

ΥΠΟΕΡΓΟ Β

Δράση Β1

EB1.5. Προσομοίωση των υπόγειων υδάτων στο Νομό Ροδόπης
με τη χρήση του συστήματος FEFLOW

EB1.5. Simulation of groundwater in the Prefecture of Rodopi using FEFLOW

**ΠΒ1.9 Ανάπτυξη του λεπτομερούς ομοιώματος των υπόγειων
υδάτων του Νομού Ροδόπης**

**DB1.9 Development of the detailed groundwater model in the
Prefecture of Rodopi**



Η παρούσα μελέτη εκπονήθηκε από το Ελληνικό Κέντρο Βιοτόπων-Υγροτόπων (ΕΚΒΥ) στο πλαίσιο της Δράσης Β1 του έργου «Προστασία και Ανόρθωση Υδατικών και Δασικών Πόρων Νομού Ροδόπης», που υλοποιείται από την Περιφέρεια Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, με τη συνεργασία του Περιφερειακού Ταμείου Ανάπτυξης Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, του Φορέα Διαχείρισης Δέλτα Νέστου – Βιστωνίδας - Ισμαρίδας και του Ελληνικού Κέντρου Βιοτόπων-Υγροτόπων (ΕΚΒΥ). Το έργο χρηματοδοτείται σε ποσοστό 50% από το Χρηματοδοτικό Μέσο Χωρών του Ενιαίου Οικονομικού Χώρου 2004 - 2009 και σε ποσοστό 50% από το Πρόγραμμα Δημοσίων Επενδύσεων (ΠΔΕ) (εθνικούς πόρους).

The present study has been prepared by the Greek Biotope/Wetland Centre in the framework of Action B1 of the project "Protection and Rehabilitation of water and forest resources of the Prefecture of Rodopi", which is implemented by The Region of East Macedonia - Thrace (REMTH) in collaboration with The Regional Development Fund of East Macedonia – Thrace, The Management Body of the Delta of Nestos – Vistonida - Ismarida, and The Goulandris Natural History Museum / Greek Biotope-Wetland Centre (EKBY). It is co-financed by 50% from the EEA Financial Mechanism for the period 2004 – 2009 and by 50% from the Public Investments Program (national funds).

Η προτεινόμενη αναφορά της παρούσας έκθεσης είναι:

Δουλγέρης Χαράλαμπος, 2012. Ανάπτυξη του λεπτομερούς ομοιώματος των υπόγειων υδάτων του Νομού Ροδόπης. Ελληνικό Κέντρο Βιοτόπων Υγροτόπων (ΕΚΒΥ). Θέρμη. 85 σελ.

This document may be cited as follows:

Doulgeris Charalampos, 2012. Development of the detailed groundwater model in the Prefecture of Rodopi. Greek Biotope-Wetland Centre. Thermi, Greece 85 p.

ΠΒ1.9 Ανάπτυξη του λεπτομερούς ομοιώματος των υπόγειων υδάτων του Νομού Ροδόπης

ΤΙΤΛΟΣ / TITLE	ΠΒ1.9 Ανάπτυξη του λεπτομερούς ομοιώματος των υπόγειων υδάτων του Νομού Ροδόπης / DB1.9 Development of the detailed groundwater model in the Prefecture of Rodopi
ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ / EDITOR	Χαράλαμπος Δουλγέρης, ΕΚΒΥ / Charalampos Doulgeris, ΕΚΒΥ
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ / DATE	Ιούνιος 2012 / June 2012
ΟΝΟΜΑ ΑΡΧΕΙΟΥ / IDENTIFIER	DB1_09_Development_GW_model.doc
ΓΛΩΣΣΑ / LANGUAGE	Ελ / El

ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

X. Δουλγέρης

Δ. Παπαδήμος

Σωτηρία Κατσαβούνη

A. Αποστολάκης

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	
ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ ΣΤΟ ΝΟΜΟ ΡΟΔΟΠΗΣ.....	3
1.1 Επιφανειακά ύδατα	3
1.2 Υπόγεια ύδατα	5
1.2.1. Πεδίο Βιστωνίδας	6
1.2.2. Λοφώδη τμήματα νότια Κομοτηνής	7
1.2.3. Πεδίο άνω ρου των χειμάρρων Βοσβόζη, Καρυδιάς, Τρελοχειμάρρου	8
1.2.4. Υδρογεωλογική λεκάνη κλάδων π. Λίσσου	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ	
ΣΤΟ ΝΟΜΟ ΡΟΔΟΠΗΣ	11
2.1. Εισαγωγή.....	11
2.2. Εγκατάσταση του FEFLOW στις υδρογεωλογικές λεκάνες του Ν. Ροδόπης ..	12
2.2.1 Δημιουργία δικτύου πεπερασμένων στοιχείων.....	12
2.2.2 Ανάπτυξη εννοιολογικού ομοιώματος υπόγειων υδάτων.....	13
2.2.2.1. Γεωλογικά στρώματα και υδραυλικά χαρακτηριστικά υδροφορέων .	14
2.2.2.2. Οριακές συνθήκες ομοιώματος.....	16
2.3. Αποτελέσματα ομοιώματος σταθερής ροής.....	22
2.4. Αποτελέσματα ομοιώματος για την περίοδο 1981-2011	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΤΟΥ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ ΝΕΡΟΥ	
ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΩΝ ΝΙΤΡΙΚΩΝ ΑΛΑΤΩΝ ΣΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ	
ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ ΡΟΔΟΠΗΣ	31
3.1. Εισαγωγή.....	31
3.2. Παράμετροι του ομοιώματος για την προσομοίωση της διείσδυσης του	
θαλασσινού νερού στα υπόγεια νερά.....	36
3.3. Παράμετροι του ομοιώματος για την προσομοίωση των συγκέντρωσης των	
νιτρικών αλάτων στα υπόγεια νερά	37
3.4. Αποτελέσματα προσομοίωσης της ποιότητας των υπόγειων υδάτων	39
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	49
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι	
Κατανομή του πιεζομετρικού φορτίου στην άνω και κάτω στρώση	
των υπόγειων υδάτων	51

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π

Κατανομή των αλάτων του θαλασσινού νερού και των νιτρικών αλάτων στην άνω και κάτω στρώση των υπόγειων υδάτων.....73

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.	Κύριες υδρολογικές λεκάνες στο Νομό Ροδόπης.....4
Πίνακας 2.	Ύψος βροχόπτωσης και τροφοδοσία υπόγειων υδάτων στο Ν. Ροδόπης.....17
Πίνακας 3.	Αρδευόμενες εκτάσεις στο πεδινό τμήμα του Ν. Ροδόπης.....20
Πίνακας 4.	Συνιστώμενα όρια αλατότητας για τη χρήση του νερού.....33

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.	Διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία στο ομοίωμα υπόγειων υδάτων του Νομού Ροδόπης13
Σχήμα 2.	Ανάγλυφο του εδάφους και γεωλογικά στρώματα στο εννοιολογικό ομοίωμα των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης.....15
Σχήμα 3.	Μέση μηνιαία τροφοδοσία των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης17
Σχήμα 4.	Περιοχές πλευρικής εισροής νερού από τον ορεινό όγκο στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης (υπόβαθρο: γεωλογικός χάρτης από Διαμαντή, 1991).....18
Σχήμα 5.	Μέση μηνιαία πλευρική εισροή στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης.....19
Σχήμα 6.	Χρονοσειρά παροχής και κατακόρυφη τομή φρεατίου άντλησης στο περιβάλλον του FEFLOW.....20
Σχήμα 7.	Φρεάτια άντλησης (μπλε κουκίδες) για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών του Ν. Ροδόπης στο περιβάλλον του FEFLOW.....21
Σχήμα 8.	Μέση ημερήσια τροφοδοσία υπόγειων υδάτων στο Ν. Ροδόπης23
Σχήμα 9.	Ισοΰψεις καμπύλες πιεζομετρικού φορτίου (m) στην άνω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (ομοίωμα σταθερής ροής).....24
Σχήμα 10.	Ισοΰψεις καμπύλες πιεζομετρικού φορτίου (m) στην κάτω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (ομοίωμα σταθερής ροής).....25
Σχήμα 11.	Σημεία παρακολούθησης του πιεζομετρικού φορτίου των υπόγειων υδάτων στις υδρογεωλογικές λεκάνες του Ν. Ροδόπης.....26
Σχήμα 12.	Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου στα σημεία 1 και 2 της άνω στρώσης των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης27
Σχήμα 13.	Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου στα σημεία 3 και 4 της άνω στρώσης των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης27

Σχήμα 14.	Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου στα σημεία 5 και 6 της άνω στρώσης των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης28
Σχήμα 15.	Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου στα σημεία 13 και 14 της άνω στρώσης των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης28
Σχήμα 16.	Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου στα σημεία 1 και 2 της κάτω στρώσης των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης.....29
Σχήμα 17.	Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου στα σημεία 3 και 4 της κάτω στρώσης των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης.....29
Σχήμα 18.	Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου στα σημεία 5 και 6 της κάτω στρώσης των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης.....30
Σχήμα 19.	Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου στα σημεία 13 και 14 της κάτω στρώσης των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης.....30
Σχήμα 20.	Θαλάσσια διείσδυση σε παράκτιο ελεύθερο υδροφορέα32
Σχήμα 21.	Επίδραση των αντλήσεων σε υποθετικό υδροφόρο σύστημα32
Σχήμα 22.	Εννοιολογική προσέγγιση των διαδικασιών μετασχηματισμού του αζώτου που καθορίζουν την εμφάνιση των νιτρικών στα υπόγεια νερά.....35
Σχήμα 23.	Αναπαράσταση της αλληλεπίδρασης της ροής του ρευστού και της μεταφοράς διαλυμένων ουσιών (τροποποίηση από Holzbecher, 1998)36
Σχήμα 24.	Διακύμανση της λίπανσης αζώτου που εφαρμόζεται στις καλλιέργειες του Ν. Ροδόπης.....38
Σχήμα 25.	Κατανομή του φορτίου αζώτου από τη λίπανση των καλλιεργειών στο Ν. Ροδόπης38
Σχήμα 26.	Τομές παρακολούθησης της ποιότητας των υπόγειων υδάτων στις υδρογεωλογικές λεκάνες του Ν. Ροδόπης40
Σχήμα 27.	Συγκέντρωση των αλάτων του θαλασσινού νερού (mg/l) στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης (κατά μήκος της τομής 3 - Οκτώβριος 2006)41
Σχήμα 28.	Συγκέντρωση των αλάτων του θαλασσινού νερού (mg/l) στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης (κατά μήκος της τομής 5 - Οκτώβριος 2006)42
Σχήμα 29.	Συγκέντρωση των αλάτων του θαλασσινού νερού (mg/l) στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης (κατά μήκος της τομής 7 - Οκτώβριος 2006)43
Σχήμα 30.	Συγκέντρωση των νιτρικών (mg/l) στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης (κατά μήκος της τομής 3 - Οκτώβριος 2006).....44
Σχήμα 31.	Συγκέντρωση των νιτρικών (mg/l) στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης (κατά μήκος της τομής 4 - Οκτώβριος 2006).....45
Σχήμα 32.	Συγκέντρωση των νιτρικών (mg/l) στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης (κατά μήκος της τομής 5 - Οκτώβριος 2006).....46
Σχήμα 33.	Συγκέντρωση των νιτρικών (mg/l) στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης (κατά μήκος της τομής 6 - Οκτώβριος 2006).....47
Σχήμα 34.	Συγκέντρωση των νιτρικών (mg/l) στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης (κατά μήκος της τομής 7 - Οκτώβριος 2006).....48

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΧΑΡΤΩΝ

Χάρτης 1.	Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά του Ν. Ροδόπης.....	4
Χάρτης 2.	Όρια υδρογεωλογικών λεκανών στο πεδινό τμήμα του Ν. Ροδόπης.....	6

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα χωρικά κατανεμημένα – φυσικής βάσης συστήματα υδρολογικής προσομοίωσης, θεωρούνται σήμερα μεταξύ των πλέον κατάλληλων εργαλείων για την εξασφάλιση επαρκούς υποστήριξης σε θέματα λήψης αποφάσεων, που αφορούν στη διαχείριση των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων σε μια λεκάνη απορροής. Τα συστήματα αυτά συνδυάζουν τη δυνατότητα προσομοίωσης περιβαλλοντικών προβλημάτων με τα πλεονεκτήματα τα οποία προσφέρουν τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Geographic Information Systems - GIS), και παρέχουν τη δυνατότητα αξιολόγησης και διερεύνησης πλήθους σεναρίων για την εξεύρεση εναλλακτικών λύσεων σε προβλήματα διαχείρισης των φυσικών πόρων, όπως είναι οι υδατικοί πόροι.

Στη διαχείριση των υδατικών πόρων πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και θέματα που αφορούν στην ποιότητα του νερού, διότι εάν η ποσότητα του νερού είναι επαρκής αλλά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού δεν ικανοποιούν τα ποιοτικά πρότυπα για τις διάφορες χρήσεις νερού, τότε το νερό δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς προηγούμενη επεξεργασία (π.χ. νερό για ύδρευση) ή χωρίς επιπτώσεις στην παραγωγική διαδικασία (π.χ. νερό για άρδευση). Στις περιπτώσεις λοιπόν που η ποιότητα του νερού είναι υποβαθμισμένη, ουσιαστικά παρουσιάζεται μερικό ή ολικό έλλειμμα νερού για την ικανοποίηση των αναγκών των συγκεκριμένων χρήσεων νερού. Η υποβάθμιση της ποιότητας των υδατικών πόρων σχετίζεται κυρίως με τη χρήση χημικών ουσιών στις διάφορες ανθρωπογενείς παραγωγικές διαδικασίες και προκαλείται από τη διάθεση των υγρών αποβλήτων απ' ευθείας στα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα, την απόθεση στερεών και υγρών αποβλήτων πάνω ή κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και τις μη σημειακές πηγές ρύπανσης των αγροτικών δραστηριοτήτων.

Η ποσότητα του νερού και των ρύπων που καταλήγουν στα υπόγεια νερά καθορίζεται από τις διαδικασίες τη κίνησης του νερού και της μεταφοράς μάζας των ρύπων στην επιφάνεια και στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους, οι οποίες μπορούν να διερευνηθούν με τη βοήθεια αναλυτικών και αριθμητικών μαθηματικών ομοιωμάτων, τα οποία περιγράφουν τις φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες με μαθηματικές σχέσεις. Η ποιότητα του υπόγειου νερού είναι το αποτέλεσμα των διεργασιών αυτών και της ανθρώπινης επέμβασης, είτε άμεσα με την εισαγωγή χημικών και βιολογικών

ουσιών στον υδρολογικό κύκλο, είτε έμμεσα με την επέμβαση και τη διατάραξη του υδρολογικού ισοζυγίου των υπόγειων νερών, όπως συμβαίνει π.χ. στην περίπτωση της διείσδυσης του θαλασσινού νερού στους υπόγειους υδροφορείς.

Τα μαθηματικά ομοιώματα προσομοίωσης της διείσδυσης του θαλασσινού νερού είναι ένα σημαντικό εργαλείο για τη διαχείριση των υδατικών πόρων σε παράκτιες περιοχές, στις οποίες οι ανάγκες σε νερό είναι συνήθως μεγάλες, και η υπερεκμετάλλευση του υπόγειου νερού μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την είσοδο του θαλασσινού νερού σε περιοχές οι οποίες προηγουμένως καταλαμβάνονταν από γλυκό νερό. Με τη βοήθεια τέτοιων ομοιωμάτων είναι δυνατή η ποσοτική περιγραφή του φαινομένου, η πρόβλεψη της κατανομής των αλάτων στον υδροφόρα και η παρακολούθηση της εξέλιξης του φαινομένου.

Στο πλαίσιο του παρόντος, περιγράφεται η εφαρμογή του συστήματος προσομοίωσης FEFLOW στις υδρογεωλογικές λεκάνες του Νομού Ροδόπης, με σκοπό την προσομοίωση της κίνησης του υπόγειου νερού στα υδροφόρα στρώματα, της διείσδυσης του θαλασσινού νερού στις παράκτιες περιοχές και της κατανομής των νιτρικών αλάτων στα υπόγεια νερά από τις πιέσεις που ασκούνται κατά τη λίπανση των γεωργικών καλλιεργειών.

Η έκθεση αποτελείται από τρία κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο δίνεται η περιγραφή των υδρογεωλογικών λεκανών και των συνθηκών που επικρατούν σε αυτές. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εφαρμογή του ανωτέρω συστήματος προσομοίωσης στις υδρογεωλογικές λεκάνες του Νομού Ροδόπης, και τέλος, στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται η επέκταση του ομοιώματος για την προσομοίωση της διείσδυσης του θαλασσινού νερού και της κατανομής των νιτρικών αλάτων στα υπόγεια νερά του Νομού Ροδόπης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ ΣΤΟ ΝΟΜΟ ΡΟΔΟΠΗΣ

1.1 Επιφανειακά ύδατα

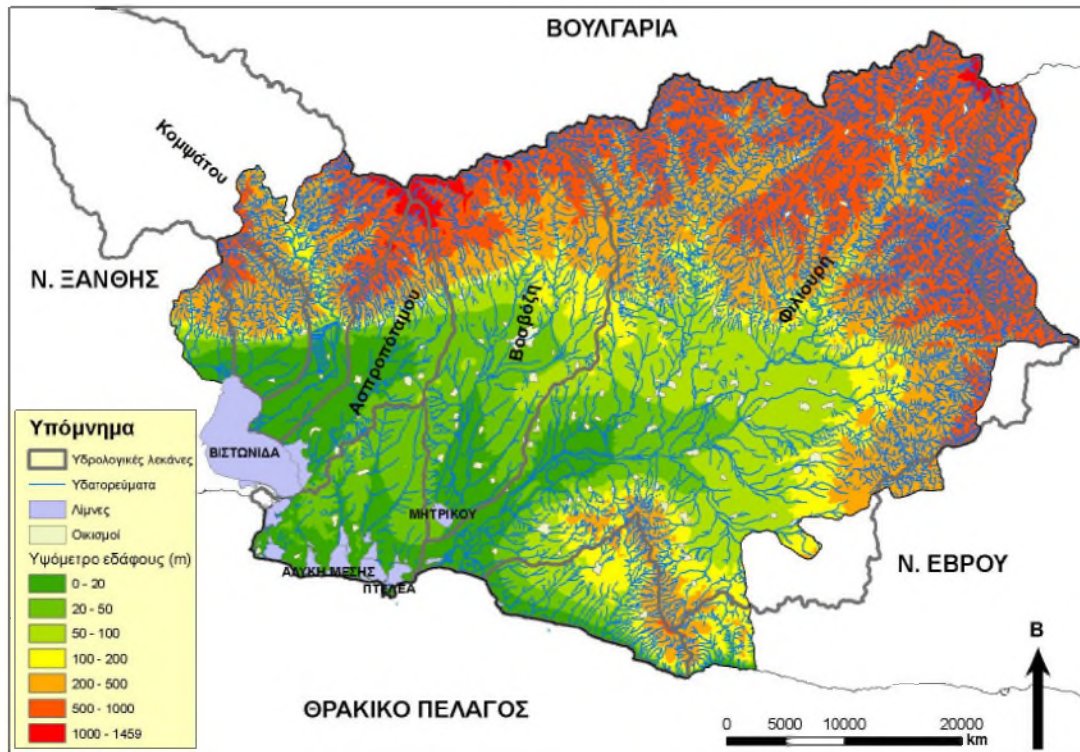
Ο Νομός Ροδόπης (Χάρτης 1) καταλαμβάνει έκταση 2.550 km² και συνορεύει βόρεια με τη Βουλγαρία, ανατολικά με τον Νομό Έβρου και δυτικά με τον Νομό Ξάνθης ενώ νότια βρέχεται από το Θρακικό Πέλαγος. Το ανάγλυφό του κυριαρχείται στο βόρειο τμήμα από τη βραχώδη μάζα του ορεινού συγκροτήματος της Ανατολικής Ροδόπης της οποίας οι ψηλότερες κορυφές Παπίκιο (1.460 m) και Μεγάλο Λιβάδι (1.267 m) βρίσκονται κατά μήκος των Ελληνο-Βουλγαρικών συνόρων. Το κεντρικό και νότιο τμήμα του ωστόσο είναι κατά βάση πεδινό με υψόμετρο που συνήθως δεν υπερβαίνει τα 100 m, και ειδικότερα, η παράκτια περιοχή του Νομού Ροδόπης διακρίνεται γεωμορφολογικά σε λοφώδη και πεδινή.

Στον Νομό Ροδόπης βρίσκονται 4 κύριες υδρολογικές λεκάνες (Πίνακας 1), η λεκάνη του π. Φιλιουρή (ή Λίσσος), η λεκάνη του π. Βοσβόζη (ρέμα Κομοτηνής), η λεκάνη του π. Ασπροπόταμου (ή Τραύος) και τμήμα της υδρολογικής λεκάνης του π. Κομψάτου (ή Ξηροπόταμος).

Ο π. Φιλιουρής, ο οποίος στραγγίζει το μεγαλύτερο τμήμα του Νομού, πηγάζει από την οροσειρά της Ροδόπης, ακολουθεί νοτιοδυτική πορεία και αφού συλλέξει μικρότερα υδατορεύματα στα ορεινά (Μακροπόταμος, Φιλιουροπόταμος, Μικρόρρεμα) καταλήγει στον όρμο Ανοιχτό του Θρακικού Πελάγους, δυτικά του χωριού Ίμερος και νότια της Λίμνης Ισμαρίδας (ή Μητρικού).

Ο π. Βοσβόζης πηγάζει από τα υψώματα της Ροδόπης βόρεια της Κομοτηνής (πρόποδες Παπίκιου Όρους και πρόποδες περιοχής Νυμφαίας) και εκβάλλει στην Λίμνη Ισμαρίδα, αφού πρώτα δεχθεί την απορροή και άλλων μικρότερων υδατορευμάτων (Χιονόρεμα, Καρυδιάς, Κάλχαντα).

Ο π. Ασπροπόταμος είναι μικρός ποταμός που πηγάζει από το Παπίκιο Όρος και εκβάλλει στο νοτιοανατολικό άκρο της Λίμνης Βιστωνίδας. Τέλος, ο π. Κομψάτος πηγάζει επίσης από την οροσειρά της Ροδόπης και ακολουθώντας πορεία νοτιοανατολική στο Νομό Ξάνθης και νοτιοδυτική στο Νομό Ροδόπης, εκβάλλει στο ανατολικό τμήμα της Λίμνης Βιστωνίδας.



Χάρτης 1. Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά του Ν. Ροδόπης

Πίνακας 1. Κύριες υδρολογικές λεκάνες στο Νομό Ροδόπης

Υδρολογική λεκάνη	Έκταση (km ²)	Υψόμετρο (m)			Μέση κλίση (%)
		min	max	mean	
Φιλιουρή	1486	0	1206	312	12
Βοσβόζη	365	4	1411	243	8
Ασπροπόταμου	139	0	1436	179	15
Κομψάτου	596	0	1585	512	25

Η λίμνη Βιστωνίδα έχει έκταση 45 km² και βάθος 2-2,5 m και είναι ο αποδέκτης της ροής τριών κύριων ποταμών που εκβάλλουν σε αυτή, του Κόσυνθου, του Κομψάτου και του Ασπροπόταμου. Η ιδιαιτερότητα της λίμνης Βιστωνίδα είναι ότι το νερό της παρουσιάζει μεταβολές στην περιεκτικότητα των αλάτων. Έτσι στο βόρειο τμήμα της λίμνης υπάρχουν γλυκά νερά από τις εισροές τριών ποταμών ενώ στο νότιο τμήμα της η λίμνη είναι αλμυρή και το νερό αυτό προέρχεται από τη θάλασσα μέσω καναλιών που τη συνδέουν με τη λίμνη.

Η λίμνη Ισμαρίδα (ή Μητρικού) είναι μία αβαθής λίμνη γλυκού νερού η οποία βρίσκεται νότια της Κομοτηνής, σε απόσταση περίπου 4 km από τη θάλασσα. Στη ζώνη που την χωρίζει από τη θάλασσα κυριαρχούν εναλλαγές αμμωδών και αργιλοϊλουόχων υλικών η διάταξη των οποίων οφείλεται στη δελταϊκή δράση κυρίως

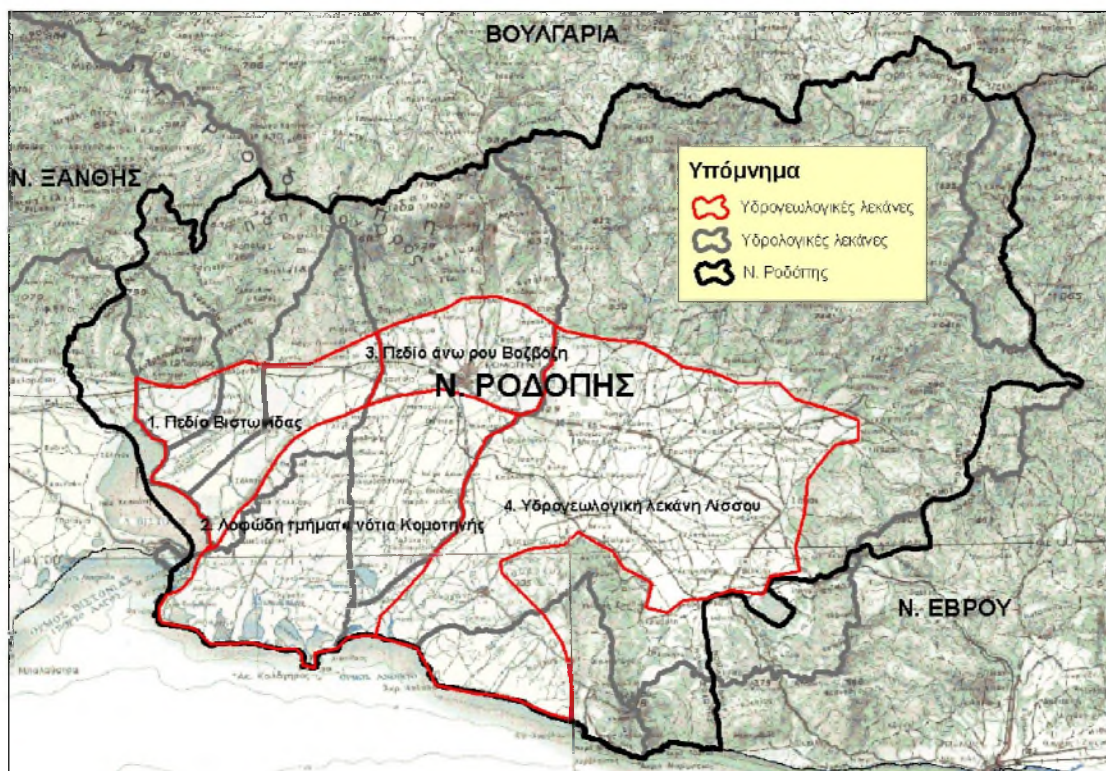
του π. Φιλιουρή αλλά και στη δράση της θάλασσας. Η λίμνη είναι ο φυσικός αποδέκτης των νερών του π. Βοσβόζη και η διευθέτηση της κοίτης του ποταμού, σε συνδυασμό με την εκφόρτιση σε αυτόν και των υπολοίπων χειμάρρων της ορεινής ζώνης, έχουν αυξήσει αισθητά τις ποσότητες νερού που φθάνουν ετησίως στη λίμνη, την ταχύτητα ροής και κατά συνέπεια τον όγκο των φερτών υλών. Ανατολικά της λίμνης υπάρχει το σύμπλεγμα λιμνοθαλασσών Πτελέας, Αλυκής, Καρατζά, Ξηρολίμνης και άλλων μικρότερων.

1.2 Υπόγεια ύδατα

Το υπόγειο υδατικό δυναμικό του Νομού Ροδόπης εμφανίζεται ιδιαίτερα πλούσιο και εξυπηρετεί το μεγαλύτερο ποσοστό των υδατικών αναγκών για την ύδρευση και την άρδευση της περιοχής. Οι υδρογεωλογικοί σχηματισμοί αναπτύσσονται στο πεδινό και λοφώδες τμήμα του νομού και δομούνται κυρίως από παλαιογενή ιζήματα, νεογενείς σχηματισμούς και τεταρτογενείς προσχώσεις (Διαμαντής, 1991).

Οι κύριες υδρογεωλογικές λεκάνες, οι οποίες μπορεί να είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους ή να βρίσκονται σε υδραυλική επικοινωνία δίνονται στο Χάρτη 1 και είναι (Διαμαντής, 1991, 2009):

- Το πεδίο της Βιστωνίδας
- Τα λοφώδη τμήματα νότια Κομοτηνής (κύριο λοφώδες τμήμα)
- Πεδίο άνω ρου των χειμάρρων Βοσβόζη, Καρυδιάς, τρελοχειμάρρου
- Υδρογεωλογική λεκάνη κλάδων π. Λίσσου (χαμηλό τμήμα)



Χάρτης 2. Όρια υδρογεωλογικών λεκανών στο πεδινό τμήμα του Ν. Ροδόπης

1.2.1. Πεδίο Βιστωνίδας

Το πεδίο της Βιστωνίδας καταλαμβάνει το νοτιοδυτικό τμήμα του Νομού και φιλοξενεί ένα σύνολο ιζημάτων δελταϊκού τύπου με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά όπως την παρουσία έντονων ποταμοχειμάρριων στρωμάτων και την ανάπτυξη ζωνών κατά μήκος παλιών και νέων κοιτών (Κομψάτος, Ασπροπόταμος), με αδρομερή υλικά τα οποία έχουν πιο λεπτή κοκκομετρική σύσταση όσο πλησιάζουμε προς τη λίμνη και γύρω από την περιοχή της λίμνης εξαπλώνονται υλικά με αργιλική ή ιλυσωαμμώδη σύσταση.

Το πεδίο αποτελεί σχεδόν υδρογεωλογική μονάδα και έρχεται σε επαφή κατά θέσεις με τις γειτονικές λεκάνες. Συγκεκριμένα, παρατηρείται μία σημαντική υπόγεια επαφή ανάμεσα στο πεδίο της Βιστωνίδας και τα λοφώδη τμήματα νότια της Κομοτηνής, με κατεύθυνση από τα υδροφόρα της Βιστωνίδας προς τα υδροφόρα των λόφων.

Το πεδίο χωρίζεται σε δύο περιοχές, την περιοχή πλησίον της κοίτης του Κομψάτου και την περιοχή βόρειο-ανατολικά του άξονα Πολύανθου-Αμβροσίας.

Στην περιοχή πλησίον της κοίτης του Κομψάτου, παρουσιάζονται υψηλές τιμές υδροπερατότητας και αποθηκευτικότητας. Η εκμετάλλευση της υδροφορίας γίνεται με περισσότερες από 850 αβαθείς γεωτρήσεις βάθους μέχρι 30 μέτρων και 150 βαθιές γεωτρήσεις με μεγάλες παροχές της τάξης των 120-150 m³/h. Πολλές από τις αβαθείς γεωτρήσεις εξαντλούνται ή κατεβαίνει υπερβολικά η στάθμη τους προς το τέλος του καλοκαιριού αλλά επανέρχεται στα κανονικά επίπεδα μέχρι το τέλος του Φθινοπώρου ακόμα και κατά τη διάρκεια των ξηρών ετών.

Η περιοχή ΒΑ του άξονα Πολύανθου-Αμβροσίας διαφέρει ριζικά από την προηγούμενη κυρίως ως προς τη δομή των υδροφόρων. Φιλοξενεί ένα σχετικά μικρού δυναμικού φρεάτιο ή μερικώς υπό πίεση ορίζοντα ενώ παράλληλα περιορισμένη εμφανίζεται και η βαθιά υδροφορία. Υπάρχουν περισσότερες από 1000 αβαθείς γεωτρήσεις βάθους μέχρι 20 μέτρων με παροχές από 5-10 m³/h και 25 βαθιές γεωτρήσεις των οποίων η παροχή δεν ξεπερνά τα 70 m³/h.

Η ποιότητα των νερών του πεδίου της Βιστωνίδας θεωρείται κατάλληλη όχι μόνο για άρδευση αλλά και για ύδρευση (ΔΠΘ, 2008).

1.2.2. Λοφώδη τμήματα νότια Κομοτηνής

Η λοφώδης περιοχή νότια της Κομοτηνής αποτελεί ενιαία υδρογεωλογική λεκάνη και ορίζεται δυτικά από το τμήμα της εθνικής οδού Ξάνθης-Κομοτηνής, ανατολικά από τον π. Λίσσο και νότια φθάνει μέχρι τη θάλασσα. Στην περιοχή εμφανίζεται έντονη καλλιεργητική δραστηριότητα και κατά συνέπεια αποτελεί ένα σημαντικό αναπτυξιακό παράγοντα για το νομό. Διακρίνονται δύο υπόγεια υδροφόρα συστήματα, της Πόρπης δυτικά του π. Βοσβόζη από το οποίο αρδεύονται 100.000 στρ. και του Ν. Σιδηροχωρίου ανατολικά του π. Βοσβόζη από το οποίο αρδεύονται 9.500 στρ..

Στο πεδίο της Πόρπης, τα χονδρόκοκκα υλικά (άμμος, χαλίκια, κροκάλες) αποτελούν το κυρίως υδροφόρο στρώμα της περιοχής, του οποίου ο πυθμένας αποτελείται από στρώμα γρι-πράσινης αργίλου. Το υδροφόρο στρώμα συχνά εμφανίζεται σε δύο ή και τρεις ενστρωματώσεις οι οποίες παρουσιάζουν υδραυλική επικοινωνία μεταξύ τους, ενώ το φαινόμενο αυτό γίνεται εντονότερο στο νότιο όριο της περιοχής. Τα στρώματα τα οποία παρεμβάλλονται ενδιάμεσα των παραπάνω ενστρωματώσεων έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ποικίλων συνθηκών υδραυλικής αγωγιμότητας του σχηματισμού τόσο στην οριζόντια όσο και στην κατακόρυφη διεύθυνση. Το μέσο πάχος των υδροφόρων της περιοχής είναι 48 m.

Εντοπίζεται ένα πυκνό δίκτυο με περισσότερες από 600 γεωτρήσεις, οι οποίες χρησιμοποιούνται τόσο για αρδευτικούς όσο και υδρευτικούς σταθμούς. Το βασικό χαρακτηριστικό της συνολικής εικόνας του υπό εξέταση υδροφόρου είναι οι αρνητικές τιμές του απόλυτου υψομέτρου της στάθμης λόγω των συνθηκών της εντατικής εκμετάλλευσης οι οποίες λαμβάνουν χώρα συστηματικά στην περιοχή την τελευταία 20-ετία.

Όσον αφορά στην ποιότητα του νερού, υπάρχει ένα αλμυρό μέτωπο το οποίο εντοπίζεται στην περιοχή Γλυκονερίου, από τη δυτική ακτή της περιοχής έρευνας ενώ αλμυρό μέτωπο εντοπίζεται επίσης στο τμήμα της περιοχής έρευνας που εκτείνεται νοτιοδυτικά της λίμνης Ισμαρίδας. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα εμφανίζει αρκετά υψηλές τιμές της τάξης των 2000 έως 12.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ δημιουργώντας προβλήματα κατά τη χρήση του νερού στην άρδευση. Το κυρίως υδροφόρο στρώμα βορειοδυτικά του άξονα μεταξύ των λιμνών Ισμαρίδας-Βιστωνίδα περιέχει υπόγεια νερά πολύ καλής ποιότητας, με τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας που δεν υπερβαίνουν τα 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Το πεδίο Ν. Σιδηροχωρίου αποτελείται από ένα φρεάτιο υδροφόρο ορίζοντα μέχρι το βάθος των 30 m ενώ από τα 90 έως τα 120 m αναπτύσσεται ένας υπό πίεση υδροφόρος ορίζοντας μικρής δυναμικότητας, ο οποίος τροφοδοτείται από τον φρεάτιο ορίζοντα. Στην περιοχή είναι έντονη η παρουσία εγκλωβισμένων αλμυρών νερών παλαιότερης ηλικίας στο φρεάτιο ορίζοντα ενώ με την εντατική εκμετάλλευση των τελευταίων δύο δεκαετιών έγινε αποδέκτης σύγχρονης διείσδυσης θαλασσινού νερού σαν αποτέλεσμα της μεγάλης υποχώρησης της στάθμης εξαιτίας των υπεραντλήσεων σε συνδυασμό με το πολύ χαμηλό υψόμετρο της περιοχής. Επιπρόσθετα, ο υπό πίεση υδροφόρος ορίζοντας έγινε αποδέκτης αλμυρού νερού από τη λειτουργία γεωτρήσεων οι οποίες επιτρέπουν την κατακόρυφη υδραυλική επικοινωνία φυσικώς απομονωμένων υδροφορέων, ο οποίος υπό άλλες συνθήκες θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για άρδευση (ΔΠΘ, 2008).

1.2.3. Πεδίο άνω ρου των χειμάρρων Βοσβόζη, Καρυδιάς, Τρελοχειμάρρου

Το πεδίο των χειμάρρων Βοσβόζη, Καρυδιάς και Τρελοχειμάρρου βρίσκεται βορειοδυτικά, βόρεια και βορειοανατολικά της πόλης της Κομοτηνής και έχει νότιο όριο την εθνική οδό Ξάνθης-Κομοτηνής, και ανατολικό και δυτικό όριο τον υδροκρίτη της λεκάνης του π. Βοσβόζη.

Το πεδίο αυτό παρουσιάζει μικρό ενδιαφέρον ως προς τα υπόγεια νερά. Το τμήμα ανατολικά της Κομοτηνής είναι πιο εξασθενημένο από πλευράς υπόγειων νερών και αντλείται από δύο μόνο βαθιές γεωτρήσεις και ένα αριθμό περίπου 50 αβαθών γεωτρήσεων. Μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το τμήμα δυτικά της Κομοτηνής που ταυτίζεται με τον άνω ρου του Βοσβόζη και καλύπτεται από τις προσχώσεις των χειμάρρων που καταλήγουν σ' αυτόν από την ορεινή ζώνη.

Στις προσχώσεις του πεδινού τμήματος του άνω ρου του Βοσβόζη φιλοξενείται ένα φρεάτιο ορίζοντας, η εκμετάλλευση του οποίου καλύπτει τις περιορισμένες αρδευτικές ανάγκες. Από την περιοχή αυτή ικανοποιούνται και οι ανάγκες ύδρευσης του Δήμου Κομοτηνής. Η ποιότητα των υπόγειων νερών είναι άριστη και ικανοποιεί όλες τις χρήσεις (ΔΠΘ, 2008).

1.2.4. Υδρογεωλογική λεκάνη κλάδων π. Λίσσου

Η υδρογεωλογική λεκάνη κλάδων του π. Λίσσου καταλαμβάνει τη μεγαλύτερη σχεδόν έκταση του χαμηλού ανάγλυφου του νομού και κατανέμεται μεταξύ του λοφώδους ανάγλυφου και τριών πεδινών τμημάτων, του Φλουροπόταμου ανατολικά, του Μακροπόταμου δυτικά και το τμήμα της νέας διαμορφωμένης κοίτης του Λίσσου που εκτείνεται νότια μέχρι τη θάλασσα. Οι λοφώδεις περιοχές χαρακτηρίζονται από την απουσία οποιασδήποτε μορφής υδροφορίας και ως εκ τούτου επικρατούν ξηρικές καλλιέργειες (σιτηρά, καπνός). Στα πεδινά τμήματα φιλοξενούνται αβαθή υδροφόρα τα οποία καλύπτουν τις αρδευτικές ανάγκες της περιοχής και εκτός από τα σιτηρά καλλιεργούνται ο αραβόσιτος, το βαμβάκι και τα τεύτλα.

Στα πεδινά τμήματα της λεκάνης του Λίσσου εντοπίζεται ένα σύνολο πρόσφατων ιζημάτων το μέγιστο πάχος των οποίων εκτιμάται στα 15 m και το οποίο μειώνεται προς τα νότια της περιοχής. Μόνο στο τρίτο πεδινό τμήμα, ευρύτερη περιοχή Ξυλαγανής, εντοπίζονται και πλειστοκαινικές αποθέσεις το πάχος των οποίων κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 50 και 80 m.

Οι αρδευτικές ανάγκες ικανοποιούνται σχεδόν εξ' ολοκλήρου με σημαντικά όμως προβλήματα κατά τα ξηρά υδρολογικά έτη. Προβλήματα υφαλμύρινσης παρατηρούνται στο νότιο τμήμα της περιοχής, πλησίον του οικισμού Ίμερος, λόγω της εκβάθυνσης των γεωτρήσεων για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών (ΔΠΘ, 2008).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΝΟΜΟ ΡΟΔΟΠΗΣ

2.1. Εισαγωγή

Για την επίτευξη των σκοπών του παρόντος, επιλέχθηκε η εφαρμογή του συστήματος προσομοίωσης των υπόγειων υδάτων FEFLOW στις υδρογεωλογικές λεκάνες του Νομού Ροδόπης. Το FEFLOW (Finite Element FLOW) είναι ένα εξειδικευμένο λογισμικό για την προσομοίωση της ροής των υπόγειων υδάτων, της μεταφοράς μάζας διαλυμένων ουσιών και της μεταφοράς θερμότητας σε πορώδη μέσα. Χρησιμοποιείται η ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων για την αριθμητική επίλυση της εξίσωσης ροής των υπόγειων υδάτων, τόσο σε συνθήκες κορεσμένης ροής όσο και ακόρεστης, καθώς και των εξισώσεων μεταφοράς μάζας και θερμότητας, λαμβάνοντας επιπρόσθετα υπόψη την επίδραση της πυκνότητας του ρευστού και τις χημικές μεταβολές σε συστήματα χημικών αντιδράσεων πολλαπλών ουσιών.

Οι υδρογεωλογικές λεκάνες, τα όρια των οποίων δόθηκαν στο Χάρτη 2, εισήχθησαν στο περιβάλλον εργασίας του FEFLOW για την ανάπτυξη ενός ενιαίου ομοιώματος των υπόγειων υδάτων του Νομού Ροδόπης. Η επιλογή αυτή πλεονεκτεί έναντι της δημιουργίας τεσσάρων ή και περισσότερων διακριτών ομοιωμάτων διότι το εργαλείο που παράγεται δίνει τη δυνατότητα για μια ταυτόχρονη διαχείριση των υπόγειων υδάτων όλων των υδρογεωλογικών λεκανών του Νομού, ενώ παράλληλα λαμβάνονται υπόψη με μεγαλύτερη ακρίβεια οι συνθήκες υδραυλικής επικοινωνίας των υπόγειων υδάτων μεταξύ των υδρογεωλογικών λεκανών αποφεύγοντας την επισφαλή εκτίμηση των οριακών συνθηκών μεταξύ των λεκανών και επιτυγχάνοντας ακριβέστερο υπολογισμό του ισοζυγίου των υπόγειων υδάτων.

Ένα από τα μειονεκτήματα του FEFLOW, με γνώμονα την ολοκληρωμένη διαχείριση των υδάτων μιας περιοχής, είναι η έλλειψη υπολογιστικών διαδικασιών για την προσομοίωση των απωλειών νερού λόγω της εξάτμισης από την επιφάνεια του εδάφους και της διαπνοής από τα στομάτια των φυτών, και κατά συνέπεια είναι εφικτή μόνο η αδρομερής εκτίμηση της τροφοδοσίας των υπόγειων υδάτων. Για την άρση του μειονεκτήματος αυτού, αξιοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης

των υδάτων που πραγματοποιείται με τα συστήματα προσομοίωσης MIKE SHE και MIKE 11, η οποία περιγράφεται στο Παραδοτέο DB1.7 του παρόντος έργου.

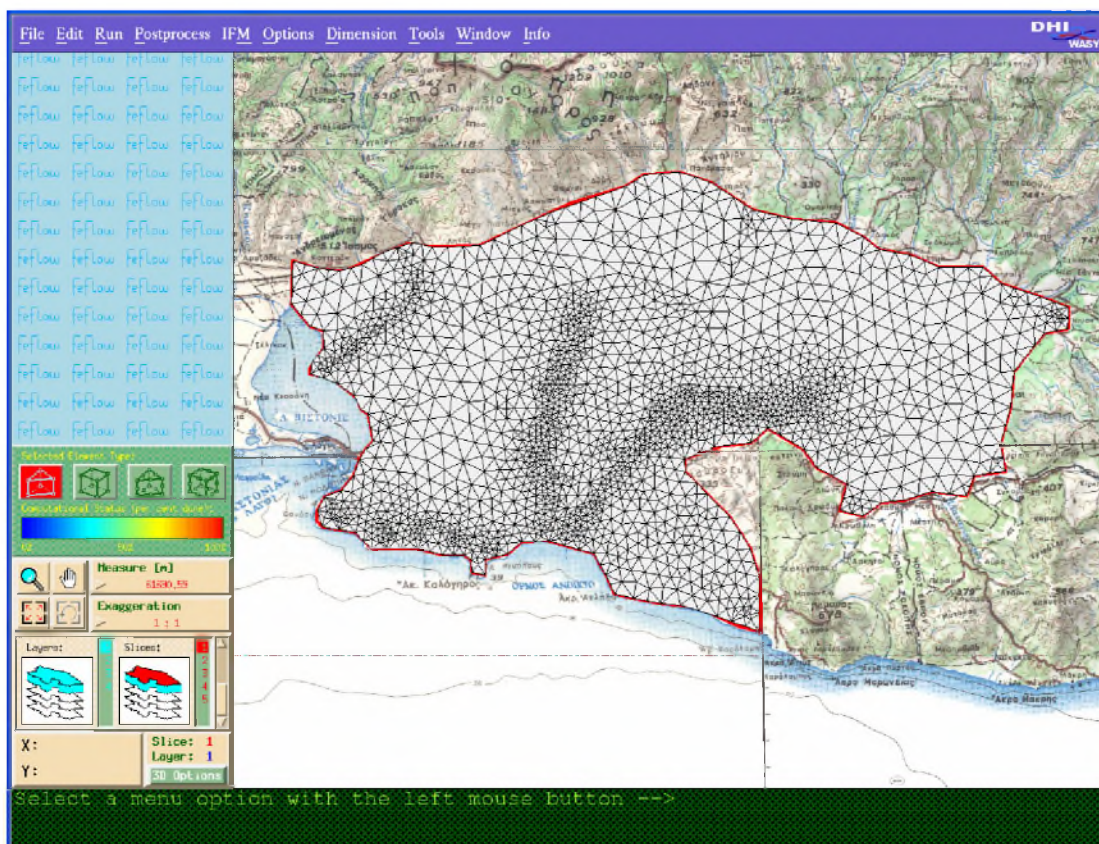
2.2. Εγκατάσταση του FEFLOW στις υδρογεωλογικές λεκάνες του Ν. Ροδόπης

2.2.1 Δημιουργία δικτύου πεπερασμένων στοιχείων

Το πρώτο βήμα για την ανάπτυξη του ομοιώματος μιας περιοχής χρησιμοποιώντας την ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων είναι η διακριτοποίηση ή διαχωρισμός της περιοχής σε πεπερασμένα στοιχεία. Στο περιβάλλον του FEFLOW υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν τριγωνικά ή τετραπλευρικά στοιχεία σε προβλήματα δύο διαστάσεων και πενταεδρικά (τριγωνικά πρίσματα) ή εξαεδρικά στοιχεία σε προβλήματα τριών διαστάσεων. Σε κάθε περίπτωση ο διαχωρισμός της περιοχής σε πεπερασμένα στοιχεία γίνεται σύμφωνα με τις ιδιαίτερες συνθήκες της περιοχής αλλά και του προβλήματος που επιλύεται. Ένα ομοιόμορφο δίκτυο είναι εύκολο να κατασκευασθεί αλλά δεν αναπαριστάνει πάντοτε καλά την περιοχή ροής. Έτσι, σε τμήματα της περιοχής όπου αναμένονται απότομες μεταβολές και μεγάλες κλίσεις του πιεζομετρικού φορτίου το δίκτυο πρέπει να έχει μικρού μεγέθους στοιχεία. Επίσης, σε περιοχές με ακανόνιστα όρια και για την καλύτερη αναπαράσταση αυτών θα πρέπει να χρησιμοποιούνται περισσότερα στοιχεία απ' ότι σε περιοχές με ομαλά όρια. Βέβαια, θα πρέπει να έχουμε υπόψη ότι η χρησιμοποίηση μεγάλου αριθμού στοιχείων δίνει μεν ακριβέστερη λύση του προβλήματος αλλά επιβραδύνει την υπολογιστική διαδικασία.

Για τη δημιουργία του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων στο ομοίωμα των υπόγειων υδάτων του Νομού Ροδόπης, συνολικής έκτασης 1030 km², χρησιμοποιήθηκαν 14984 πενταεδρικά στοιχεία και κατ' επέκταση 9805 υπολογιστικοί κόμβοι (σημεία). Αρχικά η περιοχή του ομοιώματος χωρίστηκε σε 4 υποπεριοχές, μία για κάθε υδρογεωλογική λεκάνη, και η κάθε υποπεριοχή διακριτοποιήθηκε στην επιφάνεια του εδάφους (1^ο επίπεδο) με τριγωνικά στοιχεία, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1. Μικρότερα στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν πλησίον των περιοχών που διασχίζουν τα ποτάμια, στις περιοχές που γίνονται αντλήσεις και στις περιοχές που το θαλασσινό νερό εισέρχεται στον υδροφορέα. Από την επιφάνεια του εδάφους και μέχρι τον πυθμένα του υδροφορέα χρησιμοποιήθηκαν πέντε συνολικά

επίπεδα, και το κάθε ένα από αυτά χωρίστηκε με πεπερασμένα στοιχεία όπως αυτά του Σχήματος 1.



Σχήμα 1. Διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία στο ομοίωμα υπόγειων υδάτων του Νομού Ροδόπης

2.2.2 Ανάπτυξη εννοιολογικού ομοιώματος υπόγειων υδάτων

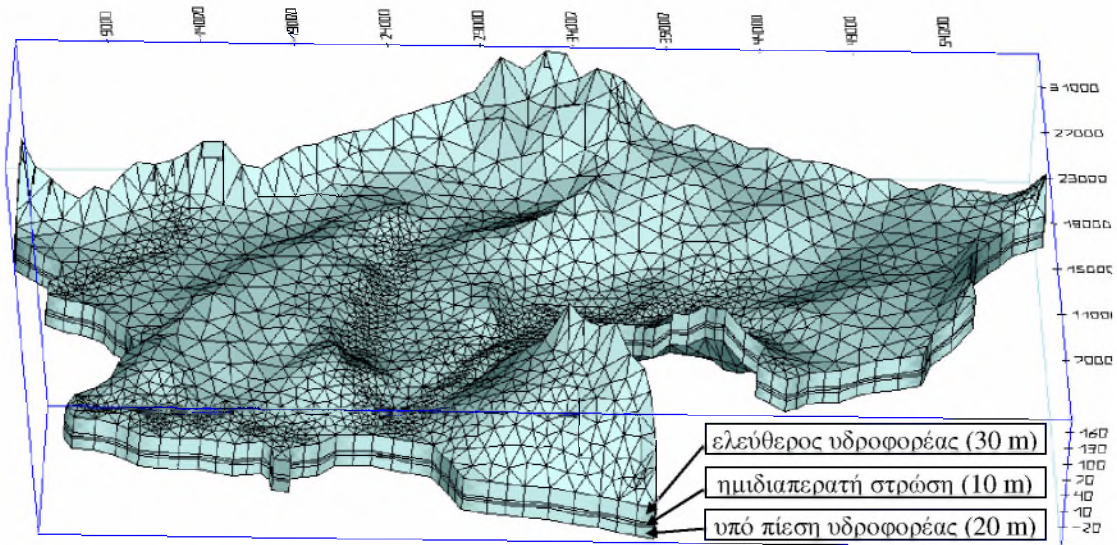
Το εννοιολογικό ομοίωμα των υπόγειων υδάτων μιας περιοχής αποτελεί τη βασική αναπαράσταση του πολύπλοκου φυσικού συστήματος του υδροφορέα. Η ανάπτυξη του εννοιολογικού ομοιώματος είναι ιδιαίτερης σημασίας και αποτελεί τη βάση για την επιτυχή ανάπτυξη του αριθμητικού ομοιώματος των υπόγειων υδάτων μιας περιοχής. Τα στοιχεία ενός εννοιολογικού ομοιώματος περιλαμβάνουν τον καθορισμό των εκτάσεων και τα χαρακτηριστικά του υδροφόρου συστήματος, την κατανόηση της κατεύθυνσης ροής των υπόγειων υδάτων, καθώς και τις εισροές και εκροές νερού στον υδροφορέα. Επίσης, η εννοιολογική σύλληψη πρέπει να λαμβάνει υπόψη τον καθολικό στόχο της προσομοίωσης αλλά και τα διαθέσιμα υδρογεωλογικά δεδομένα. Η ανάπτυξη του εννοιολογικού ομοιώματος απαιτεί ανασκόπηση της βιβλιογραφίας και των δεδομένων σχετικά με τον υδροφόρο ορίζοντα και τη ροή των

υπογείων υδάτων στην περιοχή του έργου. Στο πλαίσιο του παρόντος έργου έγινε μια λεπτομερή έρευνα των διαθέσιμων πληροφοριών από τις μελέτες οι οποίες έχουν συνταχθεί κατά καιρούς στο πλαίσιο των ερευνητικών δραστηριοτήτων του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης [Διαμαντής (1991, 2009), Δράκος και Μουζαλιώτης (2003), Πισιναράς (2003), Petalas and Lambrakis (2006), Pisinaras et al. (2007), Καλλιώρας (2008), Petalas et al. (2009)] αλλά και από πρωτογενή δεδομένα που παραχωρήθηκαν από την Περιφερειακή Ενότητα Ροδόπης.

2.2.2.1. Γεωλογικά στρώματα και υδραυλικά χαρακτηριστικά υδροφορέων

Κατόπιν επεξεργασίας των δεδομένων των γεωλογικών τομών των γεωτρήσεων αλλά και των στοιχείων που δίνονται στις παραπάνω μελέτες καταλήξαμε στο να αναπαραστήσουμε το πολύπλοκο σύστημα των υδροφορέων του Ν. Ροδόπης με τρία γεωλογικά στρώματα, τα οποία εκτείνονται σ' όλη την έκταση της περιοχής του ομοιώματος. Τα υδραυλικά χαρακτηριστικά των στρωμάτων αυτών διαφοροποιούνται από θέση σε θέση. Το πρώτο στρώμα, του οποίου το πάνω όριο είναι η επιφάνεια του εδάφους, αναπαριστά τον ελεύθερο υδροφορέα. Το επόμενο γεωλογικό στρώμα βρίσκεται ακριβώς κάτω από το προηγούμενο και αναπαριστά μια ημιδιαπερατή στρώση στην οποία το νερό κινείται με πολύ μικρότερη ταχύτητα ροής. Το τελευταίο στρώμα, στο κάτω όριο του οποίου θεωρείται ότι υπάρχει μία αδιαπέρατη στρώση, αναπαριστά το βαθύτερο υδροφορέα στον οποίο το νερό κινείται σε υπό πίεση συνθήκες. Το πάχος του υπερκείμενου στρώματος που φιλοξενεί τον ελεύθερο υδροφορέα είναι 30 m, της ημιδιαπερατής στρώσης είναι 10 m, ενώ το πάχος του υπό πίεση υδροφορέα είναι 20 m (Σχήμα 2).

Η παραπάνω θεώρηση για τον κατακόρυφο διαχωρισμό των υδροφόρων στρωμάτων υιοθετήθηκε στο μεγαλύτερο τμήμα της έκτασης του ομοιώματος. Εξάιρεση αποτελεί το πεδίο της Πόρπης, το οποίο βρίσκεται δυτικά του π. Βοσβόζη και αποτελεί τμήμα της υδρογεωλογικής λεκάνης που βρίσκεται στα λοφώδη τμήματα νότια της Κομοτηνής. Στην περίπτωση αυτή θεωρήθηκε ότι και οι τρεις γεωλογικές στρώσεις έχουν τα ίδια υδραυλικά χαρακτηριστικά και συνολικά αναπαριστούν έναν ενιαίο ελεύθερο υδροφορέα πάχους 60 m.



Σχήμα 2. Ανάγλυφο του εδάφους και γεωλογικά στρώματα στο εννοιολογικό ομοίωμα των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης

Η υδραυλική αγωγιμότητα στα ανωτέρω υδροφόρα στρώματα κυμαίνεται από $5,8 \text{ m}^3/\text{d}$ σε $201,6 \text{ m}^3/\text{d}$, σύμφωνα με τα στοιχεία που συλλέχθηκαν από τις διάφορες μελέτες αλλά και από τα στοιχεία των δοκιμαστικών αντλήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο του παρόντος έργου. Τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας βρέθηκαν σε 55 σημεία στην περιοχή μελέτης, τα περισσότερα από τα οποία εντοπίζονται στο πεδίο της Βιστωνίδας και στα λοφώδη τμήματα νότια της Κομοτηνής. Η χωρική ολοκλήρωση της ανωτέρω σημειακής πληροφορίας έγινε με τη μέθοδο των σταθμισμένων αντίστροφων αποστάσεων (Inverse Distance Weighted) και προέκυψαν οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας σε όλη την έκταση του ομοιώματος. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιήθηκαν στον ελεύθερο υδροφόρα και στον υπό πίεση υδροφόρα, ενώ για την ημιδιαπερατή στρώση θεωρήθηκε ότι η υδραυλική αγωγιμότητα είναι ίση με $8,64 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{d}$. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην υδρογεωλογική λεκάνη που βρίσκεται στα λοφώδη τμήματα νότια της Κομοτηνής, κατά μήκος του ποταμού Βοσβόζη και μέχρι τη λίμνη Ισμαρίδα εντοπίζεται ένα γεωλογικό ρήγμα, το οποίο είναι το φυσικό όριο μεταξύ του πεδίου της Πόρπης και του πεδίου του Ν. Σιδηροχωρίου. Η υδραυλική αγωγιμότητα στην περιοχή του ρήγματος θεωρήθηκε ίση με $8,64 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{d}$, τιμή η οποία προέκυψε κατά τη ρύθμιση του ομοιώματος.

Από την επεξεργασία των δεδομένων στις διάφορες μελέτες δεν προέκυψαν επαρκή στοιχεία για την εκτίμηση της χωρικής κατανομής των τιμών της ειδικής σε

νερό απόδοσης των ελεύθερων υδροφόρων στρωμάτων και της ειδικής αποθηκευτικότητας των υπό πίεση υδροφόρων στρωμάτων, με εξαίρεση τα στοιχεία που παραθέτονται από τον Καλλιώρα (2008) για το πεδίο της Πόρπης, χωρίς ωστόσο να είναι δυνατή η χωροθέτησή τους, και τα στοιχεία που προέκυψαν από τις δοκιμαστικές αντλήσεις στο πλαίσιο του παρόντος έργου. Έτσι, οι τιμές της ειδικής σε νερό απόδοσης του ελεύθερου υδροφορέα και της ειδικής αποθηκευτικότητας του υπό πίεση υδροφορέα, θεωρήθηκαν σταθερές σε όλη την έκταση του ομοιώματος και ελήφθησαν ίσες με 0,02 και 0,0001 m^{-1} , αντίστοιχα.

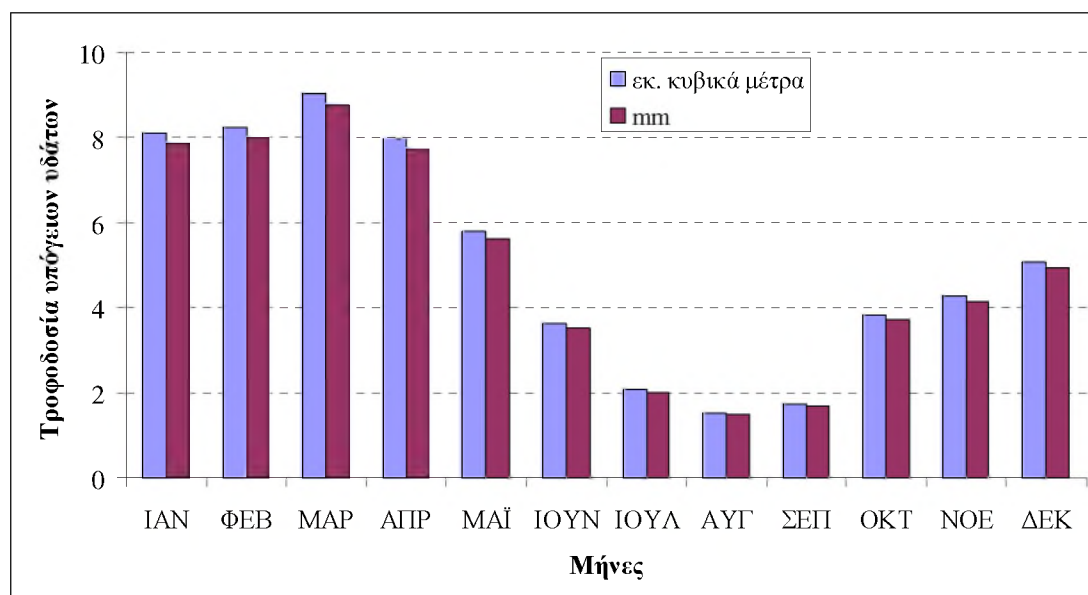
2.2.2.2. Οριακές συνθήκες ομοιώματος

Οι εισροές και εκροές νερού στα υπόγεια νερά του Ν. Ροδόπης καθορίζουν τις οριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στην περιοχή του ομοιώματος. Εισροές νερού έχουμε κυρίως από την επιφάνεια του εδάφους αλλά και ένα μικρότερο ποσοστό από τμήματα των παρυφών του ορεινού όγκου που έρχεται πλευρικά σε επαφή με τα υδροφόρα στρώματα. Εκροές νερού έχουμε από τις αντλήσεις μέσω των γεωτρήσεων για την κάλυψη κυρίως των αρδευτικών αναγκών αλλά και των άλλων χρήσεων (ύδρευση, βιομηχανία, κτηνοτροφία).

Η εισροή νερού από την επιφάνεια του εδάφους προκαλείται κυρίως από τις βροχοπτώσεις και δευτερευόντως από τις επιστροφές των αρδεύσεων και από τις διηθήσεις των επιφανειακών υδάτων. Στο πλαίσιο του παρόντος, η ποσότητα του νερού που καταλήγει στην υπόγεια στάθμη και τροφοδοτεί τα υπόγεια νερά υπολογίζεται από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του υδατικού ισοζυγίου των υδρολογικών λεκανών του Ν. Ροδόπης που πραγματοποιήθηκε με το MIKE SHE και MIKE 11 (Παραδοτέο DB1.7) και εισέρχεται ως οριακή συνθήκη με μορφή χρονοσειρών στο FEFLOW. Η χωρική κατανομή της τροφοδοσίας των υπόγειων υδάτων από την επιφάνεια του εδάφους προσεγγίστηκε με βάση την περιοχή επηρεασμού του κάθε μετεωρολογικού σταθμού όπως αυτή καθορίζεται από τα πολύγωνα Thiessen στα οποία χωρίζεται η περιοχή προσομοίωσης (βλέπε και Παραδοτέο DB1.7). Στον Πίνακα 2 δίνεται το υπερετήσιο ύψος βροχής και τροφοδοσίας των υπόγειων υδάτων στην έκταση που αντιστοιχεί στους σταθμούς με δεδομένα ύψους βροχόπτωσης για την περίοδο 1981-2011, ενώ στο Σχήμα 3 δίνεται η μέση μηνιαία μεταβολή της τροφοδοσίας των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης για την ίδια περίοδο.

Πίνακας 2. Ύψος βροχόπτωσης και τροφοδοσία υπόγειων υδάτων στο Ν. Ροδόπης

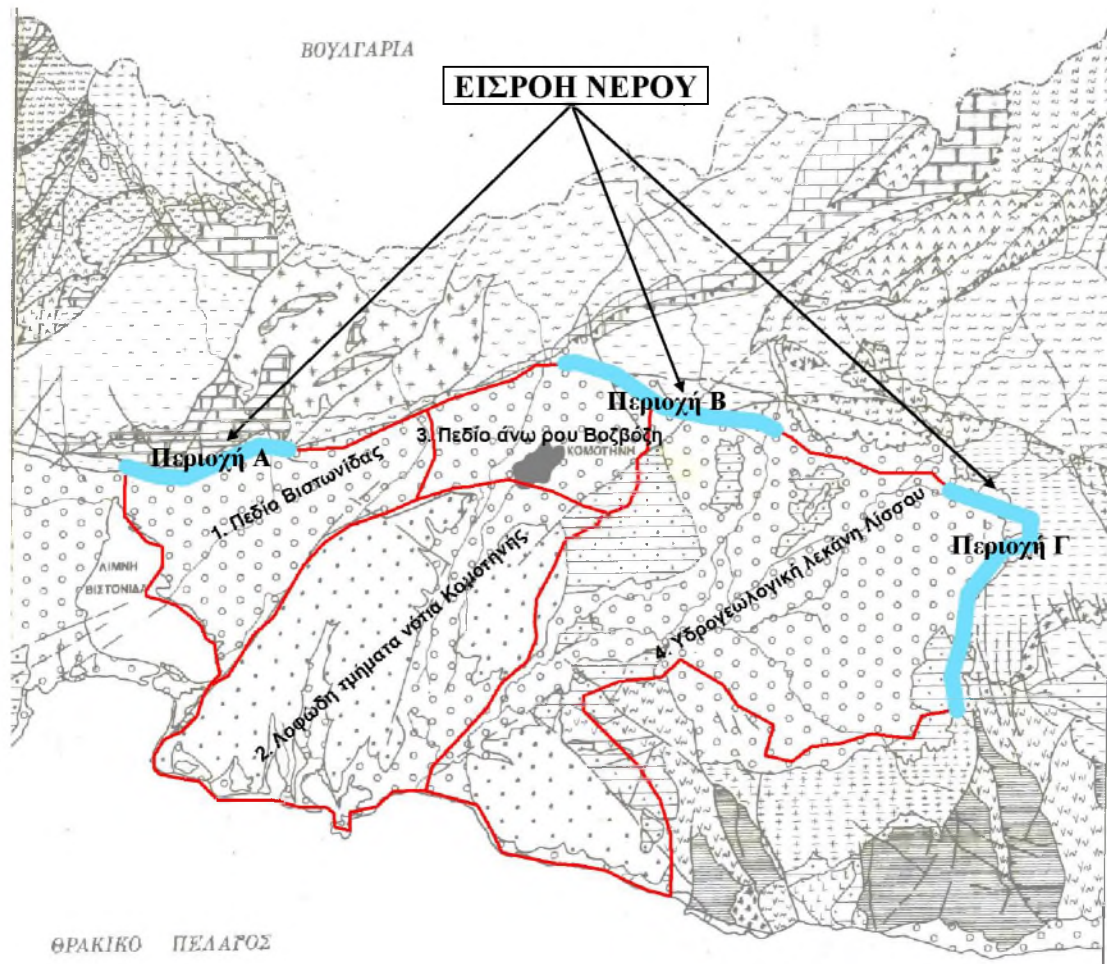
Μετεωρο- λογικός σταθμός	Έκταση πολυγώνου Thiessen, km ²	Ύψος βροχής, mm	Τροφοδοσία υπόγειων υδάτων	
			mm	% του ύψους βροχής
Αρίσβη	160,8	473	43	9,1
Οργάνη	168,6	917	109	11,9
Κρωβύλη	132,3	573	58	10,2
Μικρά Ξύδια	38,4	576	52	9,0
Σάπες	81,3	625	63	10,1
Πόρπη	298,4	486	40	8,2
Ίασμος	150,1	656	67	10,2



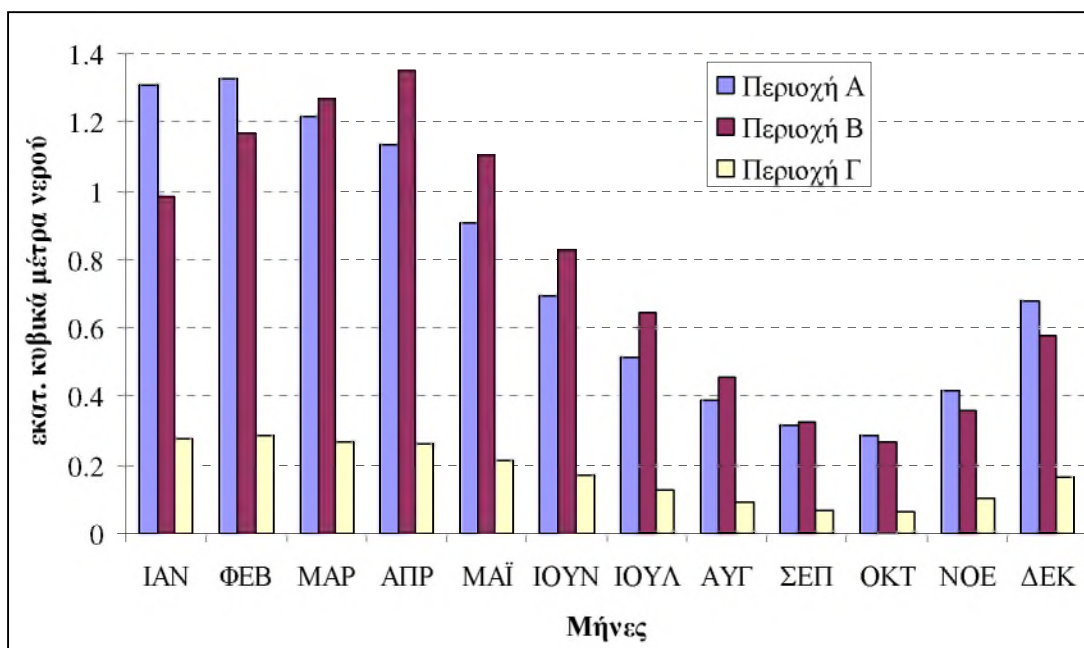
Σχήμα 3. Μέση μηνιαία τροφοδοσία των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης

Η πλευρική εισροή νερού στα υδροφόρα στρώματα υπολογίστηκε ως ποσοστό της βασικής απορροής των ορεινών υπολεκανών, η οποία προέκυψε από την εφαρμογή του ομοιώματος βροχής απορροής MIKE 11/NAM. Το ποσοστό της βασικής απορροής που εισρέει πλευρικά στα υδροφόρα στρώματα εκτιμήθηκε σε 10% στην περίπτωση του πεδίου της Βιστωνίδας και σε 20% για το πεδίο άνω ρου Βοσβόζη και την υδρογεωλογική λεκάνη Λίσσου, τιμές οι οποίες προέκυψαν κατά τη βαθμονόμηση του ομοιώματος. Οι περιοχές στις οποίες έχουμε πλευρική εισροή νερού προέκυψαν από τα δεδομένα του γεωλογικού χάρτη της ευρύτερης περιοχής του Ν. Ροδόπης (Σχήμα 3). Αναλυτικά στοιχεία για την εφαρμογή του ομοιώματος

ΜΙΚΕ 11/NAM στις ορεινές υπολεκάνες του Ν. Ροδόπης δίνονται στο Παραδοτέο DB1.7, ενώ στο Σχήμα 5 δίνεται η μέση μηνιαία μεταβολή στις περιοχές πλευρικής εισροής νερού στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης.



Σχήμα 4. Περιοχές πλευρικής εισροής νερού από τον ορεινό όγκο στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης (υπόβαθρο: γεωλογικός χάρτης από Διαμαντή, 1991)



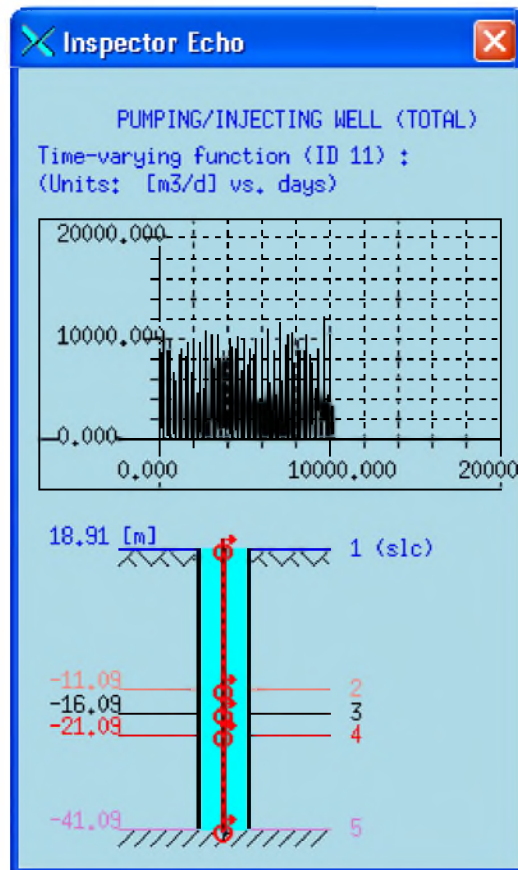
Σχήμα 5. Μέση μηνιαία πλευρική εισροή στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης

Οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών στο Ν. Ροδόπης καλύπτονται ως επί το πλείστον με την άντληση υπόγειων νερών και σε ορισμένες περιοχές είναι ιδιαίτερα μεγάλες ώστε να αποτελούν την κύρια αιτία για τον υποβιβασμό της υπόγειας στάθμης. Ο υπολογισμός των αρδευτικών αναγκών είναι ιδιαίτερης σημασίας για τον ακριβή καθορισμό του υδατικού ισοζυγίου των υπόγειων υδάτων. Στο πλαίσιο του παρόντος υπολογίσθηκαν με βάση τις κλιματικές συνθήκες καθώς και τη σύνθεση των καλλιεργειών και τα χαρακτηριστικά τους (βάθος ριζοστρώματος, δείκτης φυλλικής επιφάνειας) στο περιβάλλον του MIKE SHE (Παραδοτέο DB1.7).

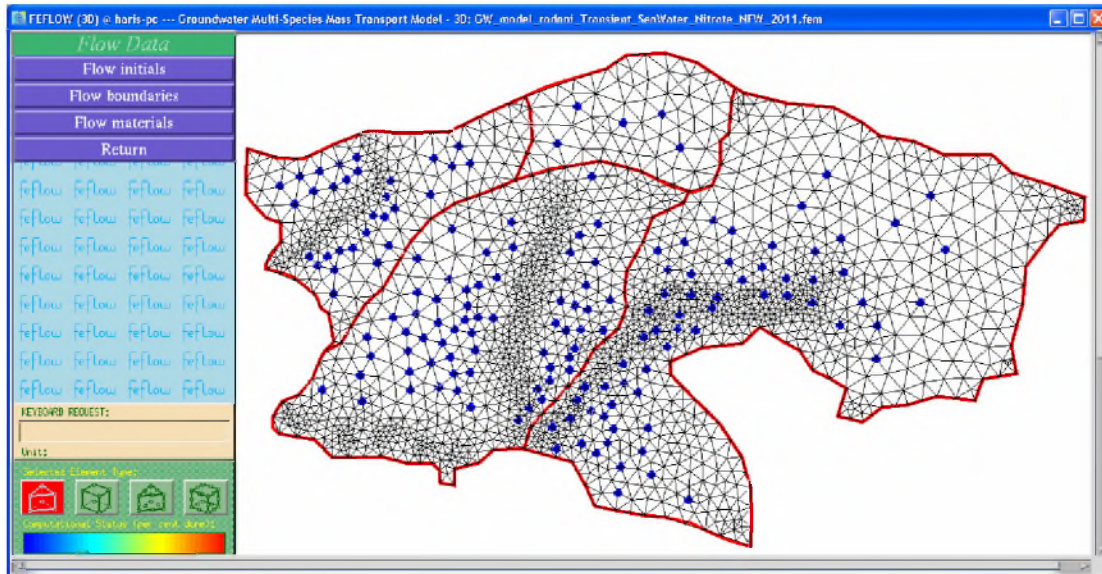
Οι αρδευόμενες εκτάσεις στο πεδινό τμήμα του Ν. Ροδόπης (περιοχή ομοιώματος) ανέρχονται στα 328.160 στρέμματα και απαιτούν κατά μέσο όρο 528,4 m³/στρέμμα ετησίως, δηλαδή 173,4 εκ. m³ νερό. Η κατανομή των αρδευόμενων εκτάσεων δεν είναι ομοιόμορφη και οι μεγαλύτερες πιέσεις ασκούνται στο πεδίο της Βιστωνίδας και στα λοφώδη τμήματα νότια της Κομοτηνής (Πίνακας 3). Οι αντλήσεις για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών στο ομοίωμα αναπαρίστανται με την εισαγωγή φρεατίων τα οποία αντλούν νερό από ολόκληρο το βάθος των υδροφόρων στρωμάτων με παροχή άντλησης η οποία δίνεται σε μορφή χρονοσειράς (Σχήματα 6 και 7).

Πίνακας 3. Αρδευόμενες εκτάσεις στο πεδινό τμήμα του Ν. Ροδόπης

Υδρογεωλογική λεκάνη	Συνολική έκταση, km ²	Αρδευόμενες εκτάσεις	
		km ²	% της συν. έκτασης
Πεδίο Βιστωνίδας	135,9	61,92	45,6
Λοφώδη τμήματα νότια Κομοτηνής	297,6	128,64	43,2
Πεδίο άνω ρου Βοσβόζη	89,7	11,04	12,3
Υδρογεωλογική λεκάνη Λίσσου	506,4	126,56	25,0
Σύνολο	1029,6	328,16	31,9



Σχήμα 6. Χρονοσειρά παροχής και κατακόρυφη τομή φρεατίου άντλησης στο περιβάλλον του FEFLOW



Σχήμα 7. Φρεάτια άντλησης (μπλε κουκίδες) για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών του Ν. Ροδόπης στο περιβάλλον του FEFLOW

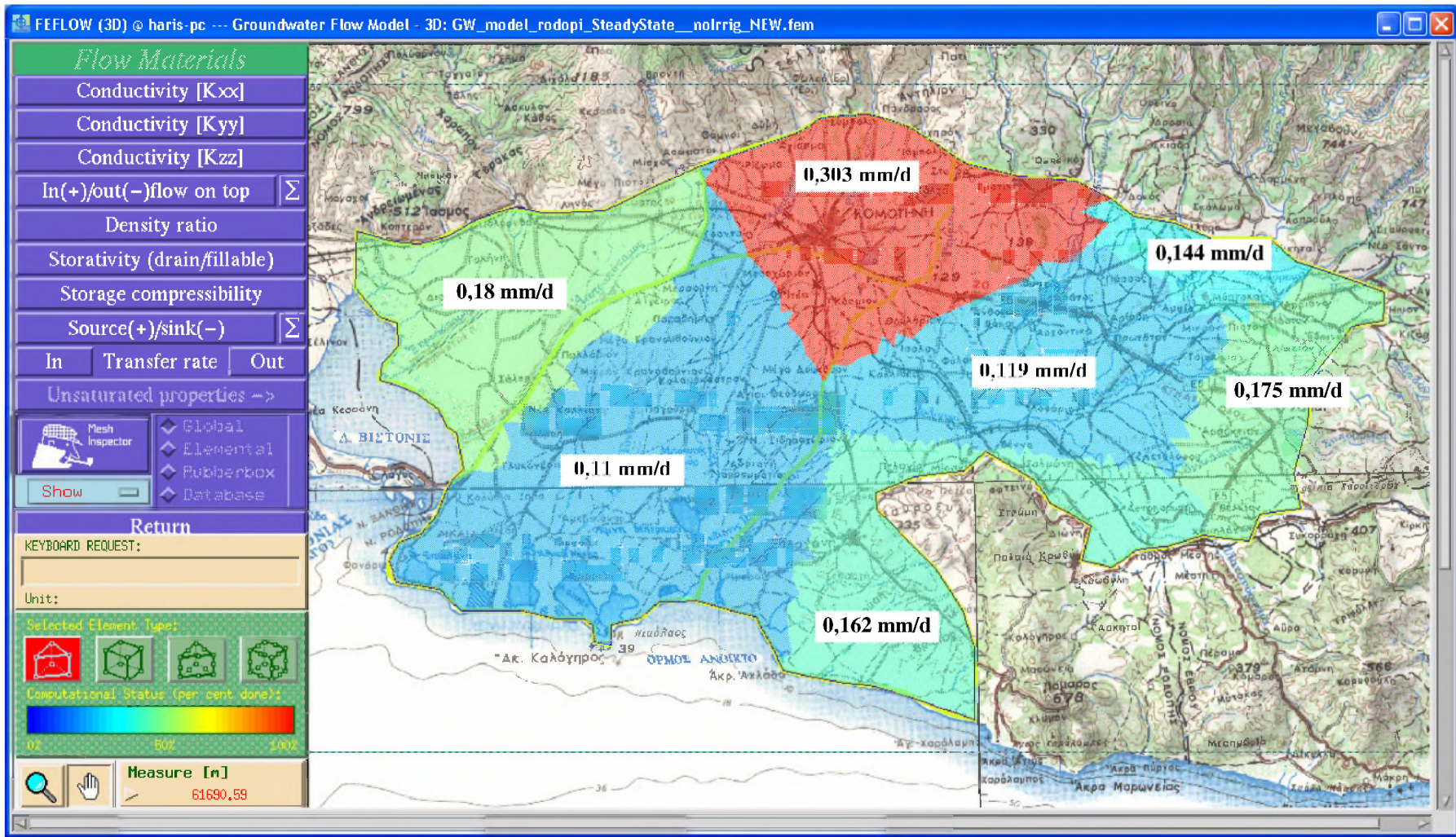
Στην περιοχή που τα υδροφόρα στρώματα γειτνιάζουν με τη θάλασσα (ή τη λίμνη Βιστωνίδα), στα τμήματα εκείνα που η στάθμη του υπόγειου νερού είναι υψηλότερη από τη στάθμη της θάλασσας έχουμε εκροή του υπόγειου νερού προς τη θάλασσα, ενώ όταν η υπόγεια στάθμη είναι σε πιο χαμηλά επίπεδα από τη στάθμη της θάλασσας έχουμε εισροή του θαλασσινού νερού προς τον υδροφορέα. Στις περιοχές που ο υδροφορέας είναι σε επαφή με τη θάλασσα ή τη λίμνη Βιστωνίδα, η οριακή συνθήκη στο ομοίωμα λαμβάνεται ως μία σταθερή τιμή του πιεζομετρικού φορτίου των υπόγειων υδάτων ίση με το απόλυτο υψόμετρο της επιφάνειας της θάλασσας, δηλ. $h = 0$ m.

2.3. Αποτελέσματα ομοιώματος σταθερής ροής

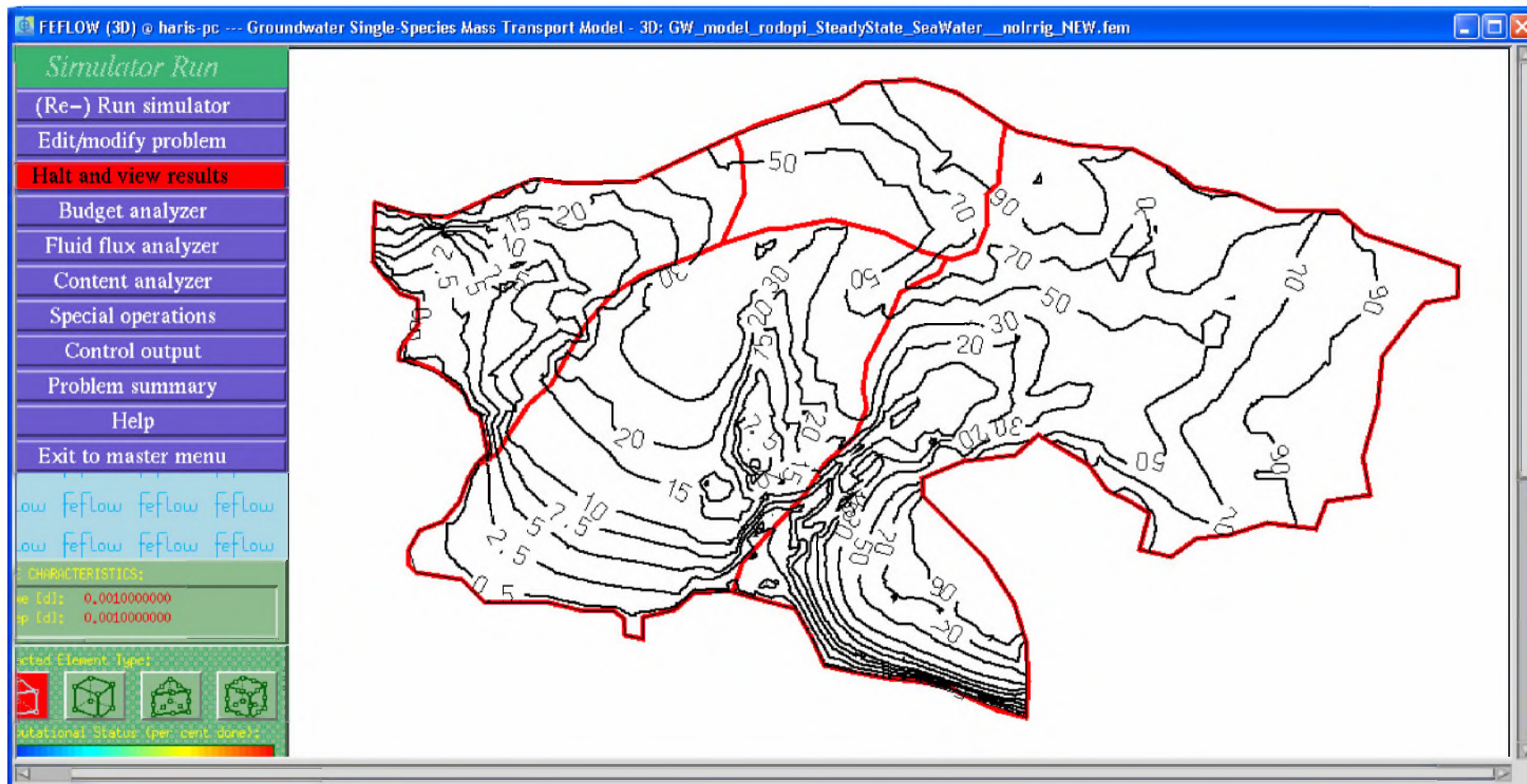
Η εφαρμογή του ομοιώματος των υπόγειων υδάτων μιας περιοχής σε συνθήκες σταθερής ροής είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την αρχική διερεύνηση και κατανόηση των διαδρομών που ακολουθεί η κίνηση του υπόγειου νερού στα υδροφόρα στρώματα. Επίσης, στο ομοίωμα σταθερής ροής μπορεί να γίνει διερεύνηση των οριακών συνθηκών που εφαρμόζονται στο ομοίωμα ή των τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας του υδροφορέα, με πολύ μικρότερη υπολογιστική προσπάθεια σε σχέση με το αντίστοιχο ομοίωμα ασταθούς ροής το οποίο συνήθως εφαρμόζεται για μια μεγάλη χρονική περίοδο αρκετών ετών. Εκτός των προηγουμένων, το ομοίωμα σταθερής ροής των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης καταρτίστηκε για την εκτίμηση της πιεζομετρίας στα υπόγεια ύδατα, η οποία θα χρησιμοποιηθεί ως αρχική συνθήκη στο ομοίωμα της περιόδου 1981-2011.

Για την ανάπτυξη του ομοιώματος σταθερής ροής θεωρήθηκε ότι ο υδροφορέας δέχεται σταθερή στο χρόνο τροφοδοσία από την επιφάνεια του εδάφους, η οποία ισούται με τη μέση ημερήσια εισροή νερού της περιόδου 1981-2011 (Σχήμα 8) και υπολογίστηκε από το υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης με την εφαρμογή του MIKE SHE. Επιπλέον, η μέση ημερήσια πλευρική εισροή νερού στα υδροφόρα στρώματα από τις ορεινές υπολεκάνες εκτιμήθηκε από τις αντίστοιχες χρονοσειρές εισροής για τις περιοχές Α, Β και Γ (βλέπε και Σχήμα 4). Η άντληση νερού δε λήφθηκε υπόψη στο ομοίωμα σταθερής ροής, εκτιμώντας ότι η ραγδαία αύξηση των αντλήσεων για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών στην περιοχή και κατ' επέκταση η επίδρασή τους στην πιεζομετρία της περιοχής ξεκίνησε μετά το 1980.

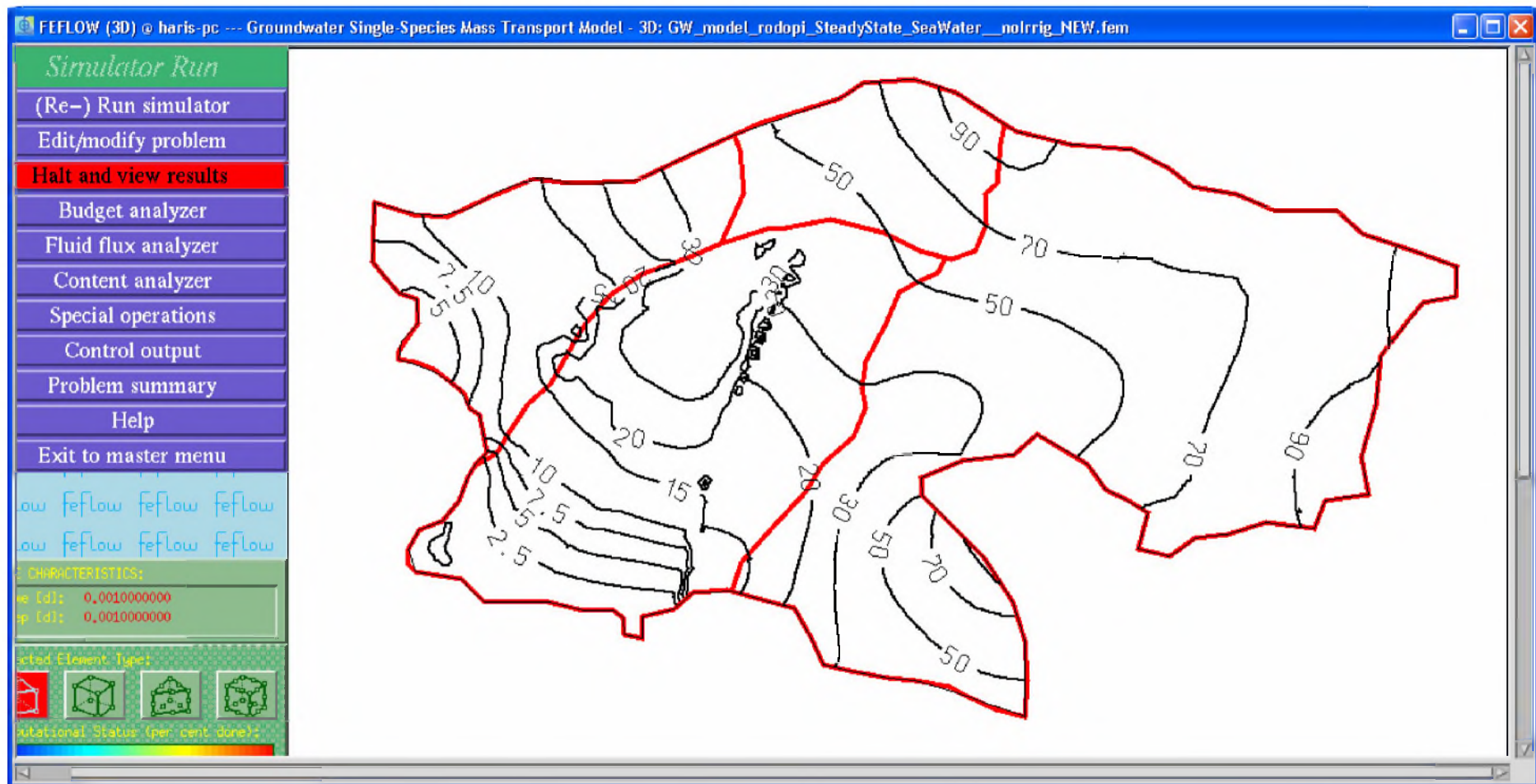
Με βάση τις παραπάνω παραδοχές, εκτελέστηκε το ομοίωμα σταθερής ροής από το οποίο υπολογίζετε η πιεζομετρία των υπόγειων υδάτων στην άνω στρώση (ελεύθερος υδροφορέας) και στην κάτω στρώση (υπό πίεση υδροφορέας) και δίνεται στα Σχήματα 9 και 10, αντίστοιχα. Η τιμή του πιεζομετρικού φορτίου είναι μεγαλύτερη από το επίπεδο της θάλασσας ($h = 0$ m) σε όλη την έκταση του υδροφορέα, το οποίο μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πριν την επίδραση των αντλήσεων είχαμε φυσική εκροή του γλυκού νερού του υδροφορέα προς τη θάλασσα και πρακτικά πολύ μικρή ή και μηδενική εισροή θαλασσινού νερού στον υδροφορέα.



Σχήμα 8. Μέση ημερήσια τροφοδοσία υπόγειων υδάτων στο Ν. Ροδόπης



Σχήμα 9. Ισοϋψείς καμπύλες πιεζομετρικού φορτίου (m) στην άνω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (ομοίωμα σταθερής ροής)



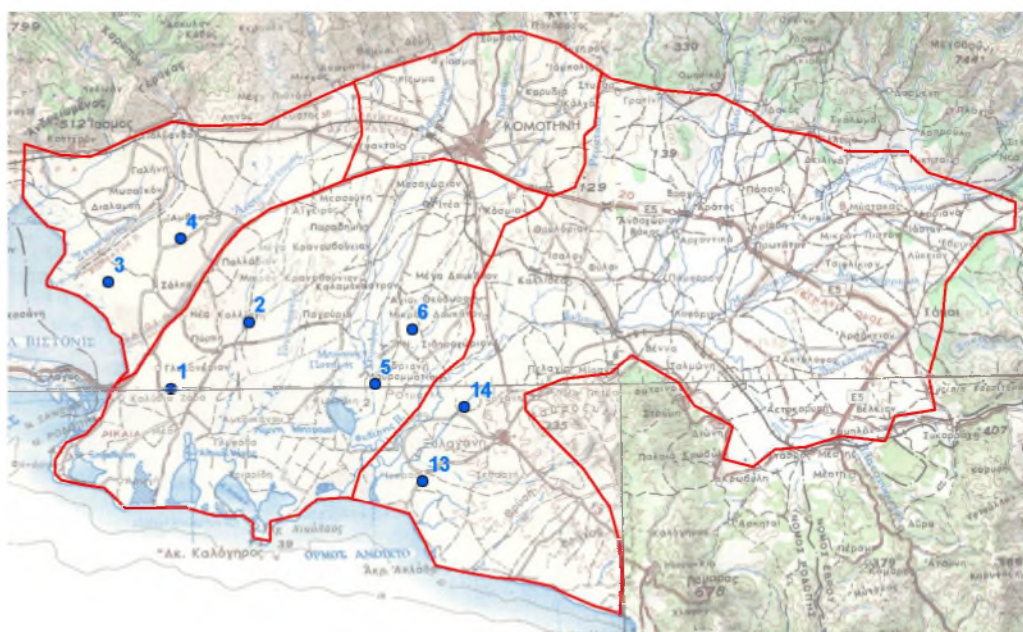
Σχήμα 10. Ισοϋψείς καμπύλες πιεζομετρικού φορτίου (m) στην κάτω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (ομοίωμα σταθερής ροής)

2.4. Αποτελέσματα ομοιώματος για την περίοδο 1981-2011

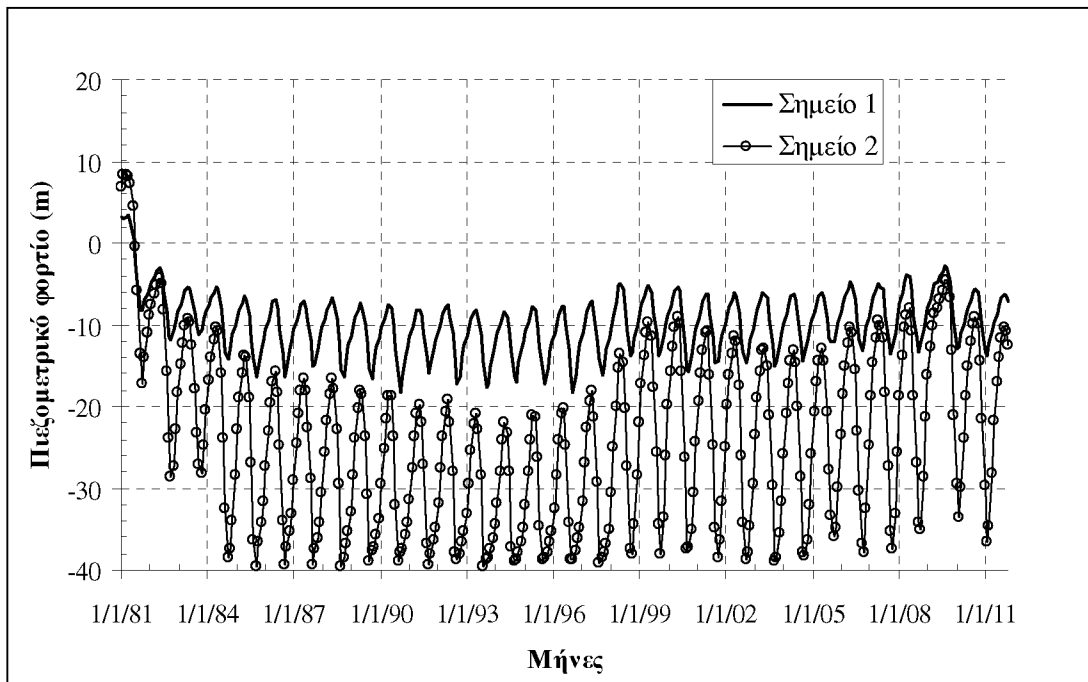
Το ομοίωμα των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης αναπτύχθηκε με βάση τις θεωρήσεις και παραδοχές της παραγράφου 2.2 και εκτελέστηκε για 30 έτη (1981-2011) με μεταβλητό χρονικό βήμα από 0,01 έως 5 ημέρες. Τα αποτελέσματα του ομοιώματος είναι το πιεζομετρικό φορτίο της άνω και κάτω στρώσης των υπόγειων υδάτων. Ως αρχική συνθήκη για την πιεζομετρία της περιοχής χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα του ομοιώματος σταθερής ροής.

Η πτώση του πιεζομετρικού φορτίου από τις αντλήσεις για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών είναι σε αρκετές περιοχές ιδιαίτερα μεγάλη. Οι μεγαλύτερες πιέσεις ασκούνται στο πεδίο της Πόρπης όπου το πιεζομετρικό φορτίο την περίοδο των αντλήσεων προσεγγίζει τα -40 m. Σημαντική πτώση του φορτίου παρατηρείται και στην περιοχή του Ν. Σιδηροχωρίου ενώ στο πεδίο της Βιστωνίδας το φορτίο διατηρείται σε υψηλότερα επίπεδα.

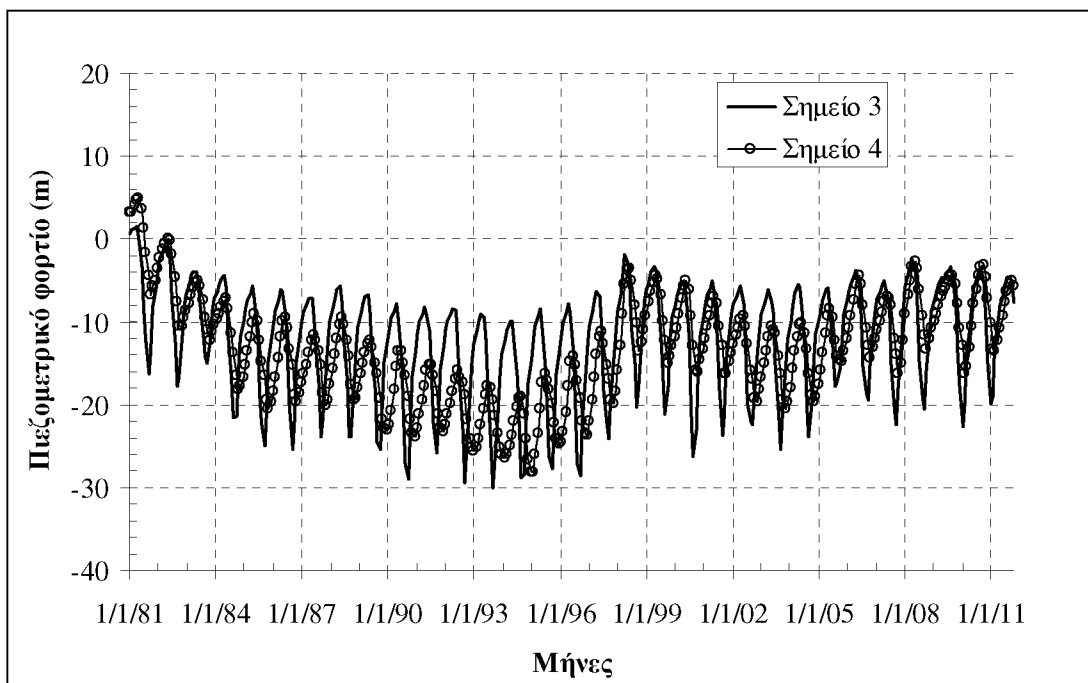
Στα Σχήματα 12 έως 19 δίνεται η διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου σε σημεία της περιοχής ενώ οι θέσεις των σημείων δίνονται στο Σχήμα 11. Στο Παράρτημα Ι δίνονται τα σχήματα της κατανομής του πιεζομετρικού φορτίου και των ταχυτήτων ροής στην άνω και κάτω στρώση των υπόγειων υδάτων για τις περιόδους υψηλής (Απρίλιος) και χαμηλής υπόγειας στάθμης (Οκτώβριος).



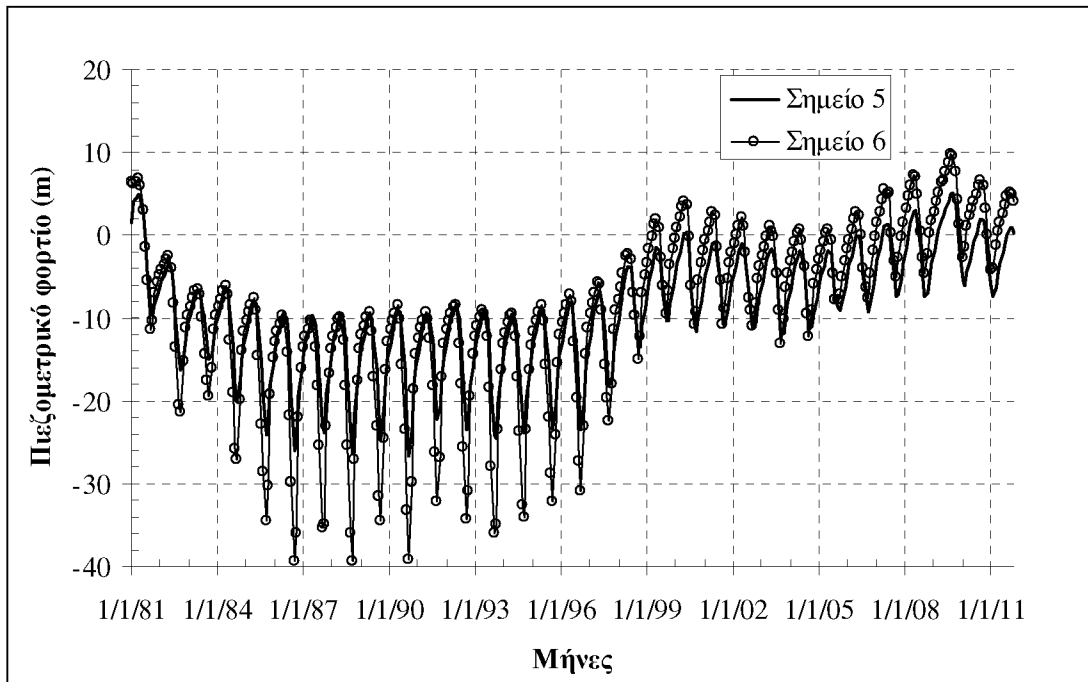
Σχήμα 11. Σημεία παρακολούθησης του πιεζομετρικού φορτίου των υπόγειων υδάτων στις υδρογεωλογικές λεκάνες του Ν. Ροδόπης



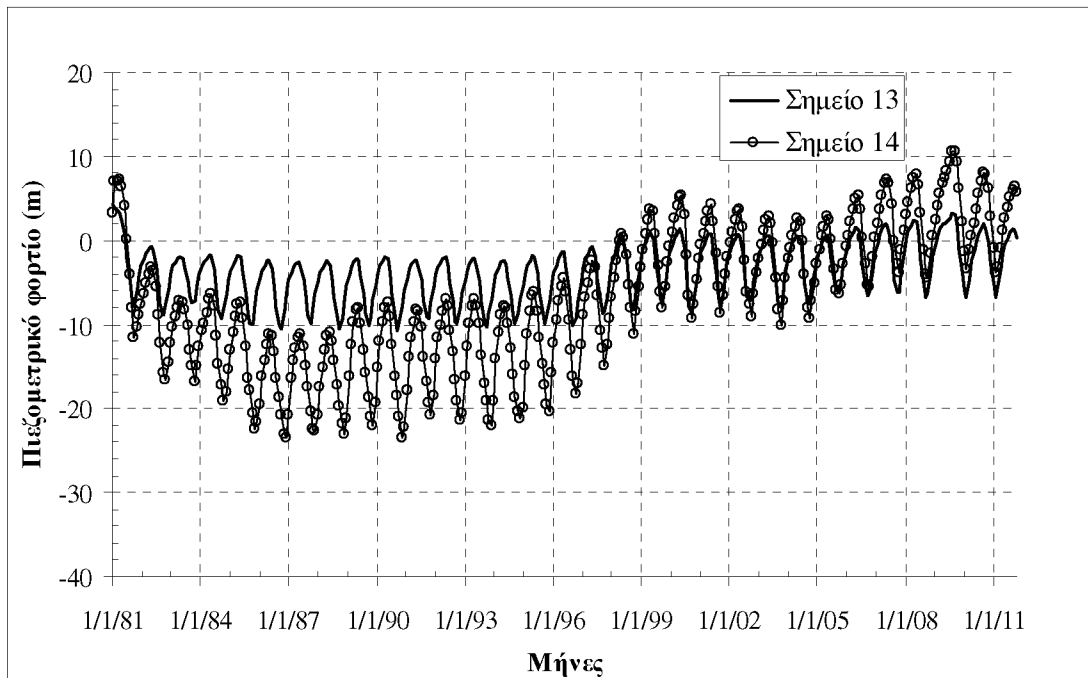
Σχήμα 12. Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου στα σημεία 1 και 2 της άνω στρώσης των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης



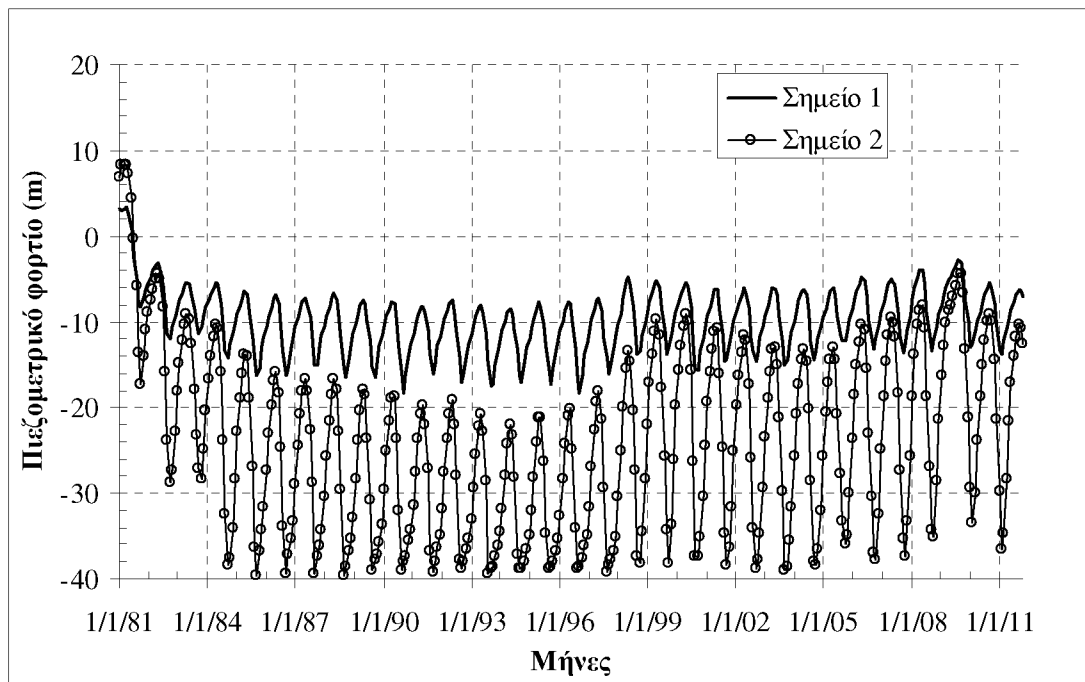
Σχήμα 13. Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου στα σημεία 3 και 4 της άνω στρώσης των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης



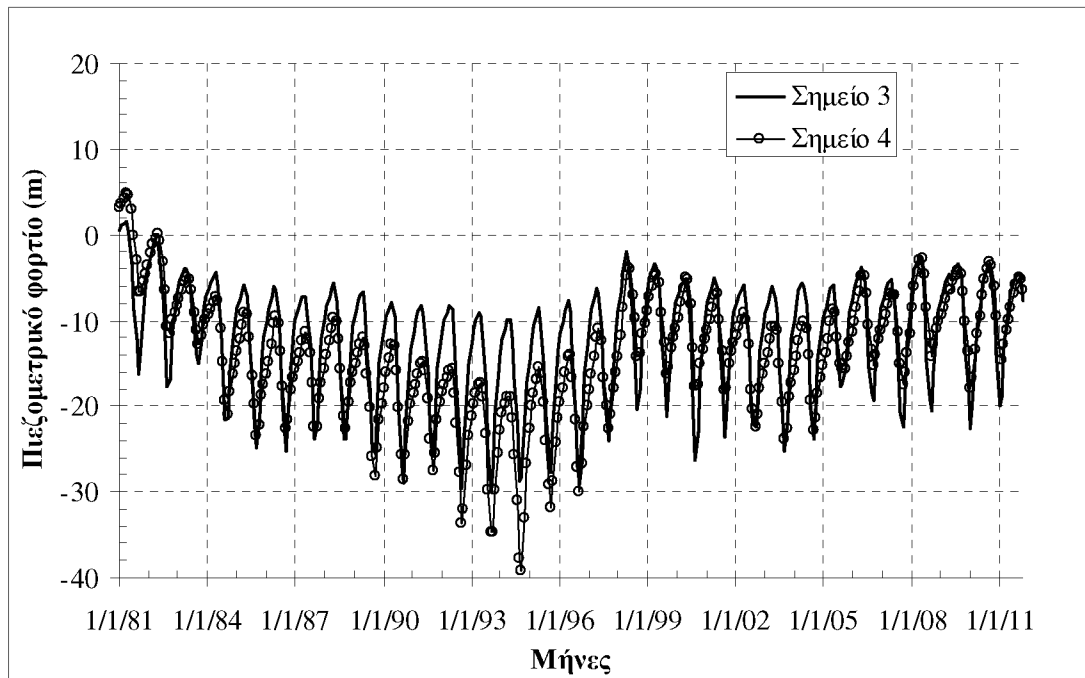
Σχήμα 14. Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου στα σημεία 5 και 6 της άνω στρώσης των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης



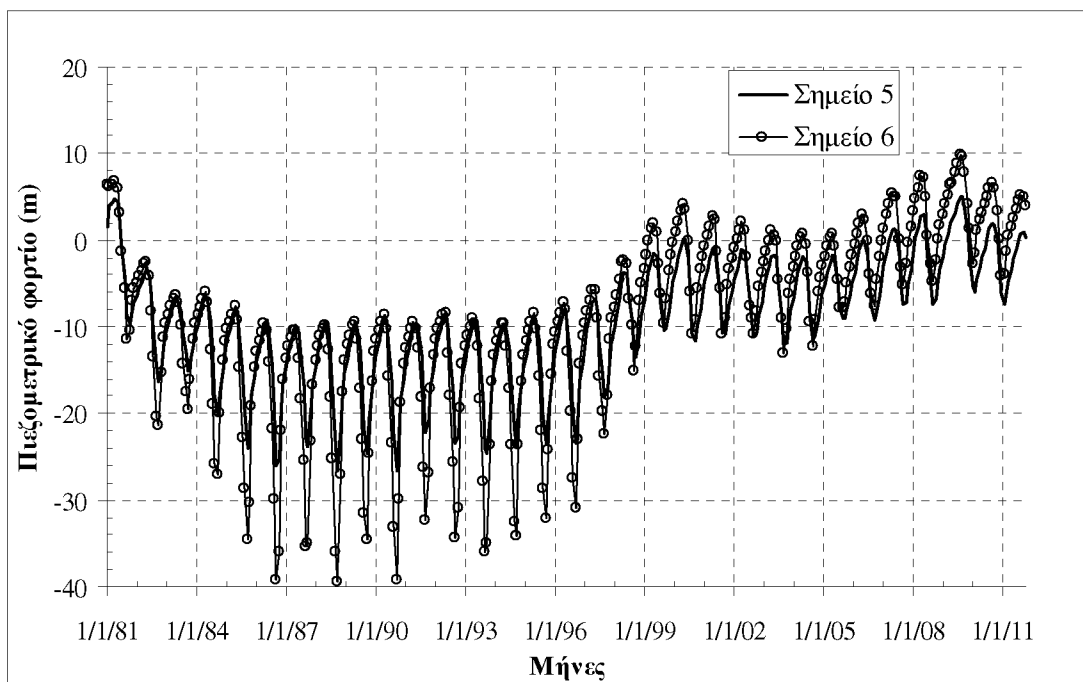
Σχήμα 15. Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου στα σημεία 13 και 14 της άνω στρώσης των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης



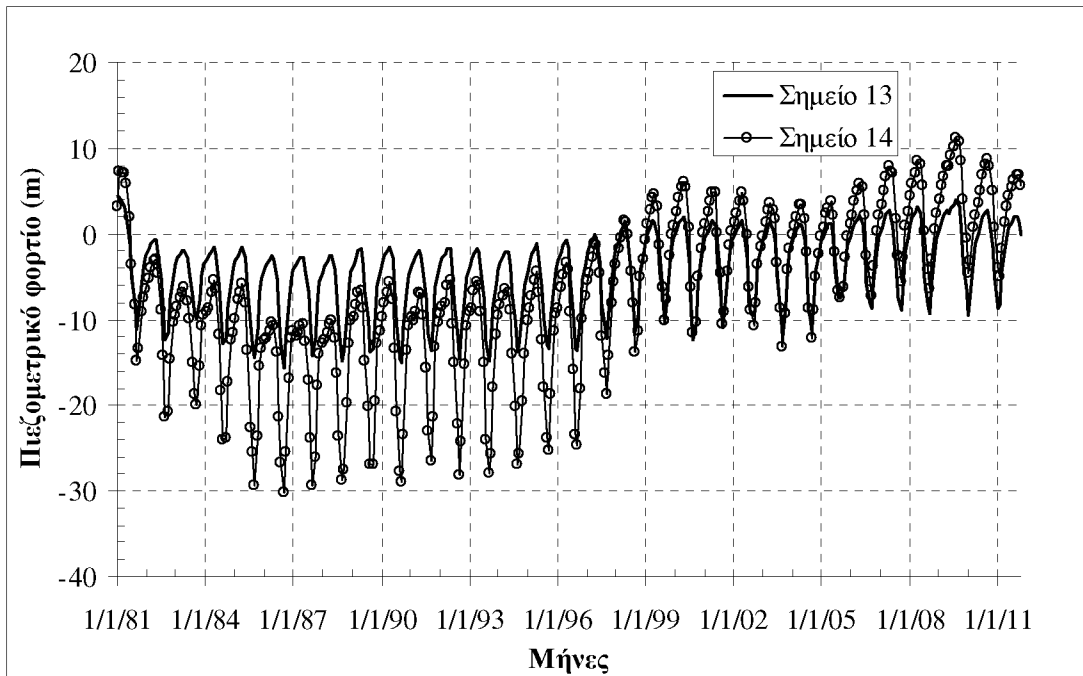
Σχήμα 16. Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου στα σημεία 1 και 2 της κάτω στρώσης των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης



Σχήμα 17. Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου στα σημεία 3 και 4 της κάτω στρώσης των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης



Σχήμα 18. Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου στα σημεία 5 και 6 της κάτω στρώσης των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης



Σχήμα 19. Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου στα σημεία 13 και 14 της κάτω στρώσης των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΤΟΥ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΩΝ ΝΙΤΡΙΚΩΝ ΑΛΑΤΩΝ ΣΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ ΡΟΔΟΠΗΣ

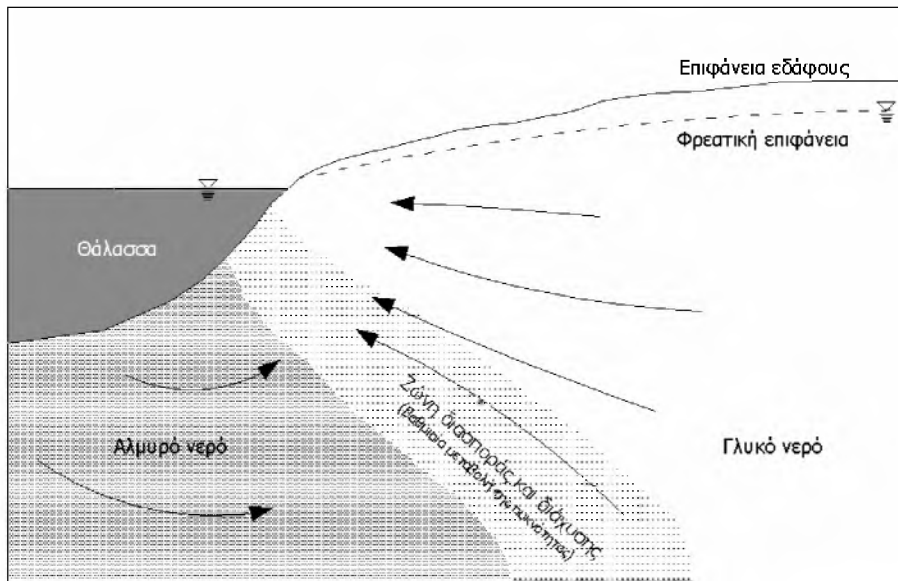
3.1. Εισαγωγή

Τα υπόγεια ύδατα του Νομού Ροδόπης αποτελούν την κυριότερη πηγή νερού για την κάλυψη των υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών της περιοχής. Με την εντατική εκμετάλλευση των υπόγειων υδατικών αποθεμάτων και την έντονη γεωργική δραστηριότητα που ασκείται στην περιοχή τις τελευταίες τρεις δεκαετίες, οι υπόγειοι υδατικοί πόροι δέχονται μεγάλες πιέσεις, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητάς τους. Στο πλαίσιο του παρόντος εξετάζεται η υποβάθμιση της ποιότητας των υπόγειων υδάτων από την αύξηση της συγκέντρωσης των αλάτων λόγω της διείσδυσης του θαλασσινού νερού στους υδροφορείς και από την αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών λόγω της εφαρμογής λιπασμάτων στις καλλιέργειες.

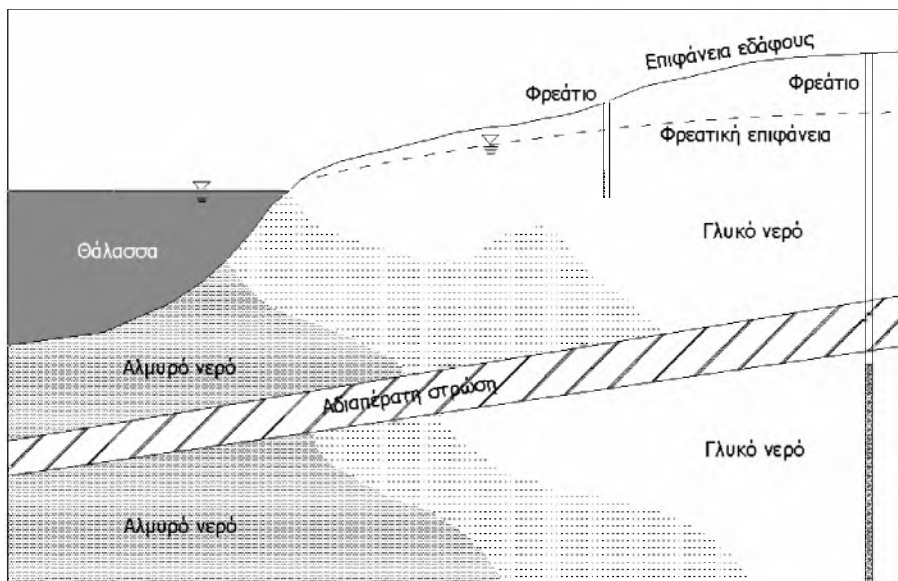
Η διείσδυση θαλασσινού νερού αφορά τη μεταφορά μάζας αλατούχου νερού σε περιοχές οι οποίες προηγουμένως καταλαμβάνονταν από γλυκό νερό. Ο ρυθμός και η διαδρομή της μεταφοράς αυτής στους υπόγειους υδροφορείς καθορίζονται από τις υδραυλικές κλίσεις, την κατανομή της υδραυλικής αγωγιμότητας, καθώς και τη διασπορά και διάχυση των αλάτων. Το αλμυρό και το γλυκό νερό όταν έρθουν σ' επαφή αναμιγνύονται, και ανάμεσά τους σχηματίζεται μία ενδιάμεση ζώνη μεταβλητής πυκνότητας, όπου το αλμυρό νερό ως πυκνότερο θα βρίσκεται προς τα κάτω σε σχέση με το γλυκό νερό.

Στον παράκτιο υδροφορέα του Σχήματος 20 παρατηρούμε τις περιοχές του αλμυρού και του γλυκού νερού, καθώς και την ενδιάμεση ζώνη μέσης πυκνότητας, που σχηματίζεται, τη ζώνη διασποράς και διάχυσης. Στη ζώνη αυτή το αλμυρό νερό αναμιγνύεται με το γλυκό νερό, το οποίο κινείται προς τη θάλασσα, αναγκάζοντας το αλμυρό νερό να ρέει κατά μήκος της περιοχής ανάμιξης, προκαλώντας έτσι μία επανακυκλοφορία του αλμυρού νερού. Το πάχος της ζώνης αυτής μπορεί να ποικίλει και σε συνθήκες ισορροπίας εξαρτάται από το είδος, τις διαστάσεις και τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα, καθώς και την παροχή του γλυκού νερού που εκρέει προς τη θάλασσα.

Στο Σχήμα 21 παρουσιάζεται η περίπτωση ενός υποθετικού παράκτιου υδροφόρου συστήματος, το οποίο αποτελείται από έναν υπό πίεση υδροφορέα και έναν υπερκείμενο ελεύθερο υδροφορέα. Οι υδροφορίες διαχωρίζονται από την ύπαρξη μιας πρακτικά αδιαπέρατης στρώσης. Η προώθηση της σφήνας του θαλασσινού νερού και η διαμόρφωση της μεταβατικής ζώνης ενδιάμεσης πυκνότητας επηρεάζονται από τις αντλήσεις, και στην περίπτωση του ελεύθερου υδροφορέα παρατηρούμε την χαρακτηριστική ανόρθωση κωνοειδούς μορφής του θαλασσινού νερού.



Σχήμα 20. Θαλάσσια διείσδυση σε παράκτιο ελεύθερο υδροφορέα



Σχήμα 21. Επίδραση των αντλήσεων σε υποθετικό υδροφόρο σύστημα

Η αλατότητα στο νερό μετράται και καταγράφεται ως ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC_w) ή ως συγκέντρωση ολικών διαλυμένων στερεών (TDS, Total Dissolved Solids). Σύμφωνα με τον Holzbecher (1998), η συγκέντρωση των ολικών διαλυμένων στερεών στο γλυκό νερό κυμαίνεται από 0 έως 10^3 mg/l, στο υφάλμυρο νερό από 10^3 έως 10^4 mg/l και στο θαλασσινό νερό από 10^4 έως 10^5 mg/l. Στον Πίνακα 5 δίνονται ενδεικτικά τα συνιστώμενα όρια αλατότητας για τις διάφορες χρήσεις του νερού.

Πίνακας 4. Συνιστώμενα όρια αλατότητας για τη χρήση του νερού

Κατηγορία	EC_w ($\mu S/cm$)	TDS (mg/l)
Υδρευση	έως 2500	έως 1600
καλής ποιότητας πόσιμο νερό	0-800	0-500
μπορεί να χρησιμοποιηθεί, αν και οι περισσότεροι θα προτιμούσαν νερό στο κάτω μισό του εύρους	800-2500	500-1600
Άρδευση	έως 5000	έως 3200
βαθμός περιορισμού στη χρήση		
κανένας	<700	<450
μικρός έως μέτριος	700-3000	450-2000
μεγάλος	>3000	>2000
Βιομηχανία	έως 2300	έως 1500

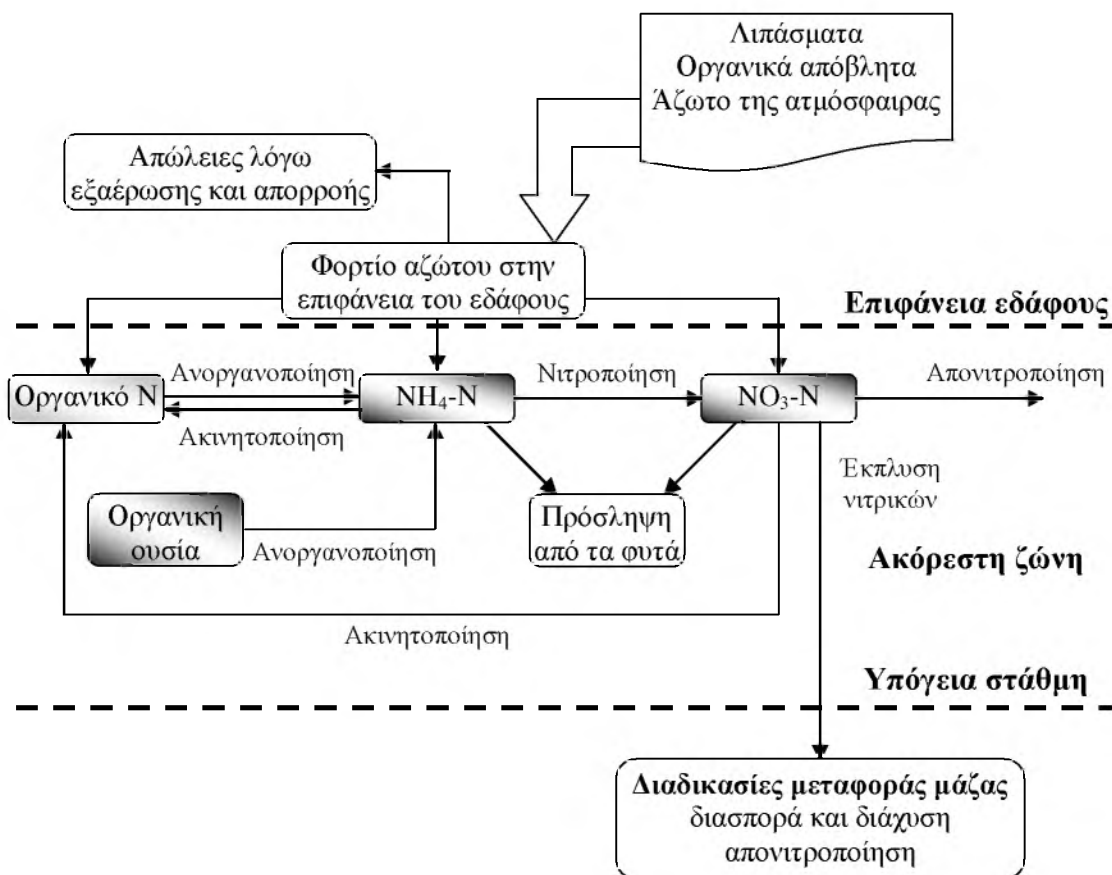
Πηγές: [Οδηγία 98/83/ΕΚ, Πανώρας και Ηλίας (1999), Αντωνόπουλος (2001)]

Η αύξηση της αλατότητας στο νερό των παράκτιων υδροφορέων οφείλεται συνήθως στη διείσδυση του θαλασσινού νερού, αλλά μπορεί να οφείλεται και σε άλλους λόγους (Jones et al., 1999), όπως η ύπαρξη παλιών θαμμένων αλμύρων (παγιδευμένα παλιά νερά) σε συγκεκριμένες περιοχές του υδροφορέα, η διάλυση αποθέσεων εβαποριτών, το εκτόπισμα παλιού αλμυρού νερού από υποκείμενο ή παρακείμενο υδροφορέα λόγω γεωθερμικών πεδίων, καθώς και από ρύπανση λόγω οικιστικών (βοθρολύματα), βιομηχανικών και γεωργικών δραστηριοτήτων. Η διάκριση της θαλάσσιας διείσδυσης από την προερχόμενη από άλλες πηγές αλατότητα μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή γεωχημικών ερευνών και τη μελέτη της σχέσης των συγκεντρώσεων μεταξύ διαφόρων χημικών παραμέτρων (π.χ. Na^+ , Cl^- , Ca/Mg). Η αναγνώριση της αιτίας της αύξησης της αλατότητας, μπορεί να είναι αρκετά χρήσιμη ιδιαίτερα στα αρχικά στάδια της διείσδυσης του θαλασσινού νερού.

Οι αζωτούχες λιπάνσεις στις καλλιέργειες έχουν σκοπό την αύξηση της απόδοσης της γεωργικής παραγωγής, αλλά το άζωτο μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα υποβάθμισης στο περιβάλλον, και στα υπόγεια νερά αυτά τα προβλήματα σχετίζονται με την αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών αλάτων. Η ρύπανση των υδάτων με νιτρικά προκαλεί δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων και αποτελεί ένα από τα προβλήματα αιχμής για την ποιότητα του πόσιμου νερού. Σύμφωνα με την Οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης 2000/60, το ύψιστο επιθυμητό όριο συγκέντρωσης των νιτρικών για το πόσιμο νερό είναι 25 mg/l και το μέγιστο επιτρεπτό όριο είναι 50 mg/l.

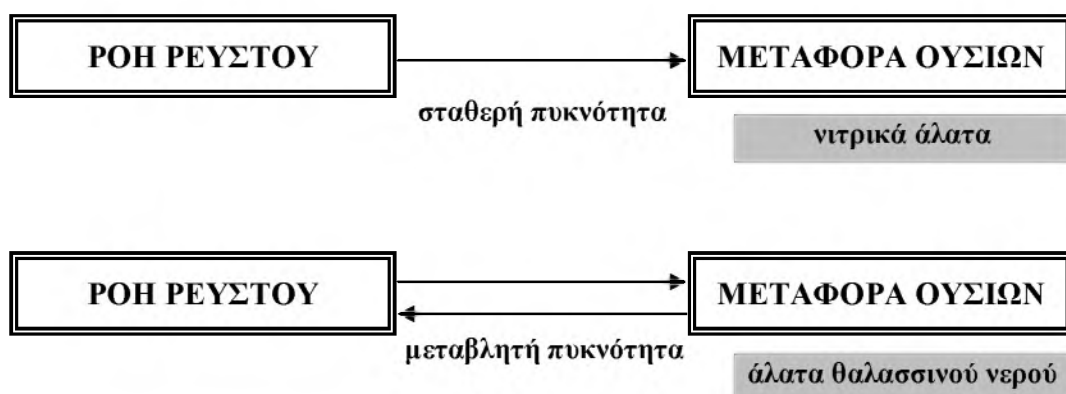
Το άζωτο του εδάφους υπόκειται σε δυναμικές συνθήκες καθώς πλήθος χημικών και βιολογικών αντιδράσεων μεταβάλλουν τη μορφή των ενώσεων του αζώτου στο έδαφος, ενώ οι φυσικές διαδικασίες της μεταφοράς μάζας του αζώτου λόγω της κίνησης του νερού συμβάλλουν στη μετακίνησή του μέσα στο έδαφος προς τα υπόγεια νερά. Η αλυσίδα των μετασχηματισμών του αζώτου στο έδαφος περιλαμβάνει την ανοργανοποίηση του οργανικού αζώτου με την παραγωγή αμμωνιακού αζώτου, που με την διαδικασία της νιτροποίησης μετατρέπεται αρχικά σε νιτρώδες και στη συνέχεια σε νιτρικό άζωτο. Η απονιτροποίηση είναι μια άλλη διαδικασία με την οποία το νιτρικό άζωτο μετατρέπεται σε αέριο άζωτο. Στις διαδικασίες μετασχηματισμού του αζώτου στο έδαφος περιλαμβάνονται, επίσης, η πρόσληψη των διαφόρων μορφών αζώτου από τα φυτά, η προσρόφιση της αμμωνιακής μορφής από τα στερεά του εδάφους και η εξαέρωση της αμμωνίας.

Στο Σχήμα 22 δίνεται η σχηματική αναπαράσταση των διαδικασιών μετασχηματισμού του αζώτου στο εδαφικό διάλυμα (ακόρεστη ζώνη) και στα υπόγεια νερά. Αξίζει να σημειώσουμε ότι η συγκέντρωση των νιτρικών αλάτων που καταλήγει στην υπόγεια στάθμη σχετίζεται με το φορτίο αζώτου που εφαρμόζεται στο έδαφος και αποτελεί ένα ποσοστό του φορτίου αυτού.



Σχήμα 22. Ενοιολογική προσέγγιση των διαδικασιών μετασχηματισμού του αζώτου που καθορίζουν την εμφάνιση των νιτρικών στα υπόγεια νερά

Η συνήθης διαδικασία αριθμητικής επίλυσης προβλημάτων μεταφοράς μάζας μίας ουσίας (ρύπου) είναι η επίλυση πρώτα της εξίσωσης κίνησης του ρευστού και στη συνέχεια η επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς μάζας. Η ροή του ρευστού δεν επηρεάζεται από τις διαλυμένες σε αυτό ουσίες, δημιουργώντας μία μονοσήμαντη σχέση μεταξύ της ροής του ρευστού και των ρυπογόνων ουσιών, όπως συμβαίνει π.χ. στην περίπτωση των νιτρικών. Αντιθέτως, στο μαθηματικό πρόβλημα της διείδυσης του θαλασσινού νερού, η σχέση μεταξύ της ροής του ρευστού και των διαλυμένων σε αυτό ουσιών (αλάτων) είναι αμφίδρομη λόγω της μεταβολής της πυκνότητας του ρευστού (νερού), η οποία προκαλείται με τη μεταβολή της συγκέντρωσης των αλάτων. Στο Σχήμα 23 δίνεται η αλληλεπίδραση μεταξύ της ροής του ρευστού και της μεταφοράς μάζας των διαλυμένων ουσιών και για τις δύο περιπτώσεις προβλημάτων που προαναφέρθηκαν.



Σχήμα 23. Αναπαράσταση της αλληλεπίδρασης της ροής του ρευστού και της μεταφοράς διαλυμένων ουσιών (τροποποίηση από Holzbecher, 1998)

Για την προσομοίωση της συγκέντρωσης των αλάτων του θαλασσινού νερού και των νιτρικών αλάτων στα υπόγεια νερά του Ν. Ροδόπης, χρησιμοποιήθηκε το ομοίωμα της κίνησης των υπόγειων υδάτων (Κεφάλαιο 2) το οποίο εμπλουτίστηκε με την εφαρμογή των κατάλληλων υπολογιστικών διαδικασιών στο περιβάλλον του FEFLOW, για την προσομοίωση προβλημάτων μεταφοράς μάζας πολλαπλών ουσιών (ρύπων).

3.2. Παράμετροι του ομοιώματος για την προσομοίωση της διείσδυσης του θαλασσινού νερού στα υπόγεια νερά

Το φαινόμενο της διείσδυσης του θαλασσινού νερού στο Ν. Ροδόπης προσομοιώθηκε ως πρόβλημα ροής ρευστού μεταβλητής πυκνότητας, σύμφωνα και με την ανάλυση της προηγούμενης παραγράφου. Ο λόγος της μεταβολής της πυκνότητας του θαλασσινού νερού και του γλυκού (καθαρού) νερού του υδροφορέα τέθηκε ίσος με 0,025, θεωρώντας ότι η πυκνότητα του θαλασσινού νερού είναι 1025 kg/m^3 και η πυκνότητα του γλυκού νερού είναι 1000 kg/m^3 .

Η υδροδυναμική διασπορά των αλάτων στο πεδίο ροής των υπόγειων νερών εκφράζεται μέσω του συντελεστή υδροδυναμικής διασποράς, ο οποίος υπολογίζεται με βάση την ταχύτητα κίνησης του νερού και τις τιμές τριών παραμέτρων: του συντελεστή διασποράς κατά μήκος της κύριας ροής (α_L), του συντελεστή διασποράς εγκάρσια της κύριας ροής (α_T) και του συντελεστή μοριακής διάχυσης (D_m). Με βάση τα βιβλιογραφικά δεδομένα (Xu and Eckstein, 1995) αλλά και τα αποτελέσματα της

κατανομής των αλάτων κατά την εφαρμογή του ομοιώματος σε συνθήκες σταθερής ροής, οι τιμές των συντελεστών στο πρόβλημα της διείσδυσης του θαλασσινού νερού θεωρήθηκαν σταθερές στην περιοχή του ομοιώματος και ίσες με $\alpha_L = 250$ m, $\alpha_T = 50$ m και $D_m = 0$ m²/d.

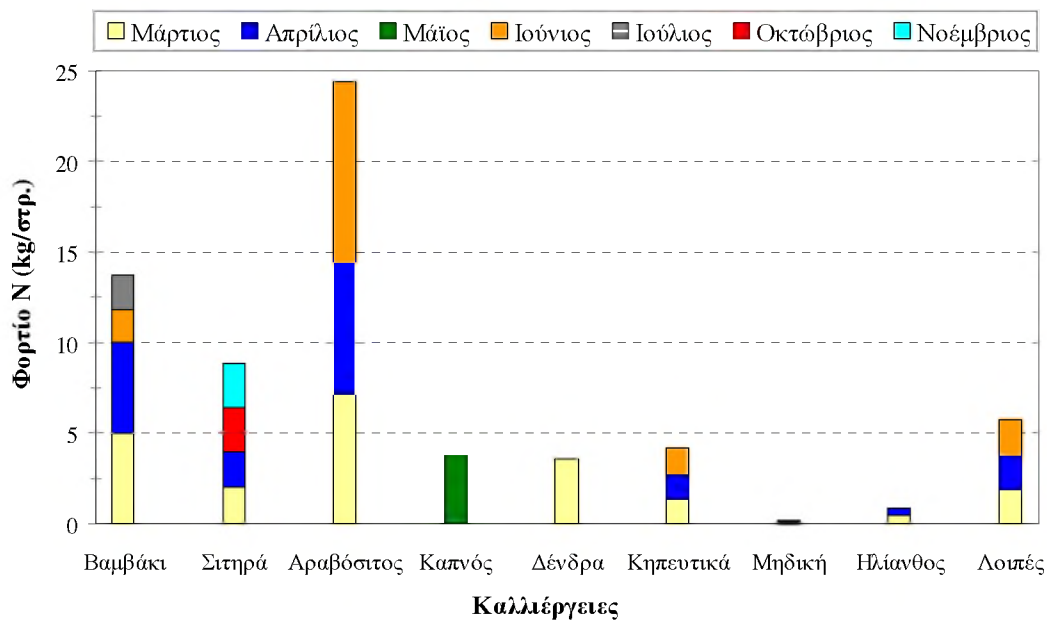
Η κινητήριος δύναμη που καθορίζει την προώθηση του μετώπου υφαλμύρινσης στο γλυκό νερού του υδροφορέα είναι το υδραυλικό φορτίο και η αλατότητα της θάλασσας. Στην περιοχή που τα υδροφόρα στρώματα γειτνιάζουν με τη θάλασσα τέθηκαν οι ακόλουθες οριακές συνθήκες στο ομοίωμα:

- σταθερή τιμή του πιεζομετρικού φορτίου των υπόγειων υδάτων ίση με το απόλυτο υψόμετρο της επιφάνειας της θάλασσας, δηλ. $h = 0$ m, και
- σταθερή τιμή της συγκέντρωσης των αλάτων του υπόγειου νερού ίση με τη συγκέντρωση των αλάτων στη θάλασσα, δηλ. $c = 35.000$ mg/l.

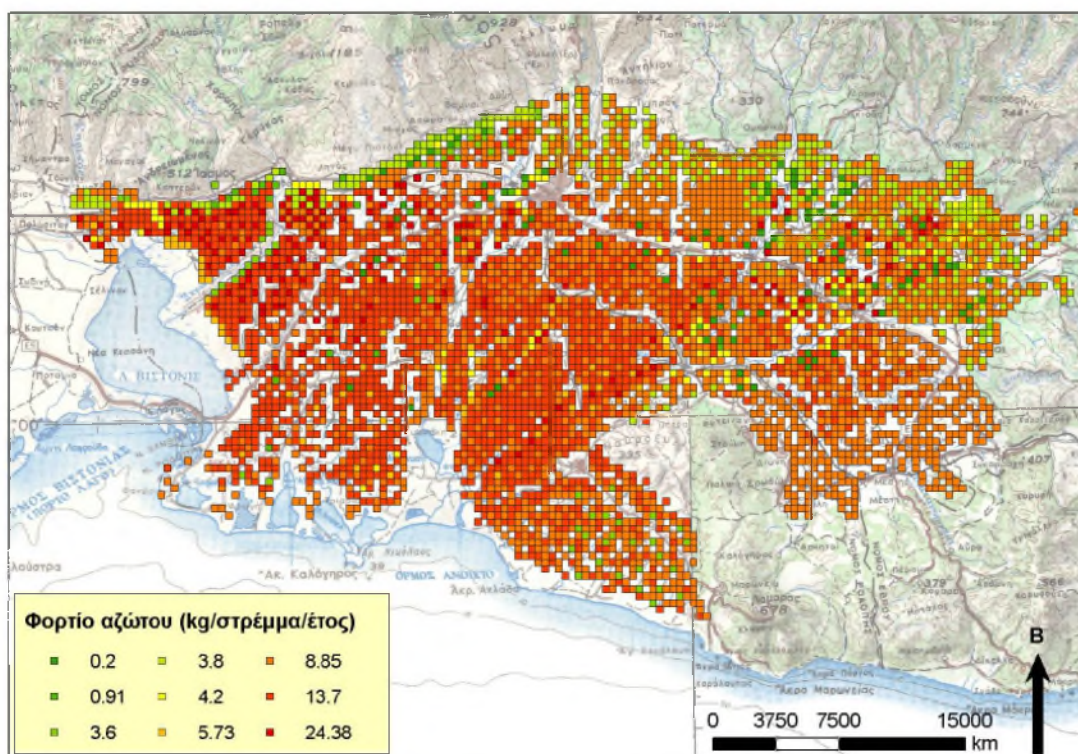
3.3. Παράμετροι του ομοιώματος για την προσομοίωση των συγκέντρωσης των νιτρικών αλάτων στα υπόγεια νερά

Στο πλαίσιο του παρόντος, όπως προαναφέρθηκε, οι αζωτούχες λιπάνσεις στις καλλιέργειες καθορίζουν την αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών αλάτων στα υπόγεια νερά του Ν. Ροδόπης. Οι λιπαντικές πρακτικές που εφαρμόζονται στις καλλιέργειες της περιοχής καταγράφονται και αναλύονται στο Παραδοτέο DB1.6 και συνοπτικά παρουσιάζονται στο Σχήμα 24, ενώ στο Σχήμα 25 δίνεται η χωρική κατανομή της τιμής του φορτίου αζώτου που δέχεται η περιοχή σε ένα έτος.

Από τα δεδομένα μελετών σχετικά με την ανάπτυξη διαχειριστικών πρακτικών για την προστασία της ποιότητας των υπόγειων υδάτων από τη ρύπανση των νιτρικών που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία, εκτιμήσαμε ότι από το συνολικό φορτίο αζώτου που δέχεται η έκταση που καταλαμβάνει η κάθε καλλιέργεια μόνο ένα σταθερό ποσοστό, ίσο με 10%, καταλήγει στην υπόγεια στάθμη.



Σχήμα 24. Διακύμανση της λίπανσης αζώτου που εφαρμόζεται στις καλλιέργειες του Ν. Ροδόπης



Σχήμα 25. Κατανομή του φορτίου αζώτου από τη λίπανση των καλλιεργειών στο Ν. Ροδόπης

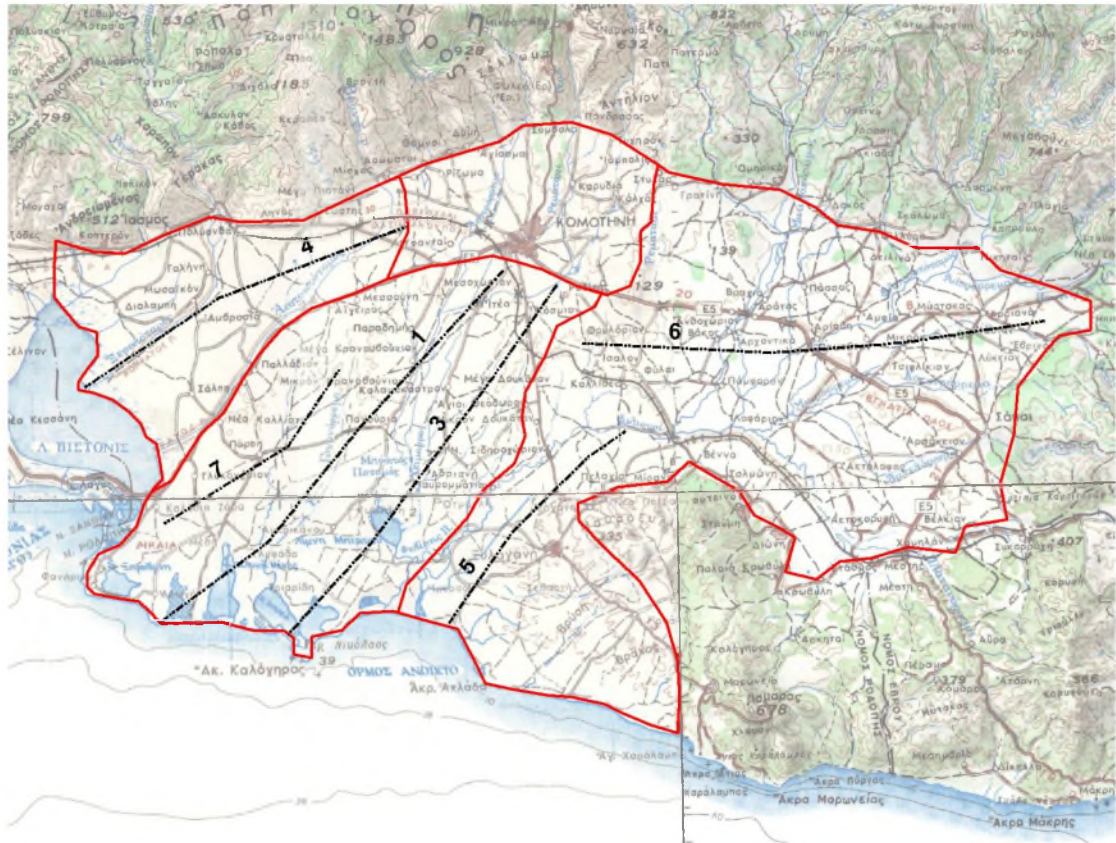
Ο συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς των νιτρικών στα υπόγεια ύδατα υπολογίζεται με βάση τις τιμές του συντελεστή διασποράς κατά μήκος της κύριας ροής, $\alpha_L = 250$ m, του συντελεστή διασποράς εγκάρσια της κύριας ροής, $\alpha_T = 50$ m και του συντελεστή μοριακής διάχυσης $D_m = 5 \times 10^{-5}$ m²/d (Frind et al., 1990; Almasri and Kaluarachchi, 2007).

3.4. Αποτελέσματα προσομοίωσης της ποιότητας των υπόγειων υδάτων

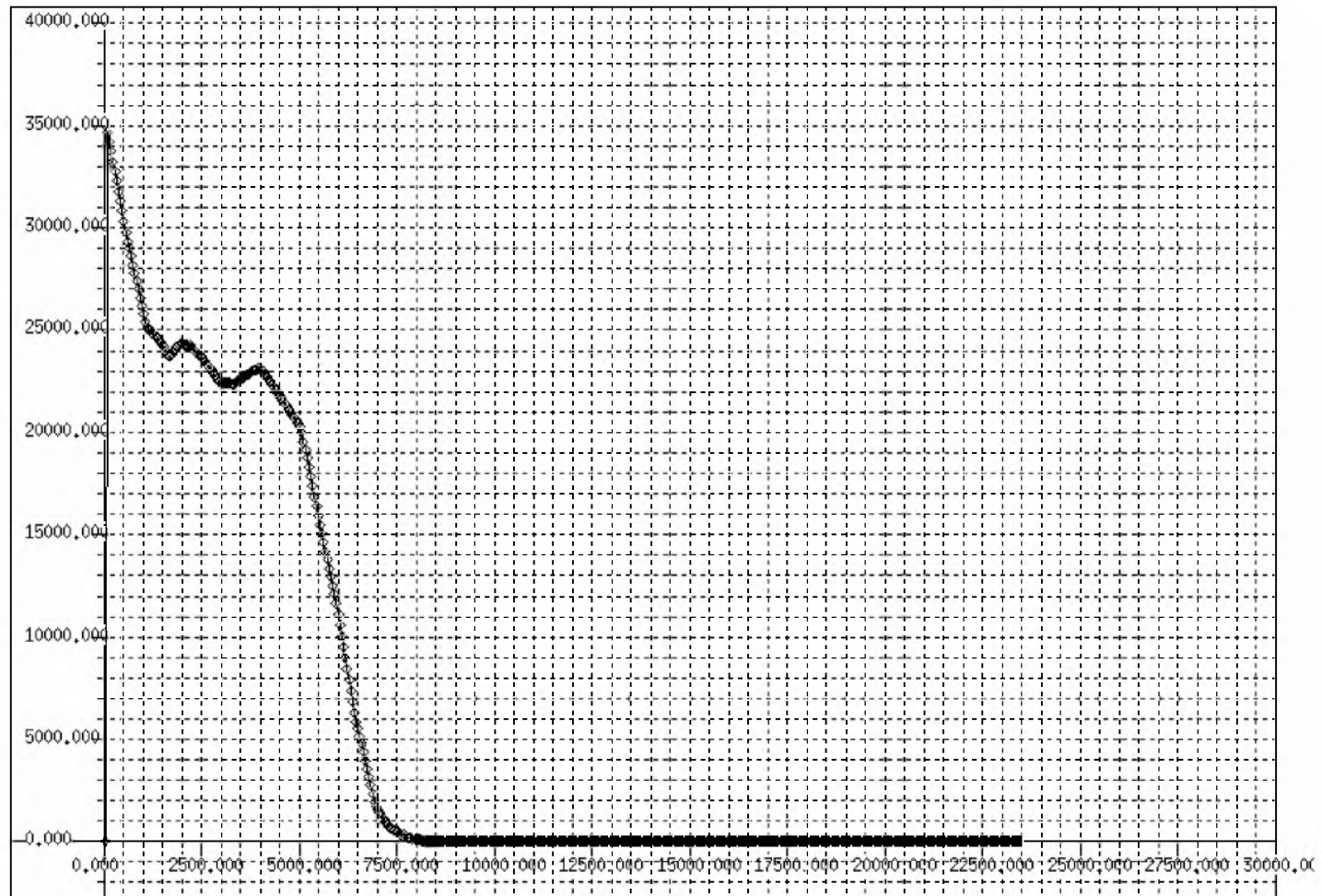
Η προσομοίωση της ποιότητας των υπόγειων υδάτων είχε διάρκεια 30 έτη (1981-2011) και η αρχική τιμή της συγκέντρωσης των αλάτων του θαλασσινού νερού και των νιτρικών θεωρήθηκε ίση με μηδέν ($c = 0$ mg/l). Η προώθηση του θαλασσινού νερού ($c = 35000$ mg/l) στο γλυκό νερό των υδροφορέων γίνεται σταδιακά και στον πέμπτο χρόνο προσομοίωσης το μέτωπο εντοπίζεται κατά μήκος της ακτογραμμής σε μια απόσταση που δεν ξεπερνά τα 2 km. Μετά από 15 χρόνια, το μέτωπο του θαλασσινού νερού εντοπίζεται σε απόσταση μεγαλύτερη των 3 km από την ακτογραμμή στις περιοχές που βρίσκονται νότια της λ. Ισμαρίδας και νοτιοανατολικά της λ. Βιστωνίδας, ενώ στα 25 χρόνια βρίσκεται περίπου στο μέσο της Ισμαρίδας (7 km από την ακτογραμμή). Στα Σχήματα 27 έως 29 δίνεται η προώθηση του μετώπου υφαλμύρινσης σε τομές κάθετες στην ακτογραμμή στις οποίες το φαινόμενο είναι πιο έντονο (βλέπε και Σχήμα 26).

Η συγκέντρωση των νιτρικών εμφανίζεται σε χαμηλά επίπεδα τα πρώτα χρόνια της προσομοίωσης αλλά αυξάνεται σταδιακά στη συνέχεια. Μετά από 15 χρόνια, η συγκέντρωση είναι μεγαλύτερη των 10 mg/l σε αρκετές περιοχές του νομού όπως, στον νοητό άξονα μεταξύ Κομοτηνής και Ισμαρίδας, σε τμήμα της περιοχής μεταξύ Ισμαρίδας και Ξυλαγανής, ενώ στο πεδίο της Βιστωνίδας οι συγκεντρώσεις ξεπερνούν τα 20 mg/l σε τμήματα της περιοχής εκατέρωθεν του Κομψάτου. Μετά από 25 χρόνια, οι συγκεντρώσεις είναι μεγαλύτερες από 20 mg/l και σε άλλες περιοχές του Νομού ενώ στο πεδίο της Βιστωνίδας ξεπερνούν και τα 40 mg/l. Στα Σχήματα 30 έως 34 δίνεται η συγκέντρωση των νιτρικών στα υπόγεια ύδατα σε διάφορες κατά μήκος τομές στην περιοχή του νομού. (βλέπε και Σχήμα 26).

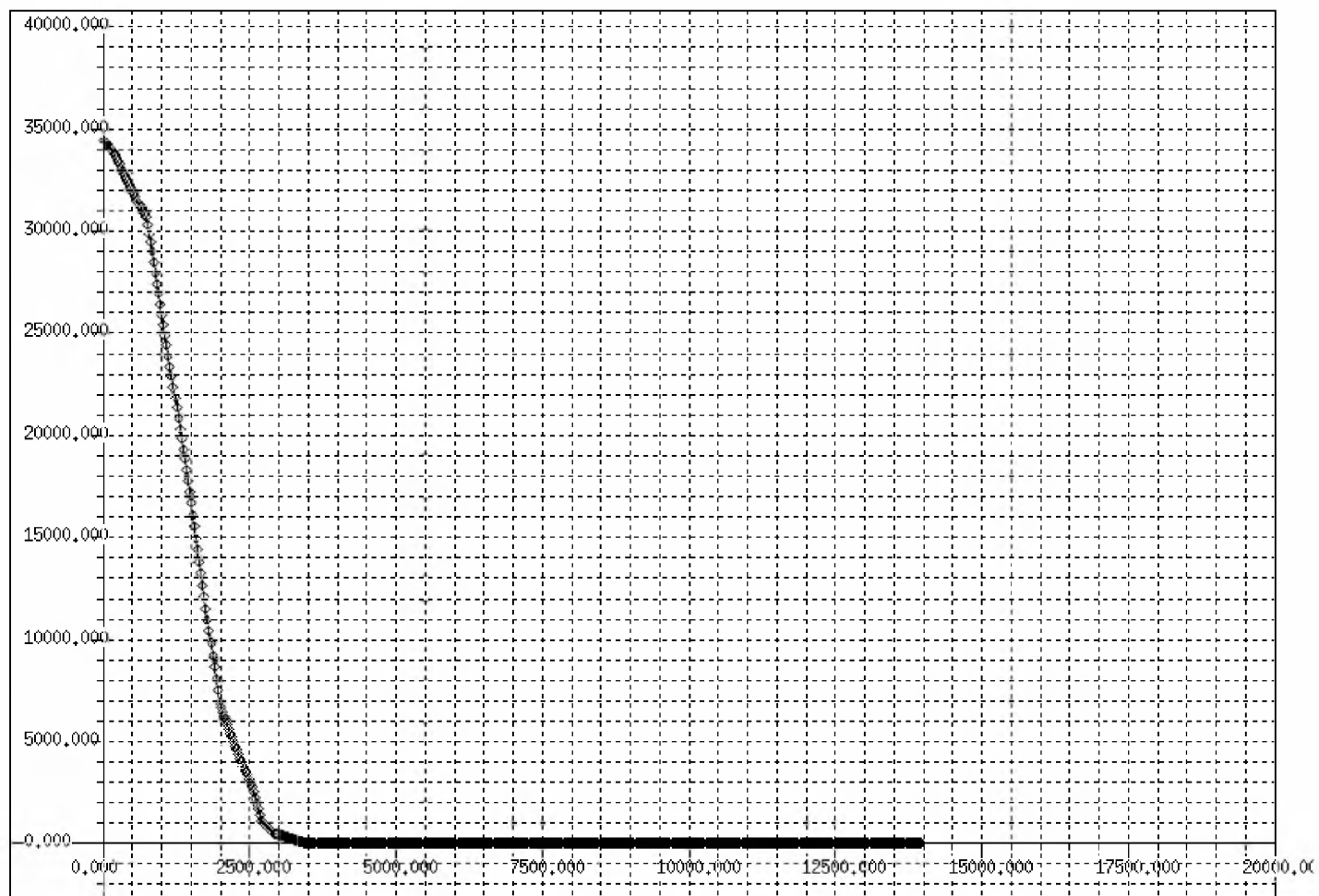
Στο Παράρτημα II δίνονται τα σχήματα της κατανομής των αλάτων του θαλασσινού νερού και της κατανομής των νιτρικών αλάτων στην άνω και κάτω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης.



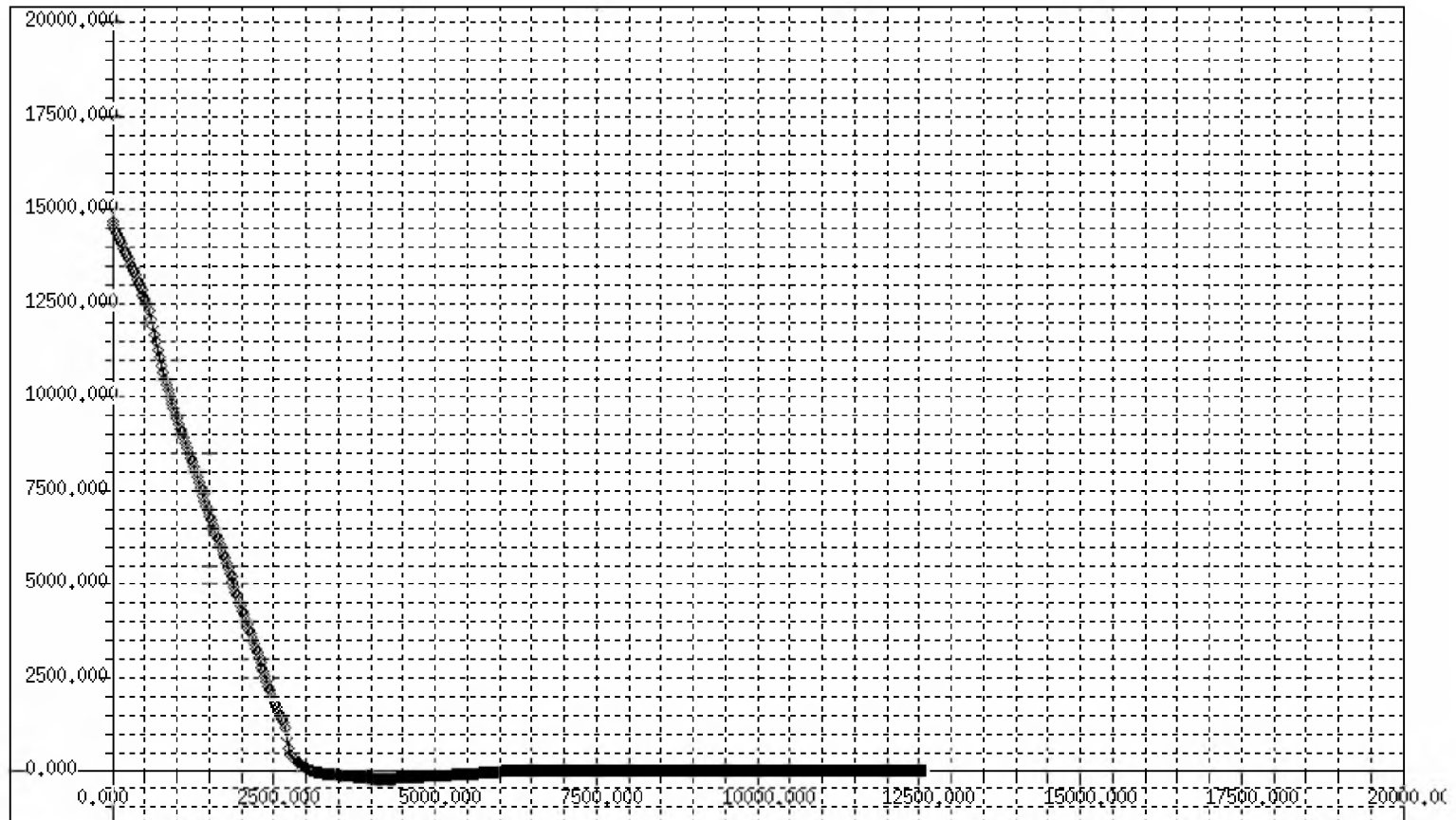
Σχήμα 26. Τομές παρακολούθησης της ποιότητας των υπόγειων υδάτων στις υδρογεωλογικές λεκάνες του Ν. Ροδόπης



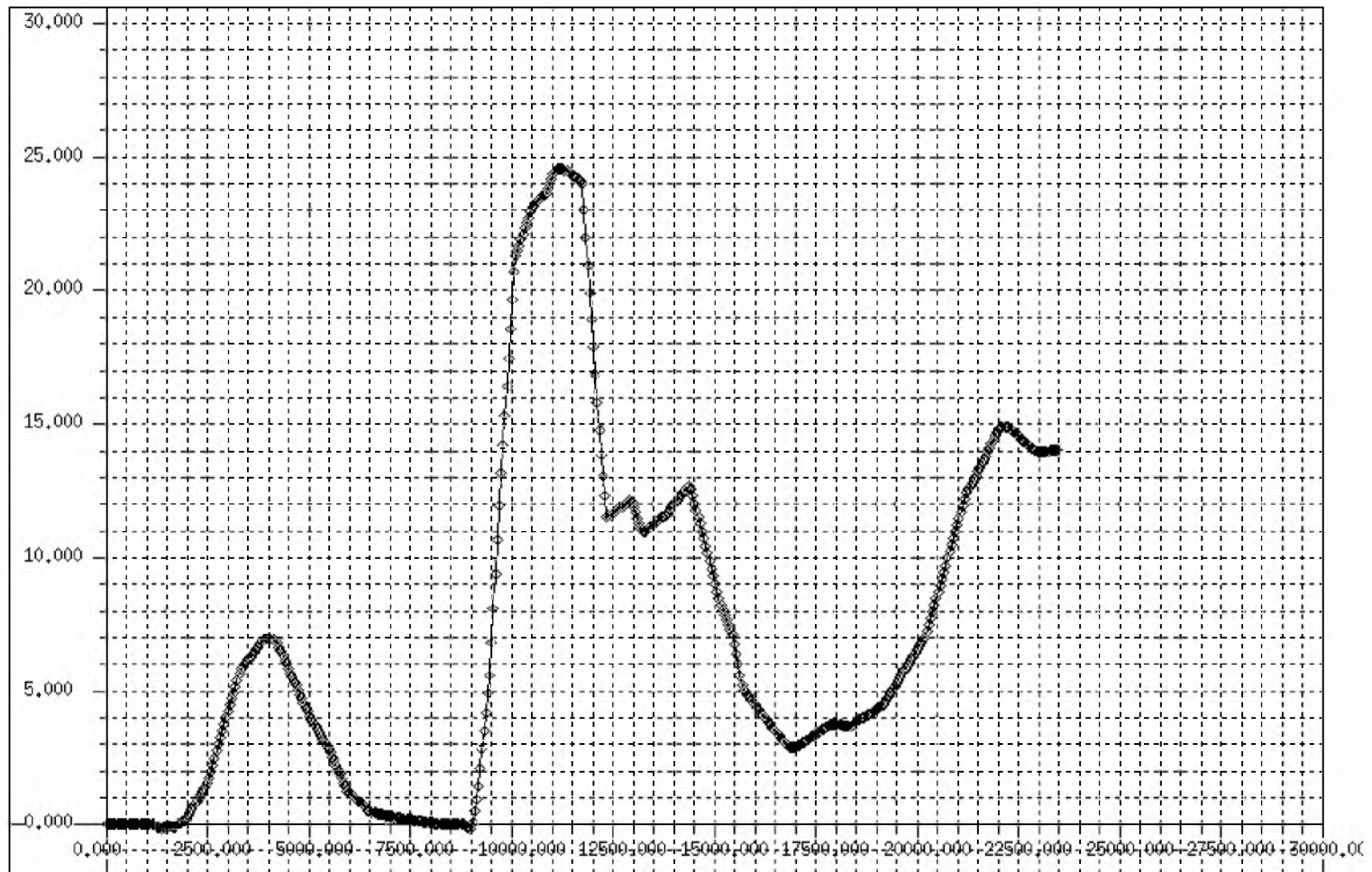
Σχήμα 27. Συγκέντρωση των αλάτων του θαλασσινού νερού (mg/l) στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης (κατά μήκος της τομής 3 - Οκτώβριος 2006)



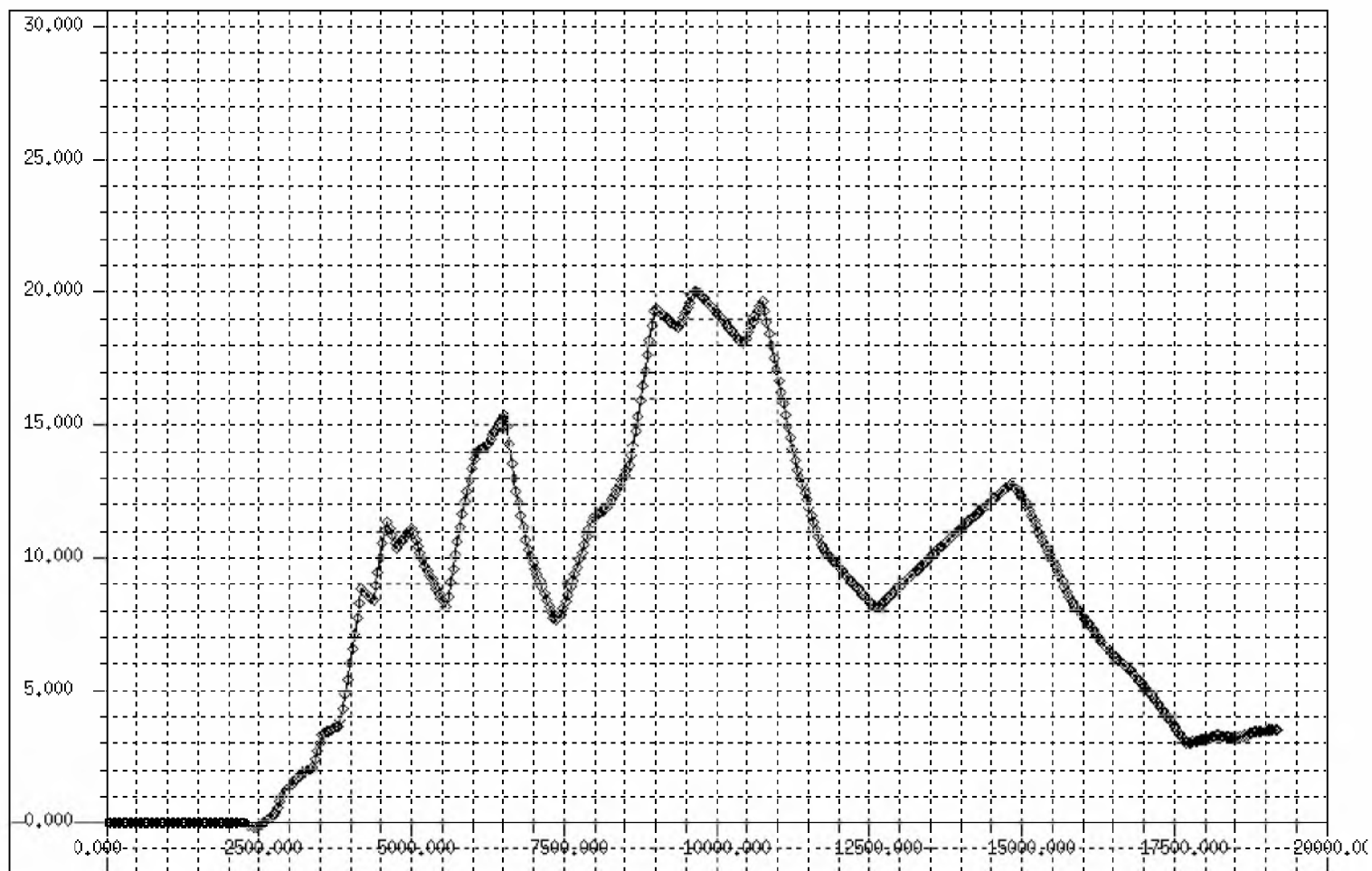
Σχήμα 28. Συγκέντρωση των αλάτων του θαλασσινού νερού (mg/l) στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης (κατά μήκος της τομής 5 - Οκτώβριος 2006)



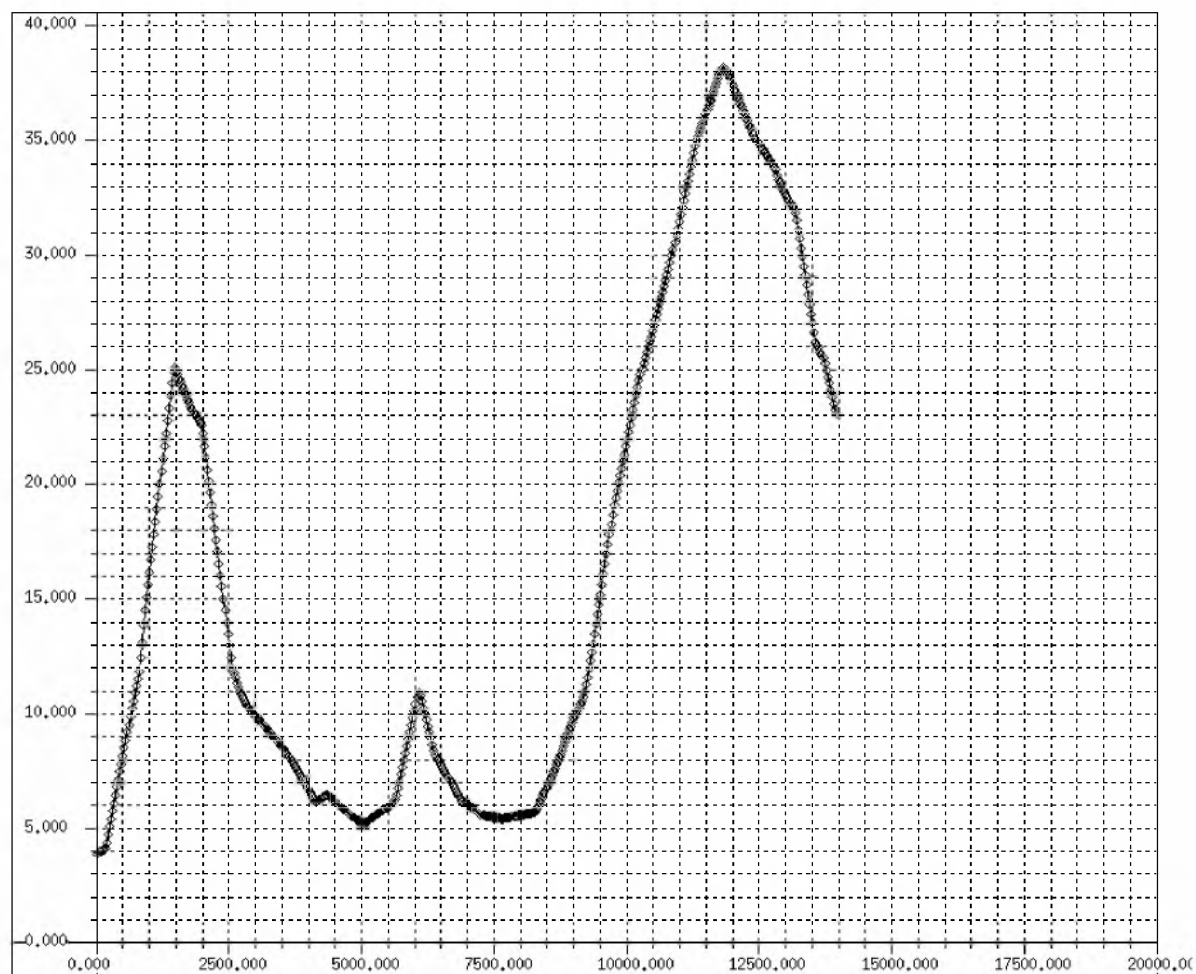
Σχήμα 29. Συγκέντρωση των αλάτων του θαλασσινού νερού (mg/l) στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης (κατά μήκος της τομής 7 - Οκτώβριος 2006)



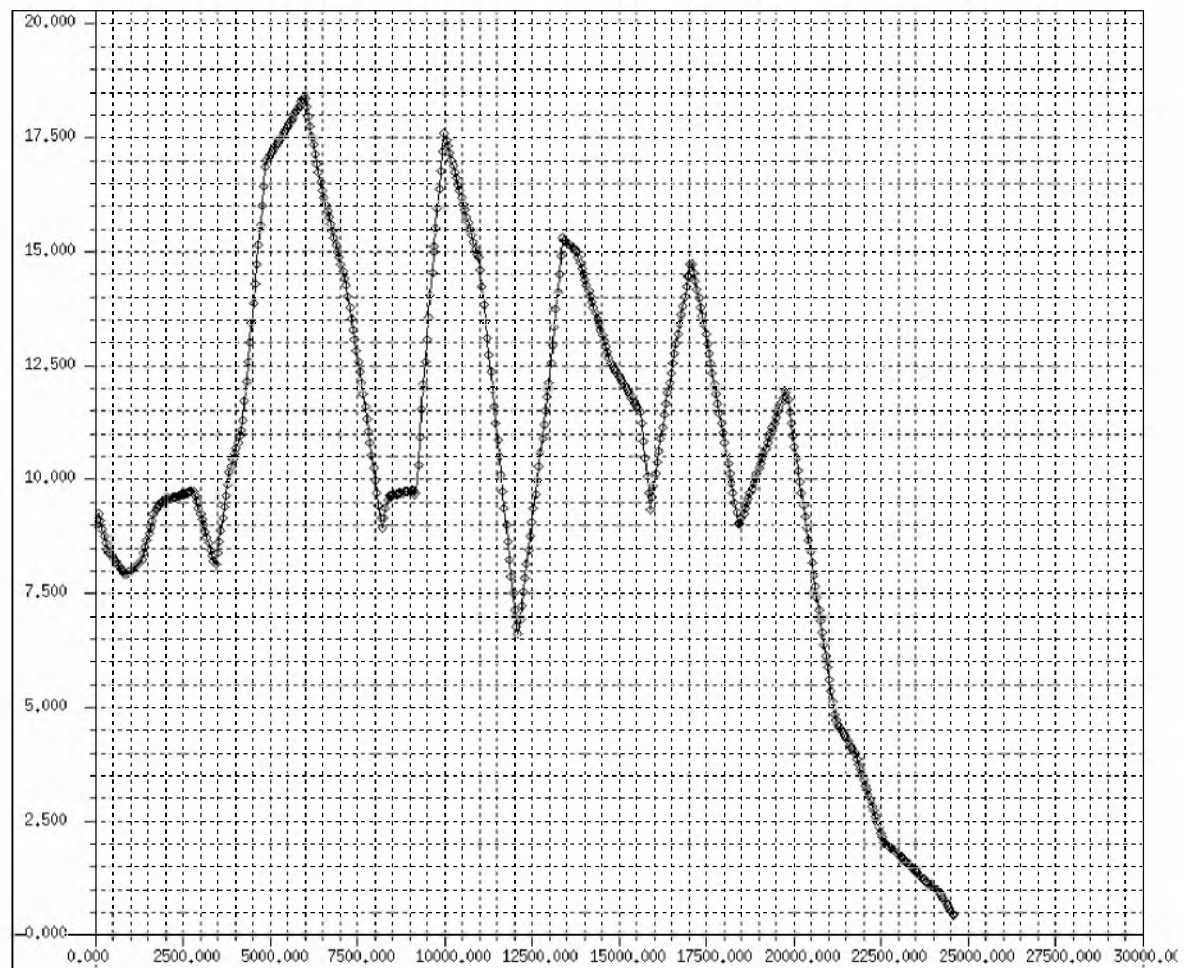
Σχήμα 30. Συγκέντρωση των νιτρικών (mg/l) στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης (κατά μήκος της τομής 3 - Οκτώβριος 2006)



Σχήμα 31. Συγκέντρωση των νιτρικών (mg/l) στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης (κατά μήκος της τομής 4 - Οκτώβριος 2006)



Σχήμα 32. Συγκέντρωση των νιτρικών (mg/l) στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης (κατά μήκος της τομής 5 - Οκτώβριος 2006)



Σχήμα 33. Συγκέντρωση των νιτρικών (mg/l) στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης (κατά μήκος της τομής 6 - Οκτώβριος 2006)



Σχήμα 34. Συγκέντρωση των νιτρικών (mg/l) στα υπόγεια ύδατα του Ν. Ροδόπης (κατά μήκος της τομής 7 - Οκτώβριος 2006)

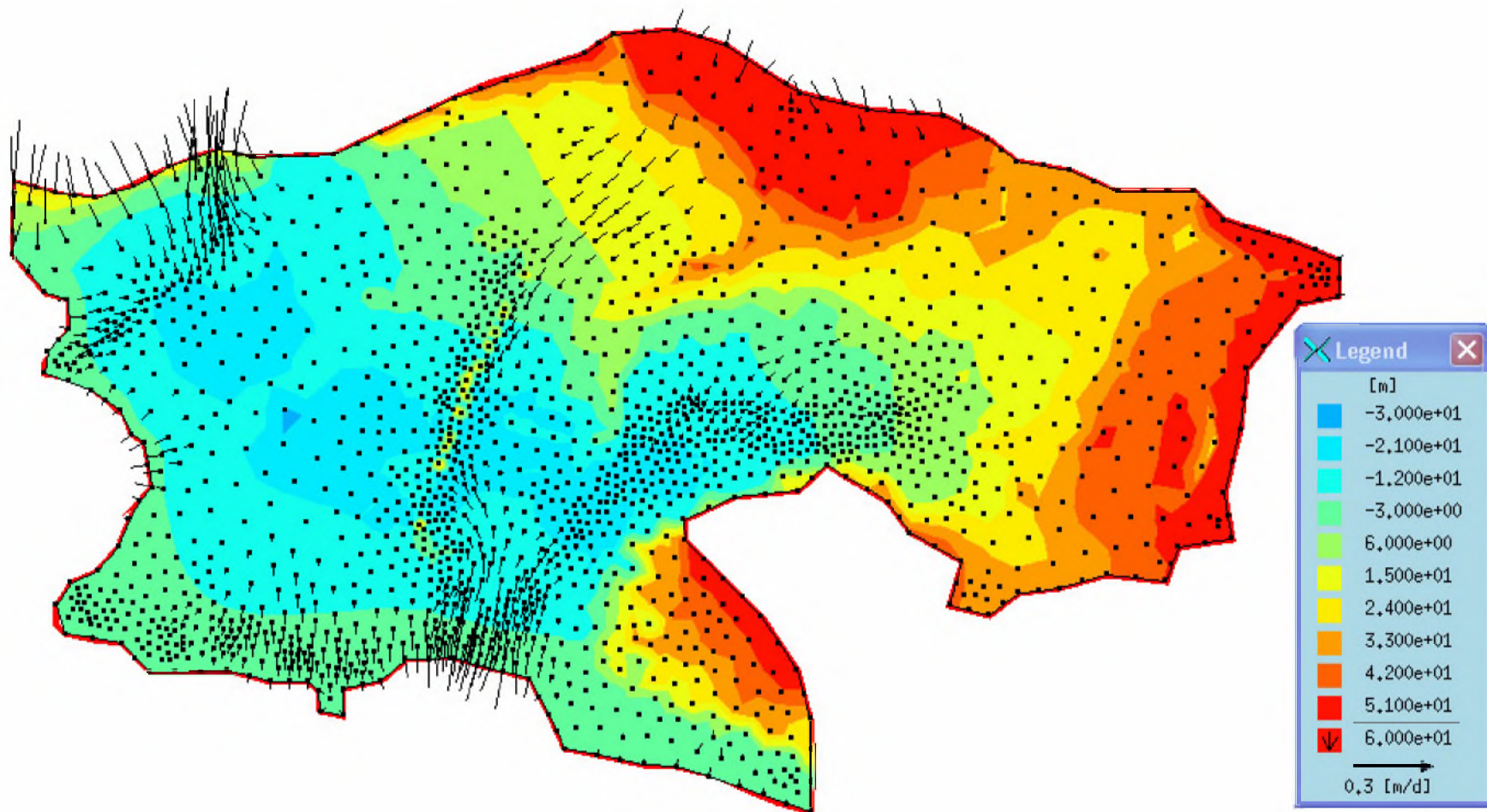
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Holzbecher, E., 1998. Modeling Density-Driven Flow in Porous Media. Springer, Berlin, 286 p.
- Petalas, C. and Lambrakis, N., 2006. Simulation of intense salinization phenomena in coastal aquifers - the case of the coastal aquifers of Thrace. Journal of Hydrology (324), 51–64.
- Petalas, C., Pisinaras, V., Gemitzi, A., Tsihrintzis, V. A. and Ouzounis, K., 2009. Current conditions of saltwater intrusion in the coastal Rhodope aquifer system, northeastern Greece. Desalination (237), 22–41.
- Pisinaras, V., Petalas, C., Tsihrintzis, V.A. and Zagana, E., 2007. A groundwater flow model for water resources management in the Ismarida plain, North Greece. Environmental Modeling and Assessment (12), 75-89.
- Refsgaard, J.C., B. Storm. 1996. Construction, calibration and validation of hydrological models. In Abbott, M.B., Refsgaard, J.C. (Eds.), Distributed Hydrological Modelling. Kluwer Academic, pp.41-54.
- Yan J.J. and K.R. Smith, 1994: Simulation of Integrated Surface Water and Ground Water Systems – Model formulation. Water Resources Bulletin, Vol. 30, No. 5, 1-12.
- Αντωνόπουλος, Β., 2001. Ποιότητα και ρύπανση υπόγειων νερών. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 344 σ.
- Διαμαντής, Ι., 1991. Υδρογεωλογική αναγνώριση και διερεύνηση δυνατοτήτων συνδυασμένης διαχείρισης υπόγειων και επιφανειακών νερών νομού Ροδόπης για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών. Τεχνική έκθεση στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος χρηματοδοτούμενου από τη Νομαρχία Ροδόπης. Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΔΠΘ, Ξάνθη, 3 τεύχη, 198 σελ.
- Διαμαντής, Ι., 2009. Ποιοτική αξιολόγηση του υπόγειου νερού επιλεγμένων πεδίων του νομού Ροδόπης στα σημεία προέλευσης του (γεωτρήσεις), ως προς την περιεκτικότητα σε νιτρικά, νιτρώδη και αμμωνιακές ουσίες, τα αίτια προέλευσης – προοπτικές. Ερευνητική έκθεση για λογαριασμό της Νομαρχίας Ροδόπης. Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΔΠΘ, Ξάνθη, 57 σελ.
- ΔΠΘ, 2008. Διερεύνηση διαθέσιμων ποσοτήτων επιφανειακού νερού σε επίπεδο λεκάνης απορροής για την ικανοποίηση αρδευτικών και άλλων αναγκών του Νομού ροδόπης. Τρόποι διαχείρισης (φράγματα, λιμνοδεξαμενές) και περιοχές διάθεσης. Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΔΠΘ, Ξάνθη, 50 σελ.

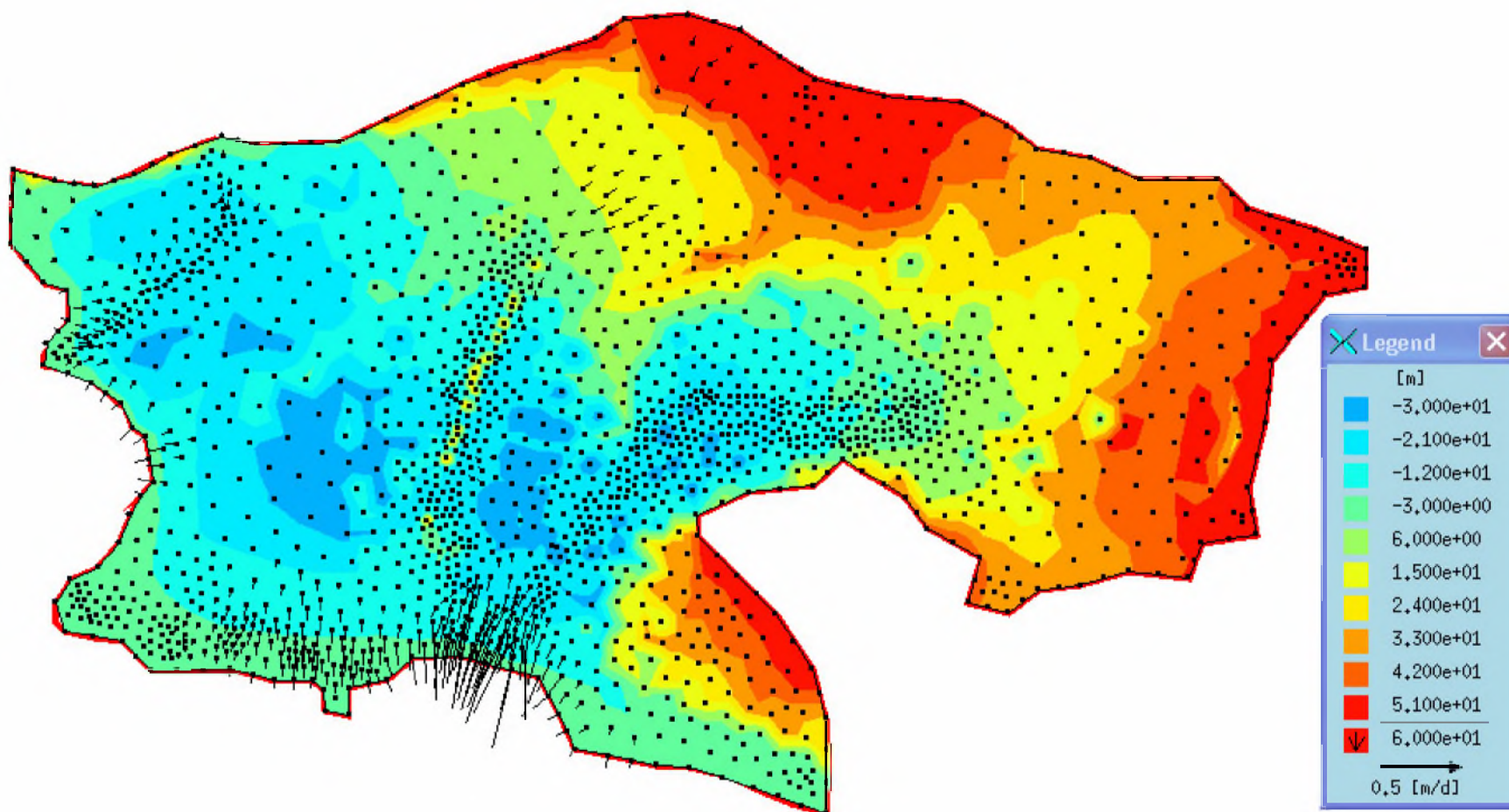
- Δράκος, Γ. και Μουζαλιώτης, Α., 2003. Το πρόβλημα της υφαλμύρινσης παράκτιων υδροφορέων. Η περίπτωση του πεδινού τμήματος Ξυλαγανής-Ιμέρου του Νομού Ροδόπης. Διπλωματική εργασία, Τμήμα. Πολιτικών Μηχανικών ΔΠΘ, Ξάνθη, 123 σελ.
- Καλλιώρας, Α., 2008. Διαχείριση υπόγειων υδατικών πόρων σε υδροφόρους που υπόκεινται σε καθεστώς θαλάσσιας διείσδυσης. Η περίπτωση του δυτικού παράκτιου τμήματος του Νομού Ροδόπης. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα. Πολιτικών Μηχανικών ΔΠΘ, Ξάνθη, 285 σελ.
- Πανώρας, Α. και Ηλίας, Α., 1999. Άρδευση με επεξεργασμένα υγρά αστικά απόβλητα. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 174 σ.
- Πισιναράς, Β., 2003. Συνθήκες διαχείρισης και προσομοίωση υπόγειου υδροφόρου συστήματος Νέου Σιδηροχωρίου, Ν. Ροδόπης. Διπλωματική εργασία, Τμήμα. Μηχανικών Περιβάλλοντος ΔΠΘ, Ξάνθη, 161 σελ.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

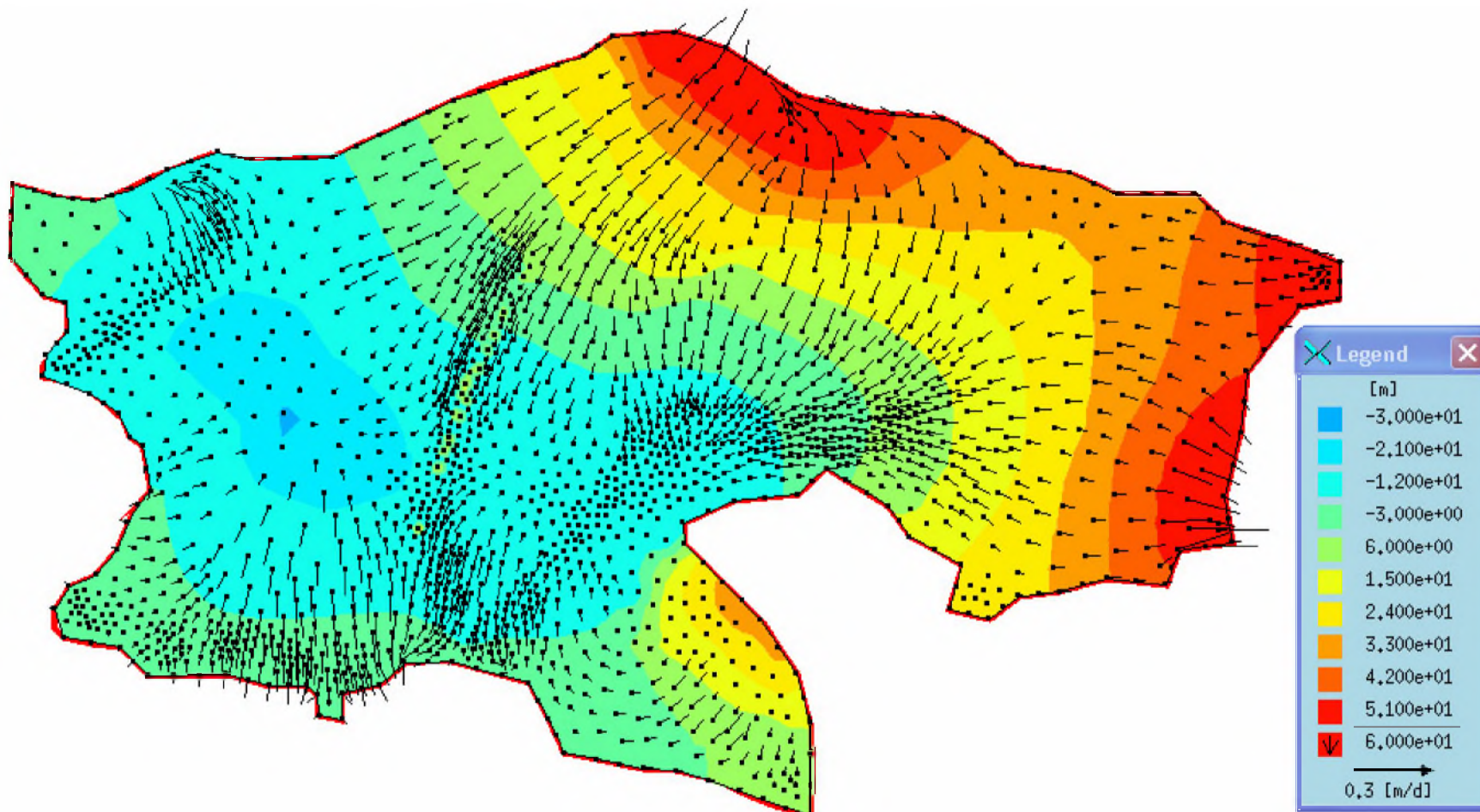
**Κατανομή του πιεζομετρικού φορτίου στην άνω και κάτω στρώση
των υπόγειων υδάτων**



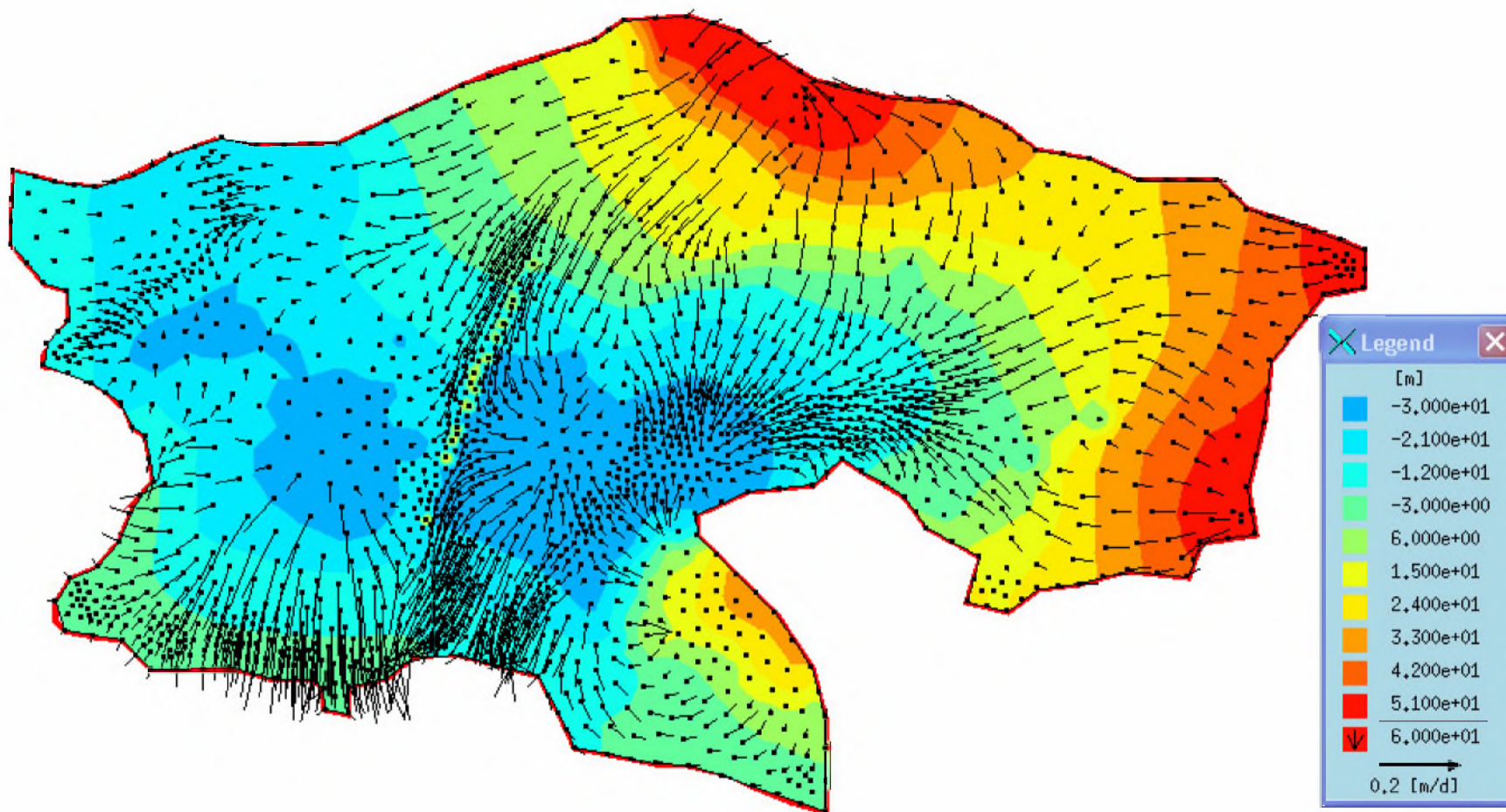
Σχήμα 35. Κατανομή πιεζομετρικού φορτίου (m) και ταχυτήτων ροής (m/d) στην άνω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Απρίλιος 1986)



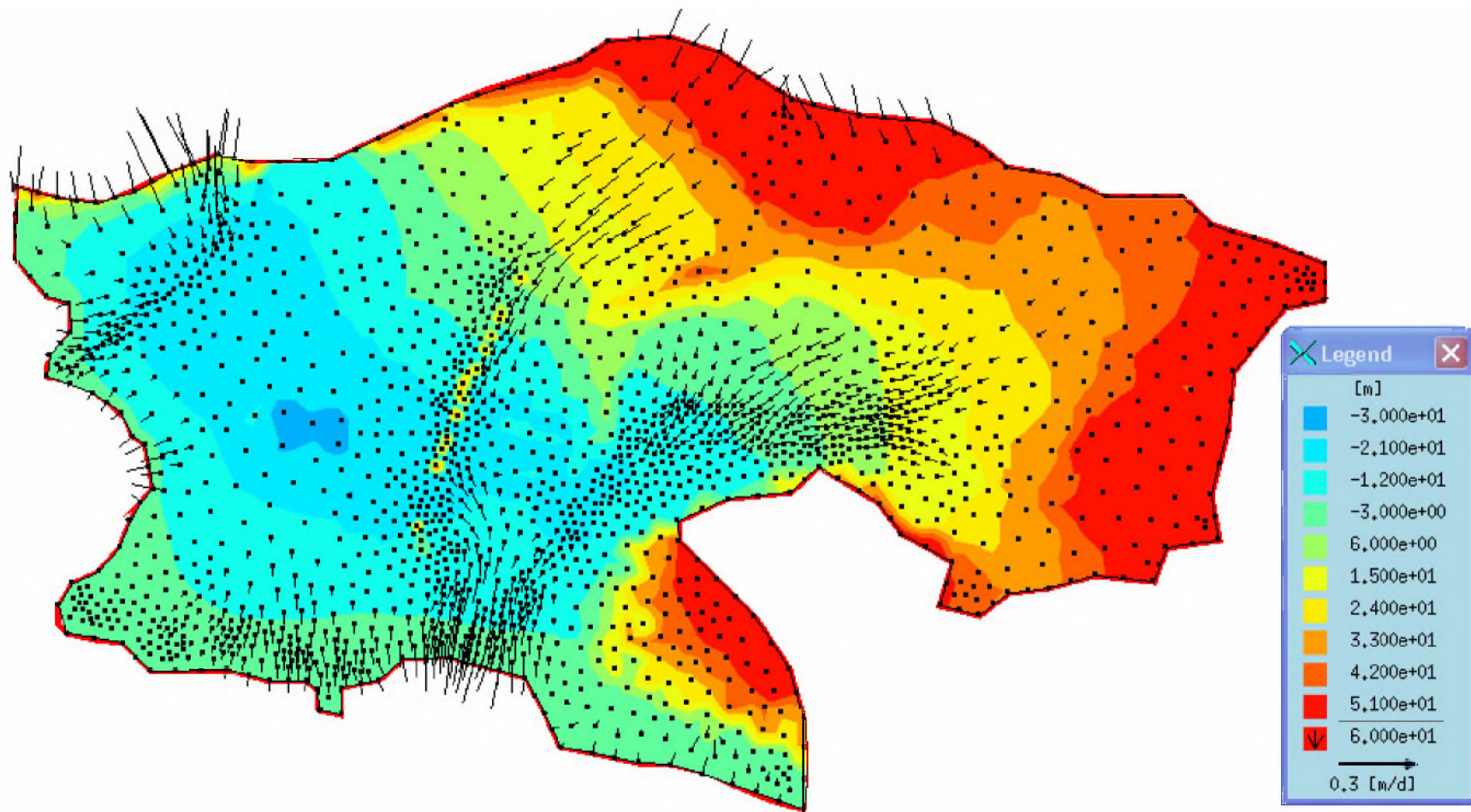
Σχήμα 36. Κατανομή πιεζομετρικού φορτίου (m) και ταχυτήτων ροής (m/d) στην άνω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Οκτώβριος 1986)



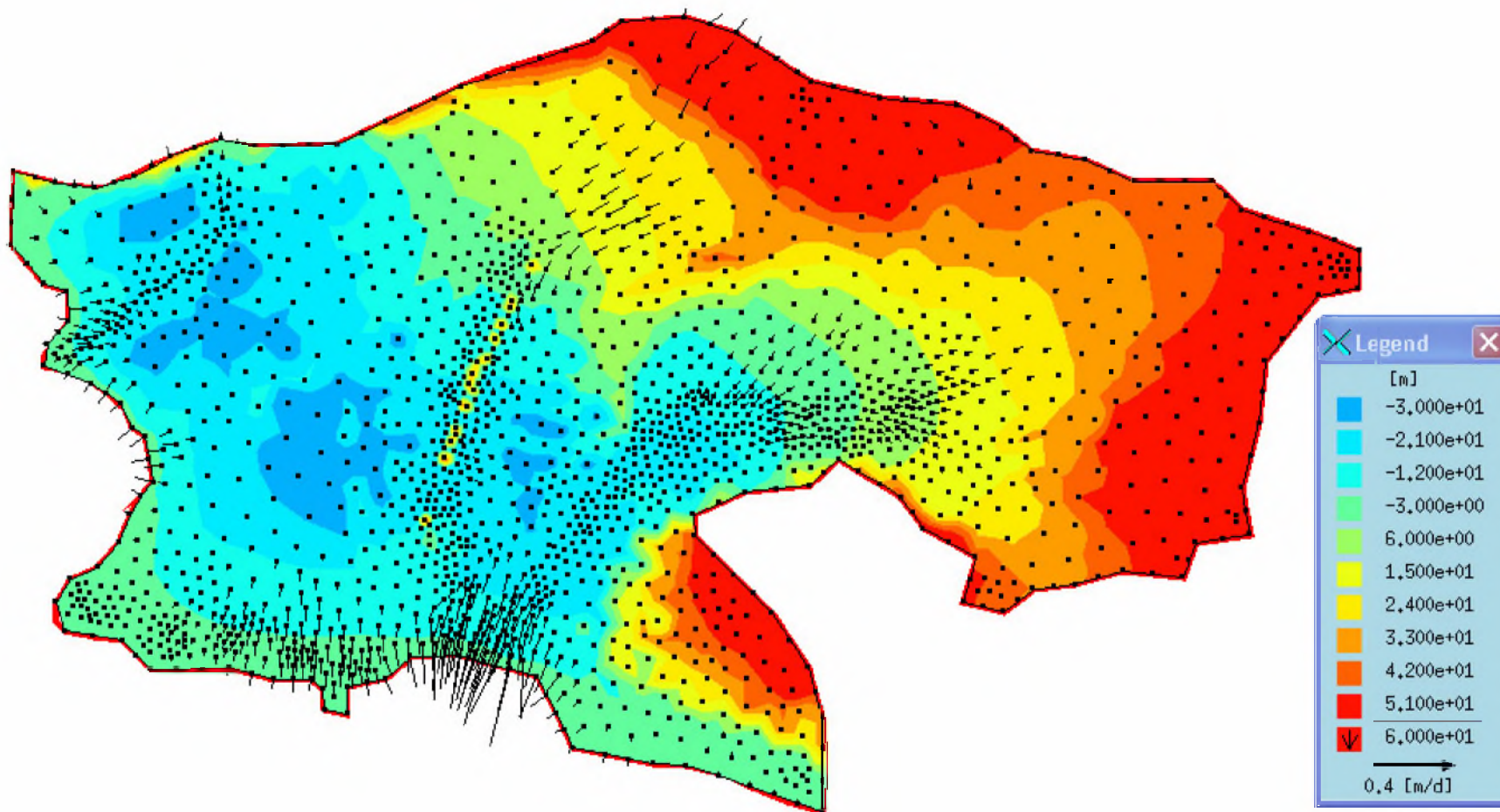
Σχήμα 37. Κατανομή πιεζομετρικού φορτίου (m) και ταχυτήτων ροής (m/d) στην κάτω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Απρίλιος 1986)



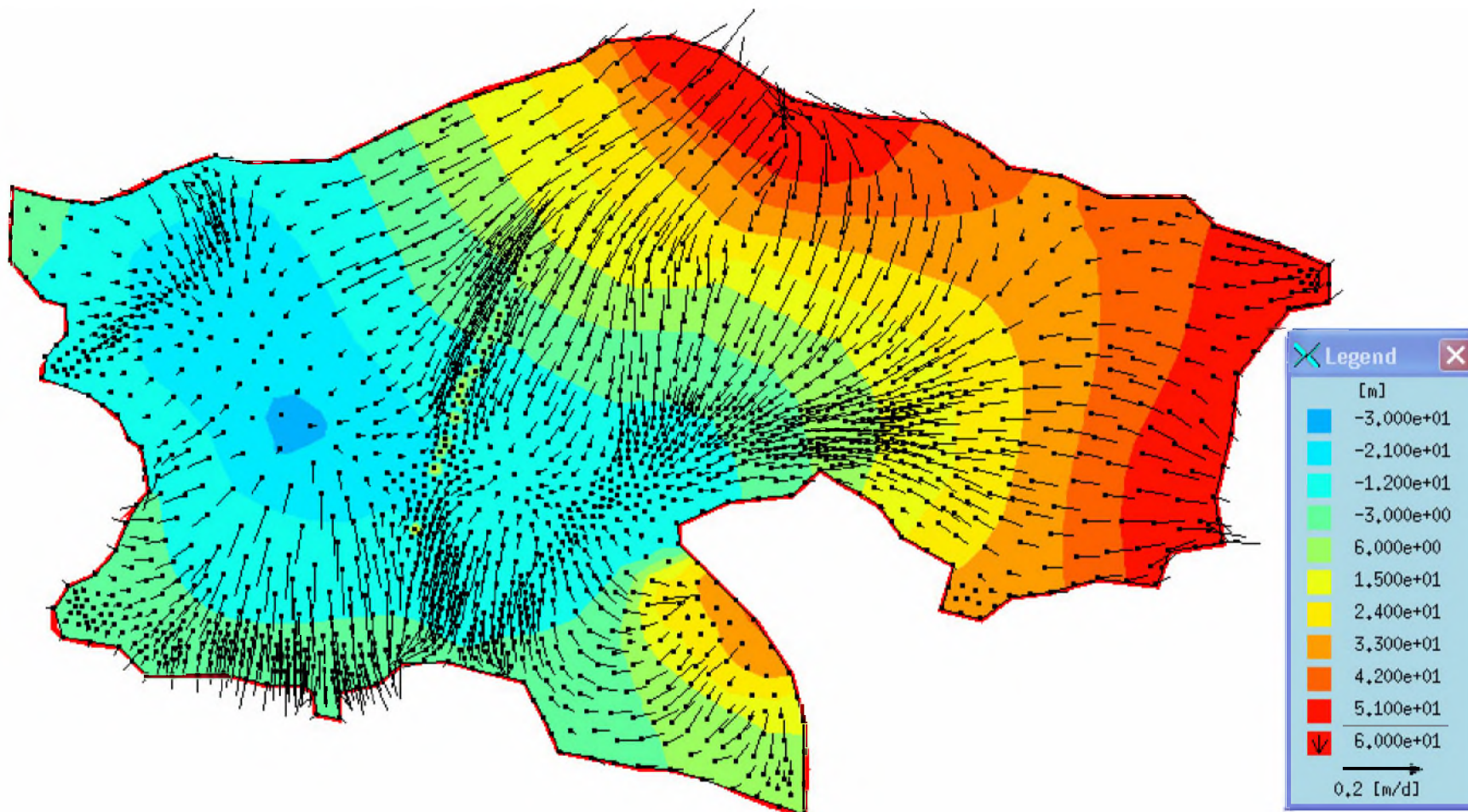
Σχήμα 38. Κατανομή πιεζομετρικού φορτίου (m) και ταχυτήτων ροής (m/d) στην κάτω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Οκτώβριος 1986)



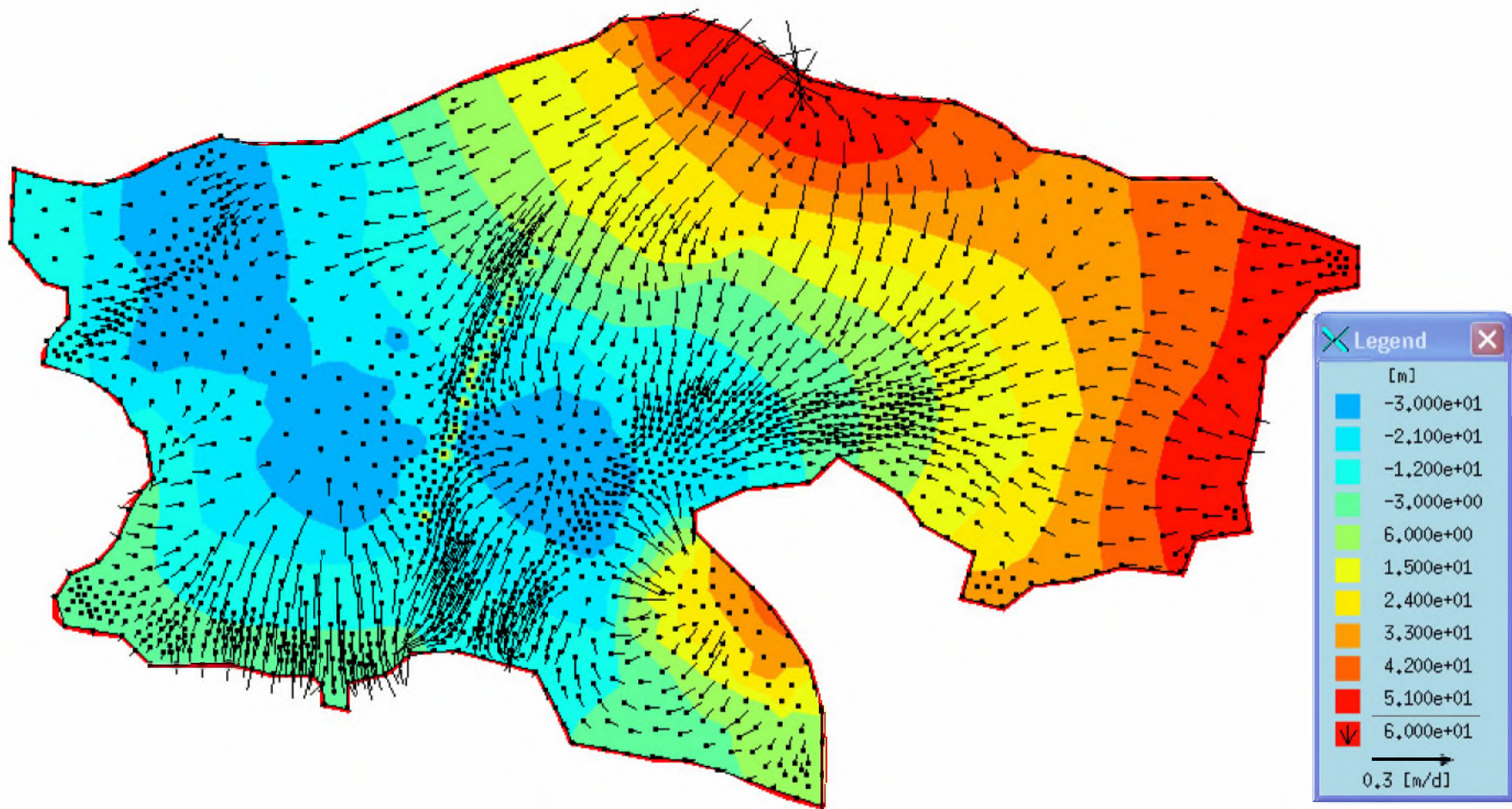
Σχήμα 39. Κατανομή πιεζομετρικού φορτίου (m) και ταχυτήτων ροής (m/d) στην άνω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Απρίλιος 1991)



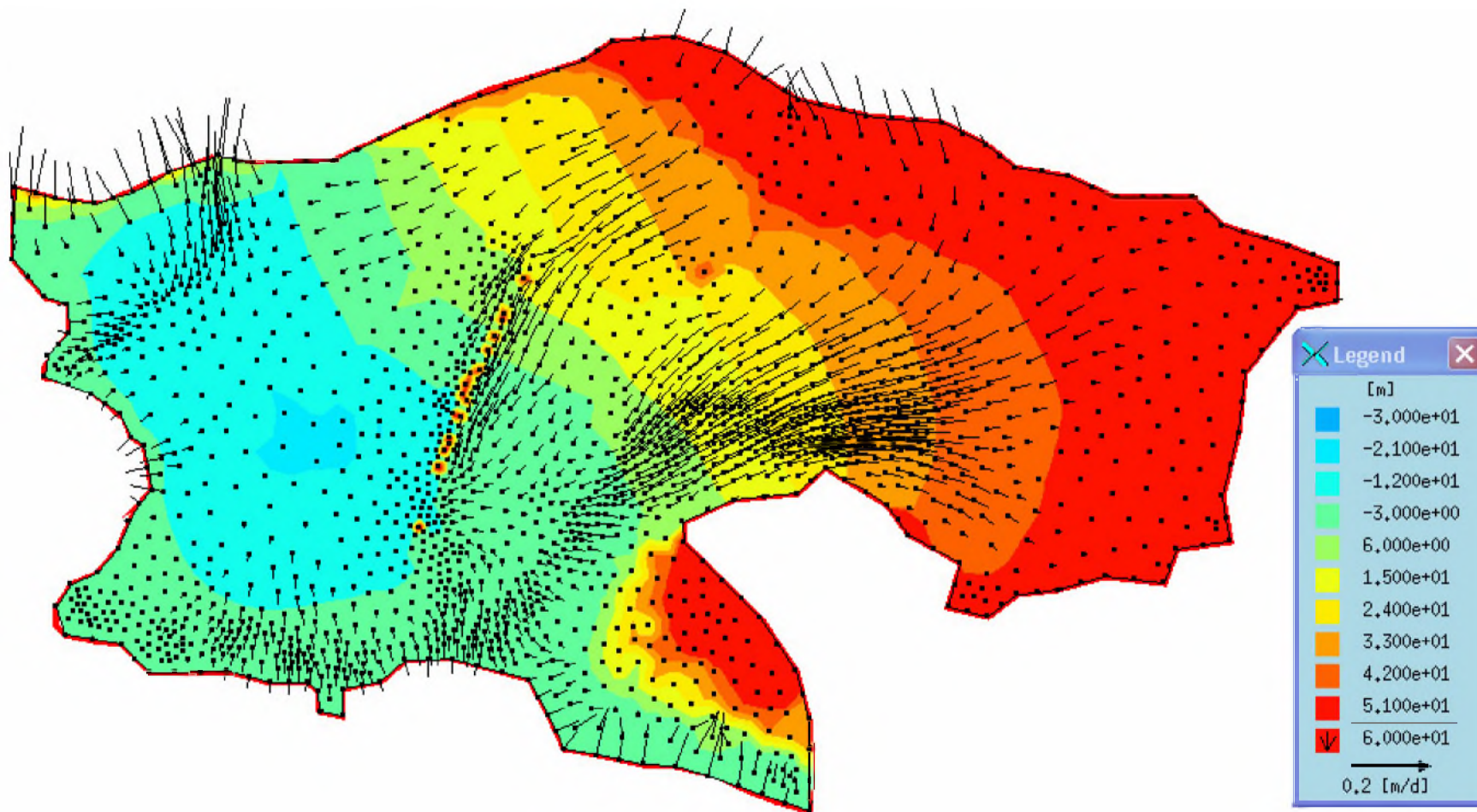
Σχήμα 40. Κατανομή πιεζομετρικού φορτίου (m) και ταχυτήτων ροής (m/d) στην άνω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Οκτώβριος 1991)



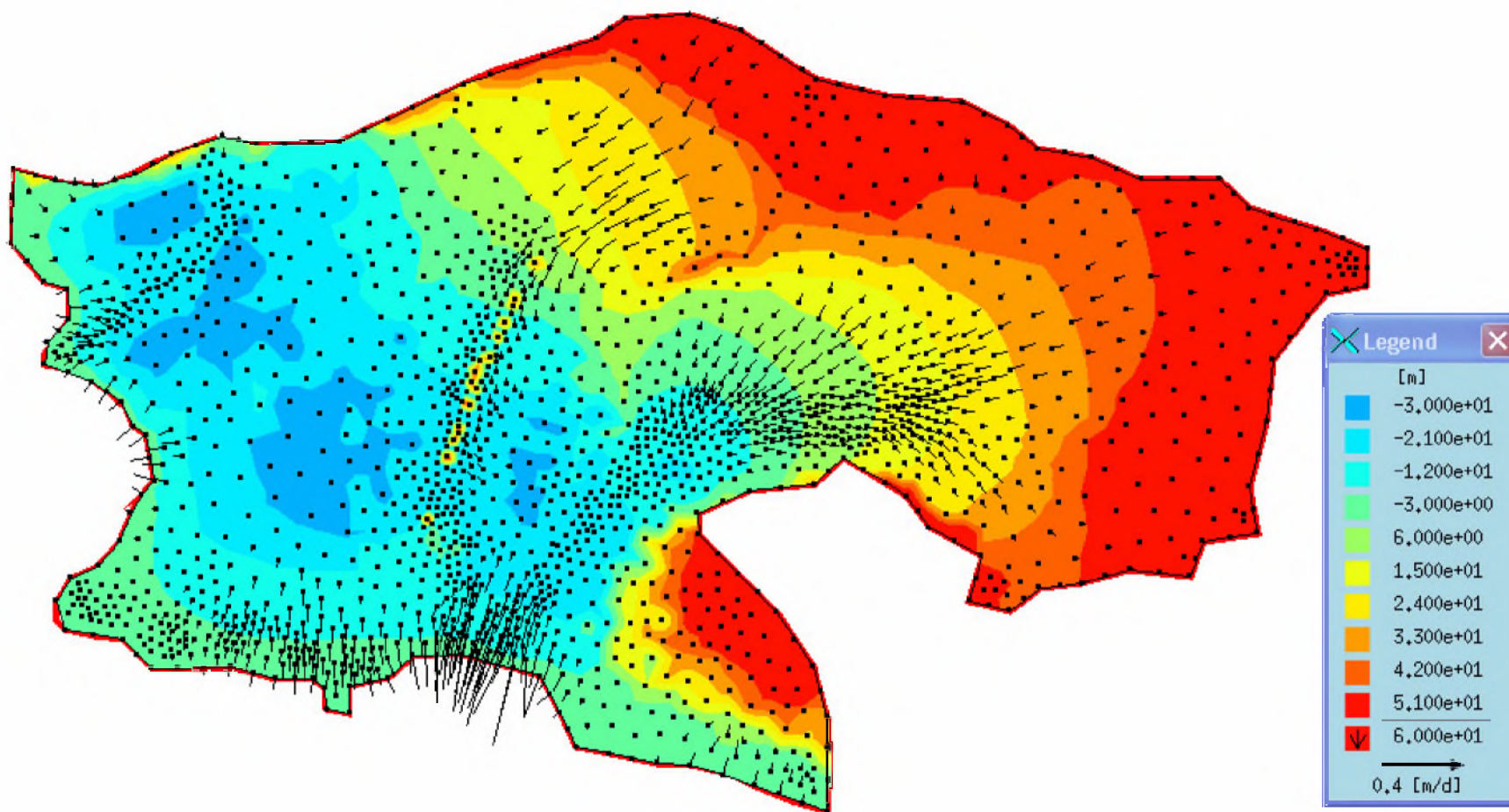
Σχήμα 41. Κατανομή πιεζομετρικού φορτίου (m) και ταχυτήτων ροής (m/d) στην κάτω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Απρίλιος 1991)



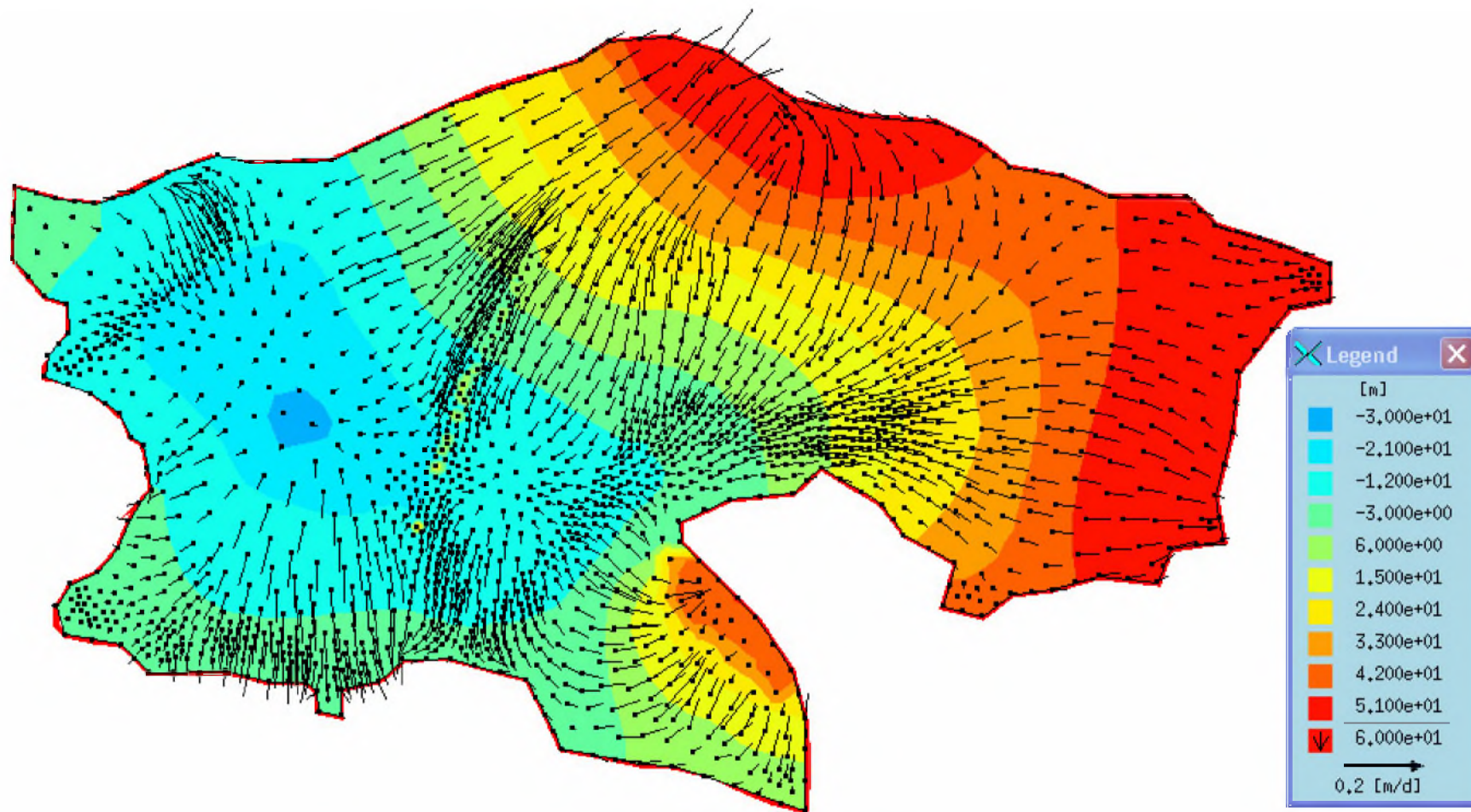
Σχήμα 42. Κατανομή πιεζομετρικού φορτίου (m) και ταχυτήτων ροής (m/d) στην κάτω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Οκτώβριος 1991)



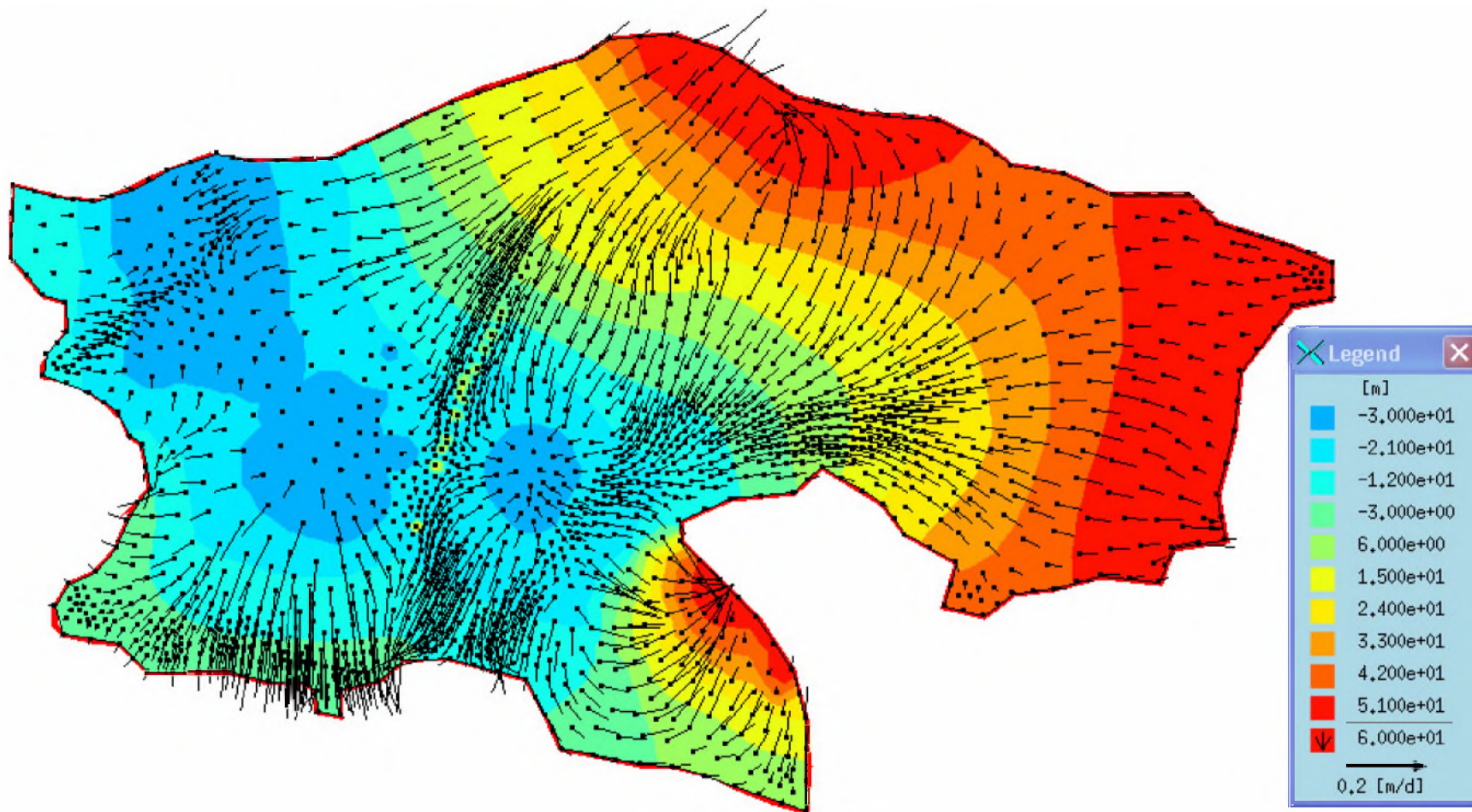
Σχήμα 43. Κατανομή πιεζομετρικού φορτίου (m) και ταχυτήτων ροής (m/d) στην άνω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Απρίλιος 1996)



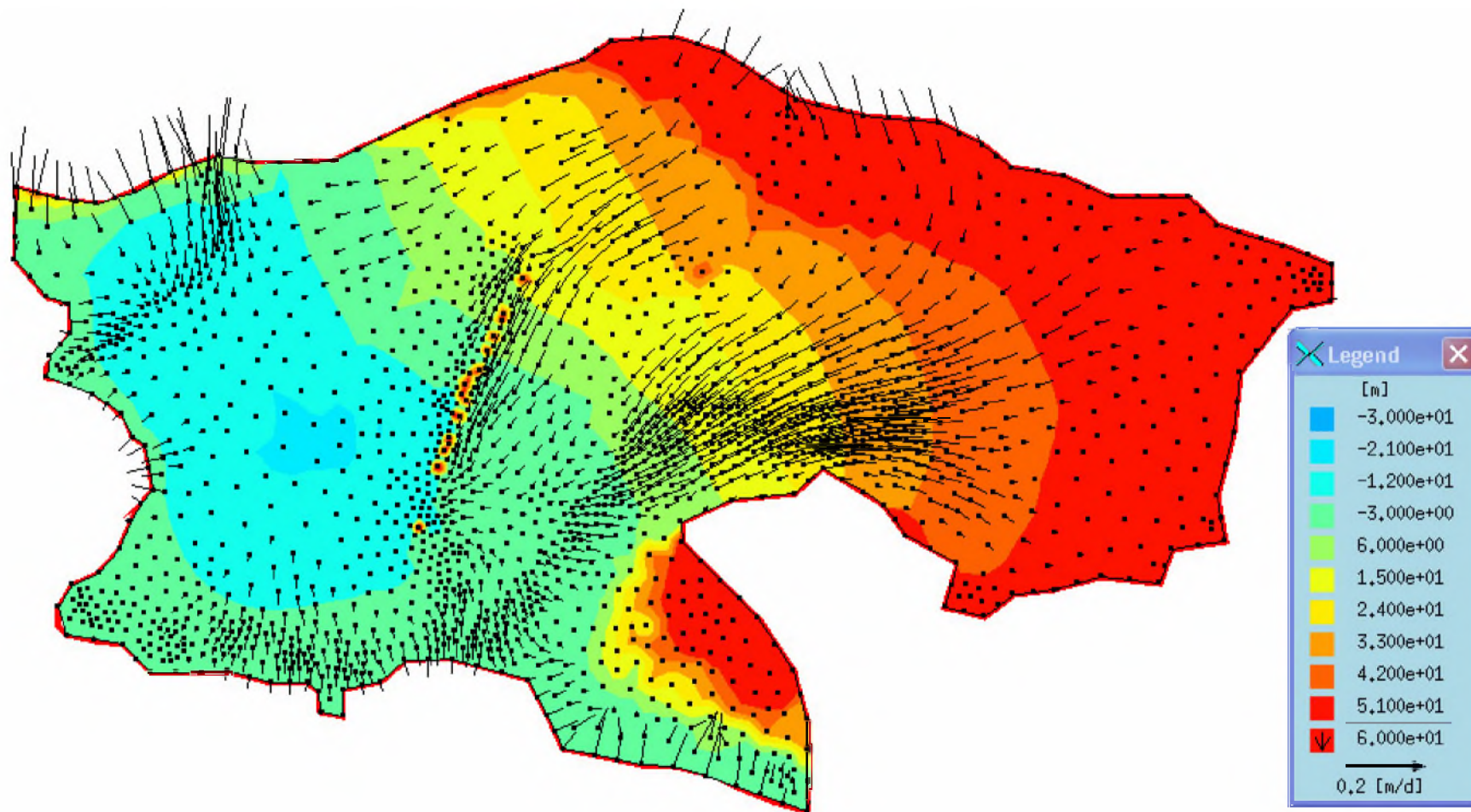
Σχήμα 44. Κατανομή πιεζομετρικού φορτίου (m) και ταχυτήτων ροής (m/d) στην άνω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Οκτώβριος 1996)



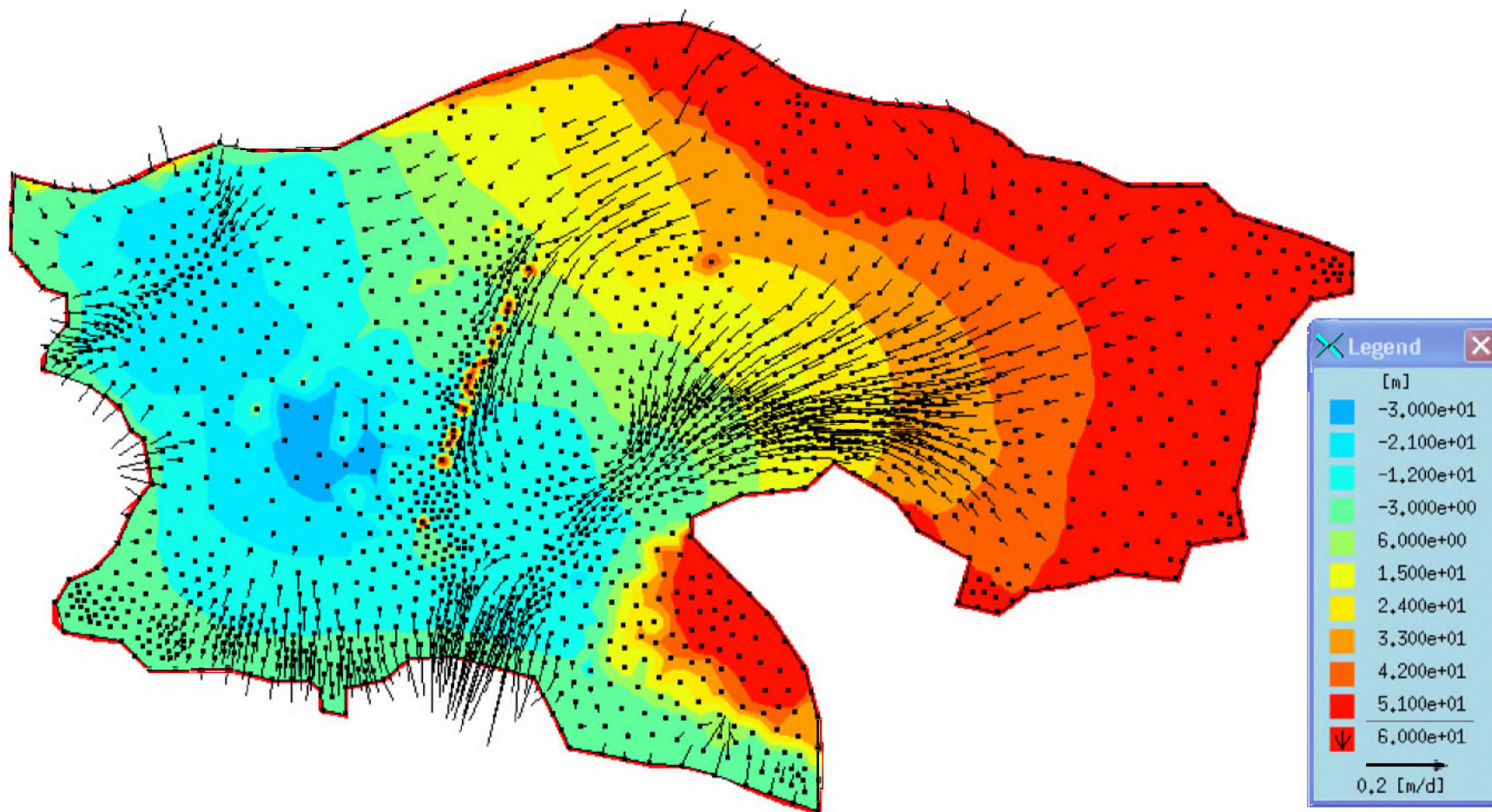
Σχήμα 45. Κατανομή πιεζομετρικού φορτίου (m) και ταχυτήτων ροής (m/d) στην κάτω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Απρίλιος 1996)



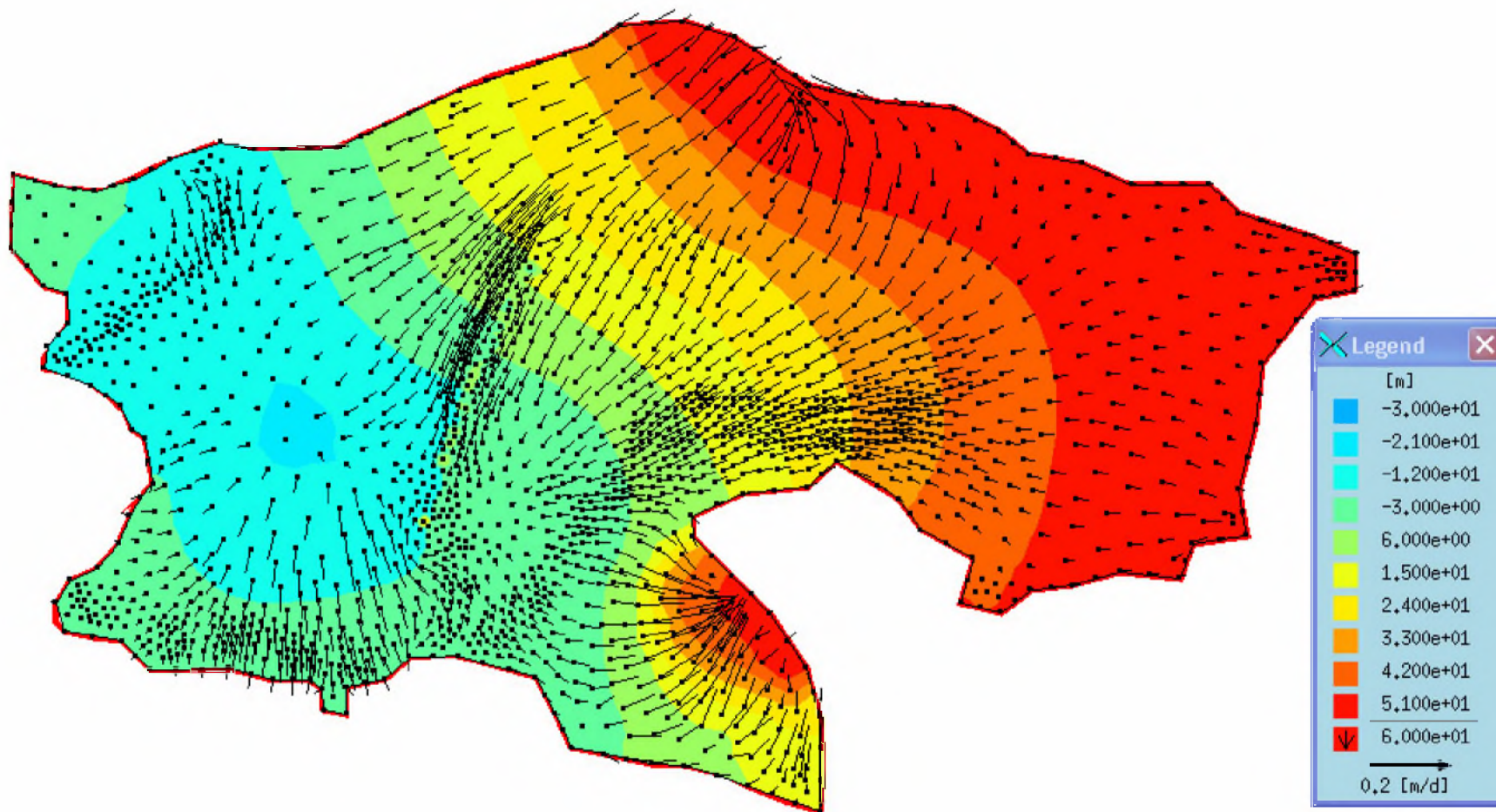
Σχήμα 46. Κατανομή πιεζομετρικού φορτίου (m) και ταχυτήτων ροής (m/d) στην κάτω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Οκτώβριος 1996)



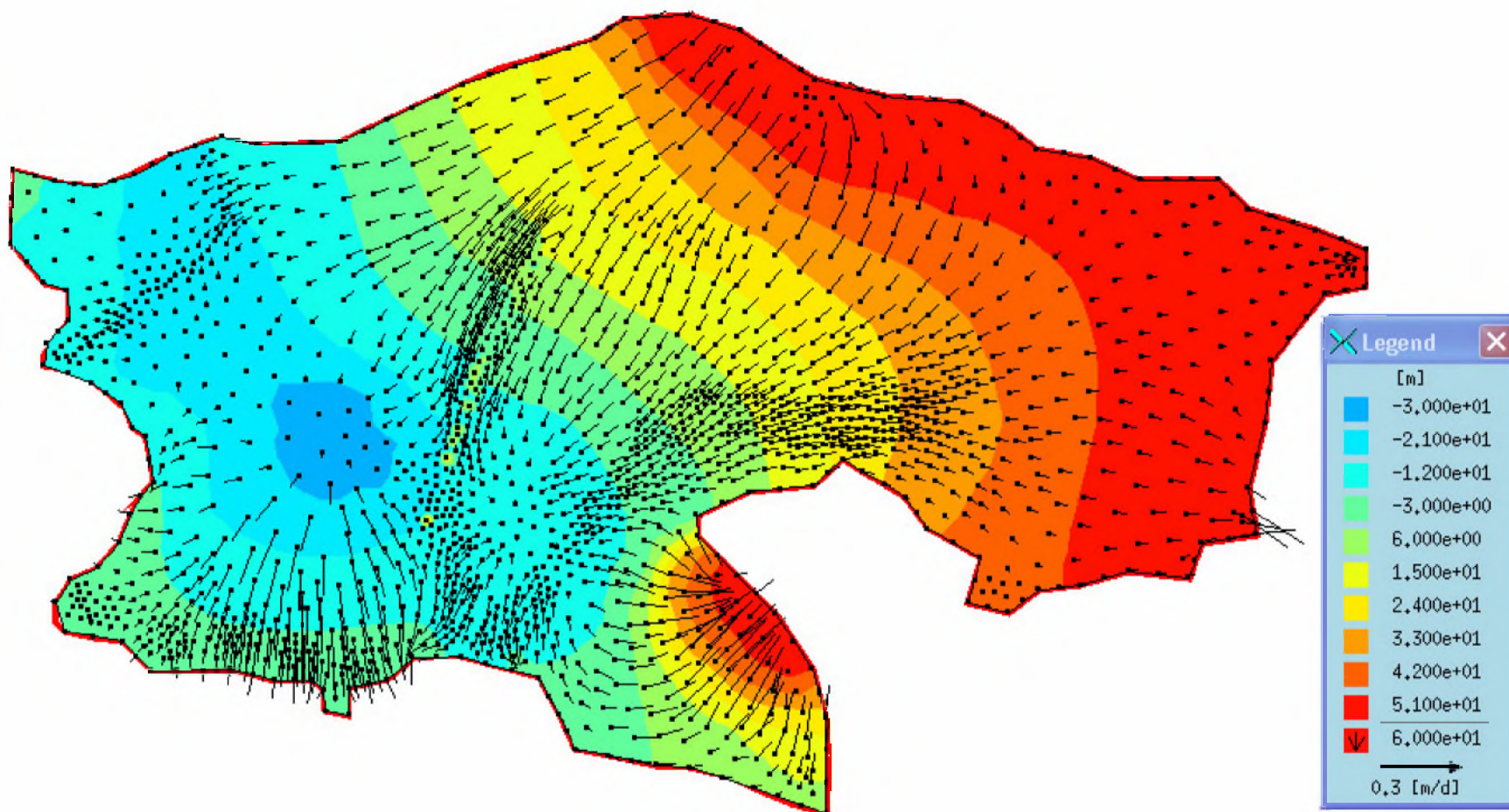
Σχήμα 47. Κατανομή πιεζομετρικού φορτίου (m) και ταχυτήτων ροής (m/d) στην άνω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Απρίλιος 2001)



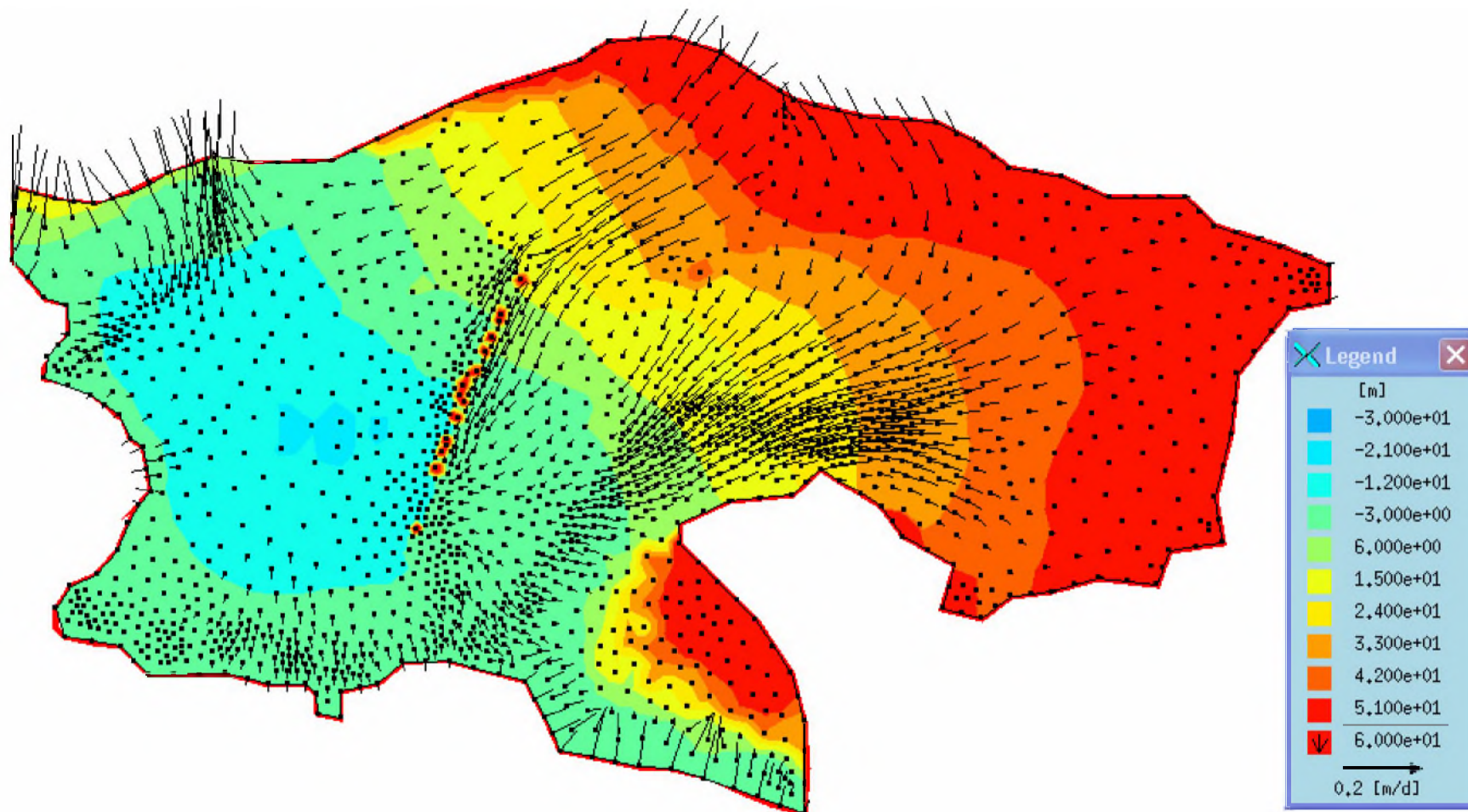
Σχήμα 48. Κατανομή πιεζομετρικού φορτίου (m) και ταχυτήτων ροής (m/d) στην άνω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Οκτώβριος 2001)



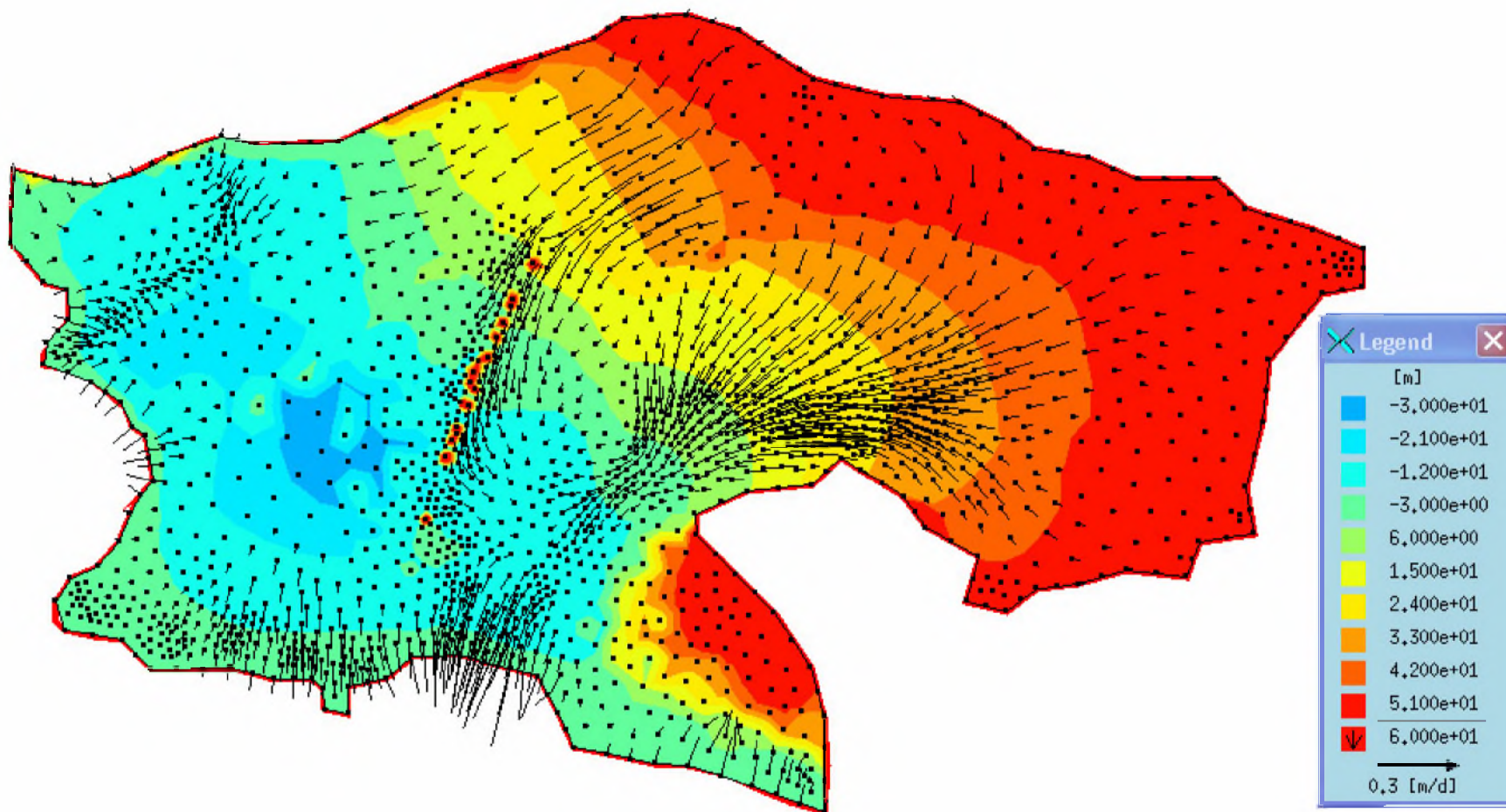
Σχήμα 49. Κατανομή πιεζομετρικού φορτίου (m) και ταχυτήτων ροής (m/d) στην κάτω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Απρίλιος 2001)



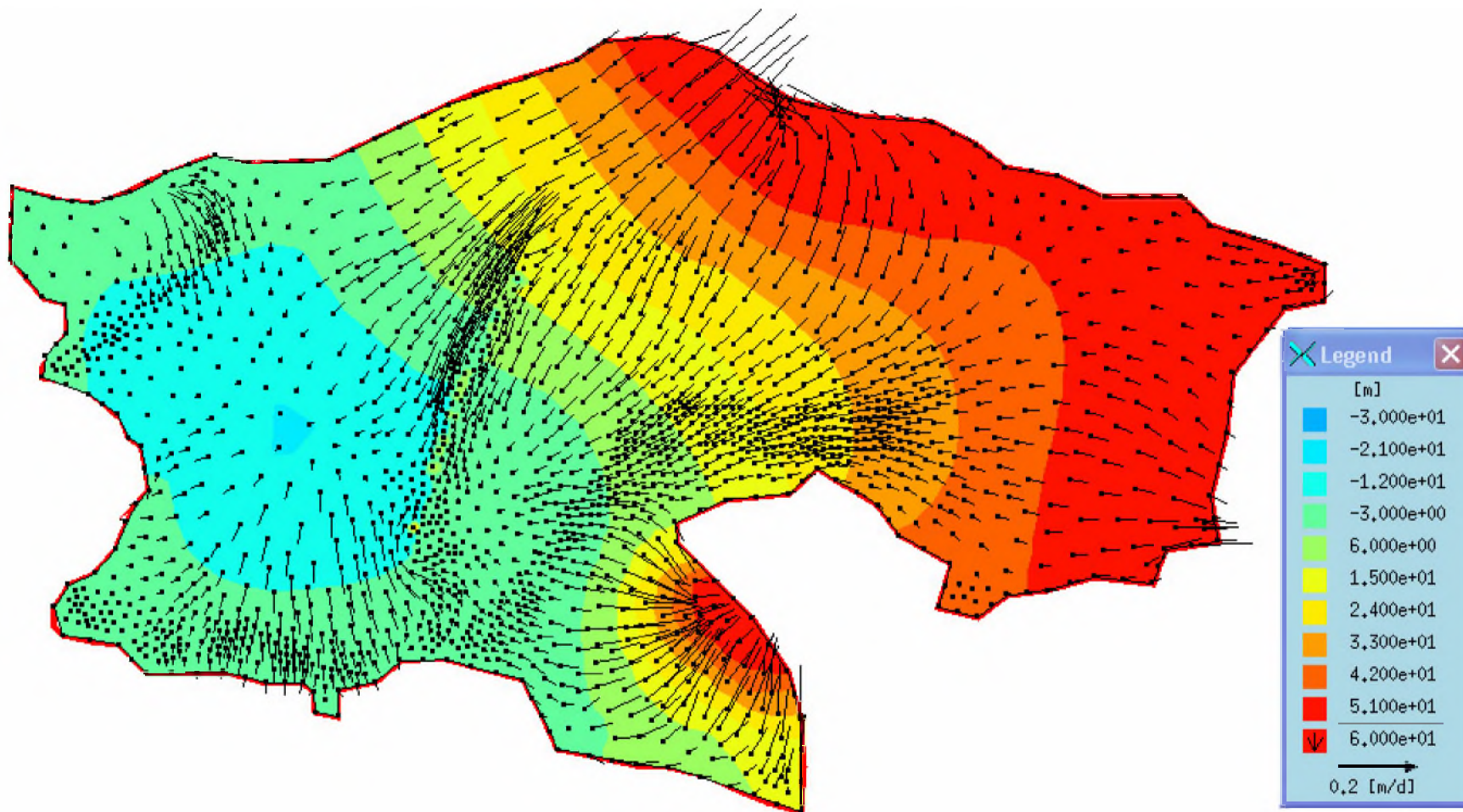
Σχήμα 50. Κατανομή πιεζομετρικού φορτίου (m) και ταχυτήτων ροής (m/d) στην κάτω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Οκτώβριος 2001)



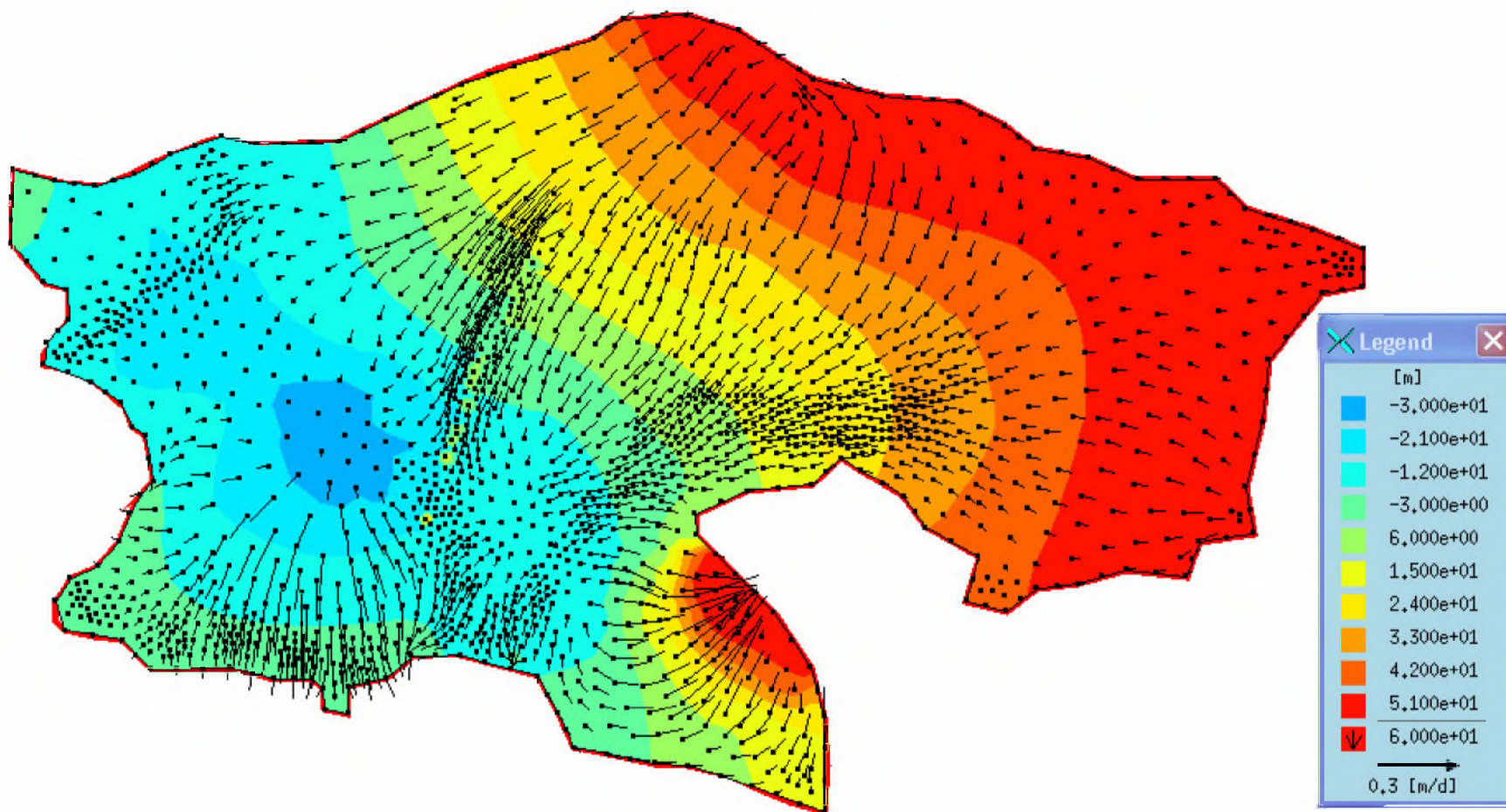
Σχήμα 51. Κατανομή πιεζομετρικού φορτίου (m) και ταχυτήτων ροής (m/d) στην άνω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Απρίλιος 2006)



Σχήμα 52. Κατανομή πιεζομετρικού φορτίου (m) και ταχυτήτων ροής (m/d) στην άνω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Οκτώβριος 2006)



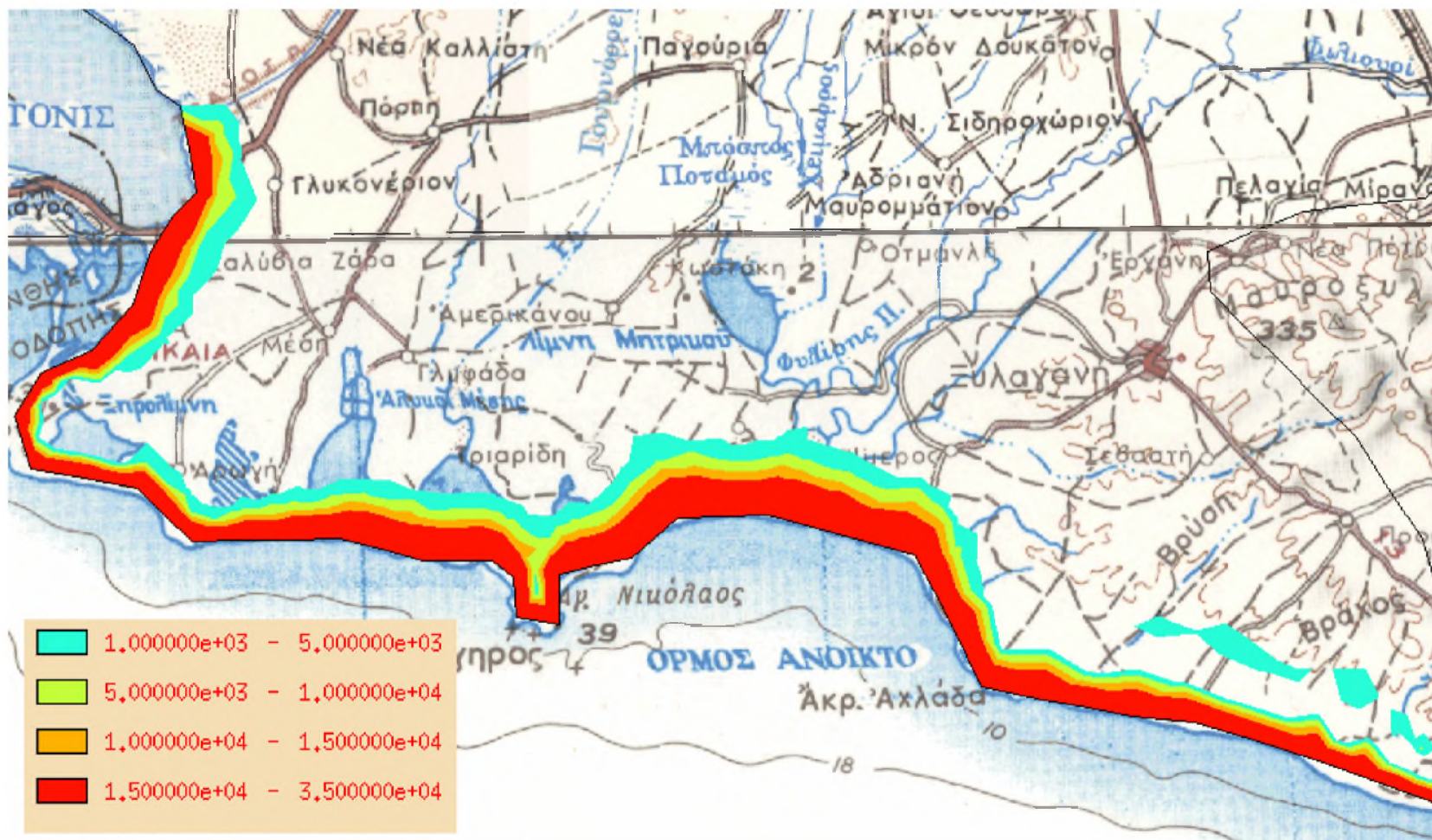
Σχήμα 53. Κατανομή πιεζομετρικού φορτίου (m) και ταχυτήτων ροής (m/d) στην κάτω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Απρίλιος 2006)



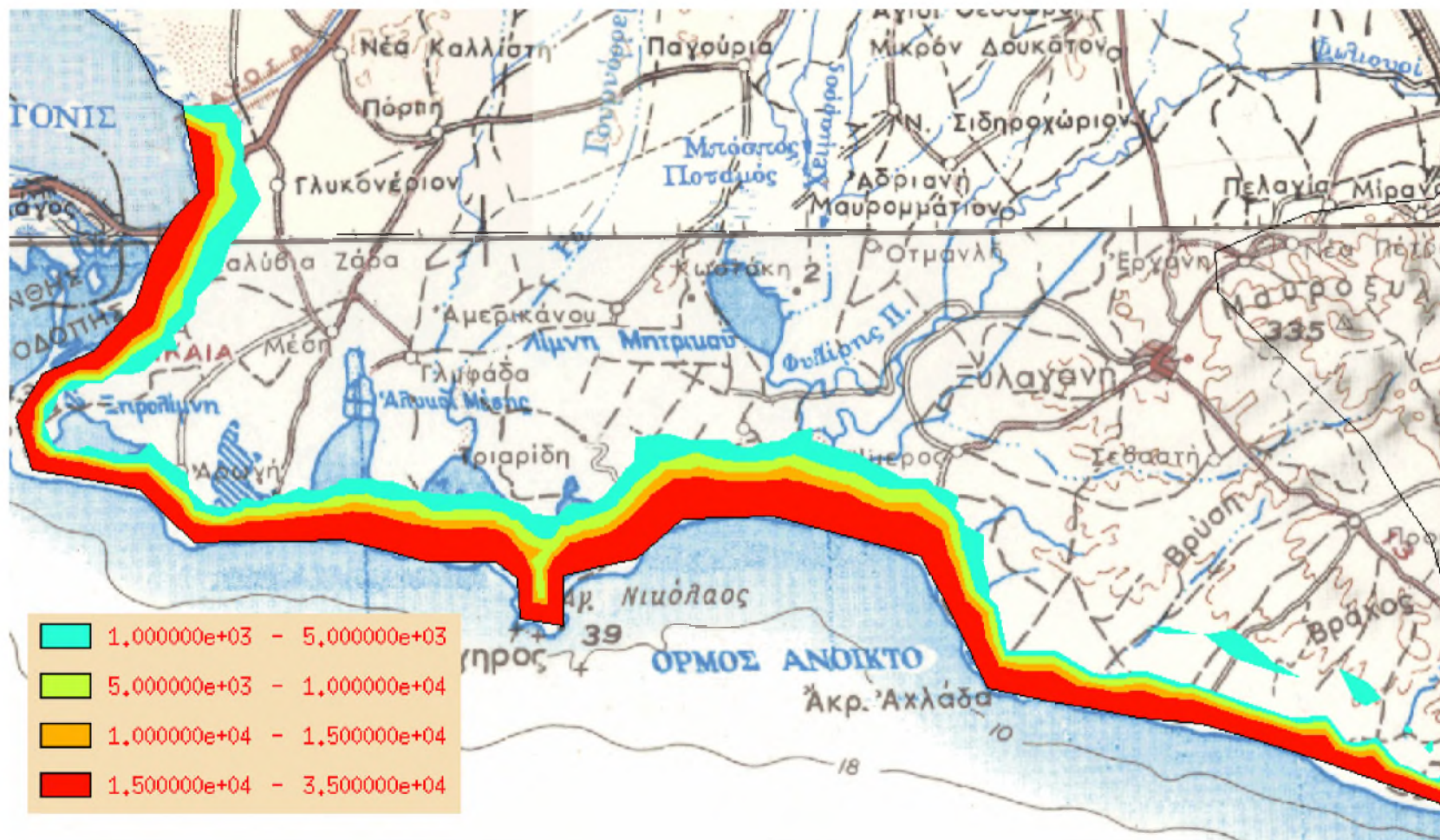
Σχήμα 54. Κατανομή πιεζομετρικού φορτίου (m) και ταχυτήτων ροής (m/d) στην κάτω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Οκτώβριος 2006)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

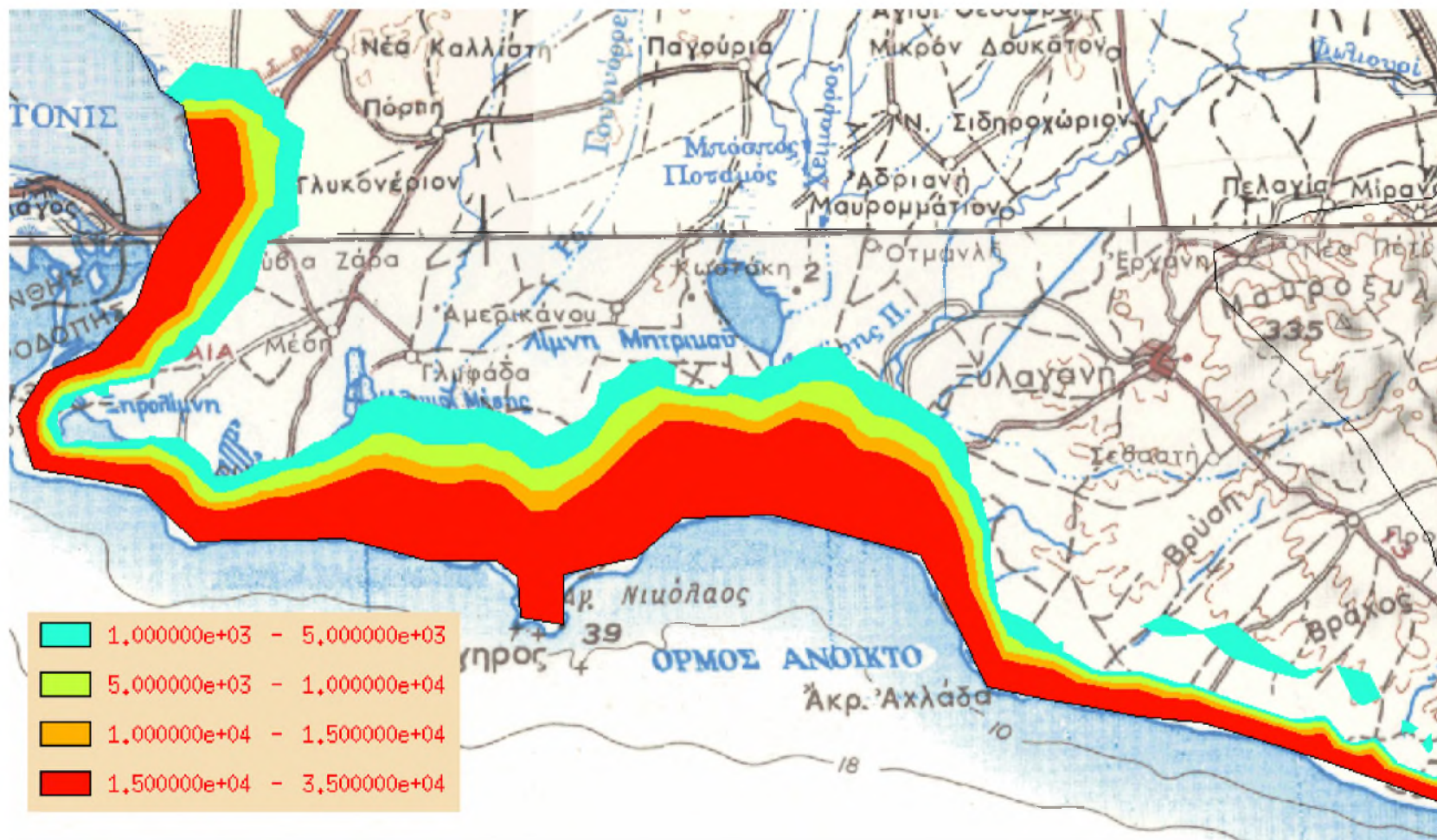
**Κατανομή των αλάτων του θαλασσινού νερού και των νιτρικών
αλάτων στην άνω και κάτω στρώση των υπόγειων υδάτων**



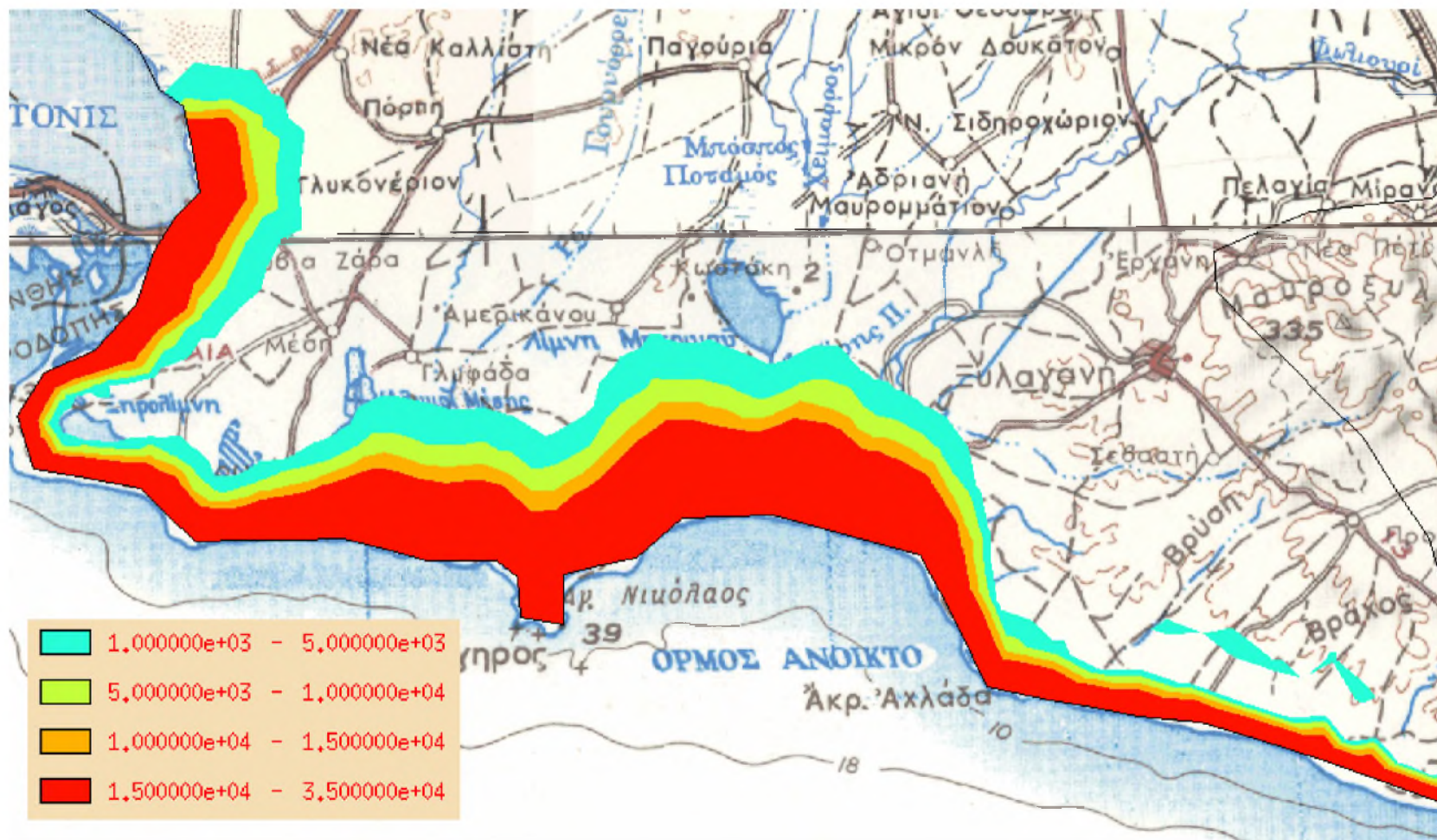
Σχήμα 55. Κατανομή της συγκέντρωσης των αλάτων του θαλασσινού νερού (mg/l) στην άνω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδού (Οκτώβριος 1986)



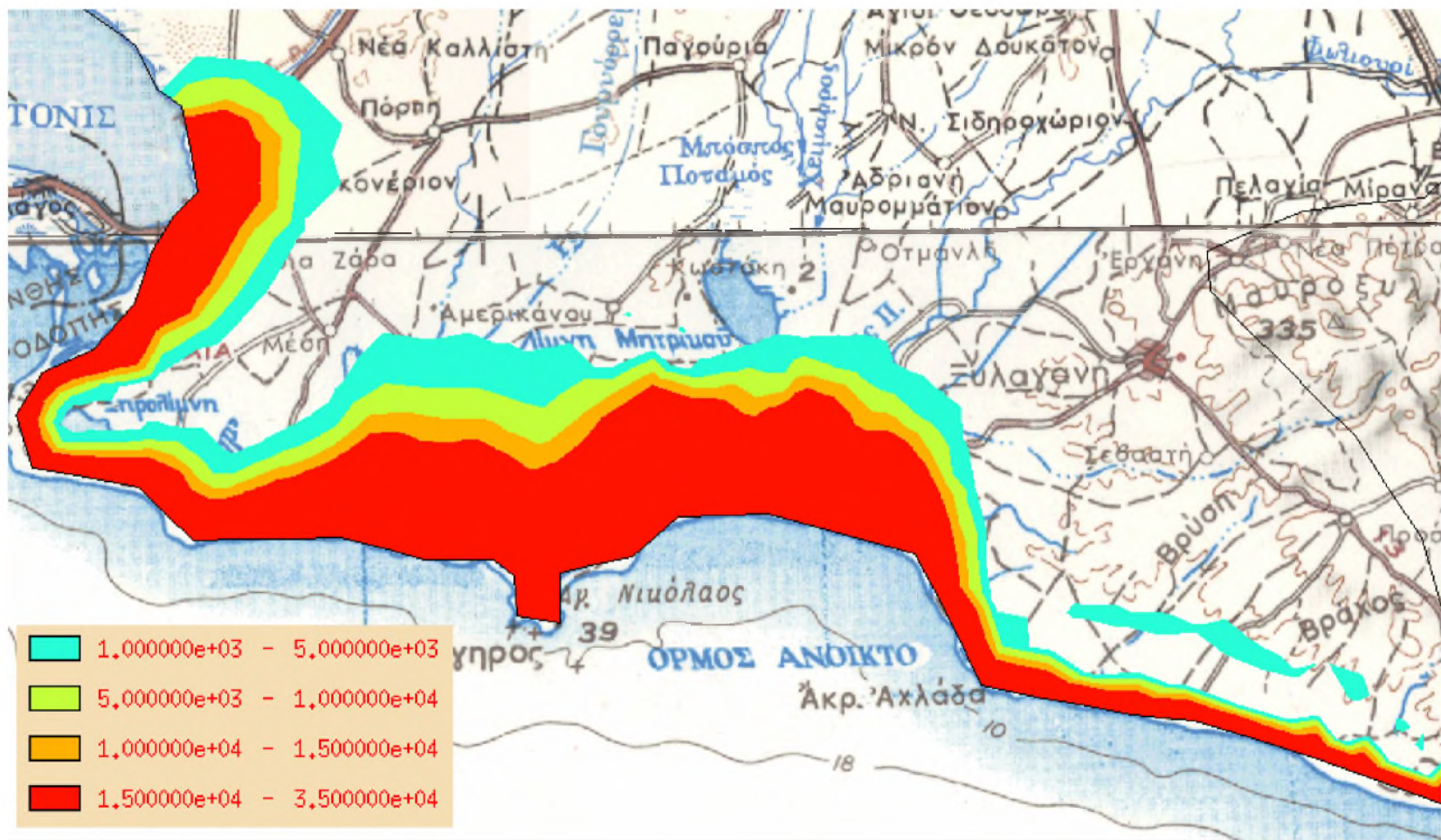
Σχήμα 56. Κατανομή της συγκέντρωσης των αλάτων του θαλασσινού νερού (mg/l) στην κάτω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδίου (Οκτώβριος 1986)



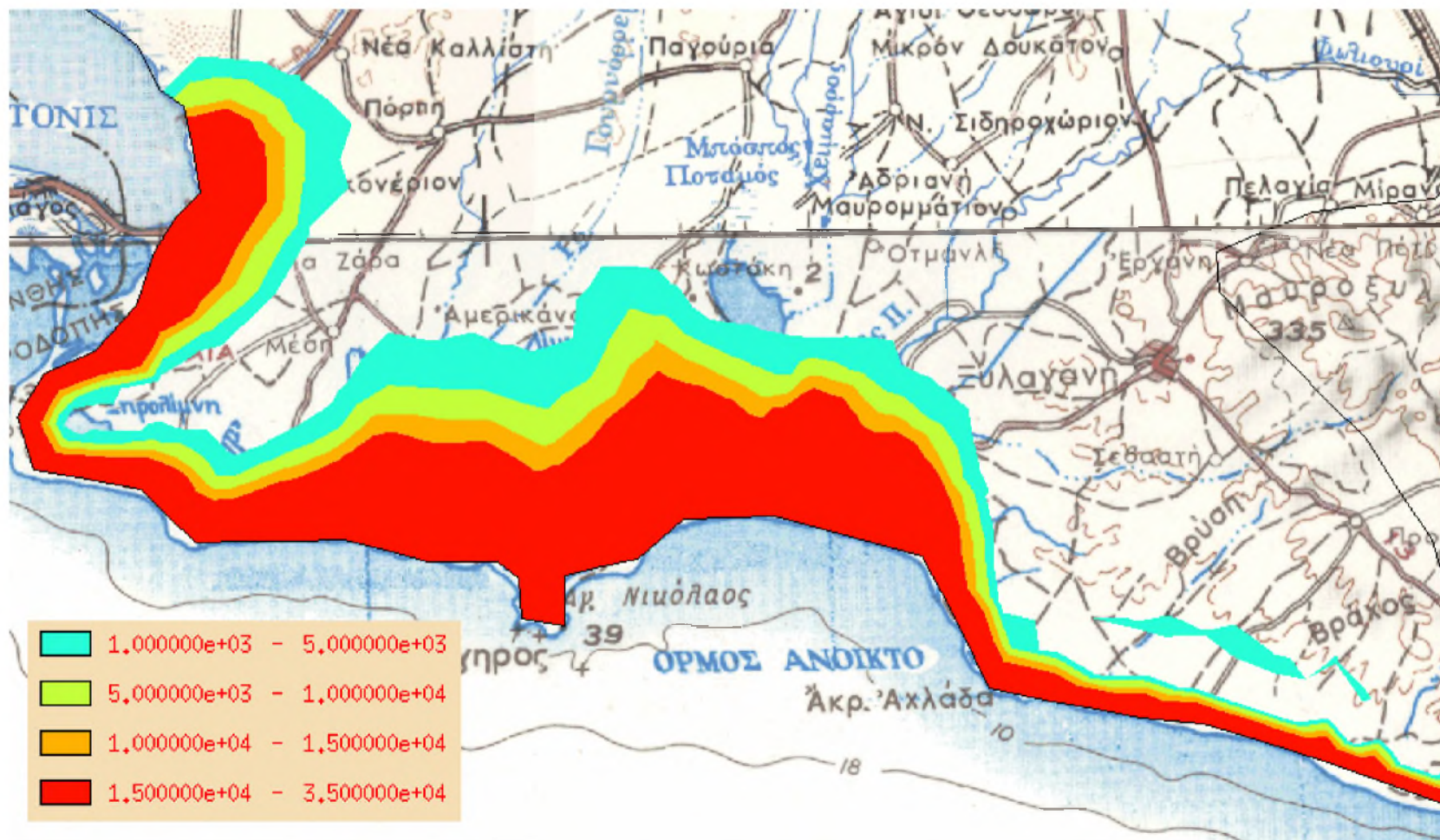
Σχήμα 57. Κατανομή της συγκέντρωσης των αλάτων του θαλασσινού νερού (mg/l) στην άνω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδίου (Οκτώβριος 1996)



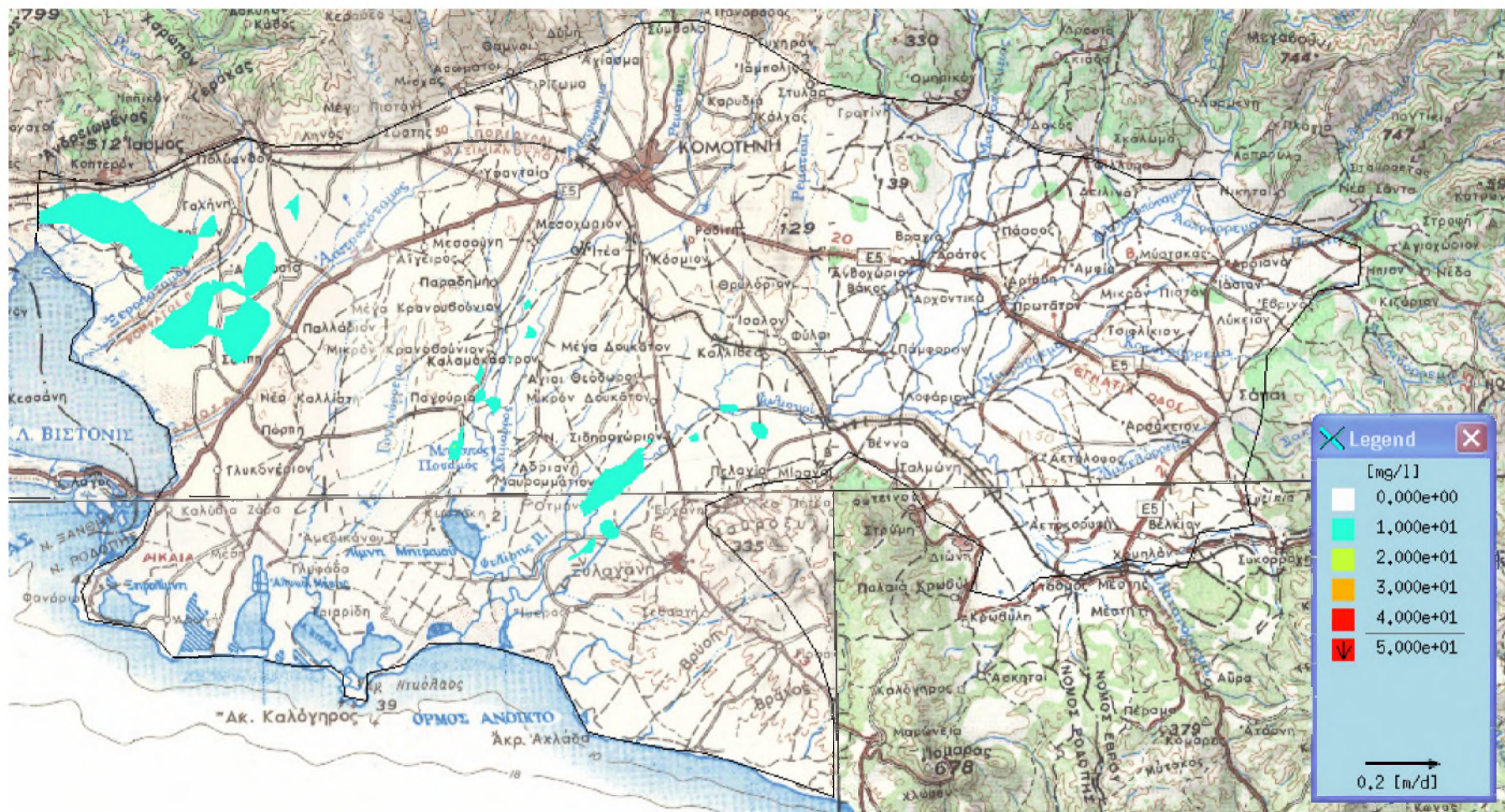
Σχήμα 58. Κατανομή της συγκέντρωσης των αλάτων του θαλασσινού νερού (mg/l) στην κάτω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Οκτώβριος 1996)



Σχήμα 59. Κατανομή της συγκέντρωσης των αλάτων του θαλασσινού νερού (mg/l) στην άνω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Οκτώβριος 2006)



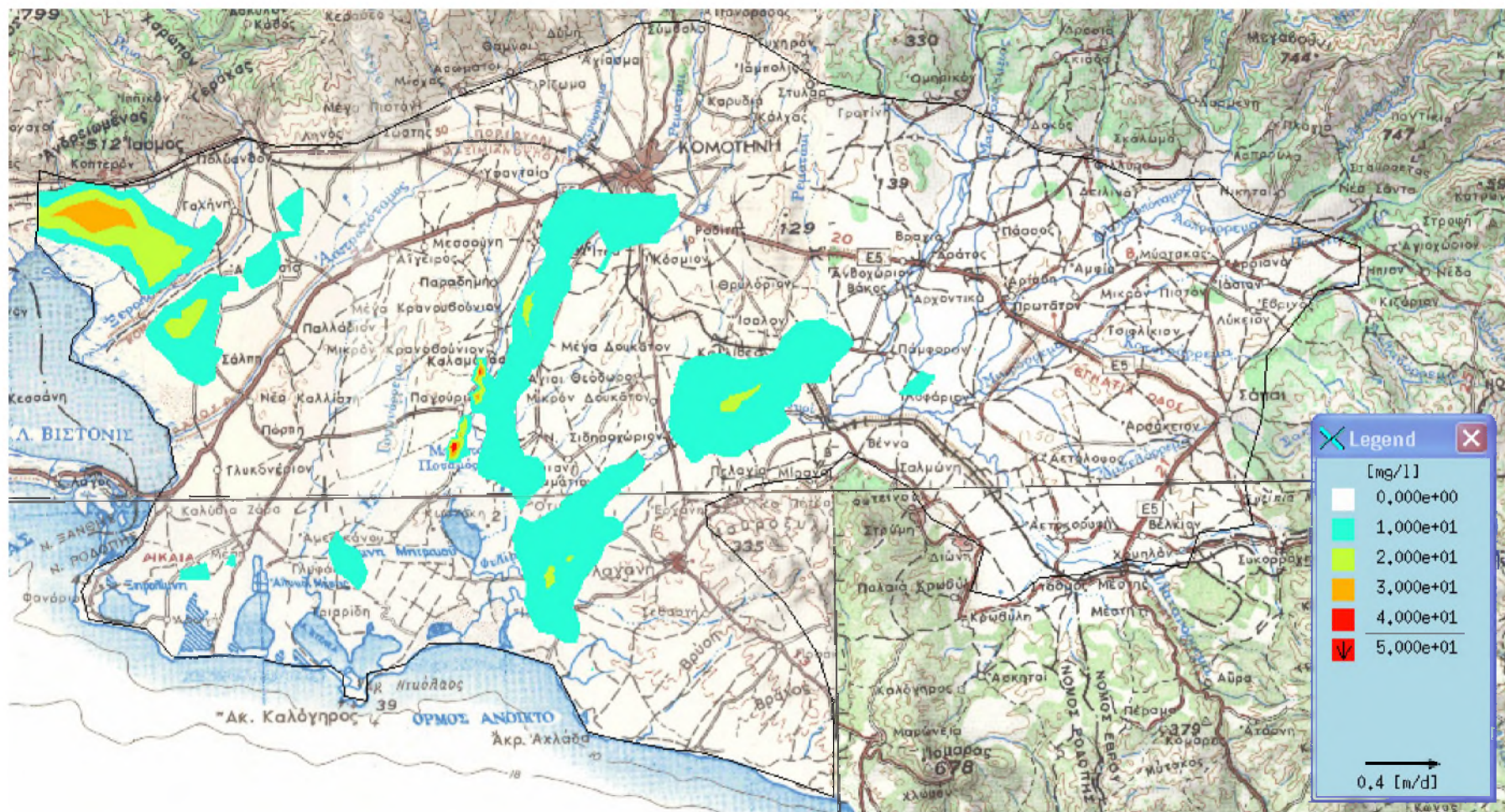
Σχήμα 60. Κατανομή της συγκέντρωσης των αλάτων του θαλασσινού νερού (mg/l) στην κάτω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Οκτώβριος 2006)



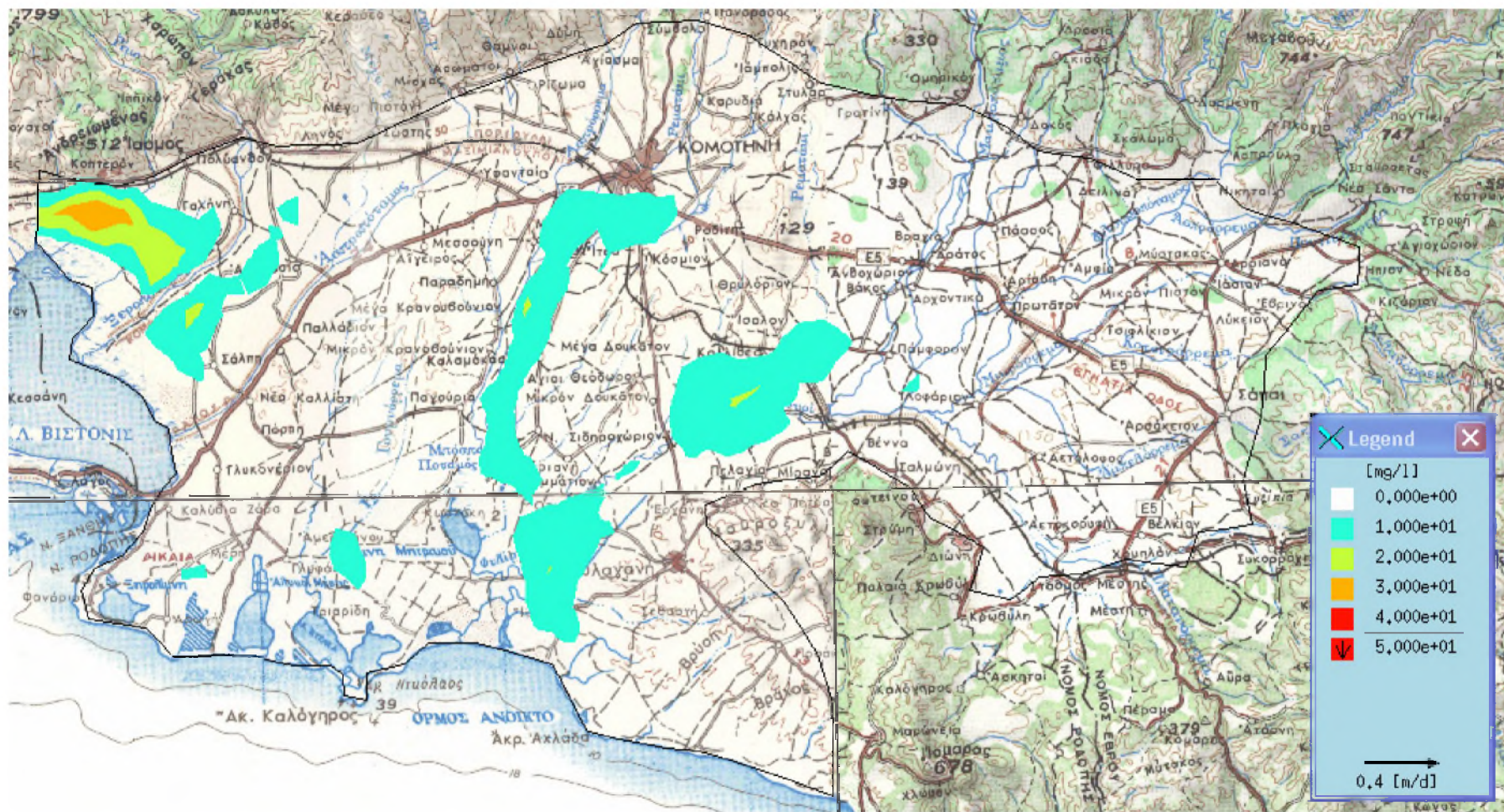
Σχήμα 61. Κατανομή της συγκέντρωσης των νιτρικών (mg/l) στην άνω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Οκτώβριος 1986)



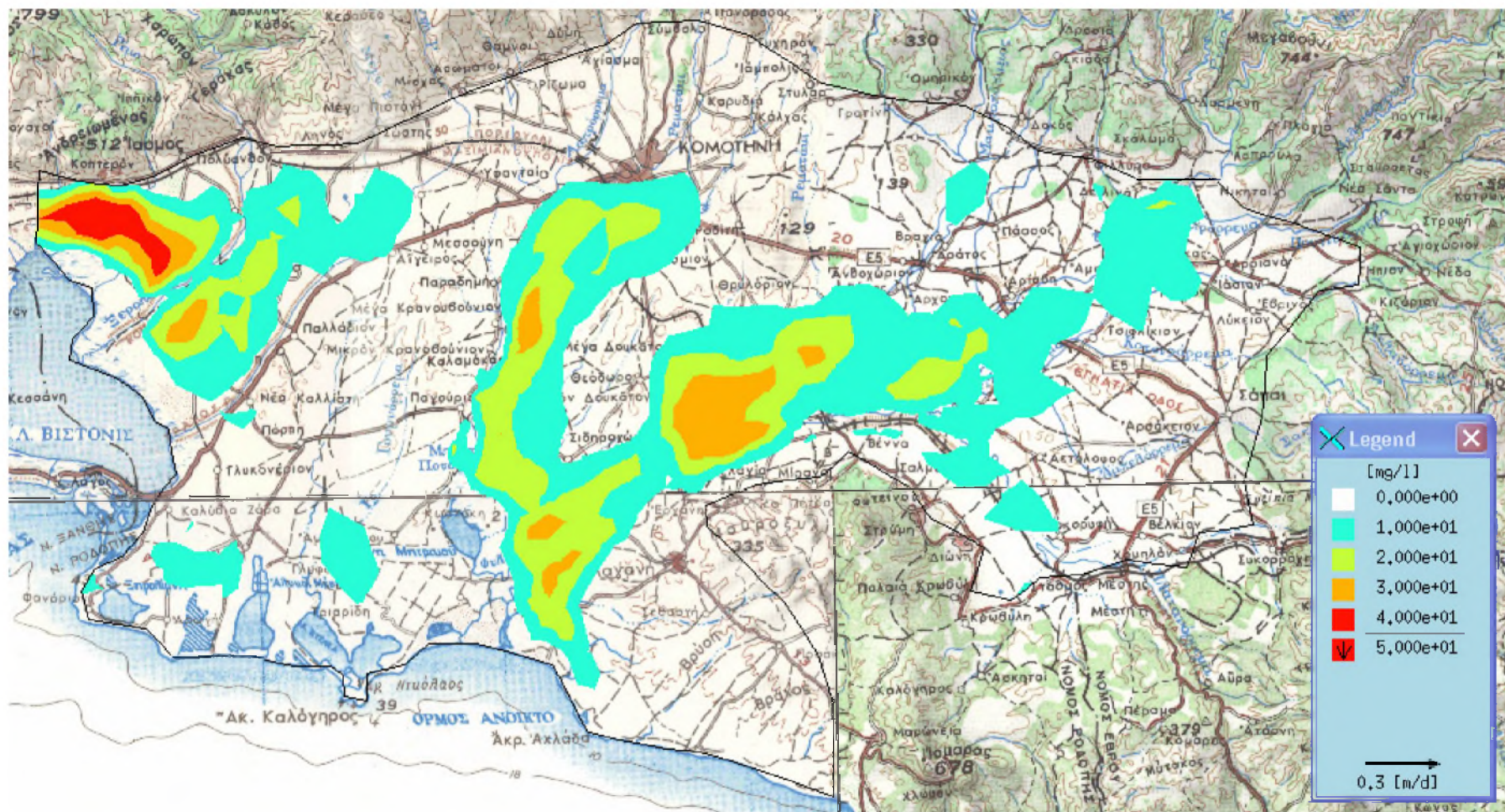
Σχήμα 62. Κατανομή της συγκέντρωσης των νιτρικών (mg/l) στην κάτω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Οκτώβριος 1986)



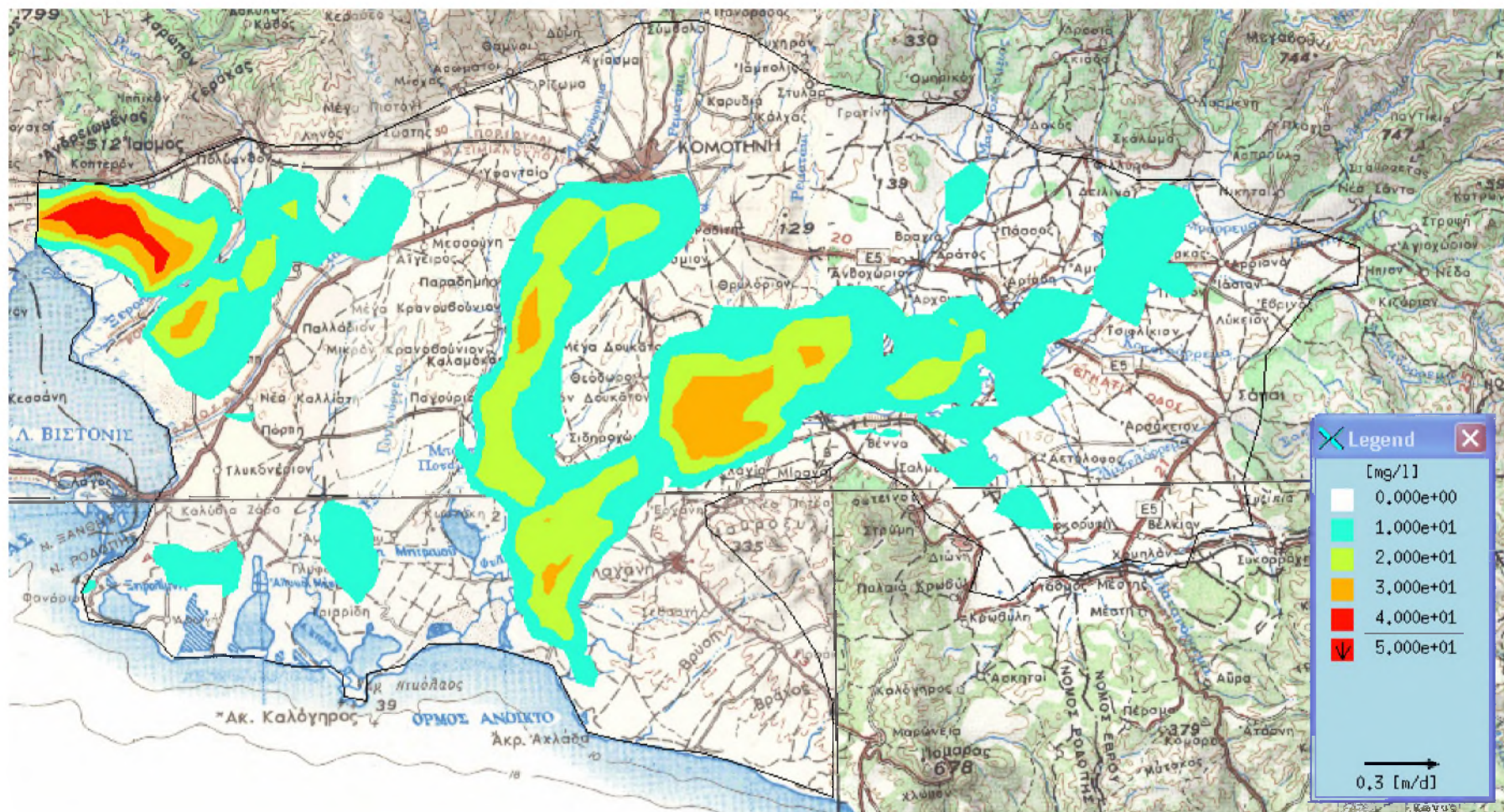
Σχήμα 63. Κατανομή της συγκέντρωσης των νιτρικών (mg/l) στην άνω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδότης (Οκτώβριος 1996)



Σχήμα 64. Κατανομή της συγκέντρωσης των νιτρικών (mg/l) στην κάτω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Οκτώβριος 1996)



Σχήμα 65. Κατανομή της συγκέντρωσης των νιτρικών (mg/l) στην άνω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Οκτώβριος 2006)



Σχήμα 66. Κατανομή της συγκέντρωσης των νιτρικών (mg/l) στην κάτω στρώση των υπόγειων υδάτων του Ν. Ροδόπης (Οκτώβριος 2006)