



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ, ΙΣΤΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ

ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ Β. ΗΡΑΚΛΕΙΩΤΗΣ

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ DRASTIC ΣΤΟ ΠΕΔΙΝΟ ΤΜΗΜΑ ΤΗΣ
ΠΙΕΡΙΑΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗΣ ΕΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΒΑΛΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

2021





ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ Β. ΗΡΑΚΛΕΙΩΤΗΣ

Φοιτητής Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5683

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ DRASTIC ΣΤΟ ΠΕΔΙΝΟ ΤΜΗΜΑ ΤΗΣ ΠΙΕΡΙΑΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗΣ ΕΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΒΑΛΑΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Τεκτονικής, Ιστορικής και Εφαρμοσμένης
Γεωλογίας,

Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας

Επιβλέπων

ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΟΣ Β. ΚΑΚΛΗΣ

Δρ. Γεωλόγος, Msc, ΕΔΙΠ Τμήματος Γεωλογίας ΑΠΘ



© Αλέξανδρος Β. Ηρακλειώτης, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Τεκτονικής,
Ιστορικής και Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, 2021

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ DRASTIC ΣΤΟ ΠΕΔΙΝΟ ΤΜΗΜΑ ΤΗΣ ΠΙΕΡΙΑΣ
ΛΕΚΑΝΗΣ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗΣ ΕΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΒΑΛΑΣ– *Διπλωματική Εργασία*

© Alexandros W. Irakliotis, School of Geology, Dept. of Structural, Historical & Applied
Geology, 2021

All rights reserved.

APPLICATION OF THE DRASTIC METHOD AT THE LOWLAND PART OF
PIERIA BASIN, KAVALA REGIONAL UNIT – *Bachelor Thesis*



Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

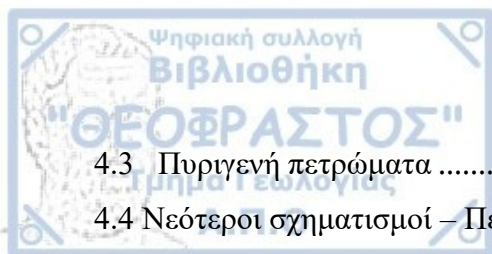
Εικόνα Εξωφύλλου: <https://lh5.googleusercontent.com/p/AF1QipM08dAiZY6gZAcUoytjl42xh1-h6XXQZqmLnX1a=h720>



*Στην μητέρα μου, τον αδερφό μου
και στη μνήμη του πατέρα μου*



ΠΡΟΛΟΓΟΣ	ix
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ	5
1.1. Ρύπανση υπόγειων υδάτων	5
1.2. Τρωτότητα των υπόγειων υδροφορέων ή νερών	5
1.3. Ευαισθησία του υδροφορέα.....	6
1.4 Προστασία Υπόγειων Υδάτων.....	6
1.5 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ	8
1.5.1. Μέθοδοι εκτίμησης της τρωτότητας.....	8
1.5.2. Απεικόνιση της τρωτότητας.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Η ΜΕΘΟΔΟΣ DRASTIC	11
2.1. Μέθοδοι Βαθμονόμησης για την εκτίμηση της τρωτότητας	11
2.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ DRASTIC	11
2.2.1. Η χρησιμότητα της μεθόδου DRASTIC	11
2.2.2. Οι παράμετροι της μεθόδου DRASTIC	12
2.2.3. Ο δείκτης DRASTIC και οι τιμές βαρύτητας των παραμέτρων του	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	16
3.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΙ ΠΛΗΘΥΣΜΙΑΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ	16
3.1.1 Γεωγραφικά στοιχεία της περιοχής.....	16
3.1.2 Πληθυσμιακά στοιχεία της περιοχής	18
3.2 ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ, ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ	19
3.2.1 Τοπογραφία και μορφολογία της περιοχής.....	19
3.2.2 Υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	24
4.1 Γενικά Στοιχεία	24
4.2 Μεταμορφωμένες σειρές	26



4.3 Πυριγενή πετρώματα	28
4.4 Νεότεροι σχηματισμοί – Πεδινό τμήμα.....	28
4.5 Τεκτονική κατάσταση της περιοχής	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ DRASTIC	31
5.1 ΤΟ ΒΑΘΟΣ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ (D).....	31
5.2 ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ (R).....	35
5.3 ΥΔΡΟΦΟΡΟ ΜΕΣΟ (A)	40
5.4 ΈΔΑΦΟΣ (S)	42
5.5 ΚΛΙΣΗ ΤΟΥ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ (T)	45
5.6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΚΟΡΕΣΤΗΣ ΖΩΝΗΣ (I)	47
5.7 ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (C).....	49
5.8 ΔΕΙΚΤΗΣ DRASTIC	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	56
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	61



Η παρούσα διπλωματική εργασία μου ανατέθηκε από το Τμήμα Γεωλογίας του Α.Π.Θ. με επιβλέποντα τον κ. Τ. Κακλή. Βασίζεται σε μεγάλο μέρος της στην διδακτορική Διατριβή του ιδίου στην Πιερία Λεκάνη Ν. Καβάλας.

Με το πέρας της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Κακλή Τριαντάφυλλο, ΕΔΙΠ του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ., τόσο για την ανάθεση της, όσο και για την πολύτιμη καθοδήγηση του κατά τη συγγραφή της. Επίσης θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την εμπιστοσύνη και το ενδιαφέρον που επέδειξε κατά τη συγγραφή της εργασίας μου, αλλά και καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στη σχολή.

Ευχαριστώ επίσης τον κ. Βουδούρη Κωσταντίνο, Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ., ο οποίος εμμέσως συνέδραμε στη συγγραφή της εργασίας, τόσο μέσω των γνώσεων που έλαβα μέσα από τα βιβλία και τις σχετικές δημοσιεύσεις του, όσο και μέσω των διαλέξεων του στο Τμήμα Γεωλογίας.

Για τον ίδιο λόγο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Καζάκη Νεραντζή, ΔΠΣ του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ., οι διαλέξεις του οποίου σχετικά με το αντικείμενο και τις μεθόδους που πραγματεύεται η εργασία ήταν πολύτιμες.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, τους φίλους μου και την Ελπίδα για την στήριξη και την υπομονή τους, αλλά και για την βοήθεια τους κατά τη συγγραφή της παρούσας εργασίας.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την διερεύνηση της τρωτότητας των υπόγειων υδροφορέων του πεδινού τμήματος της Πιερίας Λεκάνης Ν. Καβάλας μέσω της μεθόδου βαθμονόμησης της τρωτότητας «D.R.A.S.T.I.C.», καθώς και την απεικόνιση της χωρικής κατανομής αυτής με τη μορφή χάρτη.

Η περιοχή επιλέχθηκε λόγω της πληθώρας διαθέσιμων στοιχείων από προηγούμενες εργασίες, εργασίες υπαίθρου και υδρογεωλογικών τομών, σε συνδυασμό με την ανάγκη διερεύνησης και απεικόνισης της τρωτότητας σε αυτήν. Ο χάρτης τρωτότητας που κατασκευάστηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για λήψη σχετικών αποφάσεων, τη διαχείριση της περιοχής και για μελλοντικές εργασίες πάνω στην εν λόγω λεκάνη.

Για την συγγραφή της εργασίας χρειάστηκε να γίνουν οι παρακάτω εργασίες:

- Συλλογή θεωρητικών γνώσεων για τις διάφορες υδρογεωλογικές έννοιες που χρησιμοποιήθηκαν, για τις μεθόδους εκτίμησης τρωτότητας και συγκεκριμένα την μέθοδο D.R.A.S.T.I.C., καθώς και για τον τρόπο απεικόνισης της με τη χρήση λογισμικού G.I.S.
- Συλλογή γενικών στοιχείων για τη γεωγραφία, τον πληθυσμό, την τοπογραφία, την μορφολογία, την γεωλογία, το υδρογραφικό δίκτυο και τις υδρογεωλογικές συνθήκες της λεκάνης.
- Συλλογή στοιχείων που απαιτούνται για τον υπολογισμό των επτά παραμέτρων της μεθόδου D.R.A.S.T.I.C., από τομές γεωτρήσεων, μετρήσεις στάθμης σε γεωτρήσεις της λεκάνης, υπολογισθέντες τιμές από προηγούμενες εργασίες και D.E.M.
- Υπολογισμός των παραμέτρων της D.R.A.S.T.I.C. και κατασκευή των αντίστοιχων χαρτών μέσω της χρήσης του λογισμικού ArcMap (G.I.S.)
- Βαθμονόμηση των υπολογισθέντων παραμέτρων και κατασκευή του τελικού χάρτη τρωτότητας μέσω του ίδιου λογισμικού.

Αναφορικά με τη δομή της εργασίας τα θέματα που πραγματεύεται είναι χωρισμένα στα εξής κεφάλαια:



- 1^ο Κεφάλαιο: Βασικές θεωρητικές έννοιες, όπου αναλύονται οι διάφορες υδρογεωλογικές έννοιες που χρησιμοποιούνται στη παρούσα εργασία και είναι αναγκαίες για την κατανόηση της.
- 2^ο Κεφάλαιο: Η μέθοδος D.R.A.S.T.I.C., όπου αναλύονται οι επτά παράμετροι της μεθόδου D.R.A.S.T.I.C. και επεξηγείται η επίδραση τους στην τρωτότητα μιας περιοχής.
- 3^ο Κεφάλαιο: Γεωγραφικά και τοπογραφικά στοιχεία της περιοχής μελέτης, όπου περιγράφεται η γεωγραφία, τα πληθυσμιακά στοιχεία, η τοπογραφία, η μορφολογία και το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης.
- 4^ο Κεφάλαιο: Γεωλογία περιοχής μελέτης, όπου αναλύεται η λιθολογία, η στρωματογραφία και η τεκτονική της λεκάνης.
- 5^ο Κεφάλαιο: Εφαρμογή της D.R.A.S.T.I.C., όπου η μέθοδος εφαρμόζεται στην περιοχή μελέτης, δηλαδή υπολογίζονται, απεικονίζονται και σχολιάζονται οι επτά παράμετροι της, καθώς και ο τελικός χάρτης τρωτότητας της περιοχής.
- 6^ο Κεφάλαιο: Συμπεράσματα, όπου γίνεται η σύνοψη των βασικότερων συμπερασμάτων που προέκυψαν από τη συγγραφή της παρούσας εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή διπλωματική εργασία μελετάει την Πιερία λεκάνη του Νομού Καβάλας, στην ΒΑ Ελλάδα. Συγκεκριμένα αποσκοπεί στην αξιολόγηση και στην χαρτογράφηση της τρωτότητας των υδροφορέων του πεδινού τμήματος της υδρολογικής λεκάνης, με τη χρήση της μεθόδου DRASTIC και λογισμικού GIS.

Η Πιερία λεκάνη καταλαμβάνει το δυτικό τμήμα του Νομού Καβάλας. Έχει σχήμα περίπου ελλειψοειδές με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ. Η συνολική έκταση της λεκάνης ανέρχεται στα 180.96 km², από τα οποία τα 86.34 km² αποτελούν το πεδινό της τμήμα. Πρόκειται για μια πεδινή έως ημιορεινή λεκάνη με μέγιστο υψόμετρο τα 1956 m. Η λεκάνη αποστραγγίζεται κυρίως από ρέματα του γειτονικού όρους Παγγαίου και δευτερευόντως του Συμβόλου, τα οποία συμβάλλουν στον ποταμό Μαρμαρά. Ο ποταμός Μαρμαράς ρέει κατά μήκος του πεδινού τμήματος με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ και εξέρχεται από την λεκάνη με διεύθυνση Ν, εκβάλλοντας στη συνέχεια στον Στρυμωνικό κόλπο.

Γεωτεκτονικά η λεκάνη ανήκει εξ' ολοκλήρου στην Ενότητα Παγγαίου της Μάζας Ροδόπης. Το ορεινό της τμήμα δομείται από γνεύσιους, σχιστόλιθους και μάρμαρα η συνέχεια των οποίων διακόπτεται από πλουτωνικές διεισδύσεις γρανιτών. Το πεδινό της τμήμα καλύπτεται κυρίως από Ολοκαινικές και Πλειστοκαινικές αποθέσεις.

Για τον υπολογισμό της τρωτότητας χρησιμοποιήθηκαν οι επτά παράμετροι της μεθόδου DRASTIC: Το βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού, η κατείσδυση ή εμπλουτισμός, το υλικό του υδροφορέα, το έδαφος, η κλίση του αναγλύφου, η ακόρεστη ζώνη και η υδραυλική αγωγιμότητα. Από την χαρτογράφηση του δείκτη DRASTIC στο πεδινό τμήμα της λεκάνης προέκυψε ότι το μεγαλύτερο μέρος της χαρακτηρίζεται από μέτρια-υψηλή τρωτότητα (59.4%). Οι περιοχές χαμηλής-μέσης τρωτότητας είναι συγκεντρωμένες στο Δ και ΝΔ τμήμα της λεκάνης (22.7%), ενώ στο ΝΔ άκρο της βρίσκεται μια περιοχή χαμηλής τρωτότητας (4.5%). Το Α τμήμα της λεκάνης χαρακτηρίζεται από 4 ευμεγέθεις περιοχές υψηλής τρωτότητας που καλύπτουν το 13.4% του πεδινού τμήματος.



ABSTRACT

This bachelor thesis studies the Pieria basin of Kavala prefecture, in NE Greece. Specifically, it aims in the evaluation and mapping of the vulnerability of the aquifers of the lowland-area of the basin, using the DRASTIC method using GIS software.

The Pieria basin occupies the western part of Kavala prefecture. It has an almost elliptical shape and a NE-SW direction. The total area of the basin is 180.96 km², from which 86.34 km² make up the lowland-area. It is a flat to semi-mountainous basin with a maximum elevation of 1956 m. The basin is primarily drained from streams originating in Mt. Pangaion and secondarily of those in Mt. Simvolo, which contribute to the Marmaras river. The Marmaras river flows along the lowland part of the basin in a NE-SW direction, exiting the river in a south direction, finally flowing in the Strymonic Gulf.

Geotectonically the whole basin is part of the Paggaion unit, which itself is a part of the Rhodope massif. The mountainous area of the basin is formed from gneiss, schist and marble, whose continuity is interrupted by plutonic granite intrusions. The lowland-part is covered by Holocenic and Pleistocenic deposits.

For the calculation of the DRASTIC index, the seven DRASTIC parameters were used: The depth of the aquifer, recharge, aquifer media, soil, topography, impact of the vadose zone and the hydraulic conductivity of the aquifer. Based on the mapping of the DRASTIC index, it was concluded that the largest part of the lowland area of the basin is characterized by medium-high vulnerability (59.4%). The areas of low-medium vulnerability are gathered at the W and SW part of the basin (22.7%), while an area of low vulnerability is located at the SW end of the basin (4.5%). The E part of the basin is characterized by 4 sizeable areas of high vulnerability, which cover an area equal to 13.4% of the lowland part of the basin.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

1.1. Ρύπανση υπόγειων υδάτων

Οποιαδήποτε υποβάθμιση της φυσικής ποιότητας του νερού θεωρείται ρύπανση. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με την Οδηγία 2000/60 της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ως ρύπανση ορίζεται «η συνεπεία ανθρώπινων δραστηριοτήτων, άμεση ή έμμεση εισαγωγή, στον αέρα, το νερό, ή το έδαφος, ουσιών ή θερμότητας που μπορούν να είναι επιζήμια για την υγεία του ανθρώπου ή την ποιότητα των υδατικών οικοσυστημάτων ή των χερσαίων οικοσυστημάτων που εξαρτώνται άμεσα από υδατικά οικοσυστήματα, συντελούν στη φθορά υλικής ιδιοκτησίας, η επηρεάζουν δυσμενώς ή παρεμβαίνουν σε λειτουργίες αναψυχής ή σε λοιπές νόμιμες χρήσεις του περιβάλλοντος»

1.2. Τρωτότητα των υπόγειων υδροφορέων ή νερών

Όσον αφορά τους υπόγειους υδροφόρους και το υπόγειο νερό, μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψιν κατά την μελέτη τους είναι η τρωτότητα. Τρωτότητα των υπόγειων υδροφορέων ή νερών ονομάζεται η επιδεκτικότητα ή η ευαισθησία τους απέναντι στους εξωτερικούς ρύπους. Η έννοια αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι το φυσικό περιβάλλον μπορεί από μόνο του να προστατεύσει σε έναν βαθμό τα υπόγεια ύδατα, με αποτέλεσμα η κάθε περιοχή να επηρεάζεται σε διαφορετικό βαθμό από την ρύπανση από κάποια άλλη. (Βουδούρης, 2016)

Η τρωτότητα χαρακτηρίζει την ευκολία με την οποία μπορεί να φθάσει ένα ρύπος με προέλευση την επιφάνεια του εδάφους, στον υπόγειο υδροφόρο. Υπό δεδομένες πρακτικές διαχείρισης χρήσης γης στην περιοχή, εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά του ρύπου, όσο και από την ευαισθησία του υδροφόρου, καθώς και από την απόσταση από την πηγή και από άλλους παράγοντες που έχουν τη δυνατότητα να αυξήσουν το ρυπαντικό φορτίο. (Βουδούρης, 2016)

Η τρωτότητα διακρίνεται σε ειδική (specific) και γενική (intrinsic). Η ειδική τρωτότητα εξαρτάται από το είδος του ρυπαντή και τα χαρακτηριστικά του, ενώ η γενική εξαρτάται μόνο από τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του υδροφόρου και του εδάφους που βρίσκεται πάνω από αυτόν και είναι ανεξάρτητη του ρυπαντή. (Holman I.P., 2000)

1.3. Ευαισθησία του υδροφορέα

Ως ευαισθησία του υδροφορέα ορίζεται η ευκολία μετανάστευσης ενός ρύπου από την πηγή ρύπανσης, δηλαδή από την επιφάνεια του εδάφους, στον υδροφορέα. Εξαρτάται από τις γεωλογικές συνθήκες της περιοχής και από την ακόρεστη και κορεσμένη ζώνη του κάθε υδροφόρου. Είναι ανεξάρτητη των χαρακτηριστικών του ρύπου και των συνθηκών χρήσης γης. (Βουδούρης, 2016)

Επομένως οι έννοιες της τρωτότητας και της ευαισθησίας διαφέρουν μεταξύ τους. Η ευαισθησία του υδροφόρου ταυτίζεται συγκεκριμένα με την έννοια της γενικής τρωτότητας. (Βουδούρης, 2016)

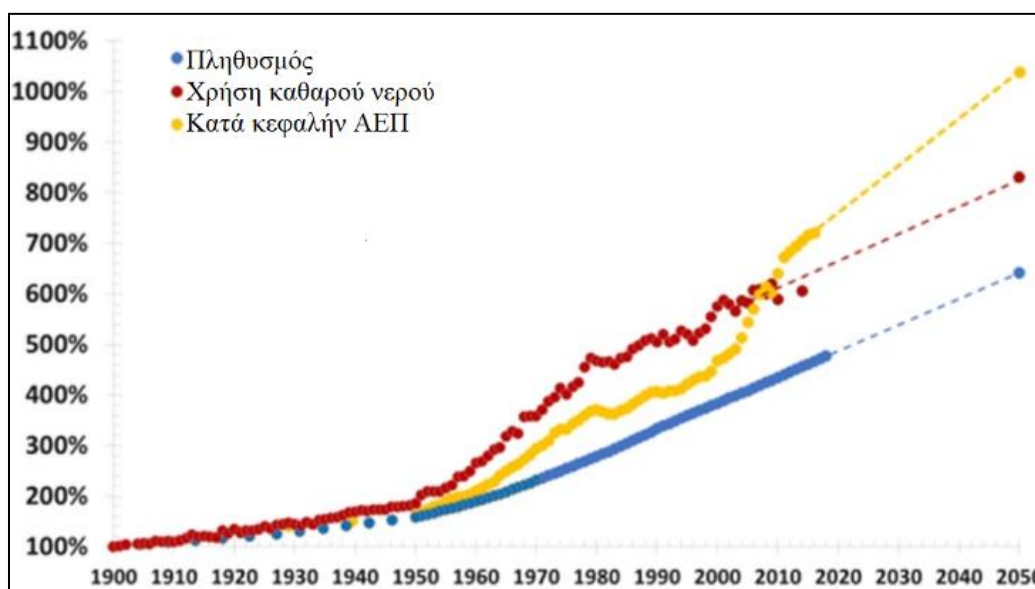
1.4 Προστασία υπόγειων υδάτων

Η ζήτηση νερού αυξάνεται αναλογικά με την πληθυσμιακή αύξηση, την οικονομική ανάπτυξη και τα μεταβαλλόμενα πρότυπα κατανάλωσης. (Σχήμα 1.1) Η παγκόσμια ζήτηση για καθαρό νερό αυξήθηκε κατά 600% τα τελευταία 100 χρόνια (Wada et al., 2016), ενώ αναμένεται να αυξηθεί κατά 20-30% ανά έτος, έως το 2050 (Burek et al., 2016). Ταυτόχρονα η διαθεσιμότητα καθαρού νερού μειώνεται παγκοσμίως, εξαιτίας της αυξανόμενης ζήτησης και του φαινομένου της ρύπανσης.

Το επιφανειακό νερό είναι η κύρια πηγή κάλυψης των ανθρώπινων υδατικών αναγκών σε παγκόσμιο επίπεδο, όμως η σημασία του υπόγειου νερού αυξάνεται συνεχώς, αφού τα επιφανειακά αποθέματα γίνονται ολοένα και λιγότερο αξιόπιστα και προβλέψιμα (Kundzewicz & Döll, 2009). Στην Ελλάδα για παράδειγμα, σύμφωνα με το τμήμα Μεσογείου της Ευρωπαϊκής Πρωτοβουλίας για το Νερό (EUWI/MED, 2007), το υπόγειο νερό καλύπτει το 42% της συνολικής ζήτησης της χώρας για καθαρό νερό.

Η ρύπανση των υπόγειων υδάτων αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα μείωσης των διαθέσιμων υδατικών αποθεμάτων, αφού το ρυπασμένο νερό κρίνεται ακτάλληλο για ύδρευση ή ακόμα και για άρδευση, ανάλογα με τον βαθμό ρύπανσης και το είδος του ρυπαντή.

Τα παραπάνω καθιστούν προφανή την ανάγκη προστασίας των υπόγειων υδάτων από το φαινόμενο της ρύπανσης. Αυτό είναι εφικτό μόνο μέσω της ορθολογικής διαχείρισης των διαθέσιμων αποθεμάτων. Αναγκαία προϋπόθεση για την ορθολογική αξιοποίηση των υδροφορέων είναι η ύπαρξη εργαλείων για την μελέτη και την παρακολούθηση της ρύπανσης και της τρωτότητας τους σε αυτήν. Στις επόμενες παραγράφους θα αναλυθεί το πως η τρωτότητα μπορεί να ποσοτικοποιηθεί, να ψηφιοποιηθεί και να παρουσιαστεί με τη μορφή χαρτών, οι οποίοι στη συνέχεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ορθολογική διαχείριση των υπόγειων υδάτων και τη δημιουργία νομοθεσίας.



Σχήμα 1.1 Παγκόσμια αύξηση του πληθυσμού, της χρήσης καθαρού νερού και του κατά κεφαλήν ΑΕΠ σε βάθος χρόνου, σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές τους το έτος 1900. (Boretti & Rosa, 2019, τροποποιημένο από τον συγγραφέα)

1.5.1. Μέθοδοι εκτίμησης της τρωτότητας

Υπάρχουν πολλοί τρόποι για να εκτιμηθεί η τρωτότητα του υπόγειου νερού. Τα διάφορα πρότυπα που έχουν εισαχθεί ανά τα χρόνια, βασίζονται σε διάφορα υδρογεωλογικά κριτήρια, όπως το πάχος της ακόρεστης ζώνης, το είδος και η κοκκομετρία του υδροφορέα, η τοπογραφία της περιοχής, ο συντελεστής υδροπερατότητας κ.α. (Βουδούρης, 2016)

Γενικά, οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι για την εκτίμηση της τρωτότητας διακρίνονται σε 3 κατηγορίες:

- Στατιστικές Μέθοδοι: Βασίζονται σε περιγραφική στατιστική των συγκεντρώσεων επιλεγμένων ρυπαντών, όπως NO_3 και As, σε συνδυασμό με ανάλυση συσχέτισης (π.χ. συγκέντρωση ενός ρυπαντή με το βάθος)
- Μέθοδοι Προσομοίωσης: Βασίζονται σε αριθμητική επίλυση των εξισώσεων κίνησης του υπόγειου νερού, όπως του Νόμου Darcy και της εξίσωσης της συνέχειας, μέσω της χρήσης κώδικων όπως η MODFLOW και η MT3D.
- Μέθοδοι Βαθμονόμησης: Βασίζονται στον πολλαπλασιασμό του κάθε παράγοντα που επιδρά στην πιθανή ρύπανση του υδροφορέα με έναν συντελεστή βαρύτητας. Οι παράγοντες αυτοί ποικίλουν από μέθοδο σε μέθοδο, αλλά γενικά αφορούν τα χαρακτηριστικά της κορεσμένης και της ακόρεστης ζώνης και τα αντίστοιχα λιθοφασικά χαρακτηριστικά των υλικών τους, την υδραυλική αγωγιμότητα, παράμετρους που αφορούν την επιφάνεια (όπως η τοπογραφία και η φυτοκάλυψη) κ.α. Οι συντελεστές βαρύτητας που δίνονται διαφέρουν επίσης από μέθοδο σε μέθοδο, όμως λαμβάνουν και διαφορετικές τιμές ανάλογα τον βαθμό επίδρασης της κάθε παραμέτρου στον εκάστοτε υπό μελέτη υδροφορέα. (Βουδούρης, 2016)

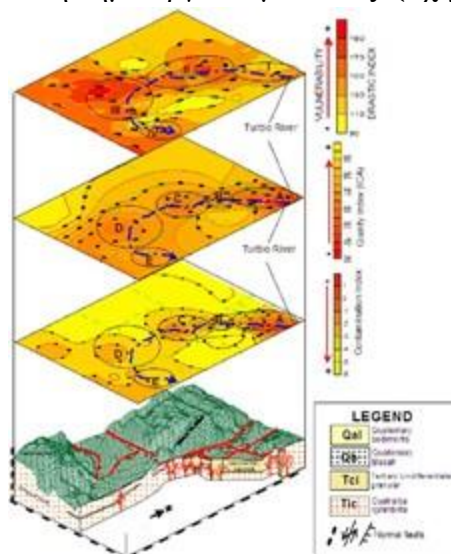
1.5.2. Απεικόνιση της τρωτότητας

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της υδρογεωλογικής έρευνας αναφορικά με την τρωτότητα μιας περιοχής γίνεται με τη μορφή χαρτών. Η κλίμακα των χαρτών αυτών διαφέρει από χώρα σε χώρα και μπορεί να είναι σε κλίμακα νομού, περιφερειακής ενότητας, ή ολόκληρης της χώρας. Σε αυτούς διακρίνονται οι περιοχές με αυξημένη ή μη αυξημένη πιθανότητα ρύπανσης των υπόγειων υδάτων.

Οι χάρτες τρωτότητας δημιουργούνται με τη βοήθεια Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και για την κατασκευή τους απαιτούνται ορισμένα δεδομένα. Σύμφωνα με τον Καλλέργη (2000), οι πληροφορίες που χρειάζονται για την κατασκευή του χάρτη τρωτότητας μιας περιοχής, συνοψίζονται στον Πίν. 1.1.

Τα δεδομένα που αφορούν την ποιότητα των υπόγειων νερών, συλλέγονται κυρίως από σταθμούς ελέγχου, που εγκαθίστανται για τον σκοπό αυτό. Η τοποθέτηση των σταθμών γίνεται έπειτα από υδρογεωλογική έρευνα και αναγνώριση των αιτίων ρύπανσης. (Βουδούρης, 2016)

Οι χάρτες τρωτότητας, σε συνδυασμό με χάρτες χρήσεων γης, ποιότητας νερού, πυκνότητας πληθυσμού κ.α, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη λήψη αποφάσεων, τη διαχείριση μιας περιοχής και τη δημιουργία νομοθεσίας. (Σχήμα 1.2)



Σχήμα 1.2 Κατανομή των τιμών του δείκτη τρωτότητας DRASTIC, του δείκτη ποιότητας ύδατος (ICU), των τιμών του δείκτη μόλυνσης και του γεωλογικού μοντέλου στην κοιλάδα του ποταμού Turbio, Μεξικό. (Ramos-Leal, 2004)

Πίνακας 1.1 Απαιτούμενες πληροφορίες για την χαρτογράφηση της τρωτότητας υπόγειων νερών
(τροποποιημένο από Καλλέργης, 2000)

ΠΕΔΙΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ	ΤΥΠΟΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
Μορφολογία	Υψόμετρα, μορφολογικές κλίσεις, πυκνότητα και κατανομή υδρογραφικού δικτύου, ιχνογράφηση ασυνεχειών
Βλάστηση	Χρήσεις γης, διαδρομές υπεδάφικου νερού, περιοχές τροφοδοσίας και εκφόρτισης
Κλιματολογία	Βροχομετρικά δεδομένα, μέση θερμοκρασία αέρα, υγρασία, ηλιακή ακτινοβολία, εξατμισοδιαπνοή, εκτίμηση της ενεργής βροχόπτωσης
Εδάφη	Πάχος, υφή, ορυκτολογική σύσταση, χημικές και φυσικές ιδιότητες, πορώδες, διαπερατότητα, υγρασία, ικανότητα κατείσδυσης
Υδρολογία	Παροχές υδρορευμάτων, ανάλυση υδρογραφημάτων, βασική ροή, ανταλλαγές νερού με υποκείμενα υδροφόρα συστήματα
Υδρογεωλογία	
<i>i) Ακόρεστη Ζώνη</i>	Πάχος, λιθοστρωματογραφία, κοκκομετρία, ορυκτολογία, γεωμετρία, δείκτης ρωγμών, δείκτης ανάπτυξης καρστ, ενεργό πορώδες, διεύθυνση ροής, συντελεστής υδροπερατότητας, τροφοδοσία
<i>ii) Κορεσμένη Ζώνη</i>	Βάθος υπόγειου νερού, πάχος, λιθοστρωματογραφία, κοκκομετρία, ορυκτολογία, γεωμετρία, δείκτης ρωγμών, δείκτης ανάπτυξης καρστ, ενεργό πορώδες, διεύθυνση ροής, συντελεστής υδροπερατότητας, τροφοδοσία
Χρήσεις Νερού	Σημεία υδροληψίας (πηγές, γεωτρήσεις) και θέσεις υδροληπτικών έργων, επιφανειακοί και υπόγειοι υδατικοί πόροι, κατανομή τους και χρήση, παροχή και πτώσεις στάθμης των υδροφορέων, ρυθμός τροφοδοσίας των διαφόρων υδατικών συστημάτων
Ποιότητα Νερού	
<i>i) Υδροχημεία</i>	Φυσικές και χημικές ιδιότητες επιφανειακών και υπόγειων νερών, χημικοί δείκτες, ισότοπα, ηλικία υπόγειου νερού και χρόνος παραμονής του στα υδροφόρα στρώματα, χαρακτηριστικοί λόγοι, κατανομή ποιότητας εδαφικών και υπόγειων νερών
<i>ii) Χαρακτηριστικά Ρύπων</i>	Αλλαγές στην ποιότητα του υπόγειου νερού, παρουσία ρύπων, φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά ρύπων, συγκέντρωση, ημιζωή, κινητικότητα, ικανότητα ιοανταλλαγής, προσρόφησης, βιοαποδόμησης κ.ά.
Ανθρώπινες Επεμβάσεις στο Περιβάλλον	Έκταση αστικών περιοχών, κατανομή και δυναμικότητα των πηγών ρύπανσης, σημειακές και διάχυτες πηγές, δυνητικοί εισοδοί ρύπων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Η ΜΕΘΟΔΟΣ DRASTIC

2.1. Μέθοδοι Βαθμονόμησης για την εκτίμηση της τρωτότητας

Όπως αναφέρθηκε, οι μέθοδοι βαθμονόμησης για την εκτίμηση της τρωτότητας, είναι αυτές που βασίζονται στον πολλαπλασιασμό του κάθε παράγοντα ρύπανσης με έναν συντελεστή βαρύτητας. Οι κυριότερες από αυτές τις μεθόδους είναι οι εξής: DRASTIC (Aller et al. 1987), GOD (Foster S.S.D., 1987), SEEPAGE (Moore & John 1990), AVI (Van Stempvoort D., 1992), SINTACS (Civita, 1994), ISIS (Civita & Regibus, 1995), DASTI (Kabbour, 2006).

Οι παραπάνω μέθοδοι χρησιμοποιούν διαφορετικό αριθμό παραμέτρων, από 2 στη μέθοδο AVI έως 7 στις μεθόδους DRASTIC και SINTACS. Σύμφωνα με τους Cogu et al. (2003) ο περιορισμός των παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψιν παράγει μη ικανοποιητικά αποτελέσματα. Οι ίδιοι ερευνητές βρήκαν ότι τα αποτελέσματα της κάθε μεθόδου δίνουν πολύ διαφορετικά αποτελέσματα σε κάθε περιοχή έρευνας.

2.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ DRASTIC

2.2.1. Η χρησιμότητα της μεθόδου DRASTIC

Σύμφωνα με τους Holman et al. (2000) και τους Gianneli, Voudouris et al. (2007) οι προτεινόμενες μέθοδοι εκτίμησης τρωτότητας είναι αυτές που βασίζονται σε γεωλογικές και υδρογεωλογικές παραμέτρους. Η μέθοδος DRASTIC (Aller L, 1987) ανήκει στις μεθόδους που στηρίζονται στη βαθμονόμηση υδρογεωλογικών παραμέτρων. Βρίσκει ευρεία εφαρμογή για την εκτίμηση του κινδύνου ρύπανσης των πορώδων υδροφορέων και έχει εφαρμοστεί εκτεταμένα στον ελληνικό χώρο, μεταξύ άλλων από τους Panagopoulos et al. (2005) και από τους Βουδούρης και Μανδηλάρας (2004).

2.2.2. Οι παράμετροι της μεθόδου DRASTIC

Το όνομα της μεθοδολογίας DRASTIC προκύπτει από τα ακρονύμια 7 λέξεων ή φράσεων που αποτελούν τις παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψιν κατά την εφαρμογή της (Βουδούρης, 2016):

- **D (Depth):** Το βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού.

Δεδομένου ότι η συγκέντρωση ενός ρύπου εξασθενεί κατά την κίνηση του νερού στο υπέδαφος, όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος στο οποίο βρίσκεται ο υπόγειος υδροφορέας, τόσο καλύτερα προστατευμένος είναι και τόσο μικρότερη η τρωτότητα του. Συνεπώς ένας ρύπος φθάνει ευκολότερα στην επιφάνεια του υπόγειου νερού, όταν ο υδροφορέας βρίσκεται σε μικρό βάθος. Ο όρος βάθος αναφέρεται στη στάθμη του υπόγειου νερού στους υπόγειους υδροφορείς, ενώ στους υπό πίεση αναφέρεται στην οροφή του υδροφορέα.

- **R (Recharge):** Η ενεργή κατείσδυση.

Πρόκειται πρακτικά για τον εμπλουτισμό, δηλαδή την ποσότητα νερού που κατεισδύει ανά μονάδα επιφάνειας. Γενικά, όσο μεγαλύτερος είναι ο εμπλουτισμός, τόσο πιο πιθανό είναι ο ρύπος να φθάσει στον υδροφορέα.

- **A (Aquifer):** Το υλικό του υδροφορέα.

Η ταχύτητα του ρύπου μέσα στον υδροφορέα εξαρτάται από το υλικό από το οποίο αυτός αποτελείται. Μεγαλύτερη ταχύτητα κίνησης συνεπάγεται την εξασθένηση του ρύπου. Όσο πιο αδρομερή είναι τα υλικά του υδροφορέα, τόσο μεγαλύτερη η υδροπερατότητα (και η ταχύτητα κίνησης) και συνεπώς τόσο μικρότερη είναι η ικανότητα εξασθένησης του ρύπου.

- **S (Soil):** Το εδαφικό υλικό.

Το εδαφικό υλικό αποτελεί το ανώτερο τμήμα της ακόρεστης ζώνης και δρα ως το πρώτο φίλτρο από το οποίο διέρχονται οι ρύποι. Επηρέαζει την τρωτότητα με δύο τρόπους: Στην εδαφική ζώνη και κυρίως στη ζώνη των ριζών το ρυπαντικό φορτίο εξασθενεί, ενώ πολλές ουσίες αποδομούνται από την δράση

μικροοργανισμών. Επιπλέον, το είδος του εδαφικού υλικού καθορίζει την ποσότητα του νερού που κατεισδύει φτάνοντας στον υδροφορέα.

➤ **T (Topography):** Η κλίση του αναγλύφου.

Όσο μεγαλύτερη η τοπογραφική κλίσης μιας περιοχής, τόσο περισσότερο ευνοείται η επιφανειακή απορροή, εις βάρος της κατείσδυσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, όσο μεγαλύτερη είναι η τοπογραφική κλίση μιας περιοχής, τόσο μικρότερο να είναι το ρυπαντικό δυναμικό της. Συνεπώς οι περιοχές με μικρές κλίσεις σχετίζονται με υψηλή τρωτότητα.

➤ **I (Impact of the vadose zone):** Η επίδραση της ακόρεστης ζώνης.

Η ακόρεστη ζώνη αποτελεί την υπεδαφική ζώνη που βρίσκεται πάνω από τη στάθμη του υπόγειου νερού. Η σύσταση της καθορίζει τον χρόνο και την πορεία κίνησης του υπόγειου νερού, καθώς και τη συγκέντρωση των ρύπων. Ο ρόλος της στην εξασθένηση των ρύπων είναι σημαντικός, εξαιτίας των διαφόρων χημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν σε αυτήν, όπως η προσρόφηση, η κατιοανταλλαγή, διάφορες βιολογικές αντιδράσεις, μείωση των παθογόνων μικροοργανισμών κ.α. Συνεπώς όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος της ακόρεστης ζώνης τόσο μικρότερο το ρυπαντικό φορτίο. Σημαντικό ρόλο παίζει επίσης και η λιθολογία της ακόρεστης ζώνης, αφού η παρουσία αργιλικών ορυκτών συμβάλλει και αυτή στη μείωση του ρυπαντικού φορτίου.

➤ **C (Hydraulic Conductivity of the aquifer):** Ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας.

Η υδραυλική αγωγιμότητα είναι αυτή που καθορίζει την ταχύτητα κίνησης των ρύπων μέσα στην κορεσμένη ζώνη. Όσο μεγαλύτερη η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας, τόσο ταχύτερη η κίνηση του ρύπου και συνεπώς τόσο μεγαλύτερη η τρωτότητα του υδροφορέα.

2.2.3. Ο δείκτης DRASTIC και οι τιμές βαρύτητας των παραμέτρων του

Για την εκτίμηση της τρωτότητας μιας περιοχής οι παραπάνω παράμετροι πολλαπλασιάζονται με έναν συντελεστή βαρύτητας, ο οποίος είναι ενδεικτικός της σημαντικότητας της κάθε μιας από αυτές. Η ίδια η παράμετρος λαμβάνει μια τιμή από 1 έως 10 για κάθε θέση, με τις μεγαλύτερες τιμές να υποδηλώνουν μεγαλύτερο δυναμικό ρύπανσης. Από το άθροισμα των γινομένων του κάθε συντελεστή βαρύτητας με την τιμή της παραμέτρου προκύπτει ο δείκτης DRASTIC (DI), ο οποίος υπολογίζεται από την κάτωθι σχέση:

$$DI = DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + IrIw + CrCw \quad (\text{Σχέση 1})$$

όπου ο δείκτης **r** εκφράζει την τιμή της παραμέτρου λαμβάνοντας τιμές από 1 έως 10, ενώ ο δείκτης **w** εκφράζει τη βαρύτητα της καθεμιάς λαμβάνοντας τιμές από 1 έως 5

Όπως αναφέρθηκε ο κάθε συντελεστής βαρύτητας εκφράζει την σημαντικότητα της κάθε παραμέτρου στον υπολογισμό της τρωτότητας. Έτσι προκύπτει ότι οι σημαντικότερες παράμετροι για την εκτίμηση της τρωτότητας είναι το βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού και η επίδραση της ακόρεστης ζώνης (βαρύτητα 5). Οι τιμές του κάθε συντελεστή βαρύτητας φαίνονται στον Πίν. 2.1.

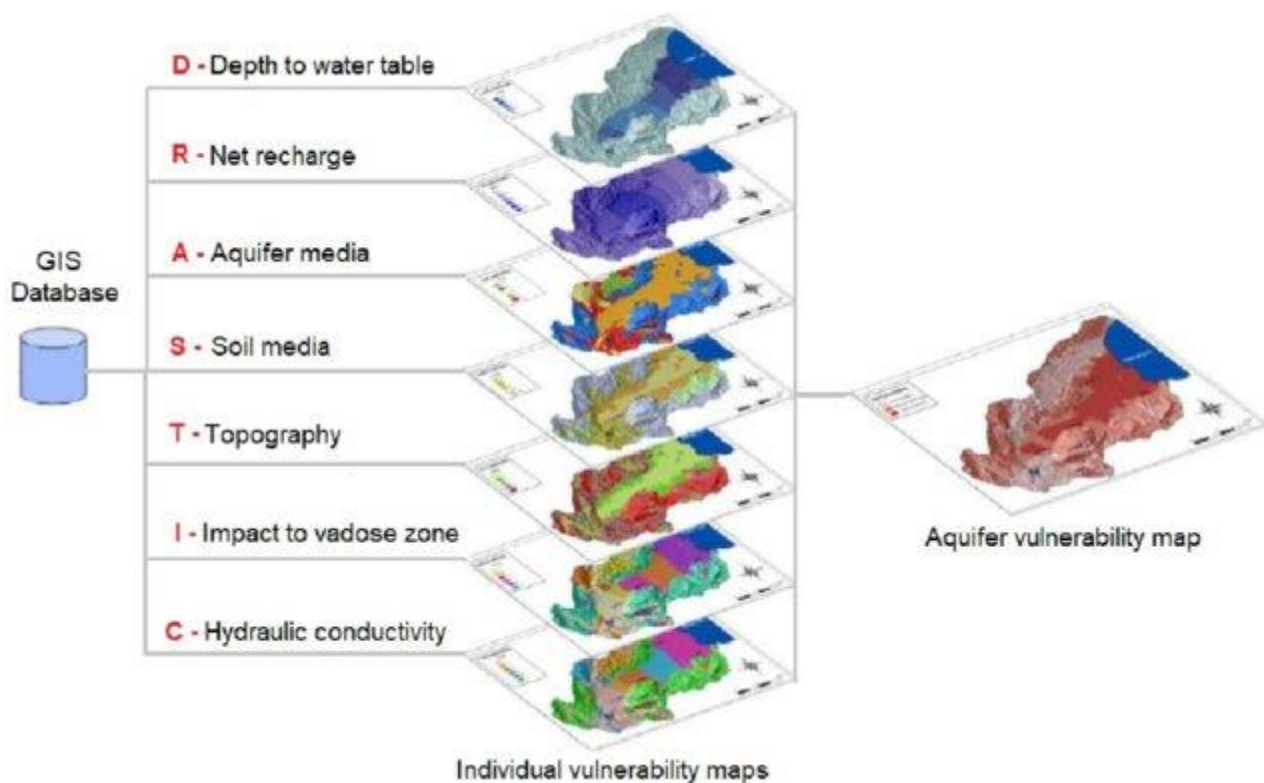
Πίνακας 2.1. Βαρύτητα της κάθε παραμέτρου στη μέθοδο DRASTIC (τροποποιημένο από Aller et al, 1987)

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

Με βάση τον δείκτη DI, γίνεται κατηγοριοποίηση της τρωτότητας σε διάφορες κλάσεις. Παρ' ότι η αρχική μεθοδολογία της DRASTIC κατά τους Aller et al. (1987) δεν έκανε χρήση κατηγοριοποίησης, η πλέον χρησιμοποιούμενη κατηγοριοποίηση γίνεται σε 5 κλάσεις (Civita M. & De Regibus., 1995):

- Πολύ υψηλή τρωτότητα (>199)
- Υψηλή τρωτότητα (160-199)
- Μέση τρωτότητα (120-159)
- Χαμηλή τρωτότητα (80-119)
- Πολύ χαμηλή τρωτότητα (<79)

Με βάση τα παραπάνω κατασκευάζονται οι χάρτες τρωτότητας με την χρήση προγραμμάτων GIS. Για να γίνει αυτό απαιτείται η γεω-αναφορά, η ψηφιοποίηση των δεδομένων και η εισαγωγή τους σε μια βάση δεδομένων. Από αυτήν κατασκευάζονται οι επιμέρους θεματικοί χάρτες (θεματικά επίπεδα) ξεχωριστά για κάθε μία παράμετρο, έχοντας ένα κοινό σύστημα συντεταγμένων. Συνδυάζοντας αυτά τα θεματικά επίπεδα προκύπτει ο τελικός χάρτης τρωτότητας της περιοχής. (Σχήμα 2.1)



Σχήμα 2.1 Διάγραμμα ροής της κατασκευής ενός χάρτη τρωτότητας υδροφορέα με τη μέθοδο DRASTIC από επιμέρους χάρτες τρωτότητας (Barbulescu 2020)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

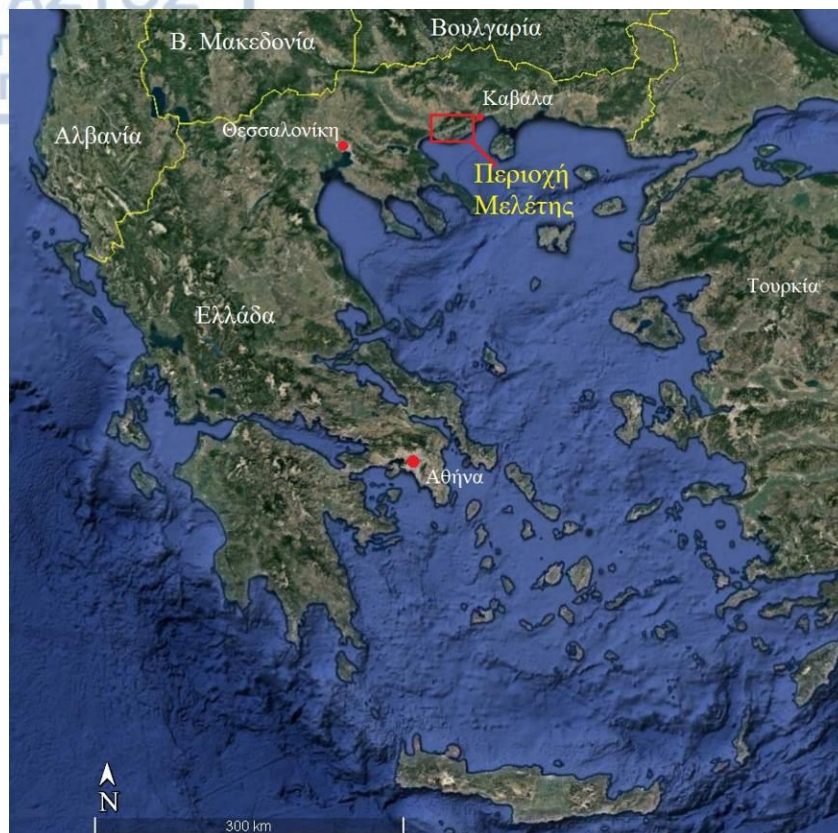
3.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΙ ΠΛΗΘΥΣΜΙΑΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

3.1.1 Γεωγραφικά στοιχεία της περιοχής

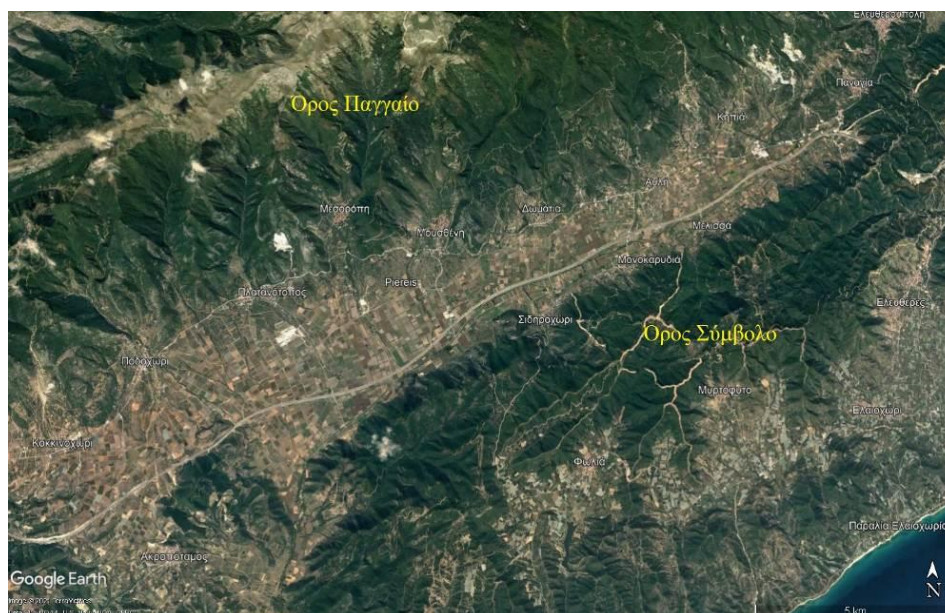
Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά το πεδινό τμήμα της Πιερίας λεκάνης. Η Πιερία λεκάνη ανήκει γεωγραφικά εξ ολοκλήρου στον Νομό Καβάλας και καταλαμβάνει το δυτικό του τμήμα. Διαρρέεται από τον ποταμό Μαρμαρά, ο οποίος αφού την διατρέχει με διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ, εξέρχεται από αυτήν με διεύθυνση προς τον Ν και στη συνέχεια εκβάλλει στον Στρυμωνικό Κόλπο.

Η Πιερία λεκάνη αποτελεί μέρος της λεκάνης του ποταμού Μαρμαρά και καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος αυτής. Οριοθετείται από το όρος Παγγαίο στα βόρεια και βορειοδυτικά της και από το όρος Σύμβολο στα νότια και νοτιοανατολικά της. Η θέση της περιοχής έρευνας στον ελλαδικό χώρο φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Στο Σχήμα 3.2. διακρίνεται μια δορυφορική φωτογραφία της Πιερίας Λεκάνης. Στο κέντρο της φωτογραφίας με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ μεταξύ του Παγγαίου όρους και το όρους Συμβόλου, διακρίνεται το πεδινό τμήμα της λεκάνης, στο οποίο εφαρμόσθηκε η μέθοδος DRASTIC.

Στο σχήμα 3.4 φαίνεται η υδροκριτική γραμμή που αποτελεί το όριο της λεκάνης. Αυτή ορίζεται στα βόρεια από τις εξής κορυφές της ορεινής μάζας του Παγγαίου: Κούμπλη (1725m), Μάτι (1835m), Αυγό (1956m) και Δύο Αδέλφια (972m). Στα νότια και νοτιοδυτικά της ορίζεται από τις εξής κορυφές του όρους Συμβόλου: Λημέρι (603m) και Βαλανιδιές (359m). Στα δυτικά ορίζεται από την κορυφή της Κουμαριάς (304m). Το σημείο εξόδου του ποταμού Μαρμαρά βρίσκεται στα νοτιοδυτικά της λεκάνης και ονομάζεται «Ερείπια Μονόλιθου» (Κακλής, 2011)



Σχήμα 3.1 Η θέση της Πιερίας Λεκάνης στην Ελλάδα. (Πηγή: Google Earth, τροποποιημένο)



Σχήμα 3.2 Δορυφορική φωτογραφία της Πιερίας Λεκάνης. (Πηγή: Google Earth, τροποποιημένο)

3.1.2 Πληθυσμιακά στοιχεία της περιοχής

Στην λεκάνη βρίσκονται συνολικά δεκαέξι κοινότητες, οι οποίες αυτοδιοικητικά ανήκουν σε τρεις δήμους, όπως φαίνεται στον πίνακα 3.1. Οι κοινότητες αυτές είναι χτισμένες στις παρυφές του Παγγαίου και του Συμβόλου. Σύμφωνα με την ΕΣΥΕ ο πληθυσμός της περιοχής παρουσίασε μείωση από το 1951, οπότε και είχε 11.209 κατοίκους, φτάνοντας να έχει 6.848 κατοίκους το 2001.

Το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού της Πιερίας λεκάνης ασχολείται με την καλλιέργεια. Τα καλαμπόκια, οι ελιές και τα αμπέλια είναι τα κύρια καλλιεργούμενα είδη. Ένα μικρότερο μέρος των κατοίκων ασχολείται με την κτηνοτροφία σε κτηνοτροφικές μονάδες κυρίως αιγοπροβάτων. Στις πλαγιές του όρους Παγγαίου υπάρχουν και μερικές μονάδες επεξεργασίας μαρμάρου. (Κακλής, 2011)

Πίνακας 3.1 Οι κοινότητες της Πιερίας Λεκάνης και οι Δήμοι στους οποίους ανήκουν (Κακλής, 2011)

Δήμος Πιερέων	Δήμος Ελευθερούπολης	Δήμος Ορφανού
Μουσθένη	Εξοχή	Ποδοχώρι
Αυλή	Κηπιά	
Δωμάτια	Ακροβούνι	
Μελισσοκομείο	Χρυσόκαστρο	
Πυργοχώρι		
Μεσιά		
Μέλισσα		
Μεσορρόπη		
Πλατανότοπος		
Καραβαγγέλης		
Σιδηροχώρι		

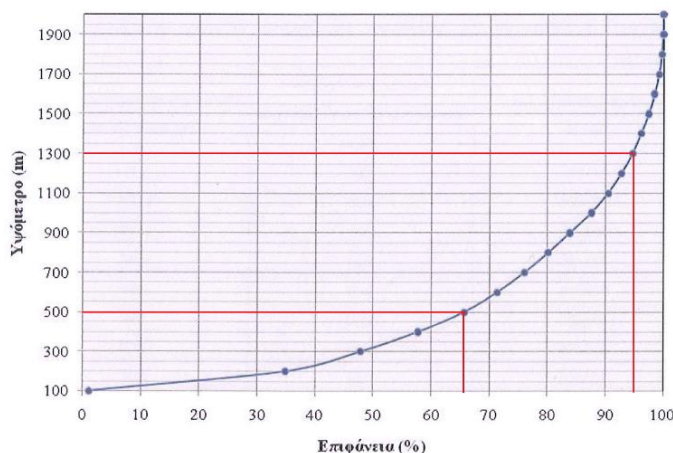
3.2 ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ, ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ

3.2.1 Τοπογραφία και μορφολογία της περιοχής

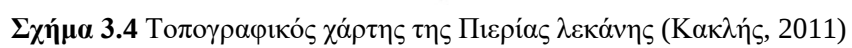
Όπως αναφέρθηκε, η Πιερία λεκάνη αναπτύσσεται με γενική διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ. Το σχήμα της είναι περίπου ελλειψοειδές και έχει έκταση 180.96 km^2 . Το μέγιστο μήκος της λεκάνης είναι περίπου 20.6 km , ενώ το μέγιστο πλάτος της περίπου 11.4 km (Κακλής, 2011). Το πεδινό τμήμα της λεκάνης έχει έκταση περίπου 86.34 km^2 , που αντιστοιχεί στο 47.7% της συνολικής έκτασής της.

Βρίσκεται μεταξύ του όρους Παγγαίου και του όρους Συμβόλου, με την κορυφή «Αυγό» του όρους Παγγαίου (1956 m) να αποτελεί το ανώτερο υψομετρικά σημείο της λεκάνης. Το χαμηλότερο υψομετρικά σημείο της εντοπίζεται στην έξοδο της λεκάνης, στη θέση «Μονόλιθος». Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης υπολογίστηκε μέσω της χρήσης GIS στα $475,1 \text{ m}$. (Κακλής, 2011)

Στην παρακάτω υψογραφική καμπύλη εκφράζεται η κατανομή της επιφάνειας της λεκάνης στα διάφορα υψόμετρα (Σχήμα 3.3). Από αυτήν παρατηρούμε ότι το 65% της συνολικής επιφάνειας της λεκάνης βρίσκεται σε υψόμετρο μικρότερο των 500 m . Το 35% της επιφάνειας καλύπτεται από ορεινό όγκο με υψόμετρο άνω των 500 m , ενώ το 5% της επιφάνειας καταλαμβάνεται από υψόμετρα μεγαλύτερα των 1300 m . Με βάση την υψογραφική καμπύλη η λεκάνη χαρακτηρίζεται πεδινή έως ημιορεινή (Κακλής, 2011).



Σχήμα 3.3 Υψομετρική καμπύλη της Πιερίας λεκάνης (Κακλής, 2011 με τροποποιήσεις)



Η μέση κλίση της λεκάνης υπολογίσθηκε μέσω της χρήσης GIS από τον Κακλή (2011) σε 12,7%. Στο Σχήμα 3.5 φαίνεται ο χάρτης κλίσεων της λεκάνης. Σε αυτόν διακρίνουμε τις μεγαλύτερες κλίσεις έως 45-50%, στο βόρειο τμήμα της λεκάνης, στη περιοχή του Παγγαίου. Στο νότιο τμήμα της λεκάνης όπου βρίσκεται το όρος Σύμβολο οι κλίσεις φτάνουν το 25-30%. Στο κεντρικό, πεδινό τμήμα οι κλίσεις είναι γενικά ήπιες και κυμαίνονται από 0 έως 5%.

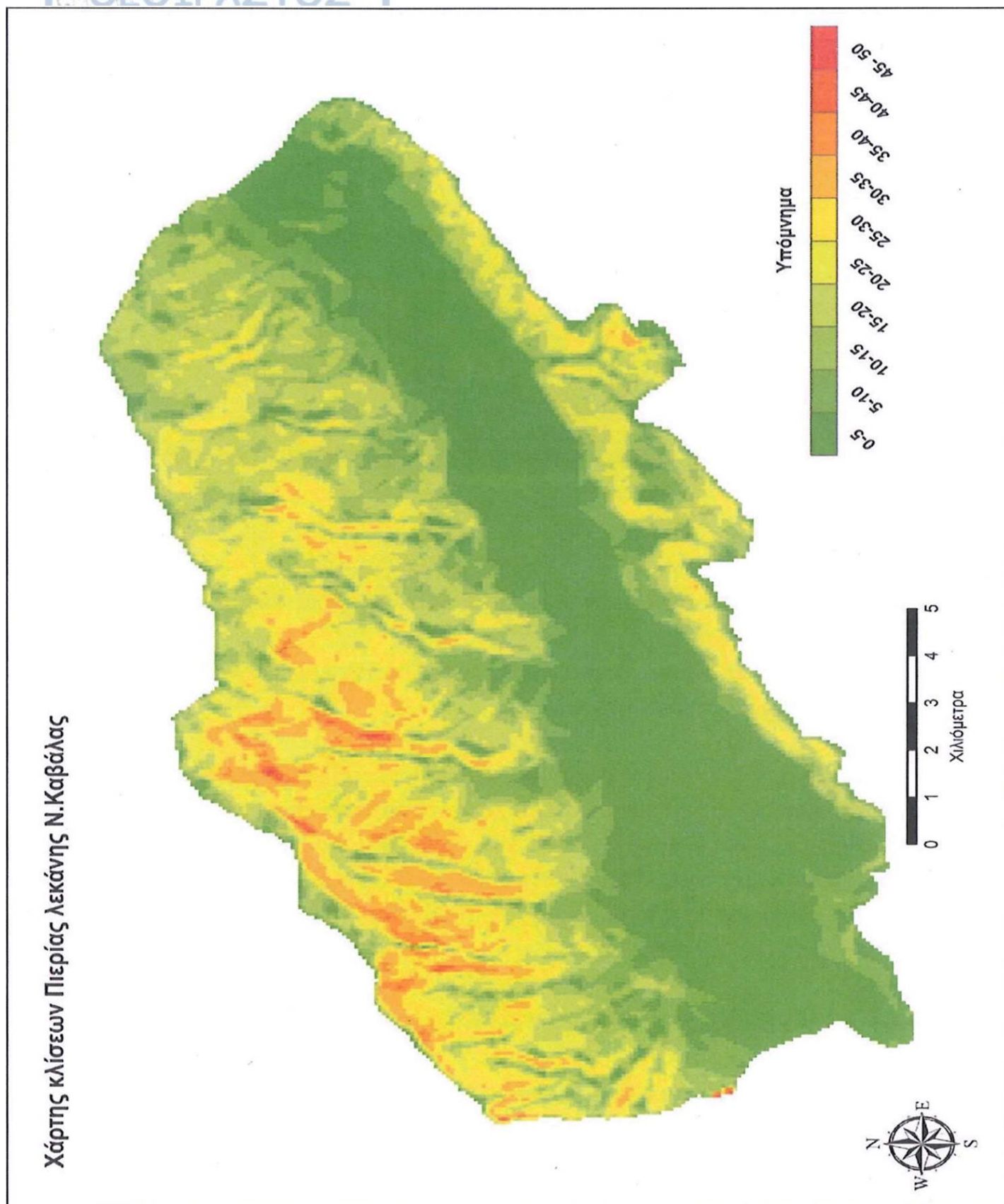
3.2.2 Υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης

Ως υδρογραφικό δίκτυο χαρακτηρίζουμε το σύνολο των ρεμάτων ή κοιτών που διαρρέουν μια λεκάνη από τα ανάντη προς τα κατόντη της. Ο τρόπος διαμόρφωσης του υδρογραφικού δικτύου χαρακτηρίζει την νομοτέλεια με την οποία τα ρέματα και οι κοίτες του είναι τοποθετημένα στον χώρο. Η δράση του υδρογραφικού δικτύου έχει μεγάλο ρόλο στην διαμόρφωση του αναγλύφου μιας περιοχής μέσω των διαδικασιών της διάβρωσης και της μεταφοράς υλικών.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6, η Πιερία λεκάνη έχει ιδιαίτερα αναπτυγμένο υδρογραφικό δίκτυο. Η αποστράγγιση της γίνεται κατά κύριο λόγο από ρέματα που δημιουργούνται στο όρος Παγγαίο και δευτερευόντως από ρέματα του όρους Συμβόλου. Αυτά συμβάλλουν στον ποταμό Μαρμαρά, ο οποίος ρέει κατά μήκος του πεδινού τμήματος της λεκάνης, παράλληλα με τις παρυφές του όρους Συμβόλου με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ. Εξέρχεται από την λεκάνη με διεύθυνση προς Ν στο σημείο «Μονόλιθος» και έπειτα εκβάλλει στο Στρυμωνικό κόλπο στο ύψος των Λουτρών Ελευθερών.

Σύμφωνα με τον Κακλή (2011) ο κύριος κλάδος του ποταμού έχει μόνιμη ροή σε όλη τη διάρκεια του χρόνου χωρίς να παρατηρείται στείρευση. Αντιθέτως μετά από έντονες βροχοπτώσεις παρατηρήθηκαν έντονα πλημμυρικά φαινόμενα, συνοδευόμενα από ραγδαία αύξηση της παροχής και της μεταφορικής ικανότητας του ποταμού.

Ο κύριος κλάδος του ποταμού βρέθηκε ότι είναι πέμπτης τάξης κατά Strahler (1952). Ο συντελεστής διακλάδωσης της λεκάνης απορροής υπολογίσθηκε ίσος με 5,7 και η υφή του χαρακτηρίστηκε ως λεπτή. Η υδρογραφική πυκνότητα υπολογίστηκε σε $2,58 \text{ km}^{-1}$ και η υδρογραφική συχνότητα ίση με $4,26 \text{ km}^{-2}$ (Κακλής, 2011).



Σχήμα 3.5 Χάρτης κλίσεων της Πιερίας Λεκάνης (Κακλής, 2011)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

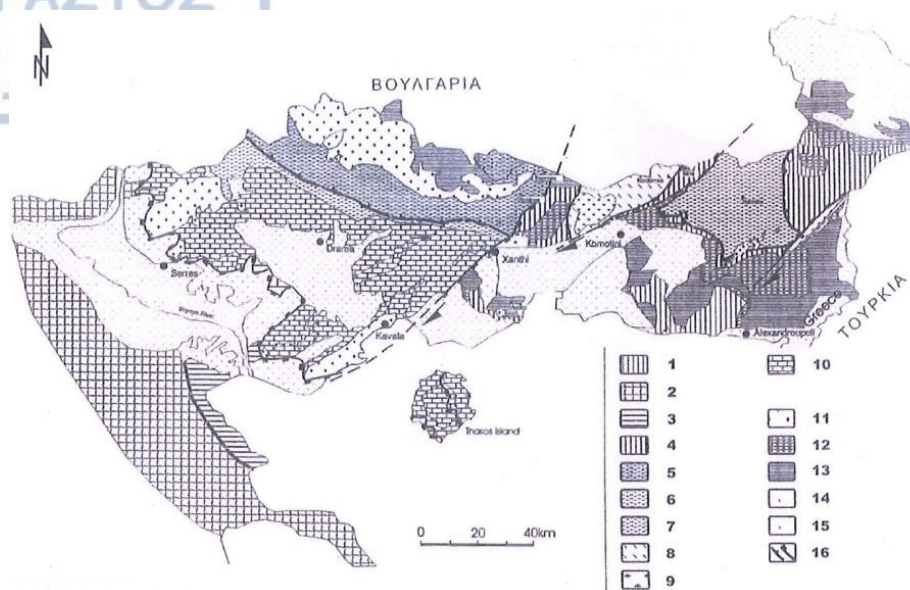
4.1 Γενικά Στοιχεία

Η Πιερία λεκάνη υπάγεται γεωτεκτονικά στην Μάζα Ροδόπης της Ελληνικής Ενδοχώρας και συγκεκριμένα ανήκει στην Ενότητα Παγγαίου (Σχήμα 4.1). Η Μάζα Ροδόπης έχει καθαρά ηπειρωτικό γεωτεκτονικό χαρακτήρα και θεωρείται ότι προέρχεται είτε από την πλάκα της Ευρασίας, είτε από Κιμμερικά ηπειρωτικά τεμάχη τα οποία αποσπάστηκαν από την Gondwana και ενσωματώθηκαν στην Ευρασία. (Μουντράκης, 2020).

Εξαιτίας της έλλειψης σαφούς στρωματογραφίας και γενικά ιζηματογενών πετρωμάτων προκύπτει δυσκολία στην μελέτη της μάζας της Ροδόπης. Η μάζα αποτελείται κυρίως από κρυσταλλοσχιστώδη και πυριγενή πετρώματα και έτσι οι νεότερες έρευνες βασίζονται κυρίως στη λιθολογική σύσταση του κρυσταλλοσχιστώδους. (Μουντράκης, 2020)

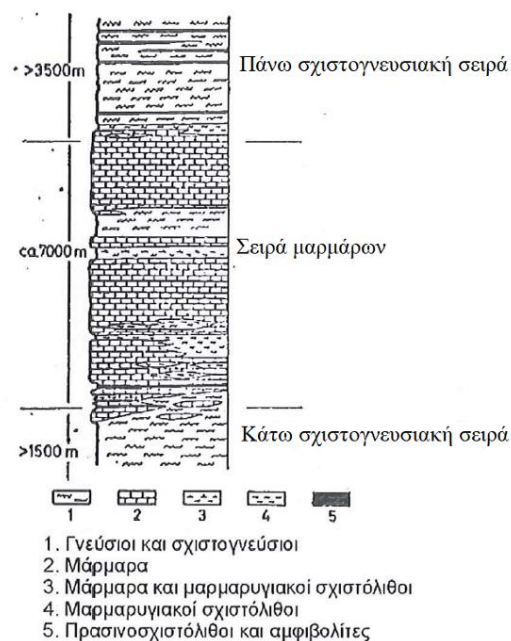
Οι νεότερες έρευνες (Papanikolaou, 1981) διαχωρίζουν την μάζα Ροδόπης σε δύο τεκτονικές ενότητες, την ανώτερη «τεκτονική ενότητα του Σιδηρονέρου» που βρίσκεται στα βόρεια, κατά μήκος των ελληνο-βουλγαρικών συνόρων και την κατώτερη «τεκτονική ενότητα του Παγγαίου» που καταλαμβάνει την Δ, ΝΔ Ροδόπη. Ο διαχωρισμός τους γίνεται με όριο την εφίππευση της ενότητας Σιδηρονέρου πάνω στην Ενότητα Παγγαίου κατά μήκος μιας μεγάλου μήκους τεκτονικής γραμμής διέυθυνσης ΒΔ-ΝΑ (περίπου 110°)

Όπως αναφέρθηκε, η περιοχή μελέτης ανήκει εξ ολοκλήρου στην Ενότητα Παγγαίου. Η Ενότητα Παγγαίου συγκροτείται από έναν κατώτερο ορίζοντα με ορθογνεύσιους, σχιστόλιθους και αμφιβολίτες, ένα μεσαίο ορίζοντα μαρμάρων μεγάλου πάχους και έναν ανώτερο ορίζοντα με εναλλαγές σχιστολίθων και μαρμάρων και θεωρείται η νεότερη εκ των δύο ενοτήτων (Σχήμα 4.2). (Μουντράκης, 2020)



Σχήμα 4.1 Χάρτης με τις επιμέρους μικρότερες ενότητες πετρωμάτων της Ροδόπης (Κατά Mroskos & Krohe 2000, από Μουντράκη, 2020)

1: Σχηματισμοί της Περιοδοπικής ζώνης στην περιοχή Αλεξανδρούπολης – Έβρου, 2 & 3: Εν. Βερτίσκου και Κερδυλλίων της Σερβομακεδονικής Μάζας, 4: Εν. Κίμης, 5 & 6: κυρίως Εν. Σιδηρονέρου, 7: Εν. Κέχρου, 8: Εν.Καρδάμου, 9: Συμπυκνωμένα πυριγενή πετρώματα της Εν. Καρδάμου, 10: Εν. Παγγαίου, 11: Γρανίτες 38-23 Ma, 12 & 13: Μολασσικά ιζήματα Α. Ηωκαίνου – Ολιγοκαίνου, 14: Μειοκαινικά ιζήματα, 15: Ιζήματα Πλειο-Πλειστοκαίνου, 16: Μεγάλες ρηξιγενείς γραμμές (συμπίεστικές-εφελκυστικές)



Σχήμα 4.2 Στρωματογραφική στήλη της μεταμορφωμένης σειράς του κρυσταλλοσχιστώδους της μάζας Ροδόπης. (Κατά Kronberg 1969, από Δημόπουλος, 1978)

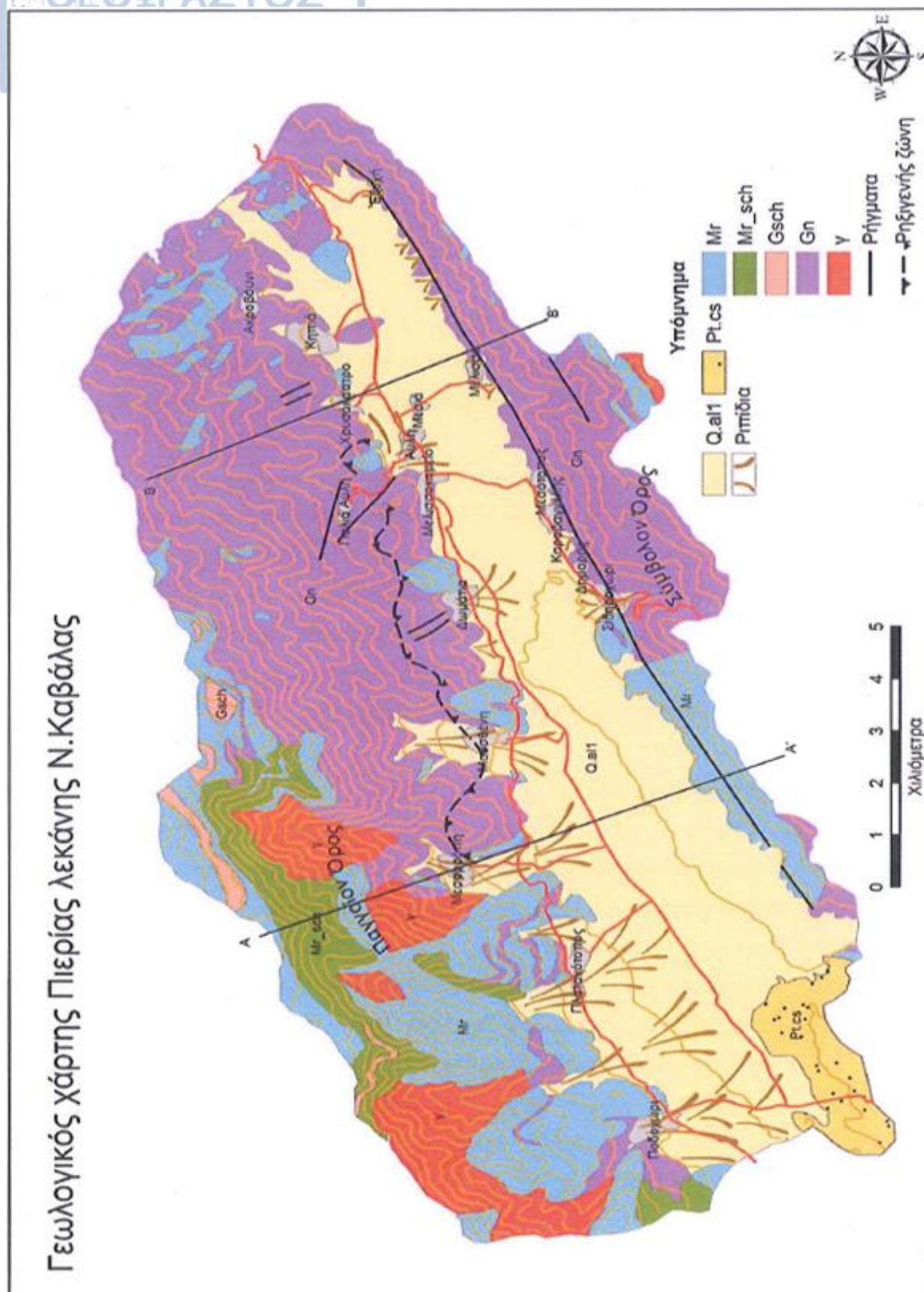
4.2 Μεταμορφωμένες σειρές

Στο σχήμα 4.3 φαίνεται ο γεωλογικός χάρτης της Πιερίας λεκάνης. Σε αυτόν διακρίνονται οι δύο κατώτερες σειρές μεταμορφωμένων πετρωμάτων, οι οποίες έχουν μεγάλη έκταση στην λεκάνη. Ακόμη διακρίνονται τα νεότερα ιζήματα του πεδινού τμήματος της λεκάνης καθώς και κάποια πυριγενή πετρώματα, που θα αναλυθούν στις επόμενες παραγράφους.

Η κάτω σχιστογενευσιακή σειρά αποτελείται κυρίως από γνέυσιους (Gn), γενευσιακούς σχιστόλιθους (Gsch), πρασινοσχιστόλιθους και αμφιβολίτες. Στο ανώτερο σημείο της σειράς, στην επαφή με την υπερκείμενη ανθρακική σειρά, συναντώνται επίσης εναλλαγές μαρμαρυγιακών σχιστόλιθων (Mr_sch) και μαρμάρων (Mr).

Η κατώτερη αυτή σειρά εμφανίζεται τόσο στις Ν παρυφές του Παγγαίου, όσο και στις Β του Συμβόλου. Αποτελείται κυρίως από γνέυσιους στη μορφή στρωμάτων και όγκων και γενευσιακούς σχιστόλιθους. Στη περιοχή του Παγγαίου η μετάβαση από τη σειρά αυτή στην σειρά των μαρμάρων γίνεται με τη παρουσία αμφιβολιτών, οι οποίοι έχουν μορφή ενστρώσεων, φακών ή εκτεταμένων επιφανειών με χαρακτηριστική στρωματοειδή δομή.

Η υπερκείμενη σειρά αποτελείται από ογκώδη, λευκά μάρμαρα δολομιτικής προέλευσης που αντιπροσωπεύουν μια παλιά ανθρακική ιζηματογένεση. Σε αυτά παρεμβάλλονται συχνά γενευσιακά υλικά. Τα μάρμαρα στη μέση της σειράς είναι πιο καθαρά σε σχέση με τα μάρμαρα που βρίσκονται κοντά στα όρια της με την υποκείμενη και την υπερκείμενη σειρά. Τα μάρμαρα είναι κυρίως συμπαγή και λευκά και δεν χαρακτηρίζονται από έντονη στρώση. Κατά θέσεις η δομή και το χρώμα τους αλλάζει, ανάλογα με τις συνθήκες ιζηματογένεσης που επικρατούσαν. (Κακλής, 2011)



Σχήμα 4.3 Γεωλογικός χάρτης της Περίας λεκάνης (Κακλής, 2011)



Η συνέχεια των μεταμορφωμένων σειρών διακόπτεται από πλουτωνικές διεισδύσεις, που είναι τοποθετημένες με γενική διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ. Πρόκειται για Τριτογενή πλουτωνικά μόνο πετρώματα ασβεσταλκαλικού χαρακτήρα. Τα αντίστοιχα ηφαιστειακά πετρώματα που υπάρχουν στην υπόλοιπη μάζα Ροδόπης, απουσιάζουν από την Πιερία λεκάνη.

Συγκεκριμένα, πρόκειται για γρανιτοειδή (γ) που εμφανίζονται σε μικρά ή μεγάλα σώματα κοντά στις περιοχές Μεσσολακιάς, Ποδοχωρίου και Μεσσορόπης. Φαίνεται πως αποτελούν εμφανίσεις μια εννιαίας πλουτωνικής μάζας που αποτελεί το κύριο τμήμα μιας αντικλινικής δομής που έχει ΒΑ-ΝΔ διεύθυνση. Η δομή αυτή έχει μήκος περίπου 25 km και είναι παράλληλη με την διεύθυνση ανάπτυξης του γειτονικού πλουτωνίτη της Καβάλας, ο οποίος αποτελεί το κύριο τμήμα του Όρους Συμβόλου στα νότια της λεκάνης.

Κατά τη διείσδυση τους στα μεταμορφωμένα πετρώματα οι πλουτωνίτες έχουν προκαλέσει τη δημιουργία φαινομένων επαφής. Αυτό είναι ορατό στη περιοχή τόσο στα μάρμαρα, όσο και στους γνεύσιους. Επίσης προκαλούν αναθόλωση των περιβαλλόντων πετρωμάτων, φαινόμενο που είναι χαρακτηριστικά ορατό στην εμφάνιση τους στην νότια πλευρά του Παγγαίου. (Κακλής, 2011)

4.4 Νεότεροι σχηματισμοί – Πεδινό τμήμα

Το πεδινό τμήμα της Πιερίας λεκάνης αποτελείται κυρίως από Ολοκαινικές αποθέσεις (Q.all). Στο ΝΔ τμήμα της περιοχής μελέτης υπάρχουν κάποιες Πλειστοκαινικές αποθέσεις (Pt.cs), οι οποίες όμως καλύπτουν ένα μικρό μόνο τμήμα της. Οι επιφανειακές Νεογενείς αποθέσεις απουσιάζουν από την λεκάνη.

Οι Ολοκαινικές αποθέσεις είναι ποταμοχερσαίας φάσης και σε αυτές συμπεριλαμβάνονται οι πλευρικοί σχηματισμοί, οι οποίοι είναι κυρίως κώνοι κορημάτων και ποταμίων αποθέσεων. Σύμφωνα με τον Δημόπουλο (1978) οι ολοκαινικοί σχηματισμοί μπορούν να διακριθούν σε τρεις βασικούς τύπους:



- Χαλαρές αποθέσεις κροκαλών. Βρίσκονται στα Β περιθώρια της λεκάνης με τα μάρμαρα του Παγγαίου και πρόκειται πιθανώς για αναβαθμίδα των ολοκαινικών αποθέσεων.
- Πλευρικοί σχηματισμοί. Πρόκειται για κορήματα με ή χωρίς πηλό, που οφείλουν την τοποθέτησή τους στη δράση του επιφανειακού νερού.
- Κώνοι ποταμοχειμάρων αποθέσεων. Είναι μορφολογικά ανάλογοι με τον δεύτερο τύπο, όμως έχουν μεγαλύτερες διαστάσεις. Βρίσκονται κυρίως κατά μήκος του Β περιθωρίου της λεκάνης με το όρος Παγγαίου και σε μικρότερη έκταση και συχνότητα στο Ν, ΝΑ και ΝΔ της περιθώριο με το όρος Σύμβολο. Αυτό δίνει στη λεκάνη μια κλίση προς τα Ν. Τα υλικά τους είναι κυρίως ακανόνιστου σχήματος ογκόλιθοι οι οποίοι στα μικρότερα υψόμετρα εμφανίζονται βαθμιαία πιο αποστρωγγυλοποιημένοι και με μικρότερο μέγεθος, φτάνοντας το μέγεθος άμμου ή ιλύος.

Τα αλλουβιακά αυτά ριπίδια εμφανίζονται με μεγάλη συχνότητα, επιφάνεια και όγκο στα όρια της λεκάνης με το όρος Παγγαίο, ενώ απουσιάζουν τελείως από τη δυτική πλευρά του Συμβόλου. Σύμφωνα με τον Δημόπουλο (1978) αυτό πιθανώς οφείλεται στη συνεχή ανύψωση του όρους Παγγαίου που οδηγεί στην ανανέωση του αναγλύφου του και στη συνεχή αλλαγή του βασικού επιπέδου των γύρω λεκανών. Αντιθέτως το όρος Σύμβολο χαρακτηρίζεται από μια συνεχή βύθιση. Αυτό το γεγονός έχει οδηγήσει τον ποταμό Μαρμαρά να κινείται παράλληλα και σε άμεση επαφή με τις παρυφές του όρους Συμβόλου.

Τα πλειστοκαινικά ιζήματα στα ΝΔ της λεκάνης είναι κυρίως χερσαία και ποταμοχειμάρια προέλευσης. Πρόκειται κυρίως για άμμους, ψαμμίτες, αργίλους και θαλάσσια κροκαλοπαγή με ενστρώσεις μαργαϊκών ασβεστολίθων και ψαμμιτών. (Syrides & Psilonikos, 1989). Τα ιζήματα αυτά διαχωρίζουν τη λεκάνη από τη θάλασσα στο ΝΔ άκρο της, όπου και διακόπτονται απότομα, χωρίς να εμφανίζονται σε άλλο σημείο της. Αυτό πιθανώς οφείλεται στην ύπαρξη ενός κανονικού ρήγματος διεύθυνσης ΒΒΔ-ΝΝΑ και μετάπτωσης του ανατολικού τεμάχους, που αποκόπτει την λεκάνη προς τα ΔΝΔ.

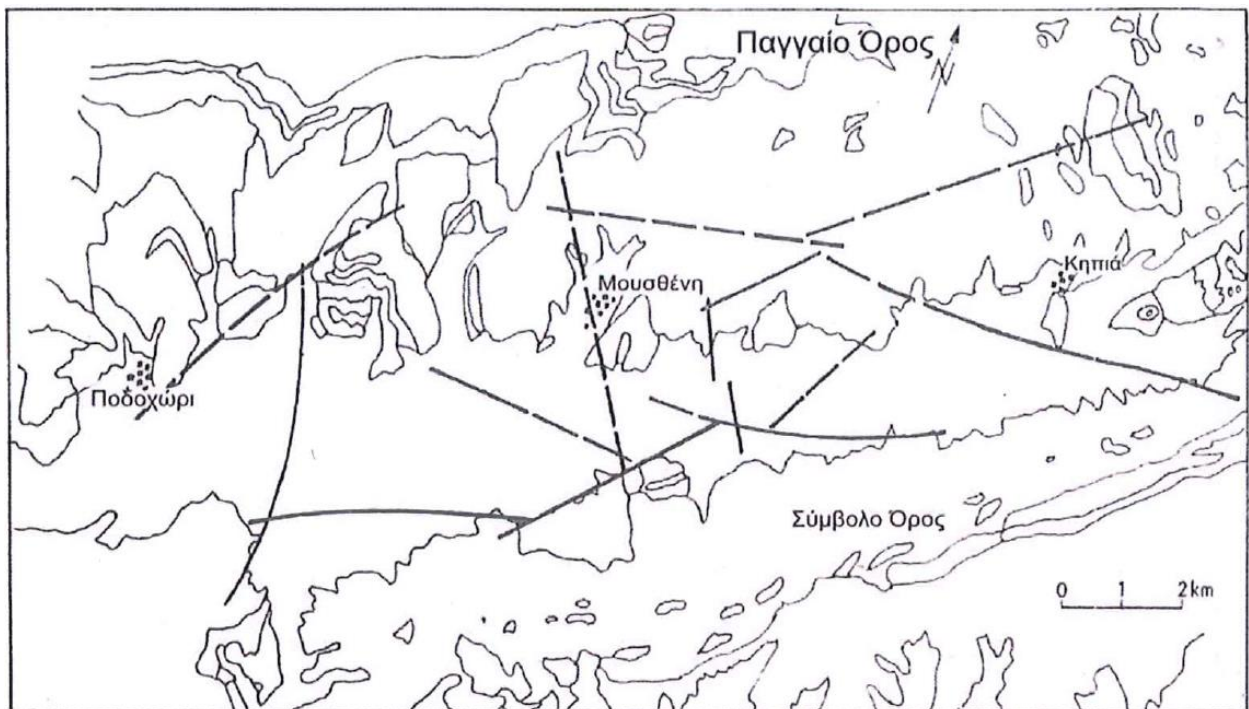
Τα νεογενή ιζήματα, όπως αναφέρθηκε απουσιάζουν από την Πιερία λεκάνη. Αξίζει όμως να σημειωθεί ότι η ύπαρξή τους στη λεκάνη δεν αποκλείεται, αφού πιθανώς υπάρχουν, αλλά έχουν καλυφθεί από τα πλειστοκαινικά ιζήματα που βρίσκονται στα ΝΔ της λεκάνης.

4.5 Τεκτονική κατάσταση της περιοχής

Οι διάφορες πτυχωσιγενείς και ρηξιγενείς δομές που έχουν αναπτυχθεί στα πετρώματα της περιοχής, παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον αφού επηρεάζουν την υδρογεωλογική συμπεριφορά των σχηματισμών. Σύμφωνα με τους Kronberg (1969) και Δημόπουλο (1978) τα μεταμορφωμένα πετρώματα διατέμνονται από δύο κύρια τεκτονικά συστήματα, τα οποία έχουν διευθύνσεις ΒΑ-ΝΔ (30° - 50°) και ΒΔ-ΝΑ (120° - 130°).

Σύμφωνα με τον Δημόπουλο (1978) τα συστήματα διακλάσεων που αναπτύσσονται στα πετρώματα, ακολουθούν τις διευθύνσεις των δύο αυτών κύριων τεκτονικών δομών. Ο ίδιος ερευνητής, κατά την χαρτογράφηση των υδροχημικών στοιχείων των υπογείων νερών της λεκάνης, εντόπισε ένα πλήθος κανονικών ρηγμάτων με διευθύνσεις ΒΒΑ-ΝΝΔ και ΒΒΔ-ΝΝΑ έως ΒΔ-ΝΑ, τα οποία φαίνονται στο Σχ. 3.10 (Δημόπουλος, 1986).

Οι παραπάνω τεκτονικές δομές επηρεάζουν σημαντικά την κατανομή, τον εμπλουτισμό και την ανάπτυξη σε βάθος των υδροφόρων στρωμάτων της λεκάνης (Κακλής, 2011).



Σχήμα 4.4 Ρηξιγενείς δομές εντός της λεκάνης απορροής (Δημόπουλος 1986),

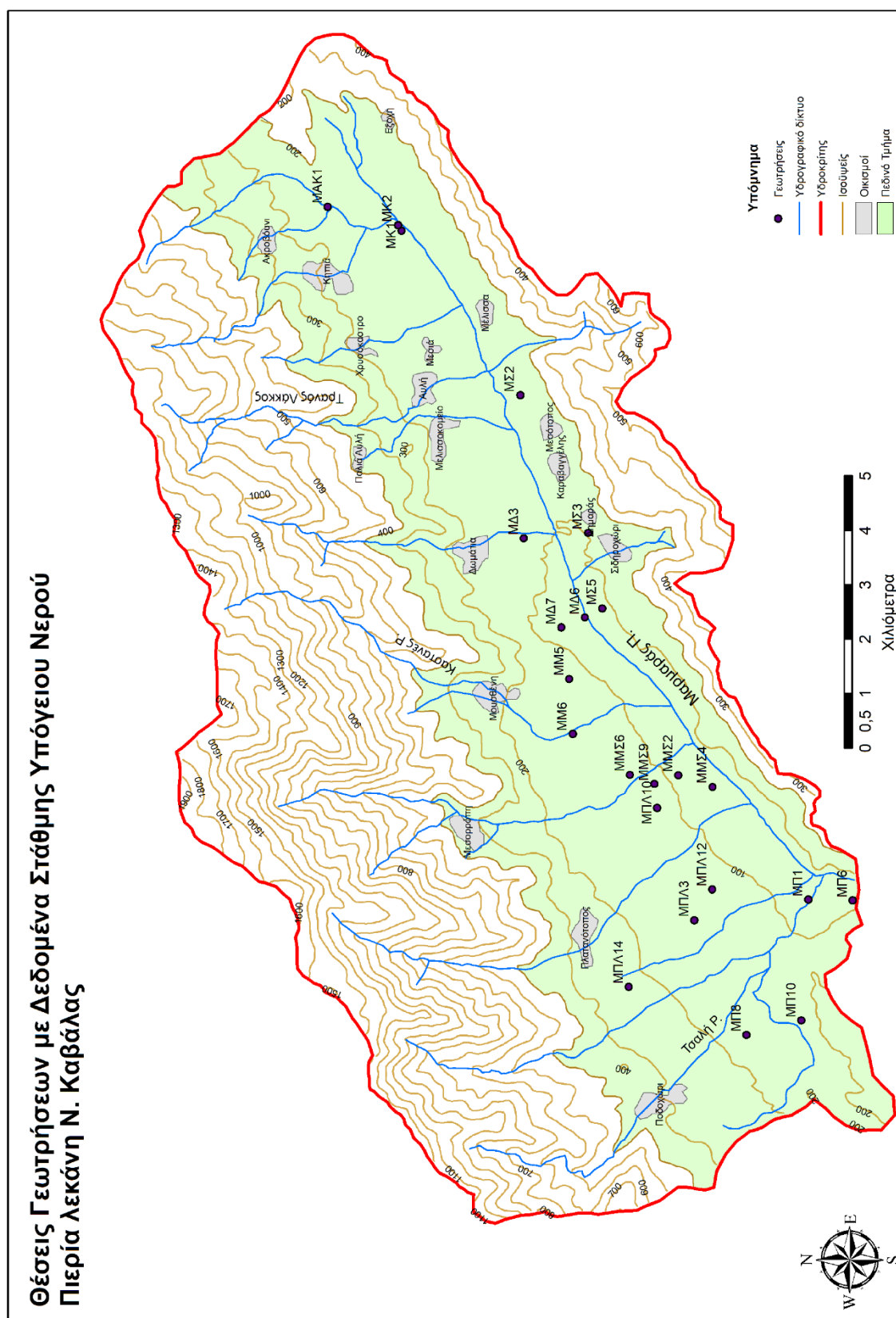
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ DRASTIC

5.1 ΤΟ ΒΑΘΟΣ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ (D)

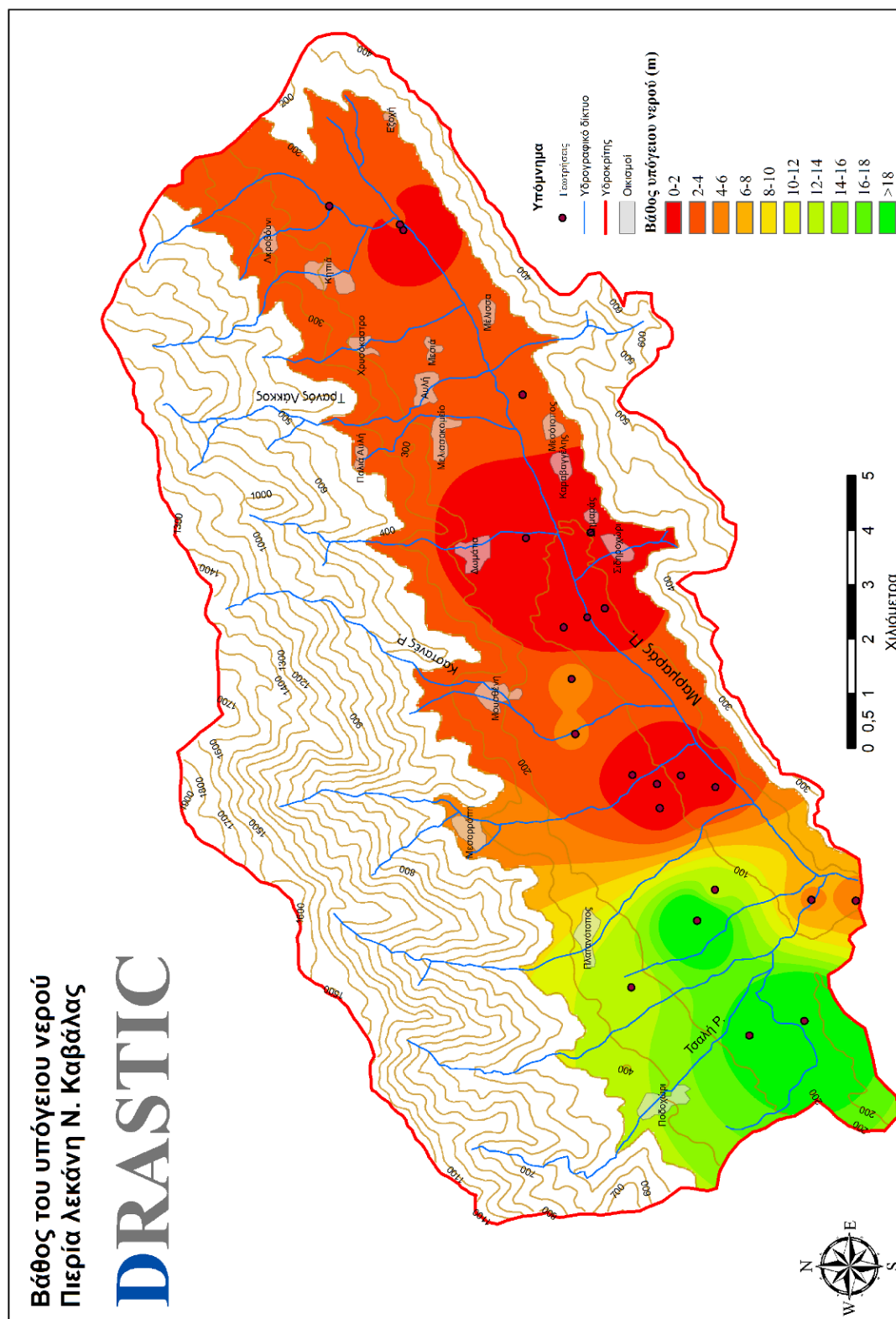
Για τον υπολογισμό του βάθους του υπόγειου νερού χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από 23 γεωτρήσεις που βρίσκονται στο πεδινό τμήμα της Πιερίας λεκάνης, για τις οποίες υπήρχαν δεδομένα στάθμης για την περίοδο 2008-2021. Η θέση αυτών των γεωτρήσεων καθώς και η αντίστοιχη ονομασία της κάθε μίας φαίνεται στο σχήμα 5.1.

Από αυτές τις γεωτρήσεις λήφθηκαν δεδομένα για τη στάθμη του υπόγειου νερού κατά την ξηρή και κατά την υγρή περίοδο του κάθε έτους. Από αυτά βρέθηκε το έτος κατά το οποίο παρατηρήθηκε η υψηλότερη μέση στάθμη από όλες τις γεωτρήσεις της περιοχής μελέτης (2011). Το έτος αυτό επιλέχθηκε διότι, όσο μικρότερο είναι το βάθος του υπόγειου νερού, τόσο μεγαλύτερη είναι και η τρωτότητα του υδροφορέα. (Βουδούρης, 2016)

Οι στάθμες της κάθε γεώτρησης χαρτογραφήθηκαν με την χρήση του προγράμματος ArcMap, και από αυτές κατασκευάστηκε ο χάρτης του σχήματος 5.2, όπου φαίνονται τα βάθη του υπόγειου νερού που επικρατούν στην λεκάνη. Τα βάθη ταξινομήθηκαν σε 10 τάξεις, ανά 2 μέτρα και τα βάθη μικρότερα των 2 μέτρων έλαβαν την μεγαλύτερη βαθμονόμηση (10), ενώ τα βάθη που είναι μεγαλύτερα των 25 μέτρων έλαβαν την ελάχιστη βαθμονόμηση (1). Η βαρύτητα της παραμέτρου εκτιμήθηκε ίση με 5.



Σχήμα 5.1 Οι θέσεις των γεωτρήσεων με δεδομένα στάθμης.



Σχήμα 5.2 Θεματικός χάρτης ταξινόμησης του βάθους του υπόγειου νερού κατά τον Μάρτιο του 2011.

Το βάθος του υπόγειου νερού στην Πιερία λεκάνη κυμαίνεται (κατά το έτος 2011 οπότε και παρατηρήθηκε το μικρότερο μέσο βάθος στην λεκάνη), από 0 m (αρτεσιανισμός) έως 32.48 m. Τα φαινόμενα αρτεσιανισμού παρατηρήθηκαν στις γεωτρήσεις ΜΔ3 (N του χωριού Δωμάτια), ΜΔ7 (NΔ του χωριού Δωμάτια και ΝΑ του χωριού Μουσθένη), ΜΜΣ6 και ΜΜΣ9 (NΝΔ του χωριού Μουσθένη. Το μεγαλύτερο βάθος παρατηρήθηκε στην γεώτρηση ΜΠ10 στο ΝΔ άκρο της λεκάνης (NΝΑ του χωριού Ποδοχώρι).

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2, τα μεγαλύτερα σχετικά βάθη, μεγαλύτερα των 8 μέτρων παρατηρούνται στο δυτικό τμήμα της λεκάνης, δυτικά του χωριού Πλατανότοπος. Τα μέγιστα βάθη της περιοχής μελέτης παρατηρούνται στο ΝΔ άκρο της. Τα μικρότερα σχετικά βάθη, μικρότερα των 8 μέτρων, παρατηρούνται στο ανατολικό τμήμα της λεκάνης, ανατολικά του χωριού Πλατανότοπος. Τα ελάχιστα βάθη παρατηρούνται συγκεντρωμένα σε τρεις περιοχές, οι οποίες βρίσκονται κοντά στον ποταμό Μαρμαρά και συγκεκριμένα σε σημεία όπου ένας μικρότερος κλάδος του ποταμού συναντά τον κύριο κλάδο.

Όσον αφορά την επίδραση του βάθους του υπόγειου νερού στην μέθοδο DRASTIC, το Δ και ΝΔ τμήμα της λεκάνης που αναφέρθηκε είναι περισσότερο προστατευμένο από πιθανή ρύπανση σε σχέση με την υπόλοιπη λεκάνη, εξαιτίας των σχετικά μεγαλύτερων βαθών που παρατηρούνται σε αυτό.

5.2 ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ (R)

Για τον υπολογισμό του εμπλουτισμού χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από 22 γεωτρήσεις του πεδινού τμήματος της λεκάνης. Κάποιες από αυτές είναι ίδιες με τις γεωτρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του βάθους του υπόγειου νερού, ενώ άλλες διαφέρουν, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα λιθολογικών τομών του συνόλου των διαθέσιμων γεωτρήσεων στη περιοχή. Οι γεωτρήσεις αυτές καθώς και η ονομασία τους φαίνονται στο σχήμα 5.3.

Ο εμπλουτισμός αντιπροσωπεύει τις ετήσιες ποσότητες νερού που κατεισδύουν από την επιφάνεια του εδάφους στον υπόγειο υδροφόρο. Για τον υπολογισμό της απαιτούνται στοιχεία βροχόπτωσης για την περίοδο μελέτης, καθώς και ο συντελεστής κατείσδυσης του κάθε τμήματος της περιοχής μελέτης (Βουδούρης, 2016).

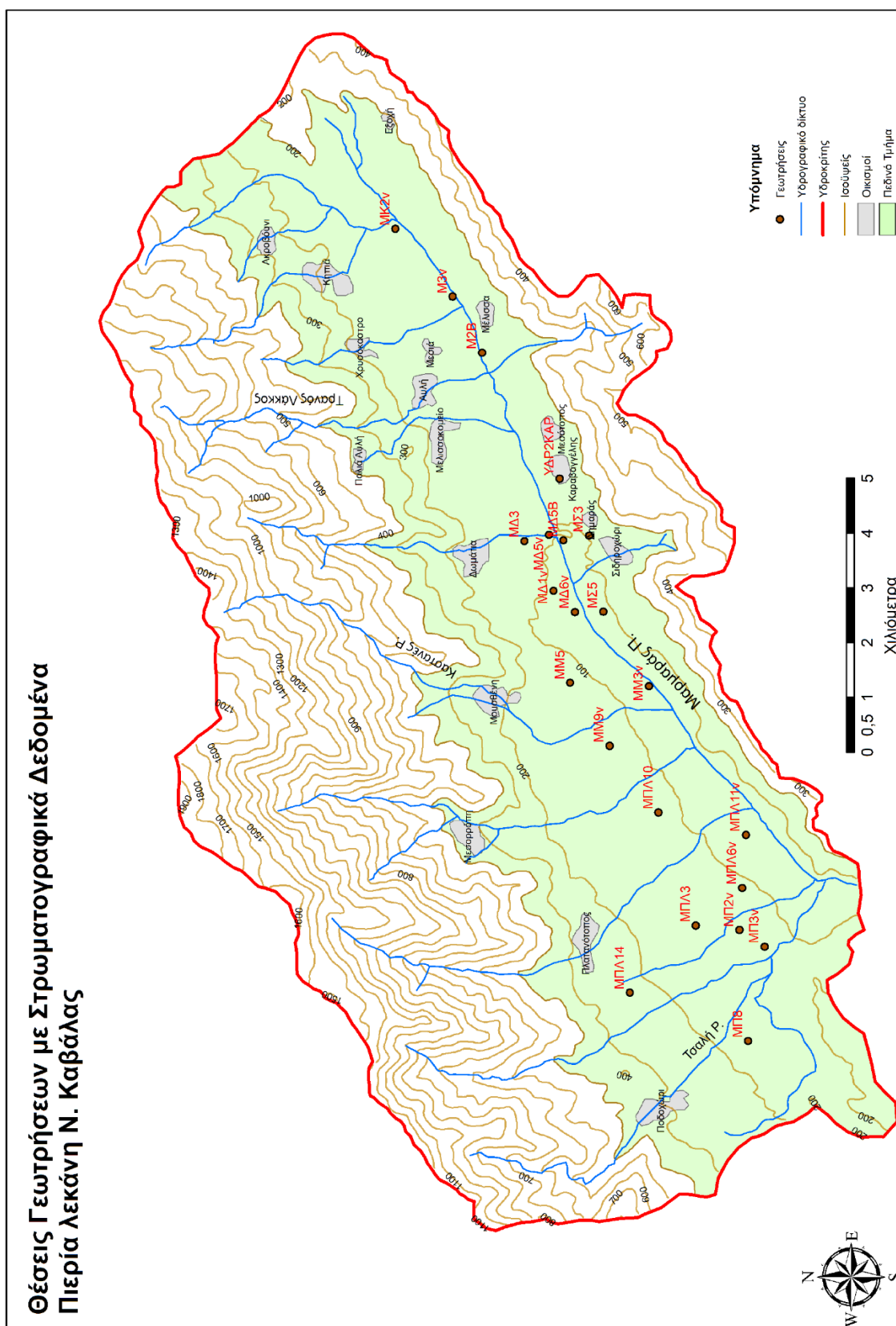
Για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας χρησιμοποιήθηκαν βροχομετρικά δεδομένα από τον σταθμό της Ελευθερούπολης, ο οποίος βρίσκεται στα ΒΑ της λεκάνης, λίγο έξω από τα όρια της. Συγκεντρώθηκαν στοιχεία για την περίοδο 2008-2020, δηλαδή από όταν άρχισε η λειτουργία του σταθμού, έως και το έτος για το οποίο υπάρχουν πλήρη δεδομένα. Από αυτά υπολογίστηκε το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης για αυτή την περίοδο, το οποίο είναι ίσο με 696.46 mm και μπορεί να θεωρηθεί αντιπροσωπευτικό του ύψους βροχόπτωσης που δέχεται η ίδια η λεκάνη.

Για την εκτίμηση του συντελεστή κατείσδυσης, δεδομένου ότι στο πεδινό τμήμα της λεκάνης οι κλίσεις παραμένουν παρόμοιες και σχετικά μικρές, χρησιμοποιήθηκε ως κριτήριο η λιθολογία των πρώτων μέτρων του επιφανειακού στρώματος, δηλαδή το έδαφος, από τις 22 προαναφερθέντες λιθολογικές τομές. Με βάση αυτό η περιοχή διαχωρίστηκε σε 3 ζώνες με 3 αντίστοιχες συντελεστές κατείσδυσης:

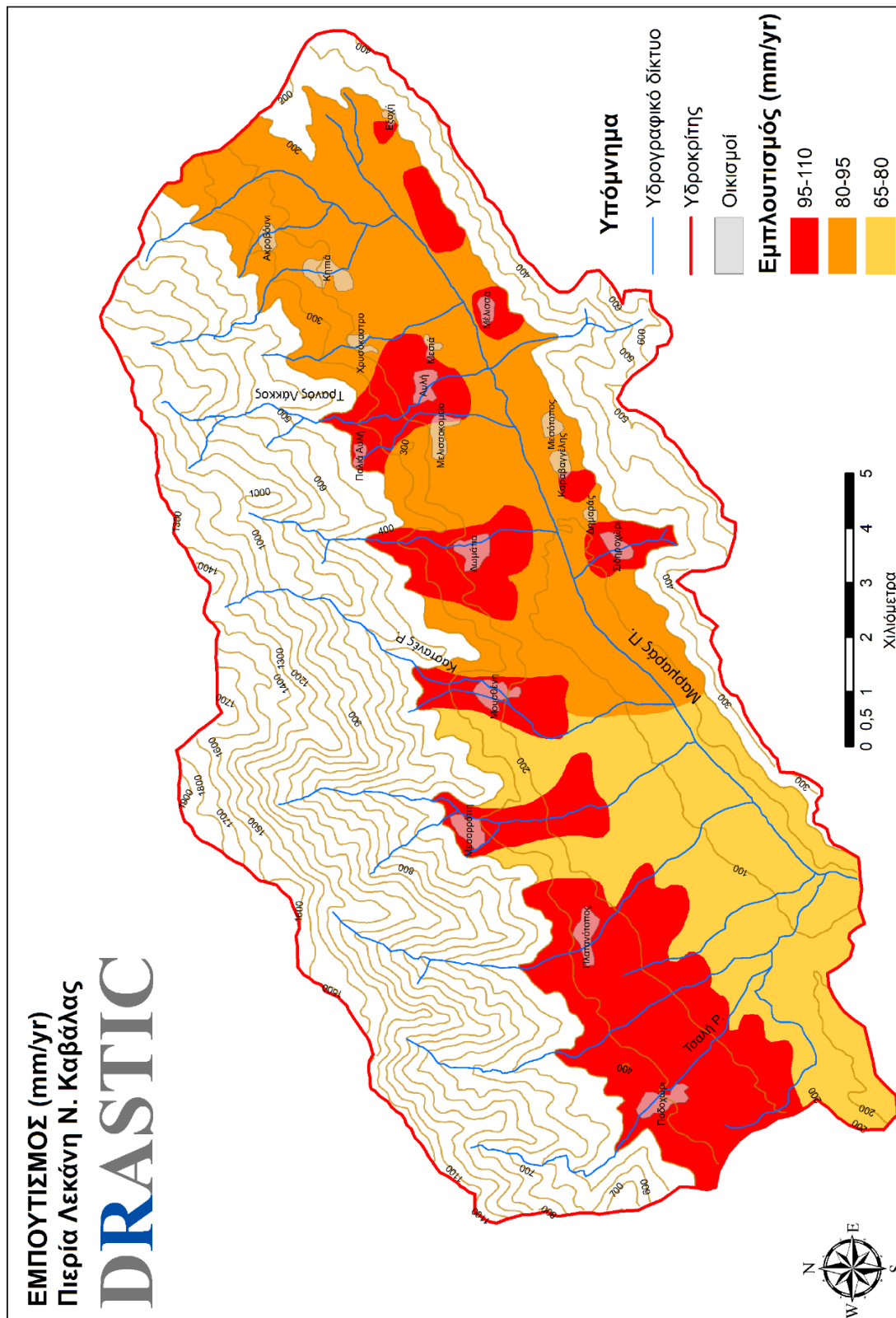
- Στην ζώνη των κώνων κορημάτων και μορφολογικά ανάλογων σχηματισμών, που βρίσκεται στα σύνορα του πεδινού τμήματος της λεκάνης με το όρος Παγγαίο και σε μικρότερη έκταση στα όρια του με το όρος Σύμβολο, όπου επικρατούν οι κροκάλες και τα χαλίκια και έχει συντελεστή κατείσδυσης 15%.
- Στη ζώνη των χαλικών που καταλαμβάνει το κεντρικό και ΒΑ τμήμα της λεκάνης, από τα νότια της Μουσθένης έως το ΒΑ όριο της λεκάνης, με εξαίρεση τα σημεία αυτής της περιοχής όπου βρίσκεται η πρώτη ζώνη. Σε αυτήν επικρατούν οι χάλικες και έχει συντελεστή κατείσδυσης 12.5%.
- Στη ζώνη της αργίλου που καταλαμβάνει το υπόλοιπο πεδινό τμήμα, δηλαδή από τα νότια της Μουσθένης έως και το ΝΔ όριο της λεκάνης, όπου επικρατούν η άργιλος και η άμμος και έχει συντελεστή κατείσδυσης 10%.

Πολλαπλασιάζοντας το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης της λεκάνης ($P=696.46 \text{ mm}$) με την επιφάνεια της κάθε ζώνης και τον αντίστοιχο συντελεστή κατείσδυσης, μπορούμε να υπολογίσουμε τον εμπλουτισμό της κάθε μίας, δηλαδή την ποσότητα των κατακρημνισμάτων που κατεισδύουν στο υπέδαφος. Με βάση τον υπολογισμό αυτόν προέκυψε ο χάρτης του σχήματος 5.4, όπου διακρίνεται η κατανομή του εμπλουτισμού στο πεδινό τμήμα της Πιερίας λεκάνης.

Το ύψος νερού που κατεισδύει ετησίως υπολογίσθηκε ίσο με περίπου 105 mm στην ζώνη των κώνων κορημάτων, 87 mm στη ζώνη των χαλικών και 70 mm στην ζώνη της αργίλου. Εντούτοις κατά την κατασκευή του χάρτη ο διαχωρισμός των επμέρους κλάσεων έγινε με εύρη 15 mm με αντίστοιχη βαθμονόμηση, δηλαδή μεγαλύτερη βαθμολογία αντιστοιχεί σε μεγαλύτερα ύψη κατείσδυσης Έτσι στην πρώτη ζώνη θεωρήθηκε ότι κατεισδύουν 95 – 110 mm νερού (βαθμοί 8), στη δεύτερη 80 – 95 mm (βαθμοί 6), ενώ στην τρίτη 65 – 80 mm (βαθμοί 5). Η βαρύτητα της παραμέτρου εκτιμήθηκε ίση με 4.



Σχήμα 5.3 Οι θέσεις των γεωτρήσεων με στρωματογραφικά δεδομένα από λιθολογικές τομές.



Σχήμα 5.4 Θεματικός χάρτης ταξινόμησης του εμπλουτισμού.

Οι τιμές νερού που κατεισδύει στο πεδινό τμήμα της λεκάνης κυμαίνονται από 70mm έως 105 mm. Στον χάρτη του Σχήματος 5.4 διακρίνεται η ταξινόμηση των τιμών εμπλουτισμού σε 3 ζώνες ανάλογα με την λιθολογία των επιφανειακών στρωμάτων. Έτσι η περιοχή μελέτης χωρίζεται:

- Στην ζώνη των κώνων κορημάτων και μορφολογικά ανάλογων σχηματισμών, που βρίσκεται στα σύνορα του πεδινού τμήματος της λεκάνης με το όρος Παγγαίο και σε μικρότερη έκταση στα όρια του με το όρος Σύμβολο. Αποτελείται κυρίως από κροκάλες και χαλίκια. Η ζώνη αυτή έχει έκταση 31 km^2 , όπως αυτή υπολογίσθηκε με τη χρήση του ArcMap, και συντελεστή κατείσδυσης 15%. Σε αυτήν υπολογίσθηκε ότι κατεισδύουν ~105mm νερού ετησίως. Όσον αφορά την επίδραση του εμπλουτισμού στη τρωτότητα, η ζώνη αυτή είναι η πιο επιρρεπής στη ρύπανση από τις τρεις.
- Στη ζώνη των χαλικών που καταλαμβάνει το κεντρικό και ΒΑ τμήμα της λεκάνης, από τα νότια της Μουσθένης έως το ΒΑ όριο της λεκάνης, με εξαίρεση τα σημεία αυτής της περιοχής όπου βρίσκεται η πρώτη ζώνη. Σε αυτήν επικρατούν οι χάλικες στο επιφανειακό στρώμα, με την άργιλο να υπάρχει σε μικρότερα ποσοστά. Η ζώνη αυτή έχει έκταση 35.4 km^2 και συντελεστή κατείσδυσης 12.5%. Σε αυτήν υπολογίσθηκε ότι κατεισδύουν ~87mm νερού ετησίως και είναι, σχετικά με τις υπόλοιπες ζώνες, μετρίως επιρρεπής στη ρύπανση.
- Στη ζώνη της αργίλου που καταλαμβάνει το υπόλοιπο πεδινό τμήμα, δηλαδή από τα νότια της Μουσθένης έως και το ΝΔ όριο της λεκάνης. Σε αυτήν επικρατεί στο επιφανειακό στρώμα η άργιλος και η άμμος και σε μικρότερο ποσοστό υπάρχουν χάλικες και κροκάλες. Η ζώνη αυτή έχει έκταση 24.7 km^2 και συντελεστή κατείσδυσης 10%. Σε αυτήν υπολογίσθηκε ότι κατεισδύουν ~70mm νερού ετησίως. Όσον αφορά την επίδραση του εμπλουτισμού στη τρωτότητα, η ζώνη αυτή είναι η σχετικά λιγότερο επιρρεπής στη ρύπανση από τις τρεις.

5.3 ΥΔΡΟΦΟΡΟ ΜΕΣΟ (Α)

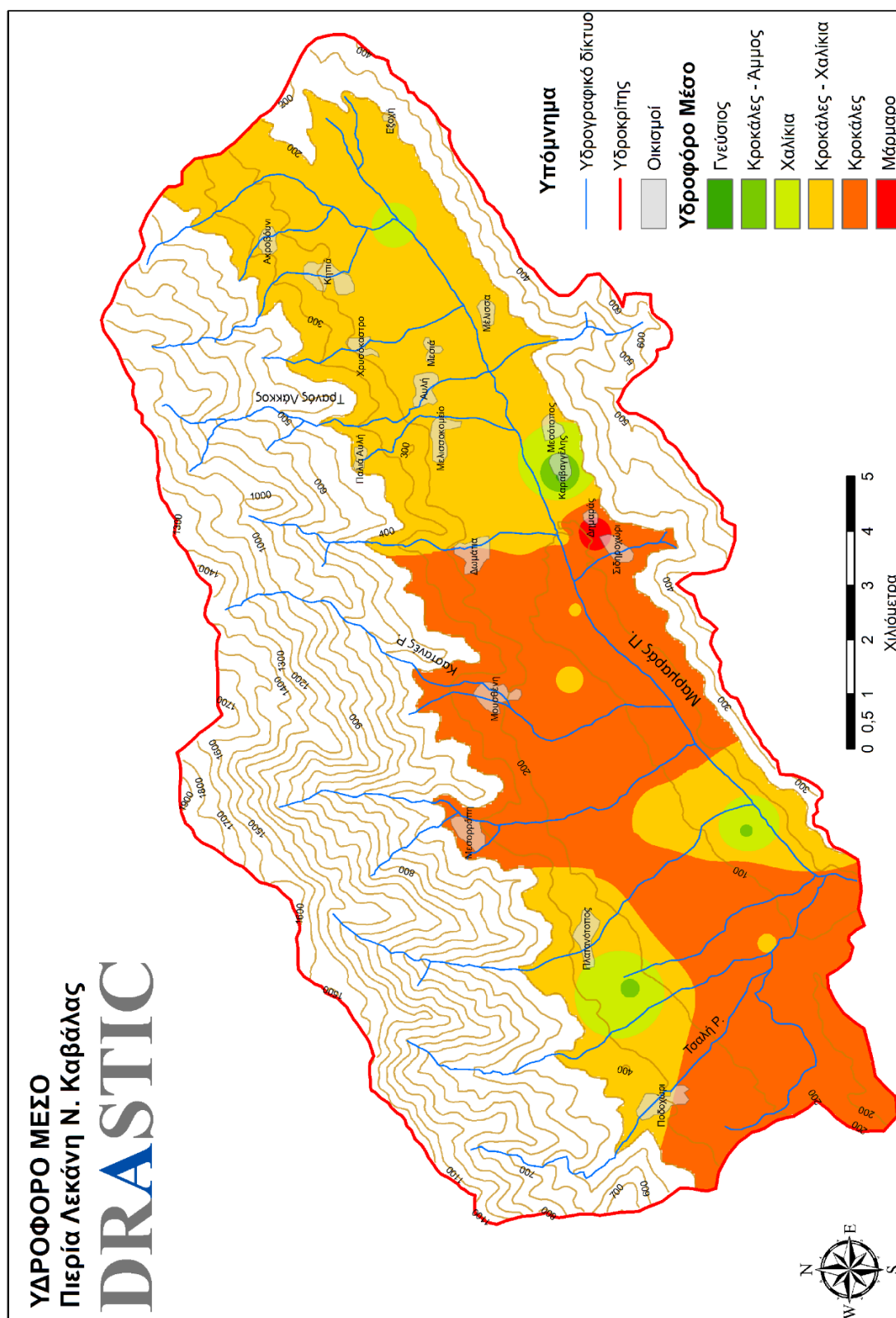
Για την ταξινόμηση του υδροφόρου μέσου χρησιμοποιήθηκαν οι λιθολογικές τομές των 22 γεωτρήσεων που απεικονίζονται στο Σχήμα 5.3. Από αυτές το υδροφόρο μέσο ταξινομήθηκε ως: Μάρμαρο (βαθμοί 10), Κροκάλες (βαθμοί 8), Κροκάλες – Χαλίκια (βαθμοί 7), Χαλίκια (βαθμοί 6), Κροκάλες – Άμμος (βαθμοί 5), Γενέσιος (βαθμοί 4). Από τα παραπάνω προέκυψε ο θεματικός χάρτης ταξινόμησης του υδροφόρου μέσου που φαίνεται στο Σχήμα 5.5.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι για τις ανάγκες της ταξινόμησης χρησιμοποιήθηκε το κύριο υδροφόρο μέσο που επικρατεί στην εκάστοτε γεώτρηση. Συνεπώς το γεγονός ότι σε μία περιοχή φαίνεται πως η υδροφορία βρίσκεται μέσα σε ένα υλικό, δεν αναιρεί το γεγονός ότι σε μικρότερο βαθμό μπορεί να υπάρχει υδροφορία και σε ένα ή περισσότερα άλλα υλικά. Η βαρύτητα της παραμέτρου εκτιμήθηκε ίση με 3.

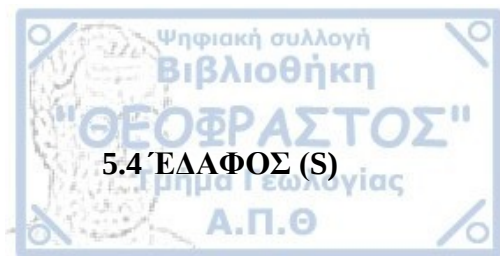
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5, τα υλικά που απαντώνται στους υδροφορείς της λεκάνης είναι γενέσιος, κροκάλες, χαλίκια, άμμος και μάρμαρο. Οι περισσότερες γεωτρήσεις του πεδινού τμήματος φέρουν κυκλοφορία σε ένα ή περισσότερα χαλαρά υλικά (κροκάλες, χάλικες, άμμος) και σε μεγαλύτερα βάθη η κυκλοφορία συνεχίζει σε συμπαγή μεταμορφωμένα υλικά του υποβάθρου (γενέσιος, μάρμαρο).

Τα κύρια υλικά που επικρατούν ως υδροφόρα μέσα στην λεκάνη είναι οι κροκάλες και οι χάλικες, με πολλές γεωτρήσεις να εμφανίζουν συνδυασμό των δύο αυτών υλικών. Στο ΒΑ τμήμα της λεκάνης (ΒΑ του άξονα των χωριών Δωμάτια και Δημαράς) το υδροφόρο μέσο που επικρατεί είναι ένας συνδυασμός κροκαλών και χάλικων. Στο ΝΔ τμήμα της λεκάνης (ΝΔ του ίδιου άξονα) επικρατούν οι κροκάλες ως υδροφόρο μέσο. Εξαίρεση αποτελούν περιοχές όπου το επικρατέστερο υδροφόρο μέσο είναι ο γενέσιος, οι οποίες βρίσκονται κοντά στα όρη Παγγαίο και Σύμβολο, καθώς και μια εμφάνιση υδροφορίας σε μάρμαρο ΒΑ του Σιδηροχωρίου, επίσης κοντά στο όρος Σύμβολο.

Όσον αφορά την επίδραση του υδροφόρου μέσου στη μέθοδο DRASTIC, το ΝΔ αυτό τμήμα της λεκάνης είναι πιο επιρρεπές στη ρύπανση από ότι το ΒΑ. Παρ' όλα αυτά ολόκληρη η λεκάνη παρουσιάζει υδροφορία σε χονδρόκοκκα υλικά που ευνοούν την μεταφορά και κυκλοφορία ρύπων στον υδροφορέα. (Βουδούρης, 2016)



Σχήμα 5.5 Θεματικός χάρτης ταξινόμησης του υδροφόρου μέσου.



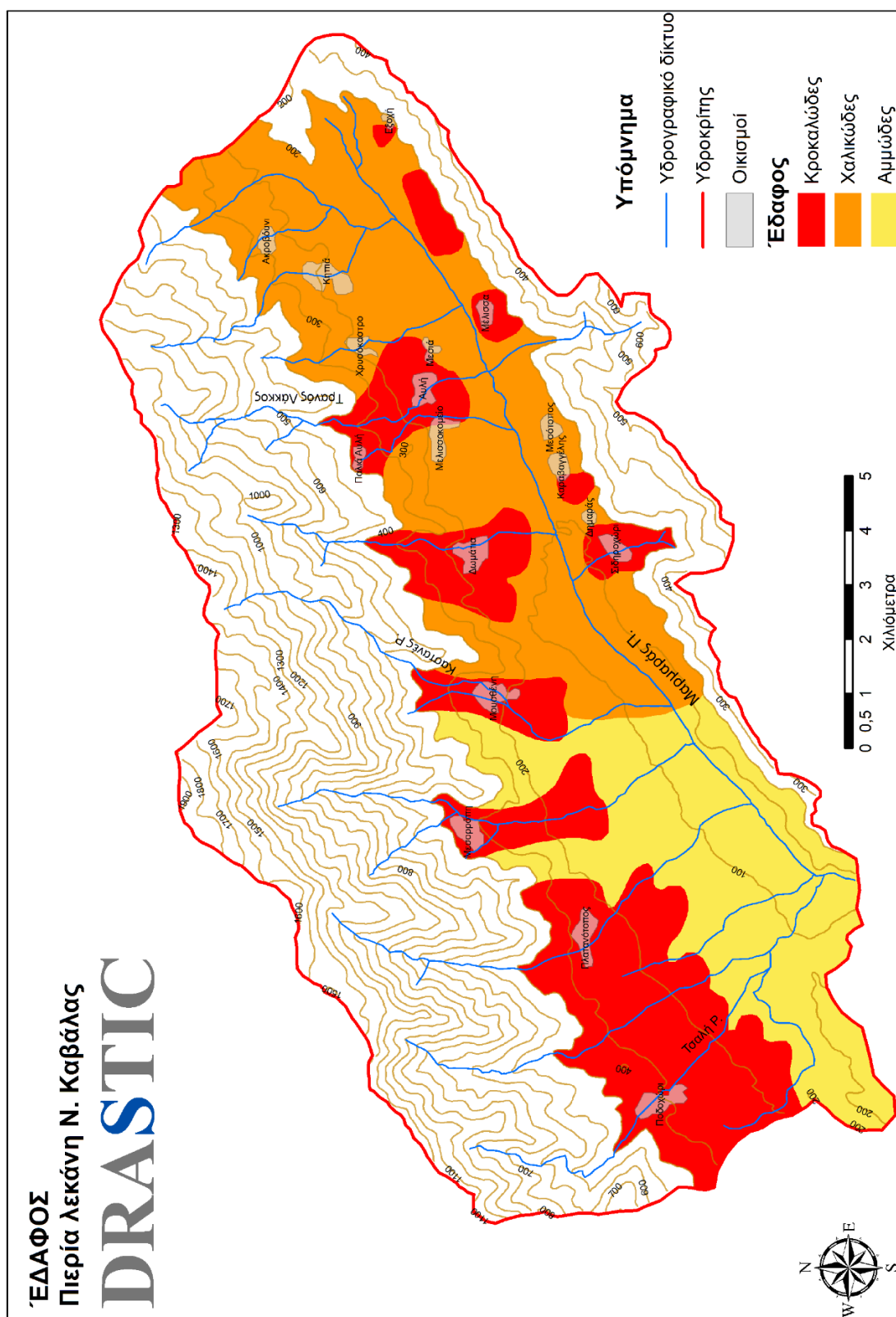
5.4 ΕΔΑΦΟΣ (S)

Η ταξινόμηση του εδάφους έγινε με βάση τις ίδιες γεωγραφικά ζώνες στις οποίες διαχωρίστηκε η περιοχή μελέτης με σκοπό τον υπολογισμό του συντελεστή κατείσδυσης. Κατά την διαδικασία αυτή διακρίθηκαν 3 ζώνες με βάση την λιθολογία του επιφανειακού στρώματος της κάθε γεώτρησης που μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές του εδάφους. Η ανάγκη της ταξινόμησης του εδάφους με τον τρόπο αυτό προέκυψε εξαιτίας της έλλειψης εδαφολογικών δεδομένων ή δειγμάτων από την περιοχή μελέτης.

Έτσι η περιοχή μελέτης ακολουθήσε το διαχωρισμό που αναφέρθηκε και στον συντελεστή κατείσδυσης:

- Στην πρώτη ζώνη όπου επικρατεί το κροκαλώδες έδαφος (βαθμοί 10).
- Στη δεύτερη ζώνη όπου επικρατεί το χαλικώδες (βαθμοί 8).
- Στη τρίτη ζώνη όπου επικρατεί το αμμώδες έδαφος (βαθμοί 6).

Από τα παραπάνω προέκυψε ο θεματικός χάρτης ταξινόμησης του εδάφους που φαίνεται στο Σχήμα 5.6. Η βαρύτητα της παραμέτρου εκτιμήθηκε ίση με 2.



Σχήμα 5.6 Θεματικός χάρτης ταξινόμησης του εδάφους.

Στην περιοχή μελέτης επικρατεί το κροκαλώδες, το χαλικώδες και το αμμώδες έδαφος. Όσον αφορά την χωρική κατανομή του εδάφους, διακρίνονται 3 ζώνες ανάλογα με τον βαθμό επικράτησης κροκαλών, χαλικών και άμμου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6. Αυτές είναι οι εξής:

- Η πρώτη ζώνη όπου επικρατεί το κροκαλώδες έδαφος και σε μικρότερο βαθμό υπάρχει χαλικώδες και αμμώδες έδαφος. Καταλαμβάνει τις περιοχές όπου βρίσκονται οι κώνοι κορημάτων και οι μορφολογικά ανάλογοι σχηματισμοί. Η ζώνη αυτή είναι η πιο επιρρεπής στην ρύπανση, αφού αποτελείται από πιο χονδρόκοκκα υλικά. (Βουδούρης, 2016)
- Η δεύτερη ζώνη όπου επικρατεί το χαλικώδες και σε μικρότερο βαθμό υπάρχει κροκαλώδες και αμμώδες έδαφος. Καταλαμβάνει το κεντρικό και ΒΑ τμήμα της λεκάνης, από τα νότια της Μουσθένης έως το ΒΑ όριο της λεκάνης, με εξαίρεση τα σημεία αυτής της περιοχής όπου βρίσκεται η πρώτη ζώνη. Η ζώνη αυτή είναι μετρίως επιρρεπής στη ρύπανση σε σχέση με τις υπόλοιπες δύο.
- Η τρίτη ζώνη όπου επικρατεί το αμμώδες έδαφος και σε μικρότερο βαθμό υπάρχει κροκαλώδες και χαλικώδες έδαφος. Καταλαμβάνει το υπόλοιπο πεδινό τμήμα, δηλαδή από τα νότια της Μουσθένης έως και το ΝΔ όριο της λεκάνης. Η ζώνη αυτή είναι η λιγότερο επιρρεπής στην ρύπανση από τις τρεις, αφού αποτελείται από πιο λεπτόκοκκα υλικά. (Βουδούρης, 2016)

5.5 ΚΛΙΣΗ ΤΟΥ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ (T)

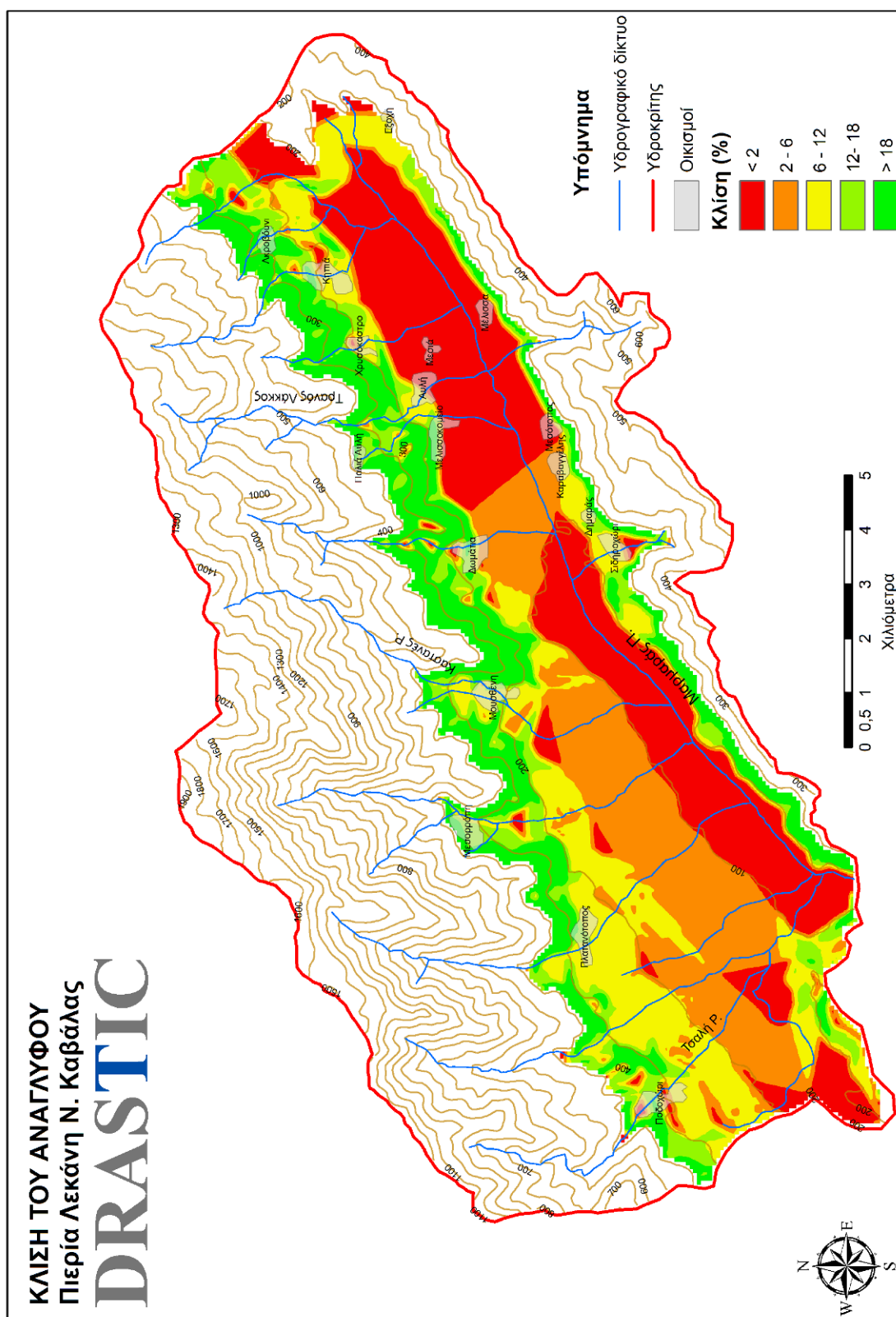
Για τους σκοπούς της χαρτογράφησης των κλίσεων που επικρατούν στην περιοχή μελέτης χρησιμοποιήθηκε το Ψηφιακό Υψομετρικό Μοντέλο (DEM) της ευρύτερης περιοχής, που αντιστοιχούσε στα όρια του πεδινού τμήματος της περιοχής μελέτης. Στη συνέχεια μέσω του εργαλείου “Slope” του προγράμματος ArcMap το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του θεματικού χάρτη ταξινόμησης της κλίσης του αναγλύφου σε ποσοστό τοις εκατό (%), ο οποίος φαίνεται στο Σχήμα 5.7. Η βαρύτητα της παραμέτρου εκτιμήθηκε ίση με 1.

Οι κλίσεις ταξινομήθηκαν στις εξής 5 τάξεις, σύμφωνα με την βαθμονόμηση των Aller et al. (1987):

- $T < 2\% \rightarrow 10$ βαθμοί
- $2\% < T < 6\% \rightarrow 9$ βαθμοί
- $6\% < T < 12\% \rightarrow 5$ βαθμοί
- $12\% < T < 18\% \rightarrow 3$ βαθμοί
- $T > 18\% \rightarrow 1$ βαθμός

Όπως φαίνεται στον χάρτη κλίσεων του Σχήματος 5.7, το ανάγλυφο του Πεδινού τμήματος της Πιερίας λεκάνης είναι σχετικά ήπιο στο μεγαλύτερο μέρος του, με κλίσεις μικρότερες του 6%. Συγκεκριμένα, παράλληλα και ΒΔ του ποταμού Μαρμαρά, στον κεντρικό άξονα της λεκάνης παρατηρούνται κλίσεις μικρότερες του 6%, οι οποίες αυξάνονται πλησιάζοντας τους πρόποδες των ορέων Παγγαίο και Σύμβολο, φτάνοντας να είναι μεγαλύτερες του 18% στα όρια του πεδινού τμήματος με τους δύο ορεινούς όγκους.

Το κεντρικό τμήμα της λεκάνης με κλίσεις μικρότερες του 6% είναι πιο τρωτό στη ρύπανση των υπόγειων νερών, αφού οι μικρότερες κλίσεις ευνοούν την κατείσδυση (Βουδούρης, 2016). Οι περιοχές στις οποίες το πεδινό τμήμα της λεκάνης γειτνιάζει με τους ορεινούς όγκους του Παγγαίου και του Συμβόλου είναι λιγότερο τρωτές στη ρύπανση, αφού οι μεγαλύτερες κλίσεις ευνοούν την επιφανειακή απορροή και σχετίζονται με μικρό δυναμικό ρύπανσης (Βουδούρης, 2016)



Σχήμα 5.7 Θεματικός χάρτης ταξινόμησης της κλίσης του αναγλύφου.

5.6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΚΟΡΕΣΤΗΣ ΖΩΝΗΣ (I)

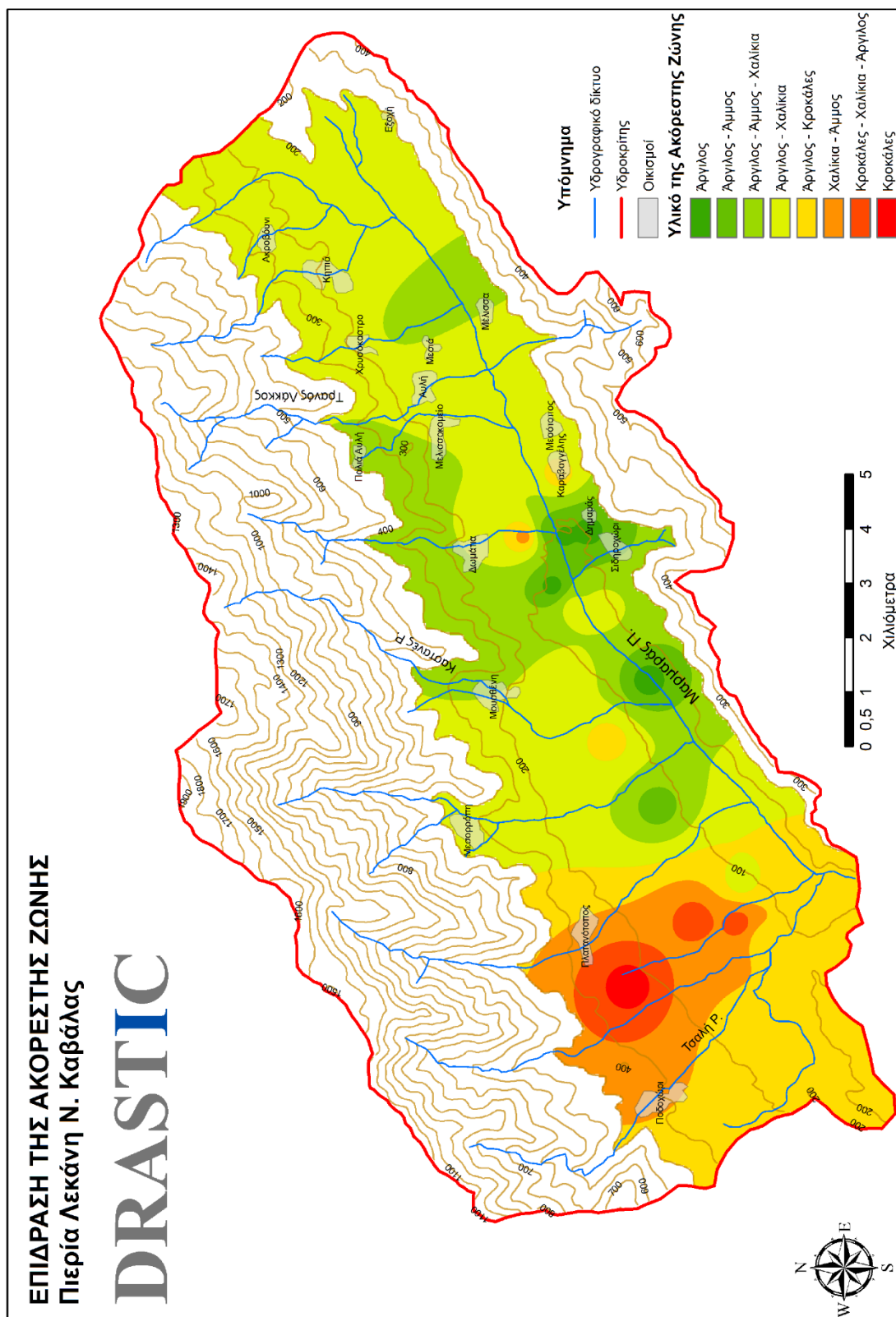
Για την ταξινόμηση του υλικού της ακόρεστης ζώνης στην περιοχή μελέτης χρησιμοποιήθηκαν οι 22 προαναφερθέντες λιθολογικές τομές που φαίνονται στο Σχήμα 5.3. Από αυτές τα υλικά της ακόρεστης ζώνης ταξινομήθηκαν ως:

- Κροκάλες → 9 βαθμοί
- Κροκάλες – Χαλίκια – Αργίλος → 8 βαθμοί
- Χαλίκια – Άμμος → 7 βαθμοί
- Αργίλος – Κροκάλες → 6 βαθμοί
- Αργίλος – Χαλίκια → 5 βαθμοί
- Αργίλος – Άμμος – Χαλίκια → 4 βαθμοί
- Αργίλος – Άμμος → 3 βαθμοί
- Αργίλος → 2 βαθμοί

Από τα παραπάνω κατασκευάστηκε ο θεματικός χάρτης ταξινόμησης του υλικού της ακόρεστης ζώνης, ο οποίος φαίνεται στο Σχήμα 5.8. Η βαρύτητα της παραμέτρου εκτιμήθηκε ίση με 4.

Όπως φαίνεται στον χάρτη του Σχήματος 5.8 η ακόρεστη ζώνη των υδροφορέων της περιοχής μελέτης αποτελείται από άργιλο, άμμο, χαλίκια και κροκάλες. Σε πολλές περιπτώσεις ένα ή περισσότερα από αυτά τα υλικά συνυπάρχουν στην ακόρεστη ζώνη. Στο μεγαλύτερο μέρος του πεδινού τμήματος συναντάμε άργιλο με χαλίκια στην ακόρεστη ζώνη. Εξάιρεση αποτελεί το κεντρικό τμήμα, όπου επικρατεί ένας συνδυασμός από άργιλο, άμμο και χαλίκια. Στο ΝΔ τμήμα της λεκάνης (NNA του Πλατανότοπου, έως και το ΝΔ όριο του υδροκρίτη) διακρίνεται μια ζώνη όπου επικρατούν οι κροκάλες και οι χάλικες με την άργιλο να υπάρχει σε μικρότερα ποσοστά.

Τα αργιλικά ορυκτά συμβάλλουν στη μείωση του ρυπαντικού φορτίου ενός υδροφορέα (Βουδούρης, 2016). Συνεπώς ΝΔ αυτή ζώνη παρουσιάζει μεγαλύτερη τρωτότητα από το υπόλοιπο πεδινό τμήμα, αφού η ακόρεστη ζώνη περιέχει λιγότερη άργιλο. Το κεντρικό τμήμα της λεκάνης είναι περισσότερο προστατευμένο από τα υπόλοιπα, αφού η άργιλος υπάρχει σε μεγαλύτερα ποσοστά στην ακόρεστη ζώνη. Το υπόλοιπο πεδινό τμήμα παρουσιάζει μέτρια τρωτότητα, αφού χαρακτηρίζεται από άργιλο σε συνδυασμό με πιο χονδρόκοκκα υλικά, όπως χαλίκια και άμμο



Σχήμα 5.8 Θεματικός χάρτης ταξινόμησης του υλικού της ακόρεστης ζώνης.

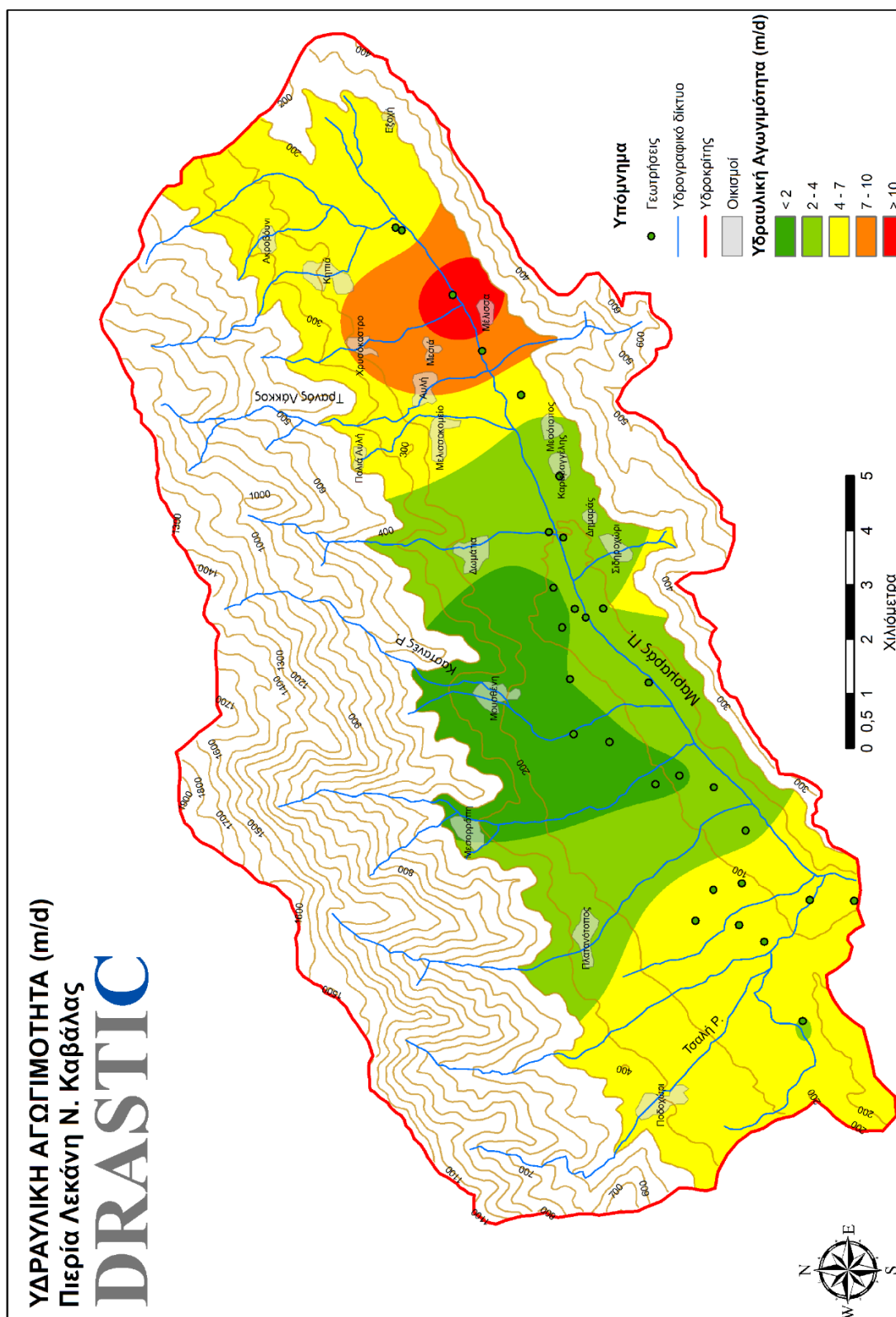
5.7 ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (C)

Για την ταξινόμηση της υδραυλικής αγωγιμότητας στην περιοχή μελέτης χρησιμοποιήθηκε ένα σύνολο 29 γεωτρήσεων για τις οποίες υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα για το πάχος του υδροφόρου, D , καθώς και για την μεταβιβαστικότητα, T . Οι γεωτρήσεις αυτές αποτελούν ένα συνδυασμό των γεωτρήσεων του Σχήματος 5.1 και του Σχήματος 5.3 για τις οποίες υπήρχαν διαθέσιμα τα εν λόγω δεδομένα. Οι τιμές μεταβιβαστικότητας βρέθηκαν από τις διαθέσιμες δοκιμαστικές αντλήσεις. Το πάχος του υδροφόρου για την κάθε γεώτρηση υπολογίσθηκε από τον Κακλή (2011), ενώ στις γεωτρήσεις όπου δεν υπήρχαν διαθέσιμα στοιχεία υπολογίσθηκε από τον συγγραφέα μέσω των λιθολογικών τομών των γεωτρήσεων.

Γνωρίζοντας τα παραπάνω υπολογίσθηκε η υδραυλική αγωγιμότητα, k , σε m/day από τη σχέση $k = T / D$. Η χωρική κατανομή της παραμέτρου έγινε με τη μέθοδο Kriging και στη συνέχεια αυτή ταξινομήθηκε στις εξής 5 τάξεις:

- $k < 2 \text{ m/day} \rightarrow 3$ βαθμοί
- $2 < k < 4 \rightarrow 4$ βαθμοί
- $4 < k < 7 \rightarrow 5$ βαθμοί
- $7 < k < 10 \rightarrow 6$ βαθμοί
- $k > 10 \rightarrow 7$ βαθμοί

Από τα παραπάνω προέκυψε ο θεματικός χάρτης ταξινόμησης της υδραυλικής αγωγιμότητας, ο οποίος φαίνεται στο Σχήμα 5.9. Στον ίδιο χάρτη φαίνονται και οι θέσεις των γεωτρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του. Η βαρύτητα της παραμέτρου εκτιμήθηκε ίση με 3.



Σχήμα 5.9 Θεματικός χάρτης ταξινόμησης της υδραυλικής αγωγιμότητας.

Οι τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας στη περιοχή μελέτης κυμαίνονται μεταξύ 0.25 m/d και 10.76 m/d με τη μέση υδραυλική αγωγιμότητα να είναι 4.3 m/d. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.9 οι μέγιστες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας βρίσκονται στο ΒΑ τμήμα της λεκάνης, Β και ΒΑ του χωριού Μέλισσα και Ν και ΝΑ του χωριού Χρυσόκαστρο, με τιμές μεγαλύτερες των 7 m/d. Στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης, από το χωριό Πλατανότοπος και ΝΑ αυτού, έως και το χωριό Μεσότοπος και ΒΔ αυτού, βρίσκονται συγκεντρωμένες οι χαμηλότερες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας στη λεκάνη, οι οποίες δεν ξεπερνούν τα 4 m/d. Στην υπόλοιπη λεκάνη οι τιμές της κυμαίνονται μεταξύ 4 και 7 m/d.

Όσο μεγαλύτερη η υδραυλική αγωγιμότητα, τόσο πιο γρήγορα κινούνται οι ρύποι και αυξάνεται η τρωτότητα (Βουδούρης, 2016). Συνεπώς το ΒΑ τμήμα της λεκάνης που χαρακτηρίζεται από τις μεγαλύτερες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας, είναι το πιο ευάλωτο στη ρύπανση. Το κεντρικό τμήμα είναι το λιγότερο ευάλωτο στη ρύπανση, ενώ το υπόλοιπο πεδινό τμήμα παρουσιάζει μέτρια τρωτότητα.



Για την κατασκευή του χάρτη τρωτότητας απαιτείται ο υπολογισμός του δείκτη τρωτότητας, ο οποίος συνδυάζει τις επιμέρους παραμέτρους της μεθόδου DRASTIC που υπολογίσθηκαν, βαθμονομήθηκαν και χαρτογραφήθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Ο δείκτης αυτός υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση (Aller L, 1987):

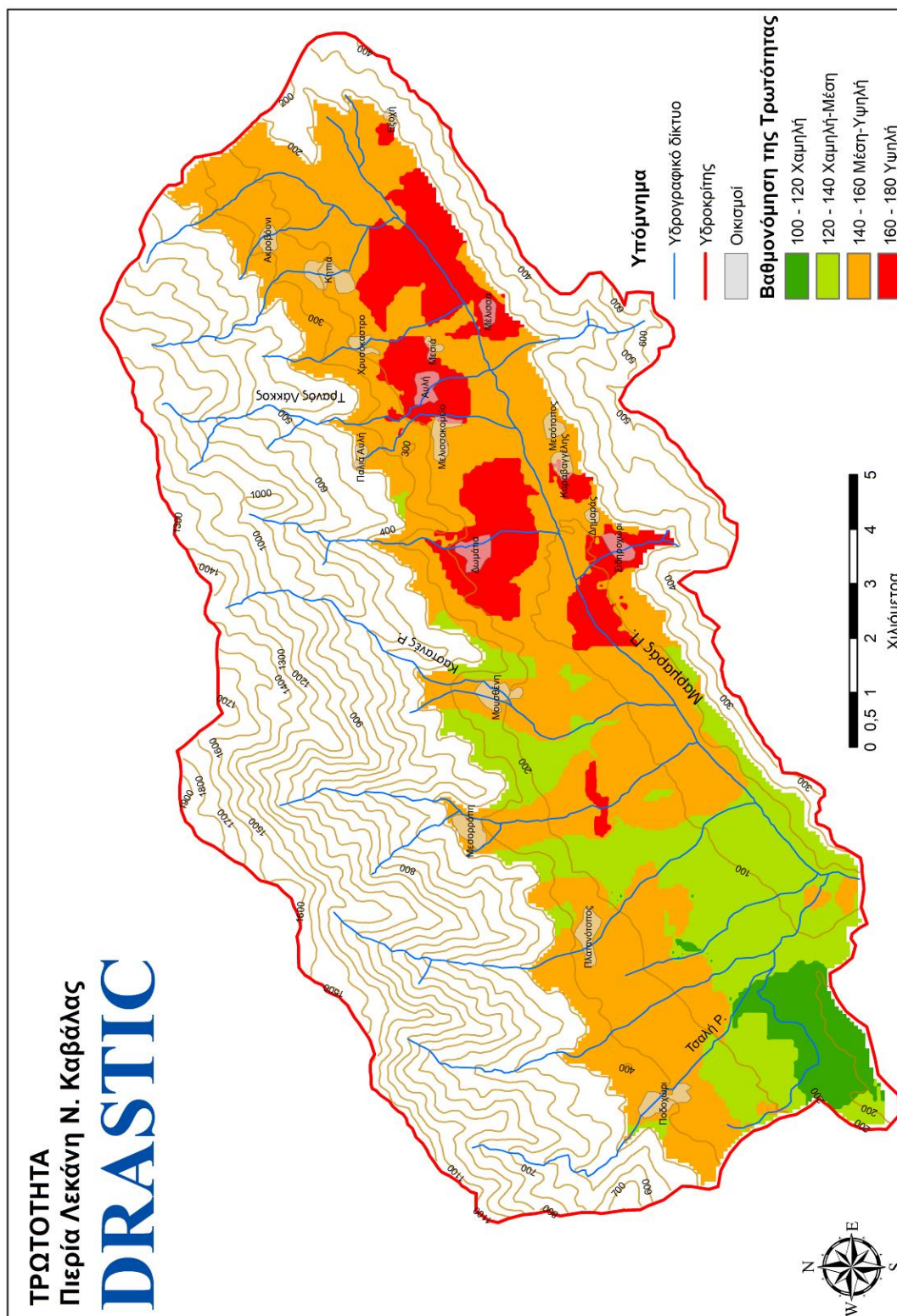
$$DI = DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + IrIw + CrCw \quad (\text{Σχέση 1})$$

Όπου ο δείκτης r εκφράζει την τιμή της παραμέτρου στη κάθε θέση, ενώ ο δείκτης w την αντίστοιχη βαρύτητα της κάθε παραμέτρου.

Από τις τιμές του δείκτη DRASTIC, όπως υπολογίσθηκαν από την παραπάνω σχέση, με τη χρήση του εργαλείου “Weighted Sum” του προγράμματος ArcMap, κατασκευάστηκε ο χάρτης τρωτότητας του πεδινού τμήματος της Πιερίας λεκάνης Ν. Καβάλας, ο οποίος φαίνεται στο Σχήμα 5.10.

Όσο υψηλότερες είναι οι τιμές του δείκτη DRASTIC τόσο μεγαλύτερο το δυναμικό για ρύπανση του υδροφορέα ή υψηλή τρωτότητα. (Βουδούρης, 2016) Οι τιμές ταξινομήθηκαν σε 4 τάξεις, σύμφωνα με την βαθμονόμηση των Aller et al. (1987):

- 100 – 120 → Χαμηλή Τρωτότητα
- 120 – 140 → Χαμηλή-Μέση Τρωτότητα
- 140 – 160 → Μέση-Υψηλή Τρωτότητα
- 160 – 180 → Υψηλή Τρωτότητα



Σχήμα 5.10 Χάρτης τρωτότητας των υπόγειων νερών στη ρύπανση στο πεδινό τμήμα της Πιερίας λεκάνης Ν. Καβάλας.

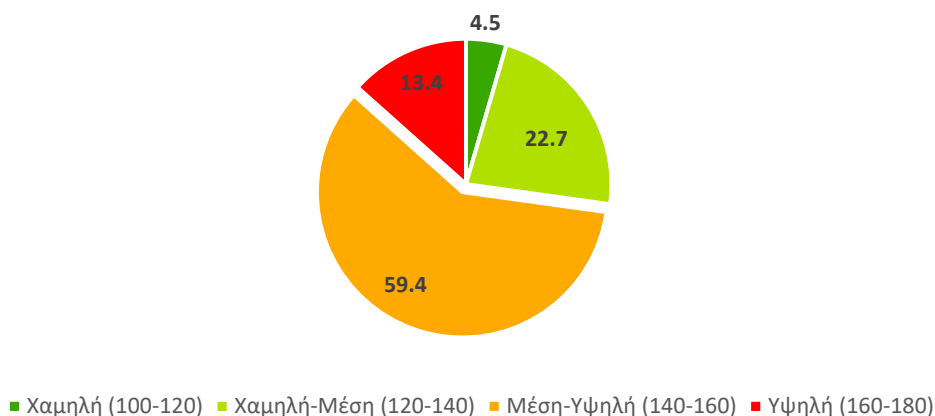
Οι τιμές του δείκτη DRASTIC στην περιοχή μελέτης κυμαίνονται μεταξύ 100 και 180, ενώ αντιστοίχως η τρωτότητα χαρακτηρίζεται από χαμηλή έως υψηλή. Συγκεκριμένα η ελάχιστη τιμή του δείκτη που υπολογίστηκε είναι 109, η μέγιστη 180 και η μέση 146 μονάδες.

Στον χάρτη του Σχήματος 5.10 φαίνεται η χωρική κατανομή της τρωτότητας, η οποία έχει ταξινομηθεί σε 4 τάξεις: Χαμηλή (100-120), Χαμηλή-Μέση (120-140), Μέση-Υψηλή (140-160) και Υψηλή (160-180). Το 4.5% της συνολικής έκτασης του πεδινού τμήματος της λεκάνης χαρακτηρίζεται από χαμηλή τρωτότητα, το 22.7% από χαμηλή-μέση, το 59.4% από μέση-υψηλή και το 13.4% από υψηλή τρωτότητα. Συνεπώς το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μελέτης (72.8%) χαρακτηρίζεται από μέση έως υψηλή τρωτότητα, ενώ το 27.2% από χαμηλή έως μέση τρωτότητα (Πίνακας 5.1 & Σχήμα 5.1)

Πίνακας 5.1 Κατανομή της τρωτότητας στην περιοχή μελέτης.

Δείκτης DRASTIC	Τρωτότητα	Έκταση (%)	Έκταση (km ²)
100 – 120	Χαμηλή	4.5	3.86
120 - 140	Χαμηλή-Μέση	22.7	19.58
140 - 160	Μέση-Υψηλή	59.4	51.29
160 - 180	Υψηλή	13.4	11.62

Έκταση Τρωτότητας (%)



Σχήμα 5.11 Έκταση της τρωτότητας στην περιοχή μελέτης, σε % του πεδινού τμήματος.

Όπως γίνεται αντιληπτό από τα παραπάνω, το μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης χαρακτηρίζεται από μέση-υψηλή τρωτότητα. Οι περιοχές μέσης-υψηλής τρωτότητας είναι συγκεντρωμένες στο κεντρικό και ΒΑ τμήμα της λεκάνης και φαίνεται να είναι αποτέλεσμα της επίδρασης όλων των παραμέτρων της μεθόδου, αφού όλες παρουσιάζουν μετρίως αυξημένες τιμές. Μέσα σε αυτήν την περιοχή συναντώνται 4 ευμεγέθεις περιοχές υψηλής τρωτότητας, σε θέσεις που χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλά βάθη υπόγειου νερού, αδρόκοκκο έδαφος και μέτριες-υψηλές τιμές εμπλουτισμού. Η ζώνη χαμηλής-μέσης τρωτότητας βρίσκεται στο ευρύτερο ΝΔ τμήμα της λεκάνης και φαίνεται να είναι αποτέλεσμα των σχετικά υψηλών βαθών του υπόγειου νερού, σε συνδυασμό με τις μέτριες τιμές εμπλουτισμού και του σχετικά μετρίου μεγέθους κόκκων εδάφους (χαλικώδες). Η ζώνη χαμηλής τρωτότητας βρίσκεται στο ΝΔ άκρο της λεκάνης, έχει πολύ μικρότερη έκταση από τις υπόλοιπες και φαίνεται να προκύπτει εξαιτίας των ιδιαίτερα αυξημένων τιμών βάθους υπόγειου νερού σε συνδυασμό με μέτριες τιμές των υπολοίπων παραμέτρων στην περιοχή αυτή.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι τιμές της τρωτότητας είναι σχετικές και ότι σε μια θέση με χαμηλή τρωτότητα, ο υδροφορέας κινδυνεύει πιθανώς από ρύπανση, αλλά σε μικρότερο βαθμό από ότι σε μια θέση με υψηλή τρωτότητα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

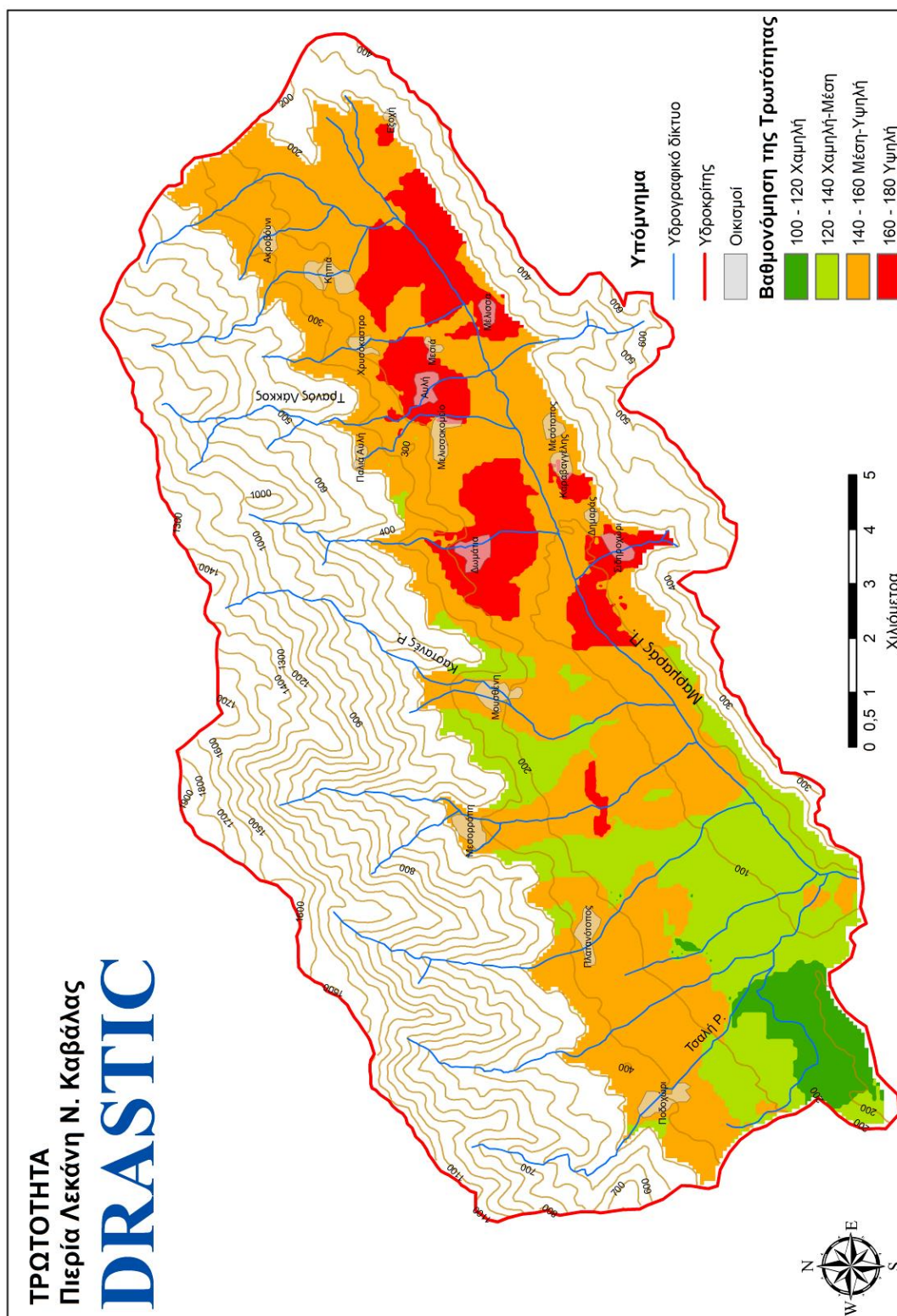
Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται συνοπτικά τα σημαντικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία:

1. Η Πιερία λεκάνη έχει έκταση 180.96 km^2 , σχήμα περίπου ελλειψοειδές και αναπτύσσεται με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ. Ανήκει εξ' ολοκλήρου στον νομό Καβάλας και βρίσκεται μεταξύ των ορέων Παγγαίο και Σύμβολο. Το ανάγλυφο της είναι πεδινό έως ημιορεινό. Το μέγιστο μήκος της είναι $\sim 20.6 \text{ km}$, ενώ το μέγιστο πλάτος της $\sim 11.4 \text{ km}$. Το πεδινό τμήμα της λεκάνης έχει έκταση περίπου 86.34 km^2 , που αντιστοιχεί στο 47.7% της συνολικής έκτασης της λεκάνης.
2. Το μέγιστο υψόμετρο της λεκάνης είναι 1956 m στη θέση «Αυγό», το ελάχιστο είναι 80 m στη θέση «Μονόλιθος» και το μέσο είναι 475.1 m. Η μέση κλίση είναι 12.7%.
3. Η Πιερία λεκάνη χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα αναπτυγμένο υδρογραφικό δίκτυο ποικίλης μορφής. Η αποστράγγιση της λεκάνης γίνεται από τον ποταμό Μαρμαρά και τα ρέματα που αποστραγγίζονται σε αυτόν. Ο π. Μαρμαράς έχει διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ, παράλληλη της λεκάνης και ρέει παράλληλα με τις παρυφές του όρους Συμβόλου. Ο κύριος κλάδος του παρουσιάζει μόνιμη ροή όλο τον χρόνο και είναι 5^{ης} τάξης κατά Strahler. Ο συντελεστής διακλάδωσης της λεκάνης απορροής υπολογίστηκε ίσος με 5,7 και η υφή του χαρακτηρίστηκε ως λεπτή. Η υδρογραφική πυκνότητα υπολογίστηκε σε $2,58 \text{ km}^{-1}$ και η υδρογραφική συχνότητα ίση με $4,26 \text{ km}^{-2}$.
4. Γεωτεκτονικά η Πιερία λεκάνη υπάγεται στην Μάζα Ροδόπης της Ελληνικής Ενδοχώρας και συγκεκριμένα ανήκει στην Ενότητα Παγγαίου. Στρωματογραφικά στην περιοχή υπάρχει μια ακολουθία μεταμορφωμένων πετρωμάτων (εναλλαγές γνευσίων, μαρμάρων, μαρμαρυγιακών σχιστολίθων και σχιστολίθων) που απαντώνται στο Β και Ν τμήμα της λεκάνης, η συνέχεια της οποίας διακόπτεται από ασβεσταλκαλικού τύπου γρανιτικές διεισδύσεις.

5. Το πεδινό τμήμα της Πιερίας λεκάνης αποτελείται κυρίως από Ολοκαινικές αποθέσεις. Στο ΝΔ τμήμα της περιοχής μελέτης υπάρχουν κάποιες Πλειστοκαινικές αποθέσεις, οι οποίες όμως καλύπτουν ένα μικρό μόνο τμήμα της. Οι επιφανειακές Νεογενείς αποθέσεις απουσιάζουν από την λεκάνη, πιθανώς όμως να βρίσκονται καλυμμένες από τα Πλειστοκαινικά ιζήματα στο ΝΔ τμήμα της λεκάνης.
6. Οι Ολοκαινικές αποθέσεις, που καλύπτουν το μεγαλύτερο κομμάτι του πεδινού τμήματος της λεκάνης, είναι ποταμοχερσαίας φάσης και σε αυτές συμπεριλαμβάνονται οι πλευρικοί σχηματισμοί, οι οποίοι είναι κυρίως κώνοι κορημάτων και ποταμίων αποθέσεων.
7. Τα μεταμορφωμένα πετρώματα διατέμνονται από δύο κύρια τεκτονικά συστήματα, τα οποία έχουν διευθύνσεις BA-ΝΔ και ΒΔ-ΝΑ και συνοδεύονται από πολλαπλά συστήματα διακλάσεων που ακολουθούν τις διευθύνσεις τους.
8. Το βάθος του υπόγειου νερού στην Πιερία λεκάνη κυμαίνεται (κατά τον Μάρτιο του 2011), από 0 m (αρτεσιανισμός) έως 32.48 m. Τα μεγαλύτερα σχετικά βάθη, μεγαλύτερα των 8 μέτρων παρατηρούνται στο δυτικό τμήμα της λεκάνης, δυτικά του χωριού Πλατανότοπος. Τα μέγιστα βάθη της περιοχής μελέτης παρατηρούνται στο ΝΔ άκρο της. Τα μεγαλύτερα σχετικά βάθη, μικρότερα των 8 μέτρων, παρατηρούνται στο ανατολικό τμήμα της λεκάνης, ανατολικά του χωριού Πλατανότοπος. Τα ελάχιστα βάθη παρατηρούνται συγκεντρωμένα σε τρεις περιοχές, οι οποίες βρίσκονται κοντά στον ποταμό Μαρμαρά και συγκεκριμένα σε σημεία όπου ένας μικρότερος κλάδος του ποταμού συναντά τον κύριο κλάδο.
9. Οι τιμές νερού που κατεισδύει στο πεδινό τμήμα της λεκάνης κυμαίνονται από 70mm έως 105 mm. Βάσει αυτού η περιοχή χωρίστηκε σε 3 ζώνες: Στη ζώνη των κώνων κορημάτων που βρίσκεται κυρίως στους πρόποδες του Παγγαίου και στην οποία κατεισδύουν ~105mm νερού ετησίως. Στη ζώνη των χαλικών που καταλαμβάνει το κεντρικό και ΒΑ τμήμα της λεκάνης όπου κατεισδύουν ~87mm νερού ετησίως. Στη ζώνη της αργίλου που καταλαμβάνει το υπόλοιπο πεδινό τμήμα όπου κατεισδύουν ~70mm νερού ετησίως.

10. Το υδροφόρο μέσο της περιοχής μελέτης είναι: Μάρμαρο, κροκάλες, χαλίκια, άμμος και γνέυσιος. Τα κύρια υλικά που επικρατούν ως υδροφόρα μέσα στην λεκάνη είναι οι κροκάλες και οι χάλικες. Στο ΒΑ τμήμα της λεκάνης το υδροφόρο μέσο που επικρατεί είναι ένας συνδυασμός κροκαλών και χαλίκων. Στο ΝΔ τμήμα της λεκάνης επικρατούν οι κροκάλες ως υδροφόρο μέσο. Εξαίρεση αποτελούν περιοχές όπου το επικρατέστερο υδροφόρο μέσο είναι ο γνέυσιος, οι οποίες βρίσκονται κοντά στα όρη Παγγαίο και Σύμβολο, καθώς και μια εμφάνιση υδροφορίας σε μάρμαρο ΒΑ του Σιδηροχωρίου.
11. Το έδαφος διακρίθηκε σε 3 ζώνες, ανάλογα με το επικρατέστερο υλικό του: Στη ζώνη όπου επικρατεί το κροκαλώδες έδαφος (γεωγραφικά αντίστοιχη της ζώνης κώνων κορημάτων). Στη ζώνη όπου επικρατεί το χαλικώδες έδαφος (γεωγραφικά αντίστοιχη της ζώνης χαλικών). Στη ζώνη όπου επικρατεί το αμμώδες έδαφος (γεωγραφικά αντίστοιχη της ζώνης αργίλου).
12. Το ανάγλυφο του πεδινού τμήματος της Πιερίας λεκάνης είναι σχετικά ήπιο στο μεγαλύτερο μέρος του, με κλίσεις μικρότερες του 6%. Συγκεκριμένα, παράλληλα και ΒΔ του ποταμού Μαρμαρά, στον κεντρικό άξονα της λεκάνης παρατηρούνται κλίσεις μικρότερες του 6%, οι οποίες αυξάνονται πλησιάζοντας τους πρόποδες των ορέων Παγγαίο και Σύμβολο, φτάνοντας να είναι μεγαλύτερες του 18% στα όρια του πεδινού τμήματος με τους δύο ορεινούς όγκους.
13. Η ακόρεστη ζώνη των υδροφορέων της περιοχής μελέτης αποτελείται από άργιλο, άμμο, χαλίκια και κροκάλες. Σε πολλές περιπτώσεις ένα ή περισσότερα από αυτά τα υλικά συνυπάρχουν στην ακόρεστη ζώνη. Στο μεγαλύτερο μέρος του πεδινού τμήματος συναντάμε συνδυασμό αργίλου και χαλικιών στην ακόρεστη ζώνη. Εξαίρεση αποτελεί το κεντρικό τμήμα, όπου επικρατεί ένας συνδυασμός από άργιλο, άμμο και χαλίκια. Στο ΝΔ τμήμα της λεκάνης διακρίνεται μια ζώνη όπου επικρατούν οι κροκάλες και οι χάλικες, με την άργιλο να υπάρχει σε μικρότερα ποσοστά.

14. Οι τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας στη περιοχή μελέτης κυμαίνονται μεταξύ 0.25 m/d και 10.76 m/d με τη μέση υδραυλική αγωγιμότητα να είναι 4.3 m/d. Οι μέγιστες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας βρίσκονται στο ΒΑ τμήμα της λεκάνης, με τιμές μεγαλύτερες των 7 m/d. Στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης, βρίσκονται συγκεντρωμένες οι χαμηλότερες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητάς της, οι οποίες δεν ξεπερνούν τα 4 m/d. Στην υπόλοιπη λεκάνη οι τιμές της κυμαίνονται μεταξύ 4 και 7 m/d.
15. Σύμφωνα με τον τελικό χάρτη τρωτότητας (Σχήμα 5.10), ο οποίος παρατίθεται ξανά παρακάτω, στο πεδινό τμήμα της Πιερίας λεκάνης συναντάμε από χαμηλή (από 100 μονάδες) έως και υψηλή (έως 180 μονάδες) τρωτότητα. Το μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης παρουσιάζει μέσο-υψηλό δυναμικό ρύπανσης (59.4% του πεδινού τμήματος). Οι περιοχές μέσης-υψηλής τρωτότητας είναι συγκεντρωμένες στο κεντρικό και ΒΑ τμήμα της λεκάνης. Μέσα σε αυτήν την περιοχή βρίσκονται 4 ευμεγέθεις περιοχές υψηλής τρωτότητας (13.4% του πεδινού τμήματος), σε θέσεις που χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλά βάθη υπόγειου νερού, αδρόκοκκο έδαφος και μέτριες-υψηλές τιμές εμπλουτισμού. Η ζώνη χαμηλής-μέσης τρωτότητας (22.7% του πεδινού τμήματος) βρίσκεται στο ευρύτερο ΝΔ τμήμα της λεκάνης και φαίνεται να είναι αποτέλεσμα των σχετικά υψηλών βαθών του υπόγειου νερού, σε συνδυασμό με τις μέτριες τιμές εμπλουτισμού και του σχετικά μετρίου μεγέθους κόκκων εδάφους (χαλικώδες). Η ζώνη χαμηλής τρωτότητας (4.5% του πεδινού τμήματος) βρίσκεται στο ΝΔ άκρο της λεκάνης, έχει πολύ μικρότερη έκταση από τις υπόλοιπες και φαίνεται να προκύπτει εξαιτίας των ιδιαίτερα αυξημένων τιμών βάθους υπόγειου νερού σε συνδυασμό με μέτριες τιμές των υπολοίπων παραμέτρων στην περιοχή αυτή.



Σχήμα 5.10 Χάρτης τρωτότητας των υπόγειων νερών στη ρύπανση στο πεδινό τμήμα της Πιερίας λεκάνης Ν. Καβάλα



Ελληνική Βιβλιογραφία

Καλλέργης, Α. (2000). *Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία* (Τόμ. Β'). Αθήνα: ΤΕΕ.

Βουδούρης, Κ., Μανδηλάρας, Δ. (2004). Εκτίμηση της τρωτότητας των υπόγειων νερών με τη μέθοδο DRASTIC: Η περίπτωση του αλλουβιακού υδροφορέα της λεκάνης του Γλαύκου (Ν. Αχαΐας). *Υδροτεχνικά, Τόμος 14*, σσ. 17-30.

Βουδούρης, Κ. (2016). *Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος-Υπόγεια Νερά & Περιβάλλον*. Θεσσαλονίκη: ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ.

Δημόπουλος, Γ. (1986). Πορώδη υπό πίεση υδροφόρα συστήματα. *Επιστημονική Επετηρίδα Σ.Θ.Ε.*, Παρ. αρ. 15, 23ου τόμου, σελ. 148.

Δημόπουλος, Γ. (1978). *Περί του σχηματισμού των υδροφόρων οριζόντων της λεκάνης μεταξύ των ορέων παργαίου-Συμβόλου (Πιερία λεκάνη)*. Θεσσαλονίκη: Φυσικομαθηματική Σχολή Α.Π.Θ.

Μουντράκης, Δ. (2020). *Γεωλογία και γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας*. University Studio.

Κακλής, Τ. (2011). *Υδρογεωλογική μελέτη και μελέτη διαχείρισης υδατικών πόρων Πιερίας λεκάνης Ν. Καβάλας (Διδακτορική διατριβή)*. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ), Σχολή Θετικών Επιστημών. Τμήμα Γεωλογίας. doi:10.12681/eadd/25643

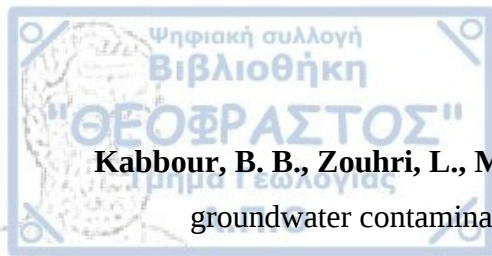
Αγγλική Βιβλιογραφία

Aller L, Bennet. T. Lehr, H.J., Petty, J.R., Hackett, G. (1987). *DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings*. Ada: US Environmental Protection Agency.

Barbulescu, A. (χ.χ.). Assessing Groundwater Vulnerability: DRASTIC and DRASTIC-Like Methods: A Review. *Water*. 12. 1356. doi:10.3390/w12051356



- Boretti, A. Rosa, L. (2019).** Reassessing the projections of the World Water Development Report. *npj Clean Water*, σ. 3.
- Burek, P. (2016).** *Water Futures and Solution: Fast Track Initiative (Final Report)*. Laxenburg, Austria: IIASA Working Paper (International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)).
- Civita, M., De Regibus, C. (1995).** *Sperimentazione di alcune metodologie per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi*. Bologna: Pitarora Ed.
- Civita, M. (1994).** *Le Carte della Vulnerabilità degli Acquiferi all'Inquinamento. Teoria e Pratica (Aquifer vulnerability maps)*. Bologna: Pitarora Ed.
- EUWI/MED, Joint Mediterranean Process. (2007).** *Mediterranean Groundwater Report. Technical report on groundwater management in the Mediterranean and the Water Framework Directive*. Ανάκτηση από http://forum.europa.eu.int/Public/irc/env/wfd/library?l=/framework_directive/groundwater_library/mediterranean_groundwater/_EN_1.0_&a=d
- Foster S.S.D., Van Duijvenbooden, W., Van Waegeningh, H.G. (1987).** *Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants*. The Hague: Committee for hydrological research TNO.
- Gianneli, C., Voudouris, K., Stamos, A. P., & Soulios, G. (2007).** Proposed method to assess the intrinsic groundwater vulnerability of shallow aquifers: An example from Amytaion Basin, North Greece. *Water Pollution in natural Porous media at different scales. Assessment of fate, impact and indicators* (σσ. 11-14). Barcelona: Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España.
- Gogu, R.C., Hallet, V. & Dassargues, A. (2003).** Comparison of aquifer vulnerability assessment techniques. Application to the Néblon river basin (Belgium). *Environmental Geology*, 44, σσ. 881-892.
- Holman I.P., Palmer R.C., Leonaviciute N. (2000).** Using soil and quaternary geological information to assess the intrinsic groundwater vulnerability of shallow aquifers: an example from Lithuania. *Hydrogeology Journal* 8, 636–645, σσ. 636-645.



- Kabbour, B. B., Zouhri, L., Mania, J., & Colbeaux, J. P. (2006).** Assessing groundwater contamination risk using the DASTI/IDRISI GIS method: coastal system of western Mamora, Morocco. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(4), σσ. 463-470.
- Kronberg, P. (1969).** Gliederung, Petrografie und Tektognese des Rhodopen-Kristallins im Tsal-Dag, Simvolon und Ost-Pangaon (Griechisch-Makedonien). *Geotekt. Forsch.*, 31, σσ. I-III.
- Kundzewicz, Z. W., and P. Döll (2009).** Will groundwater ease freshwater stress under climate change? *Hydrol. Sci. J.*, 54(4), σσ. 665-675.
- Moore, P., & John, S. (1990).** *SEEPAGE: a system for early evaluation of the pollution potential of agricultural groundwater environments*. USDA, SCS, Northeast Technical center.
- Mposkos, E., & Krohe, A. (2000).** Petrological and structural evolution of continental high pressure (HP) metamorphic rocks in the Alpine Rhodope Domain (N. Greece). *Proceedings of the 3rd International Conference on the Geology of the Eastern Mediterranean*, (Vol. 221232).
- Panagopoulos, G. P., Antonakos, A. K., & Lambrakis, N. J. (2005).** Optimization of the DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment via the use of simple statistical methods and GIS. *Hydrogeology Journal*, 14, σσ. 894-911.
- Papanikolaou, D., & Panagopoulos, A. (1981).** Observations on the structural style of S. Rhodope. *Geol. Balcanica*, 11, σσ. 12-22.
- Ramos-Leal, José & Romero, L. & Montes, Ismael. (2004).** Combined use of aquifer contamination risk maps and contamination indexes in the design of water quality monitoring networks in Mexico. *Geofísica Internacional. Vol 43, Num. 4*, σσ. 641-650.
- Strahler, A. N. (1952).** Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological society of America bulletin*, 63(11), σσ. 1117-1142.
- Syrides, G., Psilovikos, A. (1989).** Quaternary Morphodynamic phenomena at the area of Pieria-Marmaras river vallery complex, SW Rhodope, Northern Greece. *Geographica Rhodopica*, I, σσ. 70-77.



Van Stempvoort D., Evert L., Wassenaar L. (1992). Aquifer Vulnerability Index: A GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Canadian Water Resources Journal*, 18, σσ. 25-37.

Wada, Y. et al. (2016). Modelling global water use for the 21st century: The Water Futures and Solutions (WFaS) initiative and its approaches. *Geoscientific Model Development*, Vol. 9, issue 1, σσ. 175–222.