

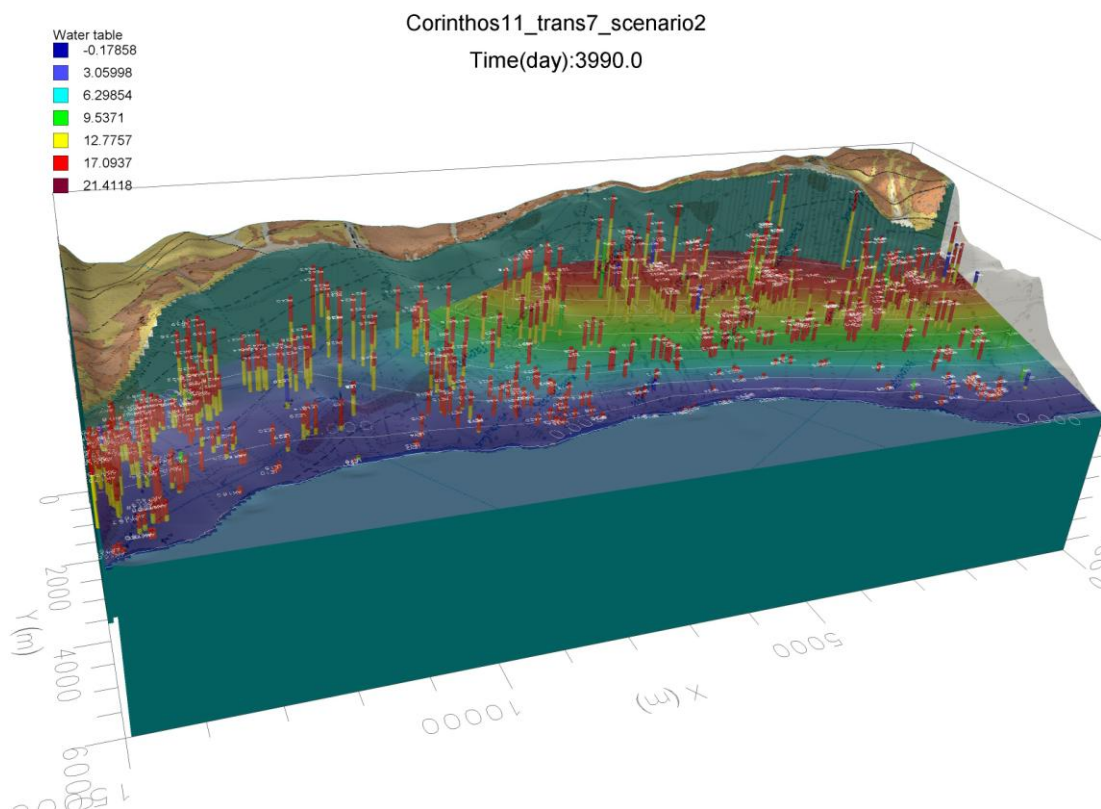


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
Εργαστήριο ΓεωΠεριβαλλοντικής
Μηχανικής

Μαθηματικό Μοντέλο Προσομοίωσης της Νιτρικής Ρύπανσης στον Προσχωματικό Υδροφόρο της Παραλιακής ζώνης Κορινθίας

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
ΕΥΤΥΧΙΑ ΨΑΡΡΟΠΟΥΛΟΥ
MSc Γεωλόγος

Επιβλέπων Καθηγητής
Γεώργιος Π. Καρατζάς



XANIA 2010

Μαθηματικό Μοντέλο Προσομοίωσης της Νιτρικής Ρύπανσης στον Προσχωματικό Υδροφόρο της Παραλιακής ζώνης Κορινθίας

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Υποβλήθηκε στο Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος – Πολυτεχνείο Κρήτης.

Εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, Τομέας Περιβαλλοντικής Υδραυλικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Εργαστήριο Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής.

Ημερομηνία Προφορικής εξέτασης: 08/10/ 2010

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Καρατζάς Γεώργιος, Καθηγητής Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης - Επιβλέπων

Διαμαντόπουλος Ευάγγελος, Καθηγητής Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης - Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

Γκέκας Βασίλειος, Καθηγητής Τμήματος του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου - Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

Νικολαΐδης Νικόλαος, Καθηγητής Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης - Μέλος Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής

Λαζαρίδης Μιχάλης, Αναπλ. Καθηγητής Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης - Μέλος Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής

Αγιουτάντης Ζαχαρίας, Καθηγητής Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων Πολυτεχνείου Κρήτης - Μέλος Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής

Βαγενάς Δημήτριος, Καθηγητής Τμήματος Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων Πανεπιστημίου Ιωαννίνων - Μέλος Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής

Τίτλος Διδακτορικής Διατριβής

**Μαθηματικό Μοντέλο Προσομοίωσης της Νιτρικής
Ρύπανσης στον Προσχωματικό Υδροφόρο της Παραλιακής
ζώνης Κορινθίας**

«Η έγκριση της παρούσης Διδακτορικής Διατριβής από το Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων της συγγραφέως» (Ν. 5343/1932, άρθρο 202, παρ.2)

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Σε αυτή την μακρά πορεία θέλω κατ'αρχήν να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Γεώργιο Καρατζά που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με αυτό το θέμα και το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (Ι.Κ.Υ.) που επιχορήγησε την παρούσα Διατριβή μέσω Υποτροφίας.

Ιδιαίτερα θέλω να ευχαριστήσω τον πρώην Διευθυντή του τμήματος Υδρογεωλογίας του Υπουργείου Αγροτικής Ανάπτυξης, Παναγιώτη Περιγιαλιώτη για την αμέριστη υποστήριξή του στο ξεκίνημα της παρούσας διατριβής αλλά και την παροχή στοιχείων και μελετών για την περιοχή έρευνας που έγιναν η αρχή μιας μεγάλης βάσης δεδομένων.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου και το Χριστόφορο που στάθηκαν πάντα δίπλα μου σε ολόκληρη την διαδρομή.

Το αφιερώνω στην μνήμη του πατέρα μου,
στην μητέρα μου και τον Χριστόφορο
που στάθηκαν και στέκονται πάντα δίπλα μου

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ABSTRACT	8
I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
1. ΟΙ ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ ΣΗΜΕΡΑ.....	10
2. ΝΙΤΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΩΝ	17
2.1 Πηγές Νιτρικής Ρύπανσης	23
2.2 Επίδραση των Υψηλών Συγκεντρώσεων Αζώτου στον Ανθρώπινο οργανισμό	28
3. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ & ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ	30
3.1 Δομή Της Παρούσας Διατριβής.....	32
3.2 Συμβολή της Διατριβής και Πρωτότυπα Σημεία.....	33
II. ΕΡΕΥΝΑ ΠΕΔΙΟΥ	36
4. ΘΕΣΗ & ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ	36
4.1 Χρήσεις Γης - Στοιχεία Υφιστάμενης Κατάστασης	37
5. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ.....	41
5.1 Γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής.....	41
5.2 Νεοτεκτονική - Λιθολογία	43
6. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ - ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ	47
6.1 Επαναπλήρωση/Εμπλουτισμός του Προσχωματικού Υδροφόρου (Recharge)	48
6.1.1 Επιφανειακή Εισροή Ύδατος στον Όγκο Ελέγχου (Aerial Recharge)	48
6.1.2 Πλευρική Τροφοδοσία (Lateral Recharge - TS)	54
6.2 Διάκριση Υδρογεωλογικών Ενότητων.....	55
6.3 Υδρολιθολογικές Τομές.....	58
6.4 Χαρακτηριστικά του Προσχωματικού Υδροφόρου συστήματος.....	63
6.5 Πιεζομετρία και Δυναμική του Υδροφόρου συστήματος	66
6.5.1 Μορφή και εξέλιξη της πιεζομετρίας.....	67
6.6 Εννοιολογικό μοντέλο Λειτουργίας του Υδροφόρου συστήματος	75
7. ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ – ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ	77
7.1 Δειγματοληψία - Αναλύσεις.....	77
7.1.1 Φασματοφωτομετρική Μέθοδος προσδιορισμού συγκέντρωσης ιόντων	78
7.2 Παρουσίαση των Αναλύσεων και Σχολιασμός των Αποτελεσμάτων	80
III. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ.....	88
8. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ	89
8.1 Εφαρμογές των Αριθμητικών Μοντέλων	94
8.2 Διαδικασία Σχεδιασμού και Εφαρμογής ενός Μαθηματικού Μοντέλου.....	96
8.3 Το Μαθηματικό Μοντέλο MODFLOW	99
8.4 Η Μαθηματική Εξίσωση Ροής (Flow Governing Equation).....	101
8.4.1 Αρχικές Συνθήκες	102
8.4.2 Οριακές Συνθήκες.....	102
8.4.3 Χρονικό Βήμα.....	103
8.5 Η Μαθηματική Εξίσωση Μεταφοράς Μάζας (Governing Equation).....	104
8.5.1 Αρχικές Συνθήκες (Initial Conditions) της Εξίσωσης Μεταφοράς Μάζας	107
8.5.2 Οριακές Συνθήκες (Boundary Conditions) της Εξίσωσης Μεταφοράς Μάζας	107
8.5.3 Υπολογισμός του Χρονικού Βήματος Μεταφοράς Μάζας.....	109
9. ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	111
10. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	120

10.1	Διακριτοποίηση (Grid Design)	124
10.2	Οι παράμετροι του Υδροφόρου (Properties).....	128
10.3	Εισαγωγή των Γεωτρήσεων Παρατήρησης & Άντλησης στο Μαθηματικό μοντέλο	131
10.4	Οριακές Συνθήκες για το Μοντέλο Ροής (Boundary Conditions).....	136
10.5	Βαθμονόμηση του Μοντέλου Προσομοίωσης Ροής	141
10.6	Εναλλακτικά Σενάρια Μοντέλου Ροής.....	151
10.7	Βαθμονόμηση του Μοντέλου Μεταφοράς Μάζας	158
11.	ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	166
11.1	Ανάλυση Ευαισθησίας.....	166
11.2	Συζήτηση	170
IV.	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	176
Π1.	Η ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ ΡΟΗΣ	176
Π1.1	Χωρική Διακριτοποίηση	179
Π1.2	Οριακές Συνθήκες (Boundary Conditions)	190
Π1.3	Αρχικές Συνθήκες (Initial Conditions).....	191
Π1.4	Χρονικά Βήματα (Time steps)	192
Π1.5	Επαναληπτικές Μέθοδοι Επίλυσης (Iteration)	192
Π1.5.1	Preconditioned Conjugate - Gradient Package (PCG2).....	195
Π1.5.2	Strongly Implicit Procedure Package (SIP)	196
Π1.5.3	Slice - Successive Overrelaxation Package (SSOR).....	197
Π1.5.4	WHS Solver for Visual MODFLOW (WHS).....	198
Π1.5.5	Link-Algebraic Multigrid Solver Package (LMG)	200
Π2.	Η ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ.....	202
Π2.1	Συμμεταφορά (Advection)	205
Π2.2	Διασπορά (Dispersion).....	207
Π2.3	Αρνητικές και Θετικές Πηγές (Sink and Sources)	210
Π2.4	Χημικές Αντιδράσεις (Chemical reactions)	211
Π2.5	Αρχικές Συνθήκες (Initial Conditions) της Εξίσωσης Μεταφοράς Μάζας	216
Π2.6	Οριακές Συνθήκες (Boundary Conditions) της Εξίσωσης Μεταφοράς Μάζας.	216
Π2.7	Υπολογισμός του Χρονικού Βήματος Μεταφοράς Μάζας.....	218
Π2.8	Η επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς μάζας.....	220
Π3.	ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	226
Π4.	ΑΡΧΕΙΟ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΤΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ.....	236
Π5.	ΥΔΡΟΛΙΘΟΛΟΓΙΚΕΣ ΤΟΜΕΣ	254
Π6.	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ (02/98-03/07)	269
Π7.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	272
Π7.1	Συγκέντρωση Νιτρικών ιόντων NO_3^- (mg/L).....	272
Π7.2	Συγκέντρωση Νιτρικών ιόντων NO_2^- (mg/L)	273
Π7.3	Συγκέντρωση Αμμωνιακών ιόντων NH_4^+ (mg/L).....	274
Π7.4	Ηλεκτρική Αγωγιμότητα ($\mu\text{S}/\text{cm}$).....	276
V.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	278

Long term water resource planning requires both spatial and temporal information on groundwater recharge in order to properly manage not only water use and exploitation but also land use allocation and development. In that context, a 3-D transient numerical model is developed to support management of groundwater resources and decision analysis for the coastal plain of Corinthos in Greece. The coastal aquifer of Corinthos, located in Peloponnesus Greece, is a plain covering the discharge sections of Asopos R., Zapantis R. and Rachiani R. water basins. The area is roughly situated between the towns of Kiato and Lechaio and covers an area of about 54 Km². To the South is bounded by a fault zone along the Athens-Patras national Road, while to the North, is bounded by the Corinthian Gulf. The topographic relief is quite gentle and varies from 0 to 60 m. The coastal plain of Corinth is one of the fast-growing rural areas due to the vicinity of Athens. The population has increased by 36% from 1971 to 2001. In conjunction with the fast development, water use has also increased. On a large part of the Plain area, irrigated agriculture (citrus fruits, olives, apricots and vineyards) is carried out and fertilizers are applied. The groundwater is extracted by wells (boreholes) drilled in the alluvium aquifer of Vocha Plain to meet municipal, agricultural and other water requirements. The studied aquifer is formed of recent unconsolidated material consisting of sands, pebbles, breccias and fine clay to silty sand deposits, characterized by high degree of heterogeneity and anisotropy.

Transient simulations usually are used in order to analyze time depended problems such as climate change and groundwater level change. Among transient models the most reliable but also the least explored, probably due to the demanding input data requirements, are the models with temporally variable recharge, also termed as fully transient models. In these models the temporal variability of heads is dependent not only on the temporal variability of aquifer storage but also on the temporal variability of fluxes. In order to arrive to a credible set of flux data as boundary conditions for the numerical model, a sinusoidal equation is developed to simulate the missing water level data and to forecast the future sequential records of the expected recharge. Coastal aquifer of Corinth in Greece is used as a case study where a fully transient predictive numerical model is developed for a period of 20 years accounting for variable flux over the years. The simulation of ground water flow of the alluvial aquifer is based on the MODFLOW code of USGS using Visual Modflow as interface. The application of the mathematical model had very satisfactory results which is a reliable hydrogeological balance. Estimation of hydraulic conductivity distribution was optimized by using trial and error inverse method.

I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

*Ύδωρ, η Αρχή των Πάντων
Θαλής ο Μιλήσιος*

Από τα αρχαία χρόνια μέχρι και σήμερα το νερό υπήρξε για την ανθρωπότητα πηγή ζωής, πλούτου αλλά και λατρείας, κάνοντας τον άνθρωπο γρήγορα να συνειδητοποιήσει την δύναμη του, κατατάσσοντάς το έτσι ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία της φύσης, αλλά ταυτόχρονα προκαλώντας τον σε ένα συνεχή αγώνα για την κατάκτηση του.

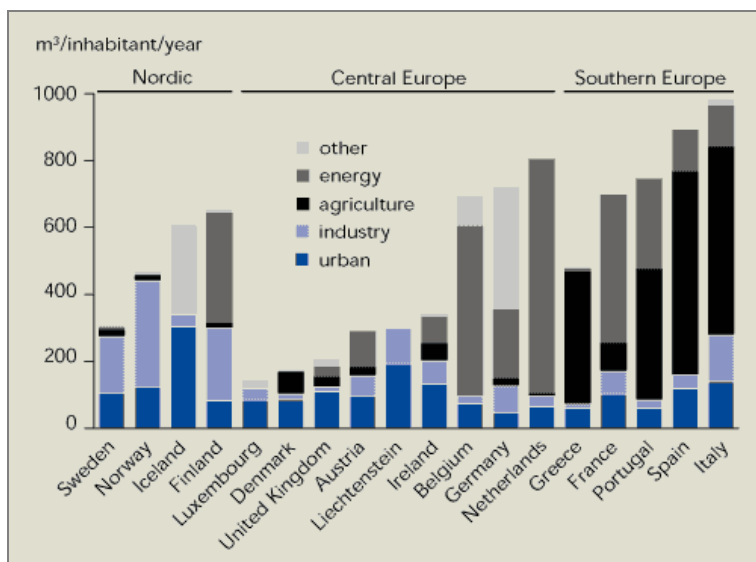
Δεν είναι τυχαία η θεοποίηση του από όλους τους αρχαίους πολιτισμούς. Από τους Ινδιάνους και Ίνκας της Αμερικής, αρχαίους Έλληνες και Αιγυπτίους, μέχρι τους Σαμάνους και Βαβυλώνιους της Ασίας, υπήρξε κύριο στοιχείο λατρείας. Για τον Θαλή, η πρώτη απόλυτη αρχή των πάντων ήταν το Ύδωρ, από το οποίο είναι δημιουργημένα τα πάντα, σε διάφορους σχηματισμούς και μεταλλάξεις του, ήταν μία ζωτική αρχή του κόσμου, αυτό που έδινε ζωή διεισδύοντας παντού, ακόμη και στο πιο μικρότερο μόριο μιας πέτρας.

Οι υδατικοί πόροι είναι τελικά, πάντα ένας από τους σημαντικότερους και πιο καθοριστικούς παράγοντες για την ανάπτυξη και την εξέλιξη μιας κοινωνίας. Αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση τόσο για την διατήρηση της ίδιας της ζωής όσο και για την ανάπτυξη κάθε είδους δραστηριότητας. Είναι ένας φυσικός πόρος που συμμετέχει στις παραγωγικές διαδικασίες, προσδιορίζει σε σημαντικό βαθμό την δυνατότητα ή αδυναμία επέκτασης των δραστηριοτήτων ενώ επηρεάζει την παραγωγικότητά τους.

Αν και στην γενική συνείδηση ήταν πάντα και είναι ακόμα ένα από τα υπέρτατα αγαθά, δεν έτυχε της ανάλογης μεταχείρισης στο πέρασμα των δεκαετιών, με αποτέλεσμα την σταδιακή υποβάθμιση σε πολλές περιοχές του κόσμου της ποιότητας και της ποσότητας των υδατικών αποθεμάτων. Ιδιαίτερα, όσο αυξάνεται η πληθυσμιακή πυκνότητα και εξελίσσεται ο βιομηχανικός και αγροτικός τομέας τόσο μεγαλύτερες ποσότητες νερού απαιτούνται για την κάλυψη των ολοένα αυξανόμενων αναγκών με αποτέλεσμα να παρατηρούνται τα φαινόμενα υπεραντλήσεων που γίνονται ιδιαίτερα αισθητά στις πιο άνυδρες περιοχές του πλανήτη.

1. ΟΙ ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ ΣΗΜΕΡΑ

Στις περισσότερες χώρες που ανήκουν στον Οργανισμό Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (ΟΟΣΑ) καταγράφηκε αύξηση της συνολικής ποσότητας απόληψης νερού σε σχέση με τις δεκαετίες του 1960 και 1970, προκειμένου να καλύψουν τις ανάγκες στον αγροτικό και τον ενεργειακό τομέα. Κάποιες από τις χώρες αυτές, από την δεκαετία του 1980, σταθεροποίησαν τελικά την ποσότητα απόληψης νερού βελτιώνοντας τις τεχνικές άρδευσης, με την αυξανόμενη χρήση 'καθαρών' τεχνολογιών αλλά και την μείωση των απωλειών από τα δίκτυα σωλήνων. Παρόλα αυτά όμως, η πληθυσμιακή αύξηση οδηγεί συνεχώς σε αύξηση των συνολικών απολήψεων. Σε παγκόσμιο επίπεδο υπολογίζεται ότι η ζήτηση σε νερό αυξήθηκε τον τελευταίο αιώνα υπερδιπλάσια της αύξησης του πληθυσμού, με την γεωργία να είναι ο μεγαλύτερος χρήστης νερού (OECD, 2005).



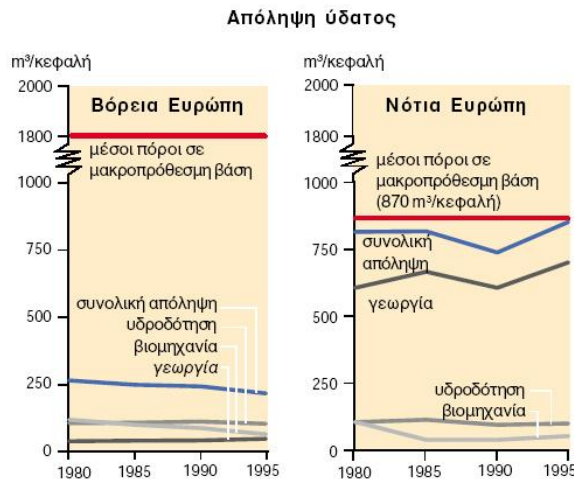
Εικόνα 1. Συνολική κατανάλωση νερού ανά κάτοικο και ανά έτος, στα κράτη μέλη του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος.

Πηγή: ΕΕΑ

<http://reports.eea.europa.eu/signals-2000/en/page013.html>

Η ανάπτυξη της γεωργίας και η αναζήτηση νέων ποικιλιών και καλλιεργητικών μεθόδων για τη μεγιστοποίηση της παραγωγής ανάγει την άρδευση σε απαραίτητη γεωργική πρακτική. Οι αρδευόμενες εκτάσεις της Νότιας Ευρώπης έχουν αυξηθεί τα τελευταία 15-20 χρόνια, ενώ συγκεκριμένα από το 1990 έως το 1996 παρατηρείται αύξηση της τάξης του 7% στις αρδευόμενες περιοχές της Νότιας Ευρώπης. Δεδομένου ότι η άρδευση είναι απολύτως απαραίτητη για την αγροτική παραγωγή κατά τους ξηρούς καλοκαιρινούς μήνες, οι χώρες της Νότιας Ευρώπης χρησιμοποιούν τα μεγαλύτερα ποσοστά αντλούμενων υδάτων για τη γεωργία, η οποία καλύπτει γενικά πάνω από τα δύο τρίτα της συνολικής υδροληψίας (Εικόνα 1). Οι χώρες της κεντρικής Ευρώπης και της Σκανδιναβίας χρησιμοποιούν τα μεγαλύτερα ποσοστά αντλούμενων υδάτων για ψύξη στην παραγωγή ενέργειας, στη βιομηχανική παραγωγή και στη δημόσια υδροδότηση. Οι γεωργικές δραστηριότητες έφτασαν στα ελάχιστα επίπεδα τους στα μέσα της δεκαετίας του 1990, τελευταία όμως οι χώρες άρχισαν να αυξάνουν ξανά τη γεωργική τους παραγωγή. Η χρήση υδάτων για τη γεωργία, κυρίως για

άρδευση, στη νότια Ευρώπη είναι κατά μέσο όρο τέσσερις φορές υψηλότερη ανά εκτάριο αρδευόμενης γης (Εικόνα 2) από οπουδήποτε αλλού στην Ευρωπαϊκή Ένωση (European Environmental Agency, 2005)



Εικόνα 2 : Αναλογία χρήσης των υδατικών πόρων σε Βόρεια και Νότια Ευρώπη σε m³ ανά κάτοικο

Πηγή: ΕΕΑ

http://reports.eea.europa.eu/signals-2001-sum/el/summary_el

Αν και στην Ελλάδα συνολικά μπορεί να θεωρηθεί ότι υπάρχει επάρκεια υδατικού δυναμικού, η χωρικά και χρονικά ανομοιόμορφη κατανομή αποθεμάτων και βροχοπτώσεων, σε συνδυασμό με την μη ορθολογική χρήση του νερού δημιουργούν συχνά προβλήματα ανεπάρκειας αυτού του πολύτιμου πόρου σε ορισμένες περιοχές της χώρας ιδιαίτερα κατά την διάρκεια των θερινών μηνών. Το μεγαλύτερο μέρος της υδατικής κατανάλωσης αποδίδεται στη γεωργική δραστηριότητα ενώ δευτερεύοντα ρόλο παίζει η οικιστική ανάπτυξη (Εικόνα 2). Η άρδευση στην Ελλάδα έχει εξέχουσα σημασία για την παραγωγικότητα της γεωργίας καθώς η έλλειψη νερού σε άγονες και ημι-άγονες περιοχές μπορεί να έχει δυσμενέστερα αποτελέσματα στις αποδόσεις των καλλιεργειών.

Οι ετήσιες απολήψεις νερού στη χώρα μας έχουν αυξηθεί κατά 70% στη διάρκεια της τελευταίας εικοσαετίας. Ταυτόχρονα, σημειώνεται μία θεαματική αύξηση της άντλησης από υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες, που φθάνει να καλύπτει το 40% της συνολικής ζήτησης νερού. Το 10-12% των απολήψεων, διατίθεται για ύδρευση ενώ το ποσοστό που διατίθεται για βιομηχανική κατανάλωση ανέρχεται σε 4-5%. Οι ανάγκες ύδρευσης εμφανίζουν μια ελαφρά μείωση του μεριδίου τους στη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, ως συνέπεια έργων υποδομής, αναμόρφωσης της τιμολογιακής πολιτικής και συστηματικής εκστρατείας ενημέρωσης των καταναλωτών. Από το νερό όμως που διανέμεται προς κατανάλωση είτε για ύδρευση είτε για άρδευση μέσω δικτύου εκτεταμένων (ανοικτών) καναλιών ένα σημαντικό ποσοστό 15-35% χάνεται από διαρροές ενώ ένα επιπλέον 10-15% χάνεται εξαιτίας της εξάτμισης. Αν και η σχέση μεταξύ ετήσιων απολήψεων και αποθεμάτων διατηρείται σε αποδεκτά επίπεδα, ανησυχία προκαλεί η υψηλή συμμετοχή των υπόγειων νερών στην κάλυψη της ζήτησης (Εθνικό Κέντρο Περιβάλλοντος & Αειφόρου Ανάπτυξης, 2003). Η ανησυχία αυτή ενισχύεται από το γεγονός ακόμη έως σήμερα προκειμένου για την

ανακούφιση των προβλημάτων ύδρευσης και άρδευσης η κύρια προσέγγιση βασίζεται στην αύξηση του αποθέματος μέσω της εκτεταμένης εκμετάλλευσης υπόγειων νερών και της κατασκευής έργων εκτροπής και αποθήκευσης νερού η οποία αφενός έχει υψηλό περιβαλλοντικό κόστος και αφετέρου έχει αποδειχθεί ότι δεν αποτελεί βιώσιμη λύση.

Πέραν όμως αυτού του γεγονότος, σοβαρότερο ακόμη ζήτημα στα πλαίσια της αειφόρου ανάπτυξης είναι ότι δεν υπάρχει ολοκληρωμένη εικόνα σε εθνικό επίπεδο για τις ποσότητες νερού που καταναλώνονται από την άρδευση και τις υπόλοιπες δραστηριότητες, πράγμα απαραίτητο για μια αξιόπιστη ολοκληρωμένη στρατηγική διαχείρισης. Η διαδικασία αδειοδότησης ανόρυξης γεώτρησης είναι τόσο πολύπλοκη και χρονοβόρα που σε πολλές περιπτώσεις οι καταναλωτές καταφεύγουν στην ανόρυξη παράνομων γεωτρήσεων με αποτέλεσμα αφενός να μην υπάρχει έλεγχος στην ανόρυξη των γεωτρήσεων και αφετέρου να μην είναι δυνατή η εκτίμηση των ποσοτήτων νερού που τελικά αντλούνται. Τα υπάρχοντα νομικά και οικονομικά εργαλεία δεν είναι επαρκή για την αντιμετώπιση του προβλήματος και η σωστή τους εφαρμογή στο πεδίο δεν ελέγχεται αποτελεσματικά. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να υπάρξει ευρύτερη εφαρμογή ενημερωτικών εργαλείων, τα οποία θα πρέπει επίσης να αξιολογούνται περιοδικά για την συνεχή βελτίωσή τους.

Συνολικά μπορεί να ειπωθεί ότι η πίεση στους υδατικούς πόρους στην Ελλάδα είναι μέτρια, αλλά υπάρχουν σοβαρές ελλείψεις νερού ειδικά κατά την περίοδο της άρδευσης, όταν η γεωργία απορροφά το 87% της συνολικής κατανάλωσης, οι παράνομες αντλήσεις είναι συχνές και ενώ οι ακατάλληλες αρδευτικές μέθοδοι και τα παλαιωμένα ή/και κακοσυντηρημένα δίκτυα οδηγούν σε σημαντικές απώλειες νερού.

Πέραν όμως από το πάρα πολύ σημαντικό ζήτημα της **ποσότητας**, η υποβάθμιση της **ποιότητας** του υδατικού δυναμικού είναι ένα επιπλέον ζήτημα που απασχολεί όλο και πιο έντονα την κοινωνία μας σήμερα. Ως υποβάθμιση των υδάτινων οικοσυστημάτων θεωρείται κάθε διαταραχή της ισορροπίας και της αναπαραγωγικής ικανότητας των οικοσυστημάτων που εξαρτώνται από το νερό. Ειδικότερα ως υποβάθμιση της ποιότητας του νερού θεωρείται κάθε επιβάρυνση του νερού με ύλη ή ενέργεια, σε ποσότητα και ένταση τέτοιες, που επηρεάζουν τον αυτοκαθαρισμό του, μέσω των βιολογικών και γεωχημικών κύκλων.

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες η φυσική ποιότητα των υδατικών πόρων μεταβλήθηκε σημαντικά εξαιτίας των διαφόρων ανθρώπινων δραστηριοτήτων και χρήσεων του νερού. Οι περισσότερες περιπτώσεις ρύπανσης αναπτύχθηκαν βαθμιαία μέχρις ότου έγιναν φανερές και μετρήσιμες. Χρειάστηκε πολύς χρόνος μέχρι να φτάσει ο άνθρωπος στην αναγνώριση των προβλημάτων ρύπανσης ή/και μόλυνσης και ακόμα περισσότερος για να γίνουν οι απαραίτητες μετρήσεις και οι έλεγχοι οι οποίοι ακόμα και σήμερα σε πολλές περιπτώσεις είναι είτε ελλιπείς, είτε δεν έχουν ολοκληρωθεί. Η ρύπανση (επιβάρυνση με ύλη ή ενέργεια), ή/και η μόλυνση (επιβάρυνση με παθογόνους για τον άνθρωπο και τα ζώα μικροοργανισμούς) των

επιφανειακών και υπόγειων νερών αποτελεί σοβαρό πρόβλημα και απασχολεί τους επιστήμονες, τους πολιτικούς αλλά και τους απλούς πολίτες σε όλο τον κόσμο, γιατί οι ανάγκες σε γλυκό νερό αυξάνονται συνέχεια ενώ οι διαθέσιμοι υδάτινοι πόροι είναι λίγοι και η δυνατότητα αυτοκαθαρισμού του υπόγειου νερού περιορισμένη.

Ο πιο κοινός ρυπαντής του υπόγειου νερού είναι το διαλελυμένο άζωτο με την μορφή των νιτρικών. Το άζωτο μπορεί να σχηματίσει ποικιλία ενώσεων λόγω των διαφορετικών καθεστώτων οξειδωσης που διαθέτει. Στην βιόσφαιρα οι περισσότερες αλλαγές από την μία οξειδωτική κατάσταση στην άλλη προκαλούνται βιολογικά. Οι ακόλουθες ιοντικές μορφές (Πίνακας 1) παρουσιάζουν το περισσότερο ενδιαφέρον σε σχέση με το περιβάλλον εδάφους /νερού (Freeze and Cherry, 1979).

ΙΟΝΤΙΚΕΣ ΕΝΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ	ΤΥΠΟΣ	ΟΞΕΙΔΩΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ
Αμμωνία	NH_3	-3
Αμμωνιακό ιόν	NH_4^+	-3
Αέριο Άζωτο	N_2	0
Οξειδίο του Αζώτου	N_2O	+1
Νιτρώδες ιόν	NO_2^-	+3
Νιτρικό ιόν	NO_3^-	+5
Οργανικό Άζωτο ¹		

Πίνακας 1: Ιοντικές μορφές του αζώτου

Στο νερό, η ιοντική μορφή του αζώτου με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι, με μειούμενο το βαθμό οξειδωσης (oxidation state) : τα νιτρικά ιόντα (NO_3^-), τα νιτρώδη ιόντα (NO_2^-), η αμμωνία (NH_3) και το οργανικό άζωτο. Όλες αυτές οι μορφές του αζώτου όπως και το αέριο άζωτο είναι βιοχημικά αλληλομετατρέπομενες και είναι συνιστώσες του κύκλου του αζώτου.

Από τα πρώτα χρόνια της δεκαετίας του 1980 παρατηρήθηκε ότι τα νιτρικά στα υπόγεια και επιφανειακά νερά, σε πολλές περιπτώσεις υπερβαίνουν τα συνιστώμενα όρια. Έτσι, από το 1991, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εκτιμώντας ότι η κύρια αιτία της διάχυτης ρύπανσης των υδάτων στην Κοινότητα είναι τα νιτρικά ιόντα γεωργικής προέλευσης και ότι η περιεκτικότητα των υδάτων σε νιτρικά ιόντα σε ορισμένες περιοχές των κρατών μελών συνεχώς αυξάνεται ενώ είναι ήδη υψηλή σε σχέση με τις προδιαγραφές της οδηγίας 75/440/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 16ης Ιουνίου 1975, εξέδωσε την οδηγία 91/676/ΕΟΚ που αποβλέπει στη μείωση της ρύπανσης των υδάτων που προκαλείται άμεσα ή έμμεσα από νιτρικά ιόντα γεωργικής προελεύσεως και στην πρόληψη της περαιτέρω ρύπανσης αυτού του είδους. Η εθνική μας νομοθεσία εναρμονίστηκε με την ΚΥΑ16190/1335 – ΦΕΚ519Β/25.06.97.

¹ Το οργανικό Άζωτο είναι Άζωτο το οποίο ενσωματώνεται σε οργανικές ουσίες

Την οδηγία για την προστασία των υδάτων από νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης ακολούθησε η οδηγία 98/83/EK σχετικά με την ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης. Η εθνική μας νομοθεσία εναρμονίστηκε με την ΚΥΑ Υ2/2600/2001-ΦΕΚ892Β/11.07.2001 όπως αυτή τροποποιήθηκε με την ΔΥΓ2/Γ.Π. οικ 38295-ΦΕΚ630Β/26.04.2007, με τις οποίες τέθηκαν τα όρια χημικών και μικροβιολογικών παραμέτρων βάσει των οποίων χαρακτηρίζεται η ποιότητα του υδάτινου σώματος.

Σε μία προσπάθεια να αντιμετωπιστεί συνολικά και αποτελεσματικά το πρόβλημα της διαθεσιμότητας και της ποιότητας του νερού, η Ευρωπαϊκή Ένωση υιοθέτησε τον Δεκέμβριο του 2000 την Οδηγία-Πλαίσιο για το Νερό (2000/60/EK). Βασικοί στόχοι της Οδηγίας είναι η ολοκληρωμένη διαχείριση όλων των υδάτων - επιφανειακών, υπόγειων και παράκτιων - καθώς και η προστασία η βελτίωση και η αποκατάστασή τους, έτσι ώστε μέχρι το τέλος του 2015 όλα τα υδάτινα συστήματα να βρίσκονται σε καλή οικολογική κατάσταση.

Αυτή η φιλόδοξη και καινοτόμος Οδηγία εισάγει μια σύγχρονη και ολοκληρωμένη αντίληψη στη διαχείριση των υδάτινων πόρων. Καθώς το νερό δε γνωρίζει σύνορα, η Οδηγία ορίζει ότι η διαχείριση του νερού θα πρέπει να γίνεται με βάση τις Λεκάνες Απορροής Ποταμού, δηλαδή με υδρολογικά και όχι διοικητικά όρια. Ζητά οικονομική ανάλυση όλων των χρήσεων του νερού, εκτίμηση των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων, και διαχείριση βάσει της αρχής ανάκτησης του κόστους των υπηρεσιών ύδατος. Προκειμένου, επίσης, να διαφυλαχθεί το δικαίωμα όλων στα κοινωνικοοικονομικά οφέλη της χρήσης του νερού, ορίζεται ότι οι ανάγκες και οι προσδοκίες όλων των ενδιαφερόμενων μελών θα πρέπει να αναλύονται σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Βάσει αυτής της αρχής, οι χώρες που μοιράζονται υδάτινα σώματα απαιτείται να συνεργάζονται μεταξύ τους μέσω της δημιουργίας κοινών λεκανών απορροής, έτσι ώστε η διαχείριση τους να είναι περισσότερο αποτελεσματική και όχι αποσπασματική.

Η Ελλάδα ενσωμάτωσε την Οδηγία-πλαίσιο στην ελληνική νομοθεσία με το νόμο Ν.3199/09.12.2003. Παρόλο που η ενσωμάτωση της Οδηγίας φαίνεται να έγινε έγκαιρα, ο νόμος χαρακτηρίζεται από βασικές ελλείψεις ως προς το περιεχόμενο και ασάφειες ως προς την εφαρμογή του. Για αυτό το λόγο η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει κινήσει διαδικασία παράβασης ήδη από το έτος 2005 στέλνοντας στη χώρα μας προειδοποιητική επιστολή (2005/2033) για τη μη πλήρη συμμόρφωση με την Οδηγία.

Η οδηγία 2000/60/EK προβλέπει τη λήψη συγκεκριμένων μέτρων για την πρόληψη και τον έλεγχο τόσο της άμεσης όσο και της έμμεσης ρύπανσης των υδάτων και τη διασφάλιση της καλής χημικής τους κατάστασης. Ειδικότερα, στην εν λόγω οδηγία, η εκτίμηση της καλής χημικής κατάστασης βασίζεται στη σύγκριση των στοιχείων που προκύπτουν από την παρακολούθηση με τα ποιοτικά πρότυπα που έχει θέσει η ΕΕ όσον αφορά τη νιτρορύπανση και τη ρύπανση από φυτοπροστατευτικά και βιοκτόνα προϊόντα, τα οποία καθορίζουν οι τιμές

κατωφλιού (μέγιστες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις ορισμένων ρυπαντών στα υπόγεια ύδατα). Τα πρότυπα αυτά καθορίζονται για τις ποτάμιες λεκάνες και τους υπόγειους υδάτινους όγκους σε εθνικό επίπεδο, λαμβάνοντας με τον τρόπο αυτό υπόψη τη μεγάλη ποικιλία των χαρακτηριστικών των υπογείων υδάτων στην ΕΕ.

Για την πρόληψη και τον έλεγχο της άμεσης και έμμεσης απόρριψης επικίνδυνων ουσιών, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή θέτει ποιοτικούς στόχους, ώστε να υπάρχει τρόπος παρακολούθησης των επιπτώσεων της απόρριψης αυτών των ουσιών και εκτίμησης των μελλοντικών κινδύνων. Προκειμένου για την εποπτική παρακολούθηση της ποιότητας των υπογείων υδάτων (Παράρτημα V οδηγίας 2000/60/ΕΕ), οι παράμετροι που επιλέχθηκαν ως δείκτες ρύπανσης είναι: οι νιτρικές ενώσεις, το Αμμώνιο, η αγωγιμότητα, το pH και η περιεκτικότητα σε οξυγόνο.

Μέχρι πολύ πρόσφατα, το ενδιαφέρον στα υπόγεια ύδατα εστίαζε κυρίως στη χρήση τους ως πόσιμο νερό (π.χ. περίπου 75% των κατοίκων της ΕΕ εξαρτώνται από τα υπόγεια ύδατα για την υδροδότησή τους) αλλά και στην χρήση τους ως ένας πολύ σημαντικός πόρος για τη βιομηχανία και τη γεωργία. Εντούτοις σήμερα γίνεται όλο και περισσότερο προφανές ότι τα **υπόγεια ύδατα πρέπει όχι μόνο να αντιμετωπισθούν ως δεξαμενή πόσιμου νερού, αλλά και να προστατευθούν για την περιβαλλοντική τους αξία**. Από αυτή την άποψη, τα υπόγεια ύδατα αποτελούν έναν σημαντικό κρίκο του υδρολογικού κύκλου μέσω της συντήρησης των υγρότοπων και των ροών ποταμών, ενεργώντας πολλές φορές ως τροφοδότης κατά τις ξηρές περιόδους. Με άλλα λόγια, παρέχουν τη βασική ροή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους για τα συστήματα των επιφανειακών σωμάτων ύδατος πολλά από τα οποία χρησιμοποιούνται για την παροχή πόσιμου νερού και την αναψυχή. Σε πολλούς ποταμούς δε, περισσότερο από 50% της ετήσιας ροής προέρχεται από τα υπόγεια νερά ενώ στις περιόδους χαμηλής ροής το καλοκαίρι, περισσότερο από 90% της ροής σε μερικούς ποταμούς μπορεί να προέλθει από τα υπόγεια νερά. Ως εκ τούτου, η επιδείνωση της ποιότητας υπογείων νερών μπορεί άμεσα να έχει επιπτώσεις σε άλλα σχετικά, υδρόβια και επίγεια οικοσυστήματα (European Commission, 2007)

Δεδομένου ότι τα υπόγεια νερά κινούνται αργά μέσω του υπεδάφους, ο αντίκτυπος των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων μπορεί να διαρκέσει για έναν πολύ μακρύ χρονικό διάστημα, που σημαίνει ότι η ρύπανση που δημιουργήθηκε μερικές δεκαετίες πριν - είτε από τη γεωργία, βιομηχανία ή άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες - μπορεί να επηρεάζει ακόμα την ποιότητα υπογείων νερών σήμερα ενώ σε μερικές περιπτώσεις, θα συνεχίσει να την επηρεάζει και για τις επόμενες γενεές. Η κληρονομιά του παρελθόντος είναι σαφώς ορατή επί των μεγάλης κλίμακας μολυσμένων τόπων, π.χ. βιομηχανικές περιοχές ή λιμενικές περιοχές όπου είναι δύσκολο ή ακόμα και αδύνατο (με την σημερινή τεχνολογία) να επανέλθουν στην πρότερή τους κατάσταση.

Το υδατικό περιβάλλον αντιδρά στην εκροή ρύπων με μία σειρά μηχανισμών που σκοπό έχουν να επαναφέρουν το περιβάλλον στην προηγούμενη κατάσταση του.

Τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στον αυτοκαθαρισμό είναι στην πραγματικότητα μηχανισμοί ανακύκλωσης της ύλης. Οι μηχανισμοί αυτοί διαχωρίζονται σε φυσικούς, χημικούς και βιολογικούς.

ΦΥΣΙΚΟΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ	ΧΗΜΙΚΟΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ	ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ
▪ Διάλυση ▪ Καθίζηση ▪ Προσρόφηση ▪ Απορρόφηση ▪ Ιοντοανταλλαγή ▪ Διάβρωση	▪ Οξειδοαναγωγή ▪ Συμπλοκοποίηση ▪ Δημιουργία χηλικών ενώσεων ▪ Καταβύθιση ▪ Συσσωμάτωση ▪ Υδρόλυση	▪ Βακτηριακή αποσύνθεση των διαλυτών ουσιών ▪ Κατανάλωση από ανώτερους οργανισμούς ▪ Κατανάλωση από φυτικούς οργανισμούς ▪ Κατανάλωση από ζωικούς οργανισμούς

Πίνακας 2 : Οι μηχανισμοί αυτοκαθαρισμού του νερού

Η διαδικασία αυτοκαθαρισμού των υπογείων υδάτων είναι αρκετά περιορισμένη, σε σύγκριση με αυτή που συναντάται σε μεγάλες επιφανειακές υδατικές μάζες λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας και της απουσίας οξυγόνου με αποτέλεσμα την απουσία των μικροβιακών αποδομητών (π.χ. βακτήρια), οι οποίοι συμβάλλουν καθοριστικά στην αποδόμηση της οργανικής ύλης.

Αναγνωρίζοντας το γεγονός ότι τα υπόγεια ύδατα αποτελούν πολύτιμο φυσικό πόρο και ως τέτοιος θα πρέπει να προστατεύεται από την υποβάθμιση και την χημική ρύπανση, η Ευρωπαϊκή Ένωση εξέδωσε πρόσφατα την θυγατρική οδηγία 2006/118/EK σχετικά με την προστασία των Υπογείων Υδάτων από την ρύπανση και την υποβάθμιση με στόχο την πρόληψη και τον έλεγχο της ρύπανσης ειδικεύοντας το άρθρο 17 της οδηγίας 2000/60/EK.

2. ΝΙΤΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

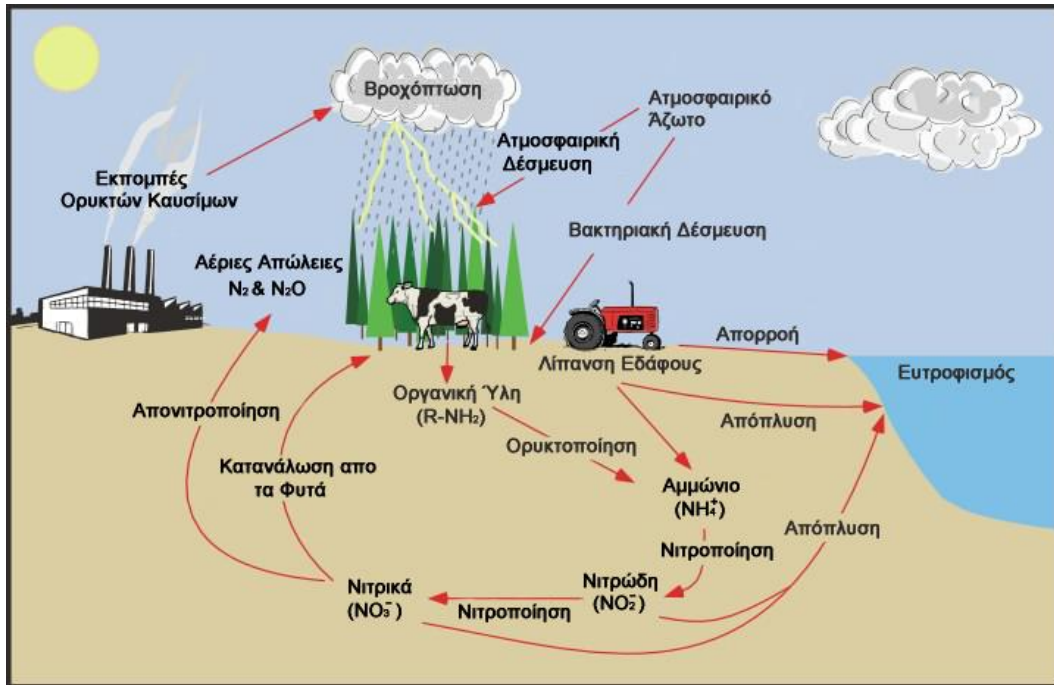
Ο τουρισμός, η αστική ανάπτυξη, η σύγχρονη γεωργία, η τάση βελτίωσης της ποιότητας ζωής και η βιομηχανοποίηση οδηγούν στην εκτεταμένη χρήση των υδατικών πόρων. Ο περιορισμένος αριθμός υδατικών αποθεμάτων στις παράκτιες μεσογειακές χώρες από την άλλη πλευρά εντείνει την υπεράντληση των υδροφορέων για την κάλυψη των αυξημένων αναγκών, με αποτέλεσμα την εξάντληση των υπόγειων αποθεμάτων ή την υποβάθμιση της ποιότητας των υπόγειων νερών. Πλέον διαδεδομένα παραδείγματα της υποβάθμισης της ποιότητας του υπόγειου υδροφορέα είναι η υφαλμύρυνση των υπόγειων υδάτων των παράκτιων υδροφορέων όπως και η ρύπανση τους από υγρά και στερεά οικιακά απόβλητα, φυτοφάρμακα και χημικά λιπάσματα.

Ειδικότερα, η ώθηση του αγροτικού τομέα προς την εντατικοποίηση των καλλιεργειών συνοδεύτηκε από αλόγιστη χρήση των υδατικών πόρων με συνήθως μειωμένης επίδοσης αρδευτικά συστήματα που προκάλεσαν προβλήματα στο υδατικό ισοζύγιο όπως συγχρόνως έγινε και αλόγιστη χρήση λιπασμάτων και γεωργικών φαρμάκων που σε τοπικό επίπεδο έγιναν αιτία εμφάνισης νιτρικών, νιτρικών αλάτων και άλλων ρυπαντών στα υπόγεια και επιφανειακά νερά. Την ίδια χρονική περίοδο, η γενική απαίτηση για αναβάθμιση του βιοτικού επιπέδου σε περιοχές οικιστικής γης έδωσε το έναυσμα για μια επιπλέον έκρηξη στην χρήση των υδατικών πόρων που πραγματοποιήθηκε και αυτή χωρίς μακροπρόθεσμο στρατηγικό σχεδιασμό και βέβαια είχε πρόσθετες – αξιοσημείωτες συνέπειες στα προβλήματα που προαναφέρθηκαν.

Ήδη σε διάφορες περιοχές γίνονται μελέτες για τον προσδιορισμό των βασικών αιτιών και την εξεύρεση σχετικών λύσεων. Λείπει όμως η ολοκληρωμένη προσέγγιση. Αν και υπάρχουν καλά νομικά εργαλεία (π.χ. η κοινή υπουργική απόφαση «Μέτρα και όροι για την προστασία των νερών από τη νιτρορύπανση γεωργικής προελεύσεως») δεν γίνεται ευρεία χρήση τους και δεν εποπτεύεται επαρκώς η εκτέλεσή τους στην πράξη.

Ο κύκλος του αζώτου αντιπροσωπεύει ίσως τον πιο σημαντικό κύκλο θρεπτικών στα χερσαία οικοσυστήματα. Το άζωτο χρησιμοποιείται από τους οργανισμούς προκειμένου να παράγουν κάποια σύνθετα οργανικά μόρια όπως αμινοξέα, πρωτεΐνες και νουκλεϊκά οξέα απαραίτητα για την ανάπτυξή τους. Αν και η ατμόσφαιρα είναι μία μεγάλη δεξαμενή αζώτου (η ατμόσφαιρα αποτελείται από 79% άζωτο) αυτό πρέπει να συνδυαστεί με υδρογόνο (σχηματίζοντας NH_4^+) ή με οξυγόνο (σχηματίζοντας NO_3^-) προκειμένου να αφομοιωθεί από τα φυτά. Η μορφή του Αμμωνίου (NH_4^+) χρησιμοποιείται λιγότερο από τα φυτά καθώς σε μεγάλες συγκεντρώσεις είναι αρκετά τοξική. Τα ζώα παίρνουν το απαραίτητο άζωτο που χρειάζονται για τον μεταβολισμό τους και την ανάπτυξή τους από την κατανάλωση των φυτών.

Το άζωτο - κοινός παρονομαστής στα προαναφερόμενα προβλήματα ρύπανσης - υφίσταται με πολλές μορφές στο περιβάλλον. Η κίνηση και ο μετασχηματισμός των αζωτούχων ενώσεων στην βιόσφαιρα μπορεί να χαρακτηριστεί από τον κύκλο του αζώτου όπως αυτός παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3 : Σχηματική απόδοση του κύκλου του Αζώτου. Προσαρμογή από <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/9s.html>

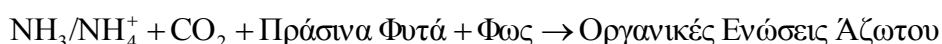
Ο μετασχηματισμός των ενώσεων του αζώτου γίνεται μέσω μηχανισμών όπως είναι η αζωτοδέσμευση (fixation), η σύνθεση, η μετατροπή σε ανόργανες ενώσεις του αμμωνίου (ammonification/mineralization), η νιτροποίηση και η απονιτροποίηση. Κάθε μία από αυτές τις διαδικασίες υποβοηθείται από συγκεκριμένους μικροοργανισμούς με κέρδος ή απώλεια ενέργειας. Η ενεργειακή κατάσταση της ένωσης είναι καθοριστική για τον προσδιορισμό της αντίδρασης που θα προκύψει.

Η **δέσμευση** (Fixation) του αζώτου αναφέρεται στην ενσωμάτωση του αδρανούς αερίου αζώτου σε μία τέτοια χημική ένωση ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τα φυτά και τα ζώα. Η δέσμευση του αζώτου διακρίνεται σε ατμοσφαιρική, βιολογική και δευτερευόντως σε βιομηχανική. Κατά την *ατμοσφαιρική αζωτοδέσμευση*, το άζωτο της ατμόσφαιρας μετά από ηλεκτρική εκκένωση αντιδρά είτε με τους υδρατμούς, σχηματίζοντας αμμωνία, είτε αντιδρά με το ατμοσφαιρικό οξυγόνο σχηματίζοντας νιτρικά ιόντα. Η αμμωνία και τα νιτρικά ιόντα μεταφέρονται με τη βροχή στο έδαφος. Η ατμοσφαιρική αζωτοδέσμευση αντιπροσωπεύει το 10% της συνολικής αζωτοδέσμευσης. Η *βιολογική δέσμευση αζώτου* πραγματοποιείται από βακτήρια που μετατρέπουν το ατμοσφαιρικό άζωτο σε νιτρικά ιόντα, τα οποία αφομοιώνονται από τα φυτά. Η βιολογική αζωτοδέσμευση αντιπροσωπεύει το 90% της

συνολικής αζωτοδέσμευσης. Σήμερα δέσμευση του αζώτου πραγματοποιείται και στις βιομηχανίες με σύνθεση της αμμωνίας από H_2 και ατμοσφαιρικό N_2 (Canter, 1997).

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΕΣΜΕΥΣΗΣ ΑΖΩΤΟΥ	ΠΡΟΪΟΝ
Αέριο άζωτο N_2 → Βιολογική (90%)	→ Νιτρικά → Οργανικό N
→ Ατμοσφαιρική (10%)	→ NH_3 → Οργανικό N
→ Βιομηχανική	→ Αμμωνιακά, Νιτρικά

Τα φυτά χρησιμοποιούν τα νιτρικά ιόντα που προσλαμβάνουν από το έδαφος προκειμένου να συνθέσουν τις αζωτούχες ενώσεις τους, όπως τις πρωτεΐνες, τα αμινοξέα και τα νουκλεϊκά οξέα. Το άζωτο που περιέχεται στις ουσίες αυτές διακινείται σε ολόκληρη την τροφική αλυσίδα. Η σύνθεση ή η αφομοίωση αναφέρεται σε βιοχημικούς μηχανισμούς οι οποίοι χρησιμοποιούν το αμμώνιο ή ενώσεις του αζώτου για να σχηματίσουν φυτικές πρωτεΐνες ή άλλες ενώσεις του αζώτου όπως :



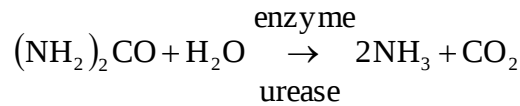
Οι ζωικοί οργανισμοί χρειάζονται τις πρωτεΐνες τις οποίες λαμβάνουν από τα φυτά και τα άλλα ζώα καθώς - εκτός από μερικές εξαιρέσεις - δεν μπορούν να μετασχηματίσουν το ανόργανο άζωτο σε οργανική μορφή όπως τα φυτά.

Όμως, τόσο τα φυτά όσο και τα ζώα αφήνουν στο έδαφος νεκρή οργανική ύλη (καρπούς, φύλλα, νεκρά σώματα, τρίχωμα) που περιέχει άζωτο. Επιπροσθέτως, τα ζώα αποβάλλουν αζωτούχα προϊόντα του μεταβολισμού (ουρία, ουρικό οξύ, κ.α.). Όλες αυτές οι ουσίες διασπώνται από τους αποδομητές του εδάφους μέσα από μια διαδικασία που καταλήγει στην παραγωγή αμμωνίας. Κατά την αποσύνθεση των φυτικών και ζωικών ιστών λειτουργεί ο μηχανισμός της αμμωνιοποίησης ο οποίος εκφράζεται ως εξής :



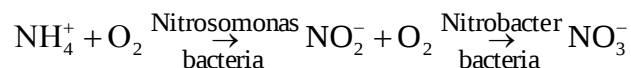
Αμμωνιοποίηση (Ammonification) ή ορυκτοποίηση /ανοργανοποίηση είναι η διαδικασία μετατροπής του οργανικού αζώτου σε ανόργανη ένωση του αμμωνίου με ετερότροφους μικροοργανισμούς.

Παράδειγμα τέτοιας αντίδρασης είναι η αντίδραση της υδρόλυσης όπου η ουρία μετατρέπεται σε άζωτο ανόργανης μορφής



Η μετατροπή πραγματοποιείται σχετικά γρήγορα σε λιγότερο από δύο εβδομάδες την Άνοιξη (Johnson, 1995). Η αμμωνία λοιπόν που συγκεντρώνεται στο έδαφος, υφιστάμενη τη δράση των νιτροποιητικών βακτηρίων του εδάφους, μετατρέπεται τελικά σε νιτρικά ιόντα, τα οποία παραλαμβάνονται και πάλι από τα φυτά. Έτσι κλείνει ένας κύκλος αζώτου στο εσωτερικό του οικοσυστήματος.

Η **νιτροποίηση** (nitrification) αναφέρεται στην βιολογική οξείδωση των αμμωνιακών ιόντων. Αυτό επιτυγχάνεται σε δύο βήματα. Πρώτα με την μετατροπή στην μορφή του Νιτρώδους ιόντος NO_2^- και μετά στην μορφή του Νιτρικού ιόντος NO_3^- με την βοήθεια δύο χημο-αυτότροφων βακτηρίων και του ανόργανου άνθρακα ως πηγή κυτταρικού άνθρακα με την εξής αντίδραση :



Οι δύο αυτές αντιδράσεις συνήθως συνδυάζονται και προχωρούν άμεσα στην μορφή του νιτρικού ιόντος ενώ τα νιτρώδη ιόντα είναι σχεδόν πάντα σε πολύ χαμηλά επίπεδα συγκέντρωσης. Τα νιτρικά αυτά ιόντα που σχηματίζονται είτε μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την 'σύνθεση' και την ανάπτυξη των φυτών είτε με έλλειψη οξυγόνου να αναχθούν λόγω της απονιτροποίησης.

Η απονιτροποίηση (denitrification) αναφέρεται στην βιολογική αναγωγή των νιτρικών ιόντων σε αέριο άζωτο. Η αναγωγή μπορεί να προχωρήσει μέσω αρκετών βημάτων σε ένα βιοχημικό μονοπάτι. Στην διαδικασία αυτή εμπλέκονται αρκετά ετερότροφα βακτήρια που απαιτούν οργανικό άνθρακα ως πηγή ενέργειας με την εξής αντίδραση:

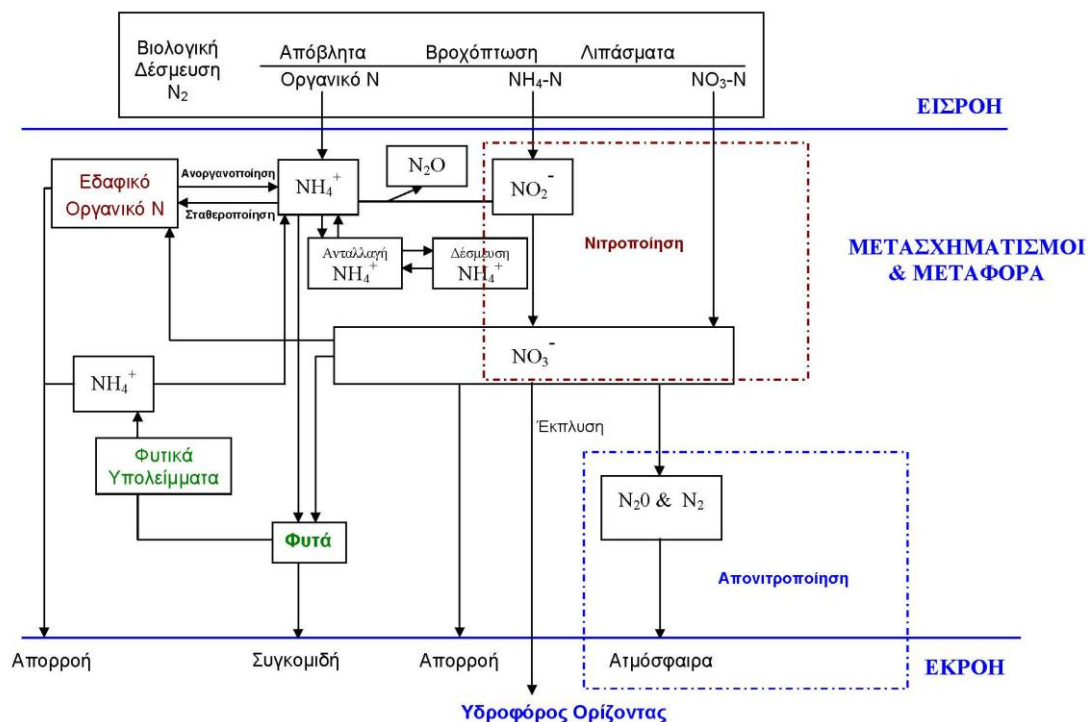


Ειδικότερα οι μετασχηματισμοί του αζώτου σε σχέση με το εδαφικό σύστημα και την μετάβασή τους στον υδροφόρο ορίζοντα παρουσιάζονται στο σχηματικό διάγραμμα της Εικόνα 3.

Παρουσία οξυγόνου, τα ιόντα NH_4^+ οξειδώνονται σε ιόντα NO_3^- (νιτροποίηση) καθώς σε οξειδωτικές συνθήκες τα ιόντα NO_3^- είναι η σταθερή μορφή του διαλελυμένου αζώτου.

Τα ιόντα NO_3^- μετακινούνται με το νερό που διαρρέει το έδαφος, χωρίς μετασχηματισμό και με μικρή ή καθόλου καθυστέρηση καθώς τα περισσότερα εδάφη έχουν αρνητικό φορτίο

στα κολλοειδή τους το οποίο δεν έλκει τα ιόντα NO_3^- με αποτέλεσμα να εκπλύνονται άμεσα προς τους υδάτινους αποδέκτες - υδροφόρους ορίζοντες, ποτάμια, λίμνες, θάλασσα. Οι συγκεντρώσεις των νιτρικών που βρίσκονται συνήθως στους υπόγειους υδροφόρους δεν περιορίζονται από κάποια όρια διαλυτότητας. Λόγω αυτού του γεγονότος αλλά και της ανιονικής τους μορφής NO_3^- , είναι πολύ κινητικά στο υπόγειο νερό (Canter, 1997)



Εικόνα 4 : Σχηματική Απόδοση του κύκλου του αζώτου σε σχέση με το εδαφικό σύστημα. Προσαρμογή από (Keeney, 1989)

Φρεάτιοι υδροφόροι με πολύ υδροπερατά ιζήματα ή ρηγματωμένα πετρώματα περιέχουν συνήθως αξιόλογα ποσά διαλελυμένου O_2 . Σε τέτοιο υδρογεωλογικό περιβάλλον τα νιτρικά μεταναστεύουν σε μεγάλες αποστάσεις σε σχέση με την θέση εισαγωγής τους στον υδροφόρο (Freeze and Cherry, 1979).

Μείωση του δυναμικού οξειδοαναγωγής του υπόγειου νερού, παρουσία μικροοργανισμών, προκαλεί απονιτροποίηση, διαδικασία κατά την οποία το NO_3^- ανάγεται σε N_2O ή σε N_2 . Τα προϊόντα της αντίδρασης αυτής βρίσκονται διαλελυμένα στο υπόγειο νερό το οποίο όταν μετακινηθεί στην ακόρεστη ζώνη, διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα. Πρέπει να σημειωθεί ότι σε περίπτωση που υπάρχουν συγχρόνως και οξυγόνο και νιτρικά ιόντα, τα βακτήρια θα προτιμήσουν να χρησιμοποιήσουν το οξυγόνο για την οξείδωση της οργανικής ύλης καθώς αποδίδει περισσότερη ενέργεια. Συνεπώς για να προχωρήσει η διαδικασία της απονιτροποίησης απαιτούνται ανοξικές συνθήκες. Συνθήκες γενικά που ευνοούν το μηχανισμό της απονιτροποίησης είναι τα υγρά εδάφη, η συμπίεση και το θερμό περιβάλλον προκειμένου για υψηλή δραστηριότητα των μικροοργανισμών του εδάφους (Johnson, 1995).

Η μη-ιονισμένη μοριακή αμμωνία βρίσκεται σε ισορροπία με το αμμωνιακό ιόν, η κατανομή του οποίου εξαρτάται από το pH και την θερμοκρασία του συστήματος της βιόσφαιρας. Γενικά πολύ μικρό ποσοστό αμμωνίας μπορεί να υφίσταται σε οξειδωτικό περιβάλλον. Τα αμμωνιακά ιόντα συγκρατούνται από τα εδαφικά κolloειδή με ιοντοανταλλαγή, κατά την αντίδραση : $RK^+ + NH_4^+ \leftrightarrow RNH_4^+ + K^+$ ενώ η περίσσεια των αμμωνιακών εκπλύνεται στους υδάτινους αποδέκτες (Stumm and Morgan, 1996).

Επειδή τα αμμώδη εδάφη έχουν μεγαλύτερο ποσοστό αέρα στο πορώδες τους σε σχέση με τα πιο λεπτόκοκκα εδάφη (ιλύς, άργιλος), είναι λιγότερο πιθανό να αναπτύξουν αναερόβιες ζώνες όπου μπορεί να εκδηλωθεί απονιτροποίηση (Arah and Smith, 1989). Το γεγονός αυτό έχει επιβεβαιωθεί και σε πειραματικά δεδομένα (Arah *et al.*, 1991) και σε προσομοίωση του φαινομένου (Arah and Smith, 1989). Θεωρείται γενικά ότι οι απώλειες του αζώτου στα ιλυώδη και αργιλικά εδάφη οφείλονται στην απονιτροποίηση όπου η έκπλυση είναι ασήμαντη ενώ στα αμμώδη εδάφη η απονιτροποίηση θεωρείται ασήμαντη και η έκπλυση λαμβάνει τον κυρίαρχο ρόλο (Wild and Babiker, 1976).

Δεδομένα που συλλέχθηκαν από τον (Kolenbrander, 1981) επιβεβαιώνουν την παραπάνω εικόνα καθώς σε εφαρμογή λιπασμάτων αζώτου 100Kg/ha, τα αργιλικά εδάφη παρουσίασαν έκπλυση αζώτου 25-30kg/ha ενώ τα αμμώδη εδάφη παρουσίασαν έκπλυση 45-65kg/ha. Ακόμα και σε υπέρμετρο ρυθμό εφαρμογής λίπανσης του εδάφους, η έκπλυση από τα αδρόκοκκα εδάφη ξεπέρασε αυτή από τα περισσότερο λεπτόκοκκα και 'βαρύτερα' εδάφη. Τα δεδομένα του (Kolenbrander, 1981) εκφράζουν επίσης έναν δεύτερο βασικό κανόνα που προέρχεται από τις μελέτες που έχουν γίνει γενικά για την έκπλυση των εδαφών (leaching) : *«η έκπλυση των νιτρικών δεν συναρτάται άμεσα με την εφαρμογή των λιπασμάτων παρά μόνο έως το σημείο ικανοποίησης της καλλιέργειας της ζήτησης σε άζωτο. Από αυτό το σημείο και έπειτα η έκπλυση των νιτρικών αυξάνεται κατακόρυφα και αυξάνεται συνεχώς με την αύξηση της εφαρμογής του λιπάσματος»*.

Η ποσότητα έκπλυσης (leaching) σε μηδενική εφαρμογή αζώτου εξαρτάται από το ρυθμό μετατροπής του εδαφικού N σε ανόργανο άζωτο, κατά την διάρκεια του φθινοπώρου και του χειμώνα. Για παρόμοιο περιεχόμενο σε οργανική ύλη, το αργιλικό έδαφος θα απελευθερώσει λιγότερο άζωτο διότι η περισσότερη οργανική ύλη είναι φυσικώς ή χημικώς σταθεροποιημένη (Vinten *et al.*, 1994). Σύμφωνα με την μελέτη των (Vinten *et al.*, 1994), εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι φθινοπωρινές καλλιέργειες έχουν μια μείζονα επίδραση στην έκπλυση του αζώτου από τα 'βαρύτερα' εδάφη. Η καλλιέργεια αερίζει το έδαφος, μειώνει το μέγεθος των συσσωματωμάτων και εκθέτει τα οργανικά υπολείμματα σε αποσύνθεση προάγοντας την μετατροπή σε ανόργανο άζωτο (mineralization) και την νιτροποίηση (nitrification) ενώ πρέπει να σημειωθεί ότι η καλλιέργεια του εδάφους γενικά μειώνει την συχνότητα εμφάνισης των αναερόβιων ζωνών στα εδαφικά συσσωματώματα όπου δυνητικά θα μπορούσε να υπάρξει απονιτροποίηση.

2.1 Πηγές Νιτρικής Ρύπανσης

Ρύπανση (pollution) του υπόγειου νερού είναι η τεχνητά προκαλούμενη υποβάθμιση της φυσικής ποιότητάς του (Todd and Mays, 2005). Η ρύπανση του υπόγειου νερού είναι θέμα υψίστης σημασίας και τυγχάνει παγκόσμιου ενδιαφέροντος τα τελευταία χρόνια. Αυτό συμβαίνει γιατί οι υδροφόροι αποτελούν σημαντική πηγή πόσιμου νερού και αφετέρου γιατί αν ένας υδροφορέας ρυπανθεί είναι εξαιρετικά δύσκολο να αποκατασταθεί. Οι πηγές της ρύπανσης του φυσικού περιβάλλοντος διακρίνονται ανάλογα με την προέλευση τους, σε ανθρωπογενείς πηγές εάν προέρχονται από οποιαδήποτε μορφής ανθρώπινη δραστηριότητα (π.χ. βιομηχανία, γεωργικές καλλιέργειες, οικιακή χρήση, χωματερές, νεκροταφεία) και σε φυσικές πηγές εάν είναι αποτέλεσμα κάποιων φυσικών διεργασιών μέσα στο περιβάλλον.

Το ποιοτικό πρόβλημα στο νερό προκαλείται κυρίως από τα αζωτούχα λιπάσματα τα οποία είναι εύκολα διαλυτά στο νερό. Τα νιτρικά ιόντα είναι πολύ ευκίνητα στο έδαφος σε αντίθεση με τα φωσφορικά και το κάλιο. Οι ποσότητες από τα νιτρικά που βρίσκονται στο έδαφος και δεν απορροφούνται από τα φυτά, είτε γιατί δεν είναι στο κατάλληλο στάδιο ανάπτυξης για να τα απορροφήσουν, είτε γιατί έχουν χορηγηθεί μεγαλύτερες ποσότητες από αυτές που μπορούν να απορροφήσουν, εκπλύονται με το νερό της βροχής ή/και της άρδευσης και καταλήγουν στα υπόγεια νερά όπου και συσσωρεύονται.

Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες σχετικά με τη συμμετοχή των διαφόρων τομέων στη ρύπανση των υδάτων, η γεωργία είναι, χαρακτηριστικά, υπεύθυνη για το 50-80% του συνολικού ρυπαντικού φορτίου στο υδατικό περιβάλλον. Η συμμετοχή της γεωργίας στις διαρροές αζώτου και φωσφορικών ενώσεων στα ύδατα έχει επιβεβαιωθεί, επίσης, από εκθέσεις που εκπονήθηκαν βάσει της οδηγίας πλαίσιο για τα ύδατα (Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, 2007). Η χρήση των λιπασμάτων, χωρίς την επιλογή του κατάλληλου είδους και την εφαρμογή της κατάλληλης ποσότητας στο σωστό χρόνο, αυξάνει το κόστος παραγωγής καθώς γίνεται υπερκατανάλωση λιπασμάτων. Πέρα όμως από την αύξηση του κόστους, δημιουργούνται προβλήματα ρύπανσης στο έδαφος αλλά και στα υπόγεια και τα επιφανειακά νερά (ευτροφισμός). Όταν πλέον η περιεκτικότητα των νερών αυτών υπερβεί τα όρια (50 mg/L) τότε το νερό θεωρείται ακατάλληλο προς πόση.

Εντατικές καλλιέργειες υπάρχουν σε όλη την παραλιακή ζώνη από την Κόρινθο μέχρι το Κιάτο όπου λειτουργούν οργανωμένα αρδευτικά δίκτυα σε συνολική έκταση 100.000 περίπου στρεμμάτων. Ειδικότερα για τις κυριαρχούσες καλλιέργειες της Κορινθίας (άμπελος, εσπεριδοειδή και ελιές) που αποστραγγίζονται στη θάλασσα κυρίως κατά τη διάρκεια της βροχοπτώσης συμβάλλοντας στη ρύπανση των νερών, η λίπανση είναι κυρίως αζωτούχος. Κυριαρχούσες καλλιέργειες (σε επίπεδο νομού) είναι τα εσπεριδοειδή (58.000 περίπου στρέμματα), οι ελιές (90.000 περίπου στρέμματα) και τα αμπέλια (40.000 περίπου στρέμματα). Τα κοινά αζωτούχα λιπάσματα που χρησιμοποιούνται στη γεωργία είναι η άνυδρη αμμωνία (82%N), η ουρία (45-46%N), η θειική αμμωνία (21%N), διαλύματα με

περιεκτικότητα 28-32%N και η νιτρική αμμωνία με περιεκτικότητα σε άζωτο 34%. Λίπασμα ευρείας εφαρμογής είναι και η νιτρική αμμωνία, που αποτελείται από 50% νιτρικό και 50% αμμωνιακό άζωτο χωρίς όμως να προτείνεται η χρήση της σε εδάφη με προβλήματα έκπλυσης (Johnson, 1995).

Η αύξηση παραγωγικότητάς της γεωργίας κατά τη διάρκεια των περισσότερων από τα τελευταία δεκαπέντε έτη συνοδεύθηκε από σημαντική αύξηση της χρήσης, τόσο του ανόργανου αζώτου (N), όσο και των φωσφορικών λιπασμάτων. Καθώς το πρόβλημα των Νιτρικών αλάτων είχε εντοπιστεί στην Ευρωπαϊκή Ένωση ήδη από την δεκαετία του 1980, το 1991 εξεδόθη η οδηγία 91/676/ΕΟΚ σχετικά με την προστασία των υδάτων από την νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης. Το Εθνικό μας δίκαιο εναρμονίστηκε με την ΥΑ 16190/1335 – ΦΕΚ 519Β/25.06.1997

Αν και ήδη από τα μέσα της δεκαετίας του '80, άρχισε να παρατηρείται σταδιακή μείωση της κατανάλωσης λιπασμάτων, το 2005 πολλά κράτη μέλη της ΕΕ κατέταξαν τον ευτροφισμό και τις σχετικές με αυτόν εισροές, γεωργικής προέλευσης στις μείζονες απειλές για την επίτευξη καλής κατάστασης των υδάτων (Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, 2007).

Στην Ελλάδα ακόμη και σήμερα η παρακολούθηση της Νιτρικής Ρύπανσης κρίνεται ανεπαρκής. Σε διάφορες περιοχές της χώρας γίνονται μελέτες για τον προσδιορισμό των βασικών αιτιών και την εξεύρεση σχετικών λύσεων αλλά λείπει η ολοκληρωμένη προσέγγιση. Αν και υπάρχουν τα σχετικά νομικά εργαλεία (ΦΕΚ 519Β/25.06.1997 «Μέτρα και όροι για την προστασία των νερών από τη νιτρορύπανση γεωργικής προελεύσεως») δεν γίνεται ευρεία χρήση τους ενώ δεν εποπτεύεται επαρκώς η εκτέλεσή τους στην πράξη από τους αρμόδιους φορείς.

Η διαπιστωμένη τις τελευταίες δεκαετίες ανησυχητική αύξηση της περιεκτικότητας των επιφανειακών και υπόγειων νερών σε ρύπους, οδήγησε την Ευρωπαϊκή Ένωση στην έκδοση της οδηγίας 98/83/ΕΚ σχετικά με την ποιότητα νερού ανθρώπινης κατανάλωσης. Η Εθνική μας νομοθεσία εναρμονίστηκε με την Υ2/2600/2001 – ΦΕΚ892Β/11.07.2001 όπως αυτή τροποποιήθηκε με την ΔΥΓ2/Γ.Π. οικ 38295 – ΦΕΚ630Β/26.04.2007 όπου τέθηκαν τα όρια χημικών και μικροβιολογικών παραμέτρων βάσει των οποίων χαρακτηρίζεται η ποιότητα του υδάτινου σώματος. Τα όρια σχετικά με τις ενώσεις του αζώτου σύμφωνα με τα ανωτέρω είναι μέγιστη αποδεκτή συγκέντρωση νιτρικών στο πόσιμο νερό στα 50 mg/L ενώ τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια για τα Νιτρώδη και τα Αμμωνιακά ιόντα είναι τα 0,5mg/L. Σύμφωνα με την οδηγία 2003/40/ΕΚ της Επιτροπής της 16^{ης} Μαΐου του 2003, οι χώρες μέλη μπορεί να θεσπίζουν αυστηρότερα όριο για τα Νιτρώδη ιόντα τα 0,1 mg/L, υπέρβαση του οποίου μπορεί να αποτελεί κίνδυνο για την Δημόσια Υγεία.

Εκτός από την εφαρμογή αζωτούχων λιπασμάτων στις καλλιεργούμενες εκτάσεις, στις αστικές περιοχές υπάρχουν και πολλές άλλες μορφές πιθανές πηγές ρύπανσης οι οποίες

συμπεριλαμβάνουν τα αστικά υγρά απόβλητα, τη βιομηχανία ή/και βιοτεχνία, τους χώρους ανεξέλεγκτης ταφής απορριμμάτων, τις κτηνοτροφικές μονάδες αλλά και τέλος την ατμοσφαιρική (υγρή) εναπόθεση.

Η υγρή εναπόθεση προέρχεται από την δέσμευση του αέριου αζώτου στα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα. Σύμφωνα με την ανάλυση της ποιότητας βροχής που έγινε στα πλαίσια διαχειριστικής μελέτης του ποταμού Αχελώου από το Εθνικό Κέντρο Θαλασσιών Ερευνών με τη συνεργασία του καθηγητή Ν. Νικολαΐδη οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στη βροχή δίνονται στον ακόλουθο Πίνακας 3.

Συγκέντρωση συστατικών στη βροχή (mg/L)	
DIN - Διαλυτό Ανόργανο Άζωτο	0.77
Οργανικό άζωτο	1.29
NH₄	0.51
NO₃	1.53
NO₂	0.02
PO₄	0.13
Ολικός P	0.046

Πίνακας 3 : Συγκεντρώσεις θρεπτικών στη βροχή

Η δεύτερη κατά σειρά σημασίας εν δυνάμει πηγή ρύπανσης και μόλυνσης του υδατικού δυναμικού με νιτρικά, είναι τα αστικά υγρά απόβλητα τα οποία μπορεί να περιέχουν έναν μεγάλο αριθμό ρυπαντών όπως είναι ανόργανα άλατα, νιτρικά, φωσφορικά, τασιενεργά προερχόμενα από οικιακά απορρυπαντικά αλλά και μολυσματικούς παράγοντες όπως είναι τα βακτήρια και οι ιοί (MacQuarry and Sudisky, 2001)

Οι οικισμοί της παραλιακής περιοχής που ερευνάται όπως θα παρουσιαστεί σε επόμενο κεφάλαιο, έως πολύ πρόσφατα, χαρακτηρίζονταν ως προς τη διάθεση των αστικών αποβλήτων τους από απουσία δικτύων ακαθάρτων που να οδηγούν τα λύματα στον Βιολογικό Καθαρισμό Κιάτου ή τον Βιολογικό Καθαρισμό της Κορίνθου. Για τον λόγο αυτό η αποχέτευση γίνεται ακόμα σε αρκετές περιπτώσεις σε απορροφητικούς βόθρους, οι οποίοι σε περιόδους αιχμής (ιδιαίτερα στους παραλιακούς οικισμούς) υπερφορτώνονται, επηρεάζοντας δυσμενώς την ποιότητα του υψηλού σχετικά υδροφόρου ορίζοντα και ακόμα χειρότερα υπερχειλίζοντας στο μέτωπο της παραλίας με την επιφανειακή διαφυγή των λυμάτων προς τη θάλασσα και τη σοβαρή ρύπανση των γειτονικών περιοχών. Την δυσάρεστη αυτή κατάσταση εντείνει και το γεγονός ότι σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται ως βόθροι παλαιά πηγάδια.

Αντίθετα με την χρήση των λιπασμάτων και την ατμοσφαιρική εναπόθεση του αζώτου, η διάθεση των αστικών λυμάτων σε απορροφητικούς βόθρους, εισάγει άζωτο και άνθρακα κάτω από το κανονικό βάθος του ριζικού συστήματος και απευθείας στην ακόρεστη ζώνη. Η συγκέντρωση του συνολικού αζώτου από την εκροή σηπτικού βόθρου κυμαίνεται από 25-60 mg/L με την αμμωνία να κυριαρχεί στο σύνολο με συγκέντρωση 20-55mg/L και τα νιτρικά με

συγκέντρωση λιγότερο από 1mg/L (Canter, 1997). Το άζωτο λοιπόν στα λύματα είναι σχεδόν εξολοκλήρου με την μορφή NH_4^+ το οποίο μπορεί να οξειδωθεί σε NO_3^- με αυτότροφα βακτήρια χρησιμοποιώντας το διαλυμένο οξυγόνο που παρέχεται στην ακόρεστη ζώνη μέσω της διάχυσης αέριου O_2 από την ατμόσφαιρα. Η οξείδωση του NH_4^+ και της οργανικής ύλης στο απορροφητικό βόθρο μπορεί να μειώσει το pH του υδατικού διαλύματος εκτός και εάν υπάρχουν ανθρακικά ορυκτά στην ορυκτολογική σύνθεση του υδροφόρου. Τα NO_3^- που παράγονται λόγω της νιτροποίησης είναι πολύ κινητικά και είναι δυνατό να εξασθενίσουν μόνο μέσω βιοχημικών αντιδράσεων όπως είναι η ετερότροφη απονιτροποίηση η οποία απαιτεί ανοξικές συνθήκες και ασταθή οργανικό άνθρακα. Για το λόγο αυτό, αυτές οι αντιδράσεις περιορίζονται πρωταρχικά στην κορεσμένη ζώνη ή σε εδαφικά στρώματα κοντά στον κορεσμό (MacQuarry and Sudisky, 2001).

Μέχρι πρόσφατα η διάθεση γενικά των απορριμμάτων σε αρκετούς παραλιακούς Δήμους του Ν. Κορινθίας θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως προβληματική καθώς εκτός από ελάχιστους δήμους όπου είχε επιχειρηθεί έργο οργάνωσης και διαχείρισης, απορριμμάτων, χρηματοδοτούμενο από το ENVIREG, στους υπόλοιπους, ο συνηθισμένος τρόπος διάθεσης ήταν η απλή ρίψη σε χαράδρες και σε ρεματιές της ημιορεινής Κορινθίας. Οι παραπάνω αναφερόμενοι τρόποι διάθεσης των στερεών απορριμμάτων δημιούργησαν σοβαρούς κινδύνους για τη δημόσια υγεία και συνέβαλλαν οπωσδήποτε σημαντικά στη ρύπανση του περιβάλλοντος με ευρύ φάσμα ρυπογόνων και μολυσματικών ουσιών. Ενθαρρυντικό κρίνεται σήμερα το γεγονός ότι βάσει της Ευρωπαϊκής Νομοθεσίας τυπικά σταμάτησε η λειτουργία των ΧΑΔΑ ενώ πρέπει να αποκατασταθούν και οι τελευταίοι εναπομείναντες χώροι άμεσα. Πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι στην ευρύτερη παραλιακή ζώνη, έχει καταγραφεί η ύπαρξη τουλάχιστον 17 νεκροταφείων τα οποία μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι πιθανές πηγές σημειακής ρύπανσης των υδροφόρων με νιτρικά.

Το έδαφος, που έχει ρυπανθεί από σημειακές πηγές ρύπανσης όπως είναι οι ανεξέλεγκτοι χώροι διάθεσης απορριμμάτων οι οποίοι δρουν και μετά την αποκατάστασή τους και τα νεκροταφεία, μπορεί να συνεισφέρει σημαντικές ποσότητες αζώτου στον υπόγειο υδροφόρο. Το έκκριμα από τους χώρους ταφής απορριμμάτων έχει υψηλή συγκέντρωση αζώτου, οργανικές ενώσεις και βαρέα μέταλλα. Το μεγαλύτερο ποσοστό του αζώτου είναι με την μορφή NH_4^+-N λόγω των αναερόβιων συνθηκών που επικρατούν στις χωματερές. Τυπικές συγκεντρώσεις N είναι σε αμμωνιακά ιόντα 0-1250mg/L, σε νιτρικά ιόντα 0-9,8mg/L και νιτρώδη ιόντα 1,5mg/L (Arigala *et al.*, 1995).

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι εκτός από την καθεαυτό φύση της πηγής του αζώτου, οι βασικοί παράγοντες που ελέγχουν τελικά την συγκέντρωση των νιτρικών είναι η ισχύς της πηγής ρύπανσης, το ύψος της βροχόπτωσης και η κατανομή της, τα χαρακτηριστικά του εδάφους, η φύση (διεύθυνση και ταχύτητα ροής) του υδροφόρου και οι αποστάσεις μεταξύ των πηγών ρύπανσης και των γεωτρήσεων. Όπου οι συγκεντρώσεις των νιτρικών είναι

ιδιαίτερα υψηλές υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να βρίσκεται κοντά και ανάντη σε σχέση με την διεύθυνση ροής, μια πηγή ρύπανσης με νιτρικά, όπως ένας απορροφητικός βόθρος (Smith *et al.*, 1999).

Οι χρήσεις γης (και κατ' αναλογία πολλές φορές το υψόμετρο) είναι ένας από τους πλέον σημαντικούς παράγοντες που καθορίζει την κατανομή της συγκέντρωσης των ενώσεων του αζώτου. Παράδειγμα συσχέτισης της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων με το υψόμετρο και τις χρήσεις γης είναι μελέτη που πραγματοποιήθηκε στα υπόγεια νερά της κεντρικής κοιλάδας της Costa Rica. Ειδικότερα, πραγματοποιήθηκε μελέτη της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων του υπόγειου νερού σε υψομετρικές διαβαθμίσεις που καθορίστηκαν από τις διαφορετικές χρήσεις γης. Η χαμηλότερη υψομετρική διαβάθμιση χαρακτηρίζονταν από οικιστική και αγροτική ανάπτυξη, η μεσαία καλύπτονταν από βοσκότοπους και η υψηλότερη από δάσος. Η συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων παρουσίασε αρνητική συσχέτιση με το υψόμετρο, που αντανακλά την επίδραση των χρήσεων γης στην ποιότητα του υπόγειου νερού.

Ένωση N	Κύρια πηγή προέλευσης	Οικοσυστήματα που ρυπαίνονται	Επιπτώσεις
NO_3^-	Λιπάσματα	Υπόγεια νερά, θάλασσες	Ανθρώπινη υγεία, ευτροφισμός
HNO_3	Καύση υγρών καυσίμων	Ατμόσφαιρα, εδάφη	Όξινη βροχή
NO_2^-	Ενδιάμεσο προϊόν κατά τη νιτροποίηση, και μετατροπή NO_3^- σε NH_4^+	Υδάτινα οικοσυστήματα	Τοξικό για ψάρια
$\text{NO (g) \& NO}_2^- \text{(g)}$	Καύση υγρών καυσίμων-καυσαέρια αυτοκινήτων	Ατμόσφαιρα	Ενισχύει την παραγωγή O_3 στην τροπόσφαιρα, τοξικό σε φυτά
N_2O	Ενδιάμεσο προϊόν κατά τη απονιτροποίηση	Ατμόσφαιρα	Καταστρέφει το O_3 στη στρατόσφαιρα
$\text{NO}_3^- \text{(g) \& NH}_4^+$	Λιπάσματα, περιττώματα ζώων	Ατμόσφαιρα, εδάφη, νερά	Κατά τη νιτροποίηση των NH_4^+ οξινίζει το έδαφος NH_3 τοξική για ψάρια, απαιτείται αυξημένο χλώριο κατά τη χλωρίωση του πόσιμου νερού.

Πίνακας 4 : Κύριες πηγές προέλευσης των ενώσεων του αζώτου και επιπτώσεις τους στον άνθρωπο και το περιβάλλον (Stumm and Morgan, 1996)

Στα πλαίσια της ίδιας μελέτης η συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων στην περιοχή υψηλότερης υψομετρικής διαβάθμισης, παρουσίασε διακύμανση άμεσα ανταποκρινόμενη στις

αλλαγές του υδρολογικού κύκλου. Κατά την υγρή περίοδο οι συγκεντρώσεις των νιτρικών στα υπόγεια νερά ήταν υψηλότερες από την ξηρή περίοδο σαν αποτέλεσμα της διήθησης στα υπόγεια νερά νιτρικών ιόντων που παράγονται μέσω βιολογικής δραστηριότητας. Αντίθετα, παρόμοια συσχέτιση μεταξύ διακύμανσης της βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια του έτους και συγκέντρωσης των νιτρικών στα υπόγεια νερά δεν παρατηρήθηκε στα χαμηλά υψόμετρα. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην ύπαρξη παραγόντων εκτός του υδρολογικού κύκλου που καθορίζουν τη συγκέντρωση των νιτρικών στα χαμηλότερα υψόμετρα, όπως είναι ο χρόνος παραμονής του νερού στον υδροφόρο που είναι μεγαλύτερης διάρκειας συγκριτικά με τα μεγαλύτερα υψόμετρα (Reynolds-Vargas and Richter, 1995)

2.2 Επίδραση των Υψηλών Συγκεντρώσεων Αζώτου στον Ανθρώπινο οργανισμό

Η ρύπανση του υπόγειου υδροφόρου με νιτρικά είναι από τις πιο σοβαρές συνέπειες των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων στα υδρολογικά συστήματα (OECD, 1986) και ως εκ τούτου έχει και πάρα πολύ σημαντική επίδραση στην ανθρώπινη υγεία. Στις μικρότερες πόλεις και χωριά, δεδομένου ότι η ύδρευση βασίζεται κυρίως σε γεωτρήσεις, η ποιότητα του νερού ύδρευσης δεν είναι σταθερή και εξαρτάται από το γεωλογικό υπόβαθρο, τα μέτρα προστασίας των πηγών ύδρευσης και το βαθμό συντήρησης των δικτύων, διότι συνήθως δεν γίνεται επεξεργασία παρά μόνο απολύμανση του νερού ενώ η ποιότητά του σπάνια ελέγχεται συστηματικά.

Οι βασικοί πιθανοί κίνδυνοι από την κατανάλωση νιτρικών είναι η μεθαιμοσφαιριναιμία (Brandenburg and Smith, 1951; Super *et al.*, 1981), ο οισοφαγικός και ο στομαχικός καρκίνος (Siddiqi *et al.*, 1992), ο διαβήτης (Kostraba *et al.*, 1992) και η θυρεοειδική υπερτροφία (van Maanen *et al.*, 1994). Σύμφωνα με την νεότερη Οδηγία 98/83/EK του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου «*σχετικά με την ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης*» οι συγκεντρώσεις νιτρικών, νιτρωδών και αμμωνιακών στο πόσιμο νερό δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα 50mg/L, 0.50mg/L και 0.50mg/L αντίστοιχα.

Η παρουσία αυξημένων ποσοτήτων νιτρικών και νιτρωδών ενώσεων στον ανθρώπινο οργανισμό λόγω της ευρείας χρήσης αμμωνιακών κυρίως λιπασμάτων στη γεωργία, μπορούν να αποβούν επικίνδυνες για την υγεία του ανθρώπου. Η πρόσληψη των νιτρικών γίνεται αφενός μέσω της κατανάλωσης των αγροτικών προϊόντων αλλά και μέσω του υπόγειου νερού που έχει υποστεί ρύπανση. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις αποτελούν η μεθαιμοσφαιριναιμία ή σύνδρομο της κυάνωσης των βρεφών (blue-baby syndrome) και ο καρκίνος του στομάχου. Η φύση των νιτρικών δεν είναι τοξική, όταν όμως εισέλθουν στο αίμα συμβάλλουν στην άμεση οξειδωση του διασθενούς σιδήρου (Fe^{+2}) της αιμοσφαιρίνης σε τρισθενή σίδηρο (Fe^{+3}) με αποτέλεσμα τη δημιουργία της μεθαιμοσφαιρίνης η οποία σε

υψηλά ποσοστά στο αίμα είναι δυνατόν να οδηγήσει σε ασφυξία λόγω της αδυναμίας της να μεταφέρει οξυγόνο στους περιφερικούς ιστούς. Κατά τη διαδικασία αυτή γίνεται ταυτόχρονη αναγωγή των νιτρικών ριζών σε νιτρώδεις ενώσεις οι οποίες είναι ιδιαίτερα τοξικές.

Η μετατροπή των νιτρικών σε νιτρώδη επιτελείται κυρίως μέσω βακτηρίων στο γαστρεντερικό σύστημα. Κατά συνέπεια ο κίνδυνος μεθαιμοσφαιριναιμίας από την κατάποση νιτρικών εξαρτάται όχι μόνο από την δόση αλλά και από τον τύπο και τον αριθμό των εντερικών βακτηρίων. Στους υγιείς ενήλικες τα διαθέσιμα δεδομένα υποστηρίζουν ότι περίπου 5% της δόσης των νιτρικών ανάγεται από τα βακτήρια στο στόμα. Μετατροπή των νιτρικών σε νιτρώδη γίνεται και στο στομάχι εφόσον το pH των γαστρικών υγρών είναι επαρκώς υψηλό (υψηλότερο του pH 5) ώστε να επιτρέψει την βακτηριακή ανάπτυξη. Οι υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών επηρεάζουν κυρίως τα βρέφη δεδομένου ότι το γαστρεντερικό σύστημα των βρεφών ευνοεί την ανάπτυξη των βακτηρίων που ανάγουν τα νιτρικά σε νιτρώδη. Για το λόγο αυτό τα βρέφη κατατάσσονται στην ομάδα υψηλού κινδύνου όσον αφορά την μεθαιμοσφαιριναιμία.

Παρόλα αυτά, λόγω της αυξημένης ικανότητας του αίματος να μεταφέρει οξυγόνο, επίπεδα μεθαιμοσφαιρίνης έως το 10% δεν συσχετίζονται με κλινικά συμπτώματα. Συγκεντρώσεις μεγαλύτερες του 10% είναι δυνατό να προκαλέσουν ένα μπλε χρώμα στο δέρμα και τα χείλη (κυάνωση), ενώ συγκεντρώσεις άνω του 25% προκαλούν αδυναμία, γρήγορο σφυγμό και ταχύπνοια ενώ θάνατος προκαλείται μόνο όταν τα επίπεδα μεθαιμοσφαιρίνης ξεπεράσουν τα 50-60% (ECETOC, 1988). Επιπλέον, η παρουσία νιτρώδων ενώσεων στο αίμα είναι δυνατόν να προκαλέσουν τον σχηματισμό νιτροσαμινών ενώσεων (RR'N-NO) που είναι υπεύθυνες για την ανάπτυξη καρκίνου σε πολλά όργανα του ανθρώπινου σώματος. Η συσσώρευση των νιτρικών ριζών στον ανθρώπινο οργανισμό είναι δυνατόν να προκαλέσει βλάβες στο θυρεοειδή, ταχυκαρδία και άλλες ηπιότερης μορφής παθολογικές ασθένειες.

3. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ & ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ

Σε παγκόσμια κλίμακα το πρόβλημα του νερού δεν είναι η αφθονία, αλλά η διαθεσιμότητα στον κατάλληλο τόπο και χρόνο και η σωστή διαχείρισή του. Η διαχείριση των υδατικών αποθεμάτων είναι ένα ζήτημα αιχμής το οποίο τα τελευταία χρόνια λόγω της επίδρασης των κλιματικών αλλαγών στο υδατικό ισοζύγιο αλλά και της κακής διαχείρισης των υφιστάμενων αποθεμάτων, επηρεάζει μεγάλο ποσοστό της Κοινωνίας.

Στα πλαίσια της ανάγκης να υπάρξουν «εργαλεία» που θα βοηθήσουν στην διαχείριση των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων αλλά και στα πλαίσια μιας προσπάθειας να αντιστραφούν τα αρνητικά φαινόμενα που δημιουργήθηκαν από την κακοδιαχείριση του φυσικού περιβάλλοντος, οι υδρολογικές μελέτες χρησιμοποιούν όλο και πιο συχνά την μοντελοποίηση της κίνησης των επιφανειακών ή/και των υπόγειων υδάτων αλλά και της μεταφοράς των ρύπων με σκοπό την **πρόβλεψη εξέλιξης του συστήματος** και την **βέλτιστη διαχείρισή του**.

Με την συνεχή ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων και των ταχυτήτων επεξεργασίας δεδομένων τα μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης αποδεικνύονται καθημερινά πολύ χρήσιμα εργαλεία για την κατανόηση της λειτουργίας ενός πραγματικού υδρογεωλογικού συστήματος, τον προσδιορισμό των παραμέτρων του υπόγειου συστήματος αλλά και την πρόβλεψη της μελλοντικής του εξέλιξης, σε ότι αφορά την εξέλιξη της στάθμης αλλά και τις συγκεντρώσεις των υπαρχόντων ρύπων ώστε να προκύψει ο **βέλτιστος δυνατός σχεδιασμός για την διαχείριση των υδατικών αποθεμάτων**. Προκειμένου λοιπόν για την επαρκή διαχείριση των αποθεμάτων αλλά και την πρόβλεψη της εξέλιξης της ποιότητας του υπόγειου υδάτινου δυναμικού, απαιτείται ο σχεδιασμός ενός **τρισδιάστατου μεταβατικού μοντέλου ροής** το οποίο να μπορεί να αποδώσει την χρονικά μεταβαλλόμενη τροφοδοσία του συστήματος σε συνδυασμό με κάποια σενάρια εξέλιξης του συστήματος. Κατά συνέπεια, ο καθορισμός της **χρονικής και χωρικής μεταβλητότητας της επαναπλήρωσης του συστήματος** είναι ιδιαίτερα σημαντικός στα πλαίσια της διαχείρισης των υδατινών πόρων και της προστασίας των αποθεμάτων.

Η παρούσα διατριβή εστιάζει στην **εξέλιξη μιας μεθοδολογίας** για την εφαρμογή ενός **πλήρως μεταβατικού μοντέλου ροής** και μεταφοράς μάζας. Ειδικότερα, σκοπός είναι ο καθορισμός μιας μεθοδολογίας που θα επιτρέπει την χρήση περιορισμένου αριθμού δεδομένων στάθμης στην περιοχή έρευνας για την δημιουργία ενός πλήρως μεταβατικού μοντέλου (full transient model) που θα λαμβάνει υπόψη την χωρικά και χρονικά μεταβαλλόμενη τροφοδοσία ύδατος. Δεύτερος άξονας της παρούσας διατριβής είναι συνακόλουθα η μοντελοποίηση της μεταφοράς μάζας (νιτρικά) στο ανωτέρω μεταβατικό σύστημα για την παρακολούθηση της εξέλιξης της ρύπανσης.

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας αυτής πραγματοποιήθηκε στην παραλιακή ζώνη του Ν. Κορινθίας με βάση ένα συνδυασμό από δεδομένα πυκνής δειγματοληψίας σε μεγάλο αριθμό υδρογεωτρήσεων (50-60 γεωτρήσεις σε έκταση 60Km²), και ικανοποιητικής γνώσης των γεωλογικών και υδρογεωλογικών συνθηκών της περιοχής, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα αξιόπιστο ομοίωμα του υπόγειου υδροφόρου συστήματος και των οριακών συνθηκών του προβλήματος.

Ο προσχωματικός υδροφόρος της παραλιακής ζώνης Κορινθίας βρίσκεται σε μια περιοχή που η κύρια χρήση γης ήταν κυρίως αγροτική και έχει υποστεί σημαντική υποβάθμιση από τις εντατικές αντλήσεις και την ρύπανση με νιτρικά ιόντα. Σήμερα η χρήση της περιοχής έρευνας μεταπίπτει σταδιακά σε οικιστική διατηρώντας όμως αρκετές αγροτικές εκτάσεις. Πηγή των νιτρικών ιόντων θεωρείται ότι είναι οι αγροτικές καλλιέργειες αλλά και η επί μακρόν ανυπαρξία του αποχετευτικού συστήματος που ώθησε κάποιους κατοίκους να χρησιμοποιούν παλαιά πηγάδια ως απορροφητικούς βόθρους.

Οι εργασίες πεδίου (μετρήσεις στάθμης σε επιλεγμένο δίκτυο γεωτρήσεων) είχαν σαν στόχο την βελτίωση και στήριξη του προτεινόμενου υδρογεωλογικού μοντέλου ενώ οι πολυάριθμες δειγματοληψίες – μετρήσεις συγκεντρώσεων ιόντων του αζώτου είχαν σαν στόχο την διερεύνηση της κατανομής και της εξέλιξης της ρύπανσης στο χώρο και στο χρόνο.

Η κύρια έρευνα της παρούσας διατριβής διαρθρώνεται σε δύο βασικά τμήματα, ένα σκέλος με τα δεδομένα πεδίου που καλύπτει τα κεφάλαια 4-7 και ένα σκέλος με την μαθηματική προσομοίωση που καλύπτει τα κεφάλαια 8-11.

Συνοπτικά σκοπός της παρούσας διατριβής είναι :

- Η αξιολόγηση όλων των υφιστάμενων μελετών και στοιχείων ώστε να δημιουργηθεί ένα αξιόπιστο **εννοιολογικό μοντέλο της περιοχής** - ερμηνεία στοιχείων από 108 γεωτρήσεις (υδρογεωτρήσεις και δειγματοληπτικές γεωτρήσεις) και κατασκευή υδρολιθολογικών/γεωλογικών τομών.
- η **δημιουργία ικανής χρονοσειράς στοιχείων στάθμης** με την χρήση εξίσωσης που εξελίχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής προκειμένου να χρησιμοποιηθούν ως οριακές συνθήκες για ένα πλήρες μεταβατικό μοντέλο ροής
- η εφαρμογή του πρωτοκόλλου δημιουργίας ενός **πλήρως μεταβατικού μοντέλου ροής** σε ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο σύστημα ροής όπως είναι ο προσχωματικός υδροφόρος της παραλιακής ζώνης Κορινθίας
- την δημιουργία του μοντέλου μεταφοράς μάζας βάσει της καθαρής (net) ποσότητας του ρύπου που φτάνει στον υδροφόρο ορίζοντα χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις των

νιτρικών ιόντων που πραγματοποιήθηκαν σε δίκτυο γεωτρήσεων σε διαφορετικές χρονικές στιγμές για την στάθμιση του μοντέλου και τέλος την

- αξιολόγηση των αποτελεσμάτων στην κατεύθυνση της διαχείρισης και της προστασίας των υδατικών αποθεμάτων.

3.1 Δομή Της Παρούσας Διατριβής

Η παρούσα Διατριβή έχει διαχωριστεί σε τέσσερις ενότητες οι οποίες επιγραμματικά είναι :

- I. Εισαγωγή - Υδατικοί Πόροι :** Γίνεται μια γενικότερη εισαγωγή στο ζήτημα της Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων όσον αφορά την ποιότητα και την ποσότητα.
- II. Έρευνα Πεδίου :** Παρουσιάζονται όλα τα στοιχεία που προέκυψαν από την έρευνα στον προσχωματικό υδροφόρο της Παραλιακής ζώνης Κορινθίας όπως και η αξιολόγησή τους
- III. Μαθηματική Προσομοίωση :** Αρχικά γίνεται παρουσίαση των εξισώσεων που διέπουν τα μοντέλα ροής και μεταφοράς μάζας ενώ στην συνέχεια βάσει των στοιχείων της έρευνας πεδίου καθορίζεται το εννοιολογικό μοντέλο του υδροφόρου και εισάγονται οι παράμετροι λειτουργίας του συστήματος.

Σε ξεχωριστό κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση της μεθοδολογίας που εξελίχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής προκειμένου για την δημιουργία χρονοσειρών στοιχείων στάθμης οι οποίες εισάγονται ως οριακές συνθήκες στα πλήρως μεταβατικά μοντέλα ροής

Παρουσίαση των Αποτελεσμάτων, Συζήτηση και Συμπεράσματα

IV. Παράρτημα

- a. Μαθηματικές Εξισώσεις Ροής και Μεταφοράς Μάζας*
- b. Κλιματολογικά Στοιχεία*
- c. Αρχείο Καταγραφής των Γεωτρήσεων*
- d. Υδρολιθολογικές / Γεωλογικές Τομές*
- e. Μετρήσεις Στάθμης (02/1998 – 03/2007)*
- f. Πίνακες Αποτελεσμάτων Χημικών Αναλύσεων*

V. Βιβλιογραφία

3.2 Συμβολή της Διατριβής και Πρωτότυπα Σημεία

Αν και τα τελευταία έτη υπάρχει μια συνεχής ανάπτυξη της εφαρμογής των μαθηματικών μοντέλων στα υδρογεωλογικά συστήματα, υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός προκλήσεων στην πρακτική εφαρμογή πολύπλοκων συστημάτων με χωρικά και χρονικά μεταβαλλόμενες παραμέτρους, που πρέπει να αντιμετωπιστούν.

Η κοινή πρακτική της προσομοίωσης μόνιμης ροής (steady state) σε πορώδες μέσο περιλαμβάνει τον ορισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας ως μια ανεξάρτητη μεταβλητή και την τροφοδοσία του συστήματος ως μια εξαρτημένη μεταβλητή που προκύπτει από την βαθμονόμηση του μοντέλου.

Στα συνήθη μεταβατικά μοντέλα ροής (transient state models), που χρησιμοποιούνται προκειμένου να εξεταστούν χρονικά εξαρτώμενες μεταβλητές, η χρονική μεταβλητότητα της στάθμης προκύπτει ως αποτέλεσμα της μεταβολής της αποθηκευτικότητας που προκαλείται λόγω των εκτεταμένων αντλήσεων ενώ η επαναπλήρωση (recharge R) του συστήματος συνήθως είναι χρονικά αμετάβλητη όπως στις προσομοιώσεις μόνιμης ροής (steady state). Αυτές οι προσομοιώσεις που αποκαλούνται από τον (Lubczynski, 2000) ως μερικές μεταβατικές (partially transient) μπορούν να παρέχουν επαρκή αποτελέσματα για την διαχείριση των υπόγειων υδατικών αποθεμάτων, όπως αναφέρει, υπό την προϋπόθεση ότι :

- (α) η ανταπόκριση στην επιβαλλόμενη τάση των αντλήσεων (όπως πχ η μείωση της στάθμης) είναι σημαντικά μεγαλύτερη σε σχέση με την φυσική ανταπόκριση του συστήματος (όπως πχ η φυσική διακύμανση της στάθμης του υπόγειου νερού) και (β) ο ρυθμός των αντλήσεων όπως και η ανταπόκριση μείωσης της στάθμης είναι επαρκώς καταγεγραμμένες χωρικά και χρονικά (Lubczynski and Gurwin, 2005). Με βάση τα συνήθη δεδομένα για τις περισσότερες περιοχές, αυτές οι προϋποθέσεις (κυρίως η δεύτερη) σπανίως είναι δυνατό να πληρούνται εκτός βέβαια από την περίπτωση που η μελέτη της περιοχής εντάσσεται σε κάποιο ερευνητικό πρόγραμμα και υπάρχει επαρκής καταγραφή των αντλήσεων και της διακύμανσης της πιεζομετρικής στάθμης.

Ανάμεσα στα μοντέλα μεταβατικής ροής (transient models) τα πιο αξιόπιστα αλλά και τα λιγότερο μελετηθέντα, πιθανότατα λόγω των αυξημένων απαιτήσεων σε δεδομένα, είναι τα μοντέλα με χρονικά μεταβαλλόμενη τροφοδοσία (R) και χρονικά μεταβαλλόμενη Εξατμισοδιαπνοή (ETg) που αποκαλούνται και **‘πλήρως μεταβατικά μοντέλα’** – ‘full transient models’ (Lubczynski, 2000). Σε αυτά τα μοντέλα η χρονική μεταβλητότητα της στάθμης εξαρτάται όχι μόνο από την χρονική μεταβλητότητα της αποθηκευτικότητας αλλά και από την χρονική μεταβλητότητα της ροής στο σύστημα (τροφοδοσία - R). Υπό αυτό το πρίσμα είναι εξαιρετικά σημαντικό να προσδιορισθεί η χρονική και χωρική μεταβλητότητα της επαναπλήρωσης του υδροφόρου ορίζοντα.

Υπάρχει πλήθος εργασιών με διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού του ρυθμού τροφοδοσίας ενός υδροφόρου (recharge R) σε διαφορετικές χωρικές και χρονικές κλίμακες οι οποίες ποικίλουν σε πολυπλοκότητα και δαπάνη. Μία συλλογή τέτοιων εργασιών παρουσιάστηκε και στο τεύχος (10) του Hydrogeology Journal (2002) που καλύπτουν ένα αρκετά ευρύ φάσμα των ζητημάτων που άπτονται της τροφοδοσίας των υπόγειων υδάτων. Σύμφωνα με τους (Healy and Cook, 2002) με βάση τις συνθήκες που επικρατούν ακόμη και σήμερα στα επιστημονικά δεδομένα, είναι εξαιρετικά δύσκολο να γίνει εκτίμηση της ακρίβειας που μπορεί να παρέχει η κάθε μέθοδος. Για το λόγο αυτό θεωρούν ότι είναι εξαιρετικά επικοινωνιακό να εφαρμόζεται ένας αριθμός μεθόδων εκτίμησης της τροφοδοσίας ελπίζοντας σε συνέπεια στα αποτελέσματα αν και η συνέπεια από μόνη της δεν μπορεί να θεωρηθεί ως ένδειξη της ακρίβειας.

Οι τεχνικές εκτίμησης της τροφοδοσίας που βασίζονται στην διακύμανση της στάθμης του υπόγειου νερού ανήκουν στις πλέον εφαρμοσμένες μεθόδους, πιθανότατα αφενός λόγω της επάρκειας σε δεδομένα στάθμης αλλά και αφετέρου στην απλότητα της εκτίμησης του ρυθμού τροφοδοσίας του υδροφόρου που βασίζεται στην χωρική ή την χρονική διακύμανση της στάθμης. Η ανάλυση της διακύμανσης της στάθμης (WTF – Water Table Fluctuation) είναι ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο στην εκτίμηση του μεγέθους της βραχυχρόνιας ή και της μακροχρόνιας μεταβολής της τροφοδοσίας και έχει εφαρμοστεί από πολλούς μελετητές υπό διαφορετικές κλιματικές συνθήκες (Gerhart, 1986; Hall and Risser, 1993; Healy and Cook, 2002). Η μέθοδος αυτή βασίζεται στον συλλογισμό ότι η αύξηση της στάθμης σε έναν ελεύθερο υδροφόρο οφείλεται στην τροφοδοσία που φθάνει στον υδατικό ορίζοντα.

Ο σκοπός της συνήθους WTF μεθόδου είναι η ποσοτικοποίηση της κάθε μεμονωμένης αύξησης της στάθμης έτσι ώστε να υπολογισθεί τελικά η συνολική τροφοδοσία του υδροφόρου για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ή εφόσον η μέθοδος εφαρμοστεί σε μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα (εποχιακά ή ετήσια) να γίνει εκτίμηση της 'καθαρής τροφοδοσίας' (net recharge) του υδροφόρου συστήματος. Το πιο βασικό προσόν της μεθόδου είναι η απλότητα και η ευκολία εφαρμογής. Λόγω του ότι η μετρούμενη στάθμη σε μια γεώτρηση παρατήρησης είναι αντιπροσωπευτική μιας περιοχής που καλύπτει μια ακτίνα αρκετών μέτρων, το αποτέλεσμα της μεθόδου WTF μπορεί να θεωρηθεί περισσότερο ως ένας συνδυασμός πολλών παραγόντων και λιγότερο ως μια σημειακή μέτρηση.

Βασίζόμενοι λοιπόν στην υπόθεση ότι η **διακύμανση της πιεζομετρικής στάθμης του υδροφόρου** είναι ένδειξη της τροφοδοσίας που εφαρμόζεται στην ευρύτερη περιοχή, η παρούσα διατριβή διερευνά την χρήση σειράς μετρήσεων στάθμης γεωτρήσεων που βρίσκονται στα όρια της περιοχής έρευνας προκειμένου να κατασκευασθεί μια αντιπροσωπευτική **χρονοσειρά μετρήσεων** η οποία θα χρησιμοποιηθεί ως **οριακή συνθήκη** σε ένα **πλήρως μεταβατικό μοντέλο ροής** το οποίο θα μπορεί να

χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια διαχείρισης και προστασίας των υδατικών πόρων της παραλιακής ζώνης Κορινθίας.

Η διακύμανση της πιεζομετρικής στάθμης (υδρολογική χρονοσειρά) είναι ένα φυσικό φαινόμενο που παρουσιάζει αταξία αλλά με συνθήκες που υποδηλώνουν ότι υπάρχει μια υποκείμενη δομή - περιοδικότητα. Με βάση τις παρατηρήσεις που έγιναν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αλλά και με πειραματική εφαρμογή προέκυψε ότι η μορφή της περιοδικότητας που εμφανίζεται στις μετρήσεις αυτές μπορεί να αποδοθεί με μια σειρά Fourier της μορφής :

$$F(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n \cos\left(\frac{2\pi}{T_n} t + \phi_n\right) + B_n \sin\left(\frac{2\pi}{T_n} t + \phi_n\right) \right)$$

η οποία που αντιπροσωπεύει ένα άθροισμα απείρων όρων.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν θα γίνει μια εκτενής παρουσίαση των δεδομένων πεδίου, την λειτουργία της εξίσωσης αλλά και των αποτελεσμάτων του μοντέλου.

Πρωτότυπη εργασία

- Ανάλυση της γεωλογίας ενός πολύπλοκου υδροφόρου συστήματος. Η αξιολόγηση όλων των υφιστάμενων μελετών και στοιχείων ώστε να δημιουργηθεί ένα αξιόπιστο εννοιολογικό μοντέλο της περιοχής (ερμηνεία στοιχείων από 108 γεωτρήσεις που εκτελέσθηκαν στην παραλιακή ζώνη Κορινθίας και **κατασκευή 20 πρωτότυπων υδρολιθολογικών τομών** αντιπροσωπευτικές για την περιοχή)
- Συλλογή στοιχείων πεδίου (καταγραφή σημείων άντλησης -650 γεωτρήσεις και πηγάδια, καταγραφή διακύμανσης στάθμης σε δίκτυο 40 γεωτρήσεων για χρονικό διάστημα 4 ετών, δειγματοληψία νερού σε δίκτυο 60 γεωτρήσεων για τον προσδιορισμό συγκέντρωσης ιόντων NO₃, NO₂ και NH₄).
- **Δημιουργία εξίσωσης προσομοίωσης της διακύμανσης στάθμης** η οποία εφαρμόσθηκε σε επιλεγμένες γεωτρήσεις με σκοπό την χρήση των στοιχείων αυτών ως οριακές συνθήκες για την δημιουργία ενός πλήρως μεταβατικού μοντέλου ροής
- Συμβολή στην **κατανόηση της λειτουργίας** της επαναπλήρωσης του υδροφόρου συστήματος - συσχέτιση με την εποχιακή κύμανση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα
- Δημιουργία τρισδιάστατου αριθμητικού μοντέλου **μεγάλης ανάλυσης** (200x200x4layers) με διαστάσεις κυττάρου **30mx75m** με σκοπό να ελεγχθεί η ανταπόκριση του συστήματος στις εισαγωγή των ανωτέρω οριακών συνθηκών

II. ΕΡΕΥΝΑ ΠΕΔΙΟΥ

4. ΘΕΣΗ & ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ

Η περιοχή έρευνας όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5, καλύπτει το μεγαλύτερο τμήμα της Βόρειας παραλιακής ζώνης του Νομού Κορινθίας. Γεωγραφικά, οριοθετείται, από τον Κορινθιακό Κόλπο προς τον Βορρά έως την ρηξιγενή ζώνη που αναπτύσσεται κατά μήκος του άξονα της Νέας Εθνικής Οδού προς τον Νότο, και καλύπτει ένα εύρος από τον Δήμο Λεχαιού (Αρχαίο Λιμάνι) έως Δυτικά, τον Ασωπό ποταμό. Το ανάγλυφο σχεδόν σε όλη την έκταση της περιοχής μελέτης είναι πολύ ήπιο, χαρακτηριζόμενο σαν πεδινό, έως το Νότιο όριο όπου εμφανίζονται κάποιες λοφώδεις εξάρσεις και μεταβάλλεται σε ημιορεινό με αυξημένα υψόμετρα και τοπογραφικές κλίσεις.



Εικόνα 5 : Δορυφορική εικόνα της ευρύτερης περιοχής μελέτης

Διοικητικά η περιοχή, εντάσσεται στα όρια του Νομού Κορινθίας περιλαμβάνοντας τους ακόλουθους Δήμους και πληθυσμούς κατά την απογραφή του 2001:

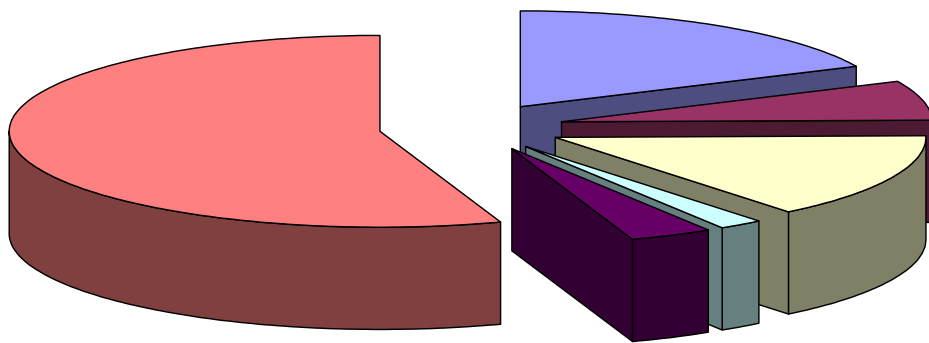
- Δήμος Άσσου - Λεχαιού με πληθυσμό 9.850 άτομα
- Δήμος Βέλου με πληθυσμό 8.211 άτομα και τον
- Δήμο Βόχας με πληθυσμό 10.112 άτομα

Ο συνολικός μόνιμος πληθυσμός της περιοχής σύμφωνα με την απογραφή του 2001 υπολογίζεται ότι είναι 28173 άτομα εκτός χωρίς να υπολογίζεται το εργατικό δυναμικό που απασχολούνται στις καλλιέργειες και αλλάζει τόπο κατοικίας συναρτήσει της προσφοράς

εργασίας. Κατά τους θερινούς μήνες παρατηρείται ιδιαίτερα σημαντική αύξηση του πληθυσμού της περιοχής καθώς λόγω της κοντινής απόστασης με την Αθήνα χρησιμοποιείται σαν τουριστικό θέρετρο.

Κύρια απασχόληση του ενεργού τμήματος του πληθυσμού είναι ο Πρωτογενής τομέας που συνεχώς αναπτύσσεται αλλά προς την κατεύθυνση των αρδευόμενων καλλιεργειών

Οικονομικώς Ενεργός, Μη Ενεργός Πληθυσμός και Απασχολούμενοι



■ Πρωτογενής Τομέας ■ Δευτερογενής Τομέας ■ Τριτογενής Τομέας ■ Δε δήλωσαν κλαδο οικονομικής δραστηριότητας ■ Ανεργοί ■ Οικονομικώς μη ενεργοί

Εικόνα 6 : Στατιστικά στοιχεία απασχόλησης του συνολικού πληθυσμού της Παραλιακής ζώνης (Δήμοι Άσσου-Λεχαιίου, Βέλου και Βόχας)

4.1 Χρήσεις Γης - Στοιχεία Υφιστάμενης Κατάστασης

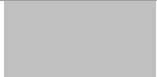
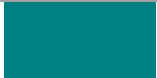
Το τυπικό μεσογειακό κλίμα της περιοχής διαχρονικά προσφέρει χαμηλό βροχομετρικό ύψος, τις τελευταίες δεκαετίες όμως η εκρηκτική αύξηση των καλλιεργούμενων αρδευόμενων εκτάσεων και η αύξηση του πληθυσμού έχουν εντείνει το πρόβλημα της λειψυδρίας καθώς η κατανάλωση νερού σε μια περιοχή λειτουργεί συνήθως και ως δείκτης ευημερίας.

Οι δήμοι Άσσου - Λεχαιίου και Βόχας αντιμετωπίζουν έντονα το πρόβλημα της λειψυδρίας (αφού πρώτα αυξήθηκαν υπέρμετρα οι πληθυσμοί τους) και οι καλλιέργειες αντιμετωπίζουν πρόβλημα στην άρδευση (αφού πρώτα διπλασιάστηκαν οι αρδευόμενες εκτάσεις).

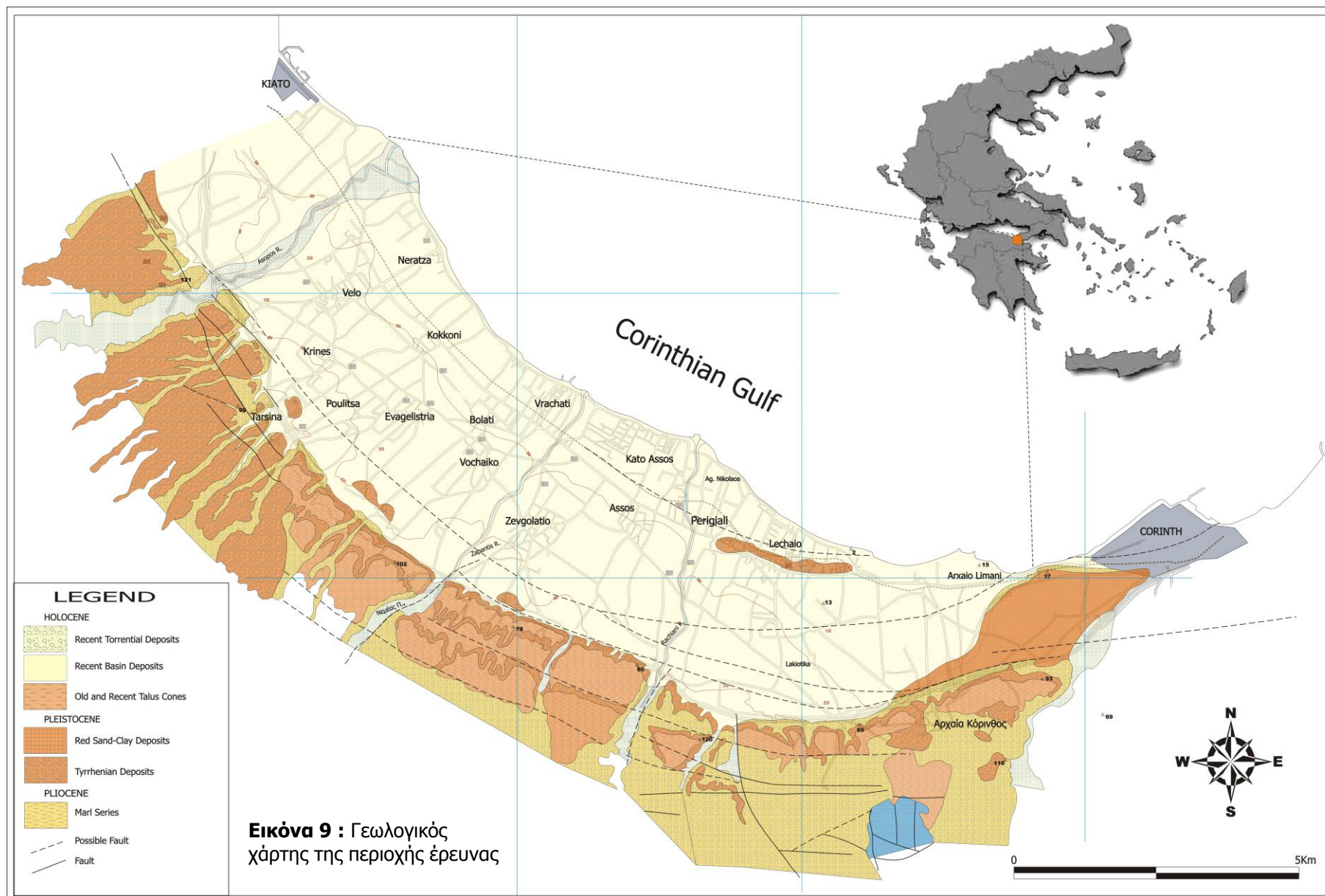
Στην άρδευση της παραλιακής ζώνης επικρατεί θα μπορούσαμε να πούμε πλήρης αναρχία, όπου ο αριθμός των παράνομων γεωτρήσεων είναι άγνωστος, η άρδευση επεκτείνεται ψηλότερα στην ημιορεινή ζώνη και το εμπόριο νερού συντηρεί ένα οικονομικό πλέγμα που έχει συμφέρον να συνεχίζεται αυτή η κατάσταση καθώς το παράδοξο και η μοναδικότητα της περιοχής είναι η χρέωση του αρδευτικού νερού με την ώρα και όχι με το κυβικό όπως γίνεται σε άλλες περιοχές της Ελλάδας.

Παρά το γεγονός ότι η κατασκευή του φράγματος θα λύσει αρκετά προβλήματα, υπάρχει και αντίλογος. Ο αντίλογος βασίζεται στην υφιστάμενη τάση της μείωσης της καλλιεργήσιμης γης και η αύξηση της οικιστικής ανάπτυξης που τείνει να ενώσει την Κόρινθο με το Κιάτο. Υπό αυτό το πρίσμα η πολιτεία οφείλει να δώσει προτεραιότητα στην καλύτερη διαχείριση των υφιστάμενων πόρων παρά να προχωρήσει στην κατασκευή ενός ακόμη πολυδάπανου έργου.

38

1.1.2.		Ασυνεχές αστικό φάσμα	Το μεγαλύτερο μέρος του εδάφους καλύπτεται από αστικές δομές -το 50 έως και 80% της συνολικής επιφάνειας. Τα κτίρια, οι δρόμοι και οι τεχνητά καλυπτόμενες περιοχές (άσφαλτος) συνδέονται με περιοχές χωρίς κάλυψη, οι οποίες καταλαμβάνουν ασυνεχείς αλλά σημαντικές επιφάνειες.
1.2.1.		Βιομηχανικές ή εμπορικές μονάδες	Οι τεχνητά καλυπτόμενες περιοχές (με τσιμέντο, ή άσφαλτο) χωρίς βλάστηση καταλαμβάνουν την μεγαλύτερη μέρος της περιοχής, η οποία περιέχει επίσης κτίρια ή/και βλάστηση. Χαρακτηριστικά, η σύσταση είναι ετερογενής (μίγμα μεγάλων κτηρίων, υπαίθριοι σταθμοί αυτοκινήτων, υπόστεγα, κ.λπ.). Βιομηχανικές ή εμπορικές μονάδες που βρίσκονται σε συνεχές ή σε ασυνεχές αστικό ύφασμα λαμβάνονται υπόψη μόνο εάν αυτοί είναι σαφώς διακριτός από τις κατοικήσιμες περιοχές.
2.2.1.		Αμπελώνες	Περιοχές με καλλιέργειες αμπέλου που εμφανίζουν χαρακτηριστική δομή
2.2.2.		Περιβόλια με Οπωροφόρα δέντρα	Περιβόλια με οπωροφόρα δέντρα: με ενιαία ή μικτά είδη δένδρων τα οπωροφόρα δέντρα συνδέονται με φυτο-καλυμμένες επιφάνειες. Οπωρώνες με έκταση λιγότερη των 25 εκταρίων που περιβάλλονται από αγροτική γη (λιβάδι ή καλλιεργήσιμο έδαφος) συμπεριλαμβάνονται στο στοιχείο 2.4.2 (σύνθετα σχέδια καλλιέργειας).
2.2.3.		Ελαιώνες	Περιοχές που με εκτεταμένη καλλιέργεια Ελιάς
2.4.2.		Σύνθετα σχέδια καλλιέργειας	Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει το σύνολο των τμημάτων με διαφορετικές ετήσιες καλλιέργειες, των λιβαδιών ή/και των μόνιμων καλλιεργειών υπό τον όρο ότι καμία από αυτές τις τρεις κατηγορίες δεν καλύπτει επιφάνεια μεγαλύτερης των 25 εκταρίων. Οι κήποι πόλεων συμπεριλαμβάνονται σε αυτή την κατηγορία.
2.4.3		Έδαφος που καταλαμβάνεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές περιοχές φυσικής βλάστησης	Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει περιοχές που καταλαμβάνονται κυρίως από γεωργικές εκτάσεις (μεταξύ 25 και 75% της συνολικής επιφάνειας) ενώ μεσολαβούν και φυσικοί βοσκότοποι υπό την προϋπόθεση ότι καμία από αυτές τις κατηγορίες δεν καλύπτει επιφάνεια μεγαλύτερης των 25 εκταρίων

Εικόνα 8 : Πίνακας με ερμηνεία των χρήσεων Γης της Εικόνα 7



5. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

5.1 Γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής

Προκειμένου για την πληρέστερη απεικόνιση και κατανόηση της δομής της περιοχής έρευνας, δημιουργήθηκε ο χάρτης της Εικόνα 9 από τον συνδυασμό των Γεωλογικών χαρτών του ΙΓΜΕ και της ΓΥΣ κλίμακας 1:50000 (φύλλα «Κόρινθος» και «Νεμέα»), ο οποίος χρησιμοποιήθηκε και ως υπόβαθρο της προσομοίωσης που έγινε με το πρόγραμμα Visual Modflow.

Όπως φαίνεται και από το γεωλογικό χάρτη της Εικόνα 9 στα όρια της περιοχής που μελετήθηκε αναπτύσσονται αποκλειστικά μεταλικά ιζήματα, αποτελώντας στην ουσία την προς την ξηρά προέκταση της λεκάνης του Κορινθιακού Κόλπου, αφού δεν αντιπροσωπεύουν παρά τα παλαιότερης ηλικίας και θαλάσσιας κυρίως φάσης, ιζήματα που έχουν αναδυθεί μέσα στα πλαίσια της νεοτεκτονικής εξέλιξης της Κορινθιακής τάφρου.

Σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη έκδοσης ΙΓΜΕ της περιοχής, η στρωματογραφία παρουσιάζει μια σχετικά απλή δομή από οριζόντια ή περίπου οριζόντια στρώματα με μικροασυμφωνίες ή μεταβάσεις που διαταράσσουν την ιδανική γεωμετρική εικόνα (Μπορνόβας *et al.*, 1972). Ωστόσο, αυτή η στρωματογραφική εικόνα απέχει πολύ από την πραγματικότητα και αυτό διότι σύμφωνα με τα υποθαλάσσια δεδομένα της τελευταίας εικοσαετίας όπως προκύπτει και από την διεθνή βιβλιογραφία (Coleman, 1976; Baldridge *et al.*, 1984) αλλά και πιο πρόσφατα δεδομένα από τον υποθαλάσσιο χώρο του Κορινθιακού (Brooks and Ferentinos, 1984; Ferentinos *et al.*, 1988; Ori, 1989; Dart *et al.*, 1994; Armijo *et al.*, 1996; Roberts and Koukouvelas, 1996) τα ενεργά περιθώρια των μεταλικών λεκανών χαρακτηρίζονται από κάποιους ιδιαίτερους γεωδυναμικούς χαρακτήρες που προϋποθέτουν σύνθετα περιβάλλοντα απόθεσης δημιουργώντας μεγάλη ποικιλία από φάσεις με έντονες πλευρικές και κατακόρυφες μεταβάσεις.

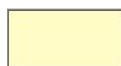
Προκειμένου λοιπόν να γίνει κατανοητή η γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής, σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μία συνοπτική περιγραφή της σύστασης των σχηματισμών όπως αυτοί περιγράφονται στους Γεωλογικούς χάρτες του ΙΓΜΕ, κλίμακας 1:50000 που έχουν εκπονηθεί από τους (Μπορνόβας *et al.*, 1972) και αντιστοιχούν στον γεωλογικό υπόβαθρο του χάρτη της Εικόνα 9. Η κατάταξη των ιζημάτων που ακολουθεί πραγματοποιείται βάσει της ηλικίας τους, από τους νεότερους σχηματισμούς προς τους παλαιότερους :

ΟΛΟΚΑΙΝΟ

Σύγχρονοι Παράκτιοι Σχηματισμοί : Αποτελούνται κυρίως από χαλαρή και ασύνδετη άμμο και κροκάλες ενώ κατά θέσεις τα υλικά αυτά είναι καλά συγκολλημένα σχηματίζοντας ψηφитоπαγείς αιγιαλούς. Εμφανίζονται σε όλη την παραλιακή έκταση από το Λέχαιο έως τις εκβολές του Ασωπού σε μία ζώνη πλάτους 5-10 μέτρων. Δεδομένου ότι η έκταση του σχηματισμού σε πλάτος είναι μικρή, αναλόγως της κλίμακας του χάρτη, αυτή απεικονίζεται ενιαία με τα προσχωματικά υλικά της πεδινής ζώνης.



Σύγχρονες Αλλουβιακές αποθέσεις : Πρόκειται για αποθέσεις που αναπτύσσονται εντός και εκτός της κοίτης των κυριότερων χειμάρρων της περιοχής. Αποτελούνται από ασύνδετα κυρίως υλικά τα οποία περιλαμβάνουν άμμους, κροκάλες και λατύπες.

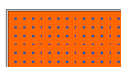


Προσχωματικά υλικά πεδινής ζώνης : Πρόκειται για υλικά αποσάθρωσης πετρωμάτων των γειτονικών σχηματισμών. Είναι χαλαρά έως ελαφρώς συνδεδεμένα υλικά τα οποία αποτελούνται από άμμους, αργίλους, πηλούς και κροκάλες σε μίγματα ποικίλων αναλογιών. Καλύπτουν σχεδόν όλη την περιοχή μελέτης από το Λέχαιο έως το Κιάτο σε μία ζώνη που εκτείνεται από την παραλία έως τον άξονα της νέας Εθνικής Οδού.



Ελουβιακοί Σχηματισμοί : Αποτελούνται κυρίως από πηλούς και ψαμμούχους πηλούς κόκκινου χρώματος που προέρχονται από την εξαλλοίωση ψαμμούχων μαργών του Πλειοκαίνου ή του Τυρρηνίου. Εμφανίζονται κατά μήκος της γραμμής που ορίζει η επιφανειακή εξάπλωση των Τυρρηνίων αναβαθμίδων και των πλειοκαινικών σχηματισμών καλύπτοντας τις επιφάνειες επιπέδωσης που δημιουργούνται στην ζώνη Νότια των αναβαθμίδων.

ΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΟ



Ερυθρά Αργιλομιγής Άμμος : Υπέρκειται των Τυρρηνίων σχηματισμών και πιθανά πρόκειται για παλαιές παράκτιες αποθέσεις διότι περιέχει μικρά θαλάσσια απολιθώματα. Η επιφανειακή του αποσάθρωση δημιουργεί ελεύθερη άμμο. Έχει πάχος 5-10 μέτρα και αναπτύσσεται στο Ανατολικό άκρο της περιοχής μελέτης.



Τυρρήνιες αναβαθμίδες : Πρόκειται για συνεκτικές αποθέσεις, κυρίως θαλάσσιες και παράκτιες, αποτελούμενες από κροκάλες, λατύπες, άμμους και ψηφίδες με κατά τόπους ενδιαστρώσεις μαργών. Κατά περιοχές, καλύπτονται από τους Ελουβιακούς σχηματισμούς αλλά και από προσχώσεις σημαντικού πάχους στην παραλιακή ζώνη. Το πάχος τους είναι από 5 έως 10 μέτρα.

Οι Τυρρήνιοι σχηματισμοί συναντώνται σε αναβαθμίδες κατά μήκος ζωνών με διεύθυνση Α-Δ, Νότια του άξονα την Νέας Εθνικής Οδού Κορίνθου - Πατρών, μορφολογία που αποδίδεται

στο Νεοτεκτονικό σύστημα κλιμακωτών ρηγμάτων με γενική διεύθυνση Α-Δ το οποίο προς τα Δυτικά μεταπίπτει σε διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ.

ΠΛΕΙΟΚΑΙΝΟ



Μάργες : Υποκίτρινες έως λευκές και ενίοτε ανοικτότεφρες ή κυανίζουσες μάργες, με παρεμβολές κατά περιοχές ψαμμιτών, ψηφίτοπαγών, κροκαλοπαγών και μαργαϊκών ασβεστολίθων. Πρόκειται για υφάλμυρες έως λιμναίες αποθέσεις με επικράτηση της λιμναίας φάσης στα ανώτερα τμήματα της σειράς. Συναντώνται σε ολόκληρη την λοφώδη περιοχή του χώρου έρευνας με καθολική επικράτηση των μαργών οι οποίες επεκτεινόμενες προς τα Βόρεια, τον Κορινθιακό Κόλπο, αποτελούν το υπόβαθρο των προσχωματικών υλικών όπως άλλωστε και των άλλων νεότερων αποθέσεων της παραλιακής πεδινής ζώνης μεταξύ Κορίνθου και Κιάτου.

5.2 Νεοτεκτονική - Λιθολογία

Προκειμένου να γίνει κατανοητή η εξέλιξη της νεότερης στρωματογραφικής δομής της περιοχής μελέτης, σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια πολύ συνοπτική καταγραφή του νεοτεκτονικού καθεστώτος της ευρύτερης περιοχής.

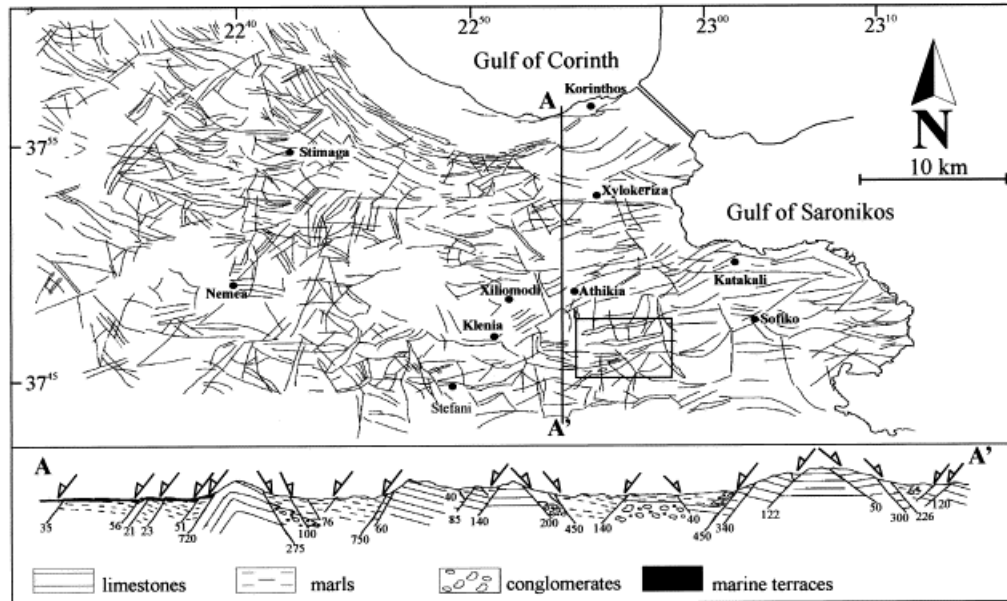
Ο Κορινθιακός Κόλπος ήδη από πολύ νωρίς προσέλκυσε το ενδιαφέρον των ερευνητών καθώς είναι η πιο ενεργή σεισμική ζώνη της Ευρώπης και η ταχύτερα διευρυνόμενη περιοχή του ηπειρωτικού φλοιού με επέκταση έως και 1,5cm/year κατά την διεύθυνση Β-Ν και περισσότερο από 1mm/year ανύψωση του Νοτίου περιθωρίου του κόλπου (Billiris *et al.*, 1991; Collier *et al.*, 1992).

Την εξέλιξη του γεωτεκτονικού καθεστώτος της περιοχής επηρέασε η επέκταση του Αιγαίου Πελάγους, μέσω μιας σειράς κανονικών ρηγμάτων μεγάλης κλίμακας, η οποία θεωρείται ότι άρχισε κατά την περίοδο του Μειόκαινου (Le Pichon and Angelier, 1979; Armijo *et al.*, 1996). Γενετικά, η επέκταση αυτή σχετίζεται αφενός με την καταβύθιση του φλοιού της Ανατολικής Μεσογείου κάτω από το Ελληνικό Ηφαιστειακό τόξο και αφετέρου με την κίνηση του Βορείου μεταθετικού ρήγματος της Ανατολίας (NAF-North Anatolian Transfer Fault) (Doutsos and Kokkalas, 2001). Αυτή η επέκταση δεν περιορίζεται σε μία στενή ζώνη πίσω από το τόξο αλλά επηρεάζει το σύνολο του Αιγαίου πελάγους, την ηπειρωτική Ελλάδα και την Τουρκία (Le Pichon and Angelier, 1979) ενώ σύμφωνα με γεωδαιτικές και τεκτονικές μελέτες συνεχίζεται έως και σήμερα (Billiris *et al.*, 1991; Doutsos and Kokkalas, 2001).

Το ευρύτερο εφελκυστικό πεδίο του Αιγαίου επηρεάζει και την λεκάνη του Κορινθιακού η οποία οριοθετείται από κανονικά ρήγματα γενικής διεύθυνσης Α-Δ. Είναι μία τάφρος, επιμήκης καταβύθιση του φλοιού η οποία διαχωρίζει την Πελοπόννησο από την υπόλοιπη ηπειρωτική Ελλάδα, με διεύθυνση Β100°Α και μήκος 105Km. Το κύριο χαρακτηριστικό

γενικότερα της νεοτεκτονικής μακροδομής της περιοχής είναι η ύπαρξη συστήματος κανονικών ρηγμάτων διεύθυνσης Α-Δ τα οποία προς τα Δυτικά, σταδιακά αλλάζουν διεύθυνση και γίνονται ΒΔ-ΝΑ σχηματίζοντας μία αμφιθεατρική μορφή.

Η νεοτεκτονική εξέλιξη της περιοχής με την δημιουργία, ανάπτυξη και μετανάστευση του συστήματος των ρηγμάτων που οριοθετούν την περιοχή αλλά και οι μεταβολές του επιπέδου της θάλασσας, έχουν αποτυπωθεί στις φάσεις, πάχος και ηλικία των Πλειο-Πλειστοκαινικών ιζημάτων που πληρώνουν την λεκάνη ιζηματογένεσης.



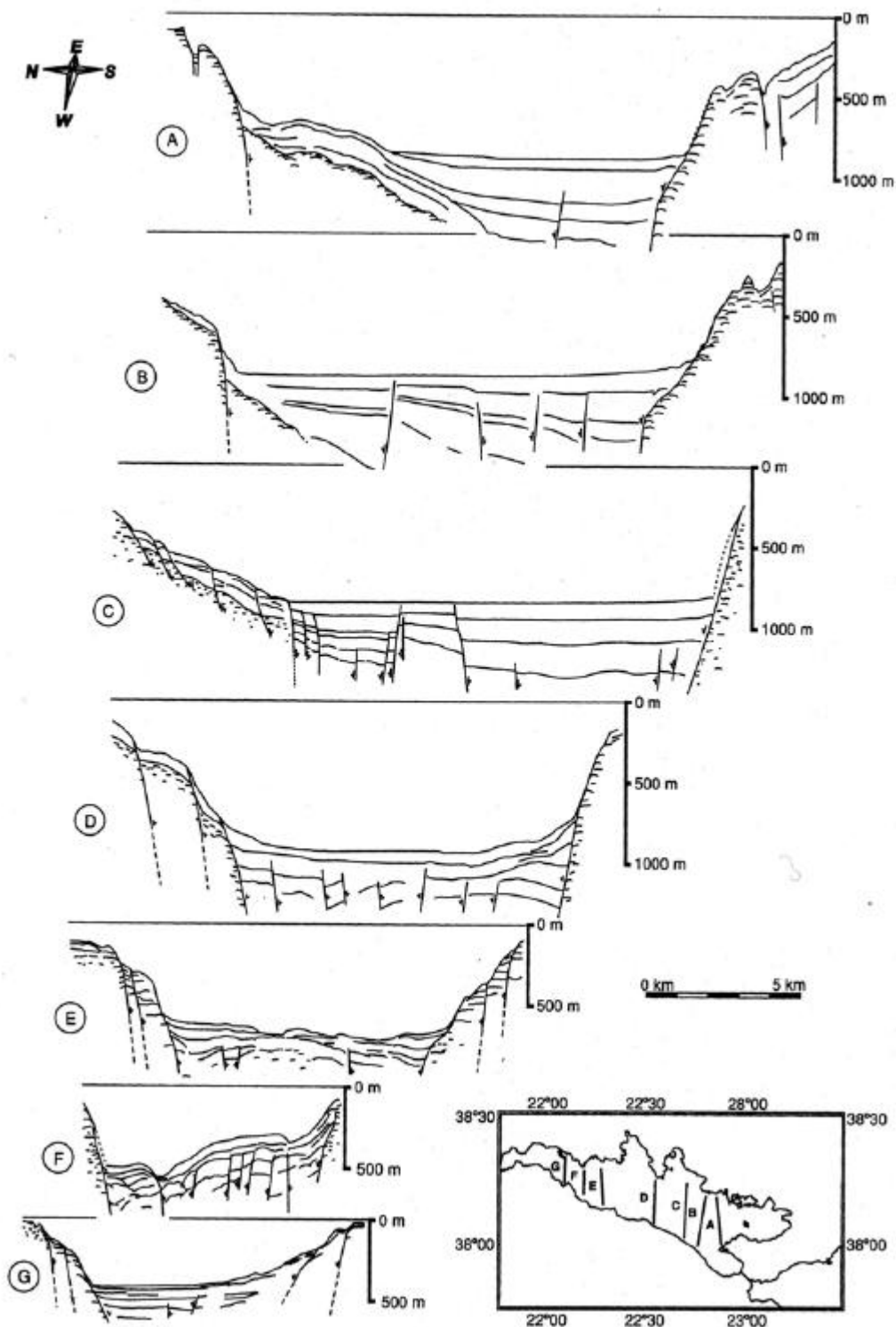
Εικόνα 10 : Εικόνα των ρηγμάτων στο Νότιο περιθώριο της περιοχής μελέτης (Κουκουνέλας *et al.*, 1999)

Λόγω του μικρού βάθους των στενών Ρίου - Αντιρρίου όπου σχηματίζεται ένας ύφαλος σε βάθος περίπου 60m, και τις συνεχείς διακυμάνσεις του επιπέδου της θάλασσας από τις περιοδικές αυξήσεις και μειώσεις των παγετώνων κατά το Τεταρτογενές, ο κόλπος περιοδικά μετασχηματίζονταν από λίμνη σε ανοικτή θάλασσα και αντιστρόφως (Moretti *et al.*, 2003) με αποτέλεσμα να έχουμε εναλλαγές φάσεων των αποθέσεων.

Κατά το τεταρτογενές, η ιζηματογένεση γενικότερα στον Κορινθιακό κόλπο ελέγχονταν από δύο κυρίως παράγοντες: την θέση της θάλασσας σε σχέση με τον ύφαλο μεταξύ Ρίου - Αντιρρίου και της εισροή του ιζήματος από τα ποτάμια. Όταν το επίπεδο της θάλασσας έπεφτε κάτω από το επίπεδο του υφάλου που σήμερα είναι περίπου στα 60m, ο κόλπος μετασχηματίζονταν σε λίμνη ενώ αυξανόμενου του επιπέδου, μετασχηματίζονταν αρχικά σε θαλάσσια περιοχή με υψηλά ποσοστά γλυκού νερού ώσπου τελικά επικρατούσαν κανονικές συνθήκες ανοικτής θάλασσας (Perissoratis *et al.*, 2000).

Ο Ori (1989) διαχωρίζει την εξέλιξη του Κορινθιακού κόλπου σε δύο φάσεις. Κατά την πρώτη φάση η ιζηματογενής λεκάνη είχε πληρωθεί αρχικά με ηπειρωτικά ιζήματα λιμναίας και λιμνοθαλάσσιας φάσης μάργες αργίλους και άμμους που εναλλάσσονταν με θαλάσσιας φάσης

ιζήματα που αποτέθηκαν ασύμφωνα στο ανθρακικό υπόβαθρο Μεσοζωικής ηλικίας.



Εικόνα 11 : Τομές στον Κορινθιακό Κόλπο που απεικονίζουν την μεταβολή στην δομική γεωμετρία. Οι τομές B και C είναι οι πλέον αντιπροσωπευτικές για την περιοχή μελέτης. Από (Stefatos *et al.*, 2002).

Κατά την δεύτερη φάση, ο Κορινθιακός απέκτησε το σημερινό προσανατολισμό ενώ η ιζηματογένεση χαρακτηρίζονταν από τις δελταϊκές αποθέσεις τύπου Gilbert (Gilbert type fan delta) και από τουρβιδίτες μέσα στον ίδιο τον κόλπο.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για πολλούς μελετητές (Armijo *et al.*, 1996; Westaway, 2002) παρουσιάζουν οι αναβαθμοί (ταράτσες) κροκαλοπαγών που εντοπίζονται στο Νότιο περιθώριο του κόλπου και αποτέθηκαν επάνω στις μεγάλου πάχους Κορινθιακές μάργες (λιμναίας έως υφάλμυρης φάσης, Πλειο-Πλειστοκαινικής ηλικίας) καθώς η εξέλιξή τους θεωρείται και το κλειδί για τους μηχανισμούς Νεοτεκτονικής εξέλιξης της ευρύτερης περιοχής. Οι Πλειστοκαινικές αναβαθμίδες κροκαλοπαγών διατάσσονται παράλληλα με την νότια ακτογραμμή του σημερινού κορινθιακού κόλπου σε μια γενική διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ παρουσιάζοντας ένα αμφιθεατρικό σχήμα.

Κατά τις εκσκαφές για την κατασκευή της διώρυγας της Κορίνθου, οι ταράτσες αυτές αρχικά, βάσει χαρακτηριστικών απολιθωμάτων, χαρακτηρίστηκαν από τον Deperet το 1913 συνολικά ως Τυρρήνιας ηλικίας. Αργότερα το 1977 ο Sebrier περιγράφοντας την στρωματογραφία έξι αναβαθμών κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα διαφορετικά επίπεδα αντιστοιχούν και σε διαφορετικά περιβάλλοντα απόθεσης, διαφορετικής ηλικίας. Παρατήρησε δε, ότι αντιστοιχούν σε κύκλους με έναρξη της ιζηματογένεσης κατά την επίκληση της θάλασσας και απόθεση με γωνιώδη ασυμφωνία στις Κορινθιακές μάργες που ακολουθούνταν από απόσυρση της θάλασσας. Δεδομένου ότι δεν μπορούσε να καθορίσει σαφή ίχνη ρηγμάτων μεταξύ των επιπέδων απέδωσε την ύπαρξη των ταρασών στις ευστατικές κινήσεις της θάλασσας κατά το Πλειστόκαινο. Σήμερα, είναι γενικά αποδεκτό ότι οι ταράτσες των κροκαλοπαγών οφείλουν την ύπαρξή τους στην παγκόσμια μεταβολή του επιπέδου της θάλασσας κατά το Τεταρτογενές σε συνδυασμό με τον ρυθμό της τεκτονικής ανύψωσης της περιοχής (Valensise and Ward, 1991).

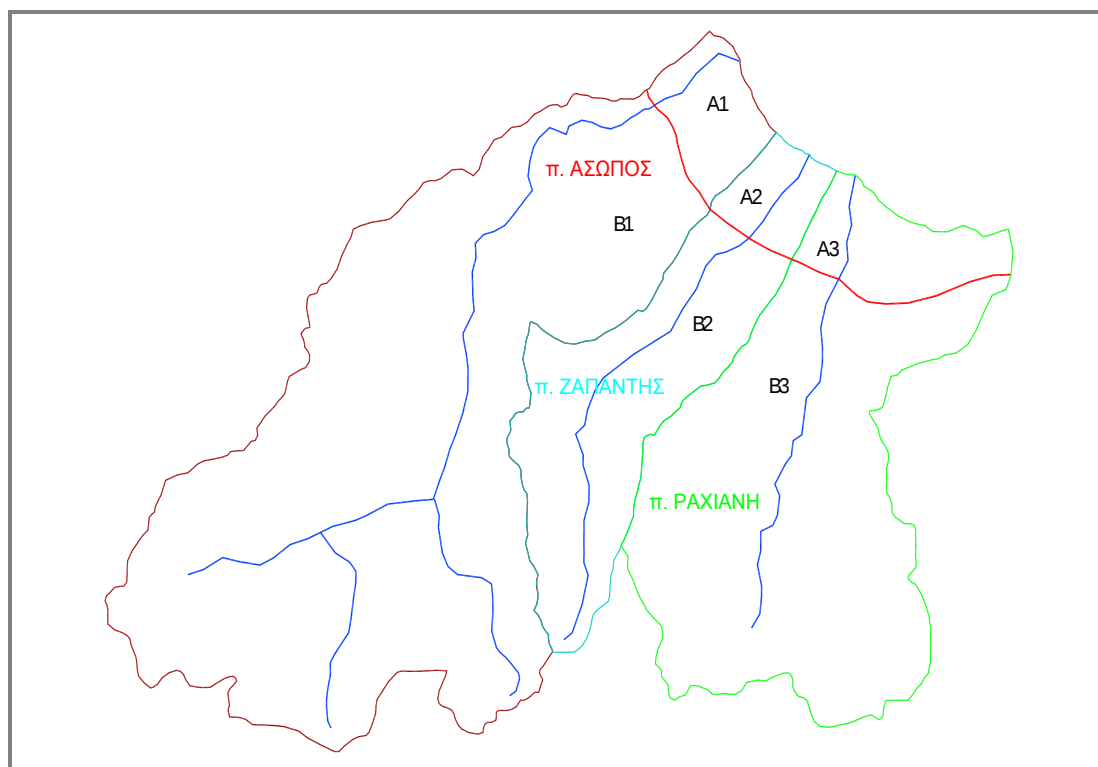
Οι Αλλουβιακές αποθέσεις που αντιπροσωπεύουν τα νεότερης ηλικίας Ολοκαινικά ιζήματα, καλύπτουν την περιοχή έρευνας σχεδόν σε όλο της το εύρος και αποτελούνται κυρίως από ασύνδετα υλικά, άμμους, αργίλους, πηλούς και κροκάλες σε μίγματα ποικίλων αναλογιών. Οι φάσεις αυτές έχουν δημιουργηθεί σε διαφορετικές χρονικές περιόδους με αντίστοιχα χαρακτηριστικά για κάθε φάση αλλά σε διαφορετική για κάθε περίοδο παλαιογεωγραφική θέση με αποτέλεσμα να εναλλάσσονται και να μεταβαίνουν η μια στην άλλη τόσο πλευρικά όσο και κατακόρυφα, κανονικά ή με ασυμφωνία. Το γεγονός αυτό καθιστά πολύ δύσκολη και πολύπλοκη την διάκριση και τον διαχωρισμό των φάσεων αυτών στο υπαιθρο όπως και καθιστά δυσχερή τον συσχετισμό των lithολογικών δεδομένων γεωτρήσεων που έχουν εκτελεστεί σε διάφορα σημεία της παραλιακής ζώνης.

6. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ - ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφεί η υδρογεωλογική δομή του υδροφόρου συστήματος το οποίο αναπτύσσεται στην Βόρεια παραλιακή ζώνη του Ν. Κορινθίας. Ο προσχωματικός υδροφόρος που μελετάται ουσιαστικά βρίσκεται στην απόληξη τριών υδρολογικών λεκανών της Κορινθίας. Οι ανωτέρω υδρολογικές λεκάνες σύμφωνα με στοιχεία από το ΕΜΠ - HydroloGIS, αντιστοιχούν σε έκταση :

Υδρολογική Λεκάνη	Συνολική Έκταση Λεκάνης (m ²)	Έκταση υπο-περιοχών (m ²)	Υπο-Περιοχές του όγκου ελέγχου
Ασωπού	326.3E+6	19.8E+6	A1
Ζαπάντη	93.3E+6	14.1E+6	A2
Ράχιανη	187.5E+6	23.1E+6	A3
ΣΥΝΟΛΙΚΑ		57.0E+6	

Η συνολική επιφάνεια του θεωρούμενου συστήματος που εξετάζεται είναι **57 Km²**.

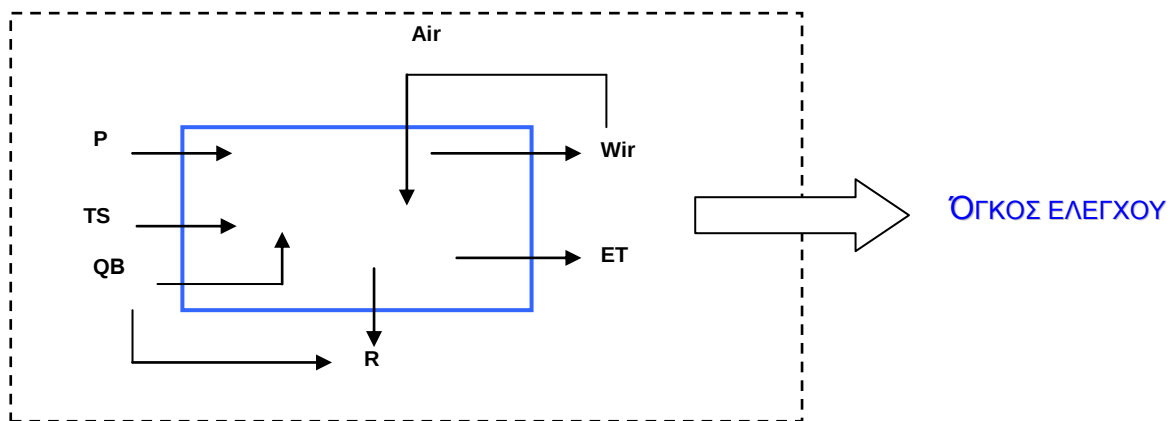


Εικόνα 12: Ο προσχωματικός υδροφόρος της παραλιακής ζώνης Κορινθίας βρίσκεται στην απόληξη τριών υδρολογικών λεκανών (π. Ασωπού, π. Ζαπάντη και π. Ράχιανη)

Για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής ο προσχωματικός υδροφόρος ορίζοντας θα θεωρηθεί σαν ένα ενιαίο σύστημα το οποίου θα προσδιορισθούν οι εισροές και οι εκροές. Αρχικά γίνεται ανάλυση και ομαδοποίηση των υδρολιθολογικών ενοτήτων ενώ στην συνέχεια, γίνεται μια παρουσίαση και αξιολόγηση της πιεζομετρίας όπως αυτή προέκυψε από τις μετρήσεις που έγιναν κατά το χρονικό διάστημα 1998-2002.

6.1 Επαναπλήρωση/Εμπλουτισμός του Προσχωματικού Υδροφόρου (Recharge)

Προκειμένου να κατανοήσουμε την λειτουργία του υδρογεωλογικού συστήματος και να θέσουμε τις αντίστοιχες παραμέτρους στο μοντέλο είναι πολύ σημαντικό να διακρίνουμε τους τρόπους τροφοδοσίας – επαναπλήρωσης (Recharge) του συστήματος με ποσότητες ύδατος. Ιδιαίτερα οι συνθήκες επαναπλήρωσης του Προσχωματικού υδροφόρου της παραλιακής ζώνης Κορινθίας (ποιοτικά χαρακτηριστικά) είναι από τις πλέον σημαντικότερες παραμέτρους που πρέπει να διερευνηθούν ώστε να αποδοθούν στο εννοιολογικό μοντέλο.



Εικόνα 13 : Ο Προσχωματικός Υδροφόρος της Παραλιακής Ζώνης Κορινθίας θεωρείται ότι είναι ένας 'Όγκος Ελέγχου' του οποίου θα διερευνηθούν οι Εισροές με περισσότερη λεπτομέρεια

Η εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου εκφράζει την διατήρηση της μάζας σε ένα όγκο ελέγχου, τον οποίο θεωρούμε ότι είναι η περιοχή που μελετάται, είναι :

$$\Delta Sw = \text{Εισροή ύδατος στο σύστημα} - \text{Εκροές ύδατος από το σύστημα}$$

όπου ΔSw είναι οι μεταβολές των υδατικών αποθεμάτων στον όγκο αναφοράς την συγκεκριμένη περίοδο, καθώς είτε έχουμε εμπλουτισμό λόγω της κατείσδυσης ύδατος στον υδροφόρο ορίζοντα είτε σταδιακή μείωση των αποθεμάτων λόγω των αντλήσεων κατά τους θερινούς μήνες.

6.1.1 Επιφανειακή Εισροή Ύδατος στον Όγκο Ελέγχου (Aerial Recharge)

Η ποσότητα ύδατος (Εικόνα 12) που εισρέει στον όγκο αναφοράς από ανάντη επιφανειακά αναλύεται σε :

- **QB_1** εισροή ύδατος στην περιοχή μελέτης, μέσω της κοίτης του Ασωπού, η οποία είναι το άθροισμα της ανάντη επιφανειακής απορροής της λεκάνης του π. Ασωπού και της ποσότητας ύδατος που εκτρέπεται από την λίμνη Στυμφαλία μέσω των σιράγγων Σούρι και Πράθι και **$(QB_2 + QB_3)$** εισροή ύδατος στην περιοχή μελέτης λόγω της επιφανειακής απορροής από τα ανάντη τμήματα των υπολοίπων λεκανών

- Την Βροχόπτωση (**P**) και
- Την επιστροφή των αρδεύσεων (**A_{ir}**)

Σημαντικότερη λεκάνη από πλευράς επαναπλήρωσης του Προσχωματικού υδροφόρου της παραλιακής ζώνης μπορεί να θεωρηθεί η λεκάνη του π. Ασωπού, στην οποία εκτός των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στην έκτασή της, συμβάλει και ο όγκος νερού που εκτρέπεται σε αυτή, από την λεκάνη της Στυμφαλίας που βρίσκεται στον ανάντη ορεινό όγκο, μέσω των σιράγγων εκτροπής, Σούρι και Πράθι.

Η σήραγγα Σούρι απάγει τα νερά της Υδρολογικής Λεκάνης της Στυμφαλίας και μέσω ανοικτού αγωγού τα οδηγεί στην σήραγγα Πράθι, αφού προηγουμένως μια ποσότητα νερού καλύψει τις αρδευτικές ανάγκες του οροπεδίου της Σκοτεινής. Σύμφωνα με παλαιότερες μετρήσεις (περίοδος 1961-1964, μετρήσεις του ΥΠΕΧΩΔΕ) από την σήραγγα Σούρι η μέση ετήσια παροχή προς την σήραγγα Πράθι ήταν $2 \text{ m}^3/\text{s}$ ή $63.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ ενώ ο μέσος ετήσιος όγκος νερού που εισέρχεται τελικά στην λεκάνη του π. Ασωπού μέσω της σήραγγας του Πράθι, σύμφωνα με μελέτη του Παν/μίου Πατρών (Κούκης, 1994) για την περίοδο 1965-1991, ανέρχεται σε $37 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$.

Σύμφωνα με στοιχεία μετρήσεων της παροχής του ποταμού Ασωπού σε τρία σημεία - ανάντη του φράγματος του ΑΟΣΑΚ, στην γέφυρα του Βασιλικού και στις εκβολές του ποταμού (θέση Νεράτζα) - που έγιναν για τις ανάγκες της μελέτης τεχνητού εμπλουτισμού της Βόρειας παραλιακής ζώνης, προκύπτει ότι για το υδρολογικό έτος 1998-1999 (Σεπτέμβριο '98 – Μάιο '99) το σύνολο της απορροής που μετρήθηκε είναι $62.09 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$. Συνυπολογίζοντας την απορροή των μηνών από Ιούνιο έως και Αύγουστο προκύπτει συνολική απορροή $64 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ για το υδρολογικό έτος 1998-1999 (Κουμαντάκης *et al.*, 1999).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, στην Περιοχή Α1, εισέρχεται ετησίως ένας όγκος ύδατος $QB_1 = 64 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$, ο οποίος προέρχεται από το άθροισμα της απορροής του ανάντη τμήματος της υδρολογικής λεκάνης του Ασωπού και της ποσότητας του ύδατος που εκτρέπεται από την λεκάνη της Στυμφαλίας. Ο όγκος ύδατος που κινείται στο ποτάμιο σύστημα του Ασωπού διευθετείται με αρδευτικά έργα (φράγμα εκτροπής του ΑΟΣΑΚ - ΑΡΔΕΥΤΙΚΟΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΣΤΥΜΦΑΛΙΑΣ ΑΣΩΠΟΥ ΚΟΡΙΝΘΙΑΣ) τα οποία διοχετεύουν όλη την ροή ή τμήμα αυτής σε μία κεντρική αύλακα (Βοχαϊκή Αύλακα) η οποία κινείται σχεδόν παράλληλα με την Νέα Εθνική Οδό, για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών της πεδινής ζώνης μεταξύ Κιάτου και Κορίνθου κατά την χειμερινή και την εαρινή περίοδο.

Από αυτή την αύλακα, διοχετεύεται νερό σχεδόν σε ολόκληρη την παραλιακή ζώνη με μικρότερα αρδευτικά δίκτυα που την διατρέχουν εγκάρσια, βάσει της ζήτησης το χειμώνα και το καλοκαίρι βάσει του κανόνα άρδευσης. Σύμφωνα με τον *κανόνα άρδευσης* οι καλλιέργειες αρδεύονται βάσει προτεραιότητας ανάλογα με την εποχή και το είδος που καλλιεργείται. Αρχικά το Μάιο αρδεύονται οι Βερικοκιές, ακολουθεί η Σουλτανίνα από τον Ιούνιο έως το

τέλος του καλοκαιριού, μετά τα εσπεριδοειδή (κυρίως πορτοκαλιές) και τέλος τα ελαιόδενδρα.

Χειμερινές αρδεύσεις πραγματοποιούνται τμηματικά σχεδόν σε όλη την έκταση της πεδινής ζώνης, με κατάκλιση της αρδευόμενης έκτασης. Ο χρόνος πραγματοποίησης τους μεταβάλλεται από έτος σε έτος ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες και τις ανάγκες των καλλιεργειών. Συνήθης μήνας έναρξης είναι ο Νοέμβριος και περατώσεως το τέλος Απριλίου όπου ξεκινούν οι θερινές αρδεύσεις. Επειδή πολλές φορές δεν υπάρχει δυνατότητα διάθεσης σε καλλιέργειες για χειμερινές αρδεύσεις, του συνόλου της εκτρεπόμενης ποσότητας από την κοίτη του Ασωπού, η πλεονάζουσα ποσότητα νερού χρησιμοποιείται είτε για τον εμπλουτισμό του προσχωματικού υδροφόρου με διοχέτευση της επιπλέον ποσότητας σε πηγάδια μεγάλης διαμέτρου είτε παροχετεύεται απευθείας στην θάλασσα μέσω άλλων αρδευτικών καναλιών.



Εικόνα 14 : Εμπλουτισμός του υδροφόρου με διοχέτευση της πλεονάζουσας ποσότητας του νερού του αρδευτικού δικτύου σε πηγάδι μεγάλης διαμέτρου (4/12/2002)

Κατά την περίοδο λειτουργίας των ελαιοτριβείων (συνήθως από Νοέμβριο έως και Ιανουάριο), δεδομένου ότι δεν υπάρχει έως και σήμερα σύστημα επεξεργασίας των αποβλήτων τους, αυτά διατίθενται παράνομα στην κοίτη του Ασωπού ανεπεξέργαστα. Ο όγκος του νερού που έχει ρυπανθεί και δεν μπορεί να αξιοποιηθεί για χειμερινές αρδεύσεις είτε εκτρέπεται απευθείας στην κεντρική αύλακα του ΑΟΣΑΚ όπου καταλήγει μέσω του τσιμεντένιου αρδευτικού δικτύου στην θάλασσα είτε ρέει στην φυσική κοίτη του Ασωπού προς τα κατάντη. Σε περίπτωση που η ρύπανση δεν γίνει εγκαίρως αντιληπτή από τους χειριστές των θυροφραγμάτων, ο εμπλουτισμός που εφαρμόζεται στο πηγάδι μεγάλης

διαμέτρου στο Δήμο του Βέλου επιδρά αρνητικά καθώς γίνεται άμεση εισαγωγή ρύπων από τα ελαιοτριβεία στο υδροφόρο σύστημα όπως ακριβώς στην περίπτωση της Εικόνα 14 .

Προσεγγιστικά μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι από την ποσότητα $QB_1=64 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ που εισέρχεται στην περιοχή A1 αφαιρείται η απορροή κατά τους μήνες Νοέμβριο έως και Ιανουάριο η οποία λόγω της ρύπανσης στην οποία υπόκειται λόγω των αποβλήτων των ελαιοτριβείων, καταλήγει μέσω τσιμεντένιου αγωγού, τελικά στην θάλασσα ανεκμετάλλευτη.

	NOE	DEC	JAN	SUM
MO (m^3/s)	1.2049	2.5987	2.6172	
Άθροισμα Μηνός (m^3/month)	3.12×10^6	6.96×10^6	7.01×10^6	17.09×10^6

Σύμφωνα με μετρήσεις ανάντη του φράγματος του ΑΟΣΑΚ για το υδρολογικό έτος 1998-1999, η ποσότητα αυτή ανέρχεται σε $17.09 \times 10^6 \text{ m}^3$. Κατά συνέπεια η ποσότητα που εισέρχεται στο σύστημα τελικά είναι $QB_1=46.91 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$.

Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν στοιχεία για τις υπόλοιπες λεκάνες απορροής, στην συνέχεια, θα χρησιμοποιηθεί η ορθολογική εξίσωση προκειμένου να καταλήξουμε σε εκτιμήσεις της μέγιστης απορροής στις επιμέρους λεκάνες. Μία από τις πιο κοινές μεθόδους εκτίμησης της μέγιστης επιφανειακής απορροής είναι η ορθολογική εξίσωση (rational equation), η οποία θεωρεί ότι εάν η βροχόπτωση διαρκέσει αρκετά, η μέγιστη παροχή από την λεκάνη απορροής θα είναι ίση με τον μέσο όρο του ρυθμού βροχόπτωσης (P) επί το εμβαδόν της λεκάνης απορροής (A) πολλαπλασιαζόμενο με ένα συντελεστή ελάττωσης (C) που αποδίδεται στην κατείδουση : $Q=CPA$.

Η μέγιστη επιφανειακή απορροή που προέρχεται από την βροχόπτωση στις περιοχές B2 και B3 δεδομένου ότι δεν έχουν γίνει αντίστοιχες μετρήσεις απορροής στους άλλους ποταμο-χειμάρρους που διαρρέουν την περιοχή ενδιαφέροντος, μπορεί να προσδιοριστεί βάσει της ορθολογικής εξίσωσης, $QB=CPB$ όπου :

- C: συντελεστής που προκύπτει από πίνακα βάσει της κάλυψης της επιφάνειας (0.15)
- P: βροχόπτωση (m/year)
- B_i : επιφάνεια της οποίας πρέπει να προσδιορισθεί η μέγιστη απορροή (m^2)

Εφαρμόζοντας την ορθολογική εξίσωση στα ανάντη τμήματα περιοχές B2 και B3 των υπολοίπων λεκανών προκύπτουν τα εξής :

- $QB_2=5.91 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$
- $QB_3=12.26 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$

Συνολικά η ποσότητα ύδατος που εκτιμάται ότι εισέρχεται με την μορφή της επιφανειακής απορροής στην περιοχή από ανάντη είναι συνολικά $QB=65.08 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$

Μία ποσότητα ύδατος που εισέρχεται στο σύστημα επιφανειακά είναι οι **Βροχοπτώσεις (P)** και οι επιστροφές από τις πραγματοποιούμενες **αρδεύσεις (A_{ir})**.

Η διηθούμενη κάθε φορά ποσότητα ύδατος εξαρτάται από το είδος του εδάφους, τον τρόπο άρδευσης και την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό. Ο Horton το 1933 πρώτος χρησιμοποίησε τον όρο της ικανότητας διήθησης (Infiltration capacity) για να προσδιορίσει το μέγιστο ποσό νερού που μπορεί να απορροφήσει δεδομένο είδος εδάφους κάτω από δεδομένες συνθήκες, σε ορισμένο χρόνο, ενώ έδειξε ότι η βροχόπτωση μόλις φτάνει την επιφάνεια του εδάφους, διηθείται στο επιφανειακό έδαφος με ρυθμό που μειώνεται με τον χρόνο. Για κάθε έδαφος, υπάρχει καμπύλη που καθορίζει τους μέγιστους δυνατούς ρυθμούς διήθησης σε σχέση με τον χρόνο. Η ικανότητα αυτή από την έναρξη της βροχόπτωσης ελαττώνεται εκθετικά με τον χρόνο, από μια μέγιστη τιμή σε μια σχετικά σταθερή τιμή (Freeze and Cherry, 1979).

Εάν το έδαφος αρχικά είναι ξηρό, η ικανότητα διήθησης είναι υψηλή. Σταδιακά, καθώς το ποσοστό υγρασίας του εδάφους αυξάνει, η ικανότητα διήθησης μειώνεται καθώς μειώνονται και οι τριχοειδείς δυνάμεις που επιβάλλουν τάση, τραβώντας την υγρασία προς τα κάτω. Επιπλέον, τα κολλοειδή σωματίδια στο έδαφος διογκώνονται καθώς αυξάνεται η περιεχόμενη υγρασία ενώ τελικά, η ικανότητα διήθησης φτάνει σε μία λίγο πολύ σταθερή τιμή - την διηθητική ικανότητα ισορροπίας (equilibrium infiltration capacity) η οποία καθορίζεται από την ακόρεστη περατότητα του εδάφους (Fetter, 1994)

Οι (Rubin and Steinhardt, 1963; Rubin *et al.*, 1964) έδειξαν ότι ο σταθερός ρυθμός διήθησης στον οποίο φτάνει τελικά το έδαφος, αριθμητικά ισούται με την κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους ενώ προσδιόρισαν τις δύο απαραίτητες συνθήκες για την ύπαρξη λιμναζόντων υδάτων (ponding) :

- a. Η ένταση βροχόπτωσης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα
- b. Η διάρκεια βροχόπτωσης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τον χρόνο που απαιτείται για το επιφανειακό κορεσμό του εδάφους

Σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτει ότι η ένταση της βροχόπτωσης είναι καθοριστική για την κατείσδυση. Εάν η ένταση είναι τόσο χαμηλή που μόλις να αντισταθμίζει την ποσότητα που ολικά κατείσδυει, τότε έχουμε το μέγιστο δυνατό ποσοστό κατείσδυσης. Όσο η ένταση της βροχόπτωσης αυξάνεται τόσο μειώνεται το ποσοστό κατείσδυσης. Κατά συνέπεια η κατείσδυση ευνοείται από τις βροχοπτώσεις χαμηλής έντασης. Συνθήκες που ευνοούν επίσης τα υψηλά ποσοστά διήθησης είναι τα αδρόκοκκα εδάφη, πυκνή βλάστηση, χαμηλή εδαφική υγρασία και η μη συμπαγοποιημένη εδαφική επιφάνεια. Εφόσον καλυφθεί η διηθητική ικανότητα ισορροπίας, το λιμνάζον νερό επίσης προάγει την υψηλή διήθηση.

Για τον Ελληνικό χώρο, οι έντονες θερινές βροχές που πέφτουν σε ξερό έδαφος, συμπληρώνουν μόνο το έλλειμμα υγρασίας των επιφανειακών τμημάτων του εδάφους χωρίς

να επαρκούν για να έχουμε ενεργή κατείσδυση. Κατά συνέπεια αυτές οι βροχές συμβάλλουν ελάχιστα ή καθόλου στην τροφοδοσία των υπόγειων υδροφόρων οριζόντων καθώς οι ισχυρές βροχοπτώσεις γενικότερα, πολύ γρήγορα υπερβαίνουν την ικανότητα διήθησης του εδάφους (infiltration capacity) με αποτέλεσμα η πλημμυρική απορροή μετά από μία έντονη βροχόπτωση να καταλήγει πολύ γρήγορα στην θάλασσα χωρίς αυτή να συμβάλλει ιδιαίτερα στην τροφοδοσία των υδροφόρων οριζόντων.

Προκειμένου να γίνει μία εκτίμηση της διηθητικής ικανότητας του εδάφους γίνεται χρήση των μετρήσεων που έγιναν σε διαφορετικά σημεία στην κοίτη του π. Ασωπού για τους σκοπούς του ερευνητικού προγράμματος τεχνητού εμπλουτισμού.

Ημερομηνία μέτρησης	Θέση Knappen (m ³ /s)	Θέση Κυπαρίσσι (m ³ /s)	Απορροή στην φυσική κοίτη m ³ /s	Γέφυρα Βασιλικού m ³ /s	Κατείσδυση έως την γέφυρα m ³ /s	Νεράτζα (εκβολή) m ³ /s	Κατείσδυση έως την Νεράτζα m ³ /s
1/4/1998	3.210	1.150	2.060	1.956	-0.104	1.683	-0.273
7/4/1998	3.002	1.281	1.721	1.449	-0.272	1.161	-0.288
13/4/1998	2.884	2.060	0.824	0.434	-0.390	0.318	-0.116
20/5/1998	1.723	1.150	0.573	0.221	-0.352	-	
AVERAGE			1.2945		-0.280		-0.226
3/4/1999	5.825	1.084	4.741	4.947	0.206	-	

Από μετρήσεις σε διάφορες θέσεις κατάντη του φράγματος εκτροπής προέκυψε ότι σημαντικός όγκος νερού μπορεί να διηθηθεί και να τροφοδοτεί το προσχωματικό υδροφόρο σύστημα. Συγκεκριμένα υπολογίσθηκε βάσει των ανωτέρω στοιχείων ότι με ρυθμισμένη συνεχή ροή κατάντη του φράγματος εκτροπής, με παροχή της τάξεως του 0.6m³/s, η διηθούμενη ποσότητα είναι της τάξεως του 0.2m³/s (Κουμαντάκης *et al.*, 1999) με συνέπεια το ποσοστό διήθησης στον υδροφόρο ορίζοντα υπό αυτές τις προϋποθέσεις να ανέρχεται στα 33,3%.

Κατά την διάρκεια των παραπάνω μετρήσεων παρατηρήθηκε επίσης ότι το διάστημα από τον Ιούνιο έως και τον Οκτώβριο, η κοίτη του Ασωπού τροφοδοτείται εξ' ολοκλήρου από την σήραγγα Πράθι ενώ η ποσότητα αυτή διοχετεύεται σχεδόν εξολοκλήρου στην αρδευτική αύλακα προκειμένου να καλύψει τις ανάγκες άρδευσης των καλλιεργειών της παραλιακής ζώνης. Κατά την περίοδο αυτή το ύψος βροχής όπως καταγράφεται στον Πίνακα 9, είναι μικρό σχετικά με το μέσο ετήσιο χωρίς να εμφανίζονται διαφοροποιήσεις από έτος σε έτος.

Οι παραπάνω πρώτες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν μετά από υψηλές βροχοπτώσεις που σημειώθηκαν 25-27/3/1998, όπου παρατηρήθηκε ότι ενώ σταδιακά μειώνεται η παροχή στην φυσική κοίτη όσο απομακρυνόμαστε από τις βροχοπτώσεις, τόσο αυξάνεται η κατείσδυση έως το σημείο μέτρησης στην γέφυρα Βασιλικού, που υπολογίζεται από 0.104 m³/s σε 0.390 m³/s. Η διαφορά των μετρήσεων από την θέση KNAPPEN στην θέση Κυπαρίσσι δίνει την παροχή (m³/s) ύδατος στην φυσική κοίτη του Ασωπού κατάντη του φράγματος εκτροπής.

Απορροή στην θάλασσα έχουμε κυρίως στην περίπτωση πλημμυρικών παροχών, δεδομένου ότι, η παροχή του ποταμού της τάξης των $1.2945\text{m}^3/\text{s}$ (μέση τιμή των μετρήσεων) ή και μικρότερη, όταν και όσο είναι διαθέσιμη, εκτρέπεται στην κεντρική αύλακα του ΑΟΣΑΚ σε όλη την διάρκεια του χρόνου για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών της πεδινής ζώνης μεταξύ Κιάτου και Κορίνθου κατά την χειμερινή και την εαρινή περίοδο.

Από τις ποσότητες του νερού που αντλείται (W_{ir}) για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών της πεδινής ζώνης, ένα τμήμα αυτού επιστρέφει ξανά μέσα στον όγκο ελέγχου. Σύμφωνα με τον (Τσακίρης, 1995) οι απώλειες προς βαθύτερους ορίζοντες από το νερό που προορίζεται για την άρδευση καλλιεργειών, για δίκτυα ανοικτών αγωγών και έργα μέσης έκτασης, κυμαίνονται από 7% έως 35% της παροχής ανάλογα με την κατάσταση της βρεχόμενη επιφάνειας και την διατομή. Για την παραλιακή ζώνη Κορινθίας που η επιφάνεια καλύπτεται κυρίως από αργιλικά ορυκτά και τις εφαρμοζόμενες μεθόδους άρδευσης, θεωρείται ότι ένα ποσοστό 20% είναι αντιπροσωπευτικό.

6.1.2 Πλευρική Τροφοδοσία (Lateral Recharge - TS)

Οι 'Τυρρήνιες' αναβαθμίδες που αναπτύσσονται στο Νότιο όριο της περιοχής μελέτης και κυρίως εκτός αυτής, είναι μία πολύ σημαντική ενότητα για την ισορροπία του προσχωματικού υδροφόρου συστήματος. Δεδομένης της αδρομερούς κυρίως λιθολογικής τους σύστασης εμφανίζουν σχετικά υψηλές τιμές υδραυλικής περατότητας συμβάλλοντας σημαντικά στην δίαυτα του προσχωματικού υδροφόρου προς τα κατάντη.

Οι τιμές των υδραυλικών χαρακτηριστικών των σχηματισμών όσον αφορά την υδραυλική αγωγιμότητα σύμφωνα με τα δεδομένα δοκιμαστικών αντλήσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος του ΕΜΠ (Κουμαντάκης *et al.*, 1999) κυμαίνονται από 1.15×10^{-5} m/s στους λεπτομερείς σχηματισμούς έως 1.39×10^{-3} m/s στους περισσότερο αδρομερείς σχηματισμούς. Οι τιμές ειδικής αποθηκευτικότητας S_y εμφανίζουν εντονότερη διαφοροποίηση σε σχέση με την υδραυλική αγωγιμότητα μεταξύ των ζωνών λεπτομερών και αδρομερών υλικών. Έτσι στις ζώνες αδρομερών υλικών το S_y κυμαίνεται από $0.2-5 \times 10^{-2}$ ενώ στις ζώνες λεπτομερών υλικών κυμαίνεται από $0.1-5 \times 10^{-5}$. Οι διαφοροποιημένες αυτές τιμές των υδραυλικών χαρακτηριστικών εξαρτώνται άμεσα από την κοκκομετρία και την σύσταση των αποθέσεων ενώ δείχνουν σε γενικές γραμμές ότι το σύστημα δεν είναι ιδιαίτερα υψηλού δυναμικού, με περιορισμένες δυνατότητες αποθήκευσης.

Για τον προσδιορισμό της Πλευρικής επαναπλήρωσης (lateral recharge) του υδροφόρου ορίζοντα στα πλαίσια της παρούσας Διατριβής χρησιμοποιήθηκε μια έμμεση τεχνική η οποία θα παρουσιαστεί με περισσότερη λεπτομέρεια στο κεφάλαιο 9 καθώς αποτελεί και βασικό άξονα της παρούσας Προσομοίωσης του Υδροφόρου συστήματος.

6.2 Διάκριση Υδρογεωλογικών Ενοτήτων

Προκειμένου να περιγραφεί το εννοιολογικό μοντέλο λειτουργίας του προσχωματικού υδροφόρου, επιχειρήθηκε η διάκριση των γεωλογικών σχηματισμών που την δομούν σε υδρογεωλογικές ενότητες βάσει της γεωλογικής δομής της ευρύτερης περιοχής όπως αυτή αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Ο διαχωρισμός αυτός βασίζεται ουσιαστικά στα λιθολογικά χαρακτηριστικά των γεωλογικών σχηματισμών τα οποία και τους προσδίδουν ιδιαίτερη υδρογεωλογική συμπεριφορά.

Προσχωματικά υλικά : Τα Προσχωματικά υλικά είναι ο ουσιαστικά η υδρογεωλογική ενότητα που φιλοξενεί τον Υδροφορέα της παραλιακής ζώνης Κορινθίας και του οποίου επιχειρείται η προσομοίωση. Σε αυτή την ενότητα εντάσσονται οι εξής σχηματισμοί :

- i. Σύγχρονες Αλλουβιακές αποθέσεις (υλικά εντός της ζώνης των χειμάρρων)
- ii. Προσχωματικά υλικά πεδινής ζώνης (υλικά αποσάθρωσης που εκτείνονται σε όλη σχεδόν την έκταση της πεδινής ζώνης)

Αν και πρόκειται για σχηματισμούς με αρκετά διαφοροποιημένα λιθολογικά χαρακτηριστικά και διαφορετικές υδραυλικές παραμέτρους, θεωρήθηκε ότι ανήκουν στην ίδια υδρογεωλογική ενότητα καθώς και οι δύο σχηματισμοί παρουσιάζουν και μεγάλο βαθμό εσωτερικής ανομοιογένειας

Οι αποθέσεις αυτές καλύπτουν σχεδόν όλη την περιοχή μελέτης από το Λέχαιο έως το Κιάτο σε μία ζώνη που εκτείνεται από την παραλία έως τον άξονα της Νέας Εθνικής Οδού. Υδρογεωλογικά, πρόκειται για υδροπερατές κυρίως αποθέσεις στις οποίες αναπτύσσεται η κύρια υδροφορία της πεδινής ζώνης.

Σε τοπικό επίπεδο αναπτύσσονται περισσότεροι από ένας υδροφόροι (ένας φρεάτιος και επάλληλοι υπό πίεση υδροφόροι που διαχωρίζονται από στρώματα μάργας ή στρώματα με αυξημένη περιεκτικότητα σε λεπτομερές αργιλικό υλικό) χωρίς όμως να γίνεται διάκριση μεταξύ τους καθώς στο επίπεδο της κλίμακας μελέτης, θεωρείται ότι βρίσκονται σε υδραυλική επικοινωνία μεταξύ τους και ότι δρουν σαν ένα ενιαίο υδροφόρο σύστημα.

Τυρρήνιες αναβαθμίδες και τα υλικά αποσάθρωσης /επικάλυψής τους : Σε αυτή την ενότητα εντάσσονται οι εξής σχηματισμοί :

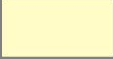
- i. “Τυρρήνιες” αναβαθμίδες (αναβαθμίδες κροκαλοπαγών)
- ii. Ελουβιακοί Σχηματισμοί
- iii. Ερυθρά Αργιλομιγής Άμμος

Αν και οι «Τυρρήνιες αναβαθμίδες» αναπτύσσονται στα όρια της περιοχής μελέτης και κυρίως εκτός αυτής, παίρνουν ενεργά μέρος στο εννοιολογικό μοντέλο καθώς είναι μία πολύ σημαντική ενότητα για την ισορροπία του πεδινού υδροφόρου συστήματος. Δεδομένης της

αδρομερούς κυρίως λιθολογικής τους σύστασης εμφανίζουν υψηλές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας. Ευρισκόμενη η ενότητα αυτή σε υδραυλική επικοινωνία με το πεδινό σύστημα θεωρείται ότι μέσω αυτής γίνεται η κύρια τροφοδοσία του προσχωματικού υδροφόρου της πεδινής ζώνης μέσω των επιφανειακών απορροών των χειμάρρων αλλά και των υπόγειων πλευρικών μεταγγίσεων (lateral recharge).

Μαργαϊκός Σχηματισμός : Αν και επιφανειακά, οι μάργες κάνουν την εμφάνισή τους Νοτιότερα των ορίων της περιοχής μελέτης, αποτελούν το υπόβαθρο όλων των προσχωματικών υλικών της πεδινής ζώνης με κυμαινόμενα βάθη, σύμφωνα με τα στοιχεία των γεωτρήσεων, από 20 έως 60 μέτρα.

Πρόκειται για πρακτικά υδατοστεγανές αποθέσεις με εξαίρεση τοπικές υδροφορίες περιορισμένου δυναμικού που αναπτύσσονται εντός των κοκκωδών ενδιαστρώσεων που παρατηρούνται σε αρκετές θέσεις του σχηματισμού.

ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ	ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ
 Σύγχρονες Αλλουβιακές αποθέσεις. Αποτελούνται από ασύνδετα κυρίως υλικά τα οποία περιλαμβάνουν άμμους, κροκάλες και λατύπες.	<u>Σύγχρονα Προσχωματικά υλικά</u> Οι αποθέσεις αυτές καλύπτουν σχεδόν όλη την περιοχή μελέτης από το Λέχαιο έως το Κιάτο σε μία ζώνη που εκτείνεται από την παραλία έως τον άξονα της Νέας Εθνικής Οδού. Υδρογεωλογικά, πρόκειται για υδροπερατές κυρίως αποθέσεις στις οποίες αναπτύσσεται η κύρια υδροφορία της πεδινής ζώνης.
 Προσχωματικά υλικά πεδινής ζώνης : Πρόκειται για υλικά αποσάθρωσης πετρωμάτων των γειτονικών σχηματισμών. Είναι χαλαρά έως ελαφρώς συνδεδεμένα υλικά τα οποία αποτελούνται από άμμους, αργίλους, πηλούς και κροκάλες σε μίγματα ποικίλων αναλογιών. Καλύπτουν σχεδόν όλη την περιοχή μελέτης από το Λέχαιο έως το Κιάτο σε μία ζώνη που εκτείνεται από την παραλία έως τον άξονα της νέας Εθνικής Οδού.	<u>Τυρρήνιες αναβαθμιδές και τα υλικά αποσάθρωσης /επικάλυψής τους</u> Δεδομένης της αδρομερούς κυρίως λιθολογικής τους σύστασης εμφανίζουν υψηλές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας. Ευρισκόμενη η ενότητα αυτή σε υδραυλική επικοινωνία με το πεδινό σύστημα θεωρείται ότι μέσω αυτής γίνεται η κύρια τροφοδοσία του προσχωματικού υδροφόρου της πεδινής ζώνης μέσω των επιφανειακών απορροών των χειμάρρων αλλά και των υπόγειων πλευρικών μεταγγίσεων.
 Ελουβιακοί Σχηματισμοί : Αποτελούνται κυρίως από πηλούς και ψαμμούχους πηλούς κόκκινου χρώματος που προέρχονται από την εξαλλοίωση ψαμμούχων μαργών του Πλειοκαίνου ή του Τυρρηνίου.	
 Ερυθρά Αργιλομιγής Άμμος : Υπέρκειται των Τυρρήνιων σχηματισμών και πιθανά πρόκειται για παλαιές παράκτιες αποθέσεις διότι περιέχει μικρά θαλάσσια απολιθώματα.	<u>Μαργαϊκός Σχηματισμός</u> Πρόκειται για πρακτικά υδατοστεγανές αποθέσεις με εξαίρεση τοπικές υδροφορίες περιορισμένου δυναμικού που αναπτύσσονται εντός των κοκκωδών ενδιστρώσεων που παρατηρούνται σε αρκετές θέσεις του σχηματισμού
 Μάργες : Υποκίτρινες έως λευκές και ενίοτε ανοικτότεφρες ή κυανίζουσες μάργες, με παρεμβολές κατά περιοχές ψαμμιτών, ψηφιτοπαγών, κροκαλοπαγών και μαργαϊκών ασβεστολίθων. Πρόκειται για υφάλμυρες έως λιμναίες αποθέσεις με επικράτηση της λιμναίας φάσης στα ανώτερα τμήματα της σειράς. Συναντώνται σε ολόκληρη την λοφώδη περιοχή του χώρου έρευνας με καθολική επικράτηση των μαργών οι οποίες επεκτεινόμενες προς τα Βόρεια, τον Κορινθιακό Κόλπο, αποτελούν το υπόβαθρο των προσχωματικών υλικών όπως άλλωστε και των άλλων νεότερων αποθέσεων της παραλιακής πεδινής ζώνης μεταξύ Κορίνθου και Κιάτου.	

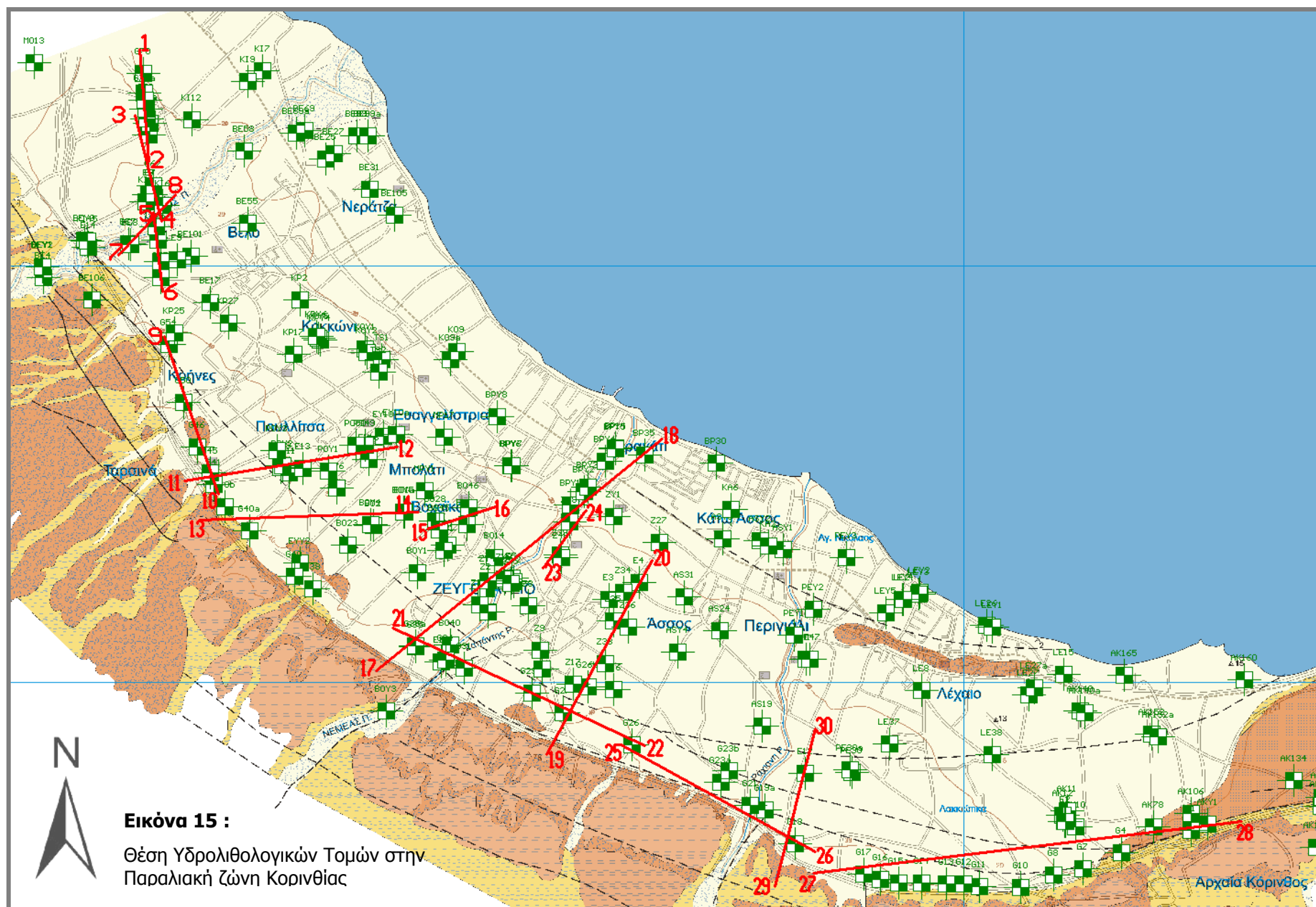
6.3 Υδρολιθολογικές Τομές

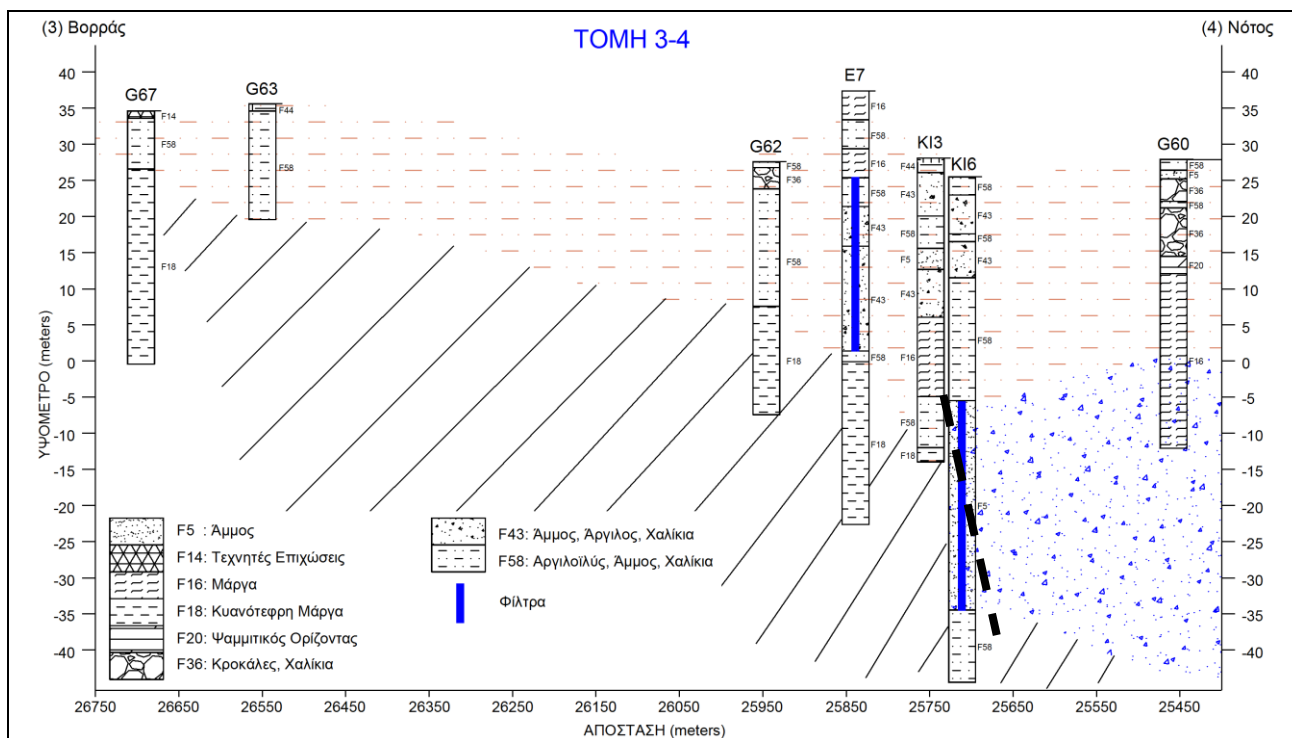
Στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος «Υδρογεωλογική μελέτη τεχνητού εμπλουτισμού υπόγειων υδροφορέων Β. Παραλιακής και Ημιλοφώδους ζώνης Ν. Κορινθίας» (Κουμαντάκης *et al.*, 1999) πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη συλλογή στοιχείων γεωτεχνικών γεωτρήσεων και υδρογεωτρήσεων που εκτελέστηκαν σε διάφορες χρονικές περιόδους και από διαφορετικούς φορείς (δημόσιους φορείς και ιδιώτες). Συνολικά συλλέχθηκαν τα στοιχεία από 108 γεωτρήσεις με την μορφή τομών Γεωτρήσεων. Από τα στοιχεία αυτά παρατηρείται έλλειψη στοιχείων στην στενή παράκτια ζώνη και για το λόγο αυτό οι περισσότερες Γεωλογικές τομές που κατασκευάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής συγκεντρώνονται στην Νότια Ζώνη.

Προκειμένου να αποδοθεί ένα εννοιολογικό μοντέλο (conceptual model) όσο το δυνατόν πλησιέστερα προς την πραγματικότητα, έγινε αξιολόγηση όλων των παραπάνω στοιχείων και προέκυψαν υδρολιθολογικές τομές οι οποίες παραθέτονται στην συνέχεια σε συνδυασμό με την θέση τους στην ευρύτερη περιοχή. Αναλυτικότερη παράθεση των Υδρολιθολογικών Τομών γίνεται στο Παράρτημα της παρούσας Διατριβής.

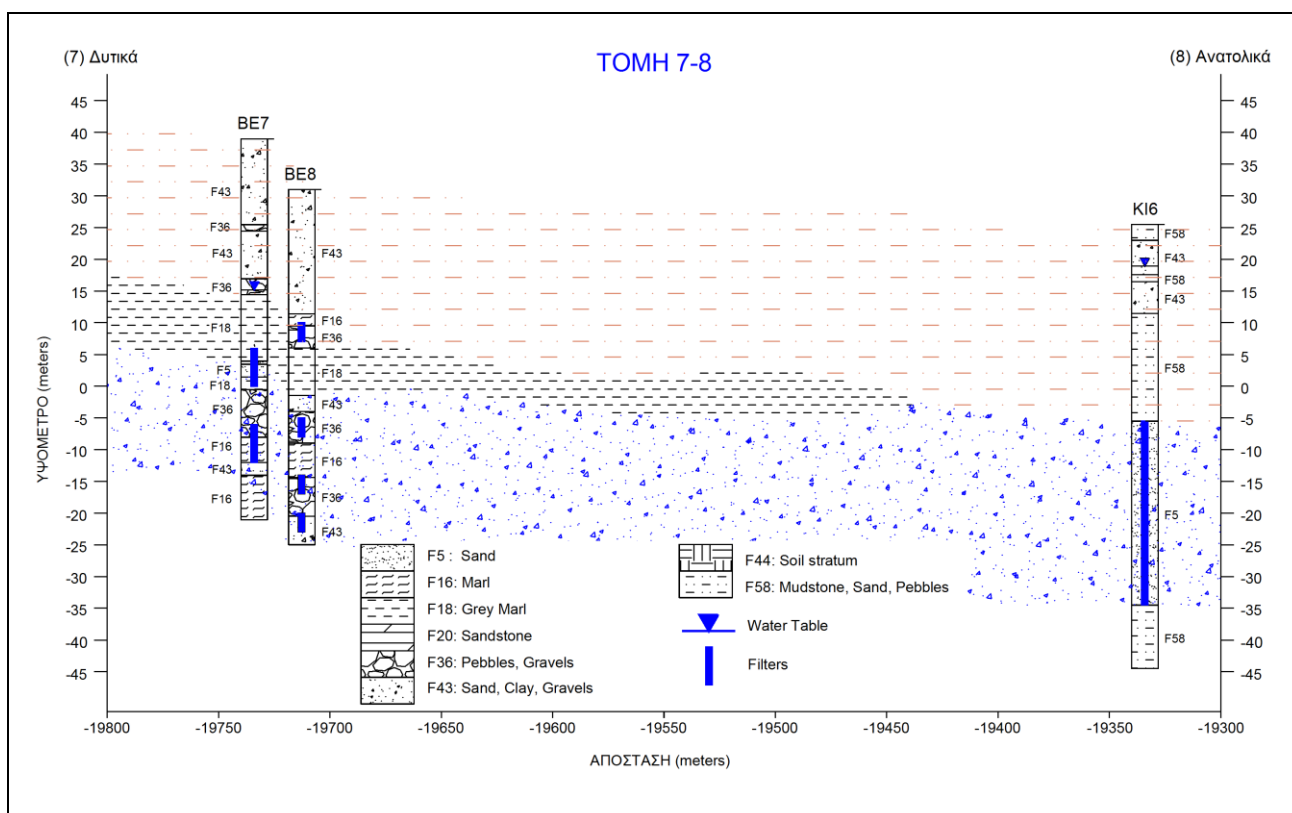
Οι υδρολιθολογικές τομές παρουσιάζουν μια εικόνα η οποία προκαθορίζεται από Νεοτεκτονική της περιοχής, με κανονικά ρήγματα και μεταβολές του επιπέδου της θάλασσας που είχαν σαν αποτέλεσμα τα στρώματα να εναλλάσσονται και να μεταβαίνουν το ένα στο άλλο τόσο πλευρικά όσο και κατακόρυφα, κανονικά ή με ασυμφωνία. Στις Υδρολιθολογικές τομές, με την διαγράμμιση συμβολίζεται το υπόβαθρο που στην περίπτωση αυτή είναι ο Μαργαϊκός Σχηματισμός.

Στην Εικόνα 15 καταγράφεται η θέση των υδρολιθικών τομών.

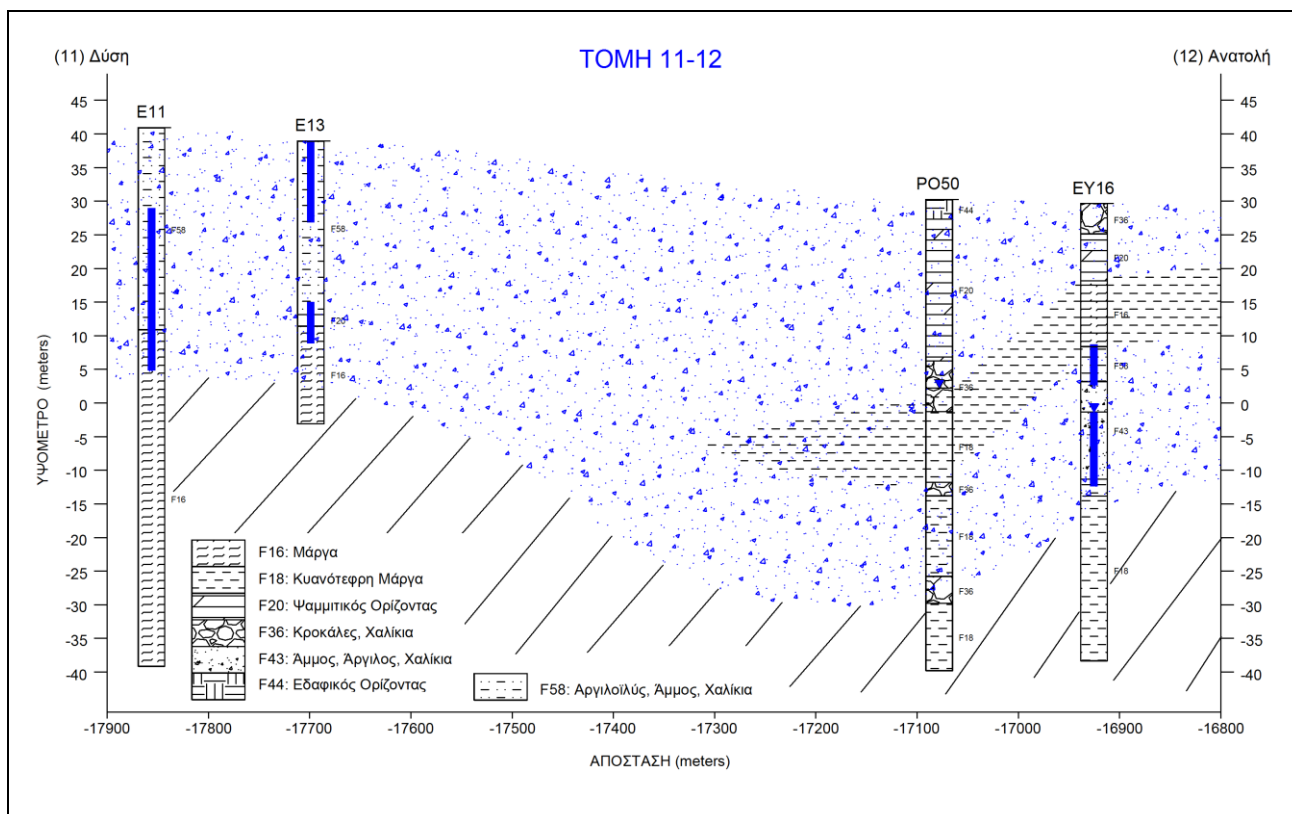




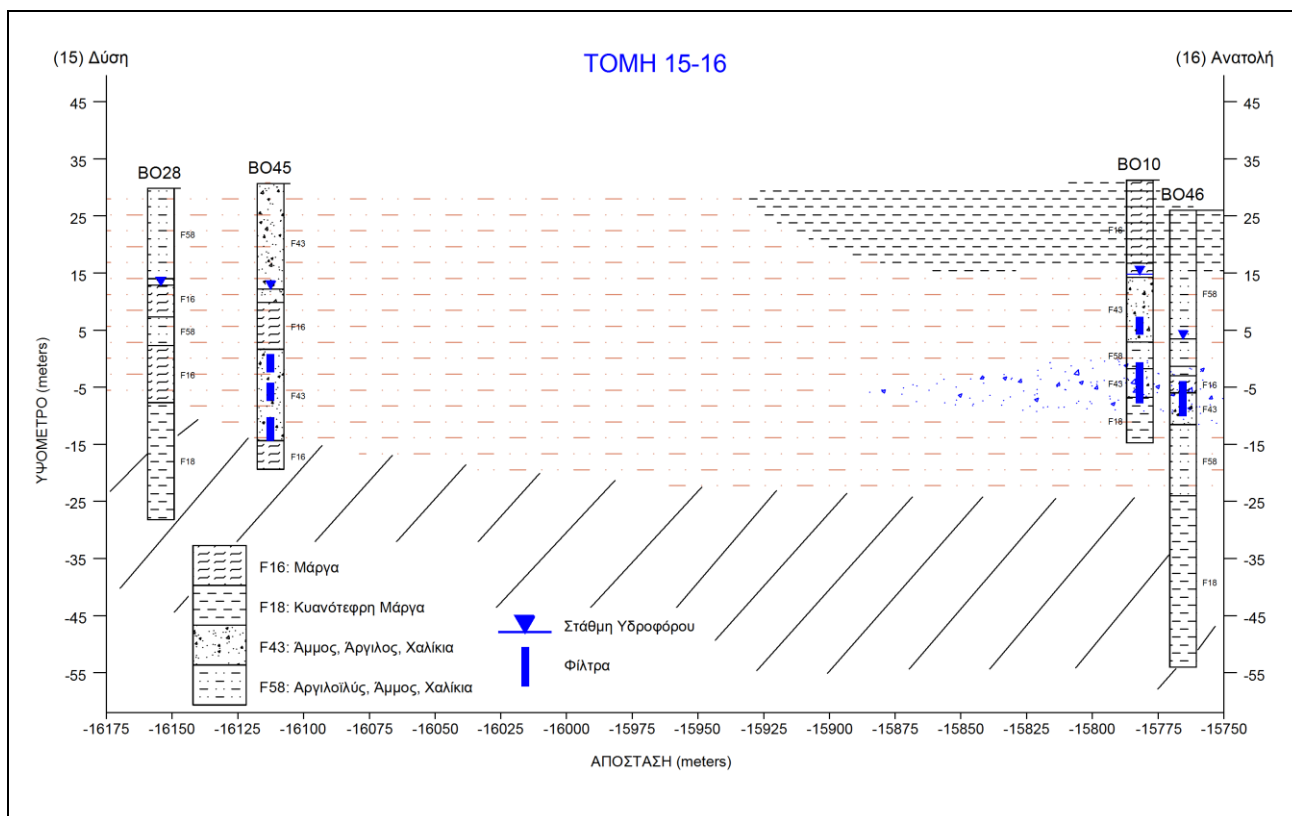
Εικόνα 16 : Τομή 3-4 Δυτικά του Ασωπού ποταμού. Πιθανή είναι η ύπαρξη ρήγματος κατά μήκος του ποταμού. Αύξηση του πάχους των αδρομερών αποθέσεων



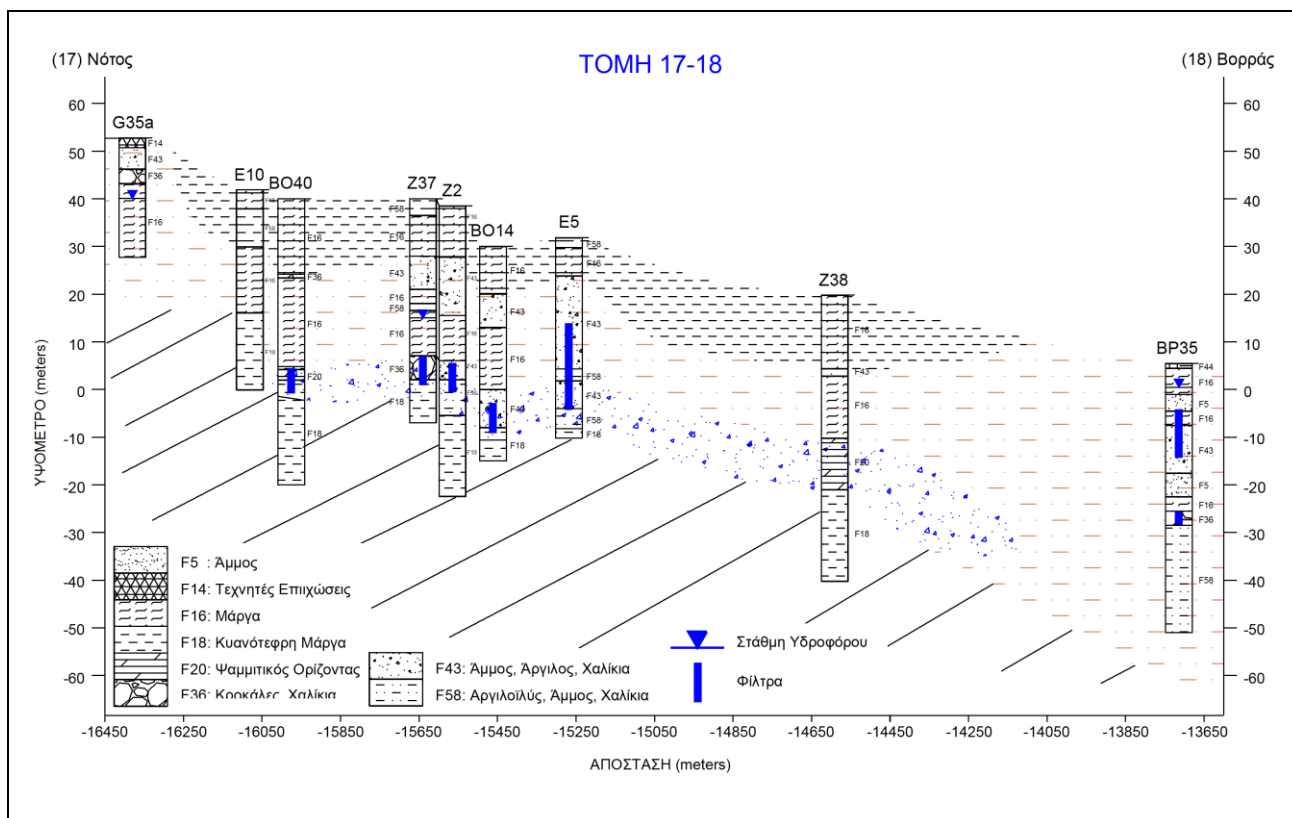
Εικόνα 17 : Τομή 7-8 κοντά στον Ασωπό ποταμό με κατεύθυνση Δύση-Ανατολή



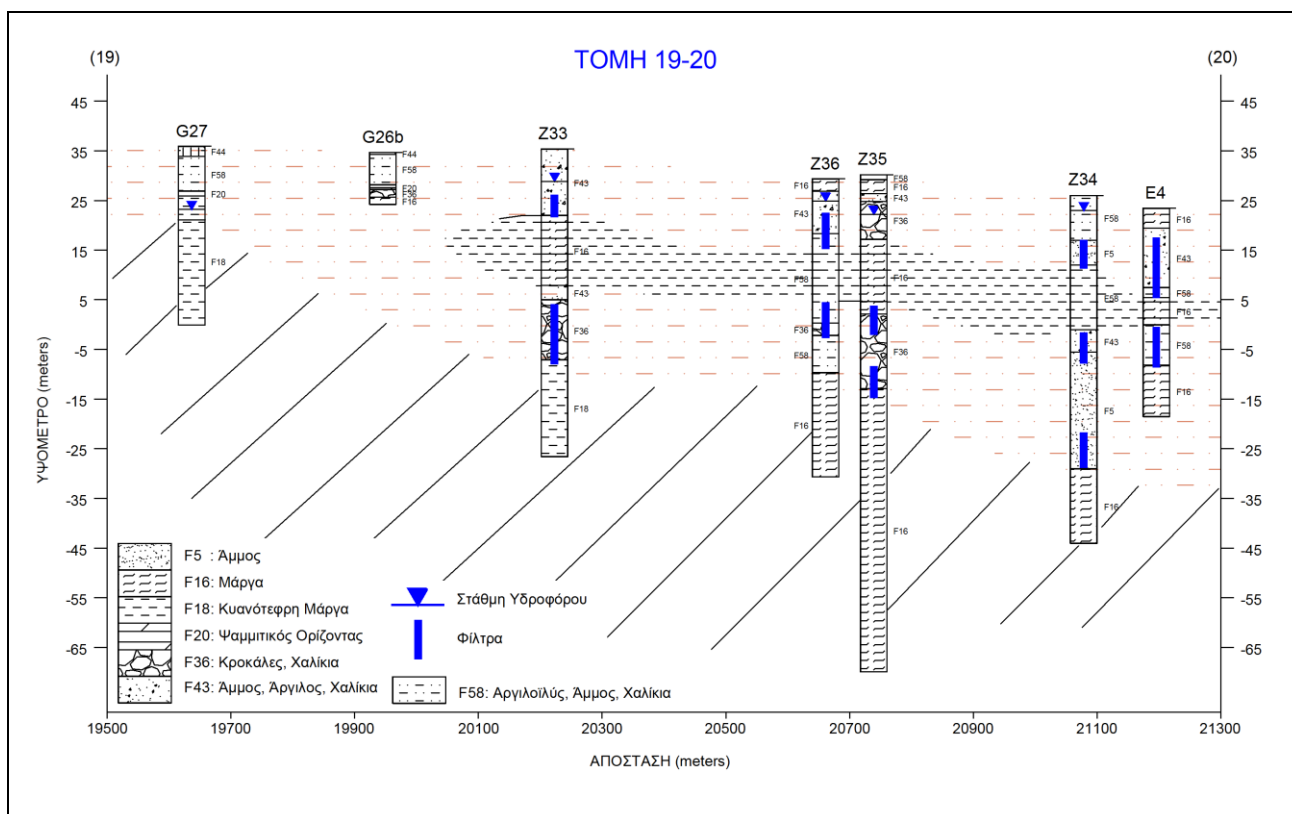
Εικόνα 18 : Τομή 11-12 ανάμεσα στον ποταμό Ασωπό και τον ποταμοχείμαρο Ζαπάντη με κατεύθυνση από την ημιλοφώδη περιοχή προς την παραλιακή ζώνη



Εικόνα 19 : Τομή 15 – 16 στο κέντρο του προσχωματικού υδροφόρου συστήματος Δυτικά του παταμοχείμαρου Ζαπάντη



Εικόνα 20 : Η Τομή 17 – 18 είναι η μεγαλύτερη σε μήκος τομή εγκάρσια του προσχωματικού υδροφόρου καθώς φτάνει από την ημιλοφώδη περιοχή κοντά στην παραλιακή ζώνη.



Εικόνα 21 : Τομή 19-20 ανάμεσα στον ποταμοχείμαρο Ζαπάντη και τον ποταμοχείμαρο Ράχιανη με κατεύθυνση από την ημιλοφώδη περιοχή προς την παραλιακή ζώνη.

6.4 Χαρακτηριστικά του Προσχωματικού Υδροφόρου συστήματος

Η περιοχή έρευνας όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, καλύπτει το μεγαλύτερο τμήμα της Βόρειας παραλιακής ζώνης του Νομού Κορινθίας. Γεωγραφικά, οριοθετείται, από τον Κορινθιακό Κόλπο προς τον Βορρά έως την ρηξιγενή ζώνη που αναπτύσσεται κατά μήκος του άξονα της Νέας Εθνικής Οδού προς τον Νότο και καλύπτει ένα εύρος από Ανατολικά την επέκταση των 'Τυρρήνιων' αναβαθμίδων στην θάλασσα έως Δυτικά, τον Ασωπό ποταμό.

Το κύριο χαρακτηριστικό της περιοχής είναι η ύπαρξη συστήματος κανονικών ρηγμάτων διεύθυνσης Α-Δ τα οποία προς τα Δυτικά, σταδιακά αλλάζουν διεύθυνση και γίνονται ΒΔ-ΝΑ σχηματίζοντας μία αμφιθεατρική μορφή. Κύρια φυσιογραφικά στοιχεία του συστήματος είναι ο Ασωπός ποταμός ο οποίος είναι και το Δυτικό όριο της περιοχής μελέτης και οι ποταμο-χειμαρροι Ζαπάντης και Ράχιανη οι οποίοι κινούνται σχεδόν παράλληλα με την υδραυλική κλίση του συστήματος.

Ο προσχωματικός υδροφόρος της παραλιακής ζώνης Κορίνθου που οριοθετείται προς τον Νότο από τη ρηξιγενή ζώνη, εντοπίζεται Νότια του Κορινθιακού Κόλπου με τον οποίο έχει άμεση λειτουργική επικοινωνία είτε με την εποχιακή εκφόρτιση του συστήματος προς την θάλασσα είτε με την εποχιακή εισροή του θαλασσινού νερού στο σύστημα σε κάποιες περιπτώσεις κατά την θερινή περίοδο.

Λιθολογικά η ευρύτερη περιοχή έρευνας, όπως προέκυψε από την επεξεργασία δεδομένων πολυάριθμων γεωτρήσεων και των υδρολιθολογικών τομών² που προέκυψαν από αυτές, χαρακτηρίζεται από πολύ έντονο βαθμό ετερογένειας και ανισοτροπίας τόσο κατά την κατακόρυφο όσο και κατά την οριζόντια διεύθυνση. Οι γεωλογικές τομές που προέκυψαν από την επεξεργασία των γεωτρήσεων όπως και η θέση τους στην ευρύτερη περιοχή έρευνας παραθέτονται στο Παράρτημα της παρούσας διατριβής.

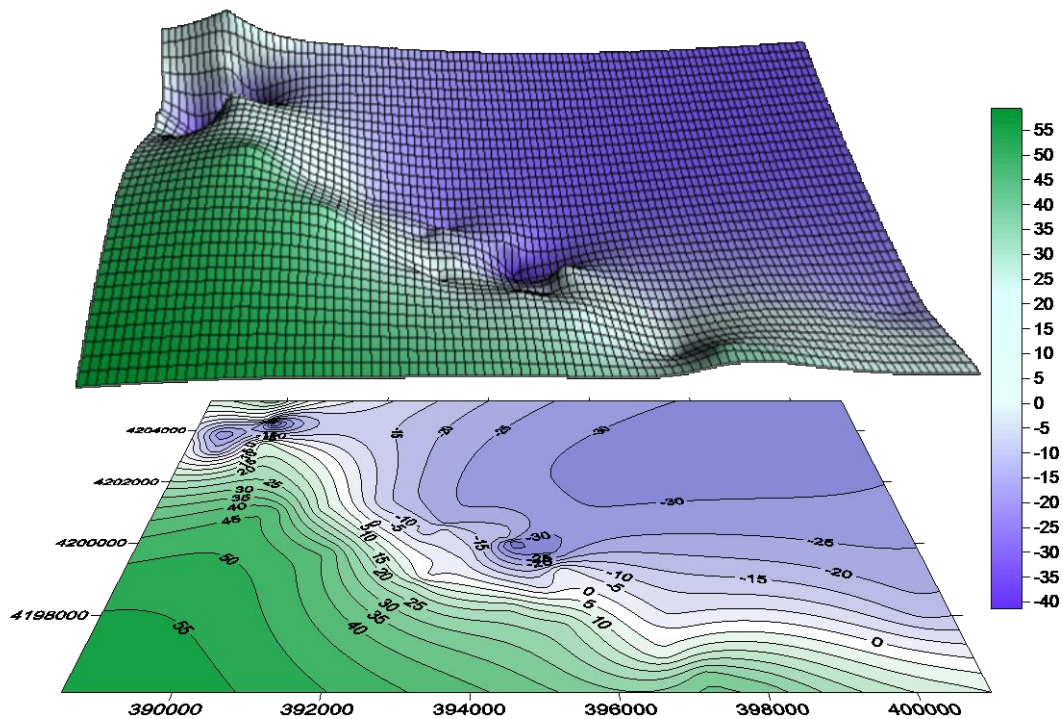
Όπως παρατηρείται και από τις υδρολιθολογικές τομές που παρατέθηκαν νωρίτερα τόσο κατά την κατακόρυφο έννοια όσο και κατά την οριζόντια, παρατηρούνται συνεχείς εναλλαγές και μεταβάσεις μεταξύ των λιθολογικών χαρακτήρων. Όπως παρουσιάζεται και στο αντίστοιχο υπόμνημα, υπάρχει εναλλαγή μεταξύ άμμων, αργίλων, χαλικιών και αργιλοϊλύος με μεταβαλλόμενο πάχος διαστρώσεων. Υπόβαθρο όλου του συστήματος του προσχωματικού υδροφόρου θεωρείται ότι είναι οι μαργαϊκές αποθέσεις η οποία είναι μη περατός σχηματισμός.

Από την επεξεργασία των λιθολογικών τομών, προέκυψε ένας χάρτης με τις ισοϋψείς της οροφής της μάργας όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 22. Τα βάθη στα οποία συναντώνται οι μαργαϊκοί σχηματισμοί (Κορινθιακές μάργες) είναι από 10-15 μέτρα στο Νότιο περιθώριο

² Το σύνολο των τομών παρουσιάζονται στο Παράρτημα με περισσότερες λεπτομέρειες

φτάνοντας τα 60-80μέτρα στην παραλιακή ζώνη. Η κλίση αυτή της οροφής της μάργας προς το Βορρά οφείλεται, όπως έχει αναλυθεί εκτενέστερα σε προηγούμενο κεφάλαιο, στην νεοτεκτονική εξέλιξη της περιοχής με την δημιουργία, ανάπτυξη και μετανάστευση του συστήματος των ρηγμάτων που οριοθετούν την περιοχή αλλά και τις μεταβολές του επιπέδου της θάλασσας που έχουν αποτυπωθεί στις φάσεις, πάχος και ηλικία των Πλειο-Πλειστοκαινικών ιζημάτων που πληρώνουν την λεκάνη ιζηματογένεσης.

Κατά μήκος του π. Ασωπού, η οροφή της μάργας φαίνεται να εμφανίζεται σε μεγαλύτερα βάθη σε σχέση με τις γειτονικές περιοχές. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται είτε σε ρηξιγενή τεκτονική είτε απλά διαβρωτικές διεργασίες του π. Ασωπού και την μετέπειτα απόθεση υλικών ποταμοχειμάριας προέλευσης.



Εικόνα 22: Δισδιάστατη και Τρισδιάστατη απεικόνιση της οροφής του Μαργαϊκού σχηματισμού (στεγανό υπόβαθρο προσχωματικού υδροφόρου συστήματος) βάσει της ανάλυσης των λιθολογικών δεδομένων των γεωτρήσεων

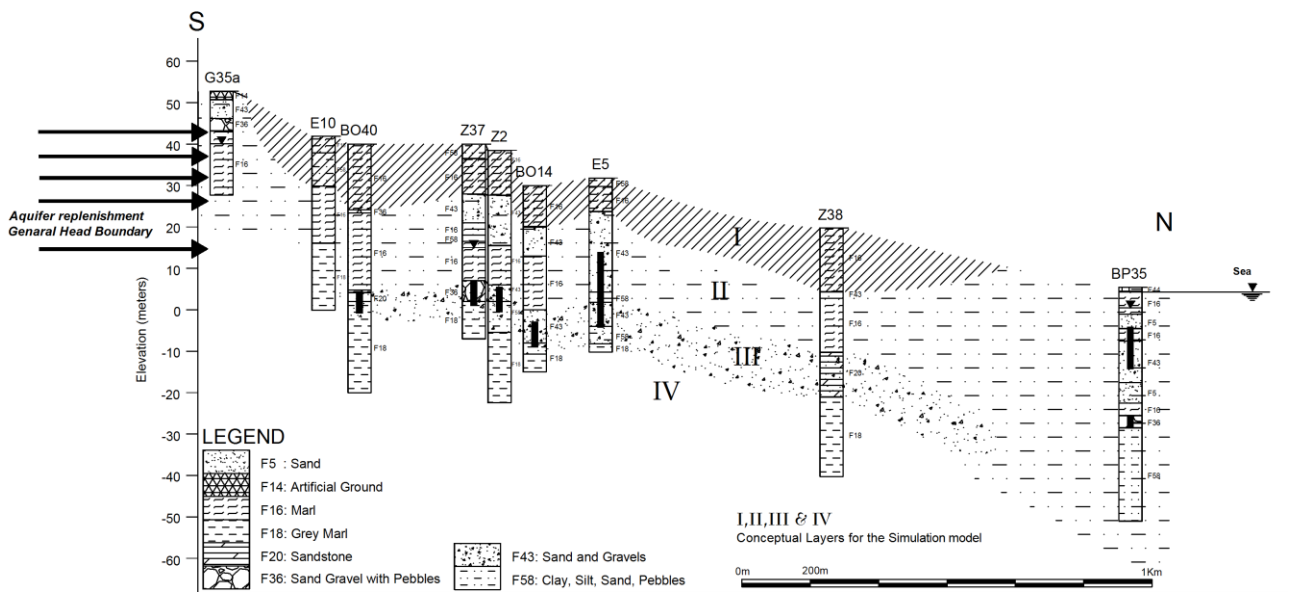
Το πάχος των προσχώσεων εντός των οποίων αναπτύσσεται το παραλιακό υδροφόρο σύστημα, ποικίλει από λίγα μέτρα (15-20μ) στις Νότιες παρυφές του συστήματος στην ημιλοφώδη ζώνη έως 60-80μ στην παραλιακή ζώνη. Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν πολλά λιθολογικά δεδομένα γεωτρήσεων από την παραλιακή ζώνη, το πάχος των προσχώσεων και το βάθος της οροφής της μάργας βασίζεται κυρίως σε λογικές εκτιμήσεις.

Υδρογεωλογικά, το υπό έρευνα σύστημα λόγω της έντονης λιθολογικής του ανομοιογένειας μεταβάλλεται από θέση σε θέση. Στην γενική του μορφή, το σύστημα αποτελείται από έναν ελεύθερο φρεάτιο υδροφόρο ορίζοντα, ένα ή περισσότερα υδατοστεγανά στρώματα και έναν ή περισσότερους υδροφόρους ορίζοντες υπό πίεση οι οποίοι λόγω των λιθολογικών μεταβάσεων, είτε βρίσκονται σε υδραυλική επικοινωνία με τον φρεάτιο υδροφόρο είτε διακόπτεται η συνέχειά τους.

Στις υδρολιθολογικές τομές με τον διαχωρισμό ενοτήτων έγινε προσπάθεια να αποδοθεί αυτό το πολύπλοκο υδρογεωλογικό καθεστώς το οποίο παρατηρήθηκε και στις μετρήσεις πεδίου σε αρκετά σημεία. Παράδειγμα ύπαρξης δύο υδροφόρων - ενός φρεάτιου και ενός υπό πίεση είναι η περιοχή της Ευαγγελίστριας όπου σε γειτονικά σημεία (Γεώτρηση EY6 και Πηγάδι EY6) μετρήθηκαν διαφορετικές πιεζομετρικές επιφάνειες.

Δεδομένου ότι στο επίπεδο της κλίμακας της έρευνας (παραλιακή ζώνη Κορινθίας) οι υδροφόροι αυτοί βρίσκονται σε υδραυλική επικοινωνία μεταξύ τους, δεν γίνεται διάκριση μεταξύ τους καθώς θεωρείται ότι δρουν σαν ένα ενιαίο υδροφόρο σύστημα.

Υδρολιθολογική Τομή με κατεύθυνση Νότο – Βορρά, που αποδίδει την γενική εικόνα λειτουργίας του συστήματος είναι η ακόλουθη.

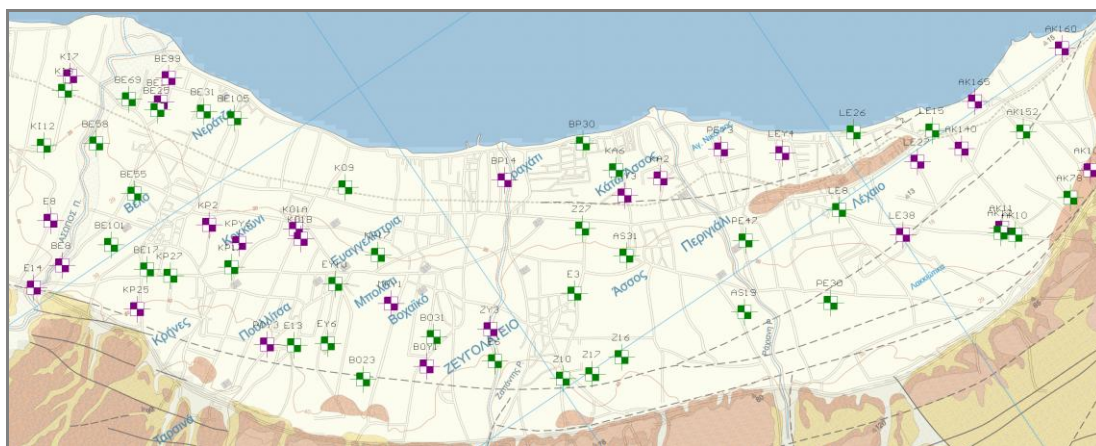


Εικόνα 23 : Εννοιολογικό μοντέλο της περιοχής έρευνας - Βασίζεται στην Υδρολιθολογική Τομή 17-18.

6.5 Πιεζομετρία και Δυναμική του Υδροφόρου συστήματος

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει συνοπτική περιγραφή των μηχανισμών λειτουργίας και εξέλιξης του υπό έρευνα υδροφόρου συστήματος όπως προέκυψαν από όλα τα διαθέσιμα στοιχεία μετρήσεων στάθμης. Για την σύνταξη των πιεζομετρικών χαρτών της περιοχής έρευνας χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία μετρήσεων στάθμης που έγιναν στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος το έτος 1998 ενώ στην συνέχεια ακολούθησε συλλογή στοιχείων από το 1999 έως το 2007 με βάση το ίδιο δίκτυο γεωτρήσεων και πηγαδιών, προκειμένου να υπάρχει συνέχεια και τα αποτελέσματα των μετρήσεων να είναι συγκρίσιμα.

Η μελέτη της πιεζομετρίας βασίζεται στην αξιολόγηση όλων των διαθέσιμων στοιχείων από το Φεβρουάριο του 1998 έως και τον Δεκέμβριο του 2002. Σε αυτό το χρονικό διάστημα πραγματοποιήθηκαν 28 φάσεις σταθμημετρήσεων. Από το Φεβρουάριο του 1998 έως τον Φεβρ. του 1999, οι σταθμημετρήσεις έγιναν στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος που είχε ανατεθεί στο ΕΜΠ από το Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης ενώ από τον Νοέμβριο του 1999 έως και τον Δεκέμβριο του 2002, έγιναν 15 φάσεις σταθμημετρήσεων στα πλαίσια της παρούσας διατριβής σε συνεργασία με το Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης. Οι φάσεις αυτές εκτελέστηκαν κατά τις ακόλουθες περιόδους: Νοέμ/1999, Δεκ/1999, Φεβρ/2000, Μάρ/2000, Απρίλ/2000, Μάιος 2000, Ιούλ/2000, Σεπτ/2000, Οκτώβριος 2000, Ιανουάριος 2001, Φεβρουάριος 2001, Μάρτιος 2001, Μάιος 2001, Ιούλιος 2001 και τέλος Δεκέμβριος 2002. Τα πλήρη στοιχεία των μετρήσεων παραθέτονται στο παράρτημα ενώ οι θέσεις των σημείων μέτρησης απεικονίζονται στον χάρτη (Εικόνα 24) που περιλαμβάνει όλα τα σημεία παρατήρησης (δειγματοληψίας και μετρήσεων στάθμης).



Εικόνα 24 : Θέσεις σημείων παρατήρησης στάθμης και σημείων δειγματοληψίας

Ο αριθμός των σημείων παρατήρησης σε κάθε φάση μετρήσεων διαφοροποιείται ανάλογα με την δυνατότητα πρόσβασης που υπήρχε την αντίστοιχη χρονική στιγμή αλλά και το καθεστώς άντλησης του υπό μέτρηση υδροληπτικού έργου. Αν και δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην γίνει χρήση στοιχείων από υδροληπτικά έργα που είχαν αντληθεί την ίδια ημέρα, δεδομένου ότι τα αποτελέσματα αυτά δεν είναι αξιόπιστα, κρίνοντας εκ των αποτελεσμάτων της πιεζομετρίας εξάγεται το συμπέρασμα ότι σε κάποιες περιπτώσεις

υπάρχει έντονος επηρεασμός των μετρήσεων στάθμης από το καθεστώς άντλησης στην ευρύτερη περιοχή, ιδιαίτερα κατά την θερινή περίοδο που οι ρυθμοί άντλησης των γεωτρήσεων παρουσιάζουν αυξητική τάση.

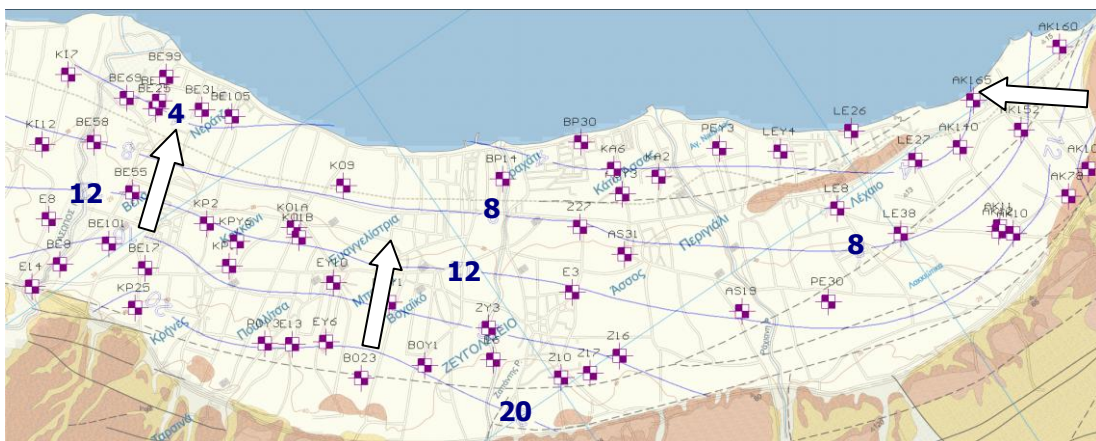
Οι μετρήσεις στάθμης σε κάθε φάση, που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής (Νοέμβριο του 1999 έως και τον Δεκέμβριο του 2002) πραγματοποιήθηκαν σε χρονικό διάστημα δύο ημερών κάθε φορά, ώστε να αντιπροσωπεύουν τις ίδιες συνθήκες εξέλιξης της υπόγειας υδροφορίας. Η επιλογή των χρονικών στιγμών παρατήρησης έγινε αφενός με βάση την ανάγκη να υπάρχει μια πλήρης σειρά μετρήσεων που θα καλύπτουν τις ακραίες οριακές συνθήκες του συστήματος (περίοδος υψηλής στάθμης από Φεβρουάριο έως Μάιο και την περίοδο χαμηλής στάθμης από Σεπτέμβριο έως και Νοέμβριο) και αφετέρου να μελετηθεί η εξέλιξη του συστήματος σε μηνιαία βάση.

6.5.1 Μορφή και εξέλιξη της πιεζομετρίας

Η γενική διεύθυνση ροής του υπόγειου νερού είναι περίπου Β-Ν προς τη θαλάσσια περιοχή του Κορινθιακού Κόλπου ενώ προς το δυτικό τμήμα του υδροφόρου ορίζοντα η διεύθυνση ροής μετατρέπεται σε ΒΒΑ διεύθυνση. Η μέση υδραυλική κλίση του υδροφόρου ανέρχεται σε 6,3‰ περίπου, ενώ μικρότερες τιμές παρατηρούνται στην ευρύτερη περιοχή των ποταμο-χειμάρρων Ζαπάντη και Ράχιανη, όπου η υδροπερατότητα των ιζημάτων είναι αυξημένη, λόγω αύξησης του κοκκομετρικού μεγέθους των υλικών του υδροφόρου.

Προκειμένου να γίνει κατανοητή η μορφή και η εξέλιξη του Υδροφόρου συστήματος, θα γίνει επιλεκτική περιγραφή διαδοχικών περιόδων υψηλής και χαμηλής στάθμης.

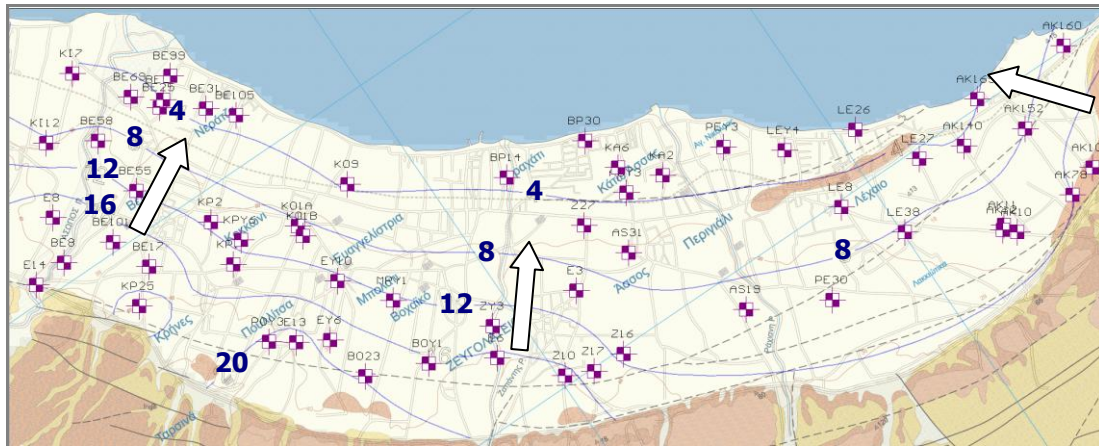
Μάιος 1998



- στον άξονα Βέλου-Νεράτζας με $i=6.3 \times 10^{-3}$
- στην περιοχή του Λεχαίου με $i=4.16 \times 10^{-3}$ και τέλος
- στον άξονα Ζευγολατιό- Βραχάτι με $i=5.34 \times 10^{-3}$
- Ανατολικά του Λεχαίου, ανάντη του αρχαίου λιμανιού $i=12.3 \times 10^{-3}$

Εικόνα 25 : Υδραυλικές κλίσεις σε διαφορετικούς άξονες - Πιεζομετρικός χάρτης τον Μάιο του 1998 (περίοδος υψηλής στάθμης)

Μάρτιος 2000

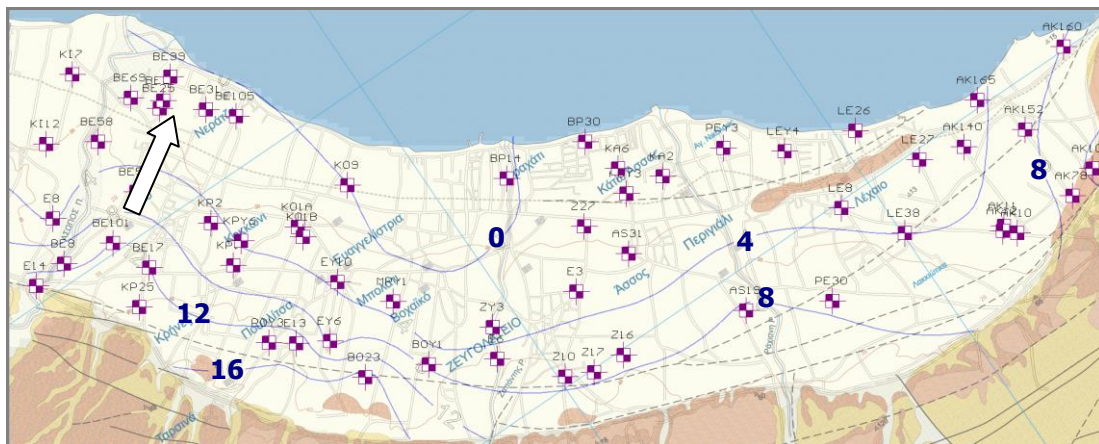


- στον άξονα Βέλου-Νεράτζας $i=4.3 \times 10^{-3}$
- στην περιοχή του Λεχαιού $i=3.58 \times 10^{-3}$ και τέλος
- στον άξονα Βοχαϊκό - Βραχάτι $i=7.16 \times 10^{-3}$,
- Ανατολικά του Λεχαιού, ανάντη του αρχαίου λιμανιού $i=9.83 \times 10^{-3}$

Εικόνα 27 : Υδραυλικές κλίσεις σε διαφορετικούς άξονες - Πιεζομετρικός χάρτης τον Μάρτιο του 2000 (περίοδος υψηλής στάθμης)

Οι παρατηρούμενες ανωμαλίες στην γενική κατανομή των πιεζομετρικών καμπυλών (που γενικά διατάσσονται παράλληλα με την παραλιακή ζώνη) οφείλονται στην περισσότερο έντονη εκμετάλλευση στην οποία υπόκειται ο υπόγειος υδροφόρος κατά την διάρκεια αυτής της περιόδου.

Οκτώβριος 2000



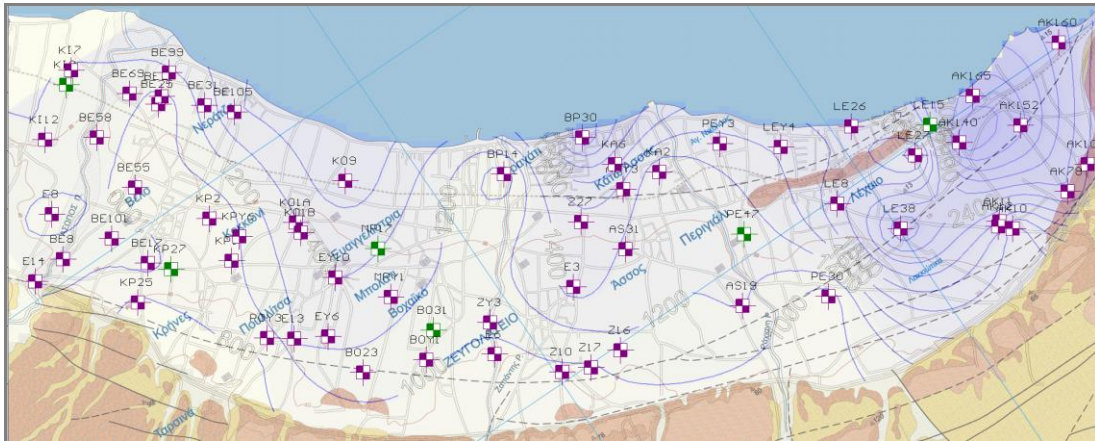
- στον άξονα Βέλου-Νεράτζας $i=4.5 \times 10^{-3}$
- στον άξονα Ζευγολατειό-Άσσος $i=7.44 \times 10^{-3}$,
- στον άξονα Μπολάτι - Παραλία $i=7.74 \times 10^{-3}$,
- Ανατολικά του Λεχαιού, ανάντη του αρχαίου λιμανιού $i=8.19 \times 10^{-3}$

Εικόνα 28 : Υδραυλικές κλίσεις σε διαφορετικούς άξονες - Πιεζομετρικός χάρτης τον Οκτώβριο του 2000

Την περίοδο χαμηλής στάθμης **Σεπτέμβριος -Οκτώβριος 2000**, οι παρατηρούμενες διακυμάνσεις στις πιεζομετρικές καμπύλες έχουν αυξηθεί όπως άλλωστε και η εκμετάλλευση

του υπόγειου υδροφορέα μετά από μία περίοδο έντονων αντλήσεων για την κάλυψη των υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών κατά την θερινή περίοδο. Τον Σεπτέμβριο του 2000, παρατηρείται το μέγιστο βάθος πιεζομετρικής επιφάνειας και το ελάχιστο απόλυτο υψόμετρο αυτής (μετρήσεις που παραθέτονται στο παράρτημα της παρούσας διατριβής).

Εμφανής είναι η έντονη μείωση της πιεζομετρικής επιφάνειας σε όλη την έκταση του υδροφόρου με αποτέλεσμα την εμφάνιση φαινομένων υφαλμύρωσης στην παραλιακή ζώνη όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 29 που καταγράφεται η εικόνα της κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

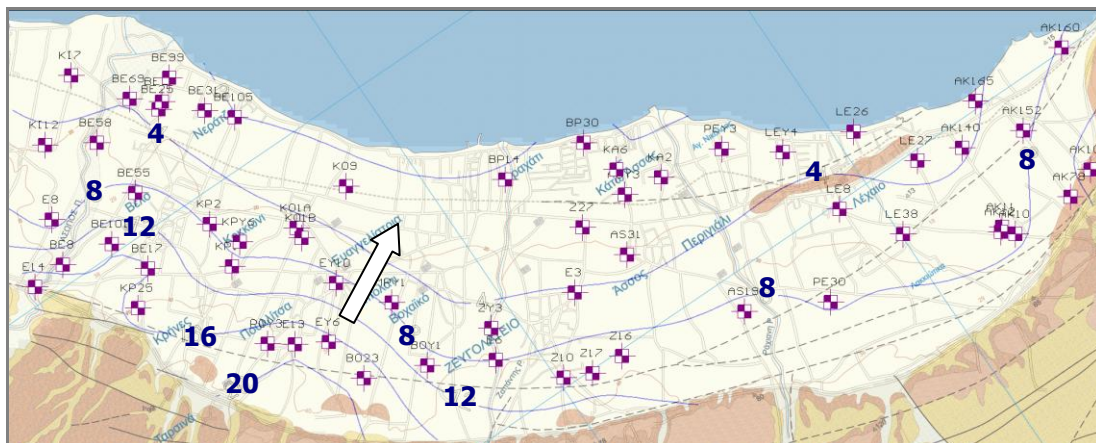


Εικόνα 29 : Κατανομή της Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας ($\mu\text{S}/\text{cm}$) τον **Οκτώβριο του 2000**. Οι υψηλότερες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας (2500-2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$) παρατηρούνται Ανατολικά του ποταμοχείμματος Ράχιανη στην περιοχή του Λεχαιού.

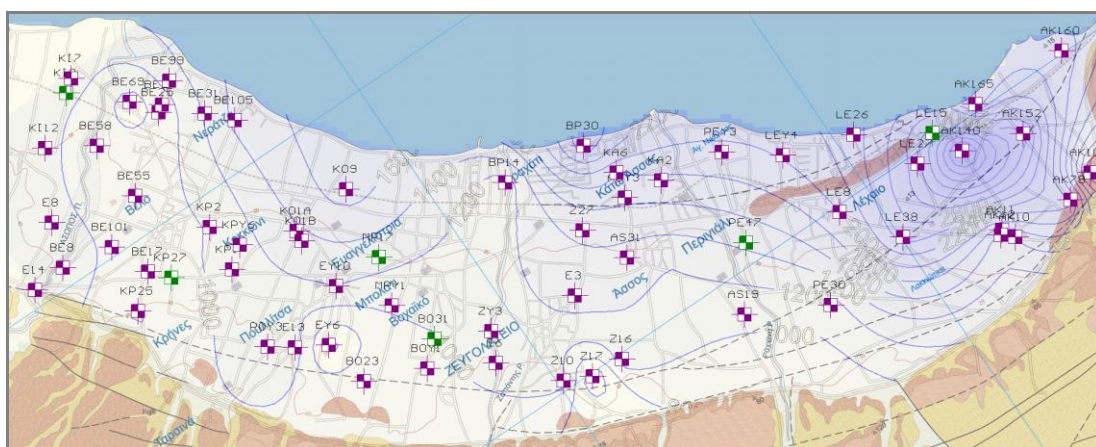
Στην παραλιακή περιοχή του Κοκκωνίου παρατηρούνται αρνητικά υψόμετρα σαν αποτέλεσμα της έντονης εκμετάλλευσης του υπόγειου υδάτινου δυναμικού καθώς γίνεται άντληση και το νερό πωλείται μέσω δικτύων σε διάφορα σημεία της πεδινής και της ημιορεινής ζώνης. Στα σημεία αυτά, όσο παρατείνεται το καθεστώς της υπερεκμετάλλευσης του υπόγειου υδροφορέα δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες για θαλάσσια διείσδυση γεγονός που απεικονίζεται και στην κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στην Εικόνα 29 με υψηλές τιμές (1600 $\mu\text{S}/\text{cm}$) στην περιοχή του Κοκκωνίου και 2400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ στην περιοχή του Λεχαιού.

Από τις φάσεις μετρήσεων (Σεπτέμβριος και Οκτώβριος του 2000) που παρουσιάζονται σε αυτή την φάση χαμηλής πιεζομετρικής στάθμης, πολύ ενδιαφέρουσα είναι η επαναπλήρωση του προσχωματικού υδροφόρου που κάνει την εμφάνισή της από τα Νότιο-Δυτικά και τα Νότιο-Ανατολικά, καθώς αρχίζουν οι βροχοπτώσεις και ελαχιστοποιούνται οι αντλήσεις στην πεδινή ζώνη.

Φεβρουάριος 2001



Εικόνα 30 : Πιεζομετρικός χάρτης τον Φεβρουάριο του 2001



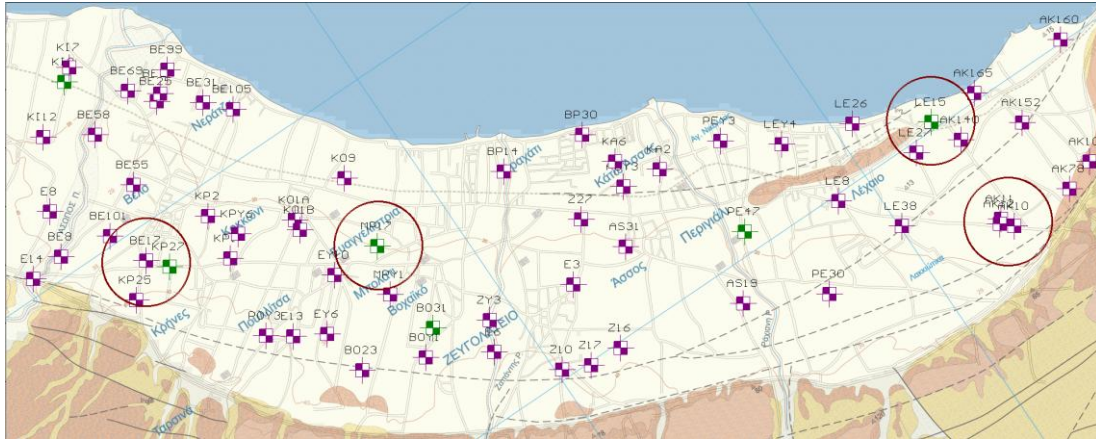
Εικόνα 31 : Κατανομή της Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας ($\mu\text{S}/\text{cm}$) τον Φεβρουάριο του 2001

Από τον Σεπτέμβριο του 2000 έως το Φεβρουάριο του 2001, δεδομένου ότι έχει μεσολαβήσει η χειμερινή περίοδος με παύση των αντλήσεων, βροχοπτώσεις και χειμερινές αρδεύσεις με κατάκλιση των εκτάσεων (μορφή τεχνητού εμπλουτισμού) ο προσχωματικός υδροφόρος φαίνεται να έχει επανακτήσει ως ένα βαθμό την ισορροπία του. Παράλληλα με την επαναπλήρωση του υδροφόρου ορίζοντα έχει μειωθεί και το μέτωπο της υφαλμύρυνση (μείωση των τιμών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας) στην Δυτική πλευρά του υδροφόρου συστήματος. Στην Ανατολική πλευρά του υδροφόρου συστήματος που η πιεζομετρία εμφανίζεται περισσότερο αμετάβλητη, εμφανίζει σταθερά αυξημένες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας (μέτρηση $4250 \mu\text{S}/\text{cm}$ στην γεώτρηση AK140).

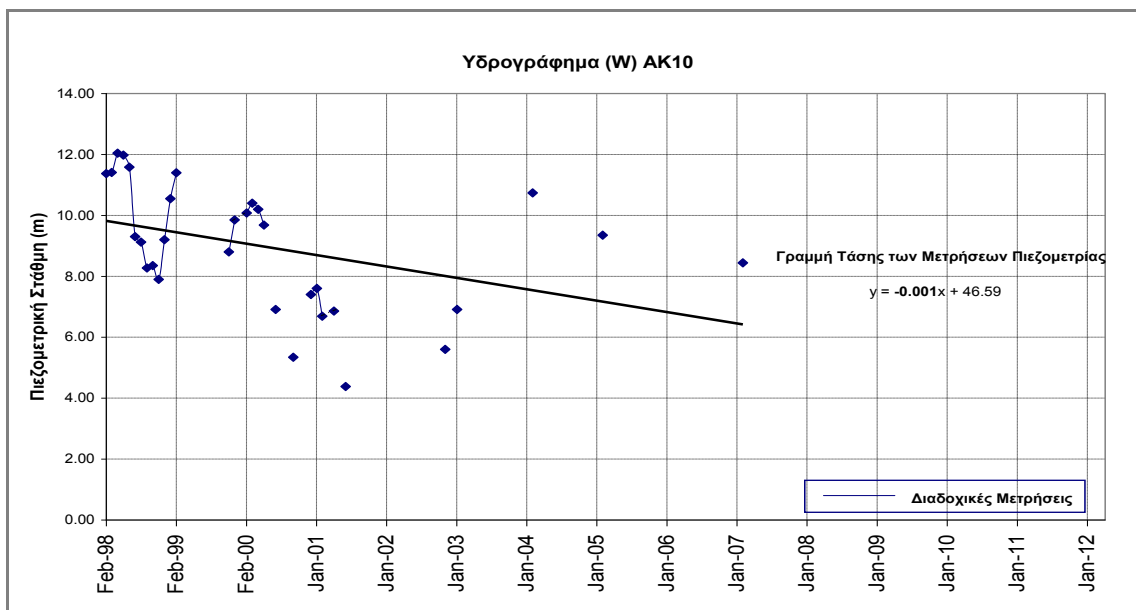
Σε κάθε περίπτωση όμως είναι εμφανής γενικά η υπερ-ετήσια μείωση της πιεζομετρικής στάθμης σε σχέση με την υψηλή περίοδο που μετρήθηκε το 1998. Η μείωση αυτή γίνεται περισσότερο εμφανής στα υδρογραφήματα επιλεγμένων θέσεων παρατήρησης που παραθέτονται στην συνέχεια.

Οι γεωτρήσεις και τα πηγάδια που επιλέχθηκαν για την παρουσίαση των υδρογραφημάτων τους, αντιπροσωπεύουν διαφορετικά σημεία του προσχωματικού υδροφόρου αλλά και

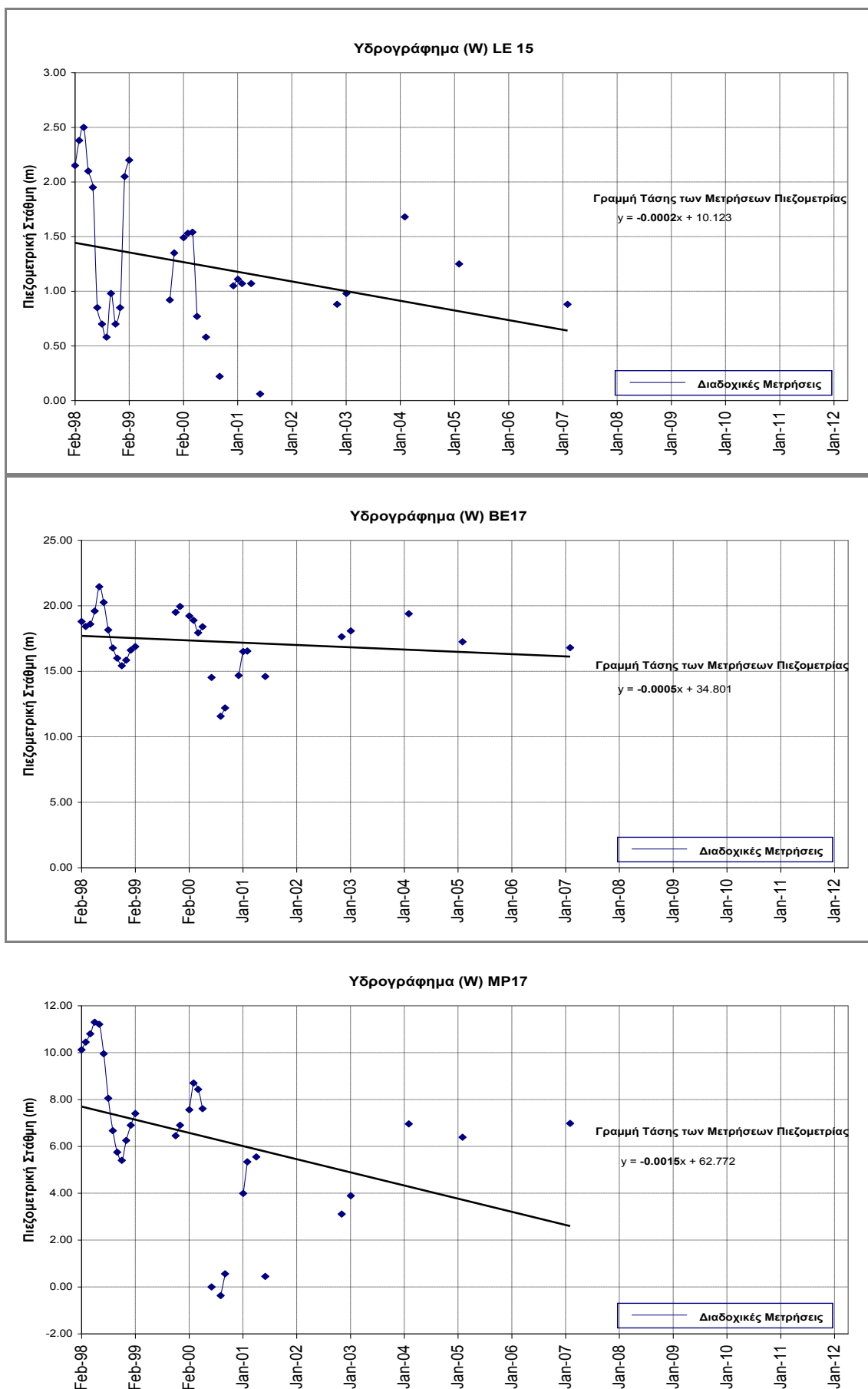
διαφορετικές συνθήκες τροφοδοσίας. Ωστόσο είναι φανερό σε όλες τις περιπτώσεις ότι υφίσταται μια διαχρονική μείωση της πιεζομετρικής στάθμης που οφείλεται αφενός στην μεταβολή των κλιματολογικών συνθηκών (λιγότερες βροχοπτώσεις) και σύγχρονη αύξηση της εκμετάλλευσης του υδατικού δυναμικού για την κάλυψη των διαρκώς αυξανόμενων αναγκών ύδρευσης και άρδευσης.



Εικόνα 32 : Θέσεις των γεωτρήσεων των οποίων ακολουθούν τα υδρογραφήματα



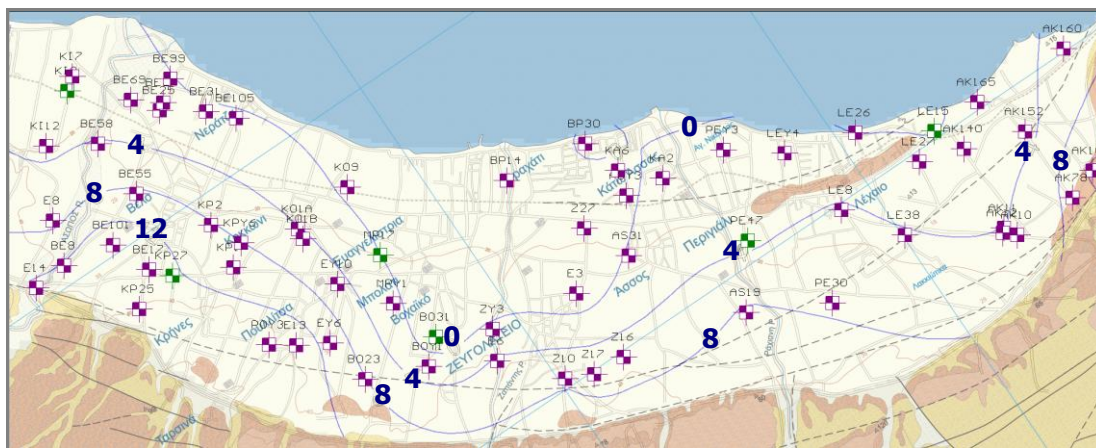
Εικόνα 33 : Υδρογράφημα της Γεώτρησης AK10



Εικόνα 34 : Υδρογραφήματα των Γεωτρήσεων ΛΕ16, ΒΕ17 και ΜΠ17

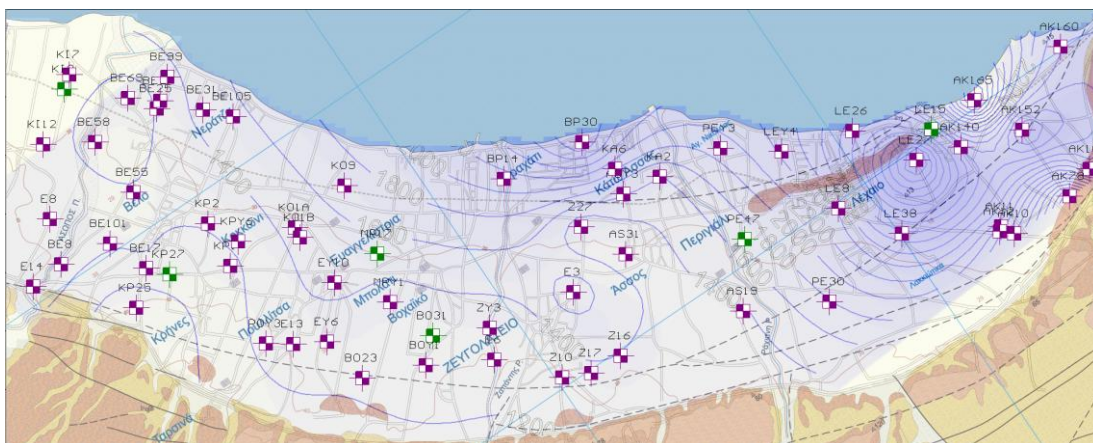
Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 35, έντονη είναι η πτώση της πιεζομετρικής επιφάνειας στην Δυτική πλευρά του υδροφόρου τον Ιούλιο του 2001 σε σχέση με τον Φεβρουάριο του 2001. Δεδομένου ότι η πιεζομετρική στάθμη είναι ήδη χαμηλά σε σχέση με παλαιότερα υδρολογικά έτη, μετά την έναρξη των αντλήσεων (**Ιούλιος 2001**) καταγράφονται αρνητικά υψόμετρα πιεζομετρικής επιφάνειας τα οποία διατηρούνται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα επιτείνοντας τον κίνδυνο θαλάσσιας διείσδυσης.

Ιούλιος 2001



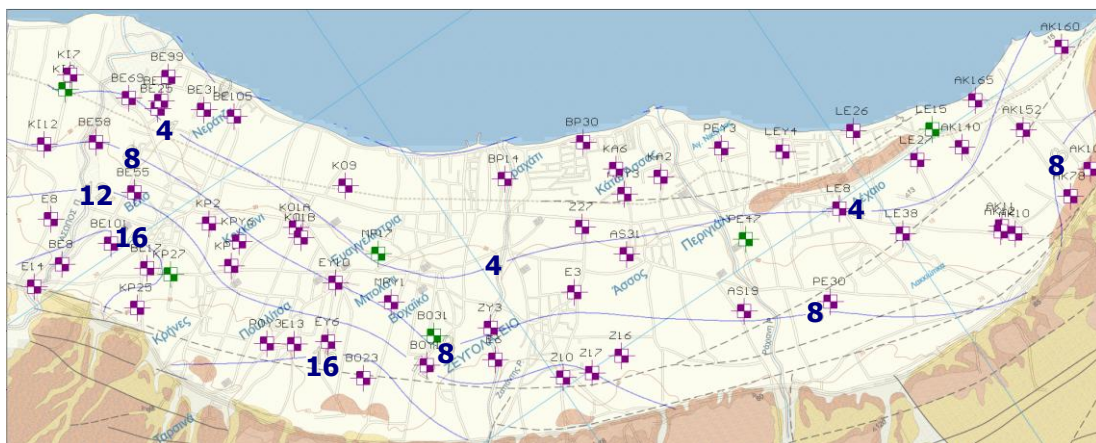
Εικόνα 35 : Πιεζομετρικός χάρτης τον Ιούλιο του 2001

Όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 36 ιδιαίτερα αυξημένες παρουσιάζονται και οι μετρηθείσες τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (4820 $\mu\text{S}/\text{cm}$ στην γεώτρηση LE27) στην περιοχή του Λεχάιου, ενδεικτικό της σταδιακής υφαλμύρινσης του υδροφόρου ορίζοντα στο Ανατολικό τμήμα του προσχωματικού υδροφόρου συστήματος



Εικόνα 36 : Κατανομή της Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας ($\mu\text{S}/\text{cm}$) τον Ιούλιο του 2001

Τον **Δεκέμβριο του 2002** αν και είναι περίοδος κατά την οποία έχουν σταματήσει οι αντλήσεις άρδευσης, στην περιοχή του Βραχατίου εμφανίζονται ακόμη αρνητικά υψόμετρα ως αποτέλεσμα της υπερ-ετήσιας μείωσης της πιεζομετρικής επιφάνειας



Εικόνα 37 : Πιεζομετρικός χάρτης τον Δεκέμβριο του 2002

6.6 Εννοιολογικό μοντέλο Λειτουργίας του Υδροφόρου συστήματος

Το εννοιολογικό μοντέλο της περιοχής που θα παρουσιαστεί είναι ουσιαστικά μια απλουστευμένη προσέγγιση των πολύπλοκων υδρογεωλογικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή έρευνας, που όμως καλύπτει τα βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Η δημιουργία ενός σωστού εννοιολογικού μοντέλου είναι πάντα το κλειδί για την κατασκευή ενός λειτουργικού μαθηματικού (υπολογιστικού) μοντέλου καθώς είναι αυτό που καθορίζει τα βασικά χαρακτηριστικά που ελέγχουν την υδρογεωλογία του συστήματος.

Το εννοιολογικό μοντέλο της περιοχής βασίστηκε αφενός στα Γεωλογικά δεδομένα των λιθολογικών τομών και αφετέρου στην υδραυλική συμπεριφορά του συστήματος όπως αυτή παρουσιάστηκε στους πιεζομετρικούς χάρτες νωρίτερα.

Ένα αρκετά σημαντικό μέρος της τροφοδοσίας του συστήματος, πραγματοποιείται κατά ένα μέρος από την διήθηση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων κατά την χειμερινή περίοδο, καθώς οι βροχοπτώσεις κατά την θερινή περίοδο είναι συνήθως έντονα φαινόμενα, τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερο βαθμό απορροής σε σχέση με τον βαθμό κατείδυσης.

Ο πλέον σημαντικός παράγοντας για την ισορροπία του συστήματος είναι η πλευρική τροφοδοσία από τα ανάντη όρια της περιοχής έρευνας (Τυρρήνιες αναβαθμίδες και ποταμοχειμνάρειες αποθέσεις) που φαίνεται να είναι και η κυριότερη πηγή επαναπλήρωσης του προσχωματικού υδροφόρου. Όπως παρατηρήθηκε από τους χάρτες πιεζομετρίας που προηγήθηκαν, η τροφοδοσία αυτή πραγματοποιείται κατά μήκος όλου του ανάντη ορίου του συστήματος διαφοροποιούμενη όμως ως προς την δυναμικότητά της. Η απόληξη της λεκάνης του π. Ασωπού που τροφοδοτείται από το Νότιο-Δυτικό όριο της περιοχής, εμφανίζει

υψηλότερο δυναμικό σε σχέση με την κεντρική περιοχή και το Νότιο-Ανατολικό όριο που έχει μεγαλύτερη υδραυλική κλίση αλλά χαμηλότερη πιεζομετρική στάθμη.

Ένας επιπλέον παράγοντας που συντελεί στην τροφοδοσία του συστήματος είναι οι χειμερινές αρδεύσεις που πραγματοποιούνται με κατάκλιση της αρδευόμενης έκτασης. Ο όγκος ύδατος που κινείται στο ποτάμιο σύστημα του Ασωπού διευθετείται με αρδευτικά έργα τα οποία διοχετεύουν είτε όλη την ροή ή τμήμα αυτής σε μία κεντρική αύλακα (Βοχαϊκή Αύλακα) η οποία κινείται σχεδόν παράλληλα με την Νέα Εθνική Οδό, για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών της πεδινής ζώνης μεταξύ Κιάτου και Κορίνθου και διοχετεύεται στην παραλιακή ζώνη με εγκάρσια αρδευτικά αυλάκια.

Δεδομένης της υπερεπάρκειας νερού που υπάρχει κατά την χειμερινή περίοδο, η υπερ-άρδευση είναι συνήθης πρακτική για πολλές καλλιεργούμενες εκτάσεις. Λόγω του χρόνου παραμονής του νερού στο έδαφος (μεγάλοι χρόνοι παραμονής σε οργωμένο έδαφος), το μεγαλύτερο μέρος του πλεονάζοντος νερού κατεισδύει στον υδροφόρο ορίζοντα εφαρμόζοντας ουσιαστικά ένα είδος τεχνητού εμπλουτισμού. Αν και αυτή η πρακτική μπορεί να θεωρηθεί πλεονέκτημα σε ότι αφορά την δυναμικότητα του υδροφόρου, η έκπλυση των συνήθως υπερ-λιπαινόμενων εδαφών προκαλεί συγχρόνως προβλήματα νιτρικής ρύπανσης και γενικότερα υποβάθμισης της ποιότητας του υδροφόρου ορίζοντα όπως και θα παρουσιασθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Ένα επιπλέον στοιχείο που προκύπτει από τους χάρτες της πιεζομετρίας που παρατέθηκαν νωρίτερα είναι ότι οι ποταμοχείμματοι Ράχιανη και Ζαπάντης δεν φαίνεται να επιδρούν στις πιεζομετρικές γραμμές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ροή δεν είναι μόνιμη και λαμβάνει χώρα μόνο μετά από έντονες βροχοπτώσεις.

Η υδραυλική κλίση κυμαίνεται μεταξύ 0.0063-0.0043 στον άξονα Βέλου-Νεράτζας και 0.0123-0.00819 ανάντη του αρχαίου Λιμανιού του Λεχαίου. Οι υψηλές υδραυλικές κλίσεις σε αυτή την περιοχή μπορεί να αποδοθούν σε έντονες λιθολογικές αλλαγές και φάση με αδρομερή υλικά.

7. ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ – ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

Κατά τη διάρκεια της έρευνας πεδίου πραγματοποιήθηκε συστηματική δειγματοληψία υπόγειων νερών που κάλυψε την περίοδο ενός έτους από τον Ιούλιο του 2000 έως τον Ιούλιο του 2001 (Ιούλιος 2000, Σεπτέμβριος 2000, Οκτώβριος 2000, Ιανουάριος 2001, Φεβρουάριος 2001, Μάρτιος 2001, Μάιος 2001 και Ιούλιος 2001) από επιλεγμένες γεωτρήσεις και πηγάδια που κάλυψαν όλη την περιοχή μελέτης.

Ο αριθμός των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για τις αναλύσεις κυμαίνεται σε κάθε δειγματοληψία από 37-42 ανάλογα με τις συνθήκες και την δυνατότητα άντλησης σε κάθε θέση δειγματοληψίας.

7.1 Δειγματοληψία - Αναλύσεις

Σκοπός της δειγματοληψίας ήταν η λήψη δείγματος αντιπροσωπευτικού της μέσης σύστασης του συνόλου. Για το λόγο αυτό προσδιορίσθηκε ένα δίκτυο γεωτρήσεων και πηγαδιών ώστε αφενός να καλύπτουν όλο το εύρος του προσχωματικού υδροφόρου ορίζονται αλλά αφετέρου να είναι συνεχώς προσβάσιμα. Στα πηγάδια η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε με κατάλληλους δειγματολήπτες στο βάθος του εξεταζόμενου υδροφορέα ενώ στις γεωτρήσεις, όπου ήταν δυνατό, έγινε δειγματοληψία μετά από άντληση της γεώτρησης για χρονικό διάστημα 10 λεπτών ώστε να εξασφαλίζεται αντιπροσωπευτικό δείγμα υπόγειου νερού.

Για την φύλαξη του δείγματος αμέσως μετά την δειγματοληψία, χρησιμοποιήθηκαν μπουκάλια πολυαιθυλενίου ώστε να μην παρουσιάζονται φαινόμενα προσρόφησης ή ανταλλαγής των ιόντων του νερού με ιόντα των τοιχωμάτων γυάλινων μπουκαλιών.

Με σκοπό την αντιπροσωπευτικότητα των αποτελεσμάτων της χημικής ανάλυσης, έγινε προσπάθεια ο χρόνος μεταξύ της δειγματοληψίας και της ανάλυσης να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος (μία ημέρα) ενώ τα δείγματα μεταφέρονταν άμεσα στο *Εργαστήριο Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης* σε θερμοκρασία 4°C. Δεν πραγματοποιήθηκε οξύνιση των δειγμάτων ώστε να είναι δυνατός απευθείας ο προσδιορισμός των νιτρικών ιόντων και των ιόντων αμμωνίου. Η μέτρηση της συγκέντρωσης των Νιτρικών, Νιτρικών και των ιόντων Αμμωνίου πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο με την χρήση Φασματοφωτόμετρου της εταιρείας Shimadzu UV-Vis σε συνδυασμό με ειδικά αντιδραστήρια της εταιρείας Merck. Πριν την πραγματοποίηση της κάθε μέτρησης προηγήθηκε φίλτρανση των θολών δειγμάτων ώστε να μην δίνουν εσφαλμένες υψηλές συγκεντρώσεις ιόντων.

7.1.1 Φασματοφωτομετρική Μέθοδος προσδιορισμού συγκέντρωσης ιόντων

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης των Νιτρικών, Νιτρωδών και Αμμωνιακών ιόντων βασίζονται στην αρχή ότι σχεδόν όλα τα στοιχεία όταν εξατμίζονται και ιονιστούν κάτω από έντονη θερμότητα μιας ηλεκτρικής εκκένωσης, εκπέμπουν ακτινοβολία χαρακτηριστικού μήκους κύματος στην περιοχή του υπεριώδους.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την μέτρηση των συγκεντρώσεων είναι ως εξής :

Προετοιμασία του δείγματος

- Φίλτρωση των θολών δειγμάτων. Απομάκρυνση των στερεών σωματιδίων από το δείγμα εφαρμόζοντας κατάλληλη μέθοδο. Τα δείγματα εάν δεν φιλτραριστούν δίνουν πολλές φορές εσφαλμένες υψηλές συγκεντρώσεις.
- Θερμοκρασία του δείγματος 5-25°C
- Εισαγωγή 1mL δείγματος στο φιαλίδιο της εταιρείας Merck με τον κατάλληλο αντιδραστήριο όπως τα αντίστοιχα που αναφέρονται στην συνέχεια

Αντιδραστήρια της εταιρείας Merck (Spectroquant) που χρησιμοποιήθηκαν για τον φασματοσκοπικό προσδιορισμό των συγκεντρώσεων νιτρικών, νιτρωδών και αμμωνιακών ιόντων

Νιτρικά NO_3^{-1} : Σε ένα διάλυμα οξυνισμένο με θειικό και φωσφορικό οξύ, τα νιτρικά ιόντα αντιδρούν με 2,6-διμεθυλφαινόλη για να σχηματίσει 4-αζωτο-2,6-διμεθυλφαινόλη πορτοκαλί χρώματος που προσδιορίστηκε φασματοφωτομετρικά σε φασματοφωτόμετρο της εταιρείας Shimadzu. Η μέθοδος για τον προσδιορισμό των Νιτρικών είναι ανάλογη κατά DIN 38405 D9 και ISO 7890/1.

Νιτρώδη NO_2^{-1} : Σε όξινο διάλυμα, νιτρώδη ιόντα αντιδρούν με σουλφανιλικό οξύ για να σχηματίσουν διαζωνιακό άλας, το οποίο με τη σειρά του αντιδρά με διυδροχλωρίδιο N-(1-ναφθυλ) αιθυλενοδιαμίνης για το σχηματισμό ενός ερυθρού-ιώδους αζωχρώματος. Αυτό το χρώμα προσδιορίστηκε φασματοφωτομετρικά στο φασματοφωτόμετρο της εταιρείας Shimadzu. Η ευαισθησία της μεθόδου για τα νιτρώδη ιόντα είναι 0,007 mg/L. Η μέθοδος είναι ανάλογη της EPA 354.1, US Standard Methods 4500-NO2-B, και EN26 777.

Αμμωνιακά NH_4^{+1} : Το αμμωνιακό άζωτο ($\text{NH}_4\text{-N}$) απαντάται εν μέρει στο σχηματισμό αμμωνιακών ιόντων και εν μέρει ως αμμωνία. Μεταξύ των δύο αυτών μορφών επιτυγχάνεται μια ισορροπία εξαρτημένη από το pH. Σε ισχυρά αλκαλικά διαλύματα το αμμωνιακό άζωτο παρουσιάζεται σχεδόν ολοκληρωτικά ως αμμωνία η οποία αντιδρά με υποχλωριώδες οξύ για το σχηματισμό μονοχλωραμίνης. Αυτή με τη σειρά της αντιδρά με τη θυμόλη για να σχηματίσει ένα κυανό παράγωγο ινδοφαινόλης, το οποίο προσδιορίστηκε

φασματοφωτομετρικά σε φασματοφωτομέτρο της εταιρείας Shimadzu. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε είναι σύμφωνη με τα πρότυπα EPA 350.1, APHA4500-NH₃ D, και ISO 7150/1.

Μέτρηση στο φασματοφωτόμετρο

Γίνεται βαθμονόμηση της συσκευής με την χρήση του blank δείγματος που περιέχει η συσκευασία Merck για να μετρηθεί η αντίστοιχη ουσία. Έχοντας ρυθμίσει το μήκος κύματος βάσει της ουσίας που θέλουμε να μετρήσουμε (πχ 338nm για NO₃⁻¹) εισάγεται η κυψελίδα στο φασματοφωτόμετρο και καταγράφεται η ένδειξη.

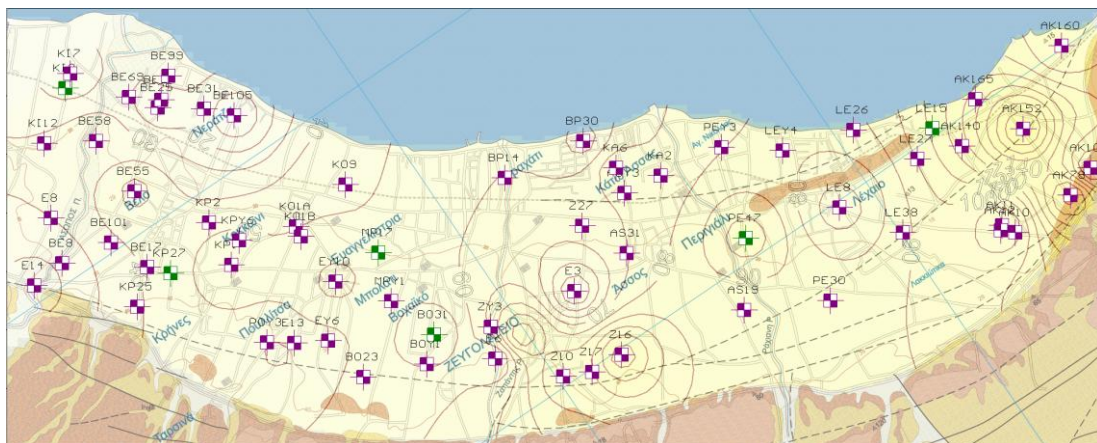
Για να μετατραπεί η εκάστοτε ένδειξη απορρόφησης σε συγκέντρωση, χρησιμοποιούνται οι πρότυπες καμπύλες (καμπύλες αναφοράς) που έχουν κατασκευασθεί εκ των προτέρων για κάθε ουσία που πρέπει να μετρηθεί. Οι πρότυπες καμπύλες συγκέντρωσης κατασκευάζονται με την βοήθεια δειγμάτων γνωστής συγκέντρωσης στα οποία γίνεται μέτρηση της απορρόφησης (φασματοφωτομετρική μέθοδος). Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων κατασκευάζεται γράφημα με την βοήθεια του οποίου υπολογίζονται οι εκάστοτε συγκεντρώσεις των δειγμάτων.

Για την μετατροπή της απορρόφησης απευθείας σε συγκέντρωση (mg/L) εκτός από τον προσδιορισμό με τις πρότυπες καμπύλες υπάρχουν επίσης συντελεστές (factors) που δίνουν τα αποτελέσματα με απλό πολλαπλασιασμό της απορρόφησης με το συγκεκριμένο συντελεστή. Μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι η μειωμένη ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

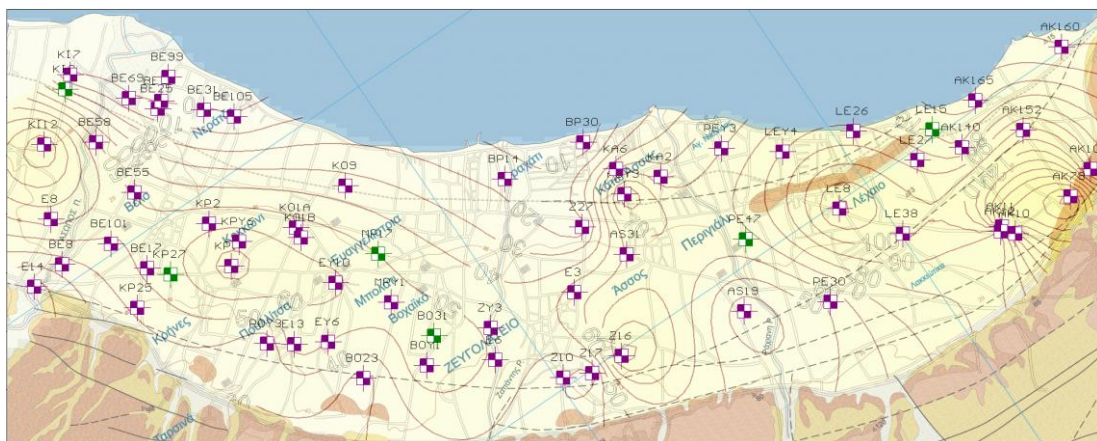
Το σύνολο των αποτελεσμάτων των μετρήσεων συγκέντρωσης NO₃, NO₂, NH₄ παρατίθεται στο παράρτημα της παρούσας διατριβής. Παράλληλα με τις μετρήσεις των συγκεντρώσεων, (επειδή δεν ήταν δυνατή η επί τόπου μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) και του pH κατά την διάρκεια της δειγματοληψίας) οι παράμετροι αυτοί προσδιορίζονταν στο εργαστήριο για ενδεικτικούς σκοπούς. Πίνακες με αποτελέσματα της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (μS/cm) παρατίθενται στο παράρτημα.

7.2 Παρουσίαση των Αναλύσεων και Σχολιασμός των Αποτελεσμάτων

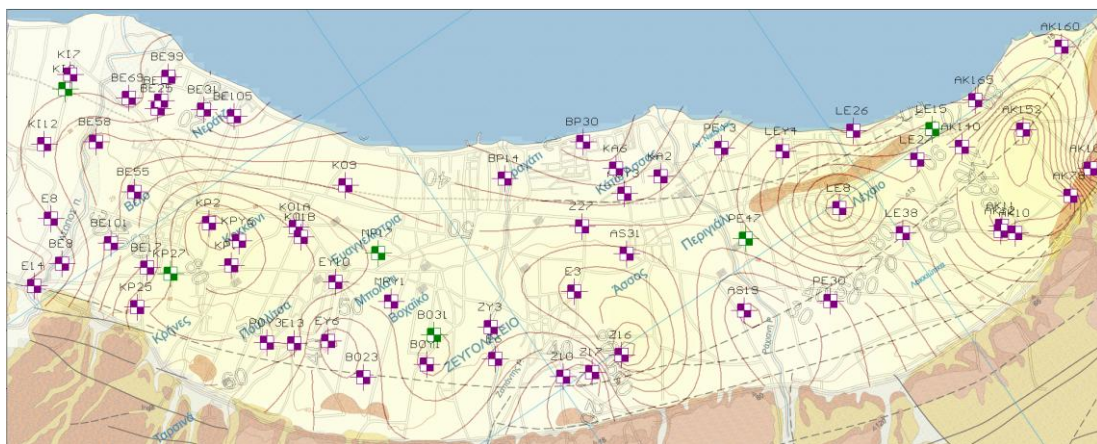
Με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν κατασκευάστηκαν οι χάρτες που παραθέτονται στην συνέχεια



Εικόνα 38 : Αποτελέσματα της κατανομής συγκέντρωσης των **Νιτρικών ιόντων** στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν τον **Ιούλιο του 2000** (ισοσυγκέντρωση ανά 10mg/L)



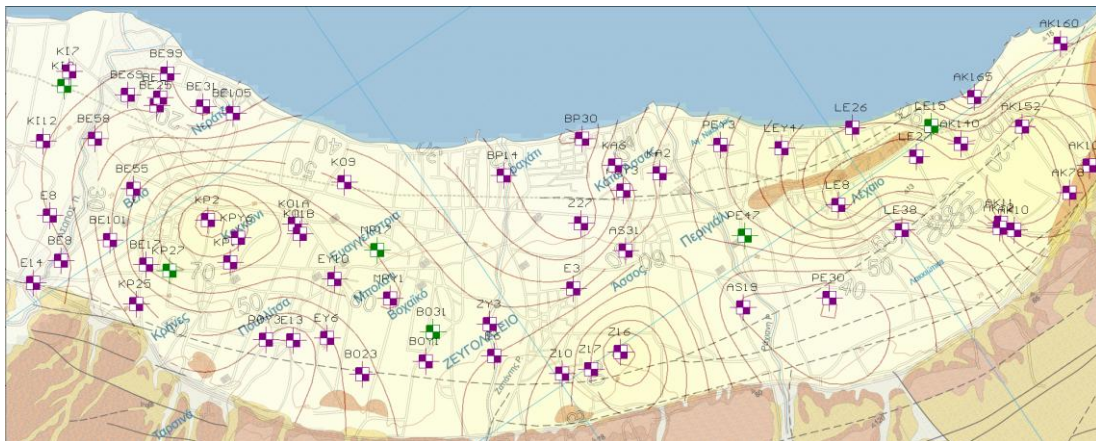
Εικόνα 39 : Αποτελέσματα της κατανομής συγκέντρωσης των **Νιτρικών ιόντων** στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν τον **Οκτώβριο του 2000** (ισοσυγκέντρωση ανά 10mg/L)



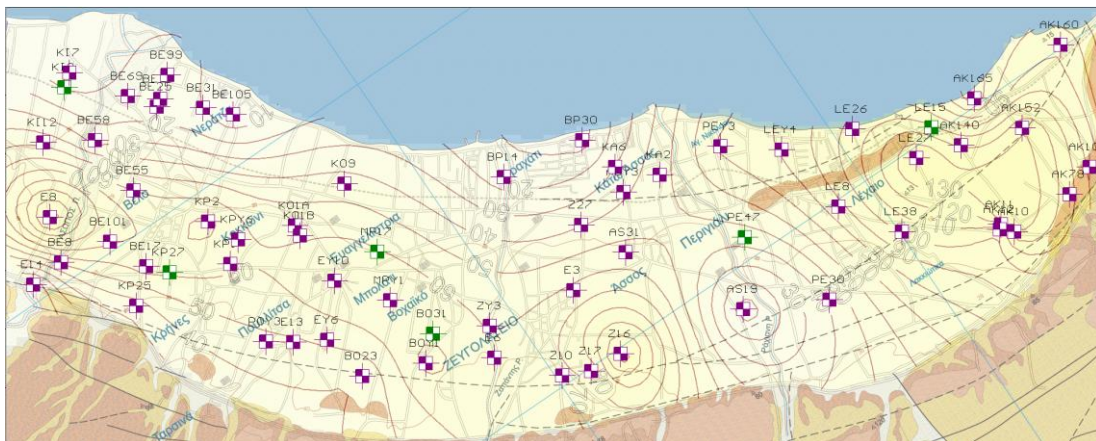
Εικόνα 40 : Κατανομή των **Νιτρικών ιόντων** κατά την δειγματοληψία του **Ιανουαρίου 2001** (ισοσυγκέντρωση ανά 10mg/L)



Εικόνα 41 : Κατανομή των **Νιτρικών ιόντων** κατά την δειγματοληψία του **Φεβρουαρίου 2001** (ισοσυγκέντρωση ανά 10mg/L)



Εικόνα 42 : Κατανομή των **Νιτρικών ιόντων** κατά την δειγματοληψία του **Μαρτίου 2001** (ισοσυγκέντρωση ανά 10mg/L)

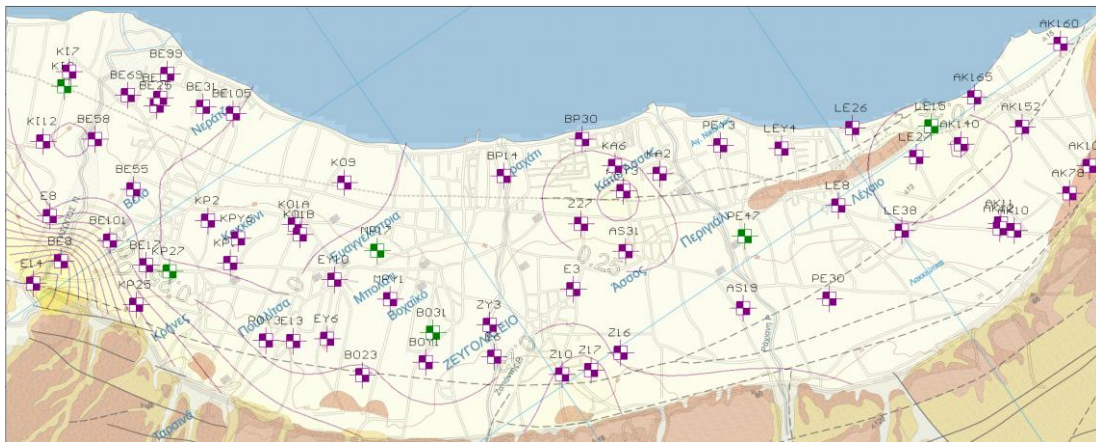


Εικόνα 43 : Κατανομή των **Νιτρικών ιόντων** κατά την δειγματοληψία του **Μαΐου 2001** (ισοσυγκέντρωση ανά 10mg/L)

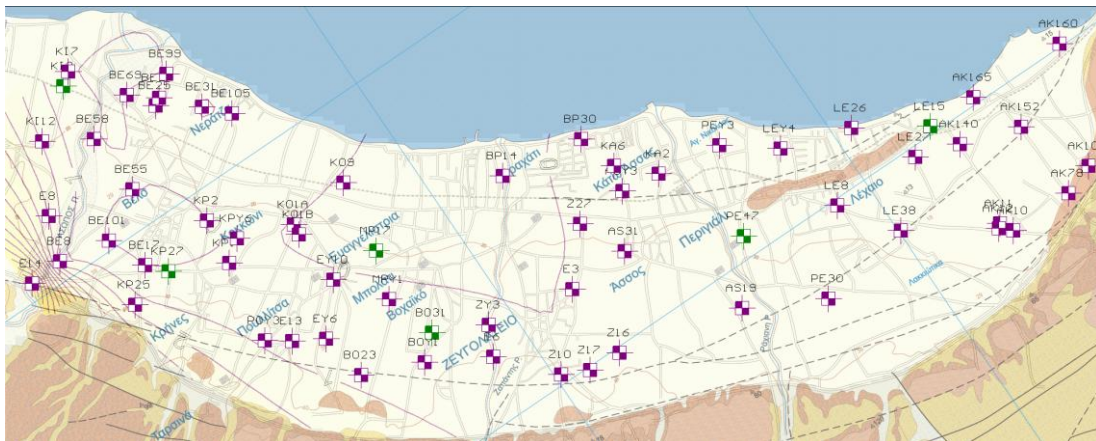


Εικόνα 44 : Κατανομή της συγκέντρωσης των **Νιτρικών ιόντων** κατά την δειγματοληψία του Ιουλίου 2001 (ισοσυγκέντρωση ανά 10mg/L)

Η εικόνα κατανομής συγκέντρωσης των **Αμμωνιακών ιόντων** είναι τελείως διαφορετική από την κατανομή συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων που μετρήθηκαν σε διαφορετικές χρονικές περιόδους.



Εικόνα 45 : Κατανομή της συγκέντρωσης των **Αμμωνιακών ιόντων** κατά την δειγματοληψία του **Οκτωβρίου 2000** (ισοσυγκέντρωση ανά 0.25mg/L)



Εικόνα 46 : Κατανομή των **Αμμωνιακών ιόντων** κατά την δειγματοληψία του **Μαρτίου 2001** (ισοσυγκέντρωση ανά 1 mg/L)

Το γεγονός αυτό πιθανά σχετίζεται με την **πηγή της ρύπανσης** που φαίνεται να είναι **διαφορετική** στις δύο περιπτώσεις. Ενώ η κατανομή της συγκέντρωσης των Νιτρικών ιόντων παραπέμπει σε μη-σημειακή ρύπανση (non point source) οφειλόμενη στην εφαρμογή λιπασμάτων, η μορφή της κατανομής της συγκέντρωσης των Αμμωνιακών ιόντων παραπέμπει σε σημειακή μορφή ρύπανσης (point source) η οποία επηρεάζει ιδιαίτερα τις γεωτρήσεις E14 και BE8 που βρίσκονται Δυτικά του Ασωπού ποταμού (στο Δυτικό όριο της περιοχής έρευνας).

Σε όλη την παραλιακή ζώνη υπάρχει εκτεταμένη εφαρμογή αγροτικών λιπασμάτων. Τα πιο κοινά χρησιμοποιούμενα λιπάσματα σύμφωνα με την βιβλιογραφία είναι τα $[(\text{NH}_4\text{NO}_3)(\text{CaCO}_3)]$ και $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ η διάλυση των οποίων δίνει υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών και θειικών ιόντων στο υπόγειο νερό.

Η διακύμανση της συγκέντρωσης των νιτρικών σε εποχή υψηλής στάθμης ανταποκρίνεται και στις μεταβολές του υδρολογικού κύκλου. Ισχυρές βροχοπτώσεις πιθανώς προκαλούν άμεση έκπλυση των νιτρικών ιδιαίτερα κατά τους μήνες με το μεγαλύτερο ύψος βροχόπτωσης και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την υγρή περίοδο, οι συγκεντρώσεις των νιτρικών να είναι σε υψηλότερα επίπεδα από αυτές που καταγράφονται την ξηρή εποχή.

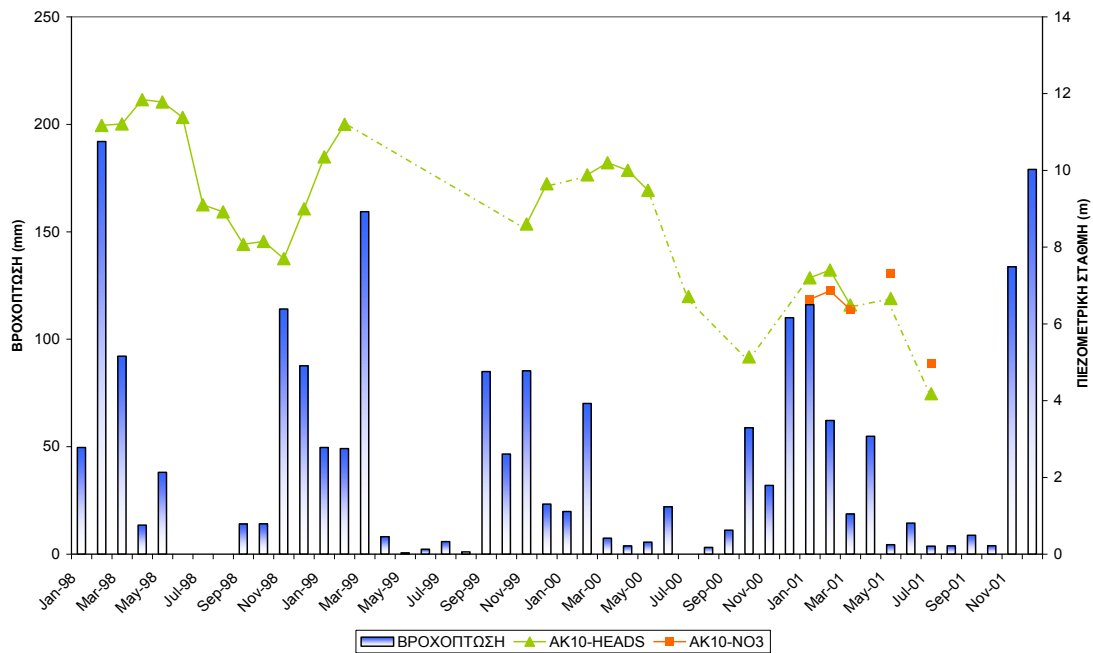
Οι παρατηρήσεις στις συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων που έγιναν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής συμφωνούν με τις παρατηρήσεις των (Goolsby *et al.*, 1991; Reynolds-Vargas and Richter, 1995) όπου, οι συγκεντρώσεις των νιτρικών, σε ήπιο κλίμα, είναι συνήθως υψηλότερες κατά το τέλος του φθινοπώρου και το χειμώνα έως την άνοιξη. Τα υψηλά αυτά επίπεδα αποδίδονται σε πολλούς παράγοντες ο πρωταρχικός από τους οποίους είναι η μειωμένη αφομοίωση των νιτρικών από τις καλλιέργειες και τα άλλα φυτά κατά την διάρκεια που δεν αναπτύσσονται, δηλαδή από το τέλος του φθινοπώρου έως και την άνοιξη.

Επειδή τα νιτρικά που έχουν παραμείνει στο έδαφος δεν καταναλώνονται από τα φυτά, εκπλύνονται προς τους βαθύτερους ορίζοντες με την αύξηση των βροχοπτώσεων. Η έκπλυση των νιτρικών από τα συστήματα απορροφητικών βόθρων είναι λιγότερο βέβαιη αλλά είναι πιθανώς ένας πολύ σημαντικός συντελεστής της νιτρικής ρύπανσης.

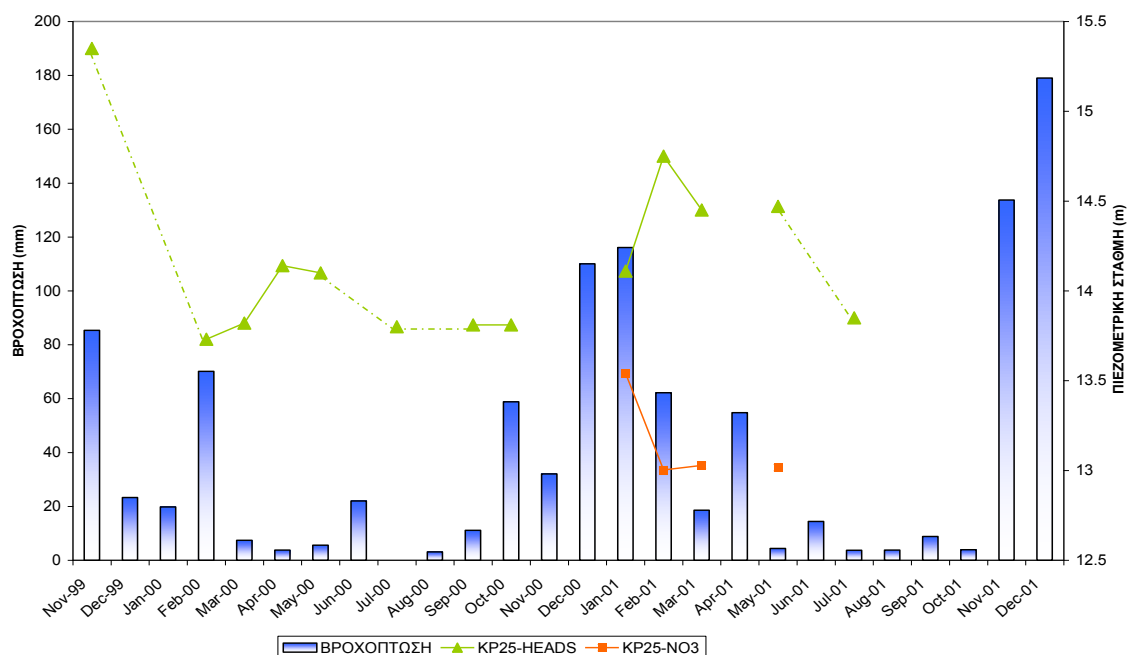
Προκειμένου να γίνει κατανοητή η συσχέτιση των Νιτρικών, της βροχόπτωσης και της διακύμανσης της πιεζομετρικής επιφάνειας, επιλέχθηκαν οι γεωτρήσεις AK10, KP25 και Z17 για να γίνει διάγραμμα συσχετισμού των ανωτέρω παραγόντων.

Αυτές οι γεωτρήσεις επιλέχθηκαν με βάση την πληρότητά τους σε διαθέσιμα στοιχεία. Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν στοιχεία σχετικά με τον όγκο και το χρόνο της άρδευσης θεωρήθηκε ότι μεσολαβεί μια χρονική περίοδος μεταξύ των επεισοδίων βροχόπτωσης και της κύμανσης της πιεζομετρικής στάθμης.

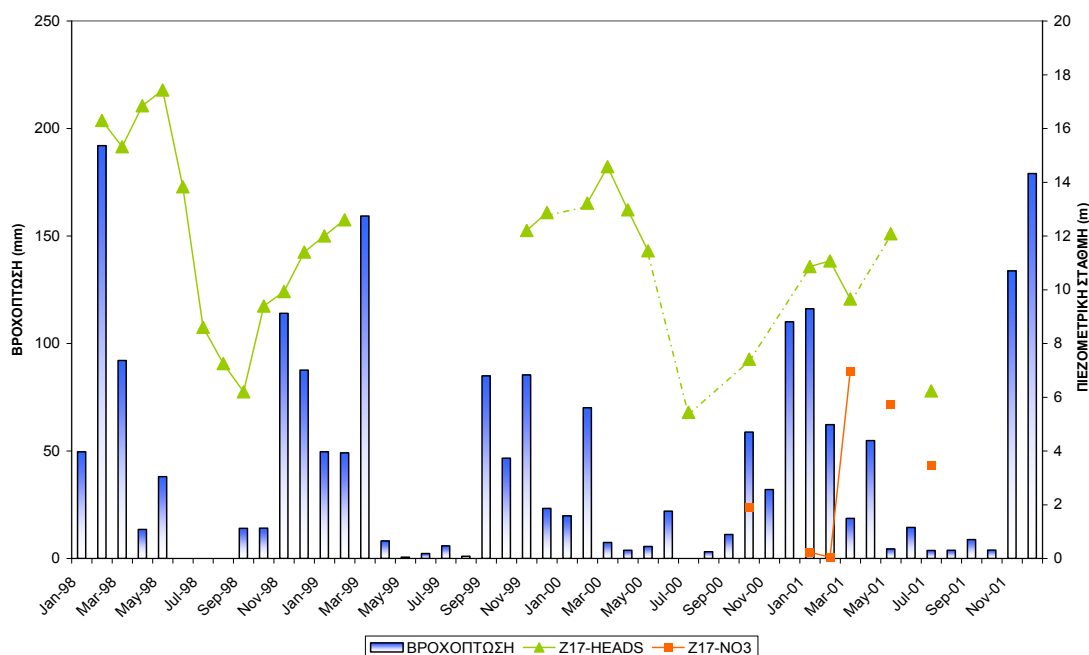
Βάσει των διαγραμμάτων της Εικόνα 47 και της Εικόνα 48 το διηθούμενο νερό φτάνει στην ανώτερη επιφάνεια του υπόγειου υδροφόρου σε χρονικό διάστημα από λίγες ημέρες έως τρεις μήνες ανάλογα με την γεωμετρία των πόρων, την υδραυλική αγωγιμότητα, το περιεχόμενο σε αργιλικά υλικά και την περιβάλλουσα θερμοκρασία. Η ποικιλότητα της ανταπόκρισης της πιεζομετρικής επιφάνειας εξαρτάται από την ένταση και την διάρκεια της βροχόπτωσης στην περιοχή που εντοπίζεται η γεώτρηση.



Εικόνα 47 : Συσχέτιση της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων, του ύψους βροχόπτωσης και της στάθμης στην Γεώτρηση AK10



Εικόνα 48 : Συσχέτιση της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων, του ύψους βροχόπτωσης και της στάθμης στην Γεώτρηση KP25



Εικόνα 49 : Συσχέτιση της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων, του ύψους βροχόπτωσης και της στάθμης στην Γεώτρηση Z17

Ο μηχανισμός της έκπλυσης των νιτρικών ποικίλει ανάλογα με την εποχή και τον τύπο της καλλιέργειας (Theocharopoulos *et al.*, 1993). Αυτό σημαίνει ότι αν και η διακύμανση της πιεζομετρικής επιφάνειας λόγω των βροχοπτώσεων και λόγω της μεταβολής του ρυθμού άντλησης είναι αρκετά σημαντική για την κίνηση των ρύπων, η αύξηση ή η μείωση της συγκέντρωσης των νιτρικών εξαρτάται κύρια από τον ρυθμό εφαρμογής των λιπασμάτων στην επιφάνεια (Reynolds-Vargas and Richter, 1995; Bhatt, 1997).

Μεγάλες διακυμάνσεις της συγκέντρωσης των νιτρικών σε μεμονωμένες γεωτρήσεις είναι ενδεικτικό της μη-σημειακής πηγής ρύπανσης (non-point source), προερχόμενη από την εφαρμογή λιπασμάτων στο έδαφος. Οι διακυμάνσεις αυτές είναι επίσης ενδεικτικές της επιβράδυνσης και της διασποράς των νιτρικών ενώ αυτές εξαρτώνται από την υπόγεια ροή και την γεωλογία της περιοχής (Bhatt, 1997).

Από την μελέτη των παραπάνω χαρτών της Κατανομής των Νιτρικών Ιόντων σε διαφορετικές χρονικές στιγμές προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα :

- Από όλες τις θέσεις δειγματοληψίας, ο αριθμός των ακατάλληλων δειγμάτων με τιμές συγκεντρώσεων που υπερβαίνουν τα όρια που έχει θέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση με την οδηγία 98/83/EC, ξεπερνάει το 50-80% του συνόλου. Στην συνέχεια παραθέτονται ενδεικτικοί πίνακες με συγκριτικά στατιστικά στοιχεία σχετικά με τις συγκεντρώσεις των αζωτούχων ενώσεων.
- Ιδιαίτερα αυξημένη παρατηρείται η συγκέντρωση των νιτρικών στις γεωτρήσεις AK11, AK152, AK78, LE27, L8, Z16 με μέση τιμή που υπερβαίνει 100mg/L η οποία μπορεί να συσχετιστεί με αρκετούς παράγοντες αναλόγως της θέσης της γεώτρησης.

Οι υψηλές συγκεντρώσεις που καταγράφηκαν από την πρώτη δειγματοληψία παρέμειναν υψηλές καθ' όλη την διάρκεια όλων των δειγματοληψιών (Psarroroulou and Karatzas, 2001). Κυρίαρχοι παράγοντες που σχετίζονται με την ύπαρξη αζωτούχων ενώσεων στο νερό είναι η χρήση των λιπασμάτων, η ύπαρξη των απορροφητικών βόθρων ή και η απ' ευθείας διάθεση στο έδαφος λυμάτων προερχόμενα από την παραγωγική διαδικασία.

- Ένδειξη ότι ο κύριος μηχανισμός κίνησης των νιτρικών είναι η έκπλυση από την επιφάνεια προς τους βαθύτερους ορίζοντες, αποτελεί η παρατήρηση ότι οι αβαθείς γεωτρήσεις παρουσιάζουν υψηλότερα επίπεδα συγκεντρώσεων νιτρικών σε σχέση με τις βαθύτερες γεωτρήσεις (Psarroroulou and Karatzas, 2001). Αντίθετα, οι γεωτρήσεις που εκμεταλλεύονται βαθύτερους ορίζοντες (AS19, E14) εμφανίζουν ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις NH_4^+ που μπορεί να αποδοθούν σε επικρατούσες αναγωγικές συνθήκες.

ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ - ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2000 (42 ΔΕΙΓΜΑΤΑ)			
Ιόντα	Μέγιστο Επιτρεπόμενο όριο σε (mg/L) σύμφωνα με τη οδηγία 98/83/EC	Αριθμός Δειγμάτων που υπερβαίνουν το όριο	Ποσοστό % δειγμάτων που υπερβαίνουν το όριο
NO3	50	21	50%
NO2	0.5	1	2.3%
NH4	0.5	4	9.5%
Συνολικά 25 ακατάλληλα δείγματα			59.5%

ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ - ΜΑΡΤΙΟΣ 2001 (37 ΔΕΙΓΜΑΤΑ)			
Ιόντα	Μέγιστο Επιτρεπόμενο όριο σε (mg/L) σύμφωνα με τη οδηγία 98/83/EC	Αριθμός Δειγμάτων που υπερβαίνουν το όριο	Ποσοστό % δειγμάτων που υπερβαίνουν το όριο
NO3	50	17	46%
NO2	0.5	2	5.4%
NH4	0.5	6	16.2%
Συνολικά 24 ακατάλληλα δείγματα			65%

ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ - ΙΟΥΛΙΟΣ 2001 (36 ΔΕΙΓΜΑΤΑ)			
Ιόντα	Μέγιστο Επιτρεπόμενο όριο σε (mg/L) σύμφωνα με τη οδηγία 98/83/EC	Αριθμός Δειγμάτων που υπερβαίνουν το όριο	Ποσοστό % δειγμάτων που υπερβαίνουν το όριο
NO3	50	25	69.5%
NO2	0.5	1	3%
NH4	0.5	3	8.5%
Συνολικά 24 ακατάλληλα δείγματα			77.8%

- Παρατηρείται πολύ σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης **Αμμωνιακών ιόντων** από την χαμηλή περίοδο Εικόνα 45 και συγκέντρωση 3mg/L NH_4^+ στην υψηλή περίοδο Εικόνα 46 και συγκέντρωση 14mg/L NH_4^+
- Οι αυξημένες τιμές σε συγκεντρώσεις αμμωνίου της τάξεως των 3-40mg/L που εμφανίζονται στις γεωτρήσεις AS19, BE8, E14 και KP25 αποδίδονται στην διάσπαση οργανικών ουσιών και αποτελούν δείκτη μόλυνσης.
- Συγκεντρώσεις των νιτρικών σε επίπεδα υψηλότερα του 0.5mg/L καθιστούν τα νερά μη πόσιμα. Στα δείγματα των γεωτρήσεων (AS19, KI7, AK160, AK165) διαπιστώθηκε υπέρβαση αυτής της τιμής.
- Η μέση τιμή του pH σε διάφορες χρονικές περιόδους είναι ίση με 7.6-7.8 υποδηλώνοντας την αλκαλική συμπεριφορά των υπογείων νερών. Μία νέα υδατική μάζα είναι συνήθως αλκαλική ($\text{pH} > 7$) και σιγά –σιγά με την πάροδο του χρόνου μετατρέπεται σε όξινη. Αυτό οφείλεται συνήθως στην συγκέντρωση οργανικού υλικού που εκλύει διοξείδιο του άνθρακα κατά την αποσύνθεσή του.
- Οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στην πλειονότητα των δειγμάτων κυμαίνονται σε υψηλά επίπεδα από 1200-4500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Αν και δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλής ποσοτικός συσχετισμός μεταξύ του ρυθμού εφαρμογής των λιπασμάτων, της βροχόπτωσης και της ανίχνευσης των νιτρικών στον υδροφόρο, τα στοιχεία αυτά που συλλέχθηκαν κατά την διάρκεια των εργασιών πεδίου όπως και οι παρατηρήσεις που έγιναν επί αυτών των στοιχείων θα χρησιμοποιηθούν για την μοντελοποίηση της κίνησης των νιτρικών που ακολουθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

III. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Το μαθηματικό μοντέλο είναι ένα εργαλείο σχεδιασμένο για να αναπαριστά μια απλοποιημένη αναπαράσταση της πραγματικότητας. Τα μαθηματικά μοντέλα χρησιμοποιούνται από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα, αλλά μόνο μετά τις αρχές του 1960 που άρχισαν να εξελίσσονται τα υπολογιστικά συστήματα αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα ευρέως (Wang and Anderson, 1982).

Η μαθηματική προσομοίωση της υπόγειας ροής είναι ένα ήδη καθιερωμένο εργαλείο διαχείρισης υδατικών πόρων το οποίο έχει εφαρμοστεί σε πολυάριθμες περιπτώσεις σε ολόκληρο τον κόσμο (Anderson and Woessner, 1992). Σε αυτό το κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί η μαθηματική προσομοίωση του προσχωματικού υδροφόρου της παραλιακής ζώνης Κορινθίας. Η προσομοίωση αυτή θα βασισθεί στα συμπεράσματα των γεωλογικών, υδρογεωλογικών, υδρολογικών και υδροχημικών ερευνών που διεξήχθησαν και αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Στόχος αυτής της μοντελοποίησης είναι η προσομοίωση των μηχανισμών ροής του συστήματος με την δημιουργία ενός πλήρως μεταβατικού μοντέλου σε συνάρτηση με όλα τα διαθέσιμα στοιχεία που συλλέχθηκαν από το πεδίο, ώστε να είναι δυνατή αφενός η πρόβλεψη της εξέλιξης του συστήματος ροής αλλά και αφετέρου η πρόβλεψη της μεταφοράς ρύπων με σκοπό την δημιουργία ενός ρεαλιστικού διαχειριστικού σχεδίου των υδατικών πόρων.

Τα μοντέλα μεταβατικής ροής (transient models) είναι τα πλέον αξιόπιστα αλλά και τα λιγότερο μελετηθέντα λόγω των ιδιαίτερα αυξημένων απαιτήσεων σε δεδομένα. Σε αυτό το πλαίσιο η παρούσα διατριβή διερευνά τις συνιστώσες της μεταβατικής μοντελοποίησης που μπορούν να κάνουν περισσότερο επιτυχή την προσομοίωση του συστήματος ροής αλλά και την προσομοίωση της μεταφοράς μάζας

Όπως αναλύθηκε εκτενώς στα προηγούμενα κεφάλαια, προκύπτει ότι ο προσχωματικός υδροφόρος της παραλιακής ζώνης Κορινθίας αποτελεί μια αρκετά ιδιαίτερη περίπτωση μοντελοποίησης λόγω των πολύ έντονων πλευρικών και κατακόρυφων γεωλογικών εναλλαγών που του επιτρέπει την συνύπαρξη περισσότερων από ένα υδροφόρων οι οποίοι μπορεί είτε να ενοποιούνται μεταξύ τους είτε και να απομονώνονται δημιουργώντας επάλληλους υδροφόρους. Στα επόμενα τμήματα του παρόντος κεφαλαίου θα αναλυθούν όλες οι συνιστώσες της προσομοίωσης σε κάθε βήμα, σε διαφορετικά σενάρια όπως και τα αποτελέσματα αυτών.

8. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ

Ξεκινώντας από τον όρο *μοντέλο (model)*, αυτός αναφέρεται σε κάθε διάταξη που μπορεί να αναπαραστήσει μερικά ή όλα τα χαρακτηριστικά ενός φυσικού συστήματος (Anderson and Woessner, 1992). Υπάρχουν δύο τομείς της υδρογεωλογίας όπου βασιζόμαστε ουσιαστικά στην χρήση μοντέλου του πραγματικού υδρογεωλογικού συστήματος : για να κατανοήσουμε αφενός γιατί ένα σύστημα συμπεριφέρεται με κάποιο συγκεκριμένο παρατηρούμενο τρόπο και αφετέρου για να προβλέψουμε πως θα εξελιχθεί ένα σύστημα ροής στο πέρασμα του χρόνου. Επιπλέον, τα μοντέλα μπορεί να χρησιμοποιηθούν και για την ανάλυση υποθετικών σεναρίων ροής προκειμένου να κατανοήσουμε την λειτουργία ενός συγκεκριμένου συστήματος υπό διαφορετικές συνθήκες το οποίο συνιστά ένα διαχειριστικό μοντέλο.

Με βάση την διεθνή πρακτική, ο σχεδιασμός διαχείρισης των υδατικών πόρων είναι μία δυναμική διαδικασία και χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο δραστηριοτήτων που εξελίσσονται με τον χρόνο και αναπροσαρμόζονται σύμφωνα με τα νέα δεδομένα. Είναι δηλαδή ένα σύνολο αποφάσεων - προγραμμάτων, για τα οποία απαιτείται συμβατότητα προς τους άλλους σχεδιασμούς που εξαρτώνται από το νερό και εξελίσσονται στην εξεταζόμενη περιοχή, όπως οι σχεδιασμοί της χρήσης γης, της αγροτικής, βιομηχανικής ή πολεοδομικής ανάπτυξης κλπ, Αυτό δημιουργεί την αναγκαιότητα κατά κανόνα να προηγείται ο σχεδιασμός των υδατικών πόρων έναντι άλλων δραστηριοτήτων στην περιοχή,

Ειδικότερα κατά την μελέτη ενός υπόγειου συστήματος ροής, δημιουργείται αρχικά ένα *εννοιολογικό μοντέλο (conceptual model)* βάσει του οποίου δομούμε την προσομοίωσή του. Ένα πλήρες εννοιολογικό μοντέλο γενικά, αποτελείται από ένα συνδυασμό όλων των γνωστών γεωλογικών και υδρογεωλογικών στοιχείων της περιοχής που μελετάται. Το εννοιολογικό μοντέλο, αν και δεν μπορεί να περιγράψει πλήρως το πραγματικό σύστημα στην κάθε του λεπτομέρεια, είναι απολύτως απαραίτητο σ' εμάς ώστε να είναι δυνατό να κατανοηθεί η λειτουργία του συστήματος και να δομηθεί βάσει αυτού, σωστά το φυσικό ή το μαθηματικό μοντέλο, ώστε να προσομοιάζει όσο το δυνατόν περισσότερο το πραγματικό σύστημα.

Τα εννοιολογικά μοντέλα στην γενική τους μορφή, είναι στατικά. Περιγράφουν την σημερινή κατάσταση του συστήματος αλλά προκειμένου να μπορέσουμε να κάνουμε προβλέψεις για την συμπεριφορά του σε κάποια μελλοντική χρονική στιγμή, είναι απολύτως απαραίτητο να έχουμε κάποιο είδος δυναμικού μοντέλου που να επιδέχεται χειρισμό του. Υπάρχουν αρκετά είδη δυναμικών μοντέλων που περιγράφουν την υπόγεια ροή. Σε αυτά περιλαμβάνονται τα φυσικά, τα αναλογικά και τα μαθηματικά μοντέλα (Prickett, 1975).

Τα *φυσικά μοντέλα (physical or scale models)* όπως είναι οι πειραματικές δεξαμενές άμμου, προσομοιάζουν με άμεσο τρόπο την υπόγεια ροή δημιουργώντας ένα φυσικό μοντέλο υπό

κλίμακα, αντίστοιχο με την περιοχή μελέτης. Οι τάσεις που εφαρμόζονται στο σύστημα αλλά και οι παρατηρήσεις, είναι άμεσες.

Η ροή του νερού σε ένα πορώδες μέσο περιγράφεται επίσης με εξισώσεις ανάλογες των εξισώσεων ροής ηλεκτρισμού διαμέσου ενός αγωγού και ανάλογες της ροής ενός ιξώδους ρευστού μεταξύ δύο παράλληλων πλακών με μικρή απόσταση μεταξύ τους. Τα *αναλογικά μοντέλα (analog models)* που περιλαμβάνουν τα *μοντέλα ιξώδους ροής (viscous fluid models - Hele Shaw or parallel plate models)* και τα *ηλεκτρικά μοντέλα (electrical models)*, χρησιμοποιούν αυτή την αναλογία των εξισώσεων ροής που τα διέπει, προκειμένου να προσομοιάσουν τις συνθήκες υδραυλικής ροής του φυσικού συστήματος, σε εργαστηριακή κλίμακα (Fetter, 1994).

Και τα φυσικά και τα αναλογικά μοντέλα έχουν κάποια βασικά μειονεκτήματα. Η κατασκευή τους απαιτεί εξειδικευμένα άτομα με εμπειρία, χρόνο και υλικά που κοστίζουν πολλές φορές αρκετά ενώ απαιτείται ειδικός χώρος λειτουργίας και φύλαξής τους. Λόγω κατασκευής, συνήθως δεν είναι εύκολο να μεταβληθούν παράμετροι όπως η γεωμετρία του υδροφόρου και τα υδραυλικά του χαρακτηριστικά με αποτέλεσμα, τα φυσικά όπως και τα αναλογικά μοντέλα να επιδέχονται περιορισμένο φάσμα χειρισμών.

Σε αντίθεση με τα ανωτέρω, τα *μαθηματικά μοντέλα (mathematical models)* προσομοιάζουν την υπόγεια ροή έμμεσα, χωρίς την χρήση δηλαδή ενός «φυσικού» μοντέλου και άμεση παρατήρηση αλλά με την χρήση των βασικών εξισώσεων που διέπουν τις φυσικές διεργασίες του συστήματος και συναρτήσει των εξισώσεων που περιγράφουν τις οριακές συνθήκες περιφερειακά του συστήματος. Για χρονικά μεταβαλλόμενα προβλήματα (μεταβατικές συνθήκες) απαιτείται επιπλέον η χρήση εξισώσεων που περιγράφουν τις αρχικές συνθήκες του συστήματος (Anderson and Woessner, 1992).

Το μαθηματικό μοντέλο είναι ένα εργαλείο σχεδιασμένο για να αναπαριστά μια απλοποιημένη εκδοχή της πραγματικότητας. Χρησιμοποιούνται από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα, αλλά μόνο μετά τις αρχές του 1960, που άρχισαν να εξελίσσονται τα υπολογιστικά συστήματα, χρησιμοποιήθηκαν πλέον ευρέως (Wang and Anderson, 1982). Η αξιοπιστία των προβλέψεων ενός μαθηματικού μοντέλου εξαρτάται απόλυτα από το πόσο καλά αυτό αποδίδει την λειτουργία του πραγματικού συστήματος αλλά και από την ικανότητα του χειριστή να ερμηνεύει τα αποτελέσματα.

Τα μαθηματικά μοντέλα γενικά, μπορούν να επιλυθούν με διαφορετικές προσεγγίσεις. Αυτές, περιλαμβάνουν τα στοχαστικά & τα ντετερμινιστικά μοντέλα αλλά και τα αναλυτικά & αριθμητικά μοντέλα.

Ντετερμινιστικά και Στοχαστικά μοντέλα : Έχει αναπτυχθεί ένας μεγάλος αριθμός μοντέλων για τις προσομοιώσεις ροής και μεταφοράς μάζας τα οποία μπορεί να χαρακτηρισθούν είτε ως ντετερμινιστικά είτε ως στοχαστικά. Ένα μοντέλο ονομάζεται ντετερμινιστικό (αιτιοκρατικό) αν εκφράζει μια ακριβή σχέση μεταξύ μετρούμενων και παραγόμενων μεταβλητών χωρίς τον παράγοντα της αβεβαιότητας. Αντίθετα, ένα Στοχαστικό μοντέλο περιέχει ποσότητες που αναπαρίστανται με στοχαστικές μεταβλητές και υπακούει σε στοχαστικές διαδικασίες, δηλαδή υπεισέρχεται στο μοντέλο η έννοια της αβεβαιότητας (Lasserre *et al.*, 1999). Τα στοχαστικά μοντέλα της υπόγειας ροής βασίζονται σε στατιστικές θεωρίες (Gelhar, 1986). Ασχολούνται με την μεταβλητότητα των προσομοιούμενων παραμέτρων και παρουσιάζουν την επίλυση του προβλήματος με πιθανοτικούς όρους (Lasserre *et al.*, 1999). Έχουν εφαρμοστεί για τον προσδιορισμό της στάθμης και του πεδίου ταχυτήτων της υπόγειας ροής (Rubin and Dagan, 1992), για την μεταφορά ρύπων (Welty and Gelhar, 1992; Li *et al.*, 2004; Gray and Miller, 2005) αλλά και για πιο σύνθετα και μεταβαλλόμενα υπόγεια συστήματα ροής (Li *et al.*, 2004).

Αναλυτικές και Αναλυτικές Προσεγγιστικές Μέθοδοι : Η εύρεση της λύσης ενός μαθηματικού μοντέλου μπορεί να γίνει αναλυτικά (εύρεση της λύσης σε κλειστή μορφή, κάτι που δεν είναι συχνά εφικτό) ή με αναλυτικές προσεγγιστικές μεθόδους (εύρεση ορισμένων όρων του αναπτύγματος της λύσης σε σειρά κ.α.). Συνήθως, προκειμένου για την αναλυτική επίλυση ενός μαθηματικού μοντέλου απαιτούνται οι αρχικές και οι οριακές συνθήκες του συστήματος ροής να είναι τόσο απλές ώστε να είναι δυνατό να λυθεί απ' ευθείας η εξίσωση ροής με απλή αντικατάσταση των όρων της. Σε αυτή την περίπτωση, τα αναλυτικά μοντέλα (analytical models) μπορούν να επιλυθούν πολύ γρήγορα, με ακρίβεια και χωρίς κόστος, με την χρήση ενός υπολογιστή. Απαιτείται ένας ελάχιστος αριθμός δεδομένων καθώς χρησιμοποιείται μια τιμή της εκάστοτε ιδιότητας για όλη την έκταση του υδροφόρου όπως για παράδειγμα, μία μέση τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας η οποία χρησιμοποιείται για όλη την έκταση του υδροφόρου (Walton, 1979).

Τα αναλυτικά μοντέλα αν και έχουν περιορισμένη εφαρμογή είναι πολύ χρήσιμα για τις προκαταρκτικές εκτιμήσεις πολύπλοκων συστημάτων υδροφόρων, τον σχεδιασμό και την εξακρίβωση των αριθμητικών μοντέλων (σε ορισμένες περιπτώσεις) αλλά και την κατανόηση των βασικών αρχών της υπόγειας ροής και της μεταφοράς ρυπαντών. Ο κύριος περιορισμός των αναλυτικών μεθόδων επίλυσης είναι ότι είναι διαθέσιμες μόνο για σχετικά απλά προβλήματα. Η γεωμετρία των προβλημάτων θα πρέπει να είναι κανονική π.χ. ένας κυκλικός ή ορθογώνιος υδροφόρος ενώ οι ιδιότητες του εδάφους θα πρέπει να είναι ομοιογενείς στην περιοχή που μελετάται ή τουλάχιστον να είναι ομογενείς σε κάποιες υποπεριοχές. Παρόλα αυτά, το γεγονός ότι αυτή η κατηγορία των μοντέλων χρησιμοποιεί συνήθως μόνο εξιδανικευμένες συνθήκες για το υπόγειο νερό, δεν μειώνει την σημαντικότητά τους καθώς πολλά συστήματα υδροφόρων μπορούν να εξιδανικευτούν με πάρα πολύ μικρή θυσία στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων της τελικής ανάλυσης.

Μερικά απλά προβλήματα υπόγειου νερού που διαπραγματεύονται ιδανικούς υδροφόρους (ομογενείς και ισότροποι) μπορούν να επιλυθούν αναλυτικά αλλά οι περισσότεροι πολύπλοκες περιπτώσεις υπόγειων υδροφόρων απαιτούν την χρήση πιο εξελιγμένων τεχνικών για την επίλυση ενός προβλήματος. Για τα περισσότερα προβλήματα λοιπόν πρακτικού ενδιαφέροντος, λόγω του ακανόνιστου σχήματος των ορίων, την ανομοιογένεια των αρχικών συνθηκών αλλά και την χωρική μεταβλητότητα των συντελεστών που εμφανίζονται στις εξισώσεις και τις οριακές συνθήκες, απαιτείται η εφαρμογή αριθμητικών προσεγγίσεων για την επίλυση των μαθηματικών μοντέλων που προσομοιάζουν την υπόγεια ροή και την μεταφορά ρύπων.

Αριθμητικές Μέθοδοι (Numerical Models) : Η επίλυση ενός μοντέλου συχνά δεν είναι δυνατή ούτε με αναλυτικές, ούτε με αναλυτικές προσεγγιστικές μεθόδους. Σε αυτές τις περιπτώσεις η επίλυση γίνεται με διακριτοποίηση του μοντέλου, επιλογή κατάλληλης αριθμητικής μεθόδου (numerical model) και μελέτη των βασικών ιδιοτήτων της με την χρήση υπολογιστή. Για την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου εφαρμόζεται ένα πλέγμα στην περιοχή ενδιαφέροντος και υπολογίζονται οι ιδιότητες είτε στους κόμβους του πλέγματος είτε στα επιμέρους στοιχεία που σχηματίζονται. Όλες οι μέθοδοι δίνουν προσεγγίσεις της υδραυλικής στάθμης στους κόμβους ή στα στοιχεία του πλέγματος για τα προβλήματα υπόγειας ροής, ενώ για τα προβλήματα μεταφοράς μάζας το αποτέλεσμα του μοντέλου είναι οι συγκεντρώσεις ανάλογα σε κάθε κόμβο ή στοιχείο του πλέγματος.

Η τελική επιλογή μοντέλου μεταξύ πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων εξαρτάται από το είδος του προβλήματος αλλά και την προτίμηση του χρήστη. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής εφαρμόσθηκε μοντέλο πεπερασμένων διαφορών.

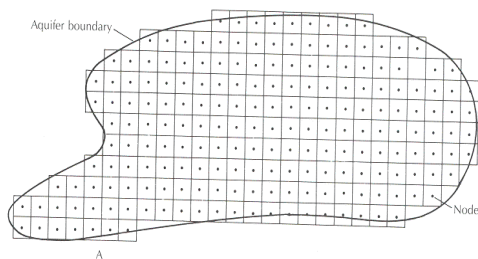
Μοντέλα πεπερασμένων διαφορών (Finite difference models)

Σε ένα εννοιολογικό μοντέλο που είναι συνεχές γίνεται η υπόθεση ότι είναι γνωστές οι ιδιότητες του υδροφόρου σε κάθε σημείο εντός των ορίων της περιοχής. Μπορεί λοιπόν να αντικατασταθεί το συνεχές μοντέλο με ένα σύνολο από διακεκριμένα σημεία που τοποθετούνται επάνω σε ένα πλέγμα. Η Εικόνα 50 & Εικόνα 51 παρουσιάζουν τους δύο τύπους πλέγματος πεπερασμένων διαφορών οι οποίες διαφοροποιούνται ανάλογα με τη θέση του σημείου αναφοράς:

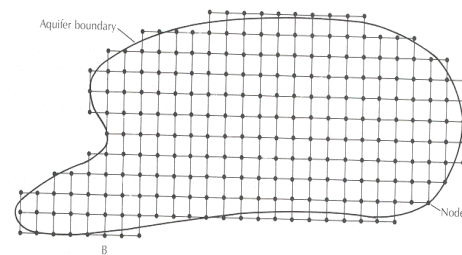
1. τα σημεία αναφέρονται στο κέντρο των στοιχείων (block centered grid), όπου το κέντρο του στοιχείου είναι ο κόμβος του πλέγματος – κεντροβαρής διάταξη (*είναι η διάταξη που χρησιμοποιείται από τον κώδικα MODFLOW*) και
2. τα σημεία αναφέρονται στα άκρα των στοιχείων (mesh centered grid), όπου τα σημεία αυτά είναι και οι κόμβοι του πλέγματος – διάταξη κορυφής

Τα σημεία των κόμβων αντιπροσωπεύουν την θέση όπου επιλύονται οι εξισώσεις για τον υπολογισμό των αγνώστων παραμέτρων των υδροφορέων (π.χ. την υδραυλική στάθμη, συγκέντρωση κ.α.) αλλά και τα σημεία όπου έχουμε τις γνωστές τιμές των παραμέτρων του μοντέλου μας όπως την μεταβιβασιμότητα (T) και την αποθηκευτικότητα (S).

Η διαφορά ανάμεσα στους δύο τύπους πλεγμάτων βρίσκεται κυρίως στον τρόπο με τον οποίο χειρίζονται τα οριακά σημεία ροής (flux boundaries). Το *mesh centered grid* θεωρείται πιο εύχρηστο για προβλήματα όπου οι τιμές της στάθμης ορίζονται στα όρια γιατί τα όρια συμπίπτουν με τους κόμβους ενώ τα *block centered grid* έχουν το πλεονέκτημα ότι η ροή (flux) προσδιορίζεται στην άκρη του στοιχείου (Fetter, 1994).



Εικόνα 50 : Κεντροβαρής διάταξη (block centered grid) του πλέγματος πεπερασμένων διαφορών. Προσαρμογή από Fetter (1994)

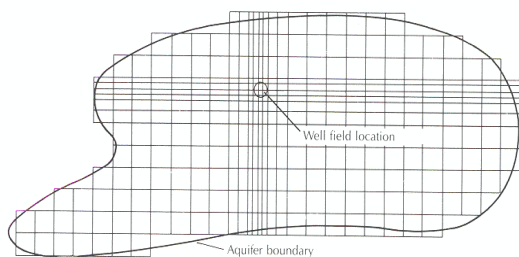


Εικόνα 51 : Διάταξη κορυφής (mesh centered grid) του πλέγματος πεπερασμένων διαφορών. Προσαρμογή από Fetter (1994)

Το βασικό πλέγμα είναι κανονικό, με ανάλογες γραμμές και στήλες όπου η απόσταση Δx είναι ίση με την απόσταση Δy . Πολλές φορές όμως ανάλογα με την φύση του προβλήματος, είναι προτιμότερο να ποικίλει το μέγεθος των γραμμών και των στηλών ώστε να υπάρχουν περισσότερα κομβικά σημεία σε συγκεκριμένα τμήματα του υδροφόρου όπου απαιτείται να εστιαστεί το ενδιαφέρον. Αυτό μπορεί να είναι επιθυμητό στην περιοχή γύρω από μία γεώτρηση όπου υπάρχουν για παράδειγμα μεγαλύτερες αναμενόμενες μεταβολές της στάθμης από άλλα τμήματα του υδροφόρου όπως στο παράδειγμα της Εικόνα 52.

Σαν εμπειρικός κανόνας για τα μεταβαλλόμενα διαστήματα μεταξύ των κόμβων, θεωρείται ότι, το μέγεθος της διαφοράς των Δx ή των Δy σε μία στήλη ή μία γραμμή και την γειτονική τους δεν θα πρέπει να μεταβάλλεται περισσότερο από 50% (Fetter, 1994)

Οποιοδήποτε πλέγμα και αν χρησιμοποιηθεί, το τελικό αποτέλεσμα είναι μία αλγεβρική εξίσωση για κάθε κόμβο στο σύστημα του πλέγματος και για κάθε άγνωστη παράμετρο (στάθμη ή συγκέντρωση). Γράφοντας την εξίσωση αυτή για κάθε κόμβο καταλήγουμε σε N εξισώσεις με N άγνωστες τιμές της υδραυλικής στάθμης (ή συγκέντρωσης) οι οποίες πρέπει να υπολογιστούν, όπου N είναι ο αριθμός των κόμβων.



Εικόνα 52 : Πλέγμα πεπερασμένων διαφορών με μεταβλητά διαστήματα. Προσαρμογή από Fetter (1994)

8.1 Εφαρμογές των Αριθμητικών Μοντέλων

Τα πρώτα αριθμητικά μοντέλα που σχετίζονται με την ροή σε πορώδες μέσο εμφανίστηκαν στις αρχές τις δεκαετίας του 1950 σε μία προσπάθεια να προκύψουν λύσεις για μεγάλα συστήματα εξισώσεων που είχαν εφαρμογή σε πετρελαϊκά αποθέματα. Αργότερα, οι (Pinder and Bredehoeft, 1968), παρουσίασαν την ανασκόπηση μιας πρωτοπόρου εργασίας που σχετίζονταν με τις αριθμητικές μεθόδους στα πορώδη μέσα. Από εκεί και έπειτα μαζί με την αλματώδη ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων, τα μοντέλα αριθμητικής προσομοίωσης έτυχαν ειδικής προσοχής και εξαιρετικής ανάπτυξης που συνεχίζεται αδιάλειπτα έως και σήμερα.

Τις τελευταίες δεκαετίες η χρήση των μαθηματικών μοντέλων στις επιστήμες έχει γίνει ένα πολύ ισχυρό εργαλείο για την περιγραφή και την μελέτη φυσικών συστημάτων και φαινομένων. Τα μοντέλα μαθηματικής προσομοίωσης στην επιστημονική περιοχή της μελέτης των υπόγειων υδρογεωλογικών συστημάτων χρησιμοποιούνται κύρια για την μελέτη της κίνησης του νερού και της μεταφοράς των ρύπων αλλά και για φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και παραμόρφωσης των δομικών στοιχείων (του σκελετού) του υδροφόρου. (Prickett and Lonquist, 1971; Trescott, 1975; Pinder and Gray, 1977; Konikow and Bredehoeft, 1978; Mercer and Faust, 1981; Wang and Anderson, 1982; McDonald and Harbaugh, 1988; Anderson and Woessner, 1992; Zheng and Bennett, 1995)

Ενώ οι περισσότερες προσπάθειες εφαρμογής των αριθμητικών μοντέλων εστιάζουν κύρια στην πρόβλεψη των συνεπειών που θα έχει κάποια ενέργεια (Predictive models), αρκετές εφαρμογές σχετίζονται και με την ερμηνεία των χαρακτηριστικών ενός συστήματος (Interpretive models) ή έχουν γενικότερο χαρακτήρα (Generic models) και χρησιμοποιούνται στον τομέα λήψης αποφάσεων (Anderson and Woessner, 1992).

Τα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης της ροής επιλύονται με την χρήση της **βασικής εξίσωσης ροής** του υπόγειου νερού :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + R = Ss \frac{\partial h}{\partial t}$$

Η εξίσωση αυτή επιλύεται για την κατανομή της υδραυλικής στάθμης σε έναν υδροφόρο ενώ τα μοντέλα μεταφοράς διαλελυμένης ουσίας επιλύουν την εξίσωση που προκύπτει από τον συνδυασμό της εξίσωσης της συνέχειας και της αρχής διατήρησης της μάζας που περιγράφουν τις μεταβολές της χημικής συγκέντρωσης του ρύπου στο υπόγειο νερό – **βασική εξίσωση μεταφοράς μάζας**.

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C) + q_s C_s + \sum R_n$$

Τα μοντέλα μεταφοράς θερμότητας, χρησιμοποιούν επιπλέον την εξίσωση μεταφοράς θερμότητας μέσα σε υδροφόρο ενώ τέλος, τα μοντέλα παραμόρφωσης υδροφόρων συνδυάζουν την εξίσωση ροής με άλλες εξισώσεις που περιγράφουν τις μεταβολές στην φυσική δομή του υδροφόρου σε σχέση με τις αλλαγές στην στάθμη του υδροφόρου.

Μαζί με την ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων αναπτύσσονται αλματώδως και τα αριθμητικά μοντέλα. Οι εφαρμογές των αριθμητικών μοντέλων όπως θα αναφερθεί και στην συνέχεια είναι πολυάριθμες καθώς διερευνώνται σταδιακά όλο και περισσότερες πτυχές των δυνατοτήτων επίλυσης που έως πρόσφατα δεν ήταν υπολογιστικά εφικτές. Στα πλαίσια ενός πολύ γενικού διαχωρισμού, τα μαθηματικά μοντέλα διακρίνονται στα εξής :

- Τα **μοντέλα ροής του υπόγειου νερού** : εφαρμόζονται κυρίως για την μελέτη συστημάτων υδροφόρων, σε τοπικές μεταβολές της στάθμης που προκαλούνται από την εκφόρτιση ή την επαναφόρτιση του υδροφόρου, στις μεταβολές της στάθμης κοντά στην περιοχή μιας γεώτρησης (αντλήσεις), σε γεωτρήσεις εμπλουτισμού αλλά και για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης των επιφανειακών και των υπόγειων νερών (Bradley, 1996; Mercurio *et al.*, 1999; Al-Kharabsheh and Al-Mahamid, 2002; Kaleris *et al.*, 2002; Kim and Sultan, 2002; Barthel *et al.*, 2005; Lubczynski and Gurwin, 2005; Stevick *et al.*, 2005)
- Τα μοντέλα **μεταφοράς διαλελυμένης ουσίας** : χρησιμοποιούνται σε μελέτες δεισόδουσης θαλάσσιου νερού στον υδροφόρο, για τον προσδιορισμό της κίνησης του εκκρίματος από χωματερές και άλλους χώρους απόθεσης αποβλήτων, την κίνηση των ραδιονουκλιδίων από ραδιενεργούς χώρους απόθεσης, την κίνηση των φυτοφαρμάκων από τις αγροτικές καλλιέργειες και γενικά όλους τους τύπους ρύπανσης του υπόγειου νερού (Lee *et al.*, 1999; Britton, 2001; Diaw *et al.*, 2001;

Kaleris *et al.*, 2002; Schreiber and Bahr, 2002; Aguirre and Haghighi, 2003; Al-Thani *et al.*, 2004; Fares and Giacobbe, 2004; Jorgensen *et al.*, 2004; Mulligan and Yong, 2004).

- Τα **μοντέλα μεταφοράς θερμότητας** : χρησιμοποιούνται κυρίως στην ανάλυση της θερμικής επίδρασης από τους χώρους αποθήκευσης ραδιενεργών αποβλήτων και στην αποθήκευση της θερμικής ενέργειας στους υδροφόρους (Atkinson *et al.*, 1998; Cheng and Yeh, 1998; Goldstein *et al.*, 2005).
- Τέλος, η εδαφική καθίζηση λόγω της απόσυρσης του υπόγειου νερού έχει μελετηθεί και με την χρήση **μοντέλων παραμόρφωσης** (Tiangu and Van der Gun, 1996; Kim and Parizek, 2005).

8.2 Διαδικασία Σχεδιασμού και Εφαρμογής ενός Μαθηματικού Μοντέλου

Για να δημιουργηθεί αρχικά το μαθηματικό μοντέλο ενός φυσικού συστήματος (ενός υδροφόρου) το πιο σημαντικό μέρος της διαδικασίας είναι η κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος συμπεριλαμβανόμενης της δομής και των τάσεων που εφαρμόζονται σε αυτή. Προκειμένου λοιπόν να μετασχηματιστεί επιτυχώς ένα εννοιολογικό μοντέλο σε μαθηματικό, είναι απαραίτητο να υπάρχει μια βάση δεδομένων με τα στοιχεία πεδίου ώστε να υπάρχει επαρκής πληροφορία για την εφαρμογή των εξισώσεων. Η εφαρμογή όλων των μοντέλων ξεκινά από την δημιουργία του μοντέλου υπόγειας ροής.

Η προετοιμασία των δεδομένων απαιτεί τον καθορισμό των ορίων της περιοχής που θέλουμε να μοντελοποιηθεί. Τα όρια μπορεί να είναι φυσικά (αδιαπέρατα, χωρίς ροή) ή αυθαίρετα (όπως μία μικρή περιοχή ενός υδροφόρου μεγαλύτερης έκτασης). Εφόσον καθοριστούν τα όρια, η περιοχή διακεκριμενοποιείται υποδιαιρώντας τη με κάποιο είδος πλέγματος (grid or mesh). Αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας είτε ορθογώνιου είτε ακανόνιστου σχήματος πολυγωνικές υποδιαιρέσεις. Το αποτέλεσμα είναι ότι η περιοχή ενδιαφέροντος διαιρείται κατά κάποιον τρόπο καταλήγοντας σε μία εξίσωση ή σετ εξισώσεων για κάθε υπο-περιοχή και χρονικό βήμα. Οι διακριτές αυτές εξισώσεις συνδυάζονται και προκύπτει ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων που πρέπει να επιλυθούν συγχρόνως για κάθε χρονικό βήμα.

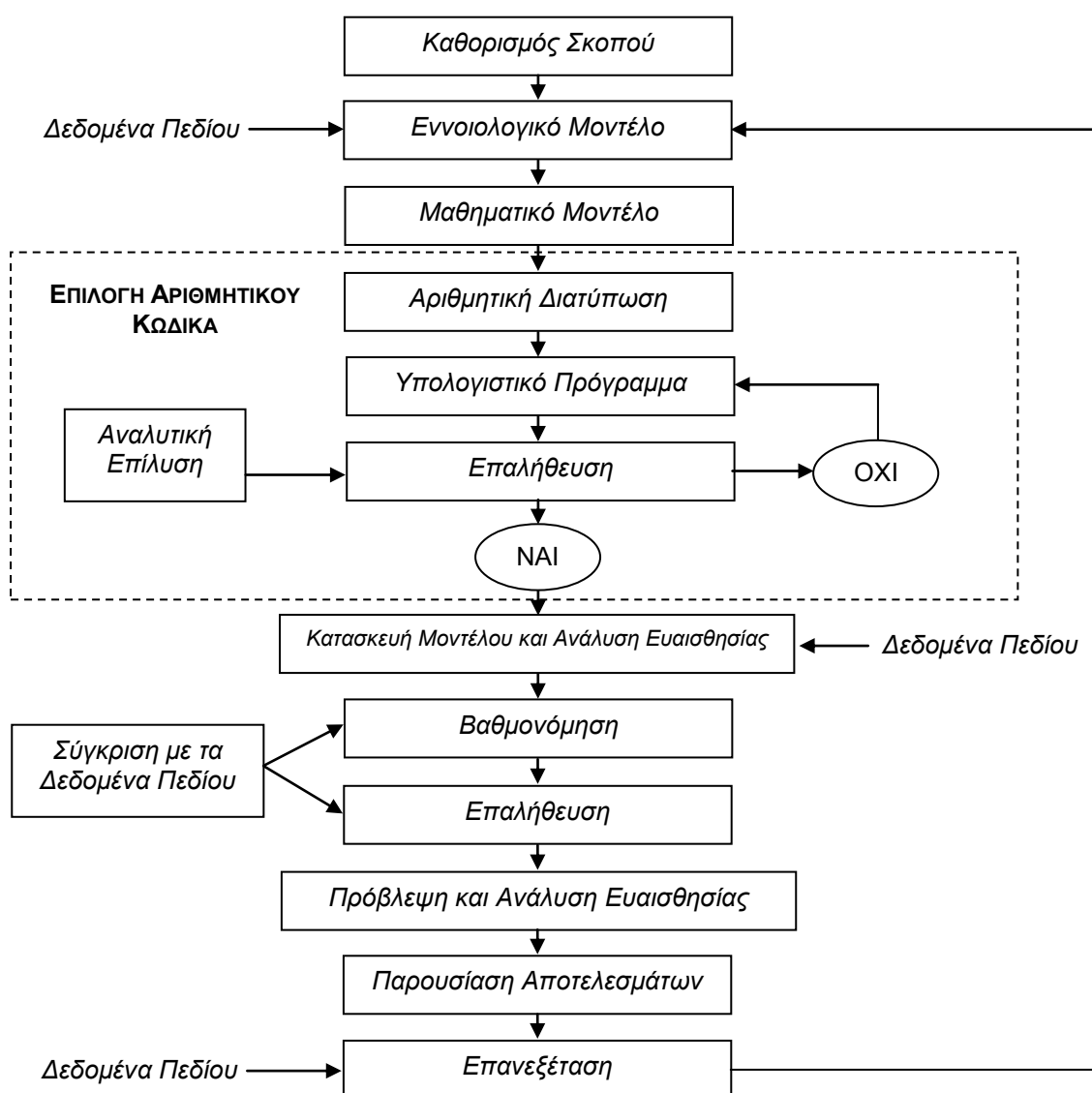
Η ιδεώδης διαδικασία για την κατασκευή ενός μοντέλου υπόγειας ροής σύμφωνα με τους (Anderson and Woessner, 1992) ακολουθεί τα βήματα όπως καταγράφονται στο διάγραμμα στην συνέχεια :

1. Καθορισμός του Σκοπού της Μοντελοποίησης. Ο σκοπός καθορίζει την βασική εξίσωση που απαιτείται να επιλυθεί αλλά και ποιος αριθμητικός κώδικας θα επιλεγεί.

2. Δημιουργία του Εννοιολογικού μοντέλου. Καθορίζονται οι υδρογεωλογικές μονάδες και οι οριακές συνθήκες του συστήματος. Αξιολογούνται τα δεδομένα πεδίου ώστε να προκύψουν τα απαραίτητα στοιχεία των παραμέτρων του υδροφόρου αλλά και οι τάσεις που εφαρμόζονται στο σύστημα.
3. Επιλογή της Βασικής Εξίσωσης και του Αριθμητικού Κώδικα. Ο αριθμητικός κώδικας είναι ένα υπολογιστικό πρόγραμμα που περιέχει έναν αλγόριθμο για την αριθμητική επίλυση του μαθηματικού μοντέλου. Εάν ο κώδικας είναι νέος απαιτείται να προηγηθεί μια διαδικασία πιστοποίησης της ικανότητάς του να ικανοποιεί το σκοπό του μοντέλου και να είναι συμβατός με τα διαθέσιμα στοιχεία. Στην πλαίσια της παρούσας διατριβής, ο αριθμητικός κώδικας που επιλέχθηκε για το μοντέλο ροής είναι το MODFLOW, ο οποίος έχει εφαρμοστεί σε πολυάριθμες εφαρμογές και έχει βελτιωθεί στο πέρασμα των χρόνων από πολυάριθμους ερευνητές.
4. Κατασκευή του Μοντέλου. Το εννοιολογικό μοντέλο μετασχηματίζεται σε κατάλληλη μορφή ώστε να μπορεί να αποδοθεί με μαθηματικούς όρους. Αυτό το βήμα περιλαμβάνει την κατασκευή του πλέγματος, την επιλογή του χρονικού βήματος, την εφαρμογή των οριακών και των αρχικών συνθηκών όπως και μία αρχική επιλογή τιμών για τις παραμέτρους του υδροφόρου και τις τάσεις που εφαρμόζονται σε αυτόν.
5. Βαθμονόμηση. Ο σκοπός της βαθμονόμησης είναι η επαλήθευση ότι το μοντέλο μπορεί να αναπαραγάγει τις τιμές στάθμης που μετρήθηκαν στο πεδίο, με αναπροσαρμογή κάποιων τιμών ώστε να μπορούν να προσεγγίζουν καλύτερα την πραγματικότητα. Η διαδικασία αυτή της αναπροσαρμογής γίνεται είτε με διαδοχικές προσεγγίσεις που κάνει ο χρήστης είτε με κάποιο πρόγραμμα όπως είναι το PEST (Parameter Estimation).
6. Ανάλυση Ευαισθησίας. Το βαθμονομημένο μοντέλο επηρεάζεται από ένα βαθμό αβεβαιότητας λόγω της αδυναμίας του να καθορίσει επακριβώς την χωρική και χρονική κατανομή των τιμών της παραμέτρου (στάθμη ή συγκέντρωση). Προκειμένου να αυξηθεί ο βαθμός εμπιστοσύνης του μοντέλου, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας ώστε να καθορισθεί κατά πόσο η μεταβολή κάποιας παραμέτρου επηρεάζει τα αποτελέσματα του μοντέλου.
7. Εάν υπάρχει ένα επιπλέον σετ δεδομένων γίνεται μια επιπλέον επαλήθευση του μοντέλου που σκοπό έχει την αύξηση του βαθμού εμπιστοσύνης του μοντέλου.
8. Πρόβλεψη. Ποσοτικοποιεί την απόκριση του συστήματος σε μελλοντικές καταστάσεις. Με την εφαρμογή εναλλακτικών σεναρίων (μεταβολή των τάσεων που εφαρμόζονται στο σύστημα) καταλήγουμε σε διάφορες πιθανές αποκρίσεις του συστήματος.
9. Ανάλυση Ευαισθησίας των προβλέψεων. Δεδομένου ότι υπάρχει μια αβεβαιότητα στην πρόβλεψη ακόμη και σε μοντέλο που έχει βαθμονομηθεί και επαληθευτεί, εφαρμόζεται

ανάλυση ευαισθησίας και στις προβλέψεις ώστε να ελεγχθεί κατά πόσο το εύρος των εκτιμώμενων μελλοντικών τάσεων τις επηρεάζει.

10. Τέλος, γίνεται η παρουσίαση του σχεδιασμού του μοντέλου και των αποτελεσμάτων.
11. Πολλές φορές χρόνια μετά την μοντελοποίηση, γίνεται εξακρίβωση του μοντέλου με νέα δεδομένα πεδίου ώστε να καθοριστεί εάν ήταν ακριβείς οι προβλέψεις που είχαν γίνει για το συγκεκριμένο πεδίο.
12. Συνήθως μετά από κάθε νέα εξακρίβωση προκύπτουν νέα στοιχεία για την λειτουργία του συστήματος τα οποία μπορεί να οδηγήσουν σε μεταβολές στο εννοιολογικό μοντέλο ή και σε μεταβολές των παραμέτρων του μοντέλου.



Εικόνα 53 : Βήματα Εφαρμογής ενός Μαθηματικού Μοντέλου. *Προσαρμογή από* (Anderson and Woessner, 1992)

8.3 Το Μαθηματικό Μοντέλο MODFLOW

Από τα πρώτα τους βήματα, τα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών που περιγράφηκαν αρχικά από τους (Trescott, 1975; Trescott and Larson, 1975; Trescott *et al.*, 1976) χρησιμοποιήθηκαν εκτεταμένα από την Γεωγραφική Υπηρεσία των ΗΠΑ (USGS) και άλλους, για την προσομοίωση της υπόγειας ροής. Οι βασικές έννοιες που διέπουν τα μοντέλα αυτά, ενσωματώθηκαν στον κώδικα του MODFLOW με σκοπό να προκύψει τελικά ένα μοντέλο που να μπορεί να επιδέχεται τροποποιήσεις στην δομή του αλλά και να είναι εύκολο στην χρήση του.

Το MODFLOW είναι ένα αρθρωτό αριθμητικό μοντέλο πεπερασμένων διαφορών που προσομοιώνει την κίνηση του υπόγειου νερού σε τρεις διαστάσεις, με την χρήση διαφόρων υπορουτίνων (modules). Δημιουργήθηκε από τους McDonald and Harbough για την Γεωγραφική Υπηρεσία των ΗΠΑ (USGS), ενώ οι υπορουτίνες που χρησιμοποιεί, δημιουργήθηκαν και εξακολουθούν να εξελίσσονται έως και σήμερα από έναν μεγάλο αριθμό επιστημόνων που ασχολούνται με την προσομοίωση την κίνησης του υπόγειου ύδατος. Οι υπορουτίνες αυτές, ομαδοποιούνται σε διάφορα 'πακέτα' (packages) που προσομοιώνουν τα ειδικά χαρακτηριστικά του υδρολογικού συστήματος που μοντελοποιείται. Η ίδια, η αρθρωτή φύση του MODFLOW, επιτρέπει στον χρήστη να εξετάζει τα ειδικά χαρακτηριστικά του υδρολογικού συστήματος ανεξάρτητα το ένα από το άλλο ενώ μπορούν να προστίθενται και νέα 'πακέτα' με επιπλέον δυνατότητες χωρίς διαταράσσεται η δομή του προγράμματος.

Το πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών, MODFLOW είναι το πλέον καθιερωμένο, στον χώρο της βιομηχανίας στις μελέτες υπόγειας ροής. Επιλέχθηκε ως μοντέλο προσομοίωσης της υπόγειας ροής στην παρούσα διατριβή λόγω του ότι έχει αφενός επαληθευτεί σε πολυάριθμες μελέτες έως σήμερα (Mercurio *et al.*, 1999; Kaleris *et al.*, 2002; Kim and Sultan, 2002; Barthel *et al.*, 2005; Lubczynski and Gurwin, 2005; Stevick *et al.*, 2005) ενώ αφετέρου, θεωρείται ότι μπορεί να δώσει αριθμητικά σταθερές λύσεις.

Το Visual MODFLOW είναι ένας προ- και μετά-επεξεργαστής του MODFLOW που δημιουργήθηκε από την εταιρεία Waterloo Hydrogeologic (Guiguer and Franz, 1998) για την εισαγωγή όλων των απαραίτητων δεδομένων (input), το 'τρέξιμο' του μοντέλου (run) αλλά και για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης (output)

Εκτός από τα βασικά υπο-προγράμματα του MODFLOW, το Visual MODFLOW ενσωματώνει και επιπλέον υπο-προγράμματα που δημιουργήθηκαν από την Waterloo Hydrogeologic. Δύο από αυτά που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διατριβή είναι το πρόγραμμα επίλυσης WHS Solver package και το πρόγραμμα βαθμονόμησης του μοντέλου (Calibration package) τα οποία αναλύονται εκτενέστερα στο παράρτημα. Το πρόγραμμα βαθμονόμησης, επιτρέπει στον χρήστη να δημιουργεί γραφήματα ώστε να μπορεί να αξιολογηθεί η απόδοση του μοντέλου σε σχέση με τις μετρήσεις πεδίου. Βοήθεια στην διαδικασία της βαθμονόμησης

προσφέρει επίσης και το ειδικά προσαρμοσμένο πρόγραμμα PEST (Parameter Estimation) - WinPEST, το οποίο βελτιστοποιεί τις υδρογεωλογικές παραμέτρους του συστήματος ώστε να αυξηθεί και η απόδοση του μοντέλου σε σχέση με τις μετρήσεις πεδίου. Με την χρήση του WinPEST πραγματοποιείται επίσης, μετά την δημιουργία του μοντέλου, ανάλυση ευαισθησίας των υδρογεωλογικών παραμέτρων προκειμένου να καθοριστεί η βαρύτητα της κάθε παραμέτρου σε σχέση με την εξέλιξη του υδρογεωλογικού συστήματος.

Γενικά, η λειτουργία των μαθηματικών μοντέλων βασίζεται στον προσδιορισμό τριών βασικών παραμέτρων :

- την μαθηματική εξίσωση που περιγράφει το φαινόμενο (Governing equation)
- τις οριακές συνθήκες (Boundary conditions) που οριοθετούν την περιοχή μελέτης αλλά και
- τις αρχικές συνθήκες (Initial conditions) οι οποίες αναφέρονται στην αρχική κατανομή της στάθμης ή της συγκέντρωσης σε όλο το σύστημα κατά την έναρξη της προσομοίωσης, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση σε μεταβατικές συνθήκες ροής/ συγκέντρωσης ρύπου (transient state).

Στο παράρτημα της παρούσας διατριβής γίνεται μία προσέγγιση στα θέματα προέλευσης των βασικών εξισώσεων ροής και μεταφοράς μάζας ενώ πραγματοποιείται μια περιορισμένη ανάλυση στις μεθόδους επίλυσής τους με βάση το μαθηματικό μοντέλο του κώδικα MODFLOW.

8.4 Η Μαθηματική Εξίσωση Ροής (Flow Governing Equation)

Η βασική εξίσωση που περιγράφει την μεταβατική ροή (transient flow) ύδατος σε ένα ανισότροπο πορώδες μέσο μπορεί να περιγραφεί με την *μερική διαφορική εξίσωση*³ της μορφής :

$$(E. 1) \quad \frac{\partial}{\partial x} (K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) + R = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad 3$$

(McDonald and Harbaugh, 1988)

- ✓ K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} είναι οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας κατά τους άξονες x, y, z οι οποίοι θεωρούνται ότι είναι παράλληλοι με τους κύριους άξονες της υδραυλικής αγωγιμότητας (LT^{-1})
- ✓ h είναι η πιεζομετρική στάθμη (L)
- ✓ R είναι ο γενικός όρος Πηγής (Source/Sink) ο οποίος είναι ουσιαστικά θετικός και ορίζεται σαν την ογκομετρική παροχή εισροής στο σύστημα ανά μονάδα όγκου του υδροφόρου και ανά μονάδα χρόνου. ($L^3L^{-3}T^{-1}$). Προκειμένου να προσομοιάσουμε εκροή από το σύστημα (άντληση), θεωρούμε ότι $R = -W$
- ✓ S_s είναι η ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους υλικού (L^{-1})
- ✓ t είναι ο χρόνος (T)

Η παραπάνω συνάρτηση περιγράφει την κίνηση της υπόγειας ροής σε συνθήκες μη ισορροπίας (μεταβατική ροή) σε ένα ετερογενές και ανισότροπο μέσο υπό την προϋπόθεση ότι οι κύριοι άξονες της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι παράλληλοι με το κύριο σύστημα συντεταγμένων X, Y, Z . Οι όροι S_s , K_{xx} , K_{yy} και K_{zz} αναφέρονται συναρτήσεως του χώρου ($S_s = S_s(x, y, z)$, $K_{xx} = K_x(x, y, z)$ κλπ) ενώ η ογκομετρική παροχή ανά μονάδα όγκου (R), αναφέρεται συναρτήσεως του χώρου και του χρόνου $R = R(x, y, z, t)$.

Το MODFLOW χρησιμοποιεί την κεντροβαρή διάταξη (block centered grid) των πεπερασμένων διαφορών προκειμένου για την χωρική διακριτοποίηση της περιοχής ενδιαφέροντος. Τα κελιά σχηματίζονται από την τομή δύο συνόλων παράλληλων γραμμών ενώ οι κόμβοι βρίσκονται στο κέντρο των στοιχείων. Στους κόμβους (nodes) αυτούς, υπολογίζεται η στάθμη για προβλήματα ροής και η συγκέντρωση για προβλήματα μεταφοράς μάζας. Η απόσταση μεταξύ των κόμβων πρέπει να επιλεγεί κατά τέτοιον τρόπο ώστε οι υδραυλικές ιδιότητες του συστήματος να είναι ομοιόμορφες σε όλη την έκταση του κελιού διότι κατά την εφαρμογή αυτών των ιδιοτήτων θεωρείται ότι εφαρμόζονται σε όλο το στοιχείο-κελί (McDonald and Harbaugh, 1988).

³ Στο παράρτημα της παρούσας διατριβής πραγματοποιείται περαιτέρω ανάλυση των εξισώσεων

Σκοπός της 'μεταβατικής προσομοίωσης' (transient simulation) είναι γενικά η πρόβλεψη της κατανομής στάθμης σε διαδοχικούς χρόνους εφόσον έχουμε σαν δεδομένα την αρχική κατανομή της στάθμης (initial conditions), τις οριακές συνθήκες (boundary conditions), τις υδραυλικές παραμέτρους και όλες τις εξωτερικές τάσεις.

8.4.1 Αρχικές Συνθήκες

Δεδομένου ότι η εξίσωση πεπερασμένων διαφορών επιλύεται από το MODFLOW με την χρήση της οπισθοδρομικής διαφοράς (backward difference)⁴, η κατανομή της στάθμης στην αρχή του κάθε χρονικού βήματος (αρχικές συνθήκες) απαιτείται να είναι γνωστή προκειμένου να υπολογιστεί η κατανομή της στάθμης στο τέλος του κάθε χρονικού βήματος. Έτσι για το πρώτο χρονικό βήμα, οι αρχικές συνθήκες κατανομής στάθμης καθορίζονται από τον χρήστη. Για τα επόμενα βήματα η αρχική κατανομή της στάθμης είναι ίση με αυτή στο τέλος του προηγούμενου χρονικού βήματος.

8.4.2 Οριακές Συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες είναι μαθηματικές εκφράσεις που καθορίζουν την εξαρτώμενη μεταβλητή (στάθμη) ή την παράγωγό της (ροή) στα όρια της περιοχής έρευνας (Anderson and Woessner, 1992).

Το MODFLOW χρησιμοποιεί τις οριακές συνθήκες προκειμένου να εκφραστούν με μαθηματικούς όρους τα φυσικά και υδραυλικά όρια μέσα σε ένα υπόγειο σύστημα ροής. Τα φυσικά όρια σχηματίζονται λόγω της φυσικής παρουσίας ενός αδιαπέρατου ορίου όπως είναι ένας αδιαπέρατος σχηματισμός ή ένα μεγάλο επιφανειακό σώμα νερού. Τα υδραυλικά όρια είναι νοητά όρια όπως οι γραμμές ροής και τα υπόγεια όρια ροής (groundwater divides) που εξαρτώνται από τις υδραυλικές συνθήκες και μεταβάλλονται με αυτές.

Τα υδραυλικά όρια εκφράζονται με τις τρεις παρακάτω μαθηματικές συνθήκες :

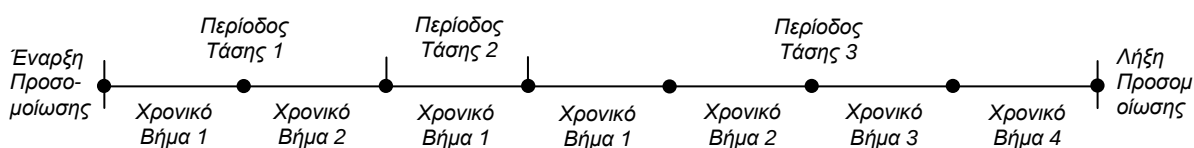
- Πρώτου είδους συνθήκη (Dirichlet Condition - Specified Head) : Η υδραυλική στάθμη είναι γνωστή και σταθερή στα όρια της περιοχής
- Δευτέρου είδους συνθήκη (Neumann Condition - Specified Flux) : Η ροή (flux) $\frac{dh}{dx}$ είναι καθορισμένη κατά μήκος ενός ορίου δηλαδή είναι καθορισμένη η πρώτη παράγωγος της υδραυλικής στάθμης. Η συνθήκη της μη ροής (no-flow boundary) στο MODFLOW εκφράζεται θέτοντας την ροή ίση με το μηδέν ($\frac{dh}{dx} = 0$) προσδιορίζοντας τα κελιά αυτά ως 'αδρανή' (inactive cells).
- Τρίτου είδους συνθήκη (Cauchy Condition - Mixed Boundary Condition) : Εάν η ροή κατά μήκος ενός ορίου διαμορφώνεται βάσει της εκάστοτε οριακής στάθμης αναφέρεται σαν

⁴ Βλέπε Παράρτημα

Cauchy boundary condition or mixed boundary condition (Head Dependent Flow Boundary).

8.4.3 Χρονικό Βήμα

Για τις προσομοιώσεις μεταβατικής ροής που απαιτείται ο προσδιορισμός του χρονικού βήματος (time step), το Visual MODFLOW συγχωνεύει όλες τις διαφορετικές χρονικές περιόδους που προσδιορίζονται από τις γεωτρήσεις και τις οριακές συνθήκες σε μία ομοιογενή περίοδο τάσης (stress period) όπως απαιτείται από τον βασικό κώδικα του MODFLOW.



Εικόνα 54 : Διάρθρωση του χρόνου προσομοίωσης σε περιόδους τάσης και χρονικά βήματα για το MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988)

Ως περίοδος τάσης (stress period) ορίζεται η χρονική περίοδος κατά την οποία όλες οι τάσεις (οριακές συνθήκες, ρυθμοί άντλησης, κα) στο σύστημα είναι σταθερές. Δυστυχώς τα δεδομένα πεδίου δεν είναι σχεδόν ποτέ σύγχρονα με αποτέλεσμα το Visual MODFLOW να συγχωνεύει όλα τα χρονικά διαγράμματα για να προκύψει το μήκος της κάθε χρονική περιόδου της μεταβατικής προσομοίωσης. Σαν αποτέλεσμα, ο χρήστης δεν μπορεί να μεταβάλει απ' ευθείας τον αριθμό των περιόδων αλλά ούτε και το μήκος τους. Μπορεί όμως να μεταβάλει τον αριθμό των χρονικών βημάτων (time steps) από τα οποία αποτελείται η περίοδος και τον πολλαπλασιαστή (multiplier) με τον οποίο προσαυξάνονται. Τιμές του πολλαπλασιαστή μεγαλύτερες της μονάδας αυξάνουν τα χρονικά βήματα μέσα σε μία περίοδο με αποτέλεσμα την καλύτερη απόδοση της μεταβολής της στάθμης σε σχέση με τον χρόνο.

Κατ' αναλογία με τις παραπάνω οριακές συνθήκες εκφράζονται και οι οριακές συνθήκες στην προσομοίωση μεταφοράς μάζας (όπως αναλύεται παρακάτω) δεδομένου ότι κάθε προσομοίωση απαιτεί τον προσδιορισμό των κατάλληλων οριακών συνθηκών προκειμένου να καθοριστεί η σχέση του εξεταζόμενου συστήματος σε σχέση με το περιβάλλον του.

8.5 Η Μαθηματική Εξίσωση Μεταφοράς Μάζας (Governing Equation)

Η μερική διαφορική εξίσωση που περιγράφει την τύχη και την μεταφορά ενός είδους ρυπαντή σε ένα τρισδιάστατο μεταβατικό σύστημα υπόγειας ροής μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$(E. 2) \quad \frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C) + q_s C_s + \sum R_n$$

όπου:

C	Η συγκέντρωση διαλελυμένης ουσίας, (ML^{-3})
θ	Το πορώδες του μέσου (αδιάστατο)
t	Ο χρόνος, (T)
x_i	Η απόσταση κατά τον άξονα X, (L)
D_{ij}	Ο τανυστής των συντελεστών της υδροδυναμικής διασποράς, (L^2T^{-1})
v_i	Η ταχύτητα του νερού των πόρων, LT^{-1} η οποία συνδέεται με την ειδική απόδοση ή ταχύτητα Darcy μέσω της σχέσης, $v_i = \frac{q_i}{\theta}$
q_s	Ο ρυθμός μεταβολής της ροής ανά μονάδα όγκου του υδροφόρου που αντιστοιχεί είτε σε θετική πηγή (source) είτε σε Αρνητική Πηγή (sink), (T^{-1}).
C_s	Είναι η συγκέντρωση ένωσης ή στοιχείου της αρνητικής ή θετικής πηγής (ML^{-3})
$\sum R_n$	Είναι ο όρος της χημικής αντίδρασης, ($ML^{-3}T^{-1}$) ο οποίος αντιπροσωπεύει το ρυθμό μεταβολής της διαλελυμένης μάζας της ενώσεως ή στοιχείου, λόγω των χημικών αντιδράσεων

Το αριστερό τμήμα της εξίσωσης μπορεί να επεκταθεί σε δύο όρους όπου :

$$(E. 3) \quad \frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \theta \frac{\partial C}{\partial t} + C \frac{\partial \theta}{\partial t} = \theta \frac{\partial C}{\partial t} + q'_s C$$

όπου $q'_s = \frac{\partial \theta}{\partial t}$ είναι ο ρυθμός μεταβολής της αποθηκευτικότητας (T^{-1})

Ο όρος της χημικής αντίδρασης $\sum R_n$ στην εξίσωση (E. 2) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συμπεριλάβει την επίδραση των βιοχημικών και γεωχημικών αντιδράσεων στην τύχη και μεταφορά των ρύπων.

Έτσι, θεωρώντας δύο βασικούς τύπους χημικών αντιδράσεων, όπως την αντίδραση ρευστού με επιφάνεια στερεού - (ρόφηση-sorption) και μία αντίδραση πρώτης τάξεως (first order reaction), ο γενικός όρος αντίδρασης μπορεί να εκφραστεί ως εξής :

$$(E. 4) \quad \sum R_n = -\rho_b \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} - \lambda_1 \theta C - \lambda_2 \rho_b \bar{C} \quad \text{όπου :}$$

ρ_b	Είναι η πυκνότητα (bulk density) του μέσου, ML^{-3}
$\bar{C}$	Είναι η μάζα της διαλελυμένης ουσίας, που έχει ροφηθεί ανά μονάδα βάρους του στερεού, MM^{-1}
λ_1	Είναι ο ρυθμός αντίδρασης, πρώτης τάξεως, για την διαλελυμένη φάση T^{-1}
λ_2	Είναι ο ρυθμός αντίδρασης, πρώτης τάξεως, για την ροφημένη φάση T^{-1}

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (E. 3) και (E. 4) στην (E. 2), η εξίσωση (E. 2) μπορεί να γίνει:

$$(E. 5) \quad \theta \frac{\partial C}{\partial t} + \rho_b \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C) + q_s C_s - q'_s C - \lambda_1 \theta C - \lambda_2 \rho_b \bar{C}$$

Η εξίσωση (E. 5) είναι ουσιαστικά μία εξίσωση διατήρησης μάζας όπου η μεταβολή της αποθηκευμένης μάζας (συνολικά η διαλελυμένη και η ροφημένη φάση μαζί) σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή ισούται με την διαφορά εισροής και εκροής μάζας λόγω επίδρασης της διασποράς, συμμεταφοράς, του όρου πηγής και των χημικών αντιδράσεων. Λόγω αυτών των διαδικασιών, κάποιες διαλελυμένες ουσίες μετακινούνται με πιο αργούς ρυθμούς σε σχέση με το υπόγειο νερό. Το φαινόμενο αυτό αποκαλείται επιβράδυνση (retardation) και αποδίδεται με τον **συντελεστή επιβράδυνσης R** ο οποίος είναι αδιάστατος και ορίζεται ως εξής :

$$(E. 6) \quad R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{C}}{\partial C}$$

Εάν υποθεθεί ότι υφίσταται τοπική ισορροπία (LEA - Local Equilibrium Assumption) όσον αφορά τις διάφορες διαδικασίες ρόφησης (η ρόφηση δηλαδή είναι επαρκώς γρήγορη σε σχέση με την κλίμακα χρόνου μεταφοράς μάζας), η εξίσωση (E. 5) μπορεί εκφραστεί με την μορφή :

$$(E. 7) \quad R \theta \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C) + q_s C_s - q'_s C - \lambda_1 \theta C - \lambda_2 \rho_b \bar{C}$$

Επειδή θεωρήθηκε ότι υφίσταται τοπική ισορροπία (LEA), ο συντελεστής επιβράδυνσης R, εξαρτάται από τον λόγο συγκεντρώσεων της προσροφημένης φάσης προς την διαλελυμένη (E. 6). Όταν δεν υφίσταται τοπική ισορροπία (LEA), οι διαδικασίες ρόφησης αντιπροσωπεύονται στην εξίσωση μεταφοράς μάζας, από μία κινητική εξίσωση μεταφοράς μάζας πρώτης τάξεως, (first-order kinetic mass transfer equation)

Στις εξισώσεις μεταφοράς μάζας που περιγράφηκαν νωρίτερα, υποτέθηκε η ύπαρξη ενός μόνο πορώδους. Αυτό το πορώδες αναφέρεται ως 'ενεργό πορώδες' (effective porosity), το οποίο είναι γενικά μικρότερο από το ολικό πορώδες του μέσου και αντιπροσωπεύει τους

πόρους που είναι διαθέσιμοι για την ροή του ρευστού. Στους πόρους που δεν επικοινωνούν μεταξύ τους (dead-end porous) το νερό έχει μηδενική ταχύτητα και χαρακτηρίζεται ως 'ακίνητο' ή 'παγιδευμένο' (immobile water). Εν τούτοις, σύμφωνα με τους (Zheng and Bennett, 1995) το ενεργό πορώδες δεν μπορεί να μετρηθεί στο πεδίο εύκολα λόγω της πολυπλοκότητας της δομής των πόρων. Έτσι, προσδιορίζεται γενικά σαν μία παράμετρο η οποία, στην βαθμονόμηση του συστήματος δίνει την καλύτερη αναπαράσταση της κίνησης του πλουμίου και της παρατηρούμενης συσσώρευσης μάζας.

Ειδικότερα σε μερικές περιπτώσεις, όπως στην μεταφορά σε ρηγματωμένα μέσα ή σε εξαιρετικά ετερογενή πορώδη μέσα, μπορεί να είναι περισσότερο κατάλληλη η προσέγγιση με την χρήση του διπλού πορώδους (dual porosity) όπου προσδιορίζεται ένα πρωτεύον πορώδες μέσω του οποίου πραγματοποιείται η κίνηση του νερού και η συμμεταφορά μάζας και ένα δευτερογενές πορώδες όπου το νερό έχει μηδενική ταχύτητα (παγιδευμένο) και η μεταφορά μάζας πραγματοποιείται μέσω της μοριακής διάχυσης. Η κίνηση του νερού μεταξύ των δύο τμημάτων διαφορετικού πορώδους εκφράζεται βάσει μιας κινητικής εξίσωσης μεταφοράς μάζας (kinetic mass transfer equation) παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιήθηκε για να περιγραφεί η μη ισορροπούσα ρόφηση.

Η εξίσωση μεταφοράς μάζας συνδέεται με την εξίσωση ροής μέσω του νόμου του Darcy όπου :

$$(E. 8) \quad v_i = \frac{q_i}{\theta} = -\frac{K_i}{\theta} \frac{\partial h}{\partial x_i}$$

K_i Είναι η πρωτεύουσα συνιστώσα του τανυστή της υδραυλικής αγωγιμότητας, $L T^{-1}$

h Είναι η υδραυλική στάθμη, L

Η υδραυλική στάθμη (h) προκύπτει από την επίλυση της τρισδιάστατης εξίσωσης ροής όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο :

$$(E. 9) \quad \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_i \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) + q_s = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

όπου S_s είναι ειδική αποθηκευτικότητα του υδροφόρου, L^{-1} και q_s είναι ο όρος πηγής όπως περιγράφεται στην εξίσωση (E. 2).

Στις εξισώσεις (E. 8) και (E. 9), θεωρείται ότι οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} κατά τους άξονες x,y,z συμπίπτουν με τους κύριους άξονες της υδραυλικής αγωγιμότητας έτσι ώστε όλοι οι μη διαγώνιοι όροι του τανυστή της υδραυλικής αγωγιμότητας να είναι μηδενικοί. Αυτή η υπόθεση χρησιμοποιείται στα περισσότερα γνωστά μοντέλα πεπερασμένων

διαφορών υπόγειας ροής, συμπεριλαμβανόμενου και του MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988).

8.5.1 Αρχικές Συνθήκες (Initial Conditions) της Εξίσωσης Μεταφοράς Μάζας

Δεδομένου ότι η εξίσωση μεταφοράς μάζας περιγράφει τις μεταβολές της συγκέντρωσης μιας ουσίας στο υπόγειο νερό, για την επίλυση της εξίσωσης είναι απαραίτητες οι αρχικές συνθήκες. Η αρχική συνθήκη στην γενική της μορφή γράφεται ως :

$$C(x, y, z) = C_o(x, y, z) \text{ στο σύνολο του } \Omega \text{ για } t=0 \text{ όπου :}$$

$C_o(x, y, z)$	Είναι η γνωστή κατανομή συγκέντρωσης
Ω	Αντιπροσωπεύει ολόκληρο το πεδίο έρευνας

Μία ειδική περίπτωση της ανωτέρω συνθήκης είναι $C(x, y, z) = 0$ όπου η αρχική συγκέντρωση είναι μηδενική σε όλη την έκταση του πεδίου. Πολλά προβλήματα μεταφοράς μάζας που έχουν σαν σκοπό την εκτίμηση μιας πιθανής ρύπανσης χρησιμοποιούν αυτό τον τύπο αρχικής συνθήκης.

8.5.2 Οριακές Συνθήκες (Boundary Conditions) της Εξίσωσης Μεταφοράς Μάζας

Η επίλυση της βασικής εξίσωσης μεταφοράς μάζας, απαιτεί επίσης τον ορισμό των οριακών συνθηκών. Τρεις γενικοί τύποι οριακών συνθηκών χρησιμοποιούνται στο μοντέλο MT3DMS για την εξίσωση μεταφοράς μάζας (Zheng and Wang, 1998) :

- Γνωστή συγκέντρωση κατά μήκος ενός ορίου (Dirichlet Condition)
- Γνωστή κλίση συγκέντρωσης εγκάρσιως ενός ορίου (Neumann Condition)
- Συνδυασμός των ανωτέρω (Cauchy Condition)

Για την οριακή συνθήκη Dirichlet, η συγκέντρωση καθορίζεται κατά μήκος ενός ορίου για όλη την διάρκεια της προσομοίωσης, όπου:

$C(x, y, z) = c(x, y, z)$ στο Γ_1 , $t \geq 0$ όπου το Γ_1 υποδηλώνει το καθορισμένο όριο και $c(x, y, z)$ είναι η καθορισμένη συγκέντρωση κατά μήκος του ορίου Γ_1 . Η καθορισμένη αυτή συγκέντρωση μπορεί να μεταβάλλεται σε σχέση με τον χρόνο.

Σε ένα μοντέλο ροής, η οριακή συνθήκη Dirichlet είναι ένα όριο σταθερής στάθμης που δρα ως μία θετική ή αρνητική πηγή ύδατος που εισέρχεται ή απομακρύνεται από το πεδίο του μοντέλου. Κατά παρόμοιο τρόπο, η οριακή συνθήκη σταθερής συγκέντρωσης σε ένα μοντέλο μεταφοράς μάζας δρα ως μία θετική πηγή που παρέχει διαλελυμένη ουσία στο πεδίο του

μοντέλου ή ως μια αρνητική πηγή που απομακρύνει διαλελυμένη ουσία από το μοντέλο κρατώντας την συγκέντρωση σταθερή.

Οριακή συνθήκη σταθερής στάθμης στο μοντέλο ροής δεν υποθέτει και οριακή συνθήκη σταθερής συγκέντρωσης στο μοντέλο μεταφοράς μάζας.

Στην περίπτωση της οριακής συνθήκης Neumann, αυτή ορίζεται ως, η κλίση της συγκέντρωσης εγκάρσιως του ορίου Γ_2 :

$$\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_i} = f_i(x, y, z, t) \text{ στο } \Gamma_2, t \geq 0 \text{ όπου } : f_i(x, y, z, t) \text{ είναι μία γνωστή συνάρτηση που}$$

αντιπροσωπεύει την κατανομή της ροής διασποράς σε σχέση με το όριο Γ_2 .

Ειδική περίπτωση της οριακής συνθήκης Neumann, είναι το όριο με μηδενική διασπορά όπου $f_i(x, y, z, t) = 0$.

Για την οριακή συνθήκη του Cauchy και η τιμή της συγκέντρωσης και η κλίση της καθορίζονται ως εξής :

$$\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} - q_i C = g_i(x, y, z, t) \text{ στο } \Gamma_3, t \geq 0 \text{ όπου } : g_i(x, y, z, t) \text{ είναι γνωστή}$$

συγκέντρωση που αντιπροσωπεύει την συνολική ροή μάζας -total flux (dispersive and advective) για το όριο Γ_3 . Για ένα φυσικό αδιαπέρατο όριο και οι δύο τύποι μεταφορά μάζας (dispersive and advective) ισούνται με μηδέν καθώς $g_i(x, y, z, t) = 0$.

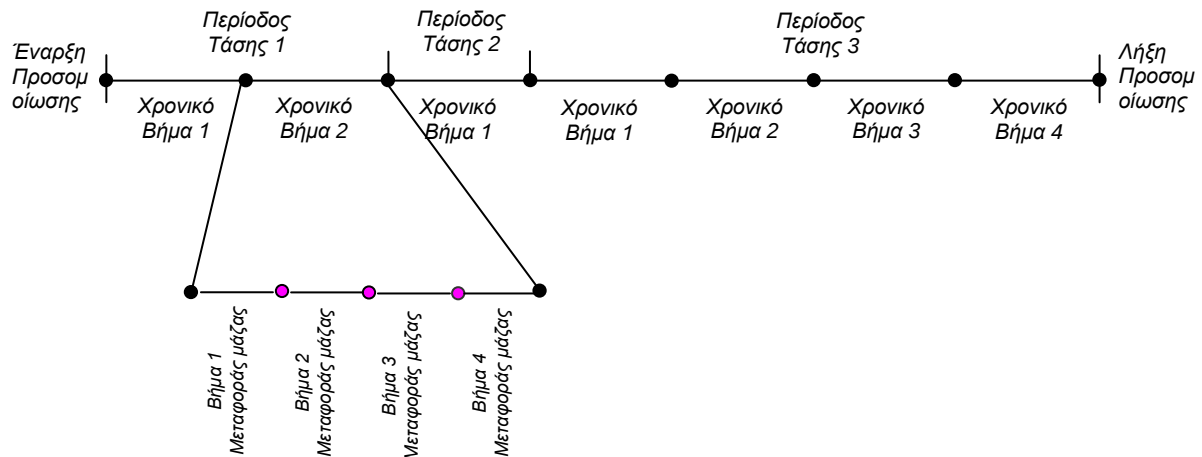
Είναι σύνηθες να υποτεθεί ότι η ροή μάζας λόγω συµμεταφοράς κυριαρχεί σε σχέση με την διασπορά και έτσι η εξίσωση μπορεί να απλοποιηθεί ως :

$$(E. 10) \quad -q_i C = g_i(x, y, z, t)$$

Η εξίσωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο μοντέλο μεταφοράς μάζας παρόμοια με τον όρο της θετικής ή της αρνητικής πηγής (Zheng and Wang, 1998).

8.5.3 Υπολογισμός του Χρονικού Βήματος Μεταφοράς Μάζας

Στα περισσότερα μοντέλα ροής όπως στο MODFLOW ο χρόνος προσομοίωσης διαχωρίζεται σε περιόδους τάσης (η χρονική περίοδος κατά την οποία όλες οι τάσεις -οριακές συνθήκες, ρυθμοί άντλησης, κα- στο σύστημα είναι σταθερές). Οι περίοδοι τάσης με την σειρά τους διαχωρίζονται σε Χρονικά Βήματα εφόσον η προσομοίωση είναι μεταβατική.



Εικόνα 55 : Διαίρεση του χρόνου προσομοίωσης σε περιόδους τάσης και χρονικά βήματα για το MT3DMS (McDonald and Harbaugh, 1988)

Στο Μοντέλο MT3DMS η προσομοίωση της μεταφοράς μάζας βασίζεται σε στην επίλυση στάθμης που δίνει το μοντέλο ροής. Το μήκος του Χρονικού Βήματος που χρησιμοποιείται στο μοντέλο ροής είναι συνήθως πολύ μεγάλο για να χρησιμοποιηθεί στην επίλυση των εξισώσεων μεταφοράς μάζας καθώς οι επιλύσεις των εξισώσεων περιορίζονται από κάποια κριτήρια σταθερότητας ή από απαιτήσεις ακρίβειας που είναι περισσότερο περιοριστικές σε σχέση με την επίλυση των εξισώσεων ροής. Για αυτόν τον λόγο κάθε χρονικό βήμα του μοντέλου ροής διαχωρίζεται σε μικρότερα χρονικά βήματα που αποκαλούνται βήματα μεταφοράς μάζας (Εικόνα 55) όπου η στάθμη είναι σταθερή. Το μήκος κάθε βήματος μεταφοράς μάζας καθορίζεται είτε κατά την εισαγωγή των δεδομένων στο μοντέλο μεταφοράς μάζας είτε αυτόματα.

Προκειμένου λοιπόν για την επίλυση των εξισώσεων μεταφοράς μάζας είτε με τις μεθόδους που βασίζονται στην ανίχνευση σωματιδίων (MOC, MMOC, HMOC) είτε με τις μεθόδους πεπερασμένων διαφορών με απ' ευθείας επίλυση (explicit finite difference), το MT3D καθορίζει το μέγεθος του χρονικού βήματος βάσει των ακόλουθων κριτηρίων σταθερότητας που πρέπει να ικανοποιούνται αναλόγως για τους διαφορετικούς όρους της εξίσωσης μεταφοράς μάζας (Ε. 2)

Όταν χρησιμοποιείται η ρητή μέθοδος (explicit method) υπολογίζονται οι απαραίτητες συνθήκες σταθερότητας για κάθε όρο της εξίσωσης μεταφοράς μάζας ενώ το ελάχιστο χρονικό βήμα μεταφοράς μάζας για κάθε ενεργό κελί, θεωρείται και ως το μέγιστο

επιτρεπόμενο για την επίλυση του συγκεκριμένου όρου. Το μέγεθος του χρονικού βήματος που χρησιμοποιείται τελικά στην εξίσωση προσομοίωσης μεταφοράς μάζας καθορίζεται από το μέγιστο επιτρεπόμενο βήμα των μεμονωμένων όρων.

Η ρητή μέθοδος είναι απλή και δεν απαιτεί το μέγεθος της υπολογιστικής μνήμης που χρειάζεται το επαναληπτικό πρόγραμμα επίλυσης (iterative solver). Παρόλα αυτά για προβλήματα μεταφοράς μάζας σε πυκνό πλέγμα, μεγάλους συντελεστές διασποράς και/ή όρους πηγής/καταβόθρας οι απαιτούμενες συνθήκες αριθμητικής σταθερότητας μπορεί να οδηγήσουν σε εξαιρετικά μικρό χρονικό βήμα. Υπό αυτές τις συνθήκες το πρόγραμμα επίλυσης GCG (Generalized Conjugate Gradient) παρουσιάζει μεγαλύτερη υπολογιστική επάρκεια (Zheng and Wang, 1998).

9. ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Αν και τα τελευταία έτη υπάρχει μια συνεχής ανάπτυξη της εφαρμογής των μαθηματικών μοντέλων στα υδρογεωλογικά συστήματα, υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός προκλήσεων στην πρακτική εφαρμογή πολύπλοκων συστημάτων με χωρικά και χρονικά μεταβαλλόμενες παραμέτρους, που πρέπει να αντιμετωπιστούν.

Η κοινή πρακτική της προσομοίωσης μόνιμης ροής (steady state) σε πορώδες μέσο περιλαμβάνει τον ορισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας ως μια ανεξάρτητη μεταβλητή και την τροφοδοσία του συστήματος ως μια εξαρτημένη μεταβλητή που προκύπτει από την βαθμονόμηση του μοντέλου. Στα συνήθη δε, μεταβατικά μοντέλα ροής (transient state models), που χρησιμοποιούνται για να εξετάσουν χρονικά εξαρτώμενες μεταβλητές, η χρονική μεταβλητότητα της στάθμης προκύπτει ως αποτέλεσμα της μεταβολής της αποθηκευτικότητας που προκαλείται λόγω των εκτεταμένων αντλήσεων ενώ η τροφοδοσία (recharge R) του συστήματος είναι χρονικά αμετάβλητη όπως στις προσομοιώσεις μόνιμης ροής (steady state). Αυτές οι προσομοιώσεις που αποκαλούνται από τον (Lubczynski, 2000) ως μερικώς μεταβατικές (partially transient) μπορούν να παρέχουν επαρκή αποτελέσματα για την διαχείριση των υπόγειων υδατικών αποθεμάτων υπό την προϋπόθεση ότι :

- ✓ η ανταπόκριση στην επιβαλλόμενη τάση των αντλήσεων (όπως πχ η μείωση της στάθμης) είναι σημαντικά μεγαλύτερη σε σχέση με την φυσική ανταπόκριση του συστήματος (όπως πχ η φυσική διακύμανση της στάθμης του υπόγειου νερού) και
- ✓ ο ρυθμός των αντλήσεων όπως και η ανταπόκριση μείωσης της στάθμης είναι επαρκώς καταγεγραμμένες χωρικά και χρονικά (Lubczynski and Gurwin, 2005).

Με βάση τα συνήθη δεδομένα για τις περισσότερες περιοχές αυτές οι προϋποθέσεις (κυρίως η δεύτερη) σπανίως είναι δυνατό να πληρούνται εκτός βέβαια από την περίπτωση που η μελέτη της περιοχής εντάσσεται σε κάποιο ερευνητικό πρόγραμμα και υπάρχει επαρκής καταγραφή των αντλήσεων και της διακύμανσης της πιεζομετρικής στάθμης.

Ανάμεσα στα μοντέλα μεταβατικής ροής (transient models) τα πιο αξιόπιστα αλλά και τα λιγότερο μελετηθέντα, πιθανότατα λόγω των αυξημένων απαιτήσεων σε δεδομένα, είναι τα μοντέλα με χρονικά μεταβαλλόμενη τροφοδοσία (R) και χρονικά μεταβαλλόμενη Εξατμισοδιαπνοή (ET) που αποκαλούνται και **‘πλήρως μεταβατικά μοντέλα’** – ‘full transient models’ (Lubczynski, 2000). Σε αυτά τα μοντέλα η χρονική μεταβλητότητα της στάθμης εξαρτάται όχι μόνο από την χρονική μεταβλητότητα της αποθηκευτικότητας αλλά και από την χρονική μεταβλητότητα της ροής στο σύστημα (τροφοδοσία R).

Υπάρχει πλήθος εργασιών με διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού του ρυθμού τροφοδοσίας ενός υδροφόρου (recharge R) σε διαφορετικές χωρικές και χρονικές κλίμακες οι οποίες

ποικίλουν σε πολυπλοκότητα και δαπάνη. Μία συλλογή τέτοιων εργασιών παρουσιάστηκε και στο τεύχος (10) του Hydrogeology Journal (2002) που καλύπτουν ένα αρκετά ευρύ φάσμα των ζητημάτων που άπτονται της τροφοδοσίας των υπόγειων υδροφόρων. Σύμφωνα με τους (Healy and Cook, 2002) με βάση τις συνθήκες που επικρατούν ακόμη και σήμερα στα επιστημονικά δεδομένα, είναι εξαιρετικά δύσκολο να γίνει εκτίμηση της ακρίβειας που μπορεί να παρέχει η κάθε μέθοδος. Για αυτό το λόγο θεωρούν ότι είναι εξαιρετικά εποικοδομητικό να εφαρμόζεται ένας αριθμός μεθόδων εκτίμησης της τροφοδοσίας ελπίζοντας σε συνέπεια στα αποτελέσματα αν και η συνέπεια από μόνη της δεν μπορεί να θεωρηθεί ως ένδειξη της ακρίβειας.

Οι τεχνικές εκτίμησης της τροφοδοσίας που βασίζονται στην διακύμανση της στάθμης του υπόγειου νερού ανήκουν στις πλέον εφαρμοσμένες μεθόδους, πιθανότατα αφενός λόγω της επάρκειας σε δεδομένα στάθμης αλλά και αφετέρου στην απλότητα της εκτίμησης του ρυθμού τροφοδοσίας του υδροφόρου που βασίζεται στην χωρική ή την χρονική διακύμανση της στάθμης. Η ανάλυση της **διακύμανσης της στάθμης (WTF – Water Table Fluctuation)** είναι ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο στην εκτίμηση του μεγέθους της βραχυχρόνιας ή και της μακροχρόνιας μεταβολής της τροφοδοσίας και έχει εφαρμοστεί από πολλούς μελετητές υπό διαφορετικές κλιματικές συνθήκες (Gerhart, 1986; Hall and Risser, 1993; Healy and Cook, 2002). Η μέθοδος αυτή βασίζεται στον συλλογισμό ότι η αύξηση της στάθμης σε έναν ελεύθερο υδροφόρο οφείλεται στην τροφοδοσία που φθάνει στον υδατικό ορίζοντα.

Ο σκοπός της συνήθους WTF μεθόδου είναι η ποσοτικοποίηση της κάθε μεμονωμένης αύξησης της στάθμης έτσι ώστε να υπολογισθεί τελικά η συνολική τροφοδοσία του υδροφόρου για ένα χρονικό διάστημα ή εφόσον η μέθοδος εφαρμόζεται σε μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα (εποχιακά ή ετήσια) να γίνει εκτίμηση της 'καθαρής τροφοδοσίας' (net recharge). Το πιο βασικό προσόν της μεθόδου είναι η απλότητα και η ευκολία εφαρμογής. Λόγω του ότι η μετρούμενη στάθμη σε μια γεώτρηση παρατήρησης είναι αντιπροσωπευτική μιας περιοχής που καλύπτει μια ακτίνα αρκετών μέτρων, το αποτέλεσμα της μεθόδου WTF μπορεί να θεωρηθεί περισσότερο ως ένας συνδυασμός πολλών παραγόντων και λιγότερο ως μια σημειακή μέτρηση.

Βασίζόμενοι λοιπόν στην υπόθεση ότι η **διακύμανση της πιεζομετρικής στάθμης του υδροφόρου** είναι ένδειξη της τροφοδοσίας που εφαρμόζεται στην ευρύτερη περιοχή, η παρούσα διατριβή διερευνά την χρήση σειράς μετρήσεων στάθμης γεωτρήσεων που βρίσκονται στα όρια της περιοχής έρευνας προκειμένου να κατασκευασθεί μια αντιπροσωπευτική **χρονοσειρά μετρήσεων** η οποία θα χρησιμοποιηθεί ως οριακή συνθήκη σε ένα πλήρως μεταβατικό μοντέλο πρόβλεψης το οποίο θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια διαχείρισης και προστασίας των υδατικών πόρων της παραλιακής ζώνης.

Η διακύμανση της πιεζομετρικής στάθμης (υδρολογική χρονοσειρά) είναι ένα φυσικό φαινόμενο που παρουσιάζει αταξία αλλά με συνθήκες που υποδηλώνουν ότι υπάρχει μια υποκείμενη δομή - περιοδικότητα. Η μορφή της περιοδικότητας που εμφανίζεται στις μετρήσεις αυτές μπορεί να αποδοθεί με μια σειρά Fourier της μορφής :

$$(E. 11) \quad F(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n \cos\left(\frac{2\pi t}{T_n} + \phi_n\right) + B_n \sin\left(\frac{2\pi t}{T_n} + \phi_n\right) \right)$$

που αντιπροσωπεύει ένα άθροισμα απείρων όρων.

Γενικά, μια **υδρολογική χρονοσειρά** είναι οι διατεταγμένες σε αυστηρή χρονική ακολουθία μετρήσεις μιας υδρολογικής μεταβλητής. Οι χρονοσειρές διακρίνονται σε διακεκριμένες (discrete) και συνεχείς (continuous). Οι μηνιαίες τιμές πιεζομετρικής στάθμης σε μια θέση αποτελούν μια διακεκριμένη χρονοσειρά καθώς έχουν πραγματοποιηθεί σε διακεκριμένες χρονικές στιγμές χωρίς να είναι οι μετρήσεις χρονικά συνεχείς ενώ παρουσιάζουν και αρκετά κενά. Η τοποθέτηση των γεγονότων κατά χρονική ακολουθία είναι προνομιακή σε σχέση με την τοποθέτησή τους κατά μέγεθος γιατί έτσι λαμβάνεται υπόψη η επίδραση των παλαιότερων γεγονότων πάνω στις τιμές των τωρινών και των μελλοντικών της ίδιας ή μιας άλλης συγγενικής χρονοσειράς. Η ιδιότητα που έχουν τα υδρολογικά γεγονότα να εξαρτώνται από προηγούμενες τιμές της ακολουθίας της χρονοσειράς ή μιας άλλης χρονοσειράς (συγγενικής) ονομάζεται μνήμη της υδρολογικής μεταβλητής.

Μία άλλη ιδιότητα που χαρακτηρίζει τις χρονοσειρές είναι η ομοιογένεια. Μία υδρολογική σειρά λέγεται ομοιογενής στο χρόνο εάν κάθε γεγονός έχει την ίδια ευκαιρία να συμβεί όλες τις φορές. Ανομοιογένεια στο χρόνο σε ένα συγκεκριμένο σημείο του χώρου μπορεί να έρθει από φυσικές ή ανθρωπίνες επεμβάσεις στην σειρά. Φυσικές αλλαγές μπορούν να προέλθουν από αλλαγή στην τάση (trend), στην περιοδικότητα (periodicity), στην εμμονή (persistence) της σειράς. Όταν λείπει η ομοιογένεια σημαίνει ότι τα δείγματα της μεταβλητής δεν ανήκουν στο ίδιο πληθυσμό (Μιμίκου, 1994).

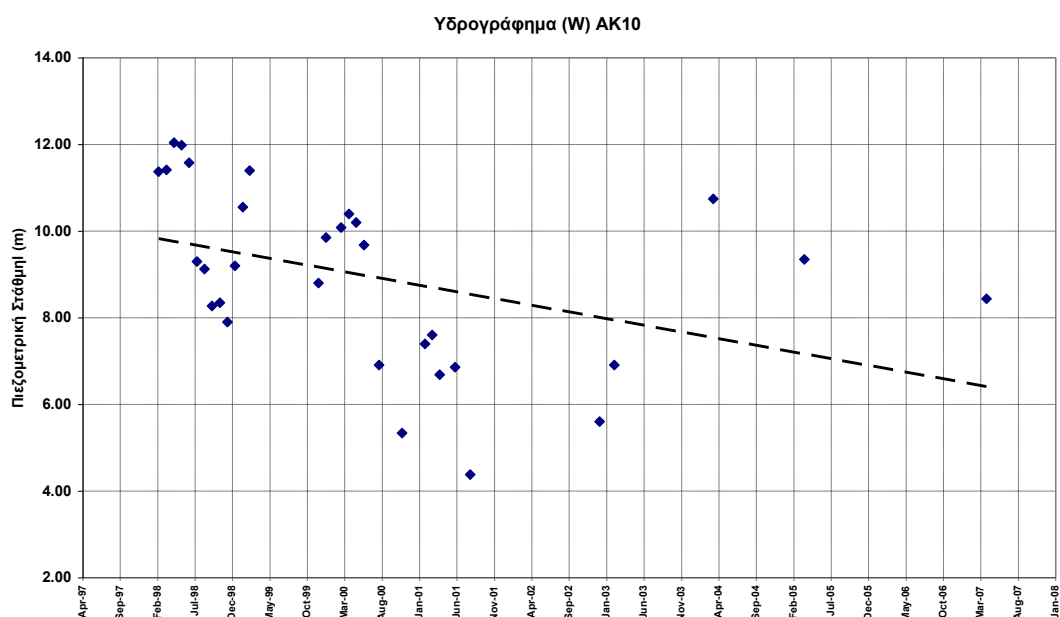
Ένα πρόβλημα που σχετίζεται με την μεταβολή της πιεζομετρικής στάθμης είναι η ερμηνεία της διακύμανσης και η πρόβλεψη της μελλοντικής χρονοσειράς διακύμανσης στάθμης. Όσο περισσότερο μεταβάλλονται οι κλιματικές συνθήκες, τόσο πιο αναγκαία είναι η εύρεση ενός **προβλέψιμου προτύπου** το οποίο θα μπορεί να αναγνωρισθεί παρά την γενική αβεβαιότητα. Στις περισσότερες περιπτώσεις **τα δεδομένα πιεζομετρικής στάθμης παρουσιάζουν μια κυκλική δομή**. Η ύπαρξη της δομής αυτής έχει διερευνηθεί σε πολλές μελέτες που υποστηρίζουν ότι υπάρχουν **κύκλοι διαφορετικών συχνοτήτων και στα κλιματικά αλλά και στα υδρολογικά δεδομένα** (Currie, 1974; Currie, 1981; Currie, 1984; Currie, 1987; Currie and O'Brien, 1988; Currie and O'Brien, 1990; Labitzke *et al.*, 1990; Burroughs, 2003; Ramachandra Rao and Hamed, 2003).

Αυτοί οι κύκλοι μπορεί να αντιπροσωπεύουν κάθε φορά την επίδραση διαφορετικών φυσικών φαινομένων στα δεδομένα (κλιματικά, υδρολογικά) όπως είναι ο ενδεκαετής κύκλος των ηλιακών κηλίδων, ο 18-ετής κύκλος των εκλείψεων της σελήνης, το φαινόμενο El-Niño με περιοδικότητα 2-3 έτη & 4-6 έτη κα. Περιοδικότητες 2-3 έτη είναι γνωστές και ως Quasi-Biennial Oscillations (QBO) (Ramachandra Rao and Hamed, 2003) .

Εάν οι μετρήσεις στάθμης ήταν συνεχείς στο χρόνο, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί ανάλυση Fourier (περιοδόγραμμα) στα δεδομένα ώστε να προκύψουν οι κύριες περιοδικότητες τους. Αυτή η προσέγγιση υλοποιήθηκε επιτυχώς από τους Almedeij and Al-Ruwaihi, (2006) με σκοπό την δημιουργία μιας ημιτονοειδούς εξίσωσης που μπορεί να 'προβλέπει' τις μεταβολές της πιεζομετρικής επιφάνειας στις γεωτρήσεις με βάση τις καταγεγραμμένες περιοδικότητές τους.

Λόγω του γεγονότος ότι στις περισσότερες των περιπτώσεων οι διαθέσιμες μετρήσεις στάθμης δεν είναι συνεχείς στο χρόνο (όπως στην παρούσα διατριβή) με βάση τις παρατηρούμενες περιοδικότητες **υλοποιήθηκε μια ημιτονοειδής εξίσωση ώστε να παραχθεί μια πλήρης σειρά δεδομένων στάθμης** που θα καλύπτει το χρονικό διάστημα (1998-2018) βαθμονόμησης του μοντέλου και πρόβλεψης της εξέλιξης της στάθμης με βάση διαφορετικά σενάρια.

Στην Εικόνα 56 απεικονίζεται το υδρογράφημα των μετρήσεων πεδίου για την γεώτρηση AK10 όπως και η ευθεία που χαρακτηρίζει την τάση των μετρήσεων



Εικόνα 56 : Υδρογράφημα των μετρήσεων πιεζομετρίας της γεώτρησης AK10. Με τις μπλε κουκίδες απεικονίζονται οι μετρήσεις στην εν λόγω θέση για το χρονικό διάστημα 2/98-3/07

Οι χρονοσειρές γενικά που περιέχουν μια περιοδική ημιτονοειδή συνιστώσα με γνωστό μήκος κύματος μπορούν να προσομοιωθούν με την χρήση αρμονικών εξισώσεων. Με βάση την Εικόνα 56 προσαρμόστηκαν τρεις κύριες συνιστώσες στα δεδομένα διακύμανσης στάθμης σε συνάρτηση με το χρόνο : Μια **ετήσια (365days)**, μια **υπερ-ετήσια περιοδικότητα (2150days)** και μια **γενική τάση** στα δεδομένα. Η τάση αυτή στα δεδομένα της πιεζομετρικής στάθμης αποδίδεται κυρίως σε ανθρωπογενείς παράγοντες όπως είναι (1) τα αυξημένα ποσοστά των αντλήσεων που οφείλονται στην υπερ-άρδευση των καλλιεργειών και στην οικιστική ανάπτυξη (2) στην μείωση των ποσοστών κατείσδυσης λόγω της αλλαγής χρήσης γης αλλά και (3) στην κλιματική αλλαγή.

Εάν περιορισθεί η εξίσωση (Ε. 11) σε ένα πεπερασμένο πλήθος όρων (δύο όροι), τότε έχουμε το πολυώνυμο Fourier ως το άθροισμα δύο αρμονικών συναρτήσεων της μορφής :

$$(Ε. 12) \quad f_1(t) = A_1 \cos\left(\frac{2\pi t}{T_1} + \phi_1\right) + B_1 \sin\left(\frac{2\pi t}{T_1} + \phi_1\right)$$

$$(Ε. 13) \quad f_2(t) = A_2 \cos\left(\frac{2\pi t}{T_2} + \phi_2\right) + B_2 \sin\left(\frac{2\pi t}{T_2} + \phi_2\right)$$

όπου **A₁, B₁, A₂, B₂** είναι τα πλάτη ταλάντωσης για τις δύο συναρτήσεις

T₁, T₂ : είναι οι παρατηρούμενες περιοδικότητες που προαναφέρθηκαν

φ₁, φ₂ : η φάση της ταλάντωσης που προσδιορίζει σε ποιο σημείο του κύκλου η ταλάντωση ξεκινά στο $t = 0$

Η συνάρτηση f(t) σαν άθροισμα των (Ε. 12) και (Ε. 13) περιγράφει την επίδραση δυο φυσικών περιοδικοτήτων (ετήσιας και υπερ-ετήσιας) που πειραματικά (Εικόνα 56) προέκυψε ότι επιδρούν στις μετρήσεις πιεζομετρικής στάθμης της γεώτρησης AK10.

Στην εξίσωση αυτή προστίθεται και η κλίση της γραμμής τάσης των μετρήσεων ώστε να περιγραφεί και η υπερ-ετήσια ανταπόκριση του υδρογεωλογικού συστήματος στις πιέσεις που δέχεται. Προκειμένου λοιπόν να προσομοιωθεί μια χρονοσειρά μετρήσεων πιεζομετρικής στάθμης, εκτός από τις μετρήσεις πεδίου απαιτούνται και :

- ✓ Ένας σταθερός όρος $A_0 = \bar{x}$ όπου $\bar{x}$ είναι ο μέσος όρος όλων των μετρήσεων πιεζομετρικής στάθμης στο δεδομένο σημείο μέτρησης και
- ✓ Ένας όρος (at) που απεικονίζει την κλίση της ευθείας της τάσης των πειραματικών μετρήσεων στάθμης

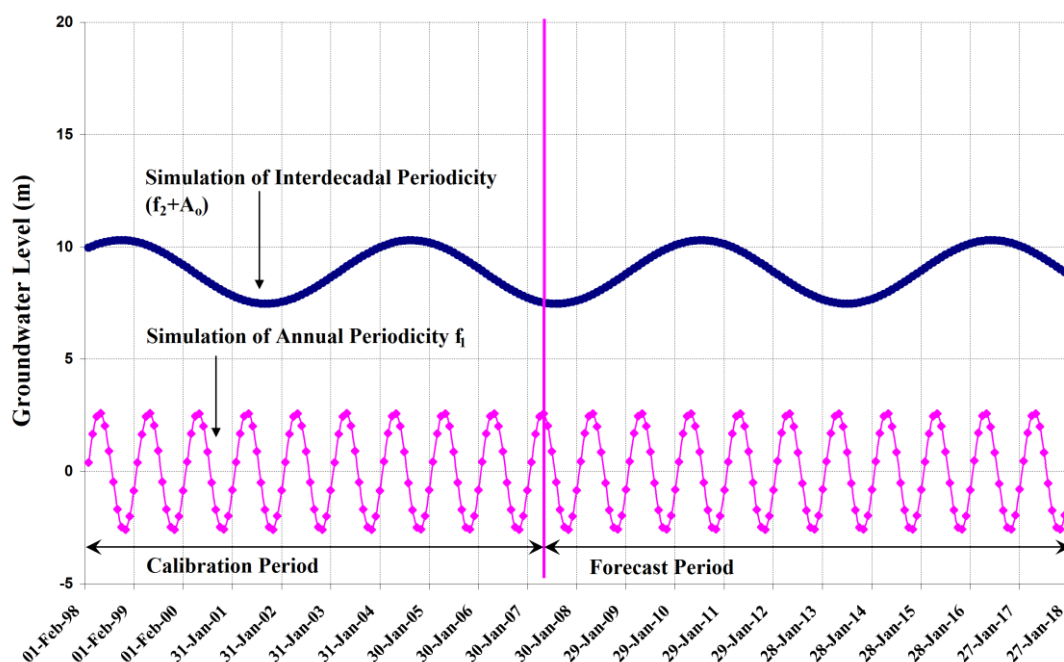
(Ε. 14)

$$f(t) = A_0 + f_1(t) + f_2(t) + (\alpha t) \Rightarrow$$

$$f(t) = A_0 + A_1 \cos\left(\frac{2\pi}{T_1}t + \phi_1\right) + B_1 \sin\left(\frac{2\pi}{T_1}t + \phi_1\right) + A_2 \cos\left(\frac{2\pi}{T_2}t + \phi_2\right) + B_2 \sin\left(\frac{2\pi}{T_2}t + \phi_2\right) + \alpha t$$

Εφαρμόζεται η σχέση (Ε. 14) στις μετρήσεις πιεζομετρίας των γεωτρήσεων AK10 και BE17 που βρίσκονται κοντά στα όρια της περιοχής μελέτης. Τα κριτήρια επιλογής των γεωτρήσεων εφαρμογής της παρούσας προσομοίωσης ήταν η πληρότητα των υφιστάμενων μετρήσεων όπως και η θέση τους στο χώρο – να βρίσκονται κοντά στα όρια της περιοχής μελέτης.

Κάνοντας χρήση του χρονικού βήματος (stress period) που θέλουμε να υλοποιήσουμε στα πλαίσια του μοντέλου προσομοίωσης της ροής ($t=30-31$ ημέρες) και για το χρονικό διάστημα των 7305 ημερών (από το 2/1998 έως το 2/2018), αφού γίνει πειραματικός προσδιορισμός των συντελεστών (A_1, B_1, A_2, B_2) και των φάσεων ϕ_1 & ϕ_2 σε υπολογιστικό φύλλο που έχει διαμορφωθεί κατάλληλα, γίνεται προσαρμογή της καμπύλης που προκύπτει από την εξίσωση, στις μετρήσεις της πιεζομετρίας.

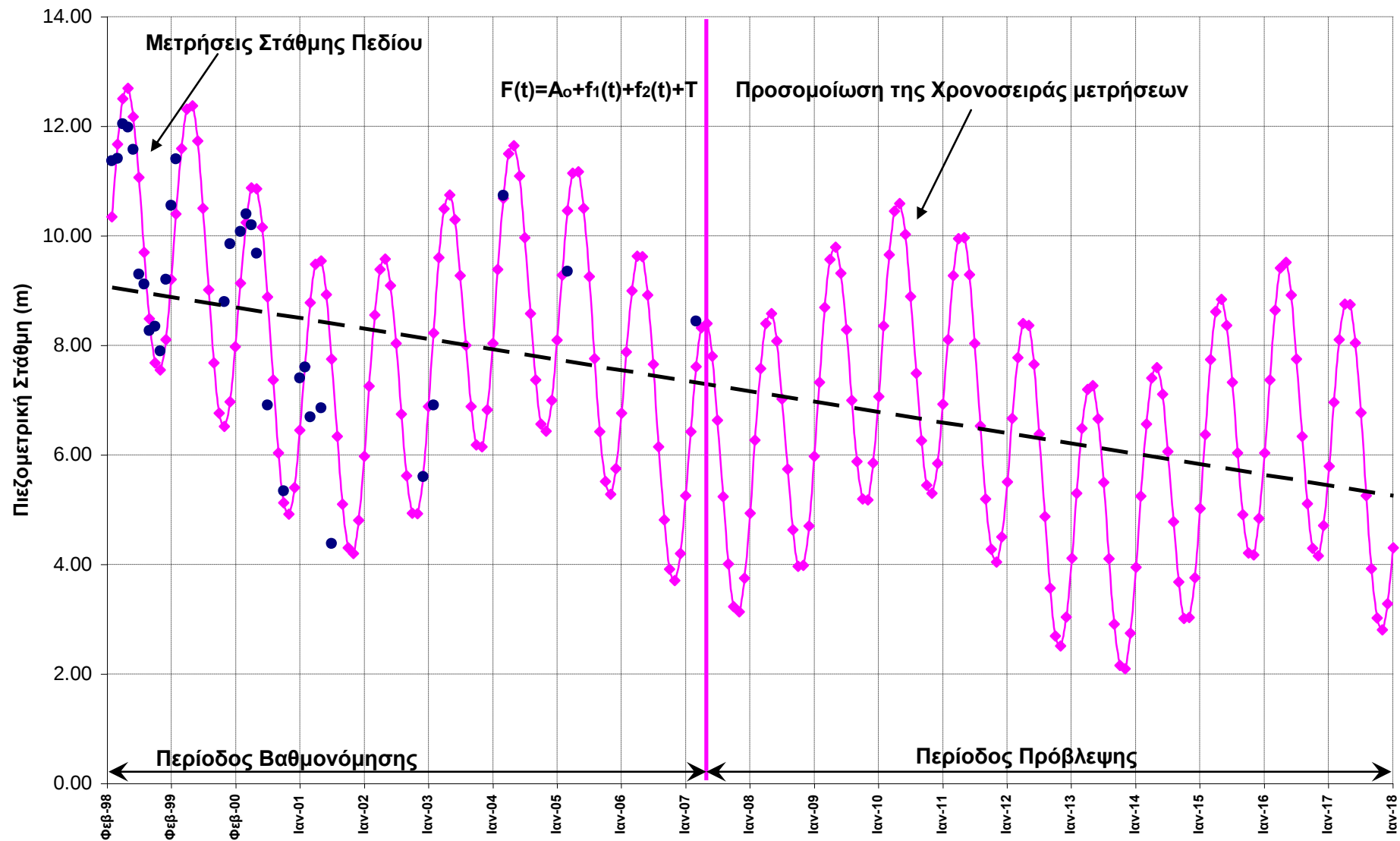


Εικόνα 57 : Αποτέλεσμα της εφαρμογής των εξισώσεων $f_1(t)$ και $f_2(t)$

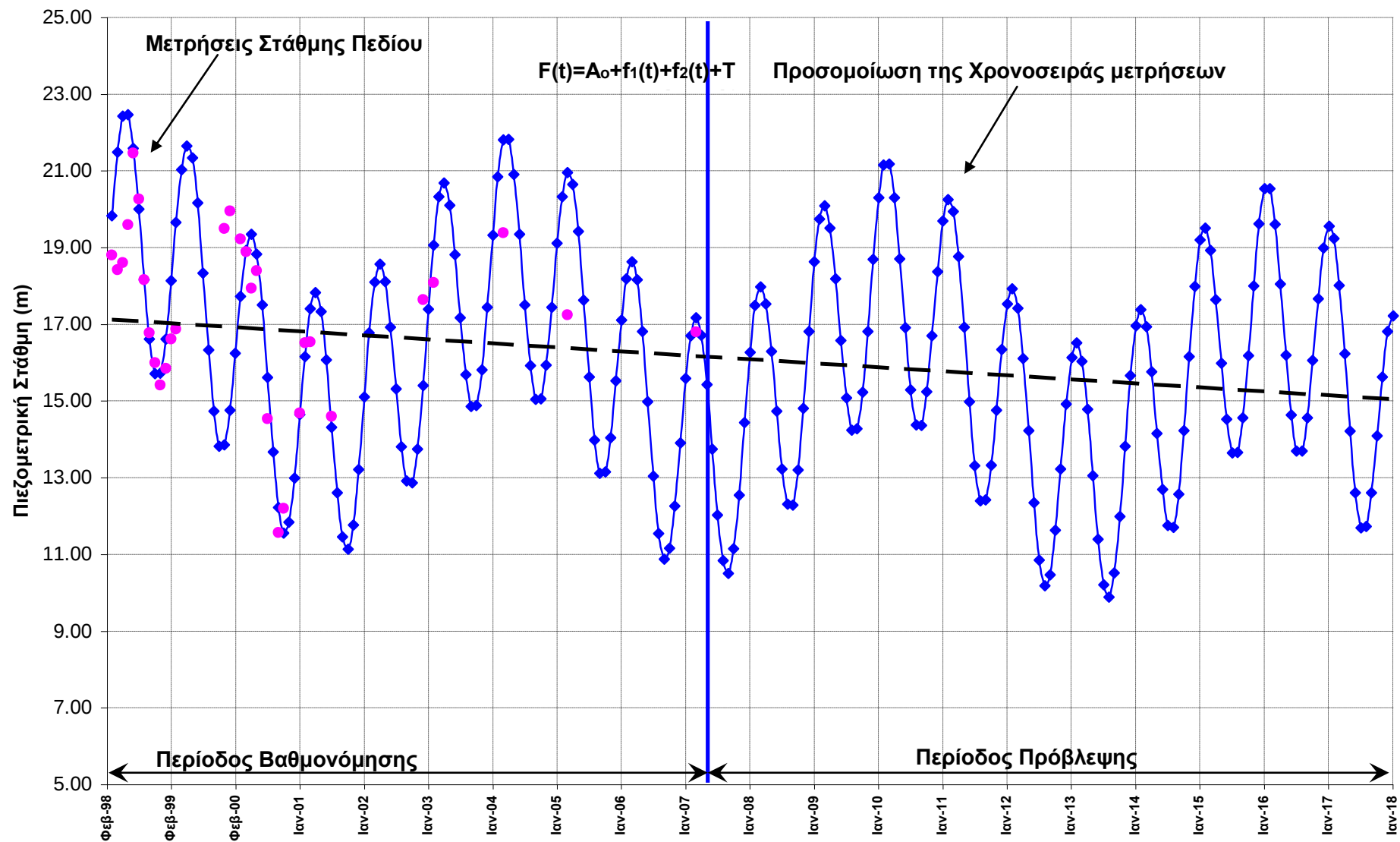
Αποτέλεσμα της εφαρμογής των εξισώσεων $f_1(t)$ και $f_2(t)$ είναι τα γραφήματα της Εικόνα 57. Αθροίζοντας τις εξισώσεις (Ε. 12) και (Ε. 13) και προσθέτοντας την τάση των πειραματικών μετρήσεων για την γεώτρηση AK10 προκύπτει το γράφημα της Εικόνα 58. Οι μετρήσεις πιεζομετρίας για το χρονικό διάστημα 2/1998 – 3/2007, με την προσαρμογή της καμπύλης που προκύπτει από το άθροισμα των αρμονικών συναρτήσεων που περιγράφουν την ετήσια και υπερ-ετήσια περιοδικότητα κύμανσης της πιεζομετρικής στάθμης έως το 2012.

Δεδομένου ότι οι γεωτρήσεις που επιλέχθηκαν (AK10 και BE17) βρίσκονται στα όρια της περιοχής μελέτης, θεωρητικά η κύμανση της πιεζομετρικής τους στάθμης μπορεί να αποδώσει την τροφοδοσία που δέχονται από τους ανάντη σχηματισμούς.

Οι τιμές (χρονοσειρά τιμών στάθμης) που προκύπτουν από την παραπάνω εξίσωση με βάση την γνωστή από τα δεδομένα πεδίου υδραυλική κλίση, εισάγονται ως οριακές συνθήκες (GHB) του μοντέλου προσομοίωσης της ροής προκειμένου να περιγραφεί η χρονικά μεταβαλλόμενη τροφοδοσία του προσχωματικού υδροφόρου από τους ανάντη σχηματισμούς.



Εικόνα 58 : Προσομοίωση της χρονοσειράς μετρήσεων για την γεώτρηση AK10 και το χρονικό διάστημα 2/1998-3/2012

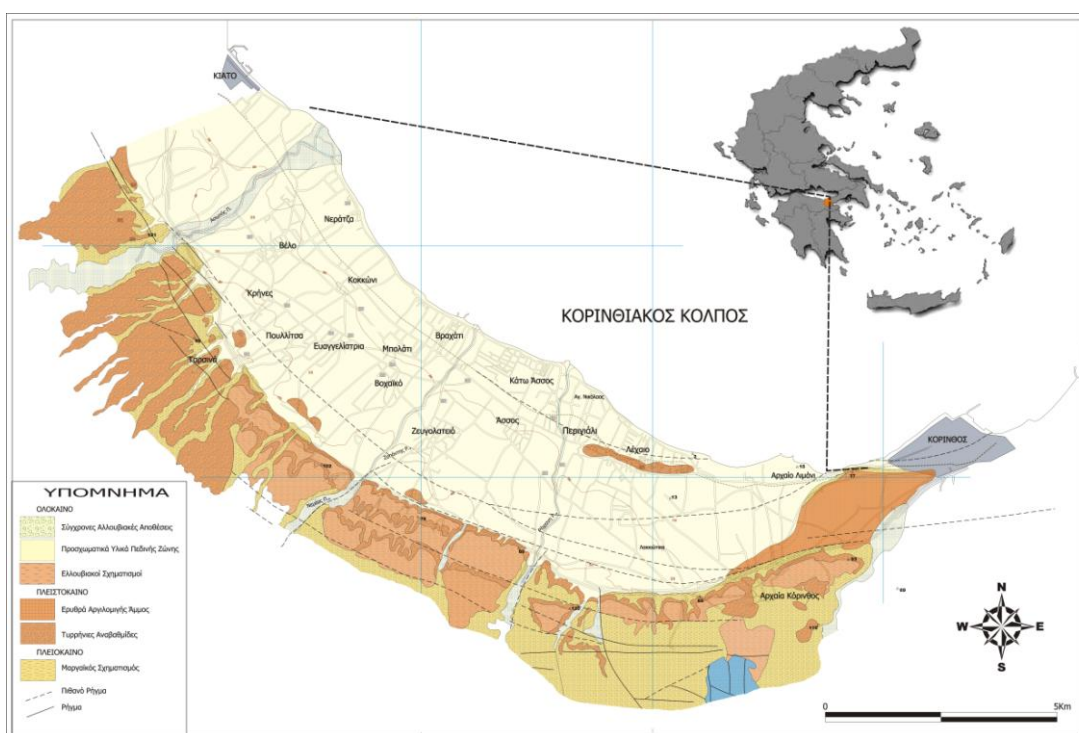


Εικόνα 59 : Προσομοίωση της χρονοσειράς μετρήσεων για την **γεώτρηση ΒΕ17** και το χρονικό διάστημα 2/1998-3/2012

10. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Το εννοιολογικό μοντέλο της περιοχής που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο είναι ουσιαστικά μια απλή προσέγγιση των πολύπλοκων υδρογεωλογικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή ενδιαφέροντος, το οποίο όμως καλύπτει τα βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Βασίστηκε αφενός στα Γεωλογικά δεδομένα των λιθολογικών τομών και αφετέρου στην υδραυλική συμπεριφορά του συστήματος όπως αυτή παρουσιάστηκε με βάση τους πιεζομετρικούς χάρτες νωρίτερα.

Συνοπτικά, οι «δρώσες δυνάμεις» που καθορίζουν την λειτουργία του συστήματος είναι οι ροές εντός και εκτός του συστήματος οι οποίες παρουσιάζονται στην συνέχεια.



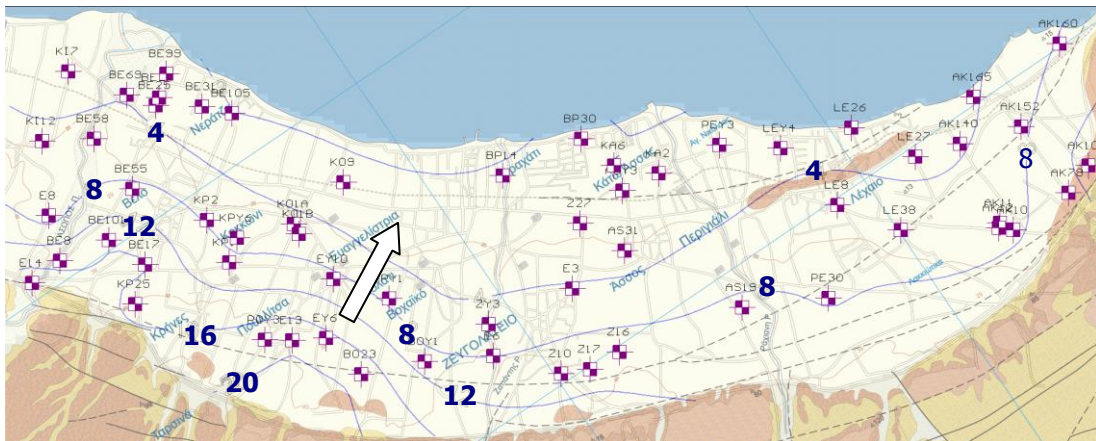
Εικόνα 60 : Γεωλογικός χάρτης της περιοχής έρευνας

Στο μεγαλύτερο τμήμα του προσχωματικού υδροφόρου της παραλιακής ζώνης Κορινθίας η ροή θεωρείται ότι εκδηλώνεται υπό συνθήκες ελεύθερου υδροφόρου. Υπό φυσιολογικές συνθήκες το υπόγειο νερό όπως είναι αναμενόμενο, ρέει υπό το καθεστώς δυναμικής ισορροπίας σχεδόν σε ολόκληρο το υδροφόρο σύστημα προς το σημείο εκφόρτισης που είναι ο Κορινθιακός κόλπος.

Μείωση ή και αναστροφή της φυσικής υδραυλικής βαθμίδας στην παραλιακή ζώνη προκαλούν οι έντονες αντλήσεις κατά την θερινή περίοδο στις παράκτιες περιοχές με αποτέλεσμα την σταδιακή διείσδυση του θαλασσινού νερού προς την ενδοχώρα. Παράταση του φαινομένου αυτού οδηγεί στην ρύπανση των υδρογεωτρήσεων με θαλασσινό νερό, γεγονός καταστρεπτικό όχι μόνο για τον παράκτιο υδροφόρο αλλά και για τα εδάφη που αρδεύονται με υφάλμυρο νερό. Τα βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος ροής αφορούν :

Την πλευρική τροφοδοσία του συστήματος: Βάσει των μετρήσεων πιεζομετρίας, η παροχή του προσχωματικού υδροφόρου αναπληρώνεται με πλευρική τροφοδοσία από τα ανάντη όρια της περιοχής έρευνας (Τυρρήνιες αναβαθμίδες και ποταμοχειμμάριες αποθέσεις) η οποία φαίνεται να είναι και η κυριότερη πηγή υδατικής αναπλήρωσης του συστήματος. Όπως παρατηρούμε από τους χάρτες πιεζομετρίας που προηγήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, η τροφοδοσία αυτή πραγματοποιείται κατά μήκος όλου του ανάντη ορίου του συστήματος διαφοροποιούμενη όμως ως προς την δυναμικότητά της. Η απόληξη της λεκάνης του π. Ασωπού που τροφοδοτείται από το Νότιο-Δυτικό όριο της περιοχής, εμφανίζει υψηλότερο δυναμικό σε σχέση με την κεντρική περιοχή και το Νότιο-Ανατολικό όριο που παρουσιάζεται να έχει μεγαλύτερη υδραυλική κλίση αλλά χαμηλότερη πιεζομετρική στάθμη.

Φεβρουάριος 2001



Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα : Ένα μέρος της συνολικής αναπλήρωσης οφείλεται και στην διήθηση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων κυρίως κατά την χειμερινή περίοδο, καθώς οι βροχοπτώσεις κατά την θερινή περίοδο είναι συνήθως έντονα φαινόμενα, τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερο βαθμό απορροής σε σχέση με τον βαθμό κατείσδυσης.

Αρδεύσεις. Οι περισσότερες καλλιέργειες της πεδινής ζώνης απαιτούν εκτεταμένες αρδεύσεις κατά την θερινή περίοδο που καλύπτονται είτε με νερό που εκτρέπεται από τον Ασωπό μέσω της Βοχαϊκής αύλακας η οποία κινείται σχεδόν παράλληλα με την Νέα Εθνική Οδό, είτε με εκτεταμένες αντλήσεις που πραγματοποιούνται σε όλη την έκταση του Βοχαϊκού πεδίου. Οι αρδεύσεις που πραγματοποιούνται κατά την θερινή περίοδο συμβάλλουν κατά ένα ποσοστό, το οποίο υπολογίζεται προσεγγιστικά (Τσακίρης, 1995) στο 20% του ποσοστού του νερού της άρδευσης.

Στην τροφοδοσία του συστήματος συντελούν έως ένα βαθμό και οι χειμερινές αρδεύσεις που πραγματοποιούνται με κατάκλιση της αρδευόμενης έκτασης. Ο όγκος ύδατος που κινείται στο ποτάμιο σύστημα του Ασωπού διευθετείται με αρδευτικά έργα τα οποία διοχετεύουν το σύνολο ή τμήμα της ροής αυτής στην κεντρική αύλακα (Βοχαϊκή Αύλακα), για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών της πεδινής ζώνης μεταξύ Κιάτου και Κορίνθου. Δεδομένης της

υπερεπάρκειας σε νερό που υπάρχει κατά την χειμερινή περίοδο, η υπερ-άρδευση είναι συνήθης πρακτική για πολλές καλλιεργούμενες εκτάσεις. Λόγω του χρόνου παραμονής του νερού στο έδαφος (μεγάλοι χρόνοι παραμονής σε οργωμένο έδαφος), το μεγαλύτερο μέρος του πλεονάζοντος νερού κατεισδύει στον υδροφόρο ορίζοντα εφαρμόζοντας ουσιαστικά ενός είδους τεχνητό εμπλουτισμό με ότι βέβαια συνεπάγεται αυτή η πρακτική (αύξηση ρύπανσης των υπόγειων υδάτων από λιπάσματα κ.α.).

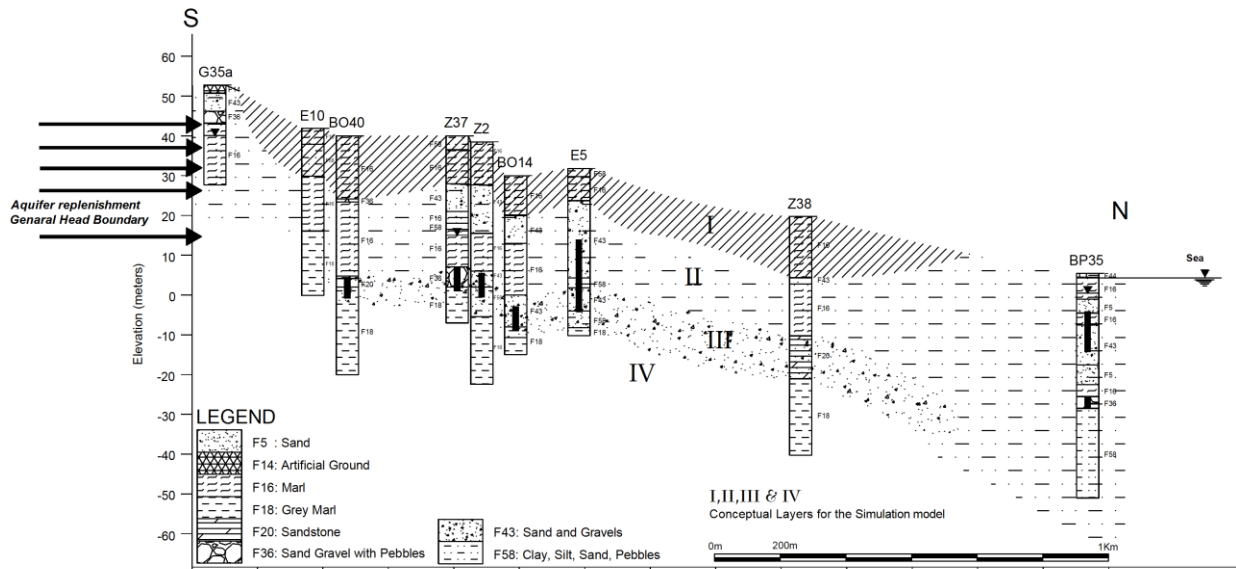
Αντλήσεις: Σημαντική πίεση στο σύστημα επιβάλλουν οι πολυάριθμες παντός είδους αντλήσεις που πραγματοποιούνται σε όλη την έκταση του Βοχαϊκού πεδίου. Σημαντικότερη πίεση επιβάλλουν οι αρδευτικές γεωτρήσεις οι οποίες εκτός από πολυάριθμες είναι και ως επί το πλείστον παράνομες. Το νερό αντλείται και μεταφέρεται με δίκτυα πολλές φορές σε μεγάλες αποστάσεις προκειμένου για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών των παραγωγών σε όλη την έκταση της παραλιακής ζώνης χωρίς κανένα σχέδιο.

Επίδραση των ποταμο-χειμάρρων στο υδραυλικό καθεστώς: Στοιχείο που προκύπτει από τους χάρτες της πιεζομετρίας που παρατέθηκαν νωρίτερα είναι ότι οι χειμάρροι Ράχιανη και Ζαπάντης δεν φαίνεται να επιδρούν στις πιεζομετρικές γραμμές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ροή δεν είναι μόνιμη και λαμβάνει χώρα μόνο μετά από έντονες βροχοπτώσεις.

Επικοινωνία του συστήματος με την θάλασσα: Εκφόρτιση του συστήματος προς τον Κορινθιακό Κόλπο κατά την χειμερινή περίοδο. Πιθανή υφαλμύρωση του υδροφόρου (εισροή από τον Κορινθιακό Κόλπο προς το σύστημα) κατά την θερινή περίοδο που εντατικοποιούνται οι αντλήσεις ύδρευσης και άρδευσης

Προκειμένου να αποδοθεί ένα εννοιολογικό μοντέλο (conceptual model) όσο το δυνατόν πλησιέστερα προς την πραγματικότητα, έγινε αξιολόγηση όλων των διαθέσιμων λιθολογικών στοιχείων για την περιοχή μελέτης από τα οποία προέκυψαν δεκατέσσερις υδρολιθολογικές τομές οι οποίες παραθέτονται στο παράρτημα σε συνδυασμό με την θέση τους στην ευρύτερη περιοχή.

Λιθολογικά η ευρύτερη περιοχή έρευνας χαρακτηρίζεται από πολύ έντονο βαθμό ετερογένειας και ανισοτροπίας τόσο κατά την κατακόρυφο όσο και κατά την οριζόντια διεύθυνση με υπάρχει εναλλαγή μεταξύ άμμων, αργίλων, χαλικιών και αργιλοίλου και με μεταβαλλόμενο πάχος διαστρώσεων. Υπόβαθρο όλου του συστήματος του προσχωματικού υδροφόρου θεωρείται ότι είναι η μάργα η οποία είναι γενικά μη-περατός σχηματισμός. Σκοπός της επεξεργασίας των λιθολογικών τομών ήταν ο προσδιορισμός του πάχους των στρωμάτων που εισάγονται στο μοντέλο προσομοίωσης του προσχωματικού υδροφόρου. Από την επεξεργασία προέκυψε χάρτης τιμών με τις ισοϋψείς της οροφής του γεωλογικού σχηματισμού της μάργας, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε ως βάση (στεγανό υπόβαθρο) του μοντέλου προσομοίωσης.



Εικόνα 61 : Τομή της ιδεατής στρωματογραφίας (Conceptual Model Layers) με βάση τα στοιχεία πεδίου

Τα βάθη στα οποία συναντώνται οι μαργαϊκοί σχηματισμοί (Κορινθιακές μάργες) είναι από 10-15μέτρα στο Νότιο περιθώριο φτάνοντας τα 60-80μέτρα στην παραλιακή ζώνη. Η κλίση αυτή της οροφής της μάργας προς το Βορρά οφείλεται, όπως έχει αναλυθεί εκτενέστερα σε προηγούμενο κεφάλαιο, στην νεοτεκτονική εξέλιξη της περιοχής με την δημιουργία, ανάπτυξη και μετανάστευση του συστήματος των ρηγμάτων που οριοθετούν την περιοχή αλλά και τις μεταβολές του επιπέδου της θάλασσας που έχουν αποτυπωθεί στις φάσεις, πάχος και ηλικία των Πλειο-Πλειστοκαινικών ιζημάτων που πληρώνουν την λεκάνη ιζηματογένεσης. Κατά μήκος του π. Ασωπού, η οροφή της μάργας φαίνεται να εμφανίζεται σε μεγαλύτερα βάθη σε σχέση με τις γειτονικές περιοχές. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται είτε σε ρηξιγενή τεκτονική είτε απλά διαβρωτικές διεργασίες του π. Ασωπού και την μετέπειτα απόθεση υλικών ποταμοχειμάριας προέλευσης.

Το πάχος των προσχώσεων εντός των οποίων αναπτύσσεται το παραλιακό υδροφόρο σύστημα, ποικίλει από λίγα μέτρα (15-20μ) στις Νότιες παρυφές του συστήματος έως 60-80μ στην παραλιακή ζώνη. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει επαρκής αριθμός λιθολογικών δεδομένων γεωτρήσεων από την παραλιακή ζώνη, το πάχος των προσχώσεων και το βάθος του σχηματισμού της μάργας (στεγανό υπόβαθρο υδροφόρων) βασίζεται κυρίως σε λογικές εκτιμήσεις επάνω στα υφιστάμενα δεδομένα.

Δεδομένου ότι υπάρχουν πολλές κατακόρυφες και πλάγιες μεταβολές της λιθολογίας, δεν υπάρχει αμιγής εμφάνιση όλων των στρωμάτων του εννοιολογικού μοντέλου σε όλη την έκταση της μελετούμενης περιοχής. Έντονη διαφοροποίηση υπάρχει ιδιαίτερα στο επιφανειακό στρώμα το οποίο εμφανίζεται άλλοτε σχετικά στεγανό δημιουργώντας υδροφόρους υπό πίεση είτε διαπερατό δημιουργώντας έναν επιφανειακό ελεύθερο

υδροφόρο. Οι μεταβολές αυτές στο μοντέλο αποδίδονται με την χωρική διαφοροποίηση της υδραυλικής αγωγιμότητας όπως αυτή απεικονίζεται στο κεφάλαιο των υδραυλικών ιδιοτήτων.

10.1 Διακριτοποίηση

Στην διαδικασία προσομοίωσης, του εννοιολογικού μοντέλου έπεται η διακριτοποίηση (grid design) που θα παρέχει τους κόμβους επίλυσης. Σε ένα αριθμητικό μοντέλο, η περιοχή που διακριτοποιείται αποτελείται από κόμβους και τα αντίστοιχα στοιχεία πεπερασμένων διαφορών (Anderson and Woessner, 1992).

Κατά τους (Spitz and Moreno, 1996) η χωρική διακριτοποίηση ενός μοντέλου πρέπει να σχεδιάζεται έχοντας σαν προτεραιότητα τους παρακάτω στόχους :

- Την ενίσχυση της σταθερότητας της λύσης του μοντέλου
- Της αύξησης της ευκρίνειας/ ανάλυσης του μοντέλου
- Την μείωση της αριθμητικής διασποράς
- Την μείωση των υπολογιστικών απαιτήσεων

Σταθερότητα : Η ομοιομορφία στο πλέγμα παρέχει την περισσότερη σταθερή επίλυση στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών. Στην περίπτωση που απαιτηθεί πύκνωση ή αραιώση των γραμμών του πλέγματος, η μεταβολή του πλάτους μεταξύ γειτονικών κυττάρων δεν θα πρέπει ποτέ να ξεπερνάει έναν συντελεστή που ισούται με 2 ενώ ο προτεινόμενος συντελεστής μεταβολής με βάση τον εμπειρικό κανόνα των (McDonald and Harbaugh, 1988) ισούται με 1.5.

Ανάλυση : Το πλέγμα θα πρέπει να διαθέτει επαρκώς μικρές διαστάσεις (ιδιαίτερα στην περιοχή που ενδιαφέρει περισσότερο) ώστε να απεικονίζει με περισσότερη λεπτομέρεια τις τοπικές μεταβολές των εδαφικών παραμέτρων, της πιεζομετρικής στάθμης και της συγκέντρωσης του ρυπαντή.

Πύκνωση λοιπόν του πλέγματος απαιτείται συνήθως αφενός στις περιοχές ενδιαφέροντος και αφετέρου στα σημεία με ισχυρές υδραυλικές κλίσεις (γεωτρήσεις άντλησης, καταβόθρες, ορύγματα κτ). Η πύκνωση αυτή, προσφέρει τη δυνατότητα να έχουμε περισσότερη λεπτομέρεια στην επίλυση αλλά συνήθως επιδρά αντιστρόφως ανάλογα στον χρόνο που απαιτείται για την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών. Προσοχή απαιτείται ώστε η πύκνωση του πλέγματος να μην επιβαίνει εις βάρος των υπολογιστικών δυνατοτήτων της επίλυσης. Ανάλυση του φαινομένου πραγματοποιείται στο κεφ. 11.1 όπου γίνεται ανάλυση ευαισθησίας του πλέγματος (grid).

Ιδιαίτερα όταν πραγματοποιείται και προσομοίωση μεταφοράς μάζας η διακριτοποίηση του μοντέλου εξαρτάται και από τους ακόλουθους παράγοντες :

Αριθμητική διασπορά : Όταν η φυσική διασπορά είναι μικρή ή αμελητέα, η αριθμητική διασπορά γίνεται ένα πολύ σοβαρό πρόβλημα που οδηγεί σε άμβλυνση (smearing) του μετώπου συγκέντρωσης η οποία θα έπρεπε να έχει οξεία (sharp) εμφάνιση.

Προκειμένου για τον έλεγχο της πιθανότητας αριθμητικής διασποράς κατά την προσομοίωση μεταφοράς μάζας, χρησιμοποιείται συνήθως ο αριθμός Peclet.

$$(E. 15) \quad P_e = \frac{|v|\Delta x}{D} \quad \text{όπου :}$$

$ v $	Είναι το μέγεθος της ταχύτητας του υπόγειου νερού (LT^{-1}) στην διεύθυνση ροής
Δx	Είναι ένα χαρακτηριστικό μήκος όπου συνήθως χρησιμοποιείται το πλάτος του κυττάρου (Δx)
D	Είναι ο συντελεστής διασποράς, (L^2T^{-1})

Σε προβλήματα που κυριαρχεί η συμμεταφορά τα οποία αναφέρονται και ως προβλήματα με 'μέτωπο απότομης εναλλαγής' (sharp front problems), ο αριθμός Peclet έχει μεγάλη τιμή πλησιάζοντας το άπειρο σε προβλήματα απόλυτης συμμεταφοράς ($Pe \rightarrow \infty$) δεδομένου ότι $D \approx 0$. Όσο περισσότερο σημαντική γίνεται η φυσική διασπορά (αυξάνει το D), τόσο μικρότερος γίνεται και ο αριθμός Peclet και στην εξίσωση μεταφοράς μάζας κυριαρχούν οι όροι διάχυσης και αντίδρασης.

Ο αριθμός Peclet εκτός από την διασπορά εξαρτάται και από το πλάτος των κελιών. Όσο το Δx μειώνεται, μειώνεται και ο αριθμός Peclet. Μικροί αριθμοί Peclet που σχετίζονται με υψηλή χωρική διακριτοποίηση (πυκνό πλέγμα) χαρακτηρίζονται και από μείωση της τεχνητής ταλάντωσης, γεγονός που έχει αποδειχθεί σε εργασία των (Huyakorn and Pinder, 1983) για $Pe \leq 2$.

Επιπλέον, σύμφωνα με την συνθήκη Courant-Friedrich-Levy 'Το χρονικό βήμα θα πρέπει να διατηρείται μικρό ώστε να έχει επαρκή χρόνο η πληροφορία να διαδοθεί διαμέσου της χωρικής διακριτοποίησης'. Μαθηματικά η παραπάνω συνθήκη εκφράζεται με τον αριθμό Courant όπου :

$$(E. 16) \quad \gamma_c = \frac{|v|\Delta t}{\Delta x} \leq 1$$

Ο αριθμός Courant (γ_c) παίρνει τιμές μεταξύ 0.5 και 1.0 και εκφράζει των αριθμό των κελιών που μπορεί να κινηθεί ένα σωματίδιο σε κάθε διεύθυνση σε κάθε χρονικό βήμα (σε ένα Βήμα Μεταφοράς μάζας).

Η εξάρτηση του φαινομένου της αριθμητικής διασποράς από τον αριθμό Courant οδήγησε στον ορισμό της εξίσωσης (Ε. 16) σαν την ελάχιστη απαίτηση ακρίβειας για την επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς μάζας (Zheng and Bennett, 1995).

Για δεδομένη ταχύτητα v και συντελεστή διασποράς D , το μέγεθος του αριθμού Peclet μπορεί να ρυθμιστεί μόνο μεταβάλλοντας το μέγεθος του πλέγματος Δx . Εντούτοις, δεδομένου ότι ο αριθμός Courant είναι αντιστρόφως ανάλογος του Δx , μειώνοντας το Δx αυξάνεται και ο αριθμός Courant εκτός εάν μειώνεται συγχρόνως και το χρονικό βήμα Δt . Κατόπιν των παραπάνω μπορεί να ειπωθεί ότι : «*Ο βέλτιστος συνδυασμός χρονικού βήματος και διαστάσεων του πλέγματος δημιουργεί ελάχιστη αριθμητική διασπορά προσδίδοντας σταθερότητα στην εξίσωση*» (Press *et al.*, 1986)

Συνοπτικά, παράγοντες που ευνοούν την αριθμητική διασπορά είναι :

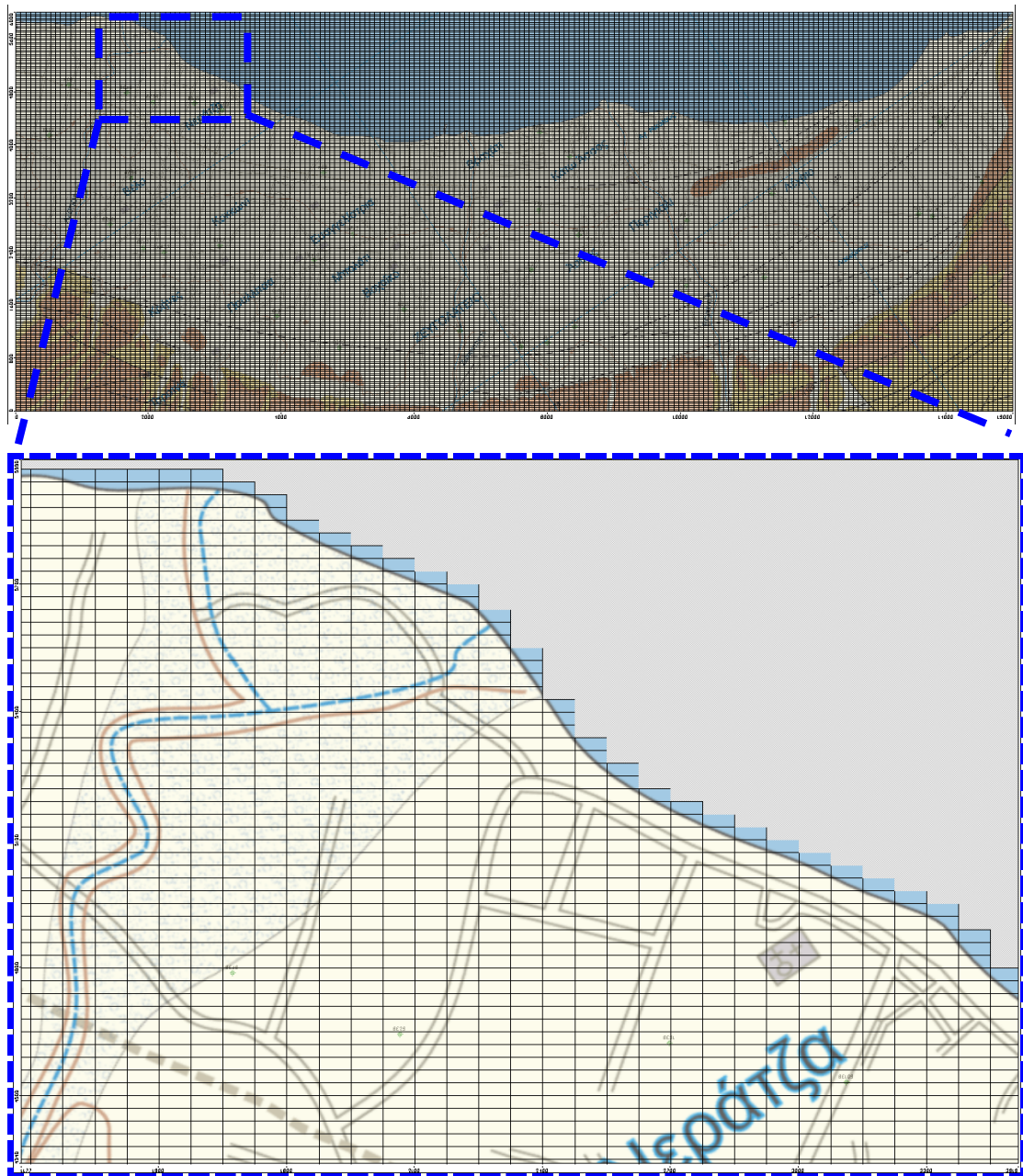
- Η υπόγεια ροή να μην συμπίπτει με κανέναν από τους άξονες του πλέγματος
- Η ύπαρξη μεγάλης απόστασης (Δx) διαδοχικών γραμμών του πλέγματος (μεγάλο πλάτος κυττάρου - L) ιδίως σε περιπτώσεις που κυριαρχεί η συμμεταφορά (advection)

Στόχος του σχεδιασμού του πλέγματος στα πλαίσια της παρούσας έρευνας ήταν να έχει το μοντέλο την μεγαλύτερη δυνατή ανάλυση στην οποία θα μπορεί να ανταποκριθεί το υπολογιστικό σύστημα επιτυγχάνοντας όμως συγχρόνως τους στόχους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Προκειμένου να μειωθούν οι παράγοντες που ευνοούν την αριθμητική διασπορά, το πλέγμα περιστράφηκε και οριοθετήθηκε κατά τέτοιο τρόπο ώστε η κύρια διεύθυνση ροής όπως προκύπτει από τους υφιστάμενους πιεζομετρικούς χάρτες να συμπίπτει με έναν από τους κύριους άξονες του πλέγματος.

Για την διακριτοποίηση λοιπόν του εν λόγω συστήματος, επιλέχθηκε η χρήση ενός κανάβου με 200 στήλες και 200 γραμμές, όπου οι διαστάσεις του κυττάρου (cell) είναι πλάτος 75μ και μήκος τα 30μ. Η διεύθυνση του μήκους συμπίπτει με την κύρια διεύθυνση ροής. Οι γραμμές και στήλες του κανάβου διατηρήθηκαν σε ίσες αποστάσεις δεδομένου ότι πεδίο ενδιαφέροντος της παρούσας μοντελοποίησης είναι το σύνολο της πεδινής ζώνης με τις γεωτρήσεις άντλησης να παρουσιάζουν αυξημένη πυκνότητα σε όλο το πεδίο. Οι θέσεις εκτός του πεδίου ενδιαφέροντος προσδιορίστηκαν με ανενεργά κελιά (φαιό χρώμα).

Η διακριτοποίηση του χώρου κατά την κατακόρυφη διεύθυνση γίνεται από το μοντέλο με τον καθορισμό του αριθμού των στρωμάτων που θα χρησιμοποιηθούν όπως και τις υδραυλικές παραμέτρους που περιέχουν ή ενσωματώνουν το πάχος των στρωμάτων. Η κατακόρυφη διακριτοποίηση μπορεί να θεωρηθεί είτε σαν μία προέκταση της επιφανειακής διακριτοποίησης – μία διαδικασία διαίρεσης του συστήματος ροής σε τμήματα βάσει της ακρίβειας που απαιτείται από τα αποτελέσματα είτε να θεωρηθεί σαν μια προσπάθεια

αναπαράστασης μεμονωμένων υδροφόρων ή υδροπερατών ζωνών από μεμονωμένα στρώματα του μοντέλου.



Εικόνα 62 : Χωρική Διακριτοποίηση της περιοχής μελέτης με κύτταρα 30mx75m

Στο Visual Modflow, προκειμένου να διαφοροποιηθούν τα στρώματα που θα χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση, υπάρχει η δυνατότητα είτε να χρησιμοποιηθεί παραμορφωμένο πλέγμα είτε να χρησιμοποιηθεί σταθερό πλέγμα με μεγαλύτερο αριθμό κυττάρων (cells). Το παραμορφωμένο πλέγμα δημιουργεί ενίοτε δευτερογενή προβλήματα στην αριθμητική επίλυση του μοντέλου (προβλήματα σύγκλισης). Προκειμένου να ελεγχθεί η παρούσα προσομοίωση ως προς τις βασικές της υποθέσεις που αφορούν την δημιουργία ενός πλήρως μεταβατικού μοντέλου, επιλέχθηκε η χρήση στρωμάτων μη παραμορφωμένου πλέγματος με διαφοροποιημένες υδραυλικές ιδιότητες. Η κατακόρυφη λοιπόν διακριτοποίηση

του πλέγματος πραγματοποιήθηκε βάσει του εννοιολογικού μοντέλου της Εικόνας 61 όπου για όλη την έκταση θεωρήθηκε η ύπαρξη τεσσάρων στρωμάτων με υδραυλικές ιδιότητες όπως αυτές θα παρουσιασθούν σε επόμενο κεφάλαιο.

Ως **Χρονικό βήμα (stress period) προσομοίωσης** ροής επιλέχθηκαν 30-31days που συμπίπτουν με τις μηνιαίες μετρήσεις στάθμης που πραγματοποιήθηκαν στο πεδίο.

10.2 Οι παράμετροι του Υδροφόρου

Οι υδρογεωλογικές παράμετροι (properties) ενός υδροφόρου ορίζονται ποικίλουν φυσιολογικά σαν αποτέλεσμα των πολύπλοκων γεωλογικών διεργασιών μέσω των οποίων δημιουργούνται και εξελίσσονται οι υδροφόροι. Φυσικές και χημικές διεργασίες που συμπεριλαμβάνουν την δομική παραμόρφωση του υδροφόρου, την απόθεση και την διαγένεση, ελέγχουν την γεωμετρία και την υφή των ιζηματογενών αποθέσεων και δημιουργούν ετερογένεια στον υδροφόρο και τις ιδιότητές του. Τις τελευταίες δεκαετίες η προσοχή έχει επικεντρωθεί στην ενσωμάτωση της ετερογένειας στα αριθμητικά μοντέλα που προσομοιώνουν την ροή και την μεταφορά μάζας. Οι παράμετροι που ποικίλουν χωρικά είναι η υδραυλική αγωγιμότητα K (ή εναλλακτικά η μεταβιβαστικότητα T), το πορώδες και το ενεργό πορώδες (Koltermann and Gorelick, 1996).

Επειδή σε καμία περίπτωση δεν είναι δυνατή η ύπαρξη τρισδιάστατης πληροφορίας σχετικά με τις υδραυλικές ιδιότητες ενός υδροφορέα πρέπει να εφαρμοστεί κάποια προσέγγιση ώστε να κατασκευασθούν οι χάρτες της χωρικής μεταβολής των υδραυλικών ιδιοτήτων. Έχουν προταθεί πολυάριθμες προσεγγίσεις για την δημιουργία χαρτών με την κατανομή των υδραυλικών ιδιοτήτων προκειμένου να εισαχθούν στα μοντέλα προσομοίωσης της υπόγειας ροής και της μεταφοράς μάζας τα οποία χρησιμοποιούν πεπερασμένα στοιχεία ή πεπερασμένες διαφορές (Pinder and Gray, 1977; Wang and Anderson, 1982; Anderson and Woessner, 1992).

Για τις περισσότερες από αυτές τις προσεγγίσεις, η διαδικασία δημιουργίας του χάρτη κατανομής των ιδιοτήτων περιλαμβάνει δύο στάδια: Την κατασκευή μιας εικόνας (*image creation*) σε σχέση με τα γεωλογικά στρώματα που επηρεάζουν την ροή και την μεταφορά μάζας και κατά το δεύτερο στάδιο, την εκτίμηση των υδραυλικών παραμέτρων (*hydraulic property estimation*) που αντιστοιχούν σε αυτά τα στρώματα. Κατά το πρώτο στάδιο λοιπόν γίνεται εκτίμηση των γεωλογικών στρωμάτων που επηρεάζουν την ροή και την μεταφορά μάζας και παράγεται μια εικόνα της κατανομής αυτών των στρωμάτων. Κατά το δεύτερο στάδιο εισάγονται οι παράμετροι των μοντέλων ροής και μεταφοράς μάζας και συνδέονται με την παραχθείσα εικόνα ώστε να δημιουργηθούν οι χάρτες χωρικής κατανομής των υδραυλικών ιδιοτήτων.

Σύμφωνα με τους (Koltermann and Gorelick, 1996) υπάρχουν, στην γενική τους μορφή τρεις μέθοδοι για την δημιουργία των χαρτών κατανομής υδραυλικών παραμέτρων :

Προσομοίωσης Δομής (Structure imitating) με την χρήση χωρικής στατιστικής και πιθανοτικών κανόνων ώστε να αποδοθούν οι γεωμετρικές σχέσεις μέσα στους υδροφόρους.

Προσομοίωσης Διαδικασίας (Process imitating) με την επίλυση των βασικών εξισώσεων ροής και μεταφοράς μάζας.

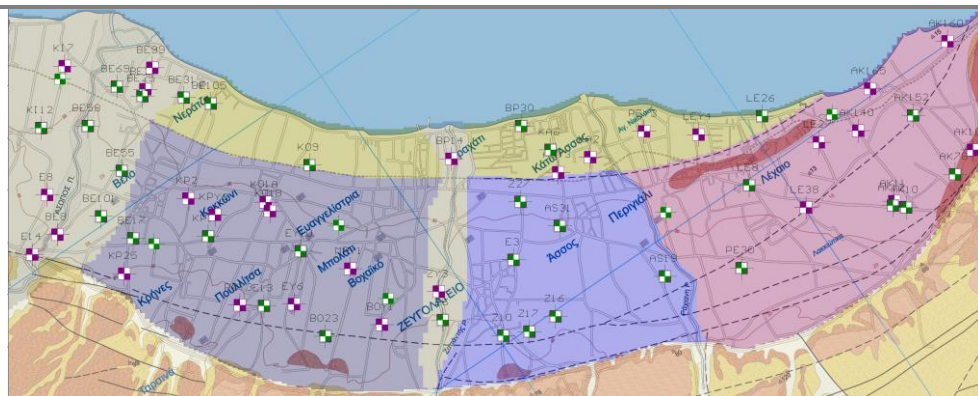
Περιγραφική (Descriptive), όπου ο υδροφόρος χωρίζεται σε ζώνες μέσω της σύνθεσης υφιστάμενων υδραυλικών μετρήσεων και γεωλογικών παρατηρήσεων σε ένα ενιαίο εννοιολογικό μοντέλο.

Στην παρούσα περίπτωση προσομοίωσης ακολουθήθηκε η τελευταία μέθοδος όπου αξιοποιήθηκαν τα υφιστάμενα lithολογικά δεδομένα των γεωτρήσεων ώστε να κατασκευασθεί, αρχικά το γεωλογικό εννοιολογικό μοντέλο όπως αυτό παρουσιάσθηκε νωρίτερα. Κατά την δημιουργία των ζωνών, το υδροφόρο σύστημα χωρίζεται σε υδρογεωλογικές φάσεις βάσει γεωλογικών ή γεωφυσικών χαρακτηριστικών τα οποία έχουν διακριτά και εσωτερικά ομοιογενείς υδραυλικές ιδιότητες. Η Anderson (1989) καθορίζει τις υδρογεωλογικές φάσεις ως *‘ομογενείς ανισότροπες ενότητες οι οποίες θα πρέπει να έχουν έννοια για τις υδρογεωλογικές μετρήσεις πεδίου, την υπόγεια ροή και την μεταφορά μάζας’*.

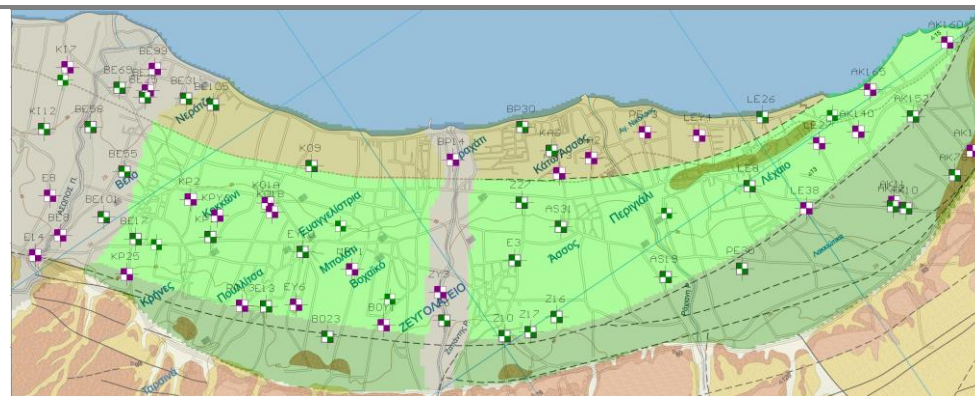
Οι τιμές των υδραυλικών παραμέτρων της κάθε υδροστρωματογραφικής ενότητας πρέπει να είναι τιμές που ενσωματώνουν όλες τις μικρότερης κλίμακας ετερογένειες χρησιμοποιώντας ουσιαστικά την έννοια του **‘ισοδύναμου ομογενούς πορώδους μέσου’**. Η χρήση ενιαίας υδραυλικής παραμέτρου σε κάθε ζώνη υπονοεί ότι η ετερογένεια μέσα στα πλαίσια της στρωματογραφικής ενότητας δεν είναι τόσο σημαντική όσο η ετερογένεια μεταξύ των διαφορετικών υδρο-στρωματογραφικών ενοτήτων.

Προκειμένου να είναι χρήσιμη για την προσομοίωση της ροής και της μεταφοράς μάζας η κατανομή της γεωλογικής ετερογένειας όπως αποδόθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, πρέπει να συνδεθεί με την χωρική κατανομή του πορώδους, του ενεργού πορώδους και της υδραυλικής αγωγιμότητας. Δεδομένου ότι δεν ήταν εφικτή η επιτόπου μέτρηση των ιδιοτήτων στο πεδίο (direct method) στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, χρησιμοποιήθηκαν έμμεσες εκτιμήσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας, του πορώδους και του ενεργού πορώδους από την βιβλιογραφία (Freeze and Cherry, 1979; Fetter, 1994; Fetter, 1999) οι οποίες αποδόθηκαν στις υδρογεωλογικές μονάδες και οι οποίες βελτιώθηκαν μέσω της βαθμονόμησης του μοντέλου.

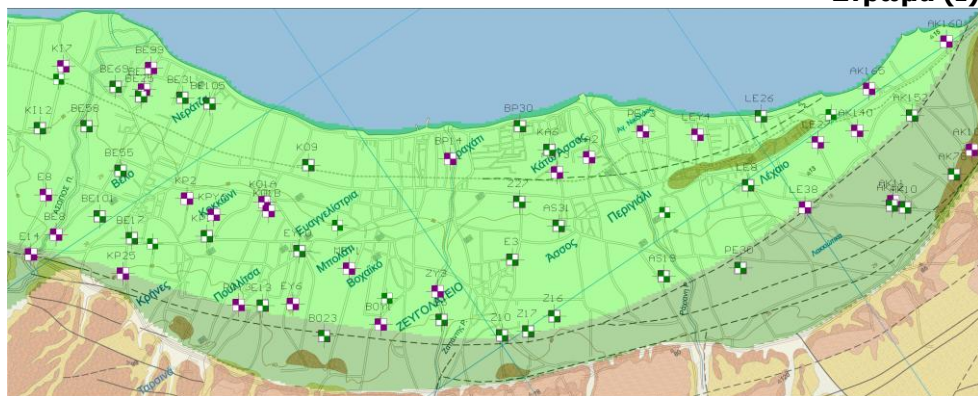
Στην επόμενη σελίδα ακολουθούν οι χάρτες κατανομής της υδραυλικής αγωγιμότητας με τις τιμές όπως αυτές προέκυψαν από την βαθμονόμηση του μοντέλου.



Στρώμα (I)



Στρώμα (II)



Στρώμα (III)



Στρώμα (IV)

Υδραυλική Αγωγιμότητα (K)

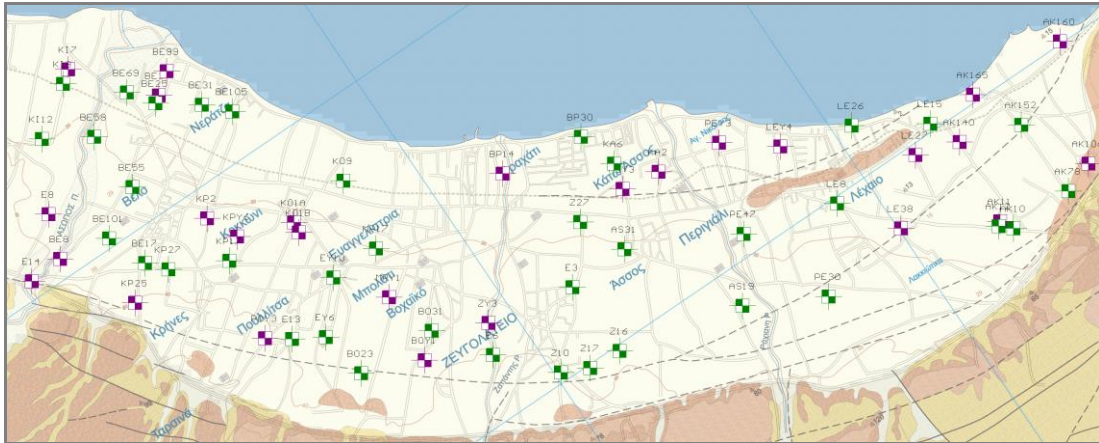
	Kx	Ky	Kz
(2)	2.313995×10^{-4}	2.313995×10^{-4}	8.893482×10^{-4}
(3)	2.125052×10^{-3}	2.15×10^{-3}	7.879077×10^{-4}
(5)	2.69×10^{-4}	2.69×10^{-4}	2.656177×10^{-6}
(6)	1.953491×10^{-4}	1.953491×10^{-4}	1.928615×10^{-3}
(7)	1.020418×10^{-4}	1.020418×10^{-4}	1.155066×10^{-4}
(8)	2.789406×10^{-3}	2.789406×10^{-3}	5×10^{-2}
(10)	3.117219×10^{-4}	3.117219×10^{-4}	5.51666×10^{-4}
(11)	2.092763×10^{-3}	2.092763×10^{-3}	9.833375×10^{-4}

Αποθηκευτικότητα (S) - Πορώδες

	Ss	Sy	Eff. Porosity	Total Porosity
(1)	0.0003	0.2966647	0.15	0.35
(2)	1.260815×10^{-6}	0.2	0.15	0.3
(3)	8.184032×10^{-7}	0.2	0.15	0.3
(4)	0.0003	0.1994135	0.2	0.4
(5)	6.13458×10^{-6}	0.204822	0.15	0.3
(6)	3.506156×10^{-6}	0.1997292	0.2	0.4
(7)	0.0003	0.1959568	0.15	0.35
(8)	1.751331×10^{-6}	0.2	0.15	0.3

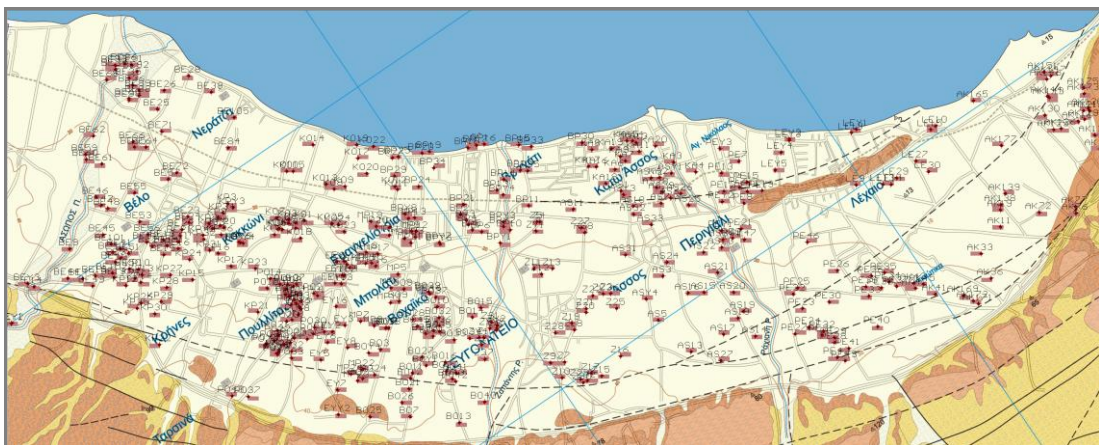
10.3 Εισαγωγή των Γεωτρήσεων Παρατήρησης & Άντλησης στο Μαθηματικό μοντέλο

Όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο των δεδομένων πεδίου, οι γεωτρήσεις που εισάγονται στο μοντέλο προσομοίωσης διαχωρίζονται σε υδρευτικές, αρδευτικές και ελάχιστες βιοτεχνικής χρήσης, βάσει της καταγραφής που πραγματοποιήθηκε στο πεδίο και παρουσιάζεται στο Παράρτημα



Εικόνα 63 : Οι θέσεις των Γεωτρήσεων παρατήρησης (Observation wells) απεικονίζονται με πράσινο χρώμα. Οι επιπλέον θέσεις (Concentration Observation wells) στις οποίες πραγματοποιήθηκε επίσης δειγματοληψία απεικονίζονται με μωβ χρώμα.

Στην Εικόνα 63 απεικονίζονται οι θέσεις μέτρησης της πιεζομετρικής επιφάνειας (πράσινο χρώμα) ενώ με μωβ χρώμα απεικονίζονται οι επιπλέον (εκτός των προαναφερθέντων θέσεων) θέσεις δειγματοληψίας.



Εικόνα 64 : Θέσεις καταγραφής των παραγωγικών γεωτρήσεων (wells)

Η παραλιακή ζώνη του Ν. Κορινθίας, εμφανίζει ολοένα αυξανόμενες ανάγκες σε νερό ιδιαίτερα κατά την θερινή περίοδο. Η συνεχής αύξηση της ζήτησης του γλυκού νερού οφείλεται σε πολλούς λόγους, οι κυριότεροι από τους οποίους είναι:

- ✓ αύξηση του μόνιμου πληθυσμού και του βιοτικού του επιπέδου
- ✓ αύξηση του εποχιακού πληθυσμού (τουρίστες)

- ✓ επέκταση των καλλιεργούμενων και αρδευόμενων εκτάσεων αλλά και εντατικοποίηση των καλλιεργειών των εξαγωγίμων προϊόντων (σταφίδα και εσπεριδοειδή)
- ✓ αύξηση του αριθμού των μεταποιητικών και βιομηχανικών μονάδων
- ✓ δημιουργία καινούργιων απαιτήσεων όπως ποτίσματα κήπων, πλύσιμο δρόμων κτλ

Προκειμένου λοιπόν για την κάλυψη των συνεχώς αυξανόμενων αναγκών έχουν πραγματοποιηθεί πολυάριθμες γεωτρήσεις όχι μόνο σε δημοτικό και κοινοτικό επίπεδο αλλά πολύ περισσότερο σε ιδιωτικό, που στις πλείστες των περιπτώσεων δεν είναι δυνατό να ελεγχθεί καθώς δεν ακολουθείται η νόμιμη διαδικασία της αδειοδότησης.

Αντλήσεις άρδευσης (W_{ir}) : Στην περιοχή έρευνας ένα μέρος των αρδευτικών αναγκών καλύπτεται από την απορροή του Ασωπού, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μέσω του αρδευτικού δικτύου (του ΑΟΣΑΚ) που καλύπτει την παραλιακή ζώνη. Το υπόλοιπο μέρος των αρδευτικών αναγκών καλύπτεται από πολυάριθμες ιδιωτικές γεωτρήσεις άρδευσης. Το γεγονός ότι δεν υπάρχει αυστηρός έλεγχος στην ανόρυξη και την κατασκευή γεωτρήσεων οδήγησε σε μία εντατική και μη ορθολογική εκμετάλλευση των υπόγειων υδροφόρων. Από την επιτόπου καταγραφή των σημείων άντλησης (γεωτρήσεις και πηγάδια) κατεγράφησαν άνω των 650 σημείων υδροληψίας (Εικόνα 64). Πολλά από τα σημεία αυτά ίσως δεν χρησιμοποιούνται πλέον καθώς ο υδροφόρος έχει κατέβει κάτω από το σημείο της διάτρησης (έχουν στερέψει).

Στον Πίνακα 5 παραθέτονται στατιστικά στοιχεία για τις Γεωργικές εκμεταλλεύσεις στην περιοχή έρευνας από την Στατιστική Υπηρεσία Ελλάδος (απογραφή έτους 1999-2000). Προκειμένου να γίνει μία εκτίμηση του όγκου του νερού που αντλείται ετησίως από τον προσχωματικό υδροφόρο για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών, θα γίνει χρήση των κατώτατων και ανώτατων ορίων που έχουν θεσπιστεί από το κράτος για την ορθολογικότερη χρήση του νερού. Βάσει του ΦΕΚ 428/02.06.1989, έχουν προσδιοριστεί τα ανώτατα και τα κατώτατα όρια για την ορθολογική χρήση του νερού στην άρδευση για την περίοδο Απρίλιο έως και Σεπτέμβριο. Για τους υπόλοιπους μήνες δεν ισχύουν όρια στην χρήση του αρδευτικού νερού καθώς συνήθως αφενός δεν πραγματοποιούνται συστηματικές αρδεύσεις και αφετέρου υπάρχει πλεόνασμα νερού.

Τυπικά, οι ανάγκες σε άρδευση καθορίζονται βάσει του Υδατικού διαμερίσματος στο οποίο ανήκει η αρδευόμενη περιοχή και από την κατηγορία στην οποία υπάγεται η καλλιέργεια βάσει ενός φυτικού συντελεστή K . Για το υδατικό διαμέρισμα της Βόρειας Πελοποννήσου και φυτικό συντελεστή $K=0,55$ (Κατηγορία I - Εσπεριδοειδή, Ελιές και Αμπέλια) σε σύνολο 44331,10 στρεμμάτων (αρδευόμενες εκτάσεις) προκύπτει ο Πίνακας 6 με τις ανάγκες σε νερό άρδευσης.

	Χρησιμοποιούμενη Γεωργική Έκταση (στρέμματα)	Αρδευόμενες Εκτάσεις (στρέμματα)	Ετήσιες Καλλιέργειες (στρέμματα)	Δενδρώδεις Καλλιέργειες ⁵ (στρέμματα)	Αμπέλια & Σταφιδάμπελα (στρέμματα)	Οικογενειακοί Λαχανόκηποι & Φυτώρια (στρέμματα)
Περιγιάλι	3.038,10	2.632,90	81,00	946,30	2.008,80	1,00
Άσσος	4.809,40	4.173,90	132,50	1.099,20	3.577,10	0,60
Κάτω Άσσος	406,20	400,20	0,00	85,20	321,00	0,00
Λέχαιο	4.513,60	3.252,60	374,50	1.507,20	2.543,90	5,00
Βέλο-Νεράτζα	6.545,60	5.146,60	391,80	4.855,70	1.172,20	1,40
Κοκκώνι	1.766,90	1.417,80	1.766,90	1.021,70	476,10	2,00
Κρήνες	2.513,90	2.246,40	24,00	1.705,10	774,80	0,00
Πουλλίτσα	4.144,30	3.853,30	425,50	1.587,20	1.913,60	0,50
Ζευγολατιό	18.363,40	13.298,80	85,50	8.908,50	9.308,00	11,40
Βοχαϊκό	4.141,50	3.467,90	111,00	2.354,30	1.658,10	3,60
Βραχάτι	3.102,40	2.243,90	206,00	1.614,10	1.218,50	1,80
Ευαγγελίστρια	1.024,40	789,90	131,00	421,10	442,50	0,30
Μπολάτι	1.766,30	1.406,90	7,50	1.104,30	544,20	6,80
ΣΥΝΟΛΟ	56.136,00	44.331,10	3.737,20	27.209,90	25.958,80	34,40

Πίνακας 5 : Στατιστικά στοιχεία για τις Γεωργικές εκμεταλλεύσεις στην περιοχή έρευνας από την Στατιστική Υπηρεσία Ελλάδος (ΕΣΥΕ, απογραφή έτους 1999-2000).

	Κατώτατο όριο αναγκαίας ποσότητας νερού για άρδευση ανά στρέμμα	Ανώτατο όριο αναγκαίας ποσότητας νερού για άρδευση ανά στρέμμα	Κατώτατο όριο αναγκαίας ποσότητας νερού για την άρδευση των 44331,10 στρεμμάτων	Ανώτατο όριο αναγκαίας ποσότητας νερού για την άρδευση των 44331,10 στρεμμάτων	Κατώτατη Συνολική αναγκαία ποσότητα, με επιφανειακές μεθόδους άρδευσης και απώλειες 5%	Ανώτατη Συνολική αναγκαία ποσότητα, με επιφανειακές μεθόδους άρδευσης και απώλειες 5%
Απρίλιος	63	77	2.792.859,3	3.413.494,7	3.919.802,53	4.790.869,75
Μάιος	85	102	3.768.143,5	4.521.772,2	5.288.622,46	6.346.346,95
Ιούνιος	96	115	4.255.785,6	5.098.076,5	5.973.032,42	7.155.195,09
Ιούλιος	104	124	4.610.434,4	5.497.056,4	6.470.785,12	7.715.166,88
Αύγουστος	99	118	4.388.778,9	5.231.069,8	6.159.689,68	7.341.852,35
Σεπτέμβριος	77	93	3.413.494,7	4.122.792,3	4.790.869,75	5.786.375,16
ΣΥΝΟΛΟ			23.229.496,4	27.884.261,9	32.602.801,96	39.135.806,18

Πίνακας 6 : Κατώτατα και Ανώτατα όρια για την χρήση αρδευτικού νερού σε m³/στρέμμα για ολόκληρο το μήνα

Προκειμένου να ληφθούν υπόψη ο βαθμός απόδοσης της μεθόδου άρδευσης και οι απώλειες κατά την μεταφορά του αρδευτικού νερού, διαιρούνται οι αναγκαίες ποσότητες του αρδευτικού νερού με έναν συντελεστή 0,7125 που αντιστοιχεί στην εφαρμογή επιφανειακών μεθόδων άρδευσης θεωρώντας ένα ποσοστό 5% απώλειες κατά την μεταφορά. Σύμφωνα λοιπόν με τον Πίνακα 6 το κατώτατο όριο αναγκαίας ποσότητας νερού άρδευσης βάσει των

⁵ Δενδρώδεις Καλλιέργειες = Εσπεριδοειδή, Βερικοκιές, Ελαιόδενδρα

προϋποθέσεων που θέσαμε παραπάνω είναι τα $32,6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ ενώ το ανώτατο όριο είναι τα **$39,1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$** .

Πρέπει να σημειωθεί ότι πέραν των ποσοτήτων νερού που χρησιμοποιούνται για άρδευση στην παραλιακή ζώνη, σημαντικές ποσότητες νερού (πχ γεωτρήσεις Κρήνης ΚΡΥ1-ΚΡΥ6) μεταφέρονται στην ημιλοφώδη ζώνη (ανάντη της περιοχής έρευνας) για αρδευτική και υδρευτική χρήση.

Αντλήσεις ύδρευσης (W_h) : Με βάσει τα στοιχεία της απογραφής του 2001 της ΕΣΥΕ ο συνολικός μόνιμος πληθυσμός της περιοχής ανέρχεται σε 28173 άτομα.

Δήμοι Παραλιακής Ζώνης	Μόνιμος πληθυσμός		Πραγματικός πληθυσμός	
	2001	1991	2001	1991
Δήμος Άσσου-Λεχαιίου	9162	5899	9850	6470
Δήμος Βέλου	7,705	7,773	8,211	8,200
Δήμος Βόχας	9,546	8,529	10,112	8,865
Συνολικά	26413	22201	28173	23535

Πίνακας 7 : Στοιχεία του πραγματικού πληθυσμού ανά Δημοτικό διαμέρισμα κατά την απογραφή της 18 Μαρτίου 2001 (στοιχεία ΕΣΥΕ)

Οι ανάγκες ύδρευσης καλύπτονται κυρίως από γεωτρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί στα αντίστοιχα Δημοτικά Διαμερίσματα και καταγράφονται αναλυτικά στον πίνακα που παρατίθεται στο παράρτημα.

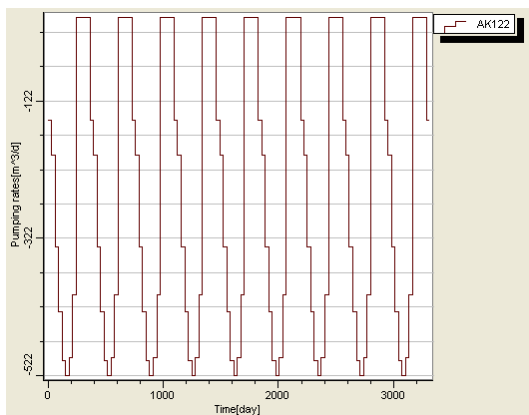
Θεωρώντας ότι η μέση κατά κεφαλή κατανάλωση νερού σε μία αναπτυγμένη χώρα είναι $0.315 \text{ m}^3/\text{day}$ (Καλλέργης, 1999) οι ανάγκες σε ύδρευση για τον μόνιμο πραγματικό πληθυσμό ανέρχονται σε $2.811.253,73 \text{ m}^3/\text{year}$.

Ο πραγματικός πληθυσμός του Δήμου Άσσου – Λεχαιίου ανέρχεται, σύμφωνα με τα στοιχεία της απογραφής του 2001, σε 9.850 κατοίκους. Ο πληθυσμός κατά τη θερινή περίοδο ανέρχεται, κατ' εκτίμηση από το Δήμο, σε 15.000 κατοίκους και κατανέμεται στα Δημοτικά Διαμερίσματα ως εξής : Άσσος 2.500, Κάτω Άσσος 4.000, Λέχαιο 5.500, Περιγιάλι 3.000. Κατά την θερινή περίοδο που αυξάνεται ο πληθυσμός της παραλιακής ζώνης (μεγάλος αριθμός παραθεριστικών κατοικιών και κάποιων ξενοδοχειακών μονάδων) αυξάνεται και η κατανάλωση νερού. Εάν θεωρήσουμε αύξηση του πληθυσμού τουλάχιστον κατά 30% που αντιστοιχεί σε πληθυσμό 7350 άτομα, τότε προκύπτει επιπλέον κατανάλωση για την θερινή περίοδο 277.830 m^3 . Βάσει των πληθυσμιακών δεδομένων, η συνολική κατανάλωση νερού για ύδρευση για την περίοδο ενός έτους ανέρχεται στα **$3.089.083,73 \text{ m}^3/\text{year}$** .

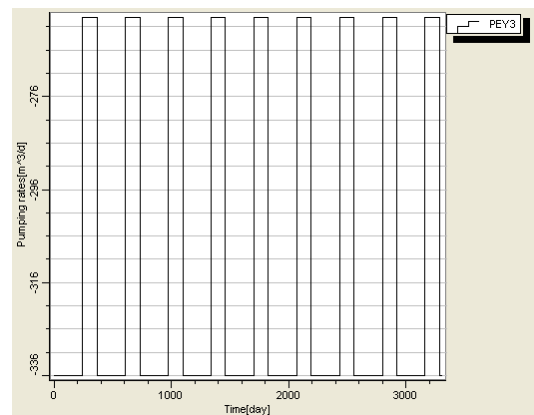
Αντλήσεις κάλυψης βιοτεχνικών και μεταποιητικών δραστηριοτήτων (Win):

Εργασιακά, οι κάτοικοι της περιοχής δραστηριοποιούνται κυρίως στον πρωτογενή τομέα (γεωργία και κτηνοτροφία) και δευτερευόντως στον δευτερογενή τομέα που αφορά βιοτεχνικές και μεταποιητικές δραστηριότητες (χαρτοποιία, παραγωγή χυμών, ελαιολιβερία κα). Αν και οι βιοτεχνικές και μεταποιητικές μονάδες που δραστηριοποιούνται στην ευρύτερη περιοχή είναι πολύ λίγες, εντούτοις σημαντικές ποσότητες νερού απαιτούνται και για την κάλυψη των λειτουργικών αναγκών τους. Αυτές οι αναγκαίες ποσότητες καλύπτονται κύρια από υδρογεωτρήσεις μέσα στον χώρο εργασίας που εκμεταλλεύονται τον προσχωματικό υδροφόρο. Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν στοιχεία κατανάλωσης νερού από αυτές τις μονάδες, προσεγγιστικά εκτιμάται ότι ένα τουλάχιστον ποσοστό 10%, της ύδρευσης, είναι η αναγκαία ποσότητα για την κάλυψη των παραπάνω αναγκών που αντιστοιχεί τελικά σε ποσότητα νερού $0,3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$.

Συνολικά για την κάλυψη των υδατικών αναγκών της παραλιακής ζώνης απαιτούνται ετησίως $W=42.56 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$.



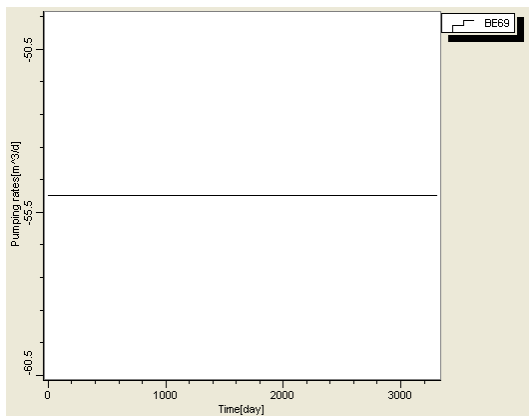
Εικόνα 65 : Σταδιακά μεταβαλλόμενη παροχή άντλησης ($150\text{-}522 \text{ m}^3/\text{d}$) για την Αρδευτική Γεώτρηση AK122 στην περιοχή ανάντη του Λεχαιού (Αρχαία Κόρινθος).



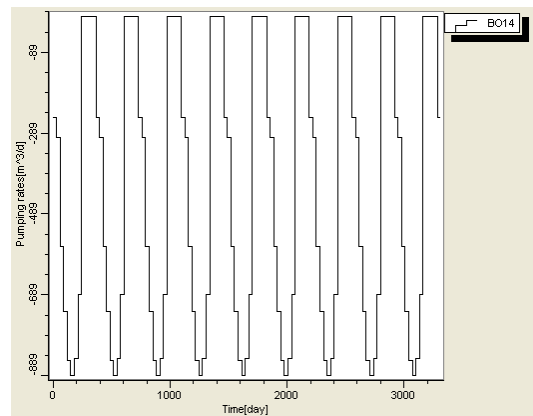
Εικόνα 66 : Μεταβολή της παροχής άντλησης για την υδρευτική γεώτρηση PEY3 άντλησης ($259\text{-}366 \text{ m}^3/\text{d}$) με βάση στοιχεία από τις Διευθύνσεις Ύδρευσης των Δ.Δ.

Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν στοιχεία παροχής και διάρκειας άντλησης για τις περισσότερες εκ των παραγωγικών γεωτρήσεων που κατεγράφησαν, θα χρησιμοποιηθούν τα στατιστικά στοιχεία από τις γεωργικές εκμεταλλεύσεις (Πίνακας 5) σε συνάρτηση με τα ανώτατα όρια για την χρήση του αρδευτικού νερού σε κυβικά μέτρα (m^3) για ολόκληρη την αρδευτική περίοδο (Πίνακας 6). Από τον συνδυασμό των ανωτέρω πινάκων και των αριθμών των καταγεγραμμένων γεωτρήσεων σε κάθε περιοχή ορίζονται οι μεταβαλλόμενες παροχές άντλησης για την κάθε γεώτρηση στο μοντέλο προσομοίωσης. Η παροχή άντλησης μεταβάλλεται για κάθε γεώτρηση ανάλογα με την θέση της στο χώρο και τις ανάγκες που καλείται να καλύψει (χωρικά) όπως μεταβάλλεται και ανάλογα με την εποχή του έτους (χρονικά).

Για το χειρισμό και την οργάνωση του μεγάλου όγκου αντλητικών δεδομένων που προέκυψαν με βάση αυτή την προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα της Microsoft Office, Access μέσω της οποίας τα δεδομένα εισήχθησαν στο πρόγραμμα Visual Modflow.



Εικόνα 67 : Υποθέτουμε σταθερή παροχή άντλησης (55 m³/d) στην γεώτρηση BE69 που καλύπτει ανάγκες βιοτεχνίας



Εικόνα 68 : Εποχιακά μεταβαλλόμενη παροχή άντλησης (250-889 m³/d) για την Αρδευτική Γεώτρηση BO14 στην περιοχή του Βοχαϊκού με βάση τις τοπικές ανάγκες άρδευσης

Θεωρούμε ότι οι μέγιστες παροχές άντλησης που υπολογίσθηκαν δεν μεταβάλλονται για το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης (1998-2018) καθώς αν και οι υδατικές ανάγκες είναι διαρκώς αυξανόμενες, το σύστημα ήδη το σύστημα λειτουργεί στα πλαίσια των ορίων του. Περαιτέρω αύξηση του ρυθμού άντλησης στις υφιστάμενες γεωτρήσεις μπορεί να οδηγήσει σε περαιτέρω υποβάθμιση της πιεζομετρικής στάθμης με αποτέλεσμα πολλές από αυτές να καταστούν ανενεργές.

10.4 Οριακές Συνθήκες για το Μοντέλο Ροής

Οι οριακές συνθήκες (boundary conditions) είναι μαθηματικές εκφράσεις που καθορίζουν την εξαρτημένη μεταβλητή (στάθμη) ή την παράγωγό της (παροχή) στα όρια της μελετώμενης περιοχής (Anderson and Woessner, 1992). Η επιλογή των οριακών συνθηκών που εφαρμόστηκαν στην περιοχή μελέτης έγινε κατόπιν προσεκτικής μελέτης της λειτουργίας του συστήματος από το εννοιολογικό του μοντέλο έως την γενική κατεύθυνση ροής που παρατηρήθηκε και μετρήθηκε στο πεδίο.

Συνοπτικά οι 'πιέσεις' (stresses) που καθορίζουν το μοντέλο ροής είναι:

1. Η επικοινωνία του υδροφόρου με την θάλασσα
2. Οι αντλήσεις για υδρευτικούς, αρδευτικούς ή και βιοτεχνικούς σκοπούς
3. Η επαναπλήρωση (recharge) του συστήματος

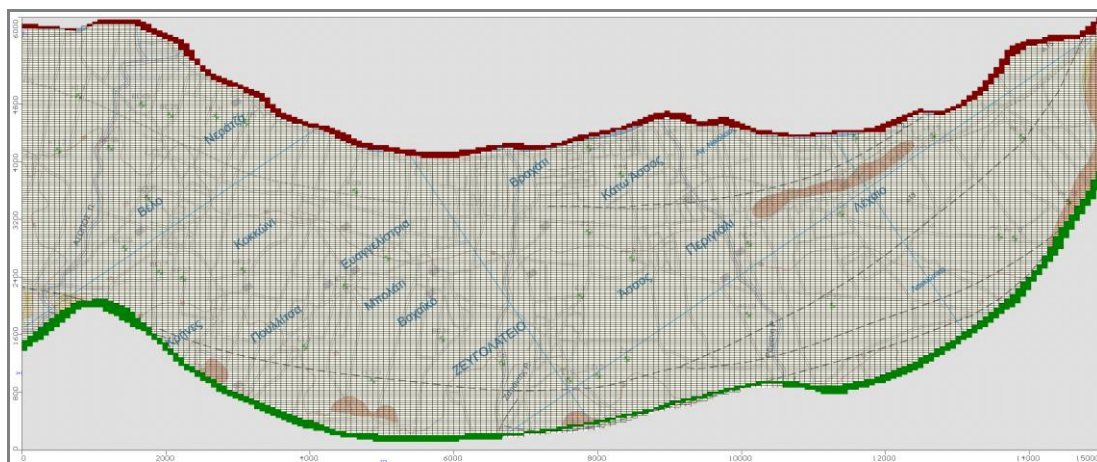
- Η συνολική επιφανειακή τροφοδοσία (Aerial Recharge) των σχηματισμών προερχόμενη από την βροχόπτωση, την άρδευση ή και την εισαγωγή λυμάτων μέσω των απορροφητικών βόθρων
- Η πλευρική τροφοδοσία (lateral recharge) του προσχωματικού υδροφόρου από τους ανάντη Πλειο-Πλειστοκαινικούς σχηματισμούς προς τις παράκτιες αποθέσεις

Για τον προσχωματικό υδροφόρο της Παραλιακής ζώνης Κορινθίας, μία από τις βασικές οριακές του συνθήκες είναι η επικοινωνία του με τον Κορινθιακό Κόλπο με τον οποίο βρίσκεται σε άμεση υδραυλική επαφή κατά μήκος της ακτογραμμής. Δεδομένου ότι το γλυκό και το αλμυρό νερό δεν αναμιγνύονται λόγω του ότι έχουν διαφορετικές πυκνότητες, ανάμεσά τους σχηματίζεται μία διεπιφάνεια που το σχήμα της καθορίζεται από το υδροδυναμικό ισοζύγιο οπουδήποτε τα δύο ρευστά βρίσκονται σε επαφή. Το βάθος της διεπιφάνειας καθορίζεται από το υδροδυναμικό ισοζύγιο με την σχέση των Ghyben-Herzberg

$$(E. 17) \quad h_s = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f$$

όπου ρ_s και ρ_f οι πυκνότητες του θαλασσινού και του γλυκού νερού αντίστοιχα ενώ h_s και h_f η στήλη του γλυκού νερού κάτω από το μέσο επίπεδο της θάλασσας (βάθος δι-επιφάνειας) και πάνω από αυτό (κορεσμένο πάχος του υδροφόρου μέχρι το επίπεδο 0m) αντίστοιχα. Αν $\rho_s = 1.025 \text{ g/cm}^3$ και $\rho_f = 1.0 \text{ g/cm}^3$ η ανωτέρω σχέση (E. 17) των Ghyben-Herzberg γίνεται :

$$(E. 18) \quad h_s \approx 40h_f$$



Εικόνα 69 : Προσδιορισμός Οριακών συνθηκών για το μοντέλο ροής.

Για τις ανάγκες του μοντέλου προσομοίωσης βάση της ανωτέρω σχέσης γίνεται δεκτό ότι το πυκνό θαλάσσιο ύδωρ επιδρά στην μεγαλύτερη ή όλη την ποσότητα του γλυκού νερού του υδροφόρου εξαναγκάζοντάς το να εκφορτίζεται κοντά στην ακτογραμμή. Προκειμένου να προσομοιωθεί αυτό το φαινόμενο χρησιμοποιείται οριακή συνθήκη μηδενικής ροής (*no-flow boundary-Neumann boundary condition*), κατά μήκος της ακτογραμμής, δημιουργώντας μία περιοχή με ανενεργά για την προσομοίωση κύτταρα.

Στο ίδιο όριο εφαρμόζεται και η οριακή συνθήκη *σταθερής στάθμης* καθώς η εκφόρτιση του υδροφόρου γίνεται στο επίπεδο αναφοράς (μηδέν) –*Dirichlet boundary condition* – απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα στην Εικόνα 69. Για τις περιοχές εκτός της περιοχής προσομοίωσης, ορίζεται οριακή συνθήκη δευτέρου είδους, μηδενικής ροής (φαιό χρώμα) κάνοντας τα κελιά ανενεργά.

Νότια της περιοχής μελέτης, δεδομένου ότι το μοντέλο δεν κρίνεται απαραίτητο να επεκταθεί και να συμπεριλάβει τους Πλειο-Πλειστοκαινικούς σχηματισμούς, αυτοί θέτονται εκτός προσομοίωσης με την εφαρμογή **οριακής συνθήκη μηδενικής ροής** (*no-flow boundary - Neumann boundary condition*) ενώ η επίδρασή τους στην λειτουργία του προσχωματικού υδροφόρου προσομοιώνεται με την χρήση *οριακής συνθήκης παροχής εξαρτώμενη από την στάθμη - head dependent flow (Cauchy)* όπου η ροή προς τον προσχωματικό υδροφόρο εξαρτάται από την στάθμη στην ανάντη περιοχή με την χρήση της **οριακής συνθήκης GHB** (General Head Boundary) - απεικονίζεται με πράσινο χρώμα στην Εικόνα 69.

Δεδομένου ότι σκοπός της παρούσας διατριβής είναι να παρουσιασθεί ένα πλήρες μεταβατικό μοντέλο ροής ικανό για να ανταποκριθεί στις ανάγκες διαχείρισης του προσχωματικού υδροφόρου, εισήχθησαν στο μοντέλο χρονικά μεταβαλλόμενες οριακές συνθήκες, ακολουθώντας διαδικασίες που θα περιγραφούν στην συνέχεια.

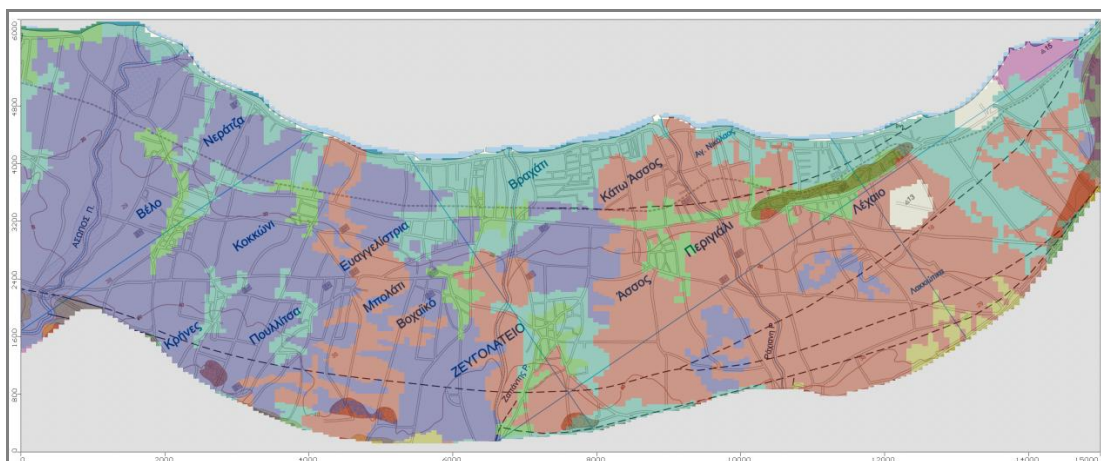
Επειδή δεν είναι γνωστή η **παροχή της πλευρικής τροφοδοσίας** που προέρχεται από τα ανάντη των υδρολογικών λεκανών και εμπλουτίζει τον προσχωματικό υδροφόρο της παραλιακής ζώνης, χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλες οριακές συνθήκες στα ανάντη (νότια) όρια του μοντέλου προκειμένου να γίνει προσομοίωση της πλευρικής τροφοδοσίας (lateral recharge). Προκειμένου λοιπόν να προσομοιωθεί η χωρική και χρονική μεταβλητότητα της πλευρικής τροφοδοσίας (τροφοδοσία από τους ανάντη σχηματισμούς) εισήχθησαν μεταβαλλόμενες οριακές συνθήκες με την χρήση του υπο-προγράμματος General Head Boundary όπου **η παροχή στον προσχωματικό υδροφόρο καθορίζεται από την στάθμη του τροφοδότη σχηματισμού.**

Για να εισάγουμε την χρονικά μεταβαλλόμενη στάθμη (h) του τροφοδότη σχηματισμού στην οριακή συνθήκη (GHB) του μοντέλου ροής, απαιτείται μια πλήρης χρονοσειρά μετρήσεων στάθμης η οποία στις περισσότερες περιπτώσεις δεν υπάρχει. Για να αντιμετωπισθεί αυτή η έλλειψη αλλά και για να γίνει πρόβλεψη της μελλοντικής διακύμανσης της πιεζομετρικής στάθμης δημιουργήθηκε μια συνάρτηση προσομοίωσης δεδομένων με βάση ορισμένες παραδοχές όπως θα παρουσιασθούν αυτές στην συνέχεια.

- ✓ Η διακύμανση της στάθμης γεώτρησης που βρίσκεται σχετικά κοντά στα όρια της μελετούμενης περιοχής είναι ενδεικτική της τροφοδοσίας που δέχεται ο υδροφόρος από τα ανάντη της γεώτρησης.

Όπως αναλύθηκε εκτενώς στο εισαγωγικό κεφάλαιο, **η ανάλυση της διακύμανσης της στάθμης (WTF)** είναι ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο στην εκτίμηση του μεγέθους της **βραχυχρόνιας ή και της μακροχρόνιας μεταβολής της τροφοδοσίας** και έχει εφαρμοστεί από πολλούς μελετητές υπό διαφορετικές κλιματικές συνθήκες (Gerhart, 1986; Hall and Risser, 1993; Healy and Cook, 2002). Η μέθοδος αυτή βασίζεται στον συλλογισμό ότι η αύξηση της στάθμης σε έναν ελεύθερο υδροφόρο οφείλεται στην τροφοδοσία που φθάνει στον υδατικό ορίζοντα. Λόγω του ότι η μετρούμενη στάθμη σε μια γεώτρηση παρατήρησης είναι αντιπροσωπευτική μιας περιοχής που καλύπτει μια ακτίνα αρκετών μέτρων, το αποτέλεσμα της μεθόδου WTF (Water Table Fluctuation) μπορεί να θεωρηθεί περισσότερο ως ένας συνδυασμός παραγόντων που επηρεάζουν το καθεστώς τροφοδοσίας και λιγότερο ως μια σημειακή μέτρηση. Με βάση την ανωτέρω παραδοχή, η χρονοσειρά μετρήσεων στάθμης σε γεώτρηση που βρίσκεται στα όρια της περιοχής μελέτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δεδομένα εισαγωγής (input) για την οριακή συνθήκη μεταβαλλόμενης στάθμης (GHB).

Όπως παρουσιάσθηκε στην ενότητα 6.5, το Νότιο όριο της περιοχής μελέτης χαρακτηρίζεται από διαφορετικές υδραυλικές κλίσεις που σχετίζονται με τις διαφορετικές συνθήκες τροφοδοσίας από τους ανάντη σχηματισμούς. Για τον λόγο αυτό, η ίδια διαδικασία προσομοίωσης της χρονοσειράς των μετρήσεων εφαρμόσθηκε και στην γεώτρηση BE17 (Εικόνα 59) που βρίσκεται στην Δυτική περιοχή ώστε να προκύψει μια δεύτερη σειρά δεδομένων. Στο μοντέλο προσομοίωσης της ροής εισάγονται τελικά δυο διαφορετικές οριακές συνθήκες (GHB) που εκφράζουν την τροφοδοσία που δέχεται ο προσχωματικός υδροφόρος από τους ανάντη σχηματισμούς στις δύο θέσεις.



Εικόνα 70 : Εφαρμογή του Recharge package του Visual Modflow με βάση το σχέδιο Χρήσεων Γης – Εφαρμογή χωρικά και χρονικά μεταβαλλόμενης παροχής

Στο Visual Modflow η τροφοδοσία που προέρχεται από την βροχόπτωση και τις αρδεύσεις (επιφανειακή τροφοδοσία) προσομοιώνεται με την χρήση του Recharge Package το οποίο εφαρμόζεται στο ανώτερο ενεργό στρώμα του μοντέλου είτε ως χρονικά αμετάβλητη παροχή (time invariant flux) όπως εφαρμόζεται συνήθως στα *σταθερά ή τα μερικώς μεταβατικά*

μοντέλα (steady state or partially transient solutions) χρησιμοποιώντας μια μέση τιμή παροχής για το χρονικό διάστημα εφαρμογής είτε ως χρονικά μεταβαλλόμενη παροχή σε πλήρως μεταβατικό μοντέλο (fully transient model) όπου η τροφοδοσία μεταβάλλεται ανάμεσα στα stress periods αλλά είναι σταθερή μέσα σε κάθε χρονική περίοδο τάσης (stress period). Εφόσον δεν ενεργοποιηθεί το 'υπο-πρόγραμμα' της εξατμισοδιαπνοής (ETg) στο Visual Modflow, το Recharge Package υπολογίζει αυτόματα την 'καθαρή' τροφοδοσία που εισέρχεται στον υδροφόρο (net recharge).

Προκειμένου να προσομοιωθεί η χωρική και χρονική μεταβλητότητα της **επιφανειακής τροφοδοσίας** (συνδυασμός βροχόπτωσης & αρδεύσεων - κατακλίσεων) εισήχθησαν τιμές παροχής ως net Recharge του υδροφόρου με χρήση του πακέτου της τροφοδοσίας (Recharge Package).

Δεδομένου επίσης ότι το ποσοστό της κατείδυσης του νερού εξαρτάται άμεσα από τις χρήσεις Γης, με βάση το σχέδιο χρήσεων γης που παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο στις επιφάνειες αυτές εφαρμόστηκαν διαφορετικές χρονικά μεταβαλλόμενες παροχές στις επιφάνειες που καλύπτονται από διαφορετικές χρήσεις γης. Οι τιμές αυτές μεταβλήθηκαν κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης του μοντέλου.

10.5 Βαθμονόμηση του Μοντέλου Προσομοίωσης Ροής

Δεδομένου ότι το μοντέλο πρέπει να έχει την ικανότητα να προσομοιώνει τις συνθήκες του πεδίου σε καλό επίπεδο ακρίβειας ώστε να είναι δυνατή και η προσομοίωση τεχνητών συνθηκών (σενάρια) υπόκειται στην διαδικασία της βαθμονόμησης.

Σκοπός γενικά της βαθμονόμησης (Calibration) είναι :

- η «σύνθεση» του φυσικού συστήματος με τον συνδυασμό των παρατηρήσεων πεδίου με τις προβλέψεις του μοντέλου
- η παρουσίαση με την μέγιστη δυνατή ακρίβεια των φυσικών και χημικών διαδικασιών και τάσεων
- Ο εντοπισμός και η εξάλειψη των τάσεων
- Βαθμονόμηση και σε σταθερές και σε μεταβατικές συνθήκες αποδίδουν περισσότερο αξιόπιστη βαθμονόμηση
- η 'εξέλιξη' ενός ακριβούς μοντέλου πρόβλεψης

Μειονεκτήματα της διαδικασίας Βαθμονόμησης του μοντέλου

- Απαιτούνται και ποσοτικά (στάθμες και συγκεντρώσεις) και ποιοτικά (διεύθυνση ροής, σχέδιο ισο-πιεζομετρικών καμπύλων, κα) κριτήρια προκειμένου για μια αξιόπιστη βαθμονόμηση
- Οι παρατηρήσεις πεδίου υπόκεινται στην αβεβαιότητα και στην ερμηνεία του χειριστή του μοντέλου
- Η βαθμονόμηση δεν είναι ποτέ μοναδική καθώς τα ίδια αποτελέσματα μπορεί να προκύψουν για διαφορετικό σετ παραμέτρων
- Η τελική λύση προκύπτει μέσα από την αξιολόγηση και την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων

Κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης ενός μοντέλου, διάφορες παράμετροι του μοντέλου μεταβάλλονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι προσομοιούμενες τιμές του να πλησιάζουν όσο το δυνατόν περισσότερο στις μετρούμενες τιμές (observed values) με τελικό σκοπό, το μοντέλο να μπορεί να προσομοιώνει όσο το δυνατόν καλύτερα το πραγματικό σύστημα.

Ο αριθμός των υδραυλικών παραμέτρων που εισάγονται στο μοντέλο, όπως έχει ήδη αναφερθεί, δεδομένου ότι μεταβάλλονται και χωρικά (υδραυλική αγωγιμότητα) και χρονικά (επιφανειακή τροφοδοσία) μπορεί να είναι άπειρος. Από την άλλη πλευρά, ο αριθμός των μετρήσεων είναι γενικά περιορισμένος και στον χώρο και στον χρόνο, με αποτέλεσμα να μπορεί να γίνει ένας πολύ μικρός αριθμός εκτιμήσεων των τιμών των υδραυλικών παραμέτρων που εισάγονται στο μοντέλο.

Για την βαθμονόμηση του μοντέλου ροής χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις στάθμης σε γεωτρήσεις και πηγάδια που έχουν πραγματοποιηθεί από το Φεβρουάριο του 1998 έως το Μάρτιο του 2007 (30 ομάδες μετρήσεων που παραθέτονται στο παράρτημα της παρούσας διατριβής ενώ η 31^η ομάδα μετρήσεων – Μάρτιος 2007 – χρησιμοποιήθηκε για το έλεγχο της βαθμονόμησης του μοντέλου).

Από μία αρχική εκτίμηση των παραμέτρων της υδραυλικής αγωγιμότητας που χαρακτηρίζουν τις γεωλογικές ενότητες όπως αυτές έχουν καθοριστεί στο εννοιολογικό μοντέλο, γίνεται αρχικά μια προσέγγιση. Από το αρχικό σετ παραμέτρων, επιλέχθηκε μία παράμετρος (η υδραυλική αγωγιμότητα) και προσαρμόστηκε σταδιακά και προς την αρνητική αλλά και προς την θετική κατεύθυνση. Η κατεύθυνση της προσαρμογής καθορίστηκε από την ανάλυση ευαισθησίας. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε για όλες τις παραμέτρους που εισήχθησαν στο μοντέλο ώστε να προκύψει ένα νέο σετ παραμέτρων που μειώνουν την διαφορά μεταξύ των μετρούμενων και των προβλεπόμενων παραμέτρων. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε έως ότου η διαφορά μεταξύ των μετρούμενων και των προβλεπόμενων παραμέτρων βρίσκεται μέσα στα όρια κύμανσης των μετρήσεων πεδίου.

Η βαθμονόμηση του παρόντος μοντέλου πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια : βαθμονόμηση σταθερής κατάστασης (steady state calibration) και βαθμονόμηση μεταβατικής κατάστασης (transient state calibration). Η ρύθμιση του μοντέλου της υπόγειας ροής του προσχωματικού υδροφόρου ορίζοντα της παραλιακής ζώνης Κορινθίας σε συνθήκες μόνιμης ροής αντιπροσωπεύουν μια χρονική σταθεροποίηση της υδροστατικής επιφάνειας που αντιστοιχεί σε συνθήκες ισορροπίας μεταξύ των εισροών και εκροών του συστήματος. Στην πραγματικότητα, τέτοιες συνθήκες σπάνια παρατηρούνται καθώς δεν υφίσταται ισορροπία λόγω των ανθρωπογενών παρεμβάσεων (αντλήσεις).

Έτσι η βαθμονόμηση του συστήματος σε συνθήκες μόνιμης ροής (steady state) πραγματοποιήθηκε σε συνθήκες δυναμικής ισορροπίας (Dynamic Steady State) με παρουσία αντλήσεων. Σημαντικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για την βαθμονόμηση και βελτιστοποίηση του μοντέλου ροής είναι το υπο-πρόγραμμα της αυτόματης βελτιστοποίησης/ βαθμονόμησης που περιλαμβάνει το Visual Modflow και ονομάζεται WinPest. Αντικειμενικός σκοπός της βαθμονόμησης του συστήματος σε συνθήκες μόνιμης ροής δυναμικής ισορροπίας ήταν η εκτίμηση της υδραυλικής αγωγιμότητας του υδροφόρου όσο και η επιβεβαίωση της επιλογής των οριακών συνθηκών του μοντέλου

Η βαθμονόμηση της μεταβατικής κατάστασης (transient state) πραγματοποιήθηκε σε δύο βήματα. Αρχικά ρυθμίστηκε η υδραυλική αγωγιμότητα και η επιφανειακή τροφοδοσία του συστήματος με βάση τα δεδομένα στάθμης και μετά ακολούθησε η βαθμονόμηση της Ειδικής απόδοσης Sy των ενοτήτων με βάση τα δεδομένα των συγκεντρώσεων ώστε τελικά να ρυθμιστούν κατά τρόπο που να αντιπροσωπεύουν τις συνθήκες που επικρατούν στην παραλιακή ζώνη Κορινθίας.

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της βαθμονόμησης γίνεται με τον υπολογισμό του σφάλματος του μοντέλου. Η ποσοτική έκφραση του σφάλματος μπορεί να γίνει με τους εξής τρόπους :

- **Μέσο σφάλμα (ME, Mean Error).** Υπολογίζεται ως η μέση διαφορά μεταξύ των προσομοιωμένων (h_{cal}) και των μετρούμενων φορτίων (h_{obs}) και εκφράζεται από τη σχέση:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_{cal} - h_{obs}), \text{ όπου } n, \text{ το πλήθος των τιμών βαθμονόμησης.}$$

- **Μέσο απόλυτο σφάλμα (AME, Absolute Mean Error).** Είναι ο μέσος όρος των απόλυτων τιμών των διαφορών των μετρούμενων και προσομοιωμένων φορτίων και δίνεται από τη σχέση:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |h_{cal} - h_{obs}|$$

Δεδομένου ότι υπολογίζει το μέσο εύρος του σφάλματος, δίνει μια καλύτερη ένδειξη για την ποιότητα της βαθμονόμησης σε σχέση με το μέσο σφάλμα

- **Τετραγωνική ρίζα του μέσου σφάλματος (RMS, Root Mean Square).** Είναι ο μέσος όρος των τετραγώνων των διαφορών των μετρούμενων και προσομοιωμένων τιμών φορτίου και εκφράζεται από τη σχέση:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_{cal} - h_{obs})^2}{n}}$$

- **Κανονικοποιημένη Τετραγωνική ρίζα του μέσου σφάλματος (Normalized Root Mean Squared).** Είναι το RMS διηρημένο με την μέγιστη διαφορά στις παρατηρούμενες μετρήσεις στάθμης και εκφράζεται ως ποσοστό. Είναι περισσότερο αντιπροσωπευτικό σε σχέση με RMS καθώς ενέχει και την κλίμακα των δεδομένων.

$$\text{Normalized RMS} = \frac{RMS}{(X_{obs})_{\max} - (X_{obs})_{\min}}$$

- **Συντελεστής Συσχέτισης (Correlation Coefficient).** Ο συντελεστής συσχέτισης (Cor) υπολογίζεται σαν την συν-διακύμανση (Cov) μεταξύ των υπολογιζόμενων αποτελεσμάτων (X_{cal}) και των παρατηρούμενων τιμών (X_{obs}) σε επιλεγμένα σημεία διηρημένα με το γινόμενο των τυπικών τους αποκλίσεων.

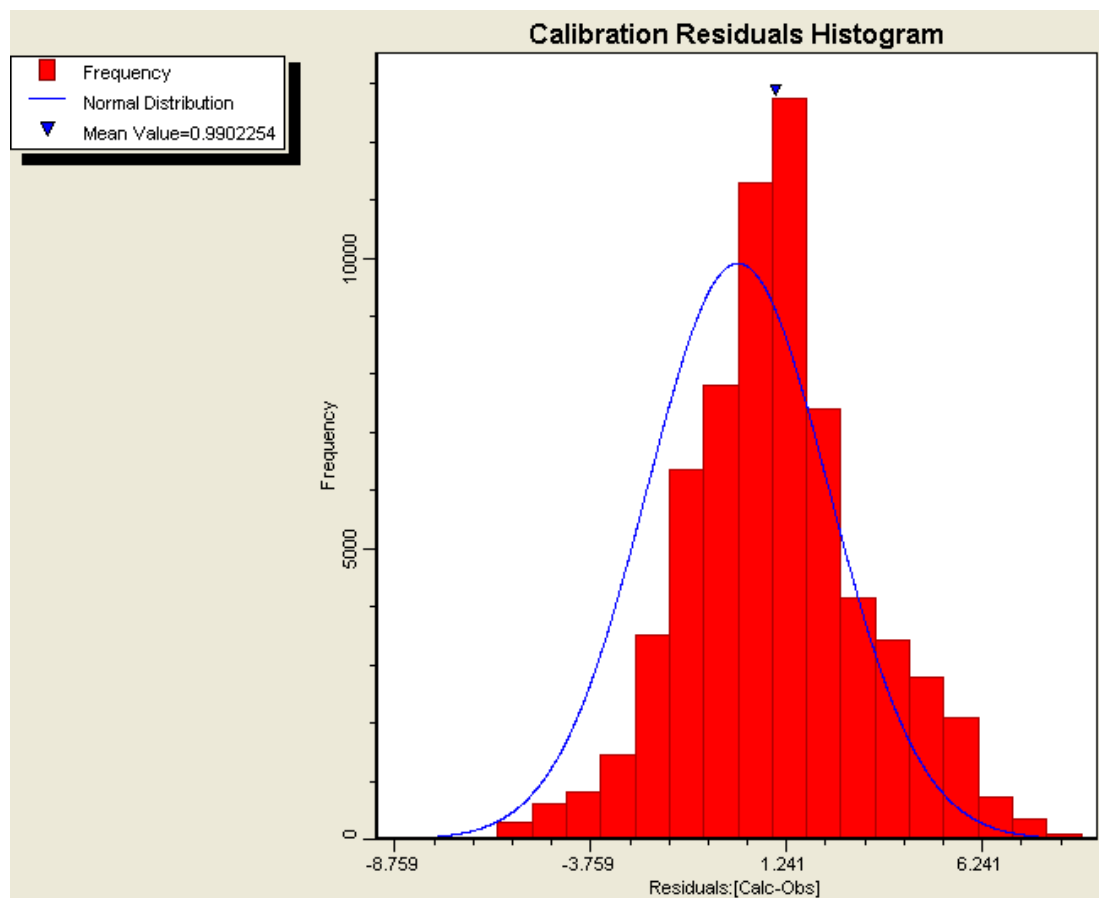
$$Cor(X_{cal}, X_{obs}) = \frac{Cov(X_{cal}, X_{obs})}{\sigma_{cal} \sigma_{obs}}$$

Οι συντελεστές συσχέτισης κυμαίνονται από -1.0 έως 1.0 και προσδιορίζουν ουσιαστικά την συσχέτιση των δεδομένων.

Για την αξιολόγηση λοιπόν των αποτελεσμάτων της βαθμονόμησης και την ορθότητα της προσομοίωσης κάθε φορά τίθεται ο στόχος της ρύθμισης, δηλαδή το επιθυμητό ή ανεκτό μέγεθος σφάλματος του μοντέλου.

Ως σημεία (observation point) ελέγχου χρησιμοποιήθηκαν 32 θέσεις παρατήρησης της πιεζομετρικής επιφάνειας. Ο αριθμός των σημείων παρατήρησης κρίνεται ικανοποιητικός για την έκταση του υδροφόρου, ενώ αρκετά ικανοποιητική είναι η χωρική κατανομή τους.

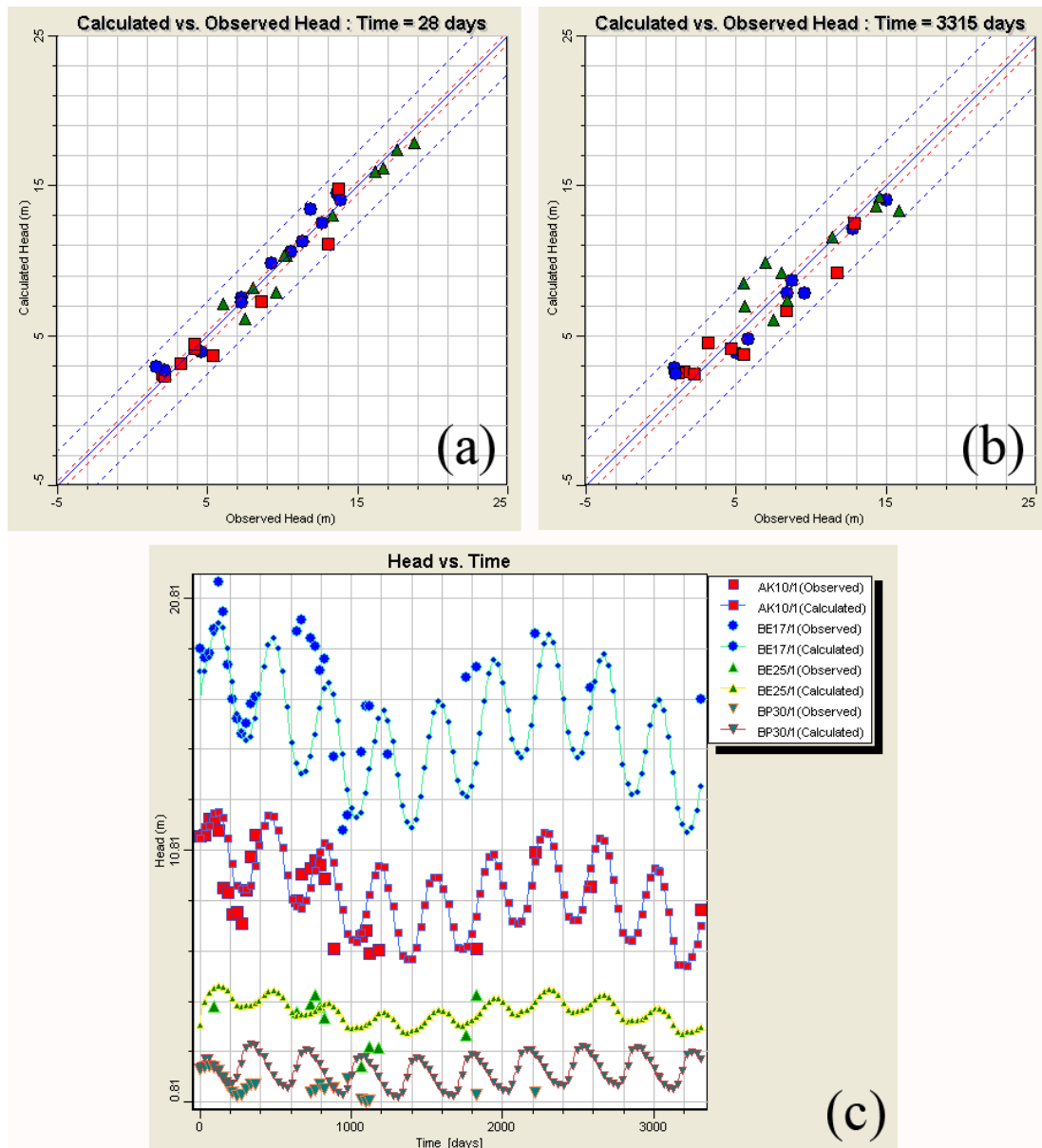
Η κατανομή των θέσεων παρατήρησης απεικονίζεται στο χάρτη της Εικόνα 63. Για κάθε θέση παρακολούθησης έχει οριστεί αποδεκτό σφάλμα απόκλισης 2m. Η τιμή αυτή θεωρείται αποδεκτή για το σύνολο της έκτασης του ομοιώματος (54-60Km²).



Εικόνα 71 : Ιστογράμμα Κατανομής του σφάλματος (Residual Distribution Histogram)

Το Ιστογράμμα Κατανομής του σφάλματος (Residual Distribution Histogram) παρέχει μια ποιοτική σύγκριση της κατανομής των κανονικοποιημένων τιμών σφάλματος σε σχέση με την κατανομή student

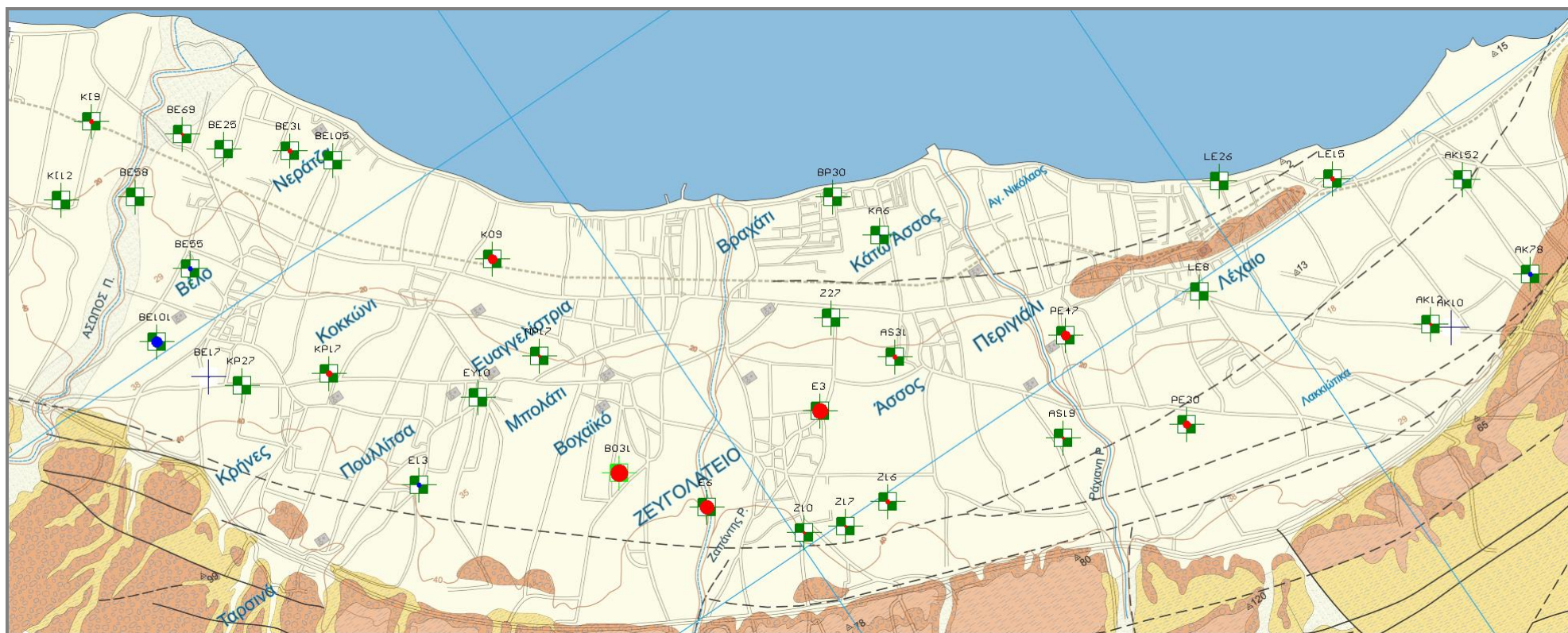
Η βαθμονόμηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε για ένα χρονικό διάστημα 9 ετών (3315 days) από 2/1998 έως και το 3/2007



Εικόνα 72 : Αποτελέσματα της βαθμονόμησης σε μεταβατική κατάσταση (transient state) στην αρχή της προσομοίωσης (a) 1^η περίοδος – 28 ημέρες και το τέλος της περιόδου βαθμονόμησης (b) 110^η περίοδος - 3315 ημέρες.

Το γράφημα (c) παρουσιάζει την μεταβολή της προσομοιούμενης στάθμης (Calculated) σε επιλεγμένες γεωτρήσεις σε σχέση με το χρόνο και σε σχέση με τις παρατηρούμενες τιμές (Observed).

Από την Εικόνα 73 παρατηρείται ότι μόνο σε τρεις θέσεις εμφανίζεται μεγάλη απόκλιση μεταξύ προσομοιωμένης και μετρημένης πιεζομετρίας (έως δύο μέτρα), καθίσταται σαφές ότι το ομοίωμα αναπαράγει με ικανοποιητικό τρόπο την μορφή της πιεζομετρικής επιφάνειας.



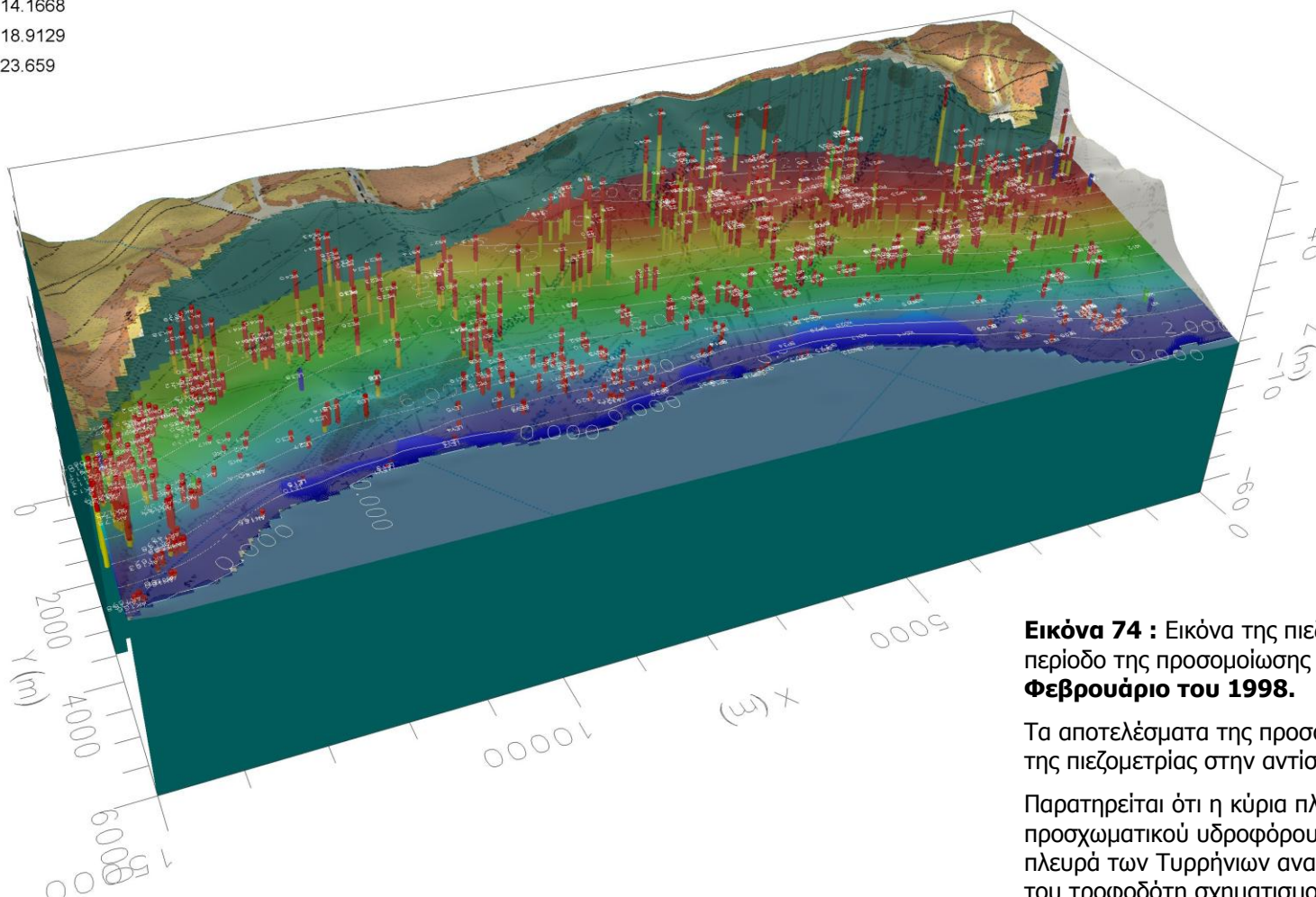
Εικόνα 73 : Χάρτης απεικόνισης των διαφορών (residuals) μεταξύ των μετρούμενων και των προσομοιούμενων τιμών πιεζομετρίας. Η θετική διαφορά μεταξύ της προσομοιούμενης και της μετρούμενης πιεζομετρικής επιφάνειας απεικονίζεται με κόκκινο κύκλο ενώ η αρνητική διαφορά με μπλε κύκλο. Όπως παρουσιάζεται στον χάρτη της παρούσας εικόνας η μέγιστη απόκλιση μεταξύ της μετρούμενης και της προσομοιούμενης πιεζομετρικής επιφάνειας που ανέρχεται περίπου στα 2m εμφανίζεται σε τρία σημεία στο κέντρο της περιοχής (κοντά στο Ζευγολατείο).

Corinthos11_trans7_100

Time(day): 28.0

Water table

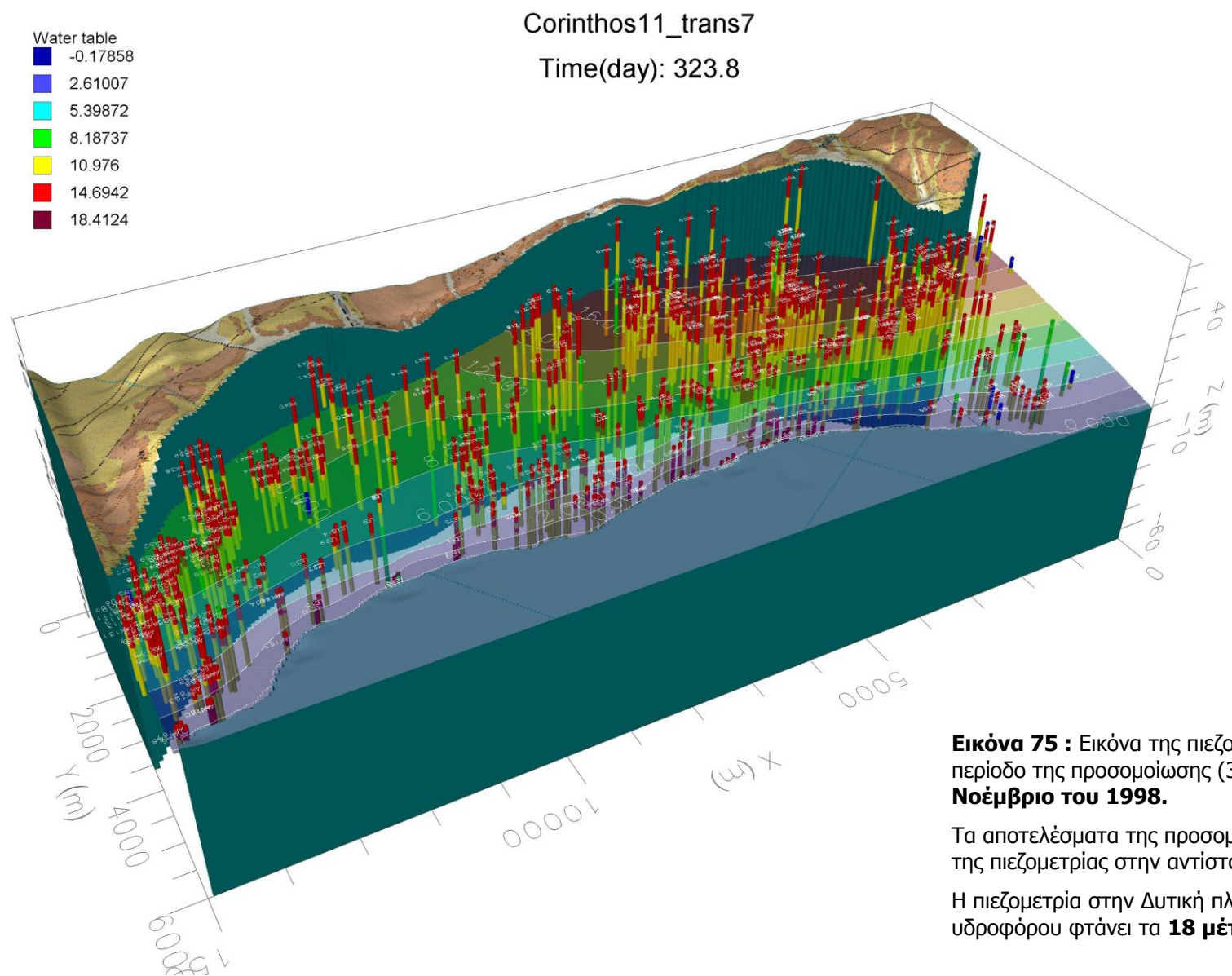
■	-0.0713405
■	3.4882
■	7.04775
■	10.6073
■	14.1668
■	18.9129
■	23.659



Εικόνα 74 : Εικόνα της πιεζομετρίας κατά την 1^η χρονική περίοδο της προσομοίωσης (28 days) που αντιστοιχεί στον **Φεβρουάριο του 1998**.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ακολουθούν την εικόνα της πιεζομετρίας στην αντίστοιχη χρονική περίοδο.

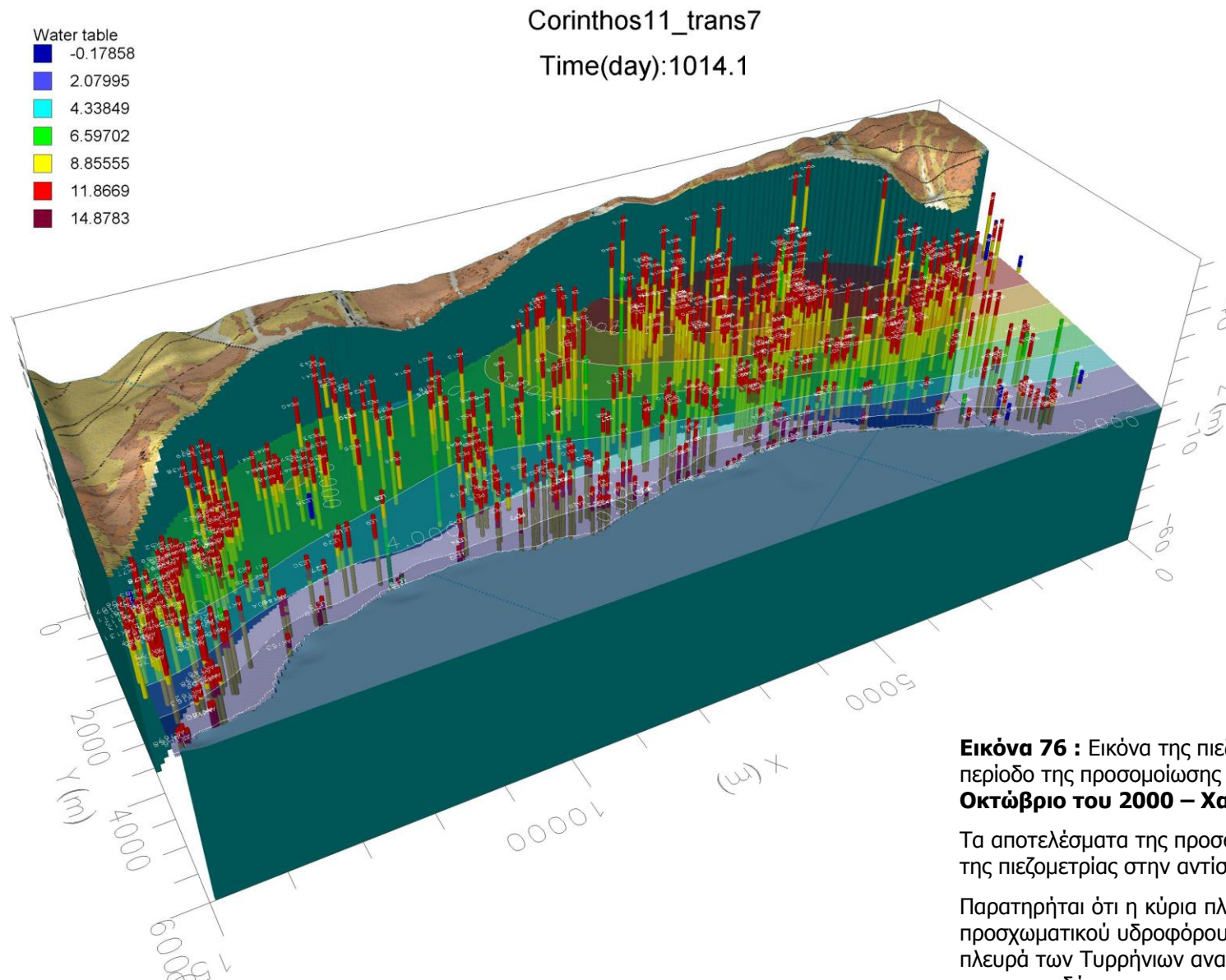
Παρατηρείται ότι η κύρια πλευρική τροφοδοσία του προσχωματικού υδροφόρου συστήματος προέρχεται την Δυτική πλευρά των Τυρρήνιων αναβαθμίδων με πιεζομετρική επιφάνεια του τροφοδότη σχηματισμού που φτάνει τα **24 μέτρα**.



Εικόνα 75 : Εικόνα της πιεζομετρίας κατά την 1^η χρονική περίοδο της προσομοίωσης (324 days) που αντιστοιχεί στον **Νοέμβριο του 1998**.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ακολουθούν την εικόνα της πιεζομετρίας στην αντίστοιχη χρονική περίοδο (Εικόνα 26).

Η πιεζομετρία στην Δυτική πλευρά του προσχωματικού υδροφόρου φτάνει τα **18 μέτρα**.



Εικόνα 76 : Εικόνα της πιεζομετρίας κατά την 33^η χρονική περίοδο της προσομοίωσης (1014 days) που αντιστοιχεί στον **Οκτώβριο του 2000 – Χαμηλή περίοδος**

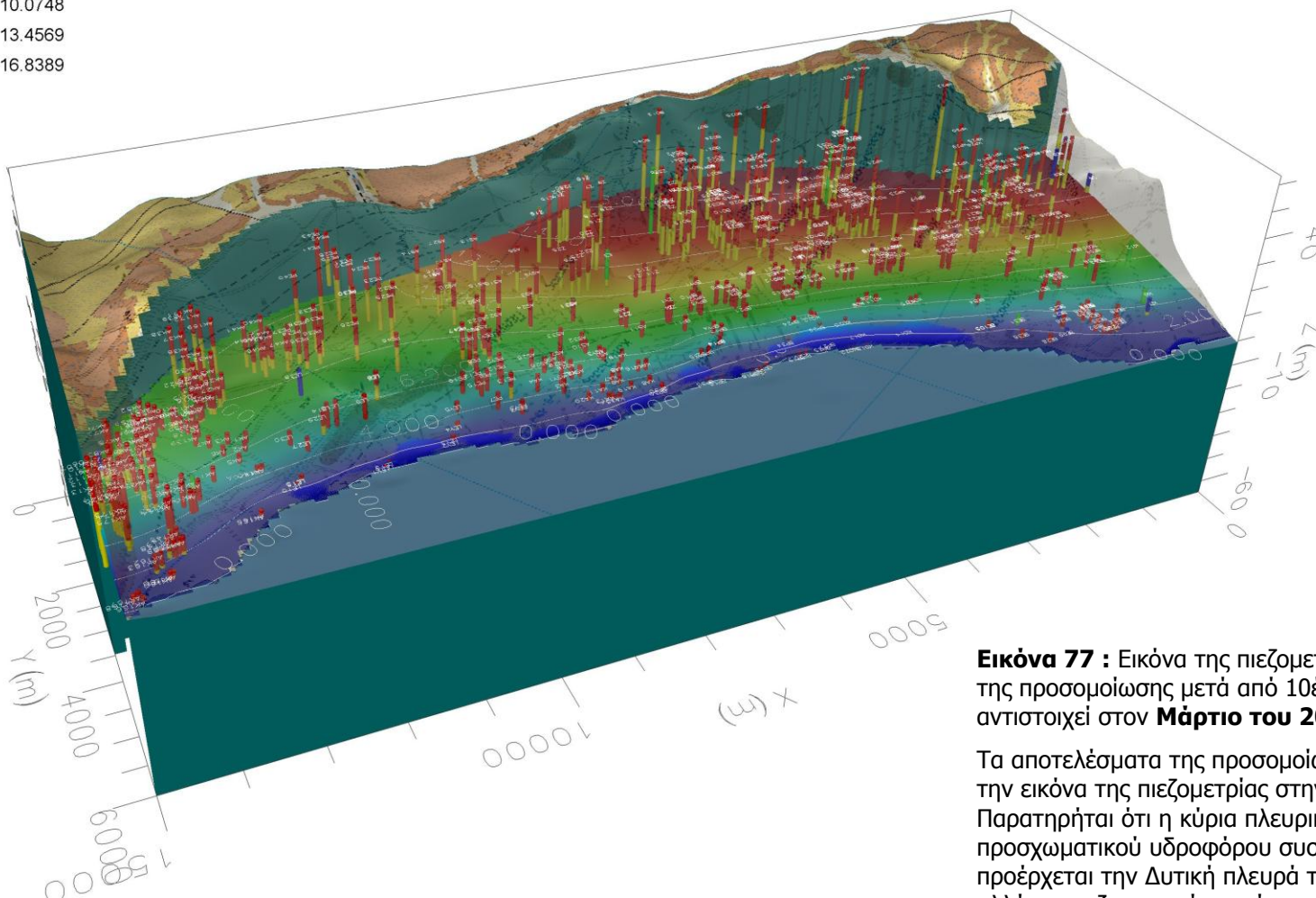
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ακολουθούν την εικόνα της πιεζομετρίας στην αντίστοιχη χρονική περίοδο (Εικόνα 28).

Παρατηρήται ότι η κύρια πλευρική τροφοδοσία του προσχωματικού υδροφόρου συστήματος προέρχεται την Δυτική πλευρά των Τυρρήνιων αναβαθμίδων με πιεζομετρική επιφάνεια του τροφοδότη σχηματισμού που φτάνει τα **14 μέτρα**.

Water table
 -0.0713405
 2.4652
 5.00174
 7.53828
 10.0748
 13.4569
 16.8389

Corinthos11_trans7_100

Time(day):3315.0



Εικόνα 77 : Εικόνα της πιεζομετρίας την 110^η χρονική περίοδο της προσομοίωσης μετά από 10έτη (3315 days) που αντιστοιχεί στον **Μάρτιο του 2007 – Υψηλή Περίοδος**

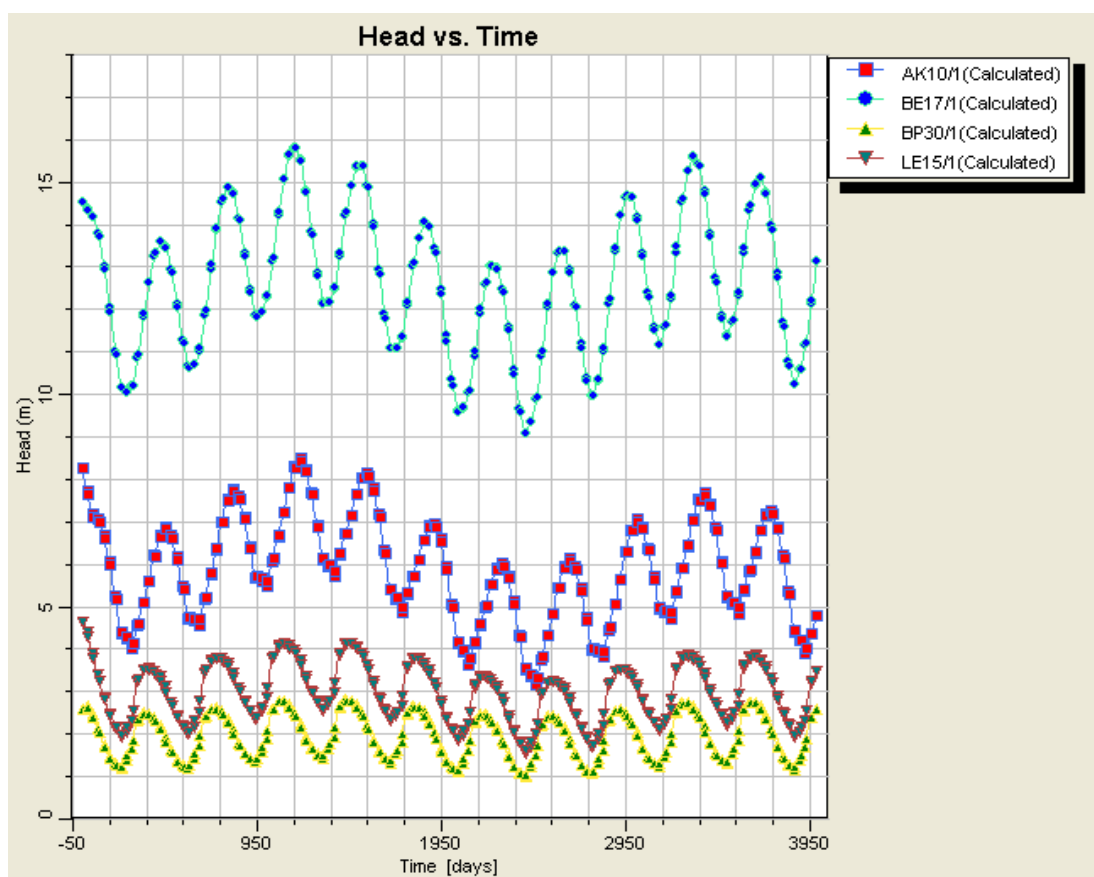
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ακολουθούν ικανοποιητικά την εικόνα της πιεζομετρίας στην αντίστοιχη χρονική περίοδο. Παρατηρείται ότι η κύρια πλευρική τροφοδοσία του προσχωματικού υδροφόρου συστήματος εξακολουθεί να προέρχεται την Δυτική πλευρά των Τυρρήνιων αναβαθμίδων αλλά με πιεζομετρική επιφάνεια του τροφοδότη σχηματισμού σημαντικά μειωμένη που φτάνει τα **16 μέτρα**.

10.6 Εναλλακτικά Σενάρια Μοντέλου Ροής

Το βαθμονομημένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για να αναλυθεί η επίδραση διαφορετικών σεναρίων Διαχείρισης του υπόγειου δυναμικού για την χρονική περίοδο 2007-2018. Η βαθμονομημένη κατανομή της πιεζομετρικής στάθμης το έτος 2007 χρησιμοποιήθηκε ως αρχική συνθήκη για το μοντέλο πρόβλεψης. Θεωρήθηκαν τρία πιθανά σενάρια ώστε να εξεταστεί η επίδραση διαφορετικών πιέσεων στο σύστημα.

Σενάριο (1) - Βασική υπόθεση :

Το Σενάριο αυτό περιλαμβάνει την συνέχιση των συνθηκών άντλησης και τροφοδοσίας (που περιγράφηκαν παραπάνω) του συστήματος της περιόδου 1998-2007 με προβολή στην χρονική περίοδο 2008-2018. Το σενάριο αυτό προσομοιώνεται με σκοπό την διερεύνηση της μακροχρόνιας ανταπόκρισης του συστήματος στις υφιστάμενες συνθήκες (τροφοδοσία του υδροφόρου πλευρικά από τις Τυρρήνιες αναβαθμίδες και επιφανειακά από το ποσοστό κατείσδυσης, εντατικές αντλήσεις) χωρίς άλλες επιπλέον φυσικές ή τεχνητές πιέσεις στο σύστημα. Το σενάριο αυτό θα θεωρηθεί και ως η βασική υπόθεση ως μέτρο σύγκρισης και για τα υπόλοιπα σενάρια που θα παρουσιασθούν στην συνέχεια.

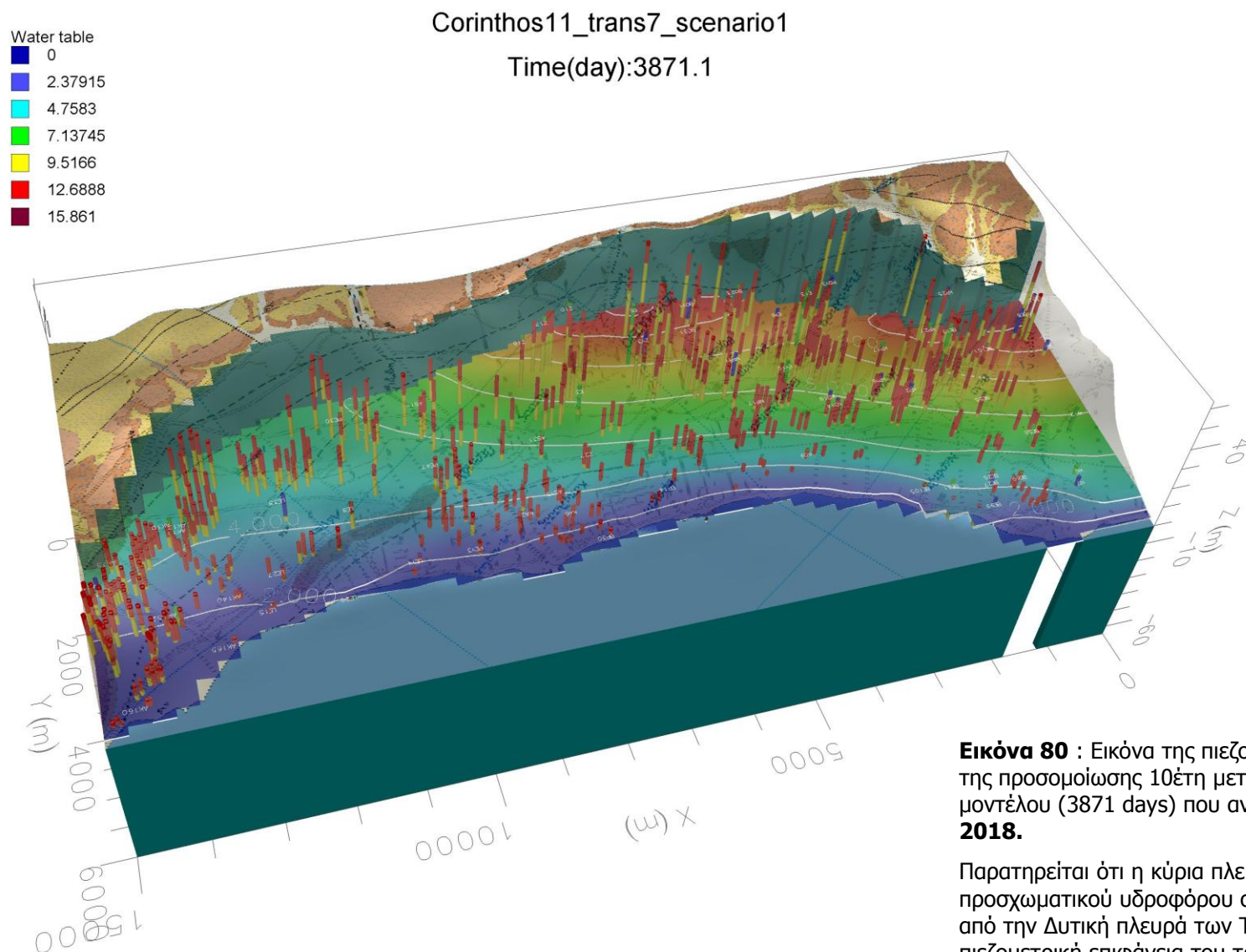


Εικόνα 78 : Το γράφημα αυτό παρουσιάζει την μεταβολή της προσομοιούμενης στάθμης σε επιλεγμένες γεωτρήσεις σε σχέση με το χρόνο για το χρονικό διάστημα 2008-2018 με βάση το Σενάριο 1 (οι τάσεις του συστήματος παραμένουν αμετάβλητες).



Εικόνα 79 : Με βάση το **Σενάριο 1** όπου για **την χρονική περίοδο 2008-2018** οι τάσεις του συστήματος παραμένουν αμετάβλητες, η πιεζομετρική επιφάνεια στην Δυτική πλευρά του συστήματος (όπως παρουσιάζεται στο υδρογράφημα της BE17 στην Εικόνα 78) παρουσιάζει ένα υπερ-ετήσιο εύρος κύμανσης 9 – 16 m ενώ η Ανατολική πλευρά εμφανίζει πιεζομετρική επιφάνεια 3-9m

Στην παρούσα εικόνα (**Σεπτέμβριος 2017**) μετά από την θερινή περίοδο των έντονων αντλήσεων η πιεζομετρική επιφάνεια είναι γενικά υποβαθμισμένη αλλά το σύστημα φαίνεται να βρίσκεται σε μια κατάσταση δυναμική ισορροπίας. Οι γεωτρήσεις AK10 και BE17 (όπως παρουσιάστηκε και στην προηγούμενη εικόνα) παρουσιάζουν σταθερή υπερετήσια μείωση της πιεζομετρικής στάθμης.

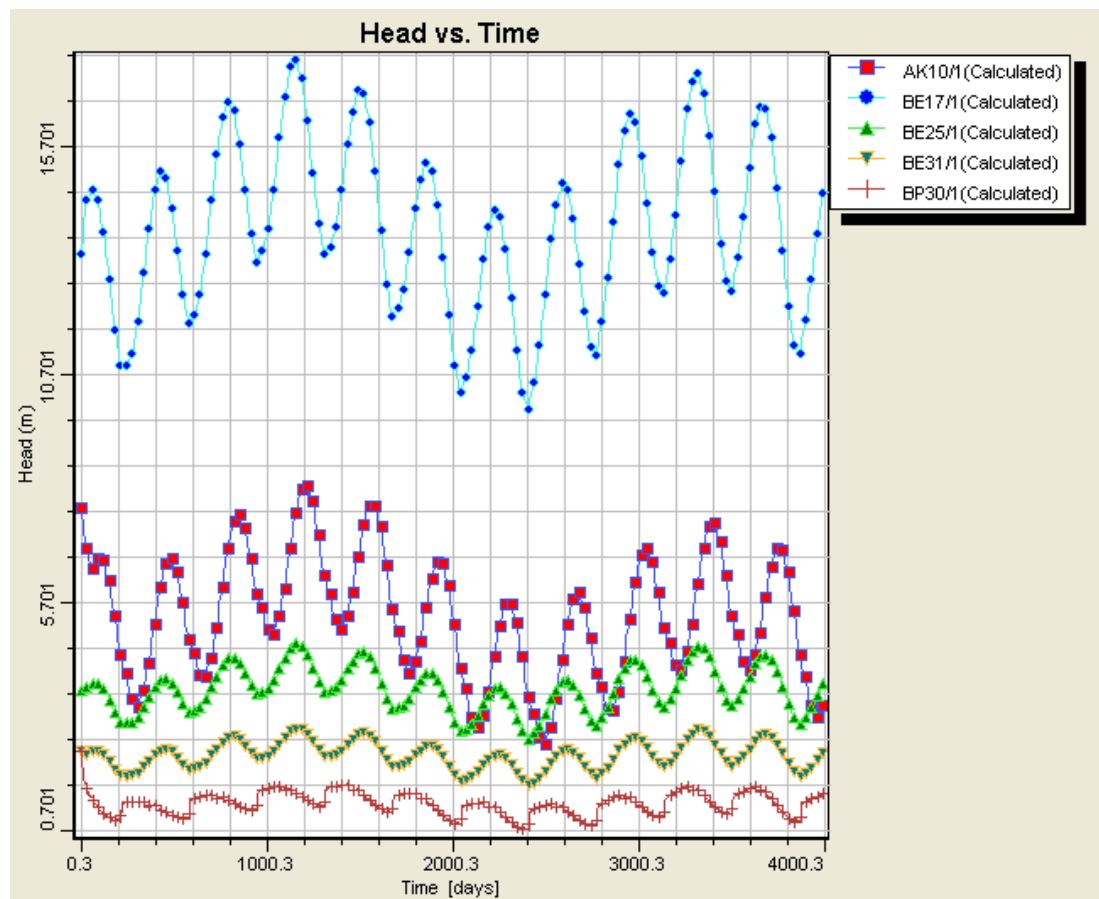


Εικόνα 80 : Εικόνα της πιεζομετρίας την 130^η χρονική περίοδο της προσομοίωσης 10έτη μετά την περίοδο βαθμονόμησης του μοντέλου (3871 days) που αντιστοιχεί στον **Σεπτέμβριο του 2018**.

Παρατηρείται ότι η κύρια πλευρική τροφοδοσία του προσχωματικού υδροφόρου συστήματος εξασφαλίζεται κύρια από την Δυτική πλευρά των Τυρρήνιων αναβαθμίδων με πιεζομετρική επιφάνεια του τροφοδότη σχηματισμού που φτάνει τα **15 μέτρα** ενώ το σύστημα βρίσκεται σε μια δυναμική ισορροπία δεδομένου ότι δεν μεταβάλλονται οι τάσεις στο σύστημα.

Παρατηρείται ότι το Βόρειο (παραλιακό) μέτωπο είναι αυτό που αναμένεται να επηρεαστεί περισσότερο στην διάρκεια των επόμενων ετών με βάση της ισχύουσες παραδοχές και εφόσον διατηρηθεί στα ίδια επίπεδα το καθεστώς άντλησης. Ιδιαίτερα στην Ανατολική πλευρά του προσχωματικού υδροφόρου συστήματος (περιοχή μεταξύ του ποταμοχείμαρου Ράχιανη και του Λεχαίου) αναμένεται να επιδεινωθούν τα προβλήματα υφαλμύρινσης του υδροφόρου ορίζοντα με σταδιακή διείσδυση του θαλάσσιου μετώπου (εικόνα 79).

Σενάριο (2) : Γίνεται εκκίνηση από το βαθμονομημένο μοντέλο και την βασική υπόθεση του Σεναρίου 1 που αντιπροσωπεύει τις υφιστάμενες συνθήκες και γίνεται η υπόθεση της **μείωσης της επιφανειακής τροφοδοσίας** λόγω μείωσης των αποθεμάτων αρδευτικού ύδατος που έρχεται από τις τον Ασωπό (είτε λόγω αλλαγής της πολιτικής της διαχείρισης του νερού είτε λόγω κλιματικών συνθηκών. Εφόσον λοιπόν μειώνονται τα αποθέματα του αρδευτικού ύδατος, μειώνεται και η εφαρμοζόμενη επιφανειακή τροφοδοσία του υδροφόρου (aerial recharge).



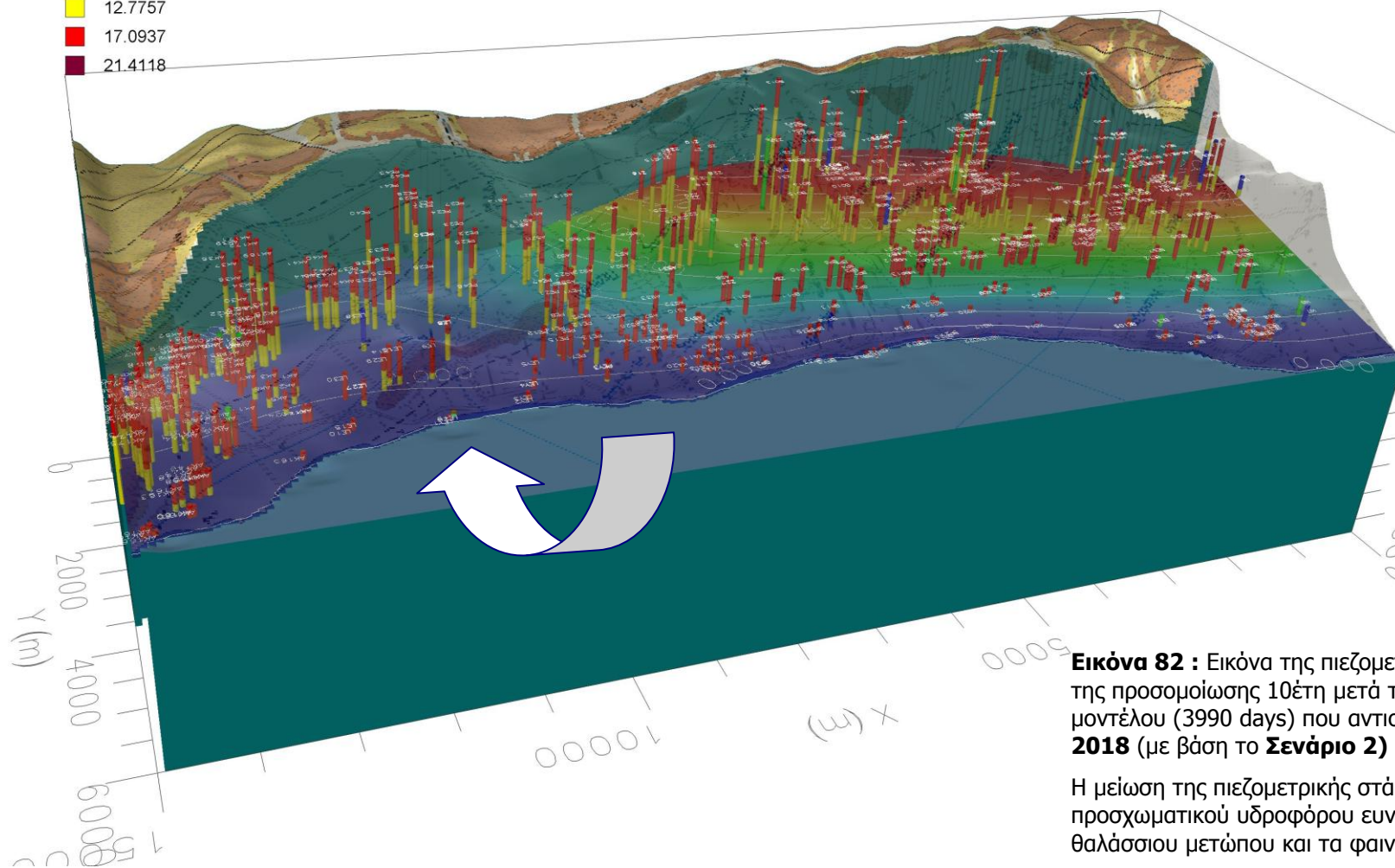
Εικόνα 81 : Με βάση το Σενάριο 2 για την χρονική περίοδο 2008-2018 από την μείωση της επιφανειακής τροφοδοσίας επηρεάζεται περισσότερο το Ανατολικό τμήμα του προσχωματικού υδροφόρου συστήματος - γεώτρηση AK10 στην περιοχή ανάμεσα στον ποταμοχείμαρο Ράχιανη και την περιοχή του Λεχαίου. Η μείωση αυτή ευνοεί την διείσδυση του θαλάσσιου μετώπου στο Ανατολικό τμήμα. Το γράφημα αυτό παρουσιάζει την μεταβολή της προσομοιούμενης στάθμης σε επιλεγμένες γεωτρήσεις σε σχέση με το χρόνο για το χρονικό διάστημα 2008 – 2018 με βάση το Σενάριο 2.

Corinthos11_trans7_scenario2

Time(day):3990.0

Water table

-0.17858
3.05998
6.29854
9.5371
12.7757
17.0937
21.4118



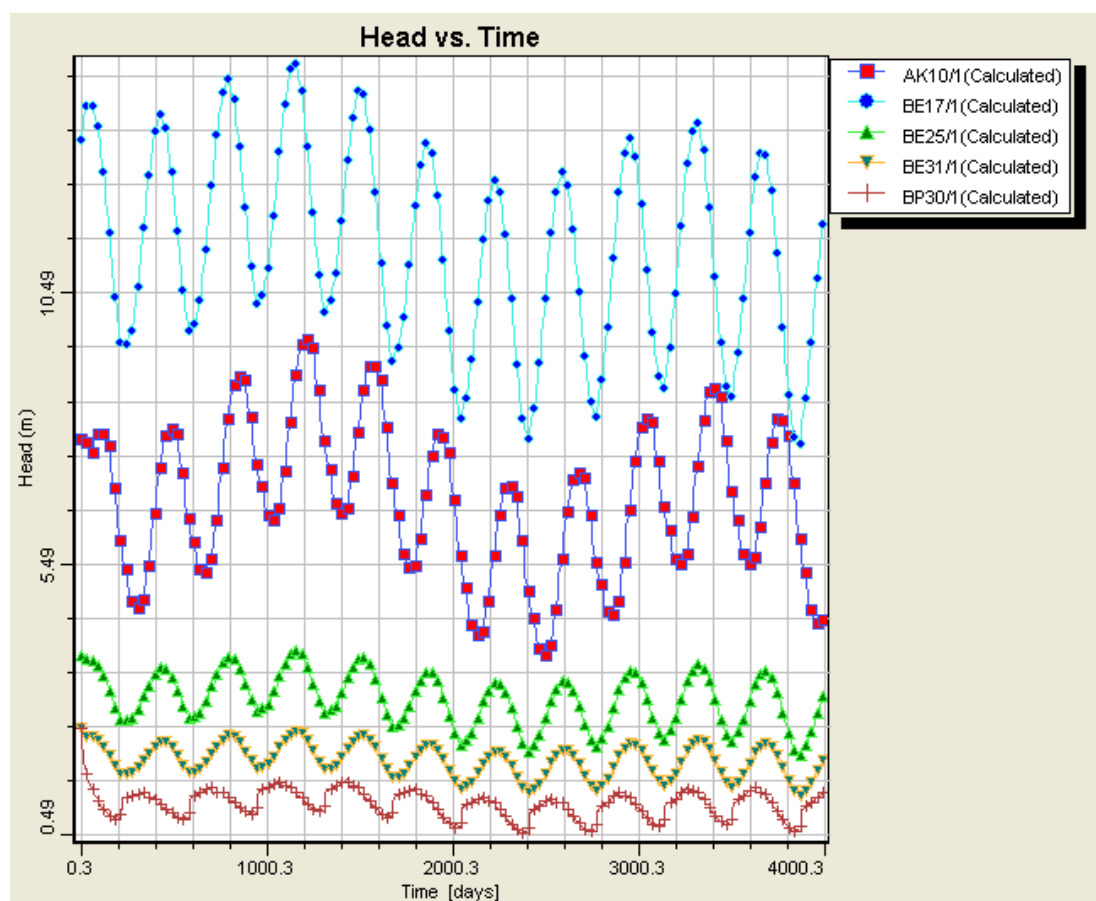
Εικόνα 82 : Εικόνα της πιεζομετρίας την 130η χρονική περίοδο της προσομοίωσης 10έτη μετά την περίοδο βαθμονόμησης του μοντέλου (3990 days) που αντιστοιχεί στον **Ιανουάριο του 2018** (με βάση το **Σενάριο 2**)

Η μείωση της πιεζομετρικής στάθμης στο Ανατολικό τμήμα του προσχωματικού υδροφόρου ευνοεί την διείσδυση του θαλάσσιου μετώπου και τα φαινόμενα υφαλμύρισης

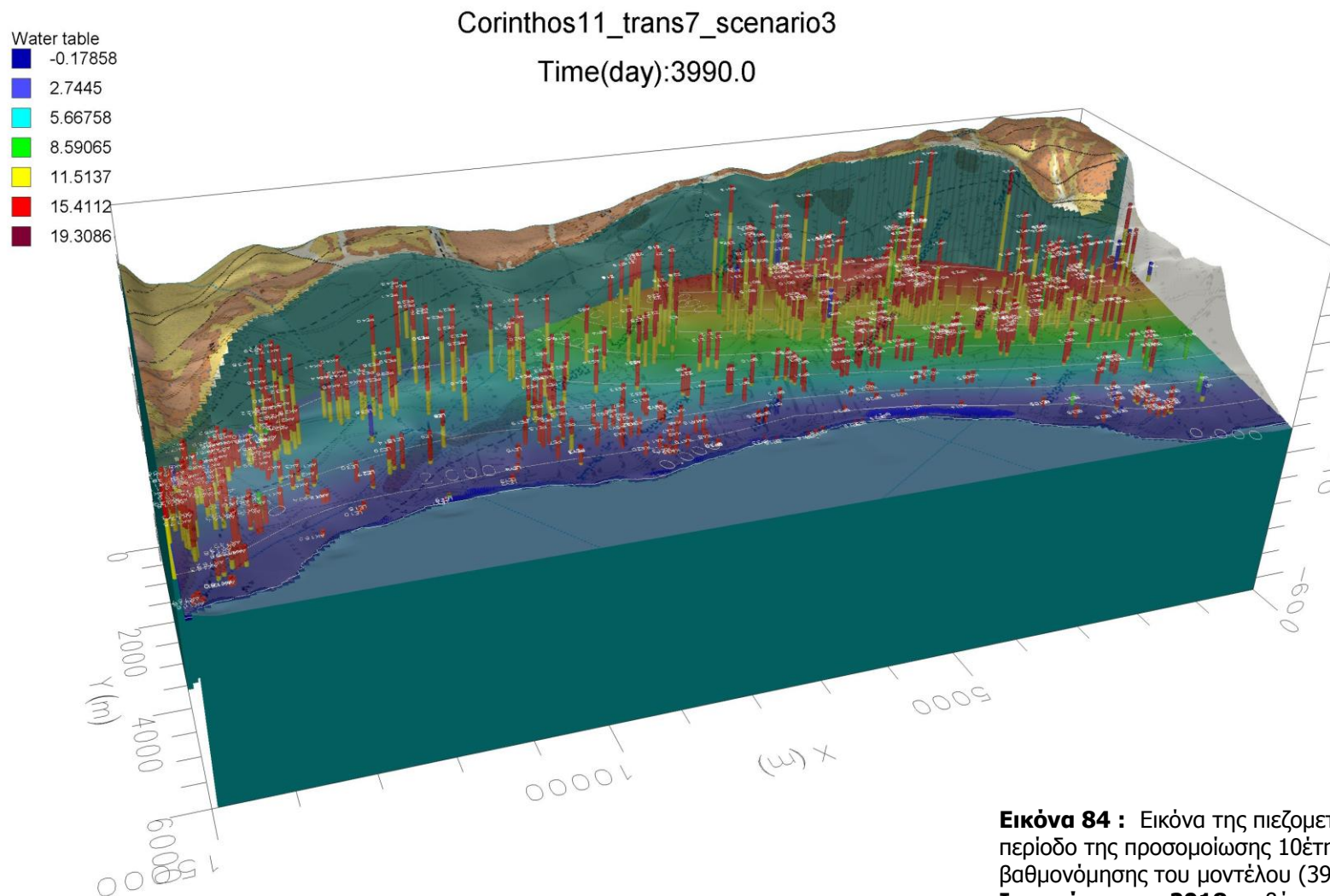
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν σημαντική μείωση της πιεζομετρικής στάθμης στο ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης ενώ το Δυτικό τμήμα επηρεάζεται λιγότερο από την μείωση της επιφανειακής τροφοδοσίας. Όπως παρουσιάζεται και στο υδρογράφημα της Εικόνα 81, η μείωση της επιφανειακής τροφοδοσίας έχει μεγαλύτερη επίδραση στο Ανατολικό τμήμα του προσχωματικού υδροφόρου (γεώτρηση AK10). Στα πλαίσια αυτά παρατηρούμε ότι το εύρος κύμανσης της γεώτρησης AK10 είναι από 3 έως 9 μέτρα στην χρονική περίοδο των 10 ετών.

Σενάριο (3) : Γίνεται εκκίνηση και πάλι από την βασική υπόθεση του Σεναρίου 1 όπου γίνεται η υπόθεση της **μειούμενης πλευρικής τροφοδοσία** του προσχωματικού υδροφόρου της παραλιακής ζώνης Κορινθίας από τις Τυρρήνιες αναβαθμίδες λόγω μεταβολής των κλιματικών συνθηκών.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν σημαντική μείωση της πλευρικής τροφοδοσίας από την ημιλοφώδη περιοχή



Εικόνα 83 : Η μείωση της πλευρικής τροφοδοσίας του προσχωματικού υδροφόρου συστήματος επηρεάζει κύρια το Δυτικό τμήμα (Δυτικά του π. Ζαπάντη) καθώς η πιεζομετρική στάθμη στην γεώτρηση BE17 κυμαίνεται σε υπερ-ετήσια βάση από 7.5 έως 14 μέτρα



Εικόνα 84 : Εικόνα της πιεζομετρίας την 130η χρονική περίοδο της προσομοίωσης 10έτη μετά την περίοδο βαθμονόμησης του μοντέλου (3990 days) που αντιστοιχεί στον **Ιανουάριο του 2018** με βάση το **Σενάριο 3**

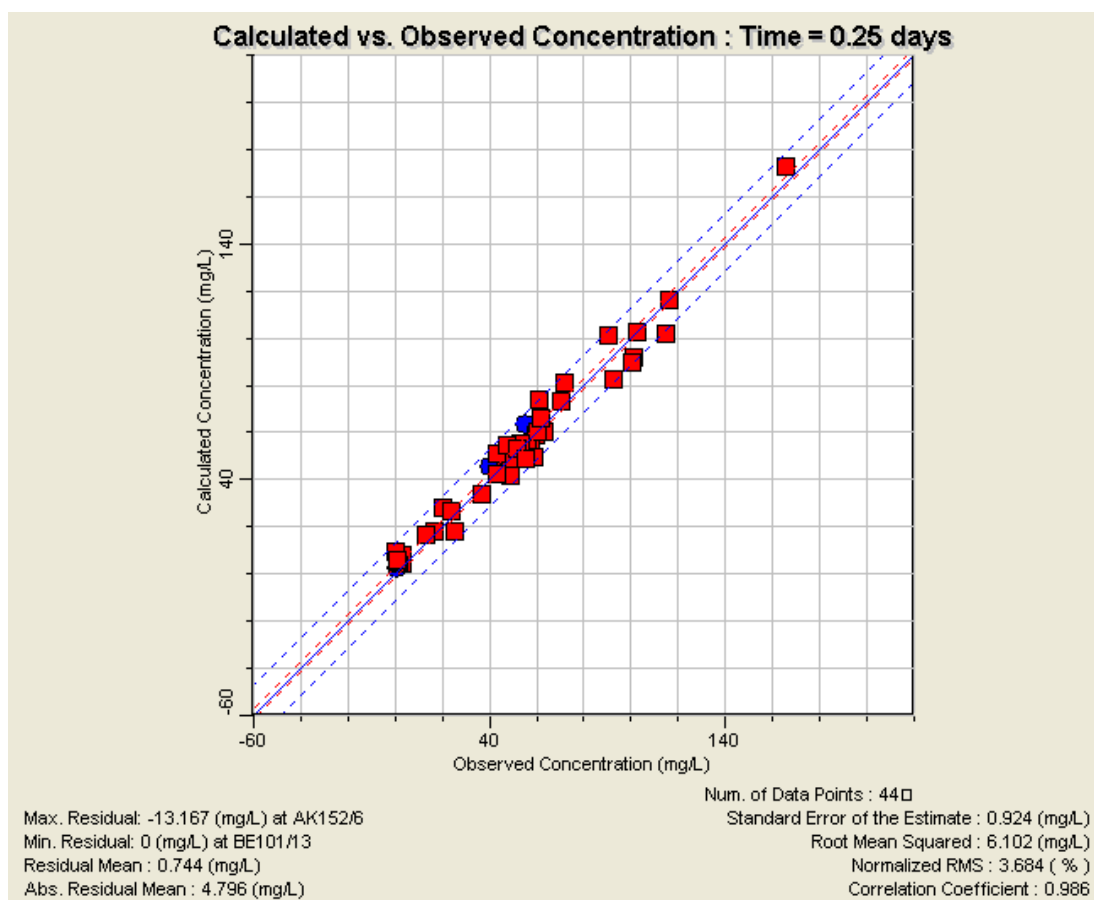
Η μείωση της πλευρικής τροφοδοσίας επηρεάζει κύρια το Δυτικό τμήμα του υδροφόρου.

10.7 Βαθμονόμηση του Μοντέλου Μεταφοράς Μάζας

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής έγινε δειγματοληψία σε επιλεγμένες γεωτρήσεις προκειμένου να γίνει **καταγραφή της εποχιακής κύμανσης** της συγκέντρωσης των **Νιτρικών ιόντων** στον **υδροφόρο ορίζοντα**. Παρά το γεγονός ότι συγχρόνως έγιναν και μετρήσεις των συγκεντρώσεων των νιτρικών και των αμμωνιακών ιόντων τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών δεν κατέστη δυνατό να χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο μεταφοράς μάζας καθώς οι μετρηθείσες συγκεντρώσεις είναι στις περισσότερες γεωτρήσεις πάρα πολύ μικρές και κοντά στα όρια ανίχνευσης της χρησιμοποιηθείσας μεθόδου.

Για το μοντέλο μεταφοράς μάζας (μεταφοράς των Νιτρικών ιόντων) χρησιμοποιήθηκε το βαθμονομημένο μοντέλο ροής που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Όπως αναφέρθηκε και στο εισαγωγικό κεφάλαιο τα νιτρικά χαρακτηρίζονται ως ιδιαίτερα κινητικά στο υπόγειο νερό με ελάχιστη ή μηδενική ρόφηση (sorption).

Για το μοντέλο μεταφοράς μάζας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα MT3DMS (Zheng and Wang, 1998) το οποίο λειτουργεί σε συνάρτηση με το μοντέλο ροής που προκύπτει από το Modflow.



Εικόνα 85 : Αποτελέσματα της βαθμονόμησης του μοντέλου μεταφοράς μάζας σε μεταβατική κατάσταση (transient state) στην πρώτη περίοδο της προσομοίωσης

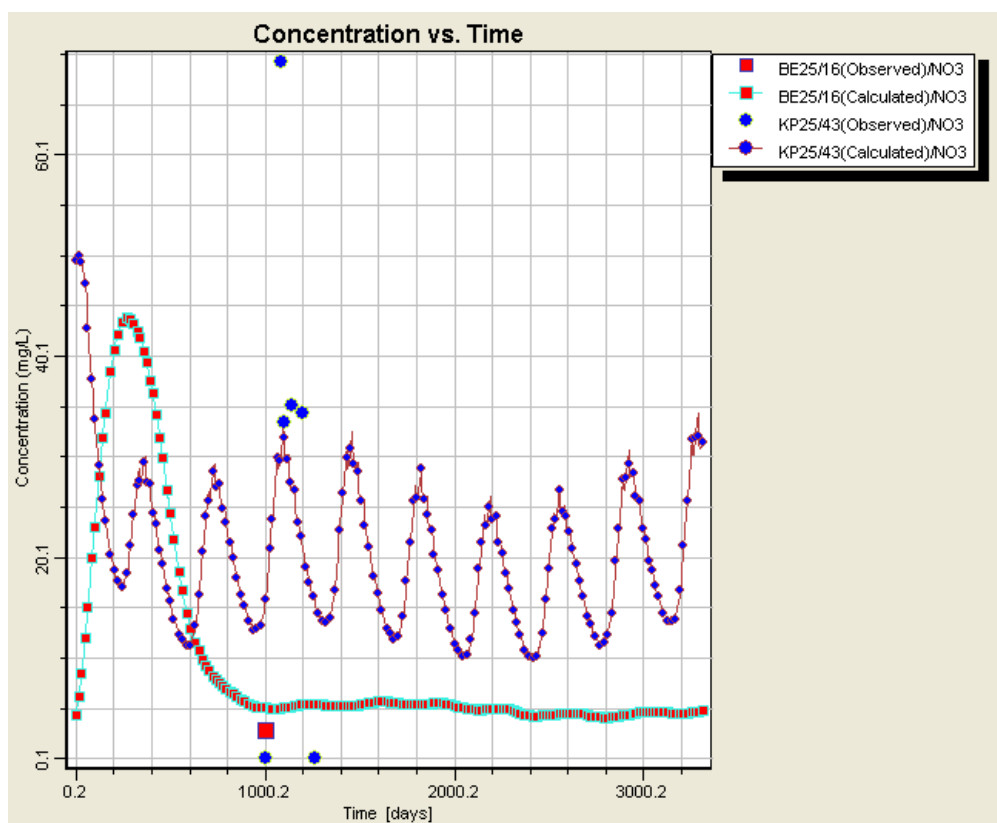
Η εικόνα της κατανομής της συγκέντρωσης των νιτρικών από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πεδίο δείχνει ότι η ρύπανση οφείλεται κύρια σε **μη σημειακή φόρτιση (non point source)**. Ο υπόγειος υδροφόρος λοιπόν δέχεται ποσότητα νιτρικών προερχόμενα κύρια από την επιφανειακή εφαρμογή λιπασμάτων. Δευτερεύουσα μπορεί να χαρακτηριστεί η σημειακή ρύπανση (point source) από την παρουσία σηπτικών δεξαμενών στην ευρύτερη περιοχή.

Για την βαθμονόμηση του μοντέλου γίνεται η υπόθεση ότι η μεταφορά των Νιτρικών στο υπόγειο νερό ελέγχεται από τις διαδικασίες συµµεταφοράς και µηχανικής διασποράς καθώς τα νιτρικά θεωρούνται συντηρητικά (δεν αντιδρούν) ενώ η επιβράδυνση (retardation) και η προσρόφηση (absorption) είναι αμελητέα. Δεδομένου ότι η διασπορά εξαρτάται άμεσα από την κλίμακα του μοντέλου (Gelhar *et al.*, 1992), το μήκος διασκορπισμού (dispersivity) που εισάγεται στο μοντέλο για τις διάφορες ενότητες αρχικά προσδιορίστηκε με βάση βιβλιογραφικά δεδομένα ενώ μεταβλήθηκε κατά την διάρκεια βαθμονόμησης. Το ενεργό πορώδες που χρησιμοποιήθηκε καταγράφεται στον πίνακα με τις παραμέτρους του μοντέλου στο κεφάλαιο 10.2.

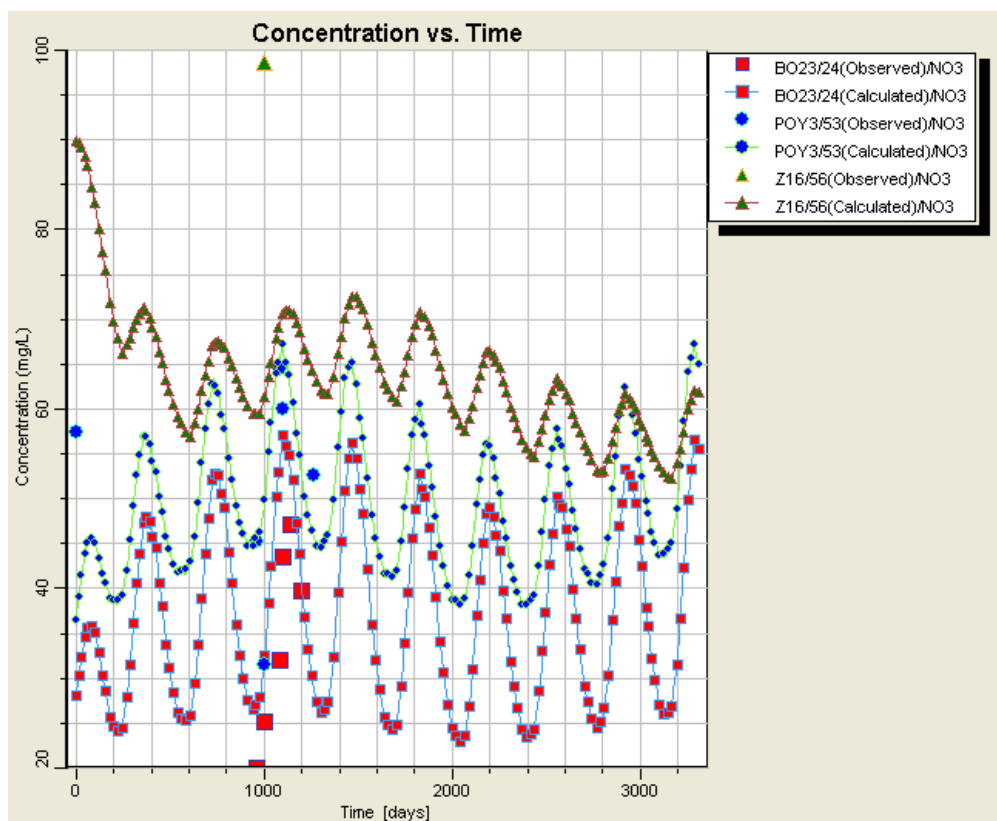
Η βαθμονόμηση της μεταβατικής προσομοίωσης του μοντέλου μεταφοράς μάζας (νιτρικά) ξεκινά την ίδια χρονική περίοδο με το μοντέλο ροής (2/1998) και τελειώνει το 3/2007 ενώ το μέγιστο χρονικό βήμα μεταφοράς μάζας τίθεται στις 30 ημέρες. Για την επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς μάζας όπως αυτή περιγράφεται στην εξίσωση (Ε. 2) χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα επίλυσης GCG (Generalized Conjugate Gradient) το οποίο κατά τους (Zheng and Wang, 1998) θεωρείται ότι παρουσιάζει την μεγαλύτερη υπολογιστική επάρκεια.

Τα αποτελέσματα της κατανομής της συγκέντρωσης των νιτρικών όπως αυτά παρουσιάστηκαν στην ενότητα 7.2 δείχνουν κυμαινόμενες συγκεντρώσεις σαν αποτέλεσμα της περιοδικής εφαρμογής των λιπασμάτων. Αυξημένες συγκεντρώσεις κατά την περίοδο με υψηλή πιεζομετρία (Φθινόπωρο και Χειμώνα) αποδίδονται αφενός στο γεγονός ότι τα φυτά την περίοδο αυτή δεν προσλαμβάνουν θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξή τους ενώ η αύξηση της πιεζομετρίας ευνοεί την κινητικότητα των νιτρικών.

Με βάση τα ανωτέρω ως οριακή συνθήκη για το μοντέλο μεταφοράς μάζας χρησιμοποιήθηκε η επιφανειακή προσθήκη συγκέντρωσης 150mg/L Νιτρικών υπό την μορφή **Recharge Concentration** στην Ανατολική πλευρά δεδομένου ότι η κατείσδυση του ρυπαντή συνδέεται με ποσότητα ύδατος που κατεισδύει στον υδροφόρο ορίζοντα. Στην Δυτική πλευρά υποτέθηκε κάποια συγκέντρωση που εισάγεται απευθείας σε βαθύτερο στρώμα υπό την μορφή **Point source** και σχετίζεται με την τροφοδοσία του συστήματος. Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης υπό την μορφή της μεταβολής της συγκέντρωσης σε σχέση με το χρόνο σε επιλεγμένες γεωτρήσεις που βρίσκονται σε διαφορετικά σημεία του προσχωματικού υδροφόρου συστήματος παρουσιάζονται στις Εικόνα 85, Εικόνα 86, Εικόνα 87 και Εικόνα 88.

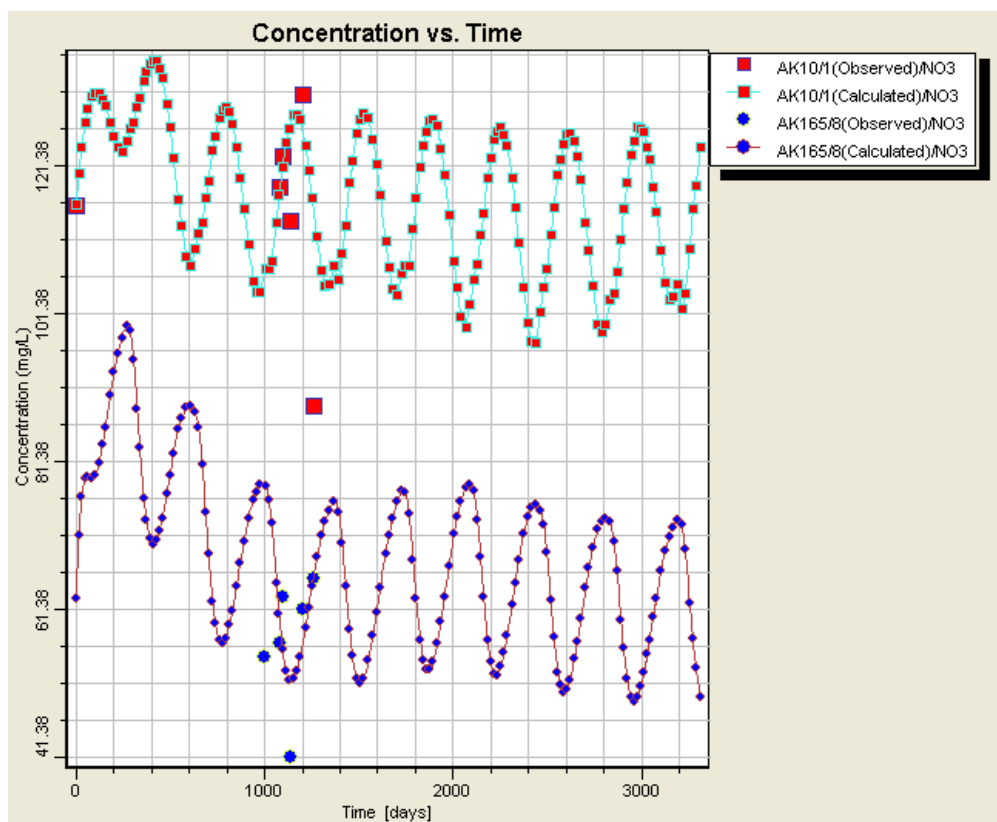


Εικόνα 86 : Μεταβολή της συγκέντρωσης σε σχέση με το χρόνο. Οι γεωτρήσεις BE25 και KP25 εντοπίζονται στην Δυτική πλευρά του προσχωματικού υδροφόρου. Τα επίπεδα κύμανσης της συγκέντρωσης δεν υπερβαίνουν τα 50mg/L.



Εικόνα 87 : Οι γεωτρήσεις BO23 και POY3 εντοπίζονται στην κεντρική ζώνη του υδροφόρου (Δυτικά του ποταμοχείμματος Ζαπάντη) όπου οι συγκεντρώσεις δεν υπερβαίνουν συχνά το 50mg/L

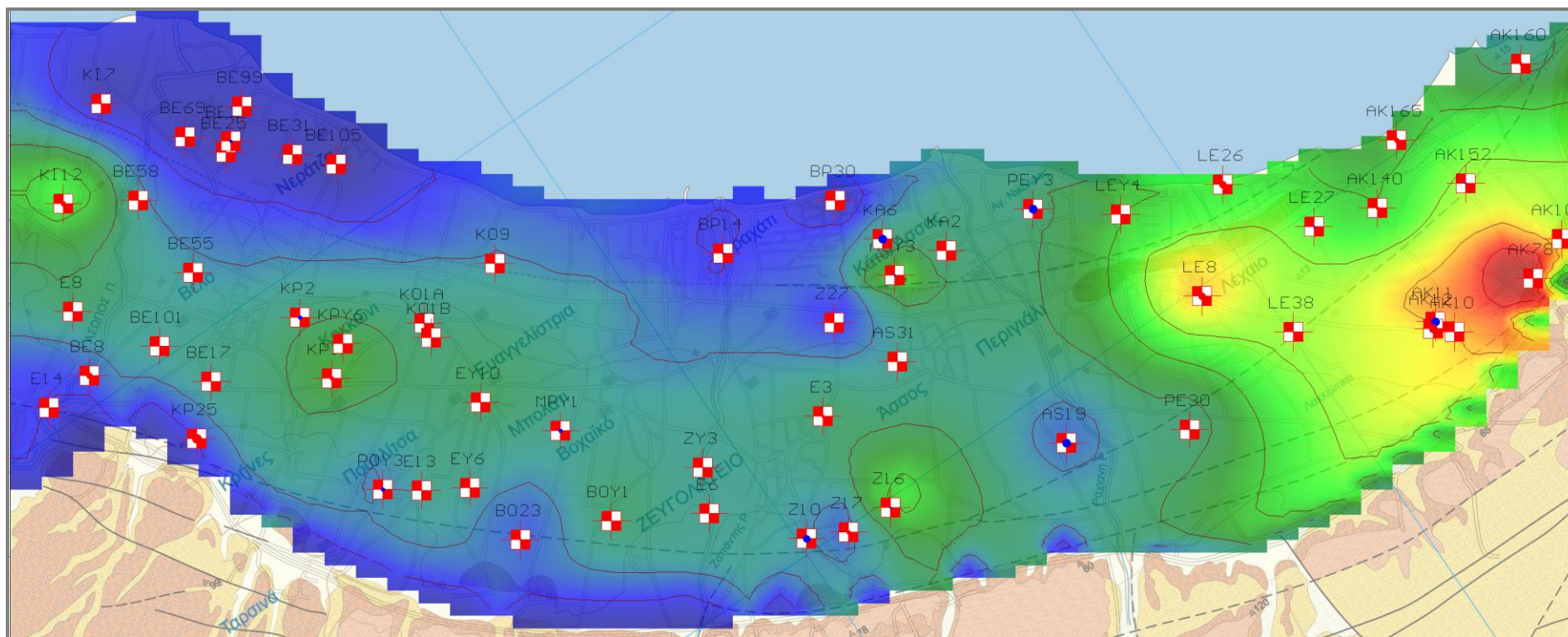
Στην γεώτρηση Z16 που εντοπίζεται Ανατολικά του π. Ζαπάντη, (Εικόνα 87) αν και η προσομοίωση δεν έφτασε τα αυξημένα επίπεδα που κατεγράφησαν τον Οκτώβριο του 2000, εντούτοις παρουσιάζονται σταθερά αυξημένες συγκεντρώσεις που φτάνουν τα 70mg/L.



Εικόνα 88 : Οι Γεωτρήσεις AK10 και AK165 που βρίσκονται στο Ανατολικό τμήμα του υδροφόρου συστήματος (Ανατολικά του π. Ράχιανη) παρουσιάζουν σταθερά υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών ιόντων.

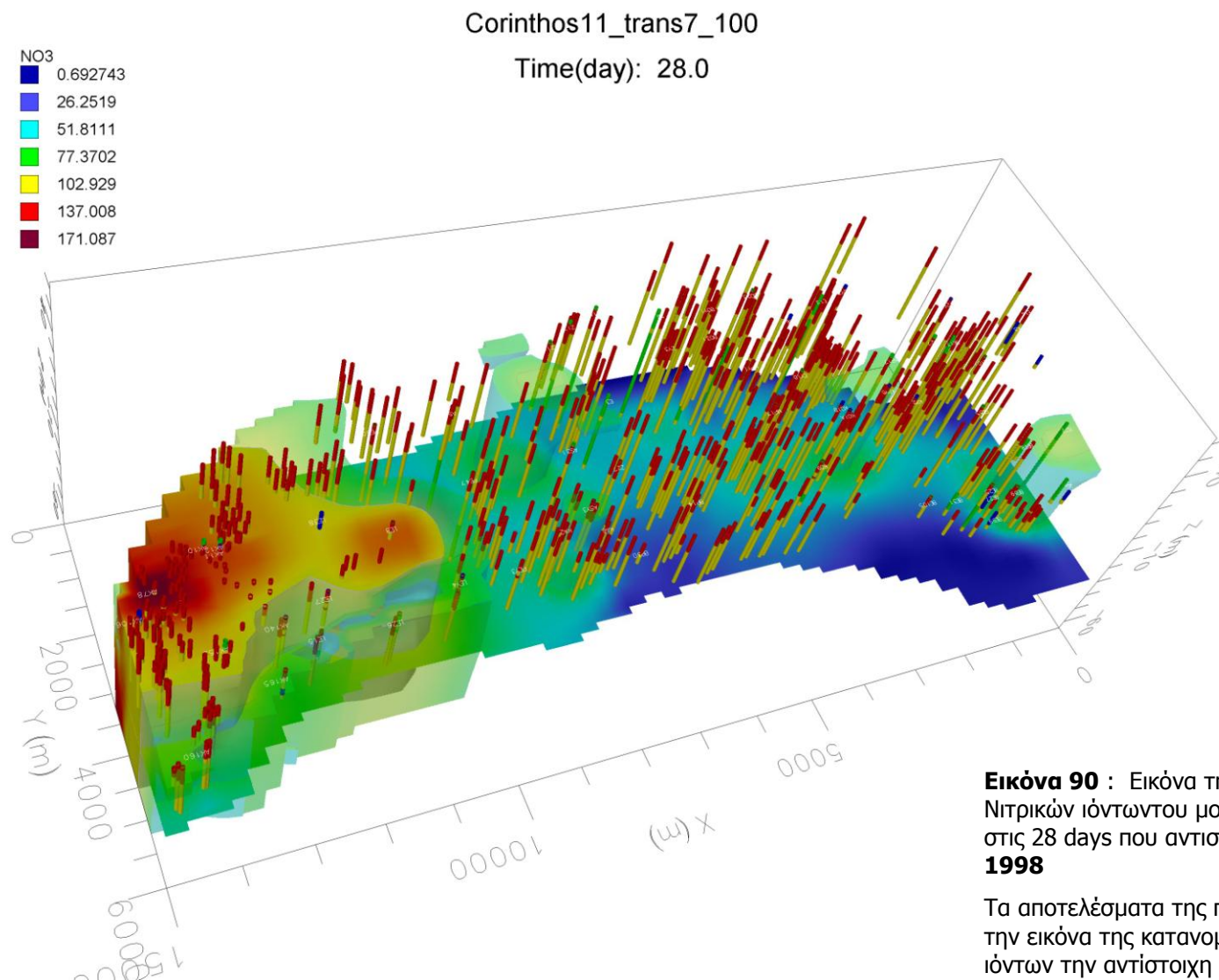
Όπως προκύπτει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συμφωνούν σε αρκετά μεγάλο βαθμό με τις μετρήσεις της συγκέντρωσης των νιτρικών στο πεδίο που παρουσιάσθηκαν στο κεφάλαιο 7.2.

Παρά το γεγονός ότι υπάρχει σε αρκετές περιπτώσεις υπάρχει καλή σύμπτωση των μετρούμενων με τις προσομοιούμενες τιμές, στις θέσεις δειγματοληψίας, αυτή η σύμπτωση δεν υπάρχει πάντα λόγω των αβεβαιοτήτων που υπεισέρχονται στην μοντελοποίηση όπως είναι η προσθήκη του ρυπαντή στο μοντέλο, οι υδραυλικές ιδιότητες του υδροφόρου αλλά ακόμα και παράμετροι που σχετίζονται με την ίδια την κατασκευή της γεώτρησης και μπορούν να επηρεάσουν τα επίπεδα συγκέντρωσης που καταγράφονται



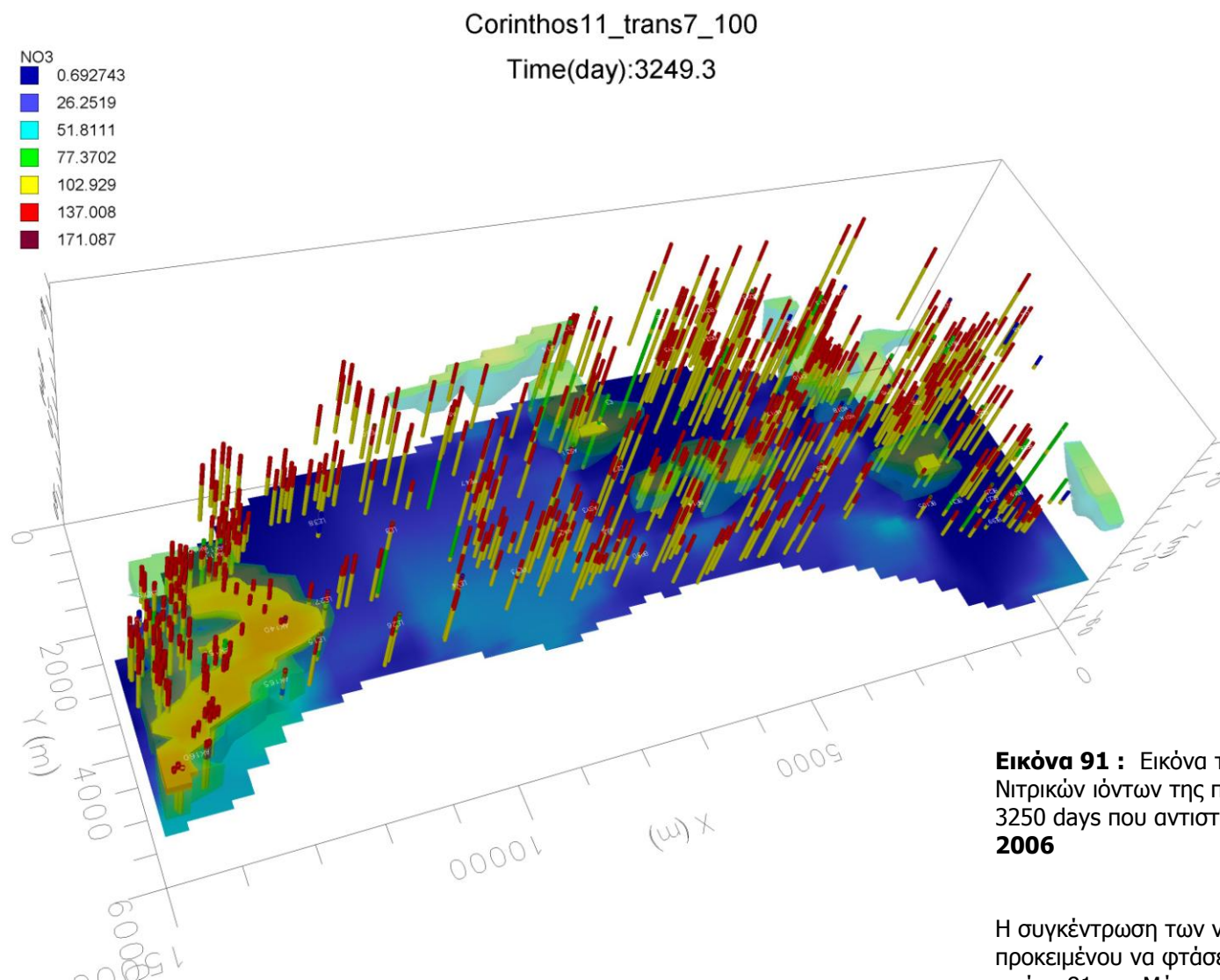
Εικόνα 89 : Η κατανομή της συγκέντρωσης των Νιτρικών ιόντων ($\text{NO}_3 \text{ mg/L}$) στην αρχή της προσομοίωσης μεταφοράς μάζας. Η κατανομή ακολουθεί πιστά την κατανομή της συγκέντρωσης όπως αυτή προέκυψε από τις μετρήσεις πεδίου για την ίδια χρονική περίοδο (Εικόνα 38 και Εικόνα 39).

Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις ($100\text{-}200\text{mg/L}$) εμφανίζονται στην Ανατολική πλευρά του υδροφόρου συστήματος (Ανατολικά του ποταμοχείμματος Ράχιας) ενώ η Δυτική πλευρά χαρακτηρίζεται κύρια από συγκεντρώσεις που κυμαίνονται στα $50\text{-}60\text{mg/L}$



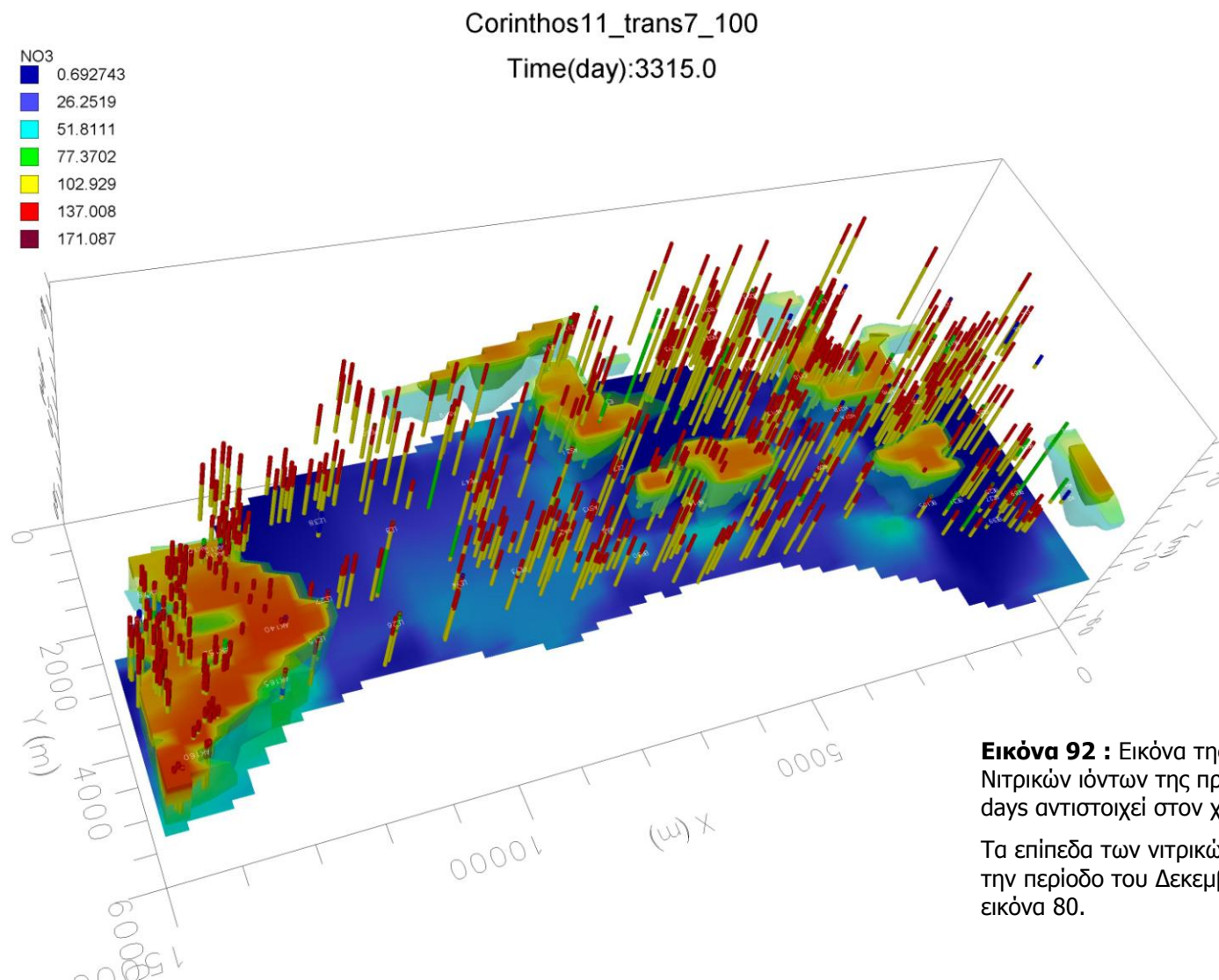
Εικόνα 90 : Εικόνα της κατανομής της συγκέντρωσης των Νιτρικών ιόντων του μοντέλου προσομοίωσης μεταφοράς μάζας στις 28 days που αντιστοιχεί στον χρονικά στον **Μάρτιο του 1998**

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ακολουθούν ικανοποιητικά την εικόνα της κατανομής της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων την αντίστοιχη χρονική περίοδο όπου με την αύξηση της πιεζομετρικής επιφάνειας αυξάνεται και αντίστοιχα η συγκέντρωση.



Εικόνα 91 : Εικόνα της κατανομής της συγκέντρωσης των Νιτρικών ιόντων της προσομοίωσης μεταφοράς μάζας στις 3250 days που αντιστοιχεί στον χρονικά στον **Δεκέμβριο του 2006**

Η συγκέντρωση των νιτρικών είναι σε αυξητική πορεία προκειμένου να φτάσει τα επίπεδα που παρουσιάζονται στην εικόνα 81 τον Μάρτιο του 2007



Εικόνα 92 : Εικόνα της κατανομής της συγκέντρωσης των Νιτρικών ιόντων της προσομοίωσης μεταφοράς μάζας στις 3315 days αντιστοιχεί στον χρονικά στον **Μάρτιο του 2007**

Τα επίπεδα των νιτρικών έχουν αυξηθεί σημαντικά σε σχέση με την περίοδο του Δεκεμβρίου του 2006 που παρουσιάζεται στην εικόνα 80.

11. ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στα πλαίσια του παρόντος κεφαλαίου αρχικά πραγματοποιείται μια ανάλυση ευαισθησίας όλων των παραμέτρων ενώ στην συνέχεια θα γίνει μια συνολική ανασκόπηση των αποτελεσμάτων των προηγούμενων κεφαλαίων σε σχέση με τον σκοπό της παρούσας Διατριβής.

11.1 Ανάλυση Ευαισθησίας

Με την χρήση του ενσωματωμένου προγράμματος WinPest στο Visual Modflow (Guiguer and Franz, 1998), πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η αβεβαιότητα των παραμέτρων που επιλέχθηκαν για το μοντέλο.

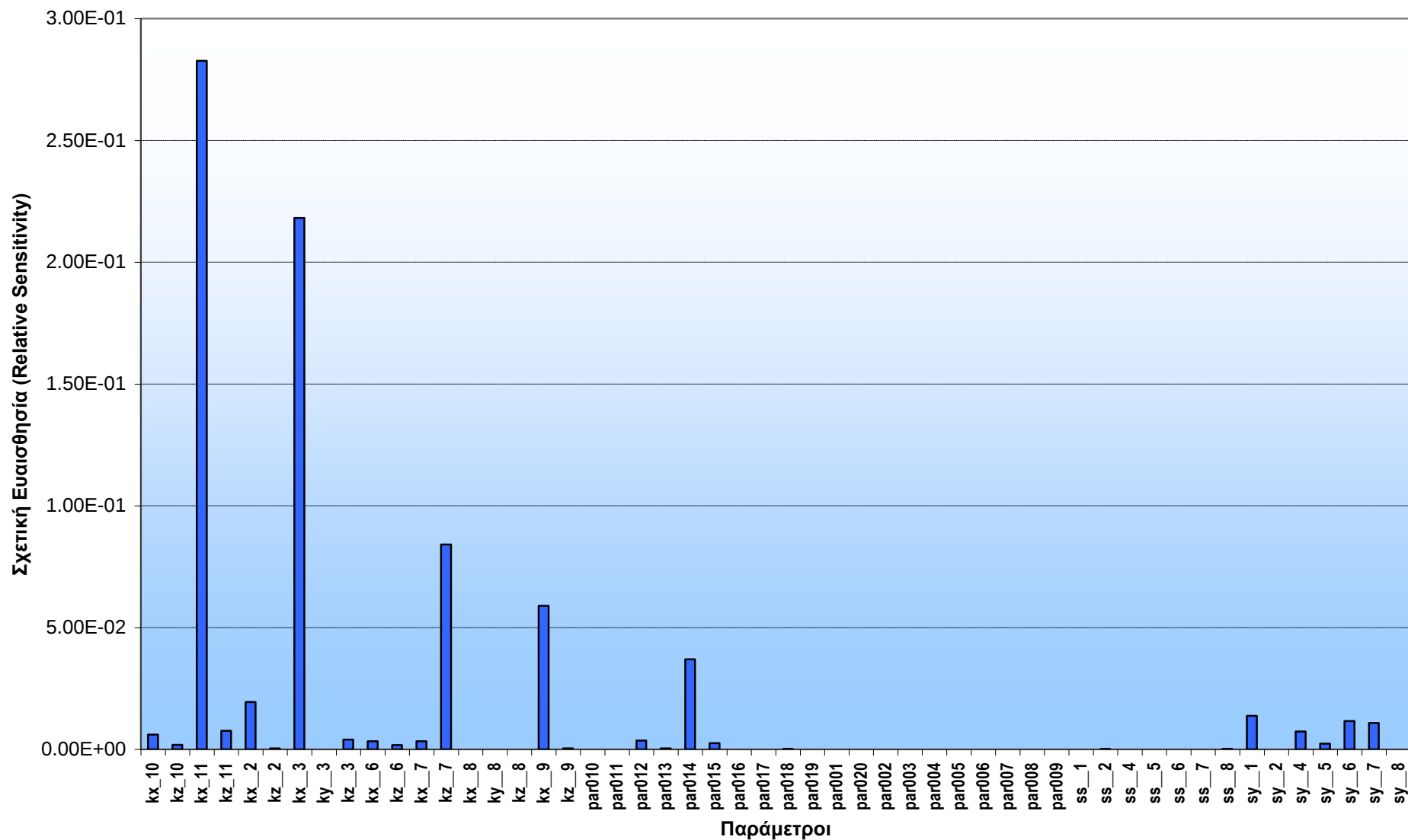
Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για την ανάλυση είναι η τροφοδοσία του μοντέλου (Recharge) όπως αυτή έχει αποδοθεί χωρικά και χρονικά (par001 – par020), η οριζόντια και η κατακόρυφη υδραυλική αγωγιμότητα (K_x , K_z) για κάθε υδρολιθολογική ενότητα και η ειδική αποθηκευτικότητα (S_s , S_y) των υδρολιθολογικών ενότητων

Στο τέλος της διαδικασίας βελτιστοποίησης που εκτελεί το WinPest, υπολογίστηκαν όλες οι τιμές της **σύνθετης ευαισθησίας** (για κάθε παράμετρο) οι οποίες εκφράζουν πόσο καλά προσδιορίζονται οι παράμετροι από τις παρατηρήσεις (observations) ενώ αντανάκλα στο βαθμό εμπιστοσύνης της βαθμονόμησης των παραμέτρων. Προκειμένου να είναι ευκολότερη η ερμηνεία της ανάλυσης όλες οι τιμές της σύνθετης ευαισθησίας (Composite Sensitivity) των παραμέτρων παρουσιάζονται στην Εικόνα 93 αφού πρώτα κανονικοποιήθηκαν σε σχέση με μια μέγιστη τιμή και προέκυψαν οι σχετικές τιμές (Relative Sensitivity).

Η παράμετρος με την υψηλότερη τιμή σχετικής ευαισθησίας είναι περισσότερο πιθανό να εμπεριέχει μικρότερη αβεβαιότητα, μεγαλύτερο εύρος εμπιστοσύνης και να δίνει περισσότερη πληροφορία σχετικά με την βαθμονόμηση του μοντέλου.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας δείχνουν ότι οι πλέον ευαίσθητες παράμετροι είναι οι υδραυλικές αγωγιμότητες K_{x3} και K_{x11} που προσδιορίζουν το δεύτερο και τρίτο στρώμα του εννοιολογικού μοντέλου όπου εντοπίζεται και ο κύριος υδροφόρος του συστήματος (βλ. ενότητα 10.2). Οι υπόλοιπες παράμετροι όπως παρουσιάζεται και στο γράφημα, έχουν πολύ χαμηλές τιμές σχετικής ευαισθησίας.

Στα πλαίσια ανάλυσης της ευαισθησίας του μοντέλου πραγματοποιήθηκε και ανάλυση της ευαισθησίας της διακριτοποίησης ώστε να καθορισθεί η ευαισθησία του μοντέλου στην μεταβολή του κανάβου κατά την x και κατά την y διεύθυνση.



Εικόνα 93 : Με το γράφημα της Σχετικής Ευαισθησίας των επιλεγέντων παραμέτρων καθορίζεται ο βαθμός της επίδρασης των παραμέτρων στα αποτελέσματα του μοντέλου. Ιδιαίτερη επίδραση παρουσιάζεται να έχουν οι υδραυλικές αγωγιμότητες (Kx3 & Kx11) που κυριαρχούν στο 2^ο και 3^ο στρώμα του μοντέλου προσομοίωσης

- ✓ Τα κελιά (cells) μειώθηκαν από το αρχικό μέγεθος κυττάρου 30x75m (grid 200x200) σε 15x37.5m (grid **400x400**).
- ✓ Στην συνέχεια τα κελιά (cells) αυξήθηκαν από το αρχικό μέγεθος κυττάρου 30x75m σε 60x150m (grid **100x100**) και μετά
- ✓ Αυξήθηκαν σε 120x300m (grid **50x50**).

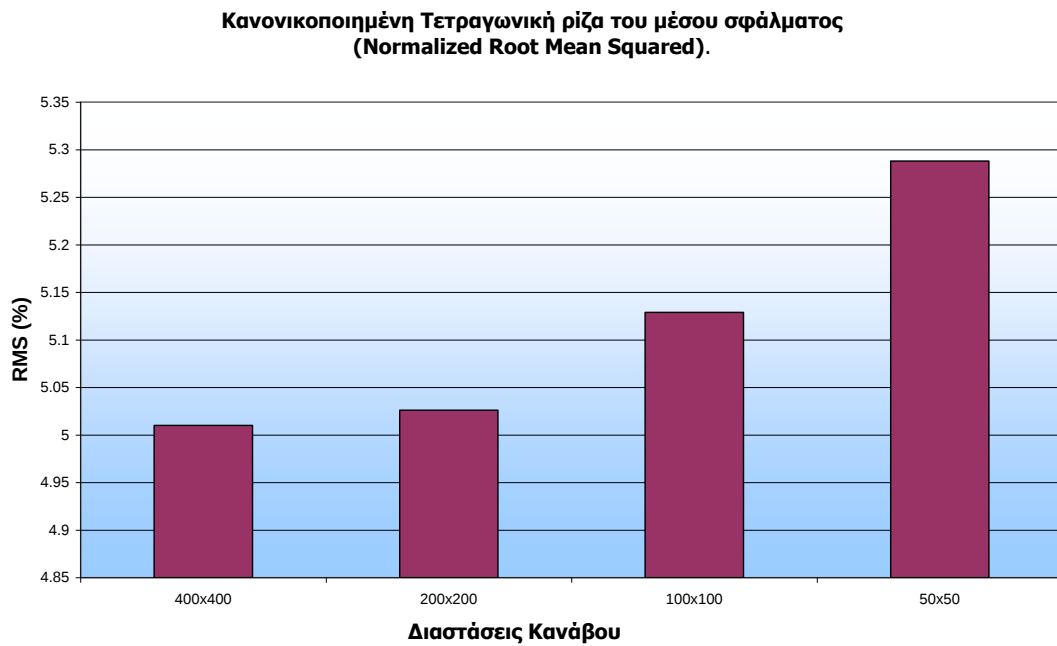
Μετά από κάθε αλλαγή στο μέγεθος του κανάβου 'έτρεχε' το μοντέλο και έγινε καταγραφή των αποτελεσμάτων της κανονικοποιημένης τετραγωνικής ρίζας του μέσου σφάλματος (RMS) όπως και ο χρόνος επίτευξης της σύγκλισης (όταν ήταν δυνατή η σύγκλιση του μοντέλου).

Κάνναβος	Μέγεθος κελιού	Απόλυτο Μέσο Σφάλμα (Absolute Mean Error)	Τετραγωνική ρίζα του μέσου σφάλματος (RMS, Root Mean Square).	Κανονικοποιημένη Τετραγωνική ρίζα του μέσου σφάλματος (Normalized Root Mean Squared) %	Χρόνος Επίτευξης της Σύγκλισης του Μοντέλου (s)
400x400	15x37.5m	0.719	0.841	5.01%	17701.5
200x200	30x75m	0.619	0.869	5.026%	2746.8
100x100	60x150m	0.715	0.861	5.129%	438.7
50x50	120x300m	0.655	0.908	5.288%	82.2

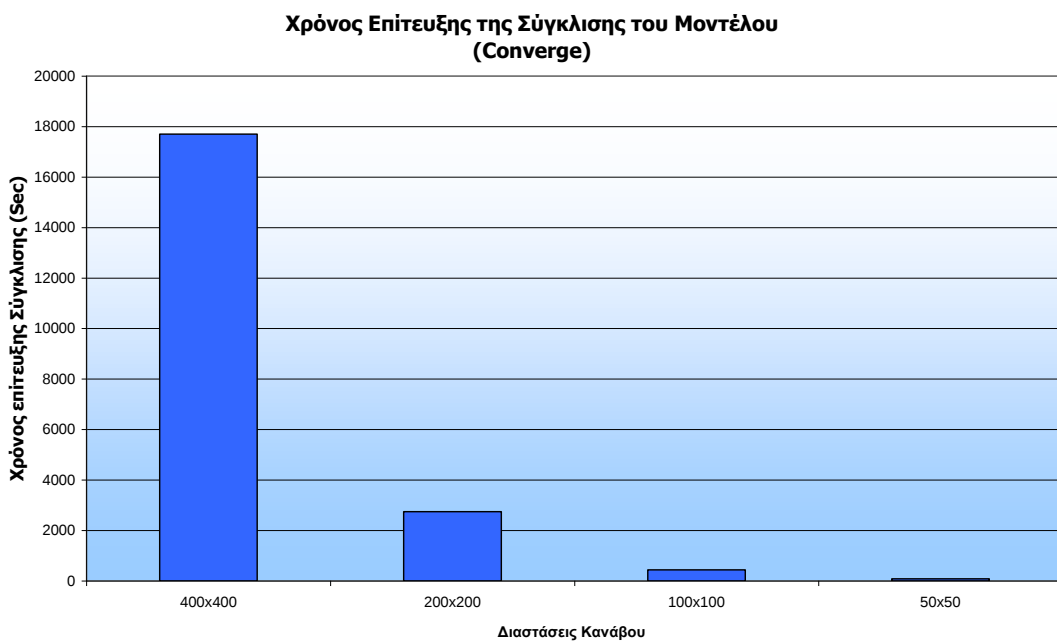
Πίνακας 8 : Ανάλυση Ευαισθησίας κανάβου

Το γράφημα στην εικόνα 93 συγκρίνει την μεταβολή του μεγέθους του κελιού (cell) με το αντίστοιχο σφάλμα στα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η αύξηση του μεγέθους των κελιών αυξάνει και το αντίστοιχο σφάλμα των αποτελεσμάτων όχι όμως αναλογικά με την αύξηση του μεγέθους των κελιών. Το γεγονός αυτό δίνει την δυνατότητα επιλογής διαστάσεων κανάβου ανάλογα με την επιδιωκόμενη ακρίβεια στα αποτελέσματα.

Δοκιμές με κάνναβους μεγαλύτερους από 400x400 έδειξαν ότι το μοντέλο είχε αδυναμία σύγκλισης. Αν και το μοντέλο με κάνναβο 400x400 τελικά συνέκλινε απαιτήθηκαν επάνω από 4 ώρες για να βγάλει αποτελέσματα, παραπλήσια με αυτά που προσδιορίστηκαν από τα άλλα μοντέλα. Αυτό δείχνει ότι ήδη από τα πρώτα βήματα της προσομοίωσης είναι πολύ σημαντικός ο καθορισμός του βέλτιστου μεγέθους κανάβου σε σχέση το στόχο του μοντέλου αλλά και σε σχέση με τις δυνατότητες του διαθέσιμου υπολογιστικού συστήματος.



Εικόνα 94 : Με βάση τον Πίνακα 8 προκύπτει το διάγραμμα της παρούσας εικόνας όπου φαίνεται ότι με την αύξηση του μεγέθους του κελιού (διαστάσεις κανάβου 50x50) αυξάνεται και το μέγεθος του RMS(%)



Εικόνα 95 : Μείωση του μεγέθους του κελιού (κάνναβος 400x400) ενέχει σημαντική αύξηση του χρόνου που απαιτείται για την επίτευξη της σύγκλισης

Αν και θα ήταν δυνατό να επιλεγεί μικρότερο μέγεθος κανάβου (100x100) ή και (50x50) με βάση το ύψος σφάλματος όπως αυτό καταγράφεται στον Πίνακα 8, δεδομένης της ύπαρξης ισχυρού υπολογιστικού συστήματος επιλέχθηκε το μεγαλύτερο μέγεθος κανάβου (κάνναβος 200x200) με στόχο την μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα ροής και μεταφοράς μάζας.

11.2 Συζήτηση

Αν και στην Ελλάδα συνολικά μπορεί να θεωρηθεί ότι υπάρχει επάρκεια υδατικού δυναμικού, η χωρικά και χρονικά ανομοιόμορφη κατανομή αποθεμάτων και βροχοπτώσεων, σε συνδυασμό με την μη ορθολογική χρήση του νερού δημιουργούν συχνά προβλήματα ανεπάρκειας αυτού του πολύτιμου πόρου σε ορισμένες περιοχές της χώρας ιδιαίτερα κατά την διάρκεια των θερινών μηνών. Το μεγαλύτερο μέρος της υδατικής κατανάλωσης αποδίδεται στη γεωργική δραστηριότητα ενώ δευτερεύοντα ρόλο παίζει η οικιστική ανάπτυξη.

Στο **Εισαγωγικό Τμήμα Ι** (κεφάλαια 1-3) της παρούσας διατριβής έγινε αρχικά μια παρουσίαση γενικά του προβλήματος της ποσότητας και της ποιότητας των υδάτων αλλά και του νομοθετικού πλαισίου που δημιουργήθηκε στην Ευρωπαϊκή Ένωση και στην Ελλάδα προκειμένου να προστατευθούν τα υπόγεια Ύδατα από την ρύπανση και την υποβάθμιση.

Σε παγκόσμια κλίμακα το πρόβλημα του νερού δεν είναι η επάρκεια, αλλά η **διαθεσιμότητα στον κατάλληλο τόπο και χρόνο και η σωστή διαχείρισή του**. Η διαχείριση των υδατικών αποθεμάτων είναι ένα ζήτημα αιχμής το οποίο τα τελευταία χρόνια λόγω της επίδρασης των κλιματικών αλλαγών στο υδατικό ισοζύγιο αλλά και της κακής διαχείρισης των υφιστάμενων αποθεμάτων, επηρεάζει μεγάλο ποσοστό της Κοινωνίας.

Στα πλαίσια της ανάγκης να υπάρξουν «εργαλεία» που θα βοηθήσουν στην διαχείριση των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων αλλά και στα πλαίσια μιας προσπάθειας να αντιστραφούν τα αρνητικά φαινόμενα που δημιουργήθηκαν από την κακή διαχείριση του φυσικού περιβάλλοντος, οι υδρολογικές μελέτες χρησιμοποιούν όλο και πιο συχνά την προσομοίωση της κίνησης των επιφανειακών ή/και των υπόγειων υδάτων αλλά και της μεταφοράς των ρύπων με σκοπό την **πρόβλεψη της χωρικής και χρονικής εξέλιξης του συστήματος και την βέλτιστη διαχείρισή του**.

Προκειμένου λοιπόν για την σωστή διαχείριση των αποθεμάτων αλλά και την πρόβλεψη της εξέλιξης της ποιότητας του υπόγειου υδάτινου δυναμικού, απαιτείται ο σχεδιασμός ενός **τρισδιάστατου μεταβατικού μοντέλου ροής** το οποίο να μπορεί να αποδώσει την χρονικά μεταβαλλόμενη τροφοδοσία του συστήματος σε συνδυασμό με κάποια σενάρια εξέλιξης του συστήματος.

Σκοπός της παρούσας Διατριβής ήταν η δημιουργία ενός πλήρως μεταβατικού μοντέλου ικανό να προσεγγίσει την χωρικά και χρονικά μεταβαλλόμενη επαναπλήρωση του προσχωματικού υδροφόρου συστήματος στην παραλιακή ζώνη Κορινθίας για το χρονικό διάστημα μιας 20-ετίας (1998-2018) ώστε βάσει αυτού να προκύψουν διαχειριστικά σχέδια τόσο για την ποσότητα όσο και για την ποιότητα.

Η παρούσα διατριβή εστιάζει λοιπόν στην **εξέλιξη μιας μεθοδολογίας** για την εφαρμογή ενός **πλήρως μεταβατικού μοντέλου ροής** και μεταφοράς μάζας. Ειδικότερα, σκοπός είναι ο καθορισμός μιας μεθοδολογίας που θα επιτρέπει την χρήση περιορισμένου αριθμού δεδομένων στάθμης στην περιοχή έρευνας για την δημιουργία ενός πλήρως μεταβατικού μοντέλου (full transient model) που θα λαμβάνει υπόψη την χωρικά και χρονικά μεταβαλλόμενη τροφοδοσία ύδατος. Δεύτερος άξονας της παρούσας διατριβής είναι συνακόλουθα η μοντελοποίηση της μεταφοράς μάζας (νιτρικά) στο ανωτέρω μεταβατικό σύστημα για την παρακολούθηση της εξέλιξης της ρύπανσης.

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας αυτής πραγματοποιήθηκε στην παραλιακή ζώνη του Ν. Κορινθίας με βάση ένα συνδυασμό από δεδομένα πυκνής δειγματοληψίας σε μεγάλο αριθμό υδρογεωτρήσεων (50-60 γεωτρήσεις σε έκταση 60 Km²), και ικανοποιητικής γνώσης των γεωλογικών και υδρογεωλογικών συνθηκών της περιοχής, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα αξιόπιστο ομοίωμα του υπόγειου υδροφόρου συστήματος και των οριακών συνθηκών του προβλήματος.

Στο τμήμα **II της Έρευνας Πεδίου** (κεφάλαια 4-7) γίνεται περιγραφή και ανάλυση των αποτελεσμάτων της έρευνας που πραγματοποιήθηκε. Οι εργασίες πεδίου (μετρήσεις στάθμης σε επιλεγμένο δίκτυο γεωτρήσεων) είχαν σαν στόχο την βελτίωση και στήριξη του προτεινόμενου υδρογεωλογικού μοντέλου ενώ οι πολυάριθμες δειγματοληψίες – μετρήσεις συγκεντρώσεων ιόντων του αζώτου σε μηνιαία βάση είχαν σαν στόχο την διερεύνηση της κατανομής και της εξέλιξης της ρύπανσης στο χώρο και στο χρόνο.

Ο προσχωματικός υδροφόρος της παραλιακής ζώνης Κορινθίας βρίσκεται σε μια περιοχή που η κύρια χρήση γης ήταν κυρίως αγροτική και έχει υποστεί σημαντική υποβάθμιση από τις εντατικές αντλήσεις και την ρύπανση με νιτρικά ιόντα. Σήμερα η χρήση της περιοχής έρευνας μεταπίπτει σταδιακά σε οικιστική διατηρώντας όμως αρκετές αγροτικές εκτάσεις. Πηγή των νιτρικών ιόντων θεωρείται ότι είναι οι αγροτικές καλλιέργειες αλλά και η επί μακρόν ανυπαρξία του αποχετευτικού συστήματος που ώθησε κάποιους κατοίκους να χρησιμοποιούν παλαιά πηγάδια ως απορροφητικούς βόθρους.

Τα αποτελέσματα της έρευνας πεδίου (μετρήσεις στάθμης) έδειξαν ότι στην Δυτική περιοχή του υδροφόρου συστήματος η υδροφορία παρουσιάζει υψηλότερες απόλυτες τιμές στάθμης σε σχέση με την Ανατολική που καταγράφεται υψηλότερη υδραυλική κλίση. Τα δεδομένα αυτά υποδηλώνουν ότι το σύστημα δέχεται εντονότερη πλευρική τροφοδοσία από τα Δυτικά (πεδίο ανάμεσα στο π. Ασωπό και π. Ζαπάντη) ενώ προς τα Ανατολικά (Ανατολικά του π. Ράχιανη) που αλλάζει η λιθολογία σε πιο αδρομερή κλάσματα, αυξάνεται και η υδραυλική κλίση.

Λόγω της εκφόρτισης του υδροφόρου στην παραλιακή ζώνη οι πιεζομετρικές καμπύλες διατάσσονται παράλληλα με αυτή. Μετά την θερινή περίοδο λόγω της έντονης εκμετάλλευσης στην οποία υπόκειται ο υπόγειος υδροφορέας κατά την διάρκεια αυτής της

περιόδου παρατηρούνται έντονες ανωμαλίες στην γενική κατανομή των πιεζομετρικών καμπυλών. Σε τμήματα δε, της παραλιακής ζώνης παρατηρούνται και αρνητικά υψόμετρα στάθμης, σαν αποτέλεσμα της έντονης εκμετάλλευσης του υπόγειου υδάτινου δυναμικού. Στα σημεία αυτά, όσο παρατείνεται το καθεστώς της υπερεκμετάλλευσης του υπόγειου υδροφορέα δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες για θαλάσσια διείσδυση γεγονός που απεικονίζεται και στην κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στην Εικόνα 29 με υψηλές τιμές (1600 $\mu\text{S}/\text{cm}$) στην περιοχή του Κοκκωνίου και 2400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ στην περιοχή του Λεχαίου.

Από όλες τις θέσεις δειγματοληψίας, ο αριθμός των ακατάλληλων δειγμάτων με τιμές συγκεντρώσεων που υπερβαίνουν τα όρια που έχει θέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση με την οδηγία 98/83/EC, ξεπερνάει το 50-80% του συνόλου. Τα περισσότερα αυξημένα επίπεδα συγκεντρώσεων εντοπίζονται στα δείγματα των γεωτρήσεων από το Ανατολικό τμήμα του προσχωματικού υδροφόρου συστήματος.

Η διακύμανση της συγκέντρωσης των νιτρικών σε εποχή υψηλής στάθμης ανταποκρίνεται και στις μεταβολές του υδρολογικού κύκλου. Ισχυρές βροχοπτώσεις πιθανώς προκαλούν άμεση έκπλυση των νιτρικών ιδιαίτερα κατά τους μήνες με το μεγαλύτερο ύψος βροχόπτωσης και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την υγρή περίοδο, οι συγκεντρώσεις των νιτρικών να είναι σε υψηλότερα επίπεδα από αυτές που καταγράφονται την ξηρή εποχή.

Ένδειξη ότι ο κύριος μηχανισμός κίνησης των νιτρικών είναι η έκπλυση από την επιφάνεια προς τους βαθύτερους ορίζοντες, αποτελεί η παρατήρηση ότι οι αβαθείς γεωτρήσεις παρουσιάζουν υψηλότερα επίπεδα συγκεντρώσεων νιτρικών σε σχέση με τις βαθύτερες γεωτρήσεις (Psarrouroulou and Karatzas, 2001). Αντίθετα, οι γεωτρήσεις που εκμεταλλεύονται βαθύτερους ορίζοντες (AS19, E14) εμφανίζουν ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις NH_4^+ που μπορεί να αποδοθούν σε επικρατούσες αναγωγικές συνθήκες.

Οι παρατηρήσεις στις συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων που έγιναν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής συμφωνούν με τις παρατηρήσεις των (Goolsby *et al.*, 1991; Reynolds-Vargas and Richter, 1995) όπου, οι συγκεντρώσεις των νιτρικών, σε ήπιο κλίμα, είναι συνήθως υψηλότερες κατά το τέλος του φθινοπώρου και το χειμώνα έως την άνοιξη. Τα υψηλά αυτά επίπεδα αποδίδονται σε πολλούς παράγοντες ο πρωταρχικός από τους οποίους είναι η μειωμένη αφομοίωση των νιτρικών από τις καλλιέργειες και τα άλλα φυτά κατά την διάρκεια που δεν αναπτύσσονται, δηλαδή από το τέλος του φθινοπώρου έως και την άνοιξη. Επειδή τα νιτρικά που έχουν παραμείνει στο έδαφος δεν καταναλώνονται από τα φυτά, εκπλύονται προς τους βαθύτερους ορίζοντες με την αύξηση των βροχοπτώσεων. Η έκπλυση των νιτρικών από τα συστήματα απορροφητικών βόθρων είναι λιγότερο βέβαιη αλλά είναι πιθανώς ένας πολύ σημαντικός συντελεστής της νιτρικής ρύπανσης.

Η εικόνα κατανομής συγκέντρωσης των Αμμωνιακών ιόντων είναι τελείως διαφορετική από την κατανομή συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων που μετρήθηκαν σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Το γεγονός αυτό πιθανά σχετίζεται με την πηγή της ρύπανσης που φαίνεται να

είναι διαφορετική στις δύο περιπτώσεις. Ενώ η κατανομή της συγκέντρωσης των Νιτρικών ιόντων παραπέμπει σε μη-σημειακή ρύπανση (non point source) οφειλόμενη στην εφαρμογή λιπασμάτων, η μορφή της κατανομής της συγκέντρωσης των Αμμωνιακών ιόντων παραπέμπει σε σημειακή μορφή ρύπανσης (point source) η οποία επηρεάζει ιδιαίτερα τις γεωτρήσεις E14 και BE8 που βρίσκονται κοντά στην ρηξιγενή ζώνη (στο Νότιο όριο της περιοχής έρευνας).

Τα στοιχεία αυτά που συλλέχθηκαν κατά την διάρκεια των εργασιών πεδίου όπως και οι παρατηρήσεις που έγιναν επί αυτών των στοιχείων χρησιμοποιήθηκαν για την αριθμητική προσομοίωση της ροής και της κίνησης των νιτρικών στο **τμήμα III της Μαθηματικής Προσομοίωσης** (κεφάλαια 8-11). Στόχος της μοντελοποίησης είναι η προσομοίωση των μηχανισμών ροής του συστήματος με την δημιουργία ενός πλήρως μεταβατικού μοντέλου σε συνάρτηση με όλα τα διαθέσιμα στοιχεία που συλλέχθηκαν από το πεδίο, ώστε να είναι δυνατή αφενός η πρόβλεψη της εξέλιξης του συστήματος ροής αλλά και αφετέρου η πρόβλεψη της μεταφοράς ρύπων με σκοπό την δημιουργία ενός ρεαλιστικού διαχειριστικού σχεδίου των υδατικών πόρων.

Παρά το γεγονός ότι η τροφοδοσία του συστήματος είναι αυτή ουσιαστικά που καθορίζει την συμπεριφορά του, τα περισσότερα μοντέλα προσομοίωσης της μεταβατικής υπόγειας ροής (transient state) που κατασκευάζονται σήμερα, χρησιμοποιούν την τροφοδοσία (recharge) ως μια χρονικά αμετάβλητη παράμετρο όπως στις προσομοιώσεις μόνιμης ροής (steady state). Βασικό μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι δεν είναι εύκολο να διερευνηθεί η μεταβολή της τροφοδοσίας σε σχέση με τον χρόνο και η επίδραση αυτής της μεταβολής στην λειτουργία του συστήματος. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής προκειμένου για τον προσδιορισμό της χωρικά και χρονικά μεταβαλλόμενης τροφοδοσίας του συστήματος χρησιμοποιήθηκε μια ιδιότητα που χαρακτηρίζει πολλά συστήματα και είναι η περιοδικότητα της μεταβολής της πιεζομετρικής στάθμης.

Βασίζόμενοι στην υπόθεση ότι η διακύμανση της πιεζομετρικής στάθμης του υδροφόρου είναι ένδειξη της τροφοδοσίας που εφαρμόζεται στην ευρύτερη περιοχή (WTF Method), η παρούσα διατριβή διερεύνησε την χρήση σειράς μετρήσεων στάθμης γεωτρήσεων που βρίσκονται στα όρια της περιοχής έρευνας για την κατασκευή μιας αντιπροσωπευτικής για την περιοχή χρονοσειράς μετρήσεων στάθμης.

Η διακύμανση της πιεζομετρικής στάθμης (υδρολογική χρονοσειρά) είναι ένα φυσικό φαινόμενο που παρουσιάζει αταξία αλλά με συνθήκες που υποδηλώνουν ότι υπάρχει μια υποκείμενη δομή - περιοδικότητα. Η μορφή της περιοδικότητας που εμφανίζεται στις μετρήσεις αυτές μπορεί να αποδοθεί με μια σειρά Fourier της μορφής :

$$F(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n \cos\left(\frac{2\pi t}{T_n} + \phi_n\right) + B_n \sin\left(\frac{2\pi t}{T_n} + \phi_n\right) \right)$$

που αντιπροσωπεύει ένα άθροισμα απείρων όρων.

Ένα πρόβλημα που σχετίζεται με την μεταβολή της πιεζομετρικής στάθμης είναι η ερμηνεία της διακύμανσης και η πρόβλεψη της μελλοντικής χρονοσειράς διακύμανσης στάθμης. Όσο περισσότερο μεταβάλλονται οι κλιματικές συνθήκες, τόσο πιο αναγκαία είναι η εύρεση ενός προβλέψιμου προτύπου το οποίο θα μπορεί να αναγνωρισθεί παρά την γενική αβεβαιότητα.

Στις περισσότερες περιπτώσεις τα δεδομένα πιεζομετρικής στάθμης παρουσιάζουν μια αναγνωρίσιμη κυκλική δομή. Η ύπαρξη της δομής αυτής έχει διερευνηθεί σε πολλές μελέτες που υποστηρίζουν ότι υπάρχουν κύκλοι διαφορετικών συχνοτήτων και στα κλιματικά αλλά και στα υδρολογικά δεδομένα (Currie, 1974; Currie, 1981; Currie, 1984; Currie, 1987; Currie and O'Brien, 1988; Currie and O'Brien, 1990; Labitzke *et al.*, 1990; Burroughs, 2003; Ramachandra Rao and Hamed, 2003)

Λόγω του γεγονότος ότι στις περισσότερες των περιπτώσεων οι διαθέσιμες για το μοντέλο μας μετρήσεις στάθμης δεν είναι συνεχείς στο χρόνο, με βάση τις παρατηρούμενες περιοδικότητες υλοποιήθηκε μια ημιτονοειδής εξίσωση ώστε να παραχθεί μια πλήρης σειρά δεδομένων στάθμης που θα καλύπτει το χρονικό διάστημα (1998-2018) βαθμονόμησης του μοντέλου και πρόβλεψης της εξέλιξης της στάθμης με βάση διαφορετικά σενάρια. Με βάση τα πειραματικά δεδομένα (μετρήσεις στάθμης πεδίου σε όλες τις γεωτρήσεις) προσαρμόστηκαν τρεις κύριες συνιστώσες στα δεδομένα διακύμανσης στάθμης σε συνάρτηση με το χρόνο : Μια ετήσια (365days), μια υπερ-ετήσια περιοδικότητα (2150days) και μια γενική τάση στα δεδομένα. Η τάση αυτή στα δεδομένα της πιεζομετρικής στάθμης αποδίδεται κυρίως σε ανθρωπογενείς παράγοντες όπως είναι (1) τα αυξημένα ποσοστά των αντλήσεων που οφείλονται στην υπερ-άρδευση των καλλιεργειών και στην οικιστική ανάπτυξη (2) στην μείωση των ποσοστών κατείσδυσης λόγω της αλλαγής χρήσης γης αλλά και (3) στην κλιματική αλλαγή.

Η χρονοσειρά μετρήσεων στάθμης που προέκυψε με βάση την ανωτέρω διαδικασία χρησιμοποιήθηκε ως οριακή συνθήκη σε ένα πλήρως μεταβατικό μοντέλο πρόβλεψης ροής και μεταφοράς μάζας στα πλαίσια διαχείρισης και προστασίας των υδατικών πόρων της παραλιακής ζώνης.

Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης έδειξαν αρκετά καλή ανταπόκριση του μοντέλου στα δεδομένα πεδίου. Από την μελέτη των γραφημάτων μεταβολής της υπόγειας πιεζομετρίας στα σημεία ελέγχου, προκύπτει ότι το μοντέλο αναπαράγει επαρκώς την πιεζομετρία του υπό μελέτη συστήματος. Παρατηρείται δηλαδή ότι παρακολουθούνται με ικανοποιητική ακρίβεια τόσο οι τάσεις μεταβολής, όσο και οι διακυμάνσεις της πιεζομετρίας. Εξαίρεση αποτελούν οι ακραίες εποχιακές διακυμάνσεις οι οποίες οφείλονται σε τοπικού χαρακτήρα απολήψεις, σε περιόδους αιχμής ή και σε τοπικές μεταβολές των υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών του υπό μελέτη συστήματος, που ούτως ή άλλως δεν είναι εύκολο να προεκτιμηθούν.

Τα αποτελέσματα έδειξαν επίσης ότι τα δύο τμήματα (Ανατολικό και Δυτικό) της περιοχής έρευνας επηρεάζονται από διαφορετικό μηχανισμό τροφοδοσίας, γεγονός που αντανακλάται και στα αποτελέσματα του μοντέλου μεταφοράς μάζας. Ενώ η Δυτική πλευρά του προσχωματικού υδροφόρου συστήματος εξαρτάται κύρια από την πλευρική τροφοδοσία που προέρχεται από τους ανάντη σχηματισμούς (Σενάριο3), η Ανατολική φαίνεται ότι επηρεάζεται περισσότερο από την διακύμανση της επιφανειακής τροφοδοσίας (Σενάριο 2).

Σε κάθε περίπτωση η κατανομή της συγκέντρωσης των Νιτρικών ιόντων ακολουθεί την διακύμανση της πιεζομετρικής στάθμης λόγω της αυξημένης κινητικότητας που τα χαρακτηρίζει και της μικρής γενικά αποθηκευτικότητας του υδροφόρου συστήματος. Το διηθούμενο νερό από τα εδάφη που έχουν λιπανθεί κινείται μέσω των μικροπόρων της ακόρεστης ζώνης. Ανάλογα με τις ιδιότητες του γεωλογικού μέσου και τη χρονική στιγμή της βροχόπτωσης στην περιοχή η χρονική υστέρηση μεταφοράς των νιτρικών στο υπόγειο νερό διαφέρει από γεώτρηση σε γεώτρηση.

Αυτό σημαίνει ότι μείωση της εφαρμοζόμενης ποσότητας λιπασμάτων μπορεί να βελτιώσει άμεσα τα επίπεδα των Νιτρικών ιόντων στις προβληματικές περιοχές (μείωση της συγκέντρωσης) και μέσα σε λίγα χρόνια σταδιακά να αναστραφεί το φαινόμενο των αυξανόμενων συγκεντρώσεων νιτρικών στον υδροφόρο ορίζοντα

Στα πλαίσια αυτά θα πρέπει να επανεξεταστεί το κυρίαρχο μοντέλο της Ελληνικής γεωργίας που στηρίζεται στις τεράστιες εισροές (νερού και αγροχημικών) με αρνητικά αποτελέσματα στο περιβάλλον, στην ποιότητα των προϊόντων και στην υγεία των καταναλωτών και να προωθηθεί η βιολογική γεωργία.

Όσον αφορά την πλευρική τροφοδοσία του συστήματος από την οποία εξαρτάται η ανάπτυξη και ευημερία της παραλιακής ζώνης θα πρέπει να δοθεί σημασία στην διευκόλυνση της δυνατότητας κατείσδυσης των όμβριων απορροών με τις εξής δράσεις:

- Την προστασία της ορεινής ζώνης και των εναπομείναντων δασών από όπου έρχεται το νερό, με την υλοποίηση δασοτεχνικών και υδρονομικών έργων.
- Την κατασκευή μικρών έργων ανάσχεσης των επιφανειακών απορροών για τον εμπλουτισμό των υδροφορέων.

Περαιτέρω έρευνα θα ήταν ενδιαφέρον να γίνει για την διαπίστωση των προαναφερθέντων κύκλων (περιοδικότητες) που επηρεάζουν την κύμανση της πιεζομετρικής στάθμης με την τοποθέτηση αυτόματων καταγραφικών σε γεωτρήσεις και επεξεργασία των αποτελεσμάτων με στόχο να διευκρινισθούν οι παράγοντες που επηρεάζουν ισχυρότερα την μεταβολή της πιεζομετρικής στάθμης (κύκλοι διαφορετικών συχνοτήτων, ανθρωπογενείς δραστηριότητες ή κλιματική αλλαγή).

IV. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Π1. Η ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΕΙΣΩΣΗ ΡΟΗΣ

Η βασική εξίσωση (Flow Governing Equation) που περιγράφει την μεταβατική ροή (transient flow) ύδατος σε ένα ανισότροπο πορώδες μέσο μπορεί να περιγραφεί με την 'μερική διαφορική εξίσωση' της μορφής :

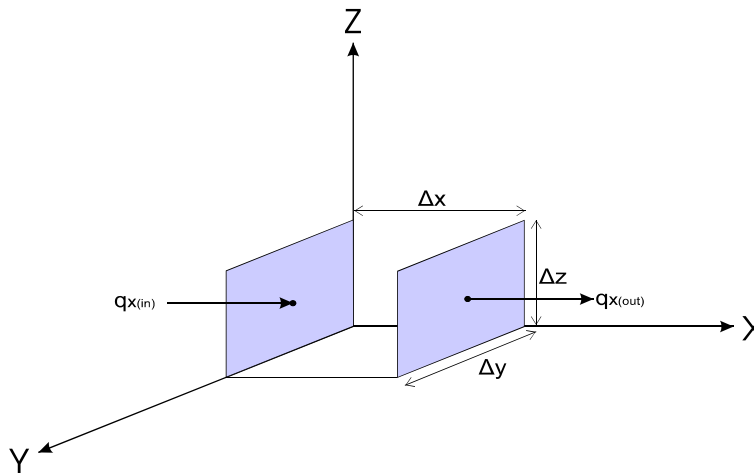
$$(E. 1) \quad \frac{\partial}{\partial x} (K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) + R = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

(McDonald and Harbaugh, 1988)

- K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} είναι οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας κατά τους άξονες x, y, z οι οποίοι θεωρούνται ότι είναι παράλληλοι με τους κύριους άξονες της υδραυλικής αγωγιμότητας ($L T^{-1}$)
- h είναι η πιεζομετρική στάθμη (L)
- R είναι ο γενικός όρος Πηγής (Source/Sink) ο οποίος είναι ουσιαστικά θετικός και ορίζεται σαν την ογκομετρική παροχή εισροής στο σύστημα ανά μονάδα όγκου του υδροφόρου και ανά μονάδα χρόνου. ($L^3 L^{-3} T^{-1}$). Προκειμένου να προσομοιάσουμε εκροή από το σύστημα (άντληση), θεωρούμε ότι $R = -W$
- S_s είναι η ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους υλικού (L^{-1})
- t είναι ο χρόνος (T)

Η παραπάνω συνάρτηση περιγράφει την κίνηση της υπόγειας ροής σε συνθήκες μη ισορροπίας (μεταβατική ροή) σε ένα ετερογενές και ανισότροπο μέσο υπό την προϋπόθεση ότι οι κύριοι άξονες της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι παράλληλοι με το κύριο σύστημα συντεταγμένων X, Y, Z . Οι όροι S_s , K_{xx} , K_{yy} και K_{zz} αναφέρονται συναρτήσει του χώρου ($S_s = S_s(x, y, z)$, $K_{xx} = K_x(x, y, z)$ κλπ) ενώ η ογκομετρική παροχή ανά μονάδα όγκου (R), αναφέρεται συναρτήσει του χώρου και του χρόνου $R = R(x, y, z, t)$.

Η εξίσωση ροής σε ένα πορώδες μέσο (E. 1), προκύπτει από τον μαθηματικό συνδυασμό του ισοζυγίου μάζας και του νόμου του Darcy, που εφαρμόζεται σε έναν κύβο πορώδους υλικού ο οποίος είναι αρκετά μεγάλος ώστε να είναι αντιπροσωπευτικός των ιδιοτήτων του πορώδους υλικού αλλά και αρκετά μικρός σε σχέση με το όλο σύστημα ώστε η μεταβολή της στάθμης μέσα στον κύβο να είναι σχετικά μικρή. Αυτός ο κύβος πορώδους υλικού είναι γνωστός με την ονομασία *Αντιπροσωπευτικός Στοιχειώδης Όγκος ή Όγκος Ελέγχου - Representative Elementary Volume (REV) or Control Volume*, ενώ έχει τις διαστάσεις Δx , Δy , και Δz όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα.



Εικόνα 96 :
Αντιπροσωπευτικός
Στοιχειώδης Όγκος ή
Όγκος Ελέγχου -
Representative
Elementary Volume
(REV) or Control Volume

Η ροή του νερού διαμέσου του όγκου ελέγχου εκφράζεται με την διανυσματική ταχύτητα $\mathbf{q}$, όπου $\mathbf{q} = q_x \mathbf{i} + q_y \mathbf{j} + q_z \mathbf{k}$ και τα $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ είναι τα μοναδιαία διανύσματα κατά μήκος των αξόνων x, y, z .

Βάσει της εξίσωσης συνέχειας, υπό την προϋπόθεση ότι η πυκνότητα του νερού είναι σταθερή, το ισοζύγιο της ογκομετρικής παροχής (L^3/T) στον παραπάνω στοιχειώδη αντιπροσωπευτικό όγκο θα είναι :

$$(\text{Εισροή } (Q_{in}) - \text{Εκροή } (Q_{out})) \pm \text{Όρος Πηγής} = \text{Συσσώρευση}$$

Θεωρώντας την ροή κατά μήκος του άξονα x , η εισροή προκύπτει μέσω της επιφάνειας $\Delta y \Delta z$ και είναι ίση με $Q_x(in)$ ενώ η εκροή θα είναι ίση με το $Q_x(out)$ και θα έχουμε :

Κατά την x - διεύθυνση : Παροχή εισροής - Παροχή εκροής = $Q_x - Q_{x+\Delta x} = q_x \Delta y \Delta z - q_{x+\Delta x} \Delta y \Delta z = (q_x - q_{x+\Delta x}) \Delta y \Delta z$ ομοίως και κατά τις άλλες διευθύνσεις :

Κατά την y - διεύθυνση : Παροχή εισροής - Παροχή εκροής = $(q_y - q_{y+\Delta y}) \Delta x \Delta z$

Κατά την z - διεύθυνση : Παροχή εισροής - Παροχή εκροής = $(q_z - q_{z+\Delta z}) \Delta x \Delta y$

Έτσι το πρώτο μέλος της εξίσωσης πολλαπλασιάζοντας και διαιρώντας με τον στοιχειώδη όγκο ΔV θα είναι :

$$\begin{aligned} \sum Q_i &= (q_x - q_{x+\Delta x}) \Delta y \Delta z + (q_y - q_{y+\Delta y}) \Delta x \Delta z + (q_z - q_{z+\Delta z}) \Delta x \Delta y \Rightarrow \\ &\Rightarrow \sum Q_i = \left(\frac{q_x - q_{x+\Delta x}}{\Delta x} + \frac{q_y - q_{y+\Delta y}}{\Delta y} + \frac{q_z - q_{z+\Delta z}}{\Delta z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z \end{aligned}$$

και όταν τα $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ και Δt τείνουν στο μηδέν τότε οι εντός της παρένθεσης όροι της ανωτέρω εξίσωσης είναι δυνατόν να εκφραστούν με την πρώτη παράγωγο:

$$\left(-\frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} - \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z$$

Δεδομένου ότι η βασική εξίσωση ροής είναι δυνατό να περιλαμβάνει όρους Πηγής (Θετικής σημειακής εισροής ύδατος όπως η γεώτρηση εμπλουτισμού ή κάποια άλλη μορφή ανατροφοδότησης του υδροφόρου συστήματος ή και Αρνητικής, όπως είναι οι γεωτρήσεις άντλησης), θεωρούμε έναν όρο ογκομετρικής παροχής εισροής ($R \Delta x \Delta y \Delta z$) με την παραδοχή ότι είναι θετικός όταν εισρέει νερό στο σύστημα και αρνητικός όταν εκρέει. Έτσι η εξίσωση παίρνει την μορφή :

$$\left(-\frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} - \frac{\partial q_z}{\partial z} + R \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \Sigma \text{υσσώρευση} = \left(\frac{\Delta V_w}{\Delta t} \right)$$

Η μεταβολή της αποθηκευτικότητας (συσσώρευση), στους υδροφόρους υπό πίεση, χαρακτηρίζεται από τον όρο της Ειδικής Αποθηκευτικότητας (S_s) - Specific Storage η οποία ορίζεται σαν τον όγκο νερού ΔV_w που απελευθερώνεται ή αποθηκεύεται ανά μονάδα όγκου του υδροφόρου και ανά μονάδα μεταβολής της στάθμης Δh : $S_s = \frac{\Delta V_w}{\Delta h \Delta x \Delta y \Delta z}$.

Άρα ο ρυθμός μεταβολής του όγκου του νερού ΔV_w στον στοιχειώδη όγκο ΔV βάσει της εξίσωσης της συνέχειας θα είναι:

$$(E. 19) \quad \Sigma Q_i = \frac{\Delta V_w}{\Delta t} = S_s \frac{\Delta h \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t}$$

όπου και αντιπροσωπεύει τον όγκο του νερού που συσσωρεύτηκε σε χρονικό διάστημα Δt με μεταβολή στάθμης Δh .

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η εξίσωση της συνέχειας που εκφράζει την ισορροπία ροής σε ένα σε έναν στοιχειώδη όγκο ΔV θα είναι :

$$\begin{aligned} \Sigma Q_i &= \left(-\frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} - \frac{\partial q_z}{\partial z} + R \right) \Delta x \Delta y \Delta z = S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V \\ \Rightarrow -\frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} - \frac{\partial q_z}{\partial z} + R &= S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \end{aligned}$$

Εφαρμόζοντας τον νόμο του Darcy στις τρεις διευθύνσεις :

$$q_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}, \quad q_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \quad \text{και} \quad q_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}$$

$$-\frac{\partial}{\partial x}\left(-K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)-\frac{\partial}{\partial y}\left(-K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)-\frac{\partial}{\partial z}\left(-K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)+R=S_s\frac{\Delta h}{\Delta t}\Rightarrow$$

$$\Rightarrow\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)+R=S_s\frac{\Delta h}{\Delta t}$$

(Ε. 20)

Η εξίσωση (Ε. 20) σε συνδυασμό με τις οριακές συνθήκες ροής (boundary conditions) που θέτουμε στα όρια του υδροφόρου συστήματος και τον προσδιορισμό των αρχικών συνθηκών στάθμης (initial heads), συνιστά ουσιαστικά την μαθηματική απεικόνιση του υπόγειου συστήματος ροής.

Η επίλυση της εξίσωσης αυτής, κατά την αναλυτική έννοια είναι μια αλγεβρική έκφραση που δίνει πιεζομετρικές στάθμες $h(x,y,z,t)$ τέτοιες ώστε όταν οι παράγωγοι του h σε σχέση με το χώρο και το χρόνο, αντικατασταθούν στην εξίσωση (Ε. 20) να ικανοποιούν και την εξίσωση και τις αρχικές και οριακές συνθήκες που έχουν τεθεί. Εκτός από πολύ απλά συστήματα, αναλυτικές λύσεις της εξίσωσης (Ε. 20) είναι πολύ σπάνια δυνατές και για αυτό τον λόγο πρέπει να χρησιμοποιηθούν διάφορες αριθμητικές μέθοδοι προκειμένου να επιτευχθούν προσεγγιστικές λύσεις.

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι μία αριθμητική προσέγγιση της εξίσωσης (Ε. 20) όπου το συνεχές σύστημα που περιγράφηκε, αντικαθίσταται από ένα πεπερασμένο σύνολο διακριτών σημείων στον χώρο και το χρόνο, ενώ κάθε παράγωγος της μερικής διαφορικής εξίσωσης που προέκυψε, αντικαθίσταται από μία αλγεβρική προσέγγιση, σε κάθε σημείο του υπολογιστικού χώρου. Αυτή η διαδικασία οδηγεί σε συστήματα αλγεβρικών γραμμικών εξισώσεων ενώ η λύση τους δίνει τιμές στάθμης στα συγκεκριμένα σημεία και χρόνους. Όλες αυτές οι τιμές που δίδονται από την παραπάνω διαδικασία, συνιστούν απλά μια προσέγγιση στην χρονικά μεταβαλλόμενη κατανομή στάθμης που θα δίνονταν από την αναλυτική λύση της μερικής διαφορικής εξίσωσης ροής (McDonald and Harbaugh, 1988).

Π1.1 Χωρική Διακριτοποίηση

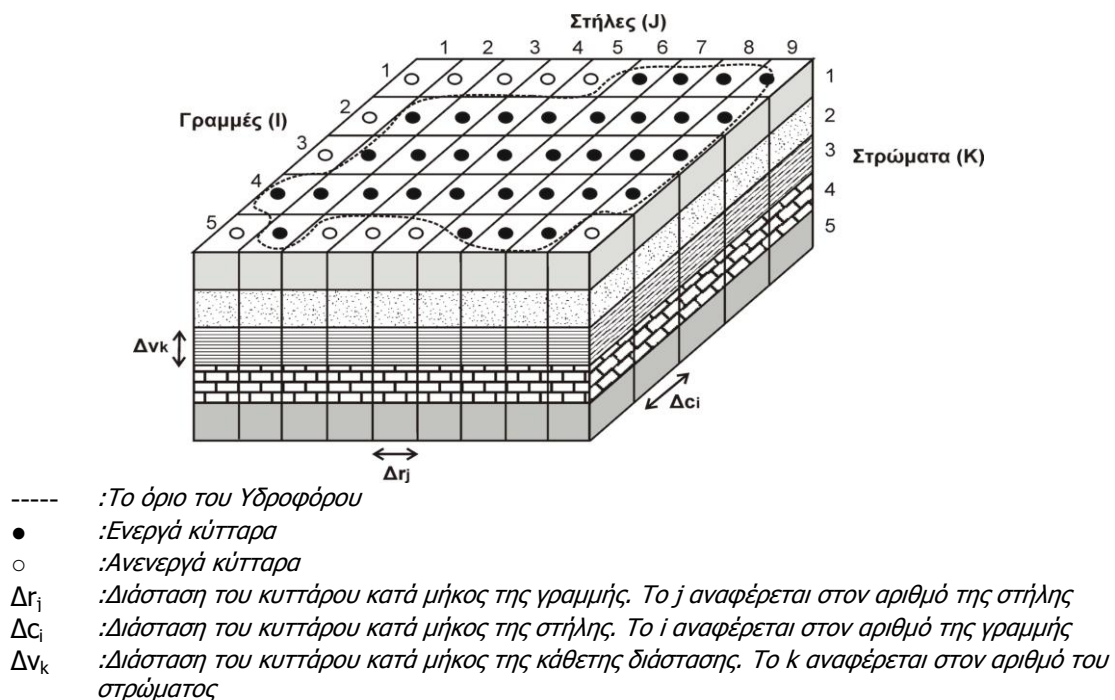
Το MODFLOW όπως έχει προαναφερθεί χρησιμοποιεί την κεντροβαρή διάταξη (block centered grid) των πεπερασμένων διαφορών προκειμένου για την χωρική διακριτοποίηση της περιοχής ενδιαφέροντος. Τα κελιά σχηματίζονται από την τομή δύο συνόλων παράλληλων γραμμών ενώ οι κόμβοι βρίσκονται στο κέντρο των στοιχείων. Στους κόμβους (nodes) αυτούς, υπολογίζεται η στάθμη για προβλήματα ροής και η συγκέντρωση για προβλήματα μεταφοράς μάζας. Η απόσταση μεταξύ των κόμβων πρέπει να επιλεγεί κατά τέτοιον τρόπο ώστε οι υδραυλικές ιδιότητες του συστήματος να είναι ομοιόμορφες σε όλη την έκταση του κελιού διότι κατά την εφαρμογή των ιδιοτήτων θεωρείται ότι αυτές έχουν εφαρμογή σε όλο το στοιχείο-κελί (McDonald and Harbaugh, 1988).

Η χωρική διακριτοποίηση ενός υδροφόρου συστήματος, παρουσιάζεται στην Εικόνα 97, όπου χρησιμοποιείται ένα δίκτυο στοιχείων (blocks) που αποκαλούνται κελιά (cells), σε θέσεις που ορίζονται βάσει των αριθμών της γραμμής (I), της στήλης (J) και του στρώματος (K), τα οποία προκύπτουν χρησιμοποιώντας ένα σύστημα δεικτών i, j, k .

Για ένα σύστημα που αποτελείται από n -γραμμές, n -στήλες και n -στρώματα :

- i είναι ο δείκτης της γραμμής όπου $i = 1, 2, 3, \dots, n$ -γραμμές,
- j είναι ο δείκτης της στήλης όπου $j = 1, 2, 3, \dots, n$ -στήλες
- k είναι ο δείκτης του στρώματος όπου $k = 1, 2, 3, \dots, n$ -στρώματα

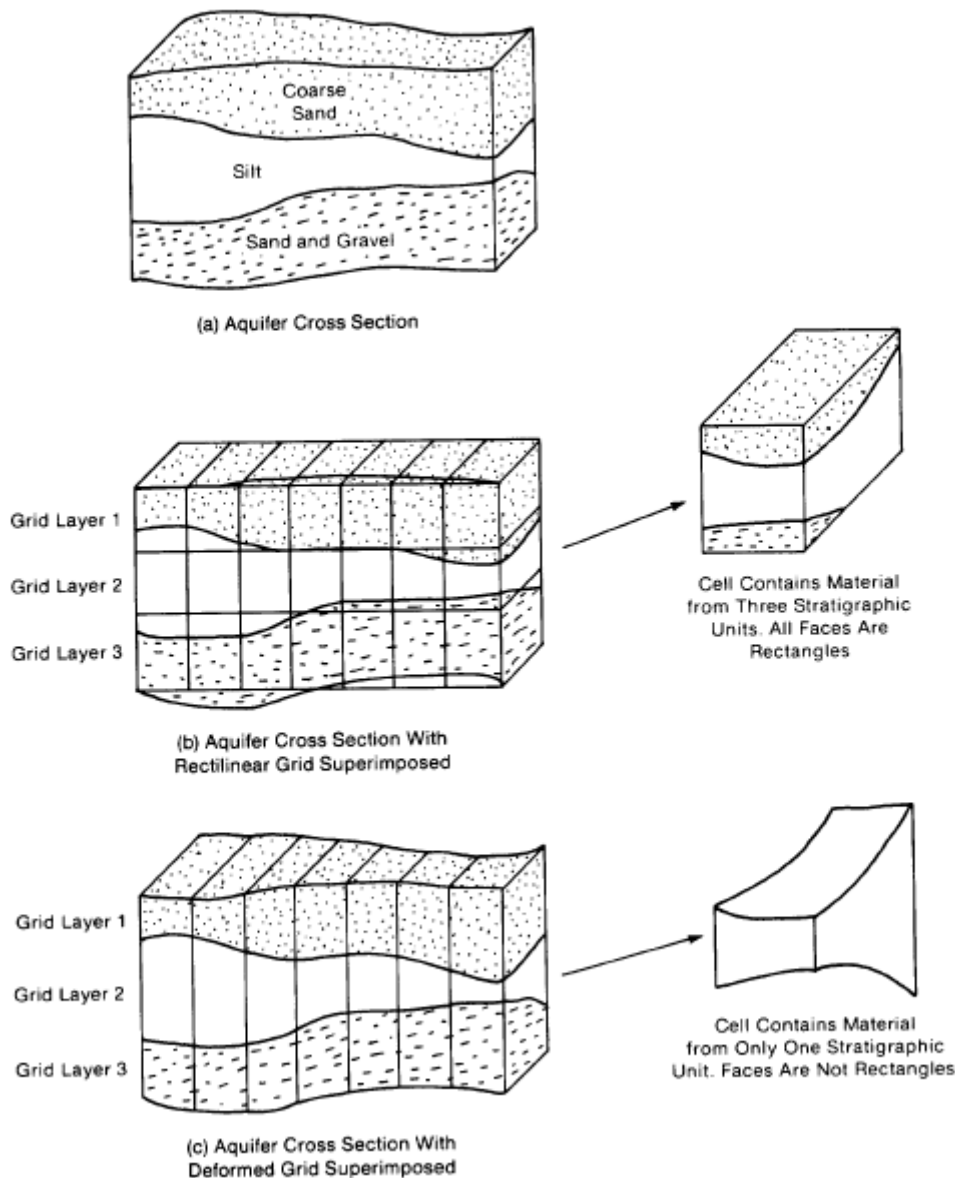
με την αρίθμηση όλων των γραμμών, στηλών και στρωμάτων να γίνεται κατά τον τρόπο που περιγράφεται στην Εικόνα 97, Ακολουθώντας τις συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν παραπάνω, το πλάτος των κελιών κατά την διεύθυνση της γραμμής (**row**), σε μία στήλη J , προσδιορίζεται ως Δr_j , το πλάτος των κελιών κατά την διεύθυνση της στήλης (**column**), σε μία γραμμή I , προσδιορίζεται ως Δc_i , και το πάχος των κελιών σε ένα στρώμα K , προσδιορίζεται ως Δv_k (**vertical**) με την παραδοχή ότι τα στρώματα αντιστοιχούν σε οριζόντιες υδρογεωλογικές μονάδες ή διαστήματα, γεγονός όμως που αντιστοιχεί σπάνια σε ένα φυσικό σύστημα.



Εικόνα 97 : Ένα διακεκριμενοποιημένο υποθετικό σύστημα υδροφόρου από (McDonald and Harbaugh, 1988)

Στην γενική περίπτωση, η διακριτοποίηση του χώρου κατά την κατακόρυφη διεύθυνση γίνεται από το μοντέλο με τον καθορισμό του αριθμού των στρωμάτων που θα χρησιμοποιηθούν βάσει της γεωλογίας της υπό μελέτης περιοχής καθώς και τις υδραυλικές παραμέτρους που περιέχουν ή ενσωματώνουν, το πάχος των στρωμάτων.

Από την μία πλευρά, η κατακόρυφη διακριτοποίηση μπορεί να θεωρηθεί σαν μία προέκταση της επιφανειακής διακριτοποίησης - μία λίγο πολύ αυθαίρετη διαδικασία διαίρεσης του συστήματος ροής σε τμήματα, βάσει της ακρίβειας που απαιτείται από τα αποτελέσματα, ενώ από την άλλη πλευρά, μπορεί να θεωρηθεί σαν μια προσπάθεια προσομοίωσης μεμονωμένων υδροφόρων ή υδροπερατών ζωνών από διαφορετικά στρώματα του μοντέλου.



Εικόνα 98 : Σχέδια κατακόρυφης διακριτοποίησης από (McDonald and Harbaugh, 1988)

Η Εικόνα 98-a, παρουσιάζει μια τυπική υδρογεωλογική ακολουθία που έχει διακεκριμενοποιηθεί βάσει δύο παραδοχών – την Εικόνα 98-b βάσει της πρώτης παραδοχής και την Εικόνα 98-c βάσει της δεύτερης. Η πρώτη παραδοχή μας οδηγεί σε μια άκαμπτη υπέρθεση ενός ορθογώνιου τρισδιάστατου πλέγματος στο υδρογεωλογικό σύστημα, στο οποίο αν και υπάρχει αντιστοιχία μεταξύ των υδρογεωλογικών στρωμάτων και των στρωμάτων του μοντέλου δεν προσαρμόζεται το πλέγμα στις στρωματογραφικές ασυμμετρίες. Κατά την δεύτερη παραδοχή, το πάχος του στρώματος του μοντέλου

μεταβάλλεται προκειμένου να προσομοιάσει το μεταβαλλόμενο πάχος των υδρογεωλογικών στρωμάτων και έχει βέβαια σαν αποτέλεσμα μια παραμορφωμένη μορφή του πλέγματος.

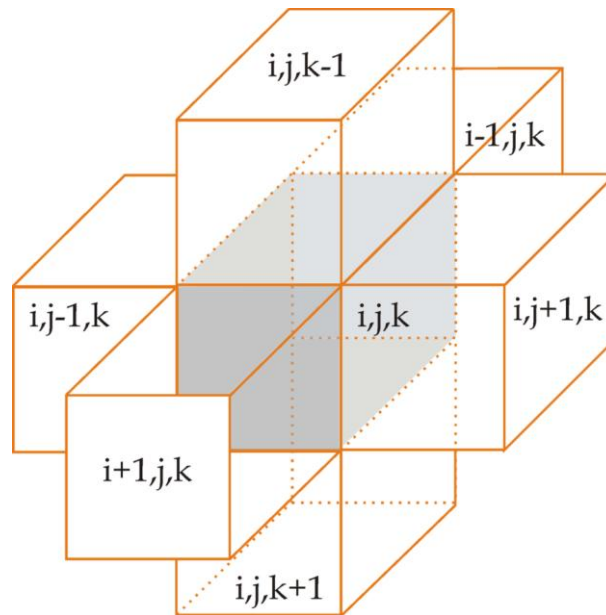
Κάθε μία από αυτές τις μεθόδους της κατακόρυφης διακριτοποίησης έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Οι εξισώσεις του μοντέλου προσομοίωσης ροής βασίζονται στην υπόθεση ότι οι υδραυλικές ιδιότητες είναι ομοιόμορφες μέσα στα μεμονωμένα κελιά ή τουλάχιστον ότι ένας σημαντικός αριθμός παραμέτρων μπορούν να προσδιοριστούν για κάθε κελί. Αυτές οι συνθήκες είναι πιο πιθανό να ικανοποιηθούν όταν τα στρώματα του μοντέλου ταυτίζονται με τα υδρογεωλογικά στρώματα όπως στην Εικόνα 98-ς. Από την άλλη πλευρά, *το παραμορφωμένο πλέγμα δεν μπορεί να ικανοποιήσει πολλές από τις υποθέσεις πάνω στις οποίες είναι βασισμένες οι εξισώσεις του μοντέλου όπως ότι τα μεμονωμένα κελιά δεν έχουν πλέον ορθογώνια μορφή αλλά και ότι οι κύριοι άξονες της υδραυλικής αγωγιμότητας μπορεί να μην ταυτίζονται με τους άξονες του μοντέλου.*

Στην πράξη, οι περισσότερες από τις επιλογές της κατακόρυφης διακριτοποίησης που πραγματοποιούνται βασίζονται σε ένα συνδυασμό των δύο παραπάνω περιπτώσεων όπου προσαρμόζεται ο αριθμός των στρωμάτων ανάλογα με την φύση του προβλήματος που καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε. Σε κάθε περίπτωση όμως εισάγεται πάντα κάποιο σφάλμα λόγω των αρχικών συνθηκών που λαμβάνουμε σαν υπόθεση.

Το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται σαν βάση του Visual Modflow και περιγράφεται εδώ, μπορεί να χρησιμοποιήσει διάφορες προσεγγίσεις σε σχέση με τις κατακόρυφες διακριτοποιήσεις καθώς το πάχος (b) των μεμονωμένων στρωμάτων δεν χρησιμοποιείται από το μοντέλο παρά μόνο μέσα από τις τιμές των υδραυλικών συντελεστών που καθορίζονται από τον χρήστη. Έτσι, προκειμένου για τον ορισμό των υδραυλικών παραμέτρων, στην ζώνη κορεσμού γίνεται χρήση των όρων της μεταβιβαστικότητας **T** (το γινόμενο της υδραυλικής αγωγιμότητας **K** και του πάχους του στρώματος **b**) και της αποθηκευτικότητας **S** (το γινόμενο της ειδικής αποθηκευτικότητας **S_e** και του πάχους του στρώματος **b**) ενώ στους ‘ελεύθερους’ υδροφόρους για τους υπολογισμούς απαιτούνται οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας και το επίπεδο αναφοράς (βάση) του υδροφόρου για κάθε κελί. Ως κορεσμένο πάχος του υδροφόρου υπολογίζεται η βάση του υδροφόρου μείον την στάθμη που μετρήθηκε ενώ ακολούθως η μεταβιβαστικότητα υπολογίζεται σαν το γινόμενο του κορεσμένου πάχους και της υδραυλικής αγωγιμότητας. Κατ’ αυτόν τον τρόπο, το πάχος του στρώματος μπορεί να μεταβάλλεται σε κάθε κελί ανάλογα με την βάση του υδροφόρου και την στάθμη.

Παρόλο που το ανάλογο της εξίσωσης ροής (Ε. 20) με πεπερασμένες διαφορές μπορεί να προκύψει εφαρμόζοντας τους κανόνες του διαφορικού λογισμού κάνοντας χρήση της αναπτύξεως των σειρών Taylor, εδώ θα εφαρμόσουμε μια εναλλακτική προσέγγιση που σκοπό έχει την απλοποίηση των μαθηματικών υπολογισμών και την επεξήγηση της υπολογιστικής μεθόδου σε σχέση με οικίες φυσικές έννοιες που διέπουν το σύστημα ροής,

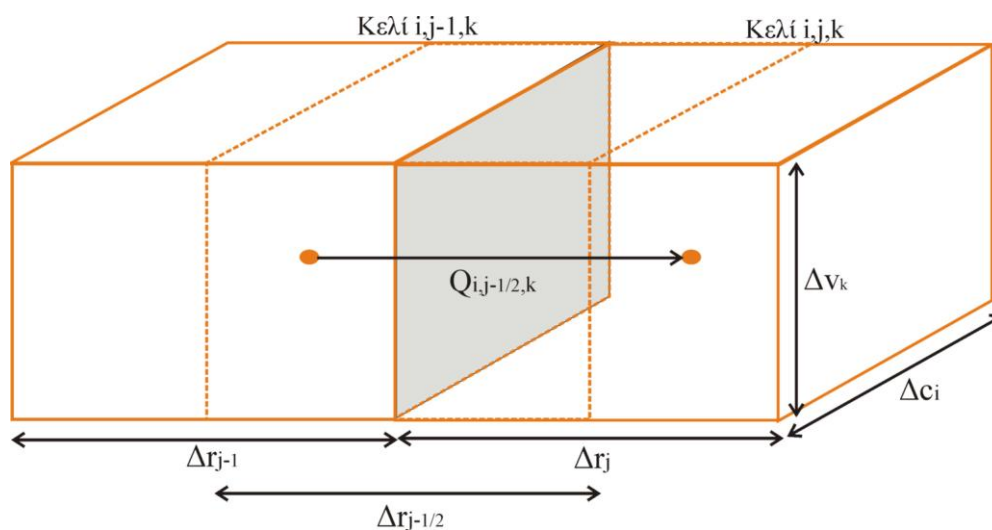
κάνοντας χρήση των εξισώσεων ροής σε ένα πεπερασμένο στοιχείο i,j,k όπως το περιγράψαμε και νωρίτερα, συναρτήσει και των γειτονικών του στοιχείων.



Εικόνα 99 : Το κελί i,j,k και τα γειτονικά αυτού (McDonald and Harbaugh, 1988)

Η Εικόνα 99 απεικονίζει έναν στοιχειώδη όγκο ελέγχου (κελί) i,j,k του υδροφόρου και τα έξι γειτονικά κελιά $(i-1,j,k)$, $(i+1,j,k)$, $(i,j-1,k)$, $(i,j+1,k)$, $(i,j,k-1)$, $(i,j,k+1)$ αυτού.

Προκειμένου να απλοποιήσουμε τις εξισώσεις που ακολουθούν, η ροή θεωρείται θετική κατά την είσοδό της στο κελί i,j,k και το μείον από την εξίσωση του Darcy έχει απαλειφθεί από όλους τους όρους κάνοντας αντιστροφή των όρων εντός της παρενθέσεως. Ο δείκτης $1/2$ που χρησιμοποιείται στα μοναδιαία διανύσματα i,j,k δεν αναφέρεται σε συγκεκριμένο σημείο αλλά χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει το μεσοδιάστημα μεταξύ των γειτονικών κόμβων.



Εικόνα 100 : Ροή από το κελί $i,j-1,k$ μέσα στο κελί i,j,k (McDonald and Harbaugh, 1988)

Ακολουθώντας τις παραπάνω συμβάσεις, η ροή μέσα στο κελί i,j,k κατά την διεύθυνση της γραμμής από το κελί $i,j-1,k$ (Εικόνα 100) δίδεται από τον νόμο του Darcy ως :

$$(E. 21) \quad Q_{i,j-\frac{1}{2},k} = Kr_{i,j-\frac{1}{2},k} \Delta c_i \Delta v_k \frac{(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j-\frac{1}{2}}} \quad 6$$

$Q_{i,j-\frac{1}{2},k}$ Είναι η ογκομετρική ροή διαμέσου της επιφάνειας μεταξύ των κελιών i,j,k και $i,j-1,k$ ($L^3 T^{-1}$)

$h_{i,j-1,k}$ και $h_{i,j,k}$ Είναι οι στάθμες στους αντίστοιχους κόμβους (L)

$Kr_{i,j-\frac{1}{2},k}$ Είναι η υδραυλική αγωγιμότητα κατά μήκος της γραμμής μεταξύ των κόμβων i,j,k και $i,j-1,k$ (LT^{-1})

$\Delta c_i \Delta v_k$ Είναι η επιφάνεια μεταξύ των κελιών i,j,k και $i,j-1,k$ (L^2)

$\Delta r_{j-\frac{1}{2}}$ Είναι η απόσταση μεταξύ των κόμβων i,j,k και $i,j-1,k$ (L)

Βάσει των παραπάνω, η εξίσωση (E. 21), μας δίνει την ροή σε μία διάσταση σε συνθήκες μόνιμης ροής - steady state (παραλείποντας τον όρο Πηγής), διαμέσου ενός στοιχείου του υδροφόρου που εκτείνεται από τον κόμβο $i,j-1,k$ έως τον κόμβο i,j,k με επιφάνεια $\Delta c_i \Delta v_k$. Παρόμοιες εκφράσεις μπορούν να γραφούν προσεγγίζοντας την ροή μέσα στο κελί i,j,k της Εικόνα 99, διαμέσου των υπόλοιπων πέντε επιφανειών :

η ροή μεταξύ των κόμβων $i,j+1,k$ και i,j,k κατά μήκος της γραμμής θα είναι:

$$(E. 22) \quad Q_{i,j+\frac{1}{2},k} = Kr_{i,j+\frac{1}{2},k} \Delta c_i \Delta v_k \frac{(h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j+\frac{1}{2}}}$$

η ροή μεταξύ των κόμβων $i+1,j,k$ και i,j,k κατά μήκος της στήλης θα είναι:

$$(E. 23) \quad Q_{i+\frac{1}{2},j,k} = Kc_{i+\frac{1}{2},j,k} \Delta r_j \Delta v_k \frac{(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k})}{\Delta c_{i+\frac{1}{2}}}$$

η ροή μεταξύ των κόμβων $i-1,j,k$ και i,j,k κατά μήκος της στήλης θα είναι:

$$(E. 24) \quad Q_{i-\frac{1}{2},j,k} = Kc_{i-\frac{1}{2},j,k} \Delta r_j \Delta v_k \frac{(h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k})}{\Delta c_{i-\frac{1}{2}}}$$

για την κατακόρυφη διεύθυνση η ροή μέσω της υποκείμενης επιφάνειας μεταξύ των κόμβων $i,j,k+1$ και i,j,k θα είναι:

⁶ Το c αναφέρεται στην στήλη (column), το v κατακόρυφα (vertical) και το r στην γραμμή (row) όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 97

$$(E. 25) \quad Q_{i,j,k+\frac{1}{2}} = K v_{i,j,k+\frac{1}{2}} \Delta r_j \Delta c_i \frac{(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k})}{\Delta v_{k+\frac{1}{2}}}$$

ενώ η ροή μεταξύ των κόμβων $i,j,k-1$ και i,j,k μέσω της υπερκείμενης επιφάνειας θα είναι:

$$(E. 26) \quad Q_{i,j,k-\frac{1}{2}} = K v_{i,j,k-\frac{1}{2}} \Delta r_j \Delta c_i \frac{(h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k})}{\Delta v_{k-\frac{1}{2}}}$$

Κάθε μία από τις παραπάνω εξισώσεις εκφράζει την ογκομετρική παροχή διαμέσου μίας επιφάνειας του κελιού i,j,k σε σχέση με τις στάθμες (h), τις διαστάσεις του πλέγματος (Δc , Δr , Δv) και την υδραυλική αγωγιμότητα (Kc , Kr , Kv).

Οι εξισώσεις μπορούν να απλοποιηθούν συνδυάζοντας τις διαστάσεις του πλέγματος και την υδραυλική αγωγιμότητα σε έναν απλό όρο που μπορεί να ονομαστεί Ειδική Αγωγιμότητα (Conductance) και ορίζεται ως

$$(E. 27) \quad Cr_{i,j-\frac{1}{2},k} = Kr_{i,j-\frac{1}{2},k} \frac{\Delta c_i \Delta v_k}{\Delta r_{j-\frac{1}{2}}}$$

$Cr_{i,j-\frac{1}{2},k}$ Είναι το γινόμενο της υδραυλικής αγωγιμότητας επί την επιφάνεια διαμέσου της οποίας γίνεται η ροή διαιρούμενη με το μήκος της γραμμής ροής (σε αυτή την περίπτωση, την απόσταση μεταξύ των κόμβων). Μονάδες σε ($L^2 T^{-1}$)

$Kr_{i,j-\frac{1}{2},k}$ Υδραυλική αγωγιμότητα (L/T) μεταξύ των κελιών i,j,k και $i,j-1,k$

$\Delta r_{j-\frac{1}{2}}$ Απόσταση μεταξύ των κόμβων των κελιών i,j,k και $i,j-1,k$ (L)

$\Delta c_i \Delta v_k$ Διαστάσεις της επιφάνειας μέσω της οποίας γίνεται η ροή (L^2)

Υποκαθιστώντας τις αντίστοιχες ειδικές αγωγιμότητες (Conductances) στις εξισώσεις (E. 22) έως (E. 26) προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις :

$$(E. 28) \quad Q_{i,j-\frac{1}{2},k} = Cr_{i,j-\frac{1}{2},k} (h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k})$$

$$(E. 29) \quad Q_{i+\frac{1}{2},j,k} = Cc_{i+\frac{1}{2},j,k} (h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k})$$

$$(E. 30) \quad Q_{i,j,k+\frac{1}{2}} = Cv_{i,j,k+\frac{1}{2}} (h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k})$$

$$(E. 31) \quad Q_{i,j+\frac{1}{2},k} = Cr_{i,j+\frac{1}{2},k} (h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k})$$

$$(E. 32) \quad Q_{i-\frac{1}{2},j,k} = Cc_{i-\frac{1}{2},j,k} (h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k})$$

$$(E. 33) \quad Q_{i,j,k-\frac{1}{2}} = Cv_{i,j,k-\frac{1}{2}} (h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k})$$

Οι εξισώσεις (E. 28) έως (E. 33) αντιστοιχούν στην ροή προς το κελί i,j,k από τα έξι γειτονικά του κελιά.

Προκειμένου να περιγραφεί η ροή στο στοιχειώδες κελί i,j,k από στοιχεία ή διαδικασίες εκτός του συστήματος του υδροφόρου όπως είναι τα ποτάμια, οι καταβόθρες, η βροχόπτωση, η εξατμισοδιαπνοή και τα πηγάδια (γεωτρήσεις), απαιτείται η εισαγωγή του όρου Πηγής στις εξισώσεις. Δεδομένου ότι αυτού του είδους η ροή, μπορεί να εξαρτάται από την στάθμη ($h_{i,j,k}$) του κελιού στο οποίο εισέρχεται αλλά μπορεί να είναι και τελείως ανεξάρτητη, οι McDonald and Harbaugh, αποδίδουν τον όρο Πηγής με την εξής γενική έκφραση :

$$(E. 34) \quad a_{i,j,k,n} = p_{i,j,k,n} h_{i,j,k} + w_{i,j,k,n}$$

$a_{i,j,k,n}$ Αντιπροσωπεύει την ροή από n -ιοστες εξωτερικές πηγές μέσα στο κελί i,j,k (L^3T^{-1})
 $p_{i,j,k,n}$ Όρος με μονάδες (L^2T^{-1}), εξαρτώμενος από την στάθμη του κελιού $h_{i,j,k}$ Ο όρος αυτός πολλαπλασιαζόμενος με το $h_{i,j,k}$ αντιπροσωπεύει την παροχή η οποία είναι εξαρτώμενη από την στάθμη του κελιού ενώ η $w_{i,j,k,n}$ είναι ανεξάρτητη
 $w_{i,j,k,n}$ Παροχή ανεξάρτητη από την στάθμη $h_{i,j,k}$, με μονάδες (L^3T^{-1})

Στην γενική περίπτωση που θεωρούμε ότι υπάρχουν N εξωτερικές πηγές ή τάσεις που να επηρεάζουν ένα μόνο κελί, το άθροισμα των Πηγών εκφράζεται ως :

$$(E. 35) \quad QS_{i,j,k} = \sum_{n=1}^N a_{i,j,k,n} = \sum_{n=1}^N p_{i,j,k,n} h_{i,j,k} + \sum_{n=1}^N w_{i,j,k,n}$$

προσδιορίζοντας το $P_{i,j,k,n}$ και το $W_{i,j,k,n}$ από τις εκφράσεις :

$$P_{i,j,k,n} = \sum_{n=1}^N p_{i,j,k,n} \quad \text{και} \quad W_{i,j,k,n} = \sum_{n=1}^N w_{i,j,k,n}$$

όπου ο γενικός όρος της εξωτερικής ροής (όρος Πηγής) για το κελί i,j,k θα είναι

$$(E. 36) \quad QS_{i,j,k,n} = P_{i,j,k,n} h_{i,j,k} + W_{i,j,k,n}$$

Εφαρμόζοντας την εξίσωση της συνέχειας (E. 19) στο κελί i,j,k λαμβάνοντας και υπόψιν την ροή από τα έξι γειτονικά κελιά όπως και τον όρο Πηγής (QS), έχουμε :

(Ε.37)

$$Q_{i,j-\frac{1}{2},k} + Q_{i,j+\frac{1}{2},k} + Q_{i-\frac{1}{2},j,k} + Q_{i+\frac{1}{2},j,k} + Q_{i,j,k-\frac{1}{2}} + Q_{i,j,k+\frac{1}{2}} + QS_{i,j,k} = Ss_{i,j,k} \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$$

$\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t}$ είναι η προσέγγιση της παραγώγου της στάθμης σε σχέση με τον χρόνο σε μορφή πεπερασμένων διαφορών

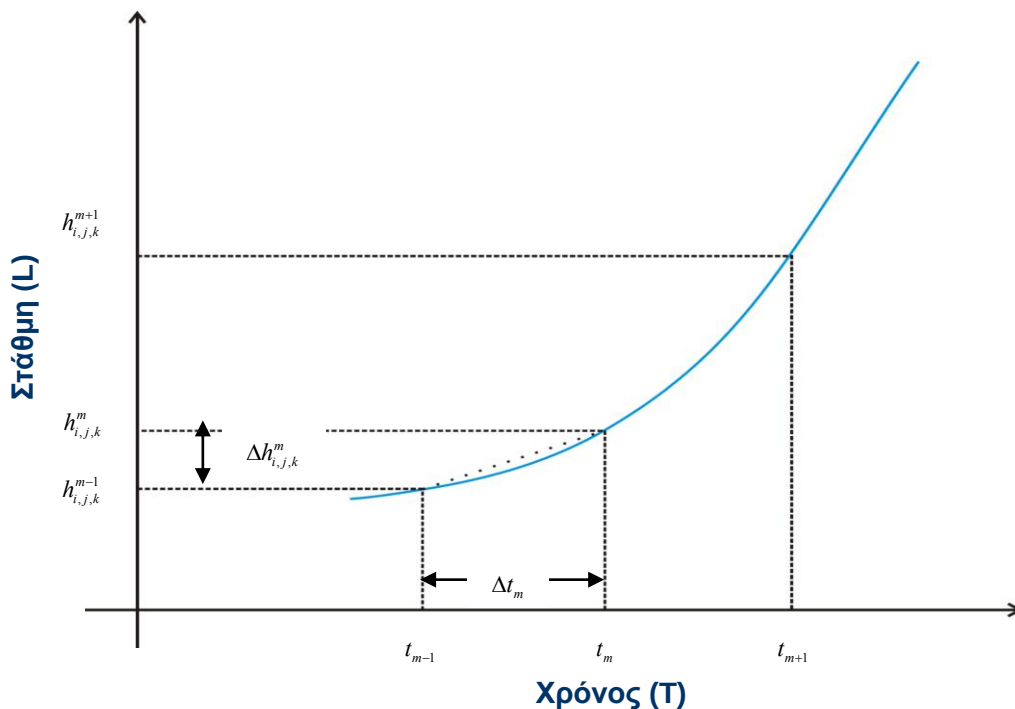
$Ss_{i,j,k}$ είναι η ειδική αποθηκευτικότητα στο κελί i,j,k (L-1)

$\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$ είναι ο όγκος του κελιού i,j,k (L3)

Οι εξισώσεις (Ε. 28) έως (Ε. 33) και (Ε. 36) μπορούν να αντικατασταθούν στην εξίσωση (Ε.37) ώστε να καταλήξουμε στην προσέγγιση με την χρήση πεπερασμένων διαφορών για το κελί i,j,k :

(Ε. 38)

$$Cr_{i,j-\frac{1}{2},k} (h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) + Cr_{i,j+\frac{1}{2},k} (h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) + Cc_{i+\frac{1}{2},j,k} (h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) + Cc_{i-\frac{1}{2},j,k} (h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) \\ + Cv_{i,j,k+\frac{1}{2}} (h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) + Cv_{i,j,k-\frac{1}{2}} (h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) + P_{i,j,k} h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} = Ss_{i,j,k} \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$$



t_m ο χρόνος στο τέλος του χρονικού βήματος m

$h_{i,j,k}^m$ Η στάθμη στο κόμβο i,j,k στο χρόνο t_m

..... Προσέγγιση της οπισθοδρομικής διαφοράς στην κλίση του υδρογραφήματος στον χρόνο t_m .

Εικόνα 101 : Υδρογράφημα του κελιού i,j,k (McDonald and Harbaugh, 1988)

Η προσέγγιση των πεπερασμένων διαφορών για την παράγωγο της στάθμης σε σχέση με τον χρόνο $\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t}$ πρέπει να εκφραστεί με βάσει ορισμένους χρόνους και ύψος στάθμης. Η

Εικόνα 101 παρουσιάζει το υδρογράφημα της στάθμης σε σχέση με τον χρόνο, στον κόμβο i,j,k. Στον οριζόντιο άξονα t_m είναι ο χρόνος κατά τον οποίο διερευνάται ο όρος της ροής στην εξίσωση (Ε.37) ενώ t_{m-1} είναι ο χρόνος που προηγείται και t_{m+1} είναι ο χρόνος που έπεται. Οι τιμές στάθμης στον κόμβο i,j,k που σχετίζονται με τα παραπάνω χρονικά διαστήματα ορίζονται με το αντίστοιχο επίγραμμα σαν $h_{i,j,k}^m$ και $h_{i,j,k}^{m-1}$. Τα επιγράμματα m-1, m και m+1 αναφέρονται σε χρονικές στιγμές χωρίς όμως να έχουν την θέση εκθέτη στις εξισώσεις που ακολουθούν.

Μία προσέγγιση της χρονικής παραγώγου της στάθμης προκύπτει από το πηλίκο της διαφοράς στάθμης $h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}$ με το χρονικό διάστημα $t_m - t_{m-1}$, για ένα χρονικό βήμα (time step) m :

$$\left(\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \right)^m = \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}}$$

Κατά αυτόν τον τρόπο, η κλίση του υδρογραφήματος ή η παράγωγος του σε σχέση με το χρόνο, προσεγγίζεται χρησιμοποιώντας την μεταβολή της στάθμης στον κόμβο για το χρονικό διάστημα που προηγείται και τελειώνει κατά την χρονική στιγμή που υπολογίζεται η ροή. Αυτό ονομάζεται οπισθοδρομική διαφορά (backward difference) όπου το $\frac{\Delta h}{\Delta t}$ υπολογίζεται για ένα χρονικό διάστημα που εκτείνεται πίσω στο χρόνο από το χρονικό σημείο t_m όπου υπολογίζεται η ροή.

Υπάρχουν δύο ακόμα τρόποι προσέγγισης του λόγου $\frac{\Delta h}{\Delta t}$. Η προσέγγιση για ένα χρονικό διάστημα που ξεκινά την χρονική στιγμή υπολογισμού της ροής t_m και εκτείνεται σε μεταγενέστερο χρονικό διάστημα t_{m+1} , η προωθημένη διαφορά (forward difference) ή για ένα χρονικό διάστημα που έχει σαν κέντρο την χρονική στιγμή t_m και εκτείνεται πίσω t_{m-1} και εμπρός από αυτό t_{m+1} , η κεντρική διαφορά (central difference).

Σύμφωνα με τους (McDonald and Harbaugh, 1988) οι τελευταίες δύο εναλλακτικές λύσεις μπορεί να οδηγήσουν το μοντέλο σε αριθμητική αστάθεια, δηλαδή αύξηση ή πολλαπλασιασμό του αριθμητικού σφάλματος κατά τον υπολογισμό της στάθμης σε διάφορα χρονικά διαστήματα της προσομοίωσης καθώς υπεισέρχεται ο παράγοντας της στάθμης στην χρονική στιγμή t_{m+1} η οποία είναι άγνωστη, ενώ η στάθμη στην χρονική στιγμή t_{m-1} είναι γνωστή από τα προηγούμενα βήματα ή αρχικά, από τις αρχικές συνθήκες (initial conditions) που θέτει ο χρήστης. Σε μία ασταθή κατάσταση, αριθμητικά σφάλματα τα οποία υπεισέρχονται στον υπολογισμό για τον οποιοδήποτε λόγο σε μια συγκεκριμένη χρονική

στιγμή αυξάνονται σε όλες τις επόμενες χρονικές στιγμές με αποτέλεσμα τελικά το αριθμητικό σφάλμα να κυριαρχεί στο αποτέλεσμα.

Αντιθέτως, η προσέγγιση με την χρήση της οπισθοδρομικής διαφοράς είναι πάντα αριθμητικά σταθερή γιατί τα αριθμητικά σφάλματα που υπεισέρχονται στον υπολογισμό μειώνονται προοδευτικά σε επόμενα χρονικά διαστήματα καθώς υπάρχει συνεχής βελτίωση της αρχικής προσέγγισης μέσω των υπολογισμών που πραγματοποιούνται στα επόμενα χρονικά βήματα (McDonald and Harbaugh, 1988). Για αυτόν τον λόγο η προσέγγιση της προς τα πίσω διαφοράς προτιμάται αν και οδηγεί σε μεγάλα συστήματα εξισώσεων που πρέπει να επιλυθούν συγχρόνως για κάθε χρονική στιγμή στην οποία υπολογίζεται η στάθμη.

Η εξίσωση (Ε. 38) μπορεί να γραφεί με την μορφή της οπισθοδρομικής διαφοράς προσδιορίζοντας τους όρους ροής στο t_m , το τέλος του χρονικού διαστήματος και προσεγγίζοντας την χρονική παράγωγο της στάθμης για το χρονικό διάστημα t_{m-1} έως t_m .

Έτσι :

$$(E. 39) \quad Cr_{i,j-\frac{1}{2},k} (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + Cr_{i,j+\frac{1}{2},k} (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + Cc_{i+\frac{1}{2},j,k} (h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + Cc_{i-\frac{1}{2},j,k} (h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) \\ + Cv_{i,j,k+\frac{1}{2}} (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) + Cv_{i,j,k-\frac{1}{2}} (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + P_{i,j,k} h_{i,j,k}^m + W_{i,j,k} = Ss_{i,j,k} \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$$

Η εξίσωση (Ε. 39) είναι μία εξίσωση οπισθοδρομικής διαφοράς (backward difference) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν βάση για την προσομοίωση της μερικής διαφορικής εξίσωσης (Ε. 1) της ροής του νερού.

Όπως ο όρος $W_{i,j,k}$, έτσι και οι συντελεστές των διαφόρων όρων που εκφράζουν την στάθμη στην εξίσωση (Ε. 39) είναι όλοι γνωστοί, όπως γνωστή είναι και η στάθμη στην αρχή του χρονικού βήματος $h_{i,j,k}^{m-1}$. Αντιθέτως όμως, οι επτά στάθμες που χαρακτηρίζουν την ροή από τα γειτονικά κελιά $h_{i,j-1,k}^m$, $h_{i,j+1,k}^m$, $h_{i-1,j,k}^m$, $h_{i+1,j,k}^m$, $h_{i,j,k-1}^m$, $h_{i,j,k+1}^m$, $h_{i,j,k}^m$ στον χρόνο t_m που είναι το τέλος του χρονικού βήματος, είναι όλες άγνωστες καθώς είναι μέρος της κατανομής στάθμης που πρέπει να επιλυθεί. Έτσι, η εξίσωση (Ε. 39) δεν μπορεί να επιλυθεί ανεξάρτητα καθώς είναι μία εξίσωση με επτά αγνώστους. Εν τούτοις, μια εξίσωση τέτοιας μορφής μπορεί να γραφεί για κάθε ενεργό κελί του πλέγματος και δεδομένου ότι υπάρχει μία άγνωστη στάθμη για κάθε κελί, καταλήγουμε σε ένα σύστημα με n-εξισώσεις και n-αγνώστους. Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να επιλυθεί συγχρόνως.

Σκοπός της 'μεταβατικής προσομοίωσης' (transient simulation) είναι γενικά η πρόβλεψη της κατανομής στάθμης σε διαδοχικούς χρόνους εφόσον έχουμε σαν δεδομένα την αρχική κατανομή της στάθμης (initial conditions), τις οριακές συνθήκες (boundary conditions), τις υδραυλικές παραμέτρους και όλες τις εξωτερικές τάσεις. Η αρχική κατανομή της στάθμης μας

παρέχει μία τιμή $h_{i,j,k}^1$ σε κάθε σημείο στο πλέγμα, δηλαδή, μας παρέχει τις τιμές της στάθμης στην αρχή του πρώτου από τα διακριτά χρονικά βήματα στα οποία χωρίζεται ο άξονας του χρόνου στην διαδικασία των πεπερασμένων διαφορών.

Το πρώτο βήμα στην διαδικασία επίλυσης είναι ο υπολογισμός των τιμών $h_{i,j,k}^2$, δηλαδή τις στάθμες στο χρόνο t_2 που σημειώνει το τέλος του πρώτου χρονικού βήματος. Κατά συνέπεια, στην εξίσωση (Ε.39) το επιγράμμα της στάθμης, $m=2$ και $m-1=1$. Έτσι :

$$\begin{aligned} & Cr_{i,j-\frac{1}{2},k} (h_{i,j-1,k}^2 - h_{i,j,k}^2) + Cr_{i,j+\frac{1}{2},k} (h_{i,j+1,k}^2 - h_{i,j,k}^2) + Cc_{i+\frac{1}{2},j,k} (h_{i+1,j,k}^2 - h_{i,j,k}^2) + Cc_{i-\frac{1}{2},j,k} (h_{i-1,j,k}^2 - h_{i,j,k}^2) \\ & + Cn_{i,j,k+\frac{1}{2}} (h_{i,j,k+1}^2 - h_{i,j,k}^2) + Cn_{i,j,k-\frac{1}{2}} (h_{i,j,k-1}^2 - h_{i,j,k}^2) + P_{i,j,k} h_{i,j,k} + W_{i,j,k} = Ss_{i,j,k} \frac{h_{i,j,k}^2 - h_{i,j,k}^1}{t_2 - t_1} \Delta r_j \Delta c_i \Delta n_k \end{aligned} \quad 7$$

Μία εξίσωση αυτής της μορφής γράφεται για κάθε κελί του πλέγματος στο οποίο η στάθμη είναι ελεύθερη να κυμαίνεται με τον χρόνο και το σύστημα επιλύεται συγχρόνως για όλες τις στάθμες στο χρόνο t_2 . Όταν επιτευχθεί αυτός ο υπολογισμός και αποκτηθούν οι τιμές, η διαδικασία επαναλαμβάνεται για να πάρουμε τις τιμές της στάθμης στον χρόνο t_3 , το τέλος του δεύτερου χρονικού βήματος. Έτσι στην Εξίσωση (Ε.39) $m=3$ και $m-1=2$ αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όσα χρονικά βήματα απαιτούνται ώστε να καλύψουμε το χρονικό εύρος που μας ενδιαφέρει.

Είναι πολύ σημαντικό να σημειώσουμε ότι το σύστημα των εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών επαναπροσδιορίζεται σε κάθε χρονικό βήμα καθώς σε κάθε χρονικό βήμα είναι και ένα νέο σύστημα εξισώσεων που πρέπει να επιλυθεί. Οι στάθμες στο τέλος του κάθε χρονικού βήματος είναι οι άγνωστοι για τους οποίους επιλύεται το κάθε σύστημα ενώ οι στάθμες στην αρχή του χρονικού βήματος είναι οι γνωστοί παράγοντες. Έτσι, η διαδικασία επίλυσης επαναλαμβάνεται για κάθε χρονικό βήμα αποδίδοντας μία νέα σειρά από στάθμες για το τέλος του κάθε χρονικού βήματος.

Π1.2 Οριακές Συνθήκες (Boundary Conditions)

Οι οριακές συνθήκες είναι μαθηματικές εκφράσεις που καθορίζουν την εξαρτώμενη μεταβλητή (στάθμη) ή την παράγωγό της (ροή) στα όρια της περιοχής έρευνας (Anderson and Woessner, 1992).

Το MODFLOW χρησιμοποιεί τις οριακές συνθήκες προκειμένου να εκφραστούν με μαθηματικούς όρους τα φυσικά και υδραυλικά όρια μέσα σε ένα υπόγειο σύστημα ροής. Τα φυσικά όρια σχηματίζονται λόγω της φυσικής παρουσίας ενός αδιαπέρατου ορίου όπως είναι

⁷ Τα επιγράμματα 1 και 2 αναφέρονται σε χρονικές στιγμές χωρίς να έχουν την θέση εκθέτη στην παραπάνω εξίσωση.

ένας αδιαπέρατος σχηματισμός ή ένα μεγάλο επιφανειακό σώμα νερού. Τα υδραυλικά όρια είναι νοητά όρια όπως οι γραμμές ροής και τα υπόγεια όρια ροής (groundwater divides) που εξαρτώνται από τις υδρολογικές συνθήκες και μεταβάλλονται με αυτές. Τα υδραυλικά όρια εκφράζονται με τις τρεις παρακάτω μαθηματικές συνθήκες :

Πρώτου είδους συνθήκη (*Dirichlet Condition - Specified Head*) : Η υδραυλική στάθμη είναι γνωστή και σταθερή στα όρια της περιοχής

Δευτέρου είδους συνθήκη (*Neumann Condition - Specified Flux*) : Η ροή (flux) $\frac{dh}{dx}$ είναι

καθορισμένη κατά μήκος ενός ορίου δηλαδή είναι καθορισμένη η πρώτη παράγωγος της υδραυλικής στάθμης. Η συνθήκη της μη ροής (no-flow boundary) στο MODFLOW εκφράζεται

και θέτοντας την ροή ίση με το μηδέν $\left(\frac{dh}{dx} = 0\right)$ προσδιορίζοντας τα κελιά αυτά ως 'αδρανή' (inactive cells).

Τρίτου είδους συνθήκη (*Cauchy Condition - Mixed Boundary Condition*) : Εάν η ροή κατά μήκος ενός ορίου διαμορφώνεται βάσει της εκάστοτε οριακής στάθμης αναφέρεται σαν *Cauchy boundary condition* or *mixed boundary condition (head dependent flow boundary)*.

Κατ' αναλογία με τις παραπάνω οριακές συνθήκες εκφράζονται και οι οριακές συνθήκες στην προσομοίωση μεταφοράς μάζας (όπως αναλύεται παρακάτω) δεδομένου ότι κάθε προσομοίωση απαιτεί τον προσδιορισμό των κατάλληλων οριακών συνθηκών προκειμένου να καθοριστεί η σχέση του εξεταζόμενου συστήματος σε σχέση με το περιβάλλον του.

Στην περίπτωση της προσομοίωσης της υπόγειας ροής οι οριακές συνθήκες περιγράφουν την ροή μεταξύ του μοντέλου και του εξωτερικού συστήματος ενώ στην περίπτωση μεταφοράς μάζας, περιγράφουν την κίνηση διαλελυμένης ουσίας μεταξύ του μοντέλου και του εξωτερικού συστήματος.

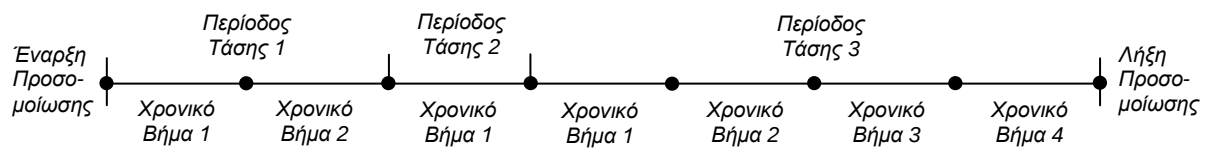
Π1.3 Αρχικές Συνθήκες (Initial Conditions)

Δεδομένου ότι η εξίσωση πεπερασμένων διαφορών επιλύεται από το MODFLOW με την χρήση της *οπισθοδρομικής διαφοράς* (backward difference), η κατανομή της στάθμης στην αρχή του κάθε χρονικού βήματος απαιτείται να είναι γνωστή προκειμένου να υπολογιστεί η κατανομή της στάθμης στο τέλος του κάθε χρονικού βήματος. Έτσι για το πρώτο χρονικό βήμα, οι αρχικές συνθήκες κατανομής στάθμης καθορίζονται από τον χρήστη. Για τα επόμενα βήματα η αρχική κατανομή της στάθμης είναι ίση με αυτή στο τέλος του προηγούμενου χρονικού βήματος.

Π1.4 Χρονικά Βήματα (Time steps)

Η επιλογή του χρονικού βήματος (time step), είναι διαθέσιμη μόνο στην περίπτωση που γίνεται προσομοίωση μεταβατικής ροής (Transient model).

Για τις προσομοιώσεις μεταβατικής ροής, το Visual MODFLOW συγχωνεύει όλες τις διαφορετικές χρονικές περιόδους που προσδιορίζονται από τις γεωτρήσεις και τις οριακές συνθήκες σε μία ομοιογενή περίοδο τάσης (stress period) όπως απαιτείται από το MODFLOW.



Εικόνα 102 : Διαίρεση του χρόνου προσομοίωσης σε περιόδους τάσης και χρονικά βήματα για το MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988)

Ως περίοδος τάσης (stress period) ορίζεται η χρονική περίοδος κατά την οποία όλες οι τάσεις (οριακές συνθήκες, ρυθμοί άντλησης, κα) στο σύστημα είναι σταθερές. Δυστυχώς τα δεδομένα πεδίου δεν είναι σχεδόν ποτέ σύγχρονα με αποτέλεσμα το Visual MODFLOW να συγχωνεύει όλα τα χρονικά διαγράμματα για να προκύψει το μήκος της κάθε χρονική περιόδου της μεταβατικής προσομοίωσης. Σαν αποτέλεσμα, ο χρήστης δεν μπορεί να μεταβάλει απ' ευθείας τον αριθμό των περιόδων αλλά ούτε και το μήκος τους. Μπορεί όμως να μεταβάλει τον αριθμό των χρονικών βημάτων (time steps) από τα οποία αποτελείται η περίοδος και τον ρυθμό (multiplier) με τον οποίο προσαυξάνονται. Τιμές του multiplier μεγαλύτερες της μονάδας αυξάνουν τα χρονικά βήματα μέσα σε μία περίοδο με αποτέλεσμα την καλύτερη απόδοση της μεταβολής της στάθμης σε σχέση με τον χρόνο.

Π1.5 Επαναληπτικές Μέθοδοι Επίλυσης (Iteration)

Προκειμένου να επιτευχθεί λύση στο σύστημα των εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών που προκύπτει για κάθε χρονικό βήμα, δεδομένου του μεγάλου συνήθως μεγέθους του συστήματος, το MODFLOW χρησιμοποιεί τις επαναληπτικές μεθόδους επίλυσης.

Σε αυτές τις μεθόδους, ο υπολογισμός της στάθμης στο τέλος του κάθε χρονικού βήματος αρχίζει ορίζοντας αυθαίρετα μία δοκιμαστική τιμή ή εκτίμηση για την τιμή της στάθμης του κάθε κόμβου στο τέλος αυτού του χρονικού βήματος (McDonald and Harbaugh, 1988). Έτσι αρχίζει μία διαδικασία υπολογισμού που μεταβάλλει αυτές τις εκτιμώμενες τιμές, δημιουργώντας ένα νέο σύνολο τιμών στάθμης που είναι περισσότερο σε συμφωνία με το σύστημα των εξισώσεων. Αυτές οι νέες ή μεταβατικές τιμές στάθμης παίρνουν την θέση των

αρχικώς θεωρούμενων τιμών και η διαδικασία του υπολογισμού επαναλαμβάνεται δημιουργώντας ένα τρίτο σύνολο τιμών στάθμης.

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται διαδοχικά σε κάθε στάδιο δημιουργώντας και ένα νέο σύνολο μεταβατικών τιμών στάθμης που ικανοποιεί περισσότερο το σύστημα των εξισώσεων. Κάθε επανάληψη του υπολογισμού καλείται 'επανάληψη' (iteration). Τελικά καθώς οι μεταβατικές τιμές στάθμης πλησιάζουν περισσότερο στις τιμές που ικανοποιούν καλύτερα το σύστημα των εξισώσεων, οι διαφορές των αποτελεσμάτων στάθμης μεταξύ των διαδοχικών σταδίων υπολογισμού γίνονται πάρα πολύ μικρές.

Έτσι, κατά τον υπολογισμό για κάθε χρονικό βήμα, δημιουργούνται διαδοχικές σειρές μεταβατικών τιμών στάθμης όπου κάθε σειρά εμπεριέχει μία μεταβατική τιμή στάθμης για κάθε ενεργό κόμβο του πλέγματος.

Ιδεατά θα θέλαμε να καθορίσουμε το τέλος των επαναλήψεων κοντά στην ακριβή λύση αλλά καθώς αυτή είναι άγνωστη πρέπει να χρησιμοποιηθεί μία έμμεση μέθοδος για τον καθορισμό του τέλους των επαναλήψεων. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρέως είναι ο καθορισμός ότι οι διαφορές (residuals) που υπολογίζονται στις στάθμες από την μία επανάληψη έως την επόμενη πρέπει να είναι μικρότερες από μια ορισμένη ποσότητα που ονομάζεται '*κριτήριο σύγκλισης*' (*convergence criterion*) και ορίζεται από τον χρήστη του μοντέλου (McDonald and Harbaugh, 1988)

Μετά από κάθε επανάληψη, οι απόλυτες τιμές της υπολογιζόμενης μεταβολής στάθμης εξετάζονται για όλους τους κόμβους του πλέγματος. Η μεγαλύτερη από αυτές τις μεταβολές συγκρίνεται με το κριτήριο σύγκλισης και εάν το υπερβαίνει, οι επαναλήψεις συνεχίζονται ενώ εάν είναι μικρότερη, οι επαναλήψεις σταματούν και η διαδικασία των επαναλήψεων σταματά για αυτό το χρονικό βήμα.

Σε κανονικές συνθήκες αυτή η διαδικασία του κριτηρίου σύγκλισης κρίνεται επαρκής για τον τερματισμό των επαναλήψεων αλλά πρέπει να σημειωθεί και ότι το κριτήριο σύγκλισης αναφέρεται στην μεταβολή της υπολογιζόμενης στάθμης χωρίς όμως αυτές οι τιμές να υπολογίζονται και κατ' ανάγκη στην ίδια ακρίβεια που αναφέρεται και το κριτήριο.

Σαν εμπειρικός κανόνας εφαρμόζεται το εξής : είναι καλό να χρησιμοποιούμε μία τιμή για κριτήριο σύγκλισης που να είναι μία τάξη μεγέθους μικρότερη από το βαθμό ακρίβειας που θέλουμε από τα αποτελέσματά μας (McDonald and Harbaugh, 1988)

Οι αλγόριθμοι επίλυσης του MODFLOW εκτός από το κριτήριο σύγκλισης, χρησιμοποιούν και ένα μέγιστο επιτρεπτό αριθμό επαναλήψεων για κάθε χρονικό βήμα. Εάν η σύγκλιση δεν επιτευχθεί μέσα σε αυτό τον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων, η επαναληπτική διαδικασία τερματίζεται και το αντίστοιχο μήνυμα τυπώνεται στα αποτελέσματα.

Η επαναληπτική αυτή διαδικασία αποδίδει μόνο μία προσέγγιση της λύσης του συστήματος των εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών για κάθε χρονικό βήμα. Η ακρίβεια αυτής της προσέγγισης εξαρτάται από διαφόρους παράγοντες που αφορούν τους αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται για την επίλυση των συστημάτων εξισώσεων, συμπεριλαμβανομένου και του κριτηρίου σύγκλισης (convergence) που χρησιμοποιήθηκε. Εν τούτοις είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί ότι ακόμα και αν είχαμε την δυνατότητα να πετύχουμε τις ακριβείς λύσεις των εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών σε κάθε χρονικό βήμα, θα ήταν και πάλι μόνο μια προσέγγιση της λύσης της διαφορικής εξίσωσης ροής (Ε. 1) δεδομένης της ασάφειας που υφίσταται στον προσδιορισμό όλων των υδρογεωλογικών παραμέτρων στο πεδίο.

Η διαφορά μεταξύ της στάθμης $h_{i,j,k}^m$ που προκύπτει από την επίλυση του συστήματος εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών μέσω των επαναληπτικών μεθόδων επίλυσης για δεδομένο κόμβο και χρόνο, και της στάθμης $h(x_i, y_j, z_k, t_m)$ που θα προέκυπτε από την αναλυτική επίλυση της διαφορικής εξίσωσης για το αντίστοιχο σημείο και χρόνο, ορίζεται σαν σφάλμα αποκοπής (truncation error) (McDonald and Harbaugh, 1988). Αυτό το σφάλμα τείνει γενικά να γίνεται μεγαλύτερο καθώς αυξάνονται οι αποστάσεις του πλέγματος και μεγαλώνει το χρονικό βήμα.

Το Visual MODFLOW v4.2 παρέχει πέντε διαφορετικές δυνατότητες για την επαναληπτική επίλυση του συστήματος των εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών και είναι δομημένο κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι εναλλακτικές διατάξεις επίλυσης (modules) να εναλλάσσονται χωρίς να διαταράσσεται η δομή του ίδιου του προγράμματος. Όποια και διάταξη επίλυσης (module) να επιλέγεται είναι βολικό να αναδιατάσσεται η εξίσωση (Ε. 39) ώστε όλοι οι όροι που περιέχουν τις άγνωστες στάθμες, στο τέλος του εκάστοτε χρονικού βήματος να ομαδοποιούνται στο αριστερό μέρος της εξίσωσης και όλοι οι υπόλοιποι όροι στο δεξιό. Η εξίσωση που προκύπτει σαν αποτέλεσμα είναι :

$$Cv_{i,j,k-\frac{1}{2}}h_{i,j,k-\frac{1}{2}}^m + Cv_{i,j,k+\frac{1}{2}}h_{i,j,k+\frac{1}{2}}^m + Cc_{i-\frac{1}{2},j,k}h_{i-\frac{1}{2},j,k}^m + Cc_{i+\frac{1}{2},j,k}h_{i+\frac{1}{2},j,k}^m + Cr_{i,j-\frac{1}{2},k}h_{i,j-\frac{1}{2},k}^m + Cr_{i,j+\frac{1}{2},k}h_{i,j+\frac{1}{2},k}^m +$$

$$+ \left(-Cr_{i,j-\frac{1}{2},k} - Cr_{i,j+\frac{1}{2},k} - Cc_{i+\frac{1}{2},j,k} - Cc_{i-\frac{1}{2},j,k} - Cv_{i,j,k+\frac{1}{2}} - Cv_{i,j,k-\frac{1}{2}} - F_{i,j,k} \right) h_{i,j,k}^m = E_{i,j,k}$$

(Ε. 40) όπου :

$$B_{i,j,k} = Ss_{i,j,k} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k \quad (L^2)$$

$$F_{i,j,k} = P_{i,j,k} - \frac{B_{i,j,k}}{t_m - t_{m-1}} \quad (L^2 T^{-1}) \quad \text{και}$$

$$E_{i,j,k} = -W_{i,j,k} - \frac{B_{i,j,k}}{t_m - t_{m-1}} h_{i,j,k}^{m-1} \quad (L^3 T^{-1})$$

Ολόκληρο το σύστημα των αλγεβρικών εξισώσεων της μορφής (Ε. 40) που περιλαμβάνει μία εξίσωση για κάθε μία μεταβαλλόμενη στάθμη σε κάθε κελί του πλέγματος, μπορεί να γραφεί με την μορφή πίνακα : $[A]\{h\} = \{q\}$ όπου

- $[A]$ είναι ο πίνακας με τους συντελεστές της στάθμης στην αριστερή πλευρά της εξίσωσης για όλους τους ενεργούς κόμβους του δικτύου,
- $\{h\}$ είναι το διάνυσμα με τις τιμές τις στάθμης στο τέλος του χρονικού βήματος m για όλους του κόμβους του πλέγματος και
- $\{q\}$ είναι ένα διάνυσμα με τους σταθερούς όρους (E) για όλους τους κόμβους του πλέγματος.

Το MODFLOW δημιουργεί τους όρους $\{q\}$ και $[A]$ με τον συνδυασμό σειρών από υπορουτίνες (modules). Κατ' αυτόν τον τρόπο, το διάνυσμα $\{q\}$ αλλά και οι όροι που συνθέτουν το $[A]$ μεταφέρονται σε υπορουτίνες που επιλύουν τις εξισώσεις για τον διανυσματικό τελεστή $\{h\}$ (McDonald and Harbaugh, 1988)

Οι διατάξεις επίλυσης που αναφέρθηκαν νωρίτερα είναι κατ' ουσία αριθμητικοί κώδικες (αλγόριθμοι) οι οποίοι χρησιμοποιούν διαφορετικές μαθηματικές προσεγγίσεις για την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών.

Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται από το Visual Modflow ver 4.2 είναι :

- Preconditioned Conjugate - Gradient Package (PCG2)
- Strongly Implicit Procedure Package (SIP)
- Slice - Successive Overrelaxation Package (SOR)
- WHS Solver for Visual MODFLOW (WHS)
- Link-Algebraic Multigrid Solver Package (LMG)

Π1.5.1 Preconditioned Conjugate - Gradient Package (PCG2)

Το πρόγραμμα PCG2 χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο '*Preconditioned Conjugate Gradient*' προκειμένου να επιλύσει το σύστημα των αλγεβρικών εξισώσεων που παράγονται από το μοντέλο, με δυνατότητα να προσομοιωθούν γραμμικές και μη, συνθήκες ροής (Steady and Transient State Conditions).

Επεξήγηση των παραμέτρων επίλυσης : Το πρόγραμμα επίλυσης PCG2, λειτουργεί σε δύο βαθμίδες (εσωτερικές και εξωτερικές επαναλήψεις) προκειμένου να προσεγγίσει την λύση για κάθε χρονικό βήμα. Οι εξωτερικές επαναλήψεις (*outer iterations*) χρησιμοποιούνται για να μεταβάλλουν τον προκαθορισμένο (preconditioned) πίνακα παραμέτρων σε μια προσέγγιση της λύσης. Στις εξωτερικές επαναλήψεις μεταβάλλονται οι υδρογεωλογικοί παράμετροι (μεταβιβαστικότητα, κορεσμένο πάχος, αποθηκευτικότητα) ενώ οι εσωτερικές επαναλήψεις (*inner iterations*) χρησιμοποιούνται απλώς για την επίλυση των πινάκων που δημιουργεί η

κάθε μία εξωτερική επανάληψη. Ένας επαρκής αριθμός εξωτερικών επαναλήψεων είναι το 25, ενώ για τις εσωτερικές επαναλήψεις επαρκής αριθμός θεωρείται το 10.

Μετά από κάθε εξωτερική επανάληψη το πρόγραμμα επίλυσης ελέγχει την μέγιστη μεταβολή της λύσης (στάθμης) σε κάθε κελί. Εάν η μέγιστη μεταβολή είναι κάτω από το *κριτήριο σύγκλισης* (*convergence criterion*) που έχει θέσει ο χρήστης θεωρείται ότι η λύση έχει συγκλίνει και το πρόγραμμα σταματά ενώ στην αντίθετη περίπτωση αρχίζει η επόμενη εξωτερική επανάληψη.

Αν και η μέγιστη μεταβολή της στάθμης είναι το κριτήριο που καθορίζει την σύγκλιση του προγράμματος επίλυσης, υπάρχει και ένα επιπλέον κριτήριο που ονομάζεται *υπολειμματικό κριτήριο σύγκλισης* (*residual criterion for convergence*) το οποίο καθορίζει την σύγκλιση των εσωτερικών επαναλήψεων. Εάν η μέγιστη απόλυτη τιμή του residual σε όλους τους κόμβους είναι μικρότερη του κριτηρίου (με μονάδες L^3T^{-1}) που έχει θέσει ο χρήστης, το πρόγραμμα προχωρά στην επόμενη εξωτερική επανάληψη. Προσοχή απαιτείται στον ορισμό του υπολειμματικού κριτηρίου σύγκλισης καθώς εξαρτάται απόλυτα από τις μονάδες που έχει επιλέξει ο χρήστης.

Π1.5.2 Strongly Implicit Procedure Package (SIP)

Η SIP είναι μία μέθοδος επίλυσης μεγάλων συστημάτων αλγεβρικών εξισώσεων με την μέθοδο των επαναλήψεων. Το πλεονέκτημα του προγράμματος SIP είναι ότι, είναι πολύ σταθερό και γενικά συγκλίνει σε μία λύση, αν και πολλές φορές πολύ αργά καθώς δεν είναι τόσο γρήγορο όπως το PCG2 αλλά από την άλλη πλευρά απαιτεί λιγότερη υπολογιστική μνήμη.

Επειδή κάθε εξίσωση εμπλέκει έως επτά άγνωστες τιμές στάθμης και επειδή η ομάδα των άγνωστων τιμών μεταβάλλεται από την μία εξίσωση στην άλλη σε όλο το πλέγμα, οι εξισώσεις αυτές πρέπει να επιλύονται συγχρόνως σε κάθε χρονικό βήμα.

Επεξήγηση των παραμέτρων επίλυσης : Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, ολόκληρο το σύστημα των αλγεβρικών εξισώσεων της μορφής (Ε. 40) που περιλαμβάνει μία εξίσωση για κάθε μία μεταβαλλόμενη στάθμη σε κάθε κελί του πλέγματος, μπορεί να γραφεί με την μορφή πίνακα της μορφής : $[A]\{h\} = \{q\}$

Το πρόγραμμα επίλυσης SIP, χρησιμοποιεί κάποιες παραμέτρους που εισάγει ο χρήστης, οι οποίες καθορίζουν τον τρόπο επίλυσης. Πρώτη από αυτές τις παραμέτρους είναι ένας αριθμός (*number of iteration parameters*) ο οποίος υποδεικνύει τον αριθμό των παραμέτρων που θα απαιτηθούν για την μετατροπή του αρχικού πίνακα $[A]$ σε έναν πίνακα $[A + B]$ ο οποίος ισούται με το γινόμενο δύο άλλων πινάκων, έναν κάτω τριγωνικό $[L]$ και έναν άνω τριγωνικό $[U]$ με όλα τα στοιχεία της διαγωνίου του να είναι ίσα με την μονάδα ώστε να

ισχύει ότι : $[A+B]\{h\} = \{q\} \Rightarrow [L][U]\{h\} = \{q\}$. Για την μετατροπή αυτή πέντε παράμετροι είναι συνήθως επαρκείς.

Ο συντελεστής επιτάχυνσης (*acceleration factor*) ελέγχει το μέγεθος της μεταβολής της στάθμης μεταξύ των επαναλήψεων. Ο συντελεστής αυτός θα πρέπει να είναι θετικός. Τιμές μεγαλύτερες της μονάδας έχουν σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερες μεταβολές στάθμης μεταξύ των επαναλήψεων όπου η επίλυση γίνεται πιο γρήγορα αλλά με υπάρχοντα κίνδυνο να γίνει υπέρβαση της σωστής τιμής. Τιμές μικρότερες της μονάδας οδηγούν σε μικρότερες μεταβολές στάθμης και κατά συνέπεια απαιτούν μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων για να επιτευχθεί λύση.

Μετά από κάθε επανάληψη, το πρόγραμμα ελέγχει την μέγιστη μεταβολή της λύσης σε κάθε κελί. Εάν η μέγιστη μεταβολή είναι κάτω από το κριτήριο σύγκλισης (*convergence criterion*) που έχει θέσει ο χρήστης θεωρείται ότι η λύση έχει συγκλίνει και το πρόγραμμα σταματά ενώ στην αντίθετη περίπτωση αρχίζει η επόμενη επανάληψη.

Βάσει της θεωρητικής προσέγγισης της μεθόδου SIP, δεδομένου ότι στους υπολογισμούς υπεισέρχονται τιμές στάθμης από μη γειτονικά κελιά, οι (Weinstein *et al.*, 1969) καθορίζουν τρεις παραμέτρους α, β, γ με τιμές μεταξύ του μηδέν και του ένα ώστε να περιορίσουν την επίδραση των ανωτέρω τιμών. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου οι παράμετροι α, β, γ αντικαθίστανται από μία, την ω . Η παράμετρος ω επαναπροσδιορίζεται συνεχώς, κυκλικά, μέσω μιας σειράς τιμών σε διαδοχικές επαναλήψεις ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητικός ρυθμός σύγκλισης.

Η παράμετρος που αναφέρεται ως user seed value είναι η βάση του καθορισμού της σειράς των τιμών ω που πολλαπλασιάζουν τον πίνακα $\{q\}$ και ελέγχονται από την υδραυλική αγωγιμότητα K και τις διαστάσεις του πλέγματος σε κάθε γειτονικό κόμβο. Η παράμετρος user seed value χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της τιμής ω ώστε να προκύψει ικανοποιητικός ρυθμός σύγκλισης περιορίζοντας την επίδραση των τιμών στάθμης από μη γειτονικά κελιά. Αυτή η παράμετρος είτε καθορίζεται από τον χρήστη σε κάθε επανάληψη είτε υπολογίζεται από το ίδιο το πρόγραμμα στην αρχή της προσομοίωσης από τις άλλες παραμέτρους του προβλήματος. Όσο περισσότερο διαγώνιος είναι ο πίνακας των συντελεστών, τόσο λιγότερο σημαντική είναι και η επιλογή της παραμέτρου "seed".

Π1.5.3 Slice - Successive Overrelaxation Package (SSOR)

Η *Successive Overrelaxation* είναι άλλη μία μέθοδος επίλυσης μεγάλων συστημάτων αλγεβρικών εξισώσεων με την μέθοδο των επαναλήψεων. Στο πρόγραμμα SSOR αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται διαιρώντας το πλέγμα των πεπερασμένων διαφορών σε κάθετα τμήματα (*slices*) κατά μήκος των γραμμών και ομαδοποιώντας τις εξισώσεις των κόμβων σε ομάδες ώστε αυτά να ανταποκρίνονται σε κάθε ένα κάθετο τμήμα ξεχωριστά.

Σε κάθε επανάληψη, σε αυτά τα συστήματα των εξισώσεων γίνεται διαδοχική επεξεργασία αποδίδοντας μία νέα ομάδα εκτιμώμενων τιμών στάθμης για κάθε ένα κάθετο τμήμα. Κατά την επεξεργασία τους αυτές οι εξισώσεις εκφράζονται αρχικά βάσει της μεταβολής της υπολογιζόμενης στάθμης μεταξύ διαδοχικών επαναλήψεων. Στην συνέχεια, το σύστημα των εξισώσεων που αντιστοιχεί σε ένα κάθετο τμήμα επιλύεται απευθείας με την μέθοδο της απαλοιφής κατά Gauss (Gaussian elimination) χειριζόμενοι τους όρους των προηγούμενων στους υπολογισμούς γειτονικών κάθετων τμημάτων, σαν γνωστές ποσότητες (εισάγοντας δηλαδή τις τιμές που υπολογίσθηκαν στο προηγούμενο κάθετο τμήμα σαν γνωστές τιμές για τον υπολογισμό των τιμών στάθμης στο επόμενο κάθετο τμήμα).

Η μεταβολή της υπολογιζόμενης στάθμης μεταξύ των επαναλήψεων (residual) πολλαπλασιάζεται με έναν παράγοντα επιτάχυνσης T (acceleration factor) που παίρνει τιμές μεταξύ 1 και 2 και το αποτέλεσμα θεωρείται ότι είναι η τελική τιμή της μεταβολής στάθμης για το δεδομένο κάθετο τμήμα και επανάληψη. Αυτή η τιμή προστίθεται στην αντίστοιχη στάθμη που προέκυψε από την προηγούμενη επανάληψη ώστε να έχουμε τις τελικές εκτιμήσεις στάθμης για την συγκεκριμένη επανάληψη και κάθετο τμήμα (slice).

$$h_{i,j,k}^{m,\ell+1} = h_{i,j,k}^{m,\ell} + T(h_{i,j,k}^{m,\ell+1} - h_{i,j,k}^{m,\ell}) \text{ όπου}$$

m : Χρονικό βήμα

$h_{i,j,k}^m$: Η στάθμη στο κόμβο i,j,k στο χρόνο tm

$\ell \& \ell + 1$: Επίπεδα επανάληψης

Αυτή η διαδικασία ακολουθείται για όλα για όλα τα κάθετα τμήματα που συνθέτουν την τρισδιάστατη απεικόνιση της περιοχής μελέτης ώστε να ολοκληρωθεί με την σειρά της η κάθε μια επανάληψη. Εάν η μέγιστη μεταβολή είναι κάτω από το κριτήριο σύγκλισης (convergence criterion) που έχει θέσει ο χρήστης θεωρείται ότι η λύση έχει συγκλίνει και το πρόγραμμα σταματά ενώ στην αντίθετη περίπτωση αρχίζει η επόμενη επανάληψη ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία για κάθε κάθετο τμήμα της τρισδιάστατης απεικόνισης.

Π1.5.4 WHS Solver for Visual MODFLOW (WHS)

Το πρόγραμμα επίλυσης εξισώσεων με επαναληπτικές μεθόδους WHS, προσεγγίζει την λύση του συστήματος σε δύο βαθμίδες επαναλήψεων ανά χρονικό βήμα. Οι εξωτερικές επαναλήψεις (*outer iterations*) χρησιμοποιούνται για να μεταβάλλουν τις παραμέτρους του προκαθορισμένου (preconditioned) πίνακα σε μια προσέγγιση της λύσης. Στις εξωτερικές επαναλήψεις μεταβάλλονται οι υδρογεωλογικοί παράμετροι (μεταβιβαστικότητα, κορεσμένο πάχος, αποθηκευτικότητα) ενώ οι εσωτερικές επαναλήψεις (*inner iterations*) χρησιμοποιούνται για την επίλυση των πινάκων που δημιουργεί η κάθε μία εξωτερική επανάληψη.

Τα διαφορετικά επίπεδα ανάλυσης (*factorization level*) που παρέχει το πρόγραμμα επιτρέπουν διαφορετικές προσεγγίσεις για την επίλυση των πινάκων ώστε να υπάρχει συνδυασμός αυξημένης αποτελεσματικότητας και σταθερότητας του μοντέλου. Το επίπεδο 0, απαιτεί περισσότερες εξωτερικές επαναλήψεις αλλά λιγότερη υπολογιστική μνήμη ενώ αντιστρόφως το επίπεδο 1 εκτελεί λιγότερες εξωτερικές επαναλήψεις και απαιτεί περισσότερη υπολογιστική μνήμη καθώς χρησιμοποιεί αποθηκευμένα δεδομένα.

Μετά από κάθε εξωτερική επανάληψη το πρόγραμμα επίλυσης ελέγχει την μέγιστη αλλαγή της λύσης (στάθμης) σε κάθε κελί. Εάν η μέγιστη μεταβολή είναι κάτω από το κριτήριο σύγκλισης (*head change convergence criterion*) που έχει θέσει ο χρήστης θεωρείται ότι η λύση έχει συγκλίνει και το πρόγραμμα σταματά ενώ στην αντίθετη περίπτωση αρχίζει η επόμενη εξωτερική επανάληψη.

Αν και η μέγιστη μεταβολή της στάθμης είναι το κριτήριο που καθορίζει την σύγκλιση του προγράμματος επίλυσης, υπάρχει και ένα επιπλέον κριτήριο που ονομάζεται υπολειμματικό κριτήριο σύγκλισης (*residual criterion for convergence*) το οποίο καθορίζει την σύγκλιση των εσωτερικών επαναλήψεων. Εάν η μέγιστη απόλυτη τιμή του residual σε όλους τους κόμβους είναι μικρότερη του κριτηρίου που έχει θέσει ο χρήστης, το πρόγραμμα προχωρά στην επόμενη εξωτερική επανάληψη. Το σχετικό υπολειμματικό κριτήριο (*relative residual criterion*) παρέχει μία επιπλέον μέθοδο ελέγχου της σύγκλισης των εσωτερικών επαναλήψεων. Συγκρίνει το υπόλοιπο της πιο πρόσφατης εσωτερικής επανάληψης a_n με το υπόλοιπο της αρχικής εσωτερικής επανάληψης a_1 ώστε εάν ισχύει :

$a_n < a_1 \times \text{relative residual criterion}$, προχωρά στην επόμενη εξωτερική επανάληψη.

Άλλη μία παράμετρος που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα επίλυσης παρόμοια με τον παράγοντα επιτάχυνσης των άλλων προγραμμάτων είναι το *dampening factor for the outer iterations*. Αυτή η παράμετρος, επιτρέπει στον χρήστη να μειώσει την μεταβολή της στάθμης που υπολογίζεται σε διαδοχικές εξωτερικές επαναλήψεις. Για τα περισσότερα προβλήματα υπόγειας ροής που θέτονται σε σωστή βάση, κατάλληλη τιμή της παραμέτρου θεωρείται η μονάδα, παίρνοντας όμως τιμές από 0 έως 1 (σπάνια κάτω από 0.6) βοηθά μια λύση αποκλίνουσα ή ταλαντευόμενη να σταθεροποιηθεί.

Τελικά, η επιλογή της μεθόδου επίλυσης του συστήματος των αλγεβρικών εξισώσεων, είναι αποκλειστική ευθύνη του χρήστη και σχετίζεται ουσιαστικά με την μαθηματική προσέγγιση που επιλέγει να ακολουθήσει. Παλαιότερα προκειμένου για την επιλογή ετίθετο ζήτημα μνήμης και χωρητικότητας του PC-ζητήματα που σήμερα έχουν λυθεί σε μεγάλο βαθμό, ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη ελευθερία επιλογής μεταξύ των μεθόδων.

Π1.5.5 Link-Algebraic Multigrid Solver Package (LMG)

Το υπο-πρόγραμμα LMG έχει κάποια αισθητά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους υπόλοιπους solvers που διαθέτονται με το MODFLOW-2000 για προβλήματα με μεγάλα πλέγματα (περισσότερα από 40000 κελιά) και (ή) ιδιαίτερα μεταβαλλόμενο πεδίο υδραυλικής αγωγιμότητας.

Τα πλεονεκτήματα των μεθόδων πολλαπλού πλέγματος σε σχέση με τις υπόλοιπες επαναληπτικές μεθόδους που αναφέρθηκαν νωρίτερα είναι :

1. Η αποτελεσματικότητα του multigrid solver δεν εξαρτάται από την αρχική κατανομή στάθμης (initial heads)
2. για πολλά ενδιαφέροντα προβλήματα, ο βαθμός της σύγκλισης κλιμακώνεται σχεδόν γραμμικά με το μέγεθος της περιοχής, αντίθετα με τους άλλους solvers όπου ο βαθμός σύγκλισης αυξάνεται μη γραμμικά (Demmel, 1997)

Οι ρυθμίσεις του solver επηρεάζουν την ταχύτητα και την αποτελεσματικότητα του LMG solver.

Max Iterations (Default=50). Είναι ο αριθμός από τις φορές που καλούνται οι ρουτίνες του AMG να δώσουν λύση. Συνήθως $2 < \text{MIXITER} < 50$. Σε γραμμικά προβλήματα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ο αριθμός 2 ενώ για μη γραμμικά φτάνει ο αριθμός 50.

MaxCycles (Default=50). Σχετίζεται με την ακρίβεια των λύσεων. Περισσότεροι κύκλοι αυξάνουν την ακρίβεια των λύσεων

Budget Closure Criterion (Default=0.01). Είναι ένα κριτήριο σύγκλισης που σχετίζεται με τα αποτελέσματα του υδατικού ισοζυγίου.

Damping Factor (Default=1). Χρησιμοποιείται για τον περιορισμό της μεταβολής στάθμης από την μία επανάληψη στην επόμενη. Κάνει την λύση να μεταβάλλεται πολύ αργά έτσι ώστε να μειωθούν οι ταλαντώσεις γύρω από μία λύση. Τιμές < 1 , περιορίζουν την μεταβολή στάθμης (Under-relaxation) ενώ τιμές > 1 επιταχύνουν την μεταβολή στάθμης (Over – relaxation).

Για γραμμικά προβλήματα δεν απαιτείται damping, άρα $\text{DAMP}=1$. Για μη γραμμικά προβλήματα είναι συνήθως απαραίτητα το $\text{DAMP}<1$ και συνήθως $0,5<\text{DAMP}<1$. Σε περίπτωση που μια σταθερή τιμή DAMP μπορεί να δυσχεράνει την επίτευξη της σύγκλισης υπάρχουν δύο άλλες τεχνικές όπου προσαρμόζεται η τιμή του DAMP προκειμένου να σταθεροποιηθεί η λύση (adaptive damping strategy) όπου είναι δυνατό να ακολουθηθούν δύο τεχνικές :

1. Cooley's method with Huyakorn's modification : $\text{DAMP}=-1$ και

2. Relative reduced residual method : DAMP=-2

Όταν ακολουθούνται οι παραπάνω τεχνικές τότε :

Max Damping Factor (Default=1).

Min Damping Factor (Default=0.2)

Perform Conjugate Gradient Iterations (ICG) (Default=0). Σε κάποιες περιπτώσεις το AMG δεν αποδίδει τα μέγιστα λόγω ενός μικρού αριθμού error components τα οποία δεν εξαλείφονται μέσω των κύκλων (MXCYC). Σε αυτή την περίπτωση μερικές επαναλήψεις με την χρήση ενός conjugate gradient solver μπορεί να μειώσει τα error components και να βοηθήσει στην σύγκλιση (Cleary *et al.*, 2000). Έτσι τίθεται το IGC=1. Ενεργοποιώντας αυτή την δυνατότητα μπορεί να μειωθεί ο χρόνος εκτέλεσης για πολλά προβλήματα αλλά θα αυξηθεί συγχρόνως και η απαιτούμενη μνήμη από το υπο-πρόγραμμα επίλυσης.

Π2. Η ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ

Η μερική διαφορική εξίσωση που περιγράφει την τύχη και την μεταφορά ενός είδους ρυπαντή (Mass Transport Governing Equation) σε ένα τρισδιάστατο μεταβατικό σύστημα υπόγειας ροής μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$(E. 2) \quad \frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C) + q_s C_s + \sum R_n \quad \text{όπου:}$$

C	Η συγκέντρωση διαλελυμένης ουσίας, (ML^{-3})
θ	Το πορώδες του μέσου (αδιάστατο)
t	Ο χρόνος, (T)
x_i	Η απόσταση κατά τον άξονα X_i , (L)
D_{ij}	Ο τανυστής των συντελεστών της υδροδυναμικής διασποράς, (L^2T^{-1})
v_i	Η ταχύτητα του νερού των πόρων, LT^{-1} η οποία συνδέεται με την ειδική απόδοση ή ταχύτητα Darcy μέσω της σχέσης, $v_i = \frac{q_i}{\theta}$
q_s	Ο ρυθμός μεταβολής της ροής ανά μονάδα όγκου του υδροφόρου που αντιστοιχεί είτε σε θετική πηγή (source) είτε σε Αρνητική Πηγή (sink), (T^{-1}).
C_s	Είναι η συγκέντρωση ένωσης ή στοιχείου της αρνητικής ή θετικής πηγής (ML^{-3})
$\sum R_n$	Είναι ο όρος της χημικής αντίδρασης, ($ML^{-3}T^{-1}$) ο οποίος αντιπροσωπεύει το ρυθμό μεταβολής της διαλελυμένης μάζας της ενώσεως ή στοιχείου, λόγω των χημικών αντιδράσεων

Το αριστερό τμήμα της εξίσωσης μπορεί να επεκταθεί σε δύο όρους όπου :

$$(E. 41) \quad \frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \theta \frac{\partial C}{\partial t} + C \frac{\partial \theta}{\partial t} = \theta \frac{\partial C}{\partial t} + q'_s C \quad \text{όπου}$$

$$q'_s = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad \text{είναι ο ρυθμός μεταβολής της αποθηκευτικότητας (T}^{-1}\text{)}$$

Ο όρος της χημικής αντίδρασης $\sum R_n$ στην εξίσωση (E. 2) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συμπεριλάβει την επίδραση των βιοχημικών και γεωχημικών αντιδράσεων στην τύχη και μεταφορά των ρύπων.

Έτσι, θεωρώντας δύο βασικούς τύπους χημικών αντιδράσεων, όπως την αντίδραση ρευστού με επιφάνεια στερεού - (ρόφηση-sorption) και μία αντίδραση πρώτης τάξεως (first order reaction), ο γενικός όρος αντίδρασης μπορεί να εκφραστεί ως εξής :

$$(E. 42) \quad \sum R_n = -\rho_b \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} - \lambda_1 \theta C - \lambda_2 \rho_b \bar{C} \quad \text{όπου :}$$

ρ_b	Είναι η πυκνότητα (bulk density) του μέσου, ML^{-3}
$\bar{C}$	Είναι η μάζα της διαλελυμένης ουσίας, που έχει ροφηθεί ανά μονάδα βάρους του στερεού, MM^{-1}
λ_1	Είναι ο ρυθμός αντίδρασης, πρώτης τάξεως, για την διαλελυμένη φάση T^{-1}
λ_2	Είναι ο ρυθμός αντίδρασης, πρώτης τάξεως, για την ροφημένη φάση T^{-1}

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (E. 41) και (E. 42) στην (E. 2), η εξίσωση (E. 2) μπορεί να γίνει:

$$(E. 43) \quad \theta \frac{\partial C}{\partial t} + \rho_b \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C) + q_s C_s - q'_s C - \lambda_1 \theta C - \lambda_2 \rho_b \bar{C}$$

Η εξίσωση (E. 43) είναι ουσιαστικά μία εξίσωση διατήρησης μάζας όπου η μεταβολή της αποθηκευμένης μάζας (συνολικά η διαλελυμένη και η ροφημένη φάση μαζί) σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή ισούται με την διαφορά εισροής και εκροής μάζας λόγω επίδρασης της διασποράς, συμμεταφοράς, του όρου πηγής και των χημικών αντιδράσεων. Λόγω αυτών των διαδικασιών, κάποιες διαλελυμένες ουσίες μετακινούνται με πιο αργούς ρυθμούς σε σχέση με το υπόγειο νερό. Το φαινόμενο αυτό αποκαλείται επιβράδυνση (retardation) και αποδίδεται με τον **συντελεστή επιβράδυνσης R** ο οποίος είναι αδιάστατος και ορίζεται ως εξής :

$$(E. 44) \quad R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{C}}{\partial C}$$

Εάν υποθεθεί ότι υφίσταται τοπική ισορροπία (LEA - Local Equilibrium Assumption) όσον αφορά τις διάφορες διαδικασίες ρόφησης (η ρόφηση δηλαδή είναι επαρκώς γρήγορη σε σχέση με την κλίμακα χρόνου μεταφοράς μάζας), η εξίσωση (E. 43) μπορεί εκφραστεί με την μορφή :

$$(E. 45) \quad R \theta \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C) + q_s C_s - q'_s C - \lambda_1 \theta C - \lambda_2 \rho_b \bar{C}$$

Επειδή θεωρήθηκε ότι υφίσταται τοπική ισορροπία (LEA), ο συντελεστής επιβράδυνσης R , εξαρτάται από τον λόγο συγκεντρώσεων της προσροφημένης φάσης προς την διαλελυμένη φάση (E. 44). Όταν δεν υφίσταται τοπική ισορροπία (LEA), οι διαδικασίες ρόφησης αντιπροσωπεύονται στην εξίσωση μεταφοράς μάζας, από μία κινητική εξίσωση μεταφοράς μάζας πρώτης τάξεως, (first-order kinetic mass transfer equation)

Στις εξισώσεις μεταφοράς μάζας που περιγράφηκαν νωρίτερα, υποτέθηκε η ύπαρξη ενός μόνο πορώδους. Αυτό το πορώδες αναφέρεται ως 'ενεργό πορώδες' (effective porosity), το οποίο είναι γενικά μικρότερο από το ολικό πορώδες του μέσου και αντιπροσωπεύει τους πόρους που είναι διαθέσιμοι για την ροή του ρευστού. Στους πόρους που δεν επικοινωνούν μεταξύ τους (dead-end porous) το νερό έχει μηδενική ταχύτητα και χαρακτηρίζεται ως 'ακίνητο' ή 'παγιδευμένο' (immobile water). Εν τούτοις, σύμφωνα με τους (Zheng and

Bennett, 1995) το ενεργό πορώδες δεν μπορεί να μετρηθεί στο πεδίο εύκολα λόγω της πολυπλοκότητας της δομής των πόρων. Έτσι, προσδιορίζεται γενικά σαν μία παράμετρο η οποία, στην βαθμονόμηση του συστήματος δίνει την καλύτερη αναπαράσταση της κίνησης του πλουμίου και της παρατηρούμενης συσσώρευσης μάζας.

Ειδικότερα σε μερικές περιπτώσεις, όπως στην μεταφορά σε ρηγματωμένα μέσα ή σε εξαιρετικά ετερογενή πορώδη μέσα, μπορεί να είναι περισσότερο κατάλληλη η προσέγγιση με την χρήση του διπλού πορώδους (dual porosity) όπου προσδιορίζεται ένα πρωτεύων πορώδες μέσω του οποίου πραγματοποιείται η κίνηση του νερού και η συμμεταφορά μάζας και ένα δευτερογενές πορώδες όπου το νερό έχει μηδενική ταχύτητα (παγιδευμένο) και η μεταφορά μάζας πραγματοποιείται μέσω της μοριακής διάχυσης. Η κίνηση του νερού μεταξύ των δύο τμημάτων διαφορετικού πορώδους εκφράζεται βάσει μιας κινητικής εξίσωσης μεταφοράς μάζας (kinetic mass transfer equation) παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιήθηκε για να περιγραφεί η μη ισορροπούσα ρόφηση.

Η εξίσωση μεταφοράς μάζας συνδέεται με την εξίσωση ροής μέσω του νόμου του Darcy όπου

$$(E. 46) \quad v_i = \frac{q_i}{\theta} = -\frac{K_i}{\theta} \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad \text{όπου}$$

K_i Είναι η πρωτεύουσα συνιστώσα του τανυστή της υδραυλικής αγωγιμότητας, $L T^{-1}$

h Είναι η υδραυλική στάθμη, L

Η υδραυλική στάθμη (h) προκύπτει από την επίλυση της τρισδιάστατης εξίσωσης ροής όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο :

$$(E. 47) \quad \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_i \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) + q_s = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

όπου S_s είναι ειδική αποθηκευτικότητα του υδροφόρου, L^{-1} και q_s είναι ο όρος πηγής όπως περιγράφεται στην εξίσωση (E. 2).

Στις εξισώσεις (E. 46) και (E. 47) θεωρείται ότι οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} κατά τους άξονες x, y, z συμπίπτουν με τους κύριους άξονες της υδραυλικής αγωγιμότητας έτσι ώστε όλοι οι μη διαγώνιοι όροι του τανυστή της υδραυλικής αγωγιμότητας να είναι μηδενικοί. Αυτή η υπόθεση χρησιμοποιείται στα περισσότερα γνωστά μοντέλα πεπερασμένων διαφορών υπόγειας ροής, συμπεριλαμβανόμενου και του MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988).

Π2.1 Συμμεταφορά (Advection)

Ο όρος που περιγράφει την συμμεταφορά (advection) στην εξίσωση μεταφοράς μάζας

$\frac{\partial(\theta v_i C)}{\partial x_i}$ περιγράφει την μεταφορά αναμειγμένων ρύπων με την ίδια ταχύτητα με αυτή του

υπόγειου νερού. Στα περισσότερα προβλήματα μεταφοράς ρύπου στο πεδίο, κυριαρχεί ο όρος της συμμεταφοράς σε σχέση με όλους του υπόλοιπους όρους της εξίσωσης.

Για να προσδιορίσουμε το βαθμό κυριαρχίας της συμμεταφοράς γενικά στην διαδικασία μεταφοράς μάζας, χρησιμοποιείται συνήθως ο αδιάστατος αριθμός Peclet ο οποίος προσδιορίζεται ως εξής :

$$(E. 48) \quad P_e = \frac{|v|L}{D} \quad \text{όπου :}$$

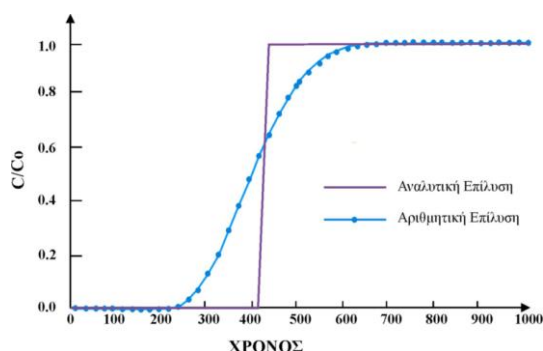
$|v|$ Είναι το μέγεθος της ταχύτητας του υπόγειου νερού (LT^{-1})

L Είναι ένα χαρακτηριστικό μήκος όπου συνήθως χρησιμοποιείται το πλάτος του κελιού, (L)

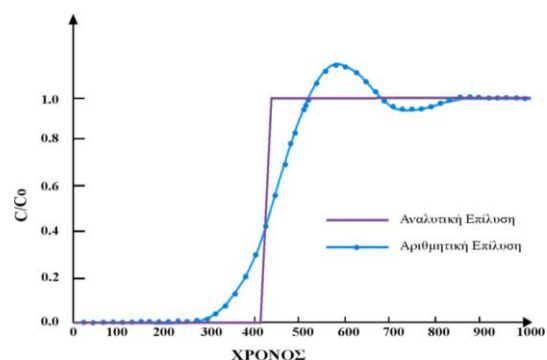
D Είναι ο συντελεστής διασποράς, (L^2T^{-1})

Σε προβλήματα που κυριαρχεί η συμμεταφορά τα οποία αναφέρονται και ως προβλήματα με 'μέτωπο απότομης εναλλαγής' (sharp front problems), ο αριθμός Peclet έχει μεγάλη τιμή πλησιάζοντας το άπειρο σε προβλήματα απόλυτης κυριαρχίας της συμμεταφοράς ($Pe \rightarrow \infty$) δεδομένου ότι $D \approx 0$.

Σε αυτού του είδους τα προβλήματα (απόλυτης κυριαρχίας της συμμεταφοράς), η επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς μάζας συνήθως παρουσιάζει δύο τύπους αριθμητικών προβλημάτων όπως αυτά καταγράφονται στην Εικόνα 103 και στην Εικόνα 104.



Εικόνα 103 : Επίδραση της αριθμητικής διασποράς



Εικόνα 104 : Επίδραση της τεχνητής ταλάντωσης

Ο πρώτος τύπος αφορά την αριθμητική διασπορά (numerical dispersion), η οποία έχει παρόμοια επίδραση με την φυσική διασπορά αλλά προκαλείται λόγω του σφάλματος αποκοπής (truncation error). Όταν η φυσική διασπορά είναι μικρή ή αμελητέα, η αριθμητική

διασπορά γίνεται ένα πολύ σοβαρό πρόβλημα που οδηγεί σε άμβλυνση (smearing) του μετώπου συγκέντρωσης η οποία θα έπρεπε να έχει οξεία (sharp) εμφάνιση όπως στην περίπτωση της αναλυτικής επίλυσης (Εικόνα 103). Όσο περισσότερο σημαντική γίνεται η φυσική διασπορά (αυξάνει το D), τόσο μικρότερος γίνεται και ο αριθμός Peclet και στην εξίσωση μεταφοράς μάζας κυριαρχούν οι όροι διάχυσης και αντίδρασης.

Εκτός από το σφάλμα αποκοπής μία επιπλέον πηγή αριθμητικής διασποράς είναι ο προσδιορισμός του χρονικού βήματος μεταφοράς μάζας. Σύμφωνα με την συνθήκη *Courant-Friedrich-Levy* 'Το χρονικό βήμα θα πρέπει να διατηρείται μικρό ώστε να έχει επαρκή χρόνο η πληροφορία να διαδοθεί διαμέσου της χωρικής διακριτοποίησης'. Μαθηματικά η παραπάνω συνθήκη εκφράζεται με τον αριθμό Courant όπου :

$$(E. 49) \quad Cou = \gamma_c = \frac{|v|\Delta t}{\Delta x} \leq 1$$

Ο αριθμός Courant παίρνει τιμές μεταξύ 0.5 και 1.0 και εκφράζει των αριθμό των κελιών που μπορεί να κινηθεί ένα σωματίδιο σε κάθε διεύθυνση σε κάθε χρονικό βήμα μεταφοράς μάζας. Η εξάρτηση του φαινομένου της αριθμητικής διασποράς από τον αριθμό Courant οδήγησε στον ορισμό της εξίσωσης (E. 49) σαν την ελάχιστη απαίτηση ακρίβειας για την επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς μάζας (Zheng and Bennett, 1995).

Για δεδομένη ταχύτητα v και συντελεστή διασποράς D , το μέγεθος του αριθμού Peclet μπορεί να ρυθμιστεί μόνο μεταβάλλοντας το μέγεθος του πλέγματος Δx . Εντούτοις, δεδομένου ότι ο αριθμός Courant είναι αντιστρόφως ανάλογος του Δx , μειώνοντας το Δx αυξάνεται και ο αριθμός Courant εκτός εάν μειώνεται συγχρόνως και το χρονικό βήμα Δt . Κατόπιν των παραπάνω μπορεί να ειπωθεί ότι : «Ο βέλτιστος συνδυασμός χρονικού βήματος και διαστάσεων του πλέγματος δημιουργεί ελάχιστη αριθμητική διασπορά προσδίδοντας σταθερότητα στην εξίσωση» (Press *et al.*, 1986)

Ο δεύτερος τύπος αριθμητικού προβλήματος που παρουσιάζεται είναι η τεχνητή ταλάντωση (artificial oscillation) αναφερόμενη και ως υποεκτίμηση (undershoot) ή υπερεκτίμηση (overshoot) όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 104. Η τεχνητή ταλάντωση είναι συχνή, ιδιαίτερα σε μερικές επιλύσεις με διατάξεις υψηλής τάξης (higher-order schemes) οι οποίες σχεδιάστηκαν ειδικά για την εξάλειψη του προβλήματος της αριθμητικής διασποράς. Η τεχνητή ταλάντωση γίνεται εντονότερη όσο περισσότερο 'απότομο' γίνεται το μέτωπο της συγκέντρωσης (επικράτηση συμμεταφοράς) όπου $Pe \rightarrow \infty$.

Δεδομένου ότι ο αριθμός Peclet εξαρτάται και από το πλάτος των κελιών προκύπτει ότι όσο το Δx μειώνεται, μειώνεται και ο αριθμός Peclet. Μικροί αριθμοί Peclet που σχετίζονται με υψηλή χωρική διακριτοποίηση (πυκνό πλέγμα) χαρακτηρίζονται από μείωση της τεχνητής ταλάντωσης, γεγονός που έχει αποδειχθεί και σε εργασία των (Huyakorn and Pinder, 1983) για $Pe \leq 2$.

Π2.2 Διασπορά (Dispersion)

Ο μηχανισμός της Διασποράς (Dispersion Mechanism) : Η διασπορά σε πορώδη μέσα αναφέρεται στην διάχυση των ρύπων σε μία ευρύτερη περιοχή από αυτή που θα μπορούσε να προβλεφθεί αποκλειστικά και μόνο από τα ανύσματα της μέσης ταχύτητας του υπόγειου νερού (Wang and Anderson, 1982).

Διασπορά προκύπτει από την αθροιστική δράση της **μηχανικής διασποράς** (το αποτέλεσμα αποκλίσεων της πραγματικής ταχύτητας σε μία μικροκλίμακα από την μέση ταχύτητα του υπόγειου νερού) και της **μοριακής διάχυσης** που συντελείται λόγω της κλίσης συγκέντρωσης. Η μοριακή διάχυση είναι γενικά δευτερεύουσα και αμελητέα συγκρινόμενη με το αποτέλεσμα της μηχανικής διασποράς και γίνεται σημαντική μόνο όταν η ταχύτητα του υπόγειου νερού είναι πάρα πολύ μικρή. Το άθροισμα της μηχανικής διασποράς και της μοριακής διάχυσης ονομάζεται υδροδυναμική διασπορά ή απλώς διασπορά.

Αν και οι μηχανισμοί της διασποράς είναι γενικά γνωστοί η απεικόνιση των φαινομένων της διασποράς σε ένα μοντέλο μεταφοράς ρύπων είναι αντικείμενο εντατικής και συνεχιζόμενης έρευνας. Ο χειρισμός της μηχανικής διασποράς ως μία διαδικασία που ακολουθεί τον νόμο του Fick, εξαρτώμενη κατ' ουσία και από την διάχυση, αντιπροσωπεύει μια ρεαλιστική προσέγγιση μέσω της οποίας μπορούν να γίνουν ρεαλιστικοί υπολογισμοί μεταφοράς μάζας χωρίς όμως να είναι δυνατό να περιγραφεί πλήρως ο ετερογενής τομέας ταχύτητας, το οποίο, φυσικά, είναι αδύνατο να γίνει στην πράξη. Ενώ πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις και θεωρίες έχουν αναπτυχθεί για να προσομοιώσουν τη διαδικασία της διασποράς, η εξίσωση (Ε. 2) είναι ακόμα η βάση για τις περισσότερες προσομοιώσεις πεδίου (Zheng and Bennett, 1995)

Ο συντελεστής Διασποράς (Dispersion Coefficient) : Η διασπορά είναι βασικά αποτέλεσμα της μηχανικής διασποράς και όχι της τυρβώδους ροής δεδομένου ότι η ροή του υπόγειου νερού θεωρείται ότι είναι στρωτή (προϋπόθεση για να ισχύει ο νόμος του Darcy). Η ανομοιογένεια του εδάφους προξενεί μικροσκοπικές και μακροσκοπικές μεταβολές στην υδραυλική αγωγιμότητα, οδηγώντας τελικά στην διασπορά του ρευστού Ένας δεύτερος μηχανισμός λόγω του οποίου πραγματοποιείται διασπορά είναι η "παραμένουσα ποσότητα ύδατος". Η άργιλος είναι ένα σχετικά αδιαπέρατο υλικό που έχει πάρα πολύ μεγάλο πορώδες αλλά και πάρα πολύ μικρή ειδική απόδοση καθώς το νερό δεσμεύεται μέσα στην δομή της. Η μοριακή διάχυση και άλλες πολύ αργές διαδικασίες μετατοπίζουν τελικά το δεσμευμένο νερό προκαλώντας μακροσκοπικά διασπορά.

Οι συντελεστές διασποράς είναι δύσκολο να προσδιοριστούν γι' αυτό συνήθως χρησιμοποιείται ένα εύρος τιμών D από την βιβλιογραφία και μετά κάνουμε διορθώσεις των D_{xx} , D_{yy} και D_{zz} απ' ευθείας στο μοντέλο μας. Η καλύτερη αλλά όμως και πιο ακριβή και χρονοβόρα μέθοδος για τον προσδιορισμό των συντελεστών διασποράς D είναι η έκχυση ιχνηλάτη σε γεωτρήσεις παρακολούθησης.

Οι συντελεστές διασποράς στα μοντέλα μεταφοράς των ρυπαντών είναι εμπειρικοί και είναι σε άμεση συνάρτηση με την κλίμακα που χρησιμοποιούμε. Ένας παράγοντας που επηρεάζεται από την κλίμακα που χρησιμοποιείται είναι το *μήκος διασκορπισμού* α (dispersivity). Οι συντελεστές διασποράς D εξαρτώνται από την ταχύτητα του ρευστού και το πορώδες μέσο.

Ο танυστής της υδροδυναμικής διασποράς D_{ij} , για ένα ισότροπο πορώδες μέσο καθορίζεται βάσει του (Bear, 1979) με τις ακόλουθες μορφές :

$$(E. 50) \quad D_{xx} = \alpha_L \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_T \frac{v_y^2}{|v|} + \alpha_T \frac{v_z^2}{|v|} + D^*$$

$$(E. 51) \quad D_{yy} = \alpha_L \frac{v_y^2}{|v|} + \alpha_T \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_T \frac{v_z^2}{|v|} + D^*$$

$$(E. 52) \quad D_{zz} = \alpha_L \frac{v_z^2}{|v|} + \alpha_T \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_T \frac{v_y^2}{|v|} + D^*$$

$$(E. 53) \quad D_{xy} = D_{yx} = (\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_x v_y}{|v|}$$

$$(E. 54) \quad D_{xz} = D_{zx} = (\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_x v_z}{|v|}$$

$$(E. 55) \quad D_{yz} = D_{zy} = (\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_y v_z}{|v|} \quad \text{όπου:}$$

D_{xx}, D_{yy}, D_{zz} Είναι οι κύριες συνιστώσες του танυστή διασποράς, ($L^2 T^{-1}$)

$D_{xy}, D_{yx}, D_{xz}, D_{zx}, D_{yz}, D_{zy}$ Είναι οι διαγώνιοι όροι του танυστή διασποράς ($L^2 T^{-1}$)

α_L Είναι το διάμηκες μήκος διασκορπισμού, (L)

α_T Είναι το εγκάρσιο μήκος διασκορπισμού, (L)

v_x, v_y, v_z Είναι οι συνιστώσες του ανύσματος της ταχύτητας κατά μήκος των αξόνων x,y,z, $L^2 T^{-1}$

$|v| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$ Είναι το μέγεθος του ανύσματος της ταχύτητας, $L^2 T^{-1}$

D^* Είναι ο συντελεστής της ενεργού μοριακής διάχυσης, $L^2 T^{-1}$.
(Παίρνει τιμές της τάξεως των $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$).

Ο όρος 'ενεργός' και ο (*) χρησιμοποιούνται προκειμένου να καταδειχθεί το γεγονός ότι ο συντελεστής διάχυσης διαφέρει από αυτόν του νερού D_d λόγω της επίδρασης των πόρων που επιβραδύνουν την κίνηση καθώς τα ιόντα αναγκάζονται να διανύσουν μεγαλύτερες αποστάσεις. Έτσι : $D^* = \omega D_d$ όπου ω είναι συντελεστής που σχετίζεται με το ελικοειδές των πόρων (Bear 1972)

Όταν το άνυσμα της ταχύτητας εναρμονίζεται με έναν από τους κύριους άξονες, όλοι οι μη διαγώνιοι όροι $D_{xy}, D_{yx}, D_{xz}, D_{zx}, D_{yz}, D_{zy}$ του τανυστή διασποράς γίνονται μηδενικοί.

Ο τανυστής της διασποράς όπως ορίζεται από δύο ανεξάρτητους συντελεστές διασποράς (α_L & α_T) για ισότροπα μέσα, για τις εξισώσεις (E. 50) - (E. 55) δεν έχει εφαρμογή σε ανισότροπα μέσα καθώς για αυτά, απαιτούνται πέντε ανεξάρτητοι συντελεστές διασποράς (McDonald and Harbaugh, 1988) Επειδή δεν είναι εφικτός ο προσδιορισμός και των πέντε αυτών συντελεστών στο πεδίο, σαν πρακτική εναλλακτική λύση στην προσομοίωση μεταφοράς ρύπου υποθέτουμε ότι ο συντελεστής διασποράς που υπολογίζεται για το ισότροπο μέσο έχει εφαρμογή και στο ανισότροπο.

Εναλλακτικά, οι (Burnett and Frind, 1987) υποστηρίζουν ότι ένας κατά προσέγγιση προσδιορισμός ενός ανισότροπου μέσου απαιτεί των ορισμό μόνο τριών συντελεστών διασποράς (α -dispersivities). Η θεωρία αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι το εγκάρσιο μήκος διασκορπισμού είναι μικρότερο στην κάθετη διεύθυνση σε σχέση με την οριζόντια και προτείνουν την χρήση του διαμήκους μήκους διασκορπισμού α_L , του οριζόντιου εγκάρσιου α_{TH} , και του κάθετου εγκάρσιου μήκους διασκορπισμού α_{TV} . Έτσι :

$$(E. 56) \quad D_{xx} = \alpha_L \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_{TH} \frac{v_y^2}{|v|} + \alpha_{TV} \frac{v_z^2}{|v|} + D^*$$

$$(E. 57) \quad D_{yy} = \alpha_L \frac{v_y^2}{|v|} + \alpha_{TH} \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_{TV} \frac{v_z^2}{|v|} + D^*$$

$$(E. 58) \quad D_{zz} = \alpha_L \frac{v_z^2}{|v|} + \alpha_{TV} \frac{v_x^2}{|v|} + \alpha_{TV} \frac{v_y^2}{|v|} + D^*$$

$$(E. 59) \quad D_{xy} = D_{yx} = (\alpha_L - \alpha_{TH}) \frac{v_x v_y}{|v|}$$

$$(E. 60) \quad D_{xz} = D_{zx} = (\alpha_L - \alpha_{TV}) \frac{v_x v_z}{|v|}$$

$$(E. 61) \quad D_{yz} = D_{zy} = (\alpha_L - \alpha_{TV}) \frac{v_y v_z}{|v|}$$

Οι εξισώσεις (E. 56) - (E. 61) είναι ισοδύναμες με τις εξισώσεις (E. 50) - (E. 55) όταν οι δύο εγκάρσιοι συντελεστές διασποράς είναι ισοδύναμοι.

Στο σύνολο των εξισώσεων (E. 50) - (E. 61) οι συνιστώσες του τανυστή των συντελεστών διασποράς, καθορίζονται βάσει της ταχύτητας του υπόγειου νερού, $\mathbf{v}$. Όταν το πορώδες ποικίλει χωρικά είναι περισσότερο βολικό να καθορίζεται ένας **φαινόμενος τανυστής διασποράς** με την μορφή :

$$(E. 62) \quad \bar{D}_{ij} = \theta D_{ij}$$

όπου η φαινόμενη διασπορά $\bar{D}$ μπορεί να προκύψει από την χρήση των συνιστωσών της ειδικής απόδοσης q (specific discharge q) αντί για την γραμμική ταχύτητα v και αντικαθιστώντας την D^* με θD^* στις εξισώσεις (E. 50) - (E. 61).

Π2.3 Αρνητικές και Θετικές Πηγές (Sink and Sources)

Ο όρος αρνητικής ή θετικής πηγής $q_s C_s$ (sink/source) της βασικής εξίσωσης μεταφοράς μάζας (E. 2) (governing equation) αντιπροσωπεύει την διαλελυμένη μάζα που εισέρχεται στην περιοχή προσομοίωσης διαμέσου θετικών πηγών (sources) ή της διαλελυμένης μάζας που απέρχεται διαμέσου αρνητικών πηγών (sinks). Ο όρος $q_s' C$ μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας «εσωτερικός» όρος πηγής ο οποίος αντιπροσωπεύει την μεταβολή της αποθήκευσης της διαλελυμένης μάζας χωρίς όμως φεύγει ή να εισέρχεται μάζα στην περιοχή προσομοίωσης.

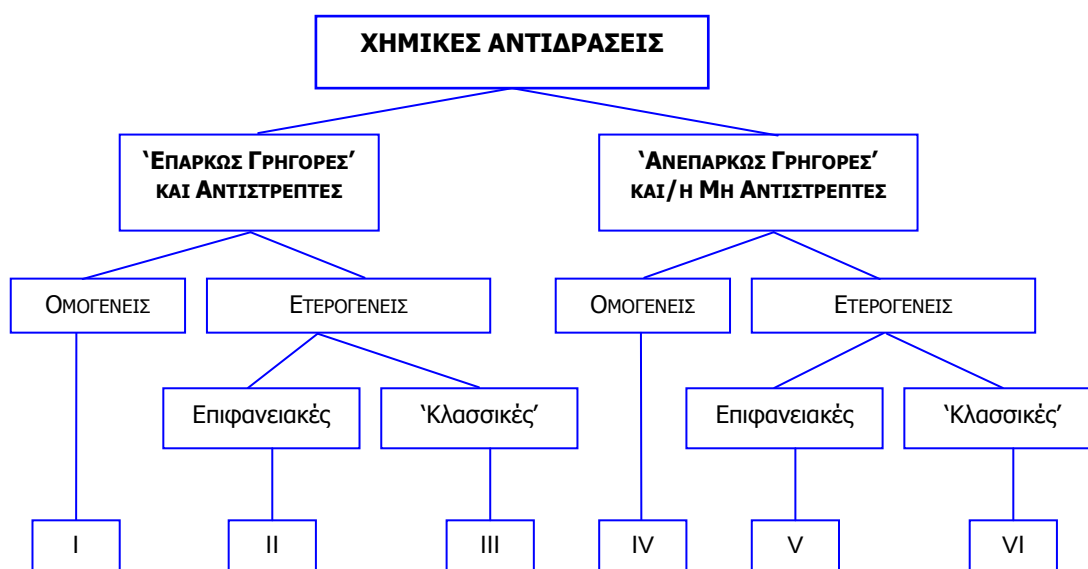
Οι πηγές γενικά, μπορούν να ταξινομηθούν σαν κανονικά (areally) κατανεμημένες στο πεδίο ή σαν σημειακές πηγές. Οι κανονικά κατανεμημένες πηγές περιλαμβάνουν την τροφοδοσία (recharge) και την εξατμισοδιαπνοή (evapotranspiration). Οι σημειακές πηγές περιλαμβάνουν τις γεωτρήσεις/πηγάδια, τις καταβόθρες και τα ποτάμια.

Για τις θετικές πηγές είναι απαραίτητο να καθοριστεί η συγκέντρωση του νερού της πηγής. Για τις αρνητικές πηγές, η συγκέντρωση του νερού είναι γενικά ίση με την συγκέντρωση του υπόγειου νερού στο σημείο που εντοπίζεται η αρνητική πηγή και η οποία δεν μπορεί να καθοριστεί επακριβώς. Εν τούτοις, υπάρχει και μια εξαίρεση όπου η συγκέντρωση της αρνητικής πηγής μπορεί να διαφέρει από αυτή η του υπόγειου νερού. Η εξαίρεση αυτή αφορά την εξατμισοδιαπνοή η οποία μπορεί να υποτεθεί ότι απομακρύνει μόνο καθαρό νερό από τον υδροφόρο και κατ' αυτόν τον τρόπο η ροή της συγκέντρωσης είναι μηδενική.

Π2.4 Χημικές Αντιδράσεις (Chemical reactions)

Οι διαλελυμένες ουσίες στο υπόγειο νερό υπόκεινται σε έναν αριθμό διαφορετικών διαδικασιών /αντιδράσεων μέσω των οποίων μπορεί να απομακρυνθούν ή και να προστεθούν στο υπόγειο νερό. Μέσω των παραπάνω διαδικασιών μπορεί να προσροφηθούν επάνω στην επιφάνεια των ορυκτών κόκκων του υδροφόρου ή σε οργανικό άνθρακα, να υποστούν χημική καθίζηση, αβιοτική ή βιοαποδόμηση, να λάβουν μέρος σε οξειδο-αναγωγικές αντιδράσεις ή εφόσον είναι ραδιενεργά, να αποικοδομηθούν.

Σύμφωνα με τον (Rubin, 1983), οι περισσότερες χημικές αντιδράσεις που επηρεάζουν την μεταφορά μάζας μπορούν να διαχωριστούν ευρέως σε δύο ομάδες : (1) αυτές που **είναι 'επαρκώς γρήγορες' και αντιστρεπτές** έτσι ώστε να μπορεί να υποτεθεί τοπική ισορροπία (LEA) και (2) αυτές που είναι **'ανεπαρκώς γρήγορες' και/ ή μη αντιστρεπτές** ώστε να μην μπορεί να υποτεθεί τοπική ισορροπία.



Εικόνα 105 : Ταξινόμηση των χημικών αντιδράσεων (Rubin, 1983)

Κάτω από κάθε μία από τις παραπάνω ομάδες ο (Rubin, 1983), κάνει έναν επιπλέον διαχωρισμό μεταξύ των 'ομογενών' αντιδράσεων που πραγματοποιούνται σε μία φάση και στις 'ετερογενών' που πραγματοποιούνται σε περισσότερες από μια φάσεις. Στην ομάδα των Ετερογενών αντιδράσεων ανήκουν οι **'Επιφανειακές'** (προσρόφηση και ιοντοανταλλαγή) και οι **'Κλασσικές'** (καθίζηση / διάλυση, οξείδωση / αναγωγή ή redox και complexation)

Αν και είναι θεωρητικώς και μαθηματικώς δυνατή η προσομοίωση των φυσικών διαδικασιών μεταφοράς όλων των χημικών διεργασιών συγχρόνως (Liu and Narasimhan, 1989; Friedly and Rubin, 1992; Lichtner, 1992) στην πράξη προκύπτουν σοβαρές υπολογιστικές δυσκολίες σε αυτή την προσπάθεια. Πέρα όμως και από αυτές τις δυσκολίες, τα προβλήματα πεδίου ενέχουν πάντα αβεβαιότητα ως προς την φύση των κύριων χημικών διεργασιών που αφορούν την ποιότητα και την ποσότητα των αντιδρώντων ουσιών. Σαν αποτέλεσμα, οι

χημικές, γεωχημικές και βιοχημικές διεργασίες αντιπροσωπεύονται τελικά στα μοντέλα μεταφοράς μάζας, στην κλίμακα του πεδίου, από αντιδράσεις της απλούστερης μορφής ή από πολύ απλοποιημένες σύνθετες αντιδράσεις.

Η επίδραση των χημικών αντιδράσεων στην μεταφορά μάζας, εκφράζεται στην εξίσωση (Ε. 43) μεταφοράς μάζας, μέσω του όρου της χημικής αντίδρασης $\sum R_n$, ο οποίος αντιπροσωπεύει τον ρυθμό μεταβολής της συγκέντρωσης συγκεκριμένης διαλελυμένης ουσίας λόγω των n χημικών αντιδράσεων.

Ρόφηση (Sorption) : Όταν ένα πορώδες μέσο είναι κορεσμένο με νερό το οποίο περιέχει κάποια διαλυμένη ουσία, πολύ συχνά, πραγματοποιείται μεταφορά μάζας μεταξύ της υδατικής φάσης και της στερεάς, όπου ποσότητα ουσίας απομακρύνεται από το διάλυμα και ακινητοποιείται επιφανειακά ή εσωτερικά στο στερεό ιστό του πορώδους μέσου λόγω των ηλεκτροστατικών ή των χημικών δυνάμεων. Η διαδικασία αυτή αποκαλείται ρόφηση (sorption). Η αντίστροφη διαδικασία όπου σωματίδια αποκολλούνται από τον στερεό ιστό και μεταφέρονται στην υδατική φάση, αποκαλείται εκρόφηση (desorption). Η ρόφηση είναι ένας πολύ γενικός όρος που περιλαμβάνει και την προσρόφηση (adsorption) και την απορρόφηση (absorption). Η προσρόφηση αναφέρεται στην προσκόλληση της χημικής ουσίας αρχικά στην επιφάνεια του πορώδους υλικού ενώ η απορρόφηση αναφέρεται στην σχετικά ομοιόμορφη διείσδυση της χημικής ουσίας στο στερεό υλικό (Zheng and Bennett, 1995).

Αν και στις περισσότερες διαδικασίες θεωρούμε την ύπαρξη τοπικής ισορροπίας (LEA) κατά την διαδικασία της ρόφησης, αυτή η υπόθεση δεν ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις. Όταν η διαδικασία ρόφησης ή εκρόφησης δεν είναι επαρκώς γρήγορη σε σχέση με τον χρόνο κατά τον οποίο βρίσκεται σε επαφή ο στερεός ιστός και η διαλελυμένη ουσία, τότε θεωρείται ως μη ισορροπούσα (non-equilibrium) ή ως rate limited reaction process. Εντούτοις, λόγω των δυσκολιών προσδιορισμού των rate constant που περιγράφουν την μη ισορροπούσα ρόφηση (non-equilibrium controlled sorption), τα περισσότερα μοντέλα μεταφοράς μάζας, προς το παρόν τουλάχιστον, βασίζονται στην υπόθεση της ύπαρξης τοπικής ισορροπίας (LEA) (Zheng and Bennett, 1995).

i. Ισόθερμες ρόφησης (Sorption Isotherms) σε συνθήκες ισορροπίας

Η ρόφηση όπως προαναφέρθηκε, περιγράφει την διαδικασία μεταφοράς μάζας μεταξύ της ουσίας που είναι διαλελυμένη στο υπόγειο νερό (υδατική φάση) και της ουσίας που είναι ροφημένη στο πορώδες μέσο (στερεά φάση). Θεωρείται ότι υφίστανται συνθήκες ισορροπίας στην συγκέντρωση μεταξύ της υδατικής και της στερεάς φάσης και ότι οι αντιδράσεις ρόφησης είναι τόσο γρήγορες σε σχέση με την ταχύτητα του υπόγειου νερού ώστε μπορεί να θεωρηθούν ως στιγμιαίες.

Η λειτουργική σχέση (αναλογία) μεταξύ της διαλελυμένης και της ροφημένης συγκέντρωσης ουσίας κάτω από μια σταθερή θερμοκρασία σε συνθήκες ισορροπίας, περιγράφεται από την

ισόθερμη ρόφησης (equilibrium sorption isotherm). Οι ισόθερμες ενσωματώνονται στο μοντέλο μεταφοράς μάζας μέσω της χρήσης του συντελεστή επιβράδυνσης (retardation factor - R) όπως ορίζεται στην εξίσωση (E. 43).

Στη συνέχεια, περιγράφονται οι τρεις τύποι ισόθερμης ρόφησης σε συνθήκες ισορροπίας : η Γραμμική, η Freundlich και η Langmuir.

Η γραμμική ισόθερμη υποθέτει ότι η ροφημένη συγκέντρωση ($\bar{C}$) είναι απευθείας ανάλογη με την διαλελυμένη συγκέντρωση (C), έτσι :

$$(E. 63) \quad \bar{C} = K_d C$$

όπου το K_d είναι ο συντελεστής κατανομής (distribution coefficient), (L^3M^{-1}) και αντιπροσωπεύει την κλίση της ευθείας, όπου $K_d = \frac{\partial \bar{C}}{\partial C}$

$$\text{Ο συντελεστής επιβράδυνσης ορίζεται ως (E. 64)} \quad R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{C}}{\partial C} = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} K_d$$

Η ισόθερμη του Freundlich είναι μια μη-γραμμική ισόθερμη η οποία μπορεί να εκφραστεί ως:

$$(E. 65) \quad \bar{C} = K_f C^a \quad \text{όπου :}$$

K_f Είναι η σταθερά του Freundlich, L^3M^{-1}

a Είναι ο εκθέτης του Freundlich, αδιάστατος

Και το K_f και το a είναι εμπειρικοί συντελεστές και πρέπει να προσδιορίζονται για κάθε ουσία στο αντίστοιχο πορώδες μέσο. Εάν το a είναι μεγαλύτερο από την μονάδα, η εξίσωση μεταφοράς μάζας θα οδηγήσει σε ένα διαχεόμενο μέτωπο ενώ εάν είναι μικρότερο της μονάδας το μέτωπο θα γίνεται πιο 'καθαρό' -sharp. Όταν ο εκθέτης a ισούται με την μονάδα, η ισόθερμη του Freundlich γίνεται ισοδύναμη με την γραμμική ισόθερμη.

Ο συντελεστής επιβράδυνσης για την ισόθερμη του Freundlich ορίζεται ως :

$$(E. 66) \quad R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{C}}{\partial C} = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} a K_f C^{a-1}$$

Η ισόθερμη του Freundlich εφαρμόζεται ευρέως για την ρόφηση διαφόρων μετάλλων και οργανικών ουσιών στο έδαφος αλλά αντιμετωπίζει το ίδιο θεμελιώδες πρόβλημα όπως και η γραμμική ισόθερμη ρόφησης : υποθέτει απειρίοριστη ικανότητα ρόφησης του στερεού, γεγονός που δεν ισχύει στην φύση.

Η ισόθερμη του Langmuir βασίσθηκε στην αρχή ότι κάθε στερεή επιφάνεια έχει ένα πεπερασμένο αριθμό σημείων ρόφησης. Όταν καλυφθούν όλα τα σημεία, η επιφάνεια δεν θα μπορεί να απορροφήσει επιπλέον ουσία από το διάλυμα (Fetter, 1999). Η ισόθερμη ορίζεται

από την εξίσωση (Ε. 67)
$$\bar{C} = \frac{K_L \bar{S} C}{1 + K_L C} \quad \text{όπου :}$$

K_L	Είναι η σταθερά του Langmuir ($L^3 M^{-1}$)
$\bar{S}$	Είναι η μέγιστη ικανότητα ρόφησης (MM^{-1}) - είναι δηλαδή η μέγιστη ποσότητα μάζας που μπορεί να προσροφηθεί ανά μονάδα μάζας του πορώδους μέσου

Ο συντελεστής επιβράδυνσης για την ισόθερμη του Langmuir ορίζεται ως :

(Ε. 68)
$$R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{C}}{\partial C} = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} \left[\frac{K_L \bar{S}}{(1 + K_L C)^2} \right]$$

Σε χαμηλές συγκεντρώσεις, η ισόθερμη του Langmuir είναι παρόμοια με την γραμμική ισόθερμη με $K_d = K_L \bar{S}$ ενώ σε υψηλές συγκεντρώσεις, η ροφημένη συγκέντρωση $\bar{C}$ πλησιάζει το ανώτατο όριο $\bar{S}$. Λόγω αυτών των ιδιοτήτων της, η ισόθερμη του Langmuir θεωρείται περισσότερο ρεαλιστική σε σχέση με την ισόθερμη του Freundlich σε συνθήκες πεδίου, που πολύ συχνά έχουμε υψηλές συγκεντρώσεις ρυπαντών (Zheng and Bennett, 1995).

ii. Ρόφηση σε συνθήκες μη-ισορροπίας (Non -Equilibrium Sorption)

Όλα τα μοντέλα σε συνθήκες ισορροπίας υποθέτουν αφενός ότι ο ρυθμός μεταβολής της συγκέντρωσης λόγω της ρόφησης, είναι πολύ μεγαλύτερος σε σχέση με την μεταβολή λόγω κάποιας άλλης αιτίας και ότι αφετέρου ο ρυθμός ροής είναι αρκετά χαμηλός ώστε να μπορεί να επιτευχθεί ισορροπία. Εάν αυτές οι υποθέσεις δεν ισχύουν, περισσότερο κατάλληλο για την περιγραφή του φαινομένου της ρόφησης είναι ένα **κινητικό μοντέλο** (kinetic model). Σε ένα κινητικό μοντέλο, η εξίσωση μεταφοράς μάζας συνδέεται με κατάλληλη εξίσωση η οποία μπορεί να περιγράψει το ρυθμό με τον οποίο η διαλελυμένη ουσία ροφάται στην στερεή επιφάνεια και εκροφάται πάλι από αυτή (Fetter, 1999)

Ο όρος της μη-αντιστρεπτής αντίδρασης, πρώτης τάξεως (first order irreversible rate reaction), που συμπεριλαμβάνεται στην εξίσωση μεταφοράς μάζας (Ε. 43), $-(\lambda_1 \theta C + \lambda_2 \rho_b \bar{C})$ εκφράζει την συνολική απώλεια μάζας από την διαλελυμένη (C) και την προσροφημένη φάση ($\bar{C}$) μαζί.

Η σταθερά ρυθμού αντίδρασης λ (rate constant) για τις μη αντιστρεπτές αντιδράσεις και εκφράζεται συνήθως συναρτήσει του χρόνου ημίσειας ζωής: $\lambda = \frac{(\ln 2)}{t_{1/2}}$ όπου $t_{1/2}$ είναι ο

χρόνος ημίσειας ζωής ενός ραδιενεργού ή ενός βιοαποικοδομήσιμου υλικού - ο χρόνος δηλαδή που απαιτείται ώστε η συγκέντρωση να μειωθεί στο μισό της αρχικής τιμής. Για τις αντιδράσεις πρώτης τάξεως, ο χρόνος ημίσειας ζωής είναι σταθερός και ανεξάρτητος από την τιμή της αρχικής συγκέντρωσης (Zheng and Wang, 1998).

Στην ραδιενεργή αποδόμηση (radioactive decay) ο ρυθμός της αντίδρασης είναι ο ίδιος και στις δύο φάσεις $\lambda = \lambda_1 = \lambda_2$ ενώ στην βιοαποδόμηση (biodegradation) έχει παρατηρηθεί ότι κάποιες αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα μόνο στην διαλελυμένη φάση. Αυτός είναι και ο λόγος που χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές σταθερές λ_1 και λ_2 .

Εάν ο ρυθμός ρόφησης της διαλελυμένης ουσίας εξαρτάται από την ποσότητα που έχει ήδη προσροφηθεί και η αντίδραση είναι αντιστρεπτή, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα αντιστρεπτό γραμμικό μοντέλο κινητικής ρόφησης (reversible linear kinetic sorption model) όπου υποθέτουμε ότι η διαδικασία ρόφησης μπορεί να παρουσιαστεί μέσω μιας πρώτης τάξεως αντιστρεπτή κινητική αντίδραση (first-order reversible kinetic reaction):

$$(E. 69) \quad \rho_b \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = \beta \left(C - \frac{\bar{C}}{K_d} \right)$$

όπου β (T^{-1}), είναι ο πρώτης τάξεως ρυθμός μεταφοράς μάζας μεταξύ της διαλελυμένης και της ροφημένης φάσης και K_d είναι ο συντελεστής κατανομής για την ροφημένη φάση όπως προσδιορίστηκε νωρίτερα για την γραμμική ρόφηση (Zheng and Bennett, 1995)

Η εξίσωση (E. 69) επιλύεται συγχρόνως με την εξίσωση μεταφοράς μάζας ώστε να προκύψουν λύσεις για την μεταφορά μάζας με ρόφηση σε συνθήκες μη ισορροπίας.

Όσο αυξάνεται ο ρυθμός μεταφοράς μάζας β , η διαδικασία της ρόφησης γίνεται γρηγορότερη και η μη ισορροπούσα ρόφηση πλησιάζει τις συνθήκες της ισορροπούσας γραμμικής ρόφησης (equilibrium controlled sorption) όπως καθορίζεται στην εξίσωση (E. 63). Για πολύ μικρές τιμές του β , η μεταφορά μάζας μεταξύ της υδατικής και της στερεάς φάσης είναι τόσο αργή ώστε η ρόφηση θεωρείται αμελητέα.

Π2.5 Αρχικές Συνθήκες (Initial Conditions) της Εξίσωσης Μεταφοράς Μάζας

Δεδομένου ότι η εξίσωση μεταφοράς μάζας περιγράφει τις μεταβολές της συγκέντρωσης μιας ουσίας στο υπόγειο νερό, για την επίλυση της εξίσωσης είναι απαραίτητες οι αρχικές συνθήκες.

Η αρχική συνθήκη στην γενική της μορφή γράφεται ως :

$$C(x, y, z) = C_o(x, y, z) \text{ στο σύνολο του } \Omega \text{ για } t=0 \text{ όπου :}$$

$C_o(x, y, z)$	Είναι η γνωστή κατανομή συγκέντρωσης
Ω	Αντιπροσωπεύει ολόκληρο το πεδίο έρευνας

Μία ειδική περίπτωση της ανωτέρω συνθήκης είναι $C(x, y, z) = 0$ όπου η αρχική συγκέντρωση είναι μηδενική σε όλη την έκταση του πεδίου. Πολλά προβλήματα μεταφοράς μάζας που έχουν σαν σκοπό την εκτίμηση μιας πιθανής ρύπανσης χρησιμοποιούν αυτό τον τύπο αρχικής συνθήκης.

Π2.6 Οριακές Συνθήκες (Boundary Conditions) της Εξίσωσης Μεταφοράς Μάζας

Η επίλυση της βασικής εξίσωσης μεταφοράς μάζας, απαιτεί επίσης τον ορισμό των οριακών συνθηκών. Τρεις γενικοί τύποι οριακών συνθηκών χρησιμοποιούνται στο μοντέλο MT3DMS για την εξίσωση μεταφοράς μάζας (Zheng and Wang, 1998) :

- Γνωστή συγκέντρωση κατά μήκος ενός ορίου (Dirichlet Condition)
- Γνωστή κλίση συγκέντρωσης εγγαρσίως ενός ορίου (Neumann Condition)
- Συνδυασμός των ανωτέρω (Cauchy Condition)

Για την οριακή συνθήκη Dirichlet, η συγκέντρωση καθορίζεται κατά μήκος ενός ορίου για όλη την διάρκεια της προσομοίωσης, όπου:

$C(x, y, z) = c(x, y, z)$ στο Γ_1 , $t \geq 0$ όπου το Γ_1 υποδηλώνει το καθορισμένο όριο και $c(x, y, z)$ είναι η καθορισμένη συγκέντρωση κατά μήκος του ορίου Γ_1 . Η καθορισμένη αυτή συγκέντρωση μπορεί να μεταβάλλεται σε σχέση με τον χρόνο.

Σε ένα μοντέλο ροής, η οριακή συνθήκη Dirichlet είναι ένα όριο σταθερής στάθμης που δρα ως μία θετική ή αρνητική πηγή ύδατος που εισέρχεται ή απομακρύνεται από το πεδίο του μοντέλου. Κατά παρόμοιο τρόπο, η οριακή συνθήκη σταθερής συγκέντρωσης σε ένα μοντέλο μεταφοράς μάζας δρα ως μία θετική πηγή που παρέχει διαλελυμένη ουσία στο πεδίο του μοντέλου ή ως μια αρνητική πηγή που απομακρύνει διαλελυμένη ουσία από το μοντέλο κρατώντας την συγκέντρωση σταθερή.

Οριακή συνθήκη σταθερής στάθμης στο μοντέλο ροής δεν υποθέτει και οριακή συνθήκη σταθερής συγκέντρωσης στο μοντέλο μεταφοράς μάζας.

Στην περίπτωση της οριακής συνθήκης Neumann, αυτή ορίζεται ως, η κλίση της συγκέντρωσης εγκαρσίως του ορίου Γ_2 :

$$\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_i} = f_i(x, y, z, t) \text{ στο } \Gamma_2, \quad t \geq 0 \text{ όπου : } f_i(x, y, z, t) \text{ είναι μία γνωστή συνάρτηση που}$$

αντιπροσωπεύει την κατανομή της ροής διασποράς σε σχέση με το όριο Γ_2 .

Ειδική περίπτωση της οριακής συνθήκης Neumann, είναι το όριο με μηδενική διασπορά όπου $f_i(x, y, z, t) = 0$.

Για την οριακή συνθήκη του Cauchy και η τιμή της συγκέντρωσης και η κλίση της καθορίζονται ως εξής :

$$\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} - q_i C = g_i(x, y, z, t) \text{ στο } \Gamma_3, \quad t \geq 0 \text{ όπου : } g_i(x, y, z, t) \text{ είναι γνωστή συγκέντρωση}$$

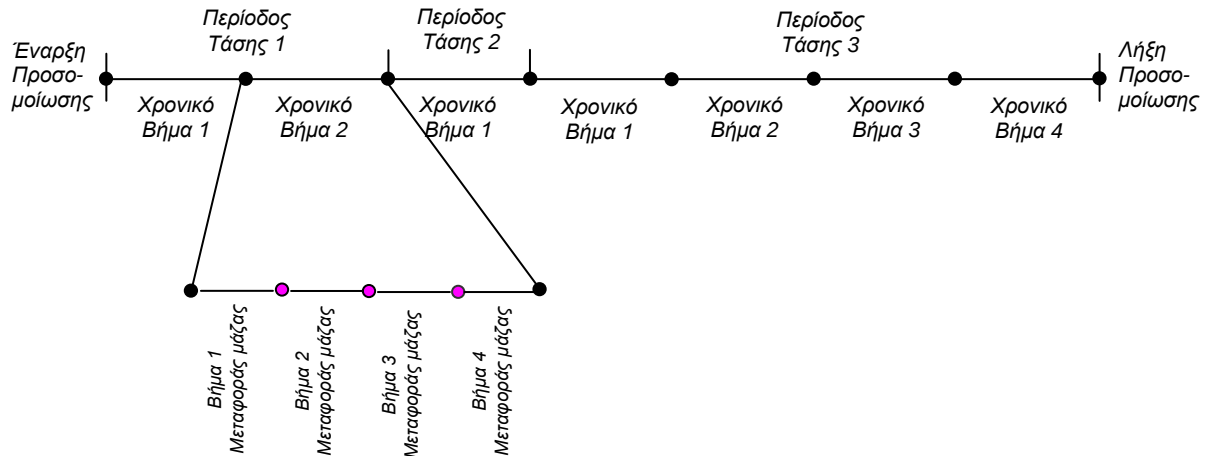
που αντιπροσωπεύει την συνολική ροή μάζας -total flux (dispersive and advective) για το όριο Γ_3 . Για ένα φυσικό αδιαπέρατο όριο και οι δύο τύποι μεταφορά μάζας (dispersive and advective) ισούνται με μηδέν καθώς $g_i(x, y, z, t) = 0$.

Είναι σύνηθες να υποθέτουμε ότι η ροή μάζας λόγω συμμεταφοράς κυριαρχεί σε σχέση με την διασπορά και έτσι η εξίσωση μπορεί να απλοποιηθεί ως : $-q_i C = g_i(x, y, z, t)$ (3.5.21)

Η εξίσωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο μοντέλο μεταφοράς μάζας παρόμοια με τον όρο της θετικής ή της αρνητικής πηγής (Zheng and Wang, 1998).

Π2.7 Υπολογισμός του Χρονικού Βήματος Μεταφοράς Μάζας

Στα περισσότερα μοντέλα ροής όπως στο MODFLOW ο χρόνος προσομοίωσης διαχωρίζεται σε περιόδους τάσης (η χρονική περίοδος κατά την οποία όλες οι τάσεις -οριακές συνθήκες, ρυθμοί άντλησης, κα- στο σύστημα είναι σταθερές. Οι περίοδοι τάσης με την σειρά τους διαχωρίζονται σε Χρονικά Βήματα εφόσον η προσομοίωση είναι μεταβατική.



Εικόνα 106 : Διάρθρωση του χρόνου προσομοίωσης σε περιόδους τάσης και χρονικά βήματα για το MT3DMS (McDonald and Harbaugh, 1988)

Στο Μοντέλο MT3DMS η προσομοίωση της μεταφοράς μάζας βασίζεται σε στην επίλυση στάθμης που δίνει το μοντέλο ροής. Το μήκος του Χρονικού Βήματος που χρησιμοποιείται στο μοντέλο ροής είναι συνήθως πολύ μεγάλο για να χρησιμοποιηθεί στην επίλυση των εξισώσεων μεταφοράς μάζας καθώς οι επιλύσεις των εξισώσεων περιορίζονται από κάποια κριτήρια σταθερότητας ή από απαιτήσεις ακρίβειας που είναι περισσότερο περιοριστικές σε σχέση με την επίλυση των εξισώσεων ροής. Για αυτόν τον λόγο κάθε χρονικό βήμα του μοντέλου ροής διαχωρίζεται σε μικρότερα χρονικά βήματα που αποκαλούνται βήματα μεταφοράς μάζας (Εικόνα 106) όπου η στάθμη είναι σταθερή. Το μήκος κάθε βήματος μεταφοράς μάζας καθορίζεται είτε κατά την εισαγωγή των δεδομένων στο μοντέλο είτε αυτόματα.

Προκειμένου λοιπόν για την επίλυση των εξισώσεων μεταφοράς μάζας είτε με τις μεθόδους που βασίζονται στην ανίχνευση σωματιδίων (MOC, MMOC, HMOC) είτε με τις μεθόδους πεπερασμένων διαφορών με απ' ευθείας επίλυση (explicit finite difference), το MT3D καθορίζει το μέγεθος του χρονικού βήματος βάσει των ακόλουθων κριτηρίων σταθερότητας που πρέπει να ικανοποιούνται αναλόγως για τους διαφορετικούς όρους της εξίσωσης μεταφοράς μάζας (Ε. 2) :

■ **Για τον όρο της Συμμεταφοράς (Advection)**

$$|\Delta t| \leq \gamma_c R_{\min} \left(\frac{\Delta x}{v_x}, \frac{\Delta y}{v_y}, \frac{\Delta z}{v_z} \right) \text{ όπου } \gamma_c \text{ είναι ο αριθμός Courant}$$

Ο αριθμός Courant (γ_c) αντιπροσωπεύει τον αριθμό κελιών που μπορεί να διασχίσει ένα σωματίδιο σε κάθε κατεύθυνση σε ένα Βήμα Μεταφοράς μάζας.

■ **Για τον όρο της διασποράς (Dispersion)**

$$\Delta t \leq \frac{0.5R}{\left(\frac{D_{xx}}{\Delta x^2} + \frac{D_{yy}}{\Delta y^2} + \frac{D_{zz}}{\Delta z^2} \right)}$$

■ **Για τους όρους Πηγής / Καταβόθρας (Sinks & Sources)**

$$\Delta t \leq \left| \frac{R_{i,j,k}^n \theta_{i,j,k}}{q_{s\ i,j,k}^n} \right|$$

■ **Για τον όρο της Χημικής Αντίδρασης (Chemical Reaction)**

$$\Delta t \leq \frac{1}{\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\beta}}$$

Όταν χρησιμοποιείται η ρητή μέθοδος (explicit method) υπολογίζονται οι απαραίτητες συνθήκες σταθερότητας για κάθε όρο της εξίσωσης μεταφοράς μάζας ενώ το ελάχιστο χρονικό βήμα μεταφοράς μάζας για κάθε ενεργό κελί, θεωρείται και ως το μέγιστο επιτρεπόμενο για την επίλυση του συγκεκριμένου όρου. Το μέγεθος του χρονικού βήματος που χρησιμοποιείται τελικά στην εξίσωση προσομοίωσης μεταφοράς μάζας καθορίζεται από το μέγιστο επιτρεπόμενο βήμα των μεμονωμένων όρων.

Η ρητή μέθοδος είναι απλή και δεν απαιτεί το μέγεθος της υπολογιστικής μνήμης που χρειάζεται το επαναληπτικό πρόγραμμα επίλυσης (iterative solver). Παρόλα αυτά για προβλήματα μεταφοράς μάζας σε πυκνό πλέγμα, μεγάλους συντελεστές διασποράς και/ή όρους πηγής/καταβόθρας οι απαιτούμενες συνθήκες αριθμητικής σταθερότητας μπορεί να οδηγήσουν σε εξαιρετικά μικρό χρονικό βήμα. Υπό αυτές τις συνθήκες το πρόγραμμα επίλυσης GCG (Generalized Conjugate Gradient) παρουσιάζει μεγαλύτερη υπολογιστική επάρκεια (Zheng and Wang, 1998).

Π2.8 Η επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς μάζας

Η αριθμητική επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς μάζας όπως περιγράφηκε νωρίτερα έχει αναφερθεί ως 'ένα αρκετά δύσκολο πρόβλημα' (Mitchell, 1984; Leonard, 1988). Η δυσκολία αυτή προκύπτει από το γεγονός ότι συνυπάρχουν στην εξίσωση μεταφοράς μάζας η πρώτη παράγωγος της μεταβολής συγκέντρωσης στο χώρο (συμμεταφορά) αλλά και η δεύτερη παράγωγός της (μηχανική διασπορά και μοριακή διάχυση).

Οι περισσότερες μαθηματικές μέθοδοι για την επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς μάζας μπορούν να ταξινομηθούν ως Eulerian, Langrangian ή Mixed Eulerian-Langrangian (Neumann, 1984).

Οι (Zheng and Bennett, 1995) μας παρέχουν μια εισαγωγή στις πιο κοινά χρησιμοποιούμενες τεχνικές επίλυσης μεταφοράς μάζας και συζητούν τις δυνατότητες αλλά και τα όρια αυτών.

Βάσει της Eulerian προσέγγισης, η εξίσωση μεταφοράς μάζας επιλύεται με μέθοδο που χρησιμοποιεί καθορισμένο πλέγμα όπως είναι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών ή των πεπερασμένων στοιχείων. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στην αρχή της διατήρησης της μάζας (mass conservative) και προσφέρει το πλεονέκτημα και την ευκολία του καθορισμένου πλέγματος (fixed grid) χειριζόμενη επιτυχώς τα αριθμητικά προβλήματα που υπάρχουν όταν κυριαρχούν οι όροι της διασποράς η/και των αντιδράσεων. Στα προβλήματα όμως που κυριαρχεί η συμμεταφορά, η μέθοδος είναι επιρρεπής σε αριθμητικά προβλήματα, όπως η αριθμητική διασπορά (numerical dispersion) και η τεχνητή ταλάντωση (artificial oscillation). Για τον υπερκερασμό αυτών των προβλημάτων με την χρήση αυτής της προσέγγισης, γενικά απαιτούνται μικρότερα ανοίγματα στο πλέγμα όπως και μικρότερα χρονικά βήματα.

Λόγω των παραπάνω προβλημάτων, η χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών προτιμάται σε προβλήματα όπου δεν κυριαρχεί το φαινόμενο της συμμεταφοράς, όπως σε περιπτώσεις με μεγάλη φυσική διασπορά ή όταν το πλέγμα είναι αρκετά πυκνό. Θεωρείται δε ότι η μέθοδος μπορεί να δώσει ασφαλή και με ακρίβεια αποτελέσματα όταν $Pe \leq 4$, (Zheng and Bennett, 1995).

Κατά την Langrangian προσέγγιση, η εξίσωση μεταφοράς μάζας, επιλύεται είτε σε παραμορφούμενο πλέγμα (deforming grid) είτε σε παραμορφούμενο σύστημα συντεταγμένων (deforming coordinate) σε σταθερό πλέγμα, μέσω του προσδιορισμού της θέσης των σωματιδίων (particle tracking) όπως στην μέθοδο του τυχαίου βήματος (random walk).

Η μέθοδος είναι εξαιρετικά επαρκής σε προβλήματα που κυριαρχούν τα φαινόμενα συμμεταφοράς χωρίς να δημιουργείται αριθμητική διασπορά. Εντούτοις, χωρίς καθορισμένο πλέγμα ή σύστημα συντεταγμένων, η μέθοδος δύναται να οδηγήσει σε αριθμητική αστάθεια

και υπολογιστικές δυσκολίες προκειμένου για ανομοιόμορφα πεδία με πολλαπλές πηγές ή/και καταβόθρες αλλά και σύνθετες οριακές συνθήκες (Yeh, 1990).

Η mixed Eulerian - Lagrangian προσέγγιση προσπαθεί να συνδυάσει τα πλεονεκτήματα και των δύο παραπάνω μεθόδων, επιλύοντας τον όρο της συμμεταφοράς με την Lagrangian method (particle tracking) και τους όρους της διασποράς και αντίδρασης με την Eulerian μέθοδο (finite difference or finite element).

Μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι μαζί με τα θετικά σημεία συνυπάρχουν και τα αρνητικά των επιμέρους μεθόδων καθώς αφενός κάποιες από αυτές (MOC) δεν εγγυώνται την διατήρηση της μάζας ενώ υπόκεινται στα ίδια αριθμητικά προβλήματα με τις Lagrangian μεθόδους. Επιπλέον, οι mixed Eulerian - Lagrangian μέθοδοι δεν εμφανίζουν την ίδια υπολογιστική επάρκεια που διαθέτει η κάθε μέθοδος χωριστά (Zheng and Wang, 1998).

Σχετικά πρόσφατα (Harten, 1983; Harten, 1984), αναπτύχθηκε μια νέα τάξη τεχνικών επίλυσης της εξίσωσης μεταφοράς μάζας που αναφέρονται ως Total Variation Diminishing methods (TVD). Ο όρος αυτός αναφέρεται στην κοινή ιδιότητα των μεθόδων ότι *‘το άθροισμα της διαφοράς συγκέντρωσης μεταξύ διαδοχικών κόμβων, ελαττώνεται σε διαδοχικά βήματα της μεταφοράς μάζας’* - μία απαραίτητη συνθήκη ώστε η επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς μάζας να είναι ελεύθερη από ψευδείς ταλαντώσεις.

Οι TVD μέθοδοι είναι κατ’ ουσία μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών υψηλής τάξης και σαν τέτοιες ανήκουν στην οικογένεια των Eulerian τεχνικών επίλυσης που βασίζονται στην αρχή της διατήρησης της μάζας. Δεδομένου ότι οι τεχνικές επίλυσης TVD υψηλότερης τάξης ελαχιστοποιούν την αριθμητική διασπορά εις βάρος της τεχνητής ταλάντωσης, εφαρμόζονται συνήθως σε συνδυασμό με αριθμητικές διαδικασίες που ονομάζονται flux limiters οι οποίες ελαχιστοποιούν τις ψευδείς ταλαντώσεις (Zheng and Wang, 1998).

Αναλόγως λοιπόν της προσέγγισης που χρησιμοποιούν οι **μέθοδοι επίλυσης**, χωρίζονται σε:

i. Particle - Based Methods

Μέθοδος των Χαρακτηριστικών (Method of Characteristics - MOC) : Αυτή η τεχνική ανιχνεύει έναν μεγάλο αριθμό κινούμενων σωματιδίων σε κάθε νέα χρονική στιγμή (forward in time) ελέγχοντας την συγκέντρωση και την θέση του κάθε σωματιδίου. Θετικό σημείο της μεθόδου είναι ότι είναι απαλλαγμένη από αριθμητική διασπορά αλλά το αρνητικό είναι ότι μπορεί να είναι αργή και με μεγάλη απαίτηση σε υπολογιστική μνήμη.

Τροποποιημένη Μέθοδος των Χαρακτηριστικών (Modified Method of Characteristics - MMOC) Σε αντίθεση με την MOC που ελέγχει την θέση του κάθε σωματιδίου, η MMOC θέτει ένα σωματίδιο στο μέσο κάθε κελί σε κάθε νέα χρονική στιγμή και προσπαθεί να ανιχνεύσει την θέση που είχε στην προηγούμενη χρονική στιγμή (backward in time) με την αντίστοιχη συγκέντρωση. Η συγκέντρωση στην προηγούμενη χρονική στιγμή χρησιμοποιείται για τον

υπολογισμό της συγκέντρωσης στην νέα χρονική στιγμή. Θετικό σημείο της μεθόδου είναι η ταχύτητα και η μικρότερη απαίτηση σε υπολογιστική μνήμη και το αρνητικό είναι ότι η χαμηλής τάξης παρεμβολή των τιμών που χρησιμοποιεί μπορεί να δημιουργήσει αριθμητική διασπορά.

Υβριδική Μέθοδος των Χαρακτηριστικών (Hybrid method of Characteristics - HMOC) : Προκειμένου να εκμεταλλευθεί τα θετικά και των δύο μεθόδων χρησιμοποιεί την μέθοδο MOC κοντά στο μέτωπο της συγκέντρωσης και την MMOC στα υπόλοιπα σημεία. Ουσιαστικό σημείο αυτής της μεθόδου είναι η επιλογή του κατάλληλου κριτηρίου αλλαγής από την μία μέθοδο στην άλλη.

ii. Finite Difference Methods

Upstream Finite Difference Method (UFD): Δεδομένου ότι ακολουθεί την Eulerian προσέγγιση, αν και είναι περισσότερο υπολογιστικά επαρκής σε σχέση με τις μεθόδους των χαρακτηριστικών και οδηγεί σε μικρότερα σφάλματα στο ισοζύγιο μάζας, τείνει να δημιουργεί σημαντικό πρόβλημα αριθμητικής διασποράς σε περιπτώσεις με καθαρό μέτωπο συγκέντρωσης.

Central Finite Difference Method (CFD): Δεν δημιουργεί τα προβλήματα αριθμητικής διασποράς όπως το UFD αλλά είναι επιρρεπής σε τεχνητές ταλαντώσεις όταν κυριαρχεί το φαινόμενο της συμμεταφοράς.

iii. TVD Methods

Συγκρινόμενη η TVD μέθοδος με την απλή μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, θεωρείται ότι είναι περισσότερο ακριβής στην επίλυση προβλημάτων που κυριαρχεί η συμμεταφορά αλλά με μεγαλύτερο υπολογιστικό φορτίο. Συγκρινόμενη δε, με μερικές Lagrangian ή mixed Eulerian - Lagrangian μεθόδους όπως είναι η μέθοδος των χαρακτηριστικών (MOC), αν και δεν είναι τόσο επαρκής στην μείωση της αριθμητικής διασποράς, διαθέτει πλεονεκτήματα όπως την ιδιότητα της διατήρησης μάζας, την μικρότερη απαίτηση σε υπολογιστική μνήμη κ.α. που την κάνουν τον καλύτερο συμβιβασμό μεταξύ της απλής μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών και του particle tracking της Lagrangian μεθόδου ή των mixed Eulerian - Lagrangian μεθόδων.

Δεδομένου ότι ο αλγόριθμος που χρησιμοποιεί η μέθοδος TVD είναι ρητός (explicit), λειτουργεί υπό προϋποθέσεις που του εξασφαλίζουν την απαραίτητη σταθερότητα (stability constraints) και αφορούν το μέγεθος του χρονικού βήματος. Η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή χρονικού βήματος είναι η ελάχιστη που υπολογίζεται για κάθε cell βάσει του αριθμού Courant (Courant Number).

Πρέπει να τονιστεί ότι αν και καμία από τις παραπάνω μεθόδους δεν αποδείχθηκε επαρκής κάτω από όλες τις συνθήκες μεταφοράς μάζας, πιστεύεται ότι ο συνδυασμός τους μπορεί να

δώσει τα καλύτερα αποτελέσματα για τα περισσότερα προβλήματα, με την επιθυμητή κάθε φορά ακρίβεια (Zheng and Bennett, 1995).

Τεχνικές επίλυσης : Σύμφωνα με τα παραπάνω ο κώδικας MT3DMS διαθέτει διάφορες επιλογές επίλυσης σχεδιασμένες να υπερνικούν την αριθμητική διασπορά και την τεχνητή ταλάντωση.

- Η μέθοδος των χαρακτηριστικών (method of characteristics - MOC) είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στην εξάλειψη της αριθμητικής διασποράς σε προβλήματα που κυριαρχούν τα φαινόμενα συµµεταφοράς.
- Η τρίτης τάξεως μέθοδος TVD, ελαχιστοποιεί και την αριθμητική διασπορά και την τεχνητή ταλάντωση.

Όταν η αριθμητική διασπορά δεν είναι ένα σημαντικό πρόβλημα, όπως σε περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται ένα πυκνό πλέγμα ή η φυσική διασπορά είναι μεγάλη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (standard finite difference method) για μεγαλύτερη υπολογιστική αποδοτικότητα.

Προκειμένου λοιπόν για την επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς μάζας, το MT3D, διαχωρίζει την εξίσωση σε δύο τμήματα : ένα που περιλαμβάνει τον όρο της συµµεταφοράς και ένα δεύτερο που περιλαμβάνει τους όρους διασποράς και αντίδρασης. Αυτός ο διαχωρισμός γίνεται προκειμένου να μπορεί ο χρήστης να επιλέξει τον συνδυασμό μεθόδων επίλυσης και για τα δύο τμήματα. Όλες οι μέθοδοι χειρίζονται τους όρους διασποράς, πηγής και αντίδρασης ακριβώς με τον ίδιο τρόπο, χρησιμοποιώντας την block - centered finite difference μέθοδο, είτε explicit or implicit in time weighting. Διαφέρουν μόνο ως προς τον τρόπο που χειρίζονται τον όρο της συµµεταφοράς. Έτσι :

- Όταν επιλέγονται οι μέθοδοι MOC, MMOC, HMOC και TVD προκειμένου για την επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς μάζας, η εξίσωση χωρίζεται σε δύο μέρη όπου στο αριστερό είναι ο όρος της συσσώρευσης μάζας μαζί με τον όρο της συµµεταφοράς και στο δεξιό τμήμα της εξίσωσης είναι ο όρος της διασποράς, της αντίδρασης και της πηγής, οι οποίες εκφράζονται με προσεγγίσεις πεπερασμένων διαφορών.
- Όταν επιλέγονται οι μέθοδοι των πεπερασμένων διαφορών (UFD, CFD) όλοι οι όροι στην εξίσωση εκφράζονται με προσεγγίσεις πεπερασμένων διαφορών και επιλύονται συγχρόνως.

Για το εάν η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών θα είναι πεπλεγμένη (implicit) ή ρητή (explicit) εξαρτάται από την επιλογή ή όχι του προγράμματος επίλυσης - Generalized Conjugate Gradient Solver (GCG) από τον χρήστη.

Για την επίλυση του όρου της **συμμεταφοράς (advection term)**, όταν επιλέγονται οι μέθοδοι MOC, MMOC και HMOC που βασίζονται στην ανίχνευση σωματιδίων, απαιτείται ο προσδιορισμός των παραμέτρων των σωματιδίων. Υπάρχουν τρεις διαφορετικές μέθοδοι ανίχνευσης σωματιδίων (particle tracking methods) διαθέσιμες στο MT3D :

- *First order Euler algorithm* - για σωματίδια που βρίσκονται σε σχετικά ομοιόμορφο πεδίο ταχυτήτων
- *Fourth order Range - Kutta algorithm* - για σωματίδια που βρίσκονται σε ισχυρά ανομοιόμορφο πεδίο ταχυτήτων (κοντά σε πηγές ή καταβόθρες)
- *Εφαρμογή του Fourth order Range - Kutta algorithm για τις πηγές / καταβόθρες και Euler στα υπόλοιπα σημεία*

Οι παράμετροι των σωματιδίων που σχετίζονται με τις διαφορετικές μεθόδους ανίχνευσης της κίνησης των σωματιδίων, περιγράφονται στην συνέχεια.

- **Concentration Weighting Factor (WD):** Κλάσμα μεταξύ του 0 και 1 (συνήθως 0.5). Μεγαλύτερη τιμή υποδηλώνει αύξηση της συγκέντρωσης των σωματιδίων στο κελί και κυριαρχία της συμμεταφοράς.
- **Max number of Particles (MXPART):** Ο μέγιστος αριθμός των σωματιδίων που κινούνται στην περιοχή της προσομοίωσης.
- **Min Number of Particles per Cell (NPMIN):** Ελάχιστος επιτρεπόμενος αριθμός σωματιδίων ανά κελί. Γενικά παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 4.
- **Max Number of Particles per Cell (NPMAX):** Μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός σωματιδίων ανά κελί. Γενικά παίρνει τιμές διπλάσιες του NPH.
- **Number of Planes (NPLANE):** Είναι ο αριθμός των επιπέδων επάνω στα οποία τοποθετούνται τα αρχικά σωματίδια σε κάθε κελί. Για προσομοιώσεις δύο διαστάσεων επαρκεί το ένα επίπεδο ενώ για τρεις διαστάσεις, επαρκούν τα δύο επίπεδα.
- **Negligible Gradient (DCEPS):** Παράμετρος που χρησιμοποιείται για την βελτίωση της υπολογιστικής επάρκειας της MOC, με συνήθη τιμή της τάξεως του 10^{-5} . Κατανέμει το αριθμό των σωματιδίων βάσει της κλίσης συγκέντρωσης.
- **Particles for $C \leq$ Negligible Gradient, (NPL):** Είναι ο αριθμός των αρχικών σωματιδίων ανά κελί όταν η υπολογιζόμενη κλίση συγκέντρωσης είναι μικρότερη ή ίση με το DCEPS. Γενικά μπορεί να πάρει την τιμή 0. Όταν $NPL=NPH$ τίθεται ομοιόμορφος αριθμός σωματιδίων σε όλα τα κελιά του πλέγματος.
- **Particles for $C >$ Negligible Gradient, (NPH):** Είναι ο αριθμός των αρχικών σωματιδίων ανά κελί όταν η υπολογιζόμενη κλίση συγκέντρωσης είναι μεγαλύτερη από το DCEPS.

- **Critical Concentration Gradient (DCHMOC):** Είναι η σχετική κλίση συγκέντρωσης μεταξύ του κελιού και των γειτονικών του η οποία χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της καθαρότητας του μετώπου συγκέντρωσης. Το κριτήριο αυτό είναι εμπειρικό και παίρνει τιμές μεταξύ 0.001 και 0.01.
- **Particle Pattern (NLSINK):** Θέτει το αριθμό των σωματιδίων ανά οριζόντιο επίπεδο.

Όταν γίνεται χρήση των πεπερασμένων διαφορών (UFD, CFD) για την επίλυση των όρων **διασποράς (dispersion), αντίδρασης (reaction) ή/και συμμεταφοράς (advection)**, ο χρήστης έχει την επιλογή να λύσει τις εξισώσεις είτε με την ρητή προσέγγιση (Explicitly) είτε με την πεπλεγμένη (Implicitly) με την χρήση του Implicit GCG solver.⁸

- Εάν λυθούν ρητώς (Explicitly), οι όροι υπόκεινται σε κάποιους περιορισμούς σε σχέση με το χρονικό βήμα προκειμένου να είναι σταθερή η λύση (stability constraints) οι οποίοι θα αναφερθούν παρακάτω.
- Εάν λυθούν βάσει της πεπλεγμένης προσέγγισης (Implicitly), χρησιμοποιείται ένα επαναληπτικό πρόγραμμα επίλυσης που ονομάζεται Implicit GCG solver.

Το πρόγραμμα επίλυσης με επαναληπτικές μεθόδους GCG, είναι συνήθως πιο γρήγορο σε σχέση με την εφαρμογή της άμεσης μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών γιατί δεν υπάρχουν περιορισμοί (unconditionally stable) όσον αφορά το χρονικό βήμα αλλά απαιτεί περισσότερη υπολογιστική μνήμη (Neville, 2002).

⁸ Η διαφορά ρητής και πεπλεγμένης προσέγγισης βασίζεται στον τρόπο επίλυσης της εξίσωσης των πεπερασμένων διαφορών

Π3. ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα : Τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα αποτελούν τη πηγή τροφοδοσίας των υδατικών πόρων. Ο κύριος όγκος των βροχών παρατηρείται την περίοδο από τα μέσα του φθινοπώρου μέχρι τα μέσα της άνοιξης, με το μέγιστο ύψος κατακρημνισμάτων να εμφανίζεται τον χειμώνα. Κατά το υπόλοιπο διάστημα οι βροχές είναι λίγες, με σχεδόν ανομβρία κατά το θέρος. Η κατανομή αυτή είναι χαρακτηριστική κυρίως του νότιου τμήματος της Χώρας και των νησιών του Αιγαίου. Ο εμπλουτισμός των υπόγειων νερών συντελείται κυρίως από το ποσοστό της κατέισδυσης των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Στην δίαυτα των υπόγειων νερών συμβάλλουν επίσης και τα επιφανειακά υδροσυστήματα, όπως λίμνες, ποταμοί, κλπ.

Έντονη βροχόπτωση που συμβαίνει σε μικρό χρονικό διάστημα συνδέεται με υψηλό ποσοστό επιφανειακής απορροής. Αντίθετα συνεχείς βροχοπτώσεις χαμηλής έντασης συμβάλλουν αποτελεσματικά στον εμπλουτισμό των υπόγειων νερών, καθότι ένα σημαντικό ποσοστό αυτών κατεισδύει στο υπέδαφος.

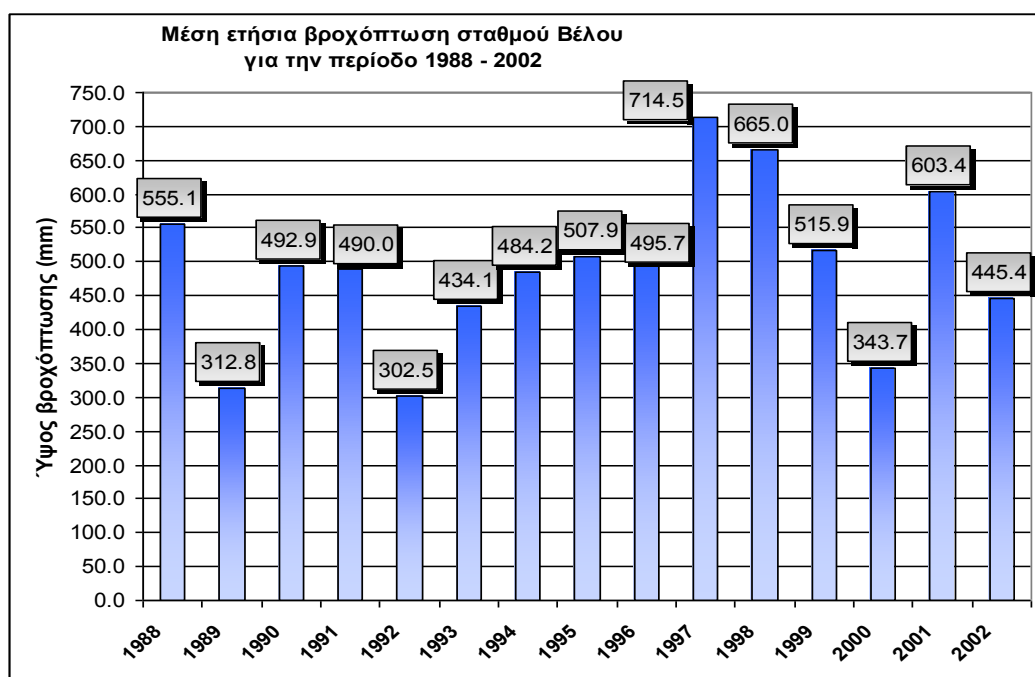
Στην παραλιακή ζώνη Κορινθίας, στο Βέλο, λειτουργεί μετεωρολογικός σταθμός της ΕΜΥ (Γεωγραφικό πλάτος Β $37^{\circ} 58'$, Γεωγραφικό Μήκος Α $22^{\circ} 45'$) σε υψόμετρο 19 μέτρων από την επιφάνεια της θάλασσας, με καταγραφές από το έτος 1987 έως το 2007).

Αν και το έτος 1997 καταγράφεται η μεγαλύτερη ετήσια βροχόπτωση για το χρονικό διάστημα 1988-2007, τα χιλιοστά βροχής δεν κατανέμονται ομοιόμορφα σε ολόκληρο το χρονικό διάστημα αλλά συγκεντρώνονται κυρίως στον Ιανουάριο με 372.5mm (Πίνακας 9). Ειδικότερα, στις 12 Ιανουαρίου του 1997 έλαβε χώρα το πιο έντονο επεισόδιο βροχόπτωσης με συνολική διάρκεια 42.5 ώρες με καταστροφικά αποτελέσματα για την πόλη της Κορίνθου (υπερχείλιση του χειμάρρου Ξηριά με ακόλουθη καταστροφή περιουσιών - καταστήματα, αυτοκίνητα που κατέληξαν στην θάλασσα κτ). Οι ισχυρές βροχοπτώσεις γενικότερα πολύ γρήγορα υπερβαίνουν την ικανότητα διήθησης του εδάφους (infiltration capacity) με αποτέλεσμα η πλημμυρική απορροή μετά από μία έντονη βροχόπτωση να καταλήγει πολύ γρήγορα στην θάλασσα χωρίς αυτή να συμβάλλει ιδιαίτερα στην τροφοδοσία των υδροφόρων οριζόντων.

Στον Πίνακα 9 παρουσιάζονται τα μηνιαία βροχομετρικά δεδομένα του σταθμού για την περίοδο 1987-2007. Από τα δεδομένα αυτά, προκύπτει ότι η μέση ετήσια βροχόπτωση για την περίοδο 1987-2007 είναι 492.9mm εκ των οποίων το 90% πέφτει κατά την διάρκεια των μηνών Οκτώβριο έως και Μάιο. Τα μεγαλύτερα ύψη βροχοπτώσεων καταγράφονται την χρονική περίοδο από τον Νοέμβριο έως και τον Ιανουάριο ενώ ως ξηρότεροι μήνες του έτους παρουσιάζονται ο Ιούνιος και ο Ιούλιος.

YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	SUM (mm)
1988	92.9	69.6	104.9	52.6	25.8	0.6	-	-	11.9	18.2	106.9	71.7	555.1
1989	1.4	21.3	53.7	9.0	13.6	9.7	8.7	1.1	15.8	87.6	66.7	24.2	312.8
1990	3.0	25.1	1.5	28.9	11.6	0.5	4.7	86.0	42.2	36.3	139.8	113.3	492.9
1991	69.0	30.1	41.8	53.8	38.8	-	4.2	46.2	4.4	59.1	92.1	50.5	490.0
1992	12.3	19.7	34.6	45.4	61.5	4.7	-	3.5	0.7	15.0	43.7	61.4	302.5
1993	25.5	79.1	13.6	19.8	95.1	0.9	-	0.5	0.7	0.7	157.6	40.6	434.1
1994	70.2	109.5	22.8	27.7	22.9	1.4	13.7	7.3	-	91.7	57.1	59.9	484.2
1995	108.1	3.1	88.3	20.5	0.7	12.1	15.8	38.4	46.3	9.6	74.7	90.3	507.9
1996	122.4	89.8	85.0	8.0	33.6	-	5.0	4.6	35.5	46.7	15.8	49.3	495.7
1997	372.5	42.8	42.9	49.2	3.5	7.2	-	10.7	2.1	21.4	41.3	120.9	714.5
1998	49.6	192.0	92.1	13.5	38.0	-	-	-	14.0	14.1	114.0	87.6	614.9
1999	49.6	49.1	159.3	8.1	0.6	2.3	5.8	1.0	84.9	46.6	85.3	23.3	515.9
2000	19.8	70.1	7.4	3.8	5.6	22.0	-	3.1	11.1	58.8	32.0	110.0	343.7
2001	116.1	62.2	18.6	54.8	4.4	14.4	3.7	3.8	8.8	3.9	133.7	179.0	603.4
2002	15.1	5.0	117.4	28.4	2.0	0.2	46.8	19.2	21.0	14.7	42.8	132.8	445.4
2003	104.4	106.3	56.7	30.5	14.1	1.4	2.3	0.4	12.8	31.5	46.4	112.3	519.1
2004	143.8	14.1	39.1	47.3	8.7	6.7	0	14.4	1.4	28	22.1	67	392.6
2005	62.3	69.7	39.8	4.4	46.3	8.8	1.9	20.3	112.8	12.5	161.5	53.3	593.6
2006	62.6	56.2	20.3	59.2	13.6	7	1.3	4.6	-	60.8	14.2	6.2	306
2007	0.0	95.7											
M.O	62.60	56.20	41.80	28.40	13.60	5.70	4.70	4.60	12.80	28.00	66.70	67.00	492.9
MAX	372.5	192.0	159.3	59.2	95.1	22.0	46.8	86.0	112.8	91.7	161.5	179.0	714.5
MIN	0.0	3.1	1.5	3.8	0.6	0.2	0.0	0.4	0.7	0.7	14.2	6.2	02.5

Πίνακας 9 : Μηνιαία Βροχομετρικά Στοιχεία της Ε.Μ.Υ. (σε mm) του σταθμού Βέλου για τα έτη 1987 έως 2002 (στοιχεία Ε.Μ.Υ.)



Εικόνα 107 : Γράφημα της Ετήσιας βροχόπτωσης για τα έτη 1988-2002

Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα της Εικόνα 108 τα έτη 1989 και 1992 σημειώθηκαν οι ελάχιστες ετήσιες τιμές βροχόπτωσης με εκτεταμένη ξηρασία η οποία έπληξε και την ευρύτερη περιοχή όπως προκύπτει και από τα στοιχεία γειτονικών μετεωρολογικών σταθμών του Υπουργείου Γεωργίας που βρίσκονται σε διαφορετικά υψομετρικά σημεία (Κεφαλάρι, Καμάρι, Πύργο).

Προκειμένου να υπολογισθεί ο όγκος νερού που δέχεται ετησίως το σύστημά μας από τις βροχοπτώσεις, πολλαπλασιάστηκε το εμβαδόν της επιφάνειας (57 Km^2) με την μέση ετήσια βροχόπτωση (492.7 mm) όπως αυτή προκύπτει για το χρονικό διάστημα 1988-2007 από τον Πίνακα 9. Ο μέσος ετήσιος όγκος νερού που δέχεται η επιφάνεια της περιοχής είναι $P=28.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$

Ατμοσφαιρική Υγρασία : Η ατμόσφαιρα περιέχει πάντοτε μια μεταβαλλόμενη ποσότητα υγρασίας (υδρατμών) που προέρχεται από την εξάτμιση του νερού των ωκεανών, των υγρών επιφανειών της ξηράς και την διαπνοή των φυτών.

YEAR	JAN	FEB	MAR	ARP	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOE	DEC
1988	75.3	66.7	70.4	69.2	60.6	56.2	51.9	53.5	58.2	65.6	73.2	70.4
1989	62.0	65.1	68.1	58.0	55.4	55.8	51.5	49.8	63.4	68.1	74.9	77.4
1990	69.6	65.1	59.2	62.4	53.1	48.1	46.0	48.9	64.7	71.3	78.9	82.1
1991	71.8	74.3	77.6	74.1	64.2	52.1	51.4	54.4	59.1	66.9	75.7	68.6
1992	69.4	62.5	70.9	68.7	61.5	57.8	54.9	50.1	56.2	69.4	70.7	69.9
1993	70.4	67.1	71.1	63.4	64.2	50.6	48.1	50.9	57.7	66.9	82.6	82.0
1994	84.9	83.4	76.7	70.1	63.7	53.8	52.8	55.4	59.9	78.7	74.1	80.4
1995	78.3	75.5	71.6	66.2	55.8	55.2	50.0	58.9	67.9	61.3	77.0	78.6
1996	83.5	75.7	76.9	66.0	65.3	55.1	59.0	64.7	66.8	71.4	73.1	79.6
M.O.	73.9	70.6	71.4	66.5	60.4	53.9	51.7	54.1	61.5	68.8	75.6	76.6

Πίνακας 10 : Μέση σχετική ατμοσφαιρική υγρασία (%) του σταθμού Βέλου την χρονική περίοδο 1988-1996 (Ε.Μ.Υ.)

Η ποσότητα αυτή εξαρτάται άμεσα από την θερμοκρασία και μειώνεται με το υψόμετρο ακολουθώντας τον ρυθμό ελάττωσης της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας. Στον Πίνακα 10 δίδονται οι μηνιαίες τιμές της σχετικής ατμοσφαιρικής υγρασίας του σταθμού της Ε.Μ.Υ. του Βέλου για την χρονική περίοδο 1988-1996 από όπου και προκύπτει ότι τα μεγαλύτερα ποσοστά υγρασίας καταγράφονται την χρονική περίοδο από τον Νοέμβριο έως και τον Μάρτιο ενώ οι ξηρότεροι μήνες του έτους είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος χωρίς όμως και πάλι η υγρασία να πέφτει κάτω από το 50%. Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 108 οι βροχοπτώσεις παρουσιάζουν την ίδια πορεία με την υγρασία. Οι μήνες δηλαδή με τις

μέγιστες βροχοπτώσεις παρουσιάζουν και την μέγιστη σχετική υγρασία ενώ την αντίθετη πορεία παρουσιάζει η ατμοσφαιρική θερμοκρασία.

Ηλιακή Ακτινοβολία : Η κύρια πηγή ενέργειας για την επιφάνεια της γης είναι αυτή που προέρχεται από τον ήλιο και για αυτό καλείται ηλιακή ενέργεια ή ηλιακή ακτινοβολία. Αυτή είναι η αιτία δραστηριοποίησης των διαφόρων φάσεων του υδρολογικού κύκλου και η ποσότητα που φτάνει στην επιφάνεια της γης επηρεάζεται από τους παρακάτω παράγοντες :

- Την συνολική ηλιακή εκπομπή (ορατή και αόρατη ακτινοβολία)
- Την μεταβολή της απόστασης γης - ήλιου ανάλογα με την εποχή (ελλειπτική τροχιά)
- Το ύψος του ήλιου που μεταβάλλεται ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος, την εποχή του έτους και την ώρα της ημέρας
- Την διάρκεια της μέρας που εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος και την εποχή του έτους

Η ηλιοφάνεια αποτελεί σημαντικό παράγοντα θερμότητας της ατμόσφαιρας και του εδάφους επηρεάζοντας την εξάτμιση του νερού. Η ηλιοφάνεια στον Ν. Κορινθίας είναι σχετικά μεγάλη. Βάσει στοιχείων της Ε.Μ.Υ. για την χρονική περίοδο 1971-1976 του μετεωρολογικού σταθμού Κορίνθου προκύπτει ότι το μέγιστο της ηλιοφάνειας παρατηρείται τον μήνα Ιούλιο (341 ώρες) ενώ το ελάχιστο τον Ιανουάριο (108 ώρες).

Θερμοκρασία Αέρα : Η ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας ακολουθεί με κάποια υστέρηση την αντίστοιχη μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας. Όταν γίνεται αναφορά στην θερμοκρασία αέρος, νοείται η θερμοκρασία αυτού υπό σκιά. Η μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα γίνεται με τα θερμόμετρα και τους θερμογράφους που είναι τοποθετημένοι μέσα σε μετεωρολογικό κλωβό όπου ο αέρας κυκλοφορεί ελεύθερα ενώ τα όργανα προστατεύονται από την άμεση ηλιακή ακτινοβολία.

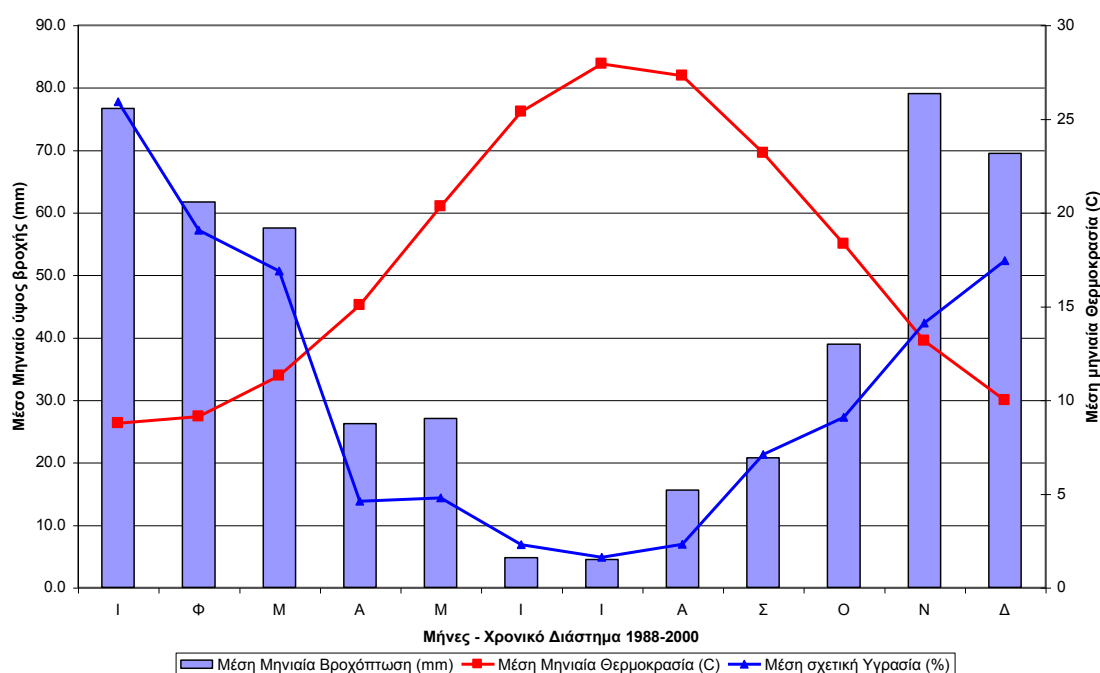
Ο μετεωρολογικός σταθμός της ΕΜΥ του Βέλου (βαρόμετρο) βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος Β $37^{\circ} 58'$, γεωγραφικό μήκος Α $22^{\circ} 45'$ και σε υψόμετρο 20 μέτρων από την επιφάνεια της θάλασσας, με καταγραφές που γίνονται καθορισμένες ώρες της ημέρας από τις οποίες προκύπτει ο μέσος όρος (στοιχεία χρονικής περιόδου 1987-1997).

Από τα στοιχεία του πίνακα 8 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα :

- Η μέση θερμοκρασία για την περιοχή έρευνας κυμαίνεται από 8.8°C τον Ιανουάριο που είναι ο ψυχρότερος μήνας, σε 27.9°C τον Ιούλιο που είναι ο θερμότερος μήνας
- Η ελάχιστη μέση μηνιαία θερμοκρασία είναι 6.5°C και έχει καταγραφεί τον Φεβρουάριο του 1993 ενώ η μέγιστη μέση μηνιαία θερμοκρασία είναι 29.9°C και έχει καταγραφεί τον Ιούλιο του 1988.

YEAR	JAN	FEB	MAR	ARP	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOE	DEC
1987												10.8
1988	10.2	9.1	10.9	14.8	20.8	25.2	29.9	28.0	23.8	17.7	11.2	9.3
1989	7.7	9.9	12.9	17.3	19.6	23.5	27.2	27.5	23.1	16.5	12.6	9.7
1990	7.5	10.3	13.1	15.9	20.9	25.3	28.7	26.8	22.6	18.8	14.6	10.2
1991	8.2	8.9	12.2	14.4	17.8	25.6	26.7	26.0	22.6	18.8	13.2	7.2
1992	7.9	7.5	10.2	15.2	18.7	24.2	26.7	28.2	22.7	19.8	14.0	9.3
1993	7.9	6.5	10.6	15.7	20.3	26.2	28.1	27.8	23.4	20.1	13.1	11.3
1994	10.3	9.5	12.0	16.2	21.4	25.3	28.2	28.7	25.6	20.1	13.3	9.4
1995	9.4	10.9	11.2	14.5	20.6	26.2	28.2	26.7	23.6	17.3	11.5	11.8
1996	9.0	9.3	9.1	14.2	21.6	25.8	27.5	27.3	22.3	16.9	13.8	11.4
1997	9.4	9.2	10.6	12.3	21.5	26.3	28.0	25.9	22.0	17.2	14.1	10.2
M.O.	8.8	9.1	11.3	15.1	20.3	25.4	27.9	27.3	23.2	18.3	13.1	10.0

Πίνακας 11 : Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$) από Στοιχεία της Ε.Μ.Υ. σταθμού Βέλου για τα έτη 1987 έως 1997 (στοιχεία Ε.Μ.Υ.)



Εικόνα 108 : Γράφημα της Μέσης Μηνιαίας βροχόπτωσης για τα έτη 1988-2007 συναρτήσει της Μέσης Μηνιαίας Θερμοκρασίας αέρα για το χρονικό διάστημα 1988-1997 και του ποσοστού της Μέσης Σχετικής Υγρασίας

Ανεμολογικά στοιχεία : Ως 'άνεμος' χαρακτηρίζεται η οριζόντια κίνηση του ατμοσφαιρικού αέρα που οφείλεται στις διαφορές της ατμοσφαιρικής πίεσης μεταξύ δύο περιοχών. Η επικρατούσα διεύθυνση των ανέμων σύμφωνα με τα δεδομένα του σταθμού Βέλου Κορινθίας είναι Βορειοανατολική έως Βορειοδυτική τον Ιούνιο ενώ κατά την διάρκεια των

μηγών Απρίλιο και Δεκέμβριο καταγράφηκαν εξίσου επικρατούσες Νότιες διευθύνσεις ανέμων ταχύτητας 2 Beaufort.

	JAN	FEB	MAR	ARP	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOE	DEC
Επικρατούσα Διεύθυνση Ανέμων	BA	BA	BA	BA/N	BA	ΒΔ	BA	BA	BA	BA	BA	BA/N
Επικρατούσα Ταχύτητα σε Beaufort	4-5	4	3	2	2-3	4	3	3	3	4	3	2-3

Πίνακας 12 : Ανεμολογικά στοιχεία του 2000 από τον σταθμό Βέλο Κορινθίας (Ε.Μ.Υ.)

Εξάτμιση : Ένα σημαντικό ποσοστό των κατακρημνισμάτων εξατμίζεται στην ατμόσφαιρα πριν ακόμη το νερό πέσει στην επιφάνεια του εδάφους και να ολοκληρώσει τον υδρολογικό κύκλο του. Το φυσικό αυτό φαινόμενο, όπου το νερό μεταβαίνει από την υγρή στην αέρια φάση καλείται εξάτμιση. Οι σπουδαιότεροι παράγοντες που συμβάλουν στην εξέλιξη του φαινομένου της εξάτμισης είναι:

- η θερμοκρασία του νερού,
- η θερμοκρασία και η απόλυτη υγρασία της ατμόσφαιρας,
- ο άνεμος που απομακρύνει τους υδρατμούς από μια περιοχή στην άλλη,
- η ποσότητα των διαλυμένων στο νερό αλάτων,
- το βάθος επιφάνειας του υπόγειου νερού,
- η δομή και η σύσταση του εδάφους,
- η ένταση και η εποχική περίοδος των βροχοπτώσεων, κλπ.

YEAR	JAN	FEB	MAR	ARP	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOE	DEC	SUM (mm)
1988	54.6	88.4	94.7	102.7	164.9	184.1	263.5	259.2	164.2	125.6	76.9	73.9	1652.7
1989	116.3	103.8	108.8	142.0	146.2	180.9		253.6				62.9	1114.5
1990	87.4									114.2	67.2		268.8
1991		65.4		87.9		195.9	207.0	198.9	149.8	112.1	67.0	93.6	1177.6
1992	85.4	95.7	89.2	95.8	145.7	171.7	213.0	259.6	209.4	123.2	105.6	109.9	1704.2
1993	102.9	107.8	116.9	121.9	118.2								567.7
1994				105.3	142.9	187.7	225.7	223.5	186.1	96	87.1	54.5	1308.8
1995	64.5	64.7	91.4	101.7	164.8	174.0	224.3	171.6	150.0	140.3	62.9	63.1	1473.3
1996	56.4	70.5	65.6	97.6	131.6	203.0	215.3	206.5	154.4	91.2	74.7	60.1	1426.9
1997	73.8	79.9	106.9	96.1	171.9	169.4	208.4	192.7	161.8	122.2	60.2	61.0	1504.3
1998	53.7	77.2	102.5		136.1	191.5	250.9	225.5	139.9	113.1	67.2	68.4	1426
M.O.	77.2	83.7	97.0	105.7	146.9	184.2	226.0	221.2	164.5	115.3	74.3	71.9	1568.0

Πίνακας 13 : Μηνιαία εξάτμιση E_{pi} (mm) στον μετεωρολογικό σταθμό του Βέλου για το χρονικό διάστημα 1988-1998 (στοιχεία Ε.Μ.Υ)

Η εξάτμιση E_{pi} μετρήθηκε με ατμόμετρο τύπου Piche το οποίο αποτελείται από επίπεδους οριζόντιους δίσκους στυπώχαρτου που διαποτίζονται με νερό και εκθέτουν και τις δύο τους

πλευρές στην ατμόσφαιρα. Το όργανο είναι τοποθετημένο με την εξατμίζουσα επιφάνεια 1.2m πάνω από το έδαφος μέσα στον μετεωρολογικό κλωβό. Πρακτικά, εφόσον το όργανο είναι τοποθετημένο σε καλυμμένο χώρο και δεν είναι εκτεθειμένο στην ηλιακή ακτινοβολία, η εξάτμιση ανταποκρίνεται κυρίως στο κοροπλήρωμα του αέρα και σε μικρότερο βαθμό στην ταχύτητα του ανέμου. Αυτό σημαίνει ότι το όργανο πιθανότερα δίνει καλύτερη μέτρηση της αποξηραντικής ικανότητας του αέρα παρά τον ρυθμό εξάτμισης.

Η αθροιστική μέση εξάτμιση για την χρονική περίοδο 1988-1998 στον σταθμό του Βέλου είναι 1568 mm. Η μέγιστη εξάτμιση παρουσιάζεται τους θερινούς μήνες με την μεγαλύτερη ηλιοφάνεια και θερμοκρασία αέρα ενώ η ελάχιστη κατά τους χειμερινούς μήνες αντίστοιχα.

Εξατμισοδιαπνοή : Η εξατμισοδιαπνοή του νερού στο φυσικό περιβάλλον, είτε από ελεύθερες υδάτινες επιφάνειες είτε από γυμνές ή φυτοκαλυμμένες επιφάνειες της γης, είναι από τις πιο σημαντικές συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου. Ο υδρολογικός κύκλος ξεκινά με την διαρκή προσφορά νερού από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης με την μορφή υδρομετεώρων που καταλήγουν στους ποταμούς, τις λίμνες και τις θάλασσες είτε άμεσα σαν επιφανειακή απορροή είτε μέσα από την διήθηση τους προς τον υδροφόρο ορίζοντα. Ο κύκλος κλείνει με την επαναφορά νερού στην ατμόσφαιρα μέσω της εξάτμισης.

Στον όρο εξατμισοδιαπνοή υπεισέρχονται δυο φυσικά φαινόμενα:

- το φαινόμενο της εξάτμισης, που συντελείται στην επιφάνεια του εδάφους και στις ελεύθερες υδάτινες επιφάνειες, και
- το φαινόμενο της διαπνοής που συντελείται από την υπάρχουσα βλάστηση και τις αναπτυσσόμενες καλλιέργειες της περιοχής.

Από πρακτική σκοπιά είναι δύσκολο να ξεχωρίσει κανείς τις απώλειες του νερού που σχετίζονται με την εξάτμιση ή με την διαπνοή. Η εξατμισοδιαπνοή εκτιμάται με βάση την εξίσωση του υδρολογικού ισοζυγίου ή εφαρμόζονται εμπειρικοί τύποι που προσφέρουν ένα προσεγγιστικό αποτέλεσμα.

Το ποσοστό του εξατμιζόμενου νερού, είναι νερό που περνά μέσα από το φυτό και εξέρχεται στην ατμόσφαιρα κυρίως μέσω των στομάτων. Η εξάτμιση του νερού που έχει περάσει μέσω του φυτού καλείται διαπνοή. Η απ' ευθείας εξάτμιση από το έδαφος και η διαπνοή γίνονται ταυτόχρονα από την φύση και ως εκ τούτου είναι δύσκολο να διαχωριστούν οι υδρατμοί που προέρχονται από τις δύο διεργασίες. Σήμερα, ο όρος *εξατμισοδιαπνοή ET* χρησιμοποιείται γενικά για να περιγράψει την συνολική διεργασία μεταφοράς ύδατος στην ατμόσφαιρα από φυτοκαλυμμένες και μη, επιφάνειες.

Πολλοί ερευνητές με βάση συγκεκριμένες εφαρμογές έχουν αναπτύξει πολλές μεθόδους για την άμεση και την έμμεση μέτρηση της εξατμισοδιαπνοής. Δεδομένου όμως του γεγονότος

ότι, μέτρηση της φυσικής εξατμισοδιαπνοής έχει αποδειχθεί αρκετά δύσκολη και δαπανηρή, γίνονται ακόμη και σήμερα πολλές προσπάθειες για την ανάπτυξη εμπειρικών και ημι-εμπειρικών μοντέλων υπολογισμού χρησιμοποιώντας μετρήσεις από άλλες μετεωρολογικές μεταβλητές που την επηρεάζουν όπως είναι η ηλιακή και η γήινη ακτινοβολία, η ηλιοφάνεια, η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, η ταχύτητα του ανέμου και (λιγότερο) η ατμοσφαιρική πίεση.

Εκτιμήσεις της εξατμισοδιαπνοής μπορούν να γίνουν βάσει της εξάτμισης που έχει καταμετρηθεί στον μετεωρολογικό σταθμό του Βέλου, χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο εμπειρικό τύπο των (Doorenbos and Pruitt, 1977) :

$$ET = C_e E_{pan}$$

όπου E_{pan} : είναι η εξάτμιση από εξατμισίμετρο τύπου λεκάνης (pan evaporation) και C_e : είναι μία σταθερά που συσχετίζει την pan εξάτμιση με την εξατμισοδιαπνοή και προκύπτει βάσει του Πίνακα 14. Η εξάτμιση που υπολογίζεται βάσει του παραπάνω πίνακα είναι $ET=940,74\text{mm/year}$.

	Περίπτωση Α Pan περιβαλλόμενο από χαμηλές καλλιέργειες				Περίπτωση Β Pan περιβαλλόμενο από ξηρή επιφάνεια			
		Ποσοστό σχετικής υγρασίας %				Ποσοστό σχετικής υγρασίας %		
Ταχύτητα Ανέμου (Km/day)	Καλλιέργεια στην πορεία του ανέμου (m)	Χαμηλή 20-40	Μέση 40-70	Υψηλή >70	Χέρσα γη στην πορεία του ανέμου (m)	Χαμηλή 20-40	Μέση 40-70	Υψηλή >70
Ελαφρύς <170 Km/day	0	0.55	0.65	0.75	0	0.70	0.80	0.85
	10	0.65	0.75	0.85	10	0.60	0.70	0.80
	100	0.70	0.80	0.85	100	0.55	0.65	0.75
	1000	0.75	0.85	0.85	1000	0.50	0.60	0.70
Μέτριος 170-425 Km/day	0	0.50	0.60	0.65	0	0.65	0.75	0.80
	10	0.60	0.70	0.75	10	0.55	0.65	0.70
	100	0.65	0.75	0.80	100	0.50	0.60	0.65
	1000	0.70	0.80	0.80	1000	0.45	0.55	0.60
Ισχυρός 425-700 Km/day	0	0.45	0.50	0.60	0	0.60	0.65	0.70
	10	0.55	0.60	0.65	10	0.50	0.55	0.65
	100	0.60	0.65	0.70	100	0.45	0.50	0.60
	1000	0.65	0.70	0.75	1000	0.40	0.45	0.55
Πολύ Ισχυρός >700 Km/day	0	0.40	0.45	0.50	0	0.50	0.60	0.65
	10	0.45	0.55	0.60	10	0.45	0.50	0.55
	100	0.50	0.60	0.65	100	0.40	0.45	0.50
	1000	0.55	0.60	0.65	1000	0.35	0.40	0.45

Πίνακας 14 : προτεινόμενες τιμές του συντελεστή C_e -μετάφραση από το αγγλικό κείμενο των Jensen, Burman and Allen. (Jensen *et al.*, 1990)

Μία ευρέως χρησιμοποιούμενη έννοια είναι αυτή της **δυναμικής εξατμισοδιαπνοής ET_p** . Με αυτόν τον όρο γενικά περιγράφεται 'ο μέγιστος ρυθμός εξατμισοδιαπνοής από μία φυτοκαλυμμένη επιφάνεια που έχει επάρκεια νερού, κάτω από ορισμένες μετεωρολογικές

συνθήκες'. Ο όρος εισήχθη για πρώτη φορά από τον **Thornwaite** το 1948 για να εκφράσει τις απώλειες νερού πάνω από το έδαφος με βλάστηση, όταν υπάρχει επάρκεια νερού στο ριζόστρωμα, παρέχοντας ένα άνω όριο στις συνολικές απώλειες από εξάτμιση και διαπνοή.

Κατά τον Thornthwaite (1948), η δυνητική εξατμισοδιαπνοή δίδεται από τον τύπο :

$$ET_p = 16 \times \left(10 \frac{T}{I} \right)^\alpha \quad \text{όπου :}$$

ET_p : είναι η μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε mm

T : είναι η μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρος για τον ανάλογο μήνα σε $^{\circ}\text{C}$

$$\alpha = 0,49239 + 1792 \times 10^{-5} \times I - 771 \times 10^{-7} \times I^2 + 675 \times 10^{-9} \times I^3$$

όπου I είναι ο *ετήσιος θερμικός δείκτης* που δίδεται από τον τύπο $I = \sum_{i=1}^{12} i$ όπου i είναι ο

$$\text{μηνιαίος θερμικός δείκτης : } i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514}$$

Οι υπολογιζόμενες τιμές ET_p για κάθε μήνα διορθώνονται με έναν συντελεστή ρ ($\rho = \frac{\mu N}{360}$)

στον οποίο υπεισέρχονται τόσο ο αριθμός ημερών κάθε μήνα (μ) όσο και οι πραγματικές ώρες μεταξύ ανατολής και δύσης του ήλιου ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος του σταθμού (N : μέση αστρονομική διάρκεια της ημέρας).

Στους υπολογισμούς του υδατικού ισοζυγίου συνηθέστερα χρησιμοποιείται ο όρος της **πραγματικής εξατμισοδιαπνοής ET_R** καθώς όταν η παροχή νερού είναι περιορισμένη, η πραγματική εξατμισοδιαπνοή είναι πάντα μικρότερη από την δυνητική. Για την εκτίμηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής υπάρχουν πολυάριθμοι εμπειρικοί τύποι οι οποίοι εμπεριέχουν σαν βασική και κύρια μεταβλητή τον παράγοντα των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (P). Ο εμπειρικός τύπος ο οποίος έχει δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα κατά την εφαρμογή του, σε 254 λεκάνες σε όλη την υδρόγειο είναι ο τύπος του **Turc** (1951).

$$ET_R = \begin{cases} \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L_T^2}}} & \text{εάν } \frac{P}{L_T} > 0.316 \\ P & \text{εάν } \frac{P}{L_T} \leq 0.316 \end{cases} \quad \text{όπου :}$$

ET_R : η πραγματική εξατμισοδιαπνοή σε mm

P : το ύψος των ετήσιων ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (βροχομετρικός δείκτης) σε mm

L_T : Θερμικός δείκτης που υποκαθιστά την δυνητική εξατμισοδιαπνοή και συναρτάται με την μέση ετήσια θερμοκρασία του αέρα T με βάση την σχέση: $L_T = 300 + 25T + 0.05T^3$

T : η μέση ετήσια θερμοκρασία του αέρα σε βαθμούς Κελσίου ($^{\circ}\text{C}$) που εκφράζει την εξατμιστική δυνατότητα της ατμόσφαιρας

Εάν τα δεδομένα το επιτρέπουν, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται η διορθωμένη

θερμοκρασία (T_{Δ}) και όχι η μέση (T), όπου :
$$T_{\Delta} = \frac{P_1 T_1 + P_2 T_2 + \dots + P_{12} T_{12}}{P_1 + P_2 + \dots + P_{12}}$$
 όπου P_i και

T_i η μέση μηνιαία βροχόπτωση και μέση μηνιαία θερμοκρασία αντίστοιχα (Σούλιος, 1986).

Η ετήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή που υπολογίζεται βάσει τύπου του Turc με διορθωμένη θερμοκρασία ($T=13,53^{\circ}\text{C}$) βάσει των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που έχουν υπολογισθεί για την περιοχή ενδιαφέροντος, είναι $\text{ETR}=429.3 \text{ mm/year}$.

Η ετήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή που υπολογίζεται βάσει τύπου του Turc με διορθωμένη θερμοκρασία ($T=13,50^{\circ}\text{C}$) και βάσει των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, είναι $\text{ETR}=429.3 \text{ mm/year}$, συνεπώς για επιφάνεια ίση με 57 km^2 , ο όγκος της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής θα είναι $\text{ET} = 24.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$.

	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	SUM (mm)
Μέση Μηνιαία Βροχόπτωση (mm)	76,6	61,6	57,5	26,2	27,0	4,7	4,5	15,6	20,7	38,9	79,0	69,5	481,9
Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)	8,8	9,1	11,3	15,1	20,3	25,4	27,9	27,3	23,2	18,3	13,1	10,0	17,5
Υγρασία (%)	73,9	70,6	71,4	66,5	60,4	53,9	51,7	54,1	61,5	68,8	75,6	76,6	65,4
Μέση Μηνιαία Εξάτμιση P_i (mm)	77,2	83,7	97,0	105,7	146,9	184,2	226,0	221,2	164,5	115,3	74,3	71,9	1567,9
Δυνητική Εξατμισοδιαπνοή κατά Thornthwaite (mm)	17,0	18,3	27,3	46,8	82,0	124,0	148,4	142,2	104,8	67,6	36,3	21,8	836,6

Πίνακας 15 : Μέσος όρος κλιματολογικών στοιχείων μετεωρολογικού σταθμού Βέλου Κορινθίας για την χρονική περίοδο 1988-2000.

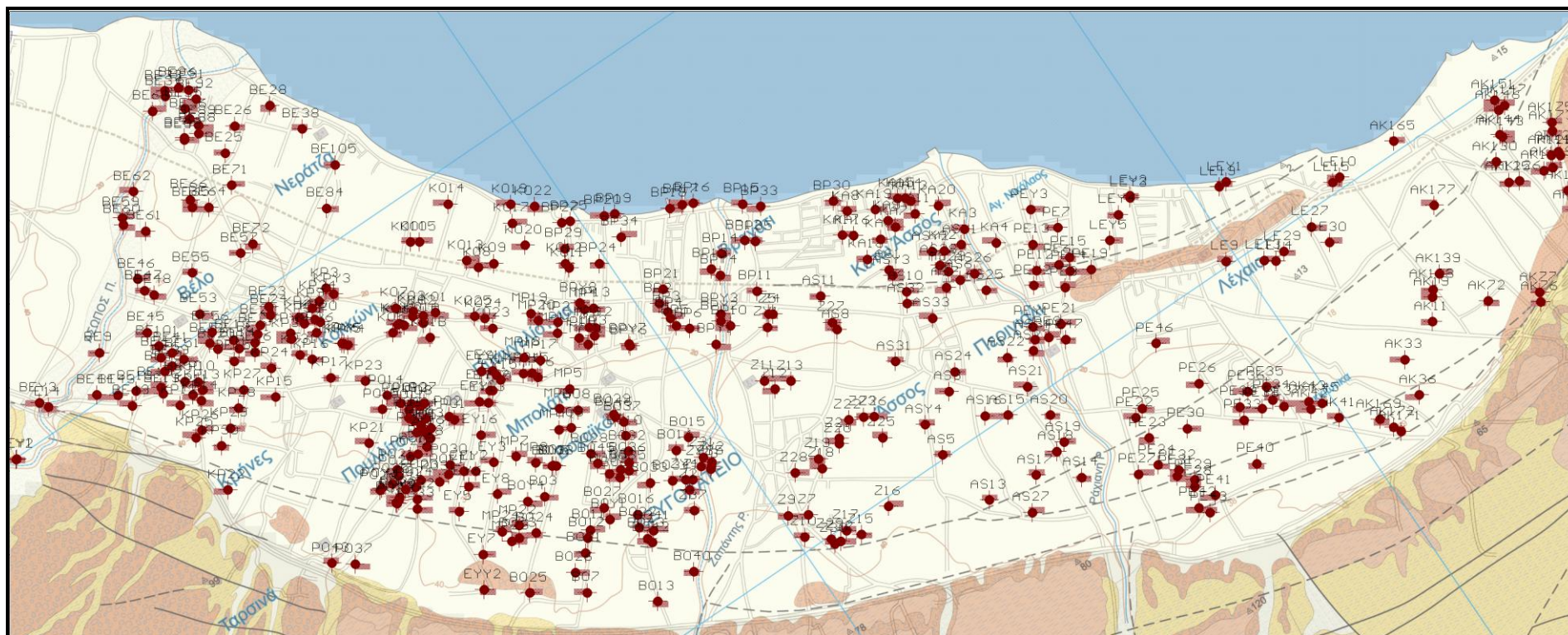
Στα πλαίσια της παρούσας Διατριβής έγινε προσπάθεια καταγραφής υφιστάμενων υδροληπτικών έργων στην περιοχή ενδιαφέροντος προκειμένου να εισαχθούν στο μοντέλο προσομοίωσης του υπόγειου υδροφόρου στοιχεία των αντλήσεων που πραγματοποιούνται στην περιοχή αλλά και τα σημεία παρατήρησης. Στην καταγραφή αυτή όσον αφορά τις γεωτρήσεις άντλησης προτεραιότητα δόθηκε στην καταγραφή των γεωτρήσεων που χρησιμοποιούνται από τα Δημοτικά Διαμερίσματα για την ύδρευσή τους δεδομένου ότι τα στοιχεία αυτά αφενός μπορούν να θεωρηθούν περισσότερο αξιόπιστα ενώ αφετέρου οι περισσότερες γεωτρήσεις που καταγράφηκαν χρησιμοποιούνται καθ' όλη την διάρκεια του έτους εφαρμόζοντας μια σχετικά σταθερή τάση στο υδροφόρο σύστημα.

Όσον αφορά τις ιδιωτικές γεωτρήσεις και πηγάδια άρδευσης, η καταγραφή που έγινε βασίστηκε σε προγενέστερη καταγραφή η οποία είχε πραγματοποιηθεί στα πλαίσια Ερευνητικού Προγράμματος Τεχνητού Εμπλουτισμού των Υπόγειων Υδροφορέων της Βόρειας Παραλιακής και Ημιλοφώδους ζώνης Ν. Κορινθίας. Αν και ακολουθήθηκε η ίδια ονοματολογία καταγραφής με βάση την περιοχή καταγραφής, δεν συμπίπτουν οι θέσεις των γεωτρήσεων σε όλες τις περιπτώσεις καθώς η απουσία συντεταγμένων των θέσεων στα τεύχη της μελέτης δεν επέτρεψε την επιβεβαίωση των στοιχείων υπαίθρου με τα στοιχεία του ερευνητικού προγράμματος.

Δεδομένου ότι οι περισσότερες γεωτρήσεις και πηγάδια ανήκουν σε ιδιώτες, η άντληση τους συνήθως δεν ακολουθεί συγκεκριμένο προγραμματισμό με βάση το είδος της καλλιέργειας αλλά βασίζεται στην κρίση του ιδιοκτήτη. Επίσης κατά την διάρκεια της εργασίας υπαίθρου παρατηρήθηκαν και φαινόμενα όπου πραγματοποιούνταν άντληση από μια γεώτρηση, μεταφορά του νερού σε γειτονική περιοχή και εμπλουτισμός άλλης γεώτρησης με υψηλότερο δυναμικό ώστε να πραγματοποιηθεί άντληση για άρδευση από την δεύτερη γεώτρηση με μεγαλύτερη παροχή από ότι θα ήταν αρχικά εφικτή.

Αρκετές από τα πηγάδια που κατεγράφησαν, δεδομένου της παλαιότερής τους κατασκευής, του μικρού βάθους αλλά και της σταδιακής μείωσης του δυναμικού του υδροφόρου συστήματος της παραλιακής ζώνης έχουν πλέον εγκαταλειφθεί. Στο μοντέλο εισάγονται κύρια τα υδροληπτικά έργα που θεωρείται ότι επηρεάζουν περισσότερο το υδροφόρο σύστημα με βάση την διάρκεια άντλησης και τις παροχές, όπως είναι αυτά που λειτουργούν από τους αρδευτικούς συνεταιρισμούς ή από ιδιώτες που πραγματοποιούν εμπορία νερού στην περιοχή.

Στους πίνακες που ακολουθούν παραθέτονται τα υδροληπτικά έργα που καταγράφηκαν στην περιοχή με βάση την χρήση του νερού και την περιοχή καταγραφής.



Εικόνα 109 : Τα Υδροληπτικά Έργα που κατεγράφησαν στην Παραλιακή ζώνη στα πλαίσια της παρούσας Διατριβής

α/α	ΟΝΟΜΑ	Χ ΕΓΣΑ87	Υ ΕΓΣΑ87	Υψόμετρο	Γ/Π	Έτος Κατασ- κής	Βάθος Γεώτρησης	Παρατηρήσεις	Χρήση
ΑΡΧΑΙΑ ΚΟΡΙΝΘΟΣ									
1	AK1	400,293.43	4,197,705.53		Π		12		ΑΡΔ ⁹
2	AK10	400,474.03	4,196,765.33	13.30	Π		14		ΑΡΔ
3	AK100	401,731.36	4,196,986.55		Π	1962	13		ΑΡΔ
4	AK101	401,738.99	4,197,112.48		Π		12		ΑΡΔ
5	AK102	401,681.75	4,197,097.22		Π		12		ΑΡΔ
6	AK103	401,609.24	4,197,097.22		Π		12		ΑΡΔ
7	AK104	401,635.96	4,197,211.70		Π	1965	12		ΑΡΔ
8	AK105	401,765.71	4,197,486.47		Π		12		ΑΡΔ
9	AK106	401,818.85	4,196,903.24		Γ	1993	90	Βρίσκεται κάτω από την ΕΟ, συνεχώς εμπλουτίζεται	ΑΡΔ
10	AK107	401,998.19	4,196,916.80		Π		35		ΑΡΔ
11	AK108	402,125.58	4,196,965.00		Π				ΑΡΔ
12	AK11	400,375.77	4,196,949.77	14.30	Π		30	Μήτρου : Δίπλα λειτουργεί ελαιοτριβείο και απέναντι χαρτοποιία. Άντληση με 4-αρα πομών	ΑΡΔ
13	AK110	401,939.66	4,196,975.33		Π				ΑΡΔ
14	AK111	402,108.37	4,197,044.20		Γ				ΑΡΔ
15	AK112	402,101.48	4,197,144.05		Π				ΑΡΔ
16	AK113	402,153.13	4,197,240.45		Γ		22		ΑΡΔ
17	AK115	402,098.04	4,197,433.27						ΑΡΔ
18	AK116	402,077.38	4,197,526.23		Γ				ΑΡΔ
19	AK117	402,290.85	4,197,557.22		Γ		15		ΑΡΔ
20	AK118	402,294.30	4,197,646.74			1960			ΑΡΔ
21	AK119	402,163.46	4,197,502.13		Γ				ΑΡΔ
22	AK12	400,325.31	4,196,907.08	11.60				Πηγάδι δίπλα σε ένα παλιό οικοδόμημα	ΑΡΔ
23	AK120	402,294.30	4,197,598.54		Γ		20		ΑΡΔ
24	AK121	402,215.10	4,197,605.42				20		ΑΡΔ
25	AK122	401,994.75	4,197,385.06			1962			ΑΡΔ
26	AK123	401,861.11	4,197,253.68				20		ΑΡΔ
27	AK124	401,689.38	4,197,291.84						ΑΡΔ
28	AK125	401,738.99	4,197,623.85			1965			ΑΡΔ
29	AK126	401,826.77	4,197,578.06		Γ	1991	16		ΑΡΔ
30	AK128	401,872.56	4,197,181.17			1965			ΑΡΔ
31	AK129	401,887.83	4,197,070.50			1965	14		ΑΡΔ
32	AK13	400,459.56	4,197,020.22		Π		12		ΑΡΔ
33	AK130	401,746.63	4,197,856.64			1991			ΑΡΔ
34	AK131	402,363.16	4,197,378.18						ΑΡΔ
35	AK132	402,552.53	4,197,484.91				16		ΑΡΔ
36	AK133	402,538.76	4,197,419.50						ΑΡΔ
37	AK134	403,020.04	4,197,289.68	28.10		1960	20		ΑΡΔ
38	AK135	402,852.08	4,197,329.97		Γ		30		ΑΡΔ
39	AK136	401,838.21	4,197,967.31						ΑΡΔ
40	AK137	402,817.65	4,197,502.13						ΑΡΔ
41	AK138	400,558.21	4,197,196.74	11.30			20		ΑΡΔ
42	AK139	400,693.19	4,197,285.00	11.30			20		ΑΡΔ
43	AK140	400,539.70	4,198,151.71	6.00			15	Χρήση για οικιακούς σκοπούς. Γεώτρηση 24μ και άντληση από τα 20μ	ΑΡΔ
44	AK140a	400,586.26	4,198,124.64	6.00					ΑΡΔ
45	AK142	402,105.35	4,197,932.97	17.50					ΑΡΔ
46	AK145	401,987.05	4,198,196.28		Π				ΑΡΔ
47	AK146	402,051.92	4,198,245.89		Γ	1990	45		ΑΡΔ
48	AK147	402,124.43	4,198,253.53		Γ		20		ΑΡΔ
49	AK148	402,212.20	4,198,268.79				12		ΑΡΔ
50	AK15	400,250.67	4,196,841.53		Π		14		ΑΡΔ
51	AK151	402,071.90	4,198,350.90			1991	10		ΑΡΔ
52	AK152	401,366.43	4,197,864.28	12.30	Γ			Από αυτό το σημείο παίρνουμε μόνο στάθμη. Επειδή αυτά τα πηγάδια δεν αντλούνται μπορούμε να παρατηρήσουμε τις διακυμάνσεις	ΑΡΔ
53	AK152a	401,439.30	4,197,832.58	12.90					ΑΡΔ
54	AK153	401,437.51	4,197,768.87						ΑΡΔ
55	AK154	401,517.65	4,198,020.74						ΑΡΔ
56	AK155	401,559.63	4,198,009.29						ΑΡΔ
57	AK156	401,552.00	4,197,875.72						ΑΡΔ

⁹ ΑΡΔ= Αρδευτική Γεώτρηση

58	AK157	401,349.74	4,197,929.15						ΑΡΔ
59	AK158	402,177.86	4,198,322.22						ΑΡΔ
60	AK159	402,105.35	4,198,329.85						ΑΡΔ
61	AK16	400,239.22	4,196,883.51						ΑΡΔ
62	AK160	402,448.37	4,198,498.68	4.00	Π			Βρίσκεται επάνω στην παλαιά ΕΟ κοντά στην θάλασσα. Στην περιοχή όλοι χρησιμοποιούν νερό από τα πηγάδια για τις οικιακές εργασίες	ΑΡΔ
63	AK161	402,410.65	4,198,509.21	3.00					ΑΡΔ
64	AK162	402,368.67	4,198,303.14				12		ΑΡΔ
65	AK163	402,460.26	4,198,310.77				10		ΑΡΔ
66	AK164	402,746.47	4,198,360.38				8		ΑΡΔ
67	AK165	401,057.60	4,198,577.01	3.50			8	Είναι το πηγάδι που τροφοδοτεί το τσιμεντόδικο, είναι αρκετά μεγάλης διαμέτρου. Συνεχής άντληση	ΒΙΟΜ ¹⁰
68	AK166	402,841.88	4,198,471.05		Π				ΑΡΔ
69	AK167	402,860.96	4,198,421.44		Π				ΑΡΔ
70	AK168	402,933.47	4,198,421.44		Π		10		ΑΡΔ
71	AK169	399,434.00	4,196,467.54		Π				ΑΡΔ
72	AK17	400,303.81	4,197,004.64		Π		14		ΑΡΔ
73	AK171	399,533.23	4,196,257.65		Π				ΑΡΔ
74	AK172	399,498.88	4,196,330.16		Π				ΑΡΔ
75	AK173	402,357.22	4,197,791.77		Π		16		ΑΡΔ
76	AK174	402,349.59	4,197,826.11		Π				ΑΡΔ
77	AK175	402,399.20	4,197,860.46		Π				ΑΡΔ
78	AK177	401,025.36	4,197,852.83		Π				ΑΡΔ
79	AK179	403,270.82	4,196,483.70	60.00	Π				ΑΡΔ
80	AK18	400,272.66	4,197,004.64		Π		14		ΑΡΔ
81	AK19	400,511.48	4,197,139.63		Γ		22		ΑΡΔ
82	AK2	400,407.65	4,197,788.60				10		ΑΡΔ
83	AK21	400,155.27	4,196,742.31		Π				ΑΡΔ
84	AK22	400,212.51	4,196,673.62		Π		14		ΑΡΔ
85	AK23	400,109.47	4,196,868.24		Π				ΑΡΔ
86	AK24	400,096.14	4,197,035.79		Π		14		ΑΡΔ
87	AK25	400,117.11	4,197,001.81		Π		14		ΑΡΔ
88	AK26	400,025.52	4,196,894.96		Π				ΑΡΔ
89	AK27	399,945.38	4,196,998.00		Π		14		ΑΡΔ
90	AK28	399,830.89	4,196,948.38		Π		15		ΑΡΔ
91	AK29	400,063.68	4,196,761.39		Π				ΑΡΔ
92	AK3	400,443.99	4,197,554.97		Π		10		ΑΡΔ
93	AK30	399,994.99	4,196,658.35		Π				ΑΡΔ
94	AK31	399,834.71	4,196,814.82		Π		19		ΑΡΔ
95	AK32	399,720.22	4,196,696.52		Π		17		ΑΡΔ
96	AK33	399,953.01	4,196,799.55		Π	1990	20		ΑΡΔ
97	AK34	399,800.36	4,196,578.21		Π		18		ΑΡΔ
98	AK36	399,872.87	4,196,444.65		Γ	1989	20		ΑΡΔ
99	AK37	399,819.44	4,196,337.79	26.10	Π		18		ΑΡΔ
100	AK38	399,895.77	4,196,230.94		Π				ΑΡΔ
101	AK39	399,697.32	4,196,238.57		Π				ΑΡΔ
102	AK40	398,886.46	4,196,771.01	23.40	Π		18		ΑΡΔ
103	AK41	399,120.09	4,196,703.52		Γ		20		ΑΡΔ
104	AK42	398,943.57	4,196,926.76		Γ		20		ΑΡΔ
105	AK43	398,969.53	4,196,994.26		Γ				ΑΡΔ
106	AK44	399,166.81	4,196,864.46		Π				ΑΡΔ
107	AK45	399,062.98	4,196,911.19		Γ				ΑΡΔ
108	AK46	399,156.43	4,197,046.17		Π	1995	16		ΑΡΔ
109	AK47	398,902.03	4,197,191.54		Π		16		ΑΡΔ
110	AK48	400,693.19	4,196,750.24		Π				ΑΡΔ
111	AK49	400,781.45	4,196,703.52		Π				ΑΡΔ
112	AK5	400,604.93	4,197,871.67		Π		12		ΑΡΔ
113	AK50	400,698.39	4,196,667.18		Π				ΑΡΔ
114	AK51	400,745.11	4,196,615.26		Π				ΑΡΔ
115	AK52	400,791.84	4,196,527.00		Π				ΑΡΔ
116	AK54	400,584.17	4,196,957.91		Π				ΑΡΔ
117	AK55	400,584.17	4,197,056.56		Π				ΑΡΔ
118	AK59	400,987.20	4,196,620.19		Π	1960	17		ΑΡΔ
119	AK6	400,630.89	4,197,653.61		Π		10		ΑΡΔ
120	AK60	400,914.69	4,196,688.88		Π				ΑΡΔ
121	AK61	400,998.65	4,196,696.52		Π	1965	17		ΑΡΔ

¹⁰ ΒΙΟΜ= Γεώτρηση Βιοτεχνικής/ Βιομηχανικής Χρήσης

122	AK66	401,078.79	4,196,746.13		Π	1965	14		ΑΡΔ
123	AK67	400,979.57	4,196,749.94		Π	1965	12		ΑΡΔ
124	AK68	401,170.38	4,196,925.49		Π	1968	12		ΑΡΔ
125	AK69	401,242.89	4,196,906.41		Π				ΑΡΔ
126	AK7	400,625.70	4,197,430.37		Π		12		ΑΡΔ
127	AK70	401,071.16	4,196,891.14		Π	1978	7		ΑΡΔ
128	AK71	400,991.02	4,196,898.77		Π	1960	10		ΑΡΔ
129	AK72	400,926.14	4,196,807.19		Π		12		ΒΙΟΜ
130	AK73	400,834.55	4,196,780.47		Π				ΑΡΔ
131	AK75	401,219.99	4,197,032.34		Π	1967	10		ΑΡΔ
132	AK76	401,334.48	4,196,513.34		Γ	1980	25		ΑΡΔ
133	AK77	401,376.45	4,196,593.48		Γ		22		ΑΡΔ
134	AK78	401,377.48	4,196,754.40	16.00	Π		16		ΑΡΔ
135	AK8	400,563.40	4,196,812.54		Π		11		ΑΡΔ
136	AK83	401,662.67	4,196,883.51		Π		14		ΑΡΔ
137	AK86	401,571.08	4,196,959.83		Γ				ΑΡΔ
138	AK87	401,460.41	4,196,971.28		Π		13		ΑΡΔ
139	AK9	400,521.87	4,196,812.54		Π		11		ΑΡΔ
140	AK90	401,239.07	4,197,101.03		Π				ΑΡΔ
141	AK91	401,414.62	4,197,123.93		Π		11		ΑΡΔ
142	AK93	401,399.35	4,197,238.42		Π		12		ΑΡΔ
143	AK96	401,479.49	4,197,394.88		Π				ΑΡΔ
144	AKY1	402,004.48	4,196,783.26	19.60	Γ			Ξεκίνησε πρόσφατα και θα λειτουργεί κύρια για το πότισμα των φυτών στην καινούργια Εθνική. Η διάτρηση δεν βρήκε ασβεστόλιθο.	ΥΔΡ ¹¹
145	AKY2	403,338.66	4,196,974.57	37.10	Γ			Θέση Γκαλντερίμι δίπλα στην Εθνική. Χρησιμοποιείται για την ύδρευση της Κορίνθου.	ΥΔΡ
146	AKY3	403,344.35	4,197,083.63	35.50	Γ			Η ΑΚΥ3 και η ΑΚΥ4 δίνουν αρκετά μεγάλες παροχές γιατί βρίσκονται μέσα στους ασβεστόλιθους.	ΥΔΡ
147	AKY4	403,468.95	4,197,213.48	35.00	Γ			Χρησιμοποιούνται για την ύδρευση της Κορίνθου	ΥΔΡ
ΔΔ ΑΣΣΟΥ (ΑΣΣΟΣ & ΚΑΤΩ ΑΣΣΟΣ)									
148	AS1	396,390.74	4,200,321.14	10.30	Γ	1990	46		ΥΔΡ
149	AS10	396,410.52	4,200,052.05	11.50	Γ	1990	50		ΑΡΔ
150	AS11	395,710.09	4,200,491.30	13.30	Γ	1993	39		ΑΡΔ
151	AS13	395,921.96	4,197,965.12	27.60	Γ	1985	36		ΑΡΔ
152	AS14	396,773.41	4,197,638.04	32.60	Γ	1989	26		ΑΡΔ
153	AS15	396,534.59	4,198,531.02	23.10	Γ				ΑΡΔ
154	AS16	396,347.69	4,198,650.43	23.40	Γ				ΑΡΔ
155	AS17	396,425.56	4,197,908.01	26.00	Γ				ΑΡΔ
156	AS18	396,716.30	4,197,980.69	25.90	Γ	1970	25		ΑΡΔ
157	AS19	396,826.49	4,198,012.67	27.00	Γ	1980	30	Η AS19 έχει πολύ άσχημη οσμή. Κοντινή γεώτρηση το AS18 όπου βρίσκουμε στα 18m ασβεστόλιθο	ΑΡΔ
158	AS2	396,140.02	4,198,847.72	21.50	Π	1976			ΥΔΡ
159	AS20	396,866.86	4,198,297.39	25.70	Γ				ΑΡΔ
160	AS21	396,841.86	4,198,647.23	21.20	Γ				ΑΡΔ
161	AS22	396,841.86	4,198,987.55	19.30	Γ				ΑΡΔ
162	AS23	397,083.25	4,198,900.50	20.20	Γ	1993	27		ΑΡΔ
163	AS24	396,352.62	4,199,159.24	17.80	Γ			Μία μόνο δειγματοληψία τον Οκτώβριο του 2000.	ΑΡΔ
164	AS25	397,043.68	4,199,628.62	12.30	Γ				ΑΡΔ
165	AS26	397,039.72	4,199,826.48	10.80	Γ	1991	32		ΑΡΔ
166	AS27	396,191.93	4,197,632.84	28.00	Γ	1980	22		ΑΡΔ
167	AS28	396,818.12	4,200,079.75		Γ	1990	33		ΑΡΔ
168	AS29	396,849.77	4,199,980.82		Π	1935	10		ΑΡΔ
169	AS3	396,197.12	4,199,039.81	19.90	Γ		15		ΑΡΔ
170	AS31	395,942.71	4,199,565.19	16.20	Γ			Είναι η γεώτρηση που βρίσκεται μέσα στο αμπέλι	ΑΡΔ
171	AS32	396,347.21	4,199,957.07		Γ				ΑΡΔ
172	AS33	396,469.88	4,199,703.81		Γ	1985	34		ΑΡΔ
173	AS34	397,154.48	4,198,975.68		Π				ΑΡΔ
174	AS4	396,315.55	4,199,862.10	13.10	Γ	1991	45		ΥΔΡ
175	AS5	395,801.11	4,198,576.00	28.40	Π	1950			ΑΡΔ
176	AS6	396,893.30	4,199,854.18	10.70	Γ	1990	40		ΑΡΔ
177	AS7	396,742.93	4,199,870.01	11.40	Γ	1985	36		ΑΡΔ
178	AS8	395,654.69	4,200,135.15	16.00	Γ	1993	36		ΑΡΔ

¹¹ ΥΔΡ= Γεώτρηση Υδρευτικής Χρήσεως

179	ASY1	397,095.21	4,200,124.62	8.80	Γ			ΚΓ124. Βρίσκεται κοντά στο ποτάμι. Από το αντλιοστάσιο του κάτω Άσσου φεύγουν 70m3/h	ΥΔΡ
180	ASY2	396,828.53	4,200,229.70	8.70	Γ			ΚΓ125. Γεώτρηση σχολείου. Πάει μαζί με την ASY1 στην δεξαμενή του Κάτω Άσσου	ΥΔΡ
181	ASY3	396,389.40	4,200,255.60	9.80	Γ			ΚΓ128. Βρίσκεται κάτω από τις γραμμές. Πάει στο αντλιοστάσιο του Άνω Άσσου με την ASY4	ΥΔΡ
182	ASY4	395,830.81	4,198,906.66	20.00	Γ			ΚΓ η ΚΦ126. Είναι βοηθητική της ASY3.	ΥΔΡ
183	KA1	396,877.47	4,200,158.89	8.50	Γ	1994	35		ΥΔΡ
184	KA11	396,901.22	4,200,617.93		Γ	1990	36		ΑΡΔ
185	KA13	396,936.83	4,200,740.60		Γ	1993	10		ΑΡΔ
186	KA14	396,909.13	4,200,792.05		Γ	1993	10		ΑΡΔ
187	KA15	396,845.82	4,200,835.57		Γ	1995	10		ΑΡΔ
188	KA16	396,295.76	4,200,784.13		Γ				ΑΡΔ
189	KA17	396,212.66	4,200,847.45		Γ				ΑΡΔ
190	KA18	396,275.98	4,200,522.95		Π	1930			ΑΡΔ
191	KA19	396,612.34	4,200,867.23		Π	1950	8		ΑΡΔ
192	KA2	396,926.84	4,200,169.28	8.90	Γ	1990	33	Γεώτρηση στην εκκλησία. Οι μετρήσεις επηρεάζονται από τον εμπλουτισμό και από την βλάβη της αντλίας	ΥΔΡ
193	KA20	397,130.74	4,200,554.61		Π	1920	9.5		ΑΡΔ
194	KA3	397,205.92	4,200,230.12	9.30	Γ	1988	35		ΑΡΔ
195	KA4	397,380.04	4,199,949.16	10.60	Γ	1980	30		ΑΡΔ
196	KA6	396,492.98	4,200,606.33	7.60	Π	1900	10	Είναι το μεγάλο πηγάδι που βρίσκεται δίπλα από το αμπέλι.	ΑΡΔ
197	KA7	396,675.66	4,200,621.88	8.30	Γ	1990	38		ΑΡΔ
198	KA8	396,382.82	4,201,009.69	6.70	Γ	1990	30		ΑΡΔ
199	KA9	396,647.96	4,200,712.90	7.30	Γ	1990	30		ΑΡΔ
ΔΔ ΒΕΛΟΥ									
200	BE10	389,778.31	4,204,015.70		Γ	1985	71		ΑΡΔ
201	BE101	390,236.64	4,203,708.94	27.00	Γ	1997	40	Είναι η γεώτρηση που βρίσκεται απέναντι από το γήπεδο του Βέλου	ΑΡΔ
202	BE102	390,027.53	4,203,372.15		Γ	1988	35		ΑΡΔ
203	BE105	392,609.65	4,204,170.69	4.50	Γ			Η γεώτρηση του φυτωρίου. Το βάθος της γεώτρησης είναι 7-10μ. Παροχή περίπου 10m3/h	ΑΡΔ
204	BE11	391,012.88	4,203,209.90	25.30	Γ	1993	40		ΑΡΔ
205	BE12	390,981.22	4,203,368.19	24.80	Π	1955	20		ΑΡΔ
206	BE13	390,858.55	4,203,348.41	26.50	Γ	1975	38		ΑΡΔ
207	BE14	390,854.59	4,203,249.48	27.10	Γ	1993	35		ΑΡΔ
208	BE15	390,747.74	4,203,178.25	28.80	Γ	1988	35		ΑΡΔ
209	BE16	390,961.43	4,203,134.72	27.50	Γ	1988	38		ΑΡΔ
210	BE17	390,448.80	4,203,151.20	30.10	Π	1994	25	Πηγάδι μεγάλης διαμέτρου. Υπολογίζεται παροχή 60m3/h το χειμώνα ενώ το καλοκαίρι φθάνει μόνο τα 10m3/h	ΑΡΔ
211	BE18	389,813.84	4,203,475.04	35.50	Γ	1980	40		ΑΡΔ
212	BE19	390,011.70	4,203,308.84	34.20	Γ	1994	40		ΑΡΔ
213	BE20	390,684.43	4,203,360.28	28.80	Γ	1992	35		ΑΡΔ
214	BE21	391,080.15	4,203,261.35	24.90	Γ	1995	35		ΑΡΔ
215	BE22	391,147.42	4,203,320.71	23.40	Γ	1990	40		ΑΡΔ
216	BE23	391,317.58	4,203,415.68	20.20	Γ	1990	35		ΑΡΔ
217	BE24	391,281.97	4,203,344.45	21.10	Γ	1990	35		ΑΡΔ
218	BE25	391,813.56	4,204,859.39	7.40	Γ	1952	11		ΑΡΔ
219	BE26	392,033.84	4,205,022.72	7.30	Γ	1986	12		ΑΡΔ
220	BE27	391,911.91	4,204,919.75	6.80	Π		12	Αντλεί με υψηλές παροχές για μεγάλο χρονικό διάστημα - πουλάει νερό σε αγρότες σε παρακείμενες περιοχές. Το χειμώνα αντλεί με 30m3/h ενώ το καλοκαίρι με 20m3/h	ΑΡΔ
221	BE28	392,421.65	4,204,990.65	5.00	Π		12		ΒΙΟΜ
222	BE29	391,812.24	4,204,872.34	8.90	Π		12		ΑΡΔ
223	BE30	391,764.75	4,204,666.57	9.90	Π		12		ΑΡΔ
224	BE31	392,320.98	4,204,482.76	5.60	Γ	1960	10	Μικρό πηγάδι με μικρό βάθος	ΑΡΔ
225	BE32	391,598.06	4,205,715.35	9.20	Π		12		ΑΡΔ
226	BE33	391,678.99	4,205,678.80	6.90	Γ		15		ΑΡΔ
227	BE34	391,647.66	4,205,631.80	7.00	Γ	1993	15		ΑΡΔ
228	BE35	391,737.05	4,205,430.31	6.30	Γ		15		ΑΡΔ
229	BE36	391,717.26	4,205,323.46	6.80	Γ		14		ΑΡΔ
230	BE37	392,235.10	4,205,587.42	3.30	Π	1960	10		ΑΡΔ
231	BE38	392,548.28	4,204,630.95	5.40	Γ		15		ΑΡΔ
232	BE39	390,233.31	4,203,479.00	28.90	Γ		30		ΑΡΔ

233	BE4	388,509.84	4,203,475.08	60.00	Γ				ΥΔΡ
234	BE40	390,146.25	4,203,475.04	29.80	Γ		30		ΑΡΔ
235	BE41	390,308.49	4,203,581.88	27.90	Γ		30		ΑΡΔ
236	BE42	390,193.73	4,203,605.63	29.80	Γ		30		ΑΡΔ
237	BE43	389,647.64	4,203,546.27	34.70	Γ		35		ΑΡΔ
238	BE44	389,485.39	4,203,661.03	34.10	Γ		35		ΑΡΔ
239	BE45	390,221.43	4,203,874.72	26.50	Γ	1975	35		ΑΡΔ
240	BE46	390,435.12	4,204,349.58	24.20	Γ	1985	40		ΑΡΔ
241	BE47	390,427.21	4,204,219.00	23.90	Γ	1988	40		ΑΡΔ
242	BE48	390,478.65	4,204,135.89	23.30	Γ		40		ΑΡΔ
243	BE49	389,703.04	4,203,384.02	36.90	Γ	1994	65		ΑΡΔ
244	BE50	390,249.14	4,203,285.09	33.00	Γ	1993	40		ΑΡΔ
245	BE51	390,363.89	4,203,467.12	30.00	Γ		28		ΑΡΔ
246	BE52	390,652.77	4,203,451.30	27.90	Γ		35		ΑΡΔ
247	BE53	390,735.87	4,203,736.21	23.50	Γ		35		ΑΡΔ
248	BE55	390,900.68	4,204,100.83	18.80	Γ		37	Είναι πηγάδι που όμως επηρεάζεται πολύ από την γεώτρηση που βρίσκεται πίσω από το σπίτι. Βάθος 12m	ΑΡΔ
249	BE56	390,733.87	4,203,527.47	26.20	Γ	1993	40		ΑΡΔ
250	BE57	391,388.81	4,203,989.48	17.80	Γ		28		ΑΡΔ
251	BE58	390,863.40	4,204,964.50	15.80	Π	1970	25	Αντιστοιχεί μάλλον στην ΚΟ82 του ΙΓΜΕ. Πηγάδι μεγάλης διαμέτρου. Βρίσκεται μέσα σε κτήμα με Βερυκοκκίες	ΑΡΔ
252	BE59	390,648.81	4,204,915.47	18.30	Γ		30		ΑΡΔ
253	BE60	390,621.11	4,204,852.15	18.30	Γ	1970	30		ΑΡΔ
254	BE61	390,759.62	4,204,681.99	15.80	Γ		30		ΑΡΔ
255	BE62	390,882.29	4,205,058.33	18.10	Γ	1975	32		ΑΡΔ
256	BE64	391,388.81	4,204,523.70	13.10	Γ		30		ΑΡΔ
257	BE65	391,258.23	4,204,610.76	11.50	Γ	1975	30		ΒΙΟΜ
258	BE66	391,281.97	4,204,685.95	10.90	Γ	1978	30		ΒΙΟΜ
259	BE68	391,467.51	4,205,587.42	9.50	Γ		20		ΑΡΔ
260	BE69	391,574.11	4,205,201.66	6.10	Π	1975	18	Είναι η γειτονική γεώτρηση με τη βιοτεχνία με τα πλακάκια. Γενικά έχουν πολύ μικρές παροχές.	ΒΙΟΜ
261	BE7	389,506.77	4,203,862.08	38.96	Γ				ΥΔΡ
262	BE70	391,539.19	4,204,519.74	12.90	Π	1970	15		ΑΡΔ
263	BE71	391,685.61	4,204,575.14	11.40	Γ	1975	20		ΒΙΟΜ
264	BE72	391,531.27	4,203,997.39	17.00	Γ		35		ΑΡΔ
265	BE73	391,578.76	4,203,542.31	18.50	Π	1975	20		ΑΡΔ
266	BE74	391,634.16	4,204,472.26	12.70	Π	1970	20		ΑΡΔ
267	BE8	389,528.04	4,203,859.58	31.00	Π			ΚΓ58β. Αντιστοιχεί στην ΒΕΥ4.Γεωτρήσεις του Δήμου Βέλου. Βρίσκεται σε περιφραγμένο χώρο του Δήμου. Γεωτρήσεις του Δήμου Βέλου. Πραγματοποιείται εμπλουτισμός από το αρδευτικό αυλάκι του ΑΟΣΑΚ	ΕΜΠΛ ¹²
268	BE82	392,405.82	4,205,117.28	4.50	Π		12		ΑΡΔ
269	BE83	392,306.89	4,205,422.40	2.10	Π		10		ΑΡΔ
270	BE84	392,306.89	4,203,874.72	8.60	Γ		12		ΑΡΔ
271	BE85	392,488.92	4,204,013.22	6.00	Π				ΑΡΔ
272	BE86	392,599.72	4,204,159.64	5.50	Π				ΑΡΔ
273	BE87	392,536.41	4,204,270.44	5.50	Π				ΑΡΔ
274	BE88	391,709.35	4,205,161.22	8.10	Γ		10		ΑΡΔ
275	BE89	391,752.88	4,205,220.58	7.80	Γ		10		ΑΡΔ
276	BE9	389,736.53	4,203,979.14		Γ	1967	105		ΑΡΔ
277	BE90	392,014.05	4,205,560.90	5.10	Π		10		ΑΡΔ
278	BE91	391,867.64	4,205,556.94		Γ		9		ΑΡΔ
279	BE92	391,875.55	4,205,442.18		Γ		10		ΑΡΔ
280	BE95	391,709.35	4,205,525.28	6.70	Π	1970	8		ΑΡΔ
281	BE96	391,800.36	4,205,628.17	6.60	Γ		10		ΑΡΔ
282	BE98	391,562.93	4,205,188.92	8.00	Γ		10		ΑΡΔ
283	BE99	392,183.13	4,205,131.96	3.90	Π		6	Γίνεται άντληση στον επιφανειακό υδροφόρο. Με δύο ώρες άντληση εξαντλείται αλλά ανεβάζει πολύ γρήγορα στάθμη.	ΑΡΔ
284	BEY1	388,506.36	4,203,594.24	38.00	Γ			Οι γεωτρήσεις βρίσκονται μέσα στο ποτάμι. Δουλεύει χειμώνα και καλοκαίρι σε 24ωρη βάση.	ΥΔΡ
285	BEY2	388,499.09	4,203,596.79	38.00	Γ			Τα BEY1 και BEY2 δουλεύουν μαζί. Η BEY2 δεν σβήνει καθόλου.	ΥΔΡ

¹² ΕΜΠΛ= Γεώτρηση Εμπλουτισμού

286	BEY3	388,992.41	4,203,911.32	34.10	Γ			Στον ίδιο περίβολο είναι το Ε14. Αντλείται σε 24ωρη βάση. Το καλοκαίρι του 2000 δούλεψε για 10 μέρες στα 25m ³ /h και μετά έπεσε στα 5-6m ³ /h	ΥΔΡ
ΔΔ ΒΟΧΑΙΚΟΥ									
287	BO	393,192.48	4,200,217.14	31.00	Γ			Είναι πολύ κοντά στην BOY1 από όπου και παίρνουμε δείγμα από το Φεβρουάριο-01 και μετά	ΑΡΔ
288	BO1	392,685.80	4,200,615.56	28.10	Γ	1983	40		ΑΡΔ
289	BO10	393,420.19	4,200,456.05	31.26	Γ	1986	45		ΑΡΔ
290	BO11	392,623.47	4,199,909.59		Γ		40		ΑΡΔ
291	BO12	392,560.15	4,199,858.14		Γ		38		ΑΡΔ
292	BO13	392,763.43	4,198,980.77		Γ	1990	30		ΑΡΔ
293	BO14	393,736.39	4,200,065.55	30.00	Γ	1980	40		ΑΡΔ
294	BO15	393,901.65	4,200,099.53		Γ	1982	40		ΑΡΔ
295	BO16	393,078.55	4,199,771.08		Γ	1976	38		ΑΡΔ
296	BO2	392,325.99	4,200,456.06	30.60	Γ	1968	50		ΑΡΔ
297	BO21	392,461.22	4,199,755.25		Γ	1994	36		ΑΡΔ
298	BO22	393,019.19	4,199,660.28		Γ		38		ΑΡΔ
299	BO23	392,020.86	4,200,232.51	33.40	Γ			Ανενεργή Γεώτρηση, Βρίσκεται μέσα σε έναν αμπελώνα. Πολύ κοντά (100-200μ) αλλάζει το ανάγλυφο ενώ κάνουν την εμφάνισή τους οι μάργες	ΑΡΔ
300	BO24	392,184.21	4,200,178.68		Γ	1987			ΑΡΔ
301	BO25	391,808.28	4,199,743.38		Γ	1994	100		ΑΡΔ
302	BO26	392,275.23	4,199,656.32		Γ				ΑΡΔ
303	BO27	392,852.98	4,200,008.52		Γ				ΑΡΔ
304	BO28	393,048.50	4,200,505.05	29.85	Γ	1978	58		ΑΡΔ
305	BO29	393,438.65	4,200,685.20		Γ				ΑΡΔ
306	BO3	392,449.35	4,200,420.07		Γ				ΑΡΔ
307	BO30	393,078.55	4,200,245.95		Γ				ΑΡΔ
308	BO31	393,142.81	4,200,156.13	32.00	Γ	1990	40	Βρίσκεται μέσα σε περιβόλι με πορτοκαλιές	ΑΡΔ
309	BO32	393,355.55	4,200,317.18		Γ				ΑΡΔ
310	BO33	393,351.59	4,199,949.16		Γ				ΑΡΔ
311	BO34	393,537.58	4,199,846.27		Γ				ΑΡΔ
312	BO35	393,252.66	4,200,158.89		Γ	1990	42		ΑΡΔ
313	BO36	393,296.19	4,200,222.21		Γ	1994	42		ΑΡΔ
314	BO37	393,474.27	4,200,574.40		Γ	1978	40		ΑΡΔ
315	BO38	392,706.57	4,200,594.18		Γ				ΑΡΔ
316	BO40	393,210.76	4,199,019.55	40.00	Π	1961	60		ΑΡΔ
317	BO41	393,114.16	4,199,557.39		Γ	1993	50		ΑΡΔ
318	BO42	393,042.93	4,199,470.33		Γ		50		ΑΡΔ
319	BO43	393,027.10	4,199,529.69		Γ	1992	50		ΑΡΔ
320	BO45	393,088.96	4,200,394.05	30.70	Γ				ΑΡΔ
321	BO46	393,438.95	4,200,660.05	26.00	Γ				ΑΡΔ
322	BO7	392,255.44	4,199,434.72	42.90	Γ		35		ΑΡΔ
323	BO8	393,181.43	4,200,918.68	25.00	Γ				ΑΡΔ
324	BO9	393,031.06	4,200,815.79	27.50	Π				ΑΡΔ
325	BOY1	392,837.03	4,199,883.30	36.90	Γ			Περιοχή Σπανού Γεώτρηση Βουράκη. Λειτουργεί σε 24ωρη βάση. Παροχή 10m ³ /h (έχει μειωθεί πολύ η παροχή από αρχικά 40m ³ /h)	ΥΔΡ
326	BOY3	392,447.78	4,198,234.83	62.00	Γ			Γεώτρηση μέσα στον Ζαπάντη. Χρησιμοποιείται κυρίως το καλοκαίρι αλλά δίνει παροχή μόνο σχεδόν για ένα μήνα.	ΥΔΡ
327	BOY4	392,289.69	4,200,473.12	29.10	Γ			Περιοχή Μπαζδή. Είναι δύο γεωτρήσεις που δίνουν 50m ³ /h και 25m ³ /h αλλά το καλοκαίρι πέφτουν στα 25m ³ /h η καθεμία.	ΥΔΡ
328	BOY5	392,675.32	4,200,617.87	27.40	Γ			ΚΓ50.Περιοχή Μπαζδή.	ΥΔΡ

ΔΔ ΒΡΑΧΑΤΙΟΥ									
329	BP1	394,347.00	4,201,348.47	15.80	Γ	1994	43		ΥΔΡ
330	BP10	394,839.51	4,200,744.56	16.00	Γ	1988	40		ΑΡΔ
331	BP11	395,235.23	4,200,875.15	11.90	Γ	1986	37		ΑΡΔ
332	BP12	395,417.26	4,201,338.14	6.80	Γ		37		ΑΡΔ
333	BP13	395,001.75	4,201,298.57	10.00	Γ	1991	40		ΑΡΔ
334	BP14	395,160.15	4,201,363.15	7.50	Γ	1991	43	Υδρευτική γεώτρηση BPY5.Χρησιμοποιείται για να πρεσάρει το δίκτυο. Η απόδοση πέφτει πάρα πολύ το καλοκαίρι	ΑΡΔ
335	BP15	395,599.29	4,201,634.93	0.90	Γ	1966	30		ΑΡΔ

336	BP16	395,217.10	4,201,913.27	1.90	Γ	1966	33		ΑΡΔ
337	BP17	395,120.47	4,201,963.38	1.50	Γ				ΑΡΔ
338	BP18	395,005.71	4,201,999.00	1.60	Γ				ΑΡΔ
339	BP19	394,542.72	4,202,256.22	1.70	Γ				ΑΡΔ
340	BP2	394,400.43	4,201,310.31	15.80	Γ	1976	36		ΑΡΔ
341	BP20	394,447.74	4,202,299.75	1.60	Γ				ΑΡΔ
342	BP21	394,511.06	4,201,401.46	11.60	Γ				ΑΡΔ
343	BP24	394,148.56	4,201,951.43		Γ	1993	33		ΑΡΔ
344	BP25	394,150.95	4,202,442.20		Γ	1987	35		ΑΡΔ
345	BP27	394,075.76	4,202,473.86		Γ	1978	33		ΑΡΔ
346	BP29	393,961.01	4,202,256.22		Γ	1970	30		ΑΡΔ
347	BP3	394,423.32	4,201,199.64	15.30	Γ	1991	42		ΑΡΔ
348	BP30	396,329.21	4,201,163.28	2.50	Π	1930	6		ΑΡΔ
349	BP33	395,725.92	4,201,520.17		Γ	1995	12		ΑΡΔ
350	BP34	394,465.30	4,202,039.20		Γ	1985	5		ΑΡΔ
351	BP35	395,496.91	4,201,875.05	5.45	Γ	1968	56.5		ΑΡΔ
352	BP4	394,408.06	4,201,134.76	16.00	Γ	1978	45		ΑΡΔ
353	BP5	394,415.69	4,201,043.17	16.40	Γ	1990	40		ΑΡΔ
354	BP6	394,503.47	4,200,947.77	17.90	Γ	1989	35		ΑΡΔ
355	BP7	394,851.38	4,200,914.72	15.00	Γ	1994	43		ΥΔΡ
356	BP8	394,835.55	4,200,859.32	15.50	Γ	1978	42		ΥΔΡ
357	BP9	394,653.52	4,200,697.07	17.10	Γ	1982	43		ΥΔΡ
358	BPY1	394,625.57	4,200,681.33	17.80	Γ			ΚΓ116.	ΥΔΡ
359	BPY2	394,790.14	4,200,834.58	15.10	Γ			ΚΓ39Α	ΥΔΡ
360	BPY3	394,828.97	4,200,891.42	14.50	Γ			Τουρκογέφυρα. Το νερό είναι σχεδόν πάντα θολό από τα ποσοστά άμμου/ιλύος. Οι BPY1, BPY2 και BPY3 πάνε στον υδατόπυργο	ΥΔΡ
361	BPY4	395,033.56	4,201,199.53	9.70	Γ			Έχει δυνατότητα παροχής 25-30m3/h. Αρχίζει να δουλεύει μετά το Πάσχα έως το τέλος του καλοκαιριού με παροχή 15m3/h.	ΥΔΡ
362	BPY5	395,156.94	4,201,344.06	7.50	Γ				ΥΔΡ
363	BPY6	393,940.56	4,201,136.67	16.90	Γ			ΚΓ115.	ΥΔΡ
364	BPY7	393,943.38	4,201,156.24	16.70	Γ			Το καλοκαίρι βγάζει από 15-20m3/h η και καθόλου	ΥΔΡ
365	BPY8	393,778.19	4,201,748.42	10.80	Γ			Στα 37μ βρήκε νερό και στα 48μ βρήκε άμμο.	ΥΔΡ
ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ									
366	E1	400,338.84	4,196,833.02	18.80	Γ				ΕΡ ¹³
367	E10	393,103.00	4,198,814.05	41.91	Γ				ΕΡ
368	E11	391,353.41	4,201,098.46	40.90	Γ				ΕΡ
369	E12	397,323.41	4,197,437.73	30.46	Γ				ΕΡ
370	E13	391,511.28	4,201,152.33	38.94	Γ			Ερευνητική γεώτρηση που βρίσκεται μέσα στο τρίγωνο Αλσάκι	ΕΡ
371	E14	389,038.57	4,203,827.88	38.00	Γ			Πρόσφατα του προσαρμόσανε αντλητικό συγκρότημα. Πολύ αμμωνία στα δείγματα. Βρίσκεται στον ίδιο περίβολο με την BEY3	ΥΔΡ
372	E2	400,355.54	4,196,832.02	18.90	Γ				ΕΡ
373	E3	395,063.56	4,199,545.58	23.50	Γ			Δείγμα από την ίδια	ΕΡ
374	E4	395,414.12	4,199,745.44	23.44	Γ				ΕΡ
375	E5	393,926.59	4,199,808.25	31.81	Γ				ΕΡ
376	E6	393,645.82	4,199,409.73	40.10	Γ			Από το Μάρτιο-01 και μετά παίρναμε δείγμα από το ΖΥ3	ΕΡ
377	E7	389,768.97	4,204,450.56	37.38	Γ				ΕΡ
378	E8	389,749.20	4,204,452.35	37.61	Γ			Βρίσκεται κοντά στην ΚΓ69	ΕΡ
379	E9	390,076.20	4,203,666.66	28.50	Γ				ΕΡ
ΕΥΑΓΓΕΛΙΣΤΡΙΑ									
380	EY1	391,950.74	4,201,057.18	26.50	Γ		30		ΑΡΔ
381	EY10	392,452.81	4,201,521.57	21.50	Γ	1975	30	Σημείο στάθμης στην Ευαγγελίστρια. Είναι υδρευτική γεώτρηση EY1 στην πλατεία του χωριού.	ΑΡΔ
382	EY10a	392,599.71	4,201,550.47	19.00	Γ				ΑΡΔ
383	EY11	392,726.35	4,201,690.33	18.70	Γ		30		ΑΡΔ
384	EY12	392,615.55	4,201,536.00	19.40	Γ		30		ΑΡΔ
385	EY13	392,516.62	4,201,464.77	21.90	Γ		30		ΑΡΔ
386	EY14	392,730.31	4,201,634.93	18.60	Γ	1960	12		ΑΡΔ
387	EY15	392,738.22	4,201,575.57		Γ	1989	40		ΑΡΔ
388	EY16	392,285.95	4,201,252.06	29.67	Γ	1957			ΑΡΔ
389	EY2	392,045.71	4,200,993.86	26.60	Γ		30		ΑΡΔ

¹³ ΕΡ= Ερευνητική Γεώτρηση

390	EY3	392,235.66	4,200,966.16	25.00	Γ		30		ΑΡΔ
391	EY5	391,697.48	4,200,768.30	33.00	Γ		30		ΥΔΡ
392	EY6	391,907.84	4,200,912.20	28.70	Γ		30	Στην ίδια θέση υπάρχουν και Γεώτρηση και Πηγάδι που δεν επικοινωνούν (μέτρηση διαφορετικής πιεζομετρικής στάθμης)	ΑΡΔ
393	EY7	391,649.99	4,200,301.35	36.60	Γ		35		ΑΡΔ
394	EY8	392,089.24	4,200,697.07	28.80	Γ	1970	30		ΑΡΔ
395	EY9	392,635.34	4,201,745.73	18.80	Γ		30		ΑΡΔ
396	EY2	391,464.87	4,200,017.90	47.00	Γ			Καινούργια γεώτρηση που προορίζεται μάλλον για άρδευση.	ΥΔΡ
ΚΙΑΤΟ									
397	KI1	390,280.79	4,204,404.98	26.00	Γ	1984	56		ΑΡΔ
398	KI10	390,573.63	4,205,216.21	13.40	Π		10		ΑΡΔ
399	KI12	390,258.51	4,205,342.53	13.90	Γ			Ίσως η γεώτρηση να είναι σχετικά εκτός περιοχής, πέρα από τον Ασωπό	ΑΡΔ
400	KI2	390,229.35	4,204,472.26	25.00	Γ	1984	65		ΑΡΔ
401	KI27	390,454.91	4,205,129.16	15.60	Γ		25		ΑΡΔ
402	KI28	390,545.93	4,205,022.31	17.30	Γ	1990	30		ΑΡΔ
403	KI3	389,713.69	4,204,361.08	28.10	Γ	1986	40		ΑΡΔ
404	KI30	390,724.00	4,205,129.56	17.00	Γ	1987	33		ΑΡΔ
405	KI31	390,886.25	4,205,212.66	17.20	Π		15		ΑΡΔ
406	KI32	390,961.01	4,205,480.37	11.70	Γ		35		ΑΡΔ
407	KI35	390,597.37	4,205,303.27		Γ	1993	34		ΑΡΔ
408	KI39	391,397.02	4,205,749.29		Π				ΑΡΔ
409	KI40	391,840.86	4,206,274.07		Π		6		ΑΡΔ
410	KI42	390,312.45	4,204,567.23		Γ				ΑΡΔ
411	KI43	389,718.87	4,204,112.15		Γ		97		ΑΡΔ
412	KI44	389,904.86	4,204,507.87		Γ	1988	65		ΥΔΡ
413	KI45	389,033.65	4,203,898.08	40.00	Γ	1989	203		ΑΡΔ
414	KI5	389,987.96	4,204,436.64	25.00	Γ	1990	70		ΑΡΔ
415	KI6	389,911.61	4,204,321.08	25.50	Γ	1986	70		ΑΡΔ
416	KI7	391,095.66	4,205,917.07	10.00	Γ			Το νερό λιγοστεύει το καλοκαίρι και χρησιμοποιείται μόνο για το πότισμα του περιβολιού.	ΑΡΔ
417	KI8	390,900.96	4,205,710.13	9.70	Γ	1990	30		ΑΡΔ
418	KI9	390,923.34	4,205,796.05	9.10	Π			Η περιοχή χαρακτηρίζεται κύρια ως αγροτική με καλλιέργειες αμπελιών και πορτοκαλιές	ΑΡΔ
ΚΟΚΚΩΝΙ									
419	KO1	392,591.81	4,202,461.99	15.60	Γ		22		ΑΡΔ
420	KO10	392,781.75	4,203,150.55	8.40	Γ				ΑΡΔ
421	KO11	393,885.82	4,202,082.10		Γ	1990	32		ΑΡΔ
422	KO12	393,881.86	4,202,137.50		Γ	1950	28		ΑΡΔ
423	KO13	393,122.08	4,202,699.42		Γ	1990	28		ΑΡΔ
424	KO14	393,284.32	4,203,245.52		Γ	1993	15.5		ΑΡΔ
425	KO15	392,852.98	4,203,103.06		Γ	1995	12		ΑΡΔ
426	KO17	393,684.00	4,202,742.95		Π				ΑΡΔ
427	KO19	393,775.02	4,202,901.24		Γ				ΑΡΔ
428	KO1a	392,440.60	4,202,446.56	16.50	Γ			Γεώτρηση που αντλείται με αυξημένες παροχές – Πώληση νερού	ΑΡΔ
429	KO1b	392,414.20	4,202,292.77	16.90	Γ			Γεώτρηση που βρίσκεται μέσα σε περιβόλι με πορτοκαλιές. Η παροχή το χειμώνα είναι 55-60m3/h ενώ το καλοκαίρι 30m3/h	ΑΡΔ
430	KO2	392,481.01	4,202,501.56	18.00	Γ	1986	21		ΑΡΔ
431	KO20	393,664.21	4,202,501.56		Γ				ΑΡΔ
432	KO22	393,953.09	4,202,750.87		Γ				ΑΡΔ
433	KO23	392,955.87	4,202,026.70		Γ	1997	35		ΑΡΔ
434	KO24	392,947.96	4,202,145.41		Γ		35		ΑΡΔ
435	KO25	392,880.68	4,202,216.64		Γ		35		ΑΡΔ
436	KO3	392,421.65	4,202,592.58	17.80	Γ	1980	35		ΑΡΔ
437	KO4	392,393.95	4,202,556.96	17.90	Γ	1985	35		ΑΡΔ
438	KO5	392,148.60	4,202,533.22	20.50	Γ	1982	35		ΑΡΔ
439	KO6	392,231.70	4,202,568.84	19.10	Γ	1990	33		ΑΡΔ
440	KO7	392,302.93	4,202,715.25	17.70	Γ	1975	25		ΑΡΔ
441	KO8	393,177.48	4,202,580.71	10.60	Γ		14.5		ΑΡΔ
442	KO9	393,320.24	4,202,527.53	8.00	Γ	1993	18	Το δείγμα προέρχεται από το φυτώριο κοντά στον δρόμο	ΑΡΔ
443	KOY1	392,252.82	4,202,571.11	16.30	Γ			Οι δύο αυτές γεωτρήσεις δουλεύουν μαζί το καλοκαίρι και εναλλάξ το χειμώνα. Δουλεύει την νύχτα.	ΥΔΡ
444	KOY2	392,275.80	4,202,533.82	16.20	Γ			Δουλεύει την ημέρα	ΥΔΡ

ΚΡΗΝΕΣ									
445	KP1	391,539.19	4,203,008.09	21.30	Γ	1989	36		ΥΔΡ
446	KP10	390,352.02	4,203,209.90	35.50	Γ		35		ΑΡΔ
447	KP11	390,241.22	4,203,138.68	35.00	Γ		35		ΑΡΔ
448	KP12	390,082.93	4,203,126.80	36.80	Γ		35		ΑΡΔ
449	KP13	390,344.11	4,203,118.89	34.40	Γ		35		ΑΡΔ
450	KP14	390,272.88	4,203,047.66	35.40	Γ		35		ΑΡΔ
451	KP15	390,878.33	4,202,667.77	36.40	Π	1975	35		ΑΡΔ
452	KP16	391,369.03	4,202,766.70	26.70	Γ	1985	35		ΑΡΔ
453	KP17	391,416.53	4,202,521.75	27.90	Γ		35	Γεώτρηση που χρησιμοποιείται για άρδευση συνδυαστικά με άλλες. Έχει πολύ λίγα φίλτρα. Μετά από άντληση ανεβάζει σχετικά γρήγορα στάθμη	ΑΡΔ
454	KP2	391,498.30	4,203,168.04	18.60	Γ		35	Αντιστοιχεί στην Υδρευτική γεώτρηση ΚΡΥ3. Παροχή 35-40 m3/h	ΑΡΔ
455	KP20	391,638.12	4,203,016.00	19.70	Γ		30		ΑΡΔ
456	KP21	391,357.16	4,201,797.18	37.10	Γ	1982	70		ΑΡΔ
457	KP22	389,995.87	4,202,200.81	59.00	Γ	1988	45		ΑΡΔ
458	KP23	391,669.78	4,202,303.70	34.20	Γ				ΑΡΔ
459	KP24	391,001.01	4,202,921.03	30.40	Γ				ΑΡΔ
460	KP25	390,029.02	4,202,786.90	34.00	Γ			Δεν χρησιμοποιείται. Βρίσκεται στην ζυγαριά.	ΑΡΔ
461	KP26	390,114.59	4,202,810.23	40.00	Γ				ΑΡΔ
462	KP27	390,665.08	4,202,901.69	30.10	Γ			Βρίσκεται μέσα σε Περιβόλι με Λεμονιές και Πορτοκαλιές	ΑΡΔ
463	KP28	390,526.14	4,202,782.53	33.70	Γ				ΑΡΔ
464	KP29	390,352.02	4,202,671.72	39.80	Γ				ΑΡΔ
465	KP3	391,867.64	4,203,249.48	18.60	Γ	1990	36		ΑΡΔ
466	KP30	390,185.82	4,202,580.71	43.50	Γ				ΑΡΔ
467	KP31	391,297.80	4,202,869.58		Π				ΑΡΔ
468	KP32	391,317.58	4,203,039.74		Π				ΑΡΔ
469	KP33	391,503.57	4,203,087.23		Π				ΑΡΔ
470	KP34	391,741.01	4,203,186.16		Γ	1995			ΑΡΔ
471	KP36	391,547.10	4,202,952.69		Γ				ΑΡΔ
472	KP6	391,610.42	4,203,063.49	20.90	Π	1968	18		ΑΡΔ
473	KP9	391,646.03	4,203,166.38	19.20	Γ		30		ΑΡΔ
474	KPY2	391,340.15	4,203,089.99	18.00	Γ			Γκράβα. Γεωτρήσεις που πέφτουν στην δεξαμενή άρδευσης. Παροχή 20m3/h	ΥΔΡ
475	KPY3	391,895.34	4,203,162.42	17.80	Γ	1989	32	Είναι γειτονική της ΚΡ2. Πάει στη δεξαμενή για άρδευση. Μάιο-Νοέμβριο αντλείται 24ωρο	ΥΔΡ
476	KPY4	391,731.59	4,202,685.27	18.80	Γ			Αντλεί από τις Κρήνες και το πάει στα Ταρσινά. Για παροχή θα βάλουμε μόνο την ΚΡΥ6	ΥΔΡ
477	KPY5	391,705.60	4,202,713.36	18.80	Γ			Τα ΚΡΥ5 και ΚΡΥ4 είναι στο ίδιο κτήμα με το κεντρικό πηγάδι των Ταρσινών ΚΡΥ6	ΥΔΡ
478	KPY6	391,691.13	4,202,730.20	18.90	Γ			Αναφέρεται στο κεντρικό πηγάδι των Ταρσινών. Κάτω από τα 30-35m εμφανίζεται η μάργα.	ΥΔΡ
ΛΕΧΑΙΟ									
479	LE1	398,274.37	4,199,288.30	6.30	Γ		20		ΥΔΡ
480	LE10	400,433.85	4,198,589.35	3.00	Γ	1995	27		ΑΡΔ
481	LE11	399,083.75	4,197,965.12	16.50	Π				ΑΡΔ
482	LE12	398,751.47	4,197,980.69	19.00	Π				ΑΡΔ
483	LE13	399,388.21	4,198,348.93	15.10	Γ		30		ΑΡΔ
484	LE14	399,475.98	4,198,280.24	14.40	Π				ΑΡΔ
485	LE15	400,349.64	4,198,585.59	4.20	Γ		12	Γεώτρηση κοντά στην θάλασσα όπου δεν μπορεί να μπει μέσα ο δειγματολήπτης	ΑΡΔ
486	LE16	398,948.76	4,198,494.68	4.50	Γ		15		ΑΡΔ
487	LE17	398,346.52	4,198,738.69	16.90	Γ	1978	20		ΑΡΔ
488	LE19	399,437.82	4,199,169.42	1.90	Γ		25		ΑΡΔ
489	LE2	398,480.93	4,199,502.51	4.70	Γ			ΚΓ131. Είναι η LEY4. Γεώτρηση Μάνας, αντλείται μαζί με τις LEY2 και LEY3 (14-15h Summer and 4-7h Winter)	ΑΡΔ
490	LE20	399,026.64	4,198,053.38	16.50	Π				ΑΡΔ
491	LE21	398,428.70	4,199,288.30		Γ	1990	23		ΑΡΔ
492	LE22	398,290.20	4,199,240.82		Γ		22		ΑΡΔ
493	LE24	398,345.60	4,199,169.59		Γ				ΑΡΔ
494	LE25	398,523.68	4,199,545.52		Γ				ΑΡΔ
495	LE26	399,453.57	4,199,182.24	2.00	Π			Είναι το πηγάδι απέναντι από το παραλιακό κέντρο. Αν και θεωρητικά προστατεύεται από πλέγμα είναι γεμάτο σκουπίδια.	ΑΡΔ
496	LE27	399,944.42	4,198,352.55	9.00	Γ		20	Είναι το συσκευαστήριο απέναντι από το LE27(Μετρήσεις)	ΑΡΔ

497	LE28	400,007.88	4,198,375.27		Γ		14	ΑΡΔ
498	LE29	399,590.47	4,198,310.77		Π		14	ΑΡΔ
499	LE3	398,618.65	4,199,565.31	4.20	Γ		25	ΑΡΔ
500	LE30	399,997.50	4,198,131.25		Γ			ΑΡΔ
501	LE31	399,883.28	4,197,814.56		Π		14	ΑΡΔ
502	LE32	400,039.03	4,197,824.94		Π	1965	12	ΑΡΔ
503	LE33	400,205.17	4,197,908.01		Π		12	ΑΡΔ
504	LE34	400,174.02	4,198,292.20		Π		9	ΑΡΔ
505	LE35	399,852.13	4,198,666.01		Π			ΑΡΔ
506	LE37	398,313.10	4,197,778.30	17.10	Π		14	ΑΡΔ
507	LE38	399,208.00	4,197,643.58	16.50	Π		16	Χρησιμοποιείται για οικιακή χρήση και πότισμα κήπου
508	LE39	400,049.42	4,197,181.16		Π		15	ΑΡΔ
509	LE4	398,780.90	4,199,525.74	3.80	Γ		24	ΑΡΔ
510	LE40	400,070.18	4,197,269.42		Π	1960	15.5	ΑΡΔ
511	LE41	400,241.51	4,197,124.05		Π		14	ΑΡΔ
512	LE43	399,218.73	4,197,513.43		Γ		19	ΑΡΔ
513	LE44	399,099.32	4,197,362.87		Π		15	ΑΡΔ
514	LE46	398,917.61	4,197,414.79		Π		17	ΑΡΔ
515	LE5	398,713.62	4,199,573.22	2.00	Γ		24	ΑΡΔ
516	LE7	398,836.30	4,199,573.22	1.90	Γ	1956	20	ΑΡΔ
517	LE8	398,687.27	4,198,421.02	16.90	Π	1959	14	Αρδευτική χρήση τους θερινούς μήνες, είναι επάνω στο τρίγωνο
518	LE9	399,083.75	4,198,546.59	16.50	Γ	1992	30	ΑΡΔ
519	LEY1	399,517.87	4,199,169.74	2.00	Γ			ΚΥΓ132. Γεώτρηση Καλα. Η άντληση είναι σχεδόν συνεχής 20-22h το καλοκαίρι και 3-4h το χειμώνα. Υδατόπυργος Αγ. Γερασίμου. Παροχή 30m3/h
520	LEY2	398,686.65	4,199,588.74	2.80	Γ			Μαζί με την LEY3 είναι βοηθητικές και δουλεύουν κυρίως το καλοκαίρι
521	LEY3	398,676.12	4,199,568.52	3.10	Γ			Οι LEY2, LEY3 και LEY4 πάνε στον υδατόπυργο Αγ Κωνσταντίνου - Β Αντλιοστάσιο
522	LEY4	398,493.62	4,199,502.35	4.60	Γ			ΥΔΡ
523	LEY5	398,283.75	4,199,347.74	6.90	Γ			ΚΓ130.Γεώτρηση Εξαρχόπουλου. Αντλείται 4-5 h την ημέρα. Συμπληρώνει την παροχή του Β Αντλιοστασίου
ΜΠΟΛΑΤΙ								
524	MP1	393,228.92	4,201,013.65		Γ		40	ΥΔΡ
525	MP10	393,585.07	4,201,476.64	16.00	Γ		25	ΑΡΔ
526	MP11	393,438.65	4,201,634.93	15.70	Γ		30	ΑΡΔ
527	MP12	393,767.10	4,201,468.73	15.80	Γ		30	ΑΡΔ
528	MP13	393,858.12	4,201,634.93	12.90	Γ		30	ΑΡΔ
529	MP14	392,951.91	4,201,504.34	18.00	Γ	1990	30	ΑΡΔ
530	MP15	393,023.14	4,201,456.86	18.10	Γ	1980	22	ΑΡΔ
531	MP16	393,042.93	4,201,393.54	18.90	Γ	1988	43	ΑΡΔ
532	MP17	393,160.58	4,201,512.30	16.20	Γ	1985	33	Είναι γεώτρηση που βρίσκεται πολύ μέσα από τον δρόμο σε ένα αμπέλι. Το πηγάδι ξεραίνεται αλλά η γεώτρηση διατηρεί στάθμη
533	MP18	393,042.93	4,201,627.02	16.80	Γ	1983	33	ΑΡΔ
534	MP19	393,339.72	4,201,931.72	14.20	Γ	1989	34	ΑΡΔ
535	MP2	393,501.97	4,201,718.03	15.00	Γ		30	ΑΡΔ
536	MP20	393,355.55	4,201,836.75	14.40	Γ	1990		ΑΡΔ
537	MP21	393,620.68	4,201,377.71		Γ	1988	30	ΑΡΔ
538	MP22	392,089.24	4,200,333.01		Γ	1983	30	ΑΡΔ
539	MP23	391,946.78	4,200,249.91		Γ	1980	30	ΑΡΔ
540	MP24	391,923.04	4,200,376.54		Γ			ΑΡΔ
541	MP3	393,715.66	4,201,409.37	16.80	Γ		35	ΑΡΔ
542	MP4	393,782.93	4,201,674.50	13.40	Γ		28	ΑΡΔ
543	MP5	393,232.88	4,201,128.41	21.50	Γ		30	ΑΡΔ
544	MP6	393,042.93	4,201,029.48		Γ		30	ΑΡΔ
545	MP7	392,441.43	4,200,890.98		Γ		30	ΑΡΔ
546	MP8	392,560.15	4,200,732.69	26.90	Γ		30	ΑΡΔ
547	MP9	393,719.61	4,201,504.34	15.40	Γ		30	ΑΡΔ
548	MPY1	392,927.54	4,200,866.12	24.00	Γ			Παλιά η περιοχή είχε όλο αρτεσιανές γεωτρήσεις. Φαίνεται να λειτουργεί συνέχεια.
ΠΕΡΙΓΙΑΛΙ								
549	PE1	397,281.11	4,199,070.66	18.00	Γ	1963	30	ΥΔΡ
550	PE12	397,546.24	4,199,509.91	14.10	Γ		30	ΑΡΔ
551	PE13	397,661.00	4,199,735.47	13.20	Π		12	ΑΡΔ

552	PE14	397,807.42	4,199,323.92	13.70	Γ	1967	18	ΑΡΔ
553	PE15	397,878.65	4,199,434.72	11.80	Γ	1995	20	ΑΡΔ
554	PE19	397,981.54	4,199,221.03	13.10	Γ	1991	28	ΑΡΔ
555	PE2	397,621.43	4,199,387.23	15.30	Γ	1962	30	ΥΔΡ
556	PE21	397,447.31	4,198,955.90	18.20	Γ		18	ΑΡΔ
557	PE22	397,521.03	4,197,814.56	29.00	Γ	25	16.8	ΑΡΔ
558	PE23	397,515.83	4,197,580.93	29.90	Γ	1991	50	ΑΡΔ
559	PE24	397,437.96	4,197,321.34	30.00	Π		25	ΑΡΔ
560	PE25	397,624.86	4,197,850.90	26.50	Γ		80	ΑΡΔ
561	PE26	398,206.34	4,197,736.68	24.00	Π			ΑΡΔ
562	PE27	397,235.48	4,197,352.49	31.40	Γ		25	ΑΡΔ
563	PE28	397,609.29	4,196,952.72	34.80	Γ		22	ΑΡΔ
564	PE29	397,645.63	4,197,004.64	34.50	Π			ΑΡΔ
565	PE30	397,869.38	4,197,444.72	27.70	Γ			Υπάρχουν δύο γεωτρήσεις. Η μικρή δίνει 6-8m ³ /h και η μεγάλη 40-50m ³ /h. Βάθος Γεώτρησης 40μ
566	PE31	397,531.41	4,197,129.24		Π		22	ΑΡΔ
567	PE32	397,572.94	4,197,165.59		Γ		33	ΑΡΔ
568	PE33	398,362.09	4,197,201.93		Π			ΑΡΔ
569	PE34	398,694.36	4,197,201.93		Π		20	ΑΡΔ
570	PE35	398,715.13	4,197,342.11		Π			ΑΡΔ
571	PE36	398,543.80	4,197,409.60		Π		18	ΑΡΔ
572	PE37	398,746.28	4,197,092.90		Γ			ΑΡΔ
573	PE38	398,564.57	4,197,196.74		Γ	1996		ΑΡΔ
574	PE39	398,398.43	4,197,331.72		Γ			ΑΡΔ
575	PE40	398,221.91	4,196,791.78		Π		20	ΑΡΔ
576	PE41	397,723.50	4,196,771.01		Γ		22	ΑΡΔ
577	PE42	397,526.22	4,196,760.63		Π		18	ΑΡΔ
578	PE43	397,588.52	4,196,661.98		Π		18	ΑΡΔ
579	PE46	398,086.93	4,198,287.01		Π		16	ΑΡΔ
580	PE47	397,398.01	4,198,806.99	19.00	Π			Βρίσκεται απέναντι από το νεκροταφείο
581	PE6	397,755.98	4,199,434.72	12.40	Γ	1990	21	ΑΡΔ
582	PE7	397,945.92	4,199,731.51	10.50	Γ	1990	20	ΑΡΔ
583	PE8	397,680.79	4,199,221.03	15.70	Π	1949	18	ΑΡΔ
584	PE9	397,277.15	4,198,920.28	19.90	Π	1967	18	ΑΡΔ
585	PEY1	397,209.70	4,199,091.10	17.00	Γ			ΚΓ129.Γεώτρηση Πλατύ. Κεντρική γεώτρηση του Περιγιαλίου. Παροχή 40-50m ³ /h
586	PEY2	397,445.06	4,199,406.29	14.10	Γ			ΚΥΓ129Α. Γεώτρηση Αγ. Αικατερίνης. Δουλεύει αποσπασματικά-κυρίως το καλοκαίρι. Παροχή 30-40m ³ /h
587	PEY3	397,832.10	4,200,019.22	8.00	Γ			Γεώτρηση Αγ. Νικολάου. Περιγιάλι. Παροχή 40-50m ³ /h
ΠΟΥΛΙΤΣΑ								
588	PO1	392,160.47	4,201,516.22	25.40	Γ		30	Τζαναβάρας-Αντιδήμαρχος. Μία μόνη δειγματοληψία τον Μάιο
589	PO10	391,835.98	4,201,729.91	27.40	Γ		30	ΑΡΔ
590	PO11	391,851.81	4,201,840.71	26.80	Γ		33	ΑΡΔ
591	PO12	391,907.21	4,201,876.32	26.60	Γ		30	ΑΡΔ
592	PO13	391,828.07	4,201,935.68	27.90	Γ		30	ΑΡΔ
593	PO14	391,760.79	4,202,074.18	29.20	Γ		30	ΑΡΔ
594	PO15	391,649.99	4,201,991.08	32.80	Γ		34	ΑΡΔ
595	PO16	391,863.68	4,201,536.00	29.10	Γ		34	ΑΡΔ
596	PO17	391,871.59	4,201,500.39	29.50	Γ		35	ΑΡΔ
597	PO18	391,796.41	4,201,452.90	29.80	Γ	1995	33	ΑΡΔ
598	PO19	391,681.65	4,201,444.99	31.20	Γ		30	ΑΡΔ
599	PO2	392,132.77	4,201,567.66	25.10	Γ		30	Θέση Αλώνια. Έγινε χαλίκωση έως τα 60μ. Η στάθμη του νερού βρίσκεται στα 45μ. Το βάθος της γεώτρησης είναι 70μ.
600	PO20	391,610.42	4,201,468.73	31.80	Γ		30	ΑΡΔ
601	PO21	391,436.30	4,201,433.11	33.00	Γ		30	ΑΡΔ
602	PO22	391,412.56	4,201,377.71	33.80	Γ		35	ΑΡΔ
603	PO23	391,566.89	4,201,223.38	36.10	Γ		30	ΑΡΔ
604	PO24	391,487.74	4,201,195.68	38.00	Γ		30	ΑΡΔ
605	PO25	391,317.58	4,201,350.01	38.90	Γ		35	ΑΡΔ
606	PO26	391,187.00	4,201,365.84	41.00	Γ		30	ΑΡΔ
607	PO27	391,250.31	4,201,183.81	46.30	Γ		30	ΑΡΔ
608	PO28	391,305.71	4,201,203.60	45.90	Γ		30	ΑΡΔ
609	PO29	391,252.09	4,201,167.51	41.00	Γ		32	Κοινοτική Γεώτρηση άρδευσης – Η εξαγωγή διοχετεύεται στο αρδευτικό αυλάκι

610	PO3	391,927.00	4,201,575.57	27.10	Γ		30		ΑΡΔ
611	PO30	391,879.51	4,201,183.81	30.00	Γ		30		ΑΡΔ
612	PO31	391,705.39	4,201,108.62	33.90	Γ		32		ΑΡΔ
613	PO32	391,432.34	4,201,092.79	39.00	Γ		30		ΑΡΔ
614	PO33	391,380.90	4,201,017.61	38.60	Γ		35		ΑΡΔ
615	PO37	390,589.46	4,200,922.63		Γ	1991	90		ΑΡΔ
616	PO39	391,792.45	4,201,619.10		Γ				ΑΡΔ
617	PO4	391,938.87	4,201,682.42	26.90	Γ		30		ΑΡΔ
618	PO41	391,396.73	4,201,235.25	39.90	Γ	1990	31		ΑΡΔ
619	PO43	390,411.38	4,201,057.18		Γ	1990	28		ΑΡΔ
620	PO49	392,240.01	4,201,419.06	28.78	Γ				ΑΡΔ
621	PO5	391,859.72	4,201,595.36	28.20	Γ		30		ΑΡΔ
622	PO50	392,134.98	4,201,423.05	30.25	Γ				ΑΡΔ
623	PO6	391,863.68	4,201,650.76	27.50	Γ		32		ΑΡΔ
624	PO7	392,010.10	4,201,813.01	26.30	Γ		33		ΑΡΔ
625	PO8	391,958.65	4,201,809.05	26.30	Γ		30		ΑΡΔ
627	PO9	391,808.28	4,201,777.39	26.80	Γ		32		ΑΡΔ
628	POY1	391,811.94	4,201,117.55	29.50	Γ			Χρησιμοποιείται μόνο το καλοκαίρι (3 μήνες) αλλά σε αυτή την περίοδο δουλεύει 24ωρο	ΑΡΔ
629	POY2	391,281.21	4,201,187.47	40.00	Γ			ΚΓ101. Κανονικά δουλεύει μόνο το καλοκαίρι αλλά τώρα λόγω έλλειψης νερού έχει μπει στο δίκτυο ύδρευσης.	ΑΡΔ
630	POY3	391,211.89	4,201,373.36	40.10	Γ			Σε αυτό το σημείο αντιστοιχεί το δείγμα της ΡΟ29	ΑΡΔ
ΖΕΥΓΟΛΑΤΕΙΟ									
631	Z1	393,703.79	4,199,743.38	36.50	Γ	1980	40		ΑΡΔ
632	Z10	394,271.33	4,198,683.44	38.50	Γ	1960	34	Γίνεται πολύ συχνά άντληση. Ανήκει στην εταιρεία Eurofilm	ΑΡΔ
633	Z11	394,803.89	4,200,131.19	20.30	Γ	1975	40		ΑΡΔ
634	Z12	394,843.46	4,200,008.52	20.20	Γ	1980	40		ΑΡΔ
635	Z13	395,013.62	4,199,980.82	17.90	Γ		30		ΑΡΔ
636	Z15	394,728.37	4,198,394.04	32.50	Π	1975	33		ΑΡΔ
637	Z16	395,095.56	4,198,466.19	31.80	Π			Μάλλον ανήκει στο Γεωργικό Συνεταιρισμό και αντλείται πολύ συχνά	ΑΡΔ
638	Z17	394,635.21	4,198,503.79	33.70	Π			Βρίσκεται ανάμεσα στα Z10 και Z16	ΑΡΔ
639	Z18	394,780.15	4,199,126.06		Γ	1987	40		ΑΡΔ
640	Z19	394,803.89	4,199,221.03		Π	1900	45		ΑΡΔ
641	Z2	393,628.57	4,199,684.55	38.50	Γ	1986	40		ΑΡΔ
642	Z20	395,049.24	4,199,228.94		Γ	1977	33		ΑΡΔ
643	Z21	395,080.90	4,199,268.52		Γ	1975	40		ΑΡΔ
644	Z22	395,255.01	4,199,363.49		Γ				ΑΡΔ
645	Z23	395,389.56	4,199,304.13		Γ				ΑΡΔ
646	Z25	395,425.18	4,199,039.00		Π				ΑΡΔ
647	Z26	395,472.66	4,199,248.73		Γ				ΑΡΔ
648	Z27	395,658.11	4,200,216.18	14.80	Γ			Είναι ένα μεγάλο πηγάδι που έχει και γεώτρηση δίπλα (μεγαλύτερου βάθους). Βρίσκεται επάνω στον κεντρικό δρόμο του οικισμού	ΑΡΔ
649	Z28	394,546.67	4,199,236.86		Π	1949	40		ΑΡΔ
650	Z29	394,465.56	4,198,519.33		Γ				ΑΡΔ
651	Z3	393,901.65	4,199,727.55	34.00	Γ	1982	45		ΑΡΔ
652	Z30	394,471.67	4,198,464.33		Γ				ΑΡΔ
653	Z31	393,908.14	4,199,860.15		Γ				ΑΡΔ
654	Z32	394,529.73	4,198,452.10		Γ	1998	32		ΑΡΔ
655	Z33	395,010.90	4,198,777.04	35.38	Γ	1958	62		ΑΡΔ
656	Z34	395,229.97	4,199,630.05	26.00	Γ				ΑΡΔ
657	Z35	395,110.94	4,199,292.04	30.22	Γ	1958	70		ΑΡΔ
658	Z36	395,284.91	4,199,212.04	29.38	Γ	1958	100		ΑΡΔ
659	Z37	393,550.98	4,199,495.04	40.00	Γ	1987	50		ΑΡΔ
670	Z38	394,610.91	4,200,478.05	19.77	Γ				ΑΡΔ
671	Z39	394,504.93	4,200,082.05	23.03	Γ				ΑΡΔ
672	Z4	395,235.23	4,200,606.06	15.50	Γ	1985	30		ΑΡΔ
673	Z40	394,514.94	4,200,047.05	23.50	Γ	1957	90		ΑΡΔ
674	Z5	395,199.61	4,200,629.80	15.60	Γ	1985			ΑΡΔ
675	Z7	394,420.04	4,198,837.18	38.40	Π		30		ΑΡΔ
676	Z8	394,121.66	4,199,475.54	36.30	Π	1984	30	Πιθανά χρησιμοποιείται ως δεξαμενή που συγκεντρώνει το νερό από διαφορετικές γεωτρήσεις και το αναδιανέμει	ΑΡΔ
677	Z9	394,258.81	4,198,942.05	39.20	Γ		40		ΑΡΔ
678	ZY1	395,123.12	4,200,532.51	16.50	Γ			Μπάλος. Δυο υποβρύχια που δουλεύουν μαζί και βγάζουν 8m3/h το καθένα.	ΑΡΔ

679	ZY2	393,948.92	4,199,774.50	33.80	Γ		Θέση Γυμνάσιο. Παροχή 15-20m ³ /h. Βάθος 40μ	ΥΔΡ
680	ZY3	393,842.23	4,199,800.67	34.10	Γ		Θέση Ρίσκα. Θεωρείται γεώτρηση καλής απόδοσης με 30-35m ³ /h. Το καλοκαίρι η παροχή μειώνεται στο μισό	ΥΔΡ
681	ZY4	393,648.66	4,199,782.08	35.70	Γ		Λειβαδία-Πρώην Δασκαλοπούλου. Βρίσκεται κοντά στην Ε6. Βάθος γεώτρησης 40μ και παροχή 15m ³ /h	ΥΔΡ
682	ZY5	393,920.74	4,199,748.97	34.80	Γ		Είναι το σημείο στο δρόμο που αντιστοιχεί στην γεώτρηση. Θα το χρησιμοποιήσουμε μόνο για τις συντεταγμένες	ΥΔΡ
ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ								
683	G1	401,815.82	4,196,705.42	21.05	Γ			ΓΕΩΤ ¹⁴
684	G10	399,823.23	4,196,046.22	38.80	Γ			ΓΕΩΤ
685	G11	399,345.34	4,196,054.52	37.60	Γ			ΓΕΩΤ
686	G12	399,154.14	4,196,088.02	33.80	Γ			ΓΕΩΤ
687	G13	398,952.86	4,196,094.03	37.35	Γ			ΓΕΩΤ
688	G14	398,666.12	4,196,111.53	38.65	Γ			ΓΕΩΤ
689	G15a	398,402.87	4,196,112.03	41.00	Γ			ΓΕΩΤ
690	G16	398,189.94	4,196,159.03	42.20	Γ			ΓΕΩΤ
691	G17	397,994.97	4,196,222.03	43.40	Γ			ΓΕΩΤ
692	G18	397,196.94	4,196,591.99	43.40	Γ			ΓΕΩΤ
693	G19a	396,852.86	4,197,002.03	40.00	Γ			ΓΕΩΤ
694	G21	396,681.06	4,197,062.64	39.70	Γ			ΓΕΩΤ
695	G23a	396,341.47	4,197,335.84	33.15	Γ			ΓΕΩΤ
696	G23b	396,436.49	4,197,474.54	31.95	Γ			ΓΕΩΤ
697	G26	395,313.09	4,197,797.24	37.52	Γ			ΓΕΩΤ
698	G26b	394,802.91	4,198,502.04	34.70	Γ			ΓΕΩΤ
699	G27	394,508.97	4,198,196.55	35.90	Γ			ΓΕΩΤ
700	G29a	394,156.58	4,198,433.75	42.10	Γ			ΓΕΩΤ
701	G31	393,365.77	4,198,744.05	52.10	Γ			ΓΕΩΤ
702	G34	393,149.19	4,198,841.15	52.45	Γ			ΓΕΩΤ
703	G35	392,804.16	4,199,003.75	51.82	Γ			ΓΕΩΤ
704	G35a	392,805.95	4,199,012.05	52.76	Γ			ΓΕΩΤ
705	G38	391,613.11	4,199,708.76	50.42	Γ			ΓΕΩΤ
706	G4	400,997.61	4,196,443.47	17.75	Γ			ΓΕΩΤ
707	G40	391,405.52	4,199,858.91	53.20	Γ			ΓΕΩΤ
708	G40a	390,883.58	4,200,414.46	54.15	Γ			ΓΕΩΤ
709	G40b	390,468.60	4,200,976.07	56.00	Γ			ΓΕΩΤ
710	G41	390,468.60	4,200,976.07	59.25	Γ			ΓΕΩΤ
711	G45	390,426.07	4,201,107.77	60.30	Γ			ΓΕΩΤ
712	G46	390,283.53	4,201,425.36	60.10	Γ			ΓΕΩΤ
713	G50	390,125.49	4,201,958.57	56.75	Γ			ΓΕΩΤ
714	G54	389,965.25	4,202,649.37	44.85	Γ			ΓΕΩΤ
715	G55	389,884.59	4,203,456.58	33.45	Γ			ΓΕΩΤ
716	G58	389,882.01	4,203,646.88	29.85	Γ			ΓΕΩΤ
717	G59	389,851.06	4,203,902.08	29.90	Γ			ΓΕΩΤ
718	G60	389,836.81	4,204,068.58	27.90	Γ			ΓΕΩΤ
719	G62	389,804.55	4,204,557.08	27.60	Γ			ΓΕΩΤ
720	G63	389,757.89	4,205,161.49	35.60	Γ			ΓΕΩΤ
721	G67	389,765.90	4,205,306.68	34.60	Γ			ΓΕΩΤ
722	G67a	389,743.02	4,205,362.09	36.40	Γ			ΓΕΩΤ
723	G68	389,729.35	4,205,472.09	38.50	Γ			ΓΕΩΤ
724	G69	389,710.35	4,205,669.89	27.35	Γ			ΓΕΩΤ
725	G7	400,545.63	4,196,261.01	21.80	Γ			ΓΕΩΤ
726	G70	389,698.22	4,205,900.79	20.30	Γ			ΓΕΩΤ
727	G70a	389,721.73	4,205,578.34	35.20	Γ			ΓΕΩΤ
728	G8	400,205.23	4,196,191.52	25.90	Γ			ΓΕΩΤ

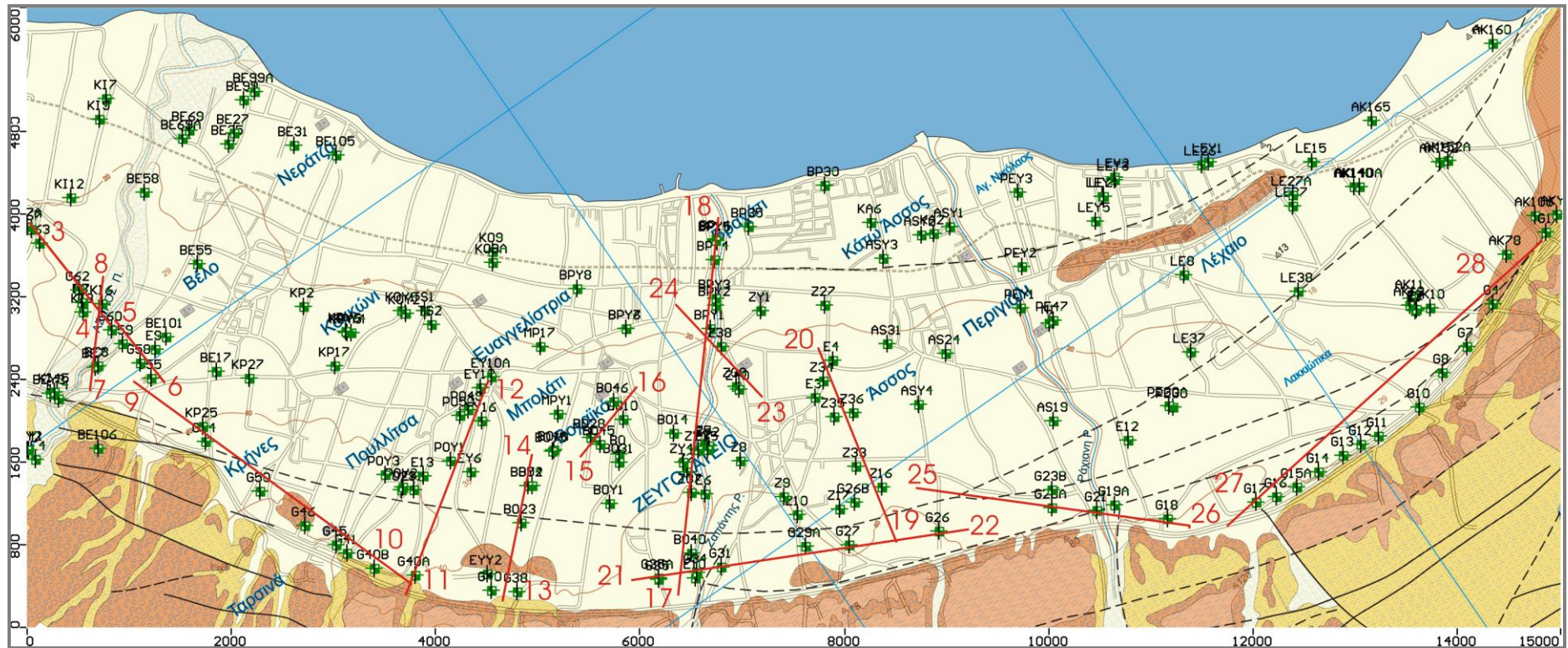
¹⁴ ΓΕΩΤ= Γεωτεχνική Γεώτρηση

ΟΝΟΜΑ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΕΠΙ ΤΩΝ ΥΔΡΕΥΤΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ	ΒΑΘΟΣ	ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΧΕΙΜΕΡΙΝΗ ΠΕΡΙΟΔΟ	ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΘΕΡΙΝΗ ΠΕΡΙΟΔΟ	ΧΡΗΣΗ ΝΕΡΟΥ
ΑΡΧΑΙΑ ΚΟΡΙΝΘΟΣ					
AKY1	Ξεκίνησε πρόσφατα και θα λειτουργεί κύρια για το πότισμα των φυτών στην καινούργια Εθνική. Στην διάτρηση δεν βρήκε ασβεστόλιθο (άμμοι και μάργες).		50m ³ /h	50m ³ /h	Άρδευση??
AKY2	Θέση Καλντερίμι δίπλα στην Εθνική. Χρησιμοποιείται για την ύδρευση της Κορίνθου.		60m ³ /h	60m ³ /h	Υδρευση
AKY3	Η AKY3 και η AKY4 δίνουν αρκετά μεγάλες παροχές γιατί βρίσκονται μέσα στους ασβεστόλιθους.		100m ³ /h	100m ³ /h	Υδρευση
AKY4	Χρησιμοποιούνται για την ύδρευση της Κορίνθου		100m ³ /h	100m ³ /h	Υδρευση
ΑΣΣΟΣ					
ASY1	Βρίσκεται κοντά στο ποτάμι. Πρωτεύουσα γεώτρηση που πάει στην δεξαμενή του Κάτω Άσσου. Αθροιστική παροχή ASY1 και ASY2.		70m ³ /h	50-60m ³ /h	Υδρευση
ASY2	Γεώτρηση σχολείου. Δευτερεύουσα γεώτρηση που πάει μαζί με την ASY1 στην δεξαμενή του Κάτω Άσσου				Υδρευση
ASY3	Βρίσκεται κάτω από τις γραμμές. Αθροιστική παροχή ASY3 και ASY4.		80-90m ³ /h	40-50m ³ /h	Υδρευση
ASY4	Είναι βοηθητική της ASY3. Πάει στο αντλιοστάσιο του Άνω Άσσου μαζί με την ASY3.				Υδρευση
ΒΕΛΟ					
BEY1	Οι γεωτρήσεις βρίσκονται μέσα στο ποτάμι. Δουλεύει χειμώνα και καλοκαίρι σε 24ωρη βάση.	43m	25m ³ /h	25m ³ /h	Υδρευση
BEY2	Τα BEY1 και BEY2 δουλεύουν μαζί. Η BEY2 δεν σβήνει καθόλου.	35m	40m ³ /h	10m ³ /h	Υδρευση
BEY3	Αντλείτο σε 24ωρη βάση. Το καλοκαίρι του 2000 δούλεψε για 10 μέρες στα 25m ³ /h και μετά έπεσε στα 5-6m ³ /h. Στον ίδιο περιβάλλον είναι το E14.				Υδρευση
E14	Σήμερα αντί για την BEY3 χρησιμοποιείται η E14 για να καλύψει τις ανάγκες του Δήμου Βέλου. Πολύ αμυνία στα δείγματα.		35m ³ /h	20m ³ /h	Υδρευση
BE8	Αντιστοιχεί στην BEY4. Γεωτρήσεις του Δήμου Βέλου	60m	60m ³ /h	35m ³ /h	Άρδευση
ΒΟΧΑΪΚΟ					
BOY1	Περιοχή Σπανού Γεώτρηση Βουράκη. Λειτουργεί σε 24ωρη βάση. Έχει παρατηρηθεί μείωση της δυναμικότητας από 40 m ³ /h παλαιότερα, σε 10m ³ /h.		10m ³ /h	3m ³ /h	Υδρευση
BOY3	Γεώτρηση μέσα στον Ζαπάντη. Χρησιμοποιείται κυρίως το καλοκαίρι αλλά δίνει παροχή μόνο σχεδόν για ένα μήνα (εκμετάλλευση φρεάτιου ορίζοντα).			10m ³ /h	Υδρευση
BOY4	Περιοχή Μπαζδής. Είναι δύο γεωτρήσεις που δίνουν 50m ³ /h και 25m ³ /h αλλά το καλοκαίρι πέφτουν στα 25m ³ /h η καθεμία.	50m	75m ³ /h	50m ³ /h	Υδρευση
BOY5	Περιοχή Μπαζδής.	50m	50m ³ /h	50m ³ /h	Υδρευση
ΒΡΑΧΑΤΙ					
BPY1	Απέναντι από τον υδατόπυργο		15m ³ /h	15m ³ /h	Υδρευση
BPY2	Άντληση από τα 39-40m.	45m	25-30m ³ /h	25-30m ³ /h	Υδρευση
BPY3	Άντληση από τα 40m. Οι BPY1, BPY2 και BPY3 πάνε στον υδατόπυργο	43-45m	25-30m ³ /h	25-30m ³ /h	Υδρευση
BPY4	Έχει δυνατότητα 25-30m ³ /h. Αρχίζει να δουλεύει μετά το Πάσχα έως το τέλος του καλοκαιριού στα 15m ³ /h. Βρίσκεται κοντά στο Ζαπάντη.			15m ³ /h	Υδρευση
BP14	Υδρευτική γεώτρηση BPY5. Η απόδοση πέφτει πάρα πολύ το καλοκαίρι		20m ³ /h	10m ³ /h	Υδρευση

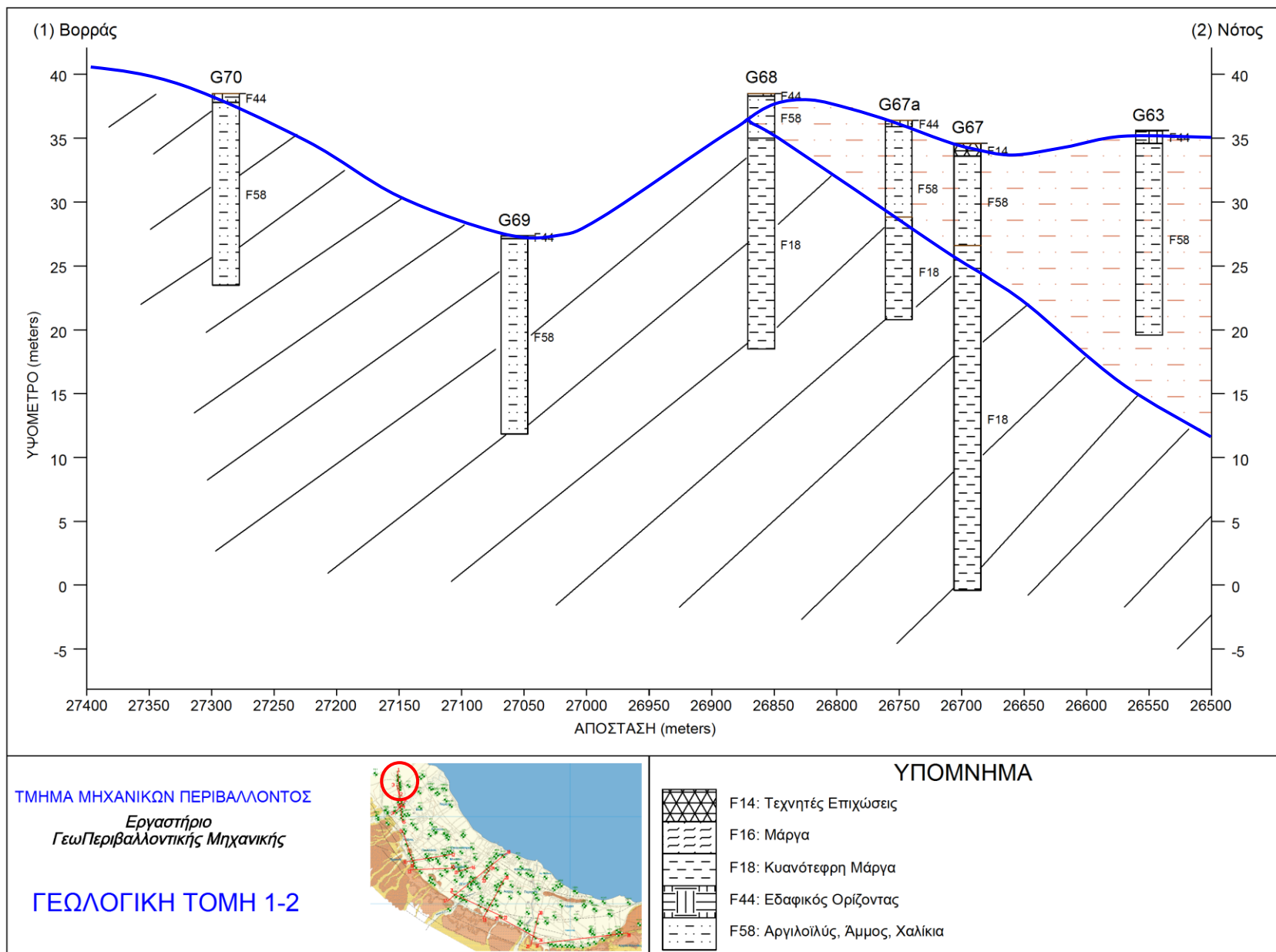
BPY6	Η δυναμικότητα έχει πέσει από τα 60m ³ /h (1970) στα 25-30 m ³ /h (σήμερα)		25-30 m ³ /h	25 m ³ /h	Υδρευση
BPY7	Το καλοκαίρι βγάζει από 15-20m ³ /h η και καθόλου. Οι BPY4, BP14, BPY6 και BPY7 χρησιμοποιούνται για να θέσουν το δίκτυο υπό πίεση.			15-20m ³ /h	Υδρευση
BPY8	Στα 37μ βρήκε νερό και στα 48μ βρήκε άμμο.		15 m ³ /h	5 m ³ /h	Υδρευση
ΕΥΑΓΓΕΛΙΣΤΡΙΑ					
EY10	Σημείο στάθμης στην Ευαγγελίστρια. Είναι υδρευτική γεώτρηση EYY1 στην πλατεία του χωριού.		35-40 m ³ /h	20 m ³ /h	Υδρευση
EYY2	Καινούργια γεώτρηση που προορίζεται για άρδευση.		40 m ³ /h	40 m ³ /h	Άρδευση
ΚΟΚΚΩΝΙ					
KOY1	Οι δύο αυτές γεωτρήσεις δουλεύουν μαζί το καλοκαίρι και εναλλάξ το χειμώνα. Το χειμώνα δουλεύει μόνο την νύχτα.	35-40m		40-50 m ³ /h	Υδρευση
KOY2	Το χειμώνα δουλεύει μόνο την ημέρα	35-40m	60 m ³ /h	60 m ³ /h	Υδρευση
ΚΡΗΝΕΣ					
KPY1 & KPY2	Γκράβα. Γεωτρήσεις, η άντληση των οποίων πέφτει σε μία κοινή δεξαμενή που χρησιμοποιείται για άρδευση. Παροχή 20m ³ /h η κάθε μία		50 m ³ /h	30 m ³ /h	Άρδευση
KPY3	Είναι γειτονική της KP2. Πάει στη δεξαμενή για άρδευση. Μάιο-Νοέμβριο αντλείται 24ωρο αλλά πέφτει η απόδοση της		30 m ³ /h	20 m ³ /h	Άρδευση
KPY4	Αντλεί νερό από την περιοχή των Κρηνών και το πάει στα Ταρσινά. Η KPY6 αντιπροσωπεύει την συνολική παροχή των KPY4,KPY5 και KPY6	30-35m	-	-	Υδρευση
KPY5	Τα KPY5 και KPY4 είναι στο ίδιο κτήμα με το κεντρικό πηγάδι των Ταρσινών KPY6	30-35m	-	-	Υδρευση
KPY6	Αναφέρεται στο κεντρικό πηγάδι των Ταρσινών το οποίο λειτουργεί και ως δεξαμενή. Κάτω από τα 30-35m εμφανίζεται η μάργα.	30-35m	60-70m ³ /h	60-70m ³ /h	Υδρευση
ΛΕΧΑΙΟ					
LEY1	Γεώτρηση Καλά. Η άντληση είναι σχεδόν συνεχής 20-22h το καλοκαίρι και 3-4h το χειμώνα. Υδατόπυργος Αγ. Γερασίμου (Α' αντλιοστάσιο).		30m ³ /h	30m ³ /h	Υδρευση
LEY2	Μαζί με την LEY3 είναι βοηθητικές και δουλεύουν κυρίως το καλοκαίρι			5m ³ /h	Υδρευση
LEY3	Οι LEY2, LEY3 και LEY4 πάνε στον υδατόπυργο Αγ Κωνσταντίνου – Β' αντλιοστάσιο			5m ³ /h	Υδρευση
LE2	Είναι η LEY4. Γεώτρηση Μάνας, αντλείται μαζί με τις LEY2 και LEY3 (14-15h Καλοκαίρι και 4-7h Χειμώνα)		40-50m ³ /h	40-50m ³ /h	Υδρευση
LEY5	Γεώτρηση Εξαρχόπουλου. Αντλείται 4-5 h την ημέρα. Συμπληρώνει την παροχή του Β Αντλιοστασίου		20m ³ /h	20m ³ /h	Υδρευση
ΜΠΟΛΑΤΙ					
MPY1	Παλιά η περιοχή είχε όλο αρτεσιανές γεωτρήσεις. Λειτουργεί συνέχεια.		20m ³ /h	20m ³ /h	Υδρευση
ΠΕΡΙΓΙΑΛΙ					
PEY1	Γεώτρηση Πλατύ. Κεντρική γεώτρηση του Περιγιαλιού.		40-50m ³ /h	40-50m ³ /h	Υδρευση
PEY2	Γεώτρηση Αγ. Αικατερίνης. Δουλεύει αποσπασματικά-κυρίως το καλοκαίρι.			30-40m ³ /h	Υδρευση
PEY3	Γεώτρηση Αγ. Νικολάου. Περιγιάλι.		40-50m ³ /h	40-50m ³ /h	Υδρευση
ΠΟΥΛΛΙΤΣΑ					
POY1	Χρησιμοποιείται μόνο το καλοκαίρι (3 μήνες) αλλά σε αυτή την περίοδο δουλεύει 24ωρο	30m		20-25m ³ /h	Υδρευση
POY2	ΚΓ101. Κανονικά δουλεύει μόνο το καλοκαίρι αλλά τώρα λόγω έλλειψης νερού έχει μπει στο δίκτυο ύδρευσης.		15m ³ /h	15m ³ /h	Υδρευση

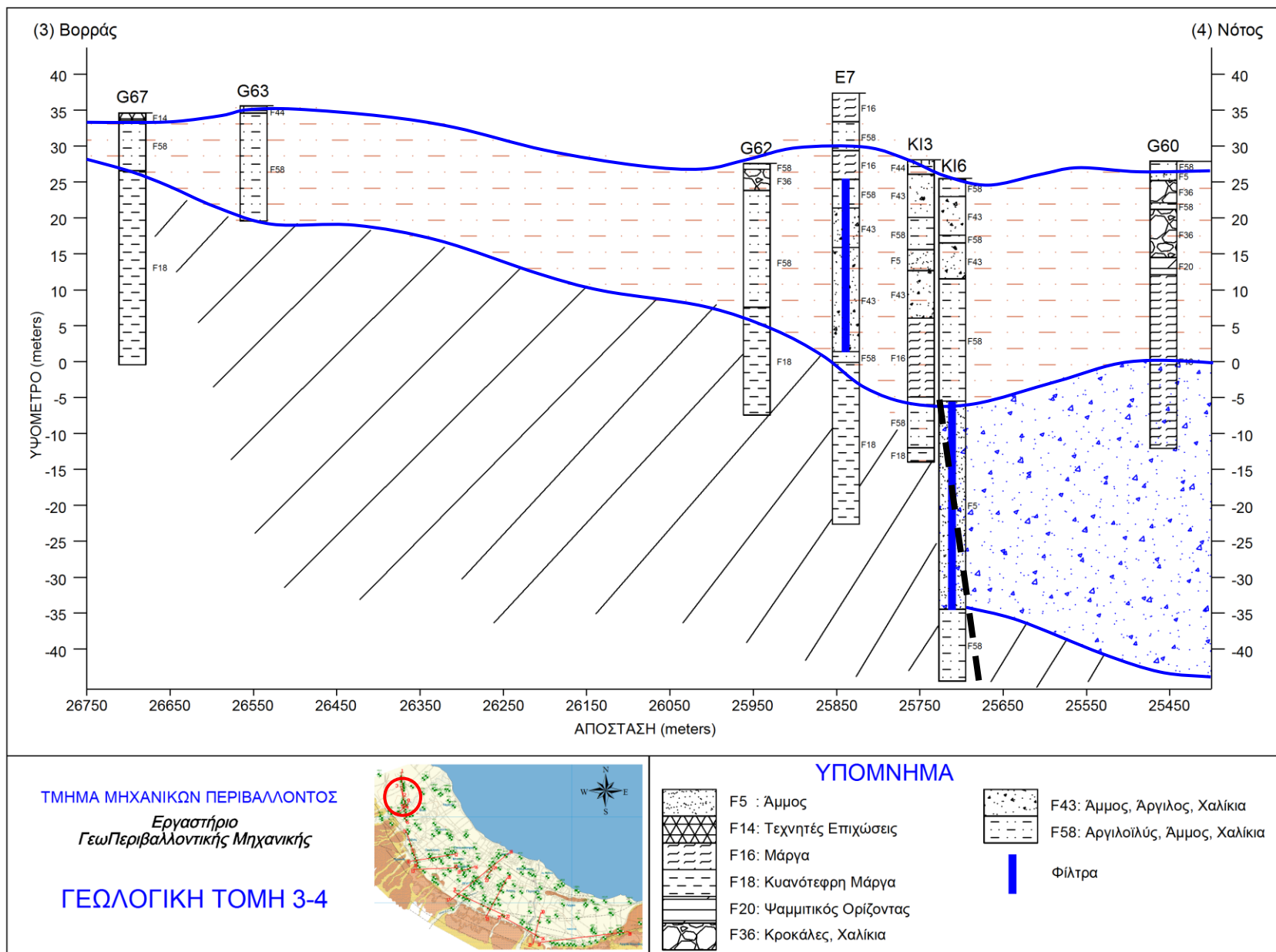
POY3	Σε αυτό το σημείο αντιστοιχεί το δείγμα της PO29		5-15m ³ /h	5-15m ³ /h	Υδρευση
ΖΕΥΓΟΛΑΤΕΙΟ					
ZY1	Μπάλος. Δυο υποβρύχια που δουλεύουν μαζί και βγάζουν περίπου 8m ³ /h το καθένα.	35m	20m ³ /h		Υδρευση
ZY2	Θέση Γυμνάσιο.	40m	15-20m ³ /h		Υδρευση
ZY3	Θέση Ρίσα. Θεωρείται γεώτρηση καλής απόδοσης		30-35m ³ /h	15m ³ /h	Υδρευση
ZY4	Λιβάδια-Πρώην Δασκαλόπουλου. Βρίσκεται κοντά στην Ε6.	40m	15m ³ /h		Υδρευση
ΙΔΙΩΤΙΚΕΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΑΥΞΗΜΕΝΟΥΣ ΡΥΘΜΟΥΣ ΑΝΤΛΗΣΗΣ					
BE27	Μεταφορά νερού για την άρδευση γειτονικών ιδιοκτησιών (πώληση)		30-50m ³ /h	20m ³ /h	Άρδευση
TS1	Μεταφορά νερού για την άρδευση γειτονικών ιδιοκτησιών (πώληση). Η γεώτρηση δεν καθαρίζει και βγάζει λεπτή άμμο. Υπεράντληση		55-60m ³ /h	30m ³ /h	Άρδευση
TS2	Βρίσκεται μέσα σε περιβόλι με πορτοκαλιές		55-60m ³ /h	30m ³ /h	Άρδευση

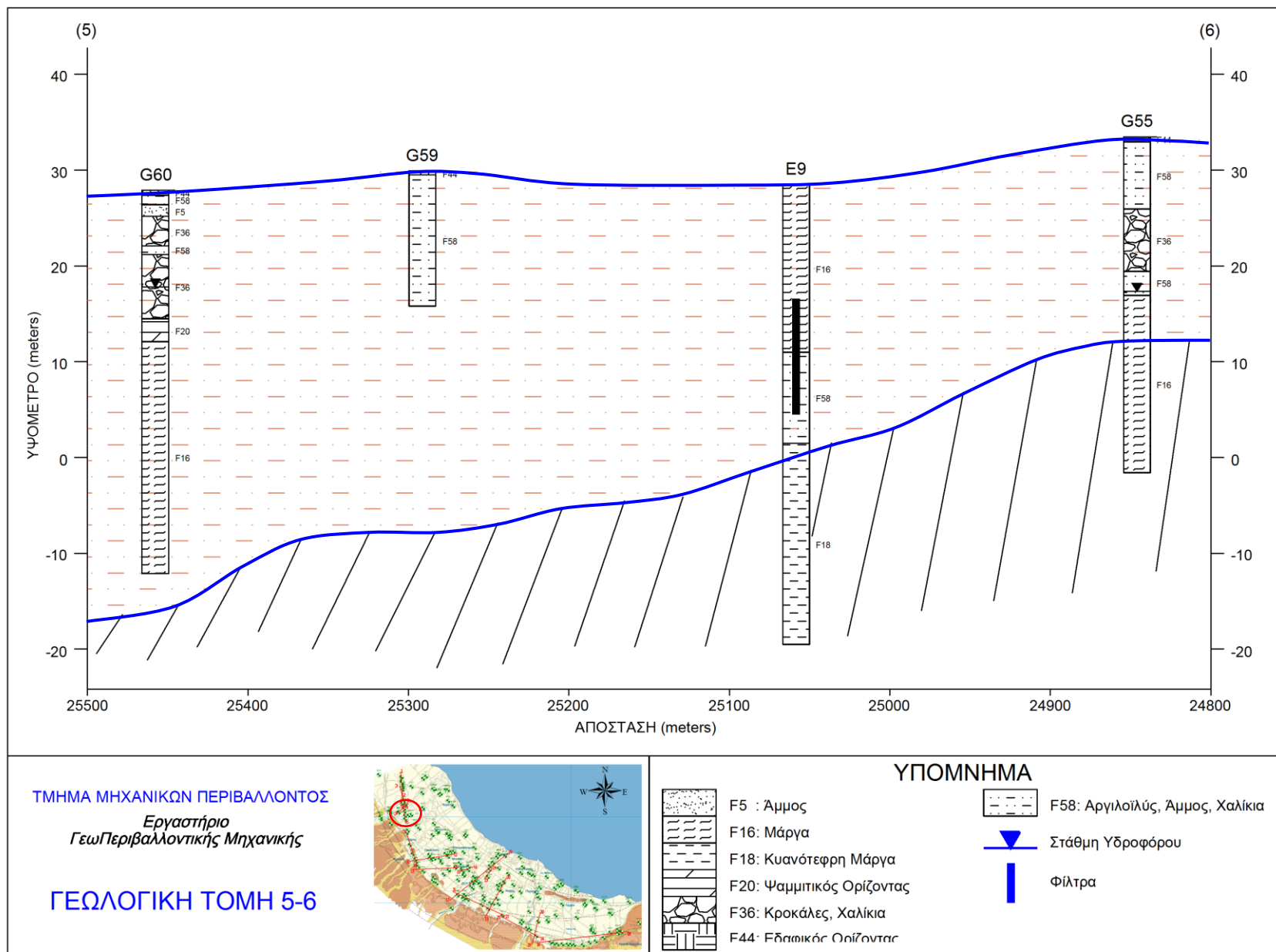
Π5. ΥΔΡΟΛΙΘΟΛΟΓΙΚΕΣ ΤΟΜΕΣ

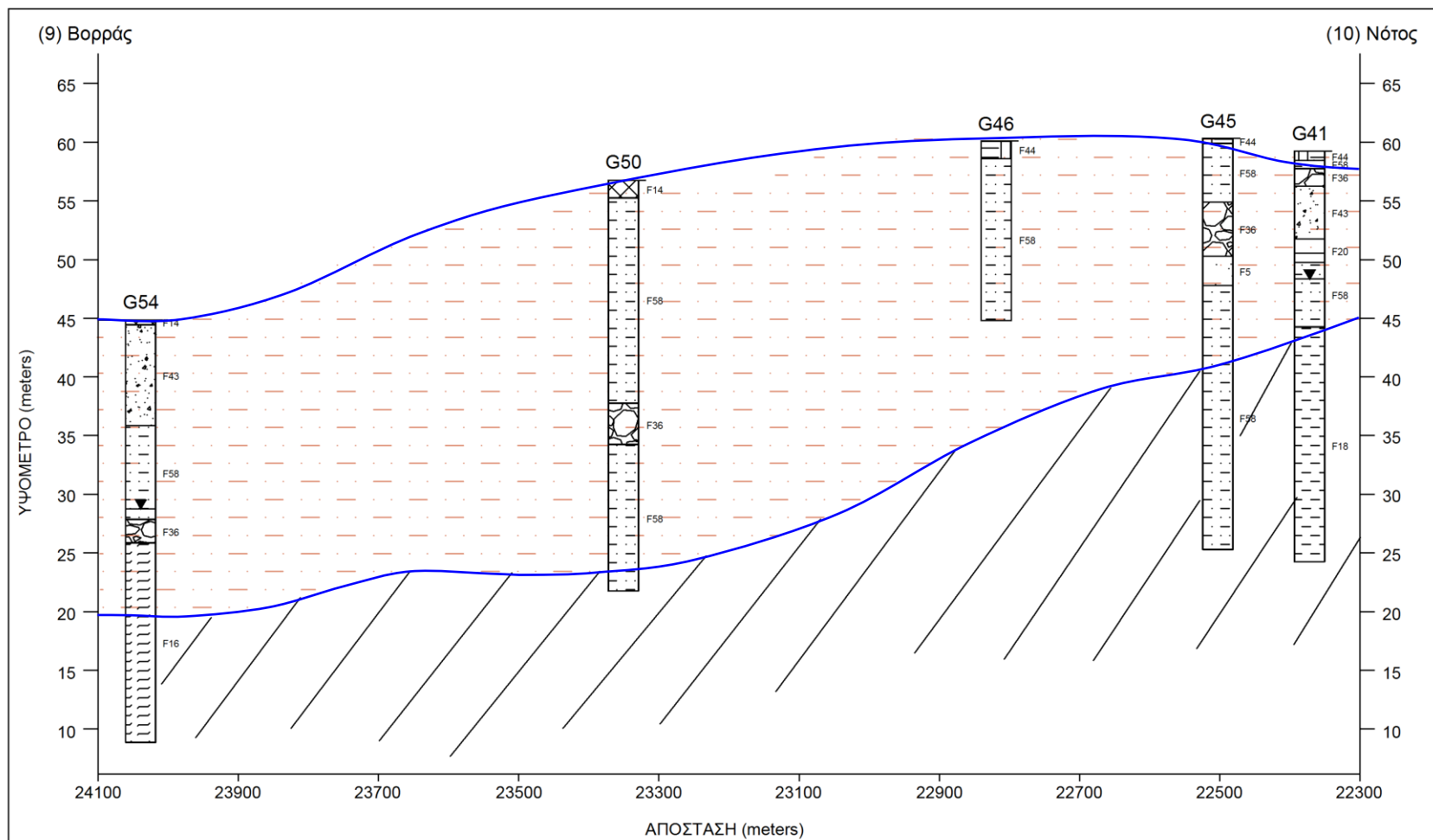


Εικόνα 110 : Θέση των Υδρολιθολογικών Τομών στην περιοχή ενδιαφέροντος









ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Εργαστήριο
ΓεωΠεριβαλλοντικής Μηχανικής

ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ 9-10



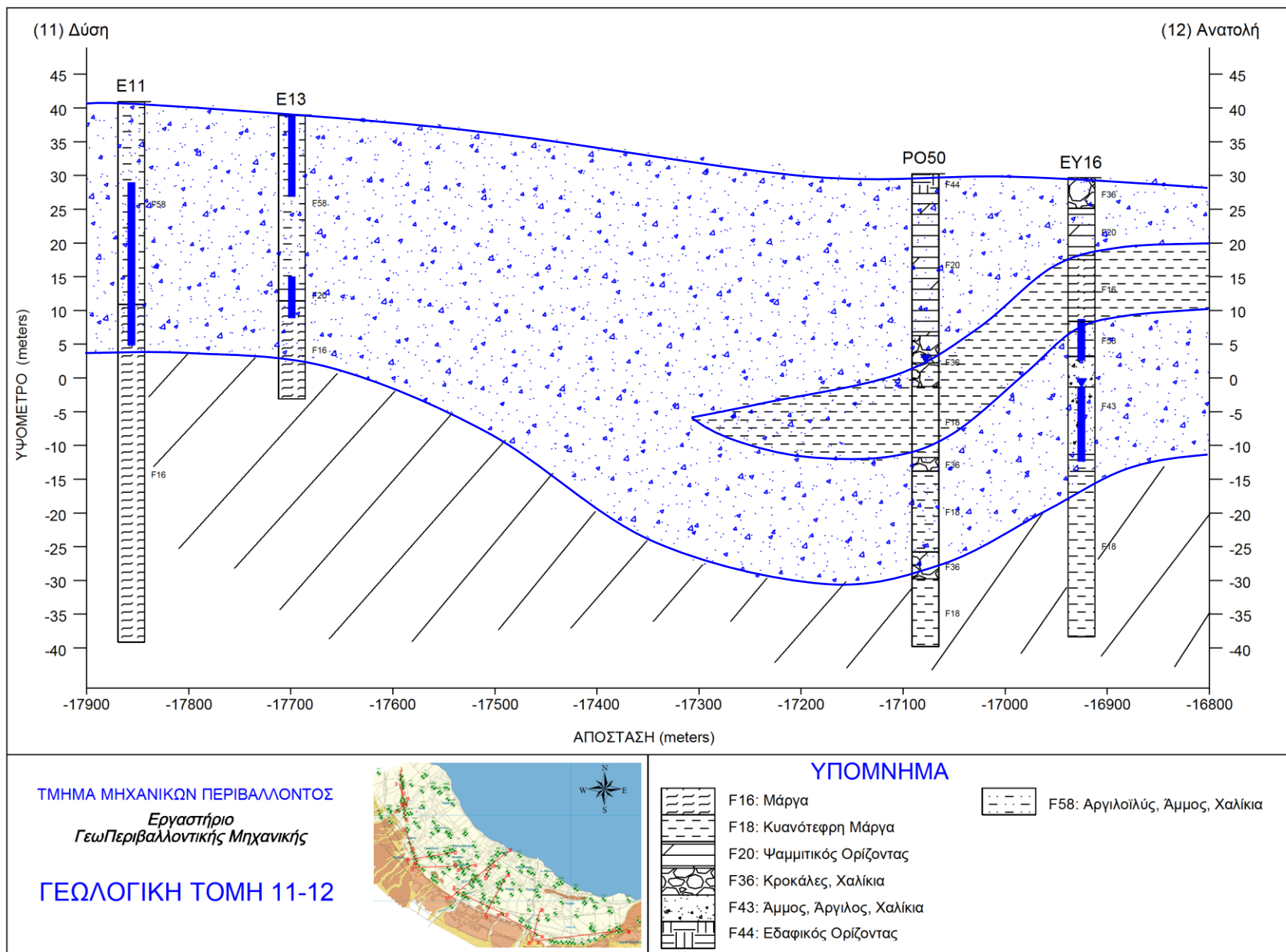
ΥΠΟΜΝΗΜΑ

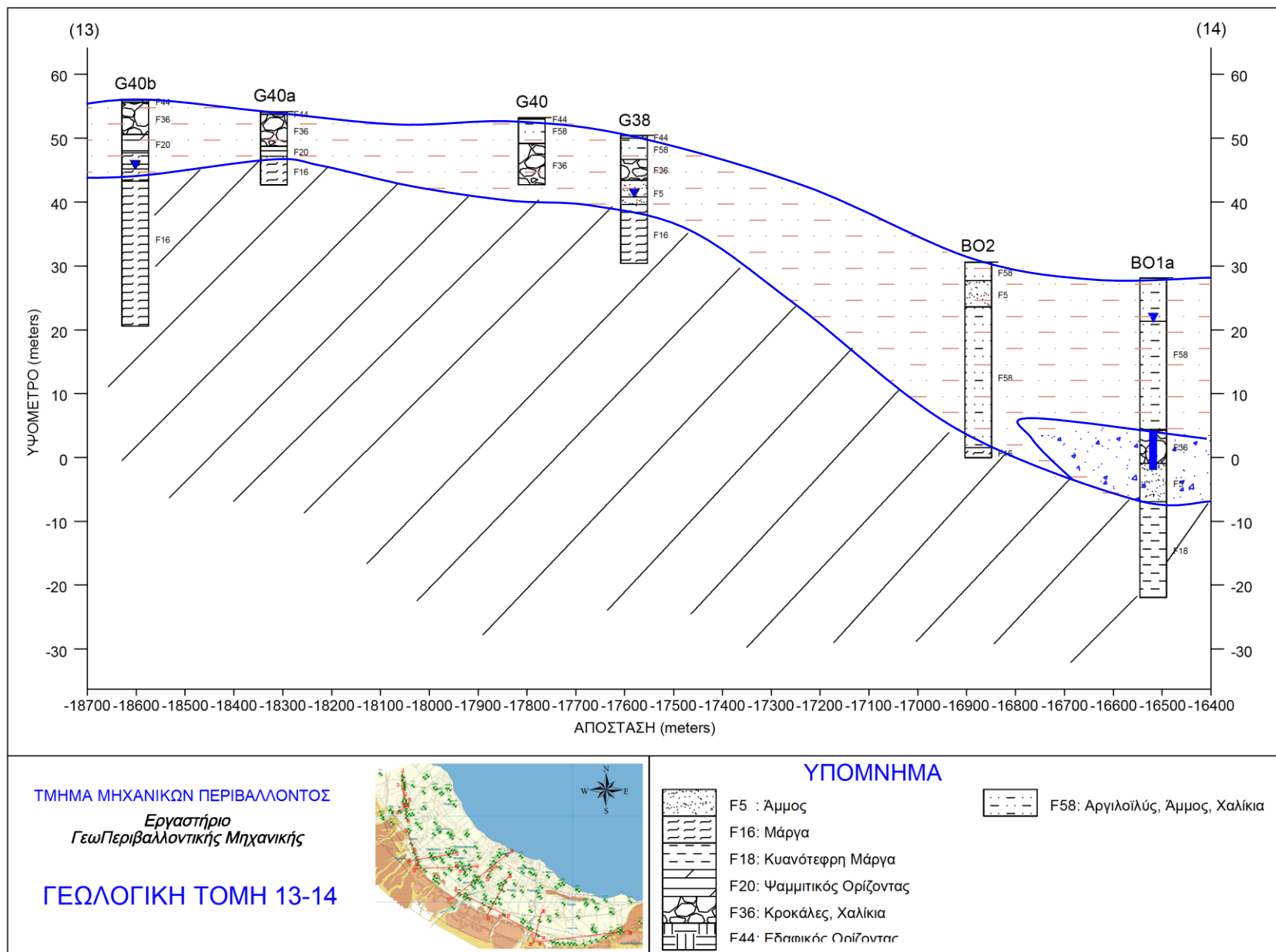


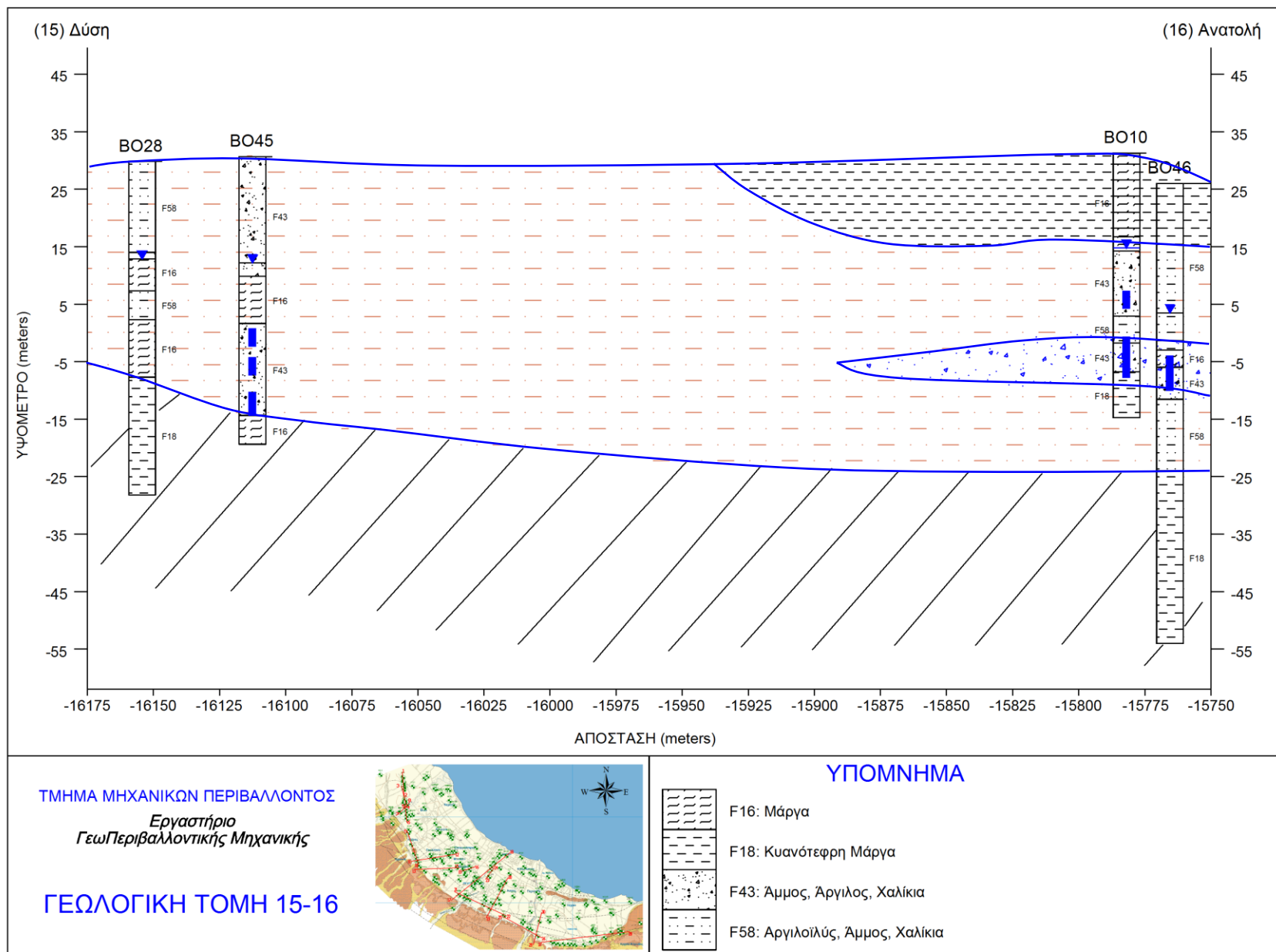
F14: Τεχνητές Επιχώσεις
F16: Μάργα
F18: Κυανότεφρη Μάργα
F20: Ψαμμικός Ορίζοντας
F36: Κροκάλες, Χαλίκια
F43: Άμμος, Άργιλος, Χαλίκια

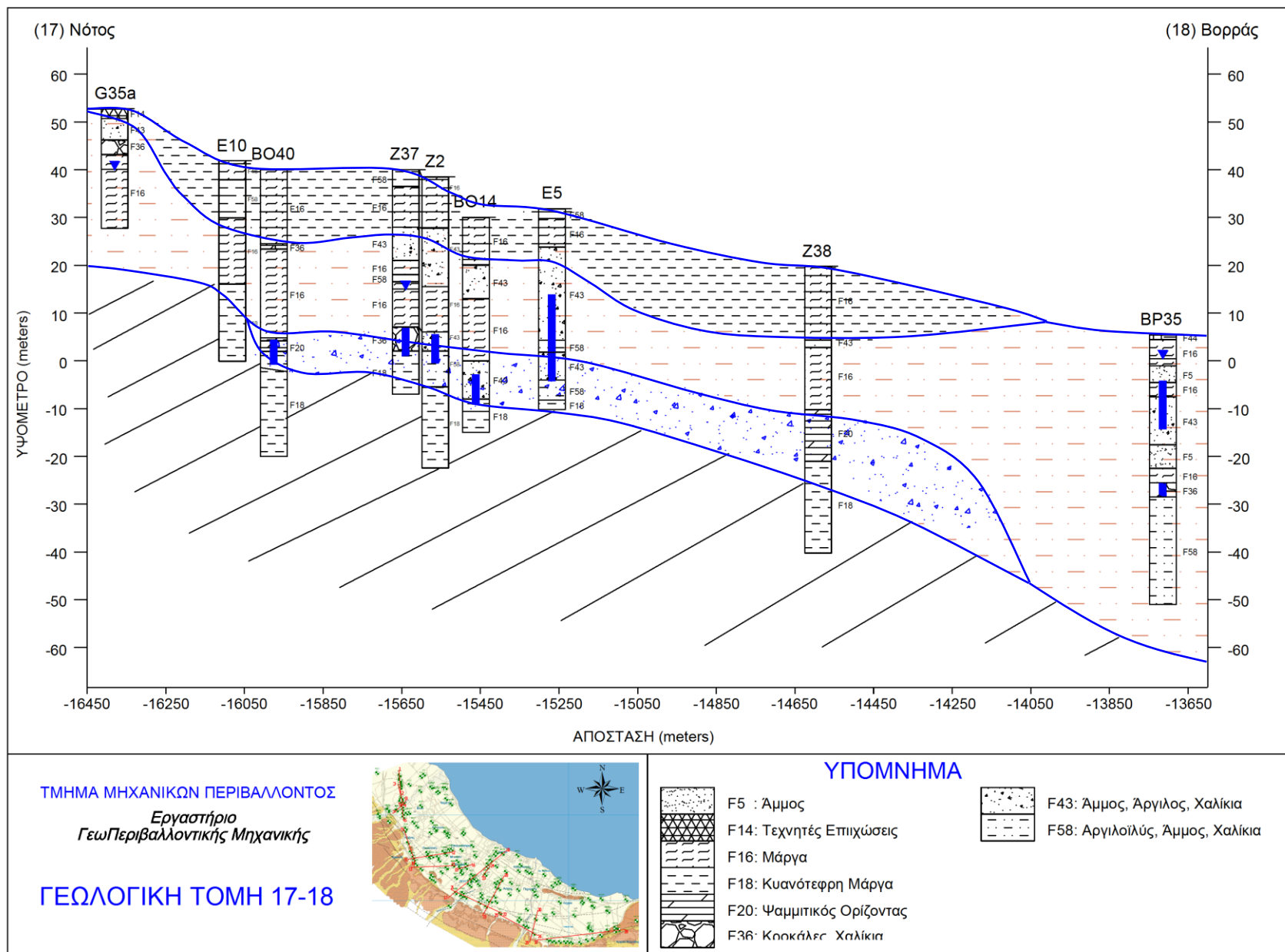


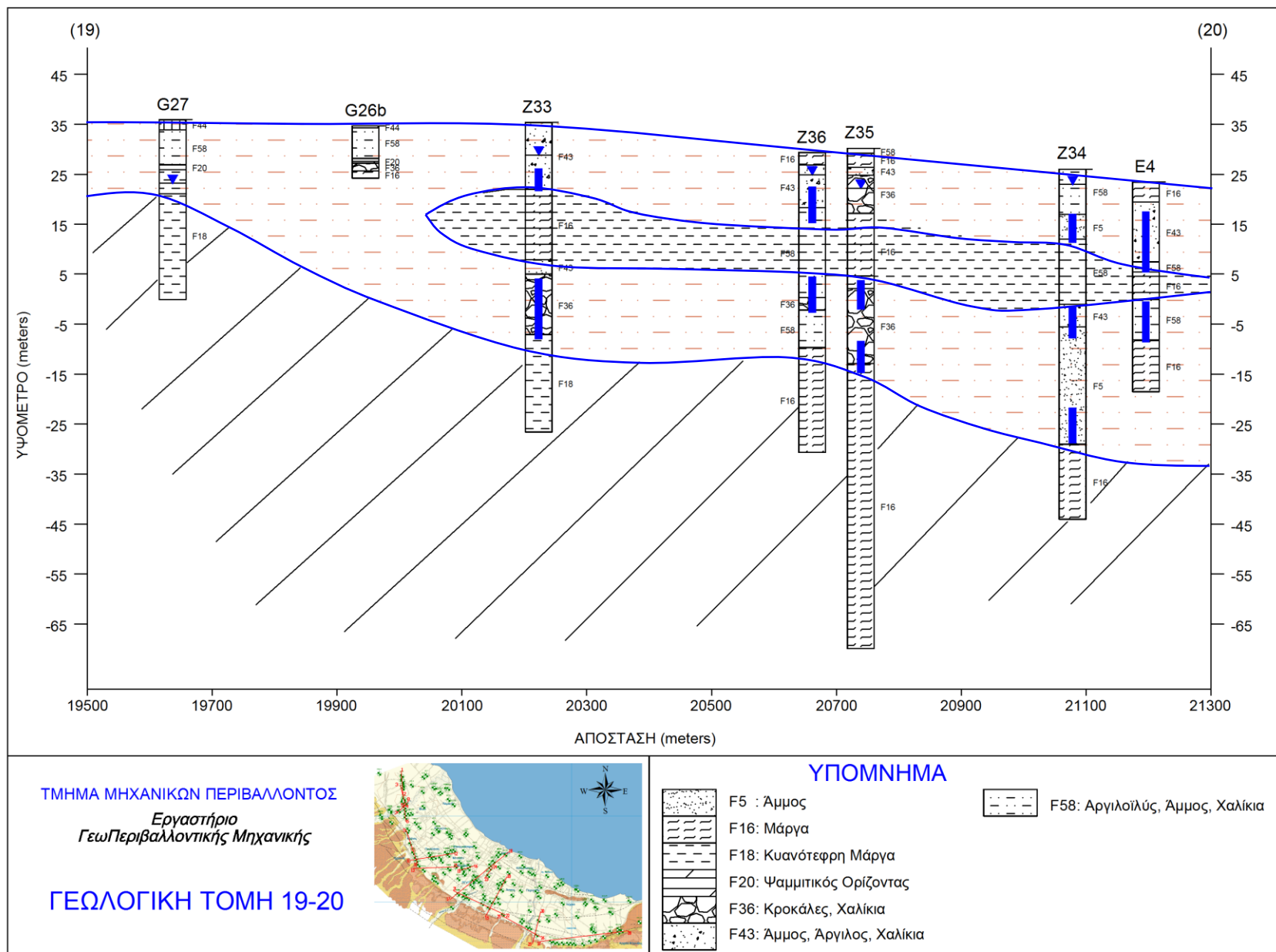
F44: Εδαφικός Ορίζοντας
F58: Αργιολίγυς, Άμμος, Χαλίκια

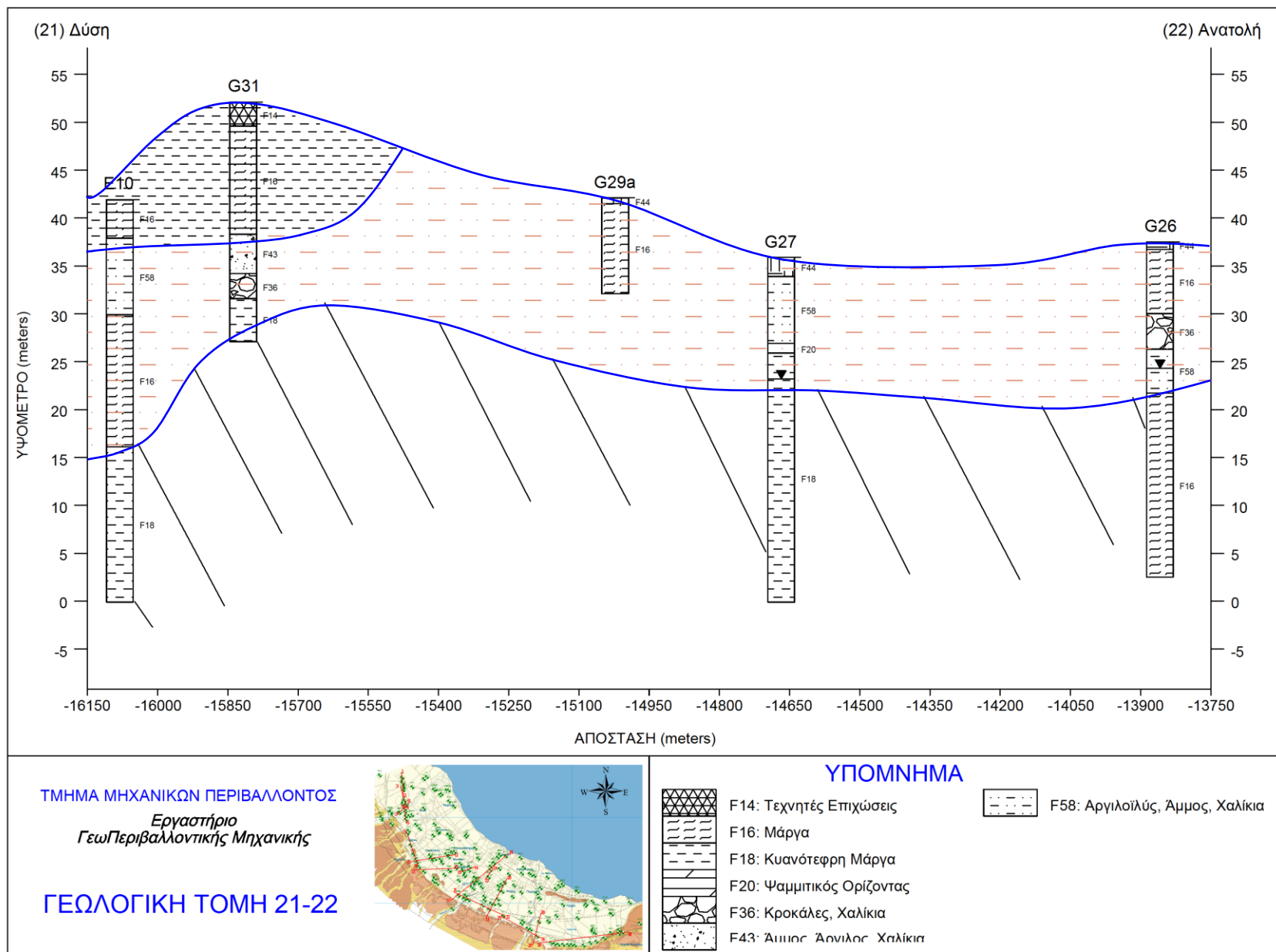


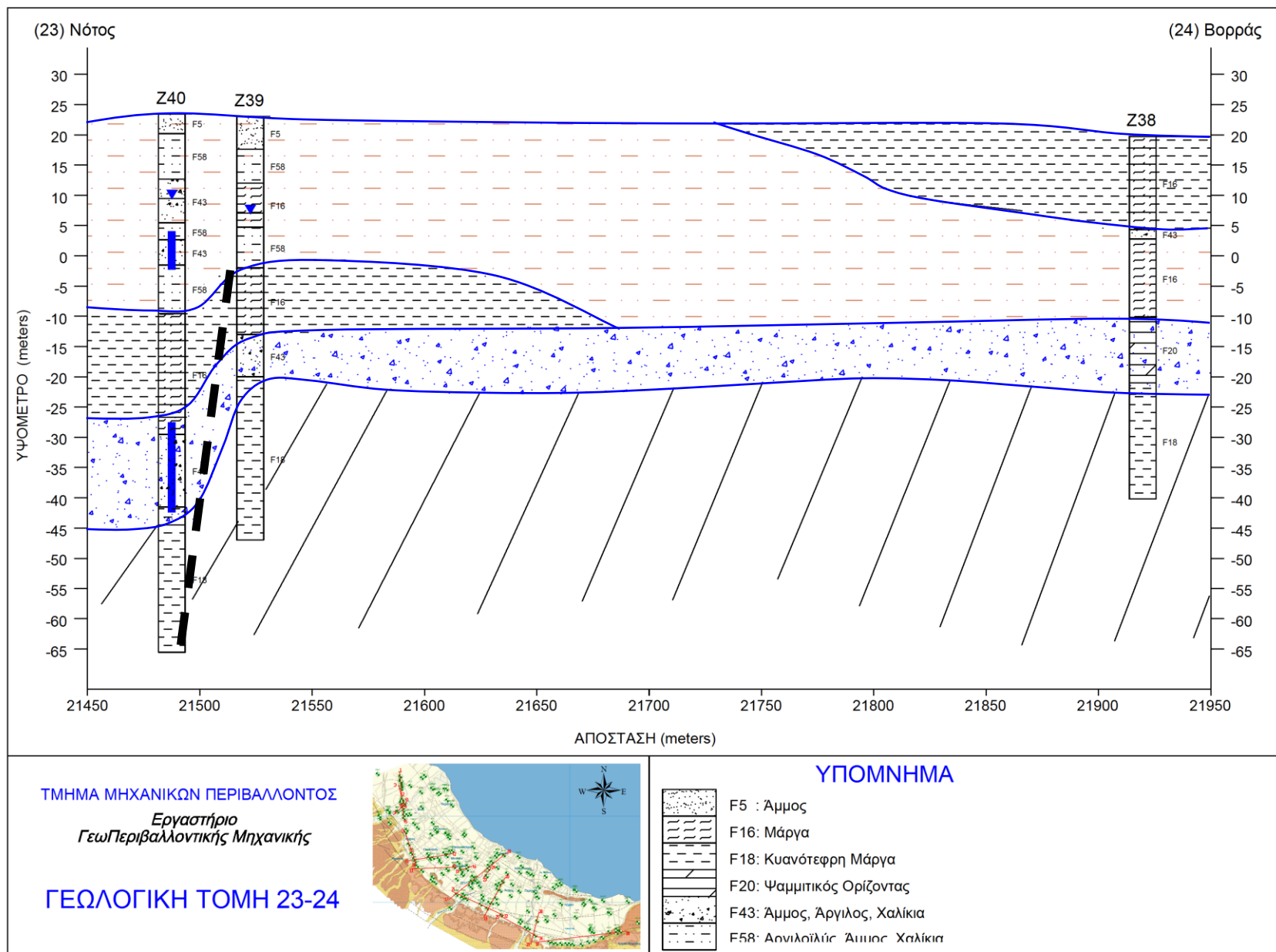


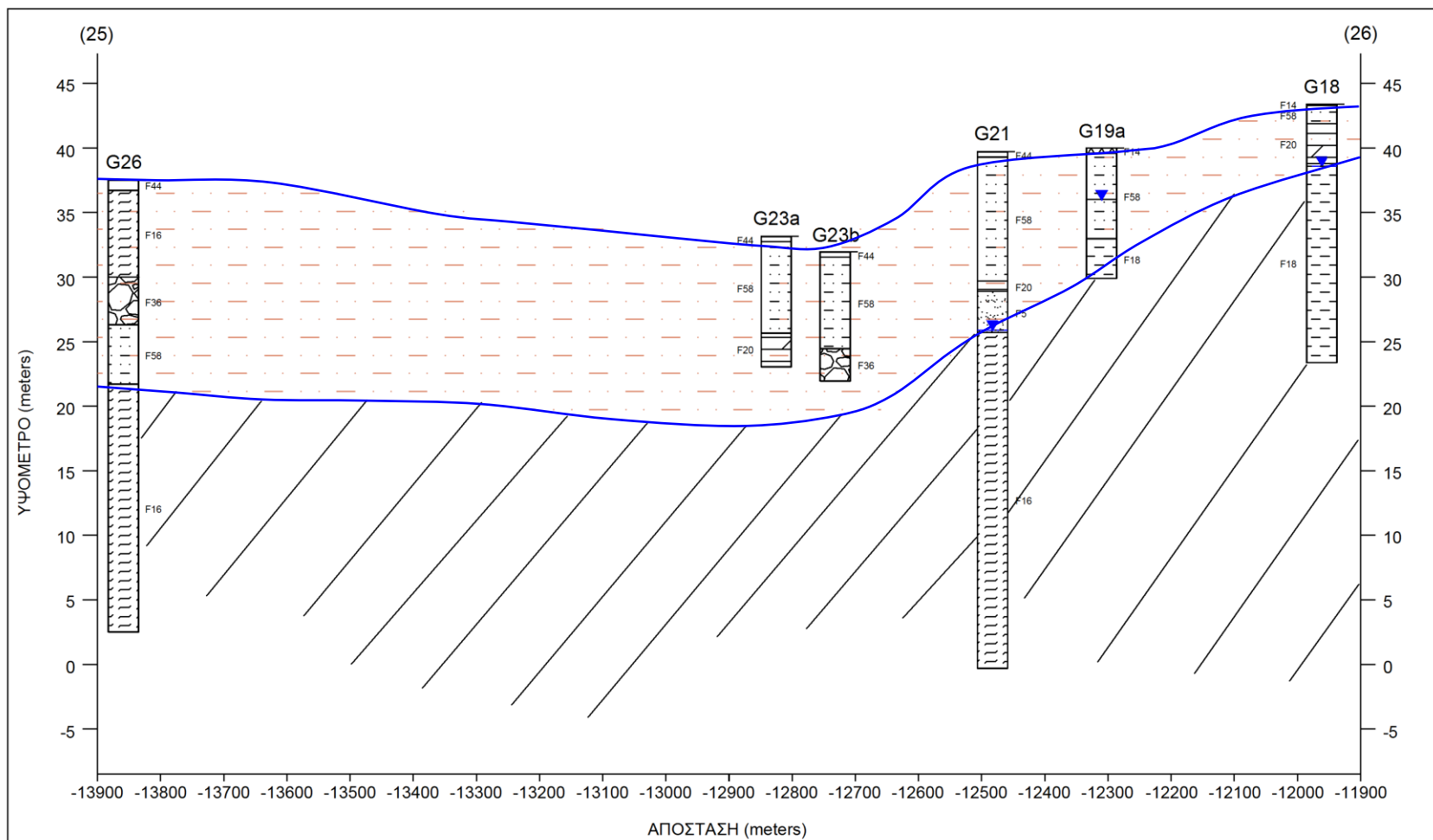












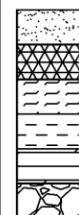
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Εργαστήριο
ΓεωΠεριβαλλοντικής Μηχανικής

ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ 25-26



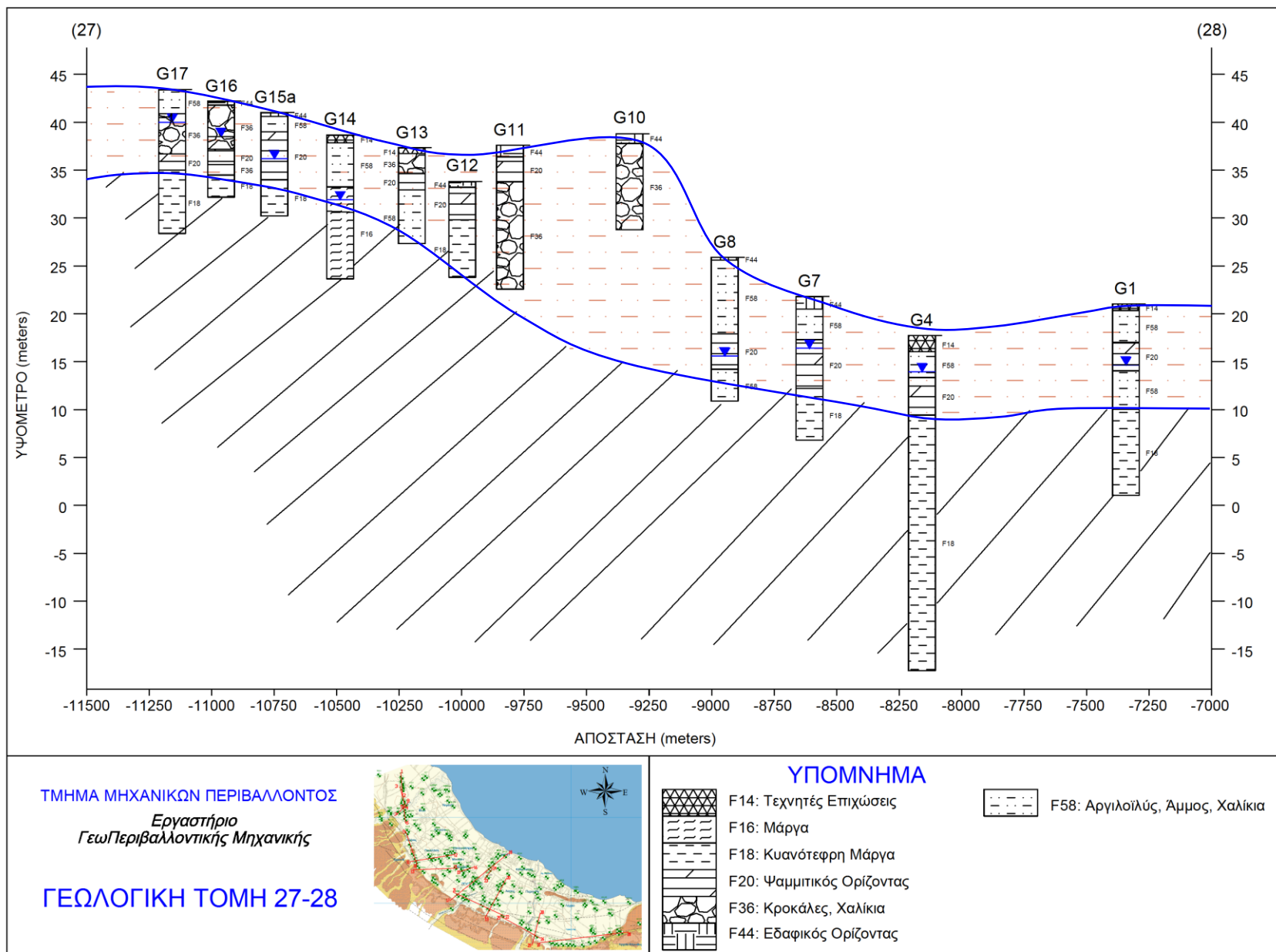
ΥΠΟΜΝΗΜΑ



F5 : Άμμος
F14: Τεχνητές Επιχώσεις
F16: Μάργα
F18: Κυανότεφρη Μάργα
F20: Ψαμμικός Ορίζοντας
F36: Κοσκάλες Χαλίκια



F44: Εδαφικός Ορίζοντας
F58: Αργιολίγυς, Άμμος, Χαλίκια



Π6. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ (02/98-03/07)

	Φεβ-98	Μαρ-98	Απρ-98	Μαϊ-98	Ιουν-98	Ιουλ-98	Αυγ-98	Σεπ-98	Οκτ-98	Νοε-98	Δεκ-98
AK10	11.37	11.41	12.04	11.98	11.58	9.30	9.12	8.27	8.35	7.90	9.20
AK106	13.40	13.85	14.10	14.57	13.87	13.00	12.50	11.30	7.70	10.93	10.20
AK12											
AK134	16.52	17.30	17.85	18.25	17.75	16.23	15.45	14.55	14.50	16.16	14.70
AK152	7.27	7.20	7.35	7.25	7.98	7.88	6.90	7.40	7.35	7.28	7.65
AK78	12.65	12.75	13.48	13.42	13.22	12.58	11.72	10.90	10.40	10.27	11.10
AS19	10.30	10.45	10.60	10.72	10.50	9.80	8.40	8.00	7.93	8.00	8.15
AS31	8.02	8.15	8.40	8.78	8.35	5.88	3.60	2.75	3.96	4.40	4.95
BE101											
BE105	3.20	3.28	3.30	3.35	3.32	2.60	2.35	1.72	1.44	1.33	1.95
BE17	18.80	18.42	18.60	19.60	21.46	20.26	18.16	16.78	16.00	15.42	15.85
BE25				4.62					1.85		
BE31	1.98	2.10	2.28	2.45	2.86	2.15	1.65	0.90	0.75	0.40	0.85
BE55		13.05							6.80		
BE58				8.88					4.02		
BE69	4.15	3.90	4.44	4.99	6.68	4.78	1.90	2.30	2.27	2.15	2.98
BO23	21.88	22.25	22.91	23.68	24.35	23.55	22.05	20.92	19.98	19.69	19.60
BO31											
BP30	2.10	2.20	2.25	2.20	2.05	1.80	1.45	1.20	1.04	1.10	1.30
E13											
E14											
E3											
E6											
E8											
EY10	13.35	13.71	14.49	15.04	15.08	13.32	12.60	11.75	7.80	7.45	8.35
EY6				21.11					12.42		
KA6				5.35					2.15		
KI12				9.60					3.88		
KI9	4.15	4.18	4.55	5.45	6.45	5.35	4.10	3.75	3.52	3.48	3.65
KO9											
KP17	13.90	13.88	14.67	15.18	16.18	11.75	10.25	9.60	9.23	10.00	10.65
KP25											
KP27											
LE15	2.15	2.38	2.50	2.10	1.95	0.85	0.70	0.58	0.98	0.70	0.85
LE26											
MP17	10.12	10.45	10.80	11.30	11.21	9.95	8.05	6.67	5.75	5.40	6.25
PE30											
PE47											
TS1											
TS2											
Z10											
Z16											
Z17	16.70	15.72	17.24	17.83	14.23	9.00	7.65	6.60	9.79	10.33	11.80
Z27	7.25	8.50	9.05	7.86	6.40	3.78	3.40	4.50	1.95	1.90	3.65

	Ιαν-99	Φεβ-99	Νοε-99	Δεκ-99	Φεβ-00	Μαρ-00	Αпр-00	Μαϊ-00	Ιουλ-00	Σεπ-00	Οκτ-00
AK10	10.55	11.40	8.80	9.85	10.08	10.40	10.20	9.68	6.91		5.34
AK106	12.10	12.65	11.33	11.76	11.94	12.06	12.49	12.17	12.29		9.62
AK12			10.55	10.80	11.03	11.23	11.12	10.75	8.38		6.25
AK134	15.58	16.30	14.95	15.53	15.60	15.55	15.84	15.30	13.65		12.60
AK152	8.00	8.38	7.15	7.93	7.99	7.97	8.28	8.05	6.70		7.16
AK78	11.90	12.40	10.15	10.30	10.41	10.59	10.83	10.52	9.46		8.01
AS19	8.40	9.18	7.90	7.97	8.33	8.51	8.75	8.55	7.78		7.74
AS31	5.37	5.65	4.64	5.54	5.67	6.17	6.76	5.53			0.42
BE101			19.20	18.30	17.54	17.81	16.89	17.60	14.55	12.89	12.43
BE105	2.60	2.77	2.32	2.40	2.80	3.04	3.06	2.78	1.53	0.59	0.73
BE17	16.61	16.88	19.50	19.95	19.22	18.89	17.94	18.40	14.53	11.57	12.20
BE25			4.40		4.70	5.07	4.60	4.15	1.82		1.68
BE31	1.40	1.80	1.76	1.90	2.10	2.68	2.64	2.20	0.98		
BE55			12.35		11.97	11.90	11.20	11.80	8.07		
BE58			8.55		8.90	9.47	7.57	8.57	2.81		2.65
BE69	4.03	4.70	4.60	4.56	4.58	5.92	4.52	4.35	2.53		1.65
BO23	19.40	19.30	19.85	16.80	20.26	20.85	20.83	20.08	19.40		19.06
BO31			11.87	12.50	13.60	15.51	9.64	7.21			3.38
BP30	1.50	1.51			1.20	1.27	1.52	1.32	1.36		1.72
E13				20.54	21.32	22.07	20.59	19.62	15.11	14.28	14.74
E14										10.37	10.15
E3			8.49	8.75	9.21	10.10	9.17	7.65	0.33	0.81	2.80
E6			13.63	14.25	15.60	16.57	15.02	12.54	9.62	7.00	5.30
E8				19.41	19.57	19.61	18.59	17.44	9.59	3.89	3.26
EY10	10.15	10.80	10.45	10.88	11.78	12.85	12.73	11.42	3.10	-0.30	
EY6			15.35		16.85	17.88	16.48	14.80		6.67	6.85
KA6			1.80		2.80	3.31	3.35	2.72	0.84		1.30
KI12			8.35		8.32	8.67	7.56	7.13	3.44	2.55	
KI9	3.93	3.95	4.58	4.65	4.77	4.94	5.12	5.16	3.84		
KO9			2.70		3.30	3.74	3.75	3.39	-0.26	-0.19	0.23
KP17	11.32	11.98	13.15	13.40	13.52	13.80				3.20	5.65
KP25			15.35		13.73	13.82	14.14	14.10	13.80	13.81	13.81
KP27			17.33		17.50	17.40	16.73	16.52	13.50	10.33	10.37
LE15	2.05	2.20	0.92	1.35	1.49	1.53	1.54	0.77	0.58		0.22
LE26			1.63	1.72	1.70	1.77	1.60	1.09	0.52		0.42
MP17	6.90	7.40	6.45	6.90	7.56	8.70	8.43	7.61	0.00	-0.37	0.56
PE30			9.30		9.31	9.69	9.88	9.50			7.47
PE47			6.02		6.42	6.64	7.02	6.75	5.41		4.25
TS1											-2.97
TS2											-3.60
Z10					16.16	16.80		13.30			
Z16			10.28		10.77	11.21	10.53	10.68	6.29		7.40
Z17	12.40	13.00	12.60	13.27	13.62	14.98	13.37	11.85	5.84		7.81
Z27	5.90	6.75	2.48	2.95	3.17	4.59	4.20	2.15			

	Ιαν-01	Φεβ-01	Μαρ-01	Μαϊ-01	Ιουλ-01	Δεκ-02	Φεβ-03	Μαρ-04	Μαρ-05	Μαρ-07
AK10	7.40	7.60	6.69	6.86	4.38	5.60	6.91	10.74	9.35	8.44
AK106	10.80	10.62	10.43	10.46	9.59	9.98	10.29	15.15		
AK12	7.95	8.36	7.73	7.82	5.30	6.55	7.20	11.50	10.00	9.56
AK134	13.40	13.69	13.61	13.40	11.45	12.60			14.42	13.68
AK152	7.30	7.39	8.23	7.83	2.59	5.99	6.19	6.00	6.18	5.80
AK78	8.70	9.05	9.30	9.20	8.15	8.80	8.96	11.50		
AS19	7.98	8.03	7.51	7.35	7.70	7.61	9.00	11.28	8.71	8.08
AS31	1.97	2.10							16.20	
BE101	14.56	15.68	15.82	18.15	15.57	17.37	17.21	18.09	16.56	16.86
BE105	0.79	0.05								
BE17	14.68	16.51	16.54		14.60	17.64	18.08	19.39	17.25	16.80
BE25	2.23	3.66	2.99	2.97	1.65	3.45	5.08	6.04		
BE31	0.32	1.00	1.00	0.92	0.25	0.80	1.48	3.68	2.25	2.49
BE55		9.25	8.75	11.61		11.21	11.69	13.93	11.25	12.22
BE58	7.61	5.40	4.80	7.05	4.16	8.17	9.80	12.10	8.34	8.85
BE69	2.10	4.27	3.10	3.02	2.28	4.18	6.41	6.99	4.45	5.52
BO23	19.70	20.07	19.85	19.64		19.34	19.74	21.69	20.55	19.77
BO31	6.53	7.15	5.27	7.53	-1.00	6.62	8.39	15.74	11.36	9.85
BP30	0.90	0.81	0.85	0.69	0.46	0.67	1.11	1.17	0.55	0.88
E13	16.46	19.46	20.20	20.41	14.92	17.66	21.22	23.41		
E14	13.69	14.70	14.58	15.03	8.85	17.20	16.09	19.67	17.92	16.44
E3	4.60	4.63	1.31	4.66	-2.15	5.12	6.18	11.83		23.50
E6	7.50	7.95	8.20	8.93	4.70	7.41	8.80	19.48	14.99	10.28
E8	5.26	6.15	6.89	8.88	6.95	21.36	20.81	22.49		
EY10							10.15	12.91	12.88	11.39
EY6										28.70
KA6	1.05	0.50	0.21	0.79	0.34	0.80	1.30	3.56	3.10	1.47
KI12	5.20	5.05	6.21	7.72	3.47	7.74	9.35	11.36	9.10	8.42
KI9		2.73	2.93	4.07	3.34	3.69	4.57		6.01	4.69
KO9	1.00	1.37	1.19	1.63	-0.55	1.82	1.99	3.82	3.14	2.68
KP17	7.54	9.43	10.53			10.41	11.95	14.88	12.82	12.78
KP25	14.11	14.75	14.45	14.47	13.85	13.85	14.22			
KP27	12.12	13.77	13.70	14.78	12.85	15.34	15.93	18.18	16.48	15.85
LE15	1.05	1.11	1.07	1.07	0.06	0.88	0.98	1.68	1.25	0.88
LE26	0.01	-0.03	-0.01	-0.06	-0.31	-0.36	-0.03	1.90	1.08	0.97
MP17		3.99	5.34	5.55	0.45	3.11	3.89	6.96	6.39	6.98
PE30	8.10	7.65	6.83	7.03		7.72	8.76			
PE47	5.00	5.23	4.85	4.58	3.44	5.03	5.86	8.69	6.69	5.62
TS1	3.03	5.68	4.99			4.34				
TS2	2.13	4.68								
Z10	12.20			13.06	7.61	13.18	14.62	20.01	16.82	14.55
Z16	9.75	10.16	10.11	10.53	6.54	10.14	10.70	14.67	12.88	9.66
Z17	11.26	11.47	10.05	12.48	6.63	12.03	13.89	17.92	14.30	10.98
Z27				-0.58		-1.20	-0.13	5.96	4.02	1.89

Π7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Π7.1 Συγκέντρωση Νιτρικών ιόντων NO₃⁻ (mg/L)

	Ιουλ-00	Σεπ-00	Οκτ-00	Ιαν-01	Φεβ-01	Μαρ-01	Μαϊ-01	Ιουλ-01
AK10			79.25			88.50	95.59	75.03
AK106			90.25	20.00	16.10	101.51	97.49	86.67
AK11			163.63	136.00	133.50	128.75	135.49	92.64
AK12				118.49	122.50	113.75	130.86	88.93
AK134			50.94					
AK140			70.44	101.88	40.75			
AK152			103.71	164.38	109.00	126.00	131.34	94.21
AK160			40.25	74.78	60.63	56.92	89.30	74.47
AK160a			37.36					
AK165			54.97	56.92	63.13	41.38	61.39	65.53
AK78	165.72		188.13	134.00	107.63	117.50	113.05	90.06
AKY2							9.26	3.90
AS1	42.26							
AS19			30.82	14.65	14.75	35.85	2.85	52.77
AS31						53.90		46.60
ASY3			92.64		38.11	33.77		
BE101			48.43					
BE105			0.75	1.57	1.57		1.07	
BE17			52.77	51.89	59.25	61.89	65.00	56.92
BE25			2.89					
BE27				16.35	13.52		11.25	
BE31						2.89		15.72
BE55					48.75	47.55	60.13	
BE58				36.48	23.25	22.64	25.00	23.58
BE69			1.76	3.40	11.64	16.92	14.50	10.82
BE8			-	0.63	-	4.28	-	
BE99			-	22.64	1.89	10.38	20.82	
BO			59.75	65.41	60.63			
BO23			25.22	32.08	43.50	47.17	39.81	
BOY1							73.27	78.93
BP14			17.23		39.87	21.51	14.72	
BP30			0.94	14.21	-	9.12	5.66	5.03
E13			57.11	68.55	62.50	19.37	48.38	70.82
E14	16.98	18.11	14.59	1.26	0.88	1.89	0.94	4.47
E3			55.97	78.05	50.50	45.28	62.63	73.33
E6			48.74					44.40
E8			63.52		0.94		119.38	75.66
EY10			62.08	67.30	41.88	66.42	69.38	61.82
EY6		58.99		15.09	15.50			58.11
KA2			52.96			52.52		54.15
KA6			49.25	22.01	47.38	42.77	31.13	27.61
KI12			102.52					
KI7		1.01	0.31	5.03	0.63	1.26	1.95	0.06
KO9		14.21	19.62	42.96	32.63	37.92	45.00	
KP17							61.38	54.15
KP2			76.48	98.18	97.50	98.88		
KP25				69.37	33.52	35.22	34.38	
KPY2							73.27	76.98

KPY6							61.75	
LE2			71.70	0.82		57.48		57.17
LE26				55.53	67.13		104.00	
LE27			57.55		101.25	124.50	143.75	235.85
LE38			102.52	69.18	68.13	54.40		
LE8			125.13	137.25	127.13	118.75		114.03
MPY1						61.64	68.93	65.41
PE30			51.89	36.04	11.50	28.68		
PEY3							72.20	53.71
POY3		45.28	31.45	64.40	60.00		47.50	52.58
KO1A		42.77	18.11	50.06	52.00			
KO1B		47.67	41.82	36.92	53.63		9.26	
Z10					72.63	75.63		
Z16			98.55	111.01	126.00	119.13	119.25	
Z17			23.90	2.89	0.63	87.11	71.45	43.14
Z27			13.14			10.38		11.01
Z8		88.05						81.13
ZY3							58.99	53.21

Π7.2 Συγκέντρωση Νιτρωδών ιόντων NO₂⁻ (mg/L)

	Ιουλ-00	Σεπ-00	Οκτ-00	Ιαν-01	Φεβ-01	Μαρ-01	Μαϊ-01	Ιουλ-01
AK10			0.21			0.01	0.02	0.03
AK106			0.01	0.01	0.02	0.03	0.01	0.01
AK11			0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
AK12				0.18	0.02	0.02	0.01	0.01
AK134			0.01					
AK140			0.06	0.10	0.01			
AK152			0.05	0.02	0.02	0.04	0.03	0.05
AK160			0.02	0.03	0.01	1.26	0.02	0.21
AK160a			0.01					
AK165			0.08	0.01	0.02	0.66	0.02	0.21
AK78			0.05	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03
AS19			1.11	0.02	0.02	0.02	0.00	2.25
AS24			0.12		0.02			
AS31						0.06		0.02
BE105			0.03	0.03	0.03		0.01	
BE17			0.06	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03
BE25			0.03					
BE27				0.01	0.01		0.01	
BE31						0.03		0.04
BE55					0.01	0.02	0.01	
BE58				0.01	0.01	0.02	0.01	0.02
BE69			0.06	0.02	0.03	0.02	0.02	0.06
BE8			0.01	0.02	0.03	0.01	0.01	
BE99			0.01	0.05	0.01	0.01	0.00	
BO			0.01	0.01	0.04			
BO23			0.08	0.05	0.01	0.02	0.33	
BOY1							0.01	0.01
BP14			0.01		0.01	0.04	0.02	
BP30			0.01	0.04	0.03	0.02	0.70	0.05
E13			0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02

E14			0.12	0.02	0.01	0.05	0.03	0.07
E3			0.01	0.11	0.04	0.02	0.02	0.01
E6			0.05					0.01
E8			0.01		0.02		0.01	0.06
EY10			0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04
EY6				0.24	0.25			0.01
KA2			0.01			0.03		0.04
KA6			0.03	0.14	0.11	0.04	0.09	0.02
KI7			0.03	0.01	2.25	0.04	0.08	0.02
KO9			0.03	0.06	0.05	0.04	0.02	
KP17							0.01	0.01
KP2			0.01	0.01	0.01	0.03		
KP25			0.01	0.32	0.04	0.03	0.03	0.07
KPY2							0.01	0.01
KPY6							0.01	
LE2			0.01	0.07		0.02		0.02
LE26				0.02	0.03		0.09	
LE27					0.02	0.08	0.25	0.10
LE37			0.02					
LE38			0.03	0.02	0.01	0.01		
LE8			0.04	0.02	0.01	0.04		0.09
MPY1						0.01	0.01	0.03
PE30			0.01	0.03	0.06	0.01	0.01	
PEY3							0.01	0.01
POY3			0.01	0.01	0.01			0.01
POY3							0.01	
POY4							0.01	
KO1A			0.02	0.01	0.01			
KO1B			0.36	0.05	0.13			
Z10					0.02	0.01		
Z16			0.06	0.02	0.01	0.06	0.02	
Z17			0.48	0.26	0.05	0.06	0.08	0.10
Z27			0.01			0.04		0.03
ZY3							0.01	0.03

Π7.3 Συγκέντρωση Αμμωνιακών ιόντων NH_4^+ (mg/L)

	Ιουλ-00	Σεπ-00	Οκτ-00	Ιαν-01	Φεβ-01	Μαρ-01	Μαϊ-01	Ιουλ-01
AK10			0.04	-		0.01	0.024	0.01
AK106				-	-	0.07	0.006	-
AK11			-	0.00	-	-	0.031	-
AK12					-	-	0.033	0.00
AK140			0.57	0.44	-			
AK152				-	-	-	-	0.04
AK160			0.08	-	-	0.21	0.019	-
AK165			0.07	-	0.00	0.00	-	0.16
AK78				-	-	0.04	0.006	0.00
AKY2							0.024	0.02
AS19			0.20	1.07	1.21	0.03	0.006	0.02
AS24			0.72		-			
AS31						0.04		0.02
ASY3						0.08		

BE105				0.01	0.03		0.019	
BE17			0.07	-	0.00	0.01	-	-
BE25			0.20					
BE31						1.17		0.33
BE55					-	0.05	0.006	
BE58				0.02	0.01	0.03	0.002	0.01
BE69				-	-	0.03	0.077	0.03
BE8			2.97	44.25	40.56	1.13	1.61	
BE99			-	-	-	0.01	0.014	
BO			0.02	-	-			
BO23			0.32	0.07	-	-	0.595	
BOY1							0.019	
BP30			-	-	-	0.06	0.329	3.63
E13			0.01	-	0.00	0.59	0.002	0.00
E14			3.19	14.75	14.57	14.87	11.72	10.05
E3			0.11	0.13	0.15	0.02	0.021	0.01
E6			0.16					0.04
E8			0.28		0.09		0.032	0.03
EY10			0.08	-	0.00	0.04	-	0.04
EY6				0.06	0.29			0.00
KA2			0.06			0.01		-
KA6			0.30	0.03	-	0.05	0.005	0.01
KALLIR							1.370	
KI7			-	-	0.01	0.05	-	-
KP2			-	-	-	0.01		
KP25				3.88	1.78	1.41	1.666	8.80
KPY2							-	0.02
LE2			0.03	1.33		0.01		0.01
LE8			-	-	-	0.26		0.03
MPY1			0.19			0.08	-	0.12
PNEYM			-			21.26		
PO29				-	0.02			0.00
POY4							0.050	
KO1A				0.01	-			
KO1B				0.15	-			
Z10			0.02		-	0.02		
Z16			0.13	-	0.00	0.07	0.027	
Z17				0.22	0.46	0.12	0.039	0.17
Z27			0.10			0.02		0.00
Z8			0.70					0.03

Π7.4 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού αναφέρεται στην ικανότητά του να μεταφέρει - άγει ηλεκτρικά φορτία. Η ικανότητα αυτή εξαρτάται από την παρουσία ιόντων, από τη συγκέντρωσή τους, την ευκινησία, το σθένος και τη θερμοκρασία. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι ένας απλός και γρήγορος τρόπος για την εκτίμηση της συγκέντρωσης των διαλυμένων ανόργανων αλάτων. Ο χρόνος που βρίσκεται το νερό σε επαφή με τα πετρώματα, είναι από τις σημαντικότερες παραμέτρους για τον καθορισμό της χημικής του σύστασης. Κατά κανόνα τα υπόγεια φυσικά νερά παρουσιάζουν υψηλότερη συγκέντρωση διαλυμένων αλάτων από τα επιφανειακά νερά γιατί βρίσκονται για μεγαλύτερο χρόνο σε επαφή με τα ευδιάλυτα υλικά των γεωλογικών στρωμάτων (Καλλέργης, 1984).

Το νερό περιέχει διαλυμένα ή εν αιωρήση άλατα που ποικίλουν καθώς αποτελούν συνάρτηση της διαδρομής που ακολουθεί το νερό για να καταλήξει στον υδάτινο αποδέκτη. Η αύξηση της αγωγιμότητας συνδέεται με την ενηλικίωση (παλαίωση) μιας υδάτινης μάζας εξαιτίας της αύξησης των θρεπτικών συστατικών της (ευτροφισμός). Όσο μεγαλύτερη είναι η αγωγιμότητα στα γλυκά νερά τόσο μεγαλύτερη είναι η βιολογική παραγωγικότητα. Συνήθως στα φυσικά γλυκά νερά η ηλεκτρική αγωγιμότητα κυμαίνεται από 50 - 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Η αγωγιμότητα μετράται σε microSiemens/cm ($\mu\text{S}/\text{cm}$) ή σε milliSiemens/cm (mS/cm). Οι τιμές μετρήσεων αγωγιμότητας που αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα είναι σε $\mu\text{S}/\text{cm}$ στους 20 °C.

	Ιουλ-00	Σεπ-00	Οκτ-00	Ιαν-01	Φεβ-01	Μαρ-01	Μαϊ-01	Ιουλ-01
AK10	1048.0		1424.00	1620.00		1442.00	1143.00	1538.00
AK106	1886.0		2360.00	922.00	696.00	2130.00	2140.00	2510.00
AK11			2000.00	1869.00	1750.00	2060.00	2000.00	2170.00
AK12					1468.00	1745.00	1801.00	1830.00
AK134	179.4		1707.00					
AK140	1880.0		3580.00	3610.00	4250.00			
AK152	2580.0		3250.00	3500.00	3080.00	3450.00	3740.00	3590.00
AK160	2210.0		2690.00	2220.00	2120.00	2650.00	2650.00	2610.00
AK160a			2510.00					
AK165			3350.00	2710.00	2760.00	3190.00	2890.00	3170.00
AK78	2030.0		2600.00	2560.00	2290.00	2760.00	2730.00	2800.00
AKY2							2300	2310
AS1	268.0							
AS19	1111.0		1212.00	929.00	1062.00	1297.00	1223.00	1375.00
AS24			1586.00		1204.00			
AS31						1276.00		1325
ASY3						1342.00		
BE101	978.0		1046.00					
BE105	1091.0	1343.00	1579.00	1387.00	1452.00		2120.00	
BE17	320.0		1086.00	968.00	967.00	1137.00	1187.00	1189.00
BE25			841.00					
BE27	554.0	385		992.00	877.00		1157.00	

BE31						1690.00		1483.00
BE55	933.0				902.00	1090.00	1160.00	
BE58	903.0			1166.00	923.00	1104.00	1069.00	1129.00
BE69	419.0	327.00	1123.00	1017.00	710.00	986.00	1119.00	1071.00
BE8	131.5		1075.00	1046.00	1109.00	956.00	991.00	
BE99	1177.0	711.00	1171.00	1136.00	1106.00	1419.00	1129.00	
BO			978.00	1099.00	996.00			
BO23			1145.00	877.00	992.00	1175.00	1230.00	
BOY1							1246.00	1321.00
BP14	1272.0		855.00		1083.00	1274.00	1301.00	
BP30	2530.0		2580.00	2740.00	2560.00	2940.00	3010.00	3030.00
E13			1244.00	1287.00	1103.00	783.00	1251.00	1380.00
E14	709.0	253.00	1036.00	1261.00	1186.00	1306.00	1329.00	1318.00
E3	384.0	546.00	1477.00	1580.00	1295.00	1454.00	1542.00	1767.00
E6	760.0		926.00					1243
E8			930.00		1050.00		1345.00	1391.00
EY10	1038.0	318.00	1404.00	1368.00	1205.00	1418.00	1500.00	1477.00
EY6	642.0	439.00		415.00	501.00			1235
KA2			1207.00			1582.00		1580
KA6	1830.0		1824.00	1767.00	1803.00	1765.00	2000.00	1986.00
KALLIR							997.00	
KI12			1254.00					
KI7	1218.0	453.00	1182.00	1147.00	1096.00	1227.00	1328.00	1332.00
KO9	1657.0	738.00	1747.00	1816.00	1701.00	1945.00	2070.00	
KP17	1051.0	268.00					1139.00	1155.00
KP2			791.00	1043.00	1012.00	1067.00		
KP25			745.00	758.00	769.00	857.00	870.00	780.00
KPY2							1116.00	1181.00
KPY6							1125.00	
LE2	263.0		1629.00	1564.00		1956		2430
LE26	2850.0			2200.00	2330.00		2710.00	
LE27	4080.0		1443.00		2900.00	3360.00	3460.00	4820.00
LE38	3580.0		2830.00	2790.00	2500.00	3070.00		
LE8	810.0		1957.00	2020.00	1990.00	2290.00		2400
MPY1	1327.0					1216.00	1300.00	1286.00
PE30	297.0		869.00	1183.00	1110.00	1211.00	1277	
PEY3							1733.00	1888.00
PNEYM						4240.00		
PO29	565.0	1013.00	841.00	1283.00	1142.00			1280
POTAMI					412.00			
POY3							1190.00	
POY4							699.00	
TS1		245.00	1149.00	110.00	1091.00			
TS2		704.00	1042.00	1167.00	1137.00			
Z10	1151.0				1067.00	1189.00		
Z16	208.0		1139.00	1208.00	1130.00	1248.00	1310.00	
Z17			957.00	290.00	393.00	1282.00	1328.00	1373.00
Z27	330.0	175.00	1551.00			1102.00		1202
Z8	1295.0	938.00						1186
ZY3							1239.00	1268.00

V. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aguirre, C. G. and Haghighi, K. (2003).** "Stochastic modeling of transient contaminant transport." *Journal of Hydrology* 276(1-4): 224-239.
- Al-Kharabsheh, A. and Al-Mahamid, J. (2002).** "Optimizing pumping rates of Hallabat-Khalidiya Wellfield using finite-difference model: a case study for evaluating..." *Journal of Arid Environments* 52(2): 259-267.
- Almedeij, J. and Al-Ruwaih, F. (2006).** "Periodic behaviour of groundwater level fluctuations in residential areas." *Journal of Hydrology* 328: 677-684.
- Al-Thani, A. A., Beaven, R. P. and White, J. K. (2004).** "Modelling flow to leachate wells in landfills." *Waste Management* 24(3): 271-276.
- Anderson, M. P. (1989).** "Hydrogeologic facies models to delineate large -scale spatial trends in glacial and glaciofluvial sediments." *Geological Society of America Bulletin* 101: 501-511.
- Anderson, M. P. and Woessner, W. W. (1992).** *Applied Groundwater Modelling. Simulation of Flow and Adjective Transport.* San Diego, Academic Press.
- Arah, J. R. M. and Smith, K. A. (1989).** "Steady-state denitrification: a mathematical model." *Journal of Soil Science* 40(139-149).
- Arah, J. R. M., Smith, K. A., Crichton, I. J. and Li, H. S. (1991).** "Nitrous oxide production and denitrification in Scottish arable soils." *Journal of Soil Science* 42: 351-367.
- Arigala, S. G., Tsotsis, T. T., Webster, I. A., Yortsos, Y. C. and Kattapuram, J. J. (1995).** "Gas generation, transport, and extraction in landfills." *Journal of Environmental Engineering* 121: 33-44.
- Armijo, R., Meyer, B., King, G. C. P., Rigo, A. and Papanastassiou, D. (1996).** "Quaternary evolution of the Corinth Rift and its implications for the Late Cenozoic evolution of the Aegean." *Geophy. Journal. Inter* 126(I): 11-53pp.
- Atkinson, K. N., Drakulic, R., Heikal, M. R. and Cowell, T. A. (1998).** "Two- and three-dimensional numerical models of flow and heat transfer over louvred fin arrays in compact heat..." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 41(24): 4063-4080.
- Baldrige, W. S., Olsen, K. H. and Callender, J. F. (1984).** "Rio Grande rift: Problems and perspectives." *Geol. Soc. Guidebook* 35: 1-12.
- Barthel, R., Rojanschi, V., Wolf, J. and Braun, J. (2005).** "Large-scale water resources management within the framework of GLOWA-Danube. Part A: The groundwater model." *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* In Press, Corrected Proof.
- Bear, J. (1979).** *Hydraulics of Groundwater.* New York, McGraw-Hill.
- Bhatt, K. (1997).** "Occurence and Distribution of Nitrate and Pesticides in Bowdle Aquifer, South Dakota." *Environmental Monitoring and Assessment* 47: 223-237.
- Billiris, H., Paradissis, D., Veis, G., England, P., Featherstone, W., Parsons, B., Cross, P., Rayson, M., Sellers, P., Askenasi, V., Davison, M., Jackson, J., A and Braseys, N. (1991).** "Geodetic determination of tectonic deformation in central Greece from 1900 to 1988." *Nature* 350: 124 -129.
- Bradley, C. (1996).** "Transient modelling of water-table variation in a floodplain wetland, Narborough Bog, Leicestershire." *Journal of Hydrology* 185(1): 87-114.

- Brandenburg, R. O. and Smith, H. L. (1951).** "Sulphemoglobinemia: A study of 62 clinical cases." *American Heart Journal* 42(4): 582-588.
- Britton, J. P. (2001).** *Soil-Bentonite Cutoff Walls: Hydraulic Conductivity and Contaminant Transport.*
- Brooks, M. and Ferentinos, G. (1984).** "Tectonics and sedimentation in the Gulf of Corinth, Zakynthos and Kefallinia Channels, Western Greece." *Tectonophysics* 101: 25-54.
- Burnett, R. D. and Frind, E. O. (1987).** "An alternating direction Galerkin technique for simulation of groundwater contaminant transport in three dimensions. Dimensionality effects." *Water Resources Research* 23(4): 695-705pp.
- Burroughs, W. J. (2003).** *Weather cycles: Real Or Imaginary.* Cambridge, University Press.
- Canter, L. W. (1997).** *Nitrates in Groundwater.* Florida, CRC Press.
- Cheng, H. P. and Yeh, G. T. (1998).** "Development and demonstrative application of a 3-D numerical model of subsurface flow, heat transfer, and reactive..." *Journal of Contaminant Hydrology* 34(1): 47-83.
- Cleary, A. J., Falgout, R. D., Henson, V. E., Jones, J. E., Manteuffel, T. A., McCormick, S. F., Miranda, G. N. and Ruge, J. W. (2000).** "Robustness and Scalability of Algebraic Multigrid." *SIAM Journal of Scientific Computing* 21(5): 1886-1908.
- Coleman, J. M. (1976).** *Deltas: processes of deposition and models for exploration.* Champaign, Ill, Continuing Education Publishing Co.,.
- Collier, R. E. L., Leeder, M. R., Rowe, P. J. and Atkison, T. C. (1992).** "Rates of tectonic uplift in the Corinth and Megara Basins, Central Greece." *Tectonics* 11(6): 1159-1167.
- Currie, R. G. (1974).** "Solar Cycle Signal in Surface Air Temperature." *J. Geophys. Res.* 79(36): 5657-5660.
- Currie, R. G. (1981).** "Evidence for 18.6 Year MN Signal in Temperature and Drought Conditions in North America Since AD 1800." *J. Geophys. Res.* 86(C11): 11055-11064.
- Currie, R. G. (1984).** "On bistable phasing of 18.6 year nodal induced flood in India." *Geophys. Res. Lett.* 11(1): 50-53.
- Currie, R. G. (1987).** "On bistable phasing of 18-6-year induced drought and flood in the Nile records since AD 650." *International Journal of Climatology* 7(4): 373-389.
- Currie, R. G. and O'Brien, D. P. (1988).** "Periodic 18.6-year and cyclic 10 to 11 year signals in northeastern United States precipitation data." *International Journal of Climatology* 8(3): 255-281.
- Currie, R. G. and O'Brien, D. P. (1990).** "Deterministic signals in precipitation records from the American corn belt." *International Journal of Climatology* 10(2): 179-189.
- Dart, C. J., Collier, R. E. L., Gawthorpe, R. L., Keller, J. V. A. and Nichols, G. (1994).** "Sequence stratigraphy of (?)Pliocene-Quaternary synrift, Gilbert-type fan deltas, northern Peloponnesos." *Marine and Petroleum Geology* 11(5): 545-560pp.
- Demmel, J. W. (1997).** *Applied Numerical Linear Algebra.* Mathematics, S. f. I. a. A. Philadelphia.
- Diaw, E. B., Lehmann, F. and Ackerer, P. (2001).** "One-dimensional simulation of solute transfer in saturated-unsaturated porous media using the discontinuous finite elements method." *Journal of Contaminant Hydrology* 51(3-4): 197-213.

- Doorenbos, J. and Pruitt, W. O. (1977).** Guidelines for Predicting Crop Water Requirements, Food and Agriculture. FAD Irrigation and Drainage Paper. Rome, Organization of the United Nations. 24: 144p.
- Doutsos, T. and Kokkalas, S. (2001).** "Stress and deformation patterns in the Aegean region." *Journal of Structural Geology* 23: 455±472.
- ECETOC (1988).** Nitrate and drinking water. Nitrate and Drinking Water. Brussels, Belgium, European Chemical Industry Ecology & Toxicology Center.
- European Commision (2007).** About Groundwater Deterioration Risks.
- European Environmental Agency (2005).** "Environmental Status Report for Greece."
- Fares, Y. R. and Giacobbe, D. (2004).** "Transient transport of reactive and non-reactive solutes in groundwater." *Computers & Geosciences* 30(5): 483-492.
- Ferentinos, G., Papatheodorou, G. and Collins, M. (1988).** "Sediment transport processes on an active submarine fault escarpment: Gulf of Corinth, Greece." *Mar. Geol.* 83: 43-61.
- Fetter, C. W. (1994).** *Applied Hydrology*, Prentice Hall.
- Fetter, C. W. (1999).** *Contaminant Hydrogeology*. New Jersey, Prentice-Hall, Inc.
- Freeze, R. A. and Cherry, J. A. (1979).** *Groundwater*, Prentice Hall, Inc.
- Friedly, J. C. and Rubin, J. (1992).** "*Solute Transport with multiple equilibrium controlled or kinetically controlled chemical reactions.*" *Water Resources Research* 28(6): 1935-1953pp.
- Gelhar, L. W. (1986).** "Stochastic subsurface Hydrology from theory to applications." *Water Resources Research* 22(9): 135.
- Gelhar, L. W., Welty, C. and Rehfeldt, K. (1992).** "A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers." *Water Resources Research* 28(7): 1955-1974.
- Gerhart, J. M. (1986).** "Ground-Water Recharge and Its Effects on Nitrate Concentration Beneath a Manured Field Site in Pennsylvania." *Ground Water* 24(4): 483.
- Goldstein, R. J., Eckert, E. R. G., Ibele, W. E., Patankar, S. V., Simon, T. W., Kuehn, T. H., Strykowski, P. J., Tamma, K. K., Bar-Cohen, A. and Heberlein, J. V. R. (2005).** "Heat transfer-a review of 2002 literature." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48(5): 819-927.
- Goolsby, D. A., Coupe, R. H. and Markovchick, D. J. (1991).** Distribution of Selected Herbicides and Nitrate in the Mississippi River and its Major Tributaries, US Geological Survey.
- Gray, W. G. and Miller, C. T. (2005).** "Thermodynamically constrained averaging theory approach for modeling flow and transport phenomena in porous medium systems: 1. Motivation and overview." *Advances in Water Resources* 28(2): 161-180.
- Guiguer, N. and Franz, T. (1998).** *Visual Modflow. User's Manual*. Waterloo, Ontario, Canada.
- Hall, D. W. and Risser, D. W. (1993).** "Effects of Agricultural Nutrient Management on Nitrogen Fate and Transport in Lancaster County, Pennsylvania." *Journal of the American Water Resources Association* 29(1): 55-76.
- Harten, A. (1983).** "High Resolution schemes for hyperbolic conservation laws." *Journal of Computational Physics* 49: 357-393pp.
- Harten, A. (1984).** "High Resolution schemes for hyperbolic conservation laws." *Journal of Computational Physics* 21: 955pp.
- Healy, R. W. and Cook, P. G. (2002).** "Using Groundwater Levels to Estimate Recharge." *Hydrogeology Journal* 10: 91-109.

- Huyakorn, P. S. and Pinder, G. F. (1983).** Computational Methods in Subsurface Flow. San Diego, Academic Press.
- Jensen, M. E., Burman, R. D. and Allen, R. G., Eds. (1990).** Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. New York.
- Johnson, J. W. (1995).** Selecting Forms of Nitrogen Fertilizer. Science, D. o. H. a. C. Columbus, Ohio, Ohio State University Extension.
- Jorgensen, P. R., Helstrup, T., Urup, J. and Seifert, D. (2004).** "Modeling of non-reactive solute transport in fractured clayey till during variable flow rate and time." Journal of Contaminant Hydrology 68(3): 193-216.
- Kaleris, V., Lagas, G., Marciznek, S. and Piotrowski, J. A. (2002).** "Modelling submarine groundwater discharge: an example from the western Baltic Sea." Journal of Hydrology 265(1): 76-99.
- Keeney, D. R. (1989).** Sources of Nitrate to Ground Water. Nitrogen Management and Grounwater Protection. Follet, R. F. New York, Elsevier Science Publishers B.V.: 395.
- Kim, J. and Sultan, M. (2002).** "Assessment of the long-term hydrologic impacts of Lake Nasser and related irrigation projects in Southwestern Egypt." Journal of Hydrology 262(1-4): 68-83.
- Kim, J. M. and Parizek, R. R. (2005).** "Numerical simulation of the Rhade effect in layered aquifer systems due to groundwater pumping shutoff." Advances in Water Resources 28(6): 627-642.
- Kolenbrander, G. J. (1981).** Leaching of nitrogen in agriculture. Dordrecht.
- Koltermann, C. E. and Gorelick, S. M. (1996).** "Heterogeneity in sedimentary deposits : A review of structure-imitating, process-imitating, and descriptive approaches." Water Resources Research 32(9): 2617-2658.
- Konikow, L. F. and Bredehoeft, J. D. (1978).** Computer Model of Two-Dimensional Solute Transport and Dispersion in Groundwater. Techniques of Water Resources Investigations, Chapter C2, US Geological Survey. Book 7: 90pp.
- Kostraba, J., Gay, E., Rewers, M. and Hamman, R. (1992).** "Nitrate levels in community drinking waters and risk of IDDM." Diabetes Care 15: 1505-1508.
- Koukouvelas, I. K., Asimakopoulos, M. and Doutsos, T. T. (1999).** "Fractal characteristics of active normal faults: an example of the eastern Gulf of Corinth, Greece." Tectonophysics 308(1-2): 263-274.
- Labitzke, K., Loon, H. V. and Shine, K. (1990).** "Associations between the 11-Year Solar Cycle, the Quasi-Biennial Oscillation and the Atmosphere: A Summary of Recent Work and Discussion." Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences 330(1615): 577-589.
- Lasserre, F., Razack, M. and Banton, O. (1999).** "A GIS-linked model for the assessment of nitrate contamination in groundwater." Journal of Hydrology 224(3-4): 81-90.
- Le Pichon, X. and Angelier, J. (1979).** "The Hellenic arc and trench system: a key to the neotectonic evolution of the eastern Mediterranean area." Tectonophysics 60: 1-42.
- Lee, K.-K., Kim, K.-R., Hong, K.-S., Lee, J.-E., Oh, D.-C., Chang, H. W. and Cho, S.-H. (1999).** "Evaluation of groundwater contamination from glass fiber dumping at Gozan-Dong, Incheon, Korea." Environmental Pollution 104(3): 459-468.
- Leonard, B. P. (1988).** *Universal Limiter for transient interpolation modelling of the advective transport equations : the ULTIMATE conservative difference scheme.* Technical Memorandum 100916ICOMP-88-11, NASA.

- Li, S.-G., Liao, H.-S. and Ni, C.-F. (2004).** "Stochastic modelling of complex nonstationary groundwater systems." *Advances in Water Resources* 27(11): 1087-1104.
- Li, S.-G., McLaughlin, D. and Liao, H. (2004).** "The accuracy of stochastic perturbation solutions to subsurface transport problems." *Advances in Water Resources* 27(1): 47-56.
- Lichtner, P. C. (1992).** "Time space continuum description of fluid/rock interaction in permeable media." *Water Resources Research* 28(12): 3135-3155pp.
- Liu, C. W. and Narasimhan, T. N. (1989).** "Redox controlled multiple species reactive chemical transport - Verification and Application." *Water Resources Research* 25(5): 883-910pp.
- Lubczynski, M. W. (2000).** Groundwater Evapotranspiration - underestimated component of groundwater balance in a semi-arid environment - Serowe case Botswana. *Groundwater : Past Achievements and Future challenges*. Rotterdam, Balkema: 199-204.
- Lubczynski, M. W. and Gurwin, J. (2005).** "Integration of various data sources for transient groundwater modeling with spatio-temporally variable fluxes--Sardon study case, Spain." *Journal of Hydrology* 306(1-4): 71-96.
- MacQuarry, K. T. B. and Sudisky, E. A. (2001).** "Multicomponent simulation of wastewater-derived nitrogen and carbon in shallow unconfined aquifers I. Model formulation and performance." *Journal of Contaminant Hydrology* 47: 53-84.
- McDonald, M. G. and Harbaugh, A. W. (1988).** *A modular three dimensional Finite Difference Groundwater Flow Model*. Modelling Techniques - Book 6. US Government Printing Office. Washington, US Geological Survey.
- Mercer, J. W. and Faust, C. R. (1981).** *Groundwater Modelling*. Columbus, OH, National Water Well Association.
- Mercurio, J. W., Beljin, M. S. and Maynard, B. J. (1999).** "Groundwater models and wellfield management: a case study." *Environmental Engineering and Policy*(1): 155-164.
- Mitchell, A. R. (1984).** *Recent developments in the finite element method*. Computational Techniques and Applications. C.A.J., N. J. a. F. North Holland, Elsevier. CTAC-83.
- Moretti, I., Sakellariou, D., Lykousis, V. and Micarelli, L. (2003).** "The Gulf of Corinth: an active half graben? *Journal of Geodynamics*. 36: 323-340.
- Mulligan, C. N. and Yong, R. N. (2004).** "Natural attenuation of contaminated soils." *Environment International* 30(4): 587-601.
- Neumann, S. P. (1984).** "Adaptive Eulerian-Lagrangian Finite Element method for advection-dispersion." *International Journal of Numerical Methods in Engineering* 20: 321-337pp.
- Neville, C. J. (2002).** A Technical Note on Generalized Conjugate Gradient Solver (GCG). Papadopoulos, S. S. and Associates.
- OECD (1986).** *Water Pollution by fertilizers and Pesticides*. Organization for Economic Co-operation and Development. Paris, France, OECD.
- OECD (2005).** *OECD Environmental Data Compendium 2004 Edition*. OECD. Paris, France.
- Ori, G. G. (1989).** "Geological history of the extensional basin of the Gulf of Corinth (?Miocene-Pleistocene), Greece." *Geology* 17: 918-921.
- Perissoratis, C., Piper, D. J. W. and Lykousis, V. (2000).** "Alternating marine and lacustrine sedimentation during late Quaternary in the Gulf of Corinth rift basin, central Greece." *Marine Geology* 167: 391-411.

- Pinder, G. F. and Bredehoeft, J. D. (1968).** "Application of Digital Computer for Aquifer Evaluation." *Water Resources Research* 4(5): 1069-1093.
- Pinder, G. F. and Gray, W. G. (1977).** *Finite Element Simulation in Surface and Subsurface Hydrology*. San Diego, Academic Press.
- Press, W. H., Flannery, S. A. and Teukolsky, W. T. (1986).** *Numerical Recipes*, University of Cambridge Press.
- Prickett, T. A. (1975).** *Modelling Techniques for Groundwater Evaluation*. New York, Academic Press.
- Prickett, T. A. and Lonquist, C. G. (1971).** *Selected Digital Computer Techniques for Groundwater Resource Evaluations*. Champaign, IL, Illinois State Water Survey. Bulletin 55.
- Psarropoulou, E. and Karatzas, G. P. (2001).** *Field Studies of Nitrate Mass Transfer in the Coastal Aquifer of Corinth, Greece*. 7th International Conference on Environmental Science and Technology, Ermoupolis, Syros, Greece.
- Ramachandra Rao, A. and Hamed, K. (2003).** "Multi-taper method of analysis of periodicities in hydrologic data." *Journal of Hydrology* 279(1-4): 125-143.
- Reynolds-Vargas, J. S. and Richter, D. D. (1995).** "Nitrate in Groundwaters of the Central Valley, Costa Rica." *Environment International* 21(1): 71-79.
- Roberts, G. P. and Koukouvelas, I. (1996).** "Structural and seismological segmentation of the Gulf of Corinth fault system: Implications for models of fault growth." *Annali di Geologia* 39: 619-646.
- Rubin, J. (1983).** "Transport of reacting solutes in porous media; relation between mathematical nature of problem formulation and chemical nature of reactions." *Water Resources Research* 19(5): 1231-1252pp.
- Rubin, J. and Steinhardt, R. (1963).** "Soil Water Relations during rain Infiltration : I. Theory." *Soil Science Soc. Amer. Proc* 27: 246-251pp.
- Rubin, J., Steinhardt, R. and Reiniger, P. (1964).** "Soil water relations during rain infiltration : II. Moisture content profiles during rains of low intensities." *Soil Science Soc. Amer. Proc* 28: 1-5pp.
- Rubin, Y. and Dagan, G. (1992).** "A Note on Head and Velocity Covariances in Three-Dimensional Flow Through Heterogeneous Anisotropic Porous Media." *Water Resources Research* 28(5): 1463-70.
- Schreiber, M. E. and Bahr, J. M. (2002).** "Nitrate-enhanced bioremediation of BTEX-contaminated groundwater: parameter estimation from natural-gradient tracer experiments." *Journal of Contaminant Hydrology* 55(1-2): 29-56.
- Siddiqi, M., Kumar, R., Fazili, Z., Spiegelhalder, B. and Preussmann, R. (1992).** "Increased exposure to dietary amines and nitrate in a population at high risk of oesophageal and gastric cancer in Kashmir, India." *Carcinogenesis* 13: 1331-1335.
- Smith, G. D., Wetselaar, R., Fox, J. J., Van de Graaff, R. H. M., Moeljohardjo, D., Sarwono, J., Wiranto, Asjari, S. R., Tjojudo, S. and Basuki (1999).** "The origin and Distribution of Nitrate in groundwater from village wells in Kotagede, Yogyakarta, Indonesia." *Hydrogeology Journal* 7: 576-589.
- Spitz, K. and Moreno, J. (1996).** *A practical guide to groundwater and solute transport modeling*. New York, John Wiley.
- Stefatos, A., G. Papatheodorou, G. Ferentinos, M. Leeder and R. Collier (2002).** "Seismic reflection imaging of active offshore faults in the Gulf of Corinth: their seismotectonic significance." *Basin Research* 14(4): 487-502.
- Stevick, E., Pohll, G. and Huntington, J. (2005).** "Locating new production wells using a probabilistic-based groundwater model." *Journal of Hydrology* 303(1-4): 231-246.

- Stumm, W. and Morgan, J. J. (1996).** Aquatic chemistry : chemical equilibria and rates in natural waters /. New York, Wiley.
- Super, M., Heese, H. d. V., MacKenzie, D., Dempster, W., du Plessus, J. and Ferreira, J. (1981).** "An epidemiological study of well water nitrates in a group of south west African/Namibian infants." Water Research 15: 1265-1270.
- Theocharopoulos, S. P., Karayianni, M., Gatzogianni, P., Afentaki, A. and Aggelidis, S. (1993).** "Nitrogen Leachnig from Soils in the Kopais area of Greece." Soil Use and management 9(2): 76-84.
- Tiangu, X. and Van der Gun, J. A. M. (1996).** "Predicting land subsidence with a constant-parameter coupled model for groundwater flow and aquitard compaction." International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 33(8): 344A.
- Todd, D. K. and Mays, L. W. (2005).** Groundwater hydrology / David Keith Todd, Larry W. Mays. Hoboken, Wiley.
- Trescott, P. C. (1975).** Documentation of Finite Difference Model for Simulation of Three-Dimensional Groundwater Flow, US Geological Survey. Open File Report 75-438: 32pp.
- Trescott, P. C. and Larson, S. P. (1975).** Supplement to open File Report 75-438, Documentation of Finite Difference Model for Simulation of Three-Dimensional Groundwater Flow, US Geological Survey. Open File Report 76-591: 21pp.
- Trescott, P. C., Pinder, G. F. and Larson, S. P. (1976).** Finite Difference Model for Aquifer Simulation in Two Dimensions with Results of Numerical Experiments. Techniques of Water Recourses Investigations, US Geological Survey. Chapter C1, Book 7: 116pp.
- Valensise, G. and Ward, S. N. (1991).** "Long-term uplift of the Santa Cruz coastline in response to repeated earthquakes along the San Andreas fault." Bull. Seismol. Soc. Am. 81: 1694-1704.
- van Maanen, J., van Dijk, A., Mulder, K., de Baets, M., Menheere, P., van der Heide, D., Mertens, P. and Kleinjans, J. (1994).** "Consumption of drinking water with high nitrate levels causes hypertrophy of the thyroid." Toxicology Letters 72: 365-374.
- Vinten, A. J. A., Vivian, B. J., Wright, F. and Howard, R. S. (1994).** "A comparative study of nitrate leaching from soils of differing textures under similar climatic and cropping conditions." Journal of Hydrology 159(1-4): 197-213.
- Walton, W. C. (1979).** "Progress in Analytical Groundwater Modelling." Journal of Hydrology 43: 149-159.
- Wang, H. F. and Anderson, M. P. (1982).** Introduction to Groundwater modelling. Finite Difference and Finite Element Methods. San Francisco, W. H. Freeman and Company.
- Weinstein, H. C., Stone, H. L. and Kwan, T. V. (1969).** " Iterative procedure for solution of systems of parabolic and elliptic equations in three dimensions." Industrial Engineering Fundamentals 8(2): 281-287pp.
- Welty, C. and Gelhar, L. W. (1992).** "Simulation of Large-Scale Transport of Variable-Density and Viscosity Fluids Using a Stochastic Mean Model." Water Resources Research 28(3): 815-828.
- Westaway, R. (2002).** "The Quaternary evolution of the Gulf of Corinth, central Greece: coupling between surface processes and flow in the lower continental crust'." Tectonophysics 348: 269- 318.
- Wild, A. and Babiker, I. A. (1976).** Winter leaching of nitrates at sites in Southern England. Agriculture and Water Quality. Bulletin, M. T. London. No. 32: 153-162.

- Yeh, G. T. (1990).** "A Lagrangian-Eulerian method with zoomable hidden fine-mesh approach to solving advection-dispersion equations." *Water Resources Research* 26(6): 1133-1144pp.
- Zheng, C. and Bennett, G. D. (1995).** *Applied Contaminant Transport Modelling*, John Wiley and Sons.
- Zheng, C. and Wang, P. P. (1998).** MT3DMS. A modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems. US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station-University of Alabama,.
- Εθνικό Κέντρο Περιβάλλοντος & Αειφόρου Ανάπτυξης (2003).** Περιβαλλοντικά Σήματα - Σχέδιο Έκθεσης Δεικτών Αειφορίας,. Αθήνα.
- Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων (2007).** Έκθεση της Επιτροπής για την Εφαρμογή της οδηγίας 91/676/ΕΟΚ σχετικά με την προστασία των υδάτων από την νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης για την περίοδο 2000-2003.
- Καλλέργης, Γ. (1999).** Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία. Αθήνα, Εκδόσεις ΤΕΕ.
- Κούκης, Γ. (1994).** Προκαταρκτική Γεωτεχνική -Τεχνοοικονομική Έρευνα του Ν. Κορινθίας. Τελική Έκθεση Ερευνητικού Προγράμματος, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας.
- Κουμαντάκης, Ι., Παναγόπουλος, Α., Βουδούρης, Κ. and Σταυρόπουλος, Ξ. (1999).** Υδρογεωλογική Έρευνα Τεχνητού Εμπλουτισμού Υπόγειων Υδροφορέων της Παραλιακής και Ημιλοφώδους ζώνης του Ν. Κορινθίας. Τελική Έκθεση ερευνητικού προγράμματος, ΕΜΠ. Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών.
- Μιμίκου, Μ. α. (1994).** Τεχνολογία Υδατικών Πόρων. Αθήνα, Παπασωτηρίου.
- Μπορνόβας, Ι., Λαλέχος, Ν. and Φιλιππάκης, Ν. (1972).** Φύλλο "Κόρινθος", ΙΓΜΕ.
- Σούλιος, Γ. ρ. (1986).** Γενική Υδρογεωλογία. Θεσσαλονίκη, University Studio Press.
- Τσακίρης, Γ. (1995).** Υδατικοί Πόροι : Ι. Τεχνική Υδρολογία. Αθήνα, Εκδόσεις Συμμετρία.