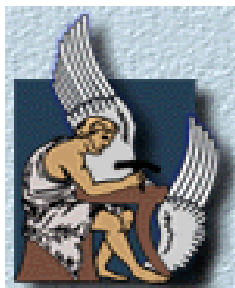


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Ανάλυση Ευαισθησίας Του Μοντέλου
Προσομοίωσης PTC Στον Υπόγειο Υδροφορέα
Της Περιοχής Λιμένα Χερσονήσου-Ηρακλείου»**

Κουμπούρης Κων. Εμμανουήλ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΚΑΡΑΤΖΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ	Αν. Καθηγητής (Επιβλέπων)
ΛΑΖΑΡΙΔΗΣ ΜΙΧΑΗΛ	Επ. Καθηγητής
ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ	Αν. Καθηγητής

ΧΑΝΙΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2005

ΕΥΧΑΡΙΣΤΗΡΙΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Έπειτα από επτά μήνες δουλειάς περίπου έφτασε η ώρα που και η δική μου διπλωματική εργασία ολοκληρώθηκε οδηγώντας στην απόκτηση του πτυχίου μου.

Για την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής κρίνεται σκόπιμο να ευχαριστήσω μία σειρά από ανθρώπους που χωρίς την καταλυτική συμβολή και βοήθειά τους δεν θα ήταν εφικτή η περάτωση της.

Αρχικά οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον καθηγητή κ. Καρατζά Γεώργιο, με την επίβλεψη του οποίου, καθ'όλη την διάρκεια των επτά μηνών, έγινε δυνατή η ολοκλήρωση της διπλωματικής μου. Η βοήθειά του ήταν καίρια, ειδικότερα όποτε υπήρχαν προβλήματα στην όλη διαδικασία.

Επίσης πρέπει να ευχαριστήσω την καθηγήτρια κ. Παπαδοπούλου Μαρία, η οποία επίσης έπαιξε καταλυτικό ρόλο σε κάποια καίρια σημεία της διαδικασίας ολοκλήρωσης της διπλωματικής καθώς και τον υπεύθυνο του Εργαστηρίου Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής κ. Βαρουχάκη Εμμανουήλ, για τις χρήσιμες συμβουλές, παρατηρήσεις και διευκολύνσεις του.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους τους φίλους και στην οικογένεια μου, που υπήρξαν υπομονετικοί σε όλο αυτό το διάστημα, ενθαρρύνοντας κάθε προσπάθειά μου και λειτουργώντας ως ανασταλτικός παράγοντας του άγχους που, όπως είναι φυσικό, κάποιες φορές μας καταβάλλει.

Ελπίζω με την προσπάθεια που κατέβαλα, να ανταποκριθώ πλήρως στις απαιτήσεις που είχα και τις υποχρεώσεις μου.

Μετά χαράς και τιμής,
Κουμπούρης Εμμανουήλ
Μηχανικός Περιβάλλοντος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΣΕΛΙΔΑ

ΜΕΡΟΣ Α

27

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

28

1. ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

29

2. ΤΟ ΥΠΟΓΕΙΟ ΝΕΡΟ ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΚΥΚΛΟ

30

3. ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

32

4. ΚΟΡΕΣΜΕΝΗ ΚΑΙ ΑΚΟΡΕΣΤΗ ΖΩΝΗ

32

4.1 Ακόρεστη ζώνη

32

4.2 Κορεσμένη ζώνη

33

5. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ

33

6. ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΟΠΩΣ ΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ

34

7. ΤΥΠΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ

36

8. ΣΗΜΑΝΤΙΚΕΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

41

8.1 Πορώδες

41

8.2 Υδραυλικό ύψος

42

8.3 Αποθήκευση

44

8.4 Ιξώδες

45

8.5 Υδραυλική κλίση

47

8.6 Υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμένων μέσων

47

8.7 Μεταβιβασιμότητα

48

8.8 Υδραυλική αγωγιμότητα ακόρεστων μέσων

49

8.9 Ανισοτροπία και ετερογένεια

50

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο

53

1. ΤΟ ΝΕΡΟ ΣΤΗΝ ΑΚΟΡΕΣΤΗ ΖΩΝΗ

54

1.1 Υδραυλική αγωγιμότητα και ειδική εκροή μέσω της ακόρεστης ζώνης

54

2. ΤΟ ΝΕΡΟ ΣΤΗΝ ΚΟΡΕΣΜΕΝΗ ΖΩΝΗ

54

3. ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΗΣ ΡΟΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

57

3.1 Εισαγωγή

57

3.2 Πίεση, αναρρόφηση, πιεζομετρικό ύψος, και υδραυλική κλίση

58

3.3 Η κίνηση του υπόγειου ύδατος

60

3.4 Ροή μέσω πορωδών μέσων – Νόμος Darcy (Darcy's Law)

61

3.5 Δυναμικό ταχύτητας, δυναμικό δράσης, και δίκτυα ροής

63

3.6	Εξίσωση Laplace	64
3.7	Ποιότητα υπογείων υδάτων	67
4.	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΙΑΛΥΜΕΝΩΝ ΡΥΠΑΝΤΩΝ	69
4.1	Συμμεταφορά	69
4.2	Διάχυση	71
4.3	Διασπορά	72
	<u>ΜΕΡΟΣ Β</u>	76
	<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο</u>	77
1.	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ	78
1.1	Εισαγωγή	78
1.2	Μοντέλα	78
1.3	Διαδικασίες ροής και μεταφοράς	81
1.4	Κυρίαρχες εξισώσεις	82
1.5	Εξίσωση ροής υπογείων υδάτων	82
1.6	Αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης εξισώσεων	83
2.	ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ	91
3.	ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	98
	<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο</u>	102
1.	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ	103
1.1	Εισαγωγή	103
1.1.1	Σκοπός	103
1.1.2	Εφαρμογή	103
1.1.3	Περιορισμοί	105
1.2	Στόχοι Μοντελοποίησης	108
1.3	Προγράμματα για την Εξασφάλιση της Ποιότητας	109
1.4	Χαρακτηρισμός της περιοχής και Σύλλογή Δεδομένων	110
1.5	Κριτήρια Επιλογής Μοντέλου	111
1.5.1	Χωρική Διαμόρφωση Μοντέλου	112
1.5.2	Χρονική Προσομοίωση	113
1.5.3	Κυρίαρχες Εξισώσεις / Εξισώσεις Διαδικασιών	113
1.5.4	Ιδιότητες Πορωδών Μέσων	113
1.5.5	Ιδιότητες Ρευστών	114
1.6	Τεκμηρίωση Μοντέλου	115
1.7	Εφαρμογή Μοντέλου	116

1.7.1	Εγκατάσταση Μοντέλου	116
1.7.2	Επαλήθευση Μοντέλου	116
1.8	Προσομοίωση	117
1.8.1	Όρια	117
1.8.2	Σχεδιασμός Δικτύων	118
1.8.3	Αρχικές Παράμετροι Εισόδου	119
1.8.4	Βαθμονόμηση	119
1.8.5	Τελικές Παράμετροι Εισόδου	121
1.8.6	Αξιολόγηση	121
1.8.7	Ανάλυση ευαισθησίας	123
1.8.8	Πρόβλεψη	123
1.9	Ανάλυση Σφάλματος	124
1.10	Επαλήθευση	125
1.11	Ερμηνεία και Αναφορά των Αποτελεσμάτων	125
2.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ	127
3.	ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ / ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ	128
<u>ΜΕΡΟΣ Γ</u>		130
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο</u>		131
1.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ	132
1.1	ΓΕΝΙΚΑ	132
1.2	ΚΛΙΜΑ	133
1.3	Χλωρίδα-Πανίδα	133
1.3.1	Χλωρίδα	133
1.3.2	Πανίδα	134
2.	ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	135
2.1	Γενικά	135
2.2	Ενότητα ανθρακικών υδροπερατών σχηματισμών	136
2.2.1	Υπόγειες υδροφορίες των ανθρακικών σχηματισμών της γεωλογικής ενότητας Πίνδου	136
2.2.2	Υπόγειες υδροφορίες των ανθρακικών σχηματισμών της γεωλογικής ενότητας Τρίπολης	136
2.2.3	Υπόγειες υδροφορίες των Πλακωδών ασβεστόλιθων.	138

2.3	Ενότητα νεογενών και τεταρτογενών σηματισμών που τροφοδοτούνται από τους προνεογενείς ανθρακικούς σηματισμούς	138
2.4	Ενότητα υδατοστεγανών σηματισμών	139
3.	ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	141
3.1	Απολήψιμος ετήσιος όγκος νερού από τις υπόγειες υδροφορίες της υδρογεωλογικής ενότητας Δίκτης	141
3.2	Υδροχημεία	142
4.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	143
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο	144
1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	145
2.	ΚΩΔΙΚΑΣ PTC	146
2.1	Ο αλγόριθμος επίλυσης PTC	147
3.	ΡΟΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ	148
3.1	Κυρίαρχη εξίσωση	148
3.2	Οριακές συνθήκες	149
3.2.1	Ειδικό ύψος	149
3.2.2	Ειδική δρώσα δύναμη	149
3.2.3	Διαρροή	150
3.2.4	Συνθήκες στάθμης ύδατος	151
3.2.5	Ισοζύγιο μάζας της ροής των ρευστών	153
4.	ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΡΥΠΑΝΤΩΝ	154
4.1	Κυρίαρχες εξισώσεις	154
4.2	Οριακές συνθήκες	155
5.	ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΟΝ PTC	156
5.1	Εισαγωγή	156
5.2	Δυνατότητες προγράμματος	156
5.3	Δεδομένα εισόδου για το μοντέλο και ζητήματα επαλήθευσης	157
5.4	Καθορισμός παραμέτρων	158
5.5	Αρίθμηση κόμβων	158
5.6	Ελεγχος σφάλματος του PTC	160
5.7	Ελεγχος γραφικών σφαλμάτων	161
5.8	Ελεγχος σφάλματος στην ισορροπία της μάζας	162
5.9	Φιλοσοφία δεδομένων εισόδου / εξόδου	162

6. ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΜΑΖΑΣ ΣΤΗΝ ΕΞΟΔΟ	163
6.1 Ισορροπία μάζας ρευστού στην έξοδο	163
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο	164
1. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ARGUSONE ΚΑΙ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ (ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ) ΕΠΙΛΥΣΗΣ PTC ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ	165
1.1 Γενικά	165
1.2 Περιγραφή των εξεταζόμενων παραμέτρων	166
1.2.1 Αναφορά μεταβολών παραμέτρων	167
1.3 Εισαγωγή οριακών και αρχικών συνθηκών περιοχής μελέτης.	168
1.4 Διαδικασία «τρεξίματος» μοντέλου- μέθοδοι προσομοίωσης	173
1.5 Επιπλέον στόχος η προσομοίωση της ζώνης υφαλμύρωσης	175
2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ	177
2.1 Αλλαγές τιμών παραμέτρων	177
2.1.1 Αλλαγές στις τιμές των παροχών άντλησης	177
2.1.1.1 «Τρεξίματα» του μοντέλου και αποτελέσματα	178
2.1.1.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων	182
2.1.1.3 Προσομοίωση υδραυλικών υψών	185
2.1.2 Αλλαγές στις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας	186
2.1.2.1 «Τρεξίματα» του μοντέλου	187
2.1.2.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων	188
2.1.2.3 Προσομοίωση υδραυλικών υψών	197
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	199
1.ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ARGUSONE ΚΑΙ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ (ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ) ΕΠΙΛΥΣΗΣ PTC ΩΣ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΧΡΗΣΕΩΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	200

2.ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΥΨΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΛΛΑΓΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΝΤΛΗΣΕΩΣ ΠΗΓΑΔΙΩΝ- ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΥΨΩΝ ΣΤΟΥΣ ΚΥΡΙΟΤΕΡΟΥΣ ΚΟΜΒΟΥΣ	240
A.Γραφήματα ποσοστιαίων μεταβολών υδραυλικών για την περίπτωση αλλαγής παροχής αντλήσεως πηγαδιών	240
B.Συνολικός πίνακας ποσοστιαίας μεταβολής των υδραυλικών υψών στους κυριότερους κόμβους	249
3.ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΥΨΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΛΛΑΓΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ- ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΥΨΩΝ ΣΤΟΥΣ ΚΥΡΙΟΤΕΡΟΥΣ ΚΟΜΒΟΥΣ	252
A.Γραφήματα ποσοστιαίων μεταβολών υδραυλικών υψών για την περίπτωση αλλαγής υδραυλικής αγωγιμότητας	252
B.Συνολικός πίνακας ποσοστιαίας μεταβολής των υδραυλικών υψών στους κυριότερους κόμβους	259
4. ΟΔΗΓΙΑ 60/2000	264
4.1 ΑΡΘΡΑ	264

EIKONEΣ

<u>Α/Α ΕΙΚΟΝΑΣ</u>	<u>ΤΙΤΛΟΣ</u>	<u>ΣΕΛΙΔΑ</u>
<u>ΜΕΡΟΣ Α</u>		
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο</u>		
Εικόνα Α-1-1	Ο υδρολογικός κύκλος	31
Εικόνα Α-1-2	Διαχωρισμοί του υπόγειου νερού	38
Εικόνα Α-1-3	Περιορισμένοι και ελεύθεροι υδροφορείς	38
Εικόνα Α-1-4	Ημιπεριορισμένοι υδροφορείς	39
Εικόνα Α-1-5	Σχήματα για τον καθορισμό του συντελεστή αποθηκευτικότητας για (α) περιορισμένους και (β) ελεύθερους υδροφορείς	40
Εικόνα Α-1-6	Αναπαράσταση του υδραυλικού ύψους	43
Εικόνα Α-1-7	Αναπαράσταση της ειδικής αποθήκευσης και αποθηκευτικότητας	45
Εικόνα Α-1-8	Αναπαράσταση του δυναμικού ιξώδους σαν αντίσταση ενός υγρού στη διάτμηση	46
Εικόνα Α-1-9	Αναπαράσταση της έννοιας της μεταβιβασιμότητας	49
Εικόνα Α-1-10	Ελλειπτική αναπαράσταση της διαπερατότητας και της υδραυλικής αγωγιμότητας	51
Εικόνα Α-1-11	Περίληψη των πιθανών συνδυασμών της ισοτροπίας, ανισοτροπίας, ομοιογένειας και ετερογένειας	52
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο</u>		
Εικόνα Α-2-1	Ροή προς ένα πηγάδι άντλησης με απώλεια ύψους	56
Εικόνα Α-2-2	Απόλυτες και πιέσεις διαμετρημάτων	59
Εικόνα Α-2-3	Ύψη και κλίσεις	60
Εικόνα Α-2-4	Οι αρχικές συσκευές του Darcy με μανόμετρο υδραργύρου (α) και ισοδύναμη αρχική συσκευή με μανόμετρο με νερό (b)	62
Εικόνα Α-2-5	Τα δεδομένα του Darcy που έγιναν γράφημα από τον Hubbert	62
Εικόνα Α-2-6	Στοιχειώδης κύβος ενός πορώδους μέσου	65
Εικόνα Α-2-7	Παραδείγματα διαλυτών συστατικών στο υπόγειο νερό	68
Εικόνα Α-2-8	Πηγές μόλυνσης υπόγειου ύδατος	69
Εικόνα Α-2-9	Διαμήκης και εγκάρσια διάδοση συναρτήσει της μηχανικής διασποράς	73
Εικόνα Α-2-10	Επίλυση της μονοδιάστατης εξίσωσης διασποράς – συμμεταφοράς	75

ΜΕΡΟΣ Β

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

Εικόνα Β-1-1	Υποθετική εφαρμογή σε (Α) έναν υδροφορέα με μη ομαλά όρια από πλέγματα (Β) πεπερασμένων διαφορών και (C) πεπερασμένων στοιχείων.	87
Εικόνα Β-1-2	Σχηματικό διαγώνιο σχήμα διαμέσου περιορισμένου υδροφορέα για την αναπαράσταση αριθμητικής προσέγγισης των παραγώγων του του υδραυλικού ύψους, (Α) $\partial h/\partial x$ και (Β) $\partial h/\partial y$.	92
Εικόνα Β-1-3	Παραδείγματα πλεγμάτων πεπερασμένων διαφορών : (Α) δυσδιάστατο κεντροθετημένο πλέγμα, (Β) δυσδιάστατο πλέγμα κεντρικών κόμβων, και (C) τρισδιάστατο κεντροθετημένο πλέγμα.	94
Εικόνα Β-1-4	Μέρος ενός υδρογραφήματος που δείχνουν ότι η παράγωγος (ή κλίση, $\partial h/\partial t$) στον χρονικό κόμβο t_n μπορεί να προσεγγιστεί από το πηλίκο $\Delta h/\Delta t$.	95
Εικόνα Β-1-5	Διάτρητο πλέγμα το οποίο δείχνει την διακριτοποίηση του χρόνου στον κόμβο (i,j) σε ένα δυσδιάστατο πλέγμα πεπερασμένων διαφορών : (Α) άμεση (εμπρόσθια διαφορά) διατύπωση και (Β) έμμεση (οπίσθια διαφορά) διατύπωση.	95
Εικόνα Β-1-6	Διάγραμμα, το οποίο δείχνει (Α) την περιοχή ενός υδροφορέα που είναι χωρισμένη τμηματικά από πεπερασμένα στοιχεία καθώς και το τυπικό στοιχείο e , (Β) την αναπαράσταση του υδραυλικού ύψους με τα πεπερασμένα στοιχεία, και (C) την διαμόρφωση του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων για την προσέγγιση του πραγματικού υδραυλικού ύψους.	99

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο

Εικόνα Β-2-1	Διάγραμμα ροής για την εφαρμογή ενός αριθμητικού μοντέλου υπογείων υδάτων	107
---------------------	---	------------

ΜΕΡΟΣ Γ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

Εικόνα Γ-1-1	Θέση Λιμένα χερσονήσου στο νομό Ηρακλείου	132
Εικόνα Γ-2-1	Κομβική κατανομή της δρώσας δύναμης q διαμέσου ενός στοιχείου μήκους L . Για γραμμικά στοιχεία, κάθε κόμβος ζυγίζεται το ίδιο (έχει τον ίδιο βαθμό σημαντικότητας)	151

Εικόνα Γ-2-2	Συνθήκες της στάθμης του ύδατος και της πτώσης στο ανώτερο στρώμα. Η επιφάνεια σημειώνεται από τις εξισώσεις $z = z1$, $z = z2$, κλπ., και είναι καθορισμένα όρια στο χώρο, και καθορίζουν τα επίπεδα. Σημείωση: η εγκάρσια στάθμη του ύδατος $z = zWT$ πρέπει να ικανοποιεί την ανισότητα $z_M \leq h_M \leq z_{M+1}$.	152
Εικόνα Γ-2-3	Δύο όμοιες διαμορφώσεις στοιχείων με μαρκαρισμένα διαφορετικά εύρη, υπαγορευμένα από την επιλογή του κομβικού σχεδίου αρίθμησης,	160

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο

Εικόνα Γ-3-1	Θέση Λιμένος Χερσονήσου μέσα στο Νομό Ηρακλείου	165
Εικόνα Γ-3-2	Χάρτης της περιοχής μελέτης στον οποίο φαίνονται οι θέσεις των γεωτρήσεων σε σχέση με την πόλη και το Λιμένα Χερσονήσου	166
Εικόνα Γ-3-3	Υποπεριοχές με διαφορετική υδραυλική αγωγιμότητα	171
Εικόνα Γ-3-4	Ισοϋψείς καμπύλες των αρχικών υδραυλικών υψών	171
Εικόνα Γ-3-5	Ισοϋψείς καμπύλες επιπέδων εδάφους	172
Εικόνα Γ-3-6	Θέσεις πηγαδιών και εισαχθείσες οριακές συνθήκες περιοχής	172
Εικόνα Γ-3-7	Δεδομένα πλέγματος μετατρέπονται σε στοιχεία πλέγματος	174
Εικόνα Γ-3-8	Θέση της ζώνης υφαλμύρωσης (salinity zone) στην περιοχή μελέτης	176
Εικόνα Γ-3-9	Θέσεις κόμβων και περιοχών με τις μεγαλύτερες μεταβολές στα υδραυλικά ύψη σε σχέση με την πόλη της Χερσονήσου για την περίπτωση μεταβολής των παροχών αντλήσεως	178
Εικόνα Γ-3-10	Περιοχές με διαφορετική υδραυλική αγωγιμότητα	187
Εικόνα Γ-3-11	Θέσεις κόμβων και περιοχών με τις μεγαλύτερες μεταβολές στα υδραυλικά ύψη σε σχέση με την πόλη της Χερσονήσου για την περίπτωση μεταβολής της υδραυλικής αγωγιμότητας	188

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Εικόνα Π-1-1	Βασικό παράθυρο μοντέλου ArgusOne	200
Εικόνα Π-1-2	Επιλογή New PTC Project για να ξεκινήσουμε μία νέα εφαρμογή	201
Εικόνα Π-1-3	Παράθυρο διαλόγου για τη διαμόρφωση των αρχικών συνθηκών που αφορούν τον κώδικα PTC.	202
Εικόνα Π-1-4	Η επιλογή General του PTC Configuration	203
Εικόνα Π-1-5	Η επιλογή Stresses του PTC Configuration	206

Εικόνα Π-1-6	Παράθυρο για την εφαρμογή των απαιτούμενων διαδικασιών στην εφαρμογή του μοντέλου.	211
Εικόνα Π-1-7	Επιλογή του μενού Special και έπειτα του Drawing Size για τον σχεδιασμό της περιοχής μας.	212
Εικόνα Π-1-8	Εισαγωγή των μηκών των ορίων της περιοχής στα πλαίσια Horizontal Extent και Vertical Extent .	212
Εικόνα Π-1-9	Σχεδιασμός της περιοχής	213
Εικόνα Π-1-10	Παράθυρο διαλόγου για την εισαγωγή της πυκνότητας της περιοχής μελέτης.	214
Εικόνα Π-1-11	Επιλογή Scale and Units από το μενού Special για καθορισμό την μονάδας μέτρησης στην περιοχή μελέτης.	215
Εικόνα Π-1-12	Επιλογή του μέτρου (m) ως μονάδα μέτρησης για την περιοχή μελέτης μας.	216
Εικόνα Π-1-13	Επιλογή Rotate and Scale Objects από το μενού Special για καθορισμό της κλίμακας της περιοχής.	217
Εικόνα Π-1-14	Διαμόρφωση της κλίμακας στον X άξονα, μέσω της επιλογής Uniform scale και εφαρμογή σε όλη την περιοχή μέσω της επιλογής Entire document.	218
Εικόνα Π-1-15	Καθορισμός των οριακών συνθηκών για τη ροή της περιοχής.	219
Εικόνα Π-1-16	Καθορισμός της πηγής ρύπανσης και της συγκέντρωσης αυτής.	220
Εικόνα Π-1-17	Αντιγραφή της πηγής στο Domain Outline Layer και αλλαγή της πυκνότητάς της.	221
Εικόνα Π-1-18	Καθορισμός της τιμής των αρχικών υδραυλικών υψών της περιοχής.	222
Εικόνα Π-1-19	Τοποθέτηση πηγαδιών άντλησης και καθορισμός των τιμών τους.	223
Εικόνα Π-1-20	Παρουσίαση της περιοχής μετά την τοποθέτηση της πηγής ρύπανσης και των πηγαδιών άντλησης.	224
Εικόνα Π-1-21	Δημιουργία του δικτύου προσομοίωσης της περιοχής	226
Εικόνα Π-1-22	Βελτιστοποίηση του εύρους ζώνης για εξοικονόμηση μνήμης στον υπολογιστή	227
Εικόνα Π-1-23	Παράθυρο από το τρέξιμο του μοντέλου	227
Εικόνα Π-1-24	Επιλογή των δεδομένων από αρχείο κειμένου	229
Εικόνα Π-1-25	Επιλογή του τρόπου ανάγνωσης των δεδομένων σαν δεδομένα πλέγματος	230
Εικόνα Π-1-26	Επιλογή αρχείου για εξαγωγή γραφήματος	231
Εικόνα Π-1-27	Δημιουργία του γραφήματος INITIAL HEADS	232

Εικόνα Π-1-28	Επιλογή χαρακτηριστικών για το γράφημα των υδραυλικών υψών μέσω του παραθύρου Contour Diagram	233
Εικόνα Π-1-29	Ρυθμίσεις επιλογής Chart	234
Εικόνα Π-1-30	Ρυθμίσεις επιλογής Position	234
Εικόνα Π-1-31	Ρυθμίσεις επιλογής Titles	235
Εικόνα Π-1-32	Επιλογή χαρακτηριστικών για το ταχυτήτων μέσω του παραθύρου Vector Diagram	238
Εικόνα Π-2-1	Θέσεις των πηγαδιών στην περιοχή μελέτης	240
Εικόνα Π-3-1	Τμήματα με διαφορετική τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας	252

ΠΙΝΑΚΕΣ ΚΑΙ ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ

<u>Α/Α ΠΙΝΑΚΑ</u>	<u>ΤΙΤΛΟΣ</u>	<u>ΣΕΛΙΔΑ</u>
<u>ΜΕΡΟΣ Α</u>		
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο</u>		
Πίνακας Α-1-1	Τιμές πορώδους για διάφορες κατηγορίες πετρωμάτων	12
Πίνακας Α-1-2	Σημαντικές φυσικές ιδιότητες εδαφών και πετρωμάτων	48
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο</u>		
Πίνακας Α-2-1	Παράγοντες μετατροπής για πιέσεις και σχετικούς όρους	59
Πίνακας Α-2-2	Προσεγγιστικά ισοδύναμα της ατμοσφαιρικής πίεσης	59
<u>ΜΕΡΟΣ Β</u>		
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο</u>		
Πίνακας Β-1-1	Σύνοψη των μέτρων ευαισθησίας που εμπλέκονται στην ανάλυση ευαισθησίας	128
<u>ΜΕΡΟΣ Γ</u>		
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο</u>		
Πίνακας Γ-1-1	Γεωτρήσεις σε διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς	140
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο</u>		
Πίνακας Γ-3-1	Τιμές παραμέτρων εισόδου	169
Πίνακας Γ-3-2	Αρχικές παροχές αντλήσεως πηγαδιών	170
Πίνακας Γ-3-3	Αυξημένες και μειωμένες τιμές παροχών αντλήσεως	177
Πίνακας Γ-3-4	Κόμβοι και υποπεριοχές με την μεγαλύτερη ποσοστιαία μεταβολή υδραυλικών υψών	180
Πίνακας Γ-3-5	Αρχικές τιμές, μεταβολές και τελικές (μέγιστες και ελάχιστες) τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας	186
Πίνακας Γ-3-6	Κόμβοι και υποπεριοχές με την μεγαλύτερη ποσοστιαία μεταβολή υδραυλικών υψών	190
<u>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</u>		
Πίνακας Π-1-1	Έλεγχος γενικών παραμέτρων (General control)	207
Πίνακας Π-1-2	Έλεγχος χρονικών παραμέτρων (Time control)	208
Πίνακας Π-1-3	Έλεγχος των γραφικών (Graphs control)	209
Πίνακας Π-1-4	Γενικός έλεγχος προσομοίωσης	210
Πίνακας Π-1-5	Παράμετροι και οι τιμές τους	224
Πίνακας Π-1-6	Αρχεία εξόδου και περιεχόμενα αυτών	228

Πίνακας Π-1-7	Ποσοστιαία μεταβολή των υδραυλικών υψών στους κυριότερους κόμβους.	249
Πίνακας Π-1-8	Ποσοστιαία μεταβολή των υδραυλικών υψών στους κυριότερους κόμβους.	260

Α/Α ΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ

ΜΕΡΟΣ Γ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο

Γράφημα Γ-3-1	Επίλυση πλέγματος με την Exact Contour method	175
Γράφημα Γ-3-2	Ποσοστιαία μεταβολή υδραυλικών υψών χειμώνα με αύξηση της άντλησης	183
Γράφημα Γ-3-3	Ποσοστιαία μεταβολή υδραυλικών υψών καλοκαιριού με αύξηση της άντλησης	183
Γράφημα Γ-3-4	Ποσοστιαία μεταβολή υδραυλικών υψών χειμώνα με μείωση της άντλησης	184
Γράφημα Γ-3-5	Ποσοστιαία μεταβολή υδραυλικών υψών καλοκαιριού με μείωση της άντλησης	184
Γράφημα Γ-3-6	Θέσεις των τελικών υδραυλικών υψών σε σχέση με τη ζώνη υφαλμύρωσης	185
Γράφημα Γ-3-7	Ποσοστιαία μεταβολή υδραυλικών υψών χειμώνα με αύξηση της υδραυλικής αγωγιμότητας	195
Γράφημα Γ-3-8	Ποσοστιαία μεταβολή υδραυλικών υψών καλοκαιριού με αύξηση της υδραυλικής αγωγιμότητας	195
Γράφημα Γ-3-9	Ποσοστιαία μεταβολή υδραυλικών υψών χειμώνα με μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας	196
Γράφημα Γ-3-10	Ποσοστιαία μεταβολή υδραυλικών υψών καλοκαιριού με μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας	196
Γράφημα Γ-3-11	Θέσεις τελικών υδραυλικών υψών σε σχέση με την ζώνη υφαλμύρωσης	197
Γράφημα Γ-3-12	Θέσεις τελικών υδραυλικών υψών σε σχέση με την ζώνη υφαλμύρωσης (χρήση μεθόδου γραμμικής παρεμβολής)	198

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Γράφημα Π-1-1	Γράφημα υδραυλικών υψών	235
Γράφημα Π-1-2	Γράφημα συγκεντρώσεων	236
Γράφημα Π-1-3	Γράφημα συγκεντρώσεων (χωρίς την ύπαρξη πηγαδιών άντλησης)	237

Γράφημα Π-1-4	Γράφημα ταχυτήτων	239
	Γραφήματα των ποσοστιαίων μεταβολών των υδραυλικών υψών για κάθε μία από τις 20 περιπτώσεις (10 πηγάδια με αύξηση και μείωση παροχής στο καθένα από αυτά)	240
	Γραφήματα των ποσοστιαίων μεταβολών των υδραυλικών υψών για κάθε μία από τις 14 περιπτώσεις (7 τμήματα της περιοχής με διαφορετική τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας με αύξηση και μείωση παροχής στο καθένα από αυτά)	253

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ
(ΑΚΡΩΝΥΜΑ)

<u>ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ</u>	<u>ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ (ΑΓΓΛΙΚΑ)</u>	<u>ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ (ΕΛΛΗΝΙΚΑ)</u>
ADE	Atmospheric	Εξίσωση Ατμοσφαιρικής
	Diffusion Equation	Διάχυσης
CFEST	Couple Fluid Energy and Solute Transport	Μοντέλο Σύνδεσης της Ενέργειας των Ρευστών και της Μεταφοράς των Διαλυτών Ουσιών
DTSC	Department of Toxic Substances Control	Τμήμα Ελέγχου Τοξικών Ουσιών
EPA	Environmental Protection Agency	Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος Η.Π.Α.
FEM	Finite-Element Method	Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων
FEMWATER	Three-dimensional Finite-Element Groundwater Flow Model	Τρισδιάστατο Μοντέλο για τη Ροή των Υπογείων Υδάτων, βασισμένο σε Πεπερασμένα Στοιχεία
GIS	Geographical Information System	Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών
GSU	Geological Support Unit	Μονάδα Γεωλογικής Υποστήριξης
HST3D	Finite-Difference Modelling Program for the Simulation of Fluid, Single-Species Solute and Heat Transport in Three Dimensions under Saturated Conditions	Πρόγραμμα Μοντελοποίησης Πεπερασμένων Διαφορών για την Προσομοίωση των Ρευστών και των Διαλυτών Ουσιών, αποτελούμενων μόνο από ένα Συστατικό, και την Μεταφορά της Θερμότητας στις Τρεις Διαστάσεις κάτω από Κορεσμένες Συνθήκες
IGWMC	International Ground Water Modelling Center	Διεθνές Κέντρο Μοντελοποίησης Υπογείων Υδάτων
MODFLOW	Modular Three- dimensional Finite- Difference Groundwater Flow Model with some Solute Transport and Parameter Estimation Capabilities	Τρισδιάστατο Μοντέλο Ροής Υπογείων Υδάτων, αποτελούμενο από Μονάδες και Πεπερασμένα Στοιχεία για την Μεταφορά Διαλυτών Ουσιών και τον Υπολογισμό των Δυνατοτήτων των Παραμέτρων
MSL	Mean Sea Level	Μέσο Επίπεδο (Στάθμη) Θάλασσας
NAPL	Non-Aqueous Phase Liquids	Υγρά μη Υδατώδους Φάσεως
NRC	National Research Council	Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας Η.Π.Α.
PTC	Princeton Transport Code	Κώδικας Μεταφοράς του Princeton

QA/QC	Quality Assurance/Quality Control	Εξασφάλιση Ποιότητας/Έλεγχος Ποιότητας
REV	Representative Elementary Volume	Αντιπροσωπευτικός Στοιχειώδης Όγκος
RWQCBs	Regional Water Quality Control Boards	Περιφερειακοί Πίνακες Ελέγχου Ποιότητας Υδάτων
SUTRA	Saturated and (or) Unsaturated, Constant or Variable-density Fluid Flow and Solute or Energy Transport	Κορεσμένη και (ή) Ακόρεστη, Σταθερής ή Μεταβαλλόμενης Πυκνότητας Υγρών, Ροή και Μεταφορά Διαλυτών Ουσιών ή Ενέργειας
erf	error function	συνάρτηση λάθους
erfc	complimentary error function	συμπληρωματική συνάρτηση λάθους
CaCO₃		ανθρακικό ασβέστιο
Fe₂O₃		οξείδιο του σιδήρου
MnO₂		οξείδιο του μαγγανίου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Για την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας κρίθηκε σκόπιμη η τμηματοποίηση της αρχικά σε τρία μέρη, ανάλογα με το γνωστικό αντικείμενο στο οποίο αναφερόμαστε, και έπειτα το κάθε μέρος υποδιαιρέθηκε σε ένα αριθμό κεφαλαίων, ανάλογα με την απαιτήσεως στην ανάλυση του κάθε θέματος.

Στο πρώτο μέρος λοιπόν, γίνεται εισαγωγή στην υδρογεωλογία καθώς και στη μηχανική των υπογείων υδάτων. Στο 1^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται το γεωλογικό υπόβαθρο των υπογείων υδάτων και οι σημαντικότερες ιδιότητες αυτών. Στο 2^ο παρουσιάζεται η ροή των υπογείων υδάτων, δηλαδή τα σημαντικότερα σημεία που διέπουν τη ροή, καθώς και οι σημαντικότεροι μηχανισμοί μεταφοράς των ουσιών.

Στο δεύτερο μέρος παρουσιάζονται τα μοντέλα (μοντελοποίηση), και η ανάλυση ευαισθησίας, που είναι και ο στόχος της προσομοίωσης που πραγματοποιείται. Συγκεκριμένα, στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στα μοντέλα υπογείων υδάτων και αναφορά στις δύο βασικότερες μεθόδους προσομοίωσης με τα μοντέλα αυτά: τις μεθόδους των πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών. Στο δε, 2^ο κεφάλαιο, παρουσιάζονται η διαδικασία μοντελοποίησης, με αναλυτική παρουσίαση όλων των βημάτων και η ανάλυση ευαισθησίας, με τα καίρια σημεία της.

Τέλος, στο τρίτο μέρος της διπλωματικής προχωράμε πλέον στην μελέτη της περιοχής του υπόγειου υδροφορέα της περιοχής Λιμένα Χερσονήσου, με σχετική αναφορά και εισαγωγή σε κάποια χαρακτηριστικά αυτής και στην υδρολογία / υδρογεωλογία της, και στη εφαρμογή του μοντέλου PTC (στα πλαίσια του ArgusOne) για την προσομοίωση της ροής. Στο 1^ο κεφάλαιο αυτού του μέρους παρουσιάζονται τόσο η υδρολογία / υδρογεωλογία της περιοχής όσο και τα χαρακτηριστικά της. Στο 2^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται το χρησιμοποιούμενο μοντέλο, με έμφαση στον αλγόριθμο επίλυσης PTC. Τέλος, στο 3^ο κεφάλαιο, αναλύεται η διαδικασία προσομοίωσης με χρήση του μοντέλου και πραγματοποιείται η ανάλυση ευαισθησίας.

ΣΤΟΧΟΣ-ΣΚΟΠΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εκπονήθηκε εξυπηρετώντας ένα συγκεκριμένο σκοπό: την πραγματοποίηση ανάλυσης ευαισθησίας σε μία επιλεγμένη περιοχή με τη χρήση ενός μοντέλου προσομοίωσης, ούτως ώστε να εξεταστούν ο βαθμός ευαισθησίας και μεταβολής κάποιων παραμέτρων στηριζόμενοι στην αλλαγή κάποιων δεδομένων εισόδου του μοντέλου.

Το παραπάνω αποτέλεσε το τελικό στάδιο αυτής της διπλωματικής. Έπρεπε να προηγηθούν κάποια άλλα βήματα, σημαντικά στη κατανόηση του περιβάλλοντος των υπογείων υδάτων και των μοντέλων προσομοίωσης.

Δόθηκε λοιπόν, αρχικά, μία πλήρης εικόνα του απαραίτητου υποβάθρου σχετικά με τα υπόγεια ύδατα, και της συμπεριφοράς αυτών, όπως επίσης παρουσιάστηκαν τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση τους και ο τρόπος λειτουργίας τους.

Τελικά, παρουσιάστηκε η εν λόγω μελετούμενη περιοχή, στοιχείο απαραίτητο για την εφαρμογή του μοντέλου προσομοίωσης, ενώ σαν τελικό στάδιο υπήρξε η χρήση του μοντέλου PTC (στα πλαίσια του ArgusOne) για την προσομοίωση της ροής της περιοχής και η ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων.

Φυσικά, και κλείνοντας μ' αυτό, ανώτερος σκοπός αυτής της εργασίας είναι να παρέχει μία σαφή εικόνα του τρόπου ανάλυσης και παρουσίασης αντίστοιχων θεμάτων, σε συνάρτηση με την λογική ανάλυση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων αυτής της ανάλυσης.

ΜΕΡΟΣ Α
«ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΣΤΗ
ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ»

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο
«ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ-ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ»

1. ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Η ανάπτυξη των υπογείων υδάτων χρονολογείται από τα αρχαία χρόνια. Η Παλαιά Διαθήκη περιέχει πολλές αναφορές στα υπόγεια ύδατα, σε πηγές και πηγάδια ; ο Tolman περιέγραψε τα μεγάλα τούνελ υποεπιφανειακού ύδατος, στην Περσία και στην Αίγυπτο που χρονολογούνται από το 800 πΧ.

Η χρησιμοποίηση του υπόγειου ύδατος βοήθησε πάρα πολύ στην, όσο το δυνατόν, πληρέστερη κατανόηση της προέλευσης, της εμφάνισης και της κίνησής του. Τα γραπτά των Ελλήνων και Ρωμαίων φιλοσόφων, στην προσπάθειά τους να εξηγήσουν την προέλευση των πηγών και των υπογείων υδάτων, περιείχαν θεωρίες που κυμαίνονταν από τον κόσμο της φαντασίας μέχρι την περίπτωση σχεδόν σωστών υπολογισμών. Μέχρι και τον 17^ο αιώνα ο κόσμος γενικά υπέθετε πως το νερό που έβγαινε από τις πηγές δεν μπορούσε να προέρχεται από τις βροχοπτώσεις, και γι' αυτό θεωρούσε πως η ποσότητα αυτού ήταν ανεπαρκής και ότι η γη ήταν πολύ αδιαπέραστη για να επιτρέψει τη διείσδυση του βρόχινου νερού κάτω από την επιφάνειά της. Επιπρόσθετα, νεότεροι Έλληνες φιλόσοφοι όπως ο Όμηρος, ο Θαλής και ο Πλάτωνας υπέθεσαν πως οι πηγές σχηματίστηκαν από το θαλασσινό νερό το οποίο οδηγήθηκε από κανάλια κάτω από τα βουνά, στη συνέχεια καθαρίστηκε και έφτασε μέχρι και την επιφάνεια. Ο Αριστοτέλης πρότεινε ότι ο αέρας μπαίνει μέσα σε κρύα και σκοτεινά σπήλαια κάτω από τα βουνά όπου συμπυκνώνεται με το νερό και οδηγεί στην δημιουργία των πηγών.

Οι Ρωμαίοι φιλόσοφοι, συμπεριλαμβανομένων του Σενέκα και του Πλίνιου, ακολούθησαν τις Ελληνικές ιδέες και συνεισέφεραν λίγα στο θέμα. Ένα σημαντικό βήμα μπροστά, παρόλ' αυτά, έγινε από το Ρωμαίο αρχιτέκτονα Βιτρούβιο. Εξήγησε την καινούρια και αποδεκτή θεωρία φίλτρανσης που έλεγε ότι τα βουνά δέχονται μεγάλες ποσότητες βροχής οι οποίες διηθούνται μέσω των στρωμάτων βράχου και κατέληγαν στη βάση τους για το σχηματισμό ρευμάτων.

Οι Ελληνικές θεωρίες συνεχίζονταν κατά τη διάρκεια του Μεσαίωνα χωρίς κάποια πρόοδο μέχρι το τέλος της Αναγέννησης.

Μία ξεκάθαρη εξήγηση του υδρολογικού κύκλου επιτεύχθηκε προς το τέλος του 17^{ου} αιώνα. Για πρώτη φορά οι θεωρίες βασίζονταν πάνω σε παρατηρήσεις και ποσοτικά δεδομένα. Τρεις Ευρωπαίοι συνεισέφεραν αξιόλογα, παρόλο που και άλλοι συνεισέφεραν και υποστήριζαν αυτές τις προόδους. Ο Pierre Perrault (1608-1680) μέτρησε την βροχόπτωση κατά τη διάρκεια 3 ετών και υπολόγισε την ποσότητα

νερού που κατέληγε στην λεκάνη αποξήρανσεων του επάνω τμήματος του ποταμού Seine. Ανέφερε γραπτώς το 1674 πως η πτώση της ποσότητας νερού στη λεκάνη ήταν περίπου 6 φορές την ποσότητα νερού που έφερνε ο ποταμός, και γι' αυτό κατέληξε πως η αρχική θεωρία της ανεπαρκούς βροχόπτωσης ήταν εσφαλμένη. Ο Γάλλος φυσικός Edme Mariotte (1620-1684) πραγματοποίησε μετρήσεις στον ίδιο ποταμό στο Παρίσι και επιβεβαίωσε την εργασία του Perrault. Οι δημοσιεύσεις του έγιναν το 1686, μετά το θάνατό του, και περιείχαν πραγματικά δεδομένα που υποστήριζαν σε μεγάλο βαθμό την θεωρία της φίλτρανσης. Η τρίτη συμβολή ήρθε από τον Άγγλο αστρονόμο Edmund Halley (1656-1742), ο οποίος ανέφερε γραπτώς το 1693 σε μετρήσεις εξατμίσεως ότι η εξάτμιση του θαλασσινού νερού ήταν σχετική ποσοτικά με τη ροή όλων των πηγών και των ρευμάτων.

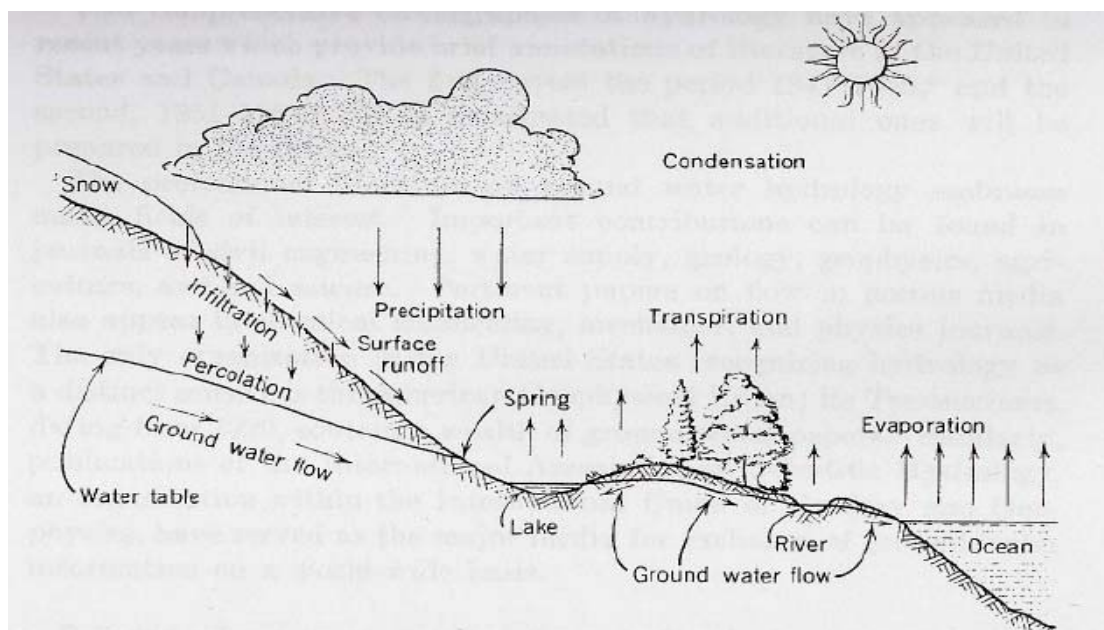
Κατά τη διάρκεια του 18^{ου} αιώνα, γεωλογικά ευρήματα καθιερώθηκαν και αυτό παρείχε μία βάση για την κατανόηση της εμφάνισης των υπογείων υδάτων. Κατά το πρώτο μισό του 19^{ου} αιώνα πολλά αρτεσιανά πηγάδια ανοίχτηκαν στη Γαλλία, προσδίδοντας ενδιαφέρον στο υπόγειο νερό. Ο Γάλλος μηχανικός υδραυλικής Henry Darcy (1803-1858) μελέτησε την κίνηση του νερού μέσα από την άμμο. Η πραγματεία του το 1856 καθόρισε την κυρίαρχη σχέση, που σήμερα είναι γνωστή ως νόμος του Darcy, των υπογείων υδάτων στους περισσότερους αλλουβιακούς και ιζηματογενείς σχηματισμούς. Μεταγενέστερες Ευρωπαϊκές συνεισφορές του 19^{ου} αιώνα έδιναν έμφαση στην ανάπτυξη της υδραυλικής των υπογείων υδάτων.

Αμερικάνικες συνεισφορές στην υδρολογία των υπογείων υδάτων χρονολογούνται στα τέλη σχεδόν του 19^{ου} αιώνα. Στο μικρό διάστημα από τότε μέχρι σήμερα, έχουν γίνει τρομακτικές πρόοδοι. **(David Keith Todd, 1980)**

2. ΤΟ ΥΠΟΓΕΙΟ ΝΕΡΟ ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΚΥΚΛΟ

Το υπόγειο νερό αποτελεί ένα τμήμα του κυκλικού συστήματος του νερού του πλανήτη, γνωστού ως υδρολογικός κύκλος. Η Εικόνα Α-1-1 αντιπροσωπεύει σχηματικά τον κύκλο. Κοιλότητες διέλευσης ύδατος στο φλοιό της γης δρουν ως αγωγοί για τη μεταφορά αυτού καθώς και σαν ρεζερβουάρ για την αποθήκευση του. Το νερό εισέρχεται σ' αυτούς τους σχηματισμούς από την επιφάνεια του εδάφους ή από σώματα επιφανειακού νερού, μέσω των οποίων ταξιδεύει μεταβαλλόμενες αποστάσεις μέχρι να επιστρέψει στην επιφάνεια με την δραστηριότητα της φυσικής

ροής, των φυτών ή του ανθρώπου. Η αποθηκευτική χωρητικότητα των ρεζερβουάρ του υπόγειου ύδατος συγχωνεύονται με μικρού βαθμού ροές για να παρέχουν τελικά μεγάλες, εκτενώς κατανεμημένες πηγές παροχής υπογείων υδάτων. Η ανάδυση του υπόγειου ύδατος στα επιφανειακά ρεύματα στοχεύει στην διατήρηση της ροής των ρευμάτων όταν η επιφανειακή απορροή είναι μικρή ή δεν υπάρχει. Παρομοίως, το νερό που αντλείται από τα πηγάδια αντιπροσωπεύει τη μόνη πηγή ύδατος σε πολλές περιοχές κατά τη διάρκεια του μεγαλύτερου μέρους του χρόνου.



Εικόνα A-1-1 : Ο υδρολογικός κύκλος
(David Keith Todd, 1980)

Πρακτικά, όλη η ποσότητα του υπόγειου ύδατος δημιουργείται από το επιφανειακό νερό. Οι κύριες πηγές φυσικής ανανέωσης (επαναφόρτισης) περιλαμβάνουν ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις, ροή ρευμάτων, λίμνες και δεξαμενές (ρεζερβουάρ). Άλλες συνεισφορές, γνωστές και σαν τεχνητή επαναφόρτιση, εμφανίζονται από υπερβολική άρδευση, διήθηση από κανάλια και νερό που προορίζεται αποκλειστικά για αύξηση των προμηθειών του υπόγειου ύδατος. Ακόμα και το θαλασσινό νερό μπορεί να περάσει υπόγεια κατά μήκος των ακτών όπου οι υδραυλικές κλίσεις τείνουν προς το εσωτερικό της ενδοχώρας. Το νερό που βρίσκεται στο εσωτερικό του εδάφους κινείται προς τα κάτω, προς την ακόρεστη ζώνη, κάτω από την επίδραση της βαρύτητας, ενώ στην κορεσμένη ζώνη κινείται σε μία κατεύθυνση που καθορίζεται από την υδραυλική κατάσταση (υδραυλικές συνθήκες) της γύρω περιοχής.

Η εκροή των υπογείων υδάτων εμφανίζεται όταν το νερό εμφανίζεται από το υπέδαφος. Κυρίως υπάρχει εμφάνιση της φυσικής εκροής σαν ροή μέσω επιφανειακών σωμάτων νερού όπως τα ρεύματα, οι λίμνες και οι ωκεανοί ; η ροή προς την επιφάνεια εμφανίζεται την άνοιξη. Το υπόγειο νερό που βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια μπορεί να επιστρέψει κατευθείαν στην ατμόσφαιρα μέσω της εξάτμισης από το χώμα και από την εφίδρωση της βλάστησης. Η άντληση από τα πηγάδια συνιστά την κυριότερη μορφή τεχνητής εκροής του υπόγειου ύδατος. **(David Keith Todd, 1980)**

3. ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

Σχεδόν όλη η ποσότητα των υπογείων υδάτων μπορεί να θεωρηθεί ως ένα κομμάτι του υδρολογικού κύκλου, συμπεριλαμβανομένου των επιφανειακών και των ατμοσφαιρικών υδάτων (υδρατμών). Σχετικά μικρές ποσότητες υπογείων υδάτων, όμως, μπορούν να εισχωρήσουν σε αυτό το κύκλο από άλλες πηγές. «Εμφυτο» νερό είναι το νερό που βρίσκεται παγιδευμένο στα διάκενα των ιζηματογενών πετρωμάτων από τη στιγμή που αυτό που αποθηκεύτηκε εκεί. Μπορεί να παράγεται από τον ωκεανό ή τις πηγές φρέσκου νερού και, τυπικά, περιέχει υψηλές ποσότητες μετάλλων. Καινούργια ποσότητα νερού μαγματικής, ηφαιστειακής ή κοσμικής προέλευσης που προστίθεται στην παροχή του επίγειου ύδατος είναι το λεγόμενο *νέο ύδωρ*. Κατά την αναφορά σε νερό που προέρχεται από μία συγκεκριμένη πηγή οι προσδιορισμοί είναι κατάλληλοι: μαγματικό νερό, ηφαιστειακό νερό και κοσμικό νερό. **(David Keith Todd, 1980)**

4. ΚΟΡΕΣΜΕΝΗ ΚΑΙ ΑΚΟΡΕΣΤΗ ΖΩΝΗ

4.1 Ακόρεστη ζώνη

Ακόρεστη ονομάζεται η ζώνη εκείνη του υπεδάφους όπου οι πόροι καταλαμβάνονται και από αέρα και από νερό. Η πίεση μέσα στους πόρους είναι μικρότερη της ατμοσφαιρικής. Εδώ διακρίνουμε δύο άλλες υποζώνες : την ζώνη του εδαφικού ύδατος και τη ζώνη των τριχοειδών φαινομένων. Η πρώτη φτάνει μέχρι την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το τέλος του ριζικού συστήματος των φυτών. Η δεύτερη

εκτείνεται από τον υδροφόρο ορίζοντα μέχρι εκεί που παρατηρούνται τα τριχοειδή φαινόμενα. (Δημήτριος Β. Κανελλόπουλος, Σεπτέμβριος 2003)

4.2 Κορεσμένη ζώνη

Κορεσμένη ονομάζεται η ζώνη που οι πόροι καταλαμβάνονται εξ'ολοκλήρου από νερό. Επίσης, βρίσκονται κάτω από υδροστατική πίεση. Το άνω όριο της κορεσμένης ζώνης είναι ο υδροφόρος ορίζοντας με την πίεση ίση με την ατμοσφαιρική. Ο υδροφόρος ορίζοντας αποτελεί και το όριο μεταξύ κορεσμένης και ακόρεστης ζώνης. (Δημήτριος Β. Κανελλόπουλος, Σεπτέμβριος 2003)

5. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ

Το υπόγειο νερό εμφανίζεται σε διαπερατούς γεωλογικούς σχηματισμούς γνωστούς σαν υδροφορείς, και αυτό σημαίνει, σχηματισμούς που έχουν δομές που επιτρέπουν στις υπολογίσιμες ποσότητες νερού να περάσουν διαμέσου αυτών κάτω από συνηθισμένες συνθήκες πεδίου. Οι δεξαμενές των υπογείων υδάτων (ρεζερβουάρ) και οι σχηματισμοί που επιτρέπουν τη διέλευση αυτών (επίσης: στρώμα, διαστρωμάτωση ή απόθεση) είναι συνώνυμα που χρησιμοποιούνται συχνά. Σε αντίθεση, ένας «aquiclude» είναι ένας αδιαπέρατος σχηματισμός οποίος μπορεί να περιέχει νερό αλλά είναι ανίκανος να διαβιβάσει (μεταφέρει) σημαντικές ποσότητες νερού ; η άργιλος είναι ένα παράδειγμα. Με τον όρο «aquifuge» εννοούμε έναν αδιαπέρατο σχηματισμό που δεν περιέχει αλλά ούτε και μεταφέρει νερό ; ο στερεός γρανίτης ανήκει σ' αυτή τη κατηγορία.

Αυτό το κομμάτι ενός πετρώματος ή ενός στερεού που δεν καταλαμβάνεται από στερεά μεταλλικά υλικά μπορεί να καταλαμβάνεται από νερό. Αυτά τα διαστήματα είναι γνωστά ως κενά, διάκενα, πόροι ή διαστήματα πόρων. Επειδή τα διάκενα μπορούν να δράσουν ως αγωγοί των υπογείων υδάτων, είναι θεμελιώδους σημασίας για τη μελέτη των υπογείων υδάτων. Τυπικά, χαρακτηρίζονται από το μέγεθος, το σχήμα, την ανομοιομορφία και την κατανομή τους. Τα αρχικά διάκενα σχηματίστηκαν (δημιουργήθηκαν) από γεωλογικές διαδικασίες που κυριαρχούν στην προέλευση των γεωλογικών σχηματισμών και βρίσκονται σε ιζηματογενή και πυριγενή πετρώματα. Τα δευτερεύοντα διάκενα αναπτύχθηκαν μετά το σχηματισμό

των πετρωμάτων ; τα παραδείγματα περιλαμβάνουν ενώσεις, σπασίματα, ανοίγματα από τη λύση των πετρωμάτων και ανοίγματα που δημιουργήθηκαν από τα φυτά και τα ζώα. (David Keith Todd, 1980)

6. ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΟΠΩΣ ΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ

Ένας σχηματισμός πετρωμάτων ή υλικών ο οποίος θα συγκρατεί σημαντικές ποσότητες νερού χαρακτηρίζεται ως υδροφορέας. Διάφοροι γεωλογικοί σχηματισμοί που ενεργούν όπως οι υδροφορείς περιγράφονται στις ακόλουθες παραγράφους και αυτή η περιγραφή βασίζεται στην εργασία του Thomas (Groundwater regions of the United States – their storage facilities, 1952).

Πιθανώς, το 90 % όλων των ανεπτυγμένων υδροφορέων αποτελούνται από μη σταθεροποιημένα πετρώματα, κυρίως αμμοχάλικο και άμμο. Αυτοί οι υδροφορείς μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις κατηγορίες βάσει του τρόπου εμφάνισής τους: ροές υδάτων, εγκαταλελειμμένες ή θαμμένες κοιλάδες, πεδιάδες και, ενδο-ορεινές κοιλάδες. Οι ροές των υδάτων αποτελούνται από το αλλούβιο που σχηματίζει και κείται κάτω από τα κανάλια των ρευμάτων, όπως επίσης σχηματίζει τις παρακείμενες κοίτες πλημμυρών. Τα πηγάδια που εντοπίζονται σε υψηλής διαπερατότητας στρώματα οριοθετώντας ρεύματα παράγουν μεγάλες ποσότητες νερού, καθώς η διήθηση από τα ρεύματα αυξάνει τα αποθέματα των υπογείων υδάτων. Εγκαταλελειμμένες ή θαμμένες κοιλάδες είναι κοιλάδες που δεν καταλαμβάνονται πλέον από ρεύματα τα οποία τις σχημάτισαν. Παρόλο που τέτοιες κοιλάδες μπορεί να μοιάζουν με ροές υδάτων, όσον αφορά την διαπερατότητα και την αποθηκευτική ποσότητα, εντούτοις η επαναφόρτιση και οι δυνατότητες για αιώνια (συνεχή) παραγωγή είναι συνήθως μικρές. Εκτενείς πεδιάδες που κρύβονται κάτω από μη σταθεροποιημένα ιζήματα υπάρχουν στις Η.Π.Α.. Σε μερικά μέρη στρώματα αμμοχάλικου και άμμου σχηματίζουν σημαντικούς υδροφορείς κάτω από αυτές τις πεδιάδες ; σε άλλα μέρη είναι σχετικά λεπτοί και έχουν μικρή παραγωγικότητα. Αυτές οι πεδιάδες είναι στις πλευρές ορεινών περιοχών ή άλλων χαρακτηριστικών γνωρισμάτων που λειτουργούν ως πηγή ιζηματογενών αποθέσεων. Οι δεξαμενές των υπογείων υδάτων επαναφορτίζονται κυρίως σε περιοχές που υπάρχει η δυνατότητα για διείσδυση νερού προς τα κάτω από πτώση και από τα εποχιακά ρεύματα. Οι ενδο-ορεινές κοιλάδες βρίσκονται κάτω από τεράστιους όγκους μη σταθεροποιημένων πετρωμάτων παραγόμενα από τη διάβρωση της οριοθέτησης των βουνών. Πολλές

από αυτές, τις περισσότερες ή λιγότερες μεμονωμένες λεκάνες, που χωρίζονται από τα όρια των βουνών, εμφανίζονται στις δυτικές Η.Π.Α.. Τα στρώματα αμμοχάλικου και άμμου αυτών των υδροφορέων παράγουν μεγάλες ποσότητες νερού, το μεγαλύτερο μέρος των οποίων αντικαθίσταται μέσω της διήθησης από ρεύματα μέσα σε αλλοούβιους ριπιδοειδείς σχηματισμούς στα στόματα των φαραγγιών των βουνών.

Οι ασβεστόλιθοι ποικίλουν όσον αφορά την πυκνότητα, το πορώδες και την διαπερατότητα τους και αυτό εξαρτάται από το βαθμό σταθεροποίησης και ανάπτυξης των διαπερατών ζωνών μετά από τις αποθέσεις. Αυτοί, που είναι και οι περισσότεροι σημαντικοί ως υδροφορείς, περιέχουν σε αρκετά μεγάλη αναλογία το αρχικό πέτρωμα το οποίο έχει λυθεί και απομακρυνθεί. Ανοίγματα στον ασβεστόλιθο μπορεί να ποικίλουν από μικροσκοπικούς αρχικούς πόρους μέχρι μεγάλα λυμένα σπήλαια που διαμορφώνουν τα υπόγεια κανάλια να είναι αρκετά μεγάλα ώστε να μεταφέρουν όλη την ποσότητα ροής ενός ρεύματος. Ο όρος, *χαμένος ποταμός*, χρησιμοποιείται για να περιγράψει ένα ρεύμα το οποίο εξαφανίζεται τελείως στο υπέδαφος σε ένα στρώμα ασβεστόλιθου. Μεγάλες πηγές βρίσκονται συχνά σε περιοχές με ασβεστόλιθους. Η λύση του ανθρακικού ασβεστίου από το νερό προκαλεί την επικράτηση του σκληρού υπόγειου νερού για να βρεθεί μέσα σε υδροφορείς από ασβεστόλιθο ; επίσης, με τη λύση του πετρώματος, το νερό έχει την τάση να αυξάνει το διάστημα των πόρων και την διαπερατότητα με το πέρασμα του χρόνου. Η επίτευξη του μεγαλύτερου βαθμού ανάπτυξης σε ένα στρώμα ασβεστόλιθου δημιουργεί μία καρστική περιοχή (περιοχή με σχηματισμούς καρστ), όπου υπόγεια αποξήρανση διαμέσου του ασβεστόλιθου δημιουργεί μεγάλες δεξαμενές υπόγειου ύδατος (ρεζερβουάρ). Παρόλο που δεν είναι συνηθισμένο, ο γύψος είναι άλλο ένα πέτρωμα που μπορεί να λυθεί και το οποίο έχει αναπτυχθεί σε τέτοιο βαθμό όπως και οι υδροφορείς.

Τα ηφαιστειακά πετρώματα μπορούν να σχηματίσουν διαπερατούς υδροφορείς. Οι ροές από βασάλτες είναι πολύ διαπερατές, κάτι που εν προκειμένω αντιστοιχεί με τους ασβεστόλιθους. Άλλες διαπερατές ζώνες σε ηφαιστειακά πετρώματα, περιλαμβάνουν ροές λατυποπαγών, πορώδεις ζώνες μεταξύ στρωμάτων λάβας, αγωγούς λάβας, ρωγμές και ενώσεις διακένων. Οι περισσότερες από τις μεγαλύτερες πηγές στις Η.Π.Α. σχετίζονται με αποθέματα βασαλτών. Οι ρυολίτες είναι λιγότερο διαπερατοί από τον βασάλτη, ενώ ρηχά παρεισφρητικά πετρώματα μπορούν να θεωρηθούν ως πρακτικά αδιαπέρατα σε ροή.

Ο ψαμμίτης και τα κροκαλοπαγή είναι τσιμενταρισμένες μορφές άμμου και αμμοχάλικου. Όπως και αυτά, το πορώδες και η παραγωγικότητα τους έχουν μειωθεί από την τσιμεντοποίηση (τη σκλήρυνση). Οι καλύτεροι ψαμμιτικοί υδροφορείς είναι εκείνοι που έχουν τσιμεντοποιηθεί μόνο τμηματικά, ή εκείνοι που παράγουν νερό μέσα από τις ενώσεις των διακένων τους. Τα κροκαλοπαγή έχουν περιορισμένη κατανομή και δεν είναι σημαντικά σαν υδροφορείς.

Τα κρυσταλλικά και τα μεταμορφωσιγενή πετρώματα είναι σχετικά αδιαπέρατα και φτωχά σαν υδροφορείς. Όπου εμφανίζονται τέτοια πετρώματα κοντά στην επιφάνεια κάτω από συνθήκες θραύσης και αποσάθρωσης, έχουν αναπτυχθεί με ρηχά πηγάδια για εσωτερικούς σκοπούς.

Ο άργιλος και πιο χονδροειδή υλικά που αναμιγνύονται με άργιλο είναι γενικά πορώδη, αλλά το πορώδες τους είναι τόσο μικρό που μπορούν να θεωρηθούν ως σχετικά αδιαπέρατα. Τα αργιλώδη εδάφη έχουν προμηθεύσει με μικρές προμήθειες νερού για οικιακή χρήση από ρηχά πηγάδια. **(David Keith Todd, 1980)**

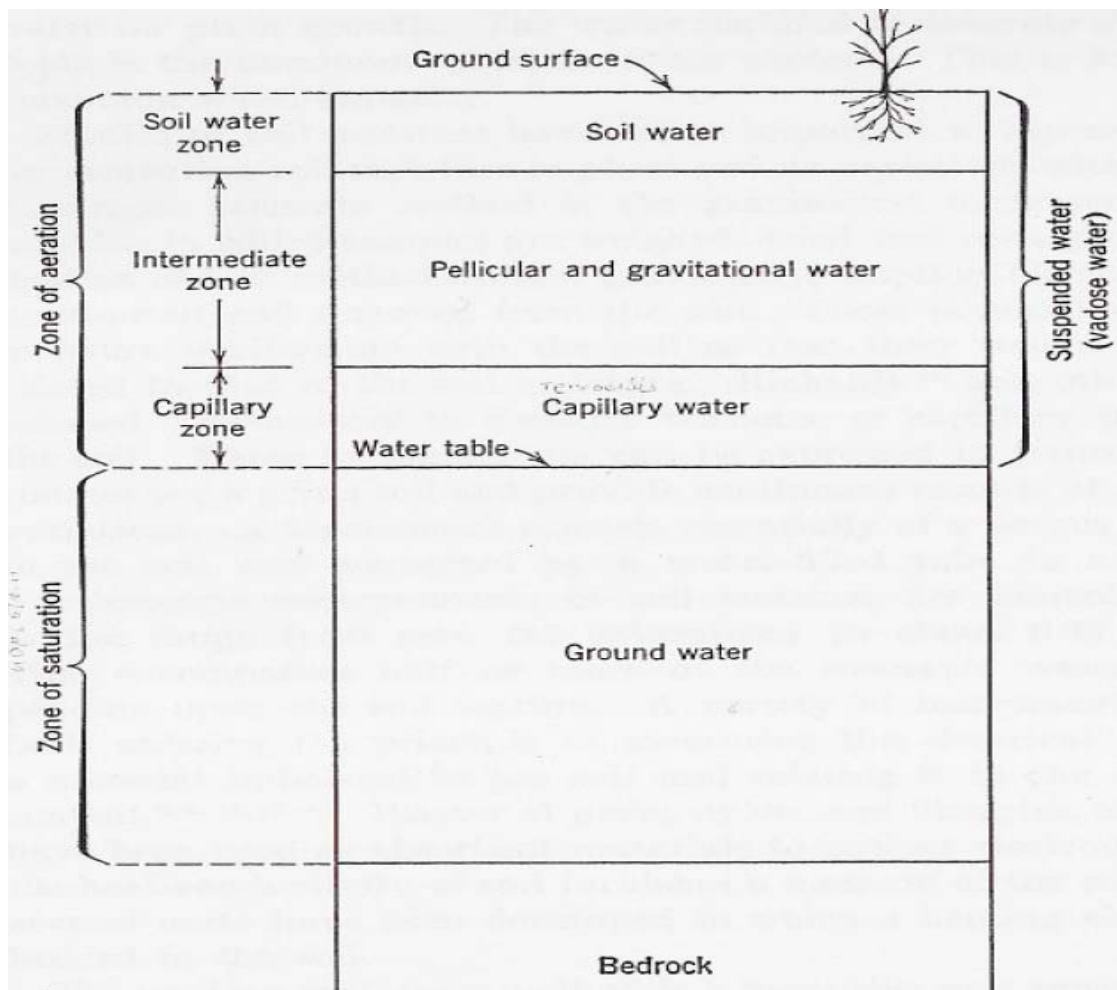
7. ΤΥΠΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ

Οι περισσότεροι υδροφορείς είναι σε μεγάλο βαθμό τοπικοί και μπορούν να οπτικοποιηθούν ως υπόγειες αποθηκευτικές δεξαμενές (ρεζερβουάρ). Το νερό μπαίνει στην δεξαμενή μέσω φυσικής ή τεχνητής επαναφόρτισης ; ρέει κάτω από την επίδραση της βαρύτητας ή εξάγεται μέσω πηγαδιών. Συνήθως, ο ετήσιος όγκος νερού που μετακινείται ή αντικαθίσταται αναπαριστά μόνο ένα μικρό μέρος της συνολικής αποθηκευτικής δυνατότητας. Οι υδροφορείς μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως περιορισμένοι ή μη περιορισμένοι ανάλογα με την παρουσία ή την απουσία της στάθμης νερού (ο μη περιορισμένος ή ελεύθερος υδροφορέας έχει ανώτερη επιφάνεια τον υδροφόρο ορίζοντα ενώ ένας περιορισμένος κάποιο πέτρωμα).

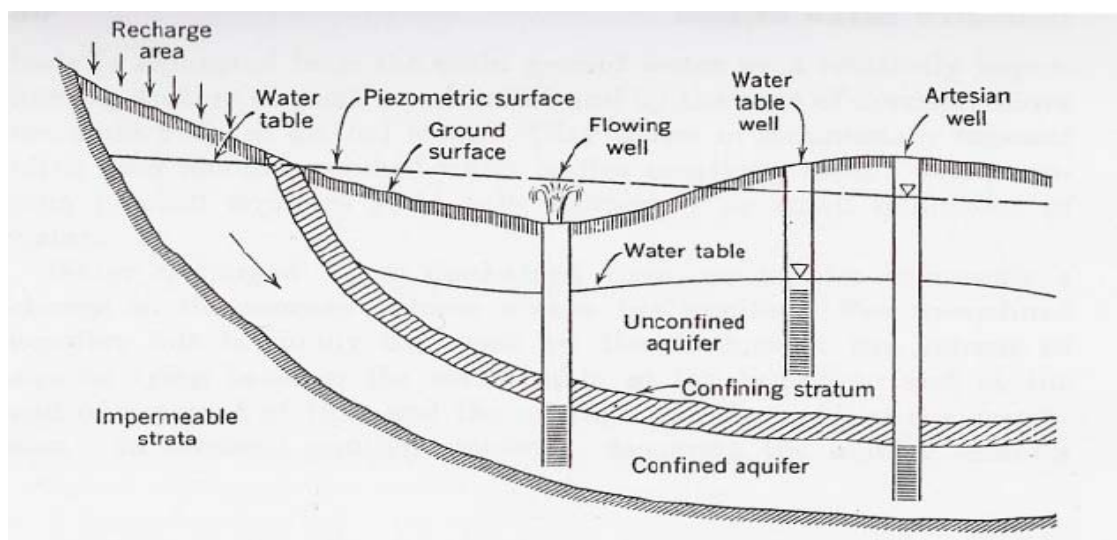
Ένας μη περιορισμένος υδροφορέας είναι αυτός που η στάθμη νερού που προαναφέραμε είναι η ανώτερη επιφάνεια της κορεσμένης ζώνης. Είναι επίσης γνωστός ως ελεύθερος, φρεατικός ή μη αρτεσιανός υδροφορέας. Η στάθμη του ύδατος ποικίλει όσο αφορά την κυματοειδή μορφή και την κλίση του, και αυτό εξαρτάται από τις περιοχές αποφόρτισης και επαναφόρτισης, από τα πηγάδια άντλησης και την διαπερατότητα. Πτώσεις και ανυψώσεις της υδάτινης στάθμης αντικατοπτρίζουν τις αλλαγές στον αποθηκευμένο όγκο ύδατος μέσα σε ένα υδροφορέα. Η Εικόνα A-1-2 είναι ένα εξιδανικευμένο τμήμα ενός ελεύθερου

υδροφορέα ; ο ανώτερος υδροφορέας στην Εικόνα Α-1-3 είναι επίσης ελεύθερος. Οι χάρτες ισοϋψών και τα προφίλ της υδάτινης στάθμης μπορούν να προετοιμαστούν από τις ανυψώσεις του ύδατος στα φρεάτια που αντλούν από τον υδροφορέα για τον καθορισμό των διαθέσιμων ποσοτήτων νερού, την κατανομή του και την κίνησή του.

Οι περιορισμένοι υδροφορείς, επίσης γνωστοί και ως αρτεσιανοί, εμφανίζονται εκεί όπου το υπόγειο νερό περιορίζεται λόγω πίεσης μεγαλύτερης από την ατμοσφαιρική από υπερκείμενα στρώματα σχετικά αδιαπέρατα. Σε ένα πηγάδι που διεισδύει σε έναν τέτοιο υδροφορέα, το επίπεδο του ύδατος θα ανυψωθεί πάνω από το πυθμένα του περιοριστικού στρώματος, όπως φαίνεται στα αρτεσιανά και ρέοντα φρεάτια της Εικόνας Α-1-3. Το νερό μπαίνει σε ένα περιορισμένο υδροφορέα σε μία περιοχή όπου το περιοριστικό στρώμα φτάνει μέχρι την επιφάνεια ή τελειώνει υπόγεια και ο υδροφορέας γίνεται ελεύθερος. Μία περιοχή που τροφοδοτεί με νερό έναν περιορισμένο υδροφορέα είναι γνωστή ως περιοχή επαναφόρτισης ή επανατροφοδότησης. Ανυψώσεις και πτώσεις του νερού στα πηγάδια που διεισδύουν σε ελεύθερους υδροφορείς καταλήγουν πρωτίστως σε αλλαγές στην πίεση παρά σε αλλαγές των αποθηκευτικών όγκων. Ως εκ τούτου οι περιορισμένοι υδροφορείς έχουν μικρές μόνο αλλαγές στην αποθηκευτικότητά τους και χρησιμεύουν κυρίως ως αγωγοί για τη μεταβίβαση του ύδατος από τις περιοχές επανατροφοδότησης σε περιοχές φυσικής ή τεχνητής αποφόρτισης. Η πιεζομετρική επιφάνεια ενός περιορισμένου υδροφορέα είναι μία φανταστική επιφάνεια που ταυτίζεται με το επίπεδο της υδροστατικής πίεσης του νερού στον υδροφορέα (Εικόνα Α-1-3). Το επίπεδο του νερού σε ένα πηγάδι που διεισδύει σε έναν περιορισμένο υδροφορέα καθορίζει το επίπεδο της πιεζομετρικής επιφάνειας σε εκείνο το σημείο. Εάν η πιεζομετρική επιφάνεια βρεθεί πάνω απ' την επιφάνεια του εδάφους τότε προκύπτει ένα ρέον φρεάτιο. Οι χάρτες των ισοϋψών και τα προφίλ της πιεζομετρικής επιφάνειας μπορούν να προκύψουν από δεδομένα πηγαδιών παρόμοιων με αυτά για το επίπεδο της υδάτινης στάθμης σε έναν ελεύθερο υδροφορέα. Πρέπει να σημειωθεί ότι ένας περιορισμένος υδροφορέας γίνεται ελεύθερος όταν η πιεζομετρική επιφάνεια πέσει κάτω από τον πυθμένα του ανώτερου περιοριστικού στρώματος. Επίσης, αρκετά συχνά συναντάμε έναν ελεύθερο υδροφορέα πάνω από ένα περιορισμένο, όπως φαίνεται στην Εικόνα Α-1-3.

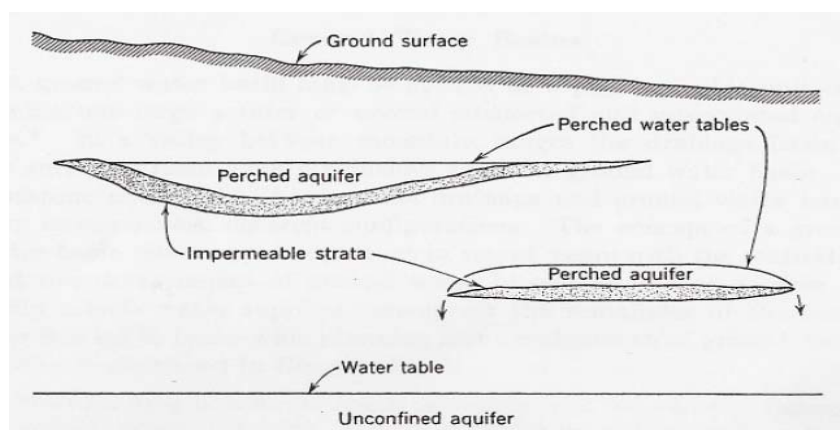


Εικόνα Α-1-2 : Διαχωρισμοί του υπόγειου νερού
(David Keith Todd, 1980)



Εικόνα Α-1-3 : Περιορισμένοι και ελεύθεροι υδροφορείς
(David Keith Todd, 1980)

Μία ειδική περίπτωση ελεύθερου υδροφορέα είναι ο ημιπεριορισμένος υδροφορέας ο οποίος διευκρινίζεται στην Εικόνα A-1-4. Αυτό συμβαίνει όποτε ένα σώμα υπόγειου ύδατος χωρίζεται από τον κύριο όγκο υπόγειου ύδατος από ένα σχετικά αδιαπέρατο στρώμα τοπικής έκτασης και από τη ζώνη αερισμού πάνω από το κύριο σώμα του υπόγειου ύδατος. Φακοί αργίλου σε ιζηματογενή αποθέσεις συχνά έχουν ρηχά ημιπεριορισμένα υδάτινα σώματα τα οποία παράγουν μόνο προσωρινές ή μικρές ποσότητες νερού.

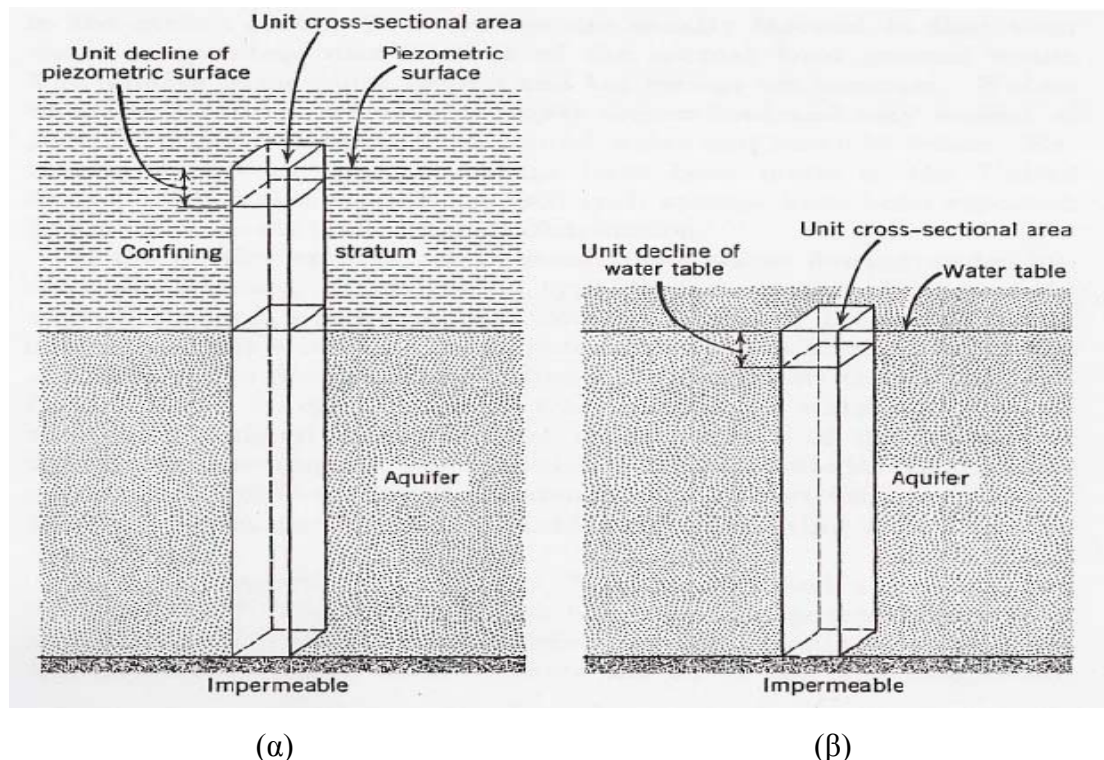


Εικόνα A-1-4 : Ημιπεριορισμένοι υδροφορείς
(David Keith Todd, 1980)

Το νερό, το οποίο αποφορτίζει ή επαναφορτίζει έναν υδροφορέα αναπαριστά μία αλλαγή στον αποθηκευτικό όγκο μέσα στον υδροφορέα. Για ελεύθερους υδροφορείς αυτό εκφράζεται απλά με την παραγωγή του όγκου του υδροφορέα που βρίσκεται μεταξύ της υδάτινης στάθμης στην αρχή της περιόδου και στο τέλος αυτής. Σε περιορισμένους υδροφορείς, παρόλ' αυτά, υποθέτοντας ότι ο υδροφορέας παραμένει κορεσμένος, οι αλλαγές στην πίεση δημιουργούν μικρές μόνο αλλαγές στον αποθηκευτικό όγκο. Όμως, η υδροστατική πίεση μέσα σε ένα υδροφορέα εν μέρει υποστηρίζει το βάρος της υπερφόρτισης, ενώ η εδαφολογική δομή του υδροφόρου στρώματος παρέχει την υπόλοιπη υποστήριξη. Όταν η υδροστατική πίεση μειώνεται, όπως στο αντλούμενο από ένα πηγάδι που διεισδύει στον υδροφορέα, νερό το φορτίο του υδροφορέα αυξάνεται. Μία συμπίεση του υδροφορέα έχει σαν αποτέλεσμα δυνάμεις που απομακρύνουν νερό απ' αυτόν. Επιπρόσθετα, μείωση της πίεσης προκαλεί μία μικρή επέκταση και συνεπώς απελευθέρωση του νερού. Η δυνατότητα παραγωγής ύδατος ενός περιορισμένου υδροφορέα μπορεί να εκφραστεί με όρους του συντελεστή αποθήκευσης.

Ο συντελεστής αποθήκευσης καθορίζεται ως ο όγκος του νερού που ένας υδροφορέας αφήνει ή αποθηκεύει ανά μονάδα επιφανείας του υδροφορέα και ανά μονάδα αλλαγής της σύστασης του κανονικού υδραυλικού ύψους αυτής της επιφάνειας. Για μία κάθετη στήλη με επέκταση βήμα ποδιού μέσω ενός περιορισμένου υδροφορέα, όπως στην Εικόνα A-1-5α, ο συντελεστής αποθήκευσης S ισούται με τον υδάτινο όγκο (σε κυβικά πόδια) που φεύγει από τον υδροφορέα όταν η πιεζομετρική επιφάνεια πέφτει ένα πόδι. Στους περισσότερους περιορισμένους υδροφορείς, οι τιμές κυμαίνονται στο εύρος $0,00005 \leq S \leq 0,005$, δείχνοντας έτσι ότι μεγάλες αλλαγές στην πίεση σε εκτενείς περιοχές είναι απαραίτητες για την παραγωγή των ουσιαστικών ποσοτήτων νερού που πρέπει να παραχθούν. Οι συντελεστές αποθήκευσης μπορεί να καθοριστούν από τεστ άντλησης σε πηγάδια και από διακυμάνσεις των υπόγειων υδάτων σαν αποτέλεσμα της ατμοσφαιρικής πίεσης ή των μεταβολών της παλίρροιας των ωκεανών.

Ο συντελεστής αποθήκευσης για έναν ελεύθερο υδροφορέα ανταποκρίνεται στην συγκεκριμένη παραγωγικότητα του υδροφορέα, όπως φαίνεται στην Εικόνα A-1-5β.



Εικόνα A-1-5 : Σχήματα για τον καθορισμό του συντελεστή αποθηκευτικότητας για
(α) περιορισμένους και (β) ελεύθερους υδροφορείς

(David Keith Todd, 1980)

(David Keith Todd, 1980)

8. ΣΗΜΑΝΤΙΚΕΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

8.1 Πορώδες

Το πορώδες (n) καθορίζεται ως ο όγκος των πόρων (V_{Π}) ενός πετρώματος ή ενός δείγματος εδάφους διαιρούμενος με τον συνολικό όγκο ($V_{ΟΛ}$) τόσο των πόρων όσο και των υλικών του εδάφους.

$$n = 100 \frac{V_{\Pi}}{V_{ΟΛ}}$$

Όταν ένα πέτρωμα πρωτοσχηματίζεται λόγω καθίζησης, ψύξης του πύρινου λειωμένου μετάλλου, σκλήρυνσης από χαλαρά ιζήματα ή όταν ένα έδαφος πρωτοσχηματίζεται από διάβρωση των υλικών του πετρώματος και πιθανή συνεπακόλουθη βιολογική κίνηση, η καινούρια οντότητα θα έχει έμφυτο πορώδες (δηλαδή το τμήμα αυτό του εδάφους ή το πέτρωμα που έχει μόλις σχηματιστεί θα έχει πορώδες με κάποια συγκεκριμένη τιμή), το οποίο είναι γνωστό ως *αρχικό πορώδες*. Αυτό το πορώδες μπορεί στη συνέχεια να μειωθεί λόγω τσιμενταρίσματος (δηλαδή σκλήρυνσης) από καθιζήσεις από κυκλοφορία των υπογείων υδάτων, ή από συνοδευτικό ενταφιασμό λόγω συμπίεσης από τα πιο πρόσφατα ιζήματα. Παρόλ' αυτά τα σπασίματα των λυμένων κοιλοτήτων που διαμορφώνονται στο βράχο, ή οι ριζικοί σωλήνες ή τα ζωικά λαγούμια στα χώματα μπορούν αργότερα να δώσουν σχηματισμούς και είναι γνωστοί ως *δευτεροβάθμιο πορώδες*. Κατά συνέπεια, το συνολικό πορώδες ενός δείγματος θα είναι το άθροισμα των αρχικών και δευτεροβάθμιων πορώδων.

Εάν όλοι οι πόροι ενός πετρώματος δεν επικοινωνούν μεταξύ τους, μόνο ένα συγκεκριμένο τμήμα των πόρων θα επιτρέψει το πέρασμα του νερού, και αυτό το τμήμα είναι γνωστό ως *ενεργό πορώδες* (n_e). Ένα παράδειγμα είναι η ελαφρόπετρα, ένα υαλώδες ηφαιστειακό ανάβλυμα (ένας σταθεροποιημένος αφρός). Το χονδροειδές αμμοχάλικο μπορεί να έχει πορώδες μόλις 25 %, αλλά αυτό το πορώδες θα είναι πρακτικά όλο ενεργό. Γι' αυτό το αμμοχάλικο είναι ένας τέλειος αγωγός για το νερό.

Τυπικές τιμές για το πορώδες δίνονται στο Πίνακα A-1-1:

Lithology	Porosity (percent)
Unconsolidated	
Gravel	25–40
Sand	25–50
Silt	35–50
Clay	40–70
Glacial Till	10–20
Indurated	
Fractured Basalt	5–50
Karst Limestone	5–50
Sandstone	5–30
Limestone, Dolomite	0–20
Shale	0–10
Fractured Crystalline Rock	0–10
Dense Crystalline Rock	0–5

Πίνακας A-1-1 : Τιμές πορώδους για διάφορες κατηγορίες πετρωμάτων
(Domenico, P.A. and Schwartz, F.W. 1990 ; Freeze, R.A. and Cherry, J.A. 1979 ;
Fetter, C.W. 1994 ; Narasimhan, T.N. and Goyal, K.P. 1984)
(Jacques W. Delleur, 1999)

8.2 Υδραυλικό ύψος

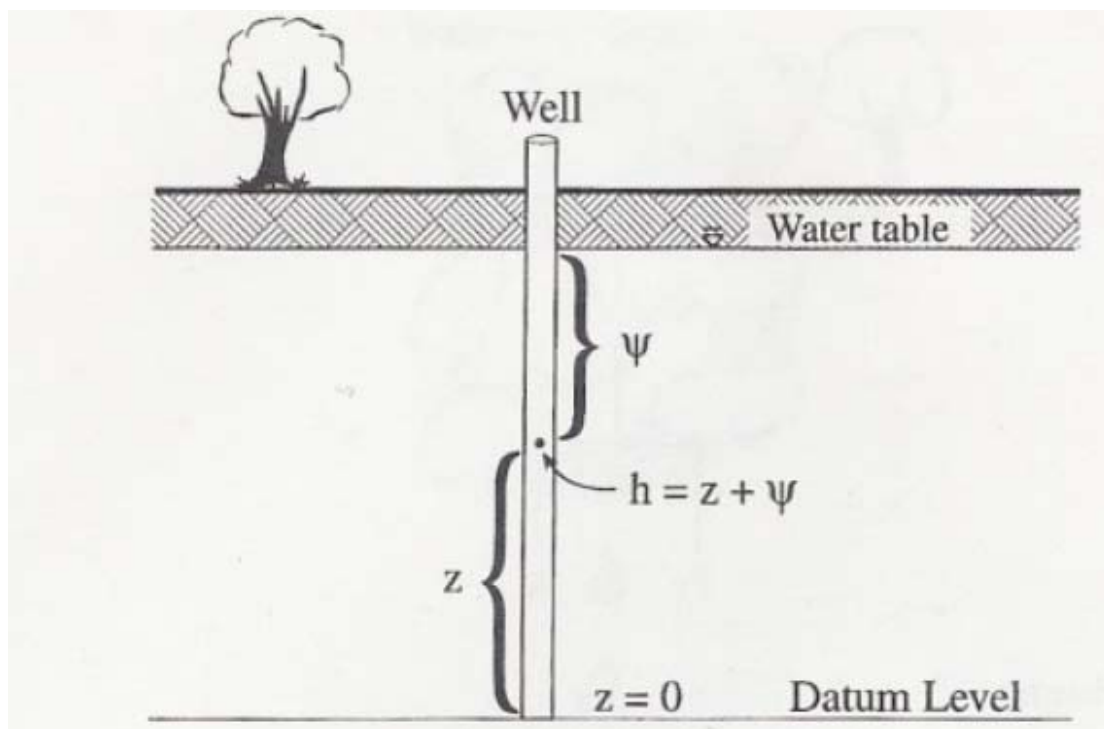
Το υδραυλικό ύψος σε ένα σημείο του υπόγειου συστήματος (Εικόνα A-1-6) εκφράζεται ως,

$$h = Z + \frac{P}{\rho g}$$

όπου Z είναι το ύψος του επιπέδου ή η απόσταση από το σημείο αναφοράς πάνω από ένα επίπεδο αναφοράς (συνήθως αυτό σημαίνει το επίπεδο της θάλασσας), P είναι η πίεση του υγρού στο σημείο που ασκείται από την στήλη του ύδατος πάνω από το σημείο και ρg είναι το ειδικό βάρος του νερού ή για να το πούμε πιο απλά

$$h = Z + \psi$$

όπου Ψ ονομάζεται επίσης πιεζομετρικό ύψος (ύψος πίεσης). Η σχέση έχει την διάσταση του μήκους.



Εικόνα A-1-6 : Αναπαράσταση του υδραυλικού ύψους
(Jaques W. Delleur, 1999)

Κατά συνέπεια, το υδραυλικό ύψος έχει την διάσταση του μήκους κάτι που το κάνει κατάλληλο για υπολογισμούς βασιζόμενους στο επίπεδο του νερού πάνω από το επίπεδο της θάλασσας, το γενικά αποδεκτό σημείο μηδέν. Η πτώση υγρών και το υδραυλικό ύψος είναι ισοδύναμα και χρησιμοποιούνται και τα δύο, εκτός όμως από το γεγονός ότι το υδραυλικό ύψος είναι περισσότερο δημοφιλής ποσότητα για μελέτες των υπογείων υδάτων. Μπορεί να δειχθεί, συχνά σαν έκπληξη για το ανυποψίαστο, ότι το νερό μπορεί να ρέει από μία πηγή με χαμηλότερη πίεση σε μία πηγή με υψηλότερη πίεση εάν το συνολικό ύψος στο αρχικό σημείο είναι μεγαλύτερο από ότι στο τελικό σημείο.

Στο πεδίο της μηχανικής για το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, η πίεση γενικά χρησιμοποιείται σε σχέση με το υδραυλικό ύψος γιατί οι πιέσεις σε μεγαλύτερα βάθη είναι κανονικά τόσο υψηλές που τα υδραυλικά ύψη είναι ασήμαντα. **(Jacques W. Delleur, 1999)**

8.3 Αποθήκευση

Μία απλή εξίσωση ισοζυγίου μάζας για ροή υπόγειου ύδατος μέσα από ένα μοναδιαίο όγκο πορώδους μέσου δίνεται ως

$$Q_{out}\Delta t = Q_{in}\Delta t \pm \Delta S\Delta t$$

όπου Q είναι ο συνολικός βαθμός ροής στον όγκο ανά μονάδα χρόνου και ΔS είναι ο όγκος ανά μονάδα χρόνου που αποθηκεύεται ή όχι στο χρόνο, t.

Σε ένα κορεσμένο πορώδες μέσο που είναι περιορισμένο ανάμεσα σε δύο διαπερατά στρώματα από πέτρωμα ή άργιλο, το νερό θα αποθηκευτεί στους πόρους του μέσου από ένα συνδυασμό δύο φαινομένων: αυτά είναι η συμπίεση του νερού και η επέκταση του υδροφορέα. Καθώς το νερό πιέζεται μέσα στο σύστημα σε ένα βαθμό που είναι μεγαλύτερος από αυτόν που εξάγεται, το νερό θα συμπιεστεί και η μάζα του πετρώματος θα επεκταθεί για να προσαρμοστεί στην υπερβολή. Σε ένα μοναδιαίο όγκο ενός κορεσμένου πορώδους πετρώματος, ο όγκος του νερού που θα αποθηκευτεί κάτω από την μοναδιαία αύξηση στο ύψος ή ο όγκος που θα αφηθεί κάτω από μία μοναδιαία μείωση στο ύψος ονομάζεται *ειδική αποθήκευση* και δείχνεται ως,

$$S_s = \rho g(\alpha + n\beta)$$

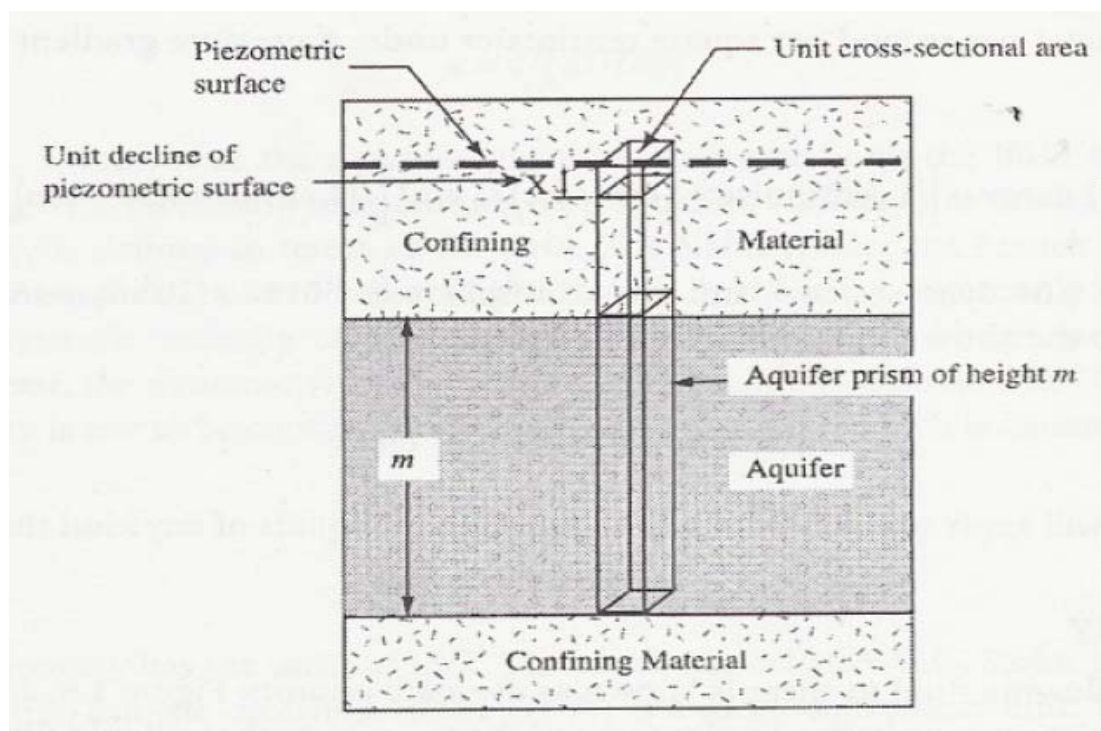
όπου α είναι ο βαθμός συμπίεσης του υδροφορέα, ρ είναι η πυκνότητα του υγρού, g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, n είναι το πορώδες και β είναι ο βαθμός συμπίεσης του νερού. Αυτή η μονάδα έχει τη διάσταση 1/μήκος και είναι αρκετά μικρή, συνήθως 0.0001 ή λιγότερο.

Ο συντελεστής αποθήκευσης ενός υδροφορέα, ή απλά, η αποθηκευτικότητα, S, δίνεται ως,

$$S = S_s b$$

όπου b είναι το κορεσμένο πάχος του υδροφορέα. Η αποθηκευτικότητα καθορίζεται ως ο όγκος του νερού ανά μονάδα επιφάνειας του υδροφορέα που αποθηκεύεται ή φεύγει από το χώρο αποθήκευσης ανά μονάδα αύξησης ή μείωσης του ύψους,

αντίστοιχα (Εικόνα A-1-7). Είναι καθαρός αριθμός. Σε περιορισμένους υδροφορείς η τιμή της αποθηκευτικότητας κυμαίνεται από 0.005 μέχρι 0.00005.



Εικόνα A-1-7 : Αναπαράσταση της ειδικής αποθήκευσης και αποθηκευτικότητας
(Ferris, J.G., Knowles, D.B., Browne, R.H., and Stallman, R.W. 1962)

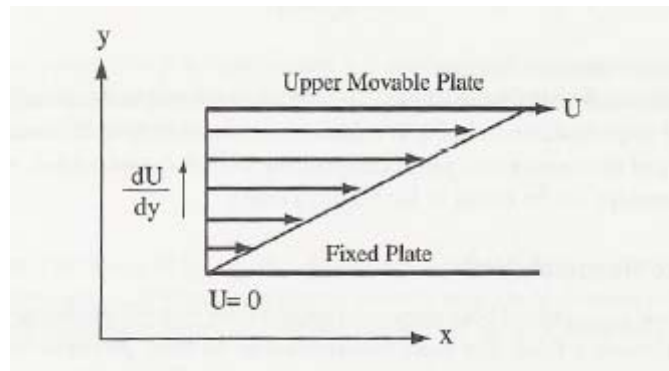
(Jacques W. Delleur, 1999)

8.4 Ιξώδες

Η αντίσταση ενός ρέοντος υγρού στη διάτμηση είναι γνωστή ως *δυναμικό ιξώδες*. Η Εικόνα A-1-8 δείχνει τις θεωρητικές και μαθηματικές σχέσεις στην ανάπτυξη του όρου. Σημειώστε ότι ένα υγρό συμπληρώνει το κενό ανάμεσα σε δύο επίπεδα ; το κάτω επίπεδο είναι στάσιμο και το πάνω κινείται προς την ίδια κατεύθυνση με αυτή της ταχύτητας, U . Το υγρό υποβάλλεται σε ελαστική ροή και σαν συνέπεια αυτού υπάρχει μία γραμμική αλλαγή στην ταχύτητα προς τα πάνω απ' το μηδέν στο κάτω επίπεδο μέχρι την τιμή U στο πάνω επίπεδο. Ο βαθμός αλλαγής της ταχύτητας στην κάθετη διεύθυνση είναι τότε dU/dy που επίσης ονομάζεται κάθετος βαθμός τάσης. Αυτό προκαλείται από την διατμητική τάση, τ , η οποία είναι

$$\tau = \frac{F}{A}$$

όπου F είναι η δύναμη που τραβάει το πάνω επίπεδο κατά μήκος της ταχύτητας, U , και A είναι το εμβαδό επιφανείας του πάνω επιπέδου.



Εικόνα A-1-8 : Αναπαράσταση του δυναμικού ιξώδους σαν αντίσταση ενός υγρού στη διάτμηση
(Jaques W. Delleur, 1999)

Από αυτές τις παρατηρήσεις είναι προφανές ότι

$$\tau \propto dU / dy$$

και υποθέτουμε ότι υπάρχει μία σταθερά, μ , η οποία θα μετατρέψει αυτή η αναλογικότητα σε μία εξίσωση, δηλαδή

$$\tau = \mu(dU / dy)$$

και

$$\mu = \tau / (dU / dy)$$

όπου η σταθερά, είναι γνωστή ως δυναμικό ιξώδες. Είναι συγκεκριμένο για ένα υγρό και θερμοκρασία, γενικά αυξανόμενο με την αύξηση της θερμοκρασίας. Το δυναμικό ιξώδες έχει τις μονάδες $[FT/L^2]$.

Το δυναμικό ιξώδες δεν πρέπει να συγχέεται με το κινηματικό ιξώδες, ν , που είναι το δυναμικό ιξώδες διαιρούμενο με την πυκνότητα του υγρού,

$$\nu = \mu / \rho$$

Το κινηματικό ιξώδες έχει τις μονάδες L^2/T . Το stoke, που πήρε το όνομά του από τον G.G.Stoke, το Βρετανό φυσικό, έχει τις μονάδες cm^2/s , αλλά το centistokes ($0.01 cm^2/s$) είναι περισσότερο βολική μονάδα. Το νερό στους $15^\circ C$ έχει κινηματικό ιξώδες $1.139 \times 10^{-6} m^2/s$ ή 1.139 centistokes. **(Jacques W. Delleur, 1999)**

8.5 Υδραυλική κλίση

Η υδραυλική κλίση είναι απλά η μείωση του ύψους ανά μονάδα μήκους της ροής κατά μήκος της γραμμής ενός ρεύματος, και δίνεται ως

$$I = dh / dl$$

ένας καθαρός αριθμός. **(Jacques W. Delleur, 1999)**

8.6 Υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμένων μέσων

Παρόλο που η εγγενής διαπερατότητα περιγράφει την ιδιότητα μεταβίβαση του νερού σε ένα πορώδες μέσο, δεν περιγράφει πλήρως τη σχέση με την ευκολία με την οποία ένα συγκεκριμένο υγρό που θα ρέει διάμεσω του μέσου. Η πλήρης περιγραφή δίνεται από την υδραυλική αγωγιμότητα, K , η οποία συνδέει το μέσο με τις ιδιότητες του υγρού,

$$K = k\rho g / \mu$$

Αυτή η παράμετρος έχει την διάσταση της ταχύτητας, γενικά cm/sec ή ft/day , και είναι μία δευτέρας τάξεως ποσότητα. Το φυσικό της νόημα δηλώνεται ως, «Ο όγκος του υγρού που ρέει κάθετα σε μία μοναδιαία περιοχή ενός πορώδους μέσου ανά μονάδα χρόνου κάτω από την επίδραση της υδραυλικής κλίσης της μονάδας». Νεότερη βιβλιογραφία έχει περιγράψει αυτό το φαινόμενο ως *συντελεστής*

πεδίου διαπερατότητας με μονάδες γαλόνια ανά μέρα ανά τετραγωνικό πόδι. Το όνομα και ο καθορισμός είναι τώρα σπανίως χρησιμοποιούμενα. Ο Πίνακας A-1-2 παρουσιάζει τη λίστα με τις υδραυλικές αγωγιμότητες διάφορων ειδών λίθων.

Lithology	Porosity (percent)	Hydraulic conductivity (cm/sec)	Compressibility, α (m^2/N or Pa^{-1})
Unconsolidated			
Gravel	25–40	10^{-2} – 10^2	10^{-8} – 10^{-10}
Sand	25–50	10^{-4} –1	10^{-7} – 10^{-9}
Silt	35–50	10^{-7} – 10^{-3}	no data
Clay	40–70	10^{-10} – 10^{-7}	10^{-6} – 10^{-8}
Glacial Till	10–20	10^{-10} – 10^{-4}	10^{-6} – 10^{-8}
Indurated			
Fractured Basalt	5–50	10^{-5} –1	10^{-8} – 10^{-10}
Karst Limestone	5–50	10^{-4} –10	not applicable
Sandstone	5–30	10^{-8} – 10^{-4}	10^{-11} – 10^{-10}
Limestone, Dolomite	0–20	10^{-7} – 10^{-4}	$< 10^{-10}$
Shale	0–10	10^{-11} – 10^{-7}	10^{-7} – 10^{-8}
Fractured Crystalline Rock	0–10	10^{-7} – 10^{-2}	$\sim 10^{-10}$
Dense Crystalline Rock	0–5	10^{-12} – 10^{-8}	10^{-9} – 10^{-11}

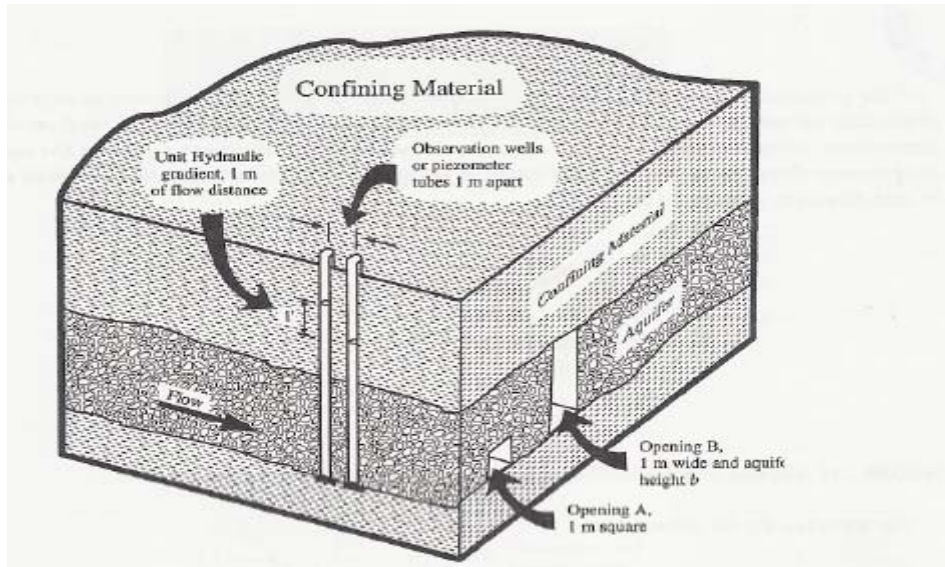
Πίνακας A-1-2 : Σημαντικές φυσικές ιδιότητες εδαφών και πετρωμάτων
(Domenico, P.A. and Schwartz, F.W. 1990 ; Freeze, R.A. and Cherry, J.A. 1979 ;
Fetter, C.W. 1994 ; Narasimhan, T.N. and Goyal, K.P. 1984)
(Jacques W. Delleur, 1999)

8.7 Μεταβιβασιμότητα

Παρόλο που είναι σύνηθες η υιοθέτηση της υδραυλικής αγωγιμότητας σε μία γενική αίσθηση στην μελέτη και στην περιγραφή των υδραυλικών ιδιοτήτων ενός πορώδους μέσου, είναι περισσότερο πλεονεκτική η χρήση του όρου, *μεταβιβασιμότητα* για την περιγραφή της ευκολίας με την οποία το νερό κινείται μέσω ενός μεγάλου πορώδους σώματος όπως ένας οριζόντιος ή στρωματωμένος υδροφορέας. Η μεταβιβασιμότητα, T , (μερικές φορές λέγεται μεταβιβαστικότητα) είναι απλά το προϊόν της υδραυλικής αγωγιμότητας και του κορεσμένου πάχους του υδροφορέα,

$$T = Kb$$

και έχει τις διαστάσεις L^2/T . Αυτά τα διαστασιολογικά χαρακτηριστικά διαφέρουν από τον καθορισμό της μεταβιβαστικότητας ως «ο όγκος του νερού ανά μονάδα χρόνου που περνάει μέσα από μία περιοχή μοναδιαίου πλάτους ενός υδροφορέα κάθετου στη ροή ενσωματωμένος πάνω στο πάχος του υδροφορέα» ή $[L^3/(TL^2)]L$ (Εικόνα A-1-9).



Εικόνα Α-1-9 : Αναπαράσταση της έννοιας της μεταβιβασιμότητας
(Ferris, J.G., Knowles, D.B., Browne, R.H., and Stallman, R.W. 1962)

Η μεταβιβασιμότητα αναφέρεται συνήθως σε μονάδες τετραγωνικών ποδιών ή τετραγωνικών μέτρων ανά ημέρα. Ο συνολικός βαθμός ροής (Q) μέσω οποιασδήποτε περιοχής (A) ενός υδροφορέα κάθετου στη διεύθυνση της ροής κάτω από την επίδραση της κλίσης (I) δίνεται από τη σχέση,

$$Q = TIA$$

(Jacques W. Delleur, 1999)

8.8 Υδραυλική αγωγιμότητα ακόρεστων μέσων

Το νερό στα ακόρεστα μέσα είναι αντικείμενο επηρεασμού όχι μόνο της υδραυλικής κλίσης, αλλά και της μοριακής κίνησης και της επιφανειακής τάσης, όπως έχει περιγραφεί προηγουμένως. Γι'αυτό το λόγο, η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα είναι μία συνάρτηση του υδραυλικού ύψους (Ψ), το οποίο, στα ακόρεστα μέσα, θα είναι πάντα αρνητικό. Κατά συνέπεια, γράφουμε την ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα $K(\Psi)$. Αυτό συζητείται αργότερα στην ενότητα για την ακόρεστη ζώνη. (Jacques W. Delleur, 1999)

8.9 Ανισοτροπία και ετερογένεια

Η συζήτηση μέχρι αυτό το σημείο έχει υποθέσει ότι το πορώδες μέσο είναι *ισοτροπικό*, π.χ., η διαπερατότητα και ως εκ τούτου, η υδραυλική αγωγιμότητα και η μεταβιβασιμότητα, είναι ίσες σε όλες τις διευθύνσεις σε οποιοδήποτε σημείο του πορώδους μέσου. Εάν οι παράμετροι διαφέρουν στην τιμή της διεύθυνσης σε ένα σημείο, τότε λέγεται ότι το μέσο είναι *ανισοτροπικό*.

Αυτές οι ιδιότητες που έχουν να κάνουν με την διεύθυνση περιγράφονται σε τρεις διαστάσεις σε σημειωμένο καρτεσιανό τανυστή χρησιμοποιώντας εννέα γενικούς όρους, a_{ij} , που μπορούν να αναπαραστήσουν την διαπερατότητα, την υδραυλική αγωγιμότητα, ή την μεταβιβασιμότητα, αλλά η μεταβιβασιμότητα είναι ένας όρος δύο διαστάσεων που μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε οριζόντια διεύθυνση (μπορούμε να τον αντιληφθούμε μόνο στην οριζόντια διεύθυνση).

$$A_{IJ} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

Αν οι κύριες διευθύνσεις του τανυστή συμπίπτουν με τους κύριους καρτεσιανούς άξονες, οι μη διαγώνιοι όροι θα ακυρωθούν και οι μόνοι όροι που θα ενδιαφέρουν θα είναι οι a_{11} , a_{22} και a_{33} . Η ειδική εκροή, η ταχύτητα και η υδραυλική αγωγιμότητα είναι διανύσματα. Κατά συνέπεια, για παράδειγμα, σε ένα τριών διαστάσεων πορώδες μέσο με ανισοτροπική υδραυλική αγωγιμότητα, η ειδική εκροή θα δίνεται ως,

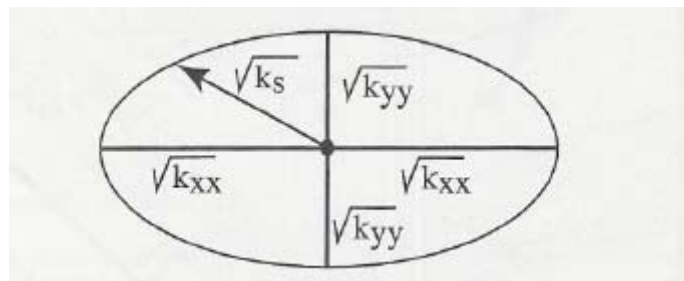
$$q = q_1 i + q_2 j + q_3 k$$

όπου i , j , k είναι μοναδιαία διανύσματα στους x , y , z άξονες αντίστοιχα, και q_1 , q_2 , και q_3 είναι τα συνιστώμενα μέρη της ειδικής εκροής (οι τρεις συνιστώσες) στους x , y , z άξονες αντίστοιχα.

Χρησιμοποιώντας K_{xx} , K_{yy} , και K_{zz} για την αναπαράσταση των κύριων διαγώνιων όρων στον τανυστή της υδραυλικής αγωγιμότητας, η παραπάνω εξίσωση μπορεί να πάρει την ακόλουθη μορφή,

$$q = -K_{xx}(\partial h / \partial x)i - K_{yy}(\partial h / \partial y)j - K_{zz}(\partial h / \partial z)k$$

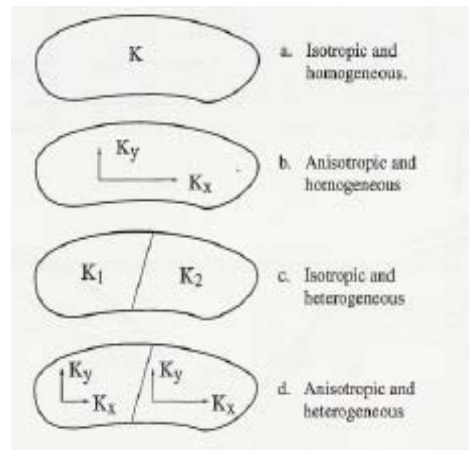
Εάν οι κύριες διευθύνσεις είναι κατά μήκος των καρτεσιανών διευθύνσεων, είναι επίσης σύνηθες να εκφράζουμε την ανισοτροπία γραφικά με χρήση της εξίσωσης και γράφημα για ένα ελλειψοειδές στις τρεις διαστάσεις, και μία έλλειψη στις δύο διαστάσεις. Χρησιμοποιώντας ένα παράδειγμα δύο διαστάσεων, οι ημιάξονες της έλλειψης αναπαριστούν την τετραγωνική ρίζα της ιδιότητας κατά μήκος αυτών των αξόνων, και το μήκος σε οποιαδήποτε δοσμένη διεύθυνση, r , είναι η τετραγωνική ρίζα της ιδιότητας σ' αυτή τη διεύθυνση (Εικόνα A-1-10) :



Εικόνα A-1-10 : Ελλειπτική αναπαράσταση της διαπερατότητας και της υδραυλικής αγωγιμότητας
(Jaques W. Delleur, 1999)

Η ανισοτροπία ή ισοτροπία της υδραυλικής αγωγιμότητας και της μεταβιβασιμότητας ελέγχεται ειδικά από την ισοτροπία ή την ανισοτροπία της εγγενούς αγωγιμότητας. Η τελευταία παράμετρος, που αποτελεί αυστηρά συνάρτηση μόνο για το πορώδες μέσο, καθορίζεται συνήθως από την κατασκευή του μέσου, η οποία ακολούθως είναι το αποτέλεσμα της γεωλογικής προέλευσης του μέσου και των επόμενων αλλαγών.

Εάν η κατάσταση της ισότητας των διευθύνσεων των ιδιοτήτων είναι η ίδια από σημείο σε σημείο οπουδήποτε στο μέσο, το μέσο ορίζεται ως *ομοιογενές*. Εάν η κατάσταση είτε της ισοτροπίας είτε της ανισοτροπίας διαφέρει από σημείο σε σημείο, τότε το μέσο ορίζεται ως *ετερογενές*. Η Εικόνα A-1-11 παρουσιάζει αυτές τις τέσσερις πιθανές περιγραφές ενός μέσου – (1) ισοτροπικό και ομοιογενές, (2) ανισοτροπικό και ομοιογενές, (3) ισοτροπικό και ετερογενές, και (4) ανισοτροπικό και ετερογενές :



Εικόνα A-1-11 : Περίληψη των πιθανών συνδυασμών της ισοτροπίας, ανισοτροπίας, ομοιογένειας και ετερογένειας
(Jaques W. Delleur, 1999)

(Jacques W. Delleur, 1999)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο
«ΡΟΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ-ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ
ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ»

1. ΤΟ ΝΕΡΟ ΣΤΗΝ ΑΚΟΡΕΣΤΗ ΖΩΝΗ

1.1 Υδραυλική αγωγιμότητα και ειδική εκροή μέσω της ακόρεστης ζώνης

Όταν η διηθητική χωρητικότητα έχει φτάσει στα όριά της, η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα παίρνει τότε τη μέγιστη τιμή της. Όταν το έδαφος είναι αρχικά ξηρό, το νερό δεν μπορεί να διανύσει καμία σημαντική απόσταση μέχρι η περιεκτικότητα του νερού στο έδαφος να είναι επαρκής και το ύψος της πίεσης γίνει λιγότερο αρνητικό. Η ειδική εκροή (ή ταχύτητα Darcy) δίνεται ως:

$$q = -K(\Psi)\partial h / \partial l \quad (1)$$

ή

$$q = -K(\theta)\partial h / \partial l \quad (2)$$

όπου θ είναι η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό. Τρεις μέθοδοι για τον υπολογισμό της ακόρεστης υδραυλικής αγωγιμότητας σαν συνάρτηση του νερού δίνονται παρακάτω και συνοψίζονται από τους Rawls et al. (1993). Οι εξισώσεις τους δεν είναι διαστασιολογημένες, κάτι που τις κάνει εφαρμόσιμες σε κάθε σχετικό σύνολο μονάδων. (Jacques W. Delleur, 1999)

2. ΤΟ ΝΕΡΟ ΣΤΗΝ ΚΟΡΕΣΜΕΝΗ ΖΩΝΗ

Σε κορεσμένους πόρους, οι δυνάμεις προσκόλλησης είναι ίσες σε όλες τις διευθύνσεις, και έτσι δεν υπάρχει κατευθυντική έλξη. Οι μόνες δυναμικές ή κινητικές δυνάμεις που δρουν είναι η βαρύτητα και η δύναμη που αναπαρίσταται από την κλίση του δυναμικού του ρευστού. Οι δυνάμεις αντίστασης λόγω του ιξώδους (αντίσταση στη διάτμηση) δουλεύουν σε αντιπαράθεση με τις δυναμικές δυνάμεις.

Ο νόμος του Darcy υποτίθεται ότι είναι σε ισχύ για την ροή σε πορώδες μέσο, και η ροή υποτίθεται ότι είναι ελασματική, π.χ., ο αριθμός *Reynolds*

$$R_e = \rho v d / \mu \quad (3)$$

έχει μια τιμή από 1 μέχρι 10, όπου το ρ είναι η πυκνότητα του νερού, ν είναι η μέση ταχύτητα των πόρων, d είναι η μέση διάμετρο των πόρων και μ είναι το δυναμικό ιξώδες του νερού σε μία δοσμένη θερμοκρασία.

Η μέση διάμετρο των πόρων είναι πιθανόν ο καλύτερος υπολογισμός των ιδιοτήτων των πόρων που μπορεί να επιτευχθεί σε μεγάλη κλίμακα. Όμως, το μέγεθος των πόρων σε ένα μέσο μπορεί να βρίσκεται μέσα στα όρια πάνω ακόμα και από μερικές τάξεις μεγέθους σε πολύ ετερογενή μέσα με μεγάλους συντελεστές ομοιομορφίας (μεγαλύτερους από 4). Γι' αυτό το λόγο, είναι απίθανο η ελασματική ροή να εμφανιστεί σε όλους τους πόρους την ίδια στιγμή. Μεγάλοι πόροι (συμπεριλαμβανομένου των θραύσεων και των καρστικών αγωγών) μπορεί να επιτρέψουν το πέρασμα του νερού σε ταχύτητες αρκετά υψηλές ώστε να είναι μη γραμμικές ελασματικές ή μεταβατικές ($4 \leq Re \leq 100$), και σε μερικές περιπτώσεις, τυρβώδης ($Re > 100$). Σε μικρούς πόρους, η τυρβώδης αντίσταση μπορεί να είναι πολύ μεγάλη για να επιτρέψει ταχύτερη ροή απ' την ελασματική. Παρά όλες αυτές τις αβεβαιότητες, οι υδρογεωλόγοι γενικά δέχονται την υπόθεση της ελασματικής ροής μέσω ενός κοκκώδους πορώδους μέσου με $Re < 100$ για το λόγο της απλοποίησης των μαθηματικών της ροής.

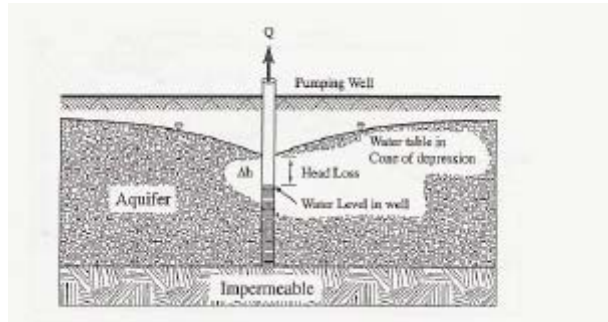
Το υπόγειο νερό μπορεί να ρέει για κάποια απόσταση μέσα σε μία ευρεία περιοχή σε ελασματική κατάσταση, αλλά καθώς προσεγγίζει ένα σημείο εκροής (π.χ., μία πηγή ή ένα πηγάδι) πολύ περισσότερο στενό απ' ό,τι το πεδίο ροής με μεγαλύτερη κλίση, οι γραμμές ροής συγχωνεύονται και η ταχύτητα ροής θα αυξηθεί για να διατηρηθεί ο ίδιος βαθμός ογκομετρικής εκροής. Κοντά ή στο σημείο της εκροής η ταχύτητα θα είναι συχνά αρκετά μεγάλη για να είναι πραγματικά τυρβώδη.

Κάτω από τέτοιες συνθήκες, η ειδική εκροή εκφράζεται ως,

$$q = -K(\partial h / \partial t)^m \quad (4)$$

όπου $m > 1$.

Η Εικόνα A-2-1 αναπαριστά μία κατάσταση όπου η ροή μπορεί να αλλάξει από ελασματική σε τυρβώδη καθώς προσεγγίζει ένα πηγάδι άντλησης. Υποθέτοντας ότι ο υδροφορέας είναι ομοιογενής και ισοτροπικός και ότι η ροή είναι υπό σταθερές συνθήκες, οι γραμμές ροής συγκλίνουν καθώς προσεγγίζουν το πηγάδι.



Εικόνα A-2-1 : Ροή προς ένα πηγάδι άντλησης με απώλεια ύψους
(Jaques W. Delleur, 1999)

Σε κάποια απόσταση από το πηγάδι η εξίσωση της ροής υπό σταθερές συνθήκες δίνεται ως

$$q = -K(h/r) \quad (5)$$

όπου r είναι η ακτινική απόσταση από το κέντρο του πηγαδιού. Στο πηγάδι ή κοντά στο πηγάδι, η εξίσωση γίνεται

$$q = -K(h/r)^m \quad (6)$$

όπου $m > 1$ και γενικά πιο κοντά στο 2.

Η ελασματική ροή σταθερής κατάστασης μέσα στο πηγάδι θα απαιτεί μία κλίση τέτοια που το επίπεδο του νερού στο περίβλημα του πηγαδιού είναι στο ίδιο επίπεδο ανύψωσης όπως αμέσως έξω απ'το περίβλημα του πηγαδιού μέσα στον υδροφορέα. Η τυρβώδης ροή μέσα στο πηγάδι απαιτεί περισσότερη ενέργεια και επιπρόσθετα πιο απότομη κλίση απ'ότι η ελασματική ροή. Για να το πετύχουμε λοιπόν αυτό, το επίπεδο του νερού μέσα στο πηγάδι θα πρέπει να πέσει κάτω από το επίπεδο που απαιτείται για την ελασματική ροή όπως παρουσιάστηκε στην Εικόνα A-2-1.

Αυτή η επιπλέον πτώση του νερού είναι γνωστή ως απώλεια ύψους ή *απώλεια πηγαδιού*, και είναι ανεπιθύμητη. Η απώλεια πηγαδιού σημαίνει επιπλέον ενέργεια η οποία μειώνει την αποτελεσματικότητα του συστήματος άντλησης και οδηγεί προς τα πάνω το κόστος της άντλησης του νερού. Επιπρόσθετα, επειδή μία μεγαλύτερη πτώση πίεσης εμφανίζεται με την απώλεια ύψους, τα αέρια θα είναι προτιμότερο να βγουν

από την διάλυση και να προκαλέσουν καθίζηση της άσβεστου (υδροξείδιο του ασβεστίου, CaCO_3) και του σιδήρου και οξειδίων του μαγγανίου (Fe_2O_3 και MnO_2 αντίστοιχα) πάνω στο κόσκινο του πηγαδιού κάτι που προκαλεί απόφραξη του κόσκινου και περαιτέρω μείωση της αποτελεσματικότητας του πηγαδιού. (**Jacques W. Delleur, 1999**)

3. ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΗΣ ΡΟΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Ουσιαστικά όλες οι ροές υπογείων υδάτων είναι τριών διαστάσεων. Αυτό σημαίνει πως η ταχύτητα ενός διηθημένου σωματιδίου νερού αναπαρίσταται από ένα διάνυσμα που έχει τρεις συνιστώσες. Ένα απλό παράδειγμα είναι η τρισδιάστατη ακτινική ροή προς ένα πηγάδι. Παρόλ'αυτά υπάρχουν αρκετές καταστάσεις όπου οι ταχύτητες είναι συνεπίπεδες ή υπάρχει ακτινική συμμετρία. Σ'αυτές τις περιπτώσεις, η ροή μπορεί να αναλυθεί σε δύο διαστάσεις με επαρκή ακρίβεια για πολλά μηχανικά προβλήματα. Ένα παράδειγμα είναι η διήθηση του νερού μέσα από μία σειρά παράλληλων οριζόντιων κεραμωτών αγωγών. Μακριά από τα όρια των σωλήνων, το σχήμα της στάθμης του νερού είναι ανεξάρτητο της τοποθεσίας κατά μήκος των σωληνωτών αγωγών. Σε μερικές περιπτώσεις το πρόβλημα της ροής μπορεί να μειωθεί περαιτέρω σε μία διάσταση. Η ύπαρξη της συμμετρίας ή των ειδικών υποθέσεων επιτρέπει την απλοποίηση πολλών προβλημάτων. Είναι σημαντικό, παρόλ'αυτά η αναγνώριση των λαθών που μπορεί να εμπεριέχουν τέτοιες απλοποιήσεις.

Οι μεταβλητές της ροής του υπόγειου ύδατος, όπως η ταχύτητα και η πίεση, μπορούν να μεταβάλλονται μέσα στο χρόνο ή μπορεί να είναι ανεξάρτητες αυτού. Για παράδειγμα, όταν αρχίσει η άντληση από ένα πηγάδι, η πτώση της στάθμης του νερού αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου. Αυτό είναι ένα πρόβλημα μη σταθερής ή παροδικής ροής. Εάν οι μεταβλητές της ροής δεν αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου, η ροή είναι σταθερή. (**Jacques W. Delleur, 1999**)

3.2 Πίεση, αναρρόφηση, πιεζομετρικό ύψος, και υδραυλική κλίση

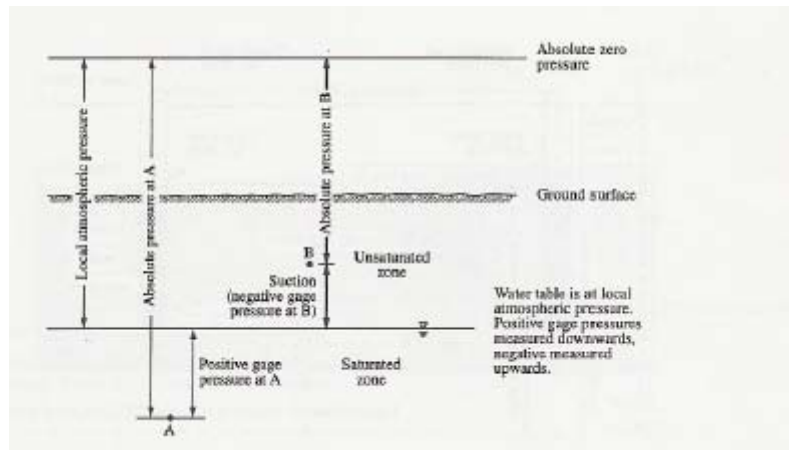
Οι πιέσεις του ύδατος εκφράζονται γενικά ως *πιέσεις διαμετρημάτων*, αλλά μπορούν επίσης να εκφραστούν και ως *απόλυτες πιέσεις*. Αυτές οι πιέσεις είναι συσχετιζόμενες με την εξίσωση (Εικόνα A-2-2)

$$\text{Απόλυτη πίεση} = \text{Τοπική ατμοσφαιρική πίεση} + \text{Πίεση διαμετρημάτων}$$

Οι πιέσεις των διαμετρημάτων χρησιμοποιούνται στην ακόλουθη συζήτηση. Η στάθμη του ύδατος βρίσκεται στην τοπική ατμοσφαιρική πίεση και εξυπηρετεί ως μία γραμμή αναφοράς για τις πιέσεις των διαμετρημάτων. Το σημείο A στην Εικόνα A-2-2 βρίσκεται στην κορεσμένη ζώνη, και η πίεση του διαμετρήματος είναι θετική και ονομάζεται *πίεση των πόρων*. Το σημείο B βρίσκεται στην ακόρεστη ζώνη, και η πίεση του διαμετρήματος είναι αρνητική. Η αρνητική πίεση αναφέρεται ως μία *αναρρόφηση* ή *ένταση*. Η αναρρόφηση εκφράζεται ως θετικός αριθμός. Κατά συνέπεια μία θετική αναρρόφηση ανταποκρίνεται σε μία αρνητική πίεση διαμετρήματος. Οι διαστάσεις της πίεσης είναι F/L^2 , δηλαδή, N/m^2 ή Pascal (Pa), kN/m^2 ή kilopascal (kPa) στο σύστημα SI και lb/in^2 και lb/ft^2 στο σύστημα των Η.Π.Α.. Ο νόμος της υδροστατικής δηλώνει ότι η πίεση, p , μπορεί να εκφραστεί με όρους ύψους του υγρού, h_p , μετρημένο από τη στάθμη του νερού (υποθέτοντας ότι το υπόγειο ύδωρ βρίσκεται σε ηρεμία ή ότι κινείται οριζόντια). Το ύψος αυτό ονομάζεται *ύψος πίεσης*

$$h_p = p / \gamma_w = p / \rho g \quad (7)$$

όπου $\gamma = \rho g$ είναι το ειδικό βάρος και ρ είναι η πυκνότητα του νερού. Για το σημείο A, η ποσότητα h_p είναι θετική, ενώ είναι αρνητική για το σημείο B. Το ύψος πίεσης γενικά εκφράζεται σε μέτρα νερού, αλλά μπορεί επίσης να εκφραστεί σε εκατοστά στήλης υδραργύρου. Κάποιοι παράγοντες μετατροπής για την πίεση και τα ύψη πίεσης βρίσκονται στη λίστα του Πίνακα A-2-1 και κάποια προσεγγιστικά ισοδύναμα της ατμοσφαιρικής πίεσης δίνονται στον Πίνακα A-2-2.



Εικόνα A-2-2 : Απόλυτες και πιέσεις διαμετρημάτων
(Jaques W. Delleur, 1999)

To convert from	to	Multiply by
atmosphere	pascal	1.013 E+5
bar	pascal	1.000 E+5
dyne/cm ²	pascal	0.100
ft of water (39.4°F)	pascal	2.989 E+3
inch of mercury (32°F)	pascal	3.386 E+3
inches of water (39.4°F)	pascal	249.1
millibar	pascal	100
millimeters of mercury (0°C)	pascal	133.3
pound per sq. foot	pascal	47.88

Source: Système International d'Unités, Universities Council on Water Resources, 1976.

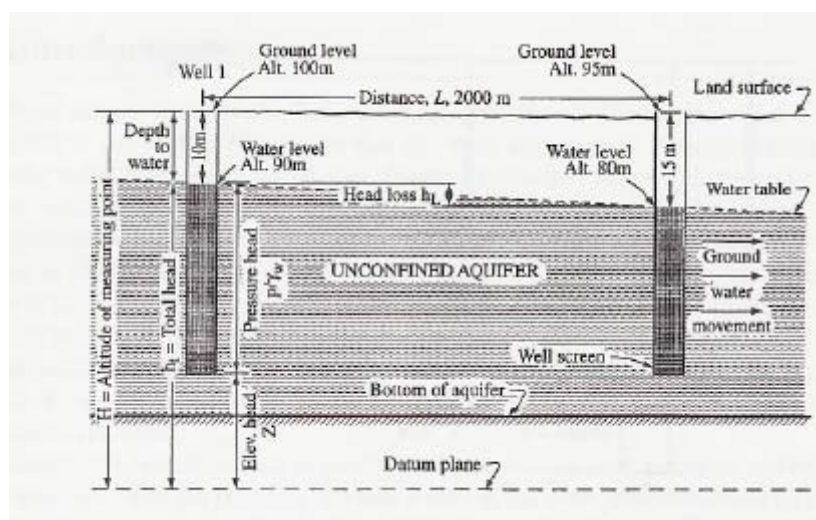
Πίνακας A-2-1 : Παράγοντες μετατροπής για πιέσεις και σχετικούς όρους
(Jaques W. Delleur, 1999)

US	Metric
14.7 psi abs.	101.3 kN/m ² , abs 1 013 mbar, abs
29.9 in.Hg	760 mm Hg 0.76 m Hg
33.9 ft. H ₂ O	10.3 m H ₂ O

Πίνακας A-2-2 : Προσεγγιστικά ισοδύναμα της ατμοσφαιρικής πίεσης
(Jaques W. Delleur, 1999)

Εάν το μέσο είναι κορεσμένο, η πίεση των πόρων, p , μπορεί να μετρηθεί από το ύψος πίεσης, $h_p = p/\gamma_w$, σε ένα πιεζόμετρο, σε ένα μη ρέον πηγάδι. Η διαφορά ανάμεσα στο ύψος του πηγαδιού, H , (Εικόνα A-2-3) και στο βάθος του νερού μέσα στο πηγάδι είναι το συνολικό ύψος, h_t , στο πηγάδι. Στη μηχανική των ρευστών το συνολικό ύψος ορίζεται ως το άθροισμα του ύψους ανύψωσης, z , του ύψους πίεσης, p/γ_w , και του κινηματικού ύψους, $v^2/2g$, όπου v είναι η ταχύτητα ροής και g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας. Για την ροή των υπογείων υδάτων το κινηματικό ύψος

μπορεί γενικά να αγνοηθεί επειδή το νερό κινείται πάρα πολύ αργά. Γι' αυτό το λόγο, το συνολικό ύψος σε ένα πηγάδι παρατήρησης θεωρείται ότι είναι ίσο με το *πιεζομετρικό ύψος*, ή το άθροισμα του ύψους ανύψωσης και του ύψους πίεσης. Το σύμβολο ψ χρησιμοποιείται κάποιες φορές για να υποδείξει το ύψος πίεσης.



Εικόνα A-2-3 : Ύψη και κλίσεις
(Heath, R.C. 1995)

Το πιεζομετρικό ύψος αναφέρεται και σαν *πιεζομετρικό δυναμικό*. Η αλλαγή του πιεζομετρικού ύψους ανά μονάδα απόστασης σε μία δοσμένη διεύθυνση είναι η υδραυλική κλίση. Αν η διεύθυνση δεν διευκρινίζεται, υποθέτουμε ότι είναι η διεύθυνση της μέγιστης υδραυλικής κλίσης. Η υδραυλική κλίση είναι μία καθαρή ποσότητα (L/L) όπου σταθερές ποσότητες χρησιμοποιούνται. (**Jacques W. Delleur, 1999**)

3.3 Η κίνηση του υπόγειου ύδατος

Η κίνηση του υπόγειου ύδατος απαιτεί ενέργεια. Αυτή η ενέργεια μπορεί να εκφραστεί ως ένα ύψος πάνω από μία γραμμή αναφοράς. Το ύψος ανύψωσης αυτής της γραμμής είναι αυθαίρετο. Αυτό οφείλεται στο ότι η διαφορά στο ύψος είναι αυτό που έχουμε υπόψιν μας. Γι' αυτό το λόγο είναι σημαντικό να μετρώνται οι ενέργειες με αντιστοιχία στην ίδια γραμμή ενέργειας. Στην μηχανική των υπογείων υδάτων, το μέσο επίπεδο της θάλασσας (MSL, Mean Sea Level) συνήθως παίρνεται ως η γραμμή

αναφοράς. Το υδραυλικό ύψος καθορίζεται ως η ενέργεια ανά μονάδα βάρους μετρούμενο σχετικά με την γραμμή αναφοράς.

Το νερό μπορεί να κατέχει διάφορες μορφές ενέργειας. Ίσως η πιο προφανής είναι η ενέργεια που κατέχει το νερό λόγω της ανύψωσής του πάνω από την γραμμή αναφοράς. Αυτή είναι η *δυναμική ενέργεια*.

Η ενέργεια που έχει το νερό λόγω της κίνησής του είναι η *κινητική ενέργεια*. Όταν το υπόγειο νερό ρέει μέσα από τους πόρους ενός πετρώματος ή ενός εδαφικού σχηματισμού, η ταχύτητα είναι πολύ μικρή, ίσως της τάξης των εκατοστών ανά έτος, και το κινητικό ύψος είναι συνήθως αμελητέο σε αντιστοιχία με άλλες μορφές ενέργειας. Μία εξαίρεση είναι τα «κοντινά φρεάτια» (near wells), όπου η ταχύτητα αυξάνει σημαντικά. Άλλη εξαίρεση είναι σε συγκεκριμένους καρστικούς αγωγούς όπου το υπόγειο νερό μπορεί να ρέει αρκετά γρήγορα ώστε το κινητικό ύψος να είναι σημαντικό.

Η ενέργεια που το νερό έχει λόγω της πίεσής του είναι η *ενέργεια πίεσης*. Η ένταση της πίεσης ενός υγρού, p , που δρα σε μία περιοχή dA παράγει μία δύναμη $p \, dA$. Εάν η περιοχή μετατοπιστεί κατά μία απόσταση ds , στην διεύθυνση της ροής, τότε η δύναμη παράγει μία ποσότητα έργου $p \, dA \, ds$, γνωστό ως *έργο ροής*. Ο όγκος dA έχει ένα βάρος $\rho g \, dA \, ds$ και το έργο ροή ανά μονάδα βάρους είναι $p \, dA \, ds / \rho g \, dA \, ds = p / \rho g$ και είναι γνωστό ως ύψος πίεσης. Το άθροισμα του ύψους του επιπέδου ανύψωσης και του ύψους πίεσης είναι γνωστό ως πιεζομετρικό ύψος $h = z + p / \rho g$. **(Jacques W. Delleur, 1999)**

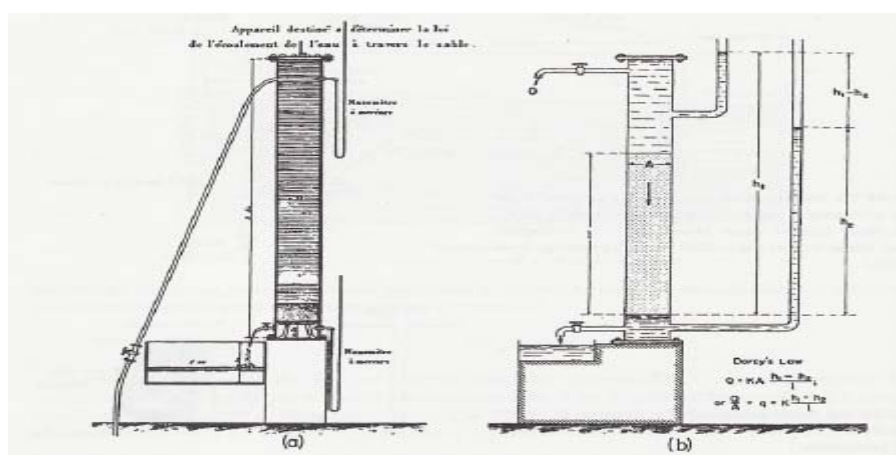
3.4 Ροή μέσω πορωδών μέσων – Νόμος Darcy (Darcy's Law)

Ο Γάλλος μηχανικός, Henry Darcy, πραγματοποίησε πειράματα πάνω στο φιλτράρισμα του νερού μέσα από στήλες άμμου. Το ότι βρήκε πως ο βαθμός ροής μέσα από μία στήλη άμμου είναι ανάλογος με την απώλεια ύψους, εμφανίζεται σε ένα παράρτημα της πραγματείας του στα αρχεία της πόλης Ντιζόν (Darcy, 1856). Η Εικόνα A-2-4 δείχνει το πραγματικό στήσιμο που χρησιμοποιήθηκε από το Darcy και η Εικόνα A-2-5 δείχνει κάποια από τα αποτελέσματα των πειραμάτων του όπως έγιναν σε γράφημα από τον Hubbert (1953) από τα δεδομένα του Darcy. Ο νόμος του Darcy δηλώνει ότι ο ογκομετρικός βαθμός ροής, Q , [$L^3 T^{-1}$] μέσα από μία ακαθάριστη περιοχή A ενός σχηματισμού με μία υδραυλική αγωγιμότητα K [$L T^{-1}$] (καθορισμοί και τιμές δίνονται στο 1^ο Κεφάλαιο), κάτω από μία υδραυλική κλίση $i = -\partial h / \partial s$

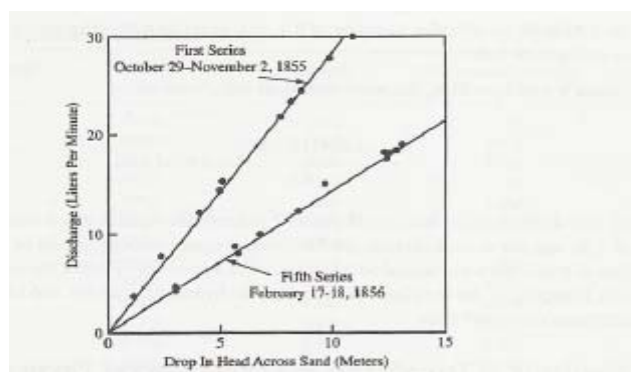
στην διεύθυνση s δίνεται από την σχέση

$$Q = qA = -KA \partial h / \partial s = KA i = \frac{k \rho g}{\mu} A i \quad (8)$$

όπου το q είναι μία θεωρητική ταχύτητα που ονομάζεται *ειδική εκροή* ή βαθμός ροής ανά μονάδα επιφανείας [LT^{-1}] επίσης γνωστή και ως *ταχύτητα Darcy*, μ είναι το ιξώδες, και k είναι η *διαπερατότητα*. Το υδραυλικό ύψος, h , είναι το άθροισμα του επιπέδου ανυψώσεως z και του ύψους πίεσης p/γ_w . Το πρόσημο μείον στην παραπάνω εξίσωση δείχνει ότι η ροή λαμβάνει χώρα από υψηλά σε χαμηλά ύψη, δηλαδή στην διεύθυνση μείωσης του ύψους. Η ταχύτητα των πόρων, $v = q/n_e$, όπου n_e είναι το ενεργό πορώδες και v είναι η μέση ταχύτητα ροής στους πόρους, που συνήθως ονομάζεται *ταχύτητα διήθησης*.



Εικόνα A-2-4 : Οι αρχικές συσκευές του Darcy με μανόμετρο υδραργύρου (α) και ισοδύναμη αρχική συσκευή με μανόμετρο με νερό (β)
(Hubbert, M.K. 1953)



Εικόνα A-2-5 : Τα δεδομένα του Darcy που έγιναν γράφημα από τον Hubbert
(Hubbert, M.K. 1953)

Και είναι η μέση ταχύτητα για την μεταφορά των διαλυτών ουσιών που δεν αντιδρούν. Στον καθορισμό των ορίων των συμβαλλόμενων περιοχών για τις ζώνες προστασίας των υψών των πηγαδιών, είναι συχνά απαραίτητο η εύρεση του χρόνου που χρειάζεται το νερό να κινηθεί από ένα σημείο ανοιγμένης γεωτρήσεως. Αυτό μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας την ταχύτητα. Ρυπαντές που ταξιδεύουν πρώτιστα με συμμεταφορά θα κινηθούν με την ίδια ταχύτητα με αυτή του νερού, αλλά αυτοί που υπόκεινται στην επίδραση της διάχυσης και της απορρόφησης κινούνται πολύ πιο αργά.

Η μονοδιάστατη μορφή του νόμου του Darcy είναι

$$q = K \frac{(p_1 / \gamma_w + z_1) - (p_2 / \gamma_w + z_2)}{L} \quad (9)$$

όπου οι υποστίξεις 1 και 2 αναφέρονται στα σημεία στα οποία τα ύψη πίεσης και τα ύψη ανυψώσεως λαμβάνονται υπόψιν, και L είναι η απόσταση μεταξύ αυτών των σημείων. (**Jacques W. Delleur, 1999**)

3.5 Δυναμικό ταχύτητας, δυναμικό δράσης, και δίκτυα ροής

Το πιεζομετρικό ύψος $h = z + p/\gamma + C$, όπου C είναι μία αυθαίρετη σταθερά, ερμηνεύεται ως ενέργεια ή δυναμικό ανά μονάδα βάρους. Η ποσότητα

$$\Phi = Kh = K \left(z + \frac{p}{\gamma} \right) + C \quad (10)$$

καθορίζεται ως το *δυναμικό ταχύτητας*, Φ. Δυνάμει του νόμου του Darcy, το αρνητικό της παραγώγου του στην διεύθυνση της ροής, για τη σταθερά K, είναι η ταχύτητα του Darcy, q. Σε ένα πιο γενικό όρο, το αρνητικό της κλίσης του δυναμικού της ταχύτητας είναι μία ταχύτητα. Αυτός είναι ο καθορισμός του δυναμικού της ταχύτητας στην κλασσική υδροδυναμική. (**Jacques W. Delleur, 1999**)

3.6 Εξίσωση Laplace

Η εξίσωση Laplace είναι θεμελιώδης στην ανάλυση πολλών προβλημάτων ροής υπογείων υδάτων. Εμφανίζεται από τον συνδυασμό του νόμου του Darcy και της εξίσωσης συνεχείας ή διατήρησης της μάζας για έναν ομοιογενή ισότροπο υδροφορέα. Θεωρούμε μία σταθερή ροή ενός ασυμπίεστου μέσα από έναν στοιχειώδη κύβο (Εικόνα A-2-6) ενός πορώδους μέσου με πορώδες n . Και είναι u , v , w οι συνιστώσες της ταχύτητας στις διευθύνσεις x , y , z . Η εισροή μέσα από την κάθετη επιφάνεια κοντά στην πηγή είναι $n \, du \, dy \, dz$. Η εκροή μέσα από την κάθετη επιφάνεια μακριά από την πηγή είναι

$$\left[nu + \frac{\partial}{\partial x}(nu)dx \right] dydz \quad (11)$$

και η αλλαγή στον όγκο του δικτύου στην x -διεύθυνση είναι

$$\frac{\partial}{\partial x}(nu) dx dy dz \quad (12)$$

Το άθροισμα όλων των αλλαγών στον όγκο του δικτύου στις x , y , z διευθύνσεις πρέπει να ισούται με μηδέν. Κατά συνέπεια

$$\frac{\partial}{\partial x}(nu) + \frac{\partial}{\partial y}(nv) + \frac{\partial}{\partial z}(nw) = 0 \quad (13)$$

Για έναν ασυμπίεστο ισότροπο ομοιογενές πορώδες μέσο, η εξίσωση συνέχειας για σταθερή ασυμπίεστη ροή είναι κατά συνέπεια

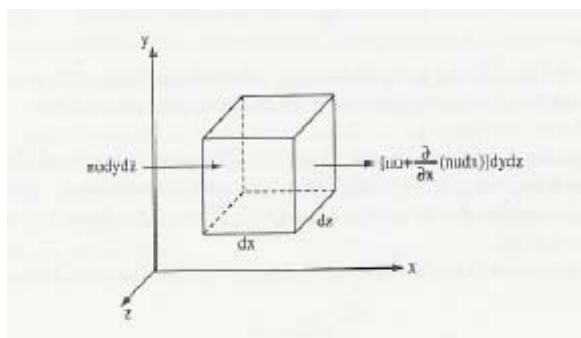
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (14)$$

Χρησιμοποιώντας το νόμο του Darcy για ένα ισότροπο ομοιογενές μέσο

$$u = -K \frac{\partial h}{\partial x}, \quad v = -K \frac{\partial h}{\partial y}, \quad w = -K \frac{\partial h}{\partial z} \quad (15)$$

Η εξίσωση του Laplace λαμβάνεται σε όρους του ύψους h :

$$\nabla^2 h = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (16)$$



Εικόνα Α-2-6 : Στοιχειώδης κύβος ενός πορώδους μέσου
(Jaques W. Delleur, 1999)

Εάν στην εξίσωση $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$ οι συνιστώσες της ταχύτητας εκφράζονται σε όρους του δυναμικού της ταχύτητας

$$u = -\frac{\partial \Phi}{\partial x}, \quad v = -\frac{\partial \Phi}{\partial y}, \quad w = -\frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad (17)$$

και έπειτα η εξίσωση Laplace εκφράζεται σε όρους του δυναμικού της ταχύτητας Φ

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (18)$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι θεμελιώδης στην ανάλυση των δικτύων ροής.

Εάν το πορώδες μέσο ενός περιορισμένου υδροφορέα θεωρείται συμπιέσιμο με μία συμπιεστότητα α (αμοιβαία του συντελεστή της ελαστικότητας, για το χαλαζία

2×10^{-11} Pa) και το νερό έχει μία συμπιεστότητα β (5×10^{-10} Pa⁻¹) και έπειτα η

εξίσωση $\nabla^2 h = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$ αντικαθίσταται από μία περισσότερο

εξεζητημένη και καλοδουλεμένη έκφραση. Μία καλή προσέγγιση είναι

$$\nabla^2 h = \frac{1}{K} \left[\beta \rho g \left(n + \frac{\alpha}{\beta} \right) \right] \frac{\partial h}{\partial t} \quad (19)$$

Ο όρος εντός των αγκυλών είναι η ειδική αποθήκευση ή συντελεστής αποθηκευτικότητας, S, δηλαδή ο όγκος αποθήκευσης που ελευθερώνεται ανά μονάδα πτώσης της πιεζομετρικής επιφάνειας ανά μονάδα οριζόντιας επιφανείας. Είναι καθαρός αριθμός και για περιορισμένους υδροφορείς είναι της τάξης του 5×10^{-2} μέχρι 10^{-5} . Ο όρος $\beta \rho g$ αναπαριστά το νερό που κατακρατείται στην αποθήκευση συναρτήσει της συμπιεστότητας του πορώδους μέσου, και $\beta \rho g n$ είναι το νερό που κατακρατείται σαν αποτέλεσμα από την επέκταση της αποθήκευσης του νερού. Για έναν ελεύθερο υδροφορέα, S είναι το πορώδες της απορροής ή η ειδική κατακράτηση, και αυτή είναι ο όγκος του νερού που αφήνεται ανά μονάδα πτώσης της στάθμης του ανά μονάδα οριζόντιας επιφάνειας. Έτσι, για το στοιχειώδη κύβο της Εικόνας A-2-6, η διαφορά ανάμεσα στην εισροή και την εκροή είναι τώρα ίση με το βαθμό αλλαγής της αποθήκευσης, η ροή είναι τώρα μεταβαλλόμενη, κατά συνέπεια απαιτείται η χρονική παράγωγος στο δεξί μέρος της παραπάνω εξίσωσης. Για δυσδιάστατη ροή σε ένα οριζόντιο και περιορισμένο υδροφορέα η παραπάνω εξίσωση γίνεται

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (20)$$

όπου $T=Kb$ είναι η μεταβιβασιμότητα του υδροφορέα, και b είναι το βάθος για ένα περιορισμένο υδροφορέα και το μέσο βάθος για έναν ελεύθερο. Εάν υπάρχει μια διαρροή ή ένας βαθμός εισροής q μέσα στον υδροφορέα ανά μονάδα επιφάνειας τότε η παραπάνω εξίσωση γίνεται

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{q}{T} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (21)$$

Ο βαθμός διαρροής μπορεί να υπολογιστεί από το νόμο του Darcy.

(Jacques W. Delleur, 1999)

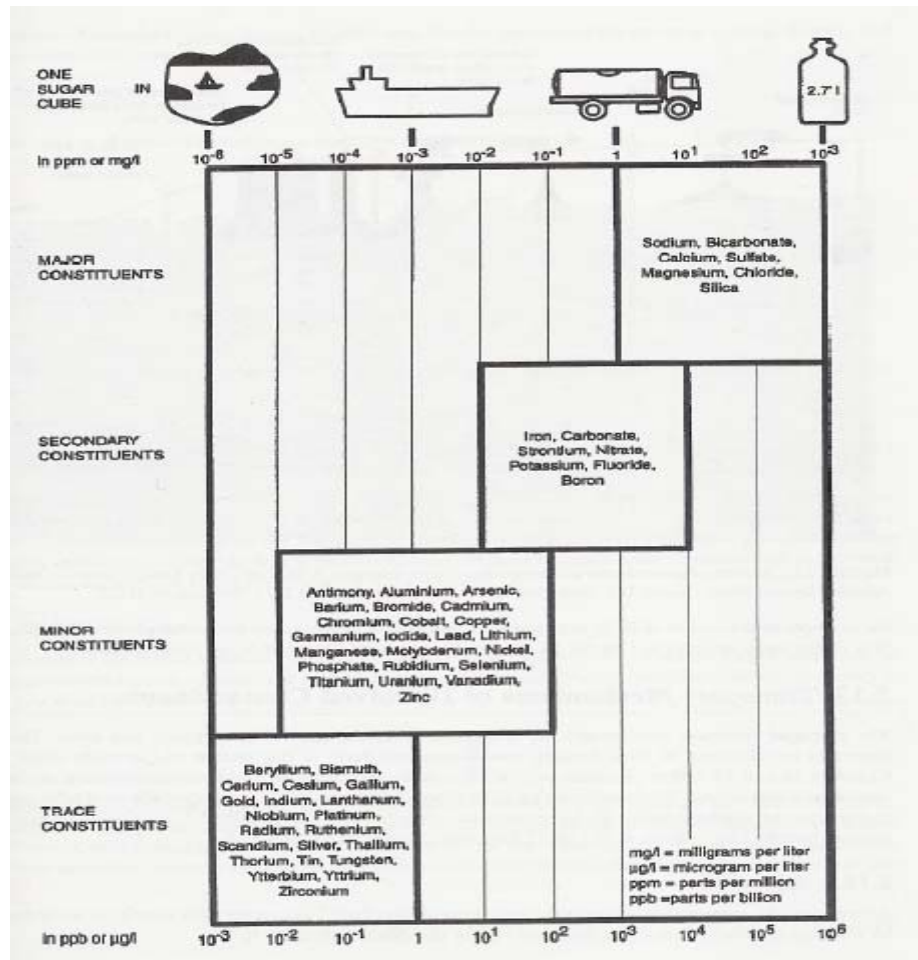
3.7 Ποιότητα υπογείων υδάτων

Η ποιότητα των υπογείων υδάτων καθορίζεται από τα διαλυμένα στοιχεία και τα αέρια και από την παρουσία των διαλυμένων στερεών, βακτηρίων και ιών. Η ποιότητα των υπογείων υδάτων βασίζεται πάνω στην φυσική και υλική του κατάσταση και από τις αλλαγές συναρτήσει των ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Στην φυσική του κατάσταση, τα διαλυμένα στοιχεία και οι συγκεντρώσεις τους εξαρτώνται από την χημική σύνθεση του υδροφορέα και από το χρόνο που ταξιδεύει το νερό μέσα από ένα σχηματισμό πετρώματος. Εάν τα μεταλλεύματα του πετρώματος είναι σχετικά διαλυτά, η χαμηλή ταχύτητα του νερού και επομένως ο μεγάλος χρόνος ταξιδιού καταλήγουν σε μία χημική ισορροπία ανάμεσα στο νερό και το πέτρωμα ως μέσο. Εξαιτίας του μεγάλου εύρους των ταχυτήτων ροής και των χημικών συνθέσεων των υδροφορέων, υπάρχει ένα πολύ μεγάλο εύρος συνθέσεων για το υπόγειο νερό. Η Εικόνα A-2-7 δείχνει τη σύγκριση του εύρους των συγκεντρώσεων διαφόρων συστατικών του υπόγειου ύδατος με τις συγκεντρώσεις ενός 2.7 gm κύβου ζάχαρης διαλυμένου μέσα σε ένα μπουκάλι 2.7 λίτρων, σε ένα φορτηγό βενζίνης, και μέσα σε ένα τάνκερ λαδιού.

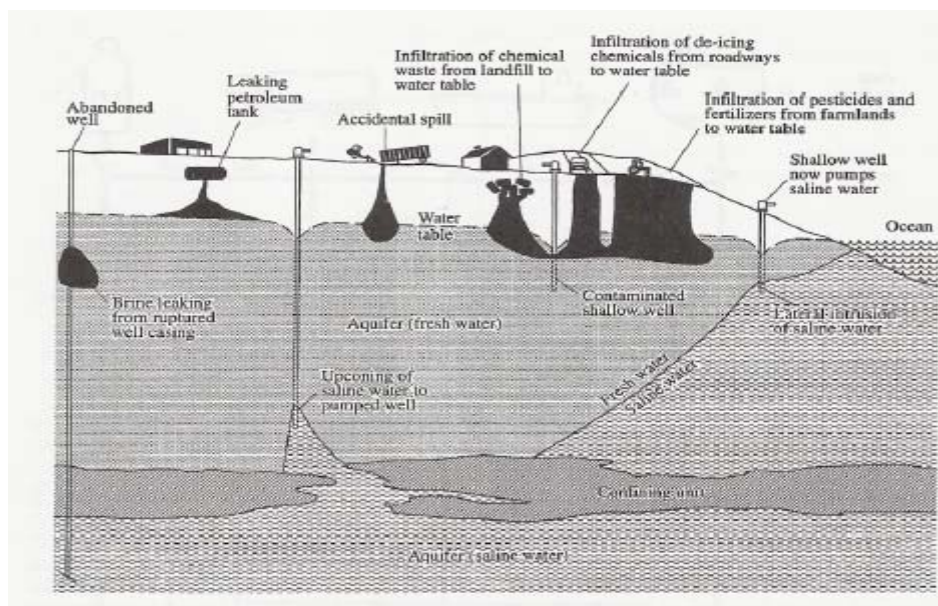
Εάν το υπόγειο νερό δεν είναι πλέον κατάλληλο για μία συγκεκριμένη χρήση, όπως η πόση, τότε λέγεται ότι το νερό είναι *μολυσμένο*. Εάν το νερό γίνει βαριά μολυσμένο τότε λέγεται *ρυπασμένο*.

Η Εικόνα A-2-8 επεξηγεί τις κύριες πηγές μόλυνσης του υπόγειου ύδατος. Αυτές οι πηγές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως *σημειακές*, *γραμμικές*, ή *μη σημειακές* (aereal) πηγές. Η γεωμετρία των πηγών επηρεάζει τη γεωμετρία του πλουμίου (δηλαδή της περιοχής του υπόγειου ύδατος που είναι μολυσμένη). Οι μολυσματικοί παράγοντες μπορούν να φτάσουν στο νερό με πολλούς τρόπους. Ο μολυσματικός παράγοντας μπορεί να είναι *διαλυτός*, π.χ. να διαλύεται στο νερό, *αδιάλυτος*, π.χ. το νερό και ο μολυσματικός παράγοντας να βρίσκονται σε διαφορετική φάση: ελαφρύτερη ή βαρύτερη απ'το νερό και ο μολυσματικός παράγοντας μπορεί να *προσροφάται* στα λεπτά μόρια τα οποία μεταφέρονται σε διάλυση από το νερό. Το διαλυτό υγρό και το νερό σχηματίζουν μία μόνο φάση. Η

κίνηση της ροής αυτής της μοναδικής φάσης κυβερνάται από το νόμο του Darcy, που συζητήθηκε πρωτύτερα σε αυτό το κεφάλαιο. Οι διαλυτές ουσίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν περαιτέρω σε *συντηρητικές* και *μη συντηρητικές*. Οι συντηρητικές διαλυτές ουσίες παραμένουν σταθερές μέσα στο υπόγειο νερό: δεν αντιδρούν με το πέτρωμα ως μέσο. Οι χλωριούχες διαλυτές ουσίες μπαίνουν σ' αυτή την κατηγορία. Οι ιχνηθέτες είναι συντηρητικά συστατικά που δεν επηρεάζουν το ιξώδες και την πυκνότητα του νερού.



Εικόνα Α-2-7 : Παραδείγματα διαλυτών συστατικών στο υπόγειο νερό
(Spitz, K. and Moreno, J. 1966)



Εικόνα Α-2-8 : Πηγές μόλυνσης υπόγειου ύδατος
(Johnston, R.H. 1986)

Η ροή πολλαπλής φάσης εμφανίζεται πρωτίστως στην ακόρεστη ζώνη, για παράδειγμα στην περίπτωση διαρροών από υδρογονάνθρακες που καταλήγει σε φάσεις υδρογονανθράκων και νερού. (Jacques W. Delleur, 1999)

4. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΙΑΛΥΜΕΝΩΝ ΡΥΠΑΝΤΩΝ

Οι κύριοι μηχανισμοί μεταφοράς είναι η συμμεταφορά, η διασπορά, και η διάχυση. Αυτές οι διαδικασίες συζητώνται στην πιο απλή μονοδιάστατη μορφή τους σε αυτό το τμήμα.

4.1 Συμμεταφορά

Η συμμεταφορά είναι η μεταφορά των διαλυτών ουσιών από την ογκομετρική ροή των υπογείων υδάτων. Η μέση ταχύτητα των πόρων, v , λαμβάνεται από την διαίρεση της δρώσας δύναμης του Darcy q από το ενεργό πορώδες n_e

$$v = \frac{q}{n_e} \quad (22)$$

Η μονοδιάστατη δρώσα δύναμη μάζας συναρτήσει της συμμεταφοράς, F , είναι το προϊόν της ποσότητας του ρέοντος ύδατος και της συγκέντρωσης των διαλυμένων στερεών

$$F = v n_e C \quad (23)$$

Η αλλαγή στη μάζα των μολυσματικών παραγόντων στην πάροδο του χρόνου σε ένα όγκο ελέγχου

$$\left[n_e \frac{\partial C}{\partial t} dx dy dz \right]$$

είναι ίση με την ισορροπία ανάμεσα στην εισροή και την εκροή μάζας των μολυσματικών ουσιών

$$\left[F dz dy - \left(F + \frac{\partial F}{\partial x} dx \right) dz dy = - \frac{\partial F}{\partial x} dx dy dz = - n_e \frac{\partial}{\partial x} (vC) dx dy dz \right] \quad (24)$$

Κατά συνέπεια για μία συντηρητική ουσία σε ένα ομοιογενή υδροφορέα, η μονοδιάστατη εξίσωση μεταφοράς με συμμεταφορά είναι

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v \frac{\partial C}{\partial x} \quad (25)$$

όπου x είναι η απόσταση στην διεύθυνση της ροής [L], t είναι ο χρόνος [T], C είναι η συγκέντρωση [M/L^3], και v είναι η ταχύτητα μεταφοράς με συμμεταφορά [L/T]. Παρατηρείται ότι ένας ακριβής υπολογισμός της ταχύτητας της ροής χρειάζεται για ένα ακριβή υπολογισμό της μεταφοράς. Σε αμμώδεις / αργιλώδεις υδροφορείς με σημαντική ποσότητα υπόγειου ύδατος, η κίνηση του πλουμίου καθορίζεται από την συμμεταφορά. Παρ'όλα αυτά, πρέπει να ειπωθεί ξανά πως η παραπάνω εξίσωση δεν έχει αξία και δεν είναι εφαρμόσιμη σε καρστικούς υδροφορείς για τους οποίους ο νόμος του Darcy δεν είναι εφαρμόσιμος. (**Jacques W. Delleur, 1999**)

4.2 Διάχυση

Η διάχυση είναι η δρώσα δύναμη της διάλυσης από μία ζώνη υψηλότερης συγκέντρωσης σε μία με χαμηλότερη συναρτήσει της κίνησης Brown των ιοντικών και μοριακών ειδών. Κάτω από συνθήκες σταθερής κατάστασης η δρώσα δύναμη F της διάχυσης περιγράφεται από το νόμο του Fick

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (26)$$

όπου D είναι ο συντελεστής διάχυσης [L^2/T]. Για τη διάχυση στο νερό, το D κυμαίνεται από 1×10^{-9} μέχρι $2 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Για τη διάχυση σε πορώδη μέσα, οι Freeze και Cherry (1979) πρότειναν να παίρνουμε έναν ενεργό συντελεστή διάχυσης $D^* = \omega D$, με το ω να κυμαίνεται από 0.5 μέχρι 0.01, για να αποτελέσει τον συντελεστή στρεβλότητας των μονοπατιών ροής. Η αλλαγή στη συγκέντρωση κατά την πάροδο του χρόνου μέσα σε ένα όγκο ελέγχου υπό την επίδραση της δρώσας δύναμης της διάχυσης δίνεται από το 2^ο νόμο του Fick

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D^* \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (27)$$

όπου D^* είναι ο πραγματικός συντελεστής διάχυσης, $D^* = \omega D$, με ω συντελεστής σχετιζόμενος με στροφική ή ελικοειδή κίνηση.

Σκεφτείτε την περίπτωση δύο παρακείμενων κορεσμένων στρωμάτων. Το πρώτο είναι αρχικά με μηδενική συγκέντρωση καθ'όλο το μήκος του $C(x,0) = 0$, και το δεύτερο στρώμα διατηρεί σταθερή συγκέντρωση στην διεπιφάνεια $C(0,t) = C_0$. Λόγω του βήματος συγκέντρωσης στην διεπιφάνεια, η διάχυση λαμβάνει μέρος από τη διεπιφάνεια μέχρι το 1^ο στρώμα.. Πολύ βαθιά μέσα στο 1^ο στρώμα, όπου δεν έχει φτάσει ακόμα η επίδραση της διάχυσης, η συγκέντρωση είναι ακόμα μηδενική, δηλαδή $C(\infty, t) = 0$. Ο Crank (1956) έδωσε την ακόλουθη λύση στην προηγούμενη εξίσωση υπό την επίδραση των παραπάνω οριακών και αρχικών συνθηκών για την εξέλιξη της συγκέντρωσης σαν μία συνάρτηση του χρόνου και της απόστασης από την διεπιφάνεια:

$$C(x,t) = C_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D^*t}}\right) \quad (28)$$

όπου erfc είναι η συμπληρωματική συνάρτηση λάθους

$$\operatorname{erfc}(u) = 1 - \operatorname{erf}(u) \quad (29)$$

και erf είναι η συνάρτηση λάθους

$$\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\pi} \int_0^u e^{-v^2} dv \quad (30)$$

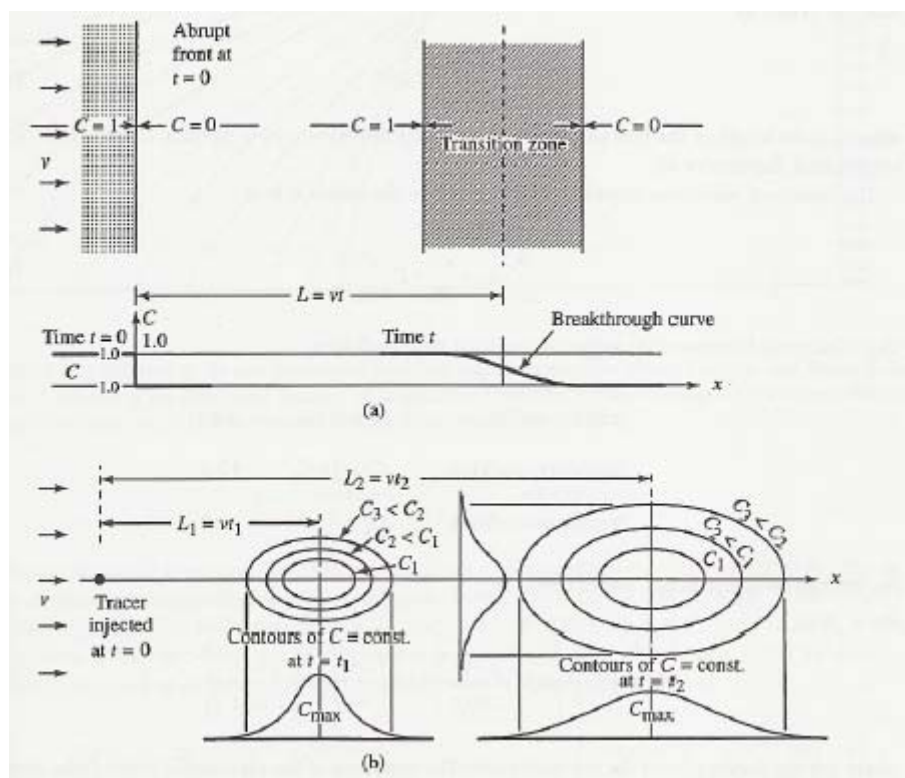
(Jacques W. Delleur, 1999)

4.3 Διασπορά

Η διασπορά είναι η εξάπλωση του πλουμίου που εμφανίζεται κατά μήκος και πλάτος της κύριας διεύθυνσης της ροής συναρτήσει των ετερογενειών του υδροφορέα τόσο σε μικροσκοπική κλίμακα (κλίμακα των πόρων) όσο και σε μακροσκοπική κλίμακα (περιφερειακός κλίμακα). Η διασπορά έχει την τάση να αυξάνει την ανομοιομορφία του πλουμίου καθώς κατεβαίνει το ρεύμα. Παράγοντες οι οποίοι συμβάλλουν στη διασπορά περιλαμβάνουν: ταχύτερη ροή στο κέντρο των πόρων απ'ότι στα άκρα, μερικά μονοπάτια είναι ταχύτερα απ'ότι άλλα, η ταχύτητα ροής είναι μεγαλύτερη σε μικρούς πόρους απ'ότι σε μεγαλύτερους. Αυτό είναι γνωστό ως *μηχανική διασπορά*. Η εξάπλωση αυτή συναρτήσει της μηχανικής διασποράς και της μοριακής διάχυσης ονομάζεται *υδροδυναμική διασπορά*.

Σαν ένα θεωρητικό παράδειγμα, ας σκεφτούμε έναν υδροφορέα με ένα απότομο μέτωπο συγκέντρωσης σε χρόνο $t = 0$. Σ'αυτό το χρόνο υπάρχει ένας ιχνηθέτης, όπως το θειούχο χλώριο, με μία συγκέντρωση $C = 1$ στα αριστερά του μετώπου, και ότι δεν υπάρχει καθόλου ιχνηθέτης στα δεξιά του μετώπου, δηλαδή $C = 0$, όπως φαίνεται στην Εικόνα A-2-9A. Αργότερα σε χρόνο t , το κέντρο του μετώπου έχει κινηθεί σε απόσταση $L=vt$, όπου v είναι η ταχύτητα ροής των πόρων. Αλλά, συναρτήσει της διασποράς, ο ιχνηθέτης έχει εξαπλωθεί γύρω από το κέντρο όπως φαίνεται στο αριστερό μέρος της Εικόνας A-2-9A. Το σχέδιο S της καμπύλης

συγκεντρώσεως σε χρόνο t , $C(t)$, ονομάζεται σιγμοειδής καμπύλη. Σε ένα δεύτερο πείραμα, μία ποσότητα ενός ιχνηθέτη εγχέεται στο σημείο $x = 0$ σε χρόνο $t = 0$. Σε χρόνο t_1 αργότερα, το κέντρο του πλουμίου έχει κινηθεί κατά απόσταση $L_1 = vt_1$ αλλά, συναρτήσει της διασποράς, ο ιχνηθέτης έχει εξαπλωθεί γύρω από το κέντρο με ελλειπτικές γραμμές συγκέντρωσης όπως φαίνεται στην Εικόνα A-2-9B. Σε χρόνο $t_2 > t_1$ η εξαπλωση έχει επεκταθεί περισσότερο όπως δείχνει και η εικόνα.



Εικόνα A-2-9 : Διαμήκης και εγκάρσια διάδοση συναρτήσει της μηχανικής διασποράς
(Bear, J. and Verruijt, A. 1987)

Εάν κάποιος θεωρήσει έναν αντιπροσωπευτικό στοιχειώδη όγκο (REV), η διασπορά μπορεί να περιγραφεί από το νόμο του Fick. Ο συντελεστής διασποράς, D_L , αντικαθιστά το συντελεστή διάχυσης D^* και γίνεται ένας φαινομενολογικός συντελεστής που ενώνει τις επιδράσεις της διάχυσης και της διασποράς. Καθώς η μηχανική διασπορά προφέρεται περισσότερο στην διαμήκη διεύθυνση απ'ότι στην εγκάρσια, εισάγονται ένας συντελεστής διαμήκους διασποράς D_L και ένας συντελεστής εγκάρσιας διασποράς D_T . Οι συντελεστές εγκάρσιας και διαμήκους διασποράς – διάχυσης καθορίζονται ως

$$D_L = a_L v + D^* \text{ και } D_T = a_T v + D^* \quad (31)$$

όπου a_L είναι η εγκάρσια διασπορά [L], a_T είναι η διαμήκης διασπορά [L], και v είναι η ταχύτητα των πόρων. Η χρήση της θεωρίας του Fick για την περιγραφή της διασποράς απαιτεί ότι οι συντελεστές διασποράς θα εξαρτώνται από την απόσταση του ταξιδιού και το χρόνο.

όπου L είναι το μήκος του μονοπατιού της ροής. Η διαμήκης διασπορά a_T είναι τυπικά το 1/10 μέχρι 1/100 της εγκάρσιας διασποράς a_L .

Η συνδυασμένη εξίσωση συμμεταφοράς – διασποράς σε μία διάσταση είναι κατά συνέπεια

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v \frac{\partial C}{\partial x} + D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (32)$$

Η λύση της παραπάνω εξίσωσης υπόκειται σ'αυτές τις συνθήκες καθορισμένου βήματος:

<i>Initial condition</i>	$C(x,0) = 0$	$x \geq 0$
<i>Boundary condition</i>	$C(0,t) = C_0$	$t \geq 0$
<i>Boundary condition</i>	$C(\infty,t) = 0$	$t \geq 0$

και έχει δοθεί από τους Ogata και Banks (1961) ως

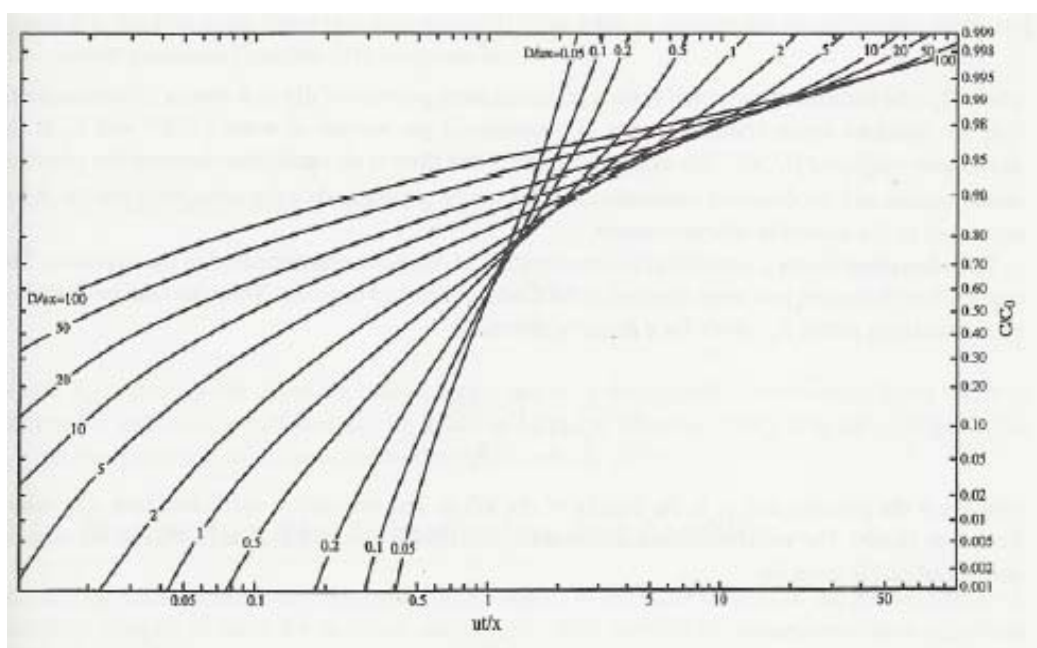
$$C(x,t) = \frac{C_0}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x-vt}{2\sqrt{D_L t}} \right) + \exp \left(\frac{vx}{D_L} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x+vt}{2\sqrt{D_L t}} \right) \right] \quad (33)$$

όπου το x είναι η απόσταση από το σημείο έγχυσης. Το θέμα της χρήσης ή μη του εκθετικού εξαρτάται από τον αριθμό Peclet ($Pe = \frac{vx}{D_L}$). Ο αριθμός Peclet είναι ένα

μέτρο της αναλογίας του βαθμού της μεταφοράς λόγω συμμεταφορά με το βαθμό μεταφοράς λόγω διάχυσης. Για μεγάλους αριθμούς Pe ($Pe > 100$), κυριαρχεί η

συμμεταφορά και ο $2^{ος}$ όρος στην δεξιά πλευρά της παραπάνω εξίσωσης γίνεται μηδαμινός. Η Εικόνα A-2-10 δείχνει την συμπεριφορά της παραπάνω εξίσωσης.

Εάν αντί για μία συνάρτηση καθορισμένου βήματος, θεωρηθεί μία γραμμική πηγή με συνεχή έγχυση μέσα στον υδροφορέα όπως, για παράδειγμα, η διαρροή από ένα κανάλι, ο Sauty (1980) βρήκε πως στην παραπάνω εξίσωση το πρόσημο συν μπροστά από το εκθετικό στην δεξιά πλευρά αντικαθίσταται από ένα μείον. Για μεγάλους αριθμούς Pe , η λύση καθορισμένου βήματος και η λύση της γραμμικής πηγής είναι ουσιαστικά ίδιες καθώς ο $2^{ος}$ όρος στην δεξιά πλευρά της παραπάνω εξίσωσης είναι μηδαμινός.



Εικόνα A-2-10 : Επίλυση της μονοδιάστατης εξίσωσης διασποράς – συμμεταφοράς
(Ogata, A. and Banks, R.B. 1961)

(Jacques W. Delleur, 1999)

ΜΕΡΟΣ Β
«ΜΟΝΤΕΛΑ-ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ-ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ»

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο
**«ΜΟΝΤΕΛΑ-ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ-
ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ»**

1. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

1.1 Εισαγωγή

Η αποτελεσματική διαχείριση των υπογείων υδάτων απαιτεί την ικανότητα της πρόβλεψης της υπεδάφιας ροής και της μεταφοράς των διαλυτών ουσιών, και της αντίδρασης της δρώσας δύναμης των υγρών και διαλυτών ουσιών στις αλλαγές στις φυσικές ή στις προκαλούμενες από τον άνθρωπο τάσεις- πιέσεις. Ένα δημοφιλές είδος εργαλείου του οποίου έχει εμπλακεί στα μέσα της δεκαετίας του '60 είναι το ντετερμινιστικό, κατανεμημένων παραμέτρων, προσομοίωσης με υπολογιστή μοντέλο για την ανάλυση της ροής και της μεταφοράς των διαλυτών στα συστήματα των υπογείων υδάτων. Η ανάπτυξη των μοντέλων με προσομοίωση σε υπολογιστή έχει κατά κάποιο τρόπο παραλληλιστεί με την ανάπτυξη και την αυξημένη ικανότητα για γρηγορότερα, μεγαλύτερης μνήμης, περισσότερο ικανών, αλλά και λιγότερο ακριβών μοντέλων.

Ο σκοπός αυτού του Κεφαλαίου είναι να αναθεωρήσει την κατάσταση προόδου στην ντετερμινιστική μοντελοποίηση της ροής των υπογείων υδάτων και των διαδικασιών μεταφοράς και προορίζεται για να περιγράψει του τύπους των μοντέλων που είναι διαθέσιμοι και πώς μπορούν αυτοί να εφαρμοστούν σε πολύπλοκα προβλήματα στο πεδίο. Θα συζητηθεί η φιλοσοφία και η θεωρητική βάση της ντετερμινιστικής μοντελοποίησης, τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί των μοντέλων, η σωστή και η κακή χρήση των μοντέλων, πώς επιλέγουμε ένα μοντέλο, και πώς βαθμονομούμε και αξιολογούμε ένα μοντέλο. **(Jacques W. Delleur, 1999)**

1.2 Μοντέλα

Η λέξη *μοντέλο* έχει τόσες πολλές επεξηγήσεις και χρησιμοποιείται τόσο πολύ που είναι κάποιες φορές δύσκολο να διακρίνει κανείς το νόημά του (Konikow και Bredehoeft, 1992). Ένα μοντέλο είναι ίσως περισσότερο εύκολα καθορισμένο σαν μία αναπαράσταση του πραγματικού συστήματος ή διαδικασίας. Ένα *θεωρητικό μοντέλο* είναι η υπόθεση του πώς ένα σύστημα ή μία διαδικασία λειτουργεί. Αυτή η υπόθεση μπορεί να εκφραστεί ποσοτικά σαν ένα μαθηματικό μοντέλο. Τα *μαθηματικά μοντέλα* είναι αφηρημένες έννοιες που αναπαριστούν διαδικασίες σαν εξισώσεις, φυσικές

ιδιότητες σαν σταθερές ή συντελεστές στις εξισώσεις και μέτρα της κατάστασης ή του δυναμικού στο σύστημα σαν μεταβλητές.

Τα περισσότερα μοντέλα υπογείων υδάτων που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι ντετερμινιστικά μαθηματικά μοντέλα. Τα ντετερμινιστικά μοντέλα βασίζονται στην διατήρηση της μάζας, της ορμής, και της ενέργειας και περιγράφουν της σχέσεις αιτίας και αποτελέσματος. Η κρυμμένη υπόθεση είναι πως δίνοντας ένα μεγάλο βαθμό κατανόησης των διαδικασιών με τις οποίες τάσεις και πιέσεις σε ένα σύστημα παράγουν παρεμφερείς αποκρίσεις σε αυτό το σύστημα, η απόκριση του συστήματος σε οποιοδήποτε σύνολο τάσεων μπορεί να προκαθοριστεί, ακόμα και αν το μέγεθος των νέων τάσεων εκπίπτει από το εύρος των ιστορικά παρατηρούμενων τάσεων.

Τα ντετερμινιστικά μοντέλα υπογείων υδάτων γενικά απαιτούν την επίλυση επιμέρους διαφορετικών εξισώσεων. Ακριβείς λύσεις μπορούν συχνά να ληφθούν αναλυτικά, αλλά τα αναλυτικά μοντέλα απαιτούν οι παράμετροι και τα όρια να είναι ιδιαίτερα εξιδανικευμένα. Κάποια ντετερμινιστικά μοντέλα θεωρούν τις ιδιότητες των πορωδών μέσων ως συσσωρευμένες παραμέτρους (ουσιαστικά, σαν ένα μαύρο κουτί), αλλά αυτό αποκλείει την αναπαράσταση των ετερογενών υδραυλικών ιδιοτήτων σε ένα μοντέλο. Η ετερογένεια, ή η μεταβλητότητα στις ιδιότητες του υδροφορέα, είναι χαρακτηριστική όλων των γεωλογικών συστημάτων και τώρα αναγνωρίζεται ότι παίζει κύριο ρόλο επιδρώντας στην ροή των υπογείων υδάτων και στην επίλυση της μεταφοράς. Κατά συνέπεια, είναι συχνά προτιμότερη η εφαρμογή μοντέλων με κατανεμημένες παραμέτρους, τα οποία επιτρέπουν την αναπαράσταση περισσότερο ρεαλιστικών κατανομών των ιδιοτήτων του συστήματος. Οι αριθμητικές μέθοδοι δίνουν προσεγγιστικές λύσεις στην κύρια εξίσωση (ή εξισώσεις) μέσα από την διακριτοποίηση του χώρου και του χρόνου. Μέσα στα πλαίσια της διακριτοποιημένης περιοχής του προβλήματος, οι εσωτερικές μεταβλητές ιδιότητες, τα όρια, και οι τάσεις του συστήματος είναι προσεγγιστικά. Τα ντετερμινιστικά, τα μοντέλα κατανεμημένων παραμέτρων, και τα αριθμητικά μοντέλα μπορούν να χαλαρώσουν τις άκαμπτες εξιδανικευμένες συνθήκες των αναλυτικών μοντέλων ή των μοντέλων συσσωρευμένων παραμέτρων, και μπορούν γι' αυτό το λόγο να είναι περισσότερο ρεαλιστικά και ανθεκτικά για την προσομοίωση των συθηκών του πεδίου (εάν εφαρμοστούν σωστά).

Ο αριθμός και ο τύπος των εξισώσεων που θα λυθούν είναι καθορισμένες από την θεωρία των κυρίαρχων κύριων εξισώσεων. Οι συντελεστές των εξισώσεων είναι οι παράμετροι που αποτελούν μέτρα των ιδιοτήτων, των ορίων, και των τάσεων του

συστήματος ; οι εξαρτημένες μεταβλητές των εξισώσεων είναι τα μέτρα της κατάστασης του συστήματος και είναι μαθηματικά καθορισμένες από την επίλυση των εξισώσεων. Όταν ένας αριθμητικός αλγόριθμος εφαρμόζεται σε ένα κώδικα ηλεκτρονικού υπολογιστή για την επίλυση ενός ή περισσότερων μερικών διαφορικών εξισώσεων, ο κώδικας στον οποίο καταλήγουμε μπορεί να θεωρηθεί ως ένα γενικό μοντέλο. Όταν οι διαστάσεις του πλέγματος, οι οριακές συνθήκες, και άλλες παράμετροι (όπως η υδραυλική αγωγιμότητα και η αποθηκευτικότητα), διευκρινίζονται σε μία εφαρμογή ενός γενικού μοντέλου για την αναπαράσταση μίας συγκεκριμένης γεωγραφικής περιοχής, το προκύπτον πρόγραμμα στον υπολογιστή είναι ένα μοντέλο συγκεκριμένης περιοχής. Η ικανότητα των γενικών μοντέλων να επιλύουν τις κύριες εξισώσεις με ακρίβεια είναι χαρακτηριστικά καταδεδειγμένη από παραδείγματα εφαρμογών σε απλοποιημένα προβλήματα. Αυτό δεν εγγυάται ένα παρόμοιο επίπεδο ακρίβειας όταν το μοντέλο εφαρμόζεται σε ένα περίπλοκο πρόβλημα στο πεδίο.

Εάν ο χρήστης ενός μοντέλου είναι απληροφόρητος ή αγνοεί τις λεπτομέρειες ενός αριθμητικού μοντέλου, συμπεριλαμβανομένου των προσεγγιστικών παραγώγων, της κλίμακας της διακριτοποίησης, και των τεχνικών επίλυσης του πίνακα, μπορεί να παραχθούν σημαντικά λάθη και να παραμείνουν απροσδιόριστα. Για παράδειγμα, εάν η εξίσωση ροής των υπογείων υδάτων λυθεί με επαναληπτικό τρόπο, αλλά το κριτήριο σύγκλισης είναι σχετικά πάρα πολύ χονδροειδές, τότε η αριθμητική επίλυση μπορεί να συγκλίνει, αλλά σε μία πολύ ελλιπή λύση. Η ανακρίβεια της λύσης μπορεί να αντανakλάται ή και όχι, στο σφάλμα ισορροπίας της μάζας. Το σφάλμα αυτό μπορεί από μόνο του να μην είναι εύκολα παρατηρούμενο από χρήστες που δεν είναι έμπειροι. Μη αναγνωρισμένα σφάλματα στα αριθμητικά μοντέλα υπογείων υδάτων γίνονται περισσότερο ισχυρά καθώς οι γραφικές διεπιφάνειες είναι φιλικές ως προς το χρήστη και κάνουν πιο εύκολη τη χρήση των μοντέλων (αλλά και την κακή χρήση). Αυτές οι διεπιφάνειες προσθέτουν ενεργά περισσότερη απόσταση ανάμεσα στο χρήστη του μοντέλου και στην αριθμητική μέθοδο η οποία βρίσκεται στον πυρήνα του μοντέλου. **(Jacques W. Delleur, 1999)**

1.3 Διαδικασίες ροής και μεταφοράς

Η διαδικασία της ροής των υπογείων υδάτων υποτίθεται ότι κυβερνάται από τις σχέσεις που εκφράζονται στο νόμο του Darcy και από την διατήρηση της μάζας. Παρόλ'αυτά, ο νόμος του Darcy έχει περιορισμούς όσον αφορά το εύρος της εφαρμοσιμότητας, και αυτοί οι περιορισμοί πρέπει να αξιολογούνται σε κάθε εφαρμογή.

Ο σκοπός ενός μοντέλου που προσομοιώνει την μεταφορά των διαλυτών στα υπόγεια νερά είναι ο υπολογισμός της συγκέντρωσης των αδιάλυτων χημικών ειδών σε ένα υδροφορέα σε οποιαδήποτε συγκεκριμένη στιγμή στο χώρο και στο χρόνο. Η θεωρητική βάση για την εξίσωση που περιγράφει την μεταφορά των διαλυτών έχει δημοσιοποιηθεί πάρα πολύ καλά στη βιβλιογραφία (e.g., Bear, 1979 ; Domenico and Schwartz, 1990). Οι Reilly et al. (1987) παρείχαν ένα θεωρητικό πλαίσιο για την ανάλυση και την μοντελοποίηση των διαδικασιών μεταφοράς των φυσικών διαλυτών στα υπόγεια νερά. Αλλαγές στην χημική συγκέντρωση εμφανίζονται μέσα σε ένα δυναμικό σύστημα υπογείων υδάτων πρωτίστως συναρτήσει τεσσάρων ευδιάκριτων διαδικασιών: (1) μεταφορά με συμμεταφορά, στην οποία τα αδιάλυτα χημικά κινούνται μαζί με το ρέον υπόγειο ύδωρ; (2) υδροδυναμική διασπορά, στην οποία ιοντική και μοριακή διάχυση και μικρής κλίμακας μεταβολές στην ταχύτητα της ροής μέσω των πορωδών μέσων προκαλούν στα μονοπάτια των αδιάλυτων μορίων και ιόντων να αποκλίνουν ή να εξαπλώνονται από την μέση κατεύθυνση της ροής του υπόγειου ύδατος ; (3) πηγές ρευστών, όπου το νερό ενός συστατικού εισάγεται εντός και αναμιγνύεται με το νερό ενός διαφορετικού συστατικού ; και (4) αντιδράσεις, στις οποίες κάποια ποσότητα ενός συγκεκριμένου αδιάλυτου χημικού είδους μπορεί να προστεθεί ή να αφαιρεθεί από το υπόγειο νερό σαν αποτέλεσμα των χημικών, βιολογικών, και φυσικών αντιδράσεων στο νερό ή μεταξύ του νερού και των στερεών υλικών του υδροφορέα ή άλλων ξεχωριστών υγρών φάσεων.

Το υποεπιφανειακό περιβάλλον αποτελεί μία πολύπλοκη, τρισδιάστατη, ετερογενή, υδρογεωλογική διάταξη. Αυτή η μεταβλητότητα επηρεάζει ισχυρά την υπόγεια ροή και μεταφορά, και μία τέτοια πραγματικότητα μπορεί να περιγραφεί με ακρίβεια μόνο μέσω προσεκτικής υδρογεωλογικής πρακτικής στο πεδίο. Παρόλ'αυτά, άσχετα από το πόσα πολλά δεδομένα έχουν συγκεντρωθεί, η αβεβαιότητα παραμένει πάντα όσον αφορά τις ιδιότητες και τα όρια του συστήματος των υπογείων υδάτων που μας ενδιαφέρει. Στοχαστικές προσεγγίσεις έχουν καταλήξει σε πολλές σημαντικές προόδους στο χαρακτηρισμό της ετερογένειας της υποεπιφάνειας και στην διαχείριση της αβεβαιότητας. **(Jacques W. Delleur, 1999)**

1.4 Κυρίαρχες εξισώσεις

Οι μαθηματικές εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν την υπόγεια ροή και τις διαδικασίες μεταφοράς μπορούν να αναπτυχθούν από τη θεμελιώδης αρχή διατήρησης της μάζας των ρευστών ή των διαλυτών ουσιών. Δίνοντας έναν αντιπροσωπευτικό στοιχειώδη όγκο (REV, Representative Elementary Volume) ενός πορώδους μέσου, μία γενική εξίσωση για την διατήρηση της μάζας για τον όγκο μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\text{Ποσοστό μάζας εισροής} - \text{ποσοστό μάζας εκροής} + \text{ποσοστό μάζας} \\ \text{παραγωγής/κατανάλωσης} = \text{ποσοστό μάζας συσσώρευσης}$$

Αυτή η δήλωση της διατήρησης της μάζας (η εξίσωση συνέχειας) μπορεί να συνδυαστεί με μία μαθηματική έκφραση από τη σχετική διαδικασία που λαμβάνει μία διαφορετική εξίσωση που περιγράφει τη ροή ή τη μεταφορά. (**Jacques W. Delleur, 1999**)

1.5 Εξίσωση ροής υπογείων υδάτων

Ο βαθμός ροής του νερού μέσω ενός πορώδους μέσου σχετίζεται με τις ιδιότητες του νερού, τις ιδιότητες του πορώδους μέσου, και την κλίση του υδραυλικού ύψους, όπως αναπαρίσταται στο νόμο του Darcy, ο οποίος μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$q_i = -K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \quad (1)$$

όπου q_i είναι η ειδική εκροή, $[LT^{-1}]$, K_{ij} είναι η υδραυλική αγωγιμότητα του πορώδους μέσου (ένας δείκτης δευτέρας τάξεως), $[LT^{-1}]$, και h είναι το υδραυλικό ύψος, $[L]$.

Μία γενική μορφή της εξίσωσης που περιγράφει την προσωρινή ροή ενός συμπιεστού ρευστού σε έναν μη ομοιογενή ανισοτροπικό υδροφορέα μπορεί να

παραχθεί από την σύνθεση του νόμου του Darcy με την εξίσωση συνέχειας. Μία γενική εξίσωση για τη ροή των υπογείων υδάτων μπορεί να γραφτεί με υποσημείωση Καρτεσιανού δείκτη ως εξής:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + W^* \quad (2)$$

όπου S_s είναι η ειδική αποθήκευση, $[L^{-1}]$, t είναι ο χρόνος, $[T]$, W είναι η ογκομετρική δρώσα δύναμη ανά μονάδα όγκου (θετική για την εκροή και αρνητική για την εισροή), $[T^{-1}]$, και x_i είναι οι καρτεσιανές συντεταγμένες, $[L]$. Η σύμβαση του αθροίσματος για την ανάλυση των Καρτεσιανών δεικτών είναι υπονοούμενη στις δύο προηγούμενες εξισώσεις. Η παραπάνω εξίσωση μπορεί γενικά να εφαρμοστεί εάν επικρατούν ισοθερμικές συνθήκες, το πορώδες μέσο παραμορφώνεται μόνο κάθετα, ο όγκος των ανεξάρτητων κόκκων παραμένει σταθερός κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης, ο νόμος του Darcy εφαρμόζεται (και οι κλίσεις του υδραυλικού ύψους είναι η μόνη κινητήρια δύναμη), και οι ιδιότητες των ρευστών (πυκνότητα και ιξώδες) είναι ομοιογενείς και σταθερές. Οι ιδιότητες του υδροφορέα μπορεί να μεταβάλλονται χωρικά, και οι τάσεις των ρευστών (W^*) μπορούν να μεταβάλλονται στο χώρο και στο χρόνο. **(Jacques W. Delleur, 1999)**

1.6 Αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης εξισώσεων

Οι μερικές διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν την ροή των υπογείων υδάτων και την μεταφορά ουσιών μπορούν να λυθούν με μαθηματικό τρόπο χρησιμοποιώντας είτε αναλυτικές είτε αριθμητικές μεθόδους. Τα πλεονεκτήματα μιας αναλυτικής μεθόδου, όταν είναι εφικτό να εφαρμοστεί μία τέτοια λύση, είναι ότι συνήθως παρέχει μία ακριβής λύση της κυρίαρχης εξίσωσης και είναι τις περισσότερες φορές σχετικά απλό και αποτελεσματικό να χρησιμοποιηθεί. Έχουν αναπτυχθεί πολλές αναλυτικές λύσεις για την εξίσωση της ροής ; παρά ταύτα, οι περισσότερες εφαρμογές περιορίζονται σε προβλήματα υδραυλικής πηγαδιών τα οποία περιλαμβάνουν ακτινική συμμετρία.. Οι οικείες καμπύλες τύπου Theis

αναπαριστούν την λύση ενός τέτοιου αναλυτικού μοντέλου. Οι αναλυτικές λύσεις είναι επίσης διαθέσιμες για την επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς διαλυτών ουσιών (π.χ. Bear, 1979 ; Javandel et al., 1984 ; Wexler, 1992). Γενικά, το να στοχεύουμε στην ακριβή αναλυτική λύση της μερικής διαφορικής εξίσωσης προϋποθέτει ότι οι ιδιότητες και τα όρια του συστήματος της ροής θα είναι σε μεγάλο βαθμό και ενδεχομένως και μη ρεαλιστικώς εξιδανικευμένα. Για την προσομοίωση των περισσότερων προβλημάτων πεδίου, τα μαθηματικά οφέλη της επίτευξης μίας ακριβούς αναλυτικής λύσης αντισταθμίζονται πιθανά με τα σφάλματα που παράγονται από την απλοποίηση των υποθέσεων σχετικά με το πολύπλοκο περιβάλλον του πεδίου, οι οποίες απαιτούνται για την εφαρμογή της αναλυτικής προσέγγισης.

Εναλλακτικά, για προβλήματα όπου τα απλοποιημένα αναλυτικά μοντέλα δεν περιγράφουν πλέον τη φύση της κατάστασης, οι μερικές διαφορικές εξισώσεις μπορούν να προσεγγιστούν αριθμητικά. Με αυτές τις ενέργειες, οι συνεχείς μεταβλητές αντικαθίστανται με διακριτές μεταβλητές οι οποίες καθορίζονται σε φραγμένα πλέγματα ή κόμβους. Κατά συνέπεια, η συνεχής διαφορική εξίσωση που καθορίζει το υδραυλικό ύψος ή την συγκέντρωση των διαλυτών ουσιών οπουδήποτε μέσα στο σύστημα, αντικαθίσταται από ένα πεπερασμένο αριθμό αλγεβρικών εξισώσεων που καθορίζουν με τη σειρά τους το υδραυλικό ύψος ή τη συγκέντρωση σε συγκεκριμένα σημεία. Το σύστημα των αλγεβρικών εξισώσεων γενικά επιλύεται με την χρήση τεχνικών μητρών (πινάκων). Αυτή η προσέγγιση αποτελεί ένα αριθμητικό μοντέλο.

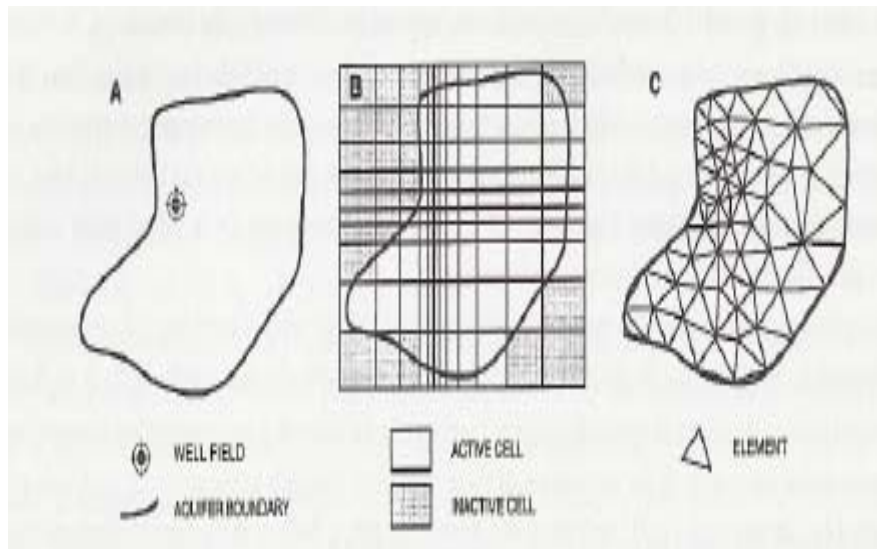
Δύο είναι οι κύριες τάξεις αριθμητικών μεθόδων που έχουν γίνει αποδεκτές για την επίλυση της εξίσωσης ροής των υπογείων υδάτων. Αυτές είναι οι μέθοδοι των πεπερασμένων διαφορών και οι μέθοδοι των πεπερασμένων στοιχείων. Καθεμία από αυτές περιλαμβάνει ένα πλήθος υποκατηγοριών και εναλλακτικών εφαρμογής. Περιεκτικές επεξεργασίες των εφαρμογών αυτών των αριθμητικών μεθόδων για τα προβλήματα των υπογείων υδάτων παρουσιάζονται από τον Remson et al. (1971) και τους Wang and Anderson (1982). Και οι δύο αυτές αριθμητικές προσεγγίσεις απαιτούν ότι η περιοχή του ενδιαφέροντος μας θα χωριστεί επιπλέον από ένα πλέγμα σε ένα αριθμό μικρότερων υποπεριοχών (κελιών ή στοιχείων) τα οποία θα σχετίζονται με κομβικά σημεία (είτε στα κέντρα είτε στις περιφέρειες των υποπεριοχών).

Επιπλέον με τις μεθόδους των πεπερασμένων στοιχείων και των πεπερασμένων διαφορών, οι μέθοδοι ολοκληρωτικής οριακής εξισώσεως και αναλυτικών στοιχείων μπορούν επίσης να εφαρμοστούν για την επίλυση της εξίσωσης ροής. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι πως, για ομοιογενείς περιοχές, μπορούν να παρέχουν ακριβείς λύσεις χωρίς διακριτοποίηση. Κατά συνέπεια, εάν η ετερογένεια ενός συστήματος μπορεί να αναπαρασταθεί επαρκώς χρησιμοποιώντας μόνο λίγα πολύ μεγάλα στοιχεία, οι μέθοδοι μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματικές σχετικά με τον υπολογιστικό χρόνο που απαιτείται. Εάν οι ετερογένειες είναι τέτοιες, που να απαιτείται ένας μεγάλος αριθμός στοιχείων για την επαρκή περιγραφή τους, τότε ενδέχεται να είναι προτιμότερες οι μέθοδοι των πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών. Μέχρι σήμερα, αυτές οι μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί ευρύτερα σε σχέση με άλλες αριθμητικές μεθόδους για την προσομοίωση των προβλημάτων της ροής των υπογείων υδάτων.

Οι μέθοδοι των πεπερασμένων διαφορών προσεγγίζουν τις πρώτες παραγώγους στις μερικές διαφορικές εξισώσεις σαν πηλίκα διαφορών (οι διαφορές μεταξύ των τιμών των ανεξάρτητων μεταβλητών σε παρακείμενους κόμβους με αντιστοιχία στην απόσταση μεταξύ των κόμβων, και σε δύο διαδοχικά χρονικά διαστήματα με αντιστοιχία στην διάρκεια αύξησης του χρονικού βήματος). Οι μέθοδοι των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούν υποθετικές συναρτήσεις της ανεξάρτητης μεταβλητής και παραμέτρους για την αξιολόγηση ισοδύναμων μορφών ολοκλήρωσης των μερικών διαφορικών εξισώσεων. Οι Huyakorn και Pinder (1983) παρουσιάζουν μία περιεκτική ανάλυση της εφαρμογής των μεθόδων των πεπερασμένων στοιχείων σε προβλήματα υπογείων υδάτων. Και στις δύο αριθμητικές προσεγγίσεις, η διακριτοποίηση των διαστάσεων του χώρου και του χρόνου επιτρέπει στο πρόβλημα των συνεχών οριακών τιμών για την επίλυση της μερικής διαφορικής εξίσωσης να μειωθεί σε μία ταυτόχρονη επίλυση ενός συνόλου αλγεβρικών εξισώσεων. Αυτές οι εξισώσεις μπορούν αν λυθούν χρησιμοποιώντας είτε επαναληπτικές είτε άμεσης μήτρας μεθόδους.

Κάθε προσέγγιση έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, αλλά είναι πολύ λίγα εκείνα τα προβλήματα υπογείων υδάτων για τα οποία κάποια από τις δύο είναι ανώτερη (κυριαρχεί). Γενικά, οι μέθοδοι των πεπερασμένων διαφορών είναι απλούστερες και σε θεωρητικό και σε μαθηματικό επίπεδο, καθώς και πιο εύκολο να προγραμματιστούν. Είναι χαρακτηριστικά συνδεδεμένες με ένα σχετικά απλό, ορθογωνικό πλέγμα, το οποίο επίσης διευκολύνει την εισαγωγή των δεδομένων. Οι

μέθοδοι των πεπερασμένων στοιχείων γενικά απαιτούν την χρήση περισσότερο εξειδικευμένων μαθηματικών, αλλά, για μερικά προβλήματα, μπορεί να είναι περισσότερο ακριβείς αριθμητικά από τις πρότυπες μεθόδους των πεπερασμένων διαφορών. Ένα κύριο πλεονέκτημα των μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων είναι η ελαστικότητα του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία επιτρέπει μία κλειστή χωρική προσέγγιση των ανώμαλων ορίων του υδροφορέα και (ή) των ζωνών των παραμέτρων μέσα στον υδροφορέα όταν αυτές λαμβάνονται υπόψιν. Όμως, η κατασκευή και η συγκεκριμενοποίηση ενός συνόλου δεδομένων είναι πολύ πιο δύσκολες για ένα μη ομαλό πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων απ'ότι για ένα ομαλό (κανονικό) ορθογωνικό πλέγμα πεπερασμένων διαφορών. Κατά συνέπεια, η χρήση ενός προ-επεξεργαστή του μοντέλου, που θα εμπεριέχει μία γεννήτρια πλέγματος και ένα σχέδιο για την αρίθμηση των κόμβων και των στοιχείων του πλέγματος και τον καθορισμό των χωρικών συντεταγμένων κάθε κόμβου, είναι κάτι που προτείνεται να γίνει. Η Εικόνα B-1-1 επεξηγεί ένα υποθετικό σύστημα ενός υδροφορέα, το οποίο έχει αδιαπέρατα όρια και ένα πεδίο με πηγές (Εικόνα B-1-1A), το οποίο έχει διακριτοποιηθεί χρησιμοποιώντας πλέγματα πεπερασμένων διαφορών (Εικόνα B-1-1B) και πεπερασμένων στοιχείων (Εικόνα B-1-1C). Οι Εικόνες B-1-1B και B-1-1C επεξηγούν θεωρητικά πως τα αντίστοιχα πλέγματα μπορούν να ρυθμιστούν για χρήση ενός πλέγματος με μικρότερα χωρικά διαστήματα στις επιλεγμένες περιοχές του ενδιαφέροντος μας. Το ορθογωνικό πλέγμα των πεπερασμένων διαφορών προσεγγίζει τα όρια του υδροφορέα με σταδιακό τρόπο, καταλήγοντας σε κάποια κελιά ή κόμβους έξω από τον υδροφορέα, όπου οι πλευρές των τριγωνικών στοιχείων του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων μπορούν να ακολουθήσουν από πολύ κοντά το εξωτερικό όριο χρησιμοποιώντας έναν ελάχιστο αριθμό κόμβων.



Εικόνα B-1-1 : Υποθετική εφαρμογή σε (Α) έναν υδροφορέα με μη ομαλά όρια από πλέγματα (Β) πεπερασμένων διαφορών και (C) πεπερασμένων στοιχείων.

(Konikow, L.F.1996)

Η εξίσωση μεταφοράς των διαλυτών ουσιών είναι περισσότερο δύσκολο να λυθεί αριθμητικά από την εξίσωση της ροής των υπογείων υδάτων επειδή οι μαθηματικές ιδιότητες της εξίσωσης μεταφοράς μεταβάλλονται εξαρτώμενες από το ποιοι όροι της εξίσωσης κυριαρχούν σε μία συγκεκριμένη κατάσταση. Όταν στην εξίσωση μεταφοράς κυριαρχεί η συµμεταφορά, κάτι που είναι σύνηθες στα περισσότερα προβλήματα πεδίων, τότε η παρακάτω εξίσωση (η οποία αποτελεί γενική μορφή της εξίσωσης μεταφοράς των διαλυτών ουσιών παρουσιαζόµενη από τον Grove-1976 και στην οποία οι ενσωματωµένοι όροι αναπαριστούν χηµικές αντιδράσεις και συγκέντρωση των διαλυτών ουσιών για το πορώδες ρευστό και την στερεή επιφάνεια)

$$\frac{\partial(\varepsilon C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\varepsilon D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\varepsilon C V_i) - C' W^* + CHEM \quad (3), \text{ όπου}$$

CHEM είναι ίσο µε ένα ή περισσότερα από τα ακόλουθα:

- ✓ $-\rho_b \frac{\partial \bar{C}}{\partial t}$ για γραμμική ελεγχόμενη ισορροπία προσρόφησης ή για αντιδράσεις ανταλλαγής ιόντων
- ✓ $\sum_{k=1}^s R_k$ για s χημικά ελεγχόμενο ποσοστό αντιδράσεων, και (ή)
- ✓ $-\lambda(\varepsilon C + \rho_b \bar{C})$ για αποσύνθεση

(επίσης D_{ij} είναι ο συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς (ένας τανυστής δευτέρας τάξεως), L^2T^{-1} , C' είναι η συγκέντρωση των προσροφημένων, πάνω στο στερεό, ειδών (μάζα των διαλυτών / μάζα του στερεού), ρ_b είναι η πυκνότητα όγκου των ιζημάτων, ML^{-3} , R_k είναι ο βαθμός παραγωγής των διαλυτών στην αντίδραση k, $ML^{-3}T^{-1}$, και λ είναι η σταθερά αποσύνθεσης (ίση με $\ln 2$ / χρόνο ημιζωής), T^{-1})

προσεγγίζει έναν υπερβολικό τύπο εξίσωσης (όμοιο με εξισώσεις που περιγράφουν τη διάδοση ενός κύματος ή ενός κρουστικού μετώπου). Αλλά εφόσον ένα σύστημα κυριαρχείται από δρώσες δυνάμεις διασποράς, όπως αυτές που μπορεί να εμφανιστούν εκεί όπου οι ταχύτητες του ρευστού είναι σχετικά χαμηλές και οι τύποι διασποράς του υδροφορέα (εγκάρσια, διαμήκης και κατακόρυφη) είναι σχετικά υψηλοί, τότε η παραπάνω εξίσωση γίνεται περισσότερο παραβολικής μορφής στη φύση (παρόμοια με την εξίσωση μη μόνιμης ροής των υπογείων υδάτων).

Οι αριθμητικές μέθοδοι που λειτουργούν καλύτερα για παραβολικές μερικές διαφορικές εξισώσεις δεν είναι οι καλύτερες για την επίλυση υπερβολικών εξισώσεων και αντίστροφα. Κατά συνέπεια, καμία αριθμητική μέθοδος ή μοντέλο προσομοίωσης δεν θα ήταν ιδανική-ό για ολόκληρο το φάσμα των προβλημάτων μεταφοράς των υπογείων υδάτων τα οποία πιθανόν να αντιμετωπιστούν στο πεδίο. Αυτή η δυσκολία ενισχύεται περισσότερο από το γεγονός ότι στο πεδίο, η ταχύτητα διήθησης στα υπόγεια ύδατα είναι μεταβαλλόμενη σε μεγάλο βαθμό, ακόμα και αν οι ιδιότητες του υδροφορέα είναι σχετικά ομοιογενείς και αυτό λόγω των επιδράσεων των πολύπλοκων οριακών συνθηκών. Κατά συνέπεια, σε ζώνες χαμηλής διαπερατότητας ή κοντά σε στάσιμα σημεία, η ταχύτητα μπορεί να είναι κοντά στο μηδέν και οι διαδικασίες μεταφοράς θα κυριαρχούνται από διαδικασίες διασποράς ; σε ζώνες υψηλής διαπερατότητας ή κοντά σε σημεία πίεσης (όπως είναι τα πηγάδια άντλησης), η ταχύτητα μπορεί να είναι της τάξης των αρκετών μέτρων την ημέρα και οι

διαδικασίες μεταφοράς θα κυριαρχώνται από την διασπορά. Με άλλα λόγια, για το ίδιο σύστημα, η κυρίαρχη εξίσωση θα είναι περισσότερο υπερβολικής μορφής σε μία περιοχή (ή σε μία χρονική στιγμή) και περισσότερο παραβολικής μορφής σε άλλη περιοχή (ή σε μία χρονική στιγμή). Γι'αυτό το λόγο, ανεξάρτητα από το ποια αριθμητική μέθοδος έχει επιλεγεί ως τη βάση για ένα μοντέλο προσομοίωσης, δεν θα ήταν ιδανικό ή βέλτιστο για όλο το εύρος του προβλήματος και σημαντικά αριθμητικά σφάλματα μπορεί να παραχθούν κάπου μέσα στην λύση. Η προσπάθεια μοντελοποίησης της μεταφοράς πρέπει να αναγνωρίζει αυτή την έμφυτη δυσκολία και να προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει και να ελέγξει αυτά τα αριθμητικά σφάλματα.

Επιπρόσθετες περιπλοκές εμφανίζονται όταν οι διαλυτές ουσίες που μας ενδιαφέρουν είναι ενεργές (δηλαδή μπορούν να συμμετέχουν σε αντιδράσεις). Οι όροι των αντιδράσεων που αναφέρονται στην παραπάνω εξίσωση είναι μαθηματικώς αρκετά απλοί. Δεν αναπαριστούν απαραίτητα τις πραγματικές περιπλοκότητες πολλών αντιδράσεων. Επίσης, κάποια συγκεκριμένα δύσκολα αριθμητικά προβλήματα εμφανίζονται όταν οι όροι των αντιδράσεων είναι σε μεγάλο βαθμό μη γραμμικοί, ή εάν η συγκέντρωση των διαλυτών ουσιών που μας ενδιαφέρουν εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την συγκέντρωση των άλλων χημικών συστατικών. Στην πραγματικότητα, οι ισόθερμες ενδέχεται να μην είναι γραμμικές και μπορεί επίσης η ισορροπία να μην είναι ελεγχόμενη. Για προβλήματα πεδίου στα οποία οι αντιδράσεις επηρεάζουν σημαντικά τις συγκεντρώσεις των διαλυτών ουσιών, η ακρίβεια της προσομοίωσης είναι λιγότερο περιορισμένη από μαθηματικούς περιορισμούς παρά από περιορισμούς που έχουν να κάνουν με το σύνολο των δεδομένων. Αυτό σημαίνει, ότι οι τύποι και οι βαθμοί των αντιδράσεων για τις συγκεκριμένες διαλυτές ουσίες και μεταλλεύματα στο συγκεκριμένο σύστημα υπογείων υδάτων που μας ενδιαφέρει, σπάνια είναι γνωστοί και απαιτείται ένας εκτενής όγκος δεδομένων για να εξασφαλίζουμε την ακρίβεια που επιθυμούμε.

Οι μέθοδοι των πεπερασμένων στοιχείων και των πεπερασμένων διαφορών μπορούν επίσης να εφαρμοστούν για την επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς, ειδικότερα όταν η μεταφορά μέσω διασποράς είναι αρκετά μεγάλη συγκριτικά με τη μεταφορά μέσω συμεταφοράς. Παρόλ'αυτά, τα αριθμητικά σφάλματα, όπως αυτά της αριθμητικής διασποράς και της απόκλισης, μπορεί να είναι σημαντικά για κάποια προβλήματα. Τα αριθμητικά σφάλματα μπορούν γενικά να μειωθούν χρησιμοποιώντας μία λεπτομερέστερη διακριτοποίηση (είτε μικρότερα χρονικά βήματα είτε λεπτομερέστερο χωρικό πλέγμα). Ένα παράδειγμα ενός τεκμηριωμένου

τρισδιάστατου, για την περίπτωση μεταφοράς, πεπερασμένων στοιχείων μοντέλου το οποίο επιλύει ταυτόχρονα την πίεση του ρευστού, την μεταφορά ενέργειας και τις εξισώσεις μεταφοράς των διαλυτών ουσιών για μη ομοιογενή αναμίξιμα ρευστά είναι το HST3D, το οποίο σημειωτέον μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέσα στο πλαίσιο του ArgusOne που χρησιμοποιούμε εμείς παρακάτω (Kipp, 1987). Ένα παράδειγμα ενός δυσδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων για μεταφορά είναι το SUTRA (επίσης δυνατόν να χρησιμοποιηθεί μέσα στα πλαίσια του ArgusOne) και το οποίο έχει τεκμηριωθεί από τον Voss (1984).

Παρόλο που τα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων είναι συχνά χρησιμοποιούμενα στα προβλήματα μεταφοράς, έχουν εφαρμοστεί και άλλοι τύποι αριθμητικών μεθόδων στα προβλήματα αυτά, συμπεριλαμβανομένου της μεθόδου των χαρακτηριστικών, τον τυχαίο περίπατο, τις μεθόδους Euler-Lagrange και τις μεθόδους προσαρμοστικού πλέγματος. Όλες αυτές οι μέθοδοι έχουν την ικανότητα να εντοπίζουν τα μέτωπα αιχμής με ακρίβεια με μία ελάχιστη αριθμητική διασπορά. Τα τεκμηριωμένα μοντέλα που βασίζονται στις παραλλαγές αυτών των προσεγγίσεων περιλαμβάνουν τους Konikow και Bredehoeft (1978), Sanford και Konikow (1985), Prickett et al. (1981) και Zheng (1990).

Καμία από τις διαθέσιμες αριθμητικές μεθόδους δεν είναι ιδανική για ένα μεγάλο εύρος προβλημάτων μεταφοράς και συνθηκών. Κατά συνέπεια, υπάρχει ακόμα πολύ έρευνα που πρέπει να γίνει πάνω στην ανάπτυξη καλύτερων αναμεμιγμένων ή προσαρμοστικών μεθόδων που θα στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση των αριθμητικών σφαλμάτων και θα συνδέουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά των διάφορων εναλλακτικών διαθέσιμων προσεγγίσεων.

Παρακάτω θα αναλύσουμε τις δύο σημαντικότερες από τις προαναφερθείσες μεθόδους, αυτή των πεπερασμένων στοιχείων και αυτή των πεπερασμένων διαφορών.

(Jacques W. Delleur, 1999)

2. ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ

ΔΙΑΦΟΡΩΝ

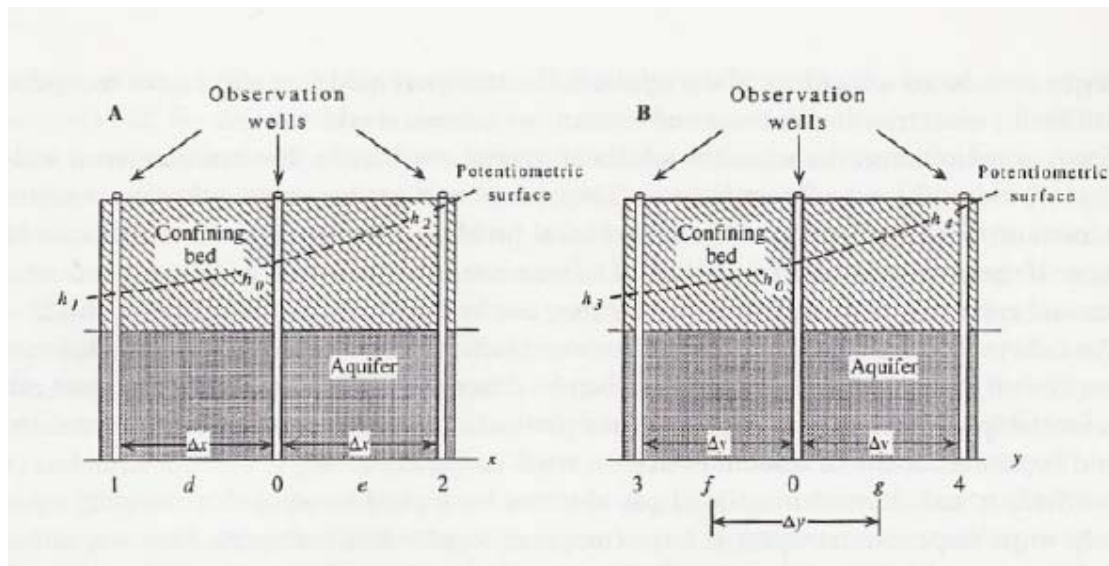
Οι μερικές διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τις διαδικασίες μεταφοράς και ροής στα υπόγεια ύδατα περιλαμβάνουν όρους που αναπαριστούν παραγώγους συνεχών μεταβλητών στο χώρο και στο χρόνο. Οι μέθοδοι των πεπερασμένων διαφορών βασίζονται στην προσέγγιση αυτών των παραγώγων (ή κλίσεων των καμπυλών) μέσω διακριτών γραμμικών αλλαγών πάνω σε διακριτά διαστήματα στο χώρο και στο χρόνο. Εάν τα διαστήματα είναι αρκετά μικρά, τότε όλες οι γραμμικές αυξήσεις θα αναπαριστούν μία καλή προσέγγιση της πραγματικής καμπυλόγραμμης επιφάνειας ή του υδρογραφήματος.

Εάν θεωρήσουμε ότι έχουμε πηγάδια παρατήρησης σε ένα περιορισμένο υδροφορέα, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα B-1-2A, Bennett (1976), τότε φαίνεται ότι μία δικαιολογημένη προσέγγιση για την παράγωγο του υδραυλικού ύψους, $\partial h / \partial x$, σε ένα ενδιάμεσο σημείο (d) μεταξύ των πηγαδιών 1 και 0 τότε:

$$\left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)_d \approx \frac{h_0 - h_1}{\Delta x} \quad (4)$$

Σημειώστε ότι τα πηγάδια παρατήρησης τοποθετούνται ούτως ώστε οι μεταξύ τους αποστάσεις να είναι ίσες. Παρομοίως, μία δικαιολογημένη προσέγγιση για τη δεύτερη παράγωγο, $\partial^2 h / \partial x^2$, στο σημείο 0 (η θέση του κεντρικού πηγαδιού) μπορεί να δοθεί ως:

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right)_0 \approx \frac{\left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)_e - \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)_d}{\Delta x} \approx \frac{\frac{h_2 - h_0}{\Delta x} - \frac{h_0 - h_1}{\Delta x}}{\Delta x} = \frac{h_1 + h_2 - 2h_0}{(\Delta x)^2} \quad (5)$$



Εικόνα B-1-2 : Σχηματικό διαγώνιο σχήμα διαμέσου περιορισμένου υδροφορέα για την αναπαράσταση αριθμητικής προσέγγισης των παραγώγων του του υδραυλικού ύψους, (Α) $\partial h/\partial x$ και (Β) $\partial h/\partial y$.
(Bennett, G.D. 1976)

Εάν επίσης θεωρήσουμε τα πηγάδια 3 και 4 που φαίνονται στην εικόνα 20.2B, τα οποία είναι τοποθετημένα σε μία γραμμή παράλληλη στον y-άξονα, μπορούμε με τον ίδιο τρόπο να προσεγγίσουμε την $\partial^2 h/\partial x^2$ στο σημείο 0 (το ίδιο σημείο 0 που φαίνεται και στην εικόνα B-1-2A) ως (Bennett, 1976):

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) \approx \frac{h_3 + h_4 - 2h_0}{(\Delta y)^2} \quad (6)$$

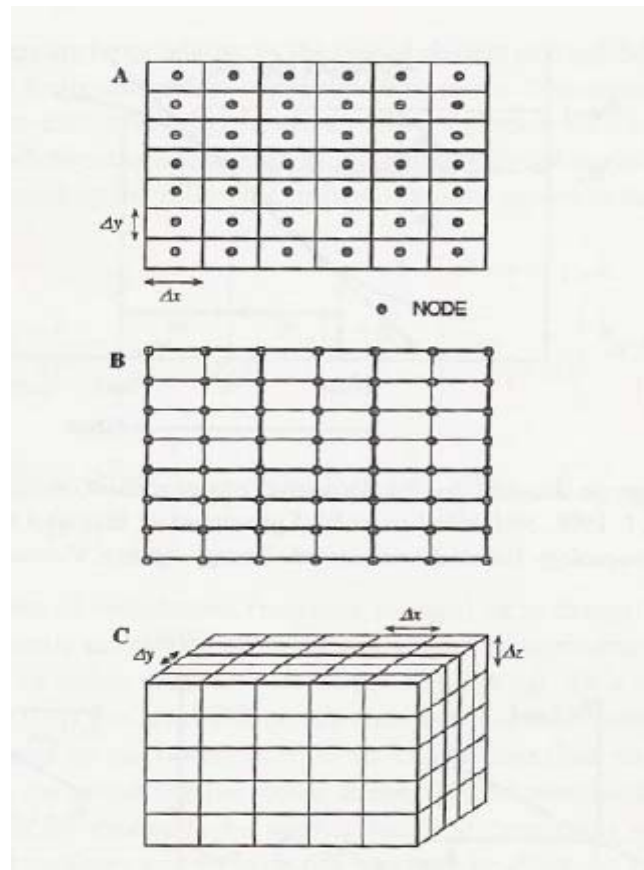
Εάν το διάστημα μεταξύ των πηγαδιών στην εικόνα B-1-2B είναι ομοιόμορφο (δηλαδή, $\Delta x = \Delta y = a$), τότε μπορούμε να αναπτύξουμε την ακόλουθη προσέγγιση:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \approx \frac{h_1 + h_2 + h_3 + h_4 - 4h_0}{a^2} \quad (7)$$

Αυτές οι προσεγγίσεις μπορούν επίσης να παρατηρηθούν μέσω της χρήσης των σειρών Taylor. Ένα σημαντικό σφάλμα το οποίο εμπλέκεται στην προσέγγιση των παραγώγων μέσω των πεπερασμένων διαφορών, αλλά αυτό το σφάλμα θα μειώνεται συνεχώς καθώς η απόσταση a (Δx ή Δy) θα παίρνει ολοένα και μικρότερες

τιμές. Αυτό το σφάλμα ονομάζεται «σφάλμα αποκοπής» επειδή η αντικατάσταση μίας παραγώγου από ένα διαφορετικό πηλίκο είναι ισοδύναμη με τη χρήση μίας αποκομμένης σειράς Taylor, με αποτέλεσμα η ακριβής λύση της διαφορικής εξίσωσης να διαφέρει από τη λύση της ανταποκρινόμενης διαφορικής εξίσωσης (Peaceman, 1977). Επίσης, είναι πιθανόν να μην υπάρχει επίτευξη μίας ακριβούς λύσης της διαφορικής εξίσωσης εξαιτίας των περιορισμών ακρίβειας που παρουσιάζονται κατά την αποθήκευση των αριθμών σε ένα ψηφιακό υπολογιστή. Για την επίλυση ενός μεγάλου συνόλου από διαφορικές εξισώσεις, πραγματοποιούνται πολλές αριθμητικές διαδικασίες, και είναι δυνατόν να παρουσιαστούν κυκλικά σφάλματα.

Στη συνέχεια ας θεωρήσουμε την κατασκευή ενός ορθογωνικού πλέγματος πεπερασμένων διαφορών. Υπάρχουν δύο διαφορετικοί πιθανοί τρόποι κατασκευής του πλέγματος οι οποίοι παρουσιάζονται στις δύο διαστάσεις στις Εικόνες B-1-3A και 3B. Στην Εικόνα B-1-3A, τα υπολογιστικά σημεία (ή κόμβοι) τοποθετούνται στο κέντρο των κλειστών τμημάτων (ή κελιών) τα οποία σχηματίζονται από τις γραμμές του πλέγματος. Αυτός ο τύπος πλέγματος συνήθως καλείται κεντροθετημένο πλέγμα. Στον δεύτερο τύπο (Εικόνα B-1-3B), οι κόμβοι θεωρείται ότι είναι τοποθετημένοι στις διασταυρώσεις των γραμμών του πλέγματος. Αυτός ο τύπος έχει διάφορες ονομασίες όπως πλέγμα κεντρικών σημείων, πλέγμα κεντρικών κόμβων, ή κεντρικό δικτυωτό πλέγμα. Παρόλο που σε γενικές γραμμές δεν υπάρχει κάποιο έμφυτο πλεονέκτημα του ενός τύπου πάνω στον άλλο, θα υπάρχουν κάποιες διαδικαστικές διαφορές μεταξύ των δύο προσεγγίσεων, όσον αφορά την επεξεργασία των ορίων και σε περιοχές επιρροής γύρω από τους κόμβους. Περισσότερο απ'όλα, αλλά όχι μόνο αυτό, τα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών των υπογείων υδάτων βασίζονται στην χρήση των κεντροθετημένων πλεγμάτων. Η χρήση διπλού ευρετηρίου είναι συνήθης για την αναγνώριση συναρτήσεων και μεταβλητών μέσα στην δυσδιάστατη περιοχή.



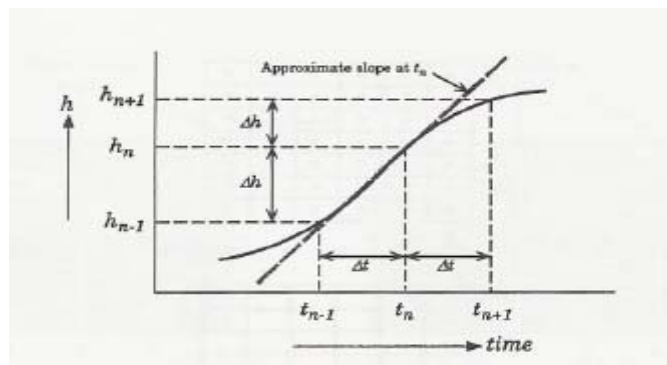
Εικόνα Β-1-3 : Παραδείγματα πλεγμάτων πεπερασμένων διαφορών : (Α) δυσδιάστατο κεντροθετημένο πλέγμα, (Β) δυσδιάστατο πλέγμα κεντρικών κόμβων, και (C) τρισδιάστατο κεντροθετημένο πλέγμα.
(A and B from Konikow, L.F.1996, C from Konikow, L.F., Go Konikow, L.F., ode, D.J., and Hornberger, G.Z.1996)

Για παράδειγμα, $h_{i,j}$ είναι το υδραυλικό ύψος στον κόμβο i,j , όπου i και j είναι οι περιοχές των γραμμών και των στηλών στο πλέγμα των πεπερασμένων διαφορών. Αυτή η διαδικασία επεκτείνεται εύκολα στις τρεις διαστάσεις, όπως φαίνεται άλλωστε στην Εικόνα Β-1-3Γ. Εδώ η κάθετη διάσταση (ή z -διεύθυνση) βρίσκεται από τον δείκτη k και επομένως το $h_{i,j,k}$ θα υποδεικνύει το υδραυλικό ύψος στον κόμβο i,j,k .

Πρέπει επίσης να λάβουμε υπόψιν μας την διακριτοποίηση του χρόνου, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως μία επιπλέον διάσταση, και ως εκ τούτου να παρουσιάζεται από ένα άλλο ευρετήριο. Εάν σκεφτούμε ένα αντιπροσωπευτικό τμήμα από ένα υδρογράφημα (βλέπε Εικόνα Β-1-4), στο οποίο γίνεται η γραφική παράσταση του υδραυλικού ύψους συναρτήσει του χρόνου για ένα μεταφορικό σύστημα ροής, τότε n θα είναι ο δείκτης που θα υποδηλώνει την χρονική στιγμή

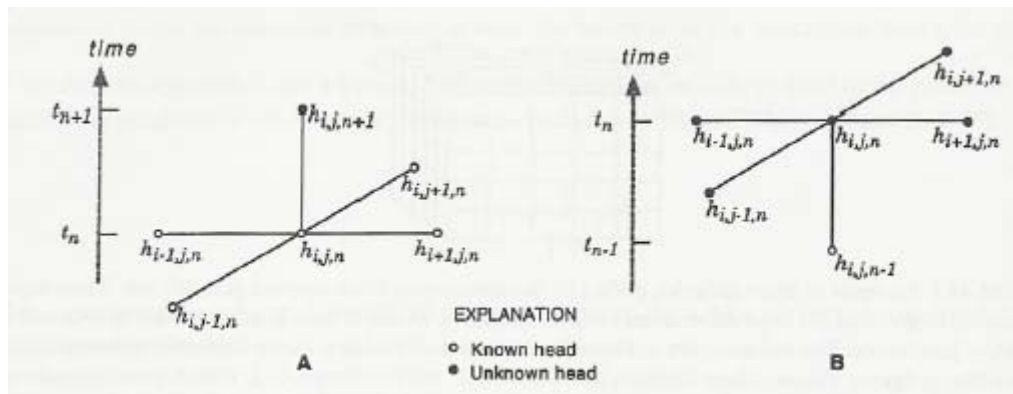
παρατήρησης συγκεκριμένου υδραυλικού ύψους (που έχει προεπιλεγεί για μετρήσεις). Η κλίση του υδρογραφήματος σε οποιοδήποτε σημείο θα είναι η παράγωγος του ύψους σε αντιστοιχία με το χρόνο, και θα μπορεί να υπολογιστεί ως $\partial h / \partial t = \Delta h / \Delta t$. Σε όρους υδραυλικού ύψους που υπολογίζονται σε συγκεκριμένες χρονικές αυξήσεις (ή χρονικούς κόμβους), η κλίση του υδρογραφήματος σε σχέση με το χρόνο n θα μπορεί να προσεγγιστεί με τη σχέση:

$$\left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_{n\Delta t} \approx \frac{h_{n+1} - h_n}{\Delta t} \quad \text{or} \quad \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_{n\Delta t} \approx \frac{h_n - h_{n-1}}{\Delta t} \quad (8)$$



Εικόνα B-1-4 : Μέρος ενός υδρογραφήματος που δείχνουν ότι η παράγωγος (ή κλίση, $\partial h / \partial t$) στον χρονικό κόμβο t_n μπορεί να προσεγγιστεί από το πηλίκο $\Delta h / \Delta t$.

(Konikow, L.F.1996)



Εικόνα B-1-5 : Διάρρητο πλέγμα το οποίο δείχνει την διακριτοποίηση του χρόνου στον κόμβο (i,j) σε ένα δυσδιάστατο πλέγμα πεπερασμένων διαφορών : (A) άμεση (εμπρόσθια διαφορά) διατύπωση και (B) έμμεση (οπίσθια διαφορά) διατύπωση.

(Konikow, L.F.1996)

Υπολογίζουμε την παράγωγο σε χρόνο $t = n\Delta t$ στην πρώτη από τις παραπάνω δύο εξισώσεις παίρνοντας μία «διαφορά προς τα εμπρός ή εμπρόσθια διαφορά» από το χρόνο n στο χρόνο $n+1$ και παίρνοντας μία «διαφορά προς τα πίσω ή οπίσθια διαφορά» στην δεύτερη εξίσωση. Για να μπορέσουμε να λύσουμε την εξίσωση της ροής των υπογείων υδάτων για έναν κόμβο (i,j) ενός πλέγματος πεπερασμένων διαφορών, θα πρέπει να υποθέσουμε υδραυλικά ύψη σε πέντε κόμβους και σε δύο χρονικά επίπεδα, όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα B-1-5. Στην εικόνα B-1-5A, έχουμε εκφράσει τις χωρικές παραγώγους του ύψους στο χρονικό επίπεδο n , όπου όλες οι τιμές είναι γνωστές, και την χρονική παράγωγο σαν εμπρόσθια διαφορά του άγνωστου ύψους στο χρονικό βήμα $n+1$. Έπειτα για κάθε κόμβο του πλέγματος θα έχουμε μία ξεχωριστή διαφορική εξίσωση, καθεμία από τις οποίες θα περιέχει μία μόνο άγνωστη μεταβλητή. Κατά συνέπεια, αυτές οι εξισώσεις μπορούν να επιλυθούν άμεσα. Αυτές οι άμεσες, λοιπόν, εξισώσεις είναι, κατά συνέπεια, εύκολο και απλό να λυθούν, αλλά μπορεί να σχετίζονται με κάποια κριτήρια σταθερότητας. Αυτό σημαίνει, πως αν οι χρονικές αυξήσεις είναι πολύ μεγάλες, τα μικρά αριθμητικά σφάλματα ή οι διαταραχές ενδέχεται να διαδοθούν σε μεγαλύτερα σφάλματα στα επόμενα στάδια των υπολογισμών.

Στην Εικόνα B-1-5B, έχουμε εκφράσει την χρονική παράγωγο σαν μία οπίσθια διαφορά από τα ύψη στο χρόνο n , τα οποία είναι λοιπόν τα άγνωστα ύψη, την στιγμή που τα ύψη στο προηγούμενο χρονικό επίπεδο, $n-1$, είναι τα γνωστά (είτε λόγω συγκεκριμένων αρχικών συνθηκών για το πρώτο χρονικό βήμα είτε λόγω επόμενων λύσεων σε επόμενα χρονικά βήματα). Οι χωρικές παράγωγοι του ύψους είναι γραμμένες για το χρονικό επίπεδο n , όπου όλες οι τιμές είναι άγνωστες, έτσι λοιπόν για κάθε κόμβο του πλέγματος θα πρέπει να έχουμε μία διαφορική εξίσωση που να περιέχει πέντε αγνώστους, η οποία δεν θα μπορεί να λυθεί απευθείας. Παρόλ'αυτά, για όλο το πλέγμα, το οποίο περιέχει N κόμβους, θα μπορούσαμε να έχουμε ένα σύστημα N εξισώσεων που θα περιείχαν συνολικά N αγνώστους. Ένα τέτοιο σύστημα ταυτόχρονων εξισώσεων, μαζί με συγκεκριμένες οριακές συνθήκες, μπορεί να λυθεί έμμεσα. Παρόλο που οι έμμεσες λύσεις είναι περισσότερο πολύπλοκες, έχουν επίσης το πλεονέκτημα ότι είναι γενικά σταθερές ανεξαρτήτου συνθηκών. Αυτό υποδηλώνει ότι θα βρεθεί μία λύση, ασχέτως του γεγονότος ότι ο υπολογισμός της παραγώγου που έχει υπολογιστεί θα είναι ακριβής, εάν τα χρονικά βήματα είναι μεγάλα σε σχέση με το βαθμό αλλαγής του ύψους. Τα περισσότερα

διαθέσιμα μοντέλα υπογείων υδάτων επιλύουν μία έμμεση προσέγγιση πεπερασμένων διαφορών στην εξίσωση της ροής.

Έχουμε θεωρήσει μία δυσδιάστατη εξίσωση ροής υπογείων υδάτων για έναν ετερογενή, ανισοτροπικό υδροφορέα, στον οποίο το σύστημα συντεταγμένων ευθυγραμμίζεται με τους κύριους άξονες του τανυστή μεταβιβασιμότητας. Αυτό μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών για τον αντιπροσωπευτικό κόμβο (i,j) ως εξής:

$$T_{xx[i-1/2,j]} \left(\frac{h_{i-1,j,n} - h_{i,j,n}}{(\Delta x)^2} \right) + T_{xx[i+1/2,j]} \left(\frac{h_{i+1,j,n} - h_{i,j,n}}{(\Delta x)^2} \right) + T_{yy[i,j-1/2]} \left(\frac{h_{i,j-1,n} - h_{i,j,n}}{(\Delta y)^2} \right) + T_{yy[i,j+1/2]} \left(\frac{h_{i,j+1,n} - h_{i,j,n}}{(\Delta y)^2} \right) = S \left(\frac{h_{i,j,n} - h_{i,j,n-1}}{\Delta t} \right) - \frac{q_{i,j}}{\Delta x \Delta y} - \frac{K_z}{m} (H_{s[i,j]} - h_{i,j,n}) \quad (9)$$

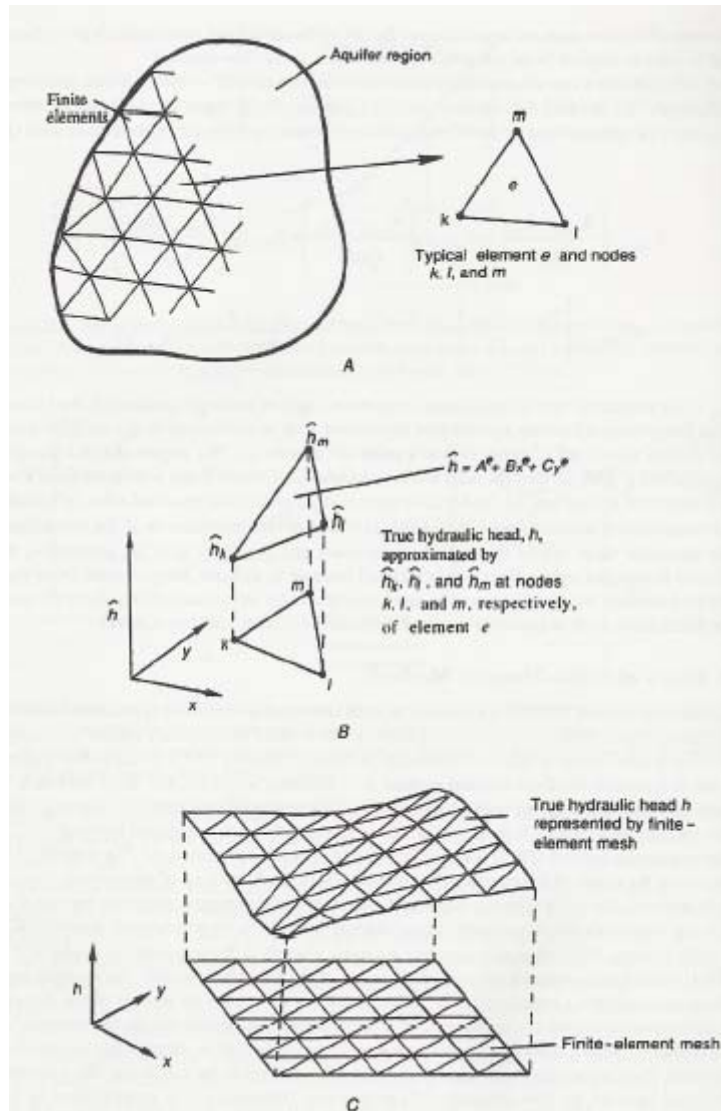
όπου $q_{i,j}$ είναι ο ογκομετρικός βαθμός αποφόρτισης (με αρνητικό πρόσημο) ή επαναφόρτισης (θετικό πρόσημο) στον κόμβο i,j, L^3T^{-1} . Αυτή η διατύπωση υποθέτει εγγενώς ότι οποιεσδήποτε πιέσεις, όπως αυτές που αναπαρίστανται από τον $q_{i,j}$, εφαρμόζονται σε όλη την επιφάνεια της περιοχής του κελιού i,j παρά σε ένα σημείο (ή στον κόμβο i,j). Αυτό υποδεικνύει πως αν ένα πηγάδι άντλησης αναπαρίσταται στον κόμβο i,j, τότε το υδραυλικό ύψος θα υπολογιστεί σαν να υπήρχε αποφόρτιση από ένα πηγάδι που είχε οριζόντια επιφανειακή περιοχή για τη γεώτρηση ίση με $\Delta x \Delta y$ παρά την πραγματική τιμή της. Στην παραπάνω εξίσωση οι όροι της μεταβιβασιμότητας αναπαριστούν τα αρμονικά μέσα της μεταβιβασιμότητας στα δύο παρακείμενα κελιά. Το αρμονικό μέσο μπορεί να αποδειχτεί κατάλληλο και συνεπές με την υπόθεση ότι η μεταβιβασιμότητα είναι σταθερή και ομοιόμορφη μέσα σε κάθε κελί αλλά μπορεί να είναι διαφορετική μέσα σε διαφορετικά κελιά. Άλλοι τύποι μέσων για μεταβιβασιμότητα μέσω μπλοκ (δηλαδή χωρισμού της περιοχής σε τμήματα ούτως ώστε να αποφύγουμε την περίπτωση ετερογένειας) μπορεί να είναι περισσότερο κατάλληλοι για άλλες υποθέσεις σχετικά με την κατανομή της μεταβιβασιμότητας, όπως η ομαλά μεταβαλλόμενη μεταβιβασιμότητα. (Goode και Appel, 1992). (Jacques W. Delleur, 1999)

3. ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM, Finite-Element Method) είναι μία αριθμητική μέθοδος ανάλυσης για την επίτευξη προσεγγιστικών λύσεων σε μία μεγάλη ποικιλία προβλημάτων στην φυσική και τη μηχανική. Η μέθοδος εφαρμόστηκε αρχικά για την κατασκευαστική μηχανική αλλά τώρα χρησιμοποιείται σε όλα τα πεδία της συνεχούς μηχανικής (αυτής δηλαδή που λειτουργεί σαν σύνολο με αδιάσπαστη αλληλουχία των επιμέρους στοιχείων της). Ο Huebner (1975) περιγράφει τέσσερις διαφορετικές προσεγγίσεις για τη μορφοποίηση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για ένα πρόβλημα, τα οποία είναι: η απευθείας προσέγγιση, η μεταβαλλόμενη προσέγγιση, η προσέγγιση του σταθμισμένου υπολοίπου και η προσέγγιση μέσω ισορροπίας της ενέργειας. Στα προβλήματα των υπογείων υδάτων, η προσέγγιση που χρησιμοποιείται συχνά είναι είτε αυτή του σταθμισμένου υπολοίπου είτε η μεταβαλλόμενη.

Η μέθοδος FEM χρησιμοποιεί την έννοια της "τμηματικής προσέγγισης". Η περιοχή του προβλήματος, δηλαδή σε ποιο βαθμό πρέπει να προσομοιώσουμε τον υδροφορέα, χωρίζεται σε ένα σύνολο από στοιχεία ή κομμάτια. Στην θεωρία, τα στοιχεία, μπορούν να είναι διαφορετικών σχημάτων και μεγεθών. Τα περισσότερα υπολογιστικά προγράμματα που χρησιμοποιούν την FEM χρησιμοποιούν και ένα μόνο είδος σχήματος για τα στοιχεία, το οποίο είναι συνήθως τριγωνικό ή τετραγωνικό. Στο μοντέλο υπογείων υδάτων MODFE (Torak, 1993 ; Cooley, 1992) χρησιμοποιούνται τα τριγωνικά στοιχεία, ενώ στο μοντέλο SUTRA (Voss, 1984) τα τετραγωνικά. Οι τιμές των σημείων για τις εξαρτημένες μεταβλητές (για παράδειγμα πίεση, ύψος, ή συγκέντρωση) υπολογίζονται στους κόμβους, οι οποίοι είναι οι γωνίες ή οι κορυφές των στοιχείων, και χρησιμοποιείται μία απλή εξίσωση για να περιγράψει την τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής μέσα στο στοιχείο. Αυτή η απλή εξίσωση ονομάζεται βασική συνάρτηση και κάθε κόμβος που είναι μέλος ενός στοιχείου έχει μία συσχετιζόμενη βασική συνάρτηση. Οι απλούστερες βασικές συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι γραμμικές συναρτήσεις. Η επίλυση της διαφορικής εξίσωσης της ροής (εξίσωση 2) ή της μεταφοράς (εξίσωση 3) προσεγγίζεται από ένα σύνολο στοιχείων στο οποίο η εξαρτημένη μεταβλητή μεταβάλλεται μόνο γραμμικά μέσα στο στοιχείο, αλλά όλο το σύνολο των στοιχείων προσεγγίζει την πολύπλοκη κατανομή του υδραυλικού ύψους ή της συγκέντρωσης. Η Εικόνα B-1-6 δείχνει την

προσεγγιστική μοντελοποιημένη κατανομή του υδραυλικού ύψους (Εικόνα B-1-6Γ) αποτελούμενη από ένα σύνολο τριγωνικών στοιχείων (Εικόνα B-1-6Α) έχοντας μία γραμμική προσέγγιση της μεταβολής του ύψους μέσα σε κάθε στοιχείο (Εικόνα B-1-6Β).



Εικόνα B-1-6 : Διάγραμμα, το οποίο δείχνει (Α) την περιοχή ενός υδροφορέα που είναι χωρισμένη τμηματικά από πεπερασμένα στοιχεία καθώς και το τυπικό στοιχείο e , (Β) την αναπαράσταση του υδραυλικού ύψους \hat{h} με τα πεπερασμένα στοιχεία, και (C) την διαμόρφωση του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων για την προσέγγιση του πραγματικού υδραυλικού ύψους.

(Torak, L.J.1993)

Στην μέθοδο της προσέγγισης του σταθμισμένου υπολοίπου, η τμηματική συνεχής επιφάνεια λαμβάνεται με την ελαχιστοποίηση των διαφορών μεταξύ της προσεγγιζόμενης και της συνεχούς επιφάνειας. Αυτή η μέθοδος συνοψίζεται από τους Huyakorn και Pinder (1983, p.39), όπως ακολουθεί. Κάθε διαφορική εξίσωση $L(h)$, όπως η μορφή σταθερής καταστάσεως της εξίσωσης (2) (της εξίσωσης της ροής των υπογείων υδάτων) μπορεί να γραφεί:

$$L(h) = 0 \quad (10)$$

πάνω από την περιοχή του προβλήματος R . Το πρώτο βήμα στο να λάβουμε την προσεγγιστική λύση είναι να καθορίσουμε την προσεγγιστική λύση ως το άθροισμα όλων των απλών βασικών συναρτήσεων ως εξής:

$$\hat{h} = \sum_{i=1}^n N_i Z_i \quad (11)$$

όπου \hat{h} είναι η προσεγγιστική λύση, n είναι ο αριθμός των γραμμικοποιημένων ανεξάρτητων βασικών συναρτήσεων, N_i είναι οι γραμμικοποιημένες ανεξάρτητες βασικές συναρτήσεις που καθορίζονται για όλη την περιοχή, και Z_i είναι οι άγνωστοι συντελεστές που πρέπει να καθοριστούν (υπάρχει ένας συντελεστής για κάθε κόμβο στο πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων). Η συνάρτηση δοκιμής και λάθους \hat{h} είναι μία προσέγγιση, ούτως ώστε όταν αντικαθίσταται στην εξίσωση (10) θα υπάρχει κάποιο σφάλμα ξ , που θα καθορίζεται ως:

$$\xi = L(\hat{h}) \quad (12)$$

Η μέθοδος του σταθμισμένου υπολοίπου καθορίζει τους άγνωστους συντελεστές ελαχιστοποιώντας το σφάλμα. Αυτό συνδέεται με την στάθμιση του σφάλματος, την ολοκλήρωσή του και θέτοντας το σφάλμα ίσο με μηδέν για όλη την περιοχή. Μία συνάρτηση στάθμισης, W_i , μπορεί να συγκεκριμενοποιηθεί για κάθε βασική συνάρτηση και η τελική ολοκλήρωση είναι:

$$\int_R W_i \xi dR = \int_R W_i L(\hat{h}) dR = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

Η εξίσωση (11) εισάγεται μέσα στην (13), και συγκεκριμενοποιούνται οι συναρτήσεις στάθμισης. Υπάρχουν τότε n εξισώσεις με n αγνώστους. Η επιλογή των συναρτήσεων στάθμισης και η απλοποίηση του ολοκληρώματος στην εξίσωση (13) μέσα σε μία γραμμική αλγεβρική εξίσωση είναι μαθηματικά απλή, αλλά όχι διαισθητική. Στην μέθοδο Galerkin, οι συναρτήσεις στάθμισης επιλέγονται να είναι ίδιες με τις βασικές συναρτήσεις, και η εξίσωση (13) απλοποιείται με τη χρήση τμηματικής ολοκλήρωσης. Επειδή η βασικές συναρτήσεις και οι συναρτήσεις στάθμισης καθορίζεται να είναι μίας συγκεκριμένης αλγεβρικής μορφής (για παράδειγμα, γραμμικές βασικές συναρτήσεις), το τροποποιημένο ολοκλήρωμα είναι απλό να λυθεί και γίνεται ένα σύνολο από n ταυτόχρονες εξισώσεις.

Εφόσον η εξίσωση (13) αξιολογηθεί μαθηματικά σε ένα σύνολο από n ταυτόχρονες εξισώσεις, αυτές επιλύονται χρησιμοποιώντας για την επίλυση τεχνικές με μήτρες (πίνακες) για τους n αγνώστους συντελεστές Z_i , και έτσι η προσεγγιστική λύση \hat{h} καθορίζεται σε κάθε κόμβο. Η χρονική παράγωγος προσεγγίζεται συχνά μέσω πεπερασμένων διαφορών, όπως έχουμε ήδη συζητήσει. Οι Huyakorn και Pinder (1983), Huebner (1975), Zienkiewicz (1971), Wang και Anderson (1982), και Cooley (1992) παρέχουν περισσότερες περιεκτικές επεξηγήσεις για τη μέθοδο. **(Jacques W. Delleur, 1999**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο
«ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ-ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ»

1. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

1.1 Εισαγωγή

1.1.1 Σκοπός

Εδώ παρέχονται οδηγίες για την εφαρμογή των υπογείων νερών και των μοντέλων μεταφοράς αποβλήτων στον χαρακτηρισμό των περιοχών όπου υπάρχουν επικίνδυνες ουσίες. Ο σκοπός αυτού του τμήματος είναι να επικεντρωθεί στην επιλογή του μοντέλου, να παρέχει τις προτεινόμενες διαδικασίες για την διαβεβαίωση και τον έλεγχο ποιότητας (QA/QC, Quality Assurance/Quality Control) και να δώσει μία υπάρχουσα και επικυρωμένη προσέγγιση στην παρουσίαση των δεδομένων.

Γίνεται υπόδειξη της χρήσης των μοντέλων για τέσσερις αρχικούς σκοπούς: 1) τον καλύτερο δυνατό χαρακτηρισμό της κατάστασης των υπογείων υδάτων σε μία περιοχή, 2) την πρόβλεψη την μεταφοράς των επικίνδυνων ουσιών, 3) τον εντοπισμό περιοχών με δυνατότητα περιβαλλοντικού κινδύνου και 4) την αξιολόγηση ύπαρξης πιθανής εξυγίανσης ή εναλλακτικών διορθωτικών κινήσεων. Αυτό ενδέχεται να περιλαμβάνει την μελλοντική πρόβλεψη της συγκέντρωσης των επικίνδυνων ουσιών σε ένα πηγάδι τροφοδοσίας, την σχεδίαση ενός συστήματος εξαγωγής και έγχυσης, την επικέντρωση στο σχεδιασμό του ελέγχου των δικτύων πηγαδιών και την προσομοίωση των επιδράσεων της επαναφόρτισης και της αποφόρτισης στη ροή του υπόγειου νερού και της μετακίνησης των επικίνδυνων ουσιών. (www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf)

1.1.2 Εφαρμογή

Υπάρχει μεγάλη αύξηση στη χρήση των μαθηματικών μοντέλων για τη ροή του υπόγειου ύδατος και την μεταφορά των επικίνδυνων ουσιών για την παροχή απαντήσεων σε ερωτήσεις υδρογεωλογικού περιεχομένου που εμφανίζονται σε περιοχές με επικίνδυνα απόβλητα. Το Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας (NRC, National Research Council, 1989) μελέτησε την επιστημονική και συχνή χρήση των μαθηματικών μοντέλων. Σαν αποτέλεσμα αυτού, κατέληξαν στο συμπέρασμα, «οι ρυθμιστικές υπηρεσίες πρέπει να παρέχουν λεπτομερείς, συνεπείς διαδικασίες για την κατάλληλη ανάπτυξη και εφαρμογή των μοντέλων.» Ο τεχνικός οδηγός που

παρέχεται σε αυτό το τμήμα εξασφαλίζει ότι 1) οι στόχοι είναι πλήρως καθορισμένοι για την μελέτη των μοντέλων, 2) οι μελέτες μοντέλων για υπόγεια νερά συναντούν πολύ καλά καθορισμένα κριτήρια αξιοπιστίας της ποιότητας για να εξασφαλίσουν την μέγιστη δυνατή ακρίβεια, 3) οι απαιτήσεις εκθέσεων έχουν διευκρινιστεί ούτως ώστε οι μελέτες των μοντέλων να μπορούν να αναθεωρηθούν ανεξάρτητα, 4) η επιλογή των μαθηματικών μοντέλων είναι η κατάλληλη σε ένα προσιτό πρόβλημα, 5) το σύνολο των δεδομένων είναι επαρκές για την προσέγγιση του πραγματικού συστήματος υπογείων υδάτων, και 6) η εγγενής αβεβαιότητα του μοντέλου έχει αξιολογηθεί και καταγραφεί ούτως ώστε οι υπεύθυνοι για τη λήψη αποφάσεων να καθορίσουν την αξία των αποτελεσμάτων (της προσπάθειας) του μοντέλου.

Υπάρχουν διάφορα κριτήρια που πρέπει να ληφθούν υπόψη στη μοντελοποίηση των υπογείων υδάτων. Η Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των Η.Π.Α. (1988α) αναφέρεται σε αυτά ως αντικειμενικά κριτήρια, τεχνικά κριτήρια και κριτήρια εφαρμογής. Τα αντικειμενικά κριτήρια έχουν να κάνουν με το σκοπό του μοντέλου (της μοντελοποίησης) είτε πρόκειται για μελέτη διαλογής είτε για λεπτομερή μελέτη μίας περιοχής. Τα τεχνικά κριτήρια υποδεικνύουν την ικανότητα ενός μαθηματικού μοντέλου να προσομοιώσει τις συγκεκριμένες διαδικασίες της περιοχής που ενδιαφέρουν. Τα κριτήρια εφαρμογής έχουν να κάνουν με την ευκολία λήψης, χρησιμοποίησης και επίδειξης της αποδεκτικότητας (πόσο αυτό αποδέχεται) ενός μοντέλου για μία συγκεκριμένη χρήση. Η κατάλληλη επιλογή και εφαρμογή ενός μοντέλου εξαρτάται από πολλές διαδικασίες που εξασφαλίζουν την ποιότητα του μέσα από την διαμόρφωσή του. Η εξασφάλιση της ποιότητας για την μοντελοποίηση συζητήθηκε λεπτομερώς από τον van der Heijde (1987) και από τους Wilkinson και Runkle (1986).

Παρόλο που όλες οι παραπάνω εκτιμήσεις θα καθορίσουν την χρησιμότητα ενός μοντέλου για μία συγκεκριμένη περιοχή, η ποιότητα και η ποσότητα των συγκεκριμένων δεδομένων εκείνης της περιοχής είναι αυτές που θα επιτρέψουν στο μοντέλο να προσομοιώσει το πραγματικό σύστημα παρά απλώς να παρέχουν το γενικό μοντέλο μιας διαδικασίας. Ένας επαρκής αριθμός αντιπροσωπευτικών σημείων δεδομένων μπορεί να επιτρέψει στον σχεδιαστή του μοντέλου να προσομοιώσει συγκεκριμένες διαδικασίες της περιοχής με μεγάλο βαθμό αξιοπιστίας. Η μοντελοποίηση με περιορισμένα δεδομένα μπορεί να επιτρέψει στον ερευνητή να αναπτύξει αρχικά συμπεράσματα, τα οποία μπορεί να βοηθήσουν στην καθοδήγηση μίας έρευνας στα πρώτα της στάδια.

Καθώς η κωδικοποίηση των υπολογιστών και οι μαθηματικές διαδικασίες σε μερικά μοντέλα είναι αρκετά πολύπλοκες και πρέπει να γίνουν κατανοητές από τον σχεδιαστή του μοντέλου για την δημιουργία μίας χρήσιμης προσομοίωσης, ο στόχος της μοντελοποίησης που υπονοείται εδώ είναι να παρέχεται μία προσέγγιση της κατάστασης μίας συγκεκριμένης περιοχής. Ένας καταρτισμένος επιστήμονας με προϋστορία στην υδρογεωλογία ή στην υδραυλική υπογείων υδάτων και με εμπειρία-πείρα στην μοντελοποίηση των υπογείων υδάτων είναι ο καταλληλότερος για να καθορίσει εάν μία προσομοίωση είναι λογική ή όχι, και για να παρουσιάσει προτάσεις βασισμένες στην μελέτη του μοντέλου.

Η μέθοδος που παρουσιάζεται εδώ ισχύει στην μοντελοποίηση για τον χαρακτηρισμό της ροής του υπόγειου ύδατος και την μεταφορά των επικινδυνών ουσιών σε μία περιοχή με επικίνδυνα απόβλητα, για την πρόβλεψη των μελλοντικών συγκεντρώσεων και των τοποθεσιών των επικινδυνών ουσιών στο υπόγειο νερό για ανάλυση επικινδυνότητας και για την προσήλωση στον σχεδιασμό και την εφαρμογή στρατηγικών για το μολυσμένο υπόγειο νερό. Καθώς υπάρχουν λίγα προβλήματα ροής και μεταφοράς που μπορούν να μοντελοποιηθούν με απόλυτη αξιοπιστία, αυτή η μέθοδος παρουσιάζεται για να επικεντρώσει στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων του μοντέλου τα οποία θα βοηθήσουν στις αποφάσεις εκτιμώντας τον υδρογεωλογικό χαρακτηρισμό, την τοποθέτηση των πηγαδιών και την εξυγίανση των υπογείων υδάτων.

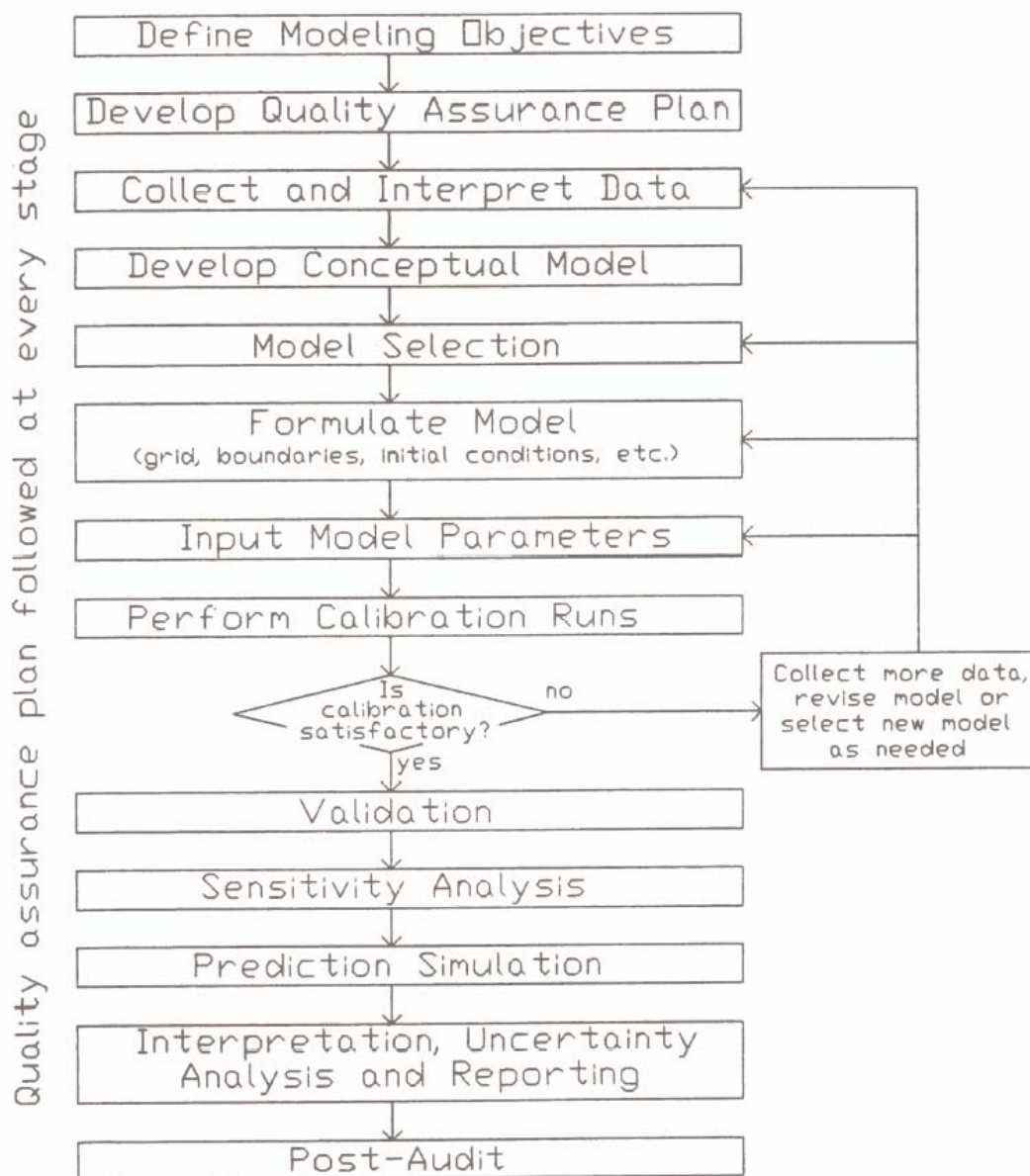
Το τμήμα αυτό έχει οργανωθεί σύμφωνα με την διαδικασία που τυπικά ακολουθείται στην εφαρμογή ενός αριθμητικού μοντέλου (Εικόνα B-1-1). Οι οδηγίες που παρουσιάζονται εδώ εφαρμόζουν συγκεκριμένα στην χρήση αριθμητικών μοντέλων. Παρ'όλα αυτά οι απαιτήσεις που υπάρχουν πρέπει επίσης να καλυφθούν, στην εφαρμόσιμη μορφή τους, όταν χρησιμοποιούμε αναλυτικά και ημι-αναλυτικά μοντέλα. (www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf)

1.1.3 Περιορισμοί

Γενική έγκριση για ένα μοντέλο δεν είναι δυνατή. Ένα μοντέλο που θα είναι κατάλληλο για ένα σκοπό μπορεί να μην είναι κατάλληλο για κάποιον άλλο. Τέτοια έγκριση θα κατέστειλε την καινοτομία και την χρήση νεότερων μοντέλων.

Αυτό το τμήμα, επίσης, δεν προορίζεται για αναφορά οδηγιών στην μοντελοποίηση των υπογείων υδάτων. Ο σκοπός του είναι να υπογραμμίσει τα στοιχεία εκείνα που πρέπει να ληφθούν υπόψη και να αναφερθούν στην πραγματοποίηση μίας επιστημονικά υπερασπίσιμης μελέτης για την μοντελοποίηση.

Η μέθοδος που αναφέρεται εδώ (με τη μορφή οδηγού) εφαρμόζεται ειδικά στην μοντελοποίηση της ροής των υπογείων υδάτων και στην μεταφορά επικίνδυνων ουσιών σε κορεσμένα πορώδη μέσα. Η μοντελοποίηση τεμαχισμένης ροής, συστημάτων με διπλό πορώδες, πολλαπλών ρευστών φάσεων και άλλων παρόμοιων πολύπλοκων συστημάτων μπορεί να είναι πέρα από τους σκοπούς αυτού του οδηγού. Παρόλο που υπάρχουν μοντέλα γι' αυτές τις καταστάσεις, οι παράμετροι που εισάγονται είναι συχνά δύσκολο ή αδύνατο να ταιριάζουν απόλυτα στο πεδίο (να είναι απόλυτα επαρκείς). Όταν χρησιμοποιούνται τέτοια μοντέλα, όμως, ο οδηγός θα πρέπει να χρησιμοποιείται και να ακολουθείται όπου είναι εφαρμόσιμος.



Εικόνα Β-2-1 : Διάγραμμα ροής για την εφαρμογή ενός αριθμητικού μοντέλου
υπογείων υδάτων

(www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf)

Η μοντελοποίηση υπογείων υδάτων είναι ένα εργαλείο που συνήθως βασίζεται πάνω σε ήδη υπάρχουσα και σωστή κατανόηση των υδρογεωλογικών συνθηκών μίας περιοχής. Αυτό το βασικό θεμέλιο πρέπει να αναπτυχθεί μέσα από ένα λεπτομερή υδρογεωλογικό χαρακτηρισμό της περιοχής. Ένα μοντέλο υπογείων υδάτων δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο για την συλλογή δεδομένων

στο πεδίο (Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας, 1989). Ο χαρακτηρισμός της υδρογεωλογίας μίας περιοχής ή η δυνατότητα αυτού απαιτείται και στους ομοσπονδιακούς και στους πολιτειακούς κανονισμούς. Ένας περιεκτικός υδρογεωλογικός χαρακτηρισμός είναι απαραίτητος για την χρησιμοποίηση υδρογεωλογικής μοντελοποίησης στη λήψη αποφάσεων. (www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf)

1.2 Στόχοι Μοντελοποίησης

Τα μοντέλα υπογείων υδάτων συνήθως χρησιμοποιούνται για:

- Προσδιορισμό των κενών στα δεδομένα κατά την διάρκεια του υδρογεωλογικού χαρακτηρισμού
- Προσήλωση στο σχεδιασμό ενός δικτύου ελέγχου πηγαδιών ικανού να εντοπίζει την απελευθέρωση ουσιών από μία δραστηριότητα που διαθέτει τα απόβλητά της
- Προσδιορισμό των σημαντικών επιπτώσεων του μολυσμένου υπόγειου ύδατος σε κοντινά πηγάδια ή επιφανειακούς υδάτινους αποδέκτες, και
- Προσήλωση στην επιλογή και στο σχεδιασμό κινήσεων εξυγίανσης για έλεγχο ή απομάκρυνση και επεξεργασία, μολυσμένου υπόγειου ύδατος.

Ο βαθμός λεπτομέρειας που απαιτείται για να προσεγγιστούν αυτοί οι στόχοι εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου των συνήθων απαιτήσεων που πρέπει να ικανοποιούνται από την μελέτη του μοντέλου, τη δυνατότητα ρίσκου για την δημόσια υγεία ή το περιβάλλον από κάποια λάθος απόφαση, βασισμένη στα αποτελέσματα του μοντέλου, την πολυπλοκότητα της υδρογεωλογίας της περιοχής και τους οικονομικούς περιορισμούς. Για παράδειγμα, ο βαθμός λεπτομέρειας που είναι απαραίτητος για να παρέχει μία αποδεκτή κατανόηση της ροής των υπογείων υδάτων σε μία περιοχή μπορεί να είναι πολύ πιο χαμηλός απ'ότι αν έπρεπε να αξιολογήσει την έκθεση ενός γειτονικού πληθυσμού σε μολυσμένο υπόγειο νερό ή να ωθήσει σε ρυθμιστικές κινήσεις. Οι στόχοι της μοντελοποίησης πρέπει να δηλώνονται σαφώς και πλήρως στο ξεκίνημα του προγράμματος και στην επιστημονική αναφορά.

Η Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των Η.Π.Α. (US EPA 1988a) διαφοροποιεί την χρήση ενός μοντέλου για μελέτες διαλογής ή λεπτομερείς μελέτες. Οι μελέτες διαλογής πραγματοποιούνται για να γίνονται γενικές συγκρίσεις πολλών περιοχών ή για πολλά σενάρια σε μία περιοχή. Οι λεπτομερείς ή οι εξειδικευμένες για μία περιοχή μελέτες πραγματοποιούνται για να γίνονται λεπτομερείς αξιολογήσεις της επίδρασης στο περιβάλλον ή της απόδοσης μίας περιοχής ή των δυνατοτήτων αυτής. Το Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας (National Research Council 1989) δήλωσε με έμφαση πως τα μοντέλα διαλογής ή τα γενικά μοντέλα δεν μπορούν ποτέ να χρησιμοποιηθούν για την αντικατάσταση των μοντέλων που είναι εξειδικευμένα σε μία περιοχή. (www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf)

1.3 Προγράμματα για την Εξασφάλιση της Ποιότητας

Η εξασφάλιση της ποιότητας είναι ένα κύριο τμήμα των περισσότερων ερευνητικών δραστηριοτήτων σε περιοχές με επικίνδυνα απόβλητα. Η συλλογή και η ανάλυση των δειγμάτων για τον έλεγχο της ποιότητας μπορεί να συνεπάγεται το 10-25 % των δειγμάτων του χώματος ή του υπόγειου ύδατος που περιλαμβάνει ο προϋπολογισμός του προγράμματος. Πολλοί συντάκτες έχουν αναγνωρίσει την ανάγκη για, και την κοινή έλλειψη από την εξασφάλιση της ποιότητας τόσο στην ανάπτυξη όσο και στην εφαρμογή των μοντέλων των υπογείων υδάτων. (van der Heijde, 1987). Δυστυχώς, η εξασφάλιση της ποιότητας στην μοντελοποίηση των υπογείων υδάτων έχει αγνοηθεί σε πολλές περιπτώσεις ή έχει ληφθεί υπόψη μόνο προς το τέλος του προγράμματος.

Η ανάπτυξη ενός σχεδίου για την εξασφάλιση της ποιότητας στην αρχή της μελέτης της μοντελοποίησης θα βοηθήσει να εξασφαλίσουμε περισσότερο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Οι εκτιμήσεις για την εξασφάλιση της ποιότητας έχουν αναγνωριστεί από πολλούς συντάκτες (National Research Council, 1990; van der Heijde, 1988). Τα ακόλουθα θα πρέπει να περιλαμβάνονται σε ένα σχέδιο για την εξασφάλιση της ποιότητας:

- ✓ Πρωτόκολλα από την συλλογή δεδομένων του πεδίου, επαλήθευση και επεξεργασία

- ✓ Γραπτή και γραφική παρουσίαση του εννοιολογικού μοντέλου, συμπεριλαμβανομένου της περιγραφής των διαδικασιών που πρέπει να ληφθούν υπόψη
- ✓ Κριτήρια για την επιλογή του μοντέλου
- ✓ Τεκμηρίωση και επανάληψη των μετρήσεων όταν γίνονται αλλαγές στον κώδικα ενός μοντέλου
- ✓ Πρωτόκολλα που θα ακολουθούνται από την διατύπωση του μοντέλου
- ✓ Πρωτόκολλα που θα ακολουθούνται από την βαθμονόμηση του μοντέλου, τα όρια των ρυθμίσεων για τις παραμέτρους και την προσδιορισμό των στόχων της βαθμονόμησης
- ✓ Πρωτόκολλα για την ανάλυση ευαισθησίας
- ✓ Διαδικασίες για την ανάλυση λάθους
- ✓ Το επίπεδο πληροφόρησης πρέπει να περιλαμβάνεται στα αποτελέσματα του υπολογιστή
- ✓ Η εφαρμοσιμότητα του συγκεκριμένου προγράμματος του μοντέλου και την μαθηματικής φόρμουλας
- ✓ Πρέπει να γίνουν υποθέσεις και η δυνατότητα τους να επηρεάσουν τα αποτελέσματα του υπολογιστή
- ✓ Καθιέρωση αρχείου με τις διαδικασίες για την τεκμηρίωση της διαδικασίας από την εφαρμογή του μοντέλου, και
- ✓ Μορφοποίηση για παρουσίαση των αποτελεσμάτων

[\(www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf\)](http://www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf)

1.4 Χαρακτηρισμός της περιοχής και Συλλογή Δεδομένων

Για να προβάλλουν μία προσέγγιση συγκεκριμένης ροής του υπόγειου ύδατος μίας περιοχής και των συνθηκών μεταφοράς των επικίνδυνων ουσιών, τα δεδομένα συνήθως χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της προσομοίωσης και η βαθμονόμηση του μοντέλου πρέπει να γίνει από τις αντίστοιχες (που αντιστοιχούν στην συγκεκριμένη ροή) μετρήσεις της περιοχής. Οι μετρήσεις των παραμέτρων πρέπει να γίνουν με έναν τρόπο που θα εξασφαλίζει ότι είναι αντιπροσωπευτικές των συνθηκών που επικρατούν στο πεδίο και η πυκνότητα των μετρήσεων πρέπει να απεικονίζει ακριβώς την διανομή των ιδιοτήτων του υδροφορέα, το υδραυλικό ύψος του υπόγειου ύδατος, τις συγκεντρώσεις των επικίνδυνων ουσιών και άλλες

παραμέτρους. Επίσης, τα κατάλληλα μέτρα ελέγχου της ποιότητας πρέπει να έπονται της συλλογής των δεδομένων που χρησιμοποιούνται στη μοντελοποίηση.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στη μοντελοποίηση των υπογείων υδάτων πρέπει να ληφθούν υπόψη, μαζί με άλλους παράγοντες, όταν σχεδιάζονται προγράμματα πεδίου για την συλλογή δεδομένων. Οι σχεδιαστές των μοντέλων πρέπει να συμμετέχουν σ' αυτή τη συλλογή ή να δουλεύουν στενά με το προσωπικό που εργάζεται στο πεδίο. Κατ'ελάχιστο, τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στην μοντελοποίηση των υπογείων υδάτων πρέπει να ελέγχονται για την ακρίβειά τους, την πληρότητα τους και την αντιπροσωπευτικότητά τους. Η αβεβαιότητα στα δεδομένα του πεδίου θα είναι ένας κύριος παράγοντας στην αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων του μοντέλου.

Για την μαθηματική προσομοίωση της συμπεριφοράς του υπόγειου ύδατος και των επικίνδυνων ουσιών σε μία περιοχή, είναι αρχικά αναγκαίο πως ο σχεδιαστής του μοντέλου πρέπει να έχει μία λεπτομερή αντίληψη της υδρογεωλογίας της περιοχής. Αυτή η αντίληψη πρέπει να αναπτυχθεί χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες μεθόδους ανάλυσης του πεδίου και των δεδομένων αυτού. Η ανάπτυξη ενός εννοιολογικού μοντέλου περιλαμβάνει την κατασκευή των ισοϋψών χαρτών (χαρτών με τις ισοϋψείς γραμμές) και των πλεγμάτων ροής ή άλλες μεθόδους για τον χαρακτηρισμό της φύσης της ροής του υπόγειου ύδατος. Η ανάγκη για συλλογή και κατάλληλη ερμηνεία των μετρήσεων του πεδίου δεν μπορεί να τονιστεί αρκετά. Οι McLaughlin και Johnson (1987) ανέλυσαν τρεις μελέτες μοντελοποίησης χρησιμοποιώντας το ίδιο μοντέλο και σύνολο δεδομένων. Τα αποτελέσματα διέφεραν αρκετά, πρωτίστως διότι υπήρχαν διαφορές στην ερμηνεία των συνθηκών του πεδίου. Οι μελέτες μοντελοποίησης συνήθως διευθύνονται από προσωπικό που δεν είναι σχετικό με τις συνθήκες της περιοχής ή που δεν έχει μεταβεί στην περιοχή. Είναι αρκετά επιθυμητό το άτομο ή η ομάδα που διευθύνει την μοντελοποίηση να είναι επίσης σχετικό με τις συνθήκες του πεδίου στην περιοχή.

www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf

1.5 Κριτήρια Επιλογής Μοντέλου

Η λογική για την επιλογή ενός συγκεκριμένου μοντέλου πρέπει να επιτρέπει την αναθεώρηση αυτού. Το μοντέλο πρέπει να έχει την δυνατότητα να προσομοιώνει τις σημαντικές διαδικασίες που έχουν καθοριστεί στο εννοιολογικό μοντέλο, όπως

επίσης τις διαστάσεις, τις οριακές συνθήκες και την ετερογένεια του εννοιολογικού μοντέλου. Αυτά τα τεχνικά κριτήρια θα συζητηθούν λεπτομερώς παρακάτω. Συντάξεις των χαρακτηριστικών των διαθέσιμων μοντέλων έχουν δημοσιευτεί (US EPA, 1988a) με στόχο την επιλογή μοντέλου. Το προσωπικό και οι δημοσιεύσεις του Διεθνούς Κέντρου Μοντελοποίησης Υπογείων Υδάτων (International Ground Water Modeling Center, IGWMC) μπορούν επίσης να είναι μία αξιολογητική πηγή στην διαδικασία επιλογής μοντέλου.

Ένα γενικό μοντέλο δεν θα πρέπει να επιλεγεί για να απαντήσει σε συγκεκριμένες ερωτήσεις της περιοχής. Ακόμα και αν ένα γενικό μοντέλο χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει την περίπτωση του χειρότερου σεναρίου μπορεί να είναι ακατάλληλο διότι μπορεί 1) να υπάρχει μία αυθαίρετη διαστρέβλωση στην επιλογή της διαδικασίας εξυγίανσης, 2) να μειωθεί η προστασία της δημόσιας υγείας από τη μη διάθεση πεπερασμένου αριθμού πηγών καθαρισμού και 3) να υπάρχει ως αποτέλεσμα επιβολή ουσιαστικών εξόδων χωρίς ισόμετρο (αντίστοιχο) περιβαλλοντικό όφελος ή όφελος στην δημόσια υγεία.

www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf

1.5.1 Χωρική Διαμόρφωση Μοντέλου

Το επιλεγόμενο μοντέλο πρέπει να έχει την δυνατότητα να αναπαριστά την διαμόρφωση του όγκου που μας ενδιαφέρει. Αυτό περιλαμβάνει όχι μόνο την γεωμετρία και τις διαστάσεις του συστήματος υπογείων υδάτων που πρέπει να προσομοιωθεί, αλλά και τις ακόλουθες πτυχές που προσδιορίστηκαν στο εννοιολογικό μοντέλο:

- Ελεύθερους, περιορισμένους και ημιπεριορισμένους υδροφορείς και το εύρος των εποχιακών αλλαγών του ύψους του υπόγειου ύδατος
- Αρχικές και οριακές συνθήκες
- Πηγές και εξόδους νερού και τα ποσοτικά αποτελέσματά τους
- Πηγές επικίνδυνων ουσιών
- Φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά των επικίνδυνων ουσιών

Όλα τα πραγματικά συστήματα υπογείων υδάτων, πηγών επικίνδυνων ουσιών και άλλων χαρακτηριστικών γνωρισμάτων, που συζητήθηκαν είναι τριών

διαστάσεων. Ένα μοντέλο μίας ή δύο διαστάσεων μπορεί να προσομοιώσει ένα σύστημα υπογείων υδάτων, αλλά μόνο όταν η διασπορά των τιμών για τις παραμέτρους σε μία συγκεκριμένη διάσταση μπορεί να ενσωματωθεί σε μία και μόνο τιμή. Ένα παράδειγμα είναι ένας υδροφορέας στον οποίο οι ταχύτητες της ροής και οι συγκεντρώσεις των επικίνδυνων ουσιών είναι εξίσου καταναμημένες στην κάθετη κατεύθυνση. Η έλλειψη τρισδιάστατων δεδομένων δεν αποτελεί δικαιολογία για την προσομοίωση στις δύο διαστάσεις. Όταν γίνεται εφαρμογή ενός μονο- ή δυσδιάστατου μοντέλου θα πρέπει να παρουσιάζεται μία λεπτομερής τεχνική δικαιολόγηση (επεξήγηση με τεχνικούς όρους) για την προσομοίωση του συστήματος σε λιγότερες από τρεις διαστάσεις.

1.5.2 Χρονική Προσομοίωση

Το επιλεγόμενο μοντέλο θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης της χρονικής κατάστασης του καθεστώτος του υπόγειου ύδατος. Τα μοντέλα σταθερής κατάστασης παρέχουν μέσα, μακροχρόνια αποτελέσματα. Τα παροδικά μοντέλα πρέπει να χρησιμοποιούνται όταν το καθεστώς του υπόγειου ύδατος μεταβάλλεται μέσα στο χρόνο. Άντληση, επαναφόρτιση, απελευθέρωση επικίνδυνων ουσιών και άλλες τάσεις μπορεί να μεταβάλλονται και αυτή η μεταβλητότητα θα πρέπει να προσομοιωθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτύχει τους στόχους της μοντελοποίησης.

(www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf)

1.5.3 Κυρίαρχες Εξισώσεις / Εξισώσεις Διαδικασιών

Τα στοιχεία αυτού του βήματος έχουν παρουσιαστεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. (www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf)

1.5.4 Ιδιότητες Πορώδων Μέσων

Αρκετές ιδιότητες γεωλογικών υλικών επιδρούν στην ροή του υπόγειου ύδατος και στην μεταφορά των επικίνδυνων ουσιών. Η πιο σημαντική ιδιότητα που ελέγχει την ροή είναι η υδραυλική αγωγιμότητα. Ιδιότητες όπως το ενεργό πορώδες και το ποσοστό αργιλικών και οργανικών υλικών ελέγχουν το βαθμό της κίνησης των επικίνδυνων ουσιών.

Στα φυσικά συστήματα οι ιδιότητες ενός πορώδους μέσου συνήθως ποικίλουν στις τρεις διαστάσεις. Αυτή η μεταβλητότητα μπορεί να πάρει την μορφή της ετερογένειας, της ανισοτροπίας ή και των δύο. Η ετερογένεια είναι η μεταβολή μίας ιδιότητας ενός υλικού από σημείο σε σημείο. Η ανισοτροπία είναι η μεταβολή μίας ιδιότητας, η οποία εξαρτάται από την διεύθυνση στην οποία μετράται. Σαν παράδειγμα, ιζήματα σε αποθηκευτικά ρεύματα (στα ρεύματα αυτά αποθηκεύονται ιζήματα, κοιτάσματα) μπορεί να είναι αρκετά ετερογενή, ξεκινώντας από κοιτάσματα χονδροειδών αμμοχαλίκων με υψηλή υδραυλική αγωγιμότητα μέχρι κοιτάσματα προσχώσεως με πολύ χαμηλότερη υδραυλική αγωγιμότητα. Επιπρόσθετα, αλλουβιακά κοιτάσματα συνήθως παρουσιάζουν ανισοτροπική υδραυλική αγωγιμότητα, λόγω μη τυχαίου προσανατολισμού των σωματιδίων που αποθηκεύονται στο τρεχούμενο νερό. Η υδραυλική αγωγιμότητα είναι μεγαλύτερη στην κανονική διεύθυνση του ρεύματος ροής απ'ότι στην διαγώνια κατεύθυνση των ρευμάτων και πολύ μεγαλύτερη απ'ότι στην κάθετη διεύθυνση.

Για να προσεγγίσει την συμπεριφορά του συστήματος υπογείων υδάτων ένα μοντέλο, θα πρέπει να είναι ικανό να προσομοιώσει την ετερογένεια και την ανισοτροπία του συστήματος όπως έχει αυτή αναγνωριστεί στο εννοιολογικό μοντέλο. Η έλλειψη επαρκών δεδομένων δεν είναι αποδεκτός λόγος για να θεωρήσουμε ένα σύστημα υπογείων υδάτων ως ομοιογενές και ισοτροπικό. Μία λεπτομερής τεχνικά αιτιολόγηση πρέπει να παρέχεται στην επιστημονική αναφορά για την αντιμετώπιση του συστήματος ως ομοιογενές ή ισοτροπικό.

(www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf)

1.5.5 Ιδιότητες Ρευστών

Στη απλούστερή τους μορφή, οι εξισώσεις που κυριαρχούν την ροή των υπογείων υδάτων εφαρμόζουν μόνο σε νερά με σταθερή πυκνότητα. Μερική μεταβολή στην πυκνότητα, που προκαλείται από την μεταβολή των συγκεντρώσεων των διαλυτών ουσιών μπορεί να είναι ασήμαντες και να παράγουν μικρό σφάλμα. Μεγάλες μεταβολές στην θερμοκρασία ή στην συγκέντρωση των διαλυτών ουσιών, παρόλ'αυτά, μπορεί να προκαλέσουν μεταβολές στην πυκνότητα που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την κατασκευή ενός ακριβούς μοντέλου. Αυτές οι περιπτώσεις απαιτούν μία περισσότερο πολύπλοκη μορφοποίηση των εξισώσεων που κυριαρχούν στη ροή των υπογείων υδάτων, και ένα μοντέλο που θα επιλύει αυτές τις εξισώσεις. Η

μοντελοποίηση πολλαπλών ρευστών φάσεων, όπως του αέρα και του νερού ή μη αναμιγνυόμενων οργανικών χημικών και νερού είναι πέρα από τους σκοπούς αυτών των οδηγιών, αλλά θα πρέπει να απευθύνονται σε εφαρμόσιμη έκταση.

(www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf)

1.6 Τεκμηρίωση Μοντέλου

Είτε πρόκειται για ένα μοντέλο για δημόσια περιοχή είτε για ένα μοντέλο διαθέσιμο εμπορικά είτε για μοντέλο που προορίζεται για ένα συγκεκριμένο πρόγραμμα, η τεκμηρίωση του πρέπει να παρέχεται στην επιστημονική αναφορά. Η τεκμηρίωση πρέπει να αναλύει τις εξισώσεις των διαδικασιών που λύθηκαν από το μοντέλο, τις υποθέσεις και τους περιορισμούς που υπήρχαν στην λύση του μοντέλου, τις αριθμητικές ή αναλυτικές τεχνικές λύσεις που υιοθετήθηκαν και την συζήτηση για την κατασκευή του κώδικα του μοντέλου. Οποιοσδήποτε μετατροπές έγιναν στο μοντέλο για την συγκεκριμένη μελέτη θα πρέπει να συζητηθούν. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να επιδειχτεί αναλυτική επανάληψη από ανεξάρτητους, καταρτισμένους σχεδιαστές μοντέλων για τα εννοιολογικά και μαθηματικά στοιχεία του μοντέλου ενώ θα πρέπει να παρουσιαστούν και παραδείγματα από προηγούμενες χρήσεις του μοντέλου. Η τεκμηρίωση μπορεί απλά να αναφέρεται σε δημόσιες πηγές που είναι διαθέσιμες να μελετηθούν, αλλά σε άλλες περιπτώσεις μία αναπαραγωγή της τεκμηρίωσης του μοντέλου ενδέχεται να απαιτείται σαν παράρτημα στην επιστημονική αναφορά.

Παρόλο που τα μοντέλα που αναπτύσσονται για μία συγκεκριμένη μελέτη, μπορεί να χρησιμοποιηθούν, μία εκτεταμένη τεκμηρίωση πρέπει να παρέχεται. Ο απαραίτητος χρόνος για την ανάπτυξη αυτής της τεκμηρίωσης και για την διαδικασία μίας αναλυτικής επανάληψης μπορεί να αποδειχθεί ότι είναι άπειρος. Με πολυάριθμα μοντέλα, τα οποία έχουν διαθέσιμη ποικιλία δυνατοτήτων, αναμένεται πως για τα νέα μοντέλα που αναπτύσσονται δεν θα υπάρχει συνηθισμένη χρήση για την ικανοποίηση αυτών των οδηγιών. Μοναδικοί αλγόριθμοι που δεν περιγράφονται στην τεκμηρίωση του μοντέλου ή που μπορεί να θεωρούνται εμπορικά μυστικά, δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται στα μοντέλα επειδή η καταλληλότητα του μοντέλου δεν μπορεί να ελεγχθεί ανεξάρτητα. Ιδιόκτητα μοντέλα (μοντέλα που ανήκουν σε κάποιον με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας) μπορούν να χρησιμοποιηθούν αλλά πλήρης τεκμηρίωση, συμπεριλαμβανομένου και «τρεξιμάτων» του μοντέλου για δείγματα, πρέπει να

παρέχονται. Αυτές οι προτάσεις σε καμία περίπτωση δεν υπάρχουν για να αποθαρρύνουν την χρήση τέτοιων (ιδιόκτητων) μοντέλων ή την ανάπτυξη νέων μοντέλων. (www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf)

1.7 Εφαρμογή Μοντέλου

Από την στιγμή που ένα αποδεκτό μοντέλο έχει επιλεγεί, η εφαρμογή του περιλαμβάνει τα βήματα της λήψης του μοντέλου και της τεκμηρίωσης του, της εγκατάστασης του στο σύστημα του υπολογιστή για χρήση αυτού και την επαλήθευση του αριθμητικού μοντέλου μέσω σύγκρισης των αποτελεσμάτων του με τις αναλυτικές λύσεις.

(www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf)

1.7.1 Εγκατάσταση Μοντέλου

Όταν χρησιμοποιούμε ένα εμπορικά διαθέσιμο ή ένα υπολογιστικό μοντέλο για δημόσια περιοχή, είναι σημαντικό να εγκαταστήσουμε το μοντέλο σωστά, σε ένα σύστημα παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιείται ή αυτό που προτείνεται στην τεκμηρίωση του μοντέλου ή στην οδηγό του χρήστη. Εάν ένα μοντέλο αλλαχθεί για να «τρέξει» σε ένα άλλο σύστημα, οι μετατροπές θα πρέπει να συζητηθούν στην επιστημονική αναφορά. Για να εξασφαλίσουμε πως η εγκατάσταση έχει ολοκληρωθεί σωστά, κάποιος πρέπει να αναπαράγει προβλήματα ως παραδείγματα, τα οποία δίνονται στην τεκμηρίωση.

(www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf)

1.7.2 Επαλήθευση Μοντέλου

Η επαλήθευση είναι η διαδικασία ελέγχου της ακρίβειας των αλγορίθμων που χρησιμοποιήθηκαν για να λυθούν οι απαραίτητες κύριες εξισώσεις και με αυτό τον τρόπο καταδεικνύεται ότι το μοντέλο πραγματικά προσεγγίζει της εξισώσεις των διαδικασιών για τις οποίες εφαρμόζεται. Αυτό μπορεί να ολοκληρωθεί με την λύση ενός προβλήματος χρησιμοποιώντας το μοντέλο και έπειτα σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτές που έχουν ληφθεί από μία αναλυτική λύση ή κάποιο άλλο αριθμητικό μοντέλο που έχει επαληθευτεί. Τα προβλήματα που επιλύονται για

επαλήθευση πρέπει να είναι παρόμοια με το πρόβλημα για το οποίο γίνεται η εφαρμογή του μοντέλου. Εάν ένα μοντέλο έχει επαληθευτεί στην λογοτεχνία ή στον οδηγό του χρήστη, θα πρέπει να παρουσιαστούν αποδείξεις γι' αυτό. Η δημοσίευση ενός μοντέλου ή της διαθεσιμότητάς του για πώληση δεν παρέχει επαλήθευση. Τα αποτελέσματα της επαλήθευσης θα πρέπει να παρουσιάζονται στην επιστημονική αναφορά. (www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf)

1.8 Προσομοίωση

Η ακόλουθη μέθοδος (οδηγός) εφαρμόζεται στην διαδικασία χρησιμοποίησης ενός μοντέλου, κατάλληλα επιλεγμένου και εφαρμοσμένου για να προσομοιώνει συγκεκριμένες συνθήκες μίας περιοχής. Η διαδικασία της εφαρμογής του μοντέλου για συγκεκριμένες περιπτώσεις μελέτης παρουσιάζονται με λεπτομέρεια από τους Anderson και Woessner (1992).

(www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf)

1.8.1 Όρια

Σε αυτό το στάδιο της οργάνωσης του μοντέλου, είναι επιθυμητό να αναπαραστήσουμε τα φυσικά όρια που προσδιορίστηκαν στο εννοιολογικό μοντέλο. Οι Franke, Reilly και Benett (1987) συζήτησαν για τον κατάλληλο καθορισμό των οριακών και των αρχικών συνθηκών. Οι οριακές συνθήκες μπορεί να είναι τριών τύπων: σταθερά όρια Dirichlet (περιλαμβάνουν όρια σταθερών υδραυλικών υψών), ειδικής ροής ή όρια Neumann (δεν περιλαμβάνουν όρια ροής) και αναμεμιγμένα ή όρια Cauchy. Εάν η συγκεκριμενοποίηση των φυσικών ορίων δεν μπορεί να γίνει (είναι απραγματοποίητη) ή εάν η ακριβής τοποθεσία των φυσικών ορίων δεν μπορεί να καθοριστεί, τότε μη φυσικά όρια μπορούν να καθοριστούν για τους σκοπούς του μοντέλου. Αυτά τα όρια θα πρέπει να επιλεγούν ούτως ώστε η τοποθεσία τους να μην έχει ουσιαστική επίδραση στα αποτελέσματα του μοντέλου στην περιοχή ενδιαφέροντος. Η επίδραση που έχουν τα όρια στα αποτελέσματα του μοντέλου μπορεί να καθοριστεί μετακινώντας τα όρια και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα σε ένα εσωτερικό τμήμα του μοντέλου. Αυτή η μέθοδος εξέτασης μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί όταν τα φυσικά όρια δεν μπορούν να τοποθετηθούν ακριβώς, όπως στην περίπτωση σφάλματος σε ίχνος της υπόγειας επιφάνειας (για το υπόγειο νερό).

1.8.2 Σχεδιασμός Δικτύων

Οι περισσότερες αριθμητικές μέθοδοι απαιτούν την συγκεκριμενοποίηση ενός δικτύου κόμβων ή κελιών μέσα στα όρια του μοντέλου. Ο κατάλληλος σχεδιασμός αυτού του δικτύου είναι σημαντικός για την ακριβή αναπαράσταση των ορίων, των πηγών και των εξόδων και άλλων χαρακτηριστικών γνωρισμάτων. Ένας καλός σχεδιασμός δικτύου βοηθάει επίσης στην εξασφάλιση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων στις περιοχές με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, μειώνοντας το μέγεθος των κόμβων σ' αυτές τις περιοχές και έτσι βελτιώνοντας την επίλυση (του προβλήματος). Μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία στο σχεδιασμό του πλέγματος από πολλές άλλες τεχνικές επίλυσης.

Οι Mercer και Faust απαριθμούν τις ακόλουθες οδηγίες για τον σχεδιασμό του πλέγματος:

- ✓ Εντοπισμός των «κόμβων των πηγαδιών» κοντά στην φυσική τοποθεσία ενός πηγαδιού άντλησης ή κοντά στο κέντρο ενός πεδίου πηγαδιών
- ✓ Ακριβής εντοπισμός των ορίων. Για μακρινά όρια, το πλέγμα μπορεί να απλωθεί, αλλά πρέπει να αποφευχθούν τα μεγάλα κενά κοντά σε μικρά
- ✓ Οι κόμβοι πρέπει να τοποθετηθούν πιο κοντά σε περιοχές όπου υπάρχουν μεγάλες χωρικές αλλαγές στην μεταβιβασιμότητα ή στο υδραυλικό ύψος
- ✓ Ευθυγράμμιση των αξόνων του πλέγματος στις κύριες διευθύνσεις της ανισοτροπίας.

Το δίκτυο κόμβων ή κελιών για μία προσομοίωση θα πρέπει σε ικανοποιητικό βαθμό να αντικατοπτρίζει τις οριακές συνθήκες και την γεωμετρία και να παρέχει τις απαραίτητες λεπτομέρειες για τις περιοχές με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Η λογική για τον σχεδιασμό ενός δικτύου θα πρέπει να συζητείται και η σχεδίαση θα πρέπει να απεικονίζεται γραφικά στην επιστημονική αναφορά.

1.8.3 Αρχικές Παράμετροι Εισόδου

Το μοντέλο θα πρέπει να έχει γενικά τιμές που θα έχουν καθοριστεί αρχικά για όλες τις παραμέτρους. Οι παράμετροι μπορεί να περιλαμβάνουν κατανομή υδραυλικού ύψους, υδραυλική αγωγιμότητα, μεταβιβασιμότητα, αποθηκευτικότητα, διασπορά, ανατροφοδότηση, άντληση, έγχυση κλπ, κάτι που εξαρτάται από τον τύπο του μοντέλου. Ο κατάλληλος καθορισμός των αρχικών συνθηκών είναι κρίσιμος στα μοντέλα μεταφοράς. Οι τιμές αυτών των παραμέτρων θα πρέπει να παρθούν από μετρήσεις στο πεδίο στην περιοχή. Γεωστατιστικές ή άλλες μέθοδοι μπορεί να είναι απαραίτητες για τη παρεμβολή του απαραίτητου συνόλου δεδομένων εισόδου από τα δεδομένα που μετρήθηκαν στο πεδίο.

Οι τιμές όλων των παραμέτρων εισόδου για κάθε κόμβο ή κελί του μοντέλου θα πρέπει να καθορίζονται σε συνοπτική ή γραφική μορφή. Η πηγή των τιμών για κάθε παράμετρο θα πρέπει να καθοριστεί. Όποιες μέθοδοι χρησιμοποιούνται στην διαδικασία μετρήσεων των δεδομένων του πεδίου για να πάρουν τις εισόδους του μοντέλου θα πρέπει επίσης να καθοριστούν και να συζητηθούν (αναφερθούν) στην τεχνική αναφορά.

(www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf)

1.8.4 Βαθμονόμηση

Η βαθμονόμηση είναι η επαναληπτική διαδικασία ρύθμισης των παραμέτρων στο μοντέλο, όπως η υδραυλική αγωγιμότητα, η μεταβιβασιμότητα και η διασπορά, ούτως ώστε να μπορεί επαρκώς το μοντέλο να προσεγγίσει το πραγματικό σύστημα υπογείων υδάτων. Αυτό ολοκληρώνεται με την σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με ένα σύνολο από τις παρατηρήσεις του πεδίου. Το σύνολο των δεδομένων βαθμονόμησης θα πρέπει να περιλαμβάνει μετρήσεις από την πλευρική και την κάθετη διεύθυνση της περιοχής του μοντέλου. Για ένα μοντέλο παροχής αυτά τα δεδομένα θα περιέχουν συχνά μετρήσεις του επιπέδου του νερού από πηγάδια ελέγχου και πιεζόμετρα. Η βαθμονόμηση για την παρατήρηση των κλίσεων του υδραυλικού ύψους σε σχέση με τις μετρήσεις του ύψους είναι πιο δύσκολη, αλλά μπορεί να είναι πιο παραστατική για προβλήματα που έχουν να κάνουν με την ταχύτητα ροής και την μεταφορά. Οι συγκεντρώσεις των επικίνδυνων ουσιών που

μετρώνται από δείγματα του υπόγειου ύδατος θα χρησιμοποιηθούν για την βαθμονόμηση ενός μοντέλου μεταφοράς τέτοιων επικίνδυνων ουσιών. Το σύνολο των δεδομένων βαθμονόμησης, συμπεριλαμβανομένου όλων των τοποθεσιών των σημείων (καταγραφής) των δεδομένων (πηγάδια ελέγχου κλπ) και οι τιμές του μανομετρικού ύψους ή των συγκεντρώσεων των επικίνδυνων ουσιών που έχουν χρησιμοποιηθεί για την βαθμονόμηση θα πρέπει να καθοριστούν στην επιστημονική αναφορά.

Η βαθμονόμηση αξιολογείται αναλύοντας τα υπόλοιπα ή τις διαφορές ανάμεσα στις παρατηρούμενες και στις προσομοιωμένες τιμές, σε συγκεκριμένες τοποθεσίες. Η βαθμονόμηση μπορεί να διευθετηθεί με τη μέθοδο δοκιμής και σφάλματος, αλλάζοντας τις τιμές των παραμέτρων μέχρι να υπάρξει μία καλή σχέση ανάμεσα στην παρατηρούμενη συμπεριφορά του καθεστώτος του υπόγειου ύδατος και στα αποτελέσματα του μοντέλου. Οι στόχοι της βαθμονόμησης θα πρέπει να δηλώνονται στο σχέδιο για την εξασφάλιση της ποιότητας. Γραμμικοί προγραμματισμοί ή άλλες τεχνικές βελτιστοποίησης μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την βαθμονόμηση του μοντέλου (Cooley, 1977 ; Carrera και Neuman, 1986). Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την βαθμονόμηση και ο αριθμός των επαναλήψεων που είναι απαραίτητος για να επιτύχουμε την βαθμονόμηση θα πρέπει να καθορίζεται στην επιστημονική αναφορά. Η βαθμονόμηση θα πρέπει να προχωράει αρχικά με την αλλαγή των παραμέτρων εκείνων με το χαμηλότερο επίπεδο ακριβείας και έπειτα με καλό συντονισμό της προσομοίωσης ρυθμίζοντας τις υπόλοιπες παραμέτρους. Οι παράμετροι θα πρέπει να ρυθμιστούν μέσα σε ένα δικαιολογημένο, περιορισμένο εύρος συγγενικό των τιμών που μετρήθηκαν στο πεδίο. Τα κριτήρια για μία αποδεκτή βαθμονόμηση θα πρέπει να καθορίζονται σε ένα κατάλληλο σχέδιο εξασφάλισης της ποιότητας. Η λογική και οι υποθέσεις που χρησιμοποιούνται για την ρύθμιση των υδρογεωλογικών παραμέτρων κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης θα πρέπει να παρουσιάζονται στην επιστημονική αναφορά.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων ενός μοντέλου και των παρατηρούμενων τιμών πρέπει να παρουσιάζεται σε συνοπτική και γραφική μορφοποίηση. Οι μετρήσεις του μανομετρικού ύψους ή των συγκεντρώσεων των επικίνδυνων ουσιών πρέπει να παρουσιάζονται με τη μορφή χαρτών των γραμμών ροής και διαγώνιων τμημάτων των παρατηρούμενων και των προσομοιωμένων τιμών. Το γενικό σχήμα της μανομετρικής επιφάνειας θα πρέπει να είναι παρόμοιο, συμπεριλαμβανομένου και

των αναχωμάτων, με τις υποπίεσεις και τις γενικές διευθύνσεις της ροής. Ένα διάγραμμα με x και y άξονες των παρατηρούμενων με τα προσομοιωμένα ύψη θα δείχνει το μέγεθος και οποιεσδήποτε τάσεις στα υπόλοιπα. Ένα ισοζύγιο μάζας της ροής του νερού και της μάζας των επικίνδυνων ουσιών (για μοντέλα μεταφοράς) θα πρέπει να παρουσιάζεται για το βαθμονομημένο μοντέλο.

[\(www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf\)](http://www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf)

1.8.5 Τελικές Παράμετροι Εισόδου

Η διαδικασία βαθμονόμησης περιλαμβάνει την αλλαγή των αρχικών παραμέτρων εισόδου, για την προσομοίωση ενός συνόλου δεδομένων από παρατηρήσεις στο πεδίο. Αυτά τα αποτελέσματα στις παραμέτρους του μοντέλου δεν έχουν τις δικές τους μετρούμενες, από το πεδίο, τιμές. Ο σχεδιαστής του μοντέλου πρέπει να δείξει ότι αυτές οι τιμές των παραμέτρων εξακολουθούν και ανήκουν σε ένα δικαιολογημένο εύρος (π.χ. ότι το μοντέλο είναι ακόμα φυσικά ρεαλιστικό για τις συνθήκες της περιοχής).

Οι τελικές τιμές για όλες τις παραμέτρους που θα χρησιμοποιηθούν στο βαθμονομημένο μοντέλο θα πρέπει να μπουν σε μία λίστα σε συνοπτική μορφή ή να παρουσιαστούν σε γραφική μορφή για κάθε κόμβο ή κελί. Αυτές θα πρέπει να συγκριθούν με τις αρχικές παραμέτρους εισόδου και να ελεγχθεί για σιγουριά ότι δικαιολογούνται φυσικά για το καθεστώς αυτό το υπόγειο ύδατος (δηλαδή ότι οι τιμές που πήραμε έχουν φυσική υπόσταση και δικαιολογούν την κατάσταση που συναντάμε στο υπόγειο νερό).

[\(www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf\)](http://www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf)

1.8.6 Αξιολόγηση

Η διαδικασία βαθμονόμησης, ρυθμίζει τις παραμέτρους στο μοντέλο μέχρις ότου η προσομοίωση να ταιριάζει σε μεγάλο βαθμό με τις παρατηρούμενες τιμές και δημιουργεί μία λύση που δεν είναι μοναδική. Πολλοί διαφορετικοί συνδυασμοί των παραμέτρων μπορούν να δώσουν αποτελέσματα που πληρούν τα κριτήρια της βαθμονόμησης ; κάθε συνδυασμός μπορεί να ταιριάζει καλύτερα σε μερικά τμήματα της περιοχής και χειρότερα σε άλλα. Γι' αυτό το λόγο η βαθμονόμηση από μόνη της δεν μπορεί να γίνει δεκτή για την επικύρωση της ακρίβειας του μοντέλου. Ο Freyberg

(1988) έδειξε ότι μία καλή βαθμονόμηση ενός μοντέλου δεν οδηγεί απαραίτητα σε καλές προδιαγραφές πρόβλεψης. Γι' αυτό το λόγο, το μοντέλο πρέπει να αξιολογείται, εάν αυτό είναι δυνατόν, για περαιτέρω εξασφάλιση ότι αντιπροσωπεύει ακριβώς το καθεστώς του υπόγειου ύδατος.

Η αξιολόγηση είναι η διαδικασία σύγκρισης του βαθμονομημένου μοντέλου με ένα άλλο, ανεξάρτητο, σύνολο δεδομένων για το καθεστώς του υπόγειου ύδατος. Αυτή πρέπει να είναι άλλη μία ιστορική περίοδος με διαφορετικές τάσεις, οι οποίες θα δείξουν τη δυνατότητα πρόβλεψης για την περιοχή, του βαθμονομημένου μοντέλου. Η χρήση δύο συνόλων δεδομένων, εάν αυτά επιβεβαιώνουν το ένα το άλλο, προσδίδουν ένα βαθμό ασφάλειας και σιγουριάς. Η ποιότητα του τεστ της αξιολόγησης εξαρτάται σε ένα βαθμό από το πόσο ανώτερη της πίεσης που δέχεται από τα δεδομένα βαθμονόμησης, από τα οποία εξαρτάται, είναι η προσομοίωση της περιοχής (van der Heijde, 1987). Εάν το βαθμονομημένο μοντέλο προσεγγίζει πραγματικά την φυσική συμπεριφορά του καθεστώτος του υπόγειου ύδατος, θα πρέπει να παρέχει μία πραγματικά δικαιολογημένη προσομοίωση για το σύνολο των δεδομένων της αξιολόγησης.

Αποτυχία του μοντέλου στην προσέγγιση του συνόλου των δεδομένων της αξιολόγησης δείχνει την ανάγκη για καλύτερη βαθμονόμηση ή ότι μία συγκεκριμένη διαδικασία έχει αγνοηθεί ή δεν έχει καθοριστεί κατάλληλα. Σ' αυτό το στάδιο, το μοντέλο μπορεί να βαθμονομηθεί περαιτέρω με το σύνολο των δεδομένων της αξιολόγησης και ύστερα να ελεγχθεί συγκριτικά με το σύνολο των δεδομένων της βαθμονόμησης. Τα επαναληπτική διαδικασία μπορεί να συνεχιστεί μέχρι το μοντέλο να μπορεί να προσομοιώσει και τα δύο σύνολα δεδομένων. Εάν αυτό δεν γίνεται να επιτευχθεί, ενδέχεται να είναι αναγκαίο να επαναπροσδιοριστεί το εννοιολογικό μοντέλο.

Το σύνολο των δεδομένων της αξιολόγησης, συμπεριλαμβανομένων των μετρήσεων των τοποθεσιών, των πηγαδιών ελέγχου, κλπ και οι τιμές των μανομετρικών υψών ή των συγκεντρώσεων των επικίνδυνων ουσιών, που χρησιμοποιούνται για βαθμονόμηση, θα πρέπει να συγκεκριμενοποιούνται για την επιστημονική αναφορά. Τα αποτελέσματα του μοντέλου και οι παρατηρούμενες τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση θα πρέπει να παρουσιαστούν σε συνοπτική και γραφική μορφή όπως συζητήθηκε στο κομμάτι της βαθμονόμησης παραπάνω.

www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf

1.8.7 Ανάλυση ευαισθησίας

Η ανάλυση ευαισθησίας είναι η διαδικασία χαρακτηρισμού των επιδράσεων των αλλαγών στις παραμέτρους ή στις οριακές συνθήκες στη συμπεριφορά του βαθμονομημένου μοντέλου. Η ανάλυση ευαισθησίας μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο πριν όσο και μετά την βαθμονόμηση του μοντέλου. Πριν από την βαθμονόμηση, η ανάλυση ευαισθησίας μπορεί να αναγνωρίσει τους σημαντικότερους παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την διάρκεια της βαθμονόμησης. Όταν πραγματοποιείται μετά την βαθμονόμηση, η ανάλυση ευαισθησίας βοηθάει να καθοριστούν οι επιδράσεις των παραμέτρων στα αποτελέσματα του μοντέλου.

Η ανάλυση ευαισθησίας ολοκληρώνεται με την αλλαγή των παραμέτρων του μοντέλου και των οριακών συνθηκών μέσα σε λογικά όρια και παρατηρώντας τις αλλαγές στα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Εάν μία μικρή αλλαγή σε μία παράμετρο παράγει μία μεγάλη αλλαγή στα αποτελέσματα του μοντέλου, τότε το μοντέλο είναι ευαίσθητο σ' αυτή τη παράμετρο. Οι ευαίσθητες παράμετροι πρέπει να χαρακτηρίζονται από καλά δεδομένα πεδίου για τη μείωση της αβεβαιότητας στα αποτελέσματα του μοντέλου. Παρατηρήθηκε από τον van der Heijde (1987) πως όταν τα μοντέλα είναι ανά ζεύγη, όπως μοντέλο ροής και μοντέλο μεταφοράς, η μελέτη της μετάδοσης των λαθών και η αύξηση της αβεβαιότητας πρέπει να είναι κομμάτι της ανάλυσης ευαισθησίας. Η Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των Η.Π.Α. (US EPA) δίνει ένα παράδειγμα ανάλυσης ευαισθησίας για μοντέλο υπογείων υδάτων για τη λεκάνη του San Gabriel (US EPA, 1988b). Επειδή το θέμα αυτής της διπλωματικής είναι η πραγματοποίηση ανάλυσης ευαισθησίας στον υπόγειο υδροφορέα της περιοχής Λιμένα Χερσονήσου-Ηρακλείου, παρατίθεται παρακάτω μία περισσότερο λεπτομερής ανάλυση αυτού του τμήματος.

([www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP Groundwater Modelling.pdf](http://www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf))

1.8.8 Πρόβλεψη

Όταν το μοντέλο έχει πλέον βαθμονομηθεί και αξιολογηθεί μπορεί να χρειαστεί να προσομοιώσει την μελλοντική κίνηση του υπόγειου ύδατος και των επικίνδυνων ουσιών ή να προσομοιώσει την αντίδραση του συστήματος των υπογείων υδάτων σε διάφορα σενάρια κινήσεων εξυγίανσης. Συνθήκες που είναι εντελώς διαφορετικές από τις συνθήκες της βαθμονόμησης και της αξιολόγησης,

όπως υψηλό βαθμό άντλησης ή αποφόρτισης μπορεί να απορρίψουν το μοντέλο ως αναπαράσταση του φυσικού συστήματος. Η αντίδραση του μοντέλου σε ποικιλία σεναρίων πρόβλεψης θα πρέπει να παρουσιάζεται και σε αφηγηματική και σε γραφική μορφή.

www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf

1.9 Ανάλυση Σφάλματος

Υπάρχουν πολλές πηγές λάθους στην μοντελοποίηση των υπογείων υδάτων. Αυτά τα λάθη χωρίζονται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες:

- Θεωρητικά λάθη είναι αυτά που εμπλέκουν την εφαρμογή ενός ακατάλληλου μοντέλου στην κατάσταση ενός πεδίου. Για την αποφυγή τέτοιων σφαλμάτων, ένα αξιόλογο θεωρητικό μοντέλο του καθεστώτος του υπόγειου ύδατος πρέπει να αναπτυχθεί και όλες οι υποθέσεις και οι περιορισμοί του μαθηματικού μοντέλου πρέπει να γίνουν κατανοητές. Ακολουθώντας τον οδηγό για θεωρητικά μοντέλα και την επιλογή μοντέλου θα προφυλαχούμε ενάντια σε τέτοια θεωρητικά σφάλματα.
- Σφάλματα δεδομένων είναι αυτά στα οποία οδηγούμαστε από τη χρήση μη αντιπροσωπευτικών δεδομένων για την περιγραφή των συνθηκών του πεδίου. Όλα τα δεδομένα που συλλέγονται και χρησιμοποιούνται στην μοντελοποίηση πρέπει να είναι υψηλής ποιότητας.
- Σφάλματα αποκοπής εμφανίζονται όταν διαφορικές εξισώσεις αντικαθίστανται από ένα σύνολο αλγεβρικών εξισώσεων (Mercer και Faust, 1980a). Το μέγεθος των σφαλμάτων αποκοπής μπορεί να προσδιοριστεί από επαναλήψεις της λειτουργίας του μοντέλου με μικρότερα διαστήματα μεταξύ των κόμβων και μικρότερα χρονικά βήματα. Σημαντικές αλλαγές στα αποτελέσματα του μοντέλου υποδεικνύουν σφάλματα αποκοπής. Η μείωση των χρονικών βημάτων και των διαστημάτων μεταξύ των κόμβων θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μέχρι τα σφάλματα αποκοπής γίνουν ασήμαντα (μηδαμινά).
- Λάθη στρογγυλοποίησης επίσης εμφανίζονται στην αριθμητική λύση, συνέπεια της πεπερασμένης ακρίβειας των υπολογισμών του υπολογιστή. Σε

ένα καλώς κωδικοποιημένο υπολογιστικό μοντέλο, αυτή είναι γενικότερα η λιγότερο σημαντική πηγή σφαλμάτων.

Όλες οι βασικές πηγές σφαλμάτων στις προσομοιώσεις πρέπει να αξιολογηθούν και να συζητηθούν στην επιστημονική αναφορά. Το συνολικό μέγεθος όλων των σφαλμάτων πρέπει να υπολογιστεί.

(www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf)

1.10 Επαλήθευση

Αυτός ο οδηγός καλύπτει την χρήση των μοντέλων για της πρόβλεψης της συμπεριφοράς των υπογείων υδάτων στο μέλλον. Ο έλεγχος συχνά θα εμφανιστεί μετά την ολοκλήρωση της μελέτης της μοντελοποίησης. Δυστυχώς, σε σπάνιες περιπτώσεις συνηθίζεται να πραγματοποιείται συνεχής έλεγχος και στη συνέχεια βελτίωση της προσομοίωσης των υπογείων υδάτων. Ο Konikow (1986) δήλωσε πως εάν ένα μοντέλο υπάρχει για να χρησιμοποιηθεί για πρόβλεψη, τότε θα πρέπει περιοδικά να επαληθεύεται ή να αναβαθμονομείται για να συμπεριλάβει νέες πληροφορίες. Την στιγμή της ολοκλήρωσης της φάσης πρόβλεψης μίας μελέτης μοντελοποίησης, θα έπρεπε να γίνεται ένα σχέδιο για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων του μοντέλου τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο. Αυτό μπορεί να ολοκληρώνεται με συνεχή έλεγχο και με την εγκατάσταση πρόσθετων πηγαδιών ή πιεζομέτρων.

Ο Konikow (1986) και οι Lewis και Goldstein (1982) έχουν συγκρίνει τα παρατηρούμενα δεδομένα από μία περίοδο σαν αποτέλεσμα μίας προσπάθειας μοντελοποίησης με τα προβλεπόμενα αποτελέσματα. Οι προβλέψεις των μοντέλων έχουν δείξει πως είναι μόνο συγκρατημένα επιτυχείς σε πολλές περιπτώσεις. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν την τάση ανάγκης για επαλήθευση ούτως ώστε να βελτιωθεί η προσομοίωση ή τα αποτελέσματα την κίνησης εξυγίανσης.

(www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf)

1.11 Ερμηνεία και Αναφορά των Αποτελεσμάτων

Η επιστημονική αναφορά που περιγράφει την μελέτη της μοντελοποίησης θα πρέπει να παρουσιάζει πληροφορίες για όλα τα στοιχεία που συζητήθηκαν παραπάνω με ένα τρόπο που επιτρέπει ανεξάρτητη επανάληψη καθώς και αναπαραγωγή των

αποτελεσμάτων από τις πληροφορίες που έχουν υποβληθεί. Μία αφηγηματική περιγραφή και ερμηνεία της διαδικασίας και των αποτελεσμάτων της μελέτης μοντελοποίησης πρέπει να παρουσιάζεται στην επιστημονική αναφορά. Το εύρος των πιθανών τιμών των διαδικασιών που μας ενδιαφέρουν και ο βαθμός αξιοπιστία στα αποτελέσματα της μοντελοποίησης θα πρέπει να συζητηθούν. Όλα τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης θα πρέπει να αξιολογηθούν κριτικά για να εξασφαλίσουμε πως είναι φυσικά λογικά (δηλαδή οι τιμές που θα πάρουμε θα πρέπει να είναι κ φυσιολογικές και μέσα σε λογικά όρια). Ο τρόπος με τον οποίο τα αποτελέσματα πρέπει να χρησιμοποιηθούν στη λήψη αποφάσεων σχετικά με την περιοχή θα πρέπει επίσης να παρουσιαστεί. Τα αποτελέσματα των υπολογιστικών μοντέλων μπορούν να εμφανιστούν περισσότερο ακριβή ή να εξασφαλίσουν ότι είναι πραγματικά (ακριβή). Για να αντιδράσει σ' αυτή τη τάση, το Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας (National Research Council, 1989) κατέληξε, «όλα τα μοντέλα πρέπει να δηλώνουν ποσοτικά , όσο το δυνατόν περισσότερο, και αν όχι ποσοτικά τότε ποιοτικά, το βαθμό και την διεύθυνση της αβεβαιότητας στα αποτελέσματά τους και το χρονικό όριο πάνω από το οποίο η πρόβλεψη του μοντέλου μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή». Επιπρόσθετα, η αβεβαιότητα πρέπει να τονιστεί οποτεδήποτε τα αποτελέσματα του μοντέλου συζητώνται. Μόνο με αυτή την πληροφορία μπορεί ένας ιθύνων να δώσει στα αποτελέσματα της μοντελοποίησης την κατάλληλη βαρύτητα όταν εξετάζονται μαζί με άλλες πληροφορίες.

Ερμηνείες των αποτελεσμάτων των μοντέλων πρέπει να αναφέρονται με σαφή και συνοπτικό τρόπο. Οι ερωτήσεις που τίθενται στους στόχους της μοντελοποίησης πρέπει να έχουν εξεταστεί πλήρως ή να προτείνεται επιπρόσθετη μελέτη. Διαβεβαίωση ότι το QA σχέδιο ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια της μελέτης της μοντελοποίησης πρέπει να παρουσιάζεται.

(www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf)

2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Ο στόχος της ανάλυσης ευαισθησίας είναι να υπολογίσει το βαθμό αλλαγής των αποτελεσμάτων ενός μοντέλου σε αντιστοιχία με τις αλλαγές στα δεδομένα εισόδου. Αυτή η γνώση είναι σημαντική για: (α) την αξιολόγηση της εφαρμοσιμότητας του μοντέλου, (β) τον καθορισμό των παραμέτρων για τις οποίες είναι απαραίτητο να έχουμε περισσότερο ακριβείς τιμές και, (γ) την κατανόηση του συστήματος το οποίο μοντελοποιείται. Η επιλογή της μεθόδου με την οποία θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση ευαισθησίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από (α) τον βαθμό ευαισθησίας που υιοθετείται, (β) τη επιθυμητή ακρίβεια στους υπολογισμούς του βαθμού ευαισθησίας που έχουμε επιλέξει και, (γ) το υπολογιστικό κόστος.

Σε γενικές γραμμές, ο όρος ανάλυση ευαισθησίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τρόπο με τον οποίο έχει επιλεγεί να γίνει η ανάλυση ευαισθησίας. Ο Πίνακας B-1-1 δείχνει κάποια από τα μέτρα που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια της ανάλυσης ευαισθησίας ενός μαθηματικού μοντέλου της μορφής

$$\mathcal{F}(u, k) = 0$$

όπου k είναι ένα σύνολο m παραμέτρων, και u είναι ένα διάνυσμα με n μεταβλητές εξόδου.

Βασιζόμενοι στην επιλογή του μέτρου για τον υπολογισμό της ευαισθησίας και στη μεταβλητότητα των παραμέτρων του μοντέλου, οι μέθοδοι ανάλυσης ευαισθησίας μπορούν ευρέως να ταξινομηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- ⇒ *Μεταβλητότητα παραμέτρων ή μορφοποίησης μοντέλου:* Σε αυτή την προσέγγιση το μοντέλο «τρέχει» για ένα σύνολο σημείων που λειτουργούν ως δείγμα (διαφορετικοί συνδυασμοί των παραμέτρων που μας ενδιαφέρουν). Τα μέτρα ευαισθησίας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν εδώ είναι η αντίδραση από την αυθαίρετη παραλλαγή παραμέτρου, η ομαλοποιημένη απάντηση και τα ακρότατα. Από αυτά τα μέτρα, οι ακρότατες τιμές έχουν είναι συχνά κρίσιμης σημαντικότητας, στις περιβαλλοντικές εφαρμογές.
- ⇒ *Ανάλυση ευαισθησίας ευρέος πεδίου:* Εδώ, η ευαισθησία εμπλέκει την συμπεριφορά του συστήματος σχετικά με όλο το εύρος της μεταβλητότητας

των παραμέτρων, και συχνά λαμβάνοντας υπόψιν την αβεβαιότητα που εμπλέκεται στον υπολογισμό των παραμέτρων.

⇒ *Ανάλυση ευαισθησίας τοπικής κλίμακας*: Εδώ, η προσοχή στρέφεται στον υπολογισμό της ευαισθησίας του μοντέλου σχετικά με τη μεταβλητότητα των δεδομένων εισόδου και της μεταβλητότητας κοντά σε ένα σημείο του δείγματος.

(www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf)

3. ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ / ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Οι συμβατικές μέθοδοι για την ανάλυση ευαισθησίας και τη διάδοση της αβεβαιότητας μπορούν να ταξινομηθούν ευρέως σε τέσσερις κατηγορίες: (α) «τέστ ευαισθησίας», (β) αναλυτικές μέθοδοι, (γ) μέθοδοι βασιζόμενες σε δείγματα και, (δ) μέθοδοι βασιζόμενες στην υπολογιστική άλγεβρα.

Sensitivity Measure	Definition
Response from arbitrary parameter variation	$u = u(\bar{k} + \delta k) - u(k)$
Normalized Response	$D_i = \frac{\delta u_i}{u_i(\bar{k})}$
Average Response	$\overline{u_i(\bar{k})} = \frac{\int \dots \int u_i(\bar{k}) d\mathbf{k}}{\int \dots \int d\mathbf{k}}$
Expected Value	$\langle u_i(\mathbf{k}) \rangle = \int \dots \int u_i(\mathbf{k}) P(\mathbf{k}) d\mathbf{k}$
Variance	$\delta_i^2(\mathbf{k}) = \langle u_i(\mathbf{k})^2 \rangle - \langle u_i(\mathbf{k}) \rangle^2$
Extrema	$\max [u_i(\mathbf{k})], \min [u_i(\mathbf{k})]$
Local Gradient Approximation	$\delta u \approx [S] \delta \mathbf{k} ; S_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial k_j}$
Normalized Gradient	$S_{ij}^n = \frac{\bar{k}_j}{u_i(\bar{k})} \frac{\partial u_i}{\partial k_j}$

Πίνακας B-1-1 : Σύνοψη των μέτρων ευαισθησίας που εμπλέκονται στην ανάλυση ευαισθησίας

(McRae et al., 1982)

Τα τέστ ευαισθησίας περιλαμβάνουν την απόκριση του μοντέλου για ένα σύνολο αλλαγών στην μορφοποίηση του, και για ένα επιλεγμένο συνδυασμό παραμέτρων. Οι αναλυτικές μέθοδοι περιλαμβάνουν είτε την διαφοροποίηση των εξισώσεων του μοντέλου και συνεπακόλουθη επίλυση ενός συνόλου βοηθητικών εξισώσεων ευαισθησίας, είτε την αναμόρφωση του κανονικού μοντέλου χρησιμοποιώντας στοχαστικές αλγεβρικές / διαφορικές εξισώσεις. Από την άλλη πλευρά οι μέθοδοι που βασίζονται στα δείγματα περιλαμβάνουν «τρεξίματα» του κανονικού μοντέλου για ένα σύνολο δεδομένων εισόδου / συνδυασμών παραμέτρων (σημεία δείγματος) και υπολογισμό της ευαισθησίας / αβεβαιότητας χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα του μοντέλου σε αυτά τα σημεία. Ακόμα μια μέθοδος ανάλυσης ευαισθησίας βασίζεται στον διαφορετικό χειρισμό του υπολογιστικού κώδικα του μοντέλου και καλείται αυτόματα τη διαφοροποίηση.

Αξίζει να αναφέρουμε πως οι αναλυτικές μέθοδοι διακρίνονται στις:

- Μεθόδους διαφορικής ανάλυσης
- Μέθοδο συνάρτησης του Green
- Μέθοδος στοχαστικών πεπερασμένων στοιχείων φασματικής βάσεως και,
- Μέθοδος της ευθείας σύνδεσης / αποσύνδεσης και οι μέθοδοι που βασίζονται σε δείγματα στις:
- Μέθοδος Monte Carlo και Latin Hypercube Sampling
- Ανάλυση ευαισθησίας εύρους Fourier (FAST)
- Μέθοδοι αξιοπιστίας και,
- Μέθοδοι επιφανειακής απόκρισης

(www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf)

ΜΕΡΟΣ Γ
**«ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ-ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ/ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ-
ΜΟΝΤΕΛΟ PTC (ArgusOne)-ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ
ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ»**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο
«ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ/ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ»

1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ

1.1 Γενικά

Η περιοχή της Χερσονήσου βρίσκεται περί τα 25 km ανατολικά του Ηρακλείου, στην Βόρεια παράκτια ζώνη. Βρίσκεται πολύ κοντά στο λιμάνι και το αεροδρόμιο του Ηρακλείου Κρήτης, επομένως πολύ κοντά στις πύλες εισόδου της πόλης. Πρόκειται για μία περιοχή με ιδιαίτερα έντονη οικιστική ανάπτυξη. Η δε τουριστική ανάπτυξη είναι ραγδαία, όπου ειδικά την περίοδο του καλοκαιριού, ο πληθυσμός της περιοχής αυξάνει κατακόρυφα λόγω της τεράστιας εισροής τουριστών. Παρακάτω παρατίθεται ένας χάρτης που δείχνει την θέση της Χερσονήσου μέσα στο νομό Ηρακλείου (Εικόνα Γ-1-1):



Εικόνα Γ-1-1 : Θέση Λιμένα χερσονήσου στο νομό Ηρακλείου

(www.vres.gr/state.php?state_id=17)

Όσον αφορά το Λιμένα φαίνεται από την παραπάνω εικόνα ότι είναι παραθαλάσσιος και η περιοχή κύριας ανάπτυξης του Δήμου, ιδιαίτερα της τουριστικής. Οι υπόλοιπες περιοχές βρίσκονται στην ενδοχώρα με κύρια ενασχόληση τη γεωργία. Σήμερα, το μεγαλύτερο ποσοστό του πληθυσμού (10.500 κάτοικοι) ασχολείται με τον τριτογενή τομέα παραγωγής.

Γενικά, πρόκειται για μία περιοχή, στην οποία ο τουρισμός αποτελεί τη βασική πηγή οικονομικής δραστηριότητας, αλλά λειτουργεί και ως δείγμα των κοινωνικών και περιβαλλοντικών αλλαγών που υφίσταται η περιοχή.

(Στεφανόπουλος Κυριάκος, Οκτώβριος 2004)

1.2 Κλίμα

Το κλίμα της Κρήτης είναι σε γενικές γραμμές ήπιο και υγιεινό και χαρακτηρίζεται ως εύκρατο μεσογειακό, με εξαίρεση τους μεγάλους ορεινούς όγκους, όπου εκεί γίνεται ηπειρωτικό. Το δε καλοκαίρι είναι ζεστό και ξηρό με ελάχιστες νεφώσεις αλλά και με μεγάλη ηλιοφάνεια, ενώ έχουμε ήπιο χειμώνα. Βέβαια, κάποιες φορές ενδέχεται να έχουμε κρύο χειμώνα με χιονοπτώσεις και θερμοκρασία σε χαμηλά επίπεδα. Γενικά, η μέση θερμοκρασία αγγίζει τους 15 °C.

Όσον αφορά το κλίμα της περιοχής της Χερσονήσου. Είναι τυπικά μεσογειακό. Οι περίοδος των βροχοπτώσεων προσδιορίζεται από τον Οκτώβριο μέχρι και το Μάρτιο, ενώ κατά τη θερινή περίοδο παρατηρείται ξηρό και θερμό κλίμα. Εδώ η μέση τιμή της θερμοκρασίας είναι λίγο υψηλότερη, στους 19 °C.

(Στεφανόπουλος Κυριάκος, Οκτώβριος 2004)

1.3 Χλωρίδα-Πανίδα

1.3.1 Χλωρίδα

Όσον αφορά την χλωρίδα, παρατηρούνται οικοσυστήματα πεδινής και ημιορεινής ζώνης και επικρατεί αυτοφυής και υποβαθμισμένη βλάστηση. Γενικά αποτελείται από δέντρα, θάμνους και ποώδη βλάστηση. Τέλος μπορούμε να αναφέρουμε πως η συγκεκριμένη περιοχή παρουσιάζει ένα είδους μωσαϊκού από τα προαναφερθέντα είδη καθώς και από παλιά ελαιόδεντρα που όμως τώρα έχουν εγκαταλειφθεί. **(Στεφανόπουλος Κυριάκος, Οκτώβριος 2004)**

1.3.2 Πανίδα

Όσον αφορά την πανίδα της περιοχής, πρέπει να σημειώσουμε πως δεν είναι όπως άλλοτε λόγω των διαταραχών που έχουν προκαλέσει οι ανθρώπινες παρεμβάσεις, παρόλο που οι κλιματικές συνθήκες στην Κρήτη ευνοούν την ανάπτυξη σημαντικής πανίδας. Έτσι τόσο ο αριθμός των θηλαστικών όσο και των πτηνών είναι περιορισμένος. **(Στεφανόπουλος Κυριάκος, Οκτώβριος 2004)**

Αναφέραμε στην αρχή πως στην περιοχή της Χερσονήσου εμφανίζεται ένας μεγάλος αριθμός τουριστών ιδιαίτερα κατά τη θερινή περίοδο. Αυτός ο τεράστιος αριθμός τουριστών θα παρουσιάζει μία αρκετά μεγάλη κατανάλωση πόσιμου νερού, η οποία έρχεται να προστεθεί στην ήδη υπάρχουσα των μόνιμων κατοίκων της περιοχής. Άρα ενδιαφέρον παρουσιάζει η μεταβολή στο ύψος του νερού (υδραυλικά ύψη) εντός του υδροφορέα της περιοχής, αφού από αυτόν τροφοδοτούνται τόσο οι μόνιμοι κάτοικοι, όσο και οι τουρίστες στην περιοχή και ακριβώς επειδή παρουσιάζονται αυξημένες ανάγκες στην κατανάλωση ύδατος, ειδικότερα το καλοκαίρι, είναι σκόπιμο και λογικό και σκόπιμο να πραγματοποιηθεί ανάλυση ευαισθησίας του υδροφορέα σχετικά με τις αλλαγές κάποιων παραμέτρων και πόσο αυτές επηρεάζουν το ύψος και την διαθέσιμη ποσότητα νερού, που θα αναφέρουμε παρακάτω.

2. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 Γενικά

Ο ορεινός όγκος της Δίκτης ανήκει στο μεγαλύτερο μέρος του στο Νομό Λασιθίου, ενώ στο Νομό Ηρακλείου ανήκει το Δυτικό τμήμα.

Δομείται κυρίως από ανθρακικούς σχηματισμούς του προνεογενούς και είναι ένα από τα κυριότερα καρστικά υδροσυστήματα της Κρήτης μετά τα Λευκά όρη και τον Ψηλορείτη.

Τον κύριο κορμό του ορεινού όγκου αποτελούν οι Πλακώδεις ασβεστόλιθοι της αυτόχθονης γεωλογικής ενότητας επάνω στην οποία έχουν επωθηθεί οι αλλόχθονες γεωλογικές ενότητες της Φυλλιτικής – Χαλαζιτικής σειράς, της Τρίπολης, της Πίνδου και των οφιολίθων – κρυσταλλοσχιστοδών.

Το νερό της βροχής που κατεισδύει στους ανθρακικούς σχηματισμούς τροφοδοτεί τις περιμετρικά αναβλύζουσες πηγές και υπόγειες υδροφορίες στα κράσπεδά του.

Επίσης πρέπει να αναφέρουμε πως ο ορεινός όγκος της Δίκτης σαν ένα αυτόνομο καρστικό υδροσύστημα θα πρέπει να μελετηθεί ενιαία, για να είναι ορθότερη η μελέτη μας.

Η περιοχή που εμείς αναφέρουμε ως Υδρογεωλογική ενότητα καρστικού υδροσυστήματος Δίκτης και βρίσκεται στην περιοχή μελέτης (βόρειο τμήμα Νομού Ηρακλείου) αποτελεί το Βορειοδυτικό τμήμα του όγκου.

Και στην περιοχή αυτή το γεωλογικό υπόβαθρο το αποτελούν οι Πλακώδεις ασβεστόλιθοι της αυτόχθονης γεωλογικής ενότητας της Κρήτης επάνω στην οποία έχουν επωθηθεί οι αλλόχθονες γεωλογικές ενότητες. Η ενότητα των οφιολίθων – κρυσταλλοσχιστοδών δεν εμφανίζεται εντός της περιοχής μελέτης.

Βέβαια πρέπει να αναφέρουμε πως οι υδρογεωλογικές συνθήκες στην περιοχή αυτή δεν είναι τελείως ανεξάρτητες απ'αυτές που επικρατούν στο σύνολο του ορεινού όγκου της Δίκτης, αλλά εμείς θα αναφερθούμε μόνο στο τμήμα αυτό.

(Υδρογεωλογική Μελέτη Ανατολικής Κεντρικής Κρήτης, ΙΓΜΕ 1996)

2.2 Ενότητα ανθρακικών υδροπερατών σχηματισμών

Σ'αυτή την ενότητα γίνεται αναφορά στις υπόγειες υδροφορίες που αναπτύσσονται στους ανθρακικούς προνεογενείς σχηματισμούς του Δυτικού τμήματος του ορεινού όγκου της Δίκτης σύμφωνα με την γεωλογική ενότητα στην οποία ανήκουν.

(Υδρογεωλογική Μελέτη Ανατολικής Κεντρικής Κρήτης, ΙΓΜΕ 1996)

2.2.1 Υπόγειες υδροφορίες των ανθρακικών σχηματισμών της γεωλογικής ενότητας Πίνδου.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις υδρογεωλογικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν όσον αφορά τις υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στους ανθρακικούς σχηματισμούς της συγκεκριμένης περιοχής είναι:

1. Το νερό της κατείσδυσης διεισδύει σε βάθος σε άλλους υδροπερατούς σχηματισμούς, και αυτό προέκυψε από το γεγονός ότι στα περιθώρια των υπό μελέτη σχηματισμών (ασβεστόλιθων) δεν αναβλύζουν πηγές που να εκφορτίζουν το νερό της βροχής που κατεισδύει σ'αυτούς, καθώς και από το γεγονός ότι οι γεωτρήσεις που έγιναν δεν μας έδωσαν ικανοποιητικές παροχές.
2. Τα αποτελέσματα των πραγματοποιούμενων γεωτρήσεων απέδειξαν ότι το νερό κατεισδύει βαθύτερα, στους ανθρακικούς σχηματισμούς της ενότητας Τρίπολης όπου και διαμορφώνονται υπόγειες υδροφορίες.

(Υδρογεωλογική Μελέτη Ανατολικής Κεντρικής Κρήτης, ΙΓΜΕ 1996)

2.2.2 Υπόγειες υδροφορίες των ανθρακικών σχηματισμών της γεωλογικής ενότητας Τρίπολης.

Όσον αφορά αυτή την ενότητα, οι ανθρακικοί σχηματισμοί καλύπτουν το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής και είναι έντονα τεκτονισμένοι και καρστικοποιημένοι, με αποτέλεσμα να κατεισδύουν στο εσωτερικό τους σημαντικές ποσότητες νερού της βροχής και επομένως να διαμορφώνονται υπόγειες υδροφορίες στην επαφή αυτών των σχηματισμών με τους υποκείμενους αδιαπέρατους της Φυλλιτικής – Χαλαζιτικής σειράς.

Οι υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν σ' αυτούς τους σχηματισμούς χωρίζονται:

1. Στους ανθρακικούς σχηματισμούς που εμφανίζονται στην περιοχή Ανάπολης – Γουρνών και νοτιότερα μέχρι τις κοινότητες Γάλιπε – Σκοτεινό, όπου βρίσκονται σε χαμηλό υψόμετρο και σε άμεση επαφή με τη θάλασσα και επομένως οι υπόγειες υδροφορίες επηρεάζονται άμεσα απ' το θαλασσινό νερό που εισχωρεί σ' αυτές κυρίως μέσω ρηγμάτων.
2. Στους ανθρακικούς σχηματισμούς που εμφανίζονται νότια της κοινότητας Χερσονήσου – Χαρασό – Κόξαρης – Καλού Χωριού, όπου οι νεογενείς αποθέσεις που βρίσκονται βόρεια δημιουργούν ένα «μπαράζ» για την είσοδο του θαλασσινού νερού, προς τους σχηματισμούς αυτούς με αποτέλεσμα να έχουμε και καλής ποιότητας υδροφορίες.
3. Στους ανθρακικούς σχηματισμούς που εμφανίζονται στην περιοχή της κοινότητας Λιμένα Χερσονήσου, όπου εδώ οι ασβεστόλιθοι του Ιουρασικού της Ζώνης Τρίπολης που έρχονται σε άμεση επαφή με τη θάλασσα, αλλά και το ρήγμα στην επαφή των ασβεστόλιθων του Ιουρασικού και του Κρητιδικού λειτουργούν ευοίωνα για την είσοδο του θαλασσινού νερού στα καρστικά και τεκτονικά διάκενα των ανθρακικών σχηματισμών της ευρύτερης περιοχής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ύπαρξη υφάλμυρου νερού από τις ερευνητικές γεωτρήσεις που ανοίχτηκαν.
4. Στους ανθρακικούς σχηματισμούς της περιοχής Μαλίων, όπου οι γεωλογικές, υδρογεωλογικές, τεκτονικές και μορφολογικές συνθήκες που επικρατούν δημιουργούν ευνοϊκές συνθήκες για την δημιουργία υπόγειων υδροφοριών στην λεκάνη των Μαλίων. Έτσι έχουμε το σχηματισμό πέντε διαφορετικών υδροφοριών οι οποίες έχουν άμεση σχέση με το νερό της κατείσδυσης στους σχηματισμούς των ασβεστόλιθων της γεωλογικής ενότητας Τρίπολης: (α) ένα φρεάτιο υδροφόρο ορίζοντα στις τεταρτογενείς αποθέσεις (άμμοι ακτών και θαλάσσιες αναβαθμίδες), όπου εδώ έχουμε τη διάνοιξη πολλών φρεατίων (τα οποία όμως χρησιμοποιούνται μόνο για την κάλυψη αρδευτικών αναγκών εφόσον η ποιότητα του νερού τους είναι

επιβαρυνόμενη με Νιτρικά), οι παροχές των οποίων είναι σημαντικές καθότι τα ιζήματα εντός των οποίων έχουν διανοιχτεί τροφοδοτούνται πλευρικά με νερό από τους προνεογενείς ανθρακικούς σχηματισμούς, (β) υπόγειες υδροφορίες εντός νεογενών σχηματισμών, οι οποίες διαμορφώνονται εντός του σχηματισμού των μαργαϊκών ασβεστόλιθων που εμφανίζονται νότια των τεταρτογενών αποθέσεων, (γ) σε κορύμματα προνεογενών ανθρακικών σχηματισμών, όπου εντός αυτών αναπτύσσεται πλούσια υπόγεια υδροφορία, (δ) σε ανθρακικούς σχηματισμούς του Κρητιδικού της ενότητας Τρίπολης και, (ε) σε ανθρακικούς σχηματισμούς του Ιουρασικού της ενότητας Τρίπολης, όπου τα καρστικά και τεκτονικά διάκενα των ασβεστόλιθων είναι συμπληρωμένα με αργιλικό υλικό.

Από τις παραπάνω υπόγειες υδροφορίες εκτιμάται ότι αντλούνται περίπου 10.000.000 m³ από τα οποία τα 4.000.000 m³ μεταφέρονται στο Ηράκλειο για την ύδρευση των κατοίκων της πόλης.

(Υδρογεωλογική Μελέτη Ανατολικής Κεντρικής Κρήτης, ΙΓΜΕ 1996)

2.2.3 Υπόγειες υδροφορίες των Πλακωδών ασβεστόλιθων.

Οι πλακώδεις ασβεστόλιθοι στην ερευνούμενη περιοχή εμφανίζονται στην περιοχή Καστελίου – Νηπιδιτού – Παναγιάς στους Δυτικούς πρόποδες του ορεινού όγκου της Δίκτης. Αυτοί είναι έντονα τεκτονισμένοι και αρκετά καρστικοποιημένοι ιδιαίτερα στα κατώτερα μέλη τους. Το δε νερό της βροχής, που κατεισδύει σ' αυτούς τους σχηματισμούς διεισδύει σε βάθος και διαμορφώνονται έτσι υπόγειες υδροφορίες στο απόλυτο υψόμετρο της θάλασσας.

(Υδρογεωλογική Μελέτη Ανατολικής Κεντρικής Κρήτης, ΙΓΜΕ 1996)

2.3 Ενότητα νεογενών και τεταρτογενών σχηματισμών που τροφοδοτούνται από τους προνεογενείς ανθρακικούς σχηματισμούς

Εδώ αναφερόμαστε στις υπόγειες υδροφορίες που αναπτύσσονται σε κορύμματα και μαργαϊκούς ασβεστόλιθους. Παρατηρούνται κορύμματα στην περιοχή της υδρογεωλογικής ενότητας του καρστικού υδροσυστήματος Δίκτης στην λεκάνη

των Μαλίων και στην περιοχή Μαθιά – Αμαριανό. Επίσης εμφανίζονται μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι με υδρογεωλογικό ενδιαφέρον στην περιοχή Χερσονήσου και Μαλίων.

Όσον αφορά τις υπόγειες υδροφορίες που αναπτύσσονται στα κορύμματα της περιοχής της λεκάνης των Μαλίων και τις υδροφορίες που αναπτύσσονται στους μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, αναφερθήκαμε σ'αυτές στο προηγούμενο τμήμα.

Πρέπει να αναφέρουμε την ανάπτυξη μίας σημαντικής υδροφορίας στην περιοχή της Χερσονήσου (βόρεια παραλία) στους σχηματισμούς των μαργαϊκών ασβεστόλιθων κι αυτό διότι οι παροχές των γεωτρήσεων που έγιναν στο σχηματισμό αυτό δεν δικαιολογούνται μόνο απ'την απευθείας κατείσδυση του βρόχινου νερού.

(Υδρογεωλογική Μελέτη Ανατολικής Κεντρικής Κρήτης, ΙΓΜΕ 1996)

2.4 Ενότητα υδατοστεγανών σχηματισμών

Εδώ γίνεται αναφορά στους προνεογενείς σχηματισμούς της Φυλλιτικής – Χαλαζιτικής σειράς, του φλύσχη των γεωλογικών ενοτήτων Πίδου και Τρίπολης καθώς και στις αποθέσεις μαργών και αργίλων.

Από τους προνεογενείς υδατοστεγανούς σχηματισμούς στην ερευνούμενη περιοχή επικρατούν οι σχηματισμοί της Φυλλιτικής – Χαλαζιτικής σειράς που εμφανίζονται στις περιοχές Καστελίου – Ξιδά – Καρουζανών και Μοχού – Γωνιές – Γαλίφα. Επίσης παρατηρούνται εμφανίσεις φλύσχη στις περιοχές Επισκοπής – Γαλίφα.

Θεωρητικά αυτοί οι σχηματισμοί είναι υδατοστεγείς, στο σαθρό τους όμως, κάλυμμα ή σε ρωγμές και διακλαδώσεις που παρουσιάζουν λόγω του τεκτονισμού μπορούν να αποθηκευτούν μικρές ποσότητες νερού και να διαμορφωθούν ασθενείς υπόγειες υδροφορίες.

Από άποψη ποιότητας το εμφανιζόμενο νερό θεωρείται καλό.

Στον παρακάτω Πίνακα Γ-1-1 παραθέτουμε τις γεωτρήσεις που έγιναν σ'αυτούς τους σχηματισμούς.

Αρ.Πρωτ.	Κοινότητα	Βάθος m	Παροχή m ³ /h	Πέτρωμα
Γ292	Πολυθέα	115	45	Φυλλίτες - Ασβεστόλιθοι
Γ293	Πολυθέα	85	18	Φυλλίτες
Γ294	Πολυθέα	90	20	Φυλλίτες
Γ295	Καρουζανά	100	5	Φυλλίτες
Γ296	Καρουζανά	100	5	Φυλλίτες
Γ297	Καρουζανά	96	15	Φυλλίτες
Γ298	Καρουζανά	120	15	Φυλλίτες
Γ299	Καρουζανά	90	10	Φυλλίτες
Γ300	Καρουζανά	290	15	Φυλλίτες
Γ301	Καρουζανά	260	30	Φυλλίτες - Ασβεστόλιθοι
Γ363	Βορίτσι	70	4	Φλύσχης
Γ364	Βορίτσι	270	15	Φλύσχης
Γ365	Βορίτσι	90	15	Φλύσχης
Γ444	Αμαριανό	110	22	Φυλλίτες
Γ445	Αμαριανό	45	3	Φυλλίτες
Γ446	Μαθιά	125	15	Φυλλίτες
Γ447	Μαθιά	60	4	Φυλλίτες

Πίνακας Γ-1-1 : Γεωτρήσεις σε διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς
(Υδρογεωλογική μελέτη Βόρειου Νομού Ηρακλείου, ΙΓΜΕ)

Οι νεογενείς υδατοστεγανοί σχηματισμοί εμφανίζονται στο Βορειοδυτικό τμήμα της υδρογεωλογικής ενότητας του καρστικού συστήματος Δίκτης. Επικρατούν δε, οι μάργες του συστήματος Φοινικιάς.

Οι μάργες λόγω της κοκκομετρίας και της σύστασής τους είναι αδιαπέρατοι σχηματισμοί και έτσι δεν αναμένονται στο εσωτερικό τους υπόγειες υδροφορίες.

(Υδρογεωλογική Μελέτη Ανατολικής Κεντρικής Κρήτης, ΙΓΜΕ 1996)

3. ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

3.1 Απολήψιμος ετήσιος όγκος νερού από τις υπόγειες υδροφορίες της υδρογεωλογικής ενότητας Δίκτης

Για τις περιοχές όπου έχουν εντοπιστεί υπόγειες υδροφορίες μπορούμε να αναφέρουμε τα παρακάτω:

1. Στην περιοχή Καινούργιου Χωριού – Επισκοπής – Βάθιας πραγματοποιείται ετήσια απόληψη νερού της τάξης των 4.000.000 m³
2. Στην περιοχή Γουρνών – Γάλιπε - Σκοτεινό πραγματοποιείται ετήσια απόληψη νερού της τάξης των 2.500.000 m³
3. Στην περιοχή Χερσονήσου – Χαρασό – Κόξαρη – Καλό Χωριό πραγματοποιείται ετήσια απόληψη νερού της τάξης των 6.000.000 m³
4. Στην περιοχή Μαλίων πραγματοποιείται ετήσια απόληψη νερού της τάξης των 10.000.000 m³
5. Στην περιοχή Καστέλι - Παναγιά πραγματοποιείται ετήσια απόληψη νερού της τάξης των 2.700.000 m³
6. Στην περιοχή που καλύπτεται από Φυλλίτες - Χαλαζίτες πραγματοποιείται ετήσια απόληψη νερού της τάξης των 1.800.000 m³
7. Στην περιοχή Χερσονήσου που καλύπτεται από μαργαϊκούς σχηματισμούς πραγματοποιείται ετήσια απόληψη νερού της τάξης των 1.400.000 m³
8. Από το νερό που κατεισδύει στους ανθρακικούς σχηματισμούς 1.200.000 m³ εκφορτίζουν από τις πηγές το οποίο πρέπει να συνυπολογίσουμε ως απολήψιμο.

Το σύνολο, λοιπόν, του απολήψιμου ετήσιου όγκου νερού από τις υπάρχουσες γεωτρήσεις ανέρχεται σε 28.900.000 m³

(Υδρογεωλογική Μελέτη Ανατολικής Κεντρικής Κρήτης, ΙΓΜΕ 1996)

3.2 Υδροχημεία

Για τον καθορισμό των ποιοτικών παραμέτρων των υδροφοριών της λεκάνης της Δίκτης έγιναν αρκετές γενικές χημικές αναλύσεις νερού από διάφορα σημεία – κλειδιά.

Βάσει των αποτελεσμάτων των αναλύσεων αυτών, αλλά και στοιχείων που δόθηκαν από τις κοινότητες μπορούμε να αναφέρουμε τα παρακάτω:

1. Εντοπίζονται υφάλμυρες υδροφορίες στους φρεάτιους υδροφόρους ορίζοντες της Βόρειας ακτής καθώς και στις υπόγειες υδροφορίες στους ανθρακικούς σχηματισμούς των περιοχών Ανώπολης, Γουβών και Λιμένα Χερσονήσου. Τους καλοκαιρινούς μήνες το μέτωπο της υφαλμύρυνσης εκτείνεται νοτιότερα, ενώ παρατηρούνται και μικρότερης έκτασης προβλήματα στις περιοχές Χερσονήσου και Μαλίων. Υφάλμυρο είναι και το νερό των πηγών Μαλίων.
2. Οι Γυψούχες υπόγειες υδροφορίες στην λεκάνη της Δίκτης είναι περιορισμένες αφού και οι περιοχές που καλύπτονται από νεογενείς αποθέσεις, εντός των οποίων έχουν εναποτεθεί τα γυψούχα στρώματα, δεν έχουν μεγάλη έκταση, και έτσι περιορίζονται στις περιοχές νοτιότερα της κοινότητας Ελιά και στην περιοχή Σγουροκεφάλι.
3. Καλής ποιότητας νερό έχουμε στις υπόγειες υδροφορίες που εντοπίστηκαν στην περιοχή Καινούργιου Χωριού – Επισκοπής, Κόξαρη – Καλό Χωριό, Καστέλι – Παναγιά σε ανθρακικούς σχηματισμούς, καθώς επίσης και στις περιοχές Πολυθέα – Καρουζανά – Ξιδάς σε σχηματισμούς της Φυλλιτικής – Χαλαζιτικής σειράς. Επίσης πρέπει να σημειώσουμε ότι και το νερό των πηγών (εκτός αυτών της περιοχής Μαλίων) που τροφοδοτούνται κυρίως από το νερό της κατείσδυσης στους ανθρακικούς σχηματισμούς της ζώνης Τρίπολης, είναι άριστης ποιότητας.
4. Η ποιότητα του νερού των φρεατίων υδροφοριών είναι βεβαρημένη κυρίως με Νιτρικά, το νερό τους όμως χρησιμοποιείται για τοπικές αρδευτικές ανάγκες.

(Υδρογεωλογική Μελέτη Ανατολικής Κεντρικής Κρήτης, ΙΓΜΕ 1996)

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Βάσει των γεωλογικών, τεκτονικών, υδρογεωλογικών, υδροχημικών και υδρολογικών δεδομένων και αναλύσεων, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- ✚ Η περιοχή της υδρογεωλογικής ενότητας του καρστικού συστήματος Δίκτης που ανήκει στο Βόρειο τμήμα του Νομού Ηρακλείου δεν αποτελεί ένα ξεχωριστό κομμάτι από το σύνολο του ορεινού όγκου της Δίκτης, τουλάχιστον όσον αφορά την γεωλογική και τεκτονική δομή αλλά και τις υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το βρόχινο νερό που κατεισδύει στον ορεινό όγκο να διεισδύει σε βάθος και να εμπλουτίζει τις υπόγειες υδροφορίες στα κράσπεδά του ή να τροφοδοτεί τις περιμετρικά αναβλύζουσες πηγές.
- ✚ Η περιοχή μελέτης καλύπτεται στο μεγαλύτερο τμήμα της από προνεογενείς σχηματισμούς από τους οποίους επικρατούν οι ανθρακικοί. Οι τεταρτογενείς και νεογενείς αποθέσεις έχουν περιορισμένη έκταση.
- ✚ Τα ανοικτά μέτωπα των ανθρακικών υδροπερατών σχηματισμών προς τη θάλασσα, καθώς και η τεκτονική της περιοχής λειτουργούν θετικά για την είσοδο του θαλασσινού νερού, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα την υφαλμύρυνση των υπόγειων υδροφοριών που έχουν εντοπιστεί στις περιοχές Ανώπολης, Γουρνών, Χερσονήσου κ.α. Βέβαια πρέπει να αναφέρουμε ότι στην υφαλμύρυνση πολλές φορές συντελεί και η υπεράντληση των υπόγειων υδροφοριών.
- ✚ Στις περισσότερες περιοχές εκ των οποίων έχουν εντοπιστεί υπόγειες υδροφορίες γίνεται πλήρης εκμετάλλευση. Αναμένονται αποθέματα νερού από το ποσοστό της κατείσδυσης στους ανθρακικούς σχηματισμούς στις περιοχές νότια της λεκάνης των Μαλίων και Καστέλι – Νιπιδιτός – Παναγιά της τάξεως των 90.000.000 m³.
- ✚ Τέλος, η ποιότητα του νερού των υδροφοριών της περιοχής είναι καλή, εκτός όμως των υφάλμυρων υδροφοριών που εντοπίζονται κατά μήκος της βόρειας ακτής και των γυψούχων υδροφοριών που είναι περιορισμένες.

(Υδρογεωλογική Μελέτη Ανατολικής Κεντρικής Κρήτης, ΙΓΜΕ 1996)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο
«ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PTC
(ArgusOne)»

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το μοντέλο ArgusOne GIS υποστηρίζει τον μεγαλύτερο αριθμό μοντέλων υπογείων υδάτων στην αγορά. Επαγγελματίες υδρολόγοι, που χρησιμοποιούν τα δικά τους μοντέλα, βρίσκουν εύκολο να αναπτύξουν το δικό τους Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (GIS) βασισμένο σε αλληλεπιδράσεις με τους χρήστες (GUIs), για τα δικά τους μοντέλα, χρησιμοποιώντας το ArgusOne.

Πολλοί άλλοι που αναπτύσσουν μοντέλα για τα υπόγεια ύδατα έχουν επίσης δημιουργήσει το ArgusOne GUIs για τα δικά τους μοντέλα, κάποια από τα οποία είναι ελεύθερα διανεμημένα μαζί με τα μοντέλα και κάποια είναι εμπορικά διαθέσιμα.

Το πλήθος των μοντέλων των υπογείων υδάτων που είναι διαθέσιμα στους χρήστες του ArgusOne κάνουν το ArgusOne το ιδανικό GIS που βασίζεται σε μοντελοποιημένο περιβάλλον για τους επαγγελματίες των υπογείων υδάτων με το να τους επιτρέπει να λύνουν σχεδόν κάθε είδους προβλήματος κάτω από την ίδια, γραφικής μορφής, αλληλεπίδραση με τον χρήστη.

Επιπρόσθετα, το ArgusOne είναι το μόνο ανοικτό, σε GIS, μοντελοποιημένο περιβάλλον, το οποίο επιτρέπει στους επαγγελματίες να το προσαρμόζουν για τις δικές τους ειδικές ανάγκες και να συνθέτουν πληροφορίες με απεριόριστους τρόπους. βασισμένους σε οποιοδήποτε θεωρητικό μοντέλο.

Το ArgusOne GIS σε αλληλεπίδραση με το χρήστη, είναι διαθέσιμο για τα ακόλουθα μοντέλα:

1. **MODEFLOW**: τρισδιάστατο μοντέλο ροής υπογείων υδάτων, αποτελούμενο από μονάδες και πεπερασμένα στοιχεία για την μεταφορά διαλυτών ουσιών και τον υπολογισμό των δυνατοτήτων των παραμέτρων.
2. **PTC**: ο Κώδικας Μεταφοράς του Princeton (Princeton Transport Code) είναι ένα προηγμένο τρισδιάστατο πρόγραμμα προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία για τη ροή των υπογείων υδάτων και την μεταφορά των διαλυτών ουσιών.
3. **NAPL**: προσομοιώνει την ρύπανση των εδαφών και των υδροφορέων, η οποία προκύπτει από την απελευθέρωση οργανικά υγρών, κοινώς αναφερόμενων ως Υγρών στη Μη Υδατώδη Φάση (NAPL, Non-Aqueous Phase Liquids).
4. **SUTRA**: κορεσμένη και (ή) ακόρεστη, σταθερής ή μεταβαλλόμενης πυκνότητας υγρών, ροή και μεταφορά διαλυτών ουσιών ή ενέργειας

(δυσδιάστατοι, δυσδιάστατοι-τρισδιάστατοι κώδικες πεπερασμένων στοιχείων).

5. **HST3D**: είναι ένα πρόγραμμα μοντελοποίησης πεπερασμένων διαφορών για την προσομοίωση των ρευστών και των διαλυτών ουσιών, αποτελούμενων μόνο από ένα συστατικό, και την μεταφορά της θερμότητας στις τρεις διαστάσεις κάτω από κορεσμένες συνθήκες. Το HST3D επιτρέπει την εισαγωγή της προσρόφησης και της αποσύνθεσης των διαλυτών ουσιών στο μοντέλο μας.
6. **FEMWATER**: το 3DFEMWATER είναι ένα τρισδιάστατο μοντέλο για τη ροή των υπογείων υδάτων, βασισμένο σε πεπερασμένα στοιχεία.
7. **CFEST**: το μοντέλο Σύνδεσης της Ενέργειας των Ρευστών και της Μεταφοράς των Διαλυτών Ουσιών είναι τρισδιάστατο και βασίζεται στα πεπερασμένα στοιχεία. Το CFEST προσομοιώνει τη ροή και τη μεταφορά σαν συνδεδεμένες ή μη συνδεδεμένες διαδικασίες.

Από όλα τα παραπάνω, το σημαντικότερο για εμάς είναι ο αλγόριθμος PTC, και αυτό γιατί είναι ο κώδικας (αλγόριθμος) που χρησιμοποιούμε στο μοντέλο ArgusOne για την επίλυσή του. (www.argusint.com/index.html)

2. ΚΩΔΙΚΑΣ PTC

Ο κώδικας PTC χρησιμοποιεί το ακόλουθο σύστημα των μερικών διαφορικών εξισώσεων για την αναπαράσταση της ροής των υπογείων υδάτων που περιγράφονται από το υδραυλικό ύψος, h ,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + Q = 0 \quad (1)$$

τα συστατικά της ταχύτητας των υπογείων υδάτων,

$$V_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}, \quad V_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}, \quad V_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2)$$

και την μεταφορά των διαλυτών ουσιών που περιγράφεται από την συγκέντρωση, c ,

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{zz} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\
& + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] - \left[V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right] \quad (3) \\
& + Q(c^w - c) - \theta [1 + E(c)] \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0
\end{aligned}$$

Αυτές οι εξισώσεις παράγονται από την αρχή διατήρησης της μάζας και από το νόμο του Darcy.

Η λύση των παραπάνω εξισώσεων γίνεται με την ακόλουθη σειρά: πρώτα επιλύουμε ως προς το υδραυλικό ύψος h από την (1) ; έπειτα, υπολογίζονται οι ταχύτητες του Darcy V_x , V_y , και V_z από την (2) ; και τέλος, λύνουμε την (3) για την συγκέντρωση των ρυπαντών c . (PTC Manual - www.argusint.com/index.html)

2.1 Ο αλγόριθμος επίλυσης PTC

Λύνοντας το σύστημα των εξισώσεων (1) – (3) για πολύπλοκα φυσικά συστήματα απαιτείται η εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων. Για συστήματα στην κλίμακα του πεδίου, η υπολογιστική προσπάθεια που εμπλέκεται στην επίλυση μίας αριθμητικής διακριτοποίησης αυτών των τρισδιάστατων εξισώσεων είναι μεγάλη. Ο PTC υιοθετεί ένα μοναδικό αλγόριθμο διαχωρισμού για την πλήρη επίλυση των τρισδιάστατων εξισώσεων, κάτι που μειώνει σημαντικά το υπολογιστικό φορτίο.

Ο αλγόριθμος περιλαμβάνει την διακριτοποίηση της περιοχής σε προσεγγιστικά παράλληλα, οριζόντια στρώματα. Μέσα σε κάθε στρώμα υπάρχει μία διακριτοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων [Pinder και Gray, 1977] που επιτρέπει μία ακριβής αναπαράσταση των ασύμμετρων (ακανόνιστων) περιοχών. Τα στρώματα συνδέονται κάθετα μέσω της διακριτοποίησης των πεπερασμένων διαφορών. Αυτή η υβριδική σύνδεση μίας μεθόδου πεπερασμένου στοιχείου και μίας μεθόδου πεπερασμένων διαφορών παρέχει την δυνατότητα εφαρμογής της διαδικασίας διαχωρισμού. Κατά τη διάρκεια μίας επανάληψης δοσμένου (γνωστού) χρόνου, όλοι οι υπολογισμοί χωρίζονται σε δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα όλες οι διακριτοποιήσεις των οριζόντιων πεπερασμένων στοιχείων επιλύονται ανεξάρτητα η μία της άλλης. Στο δεύτερο βήμα, επιλύονται οι κάθετες εξισώσεις που συνδέουν τα στρώματα.

(PTC Manual - www.argusint.com/index.html)

3. ΡΟΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ

3.1 Κυρίαρχη εξίσωση

Ο κώδικας PTC καθορίζει τα χαρακτηριστικά της ροής ενός συστήματος υπογείων υδάτων με την επίλυση για το υδραυλικό ύψος μέσω της ακόλουθης μερικής διαφορικής εξίσωσης

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + \sum_{i=1}^r Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i) = 0 \quad (4)$$

όπου, χρησιμοποιώντας ένα θεμελιώδες σύνολο μονάδων που υποδηλώνει μήκος [L], χρόνο [T] και μάζα [M],

h είναι το υδραυλικό ύψος [L],

K_{xx} είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στην x διεύθυνση [LT^{-1}],

K_{yy} είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στην y διεύθυνση [LT^{-1}],

K_{zz} είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στην z διεύθυνση [LT^{-1}],

S είναι ο συντελεστής ειδικής αποθήκευσης [L^{-1}],

Q_i είναι ο όρος της πηγής / ταμιευτήρα στην περιοχή i [L^3T^{-1}] (π.χ. αντλίες ; θετικές τιμές σημαίνουν έγχυση),

$\delta(\)$ είναι η συνάρτηση δέλτα του Dirac,

r είναι ο αριθμός των σημείων των πηγών / ταμιευτήρων.

Για ευκολία, ο τελευταίος όρος στην (4) θα συντμηθεί σε Q .

Η κυρίαρχη εξίσωση (4) επιλύεται αριθμητικά από τον κώδικα PTC χρησιμοποιώντας μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων και διαφορών.

(PTC Manual - www.argusint.com/index.html)

3.2 Οριακές συνθήκες

Ο κώδικας PTC προσαρμόζει τρεις τύπους οριακών συνθηκών στην εξίσωση της ροής. Οι τρεις τύποι είναι του Dirichlet (ειδικό ύψος), του Neumann (ειδική δρώσα δύναμη) και ο τρίτος τύπος του Cachy (διαρροή). Οι οριακές συνθήκες μπορούν να αλλαχτούν από το χρήστη κατά τη διάρκεια της πραγματοποίησης μίας προσομοίωσης. Η προεπιλεγμένη οριακή συνθήκη για όλα τα όρια είναι η μηδενική δρώσα δύναμη. Αυτό υπονοεί έναν περιορισμένο υδροφορέα με αδιαπέρατο βυθό και πλάγια σύνορα. Με την επιλογή εναλλακτικής οριακής συνθήκης στο σύνολο της περιοχής, ο χρήστης μπορεί να αναπαραστήσει άλλες υδρολογικές συνθήκες / καταστάσεις. (PTC Manual - www.argusint.com/index.html)

3.2.1 Ειδικό ύψος

Τα σταθερά οριακά ύψη καθορίζονται από συγκεκριμένους κόμβους και οι τιμές των υψών σταθεροποιούνται σ' αυτούς τους κόμβους. Ο κώδικας αυτόματα σημειώνει αυτές τις γραμμές και στήλες στον συντελεστή μήτρας που σχετίζεται με αυτούς τους κόμβους. Επειδή είναι δεδομένο ότι οι κόμβοι σταθερών υψών αποβάλλονται αποτελεσματικά από την εξίσωση μητρώων μας, θα μείνουμε με $(N \times M - N_c)$ εξισώσεις, που θα έχουν $(N \times M - N_c)$ αγνώστους, όπου το N_c είναι ο συνολικός αριθμός των οριακών κόμβων με σταθερό ύψος στην περιοχή ροής.

(PTC Manual - www.argusint.com/index.html)

3.2.2 Ειδική δρώσα δύναμη

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων παρέχει με πολύ απλά μέσα την συγκεκριμενοποίηση των οριακών συνθηκών της δρώσας δύναμης. Βάσει της εφαρμογής πάνω στο Θεώρημα του Green στην εξίσωση

$$\iint_{\Omega} \left[K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} \frac{\partial w_i}{\partial z} + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} \frac{\partial w_i}{\partial y} \right] dx dy - \int_{\sigma} \left[K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} l_y \right] w_i d\sigma - \iint_{\Omega} \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial \hat{h}}{\partial z} \right) \right] w_i dx dy + \iint_{\Omega} \left[S \frac{\partial \hat{h}}{\partial t} - Q \right] w_i dx dy = 0 \quad (5)$$

[όπου l_x και l_y είναι τα συνημίτονα κατευθύνσεων ανάμεσα στο κανονικό και στο σ των σημείων τομής (το $d\sigma$ αναπαριστά ένα μικρό μήκος κατά μήκος αυτού του ορίου) και οι x και y οι ισότιμοι άξονες αντίστοιχα], εμφανίζεται ένας όρος ορίου. Αυτός ο όρος μπορεί να ξαναγραφτεί ως:

$$-\int_{\sigma} \left[K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} l_y \right] w_i d\sigma = -\int_{\sigma} q_n w_i d\sigma \quad (6)$$

όπου q_n είναι η κανονική δρώσα δύναμη διαμέσου μίας μοναδιαίας περιοχής (ύψος x μήκος) του κάθετου ορίου σ . Όταν η δρώσα δύναμη q_n θεωρείται σταθερή κατά μήκος του «προσώπου» ενός στοιχείου μήκους L η ολοκλήρωση της παραπάνω εξίσωσης θα δώσει τις κομβικές κατανομές που υποδεικνύονται στην Εικόνα Γ-2-1. Κατά συνέπεια, ο χρήστης πρέπει μόνο να συγκεκριμενοποιήσει την ογκομετρική δρώσα δύναμη σε ένα κόμβο για να αναπαραστήσει την δρώσα δύναμη διαμέσου ενός ορίου. Οι δρώσες δυνάμεις συναρτήσει των αντλήσεων εισάγονται μαθηματικά με τον ίδιο τρόπο. Αυτό σημαίνει, πως ο χρήστης καθορίζει μία ογκομετρική δρώσα δύναμη σε ένα κόμβο. Για να διευκολύνει την εισαγωγή της ομοιόμορφης διήθησης ο κώδικας επιτρέπει την συγκεκριμενοποίηση μίας κομβικής διηθητικής δρώσας δύναμης. Η ολοκλήρωση της περιοχής για να πάρουμε την ογκομετρική δρώσα δύναμη πραγματοποιείται αυτόματα από τον κώδικα.

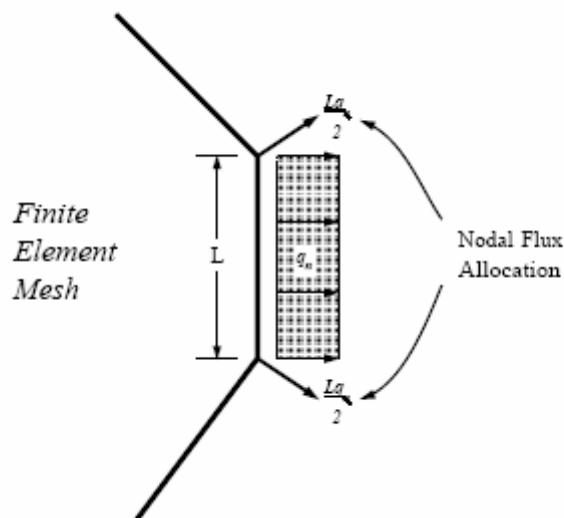
(PTC Manual - www.argusint.com/index.html)

3.2.3 Διαρροή

Οι οριακές συνθήκες διαρροής εισάγονται με την πραγματοποίηση μιας αντικατάστασης στην εξίσωση

$$f_i = -\iint_{\Omega} Q w_i dx dy - \int_{\sigma} \left[K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} l_y \right] w_i d\sigma \quad (7)$$

$$\text{με } Q = k_L (h_{j,L}^t - h_{j,k}^t) \quad (8)$$



Εικόνα Γ-2-1 : Κομβική κατανομή της δρώσας δύναμης q διαμέσου ενός στοιχείου μήκους L . Για γραμμικά στοιχεία, κάθε κόμβος ζυγίζεται το ίδιο (έχει τον ίδιο βαθμό σημαντικότητας)

(PTC Manual - www.argusint.com/index.html)

όπου $h_{j,k}^t$ είναι το άγνωστο ύψος στον κόμβο j σε χρόνο t ; $h_{j,L}^t$ είναι το αντίστοιχο ύψος στο σημείο αναφοράς της διαρροής (π.χ. επίπεδο μίας διαρροής) ; και k_L είναι αγωγιμότητα διαρροής (η υδραυλική αγωγιμότητα διαιρούμενη με την απόσταση). Ο όρος της αγωγιμότητας είναι ενσωματωμένος σε όλη την περιοχή και έτσι σιωπηρά αναπαριστά μία κάθετη διαρροή. Παρόλ' αυτά, με τον κατάλληλο προσδιορισμό της ειδικής σταθεράς του χρήστη, k_L , οποιαδήποτε κατευθυντήρια διαρροή (σε οποιαδήποτε κατεύθυνση) μπορεί να καθοριστεί.

(PTC Manual - www.argusint.com/index.html)

3.2.4 Συνθήκες στάθμης ύδατος

Η επιβολή της στάθμης του ύδατος ή οι οριακές συνθήκες ενός μη περιορισμένου υδροφορέα απαιτούν τη εισαγωγή δύο οριακών συνθηκών που εφαρμόζονται στο επίπεδο του νερού στο ανώτερο στρώμα.

Μία σχηματική αναπαράσταση της κατάστασης που εμπλέκει μία κινούμενη στάθμη νερού, υπό τον όρο της διήθησης του μεγέθους $R(x, y, z)$ δεικνύεται στην Εικόνα Γ-2-2. Το καθορισμένο επίπεδο του ανώτερου ορίου της ροής της περιοχής θα

πρέπει να δίνεται από την εξίσωση $z_{w+1}(x, y, t)$ και το πραγματικό επίπεδο της στάθμης του νερού δεικνύεται από την $z_{WT}(x, y, t)$.

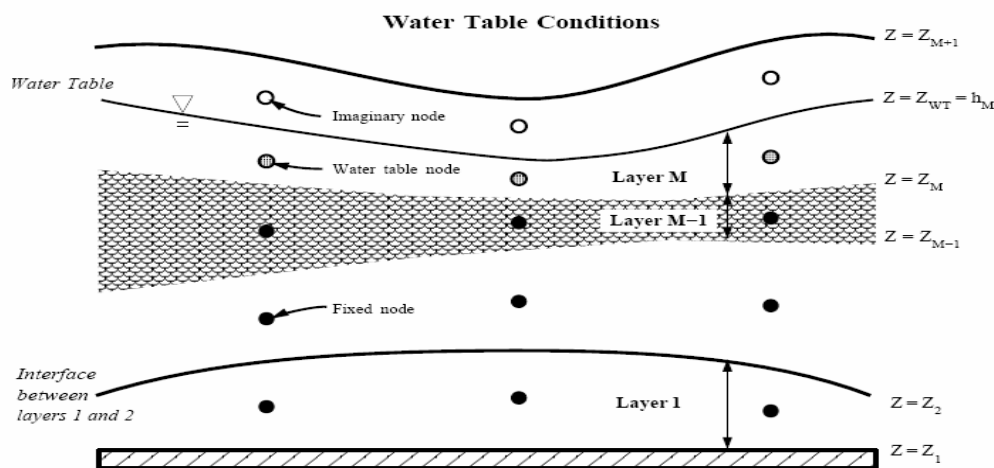
Η πρώτη οριακή συνθήκη δηλώνει ότι το επίπεδο του ύδατος στο ανώτερο επίπεδο (h_M) καθορίζει το πάχος του υδροφορέα στο ανώτερο στρώμα ($z_{WT}-z_M$).

Αναλόγως, σε κάθε κόμβο απαιτούμε να ισχύει

$$(z_{WT})_i = (h_M)_i \quad (9)$$

Στην παρούσα εργασία υποτίθεται ότι το επίπεδο του ύδατος βρίσκεται πάντα εντός του ανώτερου στρώματος ($k = M$). Κατά συνέπεια, όταν το πρόγραμμα υπολογίζει τα υδραυλικά ύψη στο ανώτερο στρώμα, ελέγχει εάν οι κομβικές τιμές του h_M είναι εντός του εύρους των επιπέδων που δίνονται από την ανισότητα

$$z_M \leq h_M \leq z_{M+1} \quad (10)$$



Εικόνα Γ-2-2 : Συνθήκες της στάθμης του ύδατος και της πτώσης στο ανώτερο στρώμα. Η επιφάνεια σημειώνεται από τις εξισώσεις $z = z_1$, $z = z_2$, κλπ., και είναι καθορισμένα όρια στο χώρο, και καθορίζουν τα επίπεδα. Σημείωση: η εγκάρσια στάθμη του ύδατος $z = z_{WT}$ πρέπει να ικανοποιεί την ανισότητα $z_M \leq h_M \leq z_{M+1}$.

(PTC Manual - www.argusint.com/index.html)

(PTC Manual - www.argusint.com/index.html)

3.2.5 Ισοζύγιο μάζας της ροής των ρευστών

Οι κυρίαρχες εξισώσεις που έχουν περιγραφεί στις προηγούμενες ενότητες για την ροή των υπογείων υδάτων βασίζονται εν μέρει πάνω στην αρχή διατήρησης της μάζας. Συναρτήσεσι των προσεγγίσεων που είναι έμφυτες στην αριθμητική λύση των κυρίαρχων εξισώσεων, ακριβής ισορροπία μάζας δεν είναι δυνατή ; παρόλ' αυτά, μία προσεγμένη διακριτοποίηση του χώρου και του χρόνου μπορεί να παράγει μία επαρκή ισορροπία μάζας. Ο κώδικας PTC παρέχει την δυνατότητα για την πραγματοποίηση ενός ελέγχου της ισορροπίας της μάζας, ο οποίος είναι ανεξάρτητος από την επίλυση των κυρίαρχων εξισώσεων. Αυτό συνοδεύεται με απευθείας υπολογισμό της δρώσας δύναμης της μάζας κατά μήκος του ορίου και της αλλαγής της μάζας μέσα στην περιοχή του μοντέλου. Η δρώσα δύναμη του δικτύου κατά μήκος των ορίων της περιοχής πρέπει να είναι ίση με την αλλαγή της μάζας μέσα στην περιοχή για να ικανοποιείται η ισορροπία της μάζας.

Ο κώδικας PTC υπολογίζει μία ισορροπία όγκου όπως ένα υποκατάστατο για μία ισορροπία μάζας. Οι δύο προσεγγίσεις είναι ισοδύναμες, καθώς η πυκνότητα του ρευστού θεωρείται σταθερή. Η αλλαγή στον όγκο του ρευστού σε έναν κόμβο είναι ίση με την αλλαγή στον ύψος στον κόμβο, πολλαπλασιαζόμενο με την περιοχή που σχετίζεται με τον κόμβο (ίση με το $\frac{1}{4}$ της περιοχής καθενός από τα στοιχεία που γειτνιάζουν με αυτό το κόμβο) και ο συντελεστής αποθήκευσης σχετίζεται με τον κόμβο. Το άθροισμα αυτών των κομβικών αλλαγών στον κόμβο είναι η ολική αλλαγή στον κόμβο.

Η ογκομετρική δρώσα δύναμη κατά μήκος των ορίου έχει ένα αριθμό συστατικών (στοιχείων). Αυτά περιλαμβάνουν τις ειδικές ογκομετρικές δρώσες δυνάμεις, είτε στα όρια είτε στα σημεία όπου υπάρχουν πηγές, υπολογιζόμενες δρώσες δυνάμεις οι οποίες προκύπτουν από την διαρροή από γειτνιάζουσες μονάδες ύδατος, και δρώσες δυνάμεις που σχετίζονται με τα ειδικά κομβικά ύψη. Η εξίσωση των πεπερασμένων στοιχείων που ανταποκρίνεται σε ένα κόμβο περιέχει ένα όρο που περιγράφει στην ογκομετρική δρώσα δύναμη σ' αυτό το κόμβο [ο δεύτερος ακέραιος στην εξίσωση (5)]. Αυτή η εξίσωση είναι απορριπτέα για τα ειδικά κομβικά ύψη όταν επιλύονται οι εξισώσεις ροής. Δίνοντας της λύση για τα ύψη όλης της περιοχής, αυτή η εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν δευτερεύον υποκατάστατο για τη δρώσα δύναμη που ανταποκρίνεται στο ειδικό κομβικό ύψος.

(PTC Manual - www.argusint.com/index.html)

4. ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΡΥΠΑΝΤΩΝ

4.1 Κυρίαρχες εξισώσεις

Αρχικά, οι ταχύτητες του Darcy V_x , V_y και V_z υπολογίζονται ποσότητες που προκύπτουν από το μέσο όρο στοιχείων. Η εξίσωση μεταφοράς είναι

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + Q(c^w - c) \\ & - \left(V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \theta [1 + E(c)] \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

Οι όροι της διασποράς στην παραπάνω εξίσωση καθορίζονται (ακολουθώντας τους Burnett και Prind.[1987]):

$$D_{xx} = (a_L V_x^2 + a_T V_y^2 + a_V V_z^2) / V + D_M \quad (12)$$

$$D_{yy} = (a_T V_x^2 + a_L V_y^2 + a_V V_z^2) / V + D_M \quad (13)$$

$$D_{zz} = (a_V V_x^2 + a_V V_y^2 + a_L V_z^2) / V + D_M \quad (14)$$

$$D_{yx} = D_{xy} = (a_L - a_T) V_x V_y / V \quad (15)$$

$$D_{yz} = D_{zy} = (a_L - a_V) V_y V_z / V \quad (16)$$

$$D_{zx} = D_{xz} = (a_L - a_V) V_z V_x / V \quad (17)$$

και οι εναπομείναντες όροι είναι

D_M είναι ο συντελεστής μοριακής διάχυσης, γενικά μικρός [L^2/T],

a_L είναι η διαμήκης διασπορά [L],

a_T είναι η οριζόντια εγκάρσια διασπορά [L],

a_V είναι η κάθετη εγκάρσια διασπορά [L],

V είναι το μέγεθος του διανύσματος της ταχύτητας [L/T] ($V \equiv \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$),

c είναι η χημική συγκέντρωση στο σημείο (x, y, z) σε χρόνο t [M/L^3],

θ είναι το πορώδες του υδροφορέα (αδιάστατο),

$E(c)$ είναι η συνάρτηση που αντιπροσωπεύει τις ιδιότητες της χημικής απορρόφησης,

Q είναι η (πηγή / ταμειυτήρας) δύναμη της άντλησης [$1/T$]

$$(Q \equiv Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i)),$$

Q_i είναι η ογκομετρικός βαθμός έγχυσης / εκροής [L^3/T] στο σημείο (x_i, y_i, z_i) ,

c^w είναι η συγκέντρωση του αντλούμενου ρευστού στο σημείο (x_i, y_i, z_i) ,

$\delta()$ είναι η συνάρτηση δέλτα του Dirac.

Για όλες τις περιπτώσεις απόσυρσης από μία αντλία ($Q_i \leq 0$), υποθέτουμε πως η συγκέντρωση του υπό απόσυρση (ρευστού) νερού c^w στην αντλία ισούται με την συγκέντρωση του γειτνιάζοντος περιβαλλοντικού ύδατος c . Κατά συνέπεια, σε όλες τις αντλίες εκροής, ο όρος $Q(c^w - c \equiv 0)$ στην προηγούμενη εξίσωση. Γι' αυτό το λόγο ο κώδικας διατηρεί τους όρους που εμπεριέχουν το Q στην προηγούμενη εξίσωση μόνο όταν πραγματοποιείται έγχυση των ρυπαντών με την αντλία ($Q_i > 0$), με την συγκέντρωση c^w να αναπαριστά την συγκέντρωση του εγχεόμενου ρευστού.

(PTC Manual - www.argusint.com/index.html)

4.2 Οριακές συνθήκες

Ο PTC επιδέχεται τον καθορισμό δύο τύπων των οριακών συνθηκών στην εξίσωση μεταφοράς ; καθορισμό της συγκέντρωσης των κόμβων και καθορισμό της εκ μεταφοράς δρώσας δύναμης. Οι οριακές συνθήκες είναι η μηδενική δρώσα δύναμη διασποράς στην κάθετη πλευρά των ορίων και μηδενική συνολική δρώσα δύναμη των ρυπαντών στα ανώτερα και κατώτερα όρια.

Ο καθορισμός των συγκεντρώσεων των κόμβων πραγματοποιείται από τον χρήστη. Ο καθορισμός των εκ μεταφοράς δρωσών δυνάμεων πραγματοποιείται με την επίδειξη μίας συγκέντρωσης συσχετιζόμενης με την ογκομετρική δρώσα δύναμη των ρευστών στα δεδομένα εξόδου του προγράμματος. Παρομοίως, η εμμέσως καθορισμένη εκ μεταφοράς δρώσα δύναμη, εισάγεται μέσω της συγκέντρωσης που σχετίζεται με την διαρροή των ρευστών στον τρίτο τύπο οριακών συνθηκών της ροής.

(PTC Manual - www.argusint.com/index.html)

5. ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΟΝ PTC

5.1 Εισαγωγή

Ο Κώδικας Μεταφοράς του Princeton (PTC) είναι το αποτέλεσμα των συνεισφορών πολλών ατόμων στο Πανεπιστήμιο του Princeton, Ένας δυσδιάστατος κώδικας για τη ροή των υπογείων υδάτων και την μεταφορά των ρυπαντών αναπτύχθηκε αρχικά από τους G.F.Pinder και W.G.Gray. Η επέκταση του κώδικα στο χώρο των τριών διαστάσεων έγινε από τον D.Krishna Babu ο οποίος επίσης αντικατέστησε τον τετραγωνισμό του Gauss με την αναλυτική ολοκλήρωση των βασικών συναρτήσεων. Ο Auli Niemi αναθεώρησε τον κώδικα και τον προσαρμόσε στο μοντέλο IBM-PC. Επιπρόσθετη δυνατότητα οριακών συνθηκών και εσωτερικός έλεγχος της υπολογισμένης επίλυσης για την ισορροπία μάζας ενσωματώθηκαν από τον David Ahlfeld. Ο Stuart Stothoff εφάρμοσε τη δομή, καθοδηγούμενη από εντολές, για τα δεδομένα εισόδου και εξόδου (input / output), εμπνεόμενος από μία παρόμοια δομή που αναπτύχθηκε από τον Roger Page, και ανέπτυξε την επαλήθευση των δεδομένων, την βήμα προς βήμα παραγωγή, και την διαδικασία γραφικών δεδομένων (παραστάσεων) ως δεδομένα εξόδου.

(PTC Manual - www.argusint.com/index.html)

5.2 Δυνατότητες προγράμματος

Ο PTC είναι ένας υβριδικός προσομοιωτής γραμμένος σε γλώσσα FORTRAN, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιτυχώς από μία ποικιλία υπολογιστών με ελάχιστη ή καμία τροποποίηση για την ροή των υπογείων υδάτων με πεπερασμένα στοιχεία / πεπερασμένες διαφορές και την μεταφορά των ρυπαντών. Οι παρούσες δυνατότητες περιλαμβάνουν:

- ✓ Προσομοιώσεις δύο διαστάσεων
- ✓ Πλήρεις προσομοιώσεις τριών διαστάσεων
- ✓ Εγκάρσια ροή υπογείων υδάτων
- ✓ Εγκάρσια μεταφορά ρυπαντών
- ✓ Εγκάρσιες οριακές συνθήκες
- ✓ Δυνατότητες για παραγωγή βήμα προς βήμα

- ✓ Ροή σε κορεσμένες και περιορισμένες συνθήκες
- ✓ Ροή σε κορεσμένο επίπεδο ύδατος
- ✓ Ισόθερμες προσρόφησης : γραμμική, Freundlich και Langmuir
- ✓ Δυνατότητες πραγματοποίησης της ισορροπίας της μάζας για την ροή των υπογείων υδάτων
- ✓ Δυνατότητες πραγματοποίησης της ισορροπίας της μάζας για τη μεταφορά των ρυπαντών
- ✓ Συνθήκες για το ειδικό υδραυλικό ύψος σε κάθε κόμβο
- ✓ Συνθήκες για την ειδική δρώσα δύναμη των υπογείων υδάτων σε κάθε κόμβο
- ✓ Συνθήκες για την ειδική διαρροή του υπόγειου ύδατος σε κάθε κόμβο
- ✓ Συνθήκες για την εκ μεταφοράς ειδική δρώσα δύναμη σε κάθε κόμβο
- ✓ Συνθήκες για την ειδική διαρροή των ρυπαντών σε κάθε κόμβο
- ✓ Συνθήκες για την ειδική βροχόπτωση σε κάθε στοιχείο στο ανώτερο στρώμα
- ✓ Τμηματικά σταθερές παράμετροι από το κάθε στοιχείο
- ✓ Τετράπλευρος και τριγωνικός στοιχεία
- ✓ Αναλυτικές ολοκληρώσεις των στοιχείων
- ✓ Εισαγωγή των παραμέτρων ανά στοιχείο ή ανά κόμβο
- ✓ Δομή, καθοδηγούμενη από εντολές και δεδομένα εισόδου καθορισμένα από το χρήστη
- ✓ Απαιτούμενη από το χρήστη, απήχηση των δεδομένων
- ✓ Δυνατότητες έκδοσης δεδομένων
- ✓ Δυνατότητες βρογχοποίησης των δεδομένων
- ✓ Δυνατότητες παραγωγής των δεδομένων
- ✓ Δυνατότητες επαλήθευσης των δεδομένων
- ✓ Έξοδος (δεδομένα εξόδου) για πακέτα γραφικών

(PTC Manual - www.argusint.com/index.html)

5.3 Δεδομένα εισόδου για το μοντέλο και ζητήματα

επαλήθευσης

Υπάρχουν αρκετά βήματα που εμπλέκονται στη δημιουργία και την επαλήθευση ενός μοντέλου σε ένα υδρογεωλογικό καθεστώς, κάποια από τα οποία πρέπει να επαναλαμβάνονται με την πάροδο του χρόνου. Κάποιος πρέπει να έχει διαθέσιμο έναν προσομοιωτή ο οποίος θα μπορεί να μοντελοποιήσει το καθεστώς

(της περιοχής) που μας ενδιαφέρει. Κάποιος πρέπει να δημιουργήσει ένα θεωρητικό μοντέλο το οποίο θα αναπαριστά την πραγματικότητα στον επιθυμητό βαθμό αφαίρεσης. Κάποιος πρέπει να παρέχει αυτό το μοντέλο στον προσομοιωτή χωρίς κανένα λάθος στην μετάφραση και κάποιος πρέπει να ερμηνεύσει την έξοδο από τον προσομοιωτή.

Οι διαδικασίες για την δημιουργία ενός κατάλληλου θεωρητικού μοντέλου είναι ένα θέμα πέρα από το σκοπό αυτού του κειμένου. Παρόλ'αυτά, υποθέτοντας πως ο PTC είναι ικανός να προσομοιώνει το επιλεγόμενο θεωρητικό μοντέλο, υπάρχει ένας αριθμός βημάτων που μπορούν να ακολουθηθούν για να εξασφαλίζουμε ότι αυτό το θεωρητικό μοντέλο είναι ορθά προσομοιωμένο. Αυτή η ενότητα συζητά ζητήματα που εμπλέκονται στην παροχή πληροφοριών για τον PTC και στην λήψη πληροφοριών από τον PTC. (PTC Manual - www.argusint.com/index.html)

5.4 Καθορισμός παραμέτρων

Η επίλυση ενός προβλήματος υπογείων υδάτων χρησιμοποιώντας έναν αριθμητικό κώδικα απαιτεί την συγκεκριμενοποίηση πολλών παραμέτρων, που είναι συγκεκριμένες για την περιοχή (που μας ενδιαφέρει). Αυτές οι παράμετροι μπορούν, στην θεωρία, να γίνονται συγκεκριμένες είτε για κάθε κόμβο είτε για κάθε στοιχείο. Επειδή η αριθμητική επίλυση απαιτεί ελαφρώς λιγότερη υπολογιστική προσπάθεια όταν οι παράμετροι θεωρούνται σταθερές για ένα στοιχείο, και από τη στιγμή που όλες οι ολοκληρώσεις σε αυτόν τον κώδικα έχουν πραγματοποιηθεί αναλυτικά, αυτές οι παράμετροι θεωρούνται συγκεκριμένες και σταθερές για κάθε στοιχείο. Για το ενδεχόμενο που ένας χρήστης αποφασίσει για συγκεκριμενοποιήσει αυτές τις παραμέτρους σε κάθε κόμβο, ο κώδικας αυτόματα θα υπολογίσει τους αριθμητικούς μέσους όρους αυτών των τιμών για κάθε στοιχείο και θα χρησιμοποιήσει τον υπολογιζόμενο μέσο όρο όπως τα πραγματικά δεδομένα εισόδου.

(PTC Manual - www.argusint.com/index.html)

5.5 Αρίθμηση κόμβων

Μία προσεκτική εξέταση των εξισώσεων των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούνται είτε για την ροή είτε για την μεταφορά θα αποκαλύψει ότι ο

συντελεστής μήτρας που δημιουργήθηκε από αυτές τις εξισώσεις θα έχει μία ενωμένη δομή.

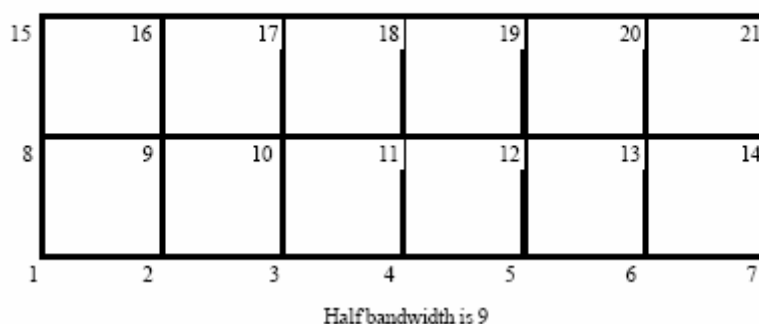
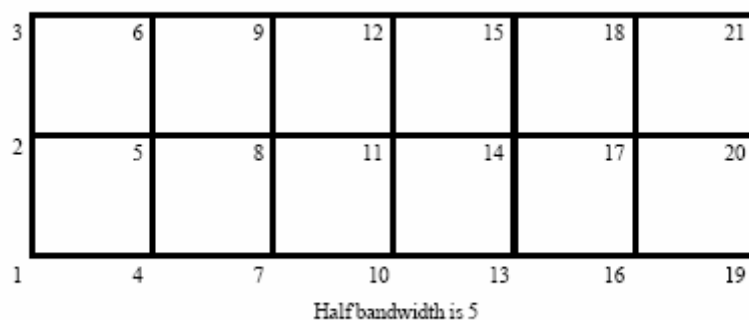
Το εύρος των μη μηδενικών στοιχείων στους συντελεστές μήτρας παίζει ένα σημαντικό ρόλο στην ποσότητα της υπολογιστικής προσπάθειας που θα απαιτηθεί για τη λύση της εξίσωσης

$$A_k h_k^{(t+\Delta t)} + \frac{(B_D)_k}{\Delta t} [h_k^{t+\Delta t} - h_k^t] - P[C_D; h]^{(t+\Delta t)} + f_k^t = 0 \quad (18)$$

και είναι σημαντικό να ελαχιστοποιήσουμε αυτή την ποσότητα. Το εύρος είναι μία συνάρτηση της μέγιστης διαφοράς ανάμεσα στους αριθμούς των κόμβων που εμφανίζονται στο ίδιο στοιχείο. Καθορίζοντας την χειρότερη διαφορά ως τη μέγιστη αυτών των διαφορών για όλο το πλέγμα, το συνολικό εύρος είναι ίσο με ένα συν το διπλάσιο της χειρότερης διαφοράς, και το μισό εύρος είναι ένα συν την χειρότερη διαφορά. Κάποιος μπορεί να μάθει μέσω της εμπειρίας του ότι το ελάχιστο εύρος παρατηρείται γενικά με την διαδοχική αρίθμηση στην κατεύθυνση του μικρότερου αριθμού στοιχείων στο μοντέλο.

Για να επεξηγήσουμε αυτό το σημείο, γίνεται αναφορά στην Εικόνα Γ-2-3, όπου ένα πλέγμα που περιέχει 12 στοιχεία και 21 κόμβους αριθμείται με δύο τρόπους. Στην περίπτωση Α, με αρίθμηση διαμέσου της μικρότερης διάστασης του πλέγματος, το μισό εύρος είναι πέντε όπως δεικνύεται από την μέγιστη κομβική διαφορά των οκτώ. Στην περίπτωση Β, με αρίθμηση διαμέσου της μεγαλύτερης διάστασης του πλέγματος, το μισό εύρος είναι εννέα.

Όταν χρησιμοποιείται η επιλογή για την επίπτωση της παραγωγίσιμης, η αρίθμηση των κόμβων πάντοτε αυξάνει κατά μήκος του άξονα x ; παρόλ' αυτά, μία εσωτερική αναρίθμηση εμφανίζεται ώστε η αρίθμηση της εξίσωσης να είναι η βέλτιστη. Όταν εισάγεται ένα πλέγμα, είναι πιθανό να διευκρινιστεί ρητά η εσωτερική αναρίθμηση, ίσως χρησιμοποιώντας κάποιον ελαχιστοποιητή του εύρους.



Εικόνα Γ-2-3 : Δύο όμοιες διαμορφώσεις στοιχείων με μαρκαρισμένα διαφορετικά εύρη, υπαγορευμένα από την επιλογή του κομβικού σχεδίου αρίθμησης.

(PTC Manual - www.argusint.com/index.html)

(PTC Manual - www.argusint.com/index.html)

5.6 Έλεγχος σφάλματος του PTC

Ένας μεγάλος αριθμός τμημάτων πληροφοριών πρέπει να εισαχθούν στον PTC, και αναπόφευκτα κάποιες από αυτές θα είναι λανθασμένα ή ακατάλληλα συγκεκριμενοποιημένες στα αρχικά στάδια της δημιουργίας του μοντέλου. Αναλόγως, είναι πάρα πολύ σημαντικό να επαληθεύσουμε όλα τα εισαχθέντα στον PTC, δεδομένα και γι' αυτό το σκοπό μπορεί να ακολουθηθεί ένας αριθμός μεθόδων.

Ο PTC είναι ικανός να βοηθήσει με συγκεκριμένα βασικά θέματα για τον έλεγχο των σφαλμάτων. Ο PTC ελέγχει ότι οι διαστάσεις και οι δείκτες είναι συμβατά με τα δεδομένα εισόδου όποτε είναι κατάλληλα. Ο PTC επίσης πραγματοποιεί μία σειρά από ελέγχους πριν από το τρέξιμο SIM, συμπεριλαμβανομένων ελέγχων με απλή επαλήθευση του πλέγματος και εγκυρότητας των παραμέτρων. Αυτοί οι τελευταίοι έλεγχοι εξασφαλίζουν ότι κάθε στοιχείο είναι γεωμετρικά κατάλληλο, ότι

όλα τα στρώματα έχουν θετικό πάχος, και ότι κάθε ιδιότητα υλικού είναι θετική.

Όταν τρέχουν οι προσομοιώσεις για το επίπεδο του ύδατος (στάθμης ύδατος), κάθε χρονικό βήμα η στάθμη του ύδατος ελέγχεται για να εξασφαλιστεί ότι κείται πλήρως εντός του ανώτερου στρώματος. Εάν κάποιος από αυτούς τους ελέγχους παραβιαστεί, το προσβαλλόμενο στοιχείο ή κόμβος επισημαίνεται στην έξοδο και η εκτέλεση σταματάει.

Αυτοί οι έλεγχοι είναι χρήσιμοι για την εύρεση χονδροειδών λαθών στην είσοδο, αλλά φυσικά παρέχουν μόνο μία ελάχιστη ασφάλεια. Δεν υπάρχει καμία ασφάλεια ότι τα στοιχεία είναι τοποθετημένα σωστά, ότι οι παράμετροι έχουν φυσική υπόσταση, ή ότι οι εφαρμοζόμενες τάσεις βρίσκονται στην σωστή τοποθεσία. Κατά συνέπεια, οι έλεγχοι είναι μόνο ένα αρχικό σημείο για μία συνολική προσπάθεια επαλήθευσης.

Ο PTC αντηχεί την εισαγωγή οποιασδήποτε παραμέτρου απαιτήσεως, όσες φορές και αν απαιτηθεί, κάτι που επιτρέπει για έλεγχο – διασταύρωση των παραμέτρων σε σχέση με τα αναμενόμενα δεδομένα εισόδου σε διάφορα σημεία κατά τη διάρκεια της εισόδου των δεδομένων. Αυτό είναι και πάλι χρήσιμο για την εύρεση των χονδροειδών λαθών, αλλά μπορεί να είναι γενικά ιδιαίτερα κουραστικό.

(PTC Manual - www.argusint.com/index.html)

5.7 Έλεγχος γραφικών σφαλμάτων

Έχει βρεθεί ότι η γραφική εξέταση του πλέγματος, των παραμέτρων, των αρχικών συνθηκών, και της επίλυσης είναι μία πολύ αποτελεσματική μέθοδος για την επαλήθευση των δεδομένων εισόδου του θεωρητικού μοντέλου. Μπορεί να είναι αμέσως εμφανές ότι ένα πηγάδι είναι σε λάθος τοποθεσία μετά από εξέταση ενός σχεδίου ισοϋψών του υδραυλικού ύψους, για παράδειγμα. Παρομοίως, ένας χάρτης ισοϋψών των παραμέτρων θα αποκαλύπτει συχνά ανακριβείς προδιαγραφές,

Με αυτή την παρατήρηση υπόψιν, ο PTC παρέχει την μεθοδολογία για την εξαγωγή των παραμέτρων και των λύσεων σε ένα αρχείο με μορφοποίηση κατάλληλη για γράφημα (εμφάνιση δεδομένων με μορφή γραφήματος).

Από την στιγμή που είναι δυνατόν να καθοριστεί καταλλήλως, από πριν, η ορθή μορφοποίηση για κάθε πακέτο γραφημάτων, οι πραγματικά ορθές δηλώσεις που ευθύνονται για την εξαγωγή στο αρχείο μπορεί να χρειαστεί να μετατραπούν πριν από την σύνταξη ούτως ώστε να είναι κατάλληλες για μία ανεξάρτητη εφαρμογή. Αυτές

οι ορθές δηλώσεις περιορίζονται από τις υπορουτίνες PTCGRF και PGRVAL στην ενότητα PTCOUT (οι υπορουτίνες PTCGRF και PGRVAL παρέχονται στις εξαγόμενες πληροφορίες σε ένα αρχείο γραφικών, συμπεριλαμβανομένου τιμών πλέγματος και κομβικών συναρτήσεων. Οποιαδήποτε εμπορικά διαθέσιμα, πακέτα γραφικών θα πρέπει να είναι ικανά να χρησιμοποιήσουν την έξοδο από τις υπορουτίνες, δίνοντας κατάλληλη μορφοποίηση από το σύνολο των δεδομένων. Εάν η έξοδος πρόκειται να προσαρμοστεί σε ένα συγκεκριμένο πακέτο γραφικών, η έξοδος από τις PTCGRF και PGRVAL μπορεί να προσαρμοστεί σ' αυτό το πακέτο με αλλαγή των σημειωμένων ορθών δηλώσεων).

(PTC Manual - www.argusint.com/index.html)

5.8 Έλεγχος σφάλματος στην ισορροπία της μάζας

Ο PTC παρέχει δυνατότητες για την ισορροπία της μάζας, τόσο για προσομοιώσεις ροής όσο και για προσομοιώσεις μεταφοράς. Η ισορροπία μάζας που εξάγεται παρέχει μία εξαιρετική επίδειξη των πιθανών σφαλμάτων χωρικής και χρονικής διακριτοποίησης, καθώς μία φτωχή επιλογή του χρονικού βήματος ή του μεγέθους του πλέγματος θα οδηγήσει σε μία φτωχή ισορροπία μάζας.

(PTC Manual - www.argusint.com/index.html)

5.9 Φιλοσοφία δεδομένων εισόδου / εξόδου

Ο PTC είναι ένα πακέτο που λειτουργεί με την καθοδήγηση εντολών, και είναι αρκετά ελαστικό στη δομή των δεδομένων εισόδου / εξόδου. Η δομή των δεδομένων εισόδου έχει σχεδιαστεί να είναι από μόνη της μία γλώσσα προγραμματισμού, καθώς η χρήση του προγράμματος μπορεί να μεταβάλλεται σε μεγάλο εύρος μέσα από τις διαφορετικές εφαρμογές. Αναλόγως, ο PTC παρέχει ισχυρές διευκολύνσεις για συγκεκριμένα δεδομένα εισόδου και απαιτούμενα δεδομένα εξόδου. Σημειώνουμε ότι όλα τα δεδομένα εξόδου πρέπει να είναι ειδικώς απαιτούμενα ; κανένα δεδομένο εξόδου δεν θα παράγεται αν δεν ζητείται πρώτα.

(PTC Manual - www.argusint.com/index.html)

6. ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΜΑΖΑΣ ΣΤΗΝ ΕΞΟΔΟ

6.1 Ισορροπία μάζας ρευστού στην έξοδο

Ο στόχος της διαδικασίας ισορροπίας της μάζας είναι να παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ανεξάρτητα υπολογιζόμενη δρώσα δύναμη του δικτύου κατά μήκος του ορίου της περιοχής του μοντέλου και της αλλαγής της μάζας στην περιοχή. Καθώς αναφερόμαστε σ' αυτή τη διαδικασία ως μία ισορροπία μάζας, όλα τα δεδομένα εξόδου είναι σε όρους ισορροπίας όγκου. Αυτό είναι ισοδύναμο των περιπτώσεων της σταθερής πίεσης. Η ισορροπία όγκου για ένα ρευστό με τον PTC παρέχει πληροφορίες για τον ολικό βαθμό ογκομετρικής δρώσας δύναμης σε κάθε ένα από τους μηχανισμούς με τους οποίους μεταφέρεται το ρευστό. Σε κάθε περίπτωση η δρώσα δύναμη εντός της περιοχής και η δρώσα δύναμη εκτός της περιοχής δίνονται.

Η συνολική δρώσα δύναμη εντός της περιοχής αντιπροσωπεύει το σύνολο των δρωσών δυνάμεων στους κόμβους στους οποίους οι δρώσα δύναμη κατευθύνεται εντός της περιοχής ; παρομοίως. Η δρώσα δύναμη εκτός είναι το σύνολο όλων των εξωτερικών κομβικών δρωσών δυνάμεων.

(PTC Manual - www.argusint.com/index.html)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

«ΕΦΑΡΜΟΓΗ PTC (ArgusOne) ΣΤΟΝ ΥΠΟΓΕΙΟ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΛΙΜΕΝΑ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ-ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ»

1. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ARGUSONE ΚΑΙ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ (ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ) ΕΠΙΛΥΣΗΣ PTC ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ

1.1 Γενικά

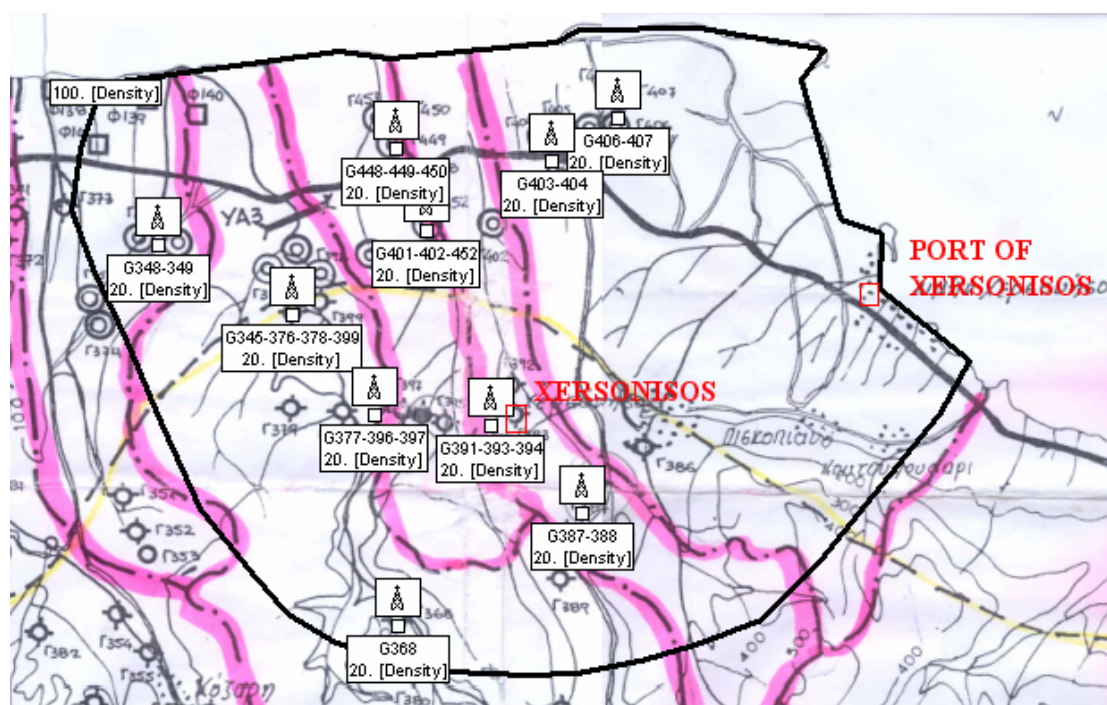
Αρχικά, πρέπει να σημειώσουμε πως στην εφαρμογή του μοντέλου στην περιοχή της Χερσονήσου, χρησιμοποιείται για τη διακριτοποίηση του πεδίου (δηλαδή της περιοχής) η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, σύμφωνα με την οποία έχουμε τμηματοποίηση της περιοχής σε στοιχεία τριγωνικού σχήματος, όπου οι κόμβοι βρίσκονται στις κορυφές αυτών των τριγώνων.

Η θέση της περιοχής καθώς και οι θέσεις των γεωτρήσεων, δηλαδή των πηγαδιών άντλησης φαίνονται στην Εικόνα Γ-3-1 και Γ-3-2:



Εικόνα Γ-3-1 : Θέση Λιμένος Χερσονήσου μέσα στο νομό Ηρακλείου
(www.vres.gr/state.php?state_id=17)

Αμέσως παρακάτω παρατίθεται ένας δεύτερος χάρτης, στον οποίο φαίνονται οι θέσεις των γεωτρήσεων στην περιοχή μελέτης:



Εικόνα Γ-3-2 : Χάρτης της περιοχής μελέτης στον οποίο φαίνονται οι θέσεις των γεωτρήσεων σε σχέση με την πόλη και το Λιμένα Χερσονήσου

1.2 Περιγραφή των εξεταζόμενων παραμέτρων

Εκτός από το παράδειγμα χρήσης του μοντέλου ArgusOne, το οποίο παρατίθεται στο παράρτημα της διπλωματικής, εδώ παρουσιάζουμε την εφαρμογή του μοντέλου για την περιοχή της Χερσονήσου και συγκεκριμένα του υπόγειου υδροφορέα στο Λιμένα Χερσονήσου, για την πραγματοποίηση ανάλυσης ευαισθησίας. Για την πραγματοποίηση της ανάλυσης ευαισθησίας στηριχθήκαμε σε δύο παραμέτρους: (α) τις παροχές αντλήσεως των πηγαδιών και, (β) τις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας, εφόσον δεν έχει ενιαία τιμή σε όλο το εύρος της περιοχής. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήσαμε μεταβολές στις τιμές αυτών των δύο παραμέτρων.

Πρέπει να αναφέρουμε πως η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιήθηκε για περίοδο μελέτης ίση με ένα έτος (360 ημέρες). Αυτή η περίοδος χωρίζεται σε δύο υποπεριόδους, χειμώνα και καλοκαίρι (180 ημέρες για την κάθε περίοδο). Η προσομοίωση της ροής, της ταχύτητας και της μάζας, που περιλαμβάνει το μοντέλο, έγινε σε χρονικό βήμα 0,5 ημερών. Δηλαδή συνολικά πραγματοποιήσαμε 720

βήματα. Επίσης στα δεδομένα εισόδου του μοντέλου εισαγάγαμε πως ο υπόγειος υδροφορέας είναι ελεύθερος. Στη συνέχεια, αναφερόμαστε στο είδος των αλλαγών που πραγματοποιήσαμε στις προαναφερόμενες δύο παραμέτρους, όπως επεξηγείται αναλυτικά παρακάτω:

1.2.1 Αναφορά μεταβολών παραμέτρων

1. **Στις παροχές αντλήσεως των πηγαδιών τα οποία έχουμε τοποθετήσει στην περιοχή μελέτης και τις αλλαγές αυτών.** Εδώ επεξεργαζόμαστε δύο διαφορετικές εκδοχές. Αρχικά αυξάνουμε τις παροχές κατά ένα ποσό ίσο με τα δύο τρίτα ($2/3$ ή 67%) της αρχικής τιμής και για τις δύο περιόδους (χειμώνα και καλοκαίρι) και έπειτα τις μειώνουμε, πάλι και για τις δύο περιόδους, κατά ένα ποσό όμοιο με το προαναφερθέν ($2/3$ ή 67%). Κατόπιν ελέγχουμε τις ποσοστιαίες μεταβολές των υδραυλικών υψών, διαπιστώνοντας την ευαισθησία της περιοχής σε διάφορες υποπεριοχές.
2. **Στις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας, η οποία διαφοροποιείται ανάλογα με το τμήμα της περιοχής στο οποίο αναφερόμαστε και τις αλλαγές αυτών.** Εδώ επίσης αλλάζουμε τις δοθείσες τιμές κατά ποσοστά ίσα με 10%, κάτι που πραγματοποιείται και για περίπτωση αύξησης αλλά και μείωσης αυτών και για τις δύο περιόδους. Κατόπιν, όπως και παραπάνω ελέγχουμε τις ποσοστιαίες μεταβολές των υδραυλικών υψών, διαπιστώνοντας την ευαισθησία της περιοχής σε διάφορες υποπεριοχές.

Σημειωτέον πως η παροχή που αντιστοιχεί στην χρονική περίοδο (που σημειώνεται ως 2^η περίοδος στην λήψη και επεξεργασία των αποτελεσμάτων) του καλοκαιριού είναι τριπλάσια απ'ότι η αντίστοιχη του χειμώνα (ο οποίος αναφέρεται αντίστοιχα ως 1^η περίοδος), καθότι όπως είναι φυσικό το καλοκαίρι οι ανάγκες για νερό είναι πολύ μεγαλύτερες απ'ότι το χειμώνα άρα αντίστοιχη βαρύτητα πρέπει να δοθεί και στις παροχές αντλήσεως των πηγαδιών. Επίσης η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας στην κατακόρυφη διεύθυνση (z-άξονα) είναι το $1/10$ (10%) της τιμής στις δύο άλλες διευθύνσεις.

Τέλος, όσον αφορά τον τρόπο με τον οποίο καθορίζονται η περίοδος μέτρησης καθώς και το χρονικό βήμα των μετρήσεων και διάφοροι άλλοι παράμετροι επεξηγείται στο παράρτημα, όπου παρατίθεται ένα απλό μεν, αλλά πλήρες για την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του μοντέλου ArgusOne, παράδειγμα με συμμετοχή όλων των παραμέτρων που θα αναφέρουμε και παρακάτω.

1.3 Εισαγωγή οριακών και αρχικών συνθηκών περιοχής μελέτης.

Έπειτα καθορίσαμε τις τιμές των οριακών συνθηκών που δώσαμε για την δημιουργία της συγκεκριμένης περιοχής μελέτης. Έτσι, αναφερθήκαμε:

- ✓ στις οριακές συνθήκες της περιοχής (Boundary conditions – BC Flow) χρησιμοποιώντας και τους δύο τύπους συνθηκών (σταθερές και μη ή 1^ο και 2^ο τύπου όπως ονομάζονται), λαμβάνοντας υπόψιν ότι ο υδροφορέας έχει ελάχιστο ύψος στην παράκτια ζώνη τα 100m,
- ✓ στα πηγάδια που τοποθετήσαμε στην περιοχή, εφαρμόζοντας μία μορφή ομαδοποίησης ούτως ώστε να μειωθεί ο αριθμός τους (καταλήγοντας σε δέκα) και να αυξηθούν οι παροχές αντλήσεως (αφού τα καινούργια πηγάδια είχαν ως παροχές τις αθροισμένες παροχές των προηγούμενων πηγαδιών, από τα οποία προήλθαν) για να μπορέσουμε να έχουμε αξιόλογα αποτελέσματα, που θα μας έδιναν αξιοποιήσιμες ποσοστιαίες μεταβολές στα υδραυλικά ύψη για την πραγματοποίηση της ανάλυσης ευαισθησίας,
- ✓ στα αρχικά υδραυλικά ύψη της περιοχής (Initial Heads), προσπαθώντας να προσομοιώσουμε την ζώνη υφαλμύρωσης της περιοχής στα 102.5 ft,
- ✓ στα διάφορα επίπεδα ύψους του εδάφους (Elevation), λαμβάνοντας υπόψιν, όπως και παραπάνω, το γεγονός ότι ο υδροφορέας φτάνει στο ύψος των 100m στην παράκτια ζώνη και θέτοντας έτσι ως ελάχιστη τιμή τα 200m,
- ✓ στο κατώτατο ύψος επιπέδου (Bottom Elevation), το οποίο, ως γίνεται συνήθως το θεωρήσαμε ίσο με 0,
- ✓ στο πορώδες (Porosity) στο οποίο δώσαμε μία τιμή για όλη την περιοχή μελέτης ίση με 0,2,

- ✓ στην αποθηκευτικότητα (Storativity) την τιμή της οποίας αφήσαμε όπως την είχε θεωρήσει το μοντέλο ίση με 10^{-4} ,
- ✓ στην βροχή (Rain), στην οποία δώσαμε δύο τιμές, μία για χειμώνα και μία για καλοκαίρι (0,000354 m/day και 0 m/day αντίστοιχα),
- ✓ στην αγωγιμότητα (Conductivity) στην οποία δόθηκαν διαφορετικές τιμές ανάλογα με τα διαφορετικά τμήματα της περιοχής,
- ✓ στην διασπορά (Dispersivity), της οποίας η τιμή έμεινε όπως είχε οριστεί στο μοντέλο και ίση με 1 και
- ✓ στην απορρόφηση (Absorption), που ομοίως με παραπάνω η τιμή της έμεινε ίση με 0.

Πρέπει να αναφέρουμε πως θεωρήσαμε ένα στρώμα (Layer) για όλη την περιοχή μελέτης. Συνοπτικά οι τιμές που δόθηκαν στις προαναφερθείσες παραμέτρους παρουσιάζονται στους παρακάτω Πίνακες:

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΤΙΜΗ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΤΙΜΗ
Οριακές Συνθήκες	100m κατά μήκος της παράκτιας ζώνης (1ου είδους συνθήκη) και μεταβαλλόμενη τιμή στα όρια της ενδοχώρας (2ου είδους συνθήκη)	Αποθηκευτικότητα	0,0001
Αρχικά Υδραυλικά Ύψη	Παίρνουν τιμές από 100,5 m κοντά στην παράκτια ζώνη και αυξάνονται προς το εσωτερικό μέχρι και τα 105,5 m	Βροχή	0,000354 m το χειμώνα και 0 m το καλοκαίρι
Επίπεδο Εδάφους	Ξεκινάει από τα 200 m και φτάνει μέχρι και τα 500 m βάσει των ισοϋψών	Υδραυλική Αγωγιμότητα	Εδώ έχουμε διάφορες τιμές ανάλογα με το τμήμα της περιοχής. Οι τιμές της ξεκινούν από τα 0,15 m/day και φτάνουν μέχρι και τα 430 m/day στην παράκτια ζώνη
Κατώτατο Επίπεδο	0 m	Διασπορά	1 (και στις τρεις διαστάσεις)
Πορώδες	0,2	Απορρόφηση	0

Πίνακας Γ-3-1 : Τιμές παραμέτρων εισόδου

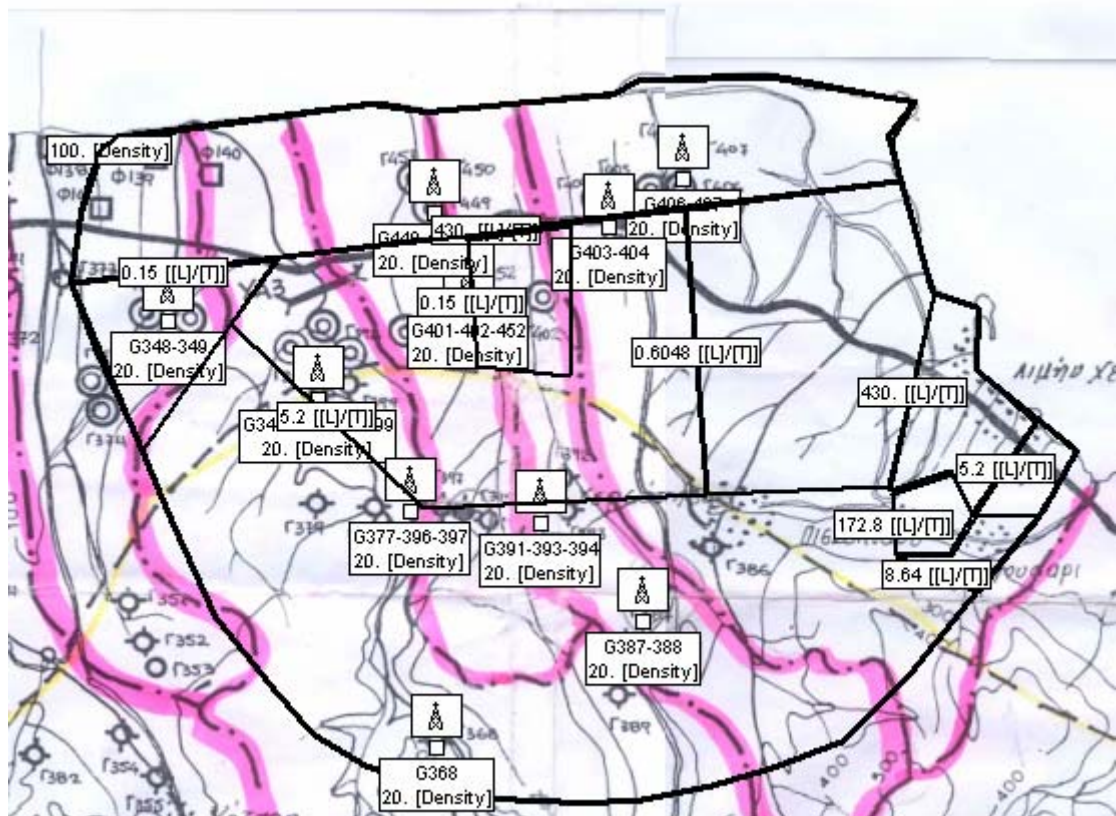
ΠΗΓΑΔΙΑ	ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΥΨΟΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΝΤΛΗΣΕΩΣ	ΧΕΙΜΩΝΑΣ(m ³ /d)	ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ(m ³ /d)
Γ368 (G368)	10	240	720
Γ345-376-378-399 (G345-376-378-399)	1	1000	3000
Γ387-388 (G387-388)	7	560	1680
Γ391-393-394 (G391-393-394)	2	840	2520
Γ377-396-397 (G377-396-397)	6	640	1920
Γ401-402-452 (G401-402-452)	4	800	2400
Γ448-449-450 (G448-449-450)	8	480	1440
Γ348-349 (G348-349)	2	840	2520
Γ406-407 (G406-407)	4	800	2400
Γ403-404 (G403-404)	9	440	1320

Πίνακας Γ-3-2 : Αρχικές παροχές αντλήσεως πηγαδιών

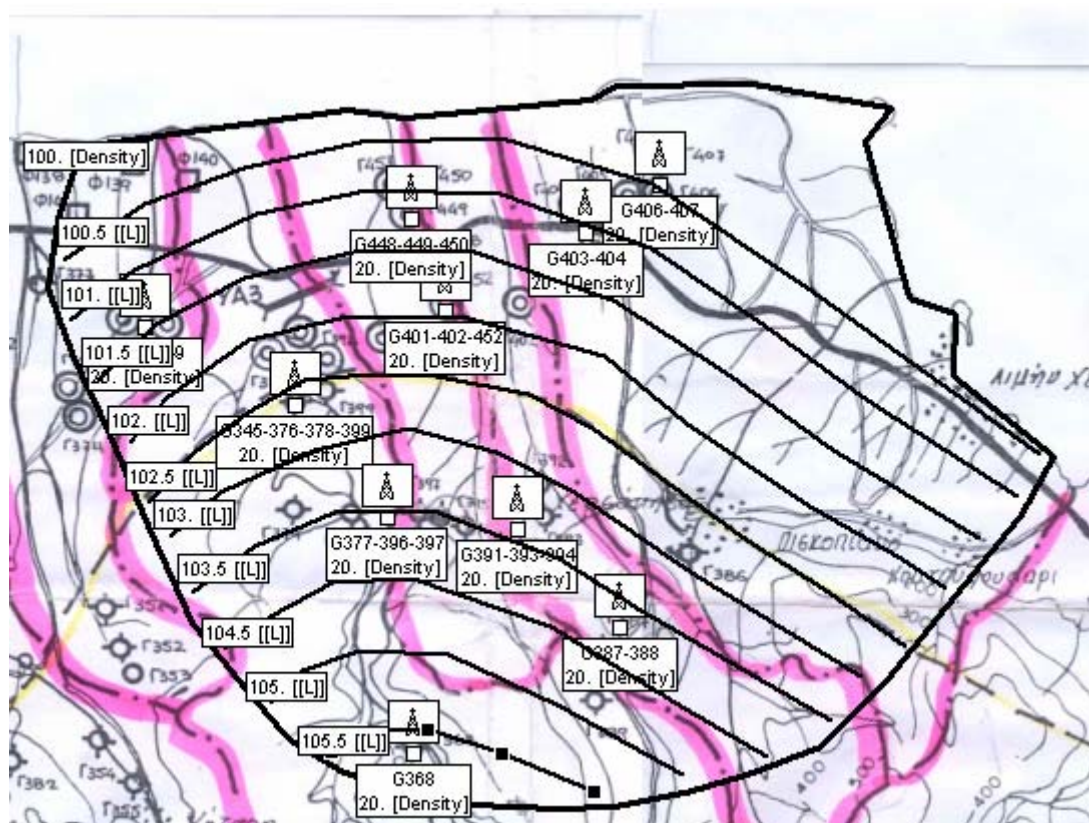
Σημείωση: Η δεύτερη στήλη αναφέρεται στη θέση του πηγαδιού ανάλογα με το ύψος της παροχή αντλήσεως.

Στον πρώτο από τους παραπάνω πίνακες παρουσιάζονται οι τιμές που παίρνουν οι παράμετροι και στον δεύτερο οι τιμές των παροχών αντλήσεως των ομαδοποιημένων πηγαδιών.

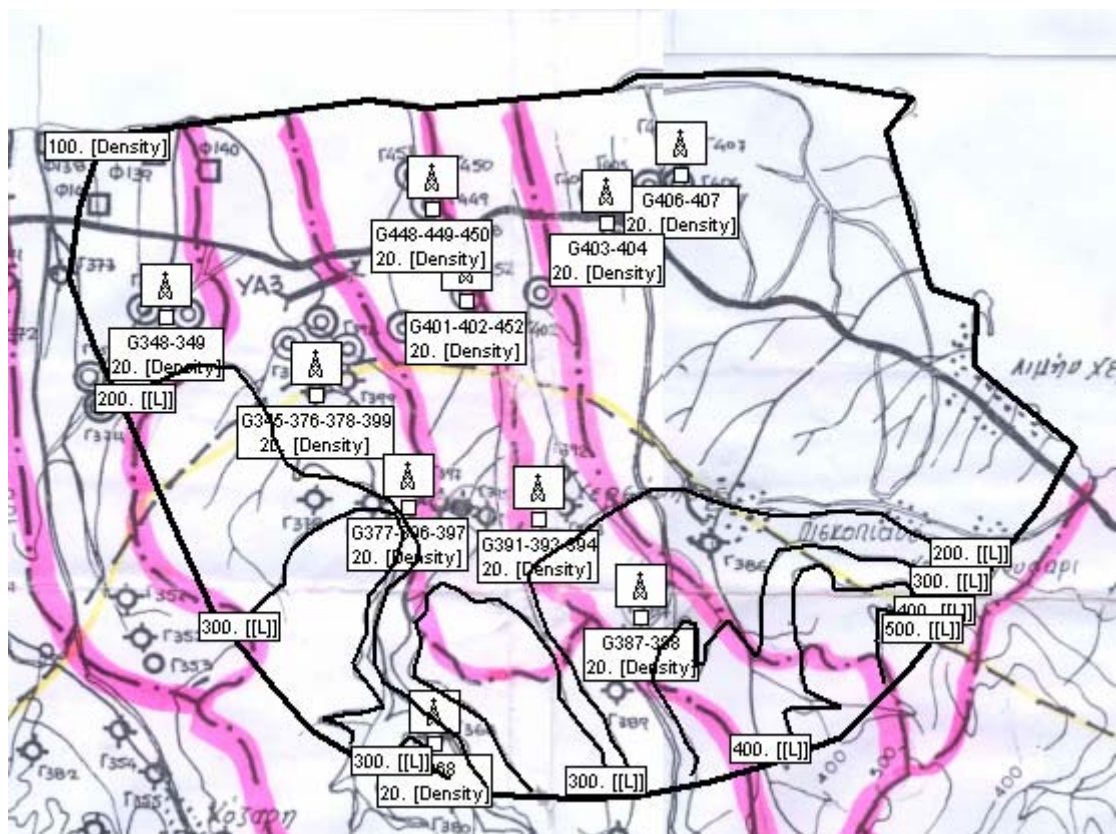
Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται: (α) οι διάφορες υποπεριοχές στις οποίες χωρίζεται η περιοχή μελέτης ανάλογα με την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας που υπάρχει (Εικόνα Γ-3-3), (β) οι ισοϋψείς καμπύλες των αρχικών υδραυλικών υψών που εισήχθησαν αρχικά για την καλύτερη δυνατή προσομοίωση της περιοχής και της ζώνης υφαλμύρωσης (Εικόνα Γ-3-4), (γ) οι ισοϋψείς καμπύλες των επιπέδων του εδάφους μέσα στην περιοχή (Εικόνα Γ-3-5) και, (δ) οι θέσεις των πηγαδιών και οι εισαχθείσες οριακές συνθήκες της περιοχής (1^{ου} και 2^{ου} τύπου – σταθερές και μη, Εικόνα Γ-3-6).



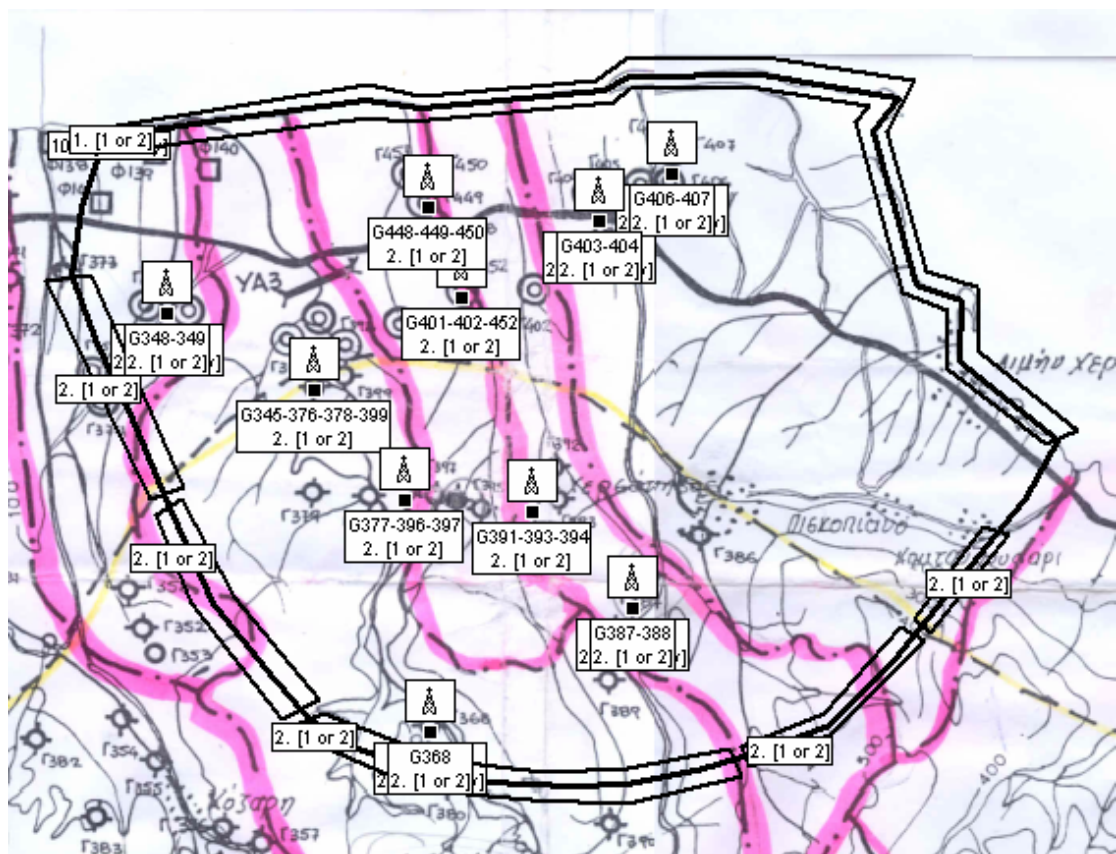
Εικόνα Γ-3-3 : Υποπεριοχές με διαφορετική υδραυλική αγωγιμότητα



Εικόνα Γ-3-4 : Ισοϋψείς καμπύλες των αρχικών υδραυλικών υψών



Εικόνα Γ-3-5 : Ισοϋψείς καμπύλες επιπέδων εδάφους



Εικόνα Γ-3-6 : Θέσεις πηγαδιών και εισαχθείσες οριακές συνθήκες περιοχής

1.4 Διαδικασία «τρέξιματος» μοντέλου-μέθοδοι προσομοίωσης

Έπειτα από την εισαγωγή των τιμών των παραπάνω παραμέτρων, πραγματοποιήσαμε τον χωρισμό της περιοχής σε στοιχεία (elements) τριγωνικής μορφής (μέσω του meshing – δημιουργία πλέγματος). Ακολούθησε η βελτιστοποίηση του εύρους ζώνης της περιοχής (optimize bandwidth) και τέλος το «τρέξιμο» του μοντέλου απ' όπου πήραμε τα τελικά αποτελέσματα σχετικά με τα υδραυλικά ύψη. Αυτά τα αποτελέσματα θα χρησιμοποιηθούν για τη σύγκριση με τις διάφορες περιπτώσεις αλλαγής στις παροχές άντλησης και στις τιμές της αγωγιμότητας στα διάφορα τμήματα της περιοχής, όπως προαναφέραμε.

Κάτι σημαντικό που πρέπει να αναφέρουμε και το οποίο σαφέστατα επηρέασαν τα εξαχθέντα αποτελέσματα του μοντέλου είναι πως όσο μεγαλύτερη είναι η παροχή άντλησης ενός πηγαδιού, τόσο περισσότερο αυτή θα επηρεάζουν το ύψος της μεταβολής των υδραυλικών υψών. Συγκεκριμένα κατά την αύξηση της παροχής αντλήσεως υπήρξε μείωση των αρχικών υδραυλικών υψών, ενώ το αντίθετο συνέβαινε κατά την μείωση της παροχής άντλησης. Επίσης, όσο μεγαλύτερη είναι η υδραυλική αγωγιμότητα σε μία περιοχή, τόσο μικρότερη θα είναι η υδραυλική κλίση στην περιοχή αυτή, για δεδομένη παροχή αντλήσεως, σύμφωνα και με το νόμο του Darcy :

$$Q = qA = -KA \partial h / \partial s = KA i = \frac{k \rho g}{\mu} A i$$

άρα τόσο μικρότερη θα είναι και η μεταβολή των υδραυλικών υψών. Ο συνδυασμός βέβαια των δύο παραπάνω περιπτώσεων, κάτι που μας ενδιαφέρει εδώ, είναι αυτός που θα μας δώσει το ύψος της μεταβολής των υδραυλικών υψών.

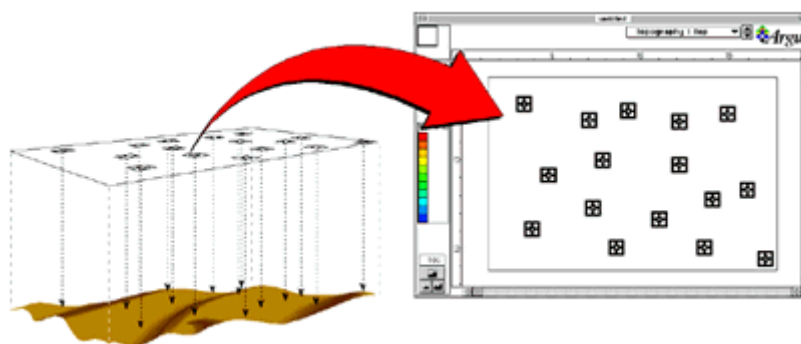
Συμπερασματικά, σε μία περιοχή με μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα και μικρές παροχές αντλήσεως θα παρατηρηθούν και μικρές μεταβολές στα υδραυλικά ύψη. Το αντίθετο θα συμβεί στην περίπτωση όπου έχουμε μικρή υδραυλική αγωγιμότητα και μεγάλες παροχές αντλήσεως. Φυσικά σε κάποια ενδιάμεση περίπτωση τα αποτελέσματα της μεταβολής των υδραυλικών υψών θα εξαρτώνται από το ύψος των δύο παραπάνω παραμέτρων και το πόσο αυτές μεταβάλλονται. Πάντως οι μεγαλύτερες μεταβολές, και αυτό είναι που μας ενδιαφέρει, θα σημειωθούν (αν φυσικά συμβαίνει κάτι τέτοιο σε κάποιο τμήμα της περιοχής μελέτης) εκεί όπου θα έχουμε πολύ μεγάλη παροχή αντλήσεως και πολύ μικρή

υδραυλική αγωγιμότητα ή εκεί όπου θα συμβαίνει το αντίθετο, δηλαδή θα έχουμε μικρή παροχή αντλήσεως και μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα.

Παρακάτω εξετάζεται η κάθε περίπτωση χωριστά, αρχικά για τις παροχές αντλήσεως των πηγαδιών και έπειτα για τις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας στα διάφορα τμήματα της περιοχής μελέτης.

Σημείωση : Για την πραγματοποίηση της εφαρμογής του μοντέλου στις διάφορες περιπτώσεις, χρησιμοποιήθηκε :

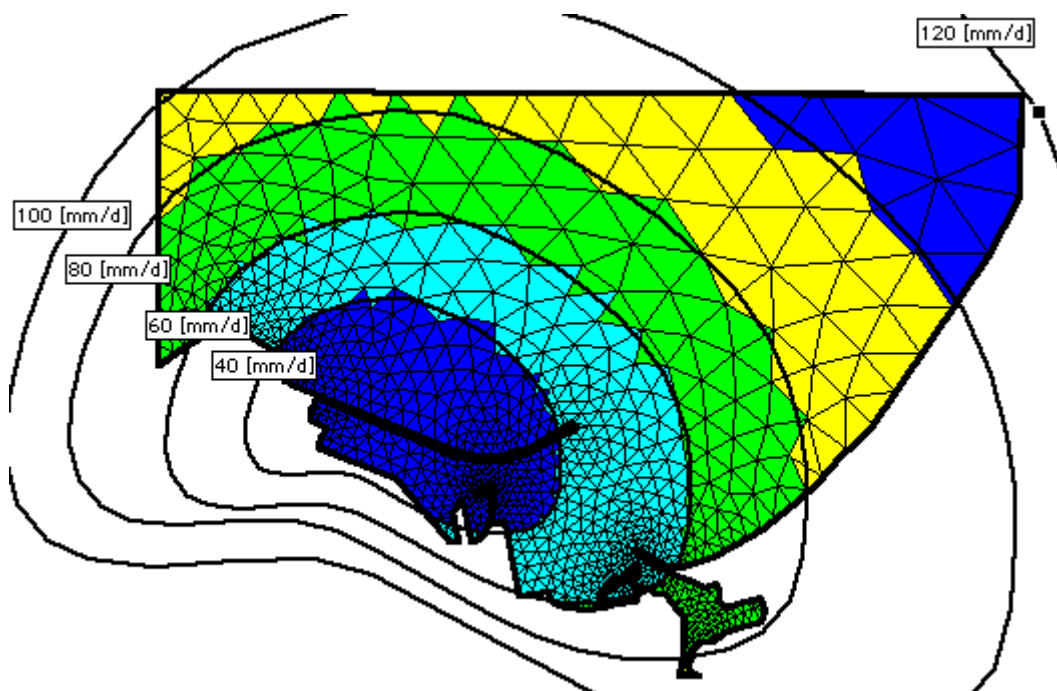
- η μέθοδος της γραμμικής παρεμβολής (Interpolation method) για την περίπτωση των αλλαγών στις παροχές αντλήσεως των πηγαδιών. Σε πολλές περιπτώσεις, συγκεντρώνονται πληροφορίες για τα διαθέσιμα σημεία. Το Argus ONE υποστηρίζει την εισαγωγή πολλών τύπων και μορφών πληροφοριών για τα σημεία. Η ερμηνεία αυτών των τύπων των πληροφοριών για την πλεγματοποίηση αντικειμένων πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας την Interpolation method.



Εικόνα Γ-3-7 : Δεδομένα πλέγματος μετατρέπονται σε στοιχεία πλέγματος
(www.argusint.com)

Η παραπάνω Εικόνα Γ-3-7 δείχνει πως δεδομένα πλέγματος μετατρέπονται σε στοιχεία πλέγματος. Μπορούμε γι' αυτό το σκοπό να χρησιμοποιήσουμε τα επίπεδα πληροφορίας Data, Information, Grid and Mesh (τα οποία φαίνονται, όπως αναφέρεται και στο παράδειγμα του παραρτήματος, στο αρχικό παράθυρο του μοντέλου) για την απλοποίηση των δεδομένων και την αναβάθμιση τους μέσα στα αριθμητικά πλέγματα.

- η μέθοδος των ακριβών ισοϋψών καμπυλών ή μέθοδος της ακριβούς ερμηνείας (Exact Contour method, δηλαδή η μέθοδος που χρησιμοποιεί με ακρίβεια της ισοϋψείς καμπύλες). Χρησιμοποιώντας την μέθοδο αυτή ένα ορισμένο σημείο επιστρέφει την τιμή του περιγράμματος (καμπύλης) στο οποίο ανήκει. Σημεία τα οποία βρίσκονται έξω από τις ισοϋψείς μας δίνουν την προκαθορισμένη τιμή του στρώματος στο οποίο ανήκουν. Στο ακόλουθο γράφημα Γ-3-1 φαίνονται όλες οι τιμές των κέντρων των στοιχείων στο πλέγμα και είναι αξιολογημένες (ορισμένες) πάντοτε αντίστοιχα με τον χάρτη του πλέγματος που παρουσιάζεται, χρησιμοποιώντας την Exact Contour method :



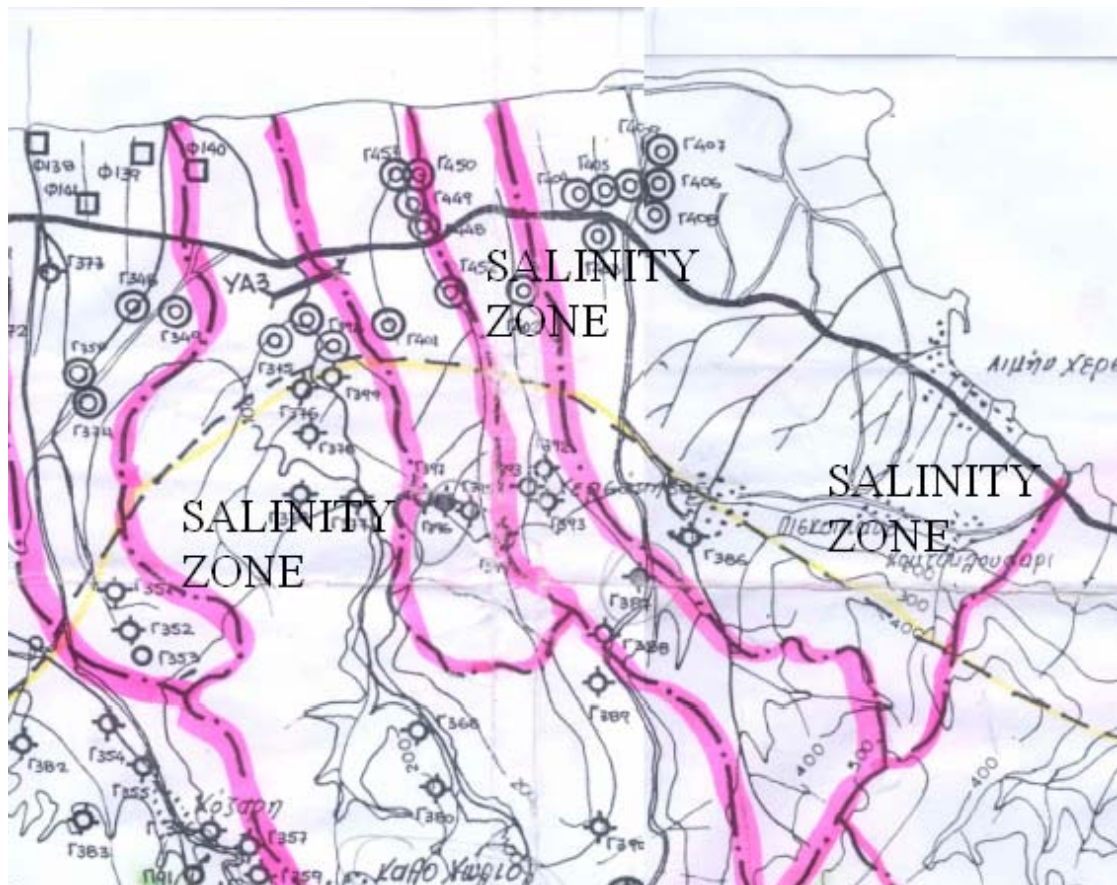
Γράφημα Γ-3-1 : Επίλυση πλέγματος με την Exact Contour method

(www.argusint.com)

1.5 Επιπλέον στόχος η προσομοίωση της ζώνης υφαλμύρωσης

Το τελευταίο σημείο στο οποίο πρέπει να σταθούμε προτού αναφερθούμε αναλυτικά στις δύο περιπτώσεις, είναι πως ένας επιπλέον στόχος μας πέρα από την πραγματοποίηση της ανάλυσης ευαισθησίας είναι τα υδραυλικά ύψη που θα πάρουμε

στα αποτελέσματα, να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν καλύτερα την ζώνη υφαλμύρωσης της περιοχής η οποία παρουσιάζεται στο υδραυλικό ύψος των 102,5 ft, όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα Γ-3-8. Θα πρέπει δηλαδή το υδραυλικό ύψος των 102,5 ft που θα πάρουμε από τα αποτελέσματα του μοντέλου να προσεγγίζει όσο το δυνατόν καλύτερα αυτή τη ζώνη (γραμμή) υφαλμύρωσης.



Εικόνα Γ-3-8 : Θέση της ζώνης υφαλμύρωσης (salinity zone) στην περιοχή μελέτης

2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

2.1 Αλλαγές τιμών παραμέτρων

2.1.1 Αλλαγές στις τιμές των παροχών άντλησης

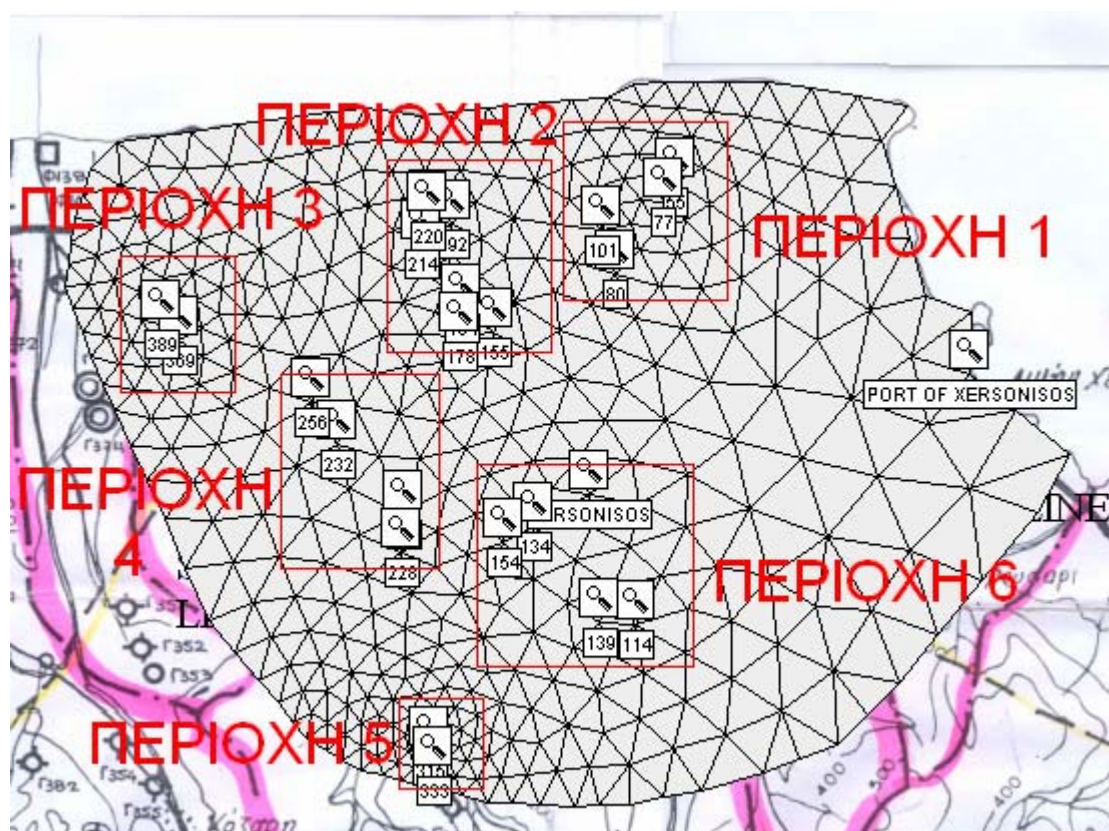
Αρχικά λοιπόν προχωρήσαμε σε αλλαγές των τιμών των παροχών άντλησης των πηγαδιών όπως φαίνεται και στον παρακάτω Πίνακα Γ-3-3. Οι αρχικές τιμές των παροχών αρχικά αυξήθηκαν και έπειτα μειώθηκαν κατά ένα συντελεστή ίσο με δύο τρίτα (ή αλλιώς περίπου 67%) σε σχέση με τις αρχικές τιμές τους. Οι αλλαγές αυτές στις τιμές των παροχών πραγματοποιήθηκαν για κάθε πηγάδι χωριστά, ούτως ώστε να μπορέσουμε να δούμε την ξεχωριστή επίδραση του καθενός στην αλλαγή των υδραυλικών υψών καθώς και στην ευαισθησία της περιοχής μελέτης.

ΠΗΓΑΔΙΑ	ΑΥΞΗΜΕΝΗ ΤΙΜΗ ΚΑΛΟΚΑΙΡΙΟΥ	ΜΕΙΩΜΕΝΗ ΤΙΜΗ ΚΑΛΟΚΑΙΡΙΟΥ	ΑΥΞΗΜΕΝΗ ΤΙΜΗ ΧΕΙΜΩΝΑ	ΜΕΙΩΜΕΝΗ ΤΙΜΗ ΧΕΙΜΩΝΑ
Γ368 (G368)	1200	240	400.00	80.00
Γ345-376-378-399 (G345-376-378-399)	5000	1000	1666.67	333.33
Γ387-388 (G387-388)	2800	560	933.33	186.68
Γ391-393-394 (G391-393-394)	4200	840	1400	280
Γ377-396-397 (G377-396-397)	3200	640	1066.67	213.33
Γ401-402-452 (G401-402-452)	4000	800	1333.33	266.67
Γ448-449-450 (G448-449-450)	2400	480	800	160
Γ348-349 (G348-349)	4200	840	1400	280
Γ406-407 (G406-407)	4000	800	1333.33	266.67
Γ403-404 (G403-404)	2200	440	733.33	146.67

Πίνακας Γ-3-3 : Αυξημένες και μειωμένες τιμές παροχών αντλήσεως

2.1.1.1 «Τρεξίματα» του μοντέλου και αποτελέσματα

Μετά από αυτές τις αλλαγές, «ξενατρέξαμε» το μοντέλο για κάθε περίπτωση χωριστά (συνολικά είχαμε 20 περιπτώσεις, 10 για τις αυξήσεις στις παροχές και άλλες 10 για τις μειώσεις), και πήραμε, όπως ήταν επόμενο, διαφορετικές τιμές των υδραυλικών υψών και τις συγκρίναμε με τις αρχικές τιμές που είχαμε, βρίσκοντας παράλληλα τις ποσοστιαίες μεταβολές αυτών. Μ' αυτό τον τρόπο διαπιστώσαμε σε ποιους κόμβους υπήρξε η μεγαλύτερη μεταβολή σε σχέση με τις αρχικές τιμές, άρα εντοπίσαμε τις περιοχές εκείνες όπου παρουσιάστηκε η μεγαλύτερη ευαισθησία. Οι κόμβοι αυτοί καθώς και οι αντίστοιχες περιοχές μεγαλύτερης ευαισθησίας φαίνονται στην παρακάτω Εικόνα Γ-3-9:



Εικόνα Γ-3-9 : Θέσεις κόμβων και περιοχών με τις μεγαλύτερες μεταβολές στα υδραυλικά ύψη σε σχέση με την πόλη της Χερσονήσου για την περίπτωση μεταβολής των παροχών αντλήσεως

Προτού αρχίσουμε την ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων, πρέπει να σημειώσουμε πως για την περίπτωση αυτή, της αλλαγής των παροχών αντλήσεως, όταν αυξανόταν η παροχή είχαμε μείωση των υδραυλικών υψών, ιδιαίτερα στην

περιοχή κοντά στο πηγάδι που γινόταν η αλλαγή, ενώ όταν μειωνόταν η παροχή είχαμε αύξηση των υδραυλικών υψών, και πάλι ιδιαίτερα στην περιοχή του πηγαδιού, του οποίου αλλάζαμε την παροχή.

Όσον αφορά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, το πρώτο πράγμα που θα πρέπει να σημειώσουμε, έχοντας βέβαια υπόψιν μας και τις παραπάνω Εικόνες Γ-3-3 έως Γ-3-6, με τις οριζόμενες αρχικές συνθήκες, είναι πως οι κόμβοι, άρα και οι περιοχές, που παρουσιάζουν την μεγαλύτερη ποσοστιαία μεταβολή στα υδραυλικά ύψη είναι αυτοί που βρίσκονται είτε πολύ κοντά είτε στην πόλη της Χερσονήσου (Περιοχή 6) με αρκετά υψηλή ή αρκετά χαμηλή παροχή αντλήσεως καθώς και κόμβοι που βρίσκονται στην ενδοχώρα και στους οποίους παρατηρείται πολύ χαμηλή παροχή άντλησης (Περιοχές 4 και 5). Όσον αφορά τις υπόλοιπες Περιοχές (1, 2 και 3) υπάρχουν μεταβολές σε κόμβους, αλλά όχι τόσο μεγάλες όσο στις προαναφερθείσες περιοχές. Γι'αυτό και οι κόμβοι αυτοί παρατίθενται στο παράρτημα της διπλωματικής, σε ένα συνολικό Πίνακα. Επίσης, δεν εμφανίζουν όλοι οι κόμβοι της Περιοχής 4 το βαθμό μεταβολής των υπολοίπων. **Συμπερασματικά λοιπόν, οι μεγαλύτερες μεταβολές, για την περίπτωση μείωσης των παροχών αντλήσεως των πηγαδιών εμφανίζονται στις Περιοχές 4, 5 και 6.** Επίσης, όσον αφορά την υδραυλική αγωγιμότητα στις περιοχές αυτών των κόμβων, παίρνει την τιμή των 12,6 m/day, που είναι σχετικά μέτρια τιμή. Όλα αυτά φαίνονται στον Πίνακα Γ-3-4 που ακολουθεί, όπου παρουσιάζονται οι προαναφερθέντες κόμβοι :

ΠΗΓΑΔΙ	ΚΟΜΒΟΣ	ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ	ΤΙΜΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ(Κ σε m/day)
Γ387-388 (G387-388)	114 (Περιοχή 6)	ΕΝΔΟΧΩΡΑ-ΚΟΝΤΑ ΠΟΛΗ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ- ΧΑΜΗΛΗ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ-ΜΕΤΡΙΑ Κ	12.6
	139 (Περιοχή 6)	ΕΝΔΟΧΩΡΑ-ΚΟΝΤΑ ΠΟΛΗ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ- ΧΑΜΗΛΗ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ-ΜΕΤΡΙΑ Κ	12.6
Γ391-393-394 (G391-393-394)	134 (Περιοχή 6)	ΠΟΛΗ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ-ΑΡΚΕΤΑ ΥΨΗΛΗ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ-ΜΕΤΡΙΑ Κ	12.6
	154 (Περιοχή 6)	ΠΟΛΗ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ-ΑΡΚΕΤΑ ΥΨΗΛΗ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ-ΜΕΤΡΙΑ Κ	12.6
Γ377-396-397 (G377-396-397)	200(Περιοχή 4)	ΚΟΝΤΑ ΠΟΛΗ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ-ΣΧΕΤΙΚΑ ΧΑΜΗΛΗ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ-ΜΕΤΡΙΑ Κ	12.6
	228(Περιοχή 4)	ΚΟΝΤΑ ΠΟΛΗ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ-ΣΧΕΤΙΚΑ ΧΑΜΗΛΗ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ-ΜΕΤΡΙΑ Κ	12.6
Γ368 (G368)	315(Περιοχή 5)	ΕΝΔΟΧΩΡΑ-ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΗ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ-ΜΕΤΡΙΑ Κ	12.6
	333(Περιοχή 5)	ΕΝΔΟΧΩΡΑ-ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΗ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ-ΜΕΤΡΙΑ Κ	12.6

Πίνακας Γ-3-4 : Κόμβοι και υποπεριοχές με την μεγαλύτερη ποσοστιαία μεταβολή υδραυλικών υψών

ΠΗΓΑΔΙ	ΚΟΜΒΟΣ	1η ΠΕΡΙΟΔΟΣ- ΧΕΙΜΩΝΑΣ (ΑΥΞΗΣΗ ΣΤΗΝ ΑΝΤΛΗΣΗ)	2η ΠΕΡΙΟΔΟΣ- ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ (ΑΥΞΗΣΗ ΣΤΗΝ ΑΝΤΛΗΣΗ)	1η ΠΕΡΙΟΔΟΣ- ΧΕΙΜΩΝΑΣ (ΜΕΙΩΣΗ ΣΤΗΝ ΑΝΤΛΗΣΗ)	2η ΠΕΡΙΟΔΟΣ- ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ (ΜΕΙΩΣΗ ΣΤΗΝ ΑΝΤΛΗΣΗ)
Γ387-388 (G387-388)	114 (Περιοχή 6)	-0.4410%	-1.4210%	0.4350%	1.3650%
	139 (Περιοχή 6)	-0.2330%	-0.7440%	0.2310%	0.7280%
Γ391-393-394 (G391-393- 394)	134 (Περιοχή 6)	-0.7010%	-2.3390%	0.6860%	2.1890%
	154 (Περιοχή 6)	-0.4480%	-1.4660%	0.4420%	1.4050%
Γ377-396-397 (G377-396- 397)	200 (Περιοχή 4)	-0.4840%	-1.5910%	0.4780%	1.5200%
	228 (Περιοχή 4)	-0.3030%	-0.9840%	0.3000%	0.9560%
Γ368 (G368)	315 (Περιοχή 5)	-0.2740%	-0.9070%	0.2720%	0.8830%
	333 (Περιοχή 5)	-0.2120%	-0.6960%	0.2100%	0.6820%

Πίνακας Γ-3-4 : Κόμβοι και υποπεριοχές με τη μεγαλύτερη ποσοστιαία μεταβολή υδραυλικών υψών (συνέχεια)

2.1.1.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Ο συνολικός πίνακας για τις μεταβολές των υδραυλικών υψών σε όλους τους κόμβους παρατίθεται στο παράρτημα.

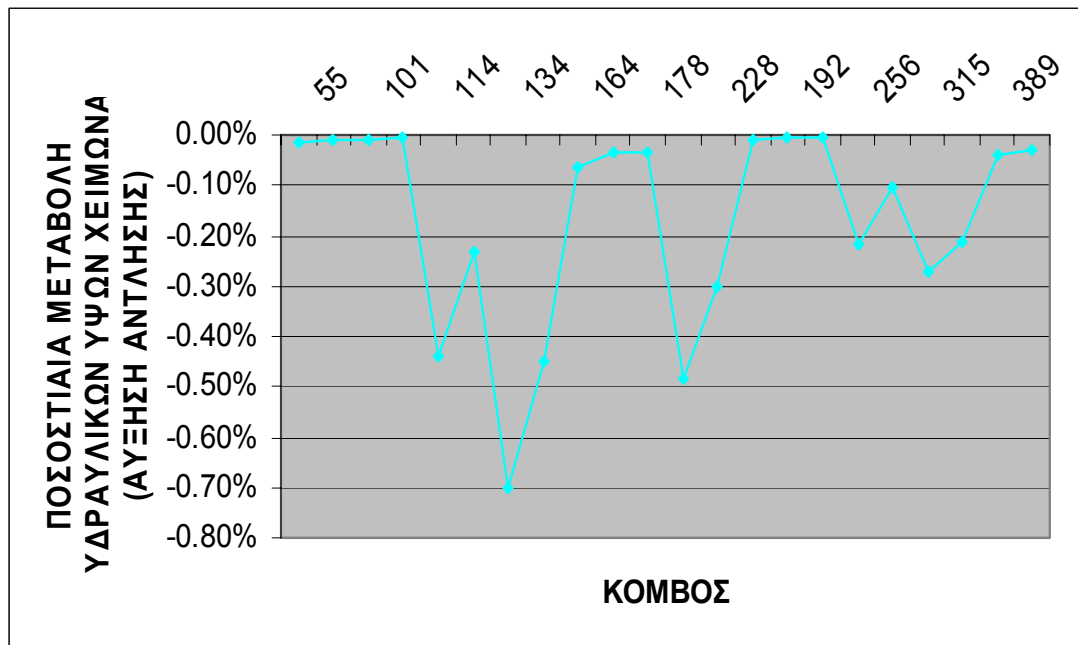
Σημειώνουμε πως οι μεταβολές κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού είναι πολύ μεγαλύτερες απ'ότι του χειμώνα και αυτό γιατί το καλοκαίρι έχουμε τριπλάσια παροχή αντλήσεως σε σχέση με το χειμώνα με αποτέλεσμα η παροχή του καλοκαιριού να επηρεάζει σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό από ότι του χειμώνα τα υδραυλικά ύψη.

Βλέπουμε λοιπόν από τα παραπάνω αποτελέσματα πως οι μεγαλύτερες μεταβολές σημειώνονται στην περιοχή όπου η υδραυλική αγωγιμότητα $K=12,6$ m/day, μία τιμή σχετικά μέτρια. Επίσης, η παροχή άντλησης των συγκεκριμένων πηγαδιών, είναι σχετικά χαμηλή. Επομένως, και σύμφωνα με το νόμο του Darcy :

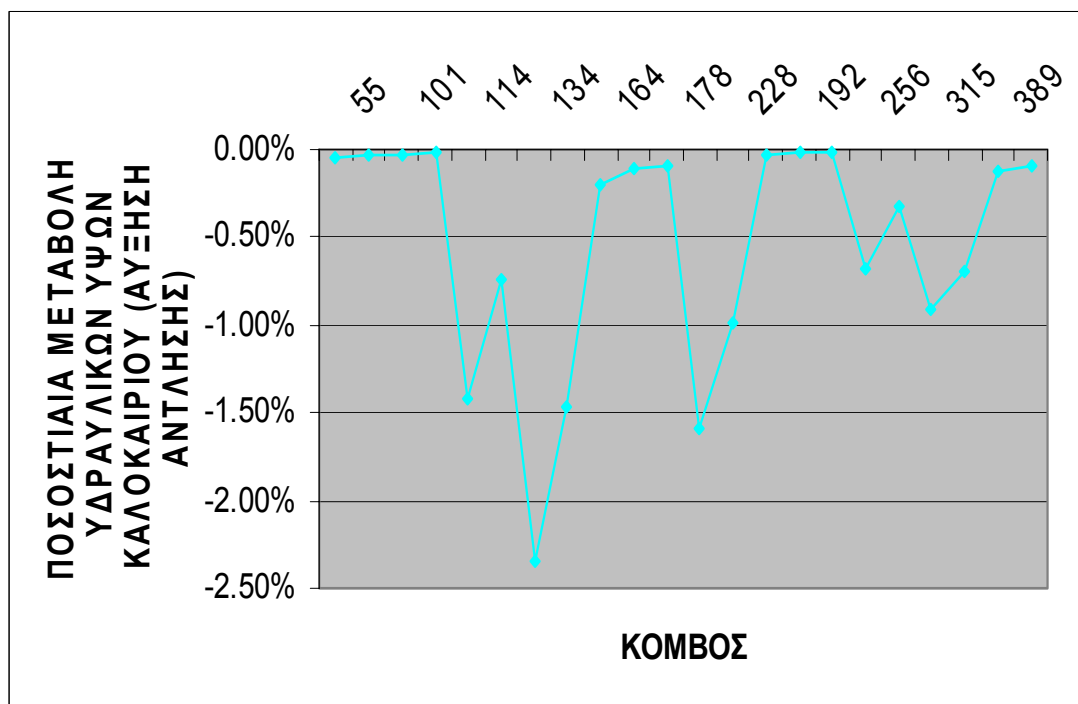
$$Q = qA = -KA\partial h / \partial s = KA_i = \frac{k\rho g}{\mu} A_i$$

εφόσον μιλάμε για χαμηλή παροχή q και σχετικά μέτρια υδραυλική αγωγιμότητα K , θα πρέπει για να επαληθεύεται η παραπάνω ισότητα η υδραυλική κλίση $\partial h / \partial s$ να είναι μεν σχετικά χαμηλή, αλλά σε σχέση με τους υπόλοιπους κόμβους, όπου με βάση την παροχή που σημειώνεται και την τιμή που παίρνει η υδραυλική αγωγιμότητα η υδραυλική κλίση είναι πολύ χαμηλή, είναι αρκετά υψηλότερη οπότε γι'αυτό το λόγο παρουσιάζονται εδώ οι μεγαλύτερες μεταβολές. Γενικά βέβαια, οι μεταβολές αυτές είναι αρκετά χαμηλές (η μεγαλύτερη είναι της τάξης του -2,34% για αύξηση στην άντληση και 2,19% για μείωση στην άντληση), άρα **μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η περιοχή μας παρουσιάζει χαμηλό βαθμό ευαισθησίας στις μεταβολές των παροχών άντλησης των πηγαδιών**. Άλλωστε μην ξεχνάμε, πως έχει γίνει ήδη ομαδοποίηση των πηγαδιών διότι οι αρχικές μεταβολές των υδραυλικών υψών ήταν πάρα πολύ χαμηλές για να θεωρηθούν αξιοποιήσιμες. Το γεγονός του χαμηλού βαθμού ευαισθησίας της περιοχής υποδεικνύει πως η περιοχή δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την μεταβολή στις παροχές αντλήσεως των πηγαδιών και πως θα ήταν καλό, αλλά όχι και επιτακτικό, να πραγματοποιηθούν επιπλέον μετρήσεις, ειδικότερα στις Περιοχές με την μεγαλύτερη ευαισθησία (4, 5 και 6), για μία καλύτερη εικόνα σχετικά με τα υδραυλικά ύψη και το πόσο και πως αυτά επηρεάζονται. Άλλωστε μην ξεχνάμε, όπως έχουμε προαναφέρει, πως η εν λόγω περιοχή είναι σημαντικού οικονομικού και ιδιαίτερα τουριστικού ενδιαφέροντος.

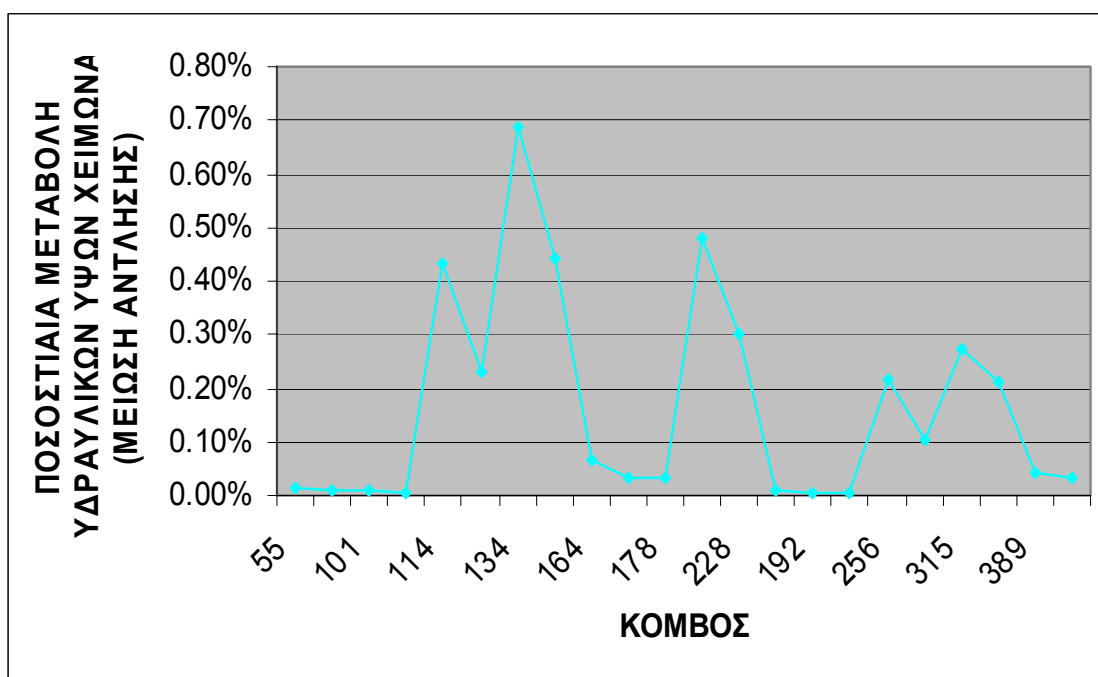
Τέλος, παραθέτουμε και τα γραφήματα ποσοστιαίας μεταβολής των υδραυλικών υψών για τις δύο περιόδους, χειμώνα και καλοκαίρι και για τις δύο περιπτώσεις, αύξησης και μείωσης της παροχής άντλησεως :



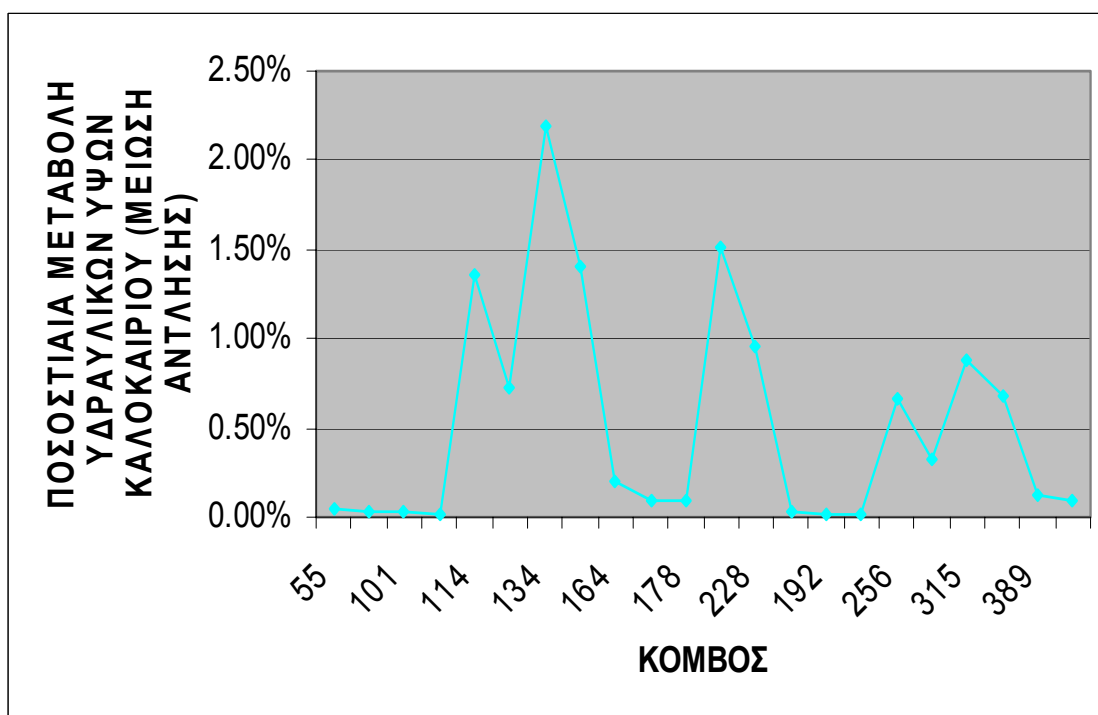
Γράφημα Γ-3-2 : Ποσοστιαία μεταβολή υδραυλικών υψών χειμώνα με αύξηση της άντλησης



Γράφημα Γ-3-3 : Ποσοστιαία μεταβολή υδραυλικών υψών καλοκαιριού με αύξηση της άντλησης



Γράφημα Γ-3-4 : Ποσοστιαία μεταβολή υδραυλικών υψών χειμώνα με μείωση της άντλησης



Γράφημα Γ-3-5 : Ποσοστιαία μεταβολή υδραυλικών υψών καλοκαιριού με μείωση της άντλησης

2.1.1.3 Προσομοίωση υδραυλικών υψών

Παρατηρούμε λοιπόν πως οι γραμμές των τελικών υδραυλικών υψών και ιδιαίτερα αυτή των 102,5 ft προσεγγίζει αρκετά καλά τη ζώνη υφαλμύρωσης.

2.1.2 Αλλαγές στις τιμές της υδραυλική αγωγιμότητας

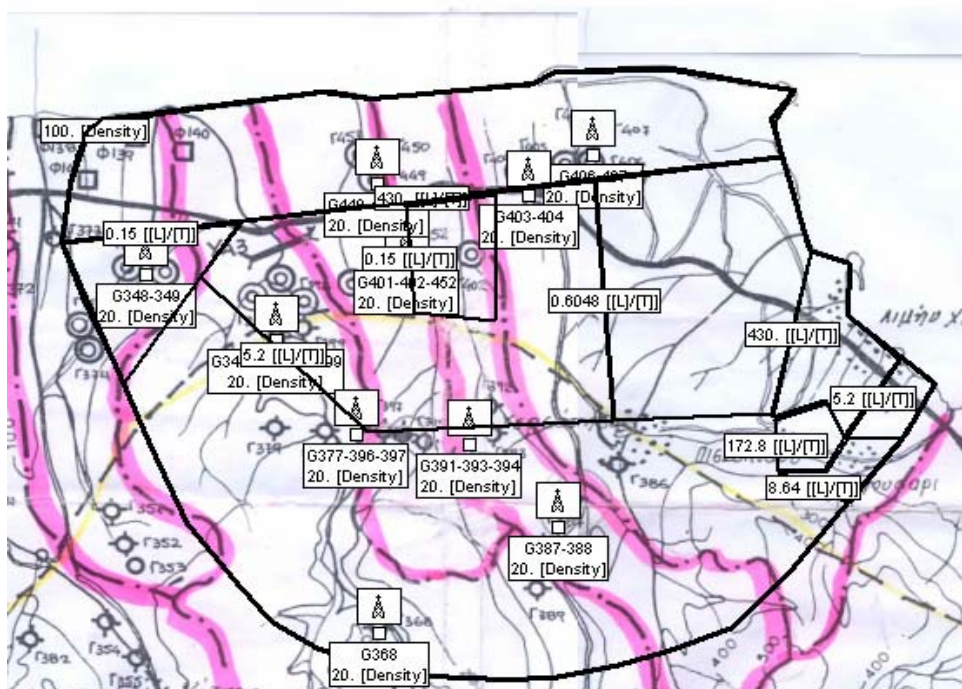
Το δεύτερο σκέλος της εφαρμογής του μοντέλου για την πραγματοποίηση της ανάλυσης ευαισθησίας του υπόγειου υδροφορέα στην περιοχή της Χερσονήσου περιλαμβάνει την αλλαγή των τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας στα διάφορα τμήματα της περιοχής. Η αλλαγή αυτή θα πραγματοποιηθεί ξεχωριστά για κάθε υποπεριοχή με διαφορετική τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας ούτως ώστε να φανεί σε ποια περίπτωση εμφανίζεται η μεγαλύτερη επίδραση στα υδραυλικά ύψη της περιοχής, επομένως και στην ευαισθησία της περιοχής. Τέλος, πρέπει να αναφέρουμε πως η αλλαγή ήταν της τάξεως του $\pm 10\%$ για κάθε μία από τις δύο περιόδους, χειμώνα και καλοκαίρι. Συνοπτικά οι αρχικές και οι τελικές τιμές για κάθε τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας που παρατηρείται στην περιοχή φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα Γ-3-5:

ΥΔΡΑΥΛΙΚΕΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΕΣ	ΑΡΧΙΚΗ ΤΙΜΗ (x-y-z)	ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗ	ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΙΜΗΣ	ΤΕΛΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΤΕΛΙΚΗ ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ
K1	0,15-0,15- 0,015	$\pm 10\%$	$\pm 0,015$	0,165	0.135
K2	0,6048- 0,6048- 0,06048	$\pm 10\%$	$\pm 0,06048$	0,66528	0.54432
K3	5,2-5,2-0,52	$\pm 10\%$	$\pm 0,52$	5,72	4.68
K4	8,64-8,64- 0,864	$\pm 10\%$	$\pm 0,864$	9.504	7.776
K5	12,6-12,6-1,26	$\pm 10\%$	$\pm 1,26$	13,86	11.34
K6	172,8-172,8- 17,28	$\pm 10\%$	$\pm 17,28$	190,08	155.52
K7	430-430-43	$\pm 10\%$	± 43	473	387

Πίνακας Γ-3-5 : Αρχικές τιμές, μεταβολές και τελικές (μέγιστες και ελάχιστες) τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας

Σημειώνουμε πως η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας στον z-άξονα είναι το 1/10 της τιμής της στους άλλους δύο άξονες.

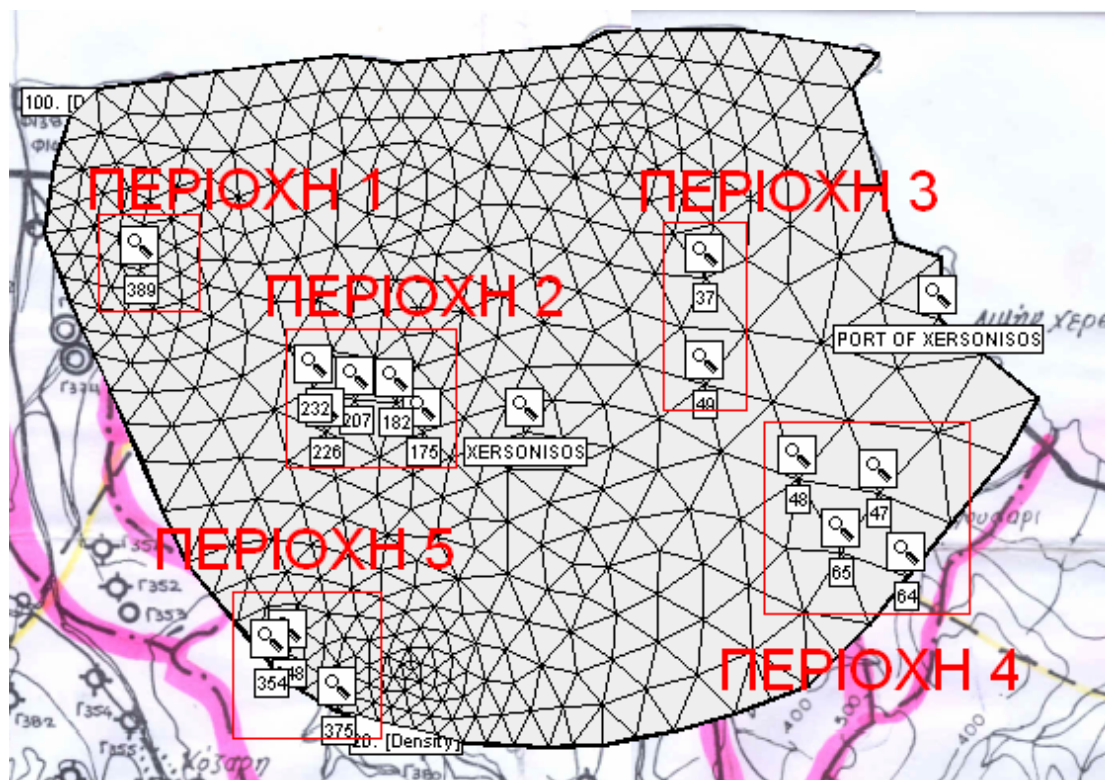
Αρχικά παραθέτουμε στην παρακάτω Εικόνα Γ-3-10, όπου φαίνονται οι διάφορες υποπεριοχές με διαφορετική τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας:



2.1.2.1 «Τρεξίματα» του μοντέλου και αποτελέσματα

Μετά από αυτές τις αλλαγές, «ξανατρέξαμε» το μοντέλο για κάθε περίπτωση χωριστά (συνολικά είχαμε 14 περιπτώσεις, 7 για τις αυξήσεις στις παροχές και άλλες 7 για τις μειώσεις), και πήραμε, όπως ήταν επόμενο, διαφορετικές τιμές των υδραυλικών υψών και τις συγκρίναμε με τις αρχικές τιμές που είχαμε, βρίσκοντας παράλληλα τις ποσοστιαίες μεταβολές αυτών. Μ' αυτό τον τρόπο διαπιστώσαμε σε ποιους κόμβους, άρα και σε ποιες υποπεριοχές, υπήρξε η μεγαλύτερη μεταβολή σε σχέση με τις αρχικές τιμές, άρα εντοπίσαμε τις υποπεριοχές εκείνες όπου παρουσιάστηκε η μεγαλύτερη ευαισθησία. Οι κόμβοι αυτοί φαίνονται στο παρακάτω

Εικόνα Γ-3-11:



Εικόνα Γ-3-11 : Θέσεις κόμβων και περιοχών με τις μεγαλύτερες μεταβολές στα υδραυλικά ύψη σε σχέση με την πόλη της Χερσονήσου για την περίπτωση μεταβολής της υδραυλικής αγωγιμότητας

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση αυξομείωσης των παροχών άντλησης των πηγαδιών, έτσι κι εδώ, προτού αρχίσουμε την ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων, πρέπει να σημειώσουμε πως για την περίπτωση αυτή, της αλλαγής των υδραυλικών αγωγιμοτήτων, όταν αυξανόταν η υδραυλική αγωγιμότητα είχαμε γενικά μείωση των υδραυλικών υψών, (χωρίς βέβαια να λείπουν και οι εξαιρέσεις, όπως θα δούμε και παρακάτω), ενώ όταν μειωνόταν η υδραυλική αγωγιμότητα είχαμε αύξηση των υδραυλικών υψών (και πάλι χωρίς να λείπουν οι εξαιρέσεις).

2.1.2.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Όσον αφορά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, το πρώτο πράγμα που θα πρέπει να σημειώσουμε, έχοντας βέβαια υπόψιν μας και τις παραπάνω Εικόνες Γ-3-3 έως Γ-3-6, με τις οριζόμενες αρχικές συνθήκες, είναι πως οι κόμβοι, άρα και οι αντίστοιχες υποπεριοχές, που παρουσιάζουν την μεγαλύτερη ποσοστιαία μεταβολή στα υδραυλικά ύψη είναι αυτοί που βρίσκονται είτε πολύ κοντά είτε στην πόλη της

Χερσονήσου (Περιοχές 2 και 3) καθώς και κόμβοι που βρίσκονται στην νοτιοανατολική ή δυτική ενδοχώρα (Περιοχές 4 και 5 αντίστοιχα) καθώς και κοντά στην παράκτια ζώνη (στην περίπτωση του κόμβου 389 της Περιοχής 1). Επίσης, όσον αφορά την υδραυλική αγωγιμότητα στις περιοχές αυτών των κόμβων, κυμαίνεται από 0,15 m/day μέχρι και 12,6 m/day, δηλαδή από χαμηλές μέχρι μέτριες τιμές. Όλα αυτά φαίνονται στον Πίνακα Γ-3-6 που ακολουθεί, όπου παρουσιάζονται οι προαναφερθέντες κόμβοι:

ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ	ΚΟΜΒΟΣ	ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ	ΑΥΞΗΜΕΝΗ ΤΙΜΗ Κ(+10%)	1η ΠΕΡΙΟΔΟΣ- ΧΕΙΜΩΝΑΣ	2η ΠΕΡΙΟΔΟΣ- ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ	ΜΕΙΩΜΕΝΗ ΤΙΜΗ Κ(-10%)	1η ΠΕΡΙΟΔΟΣ- ΧΕΙΜΩΝΑΣ	2η ΠΕΡΙΟΔΟΣ- ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ
K1=0,15	389 (Περιοχή 1)	ΜΙΚΡΗ Κ-G348-349- ΔΥΤΙΚΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	K1=0,165	2.860%	335.860%	K1=0,135	-3.840%	119.880%
K2=0,6048	37 (Περιοχή 3)	ΜΙΚΡΗ Κ-ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ-ΣΧΕΤΙΚΑ ΚΟΝΤΑ ΠΟΛΗΣ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ	K2=0,66528	-0.036%	---	K2=0,54432	0.038%	---
	389 (Περιοχή 1)	ΜΙΚΡΗ Κ-G348-349- ΔΥΤΙΚΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ		---	0.058%		---	-0.059%
K3=5,2	207 (Περιοχή 2)	ΜΕΤΡΙΑ Κ-ΚΟΝΤΑ ΣΤΟ G345/376/378/399 ΚΑΙ G377/396/397- ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ-ΚΟΝΤΑ ΠΟΛΗ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ	K3=5,72	-0.333%	---	K3=4,68	0.370%	---
	389 (Περιοχή 1)	ΜΙΚΡΗ Κ-G348-349- ΔΥΤΙΚΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ		---	2.660%		---	-3.110%

Πίνακας Γ-3-6 : Κόμβοι και υποπεριοχές με την μεγαλύτερη ποσοστιαία μεταβολή υδραυλικών υψών

K4=8,64	64 (Περιοχή 4)	ΜΕΤΡΙΑ Κ-ΚΟΝΤΑ ΣΤΟ ΑΝΑΤΟΛΙΚΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	K4=9,504	-0.0026%	---	K4=7776	0.0026%	0.002%
	389 (Περιοχή 1)	ΜΙΚΡΗ Κ-G348-349- ΔΥΤΙΚΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ		---	0.0034%		---	-0.0033%
K5=12,6	354 (Περιοχή 5)	ΜΕΤΡΙΑ Κ-ΚΟΝΤΑ ΣΤΟ G368-ΚΟΝΤΑ ΣΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΗ ΝΟΤΙΟΥ ΟΡΙΟΥ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	K5=13,86	-0.857%	-0.686%	K5=11,34	---	---
	389 (Περιοχή 1)	ΜΙΚΡΗ Κ-G348-349- ΔΥΤΙΚΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ		---	---		20.920%	119.880%
K6=172,28	65 (Περιοχή 4)	ΜΕΤΡΙΑ Κ-ΚΟΝΤΑ ΣΤΟ ΑΝΑΤΟΛΙΚΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	K6=190,08	-0.109%	---	K6=155,52	0.126%	---
	389 (Περιοχή 1)	ΜΙΚΡΗ Κ-G348-349- ΔΥΤΙΚΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ		---	0.363%		---	-0.426%
K7=430	47 (Περιοχή 4)	ΜΕΤΡΙΑ Κ-ΚΟΝΤΑ ΣΤΟ ΑΝΑΤΟΛΙΚΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	K7=473	-0.077%	---	K7=387	0.090%	---
	389 (Περιοχή 1)	ΜΙΚΡΗ Κ-G348-349- ΔΥΤΙΚΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ		---	0.264%		---	-0.316%

Πίνακας Γ-3-6 : Κόμβοι και υποπεριοχές με την μεγαλύτερη ποσοστιαία μεταβολή υδραυλικών υψών (συνέχεια)

Ο συνολικός Πίνακας για τις μεταβολές των υδραυλικών υψών σε όλους τους κόμβους παρατίθεται στο παράρτημα. Οι μέγιστες μεταβολές των υδραυλικών υψών είναι σημειωμένες με γκρι χρώμα.

Από τον παραπάνω Πίνακα Γ-3-6, παρατηρούμε πως οι μεγαλύτερες μεταβολές, ανεξαρτήτως τιμής υδραυλικής αγωγιμότητας και μεταβολής (αύξησης ή μείωσης) αυτής, σημειώνονται στον κόμβο 389 της Περιοχής 1, στον οποίο σημειώνονται πολύ μεγαλύτερες μεταβολές σε σχέση με τις μεταβολές των υπολοίπων κόμβων. Από τους προηγούμενους Πίνακες και Εικόνες που έχουμε παραθέσει μπορούμε να δούμε πως ο κόμβος αυτός βρίσκεται στη θέση του πηγαδιού Γ348-349 (G348-349), το οποίο παρουσιάζει τη δεύτερη μεγαλύτερη τιμή παροχής αντλήσεως. Επίσης βρίσκεται σε μία περιοχή όπου η υδραυλική αγωγιμότητα $K=0,15$ m/day, μία τιμή πολύ μικρή.

Επομένως και λαμβάνοντας για άλλη μια φορά υπόψιν το, περίφημο πλέον, νόμο του Darcy :

$$Q = qA = -KA\partial h / \partial s = KA i = \frac{k\rho g}{\mu} Ai$$

βλέπουμε πως από τη στιγμή που έχουμε μία αρκετά μεγάλη τιμή παροχής αντλήσεως και μία αρκετά μικρή τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας, για να επαληθευτεί η ισότητα θα πρέπει να έχουμε πολύ μεγάλη υδραυλική κλίση, δηλαδή με άλλα λόγια, θα πρέπει να υπάρχει μεγάλη μεταβολή των υδραυλικών υψών.

Επίσης, αναφέρουμε πως οι μεταβολές αυτές, στον κόμβο 389 είναι πολύ μεγαλύτερες κατά την περίοδο του καλοκαιριού αφού τότε η παροχή άντλησης είναι τριπλάσια σε σχέση με την τιμή του χειμώνα.

Το αξιοσημείωτο είναι πως ενώ σε κάθε περίπτωση οι τιμές της ποσοστιαίας μεταβολής των υδραυλικών υψών στους κόμβους παρουσιάζουν το ίδιο πρόσημο, ενώ στην περίπτωση του κόμβου 389 παρουσιάζεται αντίθετο πρόσημο. Γι'αυτό αναφέρθηκε παραπάνω πως δεν μειώνονται πάντα τα υδραυλικά ύψη με την αύξηση της υδραυλικής αγωγιμότητας ή το ανάποδο. Αυτό ενδέχεται να συμβαίνει λόγω της χρήσης της Exact Contour method, που όπως έχουμε προαναφέρει χρησιμοποιούμε σε αυτή την περίπτωση.

Εδώ όπως έχουμε αναφέρει στην αρχή αυτής της ενότητας χρησιμοποιούμε την exact contour method, δηλαδή δίνεται έμφαση στις ισοϋψείς καμπύλες που έχουν εισαχθεί μέσα στο μοντέλο. Αυτό έγινε διότι στην προσπάθεια εφαρμογής της

Interpolation method παρουσιάστηκε πρόβλημα στην περίπτωση αλλαγής της υδραυλικής αγωγιμότητας στην περιοχή όπου έχει τιμή 12,6 m/day. Συγκεκριμένα, λόγω του μεγάλου μεγέθους της εν λόγω περιοχής, οι όποιες μεταβολές στα υδραυλικά ύψη χάνονταν με αποτέλεσμα τα τελικά υδραυλικά ύψη να είναι ίσα με τα αρχικά (παρόλο που για λόγους ακριβείας τα ύψη έχουν επτά δεκαδικά ψηφία!). Γι' αυτό και σε αυτή την περίπτωση μας δίνεται η ίδια τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας μέσα σε κάθε σημείο του τμήματος της περιοχής που ισχύει αυτή η τιμή, σε αντίθεση με την μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής όπου η υδραυλική αγωγιμότητα παρουσιάζεται μεταβαλλόμενη και προσεγγίζει τη δοθείσα τιμή στα όρια του τμήματος στο οποίο αναφερόμαστε.

Όσον αφορά την τεράστια διαφορά που παρουσιάζεται ανάμεσα στα αποτελέσματα στον κόμβο 389 και στους υπόλοιπους κόμβους, μπορούμε να σημειώσουμε τα παρακάτω (αναλύοντας λίγο περισσότερο τα της προηγούμενης παραγράφου):

- ⇒ ο κόμβος αυτός βρίσκεται στην Περιοχή 1, του 2^{ου} τη τάξει πηγαδιού από πλευράς παροχής αντλήσεως, και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι σ' αυτή την περιοχή έχουμε πολύ χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα ($K=0,15$ m/day) σημαίνει ότι θα έχουμε πολύ μεγάλη υδραυλική κλίση, άρα πολύ μεγάλες μεταβολές υδραυλικών υψών
- ⇒ οι υπόλοιποι κόμβοι, που παρουσιάζουν τις αμέσως επόμενες, σε μέγεθος, μεταβολές βρίσκονται σε Περιοχές όπου ο συνδυασμός παροχής αντλήσεως – υδραυλικής αγωγιμότητας δεν ευνοεί την μεγάλη υδραυλική κλίση, άρα δεν είναι δυνατόν να έχουμε και μεγάλες μεταβολές των υδραυλικών υψών (Περιοχές 2-6). Π.χ. ο κόμβος 354 βρίσκεται κοντά στο πηγάδι Γ368 (G368), στην Περιοχή 5, το οποίο παρουσιάζει την 2^η χαμηλότερη παροχή άντλησης. Επίσης εδώ παρουσιάζεται αρκετά μεγαλύτερη υδραυλική αγωγιμότητα ($K=12,6$ m/day , δηλαδή 84 φορές μεγαλύτερη), άρα βάσει του νόμου του Darcy θα πρέπει να έχουμε πολύ χαμηλή υδραυλική κλίση. Με τον ίδιο τρόπο αιτιολογούνται και τα αποτελέσματα των υπόλοιπων κόμβων.

Συμπερασματικά λοιπόν, αυτό που μπορούμε να διαπιστώσουμε είναι πως η αλλαγή των τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας σε κάθε τμήμα της περιοχής μας, επηρεάζει

σε αρκετά μεγάλο βαθμό τα υδραυλικά ύψη και τις μεταβολές αυτών και **παρατηρείται αυξημένος βαθμός ευαισθησία της περιοχής στην αλλαγή των τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας**. Μεταβολές, οι οποίες παρουσιάζονται σε μία περιοχή κυρίως (αυτή του κόμβου 389 της Περιοχής 1), αλλά που υποδεικνύει πως υπάρχει μία διαφορά στην υδραυλική κλίση μέσα σε όλη την περιοχή που μελετάμε, η οποία παρουσιάζεται αρκετά αυξημένη (σε σχέση με την αρχική κατάσταση) στην περιοχή αυτή, ενώ στη συνέχεια μειώνεται και φτάνει λίγο χαμηλότερα από το αρχικό επίπεδο στις υπόλοιπες περιοχές, πάντα σε σχέση με την αρχική κατάσταση (αυτή η μείωση ενδέχεται να είναι και ανεπαίσθητη κάποιες φορές). Το γεγονός ότι παρουσιάζεται αυξημένος βαθμός ευαισθησίας στην περίπτωση αλλαγής των τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας στα διάφορα τμήματα της περιοχής μελέτης (και ειδικότερα στην περίπτωση της Περιοχής 1), σημαίνει πως καθίσταται απαραίτητη η περαιτέρω μελέτη και ανάλυση της εν λόγω περιοχής, για τον εντοπισμό των στοιχείων εκείνων που την διαφοροποιούν, από άποψης ευαισθησίας στις μεταβολές της υδραυλικής αγωγιμότητας, από την υπόλοιπη περιοχή. Αυτό βέβαια δεν σημαίνει πως δεν χρίζει αναλυτικότερης μελέτης και προσοχής όλη η μελετούμενη περιοχή για την περίπτωση αυτή.

Παρακάτω, παραθέτουμε και τα γραφήματα ποσοστιαίας μεταβολής των υδραυλικών υψών για τις δύο περιόδους, χειμώνα και καλοκαίρι και για τις δύο περιπτώσεις, αύξησης και μείωσης της υδραυλικής αγωγιμότητας :



Γράφημα Γ-3-7 : Ποσοστιαία μεταβολή υδραυλικών υψών χειμώνα με αύξηση της υδραυλικής αγωγιμότητας



Γράφημα Γ-3-8 : Ποσοστιαία μεταβολή υδραυλικών υψών καλοκαιριού με αύξηση της υδραυλικής αγωγιμότητας



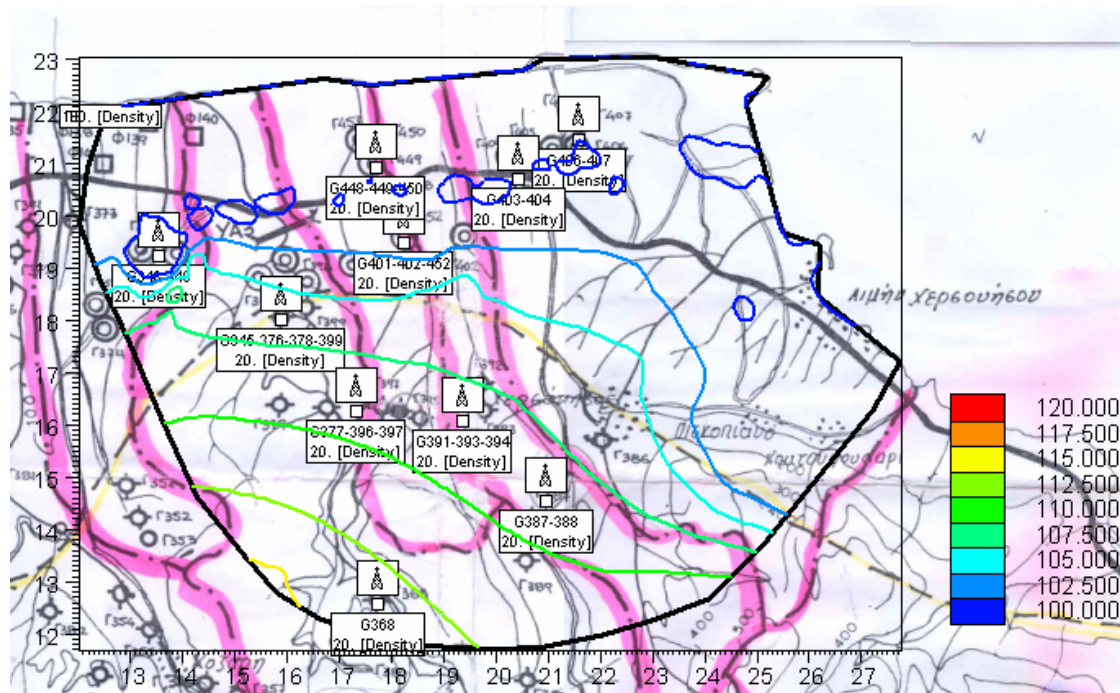
Γράφημα Γ-3-9 : Ποσοστιαία μεταβολή υδραυλικών υψών χειμώνα με μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας



Γράφημα Γ-3-10 : Ποσοστιαία μεταβολή υδραυλικών υψών καλοκαιριού με μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας

2.1.2.3 Προσομοίωση υδραυλικών υψών

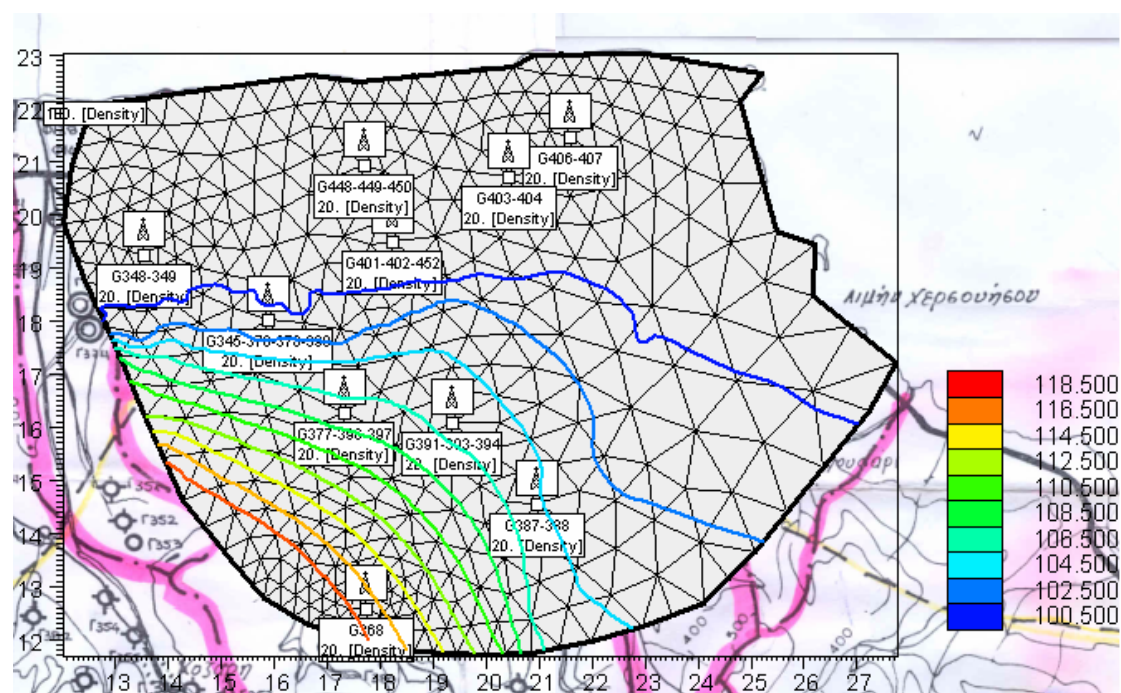
Τέλος, όσον αφορά την προσέγγιση των τελικών υδραυλικών υψών, από το παρακάτω Γράφημα Γ-3-10 βλέπουμε πως η προσέγγιση αυτή δεν είναι και τόσο καλή όσο στην περίπτωση των πηγαδιών, αλλά και πάλι μας ικανοποιεί σε σημαντικό βαθμό :



Γράφημα Γ-3-11 : Θέσεις τελικών υδραυλικών υψών σε σχέση με την ζώνη υφαλμύρωσης

Αυτή η διαφοροποίηση της μορφής των τελικών υδραυλικών υψών σε σχέση με την πρώτη περίπτωση, των πηγαδιών, ενδέχεται να οφείλεται και στο γεγονός πως στην δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιήσαμε την Exact Contour method και όχι την Interpolation method, όπως κάναμε στην πρώτη περίπτωση, με αποτέλεσμα τα τελικά υδραυλικά ύψη να είναι περισσότερο βασισμένα στην ακρίβεια που εφαρμόζει η μέθοδος σχετικά με τη χρήση των ισοϋψών καμπυλών, σε αντίθεση με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής που μεταβάλλει περισσότερο τα δεδομένα, για να παρέχει μία όσο το δυνατόν καλύτερη εικόνα, πιο κοντά στην πραγματική. Αυτό μπορούμε να το διαπιστώσουμε παραθέτοντας παρακάτω το Γράφημα Γ-3-12 που μας δείχνει τη μορφή που θα είχαν τα υδραυλικά ύψη αν χρησιμοποιούσαμε και σε αυτή την

περίπτωση, των αλλαγών στην υδραυλική αγωγιμότητα, την μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής :



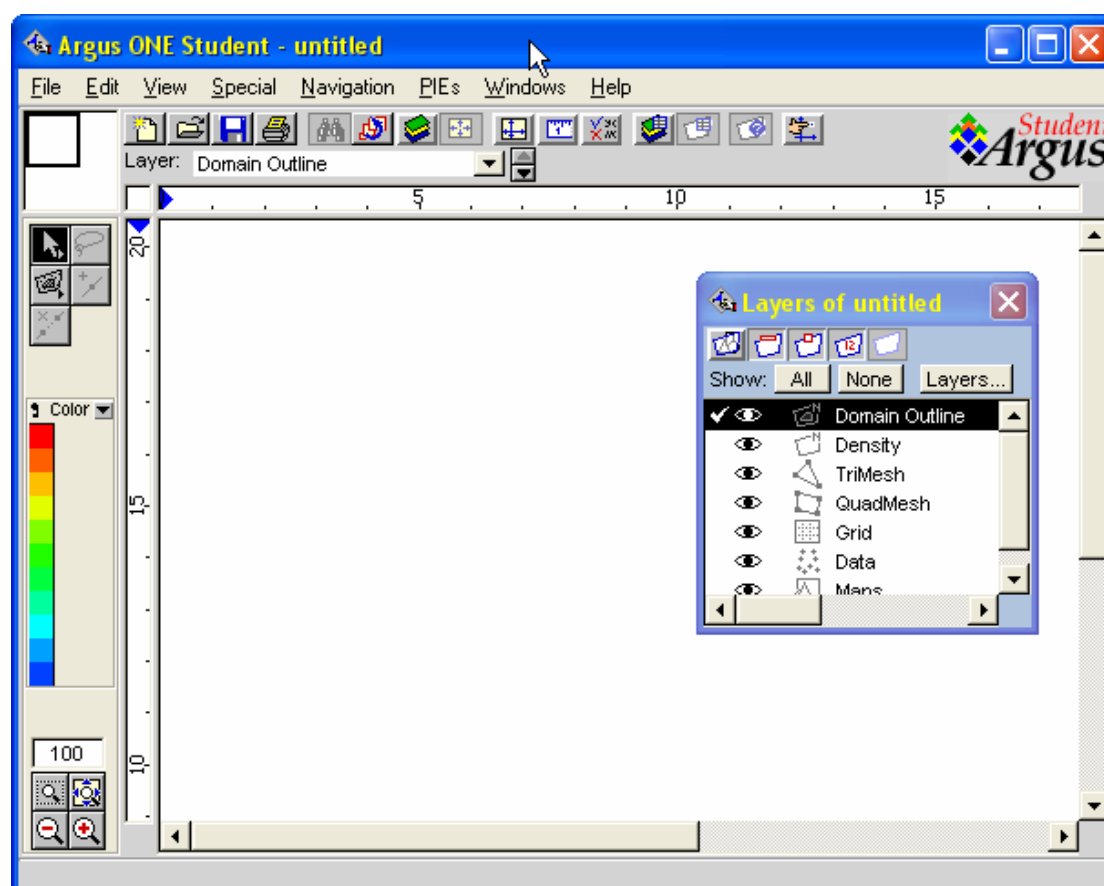
Γράφημα Γ-3-12 : Θέσεις τελικών υδραυλικών υψών σε σχέση με την ζώνη υφαλμύρωσης (χρήση μεθόδου γραμμικής παρεμβολής)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

1.ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ARGUSONE ΚΑΙ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ (ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ) ΕΠΙΛΥΣΗΣ PTC ΩΣ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΧΡΗΣΕΩΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Αρχικά, προτού προχωρήσουμε στη εφαρμογή του μοντέλου σ'αυτή την περιοχή θα πρέπει να παρουσιάσουμε ένα απλό, φανταστικής καταστάσεως, παράδειγμα με χρήση του μοντέλου ArgusOne, ούτως να μπορεί να γίνει κατανοητή η λειτουργία και η χρησιμότητα αυτού του μοντέλου.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα που θα παρουσιάσουμε, θεωρούμε ότι ο υπό μελέτη υδροφορέας είναι ελεύθερος. Αρχικά ξεκινώντας το παράδειγμα και χρησιμοποιώντας το μοντέλο το πρώτο παράθυρο που μας ανοίγεται είναι το βασικό παράθυρο του μοντέλου (Εικόνα Π-1-1).

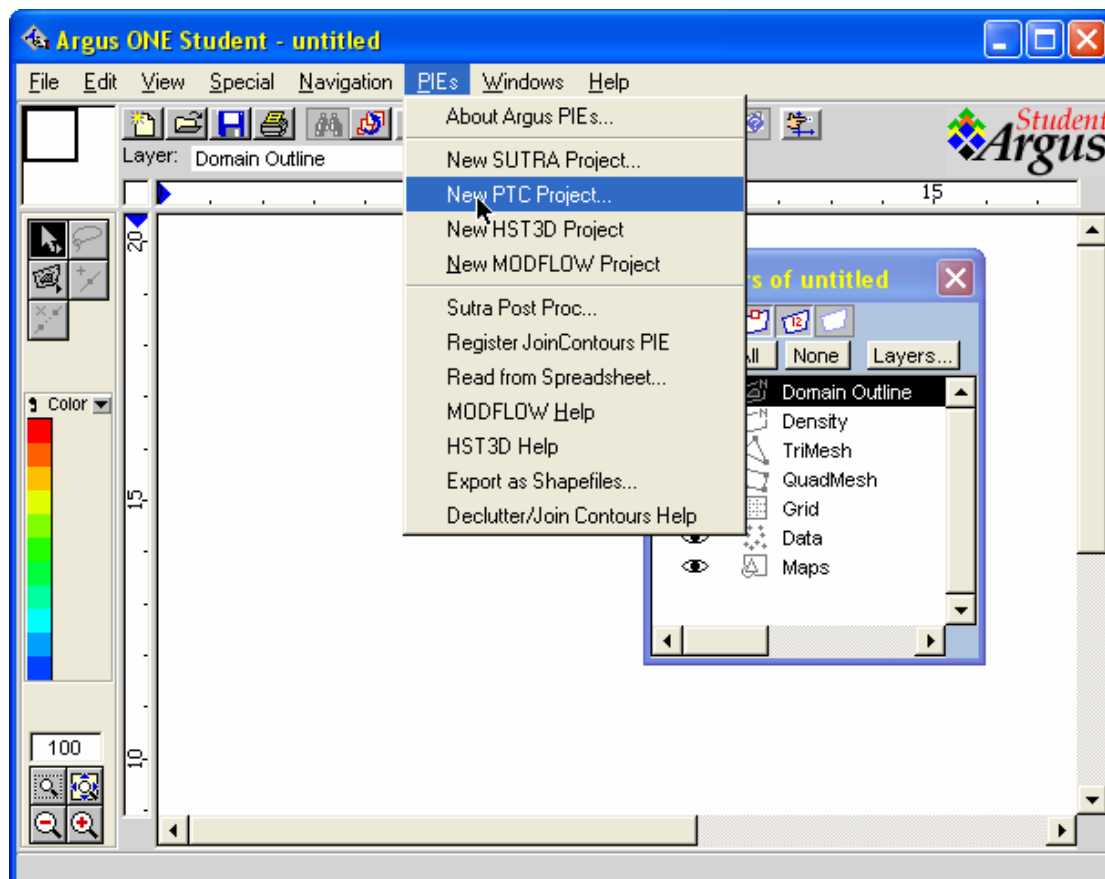


Εικόνα Π-1-1 : Βασικό παράθυρο μοντέλου ArgusOne

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στην παραπάνω εικόνα στο παράθυρο αυτό εμφανίζονται τα πρώτα βασικά επίπεδα πληροφορίας που χρησιμοποιεί το

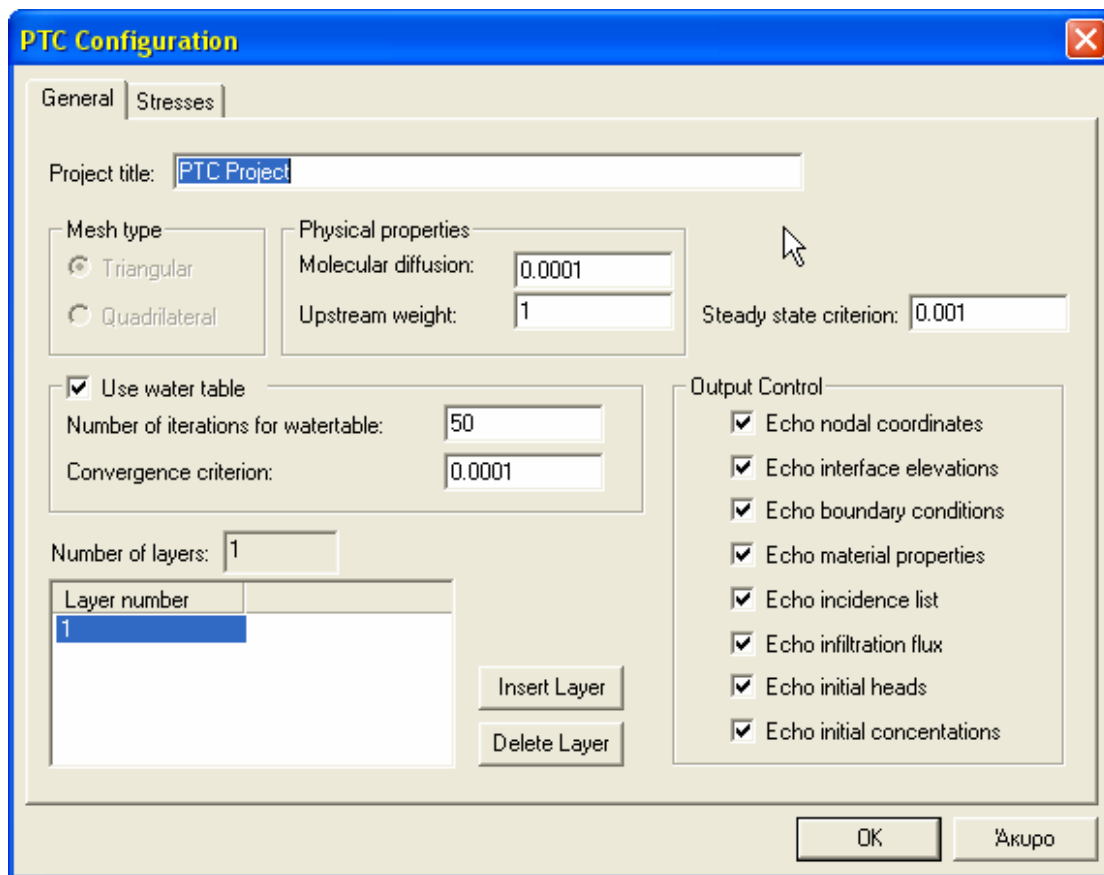
μοντέλο στην στήλη των **Layers**. Αυτά είναι τα **Domain Outline**, **Density**, **Trimesh**, **QuadMesh**, **Grid**, **Data** και **Maps**.

Για να μπορέσουμε εμείς να ξεκινήσουμε μία νέα εφαρμογή του μοντέλου, αρκεί να επιλέξουμε από τη γραμμή των διαφόρων παρεχόμενων λειτουργιών του μοντέλου το μενού **PIEs**. Από κει τσεκάρουμε την επιλογή **New PTC Project**, όπως φαίνεται στην Εικόνα Π-1-2.



Εικόνα Π-1-2 : Επιλογή New PTC Project για να ξεκινήσουμε μία νέα εφαρμογή.

Επιλέγοντας **New PTC Project** από το μενού **PIEs**, μας ανοίγεται ένα παράθυρο διαλόγου για την διαμόρφωση των αρχικών συνθηκών του μελετώμενου υδροφορέα και συγκεκριμένα την διαμόρφωση του κώδικα **PTC**. Το παράθυρο αυτό ονομάζεται **PTC Configuration**, (Εικόνα Π-1-3).



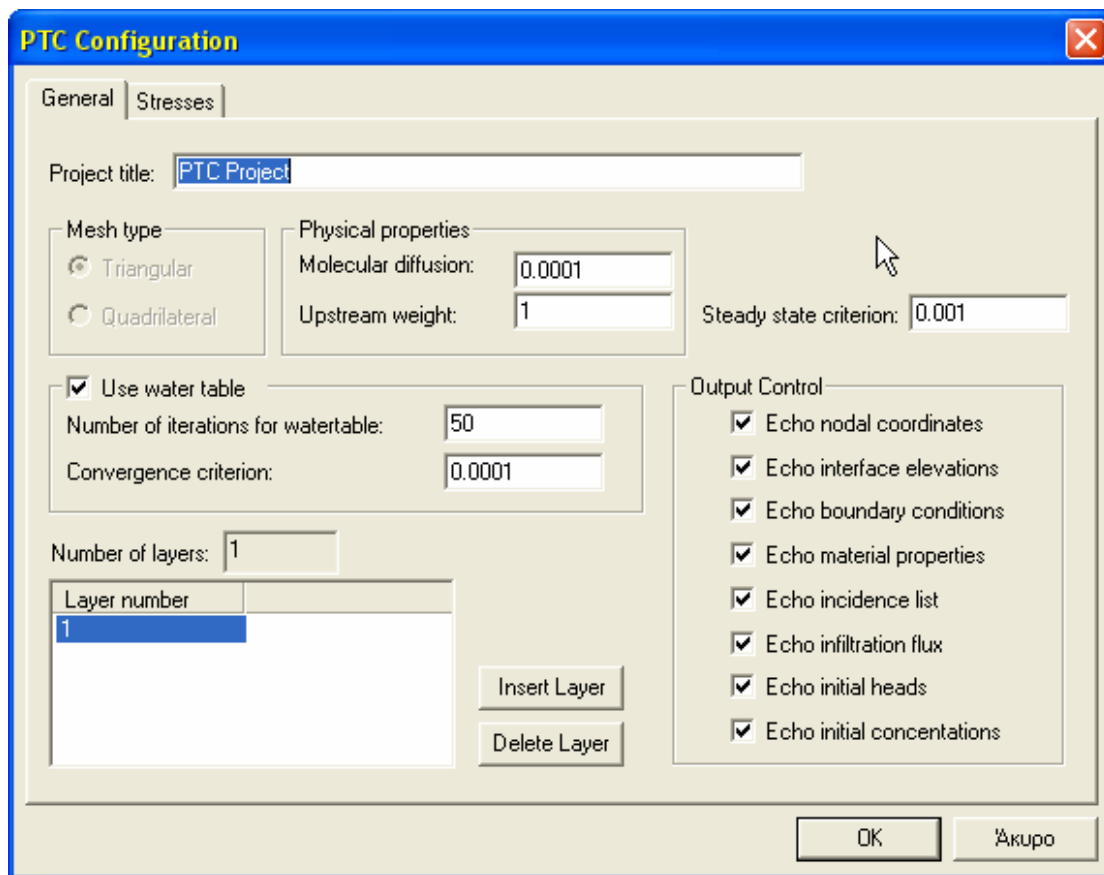
Εικόνα Π-1-3 : Παράθυρο διαλόγου για τη διαμόρφωση των αρχικών συνθηκών που αφορούν τον κώδικα PTC.

Όπως παρατηρούμε και από την παραπάνω εικόνα, το συγκεκριμένο παράθυρο έχει δύο επιλογές:

- ✓ Την επιλογή **General** και,
- ✓ Την επιλογή **Stresses**

Επιλογή General

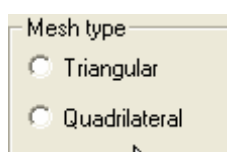
Η επιλογή **General** περιλαμβάνει (Εικόνα Π-1-4):



Εικόνα Π-1-4 : Η επιλογή **General** του **PTC Configuration**

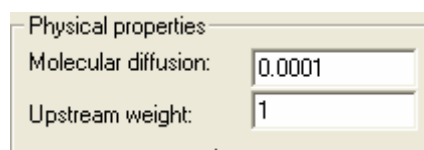
- 1) Τον τίτλο της εργασίας (**Project title**)
- 2) Το είδος του πλέγματος (**Mesh Type**), που περιλαμβάνει δύο επιλογές:
 - ✓ Το τριγωνικό πλέγμα (**Triangular**) και.
 - ✓ Το τετραγωνικό (**Quadrilateral**).

Εάν εμείς δεν επιλέξουμε ποιόν από τους δύο τύπους πλέγματος επιθυμούμε για την εργασία μας, τότε επιλέγεται αυτόματα ο τριγωνικός τύπος. Γενικότερα, ο τριγωνικός τύπος είναι καλύτερος από τον τετραγωνικό διότι προσομοιώνει καλύτερα τις διάφορες οριακές συνθήκες. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, αυτόν θα χρησιμοποιήσουμε κι εμείς.



3) Τις φυσικές ιδιότητες του υδροφορέα (**Physical properties**) που περιλαμβάνουν:

- ✓ Την μοριακή διάχυση (**Molecular diffusion**) και
- ✓ Το βάρος στα ανάντη (**Upstream weight**)




Physical properties

Molecular diffusion: 0.0001

Upstream weight: 1

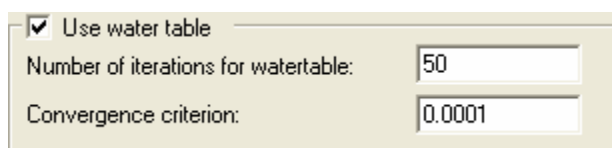
4) Το κριτήριο σταθερής κατάστασης (**Steady state criterion**) που χρησιμοποιείται για να δούμε πότε φτάνουμε σε σταθερή κατάσταση μέσα στον υδροφορέα μας.



Steady state criterion: 0.001

5) Την επιλογή για το αν ο υδροφορέας μας είναι ελεύθερος ή όχι (**Use water table**). Αν είναι ελεύθερος τότε τσεκάρουμε την συγκεκριμένη επιλογή, διαφορετικά την αφήνουμε κενή. Επίσης πρέπει να σημειώσουμε πως αν ο υδροφορέας μας είναι ελεύθερος και τσεκάρουμε την συγκεκριμένη επιλογή, τότε θα πρέπει να συμπληρώσουμε και τις δύο επιλογές που περιλαμβάνει αυτό το τμήμα:

- ✓ Τον αριθμό των επαναλήψεων για το επίπεδο του ύδατος (**Number of iterations for water table**) και
- ✓ Το κριτήριο απόκλισης για τις παραπάνω επαναλήψεις για την ελεύθερη επιφάνεια του ύδατος (**Convergence criterion**)



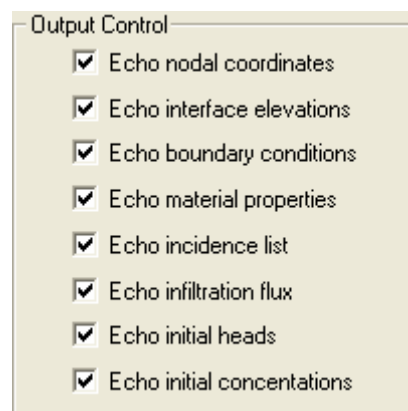
☒ Use water table

Number of iterations for watertable: 50

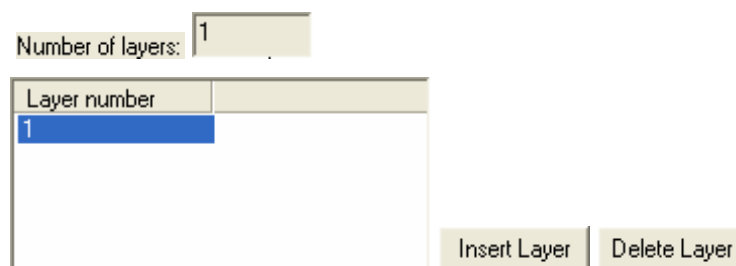
Convergence criterion: 0.0001

6) Τον έλεγχο των δεδομένων εξόδου, αυτών που παράγονται, και την επιλογή των επιθυμητών για να εξαχθούν (**Output control**), κάτι που περιλαμβάνει:

- ✓ Τις συντεταγμένες των κόμβων (**Echo nodal coordinates**)
- ✓ Τις ανυψώσεις της διεπιφάνειας των στρωμάτων (**Echo interface elevations**)
- ✓ Τις οριακές συνθήκες (**Echo boundary conditions**)
- ✓ Τις ιδιότητες των υλικών των γεωλογικών στρωμάτων (**Echo material properties**)
- ✓ Την λίστα των επιπτώσεων (**Echo incidence list**)
- ✓ Την δρώσα δύναμη της διήθησης, τη βροχή (**Echo infiltration flux**)
- ✓ Τα αρχικά υδραυλικά ύψη (**Echo initial heads**)
- ✓ Τις αρχικές συγκεντρώσεις (**Echo initial concentrations**)



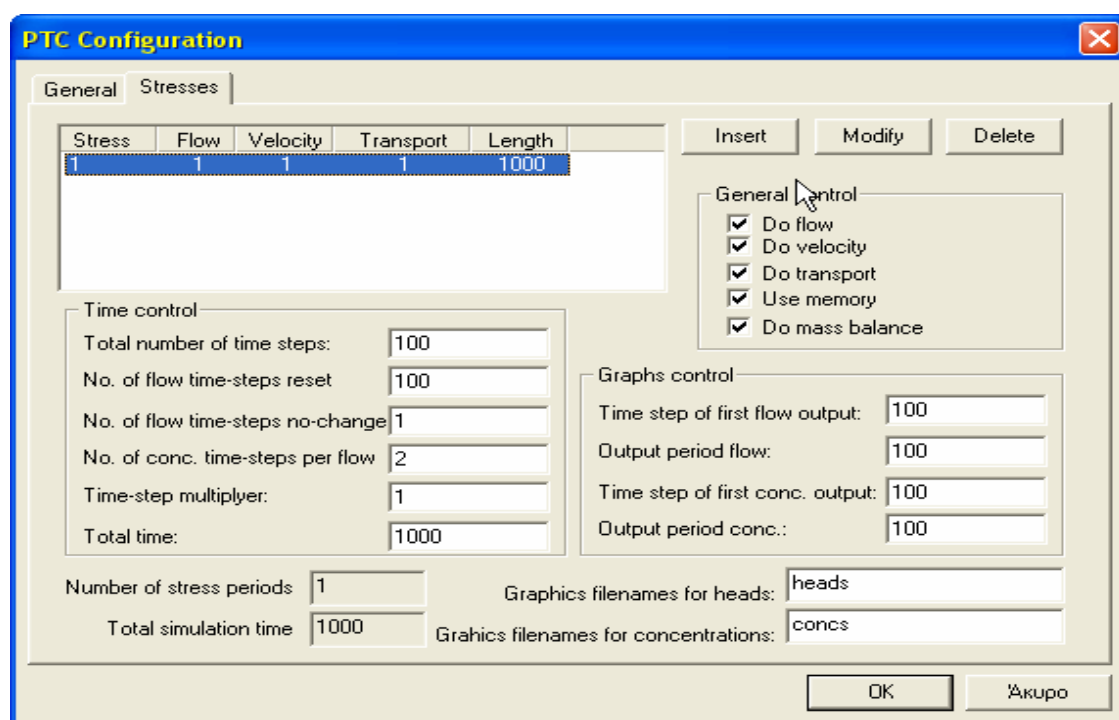
7) Τέλος, η επιλογή General περιλαμβάνει και τον καθορισμό του αριθμού των στρωμάτων από τα οποία αποτελείται ο υπό μελέτη υδροφορέας (**Number of layers**). Εάν αυτά είναι περισσότερα από ένα, τότε προσθέτουμε και τα υπόλοιπα, με την αρίθμηση να ξεκινάει από το βαθύτερο στρώμα, αυτό δηλαδή που βρίσκεται κατώτερα.




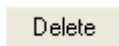
Επιλογή Stresses

Σ'αυτήν εδώ την επιλογή καθορίζεται ο αριθμός των χρονικών περιόδων μελέτης και γενικά όλες οι παράμετροι που έχουν να κάνουν με τον κώδικα PTC και που ενδεχομένως αλλάζουν έπειτα από την εκτέλεση κάποιας εργασίας.


Η επιλογή **Stresses** περιλαμβάνει (Εικόνα Π-1-5):



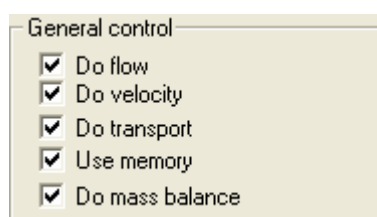
Εικόνα Π-1-5 : Η επιλογή **Stresses** του **PTC Configuration**

- 1) Έναν πίνακα που μας δείχνει τον αριθμό των περιόδων των εργασιών που πρόκειται να πραγματοποιηθούν. Εμείς μπορούμε, ανάλογα με τη εργασία που εκτελούμε να προσθέτουμε ή να αφαιρούμε περιόδους από τις επιλογές  και .

Stress	Flow	Velocity	Transport	Length
1	1	1	1	1000

Επίσης, μπορούμε να μετατρέπουμε τα δεδομένα και τις συνθήκες που έχουμε καθορίσει για μία τέτοια περίοδο εργασίας. Αρκεί να επιλέξουμε την συγκεκριμένη περίοδο, από τον παραπάνω πίνακα και αφού αλλάξουμε τις παραμέτρους που εμείς επιθυμούμε, να πατήσουμε στην επιλογή  ούτως ώστε οι αλλαγές αυτές να αποθηκευτούν.

- 2) Τον πίνακα ελέγχου (**General control**), ο οποίος μας παρέχει την δυνατότητα διαφόρων εργασιών κατά την εκτέλεση του μοντέλου και οι οποίες περιλαμβάνουν:



Όπως άλλωστε φαίνεται και στον παρακάτω Πίνακα Π-1-1:

Do flow	Πραγματοποίηση ή μη των υπολογισμών των εξισώσεων ροής.
Do velocity	Πραγματοποίηση ή μη των υπολογισμών για την ταχύτητα.
Do transport	Πραγματοποίηση ή μη των υπολογισμών των εξισώσεων μεταφοράς.
Use memory	Χρησιμοποίηση ή μη της εικονικής μνήμης. Αυτή η επιλογή πρέπει να είναι τσεκαρισμένη.
Do mass balance	Πραγματοποίηση ή μη των εξισώσεων ισοζυγίου μάζας. Αυτή η επιλογή πρέπει να είναι τσεκαρισμένη.

Πίνακας Π-1-1 : Έλεγχος γενικών παραμέτρων (**General control**)

- 3) Τον πίνακα ελέγχου των χρονικών παραμέτρων των εργασιών που πρόκειται να πραγματοποιηθούν (**Time control**)

Time control

Total number of time steps: 100

No. of flow time-steps reset 100

No. of flow time-steps no-change 1

No. of conc. time-steps per flow 2

Time-step multiplier: 1

Total time: 1000

Και όπως φαίνεται επεξηγηματικά στον Πίνακα Π-1-2:

Total number of time steps	Συνολικός αριθμός χρονικών βημάτων για την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης περιόδου εργασίας.
Number of flow time-steps reset	Αριθμός χρονικών βημάτων για την ροή, μετά την πάροδο των οποίων το χρονικό βήμα θα αλλάξει, εφόσον θα πολλαπλασιαστεί με τον πολλαπλασιαστή που δίνεται παρακάτω.
Number of flow time-steps no-change	Αριθμός χρονικών βημάτων για τη ροή, μετά την πάροδο των οποίων το χρονικό βήμα πλέον δεν θα αλλάξει λόγω της παρουσίας του πολλαπλασιαστή.
Number of concentration time-steps per flow	Αριθμός χρονικών βημάτων για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων ανά χρονικό βήμα για τη ροή.
Time-step multiplier	Ο πολλαπλασιαστής που χρησιμοποιείται στα κουτιά δύο και τρία.
Total time	Ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης περιόδου της εργασίας μας.

Πίνακας Π-1-2 : Έλεγχος χρονικών παραμέτρων (**Time control**)

- 4) Τον έλεγχο των γραφικών που προκύπτουν από τα εξαγόμενα αποτελέσματα
(**Graphs control**)

Η επεξήγηση δίνεται στον παρακάτω, Πίνακα Π-1-3:

Time step of first flow output	Χρονικό βήμα μετά από το οποίο εμφανίζονται τα πρώτα αποτελέσματα για την ροή σε μορφή γραφικών.
Output period flow	Περίοδος για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της ροής με μορφή γραφικών.
Time step of first concentration output	Χρονικό βήμα μετά από το οποίο εμφανίζονται τα πρώτα αποτελέσματα για την συγκέντρωση με μορφή γραφικών.
Output period concentration	Περίοδος για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της συγκέντρωσης με μορφή γραφικών.

Πίνακας Π-1-3 : Έλεγχος των γραφικών (**Graphs control**)

- 5) Έναν αριθμό συνολικά τεσσάρων πινάκων, για ένα γενικό έλεγχο, όσον αφορά την προσομοίωση με το μοντέλο και τις ονομασίες διαφόρων αρχείων, όπως φαίνεται και στον παρακάτω:


Επεξηγηματικά, παρουσιάζεται στον παρακάτω Πίνακα Π-1-4:

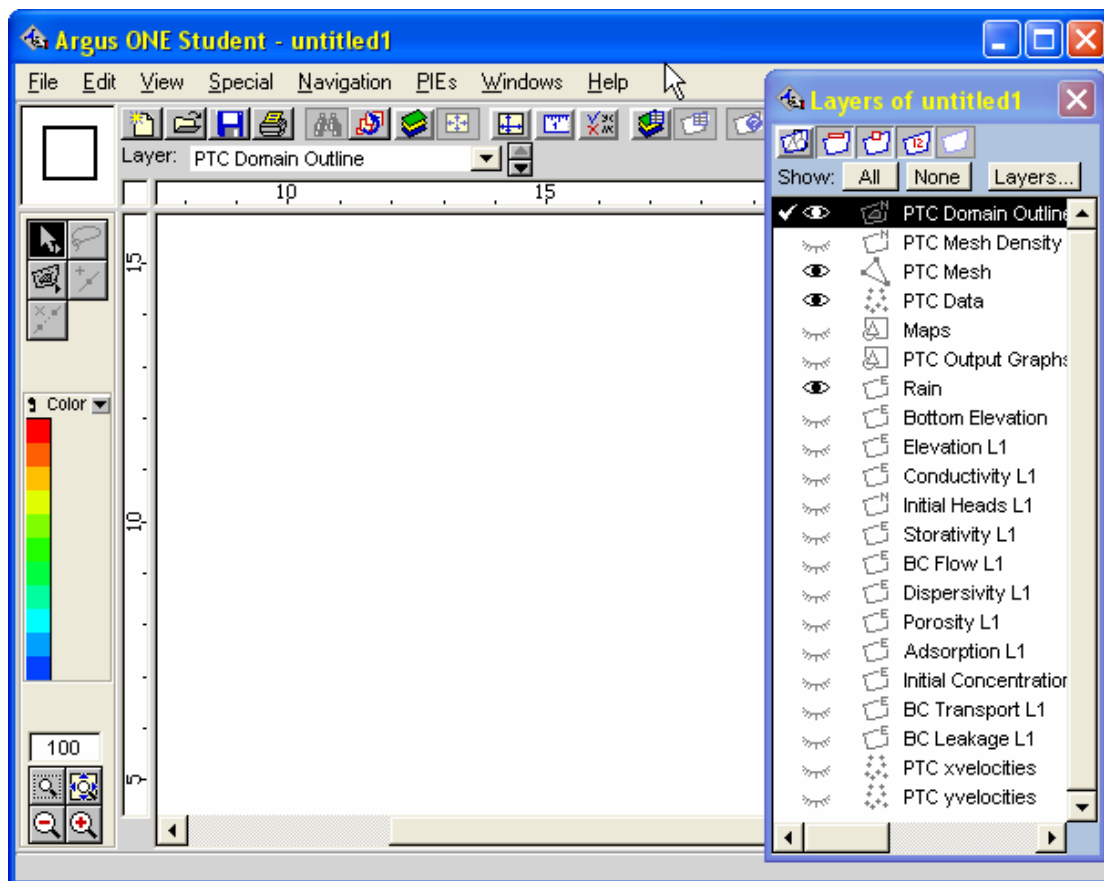
Number of stress periods	Συνολικός αριθμός περιόδων εργασίας.
Total simulation time	Συνολικός χρόνος προσομοίωσης για την εργασία μας στο σύνολο των περιόδων.
Graphics filenames for heads	Ονομασία αρχείων γραφικών για τα υδραυλικά ύψη.
Graphics filenames for concentrations	Ονομασία αρχείων γραφικών για τις συγκεντρώσεις..

Πίνακας Π-1-4 : Γενικός έλεγχος προσομοίωσης.

Πρέπει να επισημάνουμε εδώ πως ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης για το συγκεκριμένο παράδειγμα θα ανέρχεται σε 1000 ημέρες. Άλλωστε τόσο ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης, όσο και τα διάφορα χρονικά βήματα εκφράζονται σε μονάδες ημερών. Επίσης πρέπει να σημειώσουμε πως για το συγκεκριμένο παράδειγμα που θα παρουσιάσουμε έχουμε ρυθμίσει τις διάφορες παραμέτρους με τις τιμές που φαίνονται στους προαναφερόμενους πίνακες.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΑΣ

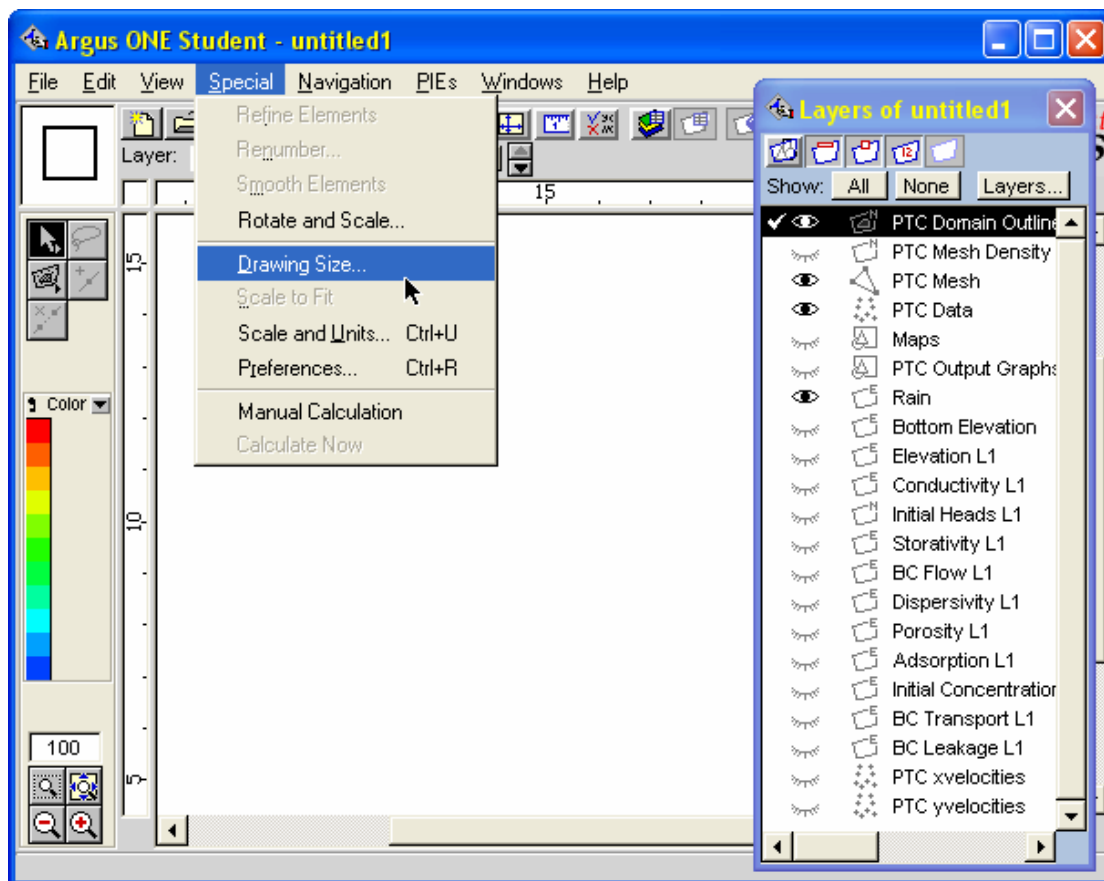
Αρχικά, πρέπει να σχεδιάσουμε την περιοχή πάνω στην οποία θα εφαρμόσουμε το παράδειγμα μας. Εφόσον έχουμε τροποποιήσει τις παραμέτρους μας, όπως έχουμε ήδη δείξει, και πατήσουμε , εμφανίζεται το παράθυρο του μοντέλου εντός του οποίου θα πραγματοποιήσουμε όλες τις υπόλοιπες διαδικασίες (Εικόνα Π-1-6):



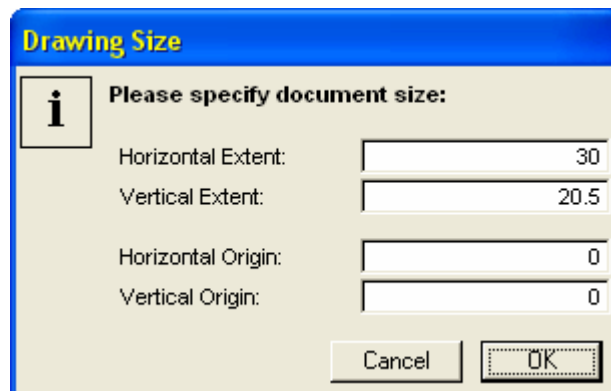
Εικόνα Π-1-6 : Παράθυρο για την εφαρμογή των απαιτούμενων διαδικασιών στην εφαρμογή του μοντέλου.

Η σχεδίαση της περιοχής μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

- ✓ Είτε να επιλέξουμε από την γραμμή των εργαλείων το μενού **Special** και έπειτα από τις διάφορες επιλογές που δίνονται να τσεκάρουμε αυτήν που λέει **Drawing Size** και στο παράθυρο διαλόγου που θα ανοίξει να εισάγουμε τα μήκη των ορίων της περιοχής (**Horizontal Extent** και **Vertical Extent**), όπως φαίνεται στις Εικόνες Π-1-7 και Π-1-8:



Εικόνα Π-1-7 : Επιλογή του μενού Special και έπειτα του Drawing Size για τον σχεδιασμό της περιοχής μας.

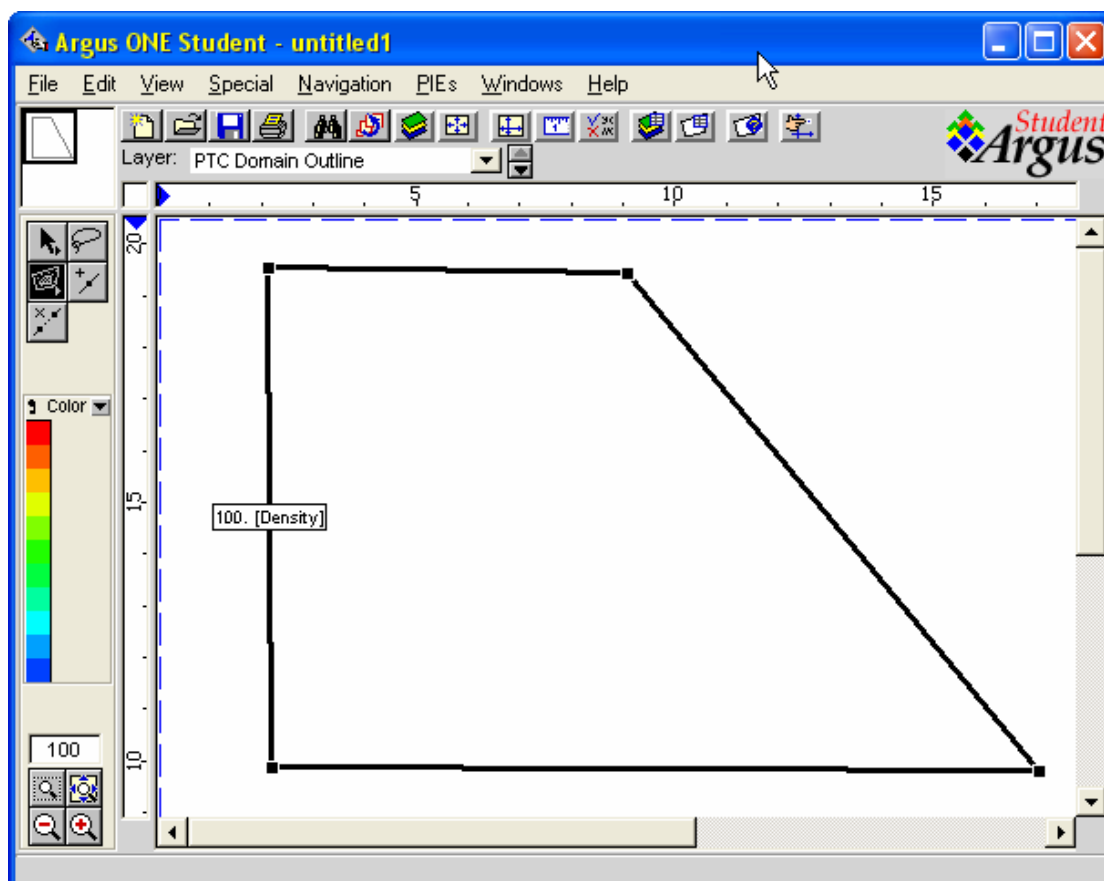


Εικόνα Π-1-8 : Εισαγωγή των μηκών των ορίων της περιοχής στα πλαίσια **Horizontal Extent** και **Vertical Extent**.

- ✓ Είτε απλά, επιλέγοντας από τη στήλη των **Layers** την επιλογή **PTC Domain Outline** και στη συνέχεια με το **Navigate Tool** (είναι το βελάκι) της αριστερής στήλης να σχεδιάσουμε τα όρια της περιοχής, οπότε και σ' αυτή την

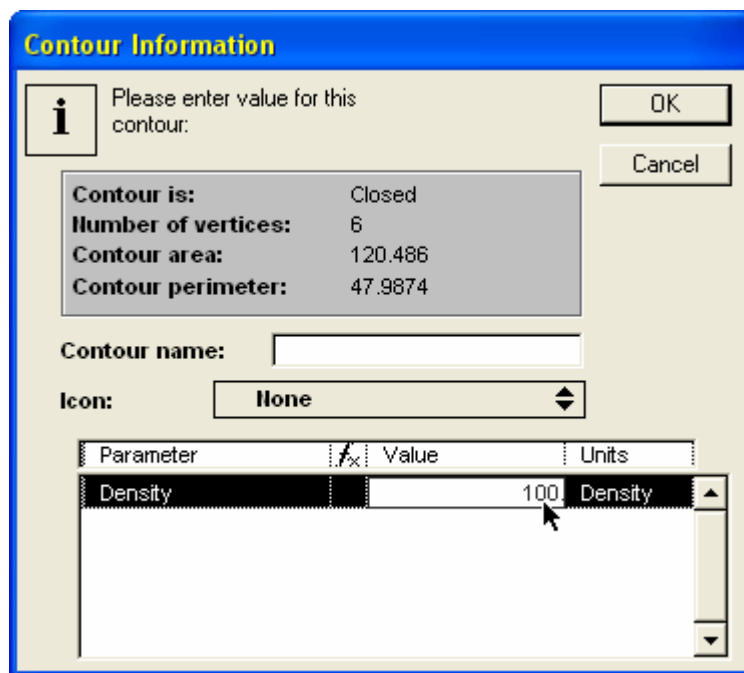
περίπτωση μετά την σχεδίαση της περιοχής το μήκος και το πλάτος αυτής θα εισαχθούν αυτόματα στα πεδία που προαναφέραμε.

Έπειτα από την στήλη των Layers τσεκάρουμε την επιλογή **PTC Domain Outline** και με τη βοήθεια του **Closed Geographic Tool**, από την αριστερή εργαλειοθήκη, σχεδιάζουμε την περιοχή μας (Εικόνα Π-1-9):



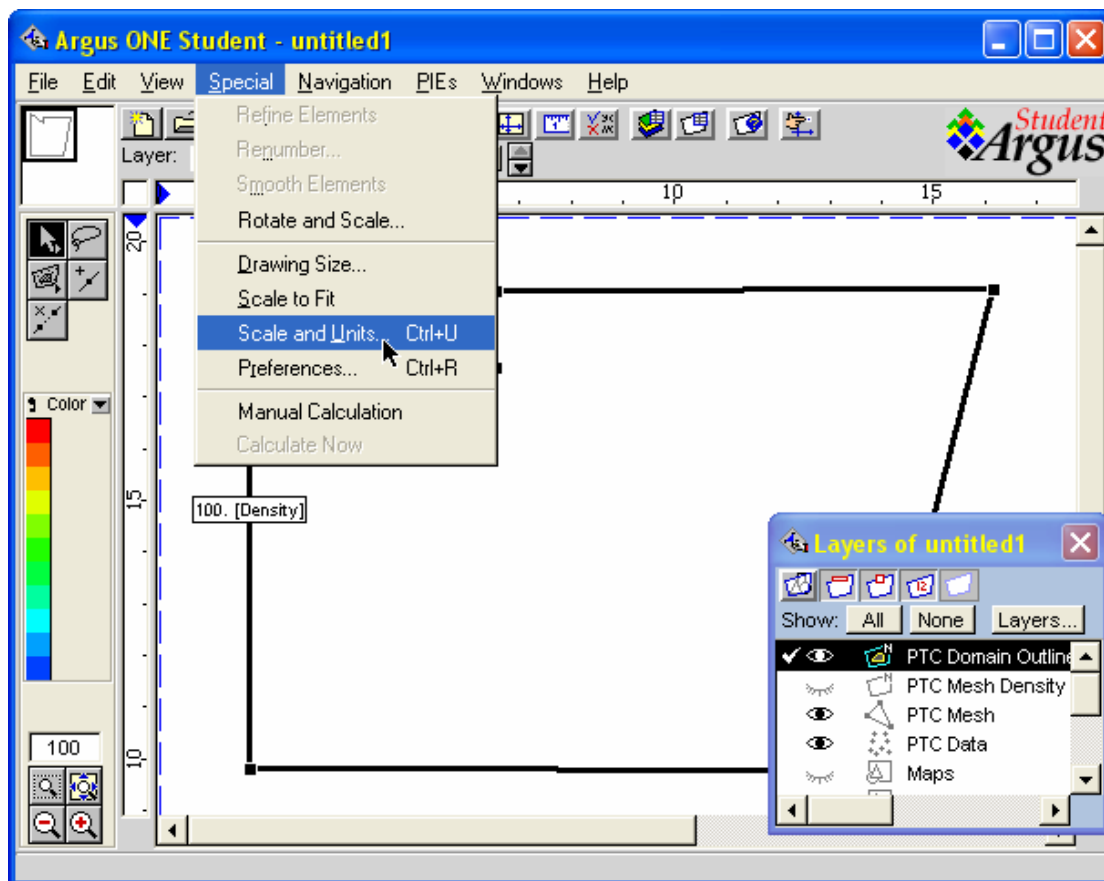
Εικόνα Π-1-9 : Σχεδιασμός της περιοχής

Αμέσως μετά την σχεδίαση της περιοχής (συγκεκριμένα μόλις κλείσει η πολυγωνική αυτή γραμμή) εμφανίζεται ένα ακόμα παράθυρο διαλόγου το οποίο μας ζητάει να εισάγουμε έναν αριθμό, ο οποίος θα υποδεικνύει την πυκνότητα της συγκεκριμένης περιοχής. Δηλαδή, θα μας δείχνει το μέγεθος των Δx και Δy των στοιχείων του πλέγματος που θα προκύψει αργότερα. Το συγκεκριμένο παράθυρο έχει τίτλο **Contour Information** και η πυκνότητα εισάγεται στο πλαίσιο με τίτλο **Density** (Εικόνα Π-1-10):



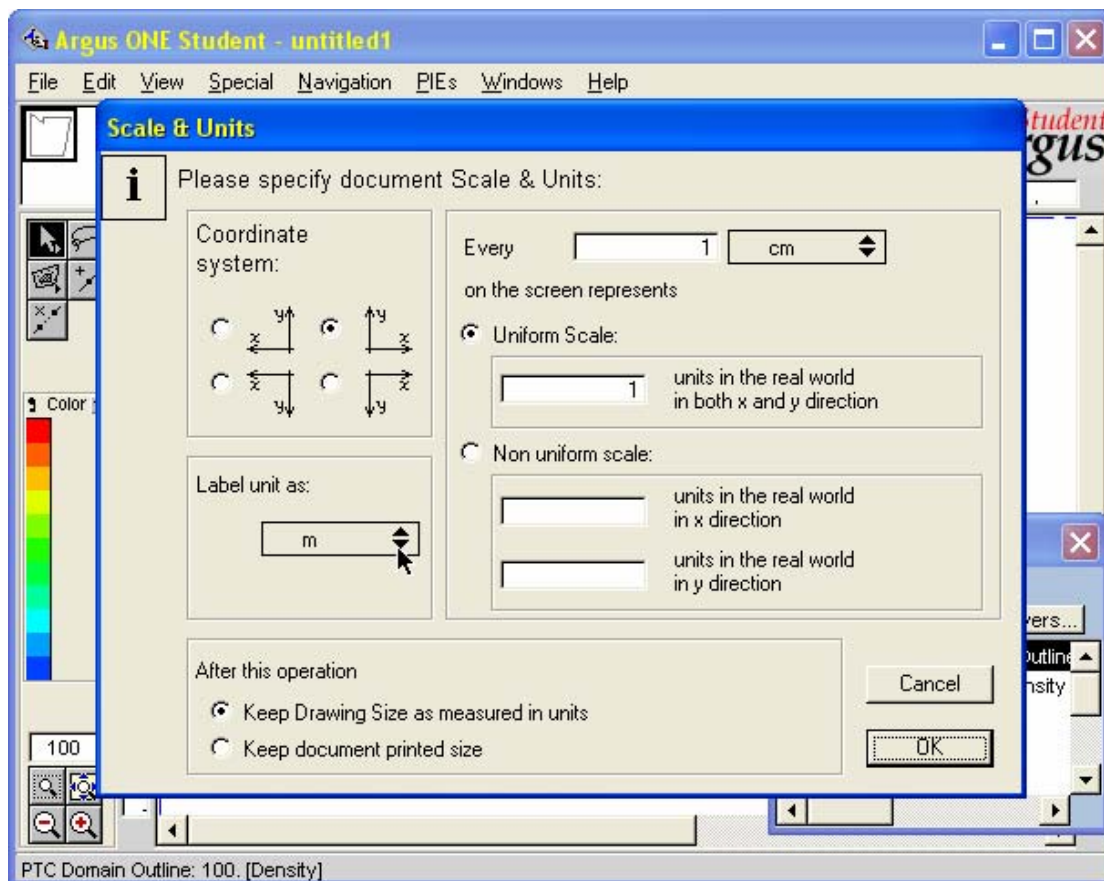
Εικόνα Π-1-10 : Παράθυρο διαλόγου για την εισαγωγή της πυκνότητας της περιοχής μελέτης.

Εφόσον έχουμε πλέον σχεδιάσει την περιοχή της μελέτης μας, μπορούμε να ορίσουμε την μονάδα μήκους που θα χρησιμοποιήσουμε. Αυτό γίνεται επιλέγοντας το μενού **Special** και έπειτα τσεκάροντας την επιλογή **Scale and Units**, όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα Π-1-11:



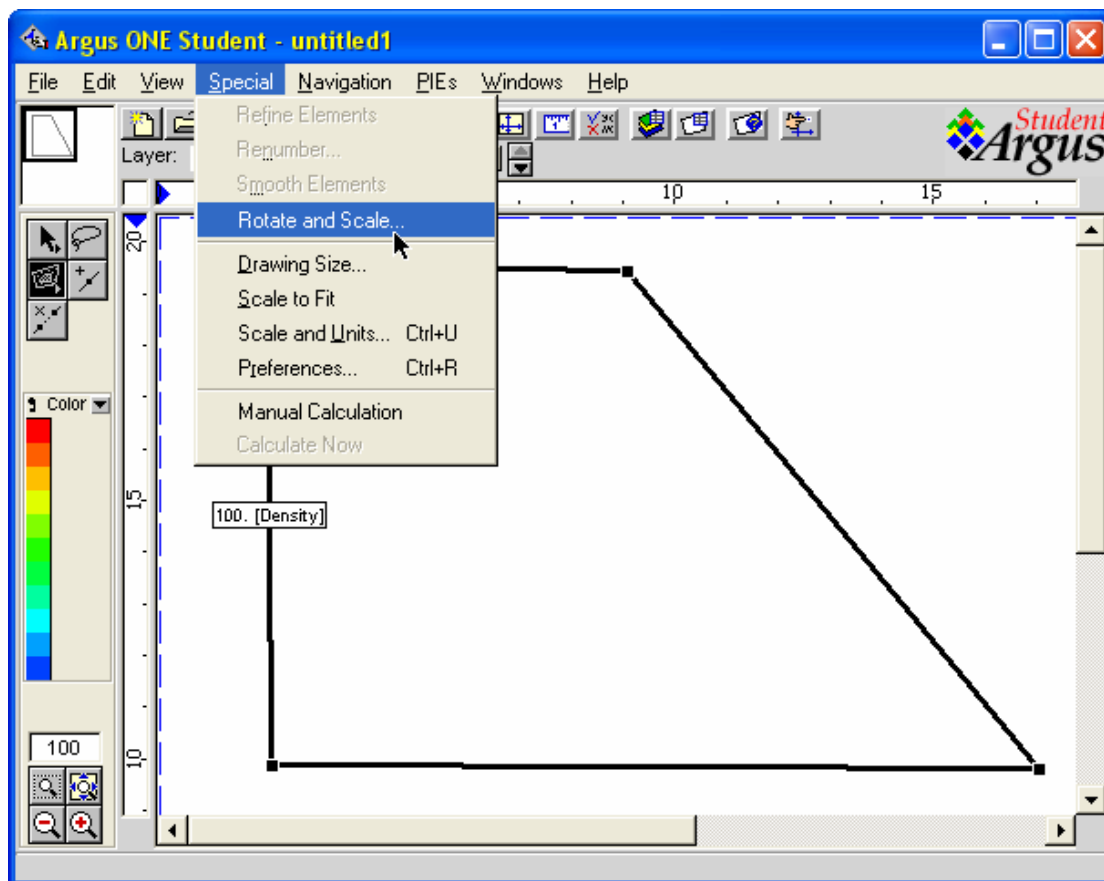
Εικόνα Π-1-11 : Επιλογή Scale and Units από το μενού Special για καθορισμό την μονάδας μέτρησης στην περιοχή μελέτης.

Τσεκάροντας λοιπόν την επιλογή αυτή μας ανοίγεται ένα παράθυρο διαλόγου με διάφορες επιλογές. Αυτή που μας αφορά εμάς είναι η **Label unit as**, στην οποία εμείς καθορίζουμε συνήθως ως μονάδα μέτρησης τα μέτρα (m), όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα Π-1-12:



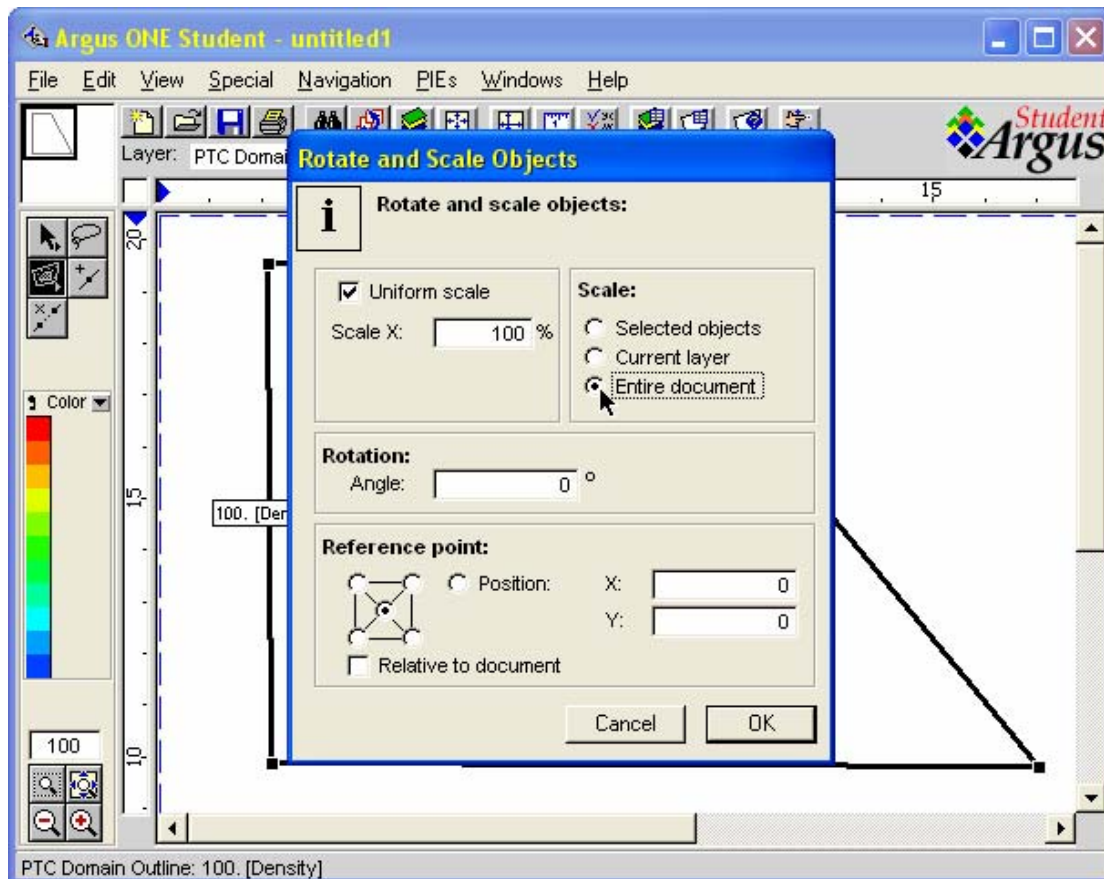
Εικόνα Π-1-12 : Επιλογή του μέτρου (m) ως μονάδα μέτρησης για την περιοχή μελέτης μας.

Το επόμενο βήμα μας είναι να καθορίσουμε την κλίμακα της περιοχής, όσον αφορά το αν το μέγεθός της αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα. Έτσι, και πάλι από το μενού **Special** τσεκάρουμε αυτή τη φορά την επιλογή **Rotate and Scale Objects**, όπως φαίνεται στην Εικόνα Π-1-13:



Εικόνα Π-1-13 : Επιλογή Rotate and Scale Objects από το μενού Special για καθορισμό της κλίμακας της περιοχής.

Κατόπιν αυτής της επιλογής μας ανοίγεται ένα άλλο παράθυρο διαλόγου στο οποίο εμείς καθορίζουμε την κλίμακα της περιοχής ως ποσοστό επί τοις εκατό (%), Θέτουμε λοιπόν την κλίμακα στον X άξονα ίση με 100 % μέσω της επιλογής **Uniform scale** και αυτό θα ισχύει για όλη την περιοχή γι'αυτό τσεκάρουμε και την επιλογή **Entire document** (όλο το έγγραφο), όπως φαίνεται στην Εικόνα Π-1-14:

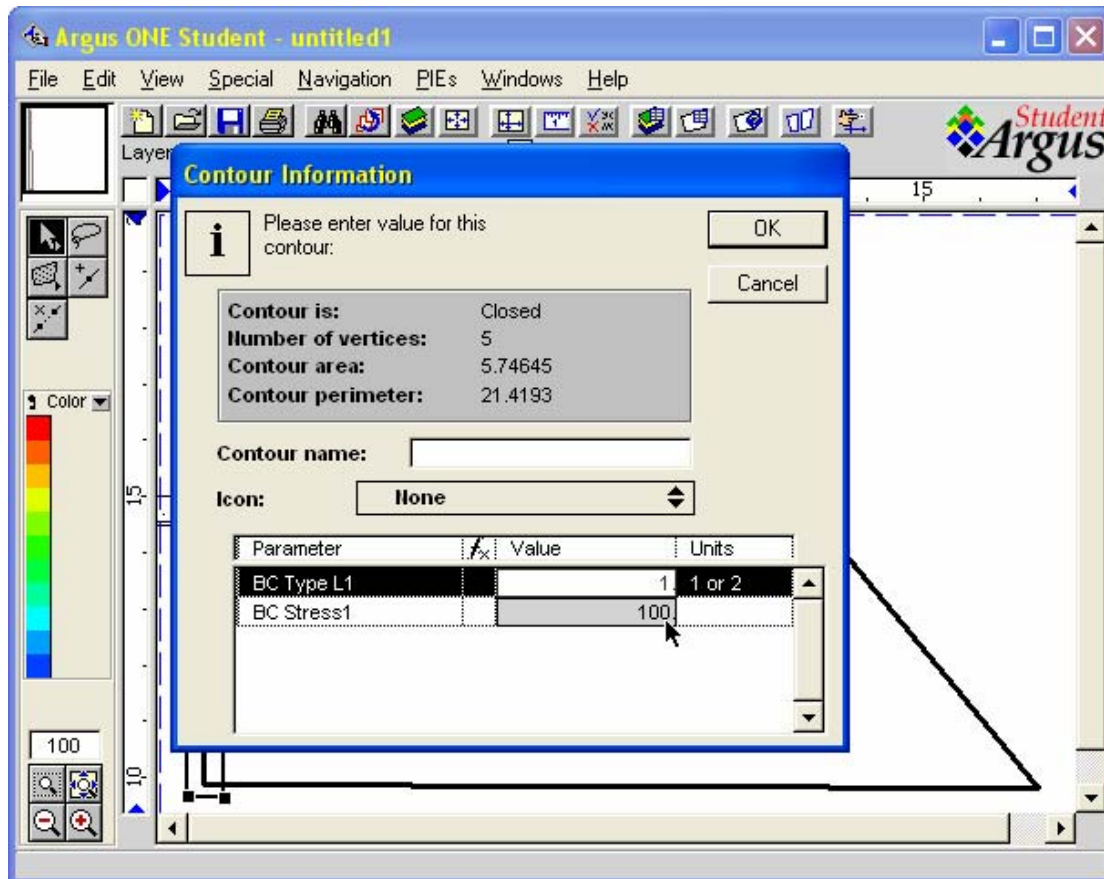


Εικόνα Π-1-14 : Διαμόρφωση της κλίμακας στον X άξονα, μέσω της επιλογής Uniform scale και εφαρμογή σε όλη την περιοχή μέσω της επιλογής Entire document.

Επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός των οριακών συνθηκών για τη ροή στην περιοχή. Από τη στήλη λοιπόν των Layers τσεκάρουμε την επιλογή **BC Flow L1**. Στη συνέχεια, με τη χρήση του **Closed Geographic Tool**, από την αριστερή εργαλειοθήκη, περικλείουμε τις περιοχές για τις οποίες θα ισχύουν οι ίδιες οριακές συνθήκες. Κάθε φορά που θα γίνεται αυτό για μία οριακή συνθήκη, μέχρι φυσικά να οριστούν όλες, θα ανοίγει το παράθυρο διαλόγου **Contour Information**, στο οποίο θα μας ζητείται να εισάγουμε τον τύπο της οριακής συνθήκης (**BC Type L1**) καθώς επίσης και την αντίστοιχη τιμή (**BC Stress1**).

Επειδή μιλάμε για σταθερά υδραυλικά ύψη ο τύπος είναι 1 (1^{ος} τύπος οριακών συνθηκών) και οι τιμές που εμείς θα εισάγουμε στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι 100 m στο αριστερό όριο της περιοχής και 40 m στο δεξιό. Πρέπει να σημειώσουμε πως ο ορισμός των οριακών συνθηκών μπορεί να συμπεριλαμβάνει και το πάνω και κάτω όριο της περιοχής, αλλά εμείς εδώ για λόγους ευκολίας ορίζουμε οριακές

συνθήκες μόνο για τα εκ δεξιών και αριστερών όρια της περιοχής. Στο περιοχή όμως την οποία θα μελετήσουμε σαφώς και θα εισαχθούν και αυτές οι οριακές συνθήκες. Όλα τα προαναφερθέντα φαίνονται στην Εικόνα Π-1-15:



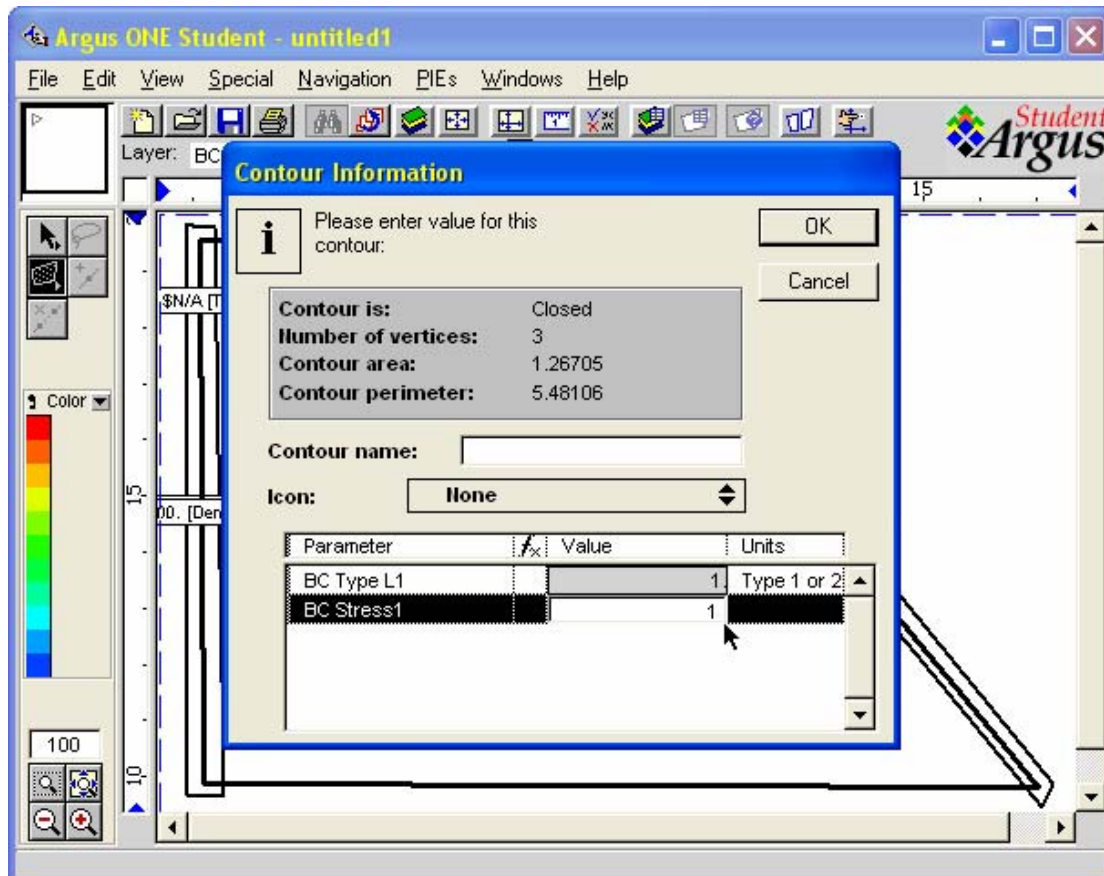
Εικόνα Π-1-15 : Καθορισμός των οριακών συνθηκών για τη ροή της περιοχής.

Το βήμα που ακολουθεί έχει να κάνει με την τοποθέτηση της πηγής ρύπανσης εντός της περιοχής, ούτως ώστε να πραγματοποιήσουμε την προσομοίωση της μεταφοράς μάζας σ' αυτήν. Βέβαια, στην μελέτη της περιοχής που μας ενδιαφέρει εμείς θα πραγματοποιήσουμε ανάλυση ευαισθησίας και εκτός από την εισαγωγή των πηγαδιών δεν θα χρειαστεί να εισάγουμε και πηγή ρύπανσης. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα αυτό γίνεται καθαρά για να δείξουμε πως δουλεύει το μοντέλο σε τέτοιες περιπτώσεις.

Για άλλη μία φορά λοιπόν από την στήλη των Layers τσεκάρουμε την επιλογή **BC Transport L1** και κατόπιν και πάλι με τη χρήση του **Closed Geographic Tool** περικλείουμε την περιοχή την οποία καλύπτει η πηγή. Αμέσως μόλις κλείσουμε την πολυγωνική γραμμή που θα καθορίζει τα όρια της πηγής ρύπανσης, εμφανίζεται και

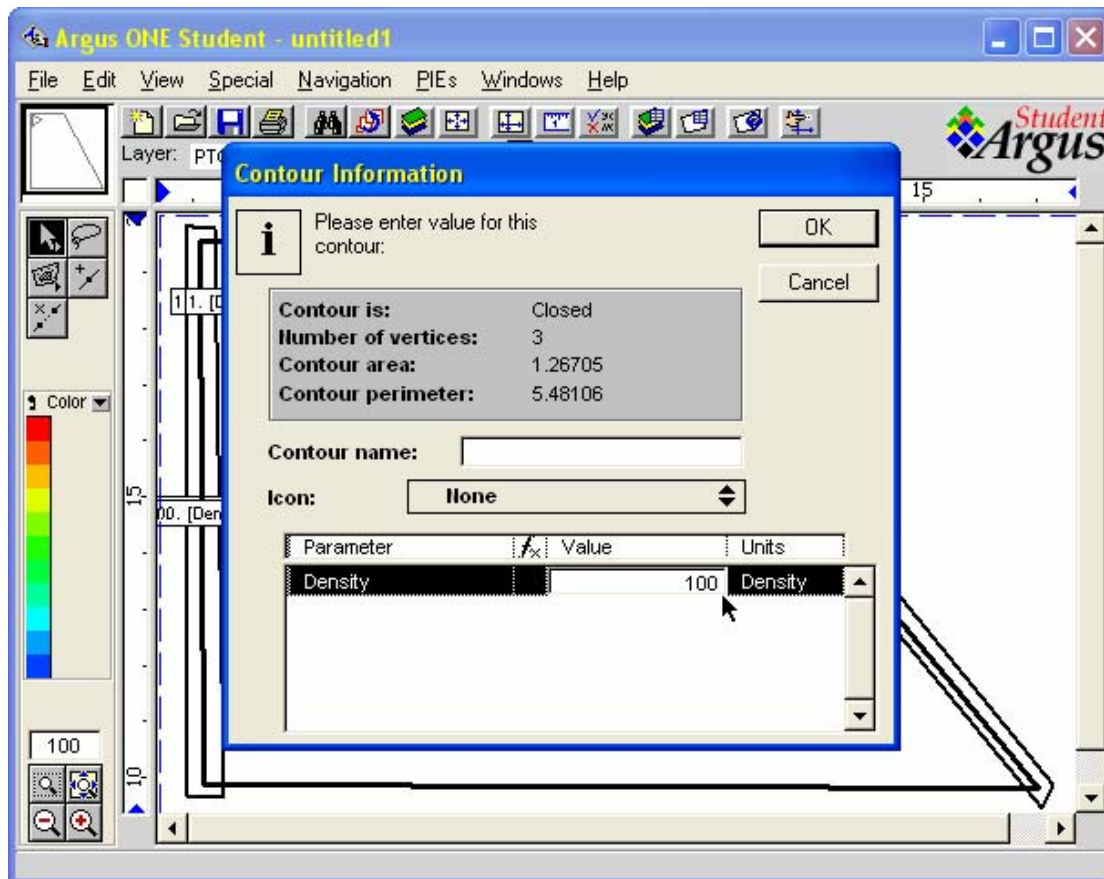
πάλι το παράθυρο διαλόγου **Contour Information** στο οποίο για άλλη μία φορά θα μας ζητείται να εισάγουμε τον τύπο της οριακής συνθήκης (**BC Type L1**) καθώς επίσης και την αντίστοιχη τιμή (**BC Stress1**).

Επειδή μιλάμε λοιπόν για σταθερή συγκέντρωση στον τύπο της συνθήκης θα εισάγουμε και πάλι την τιμή 1 ενώ θα ορίσουμε ως υποθετική τιμή τα $5 \text{ gr} / \text{m}^3$. Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται στην Εικόνα Π-1-16 παρακάτω:



Εικόνα Π-1-16 : Καθορισμός της πηγής ρύπανσης και της συγκέντρωσης αυτής.

Βέβαια πρέπει να γίνει αντιγραφή της πηγής που τοποθετήσαμε και στο **PTC Domain Outline**. Αυτό γίνεται με τη χρήση του **Navigate Tool**, οπότε και επιλέγουμε με αυτό την πηγή και κατόπιν με Copy / Paste την αντιγράφουμε στο **PTC Domain Outline** (ή **Domain Outline Layer** όπως αλλιώς ονομάζεται). Εφόσον την αντιγράψαμε αλλάζουμε και την πυκνότητά της και την θέτουμε ίση με 50. Τα παραπάνω φαίνονται στην Εικόνα Π-1-17:

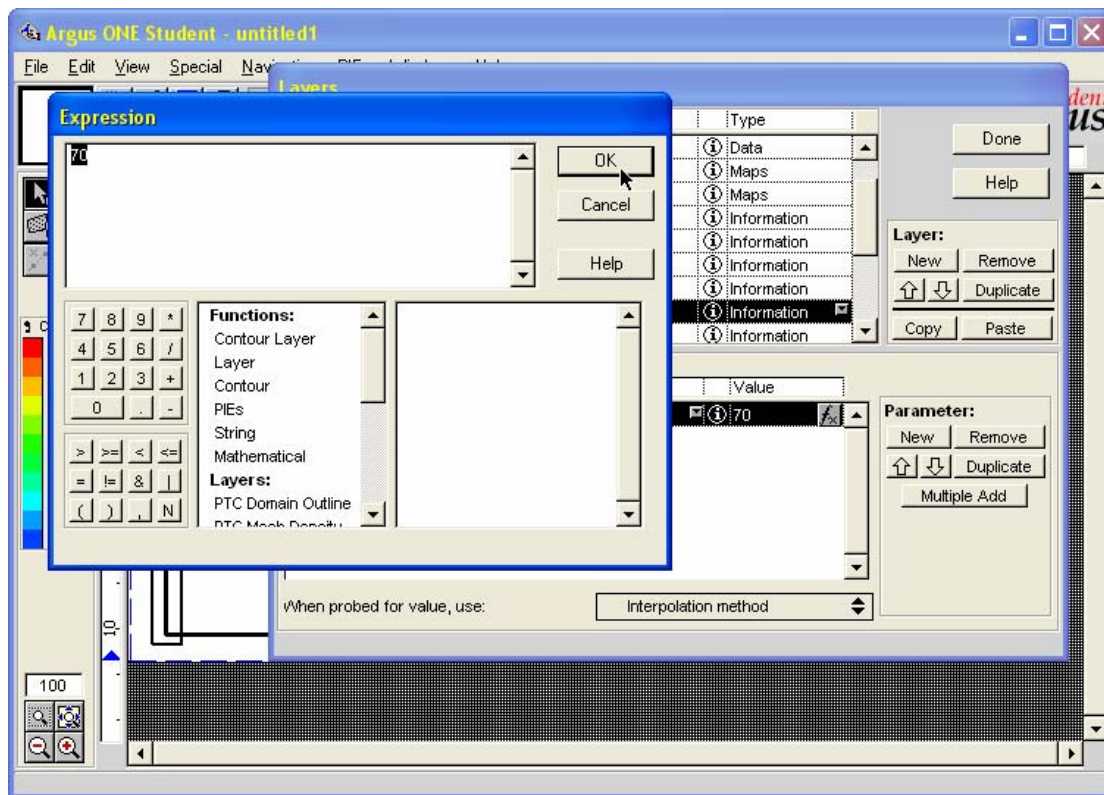


Εικόνα Π-1-17 : Αντιγραφή της πηγής στο **Domain Outline Layer** και αλλαγή της πυκνότητάς της.

Στο επόμενο στάδιο αυτού του παραδείγματος περνάμε στον καθορισμό των υπόλοιπων παραμέτρων / πληροφοριών, στις οποίες δίνουμε τις ανάλογες τιμές. Επειδή η διαδικασία που ακολουθείται είναι η ίδια για όλες, θα αναφέρουμε ενδεικτικά τον καθορισμό της τιμής του αρχικού υδραυλικού ύψους στην εν λόγω περιοχή, στη συνέχεια θα περάσουμε στην τοποθέτηση των πηγαδιών άντλησης στην περιοχή και έπειτα θα αναφερθούμε και στις υπόλοιπες παραμέτρους.

Αρχικά λοιπόν και πάλι από την στήλη των Layers τσεκάρουμε την επιλογή **Initial Heads L1** και από το μενού Show που υπάρχει τσεκάρουμε την επιλογή Layers. Μας ανοίγεται έτσι ένα παράθυρο διαλόγου στο οποίο εμείς ορίζουμε την τιμή του αρχικού υδραυλικού ύψους στην περιοχή πατώντας πάνω στην επιλογή f_x της στήλης **Value**, όπου και θέτουμε την τιμή των 70 m. Το είδος της τιμής αυτής ορίζεται ως **Information** και αυτό φαίνεται από τη στήλη **Type** όπου είναι επιλεγμένη η γραμμή που αναφέρεται στα **Initial Heads L1**. Τέλος πρέπει να σημειώσουμε ότι σε όλες αυτές τις παραμέτρους χρησιμοποιείται η μέθοδος της

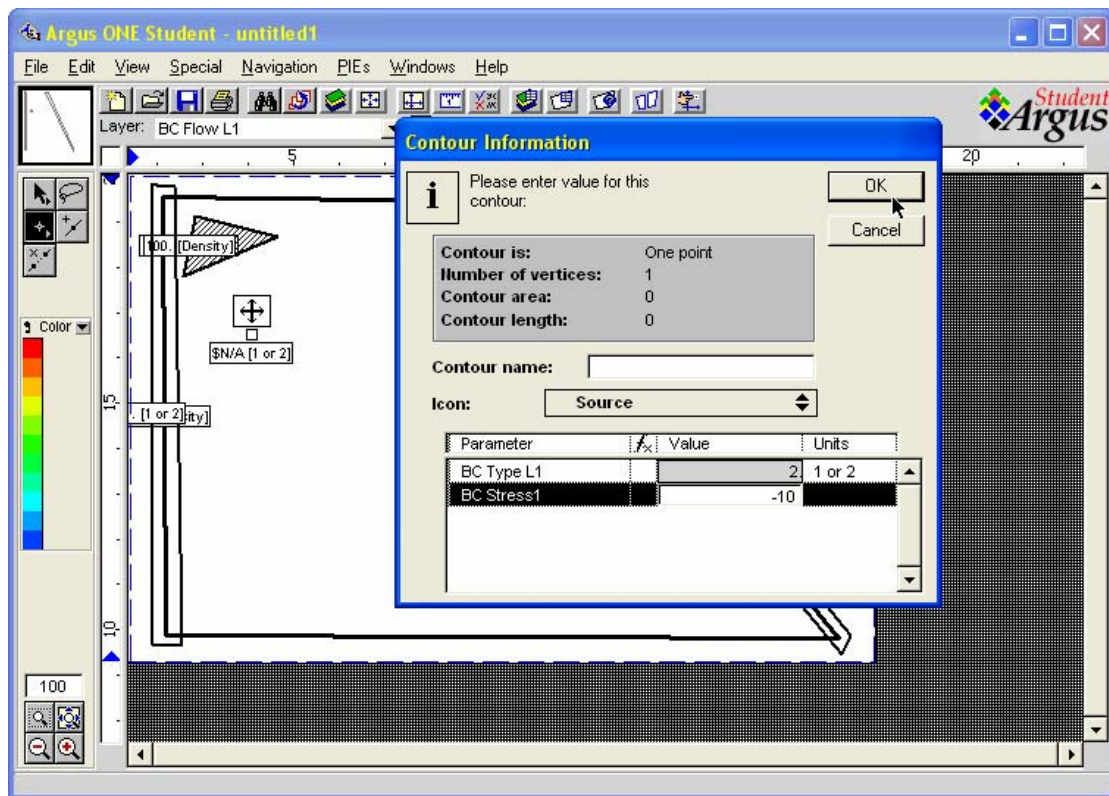
παρεμβολής, Interpolation method. Όλα τα παραπάνω φαίνονται στην κάτωθι Εικόνα Π-1-18:



Εικόνα Π-1-18 : Καθορισμός της τιμής των αρχικών υδραυλικών υψών της περιοχής.

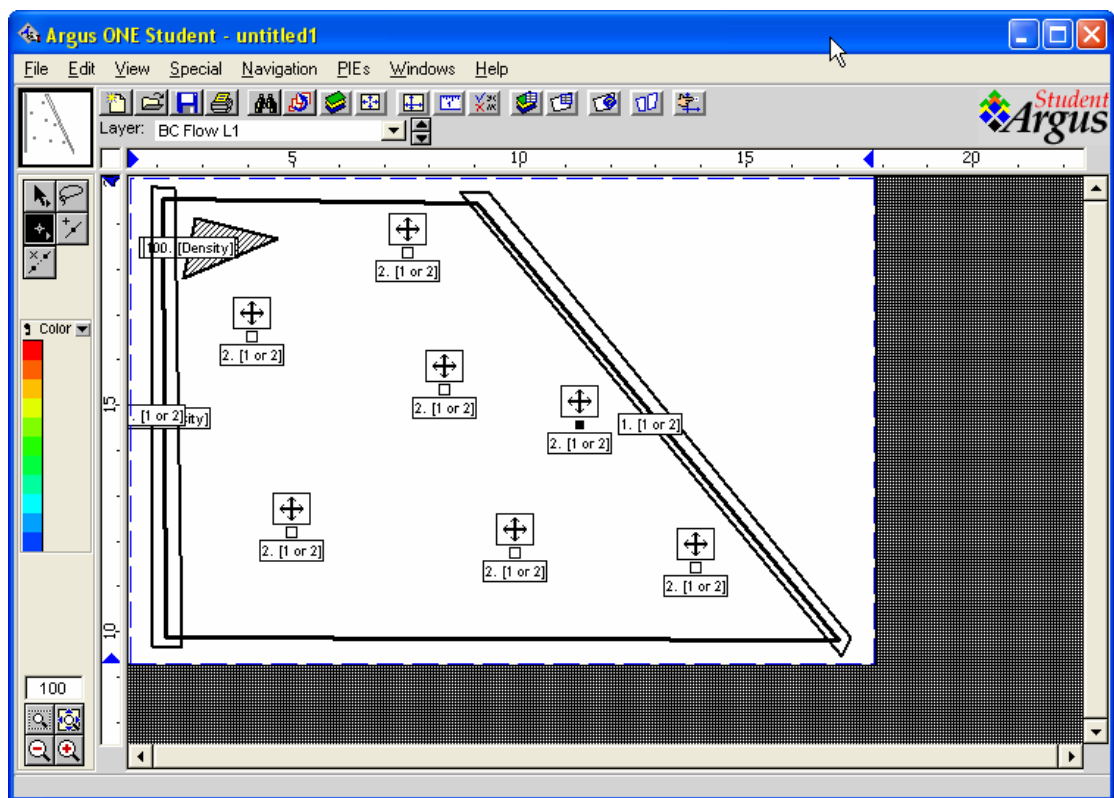
Πριν παρουσιάσουμε με μορφή πίνακα τις τιμές που δώσαμε στις υπόλοιπες παραμέτρους πρέπει να γίνει η τοποθέτηση των πηγαδιών άντλησης. Πάλι λοιπόν από τη στήλη των Layers τσεκάρουμε την επιλογή **BC Flow L1** και με τη χρήση του **Point Tool** (φαίνεται επιλεγμένο στην αριστερή πλευρά) τοποθετούμε τα πηγάδια. Έπειτα από την τοποθέτηση κάθε πηγαδιού ανοίγει το παράθυρο διαλόγου **Contour Information** στο οποίο για άλλη μία φορά θα μας ζητείται να εισάγουμε τον τύπο της οριακής συνθήκης (**BC Type L1**) καθώς επίσης και την αντίστοιχη τιμή (**BC Stress1**).

Αυτή τη φορά επειδή μιλάμε για πηγάδια δεν έχουμε σταθερά υδραυλικά ύψη και έτσι εισάγεται ο τύπος 2 ενώ για κάθε πηγάδι έχουμε και την αντίστοιχη τιμή, η οποία εισάγεται με αρνητικό πρόσημο ακριβώς για να δείξουμε ότι έχουμε άντληση νερού μέσω των πηγαδιών, Εικόνα Π-1-19:



Εικόνα Π-1-19 : Τοποθέτηση πηγαδιών άντλησης και καθορισμός των τιμών τους.

Η παραπάνω διαδικασία ακολουθείται για κάθε πηγάδι που θα τοποθετούμε. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα τοποθετήσαμε 7 πηγάδια, Εικόνα Π-1-20:



Εικόνα Π-1-20 : Παρουσίαση της περιοχής μετά την τοποθέτηση της πηγής ρύπανσης και των πηγαδιών άντλησης.

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε στον παρακάτω Πίνακα Π-1-5, τις υπόλοιπες παραμέτρους, όπως προείπαμε, με τις αντίστοιχες τιμές τους:

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΤΙΜΗ
Elevation L1 (m)	100
Bottom Elevation L1 (m)	0
Porosity L1	0.2
Storativity L1	0.0001
Initial Concentration L1 (gr/m ³)	0
Rain (m/day)	0
Conductivity L1 (m/day)	10-10-1
Dispersivity L1 (m)	1-1-1
Adsorption L1	0-0-0

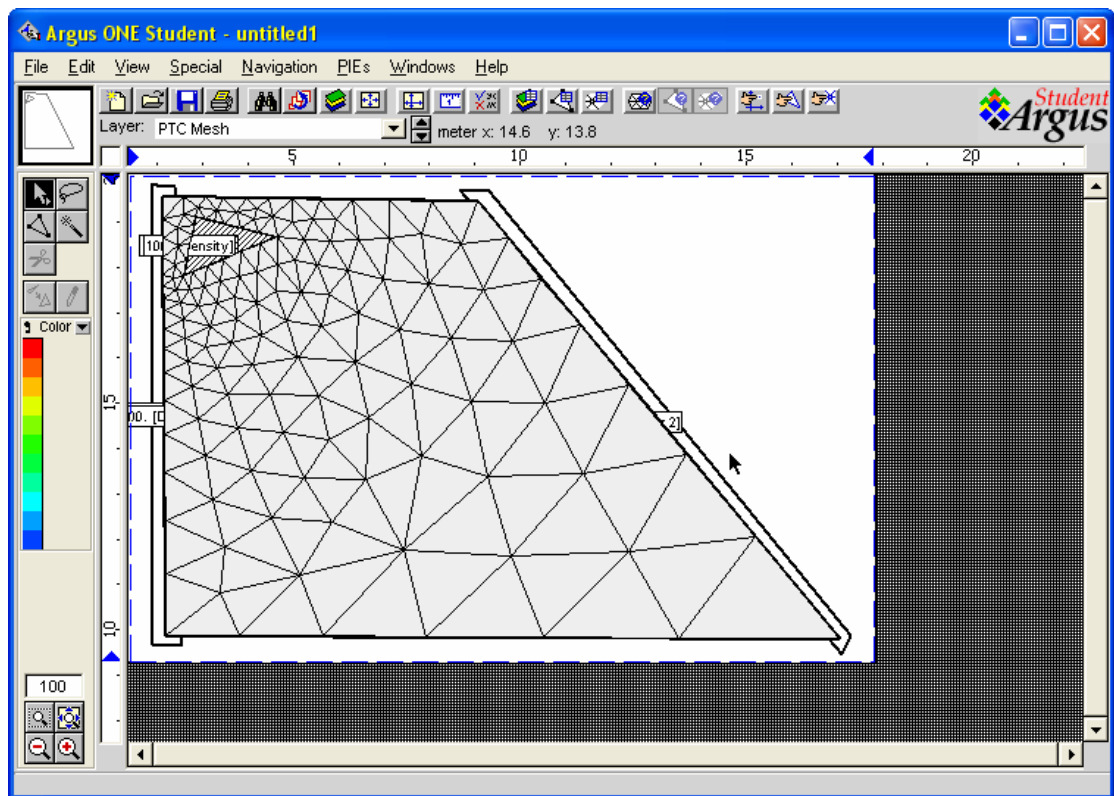
Πίνακας Π-1-5 : Παράμετροι και οι τιμές τους

Σημειώσεις

1. Όσον αφορά την πρώτη των παραμέτρων (Elevation), πρέπει να προσέχουμε ούτως ώστε η τιμή της να είναι μεγαλύτερη από την μεγαλύτερη τιμή που έχουμε δώσει στις οριακές συνθήκες, διαφορετικά το μοντέλο δεν θα μας δώσει αποτελέσματα.
2. Όσον αφορά την δεύτερη παράμετρο του πίνακα, συνήθως δίνεται η μηδενική τιμή καθότι αναφερόμαστε στο κατώτερο επίπεδο αναφοράς.
3. Πρέπει να προσέχουμε ούτως ώστε ο προσδιορισμός των τιμών των παραπάνω παραμέτρων, αλλά και γενικά όλων των βημάτων που ακολουθούνται να γίνεται με συγκεκριμένη σειρά διαφορετικά υπάρχει περίπτωση λάθους.
4. Κάτι που είναι αρκετά σημαντικό είναι πως στο συγκεκριμένο παράδειγμα ορίσαμε τις παραπάνω παραμέτρους με μία και μόνο τιμή που τις αντιπροσωπεύει για όλη την μελετούμενη περιοχή. Είναι δυνατόν όμως με τη χρήση του **Closed Geographic Tool** να καθορίζονται ενδεχομένως τμήματα της περιοχής στα οποία οι παράμετροι (μία ή και περισσότερες) θα έχουν διαφορετική τιμή απ'αυτή που ίσως να ισχύει για το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής.
5. Προσέχουμε ούτως ώστε η τιμή που δίνουμε στα αρχικά υδραυλικά ύψη να είναι μεταξύ των τιμών των οριακών συνθηκών διαφορετικά το μοντέλο δεν τρέχει λόγω λάθους.

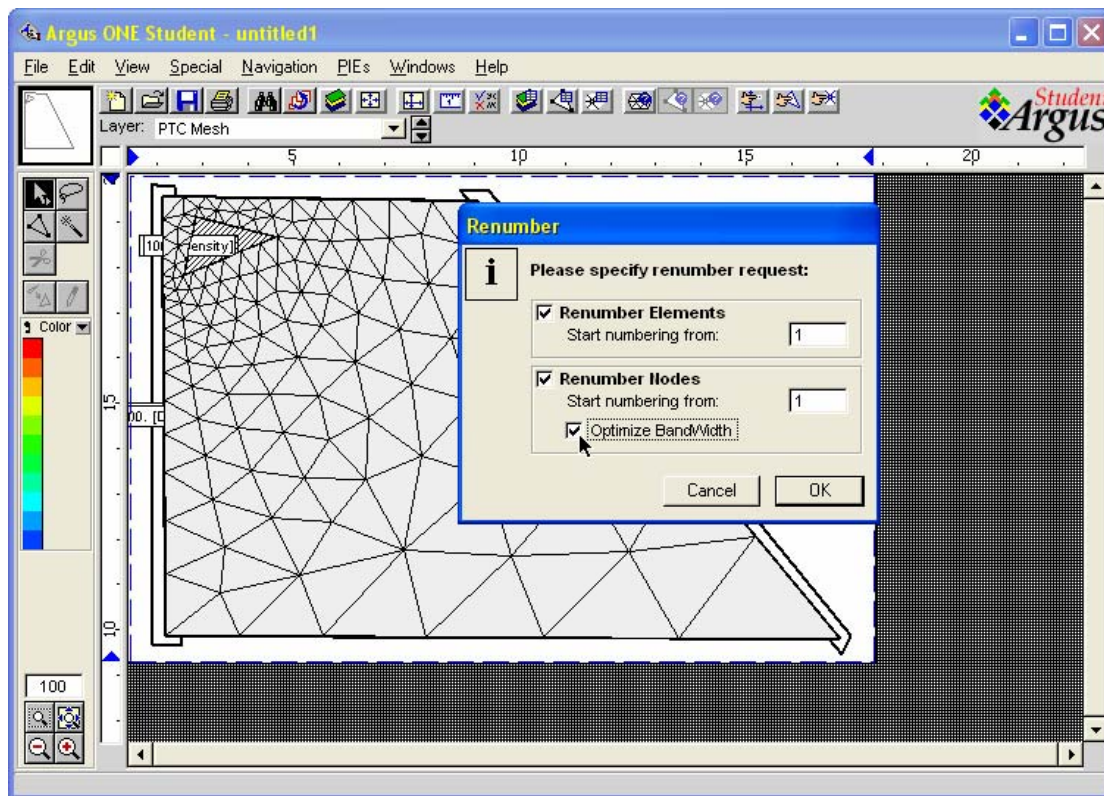
Έχοντας πλέον ορίσει τις τιμές για όλες τις παραμέτρους μπορούμε να προχωρήσουμε στο επόμενο βήμα που είναι η δημιουργία του δικτύου των στοιχείων (elements) στην περιοχή προσομοίωσης.

Για να γίνει αυτό από τη στήλη των Layers τσεκάρουμε την επιλογή **PTC Mesh** και με τη χρήση του **Magic Wand** από τη αριστερή εργαλειοθήκη (φαίνεται επιλεγμένο) πατάμε στο εσωτερικό της περιοχής και δημιουργούμε έτσι αυτόματα το δίκτυο προσομοίωσης, Εικόνα Π-1-21. Πρέπει να σημειώσουμε εδώ πως η χρησιμοποιούμενη έκδοση του Argus προορίζεται καθαρά για εκπαιδευτικούς σκοπούς και έτσι υποστηρίζει την επίλυση δικτύων που αποτελούνται το πολύ από 2000 στοιχεία.



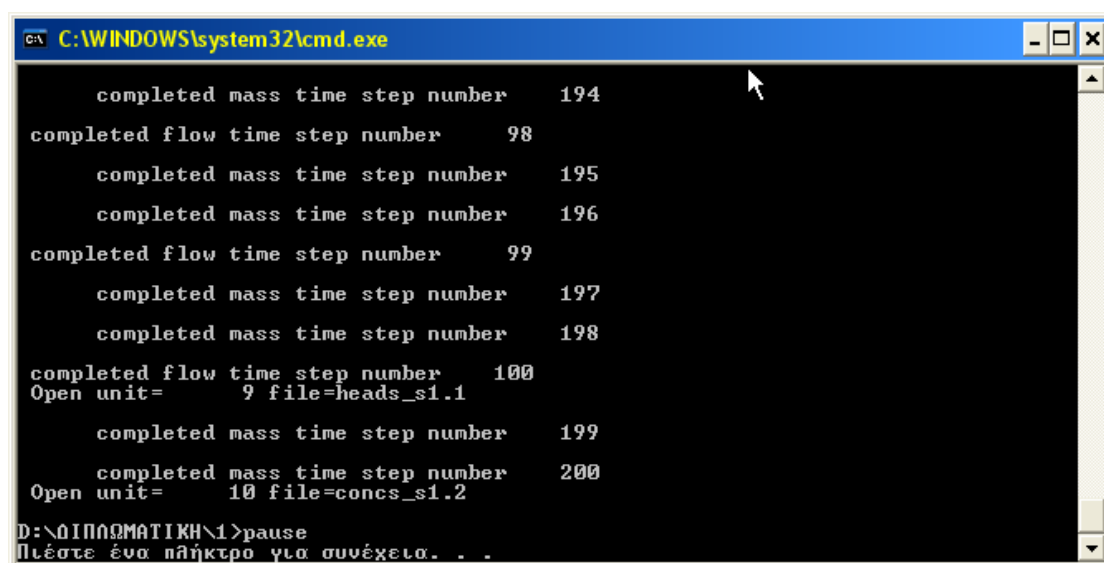
Εικόνα Π-1-21 : Δημιουργία του δικτύου προσομοίωσης της περιοχής

Εάν θέλουμε στη συνέχεια να εξοικονομήσουμε χώρο για τη μνήμη του υπολογιστή μας, μπορούμε από το μενού **Special** να τσεκάρουμε την επιλογή **Renumber** και από το παράθυρο διαλόγου που θα εμφανιστεί να τσεκάρουμε την επιλογή **Optimize Bandwidth** (βελτιστοποίηση εύρους ζώνης), Εικόνα Π-1-22:



Εικόνα Π-1-22 : Βελτιστοποίηση του εύρους ζώνης για εξοικονόμηση μνήμης στον υπολογιστή

Τέλος, απομένει μόνο να τρέξουμε το μοντέλο. Από το μενού λοιπόν **PIEs** επιλέγουμε **Run PTC** και ορίζοντας φυσικά που θέλουμε να αποθηκευτούν τόσο η περιοχή όσο και τα αποτελέσματα του μοντέλου, εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο (Εικόνα Π-1-23):



Εικόνα Π-1-23 : Παράθυρο από το τρέξιμο του μοντέλου

Με την εμφάνιση αυτού του παραθύρου έχουμε τρέξει επιτυχώς το μοντέλο για την συγκεκριμένη περιοχή. Έχουν δημιουργηθεί λοιπόν κάποια δεδομένα εξόδου, για κάθε μία από τις παραμέτρους τις οποίες εμείς εξετάζουμε και τα οποία βρίσκονται ως αρχεία στην περιοχή που αποθηκεύσαμε αυτά τα αποτελέσματα. Τα αρχεία αυτά αλλά και μία σύντομη επεξήγησή τους παρουσιάζονται στον Πίνακα Π-1-6 παρακάτω:

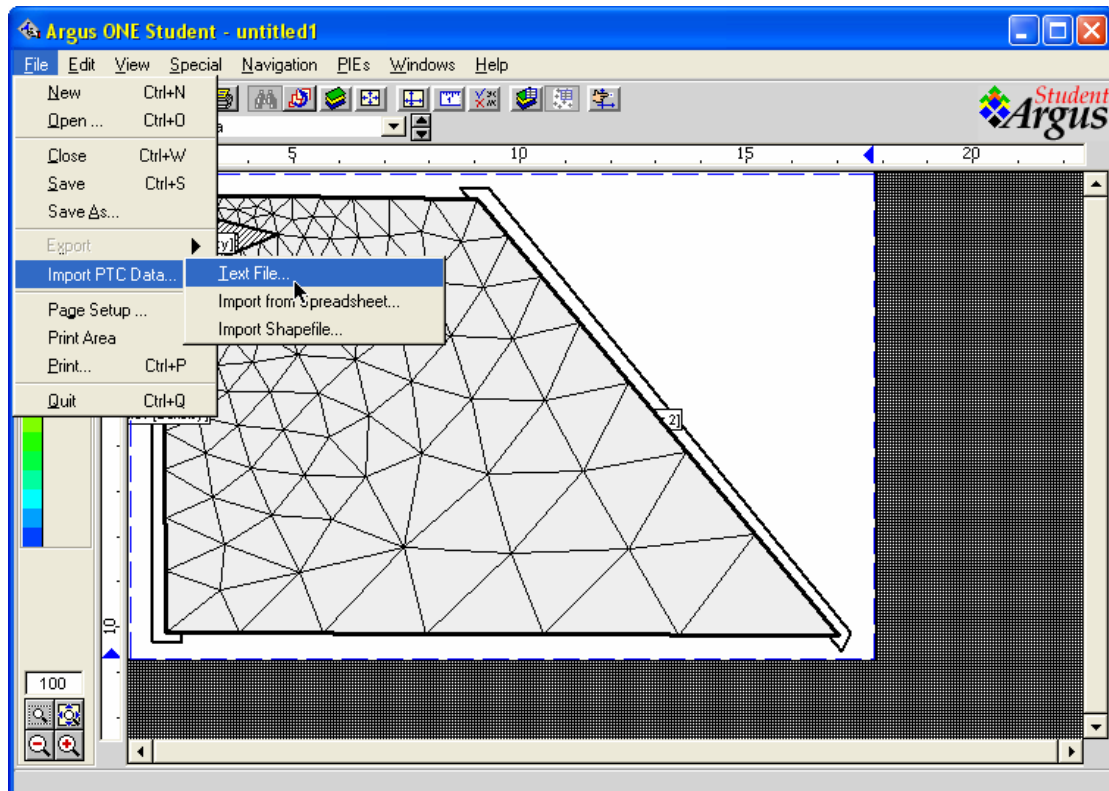
ΟΝΟΜΑ ΑΡΧΕΙΟΥ	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ
PTC.out	Το αρχείο αυτό περιέχει τα δεδομένα που εισαγάγαμε, τις χρησιμοποιούμενες εντολές και τα ενδεχόμενα μηνύματα λάθους
Mesh_xvel_s1.fin	Το αρχείο αυτό περιέχει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των ταχυτήτων της ροής στον x άξονα
Mesh_yvel_s1.fin	Το αρχείο αυτό περιέχει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των ταχυτήτων της ροής στον y άξονα
Mesh_concs_s1.fin	Το αρχείο αυτό περιέχει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της μεταφοράς των ρύπων
Mesh_heads_s1.fin	Το αρχείο αυτό περιέχει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των υδραυλικών υψών
Mesh_Mesh.inc	Το αρχείο αυτό περιέχει τις συντεταγμένες όλων των κόμβων

Πίνακας Π-1-6 : Αρχεία εξόδου και περιεχόμενα αυτών

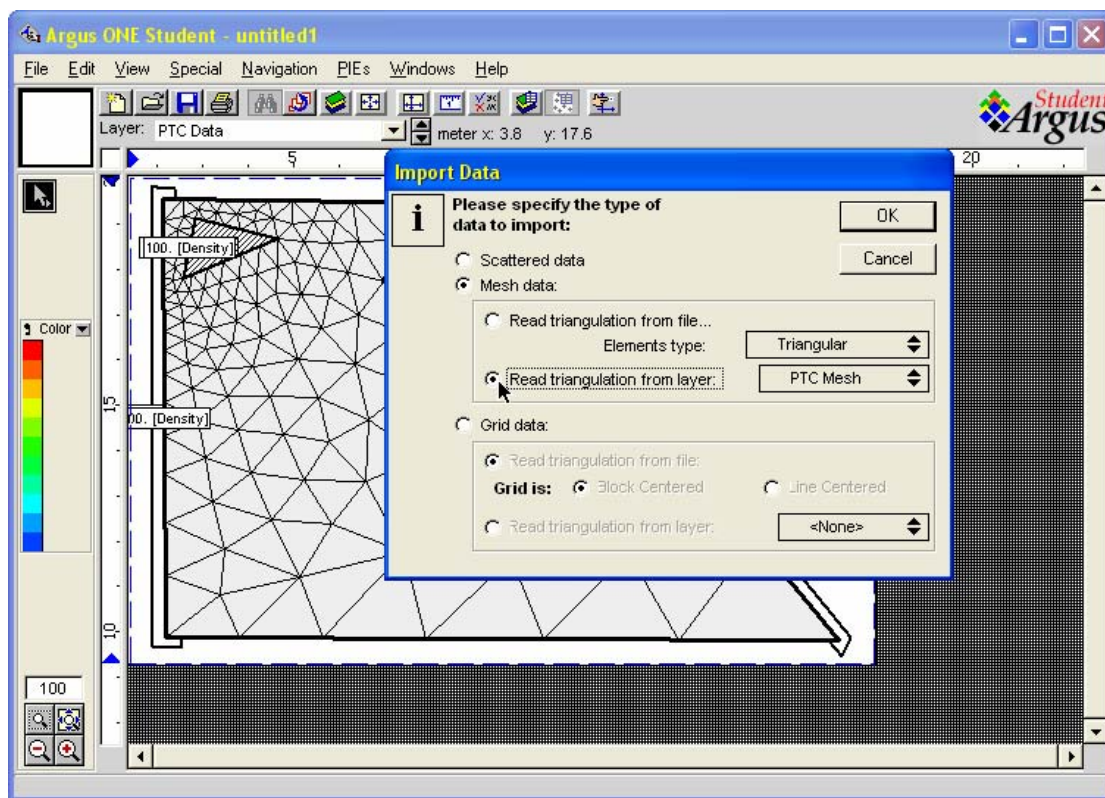
Λογικά εδώ θα μπορούσε να σταματάει η εργασία που είχαμε να κάνουμε. Το μοντέλο όμως μας δίνει τη δυνατότητα να παρασταθούν με γραφικό τρόπο τα αποτελέσματα και συγκεκριμένα τα τελικά υδραυλικά ύψη, οι ταχύτητες τόσο στο x όσο και στον y άξονα καθώς επίσης και οι συγκεντρώσεις.

Για να παρουσιάσουμε λοιπόν όσος καλύτερα γίνεται το μοντέλο και τις χρήσεις του θα προχωρήσουμε σ'αυτού του είδους την διαφορετική παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, αρχίζοντας με τα υδραυλικά ύψη. Από τη στήλη των Layers λοιπόν τσεκάρουμε την επιλογή **PTC Data** και από το μενού **File** τσεκάρουμε την επιλογή **Import PTC Data** και από τις τρεις επιλογές που

παρουσιάζονται εμείς επιλέγουμε την **Text File** (δηλαδή παίρνουμε τα δεδομένα μας από αρχείο κειμένου, Εικόνα Π-1-24) και έτσι εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου της Εικόνας Π-1-25. Σ' αυτό το παράθυρο τσεκάρουμε την επιλογή **Mesh data** (δεδομένα πλέγματος) και από τις δύο εναλλακτικές επιλογές που μας παρέχονται εμείς επιλέγουμε την **Read triangulation from layer** (δηλαδή να διαβαστεί η τριγωνοποίηση από τα στρώματα).

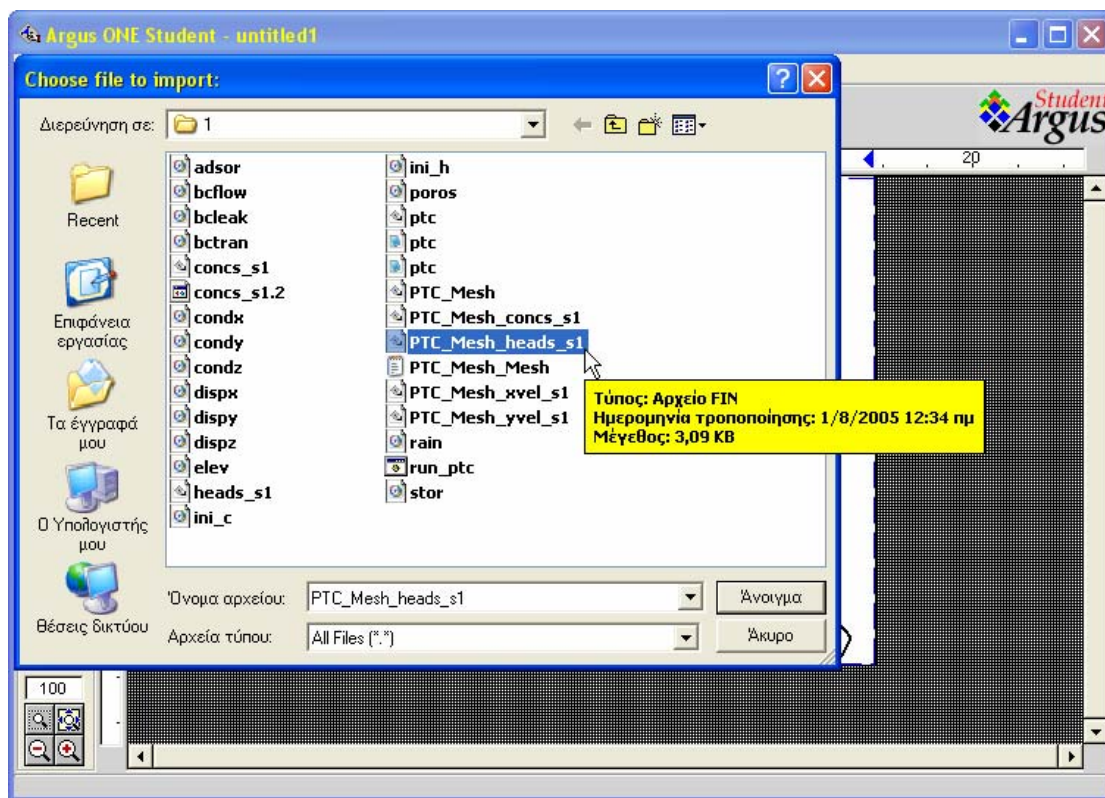


Εικόνα Π-1-24 : Επιλογή των δεδομένων από αρχείο κειμένου



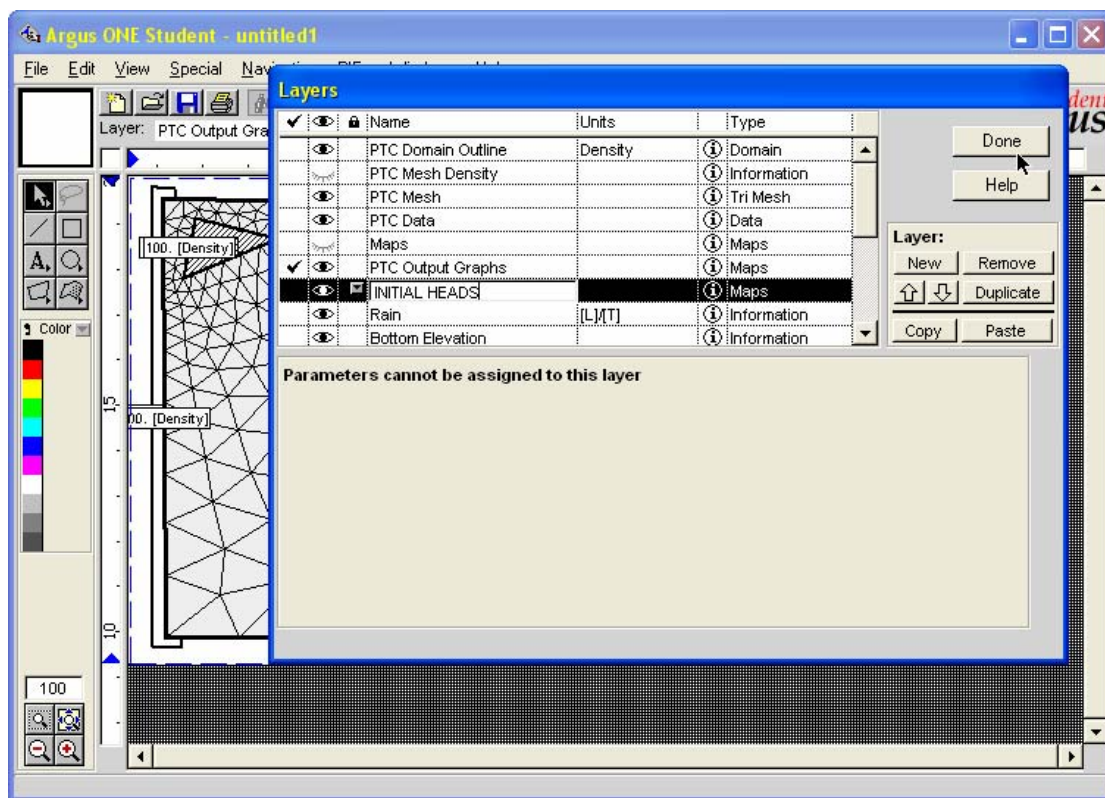
Εικόνα Π-1-25 : Επιλογή του τρόπου ανάγνωσης των δεδομένων σαν δεδομένα πλέγματος

Πατώντας λοιπόν OK για να κλείσει αυτό το παράθυρο εμφανίζεται ένα άλλο που λέγεται **Choose file to import**, δηλαδή να επιλέξουμε ποια αρχεία θέλουμε να εξάγουμε με τη μορφή γραφήματος. Αρχικά λοιπόν εμείς επιλέγουμε να εμφανιστούν όλων των ειδών τα αρχεία (από την επιλογή αρχεία τύπου τσεκάρουμε **All files**) και από τα αρχεία που εμφανίζονται εμείς επιλέγουμε αυτό με την ονομασία PTC_Mesh_heads_s1 (Εικόνα Π-1-26):



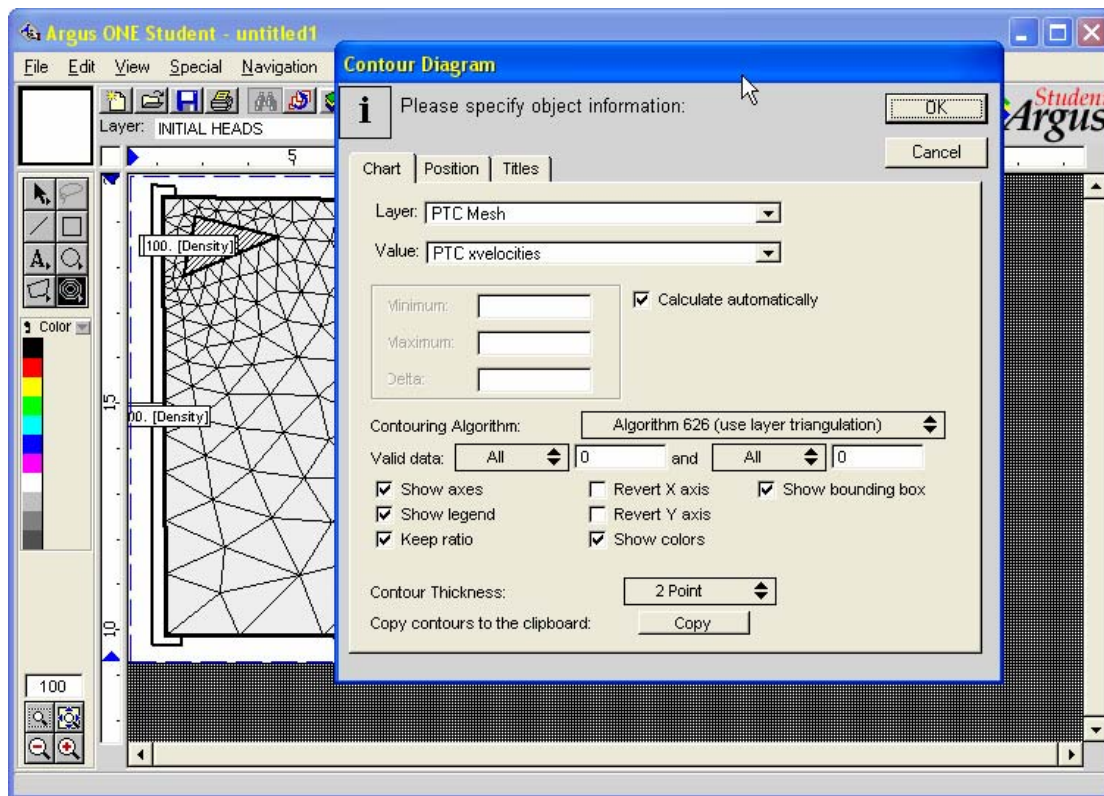
Εικόνα Π-1-26 : Επιλογή αρχείου για εξαγωγή γραφήματος

Έπειτα, για άλλη μία φορά από την στήλη των Layers τσεκάρουμε την επιλογή **PTC Output Graphs** και από το μενού **Show** επιλέγουμε **Layers** οπότε και ανοίγει ένα καινούργιο παράθυρο διαλόγου. Με τη χρήση της εντολής **Duplicate** αντιγράφεται η γραμμή που ονομάζεται **PTC Output Graphs** και εμείς την μετονομάζουμε σε **INITIAL HEADS** (Εικόνα Π-1-27):



Εικόνα Π-1-27 : Δημιουργία του γραφήματος **INITIAL HEADS**

Φυσικά πρέπει εδώ να σημειώσουμε πως θα πρέπει στην στήλη **Type** που αντιστοιχεί στην γραμμή **INITIAL HEADS** να αναγράφεται **Maps** για να μπορέσουμε να δημιουργήσουμε το γράφημα. Πατώντας τέλος **Done** ολοκληρώνουμε αυτή τη διαδικασία και εφόσον έχουμε δημιουργήσει πλέον στη στήλη των Layers την επιλογή **INITIAL HEADS** την επιλέγουμε και έπειτα από την αριστερή εργαλειοθήκη χρησιμοποιούμε το **Post-Processing** (φαίνεται τσεκαρισμένο στην επόμενη εικόνα) με το οποίο επιλέγουμε την περιοχή μας και αυτόματα εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου **Contour Diagram** (Εικόνα Π-1-28):



Εικόνα Π-1-28 : Επιλογή χαρακτηριστικών για το γράφημα των υδραυλικών υψών μέσω του παραθύρου **Contour Diagram**

Στο παράθυρο αυτό υπάρχουν τρεις βασικές επιλογές: **Chart**, **Position** και **Titles**. Όσον αφορά την πρώτη από την επιλογή **Layer** τσεκάρουμε **PTC Data**, ενώ δεν αλλάζουμε τίποτα άλλο. Από την επιλογή **Position** απλώς τσεκάρουμε την επιλογή **Overlay Source Data** και τέλος, από την Τρίτη επιλογή, την **Titles** απλώς ονομάζουμε το γράφημά μας **INITIAL HEADS** (Εικόνες Π-1-29, Π-1-30 και Π-1-31):

Contour Diagram

Please specify object information: OK Cancel

Chart | Position | Titles

Layer: PTC Data

Value: Imported Parameter1

Minimum: ☒ Calculate automatically

Maximum:

Delta:

Contouring Algorithm: Algorithm 626 (use layer triangulation)

Valid data: All 0 and All 0

☒ Show axes ☐ Revert X axis ☒ Show bounding box

☒ Show legend ☐ Revert Y axis

☒ Keep ratio ☒ Show colors

Contour Thickness: 2 Point

Copy contours to the clipboard: Copy

Εικόνα Π-1-29 : Ρυθμίσεις επιλογής **Chart**

Contour Diagram

Please specify object information: OK Cancel

Chart | Position | Titles

☒ Overlay Source Data

Dimension

Width: 13.0351

Height: 9.97526

Scale

☐ Proportional

X Scale: 95.9741 %

Y Scale: 108.338 %

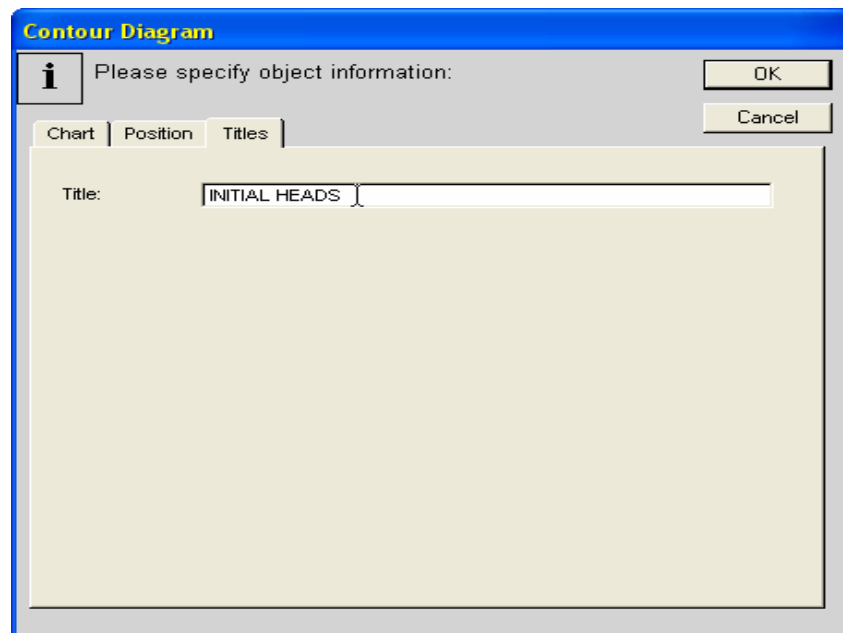
Position

☒ Top 19.9654 ☐ Right 0.783854

☐ Bot ☒ Left

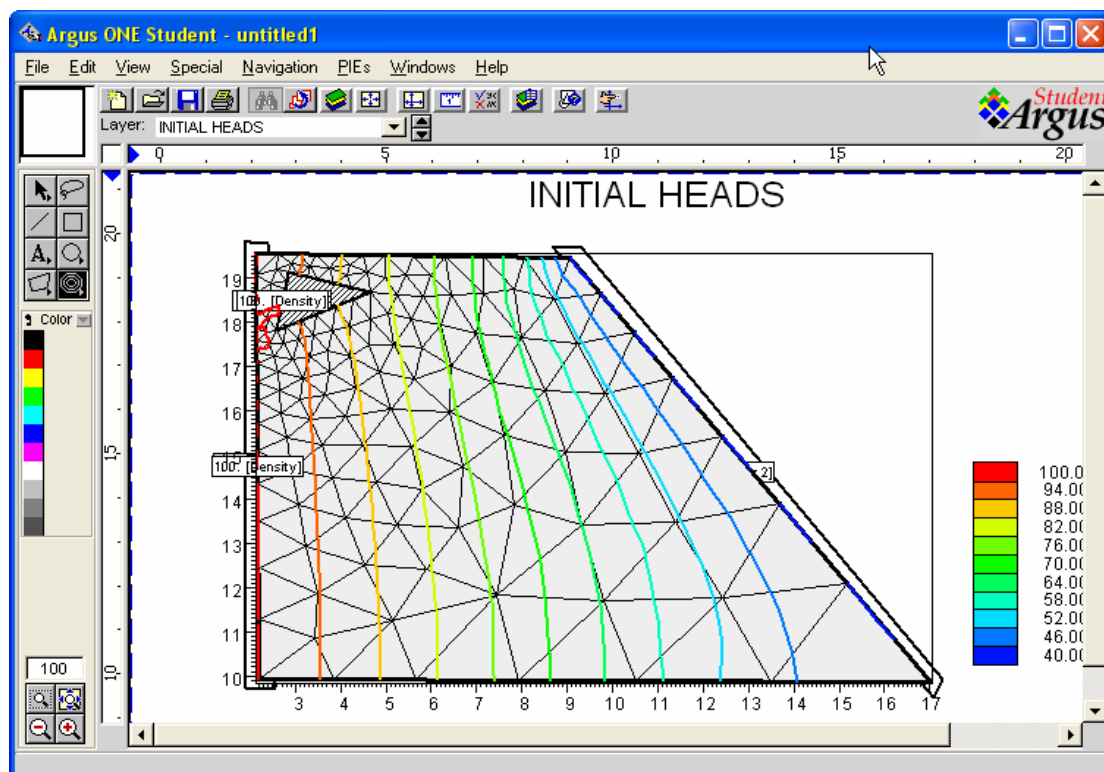
Precisely overlay the source data enclosing rectangle

Εικόνα Π-1-30 : Ρυθμίσεις επιλογής **Position**



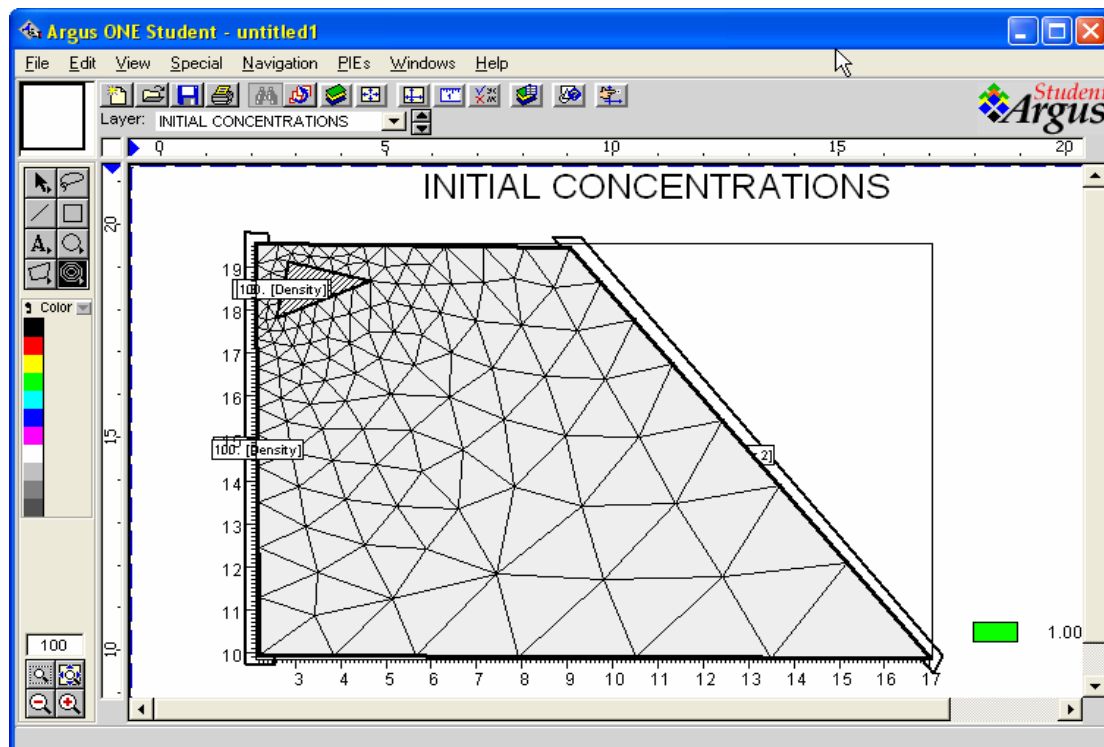
Εικόνα Π-1-31 : Ρυθμίσεις επιλογής **Titles**

Κατόπιν όλων των παραπάνω και πατώντας OK θα εμφανιστεί το ζητούμενο Γράφημα Π-1-1:



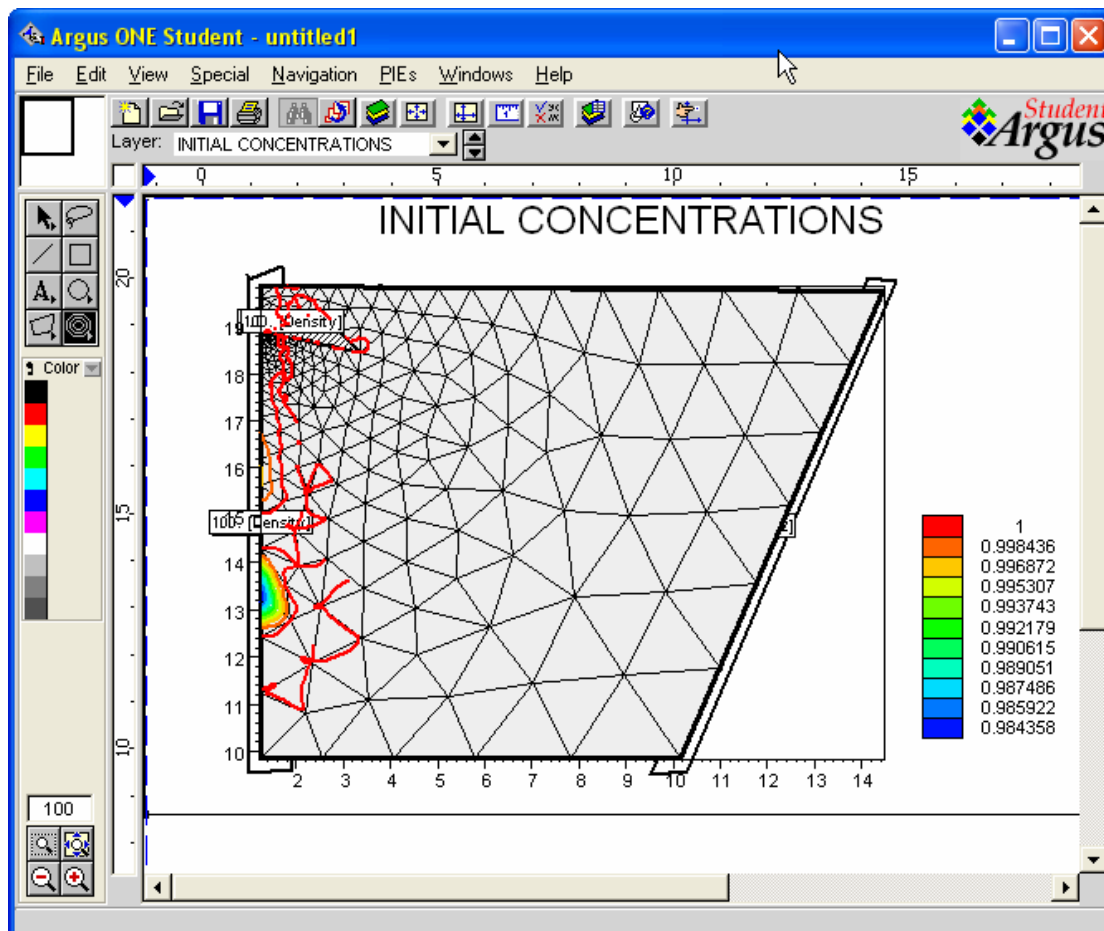
Γράφημα Π-1-1 : Γράφημα υδραυλικών υψών

Με την ίδια ακριβώς διαδικασία μπορούμε να δημιουργήσουμε το γράφημα για τις συγκεντρώσεις, το οποίο παρουσιάζεται στο Γράφημα Π-1-2:



Γράφημα Π-1-2 : Γράφημα συγκεντρώσεων

Πρέπει να σημειώσουμε πως οι συγκεντρώσεις παρουσιάζουν αυτή τη μορφή των μηδενικών τιμών διότι έχουμε χρησιμοποιήσει και πηγάδια. Εάν ξανατρέχαμε το μοντέλο χωρίς τη προσθήκη πηγαδιών το αποτέλεσμα θα ήταν όπως το Γράφημα Π-1-3 παρακάτω:



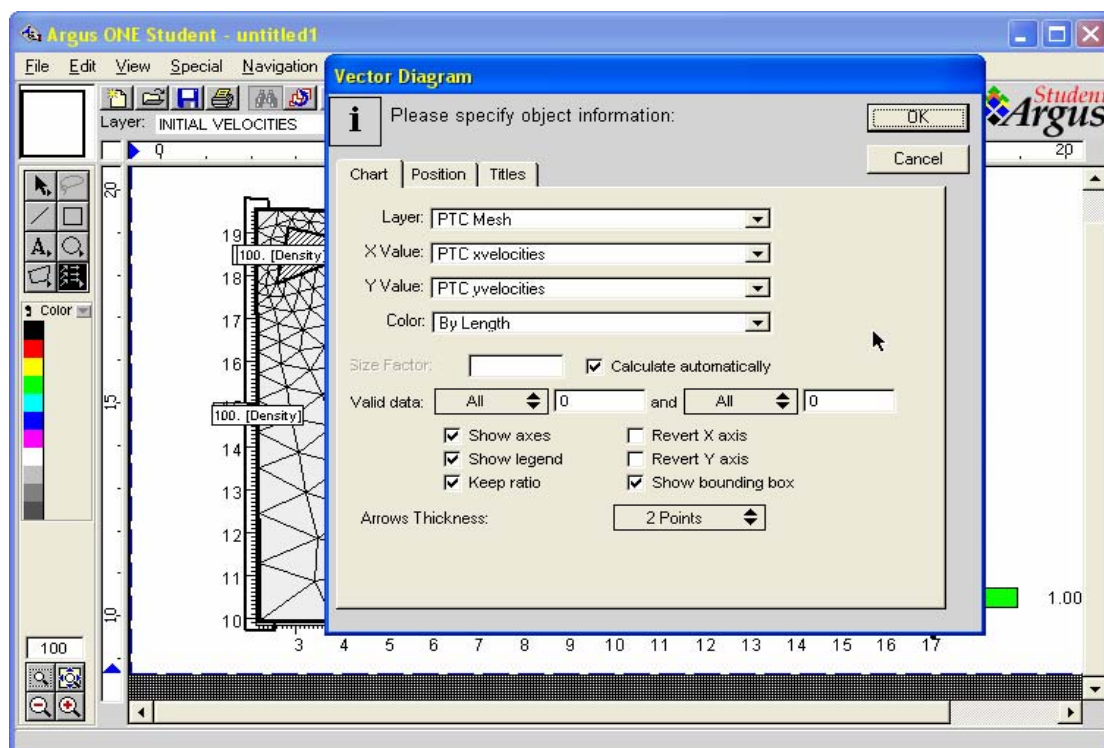
Γράφημα Π-1-3 : Γράφημα συγκεντρώσεων (χωρίς την ύπαρξη πηγαδιών άντλησης)

Τέλος έχει μείνει μόνο το γράφημα των ταχυτήτων στο $x - y$ επίπεδο. Εδώ η διαδικασία που ακολουθείται είναι λίγο διαφορετική. Αρχικά από τη στήλη των Layers τσεκάρουμε την επιλογή **PTC xvelocities**. Στη συνέχεια από το μενού **Files** τσεκάρουμε την επιλογή **Import PTC xvelocities** και κατόπιν την επιλογή **Text File**.

Αυτόματα εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου **Import Data**. Σ' αυτό το παράθυρο τσεκάρουμε την επιλογή **Mesh data** (δεδομένα πλέγματος) και από τις δύο εναλλακτικές επιλογές που μας παρέχονται εμείς επιλέγουμε την **Read triangulation from layer** (δηλαδή να διαβαστεί η τριγωνοποίηση από τα στρώματα).

Πατώντας έπειτα OK για να κλείσει αυτό το παράθυρο εμφανίζεται ένα άλλο που λέγεται **Choose file to import**, δηλαδή να επιλέξουμε ποια αρχεία θέλουμε να εξάγουμε με τη μορφή γραφήματος. Αρχικά λοιπόν εμείς επιλέγουμε να εμφανιστούν όλων των ειδών τα αρχεία (από την επιλογή αρχεία τύπου τσεκάρουμε **All files**) και από τα αρχεία που εμφανίζονται εμείς επιλέγουμε αυτό με την ονομασία **PTC_Mesh_xvel_s1**. Η ίδια ακριβώς διαδικασία ακολουθείται και για τις yvelocities.

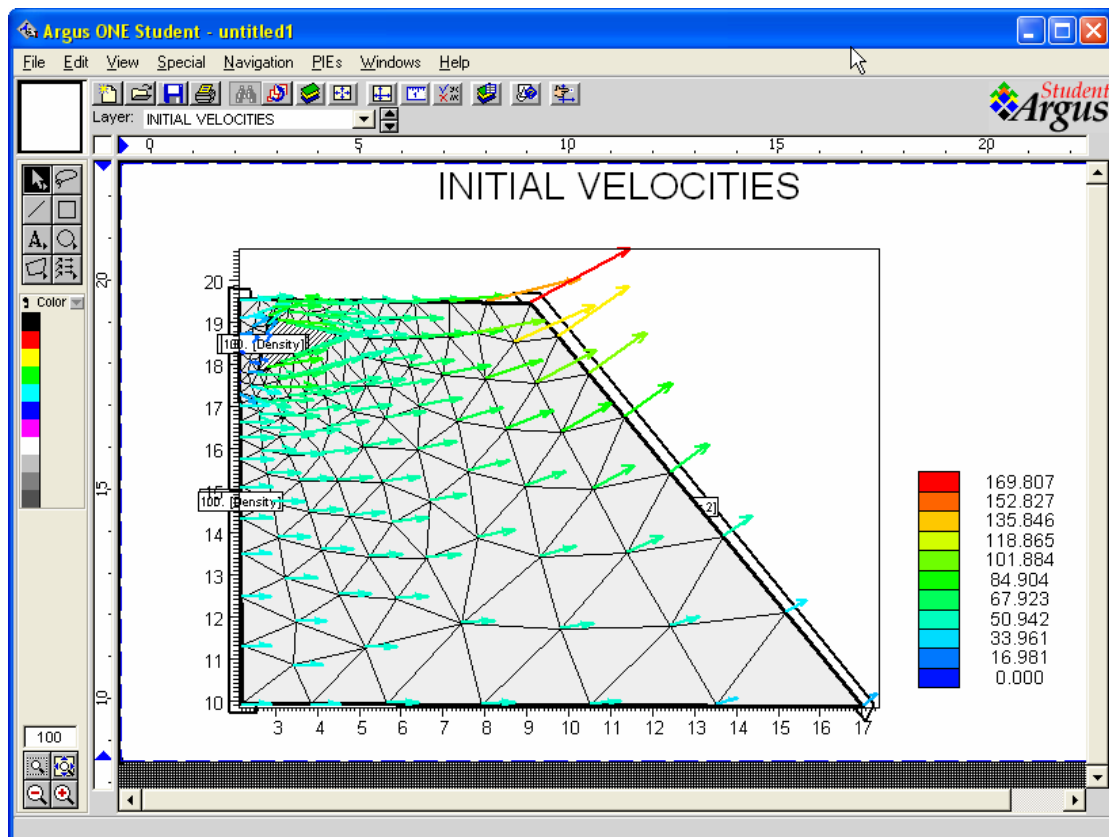
Κατόπιν, από τη στήλη των Layers τσεκάρουμε την επιλογή **PTC Output Graphs** και από το μενού **Show** επιλέγουμε **Layers** οπότε και ανοίγει ένα καινούργιο παράθυρο διαλόγου. Με τη χρήση της εντολής **Duplicate** αντιγράφεται η γραμμή που ονομάζεται **PTC Output Graphs** και εμείς την μετονομάζουμε σε **INITIAL VELOCITIES**. Επίσης θα πρέπει στην στήλη **Type** που αντιστοιχεί στην γραμμή **INITIAL VELOCITIES** να αναγράφεται **Maps** για να μπορέσουμε να δημιουργήσουμε το γράφημα. Πατώντας τέλος **Done** ολοκληρώνουμε αυτή τη διαδικασία και εφόσον έχουμε δημιουργήσει πλέον στη στήλη των Layers την επιλογή **INITIAL VELOCITIES** την επιλέγουμε και έπειτα από την αριστερή εργαλειοθήκη χρησιμοποιούμε το **Post-Processing** (φαίνεται τσεκαρισμένο στην επόμενη εικόνα) με το οποίο επιλέγουμε την περιοχή μας και αυτόματα εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου **Vector Diagram** (Εικόνα Π-1-32):



Εικόνα Π-1-32 : Επιλογή χαρακτηριστικών για το ταχυτήτων μέσω του παραθύρου **Vector Diagram**

Όπως είδαμε και προηγουμένως στο παράθυρο αυτό υπάρχουν τρεις βασικές επιλογές: **Chart**, **Position** και **Titles**. Όσον αφορά την πρώτη από την επιλογή **Layer** τσεκάρουμε **PTC Mesh**, ενώ δεν αλλάζουμε τίποτα άλλο. Από την επιλογή **Position** απλώς τσεκάρουμε την επιλογή **Overlay Source Data** και τέλος, από την Τρίτη

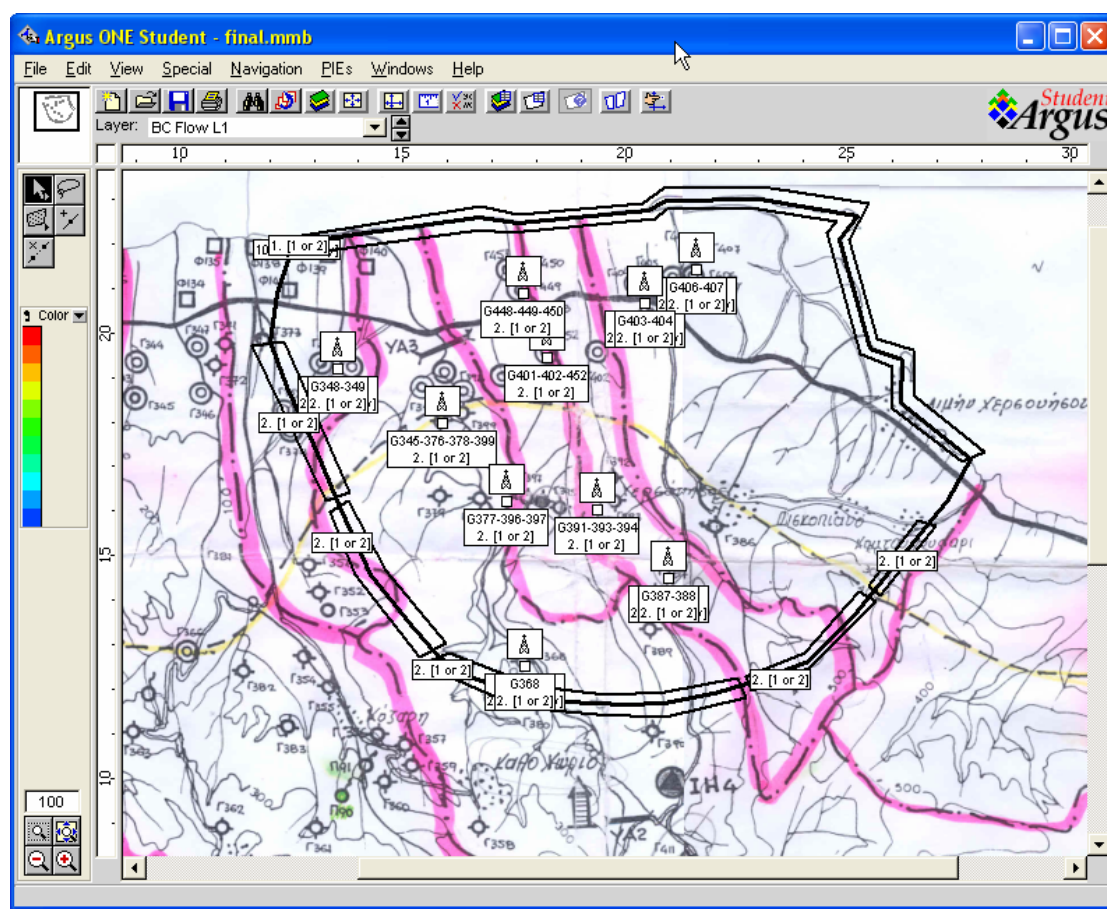
επιλογή, την **Titles** απλώς ονομάζουμε το γράφημά μας **INITIAL VELOCITIES**. Πατώντας OK θα εμφανιστεί το γράφημα των ταχυτήτων (Γράφημα Π-1-4):



Γράφημα Π-1-4: Γράφημα ταχυτήτων

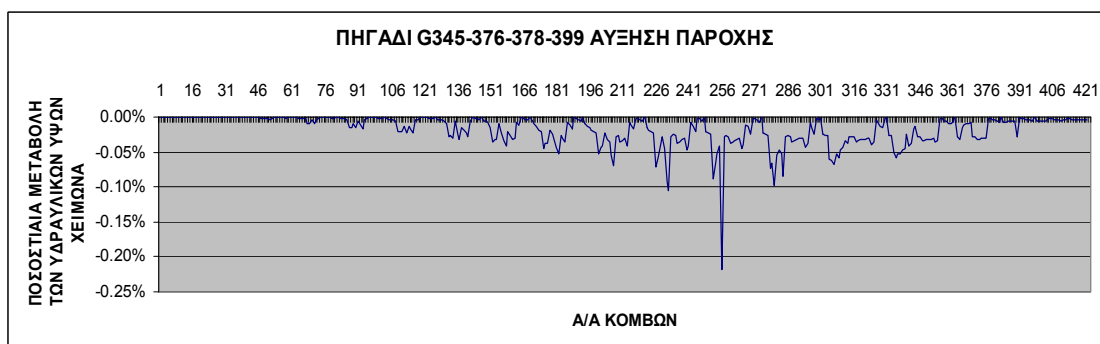
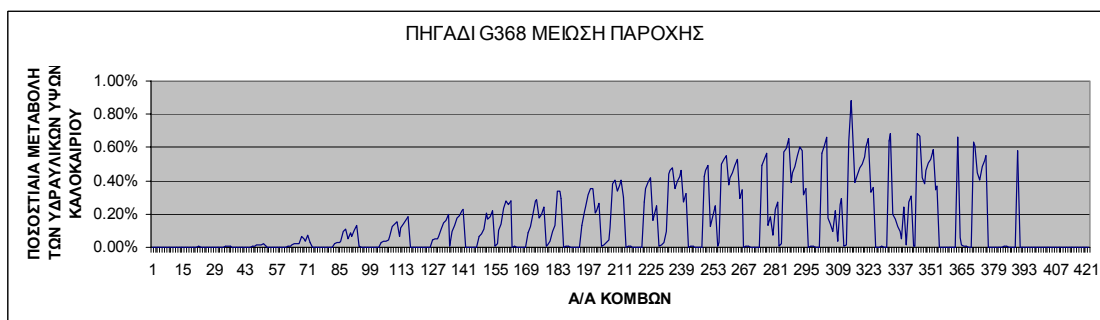
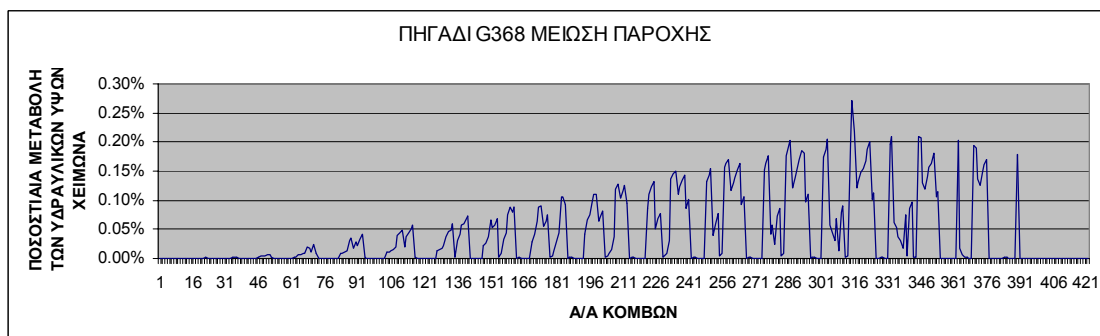
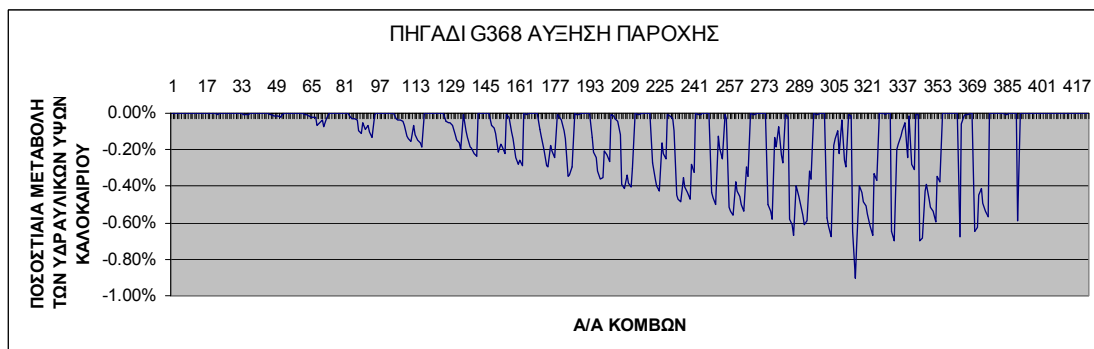
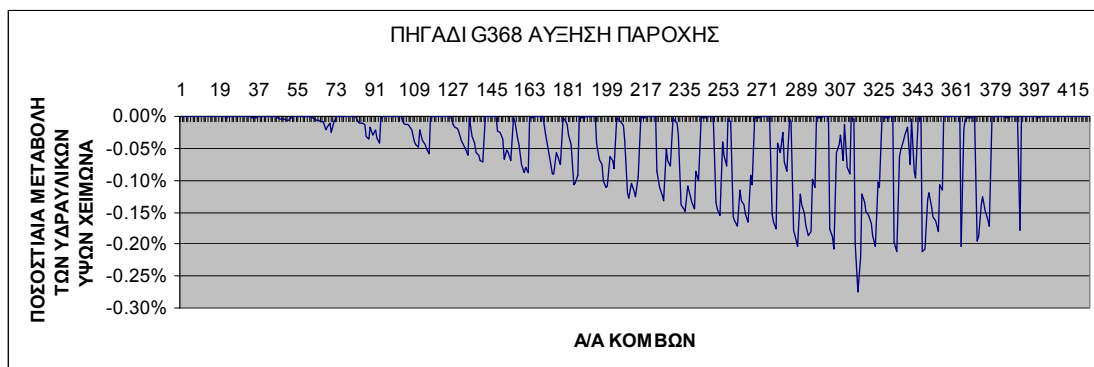
2.ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΥΨΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΛΛΑΓΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΝΤΛΗΣΕΩΣ ΠΗΓΑΔΙΩΝ- ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΥΨΩΝ ΣΤΟΥΣ ΚΥΡΙΟΤΕΡΟΥΣ ΚΟΜΒΟΥΣ

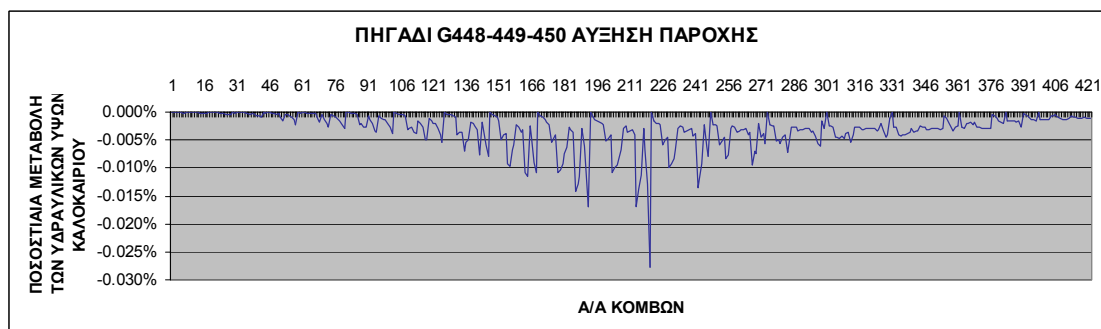
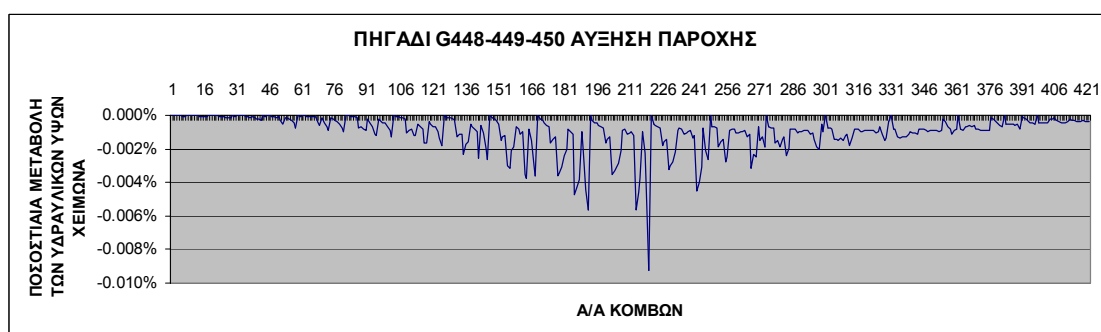
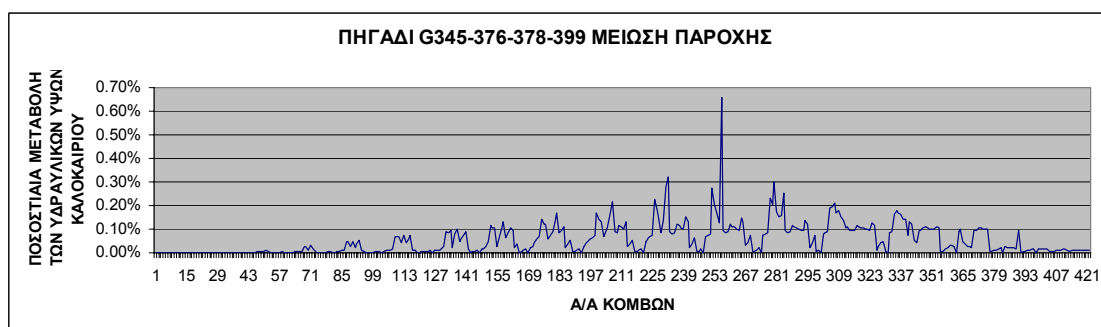
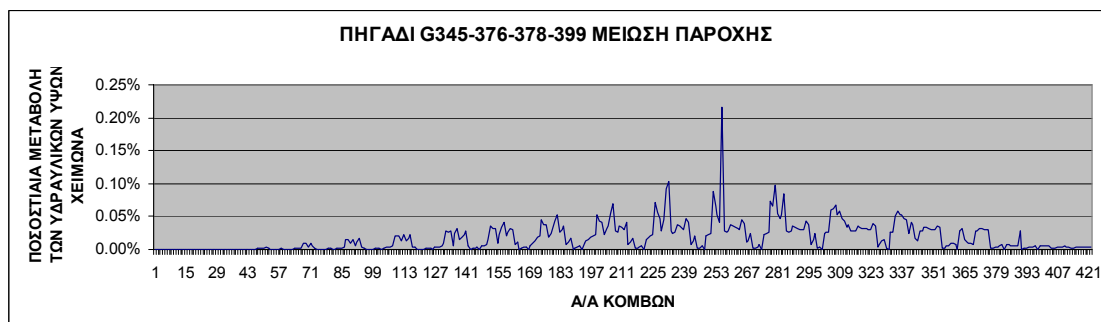
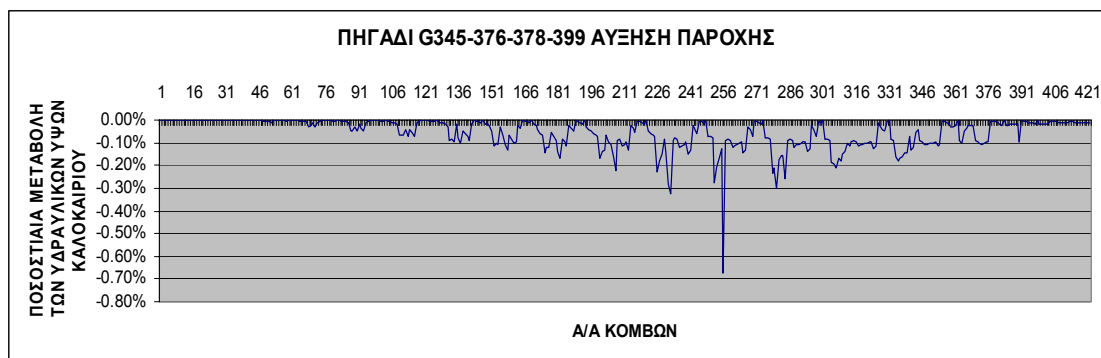
Α.Γραφήματα ποσοστιαίων μεταβολών υδραυλικών για την περίπτωση αλλαγής παροχής αντλήσεως πηγαδιών.

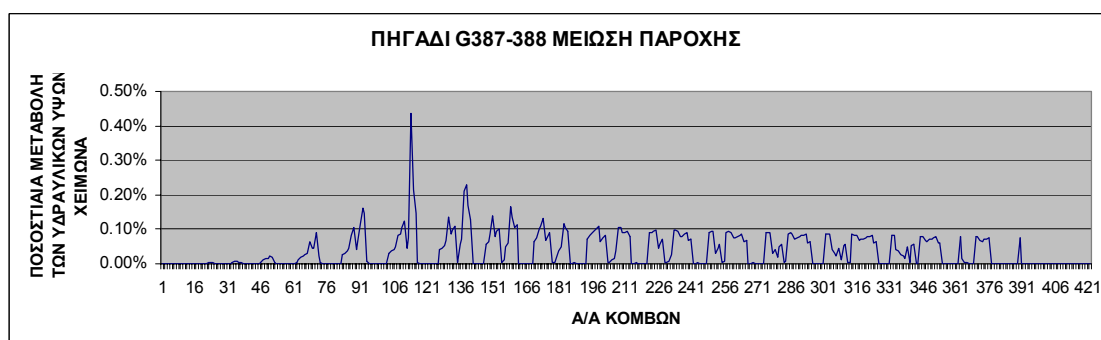
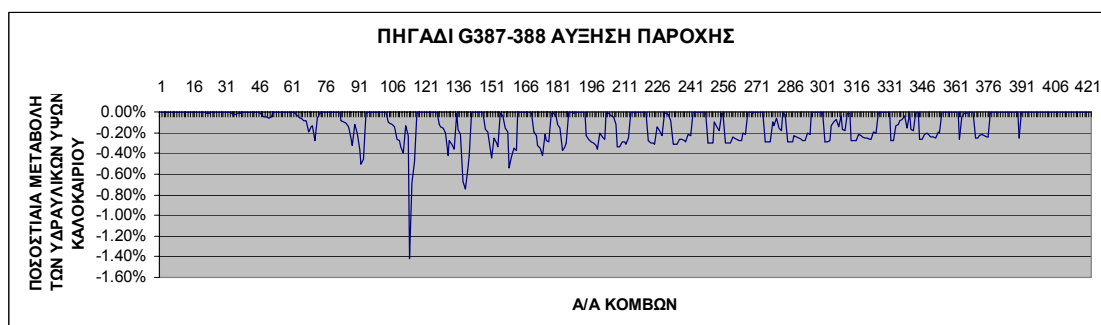
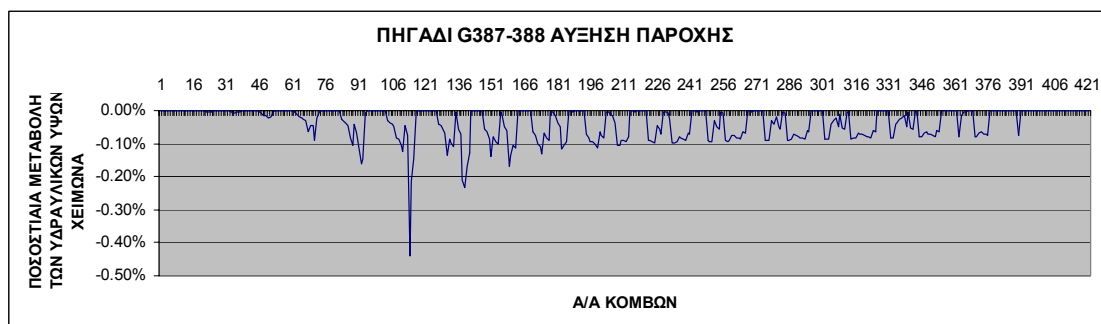
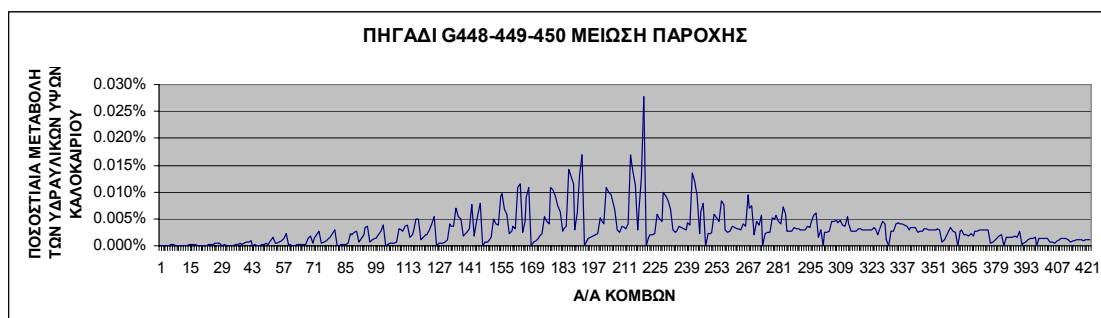
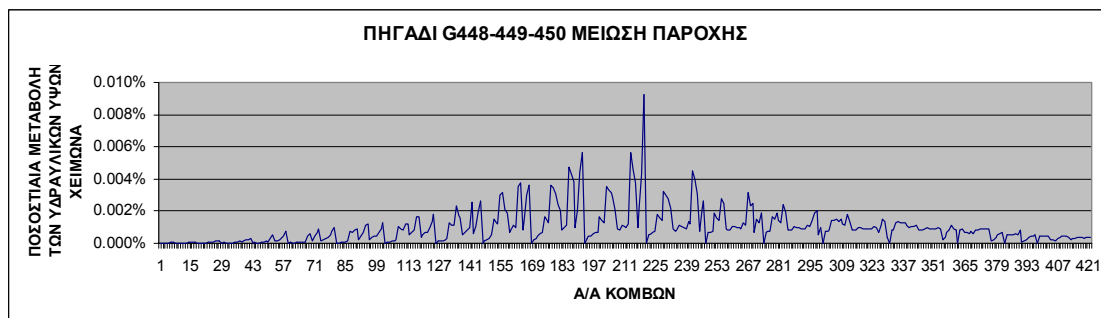


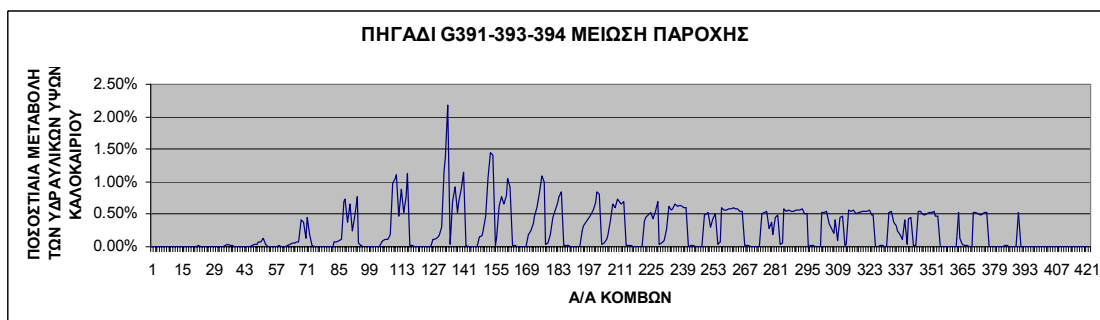
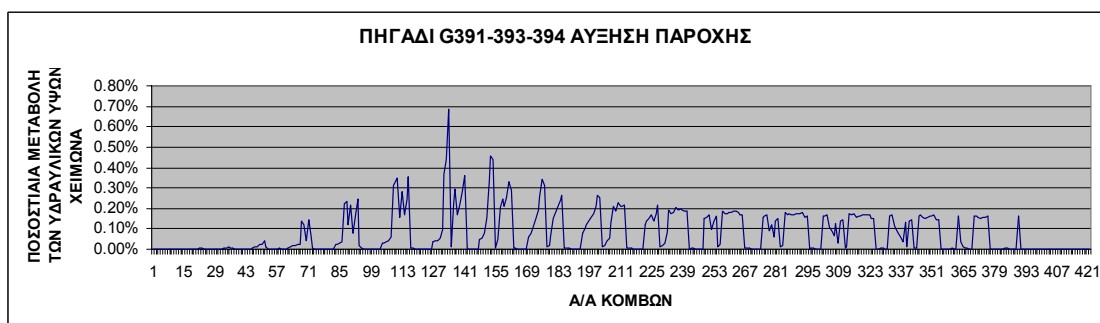
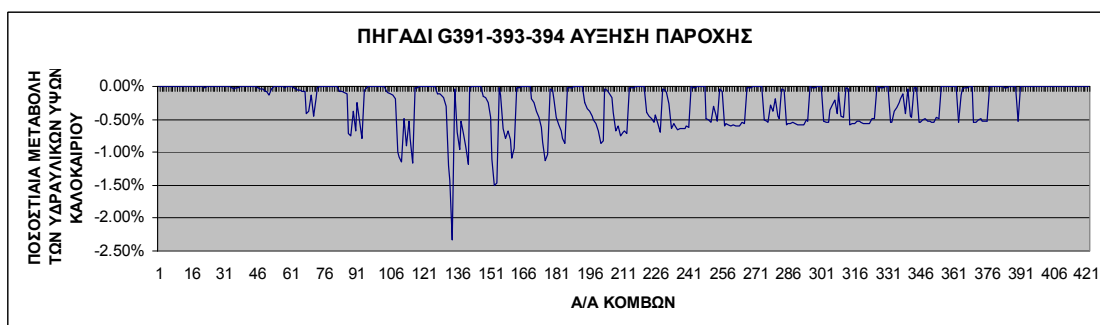
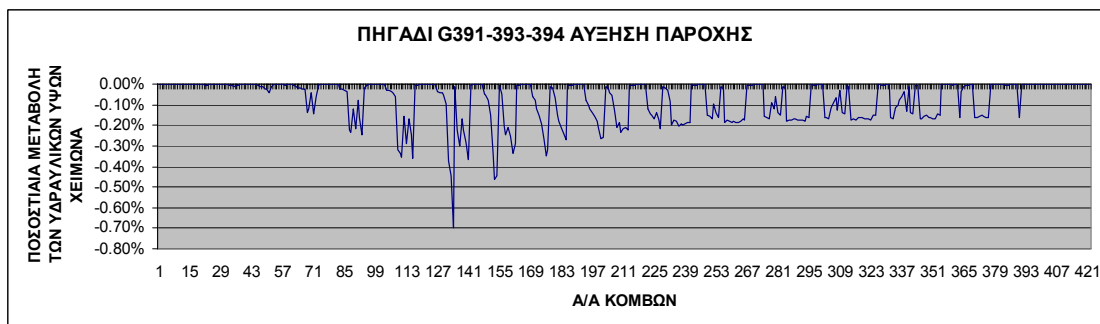
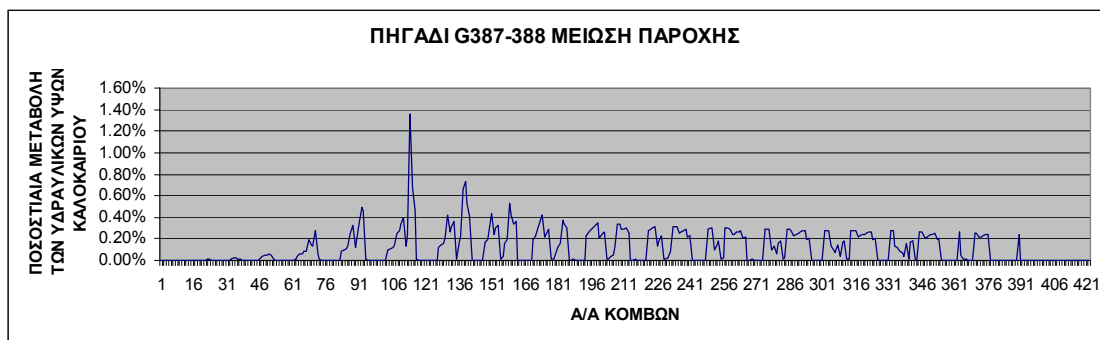
Εικόνα Π-2-1 : Θέσεις των πηγαδιών στην περιοχή μελέτης

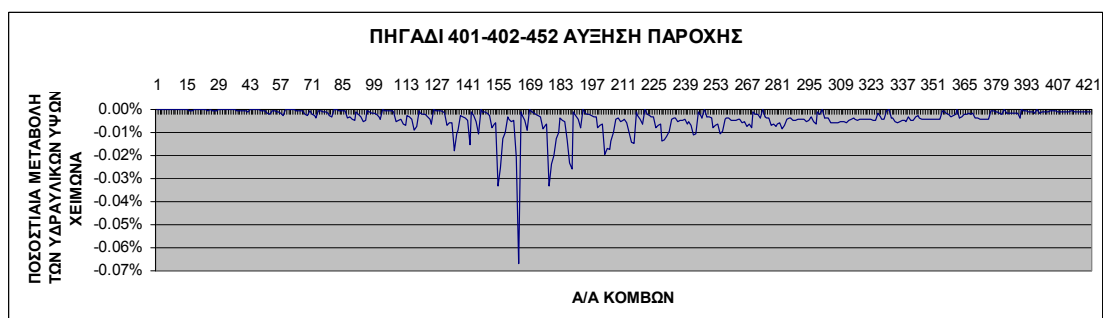
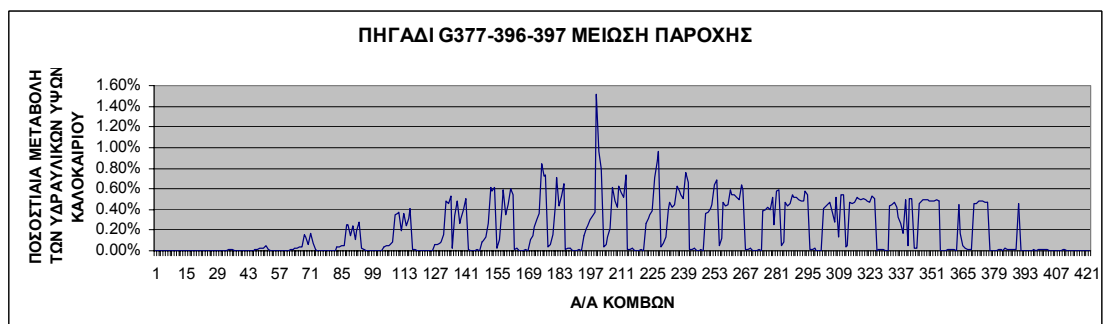
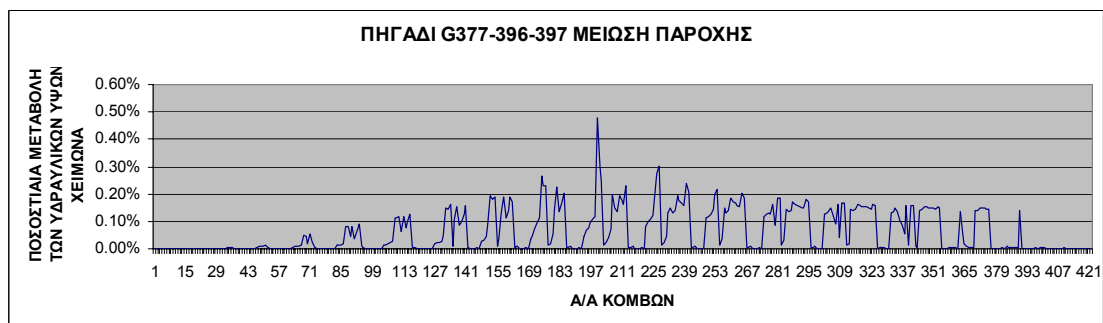
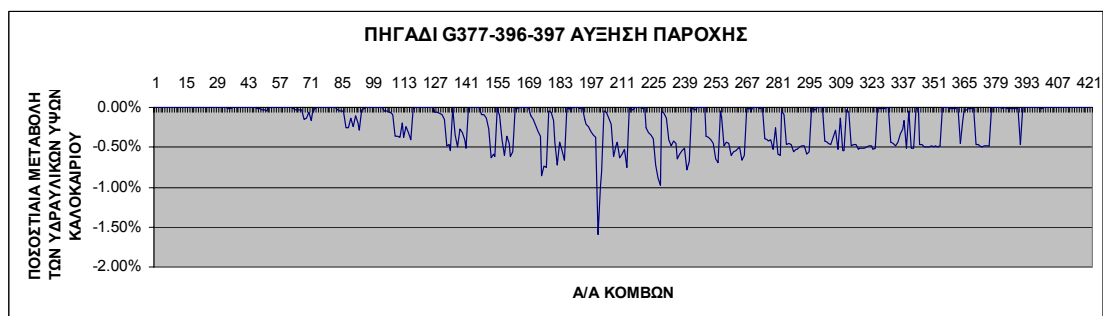
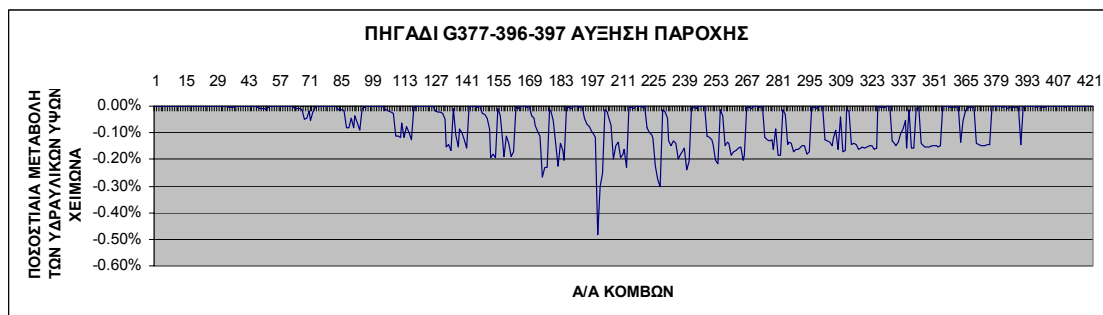
Ακολούθως, θα παρουσιαστούν τα Γραφήματα των ποσοστιαίων μεταβολών των υδραυλικών υψών για κάθε μία από τις 20 περιπτώσεις (10 πηγάδια με αύξηση και μείωση παροχής στο καθένα από αυτά):

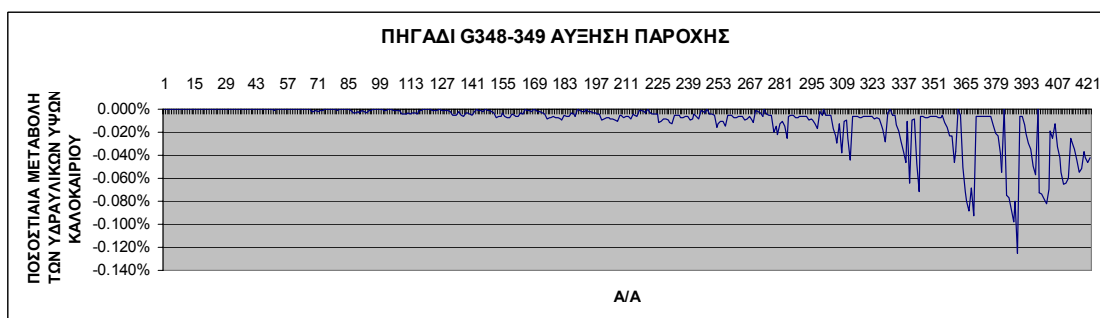
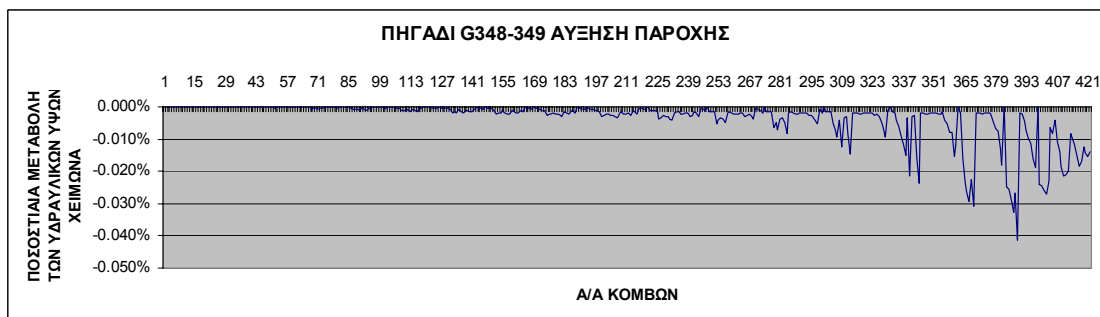
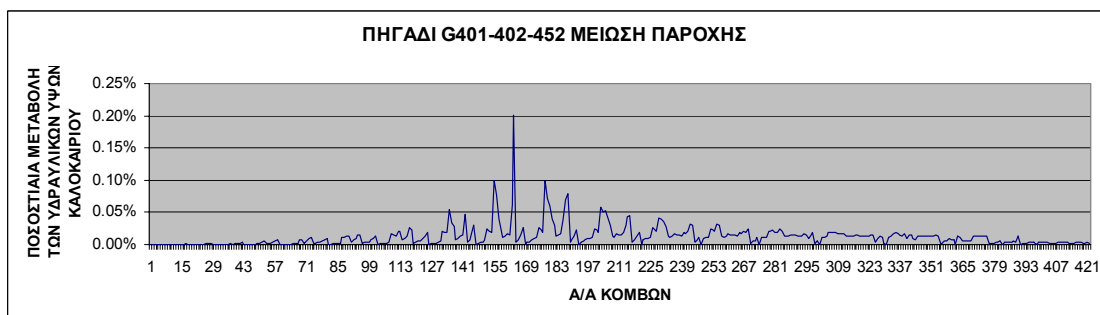
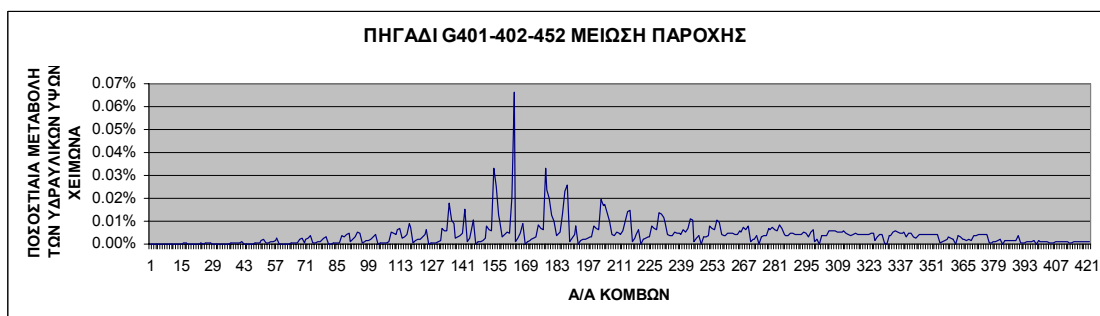
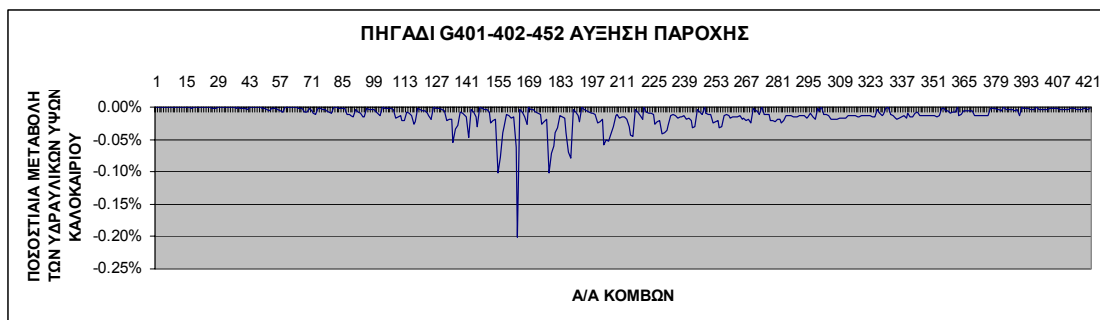


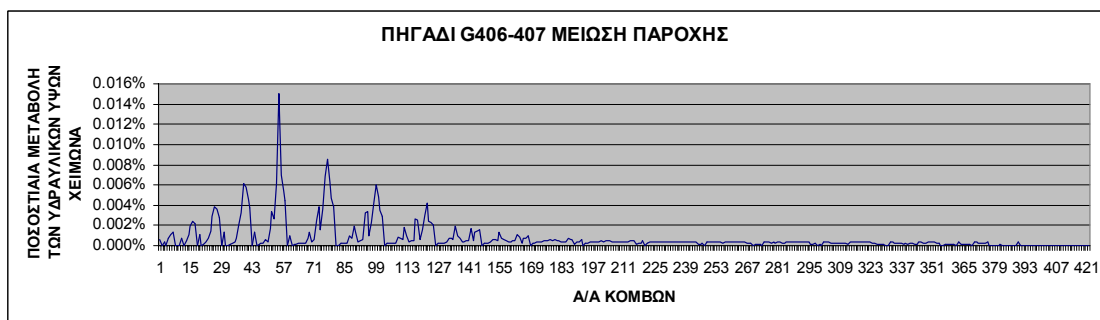
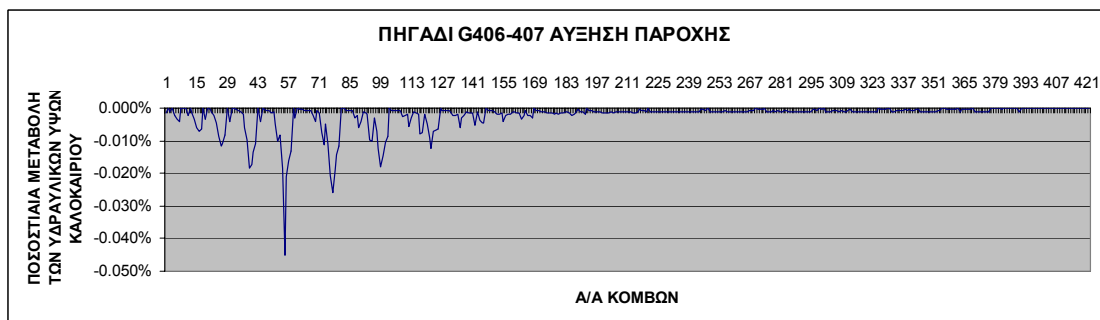
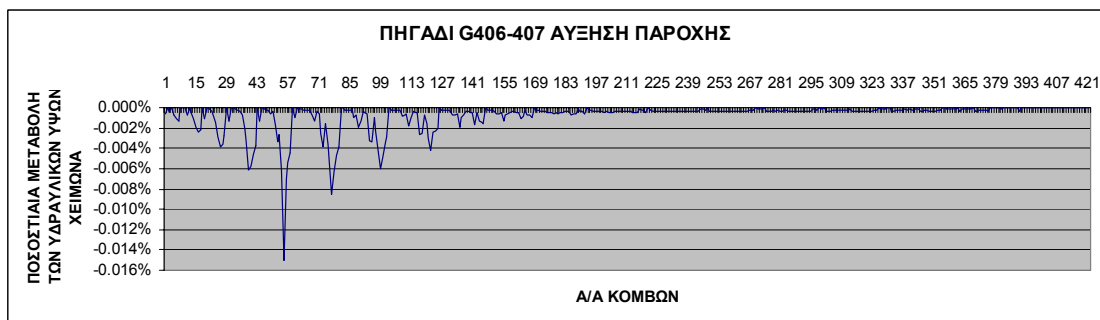
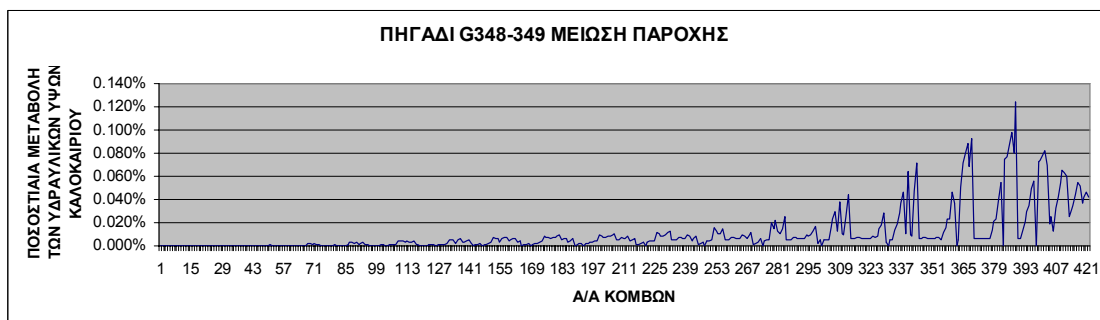
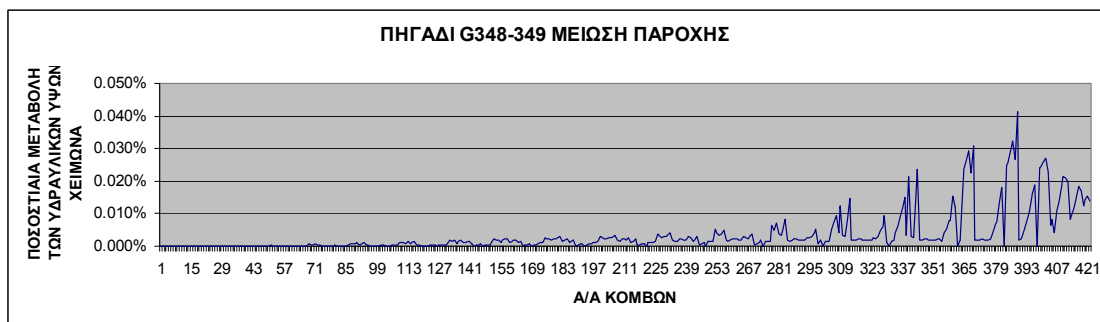


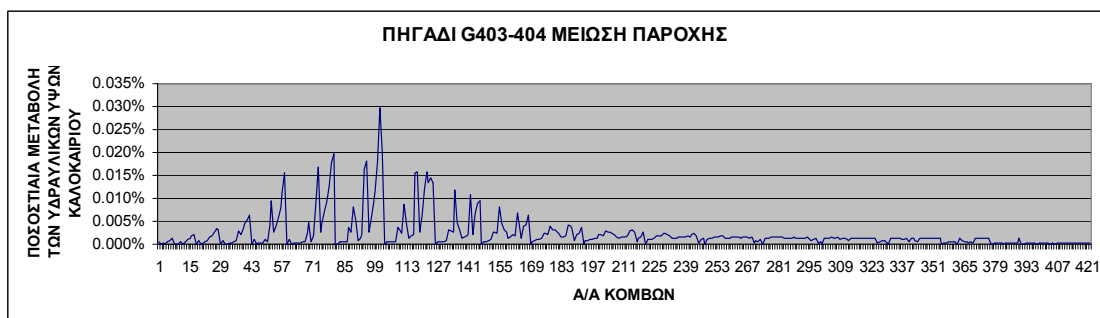
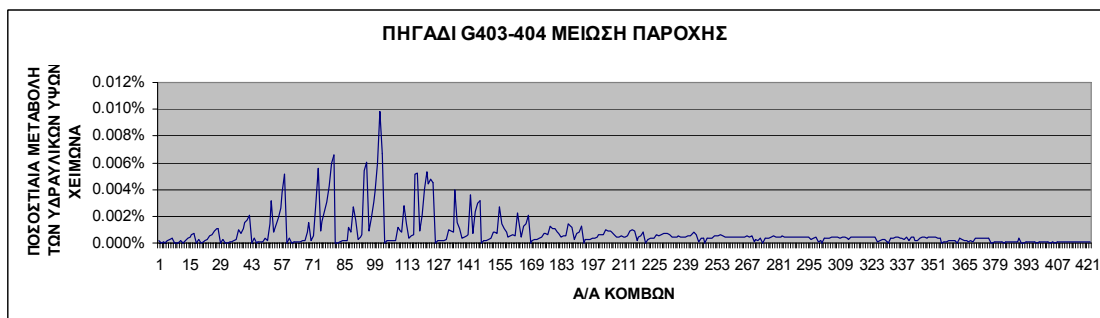
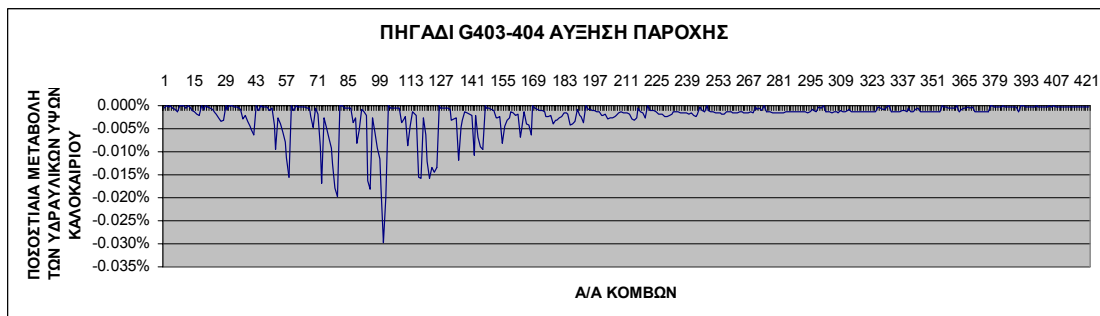
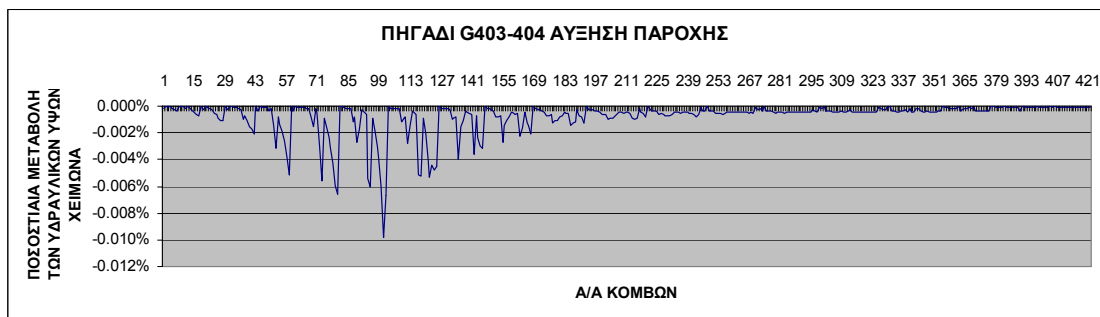
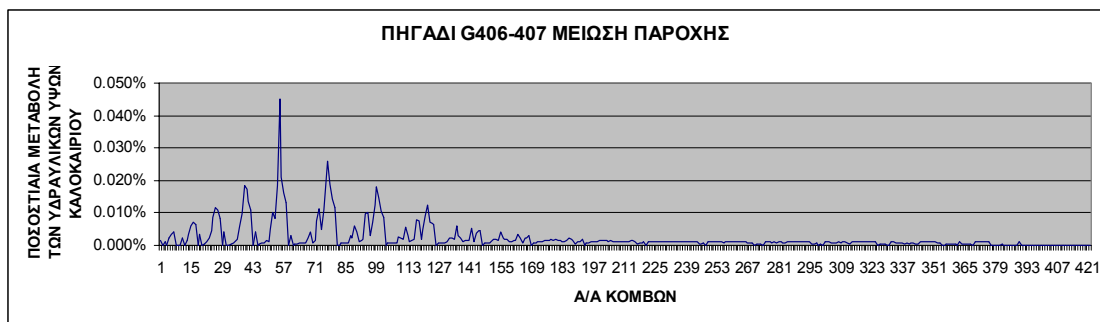












Β.Συνολικός πίνακας ποσοστιαίας μεταβολής των υδραυλικών υψών στους κυριότερους κόμβους.

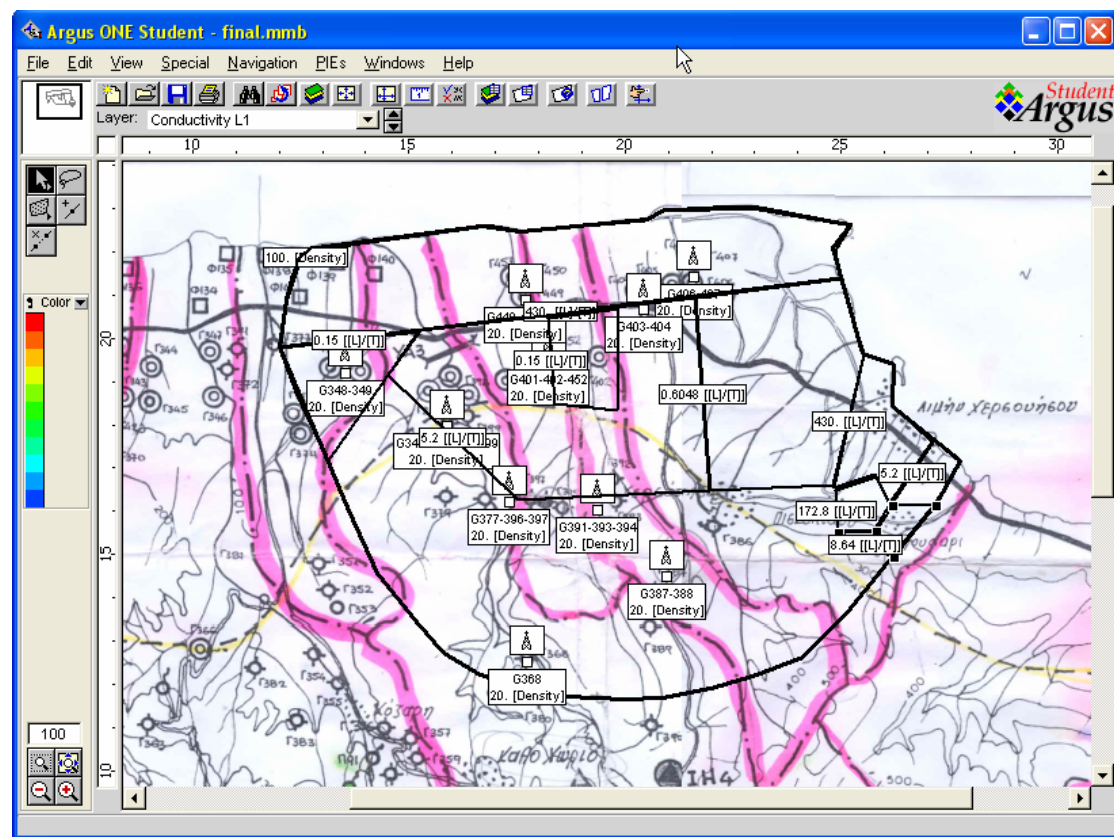
ΠΗΓΑΔΙ	ΚΟΜΒΟΣ	ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ	ΤΙΜΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ (Κ σε m/day)	1η ΠΕΡΙΟΔΟΣ- ΧΕΙΜΩΝΑΣ (ΑΥΞΗΣΗ ΣΤΗΝ ΑΝΤΛΗΣΗ)	2η ΠΕΡΙΟΔΟΣ- ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ (ΑΥΞΗΣΗ ΣΤΗΝ ΑΝΤΛΗΣΗ)	1η ΠΕΡΙΟΔΟΣ- ΧΕΙΜΩΝΑΣ (ΜΕΙΩΣΗ ΣΤΗΝ ΑΝΤΛΗΣΗ)	2η ΠΕΡΙΟΔΟΣ- ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ (ΜΕΙΩΣΗ ΣΤΗΝ ΑΝΤΛΗΣΗ)
Γ406-407 (G406-407)	55 Περιοχή 1	ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΖΩΝΗ- ΣΧΕΤΙΚΑ ΥΨΗΛΗ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ- ΠΟΛΥ ΥΨΗΛΗ Κ	430	-0.0150%	-0.0450%	0.0150%	0.0450%
	77 Περιοχή 1	ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΖΩΝΗ- ΣΧΕΤΙΚΑ ΥΨΗΛΗ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ- ΠΟΛΥ ΥΨΗΛΗ Κ	430	-0.0080%	-0.0260%	0.0080%	0.0260%
Γ403-404 (G403-404)	101 Περιοχή 1	ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΖΩΝΗ- ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΗ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ- ΠΟΛΥ ΥΨΗΛΗ Κ	5.2	-0.0099%	-0.0290%	0.0099%	0.0290%
	80 Περιοχή 1	ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΖΩΝΗ- ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΗ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ- ΠΟΛΥ ΥΨΗΛΗ Κ	5.2	-0.0070%	-0.0200%	0.0070%	0.0200%
Γ387-388 (G387-388)	114 Περιοχή 6	ΕΝΔΟΧΩΡΑ-ΧΑΜΗΛΗ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ- ΜΕΤΡΙΑ Κ	12.6	-0.4410%	-1.4210%	0.4350%	1.3650%
	139 Περιοχή 6	ΕΝΔΟΧΩΡΑ-ΧΑΜΗΛΗ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ- ΜΕΤΡΙΑ Κ	12.6	-0.2330%	-0.7440%	0.2310%	0.7280%

Γ391-393-394 (G391-393-394)	134 Περιοχή 1	ΠΟΛΗ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ-ΑΡΚΕΤΑ ΥΨΗΛΗ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ-ΜΕΤΡΙΑ Κ	12.6	-0.7010%	-2.3390%	0.6860%	2.1890%
	154 Περιοχή 1	ΠΟΛΗ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ-ΑΡΚΕΤΑ ΥΨΗΛΗ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ-ΜΕΤΡΙΑ Κ	12.6	-0.4480%	-1.4660%	0.4420%	1.4050%
Γ401-402-452 (G401-402-452)	164 Περιοχή 2	ΚΟΝΤΑ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΖΩΝΗ-ΜΕΤΡΙΑ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ-ΜΕΤΡΙΑ Κ	5.2	-0.0660%	-0.2010%	0.0660%	0.2000%
	155 Περιοχή 2	ΚΟΝΤΑ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΖΩΝΗ-ΜΕΤΡΙΑ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ-ΜΕΤΡΙΑ Κ	5.2	-0.0330%	-0.1010%	0.0330%	0.1000%
	178 Περιοχή 2	ΚΟΝΤΑ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΖΩΝΗ-ΜΕΤΡΙΑ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ-ΜΕΤΡΙΑ Κ	5.2	-0.0330%	-0.1000%	0.0330%	0.1000%
Γ377-396-397 (G377-396-397)	200 Περιοχή 4	ΠΟΛΥ ΚΟΝΤΑ ΣΤΗΝ ΠΟΛΗ-ΣΧΕΤΙΚΑ ΧΑΜΗΛΗ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ-ΜΕΤΡΙΑ Κ	12.6	-0.4840%	-1.5910%	0.4780%	1.5200%
	228 Περιοχή 4	ΠΟΛΥ ΚΟΝΤΑ ΣΤΗΝ ΠΟΛΗ-ΣΧΕΤΙΚΑ ΧΑΜΗΛΗ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ-ΜΕΤΡΙΑ Κ	12.6	-0.3030%	-0.9840%	0.3000%	0.9560%
Γ448-449-450 (G448-449-450)	220 Περιοχή 2	ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΖΩΝΗ-ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΗ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ-ΠΟΛΥ ΥΨΗΛΗ Κ	430	-0.0092%	-0.0278%	0.0092%	0.0278%

Γ448-449-450 (G448-449-450)	192 Περιοχή 2	ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΖΩΝΗ-ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΗ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ-ΠΟΛΥ ΥΨΗΛΗ Κ	430	-0.0060%	-0.0170%	0.0060%	0.0170%
	214 Περιοχή 2	ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΖΩΝΗ-ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΗ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ-ΠΟΛΥ ΥΨΗΛΗ Κ	430	-0.0060%	-0.0170%	0.0060%	0.0170%
Γ345-376-378-399 (G345-376-378-399)	256 Περιοχή 4	ΚΟΝΤΑ ΣΤΗΝ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ- ΠΟΛΥ ΥΨΗΛΗ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ-ΜΕΤΡΙΑ Κ	12.6	-0.2160%	-0.6720%	0.2160%	0.6590%
	232 Περιοχή 4	ΚΟΝΤΑ ΣΤΗΝ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ- ΠΟΛΥ ΥΨΗΛΗ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ-ΜΕΤΡΙΑ Κ	12.6	-0.1050%	-0.3260%	0.1040%	0.3230%
Γ368 (G368)	315 Περιοχή 5	ΕΝΔΟΧΩΡΑ-ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΗ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ-ΜΕΤΡΙΑ Κ	12.6	-0.2740%	-0.9070%	0.2720%	0.8830%
	333 Περιοχή 5	ΕΝΔΟΧΩΡΑ-ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΗ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ-ΜΕΤΡΙΑ Κ	12.6	-0.2120%	-0.6960%	0.2100%	0.6820%
Γ348-349 (G348-349)	389 Περιοχή 3	ΚΟΝΤΑ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΖΩΝΗ- ΑΡΚΕΤΑ ΥΨΗΛΗ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ- ΧΑΜΗΛΗ Κ	0.15	-0.0410%	-0.1250%	0.0410%	0.1250%
	369 Περιοχή 3	ΚΟΝΤΑ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΖΩΝΗ- ΑΡΚΕΤΑ ΥΨΗΛΗ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ- ΧΑΜΗΛΗ Κ	0.15	-0.0310%	-0.0930%	0.0310%	0.0920%

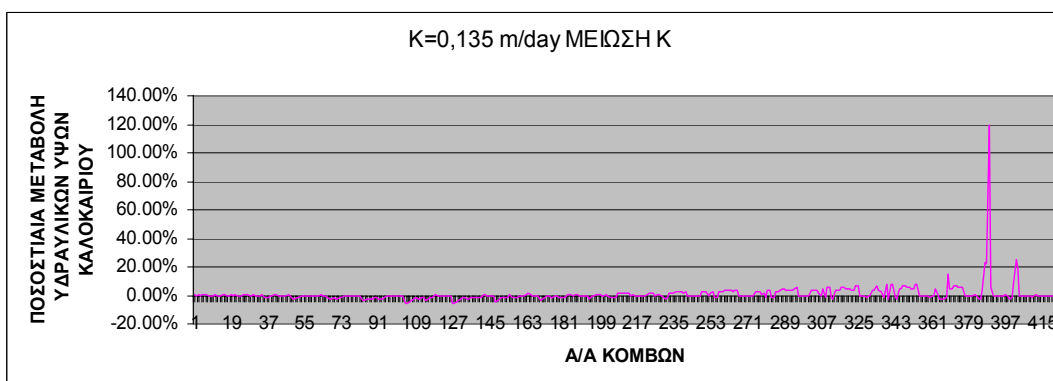
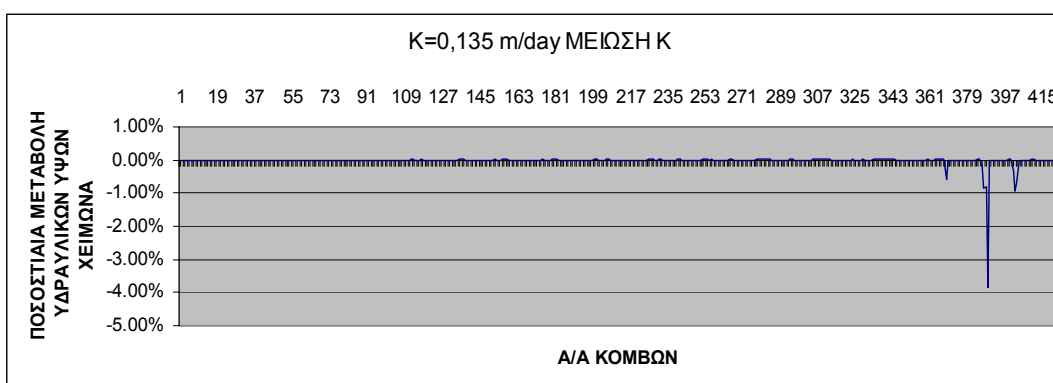
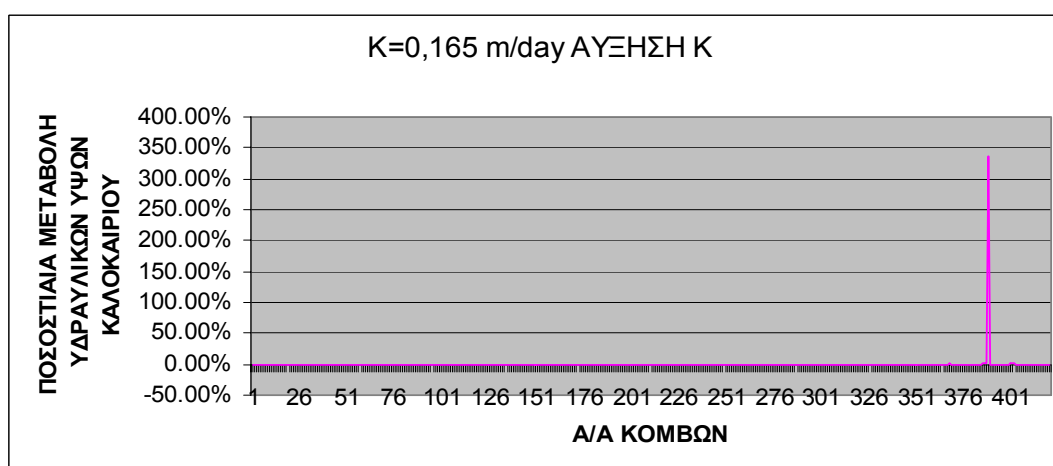
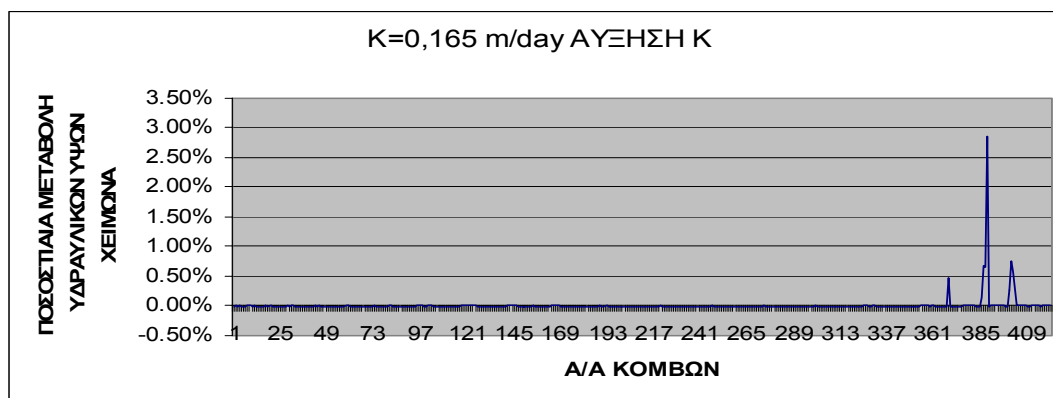
3.ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΥΨΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΛΛΑΓΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ- ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΥΨΩΝ ΣΤΟΥΣ ΚΥΡΙΟΤΕΡΟΥΣ ΚΟΜΒΟΥΣ

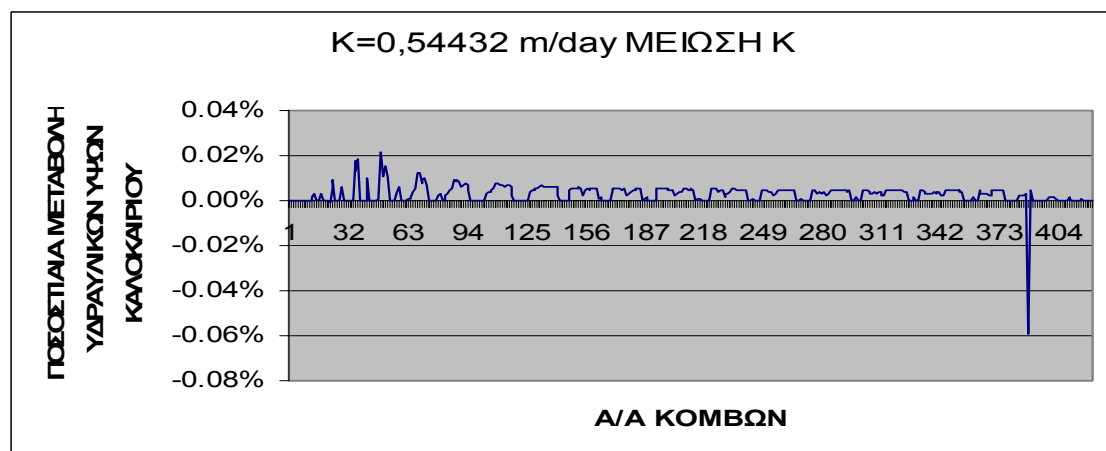
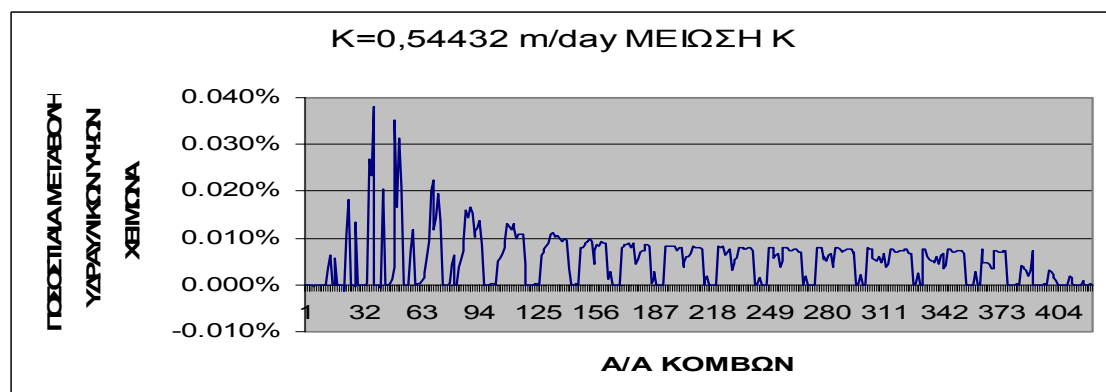
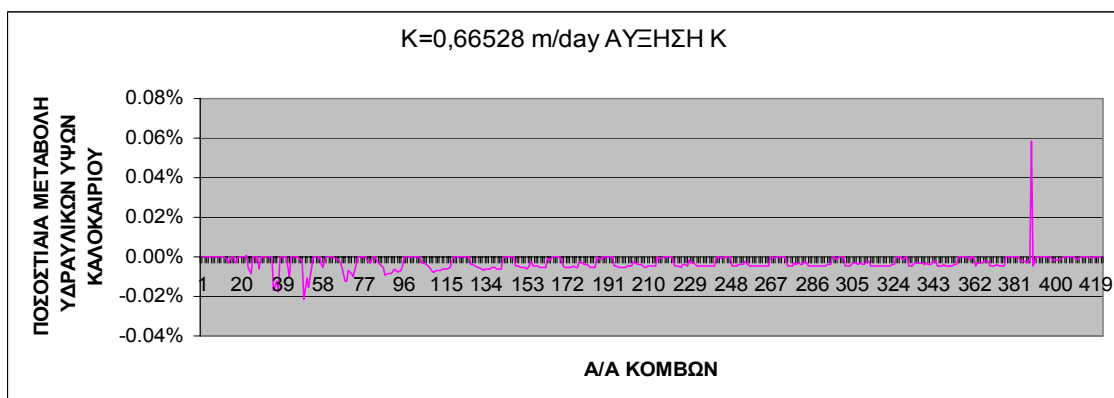
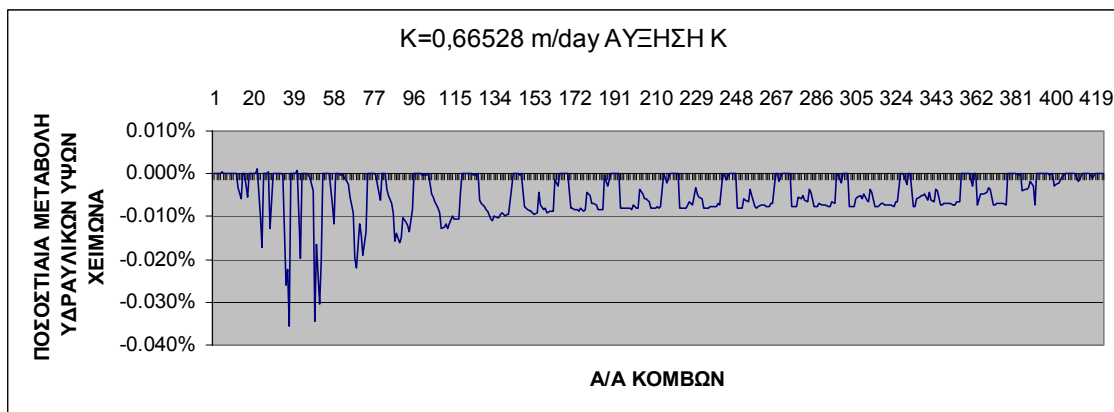
Α.Γραφήματα ποσοστιαίων μεταβολών υδραυλικών υψών για την περίπτωση αλλαγής υδραυλικής αγωγιμότητας

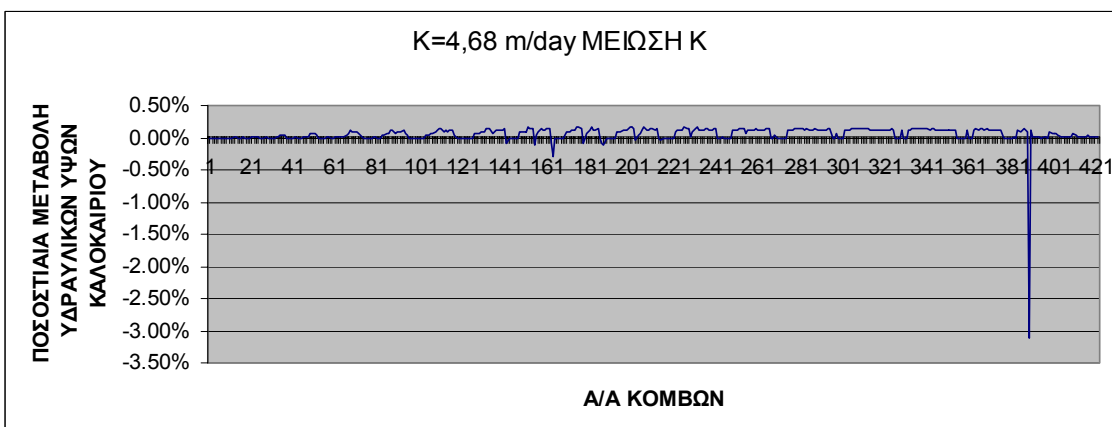
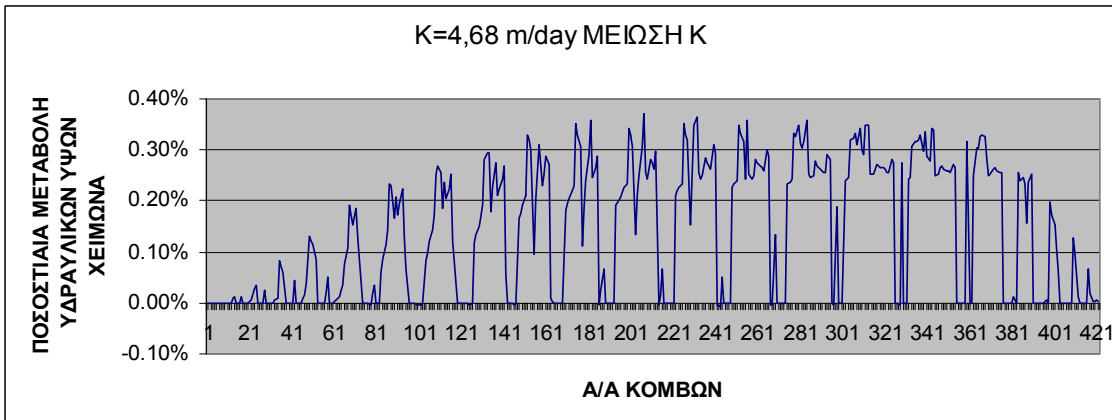
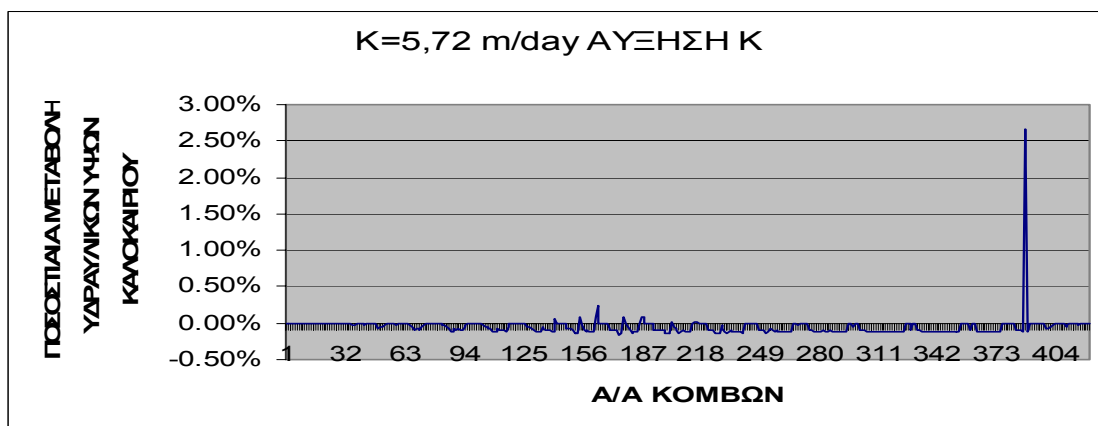
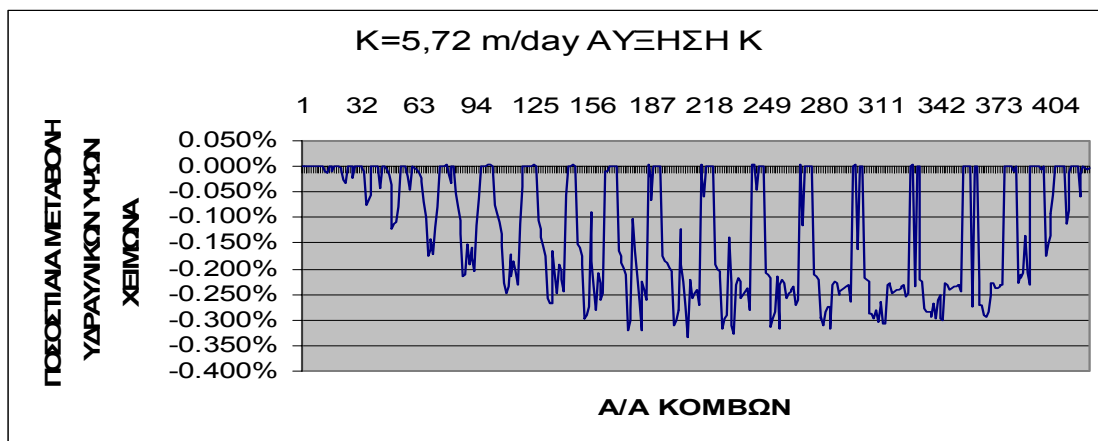


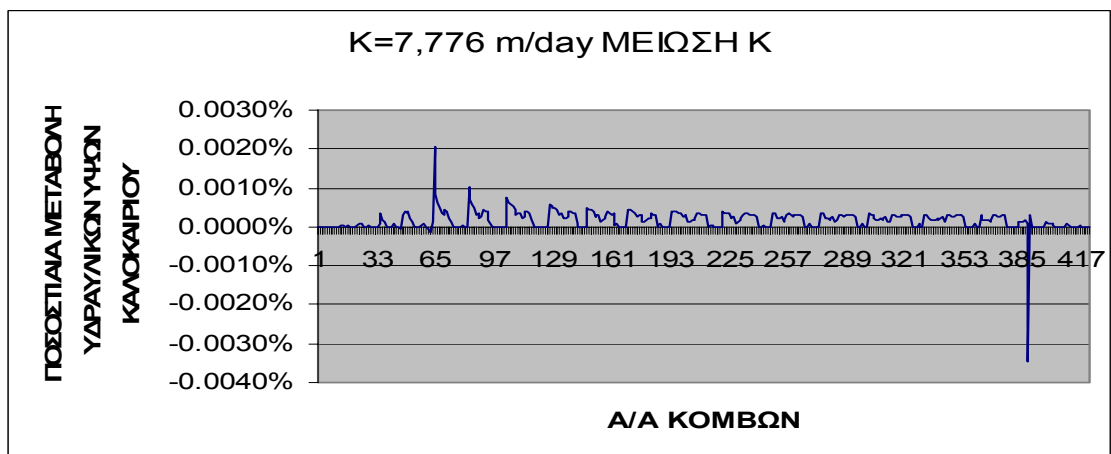
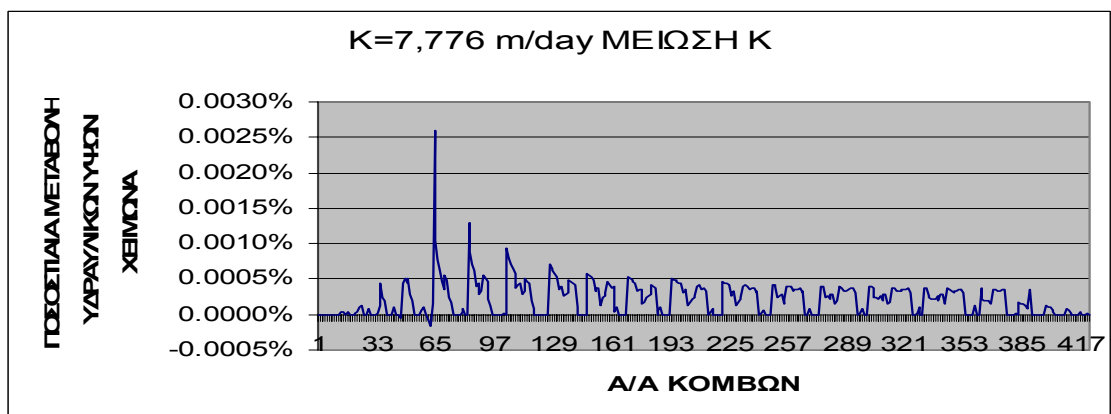
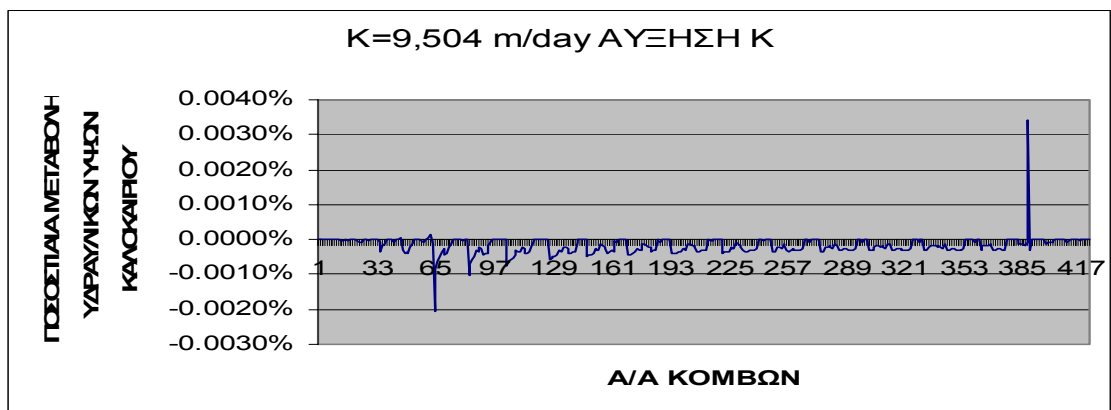
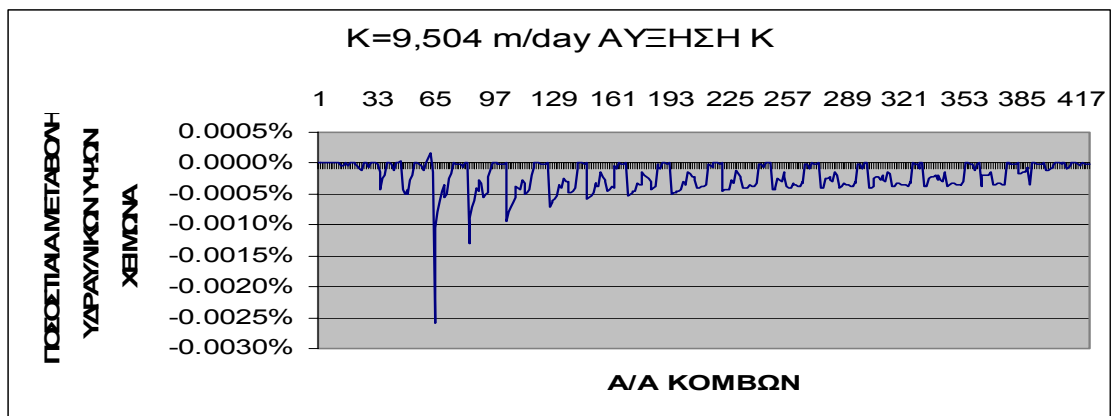
Εικόνα Π-3-1 : Τμήματα με διαφορετική τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας

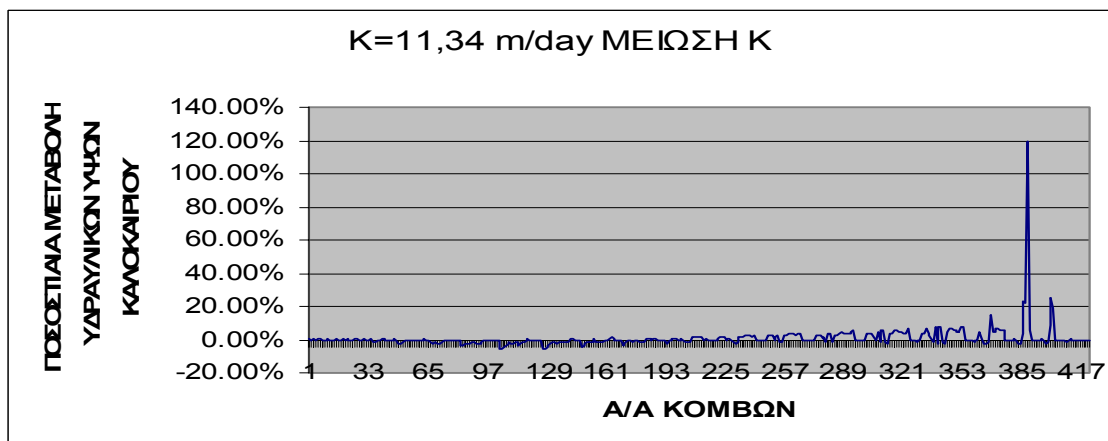
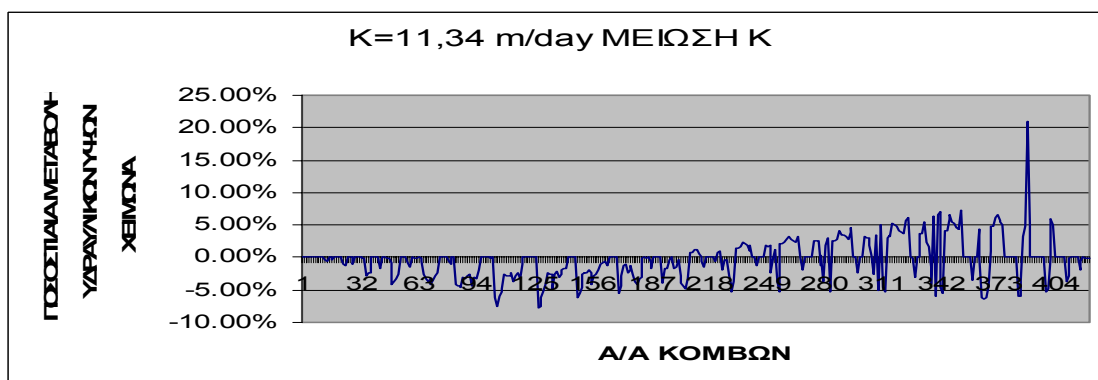
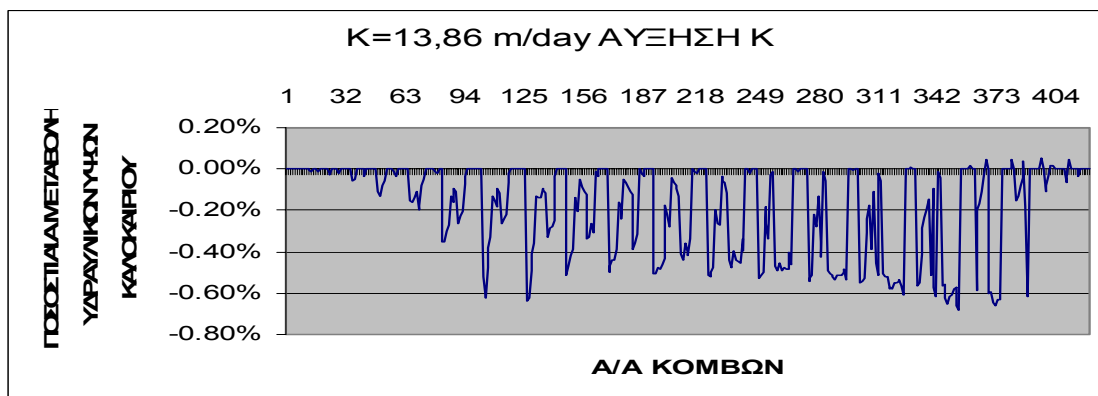
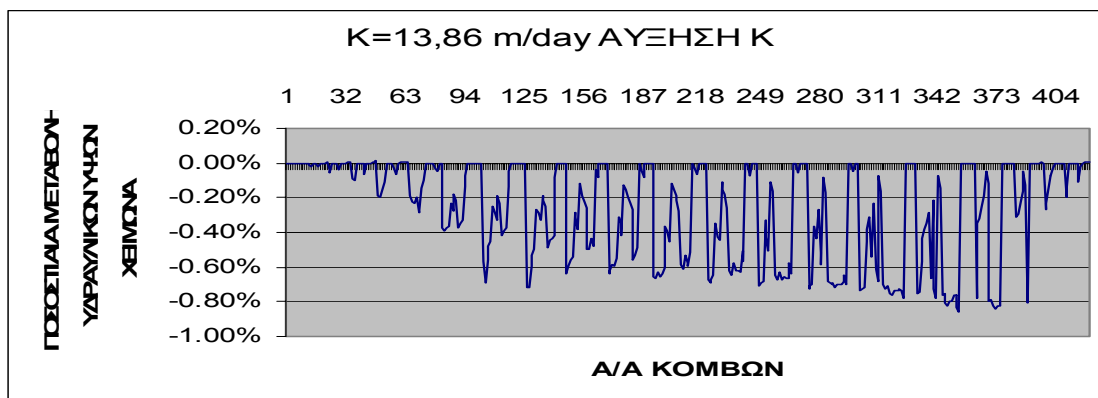
Ακολούθως, θα παρουσιαστούν τα Γραφήματα των ποσοστιαίων μεταβολών των υδραυλικών υψών για κάθε μία από τις 14 περιπτώσεις (7 τμήματα της περιοχής με διαφορετική τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας με αύξηση και μείωση παροχής στο καθένα από αυτά):

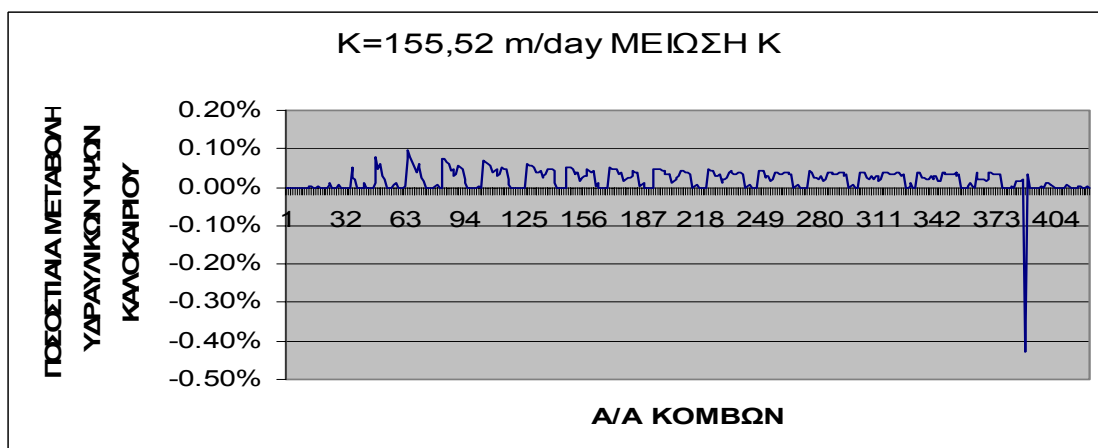
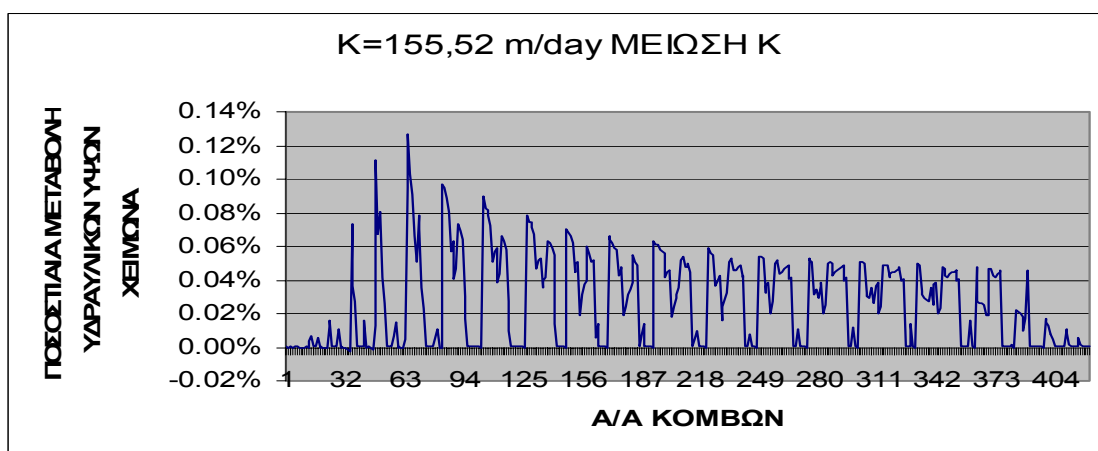
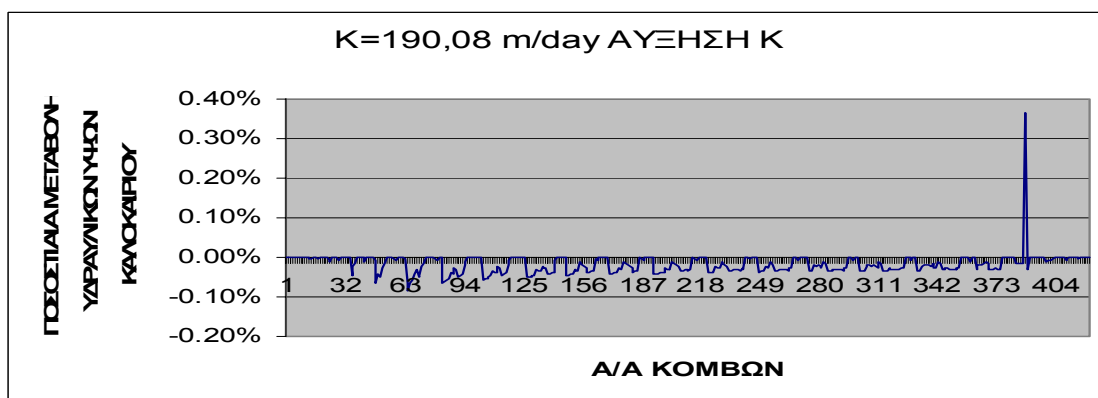
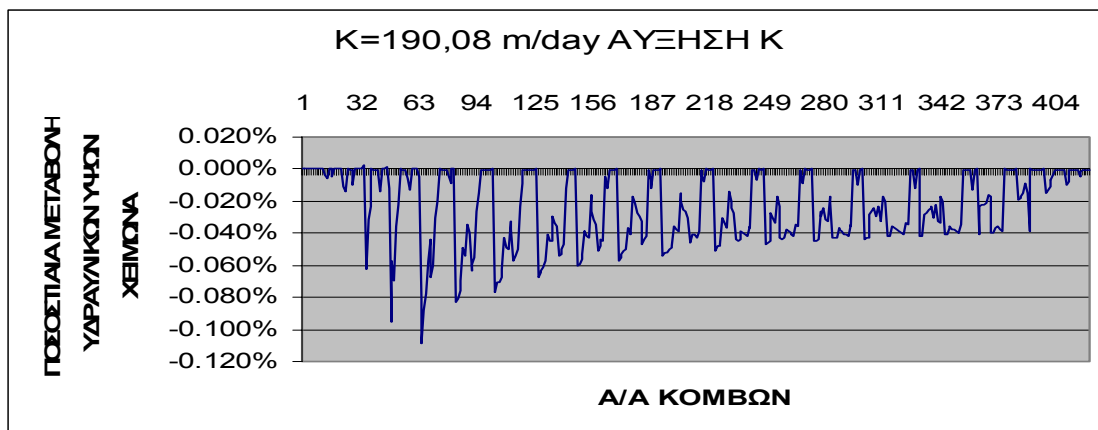


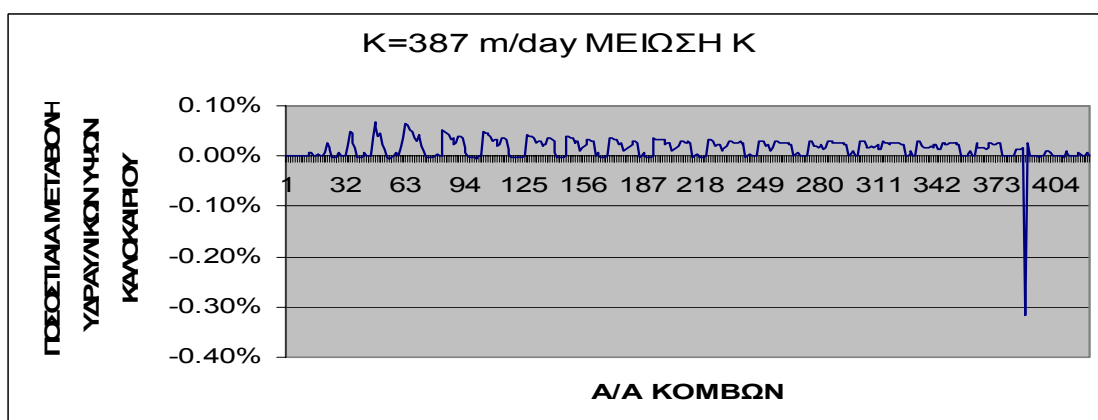
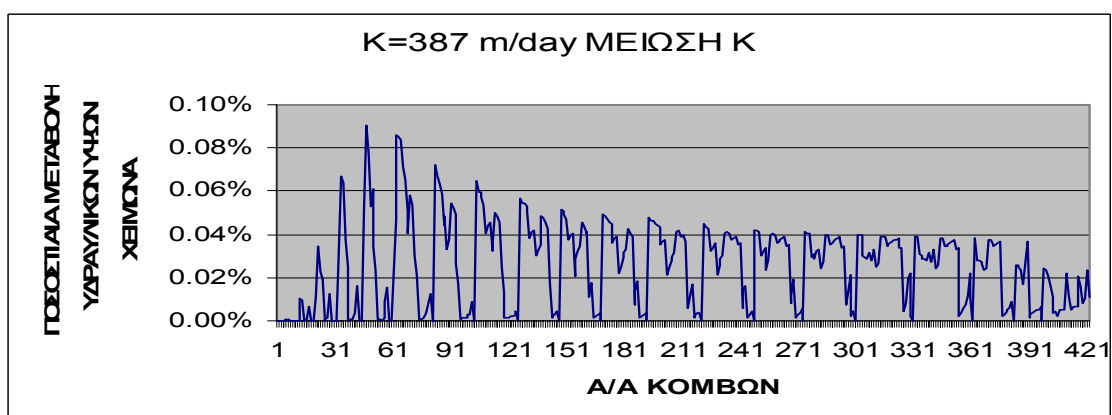
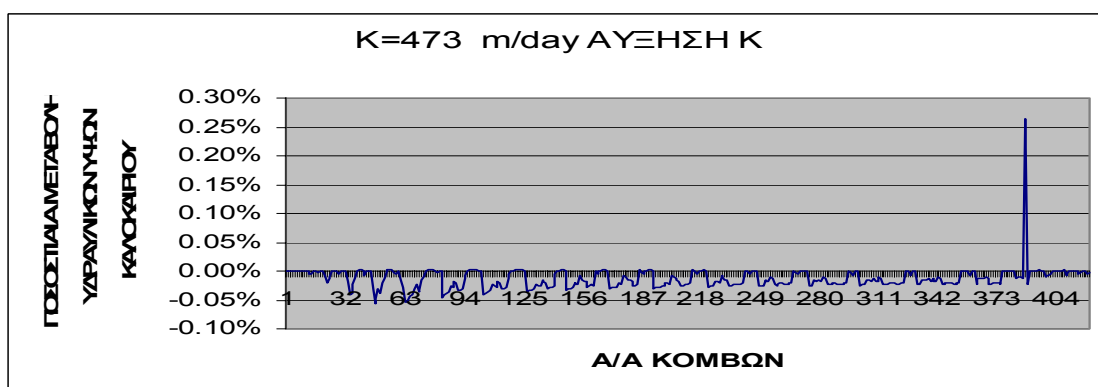
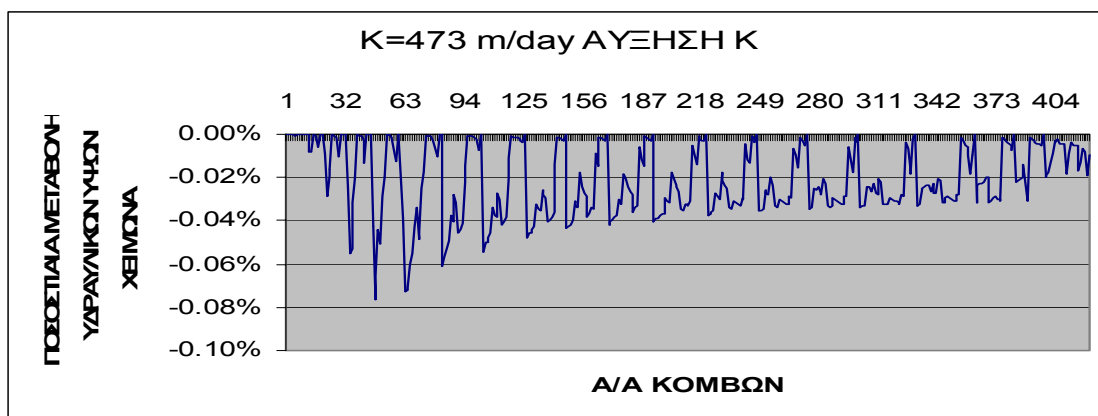












Β.Συνολικός πίνακας ποσοστιαίας μεταβολής των υδραυλικών υψών στους κυριότερους κόμβους.

ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ	ΑΥΞΗΜΕΝΗ ΤΙΜΗ Κ(+10%)	1η ΠΕΡΙΟΔΟΣ- ΧΕΙΜΩΝΑΣ	2η ΠΕΡΙΟΔΟΣ- ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ	ΜΕΙΩΜΕΝΗ ΤΙΜΗ Κ(-10%)	1η ΠΕΡΙΟΔΟΣ- ΧΕΙΜΩΝΑΣ	2η ΠΕΡΙΟΔΟΣ- ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ	ΚΟΜΒΟΣ	ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ
K1=0,15	K1=0,165	2.860%	335.860%	K1=0,135	-3.840%	119.880%	389(K1)	ΜΙΚΡΗ Κ-G348-349- ΔΥΤΙΚΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ
K2=0,6048	K2=0,66528	-0.036%	-0.018%	K2=0,5443 2	0.038%	0.038%	37(K2)	ΜΙΚΡΗ Κ-ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ-ΣΧΕΤΙΚΑ ΚΟΝΤΑ ΠΟΛΗΣ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ
		-0.017%	-0.021%		0.035%		49(K2)	ΜΙΚΡΗ Κ-ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ-ΚΟΝΤΑ ΠΟΛΗΣ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ
			0.058%			-0.059%	389(K2)	ΜΙΚΡΗ Κ-G348-349- ΔΥΤΙΚΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ
K3=5,2	K3=5,72	-0.320%		K3=4,68	0.352%		175(K3)	ΜΕΤΡΙΑ Κ-ΚΟΝΤΑ ΣΤΟ G345/376/378/399 ΚΑΙ G377/396/397- ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ-ΚΟΝΤΑ ΠΟΛΗΣ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ

K3=5,2	K3=5,72	-0.322%		K3=4,69	0.357%		182(K3)	ΜΕΤΡΙΑ Κ-ΚΟΝΤΑ ΣΤΟ G345/376/378/399 ΚΑΙ G377/396/397- ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ-ΚΟΝΤΑ ΠΟΛΗ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ
		-0.333%			0.370%		207(K3)	ΜΕΤΡΙΑ Κ-ΚΟΝΤΑ ΣΤΟ G345/376/378/399 ΚΑΙ G377/396/397- ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ-ΚΟΝΤΑ ΠΟΛΗ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ
		-0.317%			0.350%		226(K3)	ΜΕΤΡΙΑ Κ-ΚΟΝΤΑ ΣΤΟ G345/376/378/399 ΚΑΙ G377/396/397- ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ-ΚΟΝΤΑ ΠΟΛΗ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ
		-0.328%			0.366%		232(K3)	ΜΕΤΡΙΑ Κ-ΚΟΝΤΑ ΣΤΟ G345/376/378/399 ΚΑΙ G377/396/397- ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ-ΚΟΝΤΑ ΠΟΛΗ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ
			2.660%			-3.110%	389(K3)	ΜΙΚΡΗ Κ-G348- 349-ΔΥΤΙΚΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

K4=8,64	K4=9,504	-0.0026%	-0.002%	K4=7776	0.0026%	0.002%	64(K4)	ΜΕΤΡΙΑ Κ-ΚΟΝΤΑ ΣΤΟ ΑΝΑΤΟΛΙΚΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ
			0.0034%			-0.0033%	389(K4)	ΜΙΚΡΗ Κ-G348- 349-ΔΥΤΙΚΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ
K5=12,6	K5=13,86	-0.824%	-0.650%	K5=11,34			348(K5)	ΜΕΤΡΙΑ Κ-ΚΟΝΤΑ ΣΤΟ G368-ΚΟΝΤΑ ΣΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΗ ΝΟΤΙΟΥ ΟΡΙΟΥ ΠΕΡΙΟΧΗΣ
		-0.857%	-0.686%				354(K5)	ΜΕΤΡΙΑ Κ-ΚΟΝΤΑ ΣΤΟ G368-ΚΟΝΤΑ ΣΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΗ ΝΟΤΙΟΥ ΟΡΙΟΥ ΠΕΡΙΟΧΗΣ
		-0.842%	-0.629%				375(K5)	ΜΕΤΡΙΑ Κ-ΚΟΝΤΑ ΣΤΟ G368-ΚΟΝΤΑ ΣΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΗ ΝΟΤΙΟΥ ΟΡΙΟΥ ΠΕΡΙΟΧΗΣ
					20.920%	119.880%	389(K5)	ΜΙΚΡΗ Κ-G348- 349-ΔΥΤΙΚΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ
K6=172,28	K6=190,08	-0.095%		K6=155,52	0.111%		48(K6)	ΜΕΤΡΙΑ Κ-ΚΟΝΤΑ ΣΤΟ ΑΝΑΤΟΛΙΚΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

K6=172,29	K6=190,09	-0.109%		K6=155,53	0.126%		65(K6)	ΜΕΤΡΙΑ Κ-ΚΟΝΤΑ ΣΤΟ ΑΝΑΤΟΛΙΚΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ
			0.363%			-0.426%	389(K6)	ΜΙΚΡΗ Κ-G348- 349-ΔΥΤΙΚΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ
K7=430	K7=473	-0.077%		K7=387	0.090%		47(K7)	ΜΕΤΡΙΑ Κ-ΚΟΝΤΑ ΣΤΟ ΑΝΑΤΟΛΙΚΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ
		-0.072%			0.085%		64(K7)	ΜΕΤΡΙΑ Κ-ΚΟΝΤΑ ΣΤΟ ΑΝΑΤΟΛΙΚΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ
			0.264%			-0.316%	389(K7)	ΜΙΚΡΗ Κ-G348- 349-ΔΥΤΙΚΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

4. ΟΔΗΓΙΑ 60/2000

4.1 ΑΡΘΡΑ

Άρθρο 1

Σκοπός

Σκοπός της παρούσας οδηγίας είναι η θέσπιση πλαισίου για την προστασία των εσωτερικών επιφανειακών, των μεταβατικών, των παράκτιων και των υπόγειων υδάτων, το οποίο :

- (α) να αποτρέπει την περαιτέρω επιδείνωση, να προστατεύει και να βελτιώνει την κατάσταση των υδάτινων οικοσυστημάτων, καθώς και των αμέσως εξαρτώμενων από αυτά χερσαίων οικοσυστημάτων και υδροτόπων σε ό,τι αφορά τις ανάγκες τους σε νερό,
- (β) να προωθεί τη βιώσιμη χρήση του νερού βάσει μακροπρόθεσμης προστασίας των διαθέσιμων υδάτινων πόρων,
- (γ) να αποσκοπεί στην ενίσχυση της προστασίας και τη βελτίωση του υδάτινου περιβάλλοντος , μεταξύ άλλων με ειδικά μέτρα για την προοδευτική μείωση των απορρίψεων, εκπομπών και διαρροών ουσιών προτεραιότητας και με την παύση ή τη σταδιακή εξάλειψη των απορρίψεων, εκπομπών και διαρροών των επικίνδυνων ουσιών προτεραιότητας,
- (δ) να διασφαλίζει την προοδευτική μείωση της ρύπανσης των υπογείων υδάτων και να αποτρέπει την περαιτέρω μόλυνσή τους, και
- (ε) να συμβάλλει στο μετριασμό των επιπτώσεων από πλημμύρες και ξηρασίες,

και να συμβάλλει με αυτό τον τρόπο :

- στην εξασφάλιση επαρκούς παροχής επιφανειακού και υπόγειου νερού καλής ποιότητας που απαιτείται για τη βιώσιμη, ισόρροπη και δίκαιη χρήση ύδατος,
- σε μια σημαντική μείωση της ρύπανσης των υπογείων υδάτων,
- στην προστασία των χωρικών και θαλάσσιων υδάτων, και
- στην επίτευξη των στόχων των σχετικών διεθνών συμφωνιών, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που αποσκοπούν στην πρόληψη και την εξάλειψη της ρύπανσης του θαλάσσιου περιβάλλοντος, με κοινοτική δράση δυνάμει του άρθρου 16 παράγραφος 3 για την παύση ή τη σταδιακή εξάλειψη των απορρίψεων, εκπομπών και διαρροών επικίνδυνων ουσιών προτεραιότητας, με απώτατο στόχο να επιτευχθούν συγκεντρώσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον οι οποίες, για μεν τις φυσικώς απαντώμενες ουσίες να πλησιάζουν το φυσικό βασικό επίπεδο, για δε τις τεχνητές συνθετικές ουσίες να είναι σχεδόν μηδενικές.

Άρθρο 2

Ορισμοί

Για τους σκοπούς της παρούσας οδηγίας, εφαρμόζονται οι ακόλουθοι ορισμοί :

- 2) "Υπόγεια ύδατα" : το σύνολο των υδάτων που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους στη ζώνη κορεσμού και σε άμεση επαφή με το έδαφος ή το υπέδαφος.
- 3) "Εσωτερικά ύδατα" : το σύνολο των στάσιμων ή των ρεόντων επιφανειακών υδάτων και όλα τα υπόγεια ύδατα που βρίσκονται προς την πλευρά της ξηράς σε σχέση με τη γραμμή βάσης από την οποία μετράται το εύρος των χωρικών υδάτων.

- 7) "Παράκτια ύδατα" : τα επιφανειακά ύδατα που βρίσκονται στην πλευρά της ξηράς μιας γραμμής, κάθε σημείο της οποίας βρίσκεται σε απόσταση ενός ναυτικού μιλίου προς τη θάλασσα από το πλησιέστερο σημείο της γραμμής βάσης από την οποία μετράται το εύρος των χωρικών υδάτων , και τα οποία, κατά περίπτωση, εκτείνονται μέχρι του απώτερου ορίου των μεταβατικών υδάτων.
- 11) "Υδροφόρος ορίζοντας" : υπόγειο στρώμα ή στρώματα βράχων ή άλλες γεωλογικές στοιβάδες επαρκώς πορώδεις και διαπερατές ώστε να επιτρέπουν είτε σημαντική ροή υπόγειων υδάτων είτε την άντληση σημαντικών ποσοτήτων υπόγειων υδάτων.
- 12) "Σύστημα υπόγειων υδάτων" : συγκεκριμένος όγκος υπόγειων υδάτων εντός ενός ή περισσότερων υδροφόρων οριζόντων.
- 19) "Κατάσταση υπόγειων υδάτων" : η συνολική έκφραση της κατάστασης υπογείου υδατικού συστήματος, που καθορίζεται από τις χαμηλότερες τιμές της ποσοτικής και της χημικής του κατάστασης.
- 20) "Καλή κατάσταση υπόγειων υδάτων" : η κατάσταση υπόγειου υδατικού συστήματος που χαρακτηρίζεται τουλάχιστον "καλή", τόσο από ποσοτική όσο και από χημική άποψη.
- 26) "Ποσοτική κατάσταση" : η έκφραση του βαθμού στον οποίο ένα σύστημα υπόγειων υδάτων επηρεάζεται από άμεσες και έμμεσες αντλήσεις.
- 27) "Διαθέσιμοι πόροι υπόγειων υδάτων" : ο μακροπρόθεσμος μέσος ετήσιος ρυθμός γενικής ανατροφοδότησης ενός συστήματος υπόγειων υδάτων μείον τον μακροπρόθεσμο μέσο ετήσιο ρυθμό ροής που απαιτείται για την επίτευξη των στόχων οικολογικής ποιότητας για τα συναφή επιφανειακά ύδατα οι οποίοι ορίζονται στο άρθρο 4, για την αποφυγή οιασδήποτε σημαντικής μείωσης της οικολογικής κατάστασης των υδάτων αυτών και για την αποφυγή οιασδήποτε σημαντικής ζημίας των συναφών χερσαίων οικοσυστημάτων.

- 29) "Επικίνδυνες ουσίες": ουσίες ή ομάδες ουσιών που είναι τοξικές, σταθερές και επιρρεπείς σε βιοσυσσώρευση, καθώς και άλλες ουσίες ή ομάδες ουσιών που δημιουργούν ανάλογο βαθμό ανησυχίας.
- 31) "Ρύπος" : κάθε ουσία που εμπεριέχει τον κίνδυνο να προκαλέσει ρύπανση, ιδίως αυτές που απαριθμούνται στο Παράρτημα VIII.
- 32) "Απ' ευθείας απόρριψη στα υπόγεια ύδατα": απόρριψη ρύπων στα υπόγεια ύδατα χωρίς να διαπεράσουν το έδαφος ή το υπέδαφος.
- 33) "Ρύπανση" : η, συνεπεία ανθρώπινων δραστηριοτήτων, άμεση ή έμμεση εισαγωγή, στον αέρα, το νερό ή το έδαφος, ουσιών ή θερμότητας που μπορούν να είναι επιζήμια για την υγεία του ανθρώπου ή για την ποιότητα των υδατικών οικοσυστημάτων ή των χερσαίων οικοσυστημάτων που εξαρτώνται άμεσα από υδατικά οικοσυστήματα, συντελούν στη φθορά υλικής ιδιοκτησίας, ή επηρεάζουν δυσμενώς ή παρεμβαίνουν σε λειτουργίες αναπυλχής ή σε λοιπές νόμιμες χρήσεις του περιβάλλοντος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

A. ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. **ΡΟΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΡΥΠΩΝ**,
Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Γεώργιος Π. Καρατζάς,
Αναπληρωτής Καθηγητής
- [2]. **Διπλωματική Εργασία : «Προσδιορισμός της Ζώνης**
Υφαλμύρωσης στην Περιοχή Χερσονήσου – Ηρακλείου Κρήτης
με Χρήση Προσομοίωσης και Μετρήσεων Πεδίου»,
Στεφανόπουλος Κυριάκος, Οκτώβριος 2004
- [3]. **Διπλωματική Εργασία : «Προσομοίωση Ροής και Μεταφοράς**
Μάζας. Εξυγίανση Υπογείων Υδάτων εφαρμόζοντας την
Τεχνολογία των Συγκλινόντων Φραγμάτων και Διόδων –
Εφαρμογή Πεδίου σε Περίπτωση Ρύπανσης με Υδρογονάνθρακες
Πετρελαίου (BTEX)», Γενειατάκης Μανόλης & Γαρμπή Σοφία,
Ιούλιος 2003.
- [4]. **Διπλωματική Εργασία : «ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΤΟΥ**
ΜΟΝΤΕΛΟΥ PTC ΓΙΑ ΤΗ ΡΟΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΣΤΗΝ
ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΚΟΡΙΝΘΙΑΚΟΥ ΚΟΛΠΟΥ», Δημήτριος Β.
Κανελλόπουλος, Σεπτέμβριος 2003
- [5]. **Υδρογεωλογική Μελέτη Ανατολικής Κεντρικής Κρήτης, ΙΓΜΕ**
1996.

B. ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [6]. **Bear, J. and Verruijt, A. 1987. *Modeling Groundwater Flow and***
***Polution*. Reidel, Dordrecht, The Netherlands. With permission.**
- [7]. **Bennett, G.D. 1976. *Introduction to Ground-Water Hydraulics : A***
***Programmed Text for Self-Instruction*. Techniques of Water-Res.**
Invests. of the U.S. Geol. Survey, Book 3, Ch. B2.
- [8]. **David Keith Todd, *Groundwater Hydrology*, Ph.D., 1980. 2nd**
ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY.

- [9]. Domenico, P.A. and Schwartz, F.W. 1990. *Physical and Chemical Hydrology*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY.
- [10].Heath, R.C. 1995. *Basic Ground-Water Hydrology*. U.S. Geological Survey, Water-Supply paper 2200, seventh printing, Denver, CO.
- [11].Hubbert, M.K. 1953. Entrapment of petroleum under Hydrodynamic conditions. *Bulletin of American Association of Petroleum Geologists*, Vol. 37, 1954-2026. With permission.
- [12].Ferris, J.G., Knowles, D.B., Browne, R.H., and Stallman, R.W. 1962. *Theory of Aquifer Test*. U.S. Geological Survey. Water-Supply Paper 1536E.
- [13].Fetter, C.W. 1994. *Applied Hydrogeology*, 3rd ed. Macmillan College Publishing Co. Inc., New York.
- [14].Freeze, R.A. and Cherry, J.A. 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ.
- [15]. G. J. McRae, W. R. Goodin, and J. H. Seinfeld. "Mathematical Modeling of Photochemical Air Pollution". Technical report, Environmental Quality Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA, 1982. (EQL report no. 18).
- [16].Jacques W. Delleur, 1999. *The handbook of ground water engineering*, Editor-in- Chief.
- [17].Johnston, R.H. 1986. *Water Quality Issues—Factors Affecting Ground-Water Quality*. U.S. Geological Survey, Water-Supply paper 2325. Washington, D.C.
- [18].Konikow, L.F., Go Konikow, L.F., ode, D.J., and Hornderger, G.Z. 1996. A three-dimensional method-of-characteristics solute-Transport model (MOC3D). U.S. Geol. Survey Water-Res. Inv. Rept. 96-4267.
- [19].Konikow, L.F. 1996. Numerical models of groundwater flow and transport, in *manual on Mathematical Models in Isotope Hydrogeology*. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- [20].Narasimhan, T.N., and Goyal, K.P. 1984. Subsidence due to geothermal fluid withdrawal, in *Man-Induced Land Subsidence*, Reviews in Engineering Geology, v. VI, Geological Society of America, 35-66.

- [21].Ogata, A. and Banks, R.B. 1961. *A Solution of the Differential Equation of Longitudinal Dispersion in Porous Media*, U.S. Geological Survey, Professional Paper 411A. U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- [22].Spitz, K. and Moreno, J. 1966. *Practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling*. John Wiley & Sons, Inc., New York. With permission.
- [23].Torak, L.J. 1993. A modular finite-element model (MODFE) for aerial and axisymmetric ground-water-flow problems, Part 1 : Model description and user's manual. Techniques of Water-Res. Invests. of the U.S. Geol. Survey, Book 6, Ch. A3.

C. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ (INTERNET)

- [24]. www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf
- [25]. www.argusint.com/index.html
- [26]. PTC Manual (www.argusint.com/index.html)
- [27].www.vres.gr/state.php?state_id=17
- [28].www.ypan.gr/docs/odhgia%20ee.doc