυτή είναι σημαντικά μικρότερη από την ποσότητα που προσλαμβάνουμε από τις τροφές μας. Το ανώτατο επιτρεπτό όριο παρουσίας του σιδήρου στο πόσιμο νερό είναι τα 0,2 mg/l (=200 µg/l) και σαν ενδεικτική τιμή είναι τα 0,05 mg/l (Οδηγία ΕΕ).

Σύμφωνα με τη χωρική κατανομή των ιόντων σιδήρου (Σχ. 7.21) διαπιστώνεται ότι η παρουσία αυτών των μεταλλικών ιχνοστοιχείων εμφανίζεται, όπως και τα ιόντα μαγγανίου, εντός της κύριας ανάπτυξης του οικιστικού ιστού της περιοχής Μαντουδίου, με αιχμή τιμών εντός των χαλαρών σχηματισμών της βιομηχανικής ζώνης του Μαντουδίου (ορυχεία λευκόλιθου). Η μέση τιμή συγκέντρωσης σιδήρου στις πηγές (Πίν. 7.1) ανέρχεται σε 4,4 µg/l, με εύρος τιμών από 2 µg/l έως 10 µg/l. Στα πηγάδια και στις γεωτρήσεις η μέση τιμή συγκέντρωσης του σιδήρου (Πίν. 7.2) ανέρχεται σε 5,13 µg/l, με διακύμανση τιμών από 2 µg/l έως 13 µg/l (Σχ. 7.21).



Σχήμα 7.20: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής των ιόντων μαγγανίου



Σχήμα 7.21: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής των ιόντων σιδήρου



Σχήμα 7.22: Εντοπισμός θέσης ΧΑΔΑ εντός του οικιστικού ιστού Μαντουδίου

7.6.2 Ψευδάργυρος και Χαλκός (Zn^{2+} , Cu^{2+})

Ο ψευδάργυρος είναι ένα ιδιαίτερα διαδεδομένο στοιχείο της λιθόσφαιρας. Απαντάται κυρίως στα μικτά θειούχα κοιτάσματα μαζί με τον μόλυβδο, τον σίδηρο, το κάδμιο και τον χαλκό. Τα πιο συνήθη ορυκτά είναι ο σφαλερίτης (ZnS), ο ζιγκίτης (ZnO) και ο σμιθωνίτης ($ZnCO_3$). Τα οξείδια, τα ανθρακικά και τα θειούχα άλατα του ψευδαργύρου είναι ελαφρώς διαλυτά στο νερό, ενώ τα πολύ διαλυτά χλωριούχα και θειικά άλατα του ψευδαργύρου τείνουν να υδρολύονται για να σχηματίσουν υδροξείδιο του ψευδαργύρου και ανθρακικό ψευδάργυρο. Αποτέλεσμα αυτού είναι οι πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις ψευδαργύρου στα φυσικά νερά.

Στα υπόγεια νερά η συγκέντρωση του ψευδαργύρου κυμαίνεται από 0 - 0,22 mg/l. Σε πηγές μεταλλοφόρων περιοχών παρατηρούνται συγκεντρώσεις μέχρι 3,4 mg/l, και στα όξινα νερά των μεταλλείων μέχρι 2412 mg/l. Στο επεξεργασμένο πόσιμο νερό ο ψευδάργυρος κυμαίνεται από 0,01 - 1,0 mg/l. Η παρουσία υψηλότερων τιμών συνδέεται πάντοτε με την χρήση των γαλβανισμένων σωλήνων του δικτύου ύδρευσης (DVWK, 1998). Η Ε.Ε. συγκαταλέγει τον ψευδάργυρο στην κατηγορία των ανεπιθύμητων ουσιών και δίνει σαν ανώτατη παραδεκτή συγκέντρωση ψευδαργύρου στο πόσιμο νερό τα 100 µg/l.

Είναι απαραίτητο ιχνοστοιχείο τόσο για τα φυτά όσο και για τον άνθρωπο. Συγκεντρώνεται σε μεγάλες ποσότητες σε συγκεκριμένες περιοχές του εγκεφάλου, του παγκρέατος και των επινεφριδίων αδένων αλλά είναι παρόν σε όλα τα κύτταρα και κυρίως στον πυρήνα. Περισσότερα από 60 ένζυμα χρειάζονται την παρουσία ψευδαργύρου για τη δραστηριότητά τους, συμπεριλαμβανομένων των πολυμερασών RNA.

Συνίσταται κατανάλωση 15 mg Zn/day για άντρες και 12 mg/day για γυναίκες. Η ανεπάρκεια Zn προκαλεί έμφραγμα του μυοκαρδίου, καθυστέρηση της ανάπτυξης του ανθρώπου και αλλεργίες κατά την παιδική ηλικία. Αντίθετα, η υπερέπαρκεια Zn θεωρείται τοξική και προκαλεί γαστρικά προβλήματα, ναυτία, ζαλάδες και τάσεις για εμετό (www.tjclarkinc.com/minerals).

Στα υπόγεια νερά της περιοχής μελέτης (πηγές) οι συγκεντρώσεις ψευδαργύρου κυμαίνονται από 4 µg/l έως 12 µg/l, με μέση τιμή 7,75 µg/l (Πίν. 7.1). Αντίστοιχα στις γεωτρήσεις και τα πηγάδια οι συγκεντρώσεις ψευδαργύρου παρουσιάζουν ένα εύρος τιμών που δε ξεπερνά τα 15 µg/l, με μέση τιμή 6,73 µg/l (Πίν. 7.2).

Ο χαλκός αποτελεί ένα σύννηθες στοιχείο της λιθόσφαιρας. Εμπεριέχεται σε μεγάλο αριθμό ορυκτών, μικτών θειούχων, οξειδίων και υδροξυλιούχων ανθρακικών. Τα πιο γνωστά ορυκτά είναι ο κυπρίτης (Cu_2O), ο χαλκοσίνης (Cu_2S), ο μαλαχίτης ($CuCO_3$) $Cu(OH)_2$ κλπ. Ο χαλκός βρίσκεται στα μαγματικά πετρώματα με συγκεντρώσεις 97,4 mg/kg, στους ψαμμίτες με 15,4

mg/kg, στους αργίλους με 44,7 mg/kg, στα ανθρακικά πετρώματα με 4,5 mg/kg και στους εβαπορίτες με 2,0 mg/kg (Matthess, 1973).

Η παρουσία του χαλκού στο νερό εξαρτάται από το pH και το Eh. Στα υπόγεια φυσικά νερά η συγκέντρωση του χαλκού βρίσκεται πολύ κάτω του 1,0 mg/l. Στο πόσιμο νερό οι συγκεντρώσεις κυμαίνονται μεταξύ 0,01 mg/l – 0,5 mg/l με ανώτατο επιτρεπτό όριο απ' την ΕΕ 0,10 mg/l. Η ΕΡΑ δίνει πιο ελαστικές τιμές με ενδεικτική τιμή 1,3 mg/l. Στο νερό ύδρευσης παρατηρούνται συχνά υψηλές συγκεντρώσεις χαλκού (1,2 mg/l) λόγω της διάβρωσης των χρησιμοποιούμενων χαλκοσωλήνων. Στο θαλασσινό νερό η συγκέντρωση ανέρχεται σε 0,0009 mg/l (Matthess, 1973).

Στα θερμομεταλλικά νερά και σε μεταλλοφόρες περιοχές παρατηρούνται συγκεντρώσεις μέχρι 2,0 mg/l, σε πετρελαιοφόρες περιοχές οι τιμές φθάνουν τα 3,5 mg/l και στα όξινα νερά των ορυχείων απαντώνται τιμές μέχρι και 45.633 mg/l.

Ο χαλκός είναι ένα απαραίτητο ιχνοστοιχείο τόσο στην ανθρώπινη διατροφή όσο και στην ανάπτυξη των φυτών και των ζώων. Θεωρείται ότι αποτελεί μέρος των ενζύμων και των πρωτεϊνών που βοηθούν τις βιοχημικές μετατροπές σε κάθε κύτταρο. Το μέσο επίπεδο συγκέντρωσης χαλκού στο ανθρώπινο σώμα κυμαίνεται μεταξύ 50 – 120 mg με τη μέγιστη ποσότητα να βρίσκεται στο ήπαρ. Η μέση συνιστώμενη δόση για τον άνθρωπο είναι 1,5 - 3,0 mg Cu/day (www.tjclarkinc.com/minerals).

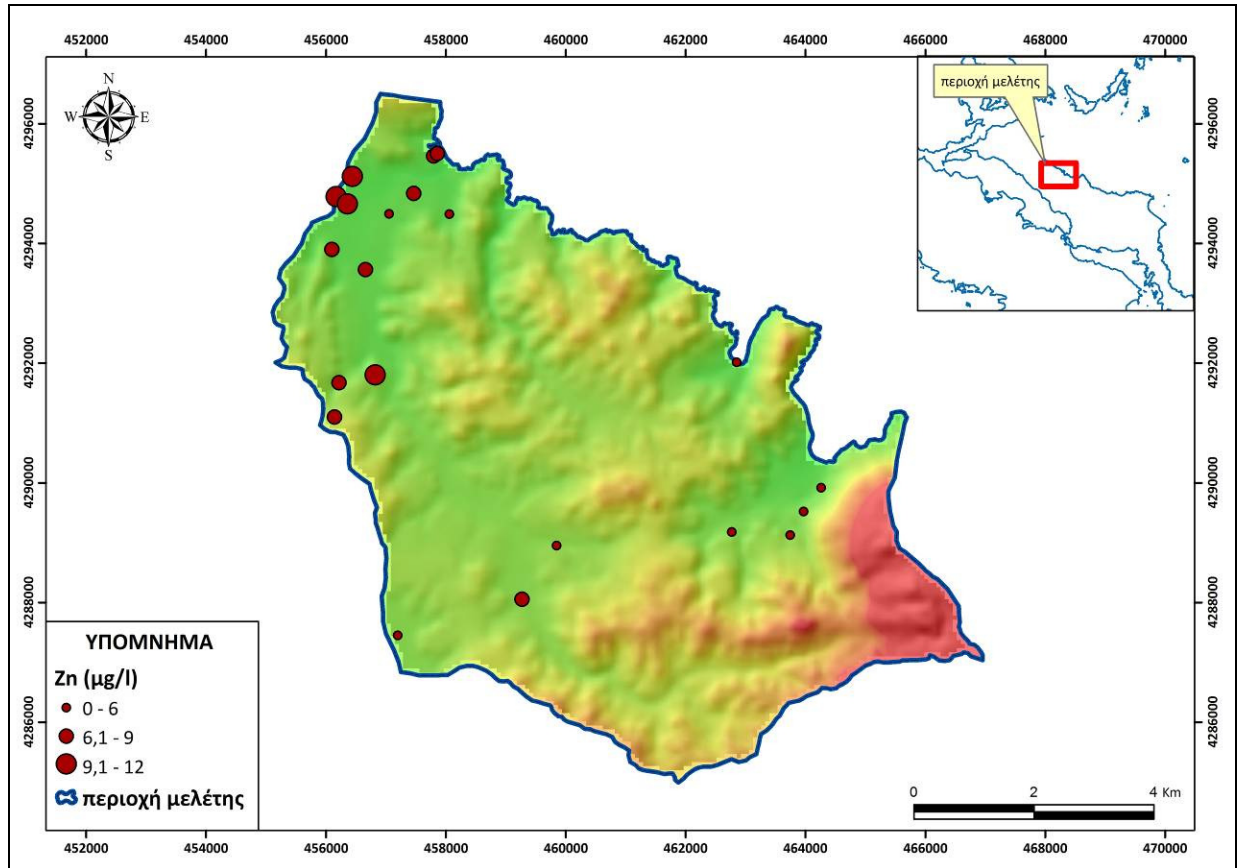
Η ανεπάρκεια χαλκού προκαλεί αναιμία, υψηλά επίπεδα χοληστερίνης, τριγλυκεριδίων και γλυκόζης, μείωση του οξυγόνου των κυττάρων, δερματικά προβλήματα και πρήξιμο στα πόδια. Η χρόνια ανεπάρκεια χαλκού μπορεί να προκαλέσει καρδιακά προβλήματα.

Αντίθετα, η πρόσληψη υπερβολικών ποσοτήτων Cu θεωρείται τοξική κι ιδιαίτερα επικίνδυνη και χρειάζεται περίπου 3 μήνες για να επανέλθουν τα επίπεδα χαλκού στο σώμα στα φυσιολογικά επίπεδα. Τα συμπτώματα της υπερβολικής λήψης Cu είναι βλάβη στο συκώτι και τον εγκέφαλο, όργανα στα οποία υπερσυσσωρεύεται, ναυτία, πονοκέφαλοι, αυξημένοι χτύποι καρδιάς, βλάβη στα νεφρά, αναιμία, τριχόπτωση στις γυναίκες. Τα ψυχολογικά συμπτώματα είναι συμπτώματα αυτισμού, κατάθλιψη, παραισθήσεις, υπερδραστηριότητα, αϋπνία, παράνοια, ψύχωση, συμπτώματα σχιζοφρένειας, υπερδιέγερση και απόσπαση απ' την πραγματικότητα.

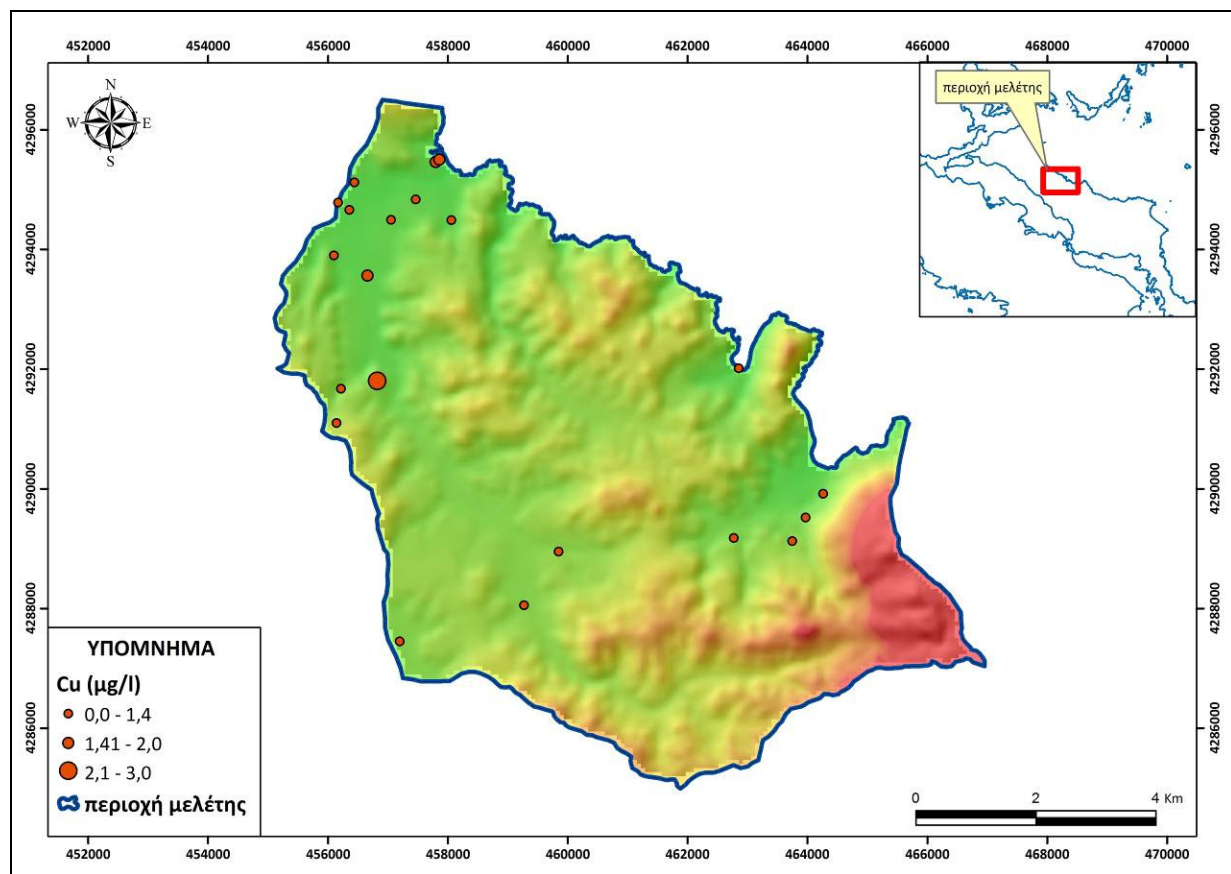
Η υπερβολική λήψη Cu απ' τον άνθρωπο μπορεί να οφείλεται σε μεγάλη ποσότητα οιστρογόνων από κατανάλωση κρέατος αντισυλληπτικά χάπια, κάπνισμα, υπερβολική ποσότητα Cu στο πόσιμο νερό, χαμηλά επίπεδα Zn^{2+} και Mn^{2+} (www.tjclarkinc.com/minerals).

Στην περίπτωση του χαλκού οι τιμές στην περιοχή μελέτης είναι αυξημένες αλλά δεν ξεπερνούν τα ανώτατα επιτρεπτά όρια που έχει θεσπίσει η Ε.Ε. με την οδηγία 2000/60.

Συγκεκριμένα η μέση τιμή περιεκτικότητας σε χαλκό για τις πηγές είναι 1,25 $\mu\text{g/l}$, με εύρος τιμών από 1 έως 3 $\mu\text{g/l}$ (Πίν. 7.1) και για τις γεωτρήσεις και τα πηγάδια η μέση τιμή περιεκτικότητας σε χαλκό ανέρχεται σε 1,17 $\mu\text{g/l}$ με εύρος τιμών από 0 $\mu\text{g/l}$ έως 3 $\mu\text{g/l}$ αντίστοιχα (Πίν. 7.2).



Σχήμα 7.23: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής των ιόντων ψευδαργύρου



Σχήμα 7.24: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής των ιόντων χαλκού

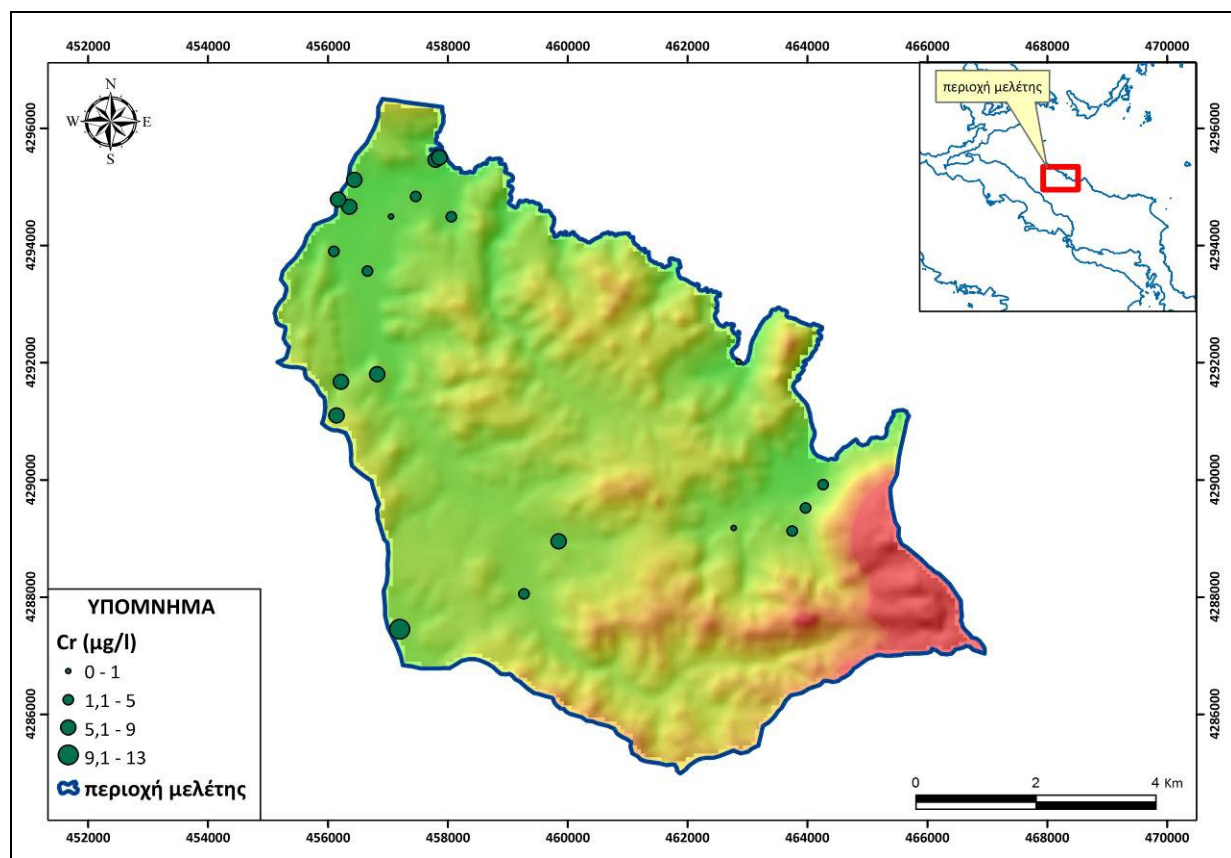
7.6.3 Χρώμιο ολικό (Cr – total)

Το τρισθενές χρώμιο είναι απαραίτητο ιχνοστοιχείο για το μεταβολισμό των σακχάρων και των λιπιδίων και συντελεί στην πρόληψη του διαβήτη και της αρτηριοσκλήρυνσης. Στα φυσικά ύδατα απαντάται συνήθως με τη μορφή εξασθενούς χρωμίου το οποίο είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο, αφού σε συγκεντρώσεις της τάξης των 10 mg/kg βάρους προκαλεί νέκρωση ιστών και νεφρική ανεπάρκεια, ενώ χαμηλότερες συγκεντρώσεις προκαλούν ερεθισμό του γαστρικού και εντερικού βλεννογόνου. Το χρώμιο περιέχεται στα απόβλητα από βιομηχανικές δραστηριότητες αφού χρησιμοποιείται ως συστατικό κραμάτων, ως προστατευτικό διάβρωσης μετάλλων και ως μέσο για την προστασία αντλιών και εναλλακτών θερμότητας.

Στην περιοχή έρευνας η μέση τιμή συγκέντρωσης χρωμίου (ολικού) για τις πηγές ανέρχεται σε 5 µg/l, με διακύμανση τιμών από 1 µg/l έως 8 µg/l (Πίν. 7.1) και για τις γεωτρήσεις και τα πηγάδια η μέση τιμή ανέρχεται σε 5,33 µg/l, με εύρος τιμών από 0 µg/l έως 13 µg/l (Πίν. 7.2).

Σύμφωνα με τον υδροχημικό χάρτη χωρικής κατανομής (Σχ. 7.25) παρατηρείται αιχμή τιμών κυρίως στους χαλαρούς σχηματισμούς της λεκάνης απορροής του Κηρέα ποταμού (περιοχή Προκόπι), καθώς επίσης και εντός του οικιστικού ιστού του Δημοτικού Διαμερίσματος

Μαντουδίου. Υψηλές συγκεντρώσεις, πάνω από τα επιτρεπτά όρια που έχει θεσπίσει η ΕΕ, εντοπίστηκαν κυρίως σε δείγματα υπόγειου νερού των υπερβασικών πετρωμάτων.



Σχήμα 7.25: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής των ιόντων χρωμίου

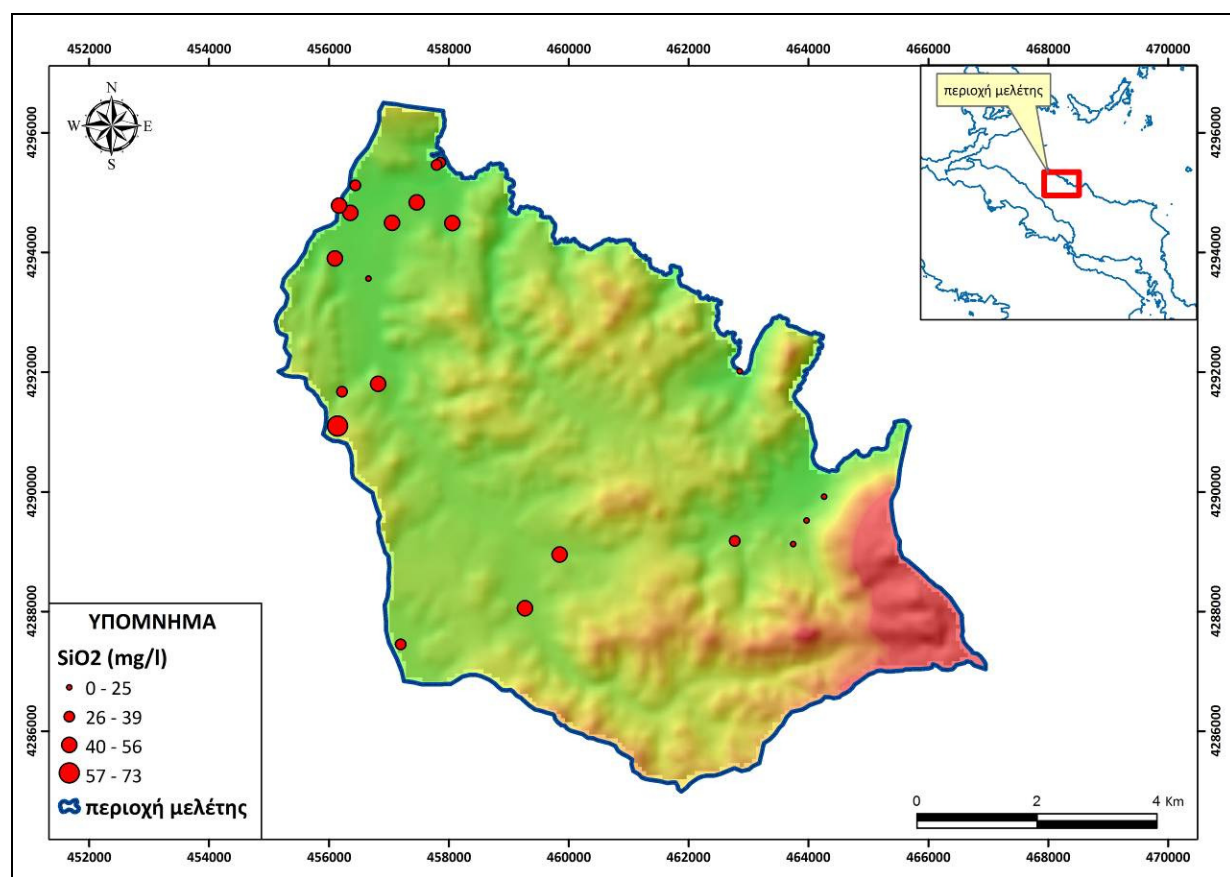
7.7 Διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2)

Το πυρίτιο είναι το δεύτερο σε αφθονία στοιχείο στο φλοιό της γης μετά το οξυγόνο. Στα υπόγεια νερά όμως βρίσκεται σε μικρές συγκεντρώσεις, λόγω της μικρής διαλυτότητάς του στο νερό (Davis, 1964). Παρόλα αυτά υψηλές συγκεντρώσεις (> 30 ppm) έχουν αναφερθεί από τους Γκάρτζο (1986), Pfeifer (1979) και Barnes and O' Neill (1969) σε υπόγεια νερά που προέρχονται από υπερβασικά πετρώματα. Οι Barnes *et al* (1978) αναφέρουν παρόμοιες συγκεντρώσεις στα υπερβασικά πετρώματα στη Νέα Καληδόνια, στο Ομάν και στην Γιουγκοσλαβία. Είναι αξιοσημείωτο πάντως το γεγονός ότι δεν αναφέρεται πουθενά το ανώτατο επιτρεπτό όριο ποσικότητας στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Kouimtzis *et al*, 1998), ούτε συμπεριλαμβάνεται στην οδηγία της UNESCO (WHO, 1984) καθώς επίσης και στην πρόσφατη οδηγία 2000/60/ΕΕ

Η περιοχή μελέτης συνίσταται από υπερβασικά πετρώματα. Η εκμετάλλευση των υπόγειων νερών της περιοχής γίνεται για ύδρευση και άρδευση και συνεπώς η γνώση των ανώτατων ορίων για την αποφυγή προβλημάτων υγείας (kidney stones) που μπορεί να προκληθεί από τις

υψηλές συγκεντρώσεις SiO_2 αποτελεί ερευνητικό θέμα προς διερεύνηση. Στην περιοχή μελέτης η μέση τιμή συγκέντρωσης του SiO_2 (πηγές) είναι 41 mg/l, με εύρος τιμών από 23,8 mg/l έως 73 mg/l (Πίν. 7.1) και για τις γεωτρήσεις και τα πηγάδια η μέση τιμή ανέρχεται σε 36,7 mg/l, με εύρος τιμών από 19 mg/l έως 56 mg/l (Πίν. 7.2).

Στο σχήμα 7.26 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή και διαπιστώνεται ότι οι υψηλότερες συγκεντρώσεις παρατηρούνται σε δύο περιοχές με υψηλές συγκεντρώσεις πυριτικών εντός των χαλαρών ιζημάτων στην ευρύτερη περιοχή Μαντουδίου και σε δείγματα νερού από τη λεκάνη του Κηρέα. Η παρουσία τους συγκρίνεται με τις αντίστοιχες υψηλές τιμές συγκέντρωσης μαγνησίου στις ίδιες περιοχές (Σχ. 7.12) και σχετίζεται με φαινόμενα υδρόλυσης των πλούσιων σε SiO_2 και μαγνήσιο ορυκτά των υπερβασικών πετρωμάτων (πχ. ολιβίνες).



Σχήμα 7.26: Υδροχημικός χάρτης χωρικής κατανομής του SiO_2 , Οκτώβριος 2007

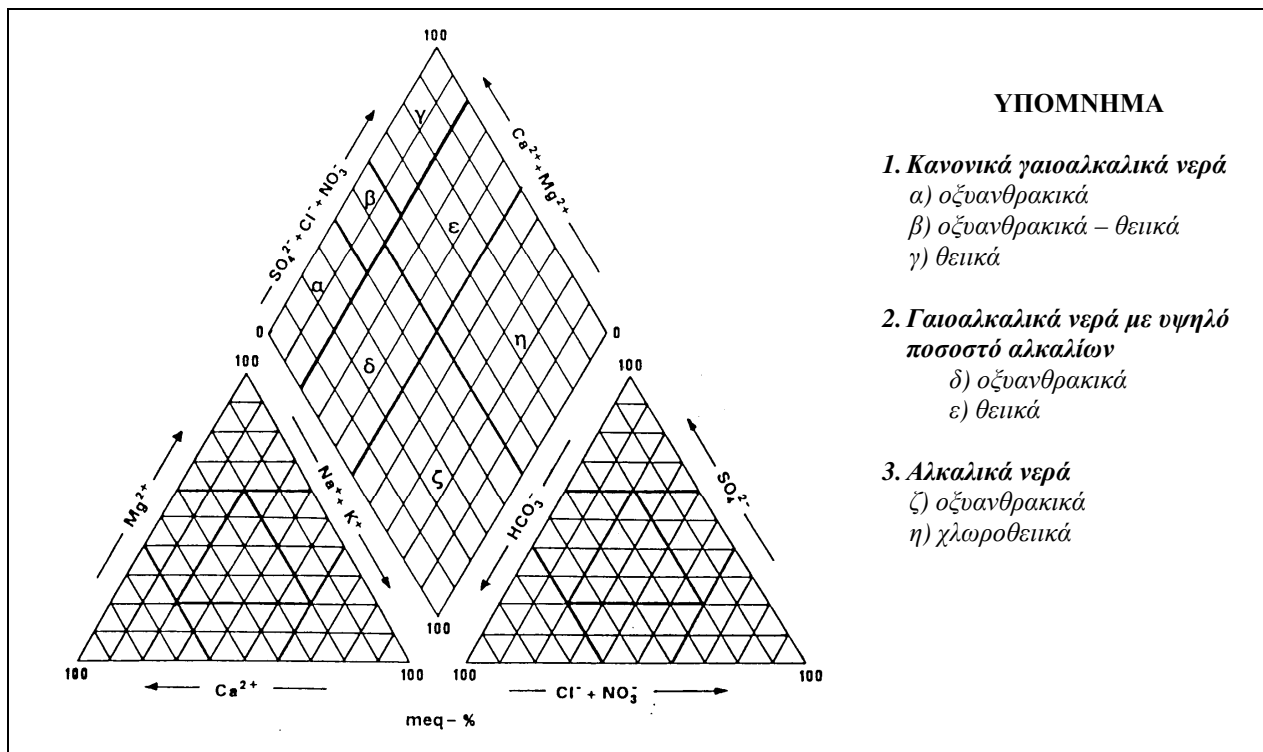
7.7.1 Μοντέλο Θερμοδυναμικών εκτιμήσεων και συνθηκών κορεσμού

Προκειμένου να διερευνηθεί ο εμπλουτισμός σε SiO_2 στο υπόγειο νερό χρησιμοποιήθηκαν τα χημικά χαρακτηριστικά του και εκτιμήθηκαν οι αλληλεπιδράσεις με τα υπερβασικά πετρώματα (ζώνη αποσάθρωσης). Στο μοντέλο οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν είναι το Mg^{2+} , SiO_2 , H^+ και H_2O .

7.8 Ταξινόμηση των υπόγειων νερών

Στο διάγραμμα 7.28 που ακολουθεί, παρουσιάζεται το διάγραμμα Piper (1944) προκειμένου να αναγνωριστούν οι γεωχημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την κίνηση των υπόγειων νερών. Στο διάγραμμα τα κατιόντα Ca^{2+} , Na^+ και Mg^{2+} εκφρασμένα επί τοις εκατό (%) του συνόλου των κατιόντων προβάλλονται σαν ένα σημείο στο αριστερό τρίγωνο ενώ τα ανιόντα Cl^- , HCO_3^- και SO_4^{2-} , επίσης εκφρασμένα σε % του συνόλου των ανιόντων εμφανίζονται σαν ένα σημείο στο δεξί τρίγωνο. Τα δύο αυτά σημεία (ένα σε κάθε τρίγωνο) προβάλλονται στη συνέχεια στον κεντρικό ρόμβο παράλληλα προς τις δύο πάνω πλευρές του. Το σημείο μες στο ρόμβο μας παρουσιάζει μια ολική εικόνα της ιοντικής κατανομής (www.ground-water-models.com). Η προβολή των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων βάση του διαγράμματος διευκολύνει την αναγνώριση γεωχημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κατά την κίνηση των υπόγειων νερών.

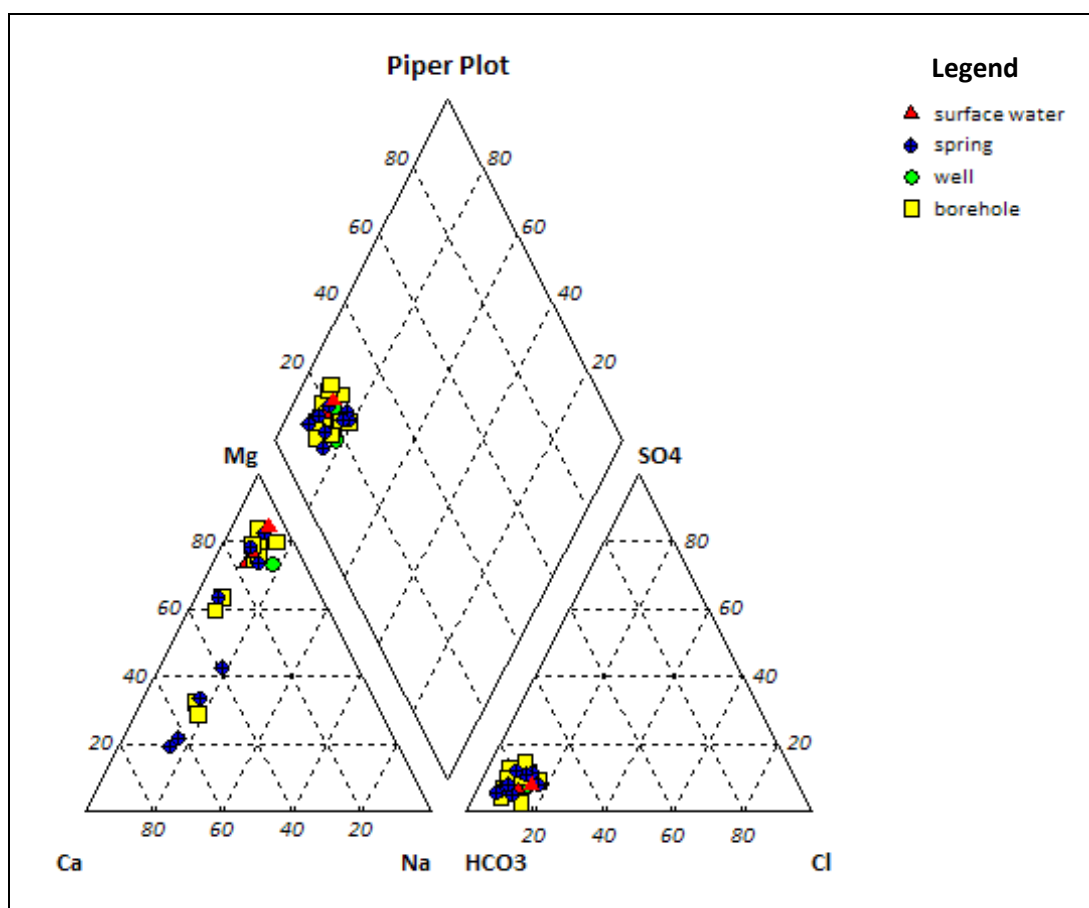
Τα αποτελέσματα της ιοντοανταλλαγής είναι ιδιαίτερα εμφανή, όταν λαμβάνει χώρα μόνο κατιοανταλλαγή όπου και τα σημεία προβάλλονται παράλληλα προς την εξωτερική πλευρά του ρόμβου, ενώ όταν συμβαίνουν άλλες αντιδράσεις τα σημεία αποκλίνουν από την εξωτερική πλευρά. Διάλυση του ανθρακικού ασβεστίου αντικατοπτρίζεται από τη μετακίνηση των σημείων προς τη γωνία $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$. Η αναγωγή των SO_4^{2-} μετακινεί τα σημεία σε θέση παράλληλη με τον άξονα των ανιόντων. Απόθεση του CaCO_3 οδηγεί τα σημεία προς τη γωνία Na^+ και SO_4^{2-} και Cl^- .



Σχήμα 7.28: Διάγραμμα Ταξινόμησης νερών κατά Piper

Σύμφωνα με το διάγραμμα Piper (Σχ. 7.29) διαπιστώνεται η ομοιογένεια της ποιοτικής σύστασης των σημείων ύδατος. Μεταξύ των κατιόντων και των ανιόντων κυριαρχεί το Mg^{2+} (μ.τ 87 meq/l %) και το HCO_3^- (μ.τ. 82 meq/l %) αντίστοιχα. Το γεγονός αυτό συνδέεται άμεσα με την πλούσια προσφορά σε μαγνησιούχα ορυκτά, τα οποία κατά τη διάβρωσή τους απελευθερώνουν το Mg^{2+} , καθώς επίσης σε άφθονο CO_2 που προέρχεται κυρίως από τη διάλυση της οργανικής ύλης στην εδαφική ζώνη. Σημαντικός παράγων επίσης θεωρείται βεβαίως και η τιμή του pH του κατεισδύοντος μετεωρικού νερού.

Συμπερασματικά, τα υπόγεια νερά των υπερβασικών πετρωμάτων της περιοχής μελέτης ανήκουν στην ομάδα των γαιοαλκαλικών, κυρίως οξειανθρακικών νερών και είναι χημικού τύπου νερού Mg – HCO_3 (Σχ. 7.29).



Σχήμα 7.29: Ταξινόμηση των υπόγειων νερών στο διάγραμμα Piper

7.9 Ποιοτική σύσταση των επιφανειακών υδάτων της περιοχής έρευνας

Οι ποταμοί και οι λίμνες είναι αποδέκτες των νερών απορροής των λεκανών τους. Τα νερά αυτά προέρχονται είτε από άμεσες κατακρημνίσεις και λιώσιμο χιονιού ή πάγων, ή είναι νερά υπερχείλισης υπογείων υδροφόρων συστημάτων και απορροής και στράγγισης γης.

Η φυσική ποιότητα και ποσότητα των νερών απορροής μιας λεκάνης εξαρτάται από τη γεωλογία και τις κλιματικές συνθήκες της λεκάνης. Λεκάνες με ευδιάλυτα πετρώματα όπως, ανθρακικούς σχηματισμούς, ασβεστόλιθοι, δολομίτες και μάρμαρα, ασβεστιτικοί ψαμμίτες και κροκαλοπαγή, εβαπορίτες κλπ., έχουν νερό απορροής σκληρό και καθαρό, ενώ λεκάνες με συμπαγείς σχηματισμούς που είναι λιγότερο υδροπερατοί (σκληρά διερηγημένα πετρώματα), όπως γρανίτες, γρανοδιορίτες κλπ., έχουν νερό μαλακό, ελαφρώς όξινο και θολό λόγω των εναιωρήσει σωματιδίων που περιέχουν. Την φυσική αυτή σύσταση έχουν και τα νερά των ποταμών που υδρομαστεύουν τις λεκάνες αυτές, αντίστοιχα.

Οι ποταμοί είναι δυναμικά συστήματα που αποτελούν μαζί με τους παραποτάμους τους ένα ενιαίο σύνολο. Μεταφέρουν σημαντικές ποσότητες υδάτων και διαλυμένων ουσιών, φυσικής ή ανθρωπογενούς προέλευσης. Η μετακινούμενη μάζα υπόκειται σε διαρκείς χημικές, βιολογικές και φυσικές αλλαγές, οι οποίες μπορούν να αλλάξουν σε μεγάλο βαθμό την φυσική ποιοτική κατάσταση του νερού του ποταμού από περιοχή σε περιοχή διέλευσης του. Οι μεταβολές αυτές σχετίζονται άμεσα με γεωγενείς παράγοντες, όπως τις γεωλογικές, τις μορφολογικές και υδρογραφικές συνθήκες που επικρατούν στη ευρύτερη περιοχή ενός επιφανειακού συστήματος, αλλά και με ανθρωπογενείς επιδράσεις.

Η φυσική κατάσταση της ποιότητας των νερών ενός επιφανειακού συστήματος, ενός ποταμού ή μίας λίμνης, σπάνια διατηρείται και επηρεάζεται από την βιομηχανική ή αγροτική χρήση της γης της λεκάνης απορροής του.

Η ποιοτική κατάσταση των επιφανειακών νερών σε κάθε τμήμα του ποταμού αντικατοπτρίζει πάντοτε τις συνθήκες του περιβάλλοντος, δηλαδή των εδαφολογικών, των ατμοσφαιρικών, των κλιματολογικών αλλά και των ανθρωπογενών επιδράσεων. Ο εντοπισμός και η εκτίμηση αυτών των επιδράσεων είναι καθοριστικής σημασίας για την διαχείριση των εδαφικών και υδάτινων πόρων μιας περιοχής.

Ρύπανση ανθρωπογενούς προέλευσης ορίζεται κάθε άμεση ή έμμεση εισαγωγή ουσιών, η οποία έχει βλαπτική επίδραση στους ζωντανούς οργανισμούς, είναι επικίνδυνη για την ανθρώπινη υγεία ή παρεμποδίζει τη χρήση των υδάτων ή αλλοιώνει την ποιότητα του νερού ή υποβιβάζει τις δυνατότητες χρησιμοποίησής τους για διάφορους άλλους σκοπούς.

Οι πηγές ρύπανσης των επιφανειακών υδάτων διακρίνονται σε μη σημειακές και σε σημειακές πηγές. Σημαντικές πηγές μη σημειακής ρύπανσης επιφανειακών νερών αποτελούν η επιφανειακή απορροή υδάτων, τα στραγγιστικά νερά αγροτικής γης και η κατακρήμνιση οργανικών κυρίως ρύπων με το νερό της βροχής. Αντιθέτως, σημαντικές πηγές σημειακής ρύπανσης αποτελούν αγροτικές και αστικές βιομηχανίες που απορρίπτουν τα απόβλητα τους στα νερά παρακειμένων ποταμών, μη ορθολογικές αγροτικές δραστηριότητες όπως,

προετοιμασία ή καθαρισμός ψεκαστικών μηχανημάτων, μη ασφαλή αποθήκευση αγροχημικών κλπ. Κατά την διάρκεια της επιφανειακής απορροής νερό και διαλυμένα σε αυτό σωματίδια μετακινούνται επιφανειακά από αγρούς και μη καλλιεργήσιμες εκτάσεις σε παρακείμενα επιφανειακά υδροφόρα συστήματα.

Οι ποσότητες των ρύπων που μεταφέρονται με το νερό απορροής στα επιφανειακά υδροφόρα συστήματα εξαρτάται από:

- α) τις συγκεκριμένες εδαφικές συνθήκες, όπως είναι η σύσταση του εδάφους, τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής κλπ.,
- β) από τις κλιματικές συνθήκες όπως διάρκεια και ύψος της βροχόπτωσης,
- γ) από τις αγροτικές πρακτικές που χρησιμοποιούνται όπως επιφανειακή εφαρμογή λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων ή ενσωμάτωση στο έδαφος,
- δ) από τις φυσικοχημικές ιδιότητες των διαφόρων χημικών ουσιών που εμπεριέχονται στους διάφορους τύπους φυτοφαρμάκων που εφαρμόζονται όπως η πτητικότητα, και η υδατοδιαλυτότητα των ουσιών και
- ε) από την ποσότητα των φυτοφαρμάκων που χρησιμοποιούνται σε διάφορα στάδια ανάπτυξης των καλλιεργειών, κλπ.

Οι παραπάνω παράγοντες δεν δρουν μεμονωμένα αλλά οι μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό τις ποσότητες των ρύπων που θα μεταφερθούν στα παρακείμενα υδατικά συστήματα.

7.9.1 Φυσικοχημικοί παράμετροι των επιφανειακών νερών

7.9.1.1 Ανάλυση

Η χημική σύσταση των επιφανειακών νερών σχετίζεται, κατά κύριο λόγο, από την ποιότητα των υπόγειων νερών που εκφορτίζονται εντός του συστήματος απορροής της λεκάνης. Πέραν των γηγενών παραγόντων στη διαμόρφωση της σύστασης του επιφανειακού νερού συμβάλλουν επίσης και ανθρωπογενείς παράγοντες, όπως είναι η απόρριψη των οικιακών και βιομηχανικών αποβλήτων ή η έκπλυση των χρησιμοποιούμενων γεωργικών λιπασμάτων.

7.9.1.2 Ποιοτικά χαρακτηριστικά

Στα πλαίσια της παρούσας έρευνας πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες επιφανειακού νερού στην έξοδο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κυμάσι. Ο ποταμός Κυμάσι αποστραγγίζει μία

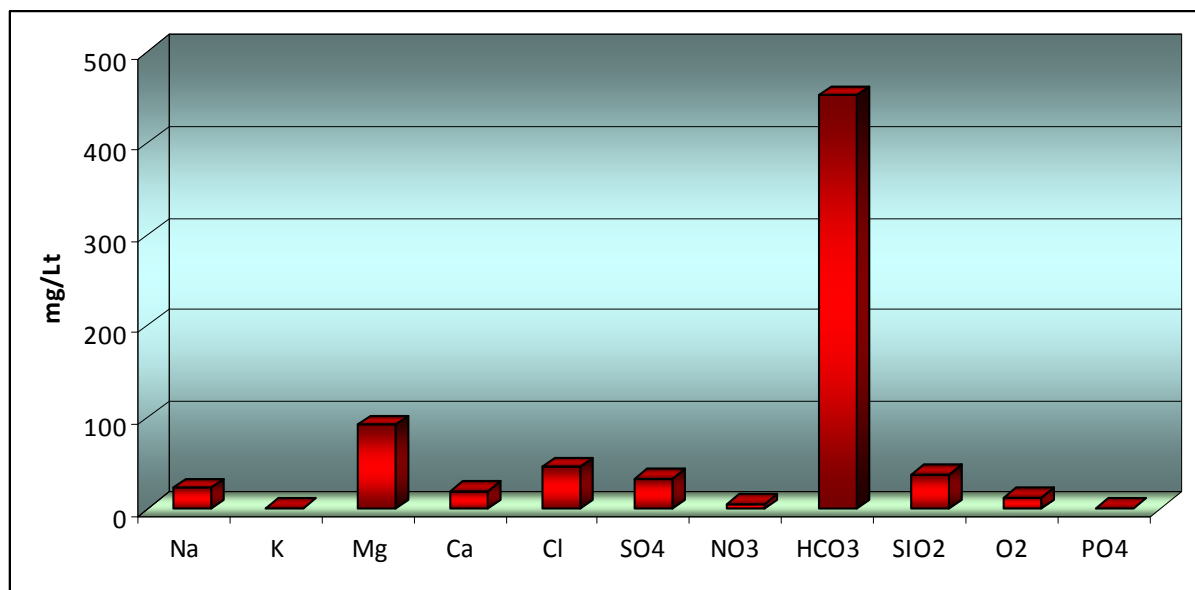
λεκάνη απορροής 34,76 km², που δομείται κυρίως κατά 77% από σκληρά διερρηγμένα πετρώματα, κατά 11 % από κρυσταλλοσχιστώδη και κατά 12% από ιζήματα.

Τα στατιστικά υδροχημικά χαρακτηριστικά των επιφανειακών νερών για την προαναφερόμενη υδρολογική περίοδο παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.4 που ακολουθεί.

Πίνακας 7.4: Στατιστική ανάλυση των κυριότερων φυσικοχημικών παραμέτρων των επιφανειακών νερών της περιοχής έρευνας, οι συγκεντρώσεις των ιόντων δίδονται σε mg/l (Οκτώβριος 2007)

Παράμετρος (mg/L)	Ελάχιστη	Μέγιστη	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	
pH	8,3	9,15	8,7	0,347	
T _{air} (° C)	24,6	27,3	26,4	1,255	
T _w (° C)	22	26,1	24,4	1,845	
E.C. (μS/cm)	617	825	751	97,629	
Na ⁺	18,4	27,3	22,4	3,775	
K ⁺	0,9	1,6	1,2	0,287	
Mg ²⁺	68,2	110,4	91,3	17,398	
Ca ²⁺	9,6	34,4	19	11,015	
NH ₄ ⁺	0	0	0	0	
Cl ⁻	31,9	56,7	45,2	10,571	
SO ₄ ²⁻	23	41	33,4	8,864	
NO ₃ ⁻	1,8	15,8	5,7	6,792	
HCO ₃ ⁻	365	503	452,5	62,217	
PO ₄ ²⁻	0,1	0,2	0,15	0,044	
DO ₂	10,8	12,6	11,7	0,746	
SiO ₂	36	38	37	0,818	
Σκληρότητα (°dH)	Ολική	18,4	26,8	23,7	3,788
	Παροδική	16,8	23,1	20,8	2,858
	Μόνιμη	1,6	3,7	2,9	0,935
Βαρέα μέταλλα (ppb)	Cr – total	1	7	4,25	2,754
	Zn ²⁺	6	15	9,75	4,112
	Cu ²⁺	0	3	1,35	1,247
	Fe – total	0	11	7	4,831
	Mn ²⁺	0,015	0,064	0,034	0,021
TDS	593	737	668,5	68,179	

Στο σχήμα 7.30 που ακολουθεί παρουσιάζεται η συμμετοχή των κύριων στοιχείων που διαμορφώνουν τον ποιοτικό χαρακτήρα των επιφανειακών υδάτων του ποταμού Κυμάσι.



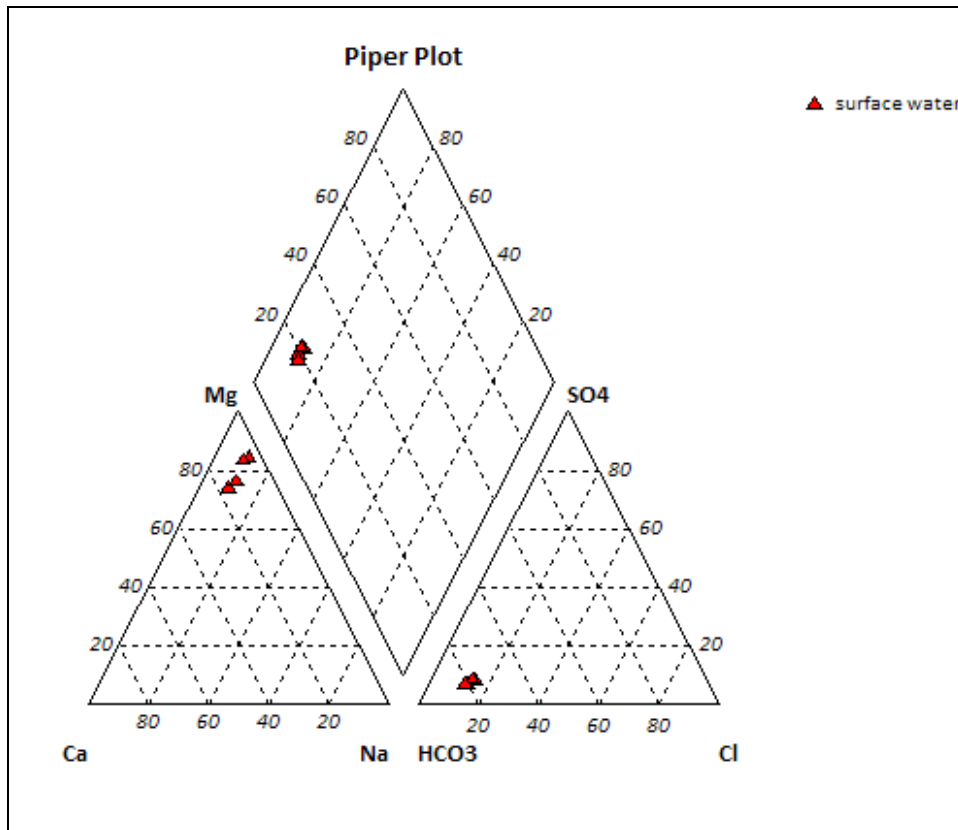
Σχήμα 7.30: Ποιοτικά χαρακτηριστικά του ποταμού Κυμάσι

Το σύνολο των διαλυμένων αλάτων (TDS) στο σημείο πριν την εκβολή του στον Κηρέα ανέρχεται σε 669 mg/l. Η θερμοκρασία του νερού κατά την περίοδο δειγματοληψίας ήταν 24,4°C και η αγωγιμότητα (E.C.) 751 μS/cm. Πρόκειται για επιφανειακό νερό με χαμηλή συγκέντρωση διαλυμένων στοιχείων. Ο ποταμός Κυμάσι παρουσιάζει αλκαλικό χαρακτήρα (pH) 8,71 και υψηλή σκληρότητα (ολική) 23,67 °dH, που οφείλεται στις υψηλές συγκεντρώσεις μαγνησίου από τα υπερβασικά πετρώματα. Τις υψηλότερες συγκεντρώσεις από την πλευρά των κατιόντων παρουσιάζουν τα γαιοαλκάλια (Mg^{2+}) 91,25 mg/l και από τα ανιόντα τα HCO_3^- (μέση τιμή 453 mg/l) και τα Cl^- (μέση τιμή 45,2 mg/l). Τα αλκάλια παρουσιάζουν χαμηλές συγκεντρώσεις Na^+ (μέση τιμή 22,43 mg/l) και K^+ (μέση τιμή 1,23 mg/l). Η παρουσία τους συνδυάζεται με την ανάπτυξη των υπερβασικών πετρωμάτων στη λεκάνη απορροής του.

Χαρακτηριστική είναι η σχετικά υψηλή συγκέντρωση των SO_4^{2-} (μέση τιμή 33,4 mg/l). Πηγή προέλευση τους αποτελεί κυρίως η χρήση λιπασμάτων θειικής αμμωνίας στις καλλιέργειες και κτηνοτροφικά απόβλητα. Οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων NO_3^- και PO_4^{3-} ανέρχονται σε 5,65 mg/l και 0,15 mg/l αντίστοιχα. Η παρουσία τους σχετίζεται κυρίως με τις γεωργικές δραστηριότητες στην λεκάνη απορροής του ποταμού Κυμάσι. Σύμφωνα με το διάγραμμα Piper (Σχ. 7.31) τα επιφανειακά νερά του ποταμού χαρακτηρίζονται από τον υδροχημικό τύπο Mg – HCO_3 .

Γενικά διαπιστώνεται ότι τα νερά του ποταμού όσον αφορά τα κύρια στοιχεία, είναι καλής ποιότητας και χαρακτηρίζονται για την περιορισμένη αλατότητα. Η επιβάρυνση που

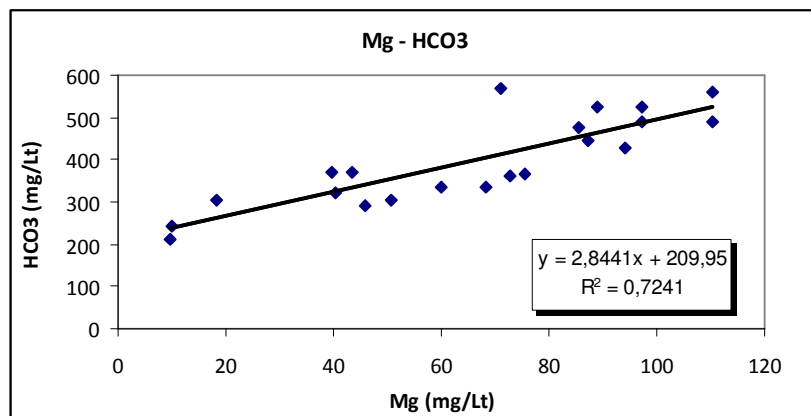
εκδηλώνεται με βάση τους δείκτες SO_4^{2-} και PO_4^{3-} , είναι κυρίως γεωργικής και ενδεχόμενα κτηνοτροφικής προέλευσης.



Σχήμα 7.31: Διάγραμμα ταξινόμησης των επιφανειακών νερών του π. Κυμάσι

7.10 Ιοντικά Διαγράμματα

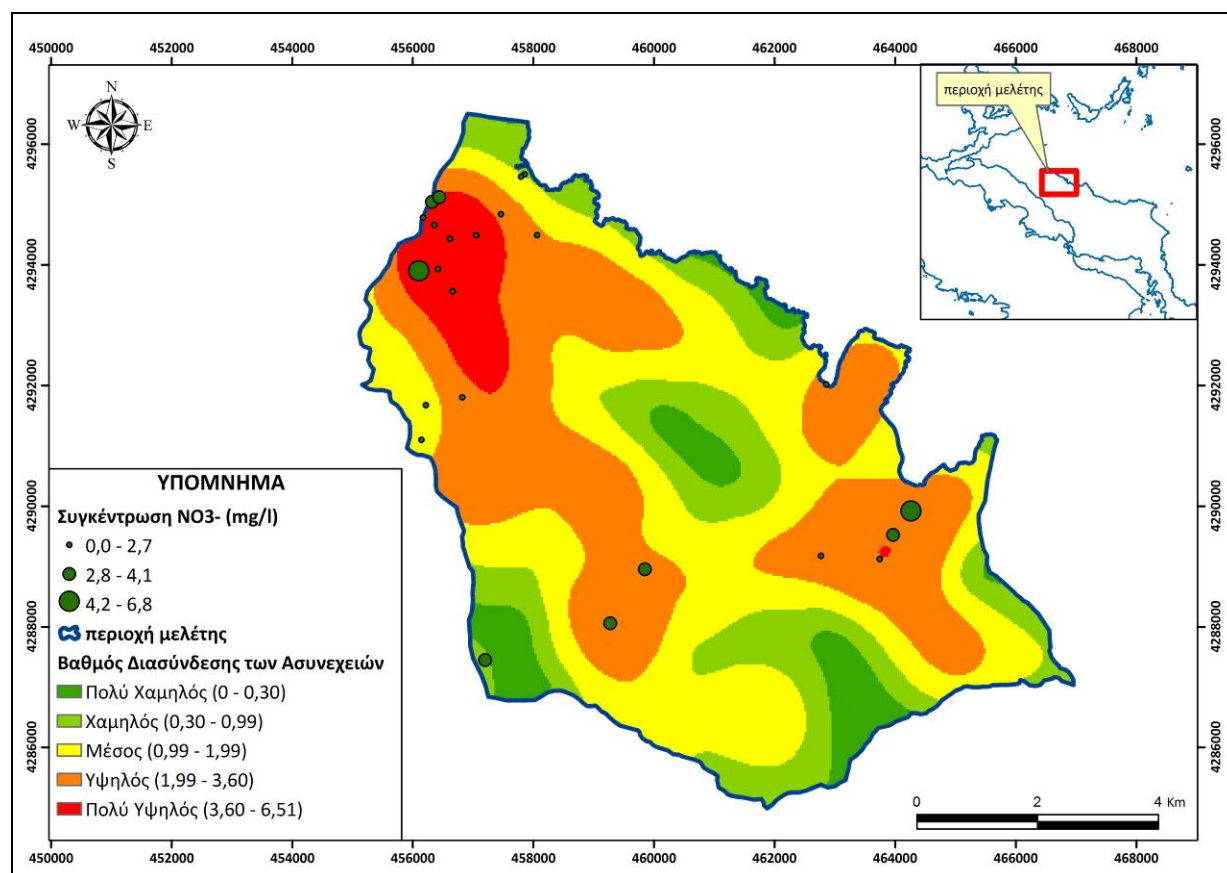
Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η συσχέτιση της συγκέντρωσης των ιόντων μαγνησίου με τις τιμές συγκέντρωσης των οξυανθρακικών ιόντων. Επί του συνόλου των δειγμάτων διαπιστώνεται ότι ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των δυο αυτών παραμέτρων, που αποτελούν τα κύρια στοιχεία που βρίσκονται εν διάλυση στο υπόγειο αλλά και στο επιφανειακό νερό είναι 0,73.



Σχήμα 7.32: Διάγραμμα ιοντικών συγκεντρώσεων Mg^{2+} - HCO_3^-

7.11 Συσχέτιση υδροχημικών παραμέτρων με τεκτονικά στοιχεία

Προκειμένου να διαπιστωθεί ο βαθμός επίδρασης των τεκτονικών στοιχείων στη διαμόρφωση του ποιοτικού χαρακτήρα των υπόγειων νερών της περιοχής μελέτης πραγματοποιήθηκε στατιστική συσχέτιση των κυριότερων υδροχημικών παραμέτρων με το βαθμό διασύνδεσης των ασυνεχειών (Σχ. 7.33).



Σχήμα 7.33: Χάρτης συσχέτισης χωρικής κατανομής βαθμού διασύνδεσης ασυνεχειών με τη συγκέντρωση NO₃⁻ (mg/l) στην περιοχή μελέτης

Σύμφωνα με το σχήμα 7.33 παρατηρείται πως οι περιοχές υψηλού βαθμού διασύνδεσης των ασυνεχειών χαρακτηρίζονται ταυτόχρονα και από υψηλές συγκεντρώσεις NO₃⁻. Δεδομένου ότι η συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων στα υπόγεια νερά έχει προταθεί ως δείκτης ρύπανσης από ανθρωπογενείς δραστηριότητες στην επιφάνεια, συνδέεται άμεσα με την αξιολόγηση μεθοδολογιών εκτίμησης της ποιοτικής υποβάθμισης (Rupert, 1999). Η πηγή ρύπανσης δεν είναι πάντα σημειακού χαρακτήρα και επομένως γίνεται κατανοητό πως η επιλεκτική πορεία (διαδρομή) που ακολουθεί το υπόγειο νερό μέχρι το υδροληπτικό έργο (στόχος), συνδέεται άμεσα με την παρουσία τεκτονικών στοιχείων (ασυνέχειες) οι οποίες υδροφορούν και εμπλουτίζουν σταδιακά τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα με αποτέλεσμα την ποιοτική υποβάθμισή του. Σύμφωνα με τα παραπάνω κατασκευάστηκε το διάγραμμα συσχέτισης των

τιμών του βαθμού διασύνδεσης των ασυνεχειών με τις τιμές συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων (Σχ. 7.33).

7.12 Συμπεράσματα

Η καταγραφή και επεξεργασία των φυσικοχημικών παραμέτρων του νερού των σημείων ύδατος στην περιοχή μελέτης πραγματοποιήθηκε προκειμένου να δώσει αφενός μία εικόνα αποτύπωσης των υφιστάμενων ποιοτικών συνθηκών αφετέρου δε να αποτελέσει και παράμετρος επαλήθευσης των παραμέτρων που συνυπολογίζονται στην εκτίμηση της τρωτότητας.

Γενικότερα, στα πλαίσια της παρούσας έρευνας, τα νερά (επιφανειακά και υπόγεια) της περιοχής εμφανίζουν έναν γαιοαλκαλικό χαρακτήρα με επικρατέστερα ιόντα τα ιόντα Mg^{2+} και τα ιόντα HCO_3^- . Πρόκειται κυρίως για νερά που ξεπλένουν τους περιδοτίτες οι οποίοι είναι πλούσιοι σε μαγνήσιο, εξαιτίας της παρουσίας μαγνησιούχων κοιτασμάτων (κοιτάσματα λευκόλιθου).

Από τη στατιστική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για τα υπόγεια αλλά και για τα επιφανειακά νερά της περιοχής μελέτης διαπιστώθηκε πως οι συγκεντρώσεις σχεδόν όλων των στοιχείων βρίσκονται σε χαμηλά επίπεδα, με τάσεις αύξησης στις περιοχές έντονης ανθρώπινης δραστηριότητας.

Παρόλα αυτά υποβάθμιση της ποιοτικής σύστασης παρατηρήθηκε επιπλέον και σε περιοχές που παρά την παρουσία μηχανισμών εξασθένησης του ρύπου, η παρουσία πυκνού δικτύου ασυνεχειών αποτελεί καταλυτικό παράγοντα στη διαμόρφωση του ποιοτικού χαρακτήρα. Αυτό επαληθεύεται και από τη συσχέτιση της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων με το βαθμό διασύνδεσης των ασυνεχειών, από όπου διαφαίνεται πως στις περιοχές υψηλού βαθμού διασύνδεσης, οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων παρατηρούνται αυξημένες.

8. ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ

8.1 Ιστορική αναδρομή της έννοιας της τρωτότητας

Αν και η έννοια της τρωτότητας του υπόγειου νερού είχε διατυπωθεί ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του 1960 (Margat, 1968), ουσιαστικά ο πρώτος γενικά αποδεκτός ορισμός της αποδίδεται στους Albinet & Margat το 1970, σύμφωνα με τον οποίο *η τρωτότητα ενός υδροφόρου ορίζοντα είναι η πιθανότητα διήθησης και διάχυσης των ρύπων υπό φυσιολογικές συνθήκες, από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι τον υδροφόρο.*

Οι Olmer & Řezáč (1974), πρότειναν ότι η τρωτότητα είναι *ο βαθμός επικινδυνότητας, ο οποίος καθορίζεται από τις φυσικές συνθήκες και είναι ανεξάρτητος από οποιαδήποτε παρουσία πηγής ρύπανσης και ότι η τρωτότητα εξαρτάται από την κατακόρυφη περατότητα στην ακόρεστη ζώνη και από την υδραυλική κλίση και ταχύτητα του νερού, μέσα στον υδροφόρο.*

Σύμφωνα με τους Villumsen *et al* (1983), η τρωτότητα είναι *η πιθανότητα των χημικών ουσιών, που χρησιμοποιούνται ή έχουν αποτεθεί πάνω ή κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, να επηρεάσουν την ποιότητα του υπόγειου νερού.* Πρότειναν ότι η χημική σύσταση του νερού μπορεί να χρησιμεύει σαν δείκτης τρωτότητας.

Κατά τη διάρκεια του Διεθνούς Συνεδρίου για την Τρωτότητα του Εδάφους και του Υπόγειου Νερού το 1987, προτάθηκαν διαφορετικοί ορισμοί για την τρωτότητα.

Οι Bachmat & Collin (1987) την όρισαν ως *την ευαισθησία της ποιότητας του υπόγειου νερού ως προς τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες, οι οποίες πιθανόν να είναι επιβλαβείς για την παρούσα μελλοντική χρήση του νερού.*

Η τρωτότητα κατά τους Sotorniková & Vrba (1987), είναι *η ικανότητα του υδρογεωλογικού συστήματος να ανταπεξέλθει στις εξωτερικές πιέσεις, φυσικές και ανθρωπογενείς, οι οποίες επιδρούν στην κατάσταση και το χαρακτήρα του στο χρόνο και τον χώρο.*

Οι Benacchio *et al* (1988), όρισαν το βαθμό της εσωτερικής τρωτότητας ως την πιθανότητα της κατείσδυσης και διήθησης των ρύπων μέσω της ακόρεστης ζώνης.

Ο Vrba το 1991, εισήγαγε την κλίμακα του χρόνου στην έννοια της τρωτότητας προτείνοντας ότι η τρωτότητα στα πλαίσια της ανθρώπινης κλίμακας είναι *μία αμετάβλητη εσωτερική ιδιότητα της ακόρεστης και κορεσμένης ζώνης του συστήματος του υπόγειου νερού και εξαρτάται από το πόσο ικανό ή μη είναι το σύστημα στο να αντιμετωπίσει τις περιβαλλοντικές διεργασίες και τις ανθρωπογενείς πιέσεις.*

Επίσης ο Palmquist (1991) όρισε την τρωτότητα του υπόγειου νερού σαν *το μέγεθος της επικινδυνότητας του υπόγειου νερού λόγω των ανθρωπογενών επιδράσεων και της παρουσίας*

ρύπων, ενώ πρόσθεσε ότι απουσία οποιονδήποτε ρύπων, ακόμα και ο πιο ευάλωτος υπόγειος υδροφόρος δεν διατρέχει κίνδυνο.

Το Αμερικάνικο Πρακτορείο Περιβαλλοντικής Προστασίας (EPA, 1991) χρησιμοποίησε τον όρο *ευαισθησία υδροφόρου ορίζοντα* για την εσωτερική ευαισθησία του στους ρύπους, βασιζόμενοι αποκλειστικά στα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του. Ο όρος *τρωτότητα*, που επίσης, χρησιμοποιήθηκε, αναφέρεται στην επιδεκτικότητα του υδροφόρου ορίζοντα στη ρύπανση, στον οποίο όμως περιλαμβάνονται τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά, οι χρήσεις γης, τα χαρακτηριστικά των ρύπων και το ρυπαντικό φορτίο.

Οι Adams & Foster (1992) προσδιόρισαν την τρωτότητα ως συνάρτηση α) του βαθμού προσέλασης της κορεσμένης ζώνης, από υδραυλικής άποψης, από τους ρύπους και β) την ικανότητα μείωσης των ρύπων λόγω φυσικοχημικών αντιδράσεων στα υπερκείμενα στρώματα της κορεσμένης ζώνης.

Έναν χρόνο αργότερα, το 1993, η Επιτροπή Τεχνικών για την Εκτίμηση της Τρωτότητας του Υπόγειου Νερού του Αμερικάνικου Συμβουλίου ερευνών προσδιόρισε την τρωτότητα ως την *τάση ή την πιθανότητα οι ρύποι να φτάσουν μία συγκεκριμένη θέση στο σύστημα του υπόγειου νερού μετά την εισαγωγή τους σε κάποιο σημείο πάνω και από τον ανώτερο υδροφόρο ορίζοντα*. Στη συνέχεια διαχώρισε την ειδική τρωτότητα, η οποία αναφέρεται σε έναν συγκεκριμένο ρύπο, σύνολο ρύπων ή ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, από την εσωτερική τρωτότητα, στην οποία δε λαμβάνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά ή η συμπεριφορά των επιμέρους ρύπων.

Οι Vrba & Zaporozec (1994) επέμειναν στο γεγονός ότι η τρωτότητα είναι **μία σχετική, μη μετρήσιμη και αδιάστατη ιδιότητα**.

Στο COST 65 (1995) παρουσιάζονται συνοπτικά οι διάφοροι ορισμοί για την τρωτότητα που έχουν κατά καιρούς δοθεί, από τους οποίους οι περισσότεροι είναι παρόμοιοι.

Με το COST 620 (1996 – 2001) προτάθηκαν οι εξής ορισμοί:

α) Η εσωτερική τρωτότητα του υπόγειου νερού, λαμβάνει υπόψη τα γεωλογικά, υδρολογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής, είναι όμως ανεξάρτητη από τη φύση των ρύπων και το οποιοδήποτε σενάριο ρύπανσης.

β) Η ειδική τρωτότητα, παράλληλα με την εσωτερική τρωτότητα μιας περιοχής, λαμβάνει υπόψη της τις ιδιότητες καθενός ρύπου ή ομάδας ρύπων με παρόμοια χαρακτηριστικά.

8.2 Η έννοια της τρωτότητας

Η έννοια της τρωτότητας υποθέτει ότι το φυσικό περιβάλλον προστατεύει έως ένα βαθμό το υπόγειο νερό από τις φυσικές και ανθρωπογενείς πιέσεις, σε σχέση πάντα με τους ρύπους που υπεισέρχονται από την επιφάνεια του εδάφους προς το υπέδαφος. Η περιγραφή του βαθμού της τρωτότητας του υπόγειου νερού στους ρύπους με τη βοήθεια χαρτών ως συνάρτηση των υδρογεωλογικών συνθηκών, δίνει έμφαση στο γεγονός ότι η προστασία του υπόγειου νερού από το φυσικό περιβάλλον δεν παραμένει σταθερή, αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με την περιοχή. Επομένως ορισμένες περιοχές παρουσιάζονται πιο τρωτές από άλλες και σκοπός της χαρτογράφησης της τρωτότητας είναι η αναγνώριση των επιμέρους περιοχών οι οποίες παρουσιάζουν διαφορετικό δυναμικό τρωτότητας (Vrba & Zaporozec, 1994).

8.3 Εκτίμηση και χαρτογράφηση της τρωτότητας

Το υπόγειο νερό είναι τρωτό σε διάφορα επίπεδα. Η τρωτότητα του είναι μία σχετική, μη μετρίσιμη, αδιάστατη ιδιότητα. Η ακρίβεια του υπολογισμού της εξαρτάται κυρίως από την ποσότητα, την ποιότητα και την αξιοπιστία των στοιχείων, τα οποία δυστυχώς δεν είναι πάντοτε διαθέσιμα. Όσο λιγότερα είναι τα στοιχεία και η γνώση του υπόγειου συστήματος, τόσο λιγότερο αξιόπιστος είναι και ο υπολογισμός της τρωτότητας του υπόγειου νερού. Ο τελευταίος όμως καθώς επίσης οι μέθοδοι και οι τεχνικές της γραφικής και αριθμητικής παρουσίασης της τρωτότητας είναι σημαντικοί για τη σύνταξη των ζητούμενων χαρτών (Vrba & Zaporozec, 1994). Η επιλογή των μεθόδων υπολογισμού καθώς και των απαιτούμενων στοιχείων εξαρτάται από το σκοπό και από τα κριτήρια τα οποία δίνονται από το χρήστη του χάρτη. Η τρωτότητα συχνά υπολογίζεται ως ποιότητα του νερού και ο υπολογισμός της γίνεται κυρίως για τον ανώτερο υδροφόρο ορίζοντα (Vrba & Zaporozec, 1994).

8.4 Χάρτης τρωτότητας

8.4.1 Γενικά

Ο χάρτης τρωτότητας είναι ένας χάρτης ο οποίος δίνει μία ή περισσότερο ή λιγότερο υποκειμενική εικόνα της ικανότητας του υπεδάφους να προστατέψει το υπόγειο νερό, κυρίως όσον αφορά την ποιότητά του. Η εικόνα αυτή είναι καθαρά υποκειμενική γιατί οι παράγοντες και τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται στον χάρτη επιλέγονται από εκείνον που σχεδιάζει το χάρτη (Vrba & Zaporozec, 1994).

Ο κύριος σκοπός του χάρτη είναι ο διαχωρισμός μιας περιοχής σε περισσότερες τάξεις, η κάθε μία από τις οποίες θα αντιπροσωπεύει διαφορετικό δυναμικό για συγκεκριμένο σκοπό και χρήση. (Vrba & Zaporozec, 1994).

Σε αντίθεση με τους γεωλογικούς χάρτες, οι χάρτες τρωτότητας του υπόγειου νερού εξαρτώνται από το χρόνο. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται συχνή ενημέρωση και ανανέωση των δεδομένων τους, προκειμένου να απεικονίζουν κάθε φορά τόσο τις αλλαγές του υπόγειου συστήματος όσο και της θέσης και της φύσης των δυνητικών πηγών ρύπανσης. (Vrba & Zaporozec, 1994).

Οι περισσότεροι χάρτες τρωτότητας έχουν σχεδιαστεί λαμβάνοντας υπόψη το ανώτερο τμήμα του υδροφόρου ορίζοντα.

Ο χάρτης τρωτότητας θα πρέπει:

- ☒ να δίνει ακριβή και λεπτομερή αξιολόγηση της ευαισθησίας του υδροφόρου έναντι των ανθρωπογενών πιέσεων
- ☒ να δίνει τη δυνατότητα σύγκρισης της σχετικής ευαισθησίας του υδροφόρου
- ☒ να καθιστά δυνατή τη σύγκριση της ευαισθησίας αυτής ανάμεσα σε διαφορετικές περιοχές
- ☒ να χρησιμοποιεί όλα τα διαθέσιμα στοιχεία για την καλύτερη δυνατή ερμηνεία τους (Vrba & Zaporozec, 1994).

Η χαρτογράφηση της τρωτότητας περιλαμβάνει το συνδυασμό περισσότερων θεματικών χαρτών στους οποίους απεικονίζονται οι φυσικοί εκείνοι παράγοντες οι οποίοι λαμβάνονται υπόψη για τη δημιουργία του τελικού χάρτη τρωτότητας του υπόγειου νερού. Στον τελικό χάρτη τρωτότητας εμφανίζονται οι διαφορετικές περιοχές ευαισθησίας του υδροφόρου ορίζοντα (Vrba & Zaporozec, 1994).

Κατά τους Bachmat & Collin (1987), η χαρτογράφηση της τρωτότητας είναι μια τεχνική ποσοτικοποίησης και απεικόνισης της τρωτότητας κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι εφικτή η χρησιμοποίηση και η εφαρμογή της κατά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Για τους Goossens & Van Damme (1987), ο χάρτης τρωτότητας είναι ένας χάρτης ο οποίος εκφράζει το βαθμό επικινδυνότητας στη ρύπανση του υπόγειου νερού του ανωτέρου υδροφόρου ορίζοντα, από ρυπαντές που θα υπεισέλθουν επιφανειακά.

Υπάρχουν κυρίως δύο βασικές προσεγγίσεις στο θέμα της χαρτογράφησης της τρωτότητας, μια γενική και μία ειδική. Οι χάρτες *γενικής ή εσωτερικής τρωτότητας* (intrinsic vulnerability) χρησιμοποιούνται για να αξιολογήσουν τη φυσική τρωτότητα του υπόγειου νερού χωρίς να λαμβάνουν υπόψη κάποιον συγκεκριμένο ρυπαντή ή μια συγκεκριμένη πηγή ρύπανσης. Οι

χάρτες ειδικής ή ενιαίας τρωτότητας (specific vulnerability) χρησιμοποιούνται για να αξιολογήσουν την επίδραση που έχει μία συγκεκριμένη χρήση γης ή μια πηγή ρύπανσης στο υπόγειο νερό. Η προσέγγιση αυτή λαμβάνει υπόψη τα χαρακτηριστικά τόσο των ρυπαντών όσο και τον υπολογισμό της ικανότητας απορρύπανσης από έναν ή περισσότερους ρυπαντές. Ο Margat (1991) θεωρεί ότι οι χάρτες εσωτερικής τρωτότητας χρησιμοποιούνται κυρίως στα αρχικά στάδια λήψεως αποφάσεων για την προστασία του υπόγειου νερού, ενώ στα επόμενα στάδια, θεωρούνται πιο αποτελεσματικοί οι χάρτες ειδικής τρωτότητας.

Ο χάρτης τρωτότητας βασίζεται στον υπολογισμό και την απεικόνιση διαφόρων παραγόντων, οι οποίοι ποικίλουν ανά περιοχή, ανάλογα με το περιβάλλον. Οι κυριότερες παράμετροι που έχουν κατά καιρούς προταθεί αφορούν (Vrba & Zaporozec, 1994):

- ⊗ το υδρογεωλογικό καθεστώς, δηλαδή τα χαρακτηριστικά του εδάφους, την ακόρεστη ζώνη, τη φύση του υδροφόρου και το βάθος στο οποίο βρίσκεται το υπόγειο νερό,
- ⊗ το σύστημα ροής του υπόγειου νερού όπως τη διεύθυνση και την ταχύτητα της ροής του υπόγειου νερού και την τοπογραφία,
- ⊗ το κλίμα, το οποίο επηρεάζει κατά κύριο λόγο το βαθμό τροφοδοσίας του υπόγειου νερού.

8.4.2 Περιορισμοί των χαρτών τρωτότητας

Οι χάρτες τρωτότητας δεν αποτελούν πανάκεια αλλά παρουσιάζουν αρκετούς περιορισμούς ως προς τη χρησιμοποίησή τους. Οι περιορισμοί αυτοί οφείλονται κυρίως στο γεγονός ότι πολλές φορές υπάρχει έλλειψη δεδομένων (ποιοτικών και ποσοτικών) σε σχέση με την κλίμακα του χάρτη. Άλλοτε πάλι η περιγραφή των χαρακτηριστικών του φυσικού συστήματος (όσον αφορά τα γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά) δεν είναι επαρκής. Η έλλειψη μιας κοινής μεθοδολογίας χαρτογράφησης της τρωτότητας, η οποία θα χαιρεί γενικής αποδοχής καθώς και αδυναμία πλήρους ελέγχου και επιβεβαίωσής της, λόγω της χρονικής διάρκειας που διαρκούν οι διαδικασίες οι οποίες επηρεάζουν την τρωτότητα του υπόγειου νερού, αποτελούν ορισμένες παραμέτρους οι οποίες θέτουν όρια στην αναπόσπαστη χρήση των χαρτών τρωτότητας.

8.5 Μεθοδολογία

8.5.1 Δημιουργία βάσης δεδομένων και θεματικών επιπέδων για την εκτίμηση και χαρτογράφηση της τρωτότητας

Τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS) αποτελούν το εργαλείο εκείνο με το οποίο ο χρήστης είναι σε θέση να διαχειρίζεται μεγάλη ποσότητα χωρικών δεδομένων, δίνοντάς του τη δυνατότητα να συνδυάζει τη διαχείριση της βάσης δεδομένων του, παράλληλα με την ψηφιοποίηση χαρτών. Στα συστήματα GIS, όλα τα στοιχεία εκείνα τα οποία μπορούν να περιγραφούν γεωγραφικά, γεωαναφέρονται, προκύπτοντας κατά αυτόν τον τρόπο διάφορα θεματικά επίπεδα δεδομένων, τα οποία μπορούν να αναλυθούν, να συσχετισθούν και να συνδυαστούν μεταξύ τους.

Η ανάλυση των δεδομένων τόσο σε χωρικό επίπεδο όσο και σε επίπεδο πινάκων αποτελεί ένα πλεονέκτημα των GIS, σε σχέση με τα παραδοσιακά συστήματα βάσης δεδομένων. Ουσιαστικά κάθε στοιχείο που μπορεί να γεωαναφερθεί και να χαρτογραφηθεί, μπορεί εν συνεχεία να ψηφιοποιηθεί και να αποθηκευτεί, δίνοντας αυτόματα τη δυνατότητα αξιολόγησης, ανάλυσης, συνεχούς ενημέρωσης και χαρτογράφησης του.

Για τη χαρτογράφηση της τρωτότητας στην περιοχή μελέτης, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Arc – View και Arc – Map της εταιρείας ESRI version 9.x Το συγκεκριμένο λογισμικό αποτελεί ένα αξιόπιστο και ευέλικτο εργαλείο, καθώς η ευχέρειά του και η αξιοπιστία του αποδεικνύεται εξίσου ικανοποιητική στην προσπάθεια απεικόνισης των αποτελεσμάτων εκτιμήσεως και χαρτογράφησης της τρωτότητας.

8.5.2 Πολυκριτηριακή μέθοδος SCALDI

Η δημιουργία ενός χάρτη τρωτότητας δε θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί χωρίς να ληφθούν όλοι εκείνοι οι μεμονωμένοι παράγοντες – κριτήρια, οι οποίοι καθορίζουν την ομοιογένεια της εκάστοτε περιοχής μελέτης και την ικανότητά της στην εξασθένιση των ρύπων. Η χαρτογράφηση της εσωτερικής τρωτότητας βασίζεται στον υπολογισμό των διαφόρων φυσικών παραγόντων και κριτηρίων, όπως είναι *το έδαφος, η ακόρεστη ζώνη, οι ιδιότητες του υδροφόρου ορίζοντα, ο βαθμός διασύνδεσης των ασυνεχειών*, τα οποία παίζουν σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της τρωτότητας των υπόγειων νερών.

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διδακτορική διατριβή είναι μια πολυκριτηριακή μέθοδος αξιολόγησης δεδομένων τύπου *Point Count System Models*. Πρόκειται για ένα συνδυασμό υποκειμενικής βαθμονόμησης των κριτηρίων από το χρήστη

και αριθμητικών πράξεων μεταξύ των επιπέδων των κριτηρίων που επιλέχτηκαν. Στόχος είναι ο υπολογισμός ενός τελικού δείκτη τρωτότητας, μέσω της βαθμονόμησης των κριτηρίων που ελήφθησαν υπόψη, το κάθε ένα από τα οποία αντιπροσωπεύονται από ένα επίπεδο πληροφοριών. Η αριθμητική τιμή της τρωτότητας δίνεται ως εξής: αρχικά υπολογίζεται η τιμή της κάθε κυψελίδας σε κάθε επίπεδο που χρησιμοποιήθηκε, αφού πρώτα πολλαπλασιαστεί με έναν συντελεστή βαρύτητας. Στη συνέχεια όλα τα επίπεδα αλληλεπικαλύπτονται και προστίθενται μεταξύ τους. Ο τελικός χάρτης που προκύπτει αντιπροσωπεύει το χάρτη τρωτότητας του υπόγειου νερού, ο οποίος βασίζεται στις πληροφορίες του κάθε επιπέδου.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε είναι μία παραλλαγή της μεθόδου *RISKE*, η οποία αναπτύχθηκε στη Γαλλία από τους Petelet – Giraud, Doerfliger & Crochet (2000) και η οποία με τη σειρά της αποτελεί μία προσέγγιση της μεθόδου *EPIC* η οποία δημιουργήθηκε και εφαρμόστηκε αρχικά στην Ελβετία από τη Doerfliger (1996) για «τη σφαιρική και με μεγάλη ακρίβεια εκτίμηση της ευαισθησίας των υπόγειων υδάτων στις φυσικές και ανθρωπογενείς επιδράσεις στις καρστικές περιοχές».

Η μέθοδος περιλαμβάνει 5 κριτήρια, τα οποία επιτρέπουν την καλύτερη κατανόηση της δομής του υδροφόρου ορίζοντα και της υπόγειας ροής του νερού μέσα στο μέσο ασυνεχειών.

Τα επιμέρους κριτήρια είναι:

- ☒ η τοπογραφική κλίση **S**,
- ☒ το εδαφικό κάλυμμα **C**,
- ☒ υδροφόρο πέτρωμα **A**,
- ☒ οι χρήσεις γης **L**,
- ☒ ο βαθμός διασύνδεσης των ασυνεχειών **DI**,

Το κάθε κριτήριο χωρίζεται σε συγκεκριμένες τάξεις τιμών, ενώ σε αυτό αντιστοιχεί και ένας συντελεστής βαρύτητας, ο οποίος δείχνει τη σχετική σημασία των κριτηρίων μεταξύ τους σε σχέση πάντα με την τρωτότητα.

Ο τελικός δείκτης τρωτότητας I_g προκύπτει από το άθροισμα των τιμών όλων των παραμέτρων πολλαπλασιαζόμενων επί των αντιστοίχων συντελεστών βαρύτητάς τους.

$$I_g = \alpha S_s + \beta C_c + \gamma A_a + \delta L_l + \varepsilon DI_{di}$$

όπου:

- I_g = Τελικός δείκτης τρωτότητας
- $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$ = συντελεστές βαρύτητας
- S_s, C_c, L_b, DI_{di} = Τιμή της τάξης των κριτηρίων

8.5.3 Μεθοδολογία εργασίας

Προκειμένου να εκτιμηθεί και να χαρτογραφηθεί η τρωτότητα του υπόγειου νερού στην περιοχή μελέτης, δημιουργήθηκε ένας σημαντικός αριθμός βάσεων δεδομένων από τα στοιχεία που συγκεντρώθηκαν για το σκοπό αυτό, ενώ παράλληλα ψηφιοποιήθηκαν χάρτες, οι οποίοι αποτέλεσαν τα επιμέρους θεματικά επίπεδα. Η επεξεργασία των επιπέδων αυτών οδήγησε στην σύνταξη του τελικού χάρτη τρωτότητας.

Πιο συγκεκριμένα, ψηφιοποιήθηκε το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής μελέτης, για την οποία χρησιμοποιήθηκαν τα τοπογραφικά διαγράμματα της Γ.Υ.Σ. κλίμακας 1:5.000. Από το ψηφιακό υποβάθρου, προέκυψε ο χάρτης κλίσεων της περιοχής, ο οποίος με κατάλληλη επεξεργασία αποτέλεσε και την ψηφιακή απεικόνιση του κριτηρίου S.

Με βάση το γεωλογικό χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε., φύλλο ΛΑΡΥΜΝΑ, ΛΙΜΝΗ, ΠΗΛΙ κλίμακας 1:50.000 (Κατσικάτσος και συν, 1978 – 1980), δημιουργήθηκε ψηφιακά ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης, από όπου προέκυψε ο χάρτης κριτηρίου A.

Στη συνέχεια, ψηφιοποιήθηκαν οι εδαφολογικοί χάρτες κλίμακας 1:50.000 της Δασικής Υπηρεσίας, από τους οποίους προέκυψε ο χάρτης του κριτηρίου C.

Ο χάρτης του κριτηρίου L προέκυψε από τους υφιστάμενους ψηφιοποιημένους χάρτες κατανομής χρήσεων γης του προγράμματος CORINE (<http://etc-lusi.eionet.europa.eu>)

Τέλος από τις εργασίες υπαίθρου, χαρτογραφήθηκαν και αναλύθηκαν οι ασυνέχειες που απαντώνται στην περιοχή μελέτης και σε συνδυασμό με τη χρήση δορυφορικών εικόνων, κατασκευάστηκαν οι χάρτες χωρικής κατανομής των ασυνεχειών. Με τη βοήθεια του Spatial Analyst tool του Arc – GIS, κατασκευάστηκαν οι επιμέρους θεματικοί χάρτες του κριτηρίου DI.

Κάθε κριτήριο υποδιαιρέθηκε σε τέσσερις τάξεις, η τιμή των οποίων κυμάνθηκε από το 0 έως το 3. Οι ψηφιακοί χάρτες, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν τα επίπεδα των κριτηρίων, μετατράπηκαν από τη διανυσματική απεικόνιση (Feature) σε εκείνη της μορφής κουκίδων (Raster). Κατά τη διαδικασία αυτή χωρίστηκαν σε κλίμακα, του οποίου η κάθε κυψελίδα είχε διαστάσεις 10 x 10 m.

Για κάθε κριτήριο, η τιμή της κάθε τάξης του πολλαπλασιάζεται με το συντελεστή βαρύτητάς του. Οι τιμές που υπολογίζονται με τον παραπάνω τρόπο για τα επιμέρους κριτήρια, στη

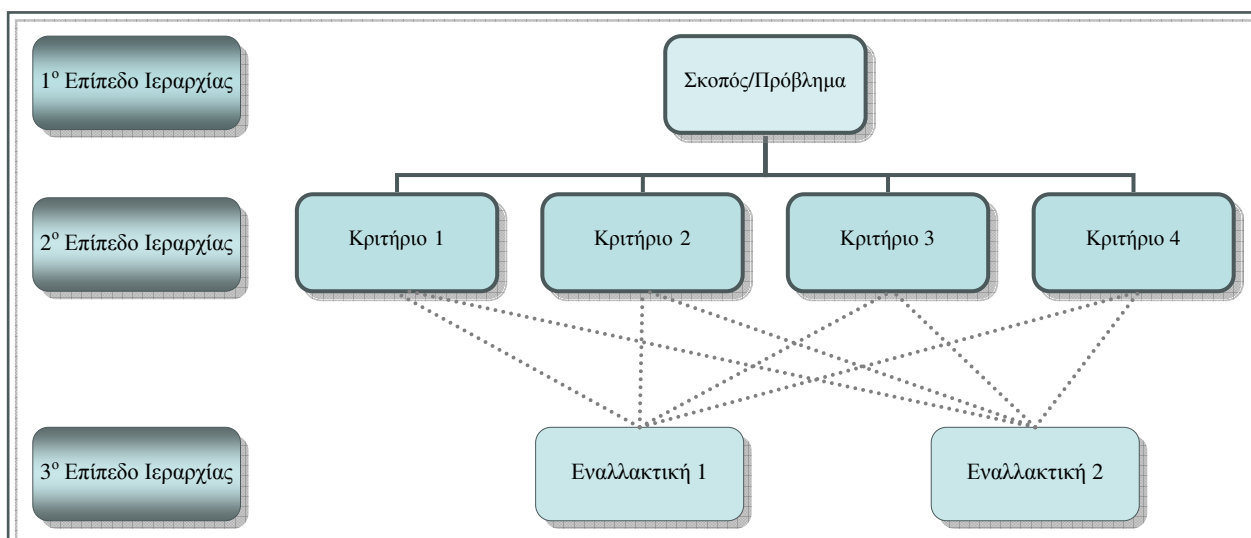
συνέχεια προστίθενται μεταξύ τους προκειμένου να υπολογιστεί ο συνολικός δείκτης τρωτότητας Ig. Παράλληλα με τον υπολογισμό αυτό, πραγματοποιήθηκε υπέρθεση των επιμέρους θεματικών επιπέδων (κριτήρια) με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός τελικού χάρτη στον οποίο επιτυγχάνεται η χωρική κατανομή του δείκτη Ig στην περιοχή μελέτης.

Στη συνέχεια η τιμή του δείκτη τρωτότητας υποδιαιρείται σε τέσσερις τάξεις, η κάθε μία από τις οποίες αντιπροσωπεύει τον αντίστοιχο βαθμό ευαισθησίας του μέσου ασυνεχειών στις φυσικές και ανθρωπογενείς πιέσεις.

Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκε σύγκριση του χάρτη κατανομής του δείκτη τρωτότητας Ig με τους χάρτες των επιμέρους κριτηρίων. Η σύγκριση αυτή αποτελεί μέρος της επαλήθευσης της ορθότητας του τελικού χάρτη.

8.5.4 Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (Analytical Hierarchy Process – AHP)

Η αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (AHP) εισήχθηκε για πρώτη φορά από τον Saaty (1977) και είναι ένα αναλυτικό και λογικά δομημένο μοντέλο, το οποίο επιτρέπει τη λήψη σύνθετων αποφάσεων μέσω της ιεραρχικής ανάλυσης του προβλήματος και της χρήσης κριτηρίων σχετιζόμενων με το πρόβλημα (Σχ. 8.1).



Σχήμα 8.1: Ιεραρχική Ανάλυση του σκοπού/προβλήματος με τη χρήση επιπέδων ιεραρχικής δόμησης

Τελικός σκοπός είναι η απόδοση συντελεστών βαρύτητας σε κάθε κριτήριο προκειμένου να αναγνωριστεί ο βαθμός επίδρασης του στο προς λύση πρόβλημα. Σύμφωνα με τον Eastman (1998), αποτελεί την περισσότερο υποσχόμενη μέθοδο στο πλαίσιο της ανάπτυξης συντελεστών βαρύτητας. Κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η ποσοτικοποίηση των υποκειμενικών κρίσεων του ειδικού σε σχέση με την επίδραση των παραμέτρων (κριτήρια)

στην επίτευξη ενός στόχου με τη χρήση πινάκων $n \times n$. Ο έλεγχος των αποτελεσμάτων επιτυγχάνεται με την εισαγωγή του δείκτη συσχέτισης (**Consistency Ratio – CR**), μέσω του οποίου ελέγχεται ο βαθμός συσχέτισης των εισαχθέντων στην ανάλυση παραμέτρων.

Η γενική διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου ξεκινά με την ιεραρχική αναδόμηση του σκοπού – προβλήματος, σε κριτήρια – παραμέτρους. Στη συνέχεια όλες οι παράμετροι – κριτήρια συγκρίνονται ανά δύο μεταξύ τους σε έναν πίνακα $n \times n$ (όπου n ο αριθμός των παραμέτρων – κριτηρίων) με βάση τη σχετική επίδρασή τους στην επίτευξη του σκοπού. Προκειμένου να αποκτήσει αριθμητική τιμή ο συγκεκριμένος λογισμός, οι Saaty (1977), Saaty & Vargas (1991), πρότειναν τη χρήση μιας αριθμητικής κλίμακας από το 1 έως το 9, όπου η τιμή 1 εκφράζει ίση επίδραση μεταξύ δύο παραμέτρων στην επίτευξη του σκοπού και η τιμή 9 εκφράζει την απόλυτη επίδραση του ενός κριτηρίου σε σχέση με το συγκρινόμενο με αυτό κριτήριο. Η κλίμακα αυτή παρουσιάζεται στον πίνακα 8.1 που ακολουθεί.

Πίνακας 8.1: Κλίμακα συγκριτικών παρατηρήσεων

Βαθμός Επίδρασης	Περιγραφή
1	Ίσης Σημασίας / Επίδρασης
3	Μέτριος Βαθμός επίδρασης μίας παραμέτρου έναντι της άλλης
5	Έντονος Βαθμός επίδρασης μίας παραμέτρου έναντι της άλλης
7	Ιδιαίτερα Έντονος Βαθμός επίδρασης μίας παραμέτρου έναντι της άλλης
9	Εξαιρετικά Έντονος Βαθμός επίδρασης μίας παραμέτρου έναντι της άλλης
2, 4, 6, 8	Ενδιάμεσες Τιμές
Αντίστροφες Τιμές	Τιμές Χρήσιμες για Αντίστροφες Συγκρίσεις

Με τη χρήση της κλίμακας συγκριτικών παρατηρήσεων ποσοτικοποιούνται οι παρατηρήσεις του ειδικού και εισάγονται σε πίνακα συγκρίσεων $n \times n$ (Πίν. 8.2). Ο πίνακας 8.2 δείχνει ένα απλό παράδειγμα ενός πίνακα 4×4 , όπου έχουν εισαχθεί 4 τυχαία κριτήρια – παράμετροι (K1, K2, K3) και τα οποία συγκρίνονται μεταξύ τους. Θεωρώντας για παράδειγμα ότι το K1 είναι ισχυρότερο από το K3, του αποδίδεται η τιμή 5. Στην αντίστροφη θέση του πίνακα του αποδίδεται η αντίστροφη τιμή (1/5 ή 0,2).

Πίνακας 8.2: Παράδειγμα 4×4 συγκριτικού πίνακα

Κριτήριο/Παράμετρος	K1	K2	K3	K4
K1	1	1/4	5	1/2
K2	4	1	4	2
K3	1/5	1/4	1	1/4
K4	2	1/2	4	1

Το επόμενο βήμα στην ανάλυση είναι ο υπολογισμός των συντελεστών βαρύτητας (eigenvectors) για κάθε μία από τις παραμέτρους, με βάση τις τιμές (eigenvalues) του πίνακα. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται με την πρόσθεση όλων των τιμών κάθε γραμμής του πίνακα και διαίρεση κάθε αθροίσματος με το συνολικό άθροισμα όλων των σειρών.

Παρά το γεγονός ότι η εφαρμογή της μεθόδου είναι σχετικά εύκολη, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην απόδοση των σχετικών τιμών καθώς είναι πολύ πιθανό η απόδοση αυτών των τιμών να είναι τρωτή από την υποκειμενικότητα του ερευνητή και να εμφανίζονται ασυνέπειες στην τελική συμπλήρωση του πίνακα.

Έστω ότι δίνεται για παράδειγμα ένας γενικός πίνακας σύγκρισης $n \times n$ (Πίν. 8.3), στον οποίο η παράμετρος A_i θεωρείται και είναι πιο σημαντική σε σχέση με την παράμετρο A_j , και η A_j θεωρείται και είναι πιο σημαντική σε σχέση με την A_k , αλλά παρόλα αυτά η A_i δε θεωρείται πιο σημαντική σε σχέση με την A_k , ενώ στην πραγματικότητα είναι πιο σημαντική.

Πίνακας 8.3: Γενική μορφή τετραγωνικού συγκριτικού πίνακα $n \times n$

Κριτήριο/πάρμετρος	A1	A2	An
A1	$a_{11} = w_1/w_2$	$a_{12} = w_1/w_2$	w_1/w_n
A2	$a_{21} = w_2/w_1$	$a_{22} = w_2/w_2$	w_2/w_n
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
An	$a_{n1} = w_n/w_1$	$a_{n2} = w_n/w_2$	w_n/w_n

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τέτοιου είδους ασυνέπειες ο Saaty (1977) εισήγαγε το βαθμό ασυνέπειας (Consistency Ratio – CR) ο οποίος εκφράζει την πιθανότητα ο $n \times n$ συγκριτικός πίνακας να έχει συμπληρωθεί από τυχαίες τιμές.

Η μαθηματική έκφραση του CR είναι:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Η τιμή CI εκφράζει το δείκτη συνέπειας (Consistency Index) και προκύπτει από τη σχέση:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

όπου λ_{\max} είναι η μέγιστη τιμή eigen του τετραγωνικού πίνακα σύγκρισης τάξης n , και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\lambda_{\max} = \sum_{j=1}^n a_{ij} (w_j/w_i)$$

Η τιμή RI εκφράζει τη μέση τιμή του δείκτη συνέπειας και ο ποιος καλείται ως τυχαίος δείκτης. Υπολογίστηκε από τον Saaty (1977) σαν το μέσο όρο των δεικτών συνέπειας τετραγωνικών πινάκων ποικίλων τάξεων n συμπληρωμένων με τυχαίες τιμές. Με βάση αυτό το λογισμό οι Saaty & Vargas (1991), συνέταξαν έναν πίνακα όπου για κάθε τάξη πίνακα αντιστοιχεί και μία τιμή RI (Πίν. 8.4).

Πίνακας 8.4: Τιμές του δείκτη RI συναρτήσει της τάξης του πίνακα

n	2	3	4	5	6	7	8
RI	0,00	0,52	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41

Με βάση μεγάλο πλήθος εφαρμογών οι Saaty & Vargas (1991) απέδειξαν ότι εάν ο βαθμός συσχέτισης είναι μεγαλύτερος του 0,1 ($CR > 0,1$), τότε υπάρχει μεγάλη ασυνέπεια μεταξύ των εισαχθέντων τιμών eigen και το αποτέλεσμα της ανάλυσης απορρίπτεται.

8.6 Ανάλυση των κριτηρίων S, C, A, L, DI

Η εκτίμηση και χαρτογράφηση της τρωτότητας στην περιοχή μελέτης μέσω του υπολογισμού του τελικού δείκτη τρωτότητας I_g , πραγματοποιήθηκε με βάση τα κριτήρια S, C, A, L, DI, όπως αυτά περιγράφονται παρακάτω. Για κάθε κριτήριο, αναγνωρίστηκαν τα χαρακτηριστικά εκείνα τα οποία το εκφράζουν και με βάση τα οποία κατέστη δυνατή η ταξινόμησή του σε 4 τάξεις (από 0 έως 3), από εκείνη με τον μικρότερο βαθμό τρωτότητας έως εκείνη με τον μεγαλύτερο. Η τάξη ενός κριτηρίου αντιπροσωπεύει τον ίδιο βαθμό τρωτότητας με την αντίστοιχη τάξη ενός άλλου κριτηρίου.

8.6.1 Κριτήριο S

Το κριτήριο S, τοπογραφική κλίση, διαιρείται σε τέσσερις τάξεις, οι οποίες είναι:

Πίνακας 8.5: Τάξεις, χαρακτηριστικά, δείκτης τρωτότητας και συντελεστής βαρύτητας του κριτηρίου S

Τάξεις	Χαρακτηριστικά	Δείκτης	Συντελεστής βαρύτητας
S ₀	Πολύ μεγάλη κλίση ($> 45^\circ$)	0	0,1924
S ₁	Μεγάλη κλίση ($25 - 45^\circ$)	1	
S ₂	Μέτρια κλίση ($5 - 25^\circ$)	2	
S ₃	Μικρή κλίση ($< 5^\circ$)	3	

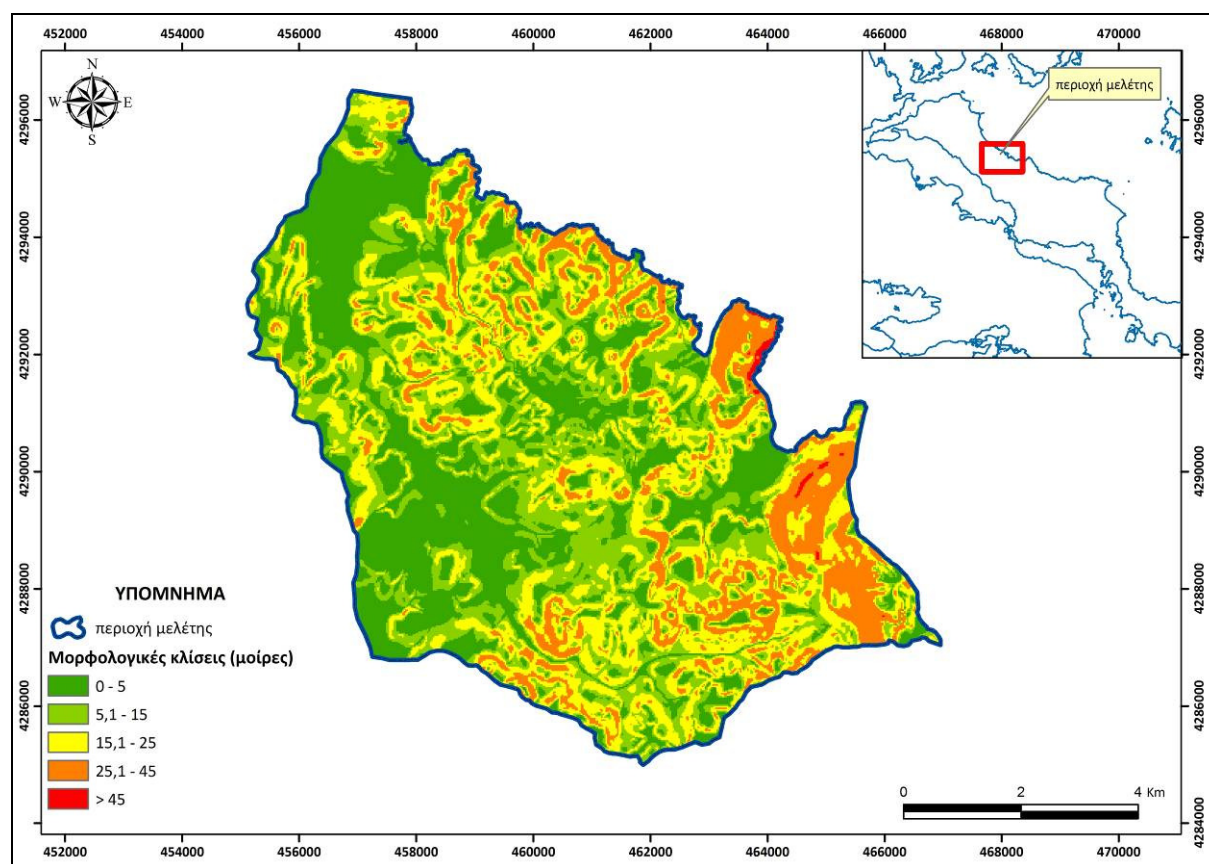
Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, η ταξινόμηση του κριτηρίου S, κατηγοριοποιείται σε τέσσερις τάξεις ως εξής:

S₀: Μηδενική έως ελάχιστη επίδραση στην τρωτότητα. Η τάξη αυτή περιλαμβάνει τις πολύ μεγάλες κλίσεις που παρατηρούνται σε μία λεκάνη απορροής και οι οποίες είναι μεγαλύτερες των 45°. Σε τέτοιες κλίσεις εννοείται η επιφανειακή απορροή, η οποία κυριαρχεί έναντι της κατεΐσδυσης, η οποία είναι ασήμαντη έως και μηδενική.

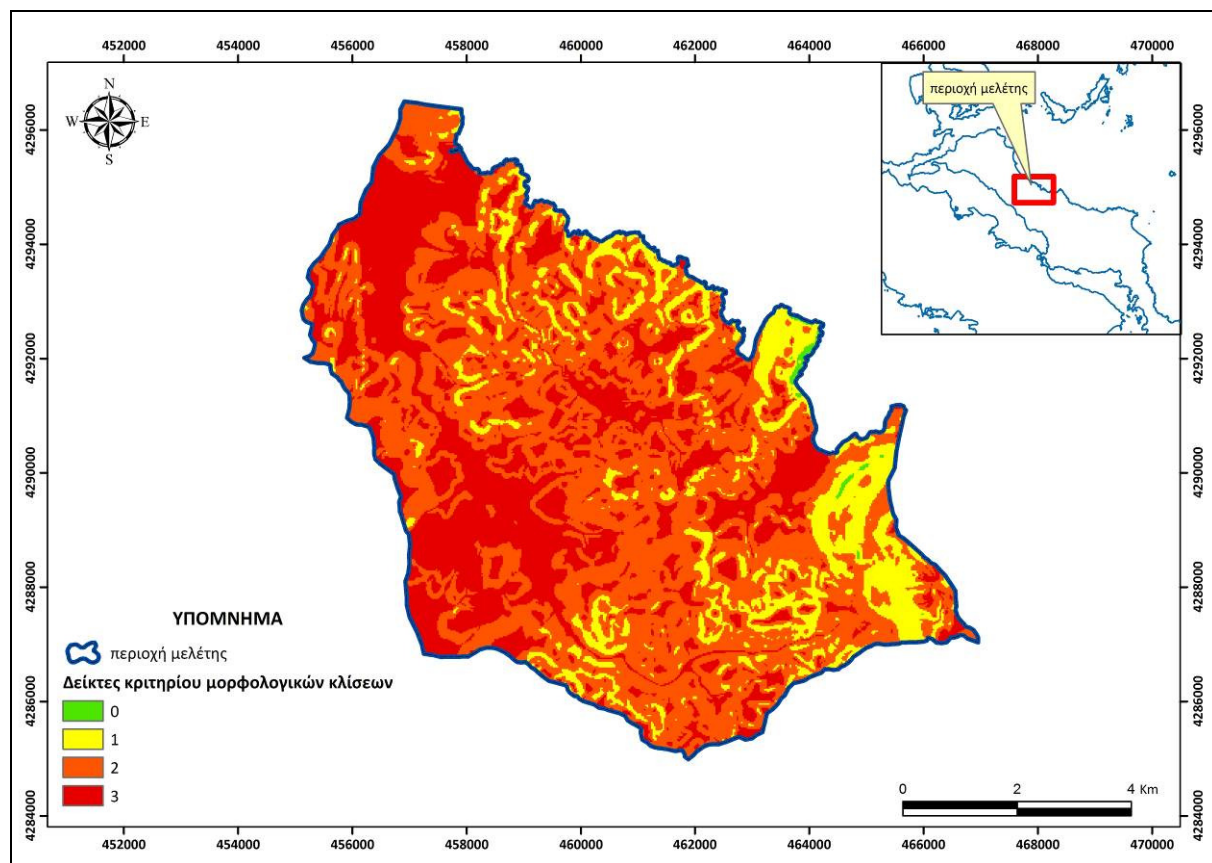
S₁: Μικρή επίδραση στην τρωτότητα. Οι κλίσεις μεταξύ 25 - 45°, οι οποίες είναι εξίσου μεγάλες και εννοούν την επιφανειακή απορροή, ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία καθώς η επίδραση της κατεΐσδυσης είναι μικρή όσον αφορά την τρωτότητα.

S₂: Μέτρια επίδραση στην τρωτότητα. Στην τάξη αυτή ανήκουν οι μεσαίες κλίσεις, οι οποίες κυμαίνονται από 5 - 25° και πλέον η κατεΐσδυση αυξάνεται σε σχέση με την επιφανειακή απορροή, πράγμα που αντικατοπτρίζεται σε μέτριο βαθμό στην τρωτότητα.

S₃: Έντονη επίδραση στην τρωτότητα. Στην τάξη αυτή περιλαμβάνονται οι κλίσεις μεταξύ 0 - 5°, όπου η επιφανειακή απορροή είναι περιορισμένη και η κατεΐσδυση κυριαρχεί έναντι αυτής.



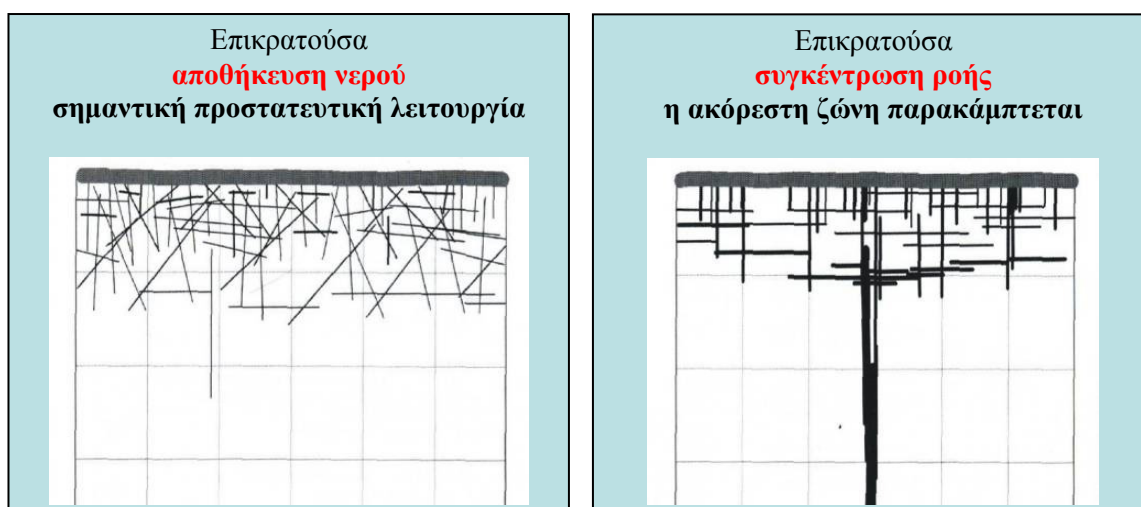
Σχήμα 8.2: Χάρτης μορφολογικών κλίσεων περιοχής μελέτης



Σχήμα 8.3: Χάρτης δεικτών κριτηρίου μορφολογικών κλίσεων

8.6.2 Κριτήριο C

Το κριτήριο εδαφικού καλύμματος αποτελεί σημαντική παράμετρος στην εκτίμηση του δείκτη τρωτότητας καθώς κατ’ αναλογία με την επικαρστική ζώνη, υπάρχει η δυνατότητα παρακάμψεως (by pass) της επιφανειακής υδροφορίας και μεταφορά του ρύπου σε βαθύτερα υδατικά σώματα (Σχ. 8.4).



Σχήμα 8.4: Σκαρίφημα της δυνατότητας παρακάμψεως (by pass) της επιφανειακής υδροφορίας και μεταφορά του ρύπου σε βαθύτερα υδατικά σώματα (COST 620)

Από την ψηφιοποίηση των εδαφολογικών χαρτών της Δασικής Υπηρεσίας, Φύλλο ΛΑΡΥΜΝΑ, ΛΙΜΝΗ, ΠΗΛΙ, ΨΑΧΝΑ κλίμακας 1:50.000 προέκυψε ο χάρτης κατανομής του εδαφικού καλύμματος (Σχ. 8.5).

Το κριτήριο C, εδαφικό κάλυμμα, διαιρείται σε τέσσερις τάξεις, οι οποίες είναι:

Πίνακας 8.6: Τάξεις, χαρακτηριστικά, δείκτης τρωτότητας και συντελεστής βαρύτητας του κριτηρίου C

Τάξεις	Χαρακτηριστικά	Δείκτης	Συντελεστής βαρύτητας
C ₀	Βαθύ	0	0,1971
C ₁	Βαθύ και αβαθές	1	
C ₂	Αβαθές	2	
C ₃	Γυμνό πέτρωμα	3	

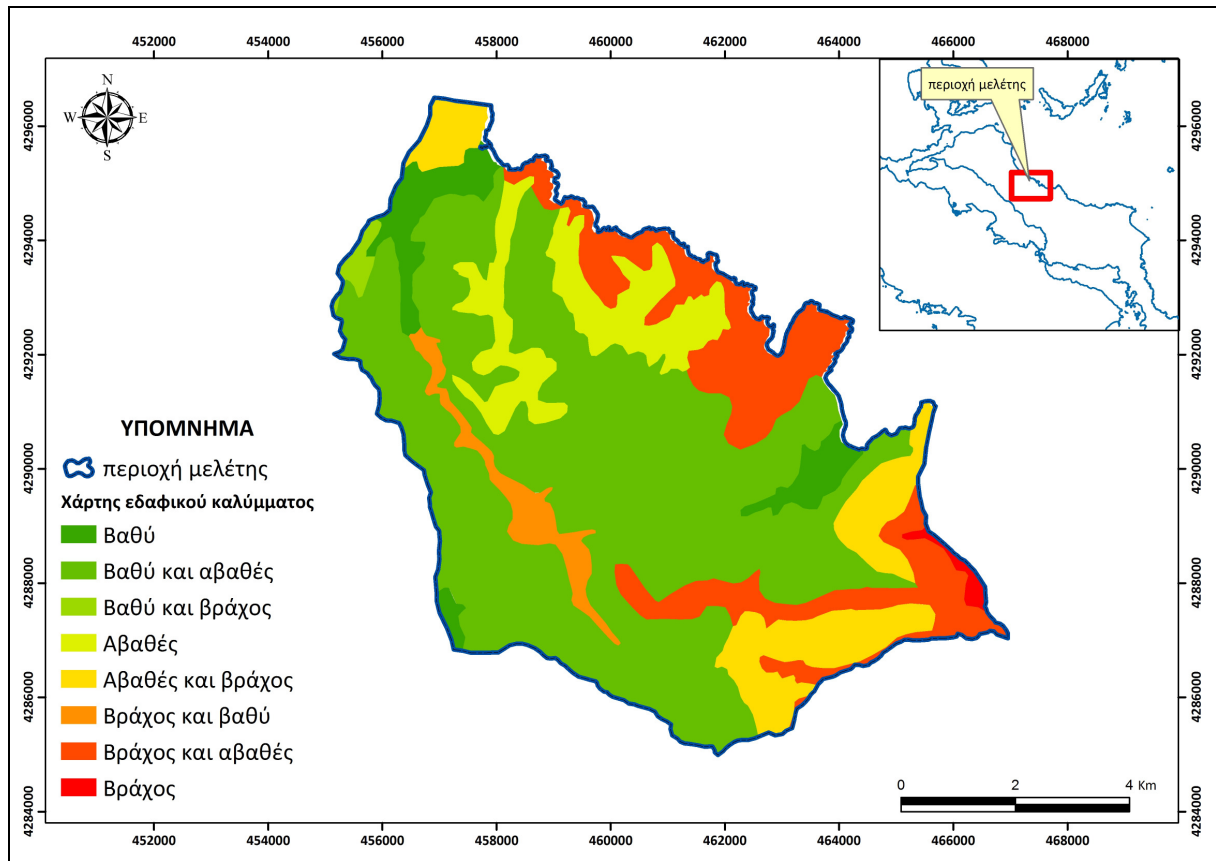
Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, η ταξινόμηση του κριτηρίου C, κατηγοριοποιείται στις τέσσερις τάξεις ως εξής:

C₀: Μηδενική έως ελάχιστη επίδραση στην τρωτότητα. Η τάξη αυτή περιλαμβάνει τις περιοχές με μεγάλο πάχος εδαφικού καλύμματος όπου ο ρύπος δύναται να υποστεί μια σειρά από μηχανισμούς εξασθένησης εξαιτίας της επικρατούσας αποθήκευσης του νερού που αποτελεί σημαντική προστατευτική λειτουργία πριν την είσοδό του σε βαθύτερα υδατικά σώματα.

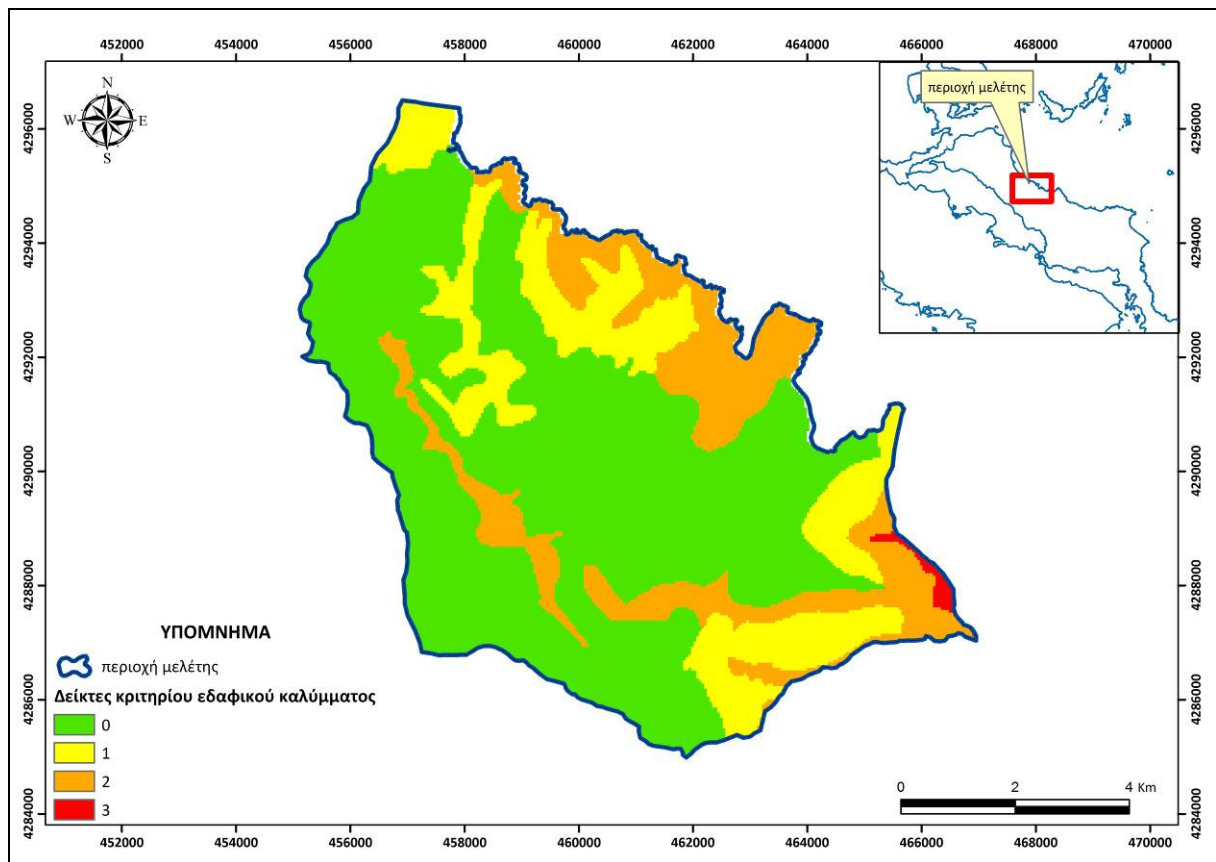
C₁: Μικρή επίδραση στην τρωτότητα. Οι περιοχές που εμφανίζουν πάχος εδαφικού καλύμματος κατά τόπους βαθύ και κατά τόπους αβαθές, συνδέονται με το 19,17% της περιοχής μελέτης, όπου ο ρύπος ενδέχεται να έχει μικρή επίδραση στην τρωτότητα, καθώς οι φυσικοί μηχανισμοί εξασθένησης του ρύπου εμφανίζονται στο μέγιστο βαθμό εν συγκρίσει με τις περιοχές όπου επικρατεί ο αβαθής χαρακτήρας.

C₂: Μέτρια επίδραση στην τρωτότητα. Στην τάξη αυτή ανήκει το 18,69% της περιοχής μελέτης και πλέον οι μηχανισμοί εξασθένησης του ρύπου λαμβάνουν χώρα στον ελάχιστο βαθμό και σε ορισμένες ζώνες.

C₃: Έντονη επίδραση στην τρωτότητα. Στην τάξη αυτή περιλαμβάνονται οι περιοχές όπου υπάρχει εμφάνιση του μητρικού πετρώματος χωρίς την παρουσία εδαφικού καλύμματος. Σε αυτήν την περίπτωση η επικρατούσα αποθήκευση του νερού είναι πολύ μικρή και η ακόρεστη ζώνη δύναται να παρακαμφθεί και να εισαχθεί σε βαθύτερα υδατικά σώματα.



Σχήμα 8.5: Χάρτης κατανομής εδαφικού καλύμματος



Σχήμα 8.6: Χάρτης δεικτών κριτηρίου εδαφικού καλύμματος

8.6.3 Κριτήριο A

Το κριτήριο A, αφορά τους σχηματισμούς που υδροφορούν και καθορίζεται από την φύση των γεωλογικών σχηματισμών και της τεκτονικής η οποία τα επηρεάζει άμεσα. Τα δύο αυτά χαρακτηριστικά είναι εκείνα τα οποία ελέγχουν σε πολύ μεγάλο βαθμό την κατείδυση του νερού. Όλοι οι υπόλοιποι σχηματισμοί θεωρούνται ότι παίζουν έναν προστατευτικό ρόλο, όσον αφορά τους υδροφόρους ορίζοντες του μέσου ασυνεχειών και δεν επηρεάζουν καθόλου τον δείκτη τρωτότητας, με αποτέλεσμα να βαθμολογούνται με την τιμή τρωτότητας μηδέν. Πρέπει να τονιστεί εδώ ότι για το κριτήριο A, λαμβάνεται υπόψη μόνο η υδραυλική συμπεριφορά των σχηματισμών και όχι η στρωματογραφία των σχηματισμών.

Στον Πίνακα 8.7 εμφανίζονται οι διαφορετικές τάξεις του κριτηρίου A, ο αριθμητικός δείκτης για την κάθε μία, καθώς και ο συντελεστής βαρύτητας του κριτηρίου A, για τον υπολογισμό της τρωτότητας.

Πίνακας 8.7: Τάξεις, χαρακτηριστικά, δείκτης τρωτότητας και συντελεστής βαρύτητας του κριτηρίου A

Τάξεις	Χαρακτηριστικά	Δείκτης	Συντελεστής βαρύτητας
A ₀	Χαμηλής έως Πολύ χαμηλής υδραυλικής αγωγιμότητας ($k < 10^{-7}$)	0	0,0614
A ₁	Χαμηλής έως Μέσης υδραυλικής αγωγιμότητας ($10^{-5} < k < 10^{-7}$)	1	
A ₂	Μέσης έως Υψηλής υδραυλικής αγωγιμότητας ($10^{-3} < k < 10^{-5}$)	2	
A ₃	Υψηλής έως πολύ Υψηλής υδραυλικής αγωγιμότητας ($k > 10^{-3}$)	3	

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, η ταξινόμηση του κριτηρίου C, κατηγοριοποιείται στις τέσσερις τάξεις ως εξής:

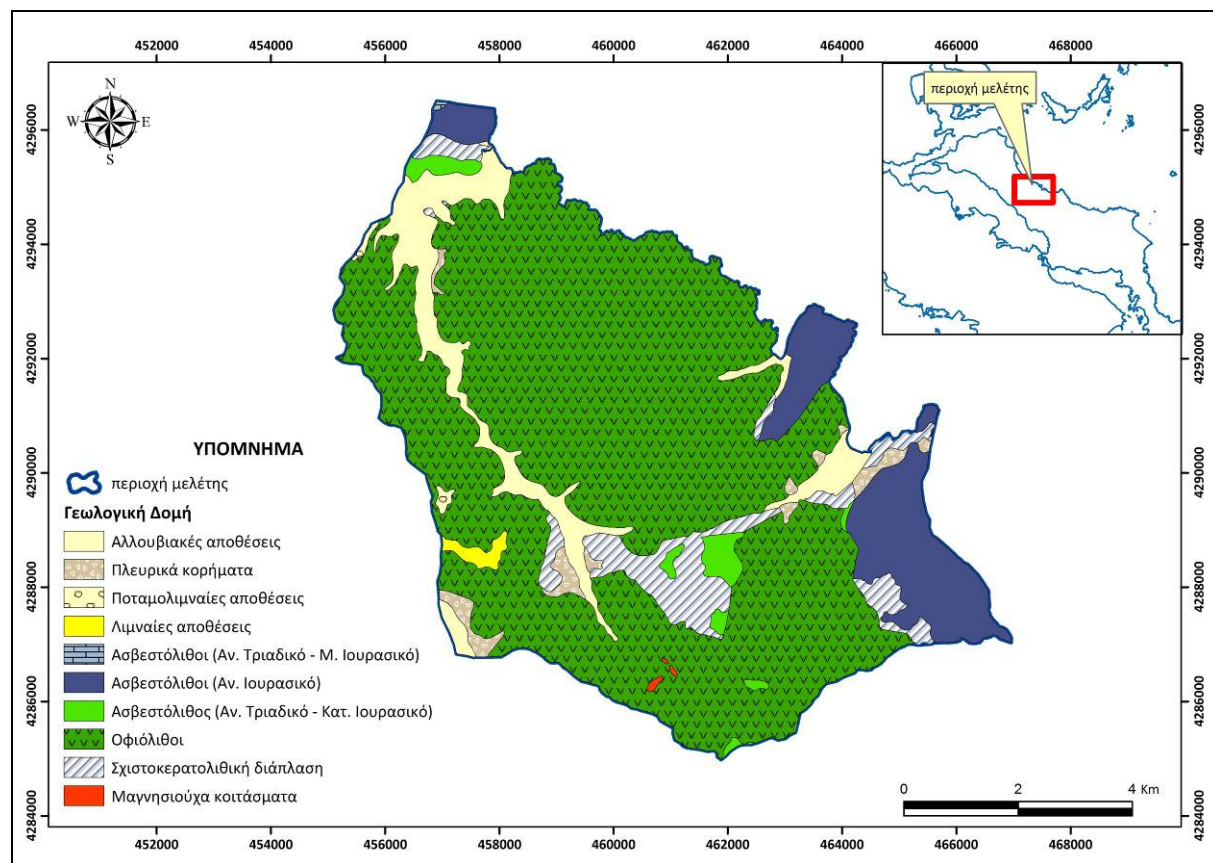
A₀: Μηδενική έως ελάχιστη επίδραση στην τρωτότητα. Η τάξη αυτή αντιπροσωπεύεται από όλους τους σχηματισμούς οι οποίοι θεωρητικά δεν υδροφορούν (σχετικά αδιαπέρατοι). Οι σχηματισμοί της κατηγορίας αυτής πρακτικά εμποδίζουν την κατείδυση του νερού προς μεγαλύτερα βάθη.

A₁: Μικρή επίδραση στην τρωτότητα. Οι αλλουβιακές αποθέσεις, κώνοι κορημάτων, συνεκτικά λατυποπαγή και κροκαλοπαγή, ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία σχηματισμών. Σε αυτούς, η κίνηση του νερού πραγματοποιείται με αργό ρυθμό.

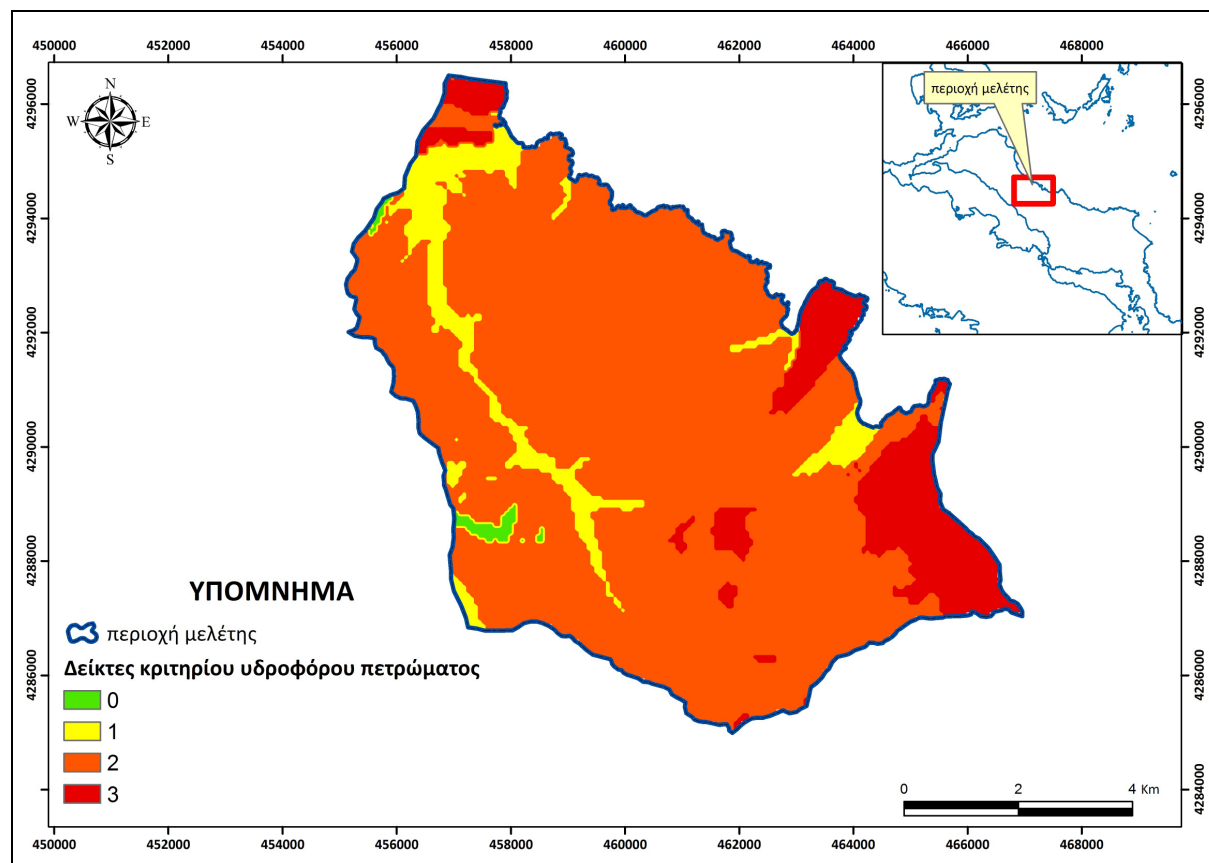
A₂: Μέτρια επίδραση στην τρωτότητα. Στην τάξη αυτή ανήκουν οι ελαφρώς κατακερματισμένοι σχηματισμοί με μικρό δίκτυο ασυνεχειών, λεπτοπλακώδεις, ελαφρώς τεκτονισμένοι ανθρακικοί σχηματισμοί σε εναλλαγές με αργιλικούς ή κλαστικούς

σηματισμούς. Η κατείσδυση και η κίνηση του νερού είναι αρκετά γρήγορη, αλλά δεν φτάνει μέχρι πολύ μεγάλα βάθη.

Α3: Έντονη επίδραση στην τρωτότητα. Η τάξη αυτή περιλαμβάνει τους σχηματισμούς εκείνους με τον πιο μεγάλο βαθμό τρωτότητας, όπως έντονα κατακερματισμένοι σχηματισμοί με καλά αναπτυγμένο δίκτυο ασυνεχειών και διαρρήξεων που επιτρέπουν την εύκολη και γρήγορη κίνηση του νερού σε μεγαλύτερα βάθη.



Σχήμα 8.7: Χάρτης της γεωλογίας της περιοχής μελέτης



Σχήμα 8.8: Χάρτης δεικτών κριτηρίου υδροφόρου πετρώματος

8.6.4 Κριτήριο L

Ο βαθμός τρωτότητας καθορίζεται από το πόσο εύκολα ή όχι θα εισέλθει ένας πιθανός ρύπος σε αυτόν, κυρίως μέσω του νερού των κατακρημνισμάτων, φτάνοντας μέχρι τον υδροφόρο ορίζοντα. Η κίνηση αυτή του νερού προς την επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα είναι πολύ πιθανόν να παρεμποδιστεί και να καθυστερήσει λόγω της βλάστησης, η οποία με τη σειρά της παίζει προστατευτικό ρόλο σε πιθανή ρύπανση των υδροφόρων οριζόντων.

Το κριτήριο αυτό λαμβάνει υπόψη του την παρουσία ή την απουσία μόνιμης βλάστησης και την πυκνότητά της. Όλα τα είδη βλάστησης, άλλα λιγότερο και άλλα περισσότερο, επηρεάζουν το καθεστώς κατείσδυσης – απορροής, γιατί αφενός καθυστερούν το νερό να φτάσει στην επιφάνεια του εδάφους και αφετέρου με το ριζικό τους σύστημα κατακρατούν ικανοποιητικές ποσότητες νερού και επομένως και ρύπων, στην περίπτωση που υφίσταται ρύπανση αυτού.

Στον Πίνακα 8.8 εμφανίζονται οι διαφορετικές τάξεις του κριτηρίου L, ο αριθμητικός δείκτης για την κάθε μία, καθώς και ο συντελεστής βαρύτητας του κριτηρίου L, για τον υπολογισμό της τρωτότητας.

Πίνακας 8.8: Τάξεις, χαρακτηριστικά, δείκτης τρωτότητας και συντελεστής βαρύτητας του κριτηρίου L

Τάξεις	Χαρακτηριστικά	Δείκτης	Συντελεστής βαρύτητας
L ₀	Δάσος	0	0,1359
L ₁	Μικρά δέντρα και θάμνοι	1	
L ₂	Αραιοί θάμνοι και δέντρα, καλλιεργήσιμες εκτάσεις, ποώδης βλάστηση	2	
L ₃	Γυμνό πέτρωμα, αστικός – βιομηχανικός ιστός, θέσεις εξόρυξης μεταλλεύματος	3	

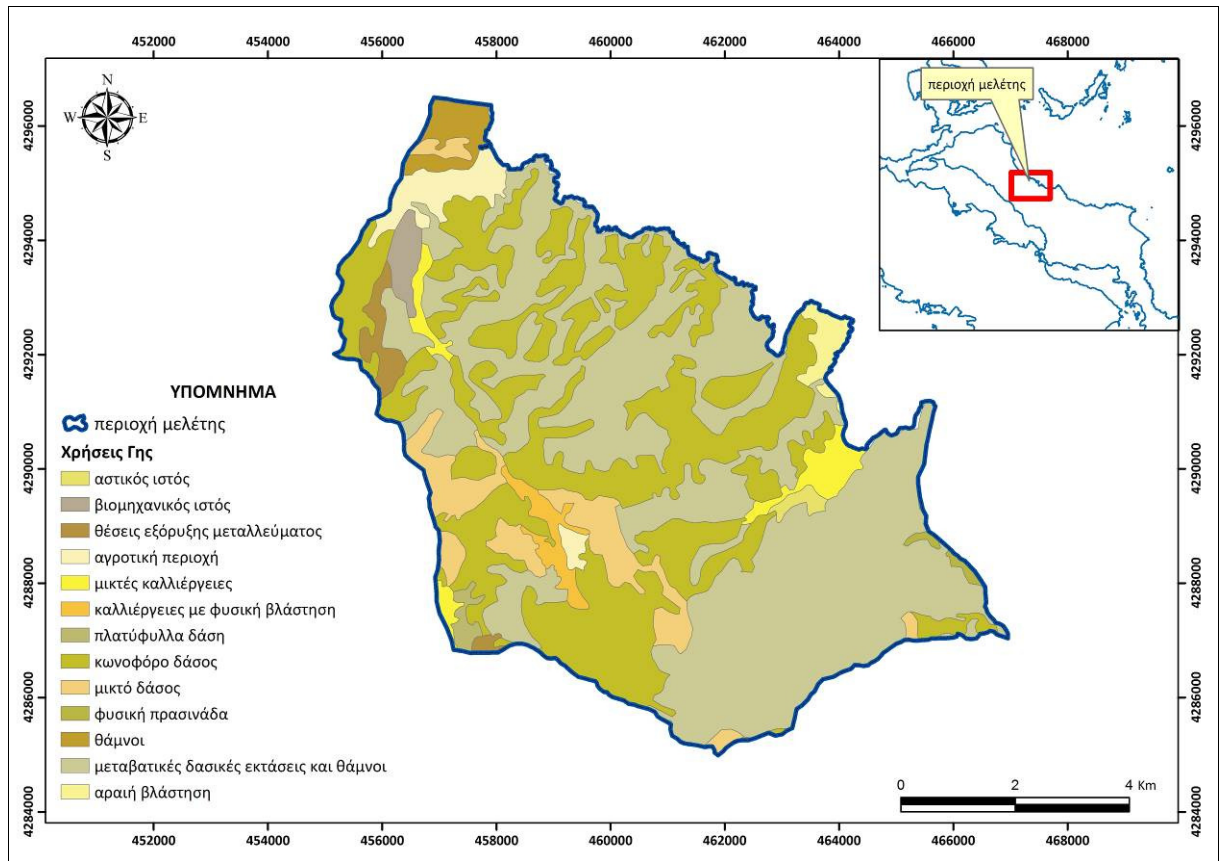
Το κριτήριο L υποδιαιρείται στις παρακάτω τάξεις:

L₀: Μηδενική έως ελάχιστη επίδραση στην τρωτότητα. Η πρώτη τάξη του κριτηρίου L περιλαμβάνει την πυκνή βλάστηση που παρατηρείται στα δάση, τον συνδυασμό δηλαδή πυκνών δέντρων και θάμνων. Η βλάστηση αυτή δεν επιτρέπει στο νερό της βροχής να φτάσει κατ' ευθείαν στην επιφάνεια του εδάφους, παίζοντας έτσι προστατευτικό ρόλο σε σχέση με τους δυνητικούς ρύπους που πιθανόν να υπάρχουν εν διαλύσει στα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα. Η τρωτότητα του μέσου ασυνεχειών που βρίσκεται κάτω από αυτό το «κάλυμμα βλάστησης» είναι πολύ μικρή έως μηδενική.

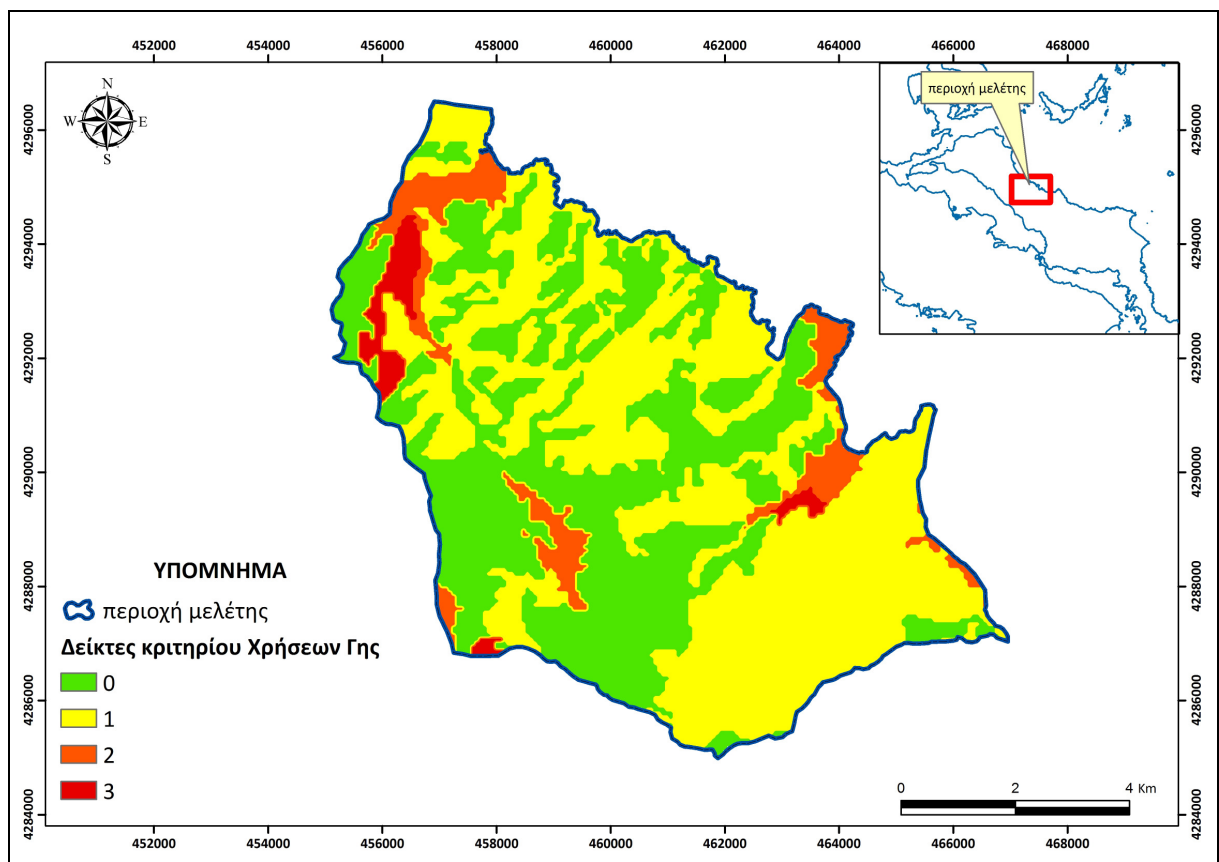
L₁: Μικρή επίδραση στην τρωτότητα. Σε αυτή την τάξη περιλαμβάνονται τα αραιά δέντρα και οι πυκνοί θάμνοι. Η τρωτότητα κι εδώ είναι μικρή καθώς το νερό εμποδίζεται από το να φτάσει απ' ευθείας στο υδατικό σώμα.

L₂: Μέτρια επίδραση στην τρωτότητα. Οι αραιοί θάμνοι και δέντρα, καθώς και οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις και οι εκτάσεις που καλύπτονται από φρύγανα, παίζουν έως ένα βαθμό προστατευτικό ρόλο σε σχέση με τον υποκείμενο υδροφόρο ορίζοντα. Η προστασία βέβαια που προσφέρουν είναι σαφώς μειωμένη σε σχέση με τις δύο προηγούμενες τάξεις, με αποτέλεσμα ο δείκτης τρωτότητας να είναι μεγαλύτερος.

L₃: Έντονη επίδραση στην τρωτότητα. Όταν εκλείπει η βλάστηση τότε το υδατικό σώμα μένει απροστάτευτο, εκτεθειμένο πια στην άμεση επίδραση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Σε αυτήν την περίπτωση η τρωτότητα είναι αρκετά αυξημένη και ο δείκτης τρωτότητας παίρνει τη μέγιστη τιμή.



Σχήμα 8.9: Χάρτης Χρήσεων Γης (Corine Landcover, 2004)



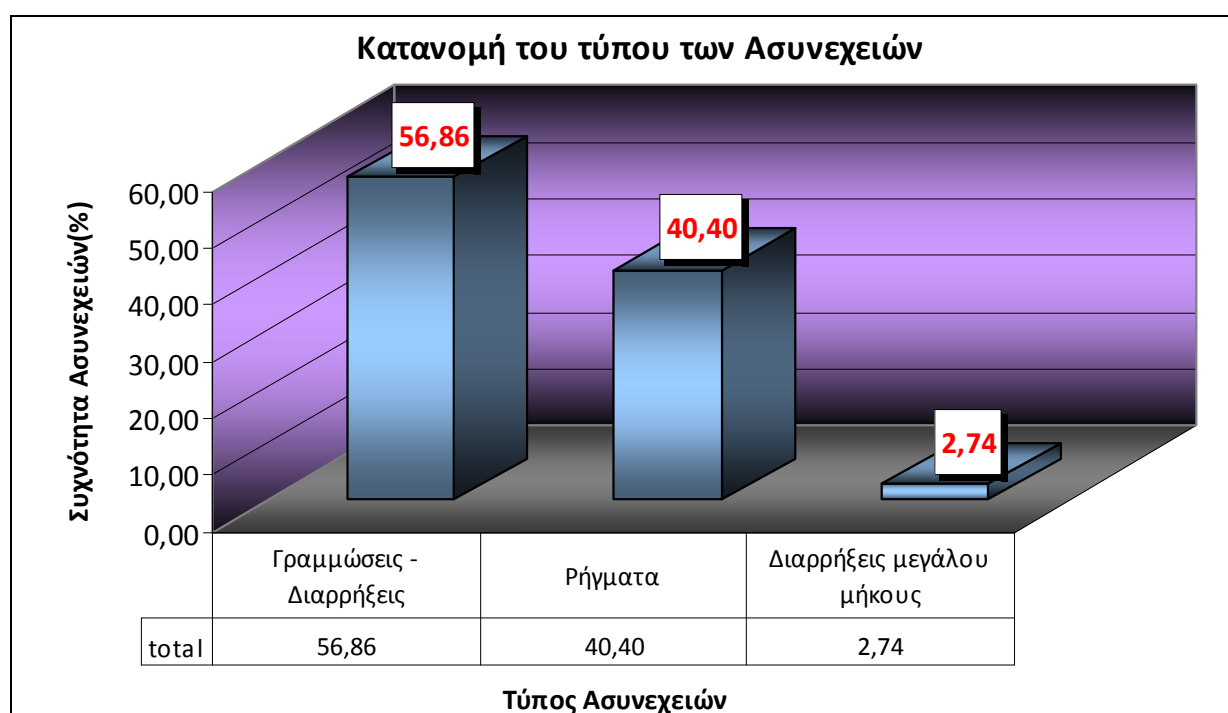
Σχήμα 8.10: Χάρτης δεικτών κριτηρίου χρήσεων γης

8.6.5 Κριτήριο DI

Η αναγνώριση, χαρακτηρισμός και ταξινόμηση των ασυνεχειών παίζουν το σημαντικότερο ρόλο στην εκτίμηση και χαρτογράφηση της τρωτότητας των διερρηγμένων πετρωμάτων (Botsialas et al., 2005) . Τα επί μέρους βήματα μιας τέτοιας προσπάθειας είναι:

- *Διατύπωση του τύπου των ασυνεχειών (Fractures Pattern Extraction)*

Πλήρης περιγραφή του συστήματος των ασυνεχειών (ρωγμές, διακλάσεις, ρήγματα, γραμμώσεις) σε διαφορετικές κλίμακες εργασίας στο ύπαιθρο και στην τηλεπισκόπηση και διάκριση των διαρρήξεων από τις τοπογραφικές ασυνέχειες.



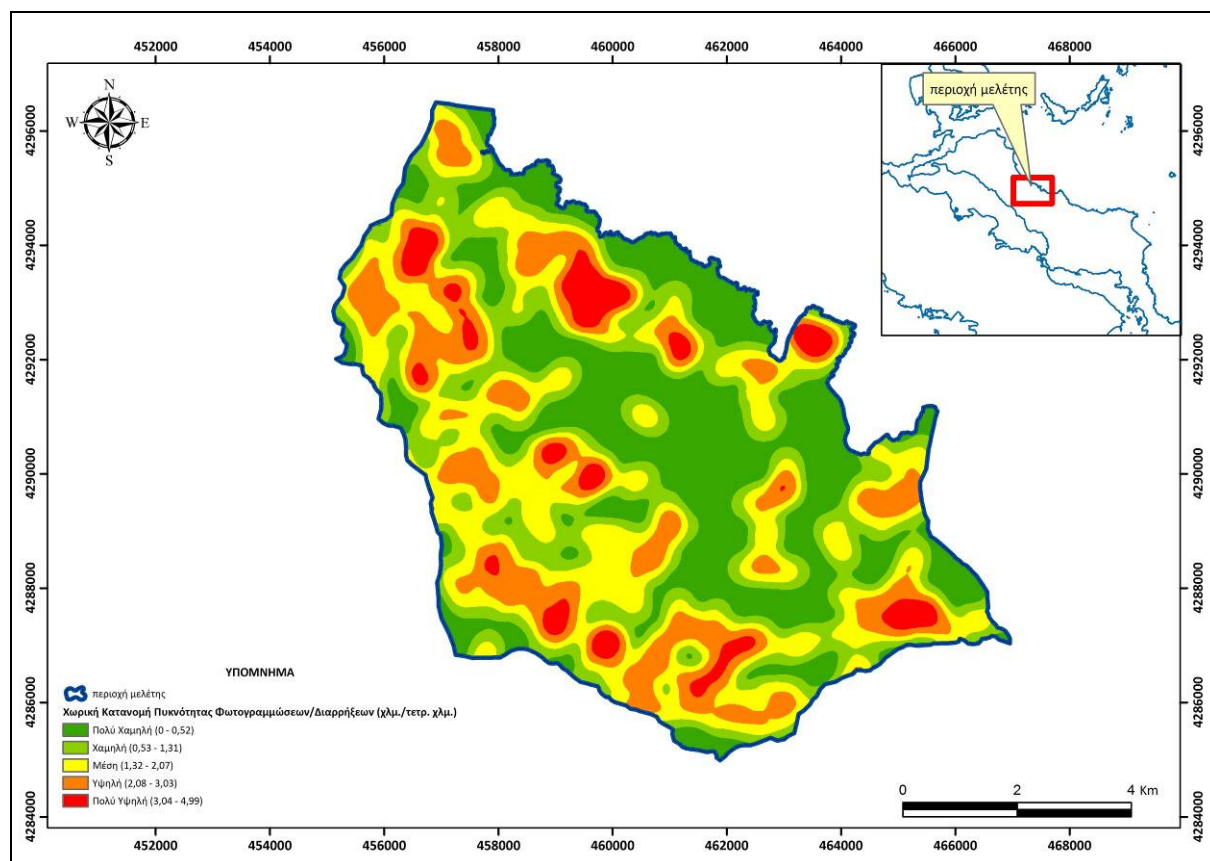
Σχήμα 8.11: Διάγραμμα κατανομής του τύπου ασυνεχειών

- *Διατύπωση περιγραφής και αναλύσεως των συνεχειών (Fractures Pattern Description and Analysis)*

Ο χάρτης των ασυνεχειών πρέπει να περιλαμβάνει χαρακτηριστικά από αεροφωτογραφίες, δορυφορικές φωτογραφίες και παρατηρήσεις υπαίθρου. Τα κριτήρια ερμηνείας των εικόνων των γραμμικών στοιχείων και η ταυτοποίησή τους ως δεικτών διερρηγμένων ζωνών πρέπει να είναι: το μήκος τους, η κατανομή τους σε διευθύνσεις, η ανίχνευση ανωμάτων διευθύνσεων, η διασύνδεσή τους, η ύπαρξη σταθερής αποστάσεως από σύνολα συγκεκριμένης διευθύνσεως, η σχέση ανάμεσα στην πυκνότητα των ασυνεχειών και στην πυκνότητα της διασυνδέσεως των γραμμικών στοιχείων

- *Κατανομή της πυκνότητας των ασυνεχειών (Fractures Frequency and Distribution)*

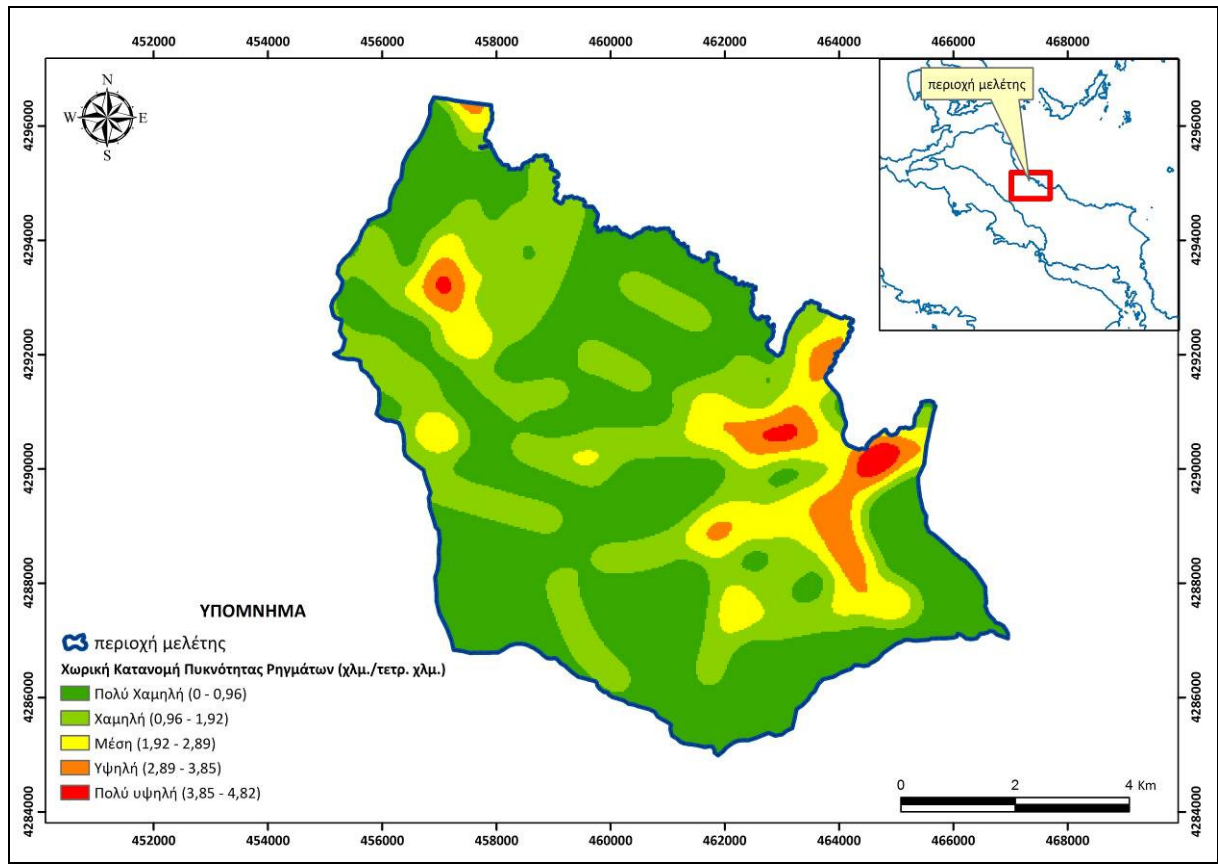
Η ομοιογένεια ή ετερογένεια της συχνότητας και κατανομής των ασυνεχειών, σε σχέση με τη λιθολογία, τα ρηξιτεμάχη και το πάχος του αποσαθρωμένου επιφανειακού μανδύα, όπου η συχνότητα των ασυνεχειών αυξάνεται με τη μείωση του πάχους του μανδύα αυτού, αποτελεί το τρίτο βήμα στην ολοκλήρωση της αναγνώρισης, του χαρακτηρισμού και της ταξινόμησης των ασυνεχειών.



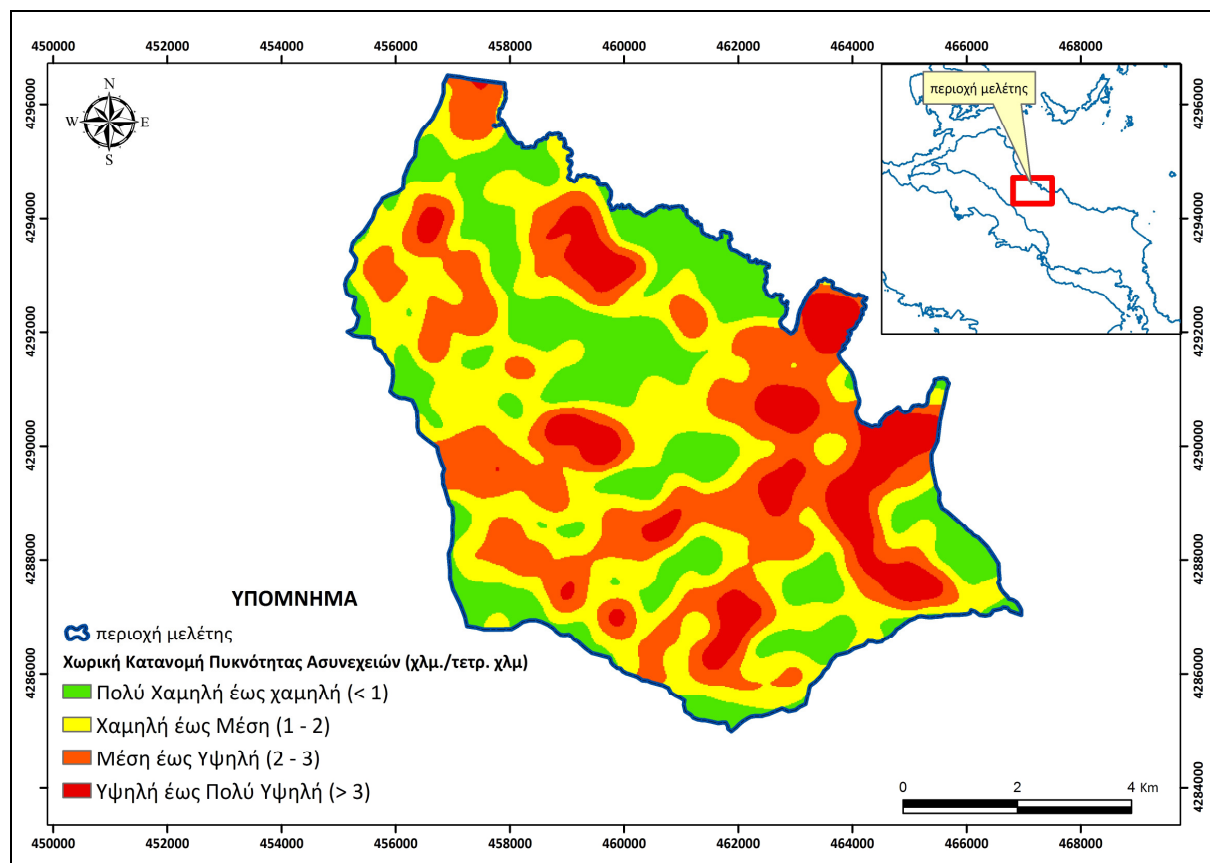
Σχήμα 8.12: Χάρτης κατανομής πυκνότητας φωτογραμμώσεων/διαρρήξεων (χλμ./τετρ. χλμ.)

Η πυκνότητα των ασυνεχειών, D (Density) και η διασύνδεση των ασυνεχειών I (Interconnection), αποτελούν τις σημαντικότερες παραμέτρους που καθορίζουν την υδραυλική συμπεριφορά του μέσου ασυνεχειών. Η ομαδοποίηση αυτών των δύο κριτηρίων οδηγεί στη δημιουργία ενός ενιαίου κριτηρίου, του βαθμού διασύνδεσης των ασυνεχειών, DI (Density Interconnection). Το κριτήριο αυτό παρέχει τη μεγαλύτερη δυνατή αποτύπωση του δείκτη τρωτότητας, αφού όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός διασύνδεσης τόσο η ροή του νερού εντός του πετρώματος είναι ομαλή και ενιαία. Είναι τέτοια η επίδραση της παραμέτρου, που στην ακραία περίπτωση του πολύ υψηλού βαθμού διασύνδεσης, το μέσο ασυνεχειών είναι δυνατόν να συμπεριφέρεται ως ομοιογενές και ισότροπο μέσο (Στουρνάρας, 2005). Η ομαδοποίηση των κριτηρίων σε ένα ενιαίο κριτήριο, το κριτήριο βαθμού διασύνδεσης DI ,

έγινε με αναλογία 1/1 κατά τον υπολογισμό των καινούριων αριθμητικών τιμών βάσει των οποίων θα οριστούν οι δείκτες τρωτότητας του DI.



Σχήμα 8.13: Χάρτης κατανομής της πυκνότητας των ρηγμάτων (χλμ. τετρ. χλμ.)



Σχήμα 8.14: Χάρτης κατανομής της πυκνότητας των ασυνεχειών (χλμ./τετρ. χλμ.)

Στον Πίνακα 8.9 εμφανίζονται οι διαφορετικές τάξεις του κριτηρίου DI, ο αριθμητικός δείκτης για την κάθε μία, καθώς και ο συντελεστής βαρύτητας του κριτηρίου DI, για τον υπολογισμό της τρωτότητας.

Ο συντελεστής βαρύτητας του κριτηρίου DI υπολογίστηκε ίσος με 0,4132.

Πίνακας 8.9: Τάξεις, χαρακτηριστικά, δείκτης τρωτότητας και συντελεστής βαρύτητας του κριτηρίου DI

Τάξεις	Χαρακτηριστικά	Δείκτης	Συντελεστής βαρύτητας
DI ₀	Πολύ χαμηλός έως χαμηλός βαθμός διασύνδεσης ασυνεχειών	0	0,4132
DI ₁	Χαμηλός έως μέσος βαθμός διασύνδεσης ασυνεχειών	1	
DI ₂	Μέσος έως Υψηλός βαθμός διασύνδεσης ασυνεχειών	2	
DI ₃	Υψηλός έως πολύ υψηλός βαθμός διασύνδεσης ασυνεχειών	3	

Το κριτήριο DI υποδιαιρείται στις παρακάτω τάξεις:

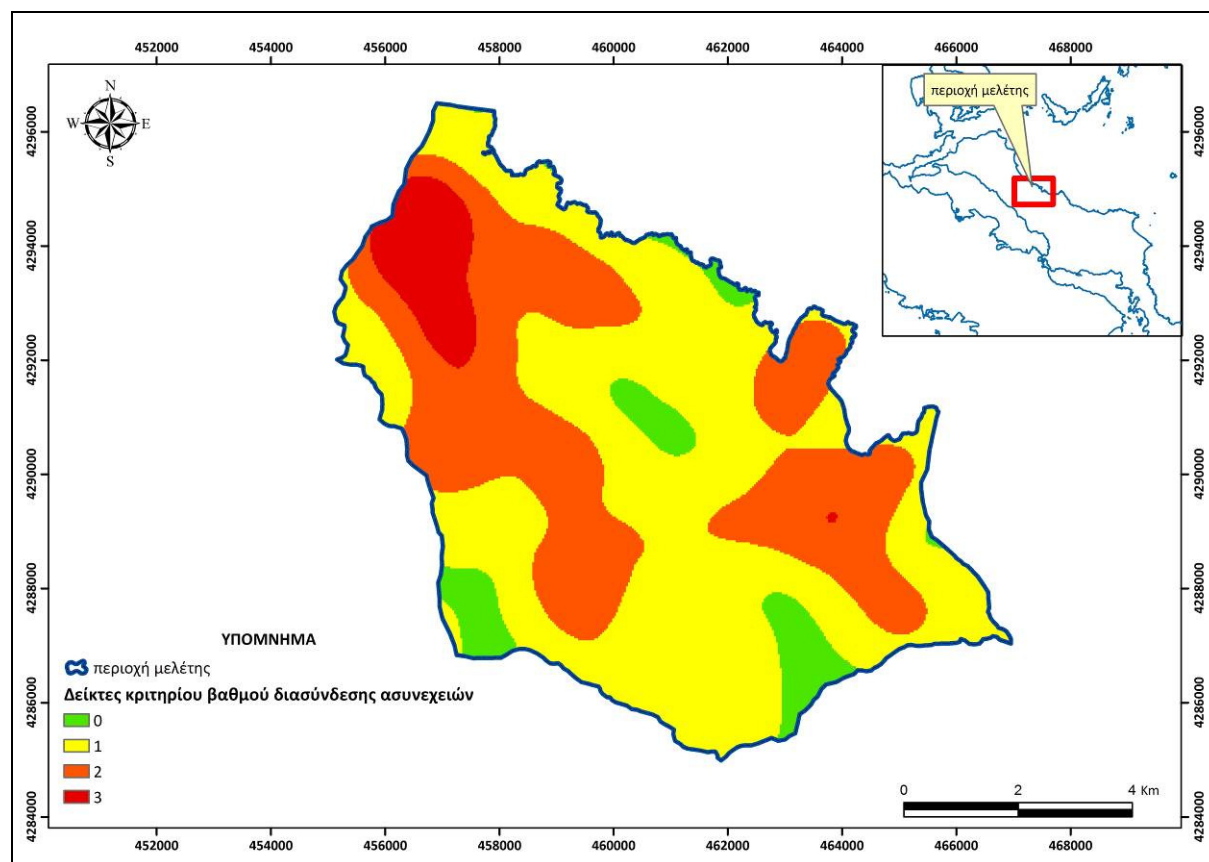
DI₀: Μηδενική έως ελάχιστη επίδραση στην τρωτότητα. Η πρώτη τάξη του κριτηρίου DI περιλαμβάνει τις περιοχές όπου παρατηρείται μικρή χωρική κατανομή της πυκνότητας των ασυνεχειών (0 – 1km/km²). Η συνθήκη αυτή δεν επιτρέπει στο νερό της βροχής να φτάσει κατ' ευθείαν στον υδροφόρο ορίζοντα, συμβάλλοντας στην προσωρινή συγκέντρωση του

νερού σε μία ανώτερη επιφανειακή ζώνη και επομένως στην προστασία του υποκείμενου υδροφόρου ορίζοντα. Ο δείκτης τρωτότητας θεωρείται ελάχιστος.

DI₁: Μικρή επίδραση στην τρωτότητα. Σε αυτή την τάξη περιλαμβάνονται οι περιοχές με μικρό δίκτυο ασυνεχειών της τάξεως του 1 – 2km/km². Η αύξηση της πυκνότητας των ασυνεχειών και κατ' επέκταση του βαθμού διασύνδεσής τους που παρουσιάζει κατά θέσεις, έχει σαν συνέπεια την ανάλογη μείωση της προστατευτικής του ικανότητας.

DI₂: Μέτρια επίδραση στην τρωτότητα. Στην τάξη αυτή το δίκτυο ασυνεχειών παρουσιάζεται πιο πυκνό και ο συνδυασμός της συγκέντρωσης ροής και της διακοπής πλευρικής εξάπλωσής καθιστά την τρωτότητα του μέσου ασυνεχειών να είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τις δύο προηγούμενες τάξεις. Στην τάξη αυτή η κατανομή της πυκνότητας των ασυνεχειών κυμαίνεται από 2 – 3km/km².

DI₃: Έντονη επίδραση στην τρωτότητα. Η πλήρης ανάπτυξη του δικτύου ασυνεχειών (> 3km/km²), η απουσία δηλαδή οποιασδήποτε ζώνης αποθήκευσης του νερού πριν την κατείσδυσή του προς τα βαθύτερα υδατικά σώματα, συνεπάγεται και την μεγάλη αύξηση της τρωτότητας, η οποία απεικονίζεται άμεσα και στην τιμή του δείκτη της τάξης αυτής.



Σχήμα 8.15: Χάρτης δεικτών κριτηρίου βαθμού διασύνδεσης ασυνεχειών

Πίνακας 8.10: Εφαρμογή της AHP και οι συντελεστές βαρύτητας για κάθε κριτήριο/παράμετρο.

	S	C	A	L	DI	Συντελεστής βαρύτητας	CR 0,0612
S	1	1/2	4	2	1/2	0,1924	
C	2	1	3	1	1/3	0,1971	
A	1/4	1/3	1	1/3	1/4	0,0614	
L	1/2	1	3	1	1/4	0,1359	
DI	2	3	4	4	1	0,4132	

Η διαδικασία υπολογισμού των συντελεστών βαρύτητας καθώς και της τιμής του consistency ratio CR (όπως προτείνουν οι Saaty & Vargas, 1991, για $CR < 0,1$) πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του λογισμικού AHP 1.0, το οποίο αναπτύχθηκε από το Marinoni (2004).

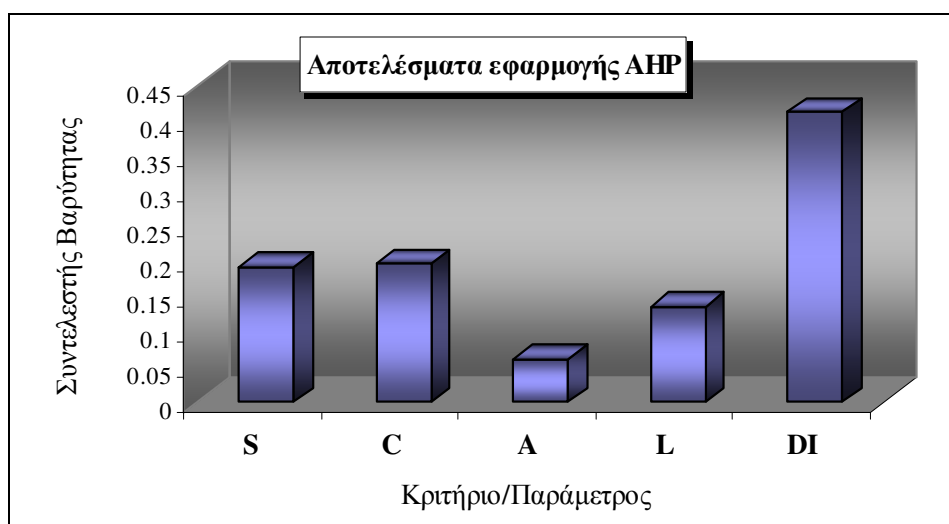
Οι συντελεστές όπως υπολογίστηκαν δίνονται στον πίνακα 8.11.

Πίνακας 8.11: Συντελεστές βαρύτητας κάθε κριτηρίου της μεθόδου SCALDI

	S	C	A	L	DI	Άθροισμα Συντελεστών
Συντελεστές Βαρύτητας	$\alpha = 0,1924$	$\beta = 0,1971$	$\gamma = 0,0614$	$\delta = 0,1359$	$\epsilon = 0,4132$	1

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, γίνεται πιο κατανοητός ο βαθμός σπουδαιότητας των κριτηρίων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση προβάλλοντας τα αποτελέσματα της AHP σε ένα ιστόγραμμα (Σχ. 8.17) ισχύει ότι:

$$DI > C > S > L > A$$



Σχήμα 8.17: Ταξινόμηση των κριτηρίων με βάση το συντελεστή βαρύτητάς τους.

Σύμφωνα με το παραπάνω ιστόγραμμα και σε σχέση με τη συνολική επίδραση των στοιχείων της τεκτονικής και μικροτεκτονικής δομής, εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο βαθμός

διασύνδεσης των ασυνεχειών κυριαρχεί έναντι των υπολοίπων παραμέτρων κατέχοντας πολύ σημαντική θέση στην εκτίμηση του δείκτη τρωτότητας. Αναφορικά με τη γεωμορφολογική δομή παρατηρείται ότι τόσο η τοπογραφία όσο και το πάχος του εδαφικού καλύμματος αποτελούν εξίσου σημαντικές παράμετροι στον προσδιορισμό της τρωτότητας. Η παρουσία του εδαφικού καλύμματος αποκτά μια μεγάλη σημασία, ανεξαρτήτως άλλων γεωλογικών, υδρογεωλογικών και περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών. Η μηχανισμοί αντιμετώπισης των ρύπων, που ενεργοποιούνται σε εδαφικό περιβάλλον είναι πιο σημαντικοί και, επιπροσθέτως, ο υδροφόρος ορίζοντας συνδέεται υδραυλικά με το υποκείμενο ομογενές και ανισότροπο μέσο ασυνεχειών. Ιδιαίτερη σημασία αποκτά και το πάχος του εδαφικού καλύμματος, σε σχέση με την κλίση και γεωμετρία του πρανούς και τις συνθήκες περατότητας των υποκειμένων ενεργών ασυνεχειών. Τέλος στην προσπάθεια διατύπωσης μιας ομάδας μεθόδων, η λιθολογία και οι χρήσεις γης συναποτελούν σημαντικούς παράγοντες επηρεασμού της τρωτότητας.

8.7.3 Δείκτης Τρωτότητας I_g

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο τελικός δείκτης τρωτότητας, στην περιοχή μελέτης δίνεται από τον τύπο:

$$I_g = 0,1924S_s + 0,1971C_c + 0,0614A_a + 0,1359L_l + 0,4132DI_{di}$$

Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, τα κριτήρια S, C, A, L και DI υποδιαιρούνται σε τέσσερις τάξεις το καθένα, με τιμές από 0 έως 3. Αντίστοιχα, οι τιμές του δείκτη I_g υποδιαιρούνται σε 4 τάξεις τρωτότητας με μικρότερη τιμή την μηδενική και μεγαλύτερη την τιμή 3.

Η τιμή μηδέν του τελικού δείκτη τρωτότητας, αντιστοιχεί στις τάξεις S_0 , C_0 , A_0 , L_0 , και DI_0 , πράγμα το οποίο αντιστοιχεί σε κλίσεις $> 45^\circ$, με μεγάλο πάχος εδαφικού καλύμματος, σε θεωρητικά αδιαπέρατους γεωλογικούς σχηματισμούς και με έντονη φυτοκάλυψη, κάτω από τους οποίους το μέσο ασυνεχειών παρουσιάζει μικρή εμφάνιση ανάπτυξης ασυνεχειών.

Αντίθετα στην τιμή 4 του I_g αντιστοιχούν οι τάξεις τρωτότητας 3, S_3 , C_3 , A_3 , L_3 και DI_3 , στις οποίες κατατάσσονται οι πολύ μικρές κλίσεις ($< 5^\circ$) σε έντονα διερρηγμένους σχηματισμούς με μεγάλη ανάπτυξη ασυνεχειών, απουσία βλάστησης και εδαφικού καλύμματος.

Οι ταξινόμηση λοιπόν του δείκτη I_g πραγματοποιείται όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.12. Η ενδιάμεση τάξη 1, αντιπροσωπεύει τα χαρακτηριστικά εκείνα του κάθε κριτηρίου τα οποία αφορούν την τάξη της ενδιάμεσης τρωτότητας. Και οι τέσσερις τάξεις απεικονίζουν τον βαθμό τρωτότητας κάθε σημείου στον χάρτη τρωτότητας στην περιοχή μελέτης.

Πίνακας 8.12: Αντιστοιχία τάξεων δείκτη τρωτότητας με τις τάξεις τρωτότητας στην περιοχή μελέτης

Τάξεις του Ig		Τάξεις Τρωτότητας	Περιγραφή
1	0 – 0,75	0	Μηδενικός έως πολύ μικρός βαθμός τρωτότητας
2	0,75 – 1,50	1	Μικρός έως μέτριος βαθμός τρωτότητας
3	1,50 – 2,25	2	Μέτριος έως μεγάλος βαθμός τρωτότητας
4	2,25 – 3,00	3	Μεγάλος έως πολύ μεγάλος βαθμός τρωτότητας

8.7.4 Σύνταξη Χάρτη Τρωτότητας

Ο χάρτης τελικής τρωτότητας παρουσιάζει τις περιοχές διαφορετικής τρωτότητας ενός υδροφόρου συστήματος, πράγμα το οποίο τον καθιστά ένα πολύ σημαντικό εργαλείο στις όποιες αποφάσεις παρθούν για την διαχείριση της συγκεκριμένης περιοχής. Ο χάρτης καθαυτός δεν είναι καθορισμένος αλλά επιδέχεται πολλές αλλαγές και τροποποιήσεις λόγω των καινούριων στοιχείων που προκύπτουν από μεταγενέστερες, πιο λεπτομερείς, τοπικού χαρακτήρα και μικρότερης κλίμακας μελέτες.

Ουσιαστικά, ο χάρτης τρωτότητας απεικονίζει την τάση που υπάρχει σχετικά με την τρωτότητα στην περιοχή μελέτης και δίνει εκείνες τις κατευθύνσεις οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη προκειμένου να διευθετηθεί πιο σωστά η περιοχή. Σε καμία όμως περίπτωση δεν αποτελεί μία μελέτη με βάση την οποία θα παρθούν οριστικές αποφάσεις, χωρίς να συνδυαστεί με μία περισσότερο λεπτομερή και τοπική μελέτη.

Με βάση τα κριτήρια που επιλέχθηκαν και τους συντελεστές βαρύτητας που υπολογίστηκαν για την χαρτογράφηση και τον υπολογισμό της τρωτότητας στην περιοχή μελέτης, κατέστη εφικτή η δημιουργία του τελικού χάρτη τρωτότητας της ευρύτερης περιοχής μελέτης, όπως αυτός φαίνεται στο σχήμα 8.18.

Οι περιοχές υψηλής τρωτότητας, όπως φαίνεται και από τον χάρτη, εμφανίζονται κυρίως ΒΔ/κά της περιοχής μελέτης και αντιπροσωπεύουν το 7,62% της περιοχής μελέτης ενώ σε μικρότερες εκτάσεις εντοπίζονται στα ΝΝΔ/κά και ΒΑ/κά της περιοχής μελέτης. Η βαθμονόμηση των παραπάνω περιοχών με δείκτη μεγάλης τρωτότητας οφείλεται κυρίως στην επίδραση του κριτηρίου DI αφενός και αφετέρου στα κριτήρια S και L. Οι συγκεκριμένες περιοχές δηλαδή χαρακτηρίζονται κυρίως από:

- Πυκνό δίκτυο ασυνεχειών με μεγάλο βαθμό διασύνδεσης
- Πολύ μικρές μορφολογικές κλίσεις (<5°) σε συνδυασμό με ελάχιστη φυτοκάλυψη έως απουσία της

Αξίζει να σημειωθεί ότι στις περιοχές αυτές ο συνδυασμός με τις αντίστοιχα μεγάλες τιμές τρωτότητας από τους χάρτες των κριτηρίων S και L, αντισταθμίζει τις μικρότερες τιμές προερχόμενες από τους χάρτες των C και A.

Οι περιοχές μέτριας τρωτότητας, αποτελούν το 24,47% της συνολικής έκτασης της υπό μελέτη περιοχής, ποσοστό αρκετά μεγάλο, το οποίο καλύπτει σχεδόν το 1/4 της περιοχής μελέτης. Η συγκεκριμένη τάξη τρωτότητας εμφανίζεται σε εκτεταμένες περιοχές, όπου η πλειοψηφία των κριτηρίων εμφανίζουν μέτριες τιμές. Το σημαντικότερο ρόλο στην βαθμονόμηση των περιοχών της συγκεκριμένης τάξης τρωτότητας έπαιξε κι εδώ το κριτήριο DI. Πολύ σημαντική όμως ήταν και η επίδραση κατά κύριο λόγο των κριτηρίων S, C και L και κατά δεύτερο λόγο του A.

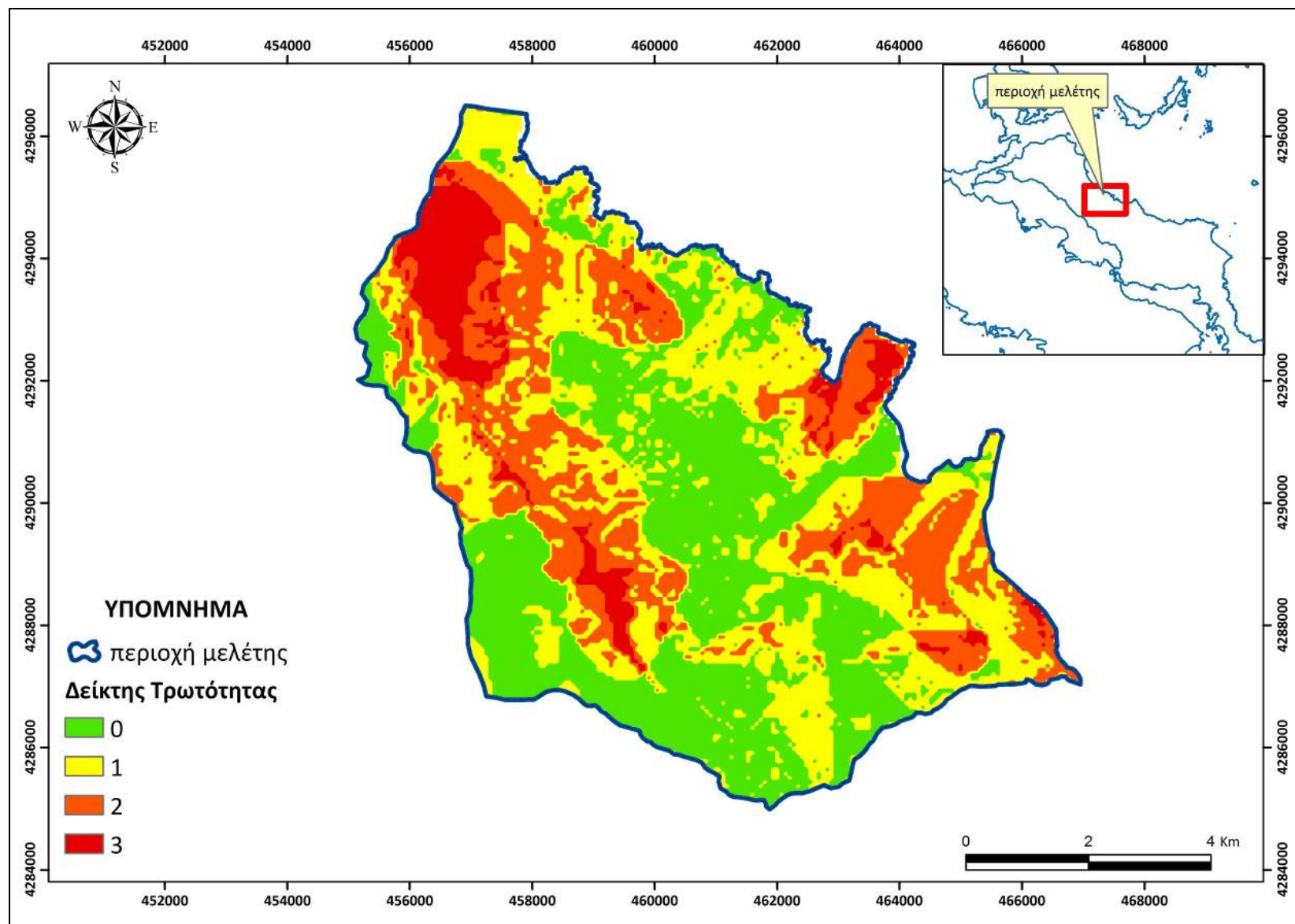
Οι περιοχές με χαμηλή τιμή του δείκτη τρωτότητας καλύπτουν συνολική επιφάνεια 32,95% και παρουσιάζει τη δεύτερη μεγαλύτερη επιφανειακή έκταση σε σχέση με τις υπόλοιπες. Ο χαμηλός έως μέτριος βαθμός τρωτότητας ο οποίος υπολογίστηκε για τις παραπάνω περιοχές, οφείλεται κατά κύριο λόγο στο κριτήριο των χρήσεων γης L. Τόσο όμως ο παράγοντας βαθμού διασύνδεσης DI, το κριτήριο S, όσο και το κριτήριο εδαφικού καλύμματος C, συνδυάστηκαν κατά τέτοιο τρόπο και ανάλογα με τους συντελεστές βαρύτητάς τους, ώστε να καταστεί δυνατή η μείωση του δείκτη τρωτότητας στο κριτήριο A, ο οποίος εμφανίζεται πολύ αυξημένος στις περισσότερες από τις προαναφερθείσες περιοχές.

Οι περιοχές ελάχιστης τρωτότητας καταλαμβάνουν τη μεγαλύτερη επιφάνεια σε ποσοστό 34,96% της συνολικής έκτασης της υπό μελέτης περιοχής.

Η πολύ μικρή τιμή του δείκτη τρωτότητας σε αυτές τις περιοχές οφείλεται κυρίως στον συνδυασμό του κριτηρίου DI, το οποίο για τις συγκεκριμένες περιοχές είχε την τιμή μηδέν και το οποίο είχε τον μεγαλύτερο συντελεστή βαρύτητας στον τύπο για τον υπολογισμό του δείκτη τρωτότητας, καθώς και των κριτηρίων S και C, τα οποία είχαν βέβαια πολύ μικρότερο συντελεστή βαρύτητας.

Στις παραπάνω περιοχές ελάχιστης τρωτότητας συνδυάζονται τα εξής χαρακτηριστικά :

- Περιοχές με πολύ έντονο ανάγλυφο ($> 45^\circ$), στις οποίες δεν πραγματοποιείται κατείσδυση.
- Θεωρητικά μη υδροφόροι σχηματισμοί
- Εδαφικό κάλυμμα πάχους $> 5\text{m}$
- Μικρός βαθμός διασύνδεσης των ασυνεχειών
- Σημαντικός βαθμός φυτοκάλυψης από δέντρα και θάμνους.



Σχήμα 8.18: Χάρτης κατανομής του δείκτη τρωτότητας στην περιοχή μελέτης

8.8 Εκτίμηση Εντάσεως Επικινδυνότητας (Risk Intensity Index)

8.8.1 Γενικά

Ο ορισμός του κινδύνου (hazard) και της επικινδυνότητας (risk) και η διάκριση μεταξύ τους είναι δύσκολη, καθώς και τα τελευταία χρόνια η ορολογία άρχισε να τυποποιεί έννοιες σαν κι αυτές και, επί πλέον, οι έννοιες αυτές συνδέονται με την ανθρώπινη υγεία και ασφάλεια, επικαλύπτονται πολλές φορές, με μία ποικιλία καταστάσεων που αντιπροσωπεύουν και διαφέρουν ως προς το περιεχόμενό τους, στις διάφορες γλώσσες. Η διάκριση πάντως των εννοιών αυτών εμφανίζεται εξαιρετικώς χρήσιμη, έως απαραίτητη, σε συνδυασμό με το μοντέλο της πορείας ενός ρύπου, η οποία είναι:

προέλευση → διαδρομή → στόχος

Ο συνδυασμός της διάκρισης των δύο εννοιών με την παραπάνω θεώρηση αποτελεί πλαίσιο θεώρησης της πρόληψης/ελαχιστοποίησης της ρύπανσης και της προστασίας του υπόγειου νερού.

Σε σχέση με το μηχανισμό διερευνήσεως τόσο του κινδύνου (hazard) όσο και της επικινδυνότητας (risk), το πρόβλημα τοποθετείται στη βάση της διακρίσεως ανάμεσα στην προσβολή του υδατικού συστήματος ή υδατικού πόρου (resource contamination) ή της προσβολής της υδροληψίας (source contamination).

Στο αρχικό μοντέλο προέλευση - διαδρομή - στόχος, ως *προέλευση* εννοείται η πηγή ρυπάνσεως, η θέση διαθέσεως του ρύπου στο φυσικό περιβάλλον, ως *διαδρομή*, αυτή που πραγματοποιεί ο ρύπος, επιφανειακώς ή υπογείως, μέχρι να φτάσει στο *στόχο* (υδατικός πόρος ή υδροληψία).

Η εκτίμηση της επικινδυνότητας μπορεί να διατυπωθεί με την εξίσωση (COST 620):

$$RII = 1/HI \times \pi$$

όπου:

RII (Risk Intensity Index): δείκτης εντάσεως επικινδυνότητας

HI (Hazard Index): δείκτης κινδύνου και

π (παράγοντας PI): δείκτης εσωτερικής τρωτότητας

8.8.2 Δείκτης Κινδύνου (Hazard Index)

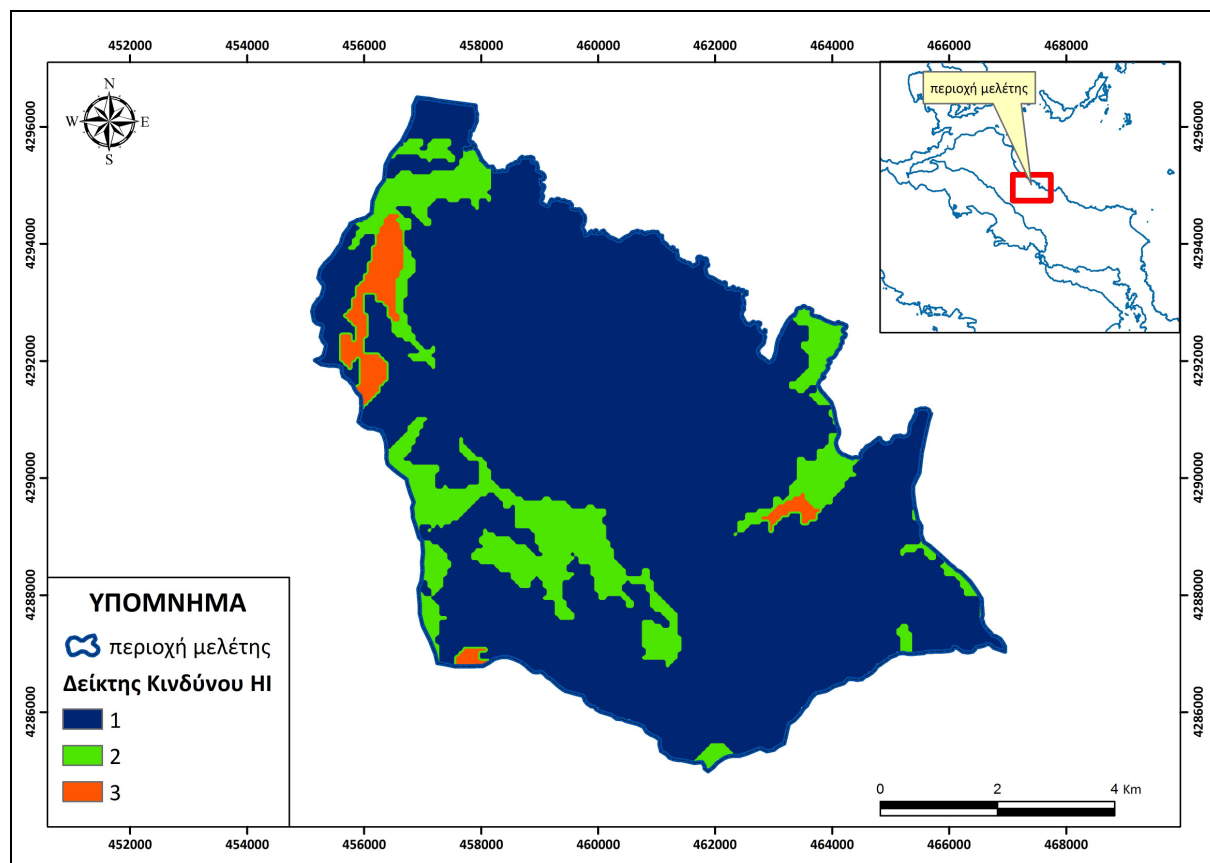
Ο δείκτης κινδύνου (hazard index) περιγράφει το βαθμό επίδρασης των κινδύνων. Για τον προσδιορισμό του απαιτείται η βαθμονόμηση των χρήσεων γης με ανάλογους συντελεστές βαρύτητας (COST 620), οι οποίοι κυμαίνονται από 10 έως 100. Σε περιπτώσεις όπου κάποια χρήση γης (όπως για παράδειγμα δασική έκταση), στην οποία δεν αντιστοιχεί κάποιος συντελεστής βαρύτητας, επιλέχθηκε η μικρότερη τιμή, προκειμένου ο λόγος $1/HI$ να έχει νόημα και να μην τείνει προς το άπειρο.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι τιμές του δείκτη κινδύνου ταξινομήθηκαν σε τρεις υποκατηγορίες σύμφωνα με τον πίνακα 8.13, από όπου κατασκευάστηκε και ο χάρτης κατανομής του δείκτη κινδύνου στην περιοχή μελέτης (Σχ. 8.19).

Πίνακας 8.13: Αντιστοιχία τάξεων δείκτη κινδύνου στην περιοχή μελέτης

Δείκτης Κινδύνου HI	Τάξεις Δείκτη Κινδύνου	Περιγραφή
0 – 24	1	Μηδενικός έως πολύ μικρός δείκτης κινδύνου
> 24 – 48	2	Μικρός δείκτης κινδύνου
> 48 – 72	3	Μέτριος δείκτης κινδύνου

Ο δείκτης κινδύνου HI στην περιοχή μελέτης υποδιαιρείται σε τρεις τάξεις, με τιμές από 1 έως 3. Η μικρότερη τιμή αντιστοιχεί σε περιοχές με μηδενικό έως πολύ μικρό δείκτη κινδύνου. Πρόκειται για περιοχές όπου η ανθρώπινη δραστηριότητα είναι πολύ μικρή έως και μηδενική (δασικές εκτάσεις). Στις περιοχές αυτές, σύμφωνα με τις χρήσεις γης (Corine Landuse, 2004) οι τιμές του δείκτη κινδύνου δεν ξεπερνούν την τιμή 24. Στη δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνονται οι περιοχές με μικρό δείκτη κινδύνου (τιμές από 24 έως 48). Πρόκειται για περιοχές, οι οποίες αποτελούνται από καλλιεργούμενες εκτάσεις με αρκετά περιορισμένη χρήση φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων. Τέλος η τρίτη κατηγορία αποτελεί την πλέον χαρακτηριστική περίπτωση στην οποία η ανθρώπινη δραστηριότητα εντείνεται σημαντικά με χρήσεις όπως είναι η βιομηχανική, τα μεταλλεία και οι περιοχές ανεξέλεγκτης διάθεσης απορριμμάτων που απαντούν στην περιοχή μελέτης και συγκεκριμένα στο ΝΑ/κό τμήμα του Δ.Δ. Μαντουδίου. Οι τιμές της κατηγορίας προσδιορίστηκαν από 48 έως 72.



Σχήμα 8.19: Χάρτης κατανομής του δείκτη κινδύνου στην περιοχή μελέτης

8.8.3 Δείκτης Εντάσεως Επικινδυνότητας (Risk Intensity Index)

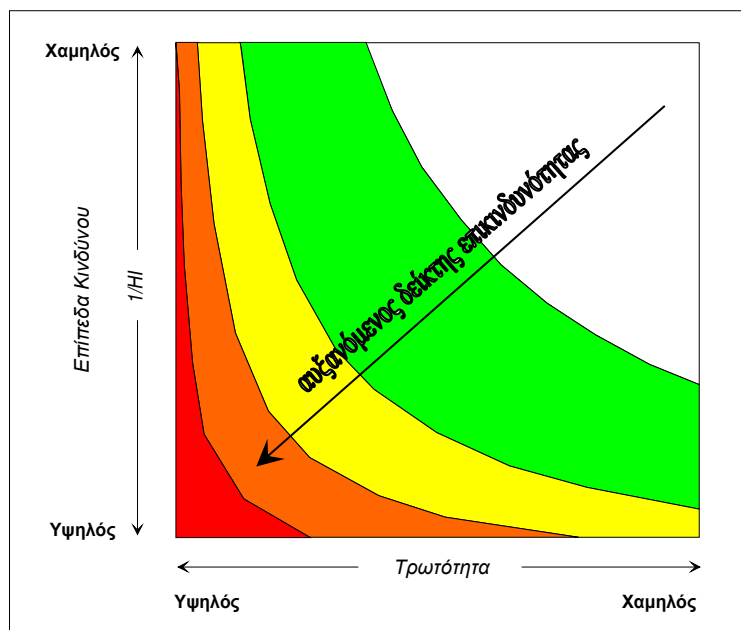
Η επίτευξη περιβαλλοντικών σκοπών, για επιφανειακά και υπόγεια υδατικά συστήματα απαιτεί μία εκτίμηση των δυνητικών κινδύνων, με προέλευση υπαρκτών ή προβλεπόμενων ανθρωπίνων δραστηριοτήτων, στο βαθμό κατά τον οποίο πραγματοποιείται ανάλυση των επιμέρους παραμέτρων που συμβάλλουν στην ποιοτική υποβάθμιση του περιβάλλοντος. Υπό αυτήν την έννοια ο προσδιορισμός των δυνητικών κινδύνων αποτελεί μόνο την αρχή εκτιμήσεως της επικινδυνότητας. Η διαχείριση της επικινδυνότητας θα πρέπει να βασίζεται επιπλέον στην ανάλυση των δυνητικών κινδύνων, στην πληροφορία του υδρογεωλογικού περιβάλλοντος, οι οποίες επηρεάζουν την κίνηση και εξασθένηση των ρύπων και τέλος στην πληροφορία για την αξία του υπόγειου νερού, η οποία, εν προκειμένω, σε σκληρά πετρώματα αποτελεί μία από τις πλέον ενδεδειγμένες υπόγειες λύσεις για περιοχές της Μεσογείου και του Ελληνικού χώρου.

Εφαρμόζοντας την εξίσωση που περιγράφει το δείκτη εντάσεως επικινδυνότητας, υπολογίστηκαν για την περιοχή μελέτης τέσσερις κατηγορίες (Πίν. 8.14).

Πίνακας 8.14: Αντιστοιχία τάξεων δείκτη εντάσεως επικινδυνότητας στην περιοχή μελέτης

Δείκτης Εντάσεως Επικινδυνότητας RII	Τάξεις Δείκτη Εντάσεως Επικινδυνότητας	Περιγραφή
0,28 – 0,83	1	Μεγάλος έως πολύ μεγάλος βαθμός επικινδυνότητας
0,84 – 1,37	2	Μέτριος έως μεγάλος βαθμός επικινδυνότητας
1,37 – 1,92	3	Μικρός έως μέτριος βαθμός επικινδυνότητας
1,93 – 2,46	4	Μικρός έως πολύ μικρός βαθμός επικινδυνότητας

Σε αντίθεση με το δείκτη τρωτότητας, ο δείκτης εντάσεως επικινδυνότητας περιγράφεται υψηλός όταν οι τιμές που παίρνει είναι μικρές και χαμηλός, όταν οι τιμές που παίρνει είναι μεγάλες. Για την περιοχή μελέτης ο δείκτης εντάσεως επικινδυνότητας υποδιαιρείται σε τέσσερις κατηγορίες με τιμές από 0,28 έως 2,46. Στο σχήμα 8.20 περιγράφονται οι τάσεις αύξησης ή μείωσης του δείκτη εντάσεως επικινδυνότητας σε συνδυασμό με τις τιμές του δείκτη τρωτότητας και των επιπέδων κινδύνου.

**Σχήμα 8.20:** Εκτίμηση Επικινδυνότητας στην περιοχή μελέτης

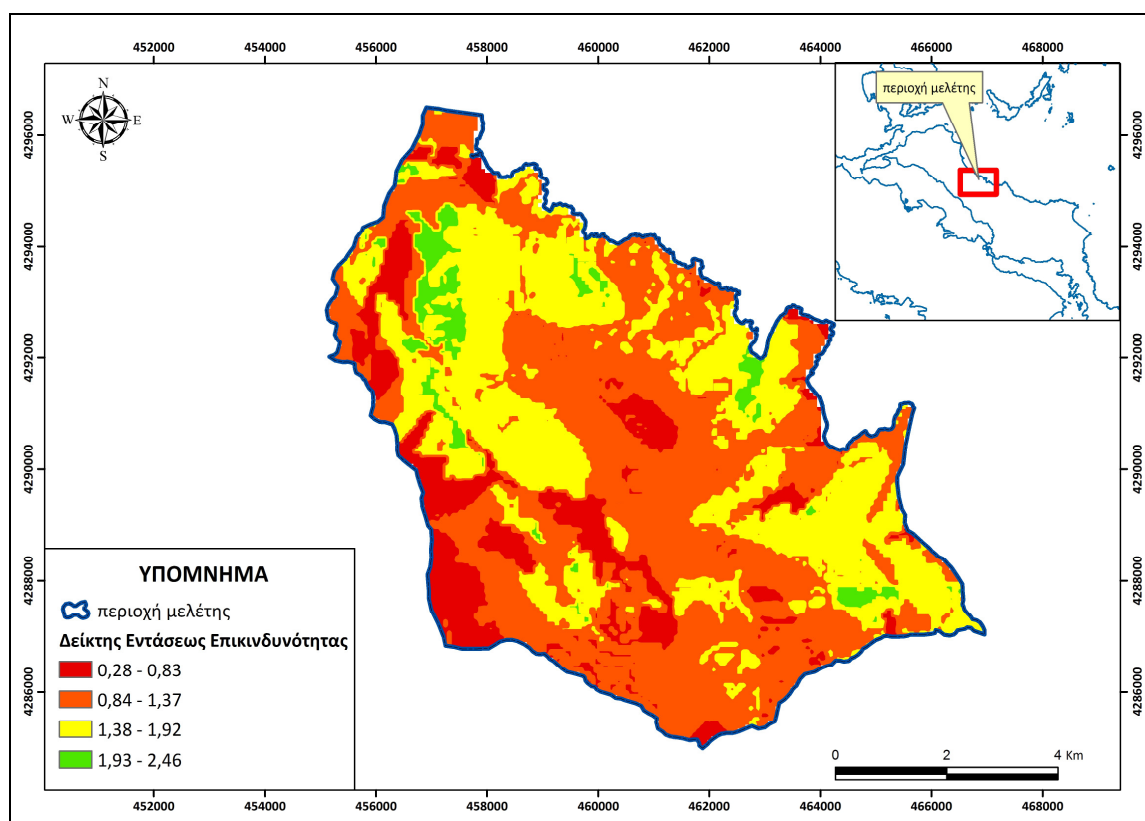
Σύμφωνα με τον πίνακα 8.14 κατασκευάστηκε ο τελικός χάρτης κατανομής του δείκτη εντάσεως επικινδυνότητας για την περιοχή μελέτης (Σχ. 8.21).

Οι περιοχές υψηλής επικινδυνότητας, όπως φαίνεται και από τον χάρτη, εμφανίζονται κυρίως ΒΔ/κά της περιοχής μελέτης και αντιπροσωπεύουν το 14,06% της περιοχής μελέτης ενώ σε μικρότερες εκτάσεις εντοπίζονται στο κεντρικό τμήμα της περιοχής μελέτης. Η βαθμονόμηση των παραπάνω περιοχών με δείκτη μεγάλης επικινδυνότητας οφείλεται κυρίως στην επίδραση των επιπέδων κινδύνου, όπου οι ανθρώπινες δραστηριότητες είναι εντατικές.

Οι περιοχές μέτριας επικινδυνότητας, αποτελούν το 48,17% της συνολικής έκτασης της υπό μελέτη περιοχής, ποσοστό αρκετά μεγάλο, το οποίο καλύπτει σχεδόν το 1/2 της περιοχής μελέτης. Η συγκεκριμένη τάξη επικινδυνότητας εμφανίζεται σε εκτεταμένες περιοχές, και είναι ενδεικτικό της επίδρασης του δείκτη κινδύνου σε αντίθεση με το δείκτη τρωτότητας.

Οι περιοχές με χαμηλή τιμή καλύπτουν συνολική επιφάνεια 33,26% και παρουσιάζει τη δεύτερη μεγαλύτερη επιφανειακή έκταση σε σχέση με τις υπόλοιπες. Στις περιοχές αυτές αντισταθμίζεται ο βαθμός επίδρασης του δείκτη κινδύνου με το δείκτη τρωτότητας. Είναι περιοχές όπου ενώ η ανθρώπινη δραστηριότητα είναι περιορισμένη, το γεωπεριβάλλον που καθορίζει το δείκτη τρωτότητας αποτελεί σημαντικό παράγοντα επίδρασης στην εκτίμηση επικινδυνότητας.

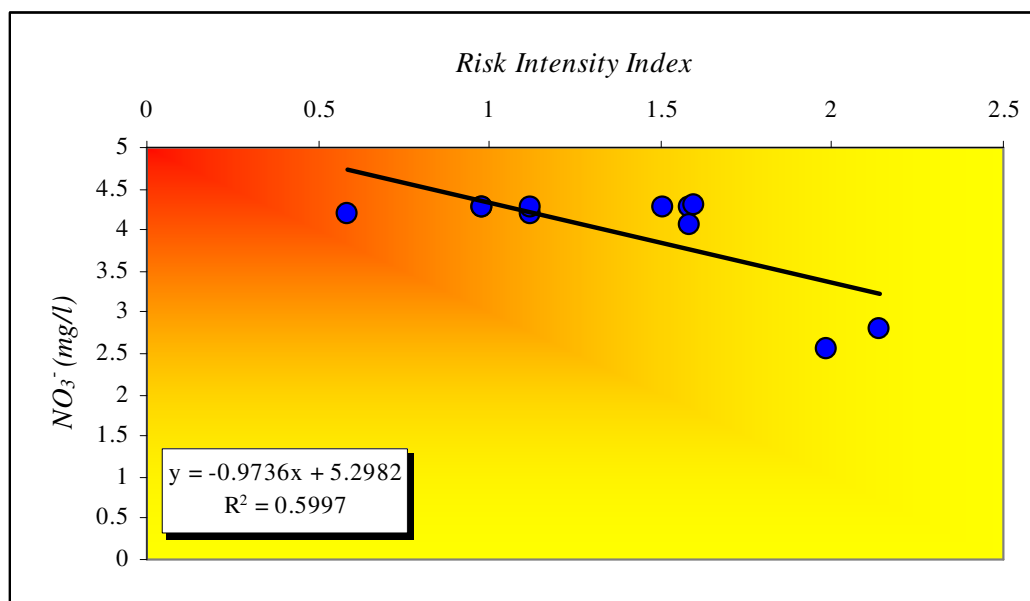
Οι περιοχές ελάχιστης επικινδυνότητας καταλαμβάνουν το μικρότερο τμήμα στην περιοχή μελέτης (4,51%). Πρόκειται για περιοχές με απουσία ανθρώπινης δραστηριότητας, ενώ παράλληλα οι μηχανισμοί εξασθένησης των ρύπων είναι ισχυροί καθώς γεωλογικά η περιοχή καλύπτεται από νεογενείς αποθέσεις αργιλικής σύστασης.



Σχήμα 8.21: Χάρτης κατανομής του δείκτη εντάσεως επικινδυνότητας στην περιοχή μελέτης

8.9 Έλεγχος των αποτελεσμάτων

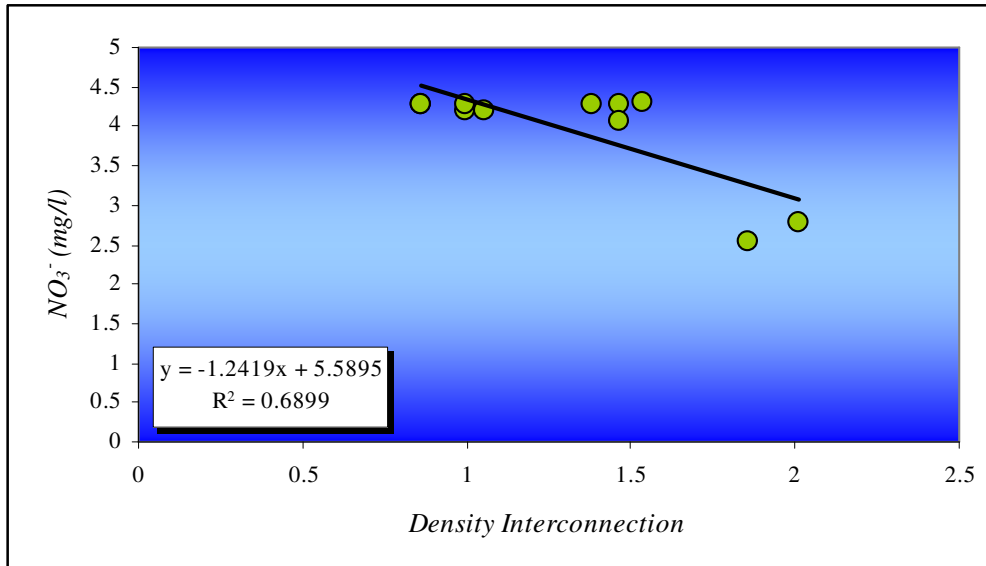
Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων της έρευνας, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα υδροχημικών αναλύσεων και συγκεκριμένα των νιτρικών ιόντων σε σημεία ύδατος (πηγές, γεωτρήσεις, φρέατα) της περιοχής έρευνας. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της χωρικής κατανομής της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων με τα αποτελέσματα της χωρικής κατανομής του δείκτη επικινδυνότητας παρατηρήθηκε σύγκλιση των εκτιμήσεων της μεθοδολογίας με το συντελεστή συσχέτισης της τάξεως του 60% (Σχ. 8.22).



Σχήμα 8.22: Συσχέτιση του δείκτη επικινδυνότητας με τη συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι στις περιοχές που εκτιμήθηκε υψηλός δείκτης εντάσεως επικινδυνότητας, οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων είναι αυξημένες. Αυτές είναι κυρίως οι περιοχές οι οποίες χαρακτηρίζονται από έντονη ανθρώπινη δραστηριότητα (καλλιεργούμενες περιοχές, αστικός ιστός), όπου αποτελεί παράλληλα και το κριτήριο L. Σύμφωνα με την εξίσωση υπολογισμού του δείκτη εντάσεως επικινδυνότητας, οι τιμές μειώνονται όσο αυξάνεται ο βαθμός κινδύνου (hazard index) που ουσιαστικά αποτελεί και το κριτήριο L της μεθοδολογίας εκτίμησης της τρωτότητας. Δεδομένου ότι ο δείκτης εντάσεως επικινδυνότητας εξαρτάται ανάλογα από το δείκτη τρωτότητας I_g , σημαντικό κριτήριο επαλήθευσης της μεθοδολογίας θεωρήθηκε η συσχέτιση του κριτηρίου βαθμός διασύνδεσης ασυνεχειών DI, με τις συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων (Σχ. 8.23) καθώς το συγκεκριμένο κριτήριο λαμβάνει το μεγαλύτερο συντελεστή βαρύτητας στην εκτίμηση της τρωτότητας. Ο λόγος είναι το γεγονός ότι σε ένα μέσο ασυνεχειών η κίνηση του υπόγειου νερού είναι επιλεκτική και επομένως ο βαθμός επίδρασης του συγκεκριμένου κριτηρίου είναι υψηλός καθώς ο ρύπος έχει τη δυνατότητα να προσβάλει το υδροληπτικό έργο ακόμα και

στην περίπτωση παρουσίας εδαφικού καλύμματος, εξαιτίας την έντονης παρουσίας πυκνού δικτύου ασυνεχειών, που επιτρέπουν την κίνηση του υπόγειου νερού. Από την παραπάνω συσχέτιση προέκυψε πως ο συντελεστής συσχέτισης της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων με το βαθμό διασύνδεσης ασυνεχειών (DI) είναι ισχυρός και ίσος με 70% (Σχ. 8.23).



Σχήμα 8.23: Συσχέτιση του κριτηρίου DI με τις συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η υδρογεωλογική, υδραυλική και μελέτη τρωτότητας στην περιοχή μελέτης είχε ως αποτέλεσμα την εξαγωγή των παρακάτω συμπερασμάτων:

1. Η περιοχή που μελετήθηκε περιλαμβάνει την επιφανειακή εμφάνιση της οφιολιθικής σειράς του Μαντουδίου, η οποία αποτελείται από τρεις κύριες λεκάνες απορροής, του ποταμού Κυμάσι, του ποταμού Δαφνοπόταμος και του ποταμού Πήλι. Ορίζεται από τις συντεταγμένες γεωγραφικού μήκους $23^{\circ} 30'$ έως $23^{\circ} 35'$ και γεωγραφικού πλάτους $38^{\circ} 50'$ έως $38^{\circ} 45'$. Η έκταση που καλύπτεται είναι περίπου $71,40 \text{ km}^2$.

2. Στην περιοχή έρευνας τα πετρώματα τα οποία απαντώνται αποτελούν την ευρύτερη οικογένεια των βασικών και υπερβασικών πετρωμάτων. Πρόκειται για το σύνολο των οφιολίθων και των διαβάσεων που σε υγιή κατάσταση εμφανίζουν μεγάλες αντοχές και έχουν την ικανότητα να δεχτούν οποιοδήποτε τεχνικό έργο, κάτι που όμως δεν αποτελεί συνηθισμένη κατάσταση καθώς λόγω της σκληρότητάς τους και των ρωγματώσεων που εμφανίζουν εύκολα, αποσυμπιέζονται οι γεωστατικές τάσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ρωγμάτωσή τους να φτάνει στη δημιουργία ενός σημαντικού δευτερογενούς πορώδους με ιδιαίτερο υδρογεωλογικό ενδιαφέρον.

3. Από τη γεωλογική και τεκτονική μελέτη της περιοχής διαπιστώθηκε ότι σχεδόν όλες οι επιφάνειες είναι κατά βάση κλειστές, συχνά παρουσιάζουν έντονο κερματισμό (κατακλαστικές ζώνες) και από υδρολιθολογικής απόψεως πρέπει να θεωρούνται αδιαπέρατες. Παρόλα αυτά εντοπίζονται και επιφάνειες, κατά κανόνα στους περιδοτίτες, οι οποίες είναι σαφείς και διαμπερείς και ακολουθούν την ίδια διεύθυνση με τη διεύθυνση των κυρίων ρηγμάτων της περιοχής μελέτης.

Από την επεξεργασία των μετρήσεων που έγινε προέκυψαν τρεις κύριες οικογένειες ασυνχειών με διευθύνσεις BA – ΝΔ, ΒΔ – ΝΑ και ΒΒΔ – ΝΝΑ.

4. Με βάση τα αποτελέσματα της ποσοτικής ανάλυσης του υδρογραφικού δικτύου για κάθε λεκάνη απορροής μελέτης υπολογίστηκαν οι κυριότερες μορφολογικές παράμετροι που περιγράφουν την υδρογραφική υφή της περιοχής μελέτης. Κατά κανόνα οι τιμές της υδρογραφικής συχνότητας είναι μεγαλύτερες από τις τιμές της υδρογραφικής πυκνότητας, ιδιαίτερα στις μικρότερες τάξεις. Σύμφωνα με την ποσοτική ανάλυση προέκυψε ότι ο συντελεστής διακλάδωσης R_b για την περιοχή μελέτης κυμαίνεται από **3,93** έως **5,27**, η

υδρογραφική πυκνότητα R_D κυμαίνεται από **2,44 έως 3,21 km/km²** και η υδρογραφική συχνότητα R_F από **5,98 έως 8,18 ανά km²**.

5. Από την επεξεργασία των γεωμορφολογικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή μελέτης διαπιστώνεται ότι τα ρέματα 2^{ης} και 3^{ης} τάξης εμφανίζουν χαμηλές τιμές τόσο υδρογραφικής πυκνότητας όσο και συχνότητας. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το γεγονός ότι οι λεκάνες 2^{ης} και 3^{ης} τάξης αναπτύσσονται κυρίως σε επιφάνειες με πολλές διαρρήξεις και ασυνέχειες, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα την κατείσδυση του νερού σε βάθος και κατ' επέκταση τη δημιουργία πολυάριθμων κλάδων με μικρά μήκη. Στα σημεία όπου η υδρογραφική πυκνότητα εμφανίζει υψηλές τιμές οφείλεται στο ότι οι κλάδοι ακολουθούν την τεκτονική γραμμή με αποτέλεσμα να βρίσκονται σε διαφορετικό στάδιο εξέλιξης (1^{ης} τάξης). Από την εφαρμογή των νόμων Horton διαπιστώνεται πως οι κλάδοι πρώτης τάξης έχουν μεγάλα μήκη με μεγάλα εμβαδά των αντίστοιχων λεκανών τους. Αντίθετα στους υπόλοιπους κλάδους, 2^{ης} τάξης και 3^{ης} τάξης τα μήκη τους είναι σχετικά μικρά ενώ οι λεκάνες εμφανίζουν μικρά εμβαδά αντίστοιχα.

6. Από τη στατιστική ανάλυση των τοπογραφικών κλίσεων διαπιστώνεται πως το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης σε ποσοστό 86% εμφανίζει τοπογραφικές κλίσεις μικρότερες από 25°. Από 25° – 45° παρατηρούνται σε ποσοστό 13,85% και ακολουθούν οι πολύ μεγάλες κλίσεις (> 45°) σε ποσοστό 0,26%. Λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις μορφολογικές κλίσεις και όχι την λιθολογία ή τους άλλους παράγοντες που επιδρούν στον συντελεστή κατείσδυσης και επιφανειακής απορροής, παράγοντες που επιδρούν στη χαρτογράφηση της εσωτερικής τρωτότητας, συνάγεται το συμπέρασμα ότι στην περιοχή μελέτης φαίνεται να είναι αυξημένη η επιφανειακή απορροή.

7. Το κύριο κλιματικό στοιχείο της περιοχής είναι η ετήσια εναλλαγή μιας ψυχρής – υγρής και μίας θερμής – ξηρής περιόδου. Αυτό διαπιστώνεται και από το γεγονός ότι η έναρξη του υδρολογικού έτους γίνεται τον μήνα Οκτώβριο, όπου αρχίζει και η υγρή περίοδος, η οποία σταματάει το μήνα Απρίλιο οπότε και αρχίζει η ξηρή περίοδος.

Γενικά το κλίμα της περιοχής χαρακτηρίζεται από την επικράτηση ανέμων μέσης διεύθυνσης ΒΔ – ΝΑ. Από τα δεδομένα των μετεωρολογικών σταθμών της Κύμης, Χαλκίδας και Προκοπίου προέκυψε ότι η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται γύρω στους 17.02 °C, με μέγιστη μέση μηνιαία τιμή της θερμοκρασίας να παρατηρείται κατά το μήνα Ιούλιο περίπου 26.4 °C και ελάχιστη μέση μηνιαία τιμή κατά το μήνα Ιανουάριο με τιμή 8.6 °C. Η συσχέτιση της θερμοκρασίας με το υψόμετρο αναλύθηκε ποσοτικά με τη χρήση της μεθόδου των

ελαχίστων τετραγώνων και προέκυψε ότι η τιμή της θερμοκρασίας αυξάνεται κατά 0,93 °C ανά 100 m υψομετρικής διαφοράς ενώ η θερμοκρασία που αντιστοιχεί στο υψόμετρο της θάλασσας ανέρχεται σε 18,046 °C. Από τη μελέτη των μέσων μηνιαίων υψών βροχόπτωσης για την ίδια περίοδο διαπιστώνεται ότι το μέγιστο ύψος ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων παρατηρείται το μήνα Ιανουάριο (μέσο ύψος βροχής 187,9 mm) ενώ τα ελάχιστα κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Για τον υπολογισμό του όγκου νερού που δέχεται η περιοχή έρευνας χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από τους τρεις μετεωρολογικούς σταθμούς της περιοχής έρευνας. Ο υπολογισμός της πραγματικής εξατμισιαδιαπνοής έγινε με την εφαρμογή της μεθόδου **Turc** (τροποποιημένη), συναρτήσεως της μηνιαίας τιμής θερμοκρασίας και βροχόπτωσης, και της μεθόδου **Thornthwaite – Matter**, συναρτήσεως της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας και του ετήσιου θερμικού δείκτη του Thornthwaite. Με βάση τα παραπάνω στοιχεία για την περιοχή έρευνας προέκυψε ότι η μέθοδος κατά Thornthwaite – Matter δίνει μια μέση ετήσια πραγματική εξατμισιαδιαπνοή της τάξεως των **702,4 mm** ύψους βροχόπτωσης σε αντίθεση με τη μέθοδο κατά Turc όπου η μέση ετήσια πραγματική εξατμισιαδιαπνοή ανέρχεται σε **712,4 mm** ύψους βροχόπτωσης. Η μέθοδος που αποδεχόμαστε είναι αυτή του Thornthwaite η οποία έχει συντελεστή **68,07%** του μέσου ετήσιου ύψους βροχόπτωσης και ανταποκρίνεται στη μέση ετήσια τιμή της πραγματικής εξατμισιαδιαπνοής, σύμφωνα και με παλαιότερες ερευνητικές εργασίες.

8. Στην υπό μελέτη περιοχή πραγματοποιήθηκαν μηνιαίες μετρήσεις της απορροής των ποταμών Κυμάσι, Δαφνοπόταμος και Πήλι στις εκβολές τους στη θάλασσα. Στην περιοχή έρευνας δε λειτουργούν λυσίμετρα και συνεπώς ο υπολογισμός του συντελεστή κατείδυσης βασίστηκε στα δεδομένα που προέκυψαν από τις παραμέτρους του υδρολογικού ισοζυγίου. Για την περιοχή έρευνας επομένως ο μέσος ετήσιος όγκος κατείδυσης υπολογίστηκε σε **385,43 mm (7,8 x 10⁶ m³)**. Ειδικότερα, όσον αφορά τους οφιολίθους ο συντελεστής κατείδυσης υπολογίστηκε με βάση ετήσιες μετρήσεις επιφανειακής απορροής σε υπολεκάνες, οι οποίες συνίστανται μόνο από οφιολίθους. Σύμφωνα με τα παραπάνω ο συντελεστής κατείδυσης υπολογίστηκε ίσος με **4,24%**.

Γνωρίζοντας για κάθε λεκάνη απορροής μελέτης της περιοχής έρευνας την επιφάνεια που καταλαμβάνουν οι οφιολίθοι στην περιοχή μελέτης και σε συνδυασμό με τις υπολογισμένες παραμέτρους του γενικευμένου υδρολογικού ισοζυγίου, εκτιμήθηκε ο μέσος ετήσιος όγκος νερού κατείδυσης των οφιολίθων ίσος με **0,709 x 10⁶ m³**.

9. Κατά την υδρογεωλογική μελέτη στην περιοχή έρευνας προέκυψε ότι οφιολιθικές μάζες φιλοξενούν ποσότητες υπόγειων νερών, οι οποίες διακινούνται μέσα κυρίως από ζώνες εντατικών διαρρήξεων. Η κατείσδυση του νερού στα πετρώματα αυτά καθορίζεται από το εύρος των τεκτονικών ασυνεχειών, αλλά και από το μέγεθος των υλικών που τις έχουν πληρώσει. Το υδρογεωλογικό καθεστώς στα πετρώματα αυτά εκφράζεται με διάσπαρτες πηγές, που χαρακτηρίζονται από εποχικές μεταβολές, και απαντώνται στο μεγαλύτερο ποσοστό τους στους σερπεντινωμένους χαρτζβουργίτες, καθώς και στην επαφή τους με τους υποκείμενους σερπεντινίτες. Στις περιοχές ανάπτυξης των οφιολιθικών υπερβασικών σχηματισμών, κυρίως περιδοτίτες, σερπεντινίτες και διαβάσεις, Κεντρικής και Βόρειας Εύβοιας εντοπίζονται περιορισμένος αριθμός πηγών, οι οποίες αναβλύζουν με σχεδόν μόνιμη ροή σε χαμηλές σχετικά μορφολογικά θέσεις. Σχεδόν στο σύνολό τους οι τιμές των παροχών τους κυμαίνονται από 0,1 l/s έως και 1,5 l/s, πλην ορισμένων εξαιρέσεων που είναι εκροές μεταλλείων μαγνησίτη και παρουσιάζουν υψηλότερες παροχές από 2,5 l/s έως 8,5 l/s.

10. Η υδροπερατότητα των σχηματισμών αυτών οφείλεται κυρίως στο δευτερογενές πορώδες το οποίο έχει δημιουργηθεί από τη δράση των τεκτονικών τάσεων εφελκυσμού και διάτμησης που έχουν προκαλέσει κατακερματισμό των πετρωμάτων. Τα τελευταία χαρακτηρίζονται από πυκνά δίκτυα ρωγμών και διακλάσεων διαφόρων διευθύνσεων ενώ παρουσιάζονται και πρωτογενείς ασυνέχειες, όπως μεσοστρωματογραφικά διάκενα.

11. Από την ανάλυση των παραμέτρων που ορίζουν το καθεστώς της υπόγειας ροής του νερού στο μέσο ασυνεχειών, φαίνεται ότι το 56,86% αντιστοιχεί σε γραμμώσεις – διαρρήξεις, ενώ το 40,40% αντιστοιχεί σε ρήγματα ορατά τα οποία προήλθαν από τη συνδυασμένη εφαρμογή τεχνικών τηλεπισκόπησης και εργασιών υπαίθρου. Τέλος το 2,74% αντιστοιχεί σε διαρρήξεις μεγάλου μήκους, οι οποίες αρχικά είχαν θεωρηθεί ως ρήγματα. Από τις εργασίες υπαίθρου διαπιστώθηκε ότι πρόκειται για διαρρήξεις μεγάλου μήκους. Σύμφωνα με τα ροδογράμματα, τα ρήγματα – διαρρήξεις εμφανίζουν ως κύρια συχνότητα διεύθυνσης τη B45°A και ως δευτερεύουσα τη B120°A, ενώ η κύρια συχνότητα διεύθυνσης των ρηγμάτων είναι B15°A και δευτερεύουσα διεύθυνση B35°A. Στην περιοχή απαντώνται και ρήγματα που έχουν ως συχνότητα διεύθυνσης τη B65°A. Από την χωρική κατανομή της πυκνότητας διαπιστώθηκαν περιοχές με υψηλή τιμή χωρικής πυκνότητας (3,25 – 6,64 km/km²). Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι περιοχές αυτές αποτελούνται από διαφορετικής λιθολογικής σύστασης χαρακτηριστικά. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση του βορειοανατολικού τμήματος της περιοχής μελέτης (περιοχή Κυμάσι) όπου απαντώνται

περιδοτίτες, και στα ανατολικά της περιοχής μελέτης (Όρος Δίρφυ) όπου αποτελείται από ανθρακικούς σχηματισμούς του Αν. Ιουρασικού.

Στις περιοχές που απαντώνται κυρίως ποταμολιμναίες αποθέσεις η χωρική κατανομή της πυκνότητας των ασυνεχειών κυμαίνεται σε πολύ χαμηλές έως χαμηλές τιμές. Το γεγονός αυτό δεν υποδεικνύει ότι ο βαθμός διάρρηξης στο βάθος συνεχίζεται να είναι χαμηλός, αφού τα αποτελέσματα στηρίζονται σε παρατηρήσεις επιφάνειας και τηλεπισκόπησης. Ταυτόχρονα όμως στις περιοχές αυτές η παρουσία πλαστικών δομών είναι περιορισμένη. Από την επεξεργασία των χαρτών χωρικής κατανομής της πυκνότητας των ρηγμάτων και χωρικής κατανομής της πυκνότητας των γραμμώσεων – διαρρήξεων διαπιστώθηκε ότι εμφανίζουν στην περιοχή Κυμάσι πανομοιότυπη εικόνα με τιμές από υψηλές έως πολύ υψηλές, ενώ προς τα νότια η κατανομή είναι ανομοιογενής και οι τιμές της πυκνότητας κυμαίνονται από πολύ υψηλές έως υψηλές για την περίπτωση των ρηγμάτων και χαμηλές έως πολύ χαμηλές για την περίπτωση των φωτογραμμώσεων – διαρρήξεων.

Εν αντιθέσει με τα παραπάνω στην υπόλοιπη περιοχή μελέτης η χωρική κατανομή της πυκνότητας παρουσιάζει μία ομοιογένεια με τιμές που κυμαίνονται από πολύ χαμηλές έως χαμηλές. Σύμφωνα με το χάρτη κατανομής του βαθμού διασύνδεσης αναδεικνύεται μια εικόνα παρόμοια με αυτή της χωρικής κατανομής της πυκνότητας των ασυνεχειών. Η περιοχή του Κυμασίου εμφανίζει τις υψηλότερες τιμές χωρικής κατανομής του βαθμού διασύνδεσης με κύρια διεύθυνση των ασυνεχειών ΝΔ – ΒΑ. Συγκρίνοντας τη χωρική κατανομή πυκνότητας και βαθμού διασύνδεσης, διαπιστώνεται ότι εμφανίζουν πανομοιότυπα χαρακτηριστικά στις περιοχές με υψηλές τιμές πυκνότητας και βαθμού διασύνδεσης αντίστοιχα. Αντίθετα σε περιοχές με διαφορετική λιθολογική σύσταση παρατηρείται ότι ο βαθμός διασύνδεσης κυμαίνεται σε χαμηλές έως πολύ χαμηλές τιμές, και οι τιμές χωρικής κατανομής της πυκνότητας στις αντίστοιχες περιοχές διαφοροποιείται.

12. Κατά το στάδιο συσχετισμού των ασυνεχειών με τις πηγές που καταγράφηκαν στην περιοχή μελέτης έγινε εκτίμηση της απόστασης των πηγών από τις ασυνέχειες. Σύμφωνα με την επεξεργασία των αποτελεσμάτων διαπιστώνεται ότι όσο απομακρυνόμαστε από τις παρακείμενες ασυνέχειες, όπου τόσο ο βαθμός διασύνδεσης όσο και κατ' επέκταση η χωρική κατανομή πυκνότητας των ασυνεχειών μειώνεται, τόσο μειώνεται και ο αριθμός των πηγών που λαμβάνουν χώρα. Στις περιοχές όπου η απόσταση από τις ασυνέχειες υπερβαίνει τα 120 μέτρα δε σημαίνει απαραίτητα ότι οι συγκεκριμένες πηγές δε σχετίζονται με το μέσο ασυνεχειών, αλλά ο βαθμός αβεβαιότητας είναι πολύ μεγαλύτερος από ότι στις πηγές που βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη των 120 μέτρων. Επιπλέον από τη χωρική κατανομή των

πηγών εντοπίστηκαν γραμμικές συσχετίσεις με τις τεκτονικές δομές που απαντούν στην περιοχή. Συγκεκριμένα παρατηρούνται ομάδες με διευθύνσεις εγκάρσιες μεταξύ τους, μία ΒΑ – ΝΔ, μία ΒΔ – ΝΑ και μία Α - Δ. Τα παραπάνω ευρήματα ενισχύουν την άποψη ότι το σύνολο των πηγών που εμφανίζονται στην περιοχή μελέτης σχετίζονται ισχυρώς με το πλήθος των ασυνεχειών.

13. Εφαρμόζοντας το βαθμό συνάφειας – αλληλεπίδρασης ανάμεσα στις πηγαίες εκφορτίσεις των πηγών που μελετήθηκαν προέκυψε ότι οι πηγές που εκφορτίζουν το οφιολιθικό σύστημα του Μαντουδίου χαρακτηρίζονται από τιμές συντελεστή συσχέτισης που κυμαίνονται από 0,56 (μέση γραμμική συσχέτιση) έως 0,83 (ισχυρή γραμμική συσχέτιση). Η διακύμανση του συντελεστή οφείλεται στην διασπορά των τιμών παροχής των πηγαίων εκφορτίσεων, η οποία παρατηρείται πολύ μικρή όταν η προβολή των σημείων αφορά τις μικρές τιμές παροχής και μεγάλη, όταν οι παροχές των πηγών αυξάνονται.

14. Εξετάζοντας τη γραφική απεικόνιση των πηγαίων εκφορτίσεων κατά ζεύγη διαπιστώνεται ισχυρή συσχέτιση της τάξεως του 83% μεταξύ των πηγών (SP2 – SPR1), κάτι που υποδηλώνει την εκφόρτιση του ίδιου συστήματος ασυνεχειών. Αντιθέτως η μικρότερη συσχέτιση παρατηρείται μεταξύ των πηγαίων εκφορτίσεων SM3 με την πηγή SPR1. Η ανωμαλία στη συσχέτιση των επιμέρους ζευγών δεν αποτελεί ταυτόχρονα και απουσία υδραυλικής επικοινωνία, αλλά ενδεχομένως την ύπαρξη διαφορετικού συστήματος τροφοδοσίας, αφού οι πηγές αυτές βρίσκονται σε διαφορετικά υψόμετρα.

15. Τέλος η συσχέτιση μεταξύ των πηγαίων εκφορτίσεων του οφιολιθικού συστήματος Μαντουδίου με την πηγαία εκφόρτιση του οφιολιθικού συστήματος Παγώντα οδήγησε στο συμπέρασμα ότι τα δύο συστήματα δεν έχουν καμία υδραυλική επικοινωνία εκφορτίζοντας διαφορετικά συστήματα τροφοδοσίας.

16. Η κατασκευή των ημιλογαριθμικών διαγραμμάτων παροχής (m^3/h) – χρόνου (μήνες) των υπό μελέτη πηγών, έδωσε τη δυνατότητα να προσδιοριστεί σε κάθε περίπτωση όπου ήταν δυνατόν, η περίοδος στέρησης, και να υπολογιστεί ο αντίστοιχος συντελεστής στέρησης α . Ο συγκεκριμένος συντελεστής έδωσε σημαντικά στοιχεία για το βαθμό διάρρηξης του οφιολιθικού συστήματος Μαντουδίου που εκφορτίζεται κάθε φορά, από την αντίστοιχη πηγή, της οποίας ο συντελεστής μελετάται. Όλες οι τιμές του α που υπολογίστηκαν είναι της τάξεως του 10^{-3} και είναι χαρακτηριστικές για υδροφόρα συστήματα μέσου ασυνεχειών. Η τάξη αυτή των τιμών αντιπροσωπεύουν συστήματα τα οποία είναι ασυνεχή και στα οποία η

κίνηση του νερού πραγματοποιείται δια μέσου διακλάσεων, ρωγμών και διαρρήξεων μικρής διαμέτρου που αντιπροσωπεύουν χαρακτηριστικά δευτερογενούς πορώδους. Μόνο στην πηγή SP2 υπολογίστηκε μεγαλύτερη τιμή συντελεστή στείρευσης, ίση με $1,06 \cdot 10^{-2}$, η οποία χαρακτηρίζεται όχι μόνο από ανεπτυγμένο δίκτυο ασυνεχειών, αλλά παράλληλα η υδροφορία της συγκεκριμένης περιοχής συνδέεται με την παρουσία ενός επιφανειακού υδροφορέα που την τροφοδοτεί με τα μετεωρικά νερά. Το χρονικό εύρος στείρευσης επί του συνόλου των πηγών κυμαίνεται από 47 ημέρες έως 83 ημέρες, με χαρακτηριστικό γνώρισμα των πηγών η αύξηση της ποσότητας εκφόρτισης κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου, όπως είναι άλλωστε αναμενόμενο, και αντίστοιχα μείωση της παροχής εκφόρτισης κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών και κυρίως κατά το τέλος του καλοκαιριού. Οι υδρογεωλογικές λεκάνες, από την ποσότητα και μόνο του νερού που εκφορτίζουν οι πηγές αυτές, είναι επί το πλείστον τοπικού χαρακτήρα.

17. Από τον υπολογισμό του συντελεστή στείρευσης της κάθε πηγής με τη βοήθεια των εξισώσεων Maillet και Drogue προέκυψε ικανοποιητική προσέγγιση υπολογισμού του συντελεστή στείρευσης με τη μέθοδο Drogue για $n = Q_0/Q_t$ ως προς το Maillet.

18. Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της μελέτης με βάση τη στατιστική ανάλυση οδήγησαν στο συμπέρασμα πως πρόκειται για νερά των οποίων η θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ από 16 - 26 °C. Η τιμή του pH κυμαίνεται μεταξύ 7,3 και 9,15 γεγονός που φανερώνει τον αλκαλικό χαρακτήρα αυτών. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα κυμαίνεται μεταξύ 461 – 910 $\mu\text{S}/\text{cm}$ και φανερώνει την ολιγομεταλλικότητα των νερών. Η υψηλή περιεκτικότητα των πηγών σε διαλυμένο Οξυγόνο (5,3–11,5 mg/l ή 69 – 94% κορεσμού) φανερώνει τη μετεωρική προέλευση αυτών. Από την πλευρά των κατιόντων υπερισχύει το Mg^{2+} , που παρουσιάζει τιμές συγκέντρωσης 46,3-110,4 mg/l. Οι τιμές συγκέντρωσης του ασβεστίου κυμαίνονται ευρέως μεταξύ 8 και 34,4 mg/l καθώς επίσης με ποσοστιαία συμμετοχή 0,8 και 5 meq/l % μεταξύ των κατιόντων. Τα αλκάλια Na^+ και K^+ παρουσιάζουν αρκετά χαμηλές συγκεντρώσεις, οι τιμές των οποίων κυμαίνονται μεταξύ 0,7 – 32,2 mg/l και 0,3 – 6,9 mg/l αντίστοιχα. Από την πλευρά των ανιόντων υπερισχύει το HCO_3^- , οι τιμές του οποίου κυμαίνονται μεταξύ 292,8 και 561,2 mg/l. Η ποσοστιαία συμμετοχή του HCO_3^- στο σύνολο των ανιόντων κυμαίνεται μεταξύ 77 και 87 meq/l %. Το Cl^- εμφανίζει γενικά χαμηλές τιμές συγκέντρωσης, πλην ορισμένων εξαιρέσεων όπου οι υψηλές περιεκτικότητες συνδέονται προφανώς με την επίδραση της θάλασσας. Τα σημεία αυτά είναι τα GK1 και FK1 των οποίων οι τιμές ανέρχονται σε 39 mg/l και 53,2 mg/l αντίστοιχα. Οι

υπόλοιπες τιμές συγκέντρωσης κυμαίνονται μεταξύ 24,8 - 53,2 mg/l. Γενικά η ποσοστιαία συμμετοχή του χλωρίου στο σύνολο των ανιόντων κυμαίνεται μεταξύ 4 meq/l % και 8 meq/l%. Τα SO_4^{2-} εμφανίζονται στα περισσότερα δείγματα νερού με συγκεντρώσεις που κυμαίνονται μεταξύ 10 και 46,5 mg/l αντίστοιχα. Η παρουσία του SO_4^{2-} συνδέεται πιθανά με οξειδωτικά φαινόμενα των θειούχων ορυκτών που εμπεριέχονται στα υπερβασικά πετρώματα ή επίσης και με οξειδοαναγωγικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην εδαφική ζώνη από τους μικροοργανισμούς κατά τη διάσπαση της οργανικής ύλης. Χαμηλές συγκεντρώσεις παρατηρούνται επίσης και στα NO_3^- που κυμαίνονται μεταξύ 1,2 και 6,8 mg/l, με μόνη εξαίρεση το επιφανειακό δείγμα από τον Κηρέα ποταμό, όπου τα NO_3^- ανέρχονται στα 16 mg/l. Χαρακτηριστικό γνώρισμα των δειγμάτων νερού αποτελούν οι υψηλές περιεκτικότητες του SiO_2 . Οι τιμές συγκέντρωσης του κυμαίνονται μεταξύ 23,0 και 44,0 mg/l.

19. Γενικά τα υπόγεια νερά των υπερβασικών πετρωμάτων, περιέχουν χαμηλές συγκεντρώσεις διαλυμένων αλάτων οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 253 mg/l και 796 mg/l (TDS), γεγονός που συνδέεται άμεσα με την ορυκτολογική σύσταση των πετρωμάτων της περιοχής τροφοδοσίας και την δυσδιαλυτότητα των ορυκτών αυτών. Σύμφωνα με το διάγραμμα Piper διαπιστώνεται η ομοιογένεια της ποιοτικής σύστασης των σημείων ύδατος. Μεταξύ των κατιόντων και των ανιόντων κυριαρχεί το Mg^{2+} (μ.τ 87 meq/l %) και το HCO_3^- (μ.τ. 82 meq/l %) αντίστοιχα. Το γεγονός αυτό συνδέεται άμεσα με την πλούσια προσφορά σε μαγνησιούχα ορυκτά, τα οποία κατά τη διάβρωσή τους απελευθερώνουν το Mg^{2+} , καθώς επίσης σε άφθονο CO_2 που προέρχεται κυρίως από τη διάλυση της οργανικής ύλης στην εδαφική ζώνη. Σημαντικός παράγων επίσης θεωρείται βεβαίως και η τιμή του pH του κατεισδύοντος μετεωρικού νερού. Συμπερασματικά, τα υπόγεια νερά των υπερβασικών πετρωμάτων της περιοχής μελέτης ανήκουν στην ομάδα των γαιοαλκαλικών, κυρίως οξειανθρακικών νερών και είναι χημικού τύπου νερού Mg-HCO_3 .

20. Από τη χημική ανάλυση επιφανειακών δειγμάτων διαπιστώνεται ότι σύνολο των διαλυμένων αλάτων (TDS) στο σημείο πριν την εκβολή του στον Κηρέα ανέρχεται σε 669 mg/Lt. Η θερμοκρασία του νερού κατά την περίοδο δειγματοληψίας ήταν 24,4 °C και η αγωγιμότητα (E.C.) 751 $\mu\text{S/cm}$. Πρόκειται για επιφανειακό νερό με χαμηλή συγκέντρωση διαλυμένων στοιχείων. Ο ποταμός Κυμάσι παρουσιάζει αλκαλικό χαρακτήρα (pH) 8,71 και υψηλή σκληρότητα (ολική) 23,67 $^{\circ}\text{dH}$, που οφείλεται στις υψηλές συγκεντρώσεις μαγνησίου από τα υπερβασικά πετρώματα. Τις υψηλότερες συγκεντρώσεις από την πλευρά των κατιόντων παρουσιάζουν τα γαιοαλκάλια (Mg^{2+}) 91,25 mg/Lt και από τα ανιόντα τα HCO_3^-

(μέση τιμή 453 mg/Lt) και τα Cl⁻ (μέση τιμή 45,2 mg/Lt. Τα αλκάλια παρουσιάζουν χαμηλές συγκεντρώσεις Na⁺ (μέση τιμή 22,43 mg/Lt) και K⁺ (μέση τιμή 1,23 mg/Lt). Η παρουσία τους συνδυάζεται με την ανάπτυξη των υπερβασικών πετρωμάτων στη λεκάνη απορροής του.

Χαρακτηριστική είναι η σχετικά υψηλή συγκέντρωση των SO₄²⁻ (μέση τιμή 33,4 mg/Lt). Πηγή προέλευση τους αποτελεί κυρίως η χρήση λιπασμάτων θεικής αμμωνίας στις καλλιέργειες και κτηνοτροφικά απόβλητα. Οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων NO₃⁻ και PO₄³⁻ ανέρχονται σε 5,65 mg/Lt και 0,15 mg/Lt αντίστοιχα. Η παρουσία τους σχετίζεται κυρίως με τις γεωργικές δραστηριότητες στην λεκάνη απορροής του ποταμού Κυμάσι. Σύμφωνα με το διάγραμμα Piper τα επιφανειακά νερά του ποταμού χαρακτηρίζονται από τον υδροχημικό τύπο Mg – HCO₃. Γενικά διαπιστώνεται ότι τα νερά του ποταμού όσον αφορά τα κύρια στοιχεία, είναι καλής ποιότητας και χαρακτηρίζονται για την περιορισμένη αλατότητα. Η επιβάρυνση που εκδηλώνεται με βάση τους δείκτες SO₄²⁻ και PO₄³⁻, είναι κυρίως γεωργικής και ενδεχόμενα κτηνοτροφικής προέλευσης.

21. Προκειμένου να διερευνηθεί ο εμπλουτισμός σε SiO₂ στο υπόγειο νερό χρησιμοποιήθηκαν τα χημικά χαρακτηριστικά του και εκτιμήθηκαν οι αλληλεπιδράσεις με τα υπερβασικά πετρώματα (ζώνη αποσάθρωσης). Στο μοντέλο οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν είναι το Mg²⁺, SiO₂, H⁺ και H₂O. Τα δείγματα νερού (πηγές και επιφανειακά νερά) που συλλέχθηκαν από την περιοχή έρευνας προβλήθηκαν σε λογαριθμικό διάγραμμα $\log a_{Mg^{2+}} / a_{H^+}^2 - \log a_{SiO_2}$, από όπου προκύπτει ότι το επικρατέστερο ορυκτό είναι ο τάλκης, το οποίο αποτελεί και το πιο ευδιάλυτο ορυκτό συγκρινόμενο με τα υπόλοιπα που χρησιμοποιήθηκαν στο εν λόγω μοντέλο.

22. Από τη στατιστική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για τα υπόγεια αλλά και για τα επιφανειακά νερά της περιοχής μελέτης διαπιστώθηκε πως οι συγκεντρώσεις σχεδόν όλων των στοιχείων βρίσκονται σε χαμηλά επίπεδα, με τάσεις αύξησης στις περιοχές έντονης ανθρώπινης δραστηριότητας. Η ποιοτική υποβάθμιση της σύστασης των υπογείων νερών της περιοχής παρατηρήθηκε σε περιοχές όπου η παρουσία πυκνού δικτύου ασυνεχειών αποτελεί καταλυτικό παράγοντα στη διαμόρφωση του ποιοτικού χαρακτήρα. Αυτό επαληθεύεται και από τη συσχέτιση της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων με το βαθμό διασύνδεσης των ασυνεχειών, από όπου διαφαίνεται πως στις περιοχές υψηλού βαθμού διασύνδεσης, οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων παρατηρούνται αυξημένες.

23. Με βάση τις κατευθύνσεις της Ενιαίας Ευρωπαϊκής Μεθόδου, όσον αφορά την εκτίμηση και χαρτογράφηση της εσωτερικής τρωτότητας των υπόγειων υδάτων, η οποία

αποτελεί ένα γενικό και ευέλικτο πλαίσιο εργασίας, δημιουργήθηκε μία πολυκριτηριακή μέθοδος αξιολόγησης δεδομένων. Η μέθοδος αυτή βασίζεται σε έναν συνδυασμό υποκειμενικής βαθμονόμησης των κριτηρίων από τον χρήστη και αριθμητικών πράξεων μεταξύ των επιπέδων των κριτηρίων που επιλέχθηκαν, προκειμένου για τον υπολογισμό ενός τελικού δείκτη τρωτότητας. Η μέθοδος λαμβάνει υπόψη της 5 κριτήρια, τα οποία επιτρέπουν την καλύτερη κατανόηση της δομής του υδροφόρου ορίζοντα και της υπόγειας ροής του νερού μέσα στο καρστικό υδροφόρο μέσο. Τα κριτήρια αυτά είναι: η τοπογραφική κλίση **S**, το εδαφικό κάλυμμα **C**, το υδροφόρο πέτρωμα **A**, οι χρήσεις γης **L** και ο βαθμός διασύνδεσης των ασυνεχειών **DI**. Η εκτίμηση και χαρτογράφηση της τρωτότητας στην περιοχή μελέτης μέσω του υπολογισμού του τελικού δείκτη τρωτότητας I_g , πραγματοποιήθηκε με βάση τα κριτήρια **S**, **C**, **A**, **L**, **DI**. Ο τελικός δείκτης τρωτότητας, στην περιοχή μελέτης υπολογίστηκε σύμφωνα με τον τύπο:

$$I_g = 0,1924S_s + 0,1971C_c + 0,0614A_a + 0,1359L_l + 0,4132DI_{di}$$

Στον τελικό χάρτη τρωτότητας εμφανίζονται περιοχές με διαφορετικές τιμές τρωτότητας. Επικρατούσες είναι κυρίως οι τιμές μέτριου και μεγάλου βαθμού τρωτότητας, ενώ κατά σειρά μικρότερες σε έκταση είναι οι περιοχές ελάχιστης τρωτότητας και ακόμα πιο μικρής έκτασης εκείνες που αντιστοιχούν σε πολύ υψηλό βαθμό τρωτότητας.

24. Προκειμένου να επαληθευτούν τα αποτελέσματα εκτιμήσεως της τρωτότητας, έγινε υπολογισμός του δείκτη εντάσεως της επικινδυνότητας για την περιοχή μελέτης όπου διαπιστώθηκε η κατηγοριοποίηση τεσσάρων περιοχών υψηλής έως χαμηλής επικινδυνότητας. Η βαθμονόμηση των παραπάνω περιοχών με δείκτη μεγάλης επικινδυνότητας οφείλεται κυρίως στην επίδραση των επιπέδων κινδύνου, όπου οι ανθρώπινες δραστηριότητες είναι εντατικές. Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων της έρευνας, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα υδροχημικών αναλύσεων και συγκεκριμένα των νιτρικών ιόντων σε σημεία ύδατος (πηγές, γεωτρήσεις, φρέατα) της περιοχής έρευνας. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της χωρικής κατανομής της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων με τα αποτελέσματα της χωρικής κατανομής του δείκτη επικινδυνότητας παρατηρήθηκε σύγκλιση των εκτιμήσεων της μεθοδολογίας με το συντελεστή συσχέτισης της τάξεως του 60%.

10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ADAMS, B., FOSTER, S., S., D.** (1992): Land – surface zoning for groundwater protection, *Journal of Institution of Water and Environmental Management*, vol. 6, pp: 312 – 320.
- ΑΛΜΠΑΝΤΑΚΗΣ, Ν.** (1976): Τα νικελιούχα σιδηρομεταλλεύματα Λοκρίδος και Εύβοιας. Διδακτορική διατριβή. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, σελ. 28.
- ALBINET, M., MARGAT, J.** (1970): Vulnerabilite des nappes d'eau souterraine a la pollution, Mapping of groundwater vulnerability to contamination, Orleans, France, *Bull. BRGM*, section 3, vol. 4, pp: 13 – 22.
- APPELO, C., A., J., POSTMA, D.** (1994): *Geochemistry, groundwater and pollution*. A.A. Balkema Rotterdam/ Brookfield, pp: 536.
- AUBOUIN, J.** (1959): Contribution a l'etude geologique de la Grece septentrionale: les confins de l'Epire et de la Thessalie. *Ann. Geol. Pays Hell.*, vol. X, pp: 1 – 483.
- BACHMAT, Y., COLLIN, M.** (1987): Mapping to assess groundwater vulnerability to pollution. In *vulnerability of soil and groundwater to pollutants*, W. Van Duijvenbooden & H. G. Van Waegeningh Eds., TNO Committee on Hydrological Research, The Hague, *Proceedings and Information* vol. 38, pp: 297 – 307.
- BARNES I, O'NEIL JR., TRESCASES, J.** (1978): Present day serpentinization in New Caledonia, Oman and Yugoslavia. *G.C.A.* vol. 42, pp: 144 – 145.
- BARNES I AND O'NEIL JR.** (1969): The relationship between fluids in some fresh Alpine – type ultramafics and possible modern serpentinization, Western United States. *Geol. Soc. Am. Bull.* vol. 80, pp: 1947 – 1960.
- ΒΑΣΗ ΔΕΛΟΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΦΥΣΗ - ΦΙΛΟΤΗΣ**, <http://www.itia.ntua.gr/filotis/>
- BENACCHIO, S., et al.** (1988): The protection of aquifers of the higher part of Venetian Plain, contamination assessment and ground water vulnerability of the Brenta River basin. vol. 5: *Vulnerability of aquifers to contamination*. Monography G.N.D.C.I. – C.N.R. n. 207, Venice, pp: 21.
- BERKALOFF, E.** (1967): Limite de validite des formules courantes de tarissement du debit. *Chron. D' Hydrogeol., B.R.G.M. Eds*, vol. 10, pp: 31 – 41.
- BOTSIALAS, C., YOXAS, G., STOURNARAS, G., VASSILAKIS, E.** (2010): Study and correlation of hydrogeological conditions of fractured rocks in Tinos Island (Aegean Sea Hellas), *Proc. of XXXVIII IAH Congress Groundwater Quality and Sustainability*, pp: 723, Krakow, Poland.
- BOWERS, T., S., JACKSON K., J., HELGESON, H., C.** (1984): *Equilibrium activity diagrams*. Springer Verlag., pp: 397.
- BOUSSINESQ, J.** (1904): Application de la theorie generale de l' ecoulement des nappes aqueuses infiltrées dans le sol aux fortes sources des terrains permeables, et, en particulier, a

- plusieurs de celles qui alimentent Paris, Mem. Acad. Des Sciences, seance du 18 Janvier 1904, C. R. A. S., 1ere semestre, T. CXXXVIII, No 3, pp: 119 – 123, Paris.
- BOUSSINESQ, J.** (1903): Sur le debit, en temps de scecheresse, d' une source alimentee par une nappe d' eaux d' infiltration, Mem. Acad. Des Sciences, seance du 22 Juin 1903, C. R. A. S., 1ere semestre, T. CXXXVI, No 25, pp: 1511 – 1517, Paris.
- BOUSSINESQ, J.** (1877): Théorie de l'Écoulement Tourbillant, Mem. Présentés par Divers Savants Acad. Sci. Inst. Fr., vol. 23, pp: 46 – 50.
- BURBANK, D.W., ANDERSON, R.**, (2001): Tectonic Geomorphology. Blackwell Science, Oxford, Chapter 7, pp: 274
- CASTANY G.** (1967): Introduction a l'etude des courbes de tarissement. Chronique d' Hdrogeologie, no 10, mars 1967, pp: 23-30.
- ΓΕΩΡΓΑΛΑΣ, Α.** (1996): Υδρογεωλογικές συνθήκες καρστικού συστήματος Υμηττού, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, σελ. 256.
- CHEMIN, J.** (1974): Essai d'application d'un modele mathematique conceptuel au calcul du bilan hydrique de l'aquifere karstique de la source du Lez (region nord de Montpellier). These de Doc. De spec., pp: 67, Univ. de Montpellier.
- CHORLEY, R., J., KENNEDY, B., A.** (1971): Physical geography, a system approach. Prentice Hall, London.
- ΓΙΑΝΝΑΤΟΣ, Γ.** (1999): Υδροδυναμική ανάλυση πηγών σε πετρώματα με επικράτηση περατότητας ασυνεχειών. Ενότητα Πίνδου. Ευρύτερη περιοχή λεκάνης Άνω Βουραϊκού Αχαΐας. Διδακτορική Διατριβή, Ε.Κ.Π.Α.
- ΓΙΟΞΑΣ, Γ.** (2009): Υδραυλική μελέτη του μέσου ασυνεχειών και τρωτότητα των υπόγειων υδροφορέων, Εφαρμογή στην ευρύτερη περιοχή Μαντουδίου – Κεντρική Εύβοια, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος.
- ΓΙΟΞΑΣ, Γ.** (2004): Υδρογεωλογικές και Υδροχημικές συνθήκες του προσχωματικού υδροφόρου ορίζοντα της λεκάνης απορροής του ποταμού Βολιναίου, ΒΔ Πελοπόννησος. Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας.
- ΓΚΑΡΤΖΟΣ, Ε., ΔΑΒΗ, Ε., ΜΙΓΚΙΡΟΣ, Γ., ΣΕΡΕΛΗΣ, Κ., ΠΑΡΧΑΡΙΔΗΣ, Ι.** (1993): Οι χρωμιτικές συγκεντρώσεις στα υπερβασικά πετρώματα της Εύβοιας και της Ανατ. Θεσσαλίας. Μελέτη γεωτεκτονικού περιβάλλοντος σχηματισμού των οικονομικό ενδιαφέρον. Τελική έκθεση ερευνητικού προγράμματος Γ.Γ.Ε.Τ. (Πρόταση 89 ΕΔ 290), σελ. 58
- COST620** (1996-2001): Vulnerability and Risk Mapping for the protection of (karstic) carbonate aquifers, Final Report (Part B – Methods and Applications) COST Action 620

- COST65 (1995):** Hydrogeological aspect of groundwater protection in karstic areas, Final report (COST action 65). - European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development, Report EUR 16547 EN, pp: 446, Brussel, Luxemburg.
- DAVIS, S.N.** (1964): Silica in streams and groundwater. Amer. Journal Science vol. 262, pp: 870 – 891.
- DEERE, D., U., PATTON, F., D.** (1971): Slope stability in residual soils, Proc. of 4th Panamerican Conference in soil Mechanics and foundation Engineering, American Society of Civil Engineering, vol. 1, pp: 87 – 170.
- DEWANDEL, B., LACHASSAGNE, P., BAKALOWICZ, M., WENG, PH., A. AL – MALKI, A.** (2003): Evaluation of aquifer thickness by analysing recession hydrographs. Application to the Oman ophiolite hard-rock aquifer, Journal of Hydrology vol. 274, pp: 248 – 269.
- DIETRICH, P., HELMIG, R., SAUTER, M., HÖTZL, H., KÖNGETER, J., TEUTSCH, G.** (2005): Flow and transport in fractured porous media, Springer Eds
- DÖERFLIGER, N.** (1996): Advances in karst groundwater protection strategy using artificial tracer tests analysis and multiattribute vulnerability mapping (EPIK method). PhD thesis, University of Neuchatel, Switzerland, pp: 308.
- ΔΟΥΤΣΟΣ, Θ.** (2002): Πανεπιστημιακές σημειώσεις Γεωλογία Ελλάδας, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας.
- DROGUE, C.** (1972): Analyse statistique des hydrogrammes de décrues des sources karstiques. Journal of Hydrology, vol. 38 (1-2), pp: 51 – 62.
- FETTER, W., C.** (1994): Applied Hydrogeology, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 3rd Edition, pp. 691.
- FEUGA, B.** (1984): Elements d' approche des milieux rocheux fractures du point de vue de l' hydraulique souterraine, Rapport du BRGM 84 SGN 128 GEG
- FORKASIEWICZ, J., PALOC, H.** (1967): Le régime de tarissement de la Foux de la Vis. Etude préliminaire. AIHS, Coll. Hydrol. des roches fissures. Dubrovnik (Yugoslavia), vol. 1, pp: 213 – 228.
- FREEZE, R., A., CHERRY, A., J.** (1979): Groundwater, Prentice Hall, Englewood Cliffs
- ΦΥΤΡΟΛΑΚΗΣ, Ν., ΛΕΙΒΑΛΙΤΗ, Α., ΛΕΙΒΑΛΙΤΗΣ, Γ., ΚΥΡΟΥΣΗΣ, Ι.** (1986): Κατάσταση των υπογείων και επιφανειακών νερών της περιοχής Μαντουδίου – Προκοπίου – Αγίας Άννας ΒΑ-Εύβοιας. ΥΠΕΧΩΔΕ/Δνση Περιβάλλοντος.
- GARTZOS, E.** (1986): On the genesis of cryptocrystalline magnesite deposits in the ultramafic rocks of north Evia, Greece. PhD Thesis, ETH Zurich.
- GOOSENS, M., VAN DAMME, M.** (1987): Vulnerability mapping in Flanders, Belgium. In Vulnerability of soil and groundwater to pollutants (W. van Duijvenbooden and H.G. van

- Waegeningh, eds), TNO Committee on Hydrological Research, The Hague, Proceedings and Information vol. 38, pp: 355 – 360.
- GREGORY, K., J., GARDINER, V.** (1975): Drainage density and climate. *Zeitschrift für Geologie*, vol. 19, pp: 287 – 298.
- HORTON, R., E.** (1945): Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America*, vol. 56, pp: 275 – 370.
- ΚΑΛΛΕΡΓΗΣ, Γ.** (2000): Εφαρμοσμένη Υδρογεωλογία, Τόμος Α', Β' και Γ', Έκδοση Τ.Ε.Ε., Αθήνα.
- ΚΑΤΣΙΚΑΤΣΟΣ, Γ.** (1992): Γεωλογία Ελλάδας, University studio press, Θεσσαλονίκη.
- KATSIKATSOS, G., MIGIROS, G., TRIANTAPHYLIS, M., METTOS, A.** (1986): Geological structure of internal Hellenides. *Geol. Geoph. Res.*, special issue, pp: 191 – 212.
- ΚΑΤΣΙΚΑΤΣΟΣ, Γ. και Συν.** (1981): Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας σε κλίμακα 1:50.000, φύλλο Ψαχνά - Πήλιον. Εκδόσεις Ι.Γ.Μ.Ε.
- ΚΑΤΣΙΚΑΤΣΟΣ, Γ. και Συν.** (1980): Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας σε κλίμακα 1:50.000, φύλλο Λίμνη. Εκδόσεις Ι.Γ.Μ.Ε.
- ΚΑΤΣΙΚΑΤΣΟΣ, Γ. και Συν.** (1978): Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας σε κλίμακα 1:50.000, φύλλο Λάρυμνα. Εκδόσεις Ι.Γ.Μ.Ε.
- KATSIKATSOS, G., MERCIER, J., VERGELY, P.** (1977): L'Eubee meridionale. *Bull. Soc. Geol. France*, vol. 19, pp: 105 – 108.
- KNIGHTON, D.** (1998): *Fluvial forms and processes*, Arnold, London, pp: 383.
- KRASNY, J.** (1996): Hydrogeological Environment in Hard Rocks: An attempt at its schematizing and terminological consideration. *Acta Universitatis Carolinae Geologica*, vol. 40, pp: 115 – 122.
- ΚΟΥΙΜΤΖΙΣ, ΤΗ., ΦΙΤΙΑΝΟΥ Κ, ΣΑΜΑΡΑ, Κ.** (1998): *Environmental Chemistry, Textbook*, University Studio Press, Thessaloniki.
- ΛΑΜΠΡΑΚΗΣ, Ν.** (1991): Εισαγωγή στην Υδροχημεία. Πανεπιστήμιο Πατρών, σελ. 158.
- ΛΑΜΠΡΑΚΗΣ, Ν.** (1991): Επεξεργασία των δεδομένων των αναλύσεων των νερών. Ορυκτός Πλούτος 74, σελ. 53 – 60.
- ΛΕΚΚΑΣ, Σ., ΑΛΕΞΟΠΟΥΛΟΣ, Α., ΚΑΡΟΤΣΙΕΡΗΣ, Ζ., ΛΟΖΙΟΣ, Σ., ΚΡΑΝΗΣ, Χ., ΣΚΟΥΡΤΣΟΣ, Ε., ΚΑΠΟΥΡΑΝΗ, Ε., ΚΑΤΣΑ, Ο.** (1998): Υδρογεωλογική μελέτη περιοχής υδρολογικών λεκανών ποταμών Νηλέα και Κηρέα (Μαντούδι – Κεντρική Εύβοια), Ερευνητικό Πρόγραμμα Ε.Κ.Π.Α.

- ΛΕΩΝΙΔΟΠΟΥΛΟΥ, Δ.** (2007): Γεωλογική και Γεωμορφολογική παράγοντες διαμόρφωσης της εσωτερικής τρωτότητας σκληρών διερρηγμένων πετρωμάτων. Εφαρμογή στη νήσο Τήνο, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
- LLOYD, J., W.** (1999): Water Resources of hard rock aquifers in arid and semi-arid zones, UNESCO.
- LLOYD, J.W., HEATHCOTE, J.A.** (1985): Natural Inorganic Hydrochemistry in Relation to Groundwater: An Introduction, Oxford University Press, USA.
- LOUIS, I., F., VAFIDIS, A., P., I. LOUIS, F., I., TASSOPOULOS, N.** (2002): The use of geophysical prospecting for imaging the aquifer of Lakka carbonates, Mandoudi Euboea, Greece Journal of the Balkan Geophysical Society, vol. 5, No 3, pp: 97 – 106.
- MAILLET, E.** (1905): Essais d'hydraulique souterraine et fluviale. pp:218, Paris
- MANGIN, A.** (1975): Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse de 3ème cycle (Université de Dijon, France) Annales de spéléol., vol. 29, pp: 285 – 382, 495 – 601, vol. 30, pp: 21 – 124.
- ΜΑΡΑΤΟΣ, Γ.** (1972): Γεωλογία της Ελλάδος. Έκδοση ΓΕ. ΜΕΛ. ΕΡ., Αθήνα.
- MARGAT, J.** (1991): La vulnérabilité des eaux souterraines aux pollutions, conception – estimation – cartographie. EEC Institute European de l'eau, Paris, France, pp: 11.
- MARGAT, J., SUAIS – PARASCANDOLA, M., F.** (1987): Mapping the vulnerability of groundwater to pollution; some lessons from experience in France. In vulnerability of soil and groundwater to pollutants, W. Van Duijvenbooden & H. G. Van Waegeningh Eds, TNO Committee on Hydrological Research, The Hague, Proceedings and Information vol. 38, pp: 433 – 436.
- MARGAT, J.** (1968): Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine a la pollution - BRGM - Publication 68 SGL 198 HYD, Orleans.
- MARIN, A., I., DÖRFLIGER, N., ANDREO, B.** (2010): Comparative Application of Two Methods (COP and PaPRIKa) for Groundwater Vulnerability Mapping in the Lez Karst System (Montpellier, South France), Environmental Earth Sciences 2010, Advances in research in karst media, Part 1, pp: 329 – 334.
- MARINONI, O.** (2004): Implementation of the Analytical Hierarchy Process with VBA in Arc-GIS, Journal of Computer and Geosciences, vol. 30, pp: 637 – 646.
- ΜΑΡΙΝΟΣ, Π.** (1975): Ενεργός κατείσδυση εντός ασβεστολίθων. Σφάλματα κατά τον υπολογισμόν, εκ διαφοράς μέσω του υδρολογικού ισοζυγίου. Ισχύς των συνήθων εξισώσεων πραγματικής εξατμισοδιαπνοής εις την Ελλάδα. Ann. Geol. Des Pays Hell., Τομ. 27, σελ. 159 - 179
- ΜΙΓΚΙΡΟΣ, Γ.** (1989): Στρωματογραφία - Εφαρμοσμένη Γεωλογία, Σημειώσεις, Γενικό Τμήμα Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών.

- MIGIROS, G.** (1983b): The Geology and Geochemistry of ophiolitic rocks in the Area of East Thessaly (Greece). *Ophioliti*, vol. 8, pp: 46.
- ΜΠΟΤΣΙΑΛΑΣ, Κ.** (2007): Ανάλυση, Ερμηνεία και Εκτίμηση του υδρογεωλογικού και τεχνικογεωλογικού περιβάλλοντος του μέσου ασυνεχειών. Εφαρμογή στο σχιστολιθικό σύστημα της Νήσου Τήνου, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
- ΜΟΥΝΤΡΑΚΗΣ, Δ** (1985): Γεωλογία της Ελλάδας. University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
- ΝΤΑΜΠΙΤΖΙΑΣ, Σ.** (2005): Δομικά χαρακτηριστικά των κοιτασμάτων φλεβικού μαγνησίτη στο Δ.Μ. Βάβδου Ν. Χαλκιδικής. Μηχανισμός απόθεσης του μαγνησίτη. Πρακτικά 2^ο Συνεδρίου Οικονομικής Γεωλογίας, Ορυκτολογίας και Γεωχημείας, σελ.: 289-297
- OLMER M., Řezač, B.** (1974): Methodical principles of maps for protection of groundwater in Bohemia and Moravia, scale 1:200000. International Association of Hydrogeologists, Memoires, Tome X, Congres de Montpellier, vol. 1, Communications, pp: 105-107.
- PALMQUIST, R., C.** (1991): Groundwater vulnerability: a DRASTIC approach. Washington Department of Ecology, Olympia, WA 98504, 84th Annual Meeting, Air & Waste Management Assoc., Vancouver, BC, Canada, June 16 - 21, pp: 16 (unpublished).
- PALYVOS, N., BANTEKAS, I., KRANIS, H.** (2006): Transverse fault zones of subtle geomorphic signature in northern Evia island (central Greece extensional province): An introduction to the Quaternary Nileas graben, *Journal of Geomorphology*, vol. 76, pp: 363 – 374.
- PAPANIKOLAOU, D.** (1985): Late Cretaceous Paleogeography of the Metamorphic Hellenides. *Geol. Geoph. Res.*, Hors serie volume in honour of Prof. Papastamatiou.
- PAPANIKOLAOU I., MIGIROS G., STAMATIS G., YOXAS G.** (2009). Fissured Rocks and Water Reservoirs in Eastern Thessaly Mountain Range, Greece (Olympus, Ossa, Maurovouni and Pelion): The Role of Tectonic Deformation, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 11, EGU 2009 – 11183, EGU General Assembly 2009, Vienna.
- PETELET – GIRAUD, E., DÖERFLIGER, N., CROCHET, P.** (2000): RISKE: Methode d'evaluation multicritere de la cartographie de la vulnerabilite des aquiferes karstiques, Application aux systemes des Fontanilles et Cent-Fonts (Herault, Sud de la France). *HYDROGEOLOGIE*, vol. 4.
- PHILLIPS, O., M.** (1991): Flow and reactions of permeable rocks, Cambridge University Press.
- PFEIFER H. R.** (1979): Fluid-Gesteins-Interaction in Metamorphen Ultramafititen der entralalpen. Ph.D. Thesis, ETH.
- PIPER, A.** (1944): A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis, *Transam*, Geophysical Union, New York, vol. 25, pp: 914 – 928.
- RENZ, C.** (1955): Die vorneogene Stratigraphie der normalsedimentaren Formationen Griechenlands. *I.G.M.E. Publ.*, pp: 637.

- SAATY, T., L.** (2003): Decision making with the AHP: Why is principal eigenvector necessary, *European Journal of Operational Research*, vol. 145, pp: 85 – 91.
- SAATY, T., L., VARGAS, G., L.** (2001): *Models, Methods, Concepts and Applications of the Analytic Hierarchy Process*, Kluwer Academic Publisher, pp: 333.
- SAATY, T., L.** (2000): *The fundamentals of decision making and priority theory with the Analytic Hierarchy Process*, RWS Publications, 2nd edition, vol.6, pp: 478
- SAATY, T., L.** (1980): *The Analytical Hierarchy Process*, McGraw Hill Eds, New York
- SAATY, T., L.** (1977): A scaling method for priorities in hierarchical structures, *Journal of Mathematical Psychology*, vol. 15, pp: 231 – 281.
- ΣΑΚΚΑΣ, Ι.** (1985): *Τεχνική Υδρολογία*, Τεύχος 1, Εκδόσεις ΑΪΒΑΖΗ, Θεσσαλονίκη.
- SCHERREIKS, R.** (2000): Platform margin and oceanic sedimentation in a divergent and convergent plate setting (Jurassic, Pelagonian Zone, NE Evnoia, Greece), *International Journal of Earth Science*, vol. 89, pp: 90 – 107.
- SCHOELLER, H.** (1967): Hydrodynamique dans le karst. *Chronique d'Hydrogéol.*, BRGM, vol. 10, pp: 7 – 21.
- ΣΕΡΕΛΗΣ Κ., ΓΚΑΡΤΖΟΣ Ε., ΤΣΑΟΥΣΙΑΔΟΥ Π.** (2004): Μελέτη των εξαλλοιώσεων των υπερβασικών πετρωμάτων που φιλοξενούν κοιτάσματα μαγνησίτη στη Β. Εύβοια, Πρακτικά 10^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, Τομ. XXXVI, σελ. 377 – 386.
- ΣΕΡΕΛΗΣ Κ.** (1989): Υδροθερμική εξαλλοίωση υπερβασικών πετρωμάτων στη Β. Εύβοια. Μεταπτυχιακή διατριβή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- SINGHAL, B., B., S., GUPTA, R., P.** (1999): *Applied Hydrogeology in Fractured Rocks*. Kluwer Academic Publishers. Netherlands.
- SNOW, D., T.** (1969): Anisotropic permeability of fractured media, *Water Resources Research*, vol. 5, No 6, pp: 1273 – 1289.
- SOTORNICOVA, R., VRBA, J.** (1987): Some remarks on the concept of vulnerability maps. In vulnerability of soil and groundwater to pollutants, W. Van Duijvenbooden & H. G. Van Waegeningh Eds., TNO Committee on Hydrological Research, The Hague, Proceedings and Information vol. 38, pp: 471 – 476.
- ΣΟΥΛΙΟΣ, Γ.** (1985): Συμβολή στην Υδρογεωλογική Μελέτη των Καρστικών Υδροφόρων Συστημάτων του Ελληνικού Χώρου, Παρ. Αρ. 27 του 23^{ου} Τόμου, Θεσσαλονίκη.
- ΣΟΥΛΙΟΣ, Γ.** (1979): *Γενική Υδρογεωλογία*, Τόμος Α, Εκδοση University Studio
- STAMATIS, G., GARTZOS, E.** (1999): The silica supersaturated waters of Northern Evia and Eastern Central Greece, *Hydrological Processes*, vol. 13, pp: 2833 – 2845.

- STEFOULI, M., TSOMBOS, P.** (2004): Identification and Monitoring of fresh water outflows in coastal areas: pilot study on Psahna area/Evia Island-Greece, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, Τομ. XXXVI, Πρακτικά 10^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσ/νίκη, σελ. 928-937.
- ΣΤΕΦΟΥΛΗ, Μ., ΤΣΟΜΠΟΣ** (2004): Η Συνδυαστική χρήση των τεχνικών επεξεργασίας δορυφορικών εικόνων και Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών στην έρευνα του γεωλογικού περιβάλλοντος, Ελληνική Εταιρεία Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο "Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών - Δυνατότητες και Εφαρμογές, Προοπτικές και Προκλήσεις".
- ΣΤΟΥΡΝΑΡΑΣ, Γ.** (2010): Τεχνική Γεωλογία, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, Θεσσαλονίκη.
- STOURNARAS, G.** (2008): Hydrogeology and vulnerability conditions of limited extension fissured rocks islands. The case of Tinos Island (Aegean Sea, Hellas), Intern. Conference, Ecohydrological Processes and Sustainable Floodplain Management, Lotz, Poland
- STOURNARAS, G.** (2008): On the necessity of the establishment special assessment and risk mapping methods of the fissured rocks vulnerability, 8th Intern. Hydrogeological Congress of Greece, 3rd MEM Workshop on Fissured Rocks Hydrogeology
- ΣΤΟΥΡΝΑΡΑΣ, Γ.** (2007): Νερό. Περιβαλλοντική Διάσταση και Διαδρομή, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, Θεσσαλονίκη.
- STOURNARAS G., LEONIDOPOULOU D., YOXAS G.** (2007): Geoenvironmental approach of Tinos Wetlands (Aegean Sea, Hellas), 35th International Congress of IAH, Groundwater and Ecosystems, PORTUGAL.
- STOURNARAS G., MIGIROS G., STAMATIS G., EVELPIDOU N., BOTSIALAS C., ANTONIOU V., VASSILAKIS E.** (2003): The fractured rocks in Hellas, IAH Sp. vol. 9, Selected Papers, Taylor & Francis Eds.
- ΣΤΟΥΡΝΑΡΑΣ, Γ.** (2000): Υδροδυναμική ανάλυση πηγών. Ειδικά Μαθήματα Γεωλογικών Εφαρμογών. Ε. Κ. Π. Α., Αθήνα.
- STRAHLER, A., N.** (1957): Quantitative analysis of watershed geomorphology, American Geophysical Union Trans., vol. 38, pp: 913 – 920.
- SWEET, H., R., FETROW, R., H.** (1975): Ground-Water Pollution by Wood Waste Disposal, vol. 13, Issue 2, pp: 227 – 231.
- THORNTHWAITTE, C., MATHER, J.** (1955): The water balance. Climatology, vol. VIII, N^ο 1, New Jersey.
- TISON, G.** (1960): Courbe de tarissement, coefficient d'ecoulement et permeabilite du basin. Memoir A.I.H.S., pp: 229 – 243.
- ΤΣΙΟΥΜΑΣ Β., ΖΟΡΑΠΑΣ Β., ΜΑΝΑΚΟΣ Α., ΣΤΑΜΑΤΗΣ Γ., ΓΙΟΞΑΣ Γ.** (2008): Επιβάρυνση των υπόγειων νερών σε νιτρικά ιόντα, Λεκάνη Ξυνιάδος (Στερεά Ελλάδα), Πρακτικά 8^ο Διεθνές Υδρογεωλογικό Συνέδριο της Ελλάδος και 3^ο MEM Workshop on Fissured Rocks

- Hydrology, Αθήνα, Οκτώβριος 2008.
- TURC, L.** (1954): Le bilan d' eau des sols: relations entre les precipitations, l' evaporation et l' ecoulement. Annales de agronomie, 5, pp: 491 – 595.
- US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY** (1996): Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices. US EPA 3052 Method, pp: 20
- VARDAKI, C., KELEPERTZIS, A.** (1999): Environmental impact of Heavy metals (Fe, Ni, Cr, Co) in soils waters and plants of Triada in Euboea from ultrabasic rocks and nickeliferous mineralisation, Environmental Geochemistry and Health vol. 21, pp: 211 – 226.
- VILLUMSEN, A., JACOBSEN, O., S., SONDESKOV, C.** (1983): Mapping the vulnerability of groundwater reservoirs with regard to surface pollution, Geological Survey of Denmark, Yearbook 1982, Copenhagen, pp: 17 – 38.
- VRBA, J., ZAPOROZEC, A.** (1994): Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability - International Contributions to Hydrogeology (IAH), vol. 16, pp: 131.
- VRBA J.** (1991): Mapping of groundwater vulnerability. International Association of Hydrogeologists, Groundwater Protection Commission, Tampa, FL, USA, pp: 35 (unpublished).
- WALSH, R., P., D.** (1985): The influence of climate, lithology and time on drainage density and relief development in the tropical terrain on the Windward Islands. Douglas & Spencer Eds., Environmental change and tropical geomorphology. Allen & Unwin, pp: 93 – 122.
- WHO** (1984): WHO' s guidelines for Drinking Water quality, Geneva
- XYPOLIAS, P., KOKKALAS, S., SKOURLIS, K.** (2003): Upward extrusion and subsequent transpression as a possible mechanism for the exhumation of HP/LT rocks in Evia Island (Aegean Sea, Greece), Journal of Geodynamics vol. 35, pp: 303 – 332
- XYPOLIAS, P., DOUTSOS, T.** (2000): Kinematics of rock flow in a crustal-scale shear zone: implication for the orogenic evolution of the southwestern Hellenides, Journal of Geological Magazine, vol. 137, pp: 81 – 96.
- ZAMANH – ΠΑΠΑΠΕΤΡΟΥ, Α.** (1995): Γεωμορφολογία, Εκδ. Συμμετρία, Αθήνα.
- ZAPOROZEC, A.** (1994): Concept of ground water vulnerability, Guidebook on mapping groundwater vulnerability, Vrba & Zaporozec Eds. International contributions to hydrogeology, Vol 16. Hannover.