

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

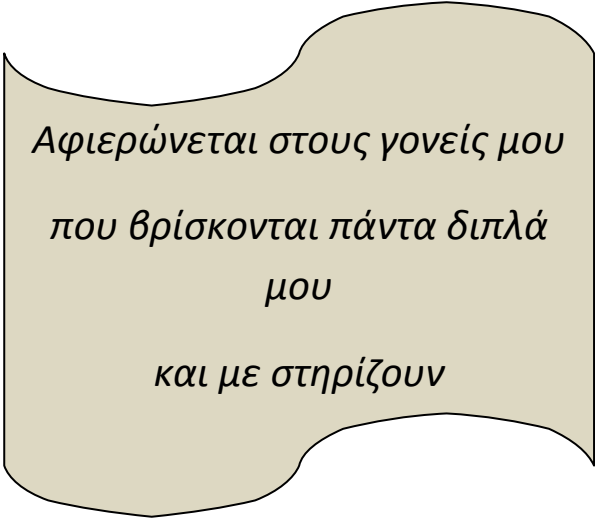


ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ-ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΕΞΑΣΘΕΝΟΥΣ
ΧΡΩΜΙΟΥ Cr(VI) ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ
ΑΣΩΠΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΣΤΗΝ ΒΟΡΕΙΟ-
ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΑΤΤΙΚΗ

ΚΑΡΑΓΙΩΡΓΗ ΒΑΣΙΛΙΚΗ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

- Καθ. Καρατζάς Γεώργιος (επιβλέπων)
- Καθ. Νικολαΐδης Νικόλαος
- Δρ. Δόκου Ζωή



*Αφιερώνεται στους γονείς μου
που βρίσκονται πάντα δίπλα
μου
και με στηρίζουν*

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία θα ήθελα πρώτα από όλα τα ευχαριστήσω τον καθηγητή και κοσμήτορα της σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Καρατζά Γεώργιο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και για την ευκαιρία που μου έδωσε να συμμετέχω στο εργαστήριο της Γεωπεριβαλλοντικής Υδραυλικής. Η συμβολή του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας ήταν πολύτιμη και καθοριστική όποτε τη χρειαζόμουν.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Νικολαΐδη Νικόλαο, καθηγητή της σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος, για την συμμετοχή του στην τριμελή επιτροπή μου.

Ένα απλό ευχαριστώ δεν αρκεί για την Μεταδιδακτορική Ερευνήτρια της σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος, κα. Δόκου Ζωή για την άψογη συνεργασία και για την πολύτιμη καθοδήγησή της. Η συμβολή της σε όλη τη διάρκεια της εργασίας και ο χρόνος που αφιέρωσε ήταν καθοριστικός για μένα και για την επιτυχή ολοκλήρωσή της.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο του εργαστηρίου της Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, κ. Βαρουχάκη Εμμανουήλ καθώς και τα υπόλοιπα μέλη για την ευχάριστη συνεργασία μας όλο το διάστημα της διεκπεραίωσης της εργασίας.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους μου, Ιωάννα, Θέτις, Βασιλική, Νίκο Β., Νίκο Γ., Κώστα και ιδιαίτερα στην Ελένη και στον Γρηγόρη, για την βοήθεια και την υποστήριξή τους όλο αυτό το διάστημα. Η ψυχολογική υποστήριξη και η αγάπη που μου έδειχναν ήταν πολύτιμος σύμμαχός μου.

Περίληψη

Το υπόγειο νερό αποτελεί σημαντικό κομμάτι του παγκόσμιου υδατικού συστήματος γιατί λόγω αυτού καλύπτονται οι ανάγκες για πόσιμο νερό. Κινείται στους υπόγειους υδροφορείς μέσω των γεωλογικών σχηματισμών και σε περίπτωση ρύπανσης, μπορεί να μεταφέρει τους ρυπαντές με τους μηχανισμούς μεταφοράς μάζας σε μεγάλες εκτάσεις του υδροφορέα.

Αντικείμενο και στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μοντελοποίηση και προσομοίωση της υπόγειας ροής του ύδατος, καθώς και η μεταφορά του εξασθενούς χρωμίου στην λεκάνη απορροής του Ασωπού ποταμού.

Το ενδιαφέρον που έχει αποκτήσει τα τελευταία χρόνια η περιοχή μελέτης, μέσα από πλήθος ερευνών και δημοσιεύσεων, οφείλεται στην εκτεταμένη και ανεξέλεγκτη ρύπανση του ποταμού και επομένως και των υπογείων υδάτων από το εξασθενές χρώμιο. Αυτή η ρύπανση μπορεί να προέρχεται είτε από τα λύματα των πολυάριθμων βιομηχανιών που αναπτύσσονται στην περιοχή είτε από τη σύσταση των πετρωμάτων του σερπεντινίτη που υπάρχουν στη γεωλογία της περιοχής. Το βασικό ερώτημα που καλούνται να απαντήσουν όλες αυτές οι έρευνες είναι η προέλευση της ρύπανσης καθώς και το μέγεθός της.

Γνωρίζοντας τη σημαντικότητα της περιοχής, λόγω ύπαρξης πολλών οικισμών και καλλιεργειών, καθώς και τη σημασία των ρυπασμένων υδάτινων πόρων για την ανθρώπινη υγεία και την ισορροπία του υδατικού συστήματος, κρίνεται απαραίτητη η μοντελοποίηση αυτή της περιοχής. Ως στόχος ορίζεται η συλλογή δεδομένων για το σύστημα των υπογείων υδάτων καθώς και για τη μεταφορά της μάζας του χρωμίου, για να μπορέσει να εκτιμηθεί η ποσότητα και κατεύθυνση των υδάτων και η προέλευση της ρύπανσης.

Το εξασθενές χρώμιο, το οποίο είναι από τις μορφές του χρωμίου που συναντάται συχνά στη φύση, αποτελεί εξαιρετικά τοξική χημική ένωση και για τον άνθρωπο και για το περιβάλλον και μπορεί να προκαλέσει μέχρι και καρκινογένεση. Το χρώμιο σε αυτή τη μορφή προέρχεται είτε από ανθρωπογενείς παρεμβάσεις είτε από φυσικές διεργασίες.

Η μοντελοποίηση της ροής και της μεταφοράς της μάζας έγινε με τη βοήθεια του μοντέλου PTC (Princeton Transport Code) από το οποίο εξάγονται συμπεράσματα για την ροή του υπόγειου ύδατος και τη μεταφορά της μάζας σε χρονική περίοδο 5 χρόνων. Ο κώδικας αυτός στηρίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων που προσομοιάζουν κατάλληλα την περιοχή.

Ως περιοχή μελέτης ορίζεται ολόκληρη η λεκάνη απορροής του Ασωπού ποταμού, ο οποίος τοποθετείται γεωγραφικά, στο μεγαλύτερο μέρος του στο νομό Βοιωτίας και στο βορειοανατολικό κομμάτι του νομού Αττικής. Για την ευρύτερη περιοχή μελέτης κρίνεται απαραίτητη η παράθεση στοιχείων γεωλογίας και υδρογεωλογίας, των οικισμών και των βιομηχανικών εγκαταστάσεων, καθώς και κάποιων μετεωρολογικών δεδομένων που θα μας βοηθήσουν να προσομοιάσουμε τη ροή του νερού και του ρύπου με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Στη συνέχεια, εντάσσοντας στο μοντέλο τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί για την ευρύτερη περιοχή μελέτης και έπειτα από τη βαθμονόμησή του, εξάγονται τα αποτελέσματα για τη ροή στην έκταση του υπόγειου υδροφορέα και για την μεταφορά του ρύπου. Από τα αποτελέσματα του μοντέλου μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για την εξάπλωση του ρύπου σε βάθος χρόνου και για την ακριβή προέλευσή του.

Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι η ρύπανση μπορεί να οφείλεται στη γεωλογία της περιοχής, μέσω της εκχύλισης εξασθενούς χρωμίου στο υπόγειο νερό από το πέτρωμα του σερπεντινίτη, οφείλεται όμως και σε μεγάλο ποσοστό στην ανθρώπινη δραστηριότητα η οποία επιβαρύνει το ήδη υπάρχον πρόβλημα.

Abstract

Groundwater is an important part of the global water system because it covers the needs for drinking water. It moves in the groundwater aquifers geological formations as the existing pollutants are transported by the mechanisms of mass transport in almost the entire area of the aquifer.

The object and aim of this diploma thesis is the modeling and simulation of the groundwater flow and transport of hexavalent chromium in the catchment area of the Asopos River.

The study area has gained interest in recent years, through many studies and publications, due to the extensive and uncontrolled pollution of the river and therefore of the groundwater, to hexavalent chromium. This pollution originates either from the numerous industries which exist in the area or due to the composition of ultrabasic rocks present in the geology of the area. The main question that needs to be answered by all these studies is the origin of the chromium pollution as well as its magnitude and extend.

Given the importance of the region, due to the existence of many settlements, and the importance of water resources for human health, it is necessary to model this region. The objective is the collection of data for the groundwater system and for the mass transport of chromium, in order to assess the efficient use of water and the origin of the pollution.

The study area has gained interest in recent years, through many studies and publications, due to the extensive and uncontrolled pollution of the river and therefore of the groundwater, to hexavalent chromium. This pollution originates either from the numerous industries which exist in the area or due to the composition of ultrabasic rocks present in the geology of the area. The main question that needs to be answered by all these studies is the origin of the chromium pollution as well as its magnitude and extend.

Hexavalent chromium, one of the forms of chromium frequently encountered in nature, is an extremely toxic compound for humans and the environment and can even cause cancer. Chromium in this form occurs either due to anthropogenic interventions or due to natural weathering of ultrabasic rocks.

The modeling of the flow and mass transfer was performed using the model PTC (Princeton Transport Code) from which conclusions are drawn for the flow of groundwater and the transfer of mass over a period of five years. This code is based on the finite element method.

The study area is the whole catchment area of Asopos River, the greater part of which is geographically situated in the prefecture of Boeotia and in the north-eastern

part of Attica. For the study area, it is necessary to select data for the geology and hydrogeology, human settlements and industrial facilities, and some meteorological data that will help us simulate accurately the groundwater flow and pollutant transport.

After entering the input data and calibrating the model, the results for the flow of groundwater and transport of chromium are presented. From these results, we can draw conclusions about the spread of the pollutant over time and its exact origin.

We conclude, therefore, that the chromium pollution may be due to the geology of the region, through the weathering of ultrabasic rocks, but also due to the human activity which aggravates the already existing problem.

Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 ^ο	1
Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 2ο	5
Βασικές έννοιες ροής υπογείων υδάτων	5
2.1 Υδρολογικός κύκλος.....	5
2.1.1 Υδρολογικό ισοζύγιο.....	6
2.2 Υδρογεωλογία και γεωλογικοί σχηματισμοί.....	7
2.3 Υπόγειο νερό και σχηματισμός υπόγειων υδροφορέων.....	8
2.3.1 Κατακόρυφη κατανομή του υπόγειου νερού.....	9
2.3.2 Υπόγειοι υδροφορείς.....	10
2.3.3 Τύποι υδροφορέων	11
2.4 Υδραυλικά χαρακτηριστικά και βασικοί νόμοι που διέπουν την υπόγεια ροή	12
2.5 Μηχανισμοί μεταφοράς μάζας	16
2.5.1 Μεταφορά λόγω διαφοράς συγκέντρωσης – Διάχυση (Diffusion).....	16
2.5.2 Μεταφορά λόγω συμμεταφοράς (Advection)	17
2.2.3 Διασπορά (Dispersion).....	18
Κεφάλαιο 3ο	19
Χρώμιο	19
3.1 Ιστορική αναδρομή.....	19
3.2 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του χρωμίου.....	19
3.3 Τρόποι εισαγωγής χρωμίου στο νερό	22
3.4 Τοξικότητα	22
3.4.1 Χρώμιο και μηχανισμοί καρκινογένεσης.....	23
3.5 Τεχνολογίες απορρύπανσης.....	24
3.6 Νομοθεσία	26
Κεφάλαιο 4 ^ο	28
Μοντελοποίηση υπόγειας ροής και μεταφοράς ρύπων	28
4.1 Ορισμός και σκοπός μοντελοποίησης.....	28
4.2 Βήματα σχεδιασμού ενός μοντέλου.....	29
4.3 Μαθηματικό μοντέλο μεταφοράς διαλυμένης ουσίας.....	33
4.3.1 Κύριες εξισώσεις.....	33
4.3.2 Αρχικές συνθήκες	34
4.3.3 Οριακές συνθήκες.....	35
4.3.4 Συνθήκες υδροφόρου ορίζοντα.....	36

4.4 Επίλυση μαθηματικού μοντέλου.....	36
Κεφάλαιο 5ο	39
Περιγραφή μοντέλων και εφαρμογών που χρησιμοποιήθηκαν.....	39
5.1 Λογισμικό Argus One	39
5.2 Ο κώδικας PTC	40
5.2.1 Αλγοριθμική επίλυση του κώδικα PTC.....	42
5.2.2 Οριακές συνθήκες.....	43
5.3 Η εφαρμογή ArcGIS 9.2	43
5.4 Το πρόγραμμα GEO5	44
Κεφάλαιο 6ο	45
Περιγραφή περιοχής μελέτης.....	45
6.1 Εισαγωγή	45
6.2 Οικισμοί περιοχής.....	45
6.3 Παραγωγικοί τομείς.....	46
6.4 Βιομηχανικές εγκαταστάσεις.....	47
6.5 Γεωλογία της περιοχής	49
6.6 Υδρογεωλογία της περιοχής.....	49
6.7 Κλιματολογικά και βροχομετρικά στοιχεία	50
6.8 Υφιστάμενη κατάσταση ρύπανσης.....	51
Κεφάλαιο 7ο	53
Χρήση μοντέλου PTC	53
7.1 Προσδιορισμός περιοχής μελέτης και εισαγωγή δεδομένων.....	53
7.2 Δημιουργία γεωλογικών τομών	54
7.3 Εισαγωγή δεδομένων στο PTC	58
7.4 Περίγραμμα περιοχής και κατασκευή πλέγματος	59
7.5 Αρχικές και οριακές συνθήκες.....	64
7.6 Βροχόπτωση	68
7.7 Βαθμονόμηση μοντέλου.....	69
Κεφάλαιο 8ο	77
Αποτελέσματα μοντελοποίησης.....	77
Κεφάλαιο 9ο	82
Συμπεράσματα.....	82
Βιβλιογραφία	85
Παραρτήματα	89
Παράρτημα Α.....	89

Παράρτημα Β.....	99
------------------	----

Κεφάλαιο 1^ο

Εισαγωγή

Η ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής του Ασωπού ποταμού, που τοποθετείται στο μεγαλύτερο μέρος του στο νομό Βοιωτίας, εκτός από το νότιο και ανατολικό του τμήμα που αποστραγγίζει τις βορειοανατολικές απολήξεις της Πάρνηθας, οι οποίες αποτελούν μέρος του νομού Αττικής, έχει γίνει θέμα πολλαπλών ερευνών και δημοσιεύσεων. Κύριες αιτίες είναι η απουσία οργανωμένων μονάδων συστηματικής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και βιομηχανικών λυμάτων από την περιοχή, οι συχνές αναφορές των κατοίκων για διάθεση αποβλήτων απευθείας στην κοίτη του Ασωπού καθώς και οι αυξημένες συγκεντρώσεις μετάλλων που προσδιορίστηκαν σε μεμονωμένες δειγματοληψίες. Το ενδιαφέρον των ερευνών εστιάστηκε καταρχήν σε αυξημένες συγκεντρώσεις τρισθενούς Cr(III) και εξασθενούς Cr(VI), οι οποίες σε ορισμένες περιοχές υπερέβαιναν ακόμη και τα όρια ποσιμότητας των 50 µg/L (Γιαννουλόπουλος, 2008). Το ουσιαστικό επίκεντρο των ερευνών, το οποίο μας αφορά για την εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι οι καταγραφείσες συγκεντρώσεις του εξασθενούς χρωμίου Cr(VI), το οποίο χαρακτηρίζεται ως καρκινογόνο και μπορεί να προκαλέσει πολλαπλά προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία. Η προέλευση αυτής της ουσίας, σύμφωνα με τις προαναφερθείσες μελέτες, ενδέχεται να είναι είτε ανθρωπογενής, λόγω της ύπαρξης βιομηχανιών όπως βαφεία, κλωστοϋφαντουργεία, μονάδων επεξεργασίας δέρματος και ξύλου καθώς και βυρσοδεψεία, είτε γηγενής που μπορεί να προέρχεται από την οξείδωση του τρισθενούς χρωμίου Cr(III) που υπάρχει στο έδαφος, κάτω από την ύπαρξη κατάλληλων συνθηκών και από τα υπερβασικά και οφειολιθικά πετρώματα του υπόγειου υδροφόρου, όπως ο σερπεντινίτης και ο περιδοτίτης. Η περιοχή του Ασωπού ποταμού έχει μελετηθεί σποραδικά, χωρίζοντας την σε επιμέρους τμήματα με επίκεντρο τις κατοικήσιμες και τις βιομηχανικές περιοχές. Σε κλίμακα τόσο μεγάλη όσο στην παρούσα διπλωματική εργασία, η οποία περιλαμβάνει την εξάπλωση της ρύπανσης σε όλη τη λεκάνη απορροής, πρώτη φορά γίνεται προσομοίωση. Από τις μέχρι τώρα έρευνες που έχουν γίνει έχουν εξαχθεί ποικίλα συμπεράσματα σχετικά με την προέλευση του εξασθενούς χρωμίου. Οι περισσότερες επικεντρώνονται στην

χημική ανάλυση των δειγμάτων που έχουν παρθεί από το έδαφος και το υπόγειο νερό με σκοπό τον προσδιορισμό του μεγέθους της ρύπανσης καθώς και της ακριβούς προέλευσής της.

Σε μια πρόσφατη έρευνα, μέσω των ορυκτολογικών και των γεωχημικών αποτελεσμάτων που εξήχθησαν, εκτιμάται τόσο η γηγενής όσο και η ανθρωπογενής προέλευση του χρωμίου στο έδαφος και το υπόγειο νερό στην περιοχή του Ωρωπού, που βρίσκεται στο βορειοανατολικό κομμάτι του νομού Αττικής, ενώ από την μοντελοποίηση της περιοχής με τη βοήθεια κατάλληλου μοντέλου, προκύπτει ότι η μεταφορά των ρυπαντών από τον ποταμό Ασωπό έχει επηρεάσει μόνο τα ανώτερα στρώματα του υδροφορέα (Moraetis et al., 2012).

Ως άλλη πηγή πληροφοριών λαμβάνεται η μελέτη στην οποία οι συγκεντρώσεις του εξασθενούς χρωμίου στα δείγματα που πάρθηκαν, παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές στην περιοχή της Αυλίδας καθώς και στις περιοχές εκατέρωθεν του Ασωπού ποταμού έως την περιοχή του Ωρωπού και της Αυλώνας. Το γεγονός ότι σε αυτές τις περιοχές επικρατεί βιομηχανική ανάπτυξη οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η πλειοψηφία των συγκεντρώσεων του εξασθενούς χρωμίου οφείλεται στη βιομηχανική ρύπανση της περιοχής. Όσον αφορά τις φυσικές πηγές ρύπανσης (οφιόλιθοι), προκύπτει ότι η παρουσία τους περιορίζεται εκτός της στενής περιοχής της λεκάνης απορροής του Ασωπού, στην περιοχή της Πάρνηθας και του όρους Κτυπά, επομένως οι διάφοροι ρυπαντές που προσδιορίστηκαν είναι στην πλειοψηφία τους αποτέλεσμα βιομηχανικής, αστικής και γεωργικής ρύπανσης (Γιαννουλόπουλος, 2008).

Στη μελέτη που έχει πραγματοποιήσει το πανεπιστήμιο Αθηνών, για τον προσδιορισμό της ετερογενούς προέλευσης του εξασθενούς χρωμίου στο έδαφος, στα φυτά και στο υπόγειο νερό, έχει εξαχθεί ως συμπέρασμα ότι στις γεωτρήσεις που διαπερνούν τον υπόγειο υδροφορέα η βασική προέλευση της συγκέντρωσης του ρυπαντή είναι μέσω της απευθείας διάθεσης βιομηχανικών αποβλήτων και όχι της αντίδρασης μεταξύ του νερού και των πετρωμάτων που περιέχουν χρώμιο. Στην ίδια μελέτη εκτιμήθηκε επίσης ότι η ανομοιογενής κατανομή του εξασθενούς χρωμίου στο υπόγειο νερό μπορεί να σχετίζεται με την έντονη νεοτεκτονική παραμόρφωση, η οποία έχει πρωτογενή ιζηματογενή χαρακτηριστικά, τα οποία περιπλέκουν την τεκτονική δομή της λεκάνης του Ασωπού και τα οποία διευκολύνουν τη μετάβαση του ρυπασμένου νερού κατά μήκος των απότομων τεκτονικών επαφών μεταξύ των διαφορετικών τύπων ιζημάτων (Economou-Eliopoulos et al., 2011).

Μία ακόμη έρευνα που πραγματοποιήθηκε για τη συγκεκριμένη περιοχή, έχει δείξει ότι το πλούμιο που δημιουργείται από την εξάπλωση της ρύπανσης στην βιομηχανική περιοχή οφείλεται σε ένα συνδυασμό γηγενών και ανθρωπογενών πηγών. Πιο συγκεκριμένα, έχει αποδειχθεί ότι, το πλήθος των βιομηχανικών εγκαταστάσεων της περιοχής είναι εγκατεστημένο σε μέρος που έχουν παρατηρηθεί υψηλές τιμές pH. Αυτό το μέρος βρίσκεται ανάντη του πλουμίου που έχει δημιουργηθεί εξαιτίας της ρύπανσης λόγω του Cr(VI) και είναι συνδυασμένο με υψηλές συγκεντρώσεις μαγνησίου (Mg) και νικελίου (Ni). Από το γεωχημικό προφίλ που έχει δημιουργηθεί έχει αναφερθεί ότι, ενώ δεν μπορεί να αγνοηθεί και να θεωρηθεί αμελητέα η ρύπανση λόγω ανθρωπογενούς παρέμβασης από την ύπαρξη βιομηχανιών, πιθανότερο παράγοντα ρύπανσης σε τόσο μεγάλη κλίμακα αποτελεί η γηγενής προέλευση λόγω της ύπαρξης πετρωμάτων (Dermatas et al, 2012).

Με βάση μία έρευνα του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, κατέστη εμφανές ότι, παρότι το Cr έχει ισχυρή λιθογενή προέλευση, λόγω των υπερβασικών πετρωμάτων, το περιεχόμενο των ασταθών μορφών και των ιζημάτων αποκαλύπτει ισχυρή παρουσία των ανθρωπογενών απορρίψεων στη συνολική ποσότητα Cr στα ιζήματα του συστήματος του ποταμού Ασωπού. Οι ασυνήθιστα υψηλές συγκεντρώσεις εξασθενούς χρωμίου στα υπόγεια νερά της περιοχής φαίνεται να έχει διπλή προέλευση: εκτός από το Cr(VI) που προέρχεται κατευθείαν από τις βιομηχανικές δραστηριότητες, το τρισθενές χρώμιο Cr(III) σχετίζεται με τα διαβρωμένα μέταλλα που θα μπορούσαν να μετακινηθούν σε μικρό βαθμό και να μετατραπούν με την παρουσία οργανικής ύλης σε άλλα μέταλλα, π.χ. οξείδια του μαγγανίου (Mn) (Botsou et al., 2011).

Η περιοχή του Ωρωπού Αττικής, έκτασης 87 km², αποτέλεσε το πεδίο μελέτης μιας πτυχιακής (Συρράκου, 2008) και μιας μεταπτυχιακής εργασίας (Μπέλλου, 2010) που εκπονήθηκαν στο Εργαστήριο Περιβαλλοντικής Μηχανικής της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η πρώτη εργασία είχε ως σκοπό τον χαρακτηρισμό και την προσομοίωση της υπόγεια ροής της περιοχής και την εξέταση του ποταμού Ασωπού ως πηγή ρύπανσης του υπόγειου υδροφορέα (Συρράκου, 2008). Στη δεύτερη εργασία εξετάστηκε και η γηγενής προέλευση της ρύπανσης λόγω της ύπαρξης υπερβασικών πετρωμάτων στην περιοχή. Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης καταδεικνύουν ότι η ρύπανση του ποταμού είναι υπεύθυνη για την ανίχνευση συγκεντρώσεων εξασθενούς χρωμίου στο ανώτερο τμήμα του υδροφορέα,

αλλά δεν μεταφέρεται στα κατώτερα στρώματα, λόγω ύπαρξης μη περατών γεωλογικών στρωμάτων. Στα κατώτερα στρώματα του υδροφορέα, η ύπαρξη χρωμίου αποδίδεται κυρίως στη γεωλογική σύσταση, από το πέτρωμα του σερπεντινίτη (Μπέλλου, 2010).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, για πρώτη φορά, μελετάται η ροή του υπόγειου ύδατος και της μεταφοράς του ρύπου σε ολόκληρη τη λεκάνη απορροής του Ασωπού ποταμού, έκτασης 720km^2 . Σκοπός είναι η μοντελοποίηση της ροής και μεταφοράς εξασθενούς χρωμίου στην περιοχή καθώς και η μελέτη της προέλευσης της ρύπανσης (γηγενής ή ανθρωπογενής).

Κεφάλαιο 2ο

Βασικές έννοιες ροής υπογείων υδάτων

2.1 Υδρολογικός κύκλος

Το επίκεντρο του ενδιαφέροντος της υδρολογίας είναι ο υδρολογικός κύκλος, που αποτελείται από συνεχόμενες διεργασίες, όπως φαίνεται στην [Εικόνα 2.1](#):



Εικόνα 2.1 Υδρολογικός κύκλος (Perlman et al., 2005)

Το νερό εξατμίζεται από τους ωκεανούς και τις επιφάνειες της γης για να μετατραπεί σε υδρατμούς που μεταφέρονται πάνω στη γη λόγω της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας. Οι υδρατμοί αυτοί συμπυκνώνονται και καταβυθίζονται στη γη και στους ωκεανούς. Το νερό που κατακρημνίζεται μπορεί να παρεμποδίζεται από τη βλάστηση, να ρέει πάνω από την επιφάνεια του εδάφους (επιφανειακή απορροή) είτε να διεισδύει στο έδαφος (υπόγεια ροή). Η εξάτμιση από την επιφάνεια της γης αποτελείται, από την απευθείας εξάτμιση από το έδαφος και την επιφάνεια των φυτών, και από την διαπνοή μέσω των φύλλων του φυτού. Αυτές οι διαδικασίες συλλογικά, ονομάζονται εξατμισοδιαπνοή. Το νερό που έχει διεισδύσει μπορεί να διηθηθεί πιο βαθιά στην αναπλήρωση των υπογείων υδάτων και αργότερα να γίνει διαρροή στα ρεύματα και να οδηγηθεί σε απορροή.

Ένα υδρολογικό σύστημα ορίζεται ως μία δομή ή ένας όγκος στο χώρο που περιβάλλεται από ένα όριο και δέχεται νερό και άλλες εισροές, τις χειρίζεται

εσωτερικά και τις παράγει σαν εξόδους. Αυτή η δομή ή ο όγκος είναι το σύνολο των διαδρόμων της ροής διαμέσου των οποίων περνάει το νερό και εισέρχεται ή εξέρχεται από το σύστημα. Ο παγκόσμιος υδρολογικός κύκλος μπορεί να παρασταθεί ως ένα σύστημα που αποτελείται από τρία υποσυστήματα: το ατμοσφαιρικό σύστημα νερού, το επιφανειακό σύστημα νερού και το υπόγειο σύστημα νερού (Todd and Mays, 2005).

2.1.1 Υδρολογικό ισοζύγιο

Το υδρολογικό ισοζύγιο αποτελεί μια μέτρηση της συνέχειας της ροής του νερού, η οποία ισχύει για οποιοδήποτε χρονικό διάστημα και για οποιονδήποτε μέγεθος περιοχής, που κυμαίνεται από περιοχές τοπικής κλίμακας, σε περιοχές περιφερειακής κλίμακας ή από οποιαδήποτε λεκάνη απορροής μέχρι ολόκληρη τη γη. Η ποσοτικοποίηση του υδρολογικού κύκλου για ένα ανοιχτό σύστημα γίνεται μέσω της εξίσωσης διατήρησης της μάζας στην οποία η μεταβολή της αποθήκευσης του νερού σε σχέση με το χρόνο (dS/dt) εντός του εν λόγω συστήματος είναι ίση με τις εισροές στο σύστημα μείον τις εκροές από το σύστημα. Για μία δεδομένη λεκάνη απορροής, το υδατικό ισοζύγιο του συστήματος υπόγειου ύδατος είναι:

$$P - R - E - T - I = \Delta S$$

όπου,

I, η κατείσδυση

T, η διαπνοή

E, η εξάτμιση

R, η επιφανειακή απορροή

P, τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα

ΔS , η διαφορά στην αποθηκευτικότητα του υπόγειου νερού

Τα παραπάνω μεγέθη μπορούν να εκφραστούν σε ύψος νερού (mm) σε όγκο νερού (m^3) ή σε ποσοστό επί τοις εκατό (%) (Todd and Mays, 2005).

2.2 Υδρογεωλογία και γεωλογικοί σχηματισμοί

Υδρογεωλογία είναι ο επιστημονικός κλάδος που ερευνά τη σχέση του υπόγειου νερού με τους γεωλογικούς σχηματισμούς, εξετάζοντας την προέλευση του νερού, την κατανομή του και την κίνησή του στο υπέδαφος.

Η παρουσία του νερού στους γεωλογικούς σχηματισμούς επιδρά είτε ως φυσικοχημική αντίδραση με τα ορυκτά συστατικά τους, είτε ως υδροστατική πίεση πόρων στους χαλαρούς (εδαφικούς) και βραχώδεις γεωλογικούς σχηματισμούς είτε ως άμεσα ασκούμενη υδραυλική πίεση. Η υδρογεωλογική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών ορίζεται από κάποια χαρακτηριστικά:

- **Το πορώδες (Porosity)**

Το πορώδες (n) ή ολικό πορώδες είναι ένα μέτρο των διάκενων που υπάρχουν σε ένα πέτρωμα ή έδαφος και εκφράζεται με το λόγο του συνολικού όγκου των διάκενων (V_{κ}) προς τον συνολικό όγκο του πετρώματος ($V_{ολ}$):

$$n = \frac{V_{\kappa}}{V_{ολ}}$$

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται κάποιες τιμές ολικού πορώδους για διάφορους τύπους πετρωμάτων:

Προσχώσεις	Πορώδες (%)	Ιζηματογενή πετρώματα	Πορώδες (%)	Κρυσταλλικά πετρώματα	Πορώδες (%)
Μικρά χαλίκια	24-36	Ψαμμίτες	5-30	Ρωγματωμένα	0-10
Μεγάλα χαλίκια	25-38	Ιλυόλιθοι	21-41	Μη ρωγματωμένα	0-5
Χονδρόκοκκη άμμος	31-48	Ασβεστόλιθοι	0-40	Βασάλτες	3-35
Λεπτόκοκκη άμμος	26-53	Καρστοποιημένοι ασβεστόλιθοι	0-40	Αποσαθρωμένοι γρανίτες	34-57
Ιλύς	34-61	Σχιστόλιθοι	0-10		
Άργιλος	34-60				

Πίνακας 2.1 Τιμές ολικού πορώδους (Καλλέργης, 1999)

- **Το ενεργό πορώδες (Effective porosity)**

Το ενεργό πορώδες αναφέρεται στο ποσό των διάκενων που επικοινωνούν μεταξύ τους και επιτρέπουν τη ροή του υπόγειου νερού υπό την επίδραση της βαρύτητας ή της υδροστατικής πίεσης. Τα διάκενα που δεν συνεισφέρουν στη ροή αυτή

καταλαμβάνονται από νερό συγκράτησης. Στους κοκκώδεις σχηματισμούς, το ενεργό πορώδες κυμαίνεται από 0-3% (άργιλος) έως 20% (χαλίκια).

Το πορώδες χαρακτηρίζεται σαν **πρωτογενές**, δηλαδή το πορώδες που οφείλεται στα διάκενα που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια του σχηματισμού του πετρώματος και σαν **δευτερογενές**, δηλαδή το πορώδες που οφείλεται στα διάκενα που δημιουργήθηκαν λόγω τεκτονισμού, αποσάθρωσης, διάλυσης κ.ά. Το πρωτογενές πορώδες εξαρτάται από τη διάταξη, το μέγεθος και τη μορφή των κόκκων.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί ταξινομούνται, ανάλογα με τη δυνατότητα που παρέχουν στο νερό να διεισδύσει και να κινηθεί μέσα στη μάζα τους, σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- **Υδροπερατοί σχηματισμοί**

Ονομάζονται οι γεωλογικοί σχηματισμοί που επιτρέπουν τη διείσδυση και κυκλοφορία του νερού διαμέσου της μάζας τους και διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- 1. Μικροδιαπερατά**

Πρόκειται για χαλαρά υλικά (άμμοι, χαλίκια, κροκάλες) ή συμπαγή πετρώματα που η υδροπερατότητά τους οφείλεται στο πρωτογενές πορώδες.

- 2. Μακροδιαπερατά**

Πρόκειται για πετρώματα που η υδροπερατότητά τους οφείλεται στο δευτερογενές πορώδες.

- **Αδιαπέρατοι σχηματισμοί**

Ονομάζονται οι γεωλογικοί σχηματισμοί που δεν επιτρέπουν την κίνηση του νερού διαμέσου της μάζας τους, υπό την επίδραση της βαρύτητας ή της υδροστατικής πίεσης (Βουδούρης, 2006).

2.3 Υπόγειο νερό και σχηματισμός υπόγειων υδροφορέων

Το υπόγειο νερό ορίζεται σαν αυτό που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, ανεξαρτήτως κατάστασης, βάθους και προέλευσης. Τα υπόγεια νερά αποτελούν μέρος του υδρολογικού κύκλου, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, και αντιστοιχούν στο 0,61% του συνολικού νερού στον πλανήτη. Η κυριότερη προέλευσή τους είναι τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα. Μικρό ποσοστό των υπόγειων νερών είναι μαγματικής ή κοσμικής προέλευσης, που εισέρχονται για πρώτη φορά στον υδρολογικό κύκλο. Το συγγενετικό (connate) είναι νερό που δεν έχει έλθει σε επαφή με την ατμόσφαιρα για μεγάλο χρονικό διάστημα, ενώ το μαγματικό και το μεταμορφωμένο νερό συνδέονται με την άνοδο του μάγματος και τις διαδικασίες της

μεταμόρφωσης των πετρωμάτων, αντίστοιχα. Το νερό εισέρχεται στο υπέδαφος από την επιφάνεια του εδάφους, είτε κατευθείαν από τις βροχοπτώσεις, είτε από σώματα επιφανειακού νερού (ποτάμια, λίμνες). Στη συνέχεια κινείται αργά σε ποικίλες αποστάσεις μέχρι να επιστρέψει στην επιφάνεια του εδάφους είτε με φυσική εκφόρτιση (πηγές), είτε με ανθρώπινη παρέμβαση (πηγάδια, γεωτρήσεις), είτε τέλος μέσω της διαπνοής των φυτών (Todd and Mays, 2005).

2.3.1 Κατακόρυφη κατανομή του υπόγειου νερού

Η παρουσία του υπόγειου νερού στο υπέδαφος μπορεί να διακριθεί σε δύο ζώνες:

- **Ζώνη κορεσμού (Zone of saturation)**

Όλα τα διάκενα της ζώνης αυτής είναι γεμάτα νερό κάτω από υδροστατική πίεση (μονοφασική ροή). Αντιπροσωπεύει ουσιαστικά το υδροφόρο στρώμα και η άνω επιφάνεια της ζώνης αυτής είναι η ελεύθερη επιφάνεια. Η ζώνη αυτή μπορεί να μας τροφοδοτήσει με νερό και ως εκ τούτου έχει ιδιαίτερη σημασία. Το επιφανειακό νερό με την επίδραση της βαρύτητας, της υδροστατικής πίεσης και των τριχοειδών δυνάμεων διεισδύει στο έδαφος διαμέσου των διάκενων και κινείται προς την κορεσμένη ζώνη, εμπλουτίζοντας τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες. Η κατείδυση, επομένως, αναφέρεται στην κατακόρυφη κίνηση του νερού στη ζώνη αερισμού και η διήθηση στην κίνηση του νερού στην κορεσμένη ζώνη.

- **Ακόρεστη ζώνη (Unsaturated zone) ή ζώνη αερισμού (Aeration zone)**

Η ακόρεστη ζώνη (vadose or unsaturated) ή μερικά κορεσμένη ζώνη (partially saturated zone) καταλαμβάνει το τμήμα μεταξύ της στάθμης του υπόγειου νερού και της επιφάνειας του εδάφους. Ενδιάμεσα υπάρχει μία υποζώνη, η τριχοειδής, με ύψος που μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το μέγεθος των διάκενων. Η τριχοειδής ανύψωση (h_c) δίνεται από τη σχέση:

$$h_c = \left(\frac{2\tau}{\varepsilon R}\right) \sigma \nu \varphi$$

όπου:

τ , η επιφανειακή τάση,

ε , το ειδικό βάρος του νερού,

R , η ακτίνα του τριχοειδούς σωλήνα και

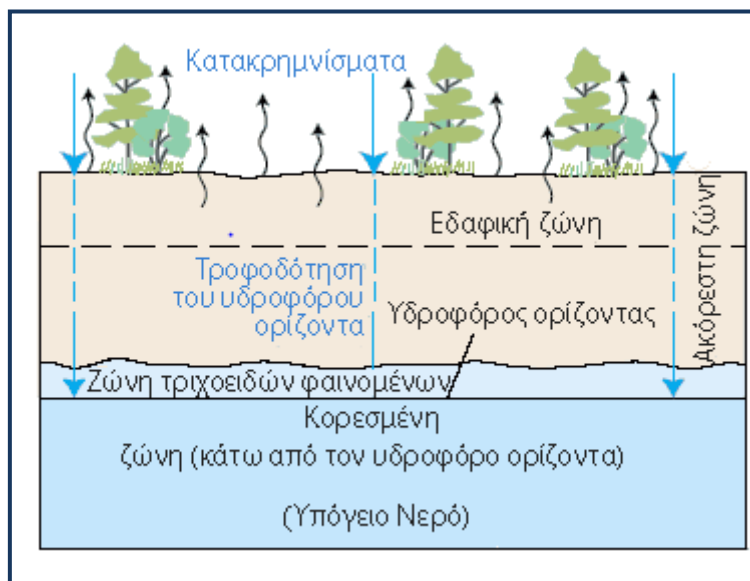
φ , η γωνία συνεπαφής ανάμεσα στα τοιχώματα του σωλήνα και του μηνίσκου.

Με εξαίρεση τμήματα της τριχοειδούς ζώνης, οι πόροι περιέχουν νερό και αέρα. Η ποσότητα του νερού σε ένα μερικώς κορεσμένο μέσο εκφράζεται με την περιεκτικότητα κατ' όγκο σε νερό (θ), που ορίζεται ως:

$$\theta = \frac{V_w}{V_T}$$

Όπου, V_w είναι ο όγκος του νερού και V_T είναι ο όγκος του μέσου.

Αν οι πόροι είναι πλήρως κορεσμένοι, τότε ο περιεχόμενος όγκος νερού είναι ίσος με το πορώδες (n). Συνεπώς στην ακόρεστη ζώνη το περιεχόμενο νερό κυμαίνεται μεταξύ $0 \leq \theta \leq n$. Η ροή στην ακόρεστη ζώνη έχει ως κύρια συνιστώσα την κατακόρυφη. Η κίνηση μπορεί να είναι ανοδική (εξάτμιση) ή καθοδική (κατείσδυση) όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.2 (Βουδούρης, 2006):



Εικόνα 2.2 Διαχωρισμός ζωνών υπεδάφους (Perlman et al., 2005)

2.3.2 Υπόγειοι υδροφορείς

Τα υπόγεια νερά συναντώνται σε πολλούς τύπους γεωλογικών σχηματισμών και οι πιο σημαντικοί από αυτούς είναι οι υδροφορείς. Ως υδροφορέας ορίζεται ο σχηματισμός που περιέχει επαρκή κεκορεσμένο διαπερατό υλικό ώστε να εφοδιάσει τα πηγάδια και τις πηγές με σημαντικές ποσότητες νερού. Αυτό συνεπάγεται μια ικανότητα να αποθηκεύουν και να μεταδίδουν το νερό. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που μπορούν να θεωρηθούν ως υδροφορείς είναι:

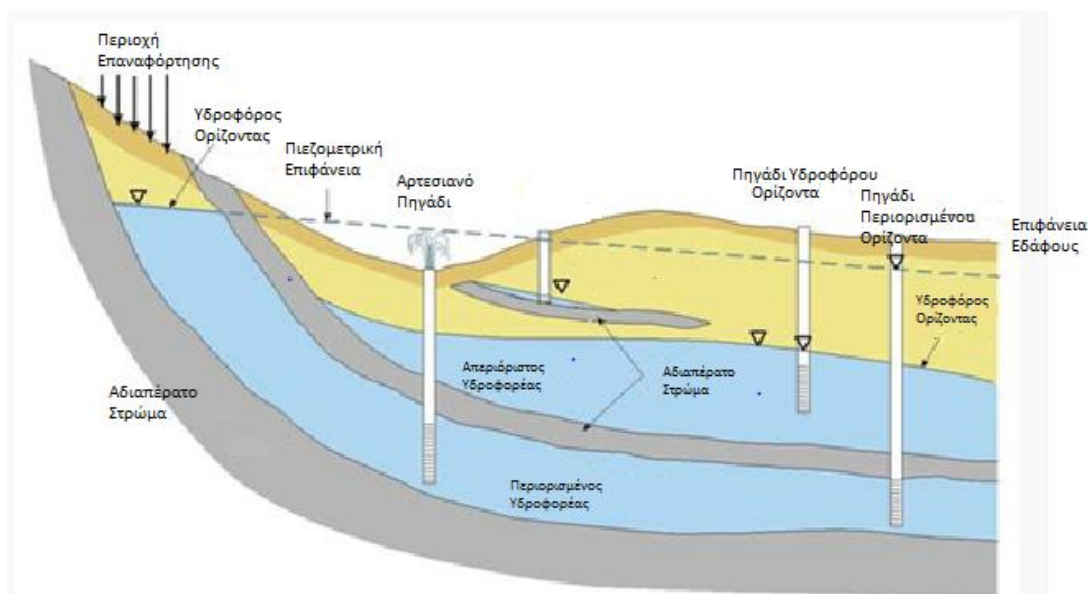
- Αλλουβιακές αποθέσεις
- Ασβεστόλιθοι
- Ηφαιστειακά πετρώματα
- Ψαμμίτες
- Πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα
- Άργιλοι (Todd and Mays, 2005)

2.3.3 Τύποι υδροφορέων

Οι περισσότεροι υδροφορείς εκτείνονται σε μεγάλες εκτάσεις και θεωρούνται ως υπόγειες δεξαμενές αποθήκευσης νερού. Το νερό εισέρχεται σε έναν υδροφορέα από φυσικό ή τεχνητό εμπλουτισμό, ρέει κατά κύριο λόγο υπό την επίδραση της βαρύτητας ή εξάγεται από τα πηγάδια. Συνήθως ο ετήσιος όγκος νερού που απομακρύνεται ή αντικαθίσταται αντιπροσωπεύει μόνο ένα μικρό κλάσμα της συνολικής χωρητικότητας αποθήκευσης. Οι υδροφορείς μπορούν να χαρακτηριστούν ως ελεύθεροι ή ως περιορισμένοι, ανάλογα με την παρουσία ή την απουσία του υδροφόρου ορίζοντα αντίστοιχα, ενώ υπάρχει και ένας τρίτος τύπος υδροφορέα, ο ημιαρτεσιανός. Στην Εικόνα 2.3 φαίνεται ο διαχωρισμός των υδροφορέων.

- Ως **ελεύθερος υδροφορέας** ορίζεται εκείνος στον οποίον ο υδροφόρος ορίζοντας ποικίλει στην κυματιστή μορφή και την κλίση ανάλογα με τις περιοχές αντλήσεως, εμπλουτισμού και ανάλογα με τη διαπερατότητα. Ανυψώσεις και πτώσεις του υδροφόρου ορίζοντα αντιστοιχούν σε αλλαγές στον όγκο του νερού που αποθηκεύεται εντός του υδροφορέα.
- Οι **περιορισμένοι υδροφορείς**, γνωστοί και ως υδροφορείς υπό πίεση, προκύπτουν όπου το υπόγειο νερό περιορίζεται υπό πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής. Η πιεζομετρική επιφάνεια, ενός περιορισμένου υδροφορέα, είναι μια φανταστική επιφάνεια που συμπίπτει με το επίπεδο της υδροστατικής πίεσης του νερού στον υδροφορέα και αξίζει να τονιστεί ότι ένας περιορισμένος υδροφορέας μετατρέπεται σε ελεύθερο υδροφορέα όταν η πιεζομετρική επιφάνεια πέσει κάτω από τον πυθμένα του ανώτερου ελεύθερου στρώματος.
- Ο **ημιαρτεσιανός υδροφορέας** μοιάζει με τον περιορισμένο στο γεγονός ότι βρίσκεται και αυτός υπό πίεση αλλά διαφέρουν στο ότι το υπερκείμενο

στρώμα είναι ημιπερατό, παρουσιάζει δηλαδή μικρή υδροπερατότητα (Βουδούρης, 2006).



Εικόνα 2.3 Είδη υδροφορέων (geosurvey.state.co.us)

2.4 Υδραυλικά χαρακτηριστικά και βασικοί νόμοι που διέπουν την υπόγεια ροή

Τα σημαντικότερα υδραυλικά χαρακτηριστικά των υπόγειων υδροφορέων είναι:

- **Το υδραυλικό φορτίο (Hydraulic head)**

Τα υπόγεια νερά κινούνται με την επίδραση της συνολικής ενέργειας που φέρουν και η οποία, ανά μονάδα όγκου, ισούται με το άθροισμα της κινητικής, της δυναμικής και της υδροστατικής. Πρακτικά η ενέργεια αυτή (H) ανά μονάδα βάρους (ή υδραυλικό φορτίο) είναι ίση με το άθροισμα του φορτίου πίεσης P/γ (pressure head) και του φορτίου ύψους της απόστασης από ένα επίπεδο αναφοράς z (elevation head):

$$H = \frac{P}{\gamma} + z$$

όπου, P η υδροστατική πίεση και γ το ειδικό βάρος του νερού ίσο με την πυκνότητά του επί την επιτάχυνση της βαρύτητας. Το φορτίο H αναφέρεται και ως πιεζομετρικό φορτίο ή πιεζομετρικό δυναμικό και ταυτίζεται με το απόλυτο υψόμετρο της στάθμης του υπόγειου νερού σε μια γεώτρηση που βρίσκεται σε ελεύθερο υδροφορέα. Στους υπό πίεση υδροφορείς το φορτίο είναι το απόλυτο υψόμετρο που θα έφτανε το νερό, αν ο σωλήνας της γεώτρησης επεκτεινόταν πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Έτσι η κίνηση του υπόγειου νερού σε ένα πορώδες μέσο οφείλεται στην υδροστατική πίεση και στη θέση του ως προς το επίπεδο αναφοράς.

Οι γραμμές ίσου υδραυλικού φορτίου (ισοδυναμικές γραμμές) μπορούν να απεικονισθούν με τη βοήθεια χαρτών και οι γραμμές ροής είναι κάθετες σε αυτές. Η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου (H) ανά μονάδα μήκους (L) κατά τη διεύθυνση της υπόγειας ροής ονομάζεται υδραυλική κλίση (i) και δίνεται από τη σχέση:

$$i = \frac{dH}{dL}$$

Το υδραυλικό φορτίο H σε ένα σημείο του πορώδους μέσου πολλαπλασιασμένο με την επιτάχυνση της βαρύτητας g , δίνει το δυναμικό ροής Φ στο σημείο αυτό. Το Φ είναι η ενέργεια ανά μονάδα μάζας και το H η ενέργεια ανά μονάδα βάρους. Το υδραυλικό φορτίο δεν μένει σταθερό, αλλά μειώνεται κατά την κίνηση του υπόγειου νερού, λόγω των απωλειών από τις τριβές (Βουδούρης, 2006).

- **Διαπερατότητα-Υδροπερατότητα (Permeability-Hydraulic conductivity)**

Η διαπερατότητα είναι μια σταθερά, που εξαρτάται μόνο από τα χαρακτηριστικά του πορώδους μέσου (το σχήμα, το μέγεθος, τη διάταξη των κόκκων) με διαστάσεις L^2 και δείχνει την ικανότητα ενός πετρώματος ή εδάφους να το διαπεράσει ένα ρευστό. Ο τύπος που εκφράζει την διαπερατότητα είναι:

$$k = \frac{K\mu}{\rho g}$$

όπου, K η υδραυλική αγωγιμότητα, μ το δυναμικό ιξώδες του ρευστού, ρ η πυκνότητα του ρευστού και g η επιτάχυνση της βαρύτητας (Todd and Mays, 2005).

Ένα μέσο έχει υδραυλική αγωγιμότητα ίση με τη μονάδα, όταν μεταβιβάζει στη μονάδα του χρόνου κάθετα στη διεύθυνση της υπόγεια ροής, μια μονάδα όγκου νερού από μοναδιαία διατομή με υδραυλική κλίση ίση με τη μονάδα. Το κινηματικό ιξώδες σχετίζεται με την εσωτερική τριβή, την αντίσταση δηλαδή του υγρού στη ροή (Βουδούρης, 2006). Η υδραυλική αγωγιμότητα έχει διαστάσεις ταχύτητας LT^{-1} και υπολογίζεται από τον νόμο του Darcy:

$$K = \frac{\nu}{dh/dL}$$

όπου,

ν , η ταχύτητα Darcy (m/day) και υπολογίζεται ως $\nu = \frac{Q}{A}$, Q η παροχή σε m^3/day και

A , η επιφάνεια σε m^2 ,

$\frac{dh}{dL}$, η υδραυλική κλίση σε m.

Γενικά οι γεωλογικοί σχηματισμοί χαρακτηρίζονται ως:

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

Η υδραυλική αγωγιμότητα υπολογίζεται από επιτόπου πειραματικές μετρήσεις, από δοκιμαστικές αντλήσεις, από την κοκκομετρία με τη βοήθεια εμπειρικών τύπων, με εργαστηριακές μεθόδους και με ιχνηθετήσεις.

Η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα, ως μέτρο κίνησης του νερού σε ακόρεστο μέσο, είναι μικρότερη από την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας σε κορεσμένο μέσο. Με βάση την περιεκτικότητα του νερού, η υδραυλική αγωγιμότητα ενός ακόρεστου μέσου (K_{unsat}) σε σχέση με την κορεσμένη τιμή (K) δίνεται από τη σχέση:

$$K_{unsat} = K \left(\frac{(S_s - S_0)}{1 - S_0} \right)^3$$

Όπου:

S_s , ο βαθμός κορεσμού και

S_0 , ο υπολειμματικός κορεσμός που αντιπροσωπεύει το νερό των πόρων που δεν κινείται και δεσμεύεται από τις τριχοειδείς δυνάμεις (Γεωργιάδης Θ., κ.α., 2004).

- **Μεταβιβασιμότητα (Transmissivity)**

Είναι το γινόμενο της υδραυλικής αγωγιμότητας (K) επί το πάχος του υδροφόρου στρώματος (D): $T = K \cdot D$. Η μεταβιβασιμότητα εκφράζει τον όγκο νερού που περνά από μια μοναδιαία διατομή του υδροφόρου στρώματος με υδραυλική κλίση ίση με τη μονάδα και έχει μονάδες L^2/T .

Στους περιορισμένους υδροφορείς η μεταβιβασιμότητα είναι σταθερό μέγεθος, μιας και το πάχος τους είναι προκαθορισμένο, ενώ στους ελεύθερους μεταβάλλεται χωρικά. Η ικανότητα αποθήκευσης του ύδατος στους περιορισμένους υδροφορείς οφείλεται στην συμπίεστότητα του ύδατος και του γεωλογικού υλικού ενώ στους

ελεύθερους υδροφορείς, εξαρτάται από την πλήρωση ή εκκένωση των πόρων (Πολυχρονάκη, 2011).

- **Αποθηκευτικότητα (Storativity)**

Ο συντελεστής εναποθήκευσης ή αποθηκευτικότητας ή υδροχωρητικότητας (S) είναι ο όγκος νερού που μπορεί να ληφθεί ή αποθηκευθεί από ένα κατακόρυφο πρίσμα ενός υδροφόρου στρώματος με μοναδιαία επιφάνεια ανά μονάδα μεταβολής του φορτίου. Έτσι η αποθηκευτικότητα ορίζεται από τη σχέση:

$$S = \frac{\Delta V}{A * \Delta h}$$

όπου, ΔV είναι ο όγκος νερού που απελευθερώνεται (ή προστίθεται) από τη μονάδα οριζόντιας επιφάνειας A , εξαιτίας μοναδιαίας πτώσης (ή αύξησης) του φορτίου Δh .

Ο συντελεστής αποθηκευτικότητας είναι καθαρός αριθμός και στους ελεύθερους υδροφορείς παίρνει τιμές που κυμαίνονται από 1%-30%, ενώ στους υπό πίεση από 0,0001%-0,5%. Η διαφορά αυτή οφείλεται στον διαφορετικό μηχανισμό απελευθέρωσης νερού από τα ανωτέρω είδη υδροφορέων. Στους υπό πίεση υδροφορείς η αφαίρεση ή η προσθήκη νερού οφείλεται σε διόγκωση του νερού και συμπίεση του υδροφορέα και συνεπώς η αποθηκευτικότητα είναι συνάρτηση της ελαστικότητας του υδροφορέα και της συμπιεστότητας του, περιεχόμενου σ' αυτόν, υπόγειου νερού. Επομένως, για να ληφθούν αξιόλογες ποσότητες από τα υπό πίεση υδροφόρα στρώματα απαιτούνται μεγάλες πτώσεις της πιεζομετρικής στάθμης και σε μεγάλη έκταση υδροφορέα. Ο συντελεστής αποθηκευτικότητας S στους ελεύθερους υδροφορείς συμπίπτει με το ενεργό πορώδες, ενώ στους υπό πίεση υδροφορείς ισχύει:

$$S = \gamma D(a + bS_y)$$

όπου

γ , το ειδικό βάρος του νερού,

D , το πάχος του υδροφορέα,

S_y , το ενεργό πορώδες,

a , ο συντελεστής συμπιεστότητας του υδροφορέα και

b , ο συντελεστής συμπιεστότητας του νερού (Βουδούρης, 2006).

2.5 Μηχανισμοί μεταφοράς μάζας

Η διαδικασία της μεταφοράς των διαλυμένων ουσιών στα υπόγεια νερά είναι γνωστή ως μεταφορά μάζας. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν αυτή τη μεταφορά βασίζονται σε μερικές διαφορικές εξισώσεις. Αυτές οι εξισώσεις είναι παρόμοιες με τις μερικές διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή του νερού και τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πάρα πολύ εξαιτίας του μεγάλου ενδιαφέροντος που παρουσιάζουν τα προβλήματα μεταφοράς συγκέντρωσης ρύπων στα υπόγεια ύδατα.

2.5.1 Μεταφορά λόγω διαφοράς συγκέντρωσης – Διάχυση (Diffusion)

Η διαδικασία κατά την οποία μια διαλυμένη ουσία στο νερό κινείται από μία περιοχή υψηλής συγκέντρωσης σε μία περιοχή μικρότερης συγκέντρωσης είναι γνωστή ως μοριακή διάχυση ή διάχυση. Διάχυση μπορεί να συμβεί ακόμα και αν δεν υπάρχει κίνηση του ρευστού αλλά μόνο διαφορά στη συγκέντρωση του ρύπου. Η μάζα του υγρού που διαχέεται είναι ανάλογη με τη διαφορά συγκέντρωσης και μπορεί να εκφραστεί μέσω του πρώτου νόμου του Fick, ο οποίος για μονοδιάστατη ροή είναι:

$$F = -D_d \left(\frac{dC}{dx} \right)$$

όπου,

F , η ροή μάζας της διαλυμένης ουσίας ανά μονάδα επιφάνειας ανά μονάδα χρόνου

D_d , ο συντελεστής διάχυσης (L^2/T)

C , η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας (M/L^3)

dC/dx , κλίσης της συγκέντρωσης ($M/L^3/L$)

Το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει την κίνηση του νερού από την περιοχή υψηλής συγκέντρωσης προς την περιοχή χαμηλότερης συγκέντρωσης.

Σε πορώδη μέσα, η διάχυση δεν συμβαίνει τόσο γρήγορα όσο στο νερό, εξαιτίας του γεγονότος ότι τα ιόντα της διαλυμένης ουσίας πρέπει να διανύσουν

μεγαλύτερα μονοπάτια διαμέσου των κόκκων του εδάφους. Για να συνυπολογιστεί και αυτό, ορίζεται ο αποτελεσματικός συντελεστής διάχυσης D^* , ως:

$$D^* = \omega D_d$$

Όπου, ω είναι μία σταθερά που σχετίζεται με την στροφική ή ελικοειδή κίνηση (στρεβλότητα). Η στρεβλότητα (tortuosity), T , είναι ένας παράγοντας εξαρτώμενος από το σχήμα της γραμμής ροής που ακολουθούν τα μόρια του νερού στα πορώδη υλικά.

Για συστήματα στα οποία η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας αλλάζει σε σχέση με τον χρόνο, εφαρμόζεται ο δεύτερος νόμος του Fick:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_d \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

όπου, $\frac{\partial C}{\partial t}$ η αλλαγή της συγκέντρωσης με το χρόνο ($M/L^3/T$).

Η λύση αυτής της εξίσωσης για κατάλληλες οριακές και αρχικές συνθήκες είναι:

$$C_i(x, t) = C_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2(D^* t)^{0.5}}$$

Όπου,

C_i , η συγκέντρωση της ουσίας σε απόσταση x από την πηγή και σε χρόνο t από την αρχή της διάχυσης,

C_0 , η αρχική συγκέντρωση

erfc , η συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος (Fetter, 1992).

2.5.2 Μεταφορά λόγω συμμεταφοράς (Advection)

Η διαδικασία κατά την οποία οι διαλυμένες ουσίες μεταφέρονται με τη ροή των υπογείων υδάτων ονομάζεται συμμεταφορά. Η ποσότητα της ουσίας που μεταφέρεται είναι συνάρτηση της συγκέντρωσής της στα υπόγεια νερά και της ποσότητας του νερού που υπάρχει κατά την ροή. Η μονοδιάστατη ροή μάζας, F_x ,

λόγω οριζόντιας μεταφοράς είναι ίση με την ποσότητα του ύδατος που ρέει πολλαπλασιασμένη με τη συγκέντρωση των διαλυμένων στερεών:

$$F_x = v_x n_e C$$

όπου,

v_x , η μέση γραμμική ταχύτητα (L/T), που δίνεται από το τύπο $v_x = \frac{K}{n_e} \frac{dh}{dL}$ με K την υδραυλική αγωγιμότητα (L/T), n_e το ενεργό πορώδες και $\frac{dh}{dL}$ η υδραυλική κλίση (Καρατζάς, 2003).

2.2.3 Διασπορά (Dispersion)

Τα υπόγεια ύδατα κινούνται με ταχύτητες που μπορεί να είναι είτε μικρότερες είτε μεγαλύτερες από τη μέση γραμμική ταχύτητα. Σε μακροσκοπική κλίμακα αυτό το φαινόμενο οφείλεται στις εξής βασικές αιτίες:

- Η ταχύτητα του υγρού, καθώς κινείται διαμέσου των πόρων, είναι μεγαλύτερη στο μέσο των πόρων απ' ό τι κατά μήκος των πλευρών
- Μερικά από τα μόρια του υγρού κινούνται κατά μήκος μεγαλύτερων διαδρομών από ότι άλλα μόρια που διανύουν την ίδια απόσταση
- Μερικοί πόροι είναι μεγαλύτεροι από άλλους, επιτρέποντας στο υγρό να κινείται πιο γρήγορα.

Εξαιτίας των ουσιών που εισέρχονται μεταξύ των πόρων του εδάφους και αναμιγνύονται με το νερό στα μονοπάτια της ροής, το νερό δεν ταξιδεύει με την ίδια. Αυτή η ανάμιξη ονομάζεται μηχανική διασπορά και έχει ως αποτέλεσμα την διάλυση των ουσιών στη ροή. Η ανάμιξη που συμβαίνει κατά μήκος των διαδρομών της ροής ονομάζεται διαμήκης διασπορά και αυτή που συμβαίνει κάθετα στις διευθύνσεις της ροής ονομάζεται εγκάρσια διασπορά (Καρατζάς, 2003).

Η υδροδυναμική διασπορά, που αποτελεί τον δεύτερο τύπο διασποράς πέρα από την μηχανική, υφίσταται λόγω ταυτόχρονης διάχυσης και μηχανικής διασποράς του ρύπου. Η διαλυμένη ουσία που εμφανίζεται στον υδροφορέα, μεταφέρεται διαμέσου των πόρων του εδάφους, με τη βοήθεια της ροής και έτσι μειώνεται η συγκέντρωσή του.

Κεφάλαιο 3ο

Χρώμιο

3.1 Ιστορική αναδρομή

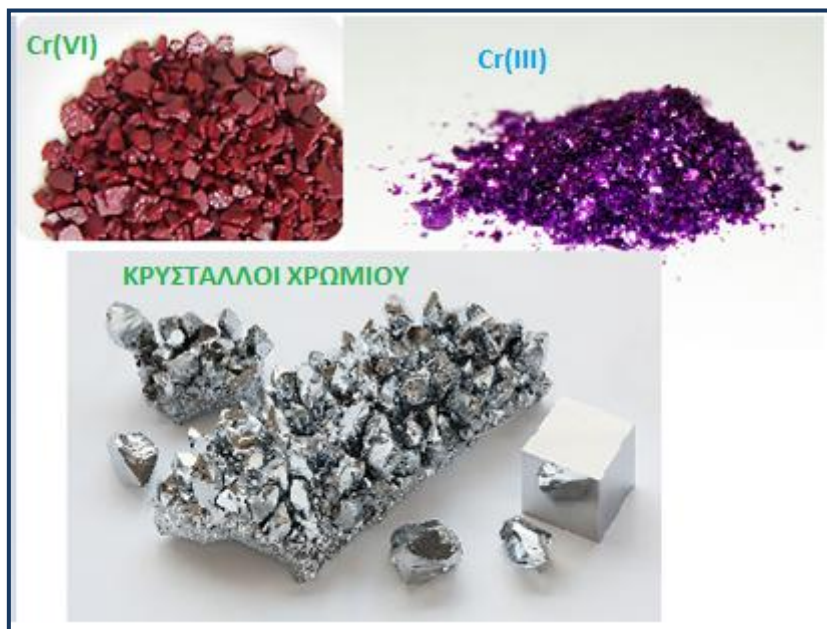
Το χρώμιο (Cr) είναι ένα από τα πιο σημαντικά και κρίσιμα υλικά που υπάρχουν στον κόσμο, έχοντας μεγάλο εύρος χρήσης σε μεταλλεία και βιομηχανίες χημικών. Η ιστορία του Cr ξεκινάει πάνω από 200 χρόνια πριν, το 1761, όταν ο Johann Gottlob Lehmann, ενώ επισκεπτόταν τα ορυχεία του Beresof που βρίσκονταν στις ανατολικότερες πλαγιές των ορέων Ural, παρατήρησε δείγματα από ένα πορτοκαλοκόκκινο μέταλλο. Το 1767, ο Louis-Nicolas Vauquelin κατάφερε να απομονώσει το στοιχείο του Cr από αυτό του οξειδίου του και εξαιτίας των πολλών χρωμάτων που είχαν τα συστατικά του, προτάθηκε το όνομα χρώμιο.

Το χρώμιο είναι ένα μέταλλο λαμπερό που όταν γυαλιστεί παίρνει ασημί χρώμα και είναι σκληρό. Έχει υψηλό σημείο τήξης στους 1857°C και σημείο βρασμού στους 2672°C , ενώ έχει αριθμούς οξειδωσης από το -2 έως το +6, με την πιο σταθερή του μορφή να την εμφανίζει στο +3.

Το χρώμιο δεν απαντάται ελεύθερο στη φύση αλλά ενωμένο με άλλα στοιχεία όπως είναι, κυρίως, το οξυγόνο. Αποτελεί περίπου το 0,02% του στερεού φλοιού της γης και είναι το 17^ο κατά σειρά αφθονίας στοιχείο. Ο χρωμίτης, FeCr_2O_4 , είναι το κύριο μέταλλευμα του χρωμίου και είναι ελαφρώς μαγνητικό. Έχει πυριγενή προέλευση και μορφοποιείται σε περιδοτίτη από πλουτώνια πετρώματα. Συναντάται αποκλειστικά στα υπερβασικά πετρώματα σαν κρύσταλλος που συσσωρεύεται στα πρώτα στάδια της μαγματικής κρυστάλλωσης και στον σερπετινίτη, που αναπτύσσεται από την υδροθερμική αλλοίωση του περιδοτίτη (Jacobs and Testa, 2005).

3.2 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του χρωμίου

Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του χρωμίου παρέμεναν μεγάλη πρόκληση για την εργαστηριακή έρευνα. Μικρές ποσότητες χρησιμοποιούνταν για να σκληραίνουν κράματα χάλυβα και οι ενώσεις του χρησιμοποιούνταν σε πολλές βιομηχανίες. Η ραγδαία αύξηση της χρήσης του χρωμίου συνέβη μεταξύ του 1915 και του 1930, όταν το χρώμιο έγινε κύριο μέταλλο για τις βιομηχανίες, μαζί με το σίδηρο (Fe), το χαλκό (Cu), το αλουμίνιο (Al), τον κασσίτερο (Sn), το μόλυβδο (Pb) και το νικέλιο (Ni) (Jacobs and Testa, 2005). Στην Εικόνα 3.1 φαίνονται οι τρεις πιο συνηθισμένες μορφές του χρωμίου και πως συναντώνται στη φύση:



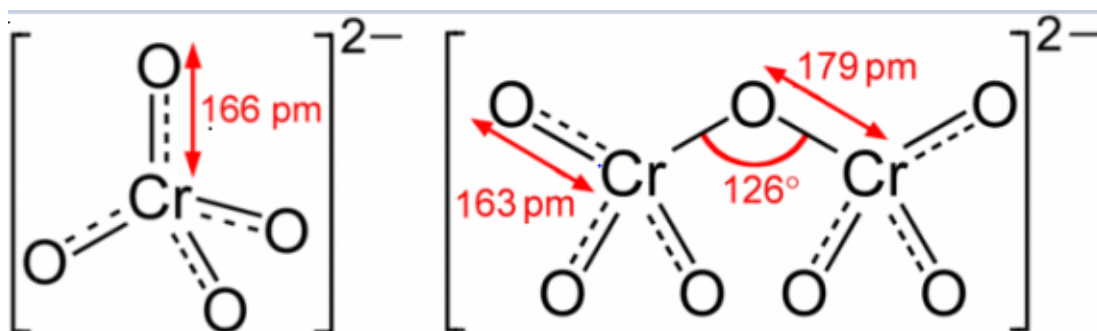
Εικόνα 3.1 Οι τρεις μορφές του χρωμίου (alevelchem.com)

Από φυσικής απόψεως, το χρώμιο είναι ένα μεταλλικό χημικό στοιχείο με σύμβολο Cr και ατομικό αριθμό 24. Οφείλει την ονομασία του στους ποικίλους χρωματισμούς που παρουσιάζουν οι ενώσεις του, όπως το σμαράγδι και το ρουμπίνι που οφείλουν το χρώμα τους στην παρουσία μικρής ποσότητας χρωμίου σε αυτά. Πρόκειται για ένα μέταλλο αργυρόλευκο, με ελαφρά κυανίζουσα απόχρωση, σκληρό αλλά εύθραυστο και εξαιρετικά ανθεκτικό στην οξειδωτική ή διαβρωτική δράση. Το φυσικό χρώμιο αποτελείται από ένα μίγμα των τεσσάρων σταθερών ισοτόπων του στοιχείου και συγκεκριμένα των Cr-50 (4,31%), Cr-52 (83,76%), Cr-53 (9,55%) και Cr-54 (2,38%). Οι κυριότερες φυσικές ιδιότητες του χρωμίου παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.1):

Πίνακας 3.1 Φυσικές ιδιότητες χρωμίου (Πολίτη, 2011)

ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΧΡΩΜΙΟΥ	
Σύμβολο	Cr
Ατομικός αριθμός	24
Ατομικό βάρος	51.996
Μοριακό βάρος (cm ³)	7.23
Σημείο τήξης (° C)	1857
Σημείο βρασμού (° C)	2672
Θερμική αγωγιμότητα (W/m/K)	94
Ηλεκτρική ειδική αντίσταση	12.7
Ειδικό βάρος (28° C)	7.2
Πυκνότητα στερεού (kg/m ³)	7140
Κύρια σθένη	+2 (δισθενές), +3 (τρισθενές), +6 (εξασθενές)

Από χημικής πλευράς, το χρώμιο διαλυτοποιείται εύκολα στα μη οξειδωτικά ανόργανα οξέα, όπως είναι το υδροχλωρικό οξύ και το αραιό θειικό οξύ. Στις συνηθισμένες θερμοκρασίες, το χρώμιο δεν οξειδώνεται από το νιτρικό οξύ και το νερό και δεν διαβρώνεται από το θαλασσινό νερό ή από τον ξηρό και τον υγρό αέρα. Σε υψηλές θερμοκρασίες, ενώνεται με τα αλογόνα, το θείο, το άζωτο, τον άνθρακα όπως επίσης και το οξυγόνο (Πολίτη, 2011). Παρακάτω φαίνεται η στερεοχημική διάταξη του μορίου του εξασθενούς χρωμίου ([Εικόνα 3.2](#)):



Εικόνα 3.2 Στερεοχημική δομή εξασθενούς χρωμίου (Θωμαΐδης κ.α., 2007)

3.3 Τρόποι εισαγωγής χρωμίου στο νερό

Το τρισθενές χρώμιο (Cr(III)) είναι η πλέον σταθερή μορφή του χρωμίου, συναντάται στη φύση ως ορυκτό και είναι ένα απαραίτητο ιχνοστοιχείο στη δίαιτα του ανθρώπου για την ενεργοποίηση της ινσουλίνης. Το εξασθενές χρώμιο (Cr(VI)) είναι η δεύτερη πιο σταθερή μορφή του χρωμίου, συναντάται σπάνια στη φύση στο ορυκτό κροκοίτη και είναι κυρίως αποτέλεσμα ανθρωπογενούς δραστηριότητας. Σε αντίθεση με τις ενώσεις του τρισθενούς χρωμίου, οι ενώσεις του εξασθενούς είναι πολύ πιο διαλυτές στο νερό.

Το χρώμιο και οι ενώσεις του βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στη μεταλλουργία, όπως στην παρασκευή ανοξείδωτου χάλυβα, στην παραγωγή πυρίμαχων υλικών και στη χημική βιομηχανία, όπως σε βιομηχανίες χρωμάτων και χρωστικών, σε βιομηχανίες επιμεταλλώσεων, σε βυρσοδεψία, στην παρασκευή βερνικιών για συντήρηση του ξύλου και σε κλωστοϋφαντουργία (Ένωση Ελλήνων Χημικών, 2007).

Το χρώμιο είναι ευρέως διαδεδομένο στη φύση με φυσική αφθονία στο φλοιό της Γης που φτάνει τα 100 ppm. Τα κανονικά επίπεδα του χρωμίου σε μη ρυπασμένα επιφανειακά νερά κυμαίνονται μεταξύ 1-10 $\mu\text{g/L}$, στο πόσιμο νερό μεταξύ 0,4-8 $\mu\text{g/L}$ και στα περισσότερα πετρώματα από 5 έως 1800 mg/kg . Παρουσία χρωμίου σε πόσιμο νερό άνω των 10 $\mu\text{g/L}$, εκτός από τις ανθρώπινες δραστηριότητες (βιομηχανίες), οφείλεται και σε φυσική ρύπανση από την παρουσία πετρωμάτων που περιέχουν χρώμιο. Στις περιπτώσεις ανθρωπογενούς ρύπανσης, το εξασθενές χρώμιο συνήθως βρίσκεται σε ποσοστό 85-90% του συνολικού.

3.4 Τοξικότητα

Η επίδραση που μπορεί να έχουν τα είδη του χρωμίου που εμφανίζονται στο περιβάλλον, όπως το τρισθενές και το εξασθενές, πάνω στον οργανισμό είναι διαφορετική και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Τέτοιοι παράγοντες είναι η συγκέντρωση των ενώσεών του, η διάρκεια της έκθεσης του οργανισμού σε αυτές και το κατά πόσο γρήγορα μεταβολίζονται ή εκκρίνονται από το σώμα (Μπέλλου, 2010). Όταν αναφερόμαστε στον άνθρωπο ή τα ζώα γίνεται διάκριση της τοξικότητας σε:

- **Οξεία τοξικότητα**, δηλαδή στη δυνατότητα μιας ουσίας να προκαλέσει βλάβη μετά από βραχυχρόνια έκθεση
- **Χρόνια τοξικότητα**, δηλαδή στη μακροχρόνια έκθεση κατά την οποία η τοξική ουσία συσσωρεύεται στο σώμα (Γιδαράκος, 2006).

Οι επιπτώσεις στην υγεία ως αποτέλεσμα της έκθεσης σε τρισθενές και εξασθενές χρώμιο είναι αρκετές. Το τρισθενές χρώμιο, από τη μία, είναι σταθερό από χημικής άποψης και σχετικά μη τοξικό, ενώ οι υδατοδιαλυτές ενώσεις του εξασθενούς χρωμίου είναι ιδιαίτερα ερεθιστικές, διαβρωτικές και τοξικές για τους ιστούς του ανθρώπινου σώματος. Οι αδιάλυτες ενώσεις του χρωμίου συγκρατούνται στους πνεύμονες για μεγάλο χρονικό διάστημα και παίζουν σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη καρκίνου των πνευμόνων.

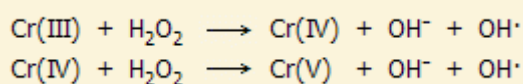
- ✓ Το τρισθενές χρώμιο είναι βασικό ιχνοστοιχείο για το μεταβολισμό των λιπών και των υδατανθράκων στα θηλαστικά, καθώς επίσης και για τη διατήρηση της δομής των νουκλεϊνικών οξέων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το τρισθενές χρώμιο θεωρείται ενεργό συστατικό που βελτιώνει τη δυναμικότητα της ινσουλίνης. Διατροφικά, είναι απαραίτητο συστατικό μιας ισορροπημένης διαίτας γιατί αποτρέπει δυσάρεστες επιπτώσεις από το μεταβολισμό των λιπιδίων και της γλυκόζης. Παρόλο που υπάρχει σε πολύ μικρές ποσότητες στο σώμα, είναι απαραίτητο για τον έλεγχο του επιπέδου του σακχάρου του αίματος.
- ✓ Το εξασθενές χρώμιο, από την άλλη, θεωρείται πολύ τοξικό, ερεθιστικό, καρκινογόνο και μεταλλαξιγόνο. Σε εισπνεύσιμο αέρα που περιείχε χρώμιο σε διάφορες συγκεντρώσεις, προκλήθηκαν αγγειογενή σοκ, ερεθισμοί της ανώτερης αναπνευστικής οδού και διατρήσεις του ρινικού διαφράγματος που συνιστούν πρόδρομο καρκίνου της αναπνευστικής οδού. Μία άλλη σημαντική επίδραση του χρωμίου είναι η δερματίτιδα εξ επαφής, η οποία εκδηλώνεται με εκζεματοειδείς αλλοιώσεις του δέρματος. (Θωμάϊδης κ.α., 2007)

3.4.1 Χρώμιο και μηχανισμοί καρκινογένεσης

Το Cr(VI), λόγω δομικής ομοιότητας με τα θειικά και τα φωσφορικά ιόντα, εισέρχεται στα κύτταρα μέσω της κυτταρικής μεμβράνης χρησιμοποιώντας το φυσιολογικό σύστημα διακίνησης αυτών των ιόντων. Στο εσωτερικό των κυττάρων αντιδρά με τις αναγωγικές ουσίες που θα βρει εκεί και ανάγεται σε Cr(III). Οι οκταεδρικής σύνταξης ενώσεις του Cr(III), λόγω του όγκου και της δυσδιαλυτότητας πολλών από αυτές, διαπερνούν την κυτταρική μεμβράνη αργά ή και καθόλου. Γι' αυτό το λόγο το Cr(VI) είναι η επικίνδυνη μορφή του χρωμίου και όχι το Cr(III).

Η πορεία αναγωγής Cr(VI) σε Cr(III) εντός του κυττάρου μπορεί να προκαλέσει καταστροφή του DNA, όπως οξειδωτικές βλάβες, θραύση των κλώνων του, σχηματισμό ενώσεων προσθήκης Cr(III)-DNA, διακλωνικές συνδέσεις και συνδέσεις πρωτεϊνών-DNA.

Έρευνες έδειξαν ότι με την είσοδο του Cr(VI) στο κύτταρο, αυτό ανάγεται από το πλήθος των αναγωγικών ουσιών και ενζύμων (όπως η γλουταθειόνη) κατά στάδια σε χαμηλότερο επίπεδο σθένους. Τα ενδιάμεσα προϊόντα αναγωγής του χρωμίου με το υπεροξειδίου του υδρογόνου (H_2O_2), ενός φυσικού συστατικού του κυτταροπλάσματος (σε πολύ μικρές βέβαια συγκεντρώσεις), παράγουν δραστικές οξυγονούχες ρίζες (ιδιαίτερα τη ρίζα υδροξυλίου, $OH\cdot$). Οι έρευνες έδειξαν ότι το Cr(V), Cr(IV) και Cr(III) με το H_2O_2 μπορούν να δημιουργήσουν τις ρίζες $OH\cdot$ με αντιδράσεις όπως:



Οι ρίζες $OH\cdot$ προκαλούν οξειδωτικές βλάβες στο DNA (Θωμαΐδης κ.α., 2007).

Το πεντασθενές χρώμιο είναι ασταθής μορφή του χρωμίου και το συναντάμε στις μεσολαβητικές αντιδράσεις και στις καταστάσεις οξείδωσης του τρισθενούς χρωμίου. (Μπερτόλη, 2013).

3.5 Τεχνολογίες απορρύπανσης

Η αποκατάσταση της ρύπανσης των υπογείων υδάτων σε αποδεκτά πρότυπα ποιότητας είναι μία διαδικασία που περιλαμβάνει την εφαρμογή διαφόρων μεθόδων σε συνδυασμό για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης της συνολικής διαδικασίας επεξεργασίας. Τα μέτρα περιορισμού και αποκατάστασης των υπογείων υδάτων που ενδέχεται να έχουν ρυπανθεί με χρώμιο περιλαμβάνουν:

- ✓ Μέθοδος άντλησης και επεξεργασίας (Pump and Treat)

Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται η άντληση, μέσω γεωτρήσεων, του υπόγειου νερού που έχει αναμιχθεί με τους ρύπους και αφού επεξεργαστεί σε κατάλληλη μονάδα, είτε θα εμπλουτίσει τον υδροφόρα, είτε θα διατεθεί στο έδαφος, ή θα εναποτεθεί σε γειτονικό υδροφόρο στρώμα. Στα μειονεκτήματα της μεθόδου

εντάσσονται, η γεωλογία του υδροφορέα και το είδος των ρυπαντών, που ενδέχεται να δυσκολεύουν την άντληση από τον υδροφορέα, το γεγονός ότι είναι αργή διότι αποτυγχάνει στο να απομακρυνθούν όλα τα ρυπασμένα ύδατα, ότι είναι πολύ δαπανηρή και ότι δεν λειτουργεί πάντα εξαιτίας του γεγονότος ότι κάποιοι ρυπαντές προσροφούνται πάνω στα πετρώματα και δεν είναι εύκολο να απομακρυνθούν (Καλλέργης, 2000)

✓ Διαπερατά αντιδρώντα φράγματα (Permeable Reactive Barriers)

Τα διαπερατά αντιδρώντα φράγματα είναι κάποια φράγματα που τοποθετούνται για μεγάλο χρονικό διάστημα, κάθετα στη ροή του υπόγειου ύδατος έτσι ώστε όλο το ρυπασμένο νερό να περνάει αυτά. Περιέχουν κάποια αντιδρώντα στερεά υλικά που αποικοδομούν ή ακινητοποιούν τους ρυπαντές. Αυτό το σύστημα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο σωστά εγκατεστημένο ώστε να αποτρέπει την περαιτέρω ρύπανση του υδροφορέα για μεγάλα χρονικά διαστήματα και το μέγεθός του να είναι όσο το δυνατόν πιο μικρό ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος (Γαρμπή κ.α., 2005)

✓ Βιολογική αποκατάσταση (bio-remediation)

Στηρίζεται στην αποδόμηση των οργανικών ουσιών με τη δράση μικροοργανισμών (βακτήρια, μύκητες). Βασικό κριτήριο για την εφαρμογή της μεθόδου αποτελεί η ικανότητα βιοδιάσπασης του ρυπαντή από τους μικροοργανισμούς που είτε ενδημούν είτε εισάγονται στη θέση της ρύπανσης. Οι μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν ως καταλύτες κατάλληλα ένζυμα που παράγουν οι ίδιοι και η δράση τους εξαρτάται από το είδος και την πυκνότητα της μικροβιακής κοινότητας, καθώς και από τις συνθήκες που ευνοούν ή αναστέλλουν την ανάπτυξή τους. Για να γίνει αερόβια αποσύνθεση, διαβιβάζεται αέρας μέσω βαθιών γεωτρήσεων. Η μέθοδος έχει μικρό κόστος και για να είναι αποτελεσματική χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους (Βουδούρης, 2006).

- ✓ Αφαίρεση χρωμίου με εφαρμογή ηλεκτρικού ρεύματος

Η μέθοδος χρησιμοποιείται γενικότερα για την απομάκρυνση βαρέων μετάλλων εφαρμόζοντας τάση μέσω ηλεκτροδίων. Η συλλογή των ιόντων πραγματοποιείται στην άνοδο (Βουδούρης, 2006).

- ✓ Χημική μείωση

Με αυτή τη μέθοδο το εξασθενές χρώμιο μετατρέπεται σε τρισθενές με τη χρήση άλατος, όπως ο δισθενής σίδηρος (Fe(II)). Αρχικά, το εξασθενές χρώμιο ανάγεται σε τρισθενές και στη συνέχεια σε όξινες και αλκαλικές συνθήκες κατακρημνίζεται. Στην περιοχή του Ασωπού ποταμού, έχει εφαρμοστεί η συγκεκριμένη μέθοδος με τη χρήση ρινισμάτων σιδήρου (Δημήτρουλα, 2009).

- ✓ Φυτοεξυγίανση

Ο όρος φυτοεξυγίανση, αναφέρεται σε κάθε σύστημα ή διαδικασία στην οποία χρησιμοποιούνται φυτά, για την *in situ* ή *ex situ* εξυγίανση ρυπασμένων υδάτων (επιφανειακών ή υπόγειων), μέσω της απομάκρυνσης, διάσπασης και σταθεροποίησης των ρυπαντών. Η τεχνική αυτή βασίζεται στη διαπίστωση ότι τα φυτά έχουν τη δυνατότητα να προσλαμβάνουν και να συσσωρεύουν ή να διασπούν τοξικές οργανικές ουσίες, τόσο από το έδαφος όσο και από την ατμόσφαιρα (Παναγοπούλου, 2011).

- ✓ Φυσική εξασθένηση της ρύπανσης

Φυσικές διεργασίες, όπως η αραίωση, η ραδιενεργός διάσπαση, η ρόφηση, η πτητικοποίηση, μπορούν να σταθεροποιήσουν, καταστρέψουν ή μετατρέψουν τους ρυπαντές (Αινατζή και Πατεράκη, 2010).

3.6 Νομοθεσία

Σύμφωνα με την Ελληνική νομοθεσία (ΚΥΑ Υ2/2600/2001-ΦΕΚ-892 Β'/11-7-2001 σε συμμόρφωση προς την οδηγία 98/83/ΕΚ) τα ανώτατα επιτρεπτά όρια συγκέντρωσης ολικού χρωμίου στο πόσιμο νερό είναι τα 50 µg/L (ppb). Για τον ελληνικό χώρο, η ΚΥΑ 4859/726 ρυθμίζει τις εκπομπές ολικού χρωμίου βιομηχανικών

αποβλήτων για υδάτινους αποδέκτες σε συγκεντρώσεις από 0,6-3 µg/L ανάλογα με τη φύση του αποδέκτη.

Στο ευρύτερο πλαίσιο υλοποίησης του Ολοκληρωμένου Προγράμματος Περιβαλλοντικής Προστασίας της περιοχής του Ασωπού, το Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, εξέτασε όλες τις πτυχές που σχετίζονται με την παρουσία του εξασθενούς χρωμίου στο πόσιμο νερό. Η παρουσία τόσο του εξασθενούς όσο και του τρισθενούς χρωμίου στο υδάτινο περιβάλλον μπορεί να οφείλεται και σε γεωλογικούς σχηματισμούς (π.χ. οφιολιθικά πετρώματα). Στη Ευρώπη εκτεταμένη παρουσία τέτοιων σχηματισμών παρατηρείται μεταξύ άλλων στην Ελλάδα, στην Αλβανία και στην Ιταλία. Η παρουσία εξασθενούς χρωμίου σε αξιόλογες συγκεντρώσεις μπορεί να συνδέεται με την απόρριψη βιομηχανικών αποβλήτων, αλλά αυτό δεν είναι απαραίτητο. Τα υπάρχοντα διεθνή όρια για το ολικό χρώμιο είναι 100 µg/l στις ΗΠΑ (EPA), 50 µg/l στην ΕΕ (Οδηγία για το Πόσιμο Νερό), και 50 µg/l από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO). Μέχρι πριν λίγα χρόνια δεν είχε θεσμοθετηθεί κάποιο συγκεκριμένο όριο για την επιτρεπτή συγκέντρωση του εξασθενούς χρωμίου στα υπόγεια ύδατα και χρησιμοποιούνταν τα ανώτερα όρια του ολικού χρωμίου. Το 2010, σύμφωνα με την ΚΥΑ 20488/10 (ΦΕΚ 749B) περί «Καθορισμού ποιοτικών περιβαλλοντικών προτύπων στον ποταμό Ασωπό και οριακών τιμών εκπομπών υγρών βιομηχανικών αποβλήτων στη λεκάνη απορροής του Ασωπού», ορίστηκε ως μέγιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση εκπομπής εξασθενούς χρωμίου τα 30 µg/L και, σύμφωνα με τα Ποιοτικά Περιβαλλοντικά Πρότυπα (ΠΠΠ), για τον ποταμό Ασωπό, τους παραποτάμους του και τα ρέματα που βρίσκονται στην υδρογεωλογική λεκάνη, τα 11 µg/L.

Μοντελοποίηση υπόγειας ροής και μεταφοράς ρύπων

4.1 Ορισμός και σκοπός μοντελοποίησης

Μοντέλο αποτελεί οποιαδήποτε συσκευή η οποία αντιπροσωπεύει μια προσεγγιστική κατάσταση του πεδίου. Τα μοντέλα υπογείων υδάτων μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, τα:

- Φυσικά, όπως τα εργαστηριακά δοχεία αποθήκευσης άμμου που προσομοιάζουν άμεσα την υπόγεια ροή του νερού
- Μαθηματικά, τα οποία προσομοιώνουν τη ροή των υπογείων υδάτων εμμέσως, μέσω μιας εξίσωσης που θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει τις φυσικές διαδικασίες που συμβαίνουν στο εξεταζόμενο σύστημα, σε συνδυασμό με τις εξισώσεις που περιγράφουν τα υδραυλικά ύψη και της ροής κατά μήκος των ορίων το μοντέλου.

Το σύνολο των εντολών που χρησιμοποιούνται για την επίλυση ενός μαθηματικού μοντέλου σε έναν υπολογιστή σχηματίζει τον λεγόμενο κώδικα, ο οποίος γράφεται μία φορά αλλά κάθε καινούριο μοντέλο σχηματίζεται και κατασκευάζεται για κάθε διεργασία μοντελοποίησης ξεχωριστά.

Στα πλεονεκτήματα των μοντέλων εντάσσεται η δυνατότητα δημιουργίας ενός πλαισίου για τη σύνθεση των πληροφοριών του πεδίου μελέτης και τον έλεγχο των ιδεών σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος. Επίσης, μπορούν να ειδοποιούν τον δημιουργό του μοντέλου για την ύπαρξη φαινομένων που δεν είχαν εξεταστεί προηγουμένως, καθώς και να αναγνωρίζουν περιοχές που απαιτούνται περαιτέρω πληροφορίες. Όσον αφορά τα μοντέλα υπόγειας ροής, αποτελούν τον καλύτερο τρόπο για λεπτομερή ανάλυση και πρόβλεψη για τις συνέπειες μια προτεινόμενης πράξης, δηλαδή χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τις τοποθεσίες και τα χαρακτηριστικά των ορίων του υδροφορέα, καθώς και για την ποσότητα του νερού μέσα στο σύστημα και την επαναφόρτιση του υδροφορέα. Τέλος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη γενικών υδρολογικών σχέσεων, όπως την αλληλεπίδραση των υπογείων υδάτων και των λιμνών.

Επομένως, για να μπορέσει να καθοριστεί ο τύπος του μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί και το επίπεδο των επιθυμητών αποτελεσμάτων, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός του σκοπού τον οποίο πρέπει να ικανοποιεί το μοντέλο, δηλαδή αν θα χρησιμοποιηθεί για πρόβλεψη, για την ερμηνεία του συστήματος ή για την γενική εξέταση του προβλήματος μέσα από το μοντέλο. Επίσης, τα επόμενα ερωτήματα τα οποία πρέπει να ικανοποιεί το μοντέλο είναι σχετικά με τις απαντήσεις και τα συμπεράσματα που θέλουν να εξαχθούν από αυτό, καθώς και αν αποτελεί το μοντέλο τον καλύτερο τρόπο για να απαντηθούν αυτά τα ερωτήματα. Τέλος, με τη βοήθεια αυτών των ερωτημάτων θα είναι εύκολος ο προσδιορισμός της χρήσης αναλυτικού ή αριθμητικού μοντέλου, όσον αφορά τα μαθηματικά μοντέλα (Anderson and Woessner, 1992).

4.2 Βήματα σχεδιασμού ενός μοντέλου

Παρά το γεγονός ότι η εφαρμογή ενός αναλυτικού μοντέλου είναι απλούστερη και πιο άμεση από την εφαρμογή ενός αριθμητικού μοντέλου, συνήθως επιλέγεται η χρήση αριθμητικού μοντέλου στα πεδία με υδρογεωλογικά και υδρογεωχημικά χαρακτηριστικά. Είναι προφανές ότι η εφαρμογή ενός μοντέλου υπόγειας ροής στο πεδίο έγκειται πολλές αβεβαιότητες, που μπορεί να οδηγήσουν σε λάθη. Για το λόγο αυτό, έχουν προταθεί πολλοί τρόποι σχεδιασμού τέτοιων μοντέλων με σκοπό την παραγωγή αποτελεσμάτων με τη μεγαλύτερη χρησιμότητα. Τα παρακάτω βήματα αντιπροσωπεύουν τις σημαντικές βαθμίδες στο σχεδιασμό ενός μοντέλου υπόγειας ροής ή/και μεταφοράς ρύπου:

1. **Προσδιορισμός στόχων.** Οι στόχοι που πρέπει να επιτευχθούν με τη χρήση ενός μοντέλου μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες. Ως πρώτος στόχος ορίζεται η πλήρης κατανόηση της ροής του νερού και της μεταφοράς του ρύπου, ώστε να πιστοποιηθούν οι υποθέσεις που έχουν γίνει και να επιβεβαιωθούν οι παρατηρήσεις. Στη συνέχεια, να οριοθετηθεί η ιστορική διαδρομή της μεταφοράς του ρύπου, ορίζοντας τα χρονικά όρια στα οποία έχει ξεκινήσει ένα γεγονός ή μέσα στο οποία οι συγκεντρώσεις έχουν φτάσει σε ένα προκαθορισμένο επίπεδο στην οριοθετημένη περιοχή. Τέλος, είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός των μελλοντικών μεταβολών στη συγκέντρωση του ρύπου, λαμβάνοντας υπ' όψιν είτε τις υπάρχουσες συνθήκες είτε τις μηχανικές

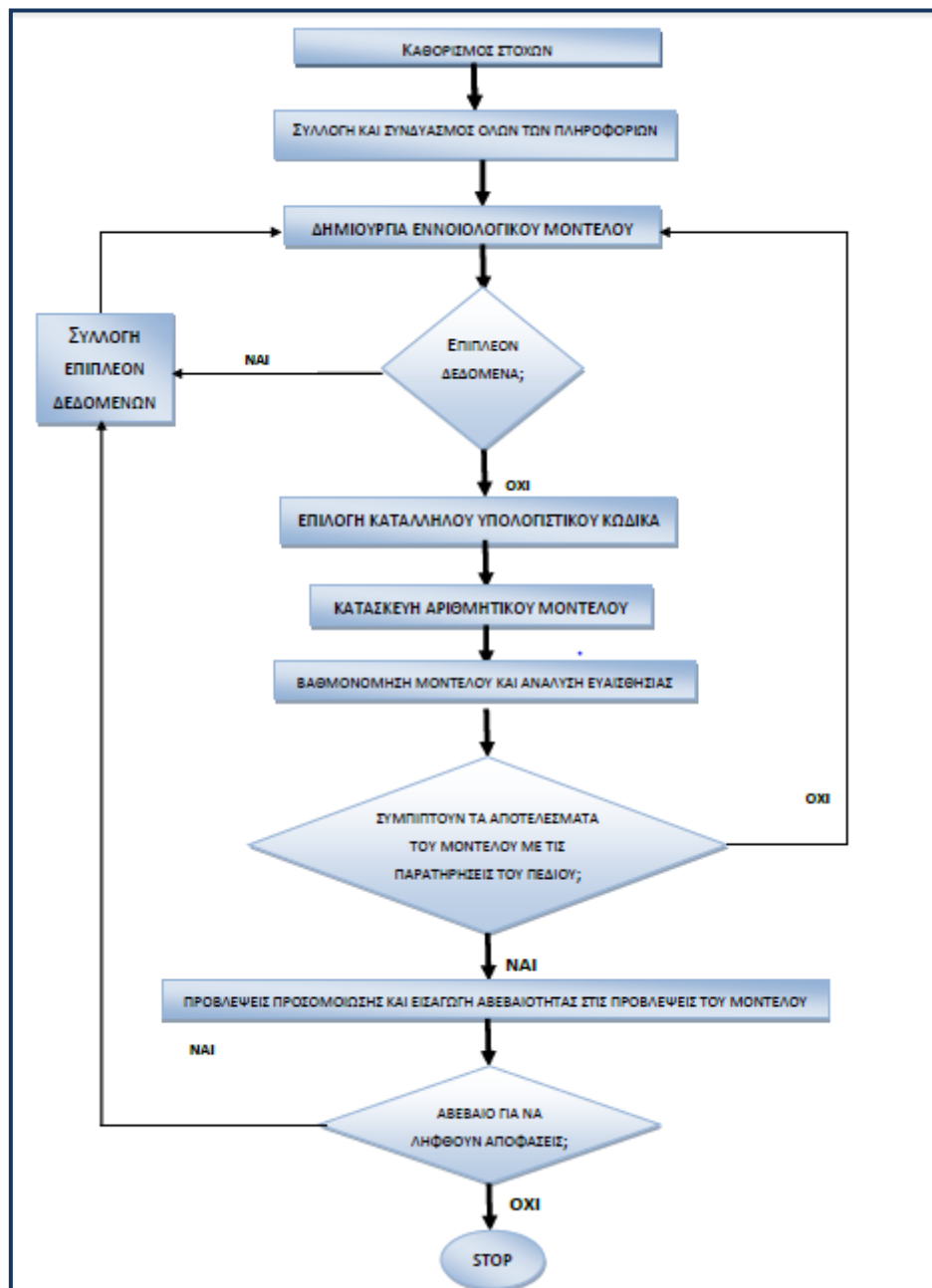
παρεμβάσεις με σκοπό τον έλεγχο της πηγής της ρύπανσης ή της μεταφοράς της μάζας.

2. **Συλλογή δεδομένων και ανάπτυξη εννοιολογικού μοντέλου.** Το πρώτο βήμα στην προσπάθεια δημιουργίας μοντέλων υπόγειας ροής και μεταφοράς ρύπων είναι η συλλογή και ο συνδυασμός όλων των σχετικών πληροφοριών σε τοπικό και εθνικό επίπεδο, είτε με τη βοήθεια δημοσιευμένων αναφορών είτε μέσω μη δημοσιευμένων δεδομένων, όπως γεωφυσικών στοιχείων και δεδομένων γεωτρήσεων. Αυτά τα στοιχεία οδηγούν στη δημιουργία του εννοιολογικού μοντέλου το οποίο χαρακτηρίζει την υπό μελέτη περιοχή. Ένα εννοιολογικό μοντέλο περιλαμβάνει πλήθος ποιοτικών και αντικειμενικών ερμηνειών και η καταλληλότητα του μπορεί να οριστεί συγκρίνοντας το εννοιολογικό μοντέλο με το αριθμητικό μοντέλο που έχει κατασκευαστεί από παρατηρήσεις του πεδίου. Το αριθμητικό μοντέλο μπορεί να παρέχει πληροφορίες και εργαλεία για την ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου, καθώς και οδηγίες για τη συλλογή μελλοντικών πληροφοριών, ειδικά στις περιπτώσεις που είναι απαραίτητα τα επιπλέον δεδομένα για την δημιουργία εννοιολογικού μοντέλου μέσω της παρατήρησης του πεδίου. Επομένως, τα αριθμητικά και τα εννοιολογικά μοντέλα πρέπει να εξετάζονται ως επαναλαμβανόμενα στοιχεία, συνδεδεμένα μεταξύ τους και τα αριθμητικά μοντέλα πρέπει να χρησιμοποιούνται για να οργανώνεται και να τοποθετείται με λογικό και συνεπή τρόπο ο μεγάλος όγκος των δεδομένων.
3. **Επιλογή του κώδικα.** Κατά την επιλογή του υπολογιστικού προγράμματος που είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του προβλήματος υπόγειας ροής και μεταφοράς ρύπου είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη πολλοί παράγοντες. Η επιλογή πρέπει να γίνει σύμφωνα με τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που ζητούνται να εξαχθούν, το αν είναι απαραίτητη η ανάλυση του πεδίου σε δύο ή τρεις διαστάσεις, αν ο ρύπος υφίσταται διασπορά ή χημική αντίδραση, καθώς και αναλογικά με τις λύσεις που είναι επιθυμητό να προταθούν. Επομένως, δεν είναι εφικτή η ύπαρξη κάποιας μεθόδου που να ικανοποιεί όλες τις συνθήκες του πεδίου.
4. **Δημιουργία μοντέλου μεταφοράς ρυπαντή.** Ως επακόλουθο του εννοιολογικού μοντέλου που έχει δημιουργηθεί, είναι ο σχηματισμός του αριθμητικού μοντέλου λαμβάνοντας υπ' όψιν τις κύριες εξισώσεις της ροής, τις

οριακές και τις αρχικές συνθήκες, τον καθορισμό των υδροφορέων, τις εξωτερικές επιρροές, όπως είναι οι πηγές και οι διαρροές, και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του πορώδους και του ρυπαντή. Αυτά τα στοιχεία θεωρούνται δεδομένα εισόδου στον κώδικα, τα οποία βοηθούν στους αριθμητικούς υπολογισμούς. Επομένως, ο υπολογιστικός κώδικας μαζί με τα δεδομένα εισόδου σε αυτόν αποτελούν το μοντέλο για το υπό μελέτη πεδίο.

5. **Βαθμονόμηση μοντέλου και ανάλυση ευαισθησίας.** Μετά την δημιουργία του αριθμητικού μοντέλου, χρησιμοποιώντας αρχικές εκτιμήσεις και παραμέτρους εισόδου, το μοντέλο βαθμονομείται με τη ρύθμιση αυτών των παραμέτρων μέχρι τα αποτελέσματα του μοντέλου να προσομοιάζουν τις παρατηρήσεις του πεδίου σε ικανοποιητικό επίπεδο. Η ανάλυση ευαισθησίας, αποτελεί τρόπο εξέτασης της γενικής ανταπόκρισης και ευαισθησίας του αριθμητικού μοντέλου στις καθορισμένες παραμέτρους και χρησιμοποιείται πριν και μετά την απαραίτητη και σημαντική βαθμονόμηση.
6. **Πρόβλεψη και αβεβαιότητα.** Έχοντας γίνει η βαθμονόμηση του μοντέλου σε ικανοποιητικό βαθμό, ακολουθεί η προσομοίωση της μελλοντικής μεταφοράς του ρύπου ή απομάκρυνσής του μέσω μεθόδων εξυγίανσης. Για ένα μοντέλο υπόγειας μεταφοράς ρύπου, η μελλοντική προσομοίωση απαιτεί τις μελλοντικές επιρροές που μπορεί να υφίσταται, όπως οι πηγές συγκεντρώσεων του ρύπου καθώς και οι τιμές της ροής του νερού, ώστε το μοντέλο να προβλέψει τα μελλοντικά δεδομένα (Zheng and Bennett, 1995).

Στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 4.1) αναπαριστώνται τα βήματα που θα πρέπει να ακολουθηθούν για να επιτευχθεί ο στόχος της σωστής δημιουργίας ενός μοντέλου υπόγειας ροής και μεταφοράς ρύπου:



Εικόνα 4.1 Βήματα σχεδιασμού μοντέλου

4.3 Μαθηματικό μοντέλο μεταφοράς διαλυμένης ουσίας

4.3.1 Κύριες εξισώσεις

Οι πολλαπλές εξισώσεις του μαθηματικού μοντέλου περιγράφουν τη μεταφορά και την αλλαγή της διαλυμένης ουσίας χωρικά και χρονικά. Υπάρχει ένας πεπερασμένος αριθμός από πιθανές λύσεις σε κάθε επιμέρους εξίσωση και για να χρησιμοποιηθούν οι αυτές οι εξισώσεις ώστε να λυθεί το πρόβλημα, χρειάζονται κάποιες επιπλέον πληροφορίες αρχικών συνθηκών, που καθορίζουν την αρχική κατάσταση της διαλυμένης ουσίας και πληροφορίες οριακών συνθηκών, που ελέγχουν την επικοινωνία της υπό μελέτη περιοχής με τις γύρω περιοχές. Οι κύριες εξισώσεις, μαζί με τις αρχικές και οριακές συνθήκες ορίζουν το μαθηματικό μοντέλο του συστήματος μεταφοράς του ρύπου.

Η μερική διαφορική εξίσωση που διέπει την τρισδιάστατη μεταφορά ενός μόνο χημικού συστατικού στα υπόγεια ύδατα, λαμβάνοντας υπ' όψιν την οριζόντια μεταφορά, τη διασπορά, τις υδατικές πηγές, την ισορροπημένη και ελεγχόμενη προσρόφηση καθώς και τις πρώτης τάξεως μη αναστρέψιμες αντιδράσεις, είναι:

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i C) + \frac{q_s}{\theta} C_s - \lambda \left(C + \frac{\rho_b}{\theta} \bar{C} \right),$$

όπου ο παράγοντας της επιβράδυνσης ορίζεται ως

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{C}}{\partial C}$$

και

C η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας (ML^{-3})

$\bar{C}$ η απορροφημένη συγκέντρωση (MM^{-1})

u_i η ταχύτητα διαρροής (LT^{-1})

D_{ij} ο τανυστικός συντελεστής διασποράς (L^2T^{-1})

q_s ο ρυθμός ροής μιας πηγής ρευστού ανά μονάδα όγκου υδροφορέα (T^{-1})

C_s η συγκέντρωση της πηγής του ρευστού ή της ροής (ML^{-3})

λ η σταθερά του ρυθμού της αντίδρασης (T^{-1})

θ το πορώδες

ρ_b η φαινόμενη πυκνότητα του πορώδους μέσου (ML^{-3})

Η κύρια εξίσωση μεταφοράς συνδέεται με την κύρια εξίσωση της ροής μέσω της σχέσης:

$$u_i = -\frac{K_{ij}}{\theta} \frac{\partial h}{\partial x_j}$$

όπου h είναι το υδραυλικό ύψος, το οποίο εντοπίζεται από τη λύση της κύριας εξίσωσης τρισδιάστατης ροής υπογείων υδάτων:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + q_s = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

όπου K_{ij} η υδραυλική αγωγιμότητα και S_s ο παράγοντας αποθηκευτικότητας του πορώδους μέσου. Η υδραυλική αγωγιμότητα, ουσιαστικά, έχει εννέα παράγοντες, τρεις για κάθε έναν άξονα του τρισδιάστατου συστήματος αλλά συνήθως οι δευτερεύοντες παράγοντες κάθε άξονα ($K_{xy}, K_{xz}, K_{yx}, K_{yz}, K_{zx}, K_{zy}$) θεωρούνται ίσοι με το μηδέν και η κύρια εξίσωση της ροής υπογείων υδάτων γίνεται (Zheng and Bennett, 1995):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + q_s = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

4.3.2 Αρχικές συνθήκες

Οι αρχικές συνθήκες αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της μαθηματικής μεθόδου που περιγράφει την παροδική μεταβολή της συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας και είναι απαραίτητο να καθορίζεται πριν από την προσπάθεια λύσης του μοντέλου. Σε γενική μορφή η αρχική συνθήκη είναι:

$$C(x, y, z, 0) = C^0(x, y, z)$$

όπου $C^0(x, y, z)$ μια ήδη γνωστή συγκέντρωση σε ολόκληρο τον τομέα που μας ενδιαφέρει (Zheng and Bennett, 1995).

4.3.3 Οριακές συνθήκες

Η επίλυση του μαθηματικού μοντέλου προϋποθέτει και τον καθορισμό κάποιων οριακών συνθηκών που ελέγχουν την αλληλεπίδραση της υπό μελέτη περιοχής με τις γύρω περιοχές. Γενικά, υπάρχουν τρεις τύποι οριακών συνθηκών στα μοντέλα μεταφοράς. Ο πρώτος τύπος καθορίζει τη συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας κατά μήκος της συνθήκης, ο δεύτερος τύπος προσδιορίζει την βαθμίδα της συγκέντρωσης εγκαρσίως της συνθήκης και ο τρίτος τύπος αποτελεί ένα συνδυασμό των δύο αρχικών.

Ο πρώτος τύπος (σταθερής συγκέντρωσης) καθορίζεται για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο και δίνεται από τον τύπο:

$$C(x, y, z, t) = c(x, y, z) \quad , \quad t > 0 \quad \text{σε ένα οριοθετημένο όριο } \Gamma_1$$

Στα συστήματα ροής, μια συνθήκη τέτοιου τύπου καθορίζει το υδραυλικό ύψος μέσα στο όριο, είτε χρησιμοποιούμενο ως πηγή που προσθέτει νερό στην περιοχή είτε ως διαρροή που αφαιρεί νερό από την περιοχή.

Στο δεύτερο τύπο (σταθερής ροή συγκέντρωσης), συνεπάγεται ότι η ροή της διασποράς της διαλυμένης ουσίας σε όλο το όριο της συνθήκης είναι καθορισμένη και μπορεί αν εκφραστεί από τον τύπο:

$$-D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} = f_i(x, y, z) \quad , \quad t > 0 \quad \text{σε ένα οριοθετημένο όριο } \Gamma_2$$

όπου $f_i(x, y, z)$ μια συνάρτηση που αντιπροσωπεύει τη ροή διασποράς μέσα στο όριο Γ_2 . Επομένως, ο κάθε χρήστης μπορεί να καθορίσει τον όγκο της ροής σε κάθε κόμβο ξεχωριστά (Babu et al., 1997).

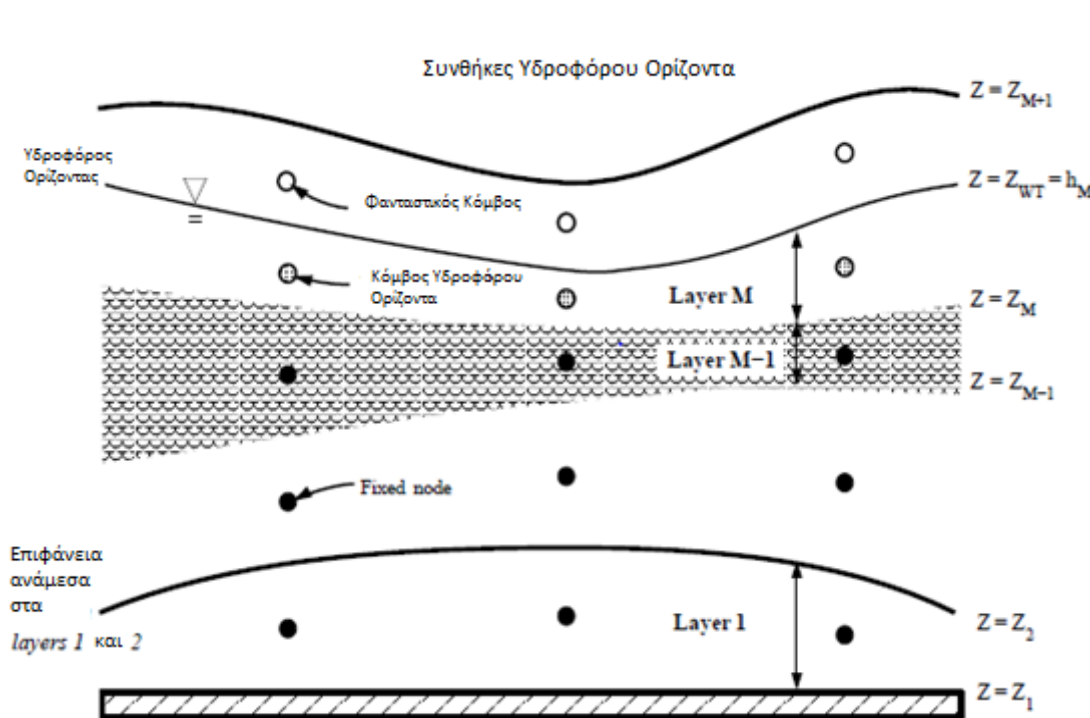
Στον τρίτο τύπο (μεικτός τύπος), τόσο η ροή διασποράς όσο και η μεταθετική ροή διαμέσου του ορίου καθορίζονται από τον τύπο:

$$-D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} + u_i C = g_i(x, y, z) \quad , \quad t > 0 \quad \text{σε ένα οριοθετημένο όριο } \Gamma_3$$

όπου $g_i(x, y, z)$ μια συνάρτηση που αντιπροσωπεύει τη συνολική ροή του συστήματος μέσα στο όριο Γ_3 .

4.3.4 Συνθήκες υδροφόρου ορίζοντα

Ο καθορισμός του υδροφόρου ορίζοντα προϋποθέτει την εισαγωγή δύο οριακών συνθηκών που ορίζουν το επίπεδο του νερού στο ανώτερο στρώμα του εδάφους. Η σχηματική απεικόνιση αυτής της κατάστασης περιλαμβάνει έναν εν κινήσει υδροφόρο ορίζοντα και το καθορισμένο επίπεδο του ανώτερου ορίου της ροής θα δίνεται από την εξίσωση $z = z_{M+1}(x, y, t)$ ενώ το πραγματικό υψόμετρο της στάθμης του νερού από την εξίσωση $z = z_{WT}(x, y, t)$, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.1):



Σχήμα 4.1 Συνθήκες στάθμης υδροφόρου ορίζοντα (Babu et al., 1997)

Η πρώτη συνθήκη υδροφόρου ορίζοντα δηλώνει ότι το επίπεδο του νερού στο ανώτερο στρώμα της περιοχής, ορίζει το πάχος του υδροφορέα στο στρώμα αυτό, ενώ η δεύτερη συνθήκη περιγράφει την απόκριση του υδροφόρου ορίζοντα στο φιλτράρισμα (Babu et al., 1997).

4.4 Επίλυση μαθηματικού μοντέλου

Το μαθηματικό μοντέλο της ροής νερού και μεταφοράς διαλυμένης ουσίας, εκφρασμένο μέσα από τις παραμέτρους των κύριων εξισώσεων, των αρχικών και

οριακών συνθηκών, τις παραμέτρους της ροής και της μεταφοράς και τις πληροφορίες για τις πηγές και τις διαρροές, πρέπει να λυθεί για να αποκτηθεί η κατανομή της ροής του νερού και της συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας στο χώρο και στο χρόνο που έχει καθοριστεί για να εξεταστεί. Η διαδικασία για την διαμόρφωση και την επίλυση ενός μαθηματικού μοντέλου μπορεί να χωριστεί γενικά σε δύο κατηγορίες:

- Αναλυτική, στην οποία χρησιμοποιούνται τυπικές μαθηματικές λύσεις για τις κύριες διαφορικές εξισώσεις
- Αριθμητική, στην οποία οι διαφορικές εξισώσεις προσεγγίζονται μέσα από ένα σύνολο αλγεβρικών εξισώσεων.

Οι αναλυτικές λύσεις μπορούν να αποκτηθούν υπό την εφαρμογή πολλών απλοποιημένων υποθέσεων, όπως η ταχύτητα μονής κατεύθυνσης και η απλή γεωμετρία του πεδίου της ροής. Για αυτό το λόγο οι αριθμητικές λύσεις για την επίλυση του μοντέλου είναι πιο διαδεδομένες και ευρέως χρησιμοποιούμενες.

Οι περισσότερες αριθμητικές μέθοδοι για τη λύση των εξισώσεων μεταφοράς-διασποράς μπορούν να ταξινομηθούν στις Eulerian, Lagrangian ή συνδυασμό των δύο προηγούμενων. Στις Eulerian μεθόδους, η εξίσωση μεταφοράς λύνεται σε ένα σταθερό χωρικό πλέγμα και δύο τυπικά παραδείγματα αυτής της μεθόδου είναι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (Finite-difference method) και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite-element method). Στις Lagrangian μεθόδους, η εξίσωση μεταφοράς λύνεται είτε σε ένα παραμορφωμένο πλέγμα είτε σε αλλαγμένες συντεταγμένες σε ένα σταθερό πλέγμα. Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων, λαμβάνει υπ' όψιν του τα πλεονεκτήματα της κάθε μεθόδου και εφαρμόζει, τις μεθόδους Lagrange για την οριζόντια μεταφορά και τις μεθόδους Euler για τη διασπορά. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι οι Eulerian, εξαιτίας του πλεονεκτήματος του σταθερού πλέγματος και της ακρίβειας και της αποτελεσματικότητας με τις οποίες αντιμετωπίζονται τα προβλήματα διασποράς. Η επιλογή της χρήσης του κώδικα πεπερασμένων διαφορών ή πεπερασμένων στοιχείων επηρεάζεται από τη μορφή του πλέγματος που σχηματίζεται από τους επικαλούμενους κόμβους.

- Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (Finite-Difference Method)

Με αυτήν τη μέθοδο υπολογίζεται η τιμή του υδραυλικού ύψους ακριβώς πάνω στον κόμβο του πλέγματος και αυτή η τιμή αποτελεί τη μέση τιμή για το κελί το οποίο

περικλείει τον κόμβο. Δηλαδή, δεν λαμβάνεται υπ' όψιν καμία αλλαγή που μπορεί να υφίσταται το υδραυλικό ύψος από τον ένα κόμβο στον άλλον. Επίσης, για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου είναι απαραίτητα λιγότερα δεδομένα εισόδου στο μοντέλο ώστε να σχηματιστεί το επιθυμητό πλέγμα και έτσι είναι ευκολότερο να προγραμματιστούν και να κατανοηθούν.

- Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite-Elements Method)

Με αυτή τη μέθοδο καθορίζεται ακριβώς η μεταβολή του υδραυλικού ύψους μέσα σε ένα στοιχείο με τη χρήση εξισώσεων παρεμβολής. Μπορεί τα υδραυλικά ύψη να υπολογίζονται πάνω στους κόμβους αλλά καθορίζονται παντού μέσω κάποιων βασικών εξισώσεων. Επίσης, προσεγγίζονται καλύτερα τα απροσδιορίστου σχήματος όρια στην εξεταζόμενη περιοχή καθώς είναι ευκολότερο να προσαρμοστεί το μέγεθος αυτών των στοιχείων στα όρια της περιοχής. Τα πεπερασμένα στοιχεία είναι σε θέση να ελέγχουν καλύτερα τα εσωτερικά όρια της περιοχής και τις ζώνες προβλημάτων που δημιουργούνται και να προσομοιάσουν πιο ικανοποιητικά τις σημειακές πηγές και τις διαρροές του υδροφορέα (Anderson, Woessner, 1992).

Περιγραφή μοντέλων και εφαρμογών που χρησιμοποιήθηκαν

5.1 Λογισμικό Argus One

Το Argus One αποτελεί ένα ανεξάρτητο μοντέλο Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) για την αριθμητική προσομοίωση των υπογείων υδάτων. Το πρόγραμμα αυτό δημιουργεί πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων ή πεπερασμένων διαφορών μέσω ενός γραφικού και εύκολου τρόπου. Περιέχει μία σειρά από βοηθητικά προγράμματα που επιτρέπουν την εισαγωγή ψηφιοποιημένων χαρτών για την αυτόματη δημιουργία πλεγμάτων. Επίσης, είναι δυνατόν να συνδέσει διαφορετικές μεταβλητές στο πλέγμα ή σε συγκεκριμένα στοιχεία ή κόμβους του πλέγματος, όπως οριακές και αρχικές συνθήκες, συγκεντρώσεις κ.α. Αυτή η σύνδεση γίνεται μέσω της χρήσης διαφόρων επιπέδων (Layers). Τα δεδομένα που διαμορφώνονται στο εσωτερικό του προγράμματος Argus One, μπορούν να εξαχθούν υπό την μορφή κατάλληλου αριθμητικού κώδικα, όπως ο κώδικας PTC που θα αναλυθεί στη συνέχεια, διότι το Argus One διαθέτει ενσωματωμένη γλώσσα για να εξαγάγει τα δεδομένα του. Τέλος, το συγκεκριμένο πρόγραμμα υποστηρίζει μεγάλη ποικιλία μοντέλων για την προσομοίωση της ροής υπογείων υδάτων, επομένως αποτελεί ιδανικό περιβάλλον μοντελοποίησης.

Το κάθε επίπεδο (Layer) είναι το βασικό αντικείμενο επεξεργασία στο Argus One, καθώς απεικονίζεται ως ένα διαφανές φύλλο εργασίας στο οποίο οι χρήστες καταγράφουν τις πληροφορίες τους. Διαφορετικού τύπου πληροφορίες μπορούν να αποθηκευτούν σε συγκεκριμένους τύπους Layers. Τα βασικά είδη layer με τα οποία δουλεύει το Argus One είναι αυτά του τομέα (Domain), δηλαδή της οριοθετημένης περιοχής την οποία θέλουμε να μοντελοποιήσουμε, του πλέγματος (Mesh) που δημιουργείται μέσω των πεπερασμένων στοιχείων ή των πεπερασμένων διαφορών και του δικτύου (Grid) που δημιουργείται από αυτά τα πλέγματα. Υπάρχουν όμως και άλλα είδη Layer, όπως το επίπεδο των πληροφοριών (Information), των χαρτών (Maps) και των δεδομένων (Data). Επομένως ο κάθε χρήστης έχει τη δυνατότητα εκτός από το να εισάγει πληροφορίες, να τις ψηφιοποιήσει δημιουργώντας γραφήματα και να τις μεταβάλλει για να ελέγξει τι συμβαίνει σε κάθε περίπτωση (ArgusOne User's Guide, 1997).

5.2 Ο κώδικας PTC

Ο κώδικας που δημιουργήθηκε από το πανεπιστήμιο του Princeton έπεται από τη συνεργασία και τη συνεχόμενη διόρθωση από πλήθος επιστημόνων (G. F. Pinder , W. G. Gray και Kiyoshi Yamada είναι κάποιοι από αυτούς) ονομάζεται κώδικας μεταφοράς του Princeton, PTC (Princeton Transport Code) και προσομοιώνει την ροή υπογείων υδάτων και μεταφορά ρύπων σε τρεις διαστάσεις μέσω της χρήσης πεπερασμένων στοιχείων πεπερασμένων διαφορών (Babu et al., 1997). Ο κώδικας αυτός είναι γραμμένος σε FORTRAN 77 και έτσι μπορεί να εκτελεστεί με επιτυχία σε οποιονδήποτε υπολογιστή με λίγο ή καθόλου τροποποίηση.

Το μοντέλο PTC καθορίζει τα χαρακτηριστικά της ροής ενός συστήματος υπογείων υδάτων λύνοντας την παρακάτω μερική διαφορική εξίσωση ως προς την τιμή του υδραυλικού ύψους h :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + \sum_{i=1}^r Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i) = 0$$

όπου,

K_{xx} , η υδραυλική αγωγιμότητα στην οριζόντια διεύθυνση x (LT^{-1})

K_{yy} , η υδραυλική αγωγιμότητα στην οριζόντια διεύθυνση y (LT^{-1})

K_{zz} , η υδραυλική αγωγιμότητα στην κάθετη διεύθυνση z (LT^{-1})

S , ο συντελεστής ειδικής αποθηκευτικότητας (L^{-1})

Q_i , η παροχή της πηγής στο σημείο i (L^3T^{-1})

δ , η συνάρτηση δέλτα

r , το πλήθος των πηγών

Για ευκολία της επίλυσης της παραπάνω διαφορικής εξίσωσης, ο τελευταίος όρος θα συντμηθεί σε Q . Η αριθμητική λύση αυτής της εξίσωσης δίνεται μέσω του κώδικα PTC με τη συνδυαστική χρήση μεθόδων των πεπερασμένων διαφορών και των πεπερασμένων στοιχείων.

Οι άλλες δύο βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται από το μοντέλο για την επίλυση του συστήματος αφορούν την ταχύτητα των υπογείων υδάτων και την μεταφορά του ρύπου μέσω της συγκέντρωσής του C .

Η ταχύτητα παρίσταται μέσω των τριών εξισώσεων των συνιστωσών της:

$$V_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}, \quad V_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}, \quad V_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}$$

Η εξίσωση που περιγράφει τη μεταφορά του ρύπου είναι:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\ & - \left[V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right] + Q(c^w - c) - \theta[1 - E(c)] \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0 \end{aligned}$$

όπου, οι συντελεστές διασποράς ορίζονται ως:

$$D_{xx} = (a_L V_x^2 + a_T V_y^2 + a_V V_z^2) / V + D_M$$

$$D_{yy} = (a_T V_x^2 + a_L V_y^2 + a_V V_z^2) / V + D_M$$

$$D_{zz} = (a_V V_x^2 + a_V V_y^2 + a_L V_z^2) / V + D_M$$

$$D_{yx} = D_{xy} = (a_L - a_T) V_x V_y / V$$

$$D_{yz} = D_{zy} = (a_L - a_V) V_y V_z / V$$

$$D_{zx} = D_{xz} = (a_L - a_V) V_z V_x / V$$

και

D_M , ο συντελεστής μοριακής διάχυσης (L^2/T)

a_L , η διαμήκης διασπορά (L)

a_T , η οριζόντια εγκάρσια διασπορά (L)

a_V , η κάθετη εγκάρσια διασπορά (L)

V , η ταχύτητα ροής (L/T)

C , η χημική συγκέντρωση σε ένα σημείο μία χρονική στιγμή (M/L^3)

θ , το πορώδες του υδροφορέα

$E(c)$, η συνάρτηση χημικής προσρόφησης

Q , ο ρυθμός άντλησης ($1/T$)

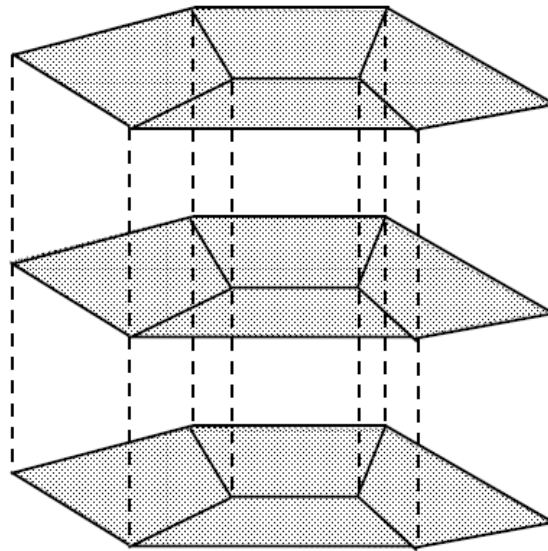
C^w , η συγκέντρωση του ρευστού την αντλίας σε ένα σημείο

Αυτές οι εξισώσεις προκύπτουν από την αρχή διατήρησης της μάζας και από τον νόμο του Darcy, όπως αναλύθηκε παραπάνω. Η σειρά επίλυσης είναι όπως και η σειρά παρουσίασης, δηλαδή πρώτα επιλύεται η εξίσωση για τον υπολογισμό του υδραυλικού ύψους h , στη συνέχεια υπολογίζονται οι ταχύτητες Darcy και τέλος λύνεται η εξίσωση μεταφοράς ως προς τη συγκέντρωση του ρύπου C .

5.2.1 Αλγοριθμική επίλυση του κώδικα PTC

Η επίλυση του συστήματος μέσω των παραπάνω εξισώσεων για πολύπλοκα φυσικά συστήματα, προϋποθέτει την εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων. Για συστήματα τριών διαστάσεων, όπου ο υπολογιστικός φόρτος είναι μεγάλος, ο κώδικας PTC εμπεριέχει ένα διαχωριστικό αλγόριθμο για την επίλυση αυτών των εξισώσεων, ο οποίος μειώνει το υπολογιστικό κόστος.

Ο αλγόριθμος περιλαμβάνει τον διαχωρισμό της υπό μελέτη περιοχής σε παράλληλα και κάθετα επίπεδα (layers), στα οποία γίνεται μία κάθετη διακριτοποίηση πεπερασμένων στοιχείων για την ακριβή αναπαράσταση των περιοχών με ακανόνιστο σχήμα, με τη χρήση οριζόντιου πλέγματος (Σχήμα 5.1) (Babu et al.,1997).



Σχήμα 5.1: Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων

5.2.2 Οριακές συνθήκες

Το μοντέλο PTC καθορίζει δύο τύπους οριακών συνθηκών για την εξίσωση μεταφοράς του ρύπου, ο πρώτος ορίζει την συγκέντρωση σε κάθε κόμβο και ο δεύτερος τη μεταφερόμενη ροή μάζας ρύπου. Οι οριακές συνθήκες είναι μηδέν στην διασπορά της ροής στην κάθετη διεύθυνση των ορίων και μηδέν για τη συνολική συγκέντρωση στο ανώτερο και στο κατώτερο σημείο των ορίων. (Babu et al., 1997).

5.3 Η εφαρμογή ArcGIS 9.2

Τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών GIS (Geographical Information Systems) είναι ένα σύστημα συλλογής, αποθήκευσης, διαχείρισης και παρουσίασης δεδομένων όπου έχουν την ίδια γεωαναφορά (Μονοκάνδυλος, 2010). Τα πληροφοριακά αυτά συστήματα αναπτύχθηκαν για να ικανοποιήσουν την ολοένα αυξανόμενη ανάγκη των κοινωνιών για αξιόπιστες και ενημερωμένες πληροφορίες σε σχέση με ζητήματα διαχείρισης προβλημάτων στον χώρο και το χρόνο. Δεν αποτελούν όμως, απλά συστήματα απεικόνισης ή χαρτογράφησης αλλά αποτελούν σημαντικό εργαλείο για τη διαχείριση φυσικών πόρων, τις επιστημονικές έρευνες, τον αναπτυξιακό σχεδιασμό καθώς και σε άλλες εφαρμογές (Μονοκάνδυλος, 2010).

Η λειτουργία του GIS βασίζεται σε μία βάση δεδομένων που αποτελείται από πληροφοριακά επίπεδα (layer) που αφορούν την ίδια περιοχή. Κάθε επίπεδο

αποτελείται είτε από τοπογραφικά και δορυφορικά δεδομένα είτε από πληροφορίες που έχουν συλλεχθεί.

Το ArcGIS 9.2 αποτελεί μέρος των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών και περιλαμβάνει τις εξής εντολές:

- ArcReader: επεξεργάζεται και απεικονίζει τους χάρτες
- ArcView: διαχειρίζεται τα χωρικά δεδομένα και δημιουργεί χάρτες σε επίπεδα
- ArcEditor: περιλαμβάνει εργαλεία για το χειρισμό των σχηματικών αρχείων
- ArcInfo: χειρίζεται, εκδίδει και αναλύει τα στοιχεία

5.4 Το πρόγραμμα GEO5

Η χρησιμοποίηση του προγράμματος GEO5 προϋποθέτει την εγκατάσταση του λογισμικού M-Tech, το οποίο δημιουργήθηκε το 1988 από τον Marc Gleason. Η πρώτη μορφή του GEO5 (Geotechnical Groundwater Graphics) αναπτύχθηκε το 1993 και από τότε έχουν γίνει πολλές αλλαγές και βελτιώσεις ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη. Οι βασικές εντολές που χρησιμοποιούνται κατά τη χρήση του προγράμματος είναι:

- **QuickLog:** Με αυτήν την εντολή επιταχύνεται και απλοποιείται η διαδικασία της δημιουργίας διαγραμμάτων για την δημιουργία πηγαδιών.
- **QuickCross/Fence:** Με τη χρήση της συγκεκριμένης εντολής τα μοντέλα χρησιμοποιούν τα δεδομένα που έχουν εισαχθεί ήδη στο QuickLog για να δημιουργήσουν δισδιάστατες και τρισδιάστατες τομές.
- **QuickGIS:** Το QuickGIS βοηθάει το χρήστη να οργανώσει τα λιθολογικά δεδομένα για μία ομάδα γεωτρήσεων, σε έναν πίνακα με X,Y συντεταγμένες και γεωλογικά στρώματα.
- **QuickSoil:** Η εντολή αυτή δημιουργεί ένα πίνακα εδαφικής ανάλυσης, ο οποίος εμφανίζει τα εδαφικά αποτελέσματα από δείγματα εδαφών για μία ομάδα παραμέτρων. Αυτός ο πίνακας διευκολύνει τον εντοπισμό των περιοχών που εμφανίζουν συγκέντρωση του ρύπου σε διαφορετικά επίπεδα του εδάφους (M-Tech Software Tutorial, v.5.0.26, CA,USA).

Κεφάλαιο 6ο

Περιγραφή περιοχής μελέτης

6.1 Εισαγωγή

Περιοχή μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής του Ασωπού ποταμού, ο οποίος στο μεγαλύτερο τμήμα του διαρρέει το νομό Βοιωτίας ενώ το νότιο και ανατολικό του τμήμα αποστραγγίζει τις βορειοανατολικές απολήξεις της Πάρνηθας οι οποίες αποτελούν μέρος του νομού Αττικής (Μαλακάσα, Αυλώνα, Ωρωπός κλπ.) (Γιαννουλόπουλος, 2008). Η συνολική έκταση της λεκάνης απορροής ορίζεται στα 720 km² και το μήκος του ποταμού στα 75 km, ξεκινώντας από την περιοχή των Λεύκτρων, στη βόρεια πλευρά του όρους Κιθαιρώνα, μέχρι την εκβολή (δέλτα) του ποταμού, κοντά στην πόλη του Ωρωπού (Tentes and Damigos, 2011). Στην Εικόνα 6.1 διακρίνεται η λεκάνη απορροής του Ασωπού ποταμού καθώς και οι δήμοι που την αποτελούν:



Εικόνα 6.1 Περιοχή μελέτης (ΥΠΕΚΑ, 2010)

6.2 Οικισμοί περιοχής

Ο ποταμός Ασωπός, όπως αναφέρθηκε, βρίσκεται στο μεγαλύτερο μέρος του στο νομό Βοιωτίας και διέρχεται από τους οικισμούς Συκάμινο, Ωρωπό, Σχηματάρι και

Οινόφυτα, ώσπου χύνεται στον Νότιο Ευβοϊκό Κόλπο. Υπάρχουν και άλλοι μικρότεροι σε έκταση και σε πληθυσμό οικισμοί που βρίσκονται κατά μήκος του ποταμού και τοποθετούνται κυρίως στο βόρειο τμήμα της λεκάνης απορροής, όπου δεν είναι χαρακτηρίζεται τόσο ορεινή περιοχή. Οι δήμοι και οι κοινότητες που περιλαμβάνονται μέσα στη λεκάνη απορροής παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 6.1:

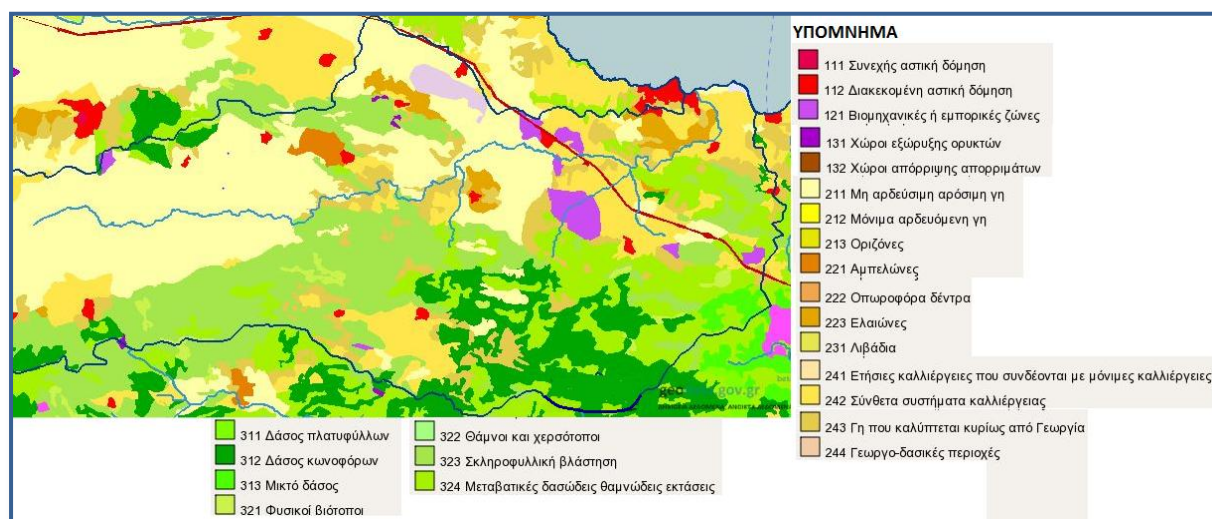
Πίνακας 6.1 Δήμοι και οικισμοί λεκάνης απορροής Ασωπού (Νικολάου, 2012)

Νομός	Δήμος/Κοινότητα	Δημοτικά/κοινοτικά Διαμερίσματα-Οικισμοί
Βοιωτίας	Δ. Πλαταιών	Καπαρέλλι, Λεύκτρα, Πλαταιαί, Λουτούφι, Μελισσοχώρι
	Δ. Θηβαίων	Θήβα, Αμπελοχώρι, Νεωχωράκι, Ελεών
	Δ. Τανάγρας	Άρμα, Ασωπεία, Καλλιθέα, Τανάγρα
	Δ. Δερβενοχωρίων	Δάφνη, Πύλη, Σκούρτα, Στεφάνη
	Δ. Οινόφυτων	Οινόφυτα, Αγ. Θωμάς, Κλειδί
	Δ. Σχηματαρίου	Σχηματάρι, Οινόη, Πλάκα, Δήλεσι
Αττικής	Δ. Ερυθρών	Ερυθρές
	Δ. Ωροπού	Ωρωπός, Μαρκόπουλο, Νέα Παλάτια, Συκάμινο, Χαλκούτσι, Νέα Πολιτεία
	Δ. Αυλώνα	Αυλώνα, Ασπροχώρι
	Κ. Μαλακάσας	Μαλακάσα, Μήλεσι

6.3 Παραγωγικοί τομείς

Στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής του Ασωπού υπάρχουν εδάφη που θεωρούνται κατάλληλα για γεωργικές εργασίες, λόγω της υψηλής τους παραγωγικότητας, οπότε και υφίστανται γεωργική εκμετάλλευση. Αυτά καλύπτονται κυρίως από καλλιέργειες μεγάλης έκτασης, που συνήθως είναι αρδευόμενες, και από καλλιέργειες λαχανικών. Τα εδάφη αυτά είναι πλούσια σε ασβέστιο και άνθρακα και είναι ουσιαστικά το αποτέλεσμα των αποθέσεων του φορτίου του Ασωπού και δευτερευόντων ρεμάτων. Ακόμα στην περιοχή συναντώνται καλλιέργειες αμπελώνων, σπυροφόρων ή άλλων δενδρωδών, χαμηλών καλλιεργειών ή ακόμα και αραιά δάση πεύκων σε εδάφη Πλειστοκαινικών αποθέσεων. Αυτά περιλαμβάνουν μάργες, κροκαλοπαγή και ψαμμίτες. Τέλος, υπάρχουν δενδρώδεις καλλιέργειες και δασικές

εκτάσεις σε εδάφη του Νεογενούς (Τέττας, 2012). Ο χάρτης με τις χρήσεις γης της περιοχής φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 6.2:



Εικόνα 6.2 Χρήσεις γης κατά Corine 2000 (geodata.gov.gr)

6.4 Βιομηχανικές εγκαταστάσεις

Οι πρώτες βιομηχανίες στην ευρύτερη περιοχή αρχίζουν να δημιουργούνται από το 1950. Η θέσπιση νόμων και οι αυστηρές απαγορεύσεις ίδρυσης ή επέκτασης βιομηχανιών μέσα στην Αττική, σε συνδυασμό με τη στρατηγική θέση της εξεταζόμενης περιοχής μιας και βρίσκεται δίπλα στο κεντρικό οδικό δίκτυο, ενίσχυσε την άναρχη εγκατάσταση βιομηχανιών. Έτσι, στη περιοχή φιλοξενείται μία πολύ μεγάλη βιομηχανική δραστηριότητα. Το αποτέλεσμα αυτής της ανεξέλεγκτης δραστηριότητας ήταν η ύπαρξη ενός μεγάλου αριθμού μη καταγεγραμμένων πηγών ρύπανσης των επιφανειακών και υπόγειων αποδεκτών με αποτέλεσμα τη δημιουργία τεράστιων περιβαλλοντικών προβλημάτων. Στην περιοχή καταγράφονται επίσημα 151 βιομηχανικές μονάδες που χρησιμοποιούν στην παραγωγική τους διαδικασία χρώμιο ή παράγουν απόβλητα χρωμίου και 385 δυνητικά ρυπογόνες βιομηχανίες. Η περιοχή διασχίζεται από το Εθνικό Σιδηροδρομικό Δίκτυο (γραμμές ΟΣΕ), το οποίο λόγω του περιδοτίτη στη βάση, μπορεί να θεωρηθεί πηγή ρύπανσης χρωμίου και να επιδεινώσει τη ποιότητα του υπόγειου νερού της περιοχής. Τέλος, στη λεκάνη του Ασωπού εντοπίζονται 12 Χώροι Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Αποβλήτων (ΧΑΔΑ), δύο Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) και επτά ενεργά Ορυχεία – Μεταλλεία (Τέττας, 2012).

Στον Πίνακα 6.2 παρουσιάζονται οι βιομηχανίες που δραστηριοποιούνται στην εξεταζόμενη περιοχή:

Πίνακας 6.2 Βιομηχανική δραστηριότητα περιοχής (Τέττας, 2012)

ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΚΛΑΔΟΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΟΝΑΔΩΝ
Αποθήκευση και Υποστηρικτικές προς τη Μεταφορά Δραστηριότητες	10
Βιομηχανία Εκδόσεων, Εκτυπώσεων, Αναπαραγωγής Προεγγεγραμμένων Μέσων Εγγραφής Ήχου και Εικόνας	2
Βιομηχανία Ξύλου και Κατασκευή Προϊόντων από Ξύλο και Φελλό (εκτός επίπλων)	1
Βιομηχανία Παραγωγής Κλωστοϋφαντουργικών Υλών και Προϊόντων	3
Κατασκευή Επίπλων	2
Κατασκευή Ηλεκτρολογικού Εξοπλισμού	1
Κατασκευή Μεταλλικών Προϊόντων	18
Κατασκευή Μηχανημάτων και Είδη Εξοπλισμού	5
Κατασκευή Σωλήνων	3
Κατασκευή Τούβλων, Πλακιδίων και λοιπών Δομικών Προϊόντων	1
Κατασκευή Χαλύβδινων Σωλήνων, Αγωγών, Κοίλων με Καθορισμένη μορφή και Συναφών Εξαρτημάτων	2
Κατεργασία και Δέψη Δέρματος	2
Κατεργασία και Δέψη Δέρματος, Κατεργασία και Βαφή Γουναρικών	1
Κατεργασία και Επικάλυψη	1
Παραγωγή Αλουμινίου	4
Παραγωγή Βασικών Μετάλλων και Κατασκευή Μεταλλικών Προϊόντων	40
Παραγωγή Βασικών Πολύτιμων Μετάλλων και άλλων μη Σιδηρούχων Μετάλλων	5
Παραγωγή Βασικών Χημικών Προϊόντων	1
Παραγωγή Εκρηκτικών	1
Παραγωγή Λιπασμάτων και Αζωτούχων Ενώσεων	2
Παραγωγή Μολύβδου, Ψευδάργυρου και Κασσίτερου	1
Παραγωγή Πλαστικών σε Πρωτογενείς Τομείς	1
Παραγωγή Χημικών Ουσιών και Προϊόντων	31
Παραγωγή Χρωμάτων, Βερνικιών και Παρόμοιων Επιχρισμάτων, Μελανιών Τυπογραφίας και Μαστιχών	2
Προπαρασκευή και Νηματοποίηση Υφαντικών Ινών	1
Φινίρισμα Κλωστοϋφαντουργικών Προϊόντων	6
Φινίρισμα Υφαντουργικών Προϊόντων	1
Χύτευση Μετάλλων	3
ΣΥΝΟΛΟ	151

6.5 Γεωλογία της περιοχής

Η δημιουργία της λεκάνης απορροής του Ασωπού ποταμού ήταν το αποτέλεσμα κάθετων τεκτονικών κινήσεων. Οι κάθετες κινήσεις του ανώτερου επιπέδου του εδάφους είχαν διαφορετικούς βαθμούς έντασης, με αποτέλεσμα η λεκάνη να μην έχει αναπτυχθεί ομοιόμορφα και να έχουν παρατηρηθεί αλλαγές στην καθίζηση από τόπο σε τόπο (Mallouchou, 2012). Η ευρύτερη περιοχή της λεκάνης εντάσσεται γεωτεκτονικά στην Πελαγονική ενότητα και οι σχηματισμοί της διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τους αλπικούς, που αποτελούν το υπόβαθρο και τα περιθώρια μιας τεκτονικής τάφρου με γενική διεύθυνση Α-Δ και στους μεταλπικούς που πληρώνουν το τεκτονικό αυτό βύθισμα. Το νότιο κράσπεδο της λεκάνης είναι το ορεινό συγκρότημα των αλπικών σχηματισμών της Πάρνηθας ενώ το βόρειο αποτελείται από τους αλπικούς σχηματισμούς του Κτυπά και του Μεσσάπιου.

Οι αλπικοί σχηματισμοί διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τους μεταμορφωμένους στο ανατολικό μέρος και τους μη μεταμορφωμένους στο υπόλοιπο. Οι κύριες περιοχές στις οποίες συναντώνται μεταμορφωμένοι σχηματισμοί είναι το Καπανδρίτι, το Γραμματικό και ο Μαραθώνας και αντιπροσωπεύονται κυρίως από μάρμαρα και μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους.

Οι μη μεταμορφωμένοι αλπικοί σχηματισμοί αναπτύσσονται επιφανειακά στην υπόλοιπη περιοχή και εμφανίζονται κυρίως στα περιθώρια της λεκάνης καθώς και μέσα στη λεκάνη σαν νησίδες κάτω από τους υπερκείμενους μεταλπικούς σχηματισμούς.

Η εξέλιξη της λεκάνης του Ασωπού ποταμού διαφοροποιείται από το Τεταρτογενές οπότε το μεγαλύτερο τμήμα της υπόκειται σε διάβρωση λόγω ανοδικής κίνησης με διατήρηση υπολειμματικών χερσαίων λεκανών μόνο σε τμήματα της σημερινής λεκάνης του Ασωπού και σε μικρές κλειστές λεκάνες όπως της Αυλώνας – Μαλακάσας (Παπανικολάου κ.α., 1988).

6.6 Υδρογεωλογία της περιοχής

Τα ετήσια ανανεώσιμα υδατικά αποθέματα σε όλη την έκταση της λεκάνης του Ασωπού ανέρχονται περίπου σε $144 \times 10^6 \text{ m}^3$ από τα οποία τα 111 αντιστοιχούν σε καρστικούς ενώ τα $32 \times 10^6 \text{ m}^3$ σε προσχωματικούς-κοκκώδεις υδροφόρους

σχηματισμούς. Στην ευρύτερη περιοχή του Ασωπού αναπτύσσονται δύο κύριοι υδροφόροι ορίζοντες, ο ανώτερος κοκκώδης υδροφόρος εντός των Νεογενών και Τεταρτογενών αποθέσεων και ο βαθύτερος καρστικός εντός των ανθρακικών σχηματισμών, ο οποίος σε ορισμένα πεδινά τμήματά του καλύπτεται από Νεογενή και Τεταρτογενή ιζήματα. Αυτοί οι υδροφόροι ορίζοντες τροφοδοτούνται:

- Ο μεν ανώτερος από τα κατεισδύοντα νερά της βροχής και από τις διηθήσεις χειμαρρικών υδάτων συμπεριλαμβανομένου και του ποταμού
- Ο βαθύτερος καρστικός από τις Β.Α. παρυφές της Πάρνηθας, από κατακόρυφες διηθήσεις καθώς επίσης και από κατακόρυφες μεταγγίσεις από τον υπερκείμενο κοκκώδη υδροφορέα.

Η ροή του υπόγειου νερού στον ανώτερο κοκκώδη υδροφόρο διαμορφώνεται από τις εκάστοτε πιεζομετρικές συνθήκες και τις ασκούμενες πιέσεις. Δυτικά των Οиноφύτων, σχηματίζεται μία καταβόθρα η οποία φαίνεται να αποτελεί το βασικότερο αποδέκτη της ροής των υπογείων νερών του κοκκώδους υδροφόρου προς τον υποκείμενο καρστικό υδροφόρο. Τα διηθούμενα αυτά νερά στη συνέχεια, ακολουθούν την κατεύθυνση ροής των υπόγειων νερών του υποκείμενου καρστικού υδροφόρου ορίζοντα βορειοανατολικά και εκβάλουν ανατολικότερα στις υφάλμυρες πηγές του Καλάμου Αττικής.

Η κίνηση του νερού στον καρστικό υδροφορέα σε γενικές γραμμές έχει κατεύθυνση ανατολική - βορειοανατολική και έχει ως τελικό αποδέκτη τις ίδιες πηγές όπως και ανώτερος κοκκώδης υδροφορέας.

Η συγκεκριμένη κατεύθυνση ροής των υπόγειων νερών, και η υδραυλική σχέση μεταξύ του κοκκώδους και του υποκείμενου καρστικού υδροφόρου επιτρέπει τον χαρακτηρισμό του τελευταίου ως υδροφόρου υψηλής ρυπαντικής επιδεκτικότητας από πηγές και δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα στην ευρύτερη λεκάνη του Ασωπού (ΤΕΕ, 2009).

6.7 Κλιματολογικά και βροχομετρικά στοιχεία

Το κλίμα της περιοχής χαρακτηρίζεται ως έντονα θερμομεσογειακό, με μικρό εύρος ετήσιας διακύμανσης. Η θερμή περίοδος διαρκεί από τον Απρίλιο έως τον Σεπτέμβριο και η ψυχρή από το Οκτώβριο έως τον Μάρτιο. Στον Πίνακα 6.3 παρατίθενται τα βροχομετρικά στοιχεία που συλλέχθηκαν από τον μετεωρολογικό

σταθμό της ΕΜΥ στην περιοχή Θίσβη για τα έτη 2003-2008 για τα οποία μοντελοποιείται η ροή του υπόγειου ύδατος. Θεωρούμε ότι το ποσοστό της βροχόπτωσης που διηθείται στο έδαφος αποτελεί το 30% της συνολικής βροχόπτωσης ανά εξάμηνο.

Πίνακας 6.3 Βροχομετρικά δεδομένα (ΕΜΥ, 2009)

Χρονική περίοδος	Ύψος βροχής (mm)	Διηθούμενο ποσοστό βροχής (m/d)
Οκτ 2003 – Μαρτ 2004	400,4	0,00067
Απριλ 2004 – Σεπτ 2004	99,6	0,00017
Οκτ 2004 – Μαρτ 2005	402,9	0,0006715
Απριλ 2005 – Σεπτ 2005	102,2	0,00017
Οκτ 2005 – Μαρτ 2006	412,2	0,00069
Απριλ 2006 – Σεπτ 2006	149,5	0,00025
Οκτ 2006 – Μαρτ 2007	309	0,000515
Απριλ 2007 – Σεπτ 2007	121,1	0,0002
Οκτ 2007 – Μαρτ 2008	257,8	0,00043
Απριλ 2008 – Σεπτ 2008	78,2	0,00013

Παρατηρείται ότι με το πέρασμα των χρόνων υπάρχει μία σημαντική μείωση στην ετήσια βροχόπτωση, επομένως και στο ποσοστό των υπογείων υδάτων (ΕΜΥ, 2009).

6.8 Υφιστάμενη κατάσταση ρύπανσης

Τα τελευταία χρόνια στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης του Ασωπού έχουν παρατηρηθεί, μέσω χημικών αναλύσεων, αυξημένες συγκεντρώσεις εξασθενούς και τρισθενούς χρωμίου. Εκτιμάται ότι η προέλευση αυτών των δύο μπορεί να προέλθει είτε από ανθρωπογενή παρέμβαση, είτε λόγω γεγενούς ρύπανσης. Ο λόγος για τον οποίο γίνεται τόση αναφορά σε αυτές τις χημικές ενώσεις είναι λόγω της τοξικότητας τους και των επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία, που μπορεί αν είναι μέχρι και καρκινογένεση.

Λόγω της ανάπτυξης της περιοχής και της ανεξέλεγκτης εμφάνισης βιομηχανικών μονάδων, οι συγκεντρώσεις του εξασθενούς και του τρισθενούς χρωμίου στο έδαφος και ειδικότερα στις πηγές υπόγειου νερού, εμφανίζονται αυξημένες. Αυτό οφείλεται

στα απόβλητα των βιομηχανικών αυτών μονάδων, οι περισσότερες από τις οποίες είναι παραγωγής και επεξεργασίας μετάλλων, βυρσοδεψεία, παραγωγής χημικών προϊόντων και χρωμάτων κ.α. μέχρι σήμερα δεν έχει εφαρμοστεί οργανωμένο σχέδιο για την προστασία του περιβάλλοντος και αν και οι περισσότερες από τις βιομηχανίες διαθέτουν συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, οι φυσικοί αποδέκτες της περιοχής, όπως ο ποταμός Ασωπός, δέχονται πολύ μεγάλο ρυπογόνο φορτίο (Angelidis and Alouri, 2000).

Θεωρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της ρύπανσης προέρχεται από την βιομηχανική δραστηριότητα, αλλά υπάρχουν μελέτες που αποδεικνύουν ότι κάποιες συγκεντρώσεις είναι αρκετά υψηλές ή σε κάποια απόσταση από τις βιομηχανικές περιοχές, επομένως υπάρχει και άλλος παράγοντας που επιδρά στη ρύπανση της περιοχής. Η ύπαρξη ενός οφιολιθικού πετρώματος στην γεωλογία της περιοχής, του σερπεντινίτη, εξηγεί αυτό το φαινόμενο. Η αποσάθρωση αυτού του πετρώματος οδηγεί στην εμφάνιση στον υπόγειο υδροφόρα συγκεντρώσεων εξασθενούς χρωμίου. Σύμφωνα με μελέτες που έχουν γίνει, έδει διαπιστωθεί ότι ο σερπεντινίτης είναι το πέτρωμα με τη μεγαλύτερη πιθανότητα απελευθέρωσης χρωμίου στο περιβάλλον (Robles-Camacho and Armienta, 2000).

Όπως αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο, το αν η προέλευση του εξασθενούς χρωμίου στον υπόγειο υδροφόρα της λεκάνης απορροής του Ασωπού, οφείλεται σε ανθρωπογενή ή γηγενή ρύπανση, διαφοροποιείται ανάλογα με την έρευνα. Η Ελλάδα είναι από τις χώρες στις οποίες υπάρχουν σημαντικές εμφανίσεις υπερβασικών πετρωμάτων, όπως ο σερπεντινίτης (Paranikolaou, 2009).

Χρήση μοντέλου PTC

7.1 Προσδιορισμός περιοχής μελέτης και εισαγωγή δεδομένων

Για τη μοντελοποίηση της υπόγειας ροής του νερού και της μεταφοράς του εξασθενούς χρωμίου στην περιοχή μελέτης είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν κάποια αρχικά δεδομένα που είναι αναγκαίο να εισαχθούν στον κώδικα PTC. Αυτό έχει ως σκοπό να μπορέσει να προσδιοριστεί η προέλευση της ρύπανσης της περιοχής και να προταθούν τρόποι αντιμετώπισης.

Ως περιοχή μελέτης θεωρείται η ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής του Ασωπού ποταμού, ο οποίος, όπως έχει αναφερθεί, βρίσκεται κυρίως στο νομό Βοιωτίας και στο βορειοανατολικό τμήμα του νομού Αττικής. Η περιοχή περιλαμβάνει πολλούς οικισμούς με βασικότερους αυτούς του Ωρωπού, του Χαλκουτσίου, του Συκάμινου, των Οиноφύτων και της Αυλώνας. Στην λεκάνη εντάσσονται και περιοχές με έντονη βιομηχανική δραστηριότητα, που ευθύνονται για μέρους της εκτεταμένης ρύπανσης με εξασθενές χρώμιο και στον ίδιο τον ποταμό και στα υπόγεια νερά που διατρέχουν την περιοχή.

Βασικά δεδομένα που είναι απαραίτητο να εισαχθούν στο μοντέλο αποτελούν οι χάρτες της περιοχής, που προσδιορίζουν τα όριά της, τα βροχομετρικά δεδομένα που έχουν συλλεχθεί, ο αριθμός των γεωτρήσεων που υπάρχουν σε όλο το εύρος της περιοχής καθώς και ο ρυθμός άντλησης της κάθε γεώτρησης, οι υδραυλικές αγωγιμότητες, που προσδιορίζονται με βάση τον γεωλογικό χάρτη, η χρονική διάρκεια για την οποία θα μελετήσουμε τη ροή του νερού και τέλος οι αρχικές και οριακές συνθήκες που διευκρινίζουν τις πηγές από τις οποίες εισρέει ή εκρέει νερό στην περιοχή.

Με τη βοήθεια το συστήματος ArcGIS εισάγονται στο μοντέλο τα εξής δεδομένα:

- Ισοϋψείς γραμμές

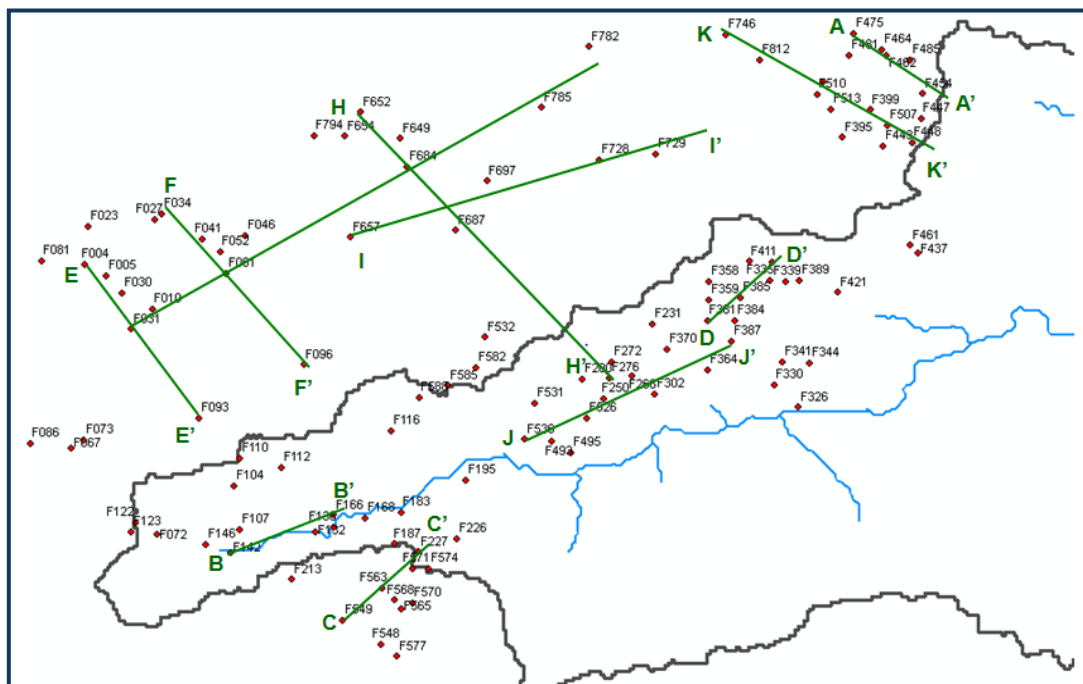
- Η ακριβής τοποθεσία των γεωτρήσεων και το βάθος τους σύμφωνα με το οποίο εντάσσονται στο αντίστοιχο στρώμα (layer) του μοντέλου. Οι σχετικοί πίνακες με τις γεωτρήσεις και τα στρώματα στα οποία ανήκουν παρατίθενται στο Παράρτημα Β.
- Ο γεωλογικός χάρτης με την πληροφορία των υδραυλικών αγωγιμοτήτων
- Οι συγκεντρώσεις του ρύπου που έχουν ανιχνευθεί στα επιμέρους δείγματα.

Τα δεδομένα αυτά εισάγονται στο PTC με τη μορφή των shapefiles και έχουν σκοπό την αρχική αναπαράσταση της περιοχής μελέτης και το ανάγλυφό της με τη μορφή των πεπερασμένων στοιχείων.

7.2 Δημιουργία γεωλογικών τομών

Στην περιοχή μελέτης, η οποία καλύπτει όλη την έκταση της λεκάνης απορροής του Ασωπού ποταμού, υπάρχει μεγάλο πλήθος γεωτρήσεων στις οποίες διαφαίνονται τα γεωλογικά στοιχεία της περιοχής και οι οποίες βοηθάνε στο προσδιορισμό των στρωμάτων στα οποία θα χωριστεί το μοντέλο και στον καθορισμό του βάθους του υδροφορέα. Πληθώρα πληροφοριών υπάρχει στο βορειοδυτικό κομμάτι της περιοχής, μέσω μίας απογραφής που είχε γίνει, με αναλυτικές πληροφορίες για τις γεωτρήσεις που υπάρχουν καθώς και τα χαρακτηριστικά τους, όπως το γεωλογικό υλικό, τις συντεταγμένες και την ανίχνευση χρωμίου. Για αυτό το λόγο, οι τομές που δημιουργήθηκαν με σκοπό να προσδιοριστεί γεωλογικά ο υδροφορέας, βρίσκονται κυρίως σε αυτή την περιοχή.

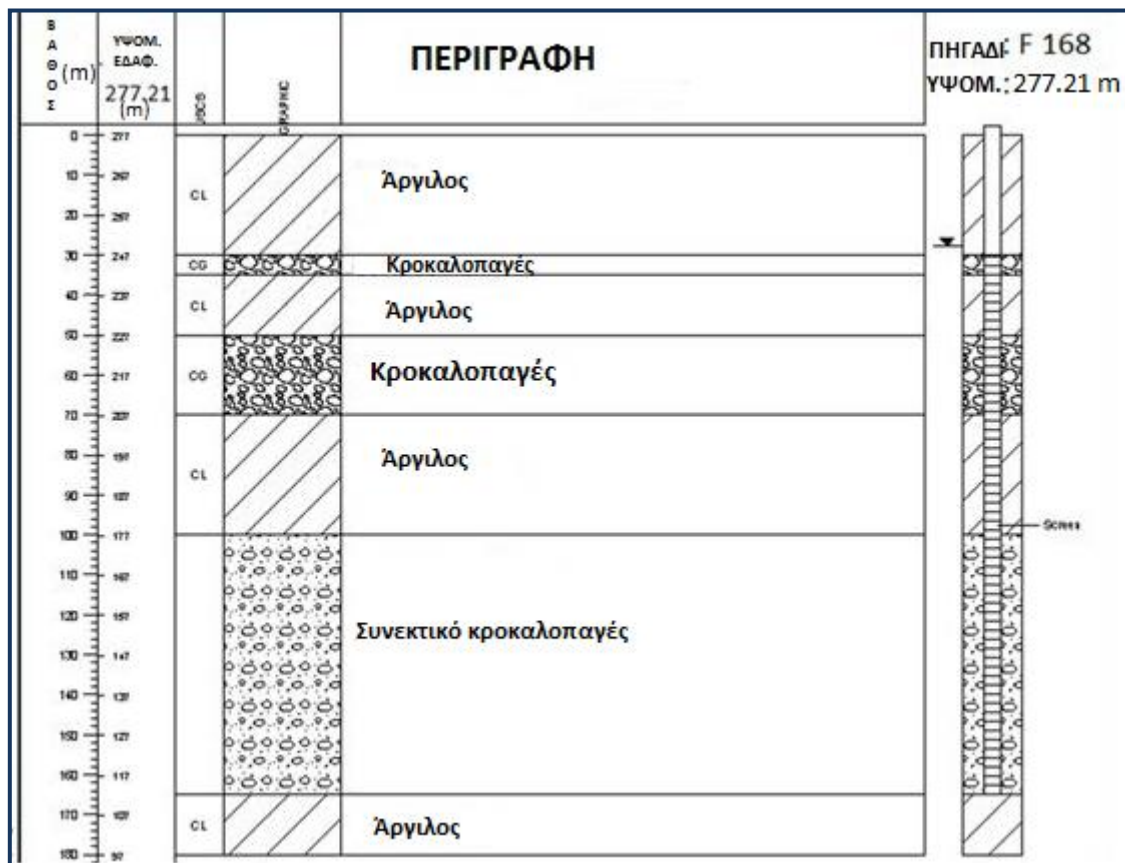
Με τη βοήθεια του προγράμματος GEO 5, δημιουργήθηκαν τομές που καλύπτουν σχεδόν όλο το εύρος της περιοχής για την οποία υπήρχαν στοιχεία και βοηθάνε στην παρατήρηση της στρωματογραφίας. Η ακριβής χωροθέτησή τους φαίνεται στην [Εικόνα 7.1](#):



Εικόνα 7.1 Τομές περιοχής μελέτης

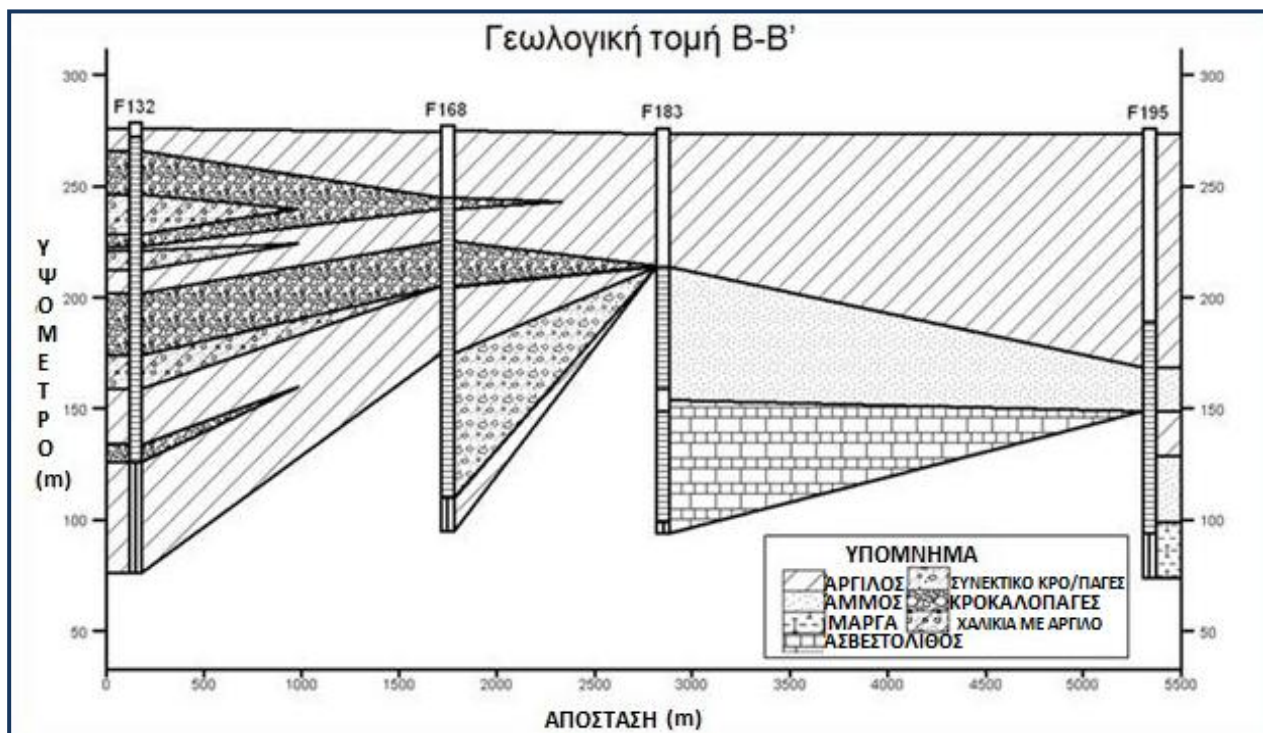
Για να μπορέσουν να δημιουργηθούν σωστά αυτές οι τομές είναι αναγκαίο να ακολουθηθούν τα εξής βήματα:

- Συλλογή δεδομένων από τις απογραφές και τις καταγραφείσες γεωτρήσεις, ώστε να διευκρινιστούν τα γεωλογικά στρώματα στην περιοχή των γεωτρήσεων, το βάθος και οι συντεταγμένες της κάθε γεώτρησης καθώς και στοιχεία για τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και τη συγκέντρωση χρωμίου που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια.
- Κατασκευή μέσω του προγράμματος GEO 5 των γεωλογικών αυτών καρότων σε ψηφιακή μορφή. Η [Εικόνα 7.2](#) παρουσιάζει ένα τέτοιο καρότο:



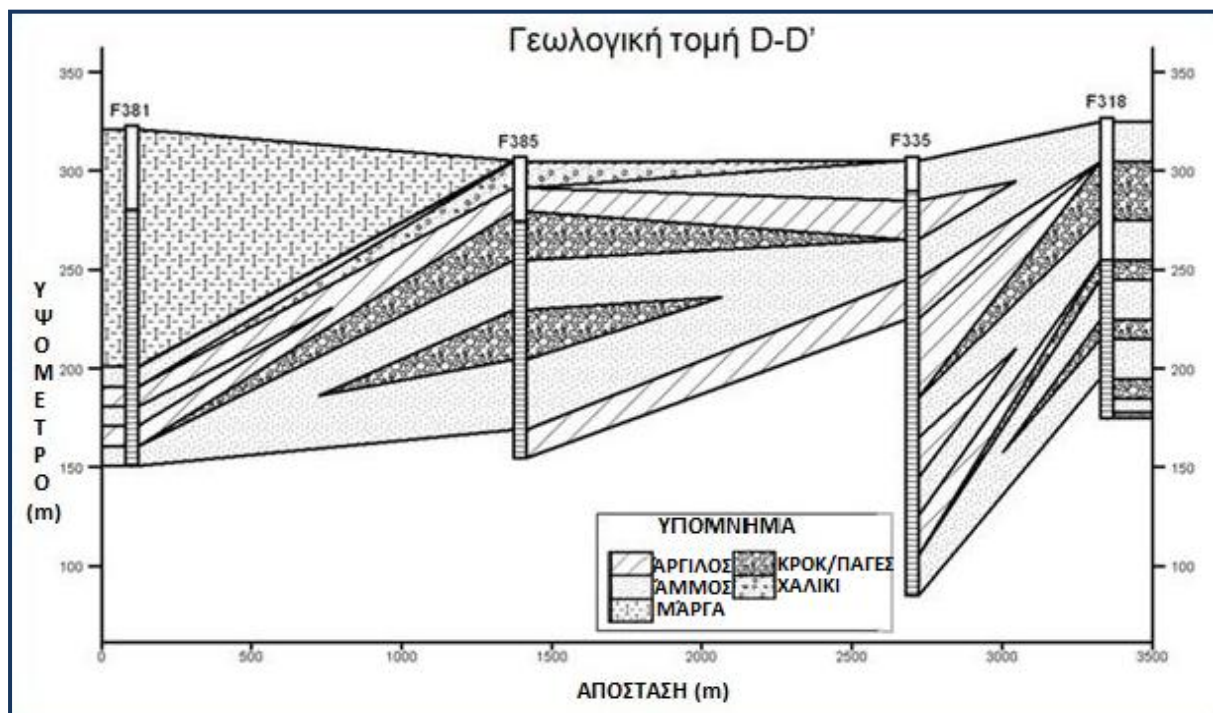
Εικόνα 7.2 Γεωλογικό καρτό γεώτρησης F 168

- Με τη βοήθεια του προγράμματος GEO 5, ενώνονται αυτά τα καρτά, με σκοπό να σχηματιστεί η κάθε τομή η οποία θα έχει τη μορφή της [Εικόνας 7.3](#):

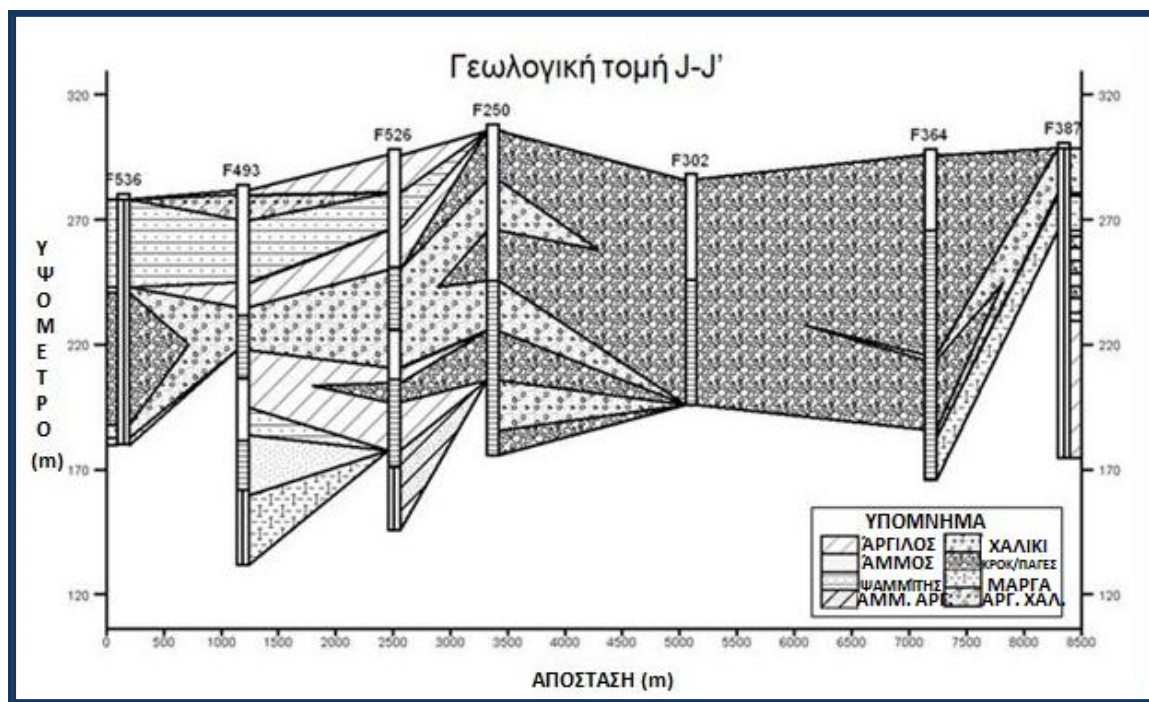


Εικόνα 7.3 Γεωλογική τομή Β-Β'

Στις [Εικόνες 7.4](#) και [7.5](#) φαίνονται οι τομές DD' και JJ' που βρίσκονται εντός της υπό μελέτη περιοχής και μας βοήθησαν κυρίως να εξάγουμε συμπεράσματα για τα εδαφικά στρώματα που θα ενταχθούν στο μοντέλο και τα χαρακτηριστικά τους, με τα οποία θα δοθούν δεδομένα για την υδραυλική αγωγιμότητα:



Εικόνα 7.4 Γεωλογική τομή DD'



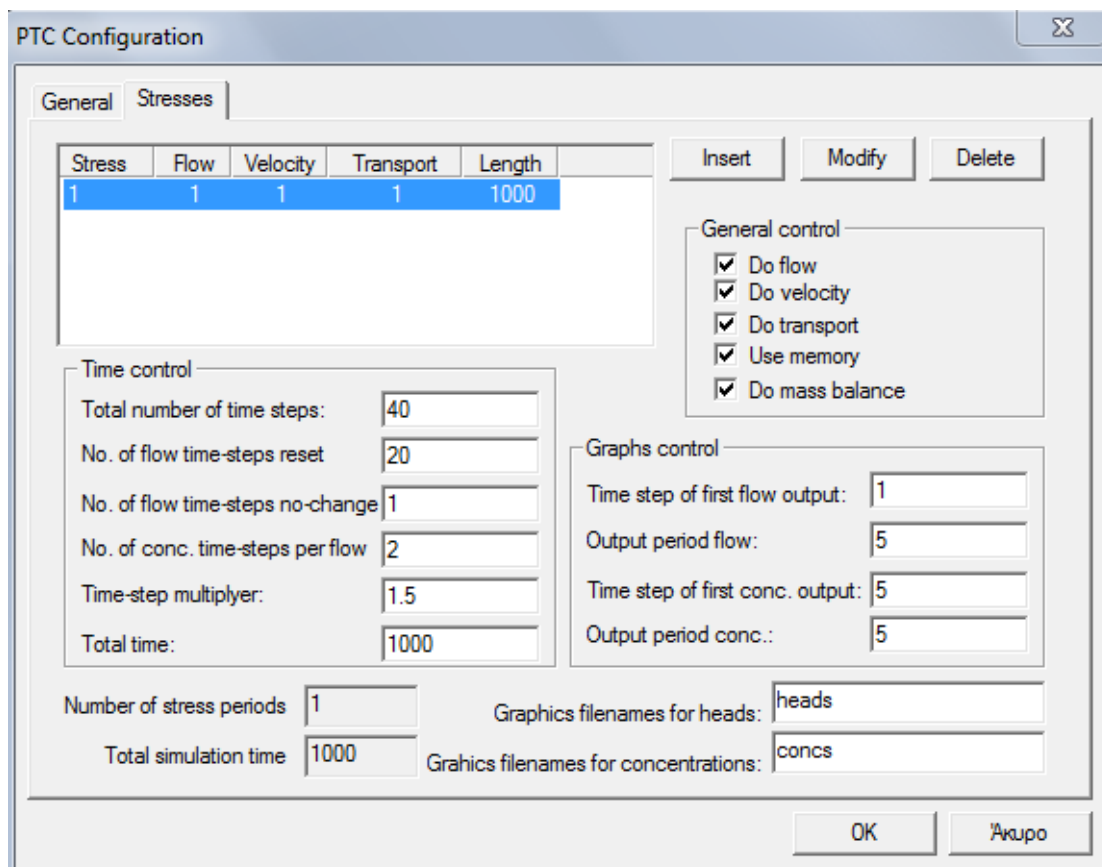
Εικόνα 7.5 Γεωλογική τομή JJ'

Σύμφωνα με τις γεωλογικές τομές, ο υδροφορέας μας θα χωριστεί σε 3 στρώματα (layers). Τα δύο από αυτά, τα βαθύτερα (Layer 1 και Layer 2), θα αποτελούνται από ασβεστόλιθο, για τη διευκόλυνση κατά την μοντελοποίηση και την επεξεργασία των δεδομένων, κα το ανώτερο στρώμα (Layer 3) θα αποτελείται από τα πετρώματα, σύμφωνα με το γεωλογικό χάρτη της περιοχής, όπως δημιουργήθηκε από το GIS.

Για την καλύτερη εφαρμογή του μοντέλου PTC είναι αναγκαία η αλλαγή επιπέδου αναφοράς από τη θάλασσα στον πυθμένα του υπό μελέτη υδροφορέα. Από τις παρατηρήσεις που έγιναν, προκύπτει ότι το βάθος της πιο βαθιάς γεώτρησης βρίσκεται στα 230 m και σε υψόμετρο 59 m. Γι αυτό το σκοπό, το υψόμετρο του κατώτερου στρώματος (Layer 3) ορίστηκε ως μηδέν και το επίπεδο της θάλασσας στα 200 m. Επομένως, στα απόλυτα υψόμετρα των γεωτρήσεων της περιοχής καθώς και στις τιμές του χάρτη των ισοϋψών προστέθηκε η τιμή των 200 m. Σύμφωνα με το καινούργιο επίπεδο αναφοράς, το πάχος του κατώτερου στρώματος (Layer 3) ορίστηκε στα 90-100 m, δηλαδή σε αυτό ανήκουν οι γεωτρήσεις που το βάθος τους φτάνει μέχρι αυτό το όριο, το δεύτερο στρώμα ορίστηκε από τα 100 m έως τα 160 m περίπου, ενώ το τρίτο στρώμα από τα 160 m έως την επιφάνεια του εδάφους.

7.3 Εισαγωγή δεδομένων στο PTC

Για να ξεκινήσει ένα καινούριο μοντέλο PTC μέσω του Argus One, επιλέγεται από τη μπάρα εργαλείων το “PIE’s” και στη συνέχεια “New PTC Project”. Έτσι ανοίγεται ένα παράθυρο διαλόγου, το PTC Configuration, μέσω του οποίου μπορούν να καθοριστούν ο τύπο του πλέγματος (τριγωνικός ή τετραγωνικός), ο αριθμός των layers από τα οποία θα αποτελείται ο υδροφορέας, οι χρονικοί περίοδοι μελέτης (stresses) κ.α. Από την επιλογή Modify δίνεται η δυνατότητα μετατροπής των δεδομένων και τις συνθηκών που καθορίζονται για κάθε χρονική περίοδο, όπως το χρονικό βήμα και το συνολικό αριθμό των βημάτων για κάθε stress όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.6:

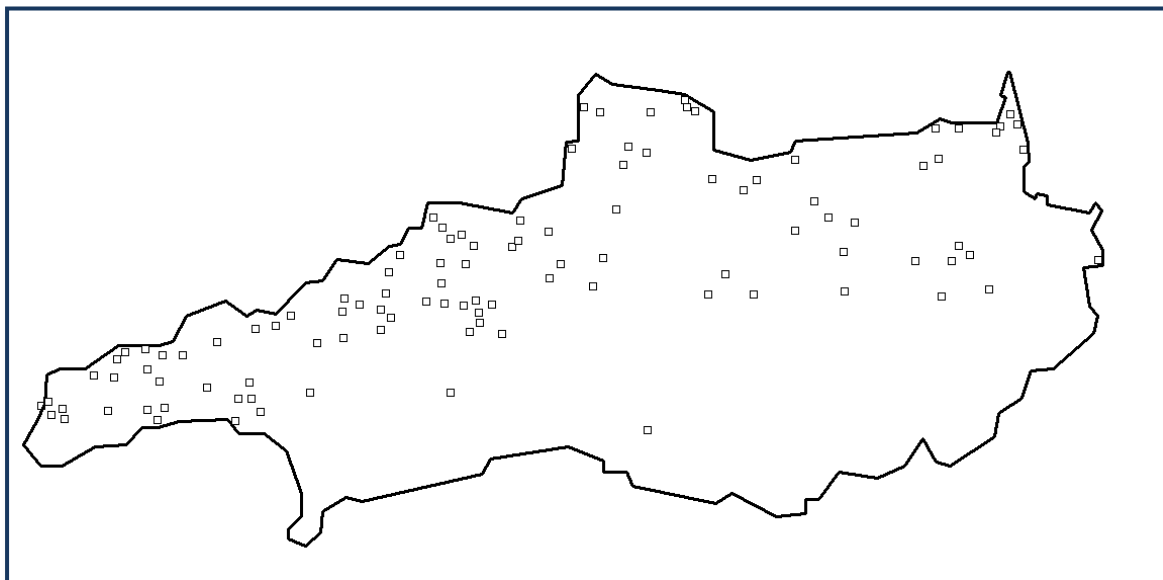


Εικόνα 7.6 PTC Configuration

Για την παρούσα διπλωματική εργασία, επιλέχθηκαν 10 stresses, 5 για τις χειμερινές χρονικές περιόδους και 5 για τις θερινές περιόδους, των 5 χρόνων από το 2003 έως το 2008. Η χειμερινή περίοδος ορίστηκε από τον Οκτώβριο έως τον Απρίλιο και η θερινή από το Μάιο έως το Σεπτέμβριο.

7.4 Περιγραφή περιοχής και κατασκευή πλέγματος

Το περίγραμμα της περιοχής μελέτης, το οποίο βρίσκεται στο layer PTC Domain Outline, σχεδιάστηκε πάνω από το υπάρχον περίγραμμα της λεκάνης απορροής από το layer Basin, ψηφιοποιώντας το χάρτη της περιοχής, ο οποίος υπήρχε σε αρχείο GIS. Στην [Εικόνα 7.7](#) φαίνεται το περίγραμμα της περιοχής μελέτης και οι κουκκίδες που διακρίνονται αποτελούν τα αρχικά σημεία στα οποία υπάρχει πληροφορία για το αντλητικό δυναμικό των γεωτρήσεων.

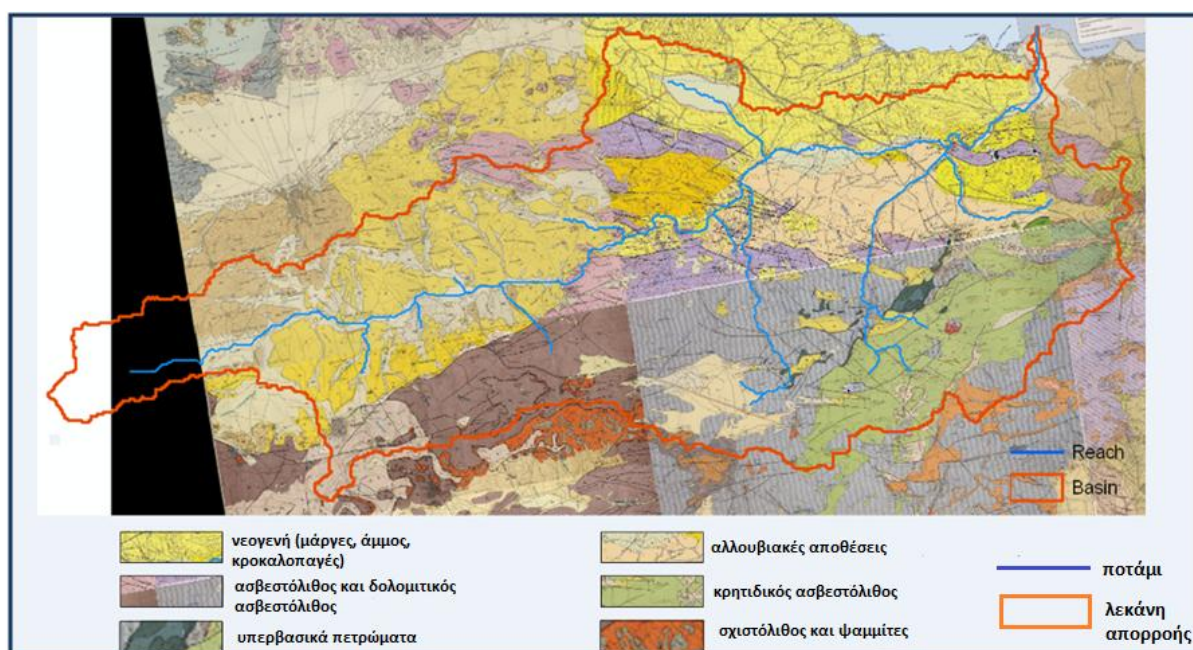


Εικόνα 7.7: Περίγραμμα περιοχής στο PTC Domain Outline

Η κατασκευή του πλέγματος της περιοχής βασίζεται στη θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων. Λόγω της έκτασης της περιοχής και της πληθώρας των στοιχείων, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Argus One με αριθμό στοιχείων 9000, που είναι και ο μέγιστος δυνατός αριθμός που υποστηρίζεται από το πρόγραμμα. Αφού έχουν περαστεί κάποια στοιχεία μέσα στο πρόγραμμα, όπως τα καταγεγραμμένα πηγάδια με τις ακριβείς θέσεις τους και με τα ακριβή υδραυλικά ύψη, όπως επίσης και οι ισοϋψείς γραμμές, έχοντας το περίγραμμα της περιοχής και πηγαίνοντας στο layer PTC Mesh, σχηματίζεται το πλέγμα της περιοχής μελέτης. Στην Εικόνα 7.8 φαίνεται το πλέγμα της λεκάνης του Ασωπού και παρατηρείται ότι σε κάποια σημεία τα στοιχεία είναι πιο πυκνά. Αυτό συμβαίνει διότι σε εκείνα τα σημεία έχουμε πηγάδια τα οποία πιθανώς να αντλούν και η πύκνωση των στοιχείων είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της πτώσης στάθμης με μεγαλύτερη ακρίβεια. Στην Εικόνα 7.8 διακρίνονται και τα πηγάδια για τα οποία έχουμε κάποια καταγεγραμμένη τιμή για το υδραυλικό ύψος (με χρώματα ανάλογα με την τιμή αυτή), τα οποία θα μας βοηθήσουν στη μετέπειτα βαθμονόμηση του μοντέλου.



Στη συνέχεια είναι απαραίτητο να ορισθεί και να περαστεί μέσα στο πρόγραμμα η παράμετρος της υδραυλικής αγωγιμότητας, ώστε να μπορεί να υπολογιστεί η ταχύτητα κίνησης του νερού καθώς και τα υδραυλικά ύψη της περιοχής. Στα δύο κατώτερα επίπεδα, το 1 και το 2, θεωρούμε ότι έχουμε μόνο ασβεστόλιθο ενώ στο επιφανειακό στρώμα ορίζεται η υδραυλική αγωγιμότητα με βάση τους γεωλογικούς σχηματισμούς που παρατηρούνται από τον γεωλογικό χάρτη της περιοχής από το GIS. Οι υδραυλικές αυτές αγωγιμότητες βρέθηκαν από ένα εύρος βιβλιογραφικών πηγών και θεωρήθηκαν ίδιες στις διευθύνσεις x και y , και μίας τάξης μεγέθους μικρότερες στη διεύθυνση z . Οι γεωλογικοί σχηματισμοί της περιοχής φαίνονται στην Εικόνα 7.9:



Εικόνα 7.9 Γεωλογία περιοχής

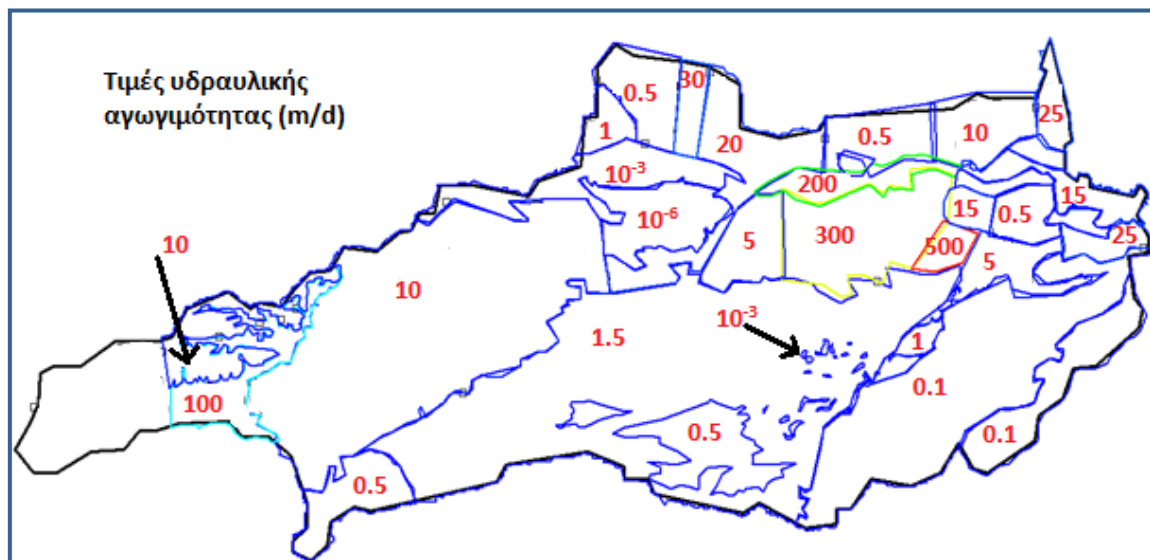
Από τα γεωλογικά πολύγωνα της περιοχής, εκτός από τις τιμές για τις υδραυλικές αγωγιμότητες εξήχθησαν συμπεράσματα και για τις τιμές του πορώδους, που είναι απαραίτητη παράμετρος για τον προσδιορισμό της μεταφοράς του ρυπαντή. Στον Πίνακα 7.1 παρουσιάζονται οι τιμές που εισήχθησαν στο μοντέλο:

Πίνακας 7.1 Σχηματισμοί περιοχής μελέτης και γεωλογικά χαρακτηριστικά

Γεωλογικός Σχηματισμός	Υδραυλική αγωγιμότητα (m/d)			Πορώδες (%)
	K_x	K_y	K_z	
Ασβεστόλιθος	10^{-2}	10^{-2}	10^{-3}	20
Νεογενή	5	5	0.5	30
Αλλουβιακές αποθέσεις	100	100	10	35
Άργιλος	10^{-5}	10^{-5}	10^{-6}	50
Κροκαλοπαγή	10	10	1	25
Υπερβασικά πετρώματα	10^{-3}	10^{-3}	10^{-4}	35
Ψαμμίτης	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	30
Τύρφη	50	50	5	40
Talus Cones	400	400	40	30

Οι τιμές αυτές δεν χρησιμοποιήθηκαν σε ολόκληρη την έκταση του στρώματος με το συγκεκριμένο πέτρωμα. Άλλαζαν κατά μία τάξη μεγέθους περίπου ανάλογα με το αν ήταν επιθυμητή η αύξηση ή η μείωση της ροή του ύδατος και επομένως και του υδραυλικού φορτίου, κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης. Σε κάθε περίπτωση όμως παρέμεναν μέσα στο αντίστοιχο εύρος τιμών που προσδιορίστηκε για κάθε πέτρωμα από τη βιβλιογραφία.

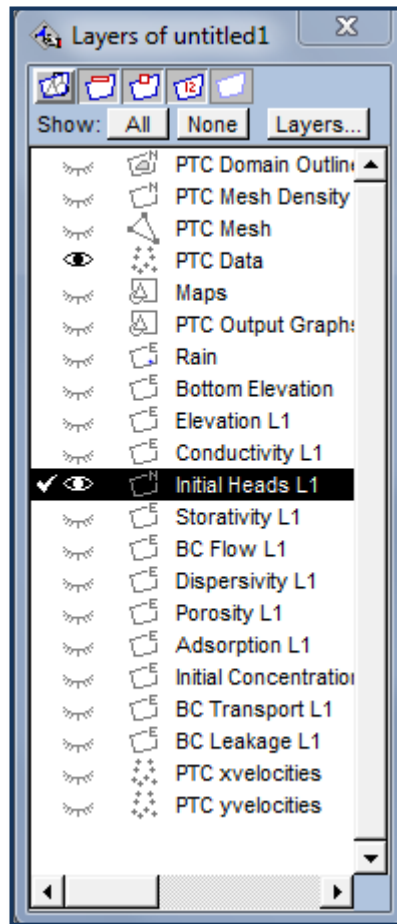
Στην Εικόνα 7.10 διακρίνονται τα γεωλογικά πολύγωνα που εισήχθησαν στο μοντέλο. Έχει γίνει διαχωρισμός κάποιων πολυγώνων σε άλλα μικρότερα με σκοπό να προσομοιαστούν καλύτερα κάποιες τιμές και να υπάρξει καλύτερη κατανομή της ροής, γιατί και στην πραγματικότητα ένα γεωλογικό υλικό δεν έχει σε όλη του την έκταση την ίδια υδραυλική αγωγιμότητα και το ίδιο πορώδες.



Εικόνα 7.10 Πολύγωνα υδραυλικής αγωγιμότητας

7.5 Αρχικές και οριακές συνθήκες

Από την Εικόνα 7.11, που παρουσιάζει τις παραμέτρους του μοντέλου που χρειάζονται για να «τρέξει» το μοντέλο και να εξάγει αποτελέσματα για τη ροή και τη μεταφορά του ρύπου, φαίνεται ότι απαιτούνται κάποιες αρχικές συνθήκες για τα υδραυλικά ύψη και τη συγκέντρωση του ρύπου.



Εικόνα 7.11 Αρχικές παράμετροι μοντέλου

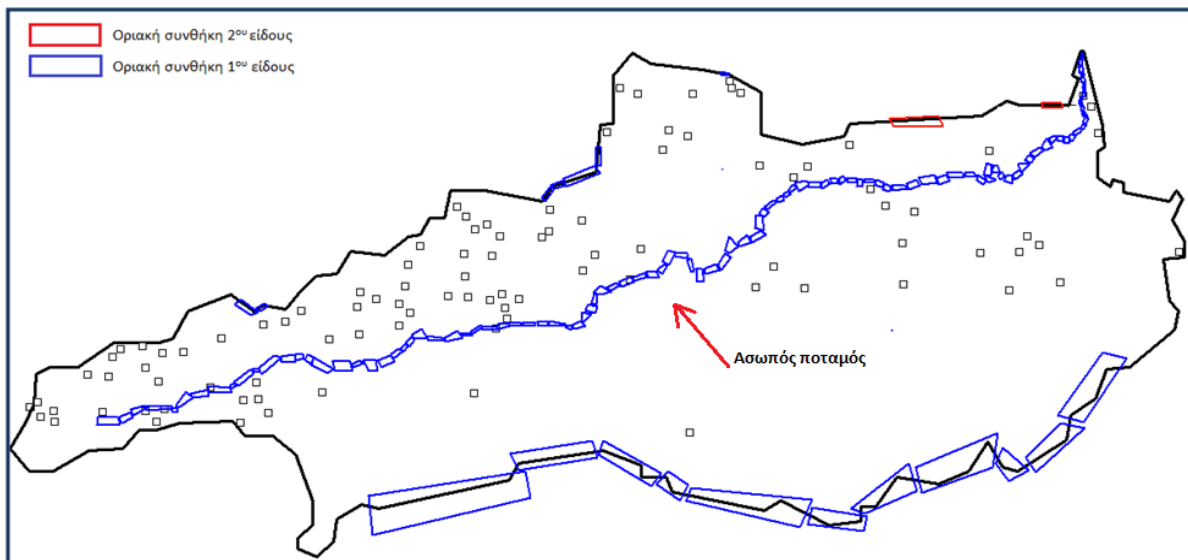
Οι αρχικές συνθήκες για τα υδραυλικά ύψη (Initial Heads) είναι το ακριβές υδραυλικό ύψος σε κάποιο πηγάδι, το οποίο υπολογίζεται από την αφαίρεση του υψόμετρου της γεώτρησης από τη μετρούμενη στάθμη ηρεμίας του πηγαδιού (ή αλλιώς του βάθους στο οποίο εντοπίστηκε το νερό). Για να εισαχθούν στο πρόγραμμα τα στοιχεία των αρχικών υδραυλικών υψών είναι απαραίτητο να προστεθεί η τιμή των 200 m στα υπολογισμένα υδραυλικά ύψη, που, όπως αναλύθηκε και παραπάνω, αποτελεί τη στάθμη της θάλασσας.

Οι αρχικές συνθήκες για τις συγκεντρώσεις του ρύπου, έχουν εισαχθεί με βάση κάποιες μελέτες που έχουν γίνει και έχουν παρατηρηθεί συγκεντρώσεις εξασθενούς χρωμίου σε καθορισμένα σημεία.

Οι οριακές συνθήκες χωρίζονται σε αυτές που ρυθμίζουν την υπόγεια ροή του νερού και σε αυτές που ρυθμίζουν την εξάπλωση της συγκέντρωσης του ρύπου.

- Για τις συνθήκες της ροής, οι οποίες εντάχθηκαν στην επιλογή BC Flow και για τα τρία layers, δημιουργήθηκαν περιφερειακά της περιοχής όρια μέσα από τα

οποία καθοριζόταν η εισροή ή η εκροή ποσότητας ύδατος από τις περιφερειακές πηγές. Αρχικά, οι συνθήκες ορίστηκαν να είναι 2^{ου} είδους (σταθερή ροή) έτσι ώστε να υπάρχει σταθερή εισροή από τους ορεινούς όγκους και τις περιφερειακές πηγές. Λόγω του γεγονότος ότι δεν μπορούσε να επιτευχθεί ικανοποιητική αντιστοίχιση των τιμών του μοντέλου για τα υδραυλικά ύψη με αυτά που ήταν καταγεγραμμένα στο πεδίο, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ένας συνδυασμός συνθηκών 1^{ου} (σταθερό υδραυλικό ύψος) και 2^{ου} είδους. Για τις συνθήκες 2^{ου} είδους θεωρήθηκε ότι έχουμε διαφορετική εισροή ύδατος χειμώνα και καλοκαίρι λόγω της τήξης του χιονιού και της βροχόπτωσης. Παρατηρήθηκε όμως ότι, λόγω της έκτασης της περιοχής και του μικρού διαστήματος για το οποίο μελετάται η κίνηση του νερού και του ρύπου (5 χρόνια), δεν μπορούν να εξαχθούν ικανοποιητικές τιμές για το υδραυλικό ύψος που θέλουμε να προσεγγίσουμε σε όλα τα καθορισμένα σημεία. Στη συνέχεια λοιπόν, προτιμήθηκαν για εκείνες τις περιοχές τις οποίες δεν μπορούσαμε να βαθμονομήσουμε ικανοποιητικά, να χρησιμοποιηθούν συνθήκες 1^{ου} είδους. Με αυτές, γινόταν έλεγχος του υδραυλικού ύψους των γεωτρήσεων που βρισκόταν πιο κοντά στη συνθήκη και η τιμή που έπαιρνε η συνθήκη ήταν λίγο μικρότερη η μεγαλύτερη από το ζητούμενο υδραυλικό ύψος ανάλογα με την κίνηση του ύδατος. Η διαφορά της τιμής ανάλογα την εποχή διέφερε κατά 0,5 m, λόγω του ότι το καλοκαίρι δεν υπάρχουν βροχοπτώσεις και εντείνεται η άντληση, επομένως το υδραυλικό ύψος μειώνεται. Τέλος, σαν οριακή συνθήκη 1^{ου} είδους ορίστηκε και το ποτάμι, στο οποίο, ανάλογα με το υψόμετρο σε κάθε σημείο, δόθηκε σε κάθε συνθήκη μία τιμή που θα μπορούσε να προσεγγίσει την τιμή του υδραυλικού ύψους στην πιο κοντινή γεώτρηση. Στην Εικόνα 7.12 φαίνονται αυτές οι συνθήκες και η ακριβής τοποθεσία τους:

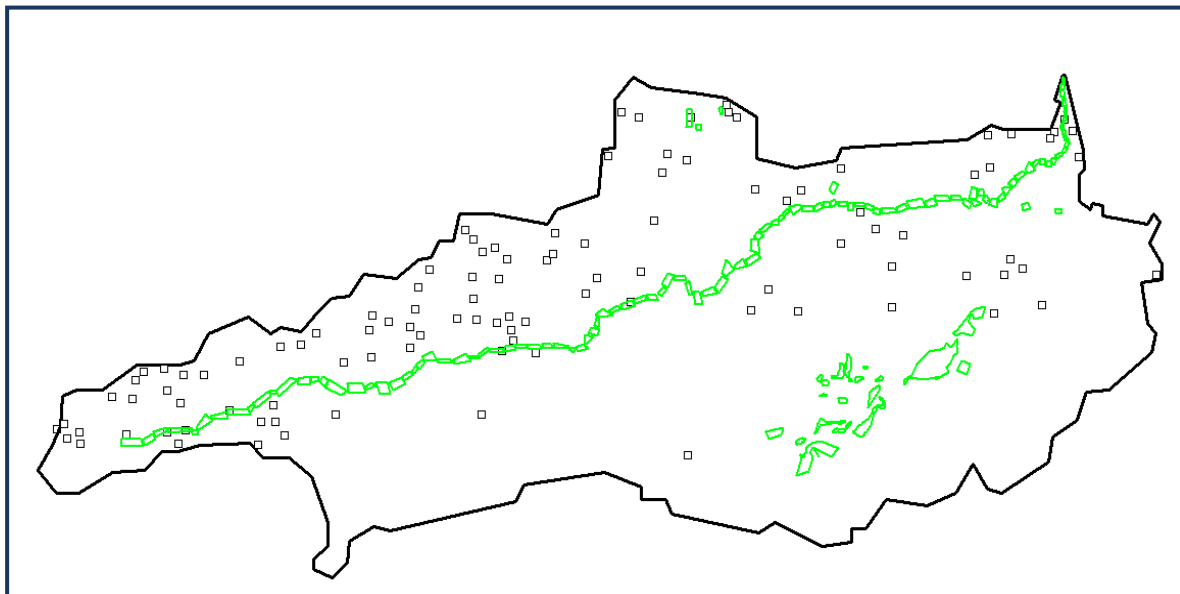


Εικόνα 7.12 Οριακές συνθήκες ροής υπόγειου ύδατος

- Για τις οριακές συνθήκες της μεταφοράς του ρύπου, οι οποίες εντάχθηκαν στην επιλογή BC Transport, γνωρίζουμε ήδη ότι η ρύπανση της υπό μελέτη περιοχής προέρχεται είτε από το πέτρωμα του σερπεντινίτη, είτε από την ανθρωπογενή προέλευση λόγω των βιομηχανιών. Οι πηγές της γηγενούς ρύπανσης εντοπίζονται με τη βοήθεια του γεωλογικού χάρτη της περιοχής ανάλογα με τα σημεία στα οποία εντοπίζονται υπερβασικά πετρώματα. Από εργαστηριακές αναλύσεις σε δείγματα που περιέχουν σερπεντινίτη, έχει εξαχθεί ότι η ποσότητα του χρωμίου που μπορεί να περάσει στο νερό από το πέτρωμα κυμαίνεται από 100 έως 170 $\mu\text{g/L}$ (Moraetis et al., 2012). Αυτές οι πηγές θεωρούνται ότι βρίσκονται στο ανώτερο και στο μεσαίο στρώμα που διαβαθμίζεται η περιοχή. Ως πηγές της ανθρωπογενούς ρύπανσης ορίζονται, το ποτάμι το οποίο ρυπαίνεται από τις βιομηχανίες, καθώς και κάποια σημεία στα οποία γνωρίζουμε ότι υπάρχουν βιομηχανίες οι οποίες ρυπαίνουν το υπέδαφος. Για παράδειγμα, στην περιοχή των Οινοφύτων εντοπίζεται σε μία γεώτρηση συγκέντρωση εξασθενούς χρωμίου περίπου 3000 $\mu\text{g/L}$, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι στη συγκεκριμένη περιοχή υπάρχει τοπική παρέμβαση του ανθρώπου στη ρύπανση.

Όλες οι συνθήκες για τη μεταφορά του ρύπου είναι 1^{ου} είδους, μιας και πρέπει να χρησιμοποιηθούν τέτοιες συνθήκες που να μπορούν να προσεγγιστούν σταθερές και δεδομένες συγκεντρώσεις του ρύπου. Οι

συνθήκες του ποταμού παίρνουν τιμές ανάλογα με την τιμή της συγκέντρωσης που θέλουν να προσεγγίσουν, ενώ οι τιμές για το πέτρωμα είναι μέσα στα όρια που έχουν εντοπιστεί από τις αναλύσεις. Στην Εικόνα 7.13 φαίνονται τα σημεία στα οποία έχουν τοποθετηθεί τέτοιες συνθήκες:



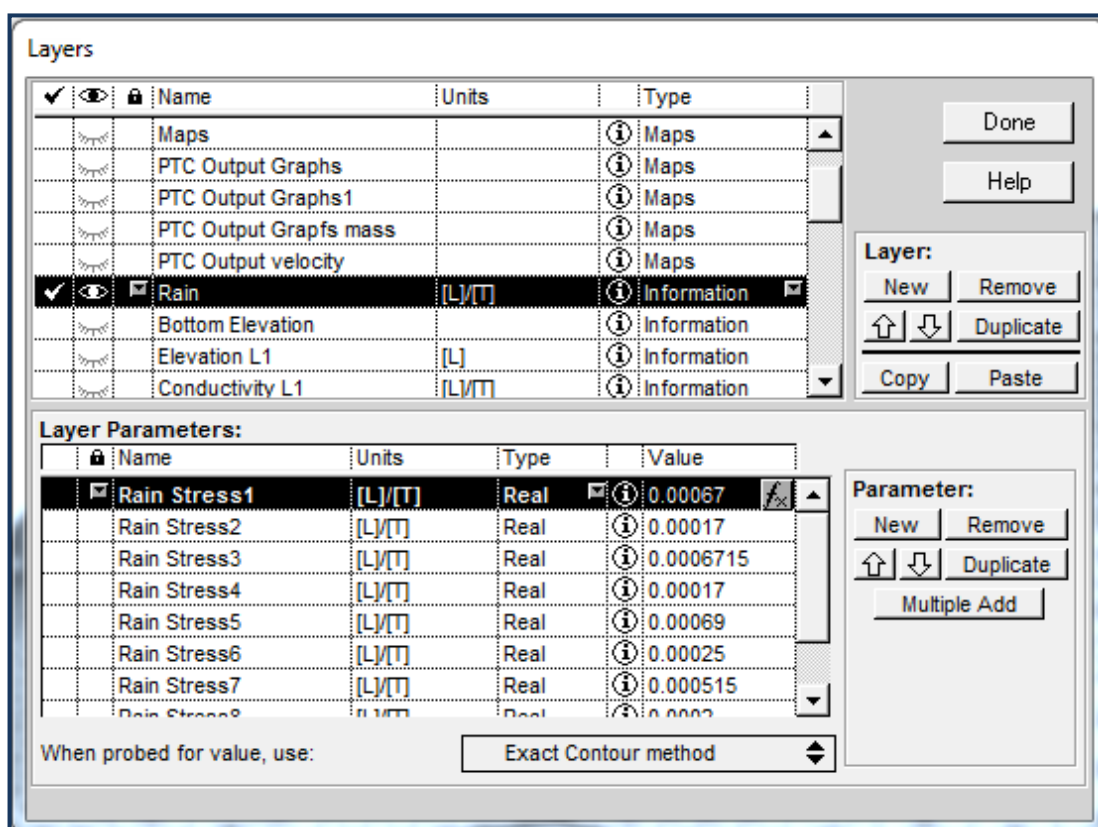
Εικόνα 7.13 Οριακές συνθήκες μεταφοράς ρύπου

7.6 Βροχόπτωση

Για τα δεδομένα της βροχόπτωσης, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας από τον μετεωρολογικό σταθμό της Θίβης, ο οποίος είναι ο μόνος σταθμός που μας δίνει μετρήσεις βροχόπτωσης για τα επιθυμητά έτη μελέτης, 2003 έως 2008. Τα αντίστοιχα δεδομένα έχουν ήδη παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 6, σχετικά με τα βροχομετρικά και κλιματολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης. Από τα αποτελέσματα αυτού του σταθμού προκύπτει ότι το ποσοστό της βροχόπτωσης παρουσιάζει μία πτώση με το πέρασμα των χρόνων.

Από τα γεωλογικά δεδομένα της περιοχής προκύπτει ότι στο μεγαλύτερο της μέρος καλύπτεται από νεογενή πετρώματα και ασβεστόλιθο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να θεωρείται ότι από την ετήσια βροχόπτωση ένα ποσοστό 30% αυτής διηθείται στον υπόγειο υδροφόρα και το υπόλοιπο είτε να απορρέει σαν επιφανειακά νερά είτε να απομακρύνεται με τις διαδικασίες της εξάτμισης και της

διαπνοής. Στην Εικόνα 7.14 παρουσιάζεται μία εικόνα του μοντέλου για το αντίστοιχο layer της βροχόπτωσης και τον τρόπο που εισήχθησαν τα δεδομένα:



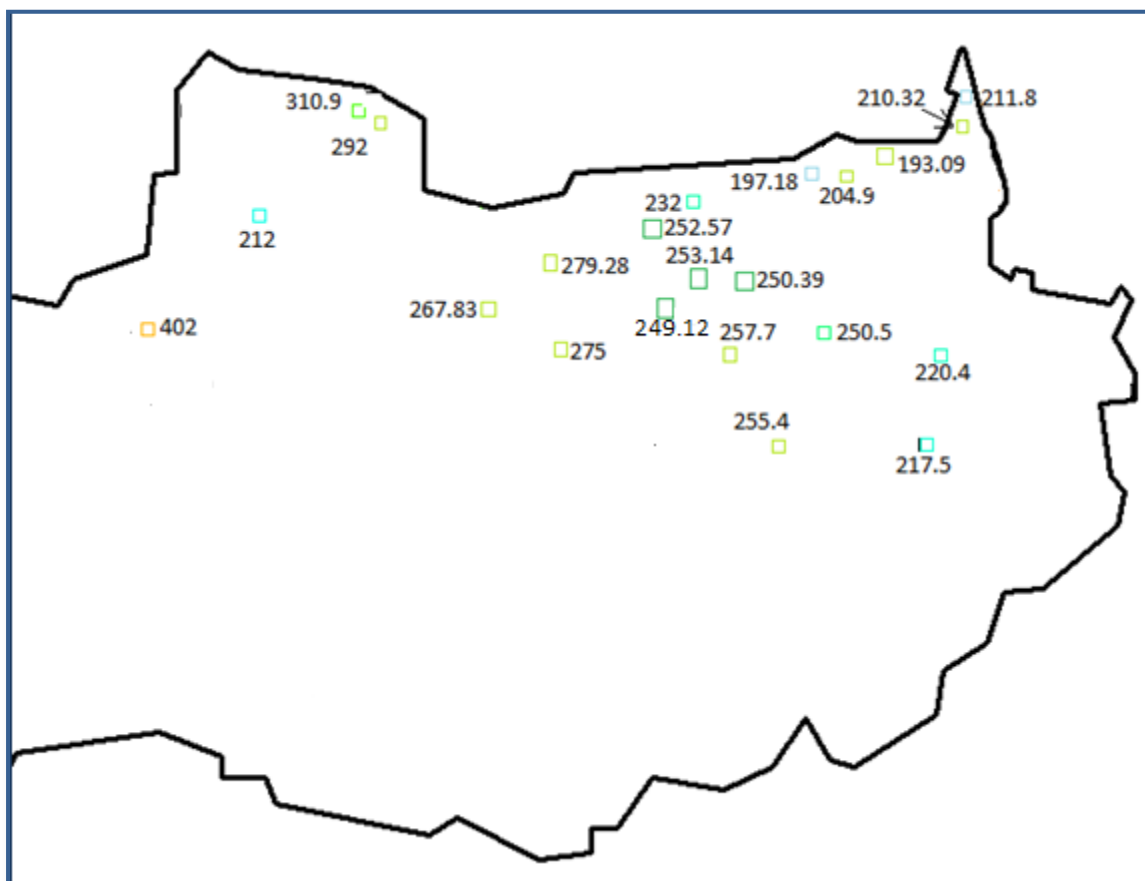
Εικόνα 7.14 Εισαγωγή δεδομένων βροχόπτωσης

7.7 Βαθμονόμηση μοντέλου

Η βαθμονόμηση αποτελεί μία διαδικασία σύγκρισης των δεδομένων που εισάγονται στο μοντέλο με αυτά που λαμβάνονται από το πεδίο. Έτσι, μετά την εισαγωγή των παραπάνω δεδομένων στο μοντέλο, πραγματοποιείται η βαθμονόμηση του, με σκοπό την αποφυγή λαθών και την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων για τις μελλοντικές μελέτες. Η βαθμονόμηση γίνεται αρχικά για τη ροή του υπόγειου ύδατος και στη συνέχεια για τη μεταφορά του ρύπου.

- Η βαθμονόμηση του μοντέλου για την υπόγεια ροή του νερού πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας δεδομένα για το υδραυλικό ύψος. Υπάρχουν δεδομένα για πάρα πολλές γεωτρήσεις σε όλη την έκταση της περιοχής αλλά δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλες για να επιτευχθεί ικανοποιητική βαθμονόμηση. Έτσι έχουν επιλεγεί κάποιες γεωτρήσεις οι οποίες καλύπτουν όλη την έκταση της περιοχής

και δίδουν ικανοποιητικά αποτελέσματα στο μοντέλο. Αυτές φαίνονται στην Εικόνα 7.15:



Εικόνα 7.15 Γεωτρήσεις παρατηρήσεων υδραυλικού ύψους

Ο παρακάτω Πίνακας 7.2 παρουσιάζει τις γεωτρήσεις αυτές με τα αντίστοιχα υδραυλικά ύψη του μοντέλου και του πεδίου, καθώς και τη μεταξύ τους διαφορά:

Πίνακας 7.2 Τιμές υδραυλικών υψών πεδίου και μοντέλου

Αριθμός γεώτρησης	Τιμή υδραυλικού ύψους πεδίου (m)	Τιμή υδραυλικού ύψους μοντέλου (m)	Διαφορά (m)
1	310,9	308,7	2,2
2	292	297,8	5,8
3	232	249,7	17,7
4	204,9	200,2	4,7
5	210,32	215,4	5,08
6	217,5	218,4	0,9
7	402	405	3

8	250,5	253,2	2,7
9	212	240,7	28,7
10	267,83	275,5	7,67
11	255,4	251,2	4,2
12	257,7	255,8	1,9
13	220,4	226,2	5,8
14	275	263,5	11,5
15	279,28	282,5	3,22
16	193,09	191,8	1,29
17	211,8	214,6	2,8
18	197,18	199,2	2,02
19	250,39	258,6	8,21
20	253,14	257,9	4,76
21	249,12	258,5	9,38
22	252,57	258,5	5,93

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι η βαθμονόμηση του μοντέλου είναι ικανοποιητική αφού δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στα υδραυλικά ύψη μεταξύ των τιμών του πεδίου και του μοντέλου στις περισσότερες περιπτώσεις.

Για να διαπιστωθεί αυτό και με μαθηματικές μεθόδους, εφαρμόστηκε ο τύπος του RMSE (Root Mean Square Error), με τη βοήθεια του οποίου υπολογίζεται το σφάλμα που εμφανίζει το μοντέλο σε σχέση με τις παρατηρήσεις του πεδίου:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_{field} - H_{model})^2}{n}}$$

όπου,

H_{field} , οι τιμές συγκέντρωσης που έχουν καταγραφεί στο πεδίο (m)

H_{model} , οι τιμές συγκέντρωσης που έχουν εξαχθεί από το μοντέλο (m)

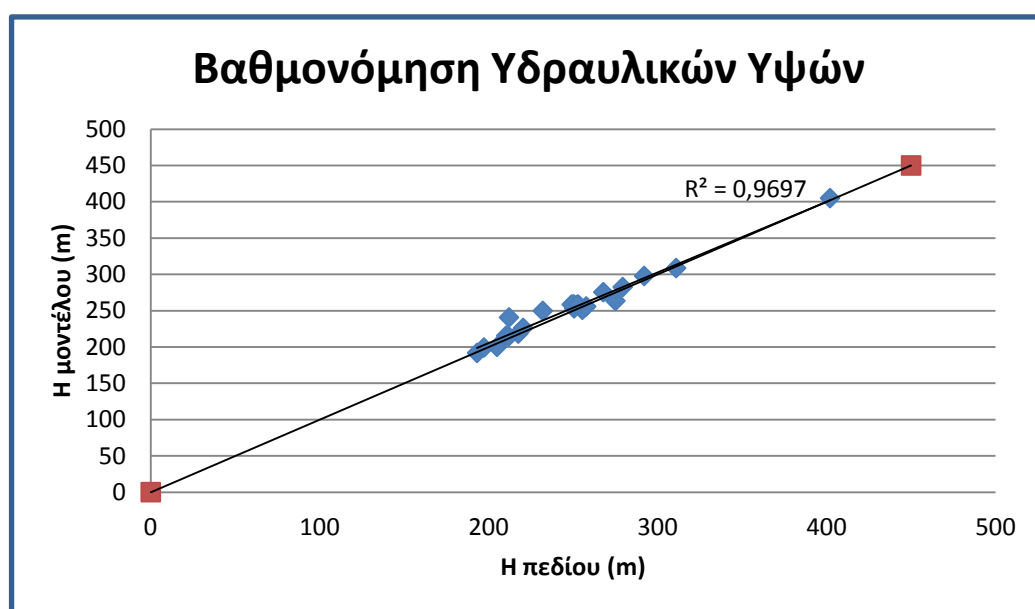
n , το πλήθος των παρατηρήσεων

Είναι φανερό ότι αυτός ο δείκτης θα έχει μονάδες μέτρησης ίδιες με την μελετώμενη παράμετρο. Επομένως, με βάση τις τιμές του Πίνακα 2, υπολογίζεται:

$$RMSE = 8.85\text{m}$$

Η τιμή θεωρείται ικανοποιητική λόγω της μεγάλης έκτασης της περιοχής και της δυσκολίας να βαθμονομηθεί το μοντέλο με πληθώρα δεδομένων και σε τόσο μεγάλη κλίμακα.

Ο άλλος τρόπος για να εξαγεις συμπεράσματα σχετικά με την σωστή βαθμονόμηση που έχει πετύχει το μοντέλο είναι με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Το σχετικό γράφημα που παρουσιάζει αυτήν την προσομοίωση φαίνεται στο Γράφημα 1:

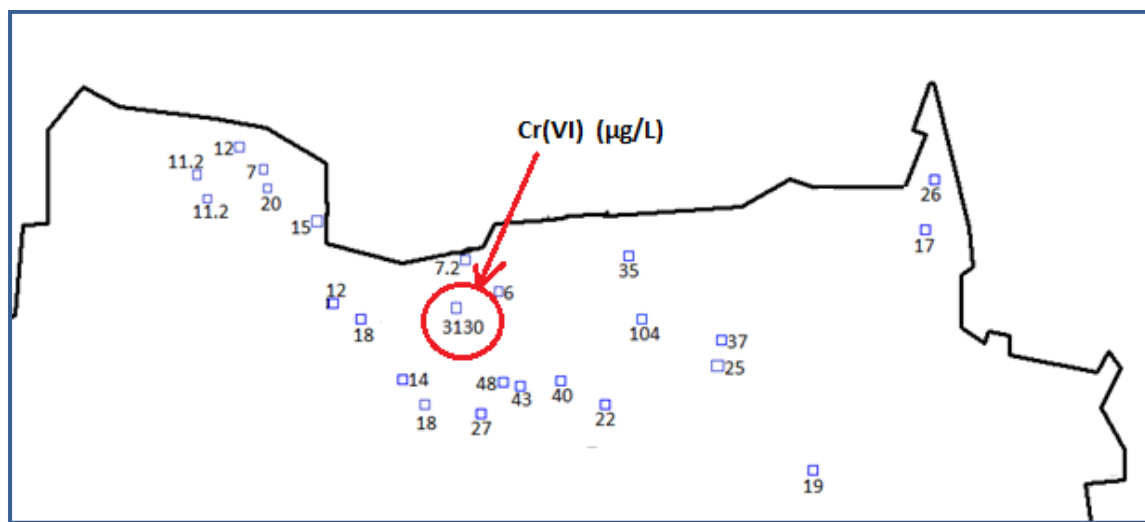


Γράφημα 1 Βαθμονόμηση Υδραυλικών Υψών

Όπως παρατηρείται από το παραπάνω γράφημα (Γράφημα 1), ο παράγοντας R^2 είναι αρκετά κοντά στη μονάδα, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι η προσομοίωση που πετυχαίνει το μοντέλο είναι ικανοποιητική.

Υπάρχουν κάποιες γεωτρήσεις όμως που παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση από την τιμή του πεδίου. Αυτές βρίσκονται στην περιοχή των Οινοφύτων και της Θήβας και μπορούν να αποτελέσουν αποκλειστικό αντικείμενο μελέτης μοντελοποίησης της υπόγεια ροής σε μοντέλο μικρότερης κλίμακας.

- Η βαθμονόμηση του μοντέλου για τη μεταφορά της μάζας του χρωμίου έγινε λαμβάνοντας υπ' όψιν τις δεδομένες συγκεντρώσεις που έχουν εντοπιστεί στο πεδίο. Και στην περίπτωση της συγκέντρωσης του χρωμίου υπάρχουν πολλές γεωτρήσεις με δεδομένα πεδίου, έτσι επιλέγεται να παρατηρηθούν κάποιες από αυτές για την βαθμονόμηση του μοντέλου που να καλύπτουν πάλι όλη την έκταση της περιοχής και αυτές φαίνονται στην Εικόνα 7.16:



Εικόνα 7.16 Γεωτρήσεις παρατηρήσεων Cr(VI)

Ο παρακάτω Πίνακας 7.3 παρουσιάζει τον αριθμό των γεωτρήσεων, τις τιμές της συγκέντρωσης του πεδίου και του μοντέλου καθώς και η μεταξύ τους διαφορά:

Πίνακας 7.3 Τιμές συγκεντρώσεων χρωμίου πεδίου και μοντέλου

Αριθμός γεώτρησης	Τιμή συγκέντρωσης χρωμίου πεδίου (μg/L)	Τιμή συγκέντρωσης χρωμίου μοντέλου (μg/L)	Διαφορά (μg/L)
1	26	32	6
2	17	22	5
3	37	30	7
4	25	31	6
5	19	28	9
6	35	29	6
7	104	100	4

8	22	30	8
9	40	46	6
10	43	49	6
11	48	36	12
12	27	21	6
13	6	18	12
14	7,2	15	7,8
15	18	22	4
16	14	17	3
17	18	17	1
18	12	14	2
19	15	13	2
20	20	13	7
21	7	13	6
22	12	13	1
23	11,2	13	1,8
24	11,2	15	3,8
25	3130	359	2771

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι η βαθμονόμηση του μοντέλου για τη μεταφορά του χρωμίου είναι πολύ ικανοποιητική μιας και η μέγιστη διαφορά μεταξύ των συγκεντρώσεων του πεδίου και του μοντέλου είναι στα 12 μg/L.

Για να διαπιστωθεί αυτό και με μαθηματικές μεθόδους, εφαρμόστηκε ο τύπος του RMSE (Root Mean Square Error), όπως και στην περίπτωση των υδραυλικών υψών:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_{field} - C_{model})^2}{n}}$$

όπου,

C_{field} , οι τιμές συγκέντρωσης που έχουν καταγραφεί στο πεδίο (μg/L)

C_{model} , οι τιμές συγκέντρωσης που έχουν εξαχθεί από το μοντέλο (μg/L)

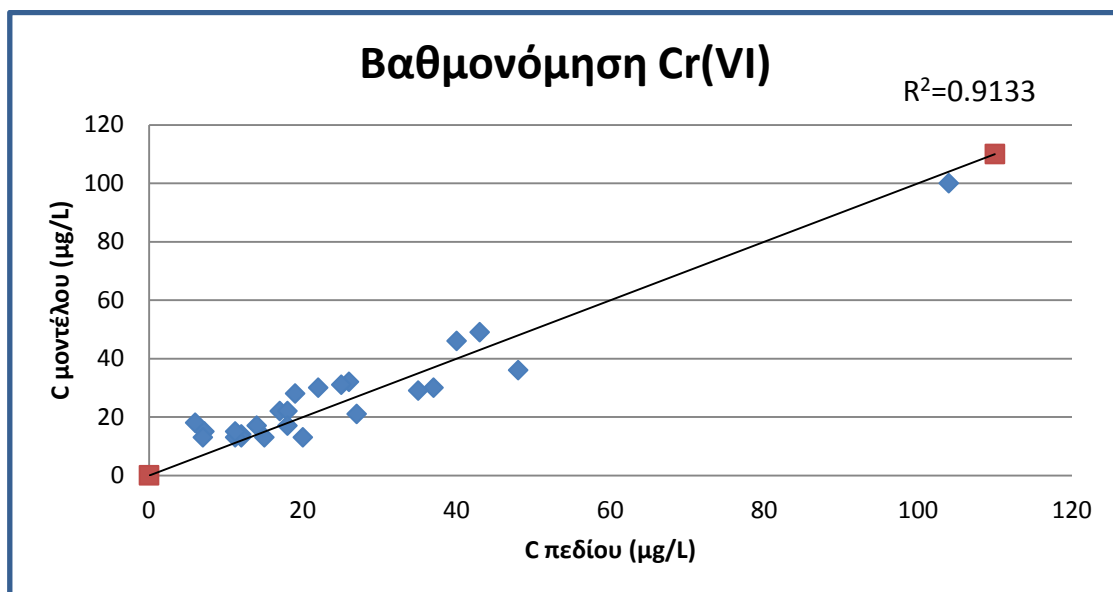
n , το πλήθος των παρατηρήσεων

Με βάση τις τιμές του Πίνακα 3, υπολογίζεται:

$$RMSE = 6.25 \mu g/L$$

Η τιμή θεωρείται ικανοποιητική διότι η ποσότητα των 6 μg είναι αμελητέα, όταν ασχολούμαστε με συγκέντρωση.

Αν εφαρμοστεί η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων για να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την σωστή βαθμονόμηση που έχει πετύχει το μοντέλο προκύπτει το παρακάτω Γράφημα 2:



Γράφημα 2 Βαθμονόμηση Συγκέντρωσης Cr(VI)

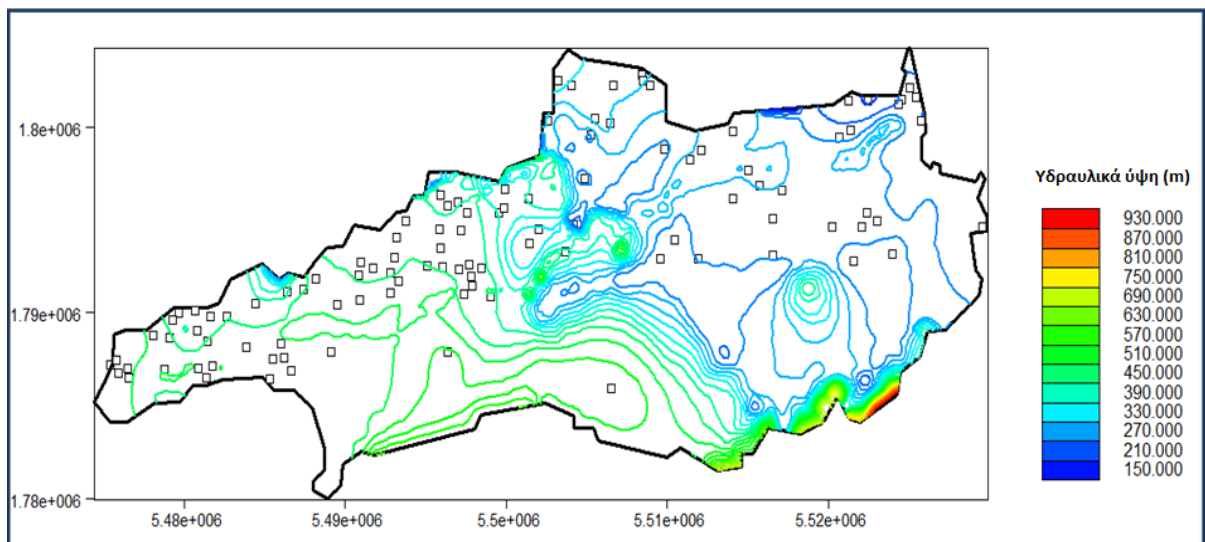
Όπως παρατηρείται η τιμή του R^2 που καταδεικνύει πόσο καλά προσομοιάζεται το μοντέλο, είναι αρκετά κοντά στη μονάδα, πράγμα το οποίο φανερώνει την αρκετά ικανοποιητική βαθμονόμηση του μοντέλου.

Υπάρχει όμως μια καταγεγραμμένη συγκέντρωση χρωμίου, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7.16, η οποία εντοπίζεται στην περιοχή των Οινοφύτων, η οποία είναι πολύ παραπάνω από το επιτρεπτό όριο. Η διαφορά της συγκέντρωσης που έχει εντοπιστεί στο πεδίο με εκείνη που υπολογίστηκε από το μοντέλο ανέρχεται στα 2771 μg/L. Είναι εμφανές ότι στην συγκεκριμένη περιοχή υπάρχει μία άλλη πηγή ρύπανσης του υπόγειου υδροφορέα και όχι από τα επιφανειακά νερά του ποταμού που

οδηγούνται προς τα υπόγεια ύδατα. Γι' αυτό το λόγο πολύ κοντά στη συγκεκριμένη γεώτρηση έχει τοποθετηθεί μία οριακή συνθήκη με σκοπό να επιτευχθεί η προσομοίωση του μοντέλου. Η τιμή που δόθηκε στην οριακή συνθήκη είναι 8000 $\mu\text{g/L}$, αλλά όπως παρατηρείται δεν παρουσιάζει κάποια σημαντική προσέγγιση η τιμή του μοντέλου με εκείνη που παρατηρήθηκε στο πεδίο πιθανώς λόγω της μικρής περιόδου προσομοίωσης και της γεωλογίας της συγκεκριμένης περιοχής. Η συγκεκριμένη περιοχή χαρακτηρίζεται βιομηχανική, οπότε το μόνο που μπορεί να εξαχθεί ως συμπέρασμα είναι, ότι κάποιες βιομηχανίες πιθανόν να ρυπαίνουν απευθείας τον υπόγειο υδροφορέα. Αυτό θα πρέπει να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής μελέτης, λόγω του ότι η περιοχή είναι κατοικήσιμη και θα υπάρξουν επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.

Αποτελέσματα μοντελοποίησης

Από τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου στη λεκάνη απορροής του Ασωπού ποταμού γίνεται αντιληπτό ότι οι τιμές των υδραυλικών υψών της περιοχής ακολουθούν τη ροή που περιμέναμε με βάση τις πλευρικές εισροές και εκροές που δέχεται η περιοχή. Οι ανώτερες τιμές εντοπίζονται στο νοτιο-ανατολικό άκρο της περιοχής όπου υπάρχουν και ορεινοί όγκοι από τους οποίους ρέει νερό προς τις καταγεγραμμένες γεωτρήσεις. Στην Εικόνα 8.1 παρουσιάζεται το γράφημα των υδραυλικών υψών που εξήχθη έπειτα από τη βαθμονόμηση του μοντέλου. Υπενθυμίζεται ότι οι τιμές των υδραυλικών υψών που παρουσιάζονται στην Εικόνα 8.1 είναι προσαυξημένες κατά 200 m, λόγω αλλαγής επιπέδου αναφοράς.

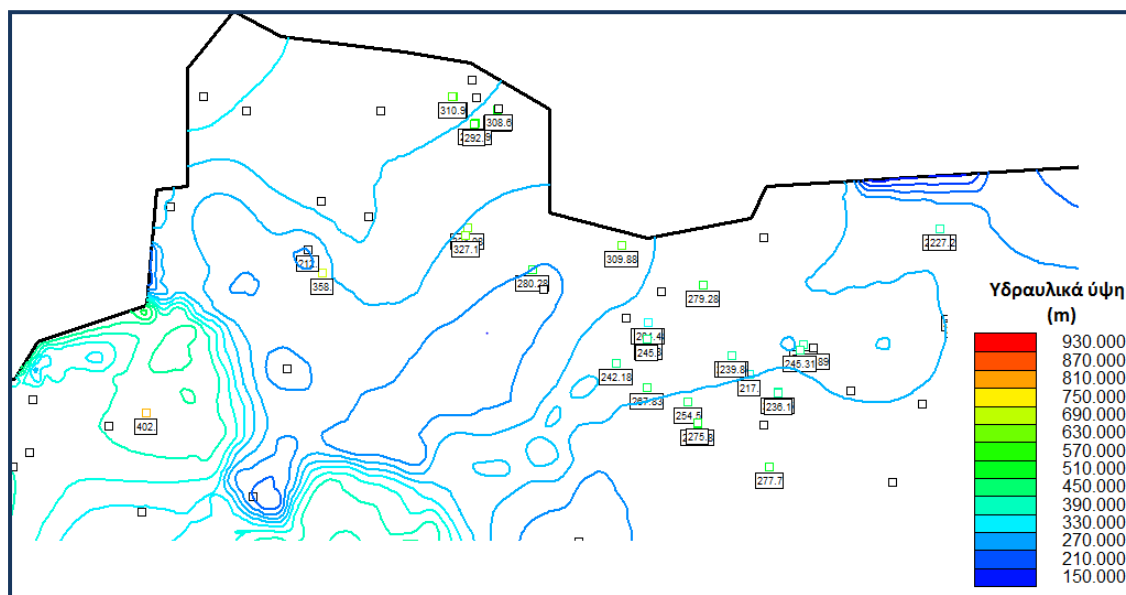


Εικόνα 8.1 Γράφημα υδραυλικών υψών

Παρατηρείται ότι στο νοτιοανατολικό τμήμα της λεκάνης, το οποίο βρίσκεται κοντά σε ορεινό όγκο, τα υδραυλικά ύψη αλλάζουν πολύ απότομα, μιας και οι ισοδυναμικές γραμμές είναι πολύ πυκνές και το εύρος του είναι πολύ μεγάλο, από 330 έως 930 m. Στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης, οι ισοδυναμικές γραμμές κυμαίνονται σε μικρότερο εύρος, μεταξύ 270 και 570 m και αυτό συμβαίνει γιατί κεντρικά τοποθετείται ο ποταμός Ασωπός, επομένως δεν είναι δυνατή η μεγάλη διαβάθμιση. Στο βορειοανατολικό κομμάτι της λεκάνης τα υδραυλικά ύψη μειώνονται σημαντικά (150-330 m) λόγω του ότι βρισκόμαστε πλέον πιο κοντά στο επίπεδο της θάλασσας, όπως αναλύεται στη συνέχεια. Οι τιμές των υδραυλικών κάτω των 200 m οφείλονται

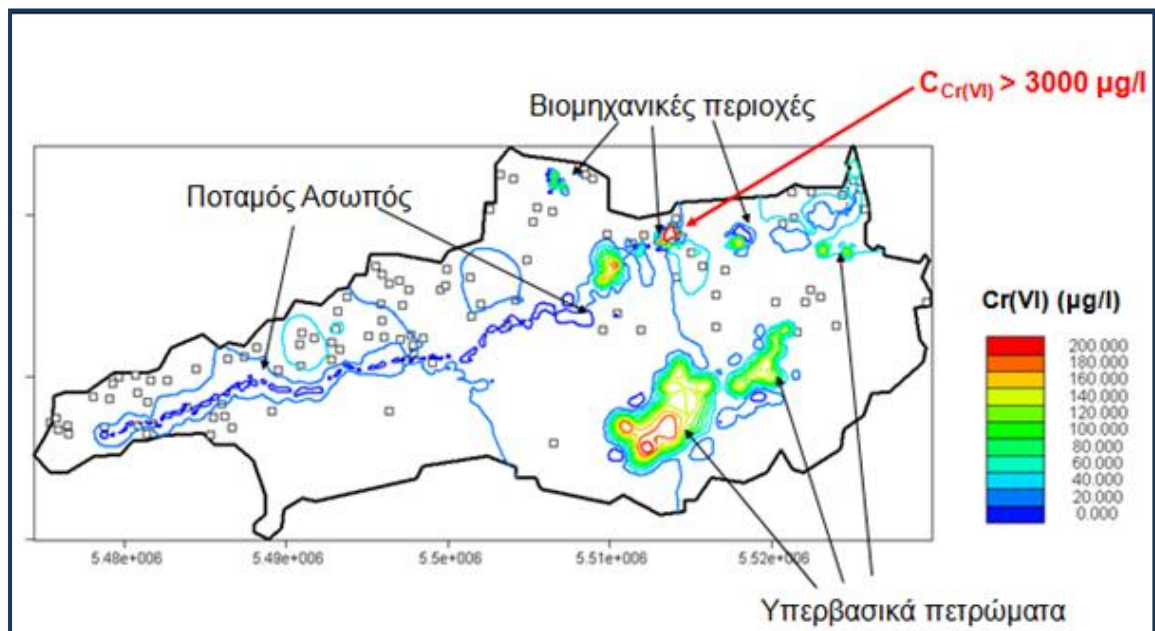
σε συνθήκες άντλησης γεωτρήσεων που βρίσκονται πολύ κοντά στο επίπεδο της θάλασσας.

Επειδή το μεγάλο πρόβλημα της ρύπανσης υφίσταται σε ένα συγκεκριμένο σημείο, κοντά στην περιοχή των Οиноφύτων, το επόμενο γράφημα με τα υδραυλικά ύψη έχει επικεντρωθεί σε εκείνη την περιοχή για να μελετηθούν τα υδραυλικά ύψη της περιοχής αυτής. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 8.2 το νερό κινείται προς τα βόρεια της περιοχής.



Εικόνα 8.2 Γράφημα υδραυλικών υψών βόρεια του ποταμού

Όσον αφορά τις συγκεντρώσεις του χρωμίου που υπάρχουν σε όλη τη λεκάνη απορροής, παρατηρείται ότι η εξάπλωση της ρύπανσης είναι πολύ δύσκολο να παρατηρηθεί σε όλη την έκταση της περιοχής λόγω του μικρού διαστήματος για το οποίο προσομοιώνεται η περιοχή μέσω του μοντέλου (5 έτη). Η Εικόνα 8.3 δίνει μια ένδειξη για την εξάπλωση της ρύπανσης η οποία έχει παρασταθεί σε διαφορετική κλίμακα για να μπορούν να εντοπιστούν όλα τα σημεία της λεκάνης στα οποία εξαπλώνεται η ρύπανση:

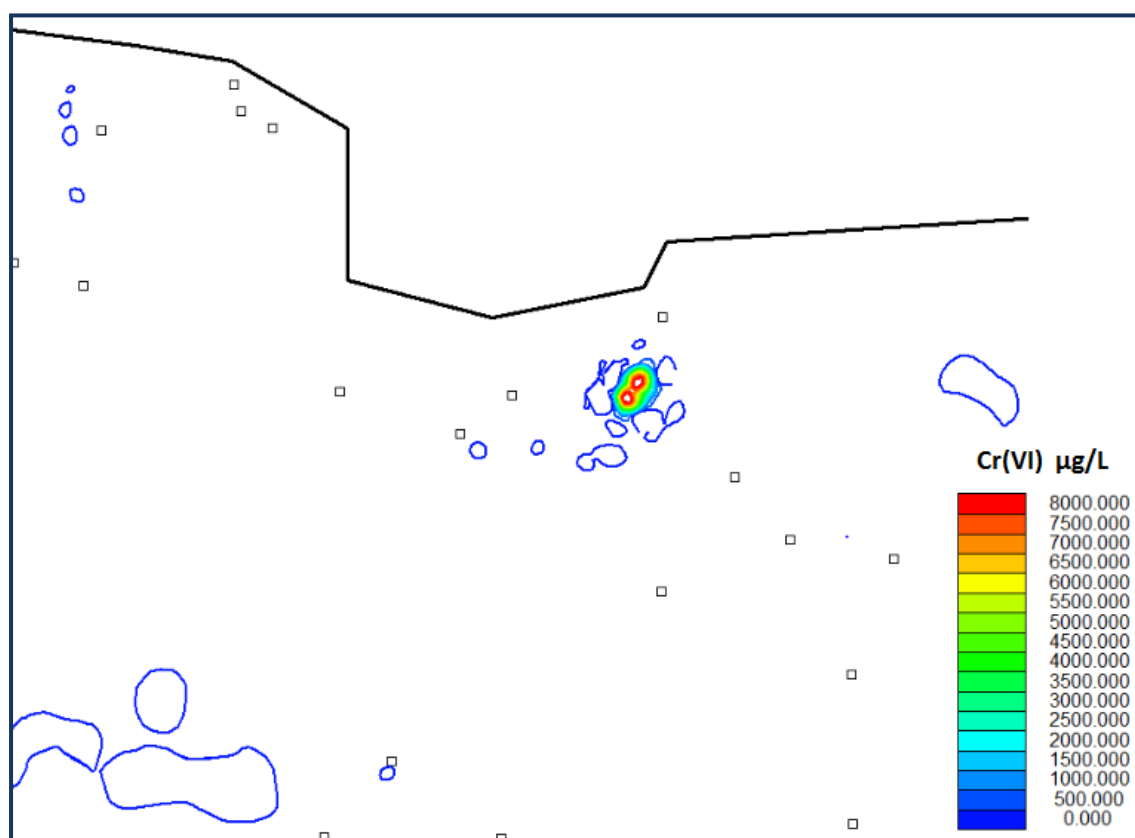


Εικόνα 8.3 Εξάπλωση πλούμιου εξασθενούς χρωμίου

Είναι εμφανές ότι στην περιοχή κατά μήκος του ποταμού οι συγκεντρώσεις του χρωμίου παραμένουν σε σχετικά χαμηλό επίπεδο, μέχρι 40 $\mu\text{g/L}$. Όσο συνεχίζεται η πορεία προς τα βορειοανατολικά η συγκέντρωση αρχίζει σταδιακά και αυξάνεται, είτε λόγω της ύπαρξης των βιομηχανιών που ρυπαίνουν τον ποταμό είτε λόγω της γηγενούς ρύπανσης. Το υπερβασικό πέτρωμα του σερπεντινίτη εντοπίζεται κυρίως στα νοτιοανατολικά της περιοχής και όπως έχει ήδη αναφερθεί οι συγκεντρώσεις χρωμίου που μπορεί να εκχύσει στα υπόγεια ύδατα κυμαίνονται από 100-170 $\mu\text{g/L}$. Επισημαίνεται ότι οι τιμές που φαίνονται στο παραπάνω γράφημα είναι διαφορετικής κλίμακας από τις πραγματικές για να φαίνεται η εξάπλωση της ρύπανσης σε όλη την περιοχή.

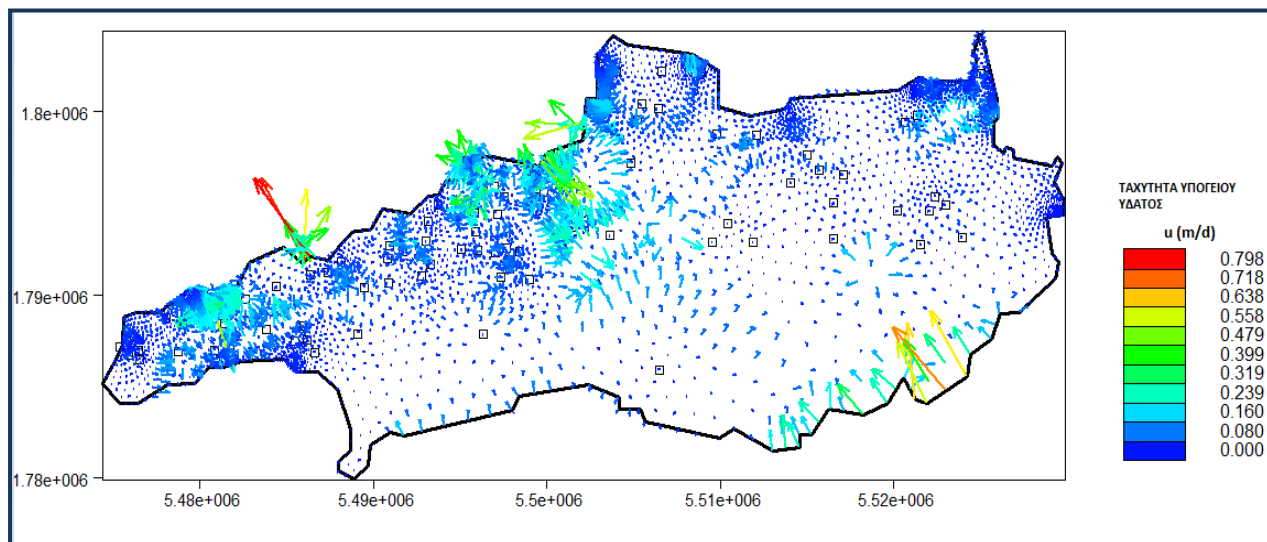
Όπως παρατηρείται η συγκεκριμένη περιοχή που βρίσκεται στα κεντρικά και βόρειο-ανατολικά της λεκάνης είναι αυτή που εμφανίζει και το μεγαλύτερο πρόβλημα. Σε εκείνη την περιοχή βρίσκονται πολλές βιομηχανίες οι οποίες ρυπαίνουν τον υδροφορέα με αποτέλεσμα η συγκέντρωση του εξασθενούς χρωμίου εκεί να φτάνει τα 3000 $\mu\text{g/L}$, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Για να μπορέσει να προσομοιαστεί αυτή η πηγή ρύπανσης μέσω του μοντέλου τοποθετείται μία οριακή συνθήκη 1^{ου} είδους που εισάγει συγκέντρωση χρωμίου στον υδροφορέα ίση με 8000 $\mu\text{g/L}$. Όπως παρατηρείται όμως από την Εικόνα 8.4 το πλούμιο δεν μπορεί έχει εξαπλωθεί σε μεγάλη έκταση πιθανώς λόγω της μικρής περιόδου προσομοίωσης και της γεωλογίας της συγκεκριμένης περιοχής, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Για την

καλύτερη προσομοίωση της περιοχής αυτής θα πρέπει να μελετηθεί πιο αναλυτικά κατασκευάζοντας ένα μοντέλο μικρότερης κλίμακας.



Εικόνα 8.4 Εξάπλωση πλουμίου περιοχής προβλήματος

Τέλος, όσον αφορά τις ταχύτητες μεταφοράς της ροής του υπόγειου ύδατος και επομένως και του ρύπου, παρατηρείται ότι έχουν αρκετά υψηλές τιμές και ειδικά κεντρικά της περιοχής όπου βρίσκεται το ποτάμι. Περιφερειακά, οι ταχύτητες διαμορφώνονται με βάση τις οριακές συνθήκες που έχουμε χρησιμοποιήσει για τη βαθμονόμηση του μοντέλου και υπάρχουν αρκετά μεγάλες τιμές εισροής και εκροής ύδατος. Η Εικόνα 8.5 παρουσιάζει μία γενική άποψη των ταχυτήτων και της κατεύθυνσης του υπόγειου νερού, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου:



Εικόνα 8.5 Γράφημα ταχυτήτων u (m/d) λεκάνης απορροής

Συμπεράσματα

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Ασωπού αποτελεί ένα πολύπλοκο υδατικό σύστημα, μιας και δέχεται εισροές και εκροές σχεδόν σε όλη την έκτασή της, λόγω της ύπαρξης πλευρικών απολίξεων καθώς και του υπάρχοντος ποταμού. Η ορθολογική διαχείριση των υπογείων υδάτων, που χρησιμοποιούνται για ύδρευση και άρδευση στην εν λόγω περιοχή, αποτελεί αντικείμενο ζωτικής σημασίας, καθώς υπάρχουν μεγάλες ποσότητες υπόγειων υδατικών αποθεμάτων που υφίστανται ρύπανση από την τοξική ουσία του εξασθενούς χρωμίου. Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η κίνηση του υπόγειου ύδατος και κατ' επέκταση και η μεταφορά της ρυπογόνου μάζας. Η συγκεκριμένη μελέτη αποτελεί την πρώτη προσπάθεια μοντελοποίησης περιοχής τόσο μεγάλης έκτασης και σε τόσο μεγάλη κλίμακα, τουλάχιστον στον ελλαδικό χώρο. Αποτελεί μία πρόκληση στην μοντελοποίηση υπογείων υδάτων και είναι κομμάτι ενός μεγαλύτερου Ευρωπαϊκού προγράμματος LIFE (CHARM: Chromium in Asopos Groundwater System: Remediation Technologies and Measures) με κύριο στόχο τη θέσπιση τεχνολογιών για την αποκατάσταση του συστήματος υπογείων υδάτων και αναπτύσσεται σε τεχνικό, κοινωνικό και διοικητικό επίπεδο.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρατηρήθηκε ότι, σε χρονική διάρκεια 5 χρόνων, από το 2003 έως το 2008, η ροή του υπόγειου ύδατος επηρεάζεται από τις πλευρικές εισροές στη λεκάνη απορροής καθώς και από την ύπαρξη του ποταμού. Λόγω σταδιακής μείωσης της ετήσιας βροχόπτωσης, ο υδροφορέας δεν εμπλουτίζεται σε επιθυμητό επίπεδο ώστε να καλύψει τις ανάγκες άρδευσης. Αυτό επηρεάζεται και από το γεγονός ότι, με το πέρασμα των χρόνων, η ποιότητα των υπογείων υδάτων υποβαθμίζεται εξαιτίας της συνεχούς ρύπανσής τους από το εξασθενές χρώμιο. Ως αποτέλεσμα αυτών των επιπτώσεων, οι τιμές των υδραυλικών υψών μειώνονται σταδιακά, και ιδιαίτερα στο βόρειο κομμάτι της περιοχής, όπου και παρατηρείται το μεγαλύτερο πρόβλημα. Όσον αφορά τις ταχύτητες μεταφοράς του υπόγειου ύδατος και επομένως και του ρύπου, εμφανίζουν μεγάλες διαφορές ανάλογα με την περιοχή, με αποτέλεσμα σε κάποιες περιοχές η εξάπλωση του ρύπου να μην είναι ιδιαίτερα εμφανής στο μικρό χρονικό διάστημα που μελετάται. Αυτό συμβαίνει σε περιπτώσεις

που η ρύπανση υφίσταται σε περιοχές με γεωλογικούς σχηματισμούς όχι τόσο διαπερατούς και στο γεγονός ότι είναι πολύ πιθανόν να αρχίζει από το έδαφος και σε αρχικό στάδιο να μην επηρεάζει τον υπόγειο υδροφόρα, δηλαδή η εμφάνιση της ρύπανσης καθυστερεί σημαντικά.

Το πλούμιο που δημιουργείται από την υφιστάμενη κατάσταση ρύπανσης οφείλεται όχι μόνο στους γεωλογικούς σχηματισμούς της περιοχής αλλά σε μεγάλο ποσοστό στην ανθρωπογενή παρέμβαση μέσω των βιομηχανικών εγκαταστάσεων. Παρατηρείται, ότι ενώ υπάρχει εξάπλωση του πλουμίου εξαιτίας της ύπαρξης του πετρώματος του σερπεντινίτη, οι συγκεντρώσεις του οποίου κυμαίνονται από 100 έως 170 $\mu\text{g/L}$, υπάρχει και εξάπλωση χρωμίου σε ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις, που δεν μπορούν να αποδοθούν στην ύπαρξη τέτοιων γεωλογικών σχηματισμών. Επομένως, η ρύπανση αυτή δεν μπορεί παρά να οφείλεται στην τοπική ύπαρξη βιομηχανικών μονάδων που είτε ρυπαίνουν τον υπόγειο υδροφόρα εναποθέτοντας τα απόβλητα στο υπέδαφος, είτε απορρίπτοντάς τα στο ποτάμι μέσω του οποίου ρυπαίνουν στη συνέχεια τον υπόγειο υδροφόρα.

Το όριο που έχει θέσει η νομοθεσία σχετικά με τη συγκέντρωση του εξασθενούς χρωμίου στο νερό ανέρχεται στα 50 $\mu\text{g/L}$. Παρατηρείται όμως ότι, υπάρχουν περιοχές και ιδιαίτερα στα βόρεια και στα νοτιοανατολικά της λεκάνης όπου οι συγκεντρώσεις που έχουν ανιχνευθεί είναι κατά πολύ υψηλότερες από αυτό το όριο. Επομένως, μπορεί να εξαχθεί ως συμπέρασμα ότι η ρύπανση της περιοχής οφείλεται σε ένα συνδυασμό παραγόντων ανθρωπογενούς και γηγενούς ρύπανσης, ανάλογα με την περιοχή που εξετάζουμε, δηλαδή παρ' ότι στο νότιο τμήμα υπάρχει το πέτρωμα του σερπεντινίτη και ανιχνεύεται συγκέντρωση, μεγάλο ποσοστό συγκέντρωσης διακρίνεται και στο βόρειο τμήμα όπου επικρατούν οι βιομηχανίες.

Η χρήση επιπλέον δεδομένων για τις πηγές (υδραυλικά ύψη) και τις συγκεντρώσεις του ρύπου ειδικά σε περιοχές νότια του ποταμού όπου υπάρχει έλλειψη στοιχείων, θα μπορούσαν να μας δώσουν καλύτερη εικόνα για την εξάπλωση της ρύπανσης και την υποβάθμιση του υδροφόρα. Ένα μειονέκτημα των υπογείων υδάτων είναι η ύπαρξη μικρού όγκου δεδομένων, με αποτέλεσμα την περιορισμένη προσομοίωση της υπόγεια ροής. Στην συγκεκριμένη μελέτη όμως, ένα από τα κυρίαρχα αρχικά προβλήματα που έπρεπε να αντιμετωπιστούν ήταν ο τεράστιος όγκος των δεδομένων. Η σημαντικότητα της περιοχής, λόγω των βιομηχανικών

εγκαταστάσεων στο βόρειο τμήμα της λεκάνης, καθώς και η έκτασή της είναι παράγοντες που παρέχουν πληθώρα πληροφοριών και δυσχεραίνουν την αρχική οργάνωση των δεδομένων που θα εισαχθούν στο μοντέλο για να επιτευχθεί η σωστή βαθμονόμηση και μοντελοποίηση.

Αντικείμενο μελλοντικής μελέτης μπορεί να αποτελέσει κυρίως η περιοχή των Οиноφύτων, η οποία μπορεί να μελετηθεί με ένα μοντέλο μικρότερης κλίμακας. Στην περιοχή αυτή, παρατηρείται συγκέντρωση εξασθενούς χρωμίου στον υπόγειο υφροφορέα που φτάνει τα 3000 $\mu\text{g/L}$. Η ρύπανση αυτή είναι τοπική και δεν επηρεάζεται από το ποτάμι, μιας και οι υπόλοιπες παρατηρήσεις για τις συγκεντρώσεις, περιφερειακά του σημείου αυτού, είναι πολύ μικρότερης κλίμακας. Είναι πολύ πιθανόν η ρύπανση αυτή να οφείλεται σε εναπόθεση βιομηχανικών αποβλήτων απευθείας στο έδαφος αντί για απόρριψη στον Ασωπό ποταμό. Τίθεται επομένως θέμα προεπεξεργασίας των αποβλήτων πριν την εναπόθεσή τους στο έδαφος ώστε να απομακρυνθούν οι ρύποι, όπως στη συγκεκριμένη περίπτωση το εξασθενές χρώμιο.

Επίσης, με τη βοήθεια του μοντέλου που βαθμονομήθηκε στη συγκεκριμένη εργασία, το οποίο αποτελεί το μοναδικό τόσο μεγάλης κλίμακας, θα μπορούσαν να μελετηθούν διάφορα σενάρια που σχετίζονται είτε με την κλιματική αλλαγή είτε με τις μεθόδους απορρύπανσης του εδάφους. Επίσης το παρόν μοντέλο θα μπορούσε να βοηθήσει και στη διαδικασία προσδιορισμού κατωφλιών (thresholds) για το εξασθενές χρώμιο, που είναι απαραίτητο να θεσπιστούν για την προστασία των υπόγειων υδατικών συστημάτων.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αινάτζη, Ο., και Πατεράκη Α., 2010, “Μέθοδοι διαχείρισης ρύπανσης εδαφών και υπογείων υδάτων”, Πτυχιακή εργασία, ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας, Τμήμα Γεωτεχνολογίας και Περιβάλλοντος
2. Βουδούρης, Κ., 2006, “Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος”, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας
3. Γαρμπή, Σ., Γενειατάκης, Ε., και Καρατζάς, Γ., 2005, “Εξυγίανση Υπογείων Υδάτων με Συγκλίνοντα Φράγματα και Διόδους. Εφαρμογή Πεδίου με ΒΤΕΧ”, Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων με Βάση τη Λεκάνη Απορροής, 5^{ου} Εθνικού Συνεδρίου, Ξάνθη
4. Γεωργιάδης, Θ., Καλλέργης, Γ., Φερεντίνος, Γ., 2004, “Διάθεση αποβλήτων και οι επιπτώσεις τους στο περιβάλλον”, Φυσικό περιβάλλον και ρύπανση, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο
5. Γιαννουλόπουλος, Π., 2008, “Αναγνωριστική υδρογεωλογική-υδροχημική έρευνα ποιοτικής επιβάρυνσης την υπογείων νερών της ευρύτερης περιοχής της λεκάνης του Ασωπού Ν.Βοιωτίας”, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών
6. Γιδαράκος, Ε., 2006, “Τοξικά απόβλητα, Διαχείριση, Επεξεργασία, Διάθεση”, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος
7. Δημήτρουλα, Ε., 2009, “Κινητικότητα Εξασθενούς Χρωμίου Cr(VI) σε Εδάφη της περιοχής Ωρωπού”, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος
8. Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (Ε.Μ.Υ), Διεύθυνση Κλιματολογίας-Εφαρμογών, 2009
9. Ένωση Ελλήνων Χημικών, 2007, “Θέσεις για την επικινδυνότητα παρουσίας Cr(VI) στα υπόγεια νερά”, Επιστημονικό Τμήμα Περιβάλλοντος, Υγείας και Ασφάλειας της Εργασίας
10. Θωμαΐδης, Ν., Βαλαβανίδης, Θ., Ευσταθίου, Κ., 2007, “Η χημική ένωση του μήνα Νοεμβρίου 2007, Εξασθενές χρώμιο”, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Χημείας
11. Καλλέργης, Α., 2000, “Εφαρμοσμένη-Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία”, Τόμος Β΄, Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας

12. Καρατζάς, Γ., 2003, “Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφοράς Ρύπων”, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος
13. Μονοκάνδυλος, Ι., 2010, “Διαχειριστικό σχέδιο εκτίμησης του κινδύνου ρύπανσης (τρωτότητα) υπογείων υδάτων ανατολικής Κρήτης με την χρήση GIS”, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος
14. Μπερτόλη, Κ., 2013, “Βιολογική επεξεργασία υπογείων υδάτων για την απομάκρυνση εξασθενούς και ολικού χρωμίου με ανοξικές – αναερόβιες συνθήκες”, Μεταπτυχιακή Διατριβή Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
15. Νικολάου, Μ., 2012, “Αποτίμηση των βελτιώσεων της λεκάνης απορροής του Ασωπού ποταμού υπό την οδηγία πλαίσιο για τα ύδατα 2000/60 στο δείγμα Αθήνας”, Μεταπτυχιακή διατριβή, Οικονομικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Μεταπτυχιακό πρόγραμμα ειδίκευσης διεθνών και ευρωπαϊκών οικονομικών σπουδών στη διεθνή οικονομική και χρηματοδοτική
16. Παλαιογιάννη-Μπέλλου, Α., 2010, “Μοντελοποίηση της υπόγειας ροής και της μεταφοράς του εξασθενούς χρωμίου στην περιοχή του Ασωπού ποταμού, νομού Αττικής”, Μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος
17. Παναγοπούλου, Α., 2011, “Βιογεωχημική μελέτη του φυτού *Origanum Majorana* με στόχο την προστασία της δημόσιας υγείας”, Μεταπτυχιακή διατριβή, Γεωεπιστήμες και Περιβάλλον, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας
18. Παπανικολάου, Ι., Μαριολάκος, Δ., Λέκκας, Λ., και Λόζιος, Γ., 1986, “Μορφοτεκτονικές Παρατηρήσεις στη Λεκάνη Ασωπού και την Παραλιακή Ζώνη Ωρωπού Συμβολή στη Νεοτεκτονική της Βόρειας Αττικής”, Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, 251-267
19. Πολίτη, Δ., 2011, “Απομάκρυνση εξασθενούς χρωμίου από βιομηχανικά απόβλητα με χρήση τροποποιημένης βιομάζας”, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Πανεπιστήμιο Πειραιώς, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών, Οργάνωση και Διοίκηση Βιομηχανικών Συστημάτων
20. Πολυχρονάκη, Μ., 2011, “ Μοντελοποίηση της υπόγειας ροής της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα”, Μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος
21. ΤΕΕ (2009). Το Πρόβλημα του Ασωπού ποταμού, Προτάσεις Αντιμετώπισής του, Ομάδα εργασίας: Ζιώγας Χ., Θεοχάρη Χ., Λειβαδάρος Ρ., Μπούρα Α., Παντελάρας Π., Παπαδοπούλου Μ., Στάμου Α.

22. Τέττας, Κ., 2012, “Γηγενές χρώμιο στο υπόγειο νερό της χώρας με έμφαση στη λεκάνη απορροής του Ασωπού ποταμού”, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
23. Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής (ΥΠΕΚΑ), Εγκύκλιος για την εφαρμογή της ΚΥΑ για τον Ασωπό, 2010
24. ΦΕΚ 892/11.7.2001, Κοινή Υπουργική Απόφαση Υ2/2600/2001, “Ποιότητα του Νερού Ανθρώπινης Κατανάλωσης”

ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Anderson, M., and Woessner, W., 1992, “Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport”, Academic Press, London
2. Angelidis, O., and Aloupi, M., 2000, “Geochemical Study of Coastal Sediments Influenced by River - Transported Pollution: Southern Evoikos Gulf”, Marine Pollution Bulletin, Greece
3. ArgusOne User’s Guide, 1997, Jericho, NY 11753, USA
4. Babu, D., Pinder, G., Niemi A., Ahlfeld D., and Stothoff S., 1997, “Chemical Transport by Three-Dimensional Groundwater Flows”, Manual of the Princeton Transport Code (PTC)
5. Botsou F., Karageorgis A.P., Dassenakis E., Scoullos M., 2011, “Assessment of heavy metal contamination and mineral magnetic characterization of the Asopos River -sediments (Central Greece)”, Marine Pollution Bulletin., 62, 547-563
6. Dermatas D., Vatseris Ch., Panagiotakis I., Chrysochoou M., 2012, “Potential Contribution of Geogenic Chromium in Groundwater Contamination of Greek Heavily Industrialized Area”, The Italian Association of Chemical Engineering
7. Economou-Eliopoulos M., Megremi I., Vasilatos Ch., 2011, “Factors controlling the heterogeneous distribution of Cr(VI) in soil, plants and groundwater: Evidence from the Assopos basin, Greece”, Chemie der Erde, 71, 39-52
8. Fetter, C., 1993, “Contaminant Hydrogeology”, Macmillan Publishing Company, New York, USA

9. Jacobs J. and Testa S., (2005). Overview of Chromium (VI) in the Environment: Background and History. In "Chromium (VI) Handbook", Guertin J. Jacobs J. and Avakian C (Eds), CRC Press
10. Mallouchou, M., 2012, "Public health impact in the case of Asopos River. A silent environmental crisis?", National and Kapodistrian University of Athens, School of Medicine, MSc "International Medicine-Health Crisis Management"
11. Moraetis D, Nikolaidis N. P, Karatzas G. P, Dokou Z., Kalogerakis N., Winkel L., Palaioianni-Bellou A., 2012, "Origin and mobility of hexavalent chromium in NorthEastern Attica, Greece", Applied Geochemistry, 27, 1170-1178.
12. M-TECH Software Tutorial, v.5.0.26, CA,USA
13. Papanikolaou, D., 2009, "Timing of Tectonic Emplacement of the Ophiolites and Terrane Paleogeography in the Hellenides, Lithos", 108, 262-280
14. Perlman, H., Makropoulos, C., Koutsoyiannis, D., 2005, "The water cycle", United States Geological Survey
15. Robles-Camacho, J., and Armienta, M., 2000, "Natural chromium contamination of groundwater at León Valley, Mexico", Journal of Geochemical Exploration, 68, 167-181
16. Tentes G. and Damigos D., 2011, "The Lost Value of Groundwater: the Case of Asopos River Basin in Central Greece", Water Resources Management, Springer
17. Todd, D., and Mays, L., 2005, "Groundwater Hydrology", Wiley, New York, USA
18. World Health Organization (WHO), 1996, "Guidelines for Drinking-water Quality", Geneva
19. Zheng, C., and Bennett, G., 1995, "Applied Contaminant Transport Modeling-Theory and Practice", ITP, New York, USA

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- alevelchem.com
- geodata.gov.gr
- geosurvey.state.co.us

Παραρτήματα

Παράρτημα Α

Πίνακας 1 Γεωτρήσεις Επιπέδου 1 (Layer 1)

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	E	N	Z	ΒΑΘΟΣ (m)	ΒΑΘΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ (m)	ΒΑΘΟΣ+200 (m)
F730	445116,7	4244100	142,11	250	-107,89	92,11
F860	451258,2	4234910	238	380	-142	58
F1107	458039,2	4240142	227,8	340	-112,2	87,8
F1428	477880,1	4240492	21,7	170	-148,3	51,7
F1434	476001	4241046	59	230	-171	29
F1511	474710,7	4239667	55,98	204	-148,02	51,98
F1724	474854,7	4241238	62,1	188	-125,9	74,1
F1573	466897,6	4237379	109,73	230	-120,27	79,73

Πίνακας 2 Γεωτρήσεις Επιπέδου 2 (Layer 2)

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	E	N	Z	ΒΑΘΟΣ (m)	ΒΑΘΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ (m)	Βάθος+200 (m)
F010	429543,4	4242672	106,45	200	-93,55	106,45
F030	428625,1	4243384	98,16	172	-73,84	126,16
F633	437568,9	4246439	103,38	170	-66,62	133,38
F634	436678,4	4246707	102,59	200	-97,41	102,59
F649	438706,6	4246763	102,94	150	-47,06	152,94
F655	435933,1	4242493	124,5	200	-75,5	124,5
F684	438796,6	4245792	103,14	150	-46,86	153,14
F688	440698,6	4245656	106,5	150	-43,5	156,5
F697	441357,7	4244822	108,91	170	-61,09	138,91
F699	441607,2	4243549	129,73	170	-40,27	159,73
F729	447125,1	4244676	125,42	180	-54,58	145,42
F740	446238	4247611	130,04	180	-49,96	150,04
F778	452159	4247672	153,32	200	-46,68	153,32
F785	443575,2	4246908	112,03	158	-45,97	154,03
F792	441174,7	4246895	106,32	150	-43,68	156,32
F799	450998,7	4247385	148,23	190	-41,77	158,23
F812	451095,5	4247141	155,03	200	-44,97	155,03
F857	456230,1	4236462	195	250	-55	145
F877	454813,3	4237922	268,83	330	-61,17	138,83
F882	454128,4	4237278	243,41	300	-56,59	143,41
F1101	453107,7	4240460	304,3	350	-45,7	154,3
F1105	456976,8	4237815	337	400	-63	137
F1168	460625,1	4244744	173	250	-77	123
F1198	461992,3	4234989	220,28	310	-89,72	110,28

F1208	463155,2	4240762	119,4	200	-80,6	119,4
F1213	464631,1	4239907	99,8	160	-60,2	139,8
F1453	479909,6	4239129	39	100	-61	139
F1532	479211,8	4238318	88,5	140	-51,5	148,5
F1533	479108,7	4239358	31	92	-61	139
F1535	478725,9	4241269	8,8	72	-63,2	136,8
F1537	478099,8	4240752	43,7	100	-56,3	143,7
F1726	479780,4	4239574	28,7	94	-65,3	134,7
F1613	473934,01	4239459,09	104	160	-56	144

Πίνακας 3 Γεωτρήσεις Επιπέδου 3 (Layer 3)

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	Ε	Ν	Ζ	ΒΑΘΟΣ (m)	ΒΑΘΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ (m)	Βάθος+200 (m)
F031	428734,7435	4242141,13	136,85	132	4,85	204,85
F067	426087,8477	4238579,12	298,03	84	214,03	414,03
F072	428482,618	4235200,14	289,98	150	139,98	339,98
F073	426559,1952	4238768,528	291,11	90	201,11	401,11
F078	437317,8617	4239663,995	316,04	288	28,04	228,04
F089	425452,9449	4238509,421	304,12	60	244,12	444,12
F104	431322,3661	4236334,731	308,22	130	178,22	378,22
F110	431659,3563	4237215,59	349,98	200	149,98	349,98
F116	436838,0486	4237182,31	300,07	200	100,07	300,07
F122	427845,1326	4235720,162	297,83	140	157,83	357,83
F123	427645,9142	4235464,098	293,28	80	213,28	413,28
F125	427327,47	4236537,99	317,89	190	127,89	327,89
F144	430750,91	4234715,61	281,9	220	61,9	261,9
F154	438899,57	4237468,86	289,5		289,5	489,5
F192	438091,79	4233964,28	299,95	210	89,95	289,95
F196	441075,23	4233739,84	289,93	180	109,93	309,93
F202	432762,02	4234398,16	279,95	150	129,95	329,95
F213	432713,216	4232897,014	286,41	130	156,41	356,41
F217	434711,6863	4232712,115	279,08	160	119,08	319,08
F219	435080,1942	4233114,948	293,91	200	93,91	293,91
F220	435311,8201	4232787,018	283,72	200	83,72	283,72
F226	438427,6307	4233228,744	311,05	294	17,05	217,05
F227	437087,3603	4233017,569	284,28	235	49,28	249,28
F231	446073,7497	4239092,162	326,11	220	106,11	306,11

F239	448623,36	4237001,01	284	200	84	284
F246	443378,03	4237508,07	323,3	120	203,3	403,3
F261	445752,12	4238054,27	303,8	100	203,8	403,8
F297	446173,0507	4237578,915	290,32	150	140,32	340,32
F302	445777,0753	4236764,892	288,02	90	198,02	398,02
F304	445170,54	4236261,68	292,8	120	172,8	372,8
F319	450070,6	4240287,88	311,5	110	201,5	401,5
F327	450231,16	4235674,05	237,8	100	137,8	337,8
F329	450243,27	4236192,39	251,8	130	121,8	321,8
F331	452866,769	4239457,682	286,61	120	166,61	366,61
F332	452505,1	4239240,48			105,8	305,8
F337	450566,77	4239628,71	301,65	180	121,65	321,65
F342	450224,12	4236862,61	260	200	60	260
F349	450973,53	4236497,74	282	190	92	292
F364	447686,1542	4237239,172	298,04	130	168,04	368,04
F383	448743,9	4239086,02	311,8	130	181,8	381,8
F387	448633,1652	4238023,812	300,8	124	176,8	376,8
F395	453429,3762	4244066,174	230,13	180	50,13	250,13
F399	454486,0626	4244801,783	234,54	200	34,54	234,54
F404	449128,81	4240874,43	316,5	200	116,5	316,5
F435	454464,75	4239672,49	284,9	170	114,9	314,9
F443	454718,9701	4243523,992	249,08	200	49,08	249,08
F445	455213,4162	4242976,122	251,99	150	101,99	301,99
F451	456321,36	4243643,91	233,7	130	103,7	303,7
F454	456304,1188	4245010,666	214,93	155	59,93	259,93
F481	454082,3031	4246732,033	177,02	180	-2,98	197,02
F492	441858,07	4236191,6	285,9	150	135,9	335,9

F501	455755,5942	4245489,574	205,94	200	5,94	205,94
F504	453086,8809	4245994,371	181,17	170	11,17	211,17
F507	454973,1582	4244175,884	239,91	170	69,91	269,91
F510	452802,0862	4245650,146	190,11	150	40,11	240,11
F513	453176,611	4245056,786	211,89	118	93,89	293,89
F525	443243,87	4236175,32	295,8	100	195,8	395,8
F532	440450,7701	4239693,132	264,9	130	134,9	334,9
F548	435346,8363	4230198,081	289,12	200	89,12	289,12
F565	436201,7292	4231249,286	277,77	200	77,77	277,77
F568	436003,1528	4231587,721	275,92	150	125,92	325,92
F570	436591,1091	4231372,093	279,78	207	72,78	272,78
F580	440772,07	4237821,45	304	140	164	364
F582	440005,857	4238749,832	292,05	232	60,05	260,05
F638	440823,8446	4247919,358	105,13	90	15,13	215,13
F657	436526,177	4243813,089	117,34	120	-2,66	197,34
F672	437616,1514	4244130,46	108,12	100	8,12	208,12
F753	440206,8628	4243111,08	132,07	130	2,07	202,07
F770	453088,2765	4246510,878	177,13	146	31,13	231,13
F782	445498,9612	4248613,878	158,56	115	43,56	243,56
F801	434073,324	4247937,546	86,8	40	46,8	246,8
F828	440966,583	4249484,794	88,21	62	26,21	226,21
F859	448151,5	4232416,03	371,94	52	319,94	519,94
F862	449635,33	4235310	235		235	435
F881	449590,71	4236713,63	273,9	250	23,9	223,9
F886	446758,97	4239853,96	326,5	200	126,5	326,5
F902	427870,24	4235022,96	291,9	280	11,9	211,9
F909	430359,29	4236629,06	331,9	300	31,9	231,9

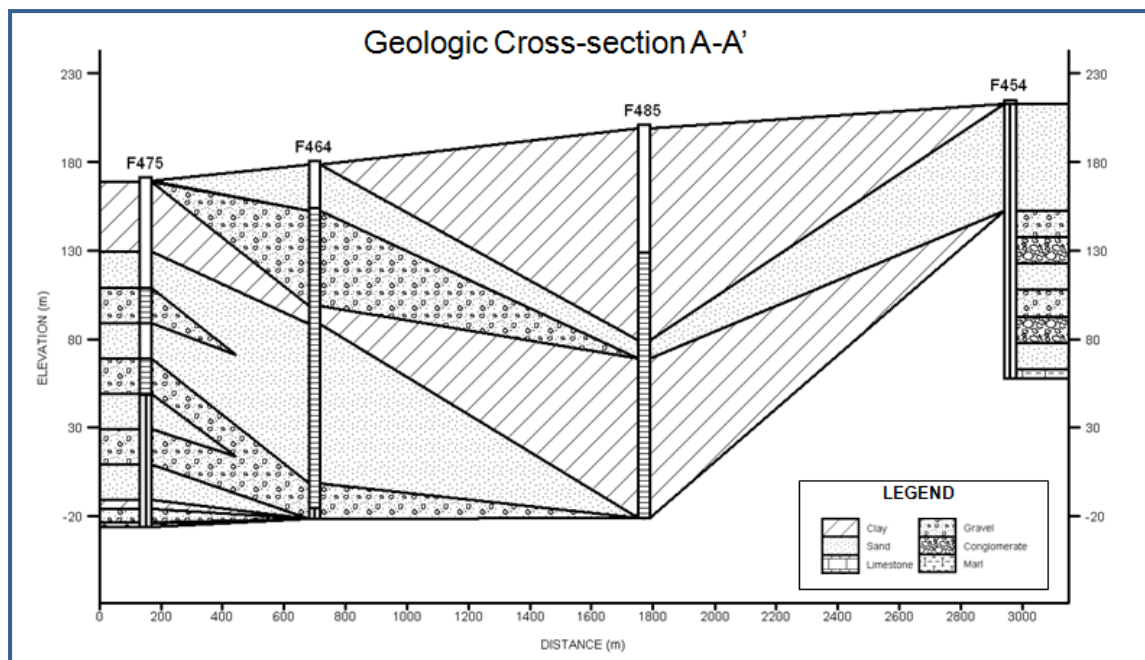
F914	432098,33	4237535,64	318,84	220	98,84	298,84
F916	433072,55	4236427,95	295,5	295	0,5	200,5
F921	433989,76	4236997,44	321,9	300	21,9	221,9
F955	439934,97	4237408,84	288,04	185	103,04	303,04
F960	438096,95	4234788,38	278,77	200	78,77	278,77
F978	435928,33	4234934,31	279,3	250	29,3	229,3
F1012	444346,64	4237717,28	293,32	250	43,32	243,32
F1046	445344,35	4237296,58	285,9	250	35,9	235,9
F1074	448787,75	4241423,41	327,9	300	27,9	227,9
F1192	457809,42	4228664,56	527,9	351	176,9	376,9
F1323	472698,77	4234707,35	97,9	90	7,9	207,9
F1477	458064,99	4245214,55	188	180	8	208
F1553	433658,29	4234334,29	278,2	280	-1,8	198,2
F1565	443620,69	4238178,7	311,35	285	26,35	226,35
F1576	457290,42	4245631,61	225,91	220	5,91	205,91
F1590	481910,78	4233044,9	248,5	50	198,5	398,5
F1607	475510,72	4234539,91	107,7	80	27,7	227,7
F1610	467500,58	4240955,06	121,7	120	1,7	201,7
F1614	469176,43	4235837,69	123	119	4	204
F1663	464286,37	4234540,26	239,78	244	-4,22	195,78
F1718	460060,3	4242757,4	157,7	80	77,7	277,7
P001	432047,7606	4243243,855	95,75	23	72,75	272,75
P002	429348,2799	4243785,437	90,86	20	70,86	270,86
P003	429826,9953	4243107,781	93	25	68	268
P007	431001,136	4242990,909	93,63	22	71,63	271,63
P009	432013,0752	4242347,551	111,56	15,25	96,31	296,31
P030	435274,1904	4240413,887	162,03	11,11	150,92	350,92

P041	429323,2094	4238889,375	255,08	14	241,08	441,08
P060	435721,4007	4239043,354	320	20	300	500
P068	427605,815	4235462,031	293	24	269	469
P117	433131,3818	4237493,373	328,92	13,3	315,62	515,62
P130	433612,2855	4235690,586	y	15,2		200
P132	434971,97	4236836,632	351,91	33	318,91	518,91
P142	428478,538	4234667,736	295,86	13	282,86	482,86
P158	437403,4484	4234070,885	279,49	24,5	254,99	454,99
P190	450032,8442	4238778,839	324,02	22	302,02	502,02
P236	434330,9884	4230667,597	252,79	42	210,79	410,79
P245	434508,8993	4231354,14	258,52	19,6	238,92	438,92
P316	437603,9992	4230547,214	316,56	21,5	295,06	495,06
F004	427552,2206	4244554,909	87,5	104	-16,5	183,5
F005	428210,3908	4244034,458	87,74	120	-32,26	167,74
F023	427861,8272	4245779,717	85,53	120	-34,47	165,53
F034	430377,1467	4245750,726	84,84	100	-15,16	184,84
F052	432110,5865	4244131,298	93,71	115	-21,29	178,71
F464	455206,4163	4246717,817	180,6	200	-19,4	180,6
F475	454346,7298	4247425,25	171,21	195	-23,79	176,21
F485	456099,1924	4246200,325	201,13	220	-18,87	181,13
F604	435994,4246	4244601,009	108,49	125	-16,51	183,49
F611	434870,1035	4247100,899	102,42	110	-7,58	192,42
F615	435668,5991	4246353,313	102,18	130	-27,82	172,18
F617	436002,1972	4245768,973	104,28	120	-15,72	184,28
F620	436927,916	4244739,647	107,73	115	-7,27	192,73
F631	436930,6049	4246254,821	103,05	140	-36,95	163,05
F650	438462,4169	4247655,557	100,28	120	-19,72	180,28

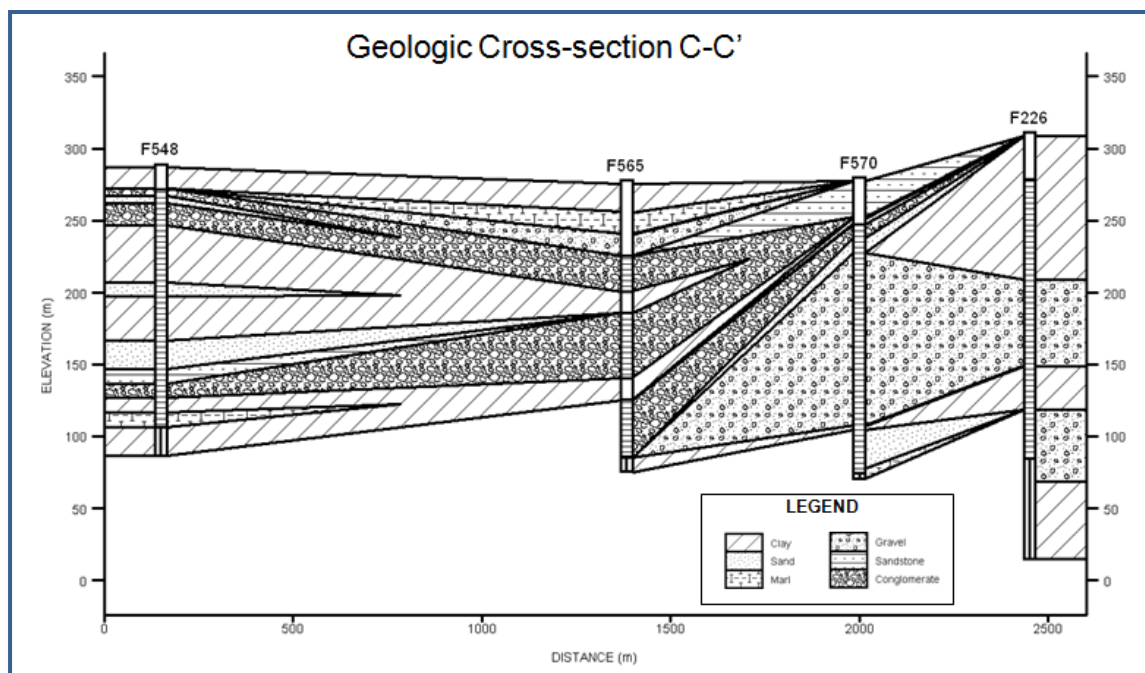
F663	437731,5505	4243309,267	112,82	150	-37,18	162,82
F674	438305,7457	4243945,422	109,5	125	-15,5	184,5
F682	439343,6111	4244827,702	106,44	120	-13,56	186,44
F687	440053,2043	4243385,177	126,22	140	-13,78	186,22
F705	443296,7482	4245791,537	111,97	150	-38,03	161,97
F707	443365,6397	4245173,551	118,54	150	-31,46	168,54
F712	441517,4753	4245811,354	107,22	120	-12,78	187,22
F721	445914,1397	4245532,942	116,72	130	-13,28	186,72
F725	446917,9516	4245267,911	122,47	150	-27,53	172,47
F728	445222,4664	4244823,601	125,9	150	-24,1	175,9
F733	447408,2717	4246387,075	130	152	-22	178
F750	442753,7072	4243614,138	132,01	160	-27,99	172,01
F779	451872,6014	4248112,161	147,83	180	-32,17	167,83
F781	444725,4541	4247360,104	118,5	130	-11,5	188,5
F784	444633,0027	4249085,941	146,95	160	-13,05	186,95
F794	435855,4369	4247387,283	102,22	120	-17,78	182,22
F798	451408,5455	4248970,049	168,06	206	-37,94	162,06
F933	433192,57	4233767,64	290,1	300	-9,9	190,1
F1167	458808,68	4242344,34	232	240	-8	192
F1199	463029,7	4235815,62	181	215	-34	166
F1221	465385,14	4240295,54	98,31	110	-11,69	188,31
F1269	469973,78	4237228,9	106,5	130	-23,5	176,5
F1319	476171,98	4232612,37	143	180	-37	163
F1330	473752,7	4232673,66	181,5	205	-23,5	176,5
F1534	479001,66	4240683,53	12,1	30	-17,9	182,1
F1606	471321,61	4234285,15	143,9	168	-24,1	175,9
F1643	468870,76	4233873,44	166,36	192	-25,64	174,36

F1656	459210,27	4243216,79	168	185	-17	183
F1666	449462,22	4240198,57	330,5	350	-19,5	180,5

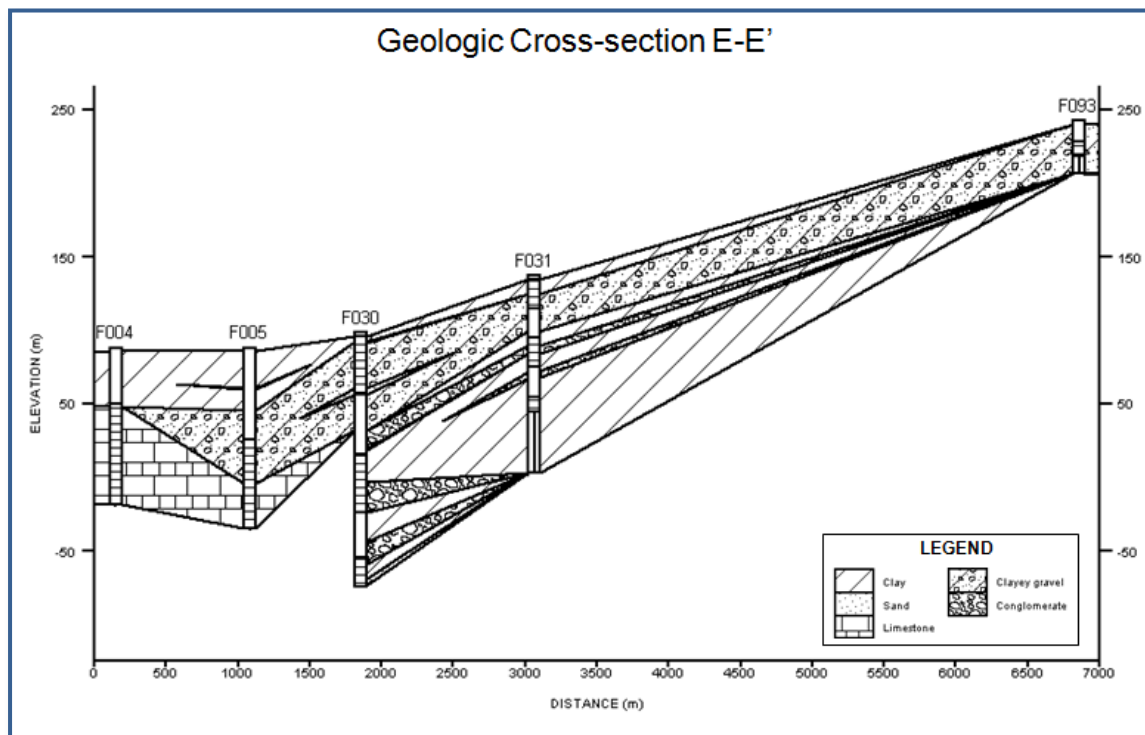
Παράρτημα Β



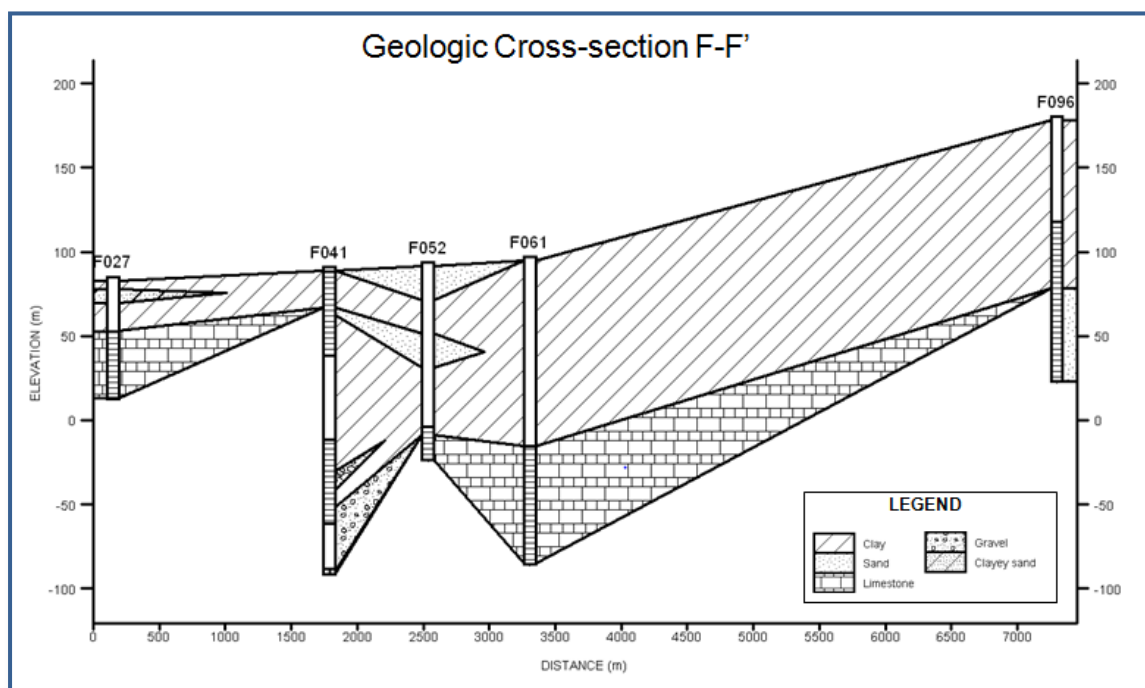
Εικόνα 1 Γεωλογική τομή A-A'



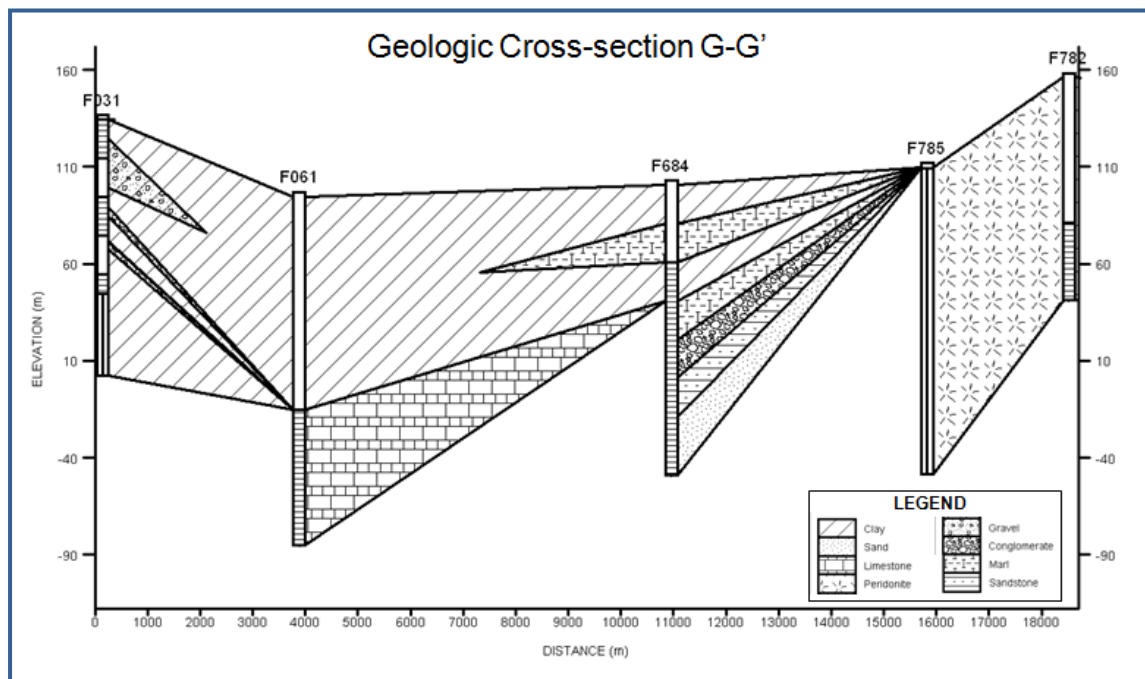
Εικόνα 2 Γεωλογική τομή C-C'



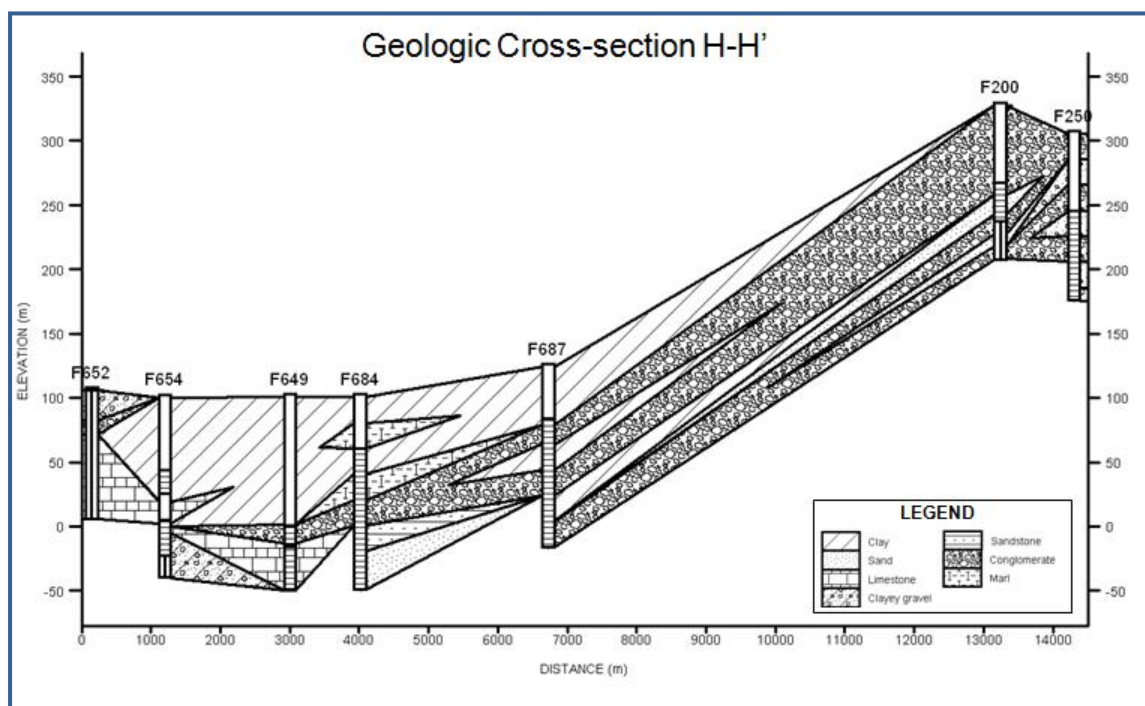
Εικόνα 3 Γεωλογική τομή E-E'



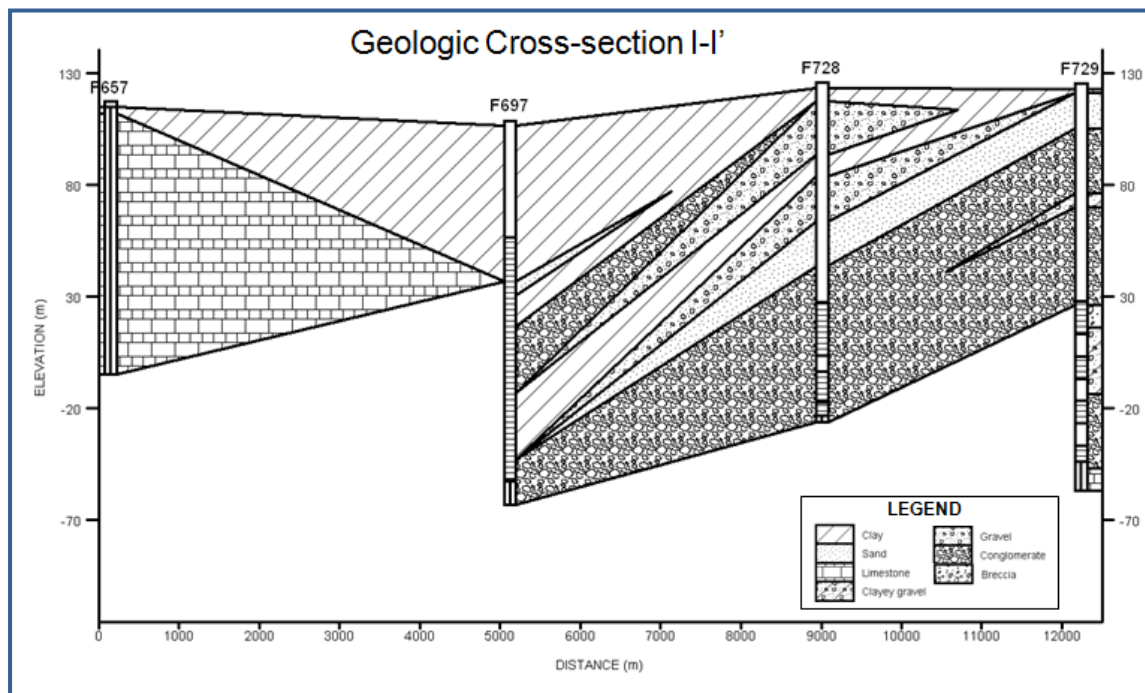
Εικόνα 4 Γεωλογική τομή F-F'



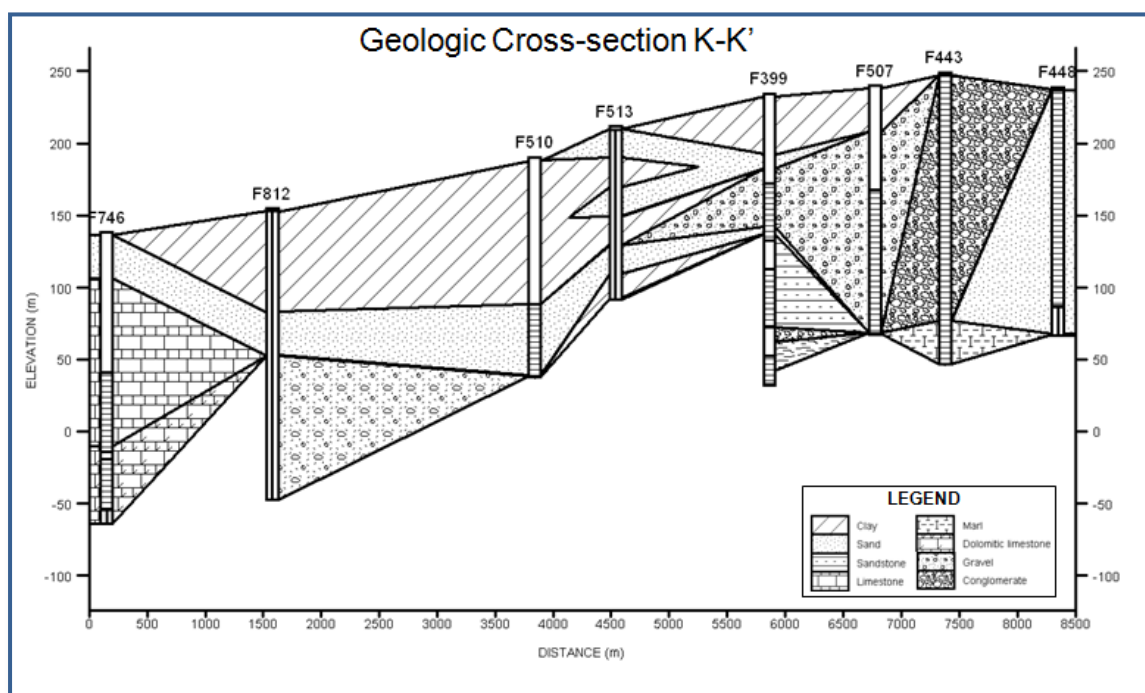
Εικόνα 5 Γεωλογική τομή G-G'



Εικόνα 6 Γεωλογική τομή H-H'



Εικόνα 7 Γεωλογική τομή I-I'



Εικόνα 8 Γεωλογική τομή K-K'