



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ
ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΗ
ΛΕΚΑΝΗ ΣΑΡΙΓΚΙΟΛ, ΝΟΜΟΥ ΚΟΖΑΝΗΣ.
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ DRASTIC.**

Κωνσταντίνος Μ. Μπριντάκης

Αθήνα, Φεβρουάριος 2022

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»

Επιβλέπουσα: Δρ. ΕΔΙΠ Ελένη Βασιλείου

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες,

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα Δρ.ΕΔΙΠ Ελένη Βασιλείου, για τη στήριξή της και την πολύτιμη καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια συγγραφής αυτής της διπλωματικής. Επίσης, οφείλω τα θερμά μου ευχαριστήρια στη Μαρία και στους γονείς μου για την συμπαράσταση και κυρίως για την αστείρευτη υπομονή που έδειξαν, προκειμένου να επέλθει αυτή η απόκτηση του μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών μου.

Μπριντάκης Κων/νος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα πραγματοποιηθεί εκτίμηση της τρωτότητας των υπόγειων υδροφόρων της λεκάνης Σαριγκιόλ, στην Κοζάνη, απέναντι στις εξωτερικές πηγές ρύπανσης με τη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από εκτεταμένες αγροτικές καλλιέργειες και άλλες περιβαλλοντικές πιέσεις, γι' αυτό στην παρούσα έρευνα υφίσταται επικέντρωση στους αγροτικούς ρύπους (νιτρικά, φωσφορικά). Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκε η εφαρμογή της μεθόδου DRASTIC. Πραγματοποιείται διερεύνηση, μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης αλλά και πειραματικών μετρήσεων, των παραμέτρων που συνθέτουν τη συγκεκριμένη μέθοδο, όπως το βάθος του υδροφόρου, το υλικό της ακόρεστης ζώνης, η υφή του εδάφους κ.ά. Επίσης, υλοποιήθηκαν εργαστηριακές μετρήσεις κοκκομετρίας, από τις οποίες εξήχθησαν κοκκομετρικά διαγράμματα, προκειμένου να υπολογιστούν οι συντελεστές υδροπερατότητας, οι οποίοι εφαρμόστηκαν στο μοντέλο. Οι εργαστηριακές μετρήσεις και το πλήθος των μετρήσεων υπαίθρου, διασφαλίζουν την καλύτερη εφαρμογή του μοντέλου και την καλύτερη εκτίμηση της τρωτότητας των υδροφόρων οριζόντων.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της περιοχής μελέτης και προσδιορισμός των χαρακτηριστικών της (υδρογεωλογικά, μορφολογικά, κλιματολογικά). Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε καταγραφή των υφισταμένων περιβαλλοντικών πιέσεων που ασκούνται στη λεκάνη της Σαριγκιόλ, όπως και των επιδράσεων τους στο υδατικό περιβάλλον. Ακολουθεί ανάλυση της μεθόδου DRASTIC και των παραμέτρων που την απαρτίζουν. Κάθε παράμετρος εξετάζεται χωριστά ενώ παράλληλα αναλύονται τα δεδομένα που εισήχθησαν στο μοντέλο, τα οποία έχουν προκύψει από προγενέστερες μελέτες, ερευνητικά, διπλωματικές εργασίες αλλά και μετρήσεις. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με τη μορφή διαγραμμάτων και πολυθεματικών χαρτών, ενώ παράλληλα πραγματοποιείται αξιολόγηση τους, με εξαγωγή συμπερασμάτων και σύγκριση αυτών με προηγούμενες έρευνες πάνω στην λεκάνη Σαριγκιόλ. Τέλος, παρατίθενται συγκεκριμένες προτάσεις για περαιτέρω αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της παρούσας διατριβής.

ABSTRACT

In this diploma thesis, the vulnerability to the external sources of pollution of the underground aquifers of Sarigiol basin, in Kozani, will be investigated, using Geographic Information Systems. The area is characterized by extensive agricultural crops and other environmental pressures, that's why this thesis focuses on agricultural pollutants (nitrates, phosphates). More specifically, the application of the DRASTIC method was chosen. The parameters that compose the DRASTIC method, such as depth of the aquifer, material of the unsaturated zone, texture of the soil, etc., are investigated, through a literature review and experimental measurements. Also, granulometry measurements were performed, from which granulometric diagrams were extracted, in order to calculate the water permeability coefficients, which were applied to the model of DRASTIC. Granulometry measurements and the number of field measurements ensure better application of the model and better results.

Initially, the characteristics of the study area were determined (hydrogeological, morphological, climatic). Afterwards, environmental pressures that are exerted in the Sarigiol basin, as well as their effects on the aquatic environment, were recorded. Also, an analysis of the DRASTIC method and the parameters that compose it, is presented. Each parameter is examined separately and data that was inserted in the DRASTIC model is analyzed. Data that was used, was extracted from previous studies, research, thesis and measurements. Results are presented in the form of diagrams and multidisciplinary maps. Moreover, the results are evaluated and compared to previous research and studies on the Sarigiol basin. Finally, specific proposals are presented for further utilization of the results of the present thesis.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT	4
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	5
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	8
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	9
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
1.1 Προσέγγιση προβλήματος	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	13
2.1 Βασικές έννοιες – ορισμοί.....	13
2.2 Περιοχή μελέτης.....	14
2.2.1 Μορφολογία εδάφους	15
2.2.2 Κλιματολογικές Συνθήκες.....	19
2.2.3 Επιφανειακά και υπόγεια νερά.....	19
2.2.4 Υδρογεωλογία περιοχής μελέτης.....	20
2.2.5 Χρήσεις γης.....	23
2.2.6 Φυσικοχημικές παράμετροι νερών.....	25
2.3 Χημική κατάσταση υπόγειων νερών.....	26
2.4 Νιτρορύπανση – Γεωργικοί ρύποι	27
2.5 Ρύπανση από μέταλλα	30
2.6 Νομοθεσία προστασίας υδατικών πόρων	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΔΙΕΘΝΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ ΣΤΟ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ	33
3.1 Λεκάνη Σαριγκιόλ – ανθρωπογενής ρύπανση	33
3.2 Εφαρμογή της μεθόδου DRASTIC.....	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	39
4.1 Σκοπός της εργασίας	39
4.2 Λογισμικά – Εργαστηριακός εξοπλισμός	39
4.2.1 Μηχανικό κόσκινο 12 φάσεων.....	39
4.4.2 Λογισμικά	39
4.3 Περιγραφή του πειράματος	39
4.4 Δειγματοληψία.....	40
4.5 Εργαστηριακός υπολογισμός συντελεστή διαπερατότητας (K)	42
4.6 Τρωτότητα υπόγειων υδροφορέων	43

4.7 Μέθοδος DRASTIC.....	43
4.7.1 Εφαρμογή της μεθόδου στη λεκάνη Σαριγκιόλ	46
Βάθος στάθμης (D)	46
Κλίση ανάγλυφου (T).....	47
Επίδραση της ακόρεστης ζώνης (I).....	48
Υδροφόρο μέσο (A)	50
Έδαφος (S)	50
Ενεργή κατείσδυση (R)	50
Υδραυλική αγωγιμότητα (C).....	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	52
D – Ενεργή κατείσδυση	52
T – Τοπογραφική κλίση	54
I – Υλικό ακόρεστης ζώνης υδροφόρου	56
A – Υλικό υδροφόρου μέσου	58
S – Υφή εδάφους	60
R – Ενεργή κατείσδυση	62
C - Υδραυλική αγωγιμότητα	64
Χάρτης τρωτότητας DRASTIC	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	72
INTERNET SITES	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	77

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Δήμος Κοζάνης (Στρ. Σχεδιασμός Δ.Κοζάνης, 2011)	15
Εικόνα 2 Γεωγραφικός χάρτης περιοχής μελέτης (http://wfdgis.ypeka.gr/).....	17
Εικόνα 3 Γεωλογικός χάρτης περιοχής μελέτης (ΙΓΜΕ, 1980)	18
Εικόνα 4 Υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής έρευνας (Καντηράνης κ.ά., 2016)	21
Εικόνα 5 Χρήσεις γης λεκάνης Σαριγκιόλ (Land Cover-Corine, 2006).....	24
Εικόνα 6 Τρωτότητα υπόγειου νερού της περιοχής Malda, στην Ινδία, χωρισμένη σε ζώνες, κάνοντας χρήση του DRASTIC (Manasree and Subodh, 2021).....	36
Εικόνα 7 Τρωτότητα υπόγειου νερού της περιοχής Behshahr, στο Ιράν, χωρισμένη σε ζώνες, κάνοντας χρήση του DRASTIC (Khosravi et al., 2020)	37
Εικόνα 8 Εφαρμογή μεθόδου DRASTIC στη λεκάνη της Σαριγκιόλ (Voudouris, 2009).....	38
Εικόνα 9 Τοποθεσία συλλογής εδαφικών δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή κοκκομετρικών διαγραμμάτων – συντελεστών διαπερατότητας.....	41
Εικόνα 10 Αναπαράσταση των συντελεστών βαρύτητας της μεθόδου DRASTIC (www.frakturmedia.net/oswp/drastic).....	45
Εικόνα 11 Μέσο βάθος στάθμης υπόγειου νερού στη λεκάνη Σαριγκιόλ	47
Εικόνα 12 Γεώτρηση - Απεικόνιση γεωλογικού προφίλ περιοχής μελέτης (Περράκη κ.ά., 2016).....	49
Εικόνα 13 Χάρτης βαθμονόμησης της παραμέτρου βάθους στάθμης υπόγειου υδροφορέα (D)	53
Εικόνα 14 Χάρτης βαθμονόμησης της παραμέτρου τοπογραφικής κλίσης (T)	55
Εικόνα 15 Χάρτης βαθμονόμησης της παραμέτρου υλικό ακόρεστης ζώνης υδροφόρου (I) 57	
Εικόνα 16 Χάρτης βαθμονόμησης του υλικού υδροφόρου μέσου (A).....	59
Εικόνα 17 Χάρτης βαθμονόμησης της παραμέτρου υφή εδάφους.....	61
Εικόνα 18 Χάρτης βαθμονόμησης του παράγοντα της ενεργής κατεΐσδυσης	63
Εικόνα 19 Χάρτης βαθμονόμησης του παράγοντα της υδραυλικής αγωγιμότητας	65
Εικόνα 20 Χάρτης DRASTIC.....	67
Εικόνα 21 Χωρική κατανομή νιτρικών ιόντων στα υπόγεια και επιφανειακά νερά στη λεκάνη Σαριγκιόλ (Περράκη κ.ά., 2016)	68

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Τιμές Υδραυλικής αγωγιμότητας (Καλλέργης, 2000)	14
Πίνακας 2 Υδατικό ισοζύγιο υπόγειου υδροφορέα λεκάνης Σαριγκιόλ (Στάμου, 2001)	20
Πίνακας 3 Έλεγχος τάσεων γεώτρησης Σαριγκιόλ (Ειδική γραμματεία υδάτων, 2014)	23
Πίνακας 4 Γεωλογικά, υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά και χρήσεις γης στη περιοχή μελέτης (ΕΛΙΜΕΙΑ 1997, Λουλούδης 1991, ΙΓΜΕ Γ' ΚΠΣ 2010, Περράκη κ.ά., 2016)	25
Πίνακας 5 Φυσικοχημικές Παράμετροι Νερών της λεκάνης Σαριγκιόλ (Vasileiou et al.,2019)	26
Πίνακας 6 Κατηγορίες του υπογείου νερού βάσει TDS (mg/L) [Καλλέργης, 2000].....	27
Πίνακας 7 Συγκεντρώσεις As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn στα φωσφορικά λιπάσματα του ελλαδικού χώρου σε σύγκριση με άλλες χώρες (Parazotos et al.,2019)	30
Πίνακας 8 Συντεταγμένες σημείων λήψης εδαφικών δειγμάτων	40
Πίνακας 9 Υπολογισμένοι συντελεστές διαπερατότητας	42
Πίνακας 10 Βαρύτητα κάθε παραμέτρου της μεθόδου DRASTIC (Aller et al., 1987)	46
Πίνακας 11 Βάθος υδροφορέα και η αντίστοιχη βαθμονόμηση του	47
Πίνακας 12 Τοπογραφικές κλίσεις και η αντίστοιχη βαθμονόμηση τους	48
Πίνακας 13 Βαθμονόμηση της παραμέτρου του υλικού της ακόρεστης ζώνης.....	48
Πίνακας 14 Βαθμονόμηση της παραμέτρου του υλικού του υδροφόρου μέσου.....	50
Πίνακας 15 Βαθμονόμηση της παραμέτρου υφή του εδάφους.....	50
Πίνακας 16 Βαθμονόμηση της παραμέτρου ενεργής κατείδυσης	51
Πίνακας 17 Τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας περιοχής μελέτης έπειτα από δοκιμαστικές αντλήσεις (Vasileiou et. al., 2018).....	51
Πίνακας 18 Βαθμονόμηση της παραμέτρου ενεργής κατείδυσης	51
Πίνακας 19 Μετρήσεις μάζας εδαφικών δειγμάτων	77
Πίνακας 20 Μετρήσεις δείγματος S8	78
Πίνακας 21 Μετρήσεις δείγματος SS6	79
Πίνακας 22 Μετρήσεις δείγματος SS2	80
Πίνακας 23 Μετρήσεις δείγματος SS5	81
Πίνακας 24 Μετρήσεις δείγματος SS8	82
Πίνακας 25 Μετρήσεις δείγματος SS1	83
Πίνακας 26 Μετρήσεις δείγματος S11	84
Πίνακας 27 Μετρήσεις δείγματος S14.....	85
Πίνακας 28 Μετρήσεις δείγματος S2.....	86
Πίνακας 29 Μετρήσεις δείγματος S10.....	87
Πίνακας 30 Μετρήσεις δείγματος W12	88
Πίνακας 31 Μετρήσεις δείγματος S12	89
Πίνακας 32 Μετρήσεις δείγματος 21, 54.813.....	90

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1 Κοκκομετρικό διάγραμμα δείγματος S8	78
Διάγραμμα 2 Κοκκομετρικό διάγραμμα δείγματος SS6	79
Διάγραμμα 3 Κοκκομετρικό διάγραμμα δείγματος SS2	80
Διάγραμμα 4 Κοκκομετρικό διάγραμμα δείγματος SS5	81
Διάγραμμα 5 Κοκκομετρικό διάγραμμα δείγματος SS8	82
Διάγραμμα 6 Κοκκομετρικό διάγραμμα δείγματος SS1	83
Διάγραμμα 7 Κοκκομετρικό διάγραμμα δείγματος S11	84
Διάγραμμα 8 Κοκκομετρικό διάγραμμα δείγματος S14	85
Διάγραμμα 9 Κοκκομετρικό διάγραμμα δείγματος S2	86
Διάγραμμα 10 Κοκκομετρικό διάγραμμα δείγματος S10	87
Διάγραμμα 11 Κοκκομετρικό διάγραμμα δείγματος W12	88
Διάγραμμα 12 Κοκκομετρικό διάγραμμα δείγματος S12	89
Διάγραμμα 13 Κοκκομετρικό διάγραμμα δείγματος 21, 54.813	90

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

AHΣ	Ατμοηλεκτρικός σταθμός
mg	Μάζα
L	Όγκος
As	Αρσενικό
Cr	Χρώμιο
TDS	Ολικά διαλυμένα στερεά
NO₃	Νιτρικά Ιόντα
P	Φώσφορος
DO	Διαλυμένο Οξυγόνο
K	Υδροπερατότητα
WHO	Παγκόσμιος οργανισμός υγείας
Km²	Έκταση
°C	Θερμοκρασία

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Προσέγγιση προβλήματος

Η προστασία και η ορθολογική χρήση των διαθέσιμων υδατικών πόρων πλέον κρίνεται απαραίτητη, πόσο μάλλον των υπόγειων κοιτασμάτων νερού, καθώς εμπεριέχουν το μεγαλύτερο ποσοστού διαθέσιμου πόσιμου νερού στον πλανήτη. Οι διάφορες περιβαλλοντικές πιέσεις που υφίστανται, είτε φυσικές είτε ανθρωπογενείς, δεν αφήνουν περιθώρια για περαιτέρω παράβλεψη του προβλήματος, δηλαδή αυτού της υποβάθμισης τους.

Η αστικοποίηση, η νιτρορύπανση μέσω των γεωργικών δραστηριοτήτων, η υπερεκμετάλλευση, η υφαλμύριση, η ερημοποίηση, η κλιματική αλλαγή, είναι κάποιες ενδεικτικές πιέσεις που οι υδατικοί πόροι υφίστανται, και οδηγούν σε ποιοτική και ποσοτική υποβάθμιση αυτών.

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί άλλον έναν παράγοντα που επιδρά στους υδατικούς πόρους καθοριστικά. Εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων, έντονες βροχοπτώσεις, ξηρασίες, αποτελούν φαινόμενα των οποίων η συχνότητα εμφάνισης ολοένα και περισσότερο αυξάνει. Επίσης, έχει παρατηρηθεί αλλαγή στη θερμοκρασία του αέρα και στις βροχοπτώσεις, γεγονός που συνεπάγεται αλλαγή "συμπεριφοράς" των ρύπων, αναφορικά με τη διάχυση και την κίνηση αυτών, αφού αυξημένη θερμοκρασία του νερού επηρεάζει την κινητικότητα και τις χημικές αντιδράσεις των στοιχείων.

Η Περιοχή μελέτης είναι η λεκάνη της Σαριγκιόλ (EL 0900062) ή αλλιώς περιοχή νοτίου Πεδίου, που βρίσκεται στο νομό Κοζάνης και ανήκει στο υδατικό διαμέρισμα Δυτικής Μακεδονίας (EL09). Με τη βοήθεια της τεχνολογίας και εξελιγμένων μαθηματικών μοντέλων υφίσταται πλέον η δυνατότητα προσομοίωσης της διάχυσης των ρύπων μέχρι την κορεσμένη ζώνη, ανεξαρτήτως προέλευσης. Στη συγκεκριμένη εργασία έγινε χρήση της μεθόδου DRASTIC, μεθόδου ανάλυσης - απεικόνισης τρωτότητας του υπόγειου υδροφόρου που λαμβάνει υπόψιν βασικούς παράγοντες, όπως το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα, το είδος του εδάφους, την κλίση του εδάφους κ.ά. Προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια στην εφαρμογή της μεθόδου DRASTIC, πραγματοποιήθηκε κοκκομετρική ανάλυση σε εδαφικά δείγματα της περιοχής μελέτης. Οι τιμές υδροπερατότητας που προέκυψαν από τις κοκκομετρικές αναλύσεις, εισήχθησαν στο μοντέλο. Έπειτα, δημιουργήθηκαν χάρτες τρωτότητας για κάθε παράμετρο του μοντέλου DRASTIC καθώς και ο τελικός χάρτης τρωτότητας, που αποτελεί συνδυασμό όλων των παραμέτρων.

Στην περιοχή της Κοζάνης καταγράφονται πηγές ρύπανσης ανθρωπογενούς και γεωγενούς προέλευσης. Οι εκτεταμένες ανθρωπογενείς δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα στη λεκάνη Σαριγκιόλ (αγροτική δραστηριότητα – υπέρμετρη χρήση λιπασμάτων, λειτουργία ΑΗΣ- εξόρυξη λιγνίτη), καθώς και η φυσική σύσταση των πετρωμάτων της λεκάνης της περιοχής μελέτης (Σαριγκιόλ), αποτελούν τους σημαντικότερους παράγοντες

που καθορίζουν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των υπογείων νερών της λεκάνης. Τα κυριότερα προβλήματα που αποτυπώνονται στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των υπογείων νερών είναι η νιτρορύπανση και η παρουσία χρωμίου στα εδάφη και στα νερά της λεκάνης.

Η δομή της παρούσας εργασίας περιγράφεται παρακάτω.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή, παρουσίαση του προβλήματος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Εισαγωγή βασικών θεωρητικών εννοιών, παρουσίαση της περιοχής μελέτης και των χαρακτηριστικών της (μορφολογία, υδρογεωλογία, γεωλογία). Επίσης υλοποιείται ανασκόπηση στην νομοθεσία που διέπει τους υδάτινους πόρους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Επισκόπηση της διεθνούς επιστημονικής εμπειρίας πάνω στο αντικείμενο της εργασίας (προηγούμενες μελέτες πάνω στην λεκάνη Σαριγκιόλ, περιπτώσεις εφαρμογής της μεθόδου DRASTIC στη διεθνή βιβλιογραφία)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ανάλυση της μεθοδολογίας, και των μέσων που χρησιμοποιήθηκαν. Περιγραφή του πειράματος Επισκόπηση της μεθόδου DRASTIC και των βασικών χαρακτηριστικών της. Εξέταση παραμέτρων που εισήχθησαν στο μοντέλο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής της μεθόδου DRASTIC στην περιοχή μελέτης, με τη μορφή χαρτών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Έκθεση συμπερασμάτων και σχολιασμός,. προτάσεις συνέχισης της έρευνας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Παράθεση της βιβλιογραφίας που χρησιμοποιήθηκε

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Παράρτημα δεδομένων – αποτελέσματα εργαστηριακών μετρήσεων που διεξήχθησαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 Βασικές έννοιες – ορισμοί

Υδροφόρος: γεωλογικός σχηματισμός που εμπεριέχει νερό στους πόρους του, έχοντας αυξημένη ικανότητα να αποθηκεύει και να μεταβιβάζει νερό. Οι κυριότεροι υδροφορείς διαχωρίζονται σε ελεύθερους (δάπεδο στεγανό και άνωθεν τους δεν παρεμβάλλεται κάποιο στεγανό στρώμα), υπό πίεση (νερό εγκλωβισμένο ανάμεσα σε αδιαπέρατα στρώματα) και ημιαρτεσιανούς (το άνωθεν στρώμα τους παρουσιάζει μικρή υδροπερατότητα). (Καλλέργης, 2000)

Ολικό πορώδες (n): ένα μέτρο των διακένων σε ένα πέτρωμα ή έδαφος. Ουσιαστικά, ισούται με το λόγο του συνολικού όγκου των διακένων (V_k) προς τον συνολικό όγκο του εδάφους ($V_{ολ}$): $n=V_k/V_{ολ}$ (Καλλέργης, 2000)

Ενεργό πορώδες: το ποσό των διακένων που επικοινωνούν και επιτρέπουν ροή του νερού από μέσα τους, είτε με τη βοήθεια της βαρύτητας, είτε της υδροστατικής πίεσης. Τα διάκενα που δεν βοηθούν στη ροή, καταλαμβάνονται από νερό που συγκρατείται και ονομάζεται νερό συγκράτησης. (Καλλέργης, 2000)

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί, αναλόγως της δυνατότητας τους να επιτρέπουν στο νερό να τους διαπερνά και να μπορεί να κινηθεί μέσα σε αυτούς, χωρίζονται σε υδροπερατούς και αδιαπέρατους σχηματισμούς.

Το νερό στο υπέδαφος διακρίνεται σε δύο ζώνες:

- Ζώνη αερισμού: Αποτελούμενη από διάκενα, και κατεχόμενη μερικώς από νερό.
- Ζώνη κορεσμού: Όλα τα διάκενα της είναι πληρωμένα με νερό κάτω υπό υδροστατική πίεση, και στην ουσία, αντιπροσωπεύει το υδροφόρο στρώμα.

Διαπερατότητα: σταθερά εξαρτώμενη από τα χαρακτηριστικά του πορώδους μέσου, δηλαδή το σχήμα, το μέγεθος και τη διάταξη των κόκκων που το απαρτίζουν.

Υδροπερατότητα ή υδραυλική αγωγιμότητα (k): Σε ένα μέσο ισούται με τη μονάδα, όταν έχει τη δυνατότητα να μεταβιβάζει στη μονάδα του χρόνου κάθετα στη διεύθυνση της υπόγειας ροής, τη μονάδα του όγκου νερού από μοναδιαία διατομή με υδραυλική κλίση ίση με τη μονάδα και την επικράτηση του κινηματικού ιξώδους. Έχει διαστάσεις ταχύτητας LT^{-1} . Γενικά οι γεωλογικοί σχηματισμοί διακρίνονται αναλόγως της υδραυλικής τους αγωγιμότητας σε:

- Πολύ υδροπερατοί για $k \geq 10^{-1}$ m/s
- Υδροπερατοί για $10^{-6} < k < 10^{-1}$ m/s
- Λίγο υδροπερατοί για $10^{-9} < k < 10^{-6}$ m/s
- Πρακτικά στεγανοί για $k \leq 10^{-9}$ m/s

Πίνακας 1 Τιμές Υδραυλικής αγωγιμότητας (Καλλέργης, 2000)

Υλικό	K (m/s)
Μεγάλα χαλίκια	$1,7 \cdot 10^{-3}$
Μεσαίου μεγέθους χαλίκια	$3,1 \cdot 10^{-3}$
Μικρού μεγέθους χαλίκια	$5,2 \cdot 10^{-3}$
Χονδρόκοκκη άμμος	$5,2 \cdot 10^{-4}$
Μεσόκοκκη άμμος	$1,4 \cdot 10^{-4}$
Λεπτόκοκκη άμμος	$2,9 \cdot 10^{-5}$
Ιλύς	$9,2 \cdot 10^{-7}$
Άργιλος	$2,3 \cdot 10^{-9}$

Μεταβιβαστικότητα (T): Αποτελεί το γινόμενο της υδραυλικής αγωγιμότητας (k) και του πάχους του υδροφόρου (D). $T=k \cdot D$. Κατ' ουσία είναι ο όγκος νερού που περνά από μοναδιαία διατομή του υδροφόρου με υδραυλική κλίση ίση με τη μονάδα και την επικράτηση του κινηματικού ιξώδους.

Αποθηκευτικότητα ή υδροχωρητικότητα (S): Ο όγκος νερού που μπορεί αποθηκευτεί από ένα κατακόρυφο πρίσμα ενός υδροφόρου με μοναδιαία επιφάνεια ανά μονάδα μεταβολής του φορτίου. Ορίζεται: $S = \Delta V / (A \cdot \Delta h)$ (όπου $\Delta V =$ ο όγκος του νερού, A εμβαδόν της οριζόντιας επιφάνειας, $\Delta h =$ η πτώση του φορτίου)

Εμπλουτισμός των υπόγειων υδροφόρων οριζόντων συμβαίνει φυσικώς ή τεχνητώς. Φυσικώς γίνεται με τους εξής τρόπους: απευθείας κατείσδυση ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, διήθηση από επιφανειακά νερά, υπόγεια τροφοδοσία από γειτονικές λεκάνες. (Καλλέργης, 2000)

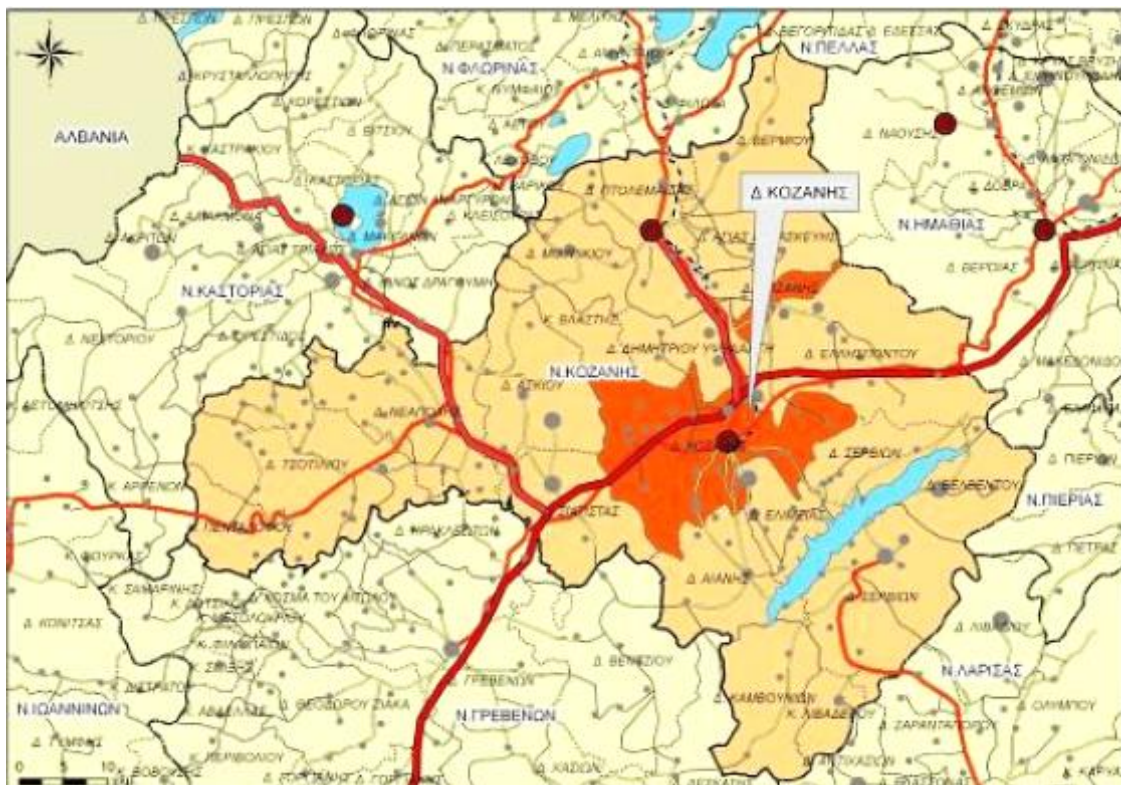
2.2 Περιοχή μελέτης

Ο δήμος Κοζάνης αποτελεί το μεγαλύτερο ενεργειακό δήμο της χώρας, λόγω της λειτουργίας των Ατμοηλεκτρικών Σταθμών της ΔΕΗ. Η Κοζάνη χαρακτηρίζεται, εκτός από την εκτεταμένη μεταλλευτική δραστηριότητα που λαμβάνει χώρα στην περιοχή, από έντονη γεωργική και κτηνοτροφική δραστηριότητα, παρά την απαλλοτρίωση εύφορων γεωργικών εκτάσεων από τη ΔΕΗ. Ανήκει στο ένατο υδατικό διαμέρισμα, αυτό της Δυτικής Μακεδονίας (EL09) (Επιχειρησιακό πρ. Δ.Κοζάνης, 2011)

Βόρεια από την πόλη της Κοζάνης χωροθετείται ο κυριότερος ενεργειακός άξονας της χώρας, όπου βρίσκεται ο Ατμοηλεκτρικός Σταθμός Αγ. Δημητρίου, ενώ μερικά χιλιόμετρα βορειότερα είναι εγκατεστημένος ο Ατμοηλεκτρικός σταθμός Πτολεμαΐδας, ο οποίος δε λειτουργεί πλέον. Η λειτουργία των ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων της ΔΕΗ, είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την εξόρυξη και καύση του λιγνίτη.

Οι αγροτικές δραστηριότητες εκτεταμένης κλίμακας, επιβάρυναν την εδαφική ποιότητα λόγω υπερβολικής χρήσης φυτοφαρμάκων, λιπασμάτων

καθώς και της καύσης υπολειμμάτων καλλιεργειών. Η πληθώρα αρδευτικών γεωτρήσεων, αλλά και η αποστράγγιση των ορυχείων της ΔΕΗ, συνέβαλαν στην υπεράντληση των υπόγειων υδροφορέων. (Επιχειρησιακό πρ. Δ.Κοζάνης, 2011)



Εικόνα 1 Δήμος Κοζάνης (Στρ. Σχεδιασμός Δ.Κοζάνης, 2011)

Οι λεκάνες Μοναστηρίου, Φλώρινας, Αμυνταίου, Πτολεμαΐδας, Κοζάνης και Σερβίων καλύπτονταν από αβαθείς λίμνες και έλη, με ταυτόχρονη ανάπτυξη της χλωρίδας. Με την πάροδο μεγάλων χρονικών περιόδων, μεγάλες ποσότητες των συγκεκριμένων φυτών συγκεντρώθηκαν στον πυθμένα των λιμνών. Έπειτα, η νεκρή βλάστηση καλύφθηκε από γαιώδη υλικά και οι υπό πίεση οργανικές ύλες, με την επίδραση μικροοργανισμών, μετατράπηκαν σε λιγνίτη. [www.dei.gr,2021]

Ο λιγνίτης ωστόσο δεν είναι το μοναδικό κοιτάσμα της περιοχής που μπορεί να εξορυχθεί. Στη λεκάνη Κοζάνης-Σερβίων έχουν εντοπιστεί κοιτάσματα λευκόλιθου και διάφορες εκφάνσεις του όπως ο χουντίτης αλλά και κοιτάσματα μαρμάρου. (Επιχειρησιακό πρ. Δ.Κοζάνης, 2011)

2.2.1 Μορφολογία εδάφους

Η Δ. Ενότητα Ελλησπόντου χωροθετείται ανατολικά της Κοζάνης, νότια της Νεογενούς λεκάνης Φλώρινας – Αμυνταίου – Πτολεμαΐδας – Κοζάνης – Σερβίων, η οποία διακόπτεται σε επιμέρους υπολεκάνες από λοφοσειρές. Το τμήμα στα νότια της λεκάνης Πτολεμαΐδας – Κοζάνης, έχει την ονομασία “Σαριγκιόλ” (GR 0900062), και αποτελεί μία ξεχωριστή μορφολογική ενότητα, αφού αποτελεί τάφρο η οποία χωροθετείται ανάμεσα σε δύο μεγάλα ορεινά

συγκροτήματα, το Βέρμιο ανατολικά και το Άσκιο δυτικά. Νότια, η λεκάνη “Σαριγκιόλ” χωροθετείται από το βουνό Σκοπός, υψομέτρου 1256 μέτρων, ενώ βόρεια η λεκάνη υφίσταται ο λόφος του Κομάνου, υψομέτρου 750 μέτρων. Η κεντρική ζώνη της λεκάνης Σαριγκιόλ, χαρακτηρίζεται από μικρά υψόμετρα και συσσώρευση περιορισμένων επιφανειακών απορροών. Οι χείμαρροι που διατρέχουν την λεκάνη, είναι ενεργοί μόνο την περίοδο των βροχοπτώσεων, τους υπόλοιπους μήνες είναι ξηροί. Κεντρικά της λεκάνης διέρχεται το ρέμα Σουλού, όπου καταλήγουν οι επιφανειακές απορροές των υδρορευμάτων της λεκάνης με τελικό αποδέκτη τη λίμνη Βεγορίτιδα. Η έκταση της περιοχής ισούται περίπου με 470 km².

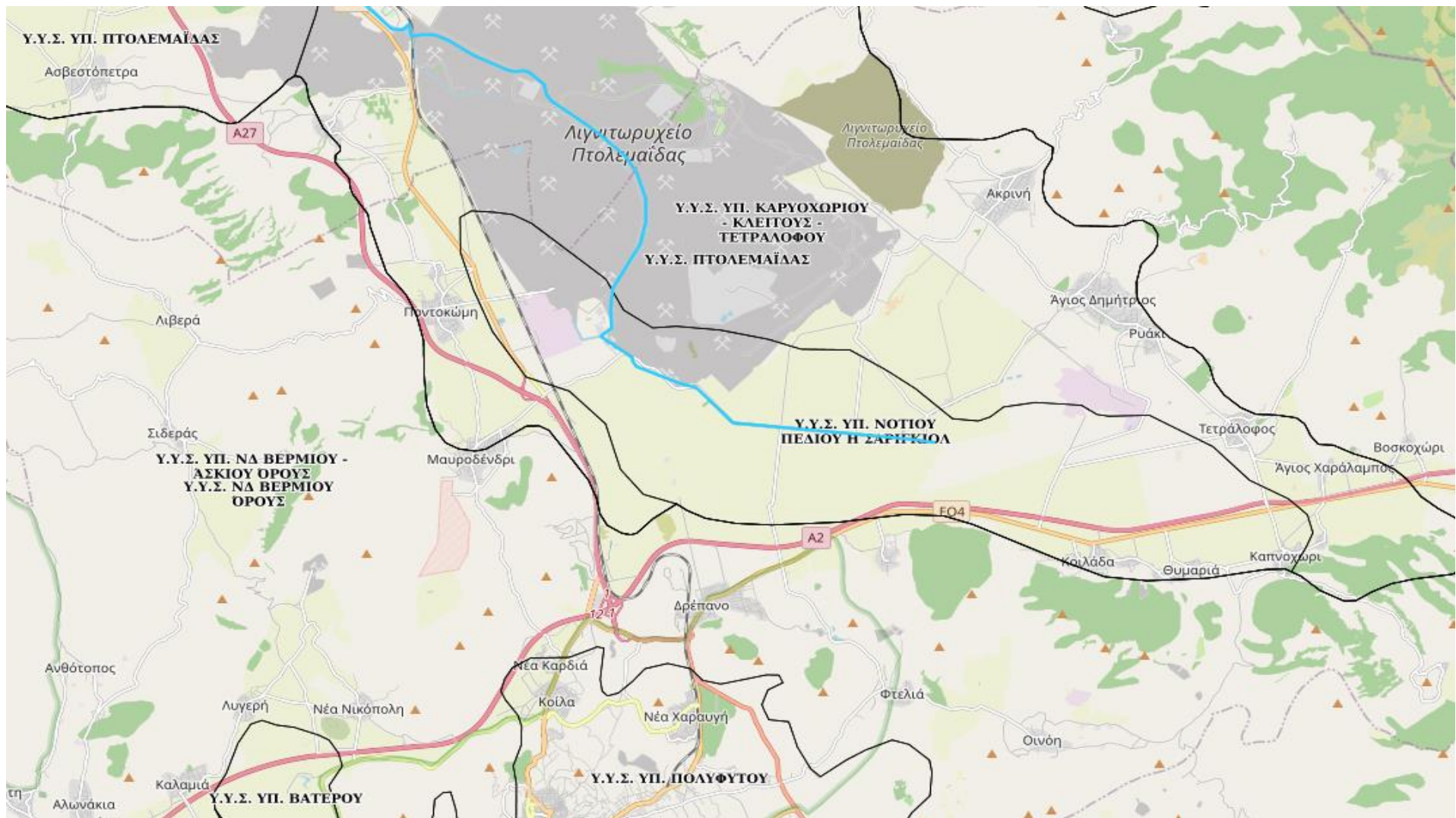
Η περιοχή μπορεί να διακριθεί σε τρεις μορφολογικές ζώνες:

Ορεινή ζώνη Βερμίου και Σκοπού. Την χαρακτηρίζουν έντονες κλίσεις του ανάγλυφου. Η υδρολογική λεκάνη που σχηματίζεται τοπικά στο τμήμα αυτό, αποστραγγίζεται στον ποταμό Αλιάκμονα.

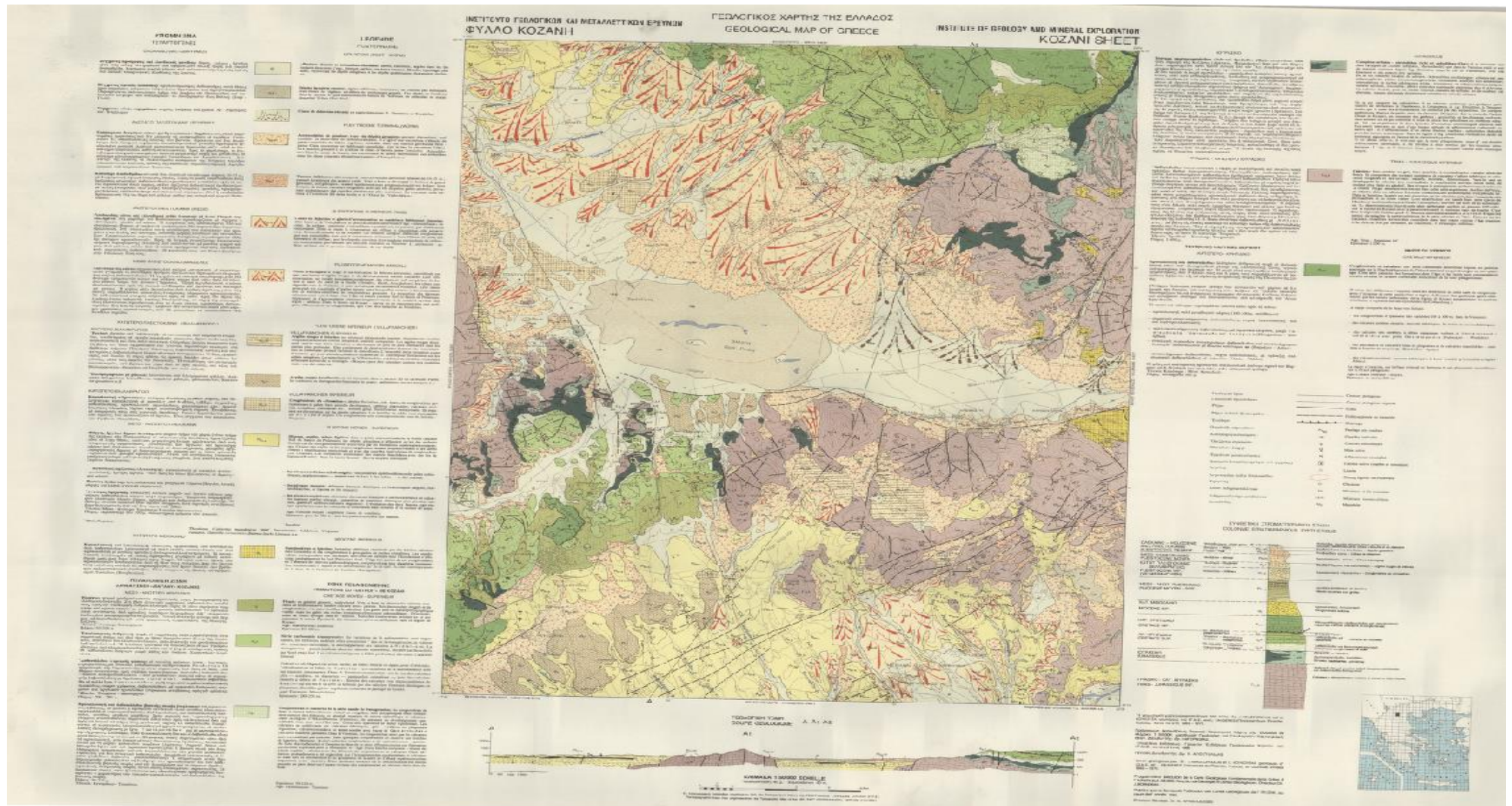
Ζώνη πλευρικών κορημάτων των δύο ορεινών όγκων. Οι κλίσεις χαρακτηρίζονται ως ομαλές. Οι περισσότεροι οικισμοί είναι δομημένοι σε αυτή τη ζώνη.

Πεδινή ζώνη. Τοπογραφικά είναι η περιοχή με το χαμηλότερο υψόμετρο και καλύπτει την έκταση του αποξηραμένου έλους «Σαριγκιόλ».

Η περιοχή δομείται γεωλογικά κυρίως από ασβεστόλιθους και οφιολιθικά πετρώματα. Τα εδάφη της περιοχής είναι πηλώδη, πηλλοαμμώδη και αργιλώδη. Σε μεγάλα τμήματα της περιοχής, παρατηρείται έλλειψη αυτοφυούς βλάστησης που οδηγεί στην αυξημένη διάβρωση και έκπλυση του εδάφους. (Επιχειρησιακό πρ. Δ.Κοζάνης, 2011)



Εικόνα 2 Γεωγραφικός χάρτης περιοχής μελέτης (<http://wfdgis.yreka.gr/>)



Εικόνα 3 Γεωλογικός χάρτης περιοχής μελέτης (ΙΓΜΕ, 1980)

2.2.2 Κλιματολογικές Συνθήκες

Οι μεγαλύτερες τιμές κατακρημνίσεων στην περιοχή της Κοζάνης να παρατηρούνται τους φθινοπωρινούς μήνες. Οι ελάχιστες θερμοκρασίες παρουσιάζονται τον Ιανουάριο ($<3^{\circ}\text{C}$) και οι μέγιστες καταγράφονται τον Ιούλιο ($>24^{\circ}\text{C}$). Οι επικρατέστερες διευθύνσεις του ανέμου στην περιοχή μελέτης είναι οι Βόρειες, συνεπώς παρατηρείται επιλεκτική ανάπτυξη της βλάστησης στις βόρειες εκθέσεις των οροσειρών-λόφων της περιοχής.

Η περιοχή χαρακτηρίζεται από μεσογειακό κλίμα, με μέση ετήσια θερμοκρασία $12,9^{\circ}\text{C}$. Η λεκάνη της Σαριγκιόλ δέχεται 643 mm βροχής το χρόνο. Έχει αποδειχθεί πως ανά 100m υψομέτρου, οι κατακρημνίσεις αυξάνονται κατά 28mm. Με τη μέθοδο thornthwaite, η εκτιμώμενη ετήσια εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται στα 417mm, αντικατοπτρίζοντας το 75% των ετήσιων βροχοπτώσεων. Το ρέμα Σουλού εκβάλλει περίπου $10\text{-}15 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ νερό ετησίως. (Voudouris, 2009)

2.2.3 Επιφανειακά και υπόγεια νερά

Η περιοχή υδρολογικά ανήκει στο ένατο υδατικό διαμέρισμα, στην υδρολογική λεκάνη της Πτολεμαΐδας, η οποία είναι κλειστή, χωρίς έξοδο σε θαλάσσιο αποδέκτη. Η επιφανειακή απορροή της λεκάνης γίνεται με μία σειρά υδρορεμάτων τα περισσότερα από τα οποία, καταλήγουν στο ρέμα Σουλού, που αρχίζει από την περιοχή του παλιού έλους Σαριγκιόλ και εκβάλλει στη λίμνη Βεγορίτιδα, με μήκος γύρω στα 25km, συγκεντρώνοντας τα ρέματα του Βερμίου, του Ασκίου και της λεκάνης Σαριγκιόλ. Το ρέμα Σουλού έχει κάποια τμήματα που δεν είναι φυσικά, τα οποία κατασκευάστηκαν το 1954, κατά τη διάρκεια αποξήρανσης της λεκάνης Σαριγκιόλ - νότιου τμήματος της λεκάνης Πτολεμαΐδας – η οποία ήταν έλος και συγκέντρωνε όλες της επιφανειακές απορροές της λεκάνης, αλλά παράλληλα αποτελούσε αποδέκτη των υπόγειων νερών που χρησιμοποιούνταν στα ορυχεία της περιοχής. (Επιχειρησιακό πρ. Δ. Κοζάνης, 2011)

Στη λεκάνη Σαριγκιόλ, μεγάλη έκταση καταλαμβάνουν τα πλειστοκαινικά και τεταρτογενή ιζήματα. Η έκταση όπου αναπτύσσεται το υδροφόρο σύστημα της λεκάνης είναι γύρω στα 60 km^2 , και το βάθος του παρουσιάζει το μέγιστο του στα 110 μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, με τη συνολική έξοδο νερού να έχει εκτιμηθεί την περίοδο λειτουργίας των ορυχείων στα $30,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ και την είσοδο (τροφοδοσία υπόγειων και επιφανειακών αποδεκτών) στα $24,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$. Από τη λεκάνη Σαριγκιόλ αντλούνται για άρδευση $12,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ νερό ανά έτος (41% του συνόλου), ενώ για αστική χρήση περί τα $6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (19,6% του συνόλου). (Voudouris, 2009). Κάθε έτος, έχει αναφερθεί από τον Κουμαντάκη (1999) πώς ο υδροφόρος ορίζοντας της λεκάνης πέφτει 1-1,5 m στο βορειοδυτικό κομμάτι της, ενώ στο ανατολικό 0,5-1,5 m.

Το έδαφος και το υπέδαφος της περιοχής της Σαριγκιόλ έχουν να αντιμετωπίσουν προβλήματα ρύπανσης, εξαιτίας της χρήσης φυτοφαρμάκων, λιπασμάτων και απότοκων της εξορυκτικής δραστηριότητας των εργοστασίων

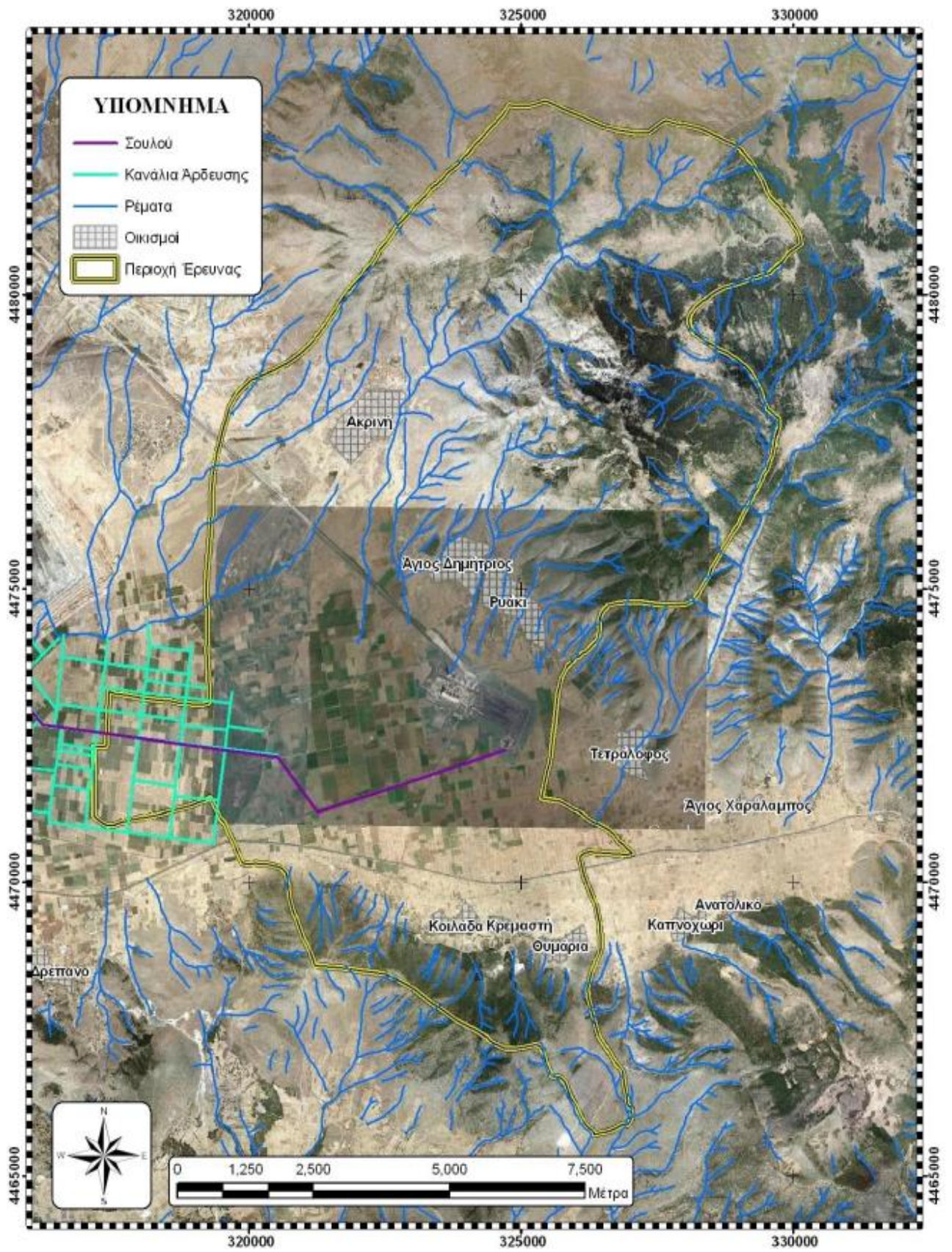
της ΔΕΗ. Από το 1961, που καταγράφονται οι πρώτες γεωτρήσεις στην λεκάνη, μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του '90, καταγράφη πτώση της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα από τα -6,5μ (1961) στα -110μ. Ο ιζηματογενής υδροφορέας υπέρκειται των λιγνιτοφόρων στρωμάτων. (Επιχειρησιακό πρ. Δ. Κοζάνης, 2011). Ο βασικός υδροχημικός τύπος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τα νερά της λεκάνης είναι ο Ca-Mg-HCO₃. Τα νερά της περιοχής χαρακτηρίζονται ως αλκαλικά λόγω της αλληλεπίδρασης του βρόχινου νερού με τα υπερβασικά και ανθρακικά πετρώματα (Περράκη κ.ά., 2016)

Πίνακας 2 Υδατικό ισοζύγιο υπόγειου υδροφορέα λεκάνης Σαριγκιόλ (Στάμου, 2001)

	Βροχόπτωση	Εξατμισοδιαπνοή	Κατείδυση	Επιφανειακή απορροή
Ποσοστό (%) της βροχόπτωσης	100	72,4	20,6	7
Όγκος νερού (*10 ⁶ m ³)	33,8	24,5	7	2,3
Ύψος (mm)	563,8	408,2	116,3	39,3

2.2.4 Υδρογεωλογία περιοχής μελέτης

Οι σχηματισμοί της λεκάνης Σαριγκιόλ, χωρίζονται σε τρεις ομάδες: τους υδροπερατούς (ανθρακικοί σχηματισμοί-ασβεστόλιθοι), τους ημιπερατούς (άργιλοι, κροκαλοπαγή και χαλίκια) και τους υδατοστεγανούς (γνευσιοσχιστόλιθοι, φλύσχης). (ΙΓΜΕ, 2010) Ο υδροφόρος επαναφορτίζεται είτε άμεσα μέσω κατακρημνισμάτων είτε από τους παγετούς που λιώνουν ποσό το οποίο έχει υπολογιστεί στα 2*10⁶ m³/yr. Κοντά στον ΑΗΣ του Αγ. Δημητρίου, η ακόρεστη ζώνη είναι ιδιαίτερα αυξημένου πάχους και αποτελείται από πολλαπλές εναλλαγές αργιλικών στρωμάτων μικρής υδροπερατότητας (K=10⁻⁶ έως 10⁻⁸ m/s, (Vasileiou, et al., 2019)



Εικόνα 4 Υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής έρευνας (Καντηράνης κ.ά., 2016)

Τα υδροφόρα συστήματα της περιοχή μελέτης διακρίνονται σε. (Περράκη κ.ά., 2016):

- Ένα υδροφόρο σύστημα, χωρισμένο σε μικρότερα επάλληλα υδροφόρα στρώματα, λόγω της παρεμβολής των αργιλικών υλικών, το οποίο βρίσκεται άνωθεν της λιγνιτοφόρου στοιβάδας της πεδινής ζώνης και καλύπτει όλη τη λεκάνη της Σαριγκιόλ. Στο συγκεκριμένο σύστημα, έχουν ανοιχθεί στην περιβάλλουσα ζώνη του αποστραγγιστικές γεωτρήσεις για την διασφάλιση του μεταλλευτικών και εξορυκτικών δραστηριοτήτων. Το νερό που αντλείται χρησιμοποιείται για την κάλυψη των αναγκών της περιοχής.
- Ένα υδροφόρο σύστημα, που αναπτύσσεται υποκείμενα των λιγνιτών. Πιο συγκεκριμένα, στην περιοχή του Κομάνου υπάρχουν δύο γεωτρήσεις, ιδιοκτησίας της ΔΕΗ, που χρησιμοποιούνται για την ύδρευση της κοινότητας. Ο συγκεκριμένος υδροφόρος ορίζοντας εμπλουτίζεται πλευρικά.
- Ένα καρστικό υδροφόρο σύστημα, ανατολικά και δυτικά της λεκάνης. Ο καρστικός υδροφορέας που αναπτύσσεται στους ασβεστολίθους του Νότιου Βερμίου, του Σκοπού και του Νοτίου Ασκίου, εκφορτίζεται στις πηγές της Νεράιδας, στον Αλιάκμονα και σε άλλα σημεία. Η υδροφορία συναντάται σε ένα μέσο υψόμετρο 300 m, χωρίς υδραυλική επικοινωνία με το υδροφόρο σύστημα άνωθεν του λιγνιτοφόρου στρώματος.
- Νοτιοδυτικά της λεκάνης Σαριγκιόλ, απαντώνται περιορισμένης έκτασης καρστικοί υδροφόροι, που δεν επικοινωνούν με τη λεκάνη Σαριγκιόλ. (ΙΓΜΕ, 2010)
- Στο μεγαλύτερο τμήμα της λεκάνης οι τιμές υδροπερατότητας είναι μεταξύ 10^{-5} και 10^{-7} m/s, τιμές που τη χαρακτηρίζουν χαμηλή. Το ενεργό πορώδες των υδροφόρων σχηματισμών της λεκάνης αγγίζει το 25% με το μέσο ενεργό πορώδες να προσεγγίζει την τιμή του 15% (Λουλούδης, 1991). Το αποτέλεσμα είναι πως το νερό δε μπορεί να κινηθεί προς μεγαλύτερα βάθη εξαιτίας της παρουσίας αργιλικών σειρών, πάνω από τα στρώματα του λιγνίτη.
- Η ακόρεστη ζώνη έχει κυμαινόμενο πάχος που ξεκινά από 5 m και φτάνει μέχρι 100 m. Κεντρικά και κατά μήκος του ρέματος Σουλού έχουμε εμπλουτισμό του υδροφορέα, οπότε και η στάθμη του παρατηρείται σχετικά είναι ψηλά. Στο υπόλοιπο τμήμα της λεκάνης είναι από 10 έως 60 m. Ανατολικά της λεκάνης, σε περιοχές με υψόμετρο, η ακόρεστη ζώνη έχει πάχος 80-110 m. Κοντά στον Αγ. Δημήτριο, το υπόγειο νερό εντοπίζεται σε 50 έως 100 m βάθος (Vasileiou et al., 2018). Το μέσο πάχος υδροφορέα υπολογίζεται στα 110 m και το μέσο πάχος των κυρίων υδροφόρων στρωμάτων υπολογίζεται κοντά στα 60 m (Στάμου, 2001).
- Το πιεζομετρικό φορτίο έχει τις υψηλότερες τιμές του (750 m) προς τις βορειοανατολικές περιοχές (Χαραυγή, Ακρινή, Αγίου Δημήτριος) καθώς και δυτικά. Υψηλό πιεζομετρικό εμφανίζεται και βόρεια του όρους Δρεπάνου (660 m). Οι χαμηλότερες τιμές πιεζομετρίας (600 m) παρουσιάζονται νοτιοδυτικά (Vasileiou et al., 2018).

- Η κίνηση του νερού είναι κυρίως από τα βορειοανατολικά προς τα νοτιοδυτικά. Οι ιδιότητες του υδροφορέα μετρήθηκαν έπειτα από αναλύσεις: $T=300-1700 \text{ m}^2/\text{d}$, $S=7 \times 10^{-3}-1 \times 10^{-2}$. (Στάμου, 2001)

Τα υπόγεια νερά της περιοχής έρχονται σε άμεση επαφή και αλληλοεπιδρούν με τα υπερβασικά πετρώματα, τα οποία είναι αποσαθρωμένα, μεταξύ των περιοχών Αγ. Δημητρίου και Εξοχής. Η κατείδυση των κατακρημνισμάτων, στους σχηματισμούς αυτούς, και δημιουργεί υπόγεια υδροφορία. Κάποια καταλήγουν στους χειμάρρους, που ωστόσο δεν είναι επιφανειακής ροής, καθώς ρέουν υπογείως, τροφοδοτώντας τον υδροφόρο των σχηματισμών εγκλείονται άνωθεν του λιγνίτη του Νοτίου Πεδίου και των πέριξ περιοχών. Στις ευρύτερες περιοχές των οικισμών Αγ. Δημητρίου και Ακρινής, που υφίστανται οι υψηλότερες συγκεντρώσεις χρωμίου λόγω οφιολίθων, υλικό πλούσιο σε χρώμιο. (Περράκη κ.ά., 2016)

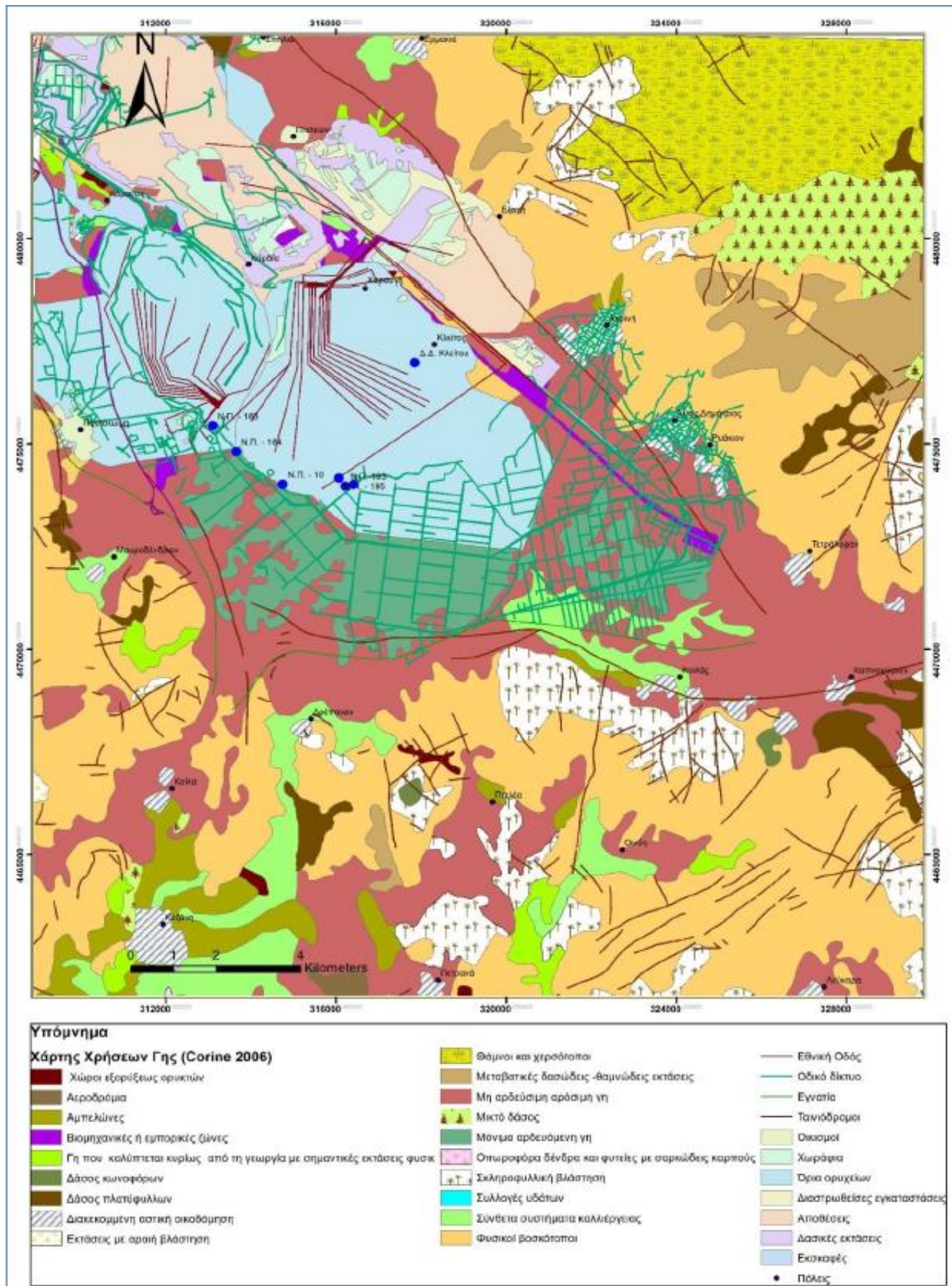
Πίνακας 3 Έλεγχος τάσεων γεώτρησης Σαριγκιόλ (Ειδική γραμματεία υδάτων, 2014)

Ημερομηνία μέτρησης	Αγωγιμ. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Cl (mgr/L)	NO ₃ (mgr/L)	Fe (mgr/L)
Οκτ-06	748	17	37.2	
Μαϊ-07	822	12.8	12.4	<100
Οκτ-07	887	11.4	24.8	<100
Μαϊ-08	582	10.6	15.5	
Ιουλ-08	851	14.5	12.4	
Σεπ-08	849	14.2	<5	1200

2.2.5 Χρήσεις γης

Η εξόρυξη του λιγνίτη και γενικότερα η εκμετάλλευση του ξεκινά το 1959, με ετήσια παραγωγή 40×10^6 τόνοι/έτος. Κοντά στο 50% του συνόλου της παραγόμενης στον ελλαδικό χώρο ηλεκτρικής ενέργειας, προέρχεται από τους δυο ΑΗΣ, αυτόν στον Άγιο Δημήτριο (ανατολικά της λεκάνης) και αυτόν στην Καρδιά (ΝΔ της λεκάνης) (Vasileiou et al., 2018).

Η ηλεκτροπαραγωγική διαδικασία ενέχει την παραγωγή τέφρας, γι' αυτό και στον σταθμό Αγ. Δημητρίου έχουμε ετησίως 3×10^6 τόνους παραγόμενης τέφρας, η οποία χαρακτηρίζεται ως έντονα αλκαλική με υψηλή περιεκτικότητα σε ασβεστίτη. Η τέφρα είναι εμπλουτισμένη σε Ag ($0,26 \text{ mg kg}^{-1}$), As ($38,8 \text{ mg kg}^{-1}$), B ($0,34 \text{ mg kg}^{-1}$), Cd ($0,65 \text{ mg kg}^{-1}$), Cr ($201,1 \text{ mg kg}^{-1}$), Ge ($1,47 \text{ mg kg}^{-1}$), Li ($3,94 \text{ mg kg}^{-1}$), Mo ($6,6 \text{ mg kg}^{-1}$), Ni ($265,5 \text{ mg kg}^{-1}$), Sb ($1,33 \text{ mg kg}^{-1}$), Se ($25,7 \text{ mg kg}^{-1}$), Zn ($65,6 \text{ mg kg}^{-1}$) (Georgakopoulos, 2003).



Εικόνα 5 Χρήσεις γης λεκάνης Σαριγκιολά (Land Cover-Corine, 2006)

Πίνακας 4 Γεωλογικά, υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά και χρήσεις γης στη περιοχή μελέτης (ΕΛΙΜΕΙΑ 1997, Λουλούδης 1991, ΙΓΜΕ Γ' ΚΠΣ 2010, Περράκη κ.ά., 2016)

ΓΕΩΛΟΓΙΑ	Υδροφόρος σχηματισμός	Τεταρτογενή και Νεογενή ιζήματα (άμμοι, χαλίκια, κώνοι κορημάτων).
ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ	Τροφοδοσία	Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, διήθηση των απορροών των χειμάρρων, πλευρική τροφοδοσία στο πεδινό τμήμα από το όρος; Βέρμιο
	Πάχος ακόρεστης ζώνης	Διαφέρει κατά θέσεις. Στη λεκάνη κυμαίνεται από 0 m έως 110 m. Κατά μήκος του Σουλού 5-20 m. Στο υπόλοιπο τμήμα 10 έως 60 m
	Υδραυλική αγωγιμότητα K (m s⁻¹)	Στα επάλληλα υδροφόρα στρώματα κυμαίνεται από 1,7 x 10 ⁻³ έως 7,1 x 10 ⁻⁷ m s ⁻¹ . Μέση τιμή αργιλικών σειρών των υπερκειμένων κυμαίνεται από 10 ⁻⁵ έως 10 ⁻⁶ m s ⁻¹ .
ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ	Κύριες ανθρώπινες δραστηριότητες	Έντονη αγροτική δραστηριότητα, κυρίως ανατολικά της λεκάνης. Έντονη μεταλλευτική δραστηριότητα και παραγωγή ενέργειας

2.2.6 Φυσικοχημικές παράμετροι νερών

Έπειτα από βιβλιογραφική έρευνα, τα ύδατα της λεκάνης Σαριγκιόλ παρουσιάζονται να έχουν τα παρακάτω φυσικοχημικά χαρακτηριστικά, που παρουσιάζονται στον πίνακα 5. Οι τιμές έχουν προέλθει από δειγματοληψίες σε αρδευτικά πηγάδια, στις πηγές του όρους Βερμίου και κοντά στο ρέμα Σουλού. Επιπλέον αξίζει να αναφερθεί πως το έδαφος στη λεκάνη της Σαριγκιόλ είναι εμπλουτισμένο με μαγνήσιο, χρώμιο και Νικέλιο. (Vasileiou et al., 2019)

Πίνακας 5 Φυσικοχημικές Παράμετροι Νερών της λεκάνης Σαριγκιόλ (Vasileiou et al., 2019)

Παράμετρος	Μονάδα μέτρησης	Αρδευτικά πηγάδια (ΜΟ)	Πηγές (ΜΟ)	Ρέμα Σουλού (ΜΟ)	ΜΟ	Ανώτατα όρια WHO (2017)
pH		8.03	7.85	8.04	7,97	6.5–8.5
T	°C	14.24	14.47	12.13	13,61	-
DO	mg/L	8.92	8.88	8.3	8,70	-
EC	μS/cm	444.76	496.65	988.33	643,25	2500
Eh	mV	318.78	292.43	277.23	296,15	-
Ca ²⁺	mg/L	54.17	74.18	67.02	65,12	-
Mg ²⁺	mg/L	25.18	23.99	33.53	27,57	-
Na ⁺	mg/L	9.88	66.4	-	38,14	200
K ⁺	mg/L	1.5	1.64	3.25	2,13	12
NO ₃	mg/L	32.68	138	-	85,34	50
Cl ⁻	mg/L	16.16	121	-	68,58	250
SO ₄	mg/L	46.64	662	-	354,32	250
HCO ₃	mg/L	197.68	281.7	171.67	217,02	-
Al	μg/L	-	253	-	253,00	-
As	μg/L	1.26	4.4	-	2,83	10
B	μg/L	17.78	12.55	110.33	46,89	2400
Cd	μg/L	-	0.64	-	0,64	3
Co	μg/L	0.14	1.4	-	0,77	-
Cr	μg/L	50.03	137.8	-	93,92	50
Cu	μg/L	2.08	1.78	4.07	2,64	2000
Fe	μg/L	-	16,168	-	16,17	-
Mn	μg/L	32.39	848.8	272.71	384,63	50
Mo	μg/L	-	2.6	-	2,60	-
Ni	μg/L	1.99	4.89	1.8	2,89	70
P	μg/L	43.88	29.7	20.33	31,30	-
Pb	μg/L	0.4	2.6	0.3	1,10	10
Rb	μg/L	0.55	0.55	3.65	1,58	-
Sb	μg/L	0.34	4.09	-	2,22	20
Se	μg/L	0.86	8.5	-	4,68	40
Si	μg/L	11,565	12,790.95	3238.33	3238,33	-
Sn	μg/L	-	1.09	DL	1,09	-
Zn	μg/L	58.38	10.87	80.53	49,93	-

2.3 Χημική κατάσταση υπόγειων νερών

Για να οριστεί ως καλή η χημική κατάσταση των υπογείων νερών, πρέπει να πληρούνται κάποια θεσπισμένα κριτήρια και προδιαγραφές. Τα επίπεδα ουσιών υψηλού κινδύνου όπως αρσενικό, κάδμιο, μόλυβδο, υδράργυρο, αμμώνιο, χλωριούχα ιόντα, θειικά ιόντα, νιτρικές ενώσεις, φώσφορος, φωσφορικά άλατα, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού, να είναι κάτω από τις ανώτερες αποδεκτές τιμές που έχει θέσει ο WHO [<https://eur-lex.europa.eu>,2021]

Αναφέρεται πως η ποιότητα νερού καθορίζεται από τους εξής παράγοντες: τα φυσικά χαρακτηριστικά, δηλαδή τη θερμοκρασία, το χρώμα, τη θολότητα, την οσμή και τα διαλυμένα στερεά. Τα χημικά χαρακτηριστικά, δηλαδή το pH, την αγωγιμότητα, τη σκληρότητα, COD, BOD, την αλκαλικότητα και της ύπαρξη ενώσεων, βαρέων μετάλλων και ιόντων στο νερό. Τα βιολογικά χαρακτηριστικά, δηλαδή την ύπαρξη μικροοργανισμών. (Σούλιος, 2006)

Η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο νερό είναι ένας δείκτης εκτίμησης της ποιότητας του νερού, και προσδιορισμού της χημικής κατάστασης του. Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα ορίζεται ως η αγωγιμότητα 1 cm³ νερού σε θερμοκρασία ίση με 25 °C, και οι τιμές της κυμαίνονται μεταξύ 300 και 1000 μS/cm για τα γλυκά υπόγεια νερά, ενώ σε περιπτώσεις που ο υδροφόρος έχει υποστεί ρύπανση η τιμή αυτή υπερβαίνει τα 1500-2000 μS/cm. Η συγκέντρωση των διαλυμένων στερεών (TDS) είναι και αυτή μια μέτρηση ποιότητας του υπόγειου νερού, που ορίζει και συγκεκριμένη ποιοτική κατάσταση του υπόγειου νερού. (Καλλιώρας, 2016)

Πίνακας 6 Κατηγορίες του υπογείου νερού βάσει TDS (mg/L) [Καλλέργης, 2000]

Ταξινόμηση κατά Hem (1985)		Ταξινόμηση κατά Davies-DeWiest (1966)	
Γλυκό	<1000	Γλυκό	<1000
Μέτρια αλατούχο	3000-10000	Υφάλμυρο	1000-10000
Πολύ αλατούχο	10000-35000	Αλμυρό	10000-100000
Υπεραλμυρό	>35000	Σαλαμούρα	>100000

Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι την ιδιότητα του νερού να το διαπερνά ηλεκτρικό ρεύμα, η οποία καθορίζεται από τη χημική σύσταση του νερού. Η συγκέντρωση των χημικών ιόντων στο νερό είναι αυτή που καθορίζει το συγκεκριμένο μέγεθος. Επιπρόσθετα, το σύνολο των διαλυμένων στερεών, TDS (mg/L) αποτελεί κατ' ουσία το σύνολο της συγκέντρωσης των χημικών ιόντων του υπόγειου νερού. Συνεπώς τα δυο μεγέθη (ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας και διαλυμένων στερεών) συσχετίζονται εξ ορισμού. Επίσης οι τιμές του pH αλλά και της θερμοκρασίας αποτελούν δείκτη ποιότητας του νερού. (Καλλιώρας, 2016)

2.4 Νιτρορύπανση – Γεωργικοί ρύποι

Τα νιτρικά και νιτρώδη άλατα αποτελούν χημικές ενώσεις του οξυγόνου με το άζωτο, που όταν απορροφηθούν από το ανθρώπινο σώμα μεταλλάσσονται σε νιτρώδη. Με την υπάρχουσα νομοθεσία σε Ελλάδα και Ευρώπη το θεμιτό ποσοστό νιτρικών αλάτων στο νερό είναι 50 mg/L και το αντίστοιχο ποσοστό για τα νιτρώδη είναι 0,5 mg/L, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της Οδηγίας EU 2000/60.

Πηγές νιτρικών ιόντων είναι το άζωτο που υπάρχει στο έδαφος και το οποίο με τη βοήθεια συγκεκριμένων βακτηρίων γίνεται νιτρικό ιόν. Επιπλέον πηγή αποτελούν οι σηπτικοί βόθροι μέσω των στραγγισμάτων τους, οι εκροές ζωικών αποβλήτων και οι εδαφοβελτιωτικές ουσίες που χρησιμοποιούνται στη γεωργία. Το άζωτο μπορεί επίσης να ανιχνευθεί στο νερό υπό τη μορφή νιτρικών και αμμωνιακών ιόντων. Ο Καλλέργης (2000) αναφέρει ως επιπλέον πηγές ρύπανσης του νερού από νιτρικά ιόντα τα υπολείμματα χλωρίδας και τα ζωικά περιττώματα. Μεγάλη παρουσία νιτρικών ιόντων στο νερό σημαίνει ύπαρξη βιολογικών ρύπων, ή εκτεταμένες γεωργικές δραστηριότητες με ανάμιξη νερών άρδευσης από χωράφια που λιπαίνονται. Ο βασικός μηχανισμός αναγωγής των νιτρικών σε αμμωνία μπορεί να επιτευχθεί από την οργανική ύλη και αποτελεί την κύρια μέθοδο απομάκρυνσης τους. (Καλλιώρας, 2016)

Τα νιτρικά και νιτρικά άλατα σε υπόγεια νερά δημιουργούνται εξαιτίας των απορρίψεων λυμάτων, είτε βιομηχανικών είτε αστικών, καθώς επίσης ανθρώπινων και ζωικών αποβλήτων. Τέλος, ευθύνη φέρουν και η χρήση ζωοτροφών και αζωτούχων λιπασμάτων. Οι συγκεκριμένες ενώσεις είναι ιδιαίτερα κινητικές στα υπόγεια νερά (Panno et al., 2006). Κύριες πηγές φωσφόρου (P) στα υπόγεια νερά και εδάφη είναι τα φωσφορικά ορυκτά καθώς και τα αγροχημικά προϊόντα ευρείας χρήσης όπως τα λιπάσματα. Άλλος ένας σημαντικός παράγοντας, άξιος αναφοράς, είναι τα ζωικά απόβλητα, η αποσύνθεση των φυτικών και ζωικών ιστών, αλλά και η διαρροή σηπτικών συστημάτων. Ο φωσφόρος είναι ρύπος μη κινητικός στα εδάφη, οπότε η μεταφορά του στα υπόγεια νερά χαρακτηρίζεται δύσκολη, καθώς προσροφάται σε ορυκτά. Εμφάνιση φωσφόρου και ασβεστίου υποδηλώνει χρήση φωσφορικών λιπασμάτων και χρήση αγροχημικών προϊόντων. Επίσης, πιθανολογείται πως αζωτούχα λιπάσματα και βόθροι, εξαιτίας της νιτροποίησης (οξειδωση του NH_4^+ σε NO_3^-) και συνεπώς οξίνισης του εδάφους, αυξάνουν τη διαλυτότητα των χρωμιούχων ορυκτών και την αποδέσμευση τρισθενούς χρωμίου. Επιπλέον, το χρώμιο και άλλα τοξικά στοιχεία ανιχνεύονται στα φωσφορικά λιπάσματα, και μάλιστα σε μεγάλες ποσότητες. (Περράκη κ.ά., 2016)

Αναφορικά με την περιοχή μελέτης, στις γεωτρήσεις, όπου υπάρχουν αγροτικές δραστηριότητες, οι συγκεντρώσεις του NO_3^- βρέθηκαν να είναι υψηλές, μέχρι 138 mg/L (Vasileίου et. al., 2019). Οι αυξημένες συγκεντρώσεις θα μπορούσαν επίσης να αποδοθούν σε σημειακές πηγές ρύπανσης, όπως τα ζωικά απόβλητα, οι απορροφητικοί βόθροι και τα νεκροταφεία, πέριξ των οικισμών Ακρινής και Αγ. Δημητρίου. Στο νότιο και νοτιοδυτικό τμήμα της λεκάνης Σαριγκιόλ, οι συγκεντρώσεις NO_3^- είναι χαμηλότερες. Αυξημένες συγκεντρώσεις φωσφόρου ανιχνεύθηκαν και σε αρδευτικές γεωτρήσεις. (Περράκη κ.ά., 2016)

Στις περιπτώσεις στις οποίες οι αγροτικές δραστηριότητες είναι ιδιαίτερες εκτεταμένες, όπως στη λεκάνη Σαριγκιόλ, η ποσότητα των αγροχημικών προϊόντων που χρησιμοποιούνται είναι μεγάλη. Σε πολλές

περιπτώσεις, αναλόγως του εμβαδού της καλλιεργούμενης περιοχής και τον τύπο της καλλιέργειας, τα χρησιμοποιούμενα λιπάσματα υπερβαίνουν τους μερικούς εκατοντάδες τόνους. Τα φωσφορικά λιπάσματα έχει αναφερθεί ότι επηρεάζουν την εδαφική και υδατική γεωχημεία καθώς είναι εμπλουτισμένα σε δυνητικά τοξικά στοιχεία όπως As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb και Zn. (Περράκη κ.ά., 2016)

Οι Shrestha et al., (2010) πρότειναν η ποσότητα των αζωτούχων λιπασμάτων σε καλλιέργειες, να αποφασίζεται βάσει αξιολόγησης των οργανικών ουσιών του εδάφους, του υπολειμματικού N, των υπολειμμάτων των καλλιεργειών, των ποικιλιών που πρέπει να καλλιεργούνται, τα συστήματα καλλιέργειας και τη συγκέντρωση N στο νερό άρδευσης. Συμπέραναν ωστόσο, ότι δεν υφίσταται ταχεία λύση για τον έλεγχο της έκπλυσης NO_3^- στα υπόγεια ύδατα. Η μείωση των ποσοτήτων που χρησιμοποιούνται για τη λίπανση, μέσω εφαρμογής της κατάλληλης πηγής N, αλλά και η επιλογή κατάλληλης χρονικής στιγμής για τη λίπανση, καταλήγει σε αποδοτικότερη χρήση του N και μειώνει την έκπλυση NO_3 . Επίσης, επισημαίνεται η ικανότητα κάποιων καλλιεργειών να απορροφούν NO_3 , γι' αυτό και προτείνεται η εφαρμογή τους. (Shrestha et al., 2010).

Όσον αφορά την έρευνα πάνω σε διαφορετικών ειδών λιπάσματα, ο Μαγνήσαλης (2019) αξιολόγησε διαφόρους τύπους λιπασμάτων του εμπορίου, που χρησιμοποιούνται εντός ελλαδικού χώρου. Συμπερασματικά, κατέληξε πως τα ορυκτά που συμμετέχουν ως επί το πλείστο στα φωσφορικά λιπάσματα είναι αυτά που ανήκουν στην ομάδα των φωσφορικά πετρωμάτων, τα οποία αποτελούν την πρώτη ύλη για την παραγωγή τους. Επιπλέον, είναι εμπλουτισμένα με δυνητικά τοξικά στοιχεία, καθώς υφίσταται ισχυρή συσχέτιση μεταξύ τοξικών στοιχείων όπως το κάδμιο, το ουράνιο, το αρσενικό, το χρώμιο και των φωσφορικών πετρωμάτων. Επιπλέον, οι περιεκτικότητες τοξικών στοιχείων στα λιπάσματα, και δει στα φωσφορικά, ποικίλλουν ανάλογα την προέλευση των φωσφορικών ενώσεων. Συνεπώς, η χρήση άνω του φυσιολογικού, λιπασμάτων, και δει φωσφορικών, δύναται να οδηγήσει στην εμφάνιση τοξικών στοιχείων στο υπέδαφος και τα υπόγεια νερά. Το χρώμιο στα φωσφορικά λιπάσματα ανιχνεύεται σε υδατοδιαλυτή μορφή και δύναται να φτάσει στην κορεσμένη ζώνη και συνεπώς να ρυπάνει τα υπόγεια νερά. (Vasileiou et al., 2019).

Πίνακας 7 Συγκεντρώσεις As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn στα φωσφορικά λιπάσματα του ελλαδικού χώρου σε σύγκριση με άλλες χώρες (Parazotos et al., 2019)

	As	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
P1	8,7	11,1	<1	230	26	36	4	323
P2	20,8	<0,1	<0,2	<10	0,3	0,5	<0,1	16
P3	7,6	16,3	0,4	54,74	23,8	28,6	1,6	547
Αργεντινή	-	0-56,8	-	10,4- 72,7	2,8- 182,6	7-26,9	5.1- 30,7	8,8- 180,6
ΗΠΑ	0-21	0-163	-	-	-	-	-	-
Βραζιλία	0,54- 26,72	0,4- 40,03	-	10,72- 31-75	-	-	0,35- 102,46	-
Σαουδική Αραβία	-	22.7- 36,8	-	199,9- 410	-	52,8- 85,2	11,2- 32,4	-
Χιλή	8,3- 19,7	2,6- 57,9	1,7-3,8	66,2- 924	1,5-155	1,8- 17,9	3,8- 22,3	28,6- 883
Ευρώπη	7,6	7,4	-	89,5	-	14,8	2,9	166

2.5 Ρύπανση από μέταλλα

Η ρύπανση του περιβάλλοντος από βαρέα και τοξικά μέταλλα αυτομάτως σημαίνει ότι έχουμε συσσώρευση τους σε οργανικές και ανόργανες ενώσεις, συνεπακόλουθα στο έδαφος και το νερό κι εν τέλει στην τροφική αλυσίδα. Πηγές αυτής της ρύπανσης είναι ανθρωπογενείς αλλά και φυσικές. Στα υδατικά συστήματα, οι φυσικές πηγές εισόδου είναι η διάβρωση, η κίνηση νερού μέσω μεταλλοφόρων σχηματισμών, στους οποίους λόγω διάφορων χημικών διαδικασιών το νερό εμπλουτίζεται. Η σύσταση κάθε πετρώματος, καθορίζει το ανάλογο χημικό φορτίο που το νερό θα φέρει μετά το διέλευση του μέσ' από αυτό.

Η αποσάθρωση και η διάβρωση των πετρωμάτων του εδάφους απελευθερώνουν βαρέα μέταλλα στο νερό και στον αέρα. Επίσης, ρόλο παίζουν και η σήψη φυτών, κατάλοιπα ζωικών αποβλήτων, αερομεταφερόμενα μόρια ατμοσφαιρικής ρύπανσης κ.ά. Γι' αυτό το λόγο τα επιφανειακά νερά συνήθως εμπεριέχουν ίχνη μετάλλων. Οι απορροές μεταλλείων και σχετικές δραστηριότητες εμπεριέχουν υψηλή συγκέντρωση μετάλλων όπως ο σίδηρος, το νικέλιο ή το κοβάλτιο, αναλόγως το είδος του κοιτάσματος που είναι προς εκμετάλλευση. Οι απορροές των βροχών σε αστικές περιοχές εμπεριέχουν συνήθως μέταλλα από την ασφαλτο και την ατμοσφαιρική σκόνη. Οι γεωργικές δραστηριότητες, όπως η χρήση λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων μπορούν να οδηγήσουν σε αύξηση συγκεντρώσεων των μετάλλων σε υδάτινα οικοσυστήματα. (Ζαμπετάκης κ.ά., 2011)

Τα βαρέα μέταλλα των επιφανειακών νερών εντοπίζονται διαλυμένα ή σε μικροσωματίδια υδροξειδίων, οξειδίων και άλλων σχηματισμών. Στη διαλυτή φάση απαντώνται συνήθως ως οργανομεταλλικά σύμπλοκα και ιόντα. Η χημεία του νερού επηρεάζει το ποσοστό απορρόφησης και προσρόφησης

των μετάλλων από και προς τα ιζήματα. Η προσρόφηση αφαιρεί το μέταλλο από το νερό και το αποθηκεύει στο υπόστρωμα. Τα μέταλλα δύνανται να εκροφηθούν από το ίζημα σε περιπτώσεις που το νερό εμφανίζει αύξηση της αλατότητας του ή μείωση του pH. (Ζαμπετάκης κ.ά., 2011)

2.6 Νομοθεσία προστασίας υδατικών πόρων

Η υποβάθμιση και η ρύπανση του περιβάλλοντος έχει αναδειχθεί σε μείζον πρόβλημα διεθνώς. Ο ΟΗΕ βοήθησε στην κινητοποίηση για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών προβλημάτων μέσω της σύγκλησης παγκόσμιας διαβούλευσης για το περιβάλλον το 1972. Στην Ελλάδα, η πρώτη δημόσια υπηρεσία που εξυπηρετεί τη διαμόρφωση περιβαλλοντικής πολιτικής ιδρύεται υπό την αιγίδα του ΟΗΕ το 1975, στο Υπουργείο Υγείας και Κοινωνικής Πρόνοιας. Πλέον, το κοινοτικό περιβαλλοντικό δίκαιο περιλαμβάνει άνω των τετρακοσίων νομικών κειμένων, τα οποία τροποποιούνται καταλλήλως και εκσυγχρονίζονται καλύπτοντας τους τομείς: ατμοσφαιρική ποιότητα, ηχητική ρύπανση, ποιότητα - διαχείριση υδάτων, προστασία βιοτόπων και ειδών πανίδας και χλωρίδας, χημικές ουσίες, διαχείριση και ανακύκλωση αποβλήτων, οικολογικός σχεδιασμός και διαχείριση εγκαταστάσεων, εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων έργων μεγάλων έργων, ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ενεργειακή απόδοση κτιρίων, εμπόριο ρύπων που συμβάλλουν στην υπερθέρμανση του πλανήτη, αντιμετώπιση κλιματικής αλλαγής, πρόσβαση των πολιτών στην περιβαλλοντική πληροφόρηση και στην δικαιοσύνη για ότι αφορά υποθέσεις περιβάλλοντος, ποινική προστασία του περιβάλλοντος. Το 2019 υιοθετήθηκε η «Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία» που αποτελεί την κατευθυντήριο γραμμή και προτεραιότητα της ευρωπαϊκής πολιτικής για τα επόμενα χρόνια στην πολιτική της ατζέντα. Αποτελεί ένα συνολικό σχέδιο δράσης με πενήντα τέσσερις πρακτικές ενέργειες που στόχο έχουν να τροποποιήσουν το οικονομικό μοντέλο της Ευρώπης. (Καλλία, 2020)

Η προσπάθεια για την δημιουργία κανονισμού που διέπει την προστασία των επιφανειακών νερών ξεκίνησε το 1975 με τις Οδηγίες 75/44/ΕΟΚ και 79/869/ΕΟΚ. Σκοπός τους αποτέλεσε ο στόχος του να δημιουργηθεί ένας κοινό ευρωπαϊκό σύνολο κανόνων, συνυφασμένο με ποιοτικούς στόχους για την προστασία του νερού που προορίζεται για κατανάλωση. Με την Οδηγία 91/271/ΕΟΚ που αφορά τη διαχείριση των αστικών λυμάτων, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή προσπάθησε να εμπλουτίσει τις προηγουμένως εκδοθείσες οδηγίες και να δημιουργήσει κανονισμούς σχετικούς με τον έλεγχο της ρύπανσης. Παράλληλα με την Οδηγία 91/271/ΕΟΚ πέρασαν και άλλες δύο, η 91/676/ΕΟΚ, με βάση αναφοράς στα νιτρικά και η 96/61/ΕΟΚ σχετική με το πλαίσιο της πρόληψης και του ελέγχου για την ρύπανση των νερών (Φερετζάκης, 2014).

Η κοινοτική οδηγία 2000/60/ΕΚ κινήθηκε με γνώμονα την προστασία των επιφανειακών υδατικών πόρων και θέσπισης ενός πλαισίου κοινοτικής

δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων. Βασική αρχή της οδηγίας είναι «ο ρυπαίνων και ο χρήστης πληρώνουν». Έμφαση έχει δοθεί στη μελλοντική διαχείριση και προστασία των υπόγειων νερών, υποχρεώνοντας τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης να προβούν σε ποικίλες ενέργειες προκειμένου να εξασφαλίσουν την προστασία τους. Η οδηγία 2006/11/ΕΚ περιέχει διατάξεις σχετικά με την προστασία και την διαχείριση των υδατικών πόρων, δρώντας συμπληρωματικά. Επιπλέον, κατατάσσει τους ρύπους σε κατηγορίες αναλόγως την ικανότητα που έχουν να μεταλλάσσονται, το χρόνο ημιζωής τους, αλλά και το βαθμό τοξικότητάς τους.

Η Οδηγία 2006/113/ΕΚ προσεγγίζει το πρόβλημα της ρύπανσης στα υφάλμυρα και παράκτια ύδατα. Ουσιαστικά αναγκάζει τα μέλη της ΕΕ να εξελιχθούν τεχνολογικά και επιστημονικά προκειμένου να εξασφαλιστεί η βέλτιστη ποιότητα των υφάλμυρων υδάτων, πράγμα αναγκαίο για τη βιωσιμότητα της πανίδας μέσα σε αυτά. Η Οδηγία 2006/118/ΕΚ έχει στόχο και αυτή να αντιμετωπίσει τον κίνδυνο της ρύπανσης των υπόγειων νερών. Η Οδηγία 2008/56/ΕΚ αφορά τα θαλάσσια ύδατα επίσης και δρα συμπληρωματικά αναφορικά με την προστασία τους.

Η Σύμβαση για την Προστασία και τη Χρήση των Διασυνοριακών Υδάτων και των Διεθνών Λιμνών αποτελεί μία διεθνή περιβαλλοντική συνθήκη του Ο.Η.Ε. που υπεγράφη στο Ελσίνκι το 1992 και αφορά την προστασία και χρήση των εθνικών και διεθνών λιμνών. Το 2013 η Σύμβαση απαριθμούσε 39 μέλη, τα οποία υποχρεούνται να τηρήσουν μέτρα διαχείρισης και προστασίας των νερών, επίβλεψης και παρακολούθησης του ζητήματος, μέσω συνεργασίας και ανταλλαγής πληροφοριών. Εμπεριέχει δε βασικές μεθόδους που βοηθούν στην αντιμετώπιση της ρύπανσης, μέσω της συνεργασίας των κρατών. Με τη σύμβαση επιτυγχάνεται μια σφαιρικότερη προσέγγιση του ζητήματος της ρύπανσης των νερών ενισχύοντας τις προσπάθειες εξέλιξης της βιωσιμότητας. [Unecce.org, 2013]

Στην ελληνική νομοθεσία η ρύπανση ορίζεται ως η εισαγωγή άμεσα ή έμμεσα ουσιών ή ενέργειας στο περιβάλλον προκαλώντας σε αυτό βλαβερές επιπτώσεις τέτοιας φύσεως, ώστε να κινδυνεύει η ανθρώπινη υγεία, να βλάπτονται οι ζωντανοί πόροι και τα οικοσυστήματα και να ελαττώνεται η αξία ή να μειώνονται οι ανέσεις των τόπων διαμονής και άλλες λογικές χρήσεις του περιβάλλοντος. (Ν. 3199/2003 -ΦΕΚ Α΄ 280/9.12.2003) Στόχος του παραπάνω νόμου ήταν η εναρμόνιση με την ευρωπαϊκή οδηγία 2000/60/ΕΚ και η βιώσιμη εκμετάλλευση των υδατικών πόρων της χώρας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΔΙΕΘΝΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ ΣΤΟ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ

3.1 Λεκάνη Σαριγκιόλ – ανθρωπογενής ρύπανση

Η λεκάνη Σαριγκιόλ αποτελεί αντικείμενο ποικίλων αναφορών και μελετών στην επιστημονική βιβλιογραφία, καθώς πλήθος ερευνητών έχει ασχοληθεί με την ανάλυση των επιπτώσεων των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στην συγκεκριμένη τοποθεσία.

Οι δραστηριότητες που σχετίζονται με την αγροτική οικονομία και κτηνοτροφία, όπως η χρήση υπέρ του δέοντος αζωτούχων και φωσφορικών λιπασμάτων, οδηγούν σε ιδιαίτερες αυξημένες συγκεντρώσεις νιτρικών ανιόντων NO_3^- και φωσφόρου στα υπόγεια νερά. Οι υψηλότερες τιμές στις συγκεντρώσεις των προαναφερθέντων ρύπων, εντοπίζονται στο ανατολικό τμήμα της λεκάνης, πράγμα απολύτως λογικό, αφού στο συγκεκριμένο σημείο οι αγροτικές δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα είναι και πιο έντονες. Νότια της λεκάνης, στον οικισμό του Δρεπάνου, οι συγκεντρώσεις NO_3^- είναι χαμηλότερες, παρά την παρουσία σημειακών πηγών ρύπανσης. (Περράκη κ.ά., 2016)

Οι αυξημένες συγκεντρώσεις χρωμίου στα υπόγεια νερά της λεκάνης Σαριγκιόλ, αποτελούν αποτέλεσμα συνδυαστικών παραγόντων. Οι φυσικοί παράγοντες περιλαμβάνουν τα πλούσια σε χρώμιο πετρώματα της περιοχής και την παρουσία οξειδίων του μαγγανίου, που δρουν ως φυσικό οξειδωτικό του χρωμίου, μετατρέποντας το σε εξασθενές. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί και η χρήση υπερφωσφορικών και αζωτούχων λιπασμάτων πλούσιων σε χρώμιο, τα οποία δημιουργούν έντονα οξειδωτικό περιβάλλον. (Περράκη κ.ά., 2016). Παρόλο που στις ανθρωπογενείς δραστηριότητες στην περιοχή περιλαμβάνεται και η μεταλλευτική δραστηριότητα, η συνεισφορά της στις συγκεντρώσεις χρωμίου είναι μηδενική, όπως έχει αποδειχθεί από πρόσφατες μελέτες (Περράκη κ.ά., 2016; Vasileiou et.al., 2019 και ΙΓΜΕ-Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας 2020).

Τα υπόγεια νερά έχουν επηρεαστεί από την αλληλεπίδραση τους με τα πετρώματα του υπεδάφους της περιοχής μελέτης. Τα υπόγεια νερά του ανατολικού τμήματος της λεκάνης ανατροφοδοτούνται από το Βέρμιο, που απαρτίζεται από ανθρακικά και υπερβασικά πετρώματα, τα οποία το εμπλουτίζουν με γεωγενές Cr. (Περράκη κ.ά., 2016). Συνεπώς, το εξασθενές χρώμιο στα υπόγεια νερά της λεκάνης Σαριγκιόλ ως επί το πλείστο προέρχεται κυρίως από φυσική πηγή, ωστόσο δεν παύει να είναι σύνθετο συνδυαστικό αποτέλεσμα των αγροτικών δραστηριοτήτων και των φυσικών παραγόντων. (Vasileiou et al., 2019).

3.2 Εφαρμογή της μεθόδου DRASTIC

Για να εκτιμηθεί η τρωτότητα του υπόγειου νερού, αναπτύχθηκαν τεχνικές που στηρίζονται στην ανάλυση των υδρογεωλογικών συνθηκών και

στη δημιουργία παραμετρικών συστημάτων, όπως τα συστήματα μοντέλων σημειακών καταμετρήσεων. Για λογαριασμό του US Environmental Protection agency δημιουργήθηκε από τους Aller et al. (1987) το μοντέλο DRASTIC. Το συγκεκριμένο σύστημα ανήκει στις μεθόδους δεικτών και βοηθάει στην εκτίμηση κινδύνου ρύπανσης των υπόγειων νερών βάσει συγκεκριμένων υδρογεωλογικών παραμέτρων. Το όνομα του μοντέλου προέκυψε από τα ακρωνύμια των παραμέτρων που λαμβάνει υπόψιν, με το πλέον σημαντικό να θεωρείται το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα και η επίδραση της ακόρεστης ζώνης- εξού και ο μεγάλος συντελεστής βαρύτητας (5). Μεγάλες τιμές του δείκτη τρωτότητας DRASTIC (DI) σημαίνουν αυξημένη πιθανότητα ρύπανσης των υπόγειων νερών. Αξίζει να σημειωθεί πως ποικίλες τροποποιήσεις και παραλλαγές της συγκεκριμένης μεθόδου έχουν δοκιμαστεί, είτε με την προσθήκη (πχ χρήσεις γης) ή την παραλλαγή κάποιων συντελεστών της. (Μανδηλαράς, 2005) Εκτενέστερη περιγραφή της συγκεκριμένης μεθόδου, παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 4 της παρούσας εργασίας.

Η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο το οποίο έχει ευρεία χρήση και αναφορά στη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία (Saidi et al. 2010, Huan et al. 2012, Ersoy and Gultekin 2013, Yin et al. 2013, Neh et al. 2015, Lathamani et al. 2015, Carreras et al. 2015, Shrestha et al. 2016, Shahab et al. 2018) για την αξιολόγηση της τρωτότητας των υπόγειων υδροφορέων. Παρακάτω αναφέρονται ενδεικτικά κάποιες μελέτες, όπου έχει γίνει χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου.

Ο Χειλάς (2019) εφάρμοσε τη μέθοδο Drastic στην περιοχή Μεσογαίας της Αττικής. Υπήρξε επικέντρωση στην τρωτότητα του υπόγειου υδροφορέα και στη ρύπανση του από τα νιτρικά ιόντα, τα οποία αποτελούν τον κύριο ρύπο της συγκεκριμένης περιοχής. Επίσης, επιχείρησε την βελτιστοποίηση της συγκεκριμένης μεθόδου μέσω στατιστικών εφαρμογών. Έπειτα από δειγματοληψία, ανάλυση των πιέσεων που δέχεται η περιοχή μελέτης, των διάχυτων και σημειακών πηγών ρύπανσης, καθώς και σύστασης των εδαφών της, δημιουργήθηκαν οι χάρτες που παρουσιάζουν την τρωτότητα του υπόγειου υδροφόρου.

Ο Μανδηλαράς (2005) χρησιμοποίησε τη μέθοδο DRASTIC για την αξιολόγηση της τρωτότητας των υπόγειων νερών της λεκάνης του Γλαύκου. Οι συνεχώς αυξανόμενες υδροληπτικές ανάγκες, σε συνδυασμό με την υφαλμύριση και τις περιβαλλοντικές πιέσεις που η λεκάνη δέχονταν και συνεχίζει να δέχεται, αποτέλεσαν το έναυσμα ενασχόλησης του ερευνητή με το υδρογεωλογικό καθεστώς της λεκάνης, καθώς και στην εφαρμογή της μεθοδολογίας DRASTIC, προκειμένου να εξαχθούν κατάλληλα συμπεράσματα. Τα αποτελέσματα του μοντέλου έδειξαν πως η δυτική πλευρά της λεκάνης χαρακτηρίζεται ως η πλέον ευάλωτη αναφορικά με τη ρύπανση. Η ανατολική πλευρά χαρακτηρίστηκε ως περιοχή με μέση διακινδύνευση τρωτότητας.

Η Βασιλείου (2011) έπειτα από εκτεταμένη έρευνα στην περιοχή της Ποταμιάς Ελασσόνας, περιοχή της Θεσσαλίας, πραγματοποίησε διερεύνηση

των αλληλεπιδράσεων του νερού και των λιγνιτικών αποθέσεων της περιοχής. Έπειτα από την εφαρμογή ποικίλων μεθόδων, συμπεριλαμβανομένου και της μεθόδου DRASTIC υλοποίησε αξιολόγηση όλων των δεδομένων κι εξήγαγε συμπεράσματα αναφορικά με τις επιδράσεις που θα είχε τυχόν εξόρυξη του λιγνίτη της περιοχής στα υδατικά αποθέματα. Προέκυψαν χάρτες τρωτότητας των υδροφόρων της περιοχής μελέτης, καθώς επίσης υλοποιήθηκε μια εμπειριστατωμένη πρόβλεψη αναφορικά με την επίδραση που θα έχει η διάνοιξη του μελλοντικού ορυχείου στην ποιότητα και ποσότητα των υδατικών αποθεμάτων της περιοχής της Ποταμιάς.

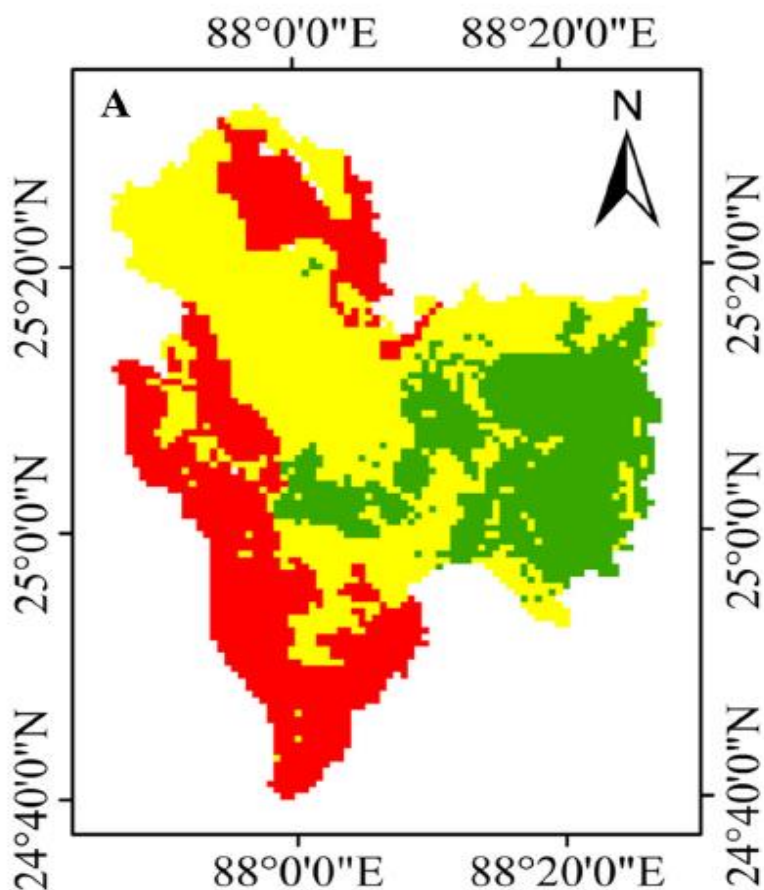
Οι Παπαθεοδώρου κ.ά. (2010) εφάρμοσαν μια τροποποιημένη μεθοδολογία του DRASTIC στον νομό Ημαθίας, η οποία θα περιλαμβάνει και τις χρήσεις γης, σε μία προσπάθεια εκτίμησης της τρωτότητας των υπογείων νερών, προκειμένου να υπάρξει η δυνατότητα σχεδιασμού που θα προλαμβάνει την ρύπανση. Η περιοχή μελέτης περιλαμβάνει το πεδινό τμήμα της Ημαθίας, καθώς οι αγροτικές δραστηριότητες που λαμβάνουν εκεί μέρος, είναι εκτεταμένης μορφής. Μέσω της συγκεκριμένης έρευνας, προέκυψαν οι χάρτες τρωτότητας των υπόγειων νερών. Αξίζει να αναφερθεί πως τα αποτελέσματα της έρευνας συγκλίνουν με την κατανομή των νιτρικών στον υδροφόρο της περιοχής μελέτης καθώς έγινε χρήση των δεδομένων που προέκυψαν από υδροχημικές αναλύσεις των συγκεντρώσεων νιτρικών ιόντων σε 130 υδρογεωτρήσεις. Το δυτικό τμήμα της πεδιάδας αποδείχθηκε πως είναι ιδιαίτερα ευάλωτο σε ρύπανση.

Ο Ρίζος (2013) εφάρμοσε τη μεθοδολογία DRASTIC στο Αργολικό πεδίο, σε μια προσπάθεια να προληφθεί η ρύπανση και να είναι πιο αποτελεσματική η προστασία της συγκεκριμένης περιοχής, καθώς αποτελεί πεδίο εφαρμογών εκτεταμένης γεωργικής δραστηριότητας. Επομένως, τα νερά της έχουν υποστεί σημαντική υποβάθμιση, αφού οι συγκεντρώσεις των νιτρικών που ανιχνεύθηκαν στα υπόγεια νερά της υπερβαίνουν τα θεσπισμένα όρια. Αφού πρώτα αναλύθηκε ο τρόπος διάχυσης των νιτρικών ρύπων στο έδαφος και πάρθηκαν οι απαραίτητες μετρήσεις, προέκυψαν οι χάρτες τρωτότητας της περιοχής μελέτης. Προέκυψε πως ο υδροφόρος ορίζοντας του Αργολικού πεδίου έχει υποστεί ρύπανση από νιτρικά. Στο τέλος, έγινε απόπειρα παρέμβασης στη παράμετρο του βάθους στάθμης, καθώς και εισαγωγής μίας νέας, αυτής της εδαφοκάλυψης, για βελτίωση της εικόνας των αποτελεσμάτων.

Αξίζει να αναφερθεί πως η χώρα της Πορτογαλίας αποτέλεσε το πρώτο κράτος της Ευρωπαϊκής Ένωσης που χρησιμοποίησε τη μεθοδολογία του DRASTIC για να απεικονίσει - χαρτογραφήσει τα εδάφη της σε κλίμακα 1:500.000 σε συνδυασμό με το λογισμικό ARC/INFO (Lobo-Ferreira and Oliveira, 1997).

Οι Manasree και Subodf (2021) προσπάθησαν να κάνουν αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης των νερών της περιοχής Malda της Ινδίας με τη χρήση του DRASTIC και των μεθοδολογιών του. Διαχώρισαν την ζώνη του υπόγειου υδροφορέα σε τρεις κατηγορίες. Οι ζώνες ήταν οι εξής: υψηλής

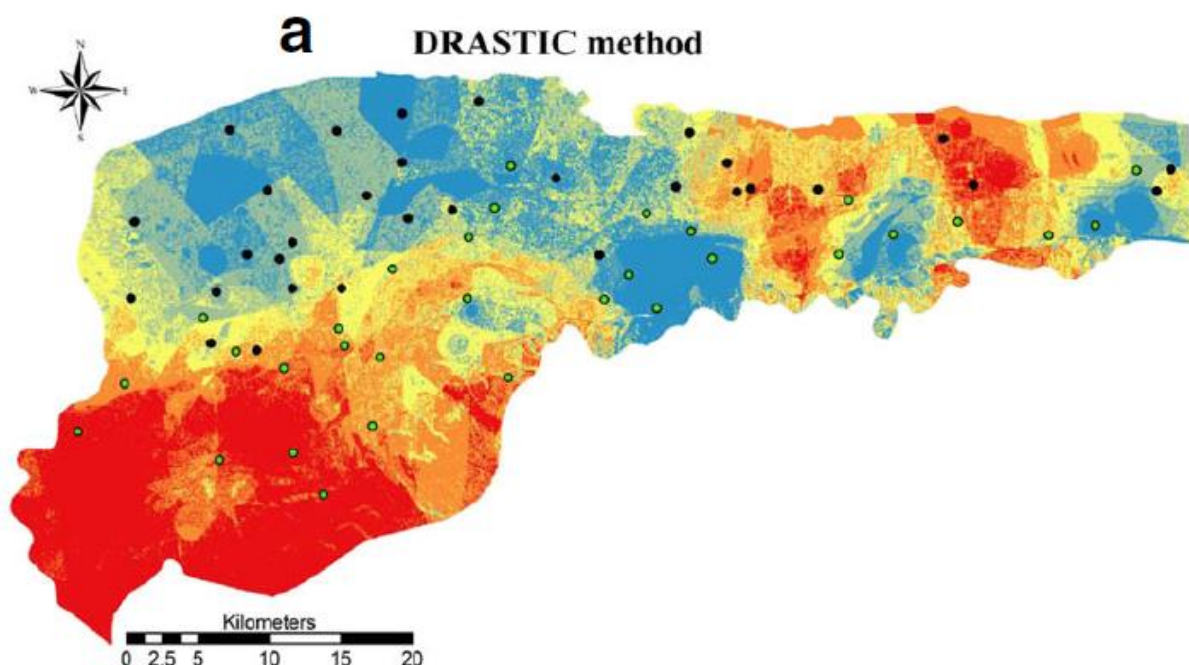
τρωτότητας, μεσαίας και χαμηλής. Στην υψηλή ζώνη τρωτότητας βρέθηκαν οι βόρειες και νότιες περιοχές, στη μεσαία οι περιοχές που βρίσκονταν στο μέσο της περιοχής μελέτης και στη χαμηλή ζώνη βρέθηκε η ανατολική περιοχή της λεκάνης. Η σημασία της παρούσας μελέτης γίνεται αντιληπτή, αφού το 50% των αρδευόμενων εκτάσεων της Ινδίας χρησιμοποιεί το υπόγειο νερό για να καλύψει τις ανάγκες του, και το 60 % της παραγόμενης σοδειάς βασίζεται στα υπόγεια πηγάδια. Έπειτα από γεωλογική και υδρογεωλογική ανάλυση της περιοχής μελέτης πραγματοποιήθηκε εφαρμογή του DRASTIC. Τα συμπεράσματα της έρευνας κατέληξαν ότι υφίσταται ποιοτική υποβάθμιση των υπόγειων νερών της περιοχής μελέτης, η οποία θα επιδεινωθεί μελλοντικά καθώς υφίσταται αλλαγή στη χρήση γης, με επίκεντρο τη βόρεια και νότια πλευρά της περιοχής μελέτης. Επίσης, προτάθηκε να δημιουργηθεί ένα μοντέλο ορθολογικής χρήσης των υπόγειων αποθεμάτων νερού, καθώς και να απαγορευθεί η εκτενής χρήση των ζιζανιοκτόνων, καθώς η επίδραση τους είναι μεγάλη όσον αφορά την ποιότητα νερού της περιοχής μελέτης.



Εικόνα 6 Τρωτότητα υπόγειου νερού της περιοχής Malda, στην Ινδία, χωρισμένη σε ζώνες, κάνοντας χρήση του DRASTIC (Manasree and Subodh, 2021)

Οι Khosravi et al. (2020) έκαναν εφαρμογή της μεθόδου Drastic και μίας παραλλαγής της, προκειμένου να αξιολογήσουν την τρωτότητα των

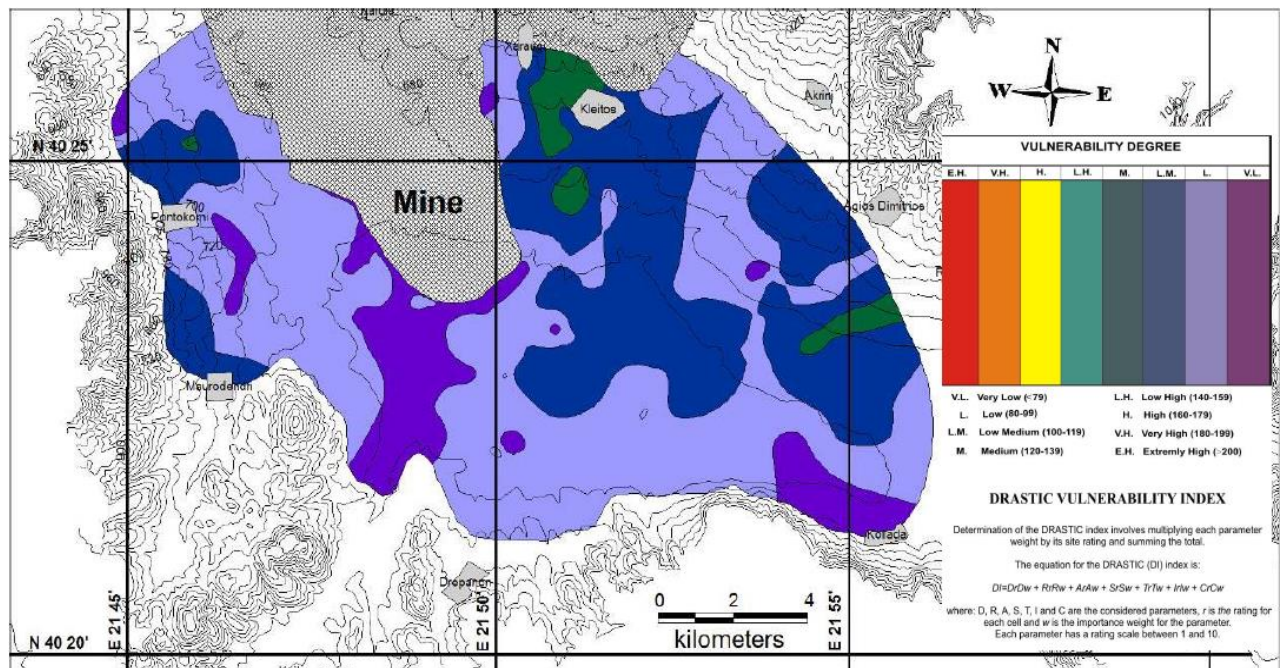
υπογείων νερών της περιοχής Behshahr, η οποία βρίσκεται στο Ιράν. Χρησιμοποίησαν δείγμα από 218 πηγάδια, και μέτρησαν τη συγκέντρωση νιτρικών και νιτρωδών ιόντων, εκ των οποίων τα 109 βρέθηκαν άνω του επιτρεπτού ορίου στα νιτρικά, δηλαδή άνω των 50 mg/L. Τελικά, παρήχθησαν πέντε χάρτες που απεικόνιζαν την δυνητική ρύπανση και τρωτότητα των υπογείων νερών. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν πως το νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης ήταν οι πιο επιδεκτικές σε ρύπανση όπου είχαν ανοικοδομηθεί πόλεις. Έπειτα από υδρογεωλογική ανάλυση της περιοχής μελέτης και των συντελεστών βαρύτητας για κάθε παράμετρο του μοντέλου DRASTIC, η έρευνα κατέληγε πως οι πιο ευάλωτες περιοχές αναφορικά με την ποιότητα των υπόγειων νερών ήταν αυτές με το χαμηλότερο βάθος υδροφόρου (1 έως 3 m) ενώ οι πλέον ανθεκτικές βρίσκονταν σε βάθος 18m.



Εικόνα 7 Τρωτότητα υπόγειου νερού της περιοχής Behshahr, στο Ιράν, χωρισμένη σε ζώνες, κάνοντας χρήση του DRASTIC (Khosravi et al., 2020)

Στη λεκάνη Σαριγκιόλ έχουν εργαστεί πολλοί ερευνητές (Παπαζώτος, 2020, Vasileiou et al., 2019, Voudouris, 2009, Περράκη κ.ά., 2016, Λουλούδης, 1991) Ο Voudouris (2009) έπειτα από μία ανάλυση της συγκεκριμένης λεκάνης (χωρική, χρήσεις γης, κλπ), αλλά και δειγμάτων νερού της περιοχής, βαθμονόμησε την τρωτότητα του υδροφόρου ορίζοντα της λεκάνης της Σαριγκιόλ. Η έρευνα κατέληγε πως η υποβάθμιση της ποιότητας του υπόγειου αποθέματος νερού της περιοχής μελέτης είναι γεγονός, καθώς παρατηρείται αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών ρύπων, εξαιτίας της ανθρώπινης δραστηριότητας και πιο συγκεκριμένα της χρήσης λιπασμάτων. Όπου δεν υφίσταται μεγάλο βάθος του υδροφόρου ορίζοντα, παρατηρήθηκε μεγαλύτερη επίπτωση στη ρύπανση από τα λιπάσματα, καθώς το έδαφος δρα ως φυσικό φίλτρο και τοίχος προστασίας. Επίσης, εκτίμησε το ποσοστό

κινδύνου ρύπανσης υπόγειου νερού (ουσιαστικά την πιθανότητα να συμβεί περιστατικό ρύπανσης υπό συγκεκριμένες συνθήκες). Το μεγαλύτερο κίνδυνο διέτρεχαν οι περιοχές όπου ο υδροφόρος τους είχε χαρακτηριστεί ευάλωτος από την μεθοδολογία DRASTIC. Η έρευνα κατέληγε πως επείγει η αλλαγή στη χρήση γης, καθώς και η μεθοδολογία που οι αγρότες εφαρμόζουν αναφορικά με την χρήση λιπασμάτων και ζιζανιοκτόνων, αφού η υψηλή συγκέντρωση νιτρικών στα δείγματα νερού δείχνουν ήδη υφιστάμενη επιβάρυνση από γεωργικούς ρύπους. Οι χάρτες εκτίμησης κινδύνου υποδεικνύουν τις περιοχές όπου πρέπει να υπάρξει επικέντρωση προκειμένου να αποφευχθούν σοβαρότερα περιστατικά ρύπανσης του υπόγειου υδροφόρου.



Εικόνα 8 Εφαρμογή μεθόδου DRASTIC στη λεκάνη της Σαριγκιόλ (Voudouris, 2009)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

4.1 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εκτίμηση της τρωτότητας των υπογείων νερών της λεκάνης Σαριγκιόλ στην Κοζάνη. Προκειμένου αυτό να επιτευχθεί, έγινε εφαρμογή της μεθόδου Drastic. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου, παρουσιάζονται με μορφή χαρτών και πινάκων και σχολιάζονται. Τέλος, γίνεται πρόταση κάποιων μεθόδων βελτίωσης της υφιστάμενης κατάστασης, καθώς και τρόπων που θα μπορούσε η παρούσα έρευνα να αξιοποιηθεί και να συνεχιστεί.

4.2 Λογισμικά – Εργαστηριακός εξοπλισμός

4.2.1 Μηχανικό κόσκινο 12 φάσεων.

Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης και στο πλαίσιο προσδιορισμού της κοκκομετρίας του εδάφους και εισαγωγής του παράγοντα αυτού στη μέθοδο DRASTIC, εξήχθησαν κοκκομετρικά διαγράμματα μέσω κοκκομετρικής ανάλυσης εδαφικών δειγμάτων της περιοχής μελέτης. Το ζύγισμα των δειγμάτων και το πέρασμα τους από το μηχανικό κόσκινο πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Γεωλογίας του Τομέα Γεωλογικών Επιστημών της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων- Μεταλλουργών του ΕΜΠ. Το ζύγισμα και η κοκκομετρική ανάλυση έγινε σε πλήθος 25 δειγμάτων.

4.4.2 Λογισμικά

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα Qgis και Arc Map (έκδοση 10.7). Επίσης, έγινε χρήση του προγράμματος excel για την δημιουργία των κοκκομετρικών καμπυλών.

4.3 Περιγραφή του πειράματος

Για τη συγγραφή της συγκεκριμένης εργασίας ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα:

Α) Συλλογή και ανάλυση βιβλιογραφικών δεδομένων αναφορικά με την υδρογεωλογία, την γεωλογία και τις χρήσεις γης της περιοχής μελέτης.

Β) Ζύγισμα και πέρασμα από μηχανικό κόσκινο εδαφικών δειγμάτων της περιοχής μελέτης.

Γ) Υπολογισμός της κοκκομετρικών καμπυλών και των συντελεστών διαπερατότητας K

Γ) Εισαγωγή δεδομένων - εφαρμογή της μεθοδολογίας DRASTIC και εξαγωγή χαρτών για κάθε κριτήριο βαθμονόμησης συνολικής τρωτότητας

Δ) Επεξεργασία, ανάλυση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

4.4 Δειγματοληψία

Από τη λεκάνη Σαριγκιόλ συλλέχθηκαν δείγματα εδάφους κατά την περίοδο του 2018. Οι συντεταγμένες των θέσεων στις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι δειγματοληψίες των εδαφικών δειγμάτων εντοπίστηκαν από GPS χειρός (WGS 84). Τα δείγματα λήφθηκαν σε βάθος 0-20 cm, ποσότητας γύρω στα 300 gr, σφραγίστηκαν και μεταφέρθηκαν στον Τομέα Γεωλογικών Επιστημών της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του ΕΜΠ. Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης, έγινε κοκκομετρική ανάλυση σε 25 δείγματα, μέσω μηχανικού κόσκινου.

Πίνακας 8 Συντεταγμένες σημείων λήψης εδαφικών δειγμάτων

Κωδικός δείγματος	Συντεταγμένες WGS '84	
S4	40 23.345	21 54.289
S11	40 23.629	21 56.172
Αλσύλιο αγ. Δημητρίου	40 24.856	21 55.164
S12	40 23.242	21 56.395
S5	40 23.099	21 54.983
W23	40 23.994	21 54.687
S7	40 23.052	21 52.311
Κτήμα κοκκινίδη	40 23.703	21 54.815
S14	40 22.679	21 55.305
S13	40 22.961	21 55.655
S6	40 23.557	21 55.062
S2	40 24.118	21 55.014
S3	40 23.341	21 54.508
W12	40 24.118	21 55.014
S10	40 23.986	21 56.065
Περιοχή Ποτιστή	40 27.103	21 57.639
S8	40 23.175	21 50.871
SS1	40 23.177	21 50.909
SS2	40 24.169	21 52.188
SS3	40 23.880	21 56.091
SS4	40 23.345	21 56.459
SS5	40 24.040	21 53.929
SS6	40 24.191	21 52.183
SS7	40 23.055	21 52.308
SS8	40 23.263	21 53.107



Εικόνα 9 Τοποθεσία συλλογής εδαφικών δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή κοκκομετρικών διαγραμμάτων – συντελεστών διαπερατότητας

4.5 Εργαστηριακός υπολογισμός συντελεστή διαπερατότητας (K)

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, πραγματοποιήθηκε προσπάθεια εργαστηριακού προσδιορισμού του συντελεστή διαπερατότητας, μέσω κοκκομετρικής ανάλυσης. Ο συντελεστής διαπερατότητας συνδέεται με το μέγεθος των κόκκων των σχηματισμών, το ποσοστό συμμετοχής των διάφορων μεγεθών των κόκκων καθώς και τη συμπίεση τους. Για να δημιουργηθεί μία κοκκομετρική καμπύλη γίνεται χρήση του γραφήματος του αθροιστικού επί τοις εκατό παραμένοντος βάρους σε κάθε κόσκινο, σε συνάρτηση με το άνοιγμα του κόσκινου.

$$\% \text{διερχόμενο} = (\text{διερχόμενο βάρος } i / \text{ολικό βάρος δείγματος}) * 100$$

Ένα δείγμα για να χαρακτηριστεί πλήρως πρέπει να έχει τρία στοιχεία: τη λεπτότητα, την κλίση της καμπύλης και το σχήμα της. Η λεπτότητα είναι το μέγεθος κόκκων όπου το 10% είναι λεπτότερο και το 90% πιο χονδρόκοκκο. (Λουλούδης, 1991)

Η κλίση βρίσκεται μέσω του συντελεστή ομοιομορφίας που αντιπροσωπεύει τη μέση κλίση της καμπύλης μεταξύ 90% και 40%. Όσο χαμηλότερη είναι αυτή η τιμή, τόσο πιο ομοιόμορφη είναι η διαβάθμιση της άμμου. Συνεπώς μεγαλύτερες τιμές, υποδεικνύουν μεγαλύτερη ανομοιομορφία. Ισχύει πως ο συντελεστής διαπερατότητας K υπολογίζεται από τον τύπο $K=100*d_{10}^2$ όπου το K εκφράζεται σε m/s όταν το d_{10} εκφράζεται σε m και αποτελεί χονδρική εκτίμηση της υδροπερατότητας.

Πίνακας 9 Υπολογισμένοι συντελεστές διαπερατότητας

Κωδικός δείγματος	K (m/s)	Συντεταγμένες WGS 84	
S2	$4.76*10^{-05}$	40 24.191	21 52.183
S12	$3.60*10^{-05}$	40 24.169	21 52.188
SS6	$1.64*10^{-05}$	40 24.040	21 53.929
W12	$1.41*10^{-05}$	40 23.263	21 53.107
SS2	$7.29*10^{-06}$	40 23.177	21 50.909
S14	$6.00*10^{-06}$	40 23.629	21 56.172
SS1	$4.00*10^{-06}$	40 22.679	21 55.305
S10	$3.06*10^{-06}$	40 24.118	21 55.014
SS5	$2.89*10^{-06}$	40 23.986	21 56.065
SS8	$2.25*10^{-06}$	40 24.118	21 55.014
S11	$1.82*10^{-06}$	40 23.242	21 56.395

4.6 Τρωτότητα υπόγειων υδροφορέων

Τρωτότητα υπόγειων υδροφορέων είναι η ευαισθησία τους απέναντι στους εξωτερικούς ρύπους και βασίζεται στην παραδοχή ότι το φυσικό περιβάλλον μπορεί να προστατεύσει σε κάποιο βαθμό το υπόγειο νερό. (Βουδούρης, 2009) Η τρωτότητα εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα αλλά και από την απόσταση από την πηγή ρύπανσης. Επιπλέον σημαντικό ρόλο παίζουν τα χαρακτηριστικά του ρύπου. Διακρίνεται σε ειδική (αναφορά σε συγκεκριμένο ρυπαντή) και γενική (αφορά τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα της ακόρεστης ζώνης). Η ευαισθησία ενός υδροφορέα υποδεικνύει την ευκολία που ένας ρύπος μεταφέρεται από το έδαφος στον υδροφορέα.

Η τρωτότητα δύναται να αντιμετωπιστεί με την αναγνώριση τριών διαφορετικών σταδίων (Στουρνάρας, 1996): Στο πρώτο στάδιο έχουμε την δυνητική εισαγωγή του ρύπου στο σύστημα. Στο δεύτερο στάδιο είναι αυτό της παραμονής του ρύπου στο υδάτινο σύστημα, και είναι συνυφασμένο με τις ιδιότητες του ρύπου και με τις υδρογεωλογικές συνθήκες του υδροφορέα. Τέλος, έχουμε το στάδιο άφιξης του ρύπου στο υδροληπτικό έργο (αν ο υδροφορέας είναι υπό εκμετάλλευση). Για να μετρηθεί η τρωτότητα υπήρξε εισαγωγή διάφορων πρότυπων που βασίζονται σε ποικίλα κριτήρια όπως το είδος υδροφορέων, το πάχος της ακόρεστης ζώνης, την ταχύτητα ροής του νερού, υδροπερατότητα κ.α. Η έννοια του δυναμικού ρύπανσης υπόγειων υδροφορέων έγινε γνωστή από τον ερευνητή LeGrand (1964) ,με κριτήρια της τα ακόλουθα: το πάχος της ακόρεστης ζώνης, την υδροπερατότητα, την υδραυλική κλίση της πιεζομετρικής επιφάνειας, την απόσταση από την πηγή ρύπανσης και την απορρόφηση της ακόρεστης ζώνης. Μια περιοχή, αναλόγως τη βαθμολογία της χαρακτηρίζεται ως:

- Πολύ χαμηλής τρωτότητας (>12 βαθμοί)
- Μέτριας τρωτότητας (8-12 βαθμοί)
- Μεγάλης τρωτότητας (4-8 βαθμοί)
- Πολύ μεγάλης τρωτότητας (<4 βαθμοί)

4.7 Μέθοδος DRASTIC

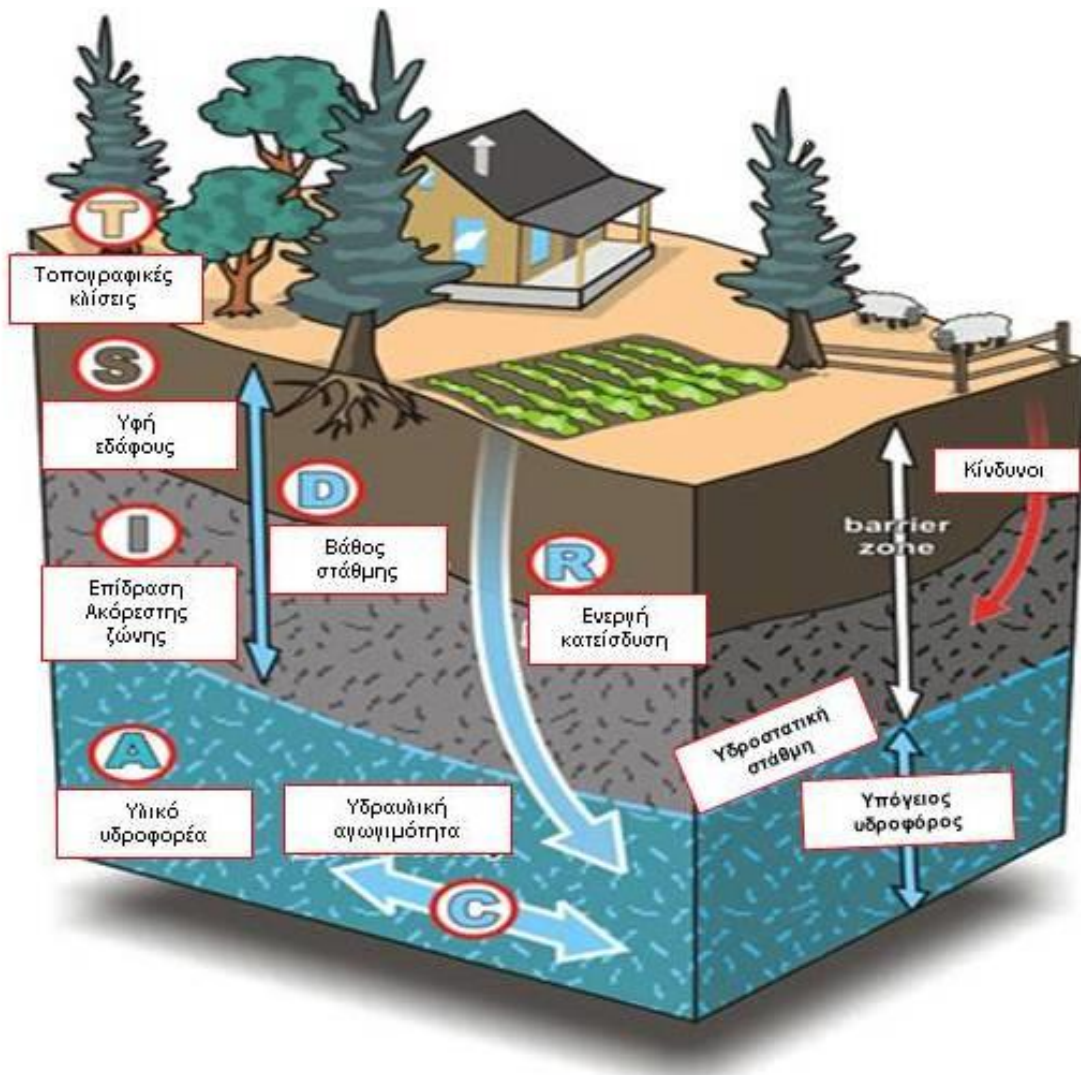
Η μέθοδος DRASTIC απαρτίζεται από τα αρχικά των επτά (7) υδρογεωλογικών παραμέτρων που χρησιμοποιεί, αποτελεί μέθοδο εκτίμησης της ποιοτικής υποβάθμισης και του κινδύνου ρύπανσης υπόγειων υδροφόρων. Πιο συγκεκριμένα:

- D (Depth) βάθος της στάθμης του υδροφόρου – Μικρό βάθος σημαίνει πως ο ρύπος δύναται να φθάσει στο νερό πιο εύκολα, γι' αυτό και μεγάλο βάθος μεταφράζεται ως χαμηλή τρωτότητα

και μεγαλύτερη προστασία από τη ρύπανση.(Μανδηλαράς, 2005)

- R (Recharge) ενεργή κατείσδυση - ποσότητα νερού ανά μονάδα επιφάνειας που κατεισδύει. Όσο μεγαλύτερος είναι ο εμπλουτισμός (μέχρι τα 280mm/y) τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα του ρύπου να μολύνει τον υδροφόρο. (Voudouris, 2009)
- A (Aquifer) υδροφορέας – υλικό και χρόνος κίνησης
- S (Soil) έδαφος – εδαφικό υλικό του ανώτερου τμήματος της ακόρεστης ζώνης.
- T (Topography) κλίση της περιοχής εφαρμογής – μεγαλύτερη κλίση σημαίνει μεγαλύτερες επιφανειακές απορροές, συνεπώς λιγότερη ποσότητα περνάει στον υπόγειο υδροφόρο
- I (Impact of the vadose zone) επίδραση της ακόρεστης ζώνης – χρόνος κίνησης νερού μέχρι τον υδροφόρο
- C (Hydraulic Conductivity of the aquifer) συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας - δυνατότητα κίνησης ρύπου (Βουδούρης, 2009)

Για την χρήση το συγκεκριμένου μοντέλου θεωρούμε πως κάθε ρύπος εισέρχεται επιφανειακά, και εισάγεται στον υδροφόρο μέσω της κατείσδυσης του βρόχινου νερού. Επιπλέον, η ταχύτητα του ρύπου είναι ίδια με την ταχύτητα του νερού. Η ελάχιστη απαιτούμενη επιφάνεια για την εφαρμογή του μοντέλου είναι τα 0,4 km². (Aller et al.,1987)



Εικόνα 10 Αναπαράσταση των συντελεστών βαρύτητας της μεθόδου DRASTIC
(www.frakturmedia.net/oswp/drastring)

Η τρωτότητα υδροφορέα γίνεται υπολογίζοντας τη βαρύτητα (X_w) της κάθε παραμέτρου X . Για κάθε παράμετρο υφίστανται δύο συντελεστές βαρύτητας που βαθμονομούνται από το 1 μέχρι το 5. Ο πρώτος χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις οικιακών - βιομηχανικών ρύπων ενώ ο δεύτερος χρησιμοποιείται για τη χρήση φυτοφαρμάκων σε περιοχές που παρατηρείται γεωργική δραστηριότητα. Τη μεγαλύτερη βαρύτητα στην περίπτωση των φυτοφαρμάκων την έχουν το βάθος στάθμης του υπόγειου νερού (D), η ακόρεστη ζώνη (I) και το έδαφος (S). Η εκτίμηση επίδρασης κάθε παραμέτρου αναφορικά με την τρωτότητα του υδροφορέα για εκάστοτε σημείο, γίνεται με πολλαπλασιασμό του συντελεστή βαρύτητας κάθε παραμέτρου με την αντίστοιχη τιμή της παραμέτρου σε κάθε θέση $X_r X_w$, και έτσι προκύπτει ο χάρτης τρωτότητας της κάθε περιοχής. (Bachmat et al., 1987). Ο δείκτης DRASTIC (DI) υπολογίζεται:

$$DI = DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + Irlw + CrCw$$

Ο δείκτης r είναι η τιμή της παραμέτρου και ο δείκτης w αποτελεί τη βαρύτητα καθεμιάς. Στον πίνακα 10 παρουσιάζονται οι δύο κατηγορίες βαρών. Οι συντελεστές βαρύτητας της γενικής κατηγορίας χρησιμοποιούνται για τους βιομηχανικούς ρύπους, ενώ της ειδικής χρησιμοποιούνται για τους αγροτικούς.

Πίνακας 10 Βαρύτητα κάθε παραμέτρου της μεθόδου DRASTIC (Aller et al., 1987)

Παράμετρος	Βαρύτητα (Γενική)	Βαρύτητα (Ειδική)
D	5	5
R	4	4
A	3	3
S	2	5
T	1	3
I	5	3
C	3	2

4.7.1 Εφαρμογή της μεθόδου στη λεκάνη Σαριγκιόλ

Βάθος στάθμης (D)

Το βάθος στάθμης του υδροφόρου είναι σημαντικός παράγοντας καθώς ορίζει τον χρόνο που θα χρειαστεί ο ρύπος για να φθάσει σε αυτόν. Το βάθος στάθμης του υδροφόρου κυμαίνεται μεταξύ 3,5 έως 102,5 μέτρα, με τη βαρύτητα της παραμέτρου να είναι 5. Πολλαπλασιάζουμε τη βαρύτητα της συγκεκριμένης παραμέτρου με τη βαθμονόμηση για κάθε θέση, ανάλογα με το βάθος στάθμης του υπόγειου νερού. Οι μετρήσεις του βάθους του υδροφόρου ορίζοντα, προέρχονται από σταθμημετρήσεις γεωτρήσεων που έγιναν στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, των οποίων οι ακριβείς θέσεις παρουσιάζονται στην εικόνα 11.

Το βάθος του υπόγειου υδροφορέα χωρίστηκε σε 10 κλάσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα 11, μαζί με τα βάρη που δόθηκαν για τη συγκεκριμένη παράμετρο. Τα σημεία που αντιστοιχούν σε μεγάλα βάθη υδροφορέα πήραν χαμηλό βάρος (rating) καθώς δεν θεωρούνται το ίδιο ευάλωτα με τα σημεία που έχουν χαμηλό βάθος υδροφορέα.

Πίνακας 11 Βάθος υδροφορέα και η αντίστοιχη βαθμονόμηση του

Βάθος (m)	Βαθμονόμηση
<5	10
5-10	9
10-15	8
15-20	7
20-25	6
25-30	5
30-35	4
35-40	3
40-80	2
>80	1



Εικόνα 11 Μέσο βάθος στάθμης υπόγειου νερού στη λεκάνη Σαριγκιόλ

Κλίση ανάγλυφου (T)

Το ανάγλυφο της περιοχής θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ομαλό, καθώς επικρατούν χαμηλές κλίσεις οι οποίες κυμαίνονται από 1 έως 4%. Εξάιρεση αποτελεί η περιοχή στα βορειανατολικά της λεκάνης με κλίση που προσεγγίζει το 10%. Κλίσεις που ευνοούν την διείσδυση συνήθως σηματοδοτούν υψηλή τρωτότητα, συνεπώς και μεγαλύτερο βάρος στη βαθμονόμηση. Αξίζει να αναφερθεί πως όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση ενός τόπου, η διείσδυση του νερού και συνεπώς του ρύπου είναι δυσκολότερη,

αφού το νερό παίρνει μορφή επιφανειακής απορροής. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, η τοπογραφική κλίση χωρίστηκε σε 3 κλάσεις. Η κλίση προήλθε από ψηφιοποίηση δορυφορικής εικόνας. Οι τιμές για κάθε κλάση κλίσεων που δόθηκαν στο μοντέλο και οι αντίστοιχες βαθμονομήσεις τους παρουσιάζονται στον πίνακα 12.

Πίνακας 12 Τοπογραφικές κλίσεις και η αντίστοιχη βαθμονόμηση τους

Κλίση (%)	Βαθμονόμηση
0-4	7
4-8	5
>8	3

Επίδραση της ακόρεστης ζώνης (I)

Οι διεργασίες που συμβαίνουν στην ακόρεστη ζώνη, όπως η αποδόμηση, η εξασθένηση, ή η καθυστέρηση στη κίνηση του ρύπου είναι συνυφασμένες με τα υλικά που συνθέτουν την ακόρεστη ζώνη. Όσο πιο μεγάλο είναι το πάχος της ακόρεστης ζώνης τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα να υπάρξει εξασθένηση του ρύπου και συγκράτηση του. Η ακόρεστη ζώνη χωρίστηκε σε 3 κλάσεις, αναλόγως το είδος πετρώματος και οι βαθμονόμηση της συγκεκριμένης παραμέτρου πήρε τιμές βαρύτητας από το 3 μέχρι το 8. Η δημιουργία των κλάσεων βασίστηκε σε δειγματοληπτικές γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος, αλλά και λιθολογικές τομές που υπήρχαν στην περιοχή και αξιολογήθηκαν .

Πίνακας 13 Βαθμονόμηση της παραμέτρου του υλικού της ακόρεστης ζώνης

Υλικό ακόρεστης ζώνης	Βαθμονόμηση
Άργιλος - χάλικες	3
Άργιλος – κροκάλες	5
Αμμοχάλικο – κροκάλες	8

ΜΗΤΡΩΟ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ

Κωδικός: Κ-ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου 1/15
 Θέση: Στον προαύλιο χώρο του ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου
 Έτος κατασκευής: 2015
 Χρήση: Δειγματοληπτική
 Διάνοιξη: ΔΕΗ-Τομέας Γεωτρήσεων ΑΚΔΜ

X=323709,99
 Y=4473505,09

Βάθος (m)	Λιθολογική Περιγραφή	Υδροστατική Στάθμη	Λιθολογική τομή		
0	Αργίλος καστανή, γάλικες, κροκάλες				
3	Αργίλος καστανέρυθρη με γάλικες				
4	Αμμοχάλικο ασύνδετο χαλαρό				
8	Αμμοχάλικο ασύνδετο χαλαρό				
10	Αμμοχάλικο με κροκάλες				
13	Αμμοχάλικο με κροκάλες				
14					
15	Αμμοχάλικο με κροκάλες				
18	Αμμοχάλικο ασύνδετο χαλαρό				
20	Αργίλος καστανή αμμούχα				
22	Αργίλος καστανή κτθ				
25	αμμούχα με κροκάλες αβεστολιθικές				
28	Αργίλος καστανή-καστανέρυθρη κτθ με κροκάλες, λατύπες αβεστολιθικές				
30	Αργίλος καστανέρυθρη κτθ με γάλικες				
32	Αργίλος καστανέρυθρη κτθ με γάλικες και κροκάλες 2-3 cm				
35	Αργίλος καστανέρυθρη κτθ με γάλικες και κροκάλες 2-3 cm				
38	Αργίλος καστανέρυθρη κτθ με γάλικες και κροκάλες 2-3 cm				
40	Αμμοχάλικο με άργιλο				
42	Αργίλος καστανέρυθρη κτθ με γάλικες				
45	Αργίλος καστανή κτθ με κροκάλες και λατύπες				
47	Αργίλος καστανέρυθρη				
50	Αργίλος καστανή κτθ με κροκάλες και λατύπες				
52	Αργίλος καστανή κτθ με γάλικες				
54	Αργίλος καστανή κτθ με κροκάλες και λατύπες				
55	Αργίλος καστανέρυθρη με γάλικες και λατύπες				
58	Αργίλος καστανέρυθρη με γάλικες και λατύπες κτθ πηλικά τεμάχια				
60	Λατυποπαγές με λατύπες και κροκάλες				
63	Αργίλος καστανέρυθρη με γάλικες και λατύπες				
65	Αργίλος καστανέρυθρη με γάλικες και λατύπες				
70	Αργίλος καστανέρυθρη με γάλικες και λατύπες				
75	Αργίλος καστανόκίτρινη κτθ με λατύπες				
80	Αργίλος με γάλικες και κροκάλες-λατύπες				
82	Κροκαλοπαγές ασύνδετο χαλαρό με κροκάλες και άργιλο καστανέρυθρη				
85	Αργίλος καστανή με γάλικες και κροκάλες-λατύπες				
87	Αργίλος καστανέρυθρη με γάλικες και κροκάλες				
90	Αργίλος καστανόκίτρινη με λατύπες				
95	Αργίλος καστανόκίτρινη με λατύπες				
100	Αργίλος καστανόκίτρινη κτθ με γάλικες				
105	Αργίλος καστανέρυθρη με γάλικες και λατύπες				
108	Αργίλος καστανόκίτρινη με γάλικες και λατύπες				
110	Αργίλος καστανή με γάλικες και λατύπες				
112	Αργίλος καστανόκίτρινη με λατύπες				
115	Αργίλος καστανόκίτρινη κτθ με λατύπες				
118	Αργίλος καστανόκίτρινη κτθ με γάλικες και λατύπες				
120	Αργίλος καστανόκίτρινη καστανέρυθρη με κροκάλες				
122	Αργίλος καστανόκίτρινη καστανέρυθρη με κροκάλες				
125	Αργίλος καστανόκίτρινη καστανέρυθρη με κροκάλες				
130	Αργίλος καστανόκίτρινη καστανέρυθρη με κροκάλες				
135	Αργίλος καστανόκίτρινη με κροκάλες-λατύπες				
138	Αργίλος καστανή κτθ με γάλικες και λατύπες				
140	Αργίλος καστανέρυθρη κτθ με λατύπες				
145	Λατυποκροκαλοπαγές ασύνδετο χαλαρό με λατύπες και κροκάλες				
150	Αργίλος καστανόκίτρινη με κροκάλες-λατύπες				
152	Αργίλος καστανόκίτρινη με κροκάλες-λατύπες				
155	Αργίλος καστανέρυθρη κτθ με κροκάλες-λατύπες				
160	Αργίλος καστανέρυθρη κατά θέσεις με λατύπες				
162	Κροκαλοπαγές ασύνδετο χαλαρό κτθ συνεκτικά σκληρό με κροκάλες και άργιλο				

Εικόνα 12 Γεώτρηση - Πεικόνιση γεωλογικού προφίλ περιοχής μελέτης (Περράκη κ.ά., 2016)

Υδροφόρο μέσο (A)

Το υδροφόρο μέσο ουσιαστικά απεικονίζει το υλικό που απαρτίζει τον υδροφόρο ορίζοντα. Όσο αυξάνεται ο χρόνος που θα χρειαστεί ο ρύπος για να κινηθεί εντός του υδροφόρου, τόσο μικρότερη είναι η δυναμική ρύπανση που θα προκαλούσε στα νερά. Για τη δημιουργία του χάρτη με τον παράγοντα του υλικού του υδροφόρου μέσου έγινε αξιολόγηση δεδομένων από προϋπάρχουσες γεωτρήσεις και λιθολογικές τομές στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, καθώς και προηγούμενων ερευνών που αφορούσαν την περιοχή μελέτης. Το υλικό του υδροφόρου ταξινομήθηκε σε 3 κλάσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα 14 μαζί με την αντίστοιχη βαθμονόμηση τους.

Πίνακας 14 Βαθμονόμηση της παραμέτρου του υλικού του υδροφόρου μέσου

Υλικό υδροφόρου μέσου	Βαθμονόμηση
Αμμώδης άργιλος	4
Άμμοι – κροκάλες	6
Αδρόκοκκα υλικά	7

Έδαφος (S)

Στην εδαφική ζώνη οι ρύποι αποικοδομούνται και εξασθενούν (Βουδούρης, 2009). Λεπτόκοκκα υλικά όπως ο άργιλος συνεισφέρουν στην κατακράτηση των ρύπων εν αντιθέσει με πιο χονδρόκοκκα υλικά τα οποία δεν δύνανται να συγκρατήσουν ρύπους με την ίδια ευκολία. Το έδαφος στην λεκάνη της Σαριγκιόλ ταξινομήθηκε βάσει των εργαστηριακών μετρήσεων που υλοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, από τις οποίες προέκυψαν οι συντελεστές υδροπερατότητας (K) διάφορων σημείων της λεκάνης. Επίσης, ελήφθησαν υπόψιν βιβλιογραφικές αναφορές και προηγούμενες μελέτες πάνω στην περιοχή μελέτης, για μεγαλύτερη ακρίβεια. Έγινε διαχωρισμός σε τρεις κλάσεις εδάφους, με τα βάρη που παρουσιάζονται στον πίνακα 15.

Πίνακας 15 Βαθμονόμηση της παραμέτρου υφή του εδάφους

Υφή του εδάφους	Βαθμονόμηση
Άργιλος	5
Αργιλώδης πηλός	6
Αμμώδης πηλός	7

Ενεργή κατείσδυση (R)

Ο εμπλουτισμός είναι η ετήσια ποσότητα νερού μετρημένη σε mm, που κατεισδύει από την επιφάνεια του εδάφους στον υδροφόρο, μέσω της ακόρεστης ζώνης. Ο συντελεστής κατείσδυσης αποτελεί συνάρτηση του ύψους βροχής, της περατότητάς, και του ανάγλυφου του εδάφους (κλίση). Όσο μεγαλύτερη είναι η συγκεκριμένη παράμετρος, τόσο μεγαλύτερες είναι οι

πιθανότητες να περάσει ο ρύπος στο υδροφόρο ορίζοντα. Η μέση ετήσια βροχόπτωση στην λεκάνη της Σαριγκιόλ έχει υπολογιστεί στα 643 mm. Ο εμπλουτισμός εκτιμήθηκε μεταξύ 15 και 90 mm/yr. Ο δείκτης κατείσδυσης σε περιοχές με παρεμφερή λιθολογία είναι μεταξύ 8 και 20% της ετήσιας βροχόπτωσης. (Voudouris, 2009)

Βάσει των συντελεστών υδροπερατότητας που υπολογίστηκαν, σχηματίστηκε ο χάρτης των ενεργών κατεισδύσεων, όπου κάθε πέτρωμα πολλαπλασιάστηκε με διαφορετικό δείκτη κατείσδυσης. Τα βάρη που δόθηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα 16.

Πίνακας 16 Βαθμονόμηση της παραμέτρου ενεργής κατείσδυσης

Ενεργή κατείσδυση (mm/yr)	Βαθμονόμηση
<20	2
20-35	4
>35	5

Υδραυλική αγωγιμότητα (C)

Η υδραυλική αγωγιμότητα συνάδει με την δυνατότητα του υδροφορέα να μεταφέρει νερό και συνεπώς ελέγχει την ταχύτητα κίνησης των ρύπων. Η τιμή της εξαρτάται από τις ιδιότητες του υδροφορέα, καθώς όσο μεγαλύτερη είναι τόσο πιο εύκολα και γρήγορα ο ρύπος θα κινηθεί αυξάνοντας την τρωτότητα του. Η υδραυλική αγωγιμότητα υπολογίζεται από το πηλίκιο της μεταδοτικότητας (T) διά το πάχος του υδροφόρου (D). ($C=T/D$) Οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας πάρθηκαν από σχετική βιβλιογραφία. Με τη χρήση του εργαλείου IDW του ArcMap προέκυψε ο χάρτης απεικόνισης της συγκεκριμένης παραμέτρου

Πίνακας 17 Τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας περιοχής μελέτης έπειτα από δοκιμαστικές αντλήσεις (Vasileiou et. al., 2018)

Q (m ³ /h)	T (m ² /s)	K (m/s)
2	$6,78 \cdot 10^{-6}$	$2,26 \cdot 10^{-7}$
4	$9,24 \cdot 10^{-6}$	$2,64 \cdot 10^{-7}$
15	$2,31 \cdot 10^{-5}$	$6,8 \cdot 10^{-7}$

Οι κλάσεις για τη βαθμονόμηση της παραμέτρου χωρίστηκαν σε 3, με τη βαρύτητα της κάθε μίας να παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 18 Βαθμονόμηση της παραμέτρου ενεργής κατείσδυσης

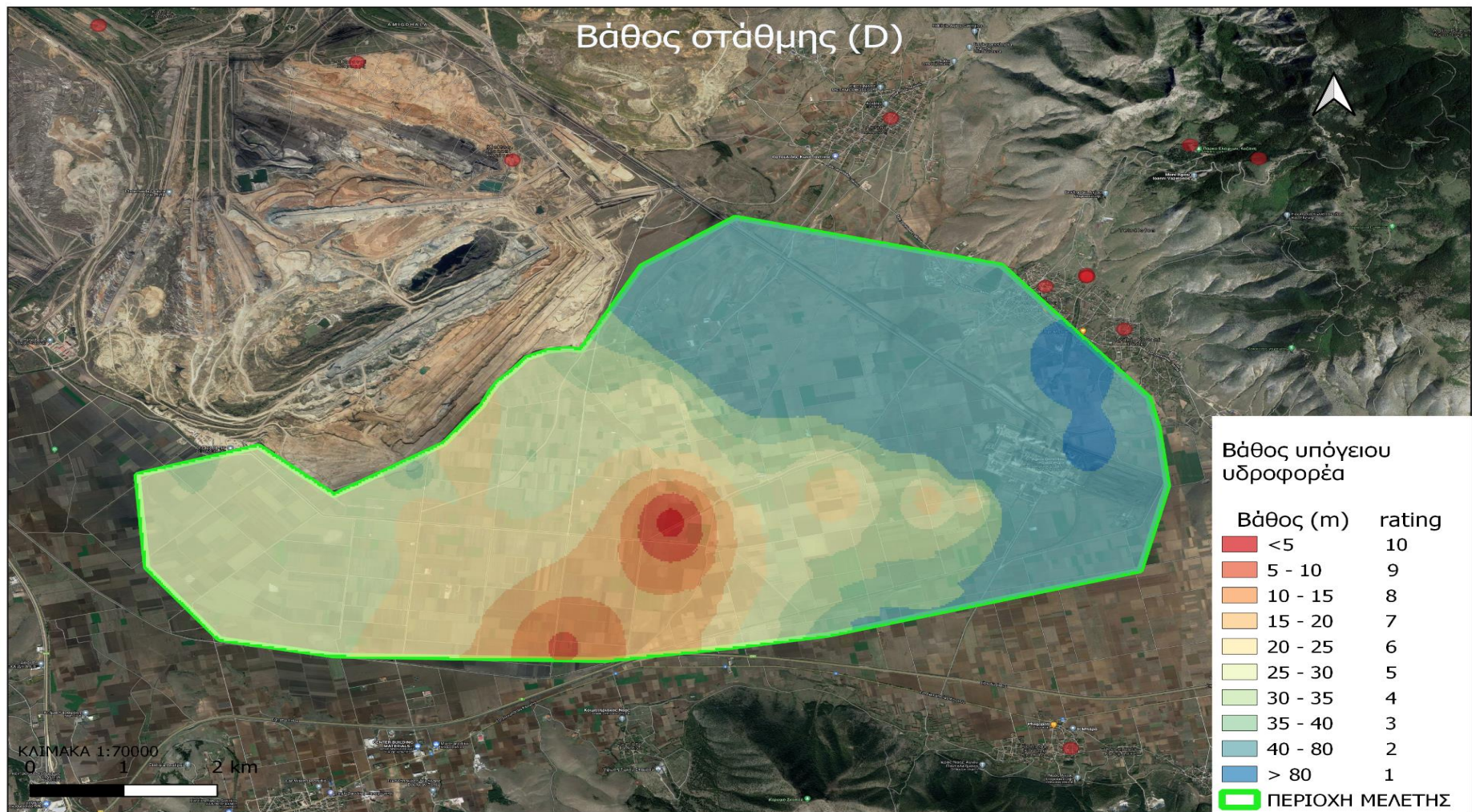
Υδραυλική αγωγιμότητα (m/s)	Βαθμονόμηση
10^{-7}	3
10^{-8}	2

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρών κεφάλαιο παρουσιάζονται οι χάρτες που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθοδολογίας DRASTIC. Κάθε παράγοντας της μεθοδολογίας προσδίδει το δικό του χάρτη, όπου παρουσιάζεται ο διαχωρισμός των κλάσεων και η βαθμονόμηση της εκάστοτε κλάσης (rating) στο σχετικό υπόμνημα. Στο τέλος παρουσιάζεται ο τελικός χάρτης απεικόνισης της τρωτότητας του υπόγειου υδροφορέα.

D – Ενεργή κατείσδυση

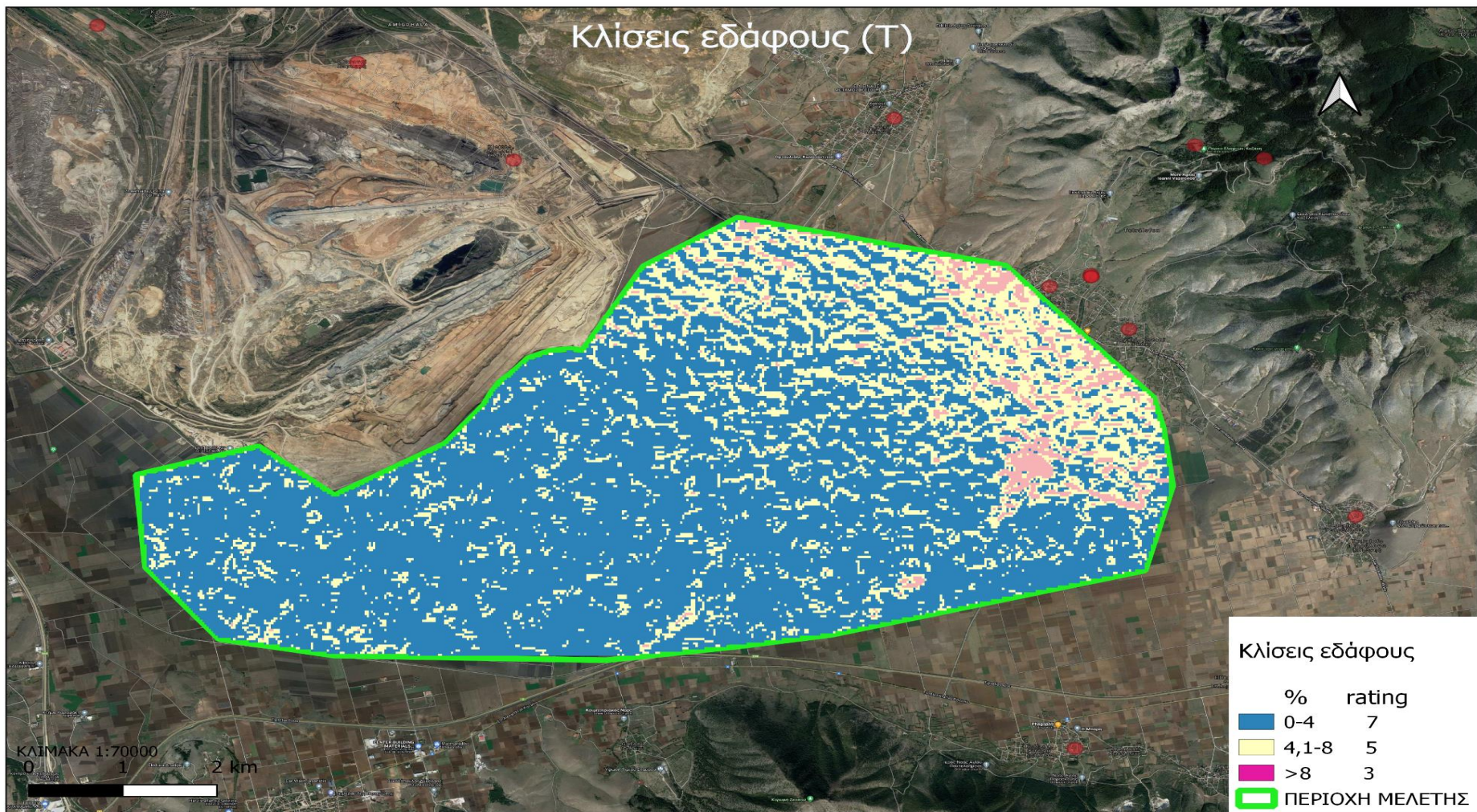
Παρατηρείται πως ανατολικά της λεκάνης σημειώνονται τα μεγαλύτερα βάθη υδροφορέα, συνεπώς θεωρούνται και τα λιγότερο ευάλωτα. Επομένως, τα μεγαλύτερα βάθη αξιολογήθηκαν με τη χαμηλότερη τιμή βαρύτητας, όπως απεικονίζεται στο χάρτη της. εικόνας 13.



Εικόνα 13 Χάρτης βαθμονόμησης της παραμέτρου βάθους στάθμης υπόγειου υδροφορέα (D)

Τ – Τοπογραφική κλίση

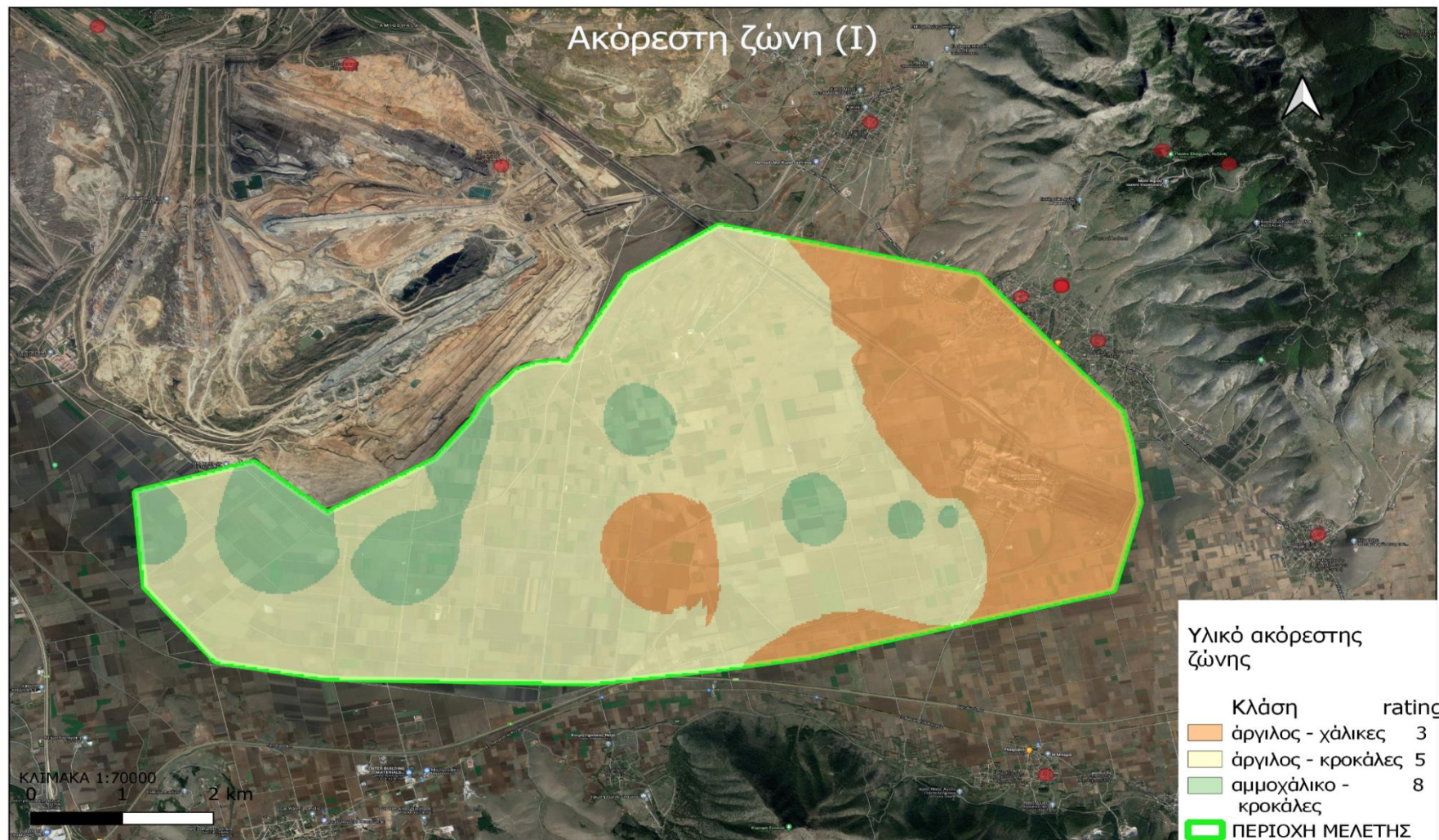
Οι τοπογραφικές κλίσεις της περιοχής είναι ως επί το πλείστο χαμηλές με εξαίρεση το βόρειο και ανατολικό τμήμα της λεκάνης. Οι κλίσεις χωρίστηκαν σε 3 κλάσεις. Τα σημεία που αντιστοιχούν σε μεγάλες κλίσεις αξιολογήθηκαν με χαμηλότερο βάρος (rating) καθώς δεν ευνοούν τη διείσδυση του ρύπου, αφού δημιουργούν επιφανειακές απορροές. (εικόνα 14)



Εικόνα 14 Χάρτης βαθμολόγησης της παραμέτρου τοπογραφικής κλίσης (T)

I – Υλικό ακόρεστης ζώνης υδροφόρου

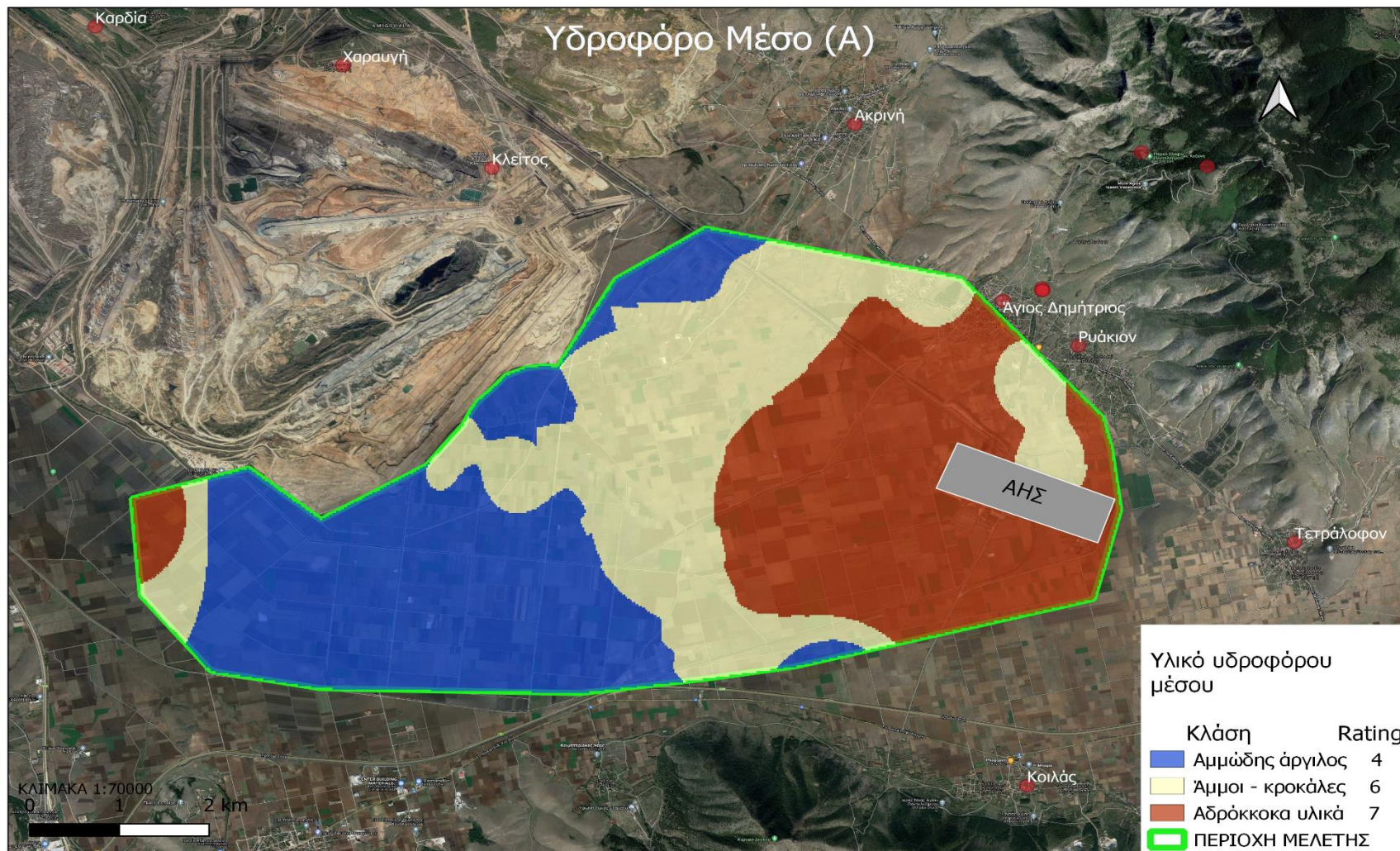
Λαμβάνοντας υπόψιν το βάθος του υδροφόρου και τα δεδομένα των γεωτρήσεων δημιουργήθηκε ο χάρτης της ακόρεστης ζώνης. Ανατολικά της λεκάνης όπου παρατηρούνται τα μεγαλύτερα βάθη του υδροφόρου έχουμε το στρώμα όπου αξιολογήθηκε και με το χαμηλότερο βάρος (άργιλος – χάλικες).



Εικόνα 15 Χάρτης βαθμονόμησης της παραμέτρου υλικό ακόρεστης ζώνης υδροφόρου (I)

A – Υλικό υδροφόρου μέσου

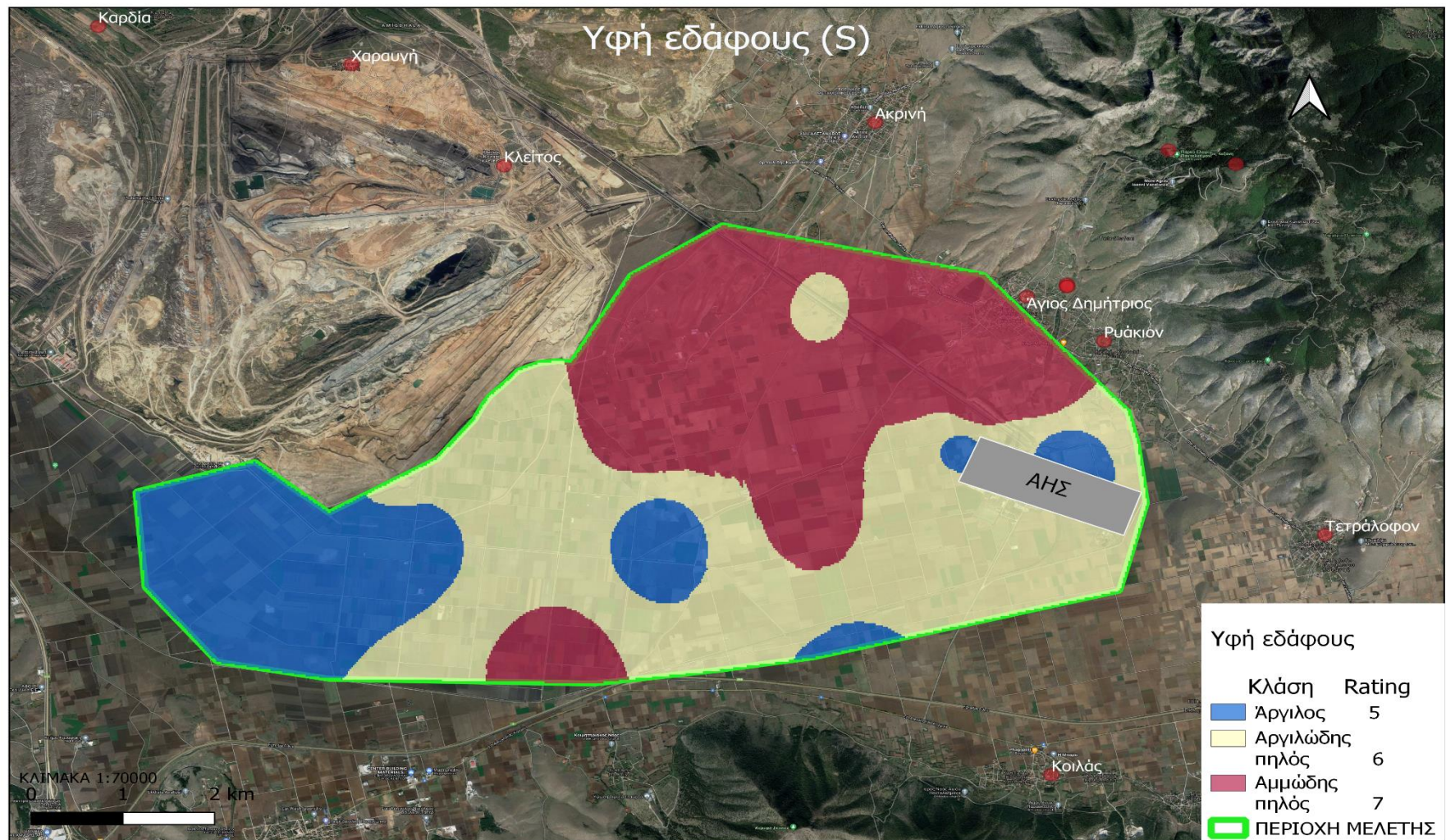
Το υλικό μέσο του υδροφορέα ταξινομήθηκε σε 3 κλάσεις. Παρατηρούμε επικράτηση κυρίως του αμμώδους αργίλου, ενώ προς τα ανατολικά και γύρω από τον ΑΗΣ επικρατούν τα αδρόκοκκα υλικά



Εικόνα 16 Χάρτης βαθμονόμησης του υλικού υδροφόρου μέσου (Α)

S – Υφή εδάφους

Το έδαφος της περιοχής μελέτης ταξινομήθηκε σε 3 κλάσεις. Παρατηρούμε ισομερή κατανομή των εδαφών ανάμεσα στον άργιλο, τον αργιλώδη πηλό και τον αμμώδη πηλό, με τον τελευταίο να επικρατεί κοντά στην περιοχή του Αγ. Δημητρίου, ανατολικά της λεκάνης. Ο άργιλος τείνει να επικρατεί στην δυτική πλευρά της περιοχής μελέτης.



Εικόνα 17 Χάρτης βαθμονόμησης της παραμέτρου υφή εδάφους

R – Ενεργή κατείδυση

Η ενεργή κατείδυση υπολογίστηκε βάσει της ετήσιας βροχόπτωσης και του συντελεστή υδροπερατότητας της λεκάνης Σαριγκιόλ. Ο χάρτης τρωτότητας της ενεργής κατείδυσης προκύπτει σε συσχέτιση και με το χάρτη της υψής εδάφους (S) Οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται ανατολικά της λεκάνης, όπου υφίστανται και πιο διαπερατά πετρώματα (αμμώδης πηλός).



Εικόνα 18 Χάρτης βαθμονόμησης του παράγοντα της ενεργής κατείδυσης

C - Υδραυλική αγωγιμότητα

Η υδραυλική αγωγιμότητα θεωρείται χαμηλή στη συγκεκριμένη περιοχή με τις τιμές της να κυμαίνονται από το 10^{-7} έως το 10^{-8} .m/s

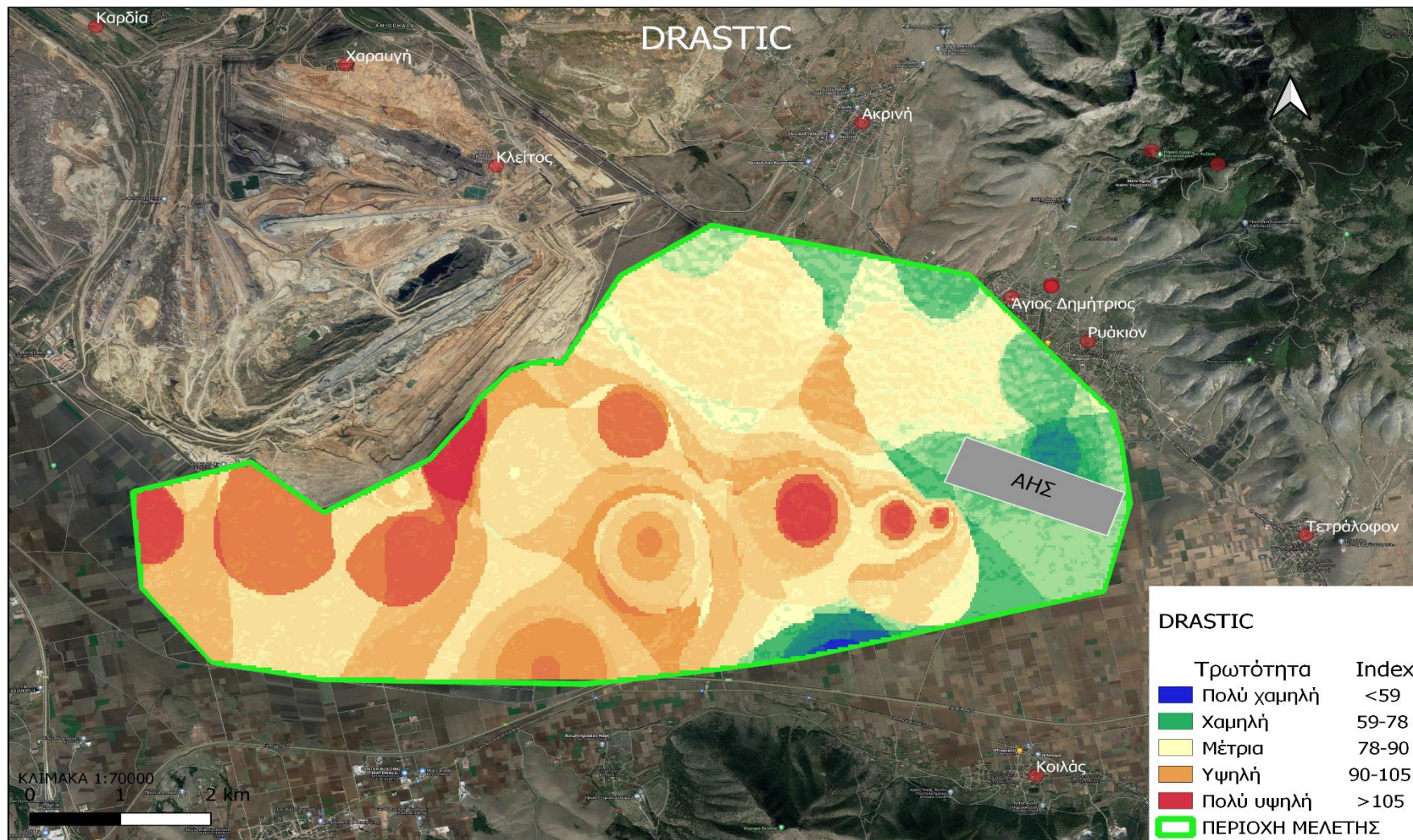


Εικόνα 19 Χάρτης βαθμονόμησης του παράγοντα της υδραυλικής αγωγιμότητας

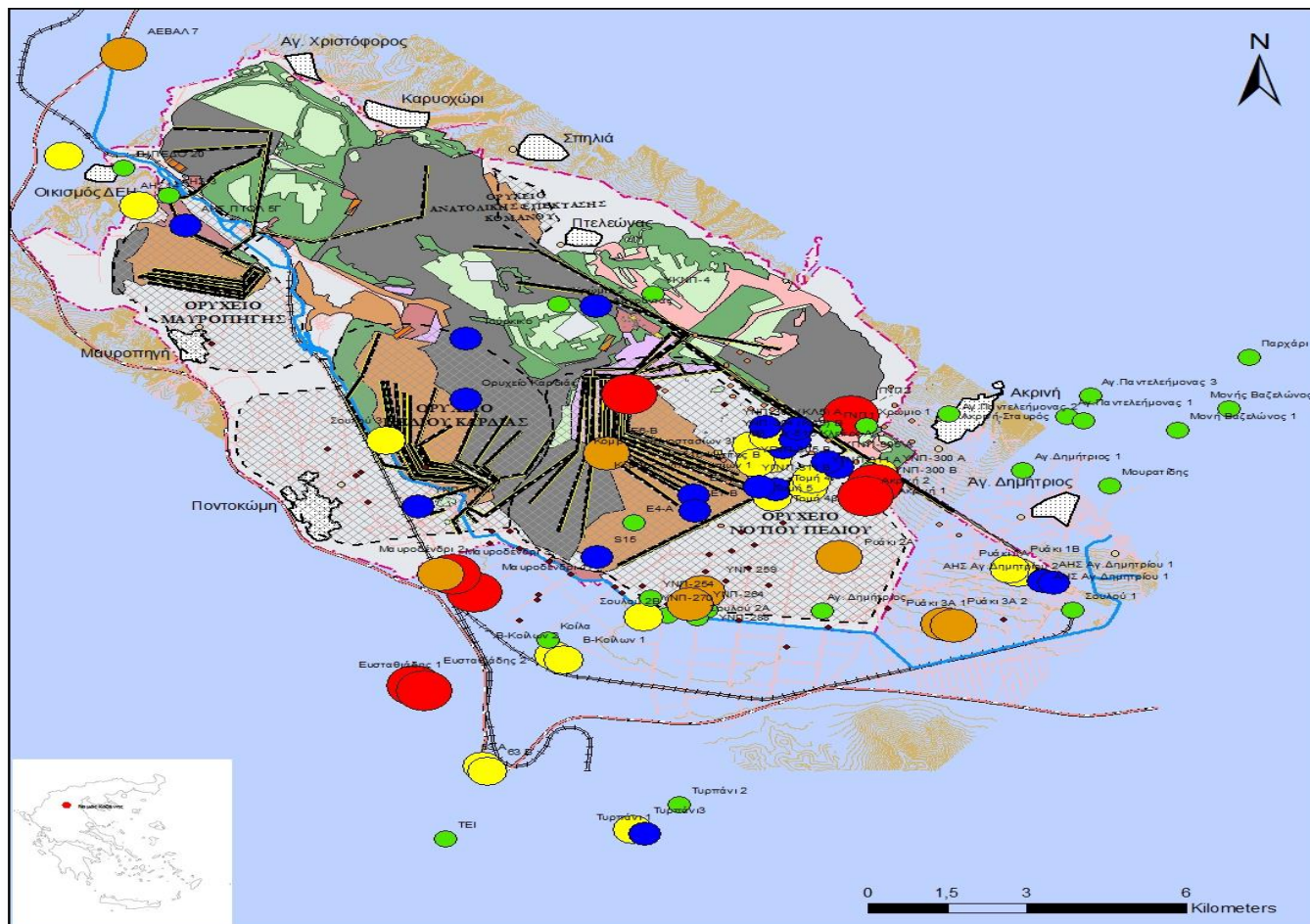
Χάρτης τρωτότητας DRASTIC

Η τρωτότητα και οι δείκτες της υπολογίστηκαν μέσω του εργαλείου του ArcMap, "Weighted Sum", όπου κάθε παράμετρος αξιολογείται με διαφορετική τιμή βαρύτητας. Η κατάταξη τρωτότητας, όπως παρουσιάζεται στον τελικό χάρτη (εικόνα 20) είναι χωρισμένη σε 5 επίπεδα : πολύ υψηλή , υψηλή, μέτρια, χαμηλή και πολύ χαμηλή. Όσο μεγαλύτερη η τιμή που παρουσιάζεται, τόσο μεγαλύτερη είναι η δυνητική ρύπανση των υπογείων νερών και συνεπώς η τρωτότητα του υδροφορέα. Στη περιοχή μελέτης, οι χαμηλοί δείκτες τρωτότητας ανατολικά και πέριξ του ΑΗΣ, συνδέονται με το μεγάλο βάθος του υδροφόρου, αλλά και με τις χαμηλές τιμές υδροπερατότητας που χαρακτηρίζουν τα στρώματα που απαρτίζουν το έδαφος άνωθεν του. Από την άλλη πλευρά, υψηλοί δείκτες τρωτότητας που παρουσιάζονται κεντρικά και δυτικά της λεκάνης, συνδέονται με το χαμηλό βάθος των υπόγειων υδροφορέων και μικρού πάχους ακόρεστη ζώνη. Αξίζει να επισημανθεί ωστόσο, πως ότι οι τιμές που υποδεικνύουν περιοχή χαμηλού δυναμικού ρύπανσης, δεν σηματοδοτούν αυτομάτως την καθαρότητα των υπόγειων νερών, αλλά αποτελούν δείκτη μεγαλύτερης ανοχής σε ρύπανση, συγκριτικά με τις περιοχές που έχουν υψηλές τιμές του δείκτη DRASTIC.

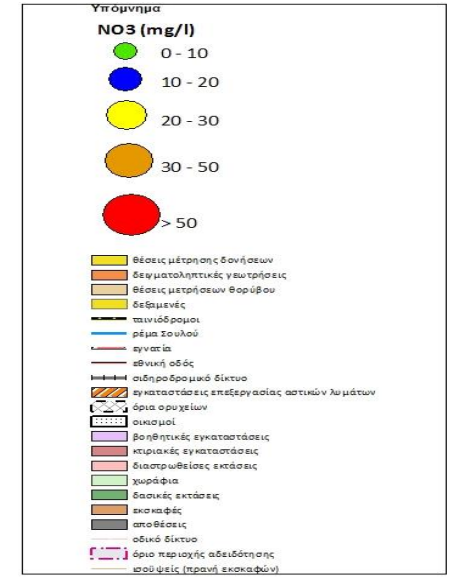
Επίσης, όπως παρουσιάζεται στην έρευνα που πραγματοποιήθηκε από την Περράκη κ.ά. (2016) (εικόνα 21) υφίσταται επαλήθευση του αποτελέσματος του μοντέλου, καθώς παρατηρείται υψηλή νιτρορύπανση στα σημεία που το μοντέλο παρουσίασε ως πιο ευάλωτα.



Εικόνα 20 Χάρτης DRASTIC



Χωρική κατανομή νιτρικών ιόντων στα υπόγεια και επιφανειακά νερά, λεκάνη Σαριγκιόλ



Ερευνητικό Έργο Ε.Μ.Π. (2016)

“Ορυκτολογική-ορυκτοχημική, πετρολογική και γεωχημική συσχέτιση της παρουσίας βαρέων μετάλλων, με έμφαση στο χρώμιο, στους γεωλογικούς σχηματισμούς (υπερβασικά πετρώματα, λιγνίτες, ενδιάμεσα στεφρα) και στα προϊόντα καύσης του λιγνίτη (στάσιμη τέφρα), με την ποιότητα των υπόγειων και επιφανειακών νερών στα λιγνιτικά πεδία της λεκάνης Σαριγκιόλ”

Επιστημονική Υπεύθυνη
 Δρ. Μ. Περράκη, Επικ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Σύνθεση-Αξιολόγηση: Μ.Περράκη, Ε. Βασιλείου
Σχεδίαση: Ε. Βασιλείου, Δρ. Μηχανικός Μεταλλείων

Εικόνα 21 Χωρική κατανομή νιτρικών ιόντων στα υπόγεια και επιφανειακά νερά στη λεκάνη Σαριγκιόλ (Περράκη κ.ά., 2016)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η λεκάνη της Σαριγκιόλ, που αποτέλεσε και την περιοχή μελέτης της παρούσας έρευνας, είναι μια περιοχή εκτάσεως 60 περίπου km² με πετρώματα χαμηλού συντελεστή υδροπερατότητας. Γενικά, χαρακτηρίζεται ως πεδινή περιοχή, με ήπιες κλίσεις και μεσογειακό κλίμα. Η αξιολόγηση της περιοχής έγινε με την εφαρμογή της μεθόδου DRASTIC, η οποία αποτελεί κύριο εργαλείο που εφαρμόζεται διεθνώς και έχει σημαντικά πλεονεκτήματα, την δυνατότητα εφαρμογής της σε διάφορες περιοχές, τα σχετικά ακριβή αποτελέσματα για περιοχές των οποίων η δομή ποικίλει, ενώ βασικές συνιστώσες της είναι οι υδρογεωλογικές παράμετροι.

Λαμβάνοντας υπόψιν δεδομένα προηγούμενων ερευνών, βιβλιογραφίας αλλά και εργαστηριακών πειραμάτων, συγκεντρωθήκαν όλες οι απαραίτητες πληροφορίες που απαιτούνταν για τις 7 κύριες παραμέτρους του μοντέλου. Έπειτα, έγινε εφαρμογή της μεθόδου DRASTIC στη λεκάνη Σαριγκιόλ με αποτέλεσμα τη δημιουργία χάρτη τρωτότητας του υπόγειου νερού της λεκάνης, με τις υψηλότερες τιμές τρωτότητας να κάνουν την εμφάνιση σε περιοχές με χαμηλό βάθος υδροφόρου και μικρή ακόρεστη ζώνη. Ως πλέον ευάλωτα προς τη ρύπανση, βρέθηκαν τα σημεία που χωροθετούνται κεντρικά και δυτικά της λεκάνης. Οι χαμηλότερες τιμές τρωτότητας καταγράφονται ανατολικά της περιοχής μελέτης και πέριξ του ΑΗΣ, όπου ο υδροφόρος έχει και τα μεγαλύτερα βάθη και από πάνω του υφίστανται στρώματα χαμηλής υδροπερατότητας.

Επίσης, τα αποτελέσματα προηγούμενων ερευνών που απεικονίζουν χάρτες τρωτότητας της περιοχής μελέτης από προηγούμενους ερευνητές (Εικόνα 8), είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης. Πιο συγκεκριμένα, ο χάρτης τρωτότητας που προέκυψε στην παρούσα εργασία παρουσιάζει ως το πλέον ευάλωτο κομμάτι ως προς πιθανή ρύπανση, εκείνο που ανήκει στο κεντρικό κομμάτι της λεκάνης, όπου και παρατηρείται το χαμηλότερο βάθος στάθμης του υπόγειου υδροφορέα. Ωστόσο, δυτικά της λεκάνης τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας διαφοροποιούνται σε σχέση με του Vouduouris (2009). Οι υψηλές τιμές τρωτότητας που δόθηκαν δυτικά της λεκάνης οφείλονται στο μικρό βάθος του υδροφορέα στη συγκεκριμένη υποπεριοχή. Η παρούσα διαφοροποίηση οφείλεται σε ποικίλους παράγοντες, όπως ο διαφορετικός χρόνος λήψης μετρήσεων στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, σε διαφορετικές κλάσεις και βάρη που χρησιμοποιήθηκαν, διαφορετική βαθμονόμηση κ.ά.

Η περιοχή μελέτης, λόγω των ανθρώπινων πιέσεων που δέχεται και της ιδιαίτερης σύστασης των πετρωμάτων της έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας διάφορων μελετητών, οι οποίοι έχουν καταλήξει πως η λεκάνη της Σαριγκιόλ είναι ένα ήδη βεβαρυμμένο σύστημα το οποίο χρήζει προστασίας και εφαρμογής ορθών περιβαλλοντικών πρακτικών. Η παρουσία νιτρικών ρύπων σε υψηλές συγκεντρώσεις αποτελεί ένδειξη επιδείνωσης της

ποιότητας των νερών στη λεκάνη, με βασικό ιθύνων την υπέρμετρη χρήση λιπασμάτων και εδαφοβελτιωτικών. Υφίστανται μετρήσεις, στα πλαίσια έρευνας που πραγματοποιήθηκε από τη Vasileiou et al. (2019), που υποδεικνύουν νιτρορύπανση άνω των επιτρεπτών ορίων. Σε ορισμένα αρδευτικά πηγάδια οι τιμές των νιτρικών ιόντων που ανιχνεύθηκαν, προσεγγίζουν τιμές της τάξεως του 140 mg/L. Ορισμένες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν επίσης στο πλαίσιο της ίδιας έρευνας, έδειξαν τιμές του φωσφόρου σε δείγματα υπόγειου νερού της περιοχής Σαριγκιόλ που προσεγγίζουν τα 150 µg/L. Πηγή του φωσφόρου αποτελούν κατά κύριο λόγο λιπάσματα και σε μικρότερο βαθμό προϊόντα αποσύνθεσης φυτικών οργανισμών και ζωικά απόβλητα. (Vasileiou et. al., 2019)

Επίσης, όπως παρουσιάζεται στην έρευνα που πραγματοποιήθηκε από την Περράκη κ.ά. (2016) (εικόνα 21), η λεκάνη της Σαριγκιόλ αποτελεί ένα σύστημα βεβαρυμμένο με νιτρικούς ρύπους. Οι μετρήσεις που υποδεικνύουν το ποσοστό νιτρορύπανσης στη λεκάνη Σαριγκιόλ, επαληθεύουν την εκτίμηση της τρωτότητας του υδροφόρου βάσει του μοντέλου DRASTIC που εφαρμόστηκε, καθώς υψηλές τιμές νιτρικών ιόντων παρουσιάζονται στα σημεία που το μοντέλο παρουσίασε ως πιο ευάλωτα και επιδεκτικά στη νιτρορύπανση.

Λύσεις οι οποίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν, προκειμένου να διασφαλιστεί η ποιότητα των υπογείων νερών της περιοχής μελέτης είναι η εφαρμογή γεωργικών μεθόδων και πρακτικών που υπακούν στην ορθολογική χρήση τόσο των υδατικών αποθεμάτων, όσο και των λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων κι εν γένει ότι δύναται να αποτελεί πηγή γεωργικών ρύπων. Προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος αυτός, πρέπει να γίνει η κατάλληλη εκπαίδευση στους παραγωγούς - γεωργούς, για να αποκτήσουν επίγνωση των επιπτώσεων των δραστηριοτήτων τους στο περιβάλλον, καθώς επίσης και την κατάσταση όπου θα κληθούν μελλοντικά να αντιμετωπίσουν αν δεν αντιστραφεί η υφιστάμενη κατάσταση. Η χρήση εκάστοτε λιπάσματος, πρέπει να γίνει λαμβάνοντας υπόψιν τις ανάγκες της καλλιέργειας, τα χαρακτηριστικά του λιπάσματος, του εδάφους εφαρμογής αλλά και του είδους του φυτού που θα το δεχθεί.

Η βελτίωση του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης θα μπορούσε να επιτευχθεί με την παρακολούθηση των μετεωρολογικών δεδομένων των διαθέσιμων σταθμών προσαρμόζοντας την άρδευση αναλόγως με τις πραγματικές ανάγκες και τις εκάστοτε καιρικές συνθήκες. Επίσης, συνίσταται η υιοθέτηση τεχνικών που θα μπορούσαν να εξοικονομήσουν νερό καθώς και την αποδοτικότητα των γεωργικών καλλιεργειών, όπως: χρήση προσομοιώσεων πριν την εφαρμογή οποιασδήποτε καλλιέργειας, αποφυγή αρδεύσεως μεσημβρινές ώρες, διατήρηση εξοπλισμού άρδευσης σε καλή κατάσταση, διάφορες τεχνικές εμπλουτισμού (αξιοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων για σκοπούς άρδευσης), επιλογή κατάλληλων ποικιλιών για καλλιέργεια, προσαρμοσμένων στο κλίμα της περιοχής.

Οι χάρτες τρωτότητας θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να αξιολογηθεί ο κίνδυνος υφιστάμενης ρύπανσης και συνεπώς να υπάρξει επικέντρωση σε συγκεκριμένα σημεία της περιοχής, για να επιτευχθεί η διατήρηση της ποιότητας των νερών της λεκάνης, αλλά και η σταδιακή εξυγίανση τους. Γενικώς, οι χάρτες τρωτότητας αποτελούν ένα χρήσιμο και εύχρηστο εργαλείο που μας αποκαλύπτει χρήσιμες πληροφορίες αναφορικά με την εκάστοτε περιοχή και μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο οδηγό, ο οποίος δύναται να συνεισφέρει στη σωστή διαχείριση των υδατικών πόρων. Η προστασία των υπόγειων νερών μπορεί να διασφαλιστεί με ποικίλους τρόπους που αναφέρθηκαν προηγουμένως και οι χάρτες τρωτότητας ως εργαλείο εντοπισμού ζωνών υψηλής επιδεκτικότητας, μπορούν να συνεισφέρουν σε αυτό, όταν χρησιμοποιούνται συνδυαστικά. Η αποδοτικότητα και η μεγαλύτερη ακρίβεια των χαρτών τρωτότητας μπορεί να βελτιωθεί μέσω της συσχέτισης βασικών παραμέτρων όπως αυτών της χρήσης γης, υδρογεωλογικών συνθηκών και της ποιότητας νερού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Βασιλείου Ε., Υδρογεωλογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής Ποταμιάς Ελασσόνας. Επιπτώσεις από τη μελλοντική εκμετάλλευση των λιγνιτικών κοιτασμάτων στο υδατικό καθεστώς, Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2011
2. Βουδούρης Κ., Υδρογεωλογία περιβάλλοντος. Υπόγεια νερά και περιβάλλον, Εκδόσεις Τζιόλα, Αθήνα, 2009
3. ΕΛΙΜΕΙΑ, Ερευνητικό Πρόγραμμα “ ΕΛΙΜΕΙΑ-Ανάπτυξη Συστήματος Διαχείρισης Υδατικών Πόρων και Μεθόδων Τεχνητού Εμπλουτισμού σε περιοχές λιγνιτικών εκμεταλλεύσεων – Πιλοτική εφαρμογή στο Νότιο Πεδίο Πτολεμαΐδας”, Συνεργαζόμενοι φορείς ΔΕΗ., ΕΜΠ., ΚΤΕΣΚ, ΔΕΥΑ. Κοζάνης, ΙΝΤΕΛΕΚ ΑΕ, χρηματοδότηση από ΓΓΕΤ, 1998
4. Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Δήμου Κοζάνης Περιόδου 2011-2014, Α' Φάση: στρατηγικός σχεδιασμός (υφιστάμενη κατάσταση-στρατηγική δήμου Κοζάνης), 2011
5. Ζαμπετάκης Γ., Θεοχάρης Στ., Καραντώνης Χ., Κιρκιλλής Χρ., Παντελόγλου Α., Στασινός Σ., Νομοθεσία τροφίμων και διατροφικοί κίνδυνοι, Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης, 2011
6. ΙΓΜΕ, Ερευνητικό πρόγραμμα : Χημικές αναλύσεις υπογείων νερών του Υδατικού Διαμερίσματος Δυτ. Μακεδονίας, Καταγραφή και αποτίμηση των υδρογεωλογικών χαρακτήρων των υπόγειων νερών και των υδροφόρων συστημάτων της χώρας, 2010
7. Καλλέργης Γ., Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία, Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, Δεύτερη Έκδοση, Τόμος Β, Αθήνα, 2000
8. Καλλία Α., Περιβάλλον και δίκαιο, Νομική Βιβλιοθήκη, Τεύχος 3, Αθήνα, 2020
9. Καλλιώρας Α., Ποιότητα Υπογείων Νερών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2016
10. Καντηράνης Ν., Μήτρακας Μ., Φιλιππίδης Α., Βαργεμέζης Γ., Ζουμπούλης Α., Τσούρλος Π., Φίκος Η., Βαμβακάρης Δ., Καραγιάννη Ε., Παραδεισοπούλου Π., Καζάκης Ν., Βογιατζής Δ., Καπράρα Ε., Καλαϊτζίδου Κ., Τσερμεντσέλη Σ., Συμεωνίδης Κ., Δρακούλης Α., Ιωαννίδης Μ., Κόλλιας Π., Γεωργίου Ι., Εκτίμηση της προέλευσης του Cr(VI) στο υπόγειο νερό ύδρευσης των Δημοτικών Διαμερισμάτων Ακρινής - Αγίου Δημητρίου - Ρυακίου του Δήμου Κοζάνης, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, Τμήμα Χημικών Μηχανικών και Τμήμα Χημείας, 2011
11. Κουμαντάκης Ι., Αξιολόγηση και διαχείριση υδατικών πόρων στη λεκάνη Σαριγκιολ της Κοζάνης, Τεχνική έκθεση, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999
12. Λουλούδης Γ., Υδρογεωλογικές συνθήκες Νοτίου λιγνιτοφόρου πεδίου Πτολεμαΐδας. Προβλήματα υπογείων νερών και αντιμετώπιση τους

- κατά την εκμετάλλευση. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1991
13. Μαγνήσαλης Α., Γεωχημική και ορυκτολογική μελέτη και χαρακτηρισμός μαγνητικών ιδιοτήτων αγροχημικών προϊόντων. Διερεύνηση πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη χρήση τους σε υπερβασικά εδάφη. Διπλωματική εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2019
 14. Μανδηλαράς Δ., Περιβαλλοντική – Υδρογεωλογική έρευνα στη λεκάνη του Γλαύκου, Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2005
 15. Παπαζώτος Π., Γεωχημικό αποτύπωμα υπερβασικών περιβαλλόντων στην ποιότητα υπογείων νερών, με έμφαση στο χρώμιο και το αρσενικό, Διδακτορική διατριβή, Σχολή Μηχανικών μεταλλείων-μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2020
 16. Παπαθεοδώρου Κ., Βεράνης Ν., Πατσιαρός Π., Τρωτότητα των υπογείων νερών της πεδινής ζώνης του νομού Ημαθίας. Εφαρμογή της τροποποιημένης μεθοδολογίας DRASTIC, Επιστημονικό Άρθρο, Περιοδικό Χωρογραφίες Τόμος 1, 2010
 17. Περράκη Μ., Βασιλείου Ε., Οικονομόπουλος Ι., Σκληρός Β., Παπαζώτος Π., Ερευνητικό πρόγραμμα : Ορυκτολογική - ορυκτοχημική, πετρολογική και γεωχημική συσχέτιση της παρουσίας βαρέων μετάλλων, με έμφαση στο χρώμιο, στους γεωλογικούς σχηματισμούς (υπερβασικά πετρώματα, λιγνίτης, ενδιάμεσα στείρα) και στα προϊόντα καύσης του λιγνίτη (ιπτάμενη τέφρα), με την ποιότητα των υπόγειων και επιφανειακών νερών στα λιγνιτικά πεδία της λεκάνης Σαριγκιόλ, Σχολή μηχανικών μεταλλείων - μεταλλουργών, ΕΜΠ, 2016
 18. Ρίζος Σ., Χαρτογράφηση της τρωτότητας του υπογείου υδατικού συστήματος αργολικού πεδίου με την αξιοποίηση της γεωπληροφορικής, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο πανεπιστήμιο, Αθήνα, 2013
 19. Σούλιος Γ., Γενική Υδρογεωλογία, Ποιότητα υπογείου νερού- Ρύπανση, μόλυνση υπογείου νερού, Θεσσαλονίκη, 2006
 20. Στάμου Α., Υδρογεωλογική μελέτη του προσχωματικού υδροφόρου Σαριγκιόλ ή Νότιο Πεδίο. Έργο Β'ΚΠΣ ΠΕΠ Δυτικής Μακεδονίας. Κοζάνη, 2001
 21. Φερετζάκης Κ., Η ρύπανση των υδάτων: Η φύση του προβλήματος και ο έλεγχος της ρύπανσης, ΤΕΙ Κρήτης, Σχολή Διοίκησης και Οικονομίας, Τμήμα λογιστικής και χρηματοοικονομικής, Ηράκλειο, 2014
 22. Χειλάς – Διαμαντόπουλος Γ.Ν., Βελτιστοποίηση Μεθόδου DRASTIC για την εκτίμηση της τρωτότητας υπόγειων υδροφορέων στην περιοχή Μεσογαίας Αττικής, Μεταπτυχιακή εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2019
 23. Aller L., Bennet, T., Lehr, JH., Petty, RJ., Hackett, G., DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential

- using hydrogeological setting. EPA/600/2-87/035. US Environmental Protection Agency, 163 p., 1987
24. Bachmat Y., Collin M., Mapping to assess groundwater vulnerability to pollution. Proc. And Information No 38. TNO Committee on Hydrogeology Research. Hague.Netherlands, 297-307., 1987
 25. Carreras X., Fraile J., Garrido T., Cardona C., Groundwater vulnerability mapping assessment using overlay and the DRASTIC method in Catalonia. In Experiences from Ground, Coastal and Transitional Water Quality Monitoring, Springer International Publishing, 117-134, 2015
 26. Ersoy A.F., Gultekin F., DRASTIC- based methodology for assessing groundwater vulnerability in the Gumushacikoy and Merzifon Basin (Amasya, Turkey), Earth Sci Res SJJ 17:1. PP.33-40, 2013
 27. Georgakopoulos, A., Chemistry and morphology of fly ash samples from the main lignite Power Stations of Northern Greece. In Proceedings of the 8th International Conference on Environmental Science and Technology, Vol B, Poster Presentations, 2003
 28. Huan H, Wang J, Teng Y Assessment and validation of groundwater vulnerability to nitrate based on a modified DRASTIC model:a case studyin Jilin City of northeast China. Sci Total Environ, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.037>
 29. Khosravi K., Sartaj M., Karimi M., Levison J., A GIS-based groundwater pollution potential using DRASTIC, research article, 2020 modified DRASTIC, and bivariate statistical models
 30. Lathamani R., Janardhana M.R., Mahalingam B., Suresha S., Evaluation of aquifer vulnerability using Drastic model and GIS: a case study of Mysore city, Karnataka, India, Aquatic, 2015
 31. Lobo-Ferreira, J.P., Oliveira, M.M., DRASTIC ground water vulnerability mapping of Portugal. In: Proceedings from the 27th Congress of the International Association for Hydraulic Research, Aug. 10–15, San Francisco, 132–137, 1997
 32. Manasree S., Subodh C.P., Application of DRASTIC and Modified DRASTIC models for modeling groundwater vulnerability of Malda district in West Bengal, Research Article, 2021 <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01176-7>
 33. Neh A.V., Ako A.A., Ayuk A.R., Hosono T., DRASTIC-GIS model for assessing vulnerability to pollution of the phreatic aquiferous formations in Douala–Cameroon. J Afr Earth Sci 102:180–190, 2015 <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2014.11.001>
 34. Panno, S. V., Kelly, W. R., Martinsek, A. T., & Hackley, K. C. Estimating background and threshold nitrate concentrations using probability graphs. Ground Water, 2006
 35. Papazotos P., Vasileiou E., Perraki M., The synergistic role of agricultural activities in groundwater quality in ultramafic environments:

- the case of the Psachna basin, central Euboea, Greece. *Environmental Monitoring and Assessment*. doi:10.1007/s10661-019-7430-3, 2019
36. Saidi S., Bouri S., Ben H., Groundwater vulnerability and risk mapping of the Hajeb-jelma aquifer (Central Tunisia) using a GIS-based DRASTIC model. *Environ Earth Sci* 59:1579–1588, 2010
37. Shrestha R. K., Cooperband L. R., MacGuidwin A. E., (2010). Strategies to Reduce Nitrate Leaching into Groundwater in Potato Grown in Sandy Soils: Case Study from North Central USA. *Am. J. Pot Res.*, 2010, DOI 10.1007/s12230-010-9131-x.
38. Shrestha S., Semkuyu D.J., Pandey V.P., Assessment of groundwater vulnerability and risk to pollution in Kathmandu Valley, Nepal. *Sci Total Environ* 556:23–35, 2016 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.201603.021>
39. Vasileiou E., Dimitrakopoulos D., Papazotos P., Oikonomopoulos I., Stathopoulos N., Skliros V., & Perraki M. Do lignite combustion products affect the groundwater quality near Power Plants of the Western Macedonia Lignite Center, 14th International symposium of continuous surface mining, Thessaloniki, Greece, September 23-26, 2018
40. Voudouris K.S. Assessing groundwater pollution risk in Sarigkiol basin, NW Greece, Lab. of Engineering Geology and Hydrogeology, Dept. of Geology, Aristotle University, Egnatia str. 54 124 Thessaloniki, Greece, 2009
41. Yin L., Zhang E., Wang X., Wenninger J., Dong J., Guo L., Huang J., A GIS-based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in the Ordos Plateau, China. *Environ Earth Sci* 69:171–185, 2013

INTEPNET SITES

1. <http://www.unece.org> [3/2021]
2. <https://www.dei.gr> [4/2021]
3. <https://ec.europa.eu> [9/2021]
4. <http://wfdgis.ypeka.gr/> [9/2021]

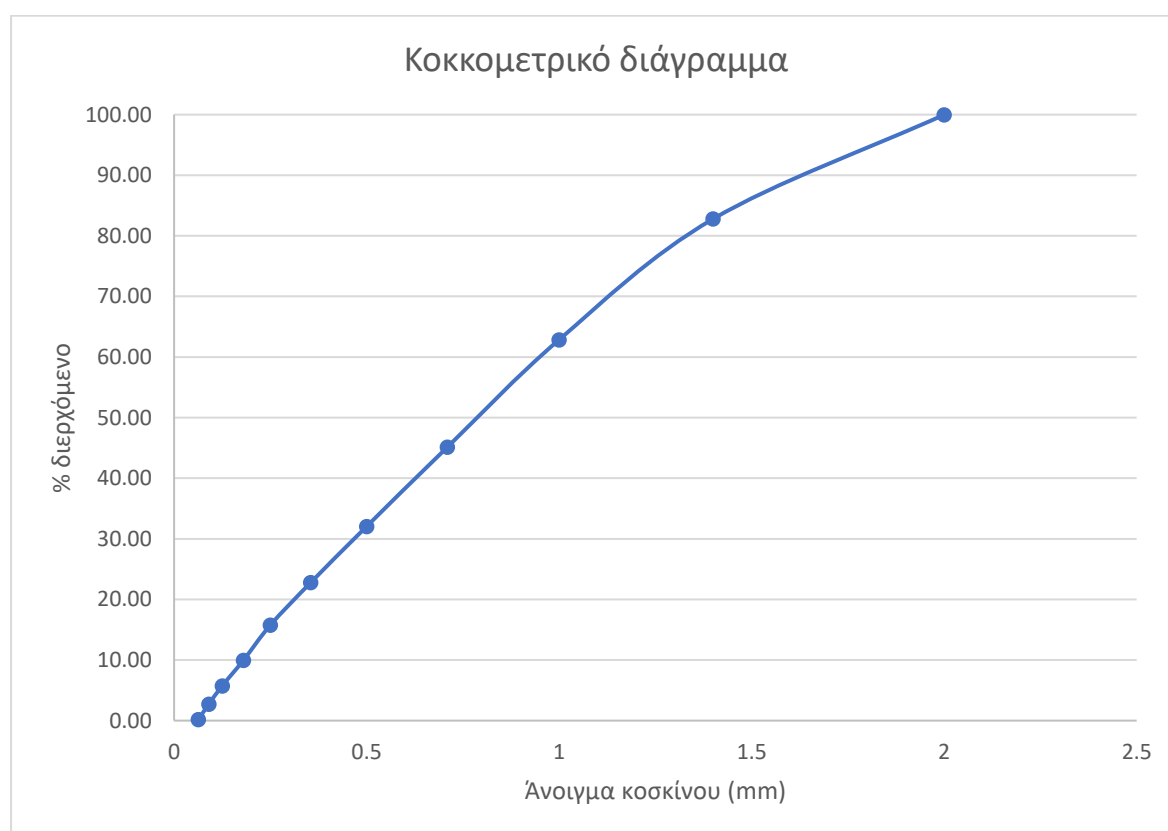
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας 19 Μετρήσεις μάζας εδαφικών δειγμάτων

Δείγμα	Βάρος (gr 2 mm)	1.4 mm	1 mm	710 μm	500 μm	355 μm	250 μm	180 μm	125 μm	90 μm	63 μm	ταψάκι	άθροισμα	
S8	300	0.0626	47.2872	54.8479	48.7256	36.0635	25.4388	19.345	15.9762	11.5857	8.349	6.978	0.4854	275.1449
S56	300	105.2462	51.4056	41.9392	35.0795	24.271	13.7584	8.6527	6.2136	4.4841	3.274	2.1741	2.6117	299.1101
S53	300	80.5987	35.3349	29.7403	29.6812	24.4901	17.4463	15.7707	12.9644	11.9637	11.7199	9.8227	5.0046	284.5375
S52	300	100.216	41.3621	37.0255	36.3877	26.2338	16.762	11.5305	9.0317	7.3685	5.5939	4.7185	0.3646	296.5948
S55	300	72.7813	37.566	37.1492	37.5718	30.5239	21.3776	15.1112	11.6199	11.4358	10.2513	6.3086	2.3837	294.0803
S57	300	76.9578	39.65	33.2387	30.1473	23.2776	15.8327	11.7385	10.0183	8.9527	7.4112	6.1158	5.4915	268.8321
S58	300	62.2452	34.1339	34.7607	37.9193	31.9689	23.0548	17.5498	15.1875	13.7183	12.5719	10.6045	2.2804	295.9952
S51	300	82.9125	40.5757	37.3587	39.2014	31.2896	21.3033	15.4935	12.2827	9.2101	7.19	5.528	0.2953	302.6408
S54	300	53.8252	24.3632	29.8194	39.8999	36.8398	27.0647	18.903	16.085	14.0673	12.6504	10.8981	0.8572	285.2732
S7	300	88.4905	45.774	27.5685	27.5658	1.0972	8.4826	5.7821	4.9845	4.32	3.6182	2.5419	0.53878	220.7641
S5	250	90.876	25.601	18.566	28.9206	0.07	9.3807	6.891	5.8629	5.7724	5.0946	4.967	23.98	225.9822
S4	300	120.05	34.484	24.4701	36.778	16.2742	10.275	8.8225	7.4103	6.4162	5.9659	4.5837	0.4394	275.9693
S6	300	98.474	39.8689	31.1497	32.3368	13.6067	14.1605	10.0813	8.33	8.8205	8.5106	4.9474	6.0493	276.3357
S13	300	118.2725	38.8786	28.041	23.9511	18.0241	13.1329	9.9079	8.2005	7.3905	6.376	4.9945	1.0276	278.1972
S11	300	112.3124	34.3191	27.9462	24.8332	20.0209	14.5174	11.1909	9.8704	8.425	8.0766	7.3907	12.2291	291.1319
S14	300	160	32.0291	23.2818	19.9948	15.1732	10.6698	8.3006	7.1394	5.7062	5.3105	5.122	7.5639	300.2913
S3	300	240	13.1029	8.3077	6.7281	4.9194	3.3994	2.5362	2.2177	1.8166	1.6257	1.503	4.5386	290.6953
S2	300	220	24.6358	15.6652	12.9713	9.007	5.8104	4.1648	3.4622	2.8295	2.6594	2.1231	0.3979	303.7266
S10	300	175	27.4062	19.328	16.0595	11.6977	8.1594	6.3936	6.0184	5.5842	5.5842	5.0584	13.9731	300.2627
W12	300	195	28.4182	18.7023	15.8987	11.5838	8.2127	6.3643	5.5617	5.4575	5.4575	3.7423	2.8839	307.2829
ΛΑΙΣΟΣ	300	170	29.8262	24.173	23.656	20.3205	14.3219	10.0277	8.0265	6.3069	6.3069	3.6077	4.753	321.3263
S12	300	210	24.5737	19.1152	16.0565	11.9229	7.6151	5.096	3.9256	2.9434	2.4711	1.9631	2.8192	308.5018
21, 54, 813	300	240	17.2553	10.2569	8.1277	5.4961	3.462	2.383	1.9354	1.4944	1.2354	1.2005	1.7954	294.6421

Πίνακας 20 Μετρήσεις δείγματος S8

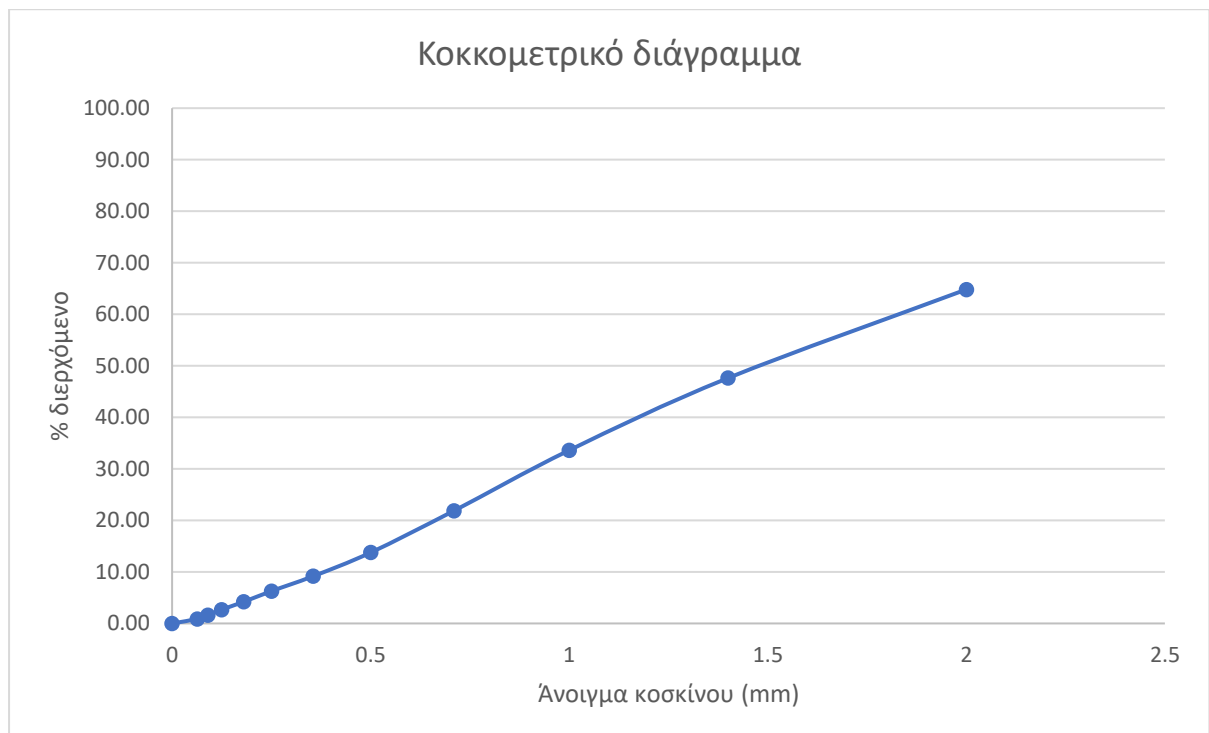
Μέγεθος κοσκίνου mm	Βάρος επί κοσκίνου (gr)	Βάρος επί κοσκίνου (%)	Βάρος αθροιστικά διερχόμενο (%)	Βάρος αθροιστικά παραμένων (%)	Διερχόμενη μάζα (gr)
2	0.0626	0.02	99.98	0.02	275.0823
1.4	47.2872	17.19	82.79	17.21	227.7951
1	54.8479	19.93	62.86	37.14	172.9472
0.71	48.7256	17.71	45.15	54.85	124.2216
0.5	36.0635	13.11	32.04	67.96	88.1581
0.355	25.4388	9.25	22.80	77.20	62.7193
0.25	19.345	7.03	15.76	84.24	43.3743
0.18	15.9762	5.81	9.96	90.04	27.3981
0.125	11.5857	4.21	5.75	94.25	15.8124
0.09	8.349	3.03	2.71	97.29	7.4634
0.063	6.978	2.54	0.18	99.82	0.4854
0	0.4854	0.18	0.00	100.00	5.00155E-14



Διάγραμμα 1 Κοκκομετρικό διάγραμμα δείγματος S8

Πίνακας 21 Μετρήσεις δείγματος SS6

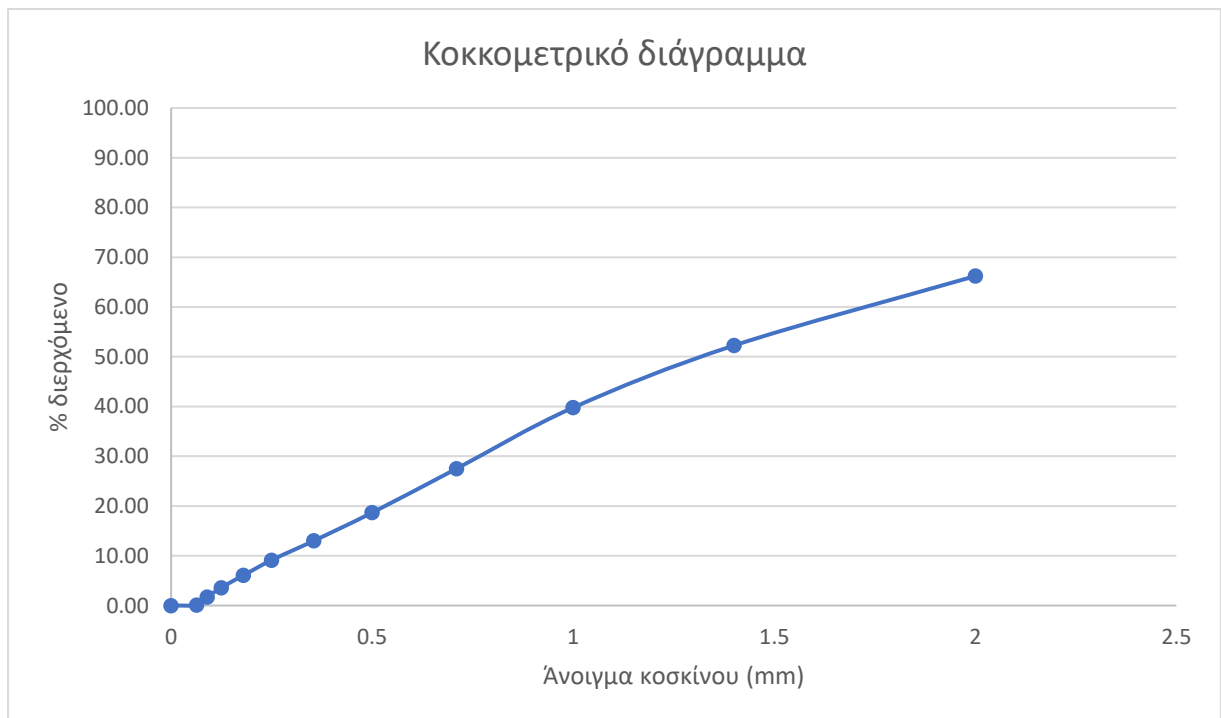
Μέγεθος κοσκίνου (mm)	Βάρος επί κοσκίνου (gr)	Βάρος επί κοσκίνου (%)	Βάρος αθροιστικά διερχόμενο (%)	Βάρος αθροιστικά παραμένων (%)	Διερχόμενη μάζα (gr)
2	105.2462	35.19	64.81	35.18644138	193.8639
1.4	51.4056	17.19	47.63	52.37262132	142.4583
1	41.9392	14.02	33.61	66.39394658	100.5191
0.71	35.0795	11.73	21.88	78.12190227	65.4396
0.5	24.271	8.11	13.76	86.23630563	41.1686
0.355	13.7584	4.60	9.16	90.83608344	27.4102
0.25	8.6527	2.89	6.27	93.72889782	18.7575
0.18	6.2136	2.08	4.19	95.80625997	12.5439
0.125	4.4841	1.50	2.69	97.30540694	8.0598
0.09	3.274	1.09	1.60	98.39998716	4.7858
0.063	2.1741	0.73	0.87	99.12684326	2.6117
0	2.6117	0.87	0.00	100	1.15463E-14



Διάγραμμα 2 Κοκκομετρικό διάγραμμα δείγματος SS6

Πίνακας 22 Μετρήσεις δείγματος SS2

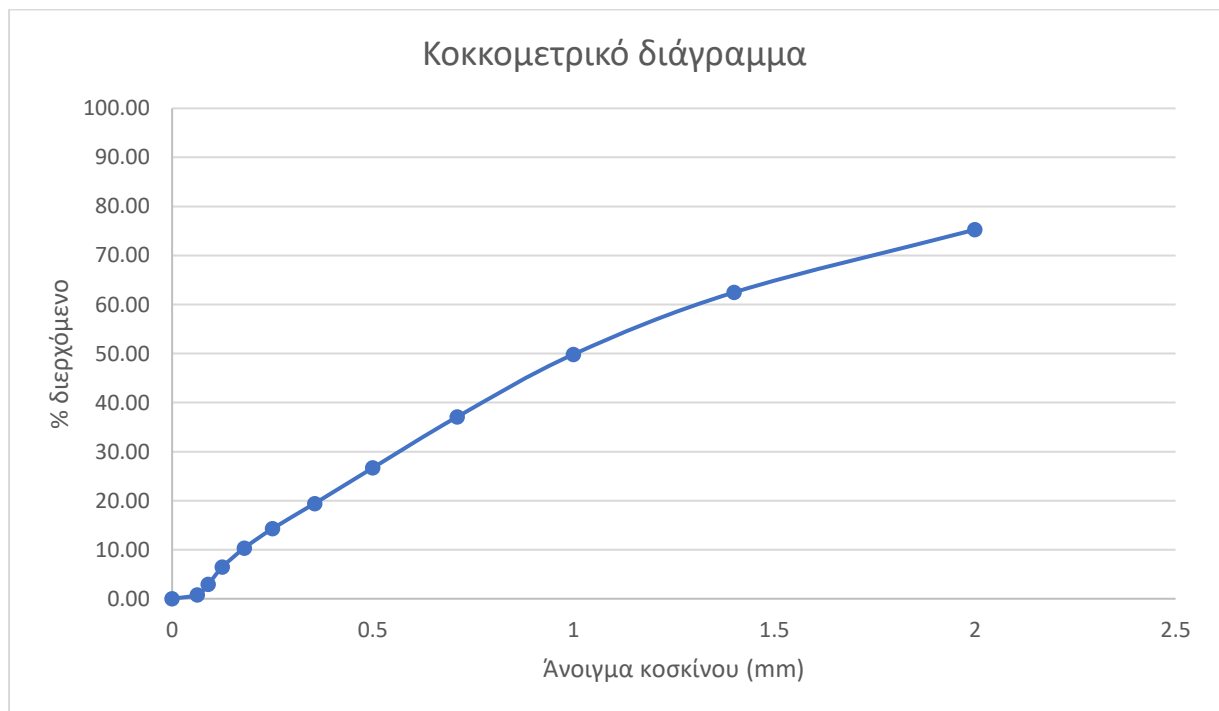
Μέγεθος κοσκίνου (mm)	Βάρος επί κοσκίνου (gr)	Βάρος επί κοσκίνου (%)	Βάρος αθροιστικά διερχόμενο (%)	Βάρος αθροιστικά παραμένων (%)	Διερχόμενη μάζα (gr)
2	100.216	33.79	66.21	33.79	196.3788
1.4	41.3621	13.95	52.27	47.73	155.0167
1	37.0255	12.48	39.78	60.22	117.9912
0.71	36.3877	12.27	27.51	72.49	81.6035
0.5	26.2338	8.84	18.67	81.33	55.3697
0.355	16.762	5.65	13.02	86.98	38.6077
0.25	11.5305	3.89	9.13	90.87	27.0772
0.18	9.0317	3.05	6.08	93.92	18.0455
0.125	7.3685	2.48	3.60	96.40	10.677
0.09	5.5939	1.89	1.71	98.29	5.0831
0.063	4.7185	1.59	0.12	99.88	0.3646
0	0.3646	0.12	0.00	100.00	2.15938E-14



Διάγραμμα 3 Κοκκομετρικό διάγραμμα δείγματος SS2

Πίνακας 23 Μετρήσεις δείγματος SS5

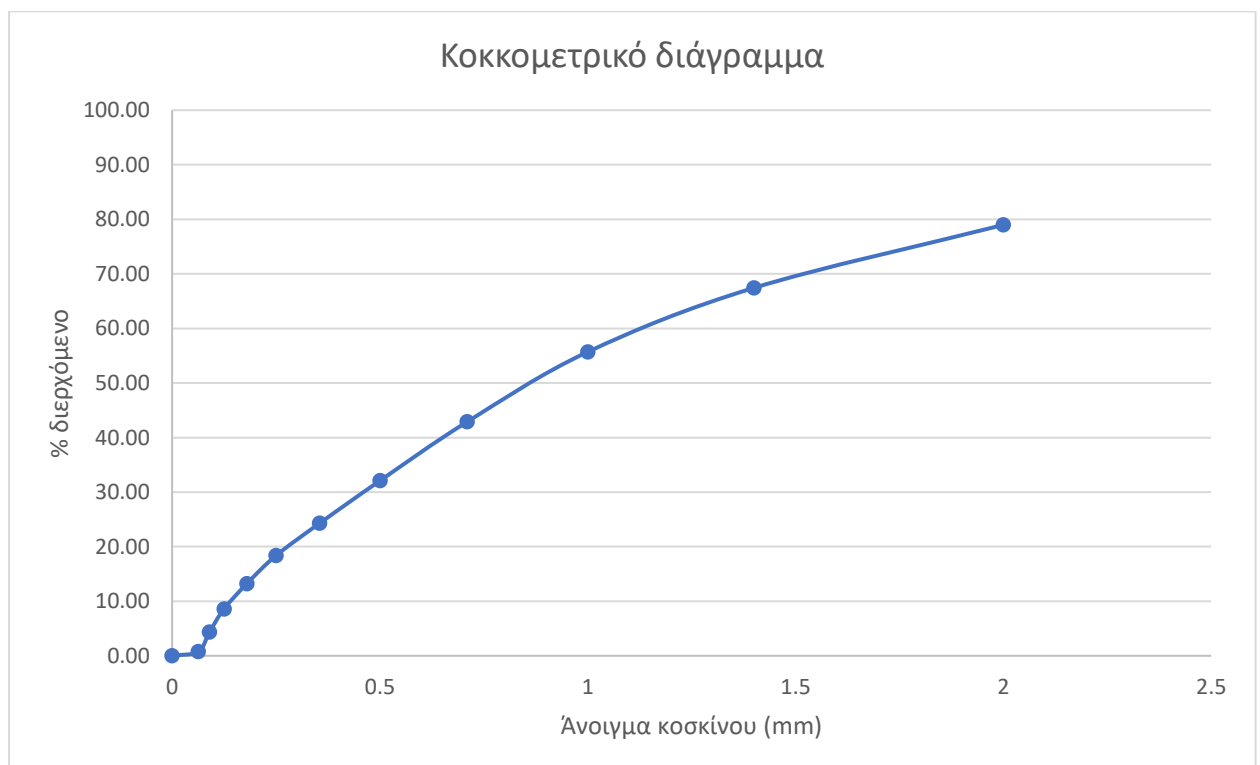
Μέγεθος κοσκίνου (mm)	Βάρος επί κοσκίνου (gr)	Βάρος επί κοσκίνου (%)	Βάρος αθροιστικά διερχόμενο (%)	Βάρος αθροιστικά παραμένων (%)	Διερχόμενη μάζα (gr)
2	72.7813	24.75	75.25	24.75	221.299
1.4	37.566	12.77	62.48	37.52	183.733
1	37.1492	12.63	49.84	50.16	146.5838
0.71	37.5718	12.78	37.07	62.93	109.012
0.5	30.5239	10.38	26.69	73.31	78.4881
0.355	21.3776	7.27	19.42	80.58	57.1105
0.25	15.1112	5.14	14.28	85.72	41.9993
0.18	11.6199	3.95	10.33	89.67	30.3794
0.125	11.4358	3.89	6.44	93.56	18.9436
0.09	10.2513	3.49	2.96	97.04	8.6923
0.063	6.3086	2.15	0.81	99.19	2.3837
0	2.3837	0.81	0.00	100.00	3.10862E-14



Διάγραμμα 4 Κοκκομετρικό διάγραμμα δείγματος SS5

Πίνακας 24 Μετρήσεις δείγματος SS8

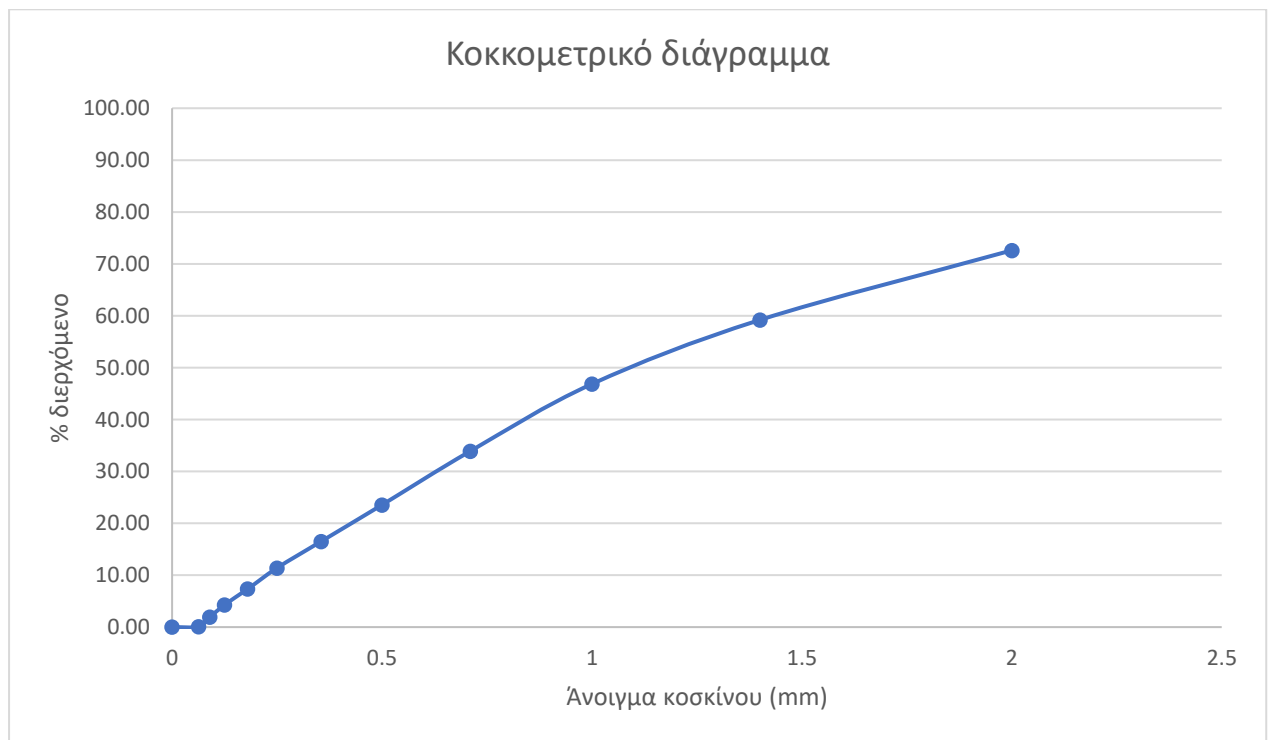
Μέγεθος κοσκίνου (mm)	Βάρος επί κοσκίνου (gr)	Βάρος επί κοσκίνου (%)	Βάρος αθροιστικά διερχόμενο (%)	Βάρος αθροιστικά παραμένων (%)	Διερχόμενη μάζα (gr)
2	62.2452	21.03	78.97	21.03	233.75
1.4	34.1339	11.53	67.44	32.56	199.6161
1	34.7607	11.74	55.70	44.30	164.8554
0.71	37.9193	12.81	42.88	57.12	126.9361
0.5	31.9689	10.80	32.08	67.92	94.9672
0.355	23.0548	7.79	24.30	75.70	71.9124
0.25	17.5498	5.93	18.37	81.63	54.3626
0.18	15.1875	5.13	13.24	86.76	39.1751
0.125	13.7183	4.63	8.60	91.40	25.4568
0.09	12.5719	4.25	4.35	95.65	12.8849
0.063	10.6045	3.58	0.77	99.23	2.2804
0	2.2804	0.77	0.00	100.00	-8.34888E-14



Διάγραμμα 5 Κοκκομετρικό διάγραμμα δείγματος SS8

Πίνακας 25 Μετρήσεις δείγματος SS1

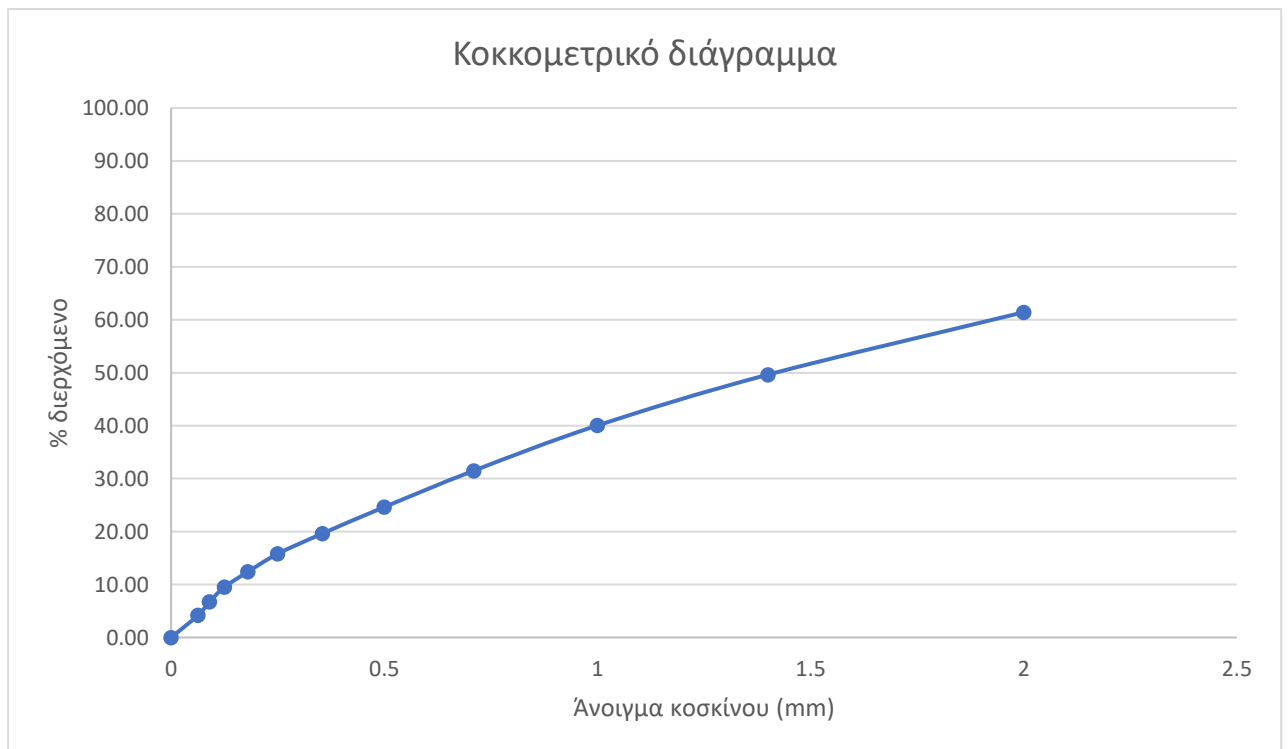
Μέγεθος κοσκίνου (mm)	Βάρος επί κοσκίνου (gr)	Βάρος επί κοσκίνου (%)	Βάρος αθροιστικά διερχόμενο (%)	Βάρος αθροιστικά παραμένων (%)	Διερχόμενη μάζα (gr)
2	82.9125	27.40	72.60	27.40	219.7283
1.4	40.5757	13.41	59.20	40.80	179.1526
1	37.3587	12.34	46.85	53.15	141.7939
0.71	39.2014	12.95	33.90	66.10	102.5925
0.5	31.2896	10.34	23.56	76.44	71.3029
0.355	21.3033	7.04	16.52	83.48	49.9996
0.25	15.4935	5.12	11.40	88.60	34.5061
0.18	12.2827	4.06	7.34	92.66	22.2234
0.125	9.2101	3.04	4.30	95.70	13.0133
0.09	7.19	2.38	1.92	98.08	5.8233
0.063	5.528	1.83	0.10	99.90	0.2953
0	0.2953	0.10	0.00	100.00	-2.55351E-15



Διάγραμμα 6 Κοκκομετρικό διάγραμμα δείγματος SS1

Πίνακας 26 Μετρήσεις δείγματος S11

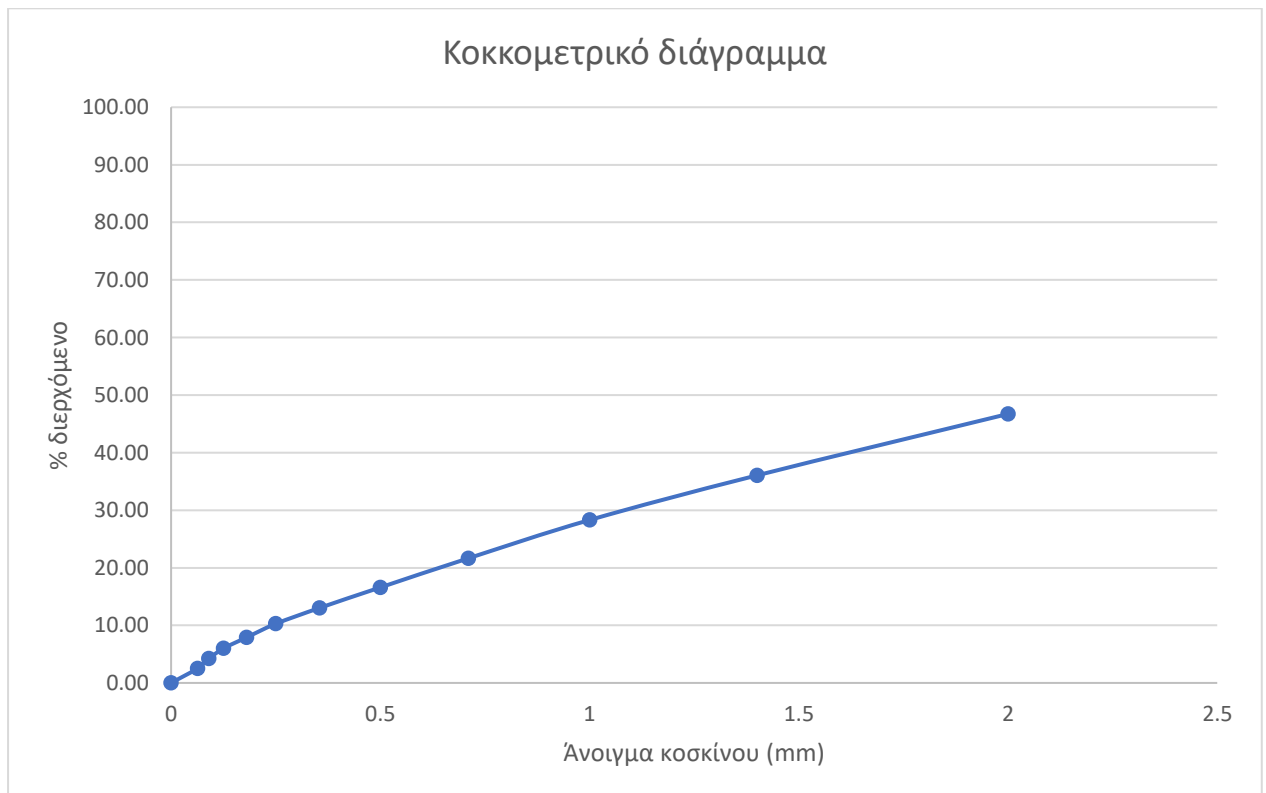
Μέγεθος κοσκίνου (mm)	Βάρος επί κοσκίνου (gr)	Βάρος επί κοσκίνου (%)	Βάρος αθροιστικά διερχόμενο (%)	Βάρος αθροιστικά παραμένων (%)	Διερχόμενη μάζα (gr)
2	112.3124	38.58	61.42	38.58	178.8195
1.4	34.3191	11.79	49.63	50.37	144.5004
1	27.9462	9.60	40.03	59.97	116.5542
0.71	24.8332	8.53	31.50	68.50	91.721
0.5	20.0209	6.88	24.63	75.37	71.7001
0.355	14.5174	4.99	19.64	80.36	57.1827
0.25	11.1909	3.84	15.80	84.20	45.9918
0.18	9.8704	3.39	12.41	87.59	36.1214
0.125	8.425	2.89	9.51	90.49	27.6964
0.09	8.0766	2.77	6.74	93.26	19.6198
0.063	7.3907	2.54	4.20	95.80	12.2291
0	12.2291	4.20	0.00	100.00	-1.95399E-14



Διάγραμμα 7 Κοκκομετρικό διάγραμμα δείγματος S11

Πίνακας 27 Μετρήσεις δείγματος S14

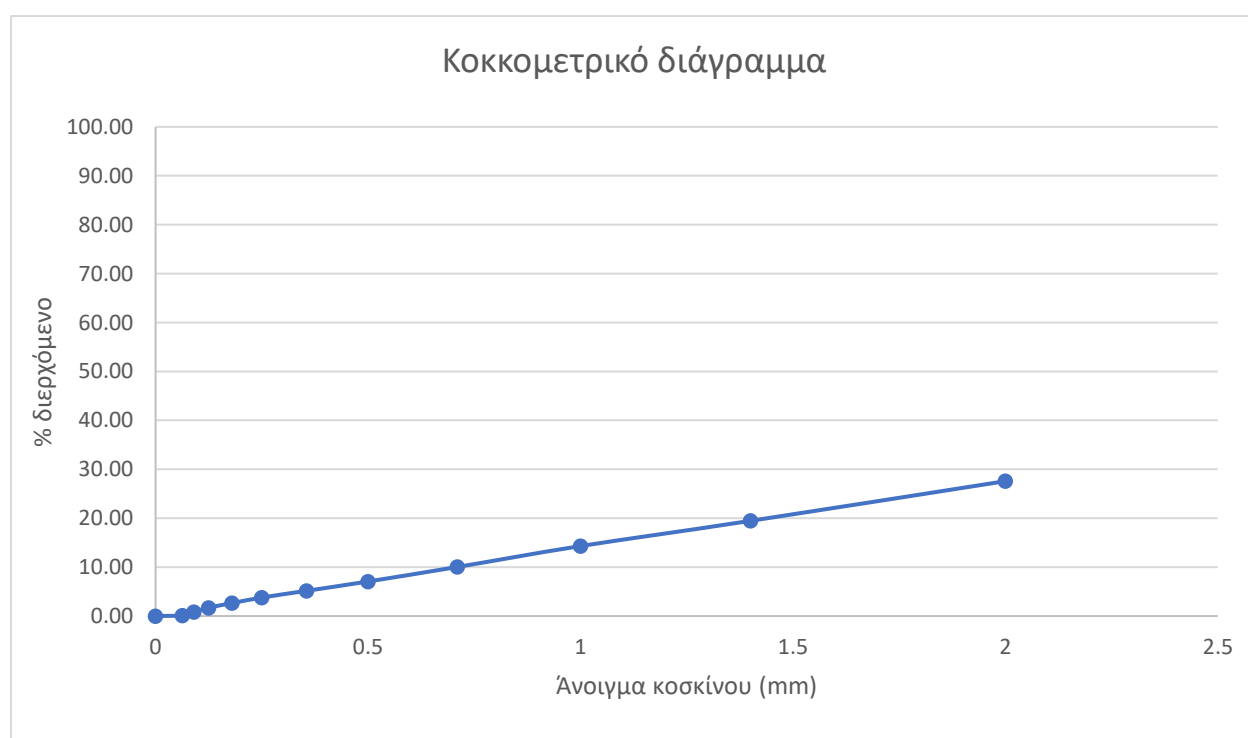
Μέγεθος κοσκίνου (mm)	Βάρος επί κοσκίνου (gr)	Βάρος επί κοσκίνου (%)	Βάρος αθροιστικά διερχόμενο (%)	Βάρος αθροιστικά παραμένων (%)	Διερχόμενη μάζα (gr)
2	160	53.28	46.72	53.28	140.2913
1.4	32.0291	10.67	36.05	63.95	108.2622
1	23.2818	7.75	28.30	71.70	84.9804
0.71	19.9948	6.66	21.64	78.36	64.9856
0.5	15.1732	5.05	16.59	83.41	49.8124
0.355	10.6698	3.55	13.03	86.97	39.1426
0.25	8.3006	2.76	10.27	89.73	30.842
0.18	7.1394	2.38	7.89	92.11	23.7026
0.125	5.7062	1.90	5.99	94.01	17.9964
0.09	5.3105	1.77	4.22	95.78	12.6859
0.063	5.122	1.71	2.52	97.48	7.5639
0	7.5639	2.52	0.00	100.00	3.19744E-14



Διάγραμμα 8 Κοκκομετρικό διάγραμμα δείγματος S14

Πίνακας 28 Μετρήσεις δείγματος S2

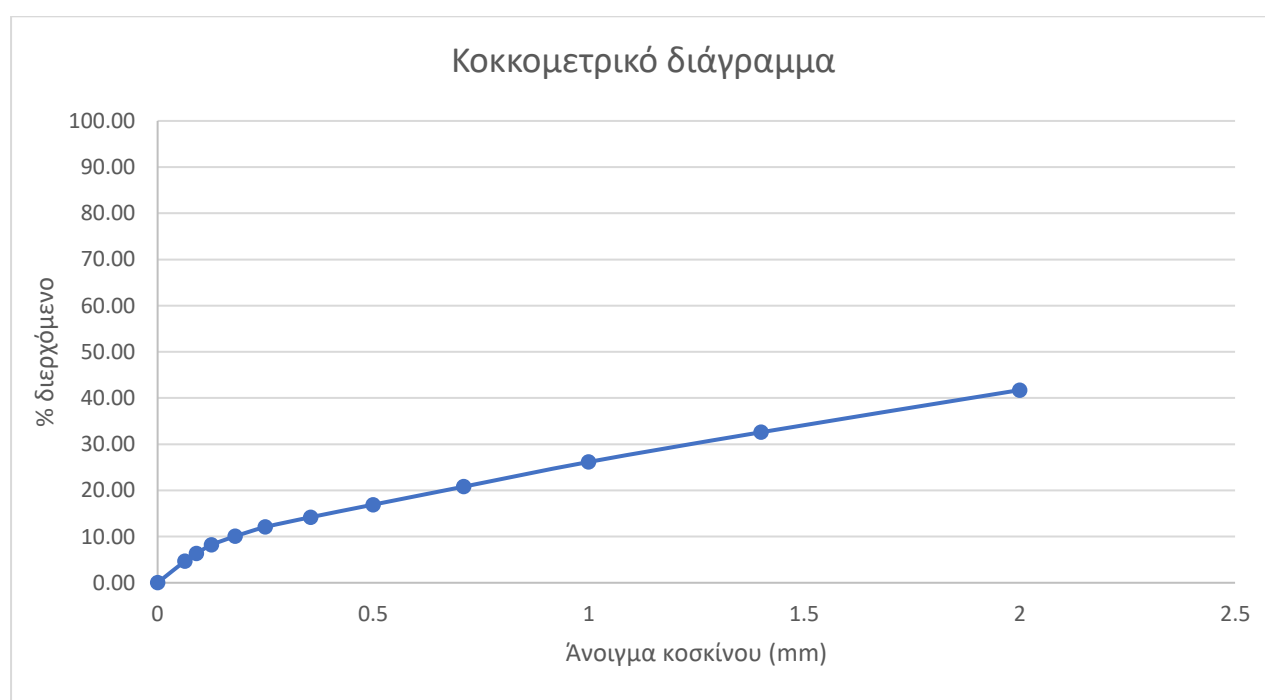
Μέγεθος κοσκίνου (mm)	Βάρος επί κοσκίνου (gr)	Βάρος επί κοσκίνου (%)	Βάρος αθροιστικά διερχόμενο (%)	Βάρος αθροιστικά παραμένων (%)	Διερχόμενη μάζα (gr)
2	220	72.43	27.57	72.43	83.7266
1.4	24.6358	8.11	19.46	80.54	59.0908
1	15.6652	5.16	14.30	85.70	43.4256
0.71	12.9713	4.27	10.03	89.97	30.4543
0.5	9.007	2.97	7.06	92.94	21.4473
0.355	5.8104	1.91	5.15	94.85	15.6369
0.25	4.1648	1.37	3.78	96.22	11.4721
0.18	3.4622	1.14	2.64	97.36	8.0099
0.125	2.8295	0.93	1.71	98.29	5.1804
0.09	2.6594	0.88	0.83	99.17	2.521
0.063	2.1231	0.70	0.13	99.87	0.3979
0	0.3979	0.13	0.00	100.00	1.99285E-14



Διάγραμμα 9 Κοκκομετρικό διάγραμμα δείγματος S2

Πίνακας 29 Μετρήσεις δείγματος S10

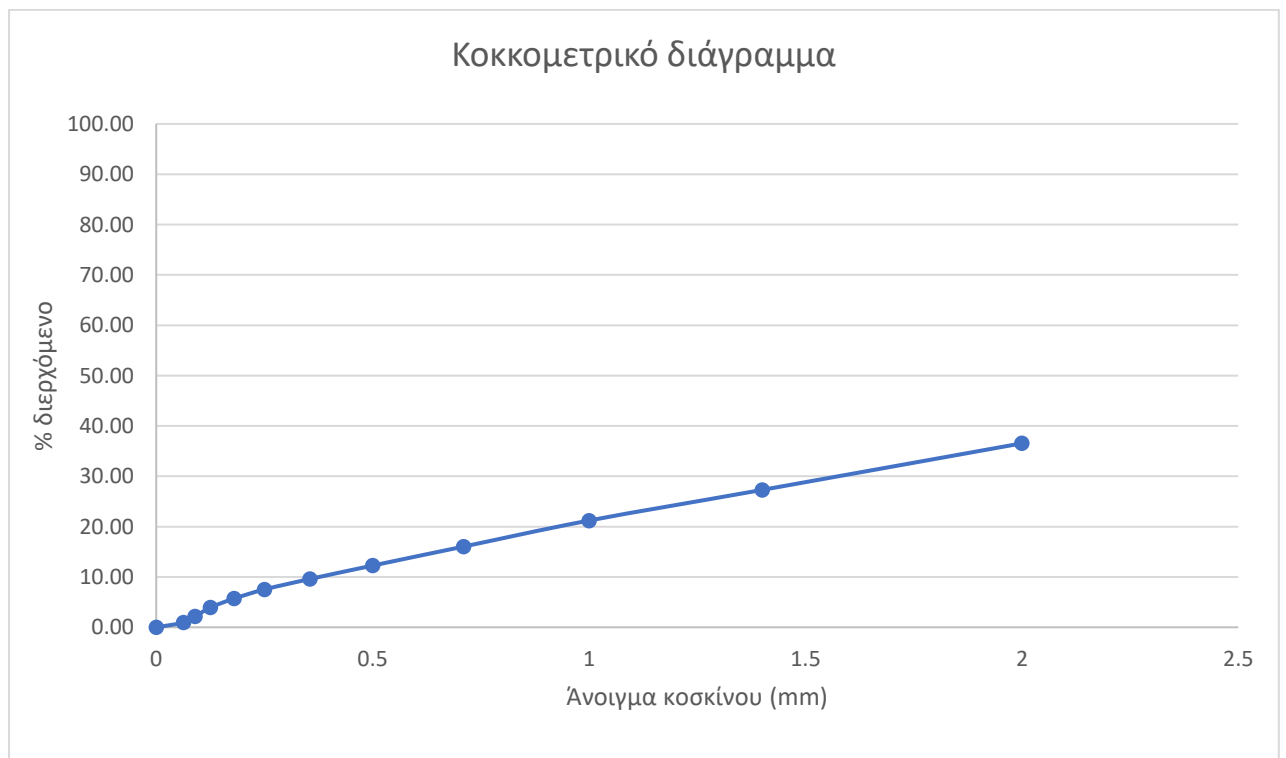
Μέγεθος κοσκίνου (mm)	Βάρος επί κοσκίνου (gr)	Βάρος επί κοσκίνου (%)	Βάρος αθροιστικά διερχόμενο (%)	Βάρος αθροιστικά παραμένων (%)	Διερχόμενη μάζα (gr)
2	175	58.28	41.72	58.28	125.2627
1.4	27.4062	9.13	32.59	67.41	97.8565
1	19.328	6.44	26.15	73.85	78.5285
0.71	16.0595	5.35	20.80	79.20	62.469
0.5	11.6977	3.90	16.91	83.09	50.7713
0.355	8.1594	2.72	14.19	85.81	42.6119
0.25	6.3936	2.13	12.06	87.94	36.2183
0.18	6.0184	2.00	10.06	89.94	30.1999
0.125	5.5842	1.86	8.20	91.80	24.6157
0.09	5.5842	1.86	6.34	93.66	19.0315
0.063	5.0584	1.68	4.65	95.35	13.9731
0	13.9731	4.65	0.00	100.00	0



Διάγραμμα 10 Κοκκομετρικό διάγραμμα δείγματος S10

Πίνακας 30 Μετρήσεις δείγματος W12

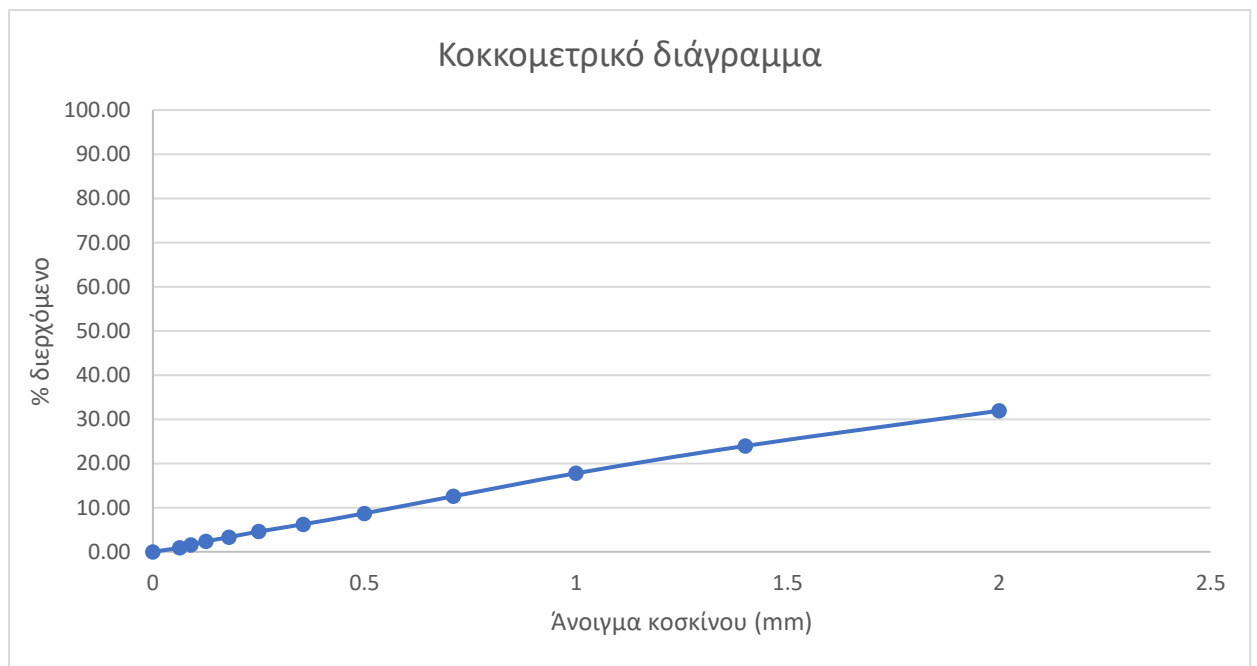
Μέγεθος κοσκίνου (mm)	Βάρος επί κοσκίνου (gr)	Βάρος επί κοσκίνου (%)	Βάρος αθροιστικά διερχόμενο (%)	Βάρος αθροιστικά παραμένων (%)	Διερχόμενη μάζα (gr)
2	195	63.46	36.54	63.46	112.2829
1.4	28.4182	9.25	27.29	72.71	83.8647
1	18.7023	6.09	21.21	78.79	65.1624
0.71	15.8987	5.17	16.03	83.97	49.2637
0.5	11.5838	3.77	12.26	87.74	37.6799
0.355	8.2127	2.67	9.59	90.41	29.4672
0.25	6.3643	2.07	7.52	92.48	23.1029
0.18	5.5617	1.81	5.71	94.29	17.5412
0.125	5.4575	1.78	3.93	96.07	12.0837
0.09	5.4575	1.78	2.16	97.84	6.6262
0.063	3.7423	1.22	0.94	99.06	2.8839
0	2.8839	0.94	0.00	100.00	-6.70575E-14



Διάγραμμα 11 Κοκκομετρικό διάγραμμα δείγματος W12

Πίνακας 31 Μετρήσεις δείγματος S12

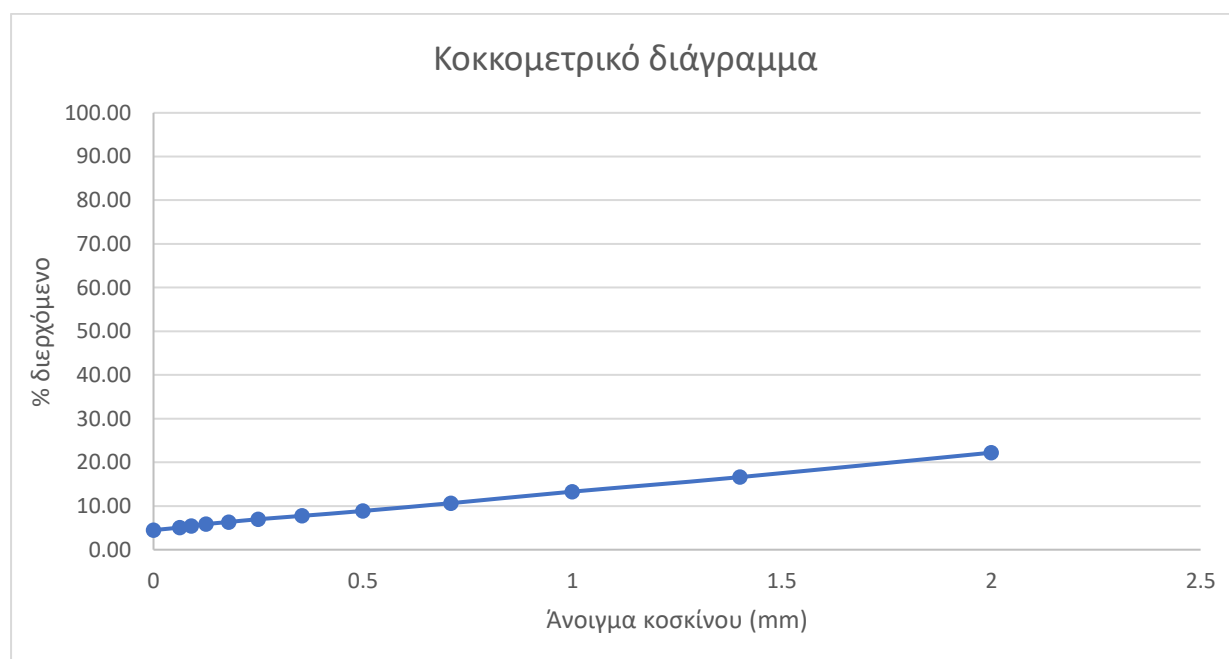
Μέγεθος κοσκίνου (mm)	Βάρος επί κοσκίνου (gr)	Βάρος επί κοσκίνου (%)	Βάρος αθροιστικά διερχόμενο (%)	Βάρος αθροιστικά παραμένων (%)	Διερχόμενη μάζα (gr)
2	210	68.07	31.93	68.07	98.5018
1.4	24.5737	7.97	23.96	76.04	73.9281
1	19.1152	6.20	17.77	82.23	54.8129
0.71	16.0565	5.20	12.56	87.44	38.7564
0.5	11.9229	3.86	8.70	91.30	26.8335
0.355	7.6151	2.47	6.23	93.77	19.2184
0.25	5.096	1.65	4.58	95.42	14.1224
0.18	3.9256	1.27	3.31	96.69	10.1968
0.125	2.9434	0.95	2.35	97.65	7.2534
0.09	2.4711	0.80	1.55	98.45	4.7823
0.063	1.9631	0.64	0.91	99.09	2.8192
0	2.8192	0.91	0.00	100.00	0



Διάγραμμα 12 Κοκκομετρικό διάγραμμα δείγματος S12

Πίνακας 32 Μετρήσεις δείγματος 21, 54.813

Μέγεθος κοσκίνου (mm)	Βάρος επί κοσκίνου (gr)	Βάρος επί κοσκίνου (%)	Βάρος αθροιστικά διερχόμενο (%)	Βάρος αθροιστικά παραμένων (%)	Διερχόμενη μάζα (gr)
2	240	77.80	22.20	77.80	54.6421
1.4	17.2553	5.59	16.61	83.39	37.3868
1	10.2569	3.32	13.29	86.71	27.1299
0.71	8.1277	2.63	10.65	89.35	19.0022
0.5	5.4961	1.78	8.87	91.13	13.5061
0.355	3.462	1.12	7.75	92.25	10.0441
0.25	2.383	0.77	6.98	93.02	7.6611
0.18	1.9354	0.63	6.35	93.65	5.7257
0.125	1.4944	0.48	5.86	94.14	4.2313
0.09	1.2354	0.40	5.46	94.54	2.9959
0.063	1.2005	0.39	5.07	94.93	1.7954
0	1.7954	0.58	4.49	95.51	-8.72635E-14



Διάγραμμα 13 Κοκκομετρικό διάγραμμα δείγματος 21, 54.813