

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος



Διπλωματική εργασία
**«Προσομοίωση της Υπόγειας Ροής στην περιοχή
των Γεωτρήσεων Νομού Χίου»**

Κωνσταντίνος Λουκάς

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ: ΚΑΡΑΤΖΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (επιβλέπων)
ΓΙΔΑΡΑΚΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ
ΔΙΑΜΑΝΤΟΠΟΥΛΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ**

**Χανιά
Οκτώβριος 2007**

Με την ολοκλήρωση της εργασίας μου θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσοι βοήθησαν στην περάτωσή της και ειδικά τον καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος, κύριο Γεώργιο Π. Καρατζά. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κυρίους Παπαλάνη και Καραολάνη για τη βοήθειά τους στη συλλογή πληροφοριών όπως και τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, καθηγητές του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος, κυρίους Ευάγγελο Γιδαράκο και Ευάγγελο Διαμαντόπουλο.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	2
Περιεχόμενα	3
Περίληψη	4
1. Γενικά στοιχεία για το νησί και την περιοχή μελέτης	6
1.1 Μορφολογικά στοιχεία νήσου Χίου.....	6
1.1.1 Γενικά.....	6
1.1.2 Υδρογραφικό δίκτυο.....	7
1.2 Γεωλογία της Χίου.....	8
1.3 Υδρολογία της Χίου.....	8
1.4 Κλίμα της Χίου.....	9
1.5 Περιοχή μελέτης και χαρακτηριστικά της.....	9
2. Γενικά στοιχεία Υπόγειας Υδραυλικής	13
2.1 Υδρολογικός κύκλος.....	13
2.2 Υδροφορείς.....	14
2.2.1 Παράμετροι υδροφορέων.....	15
3. Το φαινόμενο της υφαλμύρισης	19
4. Μοντέλα κίνησης υπογείων υδάτων	22
4.1 Εισαγωγή.....	22
4.2 Εξισώσεις και μαθηματικές μέθοδοι.....	22
4.2.1 Έννοια υδροφορέα.....	23
4.2.2 Έννοια συστήματος ροής.....	24
4.3 Αριθμητικές μέθοδοι.....	27
4.4 Εννοιολογικό μοντέλο και κατασκευή πλέγματος.....	28
4.5 Οριακές συνθήκες.....	30
5. Περιγραφή του λογισμικού Argus One και μοντέλου PTC	32
5.1 Κύριες Εξισώσεις.....	32
5.2 Επίλυση του αλγόριθμου PTC.....	33
5.3 Τρισδιάστατη Υπόγεια Ροή.....	34
5.3.1 Κύρια Εξίσωση.....	34
5.3.2 Εφαρμογή της Μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων.....	35

5.3.3 Εφαρμογή της Μεθόδου πεπερασμένων διαφορών.....	38
5.4 Οριακές συνθήκες.....	40
5.4.1 Δεδομένο Ύψος.....	40
5.4.2 Δεδομένη Ροή.....	40
5.4.3 Τρίτος Τύπος.....	42
5.5 Τρισδιάστατη μεταφορά ρύπων.....	42
5.5.1 Κύριες Εξισώσεις.....	42
6. Προετοιμασία Μοντέλου.....	42
6.1 Εισαγωγή Δεδομένων.....	45
6.1.1 Χάρτες.....	45
6.1.2 Βασικά Δεδομένα	52
6.1.3 Αρχικές και Οριακές Συνθήκες.....	53
6.2 Βαθμονόμηση Μοντέλου.....	59
7. Αποτελέσματα Μοντέλου.....	60
7.1 Σενάριο 1 (Πραγματική κατάσταση).....	60
7.2 Σενάριο 2.....	65
7.3 Σενάριο 3.....	70
7.4 Σενάριο 4.....	75
7.5 Σενάριο 5.....	78
7.6 Σενάριο 6.....	81
8. Συμπεράσματα – Προτάσεις.....	93
Βιβλιογραφία.....	95
Παράρτημα.....

Περίληψη

Η παρούσα εργασία καλείται να περιγράψει με τη βοήθεια μαθηματικών μοντέλων την κίνηση της ροής των υπογείων υδάτων στην περιοχή των γεωτρήσεων του Νομού Χίου και να εξετάσει την υφαλμύριση, ένα πρόβλημα που μαστίζει την περιοχή όπως και όλες τις παράκτιες εκτάσεις, ιδιαίτερα τις νησιωτικές.

Ξεκινώντας με την περιγραφή των χαρακτηριστικών της νήσου Χίου και ειδικότερα της περιοχής μελέτης, παρατίθενται χρήσιμες πληροφορίες για διάφορα στοιχεία της περιοχής όπως μορφολογικά, γεωλογικά και δημογραφικά. Λαμβάνουμε δεδομένα για το κλίμα και τα υδρογεωλογικά στοιχεία των λεκανών τα οποία και θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια. Στη συνέχεια παρατίθενται στοιχεία για τον τρόπο λειτουργίας της φύσης όσον αφορά την Υπόγεια Υδραυλική με ιδιαίτερη αναφορά στους υδροφορείς και τα γνωρίσματά τους. Αναλύεται το φαινόμενο της υφαλμύρισης, ο τρόπος δημιουργίας της καθώς και πιθανοί τρόποι αντιμετώπισης του σε διάφορες περιοχές.

Στη συνέχεια περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας των μοντέλων κίνησης υπογείων υδάτων και οι εξισώσεις και οι μέθοδοι που αυτά χρησιμοποιούν. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων και τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών που είναι και οι ευρύτερα διαδεδομένες. Τη σκυτάλη παίρνουν το λογισμικό και το μοντέλο που δουλεύουμε στη συγκεκριμένη εργασία, το Argus One και το PTC αντίστοιχα. Αναλύονται οι μέθοδοι και οι εξισώσεις που χρησιμοποιεί το μοντέλο μας καθώς και τα χαρακτηριστικά του.

Κατόπιν περνάμε στην εισαγωγή των δεδομένων της περιοχής μελέτης στο μοντέλο και γίνεται μια σύντομη περιγραφή των παραμέτρων που χρησιμοποιήσαμε για να απεικονίσουμε τα μορφολογικά και υδρογεωλογικά στοιχεία της περιοχής μέσω του υπολογιστή έτσι ώστε να έχουμε μια ακριβή και αντιπροσωπευτική εικόνα της κατάστασης.

Παρουσιάστηκαν και σχολιάστηκαν τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης και προσομοιώθηκαν κάποιες πιθανές καταστάσεις – σενάρια που θα μπορούσαμε να δημιουργήσουμε ούτως ώστε να δούμε την αντίδραση του συστήματος της υπόγειας ροής της περιοχής καθώς και εκτίμηση της υπάρχουσας κατάστασης μετά από πέντε

χρόνια υπό τις ίδιες συνθήκες. Τα σενάρια αυτά συγκρίθηκαν με την πραγματική κατάσταση και σχολιάστηκαν.

Τέλος παρατίθενται κάποια χρήσιμα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την προσομοίωση της κίνησης των υπογείων υδάτων καθώς και κάποιες προτάσεις για βελτίωση της υπάρχουσας κατάστασης. Από τις πιθανές λύσεις δεν υπάρχει κάποια που να δημιουργεί αισθητή διαφορά στην καταπολέμηση της υφαλμύρισης καθώς απαιτούνται μεγάλες ποσότητες νερού. Πιο συνετή παρουσιάζεται η αξιοποίηση των μονάδων επεξεργασίας λυμάτων που υπάρχουν στην περιοχή και η κυρίως εκπόνηση ενός σχεδίου που να αντιμετωπίζει την εξάπλωση της υφαλμύρισης σε όλο το νησί.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

«Γενικά στοιχεία για το νησί και την περιοχή μελέτης»

1.1 Μορφολογικά στοιχεία νήσου Χίου

1.1.1 Γενικά

Η Χίος ανήκει στο συγκρότημα των νησιών του Ανατολικού Αιγαίου, έχει έκταση 814,6 km² και είναι το πέμπτο σε μέγεθος ελληνικό νησί μετά τα νησιά Κρήτη, Εύβοια, Ρόδο και Λέσβο. Οι ακτογραμμές του νησιού έχουν μήκος περίπου 213 km. Το σχήμα του είναι επίμηκες με μέγιστο μήκος Β-Ν 50 km και πλάτος στο βόρειο τμήμα 28 km, στο κεντρικό 13 km και στο νότιο 23 km. Το νησί της Χίου με τα μικρότερα κατοικημένα νησιά, Ψαρά και Οινούσες, αποτελούν το νομό Χίου (905 km²). Το μεγαλύτερο τμήμα της Χίου είναι ορεινό και τραχύ ενώ τα πετρώματα είναι κατά 66% περίπου ασβεστόλιθοι. Κυριαρχεί η εναλλαγή βαθιών χαραδροκοιλάδων και μεμονωμένων υψιπέδων με υψηλές κορυφές με απότομες και βραχώδεις κλιτύες. Στο ΒΔ και ΝΑ τμήμα του νησιού το ανάγλυφο είναι ηπιότερο με το υψόμετρο να πέφτει σταδιακά από βορρά προς νότο. Οι υψηλότερες κορυφές είναι το Πεληναίο (1297 m), το Όρος (1118 m), ο Κοχλίας (790 m), η Κακή Ράχη (525 m), ο Κορακάρης (397 m) και ο Τράχωνας (347 m). Σύμφωνα με την απογραφή της 18^{ης} Μαρτίου 2001, ο Νομός Χίου κατοικείται από 53106 ανθρώπους με μεγαλύτερο τον δήμο Χίου με 25671 κατοίκους. [2] Παρακάτω παρουσιάζεται πίνακας με τα αποτελέσματα της απογραφής:



Σχ 1.1 Φωτογραφία από δορυφόρο [9]

	ΚΑΤΟΙΚΟΙ	ΑΝΔΡΕΣ	ΓΥΝΑΙΚΕΣ
ΝΟΜΟΣ ΧΙΟΥ	53106	27133	25973
ΔΗΜΟΣ ΧΙΟΥ	25671	12876	12795
ΔΗΜΟΣ ΑΓΙΟΥ ΜΗΝΑ	2678	1312	1366
ΔΗΜΟΣ ΑΜΑΝΗΣ	1529	795	734
ΔΗΜΟΣ ΙΩΝΙΑΣ	4474	2251	2223
ΔΗΜΟΣ ΚΑΜΠΟΧΩΡΩΝ	2870	1644	1226
ΔΗΜΟΣ ΚΑΡΔΑΜΥΛΩΝ	2758	1402	1356
ΔΗΜΟΣ ΜΑΣΤΙΧΟΧΩΡΙΩΝ	4322	2428	1894
ΔΗΜΟΣ ΟΙΝΟΥΣΣΩΝ	855	455	400
ΔΗΜΟΣ ΟΜΗΡΟΥΠΟΛΗΣ	7471	3734	3737
ΔΗΜΟΣ ΨΑΡΩΝ	478	236	242

Πίνακας 1.1 Απογραφή Νομού Χίου 18/03/2001 [10]

1.1.2 Υδρογραφικό δίκτυο

Η Χίος αποστραγγίζεται από μεγάλο αριθμό υδατορεμάτων και χειμάρρων που έχουν διεύθυνση κυρίως Β-Ν με εξαίρεση την ανατολική πλευρά του νησιού όπου αξιόλογα ρέματα έχουν διεύθυνση Δ-Α. Τα κυριότερα από αυτά είναι τα ρέματα Φανοπύργου και Κατράρη (νότια), των Καταράκτη, Κοκκαλά, Παρθένη, Αρμένη (ανατολικά-νοτιοανατολικά), της Λαγκάδας και των Καρδαμύλων (βόρεια-βορειοανατολικά) και της Αγίας Μαρκέλλας, της Βολισσού και της Ελούντας (δυτικά-βορειοδυτικά). Ο σημαντικότερος παράγοντας που καθορίζει το υδρογραφικό δίκτυο κάθε περιοχής είναι η λιθολογική σύσταση των πετρωμάτων και κατ' επέκταση η υδροπερατότητά τους. Έτσι έχουμε δίκτυο με αδρά ύψη σε περιοχές με αυξημένη υδροπερατότητα και δίκτυο με λεπτή υφή σε αντίστοιχες με χαμηλή. Σύμφωνα με την ποιοτική ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου στις κυριότερες λεκάνες περιμένουμε

μικρή υδροπερατότητα και μεγάλη επιφανειακή απορροή στις περιοχές όπου επικρατούν οι ψαμμιτοσχιστόλιθοι του Παλαιογενούς και οι μάργες και οι ψαμμίτες του Νεογενούς. Αντίθετα αναμένουμε μεγάλη κατείσδυση και ελάχιστη επιφανειακή απορροή σε περιοχές κυριαρχίας ασβεστόλιθων και δολομιτών. [2]

1.2 Γεωλογία της Χίου

Το νησί παρουσιάζει μια ιδιαίτερα περίπλοκη τεκτονική δομή όπου συμμετέχουν κυρίως κλαστικά και ανθρακικά ιζήματα του Παλαιοζωικού, Μεσοζωικού και Νεογενούς ποικίλης λιθολογικής σύστασης. Τα προαλπικά πτυχωμένα ιζήματα διακρίνονται στην επικρατέστερη αυτόχθονη σειρά, τα ιζήματα της οποίας διαμορφώθηκαν και πτυχώθηκαν επί τόπου και μια αλλόχθονη που μεταφέρθηκε τεκτονικά από την περιοχή μεταξύ Χίου-Λέσβου και επωθήθηκε πάνω της. Αυτή παρατηρείται στο ΒΔ και Ν τμήμα του νησιού. Μετά την αλπική πτύχωση στα ΝΑ αποτέθηκαν λιμναία ιζήματα (Νεογενές) που αποτελούν μια ανεξάρτητη ενότητα. [2]

1.3 Υδρολογία της Χίου

Το νησί χαρακτηρίζεται από ένα βασικό υδροκρίτη με διεύθυνση Β-Ν. Ο υδροκρίτης αυτός χωρίζεται στο νότιο τμήμα του νησιού σε δυο, σχηματίζοντας έτσι μια στενή επιμήκη λεκάνη. Οι λεκάνες του νησιού είναι

Στο νότιο τμήμα του νησιού οι λεκάνες Φανοπύργου (42km^2) και Κατράρη (35km^2).

Στο νότιο - νοτιοανατολικό οι λεκάνες Καταρράκτη ($14,25\text{km}^2$), Κοκκαλά (46km^2), Παρθένη (30km^2) και Αρμένη ($22,12\text{km}^2$).

Στο βόρειο - βορειοανατολικό οι λεκάνες Λαγκάδας ($27,5\text{km}^2$) και Καρδαμυλιώτικου ($35,25\text{km}^2$).

Στο δυτικό οι λεκάνες Βολισσού (44km^2) και Ελούντας (65km^2).

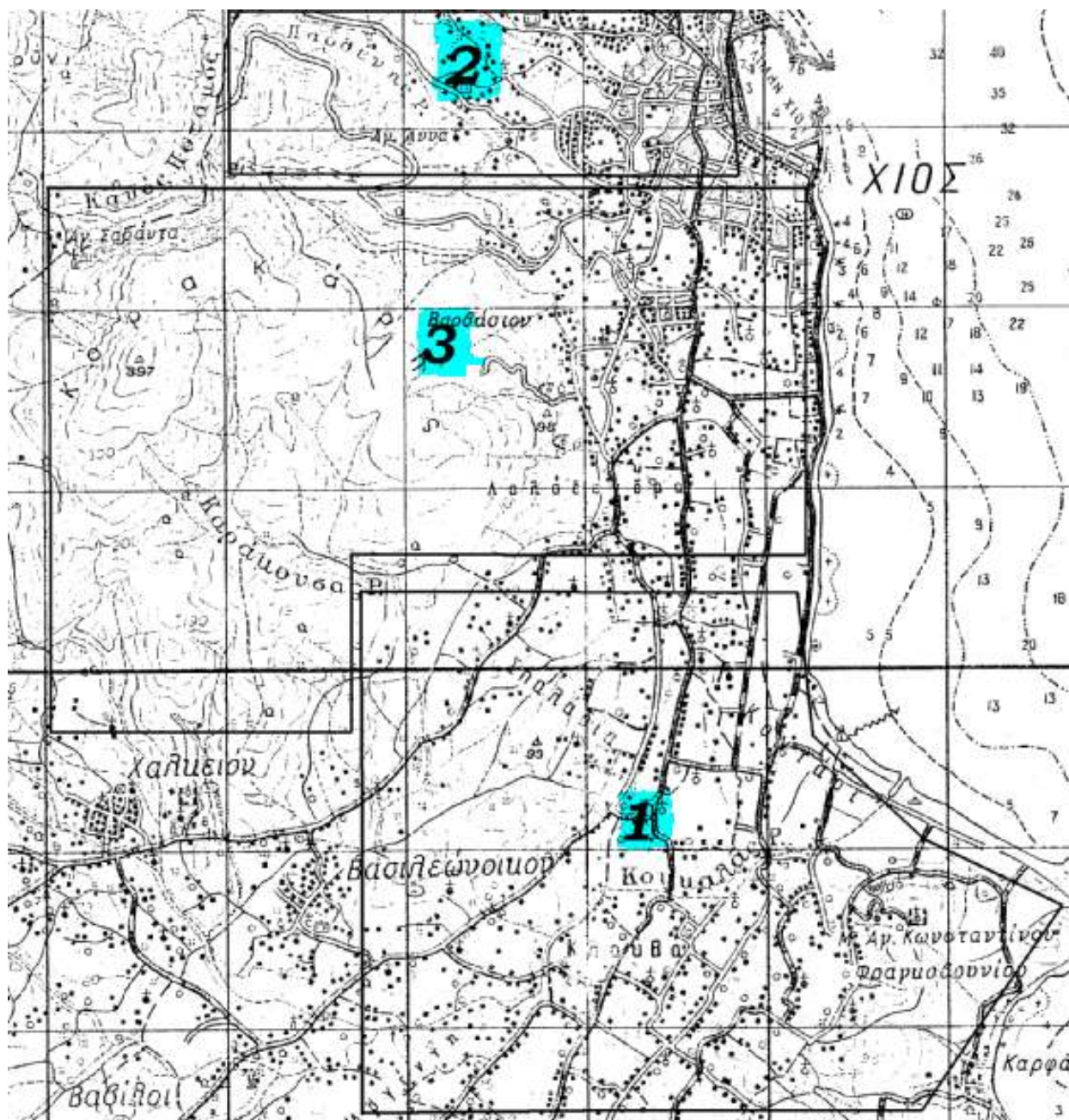
Οι λεκάνες αυτές καλύπτουν επιφάνεια $382,5\text{km}^2$, δηλαδή μόλις το 47% του εμβαδού του νησιού. Αυτό συμβαίνει καθώς η Χίος είναι διάσπαρτη από μικρές λεκάνες που καλύπτουν το υπόλοιπο 53%. [2]

1.4 Κλίμα της Χίου

Το νησί της Χίου παρουσιάζει μεσογειακό κλίμα με θερμό και ξηρό καλοκαίρι και υγρό και ξηρό χειμώνα. Η μέση ετήσια θερμοκρασία για τη θερινή περίοδο είναι 26,3 °C, για τη χειμερινή 13,8 °C οπότε η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι 18,3 °C. Η βροχόπτωση παρατηρείται μεγαλύτερη στη βόρεια Χίο από ότι στη νότια όπως και στα υψηλότερα σημεία σε σχέση με τα χαμηλότερα. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής στην κεντρική Χίο είναι 668mm. Το ημερήσιο μέγιστο ύψος βροχής κυμαίνεται μεταξύ 2,8 και 134,9mm. Χιονόπτωση έχουμε κάθε χρόνο στα ορεινά τμήματα του νησιού και σχεδόν κάθε χρόνο και σε χαμηλότερα υψόμετρα. Η μέση σχετική υγρασία βρίσκεται το καλοκαίρι στο 50% και το χειμώνα στο 74% με μέση ετήσια τιμή στο 64%. [2]

1.5 Περιοχή Μελέτης και χαρακτηριστικά της

Η περιοχή που θα μελετήσουμε είναι η ενότητα που αποτελείται από τις λεκάνες Κοκκαλά, Παρθένη και Κορακάρη. Η ευρύτερη αυτή περιοχή λειτουργεί σαν ένα ενιαίο σύστημα και είναι το μόνο σημείο του νησιού που χρησιμοποιείται για υδρευτικές και αρδευτικές ανάγκες (παρουσία γεωτρήσεων). Στην ενότητα αυτή παρατηρούμε τρεις υδροφορίες, του καρστικού συστήματος Κορακάρη, των ψαμμιτών Νεογενούς και προσχώσεων και ψαμμιτών. Οι υδροφορίες αυτές επικοινωνούν μεταξύ τους. Η στάθμη και η ποιότητα του νερού μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του έτους αλλά κάθε άνοιξη επανέρχονται στις ίδιες τιμές με εξαίρεση το χαμηλό τμήμα του Κοκκαλά. [2]



Σχ 1.2 Ενότητα λεκανών Κοκκαλά (1), Παρθένη (2) και Κορακάρη (3) [2]

Στοιχεία ενότητας

Όσον αφορά τα επιφανειακά ύδατα η επιφάνεια είναι 77km^2 , ενώ σε ό,τι αφορά τα υπόγεια είναι ίση ή μεγαλύτερη (Κορακάρης) από 70km^2 .

Η γεωλογία της αποτελείται κατά 50% από ασβεστόλιθους, 40% ψαμμιτοσχιστόλιθους και μάργες και 10% προσχώσεις.

Όγκος βροχής:

Υπολογίζεται περίπου στα $50 \cdot 10^6 \text{m}^3$.

Εξατμισοδιαπνοή:

Ασβεστόλιθοι $11,25 \cdot 10^6 \text{m}^3$

Ψαμμιτοσχιστόλιθοι $15,00 \cdot 10^6 \text{m}^3$

Προσχώσεις $8,00 \cdot 10^6 \text{m}^3$

Σύνολο $34,25 \cdot 10^6 \text{m}^3$

Απορροή:

Επιφανειακή $3,8 \cdot 10^6 \text{m}^3$

Βασική (Au) $1,2 \cdot 10^6 \text{m}^3$

Σύνολο $5,0 \cdot 10^6 \text{m}^3$

Εδαφική Συγκράτηση:

Υπολογίζεται στα $3,8 \cdot 10^6 \text{m}^3$

Απολήψεις:

Κοκκαλάς $2,0 \cdot 10^6 \text{m}^3$

Παρθένης $0,5 \cdot 10^6 \text{m}^3$

Κορακάρης $2,9 \cdot 10^6 \text{m}^3$

Σύνολο $5,4 \cdot 10^6 \text{m}^3 + 0,6 \text{ (πηγές)}$

Διήθηση:

A) υδρολογική λεκάνη: $50 - 34,2 - 3,8 = 8,2 \cdot 10^6 \text{m}^3$

A.1) υδρογεωλογική λεκάνη: $\frac{8,2 \cdot 70}{77} = 7,5 \cdot 10^6 \text{m}^3$ $7,5 \cdot 10^6 \text{m}^3$

A.2) υδρογεωλογική λεκάνη: $1,2 + 6,0 = 7,2 \cdot 10^6 \text{m}^3$ $7,2 \cdot 10^6 \text{m}^3$

Εναποθήκευση:

$$A) 7,5-1,2=6,3*10^6\text{m}^3$$

$$B) 7,2-1,2=6,0*10^6\text{m}^3$$

$$M.O: 6,1*10^6\text{m}^3$$

Ρυθμιστικά αποθέματα:

$$\text{Υπολογίζονται στα } 6,0+1,2=7,2*10^6\text{m}^3$$

Όπως παρατηρούμε, τα ρυθμιστικά αποθέματα εμφανίζονται μεγαλύτερα από την εναποθήκευση. Αυτό ίσως σημαίνει πως ίσως υπάρχει τροφοδοσία από μεγαλύτερη έκταση (Κορακάρης).

Εκμεταλλεύσιμα αποθέματα:

Με εναποθήκευση $7,2*10^6\text{m}^3$ και απολήψεις $6,0*10^6\text{m}^3$, προκύπτει ότι η εκμετάλλευση βρίσκεται σε οριακή κατάσταση και δεν υπάρχουν περιθώρια αύξησης. Μπορεί όμως χωρίς καμία επίπτωση να αυξηθεί η εκμετάλλευση κατά $1,0*10^6\text{m}^3$ τη χειμερινή περίοδο, οπότε θα έχουμε απόληψη της ποσότητας της βασικής απορροής, που φθάνει τα $1,2*10^6\text{m}^3$.

Θα μπορούσε η εκμετάλλευση να αυξηθεί δοκιμαστικά και τη θερινή περίοδο κατά $1,0*10^6\text{m}^3$, έστω και σε βάρος των μονίμων αποθεμάτων του Κορακάρη, τα οποία υπολογίζονται σε $5*10^6\text{m}^3$.

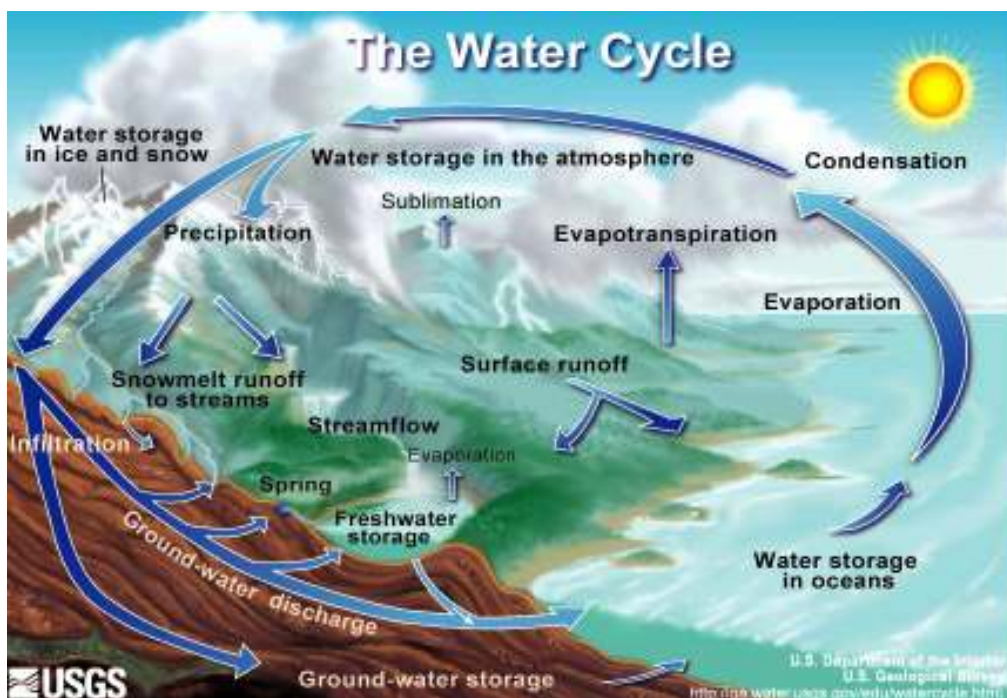
Έτσι θα είναι δυνατή η συγκέντρωση και άλλων στοιχείων σχετικά με την έκταση τροφοδοσίας της υδροφορίας του καρστικού συστήματος Κορακάρη. [2]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

«Γενικά στοιχεία Υπόγειας Υδραυλικής»

2.1 Υδρολογικός Κύκλος

Το νερό που υπάρχει στη φύση διακρίνεται σε δυο κατηγορίες: το επιφανειακό και το υπόγειο. Το υπόγειο περιλαμβάνει τις υδάτινες ποσότητες που υπάρχουν μέσα στο υπέδαφος και στους διάφορους υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς ενώ το επιφανειακό είναι το νερό θαλασσών, των λιμνών και των ποταμών. Το υπόγειο νερό αποτελεί μόλις το 4% της συνολικής ποσότητας του νερού έναντι 96% του επιφανειακού (αν συνυπολογίσουμε και το θαλάσσιο). Για να μελετήσουμε τα υπόγεια ύδατα πρέπει να τα συσχετίσουμε με τον Υδρολογικό Κύκλο καθώς μεγάλο μέρος των εκμεταλλεύσιμων υπόγειων νερών ανανεώνεται με τη διήθηση των νερών των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, ενώ μεγάλο τμήμα τους εκχύεται στις θάλασσες και τους ωκεανούς. [1]



Σχ 2.1. Ο Υδρολογικός κύκλος [11]

Η εξίσωση του υδρολογικού ισοζυγίου είναι η ακόλουθη:

$$P - R - G - (E + T) = \Delta S,$$

όπου P η βροχόπτωση

R η επιφανειακή απορροή

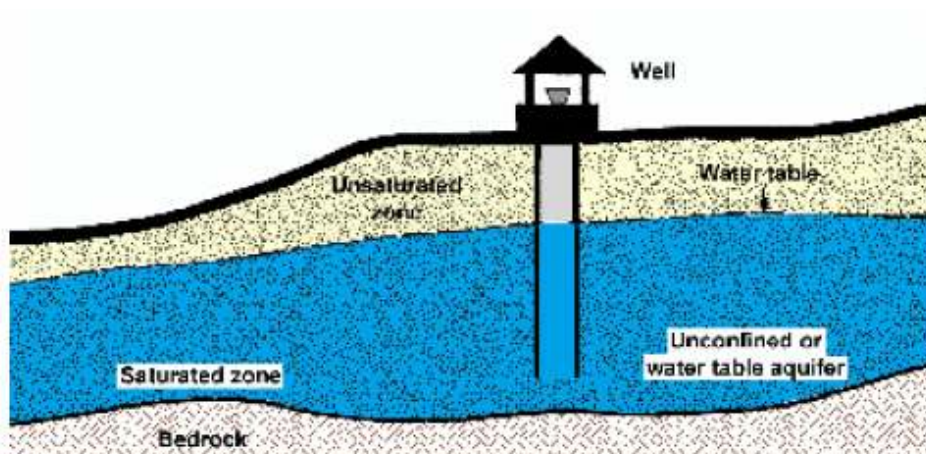
G η υπόγεια ροή

(E+T) η εξατμισοδιαπνοή

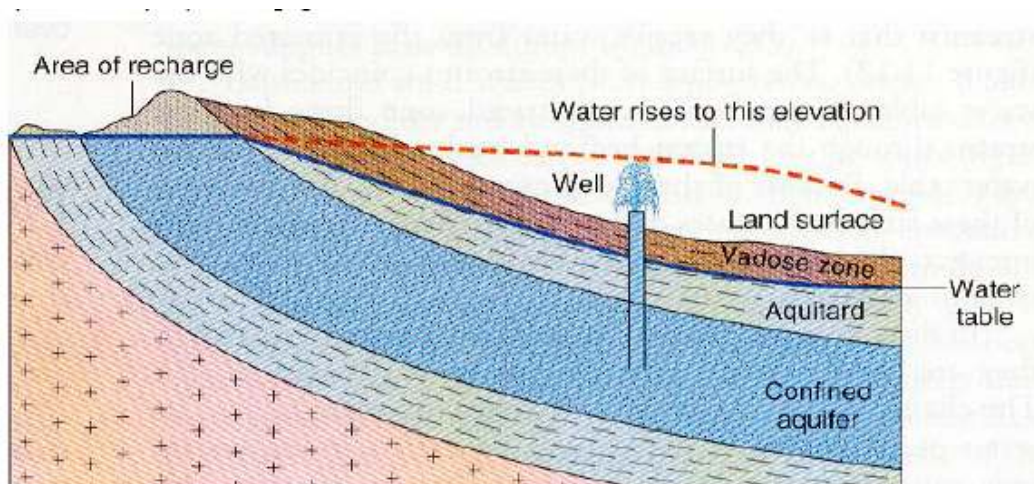
ΔS η μεταβολή του ρυθμού αποθήκευσης νερού [1]

2.2 Υδροφορείς

Υδροφορείς είναι οι υπεδάφιοι σχηματισμοί που περιέχουν σημαντικές ποσότητες διαπερατών υλικών κορεσμένων με νερό οι οποίες μπορούν να το παρέχουν σε γειτονικά φρεάτια και πηγές. Οι υδροφορείς διακρίνονται με βάση τη θέση της ανώτατης στάθμης του νερού στο έδαφος σε δυο βασικές κατηγορίες: τους ελεύθερους, με ανώτερη επιφάνεια τον υδροφόρο ορίζοντα και τους περιορισμένους, που περιέχουν νερό υπό πίεση και στην πάνω και την κάτω επιφάνειά τους περιορίζονται από αδιαπέρατα στρώματα. [1]



Σχ 2.2 Ελεύθερος Υδροφορέας [12]



Σχ 2.3 Περιορισμένος Υδροφορέας [12]

2.2.1 Παράμετροι υδροφορέων

- Πορώδες: είναι το ποσοστό του πετρώματος ή του εδάφους που δεν καταλαμβάνεται από στερεά υλικά. Περιγράφεται από τον τύπο $n = \frac{V_v}{V_o}$, όπου n το πορώδες, V_v ο όγκος των κενών και V_o ο συνολικός όγκος του δείγματος. Η τιμή του πορώδους εξαρτάται από τη σύνθεση, τη διάταξη και το σχήμα των κόκκων.
- Υδραυλική αγωγιμότητα: Για να εξηγήσουμε την λειτουργικότητα της υδραυλικής αγωγιμότητας παραθέτουμε τον Νόμο του Darcy σύμφωνα με τον οποίο ο ρυθμός ροής ($\frac{Q}{A}$) διαμέσου πορώδους υλικού είναι ανάλογος των απωλειών φορτίου, ανάλογος ενός συντελεστή K που χαρακτηρίζει το πορώδες υλικό και αντιστρόφως ανάλογος του μήκους της πορείας ροής.

Η εξίσωση του Νόμου του Darcy είναι $\frac{Q}{A} = -K \frac{\Delta h}{L}$ ή $q = -K \frac{\Delta h}{L}$,

όπου Q η παροχή [L^3T^{-1}]
 A η επιφάνεια ροής [L^2]
 K η υδραυλική αγωγιμότητα [LT^{-1}]
 Δh η απώλεια φορτίου [L]
 L το μήκος στήλης [L]
 q η ταχύτητα Darcy ή ειδική παροχή [LT^{-1}]

Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι η ταχύτητα της ροής είναι προς την κατεύθυνση που ελαττώνεται το φορτίο. Η έκφραση ($\frac{\Delta h}{L}$ ή $\frac{dh}{dl}$) ονομάζεται υδραυλική κλίση. [1]

Ο νόμος του Darcy ισχύει για αριθμούς Reynolds < 1 αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τιμές μέχρι και $Re = 10$. Στην περίπτωση των υπόγειων νερών η ροή συμβαίνει με $Re < 1$ κάτι που μας εξασφαλίζει τη χρήση του νόμου Darcy χωρίς καμιά προϋπόθεση, πλην των περιπτώσεων που υπάρχει μεγάλη υδραυλική κλίση, όπως κοντά σε φρέαρ άντλησης ή σε περιπτώσεις με τυρβώδη ροή όπως κοντά σε βασάλτη ή ασβεστόλιθο με μεγάλα ανοίγματα.

Η ταχύτητα του Darcy, εξ' ορισμού θεωρεί ότι η ροή γίνεται διαμέσου της ολικής επιφάνειας χωρίς λαμβάνει υπόψη το στερεό υλικό και τους πόρους. Ουσιαστικά όμως σε ένα πορώδες υλικό η ροή περιορίζεται μόνο εντός του χώρου των πόρων και η πραγματική ταχύτητα ορίζεται ως:

$$q_p = \frac{Q}{nA} = \frac{q}{n} = -\frac{K}{n} \frac{dh}{dl}$$

όπου q_p η ταχύτητα διήθησης [LT^{-1}]
 Q ο ρυθμός παροχής [L^3T^{-1}]
 A η επιφάνεια [L^2]
 n το πορώδες
 q η ταχύτητα του Darcy ή ειδική παροχή [LT^{-1}]
 K η υδραυλική αγωγιμότητα [LT^{-1}]
 dh η απώλεια φορτίου [L]
 dl το μήκος της στήλης [L]

- Μεταβιβασιμότητα: ορίζεται ως ο ρυθμός με τον οποίο το νερό δεδομένου κινητικού ιξώδους κινείται διαμέσου υδροφορέα μοναδιαίου πλάτους με μοναδιαία υδραυλική κλίση.

$$T = Kb$$

όπου K η υδραυλική αγωγιμότητα [LT^{-1}]
 b το κορεσμένο πάχος του υδροφορέα [L]

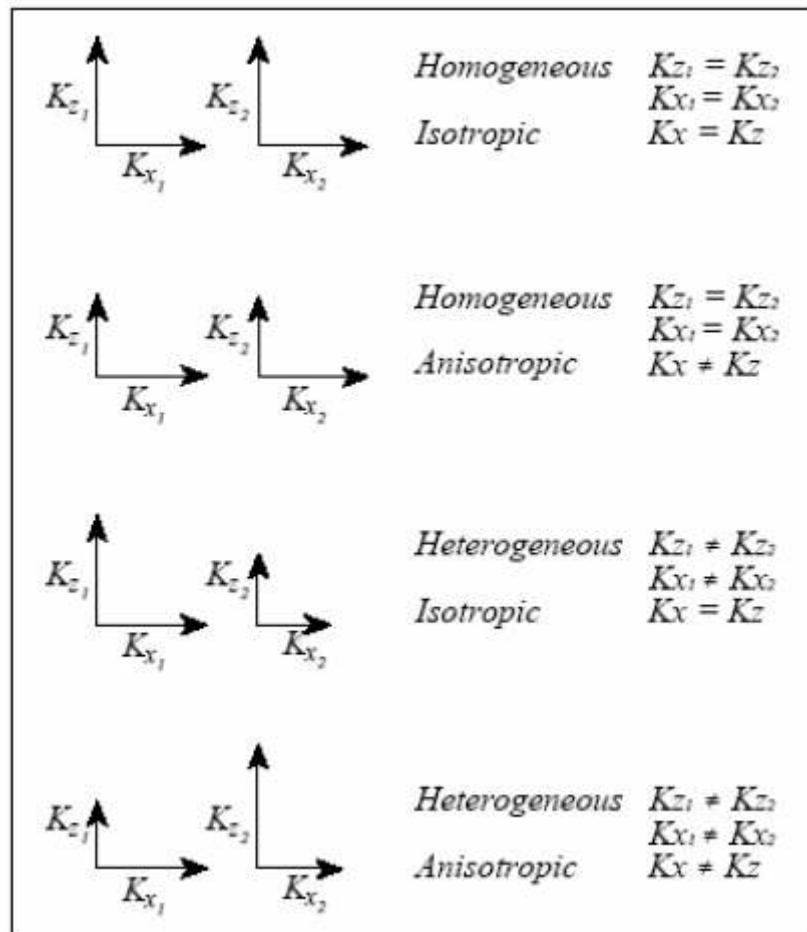
- Συντελεστής αποθηκευτικότητας: σε περιορισμένο υδροφορέα η ικανότητα αποθήκευσης νερού οφείλεται στη συμπιεστότητα του νερού και του υλικού. Σε αντίθεση, σε ελεύθερο υδροφορέα η ικανότητα αποθήκευσης του νερού οφείλεται κυρίως στην πλήρωση ή εκκένωση των πόρων.
- Ομοιογένεια και ισοτροπία: για αυτή την παράμετρο έχουμε τις παρακάτω διαφοροποιήσεις στους υδροφορείς:

1α. Ομοιογενής (homogeneous) : χαρακτηρίζεται ένας υδροφορέας που έχει τις ίδιες υδραυλικές ιδιότητες σε κάθε σημείο του.

1β. Ετερογενής (heterogeneous) : χαρακτηρίζεται ο υδροφορέας του οποίου οι υδραυλικές ιδιότητες αλλάζουν χωρικά.

2α. Ισότροπος (Isotropic) : χαρακτηρίζεται ο υδροφορέας ο οποίος σε οποιοδήποτε ορισμένο σημείο του έχει τις ίδιες υδραυλικές ιδιότητες προς όλες τις κατευθύνσεις.

2β. Ανισότροπος (Anisotropic) : χαρακτηρίζεται ο υδροφορέας με διαφορετικές υδραυλικές ιδιότητες σε κάθε κατεύθυνση. [1]

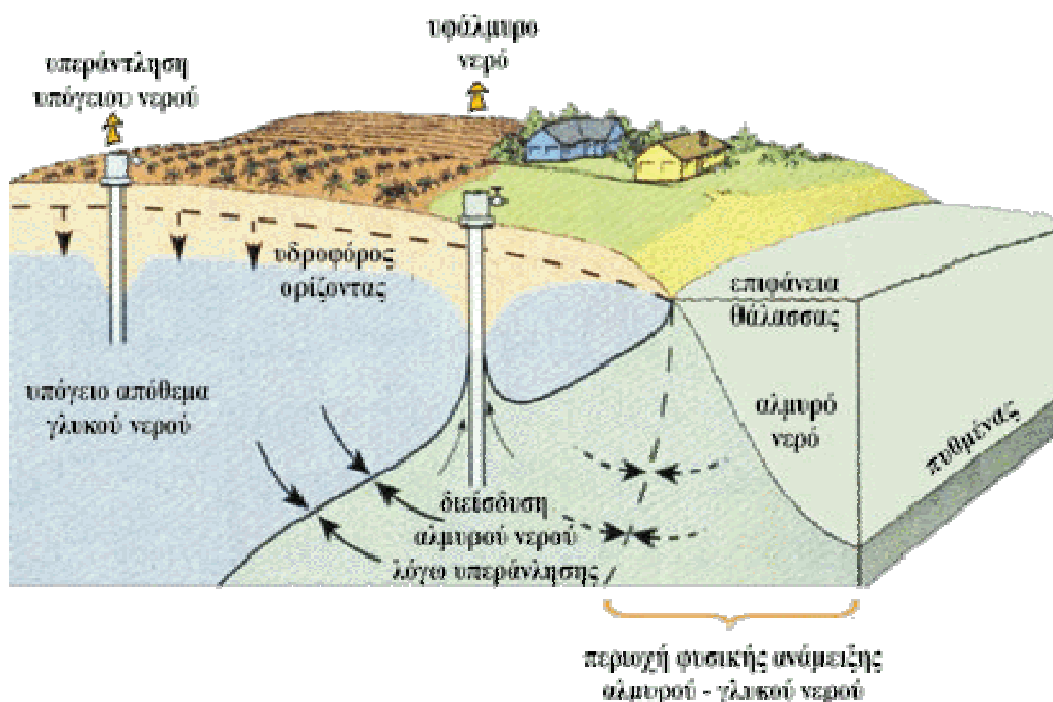


Σχ 2.4 Ομοιογένεια και Ισοτροπία [6]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

«Το φαινόμενο της υφαλμύρινσης»

Η υφαλμύριση είναι μια φυσική διαδικασία που παρατηρείται σε πολλούς παράκτιους υδροφορείς. Λόγω της υπερβολικής εκμετάλλευσης αυτών το θαλασσινό νερό βρίσκεται ελεύθερους χώρους και προσχωρεί στα κατώτερα τους στρώματα. Το θαλασσινό νερό επειδή εμπεριέχει πολλές διαλυμένες ουσίες έχει μεγαλύτερη πυκνότητα και κατά συνέπεια μεγαλύτερο βάρος από το γλυκό νερό. Έτσι, κατά την υφαλμύριση, όταν έρχονται σε επαφή η διαφορά πίεσης δημιουργεί ροή του αλμυρού προς τον υπόγειο υδροφορέα. Όσο συνεχίζεται η άντληση, η πίεση του γλυκού νερού μειώνεται και η υφαλμύριση εντείνεται συνεχώς μέχρι που αντλείται θαλασσινό νερό. Επίσης με την διείσδυση του το θαλασσινό νερό εναποθέτει άλατα στα τοιχώματα του υδροφορέα με αποτέλεσμα να μεγαλώνει ο χρόνος και η δυσκολία αποκατάστασής του. Με την άντληση θαλασσινού νερού από έναν υδροφορέα ουσιαστικά τερματίζουμε την λειτουργία του καθώς το νερό αυτό είναι επιβλαβές για την χλωρίδα, την πανίδα και τις ανθρώπινες εγκαταστάσεις. Έτσι ο υδροφορέας δεν έχει πλέον χρησιμότητα. [8]



Σχ 3.1 Υφαλμύριση σε ελεύθερο υδροφορέα [8]

Στο παραπάνω σχήμα έχουμε την αναπαράσταση της υφαλμύρινσης ενός ελεύθερου υδροφορέα από θαλασσινό νερό. Παρατηρούμε το θαλασσινό νερό να κινείται κάτω από το γλυκό. Αυτό εν αντιθέσει λόγω υδραυλικής κλίσης ρέει προς τη θάλασσα αναστέλλοντας την κίνηση του θαλασσινού να καταλάβει όλο τον υδροφορέα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Με τη μόνιμη κατεύθυνση της υδραυλικής κλίσης προς τη θάλασσα λόγω του εμπλουτισμού από τις βροχοπτώσεις δημιουργείται η ισορροπία που παρατηρούμε. Ο μαθηματικός τύπος που προσεγγίζει την οριακή διεπιφάνεια είναι η σχέση Ghyben - Herzberg:

$$\xi = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f \approx 40h_f, \text{ όπου}$$

ξ η θέση της διεπιφάνειας κάτω από τη στάθμη της θάλασσας

h_f το υδραυλικό ύψος του γλυκού νερού πάνω από τη στάθμη της θάλασσας

ρ_f η πυκνότητα του γλυκού νερού (1g/cm^3)

ρ_s η πυκνότητα του θαλασσινού νερού (περίπου $1,025\text{g/cm}^3$).

Το συμπέρασμα από τη σχέση Ghyben – Herzberg είναι ότι η διεπιφάνεια κατεβαίνει 40 μέτρα κάτω για κάθε μέτρο υδραυλικού ύψους του νερού πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Ο λόγος 40:1 που προκύπτει φανερώνει την ύπαρξη θαλασσινού νερού αρκετά μακριά από την παραλία σε παραθαλάσσιους υδροφορείς με αυξημένη άντληση όπου το υδραυλικό ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας είναι σχετικά μικρό.

Βέβαια η σχέση Ghyben – Herzberg είναι ένας πολύ απλουστευμένος τύπος καθώς δεν λαμβάνει υπόψη την έννοια της δυναμικής κίνησης της υπόγειας ροής. Επίσης δεν περιλαμβάνει εξισώσεις συμμεταφοράς και διασποράς οπότε είναι αδύνατο να προσδιορίσουμε τη μεταφορά μάζας του άλατος. Πάντως αν η μεταβατική ζώνη είναι αρκετά στενή, υπάρχει περίπτωση η σχέση Ghyben – Herzberg να προσδιορίζει επαρκώς την κατάσταση.

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι για να αντιμετωπίσουμε την υφαλμύριση. Ο προφανέστερος είναι να ελέγξουμε τους ρυθμούς άντλησης ώστε να μην υπερβαίνει τη φυσική αναπλήρωση. Με μελέτες βελτιστοποίησης μπορούμε να μεγιστοποιήσουμε την απόδοση ελαχιστοποιώντας παράλληλα την εισροή θαλασσινού νερού. Ένας άλλος τρόπος είναι ο εμπλουτισμός του υδροφορέα με φυσικά επιφανειακά ύδατα ή επεξεργασμένα λύματα ώστε να δημιουργηθεί ένα υδάτινο τείχος που θα αντικαθιστά το αντλούμενο και θα απωθεί το

θαλασσινό νερό. Θα μπορούσε ακόμη να αντληθεί το ίδιο το θαλασσινό νερό από την περιοχή υφαλμύρισης με την προοπτική να χρησιμοποιηθεί κάπου αλλού. Μια εναλλακτική μέθοδος είναι να αντλείται νερό και από τα δυο στρώματα με σκοπό την αποφυγή δημιουργίας του κώνου της υφαλμύρισης. Επίσης μια λύση ακόμη είναι η χρήση οριζόντιων πηγαδιών που θα αντλούν από το λεπτό στρώμα γλυκού νερού λίγο πάνω από το μέτωπο της υφαλμύρισης. Τέλος μπορούν να χτιστούν ακόμα και φράγματα και άλλου είδους εμπόδια σε σημεία διαφυγής του γλυκού νερού. [8]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

«Μοντέλα κίνησης υπογείων υδάτων »

4.1 Εισαγωγή

Με τον όρο ‘μοντέλο’ εννοούμε ένα τέχνασμα το οποίο αντιπροσωπεύει μία προσέγγιση της κατάστασης του πεδίου. Ένα μοντέλο μπορεί να είναι φυσικό, όταν προσομοιώνει την υπόγεια ροή άμεσα ή μαθηματικό όταν προσομοιώνει την υπόγεια ροή έμμεσα με τη χρήση θεμελιωδών εξισώσεων μέσω των οποίων αντιπροσωπεύουν τη φυσική διαδικασία η οποία λαμβάνει χώρα στο σύστημα, σε συνδυασμό με άλλες εξισώσεις για να περιγράψουν τα υδραυλικά ύψη ή τις παροχές κατά μήκος των ορίων του μοντέλου (οριακές συνθήκες). Για προβλήματα που εξαρτώνται από το χρόνο, οι εξισώσεις που περιγράφουν την αρχική κατάσταση για τα υδραυλικά ύψη του συστήματος είναι εξίσου απαραίτητες (αρχικές συνθήκες). Ένα μαθηματικό μοντέλο μπορεί να επιλυθεί είτε αναλυτικά είτε αριθμητικά και στις δύο περιπτώσεις όμως η επίλυση επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών.[3]

4.2 Εξισώσεις και μαθηματικές μέθοδοι

Τα συστήματα υπόγειας ροής προσεγγίζονται από δυο διαφορετικές έννοιες, αυτή του υδροφορέα και αυτή του συστήματος ροής.

4.2.1 Έννοια υδροφορέα

Η πρώτη προσέγγιση βασίζεται στην ιδέα του περιορισμένου (confined) και μη περιορισμένου ελεύθερου υδροφορέα (unconfined). Χρησιμοποιείται κυρίως για την ανάλυση της ροής στα πηγάδια άντλησης και αποτελεί τη βάση για αρκετές αναλυτικές λύσεις περιλαμβάνοντας και αυτές των Thiem, Theis και Jacob. Η προσέγγιση υδροφορέα προσομοιώνει δισδιάστατη και οριζόντια ροή τόσο για περιορισμένο όσο και ελεύθερο υδροφορέα. Εάν υπάρχει διαρροή μπορεί να προσομοιωθεί θεωρώντας προσέγγιση τρισδιάστατης ροής δια της οποίας η κάθετη ροή μέσα στον υδροφορέα θα αντιπροσωπεύει τον όρο της διαρροής που προσθέτει ή αφαιρεί νερό από τον υδροφορέα. Το ποσό της διαρροής εξαρτάται από την εγκάρσια υδραυλική μεταβολή του αδιαπέραστου στρώματος, από το πάχος και από την υδραυλική αγωγιμότητα. Η γενική μορφή της βασικής μαθηματικής εξίσωσης είναι:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} - R + L, \text{ όπου } L = -K'_z \frac{h_{\text{πηγής}} - h}{b'} \quad (4.1)$$

Με h το υδραυλικό ύψος

T_x, T_y τις συνιστώσες του συντελεστή μεταβιβασιμότητας στους άξονες x, y

S το συντελεστή αποθηκευτικότητας

R ένα όρο πηγής/δεξαμενής πάντα θετικό σε περίπτωση εμπλουτισμού

L τη διαρροή διαμέσου του αδιαπέρατου στρώματος

K'_z η υδραυλική αγωγιμότητα του αδιαπέρατου στρώματος

b' το πάχος του αδιαπέρατου στρώματος

$h_{\text{πηγής}}$ το υψόμετρο της πηγής

Η παραπάνω εξίσωση αφορά περιορισμένο υδροφορέα και οι όροι που βρίσκονται στο αριστερό μέλος αφορούν την οριζόντια ροή διαμέσου του. Η εφαρμογή της σε ελεύθερο υδροφορέα ακολουθεί τις παραδοχές Dupuit, σύμφωνα με τις οποίες οι γραμμές ροής είναι οριζόντιες, οι ισοδυναμικές γραμμές κάθετες και η οριζόντια υδραυλική κλίση είναι ίδια με την κλίση της ελεύθερης επιφάνειας. [3]

4.2.2 Έννοια συστήματος ροής

Σ' αυτή τη προσέγγιση δεν είναι άμεσα ενδιαφερόμενη η αναγνώριση των υδροφορέων και των αδιαπέρατων στρωμάτων αυτή καθ' αυτή, αλλά η κατασκευή της τρισδιάστατης κατανομής των υδραυλικών υψών, των υδραυλικών αγωγιμοτήτων και των αποθηκευτικών ιδιοτήτων σε οποιοδήποτε σημείο του συστήματος. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει κάθετη και οριζόντια ροή του συστήματος και επιτρέπει τη θεραπεία του σε δισδιάστατο ή τρισδιάστατο προφίλ. Μια γενική μορφή της θεμελιώδους εξίσωσης είναι η:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^* \quad (4.2)$$

όπου K_x, K_y, K_z οι συντελεστές της υδραυλικής αγωγιμότητας σε κάθε άξονα

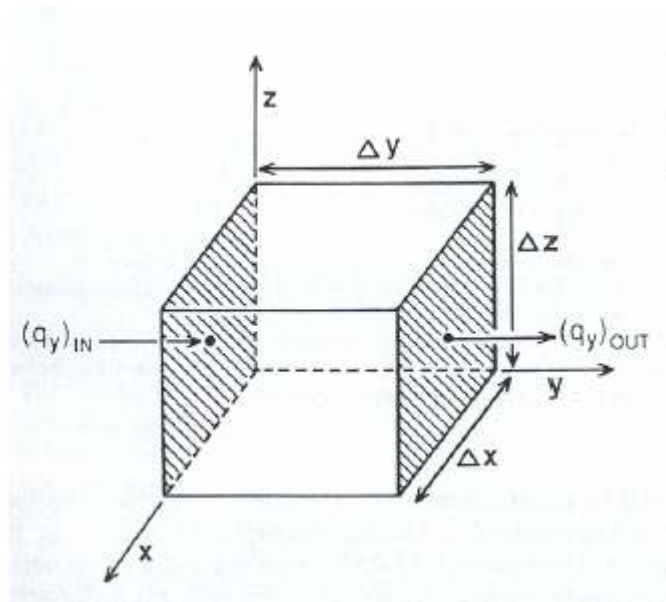
S_s η ειδική αποθηκευτικότητα

R^* ένας θετικός όρος που αντιπροσωπεύει τον όγκο του νερού που εισρέει στο σύστημα ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα και ανά μονάδα χρόνου.

Η εξίσωση αυτή προκύπτει από το συνδυασμό ισοζυγίου μάζας νερού και το νόμο του Darcy. Έτσι χρησιμοποιείται ένας κύβος πορώδους υλικού αρκετά μεγάλος ώστε να θεωρείται αντιπροσωπευτικός του πορώδους μέσου, αλλά και αρκετά μικρός ώστε η μεταβολή του υδραυλικού ύψους μέσα σε αυτόν να είναι σχετικά μικρή. Αυτός ο κύβος είναι γνωστός ως αντιπροσωπευτικός στοιχειώδης όγκος. Ο όγκος του κύβου ισοδυναμεί με το γινόμενο $\Delta x \Delta y \Delta z$ και η ροή του νερού εκφράζεται με το ρυθμό εκφόρτωσης q όπου q είναι το διάνυσμα το οποίο μπορεί να εκφραστεί ως άθροισμα τριών συστατικών με τη βοήθεια των μοναδιαίων διανυσμάτων.

$$q = q_x i_x + q_y i_y + q_z i_z$$

όπου i_x, i_y, i_z τα μοναδιαία διανύσματα κατά μήκος των αξόνων x, y, z αντίστοιχα.



Σχ 4.1 Αντιπροσωπευτικός στοιχειώδης όγκος [3]

Χρησιμοποιώντας την Αρχή Διατήρησης της μάζας έχουμε:

$$\textbf{Εκροή - Εισροή = Μεταβολή αποθηκευτικότητας}$$

Θεωρώντας ροή στον άξονα y, η εισροή στον παραπάνω κύβο κατά το μέτωπο $\Delta x \Delta z$ ισοδυναμεί με $(q_y)_{IN}$ και η εκροή με $(q_y)_{OUT}$. Άρα η διαφορά ογκομετρικού ρυθμού εκροής με το ρυθμό εισροής για τον άξονα y θα είναι:

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

Άρα η μεταβολή του ρυθμού ροής διαμέσου του αντιπροσωπευτικού στοιχειώδους όγκου κατά μήκος του άξονα y ισούται με:

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

Ανάλογα μπορούμε να εκφράσουμε το ρυθμό της ροής και στους άξονες x και z οπότε ο συνολικός ρυθμός της ροής θα ισοδυναμεί με τη μεταβολή της αποθηκευτικότητας και θα είναι:

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \text{Μεταβολή} - \text{Αποθηκευτικότητας}$$

Οι μεταβολές της αποθηκευτικότητας ορίζονται από την ειδική αποθηκευτικότητα (S_s) η οποία καθορίζεται από τον όγκο του νερού που απελευθερώνεται ανά μονάδα αλλαγής του υδραυλικού ύψους h και ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα:

$$S_s = - \frac{\Delta V}{\Delta h \Delta x \Delta y \Delta z}$$

Ο νόμος του Darcy χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τη σχέση μεταξύ q, h. Στις 3 διαστάσεις θα έχουμε:

$$q_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad q_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y} \quad q_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

Στις εξισώσεις (4.1), (4.2) θεωρήθηκε ότι οι συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι παράλληλες με τους άξονες. Στην περίπτωση που δεν συμβαίνει αυτό, το διάνυσμα των υδραυλικών αγωγιμοτήτων θα είναι:

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix}$$

Για να απαλείψουμε την εξίσωση, όταν γνωρίζουμε τις τέσσερις διευθύνσεις, ορίζουμε ένα καθολικό σύστημα συντεταγμένων για όλη την περιοχή μελέτης και επιμέρους τοπικά συστήματα συντεταγμένων για κάθε κελί ή στοιχείο του πλέγματος. Στα επιμέρους συστήματα τα στοιχεία εκτός της κύριας διαγωνίου είναι μηδενικά. Με στροφή των συντεταγμένων όλης της περιοχής μελέτης είναι δυνατό να μετατραπούν εξισώσεις σχετικές με τα κύρια στοιχεία της υδραυλικής αγωγιμότητας στο τοπικό σύστημα αντίστοιχες με στοιχεία της υδραυλικής αγωγιμότητας στο καθολικό σύστημα. Έτσι απαλείφεται ο δεύτερος δείκτης στην (4.2).

Πρόβλημα αποτελεί κατά το φαινόμενο της υφαλμύρινσης η διαφορά πυκνότητας ανάμεσα στο γλυκό και το θαλασσινό νερό. Οι εξισώσεις (4.1), (4.2) προϋποθέτουν σταθερή πυκνότητα στο σύστημα οπότε σε ανάλογες περιπτώσεις και αν οι τιμές της πυκνότητας παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές, απαιτείται νέα εξίσωση και νέος αριθμητικός κώδικας.

4.3 Αριθμητικές μέθοδοι

Η επίλυση των εξισώσεων που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα υπόγειας ροής γίνεται κυρίως με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων οι πιο διαδεδομένες των οποίων είναι:

- Οι πεπερασμένες διαφορές
- Τα πεπερασμένα στοιχεία
- Οι ολοκληρωμένες πεπερασμένες διαφορές
- Η οριακή ολοκληρωματική μέθοδος
- Τα αναλυτικά στοιχεία

Από αυτές οι πιο διαδεδομένες είναι οι δύο πρώτες, οι πεπερασμένες διαφορές και τα πεπερασμένα στοιχεία ενώ οι υπόλοιπες σχετίζονται με νέες τεχνικές και δεν είναι συχνά εφαρμόσιμες. Καμιά τους δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως η επικρατέστερη ή αποδοτικότερη αλλά ανάλογα με το είδος του το κάθε πρόβλημα ταιριάζει σε κάποια από τις δυο. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι εύκολη τόσο στην κατανόηση όσο και στον προγραμματισμό. Γενικά απαιτούνται λίγα δεδομένα για την κατασκευή του πλέγματος και υπολογίζει μια τιμή για το υδραυλικό ύψος σε έναν κόμβο η οποία είναι η μέση τιμή σε όλο το τμήμα που περιβάλλει τον κόμβο αυτόν. Δεν υπολογίζει όμως την διακύμανση του υδραυλικού ύψους από έναν κόμβο σε έναν άλλο. Αντίθετα η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων προσεγγίζει καλύτερα ακανόνιστα σχήματα και όρια καθώς επίσης χειρίζεται καλύτερα τα 'έσωτερικά' όρια όπως ελαττωματικές ζώνες. Επιπλέον προσομοιώνει τα σημεία εμπλουτισμού και άντλησης όπως και τη μεταβαλλόμενη στάθμη του κινούμενου ύδατος πολύ καλύτερα. Ακόμη καθορίζει ακριβώς την τιμή του υδραυλικού ύψους σε έναν κόμβο και προσδιορίζει την διακύμανση του ανάμεσα σε δύο κόμβους με διαφορετικές τιμές.

Αν και είναι αποδεδειγμένο ότι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι μια ειδική περίπτωση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, διακρίνονται μεταξύ τους σε ένα σημείο. Η πρώτη υπολογίζει την τιμή του υδραυλικού ύψους σε κάθε κόμβο που θα είναι και το μέσο υδραυλικό ύψος του κελιού που περιτριγυρίζει τον κόμβο. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων καθορίζει με ακρίβεια τη διακύμανση του υδραυλικού ύψους σε ένα στοιχείο με χρήση παρεμβολής. Τα υδραυλικά ύψη υπολογίζονται για ευκολία στους κόμβους αλλά καθορίζονται παντού με χρήση βασικών συναρτήσεων. [3]

4.4 Εννοιολογικό μοντέλο και κατασκευή του πλέγματος

Το εννοιολογικό μοντέλο είναι μια γραφική αναπαράσταση του μελετηθέντος συστήματος υπόγειας ροής. Χρησιμοποιείται για να απλουστευθεί το πρόβλημα του πεδίου και να καταστεί δυνατή μια ευκολότερη ανάλυση του συστήματος. Κάτι τέτοιο είναι απαραίτητο καθώς η ανακατασκευή του πεδίου στο σύνολό του δεν θεωρείται πραγματοποιήσιμη. Η κατασκευή του θεμελιώδους μοντέλου χωρίζεται σε τρία στάδια:

i. Καθορισμός των υδροστρωματογραφικών μονάδων

Γενικές πληροφορίες από γεωλογικά και υδρογεωλογικά δεδομένα οδηγούν στις υδροστρωματικές μονάδες του μοντέλου οι οποίες βασίζονται στον καθορισμό των συστημάτων ροής κατά την κατασκευή του μοντέλου.

ii. Κατάστρωση του υδατικού ισοζυγίου

Οι πηγές του συστήματος, οι αναμενόμενες κατευθύνσεις ροής και τα σημεία εξόδου είναι βασικές παράμετροι που πρέπει να καθοριστούν στο μοντέλο για το υδατικό. Αυτό συγκεντρώνει την έκταση εισροών και εκροών και υπολογίζει τις αλλαγές στην αποθηκευτικότητα του συστήματος.

iii. Καθορισμός του συστήματος ροής

Είναι εξίσου απαραίτητο στάδιο καθώς εδώ αναπαρίστανται βασικά σημεία όπως η κίνηση και η ταχύτητα της ροής των υδάτων και η χημική σύστασή τους. Γεωχημικά στοιχεία που μπορούν να συμβάλλουν εδώ είναι οι συγκεντρώσεις των κυριότερων

κατιόντων (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+2}) και ανιόντων (SO_4^{-2} , HCO_3^- , Cl^-), η θερμοκρασία, το pH, βαρέα μέταλλα, ραδιενεργά ισότοπα και οργανικοί ρυπαντές. [3]

Ένα αριθμητικό μοντέλο αποτελείται από το πλέγμα, τους κόμβους, τα πεπερασμένα στοιχεία ή τα κελιά πεπερασμένων διαφορών. Το εννοιολογικό μοντέλο καθορίζει τον αριθμό των επιπέδων ενώ το πλέγμα πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένο με τις συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας στους 3 άξονες. Αν δεν είναι τότε θα πρέπει να προστεθούν και οι εκτός διαγωνίου όροι της.

Υπάρχουν δυο είδη πλεγμάτων πεπερασμένων διαφορών, τα στοιχειοκεντρικά (block-centered) και τα δικτυοκεντρικά (mesh-centered). Στα πρώτα οι οριακές συνθήκες ροής λαμβάνονται στα άκρα των τετραγώνων ενώ στα δεύτερα εφαρμόζονται σε κόμβο. Έχουμε ένα δείκτη για κάθε κόμβο που θα υποδεικνύει τη γραμμή, τη στήλη και το επίπεδο του κόμβου. Το πλέγμα θα πρέπει να είναι έτσι διαμορφωμένο ώστε να πέφτουν μέσα την περιοχή μελέτης όσο δυνατόν περισσότεροι κόμβοι. Επίσης είναι πολύ σημαντική η επιλεγμένη απόσταση ανάμεσα στους κόμβους. Οι αποστάσεις ανάμεσά τους πρέπει να είναι περίπου ίσες στις τρεις κατευθύνσεις (αν και μπορούν να μεταβάλλονται δίνοντας μεγαλύτερη ευχέρεια αλλά αυξάνοντας έτσι το εύρος του λάθους στη λύση) και η απόσταση ενός κόμβου από τον επόμενό του δεν πρέπει να είναι πάνω από 1,5 φορά μεγαλύτερη της απόστασης από τον προηγούμενό του.

Τα πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων δίνουν μεγαλύτερη ευχέρεια στον σχεδιασμό του πλέγματος. Το σχήμα των στοιχείων προσαρμόζεται κάθε φορά ανάλογα με τη συνάρτηση που χρησιμοποιούμε για να καθορίσουμε το υδραυλικό ύψος κάθε στοιχείου. Το αδύναμο σημείο των πλεγμάτων πεπερασμένων στοιχείων είναι ότι κάθε κόμβος και στοιχείο είναι άρρηκτα συνδεδεμένα μεταξύ τους και καταλαμβάνουν μια συγκεκριμένη θέση μέσα στο πλέγμα. Αριθμούμε τους κόμβους ξεκινώντας από τον κοντινότερο στο κύριο πρόβλημα από πάνω προς τα κάτω και από αριστερά προς τα δεξιά. Η μέθοδος αυτή επεξεργάζεται ξεχωριστά κάθε στοιχείο και στη συνέχεια συναρμολογεί τις εξισώσεις κάθε στοιχείου σε έναν μαθηματικό πίνακα. Κατά το σχεδιασμό ενός τέτοιου πλέγματος για ισοτροπικά υλικά θα πρέπει οι διαστάσεις των στοιχείων να είναι σχεδόν ίσες μεταξύ τους. Ανεβαίνοντας σταδιακά, για ανισοτροπικά υλικά, η αναλογία της μεγαλύτερης προς τη μικρότερη διάσταση να μην υπερβαίνει το 5. [3]

4.5 Οριακές συνθήκες

Με τον όρο οριακές συνθήκες εννοούμε μαθηματικές εξισώσεις, οι οποίες καθορίζουν την εξαρτημένη μεταβλητή (υδραυλικό ύψος) ή την παράγωγο της εξαρτημένης μεταβλητής στα όρια του κύριου προβλήματος που εξετάζεται. Τα όρια μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, τα φυσικά και τα υδραυλικά ή υδρογεωλογικά όρια. Τα φυσικά όρια μπορούν να είναι κάποια αδιαπέρατα στρώματα στο υπέδαφος ή μεγάλες επιφανειακές υδατικές μάζες. Τα υδραυλικά όρια είναι κυρίως υδάτινα στρώματα με ξεχωριστές εντάσεις ροής.

Τα υδρογεωλογικά όρια αντιπροσωπεύονται από τους παρακάτω τύπους μαθηματικών συνθηκών: [3]

Πρώτο Είδος: Συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους, στις οποίες το υδραυλικό ύψος είναι δεδομένο (συνθήκες Dirichlet).

Δεύτερο Είδος: Συνθήκες σταθερής ροής, στις οποίες η ροή είναι δεδομένη (συνθήκες Neumann).

Τρίτο Είδος: Οριακές συνθήκες ροής εξαρτημένες από το υδραυλικό ύψος, στις οποίες υπολογίζεται η ροή κατά μήκος των ορίων από μια δεδομένη τιμή του υδραυλικού ύψους.

Όποτε είναι εφικτό τα φυσικά όρια προτιμώνται των υδραυλικών επειδή είναι σταθερά στοιχεία του συστήματος ροής. Είναι όρια με μικρή υδραυλική κλίση ή αδιαπέρατα πετρώματα ή στρώματα με μικρότερη υδραυλική αγωγιμότητα κατά δυο τάξεις μεγέθους από αυτή των στρωμάτων με οριζόντια ροή. Αν είναι ανέφικτη η χρήση φυσικών ορίων, χρησιμοποιούνται τοπικά διαχωρίσματα υπόγειου ύδατος. Στην περίπτωση που ούτε αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν, καταφεύγουμε στην χρήση υδραυλικών ορίων που προκύπτουν από πληροφορίες σχετικά με τη διαμόρφωση του συστήματος ροής. [3]

Κατά την προσομοίωση των ορίων, σε πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων και δικτυοκεντρικά πλέγματα, οι κόμβοι πρέπει πάντα να συμπίπτουν με τα όρια ενώ σε στοιχειοκεντρικά πλέγματα τα καθορισμένα υδραυλικά ύψη τοποθετούνται πάνω στους κόμβους και οι συνθήκες της ροής έξω από αυτούς.

Για οριακές συνθήκες πρώτου είδους έχουμε καθορισμένο υδραυλικό ύψος και η προσομοίωση γίνεται δίνοντας στο υδραυλικό ύψος στους κατάλληλους κόμβους δεδομένες τιμές. Όταν το όριο είναι ποτάμι, το υδραυλικό ύψος κατά μήκος αυτού ποικίλει χωρικά, ενώ όταν είναι λίμνη ή άλλο σώμα που περιέχει αποθέματα τότε επικρατούν σταθερές συνθήκες.

Οι συνθήκες καθορισμένου ύψους είναι απλούστερες και πιο εύχρηστες, ωστόσο σε συγκεκριμένες περιπτώσεις όπως συστήματα με σταθερή ροή προτιμώνται οι οριακές συνθήκες δεύτερου είδους δηλαδή καθορισμένης ροής. Αυτές χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη ροή νερού από πηγές, την υπόγεια ροή και τη διαρροή από και προς υπόγεια πετρώματα. Σε μοντέλα πεπερασμένων διαφορών τα όρια καθορισμένης ροής χρησιμοποιούνται για να προσομοιώσουν πηγάδια άντλησης ή εμπλουτισμού με συγκεκριμένο ρυθμό άντλησης, ενώ στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων εισάγουμε τη ροή ανάμεσα σε δυο κόμβους και το μοντέλο την προσαρμόζει.

Για οριακές συνθήκες τρίτου είδους η ροή εξαρτάται από τη διαφορά της τιμής του υδραυλικού ύψους στη μία πλευρά του ορίου και της άλλης τιμής που υπολογίζει το μοντέλο στην άλλη πλευρά του ορίου. Η διαφορά στα μοντέλα των πεπερασμένων διαφορών και των πεπερασμένων στοιχείων βρίσκεται στο ότι στα μεν πρώτα υπολογίζεται η ροή για κάθε κελί, στα δε δεύτερα για κάθε κόμβο. Η διαρροή από ή προς ένα ποτάμι, λίμνη ή αποθηκευτικό σώμα μπορεί να προσομοιωθεί με οριακές συνθήκες τρίτου είδους όπου η ροή δίνεται από τη σχέση:

$$L = \frac{Q_L}{A} = \frac{K_z'}{b'} (h_{source} - h)$$

όπου Q_L η ογκομετρική παροχή και A η επιφάνεια του κελιού όπου γίνεται η διαρροή, h_{source} το υδραυλικό ύψος στην πηγή (λίμνη ή ποτάμι), h η τιμή του υδραυλικού ύψους πολύ κοντά στην πηγή, K_z' η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα της κοινής επιφάνειας και b' το πάχος της.

[3]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

«Περιγραφή Λογισμικού Argus One και Μοντέλου PTC»

5.1 Κύριες Εξισώσεις

Το πρόγραμμα **PTC** χρησιμοποιεί το ακόλουθο σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων για να αντιπροσωπεύσει τη ροή υπόγειων υδάτων που περιγράφεται από το υδραυλικό ύψος, x ,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + Q = 0 \quad (5.1)$$

τις συνιστώσες της ταχύτητας,

$$V_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}, \quad V_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}, \quad V_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (5.2)$$

και τη μεταφορά μολυσματικών παραγόντων που περιγράφεται από τη συγκέντρωση, c ,

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] - \left[V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\ & + Q(c^w - c) - \theta [1 + E(c)] \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0 \end{aligned} \quad (5.3)$$

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

h είναι το υδραυλικό ύψος [L]

K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} οι συνιστώσες υδραυλικής αγωγιμότητας στους άξονες x , y , z [LT^{-1}]

S η ειδική αποθηκευτικότητα [L^{-1}]

ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι ορίζονται στη συνέχεια.

Αυτές οι εξισώσεις προέρχονται από την αρχή διατήρησης της μάζας και το Νόμο του Darcy.

Για να επιλύσουμε αυτές τις εξισώσεις, αρχικά βρίσκουμε τα υδραυλικά ύψη, h , από την (5.1), στη συνέχεια υπολογίζουμε τις ταχύτητες Darcy από την (5.2) και τελικά από την (5.3) βρίσκουμε τη συγκέντρωση c . [4]

5.2 Επίλυση του αλγόριθμου PTC

Η επίλυση του συστήματος των εξισώσεων (5.1) - (5.3) για τα σύνθετα φυσικά συστήματα απαιτεί γενικά την εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων. Σε πολύπλοκα συστήματα, ο υπολογιστικός φόρτος που απαιτείται για την αριθμητική διακριτοποίηση τέτοιων τρισδιάστατων εξισώσεων είναι μεγάλος. Το **PTC** υιοθετεί έναν αλγόριθμο για τις πλήρως τρισδιάστατες εξισώσεις που μειώνει το υπολογιστικό φορτίο σημαντικά.

Ο αλγόριθμος περιλαμβάνει διαχωρισμό της περιοχής σε σχετικά παράλληλα οριζόντια στρώματα. Σε κάθε στρώμα χρησιμοποιείται αποκωδικοποίηση πεπερασμένων στοιχείων επιτρέποντας τον ακριβή προσδιορισμό των ανώμαλων περιοχών. Τα στρώματα είναι συνδεδεμένα κάθετα με διακριτοποίηση πεπερασμένων διαφορών. Αυτό το υβρίδιο που συνδυάζει μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων και διαφορών επιτρέπει την χρήση της διαχωριστικής διαδικασίας. Κατά την κάθε επανάληψη σε δεδομένο χρονικό διάστημα, όλοι οι υπολογισμοί χωρίζονται σε δυο βήματα. Στο πρώτο βήμα όλες οι οριζόντιες διακριτοποιήσεις πεπερασμένων στοιχείων επιλύονται ανεξάρτητα η μια από την άλλη. Στο δεύτερο στάδιο, λύνονται οι κάθετες εξισώσεις που συνδέουν τα στρώματα. [4]

5.3 Τρισδιάστατη Υπόγεια Ροή

5.3.1 Κύρια Εξίσωση

Το **PTC** καθορίζει τα χαρακτηριστικά ροής ενός συστήματος υπόγειων υδάτων με την επίλυση του υδραυλικού ύψους μέσω της ακόλουθης μερικής διαφορικής εξίσωσης

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} \\ + \sum_{i=1}^r Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i) = 0 \end{aligned} \quad (5.4)$$

όπου,

Q_i ο όρος πηγής/ καταβόθρας στην τοποθεσία i [$L^3 T^{-1}$] (π.χ. στις αντλίες, οι θετικές τιμές δείχνουν έγχυση),

$\delta(\)$ η Dirac delta συνάρτηση,

r ο αριθμός των σημείων πηγών/καταβόθρων.

Για ευκολία, ο τελευταίος όρος της (5.4) θεωρείται ως Q . Η κύρια εξίσωση (5.4) λύνεται αριθμητικά από το **PTC** χρησιμοποιώντας μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων και διαφορών.

5.3.2 Εφαρμογή της Μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων

Το διαχωριστικό σχέδιο που χρησιμοποιείται από το **PTC** για να επιλύσει τη (5.4) περιέχει τον προσδιορισμό των όρων της περιλαμβάνοντας παραγώγους x και y χρησιμοποιώντας μια μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Τα πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιούνται ευρέως στο οριζόντιο επίπεδο.

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων υποθέτει ότι υπάρχει ένα άπειρο σύνολο λειτουργιών που θα αντιπροσωπεύσει ακριβώς τη λύση στη μερική διαφορική εξίσωση περιγράφοντας τη ροή υπόγειων υδάτων.

Μια πεπερασμένη κατά προσέγγιση μορφή της σειράς είναι

$$h(x, y, z, t) \sim \underline{h}(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^N h_i(z, t) w_i(x, y) \quad (5.5)$$

όπου

h είναι το υδραυλικό ύψος [L],

\underline{h} μια σειρά προσέγγισης του h [L],

h_i ένας ακαθόριστος συντελεστής [L],

w_i μια βασική ή παρεμβολική συνάρτηση (αδιάστατη),

N ο αριθμός κόμβων στο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων.

Η σειρά προσέγγισης (5.5) παρέχει μια ακριβή αναπαράσταση όταν το N τείνει στο άπειρο (το \underline{h} πλησιάζει στο h). Με μια προσεκτική επιλογή της βασικής συνάρτησης w_i , οι απροσδιόριστοι συντελεστές h_i γίνονται οι τιμές υδραυλικού ύψους στους κόμβους με συντεταγμένες (x, y, z) . Κλειδί για την υπολογιστική αποδοτικότητα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων είναι η χρήση των τμηματικά συνεχών βασικών συναρτήσεων οι όποιες είναι διάφορες του μηδενός γύρω από ένα μόνο μικρό τμήμα της συνολικής περιοχής. Ενώ πολλοί διαφορετικοί τύποι βασικών συναρτήσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν, το **PTC** χρησιμοποιεί τμηματικά γραμμικές βασικές συναρτήσεις μεταξύ κοντινών κόμβων πεπερασμένων στοιχείων.

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων προχωρά με τη σημείωση ότι, αν και ο διαφορικός όρος L (π.χ. εξίσωση 5.4) στο h είναι ίσος με μηδέν, όταν βρίσκεται στην προσεγγιστική συνάρτηση παρουσιάζεται λάθος. Στη μαθηματική σημείωση, ξαναγράφουμε τη (5.4)

$$L(h) = 0 \quad (5.6)$$

$$\text{Όταν } L(\underline{h}) = R \quad (5.7)$$

όπου R είναι το υπόλοιπο.

Για να λύσουμε τη (5.5) χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένων-στοιχείων προσπαθούμε να ελαχιστοποιήσουμε το υπόλοιπο R . Το καταφέρνουμε θεωρώντας πρώτα ένα πλήρες σύνολο συναρτήσεων w_j . Εάν ορίσουμε το υπόλοιπο R ορθογωνικό σε όλες τις πιθανές τιμές του w_j ουσιαστικά το μηδενίζουμε κι έτσι βρίσκουμε τη λύση της (5.5). Θα μπορούσαμε αλλιώς να πούμε ότι

$$L(\underline{h}) = L(h) \text{ όταν } R=0 \quad (5.8)$$

Το **PTC** χρησιμοποιεί το ίδιο σύνολο συναρτήσεων για τις βαρυτικές συναρτήσεις w_j όπως και για τις βασικές w_i , αυτή η διαδικασία ονομάζεται μέθοδος Galerkin. Ανάλογα, τα w_i και w_j χρησιμοποιούνται εναλλακτικά στο υπόλοιπο αυτής της εργασίας.

Δυστυχώς, η περίπτωση που περιγράφει η (5.8) μπορεί να επιτευχθεί μόνο όταν το N τείνει στο άπειρο και οι υπολογιστές μπορούν να δουλέψουν μόνο με πεπερασμένα σύνολα αριθμών. Αναγκάζομαστε, επομένως, να εξετάσουμε ένα πεπερασμένο υποσύνολο των τιμών w_i , $i = 1; 2; \dots; N$, κάτι που καθιστά τη λύση μας μάλλον προσεγγιστική παρά ακριβή. Ανακαλώντας τον ορισμό των ορθογώνιων συναρτήσεων, αυτοί οι όροι N μπορούν να εκφραστούν σαν

$$\int_{\Omega} L(\underline{h}) w_i dx dy = 0 \quad i=1,2,\dots,N \quad (5.9)$$

όπου η περιοχή ολοκλήρωσης καλύπτει όλη την οριζόντια διατομή της περιοχής ροής. Εισάγοντας τον ορισμό της (5.5) λαμβάνουμε, για κάθε συνάρτηση βαρύτητας w_i ,

$$\iint_{\Omega} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + Q \right] w_i dx dy = 0 \quad (5.10)$$

Ακολουθώντας τη συνήθη διαδικασία για την ολοκλήρωση στη δισδιάστατη περίπτωση, οι όροι x και y της εξίσωσης (5.10) μπορούν να ενσωματωθούν χρησιμοποιώντας το Θεώρημα του Green, έτσι

$$\begin{aligned} \iint_{\Omega} \left[K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial w_i}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\partial w_i}{\partial y} \right] dx dy - \int_{\sigma} \left[K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \ell_x + K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \ell_y \right] w_i d\sigma \\ - \iint_{\Omega} \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right] w_i dx dy + \iint_{\Omega} \left[\frac{\partial h}{\partial t} - Q \right] w_i dx dy = 0 \end{aligned} \quad (5.11)$$

όπου ℓ_x και ℓ_y είναι τα συνημίτονα διεύθυνσης μεταξύ του κανονικού ως προς το όριο της διατομής σ (το $d\sigma$ αναπαριστά ένα μικρό μήκος κατά μήκος αυτού του ορίου) και τα βέλη των συντεταγμένων x και y αντίστοιχα. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων για την διακριτοποίηση (5.4) τελειώνει με μια αντικατάσταση της (5.5) στην (5.11)

$$\begin{aligned} \iint_{\Omega} \left[K_{xx} \left(\sum_{j=1}^N h_j \frac{\partial w_j}{\partial x} \right) \frac{\partial w_i}{\partial x} + K_{yy} \left(\sum_{j=1}^N h_j \frac{\partial w_j}{\partial y} \right) \frac{\partial w_i}{\partial y} \right] dx dy \\ - \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial}{\partial z} \sum_{j=1}^N h_j w_j \right) w_i + S \frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_{j=1}^N h_j w_j \right) w_i - Q w_i \right] dx dy \\ - \int_{\sigma} \left[K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \ell_x + K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \ell_y \right] w_i d\sigma = 0 \end{aligned} \quad (5.12)$$

όπου $i = 1, 2, \dots, N$. Μια τυπική αντικατάσταση για τον τελευταίο όρο στην (5.12) δεν έγινε επειδή η ποσότητα στην παρένθεση, στην πραγματικότητα, είναι η ροή πέρα από το κάθετο

όριο σ της οριζόντιας περιοχής. Αυτός ο όρος αντιπροσωπεύει έτσι μια οριακή συνθήκη οριζόντιας ροής.

Στο οριζόντιο επίπεδο, σε δεδομένο χρονικό διάστημα, η διακριτοποίηση πεπερασμένων στοιχείων που συνοψίζεται στη (5.12) μας παρέχει N εξισώσεις για τους N αγνώστους συντελεστές (ύψη) που καθορίζονται στην (5.5). η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων βοήθησε στην μετατροπή των παραγώγων των αγνώστων υψών για τα x και y σε παραγώγους των γνωστών βασικών συναρτήσεων.

5.3.3 Εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών

Περνώντας στην σημείωση πινάκων, όπου τα έντονα κεφαλαία γράμματα αντιπροσωπεύουν τους τετραγωνικούς πίνακες και τα έντονα μικρά τα διανύσματα στηλών, ξαναγράφουμε (2.9) με μορφή πινάκων:

$$A\mathbf{h} + B\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t} - \mathbf{v} + \mathbf{f} = 0 \quad (5.13)$$

όπου \mathbf{A} και \mathbf{B} είναι $(N \times N)$ πίνακες και \mathbf{h} , $\partial \mathbf{h} / \partial t$, \mathbf{v} και \mathbf{f} διανύσματα στήλες μήκους N . Τα στοιχεία των \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{v} και \mathbf{f} είναι:

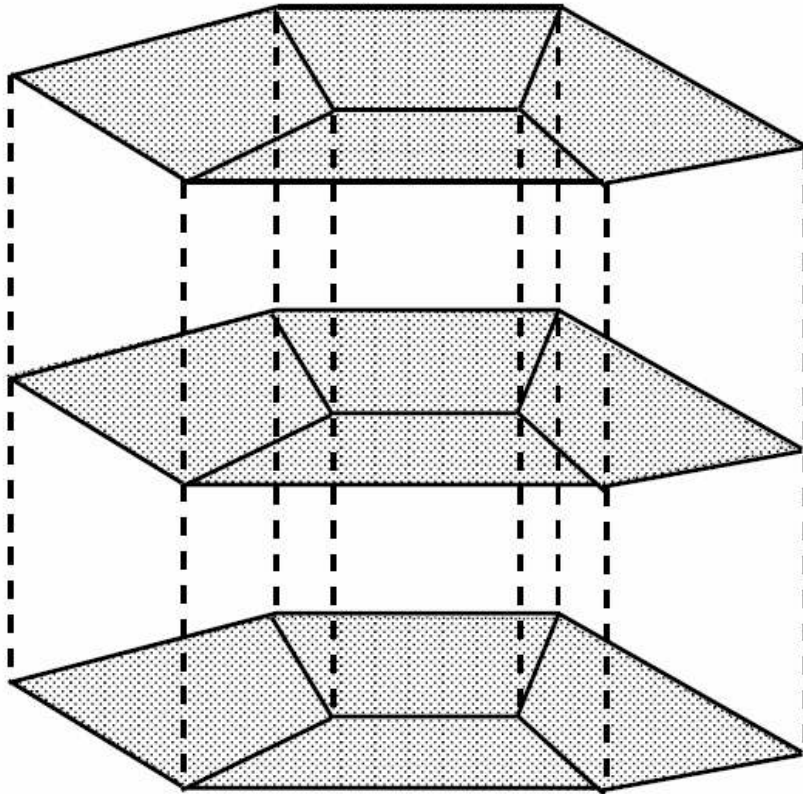
$$A_{ij} = \iint_{\Omega} \left[K_{xx} \frac{\partial w_i}{\partial x} \frac{\partial w_j}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial w_i}{\partial y} \frac{\partial w_j}{\partial y} \right] dx dy \quad (5.14a)$$

$$B_{ij} = \iint_{\Omega} S w_i w_j dx dy \quad (5.14b)$$

$$f_i = - \iint_{\Omega} Q w_i dx dy - \int_{\sigma} \left[K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} l_y \right] w_i d\sigma \quad (5.14c)$$

$$v_i = \sum_{j=1}^N \left[\iiint_{\Omega} \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h_j}{\partial z} \right) w_i w_j dx dy \right] \quad (5.14d)$$

όπου, όπως προείπαμε, το f έχει δεδομένες οριακές συνθήκες.



Σχ 5.1 Σχηματική απεικόνιση πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων στοιχισμένων κάθετα για τη δημιουργία της τρισδιάστατης διακριτοποίησης. [4]

5.4 Οριακές συνθήκες

Το PTC χρησιμοποιεί τρεις τύπους οριακών συνθηκών στην εξίσωση ροής. Οι τρεις τύποι είναι του Dirichlet (με σταθερό το υδραυλικό ύψος), του Neumann (με σταθερή τη ροή) και ένας τρίτος τύπος με διαρροή. Οι οριακές συνθήκες μπορούν να αλλάξουν από τον χρήστη κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης. Η προεπιλεγμένη οριακή συνθήκη για όλα τα όρια είναι η μηδενική ροή. Αυτό απαιτεί περιορισμένο υδροφορέα με αδιαπέρατο πυθμένα και πλευρές. Επιλέγοντας εναλλακτικές οριακές συνθήκες σε όλη την περιοχή, μπορούμε να περιγράψουμε διάφορες υδρολογικές συνθήκες.

5.4.1 Δεδομένο Ύψος

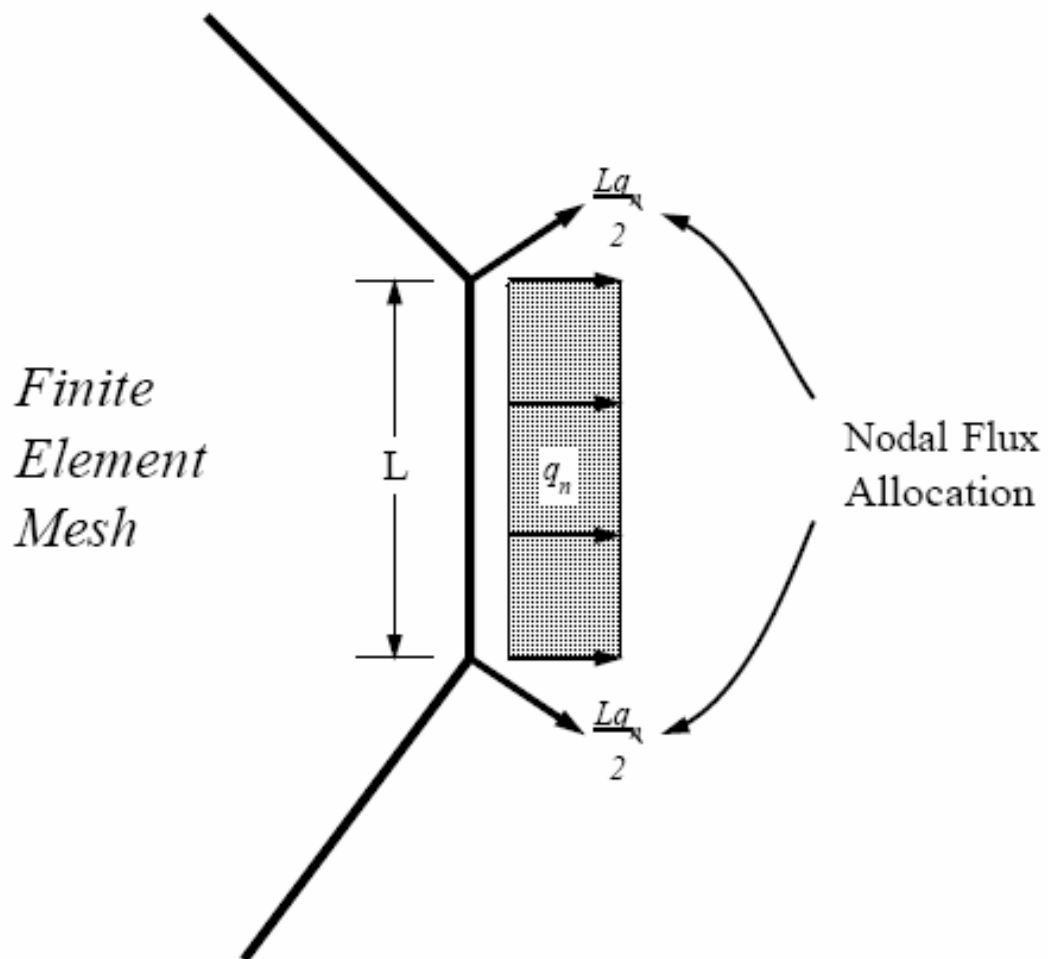
Τα όρια των υψών ξεχωρίζουν ορίζοντας κόμβους και τιμές υψών που ανταποκρίνονται σε αυτούς τους κόμβους. Ο κώδικας αυτόματα ξεχωρίζει τις σειρές και στήλες του πίνακα συντελεστών που σχετίζονται με αυτούς τους κόμβους. Εφόσον οι κόμβοι σταθερών υψών απαλείφονται έτσι αποτελεσματικά από την εξίσωση του πίνακα, μένουμε με $(N \times M - N_C)$ εξισώσεις με $(N \times M - N_C)$ αγνώστους, όπου N_C είναι ο συνολικός αριθμός κόμβων των ορίων των σταθερών υψών στην περιοχή ροής.

5.4.2 Δεδομένη Ροή

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων παρέχει έναν πολύ απλό τρόπο προσδιορισμού των οριακών συνθηκών ροής. Εφαρμόζοντάς την στο Θεώρημα του Greenm (εξίσωση 5.11) προκύπτει μια οριακή συνθήκη:

$$-\int_{\sigma} \left[K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} l_y \right] w_i d\sigma = -\int_{\sigma} q_n w_i d\sigma \quad (5.15)$$

όπου q_n είναι η κανονική ροή σε μια μοναδιαία περιοχή (μήκος X ύψος) του κατακόρυφου ορίου σ . Όταν η ροή q_n είναι σταθερή κατά μήκος της επιφάνειας ενός στοιχείου μήκους L , η ολοκλήρωση της εξίσωσης (5.15) δίνει την κομβική κατανομή που παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχ 5.2 Κομβική κατανομή της ροής q διαμέσου ενός στοιχείου μήκους L . Για γραμμικά στοιχεία, οι κόμβοι είναι ισοβαρείς. [4]

5.4.3 Τρίτος Τύπος

Οι οριακές συνθήκες διαρροής εισάγονται κάνοντας την ακόλουθη μετατροπή στην εξίσωση 5.14c:

$$Q = k_L(h_{j,L}^t - h_{j,k}^t) \quad (5.16)$$

όπου $h_{j,k}^t$ είναι το άγνωστο ύψος στον κόμβο j του στρώματος k σε χρόνο t , $h_{j,L}^t$ είναι το αντίστοιχο ύψος στο δεδομένο σημείο διαρροής και k_L είναι η αγωγιμότητα της διαρροής (υδραυλική αγωγιμότητα δια απόστασης). The conductance term is integrated over area and so implicitly represents a vertical leakage. Ωστόσο, με κατάλληλο ορισμό της σταθεράς k_L από τον χρήστη, οποιασδήποτε κατεύθυνσης διαρροή μπορεί να προσδιοριστεί. [4]

5.5 Τρισδιάστατη μεταφορά ρύπων

5.5.1 Κύριες Εξισώσεις

Η εξίσωση μεταφοράς (5.17) είναι:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + Q(c^w - c) \\ - \left(V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \theta[1 + E(c)] \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0. \end{aligned} \quad (5.17)$$

Οι όροι διασποράς στην (5.17) είναι:

$$\begin{aligned}
 D_{xx} &= (\alpha_L V_x^2 + \alpha_T V_y^2 + \alpha_V V_z^2)/V + D_M \\
 D_{yy} &= (\alpha_T V_x^2 + \alpha_L V_y^2 + \alpha_V V_z^2)/V + D_M \\
 D_{zz} &= (\alpha_V V_x^2 + \alpha_V V_y^2 + \alpha_L V_z^2)/V + D_M \\
 D_{yx} &= D_{xy} = (\alpha_L - \alpha_T) V_x V_y / V \\
 D_{yz} &= D_{zy} = (\alpha_L - \alpha_V) V_y V_z / V \\
 D_{zx} &= D_{xz} = (\alpha_L - \alpha_V) V_z V_x / V
 \end{aligned}
 \tag{5.18}$$

Και οι εναπομείναντες όροι θα είναι:

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

α_L , η διαμήκης διασπορά [L],

α_T , η οριζόντια εγκάρσια διασπορά [L],

α_V , η κάθετη εγκάρσια διασπορά [L],

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

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

θ , το πορώδες του υδροφορέα [αδιάστατο],

$E(c)$, η συνάρτηση που αναπαριστά τις ιδιότητες της χημικής προσρόφησης,

Q , η ισχύς (πηγής/καταβόθρας) της άντλησης [$1/T$] ($Q \equiv Q_i \delta(x-x_i) \delta(y-y_i) \delta(z-z_i)$),

Q_i , ο ρυθμός ογκομετρικής έγχυσης/εκβολής [L^3/T] στο σημείο (x_i, y_i, z_i) ,

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

$\delta()$, η Dirac delta συνάρτηση. [4]

Για όλες τις περιπτώσεις απομάκρυνσης από αντλία ($Q_i \leq 0$), συμπεραίνουμε ότι η συγκέντρωση του απομακρυνόμενου νερού c^w στην αντλία ισούται με τη συγκέντρωση του παρακείμενου περιβάλλοντος νερού c . Έτσι, σε όλες τις αντλίες αποφόρτισης, ο όρος $Q^*(c^w - c)$ της (5.17) μηδενίζεται. Για αυτό τον λόγο, ο κώδικας διατηρεί όλους τους όρους της (5.17)

που περιέχουν Q μόνο όταν η αντλία εκχύει ($Q_i > 0$), με τη συγκέντρωση c^w να αναπαριστά την συγκέντρωση του εκχυόμενου νερού.

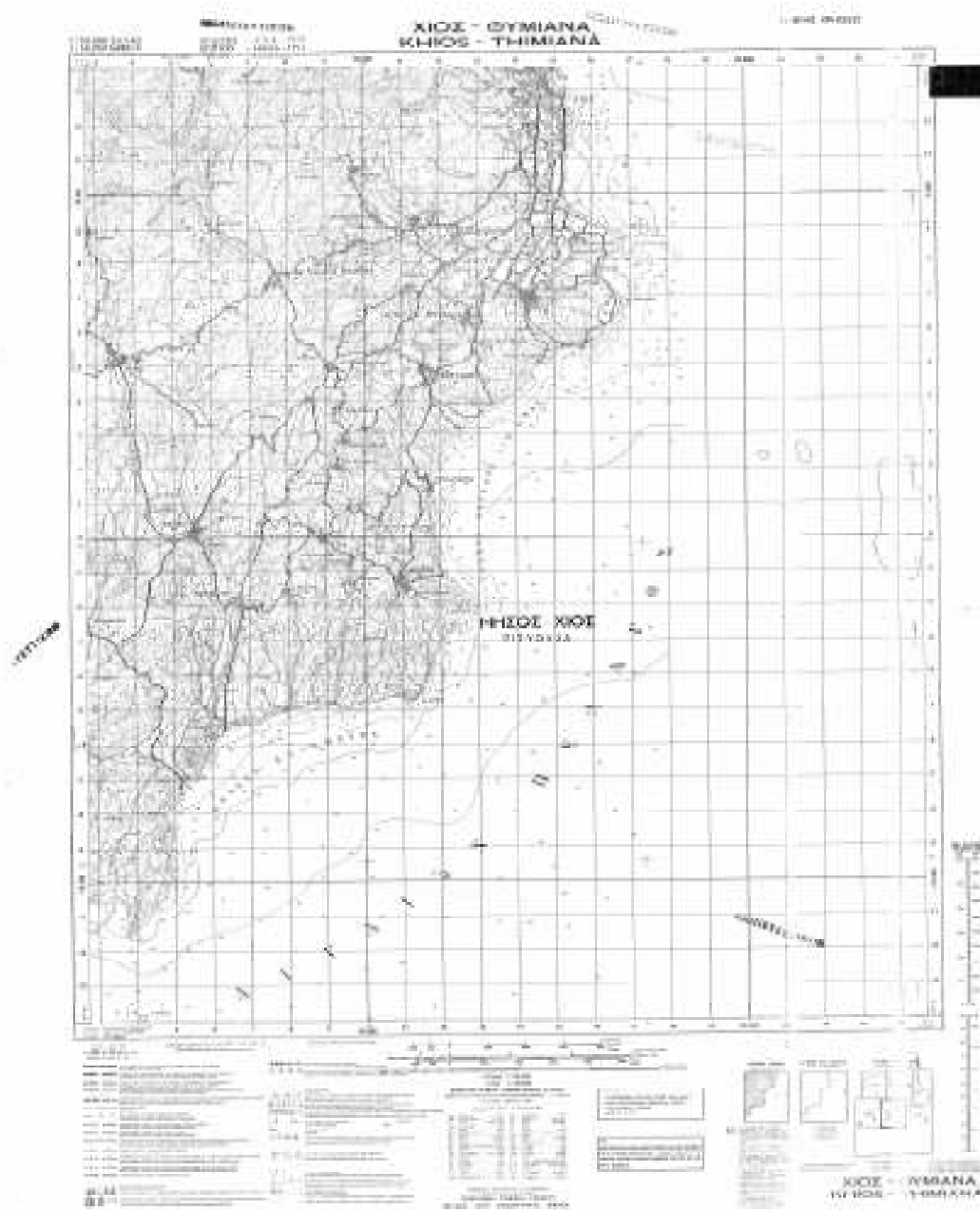
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

«Προετοιμασία Μοντέλου»

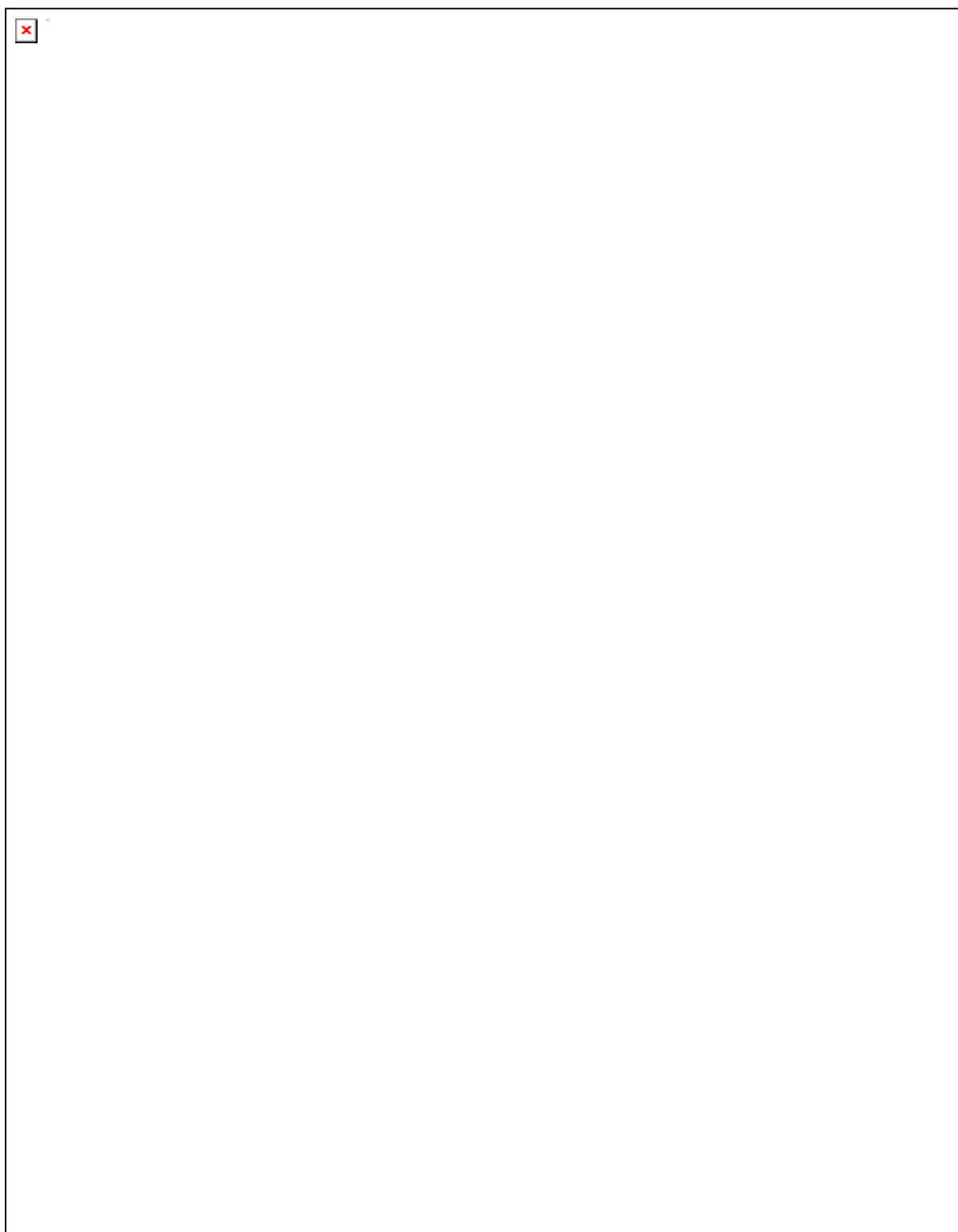
6.1 Εισαγωγή δεδομένων

6.1.1 Χάρτες

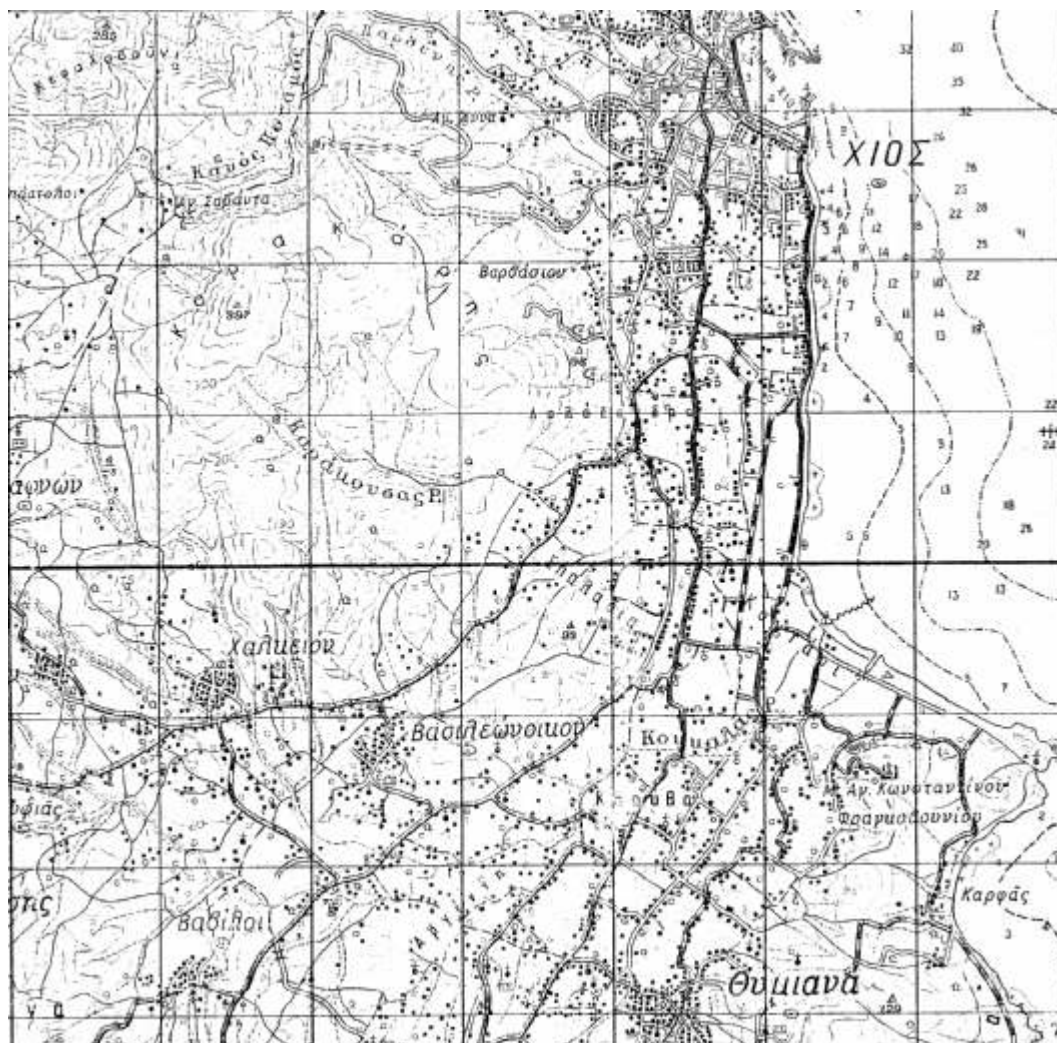
Εδώ ξεκινάμε εισάγοντας τους χάρτες στο PTC με την χρήση του λογισμικού ARGUS ONE. Χρησιμοποιούμε τμήματα από δυο χάρτες της περιοχής - έναν τοπογραφικό και έναν γεωλογικό- με τρόπο τέτοιο ώστε τα σημεία που αναπαρίστανται να απεικονίζονται στο ίδιο σημείο και στους δυο. Από τον τοπογραφικό χάρτη λαμβάνουμε στοιχεία για το ανάγλυφο της περιοχής ενώ από τον γεωλογικό παίρνουμε πληροφορίες για το είδος των πετρωμάτων που συναντώνται. Παρακάτω παρουσιάζονται ο τοπογραφικός και ο γεωλογικός χάρτης από τους οποίους επιλέξαμε την περιοχή μελέτης.



Σχ 6.1 Τοπογραφικός Χάρτης Νοτιοδυτικής Χίου []



Σχ 6.2 Γεωλογικός Χάρτης Νήσου Χίου []



Σχ 6.3 Τοπογραφικός Χάρτης περιοχής μελέτης



Σχ 6.4 Γεωλογικός Χάρτης περιοχής μελέτης

Με τη χρήση του γεωλογικού χάρτη και κάποιων τυπικών τιμών για τα υπάρχοντα πετρώματα μπορούμε να αντικατοπτρίσουμε την εικόνα της περιοχής. Έτσι για κάθε περιοχή και κάθε στρώμα εισάγουμε την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας και στις 3 διευθύνσεις (x, y, z) με βάση την αναλογία (x,x,0.1x).

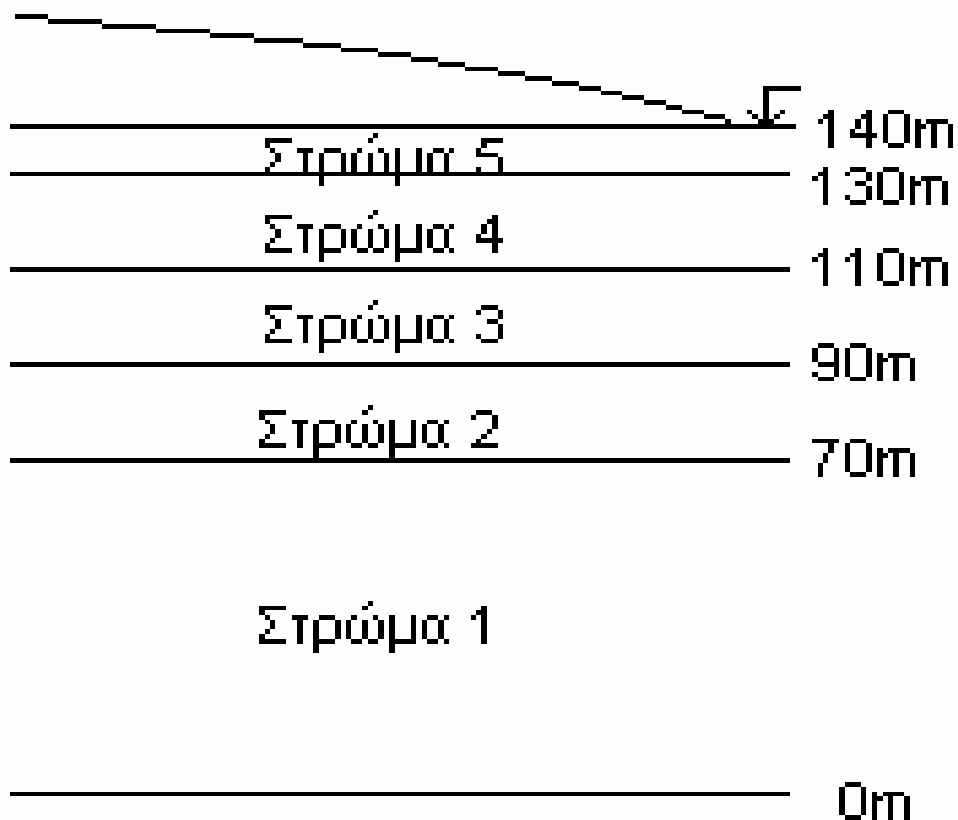
Τα πετρώματα αυτά και οι τιμές των υδραυλικών αγωγιμοτήτων που χρησιμοποιήθηκαν παρατίθενται παρακάτω:

Πέτρωμα	Υδραυλική Αγωγιμότητα (m/d)
Ασβεστόλιθος (T_R-m_j)	120
Αλουβιακές Αποθέσεις (Q_{al})	86,4
Ψαμμίτης (M_{s1})	5
Ασβεστολιθικές Προσμίξεις (T_R-m_1)	0,06
Ασβεστολιθικές Προσμίξεις (T_R-m_2)	0,05
Σιδηρούχος Ψαμμίτης (M_{ss})	10
Κλαστικά Πετρώματα (S-C)	0.005
Γενική Τιμή	10

Πίνακας 6.1 Είδη και Υδραυλικές αγωγιμότητες πετρωμάτων

6.1.2 Βασικά Δεδομένα

Στη συνέχεια ορίζουμε την περιοχή μελέτης πάνω στους χάρτες και εισάγουμε δεδομένα όπως την πυκνότητα και το σχήμα των πεπερασμένων στοιχείων (τριγωνικά), το είδος του υδροφορέα (ελεύθερος), στοιχεία υψομέτρου, υδραυλικής αγωγιμότητας και βροχοπτώσεων. Επίσης εισάγουμε τις αρχικές και τις οριακές συνθήκες και τις χρονικές περιόδους της προσομοίωσης (καλοκαίρι και χειμώνα). Ανάλογα με το βάθος στο οποίο φτάνει ο πυθμένας της κάθε γεώτρησης χωρίζουμε την περιοχή σε πέντε στρώματα-επίπεδα, ξεκινώντας από το χαμηλότερο και ανεβαίνοντας. Τα τέσσερα πρώτα στρώματα θα έχουν σταθερό πάχος και το Στρώμα 5 θα έχει υψόμετρο $140\text{m} + [\text{απόλυτο υψόμετρο σε κάθε περιοχή του ανάγλυφου}]$. Για το στρώμα αυτό εφαρμόζουμε και την επιλογή της παρεμβολής για να απεικονίζεται επακριβώς το ανάγλυφο. Θεωρούμε επίπεδο αναφοράς λίγο χαμηλότερα από το κατώτερο σημείο που φτάνει η βαθύτερη γεώτρηση δηλαδή τα 140m βάθος. Άρα στο επίπεδο της θάλασσας θα έχουμε υψόμετρο 140m. Σαν μονάδα χρόνου χρησιμοποιούμε την ημέρα (day, d) μήκους το μέτρο (meter, m).

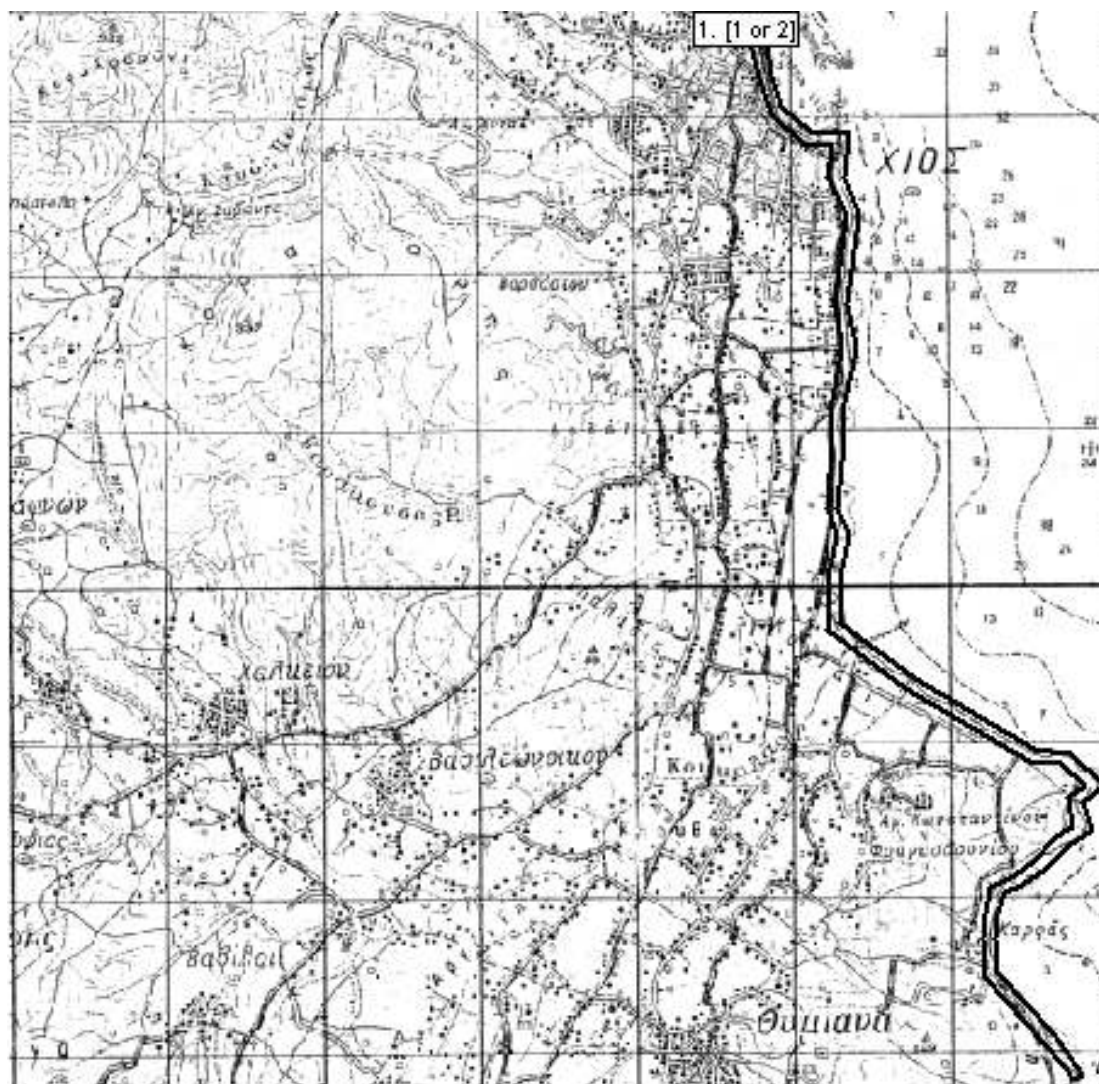


Σχ 6.5 Διαχωρισμός της περιοχής μελέτης σε στρώματα-επίπεδα

6.1.3 Αρχικές και Οριακές Συνθήκες

Αρχικές συνθήκες που εισάγουμε στο μοντέλο είναι οι ισοϋψείς καμπύλες που σχεδιάστηκαν με βάση τα στοιχεία του τοπογραφικού χάρτη. Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιούμε είναι πρώτου και δεύτερου είδους. Οι οριακές συνθήκες πρώτου είδους θεωρούνται αυτές όπου έχουμε σταθερό υδραυλικό ύψος ενώ οι οριακές συνθήκες δεύτερου είδους συναντώνται όπου έχουμε σταθερό ρυθμό ροής. Πρώτου είδους οριακή συνθήκη είναι η παράκτια γραμμή της περιοχής μελέτης όπου έχουμε σταθερό υδραυλικό ύψος 140m ενώ

δεύτερου είδους αποτελούν οι γεωτρήσεις (όπου ανάλογα με τη χρονική περίοδο οι ρυθμοί άντλησης είναι σταθεροί). Στην περιοχή γνωρίζουμε ότι λειτουργούν γεωτρήσεις άντλησης ύδατος που εισάγονται στο PTC ανάλογα με το στρώμα από το οποίο αντλούν νερό. Στη βιβλιογραφία (αρχείο του Τμήματος Υδροοικονομίας Χίου και στην Υδρογεωλογική μελέτη Ανατολικής και Κεντρικής Νήσου Χίου του Δρ. Παρασχούδη) υπάρχουν επαρκή στοιχεία για κάποιες από τις γεωτρήσεις της περιοχής τις οποίες και χρησιμοποιήσαμε. Στο Σχ.6.7 παρουσιάζονται οι ακριβείς θέσεις τους στον τοπογραφικό χάρτη και στο Σχ.6.8 οι τιμές τους και τα στρώματα από τα οποία αντλούν νερό. Στο Σχ.6.9 κάνουμε μια αντιπαραβολή των γεωτρήσεων με βάση το επίπεδο της θάλασσας για να είναι ευκολότερα αντιληπτό το βάθος της καθεμιάς. Για τη βροχόπτωση θέτουμε σαν τιμή της θερινής περιόδου 0 καθώς σύμφωνα με το κλίμα της περιοχής δεν βρέχει κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, ενώ για το χειμώνα χρησιμοποιούμε την τιμή που βρίσκουμε στη βιβλιογραφία ($668,15 \text{ mm/y} = 0.0037 \text{ m/d}$) (Παρασχούδης 1981). Για αποθηκευτικότητα δίνουμε σταθερή τιμή 0,0001 και για το πορώδες 0,2.

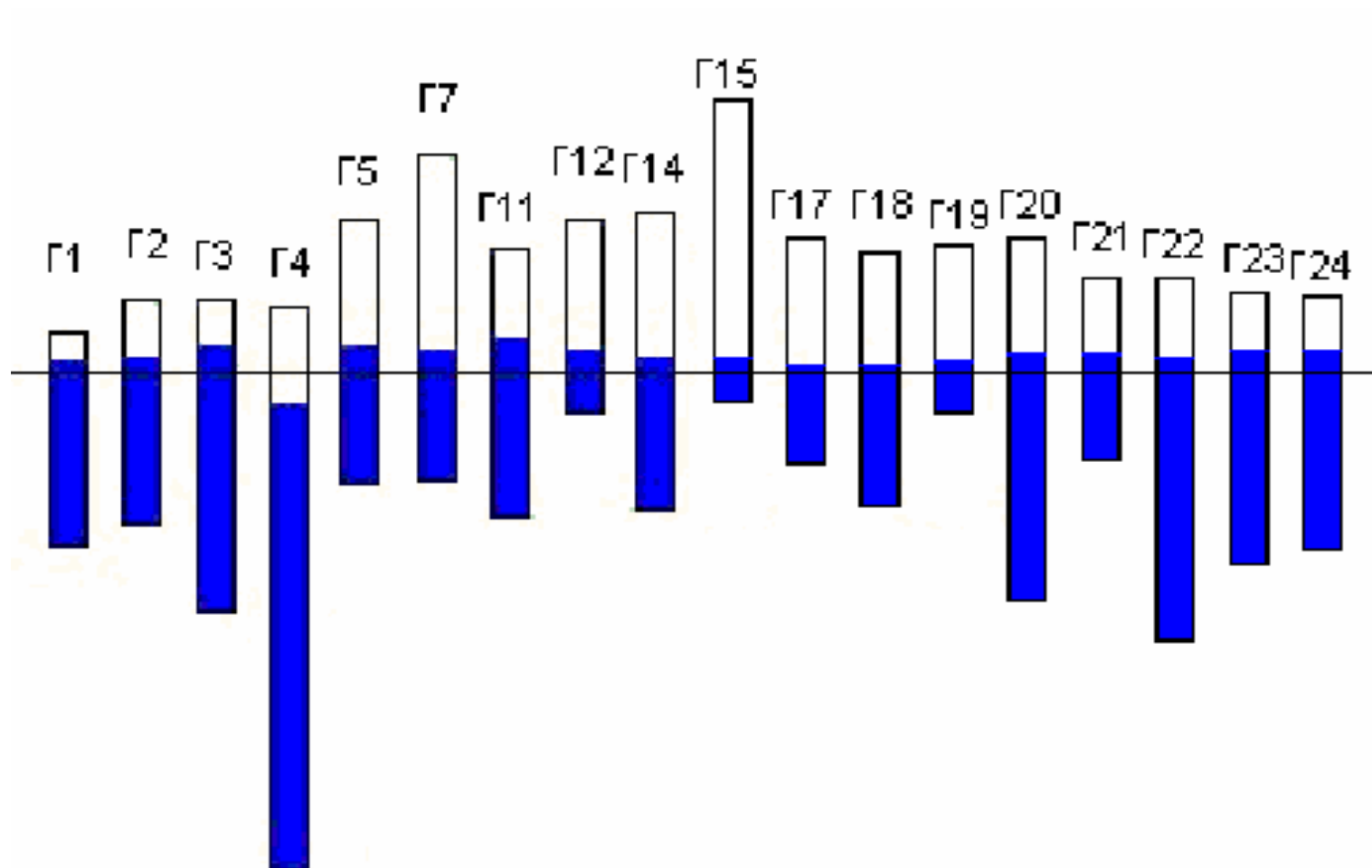


Σχ 6.6 Οριακή συνθήκη πρώτου είδους

A/A	ΟΝΟΜΑ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ	ΥΨΟΜΕΤΡΟ (m)	ΟΛΙΚΟ ΒΑΘΟΣ (m)	ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ (m)	ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΥΨΟΣ (m)	ΠΑΡΟΧΗ ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ (m3/day)	ΠΑΡΟΧΗ ΧΕΙΜΩΝΑ (m3/day)
Γ1	Γεώτρηση Παρθένη ΔΕΥΑΧ	11	59	8	143	-1440	-600
Γ2	Γεώτρηση Γούλια ΔΕΥΑΧ	20	62	16	144	-1440	-900
Γ3	Γεώτρηση Χέλίου ΔΕΥΑΧ	20	86	13	147	-1440	-900
Γ4	Γεώτρηση Ομάδας Βαρβασίου	18	155	27	131	-1000	0
Γ5	Γεώτρηση Γκιάλη- Τέπτερη	42	73	35	147	-900	0
Γ7	Γεώτρηση ΔΕΥΑΧ Κουτρουλόμυλου Παλιά	60	90	54	146	-1200	-600
Γ11	Γεώτρηση Χαλκούση	34	74	25	149	0	0
Γ12	Γεώτρηση Ομάδας Βασιλειώνοικου	42	53	36	146	-720	0
Γ14	Γεώτρηση Συνδέσμου Αγίου Γεωργίου	44	82	40	144	0	0
Γ15	Γεώτρηση ΔΕΥΑΚ Χαλκειούς	75	83	71	144	0	0
Γ17	Γεώτρηση Ομάδας Συριώδη	37	62	35	142	0	0
Γ18	Γεώτρηση Ένωσης Μαστιχοπαραγωγών Χίου	33	70	31	145	-1440	0
Γ19	Γεώτρηση ΔΕΥΑΚ Βαβίλων	35	46	33	142	0	0
Γ20	Γεώτρηση Μπουγδάνου	37	100	34	146	-1000	0
Γ21	Γεώτρηση Ομάδας Καρδαμάδας	26	50	21	145	0	0
Γ22	Γεώτρηση Βροντάδου Δήμου Ομηρούπολης	26	100	22	144	-1000	-400
Γ23	Γεώτρηση Ε.Γ.Σ. Χίου (πρώην ΕΒΕΚ)	22	75	16	146	-600	-250
Γ24	Γεώτρηση Πίττα - Ξυλά	21	70	15	146	-900	0

L1 (-140, -70)
L2 (-70, -50)
L3 (-50, -30)
L4 (-30, -10)
L5 (-10, 0)

Σχ 6.8 Στοιχεία Γεωτρήσεων



Σχ 6.9 Αντιπαράβολή Γεωτρήσεων με βάση το ύψος της επιφάνειας της θάλασσας

6.2 Βαθμονόμηση Μοντέλου

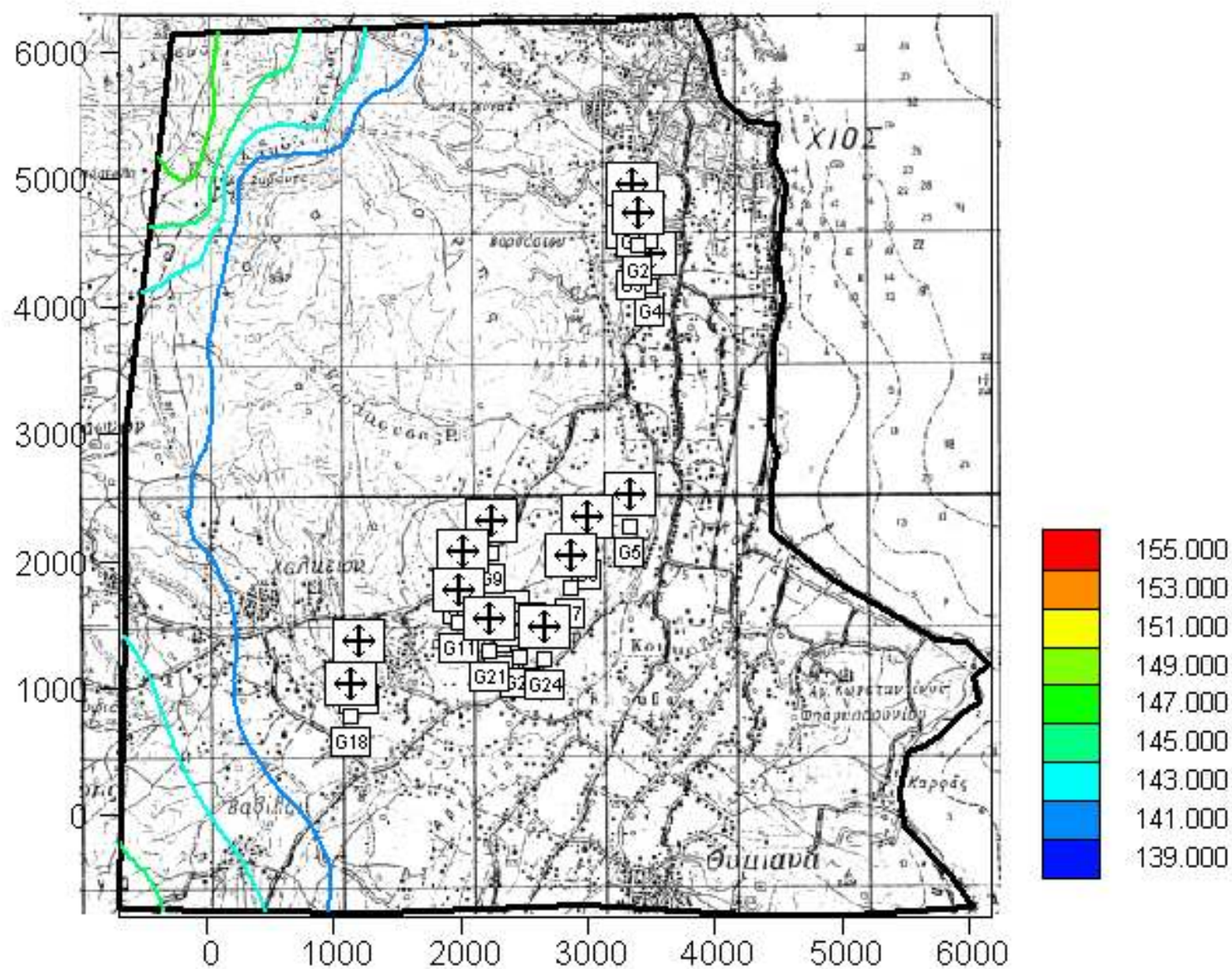
Αφού έχουμε εισαγάγει όλες τις παραμέτρους στο μοντέλο μας είμαστε έτοιμοι να περάσουμε στη βαθμονόμηση του. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη ούτως ώστε να γνωρίζουμε ότι βαδίζουμε στον σωστό δρόμο όσον αφορά τα αποτελέσματα που δίνει το μοντέλο. Οι τιμές που λαμβάνουμε από τη διεργασία της προσομοίωσης πρέπει να ανταποκρίνονται στις μετρήσεις πεδίου. Μετά από επίπονη διαδικασία λόγω απουσίας αρκετών παραμέτρων που θα βοηθούσαν στη δημιουργία μιας καλύτερης εικόνας της κατάστασης, καταφέραμε το μοντέλο μας να παρουσιάζει την πραγματικότητα με αρκετά ικανοποιητική ομοιότητα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

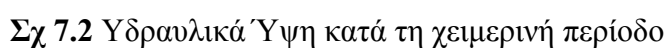
«Αποτελέσματα Μοντέλου»

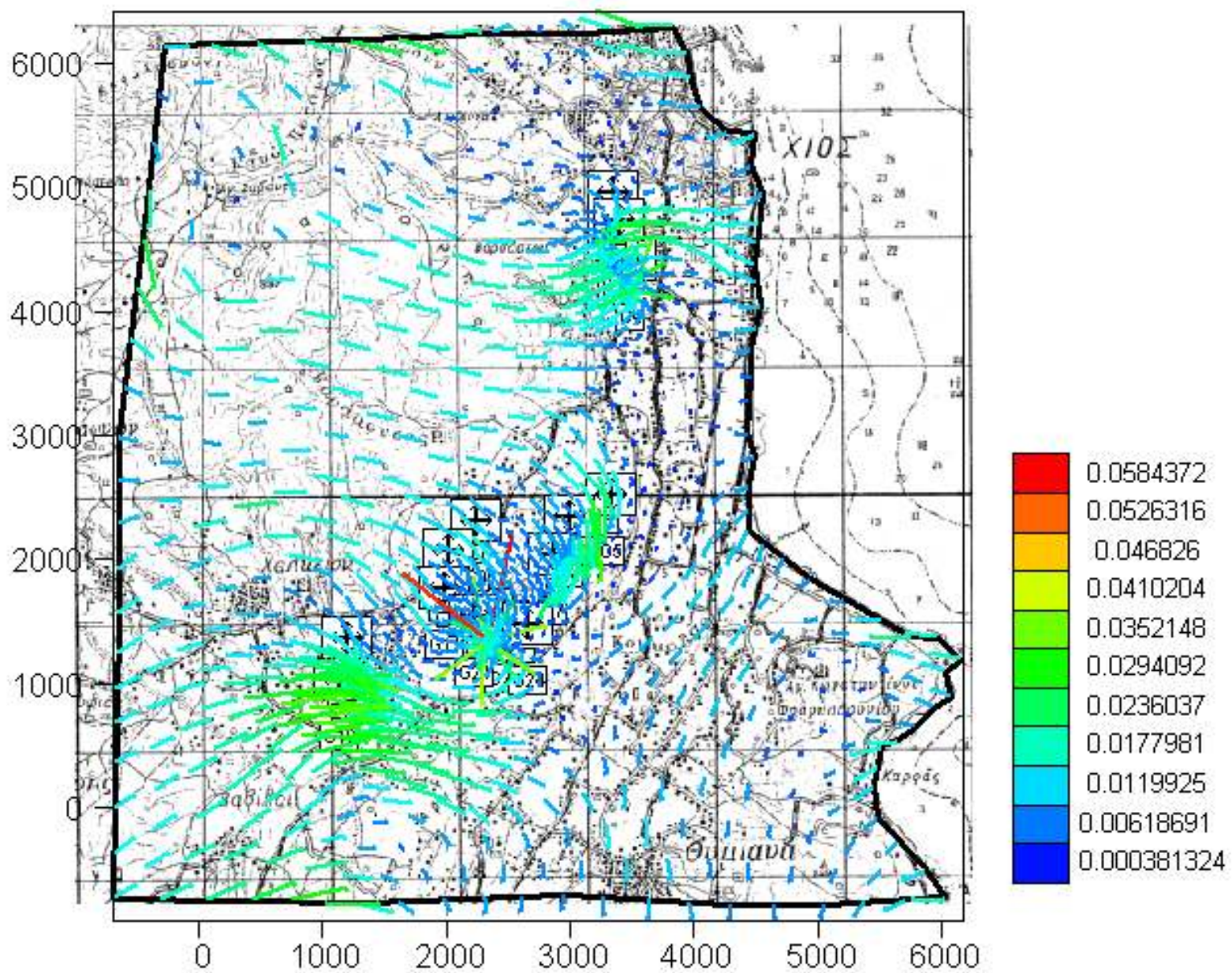
7.1 Σενάριο 1 (Πραγματική κατάσταση)

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα μας και το έτοιμο πλέον μοντέλο κάνουμε προσομοίωση ενός έτους της ροής των υπογείων υδάτων στην περιοχή μας. Διαιρέσαμε το έτος σε δυο περιόδους (θερινή, Μάιος – Οκτώβριος, και χειμερινή, Νοέμβριος – Απρίλιος). Παρακάτω παρατίθενται τα γραφήματα των υδραυλικών υψών και των ταχυτήτων των υδάτων για τη θερινή και τη χειμερινή περίοδο. Παρατηρούμε ότι τόσο το υδραυλικό ύψος αλλά και οι ταχύτητες ροής είναι αισθητά μεγαλύτερα κατά τη χειμερινή περίοδο από ό,τι τη θερινή. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται λόγω των βροχοπτώσεων αλλά και των μικρότερων τιμών των αντλήσεων κατά την περίοδο αυτή. Επίσης θα μπορούσαμε να παρατηρήσουμε ότι με το υδραυλικό ύψος του υφάλμυρου νερού να αναμένεται στα 143m, η ζώνη υφαλμύρισης είναι κατά τη θερινή περίοδο πολύ εκτεταμένη προς την ορεινή περιοχή ενώ το χειμώνα περιορίζεται στα παράλια. Από τα διαγράμματα των ταχυτήτων συμπεραίνουμε ότι για τη θερινή περίοδο οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται κοντά στις γεωτρήσεις ενώ το χειμώνα ακολουθούν ως επί το πλείστον την υδραυλική κλίση του εδάφους από τις ορεινότερες περιοχές προς τη θάλασσα. Η κατάσταση δείχνει να είναι δραματική κατά τους καλοκαιρινούς μήνες και ηπιότερη στο άλλο μισό του χρόνου.

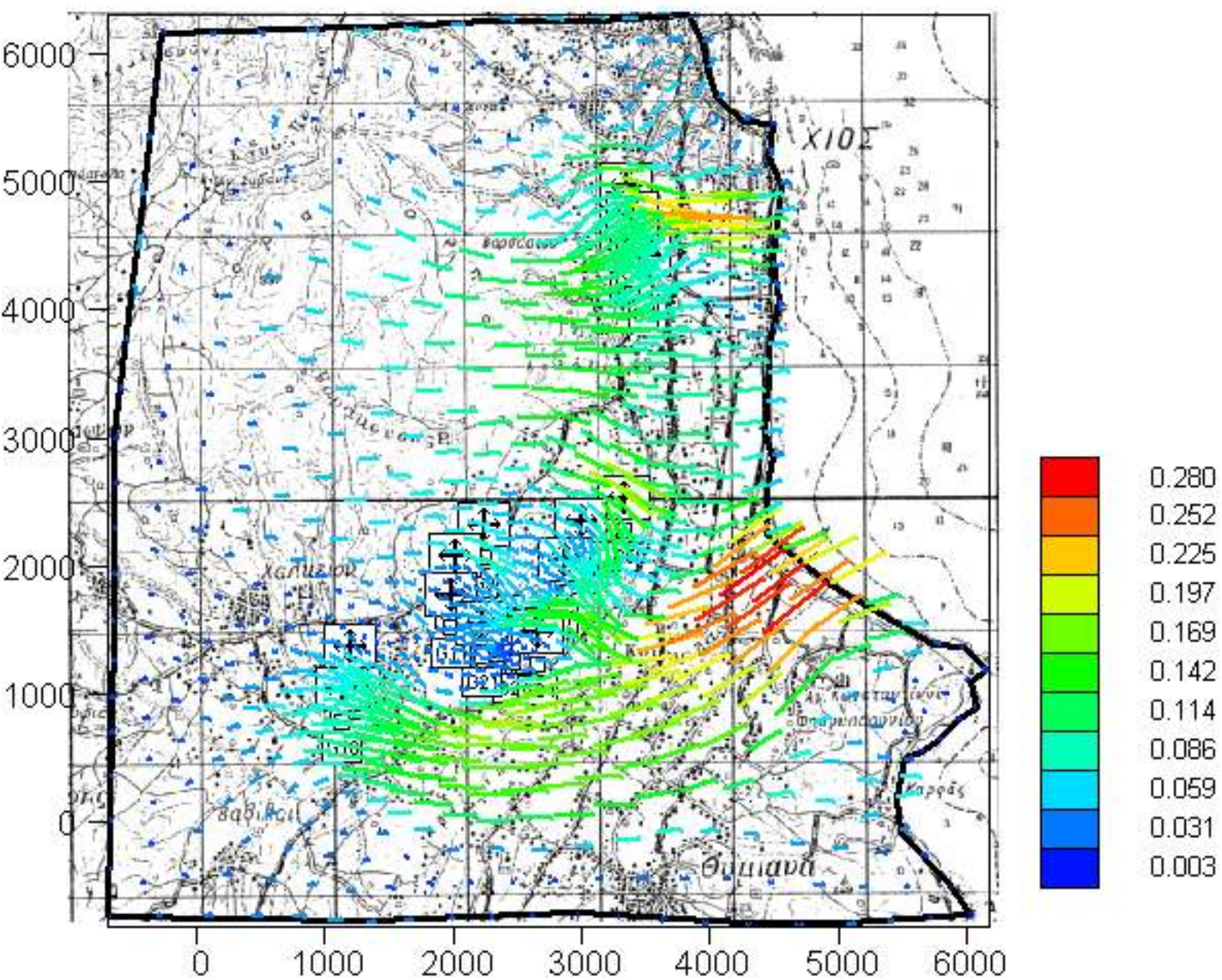


Σχ 7.1 Υδραυλικά Ύψη κατά τη θερινή περίοδο





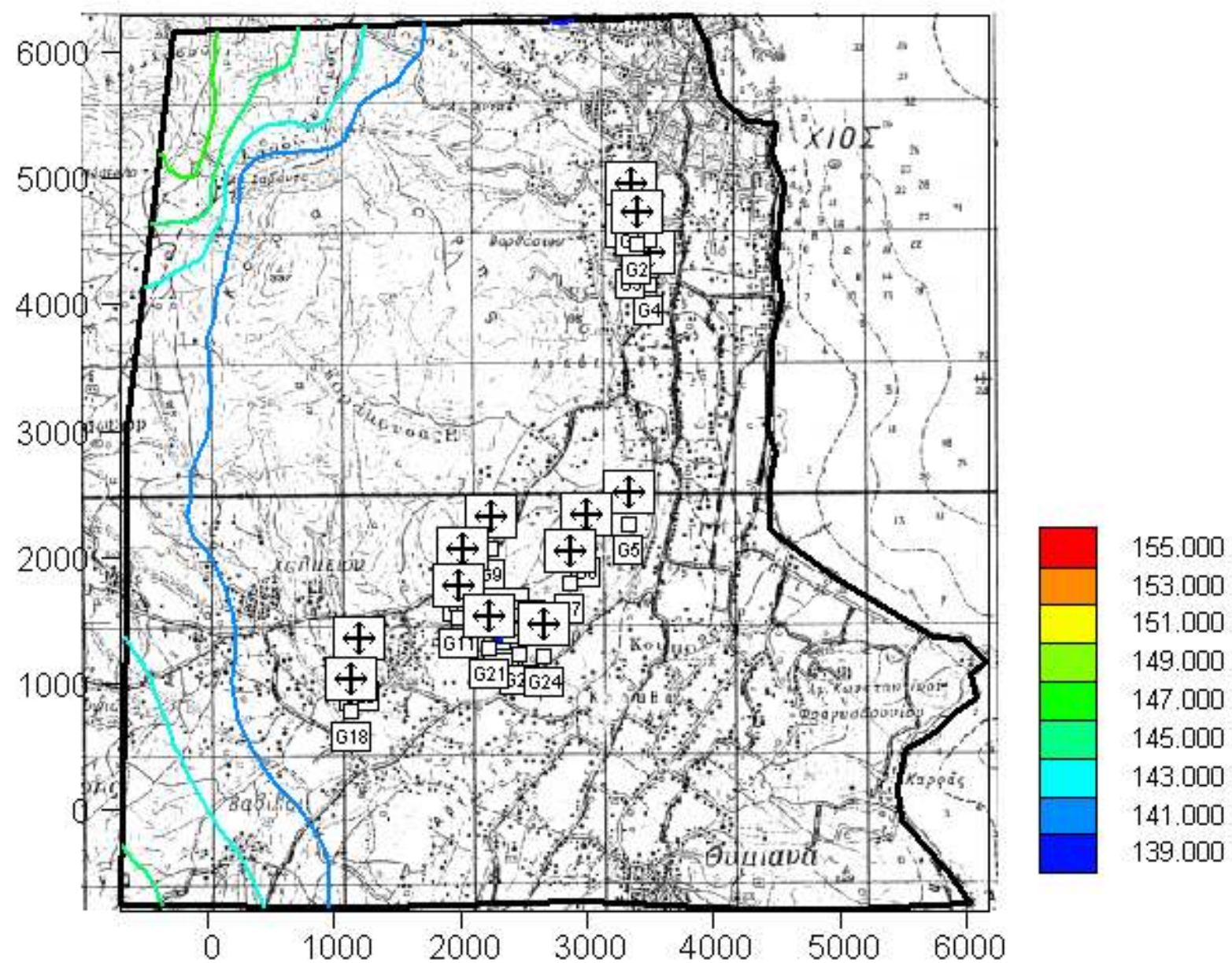
Σχ 7.3 Ταχύτητες ροής των υδάτων κατά τη θερινή περίοδο



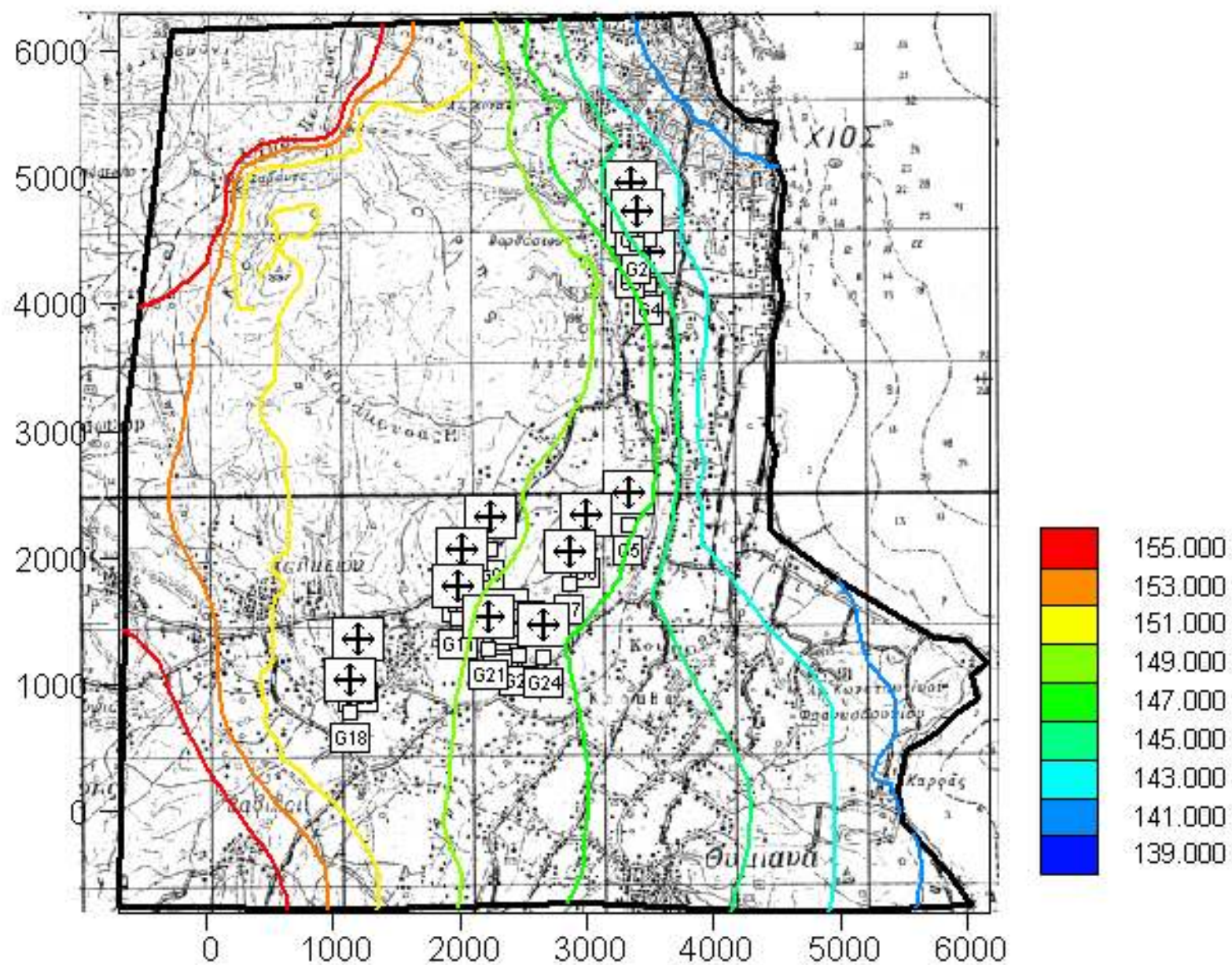
Σχ 7.4 Ταχύτητες ροής των υδάτων κατά τη χειμερινή περίοδο

7.2 Σενάριο 2

Στο συγκεκριμένο σενάριο μηδενίζουμε την εκροή του γλυκού νερού προς τη θάλασσα για τα πρώτα τρία στρώματα. Οι διαφορές σε σχέση με την πραγματική κατάσταση είναι ανεπαίσθητες όσον αφορά τα υδραυλικά ύψη και για τις δυο περιόδους. Υπάρχει βέβαια μια μικρή άνοδος του υδραυλικού ύψους τάξης για τη θερινή περίοδο και σαφώς μεγαλύτερη για τη χειμερινή. Ομοίως οι ταχύτητες ροής των υδάτων είναι ελαφρώς μεγαλύτερες από ότι στην πραγματικότητα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Η ζώνη υφαλμύρινσης μετατοπίζεται ελάχιστα προς τα παράλια.



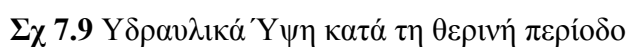
Σχ 7.5 Υδραυλικά Ύψη κατά τη θερινή περίοδο

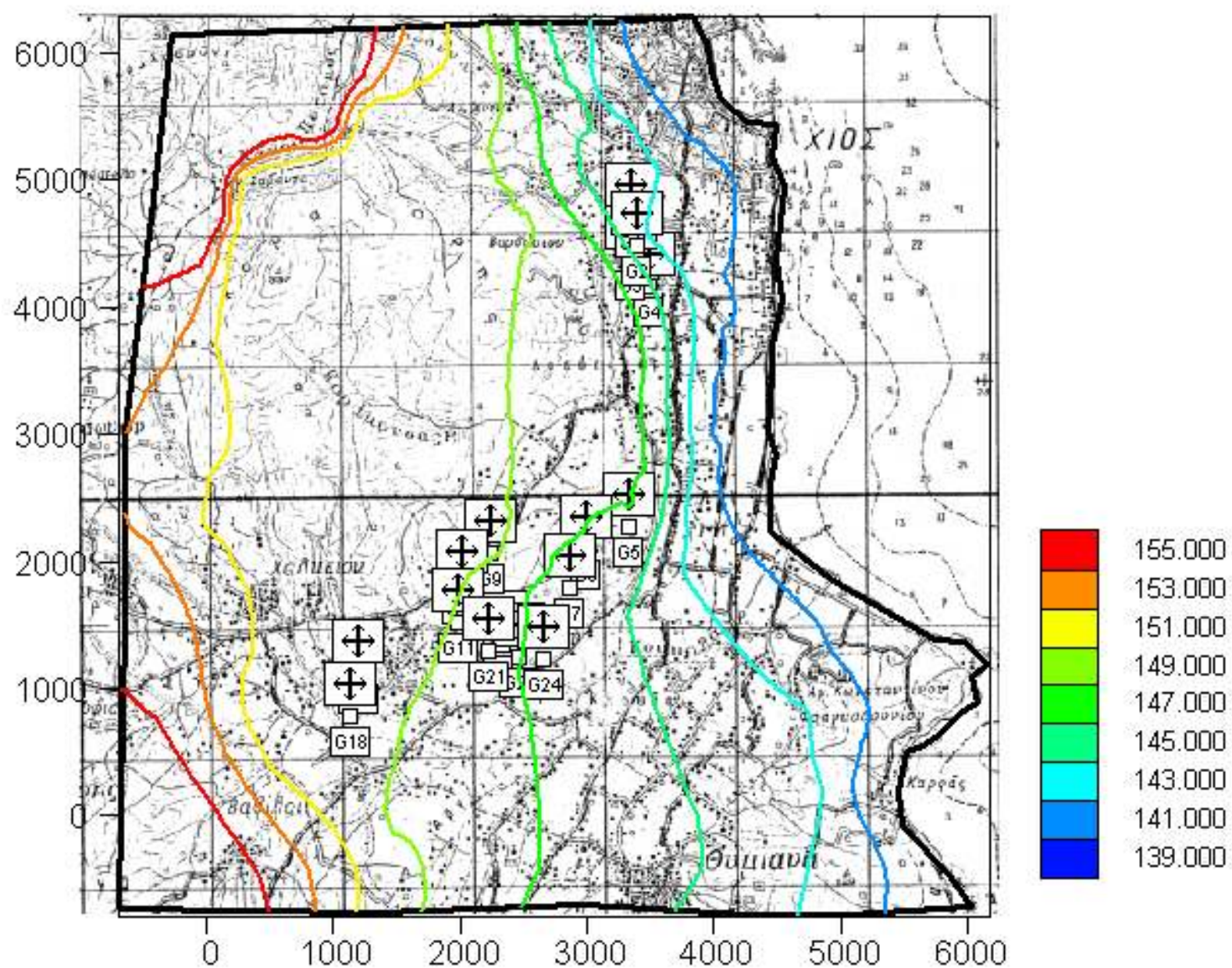


Σχ 7.6 Υδραυλικά Ύψη κατά τη χειμερινή περίοδο

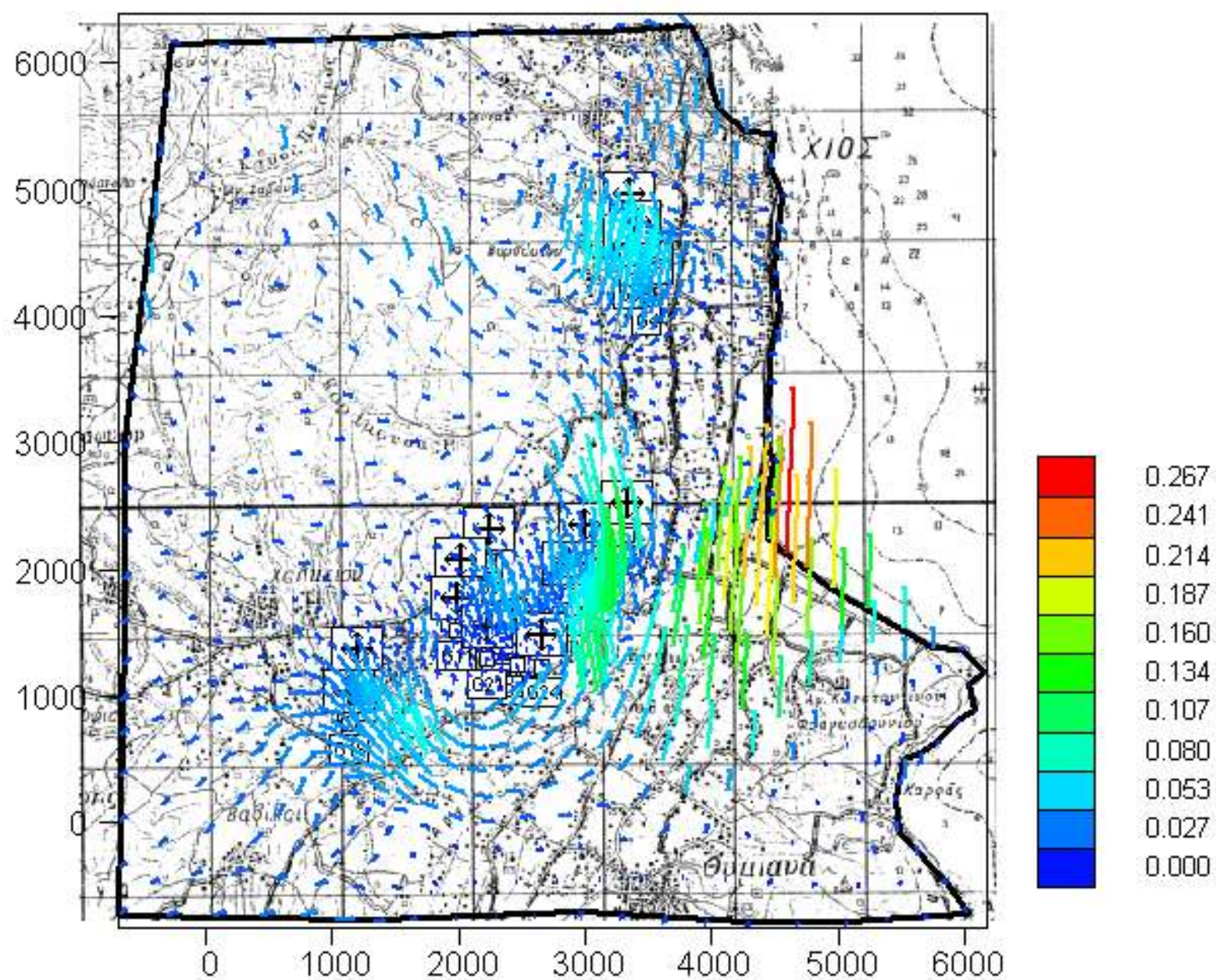
7.3 Σενάριο 3

Στο συγκεκριμένο σενάριο μηδενίζουμε την άντληση του νερού από τις γεωτρήσεις. Παρατηρούμε την εμφανή άνοδο του υδραυλικού ύψους στην περιοχή. Αυτό είναι και αναμενόμενο καθώς με την απουσία των γεωτρήσεων η ποσότητα του γλυκού νερού παραμένει στον υδροφορέα αντί να χρησιμοποιείται για αρδευτικές ανάγκες. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ζώνη υφαλμύρινσης καθώς μετατοπίζεται προς τα ανατολικά το καλοκαίρι και προς τα δυτικά το χειμώνα. Αυτό είναι εύκολο να το αντιληφθούμε αν αναλογιστούμε ότι ο κυριότερος παράγων που επιδρά στην κίνηση των υπογείων υδάτων κατά την πρώτη περίοδο είναι οι γεωτρήσεις ενώ κατά τη δεύτερη η βροχόπτωση. Τη θερινή περίοδο έχουμε μετατόπιση της ζώνης υφαλμύρινσης προς τη θάλασσα γιατί με την απουσία γεωτρήσεων έχουμε περισσότερο γλυκό νερό ενώ τη χειμερινή έχουμε ανεπαίσθητη μετατόπιση προς την αντίθετη κατεύθυνση επειδή ούτως ή άλλως οι περισσότερες γεωτρήσεις είναι κλειστές. Στον τομέα των ταχυτήτων παρακολουθούμε για τη θερινή περίοδο διπλάσιες τιμές στις περιοχές των γεωτρήσεων, μηδενικές στα βορειοδυτικά και κατά πολύ μεγαλύτερες στα ανατολικά του Κοκκαλά προς τη θάλασσα. Το χειμώνα παρουσιάζονται μεγαλύτερες εξίσου σε όλη την περιοχή μελέτης.

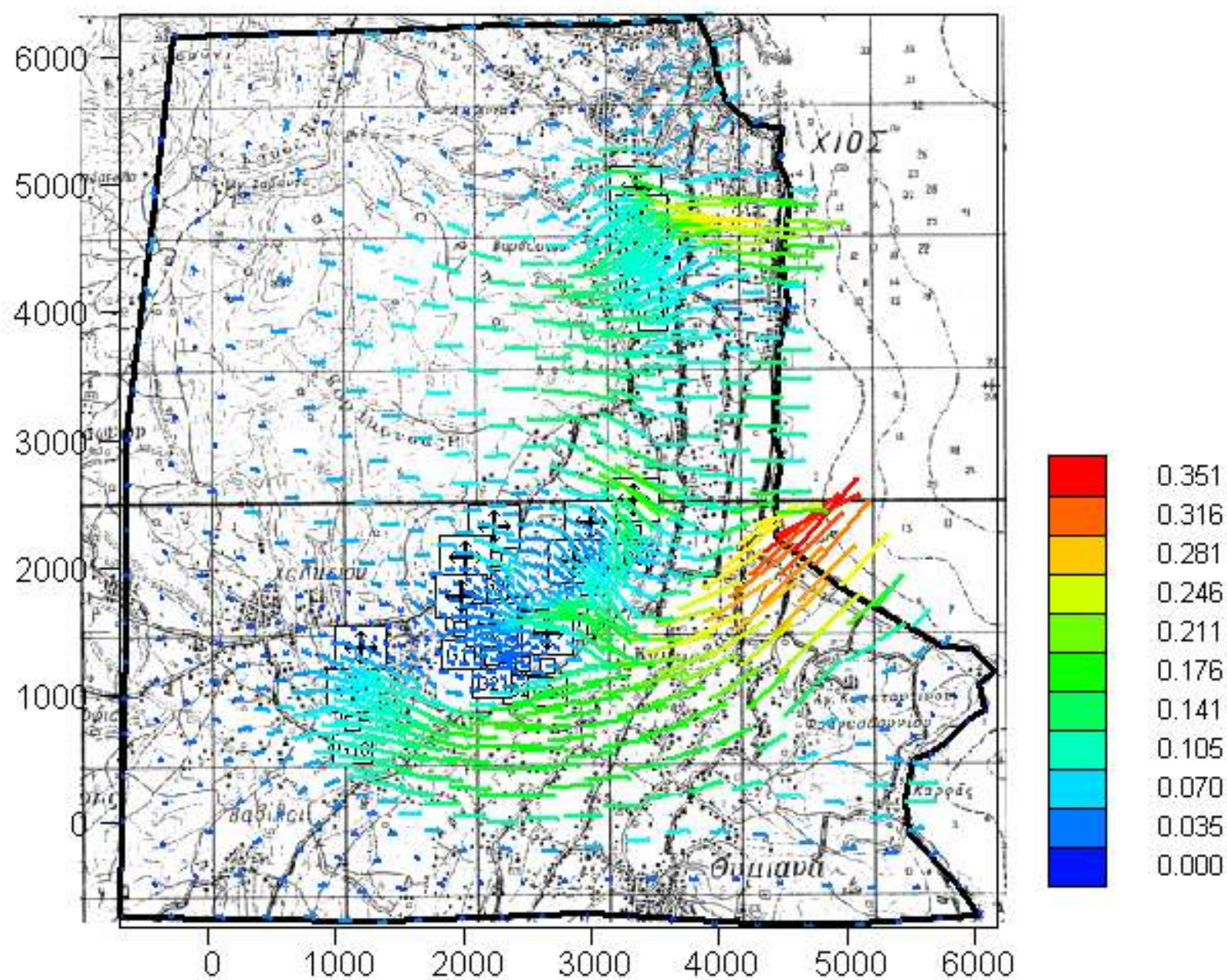




Σχ 7.10 Υδραυλικά Ύψη κατά τη χειμερινή περίοδο



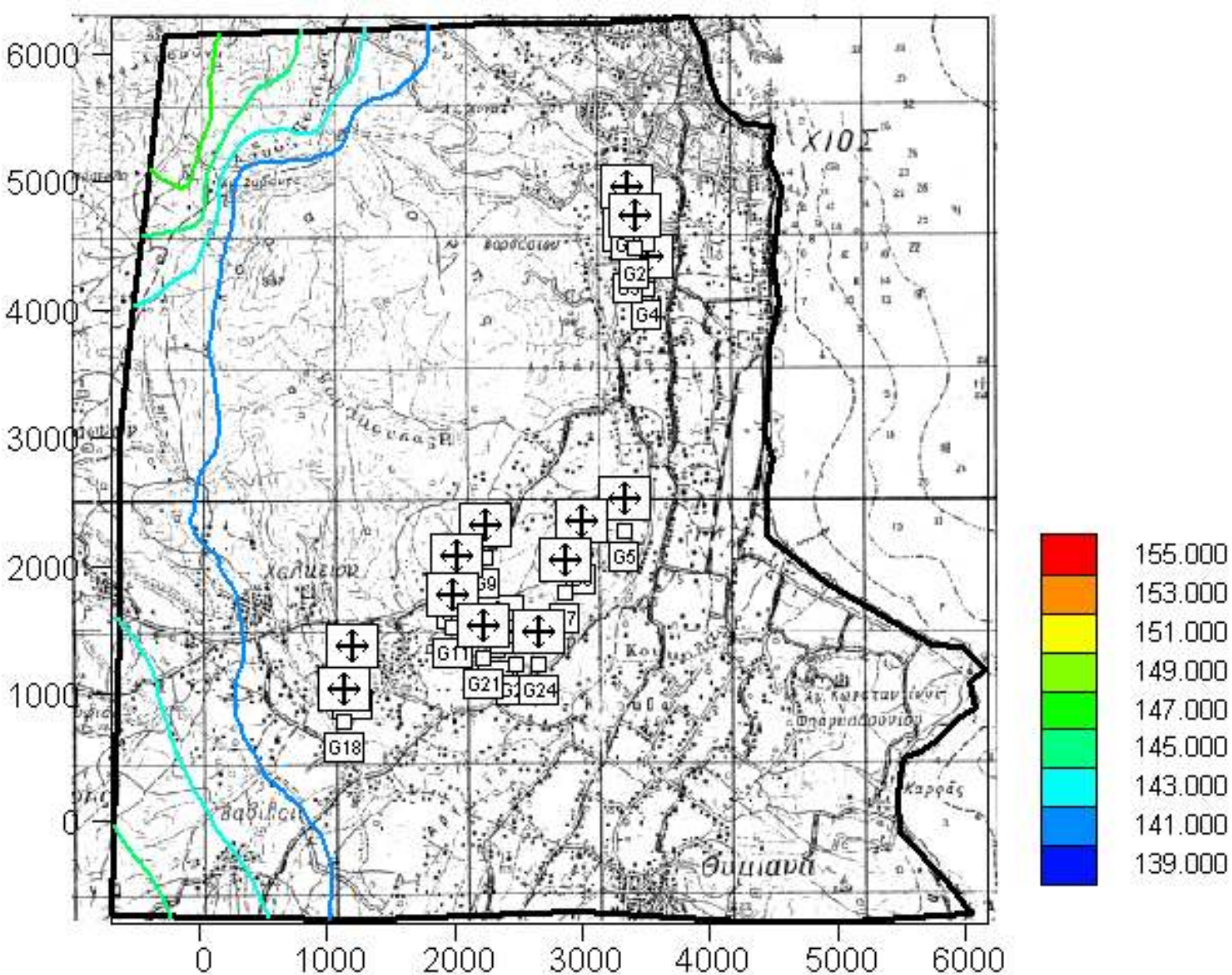
Σχ 7.11 Ταχύτητες ροής των υδάτων κατά τη θερινή περίοδο



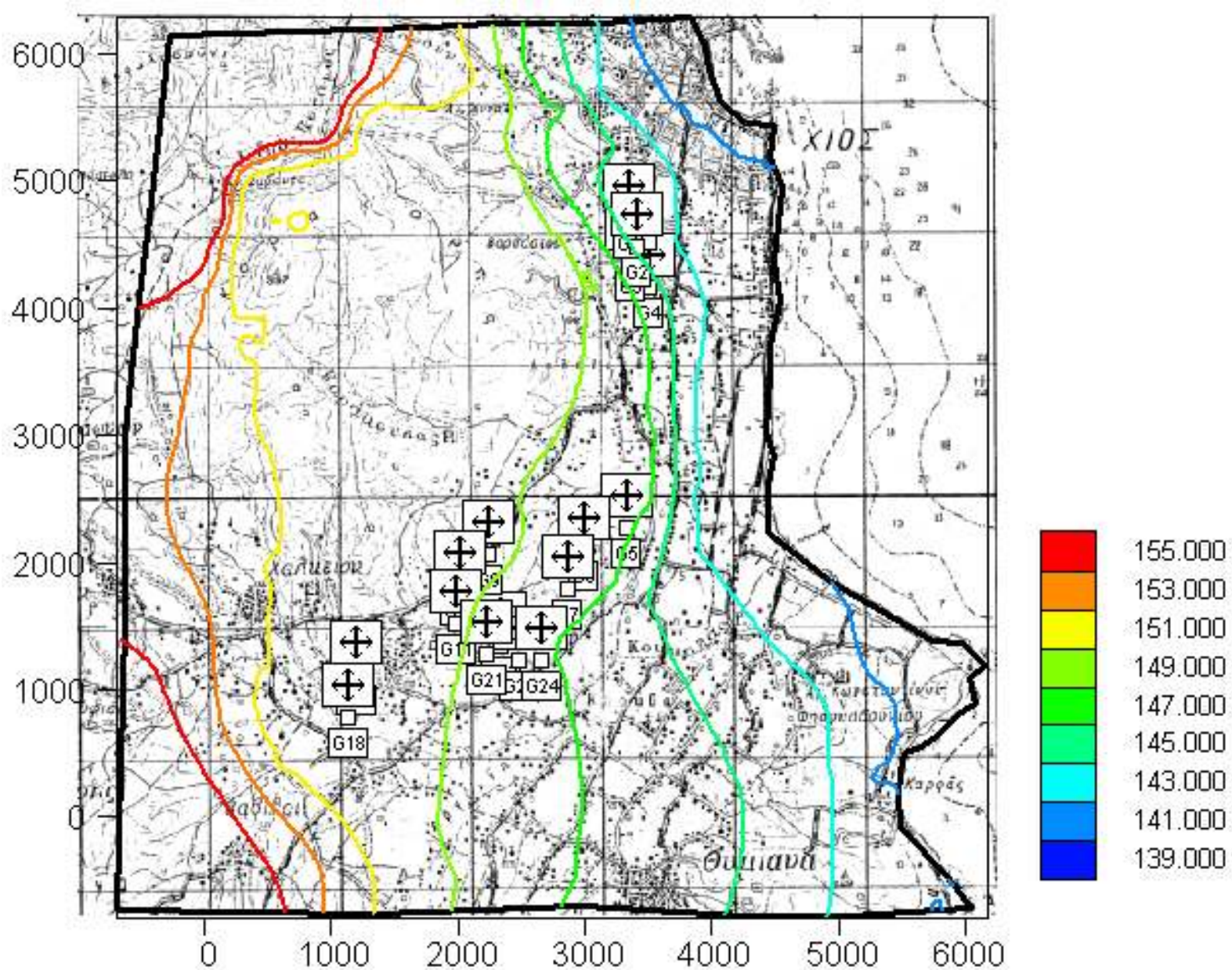
Σχ 7.12 Ταχύτητες ροής των υδάτων κατά τη χειμερινή περίοδο

7.4 Σενάριο 4

Στο συγκεκριμένο σενάριο ελαττώνουμε κατά 25% την άντληση του νερού από τις γεωτρήσεις. Τα αποτελέσματα που παίρνουμε μαρτυρούν ότι η κατάσταση παραμένει σχεδόν αμετάβλητη. Βέβαια, όπως αναμενόταν το υδραυλικό ύψος έχει μια μικρή αύξηση ειδικά κατά τους θερινούς μήνες και η ζώνη υφαλμύρινσης μετακινείται ελάχιστα προς τα ανατολικά το καλοκαίρι και προς τα δυτικά το χειμώνα αν και οι διαφορές με το πρώτο σενάριο είναι αρκετά μικρές. Οι ταχύτητες των υπογείων υδάτων τη θερινή περίοδο παρουσιάζονται κοντά στις γεωτρήσεις λίγο πεσμένες, και σχεδόν ανεπηρέαστες όσο απομακρυνόμαστε από τα σημεία άντλησης, ενώ τη χειμερινή παρατηρούνται σχετικά αναλλοίωτες σε σχέση με την πραγματική κατάσταση.



Σχ 7.13 Υδραυλικά Ύψη κατά τη θερινή περίοδο

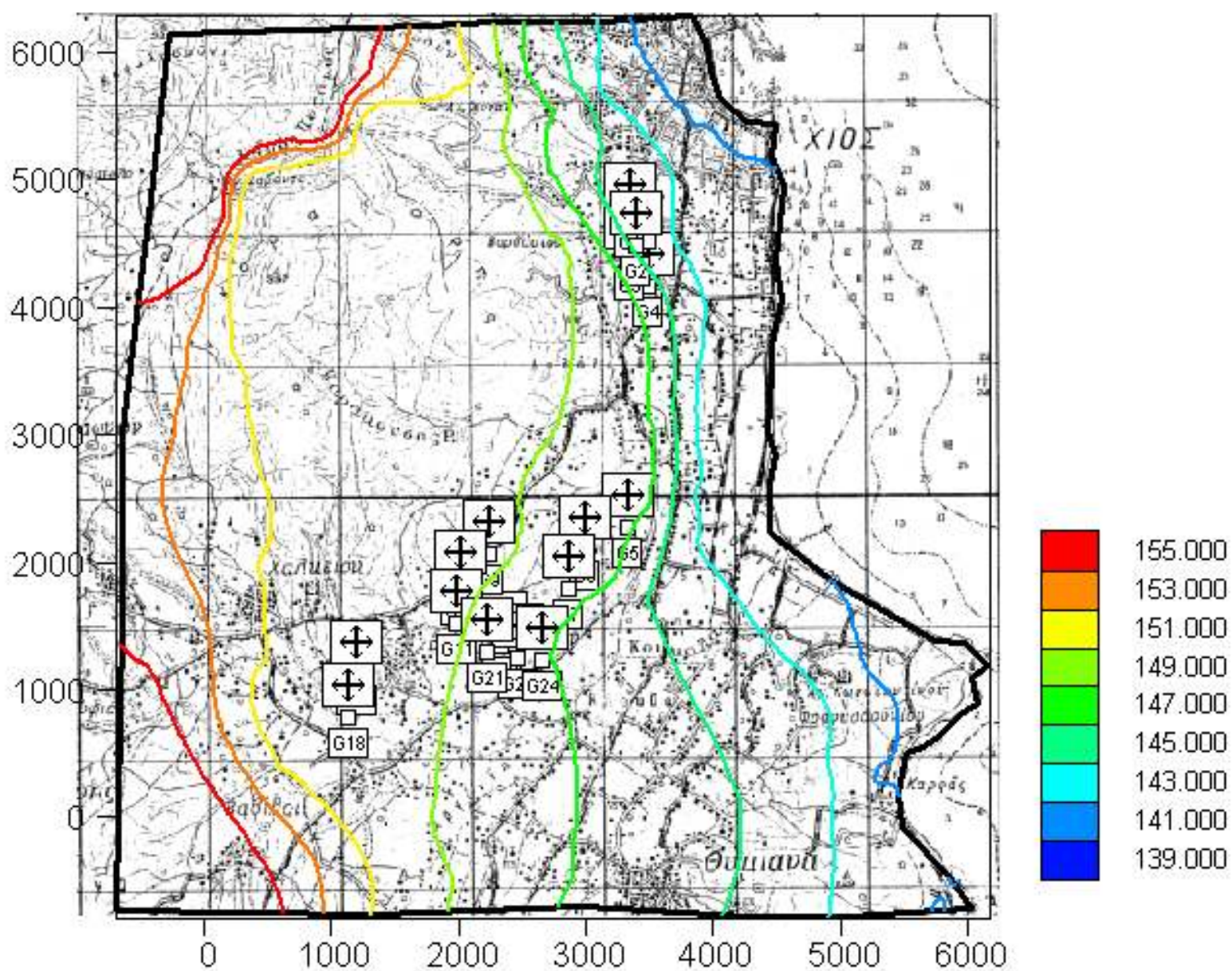


Σχ 7.14 Υδραυλικά Ύψη κατά τη χειμερινή περίοδο

7.5 Σενάριο 5

Στο συγκεκριμένο σενάριο αυξάνουμε κατά 25% την άντληση του νερού από τις γεωτρήσεις. Κι εδώ τα υδραυλικά ύψη όπως και η ζώνη υφαλμύρισης κυμαίνονται σε περίπου ίδια επίπεδα με την πραγματικότητα για όλο το έτος. Παρατηρείται οπωσδήποτε η αναμενόμενη μείωση στο υδραυλικό ύψος και η μετατόπιση της ζώνης υφαλμύρισης σε αντίθετες κατευθύνσεις από ότι στο προηγούμενο σενάριο, ειδικά κατά τη θερινή περίοδο όταν και είναι όλες οι γεωτρήσεις σε λειτουργία αλλά δεν μπορούμε να το θεωρήσουμε σαν κάτι που ανατρέπει την υπάρχουσα κατάσταση. Ακόμη μικρότερες διαφορές έχουμε κατά τους χειμερινούς μήνες με τις περισσότερες γεωτρήσεις κλειστές. Οι ταχύτητες είναι λίγο αυξημένες ειδικά στις εγγύτερες στις γεωτρήσεις περιοχές.

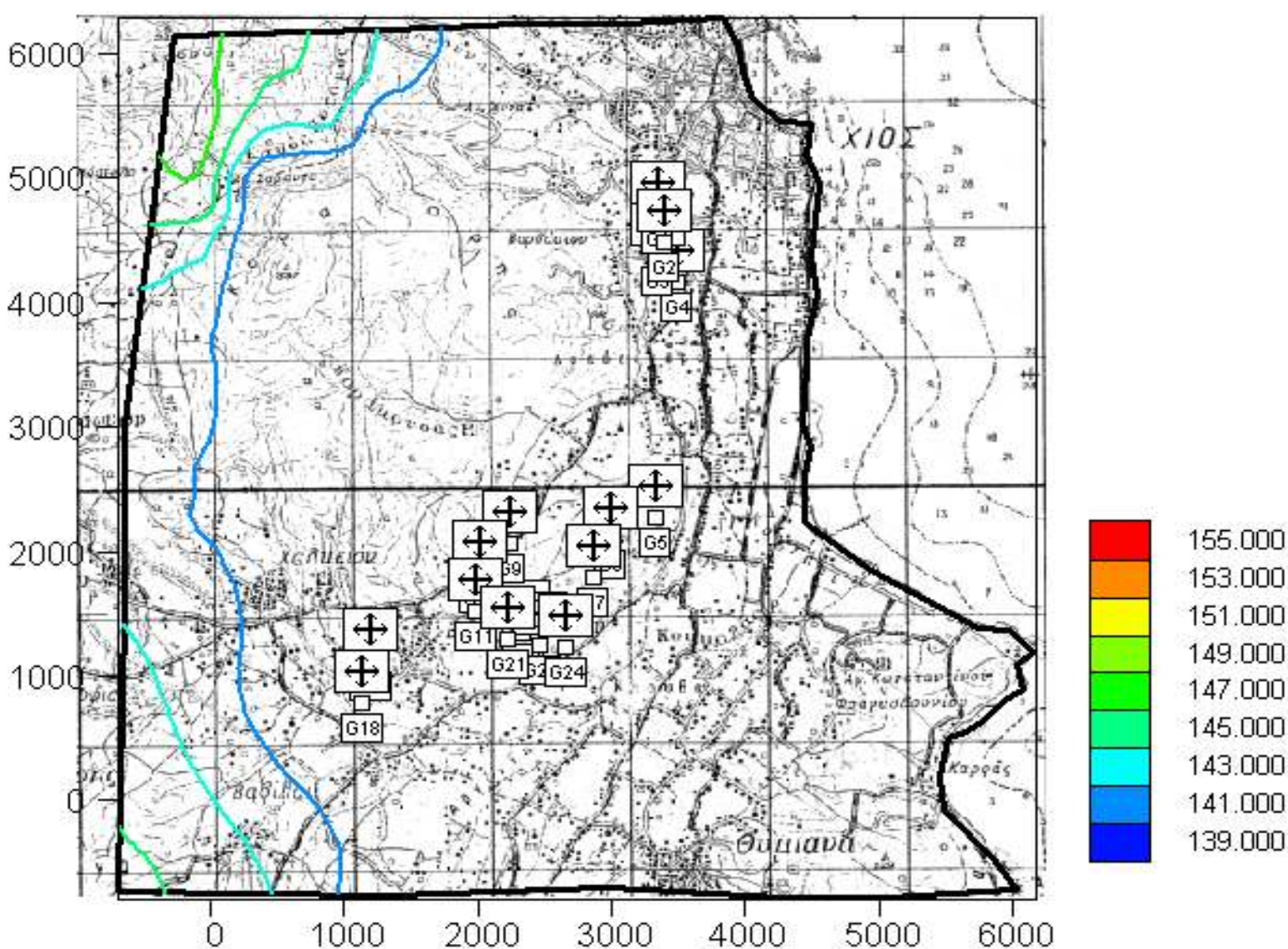




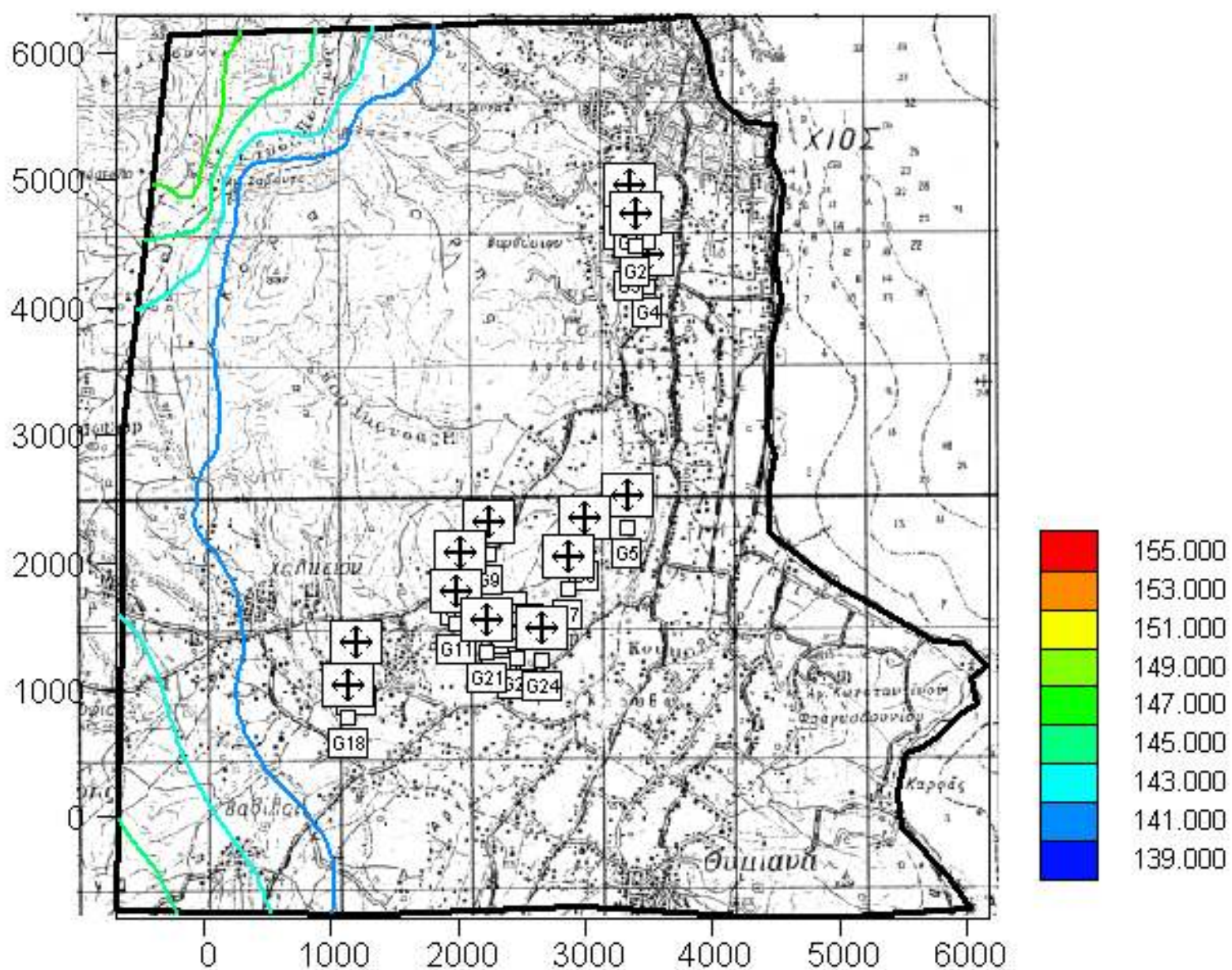
Σχ 7.16 Υδραυλικά Ύψη κατά τη χειμερινή περίοδο

7.6 Σενάριο 6

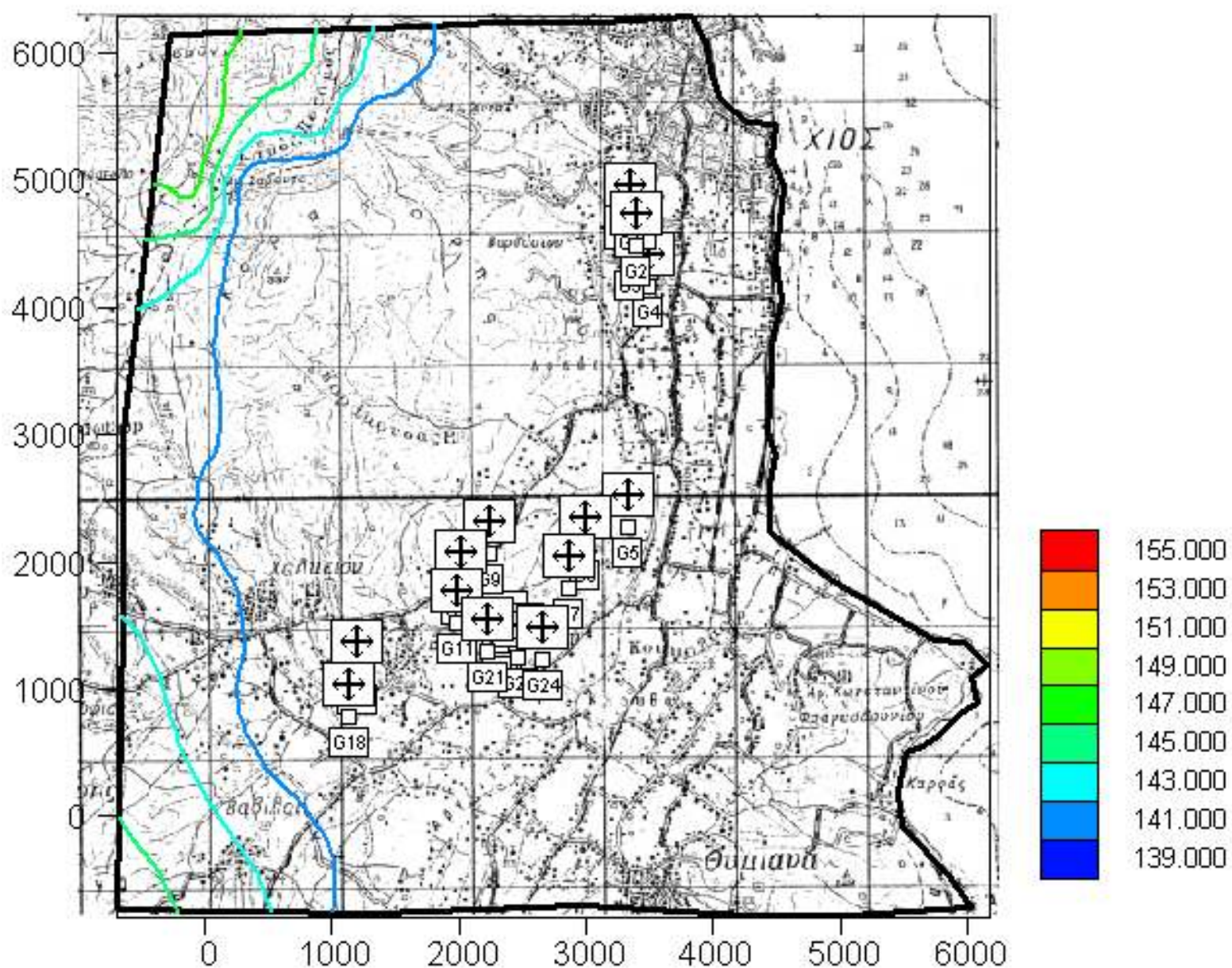
Στο συγκεκριμένο σενάριο προσομοιώνουμε τη ροή των υπογείων υδάτων για 5 χρόνια και εκτιμούμε την κατάσταση μετά την πάροδο του συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος. Μετά από προσομοίωση 5 χρόνων με το PTC παρατηρούμε ότι η κατάσταση παραμένει σχετικά αμετάβλητη, κάτι που ήταν αναμενόμενο καθώς το σύστημά μας βρίσκεται από το πρώτο έτος σε σταθερή κατάσταση (steady state).



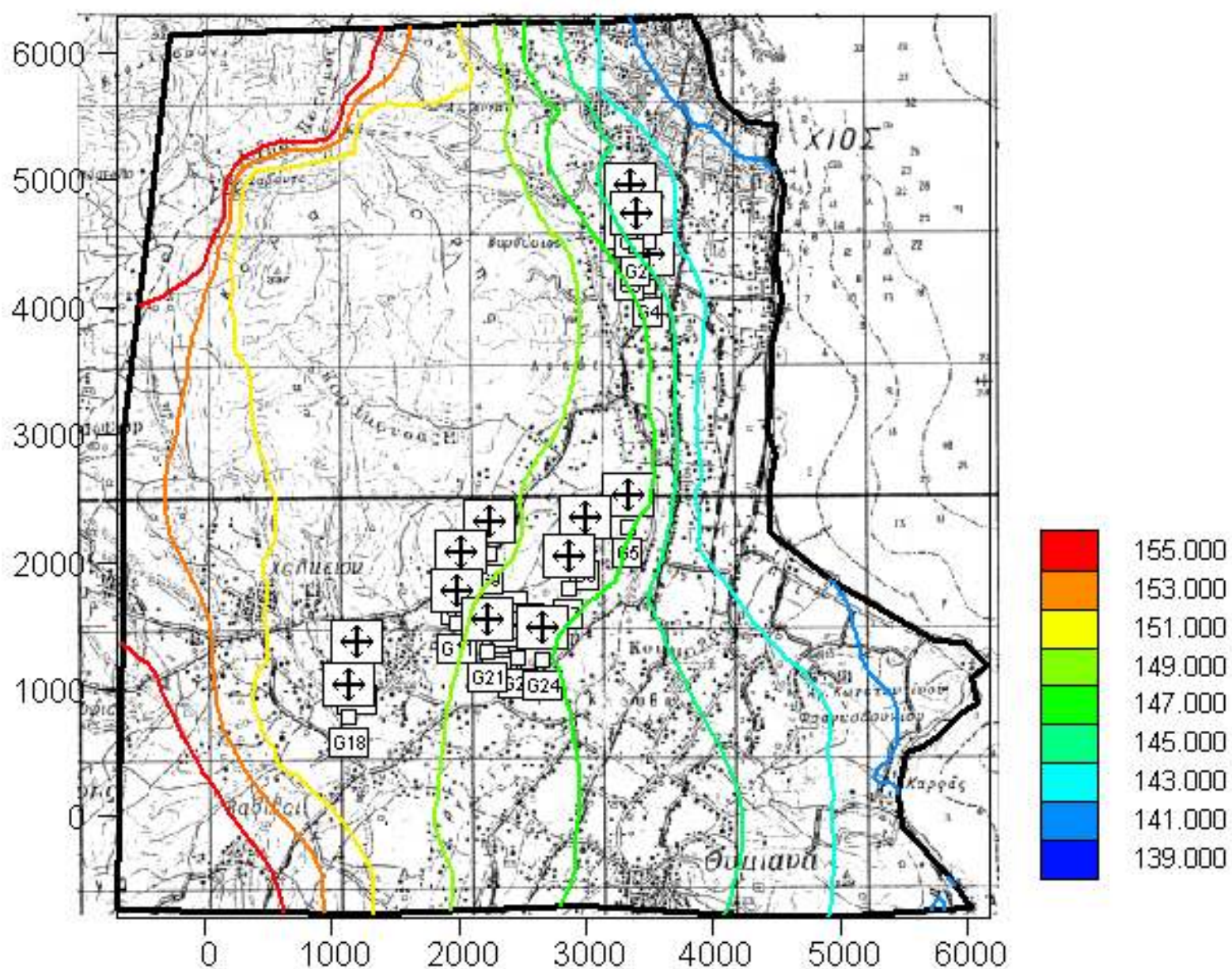
Σχ 7.17 Υδραυλικά Ύψη κατά την 1^η θερινή περίοδο



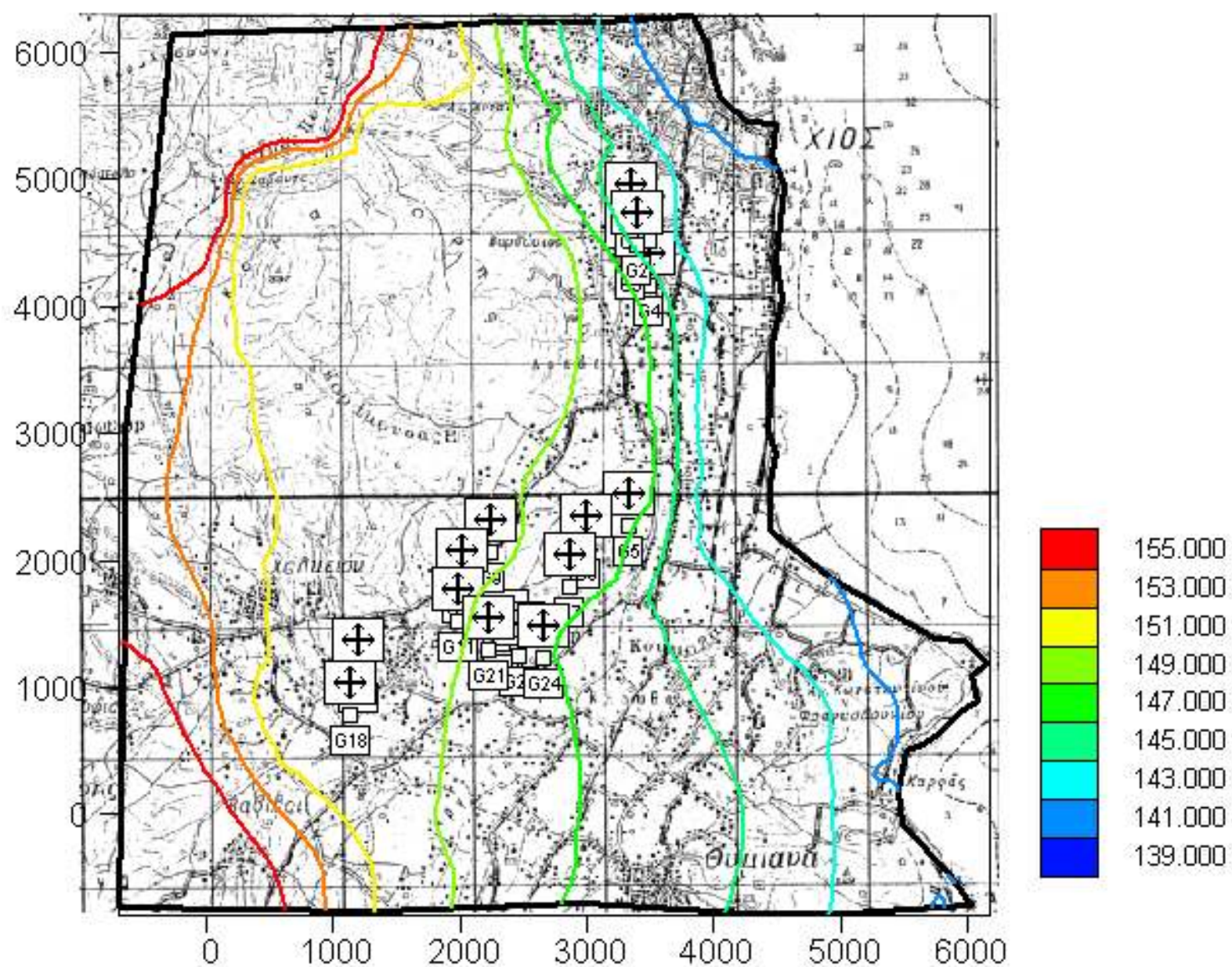
Σχ 7.18 Υδραυλικά Ύψη κατά την 3^η θερινή περίοδο



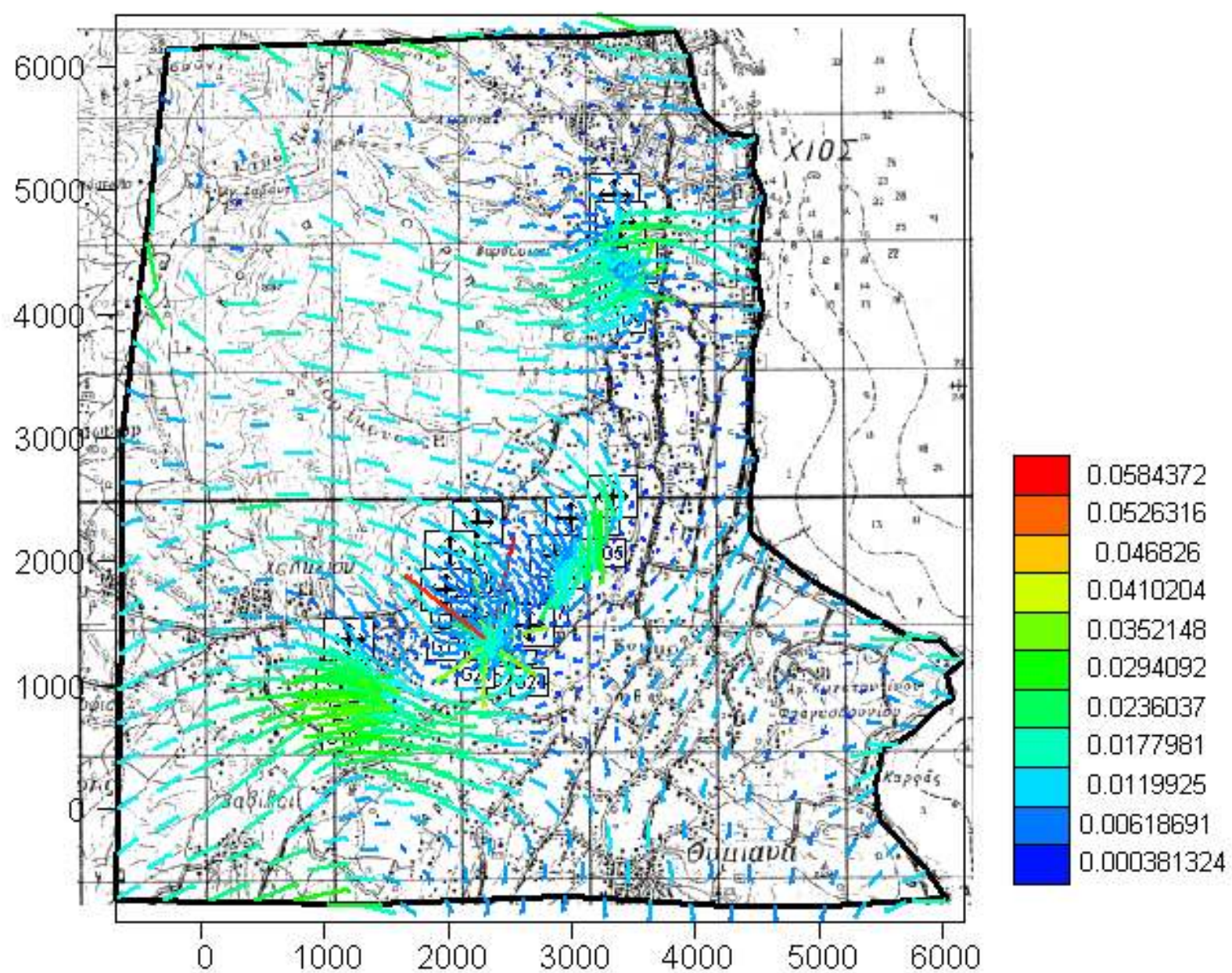
Σχ 7.19 Υδραυλικά Ύψη κατά την 5^η θερινή περίοδο



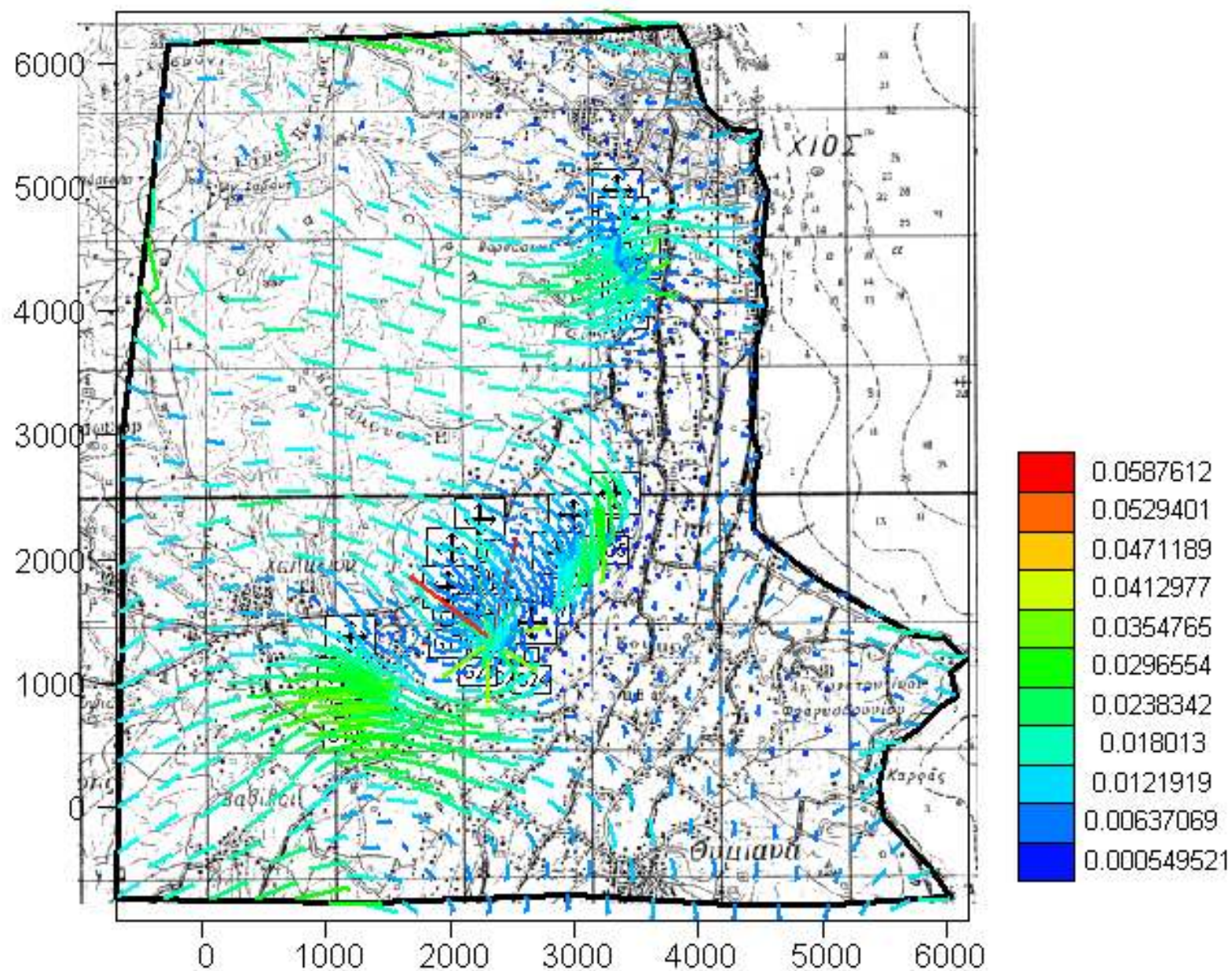
Σχ 7.21 Υδραυλικά Ύψη κατά την 3^η χειμερινή περίοδο



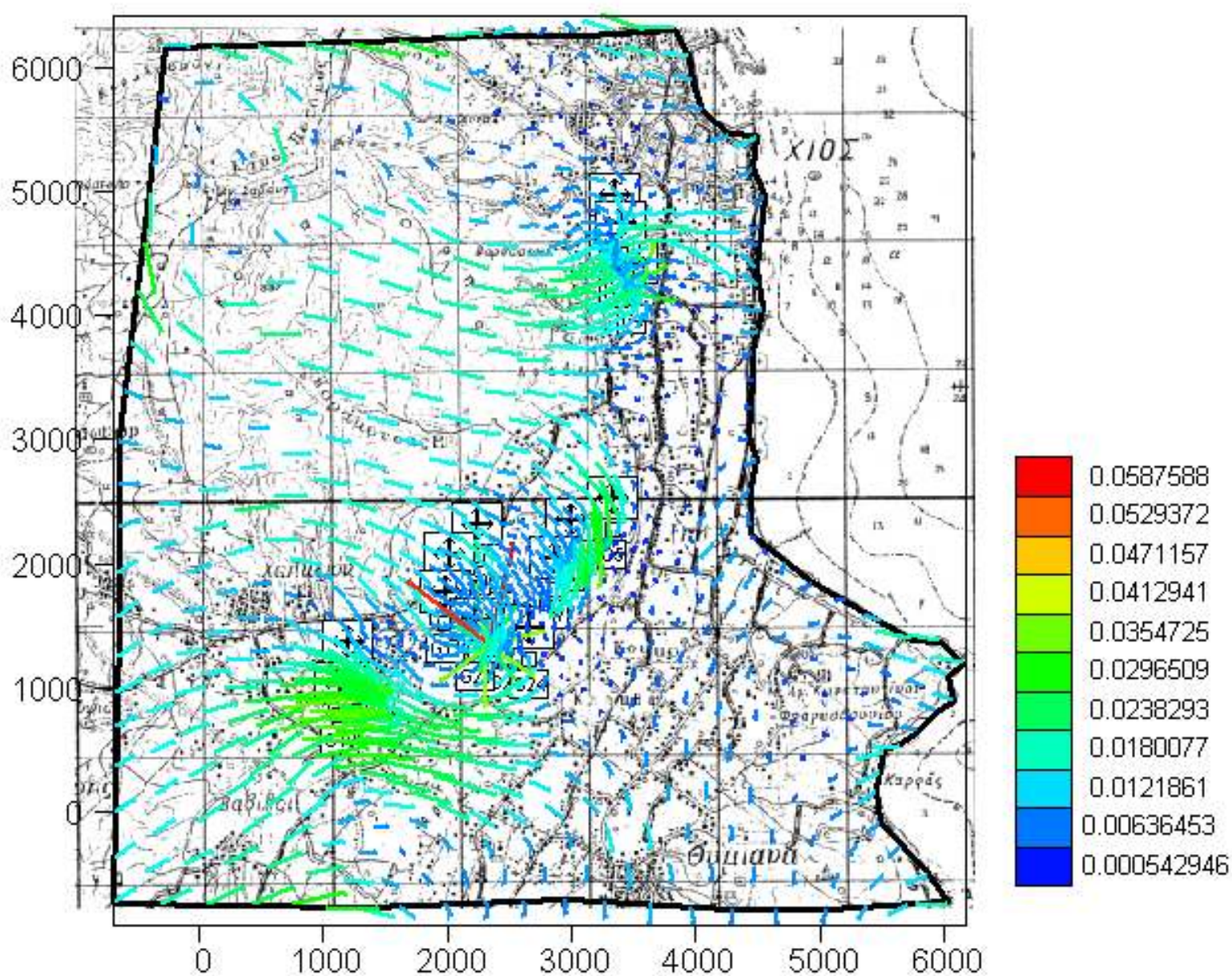
Σχ 7.22 Υδραυλικά Ύψη κατά την 5^η χειμερινή περίοδο



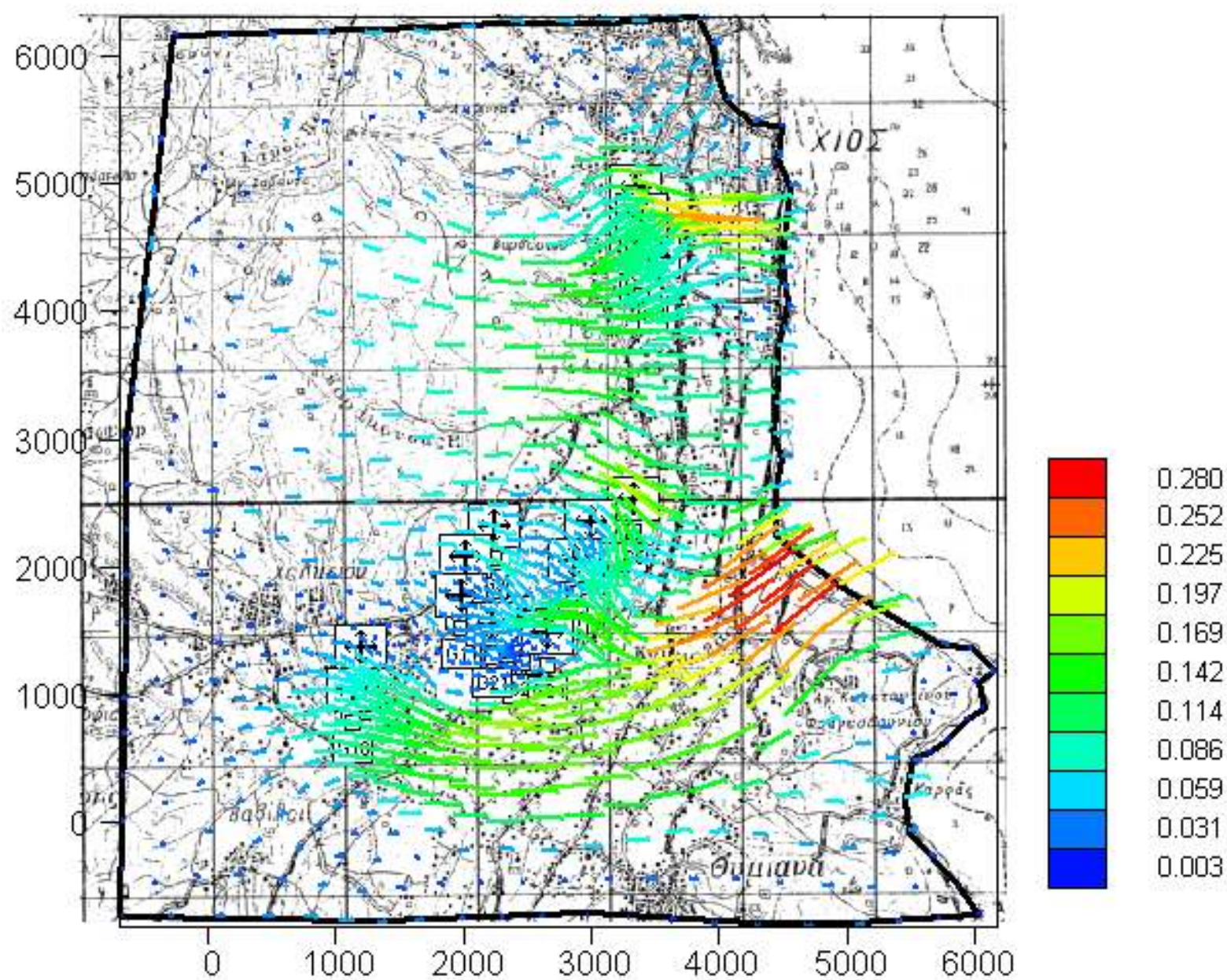
Σχ 7.23 Ταχύτητες ροής των υδάτων κατά την 1^η θερινή περίοδο



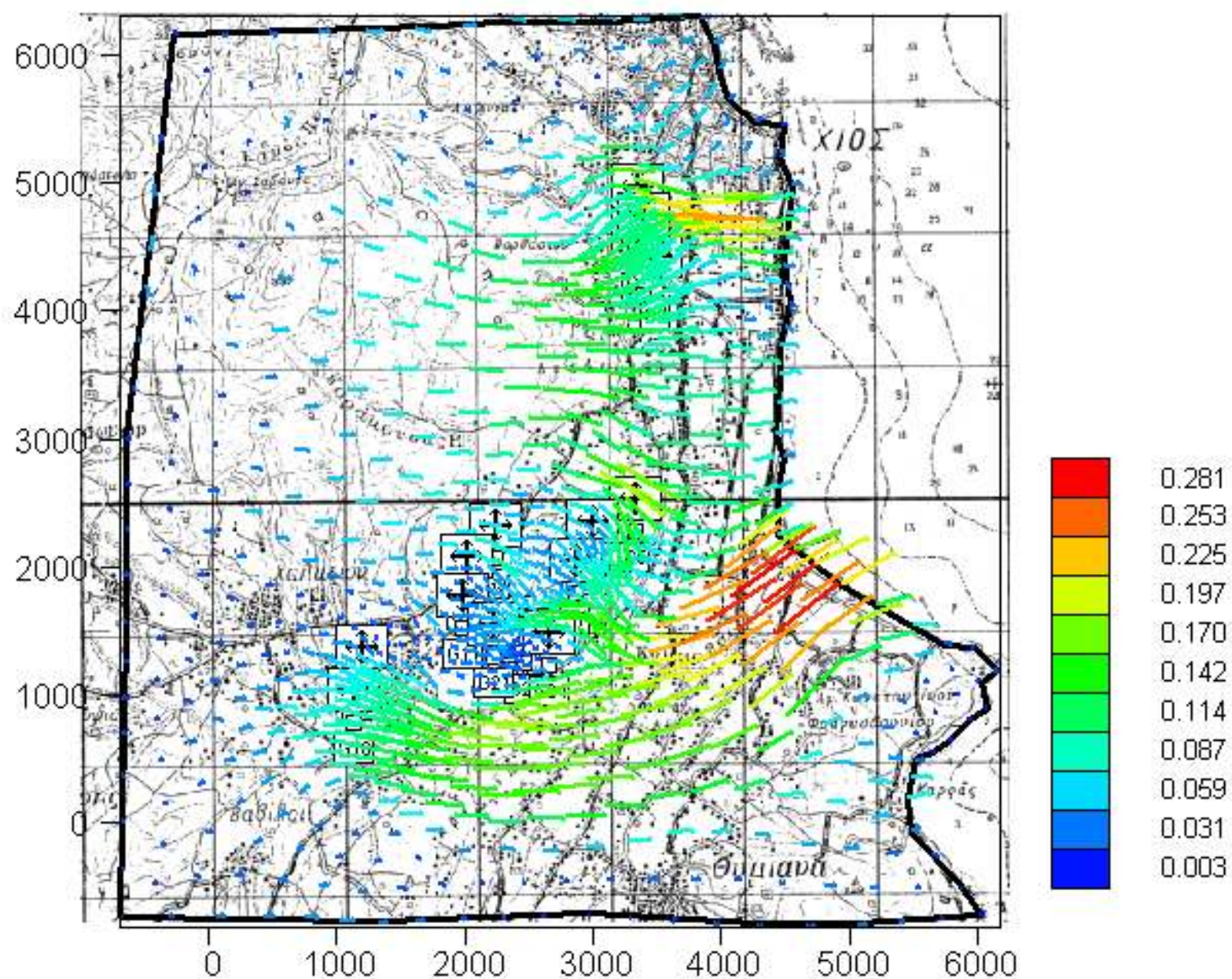
Σχ 7.24 Ταχύτητες ροής των υδάτων κατά την 3^η θερινή περίοδο



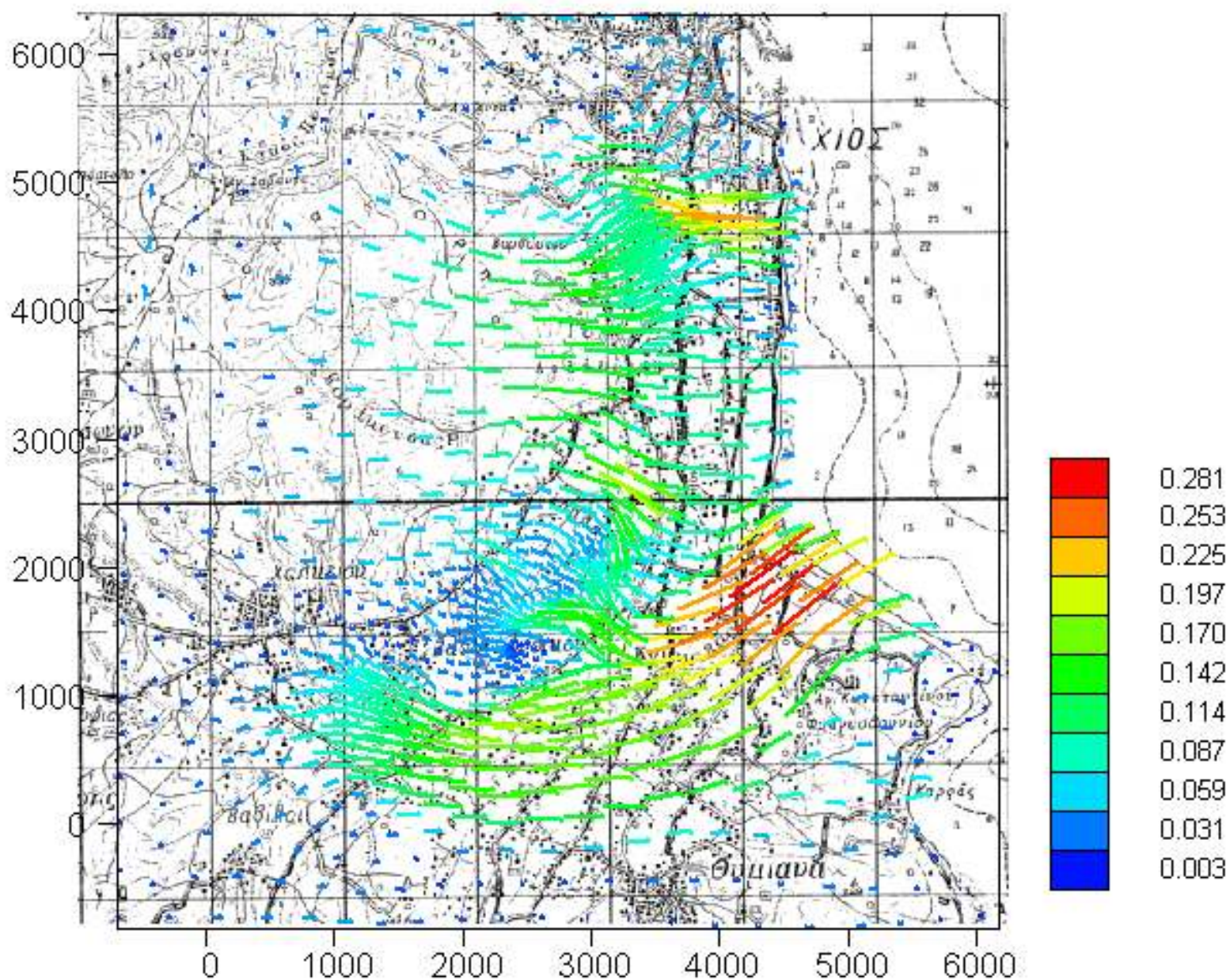
Σχ 7.25 Ταχύτητες ροής των υδάτων κατά την 5^η θερινή περίοδο



Σχ 7.26 Ταχύτητες ροής των υδάτων κατά την 1^η χειμερινή περίοδο



Σχ 7.27 Ταχύτητες ροής των υδάτων κατά την 3^η χειμερινή περίοδο



Σχ 7.28 Ταχύτητες ροής των υδάτων κατά την 5^η χειμερινή περίοδο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

«Συμπεράσματα και Προτάσεις»

Είναι εμφανές από τα αποτελέσματά μας ότι το φαινόμενο της υφαλμύρινσης βρίσκεται σε προχωρημένο στάδιο στην περιοχή μελέτης μας, ειδικά κατά τη θερινή περίοδο. Πριν παραθέσουμε τα συμπεράσματα θα ήταν σκόπιμο να λάβουμε υπόψη μας ότι τα συγκεκριμένα στοιχεία ελήφθησαν στο παρελθόν και οπωσδήποτε αυτή τη στιγμή η κατάσταση είναι σε προχωρημένο στάδιο υφαλμύρινσης και οι περισσότερες γεωτρήσεις μετά από μια περίοδο υπερεκμετάλλευσης σταμάτησαν να λειτουργούν. Οι αρδευτικοί τους προσανατολισμοί τις κατέστησαν με την πάροδο του χρόνου άχρηστες καθώς επιτάχυναν την εισχώρηση του υφάλμυρου νερού στα κοιτάσματα του γλυκού. Από τη στιγμή που έφτασαν να αρδεύουν υφάλμυρο νερό έγιναν από μόνες τους επιβλαβείς για την περιοχή και εγκαταλείφθηκαν. Η περιοχή μας είναι παραθαλάσσια και από τη στιγμή μάλιστα που βρισκόμαστε σε νησί είναι επόμενο η κατάσταση να χαρακτηρίζεται μη αναστρέψιμη. Με την απουσία πολλών πηγών εμπλουτισμού του υδροφορέα και το γεγονός ότι σαν νησιωτική η περιοχή δεν έρχεται σε επαφή με κάποια κοντινή πηγή γλυκού νερού αλλά περιτοιχίζεται από θάλασσα, η επικράτηση του υφάλμυρου νερού είναι κάτι παραπάνω από φυσικό επακόλουθο. Επίσης ακόμη κι αν καταφέρουμε να ωθήσουμε το υφάλμυρο μέτωπο προς τη θάλασσα, τα άλατα που έχουν εισχωρήσει στους πόρους του εδάφους είναι δύσκολο να απομακρυνθούν. Τέλος στη δημιουργία της υφάλμυρης περιοχής συμβάλλει και η συνεχώς αυξανόμενη έλλειψη βροχοπτώσεων με την πάροδο των ετών.

Σαν προτάσεις θα μπορούσαμε να συστήνουμε κυρίως την αναστολή της λειτουργίας των γεωτρήσεων ή τη μετατροπή τους από άντλησης σε πηγές εμπλουτισμού. Βέβαια η συγκεκριμένη λύση δεν μπορεί παρά να χαρακτηριστεί επίπονη, οικονομικώς μη συμφέρουσα αλλά και παροδική. Ακόμη και αν χορηγήσουμε νερό στον υδροφορέα μέσω των γεωτρήσεων, η υφαλμύριση είναι σχεδόν σίγουρο ότι θα επανέλθει σε περίπτωση που σταματήσει ο εμπλουτισμός. Άλλωστε και γεωγραφικά η λύση αυτή δεν ενδείκνυται για νησί.

Μια άλλη λύση θα ήταν η δημιουργία φραγμάτων για να εμποδίσουμε την εισροή του θαλασσινού νερού στον Κάμπο. Όμως και αυτή η λύση κρίνεται απαγορευτική λόγω του κόστους ενός τέτοιου έργου αλλά και της έντονης σεισμικότητας της περιοχής.

Βέβαια υπάρχει και η χρήση του τελικού προϊόντος των μονάδων επεξεργασίας λυμάτων για τον εμπλουτισμό του υδροφορέα. Η λύση αυτή μοιάζει η περισσότερη εφικτή καθώς υπάρχουν αρκετές τέτοιες μονάδες στο νησί και μάλιστα στην περιοχή του Κάμπου που αποτελεί κομμάτι της περιοχής μελέτης. Με βασικό κανόνα τη νομοθεσία περί της χρησιμοποίησης των λυμάτων θα μπορούσαμε να αξιοποιήσουμε αγαθά που ούτως ή άλλως αποτελούν άχρηστα προϊόντα χημικών διεργασιών.

Λόγω της θέσης της περιοχής και της απουσίας πολλών λύσεων θα μπορούσαμε να προτείνουμε και τη δημιουργία οριζόντιων πηγαδιών για να τραβάμε τις ποσότητες του γλυκού νερού που βρίσκονται πάνω από υφαλμυρισμένους υδροφορείς. Με την παραδεκτή έλλειψη αποθεμάτων γλυκού νερού η λύση αυτή που συνηθίζεται σε κάποιες μεσογειακές χώρες θα ήταν ένας καλός τρόπος εκμετάλλευσης των εγκλωβισμένων υπόγειων κοιτασμάτων.

Από τη στιγμή που βρισκόμαστε σε νησί μάλλον ουτοπική χαρακτηρίζεται η πρόταση μεταφοράς ποσοτήτων γλυκού νερού από παρακείμενες περιοχές καθώς στο σύνολο της η Χίος δεν διαθέτει κάποια περιοχή με περίσσειμα τέτοιων κοιτασμάτων και δεν ενδείκνυται η μεταφορά από μέρη εκτός νησιού.

Τα σενάρια μας στο σύνολό τους απέδειξαν ότι με τις συγκεκριμένες πρακτικές που δοκιμάσαμε η κατάσταση παραμένει αναλλοίωτη και απαιτείται οπωσδήποτε κάτι δραστικό. Με την επικρατούσα κατάσταση θα ήταν πιο ρεαλιστικό να εστιάσουμε το ενδιαφέρον μας στο να εκπονηθούν μελέτες και να καταστρωθούν τεχνικά σχέδια ώστε να αποτρέψουμε την περαιτέρω εξάπλωση της ζώνης υφαλμύρινσης παρά να σχεδιάζουμε την εξάλειψή της. Ιδανικό θα ήταν ένα σχέδιο που να αντιμετωπίζει την απειλή της υφαλμύρινσης και να δίνει μια βέλτιστη λύση για όλο το νησί.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Γεώργιος Π. Καρατζάς, 2004, *Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Πολυτεχνείου Κρήτης.
2. Βασίλειος Παρασκούδης, 1981, *Υδρογεωλογική μελέτη Ανατολικής και Κεντρικής Νήσου Χίου*.
3. Mary P. Anderson, William W. Woessner, 1992, *Applied Groundwater Modeling*, Academic Press.
4. D.K. Babu, G.F. Pinder, A. Niemi, D.P. Ahlfeld, S.A. Stothoff, 1997, *Chemical transport by three-dimensional groundwater flows*
5. Χημική Υπηρεσία Χίου
6. Αρχείο Τμήματος Υδροοικονομίας Χίου
7. Alan R. Freeze, John A. Cherry, 1979, *Groundwater*
8. en.wikipedia.org/wiki/Saltwater_intrusion
9. en.wikipedia.org/wiki/Chios
10. www.statistics.gr
11. ga.water.usgs.gov
12. www.mqtinfo.org/planningeduc0019.asp
13. www.europa.eu.int

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

[illegible]

[illegible]

