



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ, ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΜΠΑΜΠΑΤΣΙΚΟΥ ANNA-MARIA
Πτυχιούχος Τμήματος Γεωλογίας

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΑΙ ΓΕΩΧΗΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΚΑΙ
ΕΔΑΦΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΒΕΛΕΣΤΙΝΟΥ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ
ΡΥΠΑΝΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ



ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία»
Κλάδος Ειδίκευσης: Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία

Θεσσαλονίκη 2016

ΜΠΑΜΠΙΑΤΣΙΚΟΥ ANNA-MARIA
Πτυχιούχος Τμήματος Γεωλογίας

**ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΑΙ ΓΕΩΧΗΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ
ΚΑΙ ΕΛΑΦΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΒΕΛΕΣΤΙΝΟΥ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ
ΡΥΠΑΝΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ**

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Εφαρμοσμένης και Περιβαλλοντικής Γεωλογίας

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Βουδούρης Κωνσταντίνος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., Επιβλέπων

Μέλφος Βασίλης, Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., Μέλος

Θεοδοσίου Νικόλαος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Μέλος

© Άννα-Μαρία Μπαμπάτσικου

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΑΙ ΓΕΩΧΗΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΚΑΙ
ΕΔΑΦΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΒΕΛΕΣΤΙΝΟΥ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ
ΡΥΠΑΝΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

Ημερομηνία Έγκρισης: 5/2/2016

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικό ή ερευνητικό υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται στην παρούσα Διατριβή Ειδίκευσης εκφράζουν τη συγγραφέα και η έγκριση της εργασίας αυτής από το Τμήμα Γεωλογίας του Α.Π.Θ. δεν υποδηλώνει ότι εκφράζει τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Α.Π.Θ.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ABSTRACT	9
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	11
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
2.ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΚΑΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ	19
2.1.ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΣΗ	19
2.2.ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ.....	19
2.3.ΚΛΙΜΑ	20
2.4.ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	20
2.4.1.ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΕΣ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΒΟΛΟΥ	27
2.5.ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	27
2.5.1.ΝΕΟΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	30
2.6.ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ.....	33
2.7.ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ ΚΑΙ ΠΗΓΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ.....	36
3.ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ	41
3.1.ΓΕΩΧΗΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	41
3.1.1.ΓΕΩΧΗΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΥΔΑΤΩΝ	41
3.1.2.ΓΕΩΧΗΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΕΔΑΦΩΝ	44
3.2.ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΡΥΠΑΝΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΣΤΗ ΡΥΠΑΝΣΗ.....	46
4.ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	59
4.1.ΓΕΩΧΗΜΕΙΑ ΥΔΑΤΩΝ.....	59
4.1.1.ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ.....	59
4.1.2.ΚΥΡΙΑ ΙΟΝΤΑ	60
4.1.3.ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ – ΜΕΤΑΛΛΟΕΙΔΗ	60
4.1.4.ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ Piper	61
4.1.5.ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ Durov	62
4.1.6.ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ Schoeller.....	63
4.1.7.ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΧΗΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	64
4.1.8.ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ SAR – Wilcox.....	65
4.1.9.ΑΝΩΤΑΤΑ ΟΡΙΑ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΩΝ ΧΗΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΑ ΥΔΑΤΑ.....	67

4.2.ΓΕΩΧΗΜΕΙΑ ΕΔΑΦΩΝ.....	69
4.2.1.ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΜΕ ΟΞΕΙΔΙΑ (Al_2O_3 - Fe_2O_3 - MnO)	69
4.2.2.ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΜΕ ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ.....	78
4.2.3.ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ.....	81
4.2.4.ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΔΙΑΘΕΣΙΜΩΝ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ	85
4.2.5.ΑΝΩΤΑΤΑ ΟΡΙΑ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΩΝ ΧΗΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΑ ΕΔΑΦΗ.....	90
4.3.ΡΥΠΑΝΤΙΚΗ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ	98
4.3.1.ΣΥΓΚΡΙΣΗ DRASTIC-DRASTI.....	99
4.3.2.ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗΝ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ	103
5.ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	105
5.1.ΓΕΩΧΗΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΥΔΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΔΑΦΩΝ	105
5.2.ΡΥΠΑΝΤΙΚΗ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ	106
6.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	108
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	112

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο κύριος στόχος της παρούσας εργασίας είναι η γεωχημική και περιβαλλοντική έρευνα των υπόγειων υδάτων και των εδαφών στην περιοχή Βελεστίνου – Ριζόμυλου λόγω των υψηλών περιεκτικοτήτων σε As που ενοπίστηκαν στις γεωτρήσεις υδροδότησης της πόλης του Βόλου. Με την εξέλιξη της εργασίας και με βάση τα πρώτα αποτελέσματα της έρευνας αυτής τέθηκε και ένας δεύτερος στόχος που είναι η διερεύνηση της τρωτότητας του υπόγειου υδροφορέα στην εξωτερική ρύπανση, με την εφαρμογή της μεθόδου DRASTIC.

Η περιοχή έρευνας Βελεστίνου-Ριζόμυλος υπάγεται διοικητικά στο Νομό Μαγνησίας και βρίσκεται στο νοτιοανατολικό άκρο της Θεσσαλίας, βορειοδυτικά της πόλης του Βόλου. Η περιοχή έρευνας καταλαμβάνει έκταση 290,3 km² και χαρακτηρίζεται από πεδινό-λοφώδες ανάγλυφο που κυμαίνεται από 17 έως 719 m. Η περιοχή ανήκει κατά ένα μέρος, βόρεια, στην λεκάνη απορροής του Πηνειού και κατά ένα μέρος, νότια, στην λεκάνη απορροής των ρεμάτων Αλμυρού-Πηλίου. Το κλίμα της περιοχής χαρακτηρίζεται μεταβατικό, από Μεσογειακό σε Ηπειρωτικό και η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι 16,9°C. Η ετήσια βροχόπτωση κυμαίνεται από 500-600 mm. Γεωτεκτονικά η περιοχή ανήκει στην Πελαγονική ζώνη και αποτελείται από ασβεστόλιθους, μεταμορφωμένα πετρώματα (σχιστόλιθοι, γνεύσιοι, μάρμαρα), υπερβασικά πετρώματα καθώς και Τεταρτογενείς ποταμοχειμάρειες και αλλουβιακές αποθέσεις. Ακόμη η περιοχή χαρακτηρίζεται από έντονη τεκτονική δράση αλλά και πλούσια νεοτεκτονική δραστηριότητα, η οποία μέσω των ρηγμάτων που δημιουργεί βοηθά στον εμπλουτισμό του υπόγειου υδροφορέα. Επίσης σημαντικό στοιχείο της περιοχής είναι οι διάσπαρτες μεταλλοφορίες και συγκεκριμένα η εμφάνιση χρωμίτη, σουλφιδίων σιδήρου-χαλκού, σπανιότερα αρσενικού αλλά και βωξιτών. Στην περιοχή υπάρχουν αρκετές εγκατεστημένες βιομηχανικές μονάδες στο ανατολικό άκρο, αρκετές καλλιεργούμενες εκτάσεις αλλά και δύο ενεργά λατομεία μαρμάρου.

Από την γεωχημική και περιβαλλοντική έρευνα των υπόγειων υδάτων και εδαφών στην περιοχή προέκυψε ότι υπάρχει πιθανότητα, σε μερικές θέσεις, οι αυξημένες συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων (Cu, Cd, Ni, Pb, Zn) να οφείλονται σε ανθρωπογενείς παράγοντες (π.χ. απόβλητα χαλυβουργίας, απόρριψη μπαζών και ανακυκλώσιμων μετάλλων) ενώ στις περισσότερες θέσεις διαπιστώνεται η λιθογενής προέλευση των μετάλλων (As, Mn, Cr). Ακόμη εντοπίστηκαν υπόγεια ύδατα που αποτελούν φρέσκα νερά και άλλα που δεν ανανεώνονται κανονικά και αποτελούν πιθανά παλιές αλμύρες.

Από την εφαρμογή της μεθόδου DRASTIC για την εκτίμηση της τρωτότητας του υπόγειου υδροφορέα, προέκυψαν περιοχές με υψηλή τρωτότητα που αποτελούν κυρίως τμήματα ασβεστολίθων και μαρμάρων (NΔ στην περιοχή) και τμήματα με πολύ χαμηλή τρωτότητα που αποτελούν κυρίως αλλουβιακές και ποταμοχειμάρειες αποθέσεις. Επίσης, πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ της μεθόδου DRASTIC και DRASTI προσπαθώντας να διερευνηθεί κατά πόσο η υδραυλική αγωγιμότητα που συμπληρώθηκε βιβλιογραφικά, επηρεάζει την τελική τρωτότητα. Τέλος κατασκευάστηκε ο χάρτης διακινδύνευσης που δείχνει αρκετές περιοχές με υψηλή και πολύ υψηλή διακινδύνευση λόγω των χρήσεων γης της περιοχής έρευνας κυρίως στο NΔ και ΒΑ τμήμα.

ABSTRACT

“Environmental and geochemical investigation of the groundwater and the soil at Velestino area of Thessaly, and assessment of the aquifer vulnerability” by Bampatsikou Anna-Maria.

The first goal of this dual legged study is the environmental and geochemical investigation of the area groundwater and soil. Observing the results of this first study, a second goal was decided and that is the assessment of the vulnerability of groundwater to external pollution through the application of dratsic method. The study area, Velestino - Rizomylos, is administratively attached in the prefecture of Magnesia and is located on the southeast edge of Thessaly, northwest of the city of Volos. The study area occupies an area of 290,3 km² and is characterized by lowland-hilly topography, ranging from 17 to 719 m. The area belongs partially, to the north, to the river basin of Pineios and partly to the south, to the drainage basin of Almyros-Pelion streams. The climate is transitional from Mediterranean to Epirotic and the mean annual temperature is 16,9°C. The annual precipitation ranges from 500-600 mm. Geotectonic, the area belongs to the Pelagonian zone and consists of limestones, marbles, metamorphic rocks, ultramafic rocks and Quaternary fluvial and alluvial deposits. Furthermore, the area is characterized by intense tectonic and neotectonic activity that helps enriching the underground aquifer. It is important to mention that in the study area there exist some ore occurrences of chromite, copper-iron sulphides, rarely arsenic and also some bauxite. In addition, there are some industrial units on the eastern edge, some cultivated areas and two active marble quarries located, too. The geochemical and environmental study of groundwater and soil in the area has shown that there is a possibility, in some samples, of increased concentrations of heavy metals (Cu, Cd, Ni, Pb, Zn) due to human activities (e.g. steel waste, dumping debris and recyclable metals), but in most samples the physical origin of metals (As, Mn, Cr) was observed. Furthermore, two types of groundwater were identified (renewable fresh-water and old salt water).

Applying the DRASTIC method of assessing the vulnerability of groundwater, showed areas of high vulnerability, which consist of limestones and marbles (SW part of the region) and areas of very low vulnerability, which are mainly alluvial and fluvial deposits. Also, a comparison was made between the method DRASTIC and DRASTI trying to investigate whether the hydraulic conductivity parameter used from literature, affect the ultimate vulnerability.

Finally, the pollution risk map was constructed, showing several areas of high and very high risk because of the study area land use, mainly in the SW and NE part.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία με τίτλο «Περιβαλλοντική και γεωχημική έρευνα υπόγειων υδάτων και εδαφών στην περιοχή Βελεστίνου και εκτίμηση της ρυπαντικής επιδεκτικότητας του υδροφορέα», πραγματοποιήθηκε στο διάστημα Ιούλιο – Δεκέμβριο 2015, στο πλαίσιο του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών «Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία» με κλάδο ειδίκευσης «Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία». Τα δεδομένα των χημικών αναλύσεων υδάτων και εδαφών προέρχονται από τα αποτελέσματα του ερευνητικού προγράμματος του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης με τίτλο «Υδροχημική – υδρογεωλογική έρευνα της ευρύτερης περιοχής των σημείων ύδρευσης του δήμου Βόλου», με επιστημονικούς υπεύθυνους τον Αναπληρωτή Καθηγητή Κ. Βουδούρη και τον Καθηγητή Ι. Στράτη, που διενεργήθηκε με σκοπό την διερεύνηση της υψηλής περιεκτικότητας σε As που εντοπίστηκε σε γεωτρήσεις υδροδότησης της πόλης του Βόλου.

Πρώτος στόχος της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας είναι να μελετήσει την γεωχημική και περιβαλλοντική συμπεριφορά των δειγμάτων νερού και εδάφους με απώτερο σκοπό τη διερεύνηση της προέλευσης της ενδεχόμενης ρύπανσης από βαρέα μέταλλα. Δεύτερο σκέλος της εργασίας είναι η εφαρμογή της μεθόδου DRASTIC σύμφωνα με την οποία ερευνάται η τρωτότητα του υπόγειου υδροφορέα, του κατά πόσο δηλαδή τα υπόγεια ύδατα είναι ευάλωτα στην εξωτερική ρύπανση.

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων πραγματοποιήθηκαν οι εξής εργασίες:

1. Ψηφιοποίηση των δύο «φύλλων» του ΙΓΜΕ «Βόλος» και «Βελεστίνo» σε περιβάλλον ArcGis.
2. Κατασκευή δύο γεωλογικών τομών στην περιοχή έρευνας σε περιβάλλον Adobe Illustrator CS6.
3. Κατασκευή της στρωματογραφικής στήλης της περιοχής έρευνας.
4. Κατασκευή τρισδιάστατου χάρτη με την τοπογραφία της περιοχής στο ArcGis.
5. Κατασκευή χαρτών δειγματοληψίας στο ArcGis.
6. Κατασκευή του χάρτη χρήσεων γης της περιοχής από δεδομένα του Corine2000 στο ArcGis.
7. Ψηφιοποίηση χάρτη (Μιγκίρος 1998) με την κατανομή ορυκτού πλούτου στην Θεσσαλία.

8. Κατασκευή διαγραμμάτων συσχετίσεων των χημικών δεδομένων υδάτων και εδαφών στο πρόγραμμα Microsoft Excel.
9. Κατασκευή διαγραμμάτων Piper, Durov, Shcoeller, Sar & Willcox στο πρόγραμμα Aquachem Waterloo Hydrogeologic Software και σε προγραμματισμένη γλώσσα του Excel.
10. Κατασκευή χαρτών χωρικής κατανομής των βαρέων μετάλλων στα τρία βάθη δειγματοληψίας σε περιβάλλον ArcGis.
11. Ψηφιοποίηση δεδομένων και κατασκευή των θεματικών χαρτών της μεθόδου DRASTIC σε περιβάλλον ArcGis και Adobe Illustrator CS6.
12. Κατασκευή χαρτών σύγκρισης DRASTIC και DRASTI σε περιβάλλον ArcGis και Adobe Illustrator CS6.

Σε αυτό το σημείο έχω χρέος να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή Β. Μέλφο και τον Αναπληρωτή Καθηγητή Κ. Βουδούρη για την αμέριστη συμπαράσταση και τη συνεχή καθοδήγηση και βοήθεια που μου προσέφεραν καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας, για την υπομονή αλλά και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν αναθέτοντάς μου το θέμα της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής. Τους ευχαριστώ θερμά για τις χρήσιμες συμβουλές τους, τις παρατηρήσεις τους και για το ενδιαφέρον που έδειξαν σε όλη τη προσπάθεια συγγραφής της εργασίας μου.

Ευχαριστώ θερμά τον Διδάκτορα Ν. Καζάκη για την πολύτιμη και συνεχή βοήθεια που μου προσέφερε απλόχερα και για την άσπογη συνεργασία που είχαμε στην εφαρμογή της μεθόδου DRASTIC αλλά και για τις συμβουλές και τις επισημάνσεις του σε όλη την εργασία. Τον ευχαριστώ ακόμη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αλλά και για την εμπύχωση που μου προσέφερε σε όλη τη διάρκεια της συγγραφής.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα την υποψήφια Διδάκτορα Κ. Γιούρη που ανταποκρίθηκε στο κάλεσμα μου και δεν δίστασε να μου μεταδώσει τις γνώσεις τις και να μου δώσει τις συμβουλές τις όσο αφορά την γεωχημική και περιβαλλοντική έρευνα εδαφών και υδάτων αλλά και τις παρατηρήσεις της για όλη την εργασία.

Οφείλω να ευχαριστήσω το Ινστιτούτο Χαρτογράφησης και Ταξινόμησης Εδαφών (Ι.Χ.Τ.Ε.) το οποίο ανταποκρίθηκε και συνεργάστηκε άμεσα μαζί μου παραχωρώντας μου τον εδαφολογικό χάρτη της περιοχής που χρειαζόμουν.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζω στην συνάδελφο και πολύ καλή φίλη Α. Γκεμέ για την συνεχή υποστήριξή της, για τις παρατηρήσεις της και τις εποικοδομητικές συζητήσεις μας πάνω στα θέματα της εργασίας.

Ευχαριστώ επίσης το μέλος της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής, Αναπληρωτή Καθηγητή Ν. Θεοδοσίου (Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ) για τις παρατηρήσεις του τις διορθώσεις του και τις χρήσιμες συμβουλές του.

Τέλος ένα τεράστιο ευχαριστώ οφείλω στου γονείς μου και την οικογένεια μου που ήταν δίπλα μου, με στήριξαν όπως μπορούσαν καλύτερα και μου απέδειξαν πως όταν θέλεις κάτι πολύ πρέπει να προσπαθήσεις να επιμένεις και να υπομένεις για να το καταφέρεις.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε παγκόσμια κλίμακα ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα που έχει να επιλύσει ο άνθρωπος και η επιστημονική κοινότητα που ασχολείται με το περιβάλλον είναι τα όλο και αυξανόμενα ποσοστά ρύπανσης και μόλυνσης του πλανήτη (νερού και εδαφών), είτε προέρχονται από τον άνθρωπο είτε από την ίδια τη φύση. Το γεγονός ότι ο πληθυσμός του πλανήτη είναι όλο και αυξανόμενος, κάνει τις ανάγκες του για ενέργεια, τροφή, νερό κ.ά. να γίνονται όλο και περισσότερες, με αποτέλεσμα τη ραγδαία ανάπτυξη της βιομηχανίας, την αγροτική αλλά και την ενεργειακή ανάπτυξη. Αυτό με τη σειρά του έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των βιομηχανικών ρύπων, των τοξικών αποβλήτων, των φυτοφαρμάκων και των λιπασμάτων.

Η περιοχή έρευνας της παρούσας εργασίας, Βελεστίνο - Ριζόμυλος βρίσκεται στο νομό Μαγνησίας στην ευρύτερη περιοχή του Βόλου. Ο Βόλος είναι μία από τις περιοχές της Ελλάδας που γνώρισε μεγάλη βιομηχανική άνθιση έως και τα πρώτα μεταπολεμικά χρόνια, στη συνέχεια όμως στο δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα άρχισε να λαμβάνει χώρα η αποβιομηχάνιση του. Ωστόσο ακόμη σήμερα εξακολουθούν να λειτουργούν ορισμένες μεγάλες βιομηχανικές μονάδες. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής, την ύπαρξη αρκετών μεταλλοφόρων εμφανίσεων, καθώς και παλαιών εξορυκτικών και μεταλλευτικών δραστηριοτήτων, κατέστησε την περιοχή αυτή ενδιαφέρουσα για γεωχημική και περιβαλλοντική έρευνα. Τον Φεβρουάριο του 2014 εκπονήθηκε ένα ερευνητικό πρόγραμμα (Επιτροπή Ερευνών ΑΠΘ, ΚΩΔ. 83516), το οποίο ζητήθηκε από την Δημοτική Επιχείρηση Αποχέτευσης Μείζονος Βόλου (ΔΕΥΑΜΒ). Οι επιστημονικοί υπεύθυνοι της έρευνας ήταν ο Αναπληρωτής Καθηγητής Κ. Βουδούρης και ο Καθηγητής Ι. Στράτης. Η έρευνα αυτή πραγματοποιήθηκε με σκοπό τον προσδιορισμό της πηγής και των αιτιών ρύπανσης με αρσενικό, των υπόγειων νερών της ευρύτερης περιοχής γεωτρήσεων ύδρευσης του Δήμου Βόλου, είτε αυτή οφειλόταν στη γεωλογική δομή της περιοχής είτε σε ανθρωπογενείς πηγές ρύπανσης.

Με βάση τα εδαφικά δείγματα και μερικά από τα δείγματα υπόγειου νερού των γεωτρήσεων που λήφθηκαν για το παραπάνω πρόγραμμα, πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία η περιβαλλοντική και γεωχημική έρευνα των ιζημάτων και των υπόγειων υδάτων, καθώς επίσης εφαρμόστηκε η μέθοδος DRASTIC για την εκτίμηση της ρυπαντικής επιδεκτικότητας του υδροφορέα.

Είναι σημαντικό εδώ να οριστούν και να διαχωριστούν οι όροι της ρύπανσης και της μόλυνσης. Η ρύπανση σύμφωνα με την Οδηγία 2000/60 της Ε.Ε για την πολιτική των νερών, είναι η συνέπεια ανθρώπινων δραστηριοτήτων, άμεση ή έμμεση εισαγωγή, στον αέρα, το νερό ή το έδαφος, ουσιών ή θερμότητας που μπορούν να είναι επιζήμια για την υγεία του ανθρώπου ή την ποιότητα των υδατικών οικοσυστημάτων ή των χερσαίων οικοσυστημάτων που εξαρτώνται άμεσα από τα υδατικά οικοσυστήματα, συντελούν στη φθορά υλικής ιδιοκτησίας, ή επηρεάζουν δυσμενώς ή παρεμβαίνουν σε λειτουργίες αναψυχής ή σε λοιπές νόμιμες χρήσεις του περιβάλλοντος. Η μόλυνση από την άλλη μεριά περιορίζεται στη ρύπανση εκείνη που αποτελεί κίνδυνο για την υγεία του ανθρώπου, έχει κυρίως μικροβιακό χαρακτήρα και συνδέεται με την παρουσία μικροοργανισμών ως αποτέλεσμα ανθρώπινων δραστηριοτήτων (Βουδούρης 2009).

Όσο αφορά τη ρύπανση των υδάτων, ρυπαντής ή ρύπος ή ρυπαντική ουσία μπορεί να αποτελέσει οποιαδήποτε διαλυτή (υδρόφιλη, πχ. ανόργανα άλατα) ή αδιάλυτη (υδρόφοβη, πχ. υδρογονάνθρακες, PCBs, διαλύτες, κτλ.) ουσία στο νερό, η οποία όταν εισάγεται στο περιβάλλον μέσω ανθρώπινων δραστηριοτήτων, προκαλεί δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Μερικοί από τους πιο συχνούς και συνηθέστερους ρυπαντές που καταλήγουν στα ύδατα είναι τα βαρέα μέταλλα (Hg, Pb, Cd κ.α.), τα τοξικά στοιχεία και ενώσεις (As, Se, CN⁻ κ.α.), οι ανόργανες ενώσεις (NO₃⁻, PO₄³⁻, NO₂⁻, κ.α.), οι οργανικές ουσίες (φαινόλες, χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες, απορρυπαντικά, παρασιτοκτόνα, χρώματα βαφής, προϊόντα πετρελαίου κ.α.), οι ραδιενεργές ουσίες και οι παθογόνοι μικροοργανισμοί (βακτήρια, ιοί). Τέλος τα υδάτινα συστήματα μπορούν να υποβαθμιστούν ποιοτικά λόγω θερμικής αλλοίωσης από τα νερά ψύξης των βιομηχανιών και από την υφαλμύριση του γλυκού νερού στους παράκτιους υδροφόρους ορίζοντες (Βουδούρης 2009). Στην πραγματικότητα μερικοί από τους παραπάνω ρύπους μπορεί να προέρχονται από αστικές συγκεντρώσεις, από βιομηχανικές και γεωργικές δραστηριότητες μέσω των αέριων, στερεών αλλά κυρίως των υγρών αποβλήτων τους. Η κύρια πηγή των αστικών λυμάτων είναι οι αποχετεύσεις διαφόρων τύπων που αποτελούν τον κύριο όγκο των υγρών αποβλήτων μιας περιοχής. Έχουν συνήθως μεγάλες περιεκτικότητες σε οργανικές ύλες, ανόργανα άλατα όπως αμμωνιακά, νιτρικά και φωσφορικά. Ακόμη οι αστικές δραστηριότητες (μέσα μαζικής μεταφοράς κ.α.) ρυπαίνουν τα όμβρια ύδατα τα οποία με τη σειρά τους διέρχονται από τους δρόμους μιας πόλης μεταφέροντας ποικιλία ρύπων όπως μόλυβδος, κάδμιο σε συνήθως μικρές συγκεντρώσεις και καταλήγουν σε επιφανειακούς ή υπόγειους υγρούς αποδέκτες. Τα υγρά απόβλητα που προέρχονται από τις βιομηχανίες συνήθως

περιέχουν ανάλογους ρύπους με τα αστικά λύματα αλλά συναντούνται συχνά σε αυτά κάποιες επιπλέον τοξικές οργανικές ενώσεις και διάφορα μέταλλα όπως ο μόλυβδος και ο ψευδάργυρος (Μαμάης 2008).

Η προέλευση ρύπανσης των εδαφών και των ιζημάτων, μπορεί να διακριθεί σε φυσική και σε ανθρωπογενής. Οι φυσικές συγκεντρώσεις των ιχνοστοιχείων στα εδάφη μπορεί να προέρχονται είτε από την αποσάθρωση και διάβρωση πετρωμάτων ή μεταλλευμάτων, είτε από κάποια ηφαιστειακή δράση. Οι ανθρωπογενείς πηγές ρύπανσης στα εδάφη μπορεί να είναι μη σημειακές όπως για παράδειγμα οι λυματολάσπες, η ιπτάμενη τέφρα, τα λιπάσματα, τα ζιζανιοκτόνα, η άρδευση ή να είναι σημειακές, να προέρχονται δηλαδή από γεωθερμικά αλατούχα διαλύματα, από μεταλλευτική - μεταλλουργική δραστηριότητα, από βιομηχανίες, ή από ραδιοϊσότοπα. Ακόμη οι ανθρωπογενείς πηγές ρύπανσης στα εδάφη μπορεί να είναι πρωτογενείς, δηλαδή τα βαρέα μέταλλα και τα ιχνοστοιχεία να καταλήγουν στο έδαφος από την επεξεργασία του εδάφους είτε να προέρχονται από δευτερογενή δραστηριότητα όπως τα υπολείμματα μεταλλουργίας ή η αιωρούμενη σκόνη (Κελεπερντζής 2004, Βουδούρης 2009).

Είναι ακόμη χρήσιμο να διαχωριστούν οι έννοιες της περιβαλλοντικής και γεωχημικής έρευνας. Η γεωχημεία ασχολείται και μελετά το περιεχόμενο των χημικών στοιχείων στον γήινο φλοιό (σε ιζήματα, στα πετρώματα, στο έδαφος, στα φυτά, στο νερό, στον αέρα), έχοντας ως στόχο τον εντοπισμό υψηλών συγκεντρώσεων των χημικών στοιχείων που σχετίζονται με την ύπαρξη κάποιων κοιτασμάτων ή μεταλλικών ορυκτών. Η περιβαλλοντική γεωχημεία, η οποία είναι κλάδος της εφαρμοσμένης γεωχημείας, μελετά την ρύπανση του περιβάλλοντος από βιομηχανικά και οικιακά απόβλητα, που μπορεί να περιλαμβάνουν και μεταλλικά, ραδιενεργά παραπροϊόντα των πυρηνικών αντιδράσεων (Κελεπερντζής 2004).

Όπως τονίστηκε παραπάνω ο κύριος αποδέκτης της ρύπανσης, είτε ανθρωπογενούς είτε φυσικής, είναι τα υπόγεια ύδατα και κατ' επέκταση οι υπόγειοι ταμιευτήρες νερού τους οποίους ο άνθρωπος εκμεταλλεύεται για τις ανάγκες του, είτε αυτές είναι υδρευτικές είτε αρδευτικές είτε για άλλες χρήσεις. Όταν το νερό προορίζεται για ύδρευση και άρδευση, η ρύπανση του αποτελεί πολύ σοβαρό κίνδυνο και συνήθως η εξυγίανση του είναι πολύ δαπανηρή. Για το λόγο αυτό τις τελευταίες δεκαετίες οι ερευνητές ανακαλύπτουν μεθόδους για να προλάβουν τις μη αναστρέψιμες καταστάσεις ρύπανσης, οριοθετώντας τις περιοχές (υδροφορείς) που είναι ευπρόσβλητες και ευάλωτες στην ρύπανση, φτιάχνοντας έτσι χάρτες που ορίζουν τους πιο τρωτούς υδροφόρους ορίζοντες στη ρύπανση ανάλογα με τα φυσικά χαρακτηριστικά του

εκάστωτε περιβάλλοντος. Αυτή η διαδικασία αποτελεί μέρος της πρόληψης της ρύπανσης και έχει πολύ λιγότερο κόστος από την διαδικασία αποκατάστασης ενός ρυπασμένου υδροφορέα. Η έννοια της τρωτότητας του υδροφορέα εισήχθη για πρώτη φορά από τον Margat (1968), και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν πολλές μελέτες και προσεγγίσεις και από τους Lallemand-Barres (1994), J.Vrba & A.Zaporoze (1994). Ο Margat (1968) είχε ορίσει την έννοια της τρωτότητας ως τον βαθμό προστασίας που προσφέρει το φυσικό περιβάλλον εναντίον της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων, και είχε λάβει υπόψη του κάποιες βασικές παραμέτρους όπως το βάθος του υπόγειου νερού, τη διαπερατότητα, τη ταχύτητα του υπόγειου νερού και τη σχέση υπόγειων και επιφανειακών νερών. Ως ορισμός για την τρωτότητα των υπόγειων νερών ή υδροφόρων μπορεί να θεωρηθεί επίσης η ευαισθησία ή η επιδεκτικότητα τους απέναντι στους εξωτερικούς ρύπους. Στην πραγματικότητα η έννοια της τρωτότητας βασίζεται στο γεγονός ότι το φυσικό περιβάλλον ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του μπορεί να προστατεύσει σε κάποιο βαθμό το υπόγειο νερό (Βουδούρης 2009). Η τρωτότητα χωρίζεται σε δύο επιμέρους κατηγορίες, την γενική που σχετίζεται αποκλειστικά με τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα και του υπερκείμενου εδάφους και την ειδική που αναφέρεται μόνο σε έναν συγκεκριμένο ρυπαντή ή μία ομάδα ρυπαντών.

Οι πιο χρησιμοποιούμενες μέθοδοι για την εκτίμηση της τρωτότητας διακρίνονται σε (Βουδούρης 2009) :

- ❖ Μέθοδοι βαθμονόμησης
(Περιλαμβάνουν μεθόδους δεικτών και υβριδικές μεθόδους που συνδυάζουν μεθόδους δεικτών και στατιστικές μεθόδους)
- ❖ Στατιστικές μέθοδοι
- ❖ Μέθοδοι προσομοίωσης

Οι κυριότεροι μέθοδοι βαθμονόμησης είναι οι DRASTIC (Aller et al., 1997), GOD (Foster, 1997), AVI (Van Stempvoort et al., 1992), SINTACS (Civita, 1994), ISIS (Civita & Regibus, 1995) και DASTI (Bn Kabbour et al., 2004).

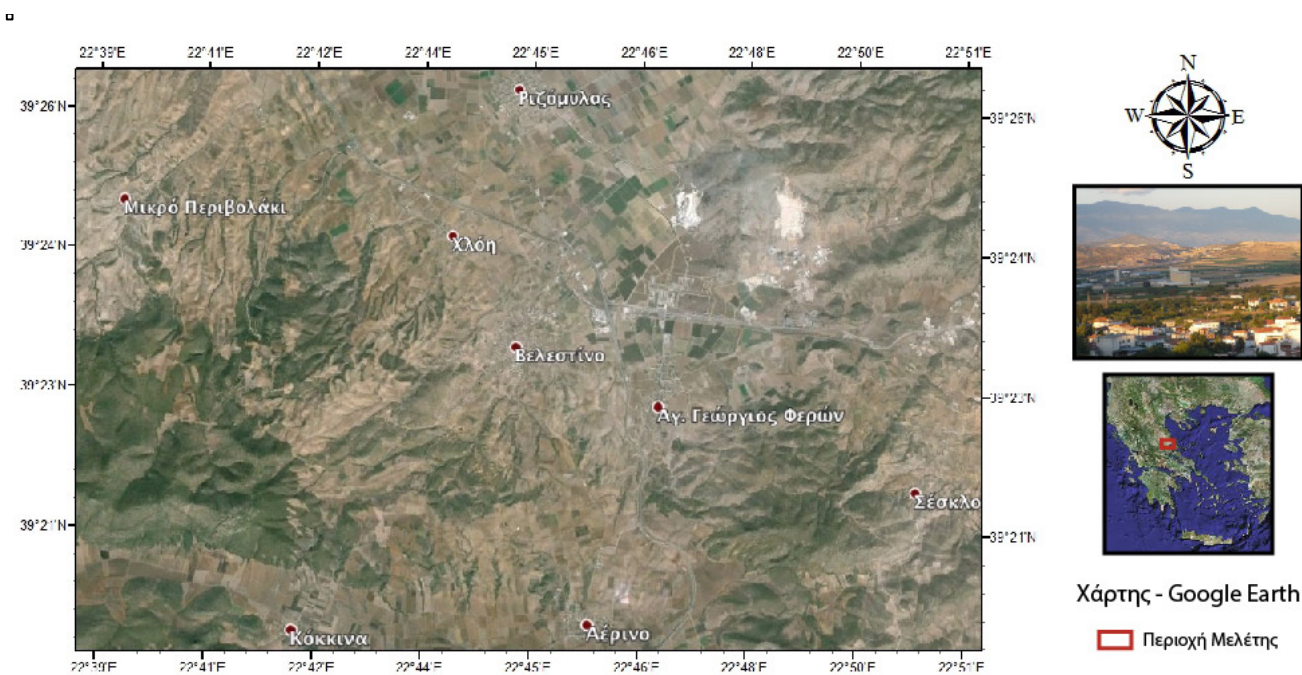
Στην παρούσα εργασία η εκτίμηση της τρωτότητας έγινε με τη μέθοδο DRASTIC. Επίσης κατασκευάστηκε ο χάρτης διακινδύνευσης του υδροφορέα. Η διακινδύνευση του υδροφορέα στη εξωτερική ρύπανση είναι συνάρτηση της τρωτότητας του, και της πιθανότητας εκδήλωσης ενός επεισοδίου ρύπανσης σε μια περιοχή (Βουδούρης 2009). Με τη σχέση $[R = V \times H]$, (Varnes 1984, Uricchio et al, 2004; Βουδούρης 2009), υπολογίζεται η διακινδύνευση του υδροφορέα στη

εξωτερική ρύπανση. Όπου R=διακινδύνευση, V=τρωτότητα, H=πιθανότητα εκδήλωσης ενός επεισοδίου ρύπανσης σε μια περιοχή κάποια χρονική στιγμή. Η πιθανότητα εκδήλωσης (H=hazard) σχετίζεται με τις χρήσεις γης (Βουδούρης 2009).

2. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΚΑΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

2.1. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΣΗ

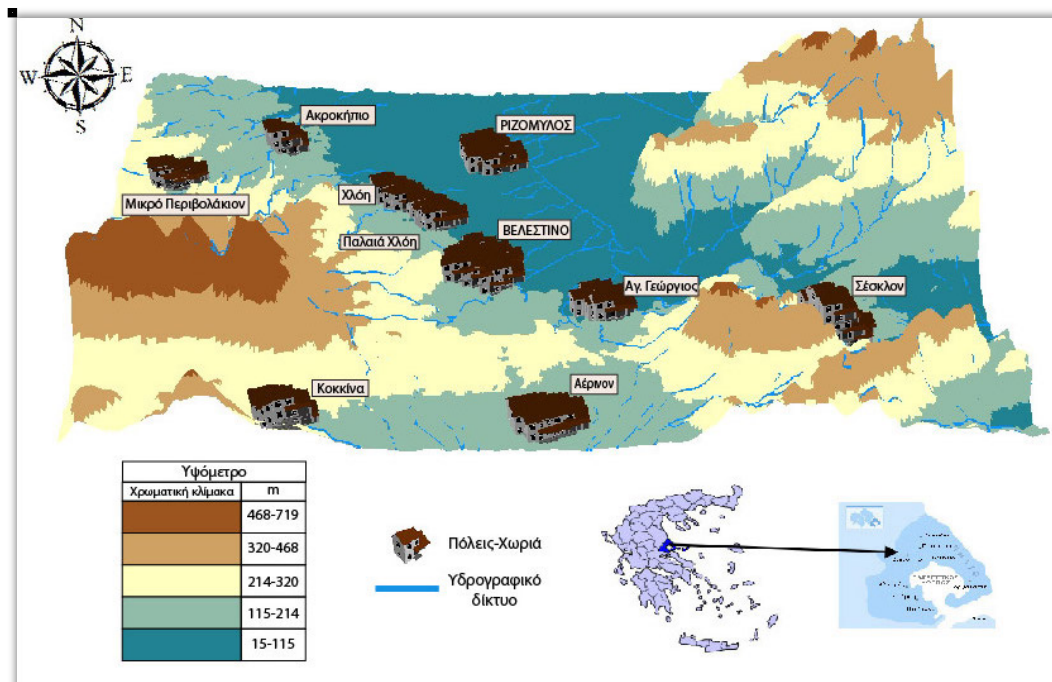
Η περιοχή έρευνας ανήκει στον Νομό Μαγνησίας στο ΝΑ τμήμα της Θεσσαλίας. Η έκταση της περιοχής έρευνας (σχήμα 2.1.) είναι 290,3 km². Οι κυριότερες πόλεις - χωριά που βρίσκονται εντός των ορίων της περιοχής έρευνας είναι το Βελεστίνο, ο Ριζόμυλος, το Αέρινο, ο Αγ. Γεώργιος, το Σέσκλο, η Χλόη, το Μικρό Περιβολάκι, η Κοκκίνα και το Αγροκήπιο.



Σχήμα 2.1 Γεωγραφική τοποθέτηση της περιοχής έρευνας.

2.2. ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Περίπου το 45% ολόκληρου του Νομού Μαγνησίας χαρακτηρίζεται ως ορεινό, ενώ οι μεταβολές του αναγλύφου και οι υψομετρικές διαφορές είναι μεγάλες. Πιο συγκεκριμένα, η μορφολογία της περιοχής έρευνας παρουσιάζεται στο σχήμα 2.2. Το χαμηλότερο υψόμετρο που παρατηρείται είναι 15 m στις πεδινές περιοχές, ενώ το μεγαλύτερο υψόμετρο φτάνει τα 719 m στο νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής έρευνας (Βελεστίνο) όπου εμφανίζεται ένα τμήμα του Χαλκοδόνιου όρους. Η περιοχή έρευνας, ανήκει κατά ένα μέρος βόρεια στην λεκάνη απορροής του Πηνειού ενώ το νότιο τμήμα της ανήκει στην λεκάνη απορροής ρεμάτων Αλμυρού-Πηλίου.



Σχήμα 2.2 3D χάρτης με την μορφολογία και τα χωριά της περιοχής έρευνας.

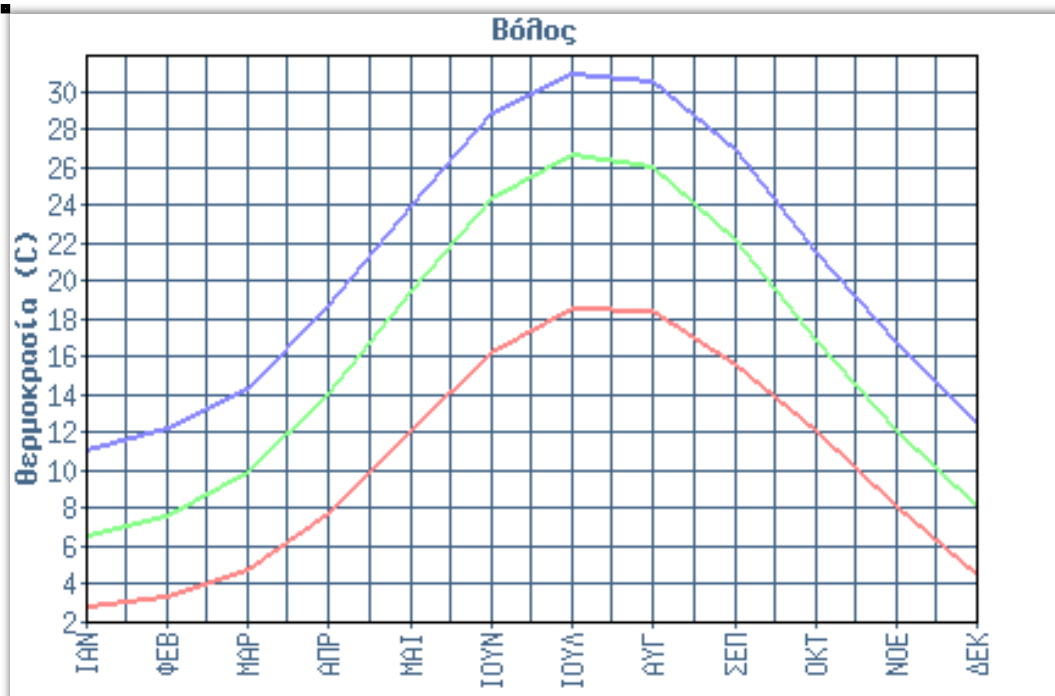
2.3. ΚΛΙΜΑ

Με βάση τα κλιματικά στοιχεία της ΕΜΥ, η ευρύτερη περιοχή του Βόλου έχει μια μέση ετήσια θερμοκρασία 16,9°C. Τον Ιανουάριο η μέση θερμοκρασία είναι 7,6°C και τον Ιούλιο 26,6°C. Το γενικότερο κλίμα της περιοχής χαρακτηρίζεται μεταβατικό, από το Μεσογειακό στο ηπειρωτικό. Στο σχήμα 2.3 φαίνεται η διακύμανση της θερμοκρασίας στην περιοχή του Βόλου την περίοδο 1956-1988, και στο σχήμα 2.4 φαίνεται η διακύμανση της υγρασίας την ίδια περίοδο ανά μήνα στην πόλη του Βόλου.

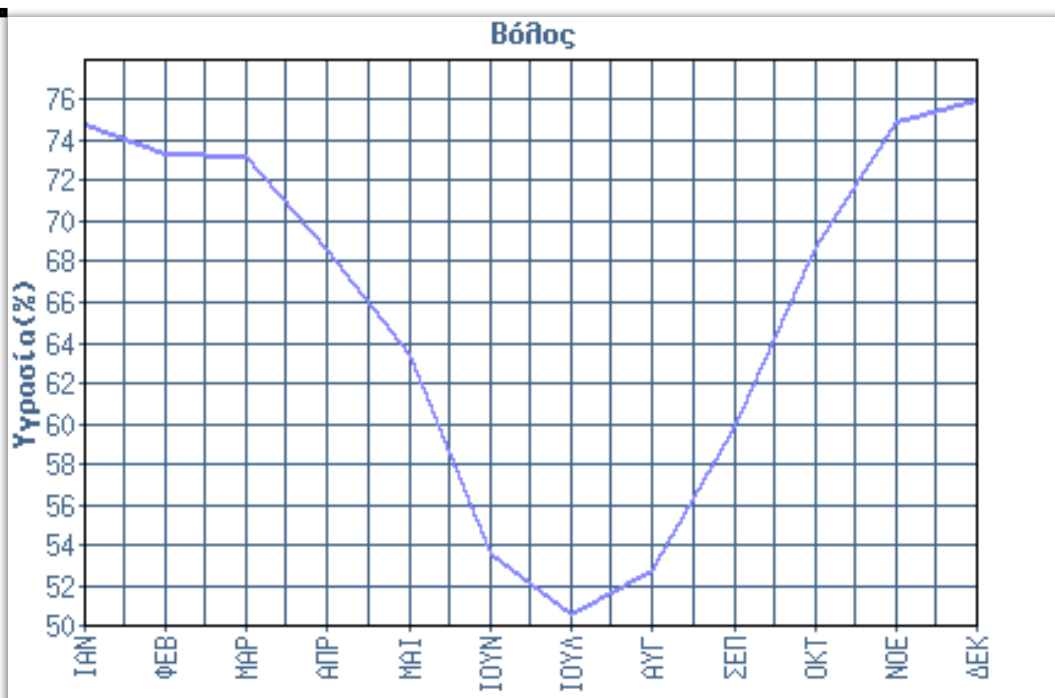
Στο πίνακα 2.3.1 αναγράφονται οι σταθμοί μέτρησης με το αντίστοιχο υψόμετρό τους, και την μέση ετήσια βροχόπτωση. Επίσης στο σχήμα 2.5 φαίνεται η χάραξη της βροχοβαθμίδας και η εξίσωση αυτής Φώλια (2009).

2.4. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Η περιοχή έρευνας ανήκει γεωτεκτονικά στην Πελαγονική ζώνη όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.6 η οποία ανήκει στις Εσωτερικές Ελληνίδες. Η Πελαγονική είναι επιμήκης ζώνη που εκτείνεται ΒΒΔ από την περιοχή των Σκοπίων και διαμέσου των ορεινών συγκροτημάτων Βόρα, Βαρνούντα, Βέρνου, Άσκιου, Πιέρων, Πηλίου και Όθρυος και φτάνει ΝΝΔ έως την Β. Εύβοια και τα νησιά Σκιάθο και Σκόπελο (Μουντράκης 2010).



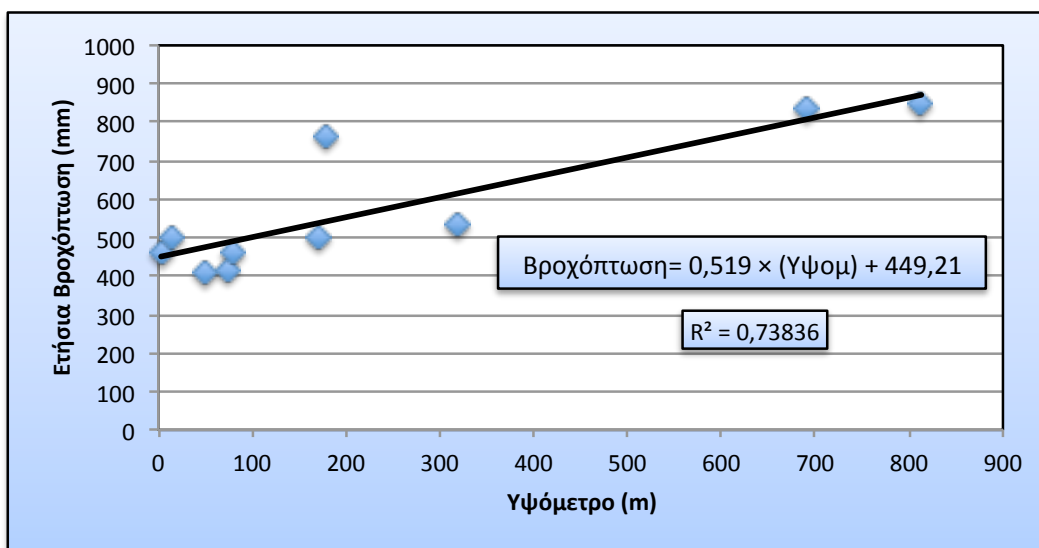
Σχήμα 2.3 Διάγραμμα μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας στο σταθμό του Βόλου, 1956-1988 (στοιχεία ΕΜΥ).



Σχήμα 2.4 Διάγραμμα μέσης μηνιαίας υγρασίας (%) στο σταθμό του Βόλου, 1956-1988 (στοιχεία ΕΜΥ).

Πίνακας 2.3.1 Μέση ετήσια βροχόπτωση για τους μετεωρολογικούς σταθμούς της λεκάνης απορροής Κάρλας (Φώλια 2009).

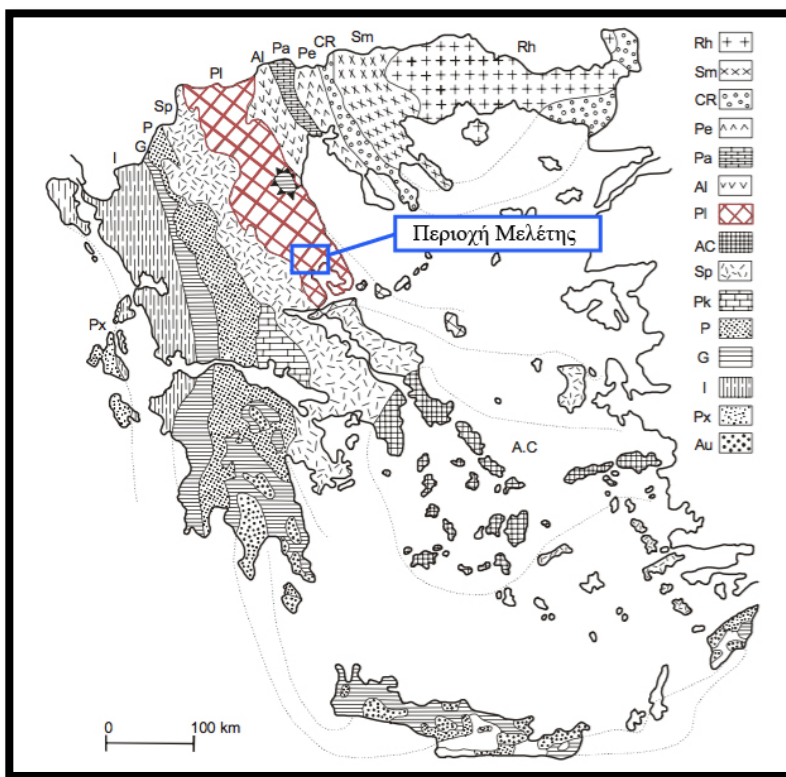
Σταθμός	Υψόμετρο(m)	Μέση Ετήσια Βροχόπτωση(mm)
ΒΟΛΟΣ	3	460,68
ΑΓΧΙΑΛΟΣ	15	501,72
ΣΩΤΗΡΙΟ	51	409,02
ΛΑΡΙΣΑ	73	414,67
ΣΤΕΦΑΝΟΒΙΚΕΙΟ	80	463,72
ΖΑΠΠΕΙΟ	170	499,96
ΑΓΙΑ	180	764,31
ΜΥΡΑ	320	535,48
ΜΑΚΡΥΝΙΤΣΑ	690	836,88
ΣΠΗΛΙΑ	813	848,79



Σχήμα 2.5 Γραμμική σχέση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης με το υψόμετρο των μετεωρολογικών σταθμών για τις δύο υψομετρικές ζώνες της υδρολογικής λεκάνης της Κάρλας (Φώλια 2009).

Την Πελαγονική ζώνη στην περιοχή έρευνας (σχήμα 2.8) απαρτίζουν το κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο, οι γενεσιωμένοι γρανίτες, τα ημιμεταμορφωμένα Περμιο - Τριαδικά πετρώματα, τα δύο ανθρακικά καλύμματα Τριαδικού – Ιουρασικού, οι οφιόλιθοι και τα Άνω Κρητιδικά επικλυσιογενή ιζήματα. Όλα οι παραπάνω σχηματισμοί αναλύονται εκτενέστερα παρακάτω, ενώ

στο σχήμα 2.7 φαίνονται οι δυο ενωμένοι ψηφιοποιημένοι χάρτες (φύλλα Βόλος-Βελεστίνο) και η περιοχή έρευνας σε κόκκινο πλαίσιο (Katsikatsos et al. 1983).



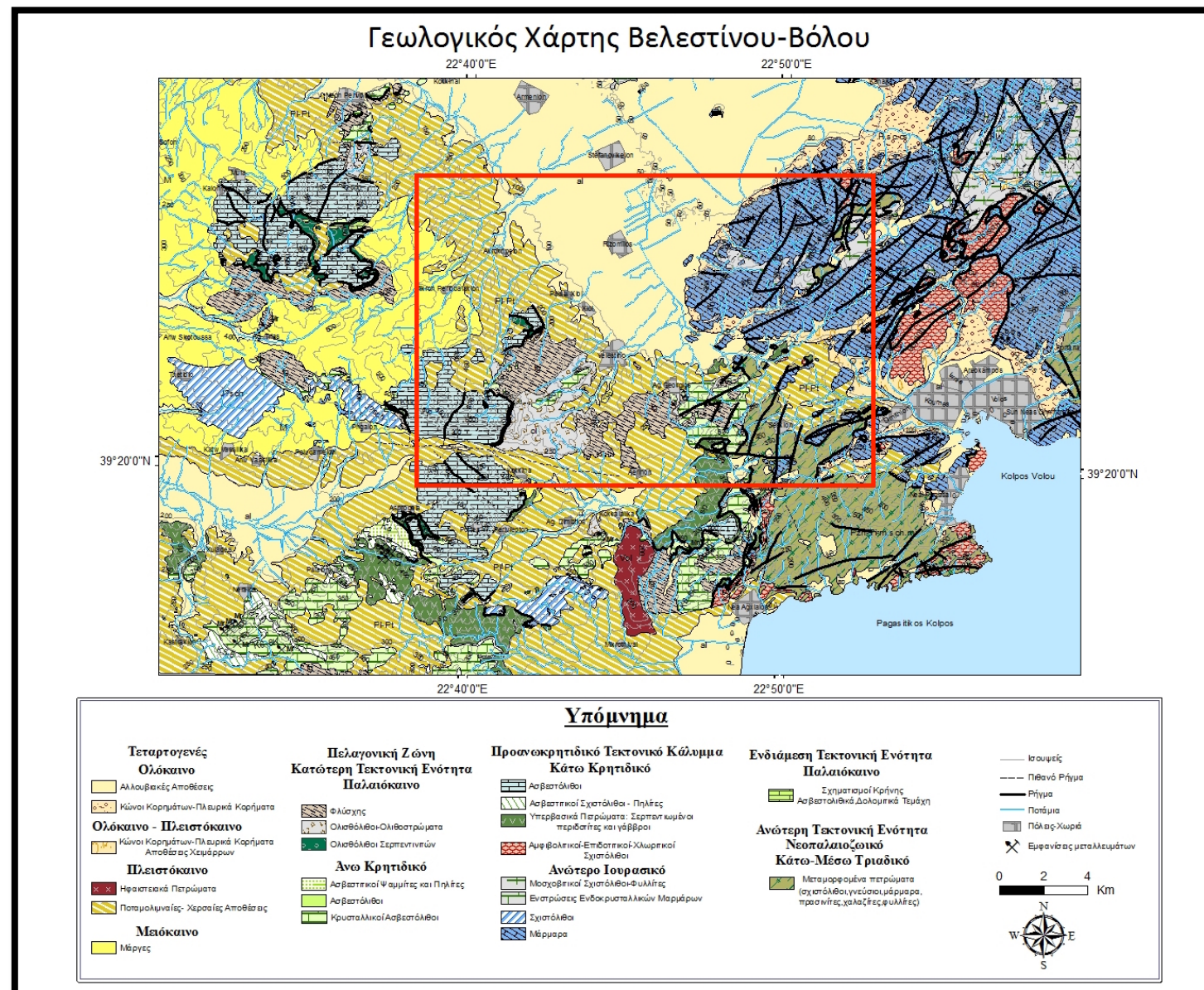
Σχήμα 2.6 Γεωτεκτονικός χάρτης των ελληνίδων ζωνών. Rh: Μάζα ης Ροδόπης, Sm: Σερβομακεδονική Μάζα, CR: Περιοδοπική Ζώνη, (Pe: Ζώνη Παιονίας Pa: Ζώνη Πάικου, Al: Ζώνη Αλμωπία) = Ζώνη Αξιού, Pl: Πελαγονική Ζώνη, Ac: Αττικοκυκλαδική Ζώνη, Sp: Υποπελαγονική Ζώνη, Pk: Ζώνη Παρνασσού – Γκιώνας, P: Ζώνη Πίνδου, G: Ζώνη Γαβρόβου – Τρίπολης, I: Ιόνιος Ζώνη, Px: Ζώνη Παξών ή Προαπούλια, Au: Ενότητα «Ταλέα Όρη - πλακάδες ασβεστόλιθου» (Mountrakis et al., 1983).

❖ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΣΧΙΣΤΩΔΕΣ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Τα πετρώματα του κρυσταλλοσχιστώδους υποβάθρου εξαπλώνονται σε ολόκληρη τη Πελαγονική ζώνη και είναι χαρακτηριστικά δομικά στοιχεία της ζώνης. Το υπόβαθρο αποτελείται από πολλές ενότητες πετρωμάτων που έχουν σχηματίσει αλληπάλληλα τεκτονικά λείπια.

Κάθε ενότητα της ζώνης αποτελείται με τη σειρά από τους βαθύτερους προς τους ανώτερους ορίζοντας από :

- Γνεύσιους βιοτιτικούς οφθαλμοειδείς ορθο-προέλευσης
- Γνεύσιους ταινιωτούς, μοσχοβιτικούς παρά-προέλευσης
- Αμφιβολίτες και αμφιβολιτικούς – βιοτιτικούς σχιστόλιθους



Σχήμα 2.7 Ψηφιοποιημένος χάρτης (Katsikatsos et al. 1983) Βελεστίνου - Βόλου και απεικόνιση της περιοχής μελέτης.

- Γρανατούχους διμαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους
- Εναλλαγές αμφιβολιτικών σχιστολίθων, μαρμαρυγιακών σχιστολίθων, επιδοιτιτικών σχιστολίθων με παρεμβολές απλιτογενέσιων

❖ **ΓΝΕΥΣΙΟΜΕΝΟΙ ΓΡΑΝΙΤΕΣ ΑΝΩ ΛΙΘΑΝΘΡΑΚΟΦΟΡΟΥ**

Σε όλη την Πελαγονική ζώνη και μέσα στο κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο εντοπίζονται γρανιτικοί όγκοι. Στις επαφές διείσδυσης των μαγμάτων με το κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο εντοπίζονται φαινόμενα μεταμόρφωσης επαφής.

❖ **ΠΕΡΜΟΤΡΙΑΔΙΑΚΕΣ ΜΕΤΑΚΛΑΣΤΙΚΕΣ ΑΚΟΛΟΥΘΙΕΣ**

Πάνω από το κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο και από τους μαγματικούς όγκους αποτέθηκε μία κλαστική ιζηματογενής σειρά με πάχος 200 m περίπου, στην οποία παρεμβάλλονται και ηφαιστειακά υλικά, όξινες λάβες αλλά και τόφφοι. Η σειρά αυτή των ιζημάτων αποτέθηκε το Πέρμιο και Κάτω Τριαδικό και μαζί με τα ηφαιστειακά υλικά μεταμορφώθηκε κατά το Ανώτερο Ιουρασικό – Κάτω Κρητιδικό σε συνθήκες χαμηλής πρασινοσχιστολιθικής μεταμόρφωσης.

❖ **ΑΝΘΡΑΚΙΚΑ ΚΑΛΥΜΜΑΤΑ ΤΡΙΑΔΙΚΟΥ - ΙΟΥΡΑΣΙΚΟΥ**

Κατά την διάρκεια του Τριαδικού – Ιουρασικού έλαβε χώρα η κύρια Αλπική ιζηματογένεση της Πελαγονικής ζώνης, η οποία ήταν νηριτική, ανθρακική. Τα ιζήματα αυτά καλύπτουν αρκετά μεγάλες εκτάσεις της Πελαγονικής ζώνης. Το σύνολο των πετρωμάτων της ιζηματογένεσης, ονομάζεται ανθρακικό κάλυμμα της Πελαγονικής και χωρίζεται σε δυτικό και ανατολικό.

❖ **ΟΦΙΟΛΙΘΟΙ ΚΑΙ ΣΥΝΟΔΑ ΙΖΗΜΑΤΑ**

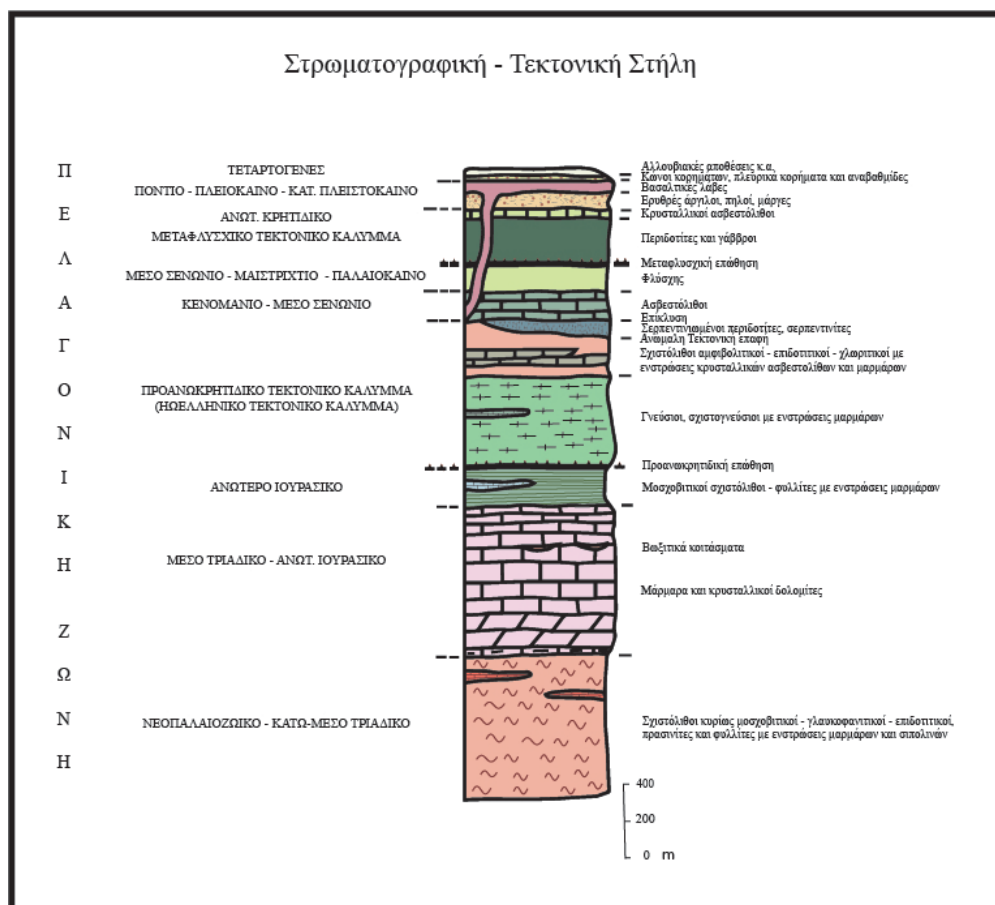
Ακόμη στη Πελαγονική παρατηρούνται αξιοσημείωτες οφιολιθικές μάζες που τοποθετούνται κυρίως στα δύο περιθώρια της ζώνης, ενώ παρατηρούνται και μερικές διάσπαρτες εμφανίσεις στο εσωτερικό της. Οι οφιόλιθοι της Πελαγονικής προέρχονται από τις δύο ωκεάνιες περιοχές της ζώνης του Αξιού και της Υποπελαγονικής ζώνης. Η επώθηση των οφιολίθων επάνω στα Τριαδικό – Ιουρασικά ανθρακικά καλύμματα έγινε μαζί με τα συνοδά ιζήματα τους ιζήματα από τις δύο ωκεάνιες περιοχές.

❖ **ΕΠΙΚΛΥΣΙΓΕΝΗ ΙΖΗΜΑΤΑ ΜΕΣΟΥ – ΑΝΩ ΚΡΗΤΙΔΙΚΟΥ**

Κατά το Μέσο – Άνω Κρητιδικό αποτέθηκαν με την επίκλυση της θάλασσας ιζήματα, με ασυμφωνία πάνω στα ήδη προϋπάρχοντα ανθρακικά πετρώματα που εν τω μεταξύ είχαν πτυχωθεί κατά τη διάρκεια της ορογενετικής περιόδου, και με επικλυσίγενή ασυμφωνία πάνω στους οφιόλιθους και τα συνοδά τους ιζήματα. Η στρωματογραφική ακολουθία του Μέσο – Άνω Κρητιδικού από κάτω προς τα πάνω περιλαμβάνει κροκαλοπαγή, μικρολατυποπαγή, μαργαϊκούς

ασβεστόλιθους, μικρολατυποπαγή ασβεστόλιθο, συμπαγή ασβεστόλιθο με απολιθώματα και φλύσχη.

Στη περιοχή έρευνας πιο συγκεκριμένα (σχήμα 2.7) εμφανίζονται με σειρά από το νεότερο προς το παλαιότερο, οι αλλουβιακές αποθέσεις Ολόκαινου και οι κώνοι κορημάτων ηλικίας Ολόκαινου – Πλειστόκαινου, οι ποταμολιμναίες – χερσαίες αποθέσεις Πλειστοκαινού, οι μάργες Μειοκαινού. Από το τμήμα της Πελαγονικής Ζώνης και την κατώτερη τεκτονική ενότητα εμφανίζονται ο φλύσξης και οι ολισθόλιθοι σερπεντινιτών ηλικίας Παλαιοκαινού και οι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι Άνω Κρητιδικού. Από το Προανωκρητιδικό τεκτονικό κάλυμμα εμφανίζονται οι ασβεστόλιθοι, τα υπερβασικά πετρώματα (σερπεντινωμένοι περιδοτίτες και γάββροι) και οι αμφιβολιτικοί – επιδοιτικοί – χλωριτικοί σχιστόλιθοι ηλικίας Κάτω Κρητιδικού. Επίσης από το ίδιο κάλυμμα εμφανίζονται οι μοσχοβιτικοί σχιστόλιθοι και φυλλίτες καθώς και τα μάρμαρα ηλικίας Άνω Ιουρασικού. Τέλος από την ανώτερη τεκτονική ενότητα εμφανίζονται τα μεταμορφωμένα πετρώματα (σχιστόλιθοι, γνεύσιοι, μάρμαρα, πρασινίτες, φυλλίτες) ηλικίας Κάτω – Μέσω Τριαδικού.



Σχήμα 2.8 Στρωματογραφική - Τεκτονική στήλη της Πελαγονικής Ζώνης (Katsikatsos et al. 1983).

2.4.1. ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΕΣ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΒΟΛΟΥ

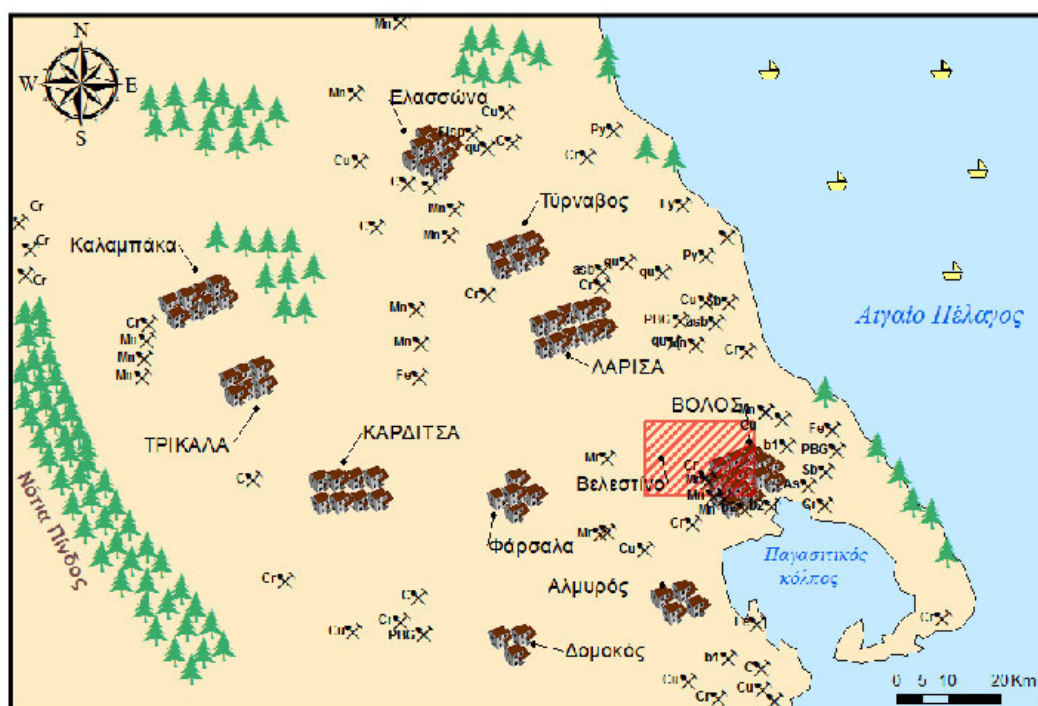
Η γεωλογία της Θεσσαλίας και κατ' επέκταση της ευρύτερης περιοχής του Βόλου, όπως περιγράφηκε παραπάνω είναι αρκετά σύνθετη καθώς περιλαμβάνει πολλά διαφορετικά πετρώματα και σχηματισμούς (μαγματικά, μεταμορφωμένα, ιζηματογενή, προαλπικά, αλπικά) τα οποία είναι τοποθετημένα γεωτεκτονικά στις ζώνες της Πελαγονικής, Υποπελαγονικής, Βοιωτικής, Πίνδου αλλά και στις ενότητες Ολύμπου – Όσσας και Αμπελακίων. Η γεωλογία της περιοχής συνδέεται άμεσα με μεταλλοφόρες εμφανίσεις.

Στην περιοχή Βόλου σύμφωνα με τις έως τώρα έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί (Μιγκίρος 1998), εντοπίζονται μεταλλικές συγκεντρώσεις που κυρίως συνδέονται με τα οφιοιθικά πετρώματα (σχήμα 2.9). Κάποιες από τις πιο σημαντικές μεταλλοφορίες που εντοπίζονται στην περιοχή είναι εμφανίσεις χρωμίτη, μαγγανίου, σουλφιδίων σιδήρου – χαλκού και σπάνια αρσενικού καθώς και εμφανίσεις βωξίτη. Κάποιες από αυτές τις μεταλλοφορίες έτυχαν μικρής εκμετάλλευσης την περίοδο 1935 – 1950. Ακόμη, κατά θέσεις έχουν λειτουργήσει και λειτουργούν λατομεία μαρμάρου είτε για την εξόρυξη δομικών λίθων είτε για τα αδρανή υλικά.

Παρακάτω αναφέρονται ξεχωριστά οι μεταλλοφορίες που απαντώνται σε κάθε περιοχή. Στο Σέσκλο εμφανίζονται οξείδια του μαγγανίου, ενώ στη Σούρπη οξείδια του σιδήρου. Στην Τσαγκαράδα, τη Ζαγορά και τον Κισσό Πηλίου εμφανίζονται μικτά θειούχα. Στην περιοχή Δράκεια απαντάται αντιμόνιο ενώ αρσενικό στην Αγριά. Οι συγκεντρώσεις αυτές πιθανώς να συνδέονται με Τριτογενή υδροθερμικά διαλύματα, τα οποία προέρχονται από όξινες υποηφαιστειακές διεισδύσεις (Μιγκίρος 1998). Στο Πήλιο και το Μαυροβούνι που βρίσκονται ανατολικά και βορειοανατολικά του Βόλου εμφανίζονται πολυμεταλλικές συγκεντρώσεις σιδηροπυρίτη, γαληνίτη, σφαλερίτη, αρσενοπυρίτη, αντιμονίτη κ.ά. Ακόμη στην περιοχή Βρύναινα και Γλαφυρά εντοπίζονται εμφανίσεις βωξίτη. Τέλος στην περιοχή της Ερέτριας εντοπίζονται μεταλλικές συγκεντρώσεις χαλκού (Cu), νικελίου (Ni) και κοβαλτίου (Co) (Δήμου 1991).

2.5. ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Η ευρύτερη περιοχή του Βόλου είναι έντονα τεκτονισμένη με ενδιαφέρουσα και πλούσια νεοτεκτονική δράση. Η ενεργή τεκτονική δραστηριότητα έχει διαμορφώσει στο παρελθόν το ανάγλυφο της περιοχής, αλλά συνεχίζει να επηρεάζει και σήμερα με την νεοτεκτονική δράση



ΥΠΟΜΝΗΜΑ



Πόλεις - Χωριά



Περιοχή Μελέτης



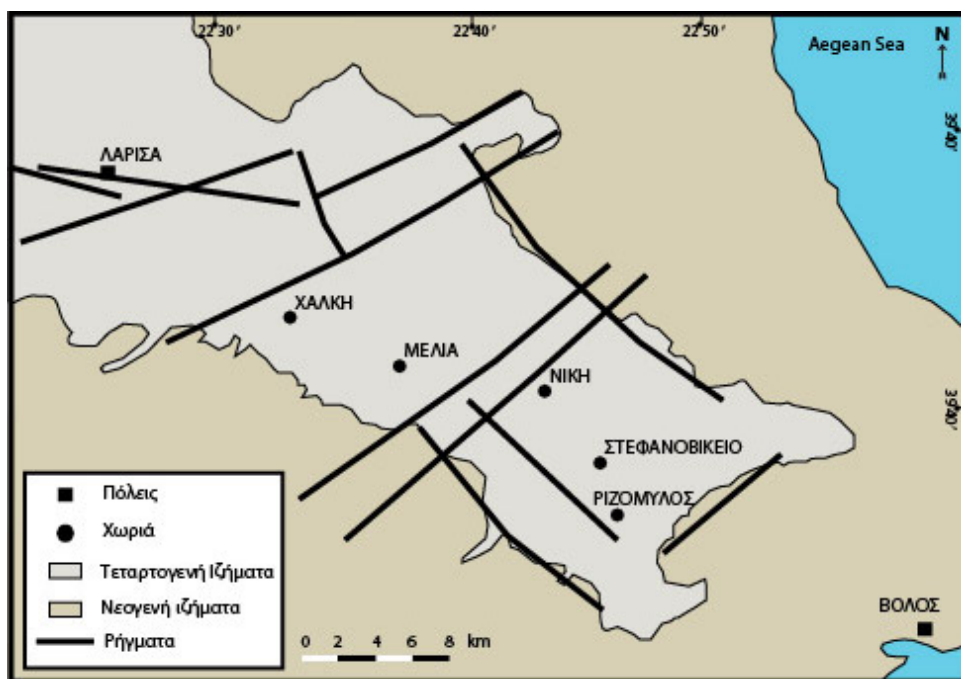
Εμφάνιση

Cr	Χρώμιο	dol	Δολομίτης
PBG	Μικτά θειούχα	cl	Άργιλος
Cu	Χαλκός	C	Λιγνίτης
Py	Σιδηροπυρίτης	graph	Γραφίτης
Sb	Αντιμόνιο	flsp	Άστριοι
As	Αρσενικό	qu	Χαλαζία
Mn	Μαγγάνιο	mr	Μάρμαρο
Fe	Σίδηρος	asb	Αμιάντος
b1	Βωξίτης (1ος οριζοντας)	tc	Τάλκης
b2	Βωξίτης (2ος οριζοντας)		

Σχήμα 2.9 Χάρτης γεωγραφικής κατανομής ορυκτού πλούτου στη Θεσσαλία (Τροποποιημένος από Μιγκίρο, 1998).

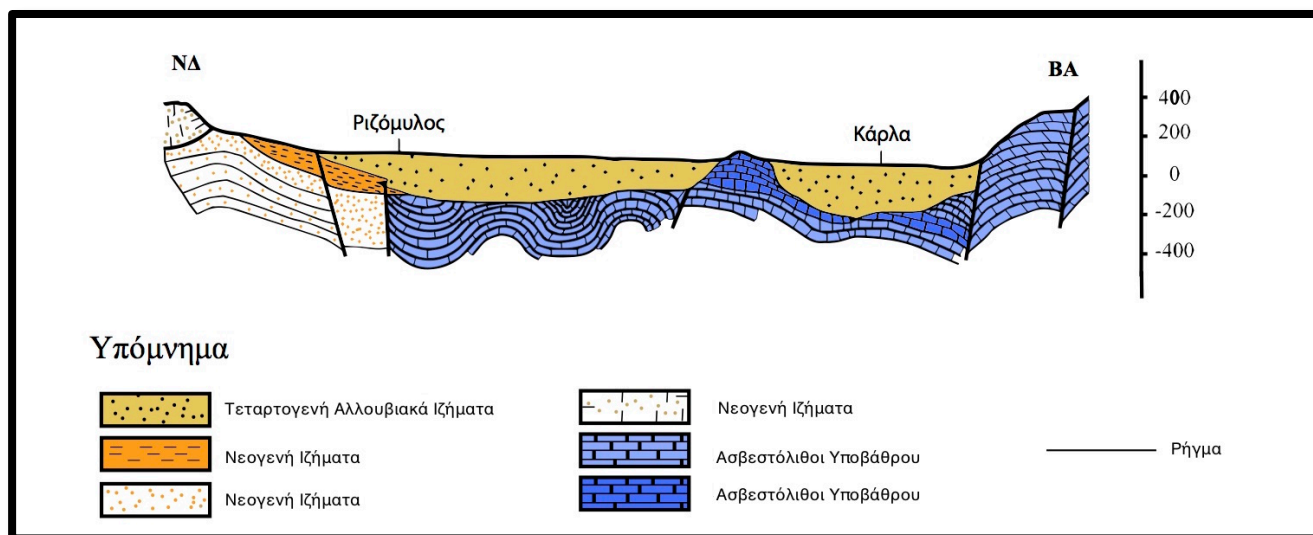
την οικονομία και την κοινωνία του Βόλου και των γύρω περιοχών, καθώς ισχυροί καταστροφικοί σεισμοί που έχουν συμβεί το 1955, 1957 και 1980 οφείλονται σε ενεργά ρήγματα της περιοχής. Στο σχήμα 2.10 φαίνονται τα πιο σημαντικά ενεργά ρήγματα της περιοχής του Βόλου και Λάρισας (Kontogianni et al. 2007). Τα ρήγματα αυτά είναι σημαντικά όχι μόνο για τη σεισμική τους δράση αλλά και για την προσφορά τους στον εμπλουτισμό του υδροφορέα. Τα

επιφανειακά ύδατα επικοινωνούν με τα υπόγεια, εκτός των άλλων, και διαμέσου αυτών των ρηγμάτων. Η περιοχή έρευνας βρίσκεται στο νοτιότερο άκρο μιας μεγάλης τεκτονικής λεκάνης με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ (Λάρισα-Βόλος). Τα ρήγματα της περιοχής συγκροτούν την τεκτονική λεκάνη όπου συγκεντρώνονται όλα τα ρέματα και τα ιζήματα από τα όρη του Πηλίου, του Μαυροβουνίου και του Χαλκοδόνη ορους. Στο σχήμα 2.11 φαίνεται μια γεωλογική τομή στην περιοχή Βελεστίνου-Ριζόμυλου-Στεφανοβίκειου-Κάρλας τροποποιημένη από Kontogianni et al. (2007), και στο σχήμα 2.12 επίσης μια γεωλογική τομή ΔΒΔ-ΑΝΑ, τροποποιημένη από το φύλλο «Βόλος» του ΙΓΜΕ (Katsikatsos et al. 1983).

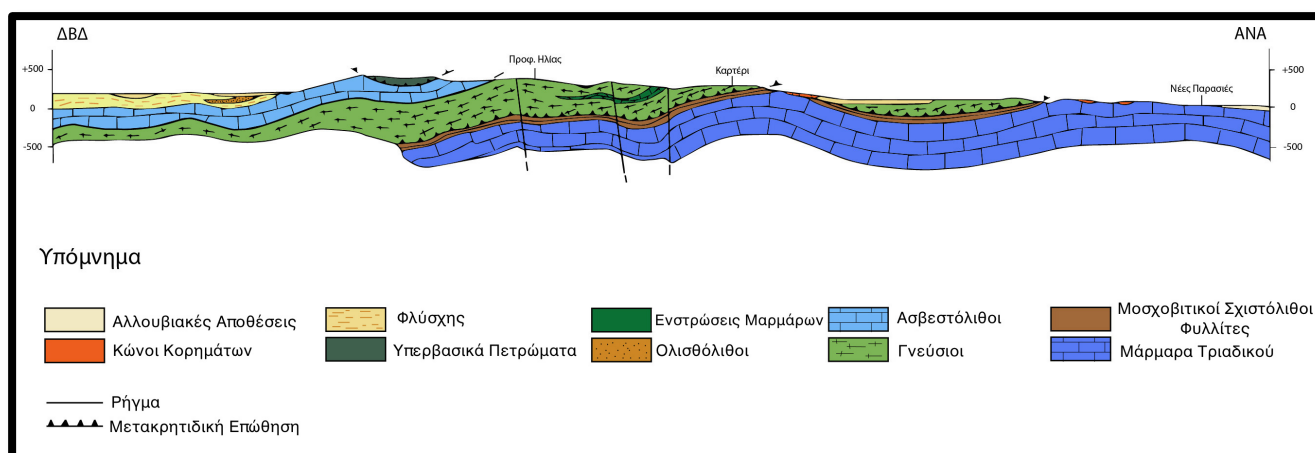


Σχήμα 2.10 Τεκτονικός χάρτης – σκαρίφημα της περιοχής Βόλου – Λάρισας με τα πιο σημαντικά ενεργά ρήγματα (Τροποποιημένος από Kontogianni et al., 2007).

Και στις δύο τομές παρατηρείται η έντονη τεκτονική δράση που έχει δημιουργήσει τις πτυχώσεις και τα ρήγματα στην περιοχή. Στην τομή Βελεστίνου-Ριζόμυλου-Στεφανοβίκειου-Κάρλας (σχήμα 2.11) φαίνονται οι δύο λεκάνες της περιοχής, με τα ρήγματα που τις έχουν δημιουργήσει, πληρωμένες με τα Τεταρτογενή ιζήματα και τον ασβεστόλιθο του υποβάθρου κάτω από αυτά. Στη δεύτερη τομή ΔΒΔ-ΑΝΑ (σχήμα 2.12) φαίνονται στο υπόβαθρο τα μάρμαρα Τριαδικού, ακριβώς πάνω από αυτά βρίσκονται οι μοσχοβιτικοί σχιστόλιθοι και πάνω από αυτούς οι γνεύσιοι της περιοχής. Πάνω στους γνεύσιους επικάθεται ο ασβεστόλιθος και στη συνέχεια ο φλύσχος και οι αλλουβιακές αποθέσεις.



Σχήμα 2.11 Γεωλογική τομή στην περιοχή Βελεστίνου – Ριζόμυλου – Στεφανοβίκειου – Κάρλας (Τροποποιημένος από Kontogianni et al., 2007).



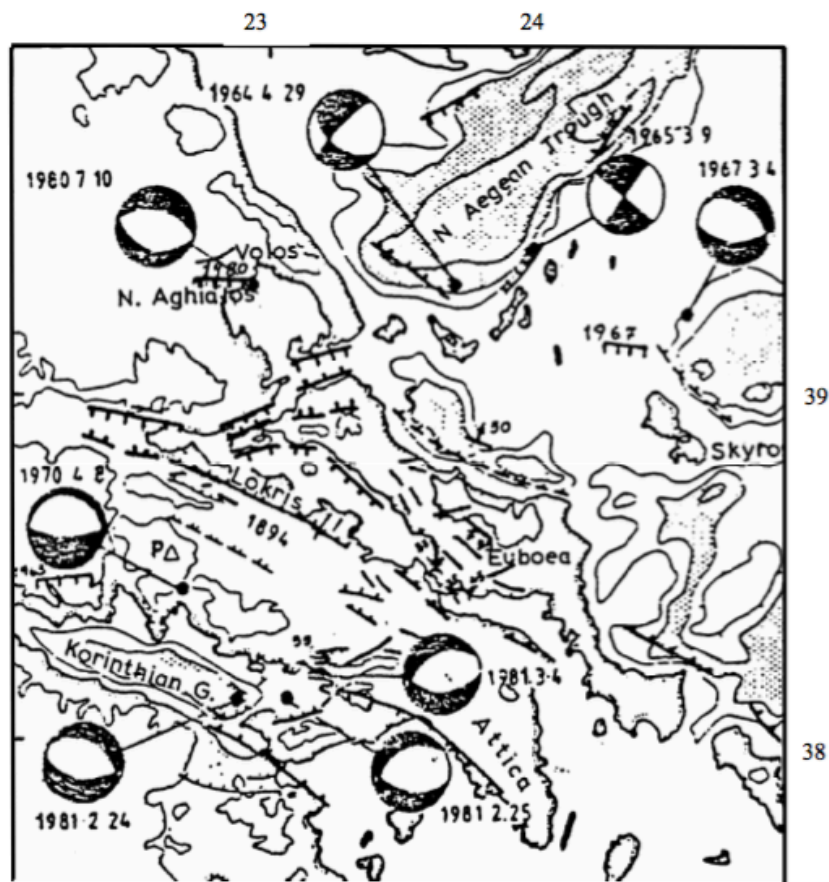
Σχήμα 2.12 Γεωλογική τομή (Τροποποιημένη από Katsikatsos et al., 1983).

2.5.1. ΝΕΟΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο η νεοτεκτονική δραστηριότητα της περιοχής είναι έντονη και έχει εκδηλώσει μεγάλα σεισμικά γεγονότα στον αιώνα μας. Σύμφωνα με τον νεοτεκτονικό χάρτη (σχήμα 2.13) οι κύριες διευθύνσεις των ρηγμάτων της περιοχής (Mercier et al., 1976) είναι ΑΒΑ-ΔΝΔ (π.χ. ρήγμα Νέας Αγχιάλου) και ΑΝΑ-ΔΒΔ (π.χ. ρήγμα Αταλάντης).

Έχουν γίνει πολλές έρευνες για τις τεκτονικές διεργασίες που έλαβαν χώρα στην περιοχή μετά την αλπική ορογένεση (Angelier, περιοχή Αταλάντης, Mercier et al., 1976). Το γενικότερο

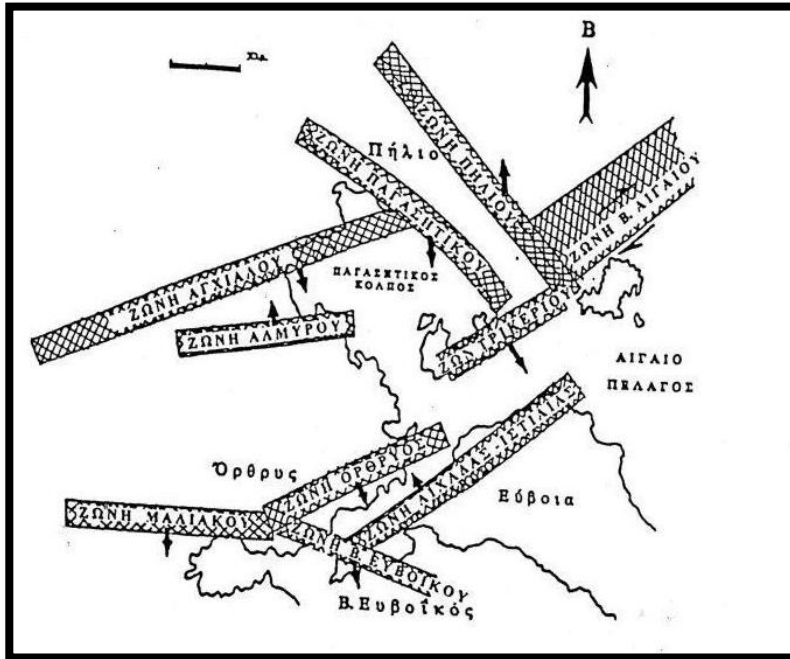
συμπέρασμα που προκύπτει από την ανάλυση των σεισμοτεκτονικών (μηχανισμοί γένεσης) και νεοτεκτονικών δεδομένων είναι ότι, η ευρύτερη περιοχή του Βόλου, είναι σε συμφωνία με την τεκτονική που επικρατεί στο νότιο Αιγαίο και αποτελείται κυρίως από κανονικά ρήγματα, εφελκυστικής τεκτονικής με μια οριζόντια συνιστώσα. Οι κύριες νεοτεκτονικές δομές κοντά στην περιοχή του Βόλου είναι όπως αναφέρθηκε η σεισμική ζώνη της Νέας Αγχιάλου (σεισμός μεγέθους 6,5 τον Ιούλιο του 1980), των Φαρσάλων, του Πηλίου και του Αλμυρού (σχήμα 2.14).



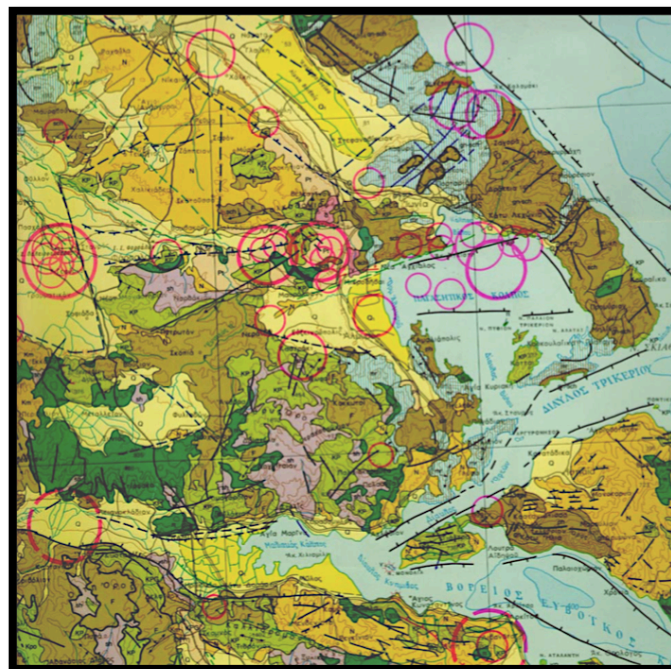
Σχήμα 2.13 Νεοτεκτονικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής του Βόλου. Απεικονίζονται τα κύρια ρήγματα, οι μηχανισμοί γένεσης των μεγαλύτερων σεισμών που συνέβησαν στην περιοχή (έως το 1981), καθώς και σεισμικά ρήγματα μεγάλων σεισμών (Πιτιλάκης κ.α., 2010).

Όσο αφορά το σεισμό της Νέας Αγχιάλου, δεν υπήρχε κανένα σαφές επιφανειακό ίχνος του σεισμικού ρήγματος αλλά η σεισμική ζώνη οριοθετούνταν από τα μετασεισμικά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά (ρωγμώσεις, μετατοπίσεις). Ο εφελκυσμός που προκάλεσε το σεισμό όπως προέκυψε από τον μηχανισμό γένεσης είναι διεύθυνσης BBA-NNΔ και συμφωνεί με το εφελκυσμό που υπολογίστηκε από τις νεοτεκτονικές έρευνες για το σύγχρονο πεδίο των τάσεων. Στο σχήμα 2.15 φαίνεται ο σεισμοτεκτονικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής του Βόλου. Δύο ακόμη σεισμοί που καταγράφηκαν και προκάλεσαν σημαντικές καταστροφές είναι ο

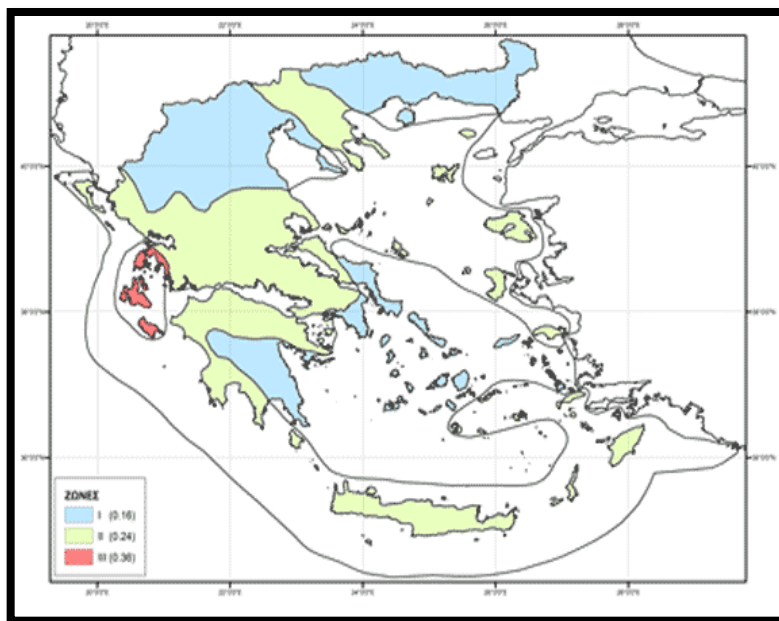
σεισμός Λεχωνίων (19/04/1995) και του Βελεστίνου (08/03/1957). Τέλος να σημειωθεί ότι η περιοχή έρευνας ανήκει σύμφωνα με την ΕΑΚ 2003 στην ζώνη II σεισμικής επικινδυνότητας με επιτάχυνση σχεδιασμού 0,24g (σχήμα 2.16).



Σχήμα 2.14 Οι κύριες τεκτονικές ζώνες διάρρηξης της ευρύτερης έρευνας με τα βέλη που δείχνουν τη σχετική τους κίνηση (Γαλανάκης, 1997).



Σχήμα 2.15 Σεισμοτεκτονικός χάρης της ευρύτερης περιοχής του Βόλου (Ι.Γ.Μ.Ε. 1989).



Σχήμα 2.16 Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας, ΕΑΚ 2003.

2.6. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Η περιοχή έρευνας σύμφωνα με την Ειδική Γραμματεία Υδάτων και το Υπουργείο Παραγωγικής Ανασυγκρότησης Περιβάλλοντος και Ενέργειας, ανήκει στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας (GR08). Σύμφωνα με το σχέδιο διαχείρισης αυτού, η περιοχή έρευνας βρίσκεται στα όρια της λεκάνης απορροής του Πηνειού και της λεκάνης απορροής ρεμάτων Αλμυρού – Βόλου. Στη λεκάνη απορροής ρεμάτων Αλμυρού – Βόλου γενικά, δεν υπάρχουν μεγάλοι ποταμοί παρά ένα σύνολο ρεμάτων που τα περισσότερα από αυτά καταλήγουν στον Παγασητικό κόλπο. Από υδρογεωλογικής άποψης η λεκάνη αυτή έχει ενδιαφέρον καθώς αναπτύσσονται σε αυτή υπόγειοι υδροφορείς στους ανθρακικούς σχηματισμούς, αλλά και στους κοκκώδεις σχηματισμούς των τεταρτογενών αποθέσεων, κυρίως στην πεδινή περιοχή του Βόλου. Οι υπόγειοι υδροφορείς των ανθρακικών πετρωμάτων είναι επηρεασμένοι από τη θαλάσσια διείσδυση όπως φαίνεται και στο χάρτη του σχεδίου διαχείρισης (σχήμα 2.17), με πορτοκαλί καταγράφονται οι περιοχές με υφαλμύριση λόγω υπεραντλήσεων ενώ οι περιοχές με κίτρινες ρίγες απεικονίζουν την υφαλμύριση λόγω φυσικής προέλευσης. Το δυναμικό των υδροφόρων αυτών εξαρτάται από τη κοκκομετρία τους αλλά και από τις συνθήκες τροφοδοσίας που επικρατούν κάθε υδρολογικό έτος. Ακόμη τα οφιολιθικά και μεταμορφωμένα πετρώματα (γνευσιοσχιστόλιθοι) παρουσιάζουν κατά τόπους σημαντικές υδροφορίες που εκφορτίζονται κυρίως μέσω πηγών.



Σχήμα 2.17 Υφαλμύριση υπόγειων υδατικών συστημάτων στην ευρύτερη περιοχή του Βόλου (Υ.Π.Ε.Κ.Α. - Ειδική Γραμματεία Υδάτων).

Πιο συγκεκριμένα στη περιοχή έρευνας οι γεωλογικοί σχηματισμοί μπορούν να διαχωριστούν με βάση τα υδρολιθολογικά τους χαρακτηριστικά, τα οποία άμεσα καθορίζουν και την υδροπερατότητα ή υδραυλική αγωγιμότητα (k) των σχηματισμών. Έτσι διακρίνονται τρεις κατηγορίες (Βουδούρης και Στράτης 2014):

❖ Υδροπερατοί σχηματισμοί ($k > 10^{-5} \text{ m/s}$)

Ως υδροπερατοί σχηματισμοί στην περιοχή μπορούν να χαρακτηριστούν τα μάρμαρα και σε μικρότερη κλίμακα οι αλλουβιακές αποθέσεις.

Η υδροπερατότητα (k) των μαρμάρων χαρακτηρίζεται ως υψηλή και κυμαίνεται από 10^{-2} έως 10^{-4} m/s . Οφείλεται κυρίως στην έντονη τεκτονική δράση και στην κρατικοποίηση που έχει υποστεί ο σχηματισμός, και ως συνέπεια αυτών παρουσιάζονται ρωγμές και διακλάσεις σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Οφείλεται δηλαδή στο αυξημένο δευτερογενές πορώδες του σχηματισμού. Η κρατικοποίηση του σχηματισμού ακόμη, συντελεί στην αύξηση του συντελεστή κατείσδυσης που κυμαίνεται περίπου από 45-50% της βροχόπτωσης.

Η υδροπερατότητα (k) των αλλουβιακών αποθέσεων κυμαίνεται ανάλογα με την λιθολογική σύσταση αυτών, από μικρή (10^{-5} m/s) ως μέτρια (10^{-3} m/s). Σε αντίθεση με τα μάρμαρα, οι αλλουβιακές αποθέσεις έχουν διάκενα μεταξύ των κόκκων τους που είτε επικοινωνούν είτε όχι, και αποτελούν το πρωτογενές πορώδες για το σχηματισμό. Μέσα από τα διάκενα αυτά κινείται το υπόγειο νερό. Σε περίπτωση που τα κενά αυτά είναι πληρωμένα με αργιλικό υλικό ή παρεμβάλλονται άλλα λεπτόκοκκα πετρώματα μεταξύ των αλλουβιακών αυτά

λειτουργούν σαν φραγμός στην κίνηση του νερού και μειώνουν την υδροπερατότητα του σχηματισμού. Οι υπόγειοι ταμιευτήρες των αλλουβιακών αποθέσεων τροφοδοτούνται από την άμεση κατείσδυση του νερού της βροχής και από την διήθηση των χειμάρρων.

❖ **Ημιπερατοί σχηματισμοί ($k : 10^{-7} - 10^{-5} \text{ m/s}$)**

Ως ημιπερατοί σχηματισμοί στην περιοχή έρευνας θεωρούνται τα κορήματα και τα υπολείμματα των αποσπασμένων πετρωμάτων. Η υδροπερατότητα αυτών κυμαίνεται από 10^{-8} έως 10^{-4} m/s και θεωρείται μέτρια έως μικρή. Ανάλογα με την λιθολογική σύσταση των σχηματισμών αυτών αλλάζει και η υδροπερατότητα τους. Αυτοί οι σχηματισμοί βρίσκονται κυρίως σε πλευρική επαφή με τα μάρμαρα (υδροπερατοί σχηματισμοί) και έτσι δέχονται σημαντική τροφοδοσία.

Κάτω από προϋποθέσεις, στην κατηγορία των ημιπερατών σχηματισμών μπορούν να προστεθούν οι σχιστόλιθοι και οι γενεύσιο-σχιστόλιθοι του τεκτονικού καλύμματος. Το δευτερογενές τους πορώδες είναι αυτό που αυξάνει την υδροπερατότητα τους. Το δίκτυο διακλάσεων και ρωγμών που δημιουργείται είναι συχνά πυκνό και μπορεί να φιλοξενεί υδροφορία η οποία εκδηλώνεται κυρίως με τη μορφή πηγών που σε μερικές περιπτώσεις εμφανίζουν υψηλές ασυνήθιστες παροχές.

❖ **Υδροστεγανοί σχηματισμοί ($k < 10^{-7} \text{ m/s}$)**

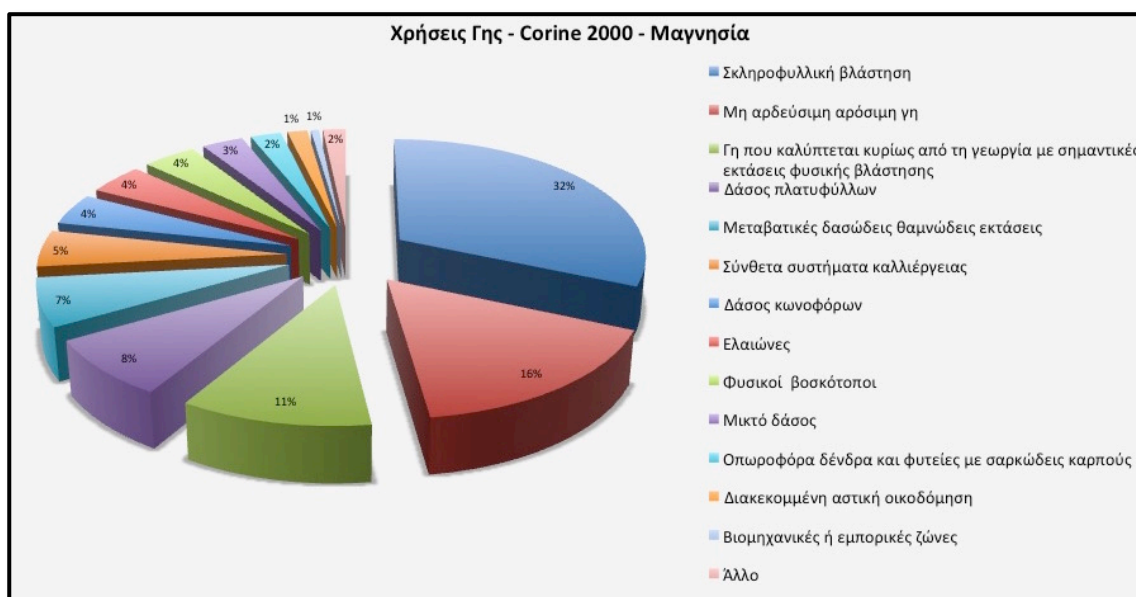
Οι σχιστόλιθοι του τεκτονικού καλύμματος που δεν έχουν υποστεί τόσο μεγάλη τεκτονική πίεση και δεν έχουν αναπτύξει το δευτερογενές πορώδες όσο αυτοί της προηγούμενης ομάδας, ανήκουν στους υδροστεγανούς σχηματισμούς καθώς επίσης εδώ ανήκει και το σύνολο των μεταμορφωμένων πετρωμάτων. Η υδροπερατότητα τους είναι τόσο μικρή ($k: 10^{-6} - 10^{-9} \text{ m/s}$) που πρακτικά χαρακτηρίζονται ως υδροστεγανοί. Στη περίπτωση που είναι μερικώς καταπονημένα ή έχουν υποστεί ισχυρό κατακερματισμό αυξάνοντας το ενεργό πορώδες τους, τότε συγκαταλέγονται στα ημιπερατά έως μερικά υδροπερατά πετρώματα. Το γεγονός ότι αποτελούν κατά βάση στεγανά πετρώματα δεν τα κάνει λιγότερο ενδιαφέροντα από υδρογεωλογικής άποψης, αντιθέτως αποτελούν σημαντικό τμήμα της διαμόρφωσης του υπόγειου υδροφορέα καθώς είναι αυτά που ορίζουν το στεγανό υπόβαθρο που συγκεντρώνει το νερό, και ελέγχουν την διακύμανση και διεύθυνση του υπόγειου νερού.

Στο σχήμα 2.18 φαίνεται η περιοχή έρευνας με τα δείγματα νερού των γεωτρήσεων Γ1, Γ2, Γ3, Γ4, Γ6, Γ7, Γ8, Γ9, Γ10 που ελήφθησαν καθώς και τα δείγματα εδάφους, τα οποία θα εξετασθούν σε επόμενο κεφάλαιο. Τα δεδομένα από τις πυρηνοληπτικές γεωτρήσεις

παραχωρήθηκαν από την ΔΕΥΑΜΒ για το ερευνητικό πρόγραμμα «Υδροχημική – υδρογεωλογική έρευνα της ευρύτερης περιοχής των σημείων ύδρευσης του δήμου βόλου». Στις Γ1 και Γ2 γεωτρήσεις φαίνονται οι τεταρτογενείς αποθέσεις που περιλαμβάνουν εναλλαγές κροκαλοπαγών, άμμου και κροκάλων και διακόπτονται από την παρουσία αργιλικών στρωμάτων. Οι Γ5, Γ6, Γ7, Γ10 γεωτρήσεις διατρύουν τους ασβεστόλιθους ενώ η Γ8 τους γνεύσιους.

2.7. ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ ΚΑΙ ΠΗΓΕΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

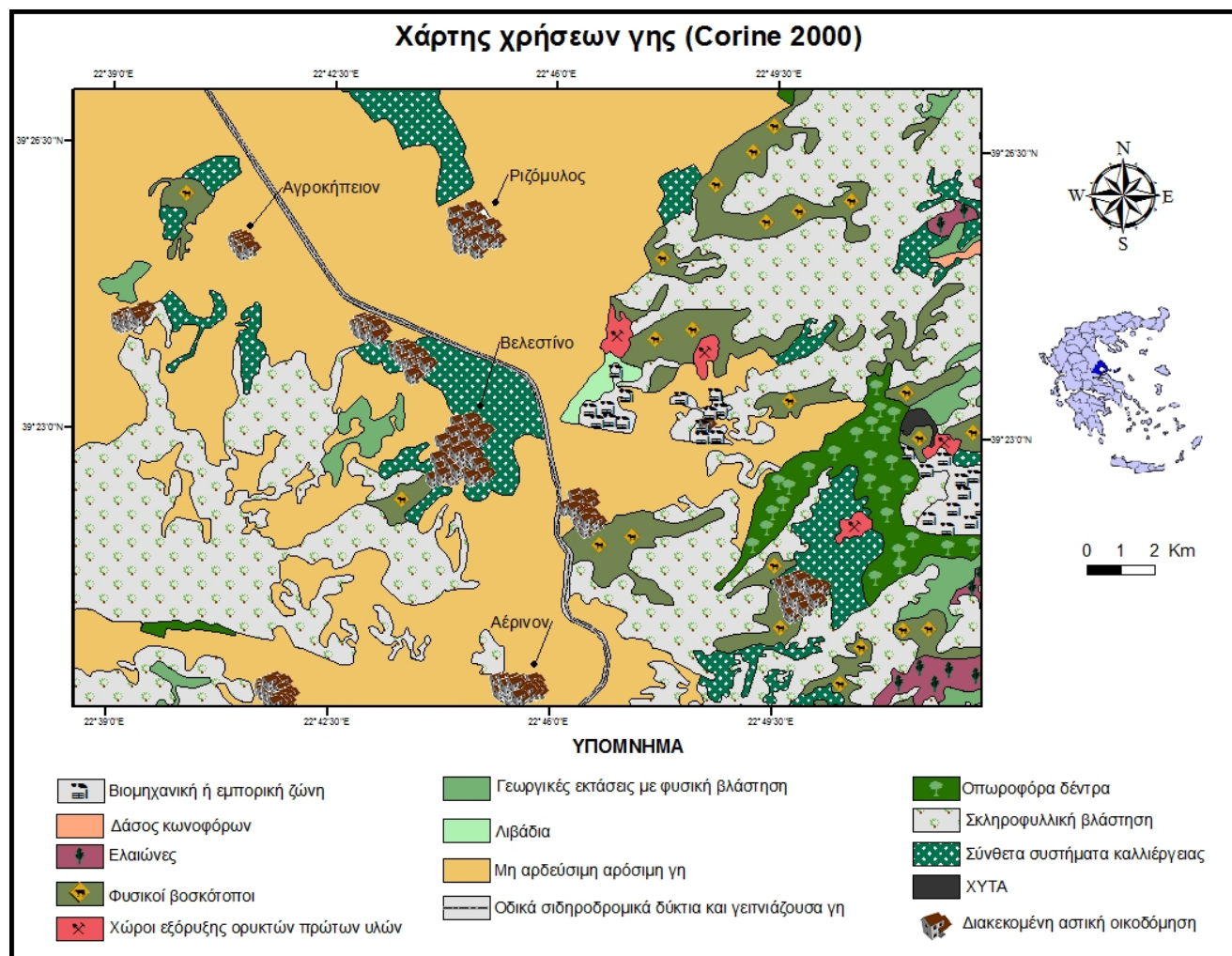
Σύμφωνα με το Corine Land Cover 2000, οι χρήσεις γης για τον Νομό της Μαγνησίας παρουσιάζονται στο σχήμα 2.19. Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό γης (32%) καλύπτεται από σκληροφυλλική βλάστηση, αμέσως μετά το 16% της γης αποτελείται από μη αρδεύσιμες αρόσιμες εκτάσεις και το 11% ανήκει σε γη που χρησιμοποιείται κυρίως για γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης.



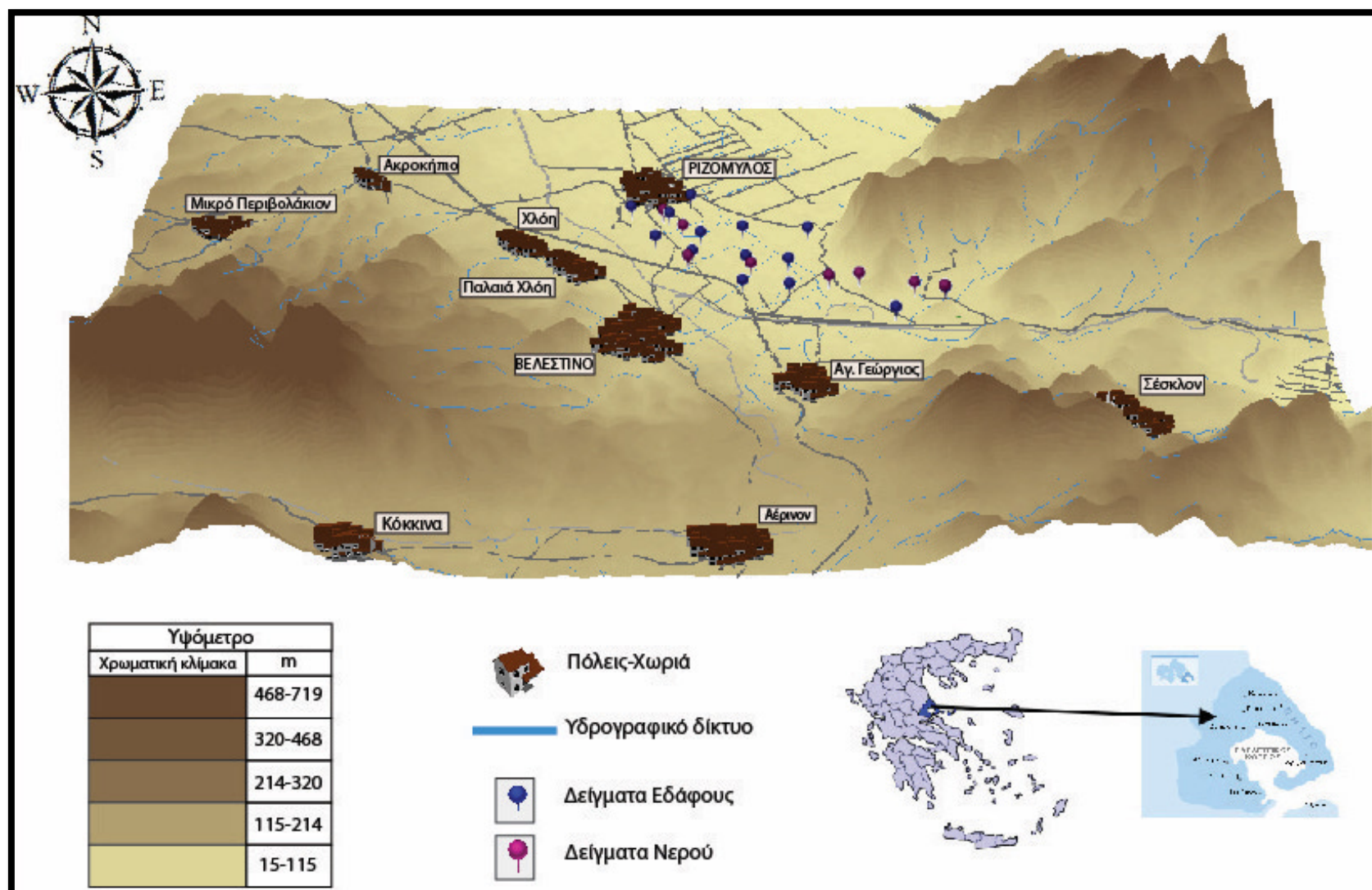
Σχήμα 2.19 Χρήσεις γης Μαγνησίας – Corine Land Cover 2000.

Στη περιοχή έρευνας πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι χρήσεις γης σύμφωνα με τα στοιχεία του Corine 2000 στο σχήμα 2.20. Το μεγαλύτερο ποσοστό καλύπτεται από μη αρδεύσιμη αρόσιμη γη, και από σκληροφυλλική βλάστηση. Ακόμη όμως υπάρχουν εκτάσεις με σύνθετες καλλιέργειες, φυσικούς βοσκότοπους αλλά και οπωροφόρα δέντρα. Σημαντική είναι η παρουσία των χώρων εξόρυξης ορυκτών και πρώτων υλών, των βιομηχανικών και εμπορικών ζωνών αλλά και του χώρου υγειονομικής ταφής απορριμμάτων.

Σε ότι αφορά τις πιέσεις και τις πηγές ρύπανσης αυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με την γεωμετρία τους σε σημειακές και διάχυτες. Σημειακές πηγές ρύπανσης μπορεί να αποτελούν οι χωματερές ή οι χώροι ανεξέλεγκτης διάθεσης απορριμμάτων (ΧΑΔΑ), οι διαφόρων τύπων δεξαμενές, τα αστικά υγρά απόβλητα από οικισμούς ή εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (ΕΕΛ), η εσταυλισμένη κτηνοτροφία, η βιομηχανία, οι μεταλλευτικές και εξορυκτικές δραστηριότητες, οι ιχθυοκαλλιέργειες κ.α., ενώ διάχυτες πηγές ρύπανσης μπορεί να αποτελούν οι απορροές των ρυπαντικών φορτίων είτε από την αγροτική δραστηριότητα ή την κτηνοτροφία είτε από αστικά υγρά απόβλητα από οικισμούς που δεν έχουν συνδεθεί με δίκτυα αποχέτευσης και κεντρικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων είτε σε σπάνιες περιπτώσεις η όξινη βροχή κ.ά.

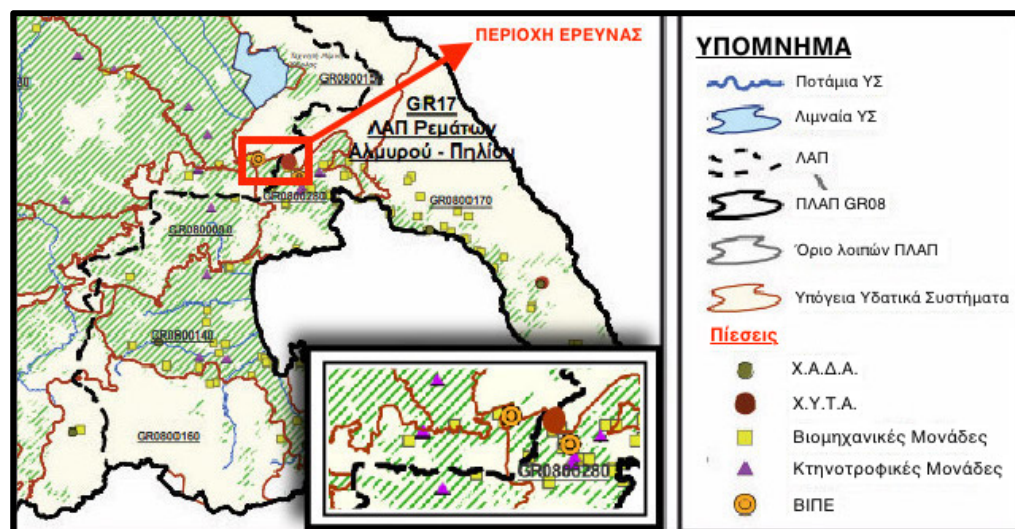


Σχήμα 2.20 Χάρτης χρήσεων γης της περιοχής έρευνας (στοιχεία: Corine Land Cover 2000).

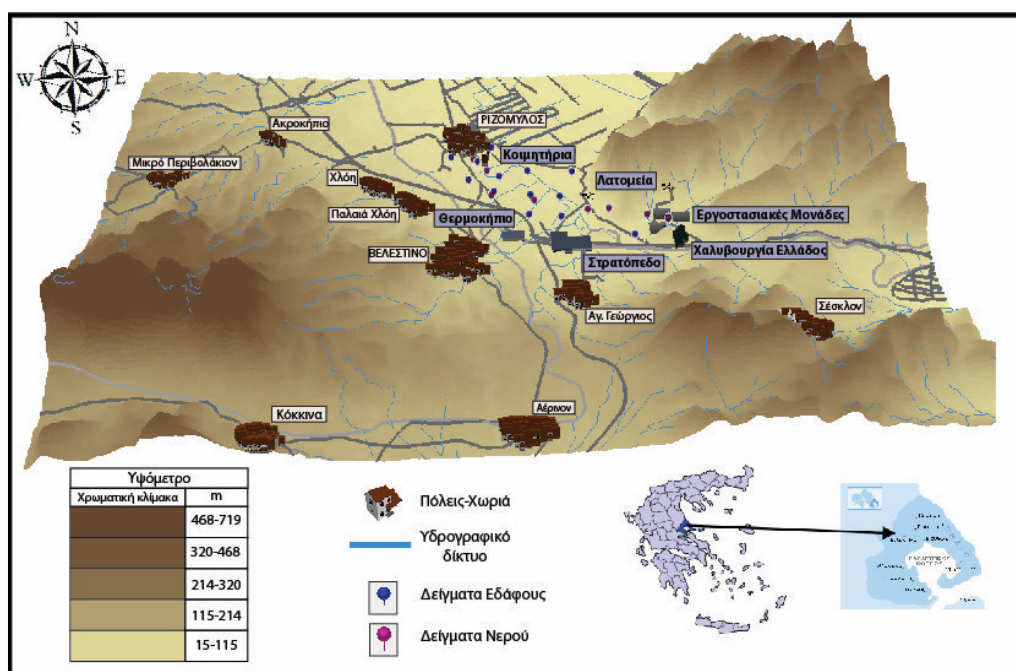


Σχήμα 2.18 Χάρτης της περιοχής έρευνας με τις θέσεις δειγματοληψίας υδάτων και ιζημάτων.

Στο σχήμα 2.21 παρουσιάζεται ο χάρτης με τις σημειακές αλλά και διάχυτες πηγές ρύπανσης των υπόγειων υδατικών συστημάτων της ευρύτερης περιοχής του Βόλου, που περιέχει στην έκθεσή του το σχέδιο διαχείρισης υδάτων του υδατικού διαμερίσματος (08) της Θεσσαλίας. Συγκεκριμένα για την περιοχή έρευνας έχουν αποτυπωθεί οι πιέσεις και οι πιθανές πηγές ρύπανσης (σχήμα 2.22) οι οποίες μπορεί να επηρεάζουν και να ευθύνονται για κάποιες από τις ανωμαλίες που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των αναλύσεων.



Σχήμα 2.21 Σημειακές και διάχυτες πιέσεις των υπόγειων υδατικών συστημάτων στην ευρύτερη περιοχή του βόλου (Υ.Π.Ε.Κ.Α. - Ειδική Γραμματεία Υδάτων).

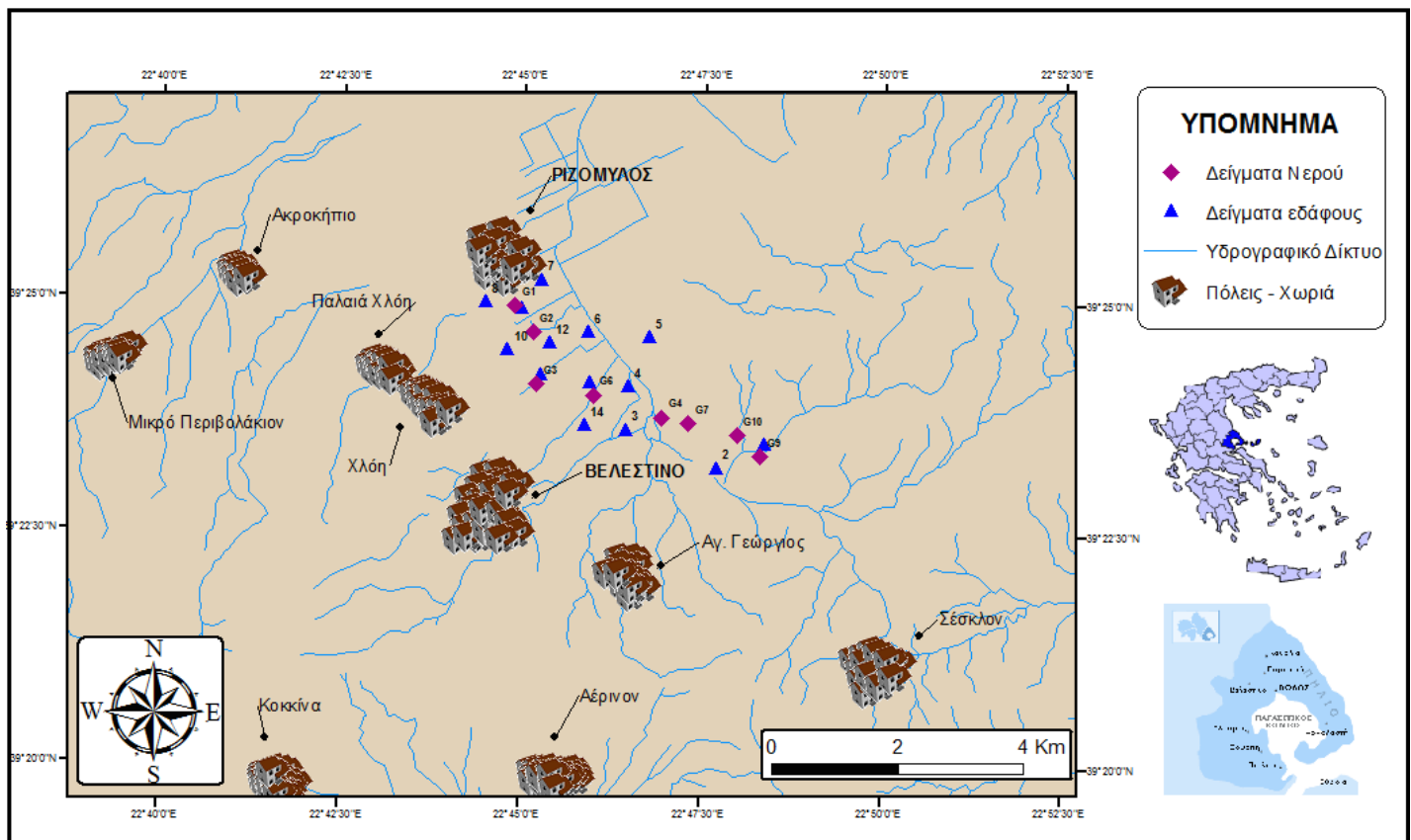


Σχήμα 2.22 Χάρτης με τις σημαντικότερες πιέσεις και τις πιθανές πηγές ρύπανσης στην περιοχή έρευνας.

Όλες οι γεωτρήσεις από τις οποίες συλλέχθηκαν τα δείγματα νερού βρίσκονται σε πιθανές πηγές ρύπανσης. Σε απόσταση 800 m από την γεώτρηση Γ1 βρίσκονται κοιμητήρια, ενώ οι γεωτρήσεις Γ2, Γ3, Γ6 αλλά και Γ1 βρίσκονται κοντά σε αγροτική περιοχή που καλλιεργείται με τη χρήση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων. Οι γεωτρήσεις Γ4 και Γ7 βρίσκονται μέσα στο προκεχωρημένο εργοστάσιο του Ελληνικού Στρατού που συντηρεί και ανακατασκευάζει άρματα από χάλυβα χρησιμοποιώντας καθαριστικά και βαφές τα οποία γενικά θεωρούνται πηγές τοξικών ουσιών και αποβλήτων. Οι γεωτρήσεις Γ9 και Γ10 βρίσκονται κοντά στην Χαλυβουργία Ελλάδος και σε άλλες εργοστασιακές μονάδες. Τέλος, στην περιοχή δειγματοληψίας εδάφους βρίσκονται δύο ενεργά λατομεία μαρμάρου καθώς επίσης τα δείγματα 1 και 2 έχουν ληφθεί πλησίον της Χαλυβουργίας και των εργοστασιακών μονάδων.

3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται αναλυτικά οι μέθοδοι έρευνας που χρησιμοποιήθηκαν για την περιβαλλοντική και γεωχημική έρευνα των υδάτων και των εδαφών, αλλά και η μέθοδος που ακολουθήθηκε και εφαρμόστηκε για την εκτίμηση της ρυπαντικής επιδεκτικότητας του υδροφορέα. Η περιοχή έρευνας για την περιβαλλοντική και γεωχημική έρευνα εδαφών και υδάτων καθώς και για την εκτίμηση της τρωτότητας του υδροφορέα έχει έκταση 290,3 km² και παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1 Χάρτης της περιοχής έρευνας με τα σημεία δειγματοληψίας νερού και εδαφών.

3.1. ΓΕΩΧΗΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

3.1.1. ΓΕΩΧΗΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΥΔΑΤΩΝ

Τα δείγματα νερού των γεωτρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν για ανάλυση στη παρούσα έρευνα προέρχονται από γεωτρήσεις της Δημοτικής Επιχείρησης Ύδρευσης και Αποχέτευσης Μείζονος περιοχής Βόλου (Δ.Ε.Υ.Α.Μ.Β.), οι οποίες διατέθηκαν για το ερευνητικό πρόγραμμα του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, «Υδροχημική – υδρογεωλογική έρευνα της

ευρύτερης περιοχής των σημείων ύδρευσης του δήμου Βόλου» με επιστημονικούς υπεύθυνους τον Αναπληρωτή Καθηγητή Κ. Βουδούρη και τον Καθηγητή Ι. Στράτη. Οι φυσικοχημικές παράμετροι και τα χημικά στοιχεία που μελετήθηκαν καθώς και τα αποτελέσματα τους παρουσιάζονται σε επόμενο κεφάλαιο.

Οι οχτώ γεωτρήσεις βρίσκονται όπως φαίνεται και στα σχήματα 2.20 και 3.1, στην ευρύτερη περιοχή του Βελεστίνου, δυτικά του πολεοδομικού συγκροτήματος του Βόλου. Αυτές οι γεωτρήσεις σύμφωνα με στοιχεία της Δ.Ε.Υ.Α.Μ.Β. υδροδοτούν με ένα μεγάλο ποσοστό της παροχής τους την Βιομηχανική Περιοχή του Βόλου (ΒΙ.ΠΕ. Βόλου). Το υπόλοιπο μέρος των υδάτων των γεωτρήσεων αυτών αναμιγνύεται πρώτα στις δεξαμενές του Βόλου (Δεξαμενές Σαρακηνού), μαζί με ένα μέρος από πηγαία ύδατα και με το μίγμα νερού που προκύπτει υδροδοτείται το Πολεοδομικό Συγκρότημα του Βόλου. Σύμφωνα με τα στοιχεία της Δ.Ε.Υ.Α.Μ.Β. η συνολική αντλούμενη ποσότητα των γεωτρήσεων αυτών για τα έτη 1988 έως και 2001 κυμάνθηκε από 1.450.00 έως 3.880.000 m³ περίπου, και με μέση ετήσια τιμή 2.440.000 m³. Η μέση μηνιαία παροχή των γεωτρήσεων υπολογίζεται περίπου στα 185 m³/hr. Οι στάθμες των υπόγειων νερών των γεωτρήσεων από την επιφάνεια του εδάφους, κυμαίνονται από 80 m στη γεώτρηση Γ1 έως 190 m στη γεώτρηση Γ6 (πίνακας 3.1). Το πιεζομετρικό τους φορτίο φαίνεται να είναι αρνητικό λόγω των εντατικών αντλήσεων που απαιτεί η περιοχή (Βουδούρης και Στράτης 2014)

Πίνακας 3.1 Θέσεις και στάθμες γεωτρήσεων.

Όνομα Γεώτρησης	Θέση	Στάθμη (Α.Ε.Ε.)
Γ1	Ριζόμυλος	80,05
Γ2	Ριζόμυλος	95,95
Γ3	Ριζόμυλος	95,2
Γ4	Άγιος Γεώργιος	-
Γ6	Άγιος Γεώργιος	190,10
Γ7	Άγιος Γεώργιος	-
Γ9	Β' ΒΙ.ΠΕ.	-
Γ10	Β' ΒΙ.ΠΕ.	74,53

Η δειγματοληψία των υδάτων πραγματοποιήθηκε στις 1-3 Ιουλίου το 2008 και για την ακριβή αποτύπωση των γεωτρήσεων χρησιμοποιήθηκε GPS. Συλλέχθηκαν δύο δείγματα από κάθε γεώτρηση στην έξοδο της αντλίας, μετά από άντληση που διαρκούσε τουλάχιστον μισή ώρα, προκειμένου να καθαριστεί η γεώτρηση και να ληφθεί αντιπροσωπευτικό δείγμα. Τα δείγματα συλλέχθηκαν σε φιάλες πολυαιθυλενίου χωρητικότητας 1,5 λίτρα. Το καθένα από τα δύο δείγματα οξινίστηκε με διάλυμα HNO_3 1M και στη συνέχεια τα δείγματα αποθηκεύτηκαν στο ψυγείο μέχρι την ημερομηνία που πραγματοποιήθηκαν οι χημικές αναλύσεις στο Εργαστήριο Αναλυτικής Χημείας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Η θερμοκρασία (T), η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) και η ενεργός οξύτητα (pH) των δειγμάτων προσδιορίστηκαν επί τόπου κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας με τη βοήθεια ευαίσθητου θερμόμετρου για τη θερμοκρασία, φορητού αγωγιμόμετρου για την ηλεκτρική αγωγιμότητα το οποίο βαθμονομήθηκε με τη βοήθεια των πρότυπων διαλυμάτων (147 $\mu\text{S}/\text{cm}$ και 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$) και ψηφιακού τύπου πεχάμετρο για την μέτρηση του pH, το οποίο επίσης βαθμονομήθηκε με τη βοήθεια πρότυπων ρυθμιστικών διαλυμάτων (pH=4 και pH=7). Και τα τρία όργανα μέτρησης είναι τύπου Crison model MM40.

Για τον προσδιορισμό των ιόντων SO_4 , NO_3^- , NO_2^- χρησιμοποιήθηκε φασματοφωτόμετρο, ενώ τα μέταλλα μετρήθηκαν στην ατομική φασματοσκοπία εκπομπής (ICP, Perkin-Elmer, Τύπου Optima 3100XL axial viewing) και απορρόφησης (Perkin-Elmer, Τύπου 5100) και τα ιόντα F με ειδικό ηλεκτρόδιο και πεχάμετρο – μιλιβोलτόμετρο (Orion 701 pH-milivolt meter) το οποίο είναι βαθμονομημένο με πρότυπα διαλύματα φθοριούχων. Οι παραπάνω μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Αναλυτικής Χημείας του ΑΠΘ.

Επίσης για την επεξεργασία χημικών δεδομένων και την κατασκευή των διαγραμμάτων Piper, Durov και Schoeller στον H/Y, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα AQUACHEM (Version 3.7) της εταιρίας WATERLOO. Ακόμη κατασκευάστηκαν διαγράμματα συσχέτισης χημικών στοιχείων και βαρέων μετάλλων σε περιβάλλον Microsoft Excel. Τέλος, με τη βοήθεια γλώσσας προγραμματισμού στο Excel κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα SAR και Wilcox.

Η χωρική κατανομή των χημικών στοιχείων των δειγμάτων νερού δεν ήταν δυνατή, σε αντίθεση με τα εδαφικά δείγματα, καθώς οι γεωτρήσεις δεν διατρέχουν όλες τον ίδιο υδροφορέα και δεν θα ήταν αντιπροσωπευτική η εικόνα της κατανομής.

3.1.2. ΓΕΩΧΗΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΕΔΑΦΩΝ

Για την γεωχημική έρευνα των εδαφών και των υδάτων χρησιμοποιήθηκαν τα δείγματα που συλλέχθηκαν για το ερευνητικό πρόγραμμα του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, «Υδροχημική – υδρογεωλογική έρευνα της ευρύτερης περιοχής των σημείων ύδρευσης του δήμου Βόλου». Οι δεκατέσσερις (14) θέσεις δειγματοληψίας φαίνονται στους χάρτες των σχημάτων 2.22 και 3.1. Τα θέσεις VS1, VS2 και VS3 βρίσκονται κοντά στην βιομηχανική περιοχή του Βόλου, ενώ οι θέσεις VS4 και VS5 βρίσκονται κοντά σε λατομείο αδρανών ανθρακικών υλικών. Οι υπόλοιπες θέσεις δειγματοληψίας βρίσκονται ως επί το πλείστον σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις μεταξύ των περιοχών Βελεστίνο-Ριζόμυλος. Η δειγματοληψία του ιζήματος έγινε με δειγματολήπτη τύπου ανοιχτού σωλήνα.

Σε κάθε θέση δειγματοληψίας λήφθηκαν δείγματα από τρία διαφορετικά βάθη, ένα από την επιφάνεια του εδάφους, ένα από βάθος 0,5 μέτρα και ένα από βάθος 1 μέτρο. Συνολικά συλλέχθηκαν 42 δείγματα εδάφους. Η κατά βάθος δειγματοληψία βοηθά στην παρακολούθηση της μεταβολής της περιεκτικότητας του στοιχείου που μελετάτε κάθε φορά με το βάθος. Αυτό με τη σειρά του μπορεί να οδηγήσει σε πολύ χρήσιμα συμπεράσματα όσο αφορά την προέλευση του ρυπαντή (π.χ. βαρέα μέταλλα), αν δηλαδή είναι φυσική ή ανθρωπογενής η πηγή ρύπανσης.

Τα δείγματα προτού αναλυθούν ως προς την περιεκτικότητα των βαρέων μετάλλων υπέστησαν μια επεξεργασία. Στην αρχή ξηράνθηκε μια ποσότητα από κάθε δείγμα στους 60 °C για 24 ώρες, προκειμένου να απομακρυνθεί η υγρασία. Στη συνέχεια ακολούθησε ήπια άλεση του δείγματος με ειδικό γουδί από αχάτη για να μην καταστραφούν οι κόκκοι αλλά παράλληλα να μπορέσουν να αποσυσσωματωθούν. Αφού αλέστηκαν, τα δείγματα πέρασαν από κόσκινο 63 μm έτσι ώστε να διαχωριστεί το κλάσμα της ιλύος και της αργίλου. Το κοσκινισμένο δείγμα χρησιμοποιήθηκε για την χημική ανάλυση και τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων διάφορων μετάλλων σε αυτό. Χρησιμοποιήθηκε για ανάλυση το δείγμα με τα λεπτόκοκκα ιζήματα και όχι όλο το κλάσμα που συλλέχθηκε, διότι λόγω της μικρότερης ειδικής επιφάνειας των κόκκων τους δεσμεύουν και συσσωρεύουν στη δομή τους τα περιβαλλοντικά διαθέσιμα ιχνοστοιχεία. Τα λεπτόκοκκα ιζήματα χρησιμοποιούνται ευρέως για το προσδιορισμό της ρύπανσης από ανόργανους ρυπαντές (Salomons 1995, Kabata-Pendias 2011).

Η χημική ανάλυση των 42 δειγμάτων εδάφους, πραγματοποιήθηκε στα διαπιστευμένα εργαστήρια Acme Analytical Laboratories στο Βανκούβερ του Καναδά. Ο προσδιορισμός των συγκεντρώσεων έγινε με την τεχνική της Φασματομετρίας Μάζας Επαγωγικά Συζευγμένου

Πλάσματος (ICP-MS). Όσο αφορά την εκχύλιση των μετάλλων από τα δείγματα, αυτή πραγματοποιήθηκε με δύο διαφορετικές μεθόδους σε δύο διαφορετικά μέρη του δείγματος:

❖ Μερική Διάσπαση (Aqua Regia Digestion)

Στη μερική διάσπαση πραγματοποιείται στο δείγμα χώνευση με αντιδραστήριο το βασιλικό νερό (Aqua Regia), δηλαδή διάλυμα πυκνού υδροχλωρικού (HCl) και νιτρικού (HNO₃) οξέος σε αναλογία 1:3. Το αντιδραστήριο αυτό, λειτουργεί ισχυρά ως διαλυτικό μέσο για τα σουλφίδια λόγω των οξειδωτικών ιδιοτήτων του αλλά διαλυτοποιεί επίσης και τα οξείδια σιδήρου, απατίτη, ουρανίου και μολυβδαινίου. Ταυτόχρονα όμως έχει περιορισμένη δράση στις πυριτικές ενώσεις. Για το λόγο αυτό, η μέθοδος μερικής διάσπασης χρησιμοποιείται για την καλύτερη προσέγγιση της μέγιστης δυνητικά διαλυτής ή περιβαλλοντικά διαθέσιμης συγκέντρωσης των μετάλλων στο ίζημα χωρίς όμως να περιλαμβάνονται τα μέταλλα που είναι ενσωματωμένα ή δεσμευμένα στο πλέγμα των πυριτικών ορυκτών που όπως προαναφέρθηκε δεν διαλυτοποιούνται εξολοκλήρου με αυτή τη μέθοδο.

❖ Ολική Διάσπαση (Near Total Digestion)

Με την μέθοδο της ολικής διάσπασης προσδιορίζεται η ολική συγκέντρωση των μετάλλων στο δείγμα. Αρχικά πραγματοποιείται οξείδωση της οργανικής ύλης με τη χρήση του νιτρικού οξέος (HNO₃) και στη συνέχεια θέρμανση με υδροφθορικό οξύ (HF). Επίσης στη χώνευση χρησιμοποιείται το υδροχλωρικό (HCl) και το υπερχλωρικό (HClO₄) οξύ. Αυτό το μίγμα των τεσσάρων οξέων προσβάλλει το πυριτικό πλέγμα των ορυκτών, με αποτέλεσμα να απελευθερώνονται και να προσμετρούνται στην ολική συγκέντρωση των μετάλλων και τα δεσμευμένα μέταλλα που βρίσκονταν στο πλέγμα των πυριτικών αλάτων. Να σημειωθεί ότι ορισμένα από τα ανθεκτικά ορυκτά όπως ο βαρίτης και το ζirkόνιο δεν διαλύονται πλήρως με την ολική διάσπαση.

Για την συσχέτιση βαρέων μετάλλων μεταξύ τους αλλά και για την συσχέτιση τους με τα οξείδια αργιλίου (Al₂O₃), σιδήρου (Fe₂O₃) και μαγγανίου (MnO) χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της μερικής διάσπασης θέλοντας έτσι να προσδιοριστεί η περιβαλλοντικά διαθέσιμη ποσότητα των μετάλλων, ενώ τα οξείδια υπολογίστηκαν με τις αποτελέσματα της ολικής διάσπασης. Οι συσχετίσεις πραγματοποιήθηκαν σε περιβάλλον Microsoft Excel. Κατασκευάστηκαν επίσης χάρτες χωρικής κατανομής του κάθε στοιχείου στα τρία διαφορετικά βάθη δειγματοληψίας χρησιμοποιώντας και πάλι τα αποτελέσματα της μερικής διάσπασης, με τη

βοήθεια του προγράμματος ArcGis 10.2. (toolbox: spatial analyst, interpolation, topo to raster, kriging) της εταιρείας Esri.

3.2. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΡΥΠΑΝΤΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΣΤΗ ΡΥΠΑΝΣΗ

Σύμφωνα με τον Στουρνάρα (1997), η τρωτότητα ενός υδροφορέα θα πρέπει να ερμηνεύεται και να αντιμετωπίζεται σε τρία στάδια:

- I. Στάδιο δυνητικής εισόδου του ρύπου στο υδατικό σύστημα (συνδέεται με υδρογεωλογικές συνθήκες και συμπεριφορά του ρύπου).
- II. Στάδιο παραμονής του ρύπου στο υδατικό σύστημα (συνδέεται με φυσικοχημικές ιδιότητες του ρύπου και υδρογεωλογικές-υδραυλικές συνθήκες του υδροφορέα).
- III. Στάδιο άφιξης του ρύπου στο υδροληπτικό έργο (αν ο υδροφορέας εκμεταλλεύεται).

Η εκτίμηση της ρυπαντικής επιδεκτικότητας ή αλλιώς τρωτότητας μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους (βαθμονόμησης, στατιστικές, προσομοίωσης), όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή. Στην συγκεκριμένη έρευνα η εκτίμηση του κινδύνου ρύπανσης των υπόγειων νερών επιλέχθηκε να γίνει με την μέθοδο δεικτών (βαθμονόμησης) DRASTIC (Aller et al. 1987), η οποία λαμβάνει υπόψη υδρογεωλογικές παραμέτρους σε πορώδεις υδροφορείς.

Η μέθοδος DRASTIC έχει εφαρμοστεί από αρκετούς ερευνητές στην Ελλάδα (Βουδούρης και Μανδηλαράς 2004, Panagopoulos et al. 2006; Antonakos & Lambrakis 2007, Πάτσιος 2007, Καζάκης 2008, Patrikaki et al. 2012) αλλά και στον κόσμο (Evans and Myers 1990, Johansson et al. 1999; Fritch et al. 2000; Al-Zabet 2002, Babeker et al., 2005; Hamza et al. 2007; Mohammad and Almasri 2008, Rahman 2008, Muheeb and Rasheed 2010; Voudouris et al. 2010), και αποτελεί την πλέον διαδεδομένη μέθοδο εκτίμησης της τρωτότητας των υπόγειων υδάτων.

Οι επτά παράμετροι που λαμβάνει υπόψη της η DRASTIC, προκύπτουν από τα ακρωνύμια των: **D** (**Depth**) βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού, **R** (**Recharge**) ενεργή κατείσδυση, **A** (**Aquifer**) υδροφορέας, **S** (**Soil**) έδαφος, **T** (**Topography**) κλίση αναγλύφου, **I** (**Impact of vadose zone**) επίδραση της ακόρεστης ζώνης, **C** (**Hydraulic Conductivity of the aquifer**) συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας ή υδροπερατότητας (πίνακας 3.2).

Η μέθοδος DRASTIC θεωρεί ότι, κάθε ρύπος εισέρχεται στο σύστημα από την επιφάνεια του εδάφους, ο ρύπος αυτός εισάγεται στο υπόγειο νερό από την κατείσδυση του νερού της

βροχόπτωσης και τέλος ο ρύπος έχει την ταχύτητα του νερού. Επίσης η ελάχιστη επιφάνεια στην οποία μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος είναι 0,4 km² (Βουδούρης 2009).

Για τον υπολογισμό της τρωτότητας με τη μέθοδο DRASTIC είναι απαραίτητο να υπολογιστεί ο δείκτης **DRASTIC (DI)** που δίνεται από τη σχέση:

$$DI = Dr \times Dw + Rr \times Rw + Ar \times Aw + Sr \times Sw + Tr \times Tw + Ir \times Iw + Cr \times Cw \quad (3.1)$$

όπου: ο δείκτης **r** εκφράζει την τιμή της παραμέτρου και
ο δείκτης **w** τη βαρύτητα της καθεμιάς.

Πίνακας 3.2 Βαρύτητα κάθε παραμέτρου στη μεθοδολογία DRASTIC.

Παράμετρος	Βαρύτητα (Γενική)	Βαρύτητα (Ειδική)
D - Βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού	5	5
R - Ενεργή κατείσδυση	4	4
A - Υδροφορέας	3	3
S - Έδαφος	2	5
T - Κλίση αναγλύφου	1	3
I - Επίδραση της ακόρεστης ζώνης	5	3
C - Συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας	3	2

Για κάθε μία παράμετρο υπάρχουν δύο τιμές βαρύτητας (πίνακας 3.2). Η γενική βαρύτητα (Typical DRASTIC) εφαρμόζεται στη περίπτωση οικιακών και βιομηχανικών ρύπων, ενώ η ειδική βαρύτητα (Pesticide DRASTIC) εφαρμόζεται στη περίπτωση χρήσης φυτοφαρμάκων σε αρδευόμενες περιοχές.

Στη παρούσα έρευνα εφαρμόστηκε η γενική βαρύτητα (Typical DRASTIC), χωρίς να πραγματοποιηθούν τροποποιήσεις στην μέθοδο που προτείνει η Aller (1987), ακολουθώντας επίσης τον χρωματικό κώδικα στους χάρτες κάθε παραμέτρου και στους τελικούς χάρτες τρωτότητας και διακινδύνευσης του υδροφορέα.

Σε περιβάλλον GIS και με βάση τον δείκτη DI κατασκευάστηκε ο χάρτης τρωτότητας. Όλες οι παράμετροι της DRASTIC γεωαναφέρονται, ψηφιοποιούνται και εισάγονται σε μια βάση δεδομένων στο πρόγραμμα GIS. Από τη βάση αυτή κατασκευάζονται οι θεματικοί χάρτες της κάθε παραμέτρου και στη συνέχεια ο τελικός χάρτης τρωτότητας. Οι παράμετροι πρέπει να έχουν βαθμονομηθεί προτού υπολογισθεί ο δείκτης DI όπως θα αναλυθεί παρακάτω. Η βαθμονόμηση κυμαίνεται από το 1 (ελάχιστο δυναμικό ρύπανσης) έως το 10 (μέγιστο δυναμικό ρύπανσης).

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι παράμετροι της DRASTIC, η βαθμονόμηση τους, που έγινε με βάση την τυπική βαθμονόμηση Aller (1987) και οι θεματικοί χάρτες της κάθε παραμέτρου. Ο τελικός χάρτης και η ερμηνεία του παρουσιάζεται σε επόμενο κεφάλαιο.

❖ **Βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού - (Depth of groundwater)**

Το βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού είναι μια παράμετρος αρκετά σημαντική και παίζει καθοριστικό ρόλο στην τρωτότητα του υδροφορέα. Το πόσο γρήγορα ή αργά θα φτάσει ένας ρύπος στο υδροφόρο σύστημα εξαρτάται από το βάθος της στάθμης του. Όσο πιο βαθιά βρίσκεται η στάθμη τόσο πιο μεγάλη θα είναι η διαδρομή του ρύπου και άρα τόσο πιο αργά θα ρυπανθεί ο υδροφορέας. Επομένως, θα υπάρχει μεγαλύτερη προστασία και χαμηλότερη τρωτότητα. Αντίθετα όσο πιο ρηχός είναι ο υδροφορέας τόσο μικρότερη θα είναι η προστασία του και μεγαλύτερη η τρωτότητα, αφού η στάθμη θα είναι πιο κοντά στην επιφάνεια του εδάφους από όπου εισάγεται ο ρύπος. Στους ελεύθερους υδροφορείς, η παράμετρος του βάθους αντιστοιχεί μέχρι τη στάθμη του υπόγειου νερού, ενώ στους υπό πίεση υδροφορείς αντιστοιχεί μέχρι την οροφή του υδροφορέα.

Οι κλάσεις της παραμέτρου του βάθους καθώς και η βαθμονόμηση των τιμών αυτών για την παρούσα έρευνα, παρουσιάζονται στον πίνακα 3.3. Σύμφωνα με τις στάθμες των γεωτρήσεων της Δ.Ε.Υ.Α.Μ.Β. αλλά και με στοιχεία από εργασίες των Βουδούρη & Στράτη (Ερευνητικό Πρόγραμμα ΑΠΘ, 2014) και Φώλια (2009), στους ασβεστόλιθους και στα κρυσταλλικά πετρώματα το βάθος στάθμης είναι πάνω από 30,5 m ενώ στις αλλουβιακές αποθέσεις και στα κορήματα από 23 έως 30,5 m.

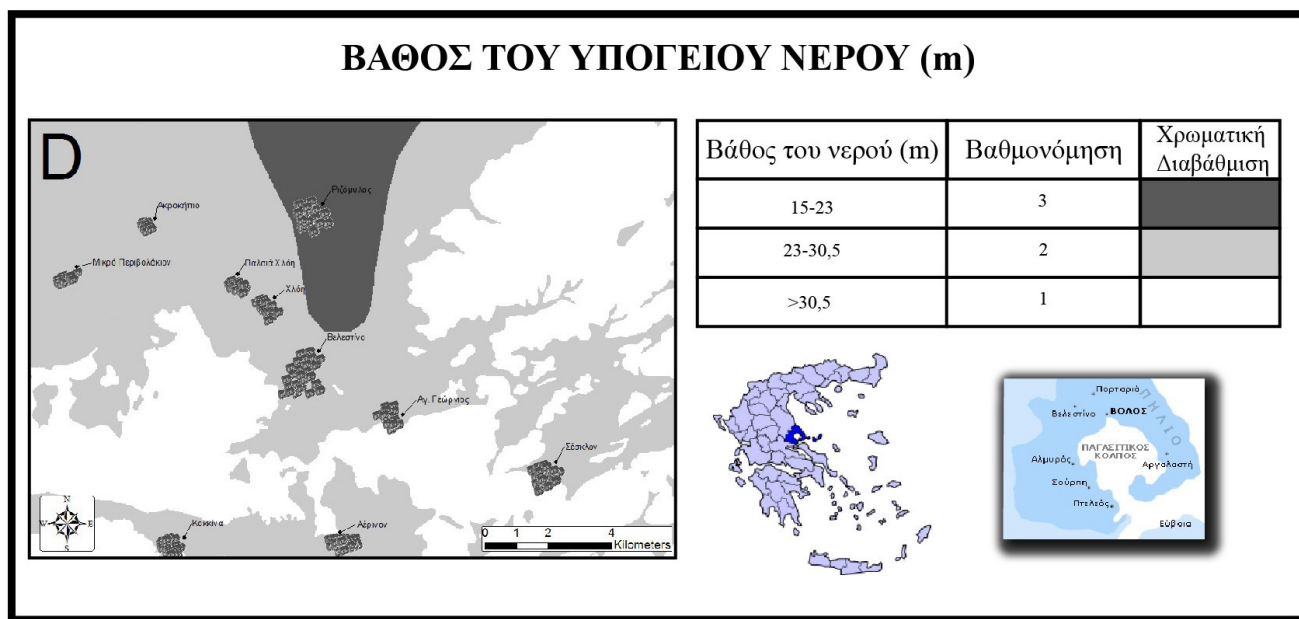
Πίνακας 3.3 Βαθμονόμηση της παραμέτρου D.

Βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού - D	
Τιμή σε (m)	Τυπική βαθμονόμηση (Rating)
15-23	3
23-30,5	2
>30,5	1

Ο θεματικός χάρτης του βάθους του υπόγειου νερού (D) παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2. Η περιοχή με υψηλή τιμή, σε σχέση με τις υπόλοιπες, είναι κοντά στη περιοχή του Ριζόμυλου ενώ χαμηλότερες τιμές παίρνουν οι περιοχές γύρω από το Βελεστίνο και τα υπόλοιπα χωριά της περιοχής έρευνας.

❖ Ενεργή κατείσδυση - (Recharge)

Η τροφοδοσία ή ο εμπλουτισμός του υδροφορέα αντιστοιχεί στην ποσότητα νερού ανά μονάδα επιφάνειας που κατεισδύει. Υπολογίζεται σε χιλιοστά (mm) / χρόνο (year) και οι κλάσεις μαζί με την βαθμονόμησή τους παρουσιάζονται στον πίνακα 3.4. Όσο πιο μεγάλος είναι ο εμπλουτισμός (μέχρι περίπου την τιμή 280 mm/year, διότι μετά πραγματοποιείται μεγάλη αραίωση του ρύπου), τόσο περισσότερο αυξάνεται η πιθανότητα του ρύπου να φτάσει στον υδροφόρο. Σύμφωνα με το μοντέλο DRASTIC, ο ρύπος εισέρχεται απο την επιφάνεια του εδάφους και κινείται με την βοήθεια του νερού των βροχοπτώσεων.



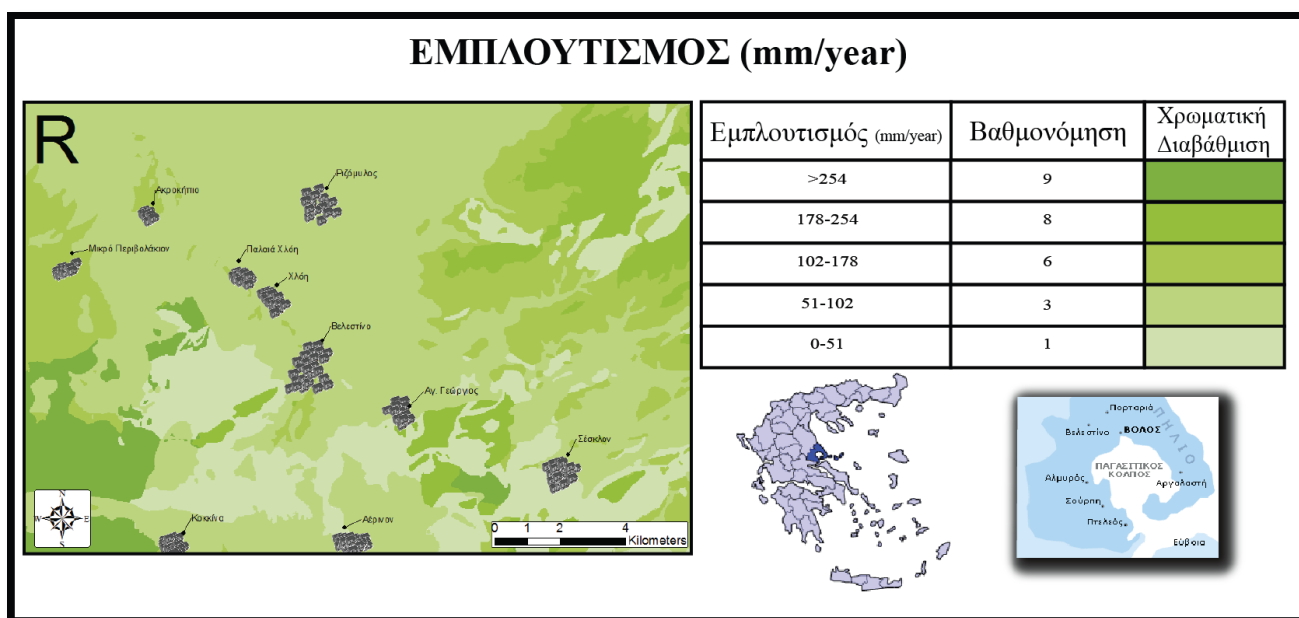
Σχήμα 3.2 Θεματικός βαθμονομημένος χάρτης της παραμέτρου D.

Πίνακας 3.4 Βαθμονόμηση της παραμέτρου R.

Ενεργή κατείσδυση - R	
Τιμή σε (mm/year)	Τυπική βαθμονόμηση (Rating)
>254	9
178-254	8
102-178	6
51-102	3
0-51	1

Έτσι για τον υπολογισμό του εμπλουτισμού στην περιοχή χρησιμοποιήθηκε η βροχοβαθμίδα της περιοχής (Φώλια, 2009), η οποία παρουσιάζεται σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Αφού κατασκευάστηκε ο χάρτης νετόπτωσης της περιοχής έρευνας, πολλαπλασιάστηκε με τον συντελεστή κατείσδυσης του κάθε σχηματισμού (Σούλιος 2006-2011), υπολογίζοντας έτσι την ενεργή κατείσδυση σε χιλιοστά. Ο θεματικός χάρτης της ενεργής κατείσδυσης παρουσιάζεται στο σχήμα 3.3. Η τιμή της παραμέτρου είναι αυξημένη στο νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής έρευνας όπου τα πετρώματα που κυριαρχούν είναι ασβεστολιθικά, ενώ μικρότερες τιμές κατείσδυσης παρατηρούνται στο κεντρικό τμήμα της περιοχής έρευνας (Ριζόμυλος - Βελεστίνο) όπου υπάρχουν περισσότερες αλλουβιακές και ποταμολιμναίες-χερσαίες αποθέσεις.



Σχήμα 3.3 Θεματικός βαθμονομημένος χάρτης της παραμέτρου R.

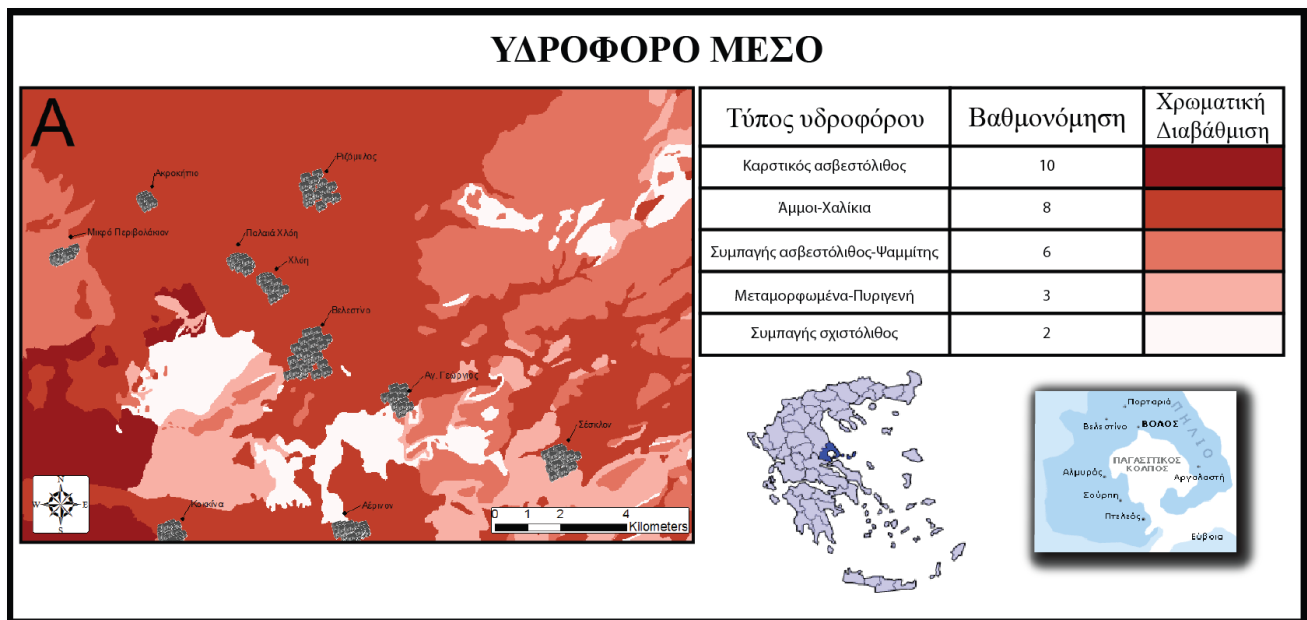
❖ Υδροφορέας - (Aquifer)

Η παράμετρος του υδροφορέα σχετίζεται άμεσα με το υλικό δηλαδή τον γεωλογικό σχηματισμό απο τον οποίο αποτελείται ο υδροφορέας. Αν το υλικό του υδροφορέα έχει μεγάλο πορώδες ή είναι έντονα καρστικοποιημένο, τότε αυξάνεται η περατότητά του και η ταχύτητα με την οποία κινείται το νερό και ο ρύπος μέσα στο υλικό, κατά συνέπεια αυξάνεται η τρωτότητα. Αντίθετα όσο πιο συμπαγές είναι το υλικό του υδροφορέα (π.χ. συμπαγής σχιστόλιθος) τόσο πιο μικρή θα είναι η τρωτότητα του καθώς τόσο πιο αργά και με δυσκολία θα κινείται ο ρύπος μέσα σε αυτόν. Στο πίνακα 3.5 παρουσιάζονται τα είδη των υδροφορέων και η αντίστοιχη βαθμονόμησή τους. Οι τιμές κυμαίνονται από 2 (συμπαγής σχιστόλιθος) έως 10 (καρστικός ασβεστόλιθος). Ο θεματικός χάρτης κατασκευάστηκε σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη και τους τύπους υδροφόρων της περιοχής έρευνας.

Πίνακας 3.5 Βαθμονόμηση της παραμέτρου Α.

Τύπος υδροφορέα - Α	
Χαρακτηρισμός	Τυπική βαθμονόμηση (Rating)
Καρστικός ασβεστόλιθος	10
Άμμοι-Χαλίκια	8
Συμπαγής ασβεστόλιθος-Ψαμμίτης	6
Μεταμορφωμένα-Πυριγενή	3
Συμπαγής σχιστόλιθος	2

Ο θεματικός χάρτης του υδροφόρου μέσου παρουσιάζεται στο σχήμα 3.4. Όπως είναι αναμενόμενο ο καρστικός ασβεστόλιθος βαθμονομείται με πολύ υψηλή τιμή (10) ενώ τα μεταμορφωμένα και πυριγενή πετρώματα καθώς και ο συμπαγής ασβεστόλιθος βαθμονομείται πολύ χαμηλότερα με τιμές 3 και 2 αντίστοιχα.



Σχήμα 3.4 Θεματικός βαθμονομημένος χάρτης της παραμέτρου Α.

❖ Έδαφος - (Soil)

Η παράμετρος έδαφος (εδαφικό υλικό του υδροφορέα), τοποθετείται χωρικά πάνω από τον υδροφόρο και αναφέρεται στο ανώτερο τμήμα της ακόρεστης ζώνης (προτελευταία παράμετρος). Επίσης σχετίζεται ιδιαίτερα με την ζώνη των ριζών και τις διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στο τμήμα αυτό. Το ρυπαντικό φορτίο διασχίζοντας την ζώνη των ριζών εξασθενεί, ενώ πολλές ουσίες αποδομούνται και απορροφούνται από μικροοργανισμούς λόγω της έντονης βιολογικής δράσης που επικρατεί εκεί. Το εδαφικό υλικό λειτουργεί σαν μια ζώνη

που φιλτράρει το νερό που κατεισδύει καθώς επίσης καθορίζει και την ποσότητα του νερού που φτάνει στον υδροφόρο. Είναι εμφανές πως όσο πιο μεγάλο πάχος έχει το εδαφικό κάλυμμα τόσο μεγαλύτερη προστασία παρέχει στον υδροφορέα επομένως τόσο πιο μικρή θα είναι η τρωτότητά του. Ακόμη, εδάφη που είναι πλούσια σε οργανικά υλικά είναι ικανά να εξασθενήσουν σταδιακά τη ρύπανση.

Επίσης, σημαντικό ρόλο στην προστασία που παρέχει η εδαφική ζώνη, έχει το ποσοστό λεπτόκοκκων υλικών. Η παρουσία ιλύος και αργίλου στο κάλυμμα αυξάνει το χρόνο κίνησης του ρύπου, καθώς τα υλικά αυτά έχουν την ικανότητα να προσροφούν και να κατακρατούν το νερό με αποτέλεσμα να μειώνεται το ρυπαντικό δυναμικό. Από την άλλη μεριά όμως, η παρουσία μεγάλου ποσοστού αργιλικών υλικών που έχουν στη δομή τους διογκούμενα ορυκτά (π.χ. μπετονίτης), λειτουργεί ακριβώς αντίθετα αυξάνοντας την τρωτότητα του υδροφορέα εξαιτίας των δευτερογενών ρωγμών που δημιουργούνται όταν αυτά χάνουν την υγρασία τους, αυξάνοντας έτσι την κατακόρυφη ταχύτητα του νερού, άρα και των ρύπων. Για την κατασκευή του θεματικού χάρτη και τη βαθμονόμηση της παραμέτρου S, χρησιμοποιήθηκαν ο εδαφολογικός χάρτης της περιοχής που παραχωρήθηκε από το Ινστιτούτο Χαρτογράφησης και Ταξινόμησης Εδαφών (I.X.T.E.) καθώς επίσης και στοιχεία από το ερευνητικό πρόγραμμα «Υδροχημική – υδρογεωλογική έρευνα της ευρύτερης περιοχής των σημείων ύδρευσης του δήμου Βόλου». Στο πίνακα 3.6 παρουσιάζονται τα είδη των εδαφών και η αντίστοιχη βαθμονόμησή τους.

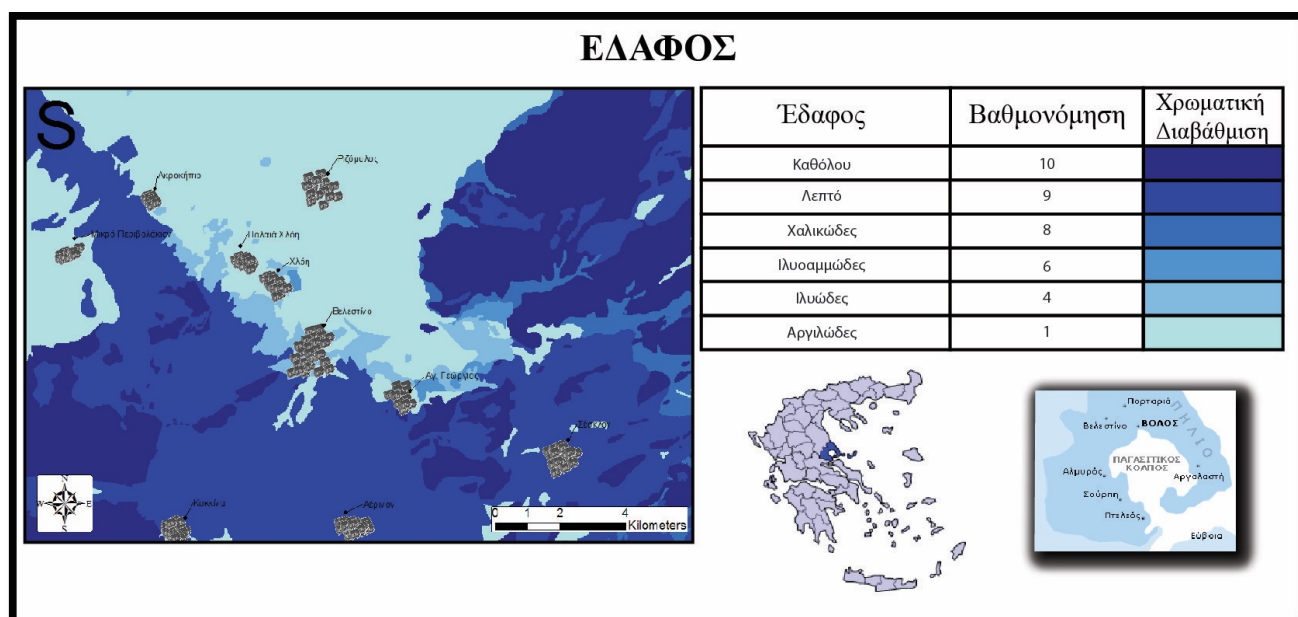
Πίνακας 3.6 Βαθμονόμηση της παραμέτρου S.

Εδαφικό υλικό - S	
Χαρακτηρισμός	Τυπική βαθμονόμηση (Rating)
Καθόλου	10
Λεπτό	9
Χαλικώδες	8
Ιλυοαμμώδες	6
Ιλυώδες	4
Αργιλώδες	1

Ο θεματικός χάρτης της παραμέτρου S παρουσιάζεται στο σχήμα 3.5. Στις περιοχές όπου δεν υπάρχει καθόλου εδαφικό κάλυμμα (περιοχές που συμπίπτουν με την εμφάνιση ασβεστολίθων και μαρμάρων) η τιμή βαθμονόμησης είναι πολύ υψηλή (10), ενώ σε περιοχές που υπάρχει ιλυώδες και αργιλώδες έδαφος οι τιμές βαθμονόμησης είναι πολύ χαμηλότερες, 4 και 1 αντίστοιχα.

❖ Κλίση αναγλύφου - (Topography)

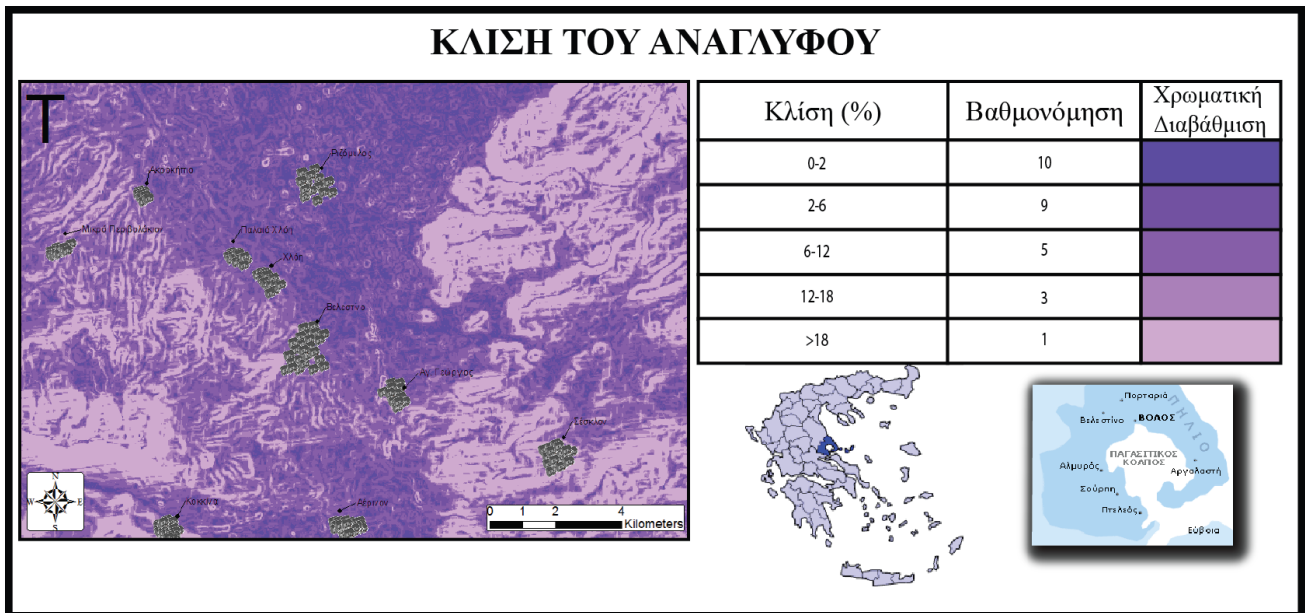
Η κλίση του αναγλύφου αποτελεί ακόμη μια παράμετρο που λαμβάνει υπόψη της η DRASTIC και αυτό γιατί επηρεάζει την κίνηση του ρύπου από το πρώτο στάδιο εισόδου του στο σύστημα. Οι μεγάλες τοπογραφικές κλίσεις γενικά ευνοούν την επιφανειακή απορροή και δυσχεραίνουν την κατείσδυση, και αυτό με τη σειρά του οδηγεί στη μείωση του ρυπαντικού φορτίου στον υδροφορέα αφού ο ρύπος θα ρέει στην επιφάνεια του εδάφους και λιγότερο θα κατεισδύει. Αντίθετα οι μικρές κλίσεις του αναγλύφου ευνοούν την κατείσδυση και το χρόνο παραμονής του ρύπου στον υδροφορέα. Ακόμη σε αρκετές περιπτώσεις η κλίση του αναγλύφου μπορεί να σχετίζεται με την υδραυλική κλίση του υπόγειου νερού με αποτέλεσμα, σε μεγαλύτερες τοπογραφικές κλίσεις να συναντώνται και μεγαλύτερες ταχύτητες στο υπόγειο νερό. Ο θεματικός χάρτης της παραμέτρου κατασκευάστηκε με τη χρήση του DEM (Digital Elevation Model) της περιοχής. Η βαθμονόμηση και οι κλάσεις της παραμέτρου παρουσιάζονται στο πίνακα 3.7 ενώ ο θεματικός χάρτης της παραμέτρου παρουσιάζεται στο σχήμα 3.6 Οι χαμηλότερες κλίσεις παρατηρούνται στο κεντρικό και βόρειο τμήμα της περιοχής έρευνας και οι τιμές βαθμονόμησής τους είναι οι υψηλότερες. Αντίθετα στα τμήματα βορειοανατολικά και νοτιοδυτικά της περιοχής όπου εμφανίζονται υψηλότερες κλίσεις, οι τιμές της βαθμονόμησης είναι πολύ χαμηλότερες.



Σχήμα 3.5 Θεματικός βαθμονομημένος χάρτης της παραμέτρου S.

Πίνακας 3.7 Βαθμονόμηση της παραμέτρου T.

Κλίση αναγλύφου - T	
Τιμή σε (%)	Τυπική βαθμονόμηση (Rating)
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
>18	1



Σχήμα 3.6 Θεματικός βαθμονομημένος χάρτης της παραμέτρου T.

❖ **Επίδραση της ακόρεστης ζώνης - (Impact of vadose zone)**

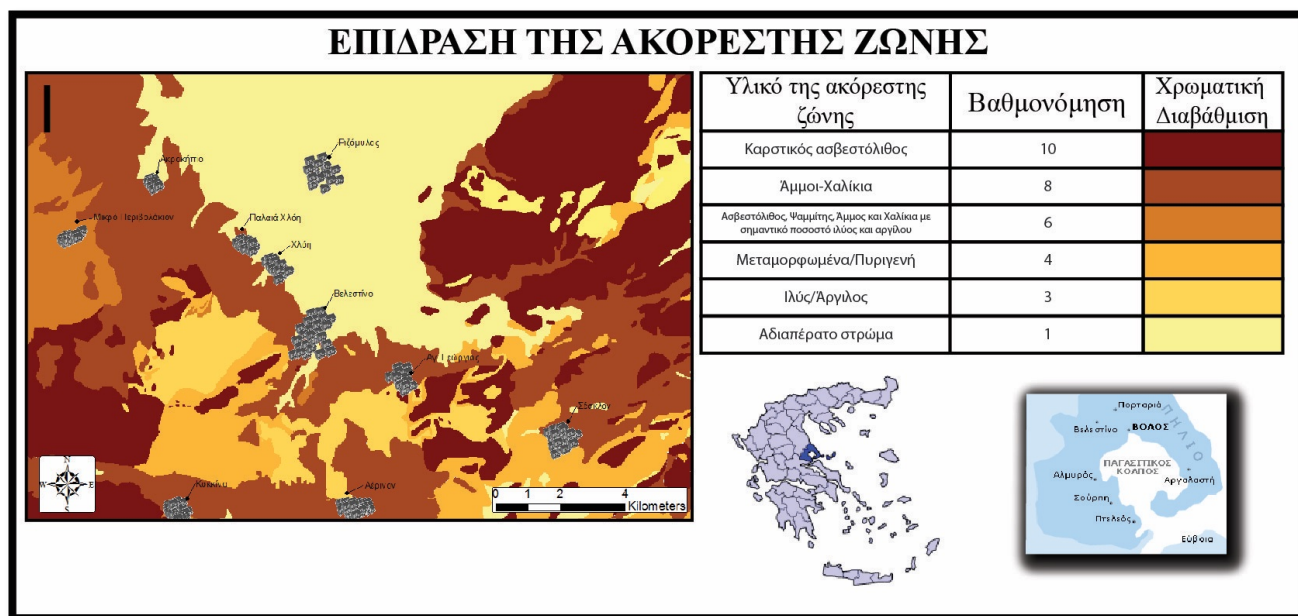
Η ακόρεστη ζώνη είναι άλλη μία πολύ σημαντική παράμετρος για τον καθορισμό της τρωτότητας ενός υδροφορέα. Ορίζεται ως η ακόρεστη περιοχή πάνω από τον υδροφόρο και στο ανώτερο τμήμα της βρίσκεται το εδαφικό κάλυμμα που περιγράφηκε παραπάνω (παράμετρος S). Ο λόγος που κάνει την ζώνη αυτή τόσο σημαντική, είναι ότι λόγω της βραδείας κίνησης του νερού, και εξαιτίας κάποιων διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα σε αυτή (προσρόφηση, ανταλλαγή κατιόντων, χημικές αντιδράσεις, μείωση παθογόνων μικροοργανισμών, βιοαποικοδόμηση, εξουδετέρωση, μηχανισμοί κατείσδυσης, οξυγόνωση, διασπορά κ.α.) συντελεί στο να μειώνει τη ρύπανση και την εισχώρηση ρυπαντών στο υδροφόρο σύστημα. Η λιθολογία της, η κοκκομετρία της, το πάχος της, τα χαρακτηριστικά του ρύπου, η συγκέντρωση

του ρύπου κ.α. είναι μερικοί από τους παράγοντες που επηρεάζουν το βαθμό εξασθένησης των ρύπων στην ακόρεστη ζώνη. Όπως παρουσιάζεται και στον πίνακα 3.8 τη μεγαλύτερη τιμή παίρνουν οι καρστικοί ασβεστόλιθοι ενώ τη μικρότερη παίρνουν οι υπό πίεση υδροφορείς ή αλλιώς το αδιαπέρατο στρώμα.

Στο σχήμα 3.7 παρουσιάζεται ο θεματικός χάρτης της παραμέτρου ο οποίος επιβεβαιώνει ότι οι περιοχές με ασβεστολιθικό και αμμώδες κάλυμμα παίρνουν πολύ υψηλές τιμές στην βαθμονόμηση ενώ οι περιοχές όπου η ακόρεστη ζώνη τους αποτελείται περισσότερο από λεπτόκοκκα υλικά ή αδιαπέρατο υπόβαθρο βαθμονομούνται πολύ χαμηλότερα.

Πίνακας 3.8 Βαθμονόμηση της παραμέτρου I.

Επίδραση της ακόρεστης ζώνης - I	
Χαρακτηρισμός	Τυπική βαθμονόμηση (Rating)
Καρστικός ασβεστόλιθος	10
Άμμοι-Χαλίκια	8
Ασβεστόλιθος, Ψαμμίτης, Άμμος και Χαλίκια με σημαντικό ποσοστό ιλύος και αργίλου	6
Μεταμορφωμένα-Πυριγενή	4
Ιλύς-Αργίλος	3
Αδιαπέρατο στρώμα	1



Σχήμα 3.7 Θεματικός βαθμονομημένος χάρτης της παραμέτρου I.

❖ Συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας - (Hydraulic Conductivity)

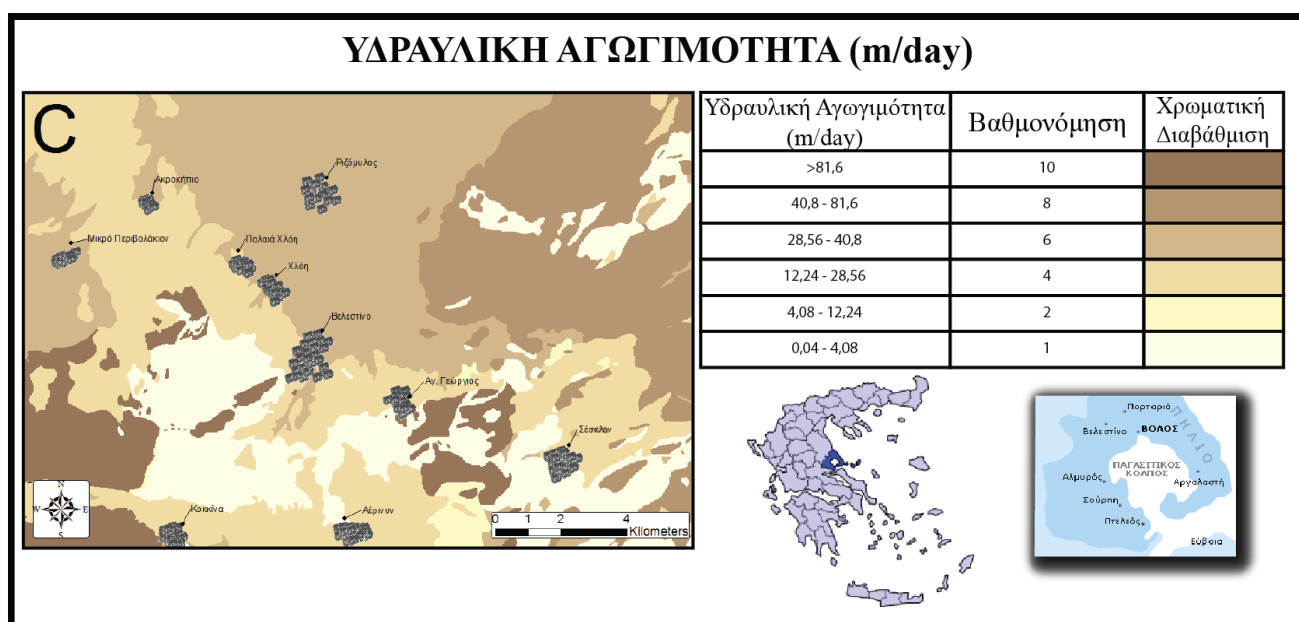
Ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας (k), αναφέρεται στην κορεσμένη ζώνη και

σχετίζεται με την ταχύτητα και την ικανότητα μετακίνησης του ρύπου μέσα στον υδροφόρο. Η τιμή του καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά του υδροφόρου συστήματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας τόσο πιο γρήγορα θα κινηθεί ο ρύπος μέσα στον υδροφόρο και συνεπώς τόσο μεγαλύτερη θα είναι η τρωτότητα του. Η υδραυλική αγωγιμότητα στη παρούσα έρευνα εκτιμήθηκε βιβλιογραφικά (Σούλιος 1996, Καλλέργης 1999), ανάλογα με το υλικό του υδροφορέα καθώς δεν υπήρχαν στοιχεία από δοκιμαστικές αντλήσεις στην περιοχή. Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης της παραμέτρου παρουσιάζονται στο πίνακα 3.9.

Πίνακας 3.9 Βαθμονόμηση της παραμέτρου C.

Υδραυλική αγωγιμότητα - C	
Τιμή σε (m/day)	Τυπική βαθμονόμηση (Rating)
>81,6	10
40,8 - 81,6	8
28,56 - 40,8	6
12,24 - 28,56	4
4,08 - 12,24	2
0,04 - 4,08	1

Ο θεματικός χάρτης της παραμέτρου C παρουσιάζεται στο σχήμα 3.8. Το νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής έρευνας όπου κυριαρχούν ασβεστόλιθοι έχει τις υψηλότερες τιμές βαθμονόμησης.



Σχήμα 3.8 Θεματικός βαθμονομημένος χάρτης της παραμέτρου C.

Το γεγονός ότι η παράμετρος της υδραυλικής αγωγιμότητας (k) συμπληρώθηκε βιβλιογραφικά, δημιουργεί μια αμφιβολία του κατά πόσο η εφαρμογή της μεθόδου DRASTIC στην περιοχή μπορεί να είναι αξιόπιστη και αντιπροσωπευτική. Για το λόγο αυτό η εφαρμογή της μεθόδου στην συγκεκριμένη περιοχή έρευνας προχώρησε ένα βήμα παραπάνω αφαιρώντας την παράμετρο της υδραυλικής αγωγιμότητας (C) από τις παραμέτρους της DRASTIC, κρατώντας ίδια την βαρύτητα των υπόλοιπων παραμέτρων, προσπαθώντας έτσι να συγκριθούν οι δύο τελικοί χάρτες DRASTIC και DRASTI. Για την επίτευξη της σύγκρισης των δύο χαρτών εφαρμόστηκε σε περιβάλλον GIS το εργαλείο Geometrical Interval χωρίζοντας με τον τρόπο αυτό τους δύο χάρτες σε 5 κλάσεις τον κάθε ένα, ώστε να μπορεί να συγκριθεί η τρωτότητα τους. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής αυτής παρουσιάζονται και συζητούνται σε επόμενο κεφάλαιο.

❖ Εκτίμηση της διακινδύνευσης υπόγειου νερού στην εξωτερική ρύπανση

Τέλος για την εκτίμηση της διακινδύνευσης του υπόγειου νερού στην εξωτερική ρύπανση, χρησιμοποιήθηκε ο τελικός χάρτης τρωτότητας DRASTIC και ο χάρτης χρήσεων γης (σχήμα 2.7.2), ο οποίος βαθμονομήθηκε (πίνακας 3.10) με βάση τη βιβλιογραφία (Secunda et al., 1998; Rupert 2001, Mclay et al, 2001; Panagopoulos et al., 2005; Antonakos & Lambrakis 2006 et al., 2012). Ο χάρτης βαθμονόμησης των χρήσεων γης παρουσιάζεται στο σχήμα 3.9.

Η παράμετρος «Χρήσεις Γης» (L), χρησιμοποιήθηκε ως όγδοη παράμετρος της DRASTIC με βαρύτητα πέντε (πίνακας 3.11) και προστέθηκε στον δείκτη DI της DRASTIC ώστε να κατασκευαστεί ο χάρτης διακινδύνευσης (Pollution Risk Map):

$$\text{DRASTIC-L} = D \times D_w + R \times R_w + A \times A_w + S \times S_w + T \times T_w + I \times I_w + C \times C_w + L \times L_w$$

(3.2)

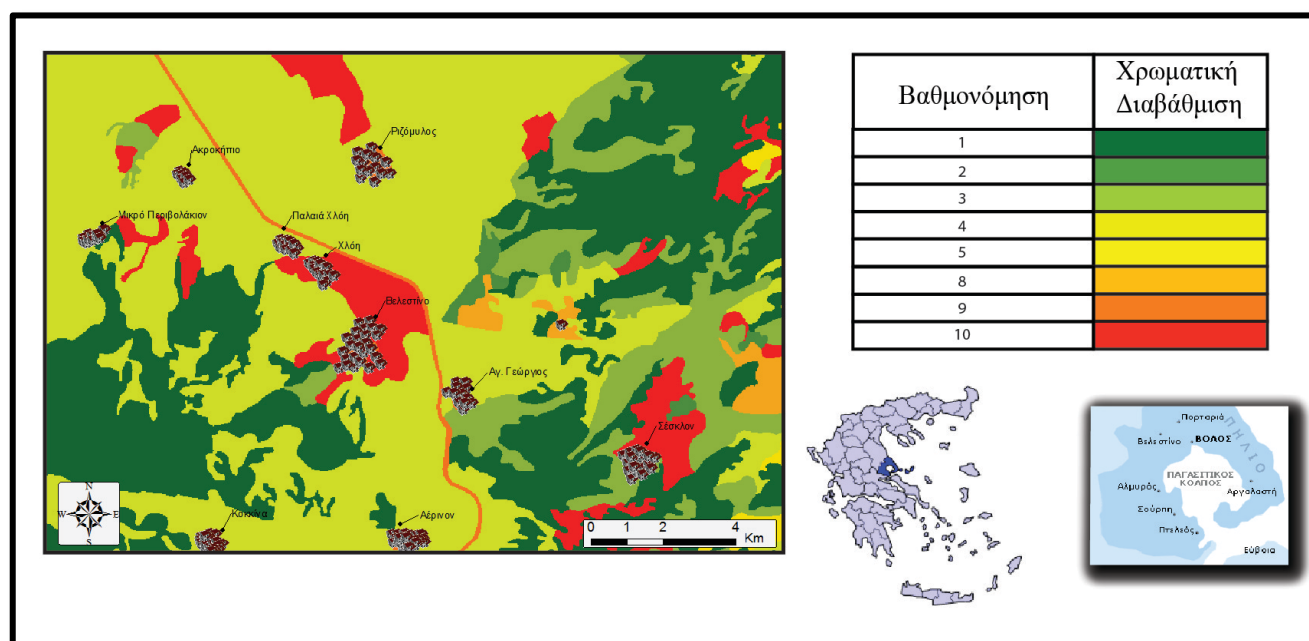
Πίνακας 3.11 Βαρύτητα κάθε παραμέτρου για τον υπολογισμό της διακινδύνευσης (DRASTIC-L).

Παράμετρος	Βαρύτητα
D - Βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού	5
R - Ενεργή κατείσδυση	4
A - Υδροφορέας	3
S - Έδαφος	2
T - Κλίση αναγλύφου	1
I - Επίδραση της ακόρεστης ζώνης	5
C - Συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας	3
L - Χρήσεις Γης	5

Με τον ίδιο τρόπο που κατασκευάστηκε ο τελικός χάρτης DRASTIC κατασκευάστηκε και ο χάρτης διακινδύνευσης, δηλαδή με τη χρήση του εργαλείου map algebra σε περιβάλλον ArcMap. Οι τελικοί χάρτες παρουσιάζονται στα αποτελέσματα.

Πίνακας 3.10 Βαθμονόμηση των χρήσεων γη

Χρήσεις Γης	Βαθμονόμηση
Σύνθετες καλλιέργιες-Αρδευόμενες εκτάσεις	10
ΧΥΤΑ	10
Διακοπτόμενη αστική οικοδόμηση	9
Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	8
Στρατιωτικές εγκαταστάσεις	8
Κτηνοτροφικές μονάδες	7
Κοιμητήρια	6
Ελαιώνες	5
Γεωργικές εκτάσεις	4
Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη	4
Φυσικοί βοσκότοποι	3
Οπωροφόρα δέντρα	3
Εκτάσεις εξόρυξης μεταλλευμάτων	2
Θαμνώδης εκτάσεις	2
Εκτάσεις με σκληροφυλλική βλάστηση	1
Δάσος πλατύφυλλων	1
Δάσος κωνοφόρων	1



Σχήμα 3.9 Βαθμονομημένος χάρτης των χρήσεων γης.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1. ΓΕΩΧΗΜΕΙΑ ΥΔΑΤΩΝ

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του pH, της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) και της θερμοκρασίας (T) για τα υπόγεια ύδατα καθώς και τις χημικές αναλύσεις των κύριων ιόντων και των βαρέων μετάλλων, παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο (πίνακας 4.1). Η ένδειξη bdl (below detection limits), στον πίνακα σημαίνει ότι η περιεκτικότητα του στοιχείου που μετρήθηκε είναι κάτω από το όριο ανιχνευσιμότητας.

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα pH, EC, T και των χημικών αναλύσεων των υδάτων (Ιούλιος 2008). **bdl**: κάτω από το όριο ανίχνευσης.

Αριθμός Γεώτρησης	pH	EC μS/cm	T (°C)	NO ₃ mg/L	SO ₄ mg/L	NO ₂ mg/L	F mg/L	HCO ₃ mg/L	Cl mg/L	Pb μg/L	Ni μg/L	Cu μg/L	Zn mg/L	Fe μg/L	Mn μg/L	Cr μg/L	Cd μg/L
G3	7,650	570,0	20,40	7,7700	7,8200	bdl	0,100	244,0	25,500	2,0	bdl	8,00	bdl	bdl	bdl	17,0	bdl
G9	7,060	2140,0	20,60	7,1300	34,600	bdl	0,090	329,0	281,00	bdl	bdl	9,00	0,020	14,0	bdl	7,0	bdl
G1	7,850	525,0	19,50	1,8000	8,2300	bdl	0,160	229,0	29,100	3,0	bdl	9,00	bdl	17,0	bdl	13,0	bdl
G6	7,460	655,0	18,90	2,3000	2,8800	bdl	0,080	328,0	19,300	bdl	bdl	9,00	bdl	81,0	41,0	bdl	bdl
G2	7,820	556,0	19,50	3,2200	4,9400	bdl	0,120	208,0	15,600	bdl	bdl	9,00	bdl	bdl	bdl	10,0	bdl
G4	7,630	1704,0	21,20	15,190	29,640	bdl	0,040	244,0	204,80	bdl	bdl	12,0	bdl	261,0	bdl	9,0	bdl
G10	7,460	1950,0	20,80	12,590	43,630	bdl	0,050	187,0	245,00	bdl	bdl	10,0	0,040	30,0	44,0	bdl	0,220
G7	7,110	1590,0	19,50	17,010	37,870	bdl	0,060	207,0	280,50	bdl	bdl	10,0	0,020	21,0	bdl	bdl	bdl

Αριθμός Γεώτρησης	Al μg/L	As μg/L	Ba μg/L	Be μg/L	Bi μg/L	B μg/L	Ca mg/L	Co μg/L	Li	Mg	Mo	K	Se	Sr	Tl	Ti	V	Na	Sb
G3	bdl	bdl	63,0	bdl	23,0	137,0	51,4	7,0	bdl	30,10	bdl	1,55	26,0	262,0	bdl	bdl	bdl	22,45	16,0
G9	bdl	bdl	126,0	bdl	31,0	222,0	106,0	7,0	9,0	56,30	bdl	7,50	bdl	445,0	bdl	bdl	bdl	161,30	bdl
G1	bdl	bdl	36,0	bdl	bdl	106,0	40,60	7,0	bdl	30,10	bdl	1,46	bdl	234,0	bdl	bdl	bdl	22,30	bdl
G6	bdl	bdl	111,0	bdl	29,0	88,0	72,30	7,0	bdl	36,50	bdl	1,26	17,0	228,0	bdl	bdl	bdl	15,50	6,0
G2	bdl	bdl	35,0	bdl	14,0	75,0	26,60	7,0	bdl	22,10	bdl	0,70	11,0	123,0	bdl	bdl	bdl	13,79	bdl
G4	bdl	bdl	65,0	bdl	16,0	95,0	70,90	7,0	bdl	37,40	bdl	2,25	bdl	218,0	bdl	bdl	bdl	68,47	bdl
G10	bdl	bdl	67,0	bdl	15,0	104,0	61,40	8,0	bdl	27,30	bdl	3,40	6,0	187,0	bdl	bdl	bdl	91,71	bdl
G7	bdl	bdl	87,0	bdl	bdl	125,0	101,30	8,0	8,0	45,10	bdl	4,96	9,0	339,0	bdl	bdl	bdl	115,0	bdl

4.1.1. ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Η τιμή του pH σε όλα τα δείγματα των γεωτρήσεων είναι μεγαλύτερη από επτά (7) και μικρότερη από οκτώ (8), το οποίο υποδηλώνει την αλκαλική συμπεριφορά των υδάτων αυτών. Σχετικά με το pH που στα υπόγεια ύδατα της περιοχής έρευνας είναι ουδέτερο, σύμφωνα με τον Connell et al. (1984), η μείωσή του αυξάνει την κινητικότητα και τον «ανταγωνισμό» μεταξύ ιόντων υδρογόνου και μεταλλικών ιόντων για τις καταλαμβανόμενες θέσεις. Επίσης η μείωση του pH μπορεί να διαλύσει τα σύμπλοκα μετάλλου-άνθρακα, απελευθερώνοντας έτσι ελεύθερα ιόντα μετάλλων στο νερό. Ακόμη, σύμφωνα με τον Μήτσιο (2004), σε όξινες συνθήκες τα βαρέα μέταλλα ως κατιόντα είναι περισσότερο κινητικά, ενώ αυξάνοντας το pH περιορίζεται η

βιοδιαθεσιμότητά τους. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) των δειγμάτων κυμαίνεται από 525 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (γεώτρηση Γ1) έως 2140 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (γεώτρηση Γ9) με την τελευταία να βρίσκεται στο ανατολικότερο άκρο των δειγμάτων νερού δυτικότερα της πόλης του Βόλου. Τέλος η θερμοκρασία των υπόγειων υδάτων κυμαίνεται από 18,9°C (γεώτρηση Γ6) έως 21,2°C (γεώτρηση Γ4).

4.1.2. ΚΥΡΙΑ ΙΟΝΤΑ

Η συγκέντρωση του νατρίου (Na) στα υπόγεια ύδατα κυμαίνεται από 13,79 mg/l (γεώτρηση Γ2) έως 161,3 mg/l (γεώτρηση Γ9). Η χαμηλότερη συγκέντρωση χλωρίου (Cl) είναι 15,6 mg/l (γεώτρηση Γ2) ενώ οι γεωτρήσεις Γ4, Γ7, Γ9 και Γ10 έχουν τις μέγιστες τιμές με 204,8 mg/l, 280,5 mg/l, 281 mg/l, 245 mg/l αντίστοιχα. Να σημειωθεί ότι σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση και το ΦΕΚ3322/2011 για τα υπόγεια ύδατα, το ανώτατο όριο για την περιεκτικότητα Cl είναι 250 mg/l, και οι γεωτρήσεις Γ7, Γ9 και Γ10 είναι πάνω από το όριο αυτό. Το ασβέστιο (Ca) κυμαίνεται από 26,6 mg/l (γεώτρηση Γ2) έως 106 mg/l (γεώτρηση Γ9) ενώ το μαγνήσιο (Mg) κυμαίνεται από 22,1 mg/l (γεώτρηση Γ2) έως 56,3 mg/l (γεώτρηση Γ9).

Τα νιτρικά ιόντα (NO_3) παίρνουν τη χαμηλότερη τιμή (1,8 mg/l) στη γεώτρηση Γ1 και την υψηλότερη (17,01 mg/l) στη γεώτρηση Γ7 χωρίς όμως να ξεπερνούν το ανώτατο όριο των 50 mg/l που έχει θεσπίσει η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΦΕΚ 3322/2011). Η περιεκτικότητα των θεικών ιόντων (SO_4) δεν ξεπερνά τα 43,63 mg/l (γεώτρηση Γ10).

4.1.3. ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ – ΜΕΤΑΛΛΟΕΙΔΗ

Η συγκέντρωση του αρσενικού (As) δεν ξεπερνά σε καμία γεώτρηση το ανώτατο όριο των 10 $\mu\text{g}/\text{l}$ παρ'αυτά στην γεώτρηση Γ9 παρατηρείται η μεγαλύτερη περιεκτικότητα με 8,16 $\mu\text{g}/\text{l}$. Ο ολικός σίδηρος (Fe), εμφανίζει την μεγαλύτερη περιεκτικότητά του στη γεώτρηση Γ4 (261 $\mu\text{g}/\text{l}$) η οποία ξεπερνά και το ανώτατο όριο για τα ύδατα ανθρώπινης κατανάλωσης (οδηγία: 98/83/EK), που είναι 200 $\mu\text{g}/\text{l}$. Το μαγγάνιο (Mn) επίσης παρουσιάζει υψηλές συγκεντρώσεις με 41 $\mu\text{g}/\text{l}$ και 44 $\mu\text{g}/\text{l}$ στη Γ6 και Γ10 γεώτρηση αντίστοιχα, χωρίς να ξεπερνάει το όριο των 50 $\mu\text{g}/\text{l}$ (οδηγία: 98/83/EK). Το χρώμιο (Cr) παρουσιάζει τις υψηλότερες συγκεντρώσεις του στις γεωτρήσεις Γ1, Γ2 και Γ3 με τιμές 13 $\mu\text{g}/\text{l}$, 10 $\mu\text{g}/\text{l}$, 17 $\mu\text{g}/\text{l}$ αντίστοιχα. Επίσης ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι περιεκτικότητες του αντιμονίου (Sb) και του σελήνιου (Se). Το αντιμόνιο έχει τη μεγαλύτερη συγκέντρωση στην γεώτρηση Γ3 με 16 $\mu\text{g}/\text{l}$ τη στιγμή που το ανώτατο όριο για

τα πόσιμα ύδατα είναι 5 $\mu\text{g/l}$. Το σελήνιο στις γεωτρήσεις Γ3, Γ6 και Γ2 παίρνει τις τιμές 26 $\mu\text{g/l}$, 17 $\mu\text{g/l}$, και 11 $\mu\text{g/l}$ αντίστοιχα, όταν το ανώτατο όριο για τα πόσιμα ύδατα είναι 10 $\mu\text{g/l}$.

4.1.4. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ Piper

Ένα από τα πιο χρησιμοποιούμενα και εύκολα στη χρήση υδροχημικά διαγράμματα για την άμεση αναγνώριση των ομοιοτήτων και των διαφορών που παρουσιάζουν τα δείγματα νερού και της ανάμειξης δύο ή περισσότερων διαφορετικών τύπων νερού είναι το τριγωνικό διάγραμμα Piper (1994), (Δημόπουλος 1983, Καλλέργης 1986, Δημόπουλος κ.α. 2008).

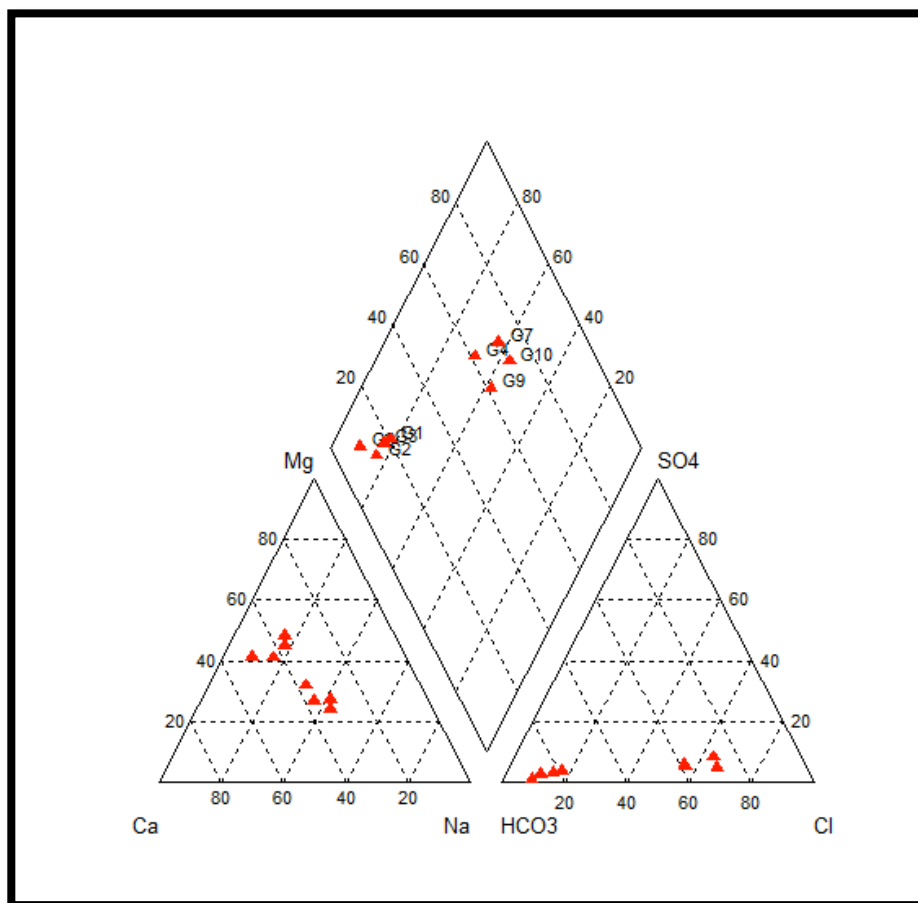
Στο αριστερό τρίγωνο (σχήμα 4.1) προβάλλονται τα κατιόντα εκφρασμένα επί τις εκατό του συνόλου των κατιόντων σε meq/l , ενώ στο δεξιό τρίγωνο προβάλλονται τα ανιόντα κατά τον ίδιο τρόπο. Στον κεντρικό ρόμβο προβάλλονται τα δύο σημεία των τριγώνων και κάθε θέση από αυτά αντιστοιχεί σε ένα διαφορετικό τύπο νερού.

Το διάγραμμα Piper είναι χρήσιμο όπως αναφέρθηκε για τον εντοπισμό του υδροχημικού τύπου των υπόγειων υδάτων (Adams et al. 2001, Martinez and Bocanegra 2002, Leboeuf 2004), αλλά είναι ακόμη χρήσιμο και για την ερμηνεία των υδροχημικών σχέσεων μεταξύ των υπόγειων υδάτων όπως (Custodio 1987):

- i. Ανάμειξη διαφορετικών τύπων νερού
- ii. Κατιοντική ανταλλαγή
- iii. Αντιδράσεις καθίζησης και διάλυσης
- iv. Θευκή αναγωγή

Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα Piper με τα δείγματα νερού της περιοχής έρευνας. Στο κεντρικό ρόμβο, στον οποίο προβάλλονται τα σημεία των τριγώνων, διακρίνονται δύο ομάδες υδάτων. Η μία ομάδα περιλαμβάνει τις γεωτρήσεις Γ1, Γ2, Γ3, Γ6 και η άλλη ομάδα τις γεωτρήσεις Γ4, Γ7, Γ9, Γ10. Οι χημικοί τύποι της κάθε γεώτρησης είναι οι εξής: **(Γ1,Γ2,Γ3):** Mg-Ca-HCO_3 , **Γ6:** Ca-Mg-Fe-HCO_3 , **Γ4:** Fe-Ca-Mg-Cl-HCO_3 , **(Γ7,Γ9):** Ca-Na-Mg-Cl-HCO_3 , **Γ10:** Na-Ca-Cl-HCO_3 . Έτσι ο γενικός χημικός τύπος που αντιπροσωπεύει την πρώτη ομάδα μπορεί να είναι $(\text{Ca,Mg})\text{-HCO}_3$ (ασβεστομαγνησιούχο-οξυανθρακικό), και για την δεύτερη ομάδα Ca(Na)-Cl (ασβεστονατρίουχο-χλωριούχο). Τα νερά της πρώτης ομάδας είναι γλυκά, «φρέσκα» νερά, που δεν φαίνεται να έχουν αναμειχθεί με άλλου τύπου ύδατα ενώ τα νερά της δεύτερης ομάδας φαίνεται να είναι νερά ανάμειξης, είτε να αποτελούν παλιές αλμύρες καθώς έχουν αυξημένα χλωριόντα σε συνδυασμό με το αυξημένο τους νάτριο. Είναι χρήσιμο να αναφερθεί ότι οι γεωτρήσεις της δεύτερης ομάδας βρίσκονται κοντά στην βιομηχανική περιοχή

του Βόλου ενώ οι γεωτρήσεις της πρώτης ομάδας βρίσκονται, ως επί το πλείστον, σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις (σχήμα 2.20, 2.22).



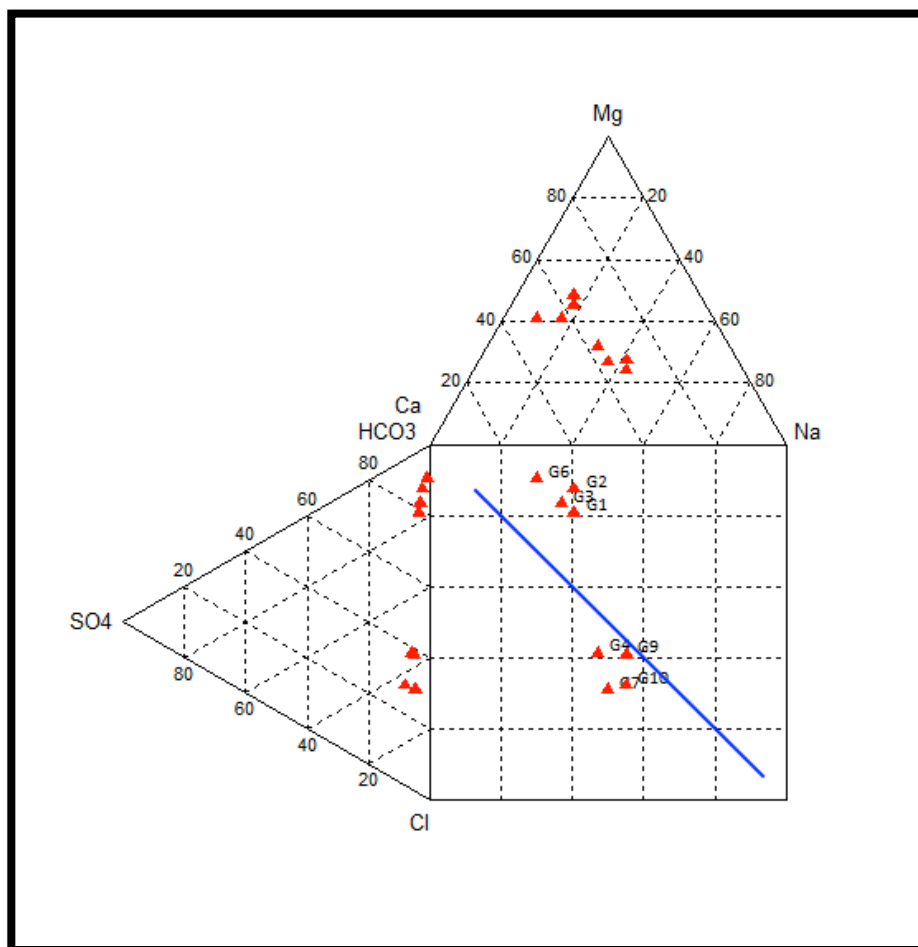
Σχήμα 4.1 Διάγραμμα Piper.

4.1.5. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ Durov

Στα υδροχημικά διαγράμματα Durov πραγματοποιείται αρχικά η τοποθέτηση των ιόντων στα δύο τρίγωνα (σχήμα 4.2) και στη συνέχεια η προβολή τους στο κεντρικό τετράγωνο για την εύρεση του χημικού τύπου του νερού κάθε δείγματος. Το παρακάτω σχήμα είναι η πιο απλή μορφή του διαγράμματος Durov.

Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα Durov για τις γεωτρήσεις της περιοχής έρευνας. Όπως και στο διάγραμμα Piper έτσι και εδώ διακρίνονται δύο ομάδες νερού. Η πρώτη ομάδα (Γ1, Γ2, Γ3, Γ6) προβάλλεται στο τετράγωνο διάγραμμα πάνω από την μπλε διαγώνιο, ενώ η δεύτερη ομάδα (Γ4, Γ7, Γ9, Γ10) προβάλλεται οριακά κάτω από τη μπλε διαγώνιο. Σύμφωνα με το πρότυπο ερμηνείας του διαγράμματος Durov, τα δείγματα της πρώτης ομάδας ανήκουν σε ανανεώσιμα γλυκά νερά όπου κυριαρχούν τα ιόντα Na και HCO_3 και κατά δεύτερο

λόγω Ca, και η θέση τους στο διάγραμμα φανερώνει διαδικασίες ανταλλαγής ιόντων. Αντίθετα τα νερά της δεύτερης ομάδας φαίνεται να αποτελούν νερά ανάμειξης και τα ιόντα που κυριαρχούν είναι Cl και Na.



Σχήμα 4.2 Διάγραμμα Durov.

4.1.6. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ Schoeller

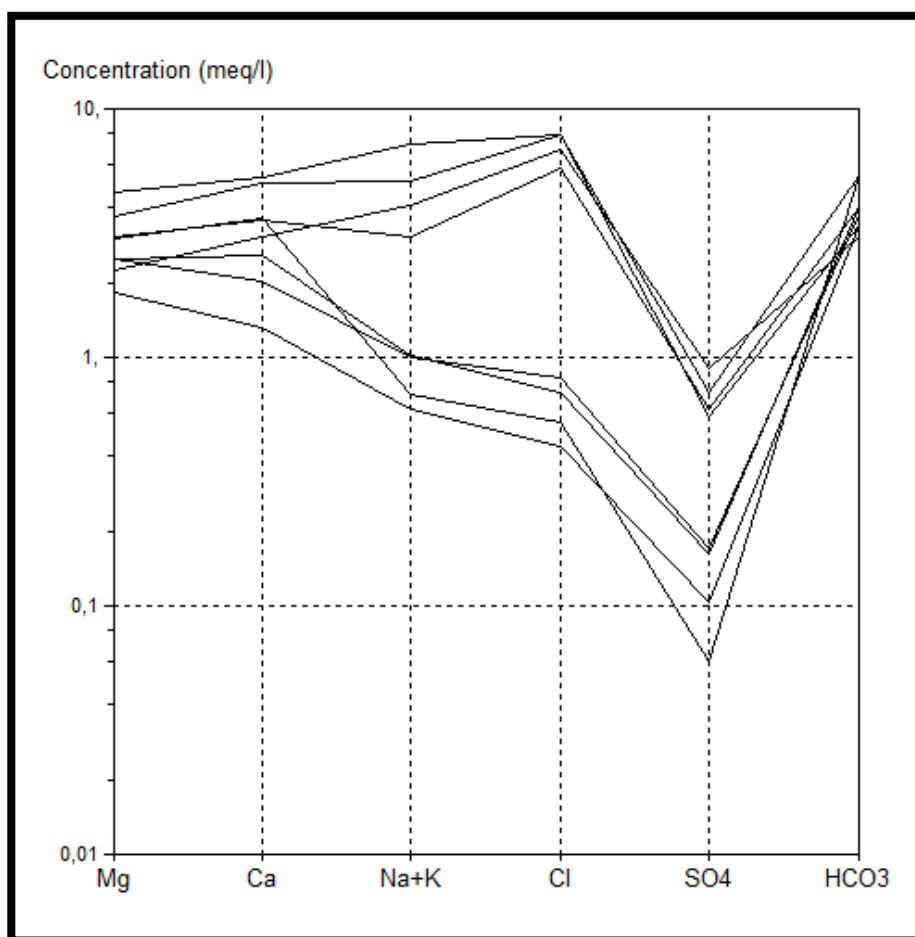
Το υδροχημικό διάγραμμα Schoeller, όπως και τα δύο προηγούμενα διαγράμματα, στοχεύει στο να απεικονίσει με όσο το δυνατόν περισσότερη σαφήνεια τους διαφορετικούς τύπους του υπόγειου νερού. Το διάγραμμα αυτό είναι στην πράξη ένα ημιλογαριθμικό διάγραμμα που στον άξονα των τετμημένων τοποθετείται σε κανονικά διαστήματα το δέκατο της συγκέντρωσης των ιόντων εκφρασμένα σε meq/l, και στον άξονα των τεταγμένων που είναι σε λογαριθμική κλίμακα τοποθετείται ο αριθμός των meq/l των ιόντων (Λαμπράκης 1994).

Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα Schoeller για τα υπόγεια ύδατα της περιοχής έρευνας. Όπως και στα άλλα δύο διαγράμματα (Piper - Durov), διαχωρίζονται και εδώ εμφανώς

οι δύο ομάδες υδάτων. Η πρώτη ομάδα (Γ1, Γ2, Γ3, Γ6) είναι αυτή με τα λιγότερα ιόντα Na, K, Cl και SO₄, ενώ η δεύτερη ομάδα (Γ4, Γ7, Γ9, Γ10) βρίσκεται πιο ψηλά στο διάγραμμα με αυξημένα ιόντα Na, K, Cl, SO₄. Ο ξεκάθαρος αυτός διαχωρισμός των δύο ομάδων και σε αυτό το διάγραμμα ενισχύει την πιθανότητα ότι τα νερά της δεύτερης ομάδας προέρχονται από εγκλωβισμένα νερά (παλιές αλμύρες), ενώ αυτά της πρώτης ομάδας είναι γλυκά νερά και ανανεώνονται με κανονικό τρόπο.

4.1.7. ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΧΗΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

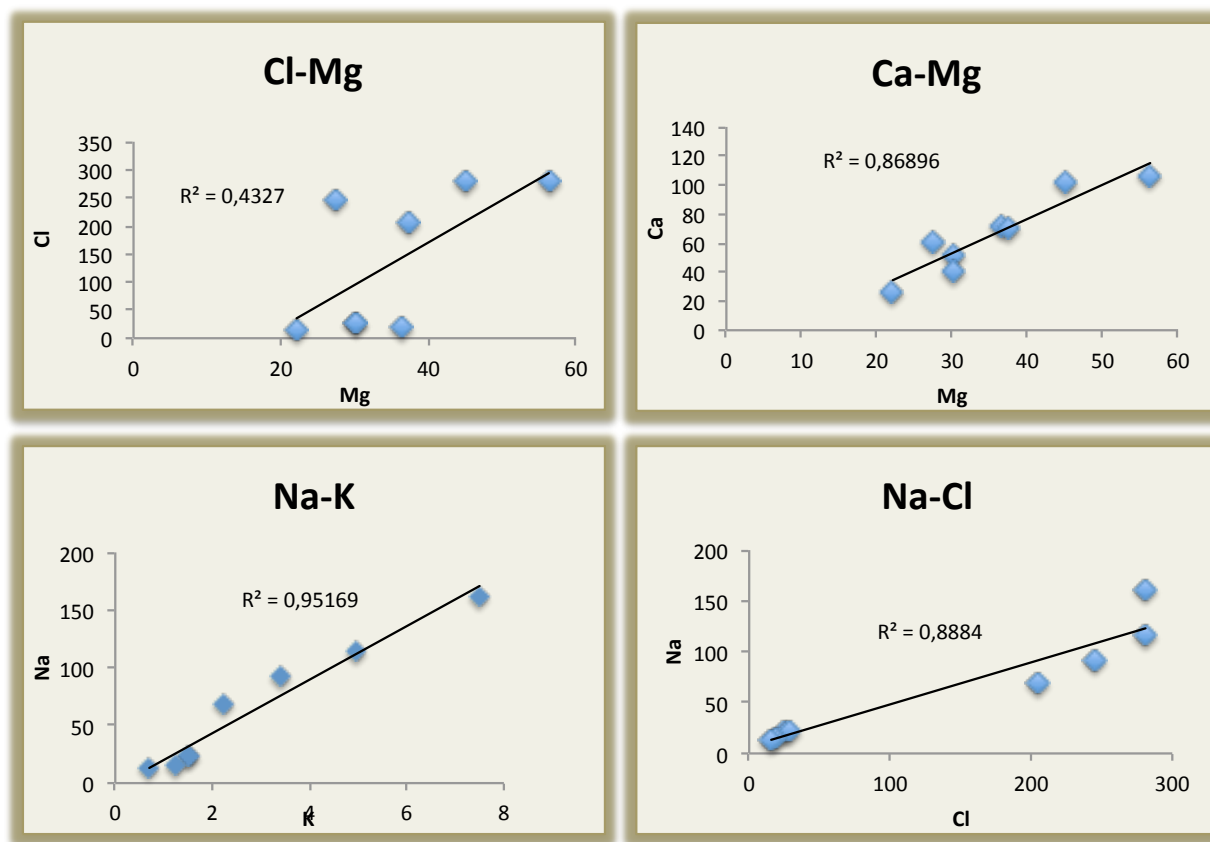
Συσχετίζοντας τις συγκεντρώσεις των χημικών στοιχείων ερευνάται το κατά πόσο σχετίζονται δύο στοιχεία μεταξύ τους, και σε δεύτερο στάδιο εξετάζεται η πιθανή προέλευση των στοιχείων αυτών.



Σχήμα 4.3 Διάγραμμα Scholler.

Λόγω της ύπαρξης υπερβασικών – οφιολιθικών και ασβεστολιθικών πετρωμάτων στη περιοχή έρευνας η συσχέτιση ασβεστίου – μαγνησίου (Ca-Mg) είναι αρκετά καλή (σχήμα 4.4).

Το χλώριο όπως παρατηρείται σχετίζεται καλά με το νάτριο καθώς επίσης και με το μαγνήσιο (σχήμα 4.4) όπως καλή είναι και η συσχέτιση νατρίου - καλίου (Na-K). Οι θετικές αυτές συσχετίσεις πιθανά να συνδέονται με την ύπαρξη κάποιων εγκλωβισμένων νερών (παλαιών αλμύρων) στα δείγματα Γ4, Γ7, Γ9, Γ10 όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.



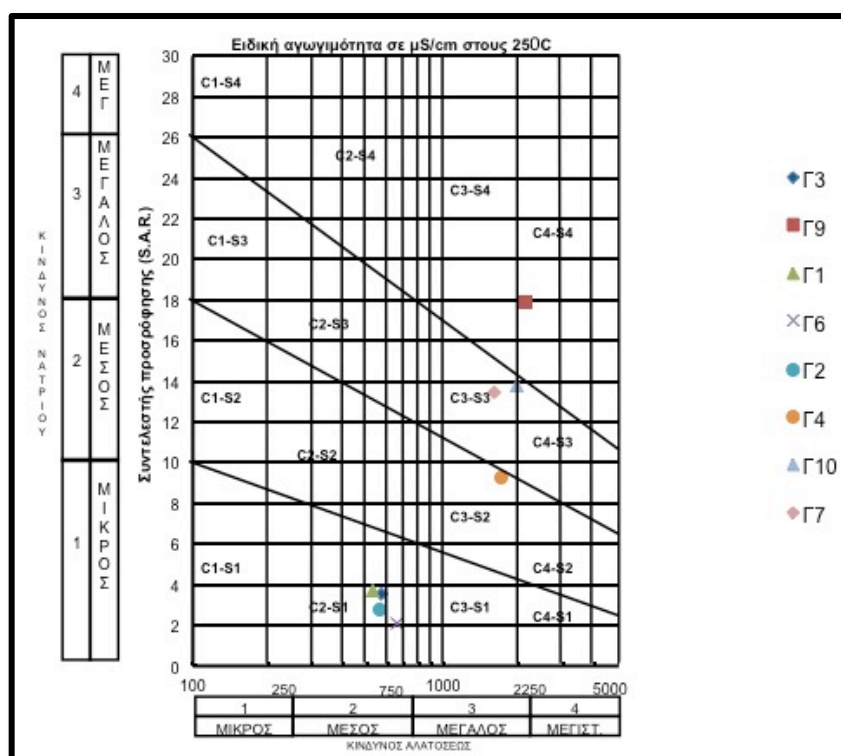
Σχήμα 4.4 Συσχετίσεις χημικών στοιχείων στα δείγματα των γεωτρήσεων.

4.1.8. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ SAR – Wilcox

Το διάγραμμα SAR χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της καταλληλότητας του νερού για άρδευση. Το συγκεκριμένο διάγραμμα έχει προταθεί από το U.S. Salinity Laboratory και εξετάζει την καταλληλότητα του νερού μέσα από δύο παραμέτρους, οι οποίες είναι ο κίνδυνος αλκαλίωσης και ο κίνδυνος αλατότητας. Το διάγραμμα Wilcox χρησιμοποιείται και αυτό για τον προσδιορισμό της καταλληλότητας και την ταξινόμηση του αρδευτικού νερού. Το διάγραμμα Wilcox λαμβάνει υπόψη του την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC $\mu\text{S}/\text{cm}$) και την επί της εκατό (%) περιεκτικότητα Νατρίου (Na).

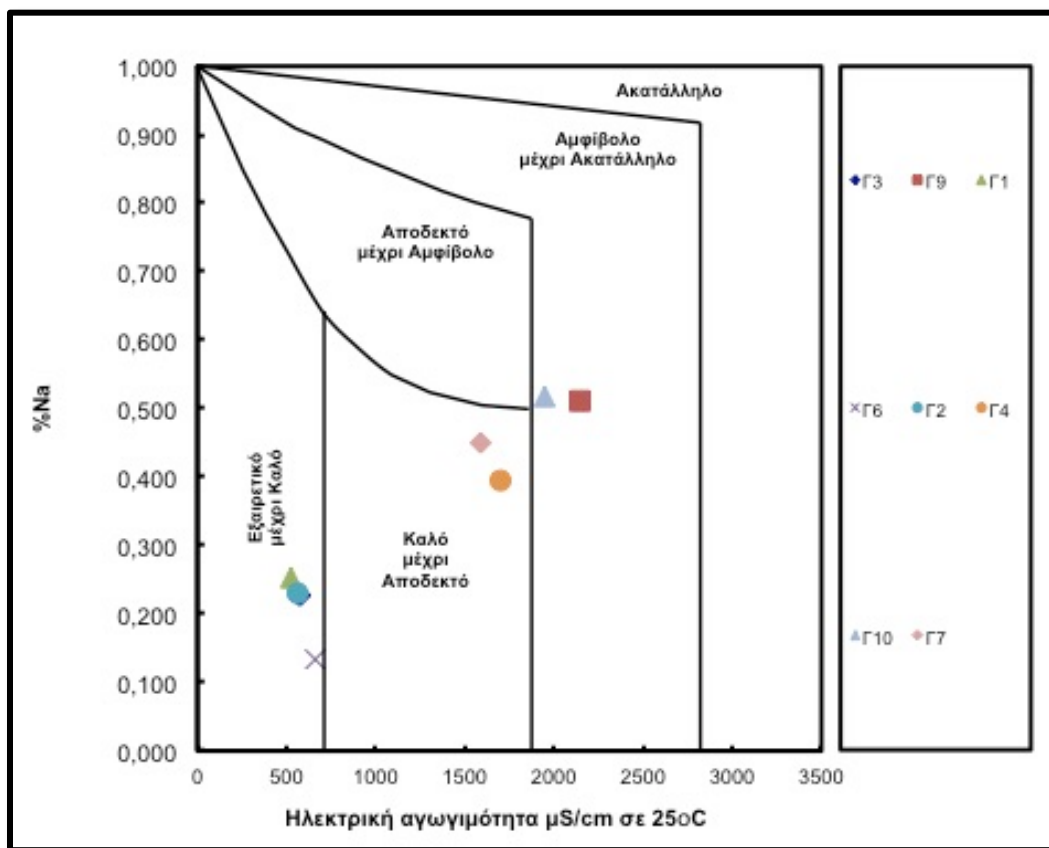
Στο σχήμα 4.5 παρουσιάζεται το διάγραμμα SAR με τα δείγματα των γεωτρήσεων της περιοχής έρευνας ενώ στο σχήμα 4.6 παρουσιάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα Wilcox. Τα νερά

των γεωτρήσεων Γ1, Γ2 και Γ3 κατατάσσονται με βάση το διάγραμμα SAR στην κατηγορία C2-S1 με μέσο κίνδυνο αλατόσεως (≈ 750) και μικρό κίνδυνο νατρίου, ενώ με βάση το διάγραμμα Wilcox χαρακτηρίζονται ως εξαιρετικά μέχρι καλά για μικρό συντελεστή προσρόφησης. Η γεώτρηση Γ4 σύμφωνα με το διάγραμμα SAR έχει μεγάλο κίνδυνο αλάτωσης και μικρό κίνδυνο νατρίου και η Γ7 έχει μεγάλο κίνδυνο αλάτωσης και μέσο κίνδυνο νατρίου ενώ το νερό και των δύο σύμφωνα με το διάγραμμα Wilcox θεωρείται καλό έως αποδεκτό για άρδευση.



Σχήμα 4.5 Διάγραμμα SAR (US Salinity Laboratory Staff, 1954).

Η γεώτρηση Γ10 έχει μεγάλο κίνδυνο αλάτωσης και μέσο κίνδυνο νατρίου σύμφωνα με το SAR, ενώ στο διάγραμμα Wilcox κρίνεται ως αμφίβολη μέχρι ακατάλληλη για άρδευση. Τέλος το νερό της γεώτρησης Γ9 σύμφωνα με το διάγραμμα SAR, έχει μέγιστο κίνδυνο αλάτωσης και μεγάλο κίνδυνο νατρίου ενώ σύμφωνα με το διάγραμμα Wilcox κρίνεται ως αμφίβολο μέχρι ακατάλληλο για άρδευση.



Σχήμα 4.6 Διάγραμμα Wilcox (Wilcox, 1948).

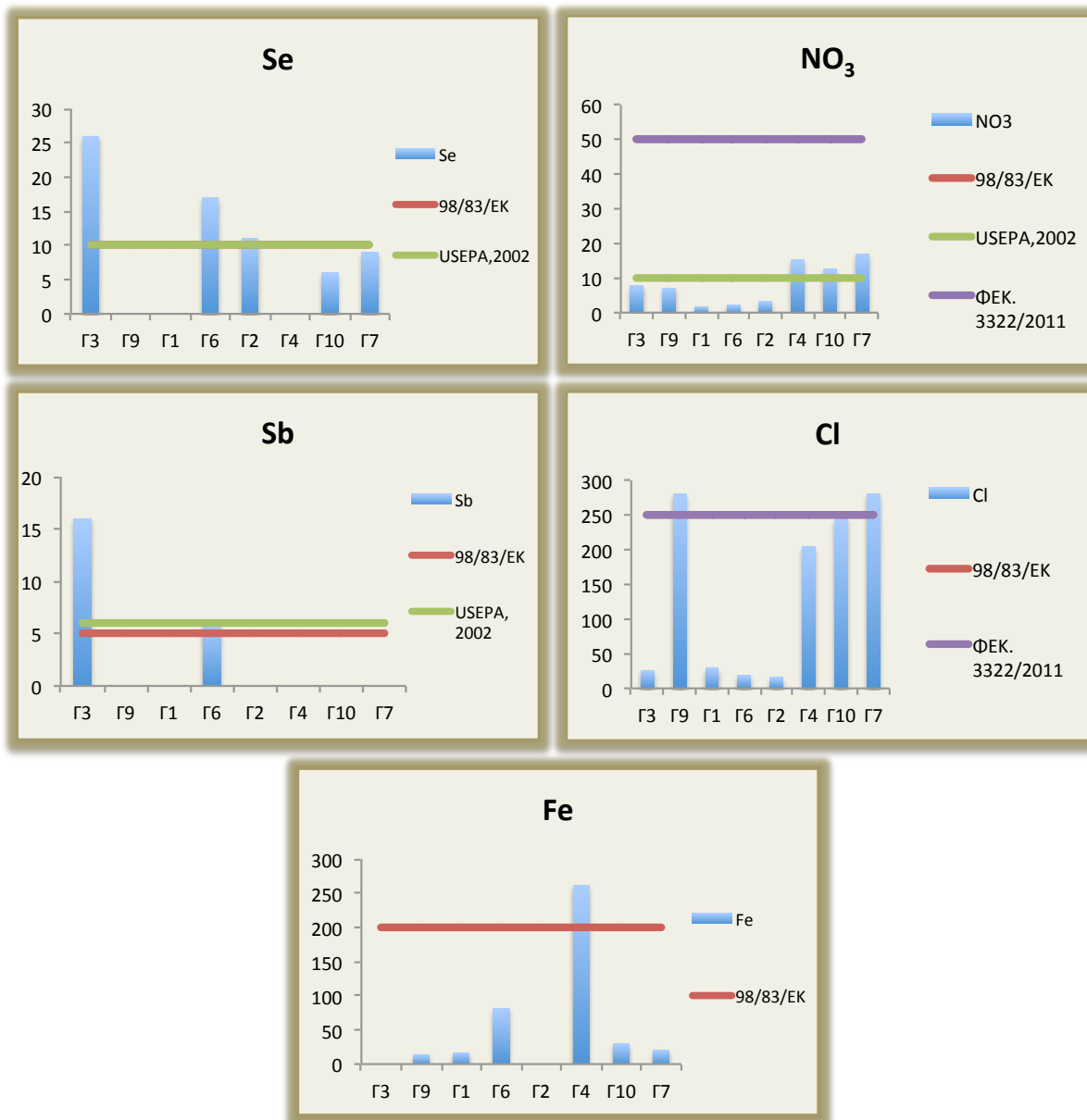
4.1.9. ΑΝΩΤΑΤΑ ΟΡΙΑ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΩΝ ΧΗΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΑ ΥΔΑΤΑ

Όπως αναφέρθηκε και στην περιγραφή των αποτελεσμάτων, υπάρχουν κάποια χημικά στοιχεία ή ιόντα που υπερβαίνουν μερικά ανώτατα όρια για τα ύδατα, είτε πρόκειται για την ανθρώπινη κατανάλωση είτε για όρια της Ευρωπαϊκής Ένωσης στα υπόγεια ύδατα.

Πιο συγκεκριμένα στο σχήμα 4.7 παρουσιάζονται τα στοιχεία που υπερβαίνουν είτε τα όρια της οδηγίας 98/83/EK του συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης είτε του ΦΕΚ 3322-2011 που ορίζει τις ανώτερες αποδεκτές τιμές για τη συγκέντρωση συγκεκριμένων ρύπων, ομάδων ρύπων ή δεικτών ρύπανσης σε υπόγεια ύδατα είτε τέλος της USEPA (United States Environmental Protection Agency) που με την οδηγία USEPA 2002 ορίζει συγκεκριμένες ανώτατες τιμές για τα πόσιμα ύδατα.

Το σελήνιο (Se) και τα νιτρικά ιόντα (NO_3) υπερβαίνουν τα όρια που θέτει η USEPA 2002 (σχήμα 4.7). Το σελήνιο σε τρεις γεωτρήσεις (Γ3, Γ2, Γ6) βρίσκεται πάνω από το όριο των 10

μg/l και τα νιτρικά (γεωτρήσεις Γ4, Γ7, Γ10) ξεπερνούν το όριο των 10 mg/l. Το αντιμόνιο (Sb) ξεπερνά στις γεωτρήσεις Γ3 και Γ6 το όριο της οδηγίας 98/83/EK και της USEPA 2002 που είναι 5 μg/l και 6 μg/l αντίστοιχα. Επίσης το χλώριο (Cl), σύμφωνα με το όριο του ΦΕΚ 3322/2011 (250 mg/l), είναι σε δύο γεωτρήσεις αυξημένο (Γ9, Γ7) ενώ η γεώτρηση Γ10 βρίσκεται οριακά κάτω από αυτό με τιμή 245 mg/l. Τέλος ένα δείγμα σιδήρου (Fe) (γεώτρηση Γ4), φαίνεται να υπερβαίνει τα όρια της οδηγίας 98/83/EK που είναι 200 μg/l.



Σχήμα 4.7 Ανώτατα όρια υδάτων

4.2. ΓΕΩΧΗΜΕΙΑ ΕΔΑΦΩΝ

Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων εδάφους για τα τρία βάθη δειγματοληψίας παρουσιάζονται στο πίνακα 4.2 – 4.4. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν την ανάλυση που έγινε στα δείγματα εδάφους με την διαδικασία μερικής διάσπασης (Aqua Regia Digestion). Τα αποτελέσματα των αναλύσεων με την διαδικασία της ολικής διάσπασης (Near Total Digestion) χρησιμοποιήθηκαν μόνο για να βρεθούν τα οξείδια των μετάλλων που ήταν απαραίτητα για να συσχετιστούν με τα βαρέα μέταλλα. Σε όλες τις υπόλοιπες συσχετίσεις χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της μερικής διάσπασης. Η επιλογή αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι οι αναλύσεις με τη μέθοδο της μερικής διάσπασης δείχνουν τις συγκεντρώσεις των περιβαλλοντικά διαθέσιμων στοιχείων. Έτσι η παρούσα εργασία μέσα από την περιβαλλοντική και γεωχημική έρευνα επικεντρώνεται στο να προσδιορίσει το περιβαλλοντικά διαθέσιμο ποσοστό των βαρέων μετάλλων, αυτό δηλαδή που θα μπορούσε να διαφύγει και να διατεθεί στο περιβάλλον κάτω από συνθήκες που το επιτρέπουν. Επίσης μέσα από τις συσχετίσεις και τα διαγράμματα των χημικών στοιχείων και των βαρέων μετάλλων γίνεται προσπάθεια να προσδιοριστεί η ενδεχόμενη πηγή ρύπανσης, φυσικής ή ανθρωπογενούς προέλευσης.

4.2.1. ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΜΕ ΟΞΕΙΔΙΑ (Al_2O_3 - Fe_2O_3 - MnO)

Λόγω του ότι τα άμορφα οξείδια των Fe, Mn και Al αποτελούν κυρίαρχες φάσεις που περιέχονται στα λεπτόκοκκα ιζήματα και λόγω του ότι έχουν την ικανότητα να δεσμεύουν σημαντικές ποσότητες βαρέων μετάλλων όπως As, Co, Cr κ.ά. (Pierce and Moore 1980, Smedley and Kinniburgh 2002, Gault et al. 2003), κρίθηκε αρχικά απαραίτητο να συσχετιστούν με τις συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων στα δείγματα με σκοπό να διερευνηθεί ποιο ποσοστό των βαρέων μετάλλων είναι δεσμευμένο στις κρυσταλλικές φάσεις και άρα βρίσκεται φυσικά στο περιβάλλον. Για τη συσχέτιση αυτή χρησιμοποιήθηκαν οι ολικές συγκεντρώσεις των οξειδίων και οι μερικές συγκεντρώσεις των μετάλλων.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι συσχετίσεις των οξειδίων με τα βαρέα μέταλλα για όλα τα δείγματα εκτός των VS1, VS2 και VS5 τα οποία παρουσιάζονται με πορτοκαλί χρώμα στα διαγράμματα και δεν συμμετέχουν στη συσχέτιση. Τα δείγματα αυτά βρίσκονται κοντά στη βιομηχανική περιοχή και στη χαλυβουργία Ελλάδος (σχήμα 2.22 & 3.1)

Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων από δείγματα στην επιφάνεια του εδάφους. **bdl**: κάτω από το όριο ανίχνευσης.

	Analyte	Mo	Cu	Pb	Zn	Ag	Ni	Co	Mn	Fe	As	U	Au	Th	Sr	Cd	Sb	Bi	V	Ca	P	La	Cr	Mg	Ba	Ti	Al	Na	K	W	Sc	Tl	S	Hg	Se	Te	Ga	Li	Rb	Hf	In	Te	Tl	
	Unit	PPM	PPM	PPM	PPM	PPB	PPM	PPM	PPM	%	PPM	PPM	PPB	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	%	%	PPM	PPM	%	PPM	%	%	%	%	PPM	PPM	PPM	%	PPB	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM
	MDL	0,01	0,01	0,01	0,1	2	0,1	0,1	1	0,01	0,1	0,05	0,2	0,1	0,5	0,01	0,02	0,02	2	0,01	0,001	0,5	0,5	0,01	0,5	0,001	0,01	0,001	0,01	0,05	0,1	0,02	0,02	5	0,1	0,02	0,1	0,1	0,1	0,1	0,05	0,5	0,5	
Sample	Type																																											
VS1a	Soil Pulp	0,39	48,28	31,63	104,9	78,0	93,5	20,2	732,0	2,63	17,0	0,39	2,0	3,1	24,3	0,45	0,20	0,22	41	2,24	0,052	13,7	91,8	1,08	119,5	0,017	1,85	0,008	0,32	0,07	3,60	0,17	0,02	32	0,1	0,05	4,7	29,1	59,2	1,1	0,05	bdl	0,5	
VS2a	Soil Pulp	0,35	47,02	28,21	94,5	57,0	277,9	33,1	666,0	2,50	19,3	0,51	2,6	3,3	38,3	0,33	0,18	0,20	42	4,00	0,037	10,7	253,2	2,39	81,4	0,017	1,29	0,034	0,25	0,06	5,00	0,15	bdl	40	bdl	0,03	3,6	23,4	70,7	0,6	bdl	2	bdl	
VS3a	Soil Pulp	0,21	60,67	16,07	91,8	47,0	197,2	34,4	954,0	4,24	7,0	0,41	2,2	4,6	29,4	0,15	0,11	0,19	76	2,45	0,030	14,2	229,3	1,62	69,2	0,028	2,18	0,006	0,17	bdl	8,60	0,07	bdl	34	bdl	0,05	6,9	41,8	54,7	0,8	bdl	0,6	bdl	
VS4a	Soil Pulp	0,18	67,39	18,33	101,7	58,0	184,3	33,3	962,0	4,83	7,9	0,56	1,8	5,0	32,0	0,19	0,10	0,23	84	0,85	0,059	16,9	215,9	1,70	70,4	0,026	2,39	0,021	0,25	bdl	9,80	0,08	bdl	38	0,1	0,04	7,8	51,2	81,6	0,8	0,09	bdl	0,5	
VS5a	Soil Pulp	0,18	42,84	16,98	66,4	54,0	139	24,8	638,0	2,90	13,7	0,37	1,5	3,5	27,7	0,26	0,11	0,18	49	1,92	0,051	13,4	148,1	1,22	85,6	0,017	1,89	0,019	0,31	bdl	5,80	0,14	0,02	31	bdl	0,06	5,1	31,3	62,8	0,9	0,07	0,7	0,5	
VS6a	Soil Pulp	0,10	28,45	10,62	44,8	33,0	125,3	17,5	415,0	2,16	3,9	0,26	1,1	2,1	50,6	0,11	0,06	0,10	35	2,07	0,039	9,2	123,3	1,18	66,5	0,018	1,55	0,011	0,20	bdl	4,40	0,10	bdl	12	bdl	0,02	3,8	22,5	58,1	0,9	0,07	bdl	bdl	
VS7a	Soil Pulp	0,11	32,94	12,93	51,5	65,0	138,9	20,3	554,0	2,50	6,2	0,44	1,4	2,8	139,9	0,15	0,09	0,13	42	4,81	0,046	10,0	135,4	1,95	89,8	0,025	1,74	0,010	0,25	bdl	4,70	0,10	bdl	21	bdl	bdl	4,5	27,6	65,7	1,1	bdl	1,9	bdl	
VS8a	Soil Pulp	0,28	56,89	63,74	80,8	56,0	201,5	30,9	952,0	3,98	9,4	0,30	2,2	4,8	33,9	0,14	0,13	0,24	60	0,84	0,052	14,1	221,9	1,65	110,0	0,020	2,42	0,007	0,38	bdl	7,20	0,15	bdl	27	bdl	0,07	6,8	50,5	99,7	1,0	bdl	bdl	0,6	
VS9a	Soil Pulp	0,18	197,84	17,46	152,9	146,0	186,9	28,8	813,0	3,78	9,1	0,36	1,4	4,8	38,4	0,15	0,12	0,21	57	0,64	0,033	13,8	219,1	1,71	104,9	0,021	2,45	0,004	0,37	bdl	7,70	0,13	bdl	22	0,2	0,02	6,9	46,1	91,1	0,9	0,06	bdl	0,6	
VS10a	Soil Pulp	0,34	81,49	24,1	109,3	237,0	197,4	31,5	1015,0	4,04	8,8	0,35	3,4	3,8	31,7	0,18	0,16	0,31	61	1,55	0,068	14,2	208,4	1,56	93,4	0,027	2,40	0,003	0,45	bdl	7,50	0,14	0,03	42	0,2	0,05	6,6	43,1	76,9	0,8	0,08	bdl	0,5	
VS11a	Soil Pulp	0,14	71,12	16,52	86,3	587,0	206,5	33,9	846,0	4,10	7,7	0,36	4,2	3,0	43,5	0,18	0,07	0,20	69	2,10	0,056	11,7	219,4	1,96	83,6	0,061	2,79	0,008	0,31	bdl	8,80	0,15	0,02	26	bdl	0,02	7,1	35,3	66,3	1,0	bdl	bdl	bdl	
VS12a	Soil Pulp	0,22	53,2	17,16	77,1	97,0	190,2	29,4	809,0	3,68	7,7	0,37	2,0	3,9	26,8	0,16	0,10	0,18	59	0,86	0,065	12,9	191,7	1,49	85,8	0,039	2,32	0,006	0,43	bdl	8,20	0,14	bdl	77	bdl	0,02	6,1	30,8	72,6	0,8	0,06	bdl	bdl	
VS13a	Soil Pulp	0,22	78,93	17,41	95,8	239,0	311,6	44,5	741,0	4,08	6,8	0,57	2,4	3,6	30,2	0,21	0,13	0,17	70	1,23	0,046	12,7	302,5	2,67	71,3	0,032	2,37	0,011	0,29	bdl	9,20	0,15	0,02	30	0,3	0,05	6,6	34,8	33,3	0,9	0,10	bdl	0,5	
VS14a	Soil Pulp	0,22	79,18	18,28	104,3	62,0	174,6	31,1	902,0	4,64	6,2	0,45	2,6	3,9	25,7	0,18	0,11	0,20	84	1,16	0,044	14,2	212,6	1,65	64,3	0,035	2,39	0,007	0,19	bdl	10,1	0,09	bdl	31	bdl	bdl	7,1	41,7	71,8	0,8	bdl	bdl	bdl	

Πίνακας 4.3 Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων από δείγματα εδάφους σε βάθος 0,5 m. **bdl**: κάτω από το όριο ανίχνευσης.

VS1b	Soil Pulp	0,24	47,63	16,74	67,5	79100,2	21,5	749,0	2,83	17,4	0,37	1,3	3,5	24,5	0,35	0,13	0,19	42	3,690,044	13,8101,9	1,16122,60,016	2,130,004	0,29	bdl	4,3	0,15	bdl	27	0,1	0,04	5,7	29,2	84,8	1,0	0,05	bdl	0,6		
VS2b	Soil Pulp	0,24	93,75	18,28	83,0	92122,4	24,2	735,0	2,56	21,5	0,46	1,9	4,3	24,6	0,16	0,15	0,20	43	2,630,031	12,3144,6	1,00	99,10,019	1,380,043	0,22	bdl	5,2	0,13	bdl	20	0,1	bdl	4,1	25,6	63,4	0,7	bdl	bdl	bdl	
VS3b	Soil Pulp	0,25	69,08	16,97	94,2	69203,1	34,2	975,0	4,70	7,2	0,43	5,4	4,7	28,0	0,18	0,11	0,21	82	1,780,031	16236,3	1,69	72,3	0,03	2,380,008	0,18	bdl	9,9	0,08	bdl	19	bdl	0,03	7,5	42,5	57,9	0,8	0,07	bdl	bdl
VS4b	Soil Pulp	0,19	125,79	21,03	128,5	81199,5	34,3	1058,0	5,06	8,3	0,59	2,2	4,8	30,6	0,21	0,09	0,22	90	0,950,063	17,3220,6	1,08	69,00,032	2,70	0,02	0,25	bdl	10,2	0,08	bdl	30	bdl	bdl	7,9	52,6	66,9	0,8	0,05	bdl	bdl
VS5b	Soil Pulp	0,15	45,09	17,23	68,3	47149,4	25,5	668,0	3,21	14	0,38	1,5	3,7	29,9	0,25	0,1	0,19	55	2,060,054	14,2167,8	1,33	89,90,026	2,190,022	0,37	bdl	7,0	0,16	bdl	15	bdl	0,03	5,9	32,2	62,4	0,9	bdl	bdl	0,5	
VS6b	Soil Pulp	0,06	42,46	10,07	51,1	32129,8	18,7	417,0	2,25	4,0	0,28	1,0	2,5	78,2	0,08	0,05	0,09	40	3,200,036	9,70124,1	1,21	74,10,028	1,660,015	0,2	bdl	5,7	0,11	bdl	16	bdl	bdl	4,3	21,5	50,2	1,0	0,08	0,6	bdl	
VS7b	Soil Pulp	0,10	37,93	12,05	56,2	32147,2	19,7	576,0	2,64	6,3	0,51	1,2	3,0156,1	0,13	0,08	0,12	45	5,060,046	10,4144,3	2,00	95,90,037	1,900,013	0,24	bdl	6,0	0,11	bdl	28	bdl	bdl	4,7	27,8	59,7	1,1	bdl	1,8	bdl		
VS8b	Soil Pulp	0,31	114,81	18,96	109,9	127222,6	32,4	1145,0	4,37	8,7	0,29	2,1	5,9	31,1	0,14	0,11	0,22	67	0,860,022	15,4239,7	1,69105,80,036	2,760,005	0,33	bdl	9,0	0,15	bdl	14	bdl	0,05	7,6	45,3	106,1	1,0	0,05	bdl	0,6		
VS9b	Soil Pulp	0,23	216,98	19,79	166,6	131204,8	29,5	980,0	4,26	9,6	0,4	1,3	5,5	46,7	0,17	0,09	0,21	65	0,690,038	15,3237,3	1,87115,80,034	2,890,009	0,42	bdl	9,9	0,15	bdl	22	bdl	bdl	7,7	46,2	87,3	1,0	0,05	bdl	bdl		
VS10b	Soil Pulp	0,34	128,12	19,34	118,5	87211,1	34,6	1018,0	4,29	9,3	0,3	2,7	4,6	27,4	0,11	0,13	0,21	65	1,060,045	14,3212,4	1,60	77,30,034	2,530,002	0,42	bdl	8,9	0,13	bdl	26	0,1	0,04	7,3	37,4	76,7	0,8	bdl	bdl	bdl	
VS11b	Soil Pulp	0,14	91,83	16,56	93,5	146210,2	35,0	821,0	4,26	7,6	0,36	2,4	3,6	46,9	0,13	0,07	0,16	72	2,640,044	12,4228,8	1,98	83,60,067	2,900,011	0,29	bdl	10,2	0,13	bdl	13	0,1	0,02	7,6	36,2	65,3	0,9	bdl	0,9	bdl	
VS12b	Soil Pulp	0,21	64,23	18,24	84,4	52195,2	31,9	862,0	3,75	8,0	0,37	1,6	4,2	28,2	0,17	0,1	0,17	60	0,880,064	13,5207,6	1,52	91,00,039	2,380,007	0,41	bdl	8,3	0,13	bdl	20	0,3	bdl	6,8	33,2	66,2	0,9	bdl	bdl	bdl	
VS13b	Soil Pulp	0,19	75,53	17,66	87,5	68195,5	30,3	625,0	4,29	6,8	0,34	1,8	4,3	27,7	0,11	0,07	0,18	76	0,820,029	13,7218,7	1,69	75,9	0,03	2,650,008	0,28	bdl	9,8	0,15	bdl	29	bdl	bdl	7,3	36,2	64,7	1,0	0,06	bdl	0,5
VS14b	Soil Pulp	0,16	73,19	16,42	88,3	91192,8	34,5	1003,0	5,03	6,4	0,42	4,3	4,0	35,0	0,10	0,06	0,18	94	2,150,039	14,8221,3	1,77	68,90,043	2,730,011	0,17	bdl	11,2	0,09	bdl	17	bdl	bdl	7,6	40	58	0,8	0,06	bdl	bdl	

Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων από δείγματα εδάφους σε βάθος 1 m. **bdl**: κάτω από το όριο ανίχνευσης.

VS1c	Soil Pulp	0,30	36,86	14,25	64,2	55	97,7	19,7	711	2,65	16,3	0,35	1,5	4,0	35,7	0,28	0,10	0,17	41	6,75	0,04	14,0	97,8	1,11	111,60	0,026	2,120	0,004	0,28	bdl	5,0	0,15	bdl	13	0,3	bdl	5,6	26,9	69,8	1,2	0,07	1,7	0,5
VS2c	Soil Pulp	0,24	42,39	20,92	64,5	37	153,5	27,1	794	2,89	27,5	0,47	1,3	4,6	29,4	0,18	0,15	0,21	49	2,69	0,035	14,6	181,3	1,24	114,60	0,027	1,740	0,049	0,28	bdl	6,6	0,17	bdl	18	0,1	bdl	4,8	28,4	49,9	0,8	bdl	0,6	0,5
VS3c	Soil Pulp	0,17	58,68	13,65	78,3	40	217,5	38,0	986	4,60	8,0	0,39	3,9	4,3	34,7	0,11	0,06	0,17	85	3,10	0,026	13,2	239,4	1,68	71,1	0,04	2,460	0,011	0,14	bdl	10,6	0,07	bdl	30	bd	bdl	7,3	35,9	52,9	0,7	bdl	1,1	bdl
VS4c	Soil Pulp	0,15	68,1	17,7	93,1	67	210,8	35,1	924	5,26	7,4	0,50	2,7	5,4	33,3	0,13	0,08	0,22	94	1,220	0,039	17,4	243,1	1,89	83,50	0,032	2,930	0,022	0,23	bdl	11,5	0,1	bdl	31	0,2	0,05	8,3	49,6	81	0,9	0,1	bdl	bdl
VS5c	Soil Pulp	0,12	43,14	15,34	63,3	36	147,2	24,7	587	3,10	11,5	0,34	2,1	3,8	37,9	0,21	0,08	0,16	53	3,40	0,039	13,5	153,7	1,28	86,20	0,025	2,080	0,021	0,26	bdl	7,2	0,13	bdl	19	0,3	0,02	5,6	29,4	67,3	0,9	bdl	bdl	bdl
VS6c	Soil Pulp	0,11	35,21	10,33	52,5	29	172,6	23,8	518	2,83	4,9	0,32	2,3	3,9	82,5	0,08	0,05	0,12	71	5,30	0,023	11,4	191,4	1,47	98,40	0,035	2,130	0,017	0,18	bdl	7,4	0,13	bdl	15	0,2	bdl	5,7	28,1	56,9	0,9	0,05	1,5	bdl
VS7c	Soil Pulp	0,14	52,56	11,01	61,7	23	141,8	19,8	590	2,71	7,4	0,70	1,8	3,5	232,8	0,10	0,07	0,13	56	7,20	0,033	10,2	142,8	2,49	96,10	0,035	1,950	0,013	0,24	bdl	6,4	0,10	bdl	14	bdl	0,03	5,2	28,6	57,5	1,1	bdl	3,1	bdl
VS8c	Soil Pulp	0,35	66,01	17,63	84,4	51	217,9	31,8	1054	4,30	8,5	0,28	1,4	6,2	29,5	0,10	0,10	0,22	65	0,760	0,021	14,9	241,0	1,68	98,9	0,03	2,700	0,005	0,26	bdl	9,1	0,13	bdl	30	bdl	0,03	7,1	49	91,4	0,9	bdl	bdl	0,5
VS9c	Soil Pulp	0,19	113,47	16,63	101,4	62	213,2	29,8	997	4,06	8,3	0,34	0,8	5,5	43,8	0,08	0,08	0,22	65	0,570	0,019	14,1	214,8	1,99	107,20	0,029	2,810	0,011	0,29	bdl	8,7	0,13	bdl	29	bdl	bdl	7,1	42,2	82,6	1,0	bdl	bdl	bdl
VS10c	Soil Pulp	0,04	68,06	16,53	82,2	138	208,1	32,5	1041	3,98	7,9	0,29	1,6	4,5	29,1	0,11	0,09	0,20	63	1,250	0,052	12,9	202,4	1,59	78,80	0,029	2,500	0,003	0,34	bdl	7,9	0,11	bdl	22	bdl	0,03	6,4	37,0	61,2	0,8	bdl	bdl	bdl
VS11c	Soil Pulp	0,12	79,72	17,00	84,2	56	201,7	29,9	751	3,83	5,8	0,37	1,7	3,9	46,6	0,08	0,05	0,15	68	3,000	0,032	11,0	210,2	1,90	69,5	0,07	2,780	0,013	0,23	bdl	9,0	0,13	bdl	21	bdl	bdl	6,6	34,3	68,6	0,8	0,05	bdl	bdl
VS12c	Soil Pulp	0,18	69,65	12,88	80,6	47	202,1	29,0	710	3,60	7,3	0,29	2,0	4,6	36,5	0,06	0,05	0,17	62	1,990	0,058	13,2	196,0	1,55	85,10	0,037	2,45	0,01	0,37	bdl	8,3	0,12	bdl	32	bdl	0,03	6,5	29,3	55,8	0,9	0,08	bdl	bdl
VS13c	Soil Pulp	0,15	56,67	14,93	70,1	47	192,6	31,0	640	4,29	6,2	0,40	1,5	4,7	30,9	0,12	0,05	0,18	83	1,340	0,023	13,7	205,1	1,69	80,70	0,035	2,850	0,011	0,25	bdl	9,9	0,13	bdl	38	bdl	bdl	7,5	36,4	60,9	0,8	0,11	bdl	bdl
VS14c	Soil Pulp	0,13	64,24	15,28	78,6	65	183,6	33,2	932	4,46	5,7	0,37	1,8	4,1	40,8	0,06	0,06	0,17	88	2,980	0,035	13,0	209,1	1,73	62,50	0,036	2,610	0,013	0,14	bdl	10,2	0,10	bdl	43	bdl	bdl	6,9	38,6	52,6	0,6	0,08	bdl	bdl

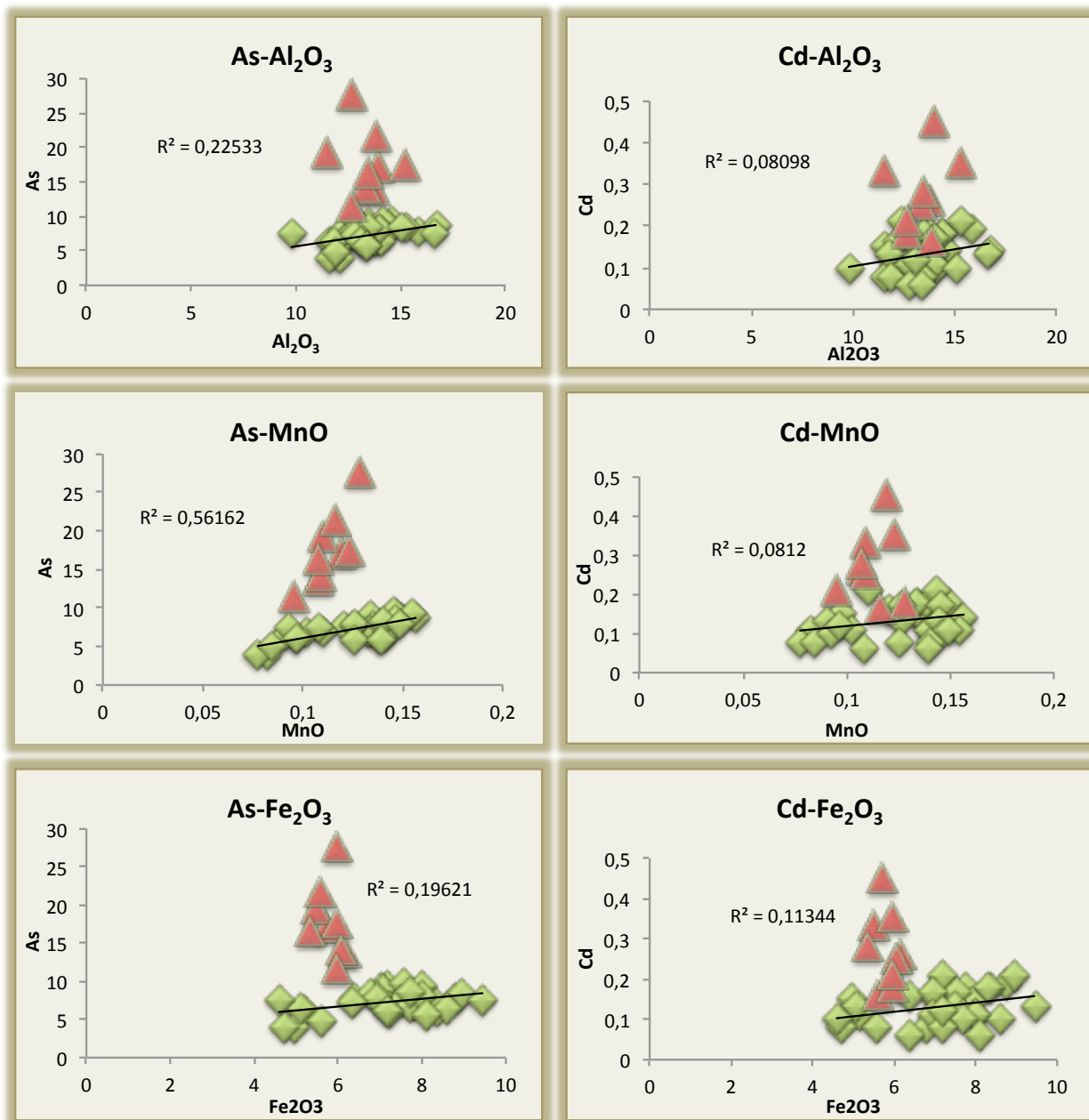
και παρατηρήθηκε ότι τα συγκεκριμένα δημιουργούν μόνα τους μια ομάδα, γι'αυτό προβάλλονται ξεχωριστά στο διάγραμμα. Να σημειωθεί ότι τα δείγματα αυτά είναι συνολικά εννιά (3 δείγματα απο 3 βάθη δειγματοληψίας) ενώ ο συντελεστής συσχέτισης με όλα τα δείγματα αλλά και χωρίς τα VS1, VS2 και VS5 παρουσιάζεται στο πίνακα 4.5. Το γεγονός ότι τα απόβλητα της χαλυβουργίας είναι Ni, Co, Cr και σε συνδιασμό με το ότι στις συσχετίσεις των μετάλλων αυτών σε μερικά απο αυτά τα δείγματα δεν συσχετίζονται θετικά με τα οξείδια, άρα δεν είναι στο πλέγμα τους, ενισχύει την πιθανότητα οι συγκεντρώσεις αυτές να προέρχονται από παλαιότερα λύματα ή απο τα διάφορα στάδια λειτουργίας της χαλυβουργικής.

Στο σχήμα 4.8 παρουσιάζονται τα διαγράμματα με τις συσχετίσεις του αρσενικού (As) και του καδμίου (Cd) με τα οξείδια ($Al_2O_3 - Fe_2O_3 - MnO$). Παρατηρείται θετική συσχέτιση σε όλα τα δείγματα εκτός των VS1, VS2 και VS5 που δεν συμπεριλαμβάνονται στη συσχέτιση και φαίνεται να δημιουργούν μια ξεχωριστή ομάδα. Το γεγονός ότι αυτά τα τρία δείγματα ξεχωρίζουν εμφανώς από τα υπόλοιπα δείχνει μια ενδιαφέρουσα γεωχημική ανωμαλία. Η καλή συσχέτιση των υπόλοιπων δειγμάτων των βαρέων μετάλλων με τα οξείδια σημαίνει πως τα μέταλλα αυτά είναι προσροφημένα στο πλέγμα των αργιλικών ορυκτών αλλά και δεσμευμένα στις κρυσταλλικές φάσεις των ορυκτών.

Στο σχήμα 4.9 παρουσιάζονται οι συσχετίσεις του νικελίου (Ni) και του χρωμίου (Cr) με τα οξείδια ($Al_2O_3 - Fe_2O_3 - MnO$). Τα δείγματα VS1, VS2 και VS5 φαίνεται πως και σε αυτά τα μέταλλα δημιουργούν μια ξεχωριστή ομάδα ενώ τα υπόλοιπα δείγματα φαίνεται πως συσχετίζονται θετικά με τα οξείδια άρα βρίσκονται φυσικά στο έδαφος και δεσμευμένα στις κρυσταλλικές φάσεις των ορυκτών. Και στα δύο μέταλλα (Ni, Cr) παρατηρούνται δύο δείγματα που ξεχωρίζουν απο τη γραμμή συσχέτισης. Αυτά τα δείγματα είναι το VS2a (πορτοκαλί) και το VS13a (πράσινο) τα οποία είναι και τα δύο επιφανειακά δείγματα. Το VS2a ανήκει στα δείγματα που δεν συμμετέχουν στη συσχέτιση και βρίσκεται κοντά στη χαλυβουργία Ελλάδος. Ενώ το VS13a συμμετέχει στη συσχέτιση και βρίσκεται στο κέντρο περίπου της περιοχής δειγματοληψίας (σχήμα 3.1). Η γεωχημική ανωμαλία που παρατηρείται σε αυτό το δείγμα πιθανά να σχετίζεται με την εμφάνιση κάποιων κοιτασμάτων χρωμίτη στην περιοχή έρευνας (σχήμα 2.9) ενώ η χημική ανωμαλία του νικελίου μπορεί να οφείλεται είτε σε απόρριψη μπαταριών είτε στη βιομηχανία χάλυβα ως παλαιότερα λύματα (Ross 1996; Seshardi et al. 2015).

Στο σχήμα 4.10 συσχετίζονται τα μέταλλα του χαλκού (Cu) και του ψευδάργυρου (Zn) με

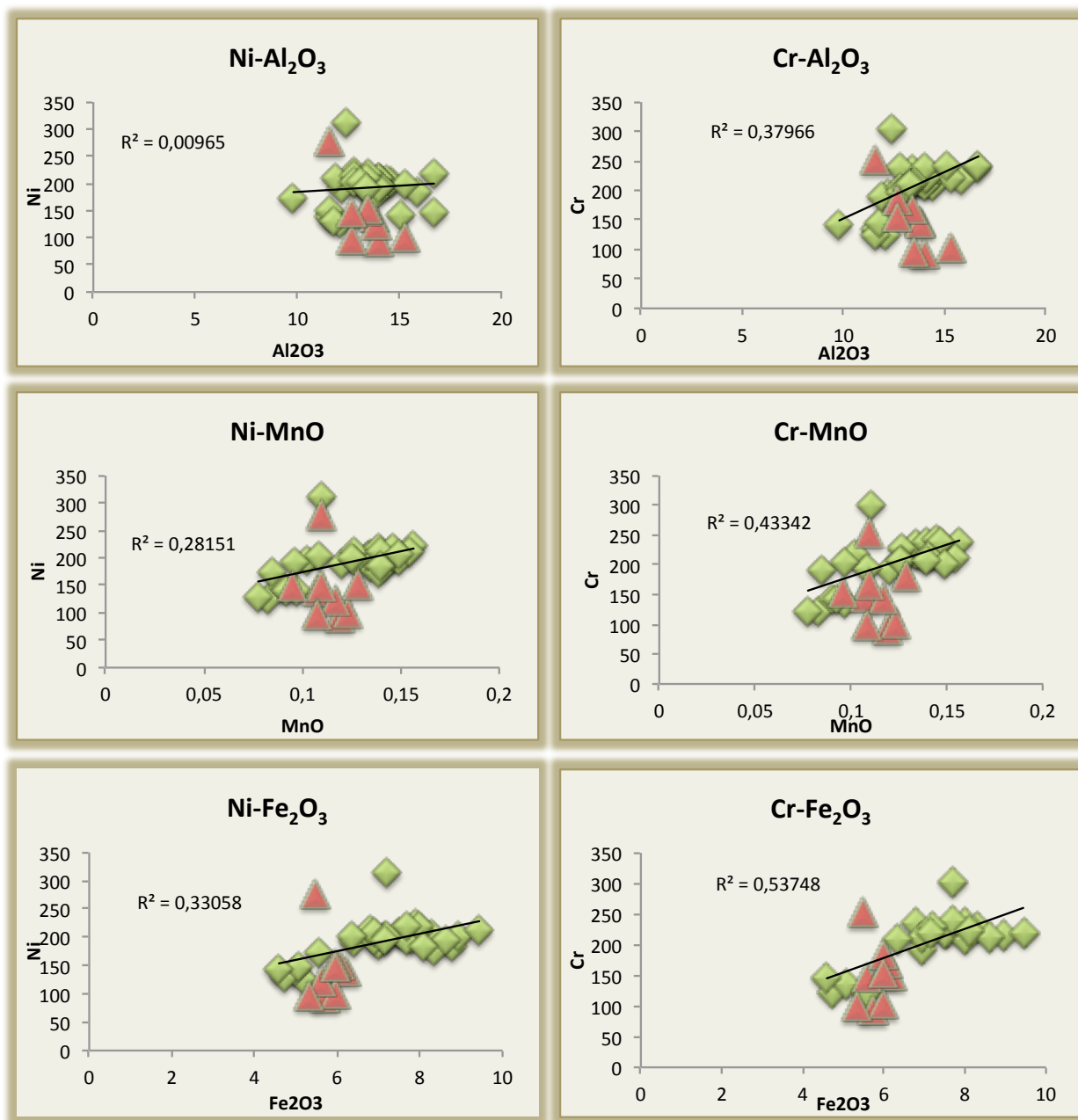
τα οξείδια (Al_2O_3 - Fe_2O_3 - MnO). Και στα δύο μέταλλα υπάρχει αρκετά καλή συσχέτιση με τα οξείδια και όπως φαίνεται ακόμη και τα δείγματα VS1, VS2 και VS5 δεν απομακρύνονται πολύ από την ομάδα των υπόλοιπων δειγμάτων. Αυτό που είναι άξιο παρατήρησης είναι τα δύο δείγματα που ξεχωρίζουν από τη συσχέτιση στον χαλκό αλλά και στο ψευδάργυρο. Αυτά τα δείγματα είναι και στις δύο περιπτώσεις τα VS9a και VS9b τα οποία βρίσκονται κοντά σε κατοικήσιμη περιοχή (Ριζόμυλος) βοριοδυτικά της περιοχής δειγματοληψίας (σχήμα 3.1).



Σχήμα 4.8 Διαγράμματα συσχέτισης αρσενικού (As) και καδμίου (Cd) με τα οξείδια Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO .
 ◆ : VS3, VS4, VS6, VS7, VS8, VS9, VS10, VS11, VS12, VS13, VS14, ▲ : VS1, VS2, VS5

Οι επιφανειακές συγκεντρώσεις των VS9a και VS9b πιθανά να οφείλονται σε ανθρωπογενή ρύπανση όπως σωροί μετάλλων ανακύκλωσης (Ross 1996, Seshardi et al. 2015).

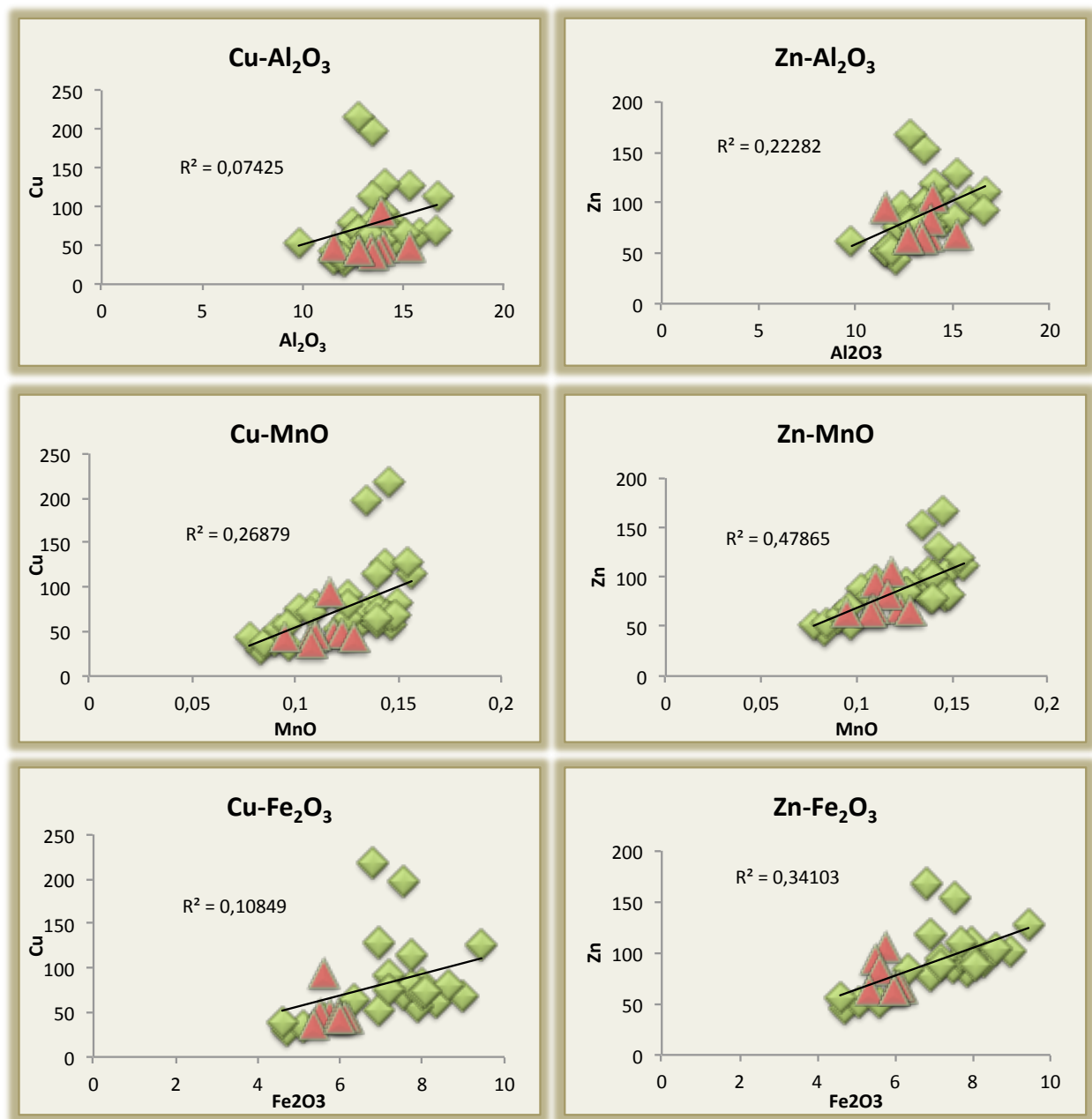
Τέλος στο σχήμα 4.11 παρουσιάζονται οι συσχετίσεις του μολύβδου (Pb) και του κοβαλτίου (Co) με τα οξείδια (Al_2O_3 - Fe_2O_3 -MnO). Οι συσχετίσεις εκτός από ένα δείγμα και στα δύο μέταλλα φαίνεται πως είναι πολύ καλές καθώς ακόμα και τα δείγματα VS1, VS2 και VS5 δεν απομακρύνονται πολύ από τη γραμμή συσχέτισης.



Σχήμα 4.9 Διαγράμματα συσχέτισης νικελίου (Ni) και χρωμίου (Cr) με τα οξείδια Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO.

◆ : VS3, VS4, VS6, VS7, VS8, VS9, VS10, VS11, VS12, VS13, VS14, ▲ : VS1, VS2, VS5

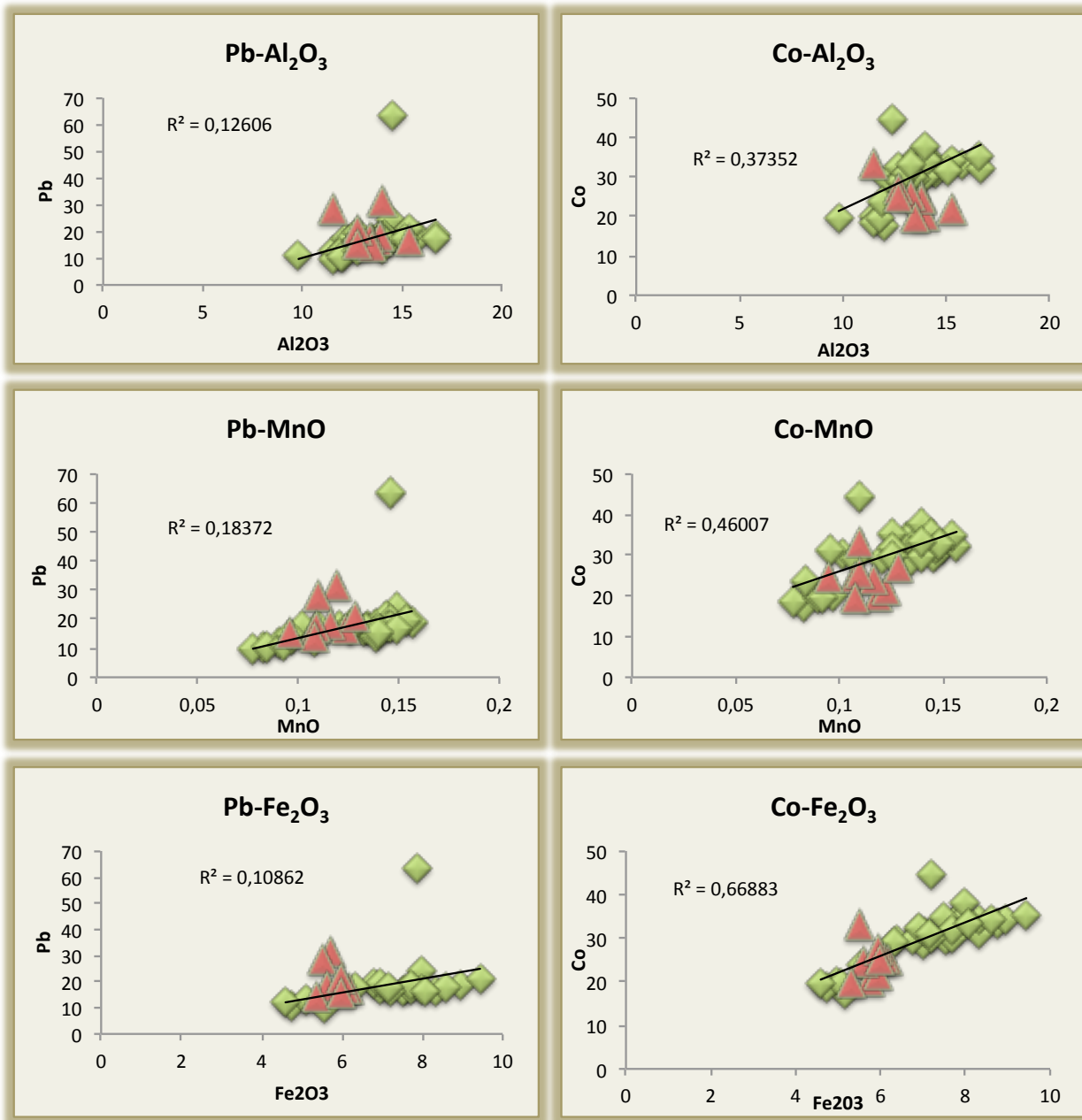
Αυτό όπως αναφέρεται και στα προηγούμενα μέταλλα σημαίνει ότι τα στοιχεία αυτά είναι δεσμευμένα στις κρυσταλλικές φάσεις των Fe και Mn και προσροφημένα στα Αργιλικά (Al). Εξάιρεση αποτελεί το δείγμα VS8a που φαίνεται να μην συσχετίζεται καλά με τα οξείδια όσο αφορά το μόλυβδο ενώ για το κοβάλτιο το δείγμα που δεν συσχετίζεται θετικά είναι το VS13a. Το δείγμα VS8a βρίσκεται κοντά στην περιοχή Ριζόμυλος βοριοδυτικά της περιοχής δηγματοληψίας ενώ το VS13a βρίσκεται στο κέντρο αυτής (σχήμα 3.1).



Σχήμα 4.10 Διαγράμματα συσχέτισης χαλκού (Cu) και ψευδαργύρου (Zn) με τα οξείδια Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO.

◆ : VS3, VS4, VS6, VS7, VS8, VS9, VS10, VS11, VS12, VS13, VS14, ▲ : VS1, VS2, VS5

Όσο αφορά τον μόλυβδο η συγκέντρωση του βρίσκεται μόνο επιφανειακά και αυτό ενισχύσει την πιθανότητα να βρίσκεται εκεί με κάποια ανθρωπογενή παρέμβαση όπως η απόρριψη μετάλλων ανακύκλωσης πχ. μπαταρίες (Ross 1996, Seshardi et al. 2015).



Σχήμα 4.11 Διαγράμματα συσχέτισης μολύβδου (Pb) και κοβάλτιου (Co) με τα οξείδια Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO.

◆ : VS3, VS4, VS6, VS7, VS8, VS9, VS10, VS11, VS12, VS13, VS14, ▲ : VS1, VS2, VS5

Στο πίνακα 4.5 παρουσιάζεται ο συντελεστής συσχέτισης R² με και χωρίς τα δείγματα VS1, VS2 και VS5. Φαίνεται ότι στις περισσότερες συσχετίσεις ο συντελεστής είναι

μεγαλύτερος όταν αφαιρούνται αυτά τα δείγματα εκτός συσχέτισης. Όπως προαναφέρθηκε τα δείγματα αυτά δεν περιλαμβάνονται στην συσχέτιση διότι θεωρείται πως αποτελούν μια ξεχωριστή ομάδα.

Πίνακας 4.5 Σύγκριση του συντελεστή συσχέτισης (R^2) σε όλες τις συσχετίσεις βαρέων μετάλλων - οξειδίων (Al_2O_3 - Fe_2O_3 - MnO) με και χωρίς τα δείγματα VS1, VS2, VS5.

Συσχέτιση	Όλα τα δείγματα R^2	Συσχέτιση	Όλα τα δείγματα εκτός του VS1,VS2,VS5 R^2
As- Al_2O_3	0,0038	As- Al_2O_3	0,2253
Ni- Al_2O_3	0,02173	Ni- Al_2O_3	0,00965
Cu- Al_2O_3	0,06879	Cu- Al_2O_3	0,07425
Co- Al_2O_3	0,18785	Co- Al_2O_3	0,37352
Pb- Al_2O_3	0,07876	Pb- Al_2O_3	0,12606
Cd- Al_2O_3	0,01977	Cd- Al_2O_3	0,08098
Zn- Al_2O_3	0,16987	Zn- Al_2O_3	0,22282
Cr- Al_2O_3	0,08898	Cr- Al_2O_3	0,37966
As-MnO	0,00618	As-MnO	0,56162
Ni-MnO	0,18596	Ni-MnO	0,28151
Cu-MnO	0,2923	Cu-MnO	0,26879
Co-MnO	0,42115	Co-MnO	0,46007
Pb-MnO	0,14132	Pb-MnO	0,18372
Cd-MnO	0,00158	Cd-MnO	0,0812
Zn-MnO	0,4634	Zn-MnO	0,47865
Cr- Al_2O_3	0,30894	Cr- Al_2O_3	0,43342
As- Fe_2O_3	0,0925	As- Fe_2O_3	0,19621
Ni- Fe_2O_3	0,30547	Ni- Fe_2O_3	0,33058
Cu- Fe_2O_3	0,19184	Cu- Fe_2O_3	0,10849
Co- Fe_2O_3	0,65697	Co- Fe_2O_3	0,66883
Pb- Fe_2O_3	0,0223	Pb- Fe_2O_3	0,10862
Cd- Fe_2O_3	0,04129	Cd- Fe_2O_3	0,11344
Zn- Fe_2O_3	0,34109	Zn- Fe_2O_3	0,34103
Cr- Al_2O_3	0,52501	Cr- Al_2O_3	0,53748

4.2.2. ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΜΕ ΒΑΡΕΑ ΜΕΤΑΛΛΑ

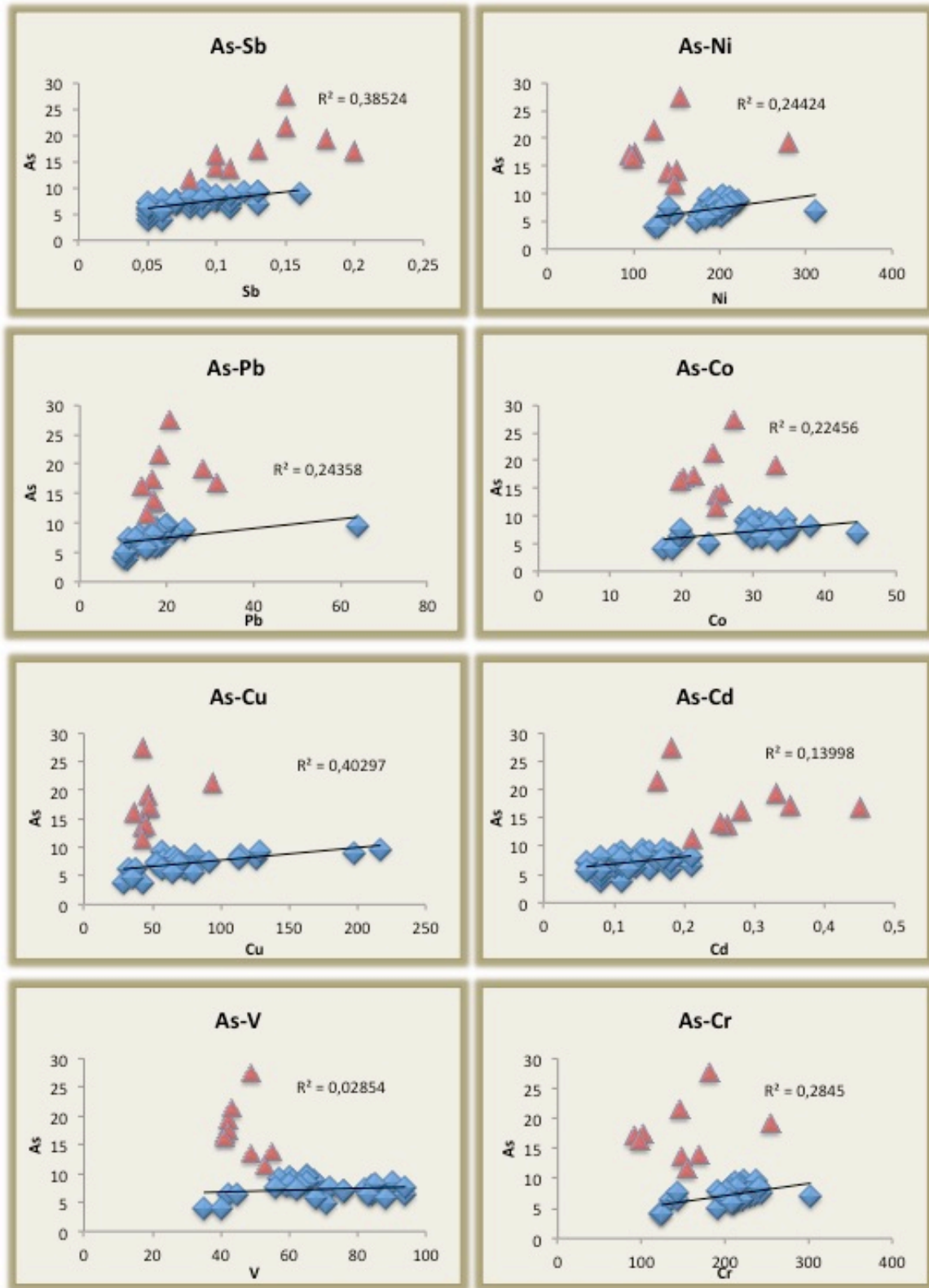
Λόγω του ότι το αρσενικό (As) παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην περιοχή και με σκοπό να μελετηθεί περαιτέρω η προέλευση των μετάλλων που παρουσιάζουν γεωχημικές

ανωμαλίες κρίθηκε σκόπιμο να συσχετισθούν τα μέταλλα (Sb, Ni, Pb, Co, Cu, Cd, V, Cr) με το αρσενικό. Το αρσενικό όπως και το κάδμιο στις συσχετίσεις με τα οξείδια παρουσιάζουν ενδιαφέρον αφού τα δείγματα VS1, VS2 και VS5 φαίνεται να δημιουργούν μια ξεχωριστή ομάδα μόνα τους. Έτσι και σε αυτές τις συσχετίσεις τα δείγματα VS1, VS2 και VS5 δεν λαμβάνουν μέρος στη συσχέτιση απλώς προβάλλονται στο διάγραμμα με κόκκινο χρώμα.

Στο σχήμα 4.12 παρουσιάζονται τα διαγράμματα συσχέτισης αρσενικού με τα βαρέα μέταλλα. Το αρσενικό (As) και το αντιμόνιο (Sb) έχουν όμοια χημική συμπεριφορά (Kabata Pendias 2011) και γι' αυτό όπως παρατηρείται συσχετίζονται πολύ καλά στο διάγραμμα. Σε όλα τα διαγράμματα τα δείγματα VS1, VS2 και VS5 φαίνονται να είναι συγκεντρωμένα πιο μακριά από τα υπόλοιπα ενώ όλα τα άλλα δείγματα συνεχίζουν να έχουν μια θετική συσχέτιση μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει πως στα δείγματα που συσχετίζονται θετικά η προέλευση τους είναι φυσική και πιθανώς οφείλεται στις μεταλλοφορίες και τη γεωλογία της ευρύτερης της περιοχής, ενώ τα δείγματα που ξεχωρίζουν της συσχέτισης μαζί και με τα VS1, VS2 και VS5 είναι πιθανό να σχετίζονται με την παρουσία των βιομηχανιών της περιοχής και ειδικότερα της χαλυβουργίας στις περιπτώσεις νικελίου, κοβαλτίου και χρωμίου τα οποία είναι απόβλητα αυτής.

Άξιο παρατήρησης είναι το γεγονός πως στα διαγράμματα As-Ni, As-Pb, As-Co, As-Cu, As-Cr υπάρχουν δείγματα που εμφανίζονται πιο μακριά από τα άλλα ενώ συμμετέχουν στη συσχέτιση. Αυτά τα δείγματα είναι για το As-Ni, As-Co και As-Cr το VS13a, για το As-Pb το VS8a και για το As-Cu τα VS9a,b. Όλα αυτά τα δείγματα είναι επιφανειακά εκτός του VS9b που είναι στα 0,5m. Το γεγονός ότι αυτά τα δείγματα παρεκκλίνουν από τη συσχέτιση και δημιουργούν μια γεωχημική ανωμαλία καθώς και το γεγονός ότι είναι επιφανειακά σημαίνει ότι πολύ πιθανόν να σχετίζονται με κάποια ανθρωπογενή ρύπανση ή μεταλλοφορία όσο αφορά το Cr. Τα υπόλοιπα δείγματα που έχουν καλή συσχέτιση μεταξύ τους ενισχύουν την άποψη ότι βρίσκονται φυσικά στο έδαφος.

Στον πίνακα 4.6 παρουσιάζεται η σύγκριση του συντελεστή συσχέτισης R^2 για τις συσχετίσεις αρσενικού με τα υπόλοιπα βαρέα μέταλλα με και χωρίς να περιλαμβάνονται τα δείγματα VS1, VS2 και VS5. Όπως και στις συσχετίσεις οξειδίων, το R^2 είναι μεγαλύτερο χωρίς να συμπεριλαμβάνονται αυτά τα δείγματα ενισχύοντας της ανθρωπογενή τους προέλευση.



Σχήμα 4.12 Διαγράμματα συσχέτισης αρσενικού (As) με βαρέα μέταλλα.

◆ : VS3, VS4, VS6, VS7, VS8, VS9, VS10, VS11, VS12, VS13, VS14, ▲ : VS1, VS2, VS5

Πίνακας 4.6 Σύγκριση του συντελεστή συσχέτισης (R^2).

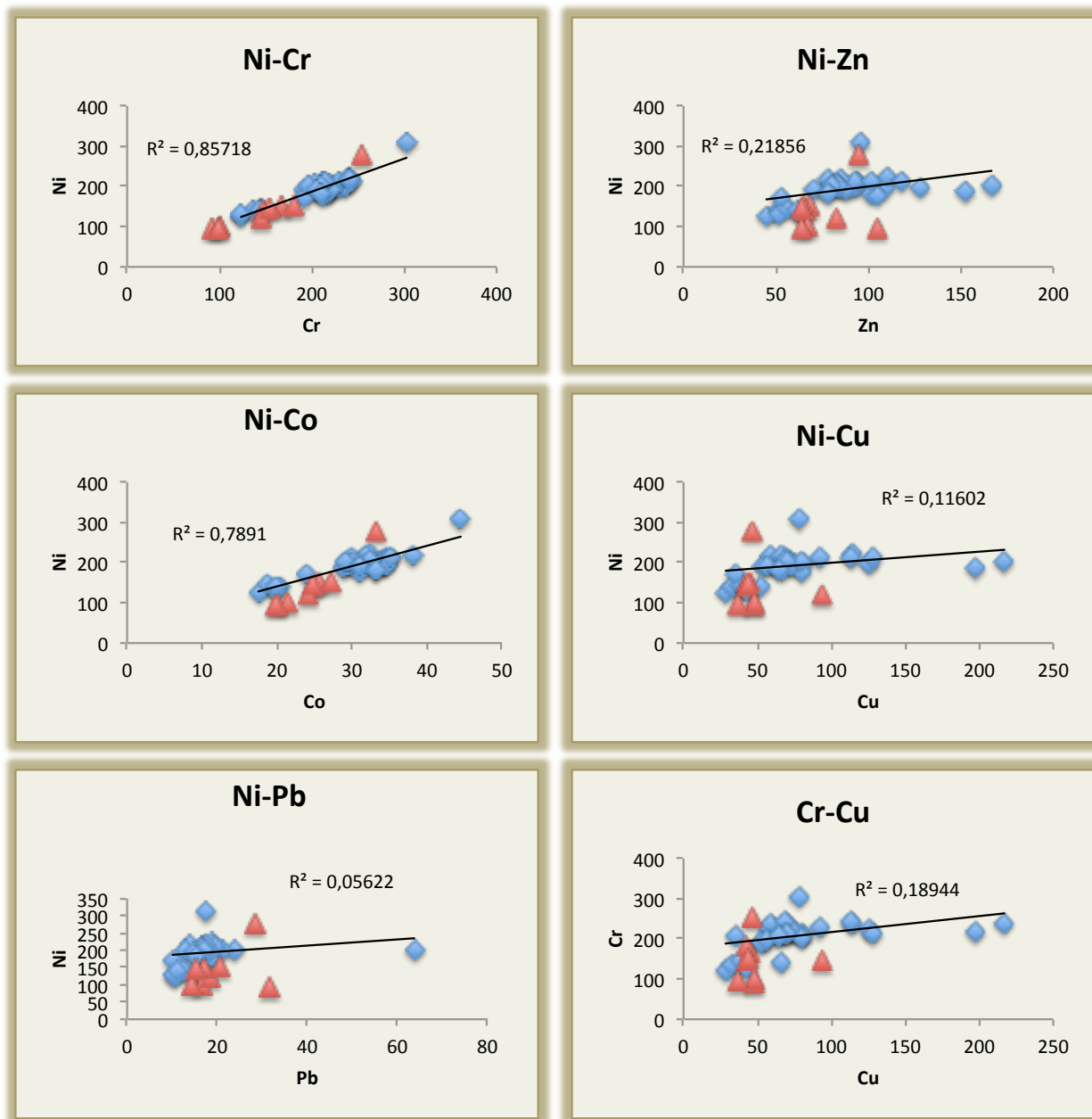
Συσχέτιση	Όλα τα δείγματα R2	Συσχέτιση	Όλα τα δείγματα εκτός του VS1,VS2,VS5 R2
As-Sb	0,46875	As-Sb	0,38524
As-Cu	0,00746	As-Cu	0,40297
As-Pb	0,06655	As-Pb	0,24358
As-Ni	0,08915	As-Ni	0,24424
As-Co	0,04549	As-Co	0,22456
As-Cd	0,39163	As-Cd	0,13998
As-V	0,22144	As-V	0,02854
As-Cr	0,09224	As-Cr	0,2845

4.2.3. ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Λόγω των γεωχημικών ανωμαλιών που παρατηρήθηκαν στις προηγούμενες συσχετίσεις και με την υποψία ότι μερικά μέταλλα σε συγκεκριμένες θέσεις δεν είναι προσροφημένα στο πλέγμα κρυσταλλικών φάσεων (συσχετίσεις οξειδίων), άρα πιθανώς να προέρχονται από ανθρωπογενείς παράγοντες, κρίθηκε απαραίτητο να συσχετισθούν μερικά από τα πιο σημαντικά βαρέα μέταλλα μεταξύ τους ώστε να διερευνηθεί η προέλευσή τους (σχήματα 4.13, 4.14, 4.15). Τα δείγματα VS1, VS2 και VS5 συνεχίζουν και σε αυτά τα διαγράμματα να βρίσκονται εκτός συσχέτισης και παρουσιάζονται με κόκκινο χρώμα.

Στα διαγράμματα Ni-Cr, Ni-Co και Cr-Co (σχήμα 4.13) παρατηρείται πάρα πολύ καλή συσχέτιση των μετάλλων δείχνοντας ότι και το χρώμιο και το κοβάλτιο είναι άμεσα συνδεδεμένα με το νικέλιο αλλά και μεταξύ τους και βρίσκονται σε πολύ μεγάλο ποσοστό γηγενώς στο έδαφος (υπερβασικά πετρώματα της περιοχής). Υπάρχει παρόλα αυτά ένα δείγμα και στις τρεις συσχετίσεις, το VS13a, το οποίο ξεφεύγει από τη συσχέτιση και όντας επιφανειακό είναι πολύ πιθανό να συνδέεται με την εμφάνιση χρωμίτη στην περιοχή (σχήμα 2.9). Στα διαγράμματα Ni-Pb, Cr-Pb και Co-Pb (σχήματα 4.13, 4.14, 4.15) υπάρχει ένα δείγμα το οποίο προβάλλεται φανερά πιο μακριά από τα υπόλοιπα και αυτό είναι το VS8a (περιοχή Ριζόμυλος). Και σε αυτή την περίπτωση, υπάρχει κάποια γεωχημική ανωμαλία στο σημείο που σχετίζεται με την περιεκτικότητα μολύβδου (Pb) στο επιφανειακό δείγμα, που πιθανά όπως

αναφέρθηκε και στις προηγούμενες συσχετίσεις να αποδίδεται σε απόρριψη κάποιων μετάλλων ανακύκλωσης στο σημείο.

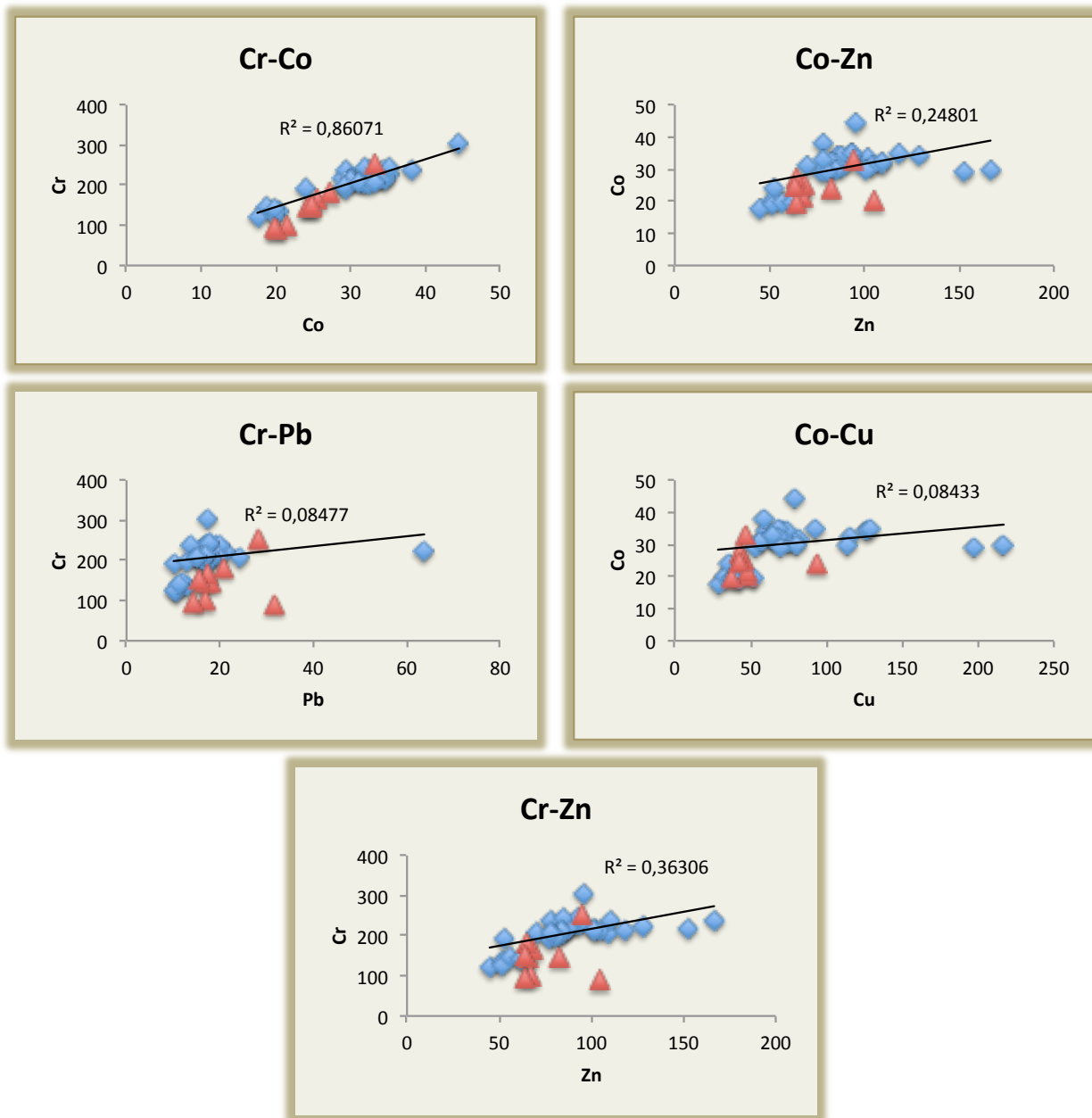


Σχήμα 4.13 Διαγράμματα συσχέτισης βαρέων μετάλλων μεταξύ τους.

◆ : VS3, VS4, VS6, VS7, VS8, VS9, VS10, VS11, VS12, VS13, VS14, ▲ : VS1, VS2, VS5

Ακόμη, στα διαγράμματα Ni-Zn, Ni-Cu, Cr-Zn, Cr-Cu, Co-Zn και Co-Cu υπάρχουν εκτός από τα καλά συσχετιζόμενα δείγματα και δύο τα οποία φαίνεται πως ξεχωρίζουν και δεν συσχετίζονται θετικά με τα υπόλοιπα. Αυτά τα δείγματα είναι τα VS9a και VS9b σε όλα αυτά τα διαγράμματα. Το δείγμα VS9 βρίσκεται κοντά στο VS8 κοντά στην περιοχή του Ριζόμυλου. Στα

διαγράμματα Pb-Zn, Pb-Cu παρατηρούνται επίσης τρία κοινά δείγματα που ξεχωρίζουν της συσχέτισης και αυτά είναι το VS8a, VS9a και VS9b ενώ στο διάγραμμα Pb-Cd το δείγμα που ξεχωρίζει είναι το VS8a.

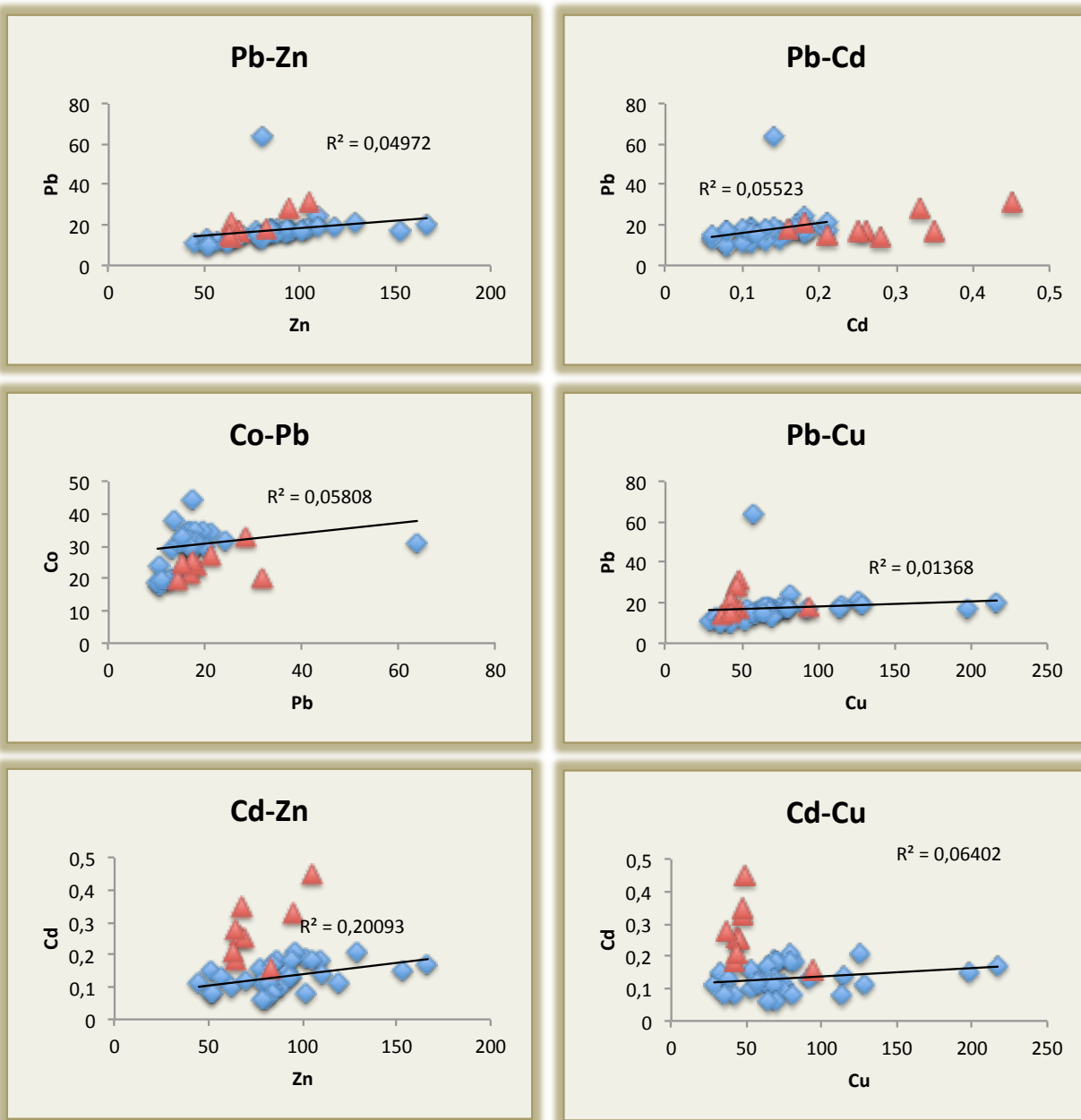


Σχήμα 4.14 Διαγράμματα συσχέτισης βαρέων μετάλλων μεταξύ τους.

◆ : VS3, VS4, VS6, VS7, VS8, VS9, VS10, VS11, VS12, VS13, VS14, ▲ : VS1, VS2, VS5

Τέλος στα διαγράμματα Cd-Zn και Cd-Cu παρατηρούνται δύο δείγματα που ξεχωρίζουν φανερά και από αυτές τις συχέτισεις και αυτά είναι τα VS9a και VS9b. Από τα παραπάνω διαγράμματα Ni-Zn, Ni-Cu, Cr-Zn, Cr-Cu, Co-Zn, Co-Cu, Pb-Zn, Pb-Cu, Pb-Cd, Cd-Zn και Cd-

Cu προκύπτει ότι ο χαλκός (Cu) και ο ψευδάργυρος (Zn) στα δείγματα VS8a, VS9a και VS9b προβάλλονται εκτός της ομάδας των υπόλοιπων αναλύσεων. Αυτή η παρατήρηση οδηγεί και πάλι στην πιθανή ανθρωπογενή προέλευση των στοιχείων αυτών στα συγκεκριμένα δείγματα.



Σχήμα 4.15 Διαγράμματα συσχέτισης βαρέων μετάλλων μεταξύ τους.

◆ : VS3, VS4, VS6, VS7, VS8, VS9, VS10, VS11, VS12, VS13, VS14, ▲ : VS1, VS2, VS5

4.2.4. ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΔΙΑΘΕΣΙΜΩΝ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

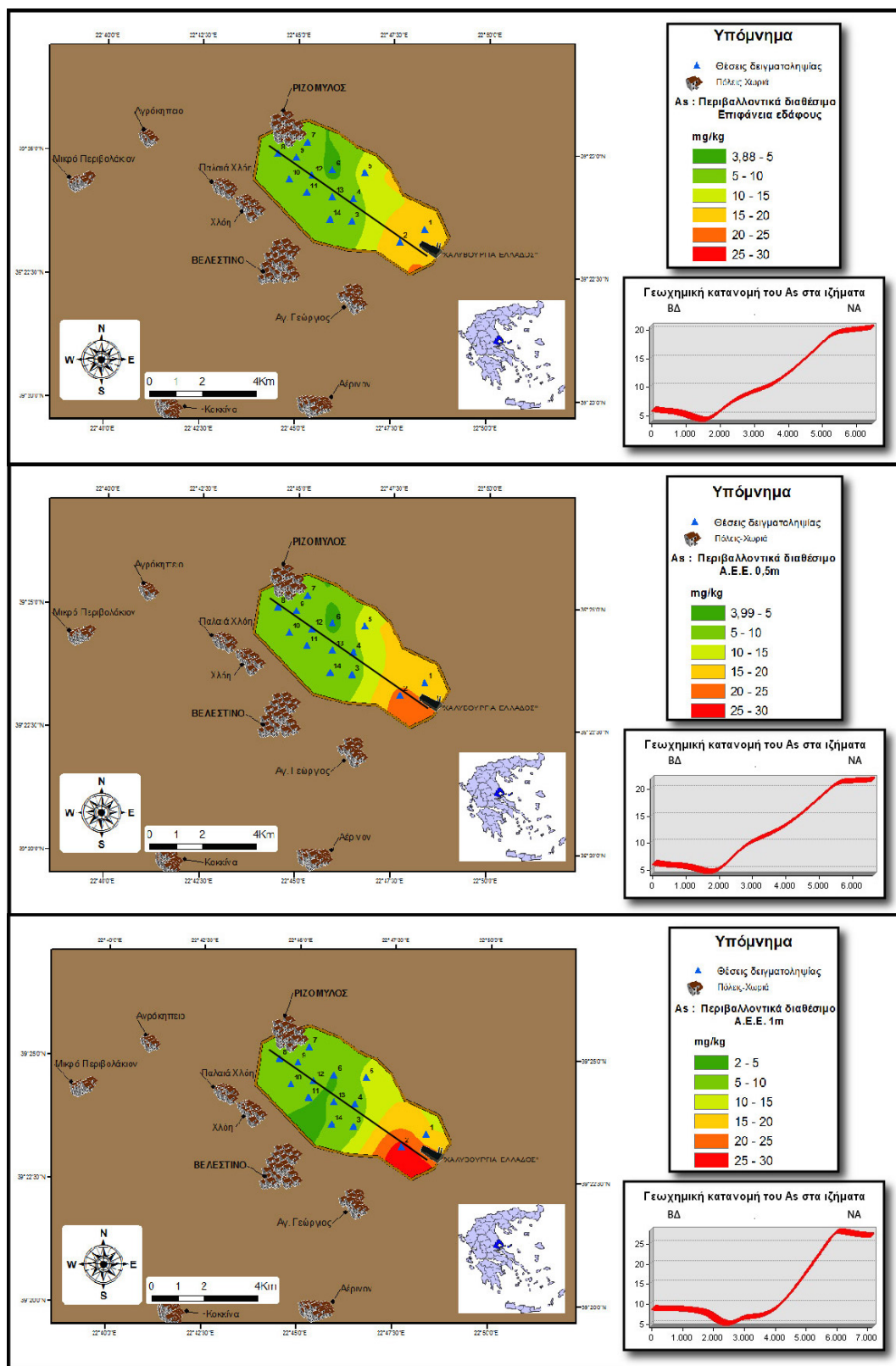
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι χωρικές κατανομές των περιβαλλοντικά διαθέσιμων βαρέων μετάλλων (As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb) στην περιοχή έρευνας για τα τρία βάθη δειγματοληψίας, καθώς επίσης παρουσιάζεται και μια γεωχημική κατανομή του κάθε στοιχείου. Η χωρική κατανομή περιορίζεται κοντά στο δίκτυο των δειγμάτων, καθώς αν πραγματοποιούνταν σε ολόκληρη τη περιοχή έρευνας δεν θα ήταν αντιπροσωπευτική, διότι δεν υπάρχουν αρκετά δείγματα για να την καλύψουν ολόκληρη.

Η κατανομή των βαρέων μετάλλων σε κάθε θέση δειγματοληψίας με το βάθος, είναι πολύ σημαντική για την εκτίμηση της φυσικής ή ανθρωπογενούς προέλευσης αυτών. Όταν ένα μέταλλο εμφανίζει υψηλές περιεκτικότητες επιφανειακά, ενώ βαθύτερα μειώνεται η συγκέντρωση του τότε πιθανόν η ύπαρξή του να συνδέεται με ανθρωπογενή ρύπανση. Αντίθετα όταν η συγκέντρωση κάποιου μετάλλου είναι εξίσου αυξημένη επιφανειακά αλλά και βαθύτερα (1 m), τότε είναι πιθανότερο το μέταλλο να βρίσκεται στις θέσεις αυτές γηγενώς, είτε λόγω των πετρωμάτων της περιοχής είτε εξαιτίας μεταλλοφοριών και μεταλλικών εμφανίσεων.

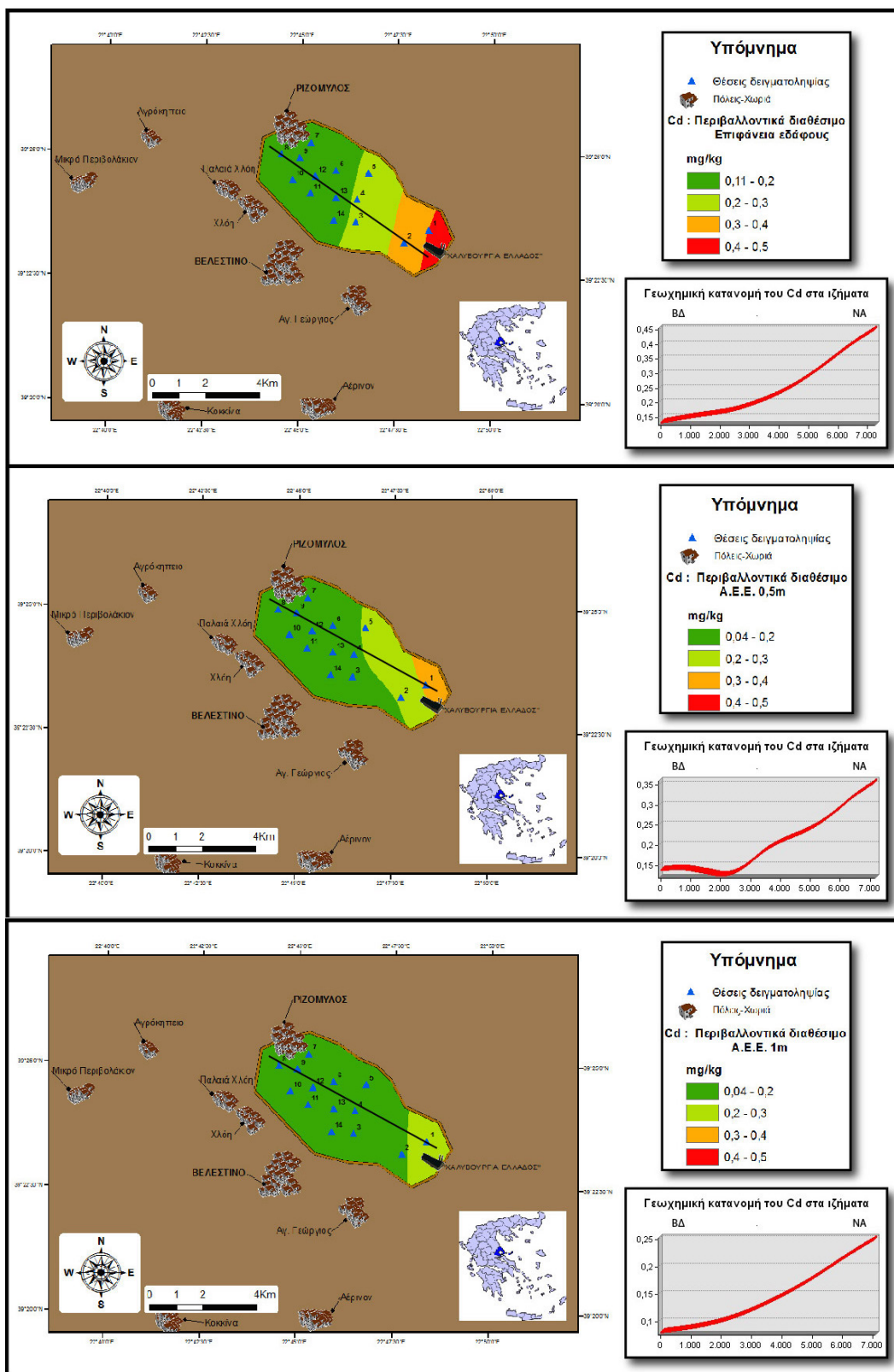
Στο σχήμα 4.16 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή του αρσενικού (As) στην περιοχή έρευνας. Όπως διαπιστώνεται η συγκέντρωση του αρσενικού είναι αυξημένη στην επιφάνεια και σε βάθος ενός μέτρου (1 m), ενώ στο δείγμα μισού μέτρου (0,5 m) είναι μειωμένη. Έτσι η συγκέντρωση του αρσενικού στην περιοχή είναι σε μεγάλο ποσοστό φυσικής προέλευσης καθώς αν υπήρχε μια ανθρωπογενής ρυπαντική δραστηριότητα, θα ήταν αυξημένες οι συγκεντρώσεις μόνο επιφανειακά και όχι στο δείγμα ενός μέτρου.

Η χωρική κατανομή του καδμίου (Cd) στην περιοχή παρουσιάζεται στο σχήμα 4.17. Οι περιεκτικότητες καδμίου στην επιφάνεια του εδάφους σε ένα δείγμα (VS1), φαίνεται πως είναι αυξημένες σε σχέση με τα 0,5 m και 1 m που μειώνονται. Αυτή η γεωχημική ανωμαλία που εντοπίζεται σε αυτό το δείγμα ίσως σχετίζεται με κάποια ανθρωπογενή δραστηριότητα που λαμβάνει χώρα κοντά, όπως η βιομηχανική περιοχή και η χαλυβουργία Ελλάδος.

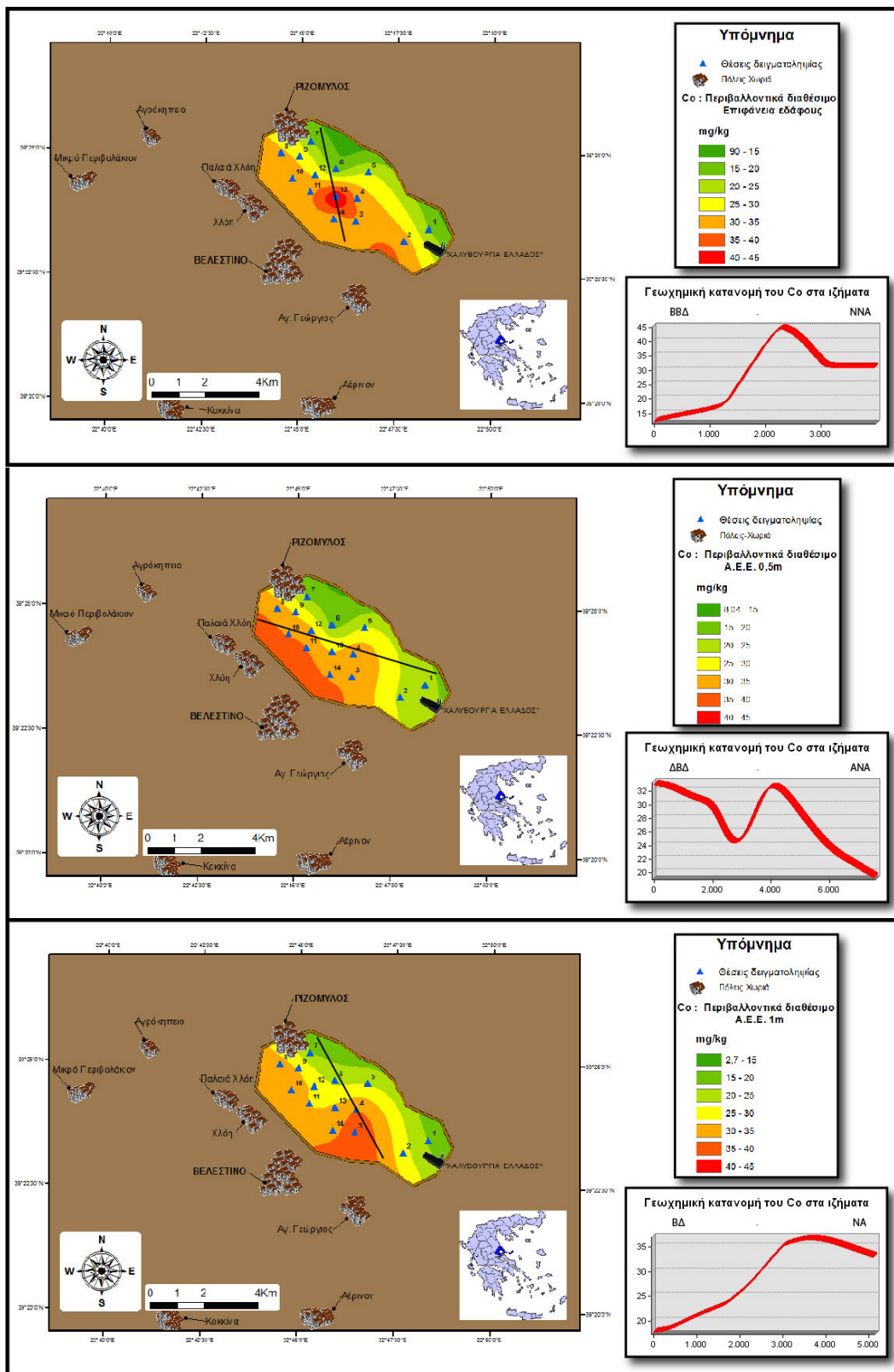
Στο σχήμα 4.18 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή του κοβαλτίου (Co) στην περιοχή έρευνας. Στο δείγμα VS13 παρατηρείται στην επιφάνεια του εδάφους μια γεωχημική ανωμαλία που προς το βάθος εξασθενεί αλλά συνεχίζει να υπάρχει αυξημένο κοβάλτιο και στα 0,5 και 1 m. Είναι πιο πιθανό λοιπόν οι συγκεντρώσεις να οφείλονται περισσότερο σε φυσικά αίτια καθώς η αυξημένη περιεκτικότητα δεν υποχωρεί εντελώς με το βάθος.



Σχήμα 4.16 Χωρική κατανομή του αρσενικού (As) σε επιφάνεια εδάφους, 0,5 m και 1 m.



Σχήμα 4.17 Χωρική κατανομή του καδμίου (Cd) σε επιφάνεια εδάφους, 0,5 m και 1 m.



Σχήμα 4.18 Χωρική κατανομή του κοβαλτίου (Co) σε επιφάνεια εδάφους, 0,5 m και 1 m.

Στο σχήμα 4.19 προβάλλεται η χωρική κατανομή του χρωμίου (Cr) με ιδιαίτερο ενδιαφέρον στο επιφανειακό δείγμα VS13 και VS2 που η συγκέντρωση χρωμίου είναι υψηλή ενώ στα 0,5 m μειώνεται σε αυτά τα δύο δείγματα, αλλά αυξάνεται στο δείγμα VS8 (περιοχή Ριζόμυλος), αυξάνοντας πάλι στο 1 m αυτή τη φορά στο δείγμα VS8, VS3 και VS4. Αυτή η γεωχημική ανωμαλία αιτιολογείται πιθανόν με τις εμφανίσεις χρωμιτών στην περιοχή έρευνας αλλά και των υπερβασικών πετρωμάτων (σχήμα 2.7 & 2.9).

Στο σχήμα 4.20 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή του χαλκού (Cu) στην περιοχή έρευνας. Παρατηρείται φανερά μια γεωχημική ανωμαλία στο δείγμα VS9 (περιοχή Ριζόμυλος), όπου οι συγκεντρώσεις είναι αυξημένες στην επιφάνεια του εδάφους και στα 0,5 m. Στο 1 m η συγκέντρωση χαλκού φαίνεται πως επιστρέφει απότομα σε φυσιολογικά επίπεδα. Αυτή η εικόνα της υψηλής κατανομής στην επιφάνεια και της απότομης πτώσης στο βάθος, ενισχύει την πιθανότητα ανθρωπογενής ρύπανσης στο σημείο όπως ήδη έχει αναφερθεί στις συσχετίσεις των μετάλλων και των οξειδίων.

Στο σχήμα 4.21 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή του μαγγανίου (Mn) στο χώρο. Οι γεωχημικές ανωμαλίες που δημιουργούνται σε μεγάλα τμήματα νότια στην περιοχή έρευνας οφείλονται πιθανά σε γηγενή προέλευση του μαγγανίου καθώς στην περιοχή υπάρχουν τέτοιες εμφανίσεις (Μιγκίρος 1998), (σχήμα 2.9).

Η χωρική κατανομή του νικελίου (Ni) (σχήμα 4.22) παρουσιάζει και αυτή ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς στα επιφανειακά δείγματα VS13 και VS2 παρατηρείται αυξημένη συγκέντρωση ενώ στα επόμενα βάθη αυτή η γεωχημική ανωμαλία μειώνεται αισθητά. Ενώ η παρουσία νικελίου μπορεί να δικαιολογηθεί με την γεωλογία της περιοχής καθώς και στις συσχετίσεις με τα οξείδια φαίνεται να είναι δεσμευμένο στις κρυσταλλικές φάσεις, υπάρχει εντούτοις το επιφανειακό αυτό δείγμα VS13a που δημιουργεί ερωτηματικά σχετικά με τη φυσική προέλευση του συγκεκριμένου δείγματος.

Ο μόλυβδος (Pb) επίσης, παρουσιάζει μια γεωχημική ανωμαλία στην χωρική του κατανομή (σχήμα 4.23) στο δείγμα VS8 (περιοχή Ριζόμυλος) η οποία στα επόμενα βάθη εξαφανίζεται εντελώς. Όπως έχει αναφερθεί αν η προέλευση του ήταν γηγενής θα είχε μια ομαλή διακύμανση και στα βαθύτερα εκτός από τα επιφανειακά δείγματα. Στη περίπτωση αυτή όμως, που δεν συμβαίνουν τα παραπάνω η αιτία παρουσίας της συγκέντρωσης μολύβδου στο δείγμα VS8, κοντά στην κατοικήσιμη περιοχή, πιθανά να οφείλεται σε ανθρωπογενείς παράγοντες.

Τέλος η χωρική κατανομή του ψευδαργύρου (Zn) στην περιοχή απεικονίζεται στο σχήμα 4.24. Τα δείγματα VS9 και VS4 φαίνεται πως έχουν κάποια αυξημένη συγκέντρωση στα 0,5m, ενώ στην επιφάνεια μόνο το VS9 φαίνεται να είναι αυξημένο. Σε βάθος 1 m μειώνονται ομαλά οι συγκεντρώσεις. Για το δείγμα VS9a,b που βρίσκεται κοντά στην κατοικήσιμη περιοχή Ριζόμυλος, υπάρχει πιθανότητα οι συγκεντρώσεις ψευδαργύρου σε αυτό να είναι ανθρωπογενείς καθώς και στις συσχετίσεις με τα οξείδια παρατηρήθηκε πως σε αυτό το σημείο δεν είναι δεσμευμένο στο πλέγμα των κρυσταλλικών φάσεων.

4.2.5. ΑΝΩΤΑΤΑ ΟΡΙΑ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΩΝ ΧΗΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΑ ΕΔΑΦΗ

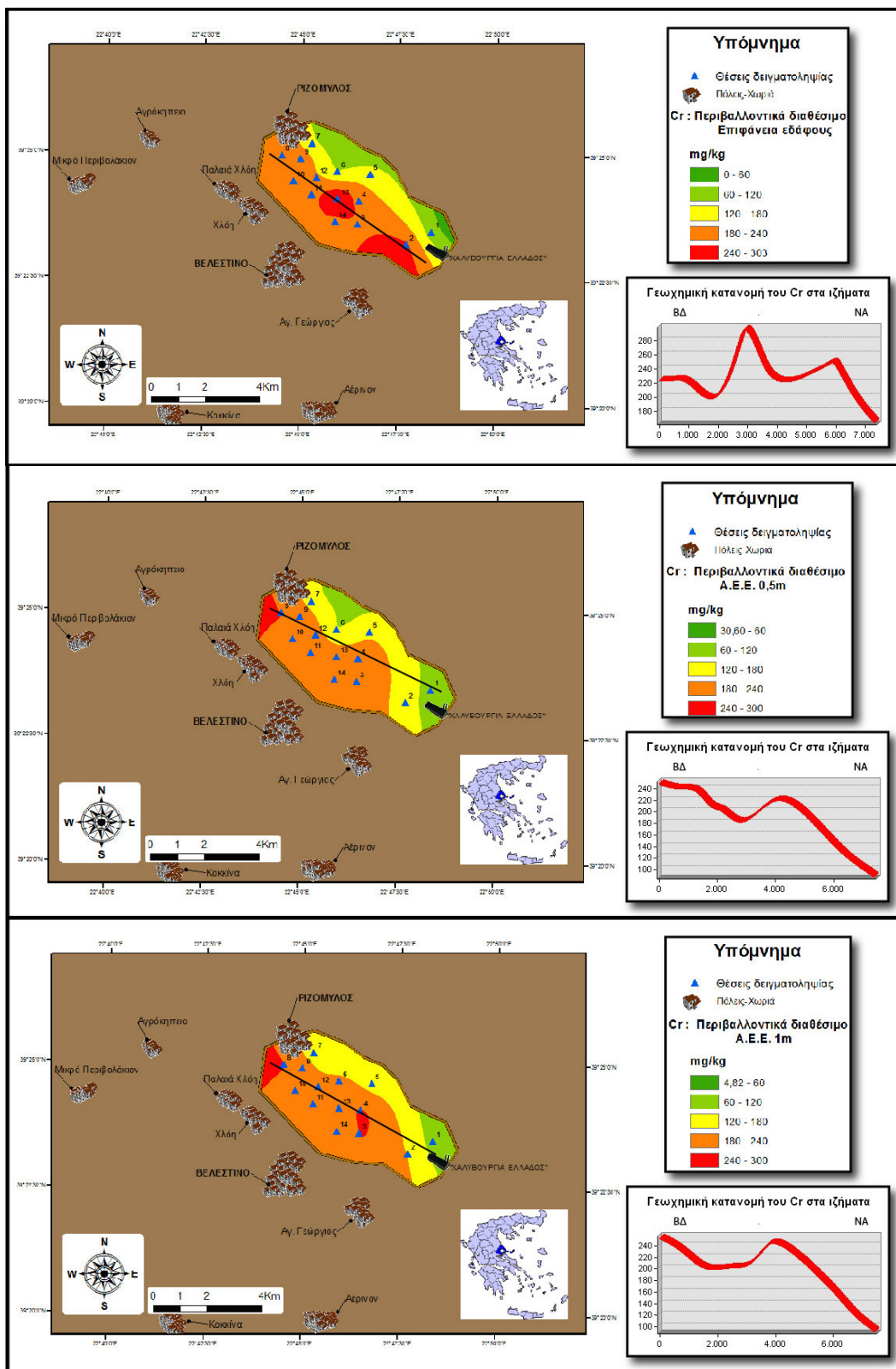
Οι γεωχημικές ανωμαλίες των βαρέων μετάλλων στα εδαφικά δείγματα που εντοπίστηκαν και σχολιάστηκαν στα προηγούμενα υποκεφάλαια, αποτελούν αφενός σημαντικές επισημάνσεις και τοποθετήσεις από την άλλη μεριά δεν σημαίνει ότι όλες οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων στα οποία εντοπίζεται μια γεωχημική ανωμαλία είναι πάνω από τα επιτρεπτά όρια. Στον πίνακα 4.7 παρουσιάζονται τα επιτρεπτά όρια των συγκεντρώσεων των βαρέων μετάλλων όπως έχουν θεσπιστεί από την Ευρωπαϊκή νομοθεσία (Kabata Pendias 2011) καθώς και τα ποιοτικά πρότυπα των ιζημάτων (SQGs), σύμφωνα με την Environmental Protection Agency (EPA), (Perin et al. 1997).

Πίνακας 4.7 Ποιοτικά πρότυπα ιζημάτων.

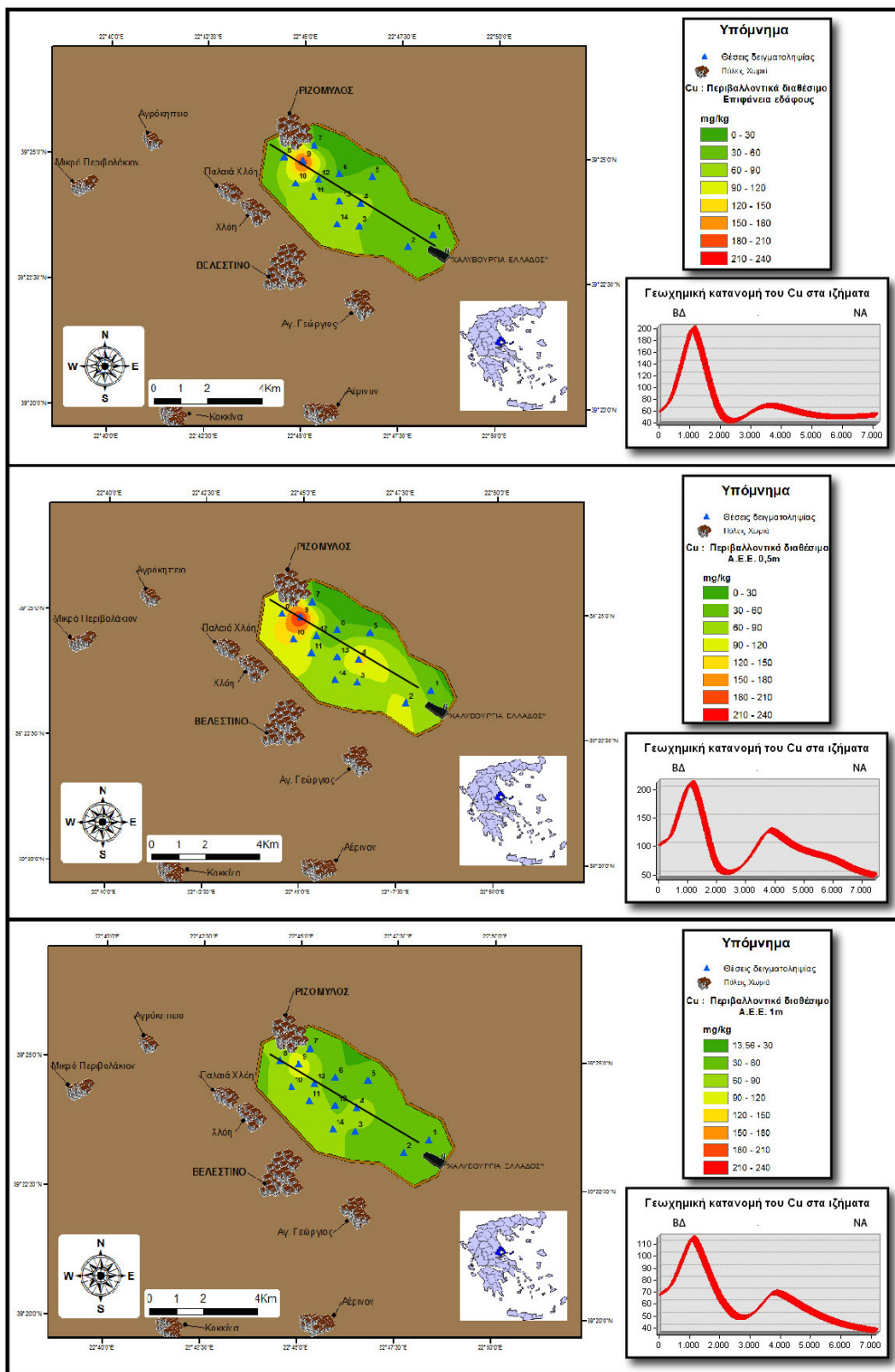
Ποιοτικά Πρότυπα ιζημάτων	ppm (mg/kg)					
	Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Cr
Ευρώπη*	150	300	300	50	75	150
USEPA**						
Μη Μολυσμένα	<25	<40	<90	-	<20	<25
Μέτρια Μολυσμένα	25-50	40-60	90-200	-	20-50	25-75
Πολύ Μολυσμένα	>50	>60	>200	-	>50	>75

*Ανώτερα επιτρεπτά όρια των συγκεντρώσεων των βαρέων μετάλλων όπως έχουν θεσπιστεί από την ευρωπαϊκή νομοθεσία (Kabata Pendias 2011).

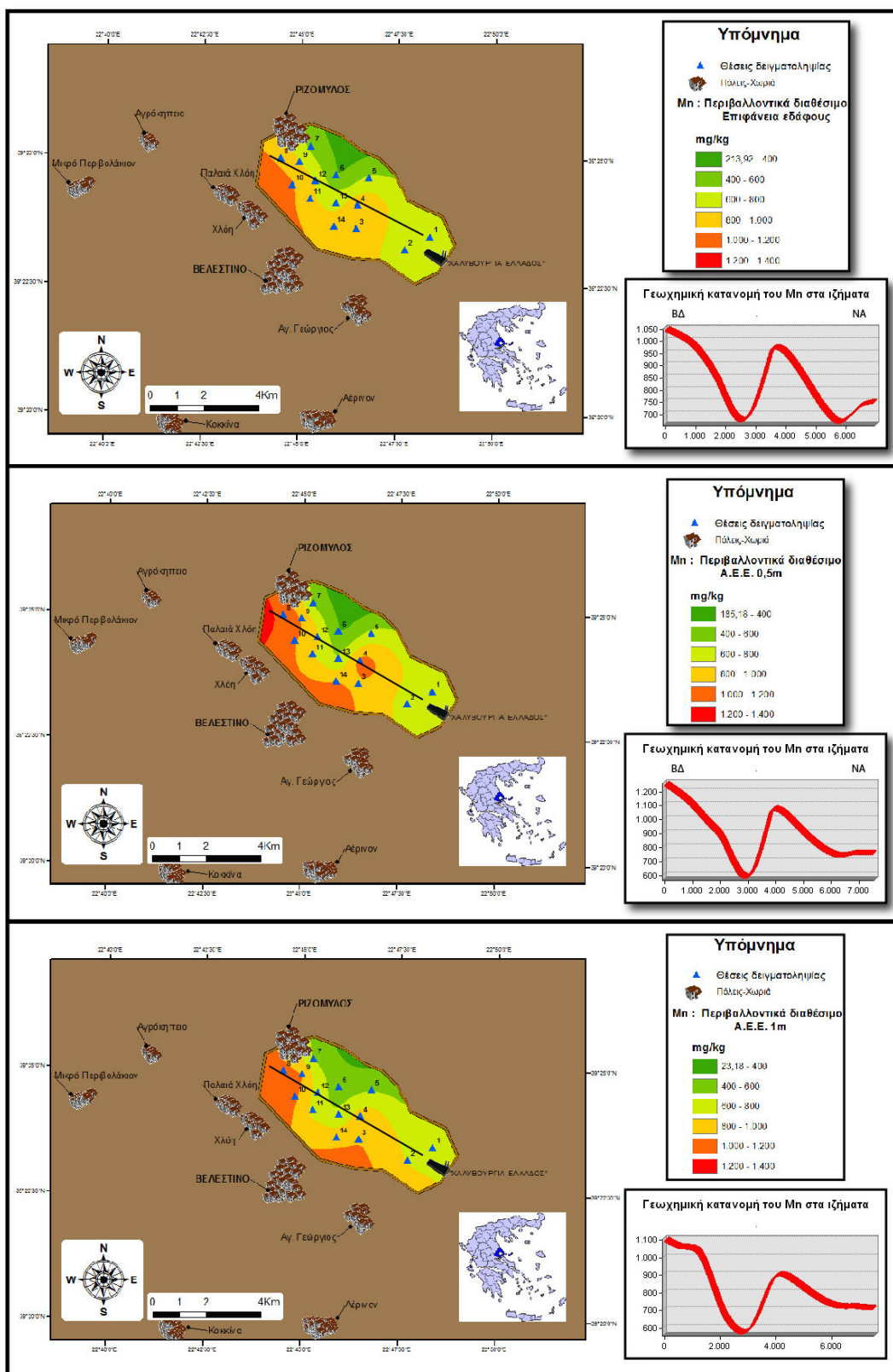
**Ποιοτικά πρότυπα ιζημάτων (SQGs), σύμφωνα με την Environmental Protection Agency (Perin et al. 1997).



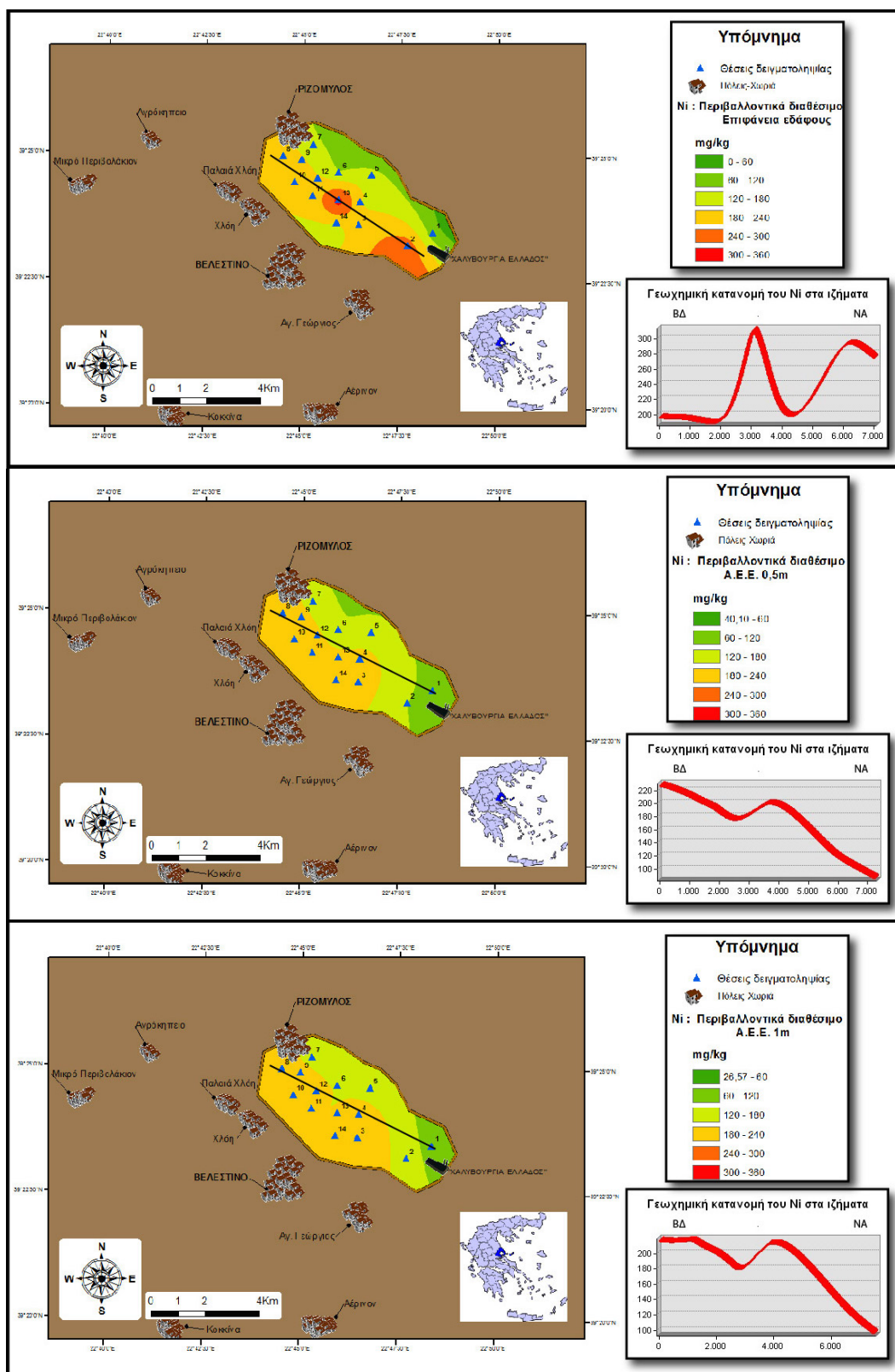
Σχήμα 4.19 Χωρική κατανομή του χρωμίου (Cr) σε επιφάνεια εδάφους, 0,5 m και 1 m.



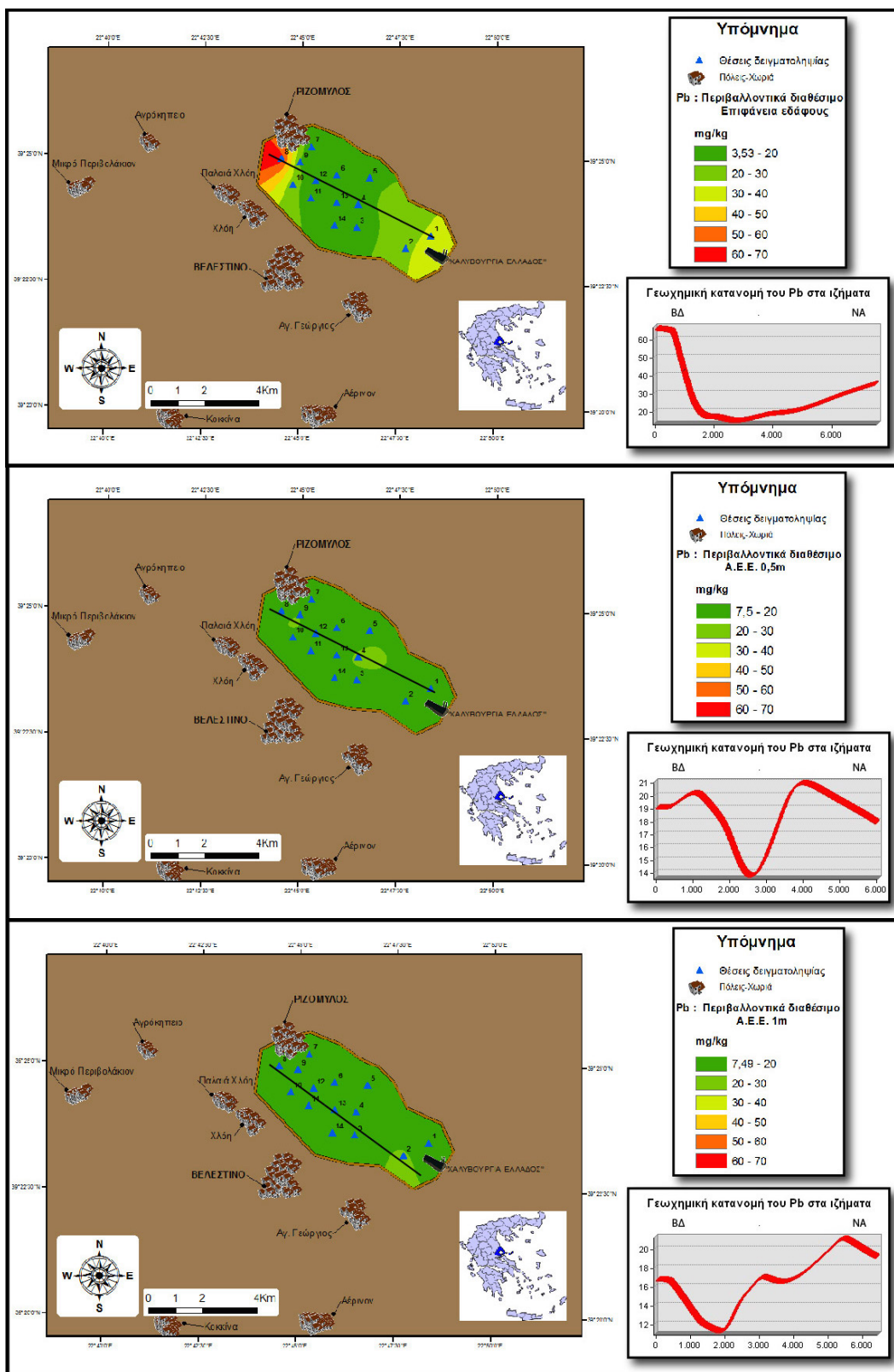
Σχήμα 4.20 Χωρική κατανομή του χαλκού (Cu) σε επιφάνεια εδάφους, 0,5 m και 1 m.



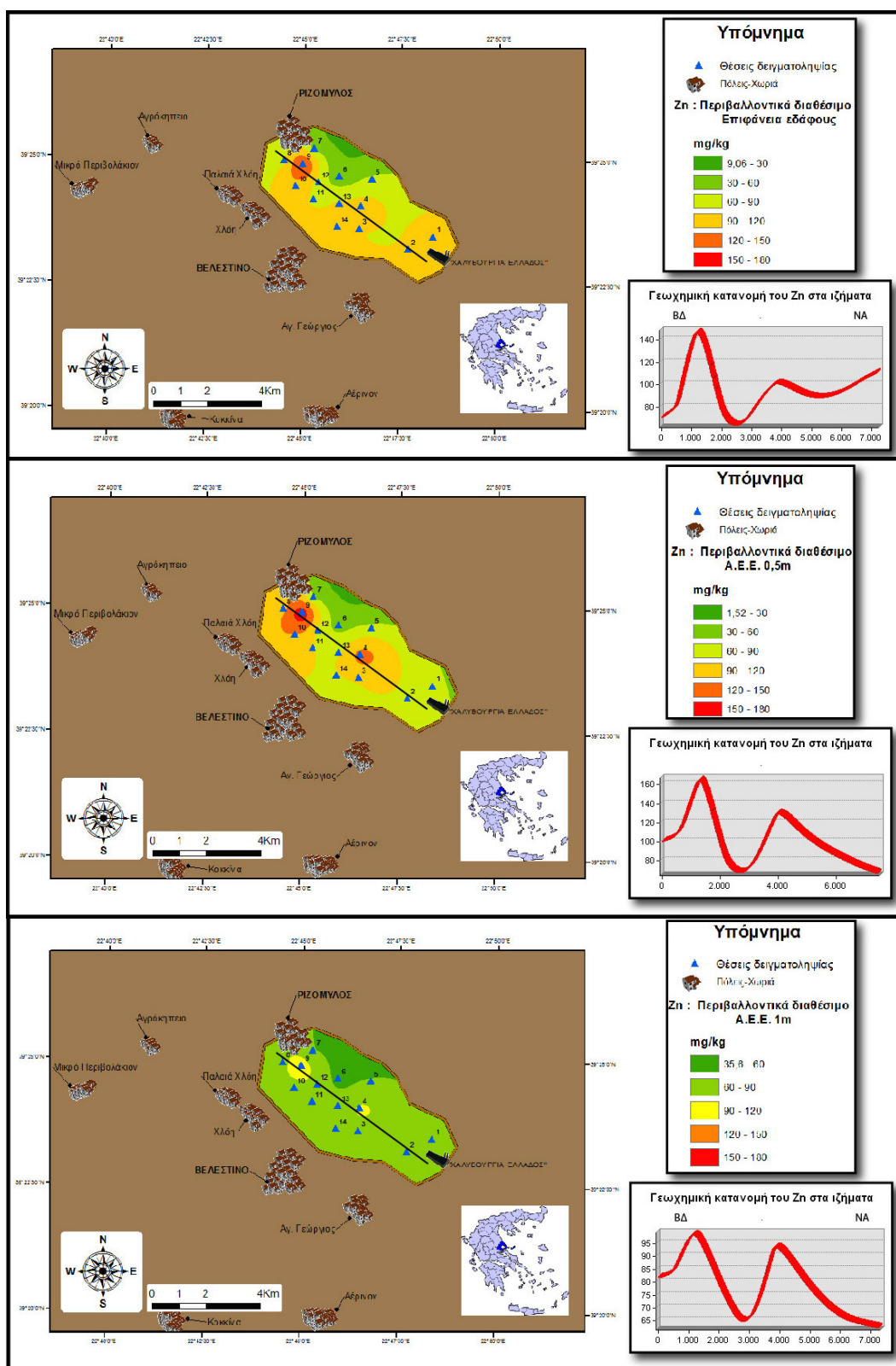
Σχήμα 4.21 Χωρική κατανομή του μαγγανίου (Mn) σε επιφάνεια εδάφους, 0,5 m και 1 m.



Σχήμα 4.22 Χωρική κατανομή του νικελίου (Ni) σε επιφάνεια εδάφους, 0,5 m και 1 m.

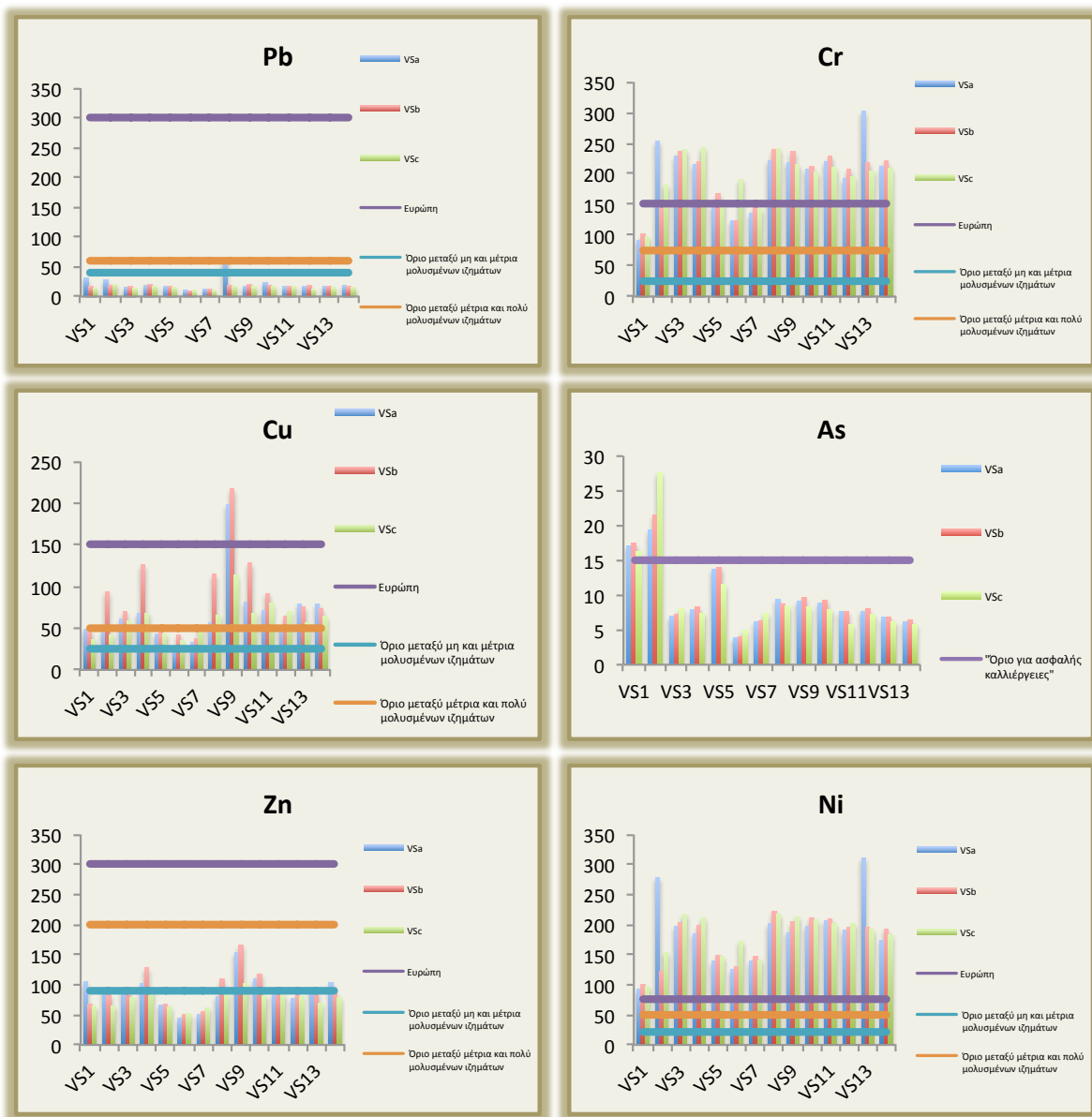


Σχήμα 4.23 Χωρική κατανομή του μολύβδου (Pb) σε επιφάνεια εδάφους, 0,5 m και 1 m.



Σχήμα 4.24 Χωρική κατανομή του ψευδαργύρου (Zn) σε επιφάνεια εδάφους, 0,5 m και 1 m.

Στο σχήμα 4.25 παρουσιάζονται τα βαρέα μέταλλα στα οποία παρατηρήθηκε ότι υπερβαίνουν κάποια από τα προηγούμενα όρια των συγκεντρώσεων. Τα μέταλλα αυτά είναι ο μόλυβδος (Pb), το χρώμιο (Cr), ο χαλκός (Cu), το αρσενικό (As), ο ψευδάργυρος (Zn), και το νικέλιο (Ni). Αναλυτικά το δείγμα VS8a του μολύβδου (Pb) βρίσκεται λίγο πάνω από το όριο μεταξύ μέτρια και πολύ ρυπασμένων ιζημάτων. Τα δείγματα VS2b, VS3(a,b,c), VS4(a,b,c), VS8(a,b,c), VS9(a,b,c), VS10(a,b,c), VS11(a,b,c), VS12(a,b,c), VS13(a,b,c) και VS14(a,b,c) του χαλκού βρίσκονται πάνω από το όριο των μέτρια και πολύ μολυσμένων ιζημάτων ενώ το VS9a,b βρίσκεται και πάνω από το όριο που θεσπίζει η Ευρωπαϊκή νομοθεσία (150 mg/kg).



Σχήμα 4.25 Ανώτατα όρια συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων στην περιοχή έρευνας.

Ο ψευδάργυρος (Zn) στα δείγματα VS2a, VS3b, VS4a,b VS8b, VS9a,b,c, VS10a,b, VS11b, VS13a και VS14a βρίσκεται πάνω από το όριο μη και μετρίως ρυπασμένων ιζημάτων. Το χρώμιο (Cr) σε όλα τα δείγματα βρίσκεται πάνω από το όριο μεταξύ μέτρια και πολύ ρυπασμένων ιζημάτων αλλά στα δείγματα VS2a,c, VS3a,b,c, VS4(a,b,c), VS5b,c, VS6c, VS8(a,b,c), VS9(a,b,c), VS10(a,b,c), VS11(a,b,c), VS12(a,b,c), VS13(a,b,c) και VS14(a,b,c) βρίσκεται πάνω από το όριο που θεσπίζει η Ευρωπαϊκή νομοθεσία για τα ιζήματα (150 mg/kg). Όσον αφορά το αρσενικό η Kabata-Pendias (2011) συνόψισε τα όρια που δίνουν πολλοί ερευνητές πάνω από τα οποία οι συγκεντρώσεις του αρσενικού θεωρούνται φυτοτοξικές. Αυτά είναι 15, 20, 25, 30 και 50 mg/kg. Αν λοιπόν η μικρότερη τιμή θεωρηθεί και οριακή (15 mg/kg), τότε τα δείγματα VS1 a,b,c και VS2a,b,c βρίσκονται πάνω από το όριο αυτό και θεωρούνται μη ασφαλή για καλλιέργειες.

Τέλος το νικέλιο όπως παρατηρείται πως είναι σε όλα τα δείγματα πάνω από το όριο που θεσπίζει η Ευρωπαϊκή νομοθεσία (75 mg/kg) και πολύ πάνω από το όριο μεταξύ μετρίως και πολύ μολυσμένων ιζημάτων (>50 μg/kg πολύ μολυσμένα).

4.3. ΡΥΠΑΝΤΙΚΗ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

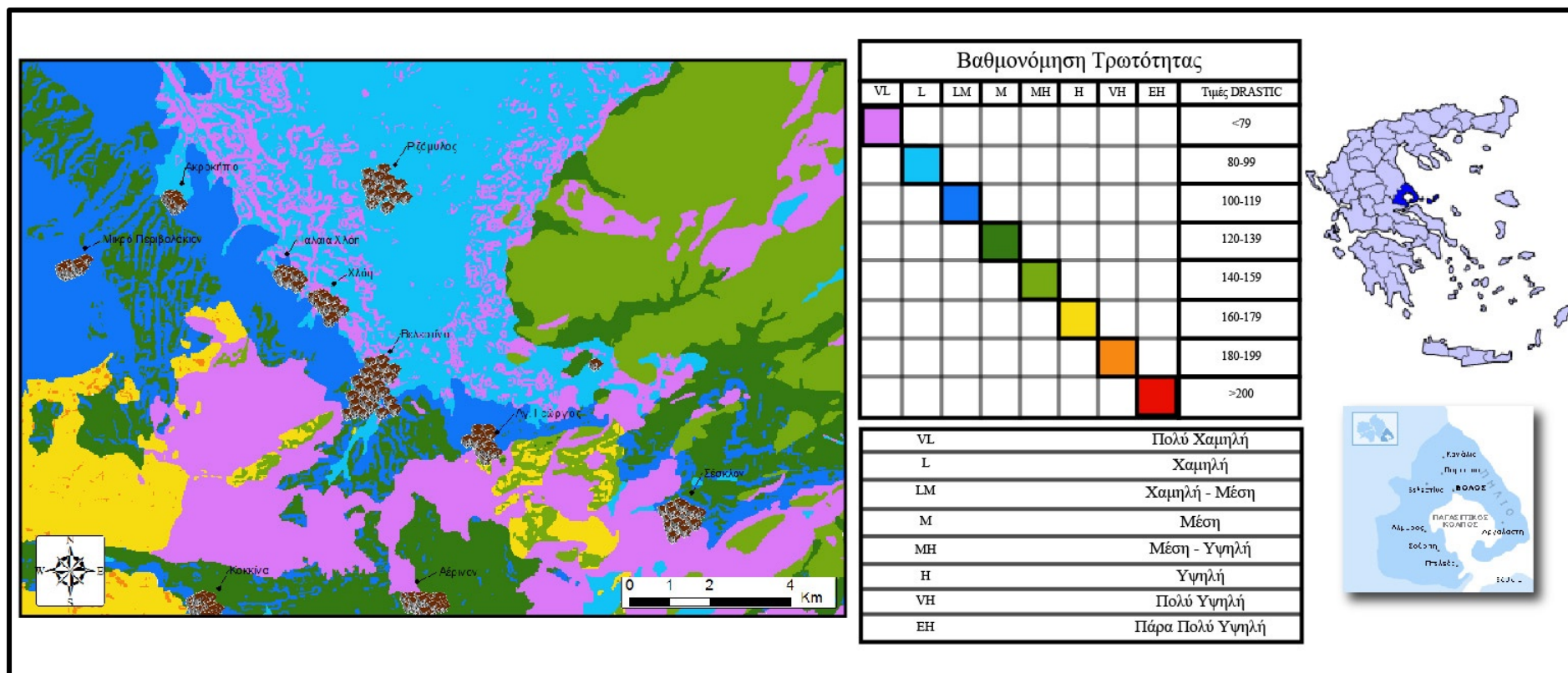
Για την κατασκευή του τελικού χάρτη DRASTIC υπολογίστηκε ο δείκτης DI σύμφωνα με τη σχέση 3.1, τις τιμές της γενικής βαρύτητας του πίνακα 3.2 καθώς και με τη χρήση του εργαλείου raster calculator του ArcMap. Στη συνέχεια οι τιμές του δείκτη DI ομαδοποιήθηκαν σε οκτώ κλάσεις σύμφωνα με την πρωτότυπη μέθοδο που προτείνει η Aller (1987). Η τρωτότητα του υπόγειου υδροφορέα στη περιοχή έρευνας, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.26, κυμαίνεται από πολύ χαμηλή (<79) έως πολύ υψηλή (180-199). Χαμηλή έως πολύ χαμηλή τρωτότητα παρατηρείται στις αλλουβιακές αποθέσεις, περιοχή Ριζόμυλος, καθώς και στον φλύσχη και τα μεταμορφωμένα πετρώματα νοτιοανατολικά στην περιοχή έρευνας και απεικονίζεται με γαλάζιο και μωβ χρώμα. Οι περιοχές με μπλε και σκούρο πράσινο χρώμα έχουν χαμηλή-μέση και μέση τρωτότητα αντίστοιχα και είναι οι περιοχές που καλύπτονται κυρίως από ποταμοχειμάρειες αποθέσεις και κορήματα. Περισσότερο ευάλωτες στη ρύπανση είναι οι περιοχές με ανοιχτό πράσινο και κίτρινο χρώμα με μέση-υψηλή και υψηλή τρωτότητα αντίστοιχα. Αυτά είναι τμήματα που καλύπτονται από ασβεστόλιθους και μάρμαρα και κυρίως βρίσκονται στο νοτιοδυτικό και βορειοανατολικό τμήμα της περιοχής έρευνας. Η διακύμανση της τρωτότητας στην περιοχή έρευνας, είναι αυτή που αναμενόταν σύμφωνα με τη βαθμονόμηση των

παραμέτρων της μεθόδου DRASTIC. Υψηλή τρωτότητα παρουσιάζουν περιοχές που βαθμονομήθηκαν με υψηλή τιμή, ενώ χαμηλή τρωτότητα παρουσιάζουν οι περιοχές που βαθμονομήθηκαν με χαμηλότερες τιμές σύμφωνα με Aller (1987). Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι, περιοχές με υψηλή τρωτότητα στην εξωτερική ρύπανση δεν σημαίνει ότι είναι ήδη ρυπασμένες αλλά ότι σύμφωνα με τις παραμέτρους που εξετάζει η DRASTIC είναι πιο ευάλωτες στη ρύπανση από κάποιες άλλες. Ακόμη, περιοχές με χαμηλή τρωτότητα στην εξωτερική ρύπανση δεν σημαίνει ότι δεν μπορούν να προβληθούν ποτέ από ρύπους, απλώς είναι λιγότερο ευάλωτες από τις υπόλοιπες.

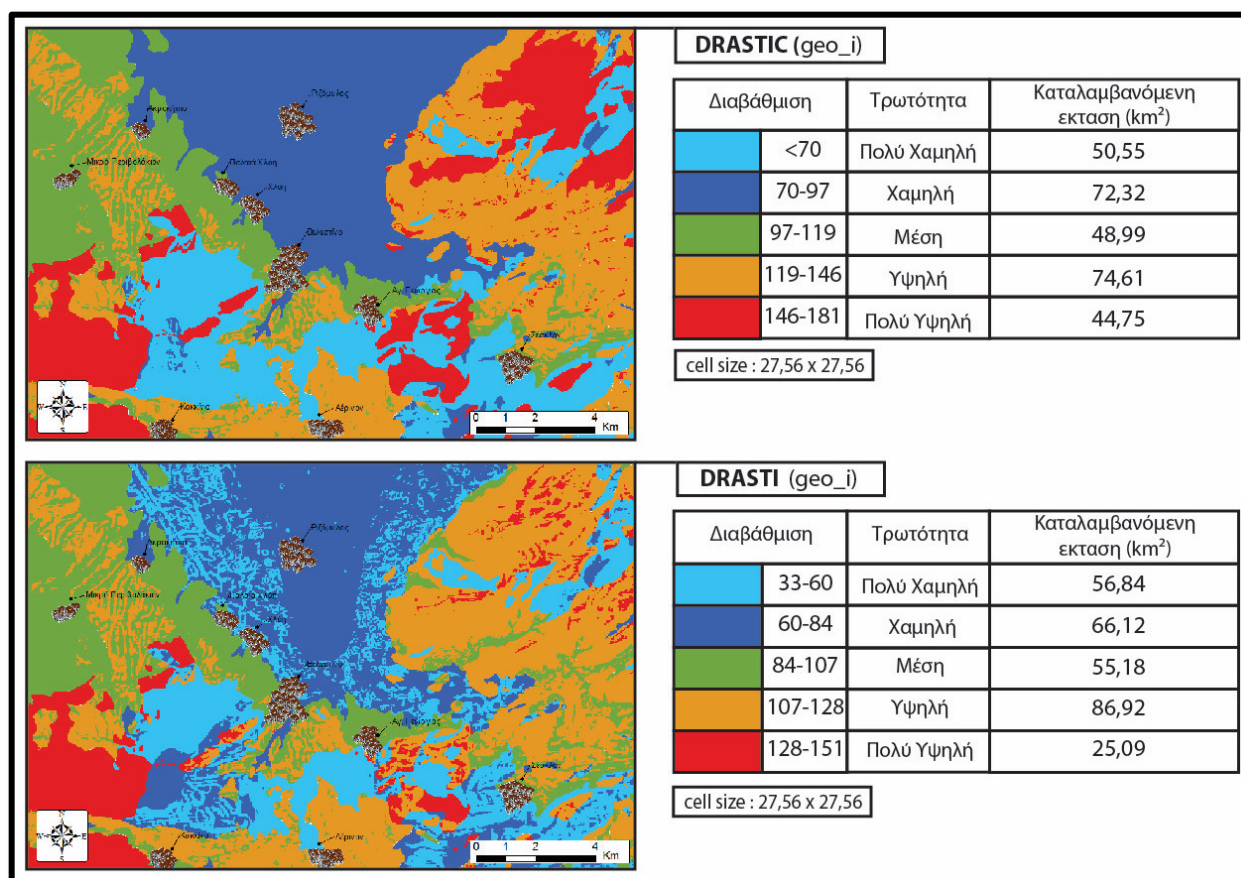
4.3.1. ΣΥΓΚΡΙΣΗ DRASTIC-DRASTI

Η σύγκριση των δύο μεθόδων DRASTIC και DRASTI πραγματοποιήθηκε για να διαπιστωθεί αν η παράμετρος της υδραυλικής αγωγιμότητας (C), που συμπληρώθηκε βιβλιογραφικά, επηρεάζει και αλλοιώνει τα αποτελέσματα της DRASTIC. Για την σύγκριση των δύο χαρτών DRASTIC και DRASTI ήταν απαραίτητο να ομαδοποιηθούν και οι δύο χάρτες σε πέντε κλάσεις με την ίδια ταξινόμηση τρωτότητας, ώστε να μπορούν να είναι εύκολα και ορθά συγκρίσιμοι. Αυτό επιτεύχθηκε όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο των μεθόδων έρευνας με το εργαλείο geometrical interval του ArcGis. Για να υπολογιστεί η καταλαμβανόμενη έκταση της κάθε κλάσης και στις δύο μεθόδους, πολλαπλασιάστηκε το μέγεθος κάθε κελιού υψωμένο στο τετράγωνο με την έκταση κάθε κλάσης στο ArcMap (count). Έτσι στο σχήμα 4.27, παρουσιάζονται οι δύο χάρτες με την διαβάθμιση και την τρωτότητά τους, αλλά και την έκταση που καταλαμβάνει η κάθε κλάση.

Στον χάρτη DRASTIC όπως φαίνεται στο σχήμα 4.27, την μεγαλύτερη έκταση την καταλαμβάνει η «υψηλή» τρωτότητα (119-146) με 74,61 km², όπως το ίδιο παρατηρείται και στον χάρτη DRASTI με την «υψηλή» τρωτότητα (107-128) να καταλαμβάνει 86,92 km². Την μικρότερη έκταση και στους δύο χάρτες την καταλαμβάνει η «πολύ υψηλή» τρωτότητα με 44,75 km² για τον DRASTIC και 25,09 km² τον DRASTI. Η «πολύ χαμηλή» τρωτότητα καταλαμβάνει μεγαλύτερη έκταση στον χάρτη DRASTI αλλά όχι με πολύ μεγάλη διαφορά σε σχέση με τον DRASTIC. Αντίθετα η μεγάλη διαφορά που παρατηρείται στο βορειοανατολικό τμήμα της περιοχής μεταξύ DRASTIC και DRASTI, στους ασβεστολίθους και τα μάρμαρα, έγκειται στο γεγονός ότι βιβλιογραφική εκτίμηση της υδραυλικής αγωγιμότητας (k) για τους σχηματισμούς



Σχήμα 4.26 Χάρτης τρωτότητας της περιοχής μελέτης με τη μεθοδο DRASTIC.

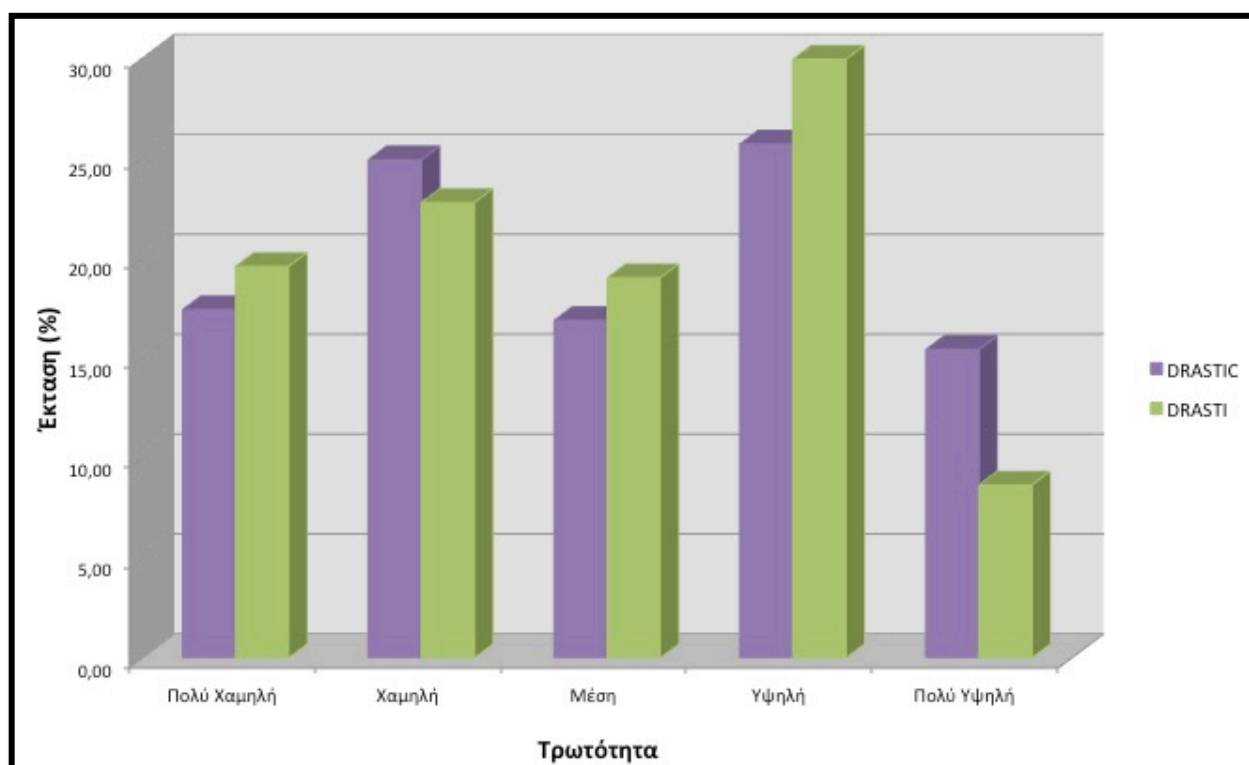


Σχήμα 4.27 Σύγκριση τρωτότητας και καταλαμβάνόμενης έκτασης των μεθόδων DRASTIC και DRASTI.

αυτούς δίνει υψηλές τιμές βαθμονόμησης και αυξάνει την «πολύ υψηλή τρωτότητα» στην περιοχή (κόκκινο χρώμα). Αντίθετα αφαιρώντας εντελώς την παράμετρο C, η «πολύ υψηλή τρωτότητα» γίνεται αμέσως «υψηλή». Στο σχήμα 4.28 παρουσιάζεται ένα ραβδόγραμμα που απεικονίζει την έκταση (%) που καταλαμβάνει κάθε κλάση των δεικτών DRASTIC και DRASTI.

Όπως παρατηρείται, υπάρχουν διαφορές στην έκταση που καταλαμβάνει κάθε κλάση αλλά οι περισσότερες είναι αρκετά μικρές. Εξάιρεση αποτελούν οι κλάσεις «υψηλή» και «πολύ υψηλή» τρωτότητα που η διαφορά στην έκταση είναι 12,31 km και 19,66 km αντίστοιχα. Στην «υψηλή» τρωτότητα η DRASTIC καταλαμβάνει μικρότερη έκταση ενώ στην «πολύ υψηλή» τρωτότητα καταλαμβάνει μεγαλύτερη σε σχέση με την DRASTI. Συμπερασματικά, οι μεγάλες διαφορές εντοπίζονται κυρίως μεταξύ πολύ χαμηλής - χαμηλής τρωτότητας και υψηλής - πολύ υψηλής όπως εντοπίζεται στο βορειοανατολικό και κεντρικό τμήμα της περιοχής έρευνας. Επομένως, με μια πρώτη ματιά η DRASTI φαίνεται να διαφέρει σε κάποια τμήματα με την

DRASTIC άρα η βιβλιογραφική συμπλήρωση της υδραυλικής αγωγιμότητας (k) δεν αποτελεί την αντιπροσωπευτικότερη εικόνα της πραγματικότητας. Όμως, με μια δεύτερη ανάγνωση γίνεται αντιληπτό ότι αφενός η μη συμμετοχή της παραμέτρου C είναι μεγαλύτερο σφάλμα καθώς όπως έχει ήδη αναφερθεί αποτελεί σημαντική παράμετρο γιατί δείχνει την ευκολία κίνησης του νερού άρα και του ρύπου στον υδροφορέα και αφετέρου ο χάρτης τρωτότητας αποτελεί έναν συμβουλευτικό χάρτη απεικονίζοντας τις πιο ευάλωτες περιοχές στη ρύπανση και όχι τις ήδη ρυπασμένες, επομένως οι χαρακτηρισμοί «υψηλή» και «πολύ υψηλή» τρωτότητα δεν έχουν τεράστιες διαφορές στη σημασία τους. Φυσικά η καλύτερη δυνατή λύση για την ακριβή συμπλήρωση της παραμέτρου θα ήταν όπως ήδη αναφέρεται να υπάρχουν δεδομένα δοκιμαστικών αντλήσεων στην περιοχή.

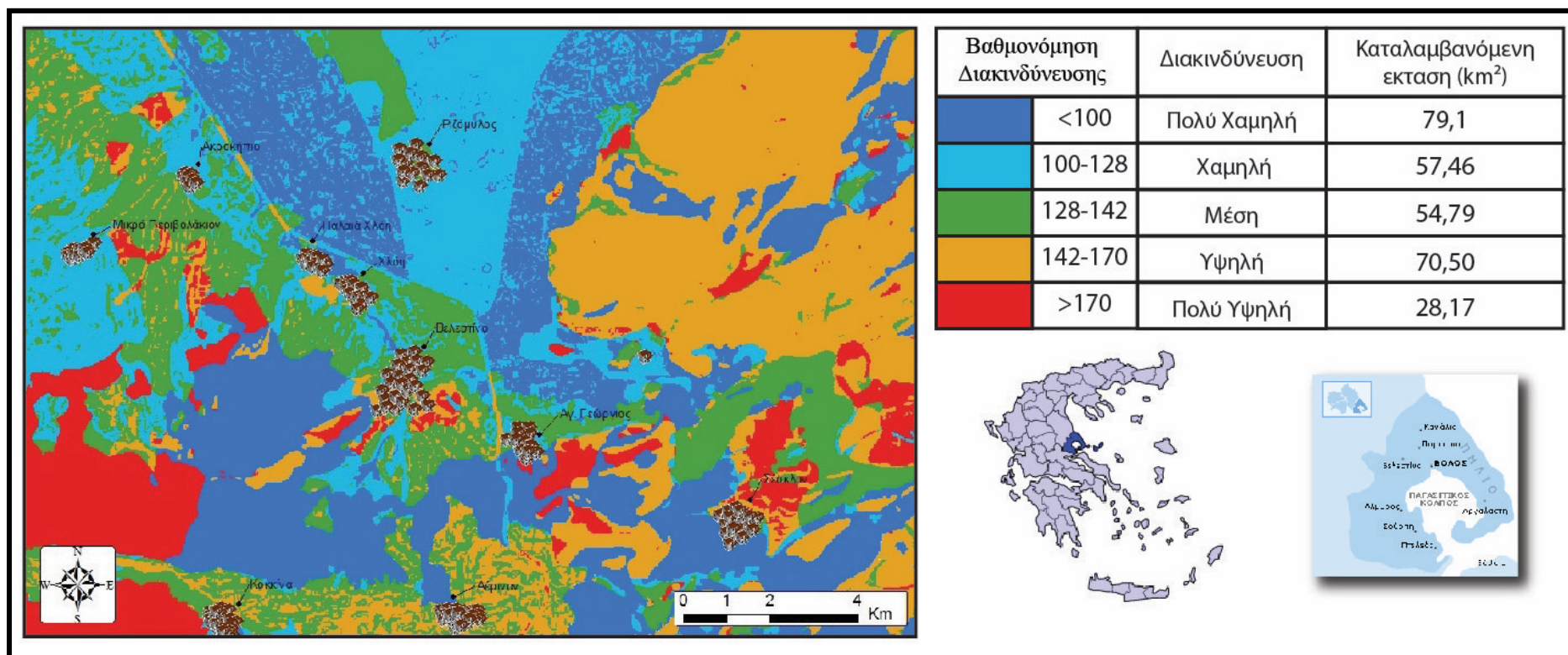


Σχήμα 4.28 Ραβδόγραμμα με την έκταση (%) που καταλαμβάνουν οι κλάσεις των δεικτών DRASTIC και DRASTI.

4.3.2. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗΝ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ

Σύμφωνα με το χάρτη χρήσεων γης (σχήμα 2.20) ο οποίος βαθμονομήθηκε βάση βιβλιογραφίας (βλ. κεφάλαιο 3.2) και με την εφαρμογή του δείκτη DRASTIC-L (σχέση 3.2), κατασκευάστηκε ο χάρτης διακινδύνευσης του υπόγειου νερού της περιοχής έρευνας (σχήμα 4.29). Η καταλαμβανόμενη έκταση υπολογίστηκε ακριβώς όπως και στο χάρτη DRASTIC και DRASTI. Η τιμή διακινδύνευσης στο χάρτη ομαδοποιήθηκε σε πέντε κλάσεις σύμφωνα με Καζάκης (2013). Τη μεγαλύτερη έκταση καταλαμβάνει η «πολύ χαμηλή» διακινδύνευση (<100) με 79,1 km² η οποία συμπίπτει σε αρκετά τμήματα με την πολύ χαμηλή τρωτότητα (σχήμα 4.3), ενώ τη μικρότερη έκταση καταλαμβάνει η «πολύ υψηλή» διακινδύνευση (>170) με 28,17 km² η οποία συμπίπτει με την υψηλή τρωτότητα στο νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής (σχήμα 4.26).

Η υψηλή διακινδύνευση συμπίπτει σε πολλά τμήματα με την μέση-υψηλή τρωτότητα (σχήμα 4.26) και αυτό συμβαίνει γιατί οι χρήσεις γης στο βορειοανατολικό τμήμα, έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα εκδήλωσης κάποιου ρυπαντικού επεισοδίου αυξάνοντας τη διακινδύνευση της περιοχής. Επίσης μέση-υψηλή και υψηλή διακινδύνευση εμφανίζουν αρκετές περιοχές που έχουν χαμηλή-πολύ χαμηλή και μέση τρωτότητα ακριβώς γιατί οι χρήσεις γης στα τμήματα αυτά έχουν κάποια εύλογη πιθανότητα εκδήλωσης ρυπαντικού φαινομένου, όπως για παράδειγμα στο βόρειο βορειοδυτικό τμήμα της περιοχής που εντοπίζονται σύνθετα συστήματα καλλιέργειας και οι περιοχές είναι «κόκκινες». Τέλος ενδιαφέρον παρουσιάζει η περιοχή με τις βιομηχανικές μονάδες (σχήμα 2.20), η οποία βρίσκεται στο νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής έρευνας και έχει μέση-υψηλή τρωτότητα ενώ η διακινδύνευση της λόγω της αυξημένης εκδήλωσης ρυπαντικού φαινομένου είναι πολύ υψηλή.



Σχήμα 4.29 Χάρτης διακινδύνευσης του υπόγειου νερού της περιοχής μελέτης.

5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

5.1. ΓΕΩΧΗΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΥΔΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΔΑΦΩΝ

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, ένας απο τους δύο στόχους της παρούσας διατριβής ήταν να μελετηθούν και να διερευνηθούν γεωχημικά και περιβαλλοντικά οι συγκεντρώσεις των χημικών στοιχείων στα υπόγεια ύδατα μέσω των δειγμάτων οκτώ (8) γεωτρήσεων της περιοχής, αλλά και των σαράντα δύο (42) συνολικά δειγμάτων εδάφους.

Αυτό όσο αφορά τα ύδατα επιτεύχθηκε μέσω της κατασκευής κάποιων διαγραμμάτων όπως Piper, Durov, Schoeller, Sar, Willcox αλλά και μέσω συσχετίσεων όσων ιόντων και βαρέων μετάλλων ήταν δυνατόν. Οι συσχετίσεις αλλά και τα διαγράμματα δίνουν την εικόνα πως αυτές οι οκτώ γεωτρήσεις δεν συμπεριφέρονται χημικά με τον ίδιο τρόπο. Οι γεωτρήσεις Γ1, Γ2, Γ3, Γ6 (βορειοδυτικό τμήμα περιοχής δειγματοληψίας) φάνηκε πως αποτελούν μία ομάδα από νερά φρέσκα και ανανεώσιμα ενώ οι γεωτρήσεις Γ4, Γ7, Γ9, Γ10 (νοτιοανατολικό τμήμα περιοχής δειγματοληψίας) παρατηρήθηκε πως αποτελούν ξεχωριστή ομάδα με αυξημένες περιεκτικότητες σε χλωριόντα και νάτριο και πιθανά να αποτελούν νερά εγκλωβισμένα (παλιές αλμύρες) που δεν ανανεώνονται κανονικά.

Ο αριθμός των συνολικών γεωτρήσεων (8) σε σχέση με την έκταση της περιοχής έρευνας δεν είναι ικανοποιητικός και σίγουρα τα αποτελέσματα των συσχετίσεων αλλά και των διαγραμμάτων θα ήταν περισσότερο τεκμηριωμένα ενώ αδιαμφισβήτητα θα υπήρχε σαφέστερη εικόνα της χημικής κατάστασης των υπόγειων υδάτων στην περιοχή αν το δίκτυο γεωτρήσεων ήταν πυκνότερο. Τα παραπάνω όμως δεν αναιρούν τις γεωχημικές ανωμαλίες που ήδη διαπιστώθηκαν αλλά και τις τιμές των ανώτατων ορίων που κάποια ιόντα και μέταλλα ξεπερνούν. Τέλος, λόγω των γεωχημικών ανωμαλιών που παρουσιάζει η περιοχή και λόγω των πλούσιων μεταλλικών εμφανίσεων συνίστανται κατά την ανόρυξη νέων υδρευτικών γεωτρήσεων, να πραγματοποιείται προηγουμένως ερευνητική γεώτρηση και δειγματοληψία ώστε να διαπιστώνεται κάθε φορά η παρουσία ή μη των βαρέων μετάλλων στα βαθύτερα γεωλογικά στρώματα.

Αναφορικά με την γεωχημική και περιβαλλοντική έρευνα των ιζημάτων στην περιοχή, το δίκτυο των δειγμάτων (42 δείγματα συνολικά), ήταν περισσότερο πυκνό και άρα ικανοποιητικό σε σχέση με αυτό των γεωτρήσεων. Για την έρευνα των εδαφών κατασκευάστηκαν διαγράμματα συσχετίσεων των περιβαλλοντικά διαθέσιμων βαρέων μετάλλων με τα οξείδια Al_2O_3 - Fe_2O_3 -

MnO, διαγράμματα συσχετίσεων του αρσενικού με τα βαρέα μέταλλα καθώς επίσης πραγματοποιήθηκαν και συσχετίσεις των βαρέων μετάλλων μεταξύ τους. Ακόμη κατασκευάστηκαν χάρτες χωρικής κατανομής των βαρέων μετάλλων στην περιοχή έρευνας. Οι γεωχημικές ανωμαλίες που εντοπίστηκαν σχετίζονται με τα δείγματα VS1, VS2 και VS5 που βρίσκονται στην βιομηχανική περιοχή Βελεστίνου-Βόλου αλλά και με τα VS8, VS9 (περιοχή Ριζόμυλος) και VS13 (κεντρικό τμήμα δειγματοληψίας), (σχήμα 3.1 & 2.7.4).

Το μεγαλύτερο ποσοστό της περιεκτικότητας των βαρέων μετάλλων προέρχεται από φυσικούς παράγοντες όπως η γεωλογία της περιοχής (υπερβασικά πετρώματα) αλλά και οι μεταλλικές εμφανίσεις χρωμίτη και μαγγανίου στη περιοχή έρευνας και σουλφιδίων σιδήρου-χαλκού καθώς επίσης και μικρότερων εμφανίσεων αρσενικού και βωξιτών στη ευρύτερη περιοχή έρευνας. Η φυσική (λιθογενής) προέλευση διαπιστώθηκε κυρίως με την θετική συσχέτιση των μετάλλων με τα οξείδια καθώς αυτό σημαίνει ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των μετάλλων βρίσκεται προσροφημένο και άρα δεσμευμένο στο πλέγμα των κρυσταλλικών φάσεων. Το υπόλοιπο ποσοστό των μετάλλων που δεν συσχετίζονται θετικά με τα οξείδια, κρίθηκε ότι πιθανά προέρχεται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες της περιοχής. Τα μέταλλα αυτά είναι ο χαλκός Cu, το κάδμιο Cd, το νικέλιο Ni και ο μόλυβδος Pb που περιγράφεται αναλυτικά στα αποτελέσματα σε ποιες θέσεις βρίσκονται αυξημένα επιφανειακά και που πιθανά να οφείλεται η ύπαρξή τους.

Τέλος σημειώθηκαν ποια από τα βαρέα μέταλλα ξεπερνούν τα όρια της Ευρωπαϊκής νομοθεσίας αλλά και όρια της Kabata-Pendias 2011. Φυσικά, αν ήταν δυνατόν στο μέλλον να πραγματοποιηθούν δειγματοληψίες εδάφους σε περισσότερα σημεία καλύπτοντας μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής έρευνας και αυξάνοντας το βάθος δειγματοληψίας θα υπήρχαν σίγουρα πιο ξεκάθαρα τα αποτελέσματα για την φυσική και μη προέλευση των βαρέων μετάλλων. Ακόμη θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και άλλες διαφορετικές μέθοδοι για την εξακρίβωση της προέλευσης των μετάλλων που σε αυτή την εργασία δεν επιλέχθηκαν.

5.2. ΡΥΠΑΝΤΙΚΗ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

Σαν δεύτερος στόχος της παρούσας διατριβής τέθηκε η εκτίμηση της ρυπαντικής επιδεκτικότητας ή αλλιώς τρωτότητας του υπόγειου υδροφορέα στην εξωτερική ρύπανση. Αυτός ο στόχος επιτεύχθηκε με την εφαρμογή της μεθόδου DRASTIC στην περιοχή έρευνας. Η μέθοδος αυτή όπως έχει ήδη αναπτυχθεί στο κεφάλαιο «μέθοδοι έρευνας» της εργασίας

λαμβάνει υπόψη της επτά παραμέτρους για την εκτίμηση της τρωτότητας, οι οποίοι είναι το βάθος της στάθμης το υπόγειου νερού (D), η ενεργή κατείσδυση (R), ο υδροφορέας (A), το έδαφος (S), η κλίση αναγλύφου (T), η επίδραση της ακόρεστης ζώνης (I) και ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας (C). Στην περιοχή το δίκτυο των γεωτρήσεων, που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση της στάθμης του υπόγειου νερού, όπως ήδη αναφέρθηκε είναι σχετικά μικρό και σίγουρα θα μπορούσε σε επόμενο στάδιο της έρευνας να δημιουργηθεί ένα πιο πυκνό δίκτυο που στα πλαίσια αυτής της εργασίας δεν ήταν δυνατό να συμβεί. Ακόμη, λόγω του ότι στην περιοχή δεν έχουν πραγματοποιηθεί δοκιμαστικές αντλήσεις ώστε να υπάρχουν δεδομένα για την υδραυλική αγωγιμότητα κάθε στρώματος ξεχωριστά, η συγκεκριμένη παράμετρος συμπληρώθηκε βιβλιογραφικά. Συνεπώς, ένα επόμενο στάδιο της παρούσας διατριβής θα μπορούσε να είναι η πραγματοποίηση δοκιμαστικών αντλήσεων στην περιοχή για την ακριβή γνώση της υδροπερατότητας. Αυτό το ελάττωμα της εφαρμογής της μεθόδου DRASTIC στην περιοχή προσπάθησε να ξεπεραστεί δημιουργώντας έναν χάρτη DRASTI, αφαιρώντας την παράμετρο της υδροπερατότητας, και κρατώντας ίδιες τις βαρύτητες των υπόλοιπων παραμέτρων προσπαθώντας έτσι να συγκριθούν οι δύο χάρτες και να ερευνηθεί κατά πόσο η βιβλιογραφική συμπλήρωση της παραμέτρου (C) επηρεάζει τα αποτελέσματα. Σημειώνεται ότι υψηλή τρωτότητα της περιοχής περιορίζεται στα ασβεστολιθικά πετρώματα και τα μάρμαρα λόγω του φτωχού εδαφικού καλλύματος, της χαμηλής στάθμης του υπόγειου νερού αλλά και λόγω της μεγάλης υδροπερατότητας τους. Σε συνέχεια της εφαρμογής DRASTIC κατασκευάστηκε ο χάρτης διακινδύνευσης λαμβάνοντας υπόψη τις χρήσεις γης της συγκεκριμένης περιοχής έρευνας. Αυτό που παρατηρείται είναι ότι περιοχές που έχουν χαμηλή-μέση τρωτότητα έχουν τελικά υψηλή και πολύ υψηλή διακινδύνευση λόγω των χρήσεων γης που αυξάνουν την πιθανότητα εκδήλωσης κάποιου ρυπαντικού φαινομένου όπως για παράδειγμα οι σύνθετες καλλιέργειες και η παρουσία βιομηχανιών. Μία ακόμη πρόταση που θα μπορούσε να υλοποιηθεί σε επόμενο στάδιο έρευνας είναι η εκτίμηση της τρωτότητας του υπόγειου υδροφορέα λαμβάνοντας όμως υπόψη, εκτός των άλλων παραμέτρων, και χημικές παραμέτρους όπως για παράδειγμα την παρουσία νιτρικών (NO_3) συγκεντρώσεων στα ύδατα ή την παρουσία βαρέων μετάλλων στα εδάφη συνδέοντας έτσι περισσότερο την γεωχημική κατάσταση της περιοχής με την τρωτότητα του υπόγειου υδροφορέα.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Γενικά για την Περιοχή Έρευνας

- Η εξεταζόμενη περιοχή έρευνας έχει έκταση 290,3 km².
- Το κλίμα της ευρύτερης περιοχής χαρακτηρίζεται μεταβατικό, από Μεσογειακό σε Ηπειρωτικό, με μέση ετήσια θερμοκρασία 16,9°C και ετήσια βροχόπτωση 500-600 mm.
- Η περιοχή έρευνας ανήκει γεωτεκτονικά στην Πελαγονική ζώνη και χαρακτηρίζεται από έντονη τεκτονική και πλούσια νεοτεκτονική δραστηριότητα.
- Στην περιοχή έρευνας κάνουν την εμφάνισή τους αρκετές μεταλλοφορίες όπως χρωμίτης, σουλφίδια σιδήρου-χαλκού, εμφανίσεις βωξίτη και σπανιότερα εμφανίσεις αρσενικού.
- Οι κυριότεροι υδροφορείς αναπτύσσονται μέσα στα καρστικά συστήματα (ασβεστόλιθοι-μάρμαρα) καθώς και στις αλλουβιακές αποθέσεις της περιοχής.

Γεωχημική και Περιβαλλοντική Έρευνα Υδάτων

- Εντοπίστηκαν δύο διαφορετικοί υδροχημικοί τύποι για δύο διαφορετικές ομάδες νερών. Για τα γλυκά νερά: (Ca,Mg) - HCO₃ και για τα νερά που αποτελούν παλιές αλμύρες: Ca (Na) - Cl.
- Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) κυμαίνεται μεταξύ 525-2140 μS/cm.
- Η περιεκτικότητα των νιτρικών (NO₃⁻) είναι μικρότερη του 50 mg/l (όριο Ευρωπαϊκής Ένωσης) αλλά μεγαλύτερη, στα δείγματα Γ4, Γ7, Γ10, του 10 mg/l (όριο USEPA 2002).
- Ο σίδηρος (Fe) ξεπερνά σε ένα δείγμα το όριο της οδηγίας 98/83/EK για τα νερά (200 μg/l).
- Υψηλές περιεκτικότητες παρουσιάζει το χρώμιο (Cr) στα Γ1, Γ2, Γ3 ενώ το χλώριο (Cl) ξεπερνά σε δύο γεωτρήσεις το όριο του ΦΕΚ3322/2011 (200 mg/l).
- Το σελήνιο (Se) και το αντιμόνιο (Sb) ξεπερνούν σε μερικές γεωτρήσεις (Γ2, Γ3, Γ6 και Γ3, Γ6 αντίστοιχα) τα όρια της οδηγίας 98/83/EK και της USEPA2002.
- Η παρουσία των βαρέων μετάλλων στα ύδατα δικαιολογείται κυρίως λόγω των μεταλλοφοριών της ευρύτερης περιοχής.
- Οι γεωτρήσεις Γ4 και Γ7 εμφανίζουν μεγάλο κίνδυνο αλατώσεως και είναι καλές έως αποδεκτές και άρδευση ενώ οι γεωτρήσεις Γ9 και Γ10 έχουν μεγάλο κίνδυνο αλατώσεως και κρίνονται από αμφίβολες έως ακατάλληλες για άρδευση.

Γεωχημική και Περιβαλλοντική Έρευνα Εδαφών

- Στις συσχετίσεις του As και του Cd με τα οξείδια Al_2O_3 - Fe_2O_3 - MnO παρατηρούνται δύο ομάδες δειγμάτων. Όλα τα δείγματα εκτός των VS1, VS2, VS5 (βιομηχανική περιοχή), συσχετίζονται θετικά άρα είναι δεσμευμένα και προσροφημένα στις κρυσταλλικές φάσεις δικαιολογώντας την φυσική τους προέλευση σε αντίθεση με τα τρία δείγματα που πιθανά είναι αποτέλεσμα ανθρωπογενών παρεμβάσεων.
- Στις συσχετίσεις Ni και Cr με τα οξείδια Al_2O_3 - Fe_2O_3 - MnO όλα τα δείγματα εκτός των VS1, VS2, VS5 και VS13a συσχετίζονται θετικά ενισχύοντας την λιθογενή τους προέλευση (υπερβασικά πετρώματα περιοχής, εμφανίσεις χρωμίτη). Τα υπόλοιπα 4 δείγματα πιθανά να συνδέονται με ανθρωπογενή ρύπανση.
- Στις συσχετίσεις Cu και Zn με τα οξείδια Al_2O_3 - Fe_2O_3 - MnO υπάρχει θετική συσχέτιση αιτιολογώντας την φυσική προέλευση των μετάλλων αυτών (σουλφίδια χαλκού) εκτός από τα δείγματα VS9a,b (περιοχή Ριζόμυλος) που πιθανά σχετίζονται με απορρίψεις μετάλλων ανακύκλωσης όπως για παράδειγμα μπαταρίες.
- Στις συσχετίσεις Pb και Co με τα οξείδια Al_2O_3 - Fe_2O_3 - MnO υπάρχει καλή συσχέτιση εκτός των δειγμάτων VS8a για το μόλυβδο και VS13a για το κοβάλτιο. Οι γεωχημικές ανωμαλίες των δύο αυτών δειγμάτων πιθανώς να σχετίζονται με ανθρωπογενή παρέμβαση.
- Στη συσχέτιση του As με τα μέταλλα (Cu, Pb, Ni, Co, Cd, Sb, V, Cr) παρατηρούνται δύο ομάδες δειγμάτων. Υπάρχει θετική συσχέτιση σε όλα τα δείγματα εκτός από τα VS1, VS2, VS5.
- Από τους χάρτες κατανομής του As προκύπτει αυξημένη συγκέντρωση στην επιφάνεια και σε βάθος 1m. Αν η προέλευση του As ήταν ανθρωπογενής οι υψηλές συγκεντρώσεις θα περιορίζονταν μόνο επιφανειακά. Άρα πιθανά το αρσενικό οφείλεται σε λιθολογικά αίτια.
- Από τις χωρικές κατανομές των Cd, Cu, Ni, Pb και Zn τα δείγματα VS1a, VS9a,b, VS13a, VS8a και VS9a,b αντίστοιχα, παρουσιάζουν επιφανειακές γεωχημικές ανωμαλίες και πιθανά συνδέονται με ανθρωπογενή ρύπανση. Τα δείγματα VS8 και VS9 βρίσκονται στην κατοικήσιμη περιοχή Ριζόμυλος ενώ το VS13 βρίσκεται στο κέντρο της περιοχής δειγματοληψίας.

- Από τις χωρικές κατανομές Mn και Cr προκύπτουν γεωχημικές ανωμαλίες σε όλα τα βάθη δειγματοληψίας και αυτό μάλλον σχετίζεται με τις εμφανίσεις χρωμίτη και μαγγανίου στην περιοχή έρευνας.

Εκτίμηση της Ρυπαντικής Επιδεκτικότητας του Υπόγειου Υδροφορέα

- Για την εκτίμηση της τρωτότητας του υδροφορέα εφαρμόστηκε η μέθοδος DRASTIC.
- Η μέθοδος DRASTIC λαμβάνει υπόψη επτά παραμέτρους, το βάθος της στάθμης το υπόγειου νερού (D), την ενεργή κατείσδυση (R), τον υδροφορέα (A), το έδαφος (S), την κλίση αναγλύφου (T), την επίδραση της ακόρεστης ζώνης (I) και τον συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας (C) με πιο σημαντικά το βάθος στάθμης και την επίδραση της ακόρεστης ζώνης.
- Σύμφωνα με τον τελικό χάρτη DRASTIC οι περιοχές που εμφανίζουν υψηλή τρωτότητα (160-179) βρίσκονται στο ΝΔ τμήμα της περιοχής έρευνας στα ασβεστολιθικά πετρώματα αλλά και στο ΝΝΑ τμήμα σε δολομιτικά τεμάχια. Τα τμήματα που εμφανίζουν μέση (120-139) τρωτότητα βρίσκονται στις ποταμολιμναίες αποθέσεις ΒΔ της περιοχής και στα κορήματα ενώ τα τμήματα που εμφανίζουν μέση υψηλή (140-159) τρωτότητα βρίσκονται κυρίως ΒΑ και καλύπτουν τα μάρμαρα τις περιοχής έρευνας. Τέλος περιοχές με χαμηλή-μέση (100-119), χαμηλή (80-99) και πολύ χαμηλή (<79) τρωτότητα καλύπτουν κυρίως αλλουβιακές αποθέσεις, μάργες, ποταμολιμναίες αποθέσεις, φλύσχη, μεταμορφωμένα της περιοχής αλλά και υπερβασικά πετρώματα.
- Για την κατασκευή του χάρτη DRASTI αφαιρέθηκε η παράμετρος (C) της υδραυλικής αγωγιμότητας χωρίς να αλλάξουν οι βαρύτητες των υπόλοιπων παραμέτρων.
- Για την σύγκριση των δύο χαρτών DRASTIC και DRASTI χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο geometrical interval του ArcGis.
- Και στους δύο χάρτες DRASTIC και DRASTI τη μεγαλύτερη έκταση την καταλαμβάνει η υψηλή τρωτότητα, με 74,61 km² και 86,92 km² αντίστοιχα, ενώ τη μικρότερη έκταση καταλαμβάνει η πολύ υψηλή τρωτότητα, με 44,75 km² και 25,09 km² αντίστοιχα.
- Η μέθοδος DRASTIC καταλαμβάνει πολύ λιγότερες περιοχές με υψηλή τρωτότητα λόγω της αφαίρεσης της παραμέτρου (C) που παίζει σημαντικό ρόλο ειδικά στο ΒΑ τμήμα της περιοχής που αποτελείται από μάρμαρα.

- Μικρές διαφορές εντοπίζονται μεταξύ χαμηλής και πολύ χαμηλής τρωτότητας στις αλλουβιακές αποθέσεις τις περιοχής, ενώ η μέση τρωτότητα παρουσιάζει διαφορά της καταλαμβανόμενης έκτασης μόλις 6,19 km² υπέρ της DRASTI.
- Ο χάρτης διακινδύνευσης διαμορφώθηκε με βάση τις χρήσεις της περιοχής έρευνας.
- Πολύ υψηλή διακινδύνευση (>170) παρατηρείται στο ΝΔ τμήμα αλλά και σε μικρότερα τμήματα μέσα στην περιοχή μελέτης και καταλαμβάνει 28,17 km².
- Πολύ χαμηλή διακινδύνευση (<100) παρατηρείται στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής έρευνας (79,1 km²).
- Αρκετά τμήμα που είχαν χαμηλότερη τρωτότητα εμφανίζονται με υψηλότερη διακινδύνευση λόγω των χρήσεων γης της περιοχής (καλλιεργούμενες εκτάσεις, βιομηχανίες κ.α.).
- Τέλος είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι χάρτες τρωτότητας και διακινδύνευσης αποτελούν σημαντικά εργαλεία για όλους τους φορείς δημόσιας διαχείρισης και τοπικής αυτοδιοίκησης που χαράσσουν πολιτική στον τομέα των υδάτων, όμως σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να αντικαταστήσουν την έρευνα πεδίου. Οι χάρτες αυτοί μπορούν να αποτελέσουν έναν γενικό οδηγό για τους επιστήμονες, τους διοικητικούς αλλά και όσους ασχολούνται με την διαχείριση των υδάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

- Αντωνόπουλος, Β. (2001): Ποιότητα και ρύπανση υπόγειων νερών. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Αντωνόπουλος, Β. (2010): Υδραυλική περιβάλλοντος και ποιότητα επιφανειακών υδάτων. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Εκδόσεις Τζιόλα.
- Αρβανίτης, Λ. (2006): Γεωχημική έρευνα σε επιφανειακά ιζήματα του επιβατικού τμήματος του λιμένα Πειραιώς. Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης. Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Βουδούρης, Κ. (2009): Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος – Υπόγεια νερά. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
- Βουδούρης, Κ. (2015): Εκμετάλλευση και διαχείριση υπόγειου νερού, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
- Βουδούρης, Κ., Μανδηλαράς, Δ., (2004): Εκτίμηση της τρωτότητας των υπόγειων νερών με τη μέθοδο DRASTIC: Η περίπτωση του αλλουβιακού υδροφορέα της λεκάνης του Γλαύκου (Ν. Αχαΐας). Υδροτεχνικά, Τόμος 14, 17-30
- Βουδούρης, Κ., Στράτης, Ι. (2014): Υδροχημική - υδρογεωλογική έρευνα της ευρύτερης περιοχής των σημείων ύδρευσης του Δήμου Βόλου. Ερευνητικό Πρόγραμμα (Επιτροπή Ερευνών ΑΠΘ, Κωδ. 83516), Τμήματα Γεωλογίας και Χημείας Α.Π.Θ. Χρηματοδότηση: Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης Αποχέτευσης Μείζονος Βόλου, 114 σελ.
- Βουτσά, Δ. (1993): Μελέτη και χαρακτηρισμός των υπογείων νερών της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλονίκης. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Χημείας Α.Π.Θ.
- Γιούρη, Α. (2008): Γεωχημική – Ορυκτολογική Περιβαλλοντική Μελέτη των Ιζημάτων και Υδάτων του Ποταμού Μπογδάνα στην περιοχή Ασσήρου, Ν. Θεσσαλονίκης. Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.
- Δασκαλάκη, Π. (2002): Συμβολή στη γνώση του χημισμού και της ποιότητας των υπόγειων υδάτων στον Ελλαδικό χώρο. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Δημόπουλος, Γ. (2008): Τεχνική Γεωλογία. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Εκδόσεις Κυριακίδη.
- Δήμου, Ε. (1991): Θειούχες συγκεντρώσεις στους σερπεντινίτες – χρωμίτες της περιοχής Ερέτριας.
- Εθνικό ίδρυμα αγροτικής έρευνας. Ινστιτούτο χαρτογράφησης και ταξινόμησης εδαφών, Ι.Χ.Τ.Ε.
- Εφημερις της Κυβερνήσεως της Ελληνική Δημοκρατίας, Τεύχος Δεύτερο, (2011): Αρ. Φύλλου 3322. Ορισμός ανώτερων αποδεκτών τιμών για τη συγκέντρωση συγκεκριμένων ρύπων, ομάδων ρύπων ή δεικτών ρύπανσης σε υπόγεια ύδατα σε εφαρμογή της παραγράφου 2 του άρθρου 3 της υπ' αριθμ.: 39626/2208/Ε130/2009 κοινής υπουργικής απόφασης (Β' 2075).
- Εφημερις της Κυβερνήσεως της Ελληνική Δημοκρατίας, Τεύχος Δεύτερο, (2001): Αρ. Φύλλου 892. Ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης, σε συμμόρφωση προς την Οδηγία 98/83/ΕΚ του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης της 3^{ης} Νοεμβρίου 1998.
- Ζαφειρόπουλος, Γ. (2009): Η παρουσία του As στα υπόγεια νερά. Πτυχιακή εργασία, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

- Καζάκης, Ν. (2008): Εκτίμηση της τρωτότητας των υπόγειων νερών στην εξωτερική ρύπανση. Εφαρμογή στη λεκάνη της Φλώρινας. Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδικευσης, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.
- Καζάκης, Ν. (2013): Εκτίμηση της διακινδύνευσης της εξωτερικής ρύπανσης των υπόγειων νερών: Εφαρμογή στη λεκάνη του Ανθεμούντα. Διαδακτορική Διατριβή. Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.
- Καζάκης, Ν., Βουδούρης, Κ., Παύλου, Α., Πατρικάκη, Ο. (2008): Εκτίμηση της τρωτότητας του υδροφορέα της λεκάνης της Φλώρινας με τη μέθοδο DRASTIC και τη χρήση GIS. Πρακτικά 3ου Περιβαλλοντικού Συνεδρίου Μακεδονίας. Θεσσαλονίκη, 14-17 Μαρτίου 2008.
- Καλλέργης, Γ. (1986): Εφαρμοσμένη υδρογεωλογία, Τόμος Α, Β». Τ.Ε.Ε., Αθήνα.
- Καλλέργης, Γ., (1999): Εφαρμοσμένη-Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία. 2η έκδοση, τόμος Α, Τ.Ε.Ε., Αθήνα.
- Καλλέργης, Γ. (2000): Εφαρμοσμένη-Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία. 2η έκδοση, τόμος Β, Τ.Ε.Ε., Αθήνα.
- Καλλέργης, Γ. (2001): Εφαρμοσμένη-Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία. 2η έκδοση, τόμος Γ, Τ.Ε.Ε., Αθήνα.
- Καραγιαννίδης, Π. (1986): Τα χημικά στοιχεία και οι ενώσεις τους.
- Καραμέρης, Κ. (2008): Διαχείριση και Προστασία περιβάλλοντος. Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων, Γενική Γραμματεία Εκπαίδευσης Ενηλίκων.
- Κατσίκατος Γ. (1991): Γεωλογία της Ελλάδας. Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών
- Κατσίκατος, Γ., Μυλωνάκης, Ι., Τριανταφύλλης, Ε., Παπαδέας, Γ., Ψώνης, Κ. (1983): Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας, Φύλλο Βελεστίνο, κλίμακα 1:50.000. ΙΓΜΕ, Αθήνα.
- Κατσίκατος, Γ., Μυλωνάκης, Μ., Βιδάκης, Μ., Hecht, J., Παπαδέας, Γ. (1998): Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας 1:50.000. Φύλλο Βόλος, ΙΓΜΕ.
- Κατσογιάννης, Γ. (2002): Απομάκρυνση αρσενικού από τα υπόγεια νερά με συνδυασμό διεργασιών. Διαδακτορική διατριβή, Τμήμα Χημείας ΑΠΘ.
- Κελεπερτζής, Α. (2004): Εισαγωγή στην Γεωλογία Περιβάλλοντος. Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος. Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Κουιμτζής Θ., Φυτιανός Κ., Σαμαρά-Κωνσταντίνου Κ. (1998): Χημεία Περιβάλλοντος. Εκδόσεις University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
- Κουιμτζής, Θ., Φυτιανός, Κ., Σαμαρά-Κωνσταντίνου, Κ., Βουτσά, F. (2004): Έλεγχος ρύπανσης περιβάλλοντος. Εκδόσεις University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
- Λαμπράκης, Ν., (1991): Εισαγωγή στην Υδροχημεία. Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Λέκκας, Ε. (1998): Γεωλογία και Περιβάλλον. Γ' Έκδοση, Αθήνα.
- Μαλισσόβα, Α. (2012): Υδρογεωλογικές συνθήκες και ποιότητα υπόγειων νερών της ευρύτερης περιοχής της πόλης του Βόλου. Διπλωματική εργασία, Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ.
- Μαμάης, Δ. (2008): Ρύπανση Υδατικών Οικοσυστημάτων. Σημειώσεις. Διεπιστημονικό-Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών (Δ.Π.Μ.Σ). Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
- Μήτρακας, Μ., Μπουγιουκλής, Γ., Στοϊλίδου, Μ. (2002): Απομάκρυνση του Αρσενικού από το νερό με τη συμβατική μέθοδο ιζηματοποίησης με Fe_3^+ ή Al_3^+ . Πρακτικά 6ου Πανελλήνιου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου. Ξάνθη.
- Μήτρακας, Μ., Παντελιάδης, Μ., Τρεσίντση, Σ. (2009): Τοξικότητα του αρσενικού και εφαρμογή των ενώσεων του σιδήρου στην απομάκρυνσή του από φυσικά νερά. Πρακτικά 3ου Πανελλήνιου Συνεδρίου «Κλιματική Αλλαγή - Βιώσιμη Ανάπτυξη και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας». Συμβούλιο περιβάλλοντος Α.Π.Θ, 15-17 Οκτωβρίου 2009, Θεσσαλονίκη.

- Μήτσιος, Ι. (2004): Γονιμότητα εδαφών – Θρεπτικά στοιχεία φυτών : Μακροθρεπτικά, μικροθρεπτικά και βαρέα μέταλλα. Μέθοδοι και εφαρμογές. Zymel, Αθήνα.
- Μιγκίρος, Γ. (1998): Συνοπτική περιγραφή του ορυκτού πλούτου της Θεσσαλίας. Γεωτεκτονική ένταξη-Αξιοποίηση πόρων. Ορυκτός Πλούτος 108, σελ.15-26.
- Μιγκίρος, Γ., Στασινούλιας, Ε., Στασινούλιας, Β., Τσαγκαλίδης, Α. (1991): Οι χρωμιτικές εμφανίσεις στα υπερβασικά πετρώματα του Νοτίου Πηλίου. Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας XXV/2, σελ.321-336.
- Μουντράκης, Δ. (1985): Γεωλογία της Ελλάδας. Εκδόσεις University Studio Press. Θεσσαλονίκη.
- Μπιτέρνα, Μ., Βουτσά, Δ. (2005): Το πρόβλημα του αρσενικού στα πόσιμα νερά: Τεχνολογίες απομάκρυνσης. Πρακτικά 13ου Σεμιναρίου για την Προστασία του Περιβάλλοντος.
- Μυριούνη, Χ. (2008): Υδρογεωλογική και Υδροχημική Διερεύνηση των Υπογείων Νερών της Παράκτιας Ζώνης της Υδρολογικής Λεκάνης Αλμυρού Μαγνησίας. Διαδακτορική Διατριβή. Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.
- Παπαευαγγέλου, Β. (2008): Υδατικοί πόροι του Νομού Μαγνησίας. Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Θράκης.
- Παπαζάχος Β., Παπαζάχου Κ. (2003): Οι σεισμοί της Ελλάδας. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη
- Πάτσιος, Ε., (2007): Εφαρμογή της μεθόδου DRASTIC για τον υπολογισμό της τρωτότητας των υπόγειων νερών στη ρύπανση: Εφαρμογή στον Αλλουβιακό υδροφόρο της Σαριγκιόλ. Διατριβή Ειδίκευσης, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.,
- Πιτλάκης, Κ.Δ., Ραπτάκης, Δ.Γ., Μακρά, Κ.Α., Βελδεμίρη, Φ., Τίκα, Θ., Αναστασιάδης, Α., Χατζηνικολάου, Ν. (2010): Γεωτεχνικός Χάρτης και Μικροζωνική Μελέτη Πολεοδομικού Συγκροτήματος Βόλου - Ν. Ιωνίας. 1–8.
- Ραμαντάνη, Χ., Ραμαντάνης, Γ. (2013): Προμελέτη Χάραξης Οδικού Τμήματος - Παράκαμψη Αγριάς Βόλου. Διπλωματική Εργασία. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- Σκόρδας, Κ. (2005): Περιβαλλοντική γεωχημική έρευνα εδαφών της ευρύτερης περιοχής του Δώτιου πεδίου Αγιάς- Λάρισας και επιπτώσεις στο περιβάλλον. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Σούλιος Γ. (2006): Γενική Υδρογεωλογία, Τόμος τέταρτος. Εκδόσεις University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
- Σούλιος, Γ., (1986): Γενική Υδρογεωλογία, Πρώτος & Δεύτερος Τόμος. University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
- Σούλιος, Γ., (2004): Γενική Υδρογεωλογία, Τρίτος Τόμος. Εκδοτικός Οίκος Αδελφών Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη.
- Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (GR08), Ειδική Γραμματεία Υδάτων. 1-272.
- ΥΠΕΧΩΔΕ Ε.Ε., Ν.Α.Μ, Α.Μ.Ε.Μ. (2001): ΕΠΠΕΕ II Πρόγραμμα: Ανάπτυξη Πολιτικής για την Αειφόρο Διαχείριση του Παγασθητικού Κόλπου, Βόλος.
- Φώλια, Σ. (2009): Επίδραση της Αβεβαιότητας των Υδρομετεωρολογικών Δεδομένων και Παραμέτρων στην Προσομοίωση του Υδροφόρου της Κάρλας, Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.
- Χριστούλας, Δ. (1991): Ρύπανση των υδάτων και αντιρρυπαντική τεχνολογία. Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.

ΕΕΝΟΓΛΩΣΣΗ

- Adams, S., Titus, R., Pietersen, K., Tredoux, G., Harris, C. (2001): Hydrochemical characteristics of aquifers near Sutherland in the Western Karoo, South Africa.
- Al-Zabet, T., (2002): Evaluation of aquifer vulnerability to contamination potential using the DRASTIC method. *Environmental Geology* 43, 203-208.
- Alberto, R., Pórcel, D., Schüth, C., León-gómez, H. De, Hoppe, A., & Lehné, R. (2014): Land-Use Impact and Nitrate Analysis to Validate DRASTIC Vulnerability Maps Using a GIS Platform of Pablillo River Basin, 2014(November), 1468–1489.
- Aller L., T., Bennet, J.H., Lehr, R.J., Petty, G., Hackett, (1987): DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological setting. EPA/600/2-87/035. US Environmental Protection Agency.
- Alvarez, R., Ordonez, A., Loredó, J. (2006): Geochemical assessment of an arsenic mine adjacent to a water reservoir (Leon, Spain), 873-884.
- Anawar, H.M., Garcia-Sanchez, A., Murciego, A., Buyolo, T. (2006): Exposure and bioavailability of arsenic in contaminated soils from the La Parrilla mine, Spain. *Environmental Geology* 50, 170-179.
- Anthemidis, A., Zachariadis, G., Stratis, J. (2005): Determination of arsenic (III) and total inorganic arsenic in water samples using an on-line sequential insertion system and hydride generation atomic absorption spectrometry, 237-242.
- Antonakos, A.K., Lambrakis, N.J., (2007): Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates, based on the drastic model, an example from NE Korinthia, Greece. *Journal of Hydrology*, Volume 333, Issues 2–4, Pages 288-304
- Bexfield, L.M., Plummer, N. (2003): Occurrence of arsenic in groundwater of the Middle Rio Grande basin, central New Mexico. In “Arsenic in groundwater: Chemistry and Occurrence” Chapter 11 (Welch, A.H., Editor). Kluwer Academic Publishers.
- Bhattacharya, P., Welch, A.H., Ahmed, K.M., Jacks, G., Naidu, R. (2004): Arsenic in groundwater of sedimentary aquifers. *Applied Geochemistry* 19(2), 163-167.
- Caputo, R., & Pavlides, S. (1993): Late Cainozoic geodynamic evolution of Thessaly and surroundings (central-northern Greece). *Tectonophysics*, 223(3-4), 339–362.
- Connell D.W., Miller G.J., (1984): *Chemistry and Ecotoxicology of Pollution*, John Wiley & Sons, New York
- Custodio, E., and Bruggeman, G.A., (1987): Groundwater problems in coastal areas in: *Studies and reports in hydrology*, UNESCO, International hydrological programme, Paris.
- Durov, S.A., (1948): Natural water and graphical representation of their composition. *Dokl. Akad. Nauk. U.S.S.R.*, V.59, p.87 -90.
- Fytianos, K., Christophoridis, Ch. (2004): Nitrate, Arsenic and Chloride pollution of drinking water in northern Greece: Elaboration by applying GIS. *Environmental Monitoring and Assessment* 93, 55-67.
- Garelick, H., Dybowska, A., Valsami-Jones, E., Priest, N. (2005): Remediation technologies for arsenic contaminated drinking waters. *Journal Soils & Sediments* 5(3), 182-190.
- Gault, A.G., Polya, D.A., Lythgoe, P.R. (2003): Seasonal variation of total dissolved arsenic and arsenic speciation in a polluted waterway. *Environ. Geochem. Health*, 25, 77–85.
- Giouri A., Christophoridis C., Melfos V., Vavelidis M. (2010a): Assessment of heavy metals concentrations in sediments of Bogdanas river at the Assiros-Lagadas area, Northern Greece. *Proceedings of the XIX CBGA Congress*, Thessaloniki, Greece. 100, 63-69.

- Giouri A., Vavelidis M., Melfos V. (2012): Primary approach on the evaluation of total arsenic concentration in Palea Kavala river, NE Macedonia, Northern Greece. In the Proceedings of the International Conference Protection and Restoration of the Environment XI, (Eds: Katsifarakis K.L. et al.). Thessaloniki, Greece, July 2012, 356-364.
- Hseu, Z.Y., Chen, Z.S., Tsai, C.C., Tsui, C.C., Cheng, S.F., Liu, C.L., & Lin, H.T. (2002): Digestion methods for total heavy metals in sediments and soils. *Water, Air, and Soil Pollution*, 141(1-4), 189–205.
- Kabata-Pendias, A. (2011): Trace elements in soils and plants. CRC Press, New York.
- Kallioras, A., Pliakas, F., Skias, S., Gkiougkis, I., (2011): Groundwater vulnerability assessment at SW Rhodope aquifer system in NE Greece. *Advances in the Research of aquatic environment*, (Eds: Lambrakis, N., Stournaras, G., Katsanou, K.), Springer. Proc. of 9th International Conference on Hydrogeology, Kalavrita, October 5-8, 2011. Vol. 2, 259-266.
- Kazakis N., Oikonomidis D., Voudouris K., (2015): Groundwater vulnerability and pollution risk assessment with disparate models in karstic, porous and fissured rock aquifers using remote sensing techniques and GIS in Anthemountas basin, Greece. *Environmental Earth Science*. 74:7, pp 6199-6209
- Kazakis N., Voudouris K.S., (2015): Groundwater vulnerability and pollution risk assessment of porous aquifers to nitrate: Modifying the DRASTIC method using quantitative parameters. *Journal of Hydrology*. 525, 13-25.
- Kazakis, N., Voudouris, K., (2011): Comparison of three applied methods of groundwater vulnerability mapping: A case study from the Florina basin, Northern Greece. *Advances in the Research of aquatic environment*, (Eds: Lambrakis, N., Stournaras, G., Katsanou, K.), Springer. Proc. of 9th International Conference on Hydrogeology, Kalavrita, October 5-8, 2011.
- Kelepertsis, A.E., Alexakis, D., Skordas, K. (2006): Arsenic, antimony and other toxic elements in the drinking water of eastern Thessaly in Greece and its possible effects on human health. *Environmental Geology* 50, 76-84.
- Kolker, A., Haack, S.K., Cannon, W.F., Westjohn, D.B., Kim, M.-J., Nriagu, J., Woodruff, G. (2003): Arsenic in southeastern Michigan. In “Arsenic in groundwater: Chemistry and Occurrence” Chapter 10 (Welch, A.H., Editor). Kluwer Academic Publishers.
- Kontogianni, V., Pytharouli, S., Stiros, S. (2007): Ground subsidence, Quaternary faults and vulnerability of utilities and transportation networks in Thessaly, Greece. *Environmental Geology*, 52(6), 1085-1095.
- Leybourne, M.I., Cameron, E.M. (2007): Groundwaters in Geochemical Exploration: Methods, Applications and Future Directions. In “Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration”, 201-221
- Manganelli, A., Goso, C., Guerequiz, R., Fernandez Turiel, J.L., Garcia Valles, M., Gimeno, D., Perez, C. (2007): arsenic distribution in South-western Uruguay. *Environmental Geology*, 53, 827-834.
- Margat, J., (1968): Groundwater vulnerability maps, conception-estimation-mapping (in French). EEC Institut Europeen de l'Eau, Paris, France.
- Martinez, D., Bocanegra, E. (2002): Hydrogeochemistry and cation-exchange processes in the costal aquifer of mar Del Plata, Argentina.
- Mitrakas, M. (2001): A survey of arsenic levels in tap underground and thermal mineral waters of Greece. *Fresenius Environmental Bulletin* 10, 717-721.

- Mountouris A., Voutsas E., Tassios D. (2002): Bioconcentration of heavy metals in aquatic environments. The importance of bioavailability. *Man. Pollut. Bull.*, 44,1136-1141.
- Nadakavukaren, J., Ingermann, R.L., Jeddelloh, G., Falkowski, S.J. (1984): Seasonal variation of arsenic concentration in well water in Lane County, Oregon.
- Pacheco, F.A.L., Pires, L.M.G.R., Santos, R.M.B., & Sanches Fernandes, L.F. (2015):Factor weighting in DRASTIC modeling. *The Science of the Total Environment*, 505, 474–86.
- Panagopoulos, G.P., Antonakos, A.K., & Lambrakis, N.J. (2006): Optimization of the DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment via the use of simple statistical methods and GIS. *Hydrogeology Journal*, 14(6), 894–911.
- Papaioannou, A.m Plageras, P., Dovriki, E., Minas, A., Krikelis, V., Nastos, P.Th., Kakavas, K., Paliatsos, A.G. (2006): Groundwater quality and location of productive activitiw in the region of Thessaly (Greece). *ScienceDirect. Desalination* 213 (2007) 209-217.
- Papp J.F. (1994): Chromium Life Cycle Study, United States Geological Survey (USGS), United States Department of the Interior, Bureau of Mines, Information Circular/1994 IC 9411, HD9539.C4P37.
- Patrikaki, O., Kazakis, N., Voudouris, K., (2012): Vulnerability Map: a Useful Tool for Groundwater Protection: an Example From Mouriki Basin, North Greece. *Fresenius* 21(8), 2516–2521.
- Pedreira, R., Kallioras, a., Pliakas, F., Gkiougkis, I., & Schuth, C. (2014): Groundwater vulnerability assessment of a coastal aquifer system at River Nestos eastern Delta, Greece. *Environmental Earth Sciences*, 73(10), 6387–6415.
- Perin, G., Bonardi, M., Fabris, R., Simoncini, B., Manente, S., Tosi, L., Scotto, S. (1997): Heavy metal pollution in central Venice Lagoon bottom sediments: evaluation of the metal bioavailability by geochemical speciation procedure. *Environmental Technology*, 18: 593–604.
- Pierce, M.L., Moore, C.B. (1980): Adsorption of arsenite on amorphous iron hydroxides from dilute aqueous solution. *Environ. Sci. Technol.*, 14, 214–216.
- Piper, A.M., (1944): A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *American Geophysical union, Transactions*, v. 25, p. 914 -923.
- Rodriguez, R., Ramos, J.A., Armienta, A. (2004): Groundwater arsenic variations: the role of local geology and rainfall. *Applied Geochemistry* 19, 245-250.
- Ross, S.M. (1994): Retention, transformation and mobility of toxic metals in soils, In: S.M. Ross (Ed.), *Toxic Metals in Soil-Plant Systems*. Wiley, New York. pp. 63-152.
- Salomons, W. (1995): Environmental impact of metals derived from mining activities: processes, predictions, preventions. J.
- Schoeller, H., (1948): Le régime hydrologique des calcaires éocènes du synclinal du Dyr El Kef (Tunisie). *Bull. Sco. Geol. Gr.*, ser. 5, Vol. 28, Paris, pp. 167 – 180. Schoeller, H., (1967): Hydrodynamique dans le karst (écoulement et emmagasinement). *Cornique d’ Hydrogéologie*, no 10, éditions B.R.G.B. Orléans (France), pp. 7 – 21.
- Schoeller, H., (1962): *Les eaux souterraines*. Ed. Masson, Paris, pp. 642.
- Seshardi, B., Bolan, N.S., Naidu, R. (2015): Rhizosphere-induced heavy metal (loid) transformation in relation to bioavailanility and remediation. *Journal of Soil Science and Plant nutrition*, 2015, 15(2), 524-548.
- Smedley, P.L. (2003): Arsenic in groundwater: South and East Asia. In “Arsenic in groundwater: Chemistry and Occurrence” Chapter 7 (Welch, A.H., Editor). Kluwer Academic Publishers.

- Smedley, P.L., Kinniburgh, D.G. (2002): A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry* 17, 517-568.
- Smith, A.H., Lingas, E.O., Rahman, M. (2000): Contamination of drinking-water by arsenic in Bangladesh: a public health emergency. *Bulletin of the world health organization*, 78(9), 1093-1103.
- U.S. Environmental Protection Agency - USEPA (2002): National Primary Drinking Water Regulations, EPA 816-F-02-013 και 40 CFR 141.
- US Salinity Laboratory Staff, 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. US Department of Agriculture, Handbook No. 60, pp: 160.
- Van der Aa, M. (2003): Classification of mineral water types and comparison with drinking water standards. *Environmental Geology*, 44:554-563.
- Voudouris, K., Kazakis, N., Polemio, M., Kareklas, K., (2010): Assessment of intrinsic vulnerability using DRASTIC model and GIS in the Kiti aquifer, Cyprus. *European Water* 30, 13-24.
- Welch, A.H., Stollenwerk, K.G., Maurer, D.K., Feinson, L.S. (2003): In situ arsenic remediation in a fractured, alkaline aquifer. In "Arsenic in groundwater: Chemistry and Occurrence" Chapter 15 (Welch, A.H., Editor). Kluwer Academic Publishers.
- Wilcox, L.V., 1948. The quality of water for irrigation. U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin No. 962, pp: 1-40.
- Wilcox, L.V., 1955. Classification and use of irrigation waters. USDA Circular No. 969, U.S. Department of Agriculture, USA.
- Wilson, F.H., Hawkins, D.B. (1978): Arsenic in streams, stream sediments and groundwater, Fairbanks area, Alaska. *Environmental Geology* 2(4), 195-202.
- Wuana, R. a., & Okieimen, F. E. (2011): Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. *ISRN Ecology*, 2011, 1-20.