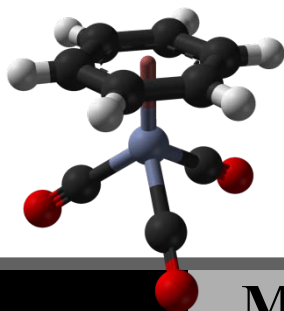




ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΑΡΤΕΜΙΣ
ΠΑΛΑΙΟΓΙΑΝΝΗ-
ΜΠΕΛΛΟΥ

Μοντελοποίηση της υπόγειας ροής
και της μεταφοράς του εξασθενούς
χρωμίου στην περιοχή του Ασωπού
ποταμού, νομού Αττικής



Εξεταστική Επιτροπή:

- Καθ. Καρατζάς Γ. (επιβλέπων)
- Καθ. Νικολαΐδης Ν.
- Καθ. Καλογεράκης Ν.

*Αφιερώνεται στον παππού και
τη γιαγιά μου,*

*Κοσμά και Περσεφόνη,
που είναι πάντα δίπλα μου και
με στηρίζουν*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διατριβή, η οποία εκπονήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος ειδίκευσης «Περιβαλλοντική και Υγειονομική Μηχανική», θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά ορισμένα πρόσωπα που με την καθοδήγηση και τη συμπαράστασή τους βοήθησαν στη διεκπεραίωσή της:

- ▶ Τον Καθηγητή και Πρόεδρο του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος και επιβλέποντα της παρούσας εργασίας κ. Καρατζά Γεώργιο, για την πολύτιμη καθοδήγηση και τις συμβουλές του καθ'όλη τη διάρκεια της παρούσας εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για τη διαρκή και άριστη συνεργασία του μαζί μου καθώς και για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου.
- ▶ Τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τον Καθηγητή κ. Νικολαΐδη Νικόλαο και τον Καθηγητή κ. Καλογεράκη Νικόλαο, για τις σημαντικές υποδείξεις τους κατά την αξιολόγηση και εξέταση της μεταπτυχιακής διατριβής.
- ▶ Τη μεταδιδακτορική ερευνήτρια Δρ. Δόκου Ζωή, για την πολύτιμη καθοδήγηση και την άψογη συνεργασία μας. Επίσης, την ευχαριστώ ιδιαίτερα για τη βοήθεια που μου προσέφερε σχετικά με τη χρήση του μοντέλου προσομοίωσης καθώς και το χρόνο που διέθεσε κατά το διάστημα που διήρκησε η εργασία.
- ▶ Το μεταδιδακτορικό ερευνητή Δρ. Μοραΐτη Δανιήλ, για την παροχή του απαραίτητου υλικού στο οποίο στηρίχθηκε η εργασία καθώς και των συμβουλών του για το θέμα που η εν λόγω εργασία πραγματεύεται.
- ▶ Τον υπεύθυνο του Εργαστηρίου Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής καθώς και τους διδακτορικούς φοιτητές του εργαστηρίου για την ευχάριστη συνεργασία μας όλο αυτό το διάστημα.
- ▶ Το Χατζηλάρη Λευτέρη, για την προσφορά βοήθειας όποτε του ζητήθηκε.
- ▶ Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου και τον αδερφό μου, που είναι πάντα δίπλα μου και στηρίζουν τις προσπάθειές μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η μοντελοποίηση της υπόγειας ροής και της μεταφοράς του εξασθενούς χρωμίου στην περιοχή του Ασωπού ποταμού του νομού Αττικής.

Τα τελευταία χρόνια πλήθος ερευνών και δημοσιεύσεων έχουν γίνει για την ευρύτερη περιοχή του Ασωπού με θέμα τη συνεχή και ανεξέλεγκτη ρύπανση του ποταμού και των υπογείων υδάτων της περιοχής από το εξασθενές χρώμιο, που προέρχεται από τα λύματα που διοχετεύουν στον ποταμό οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις που βρίσκονται στην περιοχή. Αυτό που δεν έχει εξεταστεί από τις μέχρι τώρα μελέτες, είναι η συνεισφορά των πετρωμάτων της περιοχής στη ρύπανση των υπογείων υδάτων της. Το βασικό ερώτημα επομένως, που καλείται να απαντήσει η παρούσα εργασία είναι εάν η προέλευση της ρύπανσης των υπογείων υδάτων της ευρύτερης περιοχής του ποταμού Ασωπού είναι ανθρωπογενής, γηγενής ή κάποιος συνδυασμός τους.

Ως περιοχή μελέτης στην παρούσα εργασία έχει οριστεί η ευρύτερη περιοχή του Ωρωπού Αττικής, η οποία διαρρέεται από τον ποταμό Ασωπό και η οποία απέχει 54 χιλιόμετρα από την πόλη των Αθηνών. Για την περιοχή αυτή, δίνονται τα γεωγραφικά, υδρογεωλογικά, κλιματολογικά, περιβαλλοντικά και οικονομικά στοιχεία που τη χαρακτηρίζουν και περιγράφεται η υφιστάμενη κατάσταση ρύπανσης του ποταμού Ασωπού και των υπογείων υδροφορέων της από το εξασθενές χρώμιο.

Το εξασθενές χρώμιο, το οποίο αποτελεί μια από τις πιο συνηθισμένες ενώσεις του χρωμίου, απαντάται στον αέρα, στο νερό και στο έδαφος, ως αποτέλεσμα φυσικών διεργασιών και ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Είναι εξαιρετικά τοξικό για τον άνθρωπο και το περιβάλλον, προκαλώντας σοβαρές μεταλλάξεις στους οργανισμούς και οδηγώντας τους ακόμα και στο θάνατο. Για το λόγο αυτό, έχουν θεσπιστεί αυστηρά όρια ποιότητας για το πόσιμο και το μη πόσιμο υπόγειο νερό.

Το υπόγειο νερό αποτελεί σημαντικό κομμάτι της ανθρώπινης ζωής καθώς σχετίζεται άμεσα με τις ανθρώπινες δραστηριότητες και τις ανάγκες για πόσιμο νερό. Βρίσκεται αποθηκευμένο στους υπόγειους υδροφορείς και οι ρύποι που είναι διαλυμένοι σε αυτό, μεταφέρονται με τους βασικούς μηχανισμούς μεταφοράς μάζας που είναι η συμμεταφορά, η διασπορά και η διάχυση.

Για την απάντηση του βασικού ερωτήματος της παρούσας εργασίας έγινε μοντελοποίηση της κίνησης των υπογείων υδάτων και της μεταφοράς του εξασθενούς χρωμίου με τη βοήθεια του τρισδιάστατου μοντέλου ροής υπογείων υδάτων και μεταφοράς ρύπων PTC (Princeton Transport Code) χρησιμοποιώντας τα εργαλεία που παρέχονται από το λογισμικό Argus ONE.

Αρχικά, γίνεται μια αναφορά του θεωρητικού υποβάθρου στο οποίο στηρίζεται η μοντελοποίηση της κίνησης των υπογείων υδάτων με χρήση αριθμητικών μεθόδων και ιδιαίτερα των μεθόδων των πεπερασμένων διαφορών και των πεπερασμένων στοιχείων, τις οποίες χρησιμοποιεί το αριθμητικό μοντέλο PTC. Στη συνέχεια περιγράφεται το λογισμικό Argus One και ο κώδικας PTC.

Έπειτα από την εισαγωγή των απαραίτητων για την εκτέλεση του προγράμματος δεδομένων και τη βαθμονόμηση του μοντέλου με βάση τις μετρήσεις πεδίου, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης για την παρούσα κατάσταση υπό πραγματικές συνθήκες. Με βάση αυτά, γίνεται η εξαγωγή των συμπερασμάτων για την κατάσταση του υδροφορέα και απαντάται το ερώτημα της προέλευσης της ρύπανσης που παρατηρείται στα υπόγεια νερά της περιοχής.

Τελικά, από τα αποτελέσματα του μοντέλου προκύπτει ότι, η ρύπανση των υπογείων υδάτων της ευρύτερης περιοχής του Ασωπού ποταμού δεν προέρχεται μόνο από τα λύματα των βιομηχανικών εγκαταστάσεων της περιοχής που διοχετεύονται στον ποταμό, αλλά ένα σημαντικό μέρος της είναι αποτέλεσμα της γεωλογίας της ίδιας της περιοχής.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΥΠΟΓΕΙΑ ΡΟΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΜΑΖΑΣ	1
1.1	Εισαγωγή	1
1.2	Υπόγειοι υδροφορείς	2
1.3	Χαρακτηριστικά υπόγειων υδροφορέων	3
1.4	Κύρια είδη εδαφών	6
1.5	Μηχανισμοί μεταφοράς ρύπων	7
2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	8
2.1	Ανθρωπογενές περιβάλλον	8
2.2	Περιγραφή Οικισμών	8
2.3	Οικονομία-παραγωγικοί τομείς	9
2.4	Κλιματολογικά στοιχεία	10
2.5	Γεωλογία.....	12
2.6	Υδρογεωλογία	15
2.7	Τεκτονική	15
2.8	Σεισμικότητα	16
2.9	Περιγραφή οικοτόπων	17
2.10	Υφιστάμενη κατάσταση ρύπανσης.....	19
3	ΧΡΩΜΙΟ.....	22
3.1	Εισαγωγή	22
3.2	Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά χρωμίου.....	22
3.3	Χρήσεις.....	27
3.4	Τρόπος εισαγωγής χρωμίου στο περιβάλλον	29
3.5	Τοξικότητα χρωμίου	32
3.6	Νομοθεσία	38
3.7	Προστασία και απορρύπανση υπογείων υδάτων από το χρώμο	39
4	ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΡΥΠΩΝ	44
4.1	Εισαγωγή	44
4.2	Διαδικασία μοντελοποίησης.....	45
4.3	Τα μαθηματικά μοντέλα στο υπόγειο νερό	46

4.4	Παραγωγή των βασικών εξισώσεων του συστήματος	46
4.5	Βασικές εξισώσεις του μοντέλου της υπόγειας ροής	49
4.6	Επίλυση μαθηματικού μοντέλου	51
4.7	Εννοιολογικό μοντέλο και κατασκευή πλέγματος	53
4.8	Προσδιορισμός Συνθηκών.....	55
4.9	Δεδομένα	57
5	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PTC	58
5.1	Εισαγωγή	58
5.2	Θεμελιώδεις εξισώσεις	58
5.3	Επίλυση αλγορίθμου μοντέλου PTC	59
5.4	Τρισδιάστατη ροή υπογείων υδάτων	60
5.4.1	Οριακές συνθήκες	60
5.5	Τρισδιάστατη μεταφορά ρύπων.....	61
5.5.1	Οριακές Συνθήκες	62
6	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ArcGIS 9.2	63
7	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ GEO 5	65
8	ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PTC	66
8.1	Προσδιορισμός περιοχής μελέτης	66
8.2	Γεωτρήσεις	67
8.3	Αρχικές Συνθήκες.....	75
8.4	Οριακές Συνθήκες Ροής.....	75
8.5	Οριακές Συνθήκες Μεταφοράς Ρύπου	77
8.6	Γενικές παράμετροι μοντέλου	71
8.7	Ειδικές παράμετροι μοντέλου.....	72
8.8	Βροχόπτωση	78
8.9	Βαθμονόμηση μοντέλου	79
9	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	83
9.1	Προσδιορισμός υπόγειας ροής νερού.....	83
9.2	Προσδιορισμός μεταφοράς μάζας	89
10	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	92
11	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	94

11.1	Ελληνική βιβλιογραφία.....	94
11.2	Ξένη βιβλιογραφία.....	95
11.3	Ηλεκτρονική βιβλιογραφία.....	97
12	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	98
	Συγκέντρωση χρωμίου μοντέλου και πεδίου	98
13	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	99
	Δελτία απογραφής γεωτρήσεων (γεωλογικά καρότα)	99
14	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.....	111
	Απλοποιημένη μορφή γεωτρήσεων (γεωλογικών καρότων)	111
15	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ.....	123

1 ΥΠΟΓΕΙΑ ΡΟΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΜΑΖΑΣ

1.1 Εισαγωγή

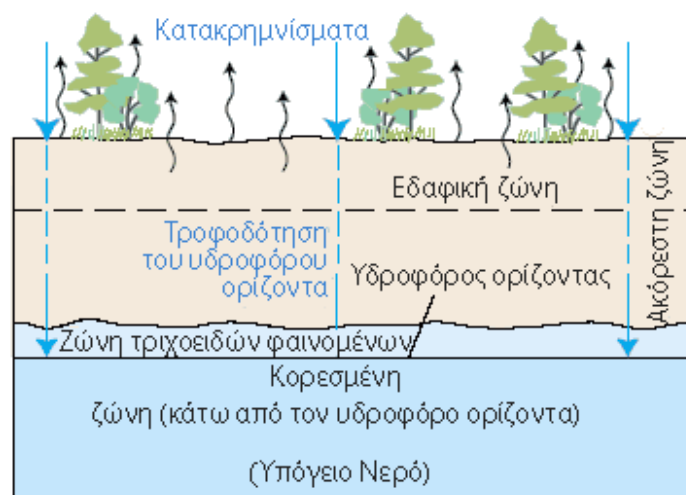
Το υπόγειο νερό χρησιμοποιείται εδώ και χιλιάδες χρόνια από τους ανθρώπους για την κάλυψη διαφόρων αναγκών όπως η ύδρευση και η άρδευση. Η ζωή στη Γη βασίζεται τόσο στο υπόγειο όσο και στο επιφανειακό νερό. Μεγάλες ποσότητες νερού βρίσκονται αποθηκευμένες κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Το νερό αυτό συνεχίζει να κινείται, αν και συνήθως με πολύ μικρή ταχύτητα, και συνεχίζει να αποτελεί μέρος του υδρολογικού κύκλου. Το μεγαλύτερο μέρος του υπόγειου νερού προέρχεται από διήθηση κατακρημνισμάτων και βρίσκεται αποθηκευμένο στην κορεσμένη και στην ακόρεστη ζώνη.

Ακόρεστη ή μη κορεσμένη ζώνη ονομάζεται η ζώνη του υπεδάφους, όπου οι πόροι καταλαμβάνονται από αέρα και νερό συγχρόνως (εκτός από τις περιπτώσεις που καταλαμβάνονται προσωρινά από νερό-περίπτωση πλημμύρας). Η πίεση μέσα στους εδαφικούς πόρους είναι μικρότερη της ατμοσφαιρικής. Στην ακόρεστη ζώνη διακρίνονται δύο υποζώνες (Καρατζάς, 2003):

- Ζώνη του εδαφικού ύδατος
- Ζώνη των τριχοειδών φαινομένων

Η πρώτη επεκτείνεται από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το τέλος της ζώνης του ριζικού συστήματος των φυτών, ενώ η δεύτερη από τον υδροφόρο ορίζοντα μέχρι το σημείο που παρατηρούνται τα τριχοειδή φαινόμενα. Οι μηχανισμοί ροής και μεταφοράς μάζας στην ακόρεστη ζώνη είναι αρκετά πολύπλοκοι, λόγω των επιδράσεων των τριχοειδών φαινομένων και των μη γραμμικών χαρακτηριστικών του εδάφους.

Κορεσμένη ζώνη ή ζώνη του υπόγειου ύδατος ονομάζεται η ζώνη όπου όλοι οι πόροι καταλαμβάνονται εξ'ολοκλήρου από νερό και βρίσκονται κάτω από υδροστατική πίεση. Επίσης, το άνω όριο της κορεσμένης ζώνης είναι ο υδροφόρος ορίζοντας με υδροστατική πίεση ίση με την ατμοσφαιρική (Καρατζάς, 2003). Ο υδροφόρος ορίζοντας αποτελεί και το όριο μεταξύ κορεσμένης και ακόρεστης ζώνης. Στην εικόνα 1, παρουσιάζονται σχηματικά τόσο η κορεσμένη όσο και η ακόρεστη ζώνη του υπεδάφους.



Εικόνα 1. Ζώνες υπεδάφους [i]

1.2 Υπόγειοι υδροφορείς

Σε γενικές γραμμές, το υπόγειο νερό που προέρχεται από την κατείσδυση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων διαχωρίζεται σε:

- **Βαρυτικό νερό:** Είναι το νερό που υπακούει στους νόμους της βαρύτητας και παίρνει μέρος στην υπόγεια κυκλοφορία.

- **Νερό κατακράτησης:** Είναι το νερό που δεν υπακούει στους νόμους της βαρύτητας και συνεπώς δεν παίρνει μέρος στην υπόγεια κυκλοφορία.

Υδροφορείς (aquifers) είναι οι γεωλογικοί σχηματισμοί που περιέχουν σημαντικές ποσότητες διαπερατών υλικών κορεσμένων με νερό και οι οποίοι προμηθεύουν με σημαντικές ποσότητες νερού γεωτρήσεις και πηγές (Καρατζάς, 2003). Οι υδροφορείς έχουν αυξημένη ικανότητα να κατακρατούν και να μεταβιβάζουν νερό. Επίσης, οι περισσότεροι υδροφορείς εκτείνονται σε μεγάλη έκταση και μπορούν να θεωρηθούν σαν υπόγειες δεξαμενές. Τέλος, ως υδροφόρος ορίζοντας θεωρείται η άνω επιφάνεια του υδροφόρου στρώματος.

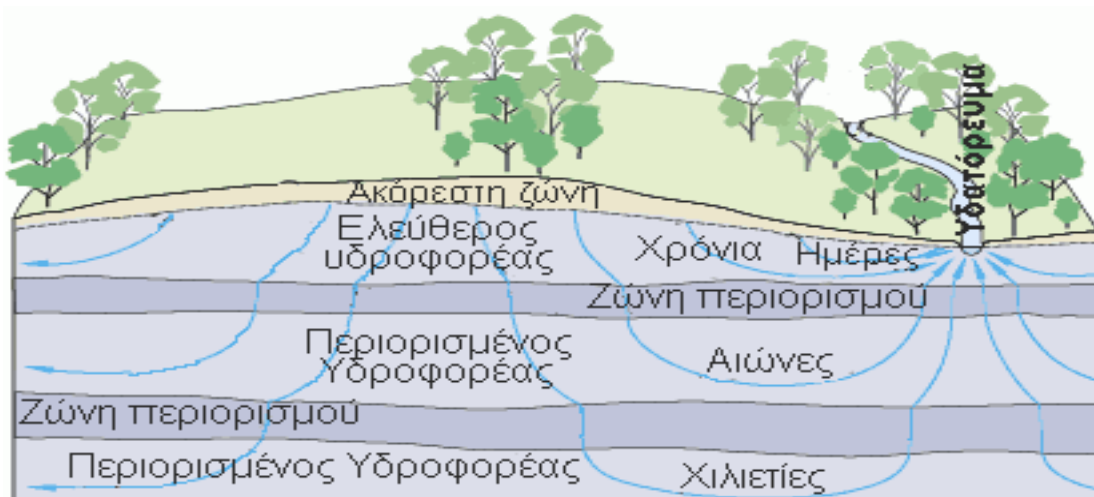
Οι υπόγειοι υδροφορείς ταξινομούνται με βάση τη θέση του υδροφόρου ορίζοντα στις εξής κατηγορίες (Εικόνα 2):

- Ελεύθερος υδροφορέας

Είναι ο υδροφορέας που έχει ως κατώτερο όριο ένα στεγανό γεωλογικό στρώμα, ενώ η ανώτερη επιφάνειά του είναι ο υδροφόρος ορίζοντας. Δεν παρεμβάλλεται δηλαδή κάποιο αδιαπέρατο γεωλογικό στρώμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στην ελεύθερη επιφάνεια του υπόγειου νερού η υδροστατική πίεση να είναι ίση με την ατμοσφαιρική.

- Περιορισμένος ή αρτεσιανός υδροφορέας

Ένας περιορισμένος υδροφορέας έχει ως ανώτερο και κατώτερο όριο αδιαπέρατα στρώματα και το νερό περιορίζεται στα όρια αυτά. Είναι κορεσμένος σε όλο το πάχος του και η πίεση του νερού είναι μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής. Για το λόγο αυτό η πιεζομετρική επιφάνεια, η οποία είναι μια εικονική επιφάνεια και συμπίπτει με το επίπεδο της υδροστατικής επιφάνειας στον υδροφορέα, βρίσκεται ψηλότερα από τη βάση της αδιαπέρατης οροφής. Όταν η πιεζομετρική επιφάνεια βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, τότε παρατηρείται αυτόματη ροή με τη μορφή πίδακα (αρτεσιανισμός).



Εικόνα 2. Τύποι υπογείων υδροφορέων [i]

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, η κατεύθυνση και η ταχύτητα του υπόγειου νερού καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά των υδροφορέων και των στρωμάτων περιορισμού (υπεδάφια στρώματα, τα οποία διαπερνά το νερό πολύ δύσκολα ή σχεδόν καθόλου). Η υπόγεια κίνηση του νερού εξαρτάται από τη διαπερατότητα (πόσο εύκολο ή δύσκολο είναι στο νερό να κινηθεί) και από το πορώδες (την ποσότητα των κενών μέσα στο υλικό) των στρώσεων. Αν το υπεδάφιο στρώμα επιτρέπει στο νερό να κινείται σχετικά γρήγορα, αυτό μπορεί να διανύσει μεγάλες αποστάσεις στη διάρκεια μερικών ημερών. Μπορεί όμως επίσης, να βυθιστεί προς βαθιούς υδροφορείς και να χρειαστεί χιλιάδες χρόνια μέχρι να ξαναεμφανιστεί στην επιφάνεια.

1.3 Χαρακτηριστικά υπόγειων υδροφορέων

Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των υπόγειων υδροφορέων είναι τα εξής:

➤ Πορώδες (Porosity)

Πορώδες (n) ονομάζεται το ποσοστό του πετρώματος ή του εδάφους που δεν καταλαμβάνεται από στερεά υλικά και εκφράζεται με το λόγο του συνολικού όγκου των διακένων (V_v) προς το συνολικό όγκο του πετρώματος/εδάφους (V_o) (Καρατζάς, 2003):

$$n = \frac{V_v}{V_o}$$

όπου V_v : Όγκος κενών

V_o : Συνολικός όγκος δείγματος

Το πορώδες επηρεάζεται από κάποιους παράγοντες όπως είναι το σχήμα των κενών, η κοκκομετρική διαβάθμιση, η διάταξη και το σχήμα των κόκκων, το υλικό πλήρωσης των κενών και η γεωλογική ιστορία του εδάφους (Καρατζάς, 2003). Για το λόγο αυτό, το πορώδες διαφέρει ανάλογα με το είδος του γεωλογικού σχηματισμού. Ωστόσο από την άποψη της υπόγειας ροής, το πορώδες δεν είναι απολύτως ενδεικτικό μέγεθος, καθώς υπάρχει κάποιο ποσό διακένων που δεν επικοινωνούν μεταξύ τους με αποτέλεσμα να μην επιτρέπεται η ροή του υπόγειου νερού διαμέσου αυτών. Έτσι, το ποσοστό των πόρων που είναι διαθέσιμο για τη ροή του ρευστού, ονομάζεται ενεργό πορώδες.

Πίνακας 1. Πορώδη διαφόρων γεωλογικών σχηματισμών (Καρατζάς, 2003)

Γεωλογικός σχηματισμός	Πορώδες
Αμμώδη εδάφη	0.45-0.55
Αργιλώδη εδάφη	0.40-0.60
Ασβεστολιθικά πετρώματα	0.20

➤ 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 ανά μονάδα βάρους ονομάζεται υδραυλικό φορτίο (H) και ισούται με το άθροισμα του φορτίου πίεσης P/γ (pressure head) και του υψομέτρου ή της θέσης (της απόστασης δηλ. από το επίπεδο αναφοράς z (elevation head)-ως επίπεδο αναφοράς συνήθως θεωρείται η στάθμη της θάλασσας) : $H=(P/\gamma)+z$

όπου

P = Υδροστατική πίεση

γ = Ειδικό βάρος νερού ίσο με την πυκνότητά του επί την επιτάχυνση της βαρύτητας ($\gamma=\rho \cdot g$)

Επίσης, το υδραυλικό φορτίο αναφέρεται και ως πιεζομετρικό φορτίο και ταυτίζεται με το απόλυτο υψόμετρο της στάθμης του υπόγειου νερού σε μια γεώτρηση που έχει διανοιχθεί 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.

➤ Υδραυλική αγωγιμότητα (Hydraulic conductivity)

Η υδραυλική αγωγιμότητα αποτελεί μέτρο της ικανότητας του νερού να μετακινείται μέσω των διακένων του γεωλογικού σχηματισμού. Εξαρτάται αφενός μεν από τα χαρακτηριστικά του εδάφους (κοκκομετρική διαβάθμιση, σχήμα και χωρική κατανομή των πόρων του εδάφους), αφετέρου δε από τις ιδιότητες του υγρού (πυκνότητα και ιξώδες). Έχει διαστάσεις ταχύτητας LT^{-1} και υπολογίζεται από τον νόμο του Darcy.

Το 1856, ο Henry Darcy μελέτησε τη ροή του ύδατος διαμέσου οριζόντιων στρωμάτων άμμου που συνήθως χρησιμοποιούνται σαν υδατικά φίλτρα. Το συμπέρασμα της μελέτης του ήταν ότι ο ρυθμός ροής (Q/A) διαμέσου πορώδους είναι ανάλογος των απωλειών φορτίου, ανάλογος ενός συντελεστή K που χαρακτηρίζει το πορώδες υλικό και αντιστρόφως ανάλογος του μήκους πορείας της ροής. Η διατύπωση αυτή αποτελεί το νόμο του Darcy και η μαθηματική έκφρασή του είναι (Καρατζάς, 2003):

$$\frac{Q\Delta h}{A} = -K \frac{\Delta h}{L} \Rightarrow q = -K \frac{\Delta h}{L}$$

Όπου,

Q : Παροχή (L^3/T)

A : Επιφάνεια (L^2)

K : Υδραυλική αγωγιμότητα (L/T)

Δh : Απώλεια φορτίου (L)

L : Μήκος στήλης (L)

q : Ταχύτητα Darcy ή ειδική παροχή (L/T)

Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι η ταχύτητα της ροής είναι προς την κατεύθυνση που ελαττώνεται το φορτίο. Επίσης, η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου ανά μονάδα μήκους κατά τη διεύθυνση της υπόγειας ροής ονομάζεται υδραυλική κλίση και δίνεται από την έκφραση $\Delta h/L$, που συνήθως εμφανίζεται στην γενική της μορφή ως $\Delta h/dL$.

Πίνακας 2. Υδραυλική αγωγιμότητα γεωλογικών σχηματισμών (Freeze and Cherry, 1979)

Γεωλογικός σχηματισμός	Υδραυλική αγωγιμότητα, K (m/s)
Χαλίκια	10^{-3} - 10^1
Καθαρή άμμος	10^{-2} - $5 \cdot 10^{-5}$
Ιλυώδης άμμος	10^{-3} - 10^{-7}
Ιλύς	10^{-5} - 10^{-9}
Ασβεστόλιθοι και δολομίτες	10^{-6} - $5 \cdot 10^{-9}$
Καρστικός ασβεστόλιθος	10^{-2} - 10^{-6}
Διαπερατός βασάλτης	10^{-2} - 10^{-7}
Ψαμμίτης	10^{-6} - 10^{-10}

➤ Μεταβιβασιμότητα (Transmissivity)

Ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας ορίζεται ως ο ρυθμός με τον οποίο όγκος νερού δεδομένου κινηματικού ιξώδους περνά από μια μοναδιαία διατομή του υδροφόρου στρώματος με υδραυλική κλίση ίση με τη μονάδα. Είναι το γινόμενο (m^2/d) της υδραυλικής αγωγιμότητας (K) επί το κορεσμένο πάχος του υδροφόρου στρώματος (b) (Καρατζάς, 2003):

$$T=K \cdot b$$

Σε έναν ομοιογενή και ομοιόμορφου πάχους περιορισμένο υδροφορέα, ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας παραμένει σταθερός, ενώ η μεταβιβασιμότητα ενός ελεύθερου υδροφορέα μεταβάλλεται χωρικά, καθώς το κορεσμένο πάχος του υδροφορέα εξαρτάται από το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα. Συνήθως χρησιμοποιείται για περιορισμένους υδροφορείς

➤ Αποθηκευτικότητα (Storativity)

Ο συντελεστής αποθηκευτικότητας ή υδροχωρητικότητας (S) είναι ο όγκος νερού που μπορεί να ληφθεί ή να 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 περιορισμένους από (0,0001-0,5)%. Η διαφορά αυτή, οφείλεται στο διαφορετικό μηχανισμό απελευθέρωσης νερού από τα δύο αυτά είδη υδροφορέων. Στους περιορισμένους 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 περιεχομένου σ' αυτόν υπόγειου νερού. Από την άλλη πλευρά, στους ελεύθερους υδροφορείς ο συντελεστής αποθηκευτικότητας εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την πλήρωση ή εκκένωση των πόρων και κατά πολύ λιγότερο στη συμπιεστότητα του υλικού και του ύδατος. Συμπίπτει επομένως, με το ενεργό πορώδες.

1.4 Κύρια είδη εδαφών

Τα κύρια είδη εδάφους που υπάρχουν και τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί ως απλοποίηση των εδαφών που παρατηρούνται στην περιοχή μελέτης είναι τα εξής:

➤ Αργιλώδη εδάφη

Τα αργιλώδη εδάφη, στα οποία πλεονάζει η άργιλος, συντίθενται από μικροσκοπικά στερεά σωματίδια με πλακοειδές σχήμα. Η επιφάνεια των στερεών σωματιδίων είναι σημαντική, γεγονός που εξηγεί την επίδραση σημαντικών μοριακών δυνάμεων μεταξύ των αργιλικών στερεών και του νερού. Έχουν επομένως, μεγάλη συνεκτικότητα και δύσκολα περνούν βαθιά μέσα τους το νερό, ο ήλιος κι ο αέρας, με αποτέλεσμα να είναι πρακτικώς αδιαπέρατα. Τα εδάφη αυτά, διογκώνονται και συρρικνώνονται σημαντικά κάτω από μεταβολές υγρασίας (λόγω εναλλαγών εποχών-χειμώνα/καλοκαίρι) και κατέχουν μεγάλο τριχοειδές δυναμικό.

➤ Κροκαλοπαγή πετρώματα

Το κροκαλοπαγές είναι ένα ιζηματογενές πέτρωμα, προϊόν μηχανικής αποσάθρωσης. Αποτελείται από κροκάλες σε ποσοστό τουλάχιστον 50% με μέγεθος ανώτερο των 2 mm. Οι κροκάλες είναι περισσότερο ή λιγότερο αποστρωγγυλωμένα θραύσματα πετρωμάτων και συνδέονται μεταξύ τους με υλικό μικροκρυσταλλικό ή άμορφο πυριτικής ή ασβεστιτικής σύστασης αλλά που μπορεί να αποτελείται και από οξειδία και από υδροξείδια του σιδήρου. Η δημιουργία των κροκαλοπαγών οφείλεται συνήθως στην αποσάθρωση των πετρωμάτων που αποτελούν το ανάγλυφο της γης λόγω των τεκτονικών παραμορφώσεων και μας πληροφορούν για τις περιοχές που αποσαθρώθηκαν αλλά και για το μέγεθος της αποσάθρωσης, την κατεύθυνση και τον τρόπο μεταφοράς του υλικού καθώς και για το παλαιοπεριβάλλον.

➤ Ασβεστολιθικά πετρώματα

Οι ασβεστόλιθοι είναι ιζηματογενή πετρώματα που έχουν ως κύριο ορυκτολογικό τους συστατικό τον ασβεστίτη (CaCO_3). Η χημική σύσταση ενός καθαρού ασβεστολιθικού πετρώματος είναι 56% CaO και 44% CO_2 . Συνήθως, όμως, οι ασβεστόλιθοι περιέχουν διάφορες προσμίξεις ενώσεων οξειδίων και υδροξειδίων του αργιλίου, του σιδήρου κ.ά, η παρουσία των οποίων επηρεάζει και το χρωματισμό του πετρώματος. Όταν οι ασβεστόλιθοι περιέχουν 5-15% MgO καλούνται μαγνησιούχοι ασβεστόλιθοι, ενώ όταν η περιεκτικότητά τους σε MgO είναι πάνω από 15% καλούνται δολομιτικοί ασβεστόλιθοι. Η απόθεση του ανθρακικού ασβεστίου μπορεί να είναι είτε χημική (κορεσμός λόγω εξάτμισης ή αύξησης συγκέντρωσης ή αλλαγής φυσικοχημικών σταθερών) είτε βιογενής από συσσώρευση και συμπαγοποίηση των σκελετικών στοιχείων διαφόρων ζωικών ή φυτικών οργανισμών μετά το θάνατό τους.

Είναι πολύ διαδεδομένα πετρώματα και υπάρχουν άφθονα στη χώρα μας ιδιαίτερα στη δυτική Ελλάδα.

Τέλος, μια επίσης πολύ σημαντική κατηγορία εδαφών, τα οποία όμως δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση στην περιοχή του Ασωπού είναι τα αμμώδη εδάφη.

➤ **Αμμώδη εδάφη**

Τα αμμώδη εδάφη έχουν ως κύριο συστατικό τους την άμμο και συντίθενται από μακροσκοπικά στερεά σωματίδια στρογγυλεμένα ή γωνιώδη. Το νερό, ο ήλιος και ο αέρας περνούν μέσα τους εύκολα και σε πολύ μεγάλο βάθος. Όμως δε συγκρατούν υγρασία και οι θρεπτικές ουσίες της επιφάνειάς τους ξεπλένονται εύκολα. Επίσης, στραγγίζουν εύκολα, δεν διογκώνονται ή συρρικνώνονται κάτω από την επίδραση της υγρασίας και παρουσιάζουν μικρό τριχοειδές δυναμικό. Τέλος, δεν παρουσιάζουν πλαστικότητα, δηλαδή κάτω από οποιοσδήποτε συνθήκες υγρασίας δεν μεταβάλουν τον σχηματισμό.

1.5 Μηχανισμοί μεταφοράς ρύπων

Ως ‘μεταφορά μάζας’ ή ‘μεταφορά διαλυμένης ουσίας’ ονομάζεται η μεταφορά ουσιών που είναι διαλυμένες σε υπόγεια ύδατα. Οι βασικοί μηχανισμοί μεταφοράς μάζας είναι η διάχυση, η διασπορά και η συμμεταφορά (Καρατζάς, 2003).

➤ **Συμμεταφορά (Advection)**

Η διαδικασία αυτή αφορά τη μεταφορά των διαλυμένων ουσιών με τη ροή του υπόγειου ύδατος. Η ποσότητα της ουσίας που μεταφέρεται είναι συνάρτηση της συγκέντρωσής της στα υπόγεια ύδατα και της ποσότητας του νερού της υπόγειας ροής. Εξαρτάται από την ταχύτητα διήθησης (seepage velocity), η οποία υπολογίζεται από την ταχύτητα Darcy διαιρεμένη με το πορώδες. Εάν δεν υπάρχει υπόγεια ροή ύδατος, η συμμεταφορά δεν προκαλεί μεταφορά ρύπων.

➤ **Διασπορά (Dispersion)**

Η διασπορά οφείλεται σε μεταβολές στην ταχύτητα λόγω της ανομοιογένειας του υδροφορέα σε μακροσκοπική κλίμακα. Στην κλίμακα αυτή, υπάρχουν τρεις βασικές αιτίες για τις διακυμάνσεις της ταχύτητας του υπόγειου ύδατος:

- ✓ Όπως το υγρό κινείται δια μέσου των πόρων, η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη στο μέσο των πόρων από ότι κατά μήκος των πλευρών
- ✓ Μερικά από τα μόρια του υγρού ταξιδεύουν στο πορώδες υλικό κατά μήκος μεγαλύτερων διαδρομών από ότι άλλα μόρια που εκτελούν την ίδια γραμμική απόσταση
- ✓ Μερικοί πόροι είναι μεγαλύτεροι από άλλους και έτσι επιτρέπουν στο υγρό να κινείται γρηγορότερα

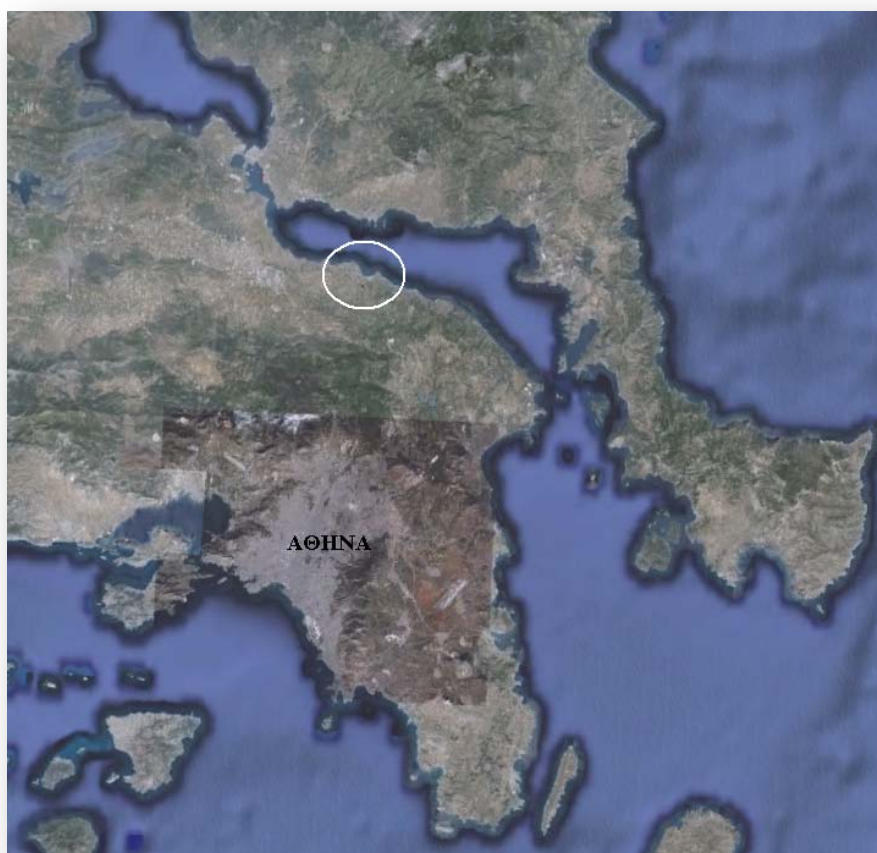
➤ **Διάχυση (Diffusion)**

Μια διαλυμένη ουσία στο νερό, κινείται από μια περιοχή υψηλής συγκέντρωσης προς μια άλλη χαμηλής συγκέντρωσης. Αυτό είναι γνωστό ως ‘μοριακή διάχυση’ ή ‘διάχυση’. Διάχυση συμβαίνει όσο υπάρχει μεταβολή συγκέντρωσης ακόμη και εάν το υγρό δεν κινείται.

2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 Ανθρωπογενές περιβάλλον

Ως περιοχή μελέτης στην παρούσα εργασία έχει οριστεί η περιοχή του Ωρωπού Αττικής, η οποία διαρρέεται από τον ποταμό Ασωπό. Ο Ωρωπός αποτελεί παραθεριστικό συγκρότημα στις ακτές του ευβοϊκού κόλπου. Βρίσκεται στα βορειοανατολικά της Αττικής και απέχει 54 χιλιόμετρα από την πόλη των Αθηνών. Αποτελείται από τον ομώνυμο οικισμό, ενώ γειτονικά χωριά είναι το Μαρκόπουλο, η Σκάλα Ωρωπού, το Συκάμινο, το Χαλκούτσι, τα Νέα Παλάτια και ο Άγιος Κωνσταντίνος. Διοικητικά υπάγεται στη Νομαρχία Ανατολικής Αττικής (Συρράκου, Χ., 2008).



Εικόνα 3. Περιοχή Ωρωπού Αττικής

2.2 Περιγραφή Οικισμών

Το Μαρκόπουλο είναι χωριό του παραθεριστικού συγκροτήματος Ωρωπίων και αποτελεί έδρα της ομώνυμης κοινότητας. Το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού απασχολείται στη βιομηχανική ζώνη που καταλαμβάνει σημαντικό κομμάτι της κοινότητας.

Η Σκάλα Ωρωπού είναι παραθεριστική κοινότητα, στο ευρύτερο παραθεριστικό συγκρότημα των Ωρωπίων. Αποτελεί το ιστορικό αλλά και σύγχρονο κέντρο του συγκροτήματος, καθώς βρίσκεται στις ακτές του ευβοϊκού κόλπου, σε αντίθεση με

τον ομώνυμο αγροτικό οικισμό του Ωρωπού. Διοικητικά αναγνωρίζεται ως αυτόνομη κοινότητα της Ανατολικής Αττικής υπό την ονομασία "Σκάλα Ωρωπού", μετά την απόσχισή της από τα Νέα Παλάτια.

Το Συκάμινο είναι χωριό της βορειοανατολικής Αττικής, στο ευρύτερο συγκρότημα των Ωρωπίων και αποτελεί έδρα της ομώνυμης κοινότητας. Εντοπίζεται 2 χμ δυτικά του Ωρωπού, στην αριστερή όχθη του Ασωπού ποταμού. Η ονομασία του Συκαμίνου προήλθε από τις πολλές μουριές (συκαμινιές) που υπάρχουν στο χωριό.

Το Χαλκούτσι είναι το βορειότερο παραθαλάσσιο χωριό της Βορειοανατολικής Αττικής και ανήκει διοικητικά στην κοινότητα Σκάλας Ωρωπού. Κατά μήκος της ακτογραμμής βρίσκεται βόρεια της Σκάλας Ωρωπού και νότια του Δηλεσίου. Στη νότια είσοδό του Χαλκουτσίου βρίσκονται και οι εκβολές του Ασωπού (Συρράκου, Χ., 2008).

Τα Νέα Παλάτια είναι οικισμός της Αττικής, κοντά στον Ωρωπό και αποτελούν έδρα της ομώνυμης κοινότητας. Δημιουργήθηκε το 1923 από πρόσφυγες, ενώ σήμερα είναι παραθεριστική κοινότητα του συγκροτήματος των Ωρωπίων. Στα διοικητικά όρια των Παλατιών συμπεριλαμβάνονται οι οικισμός Αγίου Κωνσταντίνου και Νέα Πολιτεία στα σύνορα με τη Σκάλα.

Ο Άγιος Κωνσταντίνος είναι παραθεριστικός οικισμός της Ανατολικής Αττικής. Βρίσκεται στο βορειοανατολικό τμήμα του νομού ανάμεσα στο Χαλκούτσι και την Σκάλα Ωρωπού. Ανήκει στο παραθεριστικό συγκρότημα Ωρωπού που περιλαμβάνει όλη την παραλιακή ζώνη από τα Νέα Παλάτια μέχρι το Χαλκούτσι, ενώ διοικητικά συμπεριλαμβάνεται στην κοινότητα Νέων Παλατιών.

Ιστορικά, εκεί που σήμερα βρίσκεται η Σκάλα Ωρωπού, βρισκόταν ο αρχαίος Ωρωπός, λιμάνι με ιδιαίτερη σημασία στα αρχαία χρόνια για την επικοινωνία με την Εύβοια. Ο πληθυσμός του ανερχόταν στους 6.000 κατοίκους. Ειδικά για τους Αθηναίους, που είχαν κτήσεις στο νησί αυτό, ο Ωρωπός αποτελούσε ενδιαμέσο διαμετακομιστικό σταθμό για τον εφοδιασμό της πόλης από την Εύβοια, χρησιμεύοντας παράλληλα και ως αμυντικό φυλάκιο της Αττικής προς την πλευρά της Βοιωτίας.

2.3 Οικονομία-παραγωγικοί τομείς

Στη βορειοανατολική Αττική, οι περιοχές εκατέρωθεν του Ασωπού ποταμού προς τον Ωρωπό χαρακτηρίζονται ως περιοχές με μεγάλη γεωργική ανάπτυξη. Ιδιαίτερα στη Σκάλα Ωρωπού παρατηρείται μεγάλη ανάπτυξη καλλιεργειών όπως σιτάρι και κριθάρι καθώς και δενδρωδών καλλιεργειών αλλά και αμπελών. Παράλληλα, όσον αφορά τον πρωτογενή τομέα παραγωγής, στην περιοχή παρατηρείται κτηνοτροφία κυρίως προβάτων και πουλερικών (Λοϊζίδου, Μ., 1998).

Τα τελευταία χρόνια όμως, παρατηρείται, σταδιακή μείωση της γεωργικής γης και διάθεση της για νέες αστικές χρήσεις, όπως η αναψυχή, ο τουρισμός και η κατοικία στις παράκτιες περιοχές, ενώ στην ενδοχώρα αναπτύσσεται το εμπόριο, η μεταποίηση και μερικώς η κατοικία. Οι βασικές παραγωγικές δραστηριότητες που αναπτύσσονται είναι (ΥΠΕΧΩΔΕ):

- Μεταποιητικές, βιομηχανικές ή βιοτεχνικές μικρής και μεγάλης κλίμακας ή δραστηριότητες συνδεδεμένες με την οικοδομή. Ο αριθμός των βιομηχανιών της περιοχής είναι σχετικά περιορισμένος, παρόλο που η

ευρύτερη περιοχή της Αττικής χαρακτηρίζεται από συνεχή βιομηχανική ανάπτυξη που οφείλεται κυρίως στην μικρή απόσταση από την Αθήνα.

- Εμπορικές, που καλύπτουν λιανικό και χονδρικό εμπόριο.
- Τουριστικές, είτε ξενοδοχεία - ενοικιαζόμενα δωμάτια ή διαμερίσματα, είτε 2η κατοικία, που συνοδεύονται από εμπόριο, εστιατόρια, μπαρ, μαρίνες και γενικώς θαλάσσια αναψυχή.

Οι περισσότερες από τις προαναφερθείσες δραστηριότητες διεξάγονται από κατοίκους της πρωτεύουσας σαν προσωπική εργασία ή επιχειρηματική δραστηριότητα. Πολλοί μόνιμοι κάτοικοι της περιοχής αποκτούν εισοδήματα που αποφέρει η κατάκτηση και η πώληση της γης.

2.4 Κλιματολογικά στοιχεία

Στο σημείο αυτό, παρουσιάζονται οι κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής του Ωρωπού, εξετάζοντας δύο από τα κυριότερα κλιματολογικά στοιχεία που είναι η θερμοκρασία του αέρα και τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα. Τα πρωτογενή δεδομένα συλλέχθηκαν από μετεωρολογικούς σταθμούς της περιοχής και επεξεργάστηκαν. Οι σταθμοί των οποίων τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν είναι του Τατοΐου, της Τανάγρας και της Χαλκίδας (Συρράκου, Χ., 2008).

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα μετεωρολογικά δεδομένα που λαμβάνονται από το μετεωρολογικό του Τατοΐου για τη χρονική περίοδο 1956-1997. Το υψόμετρο της περιοχής είναι 236 m (ΕΜΥ).

Πίνακας 3. Μετεωρολογικά δεδομένα σταθμού Τατοΐου

ΜΗΝΕΣ	ΜΕΣΕΣ ΜΗΝΙΑΙΕΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΙΣ (mm)	ΜΕΣΕΣ ΜΗΝΙΑΙΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ (°C)	ΜΕΣΕΣ ΜΗΝΙΑΙΕΣ ΤΙΜΕΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ (%)
Ιανουάριος	70.1	7.4	76.6
Φεβρουάριος	51.4	7.8	74.7
Μάρτιος	43.2	10.0	71.1
Απρίλιος	24.6	14.1	64.6
Μάιος	20.8	19.5	56.4
Ιούνιος	10.8	24.5	47.9
Ιούλιος	9.7	26.7	44.7
Αύγουστος	4.2	26.2	45.8
Σεπτέμβριος	13.5	22.2	54.6
Οκτώβριος	49.9	16.9	66.6
Νοέμβριος	55.9	12.4	75.4
Δεκέμβριος	76.0	9.0	77.9

ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ (mm)	430.1		
-----------------------------------	-------	--	--

Παράλληλα, ο μετεωρολογικός σταθμός της Τανάγρας βρίσκεται σε υψόμετρο 140 m και δίνει τα παρακάτω μετεωρολογικά δεδομένα για το χρονικό διάστημα 1986-1992 (Λοϊζίδου, Μ., 1998).

Πίνακας 4. Μετεωρολογικά δεδομένα σταθμού Τανάγρας

ΜΗΝΕΣ	ΜΕΣΕΣ ΜΗΝΙΑΙΕΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΙΣ (mm)	ΜΕΣΕΣ ΜΗΝΙΑΙΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ (°C)	ΜΕΣΕΣ ΜΗΝΙΑΙΕΣ ΤΙΜΕΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ (%)
Ιανουάριος	64.5	7.4	77
Φεβρουάριος	49.9	8.2	74.5
Μάρτιος	49.2	10.3	72.7
Απρίλιος	27.9	14.6	66.3
Μάιος	21.7	19.9	58.9
Ιούνιος	12.8	25.1	49.4
Ιούλιος	6.9	27.3	47.5
Αύγουστος	10.3	26.6	49.3
Σεπτέμβριος	20.4	22.3	58.7
Οκτώβριος	50.5	17.2	68.7
Νοέμβριος	58.8	12.9	75.7
Δεκέμβριος	74.9	9.4	77.5
ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ (mm)	447.8		

Όπως φαίνεται από τα κλιματολογικά στοιχεία που προκύπτουν από τους σταθμούς του Τατοΐου και της Τανάγρας και που αναφέρονται περίπου στο ίδιο χρονικό διάστημα, το μέγιστο ύψος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων εμφανίζεται το μήνα Δεκέμβριο και είναι 76.0 mm και 74.9 mm αντίστοιχα, ενώ το ελάχιστο ύψος βροχόπτωσης εμφανίζεται τον Αύγουστο (4.2 mm) σύμφωνα με το σταθμό του Τατοΐου και τον Ιούλιο (6.9 mm) σύμφωνα με το σταθμό της Τανάγρας. Παρατηρείται μια υγρή περίοδος του έτους από τον μήνα Οκτώβριο έως το μήνα Απρίλιο, και μια ξηρή περίοδος από το Μάιο έως το Σεπτέμβριο. Σχετικά με τη θερμοκρασία του αέρα, η ελάχιστη παρατηρείται το μήνα Ιανουάριο και είναι 7.4 °C, ενώ η μέγιστη διαπιστώνεται από το σταθμό του Τατοΐου και της Τανάγρας το μήνα Ιούλιο, με τιμές 26.7 °C και 27.3 °C αντίστοιχα.

Από την άλλη πλευρά, τα μετεωρολογικά δεδομένα που προέρχονται από το μετεωρολογικό σταθμό της Χαλκίδας αναφέρονται στη χρονική περίοδο 2006-2007.

Πίνακας 5. Μετεωρολογικά δεδομένα σταθμού Χαλκίδας

ΜΗΝΕΣ	ΜΕΣΕΣ ΜΗΝΙΑΙΕΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΙΣ (mm)	ΜΕΣΕΣ ΜΗΝΙΑΙΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ (°C)	ΜΕΣΕΣ ΜΗΝΙΑΙΕΣ ΤΙΜΕΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ (%)
Ιανουάριος	31.50	10.15	72.50
Φεβρουάριος	59.80	10.50	69.50
Μάρτιος	86.60	13.35	63.50
Απρίλιος	20.20	16.85	60.00
Μάιος	55.80	21.55	58.00
Ιούνιος	25.00	27.35	54.00
Ιούλιος	22.20	28.40	49.50
Αύγουστος	3.05	29.35	51.50
Σεπτέμβριος	40.85	23.95	57.00
Οκτώβριος	80.30	19.60	68.50
Νοέμβριος	58.80	13.95	70.50
Δεκέμβριος	27.55	10.60	73.00
ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ (mm)	511.65		

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω τιμές, τα κλιματολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής με το πέρασμα των χρόνων παρουσιάζουν μια σχετική αύξηση στις τιμές της θερμοκρασίας και του συνολικού ύψους βροχής, ενώ η υγρασία παρουσιάζει διακυμάνσεις.

Από όλα τα παραπάνω στοιχεία, γίνεται φανερό ότι το κλίμα της ευρύτερης περιοχής μελέτης, όπως και της Ελλάδας γενικότερα, είναι τυπικά μεσογειακό, δηλαδή ήπιοι και υγροί χειμώνες και σχετικά θερμά και ξηρά καλοκαίρια.

2.5 Γεωλογία

Στην περιοχή μελέτης διακρίνονται δύο κατηγορίες σχηματισμών και αυτοί είναι:

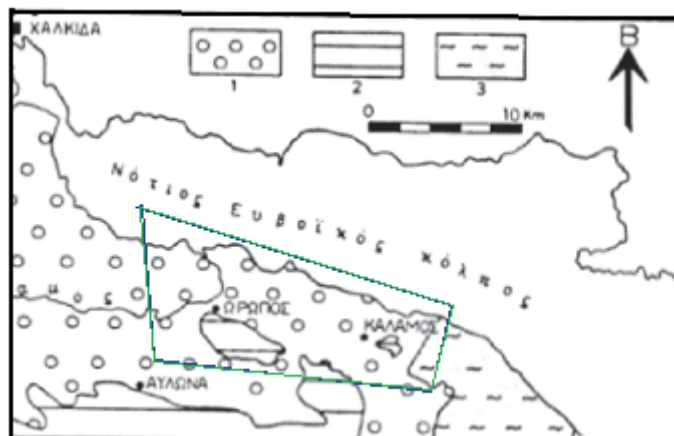
- Αλπικοί, που αποτελούν το υπόβαθρο και τα περιθώρια μιας τεκτονικής τάφρου με γενική διεύθυνση Α-Δ
- Μεταλπικοί, που πληρώνουν το τεκτονικό αυτό βύθισμα

Στην περιοχή μελέτης περιλαμβάνεται μια μεγάλη λεκάνη απορροής και αυτή είναι η λεκάνη του Ασωπού ποταμού που αποστραγγίζεται στην περιοχή του Ωρωπού στον ευβοϊκό κόλπο.

Στην ευρύτερη περιοχή, οι αλπικοί σχηματισμοί διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τους μεταμορφωμένους στο ανατολικό μέρος και τους μη μεταμορφωμένους σχηματισμούς στο υπόλοιπο. Συγκεκριμένα, στη μελετηθείσα περιοχή εμφανίζονται οι μη μεταμορφωμένοι αλπικοί σχηματισμοί, οι οποίοι αναπτύσσονται επιφανειακά στην περιοχή μελέτης και αποτελούν το υπόβαθρο του μεγαλύτερου τμήματος της λεκάνης του Ωρωπού. Εμφανίζονται κυρίως στα περιθώρια της λεκάνης καθώς και μέσα στη λεκάνη σαν νησίδες κάτω από τους υπερκείμενους μεταλπικούς σχηματισμούς όπως στην περιοχή Μήλεσι-Ωρωπού.

Η δημιουργία της λεκάνης μέσα στην οποία άρχισε η απόθεση των μεταλπικών σχηματισμών τοποθετείται στο Μειόκαινο με αντιπροσωπευτικότερους λιθολογικούς τύπους διάφορα ιζήματα χερσαίας και λιμναίας φάσης, όπως αργιλοκροκαλοπαγή, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, μάργες και τραβερτινώδεις ασβεστόλιθους με παρουσία λιγνιτών.

Η εξέλιξη της λεκάνης αυτής διαφοροποιείται κατά 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 (Παπανικολάου, Ι., et al., 1986).



Εικόνα 4. Γεωλογικό σκαρίφημα περιοχής μελέτης: 1. Μεταλπικοί σχηματισμοί 2. Αλπικοί σχηματισμοί μη μεταμορφωμένοι 3. Αλπικοί σχηματισμοί μεταμορφωμένοι (Παπανικολάου, Ι., et al., 1986).

Αναλυτικότερα, στη μελετηθείσα περιοχή συναντώνται οι παρακάτω γεωλογικοί σχηματισμοί (Συρράκου, Χ., 2008):

- Κροκαλοπαγή Μαρκοπούλου-Ωρωπού

Καταλαμβάνουν σχεδόν εξ'ολοκλήρου την περιοχή Μαρκοπούλου-σκάλας Ωρωπού και Ωρωπού και συνεχίζονται προς τα δυτικά στην περιοχή Χαλκοντσίου και Δηλεσίου. Αποτελούνται συνήθως από ψαμμιτικό υλικό και κροκάλες ποικίλης λιθολογικής σύστασης και ποικίλου μεγέθους μέχρι και 50 cm και σε μερικές περιπτώσεις μέχρι και 1 m μέτριας συνεκτικότητας.

- Μάργες περιοχής Συκαμίνου

Οι μάργες καλύπτουν μέρος του νότιου τμήματος της περιοχής μελέτης και συγκεκριμένα απαντώνται στην κοινότητα Ωρωπού. Τα βαθύτερα μέλη αποτελούνται από λευκές έως τεφρόλευκες, υποκίτρινες εύθρυπτες έως πολύ σκληρές μάργες, κατακερματισμένες με καλή στρώση, λεπτοπλακώδεις και με μικρή σχετικά κλίση. Προς τα πάνω μεταβαίνουν σε μαργαικά υλικά που φέρουν διαστρώσεις από φυλλώδεις μάργες. Τα ανώτερα μέλη αποτελούνται από τραβερτίνες που εναλλάσσονται με μαργαϊκούς ασβεστόλιθους.

- Ποταμοχερσαίες αποθέσεις περιοχής Δήλεσι-παραλία Αυλίδος

Καλύπτουν το βορειο-δυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης, δηλαδή το μεγαλύτερο τμήμα τη κοινότητας του Συκαμίνου και τον οικισμό Χαλκούτσι καθώς και ένα μικρό μέρος της κοινότητας του Ωρωπού. Αποτελούνται κυρίως από κροκαλοπαγή μικρής και μεγάλης συνεκτικότητας που εναλλάσσονται με ψαμμίτες και καστανέρυθρους πηλούς και αργίλους. Οι κροκάλες έχουν ποικίλο μέγεθος και το συνδετικό υλικό είναι ψαμμιτικό, αργιλοψαμμιτικό ή κροκαλοψαμμιτικό και προέρχονται από το προνεογενές υπόβαθρο της Πάρνηθας, από μεταμορφωμένα πετρώματα και από τα βαθύτερα μέλη των νεογενών (μαργαικοί ασβεστόλιθοι).

- Ποταμοχερσαίες αποθέσεις

Είναι καστανόχρωμα ιζήματα που καταλαμβάνουν ένα μικρό τμήμα νοτιοδυτικά της περιοχής μελέτης και συνεχίζοντας καταλαμβάνουν μεγάλο μέρος της περιοχής Σχηματαρίου-Οινοφύτων. Όπου αποτελούνται από μη συνεκτικά κροκαλοπαγή που εναλλάσσονται με ενστρώσεις καστανόχρωμων άμμων και πηλών των οποίων το πάχος μεταβάλλεται από θέση σε θέση.

- Ασβεστόλιθοι, δολομιτικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες

Τεφροί έως λευκότεροι, μέσο-έως παχυστρωματώδεις, κατά θέσεις άστρωτοι συνήθως μικροκρυσταλλικοί και έντονα τεκτονισμένοι. Συναντώνται στο νότιο τμήμα των κοινοτήτων Συκαμίνου και Ωρωπού.

- Ασβεστόλιθοι Ασπροχωρίου

Μέσο έως παχυστρωματώδεις και κατά θέσεις άστρωτοι, ανοικτότεφροι έως σκουρότεφροι και τοπικά ροδόχρωμοι ή υποκίτρινοι, μικροκρυσταλλικοί, έντονα καρστικοί με πολλές παρεμβολές δολομιτών ή δολομιτικών ασβεστολίθων.

- Ιλύς τεναγών, άμμοι και κροκάλες αυτών

Καλύπτουν το βορειότερο μέρος της περιοχής μελέτης δηλαδή την περιοχή γύρω από την ακτογραμμή στους οικισμούς Χαλκούτσι και Άγιος Κωνσταντίνος Ωρωπού.

2.6 Υδρογεωλογία

Το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής διακρίνεται σε δύο τμήματα, το δυτικό και το ανατολικό, με όριο περίπου τη νοητή γραμμή διεύθυνσης Β-Ν που περνάει από την περιοχή του Ωρωπού. Δυτικά, αναπτύσσεται το μεγάλο υδρογραφικό σύστημα του Ασωπού ποταμού, ενώ ανατολικά αναπτύσσονται πολλά μικρά υδρογραφικά συστήματα (Παπανικολάου, Ι., et al., 1986). Τα δύο τμήματα που αντιστοιχούν στον άνω και μέσο ρου του Ασωπού παρουσιάζουν ομαλή μορφολογία, γενική κλίση προς το νότο και επικοινωνούν μεταξύ τους με το στένεμα της κοιλάδας του Ασωπού στο ύψος του Αγ.Θωμά. Μεταξύ των δύο τμημάτων παρουσιάζεται σημαντική υψομετρική διαφορά της τάξεως των 200 m, με υπερυψωμένο το δυτικό τμήμα έναντι του ανατολικού.

Επίσης, το υδρογραφικό δίκτυο του Ασωπού καταλαμβάνει τα 2/3 σχεδόν της περιοχής και χαρακτηρίζεται από μια ασυμμετρία με ανάπτυξη των δευτερευόντων κλάδων κυρίως προς νότο, δηλαδή αποστράγγιση των βόρειων κλιτύων της Πάρνηθας και πολύ λιγότερο προς το βορρά όπου ο υδροκρίτης με διεύθυνση περίπου Α-Δ ακολουθεί μια γραμμή λόφων με εμφανίσεις του Αλπικού υποβάθρου.

Ο Ασωπός ποταμός αποτελεί τον κεντρικό συλλέκτη των απορροών και των υπογείων υδάτων της περιοχής ενώ τροφοδοτείται κυρίως από τις βροχοπτώσεις, παρουσιάζοντας τη μέγιστη ροή του κατά τη χειμερινή περίοδο. Παράλληλα, η ένταση της ροής του ποταμού επηρεάζεται τόσο από τη γεωλογική δομή όσο και από την περατότητα των σχηματισμών που διατρέχει (Συρράκου, Χ., 2008). Πιο συγκεκριμένα, η υδρολογική λεκάνη του Ασωπού αποτελείται κυρίως από νεογενείς - πλειστοκαινικές αποθέσεις σε ποσοστό περίπου 45% και δευτερευόντως από αλπικούς σχηματισμούς (ποσοστό περίπου 40%). Οι αλλουβιακοί σχηματισμοί καταλαμβάνουν περίπου το 13,5% της έκτασής της, ενώ τα προαλπικά και μεταμορφωμένα πετρώματα έχουν πολύ μικρή εξάπλωση. Μορφολογικά, ο κύριος κλάδος του Ασωπού αναπτύσσεται με διεύθυνση από Δύση προς Ανατολή (ΥΠΕΧΩΔΕ).

Παράλληλα, στο υδρογραφικό δίκτυο της μιας περιοχής περιλαμβάνονται και οι υπόγειοι υδροφορείς που παρατηρούνται στην περιοχή αυτή. Έτσι, σύμφωνα με τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από το μοντέλο της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, στην περιοχή μελέτης βρίσκεται ένας περιορισμένος και ένας ελεύθερος υδροφορέας. Ο περιορισμένος υδροφορέας βρίσκεται περίπου 200 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και διαχωρίζεται από τον ελεύθερο υδροφορέα με ένα αδιαπέρατο στρώμα αργίλου μικρού πάχους και πολύ χαμηλής υδραυλικής αγωγιμότητας. Ο ελεύθερος υδροφορέας βρίσκεται πάνω από το αδιαπέρατο αυτό στρώμα και μέχρι την επιφάνεια του εδάφους. Οι δύο αυτοί υδροφορείς αποτελούν δύο ξεχωριστά συστήματα ροής.

2.7 Τεκτονική

Η ευρεία περιοχή έχει υποστεί την επίδραση επανειλημμένων τεκτονικών κινήσεων. Γενικά, διακρίνουμε μια παλαιότερη προνεογενή τεκτονική και μια νεώτερη τεκτονική του Τριτογενούς και του Τεταρτογενούς (ΥΠΕΧΩΔΕ).

Παλαιότερη προνεογενή τεκτονική: Σύμφωνα με παλαιότερες μελέτες έχουμε επώθηση του Γραμματικού συστήματος στο σύστημα της Πάρνηθας. Η επώθηση αυτή, καλύπτεται από τις αποθέσεις του Νεογενούς και δεν είναι ορατή. Έτσι σύμφωνα με τις πιο πρόσφατες απόψεις επί της τεκτονικής σχέσεως μεταμορφωμένων και μη μεταμορφωμένων σχηματισμών στον ευρύτερο χώρο της

Αττικής και της Νοτίου Εύβοιας, οι μη μεταμορφωμένοι σχηματισμοί του συστήματος της Πάρνηθας έχουν επωθηθεί προς το Νότο στα μεταμορφωμένα πετρώματα του μεταμορφωμένου συστήματος.

Νεότερη τεκτονική: Η λεκάνη Ωρωπού-Μαλακάσας αντιστοιχεί σε μια τεκτονική τάφρο που σχηματίστηκε ως συνέπεια ηπειρογενετικών κινήσεων. Οι μετατοπίσεις ήταν κατακόρυφες, με αποτέλεσμα τη δημιουργία τεκτονικών τάφρων και κεράτων. Κατόπιν, έχουμε τις αποθέσεις των νεογενών ιζημάτων και ακολουθούν περίοδο νεώτερων διαρρήξεων. Τέλος, κατά το Τεταρτογενές, εκτός των ηπειρογενετικών κινήσεων, έλαβαν χώρα και ευστατικές κινήσεις, ανοδικές και καθοδικές, οφειλόμενες στη δέσμευση ή απελευθέρωση πάγων στους πόλους (παγετώδεις και μεσοπαγετώδεις περίοδοι) οι οποίες είχαν σαν αποτέλεσμα την μετακίνηση της γραμμής των ακτών αντίστοιχα προς τα κάτω ή προς τα πάνω.

2.8 Σεισμικότητα

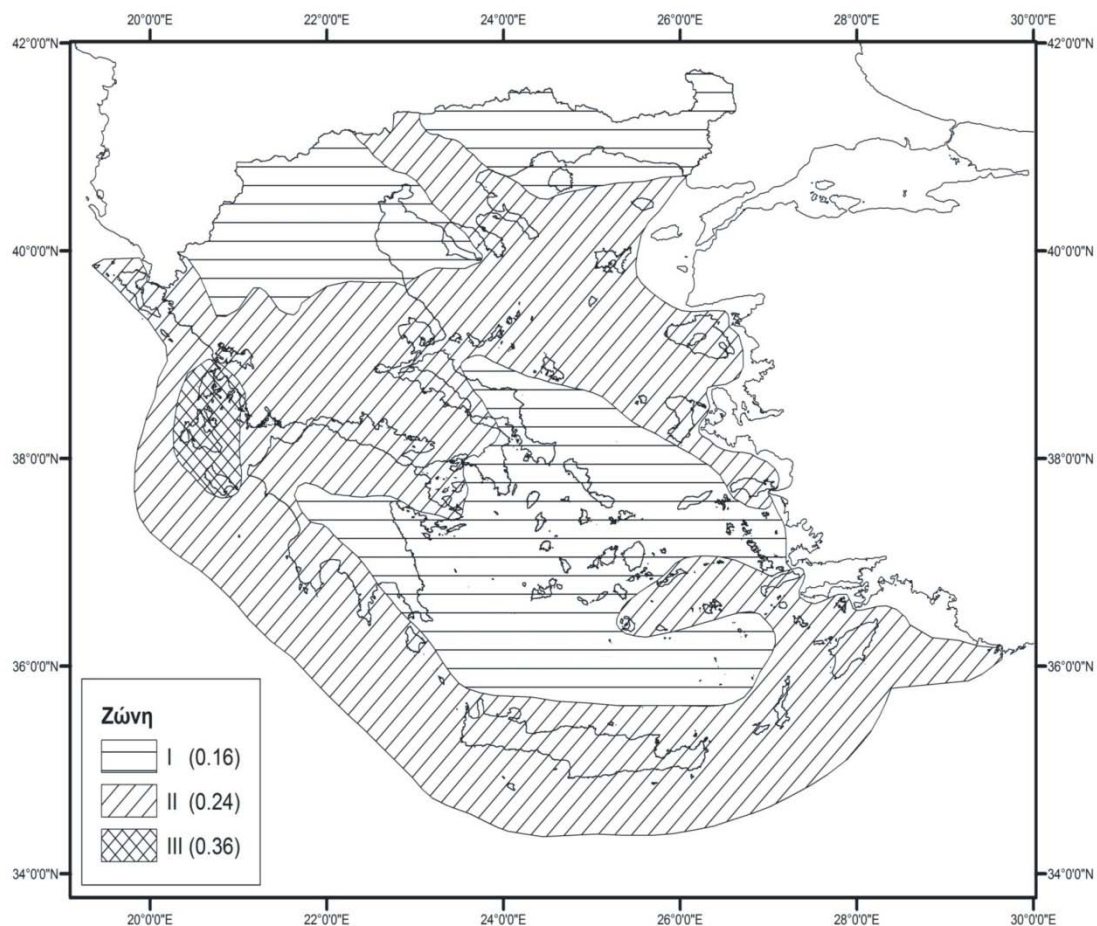
Σύμφωνα με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό ΕΑΚ 2000, η Ελλάδα υποδιαιρείται σε τρεις Ζώνες Σεισμικής Επικινδυνότητας I, II, III, τα όρια των οποίων καθορίζονται στο Χάρτη Ζωνών Σεισμικής Επικινδυνότητας της Ελλάδος (Χάρτης 1). Όπως φαίνεται και στον ακόλουθο χάρτη, η περιοχή μελέτης ανήκει στη ζώνη II. Η σεισμική επιτάχυνση εδάφους (A), δίνεται από τον παρακάτω τύπο (Φ.Ε.Κ Β' 1154/12-8-2003):

$$A = \alpha \cdot g$$

Όπου, α : Συντελεστής σεισμικής επιβάρυνσης

g : Επιτάχυνση της βαρύτητας

Η σεισμική επιτάχυνση που προσδιορίζεται με βάση αυτό τον τύπο, αποτελεί σημαντικό παράγοντα στη σεισμική καταπόνηση των κατασκευών. Για τη ζώνη II ο συντελεστής σεισμικής επιβάρυνσης έχει ορισθεί ίσος με 0.24. Επομένως, η περιοχή μελέτης παρουσιάζει έντονη σεισμική δραστηριότητα, η οποία οφείλεται στην ύπαρξη της ρηξιγενούς ζώνης Μήλεσι-Ωρωπού και εντοπίζεται κατά κύριο λόγο στον υποθαλάσσιο χώρο του Ν. Ευβοϊκού.



Χάρτης 1. Ζώνες Σεισμικής Επικινδυνότητας της Ελλάδας (Φ.Ε.Κ Β' 1154/12-8-2003)

2.9 Περιγραφή οικοτόπων

Ιδιαίτερης σημασίας για το φυσικό περιβάλλον της περιοχής καθώς και για την ορνιθοπανίδα, είναι οι εκβολές του ποταμού Ασωπού και η λιμνοθάλασσα Ωρωπού, καθώς αποτελούν ένα ενιαίο υγροτοπικό σύστημα και σημαντικό καταφύγιο άγριας ορνιθοπανίδας της Αττικής. Ο υγρότοπος αυτός έχει ενταχθεί στο δίκτυο Natura 2000 (GR 3000002), το οποίο είναι ένα διευρωπαϊκό δίκτυο προστατευόμενων περιοχών που δημιουργήθηκε με βάση την Οδηγία 92/43/ΕΟΚ «για τη διατήρηση των φυσικών οικοτόπων καθώς και της άγριας πανίδας και χλωρίδας» και στο οποίο ανήκουν φυσικοί οικότοποι ιδιαίτερης οικολογικής αξίας.

Το κεντρικό τμήμα του υγροτοπικού συστήματος αποτελεί διάπλαση αλμυρού έλους το οποίο έχει κατακερματιστεί πρόσφατα από κτίρια και δρόμους. Ειδικότερα, οι διαπλάσεις που χαρακτηρίζουν τον οικότοπο είναι:

1. Μικρές ελώδεις εκτάσεις με *Juncus* spp. διάσπαρτες μεταξύ κτιρίων και δρόμων στο κεντρικό τμήμα του οικοτόπου. Τα φυτικά είδη *Artiplex portulacoides*, *Sarcocornia perennis*, *Suaeda maritima*, *Salsola soda*, *Spergularia salina*, *Triglochin bulbosa* ssp. *barrelieri*, *Ruppia maritima*, *Juncus maritimus* και *Juncus subulatus* είναι σημαντικά για τη δομή του υγροτόπου αυτού.

2. Αμμόδεις και λασπώδεις εκτάσεις στο ανατολικό τμήμα του οικοτόπου που καλύπτονται εποχιακά από τη θάλασσα, σχηματίζοντας λιμνοθάλασσες και μεταβάλλοντας την τοπογραφία των θαλασσίων εισροών
3. Υδροφιλή βλάστηση όπως παραποτάμιες διαπλάσεις με *Vitex agnus-castus*, *Arundo donax* κλπ., που καλύπτουν τις όχθες του Ασωπού ποταμού σε απόσταση 100 μέτρων περίπου από την ακτή. Το πλησιέστερο στην ακτή μέρος των όχθων είναι γυμνό από βλάστηση.

Το χερσαίο μέρος του οικοτόπου έχει οριοθετηθεί σύμφωνα με την παρουσία ανθρωπογενών τεχνητών ορίων (δρόμοι, κτίρια, φράκτες κλπ) που περιβάλλουν το μεγαλύτερο μέρος των σημαντικών βιοτόπων. Τα εντός της θάλασσας όρια του οικοτόπου ακολουθούν μία παράλληλο προς την ακτογραμμή και σε απόσταση περίπου 50 μέτρων από αυτή, έτσι ώστε να περικλείουν το μέρος του θαλάσσιου περιβάλλοντος που επηρεάζεται από τις εποχιακές επικλύσεις και τις αντίστοιχες τοπογραφικές μεταβολές.

Ο οικοτόπος αυτός, αποτελεί σημαντικό υγρότοπο που εξυπηρετεί τα μεταναστευτικά πουλιά ως ενδιάμεσος σταθμός ανάπαυσης. Η ποιότητά του μειώνεται διαρκώς αλλά στη σημερινή του κατάσταση μπορεί ακόμα να διατηρήσει ορισμένους πληθυσμούς πουλιών και φιλοξενεί μεταξύ άλλων φλαμίνγκο, γεράκια και ερωδιούς. Ο πλέον χαρακτηριστικός τύπος ενδιαιτήματος που απαντάται στο συγκεκριμένο οικοτόπο είναι οι εποχιακά κατακλυζόμενες αμμόδεις και λασπώδεις εκτάσεις καθώς είναι μοναδικός για την ανατολική κεντρική Ελλάδα (ΥΠΕΧΩΔΕ).

Η γεωγραφική περιοχή που καταλαμβάνει η περιοχή μελέτης ανήκει φυτοκοινωνιολογικά στη Ευμεσογειακή ζώνη (παραλιακή, λοφώδης και υποορεινή περιοχή). Πιο συγκεκριμένα, η περιοχή αυτή ανήκει στην υποζώνη *Oleo Ceratonia*, το κλίμα της οποίας χαρακτηρίζεται από ανοιξιότικες και φθινοπωρινές βροχοπτώσεις και από μια μεγάλης διάρκειας ξηρή περίοδο. Η υποζώνη αυτή μπορεί να διακριθεί σε δύο αυξητικούς χώρους, εκ των οποίων ο ένας παρουσιάζει τη μεγαλύτερη εξάπλωση στην περιοχή (*Oleo – Ientiscentum*). Στον αυξητικό αυτό χώρο εμφανίζονται, παρά την ξηρότητα του κλίματος, θαυμάσιες συστάδες της χαλέπιου πεύκης (*Pinus halepensis*). Κάποια από τα φυτά που κυρίως συναντώνται είναι τα ακόλουθα: σχίνος (*Pistacia lentiscus*), ρείκι (*Erica manipuliflora*), αγιόκλημα (*Lonicera etrusca*), πικροδάφνη (*Nerium oleander*), θυμάρι (*Thymus thracicus*), μυρτιά (*Myrtus communis*) και άγρια καλάμια (*Phragmites australis*) (στις όχθες του ποταμού) [ii].

Τα παραπάνω είδη απαντώνται στην περιοχή είτε ως αυτοφυή (ενδημικά και μη), είτε έχουν εγκατασταθεί τεχνητά κατά καιρούς, από τους κατοίκους της περιοχής και στη συνέχεια πολλαπλασιάστηκαν με φυσικό τρόπο. Καταλαμβάνουν δε επιφάνειες όπως αγροί, εγκαταλειμμένα οικοπέδα, ακτές, δασικές εκτάσεις και άλλους ελεύθερους χώρους. Τέλος, από γεωργικής απόψεως κυριαρχεί κυρίως η καλλιέργεια της ελιάς και των εσπεριδοειδών.

Στην ευρύτερη περιοχή μελέτης, τα είδη της πανίδας που απαντώνται κυρίως είναι ο ασβός, ο σκαντζόχοιρος, η νυφίτσα, η αλεπού, η νυχτερίδα και το κουνάβι, ενώ στις εκβολές του ποταμού Ασωπού από θηλαστικά απαντάται κυρίως η φώκια *Monachus monachus* και από ψάρια το είδος *Phoxinellus* spp [ii]. Επίσης, στις όχθες του ποταμού υπάρχουν διάφορα είδη αμφιβίων όπως ο νεροβάτραχος (*Rana ridibunda*) και ο πρασινόφρυνος (*Bufo viridis*), ενώ τμήματά του έχουν εμπλουτιστεί με πέστροφες και κυπρίνους (Λοϊζίδου, Μ., 1998; Συρράκου, Χ., 2008).

2.10 Υφιστάμενη κατάσταση ρύπανσης

Τα τελευταία χρόνια στην ευρύτερη περιοχή μελέτης και συγκεκριμένα στο γειτονικό δήμο Οινοφύτων Σχηματαρίου παρατηρείται η συγκέντρωση σημαντικού αριθμού και μεγέθους βιομηχανικών μονάδων. Οι βιομηχανικές αυτές μονάδες περιλαμβάνουν ένα μεγάλο αριθμό εγκαταστάσεων παραγωγής και επεξεργασίας μετάλλων, ενώ σε μικρότερο ποσοστό απαντώνται μονάδες όπως βαφεία, κλωστοϋφαντουργεία, βυρσοδεψεία, βιομηχανίες παραγωγής απορρυπαντικών, ειδών διατροφής, χημικών προϊόντων, λιπασμάτων, φαρμάκων και χρωμάτων. Μέχρι σήμερα δεν έχει εφαρμοστεί οργανωμένο σχέδιο για τη δημιουργία των απαραίτητων υποδομών, που είναι αναγκαίες τόσο για την οικονομική λειτουργία των μονάδων, αλλά κυρίως για την προστασία του περιβάλλοντος, όπως είναι η κατασκευή οδικού δικτύου, η χωροταξική οργάνωση της περιοχής και η κατασκευή αποχετευτικού δικτύου. Αν και οι περισσότερες από τις βιομηχανίες διαθέτουν συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, οι φυσικοί αποδέκτες της περιοχής δέχονται μεγάλο ρυπογόνο φορτίο (Angelidis and Aloupi, 2000). Η κατάσταση αυτή συνδέεται ευθέως με την υποβάθμιση του περιβάλλοντος και τη ρύπανση των φυσικών αποδεκτών της περιοχής, αλλά και τη βιωσιμότητα των ίδιων των επιχειρήσεων.

Τα αντιρρυπαντικά συστήματα των βιομηχανιών και ο έλεγχος της συνολικής περιβαλλοντικής διαχείρισης των βαρέων μετάλλων και κάθε τοξικής ουσίας που παράγεται κατά την παραγωγική διαδικασία, απαιτούν ειδικές μεθόδους διαχείρισης και διάθεσης, οι οποίες δεν υφίστανται στις βιομηχανίες της περιοχής. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα απόβλητα να καταλήγουν είτε στο έδαφος είτε στον ποταμό Ασωπό και κατ' επέκταση και στους υπόγειους υδροφορείς. Παράλληλα, οι μεγάλες ελλείψεις σε υποδομές και κυρίως σε επιστημονικό προσωπικό των συναρμοδίων υπηρεσιών της Νομαρχίας Βοιωτίας, πρακτικά καθιστούν αδύνατο τον ουσιαστικό έλεγχο της λειτουργίας των βιομηχανικών-βιοτεχνικών μονάδων του νομού Βοιωτίας καθώς και τους περιβαλλοντικούς ελέγχους.

Έτσι, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια συνεχής και ανεξέλεγκτη ρύπανση του ποταμού Ασωπού και των υπογείων υδάτων της περιοχής, με ιόντα χρωμίου, μολύβδου και νιτρικών που βρίσκονται στα απόβλητα των βιομηχανιών και βιοτεχνιών της γύρω περιοχής. Επιπλέον συνέπεια της υποβάθμισης της περιοχής είναι η μείωση της τουριστικής εξέλιξής της και η γενικότερη αναταραχή του ντόπιου πληθυσμού.

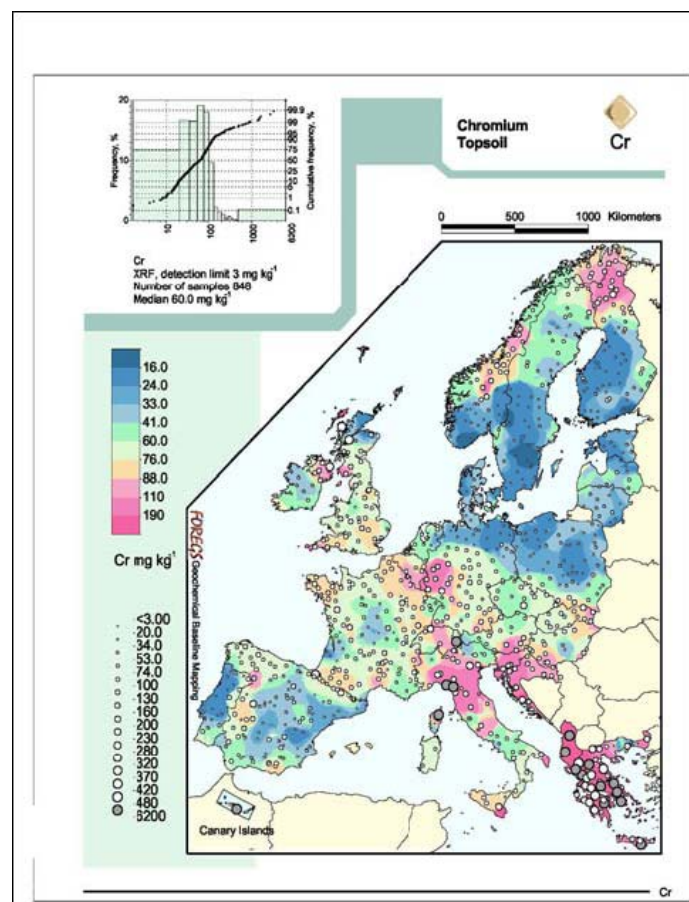
Στην περιοχή μελέτης, ο ρόλος του Ασωπού ποταμού είναι καθοριστικός στην αναπλήρωση των υπόγειων υδροφόρων σχηματισμών της περιοχής, που αποτελούν πηγή αρδευτικού και πόσιμου νερού, γεγονός που επιτάσσει την άμεση και ολοκληρωμένη διαχείριση της ποιότητας των νερών του.

Ο Ασωπός είναι ποταμός που διατρέχει τα σύνορα των Νομών Βοιωτίας και Αττικής. Οι κύριες πηγές του βρίσκονται στον Κιθαιρώνα ενώ στην πορεία του συμβάλλουν και άλλα ρεύματα που προέρχονται από τους ορεινούς όγκους μεταξύ Πάρνηθας και Δερβενοχωρίων. Έχει συνολικό μήκος 57 χιλιόμετρα και διέρχεται από το Σικάμινο, τον Ωρωπό, το Σχηματάρι και τα Οινόφυτα, ώσπου χύνεται στον Ευβοϊκό Κόλπο, λειτουργώντας ως αποστραγγιστικό δίκτυο. Τροφοδοτείται κυρίως από τα νερά των βροχοπτώσεων, ενώ μικρή ποσότητα νερού προέρχεται από αναβλύσεις. Από παλαιότερες μελέτες και μακροσκοπικές παρατηρήσεις της περιοχής, παρατηρούνται απότομες μεταβολές στην παροχή του ποταμού κατά τη διάρκεια του υδρολογικού έτους.

Εκτός όμως από την ανθρωπογενή ρύπανση, η οποία απελευθερώνει κυρίως Cr(VI), παρατηρείται στην υπό μελέτη περιοχή και γηγενής ρύπανση, σύμφωνα με

την οποία, το χρώμιο μπορεί να απελευθερωθεί στο νερό και στο έδαφος είτε ως Cr(VI) είτε ως Cr(III). Η ρύπανση αυτή προέρχεται από ένα επιφανειακό οφιολιθικό πέτρωμα που ονομάζεται σερπεντινίτης (serpentinite). Ως φυσική πηγή, το χρώμιο προέρχεται πιθανώς από την αποσάθρωση του συγκεκριμένου πετρώματος. Σύμφωνα με μελέτες που έχουν γίνει, έχει διαπιστωθεί ότι ο σερπεντινίτης αποτελεί το πέτρωμα με τη μεγαλύτερη πιθανότητα να απελευθερώσει χρώμιο στο περιβάλλον (Robles-Camacho and Armienta, 2000). Συγκεντρώσεις εξασθενούς χρωμίου γηγενούς προέλευσης, έχουν αναφερθεί σε διάφορες περιοχές μελέτης όπως, στη Νέα Καληδονία του Καναδά, στην Πολιτεία της Καλιφόρνια των ΗΠΑ, στο Μεξικό, στην Ιταλία, στην Κύπρο και στη Ζιμπάμπουε (Ball and Izbicki, 2004; Cooper, 2002; Oze, et al, 2007). Οι τιμές του εξασθενούς χρωμίου σε αρκετές από αυτές τις περιπτώσεις ξεπερνούν το όριο των 50 $\mu\text{g/L}$.

Το χρώμιο βρίσκεται κυρίως σε υπερβασικά πετρώματα, που αποτελούν περίπου το 1% της χερσαίας έκτασης της Γης (Oze, et al, 2007). Η Ελλάδα είναι από τις χώρες που έχει σημαντικές εμφανίσεις υπερβασικών πετρωμάτων σύμφωνα με τον Παπανικολάου (Papanikolaou, D., 2009), αλλά και όπως αποδεικνύεται από το Γεωχημικό Άτλα της Ευρώπης, όπου παρουσιάζονται υψηλές συγκεντρώσεις χρωμίου στα επιφανειακά εδάφη όλης της χώρας (Νικολαΐδης και Καλογεράκης, 2008). Έτσι, από το Γεωχημικό Άτλα της Ευρώπης (Χάρτης 2), καθώς και από μια μελέτη του Πανεπιστημίου του Αιγαίου (Angelidis and Aloupi, 2000) προκύπτει ότι, οι υψηλές συγκεντρώσεις του χρωμίου στα ιζήματα της ευρύτερης περιοχής του Ασωπού αποδίδονται σε γηγενή προέλευση.



Χάρτης 2. Γεωχημικός Άτλας της Ευρώπης-Συγκέντρωση ολικού χρωμίου στο επιφανειακό έδαφος
(Νικολαΐδης και Καλογεράκης, 2008)

Παρόλα αυτά, η σχετική επιρροή των φυσικών και ανθρωπογενών πηγών στο περιβάλλον δεν είναι ιδιαίτερα σαφής, ειδικά στις περιοχές όπου τα τοπικά μεταλλεύματα περιέχουν υψηλές φυσικές συγκεντρώσεις μετάλλων. Επομένως, για μια πιο αντιπροσωπευτική και αντικειμενική αξιολόγηση της διαδικασίας ρύπανσης στο περιβάλλον, είναι σημαντικό να είναι κανείς σε θέση να διακρίνει την προέλευση της ρύπανσης. Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή εξετάζεται η προέλευση της ρύπανσης λόγω των ιόντων χρωμίου στην περιοχή του Ασωπού ποταμού. Γίνεται δηλαδή ο έλεγχος του κατά πόσο τα αίτια της ρύπανσης από το χρώμιο είναι ανθρωπογενή, γηγενή ή κάποιος συνδυασμός τους.

3 ΧΡΩΜΙΟ

3.1 Εισαγωγή

Το χρώμιο είναι χημικό στοιχείο, το οποίο ανακαλύφθηκε το 1797 στη Γαλλία από τον N.L. Vaquelin, με σύμβολο Cr και ατομικό αριθμό 24. Η προέλευση του ονόματος του είναι ελληνική και προέρχεται από τη λέξη «χρώμα», λόγω της χρωματικής ποικιλίας των ενώσεων του. Τα χρώματα των ενώσεων του χρωμίου και των διαλυμάτων τους ουσιαστικά καλύπτουν όλο το ορατό φάσμα: από το ιώδες (άλατα του Cr(III)) έως το βαθύ κόκκινο (ορισμένες ενώσεις του Cr(VI)).

Το χρώμιο είναι το 21^ο πιο συνηθισμένο στοιχείο στην επιφάνεια της γης με μέση συγκέντρωση 100 ppm. Απαντάται στον αέρα, στο νερό και στο έδαφος, ως αποτέλεσμα φυσικών διεργασιών ή ανθρωπίνων δραστηριοτήτων, όπως είναι η καύση ορυκτών καυσίμων, τα βυρσοδεψεία, τα εργοστάσια κλωστοϋφαντουργίας, επιμεταλλώσεων, οι μεταλλουργικές βιομηχανίες και τα αστικά λύματα (Οικονομόπουλος, 1999). Η συγκέντρωση του στο χώμα είναι μεταξύ 1 και 3000 mg/kg, στο θαλασσίνο νερό 5 με 800 µg/L και στα ποτάμια και τις λίμνες 26 µg/L με 5.2 mg/L (Kotas and Stasicka, 2000).

3.2 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά χρωμίου

Το χρώμιο είναι ένα αργυρόλευκο, φυσικά σχηματιζόμενο μέταλλο, που όταν γυαλίζεται, δίνει μια όμορφη μεταλλική λάμψη. Γι' αυτό και η βιομηχανία, το χρησιμοποιεί ευρέως για την παρασκευή μεταλλικών αντικειμένων. Επίσης, είναι σκληρό και άσμο μέταλλο, με υψηλό σημείο τήξης. Δεν μαυρίζει κατά την επαφή του με τον αέρα, είναι ασταθές στο οξυγόνο και όταν έρθει σε επαφή με αυτό, παράγει ένα λεπτό στρώμα οξειδίων που το καθιστά αδιαπέρατο στο οξυγόνο και προστατεύει το μέταλλο από αυτό [iii].

Επίσης, το χρώμιο, είναι αξιοσημείωτο για τις μαγνητικές του ιδιότητες, καθώς είναι το μόνο στερεό στοιχείο που μπορεί, όταν βρίσκεται στη φύση σαν στοιχείο και όχι σε ενώσεις, να μην έλκεται μαγνητικά σε θερμοκρασία δωματίου (ή χαμηλότερη). Πάνω από τους 38°C έρχεται σε παραμαγνητική κατάσταση (Kotas and Stasicka, 2000).

Έχει ενώσεις με αριθμούς οξείδωσης από -2 έως +6, ωστόσο οι πιο συνήθεις είναι οι ενώσεις του δισθενούς χρωμίου Cr(II) (ισχυρό αναγωγικό, ασταθές παρουσία οξυγόνου), του τρισθενούς χρωμίου Cr(III) (οι πλέον σταθερές ενώσεις του χρωμίου) και του εξασθενούς χρωμίου Cr(VI) (χρωμικά και διχρωμικά άλατα: σταθερές ενώσεις αλλά και σχετικώς ισχυρά οξειδωτικά).



Εικόνα 5. Στοιχειακό χρώμιο [iv]

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται κάποιες από τις βασικές φυσικοχημικές ιδιότητες του στοιχειακού χρωμίου (Οικονομόπουλος, 1999; ν):

Πίνακας 6. Φυσικοχημικές ιδιότητες στοιχειακού χρωμίου

Φυσικοχημικές ιδιότητες	Χρώμιο
Σύμβολο	Cr
Ατομικός αριθμός	24
Ατομική Μάζα (g/mol)	51.996
Μοριακός όγκος (cm ³ /mole)	7.78
Πυκνότητα (στους 20 °C) (g/cm ³)	7.19
Φυσική κατάσταση (σε θερμοκρασία δωματίου & 1 atm)	στερεό
Οσμή	Άοσμο
Διαλυτότητα στο νερό	Αδιάλυτο
Σημείο τήξης (°C)	1857
Σημείο βρασμού (°C)	2672
Πτητικότητα	Μη-πτητικό στους 20 °C
Πυκνότητα ατμού (g/cm ³)	7.14
Ηλεκτρική αγωγιμότητα (10 ⁶ /cm)	0.0774
Θερμική αγωγιμότητα (W/cmK)	0.937
Ενθαλπία εξάτμισης (kJ/mole)	348.8
Ευφλεξιμότητα	Άφλεκτο στερεό (εκτός από μορφή σκόνης)
Ηλεκτροαρνητικότητα	1.66
Ατομική ακτίνα (pm)	140
Δυνατότητα ιονισμού (kJ/mol):	
Ενέργεια πρώτου ιονισμού (Cr → Cr ⁺ + e ⁻)	651.1
Ενέργεια δεύτερου ιονισμού (Cr → Cr ²⁺ + 2e ⁻)	1590.1
Ενέργεια τρίτου ιονισμού (Cr → Cr ³⁺ + 3e ⁻)	2987
Δυνατότητα σθένους ηλεκτρονίων (-V)	0.71 (Cr ³⁺ / Cr)

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται κάποιες από τις φυσικοχημικές ιδιότητες του στοιχειακού χρωμίου και ορισμένων ενώσεων του:

Πίνακας 7. Φυσικοχημικές ιδιότητες ενώσεων χρωμίου

Ιδιότητα	Cr	CrCl ₃	K ₂ CrO ₄	Cr ₂ O ₃	CrO ₃
Σημείο τήξης (°C)	1857	1152	968.3	2266	196
Σημείο βρασμού (°C)	2672	-	-	4000	-
Διαλυτότητα στο νερό (g/L)	Αδιάλυτο	Σχετικά διαλυτό	790	Αδιάλυτο	624
Πυκνότητα (g/cm ³)	7.19	2.76	2.73	5.21	2.70

Επίσης, στην ευρύτερη περιοχή του Ασωπού ποταμού, έχει υπολογιστεί ο συντελεστής κατανομής και ο συντελεστής επιβράδυνσης του χρωμίου από επιστημονική ομάδα του Πολυτεχνείου Κρήτης στα πλαίσια της τεχνικής έκθεσης προς το δήμο Ωρωπίων (Νικολαΐδης και Καλογεράκης, 2008).

Έτσι, ο λόγος της συγκέντρωσης του χρωμίου στο έδαφος προς τη διαλυτή συγκέντρωση χρωμίου στο νερό άρδευσης, δίνει το συντελεστή κατανομής (partitioning coefficient):

$$K_d = \frac{200 \frac{\mu\text{g}}{\text{g}}}{42 \frac{\mu\text{g}}{\text{L}}} \Rightarrow K_d = 4.762 \frac{\text{L}}{\text{g}}$$

Ενώ, ο συντελεστής επιβράδυνσης είναι ο λόγος της ταχύτητας του νερού προς τη ταχύτητα του ρύπου (χρώμιο) και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_f = 1 + \left(\frac{\rho}{\varepsilon} \right) \cdot K_d$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα του εδάφους (1200 g/L) και ε είναι το πορώδες (0.40).

Αντικαθιστώντας, προκύπτει ότι ο συντελεστής επιβράδυνσης είναι 14287, δηλαδή το χρώμιο έχει εξαιρετικά μεγάλη τάση προσρόφησης στο έδαφος και μετακινείται πολύ δύσκολα.

➤ Γεωχημεία Χρωμίου

Στα υπόγεια και στα επιφανειακά νερά, το χρώμιο βρίσκεται στην εξασθενή και στην τρισθενή μορφή του. Με την τρισθενή μορφή το χρώμιο κυριαρχεί ως ιόν Cr^{3+} σε τιμή pH μικρότερη από 3.5. Αυξάνοντας την τιμή του pH, το ιόν Cr^{3+} υδρολύεται στα εξής ιόντα: CrOH^{2+} , Cr(OH)_2^+ , Cr(OH)_3 και Cr(OH)_4^- . Σε αλκαλικά διαλύματα, για παράδειγμα, το Cr(III) παρέχει διαλυτά υδροξυσύμπλοκα, τα οποία στη συνέχεια οξειδώνονται προς χρωμικά άλατα με υπεροξείδιο του υδρογόνου (Αντιδράσεις 1 και 2). Βιομηχανικά, τα χρωμικά άλατα παρασκευάζονται με σύντηξη χρωμίτη με Na_2O_2 (υπεροξείδιο του νατρίου) [vi].

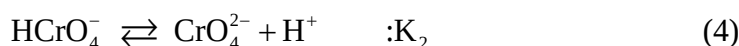
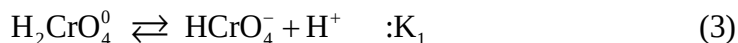


ιώδες πρασινωπό

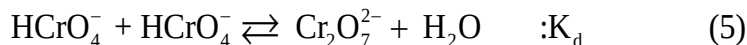


πρασινωπό κίτρινο

Από την άλλη πλευρά, το εξασθενές χρώμιο Cr(VI) υπάρχει στα διαλύματα με τις εξής μορφές μονομερών ιόντων: H_2CrO_4 , HCrO_4^- (διχρωμικό ιόν) και CrO_4^{2-} (χρωμικό ιόν) ή ως διμερές ιόν $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ (διχρωμικό ιόν). Όταν η συγκέντρωση του εξασθενούς χρωμίου είναι μεγαλύτερη από 1 mg/L στο νερό, τότε τα μονομερή ιόντα δίνουν κίτρινο χρώμα σε αυτό. Νερό το οποίο περιέχει ψηλά επίπεδα του διχρωμικού ιόντος $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ έχει πορτοκαλί χρώμα. Τα μονομερή ιόντα συνδέονται μέσα από μια σειρά αντιδράσεων οξείδωσης (Palmer and Puls, 1994):



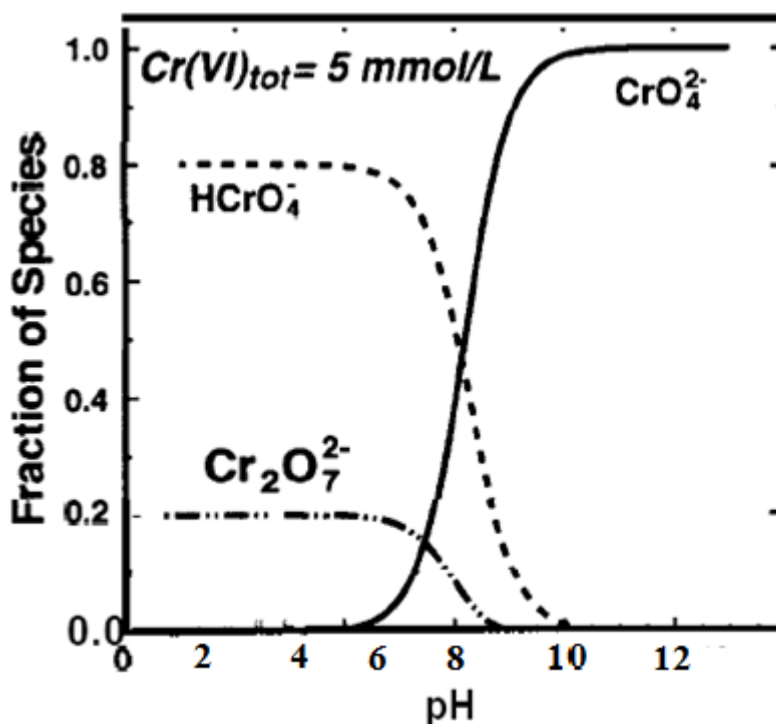
Όπου η τιμή του pK είναι -0.86 και 6.51, αντίστοιχα. Το διχρωμικό ιόν $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ είναι το αποτέλεσμα του πολυμερισμού των ιόντων HCrO_4^- :



Όπου, η τιμή του pK είναι -1.54. Σύμφωνα με τις παραπάνω αντιδράσεις, τα κίτρινα χρωμικά ιόντα μετατρέπονται αντιστρεπτά σε πορτοκαλόχρωμα διχρωμικά ιόντα. Επομένως, μπορεί να δημιουργηθεί η ακόλουθη συνολική αντίδραση:

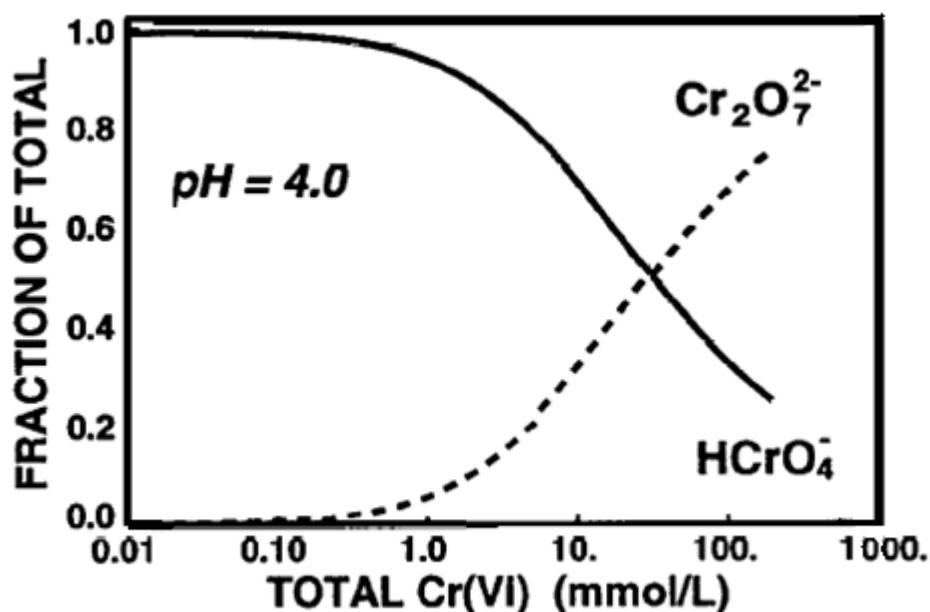


Η ισορροπία χρωμικών - διχρωμικών είναι μια από τις πιο χαρακτηριστικές αντιδράσεις του Cr(VI) (Αντίδραση 6). Η σχετική συγκέντρωση κάθε ενός από αυτά τα ιόντα εξαρτάται αφενός από το pH του ρυπασμένου νερού (Διάγραμμα 1) και αφετέρου από τη συνολική συγκέντρωση του εξασθενούς χρωμίου Cr(VI) σε αυτό (Διάγραμμα 2).



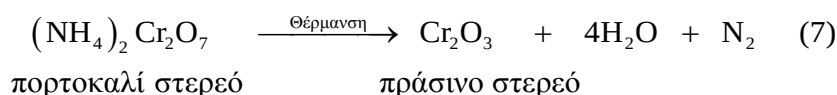
Διάγραμμα 1. Κλάσμα ιόντων χρωμίου συναρτήσει του pH (Palmer and Puls, 1994)

Από το διάγραμμα 1, προκύπτει ότι για τιμές pH μεγαλύτερες από 6.5, κυριαρχεί το ιόν CrO_4^{2-} , ενώ για τιμές pH μικρότερες από 6.5 και επιπλέον όταν οι συγκεντρώσεις του εξασθενούς χρωμίου Cr(VI) είναι χαμηλές (< 30 mM) υπερσχύει το ιόν HCrO_4^- . Η παρουσία του ιόντος $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ θεωρείται σημαντική όταν οι συγκεντρώσεις είναι μεγαλύτερες από 1 mM ή μπορεί ακόμα και να υπερσχύει όταν οι συνολικές συγκεντρώσεις του Cr(VI) είναι μεγαλύτερες από 30 mM.

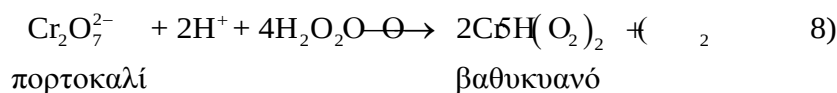


Διάγραμμα 2. Κλάσμα ολικού χρωμίου συναρτήσει της συγκέντρωσης εξασθενούς χρωμίου (Palmer and Puls, 1994)

Επίσης, το Cr(VI), ως διχρωμικό ιόν, είναι σχετικώς ισχυρό οξειδωτικό σε όξινα διαλύματα και παρέχει αντιδράσεις οξειδοαναγωγής με ανόργανες αναγωγικές ουσίες όπως π.χ. Fe(II), SO₂, όπως και με οργανικές ενώσεις (π.χ. οξείδωση της αιθανόλης προς ακεταλδεΐδη) κατά τις οποίες το Cr(VI) ανάγεται προς Cr(III). Εντυπωσιακή είναι η αντίδραση αυτοοξειδοαναγωγής του διχρωμικού αμμωνίου (Αντίδραση 7), που χρησιμοποιείται συχνά σε επιδείξεις χημικών πειραμάτων και είναι γνωστή ως χημικό ηφαίστειο (chemical volcano) [v].



Ιδιαίτερα χαρακτηριστική είναι η αντίδραση των διχρωμικών ιόντων με υπεροξείδιο του υδρογόνου σε όξινο διάλυμα. Κατά την αντίδραση αυτή, παράγεται μια έντονα κυανή υπεροξειδική ένωση του χρωμίου με τύπο CrO(O₂)₂ (Αντίδραση 8).



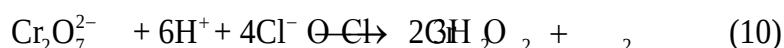
Το CrO(O₂)₂ διασπάται ταχύτατα σε υδατικά διαλύματα, όπως φαίνεται στην παρακάτω αντίδραση (Αντίδραση 9), αλλά μπορεί και να εκχυλισθεί με οξυγονούχους οργανικούς διαλύτες όπου είναι σταθερότερη. Η αντίδραση σχηματισμού CrO(O₂)₂ χρησιμοποιείται για την ποιοτική ανίχνευση τόσο των διχρωμικών ιόντων, όσο και του υπεροξειδίου του υδρογόνου σε πολύ αραιά υδατικά διαλύματα.



Άλλη ένωση του Cr(VI) είναι το τριοξείδιο του χρωμίου (ανυδρίτης του χρωμικού οξέος, CrO₃) το οποίο διαλύεται εύκολα στο νερό παρέχοντας χρωμικό οξύ. Το CrO₃

είναι εξαιρετικά ισχυρή οξειδωτική ένωση και απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά τη χρήση της γιατί σε επαφή με οργανικά υλικά προκαλεί ανάφλεξή τους.

Τέλος, μια ακόμα ενδιαφέρουσα ένωση του Cr(VI) είναι το χλωριούχο χρωμύλιο (CrO_2Cl_2) λόγω της πτητικότητάς του. Είναι ένα έντονα κόκκινο υγρό με σημείο βρασμού 117°C , πυκνότητα $1,91 \text{ g/mL}$ και σε εμφάνιση θυμίζει το υγρό βρώμιο. Αντιδρά έντονα με το νερό παρέχοντας χρωμικό οξύ και αέριο HCl . Παρασκευάζεται με απευθείας επίδραση πυκνού θεικού οξέος σε στερεό μίγμα NaCl και $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (Αντίδραση 10). Η αντίδραση αυτή έχει χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση χλωριούχων αλάτων σε στερεή κατάσταση (από τους παραγόμενους κόκκινους ατμούς), ωστόσο απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή λόγω της πιθανότητας εισπνοής των ατμών του χλωριούχου χρωμυλίου, γεγονός το οποίο συνεπάγεται την απευθείας μεταφορά του τοξικότατου Cr(VI) στους πνεύμονες, που αποτελεί και τον πιο επικίνδυνο για την υγεία τρόπο εισόδου Cr(VI) στον οργανισμό [v].



3.3 Χρήσεις

Το χρώμιο απελευθερώνεται στο περιβάλλον σε μεγάλες ποσότητες και στις δύο οξειδωτικές του καταστάσεις Cr(III) και Cr(VI), ως αποτέλεσμα ανθρώπινων δραστηριοτήτων, με κύρια την χρήση του στη βιομηχανία, καθώς αποτελεί βασικό συστατικό για την κατασκευή μεγάλης ποικιλίας προϊόντων. Οι κύριες χρήσεις του χρωμίου είναι στην παραγωγή:

- Κραμάτων
- Χρωμάτων και χρωστικών ουσιών
- Μελανιών
- Παραγωγής ανοξείδωτου χάλυβα και πυρίμαχων σκευών
- Μπαταριών
- Καταλυτών
- Κεραμικών
- Μυκητοκτόνων
- Συντηρητικών ξύλου

Εξίσου σημαντική είναι η χρήση του χρωμίου και στα εξής:

- Επιμεταλλώσεις
- Βυρσοδεψία
- Βάψιμο των υφασμάτων.
- Τυπογραφικές βιομηχανίες
- Βιομηχανίες πετρελαίου
- Υφαντουργικές βιοτεχνίες
- Βιομηχανίες παραγωγής σπέρτων και πυροτεχνημάτων

Πιο συγκεκριμένα, για την παρασκευή κραμάτων, χρησιμοποιούνται δύο από τα πιο σημαντικά προϊόντα του χρωμίου, που είναι το χρωμικό και διχρωμικό νάτριο. Επίσης, τα προϊόντα αυτά χρησιμοποιούνται για την παρασκευή χρωμικού οξέος, αλλά και για την πρόληψη της σκουριάς (WHO, 2000).

Παράλληλα, για τις επιστρώσεις προστασίας μεταλλικών επιφανειών από τη διάβρωση, οι μεταλλοβιομηχανίες χρησιμοποιούν πολλές ενώσεις του Cr(VI). Στη συγκεκριμένη διεργασία, τμήμα της μεταλλικής επιφάνειας μετατρέπεται με χημικό ή ηλεκτροχημικό τρόπο σε αδρανή επίστρωση. Τυπική είναι η διεργασία Cronak για επιφάνειες ψευδαργύρου ή καδμίου, κατά την οποία το αντικείμενο εμβαπτίζεται για 5-10 s σε διάλυμα 182 g $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}/\text{L}$ και 6 mL πυκνού $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{L}$ (Xia et al, 2000). Ως παρεμποδιστές διάβρωσης χρησιμοποιούνται πολλά χρωμικά και διχρωμικά άλατα, λόγω όμως της υψηλής τους τοξικότητας, οι βιομηχανίες έχουν οδηγηθεί στη σταδιακή αντικατάστασή τους.

Επίσης, για την παθητικοποίηση (passivation) μεταλλικών επιφανειών αλουμινίου, ψευδαργύρου, καδμίου, χαλκού, αργύρου, μαγνησίου, κασσιτέρου και κραμάτων τους, εφαρμόζεται η διεργασία επίστρωσης με χρωμικά (Chromate Conversion Coating, CCC). Τα κυριότερα χρωμικά άλατα που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη διεργασία είναι το χρωμικό ασβέστιο, το χρωμικό στρόντιο και ο χρωμικός ψευδάργυρος. Για την ίδια διεργασία χρησιμοποιείται και το τριοξείδιο του χρωμίου (National Toxicology Program).

Τα χρωμικά, συχνά χρησιμοποιούνται ως χρωστικές στη φωτογραφία. Ο χρωμικός μόλυβδος (PbCrO_4), γνωστός ως κίτρινο του χρωμίου είναι μια εξαιρετικής ποιότητας κίτρινη χρωστική και χρησιμοποιείται στο χρωματισμό του βινυλίου, του ελαστικού και του χαρτιού, αν και λόγω της μεγάλης τοξικότητάς του η χρήση του πλέον αποθαρρύνεται. Επίσης, οι ενώσεις του Cr(VI) χρησιμοποιούνται σε βαφές υφασμάτων, χρώματα και μελάνια.

Ακολουθως, μια από τις πιο σημαντικές κατηγορίες στη χρήση του χρωμίου είναι η παραγωγή ανοξειδωτου χάλυβα καθώς στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται η μεγαλύτερη ποσότητα χρωμίου. Με προσθήκη χρωμίου από 13% έως 30%, οι χρωμιοχάλυβες εμφανίζουν μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με τον κοινό χάλυβα στη διάβρωση και στην οξείδωση σε φυσικό και αστικό περιβάλλον. Το χρώμιο σχηματίζει μια αδρανή επικάλυψη Cr_2O_3 , απρόσβλητη από το νερό και τον αέρα, αλλά ταυτόχρονα εξαιρετικά λεπτή ώστε το κράμα να μην χάνει τη λάμψη του (Ashby and Jones, 1998).

Εκτεταμένη χρήση των αλάτων του Cr(VI) (κυρίως του χρωμικού νατρίου και αμμωνίου) γίνεται στη βυρσοδεψία για την κατεργασία δερμάτων (δέψη - leather tanning). Η δέψη με χρωμικά είναι ταχύτερη από τη δέψη με φυτικές ταννίνες και τα δέρματα που παράγονται με αυτόν τον τρόπο έχουν μεγαλύτερη αντοχή στην τάση και είναι ιδανικά για δερμάτινες τσάντες και ρούχα. Επίσης, για τη δέψη των δερμάτων χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό και το θειικό χρώμιο. Η πρόσληψη του χρωμίου από το δέρμα δεν είναι πλήρης, οπότε ενώσεις χρωμίου διαφεύγουν μαζί με άλλα υγρά που χρησιμοποιούνται, στα υγρά απόβλητα των βιοτεχνιών επεξεργασίας δέρματος αλλά και στο έδαφος (Πατσιούρα, 2004).

Τέλος, ενώσεις του Cr(VI) χρησιμοποιούνται ως συντηρητικά ξύλου. Το 1996, το 52% της παραγωγής των ενώσεων Cr στις ΗΠΑ χρησιμοποιούνταν στην παρασκευή ενός συντηρητικού ξύλου, του χρωμιωμένου αρσενικού χαλκού (chromated copper arsenate, CCA). Το CCA είναι μίγμα χρωμικών αλάτων, οξειδίου του χαλκού και οξειδίου του αρσενικού (As_2O_5). Τα χρωμικά βασικά δρουν ως χημικά στερεωτικά μέσα του χαλκού και αρσενικού, τα οποία δρουν ως μυκητοκτόνα/βακτηριοκτόνα και ως εντομοκτόνα, αντίστοιχα.

3.4 Τρόπος εισαγωγής χρωμίου στο περιβάλλον

Η διασπορά των διαφόρων μορφών του χρωμίου στο περιβάλλον, εξαρτάται από το pH, την οξειδοαναγωγική δυνατότητα, την παρουσία οξειδωτικών ή αναγωγικών ενώσεων, τις κινητικές των οξειδοαναγωγικών αντιδράσεων, το σχηματισμό των διαφόρων αλάτων καθώς και τη συνολική συγκέντρωση χρωμίου. Στο περιβάλλον, το Cr(VI) απαντάται κυρίως ως CrO_4^{2-} ή HCrO_4^- , ενώ το Cr(III) ως $\text{Cr}(\text{OH})_n(3-n)^+$. Με τις μορφές αυτές, το χρώμιο εισέρχεται στο περιβάλλον, μέσω του αέρα, του νερού και του εδάφους, μέσα από φυσικές διαδικασίες και ανθρώπινες δραστηριότητες. Σχεδόν όλο το χρώμιο στη φύση βρίσκεται ως τρισθενές χρώμιο, Cr(III). Το εξασθενές χρώμιο, Cr(VI), που συναντάται στο περιβάλλον, είναι σχεδόν αποκλειστικά ανθρωπογενές.

Μέσω των φυσικών διεργασιών, το χρώμιο εμφανίζεται κυρίως με τη μορφή του Cr(III), με κυριότερο ορυκτό τον χρωμίτη $\text{Fe}(\text{Mg})\text{Cr}_2\text{O}_4$, που αποτελεί το βασικό μέταλλευμα χρωμίου. Υπάρχουν και ορισμένα σπάνια ορυκτά όπου το χρώμιο είναι εξασθενές από τα οποία το γνωστότερο είναι ο κροκοϊτης, με χημικό τύπο PbCrO_4 (χρωμικός μόλυβδος). Ο χρωμίτης βρίσκεται σε συμπλέγματα εκρηξιγενών πετρωμάτων μαζί με σερπεντίνη, πυροξένους και ολιβίνη. Τα μεταλλεύματα χρωμίου εξάγονται σήμερα στη Νότια Αφρική, τη Ζιμπάμπουε, τη Φινλανδία, την Ινδία, το Καζακστάν και τις Φιλιππίνες. Συνολικά εξάγονται 14 εκατομμύρια τόνοι ορυκτών χρωμίου. Μαζί με τις ανεκμετάλλευτες αποθέσεις στη Γροιλανδία, τον Καναδά και τις ΗΠΑ, θεωρείται ότι τα αποθέματα ορυκτών χρωμίου φτάνουν το 1 δισεκατομμύριο τόνους [iii].

Οι κύριες ανθρώπινες δραστηριότητες που αυξάνουν τις συγκεντρώσεις του χρωμίου στο περιβάλλον είναι η καύση ορυκτών καυσίμων, τα βυρσοδεψεία, τα εργοστάσια κλωστοϋφαντουργίας, επιμεταλλώσεων, οι μεταλλουργικές βιομηχανίες και τα αστικά λύματα (Οικονομόπουλος, 1999). Διάφορες βιομηχανίες εκπέμπουν στον αέρα, στο νερό και στο έδαφος πλήθος ενώσεων του Cr(VI). Σε αυτή την περίπτωση, το Cr(VI) βρίσκεται συνήθως σε ποσοστό 85-90% του συνολικού.

➤ Χρώμιο στο Έδαφος

Το χρώμιο στο φλοιό της γης βρίσκεται σε φυσική αφθονία και συνδέεται κυρίως με βασικά και υπερβασικά πετρώματα. Τα όξινα πυριγενή και ιζηματογενή πετρώματα εμφανίζουν μικρότερες ποσότητες χρωμίου που κυμαίνονται από 5 έως 120 ppm, με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται στα αργιλούχα ιζήματα (Ιωάννου, 2001). Η περιεκτικότητα των περισσότερων πετρωμάτων σε χρώμιο κυμαίνεται από 5 έως 1800 mg/kg.

Τα επίπεδα του χρωμίου στα εδάφη ποικίλουν ανάλογα με την περιοχή και το βαθμό ρύπανσης από τις ανθρωπογενείς πηγές. Αναλύσεις δειγμάτων εδαφών έχουν δείξει ότι μια μέση συγκέντρωση σε αυτά είναι 14-70 mg/kg. Μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό είναι διαθέσιμο στα φυτά (μέχρι 0.19 mg/kg) και δεν έχει διευκρινιστεί επαρκώς το κατά πόσο το χρώμιο είναι γι' αυτά ένα απαραίτητο ιχνοστοιχείο (INCHEM, 1988). Τα φυσικά επίπεδα της συγκέντρωσης του χρωμίου στο έδαφος είναι γενικά υψηλά. Λόγω, όμως, της δυσδιαλυτότητας των ενώσεών του, πολύ μικρές ποσότητες απελευθερώνονται από το έδαφος με έκπλυση από τα νερά της βροχής (Οικονομόπουλος, 1999). Το εξασθενές χρώμιο στα εδάφη ανάγεται γρήγορα σε τρισθενές από την οργανική ύλη (WHO, 2000).

Παράλληλα, το χρώμιο μπορεί να καταλήξει στο έδαφος μέσω της διάθεσης αποβλήτων ή μέσω της εναπόθεσης του από τον αέρα. Το χρώμιο που βρίσκεται στα

εδάφη προσκολλάται έντονα στους εδαφικούς κόκκους με αποτέλεσμα να μην μετακινείται εύκολα προς τα υπόγεια ύδατα.

➤ Χρώμιο στο Νερό

Η συγκέντρωση του χρωμίου στο νερό ποικίλει, ανάλογα με τη φύση του εδάφους και το είδος των βιομηχανικών πηγών της περιοχής (WHO, 2000). Τα φυσιολογικά επίπεδά του, στα μη ρυπασμένα επιφανειακά ύδατα είναι συνήθως χαμηλά και κυμαίνονται στην περιοχή 1 - 10 $\mu\text{g/L}$, ενώ στο πόσιμο νερό οι συγκεντρώσεις του βρίσκονται στην περιοχή 0,4 - 8 $\mu\text{g/L}$. Η συγκέντρωση του χρωμίου στο θαλασσινό νερό κυμαίνεται μεταξύ 0-0.36 $\mu\text{g/L}$ (Οικονομόπουλος, 1999).

Συνήθως δεν καταγράφονται υψηλά επίπεδα χρωμίου (έως 20 $\mu\text{g/L}$) σε νερό βρύσης, ενώ όταν εντοπίζεται χρώμιο στο νερό αυτό, βρίσκεται στην εξασθενή μορφή του, καθώς σπάνια το τρισθενές χρώμιο, εμφανίζεται στο χλωριωμένο πόσιμο νερό. Επίσης, παρατηρούνται μεγάλες διακυμάνσεις στα επίπεδα του χρωμίου στο πόσιμο νερό κατά τη διάρκεια της ημέρας και αυτό πιθανώς να οφείλεται στο χρονικό διάστημα που παραμένει το νερό σε επαφή με τις σωληνώσεις.

Στην περίπτωση διάθεσης βιομηχανικών ανεπεξέργαστων αποβλήτων που περιέχουν Cr(VI) σε υδάτινους αποδέκτες, τα επίπεδα του Cr(VI) στα ύδατα του αποδέκτη και στα υπόγεια ύδατα μπορεί να φτάσουν μερικές δεκάδες $\mu\text{g/L}$. Στα φυσικά ύδατα, οι ενώσεις του εξασθενούς χρωμίου είναι σταθερές, καθώς η παρουσία αναγωγικών συνθηκών δεν είναι συχνή. Το εξασθενές χρώμιο ανάγεται σε τρισθενές παρουσία αναγωγικών συνθηκών ή όταν έρθει σε επαφή με οργανική ύλη που βρίσκεται στο νερό (INCHEM, 1988). Πολλές ενώσεις του χρωμίου είναι σχετικά αδιάλυτες στο νερό. Οι ενώσεις του Cr(III) είναι αδιάλυτες στο νερό και θεωρούνται σχετικά αδρανής, επειδή έχουν την τάση να προσροφώνται στα αιωρούμενα σωματίδια και στο ίζημα. Το οξείδιο του Cr(III) και το υδροξείδιο του Cr(III) είναι οι μόνες υδροδιαλυτές ενώσεις. Το οξείδιο του Cr(VI) είναι ένα παράδειγμα εξαιρετικά υδροδιαλυτής ένωσης με διαλυτότητα = 1680 g/L (WHO, 2000.; iii). Σε γενικές γραμμές, το Cr(VI) θεωρείται ευκίνητο στο υδάτινο περιβάλλον, παραμένει στη διαλυτή φάση και είναι βιοδιαθέσιμο. Από την άλλη πλευρά, το Cr(III) θεωρείται "μη ευκίνητο", και λιγότερο βιοδιαθέσιμο.

Το Cr(VI) μπορεί να υπάρξει φυσικά στα υπόγεια νερά που είναι απρόσβλητα από την τοπική βιομηχανική δραστηριότητα. Από μετρήσεις που έχουν γίνει σε διάφορες περιοχές, έχει φανεί ότι μπορεί να υπάρξει στα νερά αυτά με τη μορφή χρωμικού και διχρωμικού ιόντος. Η ύπαρξη του Cr(VI) στα υπόγεια νερά επηρεάζεται από την ενεργό οξύτητα (pH) και την ηλεκτρική αγωγιμότητα (Eh). Το χρωμικό ιόν κυριαρχεί σε υψηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας (>500 mV σε pH=6 και >300 mV σε pH=9). Σε χαμηλότερες τιμές Eh, τα στοιχεία του Cr(III) εμφανίζονται σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις από το χρωμικό ιόν, ενώ παράλληλα τα στοιχεία αυτά εξαρτώνται από το pH. Κάτω από οξειδωτικές συνθήκες όπου το χρωμικό ιόν είναι σταθερό, η συγκέντρωση του ολικά διαλυμένου χρωμίου μπορεί να φτάσει πάνω από 1 mg/L, λόγω της μεγάλης διαλυτότητας των μεταλλευμάτων των χρωμικών ανόργανων. Αντιθέτως, κάτω από πιο περιοριστικές συνθήκες, όπου τα στοιχεία και τα μεταλλεύματα του Cr(III) είναι σταθερά, η συγκέντρωση του ολικά διαλυμένου χρωμίου είναι τυπικά κατά πολύ μικρότερη από 1 mg/L λόγω της χαμηλής διαλυτότητας των μεταλλευμάτων του Cr(III), όπως το Cr(OH)_3 and $(\text{Fe,Cr})(\text{OH})_3$.

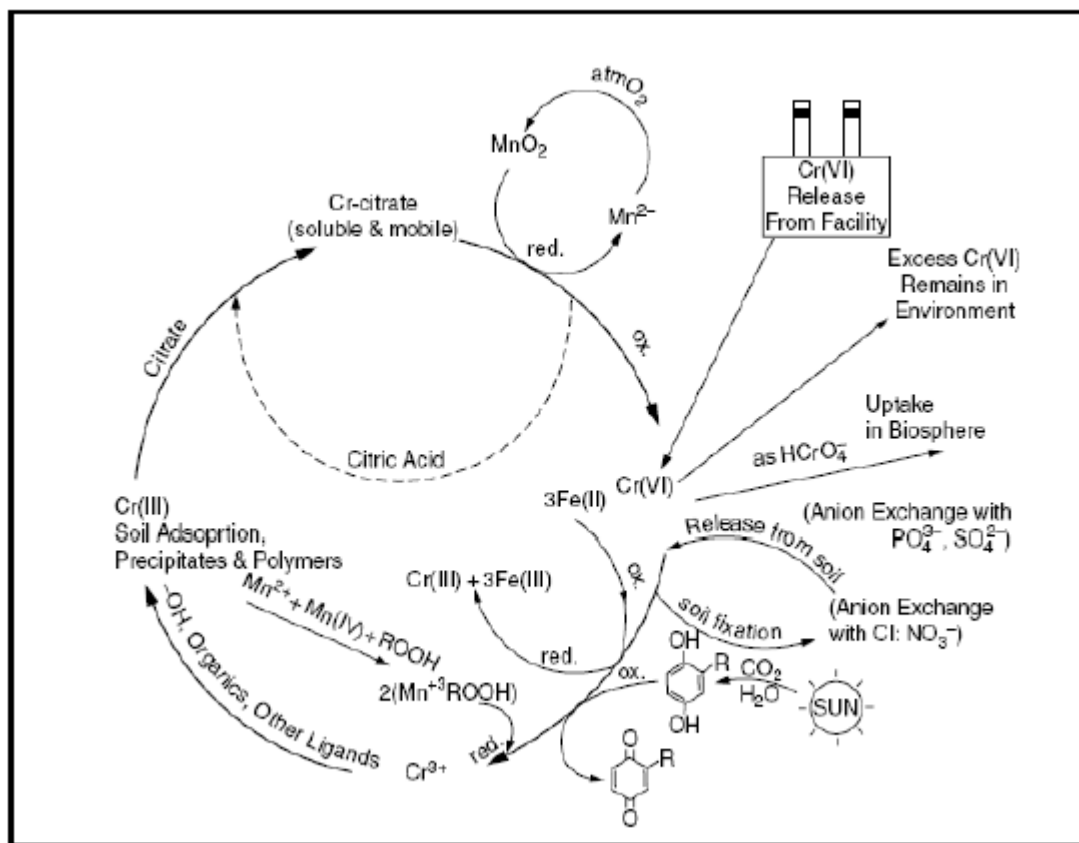
➤ Χρώμιο στον Αέρα

Στον αέρα, το χρώμιο βρίσκεται υπό μορφή μικρών σωματιδίων ή aerosols. Τόσο το Cr(III), όσο και το Cr(VI) απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα από διάφορες διεργασίες, όμως σύμφωνα με έρευνες, το ποσοστό του Cr(VI) που παρατηρείται στον αέρα, υπολογίζεται γύρω στο 0.01–30%. Οι εκπομπές δηλαδή αερίων του χρωμίου αποτελούνται κατά βάση από το Cr(III), χωρίς το αποτέλεσμα αυτό να αποτελεί αδιαμφισβήτητο γεγονός καθώς, οι πληροφορίες σχετικά με τη συγκέντρωση του χρωμίου στην ατμόσφαιρα είναι περιορισμένες (WHO, 1996).

Οι σημαντικότερες βιομηχανικές πηγές χρωμίου στην ατμόσφαιρα είναι εκείνες σχετικές με την παραγωγή σιδηροχρωμίου. Ο καθαρισμός μεταλλεύματος, η χημική και πυρίμαχη επεξεργασία, τα εργοστάσια παραγωγής τσιμέντου, η επένδυση των φρένων και οι καταλυτικοί μετατροπείς των αυτοκινήτων, η επεξεργασία δέρματος και οι χρωστικές ουσίες χρωμίου συμβάλλουν επίσης στην απελευθέρωση του χρωμίου στην ατμόσφαιρα. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση των επιπέδων του Cr(III) στον αέρα, είναι κυρίως αποτέλεσμα της καύσης γαιανθράκων ή και ορυκτελαίων καθώς και της διαδικασίας παραγωγής χάλυβα, ενώ οι ηλεκτροσυγκολλήσεις και η χρήση χημικών ενώσεων του Cr(VI) αυξάνουν τα ποσοστά του στην ατμόσφαιρα (WHO, 1996). Παράλληλα, η παρουσία χρωμίου στον αέρα μπορεί να προέρχεται και από φυσικές πηγές, όπως είναι η διάβρωση αργιλικών σχιστόλιθων, αργίλων και άλλων πετρωμάτων από τον αέρα. Σε χώρες όπου το χρώμιο εξορύσσεται, οι παραγωγικές διεργασίες μπορεί να αποτελούν, επίσης, μια πολύ σημαντική πηγή.

Μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν πάνω από το βόρειο Ατλαντικό, στο βόρειο γεωγραφικό πλάτος των 30° μοιρών, σε απόσταση αρκετών χιλιάδων χιλιομέτρων από μεγάλα τμήματα χέρσου, έδειξαν ότι οι συγκεντρώσεις του χρωμίου κυμαίνονται από 0.07–1.1 ng/m³. Οι συγκεντρώσεις πάνω από το Βόρειο Πόλο ήταν ελαφρώς μικρότερες. Έχουν επίσης καταγραφεί οι παρακάτω συγκεντρώσεις χρωμίου: 0.7 ng/m³ στα νησιά Σέτλαντ και τη Νορβηγία, 0.6 ng/m³ στο βόρειο Καναδά και 1–140 ng/m³ στην κεντρική Ευρώπη (WHO, 2000). Στις μη-βιομηχανοποιημένες περιοχές, οι συγκεντρώσεις που βρίσκονται πάνω από 10 ng/m³ δεν είναι ασυνήθιστες. Οι συγκεντρώσεις στις αστικές περιοχές είναι 2–4 φορές υψηλότερες από τις συγκεντρώσεις στις περιοχές της περιφέρειας. Τέλος, ως αποτέλεσμα του καπνίσματος, οι συγκεντρώσεις του χρωμίου στους εσωτερικούς χώρους μπορεί να είναι 10–400 φορές μεγαλύτερες από τις συγκεντρώσεις του στους εξωτερικούς χώρους (περίπου 1000 ng/m³) (WHO, 1996).

Το μεγαλύτερο μέρος του χρωμίου που βρίσκεται στον αέρα, θα απομακρυνθεί μέσω της υγρής ή ξηρής εναπόθεσης και θα καταλήξει στα ύδατα ή στο έδαφος.



Εικόνα 6. Κύκλος χρωμίου στο περιβάλλον (US EPA, 2000)

➤ Χρώμιο στις τροφές

Η ημερήσια πρόσληψη χρωμίου μέσω της τροφής είναι δύσκολο να υπολογισθεί, καθώς οι υπάρχουσες μελέτες έχουν χρησιμοποιήσει μεθόδους που δεν είναι συγκρίσιμες. Συγκεκριμένα, για τη Βόρειο Αμερική η ημερήσια πρόσληψη είναι από 50 έως 200 $\mu\text{g}/\text{ημέρα}$. Σε γενικές γραμμές, οι τροφές περιέχουν χρώμιο σε συγκεντρώσεις από <10 έως $1300 \mu\text{g}/\text{kg}$, οι υψηλότερες εκ των οποίων έχουν βρεθεί στο κρέας, στα ψάρια, στα φρούτα και στα λαχανικά (WHO, 1996). Σε αλκοολούχα ποτά στη Βρετανία, τα επίπεδα του χρωμίου ήταν υψηλότερα από τις Η.Π.Α. Συγκεκριμένα ήταν $0.45 \text{ mg}/\text{L}$ για το κρασί, $0.30 \text{ mg}/\text{L}$ για τη μύρα και $0.135 \text{ mg}/\text{L}$ για τα οиноπνευματώδη (WHO, 2000).

Όταν το ποσοστό του χρωμίου στο έδαφος αυξάνεται, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υψηλές συγκεντρώσεις στις καλλιέργειες. Επίσης, η οξύτητα του εδάφους, μπορεί να επηρεάσει την ικανότητα λήψης χρωμίου των καλλιεργειών. Τα φυτά συνήθως απορροφούν μόνο Cr(III) . Παρόλο που το είδος του χρωμίου αυτού μπορεί να μην είναι επιβλαβές για τα φυτά, όταν οι συγκεντρώσεις του, υπερβάν μια συγκεκριμένη τιμή τότε μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις για αυτά.

3.5 Τοξικότητα χρωμίου

Οι άνθρωποι μπορούν να εκτεθούν στο χρώμιο μέσω της αναπνοής, της κατανάλωσης τροφών και πότων που το περιέχουν και μέσω της επαφής με το δέρμα τους. Γενικά, το επίπεδο του εξασθενούς χρωμίου στον αέρα και το νερό είναι αρκετά χαμηλό. Το επίπεδο χρωμίου στο πόσιμο νερό είναι επίσης συνήθως χαμηλό, αλλά το

μολυσμένο υπόγειο νερό μπορεί να περιέχει το επικίνδυνο για την υγεία χρώμιο, που είναι το εξασθενές χρώμιο (Cr(VI)).

Για τους περισσότερους ανθρώπους, η κατανάλωση τροφής που περιέχει Cr(III), αποτελεί την κύρια οδό λήψης χρωμίου, καθώς το Cr(III) εμφανίζεται με φυσικό τρόπο σε πολλά λαχανικά, φρούτα, κρέατα και σιτάρια. Οι διάφοροι τρόποι προετοιμασίας και αποθήκευσης τροφίμων μπορούν να αλλάξουν το ποσοστό χρωμίου που υπάρχει σε αυτά. Όταν τα τρόφιμα αποθηκεύονται σε δεξαμενές ή δοχεία χάλυβα, τότε οι συγκεντρώσεις χρωμίου μπορούν να αυξηθούν [iii]. Παράλληλα, η δερματική έκθεση των ανθρώπων στο χρώμιο μπορεί να εμφανιστεί κατά τη διάρκεια της χρήσης καταναλωτικών προϊόντων που περιέχουν χρώμιο, όπως το ξύλο που επεξεργάζεται με διχρωμικό άλας χαλκού ή το δέρμα που αμυρίζεται με χρωμικό θεικό άλας (ATSDR, 1998).

Σε γενικές γραμμές, η μέση ημερήσια πρόσληψη χρωμίου από το νερό και τα τρόφιμα υπολογίζεται ότι είναι πάνω από 52 µg/d. Η συνολικά εκτιμώμενη πρόσληψη του χρωμίου από τον αέρα, το νερό, και τα τρόφιμα από το γενικό πληθυσμό στο Ηνωμένο Βασίλειο βρίσκεται μεταξύ των ορίων 78-106 µg/d. Από τη συνολική πρόσληψη, τα τρόφιμα συνεισφέρουν το 93-98%, ενώ το νερό το 1.9-7%. Η πρόσληψη μέσω του αέρα, συνεισφέρει ελάχιστα στη συνολικά εκτιμώμενη ποσότητα πρόσληψης χρωμίου. Στην Ολλανδία, η εκτιμώμενη μέση ημερήσια εισαγωγή χρωμίου στον οργανισμό είναι 100 µg, με την τιμή αυτή να κυμαίνεται μεταξύ των ορίων 50-200 µg. Γενικά, τα τρόφιμα αποτελούν τη σημαντικότερη πηγή πρόσληψης χρωμίου. Η εισαγωγή του χρωμίου στον οργανισμό μέσω του πόσιμου νερού μπορεί, επίσης να είναι σημαντική όταν τα συνολικά επίπεδα χρωμίου σε αυτό, είναι επάνω από 25 µg/L. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα επίπεδα της ημερήσιας πρόσληψης χρωμίου από τους ανθρώπους μέσω των διαφορετικών οδών έκθεσης (WHO, 1996):

Πίνακας 8. Ημερήσια πρόσληψη χρωμίου από διαφορετικές οδούς έκθεσης

Οδός έκθεσης	Ημερήσια πρόσληψη χρωμίου	Απορρόφηση
Τροφές	<200 µg	<10 µg
Πόσιμο νερό	0.8-16 µg	<1 µg
Αέρας	<1000 ng	<5 ng

Οι τιμές του παραπάνω πίνακα δεν ισχύουν για όλο τον πληθυσμό, καθώς άτομα που εργάζονται στην παραγωγή χρωμικών αλάτων, την παραγωγή ανοξειδωτού χάλυβα και τις βιομηχανίες δέρματος και χρωματισμού υφασμάτων, εκτίθενται σε σημαντικές ποσότητες χρωμίου. Η επαγγελματική έκθεση μπορεί να είναι δύο τάξεις μεγέθους υψηλότερη από την έκθεση στο γενικό πληθυσμό. Επίσης, άτομα τα οποία ζουν κοντά στις περιοχές διάθεσης αποβλήτων χρωμίου ή κοντά στα εργοστάσια παρασκευής και επεξεργασίας χρωμίου, έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες έκθεσης σε υψηλά ποσοστά χρωμίου σε σχέση με το γενικό πληθυσμό (ATSDR, 1998).

Η επίδραση των ειδών του χρωμίου πάνω στους οργανισμούς είναι πολύ διαφορετική. Εκτός από τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των ειδών του, η επίδραση αυτή, εξαρτάται επιπλέον από τη συγκέντρωσή τους, τη διάρκεια της έκθεσης του

οργανισμού σε αυτά και το κατά πόσο γρήγορα μεταβολίζονται και εκκρίνονται από το σώμα.

Όταν αναφερόμαστε στον άνθρωπο ή τα ζώα γίνεται διάκριση ανάμεσα στην οξεία και τη χρόνια τοξικότητα (Γιδαράκος, 2006):

- ο Η **οξεία τοξικότητα** μιας χημικής ουσίας είναι η δυνατότητά της να προκαλέσει βλάβη μετά από βραχυχρόνια έκθεση (λιγότερο από 30 ημέρες).
- ο Η **χρόνια τοξικότητα** περιλαμβάνει μακροχρόνια έκθεση κατά την οποία η τοξική ουσία συσσωρεύεται στο σώμα, κάνοντας την ανάπτυξη και την παρακολούθηση της απόκρισης αρκετά πιο περίπλοκη.

Από τα ιζήματα, το χρώμιο δεν επαναδιαλύεται εύκολα, με αποτέλεσμα να μην προσλαμβάνεται από τους θαλάσσιους οργανισμούς σε μεγάλο βαθμό. Η αύξηση της αλατότητας προκαλεί και αύξηση της διαλυτοποίησης του χρωμίου από τα ιζήματα. Δεν είναι γνωστό εάν το χρώμιο συσσωρεύεται στους οργανισμούς των ψαριών, αλλά οι υψηλές συγκεντρώσεις του, λόγω της διάθεσης των μεταλλικών προϊόντων στα επιφανειακά νερά, μπορούν να βλάψουν τα βράγχια των ψαριών που βρίσκονται κοντά στο σημείο διάθεσης των αποβλήτων. Γενικά, τα ψάρια παρουσιάζουν σχετική ανθεκτικότητα στο Cr, ενώ μερικά ασπόνδυλα είναι σχετικά ευαίσθητα. Σε συγκέντρωση 5 mg Cr⁶⁺/L, το χρώμιο προκαλεί ελάττωση της φωτοσύνθεσης του φυτοπλαγκτού κατά 50%. Στα ζώα, το χρώμιο μπορεί να προκαλέσει αναπνευστικά και γεννητικά προβλήματα, στειρότητα καθώς και σχηματισμό όγκων (Οικονομόπουλος, 1999).

Είδη χρωμίου που επηρεάζουν τους οργανισμούς:

➤ Τρισθενές χρώμιο (Cr(III) ή Cr³⁺)

Το τρισθενές χρώμιο (Cr(III) ή Cr³⁺) θεωρείται απαραίτητο ιχνοστοιχείο για τον οργανισμό, αφού φαίνεται να συμμετέχει στον παράγοντα ανοχής της γλυκόζης (Glucose Tolerance Factor, GTF). Ο παράγοντας GTF μαζί με την ινσουλίνη ρυθμίζουν την ποσότητα της γλυκόζης στο αίμα. Παρατηρήσεις σε πειραματόζωα, έδειξαν ότι έλλειψη χρωμίου, προκαλεί αύξηση του σακχάρου στο αίμα και εμφάνιση γλυκόζης στα ούρα (INCHEM, 1988). Η απώλειά του Cr(III) μπορεί να προκαλέσει αρρώστια ονομαζόμενη “απώλεια χρωμίου”.

Για το λόγο αυτό, ενδείκνυται η πρόσληψη 30 έως 50 µg Cr(III) ημερησίως, ενώ ποσότητες μέχρι 200 µg δεν έχει αναφερθεί ότι προκαλούν προβλήματα υγείας (Krejpcio, 2001). Παρόλα αυτά, η χρήση διατροφικών συμπληρωμάτων με χρώμιο είναι αμφιλεγόμενη εξαιτίας των περίπλοκων αποτελεσμάτων των συγκεκριμένων συμπληρωμάτων. Κάποιες περίπλοκες οργανικές ενώσεις του χρωμίου προκαλούν ζημιά στα χρωμοσώματα των κυττάρων των χάμστερ. Έτσι, στις Ηνωμένες Πολιτείες οι διατροφικές οδηγίες για την ημερήσια κατανάλωση χρωμίου μειώθηκαν από τα 50-200 µg για έναν ενήλικα στα 35 µg (για τους άντρες) και 25 µg (για τις γυναίκες).

Οι επιδράσεις του Cr(III) στους οργανισμούς, διακρίνονται ανάλογα με τη διάρκεια έκθεσής τους σε αυτό (ATSDR, 1998):

- Οξεία τοξικότητα

- ✓ Οι δοκιμές οξείας τοξικότητας στα ζώα, έχουν δείξει ότι το Cr(III) παρουσιάζει μέτρια τοξικότητα κατά τη στοματική έκθεση.

- Χρόνια τοξικότητα

- ✓ Η συγκέντρωση αναφοράς (RfD) για το Cr(III) είναι 1.5 mg/kg/d. Η τιμή αυτή είναι βασισμένη στο επίπεδο έκθεσης στο οποίο δεν παρατηρήθηκε κανένα σύμπτωμα στους αρουραίους που εκτέθηκαν στο Cr(III) μέσω της διατροφής τους.
- ✓ Πιο συγκεκριμένα, από τα πειράματα αυτά, έχει παρατηρηθεί ότι από τη χρόνια έκθεση σε Cr(III) δεν επηρεάζεται η κατανάλωση τροφής, η πρόσληψη σωματικού βάρους και η εμφάνιση των ιστών στους αρουραίους. Η μόνη επίδραση που παρατηρήθηκε ήταν κάποια συσσώρευση του χρωμίου στους διάφορους ιστούς (WHO, 1996).
- ✓ Δεν υπάρχουν διαθέσιμες πληροφορίες για το εάν το Cr(III) επηρεάζει την ανθρώπινη ανάπτυξη και την αναπαραγωγή.
- ✓ Δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία για τη δυνατότητα οι ενώσεις του Cr(III) να έχουν καρκινογόνο δράση.
- ✓ Η Environmental Protection Agency (EPA) έχει δηλώσει ότι " η ταξινόμηση του Cr(VI) ως γνωστή ανθρώπινη καρκινογόνο ουσία προκαλεί ανησυχία για την καρκινογόνο δυνατότητα του Cr(III) ".

➤ Εξασθενές χρώμιο (Cr(VI) ή Cr⁶⁺)

Σε αντίθεση με το τρισθενές, το εξασθενές χρώμιο Cr(VI) είναι πολύ τοξικό και μπορεί να προκαλέσει μεταλλάξεις έπειτα από την είσοδο του στους οργανισμούς. Το Cr(VI) είναι τοξικότερο από το Cr(III), και για τις οξείες και για τις χρόνιες εκθέσεις και για αυτό, ο οργανισμός έχει διάφορα συστήματα για τη μετατροπή του Cr(VI) σε Cr(III), οδηγώντας έτσι σε αυξημένα επίπεδα Cr(III) σε αυτόν.

Κάποιοι επιστήμονες υποστηρίζουν ότι το χρώμιο (VI) μπορεί να προκαλέσει καρκίνο όταν εισπνέεται ως ατμός, όπως μέσω της διαδικασίας του μπάνιου, καθώς όπως με όλα τα τοξικά στοιχεία και ιδίως με τα μέταλλα, η έκθεση μέσω της εισπνοής έχει τον υψηλότερο κίνδυνο. Εντούτοις, ο μόνος τρόπος για να μπορέσει το χρώμιο (VI) να εισπνευσθεί είναι εάν ένα άτομο εκτίθεται σε καπνούς χρωμίου ή εάν το χρώμιο (VI) βρίσκεται σε αερομεταφερόμενα σταγονίδια χρώματος/νερού που εισπνέει.

Οι επιδράσεις του Cr(VI) στους οργανισμούς, διακρίνονται ανάλογα με τη διάρκεια έκθεσής τους σε αυτό (ATSDR, 1998):

-Οξεία τοξικότητα

- ✓ Η αναπνευστική οδός είναι το σημαντικότερο όργανο-στόχος για το Cr(VI). Η μείωση της αναπνοής, ο βήχας, ο κνησμός και το φτέρνισμα είναι συμπτώματα που έχουν αναφερθεί σε περιπτώσεις εισπνοής πολύ υψηλών συγκεντρώσεων τριοξειδίου του χρωμίου.
- ✓ Άλλα συμπτώματα που σημειώνονται από την οξεία έκθεση μέσω εισπνοής σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις του Cr(VI), περιλαμβάνουν επιπτώσεις στο γαστρεντερικό και νευρολογικό ανθρώπινο σύστημα. Τέτοιες επιπτώσεις μπορεί να είναι καταστροφή των νεφρών και του ήπατος, έλκος στομάχου και γαστρεντερικός ερεθισμός, αλλά ακόμα και ο θάνατος.

- ✓ Παράλληλα, η οξεία έκθεση μέσω του δέρματος προκαλεί στους ανθρώπους δερματικά εγκαύματα.
- ✓ Η κατάποση σημαντικών ποσοτήτων Cr(VI), προκαλεί γαστρεντερικά προβλήματα στους ανθρώπους και τα ζώα, συμπεριλαμβανομένου του κοιλιακού πόνου, του εμετού, και της αιμορραγίας.

-Χρόνια τοξικότητα

- ✓ Χρόνια έκθεση των ανθρώπων στο Cr(VI) μέσω της αναπνευστικής οδού οδηγεί σε επιπτώσεις σε αυτή, όπως είναι διατηρήσεις και έλκη του διαφράγματος, βρογχίτιδα, μειωμένη πνευμονική λειτουργία, πνευμονία, άσθμα, καρκίνο του πνεύμονα και της ρινικής κοιλότητας.
- ✓ Η χρόνια ανθρώπινη έκθεση σε υψηλά επίπεδα του Cr(VI) μέσω της εισπνοής ή της στοματικής έκθεσης μπορεί να δημιουργήσει σοβαρά προβλήματα στο συκώτι, το νεφρό, το γαστρεντερικό και το ανοσοποιητικό σύστημα, και ενδεχομένως το αίμα.
- ✓ Σύμφωνα με πλήθος πειραματικών δεδομένων που υπάρχουν, οι ενώσεις του Cr(VI) καταστρέφουν το DNA και προκαλούν μεταλλάξεις.
- ✓ Από μελέτες σε αρουραίους, έχει αποδειχθεί ότι, μετά από έκθεση μέσω εισπνοής, ο πνεύμονας και το νεφρό έχουν τα πιο υψηλά επίπεδα χρωμίου που δεσμεύεται από τους ιστούς.
- ✓ Η δερμική έκθεση στο Cr(VI) μπορεί να προκαλέσει δερματίτιδες, ευαισθησία, έλκος του δέρματος και αλλεργικές αντιδράσεις, ιδιαίτερα από ενδύματα και υποδήματα από δέρμα που έχει κατεργαστεί με Cr(VI).
- ✓ Μελέτες σε πειραματόζωα έδειξαν ότι η πόση νερού επιβαρυνμένου με Cr(VI) μπορεί να προκαλέσει καρκίνο του γαστρεντερικού συστήματος. Ωστόσο, δεν είναι σαφές αν τα επίπεδα που προσδιορίζονται σε πόσιμα ύδατα είναι ικανά να προκαλέσουν καρκίνο. Σύμφωνα με την International Agency for Research on Cancer (IARC), το Cr(VI) που προσλαμβάνεται με το νερό μετατρέπεται σε μεγάλο ποσοστό σε Cr(III) στο όξινο περιβάλλον του στομάχου, γεγονός που δεν επιτρέπει την περαιτέρω απορρόφηση του χρωμίου από τον οργανισμό, καθώς το Cr(III) δεν μπορεί να διαπεράσει την κυτταρική μεμβράνη.
- ✓ Περιορισμένες πληροφορίες για τις αναπαραγωγικές επιπτώσεις του Cr(VI) στους ανθρώπους που εκτίθενται μέσω της εισπνοής, υποστηρίζουν ότι η έκθεση στο Cr(VI) μπορεί να οδηγήσει σε επιπλοκές κατά τη διάρκεια της εγκυμοσύνης και του τοκετού.
- ✓ Η συγκέντρωση αναφοράς (Reference Concentration-RfC) για το Cr(VI) είναι 0.0001 mg/m^3 . Η τιμή αυτή είναι βασισμένη στις επιπτώσεις του αναπνευστικού συστήματος των αρουραίων. Η συγκέντρωση αναφοράς (RfC) είναι μια εκτίμηση της συνεχούς έκθεσης μέσω εισπνοής του ανθρώπινου πληθυσμού (συμπεριλαμβανομένων των ευαίσθητων υποομάδων) που είναι πιθανό να είναι χωρίς αξιόλογο κίνδυνο επιβλαβών αποτελεσμάτων κατά τη διάρκεια μιας ζωής. Δεν είναι ένας άμεσος εκτιμητής του κινδύνου αλλά ένα σημείο αναφοράς για τη μέτρηση των πιθανών αποτελεσμάτων. Σε εκθέσεις κατά πολύ μεγαλύτερες από τη συγκέντρωση αναφοράς, αυξάνονται οι πιθανότητες δυσμενών

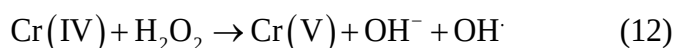
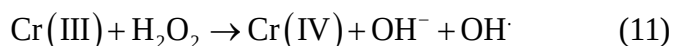
- επιπτώσεων στην υγεία. Αν ένας οργανισμός εκτεθεί σε συγκέντρωση Cr(VI) κατά τη διάρκεια της ζωής του μεγαλύτερη από τη συγκέντρωση αναφοράς (RfC), αυτό δεν σημαίνει απαραίτητα ότι θα εμφανίσει κάποιο σοβαρό πρόβλημα υγείας.
- ✓ Η συγκέντρωση αναφοράς (RfC) για το Cr(VI) είναι 0.000008 mg/m³ βασισμένο στα αναπνευστικά αποτελέσματα στους ανθρώπους.

Μηχανισμοί καρκινογένεσης λόγω χρωμίου

Το Cr(VI), ως χρωμικά ιόντα, λόγω δομικής ομοιότητας με τα θειικά και τα φωσφορικά ιόντα, εισέρχεται σαν "Δούρειος Ίππος" 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) το οποίο φαίνεται ότι είναι και ο "πραγματικός κίνδυνος". Αντίθετα, οι οκταεδρικής σύνταξης ενώσεις του Cr(III), λόγω του όγκου και της δυσδιαλυτότητας πολλών από αυτές, διαπερνούν την κυτταρική μεμβράνη αργά ή και καθόλου (Fan and Harding-Barlow, 1987). 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 (H₂O₂), ενός φυσικού συστατικού του κυτταροπλάσματος (σε πολύ μικρές βέβαια συγκεντρώσεις), παράγουν δραστικές οξυγονούχες ρίζες (ιδιαίτερα τη ρίζα υδροξυλίου, OH[•]). Οι έρευνες έδειξαν ότι το Cr(V), Cr(IV) και Cr(III) με το H₂O₂ μπορούν να δημιουργήσουν τις ρίζες OH[•] με αντιδράσεις (τύπου αντίδρασης Fenton, δηλ. της αντίδρασης Fe(II) με το H₂O₂) όπως:



Οι ρίζες OH[•] προκαλούν οξειδωτικές βλάβες στο DNA και συγκεκριμένα παρέχουν την οξειδωμένη μορφή της γουανοσίνης, την 8-υδροξυδεοξυ-γουανοσίνη (8-OHdG).

Πρόσφατα, ερευνητές από το Πανεπιστήμιο Brown ανακοίνωσαν ένα μάλλον παράδοξο εύρημα. Διαπίστωσαν ότι η αναγωγή του Cr(VI) από το ασκορβικό οξύ (βιταμίνη C) στο εσωτερικό των πνευμονικών κυττάρων προκαλεί μαζικές βλάβες στο DNA. Μικρές δόσεις Cr(VI) σε συνδυασμό με τη βιταμίνη C προκαλούν 15 φορές περισσότερες θραύσεις στα χρωμοσώματα και 10 φορές περισσότερες μεταλλάξεις σε σχέση με τις αντίστοιχες βλάβες που προκαλεί το Cr(VI) απουσία βιταμίνης C. Έτσι, σύμφωνα με τη μελέτη αυτή, η κατά τα άλλα ευεργετική για την υγεία βιταμίνη C δρα ως ενισχυτής της τοξικής δράσης του Cr(VI) (Brown University, 2007). Από την εργασία αυτή, αλλά και από πολλές άλλες ανάλογες, διαφαίνεται ότι οι επικίνδυνα δραστικές μορφές του χρωμίου μπορεί να εμφανίζονται κατά την πορεία της αναγωγής του Cr(VI) προς Cr(III).

3.6 Νομοθεσία

Τα όρια ποιότητας των υπογείων και επιφανειακών υδάτων, συνήθως εξαρτώνται από την επιθυμητή χρήση των νερών και στόχο έχουν να προστατεύσουν την υγεία του ανθρώπου, τη χλωρίδα, την πανίδα, τα υλικά από τη μεταφορά και βιομηχανική χρήση των νερών καθώς και να διευκολύνουν την επεξεργασία τους. Τα όρια που έχουν θεσπιστεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση καθώς και οι οδηγίες της Παγκόσμιας Οργάνωσης Υγείας (Π.Ο.Υ), σχετίζονται με τις επιπτώσεις που έχουν οι διάφοροι παράμετροι ρύπανσης στον άνθρωπο και στο περιβάλλον και στόχο έχουν να διατηρήσουν τις αρνητικές επιπτώσεις σε ανεκτά επίπεδα (Οικονομόπουλος, 1999).

➤ Όρια ποιότητας για πόσιμο νερό

Το νερό το προοριζόμενο για ανθρώπινη κατανάλωση πρέπει να είναι από κάθε άποψη αβλαβές για την υγεία του ανθρώπου, οργανοληπτικά άμεμπτο και απολύτως καθαρό, απαλλαγμένο από οποιεσδήποτε ουσίες σε αριθμούς και συγκεντρώσεις που να αποτελούν ενδεχόμενο κίνδυνο για τη δημόσια υγεία.

Η προστασία του πόσιμου νερού αποτελεί στόχο εθνικής και κοινοτικής πολιτικής και υπόκειται σε συμφωνίες υποχρεωτικού χαρακτήρα με σκοπό τη διατήρηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του, ώστε να διασφαλίζεται η προστασία της δημόσιας υγείας. Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης θα πρέπει να κυμαίνονται μεταξύ ορισμένων αποδεκτών ορίων, που αποτελούν και τα πρότυπα ποιότητας του νερού, και τα οποία θεσπίζονται νομοθετικά.

Τα πρότυπα αυτά έχουν καθορισθεί με την Οδηγία 98/83 Ε.Κ. και αναφέρονται στην Κοινή Υπουργική Απόφαση (ΚΥΑ) Υ2/2600/2001 (ΦΕΚ 892/11.7.2001). Η Οδηγία αυτή υιοθετήθηκε για την αναπροσαρμογή της οδηγίας 80/778/ΕΟΚ (Υ.Δ. Α5/288/86, ΦΕΚ 53/Β/20-2-1986) που ίσχυε μέχρι τις 25/12/03, με στόχο να καταστεί εφικτή η τήρηση των απαιτητών βασικών ποιοτικών και υγειονομικών παραμέτρων. Σύμφωνα με την ΚΥΑ Υ2/2600/2001, ως «πόσιμο» νερό νοείται το νερό που χρησιμοποιείται για ανθρώπινη κατανάλωση, είτε στη φυσική του κατάσταση, είτε μετά από επεξεργασία, ανεξάρτητα από την προέλευση του και από το εάν παρέχεται από δίκτυο διανομής, από βυτίο ή συσκευασμένο σε φιάλες ή δοχεία και περιλαμβάνει (ΦΕΚ 892/11.7.2001):

- Το νερό που διατίθεται για ανθρώπινη κατανάλωση (πόση, μαγείρεμα, προπαρασκευή τροφής ή άλλες οικιακές χρήσεις).
- Το νερό που χρησιμοποιείται στις βιομηχανίες τροφίμων και ποτών για την παρασκευή, επεξεργασία, συντήρηση ή εμπορία προϊόντων ή ουσιών που προορίζονται για ανθρώπινη κατανάλωση.
- Το νερό που επηρεάζει τον τελικό βαθμό υγιεινής των τροφίμων και ποτών.
- “τα οικιακά συστήματα διανομής”: οι σωληνώσεις, τα εξαρτήματα και οι συσκευές που έχουν εγκατασταθεί μεταξύ των κρουνών που συνήθως χρησιμοποιούνται για παροχή νερού ανθρώπινης κατανάλωσης και του δικτύου διανομής, αλλά μόνον εφόσον αυτά δεν υπάγονται στην ευθύνη του φορέα ύδρευσης, υπό την ιδιότητα του αυτή.

Σύμφωνα λοιπόν με την Κοινή Υπουργική Απόφαση (ΚΥΑ) Υ2/2600/2001, το χρώμιο ανήκει στην κατηγορία των χημικών που λόγω της επικινδυνότητάς τους είναι εξαιρετικά σημαντικά για την ανθρώπινη υγεία. Ως ανώτατο επιτρεπτό όριο συγκέντρωσης ολικού χρωμίου στο πόσιμο νερό έχουν θεσπιστεί τα 50 µg/L, ενώ δεν έχει καθοριστεί συγκεκριμένο όριο για το εξασθενές χρώμιο.

Στην Αμερική, η US Environmental Protection Agency (EPA) έχει θεσπίσει τους εθνικούς πρωτεύοντες κανονισμούς για το πόσιμο νερό (National Primary Drinking Water Regulations, NPDWRs), οι οποίοι αποτελούν νομικά όρια και οι οποίοι προστατεύουν τη δημόσια υγεία, περιορίζοντας τα επίπεδα των ρυπαντών στο πόσιμο νερό. Σύμφωνα με την EPA, για το πόσιμο νερό έχει θεσπιστεί ως ανώτατο επιτρεπτό όριο ολικού χρωμίου η τιμή των 100 µg/L, θεωρώντας ότι η συγκέντρωση αυτή του χρωμίου στο πόσιμο νερό δεν αποτελεί κίνδυνο για τη δημόσια υγεία (Robles-Camacho and Armienta, 2000).

➤ Όρια ποιότητας για μη πόσιμο νερό

Σύμφωνα με την Παγκόσμια Οργάνωση Υγείας (Π.Ο.Υ), απαγορεύεται αυστηρά για αρδευτικούς σκοπούς, η χρήση νερού εφόσον σε αυτό έχει εντοπιστεί χρώμιο σε συγκέντρωση μεγαλύτερη των 1.0 mg/L. Επίσης, στο νερό που καταναλώνεται από τα οικίστα ζώα η συγκέντρωση του χρωμίου, δε θα πρέπει να υπερβαίνει την ίδια τιμή (Οικονομόπουλος, 1999).

Παράλληλα, στην κατηγορία του μη πόσιμου νερού περιλαμβάνονται και οι υδάτινοι αποδέκτες. Σύμφωνα με την ΚΥΑ 4859/726, ρυθμίζονται οι εκπομπές ολικού χρωμίου από απόβλητα βιομηχανιών σε υδάτινους αποδέκτες, σε συγκεντρώσεις που κυμαίνονται (ανάλογα με τον αποδέκτη) από 0.6 έως 3.0 mg/L, ενώ μέχρι στιγμής δεν έχει θεσπιστεί αντίστοιχο όριο για το έδαφος (ΚΥΑ 4859/726, 2001).

Καθώς, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η πρόσληψη του επιβλαβούς για την υγεία χρωμίου, δεν γίνεται μόνο μέσω του ύδατος αλλά και μέσω του αέρα, έχουν θεσπιστεί επιτρεπτά όρια έκθεσης (Permissible Exposure Limits, PELs) και προτεινόμενα όρια έκθεσης (Recommended Exposure Limits, RELs) για τους εργασιακούς χώρους στους οποίους οι εργαζόμενοι εκτίθενται σε υψηλές συγκεντρώσεις χρωμίου. Η έκθεση ενός εργαζομένου σε Cr(VI) από τον αέρα στον εργασιακό του χώρο είναι πιο σημαντική και επικίνδυνη. Για παράδειγμα, σε εργασιακούς χώρους όπου εκτελούνται συγκολλησεις μετάλλων, το προτεινόμενο όριο έκθεσης για το Cr(VI) στον αέρα κατά τη διάρκεια 8ώρου κυμαίνεται από 1.0 έως 5.0 µg/m³, ενώ υπάρχουν δεκάδες ρυθμίσεις κατά περίπτωση.

Παράλληλα, για τον περιορισμό της χρήσης του χρωμίου από τις βιομηχανίες, η Ευρωπαϊκή Ένωση, ενέκρινε τον Ιανουάριο του 2003 την Οδηγία 2002/95/EC, που θέτει περιορισμούς στη βιομηχανική χρήση κάποιων εξαιρετικά επικίνδυνων χημικών, συμπεριλαμβανομένου και του εξασθενούς χρωμίου. Η οδηγία αυτή αναφέρεται ως Οδηγία Περιορισμού Επικινδύνων Ουσιών (Restriction of Hazardous Substances Directive, RoHS). Η μοναδική εξαίρεση που αναφέρεται στο Παράρτημα της οδηγίας αφορά στη χρήση του Cr(VI) ως αντιδιαβρωτικού του ανθρακούχου χάλυβα των συστημάτων ψύξης που λειτουργούν με απορρόφηση θερμότητας (βιομηχανικά ψυγεία με συμπιεστές που λειτουργούν με θερμική και όχι ηλεκτρική ενέργεια) (Οδηγία 2002/95/EK, 2003). Αυτή η οδηγία, εφαρμόζεται τα τελευταία χρόνια στα κράτη-μέλη, οδηγώντας τη βιομηχανία σε χρήση εναλλακτικών επιστρώσεων όπως αυτές του Cr(III), Zn και Ni, οι οποίες αν και δεν είναι τόσο αποτελεσματικές όσο αυτή του Cr(VI), είναι λιγότερο επιβλαβείς για το περιβάλλον.

3.7 Προστασία και απορρύπανση υπογείων υδάτων από το χρώμιο

Η απομάκρυνση του χρωμίου από κάποιον υπόγειο υδροφορέα παραμένει ένα εξαιρετικά σημαντικό ζήτημα στην τομέα της περιβαλλοντικής αποκατάστασης λόγω των καρκινογόνων χαρακτηριστικών των ιόντων του χρωμίου. Λόγω των

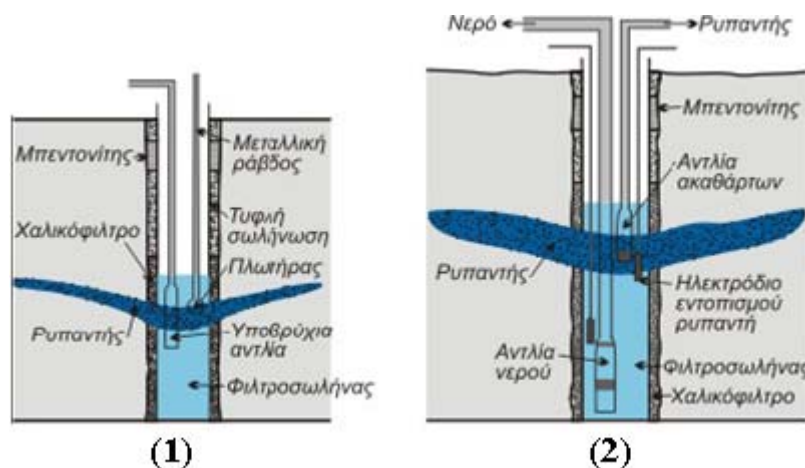
χαρακτηριστικών αυτών, επιβάλλεται η λήψη μέτρων απορρύπανσης και προστασίας των υδροφορέων καθώς η ρύπανσή τους, ενέχει σοβαρούς κινδύνους για τη δημόσια υγεία. Επιπλέον, η ανάγκη βελτίωσης της ποιότητας του περιβάλλοντος της περιοχής που έχει ρυπανθεί, καθώς και η ανάγκη αύξησης της εμπορικής αξίας των ακινήτων της, επιτάσσουν την προστασία των υπογείων υδάτων της (Καββαδάς και Πανταζίδου, 2004).

Γενικά, οι τεχνολογίες απορρύπανσης υπογείων υδροφορέων αφορούν στην ανάληψη ενεργειών για την περιβαλλοντική αποκατάσταση των υδάτων που έχουν ήδη ρυπανθεί, ενώ τα μέτρα προστασίας υπογείων υδάτων, χρησιμοποιούνται προκειμένου να αποφευχθεί η περαιτέρω επέκταση της ρύπανσης από περιοχές που έχουν ρυπανθεί προς άλλες μη ρυπασμένες περιοχές, μέσω της κίνησης του υπόγειου νερού.

Συγκεκριμένα, οι τεχνολογίες απορρύπανσης που χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση του χρωμίου από τους υπόγειους υδροφορείς είναι οι εξής:

➤ *Αντληση διαλυμένων ρύπων και επεξεργασία (pump and treat methods)*

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, γίνεται άντληση του ρυπασμένου υπόγειου ύδατος με σύστημα γεωτρήσεων, το οποίο οδηγείται έπειτα σε μονάδα επεξεργασίας προκειμένου να απορρυπανθεί. Στη συνέχεια, εισάγεται εκ νέου στον υδροφορέα από άλλες γεωτρήσεις, διοχετεύεται σε κοντινό υδάτινο αποδέκτη ή απλά γίνεται η διάθεσή του στο έδαφος. Η πιο αποτελεσματική διάταξη είναι αυτή στην οποία υπάρχουν δύο γεωτρήσεις άντλησης και μία γεώτρηση έκχυσης στο μέσο των δύο πρώτων, όλες σε ευθεία γραμμή (Καββαδάς και Πανταζίδου, 2004). Η επεξεργασία του αντλούμενου ρυπασμένου νερού μπορεί να γίνει με προσρόφηση από ενεργό άνθρακα (Mukhopahyay et al, 2007). Συνήθως, η μέθοδος pump and treat είναι ακριβή και σε πολλές περιπτώσεις αναποτελεσματική στην προβλεπόμενη μείωση του ρυπαντή.



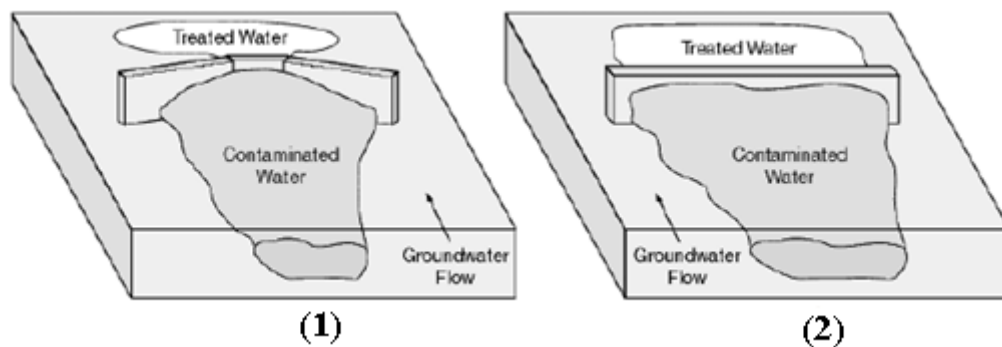
Εικόνα 7. Συστήματα άντλησης και επεξεργασίας: 1. Απλή γεώτρηση, μια αντλία 2. Απλή γεώτρηση, ζεύγος αντλιών (Καββαδάς και Πανταζίδου, 2004).

➤ *Διαπερατά Αντιδρώντα Φράγματα (Permeable Reactive Barriers)*

Τα διαπερατά αντιδρώντα φράγματα (PRBs) αποτελούν μια in situ παθητική ζώνη επεξεργασίας του ρυπασμένου ύδατος και συνήθως τοποθετούνται κάθετα στη ροή του υπόγειου ύδατος και της ζώνης ρύπανσης έτσι ώστε όλο το ρυπασμένο ύδωρ να περνάει από τη δίοδο. Η τεχνολογία αυτή εκμεταλλεύεται τη φυσική ροή του υπογείου ύδατος για την παθητική του εξυγίανση, καθώς δεν απαιτείται καμία

εξωτερική πηγή ενέργειας. Η θέση τους μπορεί να είναι πλησίον της ζώνης ρύπανσης για την αποφυγή εξάπλωσης του ρύπου ή στα κατάντη της πηγής ρύπανσης.

Τα φράγματα αυτά, περιέχουν αντιδρώντα στερεά υλικά, τα οποία αποικοδομούν, μετατρέπουν ή ακινητοποιούν τους ρυπαντές καθώς το υπόγειο ύδωρ ρέει δια μέσου αυτών, ενώ παράλληλα είναι αρκετά αδιάλυτα ώστε να παραμένουν στη θέση τους για σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα. Γενικά, το σύστημα των φραγμάτων, θα πρέπει να είναι εγκατεστημένο με τέτοιο τρόπο, ώστε ο χρόνος συγκράτησης του ρυπασμένου ύδατος στη δίοδο να είναι αρκετά μεγάλος έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή μείωση στις συγκεντρώσεις των ρύπων, ενώ παράλληλα το μέγεθος των φραγμάτων και ο αριθμός των διόδων πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος (Γαρμπή et al).



Εικόνα 8. Τύποι υπογείων διαπερατών φραγμάτων: 1. Ενεργή τάφρος υψηλής διαπερατότητας 2. Σύστημα συγκλινόντων φραγμάτων και διόδων

➤ *Χημική μείωση (chemical reduction-precipitation)*

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, το εξασθενές χρώμιο μετατρέπεται σε τρισθενές με τη χρήση συνήθως άλατος είτε S(IV) είτε Fe(II). Η μέθοδος αυτή ακολουθεί μια διαδικασία δύο βημάτων σύμφωνα με την οποία εμφανίζονται διαδοχικά η αναγωγή και η κατακρήμνιση σε πολύ υψηλά όξινες και αλκαλικές συνθήκες pH, αντίστοιχα (Mukhopahyay et al, 2007).

Στη ρυπασμένη από χρώμιο περιοχή του Ασωπού ποταμού, έχει χρησιμοποιηθεί η παρούσα μέθοδος με τη χρήση ρινισμάτων σιδήρου (Δημήτρουλα, 2009). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, χρησιμοποιήθηκε μια στήλη ρινισμάτων σιδήρου, η οποία παρεμβалλόταν στη ροή του υπόγειου νερού. Το εξασθενές χρώμιο που υπήρχε στο νερό, αναγόταν σε τρισθενές και καθίζανε σε οξείδια που δημιουργούνταν από τα ρινίσματα του σιδήρου. Ως αποτέλεσμα αυτού του φιλτραρίσματος, το νερό είχε κόκκινη απόχρωση και για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε και δεύτερο φίλτρο προκειμένου να καθαριστεί πλήρως. Παράλληλα, τα ρινίσματα σιδήρου θα μπορούσαν να αποτελέσουν ένα ομοιογενές μείγμα με τα εδάφη τα οποία περιέχουν χρώμιο προκειμένου οι ποσότητες χρωμίου να σταθεροποιηθούν στα εδάφη αυτά και να μην εκροφηθούν στα ύδατα τα οποία ξεπλένουν τις ρυπασμένες αυτές περιοχές.

➤ *Εφαρμογή ηλεκτρικού ρεύματος (electroreclamation/electroctrokinetic)*

Σύμφωνα με τη διαδικασία αυτή, γίνεται ο διαχωρισμός και η απομάκρυνση του χρωμίου, όπως και άλλων βαρέων μετάλλων και οργανικών ρυπαντών, από κορεσμένα και μη κορεσμένα εδάφη, απόβλητα και ιζήματα. Κατά τη μέθοδο αυτή, μια σειρά ηλεκτροδίων τοποθετείται στη ρυπασμένη περιοχή και στη συνέχεια εφαρμόζεται μια χαμηλή διαφορά δυναμικού (50 έως 150 βολτ). Στο νερό, τα ενεργά

ηλεκτρόδια δημιουργούν ένα όξινο περιβάλλον στην άνοδο και ένα βασικό περιβάλλον στην κάθοδο, με αποτέλεσμα το χρώμιο να συλλέγεται στην άνοδο. Έτσι, η τιμή του pH μειώνεται στην άνοδο, ενώ αυξάνεται στην κάθοδο. Συνήθως, για την αποφυγή σημαντικών διαφορών στην τιμή του pH μεταξύ ανόδου και καθόδου, τα ενεργά ηλεκτρόδια τοποθετούνται μέσα σε κεραμικά περιβλήματα τα οποία γεμίζουν με ένα ρευστό υλικό. Αυτό το ρευστό όχι μόνο κρατά μια ισορροπία του pH στην άνοδο και την κάθοδο, αλλά βοηθά παράλληλα στη διαλυτοποίηση και την κίνηση των ρυπαντών (US EPA, 2000).

➤ *Φυτοεξυγίανση/φυτοαποκατάσταση (phytoremediation)*

Η φυτοαποκατάσταση ως μέθοδος εξυγίανσης του περιβάλλοντος, εκμεταλλεύεται την ικανότητα των φυτών να λαμβάνουν μέσω του ριζικού τους συστήματος και να συσσωρεύουν στους ιστούς τους, τα απαραίτητα για την επιβίωσή τους θρεπτικά ανόργανα και οργανικά συστατικά, συμπεριλαμβανομένων και των επικίνδυνων ρυπαντών που βρίσκονται στο ρυπασμένο έδαφος και στο υπόγειο νερό. Μερικά φυτά έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν μεγάλες ποσότητες βαρέων μετάλλων, ακόμα και μέταλλα τα οποία δεν φαίνεται να είναι απαραίτητα για την επιβίωσή τους (US EPA, 2000).

Η μέθοδος αυτή περιβαλλοντικής αναβάθμισης, είναι εξαιρετικά ελκυστική γιατί είναι χαμηλού κόστους, γίνεται επί τόπου (in situ) και επιπλέον είναι εύκολα αποδεκτή από το ευρύ κοινό. Παρόλα τα οφέλη της, η φυτοεξυγίανση όπως άλλωστε και κάθε μέθοδος έχει τα μειονεκτήματά της. Η μέθοδος αυτή, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποκατάσταση υδροφορέων και ρυπασμένων εδαφών που βρίσκονται σε μεγάλο βάθος. Σε περιπτώσεις όπου οι συγκεντρώσεις των ρυπαντών κυμαίνονται σε υψηλά επίπεδα, η τεχνική αυτή μειονεκτεί καθώς οι συγκεντρώσεις των ρυπαντών μπορεί να αποβούν τοξικές για τα φυτά, με αποτέλεσμα την αναχαίτιση της ανάπτυξής τους. Επίσης, η μέθοδος αυτή έχει τα ίδια προβλήματα με τις υπόλοιπες «επί τόπου» μεθόδους όσον αφορά τη δυσχέρεια στη μεταφορά μάζας από το σημείο της ρύπανσης στις ρίζες του φυτού. Τέλος, υπάρχει ο κίνδυνος μεταφοράς της ρύπανσης από ένα μέσο σε ένα άλλο ή βιοσυσσώρευσης των μετάλλων στα ζώα (Καλογεράκης, 2006).

Στην περίπτωση εξυγίανσης του περιβάλλοντος από ρυπασμένο με χρώμιο υπόγειο υδροφόρεα, όπως στην περίπτωση του Ασωπού ποταμού, μπορεί να χρησιμοποιηθούν δέντρα με βαθύ ριζικό σύστημα όπως είναι οι λεύκες (US EPA, 2000). Οι ρίζες των δέντρων αυτών, εκτός από το μεγάλο βάθος στο οποίο, δημιουργούν επιπλέον αναγωγικό περιβάλλον, το οποίο μετατρέπει το εξασθενές χρώμιο σε τρισθενές, το οποίο όπως έχει ήδη αναφερθεί δεν είναι τοξικό για τους οργανισμούς.

➤ *Φυσική αποκατάσταση/μείωση ρύπων (Natural Attenuation)*

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η μάζα, η τοξικότητα, η κινητικότητα, ο όγκος ή η συγκέντρωση των ρύπων στα υπόγεια νερά μειώνονται με τη βοήθεια διαφόρων φυσικών, χημικών ή βιολογικών διεργασιών οι οποίες κάτω από ευνοϊκές συνθήκες δρουν χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση. Αυτές οι «επί τόπου» διεργασίες περιλαμβάνουν τη βιοαποδόμηση, τη διασπορά, την αραίωση, την προσρόφηση, την εξάτμιση, τη χημική ή βιολογική σταθεροποίηση και τη μετατροπή ή την καταστροφή των ρύπων. Σύμφωνα με την Υπηρεσία Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (Environmental Protection Agency, EPA) ακόμα και με τη μέθοδο αυτή απαιτείται η ίδια σχολαστικότητα στο χαρακτηρισμό της ρυπασμένης περιοχής και στην παρακολούθηση των ρύπων όπως και στις υπόλοιπες μεθόδους. Για το λόγο αυτό, ο πλέον αποδεκτός όρος για το χαρακτηρισμό της μεθόδου αυτής είναι ο όρος «Φυσική Μείωση των Ρύπων υπό Παρακολούθηση».

Πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου, είναι ότι υπάρχει λιγότερη ανθρώπινη παρέμβαση στο περιβάλλον με παράλληλη μείωση του συνολικού κόστους αποκατάστασης του περιβάλλοντος. Από την άλλη πλευρά, ο σημαντικά μεγάλος χρόνος στην αποκατάσταση του περιβάλλοντος και η απαιτούμενη συνεχής παρακολούθηση για μεγάλο χρονικό διάστημα καθώς επίσης και το κόστος της παρακολούθησης, το οποίο μπορεί να γίνει απαγορευτικό, αποτελούν σημαντικά μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής (US EPA, 2000; Καλογεράκης, 2006).

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από τη συγκέντρωση και την ποσότητα του χρωμίου, το είδος της πηγής ρύπανσης (σημειακή ή διάχυτη, συνεχής ή παροδική), το πάχος της ακόρεστης και κορεσμένης ζώνης, το κόστος και τη διαθέσιμη τεχνολογία, καθώς και τη μελλοντική χρήση γης. Η επιτόπια παρακολούθηση (site monitoring) αποτελεί το πρώτο βήμα για την επιλογή της τεχνικής απορρύπανσης. Για σοβαρά επεισόδια ρύπανσης η παρακολούθηση διαρκεί για αρκετό καιρό (3 δεκαετίες) μετά την ολοκλήρωση των εργασιών απορρύπανσης.

Τέλος, τα μέτρα προστασίας που χρησιμοποιούνται συνήθως για την αποφυγή επέκτασης της ρύπανσης στους υδροφορείς και στα εδάφη της ευρύτερης περιοχής περιλαμβάνουν:

- Συστήματα κάλυψης της επιφάνειας περιοχών που έχουν ρυπανθεί με σκοπό τον εγκιβωτισμό των ρύπων, ώστε αφενός μεν να μη διασπείρονται στο περιβάλλον με τη μορφή σκόνης, αφετέρου δε να περιορίζεται η κατείσδυση των επιφανειακών υδάτων (γεγονός που μπορεί να καταλήξει στη ρύπανση των υπόγειων υδροφορέων της περιοχής).
- Κατακόρυφα περιμετρικά διαφράγματα με σκοπό τον περιορισμό της επέκτασης της ρύπανσης μέσω της κυκλοφορίας του υπόγειου νερού στην οριζόντια διεύθυνση.
- Οριζόντια διαφράγματα βάσης, με σκοπό τον περιορισμό της επέκτασης της ρύπανσης μέσω της κίνησης των ρύπων στην κατακόρυφη διεύθυνση.
- Υδραυλικά συστήματα, όπως συστήματα αναστροφής της διεύθυνσης κίνησης του υπόγειου νερού (κυρίως μέσω εκτεταμένων αντλήσεων), με σκοπό να αποφευχθεί η επέκταση της ρύπανσης προς περιοχές που πρέπει να προστατευθούν.

4 ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΡΥΠΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο μέθοδοι προσομοίωσης (simulation) και μοντελοποίησης (modelling), προκειμένου να επιτευχθούν προσεγγιστικές λύσεις σε πολλά επιστημονικά προβλήματα. Ως "προσομοίωση" καλείται η διαδικασία εκείνη κατά την οποία η εφαρμογή ενός προτύπου (μοντέλου) οδηγεί στην αναπαραγωγή της πραγματικότητας. Με τις μεθόδους προσομοίωσης γίνεται προσπάθεια να περιγραφεί ένα φυσικό φαινόμενο με τη βοήθεια μαθηματικών μοντέλων, όσο γίνεται πιο ρεαλιστικά.

Ως "πρότυπο" ή "μοντέλο" (model) καλείται η μορφοποιημένη έκφραση μιας θεωρίας ή συνήθους κατάστασης που μεταβάλλεται και επαναλαμβάνεται. Γενικά, μοντέλο είναι κάθε μέσο με το οποίο είναι δυνατή η προσεγγιστική απεικόνιση των φυσικών συνθηκών. Υπάρχουν δύο ειδών μοντέλα (Anderson and Woessner, 1992):

- Φυσικά μοντέλα (αναπτύσσονται σε εργαστήρια και απεικονίζουν απευθείας τις φυσικές συνθήκες)
- Μαθηματικά μοντέλα (προσομοιάζουν τις φυσικές συνθήκες έμμεσα, μέσω μαθηματικών εξισώσεων και συνοριακών συνθηκών)

Τα μαθηματικά πρότυπα επιλύονται, είτε αναλυτικά, είτε αριθμητικά. Ανάλογα με το είδος του προβλήματος που καλείται να αντιμετωπισθεί κάθε φορά, επιλέγεται και ο τύπος του μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί. Το σύνολο των εντολών που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του μοντέλου ονομάζεται πρόγραμμα H/Y ή κώδικας.

«Υπάρχουν υπερασπιστές και πολέμιοι της μοντελοποίησης». Οι πρώτοι υποστηρίζουν ότι ένα μοντέλο μπορεί να οδηγήσει στην ανίχνευση προβλημάτων σε περιοχές που υπάρχει έλλειψη στοιχείων πεδίου ή να προβλέψουν την εξέλιξη ενός συστήματος ροής μέσα στο χρόνο, εντός ελεγχόμενων περιθωρίων σφάλματος. Οι δεύτεροι ισχυρίζονται ότι ένα μοντέλο μπορεί να δώσει αποτελέσματα ανεξέλεγκτου λάθους, καθώς για να λειτουργήσει πρέπει να εστιάσει σε μια μικρή περιοχή, να απομονώσει τα συστήματα υπόγειας ροής και να απλοποιήσει πολύ τις πραγματικές συνθήκες. Επίσης, τα μοντέλα απαιτούν πολλά στοιχεία πεδίου με αποτέλεσμα το γεγονός αυτό, να τα καθιστά πολύ ακριβά στη συγκέντρωση των πληροφοριών και στην εκτέλεση τους (run).

Παρόλα αυτά, τα μοντέλα έχουν αρχίσει τα τελευταία χρόνια να καταλαμβάνουν εξέχουσα θέση στο χώρο της υδρογεωλογίας. Αυτό οφείλεται αφενός στη συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για ποσοτικοποιημένες μελλοντικές προβλέψεις, εξαιτίας της συνεχούς μείωσης των όγκων νερού στον πλανήτη, αφετέρου στην αλματώδη αύξηση της χρήσης των H/Y που εμπλέκεται ολοένα και περισσότερο σε όλα τα πεδία της επιστήμης.

Η πραγματοποίηση της μοντελοποίησης απαιτεί προηγούμενη μακροχρόνια, επίπονη και συχνά υψηλού κόστους εργασία υπαίθρου. Κανένα μοντέλο δεν λειτουργεί χωρίς την εισαγωγή πραγματικών στοιχείων πεδίου, των οποίων η πληθώρα καθορίζει σε σημαντικό βαθμό και την ακρίβεια του μοντέλου (Anderson and Woessner, 1992).

4.2 Διαδικασία μοντελοποίησης

Ξεκινώντας τη διαδικασία της μοντελοποίησης θα πρέπει να ακολουθηθούν τα βήματα που περιγράφονται στη συνέχεια. Η αξιοπιστία του μαθηματικού μοντέλου εξαρτάται από την ορθή εφαρμογή των βημάτων αυτών. Τα βήματα είναι τα εξής (Anderson and Woessner, 1992):

- a. *Προσδιορισμός του στόχου του μοντέλου.* Επιλογή δηλαδή των κατάλληλων εξισώσεων και του κώδικα που θα χρησιμοποιηθεί.
- b. *Δημιουργία του θεμελιώδους μοντέλου του συστήματος.* Προσδιορίζονται οι υδροστρωματογραφικές μονάδες και τα όρια της περιοχής, καθώς συλλέγονται και πληροφορίες σχετικά με το υδατικό ισοζύγιο και με τις παραμέτρους του υδροφορέα.
- c. *Επικύρωση του κώδικα επίλυσης.* Επιλογή δηλαδή του υπολογιστικού προγράμματος που χρησιμοποιεί τον κατάλληλο αλγόριθμο για την μαθηματική επίλυση του μοντέλου και σύγκριση της αριθμητικής λύσης που παράγεται με μια ή περισσότερες αναλυτικές λύσεις ή με άλλες αριθμητικές λύσεις ή ακόμα και με αποτελέσματα από εργαστηριακά πειράματα (εφόσον αυτό είναι εφικτό).
- d. *Σχεδιασμός μοντέλου.* Το εννοιολογικό μοντέλο τίθεται σε κατάλληλη μορφή μετά από μια σειρά διαδικασιών όπως ο σχεδιασμός του πλέγματος, η επιλογή των χρονικών βημάτων και ο καθορισμός αρχικών και οριακών συνθηκών.
- e. *Βαθμονόμηση μοντέλου.* Η επαλήθευση δηλαδή ότι το μοντέλο μπορεί να προβλέψει τις ήδη γνωστές από μετρήσεις πεδίου τιμές για τα υδραυλικά ύψη και τις ροές, μέσω της ρύθμισης των παραμέτρων του μοντέλου.
- f. *Ανάλυση ευαισθησίας βαθμονόμησης.* Μια ανάλυση ευαισθησίας εκτελείται προκειμένου να προσδιοριστεί η επίδραση της αβεβαιότητας στο βαθμολογημένο μοντέλο.
- g. *Επαλήθευση μοντέλου.* Για μεγαλύτερη εμπιστοσύνη στα αποτελέσματα του μοντέλου, λαμβάνει χώρα η επαλήθευση του μοντέλου με τη χρήση των βαθμονομημένων τιμών για υπολογισμό μιας δεύτερης σειράς που είναι ήδη γνωστές από μετρήσεις πεδίου.
- h. *Πρόβλεψη.* Αποτελεί την απάντηση του συστήματος σε μελλοντικά γεγονότα. Η εκτίμηση των μελλοντικών τάσεων είναι απαραίτητη για την εκτέλεση της προσομοίωσης. Η αβεβαιότητα σε μια πρόβλεψη προκύπτει από την αβεβαιότητα στη λειτουργία του βαθμονομημένου μοντέλου και στην ανικανότητα να υπολογιστούν οι ακριβείς τιμές για τις μελλοντικές τάσεις.
- i. *Ανάλυση ευαισθησίας πρόβλεψης.* Εφαρμόζεται για να ποσοτικοποιήσει την επίδραση της αβεβαιότητας στην πρόβλεψη.
- j. *Παρουσίαση του σχεδιασμού του μοντέλου και των αποτελεσμάτων του.* Το βήμα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό καθώς καθίσταται κατανοητή η προσπάθεια μοντελοποίησης.
- k. *Μελλοντική επαλήθευση.* Με το πέρασμα αρκετών χρόνων γίνεται μια επαλήθευση του μοντέλου προκειμένου να προσδιοριστεί αν η πρόβλεψη ήταν σωστή.
- l. *Επανασχεδιασμός του μοντέλου.* Η μελλοντική επαλήθευση του μοντέλου μπορεί να οδηγήσει σε νέες ιδέες για τη συμπεριφορά του συστήματος με αποτέλεσμα να γίνουν αλλαγές στις παραμέτρους του μοντέλου.

4.3 Τα μαθηματικά μοντέλα στο υπόγειο νερό

Τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται κατά κανόνα στις μελέτες για τα υπόγεια νερά αποτελούν μια προσπάθεια να παρασταθούν οι υδρογεωλογικές διαδικασίες με μαθηματικές εξισώσεις. Έτσι, γίνεται δυνατή η παρουσίαση μιας τεράστιας ποσότητας πληροφοριών με απλό και συνεκτικό τρόπο. Όμως, το σημείο εκκίνησης στην κατασκευή είναι η σαφής και πλήρης κατανόηση των διαδικασιών που καλείται να περιγράψει το μοντέλο (Καλλέργης, 2001).

Στην περίπτωση της ροής του υπόγειου νερού θα πρέπει να θεωρούνται ως βασικές οι εξής δύο διαδικασίες:

- Η ροή του υπόγειου νερού λόγω των υδραυλικών βαθμίδων
- Η αφαίρεση (άντληση) ή προσθήκη νερού (εμπλουτισμός)

Στην περίπτωση όμως των μοντέλων της μεταφοράς της ρύπανσης παρεμβαίνει ένα μεγάλο πλήθος, διαφορετικών μεταξύ τους, διαδικασιών, οι οποίες μπορούν να καταταγούν σε δύο ομάδες:

- Στις διαδικασίες μεταφοράς με μοριακή διάχυση, μηχανική διασπορά και συμμεταφορά
- Στις διαδικασίες που ευθύνονται για την παραγωγή ή την εξασθένηση του ρυπαντή, όπως είναι οι χημικές, βιολογικές, ακόμα και πυρηνικές διαδικασίες (ρόφιση, ιοντοανταλλαγή, οξειδοαναγωγή, ραδιενεργός θάνατος και βιοδιάσπαση)

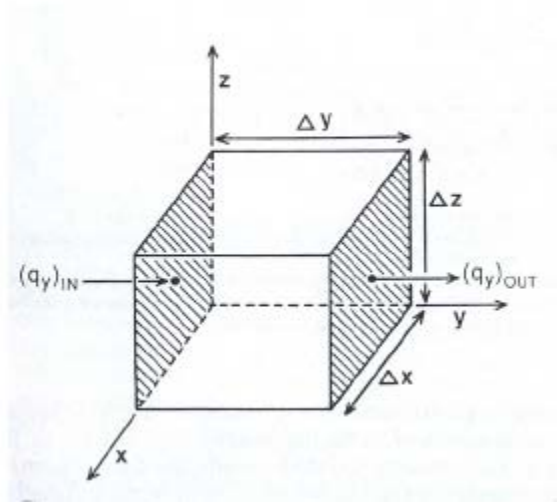
Για την πλήρη περιγραφή του υδροφόρου συστήματος που θα παρουσιαστεί στο μοντέλο απαιτούνται πέρα από τις εξισώσεις που ελέγχουν τις διαδικασίες και:

- Ειδικές αριθμητικές τιμές των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τις διαδικασίες καθώς και των παραμέτρων προσομοίωσης που εμπλέκονται στη διαδικασία επίλυσης των εξισώσεων
- Πληροφορίες για την περιοχή, το σχήμα και τις συνθήκες κατά μήκος των ορίων του υδροφορέα

Το μεγαλύτερο πρόβλημα στη σύνταξη των μαθηματικών μοντέλων είναι η ετερογένεια στην κλίμακα του πεδίου (μακροετερογένεια), με αποτέλεσμα τα στοιχεία εισόδου να προέρχονται από εκτιμήσεις που συχνά απέχουν σημαντικά από την πραγματικότητα. Την ίδια αναξιοπιστία παρουσιάζει και η προέκταση των πορισμάτων της εργαστηριακής έρευνας (μικροετερογένεια) στη φυσική κλίμακα (Καλλέργης, 2001).

4.4 Παραγωγή των βασικών εξισώσεων του συστήματος

Η βασική φιλοσοφία στην κατασκευή ενός μαθηματικού μοντέλου συνίσταται στην ανάπτυξη της εξίσωσης **‘διατήρησης της ρευστής μάζας’**, σύμφωνα με την οποία ισχύει ότι: Εκροή - Εισροή = μεταβολές στην αποθηκευτικότητα, σε έναν στοιχειώδη (μικρό) κύβο του πορώδους μέσου με υπολογισμό των εισροών, των εκροών και της αποθήκευσης ή της αφαίρεσης ρευστού από τον κύβο. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ο αντιπροσωπευτικός στοιχειώδης όγκος (Representative Elementary Volume – REV) (Anderson and Woessner, 1992):



Εικόνα 9. Αντιπροσωπευτικός στοιχειώδης όγκος (REV) (Anderson and Woessner, 1992)

Ο όγκος του παραπάνω σχήματος ισούται με $\Delta x \Delta y \Delta z$, ενώ η ροή του ύδατος μέσα από τον όγκο ελέγχου εκφράζεται από το ρυθμό άντλησης (q), όπου q είναι ένα διάνυσμα το οποίο μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$q = q_x i_x + q_y i_y + q_z i_z \quad (1)$$

όπου, i_x , i_y και i_z τα μοναδιαία διανύσματα των αξόνων x , y και z αντίστοιχα

Αν θεωρηθεί ότι υπάρχει ροή κατά μήκος του άξονα y του όγκου ελέγχου, τότε η εισροή που λαμβάνει χώρα στον όγκο αυτό διέρχεται από επιφάνεια $\Delta x \Delta z$ και ισοδυναμεί με $(q_y)_{IN}$, ενώ η εκροή με $(q_y)_{OUT}$. Επομένως, η διαφορά του ογκομετρικού ρυθμού εκροής μείον τον ογκομετρικό ρυθμό εισροής ισούται με:

$$\left[(q_y)_{OUT} - (q_y)_{IN} \right] \Delta x \Delta z \quad (2)$$

Η εξίσωση αυτή μπορεί να γραφτεί και ως εξής:

$$\frac{\left[(q_y)_{OUT} - (q_y)_{IN} \right]}{\Delta y} (\Delta x \Delta y \Delta z) \quad (3)$$

Δηλαδή, η μεταβολή του ρυθμού ροής διαμέσου του αντιπροσωπευτικού στοιχειώδη όγκου κατά τον άξονα y μετατρέποντας την παραπάνω εξίσωση σε μερική διαφορική, είναι:

$$\frac{\partial q_y}{\partial y} (\Delta x \Delta y \Delta z) \quad (4)$$

Με ανάλογο τρόπο μπορεί να εκφραστεί ο ρυθμός ροής και στους άξονες x και z , με αποτέλεσμα η συνολική μεταβολή του ρυθμού της ροής να ισούται με τη μεταβολή της αποθηκευτικότητας και να εκφράζεται ως:

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \text{Αλλαγή στην αποθηκευτικότητα} \quad (5)$$

Επίσης, εάν θέλουμε να εξετάσουμε την περίπτωση ύπαρξης πηγαδιού άντλησης ή εμπλουτισμού, τότε ο ογκομετρικός ρυθμός εκροής αντιπροσωπεύεται από τον όρο:

$R^* \Delta x \Delta y \Delta z$, όπου R^* είναι ένας θετικός όρος όταν πρόκειται για πηγή (πηγάδι εμπλουτισμού). Αντιπροσωπεύει τον όγκο του νερού που εισρέει στο σύστημα ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα και ανά μονάδα χρόνου. Έτσι, προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \pm R^* \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \text{Αλλαγή στην αποθηκευτικότητα} \quad (6)$$

Η μεταβολή της αποθηκευτικότητας ορίζεται από την ειδική αποθηκευτικότητα S_s , η οποία ορίζεται ως ο όγκος του νερού που απελευθερώνεται (δεν είναι πλέον αποθηκευμένος) ανά μονάδα αλλαγής υδραυλικού ύψους h και ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα:

$$S_s = - \frac{\Delta V}{\Delta h \Delta x \Delta y \Delta z} \quad (7)$$

Σύμφωνα με την παραδοχή ότι, το ΔV είναι θετικό όταν το Δh είναι αρνητικό, δηλαδή όταν απελευθερώνεται νερό από τον υδροφορέα το υδραυλικό ύψος μειώνεται, ο ρυθμός αλλαγής της αποθηκευτικότητας στον όγκο ελέγχου είναι:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (8)$$

Η τελική μορφή του ισοζυγίου μάζας του νερού είναι αυτή που ακολουθεί και προκύπτει συνδυάζοντας τις εξισώσεις (6) και (8) και διαιρώντας τις με τον όρο $\Delta x \Delta y \Delta z$:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} + R^* \quad (9)$$

Καθώς το q δεν είναι άμεσα μετρήσιμο, η παραπάνω εξίσωση δεν μπορεί να έχει ευρεία χρήση. Επομένως, στο σημείο αυτό θα χρησιμοποιηθεί ο νόμος του Darcy, καθώς δίνει μια σχέση μεταξύ των q και h , και γνωρίζουμε ότι το υδραυλικό ύψος h είναι άμεσα μετρήσιμο. Επομένως, ο νόμος του Darcy για τις τρεις διαστάσεις είναι ο εξής:

$$\begin{aligned} q_x &= -K_x \frac{\partial h}{\partial x} \\ q_y &= -K_y \frac{\partial h}{\partial y} \\ q_z &= -K_z \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \quad (10)$$

Το εγχείρημα όμως γίνεται εξαιρετικά περίπλοκο στην περίπτωση της ακόρεστης ροής και της μεταφοράς ρυπαντή. Δεν πρέπει πάντως να αγνοηθεί ότι σε κάθε περίπτωση είναι απαραίτητες οι πληροφορίες για το σχήμα και το μέγεθος της διερευνούμενης περιοχής, τις αρχικές και τις συνοριακές συνθήκες της περιοχής αυτής, καθώς και για τις φυσικές και χημικές συνθήκες που περιγράφουν και ελέγχουν τις διαδικασίες στο σύστημα.

4.5 Βασικές εξισώσεις του μοντέλου της υπόγειας ροής

Ένα σύστημα υπόγειας ροής μπορεί να προσεγγιστεί είτε με τη θεώρηση του υδροφορέα (aquifer viewpoint) είτε με τη θεώρηση του συστήματος ροής (flow system viewpoint) (Anderson and Woessner, 1992).

➤ Προσέγγιση υδροφορέα

Η προσέγγιση αυτή, βασίζεται στην έννοια του περιορισμένου και του ελεύθερου υδροφορέα. Ο υδροφορέας αποτελείται από πορώδες υλικό με δυνατότητα αποθήκευσης και μεταφοράς σημαντικών ποσοτήτων ύδατος σε πηγάδια. Αυτή η προσέγγιση είναι κατάλληλη για αναλύσεις της ροής προς πηγάδια άντλησης και αποτελεί τη βάση για πολλές αναλυτικές λύσεις συμπεριλαμβανομένων των μεθόδων Thiem, Theis και Jacob. Παράλληλα, στην περίπτωση αυτή, η ροή του υπόγειου ύδατος θεωρείται αυστηρά οριζόντια μεταξύ των υδροφορέων και αυστηρά κάθετη μεταξύ των περιοριστικών στρωμάτων.

Η θεώρηση του υδροφορέα χρησιμοποιείται στην προσομοίωση της δισδιάστατης οριζόντιας ροής σε περιορισμένους και ελεύθερους υδροφορείς, ενώ οι περιορισμένοι υδροφορείς με διαρροή προσομοιώνονται με βάση μια ψευδο-τρισδιάστατη προσέγγιση. Η γενική μορφή της βασικής εξίσωσης για τη θεώρηση του υδροφορέα είναι η εξής:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} - R + L \quad (11)$$

$$L = -K'_z \frac{h_{\text{source}} - h}{b'}$$

Όπου,

h : υδραυλικό ύψος

T_x, T_y : συνιστώσες του συντελεστή μεταβιβασιμότητας στις κατευθύνσεις x και y (εφαρμογή της εξίσωσης σε ανισότροπους υδροφορείς όπου $T_x \neq T_y$)

S : συντελεστής αποθηκευτικότητας

R : όρος πηγής/δεξαμενής (θετικός σε περίπτωση εμπλουτισμού, ενώ σε περίπτωση άντλησης με ρυθμό W , ισχύει $R = -W$)

L : διαρροή μέσω ενός περιοριστικού στρώματος

K'_z : κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα περιοριστικού στρώματος

b' : πάχος περιοριστικού στρώματος

h_{source} : υδραυλικό ύψος στο στρώμα που βρίσκεται στην άλλη πλευρά του περιοριστικού στρώματος.

Στο αριστερό μέρος της εξίσωσης, οι όροι αντιπροσωπεύουν οριζόντια ροή διαμέσου περιορισμένου υδροφορέα. Για την εφαρμογή της εξίσωσης (11) σε

ελεύθερο υδροφορέα απαραίτητη προϋπόθεση είναι οι παραδοχές Dupuit, οι οποίες είναι οι εξής:

- a) οι γραμμές ροής είναι οριζόντιες και οι ισοδυναμικές γραμμές είναι κάθετες
- b) η υδραυλική κλίση είναι ίση με την κλίση του υδροφόρου ορίζοντα και ανεξάρτητη του βάθους.

Ισχύει ότι $T_x = K_x h$ και $T_y = K_y h$, όπου h είναι το κορεσμένο πάχος του υδροφορέα. Αντικαθιστώντας αυτές τις σχέσεις στην εξίσωση (11) και θεωρώντας ότι το L είναι μηδέν και ο συντελεστής αποθήκευσης (S) είναι ίσος με την ειδική αποθηκευτικότητα (S_y), προκύπτει η μη γραμμική **εξίσωση Boussinesq**:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S_y \frac{\partial h}{\partial t} - R \quad (12)$$

Με μια επιπλέον αντικατάσταση $\frac{\partial h^2}{\partial x} = 2h \frac{\partial h}{\partial x}$ και $\frac{\partial h^2}{\partial y} = 2h \frac{\partial h}{\partial y}$, η παραπάνω εξίσωση παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h^2}{\partial y} \right) = 2S_y \frac{\partial h}{\partial t} - 2R \quad (13)$$

Αυτή η εξίσωση, είναι μη γραμμική καθώς στο αριστερό μέλος της ο όρος h είναι υψωμένος στη δεύτερη δύναμη, ενώ στο δεξιό μέλος είναι στην πρώτη δύναμη. Εφόσον η τιμή του κορεσμένου πάχους του υδροφορέα (h) είναι γνωστή, η εξίσωση μπορεί να γραμμικοποιηθεί με τη βοήθεια ενός αριθμητικού μοντέλου.

➤ Προσέγγιση συστήματος ροής

Σε αυτή την περίπτωση, είναι απαραίτητη η κατασκευή της τρισδιάστατης κατανομής της ροής, της υδραυλικής αγωγιμότητας και των ιδιοτήτων της αποθηκευτικότητας σε όλα τα σημεία του συστήματος. Επίσης, με την προσέγγιση αυτή είναι δυνατός ο χειρισμός της ροής είτε σε δύο είτε σε τρεις διαστάσεις, καθώς επιτρέπει τόσο οριζόντιες όσο και κάθετες συνιστώσες ροής στο σύστημα. Μια γενική μορφή της εξίσωσης του συστήματος είναι:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^* \quad (14)$$

όπου

K_x, K_y, K_z : συνιστώσες υδραυλικής αγωγιμότητας

S_s : ειδική αποθηκευτικότητα

R^* : γενικός όρος εμπλουτισμού/άντλησης (θετικός σε περίπτωση εμπλουτισμού, ενώ σε περίπτωση άντλησης με ρυθμό W , ισχύει $R = -W$). Δηλώνει την εισροή στο σύστημα ανά μονάδα όγκου υδροφορέα ανά μονάδα χρόνου.

4.6 Επίλυση μαθηματικού μοντέλου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η επίλυση των μαθηματικών μοντέλων μπορεί να γίνει είτε με μεθόδους αναλυτικές είτε με μεθόδους αριθμητικές, παρόλο που δεν είναι ασυνήθιστος ο συνδυασμός των δύο.

Οι αναλυτικές μέθοδοι χρησιμοποιούν συμβατικές μαθηματικές λύσεις των θεμελιωδών διαφορικών εξισώσεων και η χρήση τους είναι δυνατή μόνο κάτω από πολύ απλοποιητικές υποθέσεις, όπως ομοιόμορφο πεδίο ταχυτήτων και σταθερές παραμέτρους, απλό γεωμετρικό πεδίο ροής και μια απλουστευμένη μορφή κατανομής των εισροών και εκροών. Παρόλο που μπορούν να επιτευχθούν μόνο υπό περιοριστικές υποθέσεις, η απλότητά τους τις κάνει χρήσιμες σαν εργαλεία παρατήρησης (screening tools).

Από την άλλη πλευρά, οι αριθμητικές μέθοδοι προσεγγίζουν τις διαφορικές εξισώσεις με σειρά αλγεβρικών εξισώσεων. Οι μέθοδοι αυτές, είναι πολύ πιο πολύπλευρες και ουσιώδεις από τις αναλυτικές μεθόδους και χάρη στην ανάπτυξη των ηλεκτρονικών συστημάτων, η επίλυση τους είναι πια σχετικά εύκολη και γρήγορη. Στη μοντελοποίηση ροής των υπογείων υδάτων χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες αριθμητικές μέθοδοι (Anderson and Woessner, 1992):

- Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (Finite Differences Method)
- Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite Elements Method)
- Μέθοδος ολοκλήρωσης πεπερασμένων διαφορών (Integrated Finite Differences Method)
- Μέθοδος εξίσωσης οριακής ολοκλήρωσης (Boundary Integral Equation Method)
- Μέθοδος αναλυτικών στοιχείων (Analytic Elements Method)

Σε όλες τις παραπάνω μεθόδους, ένας κώδικας αναλαμβάνει να επιλύσει μια ομάδα αλγεβρικών εξισώσεων, οι οποίες έχουν δημιουργηθεί από προσέγγιση των επιμέρους διαφορικών εξισώσεων και οι οποίες σχηματίζουν ένα μαθηματικό μοντέλο. Οι διαφορικές εξισώσεις που υπολογίστηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο ονομάζονται θεμελιώδεις εξισώσεις (governing equations) της ροής του υπόγειου ύδατος. Όμως, για να χρησιμοποιηθεί μία θεμελιώδης εξίσωση για τη λύση ενός προβλήματος χρειάζονται επιπλέον πληροφορίες με τις εξής μορφές:

- 1) Αρχικές συνθήκες (καθορίζουν την αρχική κατάσταση μέσα στο σύστημα)
- 2) Οριακές συνθήκες (ελέγχουν τον τρόπο με τον οποίο η υπό μελέτη δομή επικοινωνεί με περιοχές εκτός αυτής)

Από τις προαναφερθείσες μεθόδους, οι δύο πρώτες χρησιμοποιούνται συχνότερα στην επίλυση προβλημάτων υπόγειας ροής, ενώ οι δύο τελευταίες είναι σχετικά νέες μέθοδοι και για το λόγο αυτό δεν είναι ευρέως διαδεδομένες. Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή για την εκτίμηση της υπόγειας ροής, χρησιμοποιείται το αριθμητικό μαθηματικό μοντέλο PTC, το οποίο χρησιμοποιεί συνδυασμό των μεθόδων των πεπερασμένων στοιχείων και των πεπερασμένων διαφορών που αναλύονται στη συνέχεια. Γενικά, η σωστή επιλογή μεταξύ των δύο μεθόδων συνίσταται από το πρόβλημα που πρόκειται να επιλυθεί καθώς και από την προτίμηση του ίδιου του χρήστη.

Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων είναι ότι:

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών υπολογίζει μια τιμή για το υδραυλικό ύψος κάθε κόμβου, η οποία αποτελεί παράλληλα και τη μέση τιμή για τα κελιά που

περιβάλλουν τον κόμβο και δεν γίνεται καμία υπόθεση σχετικά με τη μεταβολή της τιμής από κόμβο σε κόμβο. Αντίθετα, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, υπολογίζει με ακρίβεια τη μεταβολή των υδραυλικών υψών μέσα σε κάθε στοιχείο κάνοντας χρήση της μεθόδου της γραμμικής παρεμβολής (interpolation function).

Παρόλες τις διαφορές τους, έχει πλέον αποδειχθεί (Pinder and Gray, 1976; Wang and Anderson, 1977) ότι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι μια ειδική περίπτωση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι, η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται κυρίως από την προτίμηση του χρήστη και όχι από την επιλογή των πλεονεκτημάτων της μιας έναντι της άλλης. Αν και υπάρχουν διαφωνίες ανάμεσα στους χρήστες για το ποια μέθοδος είναι καλύτερη, σύμφωνα με τον Gray (1984) "οι διαφωνίες μεταξύ των χρηστών για το ποια μέθοδος είναι καλύτερη συνίσταται απλώς στο ότι ο κάθε χρήστης έχει χρησιμοποιήσει περισσότερο κάποια από τις δύο μεθόδους". Μπορεί να ειπωθεί επίσης, ότι "η κάθε μέθοδος έχει κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που την κάνουν πιο ελκυστική για συγκεκριμένες εφαρμογές".

➤ Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών

Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος προσέγγισης στην προσομοίωση υπόγειας ροής, κυρίως λόγω της απλότητας και της ευκολίας με την οποία μπορεί να εφαρμοστεί σε τρισδιάστατα προβλήματα. Σε κάθε προσομοίωση ροής πεπερασμένων διαφορών, το φορτίο υπολογίζεται σε καθορισμένα σημεία στο χώρο. Αυτά τα σημεία ονομάζονται κόμβοι του πλέγματος πεπερασμένων διαφορών. Οι κόμβοι στους οποίους θα υπολογιστούν οι μεταβλητές του υδροφόρου μπορεί να βρίσκονται είτε στο κέντρο κάθε βρόχου (block-centered), είτε στις τέσσερις των τετραγώνων του βρόχου (mesh-centered).

Η επιλογή ανάμεσα στις δύο διατάξεις γίνεται ανάλογα με τις οριακές συνθήκες. Όταν είναι γνωστή η παροχή εγκάρσια προς το όριο (συνθήκη Neumann) είναι πιο πρακτική η χρήση της 'κεντροβαρικής' διάταξης των κόμβων, ενώ όταν είναι γνωστό το φορτίο στο όριο (συνθήκη Dirichlet) πρέπει να επιλέγεται η διάταξη 'κορυφής'. Υπάρχουν και περιπτώσεις στις οποίες οι οριακές συνθήκες είναι μικτές (Καλλέργης, 2001).

Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών στηρίζεται στην αρχή ότι το πρώτο βήμα στην αριθμητική επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων είναι η εξίσωση να αντικατασταθεί από μία ομάδα εξισώσεων αλγεβρικών διαφορών. Αυτές είναι σχέσεις μεταξύ τιμών ανεξαρτήτων μεταβλητών, π.χ. της Φ , σε γειτονικά σημεία του x χώρου, όπου το x δηλώνει την διανυσματική θέση στο οριοθετημένο σύστημα συντεταγμένων και το t τον χρόνο. Έτσι, η συνεχής μεταβλητή $\Phi = \Phi(x, t)$, που εμφανίζεται σε μία μερική διαφορική εξίσωση, αντικαθίσταται από μία διακριτή μεταβλητή. Η ομάδα των εξισώσεων που δημιουργείται, επιλύεται αριθμητικώς σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, ώστε να λάβει τιμές εξαρτημένης μεταβλητής πάνω σε προκαθορισμένο αριθμό διακριτών σημείων του υπό έρευνα x χώρου. Συνοπτικά, οι χρονικές παράγωγοι υπολογίζονται με τρεις τρόπους:

- a) με χρήση τιμών από το προηγούμενο χρονικώς βήμα
- b) με χρήση τιμών από το επόμενο χρονικώς βήμα
- c) με χρήση τιμών και από τα δύο προαναφερόμενα με συγκεκριμένο συντελεστή βαρύτητας για το καθένα.

Οι μέθοδοι καλούνται αντιστοίχως ρητές (explicit schemes - backward simulation of time derivative), πεπλεγμένες (implicit scheme - forward simulation of time derivative) και μεικτές (Crank-Nicolson scheme - equal weighting factors). Το ρητό

σχήμα είναι το ευκολότερο αλλά και το πιο ασταθές. Τα άλλα είναι περισσότερο σταθερά, αλλά δυσκολότερα στην κατάστρωση και την επίλυση (Τέντες, 2001).

Σε γενικές γραμμές, η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι ευκολότερα κατανοητή, καθώς χρειάζεται να εισαχθούν λιγότερα στοιχεία, προκειμένου να κατασκευαστεί ο κάνναβος των πεπερασμένων διαφορών.

➤ Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι νεότερη από την προηγούμενη και έχει προέλθει από την ανάγκη για επίλυση συστημάτων (Τέντες, 2001):

- a) με ακανόνιστα και πολύπλοκα γεωμετρικά όρια πεδίου
- b) με συνδυασμούς οριακών συνθηκών
- c) με μεγάλη λεπτομέρεια στους υπολογισμούς, λόγω της δυνατότητας πυκνώσεως του καννάβου

Ο πρωταρχικός ρόλος κάθε ειδικής τεχνικής που στηρίζεται στην θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων είναι ο μετασχηματισμός της διαφορικής εξίσωσης με μερικές παραγώγους σε μία ολοκληρωματική εξίσωση που θα περιλαμβάνει μόνο πρώτης τάξεως παραγώγους. Μετά από αυτό είναι δυνατή η αριθμητική ολοκλήρωση σε μικρά στοιχεία, στα οποία έχει χωριστεί το συνολικό πεδίο.

Η ευελιξία που παρουσιάζει η μέθοδος αυτή, αναφορικά με την επιλογή της μορφής των βρόχων, αντισταθμίζεται από τη μεγαλύτερη δυσκολία με την οποία γίνεται η εισαγωγή των δεδομένων και το μεγαλύτερο χρόνο που απαιτούν οι υπολογισμοί. Επίσης, τα πεπερασμένα στοιχεία προσεγγίζουν καλύτερα ακανόνιστα συνοριακά σχήματα (boundaries) από τις καθορισμένες πεπερασμένες διαφορές. Γενικά, αυτή η μέθοδος δεν έχει ιδιαίτερα μεγάλο εύρος εφαρμογής (Καλλέργης, 2001).

4.7 Εννοιολογικό μοντέλο και κατασκευή πλέγματος

➤ Κατασκευή εννοιολογικού μοντέλου

Το εννοιολογικό μοντέλο αποτελεί μια γραφική αναπαράσταση ενός συστήματος υπόγειας ροής, το οποίο βρίσκεται συνήθως στη μορφή ενός διαγράμματος ή μιας στρωματοποιημένης τομής. Οι διαστάσεις του αριθμητικού μοντέλου και η μορφή του πλέγματος καθορίζονται από το είδος του εννοιολογικού μοντέλου.

Στόχος της δημιουργίας ενός εννοιολογικού μοντέλου είναι η απλοποίηση του πρόβληματος του πεδίου και η οργάνωση των πολύπλοκων δεδομένων του έτσι ώστε όλο το σύστημα να μπορεί να αναλυθεί άμεσα (Anderson and Woessner, 1992). Έτσι, καθώς ολοκληρη η ανακατασκευή του πεδίου είναι ανέφικτη, ο μελετητής καλείται να επιλέξει ανάμεσα από ένα πλήθος παραδοχών, τις πλέον κατάλληλες για την περίπτωση που εξετάζει, έτσι ώστε:

- Οι παραδοχές να μην είναι τόσες πολλές ώστε η προσέγγιση να αποκλίνει σημαντικά από το φυσικό πρόβλημα
- Οι παραδοχές να είναι τουλάχιστον τόσες όσες χρειάζονται για να οδηγηθεί το πρόβλημα σε λύση

Το πρώτο βήμα για τη διαμόρφωση του εννοιολογικού μοντέλου είναι ο προσδιορισμός της περιοχής ενδιαφέροντος και των ορίων του μοντέλου. Τα αριθμητικά μοντέλα απαιτούν οριακές συνθήκες, έτσι ώστε τα υδραυλικά υψη και οι

ροές να μπορούν να οριστούν μέσα στα όρια του συστήματος και όταν είναι εφικτό τα φυσικά υδρολογικά όρια του συστήματος να χρησιμοποιούνται και ως όρια του μοντέλου. Για την κατασκευή του εννοιολογικού μοντέλου είναι απαραίτητα τρία βήματα (Anderson and Woessner, 1992):

1. Καθορισμός υδροστρωματογραφικών μονάδων

Γεωλογικές πληροφορίες που περιέχονται σε γεωλογικούς χάρτες συνδυάζονται με δεδομένα της γεωλογίας και της υδρογεωλογίας προκειμένου να καθοριστούν οι υδροστρωματογραφικές μονάδες που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο. Οι μονάδες αυτές, περιλαμβάνουν γεωλογικούς σχηματισμούς με παρόμοιες υδρογεωλογικές ιδιότητες και είναι περισσότερο χρήσιμες για την προσομοίωση γεωλογικών σχηματισμών μικρής κλίμακας. Κατά τη διάρκεια της κατασκευής του μοντέλου τα τοπικά συστήματα ροής, οι υδροφορείς και τα αδιαπέρατα στρώματα καθορίζονται έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν ως βάση των υδροστρωματογραφικών μονάδων.

Με βάση αυτές τις πληροφορίες γίνεται κατανοητή η ιστορία του τρόπου απόθεσης των γεωλογικών σχηματισμών, με αποτέλεσμα οι γεωλόγοι να είναι σε θέση να βοηθήσουν στην αναδιαμόρφωση του περιβάλλοντος απόθεσης. Παράλληλα, σε αυτή την ανάλυση μπορούν να βοηθήσουν πολύ και τα μοντέλα-φακοί, τα οποία είναι μονάδες από υλικό με παραπλήσιες φυσικές ιδιότητες, τα οποία αποτέθηκαν σε παρόμοιο γεωλογικό περιβάλλον.

Η έννοια μιας υδροστρωματογραφικής μονάδας είναι περισσότερο χρήσιμη στην προσομοίωση γεωλογικών συστημάτων σε ευρεία κλίμακα. Σε μικρότερες κλίμακες, θα μπορούσαν να ομαδοποιηθούν οι παρακείμενες γεωλογικές μονάδες που έχουν παρόμοιες υδρογεωλογικές ιδιότητες στις τοπικά καθορισμένες υδροστρωματογραφικές μονάδες. Παρόλα αυτά, στην πράξη είναι δύσκολο να γίνει κάτι τέτοιο καθώς απαιτούνται λεπτομερείς πληροφορίες για τη στρωματογραφία και την υδραυλική αγωγιμότητα κάθε περιοχής, προκειμένου να καθοριστούν οι υδροστρωματογραφικές μονάδες σε αυτήν την κλίμακα. Τέτοιες λεπτομερείς πληροφορίες είναι σπάνια διαθέσιμες (Anderson and Woessner, 1992).

2. Καθορισμός υδατικού ισοζυγίου

Οι πηγές του συστήματος καθώς και οι αναμενόμενες κατευθύνσεις ροής και τα σημεία εξόδου αποτελούν τμήματα του υδατικού ισοζυγίου και του εννοιολογικού μοντέλου. Με βάση αυτά, γίνεται γνωστό το μέγεθος των εισροών και εκροών καθώς και η αποθηκευτικότητα του συστήματος.

Οι εισροές περιλαμβάνουν την υπόγεια επαναφόρτιση μέσω της βροχόπτωσης, της επιφανειακής ροής ή των επιφανειακών νερών, ενώ οι εκροές περιλαμβάνουν εξόδους από πηγές, επιφανειακά ρέματα, άντληση και τέλος μέσω εξατμισοδιαπνοής. Κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης, το υδατικό ισοζύγιο που υπολογίζεται από το μοντέλο συγκρίνεται με αυτό που προκύπτει από τα δεδομένα του πεδίου.

3. Καθορισμός συστήματος ροής

Προκειμένου να καθοριστεί η κίνηση του υπόγειου νερού του συστήματος, χρησιμοποιούνται οι υδρολογικές πληροφορίες σε συνδυασμό με τη βροχόπτωση, την εξάτμιση, την επιφανειακή απορροή καθώς επίσης και με τα δεδομένα για το υδραυλικό ύψος και τη γεωχημεία. Τα γεωχημικά στοιχεία περιλαμβάνουν πληροφορίες για τις συγκεντρώσεις των κυριοτέρων κατιόντων και ανιόντων του

νερού και του υπεδάφους, τη θερμοκρασία και το pH, ενώ μπορεί να περιέχει και μετρήσεις για βαρέα μέταλλα, ραδιενεργά ισότοπα και οργανικούς ρυπαντές. Από την άλλη πλευρά, η γνώση του υδραυλικού ύψους σε διάφορα σημεία του συστήματος, βοηθά στην εκτίμηση της γενικής κατεύθυνσης της ροής και της σύνδεσης μεταξύ υδροφορέων και επιφανειακών συστημάτων νερού.

Προκειμένου να κατασκευαστεί το πλέγμα ενός μοντέλου είναι απαραίτητη η κατάταξη του μοντέλου με βάση το χώρο που προσομοιάζει. Με βάση αυτό το κριτήριο προκύπτουν οι εξής κατηγορίες (Anderson and Woessner, 1992):

- Δυσδιάστατα επιφανειακά (aquifer viewpoint)
- Δυσδιάστατα profile (flow system viewpoint)
- Ήμι-τριδιάστατα (aquifer viewpoint)
- Τριδιάστατα (flow system viewpoint)

4.8 Προσδιορισμός Συνθηκών

Για την επίλυση των βασικών εξισώσεων που περιγράφουν τη ροή και που παρουσιάστηκαν παραπάνω, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των αρχικών, δομικών και οριακών συνθηκών.

Ως οριακές συνθήκες νοούνται οι μαθηματικές εξισώσεις, οι οποίες καθορίζουν την εξαρτημένη μεταβλητή (υδραυλικό ύψος) ή την παράγωγο της εξαρτημένης μεταβλητής (flux) στα όρια του προβλήματος που εξετάζεται (Anderson and Woessner, 1992). Δηλαδή, οι οριακές συνθήκες ορίζουν την αλληλεπίδραση της υπό μελέτη περιοχής με το εξωτερικό της περιβάλλον. Παράλληλα, οι αρχικές συνθήκες γενικά χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την τιμή μιας παραμέτρου, όπως τη συγκέντρωση μιας διαλυμένης ουσίας, σε κάποιο αρχικό χρόνο ίσο με το μηδέν (Καρατζάς, 2003). Τέλος, ως δομικές συνθήκες του υδροφορέα, νοούνται τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα, που περιλαμβάνουν τη γεωμετρία (συντεταγμένες γεωμετρικών ορίων) και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του (υδραυλική αγωγιμότητα, πορώδες, ειδική αποθηκευτικότητα).

Για το σωστό σχεδιασμό ενός μοντέλου απαραίτητη προϋπόθεση είναι η προσεκτική και μελετημένη επιλογή των οριακών συνθηκών, καθώς αποτελεί ένα από τα βήματα της μοντελοποίησης που παίζει καθοριστικό ρόλο στην επίλυση του προβλήματος και ενέχει τα σοβαρότερα σφάλματα (Anderson and Woessner, 1992).

Τα συστήματα της υπόγειας ροής περιλαμβάνουν δύο ειδών όρια, τα φυσικά και τα υδραυλικά ή υδρογεωλογικά όρια.

➤ Φυσικά όρια

Τα φυσικά όρια περιλαμβάνουν κυρίως αδιαπέρατα στρώματα βράχου ή μεγάλα επιφανειακά υδατικά σώματα, καθώς αποτελούν μέρη ολόκληρου του συστήματος. Επίσης, ως φυσικά όρια θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν τα εξής:

- Αδιαπέρατοι βράχοι ως το κατώτερο όριο του συστήματος
- Σημεία όπου παρατηρείται διαφορά στην υδραυλική αγωγιμότητα πάνω από δύο τάξεις μεγέθους. Σ' αυτή την περίπτωση η υδραυλική αγωγιμότητα προκαλεί διάθλαση στις γραμμές της ροής και στα στρώματα με μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα η ροή ουσιαστικά θεωρείται οριζόντια, ενώ στα στρώματα με χαμηλότερη υδραυλική αγωγιμότητα είναι κάθετη

- Επιφανειακοί υδάτινοι αποδέκτες, οι οποίοι διεισδύουν ολικά σε υπόγειους υδροφορείς και αποτελούν όρια συγκεκριμένου υδραυλικού ύψους
- Αδιαπέρατα στρώματα καθώς επίσης και εισροές αλμυρού νερού σε παραθαλάσσιους υδροφορείς αποτελούν ιδανικά όρια μηδενικής ροής

Όταν υπάρχουν σταθερές συνθήκες σε κάποιο πρόβλημα, τότε είναι απαραίτητο τουλάχιστον ένας οριακός κόμβος να έχει καθορισμένο υδραυλικό ύψος έτσι ώστε να αποτελέσει τη βάση και να αρχίσει να υπολογίζει τις τιμές και στους άλλους κόμβους. Οι οριακές συνθήκες ροής σε συνδυασμό με τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος μπορεί να αποτελέσουν τη βάση για την επίλυση και άλλων σημαντικών προβλημάτων (Anderson and Woessner, 1992).

➤ Υδρογεωλογικά όρια

Τα υδραυλικά όρια, είναι αποτέλεσμα υδρολογικών συνθηκών και επομένως δεν είναι εμφανή. Περιλαμβάνουν υπόγεια χωρίσματα και στρωτές ροές. Επίσης, τα υδρογεωλογικά όρια αντιπροσωπεύονται από τους τύπους μαθηματικών συνθηκών που ακολουθούν (Anderson and Woessner, 1992).

- **Τύπος I:** Συγκεκριμένο υδραυλικό ύψος, όπου το υδραυλικό ύψος είναι δεδομένο και καθορισμένο (Συνθήκες Dirichlet)
- **Τύπος II:** Συγκεκριμένη ροή, όπου η παράγωγος του υδραυλικού ύψους (flux) είναι δεδομένη και ακολουθεί συγκεκριμένη εξίσωση σταθερής ροής. Όταν έχουμε οριακές συνθήκες μηδενικής ροής τότε η ροή είναι μηδέν (Συνθήκες Neumann)
- **Τύπος III:** Οριακές συνθήκες ροής εξαρτημένες από το υδραυλικό ύψος, στις οποίες υπολογίζεται η flux κατά μήκος των ορίων από μια δεδομένη τιμή του υδραυλικού ύψους. Αυτός ο τύπος οριακών συνθηκών ονομάζεται και μεικτός (mixed) διότι συσχετίζει τα οριακά υδραυλικά ύψη με τις οριακές συνθήκες ροής. Αποτελεί δηλαδή, ένα συνδυασμό των τύπων I και II (Cauchy ή μεικτές οριακές συνθήκες)

Πιο συγκεκριμένα, για τον τύπο I, όπου το υδραυλικό ύψος είναι καθορισμένο, η προσομοίωση πραγματοποιείται εάν τεθεί το υδραυλικό ύψος στους κατάλληλους κόμβους ίσο με γνωστές τιμές που έχουν μετρηθεί. Στην περίπτωση που το όριο είναι ένα ποτάμι, το υδραυλικό ύψος κατά μήκος αυτού ποικίλει χωρικά, ενώ όταν είναι μία λίμνη ή άλλο σώμα που περιέχει αποθέματα τότε επικρατούν σταθερές συνθήκες. Σε δυσδιάστατες προσομοιώσεις οι κόμβοι συγκεκριμένου υδραυλικού ύψους αντιπροσωπεύουν επιφανειακά υδατικά σώματα που διεισδύουν εξολοκλήρου στον υδροφορέα ή το κάθετο μέσο υδραυλικό ύψος. Σε τρισδιάστατα μοντέλα οι κόμβοι αυτοί αντιπροσωπεύουν τα επίπεδα της στάθμης του νερού ή επιφανειακά υδατικά σώματα. Φυσικά είναι δυνατόν να αλλάζει η τιμή του υδραυλικού ύψους στα όρια καθώς γίνεται η προσομοίωση, αρκεί η καινούργια τιμή να μπορεί να δικαιολογηθεί (Anderson and Woessner, 1992).

Για τον τύπο II, όπου η ροή είναι καθορισμένη, να προσομοιώνονται επιφανειακά υδατικά σώματα, υπόγειες πηγές, ροές καθώς επίσης υδραυλικά όρια σε τοπικά συστήματα ροής. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι συνθήκες καθορισμένης ροής αποδίδουν περισσότερο όπως σε συστήματα όπου η ροή παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης αλλά το υδραυλικό ύψος όχι, παρόλο που συνήθως προτιμώνται οι συνθήκες καθορισμένου υδραυλικού ύψους, διότι είναι πιο εύκολες στον υπολογισμό.

Τέλος, για τον τύπο III, όπου η ροή είναι εξαρτώμενη από το υδραυλικό ύψος: Η ροή (flux) κατά μήκος των ορίων εξαρτάται από τη διαφορά της τιμής του υδραυλικού ύψους στη μία πλευρά του ορίου και της άλλης τιμής που υπολογίζει το μοντέλο στην άλλη πλευρά του ορίου. Η διαφορά στα μοντέλα των πεπερασμένων διαφορών και των πεπερασμένων στοιχείων βρίσκεται στο ότι στα μεν πρώτα υπολογίζεται η ροή για κάθε κελί, στα δε δεύτερα για κάθε κόμβο. Η διαρροή από ή προς ένα ποτάμι, λίμνη ή αποθηκευτικό σώμα μπορεί να προσομοιωθεί χρησιμοποιώντας συνθήκες ροής εξαρτώμενης από το υδραυλικό ύψος. Επίσης, η εξατμισοδιαπνοή κατά μήκος της επιφάνειας του νερού μπορεί να υπολογιστεί με παρόμοιο τρόπο, όπου η flux θα εξαρτάται από το βάθος του νερού και από την επιφάνεια (Anderson and Woessner, 1992).

Γενικά, και οι τρεις τύποι μαθηματικών συνθηκών που μόλις αναφέρθηκαν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στο εσωτερικό του προβλήματος με σκοπό να προσδιορίσουν πηγές ή σημεία συγκέντρωσης υπόγειου νερού ή ακόμη και για να προσδιορίσουν εσωτερικά όρια όπως λίμνες και ποτάμια. Δεν χρησιμοποιούνται δηλαδή αποκλειστικά ως οριακές συνθήκες.

4.9 Δεδομένα

Τα δεδομένα που απαιτούνται από τα μοντέλα της υπόγειας ροής μπορούν να διακριθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Είναι τα φυσικά και τα υδρογεωλογικά δεδομένα και παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα που ακολουθεί. Οι πληροφορίες αυτές προέρχονται είτε από τη διεθνή βιβλιογραφία είτε από εργαστηριακές μετρήσεις ή μελέτες πεδίου (Anderson and Woessner, 1992).

Πίνακας 9. Δεδομένα μοντέλων υπόγειας ροής

ΦΥΣΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ
Γεωλογικοί χάρτες που απεικονίζουν το μέγεθος και τα όρια του συστήματος
Τοπογραφικοί χάρτες
Χάρτες με πληροφορίες για τους υδροφορείς καθώς και για τα αδιαπέραστα στρώματα (όρια και πάχος)
Χάρτες με τα χαρακτηριστικά των ποταμών και των λιμνών (όρια και πάχος)
ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ
Ποτενσιομετρικοί χάρτες για υδροφορείς και στοιχεία για στάθμη νερού
Υδρογραφία υπόγειων υδάτων και ρυθμός αποφόρτισης με τα επιφανειακά ύδατα
Χάρτες με την υδραυλική αγωγιμότητα και τη μεταβιβασιμότητα των εδαφών
Χάρτες με την αποθηκευτική ικανότητα των υδροφορέων
Υδραυλικές αγωγιμότητες και συμπεριφορά του υδροφορέα με τα παρακείμενα ποτάμια και λίμνες.
Χωρική και χρονική κατανομή του ρυθμού εξατμισοδιαπνοής, υπόγειας επαναφόρτισης, αλληλεπίδρασης επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, υπόγειας άντλησης και φυσικής υπόγειας αποφόρτισης.

5 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PTC

5.1 Εισαγωγή

Το PTC είναι ένας κώδικας, γραμμένος σε FORTRAN 77, που προσομοιώνει την τρισδιάστατη ροή των υπογείων υδάτων και τη μεταφορά του ρύπου που βρίσκεται σε αυτά. Κάθε τρισδιάστατο στοιχείο είναι μια στήλη με τριγωνική διατομή, καθώς ο κώδικας αυτός, χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για το οριζόντιο (δισδιάστατο) πρόβλημα και τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών για την προσέγγιση του κάθετου προβλήματος.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, η προσομοίωση της υπόγειας ροής και της μεταφοράς μάζας έγινε με χρήση του κώδικα PTC χρησιμοποιώντας τα εργαλεία που παρέχονται από το λογισμικό Argus ONE. Με τον τρόπο αυτό, ο ορισμός των διαφόρων παραμέτρων του PTC είναι πιο εύκολος, ενώ παράλληλα υπάρχει η δυνατότητα εκτέλεσης του κώδικα PTC και εξαγωγής των δεδομένων σε αρχεία που μπορούν να διαβαστούν από αυτόν. Επίσης, τα αποτελέσματα του PTC μπορούν, μέσω του Argus ONE, να παρουσιαστούν γραφικά (Γαρμπή et al).

Το Argus ONE (Argus Open Numerical Environments) αποτελεί ένα προηγμένο γραφικό λογισμικό επεξεργασίας πληροφοριών, το οποίο επιτρέπει την επίλυση σχεδόν κάθε τύπου προβλήματος χρησιμοποιώντας το ίδιο γραφικό μέσο αλληλεπίδρασης με το χρήστη. Ο λόγος αυτός, το καθιστά ως ένα ιδανικό περιβάλλον μοντελοποίησης, βασισμένο σε GIS, για τα υπόγεια ύδατα. Επίσης, όπως έχει ήδη αναφερθεί, το λογισμικό αυτό στηρίζεται στις μεθόδους των πεπερασμένων διαφορών και των πεπερασμένων χρησιμοποιώντας έναν εύκολο και γραφικό τρόπο για τη δημιουργία των αρχείων που απαιτούνται για το μοντέλο PTC. Παρέχει με τρόπο κατάλληλο όλα τα απαραίτητα για τη μοντελοποίηση εργαλεία, όπως είναι η εισαγωγή και χρήση ψηφιακών χαρτών και ο καθορισμός και η διαχείριση των αρχικών και οριακών συνθηκών καθώς και των τιμών των συγκεντρώσεων. Υποστηρίζει το μεγαλύτερο αριθμό μοντέλων υπογείων υδάτων που κυκλοφορούν στις μέρες μας, όπως:

- MODFLOW - Ground-Water Flow Modeling
- MOC3D - Solute Transport Modeling
- HST3D - 3-D Heat and Solute Transport Modeling
- SUTRA - Saturated/Unsaturated Flow and Heat/Solute Transport
- PTC - Princeton Flow and Transport Code
- ARC/INFO and ArcView Interfaces

5.2 Θεμελιώδεις εξισώσεις

Το μοντέλο PTC για την περιγραφή της υπόγειας ροής, χρησιμοποιεί το σύστημα διαφορικών εξισώσεων που ακολουθεί χρησιμοποιώντας:

- το υδραυλικό ύψος:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + Q = 0 \quad (15)$$

- την ταχύτητα που περιγράφεται από τις συνιστώσες της, ως εξής:

$$V_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}, \quad V_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}, \quad V_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (16)$$

- τη μεταφορά ρύπων, που περιγράφεται από τη συγκέντρωση:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] - \left[V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\ & + Q(c^w - c) - E(c) = \frac{\partial c}{\partial t} \end{aligned} \quad (17)$$

Όπου,

- h: υδραυλικό ύψος [L]
- K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} : υδραυλική αγωγιμότητα στην x, y, z κατεύθυνση, αντίστοιχα [$L T^{-1}$]
- S: ειδικός συντελεστής αποθηκευτικότητας [L^{-1}]
- Q: ρυθμός άντλησης [$L^3 T^{-1}$]
- V_x , V_y , V_z : συνιστώσες ταχύτητας στην x, y, z κατεύθυνση, αντίστοιχα [$L T^{-1}$]
- D_{xx} , D_{yy} , D_{zz} , D_{xy} , D_{yx} , D_{xz} , D_{zy} , D_{zx} : συνιστώσες υδροδυναμικής διασποράς [$L^2 T^{-1}$]
- c: συγκέντρωση ρύπου στο σημείο (x,y,z) τη χρονική στιγμή t [ML^{-3}]
- c^w : συγκέντρωση αντλούμενου νερού στο σημείο (x_i, y_i, z_i) [ML^{-3}]
- θ: πορώδες υδροφορέα (αδιάστατο)
- E(c): όρος που αντιπροσωπεύει τις ιδιότητες της χημικής προσρόφησης

Οι εξισώσεις αυτές προκύπτουν από την αρχή διατήρησης της μάζας και το νόμο του Darcy. Η σειρά επίλυσης τους ακολουθεί τη σειρά που παρουσιάζονται οι εξισώσεις, αρχικά δηλαδή λύνεται η εξίσωση (15) για την εύρεση του υδραυλικού ύψους, στη συνέχεια οι εξισώσεις (16) για την εύρεση των συνιστωσών της ταχύτητας και τέλος η εξίσωση (17) με σκοπό την εύρεση της συγκέντρωσης του ρύπου c (Babu et al, 1997).

5.3 Επίλυση αλγορίθμου μοντέλου PTC

Προκειμένου να επιλυθεί το σύστημα των παραπάνω εξισώσεων (15)-(17), σε σύνθετα φυσικά συστήματα είναι απαραίτητη η εφαρμογή των αριθμητικών μεθόδων. Ιδιαίτερα για συστήματα κλίμακας πεδίου, όπου ο υπολογιστικός φόρτος για την επίλυση των τρισδιάστατων αυτών εξισώσεων είναι πολύ μεγάλος, το μοντέλο PTC εμπεριέχει ένα μοναδικό διαχωριστικό αλγόριθμο (splitting algorithm) για την επίλυση τέτοιων εξισώσεων, ο οποίος μειώνει το υπολογιστικό κόστος σημαντικά.

Ο αλγόριθμος περιλαμβάνει με μια διακριτική ευχέρεια το διαχωρισμό του πεδίου ορισμού σε οριζόντια και παράλληλα στρώματα. Μέσα σε αυτά τα στρώματα γίνεται μια οριζόντια διακριτοποίηση πεπερασμένων στοιχείων για πιο σωστή αναπαράσταση πεδίων ορισμού με ακανόνιστο σχήμα. Τα στρώματα συνδέονται κάθετα με διακριτοποίηση πεπερασμένων διαφορών. Η υβριδική μέθοδος της ένωσης των

πεπερασμένων στοιχείων με τις πεπερασμένες διαφορές εξασφαλίζει τη δυνατότητα εφαρμογής της διαχωριστικής διαδικασίας. Κατά τη διάρκεια μιας επανάληψης συγκεκριμένης χρονικής περιόδου όλοι οι υπολογισμοί χωρίζονται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος, όπου όλες οι οριζόντιες διακριτοποιήσεις πεπερασμένων στοιχείων επιλύονται ανεξάρτητα η μια από την άλλη και στο δεύτερο μέρος, επιλύονται όλες οι κάθετες εξισώσεις που συνδέουν τα στρώματα μεταξύ τους (Babu et al, 1997).

5.4 Τρισδιάστατη ροή υπογείων υδάτων

Το μοντέλο PTC καθορίζει τα χαρακτηριστικά της ροής ενός συστήματος υπογείων υδάτων επιλύνοντας την ακόλουθη διαφορική εξίσωση ως προς το υδραυλικό ύψος:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + \delta \sum_{i=0}^r Q_i x(\delta - y_i) y(\delta - z_i) z(-\theta_i) = \quad (18)$$

Όπου,

δ : συνάρτηση δέλτα του Dirac

r : αριθμός των σημείων πηγών/ καταβύθισης.

5.4.1 Οριακές συνθήκες

Το μοντέλο PTC χρησιμοποιεί τρεις τύπους οριακών συνθηκών στην εξίσωση της ροής. Οι τύποι αυτοί είναι οι συνθήκες Dirichlet (καθορισμένο υδραυλικό ύψος), Neumann (καθορισμένη ροή) και οι συνθήκες τρίτου τύπου (διαρροή). Οι οριακές συνθήκες μπορούν να μεταβληθούν από το χρήστη κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, ενώ η προεπιλεγμένη συνθήκη για όλα τα όρια είναι μηδέν. Η επιλογή αυτή υποδηλώνει περιορισμένο υδροφορέα με αδιαπέρατο πυθμένα καθώς και αδιαπέρατα στρώματα γύρω από αυτόν. Επιλέγοντας διαφορετικές οριακές συνθήκες κατά μήκος της μελετηθείσας περιοχής, ο χρήστης μπορεί να αναπαραστήσει άλλες υδρολογικές συνθήκες (Babu et al, 1997).

- Καθορισμένο Υδραυλικό Ύψος

Οι οριακές συνθήκες αυτού του είδους καθορίζονται δηλώνοντας τους κόμβους και τις τιμές του υδραυλικού ύψους σε καθένα από αυτούς. Αυτόματα, το πρόγραμμα ορίζει τις γραμμές και τις στήλες του πίνακα των συντελεστών που σχετίζονται με αυτούς τους κόμβους, ως σταθερούς όρους. Επομένως, εφόσον οι κόμβοι με σταθερό υδραυλικό ύψος παραλείπονται από τη μαθηματική εξίσωση του πίνακα, τότε απομένουν $(N \times M - N_C)$ εξισώσεις με $(N \times M - N_C)$ αγνώστους, με N_C τον ολικό αριθμό των κόμβων με σταθερό υδραυλικό ύψος στην περιοχή μελέτης (Babu et al, 1997).

- Καθορισμένη Ροή

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων παρέχει ένα πολύ απλό μέσο καθορισμού των οριακών συνθηκών. Με την εφαρμογή του θεωρήματος του Green προκύπτει ένα οριακός όρος στις εξισώσεις του μοντέλου. Όταν η ροή θεωρείται σταθερή κατά μήκος ενός στοιχείου με μήκος L η ολοκλήρωση των σχέσεων θα δίνεται από τις

κομβικές κατανομές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο χρήστης να χρειάζεται μόνο να ορίσει την ογκομετρική ροή σε ένα κόμβο προκειμένου να αναπαραστήσει τη ροή κατά μήκος του ορίου. Από μαθηματικής πλευράς, η ροή λόγω άντλησης εισάγεται επίσης με τον ίδιο τρόπο. Για την διευκόλυνση της εισαγωγής ομοιόμορφης διήθησης, ο κώδικας επιτρέπει τον καθορισμό μιας κομβικής ροής διήθησης και αυτόματα πραγματοποιείται ολοκλήρωση της περιοχής με σκοπό να καθοριστεί η ογκομετρική ροή (Babu et al, 1997).

- Τρίτου Τύπου

Στις οριακές συνθήκες τρίτου τύπου εισάγεται ένας όρος αγωγιμότητας διαρροής (leakage conductance), ο οποίος είναι η υδραυλική αγωγιμότητα προς την απόσταση και ολοκληρώνεται στην περιοχή για να αναπαραστήσει την κάθετη διαρροή. Με κατάλληλο προσδιορισμό της καθοριζόμενης από το χρήστη παραμέτρου, μπορεί να οριστεί η διαρροή προς οποιαδήποτε κατεύθυνση (Babu et al, 1997).

5.5 Τρισδιάστατη μεταφορά ρύπων

Η εξίσωση μεταφοράς ρύπων, η οποία έχει ήδη αναφερθεί είναι η εξής:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] - \left[V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\ & + Q(c_{\text{eff}} - c) = \rho \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

Οι όροι διασποράς της παραπάνω εξίσωσης, δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\begin{aligned} D_{xx} &= \alpha_L V_x^2 + \alpha_T V_y^2 + \alpha_v V_z^2 + D_M \\ D_{yy} &= \alpha_T V_x^2 + \alpha_L V_y^2 + \alpha_v V_z^2 + D_M \\ D_{zz} &= \alpha_v V_x^2 + \alpha_v V_y^2 + \alpha_L V_z^2 + D_M \\ D_{yx} &= D_{xy} = (V_L V_x - V_y^2) \alpha_T \\ D_{yz} &= D_{zy} = (V_L V_y - V_z^2) \alpha_T \\ D_{zx} &= D_{xz} = (V_L V_z - V_x^2) \alpha_v \end{aligned} \quad (20)$$

Όπου,

- D_M : συντελεστής μοριακής διάχυσης, συνήθως παίρνει μικρή τιμή [L^2/T]
- α_L : συντελεστής διαμήκους διασποράς [L]
- α_T : συντελεστής εγκάρσιας οριζόντιας διασποράς [L]
- α_v : συντελεστής εγκάρσιας κάθετης διασποράς [L]
- V : μέγεθος του διανύσματος της ταχύτητας, $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$ [L/T]
- Q : ισχύς άντλησης /εμπλουτισμού, $Q = Q_x (x - \delta_i) y (y - \delta_i) z (z - \delta_i) [1/T]$

Όλοι οι υπόλοιποι όροι είναι ίδιοι με αυτούς που έχουν ήδη αναφερθεί.

Σε όλες τις περιπτώσεις άντλησης ($Q_i \leq 0$), γίνεται η υπόθεση ότι η συγκέντρωση του νερού που αντλείται (c_w) ισοδυναμεί με τη συγκέντρωση του νερού γύρω από το σημείο αυτό (c). Επομένως, σε όλα τα πηγάδια ο όρος $Q(c_w - c)$ ισοδυναμεί με μηδέν. Έτσι, ο όρος με το Q παραμένει στην παραπάνω εξίσωση μόνο όταν το πηγάδι αντλεί το ρύπο ($Q_i > 0$), με συγκέντρωση που αναπαριστά τη συγκέντρωση του αντλούμενου νερού που εισέρχεται στον υδροφορέα (c_w) (Babu et al, 1997).

5.5.1 Οριακές Συνθήκες

Το μοντέλο PTC χρησιμοποιεί δύο τύπους οριακών συνθηκών στην εξίσωση μεταφοράς: α) την σταθερή συγκέντρωση σε κάποιο κόμβο και β) την καθορισμένη ροή συμμεταφοράς. Οι οριακές συνθήκες είναι μηδενικής ροής από διασπορά στα κάθετα όρια και μηδενικής ολικής ροής ρύπου στο ανώτερο και κατώτερο όριο.

Ο πρώτος τύπος οριακών συνθηκών, που είναι σταθερή συγκέντρωση σε κάποιο κόμβο καθορίζεται απευθείας από το χρήστη, ενώ η καθορισμένη ροή συμμεταφοράς καθορίζεται δηλώνοντας μια συγκέντρωση σχετική με την ογκομετρική ροή ρευστού στο πρόγραμμα εισόδου. Ομοίως, έμμεσα η καθορισμένη ροή συμμεταφοράς εισάγεται μέσω της συγκέντρωσης που σχετίζεται με το διαρρέον υγρό στην οριακή συνθήκη ροής τρίτου τύπου (Babu et al, 1997).

6 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ArcGIS 9.2

Η εφαρμογή ArcGIS 9.2 αποτελεί μέρος του συνόλου των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (Geographical Information Systems, GIS), τα οποία είναι πληροφοριακά συστήματα που αναπτύχθηκαν για να ικανοποιήσουν την ολοένα αυξανόμενη ανάγκη των κοινωνιών για αξιόπιστες και ενημερωμένες πληροφορίες σε σχέση με ζητήματα διαχείρισης προβλημάτων στο χώρο και το χρόνο. Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών δεν είναι απλά συστήματα πληροφοριών καθώς μπορούν να συνδυάσουν πληροφορίες που σχετίζονται τόσο με τη γεωγραφική θέση ενός φαινομένου, όσο και με περιγραφικά (μη γεωγραφικά) δεδομένα που αφορούν το φαινόμενο αλλά και την εξέλιξη του φαινομένου στο χρόνο.

Σήμερα, τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών βρίσκουν εφαρμογή σε οτιδήποτε σχεδόν έχει να κάνει σχετικά με τη λήψη αποφάσεων που αφορούν τη χρονική και χωρική παρουσίαση ή εξέλιξη ενός φαινομένου. Χρησιμοποιούνται στην τοπογραφία, στη διαχείριση γης, στη γεωλογία αλλά και σε ζητήματα διαχείρισης περιβαλλοντικών επιπτώσεων και κινδύνων. Ολοένα αυξανόμενη ωστόσο είναι η χρήση τους σε σχέση με κοινωνικά και οικονομικά ζητήματα (Καραμπάτσος, 2003).

Συγκεκριμένα, το ArcGIS μπορεί να περιλαμβάνει τα εξής:

- ArcReader, το οποίο επιτρέπει την επεξεργασία και απεικόνιση χαρτών
- ArcView, που επιτρέπει τη διαχείριση των χωρικών δεδομένων καθώς και τη δημιουργία χαρτών σε επίπεδα (layers)
- ArcEditor, που εκτός από τη λειτουργία ArcView, περιλαμβάνει τα πιο προηγμένα εργαλεία για το χειρισμό των shapefiles και των geodatabase
- ArcInfo, με τη βοήθεια του οποίου μπορεί να γίνει ο χειρισμός, η έκδοση, και η ανάλυση στοιχείων.

Επίσης, το ArcGIS υποστηρίζει τα εξής γεωγραφικά δεδομένα:

- Σχηματικά αρχεία (shapefiles): Τα αρχεία αυτά, περιέχουν γεωγραφικά και περιγραφικά δεδομένα, τα οποία μπορούν να διορθωθούν μέσα από το περιβάλλον του ArcView. Επίσης, περιέχουν ή μόνο σημεία ή μόνο γραμμές ή μόνο πολύγωνα.
- Αρχεία θεματικών επιπέδων (ARC/INFO Coverage): Ένα αρχείο θεματικών επιπέδων είναι μια βάση χωρικών δεδομένων που αποθηκεύει σε ένα σύνολο αρχείων τη γεωγραφική και περιγραφική πληροφορία. Περιέχει γραμμές και πολύγωνα, σημεία ή πολύγωνα αλλά όχι ταυτόχρονα σημεία και πολύγωνα.
- Ψηφιδωτά αρχεία (ARC/INFO Grids): Αυτά τα αρχεία, αποτελούνται από ψηφιδωτά δεδομένα, κατάλληλα για να περιγράψουν γεωγραφικά φαινόμενα που διαφέρουν στο χώρο.
- Εικόνες (Images): Τα αρχεία αυτά δίνουν τη δυνατότητα να προστεθούν αεροφωτογραφίες, δορυφορικές εικόνες και σαρωμένα έντυπα στο Arc GIS. Οι εικόνες αυτές, αφού διορθωθούν γεωμετρικά μπορούν να δημιουργήσουν ένα ιδανικό υπόβαθρο για να δημιουργηθούν σχηματικά αρχεία.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το ArcGIS χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση και σύνθεση των χαρτών της περιοχής, τη διαχείριση των δεδομένων που εξάγονται από αυτούς, καθώς και την τρισδιάστατη απεικόνιση της περιοχής μελέτης.

Λεπτομερέστερα, το ArcGIS χρησιμοποιήθηκε για τη γραφική απεικόνιση πάνω στο
χάρτη, των ορίων της περιοχής, του ποταμού Ασωπού καθώς και των γεωτρήσεων.

7 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ GEO 5

Το πρόγραμμα GEO5 στηρίζεται στο λογισμικό M-TECH το οποίο δημιουργήθηκε το 1988 από τον Marc Gleason, ο οποίος είχε μεγάλη εμπειρία στην πληροφορική και στην περιβαλλοντική μοντελοποίηση. Το πρόγραμμα αυτό αποτελείται από 4 εφαρμογές οι οποίες είναι οι εξής (M-TECH Software Tutorial):

- **QuickLog**

Με τη βοήθεια του QuickLog επιταχύνεται και απλοποιείται η διαδικασία της δημιουργίας διαγραμμάτων που απεικονίζουν γεωτρήσεις. Σκοπός ήταν η δημιουργία ενός απλού και εύχρηστου προγράμματος για την άμεση χρήση του από γεωλόγους ή χειριστές εισαγωγής δεδομένων, χωρίς τη χρήση συστήματος CAD (Computer-Aided Design). Η εφαρμογή αυτή είναι πολύ φιλική προς το χρήστη καθώς ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει πλήθος διαφορετικών σχεδίων που θα ήθελε να εμφανίζονται στο διάγραμμα της γεώτρησης, χωρίς την απαίτηση προγραμματισμού ή μακροσκελούς μορφοποίησης.

- **QuickCross/Fence**

Οι εφαρμογές QuickCross και QuickFence χρησιμοποιούν δεδομένα τα οποία έχουν ήδη εισαχθεί στην εφαρμογή QuickLog με σκοπό τη δημιουργία τομών. Τα διαγράμματα αυτά μπορούν να τυπωθούν απευθείας ή μπορούν να εισαχθούν σε ένα πρόγραμμα CAD για περαιτέρω επεξεργασία.

- **QuickGIS**

Η εφαρμογή αυτή επιτρέπει την οργάνωση των λιθολογικών δεδομένων για μια ομάδα γεωτρήσεων σε ένα πίνακα με γεωλογικά επίπεδα και συνετεταγμένες X,Y. Στη συνέχεια, τα δεδομένα αυτά μπορούν εξαχθούν στο πρόγραμμα ArcView καθώς και σε άλλα GIS συστήματα ή να χρησιμοποιηθούν για ενίσχυση των δυνατοτήτων των εφαρμογών QuickCross και QuickFence.

- **QuickSoil**

Η εφαρμογή QuickSoil χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ενός πίνακα ανάλυσης εδάφους, ο οποίος παρουσιάζει τα αποτελέσματα της δοκιμής δειγμάτων εδάφους για ένα σύνολο παραμέτρων. Κάθε δείγμα εδάφους τοποθετείται στο σωστό βάθος και σκιάζεται σύμφωνα με την τιμή της κάθε παραμέτρου που έχει δοκιμαστεί. Ο πίνακας βοηθά στον ευκολότερο προσδιορισμό των ρυπασμένων περιοχών στα διάφορα επίπεδα του εδάφους.

8 ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PTC

Σύμφωνα με τα όσα έχουν ήδη ειπωθεί, το βασικό ερώτημα που καλείται να απαντήσει η παρούσα εργασία είναι εάν η προέλευση της ρύπανσης των υπογείων υδάτων της ευρύτερης περιοχής του ποταμού Ασωπού είναι ανθρωπογενής, γηγενής ή κάποιος συνδυασμός τους. Η ανθρωπογενής ρύπανση προέρχεται από τα λύματα που διοχετεύουν στον ποταμό οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις που βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή μελέτης, ενώ η γηγενής οφείλεται στη διάβρωση του επιφανειακού πετρώματος σερπεντινίτη (serpentinite). Έτσι, προκειμένου να απαντηθεί το ερώτημα αυτό, γίνεται η μοντελοποίηση της ροής του υπόγειου νερού καθώς και του ρυπαντή με τη βοήθεια του μοντέλου PTC.

Αρχικά, είναι απαραίτητη η εισαγωγή κάποιων στοιχείων στο μοντέλο, έτσι ώστε να γίνει η προσομοίωση της περιοχής μελέτης καθώς και του υδροφορέα της περιοχής. Τα στοιχεία αυτά αφορούν τους χάρτες, τα υψόμετρα, τις γεωτρήσεις της περιοχής με τους ρυθμούς άντλησής τους, την υδραυλική αγωγιμότητα και το πορώδες του εδάφους, τη βροχόπτωση, τις αρχικές και οριακές συνθήκες καθώς και τη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης. Με τα στοιχεία αυτά, το μοντέλο PTC επιτυγχάνει μια αναπαράσταση της περιοχής μελέτης και δίνει το υδραυλικό ύψος του υδροφορέα και τις κάθετες και οριζόντιες ταχύτητες του νερού. Τέλος, γίνεται ο υπολογισμός της συγκέντρωσης του χρωμίου (ρύπος) στον υδροφορέα καθώς και ο προσδιορισμός της κατεύθυνσης του.

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να αναφερθεί ότι η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή στηρίχθηκε στο δισδιάστατο μοντέλο ενός στρώματος το οποίο αναπτύχθηκε στη διπλωματική εργασία της Συρράκου Χριστίνας (Συρράκου, Χ., 2008). Επίσης, στοιχεία για την περιοχή μελέτης έχουν ληφθεί από την προαναφερόμενη διπλωματική εργασία.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται μια σειρά συγκεκριμένων βημάτων, που ακολουθήθηκαν προκειμένου να γίνει η μοντελοποίηση της περιοχής μελέτης:

8.1 Προσδιορισμός περιοχής μελέτης

Ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε, η περιοχή του Ωρωπού Αττικής περιλαμβάνοντας μεγάλο τμήμα του ρυπασμένου με χρώμιο ποταμού Ασωπού. Τα όρια της περιοχής περικλείουν τους οικισμούς: Ωρωπού, Χαλκουτσίου, Συκάμινου, Μαρκόπουλου, Αγίου Κωνσταντίνου, Σκάλας Ωρωπού και Νέων Παλατιών καθώς και τους όρμους Χαλκουτσίου και Ωρωπού. Εκτείνεται ανατολικά μέχρι τον οικισμό Μαρκόπουλο, δυτικά σε σημαντική απόσταση από το ακρωτήριο Αγκίστρι μέχρι τα όρια του οικισμού Δήλεσι, χωρίς όμως να τον περιλαμβάνει και νότια μέχρι τη νέα εθνική οδό Αθηνών-Θεσσαλονίκης. Η περιοχή έχει επιφάνεια περίπου 87.5 τετραγωνικά χιλιόμετρα.

Εικόνα 10. Περιοχή μελέτης

Για την προσομοίωση της περιοχής μελέτης εισήχθηκαν στο πρόγραμμα PTC, ως shapefiles, ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής καθώς και αρχεία που περιλαμβάνουν τις ισοϋψείς γραμμές, τις γεωτρήσεις και τον ποταμό Ασωπό. Τα αρχεία αυτά, δημιουργήθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος ArcGIS 9.2. Από το αρχείο με τις ισοϋψείς καθώς και από τα υψόμετρα των γεωτρήσεων, δόθηκαν στο μοντέλο τα στοιχεία των υψομέτρων της περιοχής και με μια μέθοδο παρεμβολής του μοντέλου PTC δημιουργήθηκε το ανάγλυφό της. Το ανάγλυφο της περιοχής είναι σχετικά έντονο καθώς μέσα σε λιγότερο από 7 χιλιόμετρα παρατηρείται αύξηση υψομέτρου 300 μέτρων.

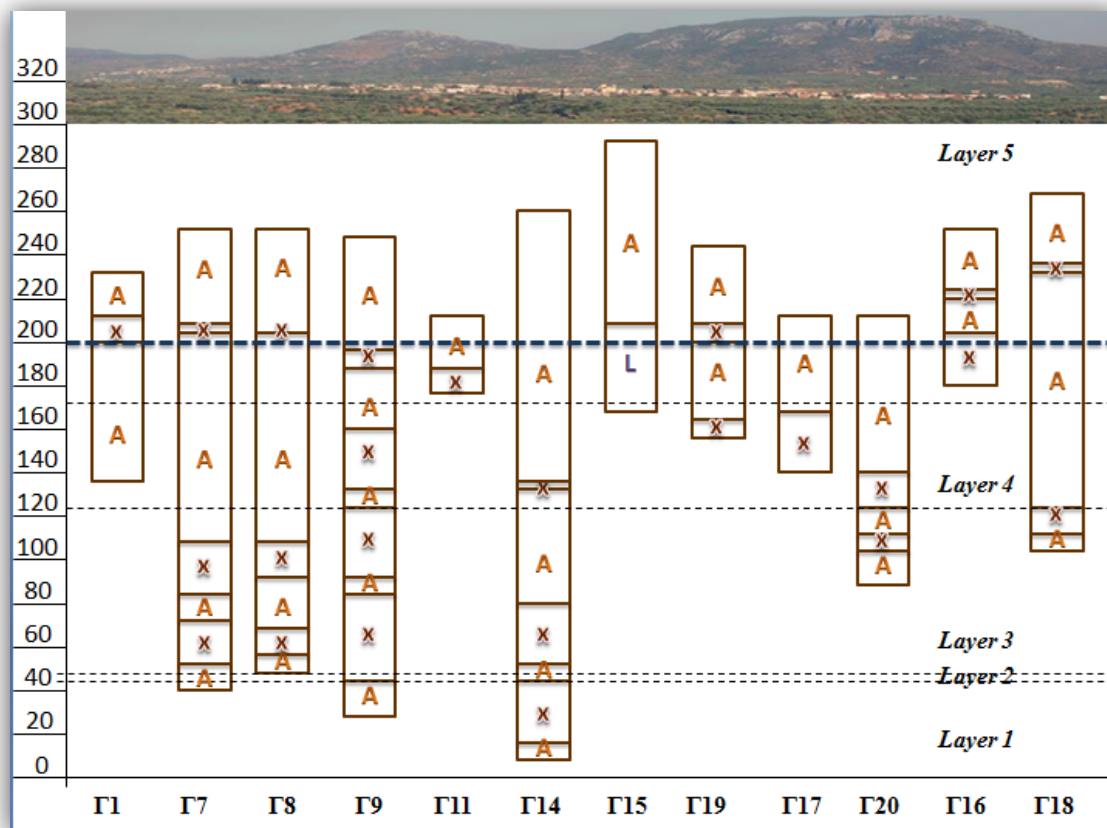
Παράλληλα, θα πρέπει να αναφερθεί ότι σε όλα τα απόλυτα υψόμετρα που δίνονται από το χάρτη προστέθηκε η τιμή των 200 μέτρων, καθώς το επίπεδο αναφοράς βρίσκεται στα 200 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Για το λόγο αυτό, η επιφάνεια της θάλασσας θεωρούμε ότι βρίσκεται στα 200 μέτρα. Η επιλογή της τιμής αυτής, προέκυψε από το βάθος σε συνδυασμό με το υψόμετρο της πιο βαθιάς γεώτρησης που υπάρχει στην περιοχή μελέτης και εισήχθηκε στο μοντέλο. Συγκεκριμένα, η περιοχή στην οποία έχει διανοιχτεί η γεώτρηση 14 έχει υψόμετρο 63, ενώ το βάθος της γεώτρησης αυτής είναι 250 μέτρα. Επομένως, το κατώτατο σημείο της συγκεκριμένης γεώτρησης βρίσκεται περίπου -200 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας (Γεώτρηση Γ14, Παράρτημα Β και Γ).

8.2 Γεωτρήσεις

Στην περιοχή μελέτης, υπάρχουν δεδομένα για 43 γεωτρήσεις σε διάφορα σημεία της (Παράρτημα Δ). Τα δεδομένα των γεωτρήσεων δεν είναι ίδια για όλες τις γεωτρήσεις και για το λόγο αυτό, δεν χρησιμοποιούνται όλες οι γεωτρήσεις για τον ίδιο σκοπό. Τα δεδομένα αυτά, αφορούν το υψόμετρο στο οποίο βρίσκονται οι γεωτρήσεις, το βάθος, τη στάθμη ηρεμίας, την παροχή εκμετάλλευσης και τη

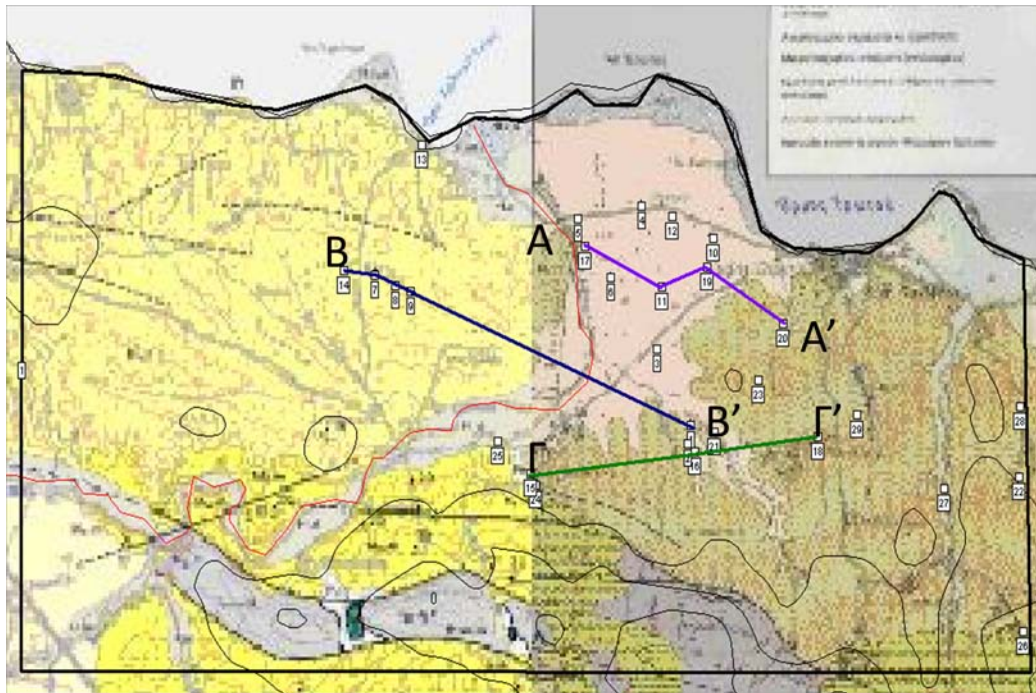
στρωματογραφία. Σε κάθε γεώτρηση αντιστοιχεί είτε κάποιο από τα παραπάνω στοιχεία είτε κάποιος συνδυασμός τους.

Στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 11) παρουσιάζονται οι γεωτρήσεις για τις οποίες δίνεται η τομή τους και με τη βοήθεια των οποίων έγινε η εκτίμηση της στρωματογραφίας της περιοχής μελέτης και του διαχωρισμού της σε στρώματα (layers) για την όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτική απεικόνιση της περιοχής στο μοντέλο.

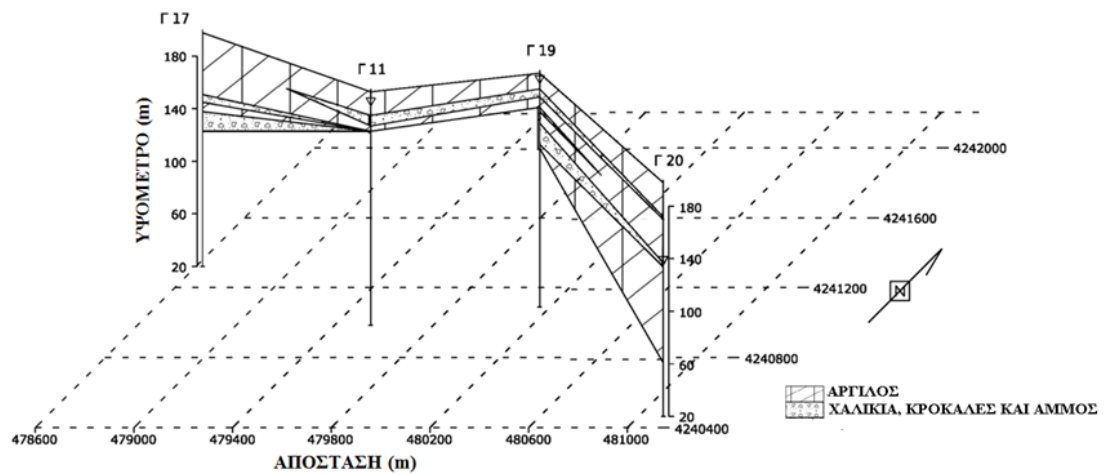


Εικόνα 11. Γεωλογικές τομές γεωτρήσεων περιοχής μελέτης, όπου X: χαλίκια, κροκάλες και άμμος, A: άργιλος και L: ασβεστόλιθος

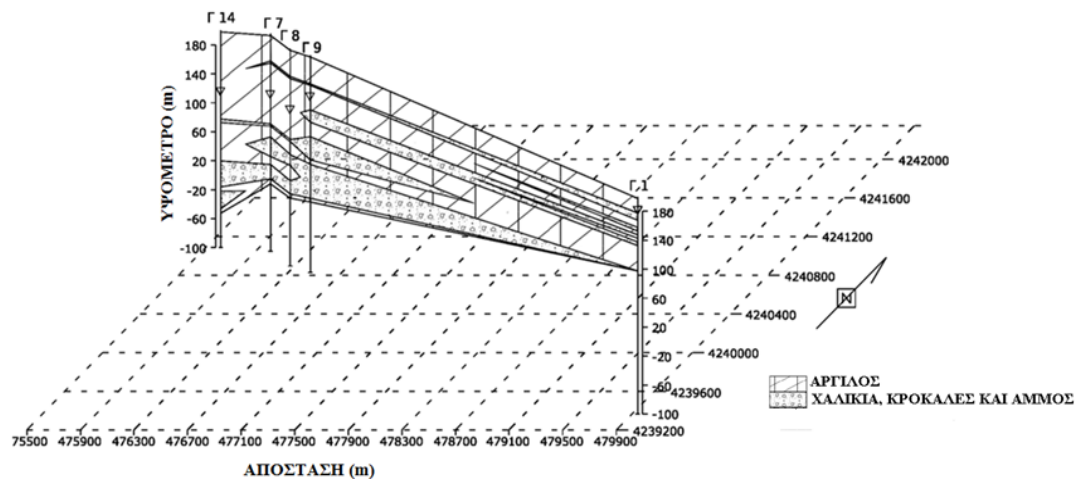
Επίσης, με τη βοήθεια του προγράμματος GEO5, δημιουργήθηκαν κάποιες τομές του εδάφους, οι οποίες βοήθησαν στην καλύτερη κατανόηση της στρωματογραφίας της περιοχής μελέτης. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η θέση των τομών στο χάρτη και στη συνέχεια η στρωματογραφία των τομών αυτών.



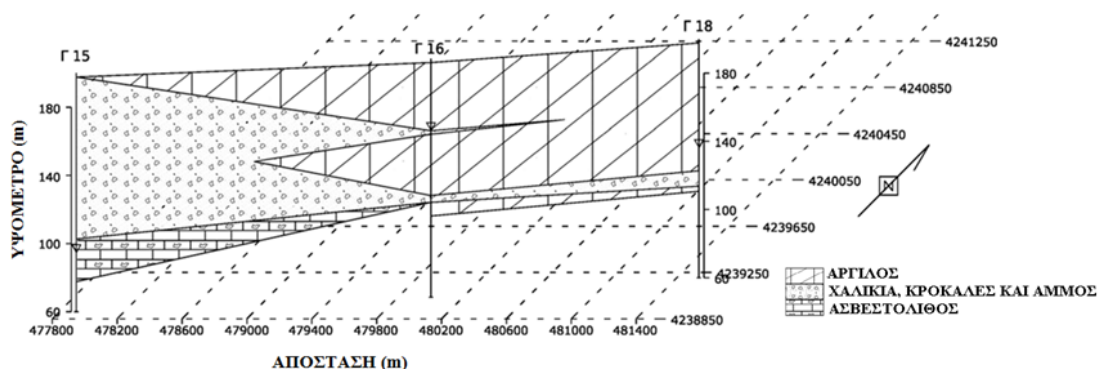
Εικόνα 12. Κάτοψη τομών



Εικόνα 13. Τομή ΑΑ'

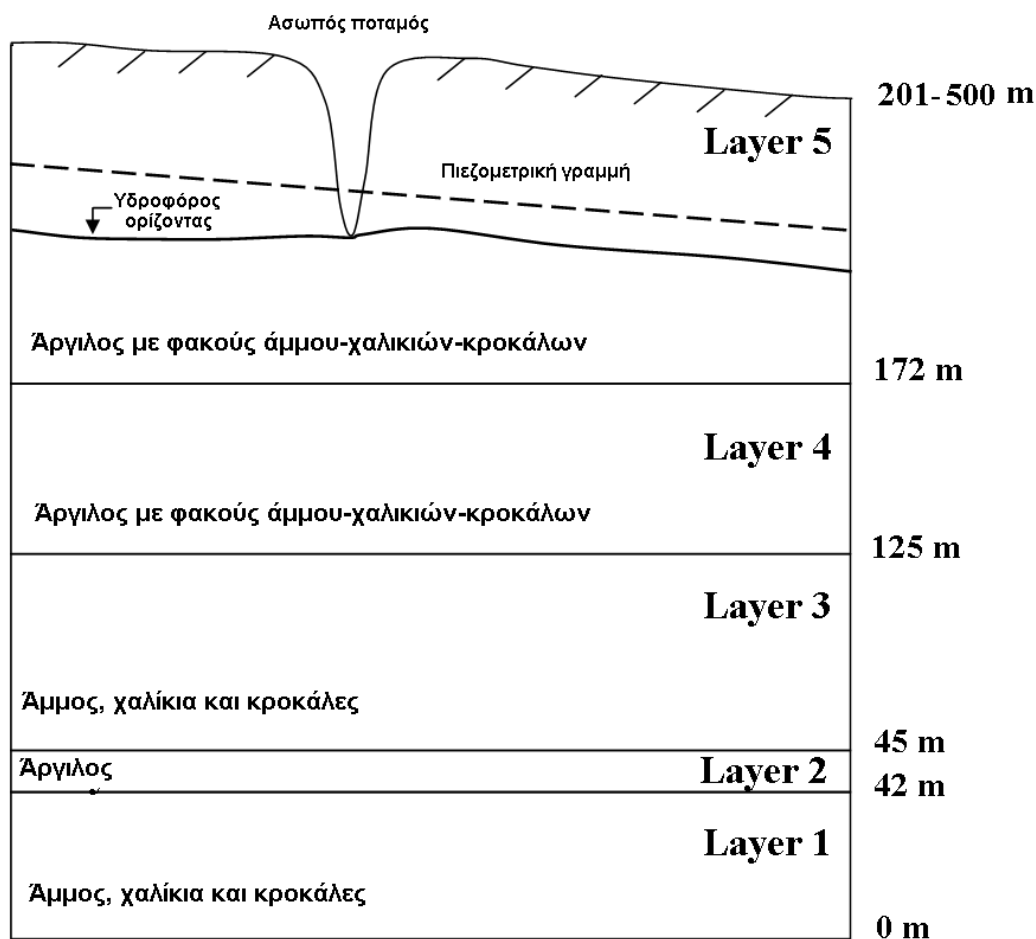


Εικόνα 14. Τομή ΒΒ'



Εικόνα 15. Τομή ΓΓ΄

Σύμφωνα με τις τομές των γεωτρήσεων, τα επίπεδα που θα χρησιμοποιηθούν στο PTC θα είναι αυτά που παρουσιάζονται στην Εικόνα (16). Η υπό μελέτη περιοχή διαχωρίζεται σε 5 στρώματα, ξεκινώντας την αρίθμηση από κάτω (πυθμένας) προς τα πάνω, έτσι ώστε να υφίσταται κάποιος διαχωρισμός ανάμεσα στις ρηχές και βαθιές γεωτρήσεις:



Εικόνα 16. Τομή του εννοιολογικού μοντέλου της περιοχής μελέτης

Σύμφωνα με το εννοιολογικό μοντέλο, στην περιοχή μελέτης υπάρχουν δύο υδροφορείς, ένας περιορισμένος (Layer 1) και ένας ελεύθερος (Layers 3, 4 και 5), που αποτελούν δύο ξεχωριστά συστήματα ροής. Ο περιορισμένος υδροφορέας, πάχους 42 μέτρων και το κατώτερο τμήμα του ελεύθερου υδροφορέα, με πάχος 80 μέτρα

(Layers 1 και 3), αποτελούνται κυρίως από άμμο (sand), χαλίκια (gravels) και κροκάλες (cobbles).

Το 2^ο στρώμα (Layer 2) έχει πάχος 3 μέτρα και αποτελείται κυρίως από άργιλο (clay), δημιουργώντας ένα αδιαπέρατο στρώμα το οποίο εμποδίζει την επικοινωνία και τη μεταφορά του νερού και των ρύπων μεταξύ των στρωμάτων 1 και 3. Στη συνέχεια, το στρώμα 4 (Layer 4) έχει πάχος 47 μέτρα και αποτελείται κυρίως από άργιλο με σημαντική ποσότητα κατά τόπους άμμου, χαλικιών και κροκάλων. Τέλος, το 5^ο στρώμα (Layer 5) έχει την ίδια γεωλογική σύσταση με το στρώμα 4, ενώ δεν έχει συγκεκριμένο πάχος καθώς το ανώτερο τμήμα του στρώματος αυτού, αποτελεί το ανάγλυφο της περιοχής το οποίο δεν είναι ομοιόμορφο. Επίσης, στο στρώμα αυτό και σε συγκεκριμένο τμήμα της περιοχής απαντάται σημαντική ποσότητα ασβεστόλιθου. Το μέγιστο υψόμετρο της περιοχής φτάνει τα 500 μέτρα.

Παρόλο που σύμφωνα με το γεωλογικό χάρτη της περιοχής παρατηρούνται στο επίπεδο αυτό πολλά στρώματα με διαφορετική υδραυλική αγωγιμότητα, στην παρούσα εργασία, τα στρώματα αυτά δεν έχουν ληφθεί υπόψη καθώς είναι επιφανειακά και θεωρήθηκαν πιο αξιόπιστα τα στοιχεία που προκύπτουν από τα τεχνικά χαρακτηριστικά των γεωτρήσεων. Τα δελτία απογραφής των τεχνικών χαρακτηριστικών των γεωτρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν για το διαχωρισμό της περιοχής μελέτης σε επίπεδα, βρίσκονται στα Παραρτήματα Β και Γ και προέρχονται από τη Γενική Διεύθυνση Εγγείων Βελτιώσεων του Υπουργείου Γεωργίας, Περιφέρεια Αττικής.

8.3 Γενικές παράμετροι μοντέλου

Οι γενικές παράμετροι του μοντέλου, οι οποίες ισχύουν για όλα τα επίπεδα και από τις οποίες εξαρτάται η λειτουργία του προγράμματος δίνονται στο παράθυρο PIEs / Edit Project Info / PTC Configuration.

Στην επιλογή «General», καθορίζεται ο αριθμός των επιπέδων (Layer number) στα οποία πιθανώς να χωρίζεται η περιοχή μελέτης, ο τύπος του πλέγματος (τριγωνικός ή τετραγωνικός), το είδος του υδροφορέα της περιοχής (περιορισμένος ή ελεύθερος) καθώς και το κριτήριο σύγκλισης σταθερής κατάστασης (steady state criterion). Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, η διαφορά της τιμής του υδραυλικού ύψους μιας χρονικής περιόδου από την αμέσως προηγούμενη θα πρέπει να είναι μικρότερη από την τιμή αυτή, όταν η κίνηση του υπογείου νερού πραγματοποιείται με σταθερή ροή.

Στην παρούσα εργασία, τα επίπεδα στα οποία χωρίζεται η περιοχή μελέτης είναι 5, ξεκινώντας από το 1^ο (κατώτερο) μέχρι το 5^ο (ανώτερο) στρώμα. Ο τύπος του πλέγματος είναι τριγωνικός, ενώ το πλέγμα αποτελείται από 2364 κόμβους και 4526 στοιχεία. Το κριτήριο σύγκλισης σταθερής κατάστασης έχει την τιμή 0.12. Στην περιοχή μελέτης υπάρχουν δύο υδροφορείς, ένας περιορισμένος και ένας ελεύθερος. Στο συγκεκριμένο παράθυρο καθορίζεται μόνο ο ελεύθερος υδροφορέας.

Στην επιλογή «Stresses», καθορίζεται ο αριθμός και η χρονική διάρκεια των περιόδων που θα εκτελέσει το μοντέλο, ο αριθμός των βημάτων που θα ακολουθήσει σε κάθε περίοδο, ο αριθμός των βημάτων που θα χρειαστεί για να εξαγάγει τα αποτελέσματα καθώς και οι εργασίες τις οποίες θα εκτελέσει σε κάθε περίοδο, όπως είναι ο υπολογισμός της ροής του υπόγειου νερού, της ταχύτητάς του και της μεταφοράς του ρύπου.

Στη συγκεκριμένη εργασία, η μοντελοποίηση πραγματοποιείται για 30 χρόνια, με κάθε έτος να αποτελείται από δύο περιόδους (χειμερινή - καλοκαιρινή). Αυτό έχει ως

αποτέλεσμα ο αριθμός των περιόδων να είναι 60 και η χρονική διάρκεια κάθε περιόδου 180 μέρες. Η χειμερινή περίοδος είναι από το Δεκέμβριο μέχρι το Μάιο, ενώ η καλοκαιρινή από τον Ιούνιο έως το Νοέμβριο. Σε όλες τις περιόδους γίνεται ο υπολογισμός της ροής, της ταχύτητας και της μεταφοράς μάζας, ενώ ο συνολικός αριθμός των βημάτων που θα εκτελέσει το μοντέλο σε κάθε περίοδο είναι 1600.

8.4 Ειδικές παράμετροι μοντέλου

Στη συνέχεια, εισάγονται οι παράμετροι του μοντέλου που είναι διαφορετικές για κάθε γεωλογικό στρώμα. Οι παράμετροι αυτές είναι, η υδραυλική αγωγιμότητα στις τρεις κατευθύνσεις του χώρου (conductivity), το πορώδες (porosity) και ο συντελεστής διασποράς στις τρεις κατευθύνσεις του χώρου (dispersivity) στην περίπτωση μεταφοράς κάποιου ρύπου.

Ο συντελεστής διασποράς είναι διαφορετικός για τα στρώματα που αποτελούνται κυρίως από άργιλο και διαφορετικός για αυτά που αποτελούνται κυρίως από άμμο, χάλικες και κροκάλες. Στο μοντέλο, ο συντελεστής διασποράς και στις τρεις κατευθύνσεις του χώρου, έλαβε την τιμή 70 στα στρώματα που αποτελούνται κυρίως από άργιλο (Layers 2, 4 και 5) και την τιμή 50 σε αυτά που αποτελούνται κυρίως από άμμο, κροκάλες και χάλικες (Layers 1 και 3) (Baker and Pavlik; New Zealand Ministry of Works and Development, 1977).

Στη συνέχεια, για κάθε γεωλογικό στρώμα ορίζεται το πορώδες και η υδραυλική αγωγιμότητα στις τρεις κατευθύνσεις. Η υδραυλική αγωγιμότητα έχει την ίδια τιμή στις κατευθύνσεις x και y, ενώ διαφοροποιείται στην κατεύθυνση z, όπου ισούται με το 10% της τιμής της υδραυλικής αγωγιμότητας στην x και y κατεύθυνση. Οι τιμές του πορώδους και της υδραυλικής αγωγιμότητας της x και y κατεύθυνσης των εδαφών από τα οποία αποτελούνται τα στρώματα του μοντέλου, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 10) και έχουν ληφθεί από τη βιβλιογραφία (New Zealand Ministry of Works and Development, 1977; Davis, 1969; Masch and Denny, 1966):

Πίνακας 10. Τιμές πορώδους και υδραυλικής αγωγιμότητας που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο

Πετρώματα	Υδραυλική Αγωγιμότητα (m/d)	Πορώδες (%)
Άργιλος	8.64×10^{-6}	55
Αμμώδης άργιλος	8.64×10^{-3}	55
Άμμος, χάλικες & κροκάλες	86.4	22
Ασβεστόλιθος	8.64	28

Έχει ληφθεί ως παραδοχή, ότι κάθε επίπεδο του μοντέλου αποτελείται από ένα μόνο γεωλογικό στρώμα, με αποτέλεσμα σε κάθε επίπεδο να εισάγεται μια τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας και πορώδους. Σε κάθε στρώμα, όμως, εμφανίζονται γεωλογικοί σχηματισμοί με αρκετά διαφορετικά χαρακτηριστικά από το επικρατές στρώμα, οι οποίοι και επηρεάζουν την υπόγεια ροή. Η εισαγωγή των γεωλογικών

αυτών σχηματισμών γίνεται με τη μορφή «φακών». Οι «φακοί» έχουν διαφορετική υδραυλική αγωγιμότητα και πορώδες από τη γενική τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας και του πορώδους του αντίστοιχου γεωλογικού στρώματος. Λόγω έλλειψης δεδομένων από τους γεωλογικούς χάρτες της περιοχής, οι «φακοί» έχουν δημιουργηθεί με βάση τα δεδομένα από τα γεωλογικά καρότα των γεωτρήσεων.

Στο 1^ο στρώμα, το οποίο αποτελείται κυρίως από άμμο, χάλικες και κροκάλες, παρατηρείται ένας φακός από αμμώδη άργιλο στη γεώτρηση 9, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

Εικόνα 17. «Φακοί» 1^{ου} στρώματος

Το 2^ο στρώμα αποτελεί ένα αδιαπέρατο στρώμα αργίλου, το οποίο δεν περιλαμβάνει «φακούς», ενώ λειτουργεί ως ανώτερο όριο για τον περιορισμένο υδροφορέα που βρίσκεται στο 1^ο στρώμα. Το 3^ο στρώμα, όπως και το 1^ο, αποτελείται κυρίως από άμμο, χάλικες και κροκάλες, ενώ έχει ένα «φακό» από αμμώδη άργιλο γύρω από τη γεώτρηση 14.

Εικόνα 18. «Φακοί» 3^{ου} στρώματος

Το 4^ο και το 5^ο στρώμα αποτελούνται κυρίως από αμμώδη άργιλο, ενώ έχουν «φακούς» από άμμο, κροκάλες και χάλικες καθώς και από ασβεστόλιθο:

Εικόνα 19. «Φακοί» 4^{ου} στρώματος

Εικόνα 20. «Φακοί» 5^{ου} στρώματος

8.5 Αρχικές Συνθήκες

Προκειμένου να επιτευχθεί η επίλυση των εξισώσεων που διέπουν το μοντέλο, είναι απαραίτητες κάποιες αρχικές τιμές (initial conditions) των μεταβλητών. Για τη ροή του υπόγειου νερού στη συγκεκριμένη περίπτωση, η μεταβλητή είναι το υδραυλικό ύψος. Το αρχικό υδραυλικό ύψος μιας γεώτρησης, προκύπτει από την αφαίρεση του βάθους της στάθμης ηρεμίας από το υψόμετρο στο οποίο βρίσκεται η γεώτρηση. Ως στάθμη ηρεμίας ορίζεται η στάθμη στην οποία βρίσκεται το νερό όταν δεν αντλείται. Επίσης, στις αρχικές τιμές του υδραυλικού ύψους προστίθεται και το ύψος του νερού στην ακτογραμμή, που όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι 200 μέτρα. Αντίθετα, οι αρχικές συνθήκες για τη μεταφορά του χρωμίου στην περιοχή μελέτης είναι μηδενικές.

8.6 Οριακές Συνθήκες Ροής

Έπειτα από την εισαγωγή των αρχικών συνθηκών στο μοντέλο, εισήχθησαν οι οριακές συνθήκες της ροής στην επιλογή BC Flow. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, οι οριακές συνθήκες που εμφανίζονται στα διάφορα στρώματα είναι μόνο 1^{ου} (σταθερό υδραυλικό ύψος) και 2^{ου} (σταθερή ροή) είδους. Σε όλα τα γεωλογικά στρώματα καθώς και σε όλες τις χρονικές περιόδους (χειμερινή - καλοκαιρινή), εμφανίζεται κατά μήκος της ακτογραμμής οριακή συνθήκη 1^{ου} είδους. Σε αυτή τη συνθήκη το υδραυλικό ύψος του νερού είναι το ύψος της στάθμης της θάλασσας και έχει τιμή 200 m.

Έπειτα από τη βαθμονόμηση του μοντέλου προσδιορίστηκαν 3 επιπλέον οριακές συνθήκες, οι οποίες βρίσκονται περιμετρικά της περιοχής μελέτης και συγκεκριμένα δυο εξ αυτών βρίσκονται στο νότιο τμήμα της περιοχής και μια στο ανατολικό άκρο της. Και οι 3 αυτές οριακές συνθήκες είναι 1^{ου} είδους. Οι τιμές των οριακών αυτών συνθηκών διαφέρουν ανάλογα με τη χρονική περίοδο στην οποία αναφέρονται, καθώς και με το εάν προσδιορίζουν τον περιορισμένο ή τον ελεύθερο υδροφορέα. Οι τιμές τους είναι υψηλότερες όταν προσδιορίζουν τον περιορισμένο υδροφορέα από ότι όταν προσδιορίζουν τον ελεύθερο. Ο περιορισμένος υδροφορέας βρίσκεται στο 1^ο στρώμα, ενώ στα στρώματα 3, 4 και 5 ο υδροφορέας είναι ελεύθερος. Το 2^ο στρώμα λειτουργεί ως αδιαπέρατο στρώμα που εμποδίζει την επικοινωνία μεταξύ 1^{ου} και 3^{ου} στρώματος. Στο στρώμα αυτό, δεν παρατηρείται υδροφορέας και επομένως δεν έχει γίνει η εισαγωγή οριακών συνθηκών σε αυτό.

Στον περιορισμένο υδροφορέα (1^ο στρώμα) και κατά τη χειμερινή περίοδο, οι τιμές των οριακών συνθηκών που ορίστηκαν ήταν οι εξής: στο νότιο-δυτικό όριο δόθηκε η τιμή των 255 m, ενώ στο νότιο-ανατολικό και ανατολικό όριο η τιμή των 260 m. Επίσης, στον υδροφορέα αυτό, έχει ορισθεί μια επιπλέον συνθήκη 1^{ου} είδους η οποία βρίσκεται στο μέσο του δυτικού τμήματος της περιοχής μελέτης και στην οποία δόθηκε η τιμή των 270 m. Για τον ελεύθερο υδροφορέα επίσης κατά τη χειμερινή περίοδο (3^ο, 4^ο και 5^ο στρώμα), οι τιμές των οριακών συνθηκών που δόθηκαν ήταν οι εξής: στο νότιο-δυτικό και νότιο-ανατολικό όριο δόθηκε η τιμή των 240 m, ενώ στο ανατολικό όριο η τιμή των 255 m.

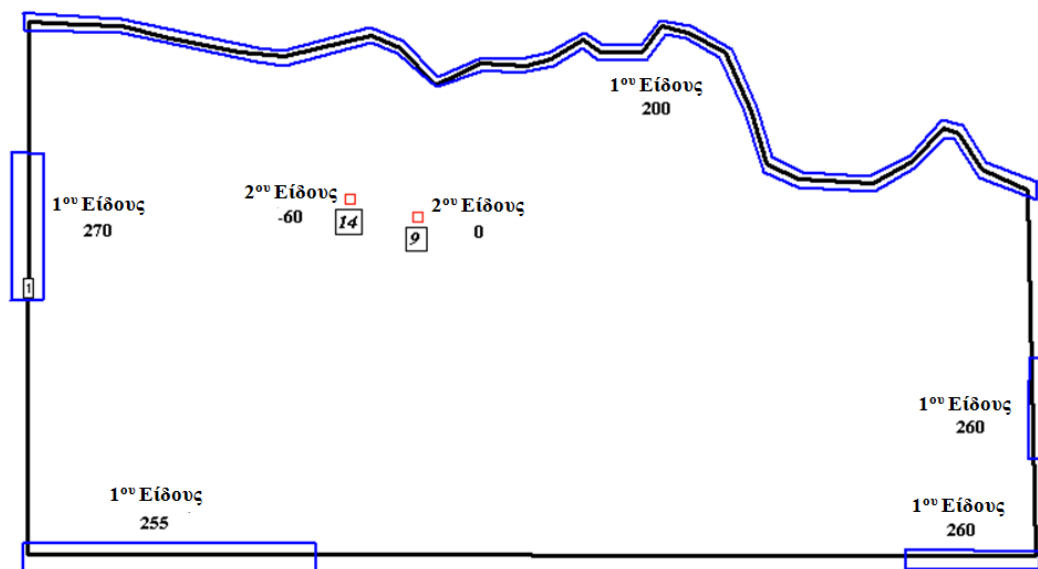
Ανάλογα με τη χρονική περίοδο οι οριακές συνθήκες διαφέρουν ως εξής:

Κατά τη χειμερινή περίοδο, οι οριακές συνθήκες είναι 2 μέτρα υψηλότερες από ότι το καλοκαίρι. Η διαφορά αυτή οφείλεται στη μεγαλύτερη εισροή νερού το χειμώνα, πιθανώς λόγω του λιώσιματος των χιονιών από τα βουνά, της μεγαλύτερης βροχόπτωσης και της έλλειψης άντλησης από τις γεωτρήσεις. Παράλληλα, κατά τη χειμερινή περίοδο και μόνο στο 5^ο στρώμα, εμφανίζεται ο ποταμός Ασωπός (συνθήκη

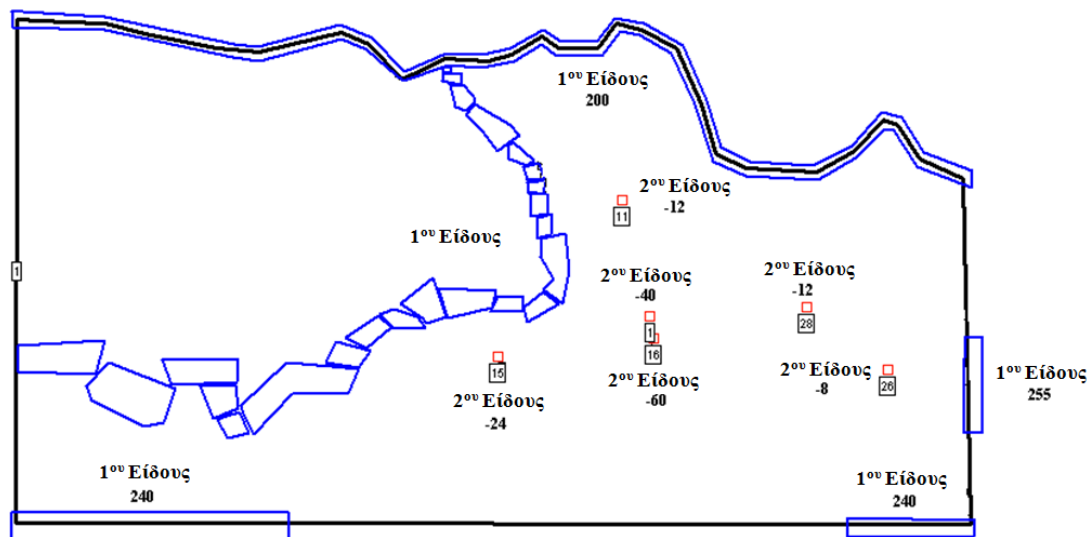
1^{ου} είδους). Στο ποτάμι το ύψος του νερού κυμαίνεται από 40-50 cm κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, ενώ το ύψος αυτό του νερού διαφοροποιείται κατά μήκος του ποταμού ανάλογα με τη μορφολογία του εδάφους. Για την εισαγωγή της συγκεκριμένης οριακής συνθήκης, το ποτάμι χωρίστηκε σε μικρά τμήματα, στα οποία η τιμή του υδραυλικού ύψους του νερού που δόθηκε μειώνεται ομαλά, ξεκινώντας από την τιμή των 245 m στο σημείο όπου το ποτάμι συναντά το δυτικό όριο της περιοχής μελέτης και καταλήγοντας στην τιμή των 200 m στο δέλτα του ποταμού.

Αντιθέτως, κατά την καλοκαιρινή περίοδο, λειτουργούν οι γεωτρήσεις της περιοχής αλλά μόνο για 2 ώρες την ημέρα, ενώ ο ποταμός λόγω του κλίματος, σχεδόν στερεύει με αποτέλεσμα να μην τροφοδοτεί τα υπόγεια νερά. Οι γεωτρήσεις αποτελούν οριακές συνθήκες 2^{ου} είδους και λαμβάνουν τιμή ίση με την παροχή εκμετάλλευσης για 2 ώρες (Παράρτημα Δ). Η τιμή αυτή είναι αρνητική καθώς γίνεται άντληση του νερού από το σύστημα των υπογείων υδάτων.

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται οι οριακές συνθήκες κατά τη χειμερινή περίοδο, στον περιορισμένο (στρώμα 1) και στον ελεύθερο (στρώμα 5) υδροφορέα. Παράλληλα, στις εικόνες αυτές απεικονίζονται οι γεωτρήσεις που λειτουργούν κατά την καλοκαιρινή περίοδο στα αντίστοιχα στρώματα.



Εικόνα 21. Οριακές συνθήκες περιορισμένου υδροφορέα κατά τη χειμερινή περίοδο (1^ο στρώμα)



Εικόνα 22. Οριακές συνθήκες ελεύθερου υδροφορέα κατά τη χειμερινή περίοδο (5^ο στρώμα)

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι στο στρώμα 3 βρίσκονται οι γεωτρήσεις 7, 8, 18, 20, 22, ενώ στο στρώμα 4 οι γεωτρήσεις 17, 19, 26 και 27 και λειτουργούν κατά την καλοκαιρινή περίοδο για 2 ώρες την ημέρα με τις παροχές εκμετάλλευσης που δίνονται στο Παράρτημα Δ.

8.7 Οριακές Συνθήκες Μεταφοράς Ρύπου

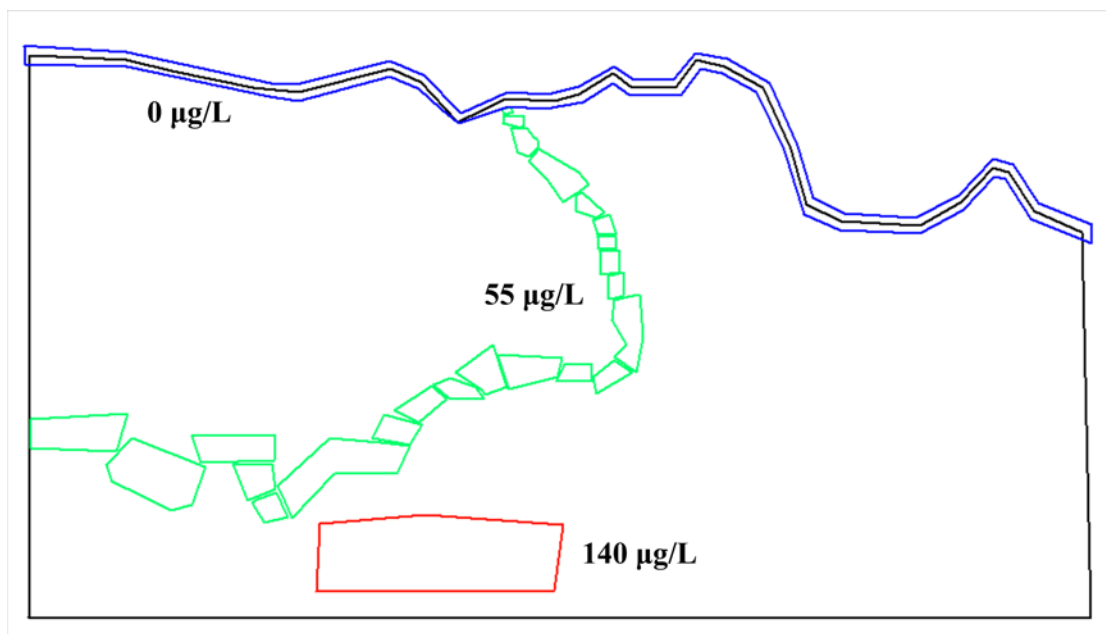
Οι οριακές συνθήκες της ρύπανσης εισάγονται στην επιλογή BC Transport σε κάθε ένα από τα στρώματα του μοντέλου. Η περιοχή μελέτης, ρυπαίνεται από χρώμιο, μέσω ενός πετρώματος σερπεντινίτη (γηγενής ρύπανση) και μέσω του ποταμού Ασωπού (ανθρωπογενής ρύπανση).

Το πέτρωμα σερπεντινίτη, είναι ένα επιφανειακό πέτρωμα το οποίο με την πάροδο των χρόνων αποσθλώνεται και εισχωρεί κάτω από τα υπόλοιπα πετρώματα της περιοχής, με κλίση 20°. Στο μοντέλο, το πέτρωμα ξεκινάει περίπου από το μέσο του νοτίου ορίου της περιοχής μελέτης και κατευθύνεται βόρεια προς τη θάλασσα με κλίση 20°. Με βάση αυτή την κλίση, το πέτρωμα συναντά τα διάφορα στρώματα του μοντέλου σε διαφορετικό σημείο κάθε φορά. Παρόλα αυτά, το πέτρωμα δεν εμφανίζεται στον περιορισμένο υδροφορέα (Layer 1), καθώς από μετρήσεις πεδίου που έχουν γίνει δεν έχουν βρεθεί αξιοσημείωτες συγκεντρώσεις χρωμίου σε αυτόν, με αποτέλεσμα να θεωρείται ότι το πέτρωμα δεν έχει εισχωρήσει τόσο βαθιά. Από εργαστηριακές αναλύσεις σε δείγματα που περιέχουν το συγκεκριμένο πέτρωμα, προκύπτει ότι η ποσότητα του χρωμίου που μπορεί να εκχυλιστεί στο νερό από το πέτρωμα κυμαίνεται μεταξύ των ορίων 100 – 170 µg/L. Επομένως, έπειτα από τη βαθμονόμηση του μοντέλου και λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των χημικών αυτών αναλύσεων, έχει θεωρηθεί ότι το πέτρωμα έχει συγκέντρωση χρωμίου 140 µg/L.

Παράλληλα, η εμφάνιση του ποταμού Ασωπού κατά τη χειμερινή περίοδο δημιουργεί μια επιπλέον πηγή ρύπανσης. Έπειτα από τη βαθμονόμηση του μοντέλου υπολογίστηκε ότι στο ποταμό Ασωπό η συγκέντρωση του χρωμίου είναι 55 µg/L.

Τέλος, από χημικές αναλύσεις που έχουν γίνει στις εκβολές του ποταμού Ασωπού αλλά και σε όλη την ακτογραμμή της περιοχής μελέτης, προέκυψε ότι η συγκέντρωση του χρωμίου στην ακτογραμμή είναι 0 µg/L. Επομένως, σε όλα τα επίπεδα (Layers)

του μοντέλου, έχει τοποθετηθεί μια επιπλέον συνθήκη για τη ρύπανση, που δηλώνει ότι στην ακτογραμμή η συγκέντρωση του χρωμίου είναι 0 $\mu\text{g/L}$.



Εικόνα 23. Οριακές συνθήκες συγκέντρωσης χρωμίου (5^ο στρώμα)

8.8 Βροχόπτωση

Για τον προσδιορισμό της τιμής της βροχόπτωσης που εισήχθηκε στο μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής μελέτης που δίνονται από τους μετεωρολογικούς σταθμούς της Τανάγρας για το χρονικό διάστημα 1986-1992 και της Χαλκίδας για τα έτη 2006 και 2007. Τα μετεωρολογικά δεδομένα του σταθμού του Τατοΐου για τη χρονική περίοδο 1956-1997 δεν χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο καθώς η μοντελοποίηση έγινε για χρονικό διάστημα 30 χρόνων, δηλαδή κατά την περίοδο 1978-2008.

Παρόλα αυτά, από τα αποτελέσματα και των τριών σταθμών προκύπτει ότι με το πέρασμα των χρόνων η μέση ετήσια βροχόπτωση σταδιακά αυξάνεται. Έτσι, λόγω απουσίας μετεωρολογικών δεδομένων για το ενδιάμεσο χρονικό διάστημα 1998-2005, λαμβάνεται μια ενδιάμεση τιμή μεταξύ των τιμών 447.8 mm (Σταθμός Τανάγρας) και 511.65 mm (Σταθμός Χαλκίδας). Ως μέση ετήσια βροχόπτωση για το ενδιάμεσο αυτό χρονικό διάστημα λήφθηκε η τιμή των 480 mm. Τελικά, στο μοντέλο χρησιμοποιείται ο μέσος όρος των τιμών που μόλις αναφέρθηκαν και ισούται με την τιμή των 480 mm=0.480 m.

Από τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης προκύπτει ότι, στην επιφάνεια του εδάφους κυριαρχεί κυρίως η άργιλος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να παρατηρείται διήθηση σε πολύ μικρό ποσοστό. Έτσι, έγινε η παραδοχή ότι η διήθηση που πραγματοποιείται στη μελετηθείσα περιοχή είναι της τάξης του 5.5% της βροχόπτωσης. Η υπόλοιπη ποσότητα του νερού που δεν διηθείται, είτε απορρέει επιφανειακά, είτε απορροφάται από τα φυτά, είτε εξατμίζεται.

Επομένως, κατά τη χειμερινή περίοδο, η ποσότητα των υδάτων που καταλήγει στους υπογείους υδροφορείς λόγω βροχοπτώσεων είναι:

$$0.480\text{m} \cdot 5.5\% = 0.026 \frac{\text{m}}{\text{yr}}$$

$$0.026\text{m} / 180\text{d} = 0.00014 \frac{\text{m}}{\text{d}}$$

Στην περιοχή μελέτης, κατά την καλοκαιρινή περίοδο δεν παρατηρούνται σημαντικές βροχοπτώσεις και για το λόγο αυτό στο μοντέλο η τιμή της βροχόπτωσης κατά την περίοδο αυτή είναι μηδενική.

8.9 Βαθμονόμηση μοντέλου

➤ Με βάση το υδραυλικό ύψος

Έπειτα από την εισαγωγή των δεδομένων στο μοντέλο, πραγματοποιείται η βαθμονόμηση του προκειμένου να επιτευχθεί επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων και αποφυγή λανθασμένων συμπερασμάτων. Παρόλο που υπάρχουν στοιχεία για 43 γεωτρήσεις της περιοχής μελέτης, τα στοιχεία αυτά δεν είναι επαρκή με αποτέλεσμα να μην μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλες οι γεωτρήσεις για τη βαθμονόμηση του μοντέλου.

Η βαθμονόμηση αποτελεί μια διαδικασία προσομοίωσης των δεδομένων που εισάγονται στο μοντέλο με τα δεδομένα που λαμβάνονται από το πεδίο. Για τη βαθμονόμηση του μοντέλου με βάση τη ροή του υπόγειου νερού, γίνεται σύγκριση των υδραυλικών υψών που προέκυψαν κατά την εκτέλεση του προγράμματος, με τα αρχικά υδραυλικά ύψη των γεωτρήσεων που είχαν μετρηθεί στο πεδίο. Προκειμένου να γίνει η προσομοίωση των υδραυλικών υψών του μοντέλου με αυτά του πεδίου, γίνονται αλλαγές στην τιμή, στο μέγεθος και στη θέση των οριακών συνθηκών και των «φακών» καθώς και στην τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας των διαφόρων γεωλογικών στρωμάτων. Η βαθμονόμηση της ροής έγινε για τη χειμερινή περίοδο και τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την περίοδο αυτή, εισήχθησαν ως αρχικές συνθήκες στην καλοκαιρινή περίοδο. Η μοντελοποίηση της περιοχής έγινε για συνολικό χρονικό διάστημα 30 χρόνων, καθώς το μεγαλύτερο μέρος των βιομηχανικών μονάδων που βρίσκονται εγκατεστημένες στην περιοχή μελέτης ξεκίνησαν τη λειτουργία τους μέσα στην περίοδο αυτή.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 11), παρουσιάζονται οι γεωτρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του μοντέλου με βάση τη ροή, το στρώμα στο οποίο βρίσκεται η κάθε γεώτρηση, οι τιμές των υδραυλικών υψών των γεωτρήσεων στο πεδίο, οι αντίστοιχες τιμές του μοντέλου καθώς και η μεταξύ τους διαφορά κατά απόλυτη τιμή. Τα αποτελέσματα του υδραυλικού ύψους του μοντέλου προέρχονται από την τελευταία καλοκαιρινή περίοδο του χρονικού διαστήματος προσομοίωσης.

Πίνακας 11. Υδραυλικά ύψη γεωτρήσεων μοντέλου - πεδίου

Όνομα γεώτρησης	Στρώμα γεώτρησης (Layer)	Υδραυλικό ύψος πεδίου (m)	Υδραυλικό ύψος μοντέλου (m)	Διαφορά (m)
1	5	211	215	4
2	5	214	215	1
6	4	215	209	6
7	3	201	209	8
8	3	217	209	8
9	1	220	216	4
10	5	206	205	1
13	5	242	201	41
16	5	215	215	0
18	3	203	218	15
19	4	200	205	5
22	3	253	250	3

Από τον παραπάνω πίνακα, παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των υδραυλικών υψών που προκύπτουν από το μοντέλο και αυτών που έχουν εισαχθεί σε αυτό από τις μετρήσεις πεδίου. Στις περισσότερες γεωτρήσεις η διαφορά είναι μικρότερη από 5 μέτρα και σε κάποιες μικρότερη από 10 μέτρα. Παρόλα αυτά, υπάρχουν και δύο γεωτρήσεις των οποίων η διαφορά είναι μεγαλύτερη από 10 μέτρα (Γεωτρήσεις 13 και 18). Οι διαφορές αυτές είναι αξιοσημείωτες, όμως λόγω της τοποθεσίας των γεωτρήσεων, δεν μπορούν να μειωθούν χωρίς να δημιουργήσουν σημαντικές μεταβολές στα υδραυλικά ύψη των υπόλοιπων γεωτρήσεων. Συγκεκριμένα, η γεώτρηση 13 βρίσκεται σχεδόν πάνω στην ακτογραμμή με αποτέλεσμα να μην μπορεί να μειωθεί περαιτέρω, καθώς η οριακή συνθήκη της ακτογραμμής δεν μπορεί να λάβει άλλη τιμή εκτός της τιμής 200. Παράλληλα, η γεώτρηση 18 βρίσκεται κοντά στις γεωτρήσεις 1, 2 και 16 και οποιαδήποτε αλλαγή για βελτίωση της τιμής της γεώτρησης 18, επηρεάζει τις υπόλοιπες τρεις γεωτρήσεις αρνητικά. Επομένως, καθώς η πλειοψηφία των υδραυλικών υψών των γεωτρήσεων προσομοιάζεται από το μοντέλο, η βαθμονόμηση της ροής θεωρείται ικανοποιητική.

➤ Με βάση τη συγκέντρωση εξασθενούς χρωμίου

Στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη βαθμονόμηση της ροής γίνεται βαθμονόμηση του μοντέλου με βάση τη ρύπανση της περιοχής από το εξασθενές χρώμιο. Για τη βαθμονόμηση του μοντέλου με βάση τη ρύπανση, γίνεται σύγκριση των τιμών της συγκέντρωσης του χρωμίου που

προέκυψαν κατά την εκτέλεση του μοντέλου με αυτές που προέκυψαν από τις μετρήσεις στο πεδίο το Νοέμβριο του 2008 (καλοκαιρινή περίοδος). Η σύγκριση των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 12).

Πίνακας 12. Συγκέντρωση χρωμίου μοντέλου – πεδίου περιόδου Νοεμβρίου 2008

Όνομα γεώτρησης	Στρώμα γεώτρησης (Layer)	Τιμή Cr μοντέλου (μg/L)	Τιμή Cr πεδίου (μg/L)
1	5	0.06	25.81
5	5	0.10	0.01
7	3	31.80	31.56
8	3	48.43	63.45
9	1	1.59	0.01
31	5	54.95	55.98
32	5	0.00	0.01
36	5	0.00	0.01
39	5	0.10	0.18
40	5	54.95	50.32
41	5	0.25	0.18
42	5	54.95	45.25
43	3	116.08	120.00

Από τον παραπάνω πίνακα γίνεται φανερό ότι το μοντέλο προσομοιάζει αρκετά καλά τις μετρήσεις της συγκέντρωσης του εξασθενούς χρωμίου που έχουν ληφθεί κατά την περίοδο αυτή. Από τις 13 γεωτρήσεις του πίνακα, μόνο η γεώτρηση 1 παρουσιάζει σημαντική διαφορά στις συγκεντρώσεις χρωμίου μεταξύ πεδίου και μοντέλου. Έτσι, η βαθμονόμηση του μοντέλου με βάση τη συγκέντρωση του εξασθενούς χρωμίου θεωρείται επιτυχής.

Η επιλογή της χρονικής περιόδου του Νοεμβρίου 2008 έγινε ανάμεσα σε τρεις άλλες χρονικές περιόδους για τις οποίες υπάρχουν μετρήσεις πεδίου. Οι υπόλοιπες χρονικές περίοδοι είναι οι Φεβρουάριος και Μάιος 2008 και ο Φεβρουάριος 2009. Το μοντέλο προσομοίωσε καλύτερα τα αποτελέσματα της περιόδου του Νοεμβρίου 2008 και για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές της συγκέντρωσης του εξασθενούς χρωμίου της περιόδου αυτής για τη βαθμονόμηση του.

Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης του μοντέλου κατά τις χρονικές περιόδους που προαναφέρθηκαν, παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις στις μετρήσεις της συγκέντρωσης του εξασθενούς χρωμίου ορισμένων γεωτρήσεων. Στις γεωτρήσεις αυτές, οι τιμές του εξασθενούς χρωμίου κυμαίνονται από περίπου 2 μg/L μέχρι περίπου 50 μg/L.

Συγκεκριμένα, κατά την περίοδο του Νοεμβρίου 2008 παρατηρούνται υψηλές συγκεντρώσεις εξασθενούς χρωμίου στα πηγάδια 1, 7 και 31, οι οποίες όμως εξαφανίζονται το Φεβρουάριο του 2009. Καθώς το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται κατά τη χειμερινή περίοδο κατά την οποία παρατηρούνται υψηλές τιμές βροχόπτωσης και καθώς οι γεωτρήσεις 1 και 31 είναι ρηχές, μια πιθανή εξήγηση είναι ότι το χρώμιο

διαλύεται σε ένα αρκετά μεγαλύτερο όγκο νερού, καθώς η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα ανεβαίνει κατά το χρονικό αυτό διάστημα, καταλήγοντας σε μειωμένα επίπεδα ρύπανσης. Παρόλα αυτά, η εξήγηση αυτή δεν καλύπτει τη διακύμανση στη γεώτρηση 7 καθώς η γεώτρηση αυτή αντλεί από ένα ενδιάμεσο βάθος (Layer 3). Μια άλλη πιθανή εξήγηση είναι ότι μπορεί να υπάρχουν επιπρόσθετες διαρροές λυμάτων με εξασθενές χρώμιο, για μικρά χρονικά διαστήματα, οι οποίες όμως δεν λήφθηκαν υπόψη ως πηγές ρύπανσης στο μοντέλο. Αυτό μπορεί να εξηγήσει το γεγονός ότι το μοντέλο δεν μπόρεσε να προσομοιώσει την υψηλή συγκέντρωση εξασθενούς χρωμίου της γεώτρησης 1 κατά την περίοδο του Νοεμβρίου 2008. Μια τοπική πηγή μπορεί να υπάρχει σε παρακείμενη τοποθεσία της περιοχής μελέτης η οποία δημιουργεί τη ρύπανση που παρατηρείται στο πηγάδι αυτό.

9 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

9.1 Προσδιορισμός υπόγειας ροής νερού

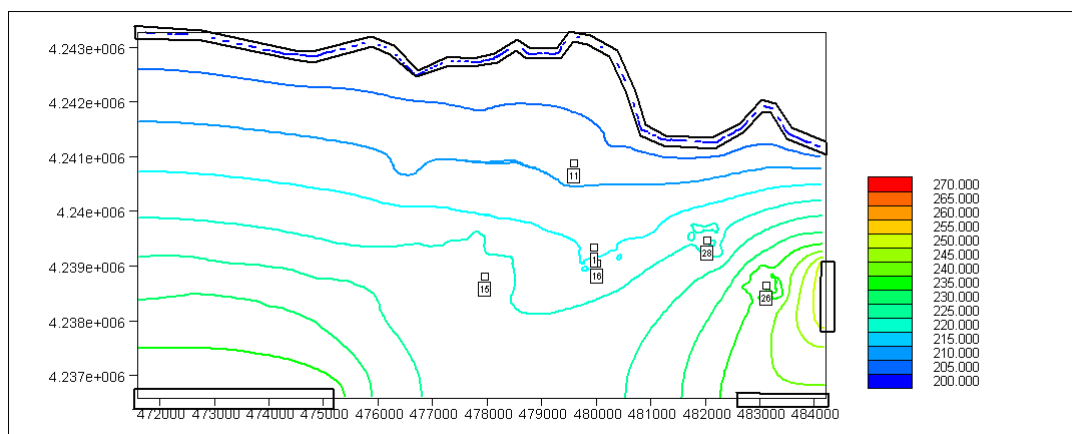
Έπειτα από τη βαθμονόμηση του μοντέλου με βάση το υδραυλικό ύψος, πραγματοποιείται η προσομοίωση των υπογείων υδάτων της περιοχής, κατά την καλοκαιρινή και τη χειμερινή περίοδο.

Κατά την καλοκαιρινή περίοδο, τα υδραυλικά ύψη και οι ταχύτητες του υπόγειου νερού επηρεάζονται από τη γεωλογία της περιοχής μελέτης και από τη λειτουργία των γεωτρήσεων της. Αντίθετα, κατά τη χειμερινή περίοδο, η κίνηση του υπόγειου νερού (υδραυλικό ύψος και ταχύτητα) επηρεάζεται από την παρουσία του ποταμού Ασωπού καθώς και από τη βροχόπτωση που παρατηρείται κατά την περίοδο αυτή. Επίσης, το χειμώνα οι γεωτρήσεις δεν λειτουργούν, γεγονός που επηρεάζει ως ένα βαθμό την κίνηση του νερού κατά την περίοδο αυτή.

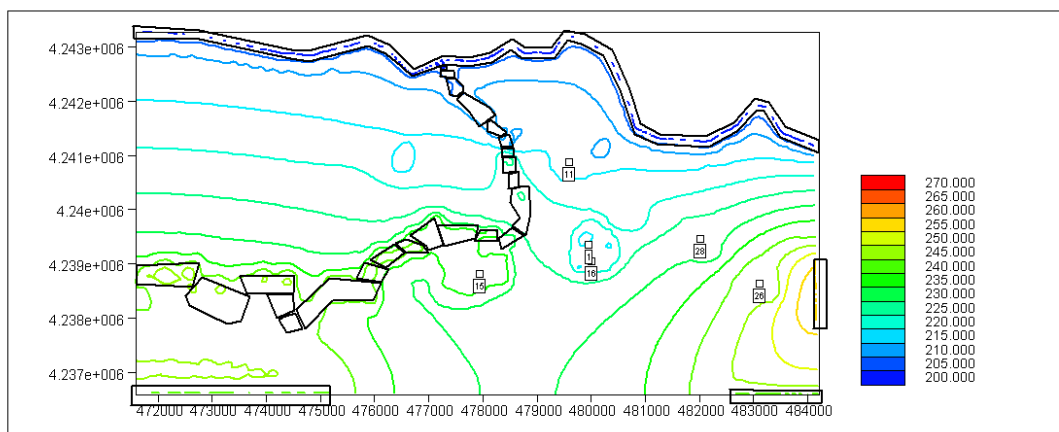
Στα γραφήματα ροής που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα υδραυλικά ύψη και οι ταχύτητες του υπόγειου νερού στα τρία βασικά στρώματα του μοντέλου (Layers 1, 3 και 5) μετά το πέρας της θερινής και χειμερινής περιόδου του τελευταίου έτους του χρόνου προσομοίωσης.

➤ Υδραυλικά ύψη 5^{ου} στρώματος

Στα παρακάτω διαγράμματα, παρουσιάζονται οι πιεζομετρικοί χάρτες του 5^{ου} στρώματος για το καλοκαίρι και το χειμώνα:



Εικόνα 24. Υδραυλικά ύψη (σε μέτρα) 5^{ου} στρώματος για το καλοκαίρι



Εικόνα 25. Υδραυλικά ύψη (σε μέτρα) 5^{ου} στρώματος για το χειμώνα

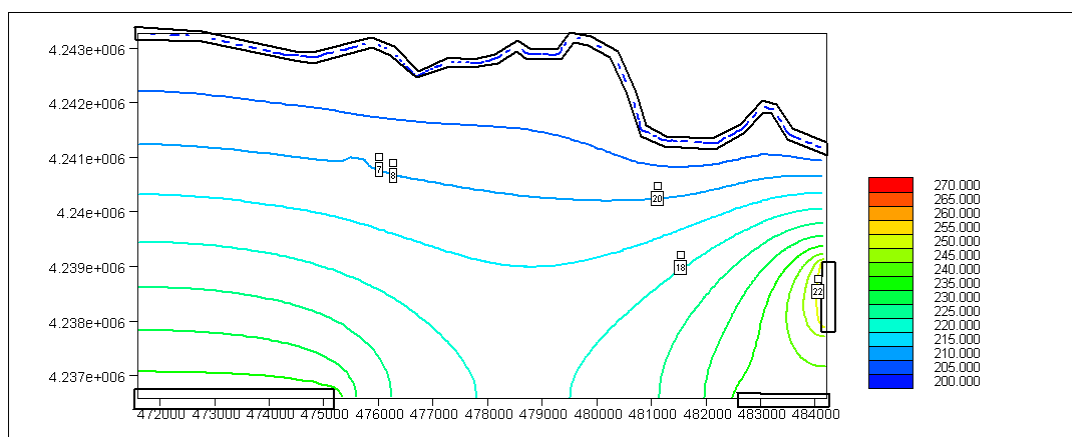
Όπως φαίνεται και από τα δύο διαγράμματα, το υδραυλικό ύψος του υπόγειου ύδατος παρουσιάζει μια σχετικά ομαλή μείωση, με τις μέγιστες τιμές να παρατηρούνται στο νότιο και ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης και τις ελάχιστες στο βόρειο τμήμα της. Σύμφωνα με τις τιμές αυτές, γίνεται φανερό ότι το υπόγειο νερό κινείται από το νότιο και ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης προς το βόρειο τμήμα της. Η κίνηση αυτή δικαιολογείται από τη γεωμορφολογία της περιοχής, καθώς στο νότιο και ανατολικό τμήμα της βρίσκονται λόφοι, με το υψόμετρο τους να κυμαίνεται μεταξύ 300-500 m, ενώ στο βόρειο τμήμα της περιοχής βρίσκεται η ακτογραμμή του Ευβοϊκού κόλπου με υψόμετρο 200 m. Έτσι, οι τιμές των υδραυλικών υψών που παρατηρούνται στο ανώτερο στρώμα του ελεύθερου υδροφορέα κυμαίνονται μεταξύ 255-200 m. Από την κατανομή των υδραυλικών υψών εξάγεται το συμπέρασμα πως ο υδροφορέας τροφοδοτείται με νερό από το νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης.

Μεταξύ των δύο χρονικών περιόδων παρατηρείται διαφορά στις τιμές του υδραυλικού ύψους του νερού. Κατά τη χειμερινή περίοδο οι τιμές του υδραυλικού ύψους κοντά στα όρια της περιοχής μελέτης και συγκεκριμένα κοντά στις οριακές συνθήκες είναι αυξημένες λόγω του εμπλουτισμού του ελεύθερου υδροφορέα από τις βροχοπτώσεις. Επιπλέον, υπάρχει έντονη διαφοροποίηση του υδραυλικού ύψους λόγω της παρουσίας του ποταμού Ασωπού που εμφανίζεται στην περιοχή μελέτης κατά τη χειμερινή περίοδο και μόνο. Η μορφή των ισοδυναμικών γραμμών δείχνει το πώς επηρεάζεται η ροή του υπόγειου νερού από το ποτάμι, με τη μείωση των υδραυλικών υψών να ακολουθεί τη ροή του ποταμού, με κατεύθυνση από τα νοτιοδυτικά προς τα βορειοανατολικά της περιοχής μελέτης.

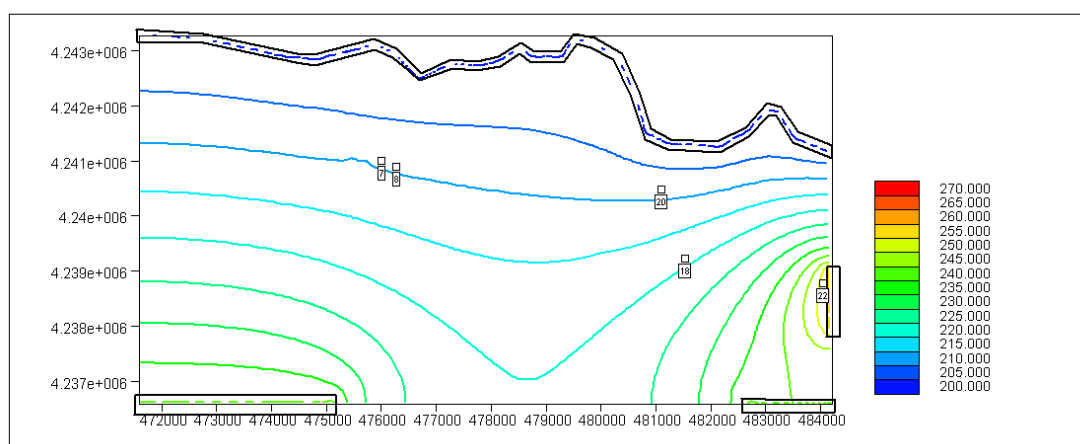
Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι στα σημεία που υπάρχουν οι γεωτρήσεις το υδραυλικό ύψος μειώνεται, επηρεάζοντας τη μορφή των ισοδυναμικών γραμμών.

➤ Υδραυλικά ύψη 3^{ου} στρώματος

Τα διαγράμματα ροής των υδραυλικών υψών που ακολουθούν, παρουσιάζουν την κίνηση του νερού στο 3^ο στρώμα, στο κατώτερο δηλαδή στρώμα του ελεύθερου υδροφορέα.



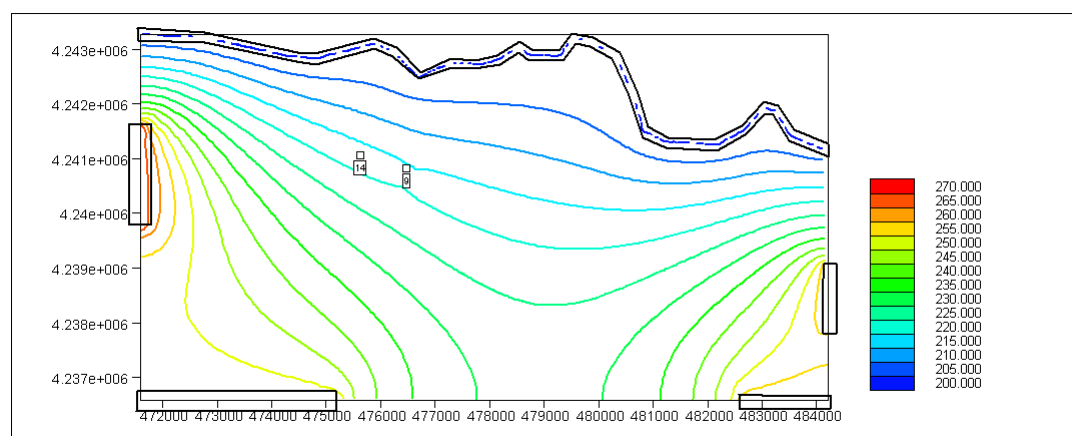
Εικόνα 26. Υδραυλικά ύψη (σε μέτρα) 3^{ου} στρώματος για το καλοκαίρι



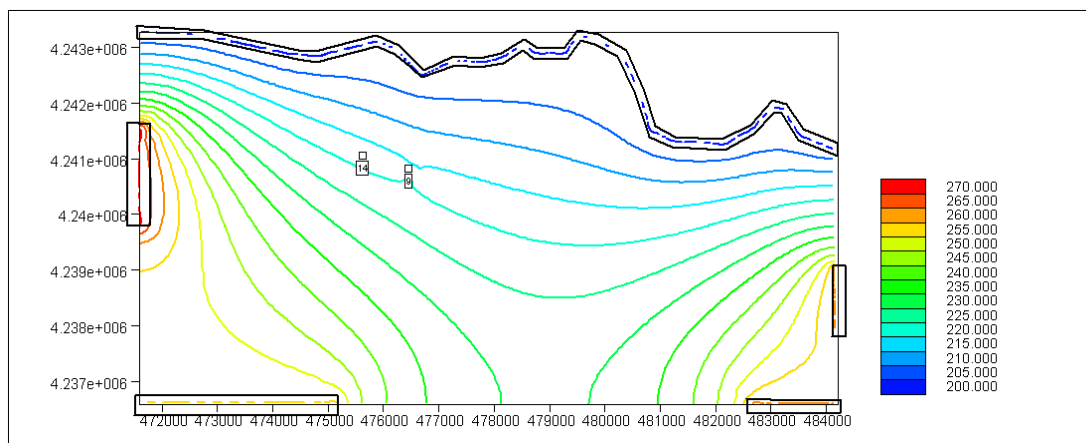
Εικόνα 27. Υδραυλικά ύψη (σε μέτρα) 3^{ου} στρώματος για το χειμώνα

Όπως στο 5^ο στρώμα, έτσι και σε αυτό, υπάρχουν κάποιες διαφορές στις τιμές του υδραυλικού ύψους στα διάφορα σημεία της περιοχής μεταξύ των δύο περιόδων, με τις τιμές του υδραυλικού ύψους να είναι υψηλότερες κατά τη χειμερινή περίοδο. Οι διαφορές αυτές δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικές καθώς το ύψος του νερού σε αυτό το στρώμα, δεν επηρεάζεται καθόλου από τον ποταμό Ασωπό. Παράλληλα, οι γραμμές ροής είναι αρκετά ομαλοποιημένες, συμπεριφορά που δικαιολογείται από την ομοιογενή γεωλογική σύσταση του στρώματος.

➤ Υδραυλικά ύψη 1^{ου} στρώματος



Εικόνα 28. Υδραυλικά ύψη (σε μέτρα) 1^{ου} στρώματος για το καλοκαίρι

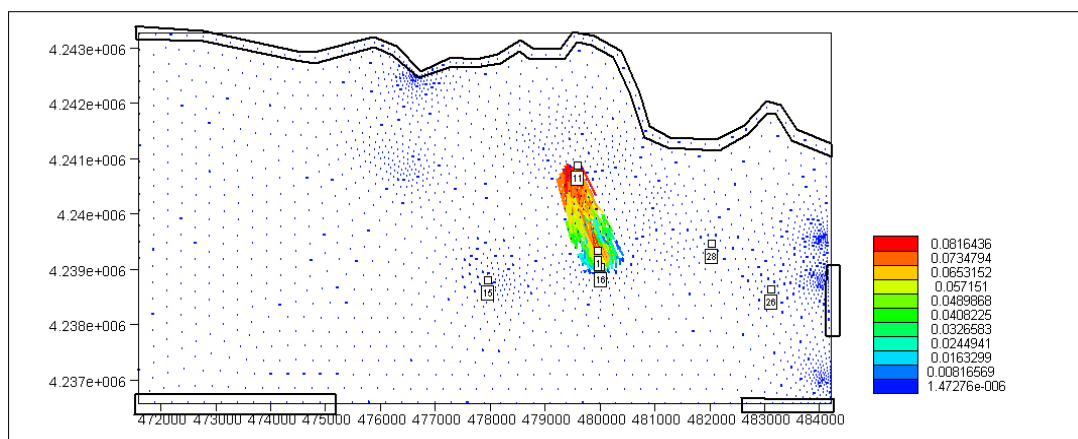


Εικόνα 29. Υδραυλικά ύψη (σε μέτρα) 1^{ου} στρώματος για το χειμώνα

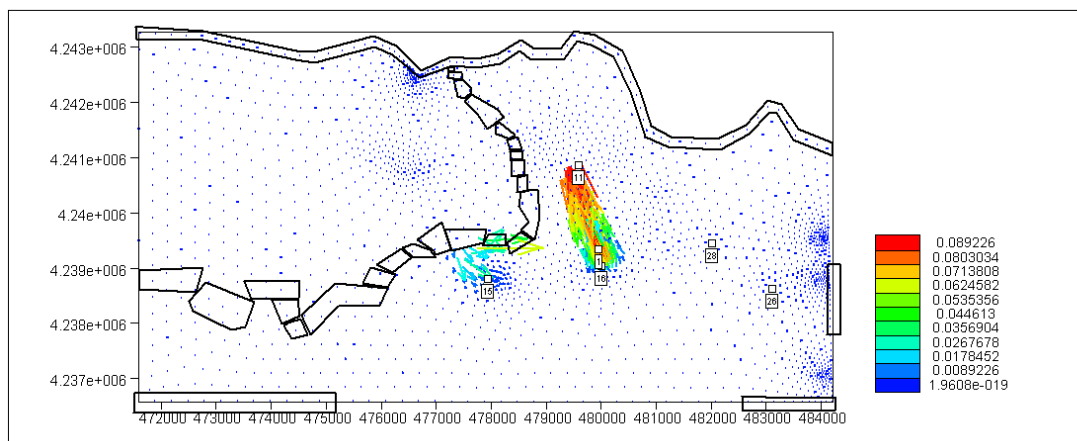
Στις παραπάνω εικόνες (Εικόνες 27 και 28), παρουσιάζεται ο πιεζομετρικός χάρτης του περιορισμένου υδροφορέα κατά την καλοκαιρινή και χειμερινή περίοδο. Όπως και στα προαναφερθέντα στρώματα, το νερό κινείται από τα νότια προς τα βόρεια της περιοχής μελέτης. Παράλληλα, στο στρώμα αυτό υπάρχει και σχετικά μεγάλη εισροή νερού από το δυτικό όριο της περιοχής μελέτης, εισροή που δεν παρατηρείται στον ελεύθερο υδροφορέα και η οποία προέκυψε από τη βαθμονόμηση του μοντέλου. Λόγω της πίεσης που υφίσταται το νερό που βρίσκεται αποθηκευμένο στον περιορισμένο υδροφορέα, το υδραυλικό ύψος του νερού στο στρώμα αυτό λαμβάνει υψηλότερες τιμές από τις τιμές του ελεύθερου υδροφορέα, με τη μέγιστη τιμή να φτάνει τα 270 m. Η ιδιαίτερα υψηλή αυτή τιμή παρατηρείται στο δυτικό όριο της περιοχής μελέτης. Ακόμα και στα υπόλοιπα όρια της περιοχής μελέτης, οι τιμές του υδραυλικού ύψους στον περιορισμένο υδροφορέα είναι περίπου 10 μέτρα υψηλότερες από τις αντίστοιχες του ελεύθερου υδροφορέα.

➤ Ταχύτητες 5^{ου} στρώματος

Στις εικόνες που ακολουθούν, παρουσιάζονται οι ταχύτητες του υπόγειου νερού (m/d) στο ανώτερο στρώμα του ελεύθερου υδροφορέα.



Εικόνα 30. Ταχύτητες (σε m/d) 5^{ου} στρώματος για το καλοκαίρι



Εικόνα 31. Ταχύτητες (σε m/d) 5^{ου} στρώματος για το χειμώνα

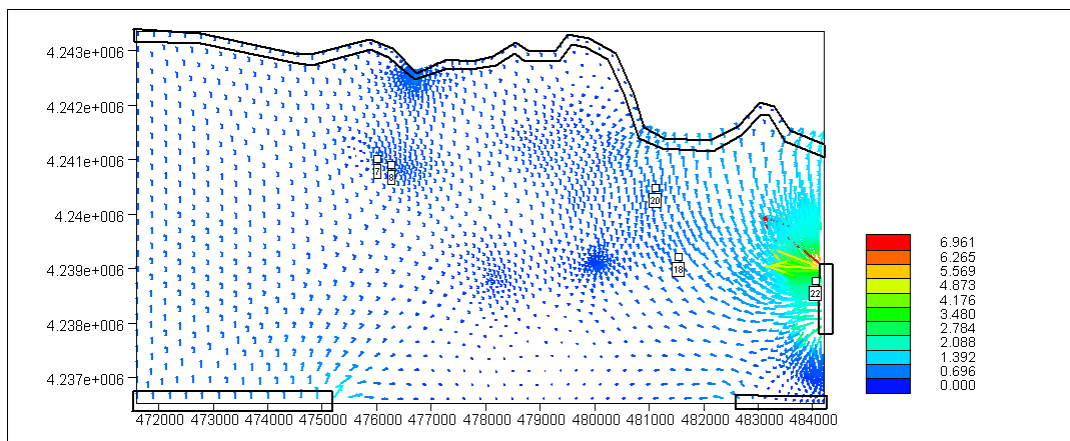
Όπως φαίνεται από τις παραπάνω εικόνες, το υπόγειο νερό κινείται με πολύ μικρή ταχύτητα στο συγκεκριμένο στρώμα. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι, το ανώτερο στρώμα της περιοχής μελέτης αποτελείται κατά κύριο λόγο από άργιλο μικρής υδραυλικής αγωγιμότητας.

Οι υψηλότερες ταχύτητες του νερού παρατηρούνται σημειακά σε μια περιοχή που βρίσκεται περίπου στο κέντρο τη περιοχής μελέτης. Στο σημείο αυτό υπάρχει ένας «φακός» σχετικά μεγάλης υδραυλικής αγωγιμότητας, ο οποίος αποτελείται κυρίως από άμμο, χαλίκια και κροκάλες. Η διεύθυνση των ταχυτήτων είναι από τα νότια προς τα βόρεια της περιοχής μελέτης, ακολουθώντας τις γραμμές ροής του νερού.

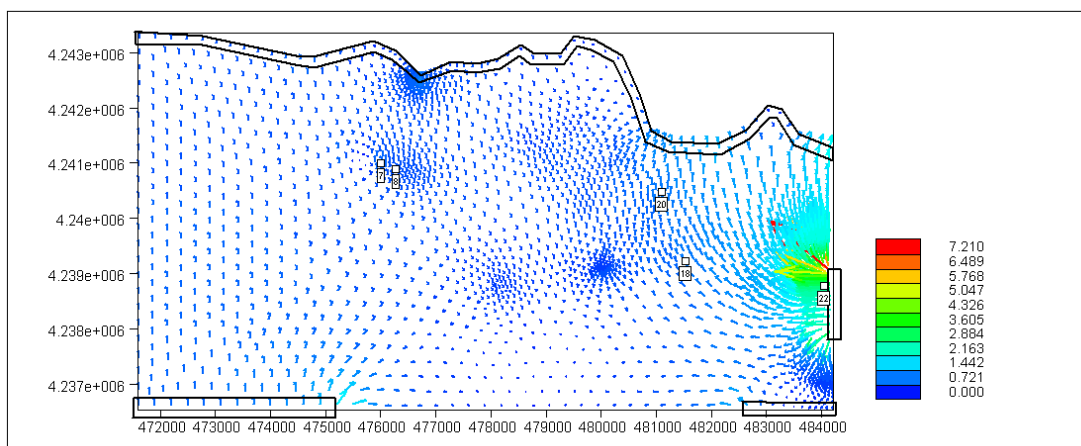
Όπως είναι αναμενόμενο από τα όσα έχουν ειπωθεί μέχρι τώρα, κατά τη χειμερινή περίοδο, λόγω της εισροής επιπλέον νερού στον υπόγειο υδροφόρα, η ταχύτητα του νερού είναι μεγαλύτερη. Η διάφορα αυτή δεν είναι σημαντική. Το χειμώνα η μέγιστη ταχύτητα λαμβάνει την τιμή 0.089226, ενώ το καλοκαίρι την τιμή 0.0816436. Επίσης, κατά τη χειμερινή περίοδο παρατηρείται κάποια επιπλέον κίνηση νερού από το μέσο περίπου του ποταμού και προς τα ανατολικά της περιοχής μελέτης.

➤ Ταχύτητες 3^{ου} στρώματος

Στο στρώμα αυτό, όπως γίνεται φανερό από τις εικόνες που ακολουθούν, η ταχύτητα του νερού είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητά του στο 5^ο στρώμα στα ίδια σημεία. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι, το στρώμα αυτό αποτελείται κυρίως από άμμο, χαλίκια και κροκάλες, που έχουν μεγαλύτερη υδραυλική αγωγιμότητα από την άργιλο, με αποτέλεσμα να είναι πιο εύκολη η κίνηση του νερού στο έδαφος αυτό. Επίσης, και στις δυο χρονικές περιόδους παρατηρείται αρκετά υψηλή κίνηση νερού στο ανατολικό όριο της περιοχής μελέτης, το οποίο έχει διεύθυνση προς το εσωτερικό της περιοχής.



Εικόνα 32. Ταχύτητες (σε m/d) 3^{ου} στρώματος για το καλοκαίρι



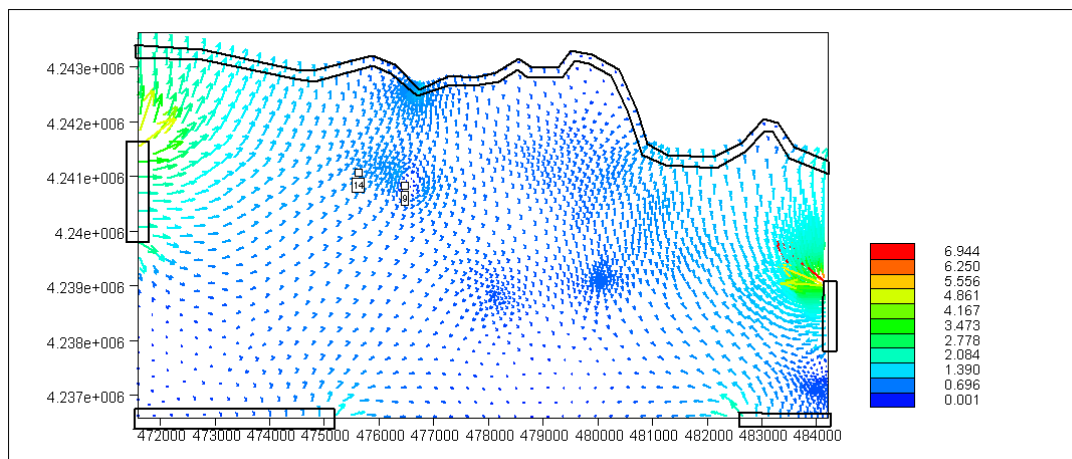
Εικόνα 33. Ταχύτητες (σε m/d) 3^{ου} στρώματος για το χειμώνα

Η μοναδική διάφορα που παρατηρείται στις ταχύτητες του κατώτερου στρώματος του ελεύθερου υδροφορέα κατά τις δυο χρονικές περιόδους είναι το μέγεθος της ταχύτητας. Συγκεκριμένα, κατά τη χειμερινή περίοδο η μέγιστη τιμή της ταχύτητας είναι 7.210 m/d, ενώ κατά την καλοκαιρινή περίοδο είναι 6.961 m/d.

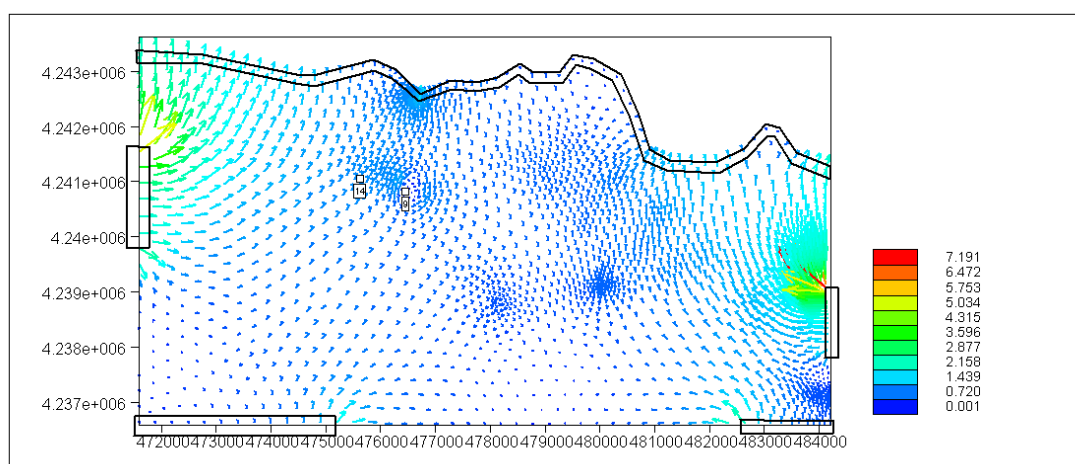
➤ Ταχύτητες 1^{ου} στρώματος

Στις εικόνες που ακολουθούν, παρουσιάζεται η κίνηση του υπόγειου νερού του περιορισμένου υδροφορέα κατά την καλοκαιρινή και χειμερινή περίοδο.

Η ταχύτητα του νερού κατά τις δύο χρονικές περιόδους σε αυτό το στρώμα, λαμβάνει περίπου τις ίδιες τιμές με την ταχύτητα στο 3^ο στρώμα. Η μόνη διαφορά παρατηρείται στο δυτικό άκρο της περιοχής μελέτης, όπου στον περιορισμένο υδροφορέα υπάρχει, όπως έχει ήδη αναφερθεί, μια επιπλέον εισροή νερού, με αποτέλεσμα η διεύθυνση και το μέγεθος της ταχύτητας του νερού στο σημείο αυτό να είναι διαφορετική.



Εικόνα 34. Ταχύτητες (σε m/d) 1^{ου} στρώματος για το καλοκαίρι



Εικόνα 35. Ταχύτητες (σε m/d) 1^{ου} στρώματος για το χειμώνα

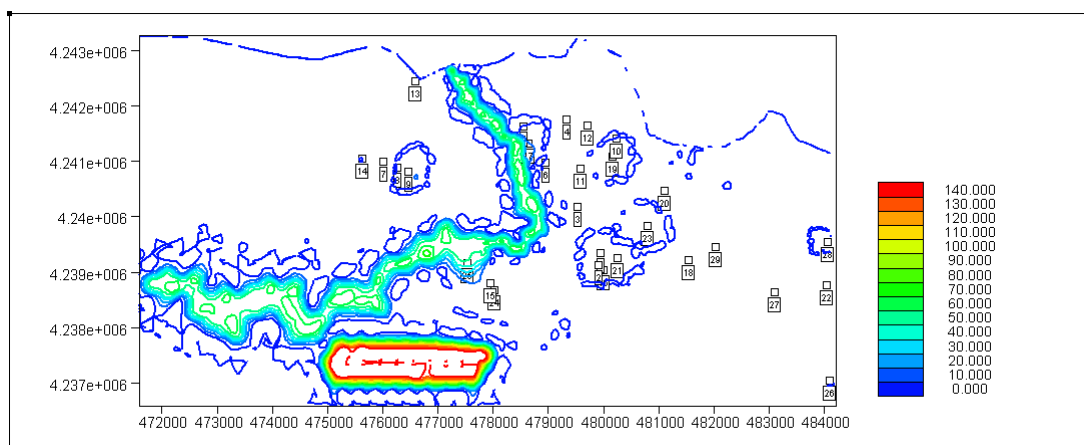
Σε όλα τα στρώματα της περιοχής μελέτης, οι ταχύτητες παρουσιάζουν σε συγκεκριμένα σημεία της περιοχής κάποια πύκνωση. Τα σημεία αυτά είναι τα ίδια σε όλα τα στρώματα του πεδίου ορισμού. Στα σημεία αυτά βρίσκονται οι γεωτρήσεις της περιοχής καθώς και το δέλτα του ποταμού, με αποτέλεσμα να υπάρχει μια πύκνωση στο πλέγμα του μοντέλου.

9.2 Προσδιορισμός μεταφοράς μάζας

Στο σημείο αυτό, γίνεται η προσομοίωση της μεταφοράς του χρωμίου κατά την καλοκαιρινή και χειμερινή περίοδο. Η ρύπανση στον ποταμό Ασωπό παρουσιάζεται κατά τη χειμερινή περίοδο καθώς κατά την περίοδο αυτή εμφανίζεται και το ποτάμι. Λόγω όμως της παρουσίας της αργίλου στα επιφανειακά στρώματα που εμποδίζει τη διήθηση και απομάκρυνση της ρύπανσης, παρατηρείται ρύπανση και κατά την καλοκαιρινή περίοδο. Έτσι, τα αποτελέσματα της καλοκαιρινής περιόδου παρουσιάζουν μικρές διαφορές σε σχέση με τα αποτελέσματα της χειμερινής περιόδου. Επομένως, ουσιαστικές διαφορές στη μεταφορά του χρωμίου, παρατηρούνται μόνο μεταξύ των διαφορετικών στρωμάτων του μοντέλου.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της μεταφοράς του χρωμίου για τα τρία βασικά στρώματα του μοντέλου (Layers 1, 3 και 5) κατά την καλοκαιρινή περίοδο.

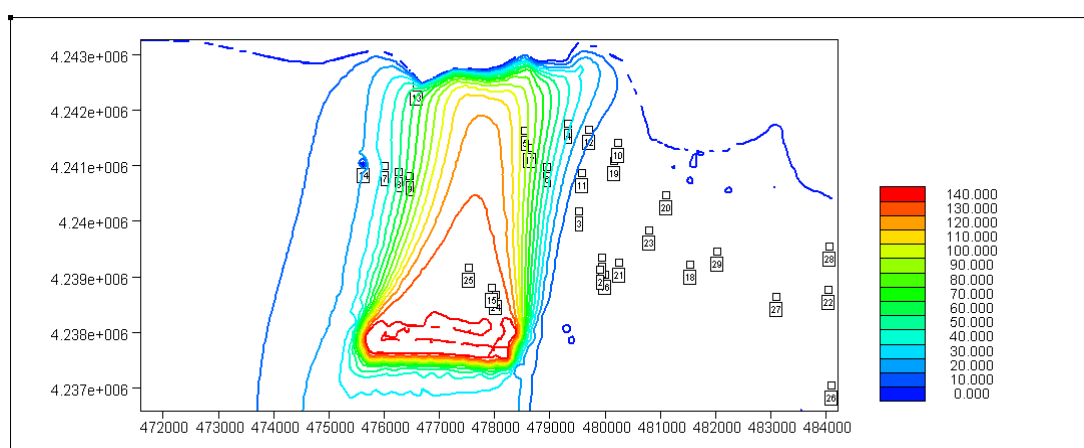
➤ **Μεταφορά μάζας στο 5^ο στρώμα**



Εικόνα 36. Συγκέντρωση χρωμίου (σε µg/L) 5^{ου} στρώματος για το καλοκαίρι

Στο στρώμα αυτό, παρατηρείται ρύπανση η οποία οφείλεται εν μέρει στο πέτρωμα, από την αποσάθρωση του οποίου προέρχεται το χρώμιο (γηγενής ρύπανση), και εν μέρει στον ποταμό Ασωπό, ο οποίος ρυπαίνεται από τις παρακείμενες βιομηχανίες. Η ρύπανση της περιοχής λαμβάνει τιμές από 0 µg/L έως 140 µg/L. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, από πειραματικές μετρήσεις που έχουν γίνει, η συγκέντρωση του χρωμίου στην πηγή ρύπανσης είναι 140 µg/L, ενώ στον ποταμό η μέγιστη τιμή που έχει μετρηθεί είναι η τιμή των 55 µg/L. Από τα αποτελέσματα του μοντέλου, γίνεται εμφανές ότι, δεν υπάρχει ιδιαίτερα σημαντική εξάπλωση του χρωμίου στο στρώμα αυτό. Η ρύπανση δηλαδή του χρωμίου εμφανίζεται μόνο γύρω από το πέτρωμα και από τον ποταμό Ασωπό. Η συμπεριφορά αυτή, οφείλεται στη γεωλογία του συγκεκριμένου στρώματος, που όπως έχει ήδη αναφερθεί, αποτελείται κατά κύριο λόγο από άργιλο μικρής υδραυλικής αγωγιμότητας, με αποτέλεσμα να μην ευνοείται η εξάπλωση της ρύπανσης στο συγκεκριμένο στρώμα.

➤ **Μεταφορά μάζας στο 3^ο στρώμα**

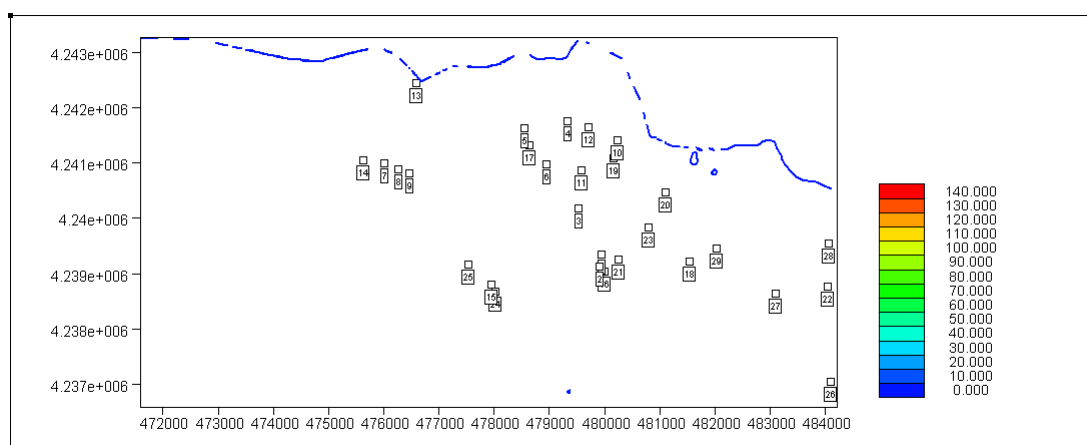


Εικόνα 37. Συγκέντρωση χρωμίου (σε µg/L) 3^{ου} στρώματος για το καλοκαίρι

Στο στρώμα αυτό, η ρύπανση οφείλεται μόνο στο πέτρωμα του σερπεντινίτη. Το ποτάμι είναι πολύ ρηχό και επιπλέον τα ανώτερα στρώματα της περιοχής μελέτης αποτελούνται κυρίως από άργιλο, με αποτέλεσμα να μην ευνοείται η μεταφορά του χρωμίου προς τα κατώτερα στρώματα. Έτσι, δεν παρατηρείται ρύπανση λόγω του ποταμού στο συγκεκριμένο στρώμα.

Λόγω της γεωλογίας του συγκεκριμένου στρώματος, καθώς αποτελείται κυρίως από χάλικες, κροκάλες και άμμο, ευνοείται η εξάπλωση του χρωμίου και η μεταφορά του με τη ροή του υπόγειου νερού, από την περιοχή γύρω από το πέτρωμα προς την ακτογραμμή. Έτσι, στις γεωτρήσεις που βρίσκονται στο στρώμα αυτό, ανιχνεύονται ποσότητες εξασθενούς χρωμίου που οφείλονται στην εκχύλιση του χρωμίου από το συγκεκριμένο πέτρωμα.

➤ **Μεταφορά μάζας στο 1^ο στρώμα**



Εικόνα 38. Συγκέντρωση χρωμίου (σε mg/L) 1^{ου} στρώματος για το καλοκαίρι

Όπως γίνεται φανερό από την παραπάνω εικόνα, δεν παρατηρείται ρύπανση από το εξασθενές χρώμιο στον περιορισμένο υδροφορέα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ύπαρξη του 2^{ου} στρώματος του μοντέλου, το οποίο όπως έχει ήδη αναφερθεί, λειτουργεί ως αδιαπέρατο στρώμα εμποδίζοντας την επικοινωνία και τη μεταφορά του χρωμίου από το 3^ο στρώμα στο 1^ο.

10 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπερασματικά, στην ευρύτερη περιοχή του Ασωπού ποταμού παρατηρείται η παρουσία δύο υδροφορέων, ενός περιορισμένου και ενός ελεύθερου, με τον περιορισμένο να βρίσκεται στο κατώτερο στρώμα του μοντέλου (στρώμα 1) και τον ελεύθερο να βρίσκεται στα ανώτερα στρώματα του μοντέλου (στρώματα 3, 4 και 5).

Οι υπόγειοι υδροφορείς της περιοχής μελέτης φαίνεται να προσομοιάζονται σε σημαντικό βαθμό από το μοντέλο. Στον ελεύθερο υδροφορέα, και στις δύο περιόδους (καλοκαιρινή και χειμερινή), η κατεύθυνση της υπόγειας ροής, πραγματοποιείται από το νότιο και νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης προς την ακτογραμμή που βρίσκεται στο βόρειο τμήμα της περιοχής. Η κίνηση αυτή δικαιολογείται από τη γεωμορφολογία της περιοχής, καθώς στο νότιο και ανατολικό τμήμα της βρίσκονται λόφοι, με το υψόμετρο τους να κυμαίνεται μεταξύ 300-500 m, ενώ στο βόρειο τμήμα της περιοχής βρίσκεται η ακτογραμμή του Ευβοϊκού κόλπου με υψόμετρο 200 m. Στα ανώτερα στρώματα του ελεύθερου υδροφορέα, η κίνηση του υπόγειου νερού εμποδίζεται, λόγω της γεωλογικής σύστασης των στρωμάτων αυτών, που αποτελούνται κυρίως από άργιλο. Επιπλέον, στο ανώτερο στρώμα του ελεύθερου υδροφορέα (5^ο Στρώμα) και κατά τη χειμερινή περίοδο, γίνεται εμπλουτισμός των υπογείων υδάτων του από τον Ασωπό ποταμό και από τις βροχοπτώσεις, γεγονός που φαίνεται να επηρεάζει τη ροή του νερού στο στρώμα αυτό. Η μορφή των ισοδυναμικών γραμμών δείχνει το πώς επηρεάζεται η ροή του υπόγειου νερού από το ποτάμι, με τη μείωση των υδραυλικών υψών να ακολουθεί τη ροή του ποταμού. Αντίθετα, οι γεωτρήσεις που λειτουργούν κατά την καλοκαιρινή περίοδο και μόνο, φαίνεται να επηρεάζουν μόνο τοπικά τη διεύθυνση της ροής του υπόγειου νερού.

Παράλληλα, στον περιορισμένο υδροφορέα, η κατεύθυνση της ροής παρατηρείται από το νοτιοδυτικό και νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης προς το βόρειο τμήμα της περιοχής, ενώ η κίνηση του νερού φαίνεται να επηρεάζεται κυρίως από τη γεωλογία του στρώματος, που αποτελείται κατά βάση από άμμο, χάλικες και κροκάλες. Επίσης, λόγω της πίεσης που υφίσταται το νερό που βρίσκεται αποθηκευμένο στον περιορισμένο υδροφορέα, το υδραυλικό ύψος του νερού στο στρώμα αυτό λαμβάνει υψηλότερες τιμές από τις τιμές του ελεύθερου υδροφορέα.

Σε γενικές γραμμές, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση της στάθμης και της ταχύτητας του υπόγειου νερού της μελετηθείσας περιοχής καταδεικνύουν μια σχετικά ομοιογενή κυκλοφορία του νερού, η οποία διαφοροποιείται σε κάθε στρώμα του μοντέλου. Η διαφοροποίηση της κίνησης του υπόγειου ύδατος στα διάφορα στρώματα του μοντέλου φαίνεται να επηρεάζεται άμεσα από τη γεωλογία του εκάστοτε στρώματος καθώς και από τη χρονική περίοδο (διαφοροποίηση μεταξύ θερινής και χειμερινής περιόδου).

Στη συνέχεια, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης της μεταφοράς του εξασθενούς χρωμίου, προκύπτει ότι η ρύπανση των υπογείων υδάτων της ευρύτερης περιοχής του Ασωπού ποταμού δεν προέρχεται μόνο από τα λύματα των βιομηχανικών εγκαταστάσεων της περιοχής που διοχετεύονται στον ποταμό, αλλά ένα σημαντικό μέρος της είναι αποτέλεσμα της γεωλογίας της ίδιας της περιοχής μελέτης.

Συγκεκριμένα, ο Ασωπός ποταμός ρυπαίνει το ανώτερο στρώμα του ελεύθερου υδροφορέα (επιφανειακό στρώμα) και η ρύπανση αυτή ανιχνεύεται στις γεωτρήσεις που βρίσκονται γύρω από αυτόν και μόνο σε όσες βρίσκονται στο ανώτερο στρώμα. Λόγω της γεωλογίας των ανώτερων στρωμάτων της περιοχής μελέτης, τα οποία

αποτελούνται κυρίως από άργιλο, δεν ευνοείται ούτε η οριζόντια αλλά ούτε και η κατακόρυφη μεταφορά του εξασθενούς χρωμίου. Έτσι, το χρώμιο παραμένει μόνο γύρω από τις πηγές ρύπανσης.

Αντίθετα, οι γεωτρήσεις που αντλούν από τα βαθύτερα στρώματα, ρυπαίνονται από το πέτρωμα το οποίο έχει εισχωρήσει στα κατώτερα στρώματα του ελεύθερου υδροφορέα (3^ο στρώμα). Η μεταφορά του χρωμίου στο στρώμα αυτό, επηρεάζεται άμεσα από τη γεωλογική του σύσταση, καθώς αποτελείται κατά κύριο λόγο από χαλίκια, άμμο και κροκάλες. Η ευκολότερη κίνηση του νερού στο στρώμα αυτό φαίνεται και από τις υψηλότερες τιμές των ταχυτήτων του υπόγειου ύδατος στο συγκεκριμένο στρώμα. Επίσης, σε γενικές γραμμές, ο περιορισμένος υδροφορέας δεν κινδυνεύει σημαντικά από ρυπαντικούς παράγοντες, όπως είναι το εξασθενές χρώμιο, λόγω της προστασίας που του παρέχει το αδιαπέρατο στρώμα (στρώμα 2) που τον καλύπτει.

Στην ελληνική νομοθεσία, το χρώμιο κατατάσσεται στα χημικά που λόγω της επικινδυνότητάς τους είναι εξαιρετικά σημαντικά για την ανθρώπινη υγεία. Συγκεκριμένα, το εξασθενές χρώμιο είναι πολύ τοξικό και μπορεί να προκαλέσει μεταλλάξεις έπειτα από την είσοδο του στους οργανισμούς. Ως ανώτατο επιτρεπτό όριο συγκέντρωσης ολικού χρωμίου στο πόσιμο νερό έχουν θεσπιστεί τα 50 µg/L, το οποίο συμπεριλαμβάνει το εξασθενές χρώμιο.

Με όριο την τιμή των 50 µg/L, γίνεται φανερό ότι υπάρχουν κάποιες γεωτρήσεις στις οποίες ανιχνεύεται εξασθενές χρώμιο σε συγκέντρωση μεγαλύτερη από την τιμή αυτή. Επίσης, από χημικές αναλύσεις που έχουν γίνει στον ποταμό Ασωπό αλλά και έπειτα από τη βαθμονόμηση του μοντέλου προέκυψε ότι η συγκέντρωση του εξασθενούς χρωμίου στον ποταμό είναι λίγο υψηλότερη από το ανώτατο επιτρεπτό όριο.

Έτσι, εξάγεται το συμπέρασμα ότι υπάρχει ρύπανση στην ευρύτερη περιοχή του Ωρωπού Αττικής, η οποία χρήζει άμεσης αντιμετώπισης. Η αποκατάσταση των υπογείων υδάτων της περιοχής μελέτης μπορεί να γίνει με κάποια από τις τεχνολογίες αποκατάστασης που έχουν ήδη αναφερθεί και οι οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς σε άλλες περιοχές για την αποκατάστασή τους από τη ρύπανσή τους λόγω εξασθενούς χρωμίου. Οι κυριότερες μέθοδοι αποκατάστασης είναι η άντληση διαλυμένων ρύπων και απορρύπανση (pump and treat methods), τα διαπερατά αντιδρώντα φράγματα (Permeable Reactive Barriers), η χημική μείωση (chemical reduction-precipitation), η φυτοεξυγίανση (phytoremediation) καθώς και η φυσική αποκατάσταση/μείωση ρύπων (natural attenuation).

Τέλος, στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής προέκυψαν από τα διαθέσιμα στοιχεία των γεωτρήσεων και των τιμών του εξασθενούς χρωμίου. Ένα από τα βασικά προβλήματα που έχει να αντιμετωπίσει οποιοσδήποτε ασχολείται με την υπόγεια υδραυλική, είναι η έλλειψη των στοιχείων και η ποιότητά τους. Τα διαθέσιμα στοιχεία δεν είναι ποτέ επαρκή για την πλήρη γνώση της γεωλογίας της περιοχής μελέτης καθώς και της ροής του υπόγειου νερού και των ρυπαντών που βρίσκονται διαλυμένοι σε αυτό. Από την άλλη πλευρά, η ποιότητα των στοιχείων επηρεάζεται από πλήθος αστάθμητων παραγόντων, όπως είναι τα σφάλματα λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών και λόγω του ανθρώπινου παράγοντα. Έτσι, καθώς τα αποτελέσματα του μοντέλου εξαρτώνται άμεσα από τα στοιχεία που έχουν εισαχθεί σε αυτό, θα μπορούσαμε να πούμε ότι τα αποτελέσματα που πρόέκυψαν δεν είναι απόλυτα αλλά είναι τα βέλτιστα δυνατά σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία.

11 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

11.1 Ελληνική βιβλιογραφία

- Γαρμπή, Σ., Γενειατάκης, Ε., και Καρατζάς, Γ., “Εξυγίανση Υπογείων Υδάτων με Συγκλίνοντα Φράγματα και Διόδους. Εφαρμογή Πεδίου με ΒΤΕΧ”, Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων
- Γιδαράκος, Ε., 2006, “Τοξικά απόβλητα, Διαχείριση, Επεξεργασία, Διάθεση”, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος
- Δημήτρουλα, Ε., 2009, “Κινητικότητα Εξασθενούς Χρωμίου Cr(VI) σε Εδάφη της περιοχής Ωρωπού”, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος
- Ελληνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (Ε.Μ.Υ), Διεύθυνση Κλιματολογίας-Εφαρμογών, “Κλιματολογικές Βάσεις Δεδομένων Περιόδου 1956-1997”
- Ιωάννου, Ι., 2001, “Μελέτη της Προσρόφησης Βαρέων Μετάλλων και Τοξικών Στοιχείων στα Ιζήματα του Θερμαϊκού Κόλπου”, Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων
- Καββαδάς, Β., και Πανταζίδου, Μ., 2004, “Στοιχεία Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- Καλογεράκης, Ν., 2006, “Βιολογικές Μέθοδοι Εξυγίανσης Περιβάλλοντος”, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος
- Καλλέργης, Α., 2001, “Εφαρμοσμένη-Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία”, Τόμος Γ΄, Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας
- Καραμπάτσος, Ι., 2003, “Συμβολή στην Αντισεισμική Προστασία της πόλης των Χανίων με χρήση GIS, Εφαρμογή στο δίκτυο ύδρευσης”, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος
- Καρατζάς, Γ., 2003, “Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφοράς Ρύπων”, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος
- Κοινή Υπουργική Απόφαση (ΚΥΑ) 4859/726, 2001, “Μέτρα και Περιορισμοί σχετικά με την Προστασία Υδατικού Περιβάλλοντος από Απορρίψεις και ειδικότερα Καθορισμός Οριακών Τιμών Ορισμένων Επικίνδυνων Ουσιών που Υπάρχουν στον Κατάλογο II της Οδηγίας 76/464/ΕΟΚ”
- Λοϊζίδου, Μ., 1998, Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων για το έργο: “Ίδρυση και Λειτουργία Κεντρικής Μονάδας Επεξεργασίας των Βιομηχανικών Αποβλήτων της Περιοχής Ασωπού και των Αστικών Λυμάτων Δήμου Αυλώνας”
- Νικολαΐδης, Ν., και Καλογεράκης, Ν., 2008, “Βιώσιμη Διαχείριση Υδατικών Πόρων του δήμου Ωρωπού, Ν. Αττικής-Διερεύνηση Ποιότητας Υδατικών Πόρων”, Τεχνική έκθεση προς το Δήμο Ωρωπίων, Αττικής
- Οδηγία 2002/95/ΕΚ, 2003, “Περιορισμός της Χρήσης ορισμένων Επικίνδυνων Ουσιών σε Είδη Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού”

- Οικονομόπουλος, Α., 1999, “Ρύπανση και Έλεγχος Ρύπανσης Νερών”, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος
- 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”
- Πατσιούρα, Α., 2004, “Απομάκρυνση Βαρέων Μετάλλων με Χρήση Ελληνικών Λιγνιτών”, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος
- Συρράκου, Χ., 2008, “Χαρακτηρισμός της Υπόγειας Ροής με Προσομοίωση της Περιοχής του Ποταμού Ασωπού, Νομού Αττικής”, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος
- Τέντες, Μ., 2001, “Πολυκυτταρικό Μοντέλο Υδροφορέα”, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων»
- Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, Οργανισμός Ρυθμιστικού Σχεδίου και Προστασίας Περιβάλλοντος Αθήνας, “Στρατηγική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων του Σχεδίου Επικαιροποίησης του ΡΣΑ”
- Φ.Ε.Κ Β΄ 1154/12-8-2003, Απόφαση Αριθ. Δ17α/115/9/ΦΝ275, “Τροποποίηση διατάξεων του «Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού ΕΑΚ 2000» λόγω αναθεώρησης του Χάρτη Σεισμικής Επικινδυνότητας”
- ΦΕΚ 892/11.7.2001, Κοινή Υπουργική Απόφαση Υ2/2600/2001, “Ποιότητα του Νερού Ανθρώπινης Κατανάλωσης”

11.2 Ξένη βιβλιογραφία

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 1998, “Toxicological Profile for Chromium”, U.S. Public Health Service, U.S. Department of Health and Human Services, Atlanta
- Anderson, M., and Woessner, W., 1992, “Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport”, Academic Press, London
- Angelidis, O., and Aloupi, M., 2000, “Geochemical Study of Coastal Sediments Influenced by River - Transported Pollution: Southern Evoikos Gulf”, Marine Pollution Bulletin, Greece, 40(1), 77-82
- Ashby, M., and Jones, D., 1998, “Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures, Processing, and Design”, 2nd Edition Oxford, Pergamon Press
- Babu, D., Pinder, G., Niemi A., Ahlfeld D., and Stothoff S., 1997, “Chemical Transport by Three-Dimensional Groundwater Flows”
- Baker, F., and Pavlik, H., “Characterization and Modeling of Groundwater Flow in a Heterogeneous Aquifer System to Evaluate Contaminant Migration”, in Fifth Canadian/American Conference on Hydrogeology, S.Bachu (Ed.), National Water Well Association

- Ball, J., and Izbicki, J., 2004, "Occurrence of Hexavalent Chromium in Groundwater in the Western Mojane Desert, California", *Applied Geochemistry*, 19, 1123-1135
- Brown University, 2007, "Chromium 6: A Killer Compound with an Improbable Trigger", *Media Relations*
- Cooper, G., 2002, "Oxidation and Toxicity of Chromium in Ultramafic Soils in Zimbabwe", *Applied Geochemistry*, 17, 981-986
- Davis, S., 1969, "Porosity and Permeability of Natural Materials. Flow through Porous Media", ed. R.J.M. De Wiest, Academic Press, New York, 54-89
- Fan, A., and Harding-Barlow, J., 1987, "Chromium in Genotoxic and Carginogenic Metals. Environmental and Occupational Occurrence Exposure. Advances in Modern Environmental Toxicology", Princetown Scientific Publishing, 87-125
- Freeze, R., and Cherry, J., 1979, "Groundwater", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ
- INCHEM, 1988, International Program on Chemical Safety: "ENVIRONMENTAL HEALTH CRITERIA 61: CHROMIUM", Geneva
- Kotas, J., and Stasicka, Z., 2000, "Chromium occurrence in the environment and methods of its speciation", *Environmental Pollution*, 107, 263-283
- Krejpcio, Z., 2001, "Essentiality of Chromium for Human Nutrition and Health", *Journal of Environmental Studies*, 106, 399-404
- Masch, F., and Denny, K., 1966, "Grain Size Distribution and its Effect on the Permeability of Unconsolidated Sands", *Water Resources*, 665-677
- M-TECH Software Tutorial
- Mukhopahyay, B., Sundquist, J., and Schmitz, R., 2007, "Removal of Cr(VI) from Cr-contaminated groundwater through electrochemical addition of Fe(II)", *Journal of Environmental Management*, 82, 66-76
- National Toxicology Program, "Chromium Hexavalent Compounds, 11th Edition", Report on Carcinogens
- New Zealand Ministry of Works and Development, 1977, "Water and Soil Division, Movement of Contaminants into and through the Heretaunga Plains Aquifer", report, Wellington
- Oze, C., Bird, D., and Fendorf, S., 2007, "Genesis of Hexavalent Chromium from Natural Sources in Soil and Groundwater", *PNAS*, 104 (16), 6544-6549
- Palmer, C., and Puls, R., 1994, "Natural Attenuation of Hexavalent Chromium in Groundwater and Soils", US Environmental Protection Agency, Groundwater Issue
- Papanikolaou, D., 2009, "Timing of Tectonic Emplacement of the Ophiolites and Terrane Paleogeography in the Hellenides, Lithos", In Press
- Pinder, G., and Gray, W., 1976, "Is there a difference in the finite element method?", *Water Resources Research* 12(1), 105-107

- Robles-Camacho, J., and Armienta, M., 2000, “Natural chromium contamination of groundwater at León Valley, Mexico”, *Journal of Geochemical Exploration*, 68, 167-181
- US Environmental Protection Agency, 2000, “In Situ Treatment of Soil and Groundwater Contaminated with Chromium”, Technical Resource Guide
- Wang, H., and Anderson, M., 1977, “Finite Differences and Finite Elements as Weighted Residual Solutions to Laplace’s Equation”, In: *Finite Elements in Water Resources*, Pentech Press, London, 2.167-2.178
- World Health Organization (WHO), 1996, “Guidelines for Drinking-water Quality”, Geneva
- World Health Organization (WHO), 2000, “Air Quality Guidelines-Second Edition, Chromium”, Regional Publications, European Series, No 91
- Xia, L., Akiyama, E., Frankel, G., and McCreery, R., 2000, “Storage and release of soluble hexavalent chromium from chromate conversion coatings-Equilibrium aspects of Cr-VI concentration”, *Journal of the Electrochemical Society*, 147, 2556-2562

11.3 Ηλεκτρονική βιβλιογραφία

- [i] ega.water.usgs.gov/edu/watercyclegreek.html
- [ii] <http://www.iama.gr/ethno/oropos/sv2gns.html>
- [iii] <http://www.lenntech.com/periodic/elements/cr.htm#Health%20effects%20of%20chromium>
- [iv] <http://www.periodictable.com/Elements/024/index.html>
- [v] <http://www.hpa.nhs.uk/HPA/Topics/ChemicalsAndPoisons/CompendiumOfChemicalHazards/1190384320965/>
- [vi] http://www.chem.uoa.gr/chemicals/chem_cr6.htm#02

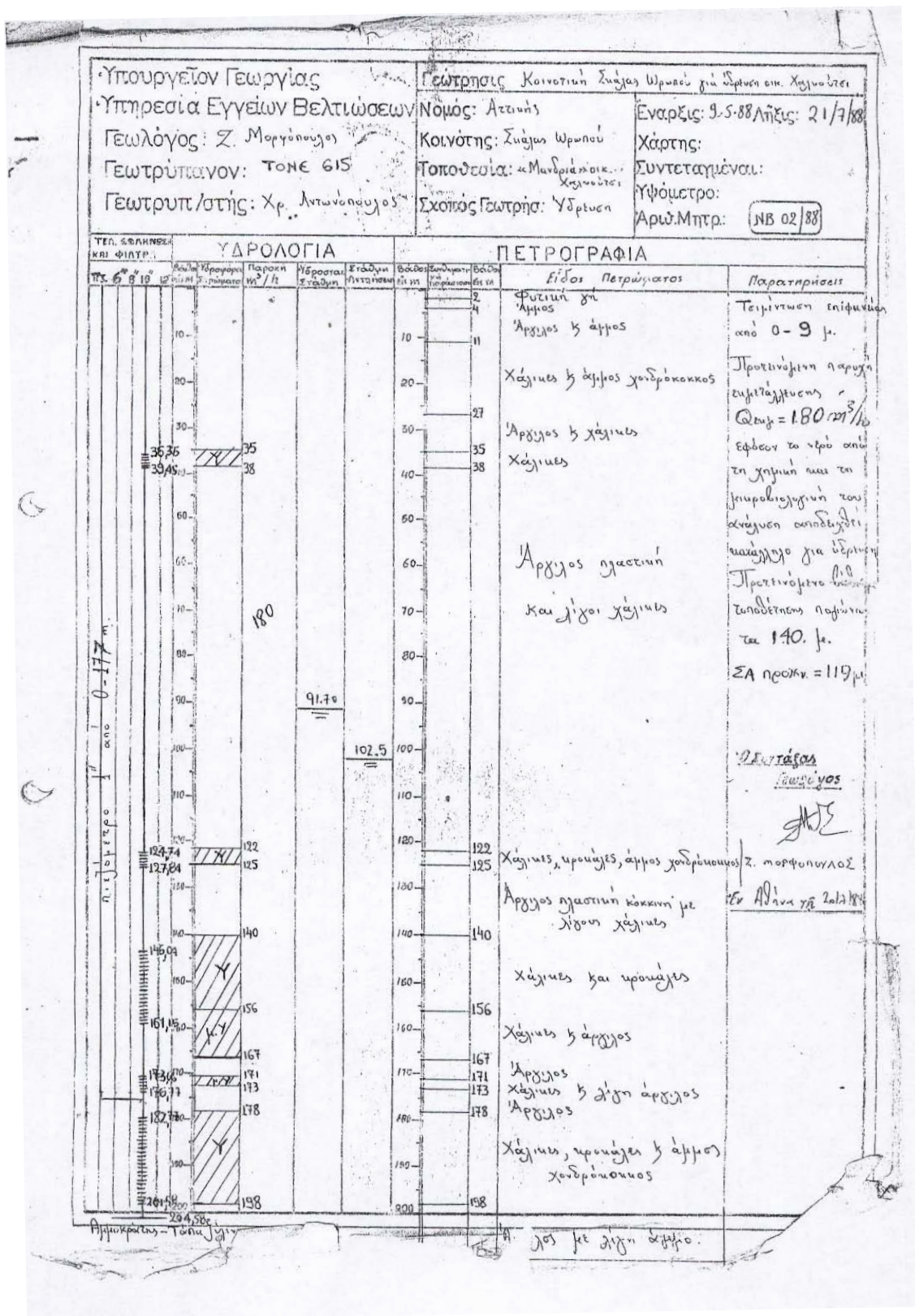
12 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

12.1 Συγκέντρωση χρωμίου μοντέλου και πεδίου

Πίνακας 13. Περίοδος Φεβρουαρίου 2009 (Χειμερινή περίοδος)

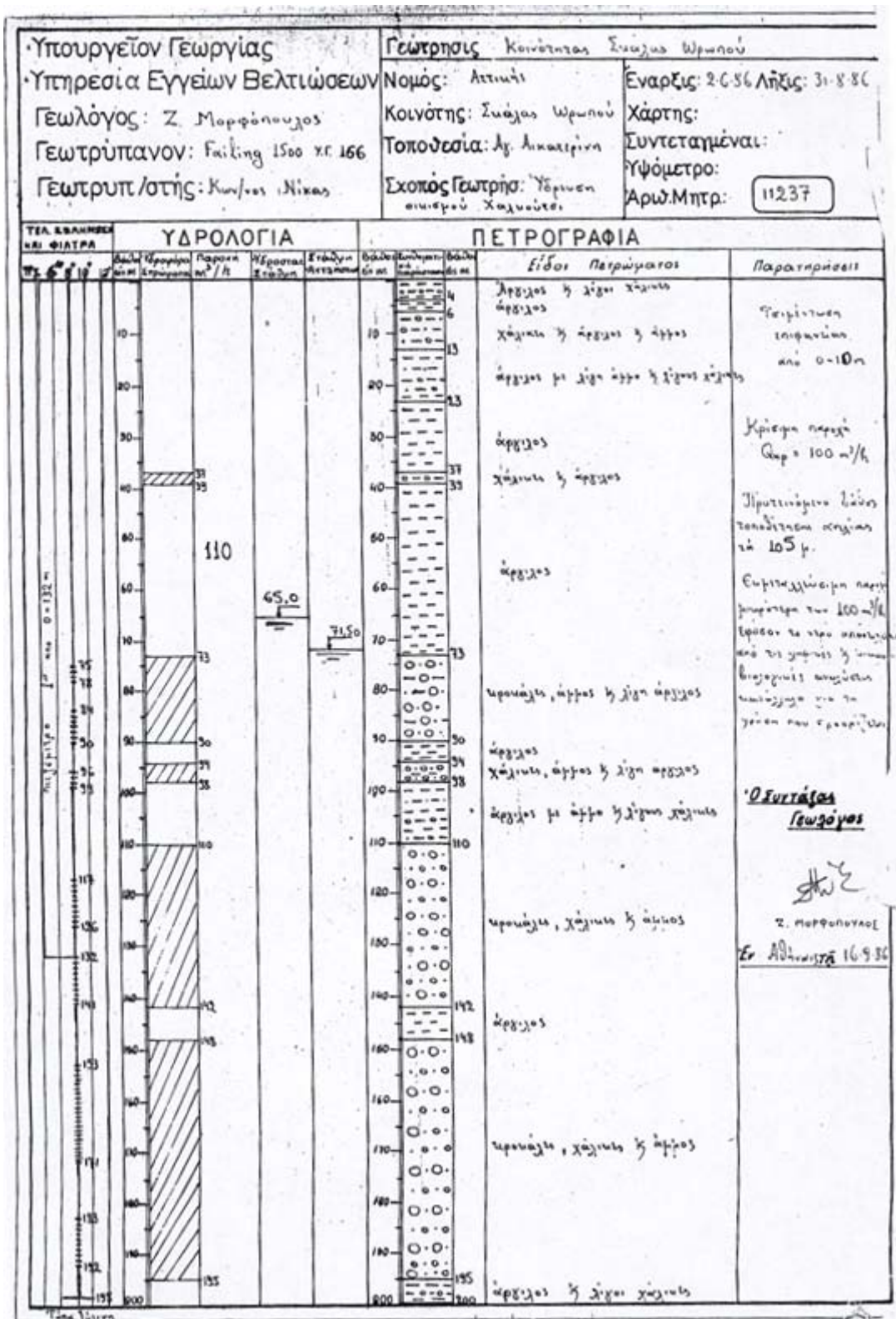
Όνομα γεώτρησης	Στρώμα γεώτρησης (Layer)	Τιμή Cr μοντέλου (μg/L)	Τιμή Cr πεδίου (μg/L)
1	5	0.05	3.28
7	3	31.57	0.53
8	3	48.22	31.58
9	1	1.55	1.45
13	5	0.40	6.77
14	1	0.26	23.25
30	5	0.42	82.89
31	5	55.00	1.09
32	5	0.00	1.30
42	5	55.00	28.10
43	3	115.96	80.79

➤ ΓΕΩΤΡΗΣΗ 7



101

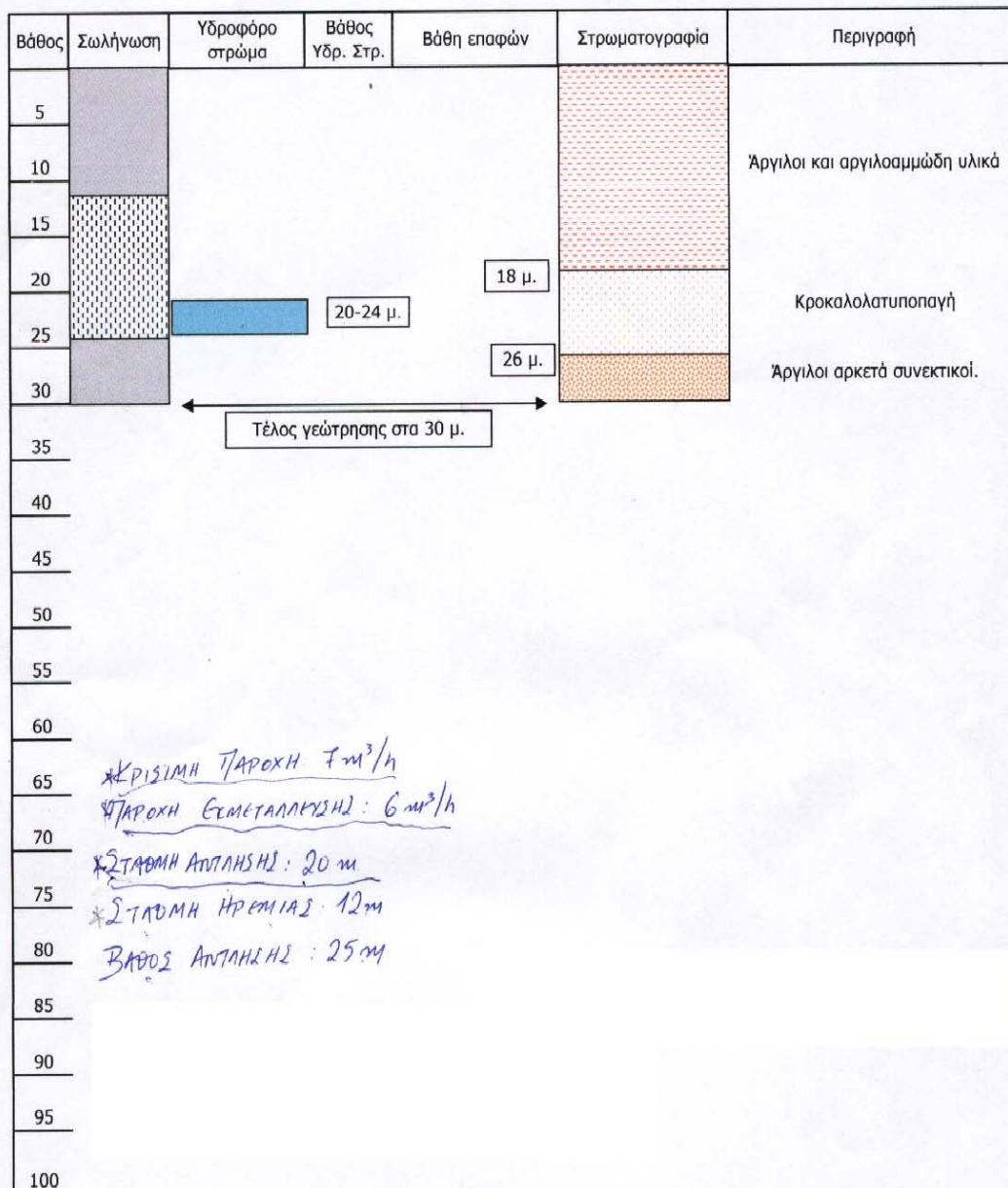
➤ ΓΕΩΤΡΗΣΗ 9



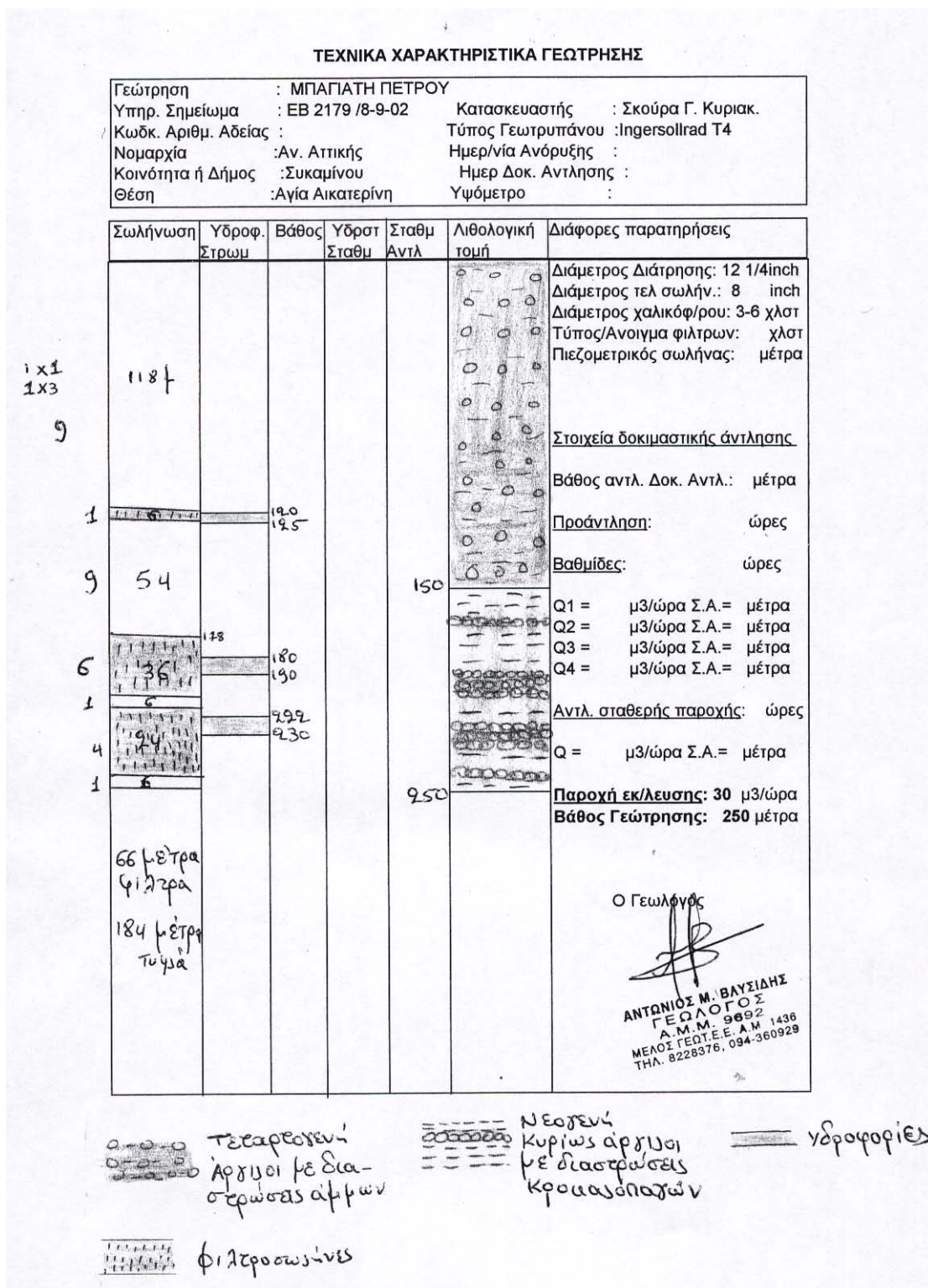
➤ ΓΕΩΤΡΗΣΗ 11

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΔΡΟΓΕΩΤΡΗΣΗΣ

*Ιδιοκτήτης Υδρογεώτρησης: Φαφούτης Χρήστος & Σωτήριος.					
Αρ. Πρωτ. Αδείας:	10966/12-09-2006	Κατασκευαστής:	Ράπτης Β.		
Κωδ. Αριθμ. Αδείας:	073071000729	Τύπος γεωτρύπης:	Ingersollrad T4		
Νομαρχία:	Αν. Αττικής	Ημερ. Ανόρυξης:	23/1/2007		
Δήμος:	Ωρωπίων	Ημ. Δοκ. Άντλησ.:	5/2/2007		
Θέση:	Λεύκα ή Κάμπος	*Ψόμετρο:	6 μέτρα		



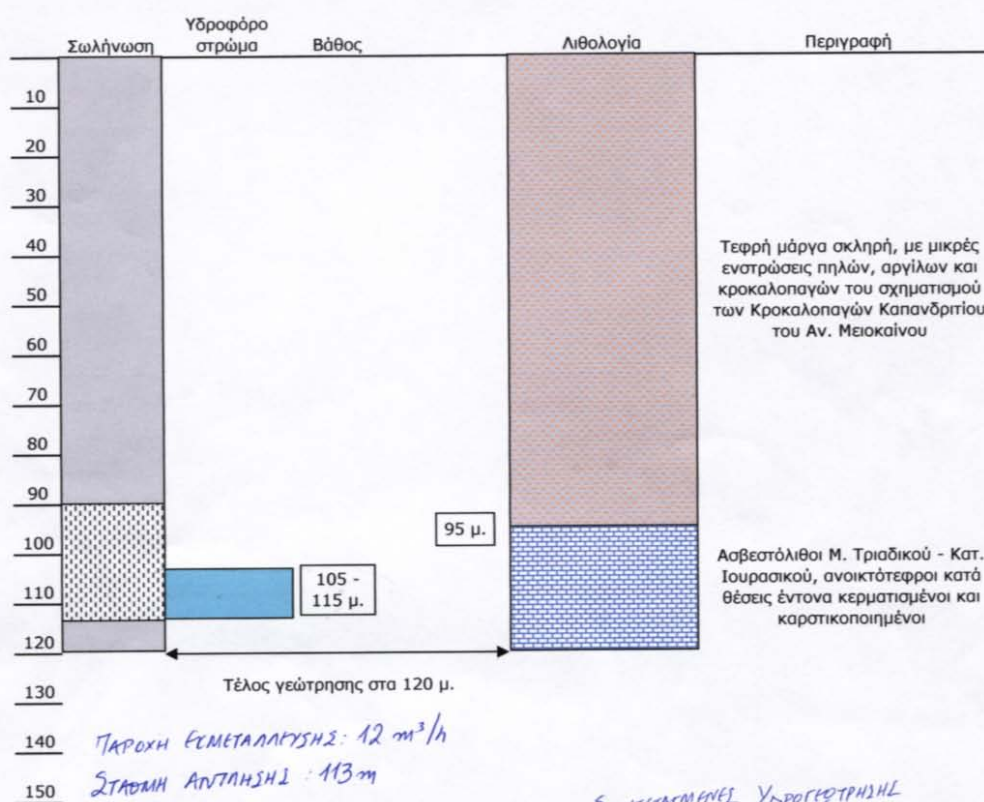
➤ ΓΕΩΤΡΗΣΗ 14



➤ ΓΕΩΤΡΗΣΗ 15

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΔΡΟΓΕΩΤΡΗΣΗΣ

Γεώτρηση:	Στιβακτάκης Εμμανουήλ & Σκευή Ιωάννα		
Αρ. Πρωτ. Αδείας:	10967/12-09-06	Κατασκευαστής:	-
Κωδ. Αριθμ. Αδείας:	073071000731	Τύπος γεωτρύπης:	Ingersollrad T4
Νομαρχία:	Ανατ. Αττικής	Ημερ. Ανόρυξης:	6-7 Νοεμβρίου 2006
Δήμος:	Ωρωπίων	Ημ. Δοκ. Άντλησ.:	16-17 Νοεμβρίου 2006
Θέση:	Σκινιά		
Συντεταγμένες γεώτρησης:	Χ:477905 Ψ:4238911		

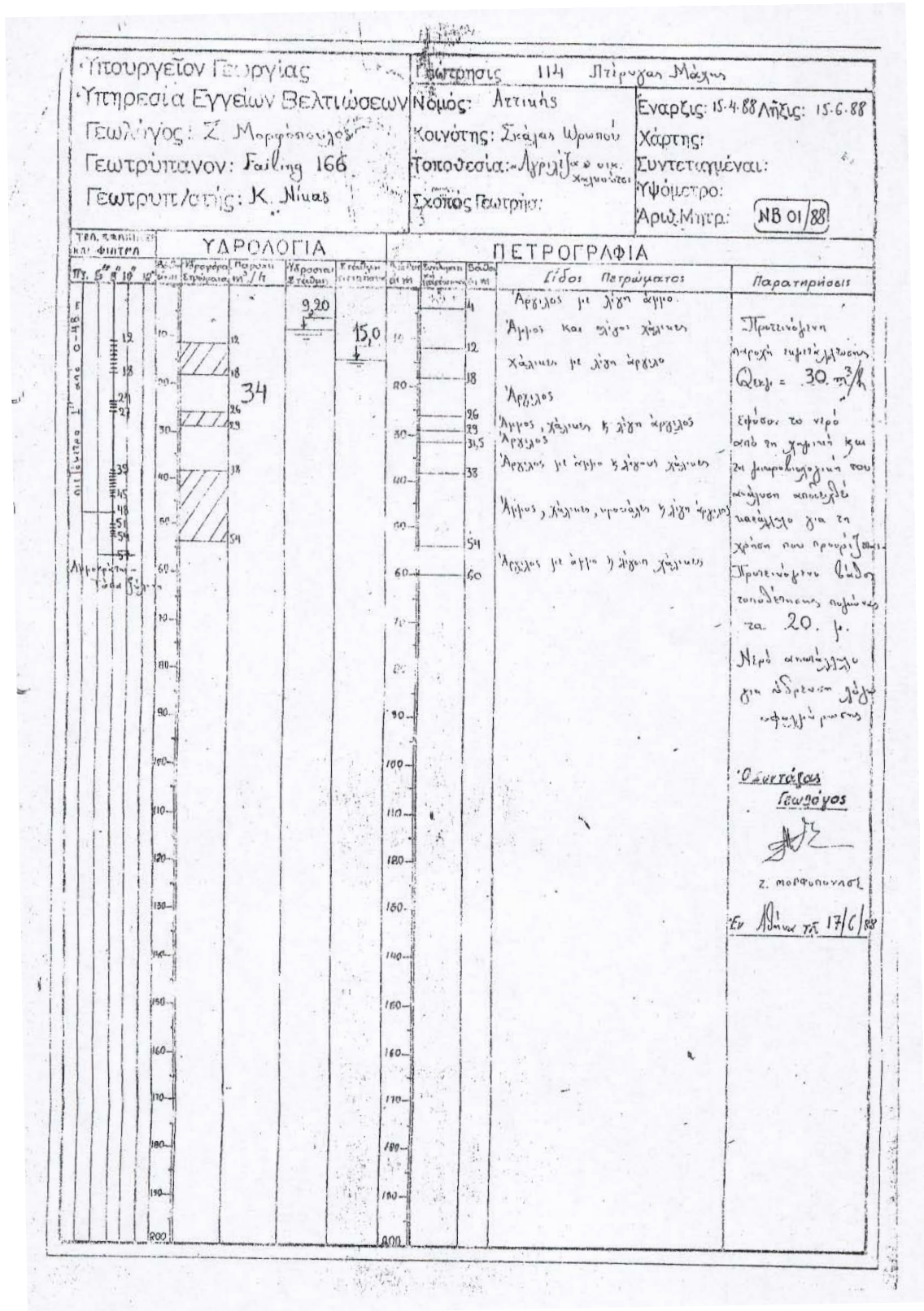


ΥΠΟΜΝΗΜΑ

	Υδροφόρο στρώμα
	Φιλτροσωλήνες
	Τυφλοί σωλήνες

ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΥΔΡΟΓΕΩΤΡΗΣΗΣ
Χ: 477905
Ψ: 4238911

➤ ΓΕΩΤΡΗΣΗ 16



➤ ΓΕΩΤΡΗΣΗ 17

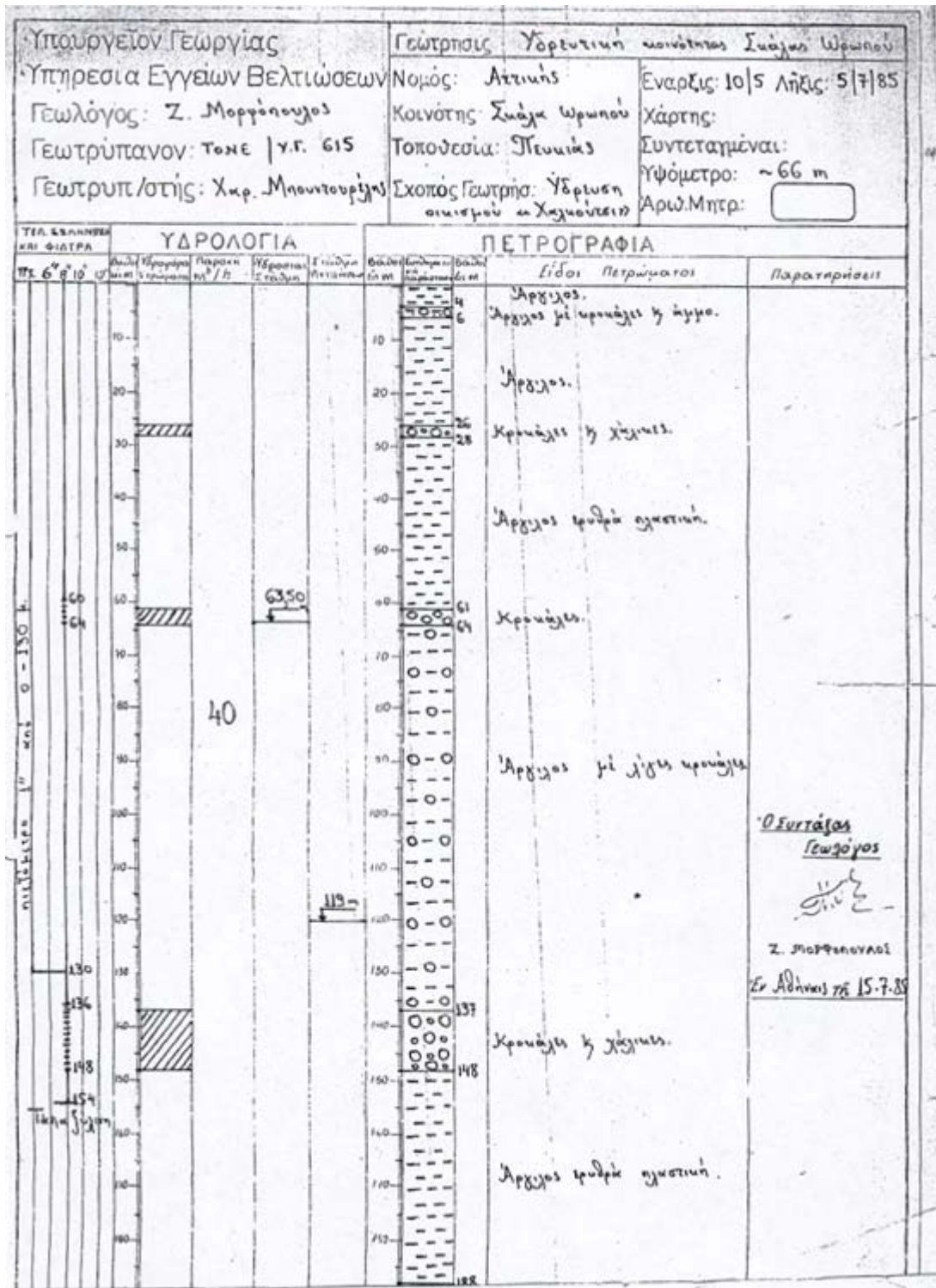
ΤΕΧΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΤΟΜΗ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ
ΦΩΝΑΤΕΡΟΝΤΜΟ ΝΤΟΥΜΑΝΗΣ ΣΩΤΗΡΙΟΣ ΑΡ.ΑΔΕΙΑΣ Ε.Β. 789/16-5-2001

ΝΟΜΟΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΚΟΙΝΟΤΗΤΑ ΟΡΩΠΟΥ
ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΑΓ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ
ΤΥΠΟΣ ΓΕΩΤΡΗΤΗΡΙΑΣ ΑΕΡΟΣΦΥΡΟ
ΧΡΟΝΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΕΠΑΡΤΗ 28-5-2001
ΛΗΞΗ 29-5-2001

ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ	ΚΑΙΜΑΚΑ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ	ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
	10 20 30 40 50 60 70	1 : 1000 αργίλος πλαστική αιμώδης λάσπη πλαστική αργίλος αιμοχαλκήες χαλαροί	διαμέτρος ερευνητικής γεωτρήσεως : διαμέτρος τελικής διατρήσης : 12" διαμέτρος τελικής σωληνώσεως : 8" διαμέτρος χαλικοφίλτρου : 3-7 χιλ. τύπος φίλτρων : γεφύρια ανοίγμα φίλτρων : 3 χιλ. Πιεζόμετρο : παροχή : $20 \text{ m}^3/\text{h}$ βάθος κοπής : 70 m ΑΛΕΞ. ΒΑΣΙΛΑΚΗΣ - ΔΗΜΟΓΕΡΟΝΤΑΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΟΣ Τ.Θ. 190 04 ΣΠΑΤΑ ΑΦΜ: 41009975 - ΔΟΥ ΚΟΡΩΠΟΥ ΤΗΛ. 6633021 - 6634298

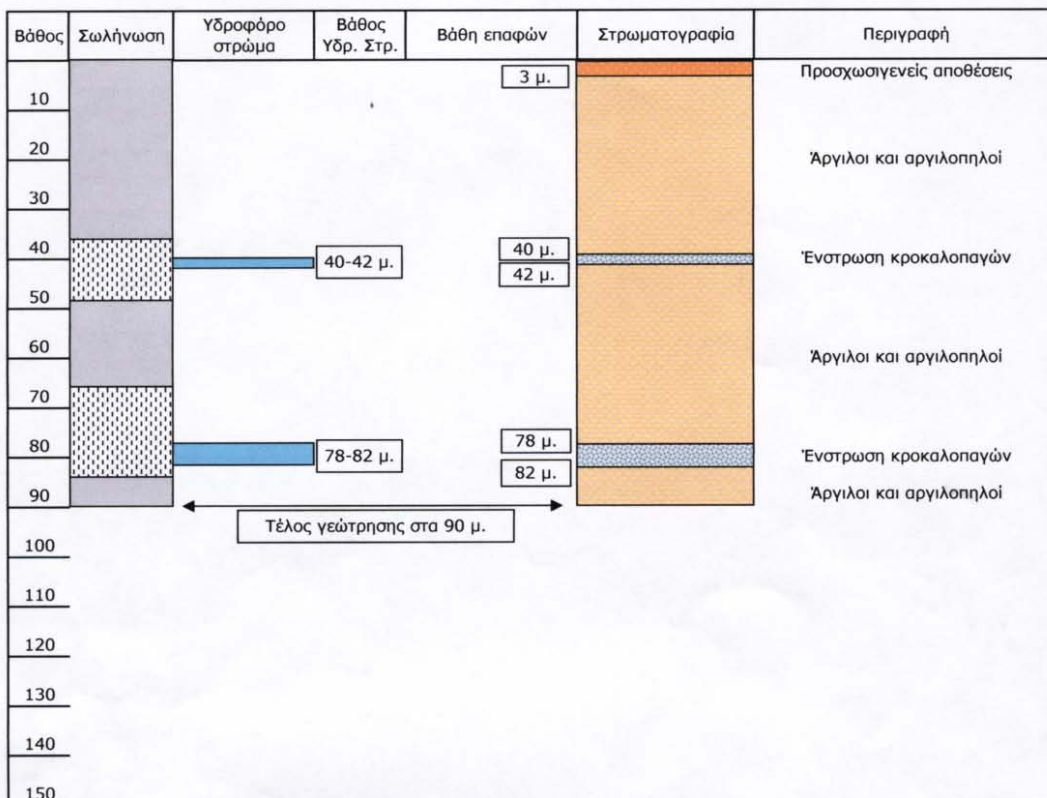
➤ ΓΕΩΤΡΗΣΗ 18



➤ ΓΕΩΤΡΗΣΗ 19

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΔΡΟΓΕΩΤΡΗΣΗΣ

Ιδιοκτήτης Υδρογεώτρησης: Σμαήλος Ελευθέριος και Σμαήλου Βεατρίκη		
Αρ. Πρωτ. Αδείας:	1736/7-4-2005	Κατασκευαστής: Φαχάμ Μιχάλης
Κωδ. Αριθμ. Αδείας:	073071000641	Τύπος γεωτρύπης: -
Νομαρχία:	Ανατολικής Αττικής	Ημερ. Ανόρυξης: Σεπτέμβριος 2005
Δήμος:	Ωρωπού	Ημ. Δοκ. Άντλησ.: -
Θέση:	Σαραντάρι	Υψόμετρο: 42 μέτρα



ΥΠΟΜΝΗΜΑ

	Υδροφόρο στρώμα
	Φιλτροσωλήνες
	Τυφλοί σωλήνες

Στοιχεία διάτρησης και σωλήνωσης γεώτρησης

Διάμετρος Διάτρησης:	12 ίντσες
Διάμετρος τελ. Σωλήνωσης:	8 ίντσες
Τύπος σωλήνων:	Μεταλλικοί γαλβανιζέ με μούφες
Τύπος/άνοιγμα φίτρων:	Πλάγια προσανατολισμένα προς την ροή, 3 χιλιοστά
Διάμετρος Χαλικόφιλτρου:	Διαβάθμιση, 3 - 6 χιλιοστά
Είδος χαλικόφιλτρου:	Ποτάμιας προέλευσης

Στοιχεία παροχής και βάθους γεώτρησης

Κρίσιμη παροχή:	8 κ.μ./ώρα	Ο Γεωλόγος
Παροχή εκμετάλλευσης:	6 κ.μ./ώρα	
Στάθμη ηρεμίας:	42 μέτρα	
Βάθος άντλησης:	85 μέτρα	
Βάθος γεώτρησης:	90 μέτρα	

➤ ΓΕΩΤΡΗΣΗ 20

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

ΝΟΜΑΡΧΙΑ ΑΤΤΙΚΗΣ

Δ/ΝΣΗ ΒΙΤΕΙΩΝ ΒΕΛΤ/ΣΕΩΝ

ΜΕΛΑΝΟΠΟΥ 22

105 52 ΑΘΗΝΑ

ΕΚΔΙΟΜΗ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΣ ΝΒ.09.....

ΝΟΜΟΣ Αρ. 1111... ΠΕΡΙΟΧΗ Νέα Φοιγιά

ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ: Δραμίδει... ΥΨΟΜΕΤΡΟ

ΕΝΑΡΞΙΣ 23.7.85... ΑΝΟΙΞΙΣ .. 24.9.85

ΓΕΩΤΡΥΠΑΝΟΝ FAIRING 166 ΓΕΩΤΡΥΠΑΝΙΣΤΗΣ

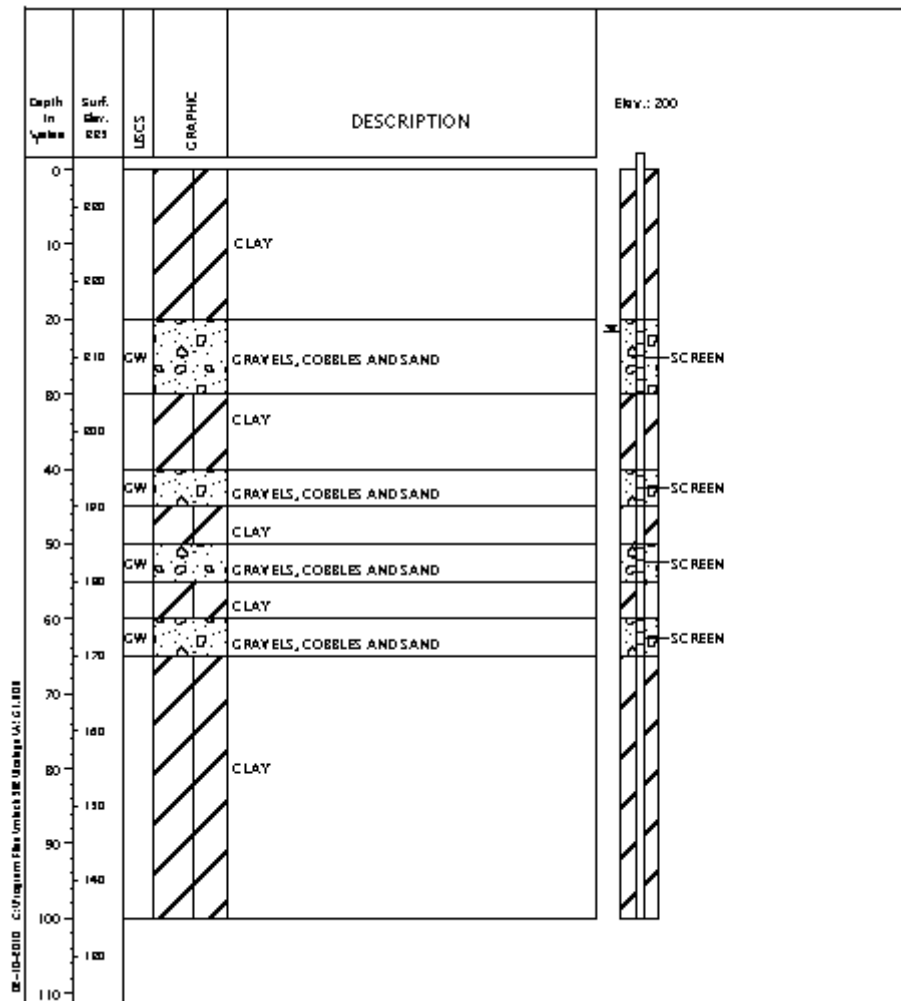
Νίμωας Κων/νος

ΓΕΩΤΡΗΣΙΣ	ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ	ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΑ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
ΤΟΜΗ ΤΕΛΙΚΗΣ ΣΥΛΛΗΨΗΣ	ΥΔΡΟΦ.	ΕΙΔΟΣ	
Διάμ. σωλ. κατ. φίλτρ.	ΕΤΡΩΜ.	ΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	
0	8"	Αρχιζος με χιγν Αρχιζος με χιγν Κρομαζος Αρχιζος με χιγν Κρομαζος	1) Βάθος τοποθετή- σεως άντλης 107 μέτ 2) Ήρται λειτουργ- γίας άντλης συγ- κροτήματος ήρται 24 3) Τύπος άντλης συγκροτήματος PERKING ΕΤΟΙΧΕΙΑ
75		1) ΥΔΡΟΣΤΑΤ. ΣΤΑΣΗ ΜΕΤΡ. 63,50	1) ΣΥΝ. ΕΡΓΑΣ. ΠΕΤΡ.
84		2) ΣΤΑΣΗ ΑΝΤΛΗΣ. ΜΕΤΡΑ 100	2) ΜΕΣΗ ΠΕΤΡ. ΠΑΡΟΧ.
87		3) ΠΑΡΟΧΗ Μ ³ 20	3) ΣΥΝΘΕΣΗ ΠΕΤΡ.
93		Υδροφόρος Κρομαζος Αρχιζος	4) ΧΡΗΣΙΜΕΣ ΕΡΓΑ- ΣΙΑΣ
96		Υδροφόρος Κρομαζος Αρχιζος	5) ΠΗΓΑΙ ΧΡΗΜ/ΣΕΩΣ
105		Υδροφόρος Κρομαζος Αρχιζος	Ο ΓΕΩΤΡΥΠΑΝΙΣΤΗΣ
111		Υδροφόρος Κρομαζος Αρχιζος	
117		Υδροφόρος Κρομαζος Αρχιζος	
120		Αρχιζος	

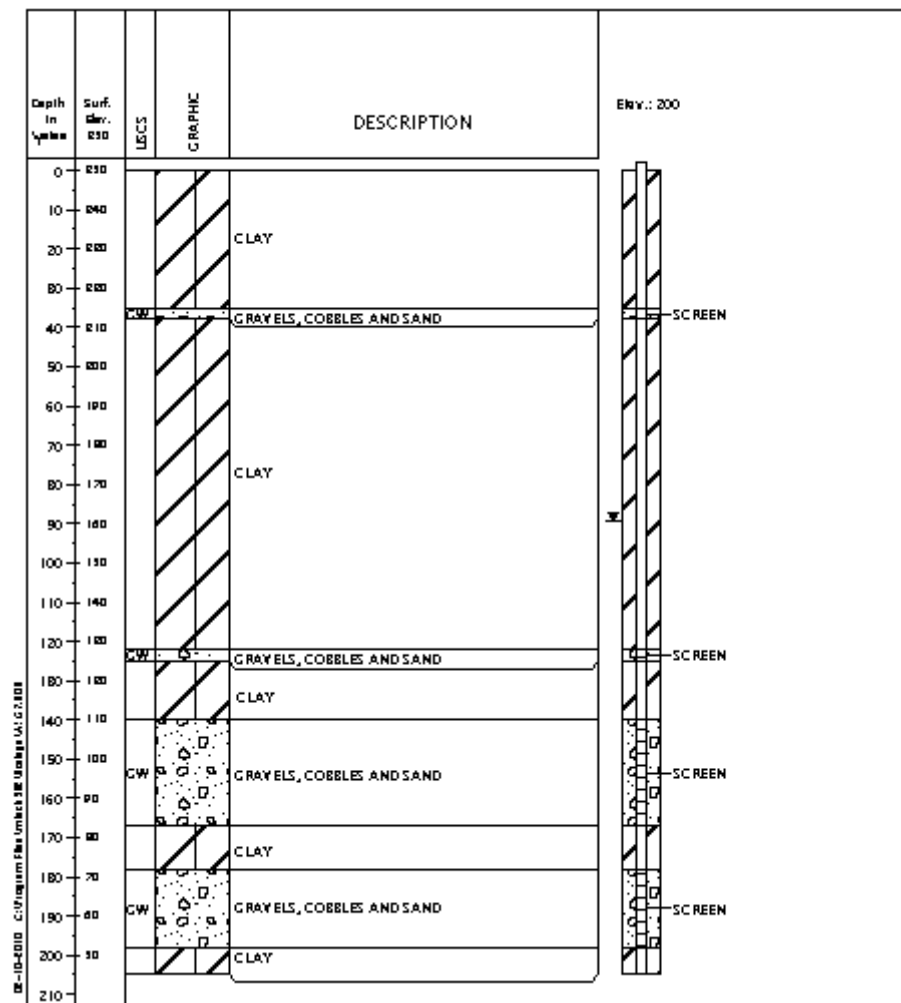
14 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

14.1 Απλοποιημένη μορφή γεωτρήσεων (γεωλογικών καρτών)

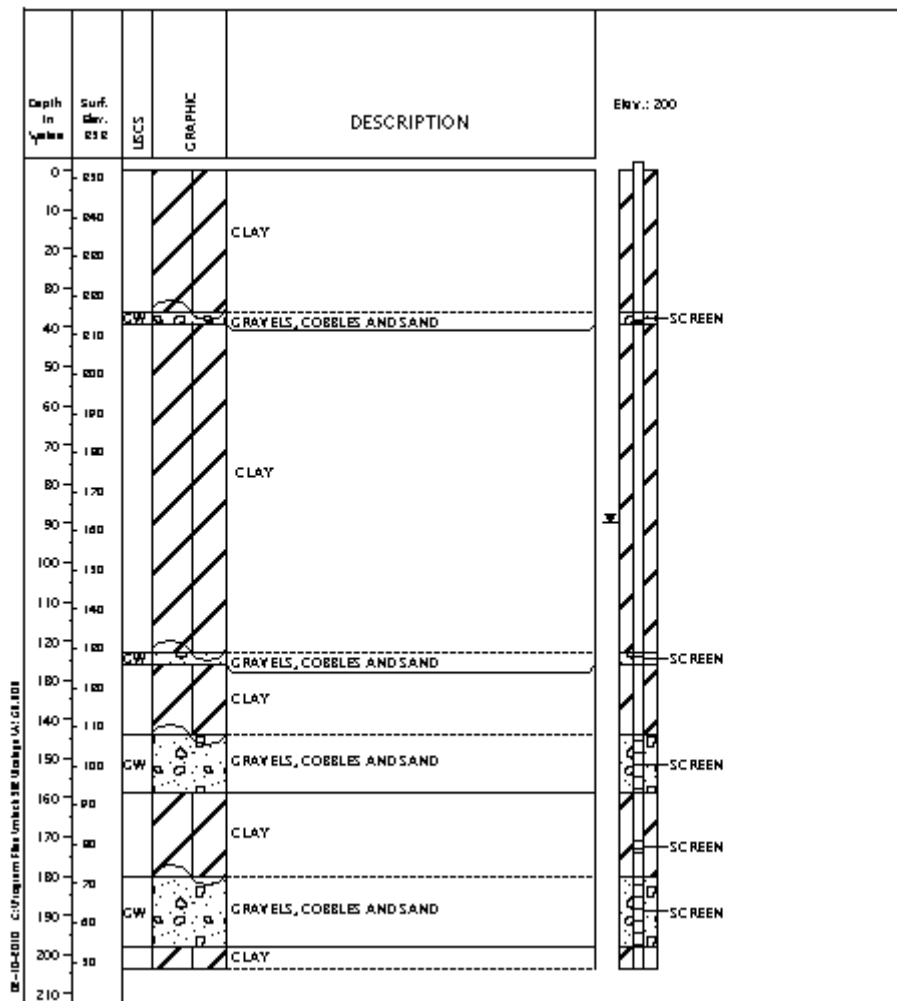
➤ ΓΕΩΤΡΗΣΗ 1



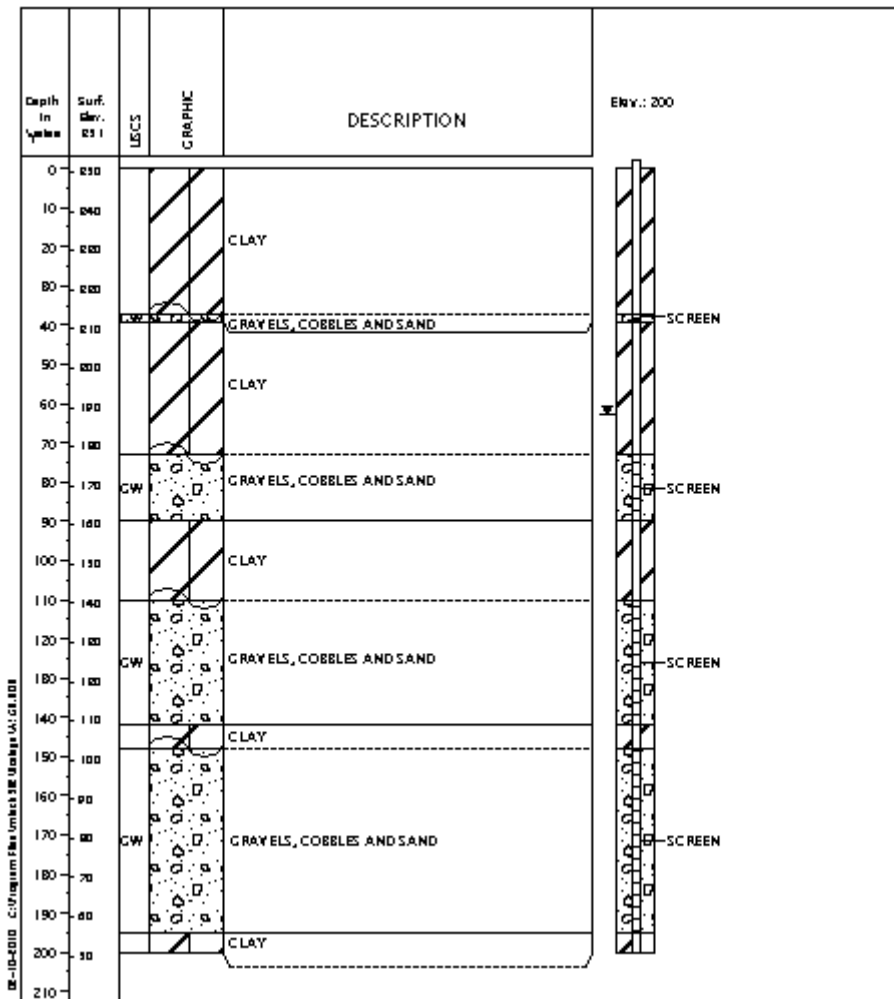
➤ ΓΕΩΤΡΗΣΗ 7



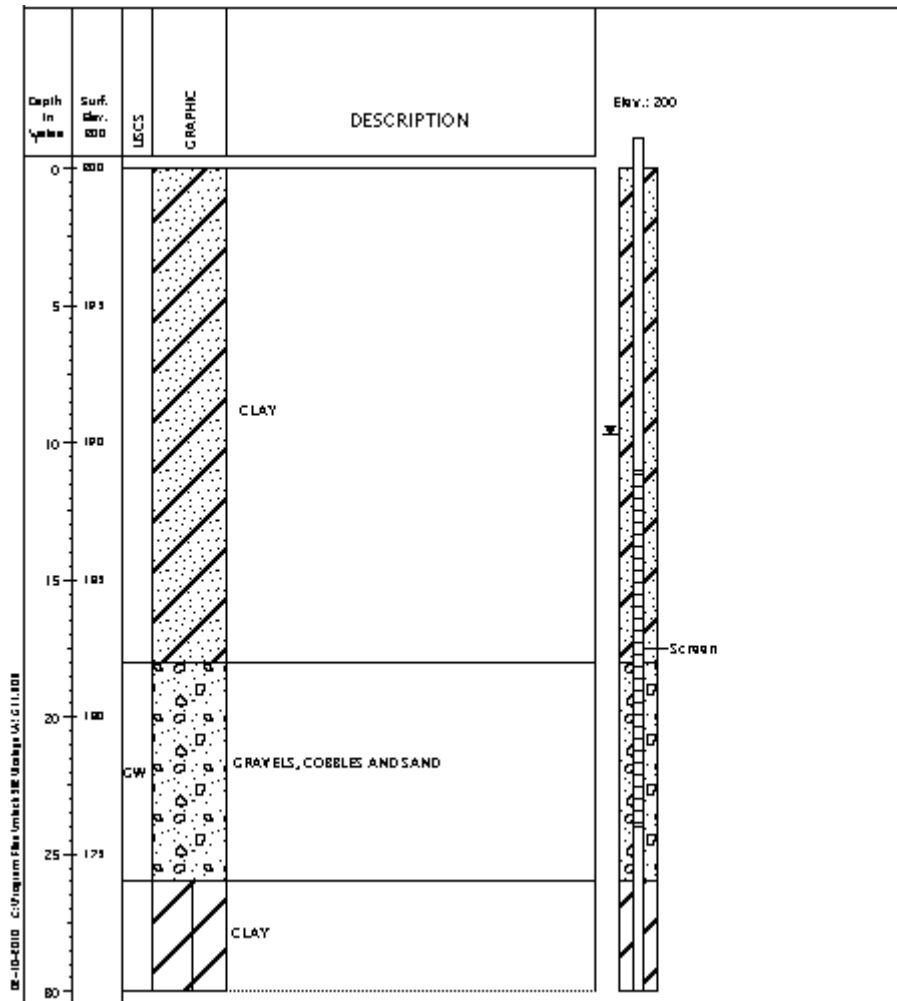
➤ ΓΕΩΤΡΗΣΗ 8



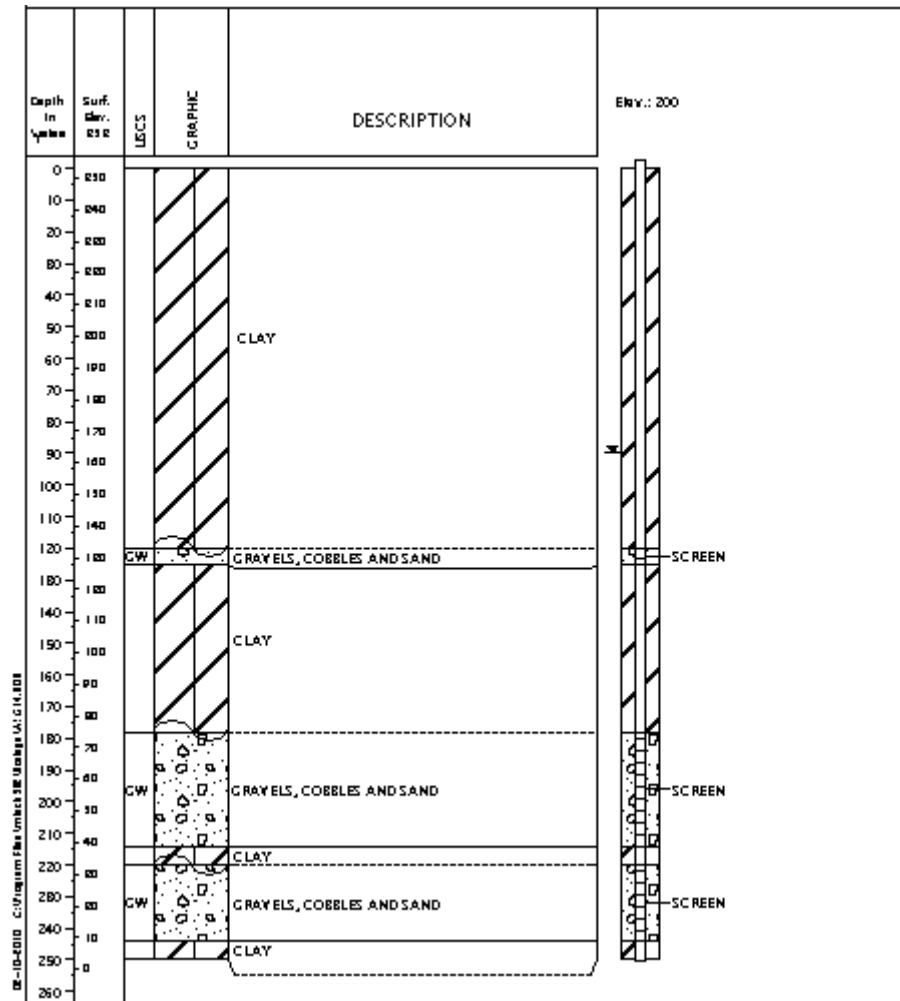
➤ ΓΕΩΤΡΗΣΗ 9



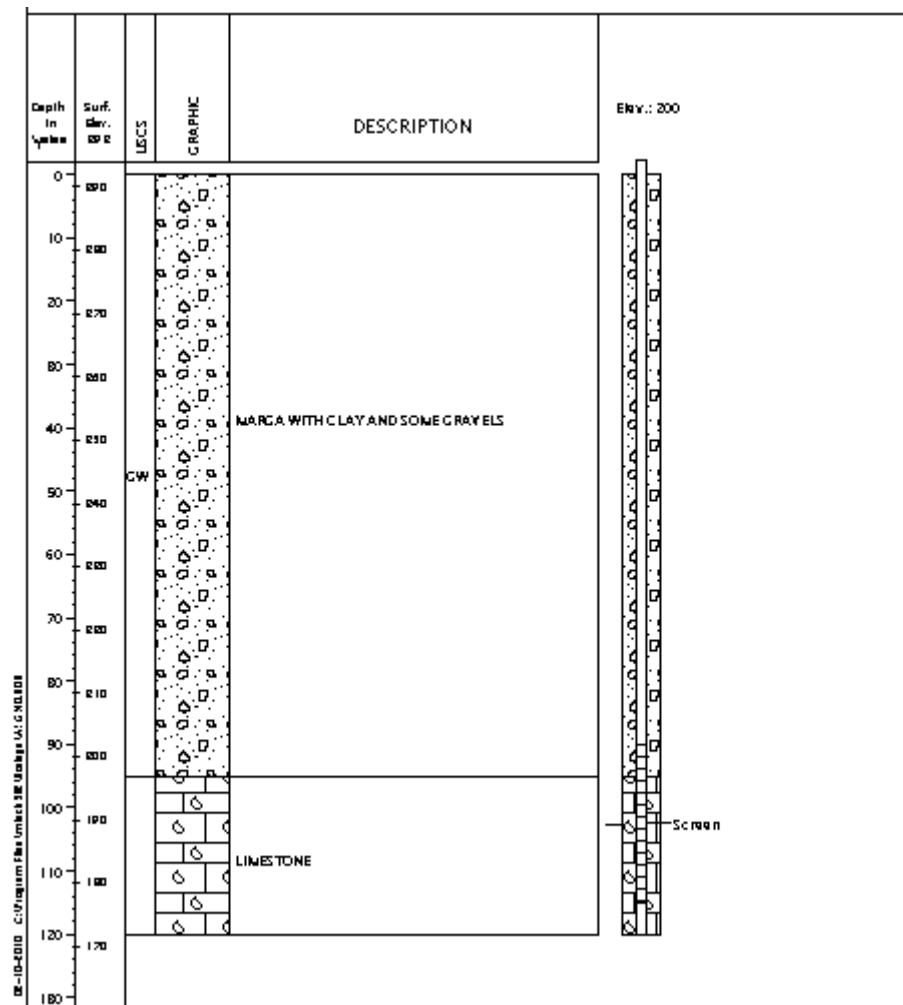
➤ ΓΕΩΤΡΗΣΗ 11



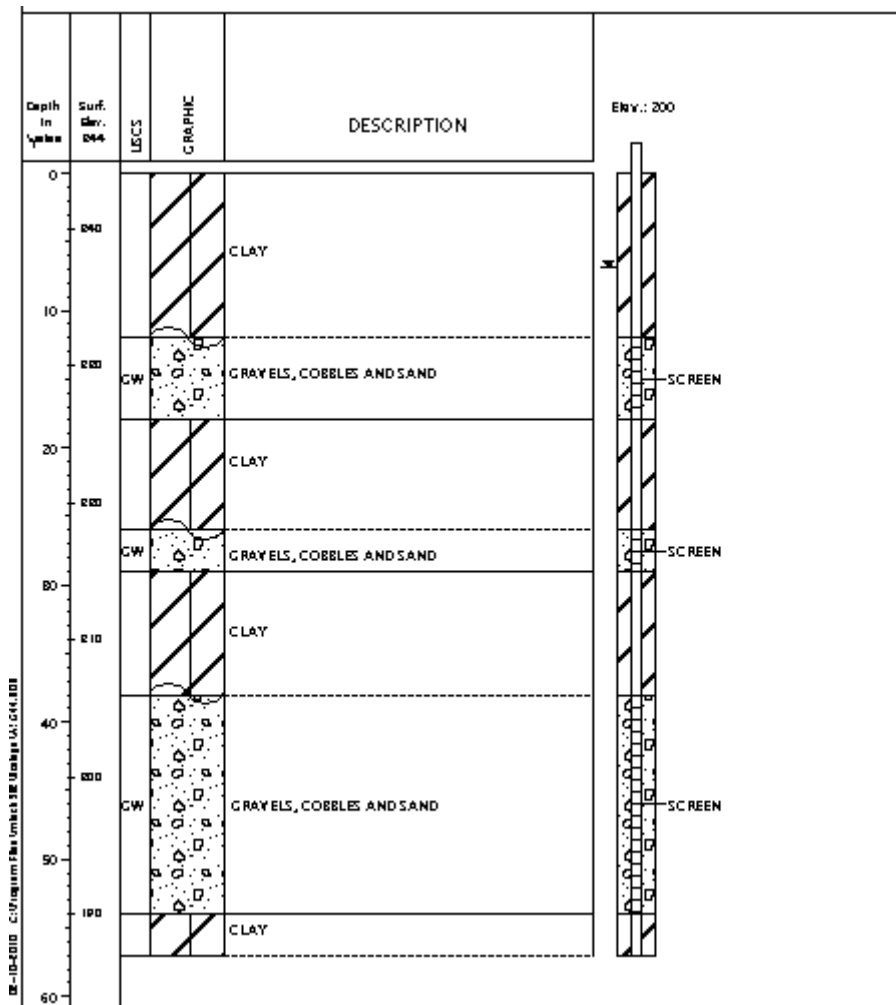
➤ ΓΕΩΤΡΗΣΗ 14



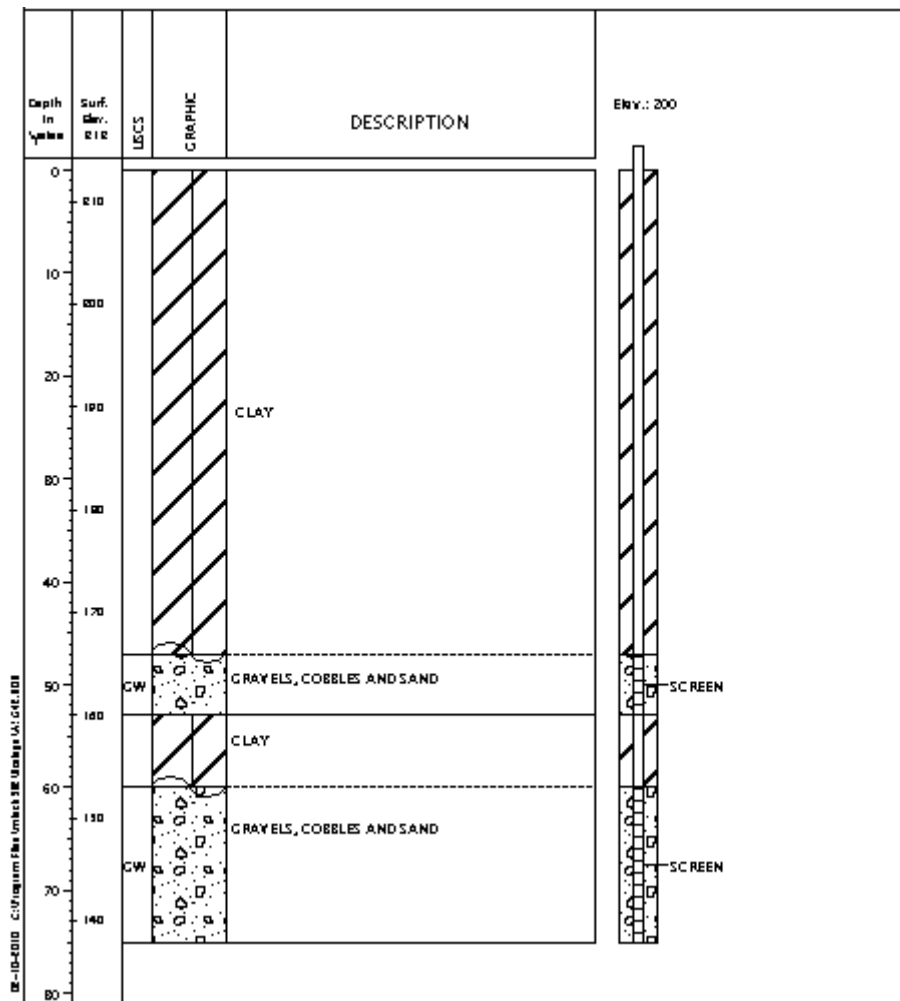
➤ ΓΕΩΤΡΗΣΗ 15



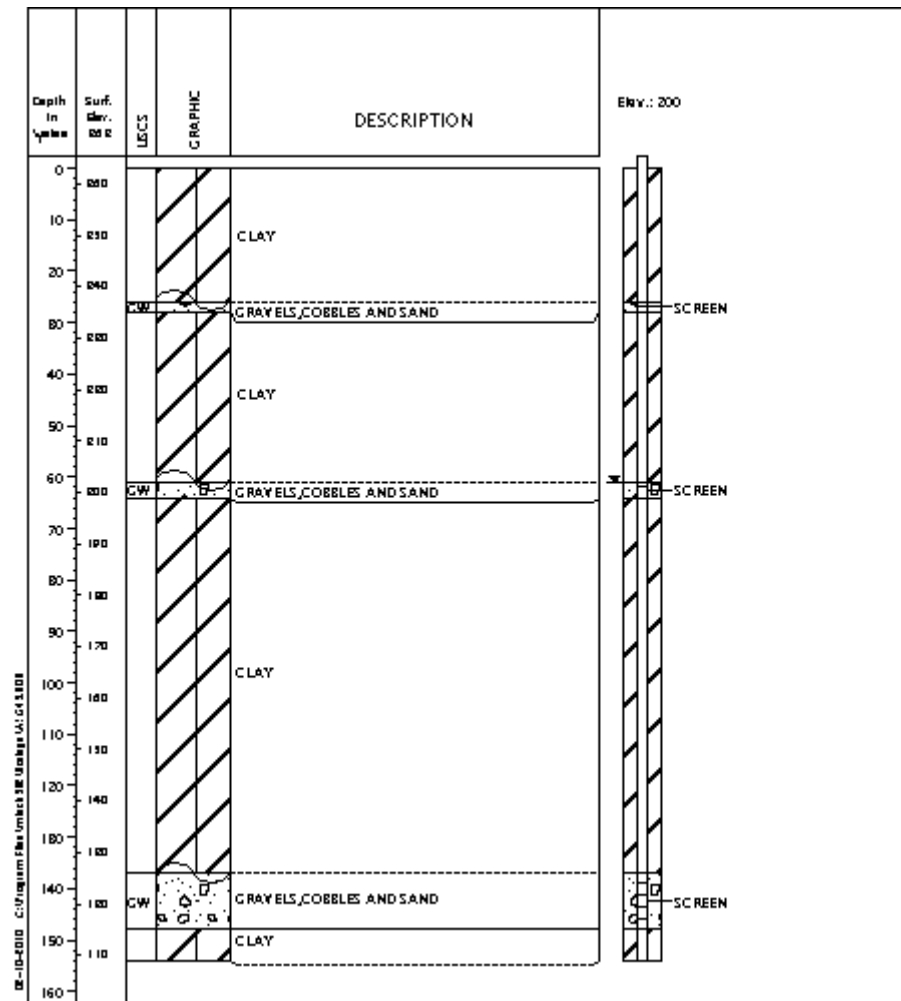
➤ ΓΕΩΤΡΗΣΗ 16



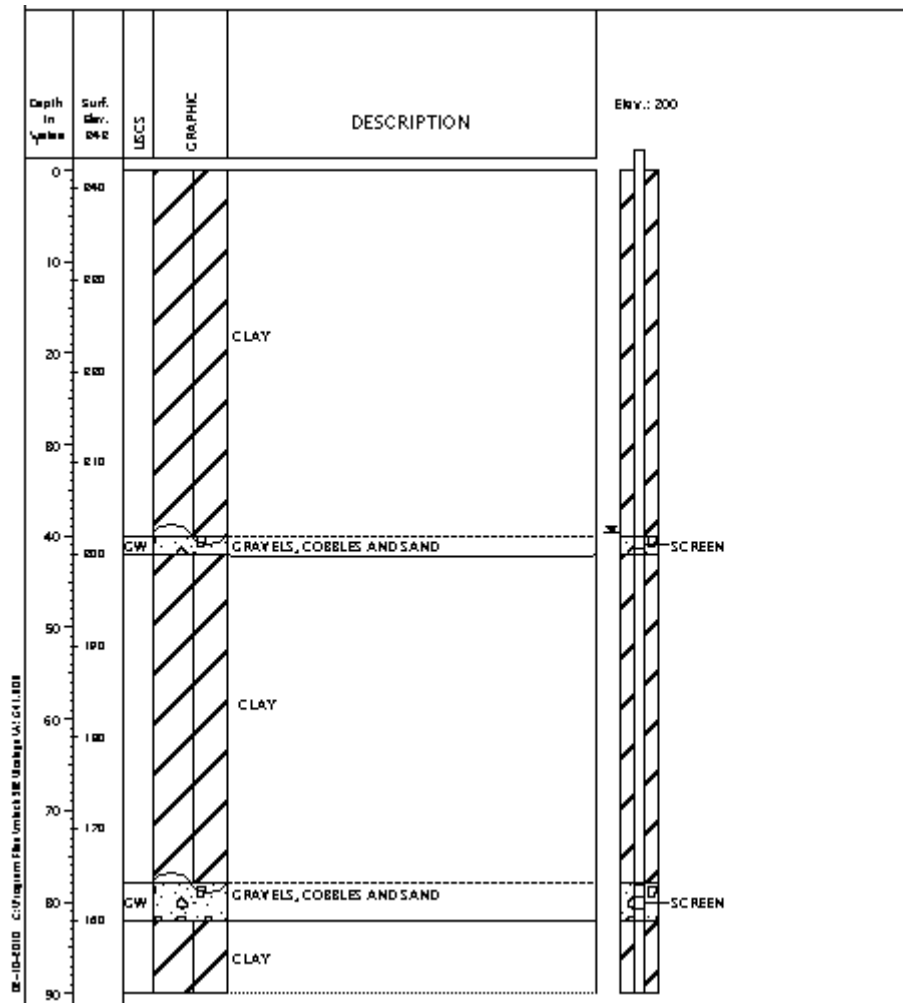
➤ ΓΕΩΤΡΗΣΗ 17



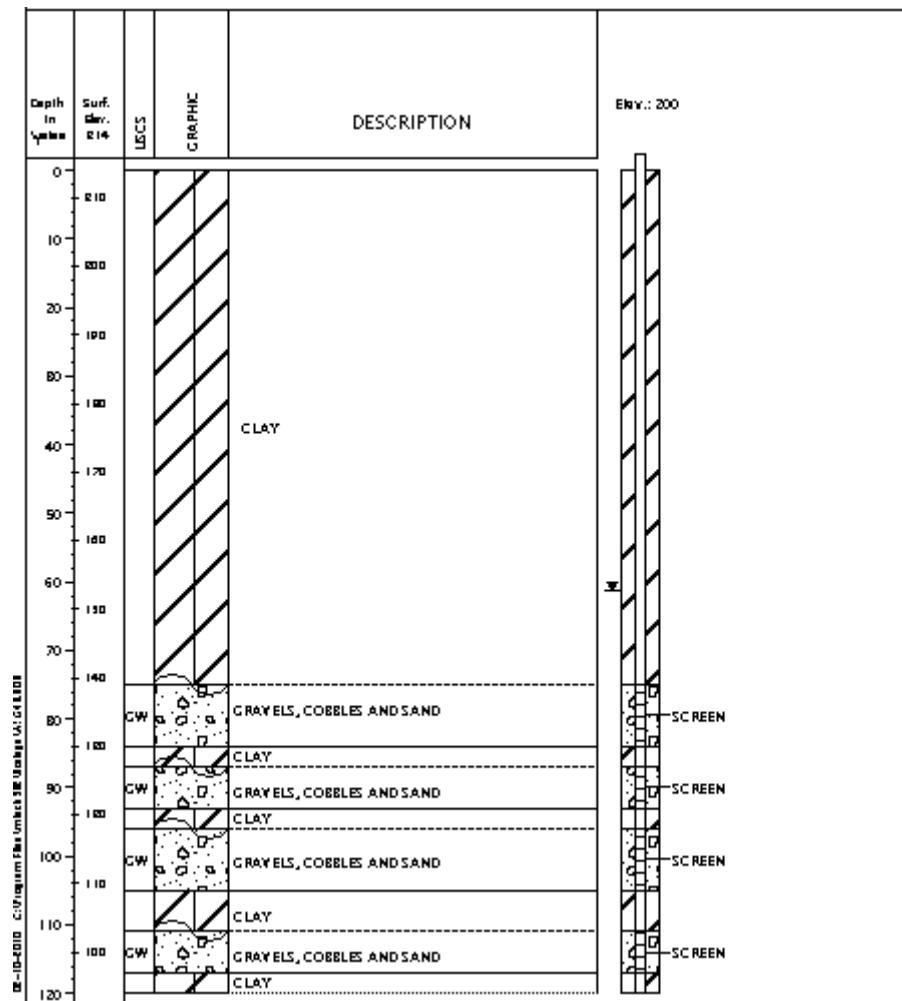
➤ ΓΕΩΤΡΗΣΗ 18



➤ ΓΕΩΤΡΗΣΗ 19



➤ ΓΕΩΤΡΗΣΗ 20



15 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

Πίνακας 14. Τεχνικά χαρακτηριστικά υδρογεωτρήσεων

Γεωτρήσεις	Ιδιοκτήτης	Θέση	Συντεταγμένη χ	Συντεταγμένη y	Απόλυτο υψόμετρο γεώτρησης (m)	Υψόμετρο PTC (m)	Βάθος γεώτρησης (m)
1	Κοινοτική	Σαραντάρι (Ωρωπός)	479944	4239364	35	235	94
2			479897	4239136	44	244	
3			479531	4240190	23	223	
4			479326	4241799	8	208	
5			478519	4241639	2	202	
6			478948	4240994	22	222	
7	Κοινοτική	Μανδριά (Χαλκούτσι)	476011	4241050	38	238	198
8	Κοινοτική	Χρυσοπηγή	476268	4240896	55	255	204

		(Χαλκουτσίου)					
9	Κοινοτική	Αγ. Αικατερίνη (Ωρωπού)	476466	4240827	58	258	200
10			480196	4241427	12	212	
11	Φαφούτης Χρήστος& Σωτήριος	Λεύκα ή Κάμπος (Ωρωπός)	480196	4241427	6	206	30
12			479703	4241669	24	224	
13			476580	4242454	47	247	
14	Μπαγιάτη Πέτρου	Αγία Αικατερίνη (Συκάμινου)	475614	4241086	63	263	250
15	Στιβακτάκης Εμμανουήλ& Σκέυη Ιωάννα	Σκινιά (Ωρωπός)				260	120
16	Κοινοτική	<<Αγριλεζα>> (Χαλκούτσι)				245	60
17	Ντουμάνης Σωτήριος	Αγ. Γεώργιος (Ωρωπός)				213	70

18	Κοινοτική	Πευκιάς (Ωρωπός)			66	266	188
19	Σμαήλος Ελευθέριος& Βεατρίκη	Σαραντάρι (Ωρωπός)			42	242	90
20	Κοινοτική	Νέα Πολιτεία (Ωρωπός)				249	120
21	Ελένη&Ευγενία Βαρέλα	Σχοινιάς Ωρωπού				247	120
22	Ρουσόνελου	Λάκκα Λιοντάρι- Μαρκόπουλο Ωρωπού				297	200
23	Τούλιας Κων/νος	Νέα Πολιτεία (Ωρωπού)			80-90	279	130
24	Κιαπέκος Κων/νος	Ωρωπός			70-80	277	80
25	Τσόταλου Καλλιρόη	Περιστερία- Ωρωπός			15	215	60
26	Ελεάννα Καπράνου	Αγία Παρασκευή- Μαρκόπουλο					100

		Ωρωπού					
27	Τρίχας Μιχάλης	Κοπρίτσα- Μαρκόπουλο Ωρωπού					100
28	Θωμαΐδη Θεοδώρα	Λάκκα Λιοντάρι- Μαρκόπουλο Ωρωπού			90-100	271	140
29	Τσούμας Πέτρος	Νέα Πολιτεία			56-74	258	80
30					53	253	
31					12	212	
32					17	217	
33					6	206	
34					6	206	
35					0	200	
36					37	237	
37							
38					23	223	

39					11	211	
40					7	207	
41					26	226	
42					7	207	
43					47	247	

Πίνακας 15. Συνέχεια Πίνακα 14

Γεωτρήσεις	Βάθος στάθμης άντλησης (m)	Βάθος στάθμης ηρεμίας (m)	Initial head= Υψόμετρο- Βάθος στάθμης ηρεμίας	Κρίσιμη παροχή (m ³ /h)	Παροχή εκμετάλλευσης (m ³ /h)	Παροχή εκμετάλλευσης για 2 ώρες (m ³ /d)	Βάθος υδροφόρου στρώματος (m)
1	78	24	211		20	40	
2		29.65	214				
3		30	193				
4		2.95	205				
5							
6		7.5	215				
7	102.5	37	201		180	360	35-38

							122-125
							140-156
							178-198
8		38	217		180	360	
9	71.5	38	220	100	110	220	37-39
							73-90
							94-98
							110-142
							148-195
10		6.00	206				

11	20	12	194	7	6	12	20-24
12							
13		5	242				
14					30	60	120-125
							180-190
							222-230
15	113	105			12	24	105-115
16	15	9.2	235	34	30	60	18-12
							26-29
							38-54

17				20		40	
18	119	63.5	203		40	80	26-28
							61-64
							137-148
19		42	200	8	6	12	40-42
							78-82
20	100	63.5	185		20	40	75-84
							87-93
							96-105
							111-117

21							90-120
22		45-50	250		10-12	22	
23							
24							
25							υδροφορείς μέχρι τα 60 m
26					1.5	3	
27					3-5	8	
28					5-15	20	
29					5-7	12	

!!! Οι γεωτρήσεις 7, 8 και 9 είναι κοινοτικές γεωτρήσεις και λόγω της ρύπανσης των υδάτων τους από χρώμιο σταμάτησαν να λειτουργούν. Έτσι, στο μοντέλο ως παροχή εκμετάλλευσης των γεωτρήσεων αυτών χρησιμοποιήθηκε η τιμή 0.

!!! Για τον υπολογισμό της παροχής εκμετάλλευσης για 2 ώρες (m^3/d), χρησιμοποιείται η μέση τιμή του εύρους τιμών της παροχής εκμετάλλευσης (m^3/h) που δίνεται για κάθε γεώτρηση.

!!! Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι, το αρχικό υδραυλικό ύψος (initial head) των γεωτρήσεων 3, 11 και 20 λαμβάνει τιμή μικρότερη από 200 μέτρα, τιμή που στην παρούσα εργασία έχει ορισθεί ως το ύψος στο οποίο βρίσκεται η στάθμη της θάλασσας. Καθώς τα αρχικά υδραυλικά ύψη των γεωτρήσεων πρέπει να λαμβάνουν τιμές υψηλότερες από το ύψος στο οποίο βρίσκεται η στάθμη της θάλασσας, οι τιμές αυτές δεν λήφθησαν υπόψη στη βαθμονόμηση του μοντέλου.