ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

Προσομοίωση της υπόγειας ροής με τον κώδικα Modflow. Εφαρμογή σε υδροφορείς του Ελληνικού χώρου. (Προσχωματική λεκάνη Ελασσόνας – Τσαρίτσανης Νομού Λάρισας)

ΚΑΡΑΠΙΛΑΦΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΓΕΩΛΟΓΟΣ

ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών

Εφαρμοσμένης & Περιβαλλοντικής Γεωλογίας

Θεσσαλονίκη 2008

06/07/2010 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Επιθυμώ να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στα πρόσωπα που έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στη διεκπεραίωση αυτής της διατριβής ειδίκευσης. Έτσι, αρχικά, ευχαριστώ θερμά τον Επίκουρο καθηγητή του τμήματος κ. Κωνσταντίνο Βουδούρη, υπεύθυνο ανάθεσης του θέματος και επίβλεψης της παρούσας εργασίας. Η συνεχής καθοδήγηση, εμπιστοσύνη και συνέπειά του συνέβαλαν απεριόριστα στην πραγματοποίηση μιας παραγωγικής δουλείας.

Επίσης, πολύτιμη υπήρξε η προσφορά του καθηγητή του τμήματος Γεωλογίας Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης κ. Γεωργίου Σούλιου. Οι γνώσεις, που μου εμφύτευσε και οι συμβουλές, που πρόθυμα μου προσέφερε καθοδήγησαν τη διατριβή μου.

Ακόμη, ευγνωμονώ τον υδρογεωλόγο του Ι.Γ.Μ.Ε. κ. Αντώνη Μανάκο για το χρόνο που διέθεσε παραθέτοντάς μου στοιχεία σχετικά με την περιοχή, τα οποία αποτέλεσαν πολύτιμη βοήθεια στη συγκρότηση μιας αξιόπιστης εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ τους υποψήφιους διδάκτορες, Χρήστο Μυρίουνη και Νεραντζή Καζάκη, για τις συμβουλές και τη βοήθειά τους.

06/07/2010 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	Σελίδα
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
1.1 Γενικά.	4
1.2 Αντικείμενο και σκοπός της μελέτης.	4
1.3 Μεθοδολογία έρευνας.	5
1.4 Διαθέσιμα και υφιστάμενα στοιχεία.	6
2. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΚΑΙ ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	7
2.1 Γεωγραφικά στοιχεία της περιοχής.	7
2.2 Γεωμορφολογικά στοιχεία της περιοχής.	8
3. ΓΕΩΛΟΓΙΑ – ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	10
3.1 Γεωλογία της λεκάνης μελέτης.	10
3.2 Τεκτονική της λεκάνης μελέτης.	22
4. ΥΔΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ	23
4.1 Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα.	23
4.2 Θερμοκρασιακά δεδομένα.	26
5. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	29
5.1 Υδρογεωλογία της λεκάνης μελέτης.	29
5.2 Υδρολογικό ισοζύγιο.	29
5.3 Γεωμετρικά στοιχεία υδροφορέων.	32
5.4 Υδρολιθολογικά στοιχεία υδροφορέων.	36
5.5 Πιεζομετρική κατάσταση υδροφορέων.	39
5.6 Αποθέματα της λεκάνης	51
➢ ***Ρυθμιστικά αποθέματα.***	52
➢ ***Μόνιμα αποθέματα.***	53
➢ ***Εκμεταλλεύσιμα αποθέματα.***	53
6. Ο ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗΣ MODFLOW	55
6.1 Γενικά.	55
6.2 Η εξίσωση της ροής.	56
6.3 Αριθμητικό σχήμα επίλυσης – Διακριτοποίηση του πεδίου.	57
6.4 Προσομοίωση γεώτρησης στο MODFLOW.	61
6.5 Μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επίλυση των αλγεβρικών εξισώσεων από το MODFLOW.	64
6.6 Βασικά υποπρογράμματα του MODFLOW.	65
6.7 Φάσεις της προσομοίωσης.	69
7. ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ GMS 6.0	70
7.1 Το κύριο μενού.	70
7.2 Η παλέτα εργαλείων.	71
7.3 Το παράθυρο σύνταξης.	75
7.4 Το παράθυρο των χρονικών βημάτων.	75
7.5 Η μπάρα ιδιοτήτων.	76
7.6 Ο Εξερευνητής λειτουργίας.	76

06/07/2010 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

7.7 Το παράθυρο γραφικής απεικόνισης.	77
8. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ	78
8.1 Γενικά.	78
8.2 Σχηματοποίηση και διακριτοποίηση του υδροφορέα.	79
8.3 Προσδιορισμός των υδραυλικών χαρακτηριστικών του υδροφορέα.	82
➢ **Προσδιορισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας.**	82
➢ **Προσδιορισμός της κατείσδυσης (Recharge).**	83
➢ **Προσδιορισμός των γεωτρήσεων εκροής και εισροής.**	83
➢ Γεωτρήσεις εκροής.	83
➢ Γεωτρήσεις εισροής.	85
8.4 Προσδιορισμός των αρχικών πιεζομετριών (Starting Heads) και των σημείων παρατήρησης (Observation Points).	87
9. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ MODFLOW	90
9.1 Εφαρμογή σε σταθερές συνθήκες (Steady State).	90
9.2 Υποθετικά σενάρια.	93
➢ ***Σενάριο 1ο***	93
➢ ***Σενάριο 2ο***	96
➢ ***Σενάριο 3ο***	98
➢ ***Σενάριο 4ο (τεχνητός εμπλουτισμός).***	101
9.3 Εφαρμογή σε μεταβαλλόμενες συνθήκες (Transient case) .	106
➢ ***Ρύθμιση του μοντέλου σε μεταβαλλόμενες συνθήκες (Transient case).***	106
➢ ***Πρώτη περίοδος (Stress Period 1).***	108
➢ ***Δεύτερη περίοδος (Stress Period 2).***	111
10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	114
11. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	118
12. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	123

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά.

Η παρούσα εργασία αποτελεί Διατριβή στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών Εφαρμοσμένης και Περιβαλλοντικής Γεωλογίας και εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας του Τμήματος Γεωλογίας Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

1.2 Αντικείμενο και σκοπός της μελέτης.

Το πεδινό τμήμα της λεκάνης Ελασσόνας – Τσαρίτσανης του Νομού Λάρισας τυγχάνει εντατικής καλλιέργειας τα τελευταία χρόνια, με αποτέλεσμα τη συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση υδατικών πόρων για αρδευτική χρήση.

Στην περιοχή, συνήθως, καλλιεργούνται σιτάρι, καλαμπόκι, καπνός και τριφύλλι των οποίων οι αρδευτικές ανάγκες καλύπτονται κύρια από ένα εκτεταμένο δίκτυο υδρογεωτρήσεων. Οι αντλούμενες όμως ποσότητες υπόγειου νερού υπερβαίνουν σε ετήσια βάση το φυσικό ρυθμό εμπλουτισμού και αυτό έχει ως συνέπεια την εγκατάσταση αρνητικών ισοζυγίων και την ποσοτική μείωση των αποθεμάτων του υπογείου νερού. Γεγονός που αντικατοπτρίζεται από την πτώση της στάθμης του υπογείου νερού τα τελευταία χρόνια στην περιοχή (εικόνες 5.6 και 5.7).

Η παρούσα εργασία στοχεύει στη δημιουργία ενός μοντέλου προσομοίωσης του υπογείου υδροφορέα της λεκάνης Ελασσόνας – Τσαρίτσανης βασισμένου στον αριθμητικό προσομοιωτή Modflow.

Σκοπός της προσομοίωσης, της ροής του υδροφορέα της λεκάνης Ελασσόνας – Τσαρίτσανης είναι:

- Να διερευνηθεί, εάν είναι ρεαλιστικές οι εκτιμήσεις των συνιστωσών του υδρολογικού ισοζυγίου του υδροφορέα - όπως αυτές παρουσιάζονται στο 5ο κεφάλαιο.
- Να προσομοιωθεί η ροή των υπογείων νερών.

06/07/2010 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

- Να προσδιορισθεί ο κίνδυνος μείωσης των αποθεμάτων του υπογείου νερού.
- Να εκτιμηθεί η ποσοτική κατάσταση του υδροφορέα υπό το καθεστώς διαφόρων διαχειριστικών σεναρίων.

1.3 Μεθοδολογία έρευνας.

Για την επίτευξη των παραπάνω, εξετάζονται διάφορα σενάρια σχετικά με τις τιμές των συνιστωσών του υδρολογικού ισοζυγίου.

Κριτήριο αξιολόγησης των διαφόρων σεναρίων συνιστά το κατά πόσο με τα σενάρια αυτά προσεγγίζονται ικανοποιητικά μετρήσεις της υπόγειας στάθμης των υδάτων. Μονοσήμαντη απάντηση στο ερώτημα δίνεται μόνο, εφόσον τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα είναι γνωστά.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται στοιχεία, τόσο από επί τόπου μετρήσεις που γίνανε, όσο και από δημοσιευμένα στοιχεία του Ι.Γ.Μ.Ε. για τη λεκάνη Ελασσόνας – Τσαρίτσανης.

Η διαδικασία που ακολουθείται για την επίτευξη των προαναφερθέντων στόχων είναι η έξης:

- Με τη μέθοδο Kriging, προσδιορίζεται η κατανομή της υδραυλικής αγωγιμότητας στο τμήμα του υδροφορέα που μελετάται.
- Για τα διάφορα σενάρια - σχετικά με τις τιμές των συνιστωσών του υδρολογικού ισοζυγίου - διερευνάται η δυνατότητα να προσεγγισθούν οι μετρημένες τιμές της στάθμης, μεταβάλλοντας τις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας - όπως προκύπτουν από τη μέθοδο Kriging - δηλαδή πολλαπλασιάζοντας ομοιόμορφα όλες τις τιμές με ένα σταθερό παράγοντα.

Ένα σενάριο θεωρείται πιθανό, εφόσον οι τιμές της στάθμης που υπολογίζονται στις θέσεις των γεωτρήσεων για το μήνα Μάιο (δηλαδή πριν την έναρξη της περιόδου άντλησης) προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις τιμές της στάθμης που προκύπτουν από τις μετρήσεις.

06/07/2010 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Οι λόγοι επιλογής της στάθμης κατά το μήνα Μάιο, για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τις μετρήσεις, είναι οι εξής:

- Η στάθμη του υπογείου νερού στις γεωτρήσεις τη συγκεκριμένη περίοδο έχει μεγαλύτερη χρονική απόσταση από την προηγηθείσα περίοδο άντλησης που τελείωσε τον Οκτώβριο. Έτσι, οι τιμές της στάθμης απαλλάσσονται από πιθανά σφάλματα που παρουσιάζουν οι μετρήσεις κατά τις περιόδους άντλησης.
- Οι υπολογιζόμενες τιμές της στάθμης, κατά τις περιόδους λειτουργίας των γεωτρήσεων, παρουσιάζουν σφάλματα λόγω της διαφοράς μεταξύ των διαστάσεων των κελιών του κανάβου και της διαμέτρου των γεωτρήσεων.

Για τη συγκριτική αξιολόγηση των πιθανών σεναρίων χρησιμοποιείται ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης - μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων χρονοσειρών της στάθμης - καθώς επίσης και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των υπολογισμένων χρονοσειρών.

Η προσομοίωση της ροής στον υδροφορέα της λεκάνης Ελασσόνας – Τσαρίτσανης γίνεται με τον αριθμητικό προσομοιωτή MODFLOW (αναπτύχθηκε από τους, Mc Donald και Harbaugh 1998). Πρόκειται για ένα τρισδιάστατο μοντέλο υπόγειας ροής πεπερασμένων διαφορών. Συνοπτική περιγραφή του MODFLOW δίνεται στο 6^{ο} κεφάλαιο.

1.4 Διαθέσιμα και υφιστάμενα στοιχεία.

Τα διαθέσιμα και υφιστάμενα στοιχεία για τη μελέτη αυτή είναι τα ακόλουθα :

- Το φύλλο Ελλασών των τοπογραφικών χαρτών με κλίμακα 1:50.000 της Γ.Υ.Σ.
- Το φύλλο Ελλασών των Γεωλογικών χαρτών με κλίμακα 1:50.000 του Ι.Γ.Μ.Ε.
- Δεδομένα για τη λεκάνη μελέτης από το Ι.Γ.Μ.Ε.
- Δεδομένα για τη λεκάνη μελέτης από επί τόπου συλλογή τους.

06/07/2010 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

2. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΚΑΙ ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ.

2.1 Γεωγραφικά στοιχεία της περιοχής.

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο κεντρικό τμήμα της Θεσσαλίας και ανήκει στο Νομό Λαρίσης.

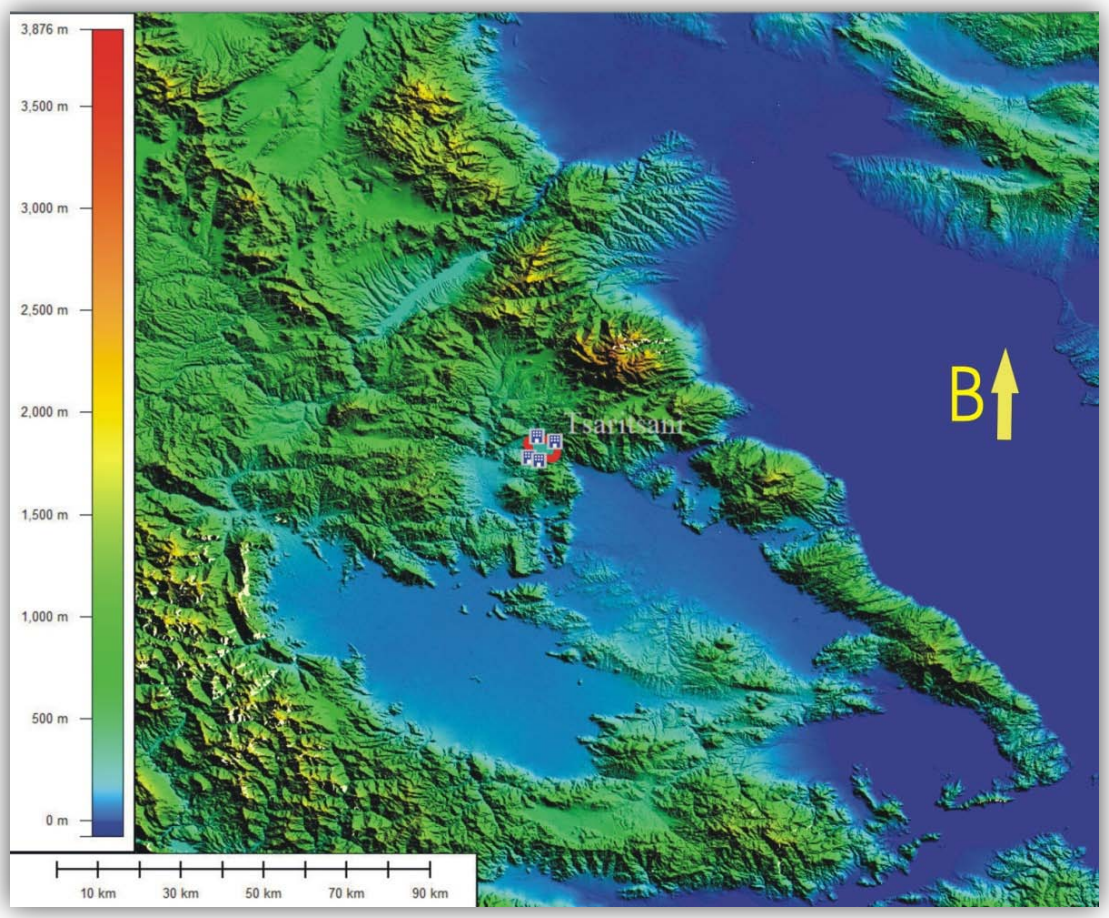
Η λεκάνη συνορεύει στα Βόρεια με την πόλη της Ελασσόνας, στα Ανατολικά - Βορειοανατολικά με το χωριό Τσαρίτσανη και στα Νότια - Νοτιοδυτικά με το χωριό Στεφανόβουνο και Γαλανόβρυση.

Στο Βόρειο τμήμα της λεκάνης δεσπόζει μέρος του Ελασσονίτικου Ποταμού. Μικρό κομμάτι της περιοχής καταλαμβάνει η πόλη της Ελασσόνας. Η υπόλοιπη λεκάνη αποτελεί – στο μεγαλύτερο τμήμα - καλλιεργήσιμη έκταση.

Εικόνα 2.1 Γεωγραφική θέση της λεκάνης μελέτης.

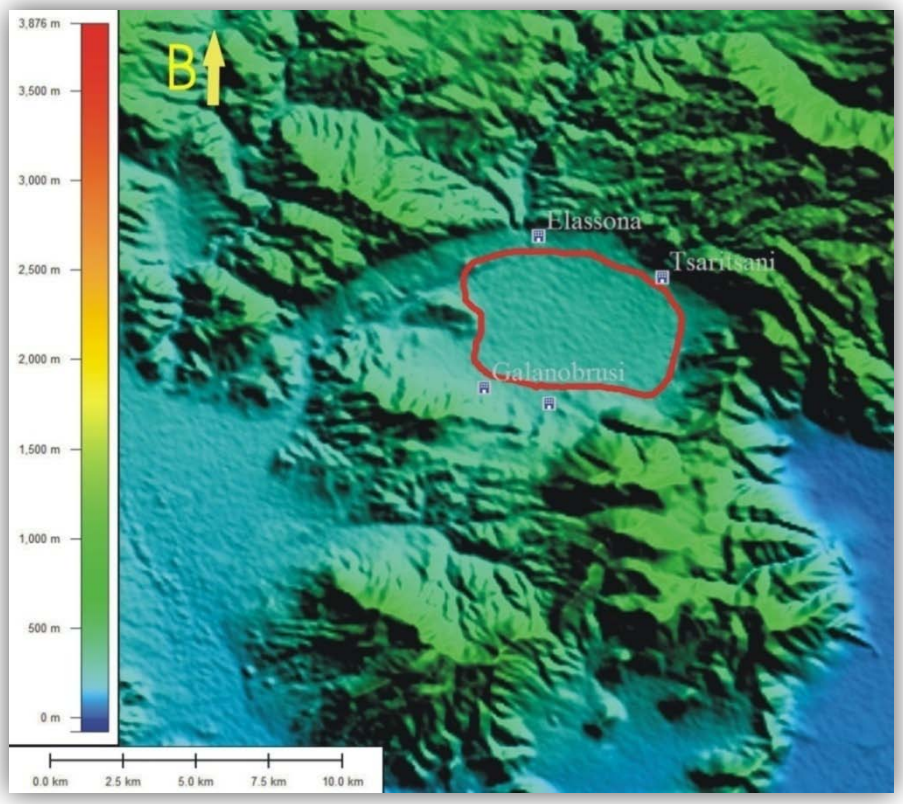
2.2 Γεωμορφολογικά στοιχεία της περιοχής.

Η συνολική έκταση της περιοχής μελέτης είναι 22,36 km^2 με ομοιόμορφη κατανομή στα διάφορα υψόμετρα. Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης ανέρχεται σε 265 m. Η συνολική έκτασή της είναι πεδινή με πολύ ήπιο ανάγλυφο και το υψόμετρό της κυμαίνεται από 251 έως 299 m.



Εικόνα 2.2 Μορφολογικός Χάρτης της περιοχής μελέτης.

Η περιοχή της λεκάνης παρουσιάζει μέτρια επιφανειακή υδροφορία και έχει μέτρια ανεπτυγμένο υδρογραφικό δίκτυο.



Εικόνα 2.3 Μορφολογικός χάρτης της περιοχής μελέτης.

Εικόνα 2.4 Τρισδιάστατη απεικόνιση της περιοχής μελέτης.

3. ΓΕΩΛΟΓΙΑ – ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

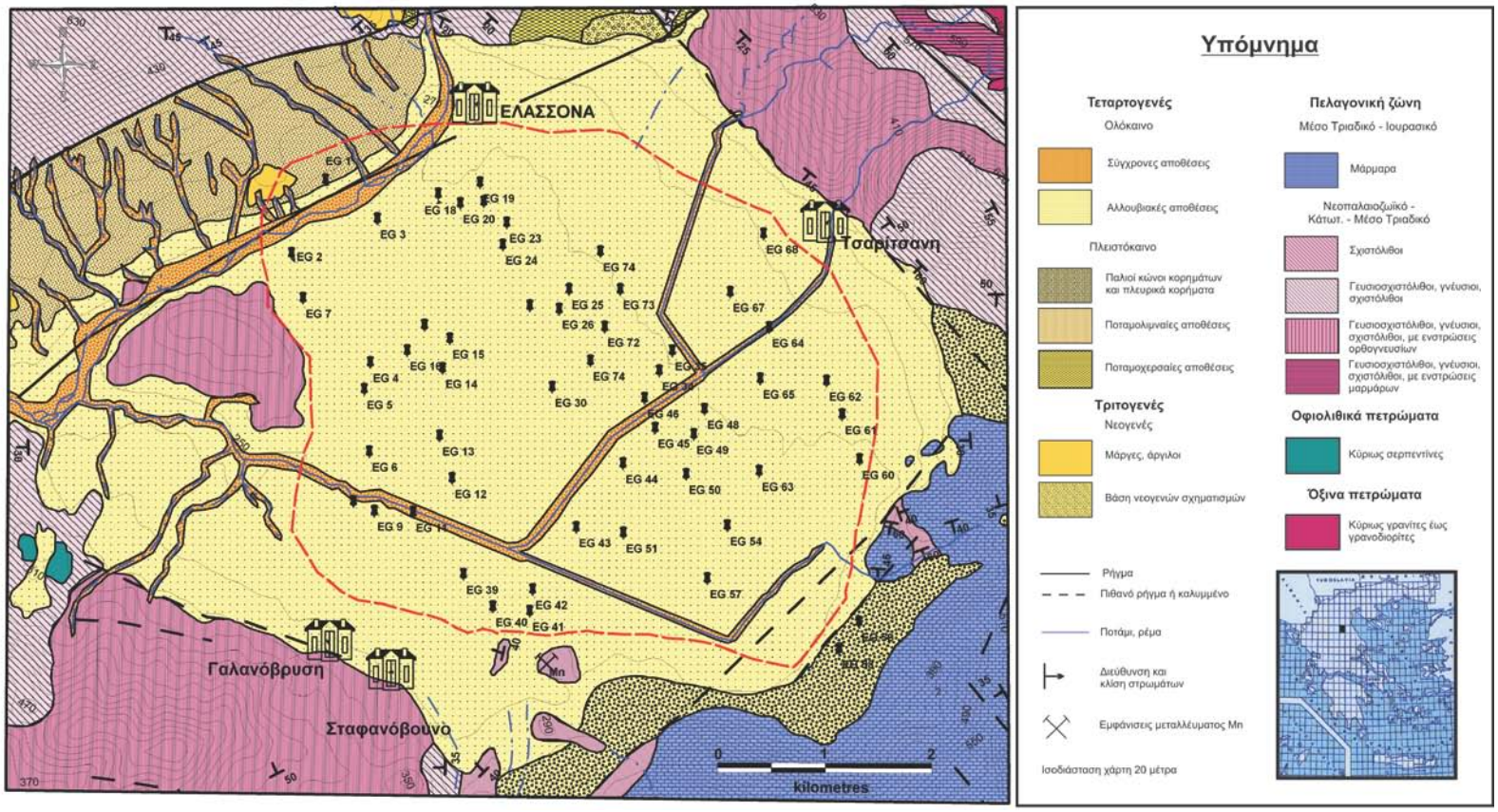
3.1 Γεωλογία της λεκάνης μελέτης.

Η περιοχή αποτελεί τεκτονικό βύθισμα με κύριες διευθύνσεις των αρχικών ρηγμάτων ΒΔ-ΝΑ. Δομείται από γεωλογικούς σχηματισμούς, οι οποίοι ανήκουν στο «τεκτονικό πελαγονικό κάλυμμα» και γεωτεκτονικά η περιοχή ανήκει στην Πελαγονική ζώνη. Το Πελαγονικό κάλυμμα συνίσταται από προαλπικούς και αλπικούς γεωλογικούς σχηματισμούς. Το κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο συνίσταται από γνευσιοσχιστόλιθους, γνεύσιους και σχιστόλιθους, που αποτελούν την κύρια μάζα των Νεοπαλαιοζωϊκών και Κάτω – Μεσοτριαδικών σχηματισμών (Μανάκος – Βουδούρης 2006).

Τα νοτιοανατολικά περιθώρια της λεκάνης δομούν τα μάρμαρα της Πελαγονικής (Μέσο Τριαδικό – Ιουρασικό). Πρόκειται για μεσοστρωματώδη και λιγότερο παχυστρωματώδη έως άστρωτα. Παρουσιάζονται έντονα καρστικοποιημένα και πτυχωμένα. Στα τεκτονικά βυθίσματα της περιοχής, τα οποία δημιουργήθηκαν από την εφελκυστική (θραυσιγενή) τεκτονική που έλαβε χώρα από το Μειόκαινο και μετά, απαντώνται ιζήματα του Νεογενούς και Τεταρτογενούς. Τα ιζήματα του Νεογενούς διακρίνονται σε τρείς επιμέρους σειρές. Η υποκείμενη σειρά περιλαμβάνει το σχηματισμό της βάσεως και αποτελείται από πηλούς, κατά κανόνα αμμούχους και ιλιούχους, με στρώματα ψηφίδων ή και κροκάλων. Η ενδιάμεση σειρά (άνω Μειοκαινικής ηλικίας) περιλαμβάνει τα ιζήματα που φιλοξενούν λιγνιτοφόρα στρώματα και για το λόγο αυτό χαρακτηρίζεται ως λιγνιτοφόρα σειρά. Λιθολογικά συνίσταται κυρίως από αργιλοϊλύες, αμμοαργίλους, άμμους, αργίλους και σπανιότερα από ιλύες ή ιλυόλιθους εύθρυπτους λίγο ασβεστούχους. Η υπερκείμενη σειρά περιλαμβάνει το σχηματισμό Ιλύος. Συνίσταται από αδροκαρστικές αποθέσεις με ασύνδετες έως χαλαρά συνδεδεμένες κροκάλες λατύπες, με άμμους και αμμοαργίλους, καθώς και ογκόλιθους που λιθολογικά είναι ίδιοι με τα παρακείμενα περιθώρια. Από πλευράς ηλικίας τοποθετούνται στο Πλειόκαινο. Ακολουθούν Άνω Πλειστοκαινικές χερσαίες αποθέσεις με πηλούς, αμμοχάλικα και κροκάλες που

06/07/2010 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Γεωλογικός χάρτης της λεκάνης Ελασσόνας - Τσαρίτσανης Νομού Λάρισας



Χάρτης 3.1

συνιστούν ιζήματα αναβαθμίδων ή κώνους κορημάτων. Τέλος, η λιθολογική στήλη ολοκληρώνεται με σύγχρονες αποθέσεις του Ολόκαινου. Πρόκειται για ασύνδετες λατύπες ποικίλου μεγέθους και λιθολογικής σύστασης - κυρίως ανθρακικής - με λεπτομερές υλικό (Μανάκος – Βουδούρης 2006).

Ακολουθεί αναλυτικότερη παρουσίαση του υπομνήματος του γεωλογικού χάρτη:

Τεταρτογενές.

Όλοκαινο

Σύγχρονες αποθέσεις: στις κοίτες των ποταμών και των χειμάρρων και στις νέες αναβαθμίδες τους. Αποτελούνται από κροκάλες και λατύπες ποικίλου μεγέθους και λιθολογικής σύστασης και από άμμους.

Αλλουβιακές αποθέσεις: ποταμολιμναίες αποθέσεις από άμμους και αργίλους, με ασύνδετες κροκάλες, λατύπες και χάλικες, ποικίλης σύστασης.

Πλειστόκαινο.

Παλιοί κώνοι κορημάτων και πλευρικά κορήματα: αδρομερή υλικά με κροκάλες και λατύπες, σχεδόν αποκλειστικά ανθρακικές, συγκολλημένες κατά κανόνα με ανθρακική και λιγότερο αργιλική συγκολλητική ύλη και κοκκινωπό λεπτομερές υλικό. Τα κροκαλοπαγή εμφανίζονται σε πάγκους έως 2,5 m ενώ το συνολικό πάχος φθάνει έως 10 m.

Ποταμολιμναίες αποθέσεις: άργιλοι και άμμοι, με παρεμβολές αδρομερών υλικών. Στο σχηματισμό αυτό έχει δοθεί από τον H. Schneider (1968) πλειστοκαινική ηλικία. Πάχος: έως 15 m.

Ποτομοχερσαίες αποθέσεις: αποτελούνται από αργιλοαμμώδη υλικά, με ασύνδετες ή, σπανιότερα, χαλαρά συνδεδεμένες κροκάλες, λατύπες και κομμάτια συνήθως αποστρογγυλεμένα, γνευσιακής και γνευσιοσχιστολιθικής προέλευσης, που κατά θέσεις εμφανίζονται σε στρώσεις. Στους χαμηλότερους ορίζοντες, τα γνευσιακά - γνευσιοσχιστολιθικά κομμάτια είναι περισσότερα και ογκωδέστερα, με διάμετρο που

ξεπερνάει τα 2 m, ενώ στους ψηλότερους ορίζοντες μειώνονται σημαντικά και σε ποσοστό και σε μέγεθος. Πάχος: έως 80 m.

Τριτογενές.

Νεογενές.

Μάργες, άργιλοι: οι μάργες είναι υπόλευκες, εύθρυπτες και σπανιότερα σκληρές, εναλλασσόμενες με αργιλομαργαϊκό υλικό και με ενστρώσεις μαργαϊκών ασβεστόλιθων σε πάγκους πάχους έως 50 cm. Οι άργιλοι είναι κυρίως υπόλευκες και σπανιότερα κοκκινωπές έως κοκκινοκίτρινες, εύθρυπτες ή και σκληρές. Περιέχουν ασύνδετες κροκάλες και λατύπες ανθρακικές και γνευσιακές καθώς και κροκαλοπαγή και λατυποπαγή, με στοιχεία ανθρακικά, γνευσιακά και χαλαζιακά. Ενστρώσεις ψαμμιτών από χονδρόκοκκους και λεπτόκοκκους ψαμμίτες, σε πάγκους πάχους έως 40 cm, παρατηρούνται στο σχηματισμό αυτόν, ενώ στους ψηλότερους ορίζοντες του, παρατηρείται άμμος με ασύνδετα χαλίκια σε στρώσεις πάχους περίπου 20 cm. Στις υπόλευκες αργίλους συχνή είναι η παρουσία ιχνών φύλλων, βλαστών και σπόρων. Πάχος: 180 m περίπου.

Βάση νεογενών σχηματισμών: από ανθρακικά κροκαλοπαγή, γνευσιακά κροκαλο-λατυποπαγή και κομμάτια μαρμάρου ποικίλου μεγέθους. Μέγιστο πάχος: 50 m.

Πελαγονική ζώνη.

Μέσο Τριαδικό – Ιουρασικό.

Μάρμαρα: αποτελούν την κανονική προς τα πάνω εξέλιξη των παλαιοζωικών - κάτω μεσοτριαδικών σχηματισμών. Κυρίως μεσοστρωματώδη και λιγότερο παχυστρωματώδη έως άστρωτα. Κατά θέσεις γίνονται δολομιτικά ή ακόμη και αδροκρυσταλλικοί δολομίτες, ιδιαίτερα στα κατώτερα μέλη. Λευκά και ροδόλευκα στα κατώτερα μέλη, και τεφρά έως σκοτεινότεφρα, βιτουμενιούχα στα ανώτερα. Καρστικά, τεκτονισμένα και πτυχωμένα με περισσότερα του ενός συστήματα πτυχών.

Νεοπαλαιοζωικό – Κατώτ. Μέσο Τριαδικό.

Στην περιοχή Δ-ΝΔ και Ν. του Δομένικου, κοντά στην επαφή τους με τους υποκείμενους σχιστόλιθους και μέσα στα μάρμαρα, παρατηρούνται εμφανίσεις

μεταλλεύματος Μαγγανίου (Mn). Η μεταλλοφορία απαντάται με μορφή φλεβιδίων ή εμποτισμάτων μέσα στα μάρμαρα, είναι δε πλουσιότερη μέσα ή κοντά σε διακλάσεις και ρήγματα. Κοντά στη βάση τους, στην περιοχή του Κεφαλόβρυσου, μέσα σε κρυσταλλικούς δολομίτες, βρέθηκε από τους Γ. Κατσικάτσο και Γ. Μιγκίρο μικροπανίδα του Μέσου Τριαδικού αποτελούμενη από: Meandrospira dinarica και ελάχιστα Οστρακώδη (ο προσδιορισμός έγινε από τη Δρ. Σ. Τσαϊλά - Μονόπωλη). Το πάχος τους ξεπερνάει τα 500 m.

Οι νεοπαλαιοζωικοί - κάτω μεσοτριαδικοί σχηματισμοί, καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση στο φύλλο. Η μετάβαση τους προς το υποκείμενο προ-λιθανθρακοφόρο γνευσιακό υπόβαθρο της Πελαγονικής είναι κανονική, χωρίς την ύπαρξη ασυμφωνίας, ο δε χωρισμός τους είναι δύσκολος.

Σχιστόλιθοι: αποτελούν τα ανώτερα μέλη των νεοπαλαιοζωικών - κάτω μεσοτριαδικών σχηματισμών. Πρόκειται για:

- Σερικιτικούς σχιστόλιθους - ηφαιστειογενούς πιθανώς προέλευσης - με ιστό μικρό κρυσταλλικό-λεπιδοβλαστικό και υφή σχιστώδη. Κύρια ορυκτά: σερικίτης, χαλαζίας, λιγότερο, ασβεστίτης. Δευτερεύοντα: ζιρκόνιο, απατίτης, τιτανίτης.
- Πρασινοσχιστόλιθους με ιστό κοκκολεπιδοβλαστικό και υφή προσανατολισμένη και πτυχωμένη. Κύρια ορυκτά: χαλαζίας, αλβίτης, επίδοτα, σερικίτης, χλωρίτης, ακτινόλιθος. Δευτερεύοντα: τιτανίτης, οξείδια-υδροξείδια του σιδήρου.
- Μαρμαρυγιακούς - ακτινολιθικούς σχιστόλιθους με ιστό νηματοβλαστικό και υφή προσανατολισμένη. Κύρια ορυκτά: ακτινόλιθος, λευκός μαρμαρυγίας. Δευτερεύοντα: επίδοτο, τιτανίτης, ρουτίλιο.
- Μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους με ιστό λεπιδοβλαστικό και υφή προσανατολισμένη και πτυχωμένη. Κύρια ορυκτά: μοσχοβίτης, βιοτίτης, χαλαζίας, επίδοτο. Δευτερεύοντα: απατίτης, τιτανίτης.
- Χλωριτικούς - σερικιτικούς - ακτινολιθικούς σχιστόλιθους με ιστό μικροκρυσταλλικό - διαθλαστικό και υφή προσανατολισμένη. Κύρια ορυκτά: ακτινόλιθος, σερικίτης, χλωρίτης, λίγοι άστριοι. Δευτερεύοντα: ορυκτά του τιτανίου.

Οι σχιστόλιθοι αυτοί έχουν υποστεί χαμηλού βαθμού μεταμόρφωση στην πρασινο-σχιστολιθική φάση. Κατά θέσεις, κοντά στην επαφή με τα υπερκείμενα

μάρμαρα, απαντώνται ασβεστιτικοί σχιστόλιθοι με ενστρώσεις μαρμάρων και σιπολινών μικρού πάχους.

Το πάχος τους ποικίλει από λίγα έως 150 m.

Γνευσιοσχιστόλιθοι, γνεύσιοι, σχιστόλιθοι, με ενστρώσεις ορθογνεύσιων (Pzn-T,.m.sch,gn) και μαρμάρων (Pzn-T,.m.mr): αποτελούν την κύρια μάζα των νεοπαλαιοζωικών - κάτω μεσοτριαδικών σχηματισμών. Τα πετρώματα που αναγνωρίστηκαν στο σχηματισμό αυτό είναι δυνατό να διακριθούν στους εξής πετρογραφικούς τύπους: επιδοτιτικοί - διμαρμαρυγιακοί γνευσιοσχιστόλιθοι και γνεύσιοι, επιδοτιτικοί - αμφιβολιτικοί γνεύσιοι, πρασινοσχιστόλιθοι (χλωριτικοί, επιδοτιτικοί, ακτινολιθικοί, μαρμαρυγιακοί και αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι). Ως επουσιώδη ορυκτά σε όλα σχεδόν τα πετρώματα απαντώνται κυρίως ο τιτανίτης και οξείδια του σιδήρου, σπανιότερα ρουτίλιο και απατίτης. Το χρώμα των πετρωμάτων, που ποικίλει ανάλογα με την ορυκτολογική σύσταση, είναι υποπράσινο, υπόλευκο, πρασινότεφρο, καστανότεφρο και τεφροκύανο και μεταβάλλεται από περιοχή σε περιοχή. Τα παραπάνω πετρώματα έχουν υποστεί μεταμόρφωση στα πλαίσια της πρασινοσχιστολιθικής φάσης. Οι ενστρώσεις των ορθογνεύσιων (Pzn -T,.m.gn) είναι πετρώματα με ιστό υπολειμματικό γρανιτικό, έντονα κατακλαστικό και υφή ελαφρά προσανατολισμένη. Τα ορυκτολογικά συστατικά είναι άστριοι (κυρίως μικροκλινής, περθίτες) χαλαζίας και σε μικρότερη αναλογία επίδοτο, ακτινόλιθος, βιοτίτης, ρουτίλιο, τιτανίτης, αλανίτης.

Οι ενστρώσεις μαρμάρων (Pzn-Tim.mr) εμφανίζονται μέσα σε σχιστόλιθους και σπανιότερα σε γνευσιοσχιστόλιθους, ενώ δεν παρατηρούνται μέσα σε γνεύσιους. Είναι αδροκρυσταλλικά μάρμαρα κατά θέσεις δολομιτιωμένα, με σχιστολιθικές παρεμβολές. Λεπτό και μέσο στρωματώδη, χρώματος κυρίως γκρίζου έως μαύρου και κυανόμαυρου, καθώς και παχυστρωματώδη κυρίως λευκά. Το πάχος τους φθάνει τα 150 m. Σε ανάλογες ενστρώσεις μαρμάρων στο φύλλο ΓΟΝΝΟΙ βρέθηκε από τον Γ. Μιγκίρο μικροπανίδα Κωνοδόντων του Κατώτερου (;) - Μέσου Τριαδικού, αποτελούμενη από: Prioniodina (Cypridodella) venusta (HUCKRIEDE), Neobindeodella iriassica (MULLER), Lonchodinci langarica (MOZUR & MOSTLER), Corntidina brevircmiilis minor (KOZUR), Prioniodina kochi (HUCKRIEDE). Οι παραπάνω πετρολογικοί τύποι εναλλάσσονται τόσο κατά στρώση

06/07/2010 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

όσο και πλευρικά, με επικράτηση κατά θέσεις πότε του ενός και πότε του άλλου τύπου. Το συνολικό πάχος του σχηματισμού είναι 600 m περίπου.

Οφιολιθικά πετρώματα.

Εμφανίζονται στο επίπεδο της επώθησης των σχηματισμών της Πελαγονικής ζώνης, πάνω στη σχετικά αυτόχθονη υποκείμενη ανθρακική σειρά, αλλά και μέσα στους παλαιοζωικούς - κάτω - μεσοτριαδικούς επωθημένους σχηματισμούς. Αποτελούνται κυρίως από σερπεντινίτες πράσινου έως καστανοπράσινου χρώματος, πολύ τεκτονισμένους και συχνά σχιστοποιημένους. Πάχος: έως 100 m.

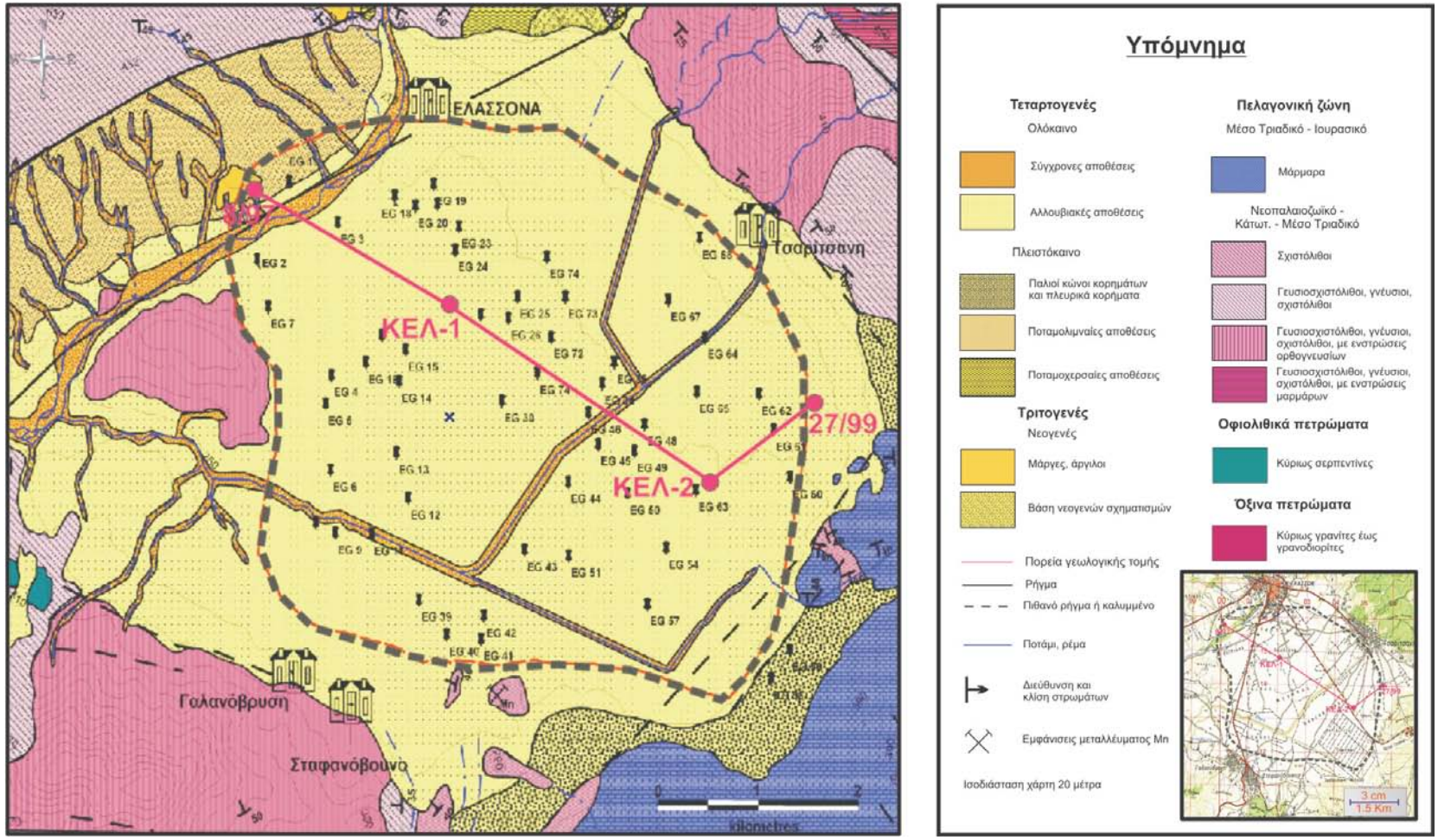
Όξινα πετρώματα.

Πρόκειται για όξινες διεισδύσεις που, στην περιοχή του φύλλου, διατρυπούν σχηματισμούς της Πελαγονικής ζώνης, ενώ δεν θίγουν την αυτόχθονη σειρά, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα πώς η διείσδυση έλαβε χώρα πριν από την επώθηση των σχηματισμών της Πελαγονικής πάνω στην αυτόχθονη σειρά. Αντιπροσωπεύονται κυρίως από γρανίτες έως γρανοδιορίτες. Συχνή είναι η παρουσία απλιτοπηγματιτικών και χαλαζιακών φλεβών. Είναι συνήθως πολύ αποσαθρωμένα και εύθρυπτα πετρώματα με αποτέλεσμα τη δημιουργία λευκής άμμου από τους άστριους. Αποτελούνται κυρίως από χαλαζία, άστριους (μικροκλινή και πλαγιόκλαστα), βιοτίτη, μοσχοβίτη, και λιγότερο πράσινη κεροστίλβη. Σε μικρότερη αναλογία απαντούν χλωρίτης, επίδοτο, τιτανίτης, ζιρκόνιο και απατίτης. Ο ιστός τους είναι γρανιτικός και η υφή τους είναι ακανόνιστη έως πολύ λίγο προσανατολισμένη. Τα πλαγιόκλαστα έχουν υποστεί επιδοτιτίωση, ενώ συχνά ο μοσχοβίτης και ο βιοτίτης παρουσιάζουν ελαφρή εξαλλοίωση σε σερικίτη.

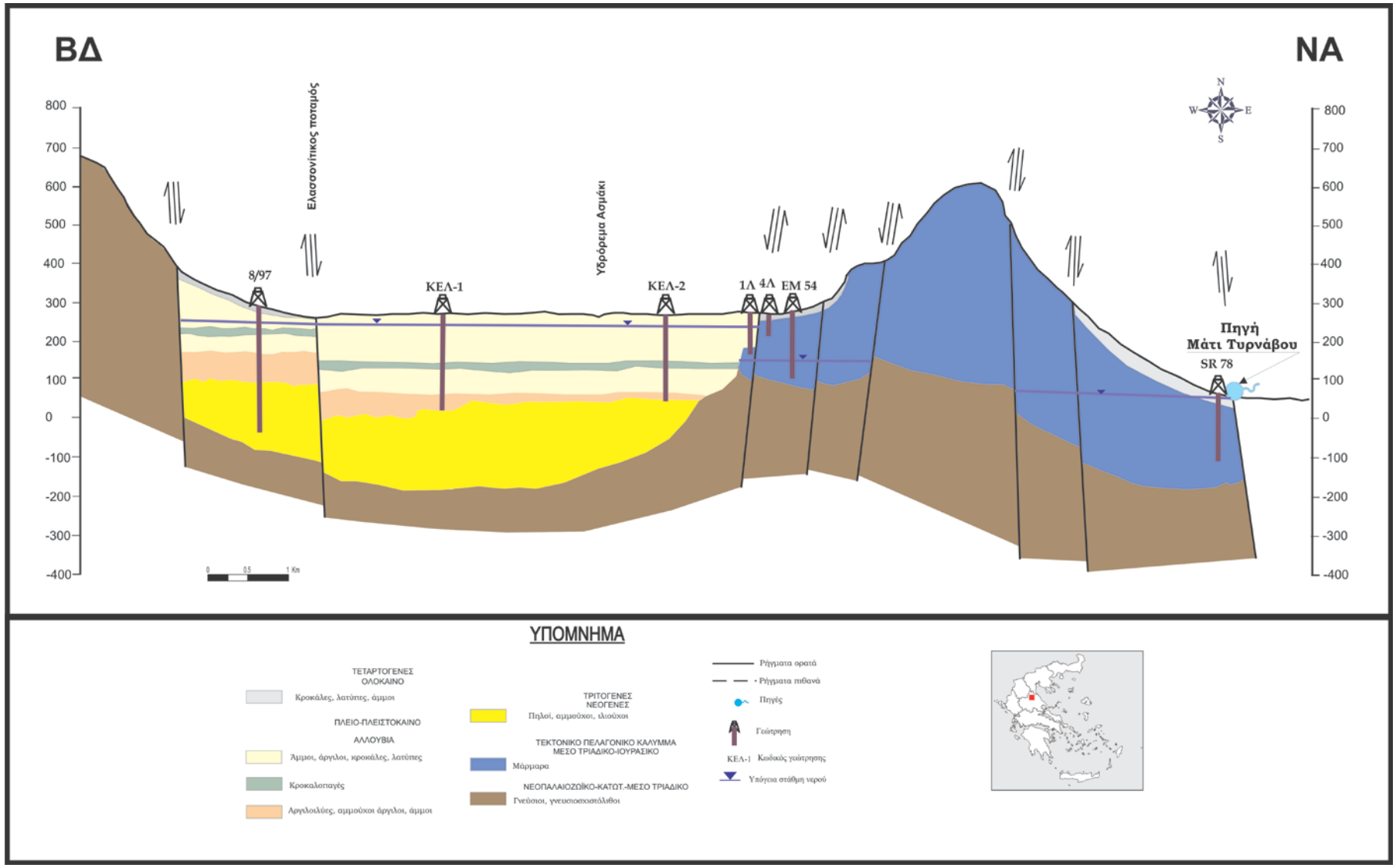
Στην εικόνα 3.1 που ακολουθεί φαίνεται η γεωλογική τομή της περιοχής

06/07/2010 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

Γεωλογικός χάρτης όπου φαίνεται η πορεία της γεωλογικής τομής

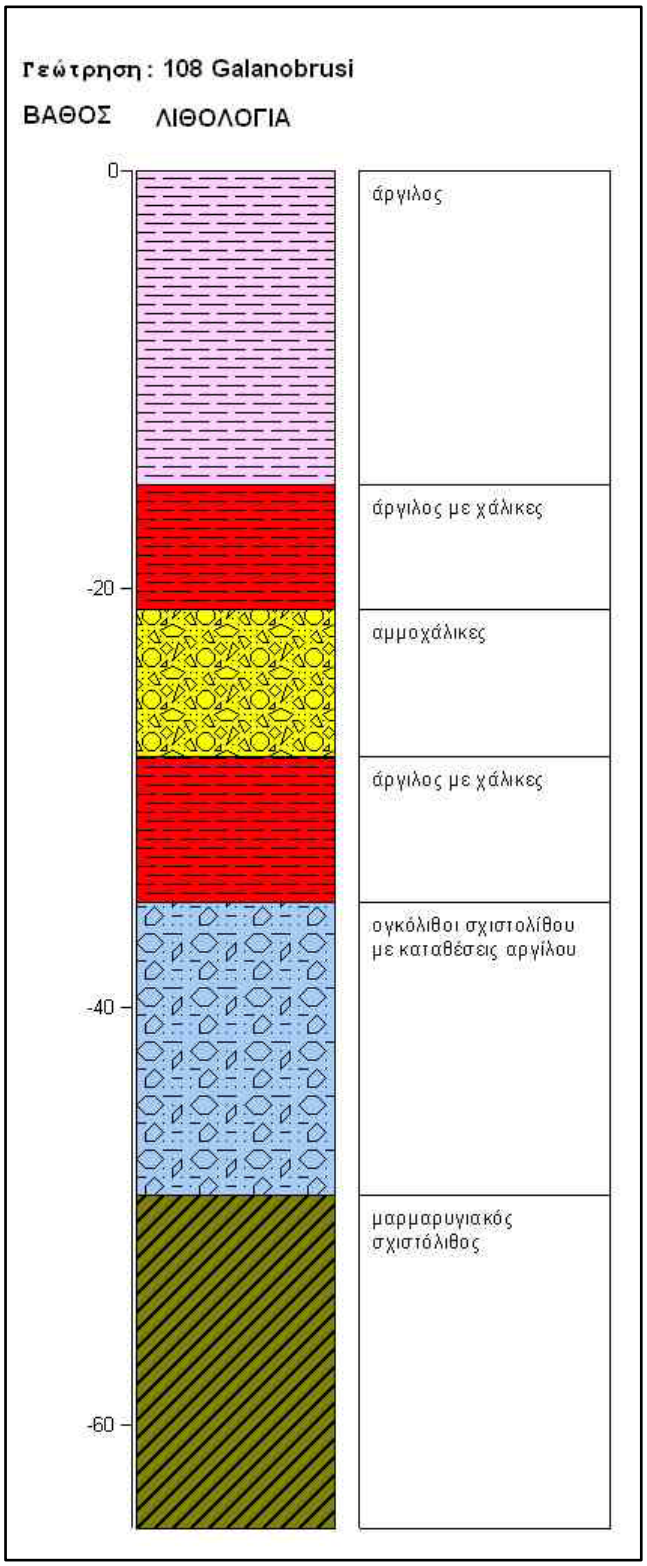


Χάρτης 3.2

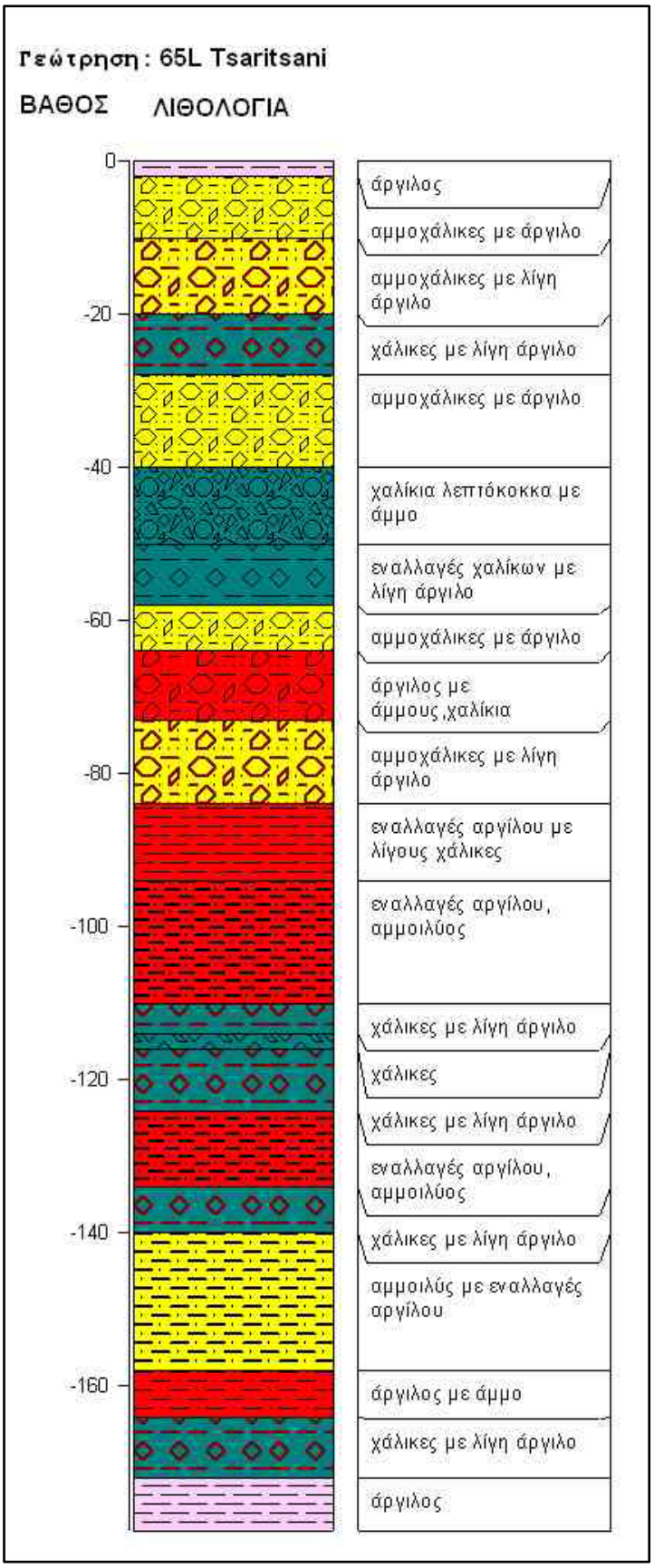


Εικόνα 3.1 Γεωλογική τομή στη λεκάνη μελέτης (Μανάκος Α. 2004)

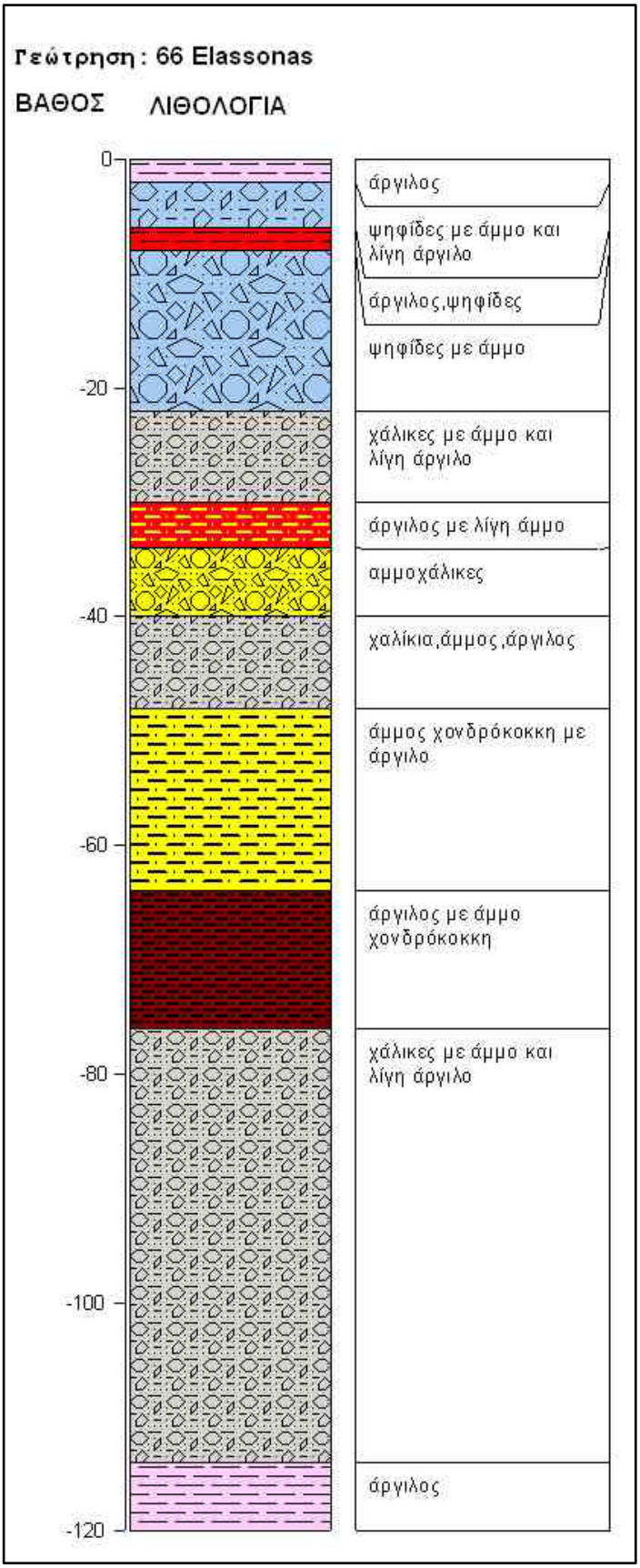
Ενδεικτικά παραθέτουμε τρία προφίλ γεωτρήσεων της περιοχής έρευνας. Η θέση των γεωτρήσεων φαίνεται στο χάρτη 3.1.



Εικόνα 3.2 Γεωλογικό προφίλ της γεώτρησης 108 Γαλανόβρυσης.



Εικόνα 3.3 Γεωλογικό προφίλ της γεώτρησης 65 Λ Τσαρίτσανης.



Εικόνα 3.4 Γεωλογικό προφίλ της γεώτρησης 66 Ελασσόνας.

3.2 Τεκτονική της λεκάνης μελέτης.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί, που απαντούν στη περιοχή, έχουν υποστεί τεκτονική καταπόνηση αντιπροσωπευόμενη από ρήγματα. Αυτά έχουν διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της δομής και εξέλιξης της λεκάνης. Πρόκειται για ρήγματα με ποικίλα γεωμετρικά, κινηματικά, δυναμικά και χρονικά χαρακτηριστικά. Διαπιστώνει κανείς δύο κύριες διευθύνσεις ρηγμάτων. Τα παλαιότερα ρήγματα (κρασπεδικά), που δημιούργησαν την αρχική λεκάνη, είναι Μειοκαινικής ηλικίας και έχουν διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ. Τα νεώτερα ρήγματα με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ, σχεδόν κάθετα στα προηγούμενα, έδρασαν κατά το Πλειο –Πλειστόκαινο και Τεταρτογενές διαμορφώνοντας τη σημερινή εικόνα της λεκάνης (Μανάκος – Βουδούρης 2006).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το κανονικό ρήγμα με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ, που διέρχεται μέσα από την πόλη της Ελασσόνας και διαμόρφωσε την προς ΝΔ πορεία του Ελασσονίτικου ποταμού. Το ρήγμα αυτό βύθισε το Νοτιοανατολικό τμήμα της λεκάνης κατά 100 m περίπου και χώρισε την ενιαία προσχωματική λεκάνη Ελασσόνας – Τσαρίτσανης σε δύο τμήματα διαμορφώνοντας ταυτόχρονα και τις υδρογεωλογικές του συνθήκες. Στο Ανατολικό τμήμα της, που έχει έκταση 32 Km^2 περίπου και το πάχος των αλλούβιων είναι σημαντικό, αναπτύσσεται ο πλούσιος σε υπόγεια νερά προσχωματικός υδροφορέας. Αντίθετα, στο Δυτικό τμήμα της, η επιμήκης υπολεκάνη έκτασης 10 Km^2 δεν παρουσιάζει ιδιαίτερο υδρογεωλογικό ενδιαφέρον.

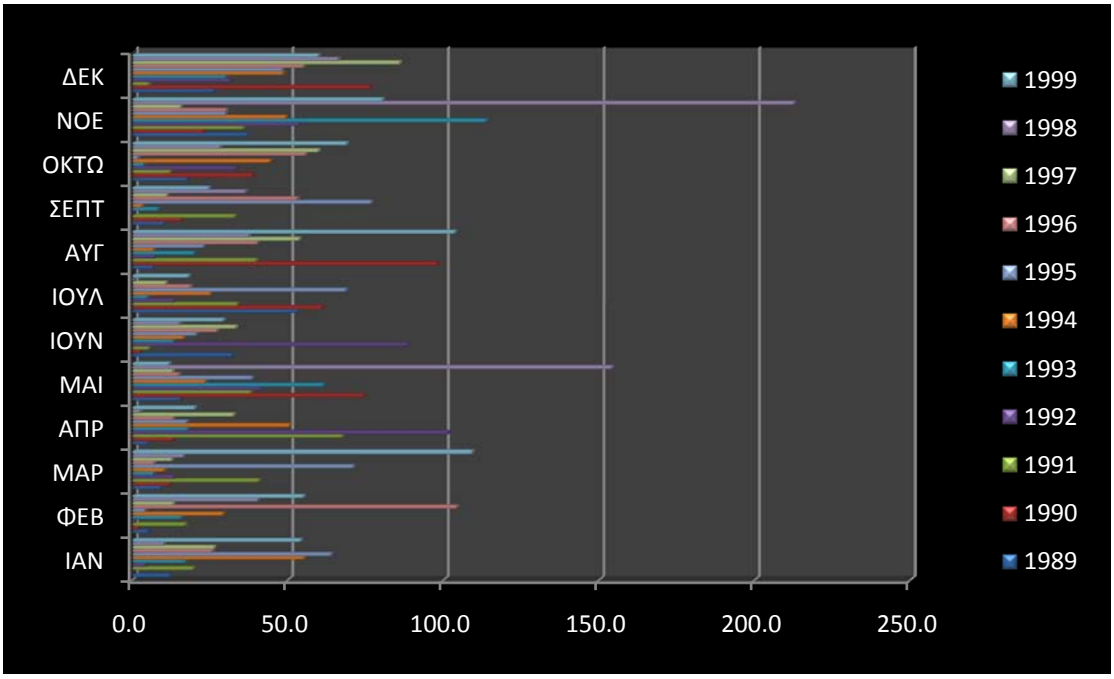
06/07/2010 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

4. ΥΔΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ

4.1 Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα.

Για την περιοχή μελέτης χρησιμοποιούνται στοιχεία από το σταθμό της Ελασσόνας που βρίσκεται σε υψόμετρο 314 μέτρων και είναι ανάλογο με το μέσο υψόμετρο της λεκάνης εφαρμογής του μοντέλου. Η συλλογή των στοιχείων έγινε από το φορέα ΔΕΚΕ για την περίοδο 1971-2000. Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζονται στους πίνακες 4-1 & 4-2.

Στη συνέχεια στην εικόνα 4.1 γίνεται απεικόνιση της διακύμανσης των βροχοπτώσεων από το έτος 1989 έως το 1999 σε μορφή ραβδοδιαγράμματος.



Εικόνα 4.5 Ραβδοδιάγραμμα διακύμανσης των βροχοπτώσεων την περίοδο 1989-1999.

Πίνακας 4-1 Βροχομετρικά δεδομένα από το σταθμό Ελασσόνας.

													ΥΨΟΣ ΒΡΟΧΗΣ			
ΕΤΟΣ	**ΙΑΝ**	**ΦΕΒ**	**ΜΑΡ**	**ΑΠΡ**	**ΜΑΙ**	**ΙΟΥΝ**	**ΙΟΥΛ**	**ΑΥΓ**	**ΣΕΠΤ**	**ΟΚΤΩ**	**ΝΟΕ**	**ΔΕΚ**	**Μηνιαίο**			
													Ολικό	**Μέσο**	**Μέγιστο**	**Ελάχιστο**
	_	_	_	_	_	_	_	_	_	52.7	64.4	53.1				
1971	22.0	83.7	122.5	26.4	93.2	28.6	47.5	10.8	19.6	21.5	47.1	61.5	**584.4**	48.7	122.5	10.8
1972	40.3	75.3	50.4	85.0	65.8	36.5	115.0	42.8	19.2	153.8	7.4	4.2	**695.7**	58.0	153.8	4.2
1973	66.7	50.1	95.1	19.5	5.4	8.9	53.3	46.6	51.0	69.6	39.1	68.7	**574.0**	47.8	95.1	5.4
1974	26.8	56.6	43.5	66.9	28.7	68.6	8.8	3.3	52.3	41.1	60.7	21.3	**478.6**	39.9	68.6	3.3
1975	26.8	40.5	22.3	15.3	27.8	73.7	27.6	67.0	10.2	25.7	40.8	43.6	**421.3**	35.1	73.7	10.2
1976	29.6	52.9	29.3	43.7	112.7	40.9	51.3	53.8	16.4	28.4	56.4	30.6	**546.0**	45.5	112.7	16.4
1977	20.5	22.0	26.7	20.1	31.8	5.6	0.0	4.5	36.9	12.7	38.8	49.6	**269.2**	22.4	49.6	0.0
1978	81.3	39.4	40.7	86.4	34.6	10.4	12.5	3.3	301.0	56.5	19.5	70.3	**755.9**	63.0	301.0	3.3
1979	60.1	58.6	27.7	77.2	53.5	28.4	15.7	57.2	40.7	119.8	226.6	52.5	**818.0**	68.2	226.6	15.7
1980	96.3	36.1	94.8	34.4	112.6	25.3	9.8	22.3	22.0	111.1	45.2	47.9	**657.8**	54.8	112.6	9.8
1981	64.2	37.1	26.2	39.0	_	37.1	_	46.8	6.5	97.9	60.6	77.0	**492.4**	49.2	97.9	6.5
1982	2.8	94.0	45.9	166.5	99.8	10.8	10.4	52.5	23.7	96.2	110.3	44.1	**757.0**	63.1	166.5	2.8
1983	5.0	24.0	47.1	7.3	44.0	100.2	_	20.0	24.4	26.7	72.2	181.6	**552.5**	50.2	181.6	5.0
1984	39.2	55.5	21.2	56.1	1.6	33.8	0.0	85.0	10.0	0.5	51.6	57.2	**411.7**	34.3	85.0	0.0
1985	99.9	16.6	77.6	21.9	42.7	30.8	10.4	0.0	0.0	47.5	151.6	9.7	**508.7**	42.4	151.6	0.0
1986	50.4	104.2	93.7	4.2	78.2	63.0	36.5	6.5	3.4	52.2	19.7	19.9	**531.9**	44.3	104.2	3.4

Πίνακας 4-2 Βροχομετρικά δεδομένα από το σταθμό Ελασσόνας.

													ΥΨΟΣ ΒΡΟΧΗΣ			
ΕΤΟΣ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠΤ	ΟΚΤΩ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	Μηνιαίο			
													Ολικό	Μέσο	Μέγιστο	Ελάχιστο
1987	44.2	31.7	124.7	86.4	70.2	20.8	12.7	38.8	0.9	89.3	77.7	18.3	615.7	51.3	124.7	0.9
1988	20.9	8.6	16.0	7.6	15.8	12.1	29.6	17.1	5.3	14.4	80.3	9.1	236.8	19.7	80.3	5.3
1989	12.0	5.0	9.2	5.0	15.4	32.2	53.0	6.6	10.2	17.6	37.0	26.3	229.5	19.1	53.0	5.0
1990	0.0	2.0	12.1	13.2	74.4	2.6	61.0	98.0	15.7	38.7	23.0	76.4	417.1	34.8	98.0	0.0
1991	19.5	17.0	40.6	67.4	38.0	5.2	33.6	39.7	32.8	12.1	35.6	5.2	346.7	28.9	67.4	5.2
1992	4.4	0.8	13.5	101.6	41.5	88.4	13.3	7.2	0.0	33.4	53.7	31.5	389.3	32.4	101.6	0.0
1993	17.0	15.7	6.8	17.8	61.3	13.2	4.8	19.8	8.2	3.6	113.6	30.0	311.8	26.0	113.6	3.6
1994	55.0	29.0	10.2	50.5	23.4	16.4	25.0	6.6	3.1	44.1	49.2	48.3	360.8	30.1	55.0	3.1
1995	63.7	4.0	70.9	17.4	38.4	20.4	68.5	22.8	76.6	1.8	29.9	48.0	462.4	38.5	76.6	1.8
1996	25.7	104.2	7.0	13.1	14.9	27.2	18.6	40.1	53.0	55.6	30.1	55.0	444.5	37.0	104.2	7.0
1997	26.2	13.1	12.6	32.4	12.9	33.2	10.7	53.5	11.0	59.7	15.4	85.8	366.5	30.5	85.8	10.7
1998	10.1	40.3	16.4	2.4	154.0	15.1	0.4	37.5	36.2	28.2	212.5	66.1	619.2	51.6	212.5	0.4
1999	54.0	54.9	109.1	20.0	11.7	29.2	18.0	103.5	24.4	68.8	80.3	59.7	633.6	52.8	109.1	11.7
Μ.Ο	37.40	40.44	45.30	41.54	50.15	31.68	27.70	34.95	31.54	49.26	65.03	48.26	499.62	42.06	116.72	5.22
Μέγ.	99.90	104.20	124.70	166.50	154.00	100.20	115.00	103.50	301.00	153.80	226.60	181.60	818.00	68.17	301.00	16.40
Ελάχ.	0.00	0.80	6.80	2.40	1.60	2.60	0.00	0.00	0.00	0.50	7.40	4.20	229.50	19.13	49.60	0.00

Από τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι στην ευρύτερη περιοχή της Ελασσόνας το μέσο ύψος των κατακρημνισμάτων είναι 499,62 mm, με μέγιστο 818 mm κατά το έτος 1979 και ελάχιστο 229,5 mm κατά το έτος 1989.

4.2 Θερμοκρασιακά δεδομένα.

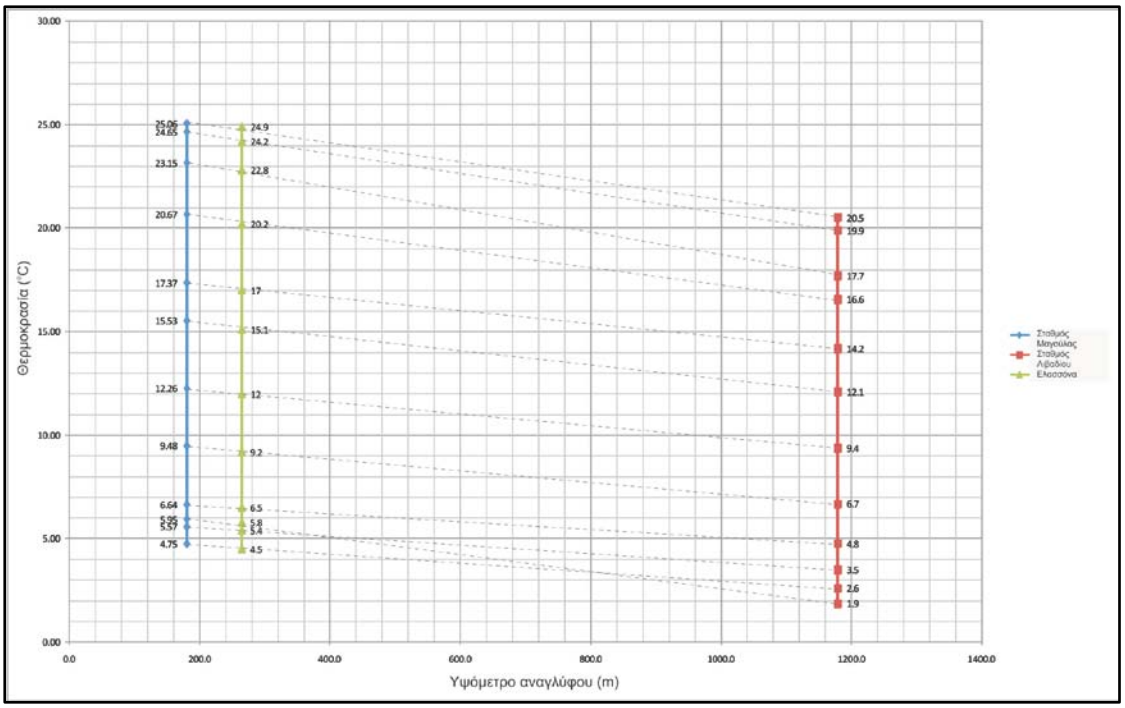
Τα διαθέσιμα θερμοκρασιακά δεδομένα για την περιοχή αφορούν το σταθμό του Λιβαδίου και το σταθμό της Μαγούλας (πίνακες 4-3 & 4-4). Οι δυο αυτοί σταθμοί, όμως, βρίσκονται σε διαφορετικά υψόμετρα (1.179 m ο σταθμός του Λιβαδίου και 181 m αυτός της Μαγούλας) από το μέσο υψόμετρο της λεκάνης μελέτης που είναι στα 265 m. Αντιπροσωπευτικά θερμοκρασιακά δεδομένα για την περιοχή προκύπτουν από τη μέθοδο της παρεμβολής για το υψόμετρο των 265 m (εικόνα 4.2). Αυτά παρουσιάζονται στον πίνακα 4-5.

Πίνακας 4-3 Μέση Μηνιαία θερμοκρασία για το σταθμό Λιβαδίου.

ΣΤΑΘΜΟΣ	**ΛΙΒΑΔΙ**
ΥΨΟΜΕΤΡΟ	**1179 m**
ΦΟΡΕΑΣ	**ΥΕΒ**
Μήνας	**T_{μ} (^{o}C)**
ΙΑΝ	2.6
ΦΕΒ	1.9
ΜΑΡ	4.8
ΑΠΡ	9.4
ΜΑΪ	14.2
ΙΟΥΝ	17.7
ΙΟΥΛ	20.5
ΑΥΓ	19.9
ΣΕΠ	16.6
ΟΚΤ	12.1
ΝΟΕ	6.7
ΔΕΚ	3.5

Πίνακας 4-4 Μέση Μηνιαία θερμοκρασία για το σταθμό Μαγούλας.

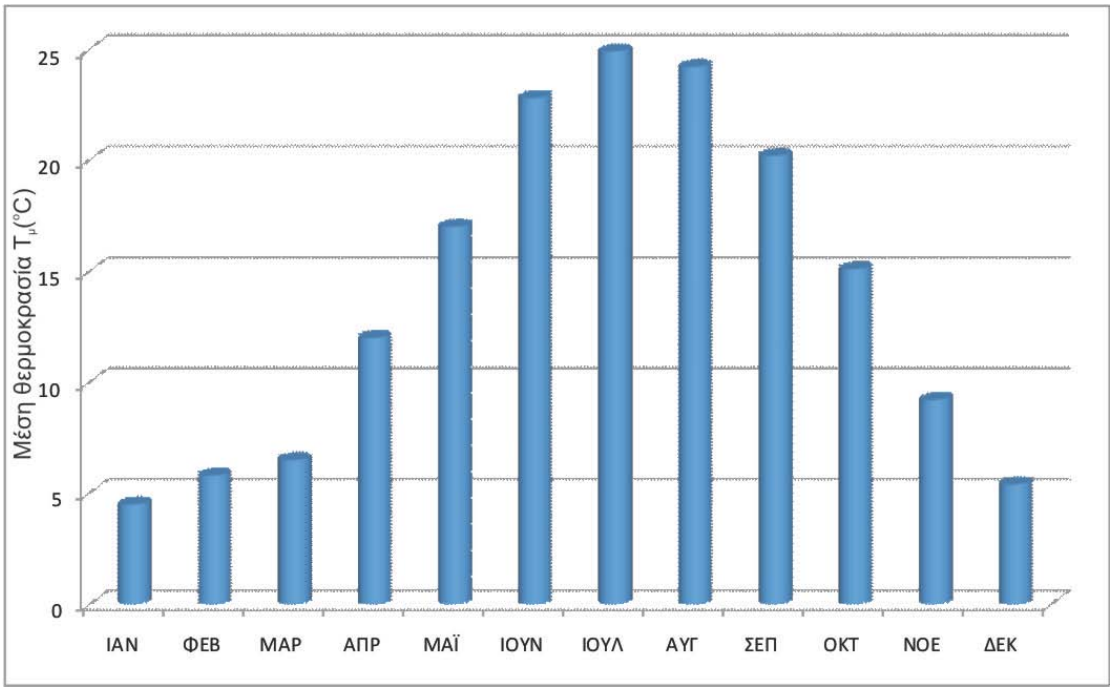
ΣΤΑΘΜΟΣ	**ΜΑΓΟΥΛΑ**
ΥΨΟΜΕΤΡΟ	**181 m**
ΦΟΡΕΑΣ	**ΥΕΒ**
Μήνας	**T_{μ} (^{o}C)**
ΙΑΝ	4.7
ΦΕΒ	6.0
ΜΑΡ	6.6
ΑΠΡ	12.3
ΜΑΪ	17.4
ΙΟΥΝ	23.2
ΙΟΥΛ	25.1
ΑΥΓ	24.6
ΣΕΠ	20.7
ΟΚΤ	15.5
ΝΟΕ	9.5
ΔΕΚ	5.6



Εικόνα 4.2 Διάγραμμα παρεμβολής για την εύρεση της T_μ στην περιοχή μελέτης (265m).

Πίνακας 4-5 Μέση Μηνιαία θερμοκρασία για την περιοχή μελέτης.

ΠΕΡΙΟΧΗ	**ΕΛΑΣΣΟΝΑ**
ΜΕΣΟ ΥΨΟΜ.	**265 m**
Μήνας	**T_μ (^oC)**
ΙΑΝ	4.5
ΦΕΒ	5.8
ΜΑΡ	6.5
ΑΠΡ	12
ΜΑΪ	17
ΙΟΥΝ	22.8
ΙΟΥΛ	24.9
ΑΥΓ	24.2
ΣΕΠ	20.2
ΟΚΤ	15.1
ΝΟΕ	9.2
ΔΕΚ	5.4



Εικόνα 4.3 Διάγραμμα μέσης μηνιαίας Θερμοκρασίας στη λεκάνη μελέτης.

Από τους πίνακες που προηγούνται, συμπεραίνεται ότι η μέση θερμοκρασία για τη λεκάνη είναι περίπου 13,96 ^{o}C, εμφανίζοντας μέγιστη τιμή 24,9 ^{o}C κατά το μήνα Ιούλιο και ελάχιστη 4,9 ^{o}C τον Ιανουάριο.

4. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

5.1 Υδρογεωλογία της λεκάνης μελέτης.

Στους κοκκώδεις γεωλογικούς σχηματισμούς αναπτύσσονται επάλληλα στρώματα που συνίστανται κυρίως από αμμοχάλικα και κροκάλες. Στη Νοτιοανατολική περίμετρο του προσχωματικού υδροφορέα αναπτύσσεται ο σημαντικός - όσον αφορά την υδροδυναμικότητά του - καρστικός υδροφορέας Τυρνάβου – Δαμασίου, ο οποίος αποστραγγίζεται από τις μεγάλες καρστικές πηγές Μάτι Τυρνάβου και Αγίας Άννας.

Η τροφοδοσία των προσχωματικών υδροφόρων στρωμάτων εξασφαλίζεται, εν μέρει, με απ' ευθείας κατείσδυση των κατακρημνισμάτων, με διήθηση νερού από τον Ελασσονίτικο ποταμό και τους χειμάρρους. Επιπλέον τροφοδοσία υφίστανται από τις τεκτονικές δομές των μεταμορφωμένων πετρωμάτων που δομούν το Βόρειο και Βορειοανατολικό ημιορεινό τμήμα της υδρολογικής λεκάνης. Ένα σημαντικό ποσοστό, που ανέρχεται σε 15-20% του όγκου νερού και χρησιμοποιείται στις αρδεύσεις, επιστρέφει και επανατροφοδοτεί τους ρηχούς υπόγειους υδροφορείς της περιοχής.

Η υπόγεια τροφοδοσία πραγματοποιείται κύρια από Βόρεια προς τα Νότια με Νοτιοανατολική διεύθυνση (χάρτες 5.4 – 5.9) δηλαδή προς τα μάρμαρα του καρστικού υδροφορέα Δαμασίου – Τυρνάβου, τα οποία στραγγίζουν τα υπόγεια νερά του προσχωματικού υδροφορέα σε βάθος 76 m. Η πιεζομετρική στάθμη του υδροφορέα κυμαίνεται από +230 έως +270 m, ενώ οι ετήσιες εποχιακές διακυμάνσεις της ανέρχονται έως 5 m.

5.2 Υδρολογικό ισοζύγιο.

Το υδρολογικό ισοζύγιο για την περιοχή μελέτης υπολογίζεται με τη μέθοδο Thornthweïte. Για την εφαρμογή της μεθόδου χρησιμοποιούνται οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες για τη λεκάνη μελέτης, όπως υπολογίζονται στην παράγραφο 4.2 (πίνακας 4-5). Επίσης, χρησιμοποιούνται τα μέσα μηνιαία ύψη κατακρημνισμάτων,

06/07/2010 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

όπως προκύπτουν από τα μηνιαία ύψη κατακρημνισμάτων του σταθμού της Ελασσόνας και το μέσο υψόμετρο της λεκάνης, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων και συσχετίζοντας το ύψος κατακρημνισμάτων των σταθμών με το υψόμετρό τους. Η συνολική εφαρμογή της μεθόδου και τα διάφορα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (5-2).

Ο όγκος νερού που συμμετέχει στις διαδικασίες απορροής και κατείσδυσης υπολογίζεται στα 2.385.803 m^3 και ανέρχεται σε 21,2 % του συνολικού ύψους βροχόπτωσης. Επομένως, ο όγκος νερού, που εξατμίζεται και διαπνέεται, είναι 8.867.985 m^3 και ανέρχεται σε 78,8 % του συνολικού ύψους βροχόπτωσης. Το υδρολογικό ισοζύγιο παρουσιάζεται συνοπτικά στον πίνακα 5-1.

Πίνακας 5-1 Υδρολογικό ισοζύγιο της λεκάνης Ελασσόνας - Τσαρίτσανης

P	E	Q	Μονάδες
503,3	396,8	106,5	**mm**
11.253.788	8.867.985	2.385.803	**m^3**
100	78,8	21,2	**%**

Πίνακας 5-2 Εφαρμογή της μεθόδου Thornthweïte για τη λεκάνη Ελασσόνας - Τσαρίτσανης

Υπολογισμός εξατμισοδιαπνοής κατά Thornthweite					S_{t0} =	60	α =	1.487	Συντ. Πρ. εξατμησ. κατά Thornthweite				78.8%
	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ	Σ/Μ.Ο.
T ^{0}C	4.50	5.80	6.50	12.00	17.00	22.80	24.90	24.20	20.20	15.10	9.20	5.40	**13.97**
i	0.85	1.25	1.49	3.76	6.38	9.95	11.37	10.89	8.28	5.33	2.52	1.12	**63.18**
E_{Δ}'	9.7	14.1	16.7	41.5	69.7	107.9	123.0	117.9	90.1	58.5	28.0	12.7	
n	0.83	0.83	1.03	1.11	1.25	1.26	1.27	1.19	1.04	0.96	0.82	0.8	
E_{Δ}	8.0	11.7	17.2	46.1	87.1	135.9	156.2	140.3	93.7	56.1	22.9	10.1	**785.42**
P (mm)	37.4	40.4	45.3	41.5	50.2	31.7	27.7	35	31.5	49.3	65	48.3	**503.3**
Έλλειμμα	0.0	0.0	0.0	4.6	36.9	104.2	128.5	105.3	62.2	6.8	0.0	0.0	
Πλεόνασμα	29.4	28.7	28.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	42.1	38.2	
APWL	0.0	0.0	0.0	-4.6	-41.5	-145.8	-274.3	-379.5	-441.7	-448.5	0.0	0.0	
St	60.0	60.0	60.0	55.6	30.0	5.3	0.6	0.1	0.0	0.0	42.1	60.0	
ΔSt	0.0	0.0	0.0	-4.4	-25.6	-24.7	-4.7	-0.5	-0.1	0.0	42.1	17.9	
Er	8.0	11.7	17.2	45.9	75.8	56.4	32.4	35.5	31.6	49.3	22.9	10.1	**396.8**
Έλλ. νερού	0.0	0.0	0.0	0.2	11.4	79.5	123.8	104.8	62.1	6.8	0.0	0.0	
Ολ. Απορροή	29.4	28.7	28.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.3	**106.5**

5.3 Γεωμετρικά στοιχεία υδροφορέων.

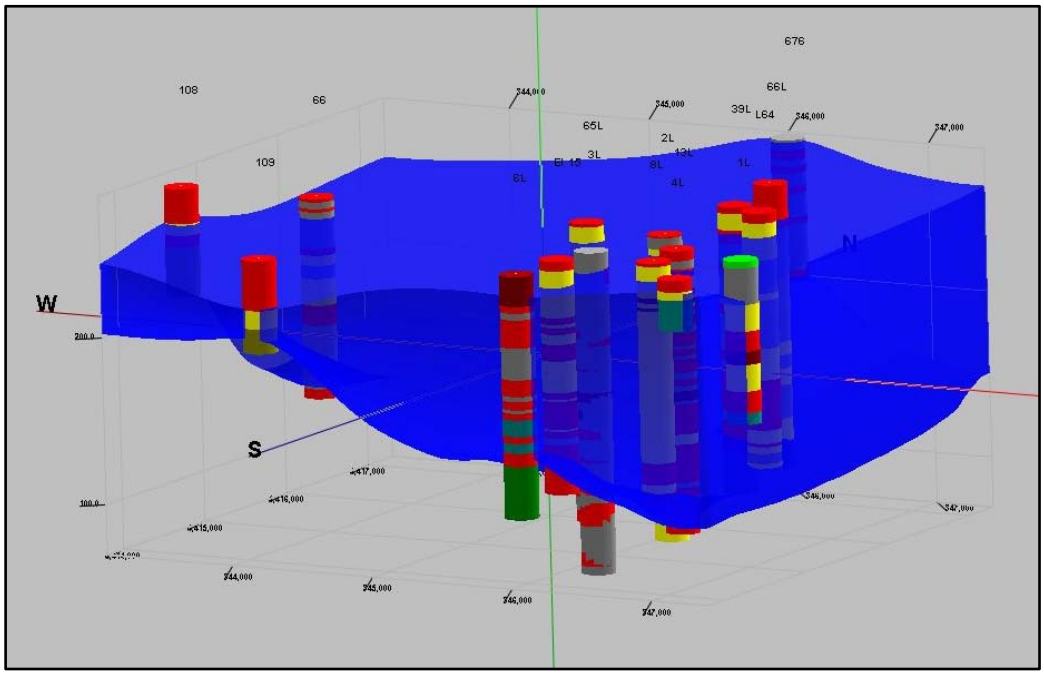
Γεωμετρικά στοιχεία των υδροφορέων αποτελούν το πάχος τους και το μέγιστο βάθος τους (ως τέτοιο θεωρούμε το βάθος των γεωτρήσεων), όπως φαίνονται στον πίνακα 5-3.

Πίνακας 5-3 Γεωμετρικά στοιχεία υδροφορέων.

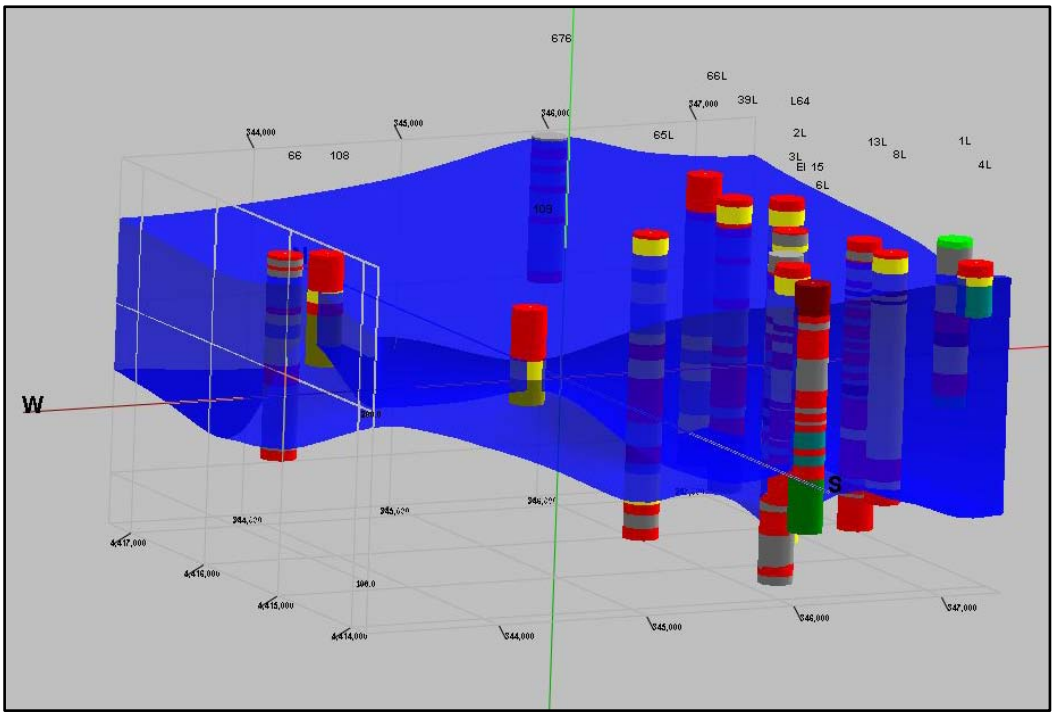
Όνομα	Υψόμετρο (m)	Βάθος γεώτρησης (m)	πλήθος υδροφόρων	Πάχος Υδροφόρων (m)	Ποσοστό (%)
1Λ	267	98	2	32	32.7
2Λ	267	183	8	148	80.9
3Λ	263	193	9	111	57.5
4Λ	264	30.5	2	10	32.8
6Λ	259	146	6	44	30.1
ΕΛ15	262	140	9	37	26.4
8Λ	265	147	9	96	65.3
39Λ	271	172	3	116	67.4
64Λ	272	154	5	99	64.3
65Λ	263	179	5	101	56.4
66Λ	277	170	6	77	45.3
109	254	56	2	16	28.6
108	277	65	3	21	32.3
676	282	85	4	32	37.6
66	254	120	4	82	68.3
13Λ	267	170	11	45.5	26.8

Στη συνέχεια, παρατίθεται η τρισδιάστατη απεικόνιση του υδροφορέα της περιοχής μελέτης - όπως προκύπτει από επεξεργασία των διαθέσιμων δεδομένων με το λογισμικό ***RockWorks 2006*** - και ο χάρτης ισοκατανομής του ποσοστού των υδροφόρων.

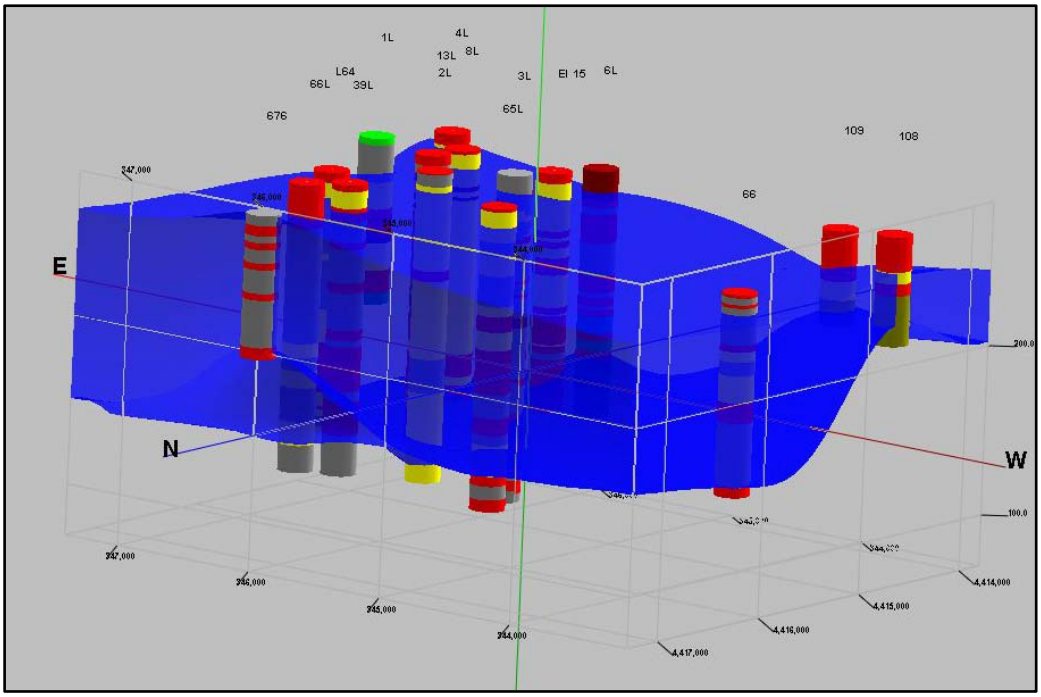
Εικόνα 5.1 Υπόμνημα ερμηνείας, της λιθολογίας, των γεωτρήσεων των εικόνων 5.2 έως 5.4.



Εικόνα 5.2 Τρισδιάστατη απεικόνιση του υδροφορέα από τη ΝΑ πλευρά της περιοχής.

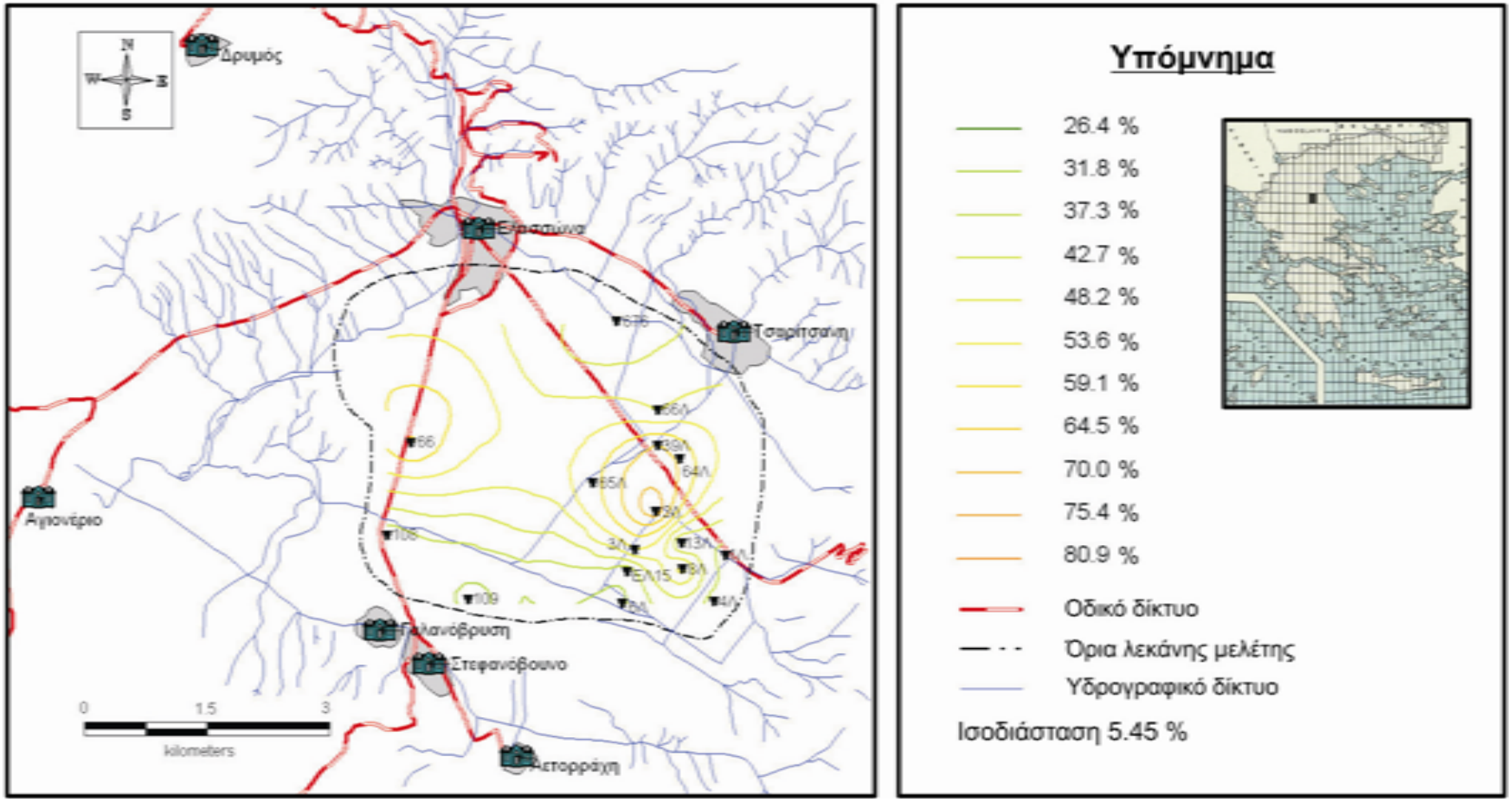


Εικόνα 5.3 Τρισδιάστατη απεικόνιση του υδροφορέα από τη ΝΔ πλευρά της περιοχής.



Εικόνα 5.4 Τρισδιάστατη απεικόνιση του υδροφορέα από τη ΒΔ πλευρά της περιοχής.

Χάρτης ισοκατανομής του ποσοστού των υδροφόρων (%)



Χάρτης 5.1

Τόσο από τις τρισδιάστατες απεικονίσεις, όσο και από το χάρτη, συμπεραίνεται ότι στη νοτιοανατολική πλευρά της λεκάνης συναντάται μεγαλύτερο ποσοστό υδροφόρων που φτάνουν σε μεγαλύτερο βάθος.

5.4 Υδρολιθολογικά στοιχεία υδροφορέων.

Τα υδρολιθολογικά στοιχεία, που μελετώνται στην παρούσα εργασία, είναι ο Συντελεστής διαπερατότητας k (m/s) και η Υδραυλική αγωγιμότητα υδροφόρων T (m^2/s). Τα δεδομένα δίνονται στους πίνακες 5-4 και 5-5.

Πίνακας 5-4 Συντελεστής διαπερατότητας k (m/s).

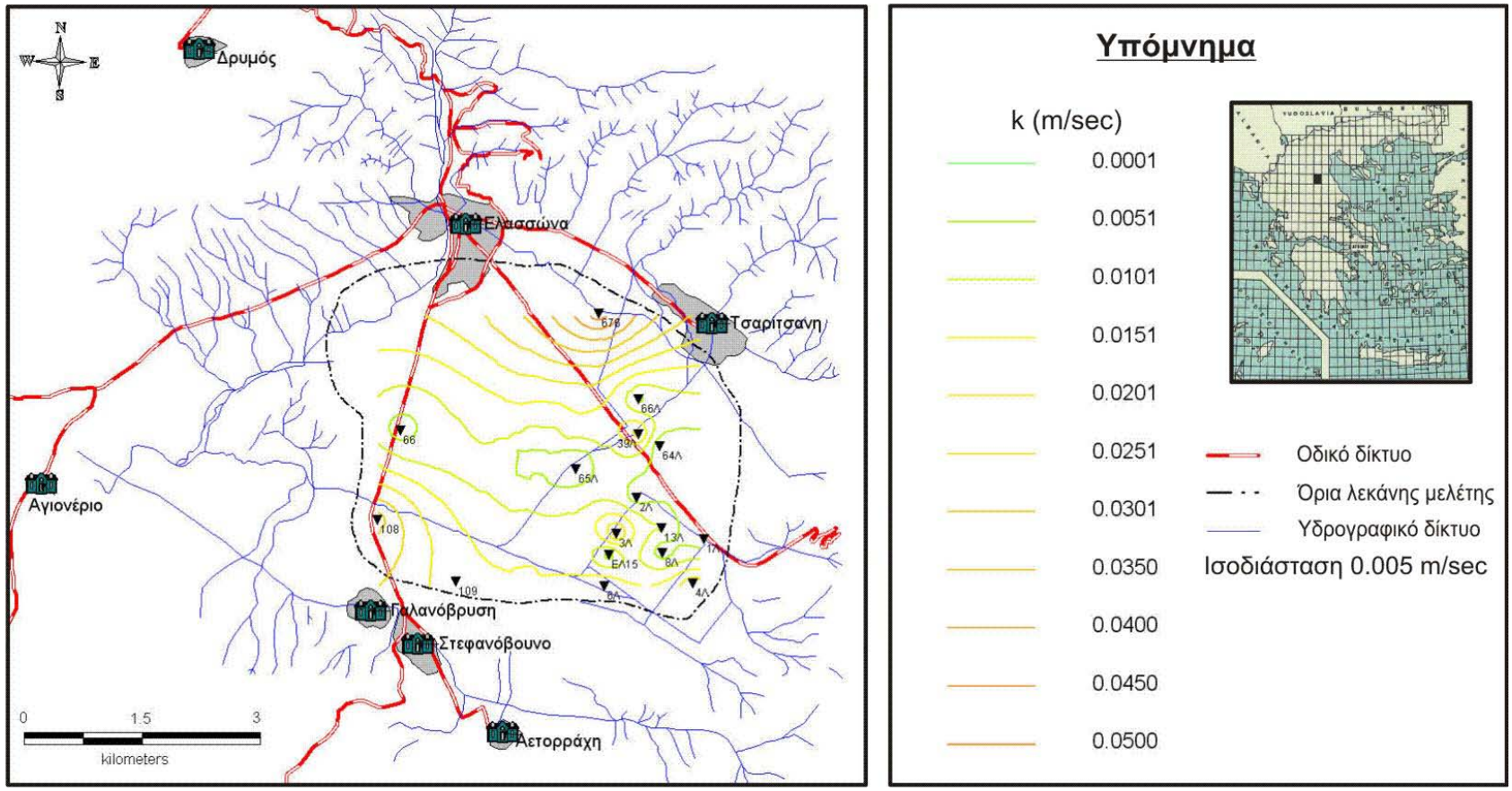
Γεώτρηση	Συντελεστής Διαπερατότητας k (m/s) (κατά breddin)
1Λ	$2.95 \cdot 10^{-4}$
2Λ	$1.09 \cdot 10^{-3}$
3Λ	$2.95 \cdot 10^{-2}$
4Λ	$2.52 \cdot 10^{-2}$
6Λ	$2.11 \cdot 10^{-2}$
ΕΛ15	$4.48 \cdot 10^{-4}$
8Λ	$1.57 \cdot 10^{-4}$
39Λ	$2.41 \cdot 10^{-2}$
64Λ	$1.26 \cdot 10^{-4}$
65Λ	$2.81 \cdot 10^{-4}$
66Λ	$2.43 \cdot 10^{-3}$
109	$1.60 \cdot 10^{-2}$
108	$3.35 \cdot 10^{-2}$
676	$5.00 \cdot 10^{-2}$
66	$5.27 \cdot 10^{-4}$
13Λ	$1.14 \cdot 10^{-2}$

Πίνακας 5-5 Υδραυλική αγωγιμότητα υδροφόρων T (m^2/s).

Γεώτρηση	Υδραυλική αγωγιμότητα υδροφόρων T (m^2/s)
1Λ	$9.44 \cdot 10^{-3}$
2Λ	$1.62 \cdot 10^{-1}$
3Λ	3.27
4Λ	$2.52 \cdot 10^{-1}$
6Λ	$9.31 \cdot 10^{-1}$
ΕΛ15	$1.65 \cdot 10^{-2}$
8Λ	$1.51 \cdot 10^{-2}$
39Λ	2.80
64Λ	$1.25 \cdot 10^{-2}$
65Λ	$2.84 \cdot 10^{-2}$
66Λ	$1.87 \cdot 10^{-1}$
109	$2.56 \cdot 10^{-1}$
108	$7.03 \cdot 10^{-1}$
676	1.6
66	$4.32 \cdot 10^{-2}$
13Λ	$5.20 \cdot 10^{-1}$

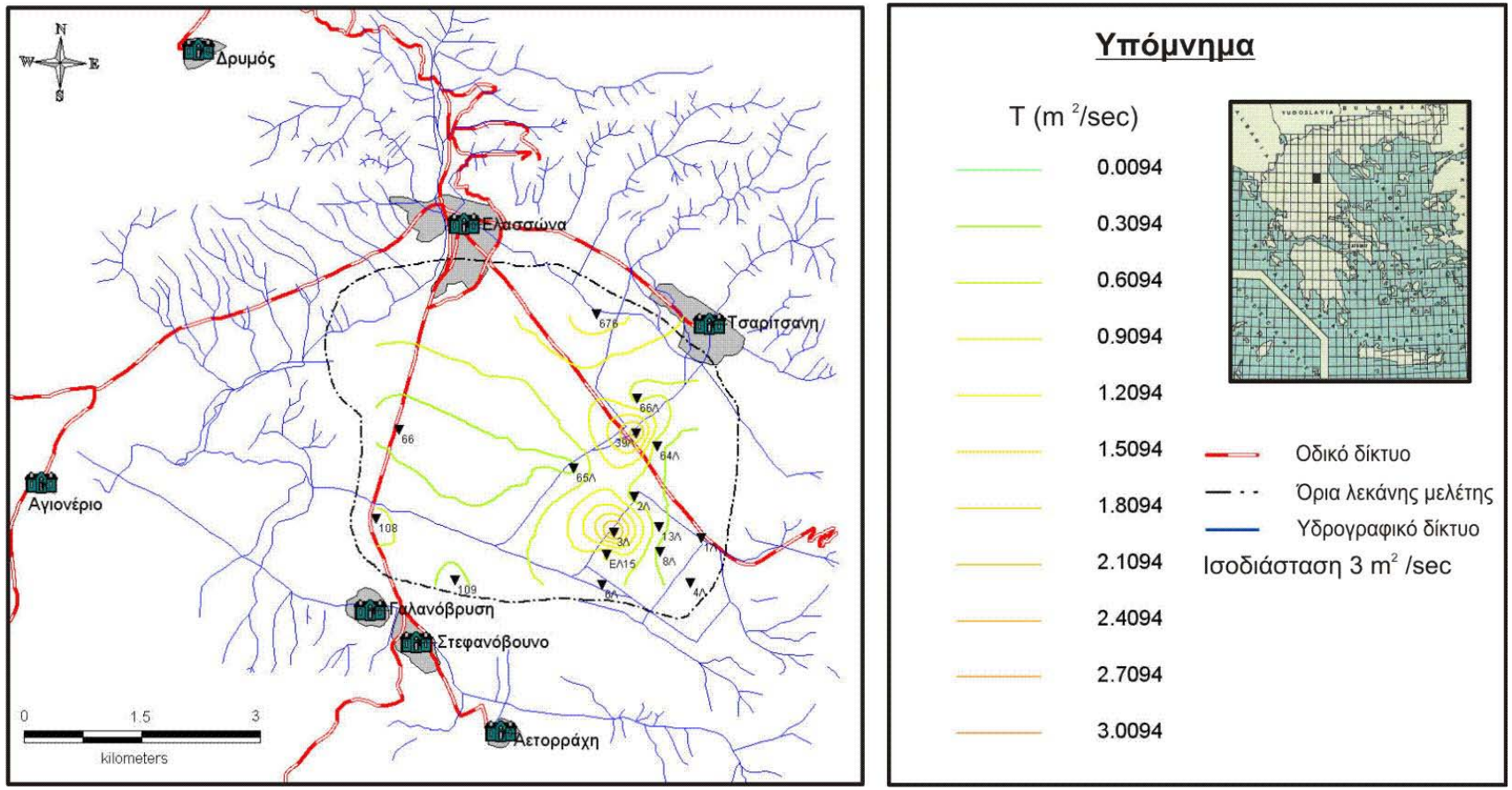
Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα, σχεδιάζονται οι θεματικοί χάρτες 5.2 και 5.3.

Χάρτης ισοκατανομής του συντελεστή διαπερατότητας k (m/s)



Χάρτης 5.2

Χάρτης ισοκατανομής της υδραυλικής αγωγιμότητα T (m^2/s)



Χάρτης 5.3

Στους δύο παραπάνω χάρτες διαφαίνεται ότι στη λεκάνη συναντώνται πολύ καλοί συντελεστές διαπερατότητας (k) και υδραυλικής αγωγιμότητας (T). Εξαίρεση αποτελεί μια ζώνη που καθορίζεται περίπου από τις γεωτρήσεις 66, 65Λ, 64Λ, 2Λ, 8Λ, 1Λ και 4Λ (χάρτες 5.2 &5.3), όπου οι συντελεστές είναι μικρότεροι.

5.5 Πιεζομετρική κατάσταση υδροφορέων.

Σ' αυτήν την ενότητα εξετάζονται τα πιεζομετρικά χαρακτηριστικά των υδροφορέων της λεκάνης μελέτης. Αυτά είναι η **Πιεζομετρική Στάθμη,** η **Παροχή (Q)** και η **Ειδική Παροχή (C).**

Πίνακας 5-6 Πιεζομετρική στάθμη για τις περιόδους 5/1997 έως 10/1999.

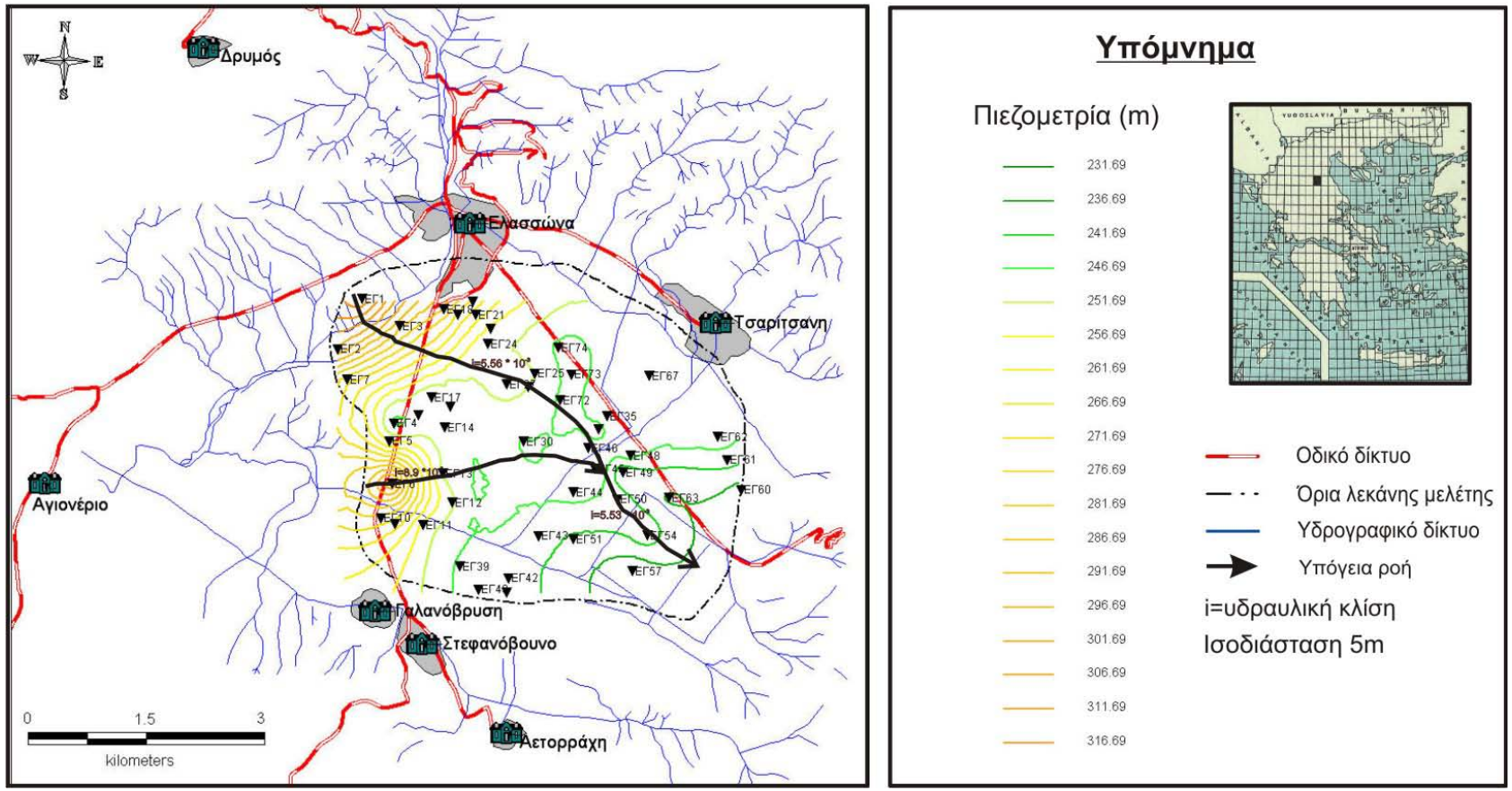
Όνομα Γεώτρησης	Πιεζομετρία Μάιος 97 (m)	Πιεζομετρία Σεπτέμβριος 97 (m)	Πιεζομετρία Μάιος 98 (m)	Πιεζομετρία Σεπτέμβριος 98 (m)	Πιεζομετρία Μάιος 99 (m)	Πιεζομετρία Οκτώβριος 99 (m)
ΕΓ1	321.05	320.00	323.98	320.30	323.68	321.60
ΕΓ3	288.40	285.70	288.42	285.80	289.19	287.14
ΕΓ2	300.90	296.69	299.11	295.74	299.26	297.26
ΕΓ7	273.80	270.57	273.56	270.48	273.25	272.79
ΕΓ4	245.65	243.55	246.57	242.69	246.53	244.51
ΕΓ5	255.60	252.50	255.11	250.79	254.95	253.12
ΕΓ6	301.79	299.60	302.46	298.76	302.40	300.91
ΕΓ10	274.68	272.94	273.92	270.77	273.76	273.32
ΕΓ9	269.24	267.35	270.69	267.84	270.43	269.20
ΕΓ11	255.34	253.26	257.96	255.08	257.80	254.04
ΕΓ12	252.45	250.79	253.22	248.89	253.05	250.61
ΕΓ13	250.60	246.83	249.91	245.56	250.20	248.65
ΕΓ14	248.58	245.48	249.29	244.90	249.62	245.95
ΕΓ16	247.30	243.93	249.44	246.06	251.60	252.05
ΕΓ17	247.36	245.70	249.94	246.56	250.23	247.53
ΕΓ15	248.43	245.86	249.98	246.61	249.20	246.16
ΕΓ18	282.20	278.26	284.45	280.16	283.78	281.92
ΕΓ20	270.79	267.68	273.42	271.11	274.42	271.22
ΕΓ21	264.75	263.40	266.12	264.76	267.40	265.50
ΕΓ19	271.90	269.76	277.07	272.71	276.39	274.85
ΕΓ23	255.64	253.60	258.37	254.96	259.30	257.55
ΕΓ24	252.46	248.71	255.53	251.86	256.21	255.10
ΕΓ27	253.95	250.70	255.50	252.26	254.52	252.52
ΕΓ26	251.85	248.60	253.33	250.86	253.41	250.02
ΕΓ25	251.82	249.60	252.29	250.16	254.54	254.10
ΕΓ74	245.84	243.81	245.55	241.16	245.14	241.55

ΕΓ73	245.37	242.40	246.07	241.66	254.64	242.02
ΕΓ72	246.18	242.63	246.53	243.16	247.14	243.56
ΕΓ67	251.26	249.49	252.93	250.56	251.29	247.08
ΕΓ62	249.70	247.50	251.55	249.96	253.73	250.62
ΕΓ61	244.25	241.90	244.94	241.88	245.65	245.68
ΕΓ60	234.82	230.92	236.01	232.82	236.42	232.77
ΕΓ57	231.69	228.42	231.89	229.06	233.90	230.02
ΕΓ54	245.28	242.40	245.58	242.56	246.40	243.59
ΕΓ63	235.84	232.82	236.01	233.46	237.23	234.31
ΕΓ35	250.83	250.10	252.60	247.77	251.61	248.85
ΕΓ34	244.68	243.86	245.85	247.59	245.26	243.36
ΕΓ48	249.28	246.10	250.13	246.91	249.75	246.36
ΕΓ49	237.28	233.72	238.47	235.86	237.70	235.16
ΕΓ50	244.56	242.45	246.13	242.66	245.50	241.85
ΕΓ46	248.45	245.75	249.99	246.96	250.80	247.86
ΕΓ45	253.10	249.87	254.42	250.63	253.47	250.82
ΕΓ44	248.33	246.36	251.40	248.11	251.95	248.44
ΕΓ43	244.36	241.27	244.30	241.56	244.49	241.68
ΕΓ51	240.74	237.50	241.79	238.09	242.23	238.76
ΕΓ42	242.56	239.09	243.90	240.20	244.04	240.58
ΕΓ41	245.93	242.40	246.55	242.96	246.80	243.68
ΕΓ40	242.17	239.86	243.88	240.20	243.70	241.35
ΕΓ39	245.66	242.86	247.33	244.26	247.10	244.88
ΕΓ30	246.50	243.80	249.33	247.76	248.60	244.25

Πίνακας 5-7 Μέσης και Ειδικής παροχής.

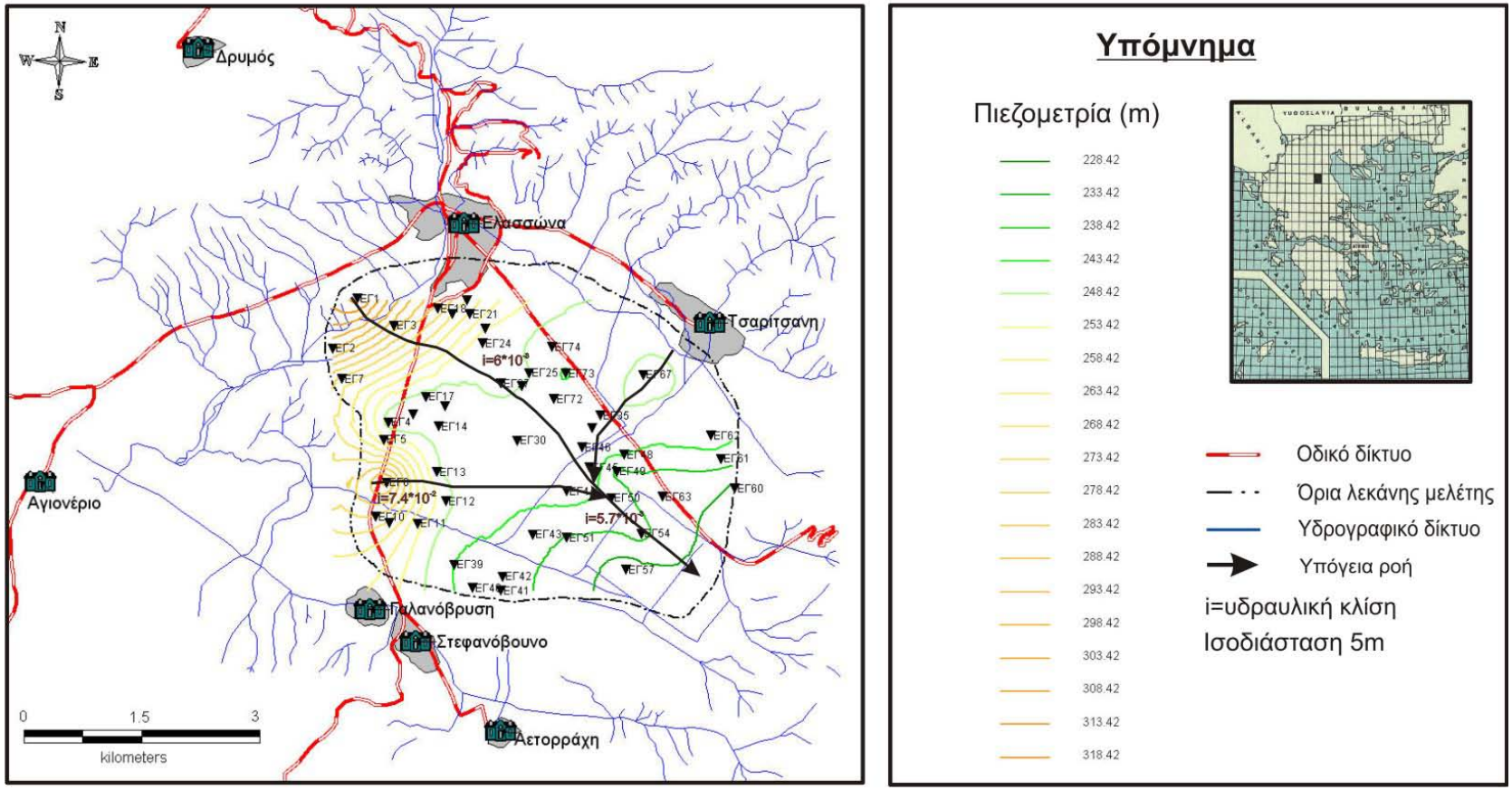
Όνομα Γεώτρησης	**Μέση παροχή Q (m^3/h)**	**Ειδική Παροχή C (m^2/h)**
1Λ	36	2.337
2Λ	120	3
3Λ	120	2.96
6Λ	24	0.361
ΕΛ15	15	0.325
8Λ	162	6.26
39Λ	90	2.39
64Λ	45	1.28
65Λ	90	4.04
66Λ	60	5.45
109	20	0.657
108	35	1.4
66	45	2.65
13Λ	110	1.92

Χάρτης ισοκατανομής της Πιεζομετρικής κατάστασης των υδροφόρων στρωμάτων το Μάιο του 1997 (m)



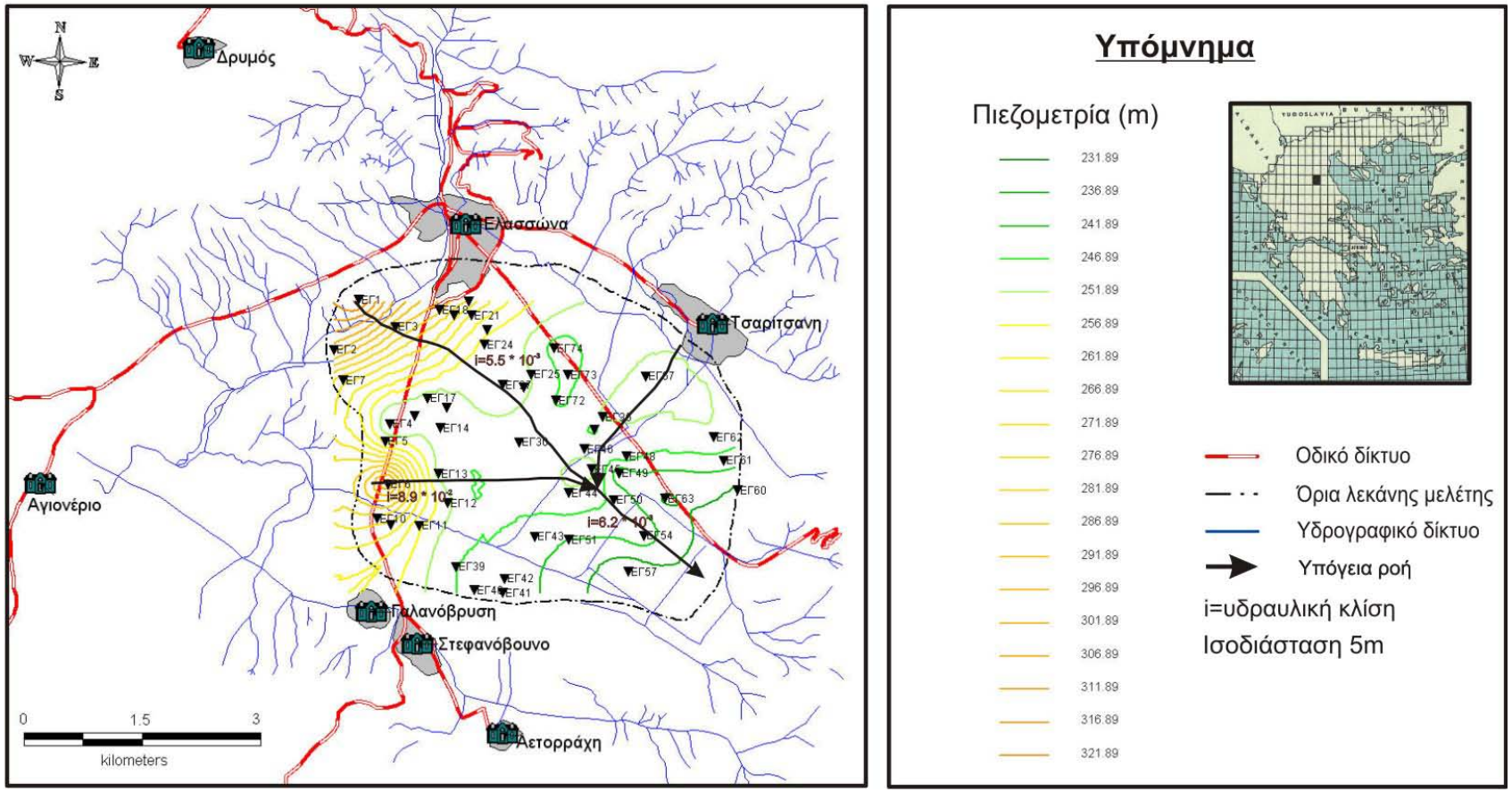
Χάρτης 5.4

Χάρτης ισοκατανομής της Πιεζομετρικής κατάστασης των υδροφόρων στρωμάτων το Σεπτέμβριο του 1997 (m)



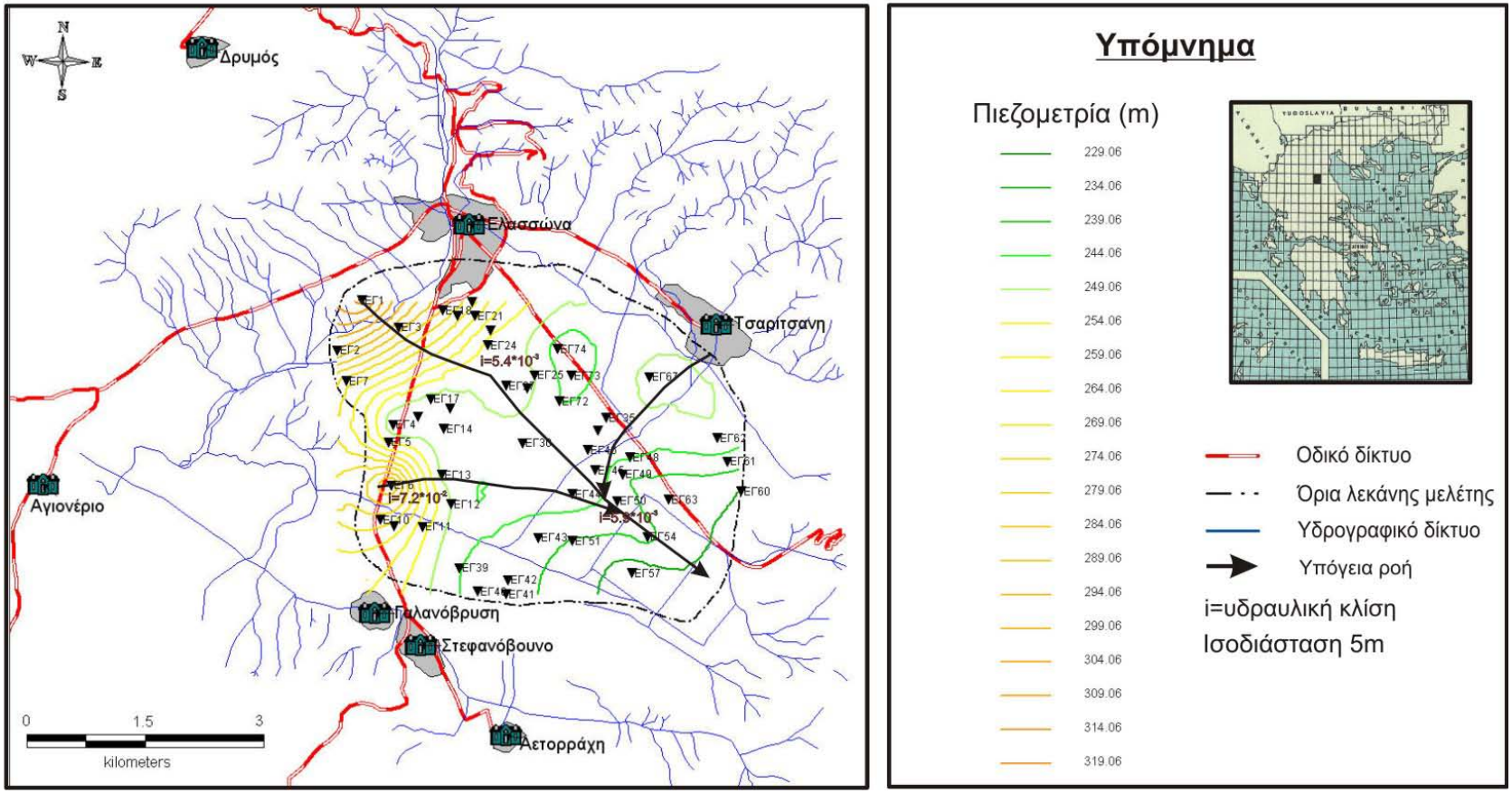
Χάρτης 5.5

Χάρτης ισοκατανομής της Πιεζομετρικής κατάστασης των υδροφόρων στρωμάτων το Μάιο του 1998 (m)



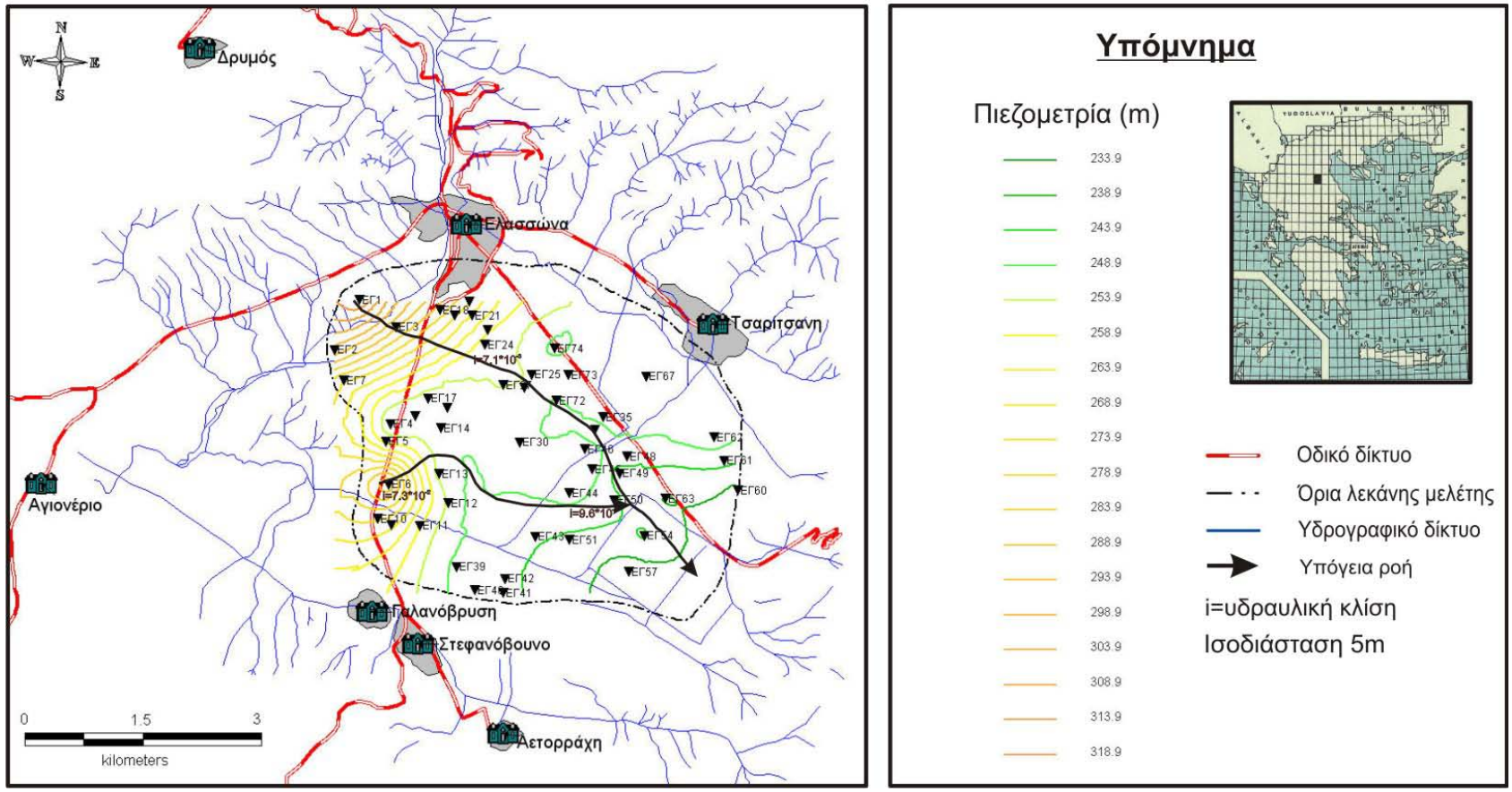
Χάρτης 5.6

Χάρτης ισοκατανομής της Πιεζομετρικής κατάστασης των υδροφόρων στρωμάτων το Σεπτέμβριο του 1998 (m)



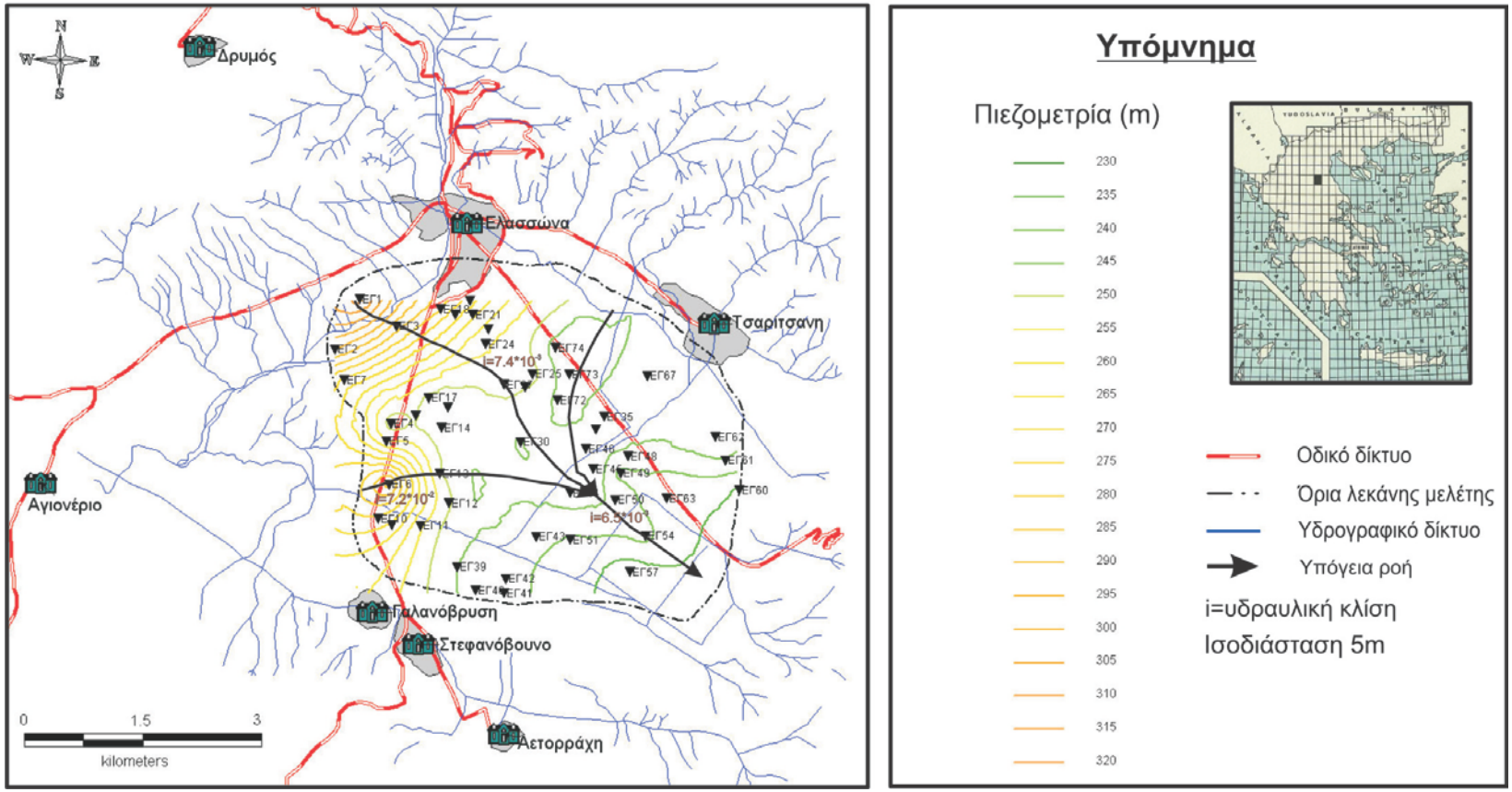
Χάρτης 5.7

Χάρτης ισοκατανομής της Πιεζομετρικής κατάστασης των υδροφόρων στρωμάτων το Μάιο του 1999 (m)



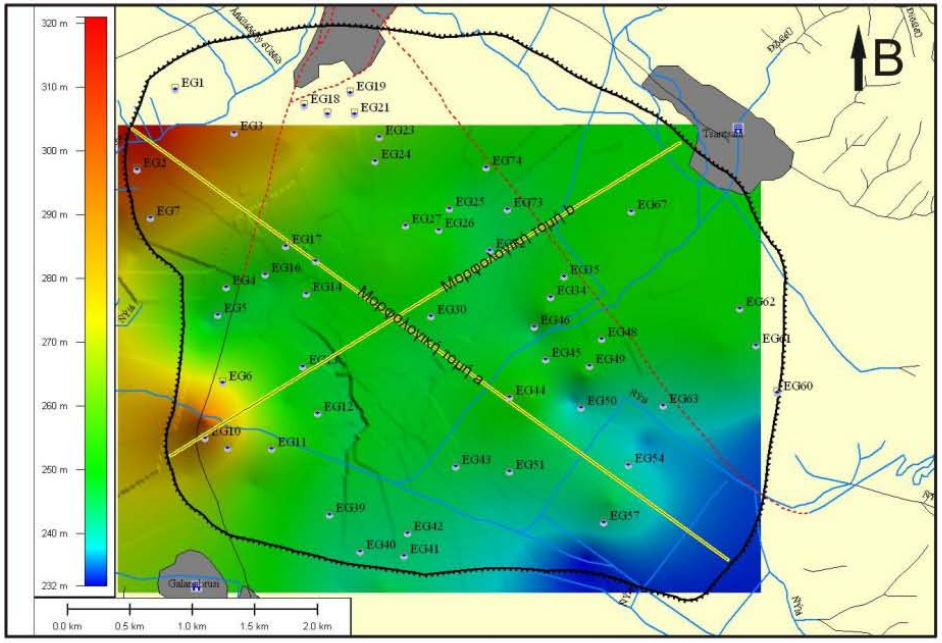
Χάρτης 5.8

Χάρτης ισοκατανομής της Πιεζομετρικής κατάστασης των υδροφόρων στρωμάτων τον Οκτώβριο του 1999 (m)

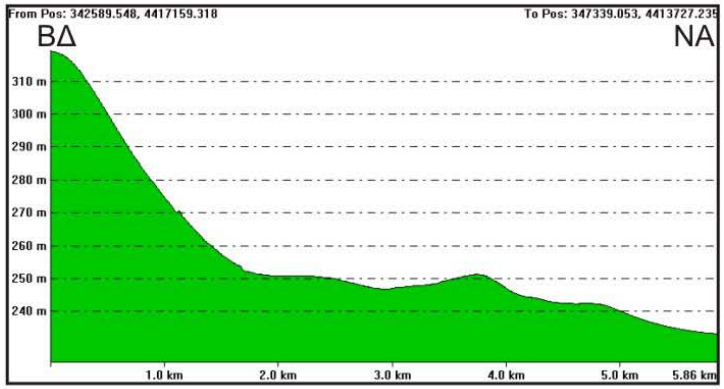


Χάρτης 5.9

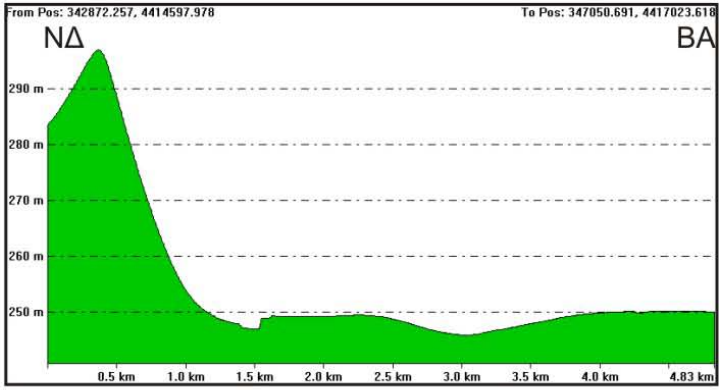
Χάρτης ισοκατανομής της Πιεζομετρικής κατάστασης
των υδροφόρων στρωμάτων το Μάιο του 1997 (m)
και μορφολογικές τομές του υδροφορέα βάση των παραπάνω πιεζομετριών



Χάρτης ισοκατανομής της πιεζομετρίας Μάιος 97



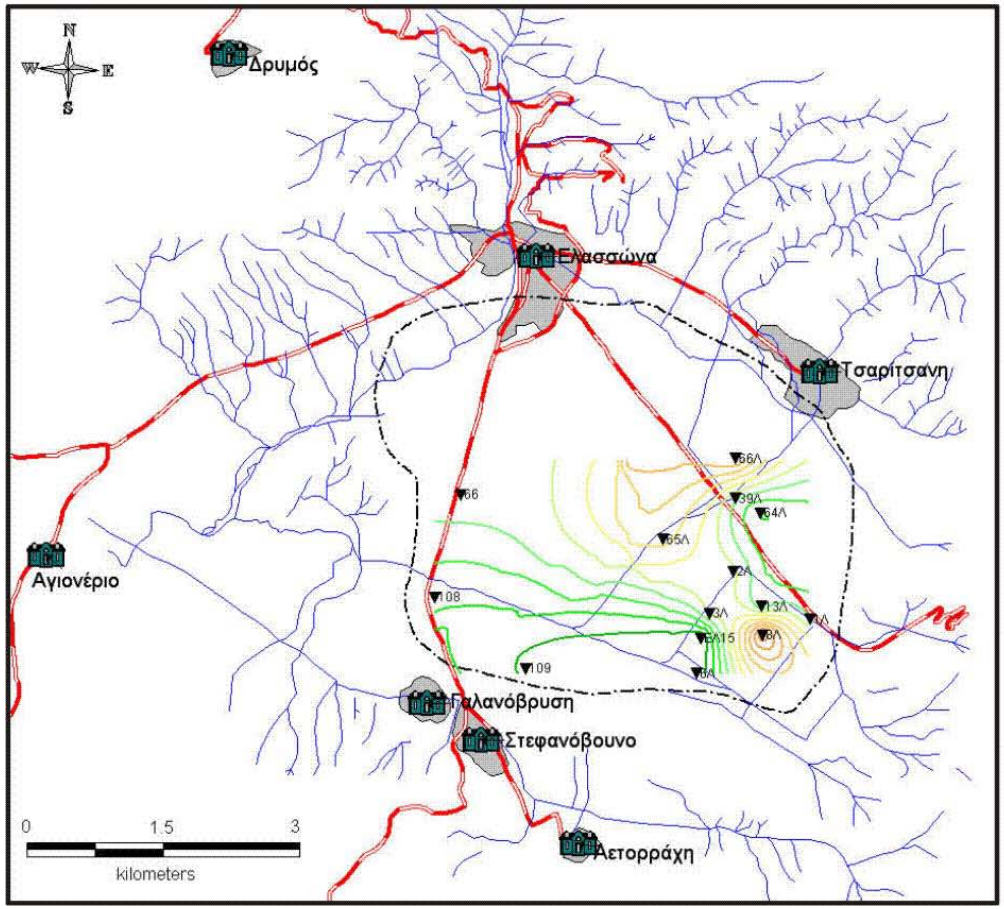
Μορφολογική τομή a



Μορφολογική τομή b

Εικόνα 5.5

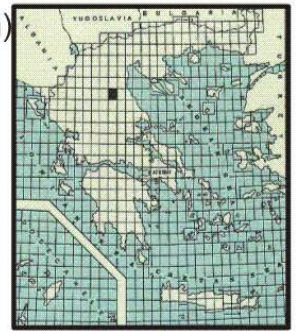
Χάρτης ισοκατανομής της Παροχής άντλησης Q (m^3/h)



Υπόμνημα

Παροχή άντλησης Q (m^3/h)

- 0.33
- 0.83
- 1.33
- 1.83
- 2.33
- 2.83
- 3.33
- 3.83
- 4.33
- 4.83
- 5.33
- 5.83



Οδικό δίκτυο

Όρια λεκάνης μελέτης

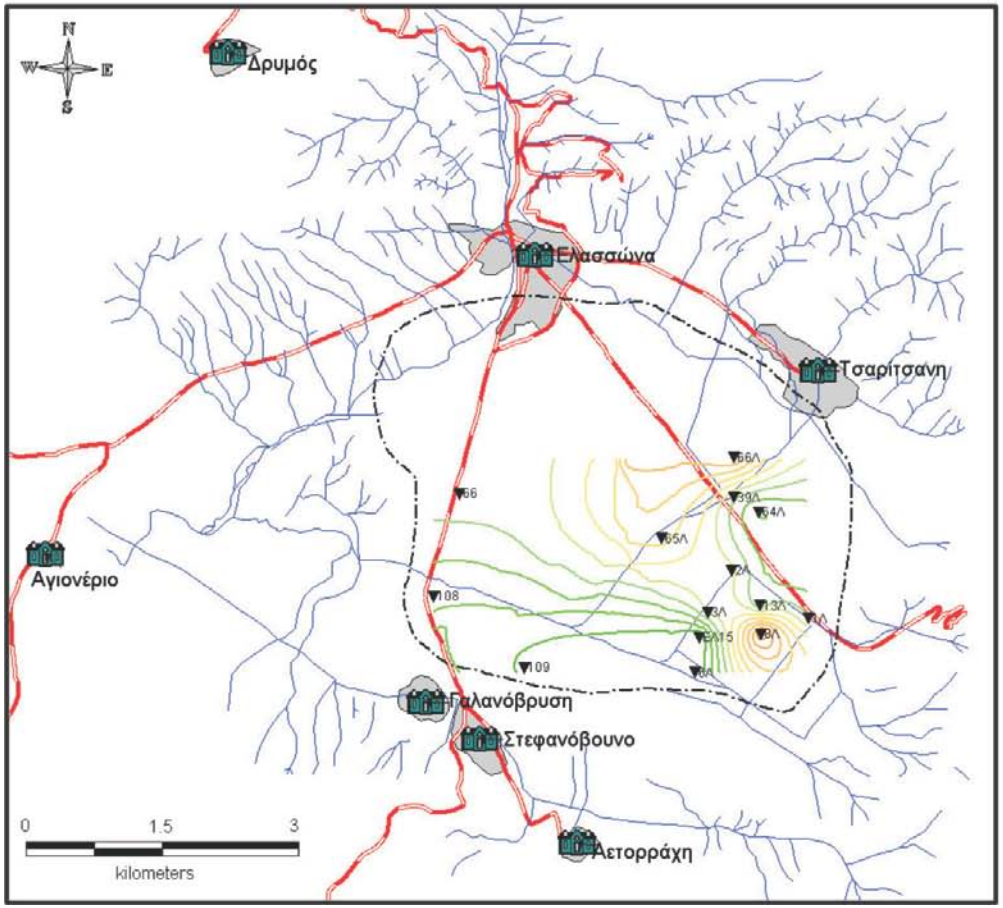
Υδρογραφικό δίκτυο

Ισοδιάσταση 0,5 m^3/h

Χάρτης 5.10

Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

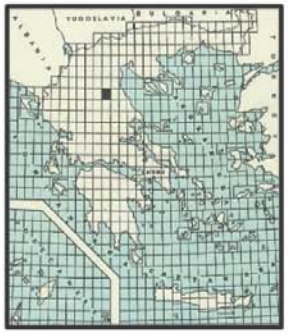
Χάρτης ισοκατανομής της Ειδικής παροχής C (m^2/h)



Υπόμνημα

Ειδική παροχή C (m^2/h)

- 0.33
- 0.83
- 1.33
- 1.83
- 2.33
- 2.83
- 3.33
- 3.83
- 4.33
- 4.83
- 5.33
- 5.83



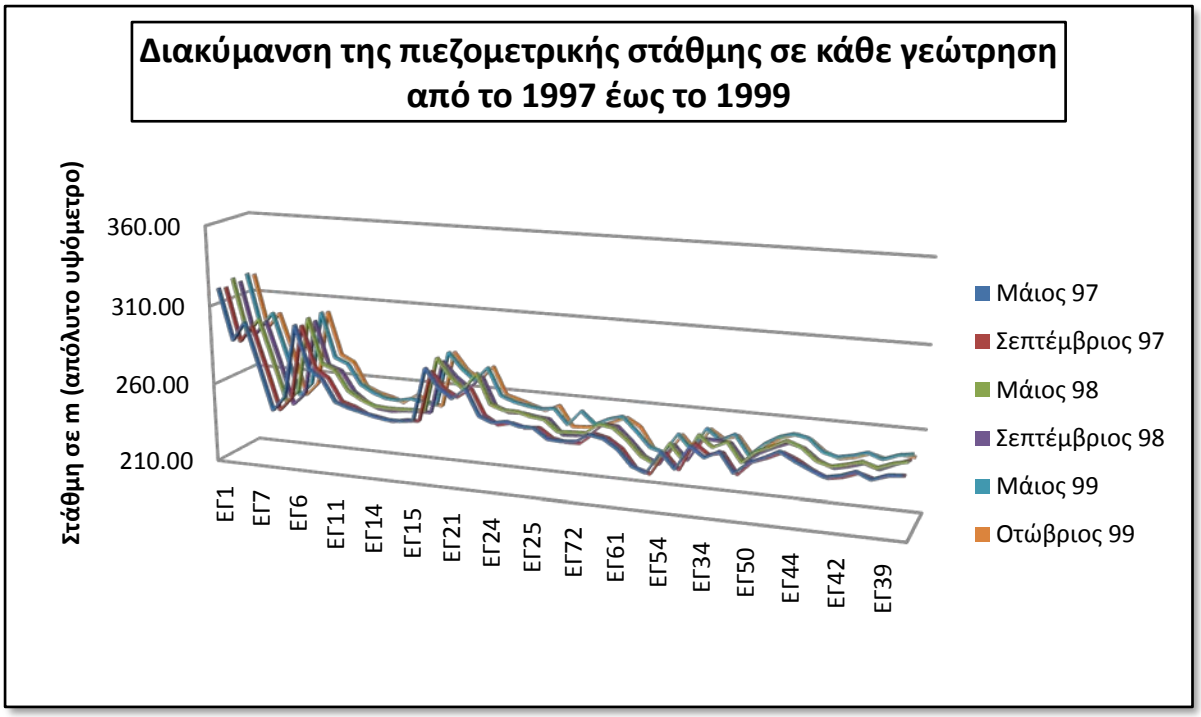
Οδικό δίκτυο

Όρια λεκάνης μελέτης

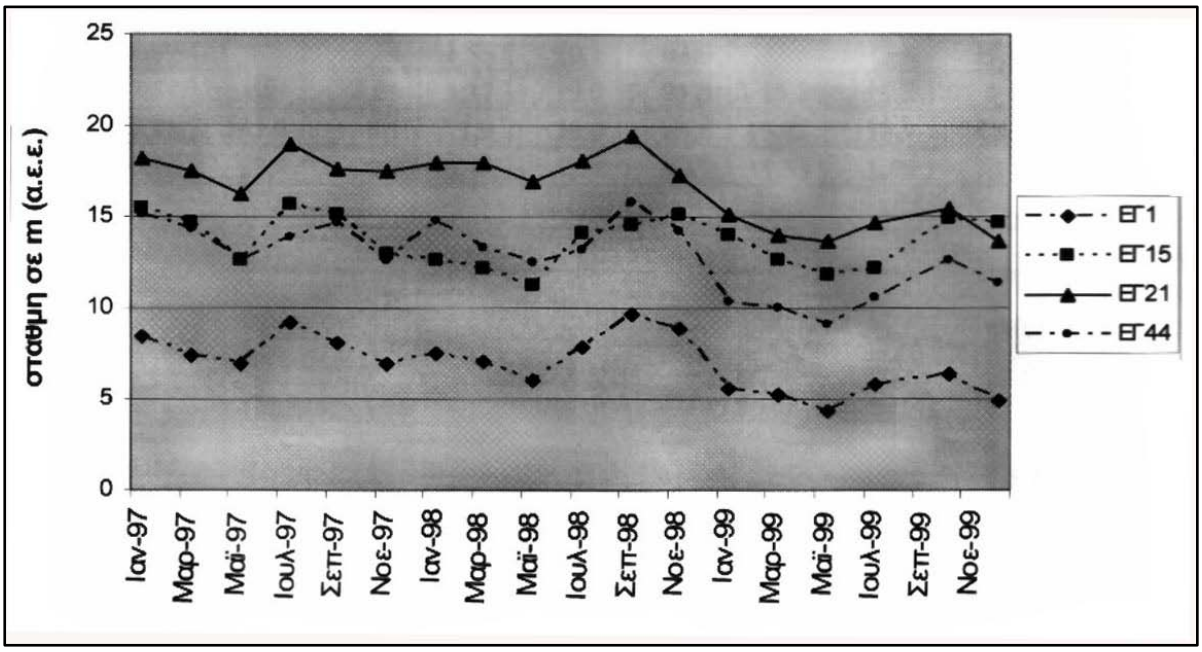
Υδρογραφικό δίκτυο

Ισοδιάσταση 0,5 m^2/h

Χάρτης 5.11



Εικόνα 5.6 Διάγραμμα διακύμανσης της πιεζομετρικής στάθμης, από το 1997 έως το 1999 για κάθε γεώτρηση.



Εικόνα 5.7 Διακύμανση της στάθμης του υπογείου νερού (m) σε γεωτρήσεις της λεκάνης Ελασσόνας – Τσαρίτσανης (Μανάκος – Βουδούρης 2006).

Σύμφωνα με τους παραπάνω χάρτες, η υπόγεια τροφοδοσία στη λεκάνη γίνεται κυρίως από τα Βορειοδυτικά και τα Δυτικά, αλλά παρατηρείται και μια

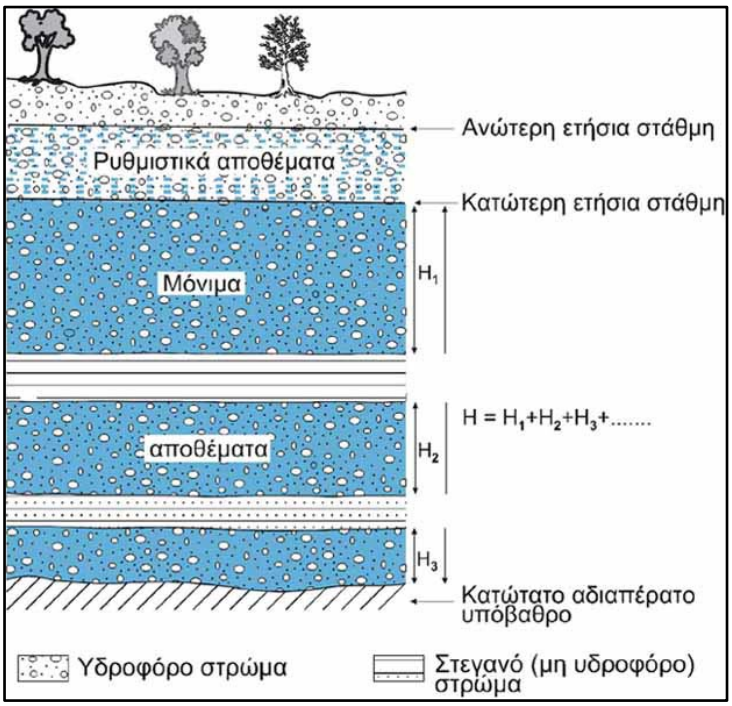
δευτερεύουσα τροφοδοσία από τα Βόριο Βορειοανατολικά, κατά τους χειμερινούς μήνες του υδρολογικού έτους. Επίσης, στην εικόνα 5.5, όπου παρατίθενται οι μορφολογικές τομές του πιεζομετρικό χάρτη, εντοπίζεται στα Βορειοδυτικά και τα Δυτικά η πορεία του υπόγειου υδροκρίτη.

Από τους χάρτες της παροχής άντλησης (Q) και της ειδικής παροχής (C), παρατηρείται ότι υπάρχει μια ζώνη με μεγαλύτερη άντληση υδάτων, που οριοθετείτε περίπου από τις γεωτρήσεις 66Λ, 65Λ και 8Λ. Και από τις εικόνες 5.6 & 5.7 φαίνεται πως δεν έχουμε μεγάλη πτώση στάθμης με το χρόνο.

Τέλος, σύμφωνα με τους Μανάκο – Βουδούρη (2006) το υπόγεια νερά είναι Ca (Mg) - HCO_3 καλής ποιότητας για άρδευση.

5.6 Αποθέματα της λεκάνης.

Με τον όρο «αποθέματα υπογείου νερού» εννοείται η ποσότητα του υπογείου νερού, που υπάρχει αποθηκευμένη στο υπέδαφος μιας συγκεκριμένης περιοχής ή λεκάνης κατά μία ορισμένη στιγμή και σε ορισμένα τμήματα του υπεδάφους της.



Εικόνα 5.8 Ρυθμιστικά και μόνιμα αποθέματα υπόγειου νερού (Σούλιος 2004).

Με βάση τα υφιστάμενα και δεδομένα στοιχεία υπολογίζονται τα **ρυθμιστικά, τα εκμεταλλεύσιμα και τα μόνιμα** αποθέματα της λεκάνης.

- ***Ρυθμιστικά αποθέματα.***

Αυτά είναι ουσιαστικά η ποσότητα του υπογείου νερού που περιλαμβάνεται στο υπέδαφος ανάμεσα στην ανώτερη ετήσια στάθμη των υδροφόρων στρωμάτων και στην κατώτερη (Σούλιος 2004). Στον ελληνικό χώρο η στάθμη αυτή βρίσκεται στην ανώτερή της τιμή περίπο υ από τα μέσα Απριλίο υ έως τα τέλη Μαΐου και στην κατώτερη από τις αρχές Οκτωβρίου έως τα τέλη Νοεμβρίου. Στην περιοχή που εξετάζεται, λαμβάνεται ως ανώτερη ετήσια στάθμη αυτή που έχει καταγραφεί στις *1/5/1997* και σαν κατώτερη αυτή στις *1/9/1998*.

Τα ρυθμιστικά αποθέματα υπολογίζονται από τη σχέση,

$$W_R = E \times \Delta h \times m_e$$ όπου,

E : η έκταση του υδροφόρου στρώματος

Δh : η μέση τιμή της διακύμανσης της στάθμης

$\mathbf{m_e}$: το ενεργό πορώδες

Στην προκειμένη περίπτωση η έκταση του υδροφόρου στρώματος είναι η συνολική έκταση της λεκάνης, δηλαδή **E = 22,36 km^2**. Η μέση τιμή διακύμανσης της στάθμης, που προκύπτει από τη μέση τιμή των διαφορών της κατώτερης από την ανώτερη στάθμη σε κάθε γεώτρηση, υπολογίζεται ότι είναι **Δh = 3,89 m**. Τέλος, η τιμή του ενεργού πορώδους υπολογίζεται κατ' εκτίμηση από τη λιθολογία των υδροφορέων που είναι πρόσφατες αμμώδεις προσχώσεις. Συνεπώς, η τιμή το υ ενεργού πορώδους, που αντιστοιχεί σ' αυτή τη λιθολογία, είναι 10-20 %. Όμως, λόγω του ότι έχουμε και κάποιες στρώσεις αργίλων, για τον υπολογισμό των ρυθμιστικών αποθεμάτων χρησιμοποιείται η τιμή 8 % από την οποία προκύπτει $\mathbf{m_e = 0,08}$.

Επομένως, από το γινόμενο των τριών παραπάνω παραμέτρων τα ρυθμιστικά αποθέματα βρίσκεται ότι είναι $\mathbf{W_R = 6,95 \times 10^6\ m^3}$.

- ***Μόνιμα αποθέματα.***

Είναι η ποσότητα του νερού που βρίσκεται κάτω από την κατώτερη ετήσια στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα (εικόνα 5.8) ή αν εξετάζεται σε υπερετήσια βάση, κάτω από τη μέση ετήσια κατώτερη στάθμη (Σούλιος 2004).

Τα μόνιμα αποθέματα στους ελεύθερους υδροφόρους υπολογίζονται από τη σχέση

$W_p = E \times H \times m_e$ όπου,

E : η έκταση του υδροφόρου στρώματος

H : το μέσο πάχος των υδροφόρων στρωμάτων

$\mathbf{m_e}$: το ενεργό πορώδες

Ομοίως με τα ρυθμιστικά αποθέματα, η έκταση του υδροφόρου στρώματος είναι **E = 22,36 km^2**. Το μέσο πάχος των υδροφόρων στρωμάτων, που προκύπτει από το μέσο όρο του πάχους των υδροφόρων σε κάθε γεώτρηση, υπολογίζεται ότι είναι **H = 66,7 m**. Τέλος, η τιμή του ενεργού πορώδους, όπως και στα ρυθμιστικά αποθέματα, είναι **m_e = 0,08**.

Επομένως, από το γινόμενο των τριών παραπάνω παραμέτρων τα μόνιμα αποθέματα βρίσκεται ότι είναι **W_p = 119,3 × 10^6 m^3**.

- ***Εκμεταλλεύσιμα αποθέματα.***

Εκμεταλλεύσιμα ή εκκενώσιμα αποθέματα είναι εκείνα τα οποία μπορούν να τεθούν υπό εκμετάλλευση (δεν υπάρχει σαφής καθορισμός τους στη βιβλιογραφία). Συνδέονται με τα ρυθμιστικά αποθέματα, αλλά ποσοτικά είναι περισσότερα. Είναι δυνατόν να οριστούν ως η ποσότητα εκείνων των αποθεμάτων που θα μπορούσαν κάθε χρόνο να τίθενται υπό εκμετάλλευση, χωρίς να ανατρέπεται η φυσική ισορροπία σε μια λεκάνη ή προκαλείται περιβαλλοντικό πρόβλημα (Σούλιος 2004).

Τα εκμεταλλεύσιμα αποθέματα υπολογίζονται από τη σχέση,

$$W_p = W_R + \frac{2}{3} W_R$$

όπου,

W_R : Τα ρυθμιστικά αποθέματα του υδροφόρου στρώματος.

Τα ρυθμιστικά αποθέματα για το υδροφόρο στρώμα, που μελετάται, είναι **W_R=6,95 × 10^6 m^3.**

Συνεπώς, τα εκμεταλλεύσιμα αποθέματα ισούνται με **W_E= 11,6 × 10^6 m^3** .

6. Ο ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗΣ MODFLOW

6.1 Γενικά.

Για την προσομοίωση της υδροδυναμικής κατάστασης των υδροφορέων χρησιμοποιείται από πολλούς ερευνητές ο κώδικας **MODFLOW** ***(Modular three dimensional finite difference ground water flow model)*** της Αμερικανικής Υπηρεσίας Γεωλογικών Ερευνών *(U.S.G.S.).* Το ***GMS (Groundwater Modeling System)*** συνιστά το πιο πλήρες πρόγραμμα που υποστηρίζει κώδικα MODFLOW στην αγορά. Ακόμα, στα πλεονεκτήματά του συνυπολογίζεται και η συμβατότητά του με το ArcGIS.

Το πρόγραμμα στηρίζεται στην αριθμητική επίλυση μιας κύριας διαφορικής εξίσωσης, όπως προκύπτει από την εφαρμογή της εξίσωσης διατήρησης της μάζας και του νόμου του Darcy. Πρόκειται για ένα μοντέλο πεπερασμένων διαφορών με επίλυση των εξισώσεων στο κέντρο των κυψελίδων του κανάβου.

Το GMS είναι γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού ***FORTRAN*** και περιλαμβάνει το κεντρικό πρόγραμμα και μια σειρά από ανεξάρτητα υποπρογράμματα ***(packages)***.

Τα κυριότερα υποπρογράμματα ***(packages)*** είναι τα εξής:

Basic package, BCF2 (block centered flow) package, River package, Stream package, Well package, Recharge package, Drain package, Evapotranspiration package, General-head package, SIP solution package, SSOR solution package, PCG2 solution package, Output control package.

Για την εφαρμογή του MODFLOW σε μία περιοχή πρέπει να γίνει εισαγωγή κάποιων απαραίτητων δεδομένων, τα οποία είναι τα εξής:

- Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα.
- Οι αρχικές συνθήκες, δηλαδή οι τιμές του πιεζομετρικού φορτίου σε όλους τους κόμβους του κανάβου.
- Οι οριακές συνθήκες, είτε με τιμές πιεζομετρικού φορτίου, είτε με τη μορφή ροής στα όρια του κανάβου.

06/07/2010 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

- Τα βάθη των υδροφόρων στρωμάτων.
- Οι υδραυλικές παράμετροι (υδραυλική αγωγιμότητα, συντελεστής αποθηκευτικότητας).
- Οι παροχές αντλήσεων ή εμπλουτισμού.
- Τα δεδομένα κατείσδυσης, που προκύπτουν από τις βροχοπτώσεις, την εξατμισοδιαπνοή και το είδος των γεωλογικών σχηματισμών.
- Οι διηθήσεις από ποταμοχειμάρρους.
- Οι επιστροφές άρδευσης.

Πρέπει να τονισθεί ότι η ακρίβεια της προσομοίωσης του μοντέλου συνδέεται άμεσα με την αξιοπιστία των εισαγόμενων πληροφοριών.

6.2 Η εξίσωση της ροής.

Η τρισδιάστατη κίνηση υπογείου ύδατος, υπό συνθήκες μη μόνιμης ροής διαμέσου ενός ετερογενούς και ανισότροπου πορώδους μέσου, περιγράφεται από τη μερική διαφορική εξίσωση (Anderson and Woessner, 1992):

$$\frac{\partial}{\partial x}(T_{xx}\frac{\partial h}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(T_{yy}\frac{\partial h}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(T_{zz}\frac{\partial h}{\partial z})-W=S_s\frac{\partial h}{\partial t} \qquad \textbf{(6.1)}$$

Όπου:

T_{xx}, T_{yy}, T_{zz} : οι τιμές της μεταβιβαστικότητας κατά τον x, y, z αντίστοιχα (L^2 /T)

h : το υδραυλικό φορτίο (L)

W: παροχή ανά μονάδα χρόνου, που προέρχεται από εισροές ή εκροές του νερού (T^{-1})

S_s: ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους μέσου (L^{-1})

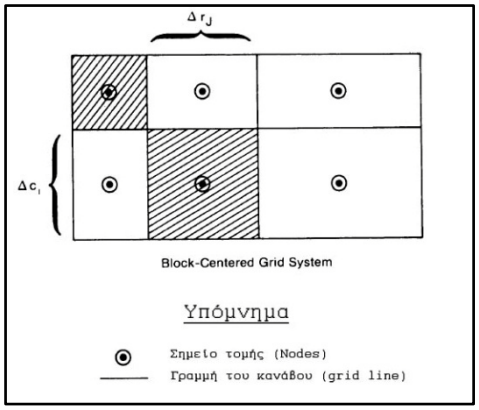
t : ο χρόνος (T)

Στη γενική περίπτωση, η ειδική αποθηκευτικότητα και η υδραυλική αγωγιμότητα είναι συναρτήσεις του χώρου ($S_s = S_s\,(x,y,z)$, $T_{xx}=T_{xx}\,(x,y,z)$ *κλπ.*), ενώ η παροχή ανά μονάδα όγκου είναι συνάρτηση του χώρου και του χρόνου ($W=W(x,y,z,t)$). Η εξίσωση (6.1) περιγράφει τη μη μόνιμη υπόγεια ροή σε ετερογενές και ανισότροπο μέσο, με την παραδοχή ότι οι κύριοι άξονες της υδραυλικής αγωγιμότητας συμπίπτουν με το γενικό σύστημα συντεταγμένων.

Για την αριθμητική επίλυση της εξίσωσης (6.1), με σχήμα πεπερασμένων διαφορών, το πεδίο επίλυσης διακριτοποιείται σε πεπερασμένο πεδίο διακεκριμένων σημείων στο χώρο και στο χρόνο. Η επίλυση του συστήματος γραμμικών διαφορικών εξισώσεων που προκύπτουν από την παραπάνω διακριτοποίηση οδηγεί στην εξίσωση μίας προσεγγιστικής λύσης και προσδιορισμού των υδραυλικών φορτίων στο πεδίο επίλυσης.

6.3 Αριθμητικό σχήμα επίλυσης – Διακριτοποίηση του πεδίου.

Για την εξαγωγή του αριθμητικού σχήματος επίλυσης της εξίσωσης (6.1), το πεδίο επίλυσης (υδροφορέας) διακριτοποιείται χωρικά σε ένα πλέγμα (κάναβο) κελίων, οι θέσεις των οποίων προσδιορίζονται με όρους σειρών, στηλών και επιπέδων με τη χρήση δεικτών *i,j,k* (εικόνα 6.2). Το κέντρο κάθε κελιού (κόμβος) αποτελεί το σημείο προσδιορισμού του υδραυλικού φορτίου (block – centered formulation, εικόνα 6.1).



Εικόνα 6.1 Κάναβος όπου φαίνεται το block centered formulation

Η αρχή της συνέχειας ισχύει για κάθε κελί, ο ρίζοντας πως το σύνολο της εισερχόμενης και εξερχόμενης ροής - προς και από το κελί - θα ισούται με την αλλαγή του αποθέματος μέσα στο κελί. Βάσει της παραπάνω αρχής και της χωρικής

διακριτοποίησης, η εξίσωση (6.1) προσεγγίζεται με το άρρητο, ανάντη σχήμα πεπερασμένων διαφορών της εξίσωσης (6.2).

$$
\begin{aligned}
&CR_{i,j-1/2,k}(h^m_{i,j-1,k}-h^m_{i,j,k})+CR_{i,j-1/2,k}(h^m_{i,j+1,k}-h^m_{i,j,k})+\\
&CR_{i-1/2,j,k}(h^m_{i-1,j,k}-h^m_{i,j,k})+CR_{i-1/2,j,k}(h^m_{i+1,j,k}-h^m_{i,j,k})+\\
&CR_{i,j,k-1/2}(h^m_{i,j,k-1}-h^m_{i,j,k})+CR_{i,j,k-1/2}(h^m_{i,j,k+1}-h^m_{i,j,k})+\\
&P_{i,j,k}h^m_{i,j,k}+Q_{i,j,k}=SS_{i,j,k}(\Delta r_j\Delta c_i\Delta v_k)\frac{(h^m_{i,j,k}-h^{m-1}_{i,j,k})}{t_m-t_{m-1}}
\end{aligned}
\qquad \textbf{(6.2)}
$$

Όπου

i,j,k δείκτες χωρικής διακριτοποίησης κατά τους άξονες x,y,z αντίστοιχα (εικόνα 6.3)

m δείκτης διακριτοποίησης στο χρόνο

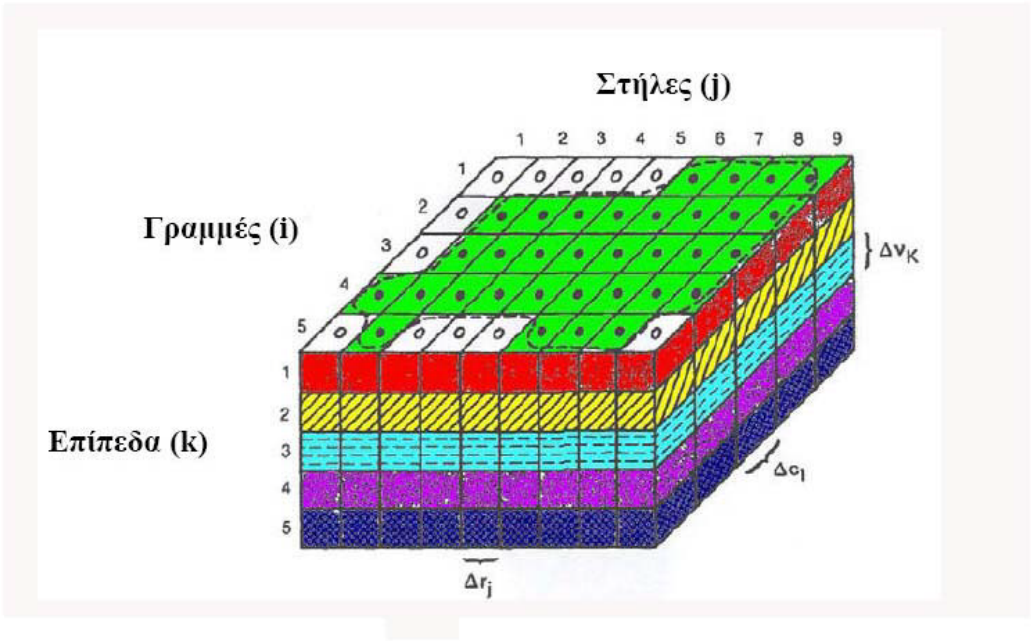
h το υδραυλικό φορτίο (L)

SS ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους μέσου (L^{-1})

$\Delta rj, \Delta ci, \Delta v_k$ οι διαστάσεις των κελιών κατά τη διεύθυνση των σειρών, στηλών και επιπέδων αντίστοιχα (εικόνα 6.2)

CR,CC,CV οι συντελεστές μεταβιβασιμότητας για ροή κατά τη διεύθυνση των σειρών, στηλών και επιπέδων αντίστοιχα (L^2t^{-1})

Τέλος, όπου $P_{i,j,k}=\sum_{n=1}^{N}p_{i,j,k,n}$ (L^2t^{-1}) και $Q_{i,j,k}=\sum_{n=1}^{N}q_{i,j,k,n}$ (L^3t^{-1}) συντελεστές που καθορίζουν τη ροή από n εξωτερικούς παράγοντες προς τα κελιά, σύμφωνα με τη σχέση $QS_{i,j,k}=P_{i,j,k}h_{i,j,k}+Q_{i,j,k}$ (L^3t^{-1}).



Υπόμνημα

- - - - Όρια υδροφορέα

● Ενεργά κελιά

0 Ανενεργά κελιά

Δr_J Διάσταση κελιού κατά τη διεύθυνση των σειρών. Ο δείκτης (j) υποδεικνύει τον αριθμό της στήλης

Δc_I Διάσταση κελιού κατά τη διεύθυνση των στηλών. Ο δείκτης (i) υποδεικνύει τον αριθμό της σειράς

Δv_K Διάσταση κελιού κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Ο δείκτης (k) υποδεικνύει τον αριθμό του επιπέδου

Εικόνα 6.2 Χωρική διακριτοποίηση υδροφορέα στο MODFLOW

Το αριθμητικό σχήμα της εξίσωσης (6.2) περιγράφει τη ροή από και προς το κελί i,j,k την κάθε χρονική στιγμή και περιλαμβάνει 7 άγνωστα υδραυλικά φορτία του κελιού i,j,k και των έξι γειτονικών του κελιών (εικόνα 6.3). Η εξίσωση (6.2) μετασχηματίζεται, με μεταφορά όλων των αγνώστων στο 1^{ο} μέλος, στην εξίσωση (6.3).

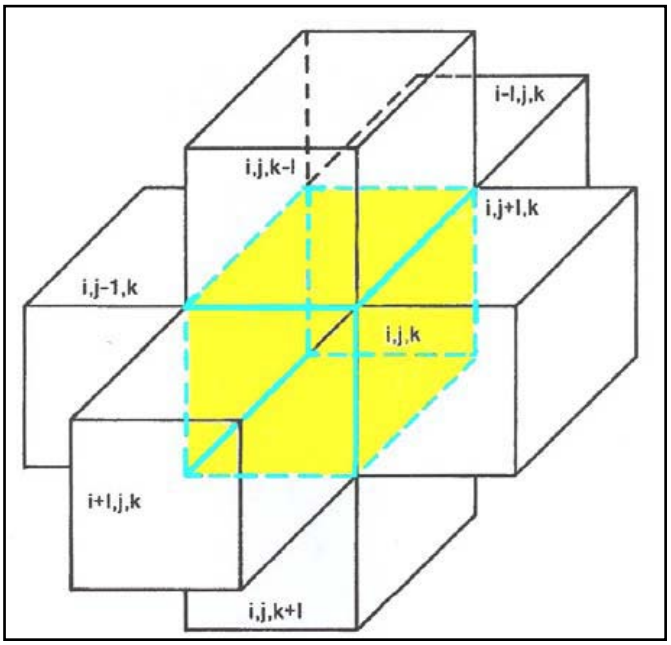
$$CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} h^m_{i,j,k-1} + CC_{i-\frac{1}{2},j,k} h^m_{i-1,j,k} + CC_{i,j-\frac{1}{2},k} h^m_{i,j-1,k} + (-CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} - CC_{i-\frac{1}{2},j,k} - CC_{i,j-\frac{1}{2},k} - CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} - CC_{i+\frac{1}{2},j,k} - CC_{i,j+\frac{1}{2},k} + HCOF_{i,j,k}) h^m_{i,j,k} + CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} h^m_{i,j,k+1} + CC_{i+\frac{1}{2},j,k} h^m_{i+1,j,k} + CC_{i,j+\frac{1}{2},k} h^m_{i,j+1,k} = RHS_{i,j,k} \quad \textbf{(6.3)}$$

Όπου,

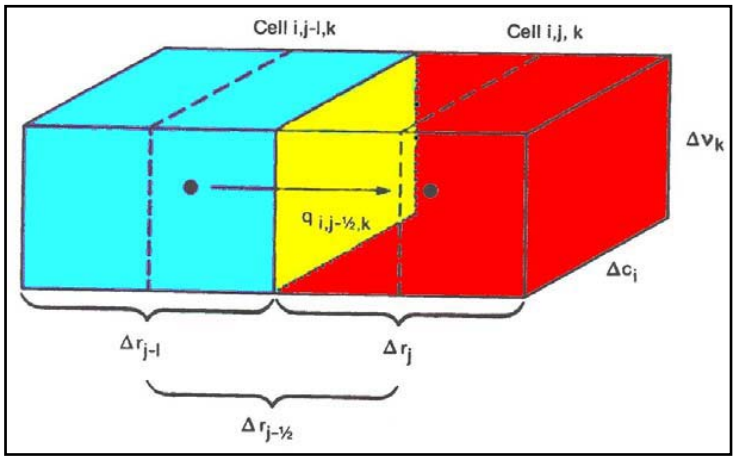
$$HCOF_{i,j,k} = P_{i,j,k} - \frac{SCL_{i,k,j}}{t_m - t_{m-1}} \qquad (L^2t^{-1})$$

$$RHS_{i,j,k} = -Q_{i,j,k} - \frac{SCl_{i,j,k} h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} \qquad (L^3t^{-1})$$

$$SCl_{i,j,k} = SS_{i,j,k} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$$



Εικόνα 6.3 Κελί i,j,k και δείκτες για τα έξι γειτονικά κελιά



Εικόνα 6.4 Ροή από το κελί i,j-1,k στο κελί i,j,k.

Το σύστημα των εξισώσεων, που διαμορφώνεται με την εφαρμογή της εξίσωσης (6.3) σε κάθε κελί του κανάβου και τον ορισμό των οριακών συνθηκών, εκφράζεται σε πινακοποιημένη μορφή ως:

$$[A]\cdot\{h\}=\{q\} \qquad \textbf{(6.4)}$$

Όπου,

[A] ο πίνακας των συντελεστών των υδραυλικών φορτίων

{h} ο πίνακας των αγνώστων υδραυλικών φορτίων στο χρονικό βήμα m

{q} ο πίνακας των σταθερών όρων RHS.

Το πρόγραμμα, μέσα από μία σειρά υπορουτίνων, διαμορφώνει τους πίνακες [A] και {q}. Στη συνέχεια, με χρήση κάποιας αριθμητικής μεθόδου, επιλύει το σύστημα της εξίσωσης (6.3) προσδιορίζοντας τα υδραυλικά φορτία {h} στους κόμβους του κανάβου διακριτοποίησης για κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης.

6.4 Προσομοίωση γεώτρησης στο MODFLOW.

Οι γεωτρήσεις προσομοιώνονται στο MODFLOW ως κελιά ορθογωνικής ή τετραγωνικής διατομής στα οποία καθορίζεται μια παροχή άντλησης. Όπως αποδεικνύεται ακολούθως, αυτός ο τρόπος προσομοίωσης των γεωτρήσεων επιτρέπει μόνο υπό προϋποθέσεις τη σύγκριση της υπολογιζόμενης, κατά την περίοδο άντλησης, στάθμης με μετρημένες τιμές (Trescott et al., 1976).

Το υδραυλικό φορτίο, που υπολογίζεται για έναν κόμβο του κανάβου, που αντιστοιχεί σε γεώτρηση άντλησης, είναι ένα μέσο υδραυλικό φορτίο, που έχει προσδιοριστεί για το κελί και δεν αντιστοιχεί στο πραγματικό υδραυλικό φορτίο μέσα στη γεώτρηση. Εάν υποτεθεί ότι το πηγάδι – κελί αντλεί νερό ομοιόμορφα από κάθε πλευρά του και διαπερνά πλήρως το πάχος του υδροφορέα, η παροχή εισροής στο κελί - από κάθε πλευρά - αντιστοιχεί στο ¼ της συνολικής εισροής, εξαιτίας μόνο της άντλησης (εικόνα 6.5 α). Τότε, η παροχή εισροής, από το κελί (i-1,j,k) στο κελί (i,j,k), μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση της εξίσωσης (6.5):

$$\frac{Q_{w[i,j,k]}}{4} = \Delta x_j \cdot T_{i,j} \cdot \frac{\Delta h}{\Delta y} \qquad \textbf{(6.5)}$$

Όπου : $\Delta h = h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}$ η διαφορά του υπολογισμένου υδραυλικού φορτίου στους δύο γειτονικούς κόμβους.

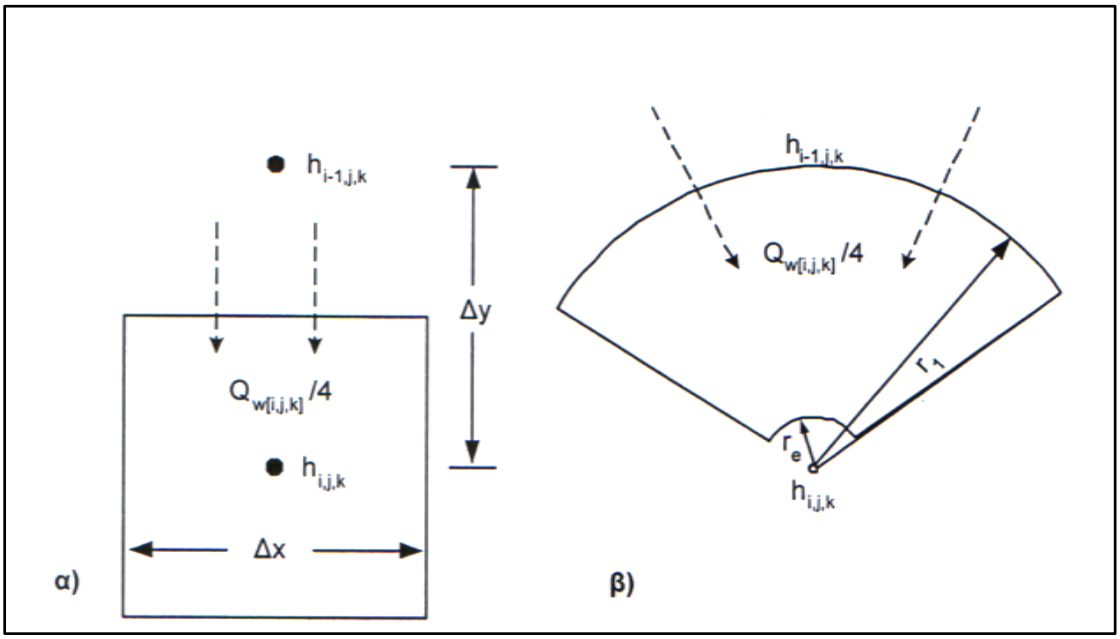
$T_{i,j} = T_{xx[i,j]} = T_{yy[i,j]}$ ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας (υπόθεση ομογενή και ισότροπου υδροφορέα)

Η ισοδύναμη εισροή σε γεώτρηση κυκλικής διατομής και για καθεστώς ακτινικής ροής, δίνεται από την εξίσωση του Thiem (1906):

$$\frac{Q_{w[i,j,k]}}{4} = \frac{\pi \cdot T_{i,j}}{2} \cdot \frac{\Delta h}{\ln(\frac{r_1}{r_e})} \qquad \textbf{(6.6)}$$

όπου: r_1 η ακτίνα απόστασης ίσης με τις πλευρές του κελίου – πηγαδιού

r_e η ακτίνα που αντιστοιχεί σε πηγάδι κυκλικής διατομής και άντλησης με το κελί – πηγάδι. (Εικόνα 6.5)



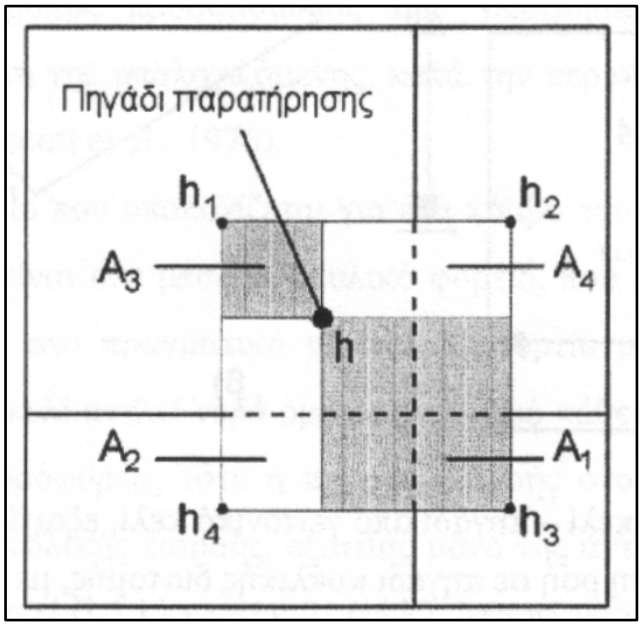
Εικόνα 6.5 α) Ροή σε κελί – πηγάδι από γειτονικό κελί, εξαιτίας άντλησης παροχής Q_W
β) Ακτινική ροή σε πηγάδι κυκλικής διατομής, με παροχή άντλησης Q_W

Εξισώνοντας τις εξισώσεις (6.5) και (6.6) προσδιορίζεται η ακτίνα αντλητικής γεώτρησης κυκλικής διατομής, ισοδύναμης με τη γεώτρηση – κελί του διακριτοποιημένου υδροφορέα:

$$r_e = \frac{r_1}{4.81} \qquad \textbf{(6.7)}$$

Επειδή το MODFLOW υπολογίζει τα υδραυλικά φορτία στο κέντρο των κελιών του κανάβου και λόγω του ότι σπάνια οι θέσεις των γεωτρήσεων συμπίπτουν με τα κέντρα των κελιών, στον κώδικα εφαρμόζεται μια μέθοδος παλινδρόμησης για τον υπολογισμό των τιμών τού προσδιορισμένου από την προσομοίωση υδραυλικού φορτίου στις θέσεις των γεωτρήσεων. Η μέθοδος χρησιμοποιεί τις υπολογισμένες τιμές των τεσσάρων - γειτονικών στη θέση της γεώτρησης - κελιών σύμφωνα με την εξίσωση (6.8) και την εικόνα 6.6.

$$h = \frac{\sum_{j=1}^{4} (h_i \cdot A_j}{\sum_{j=1}^{4} A_j} \qquad \textbf{(6.8)}$$



Εικόνα 6.6 Υπολογισμός υδραυλικού φορτίου στη θέση της γεώτρησης (h) βάσει των υπολογισμένων τιμών στα τέσσερα γειτονικά κελιά του κανάβου διακριτοποίησης.

όπου: h το υδραυλικό φορτίο στη θέση της γεώτρησης

h_i τα υδραυλικά φορτία στα 4 γειτονικά κελιά (βλ εικόνα 6.6)

A_j τα εμβαδά των περιοχών που ορίζονται από τα κέντρα των 4 κελιών και τη θέση της γεώτρησης (βλ. εικόνα 6.6).

6.5 *Μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επίλυση των αλγεβρικών εξισώσεων από το MODFLOW.*

Για την επίλυση, το πρόγραμμα MODFLOW χρησιμοποιεί την επαναληπτική μέθοδο. Πιο συγκεκριμένα υπάρχει δυνατότητα χρήσης τριών διαφορετικών μεθόδων:

1. Ισχυρά πεπλεγμένη (Strongly Implicit Procedure 1, S.I.P. 1)
2. Σταδιακή υπερχαλάρωση των κόμβων (Slice Successive Overlaxation 1, S.O.R.1) και
3. Υπό προϋποθέσεις συζυγών κλίσεων (Preconditioned Conjugate Gradient 2, P.C.G.2).

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών παρουσιάζει πλεονεκτήματα όπως: η καλύτερη περιγραφή πολύπλοκων συνόρων, η λεπτομερής ανάλυση περιοχών με πύκνωση των κόμβων του δικτύου κ.ά.

Η χωρική διακριτοποίηση του υδροφορέα πραγματοποιείται με τη μορφή ενός δικτύου από στοιχειώδη τρισδιάστατα ορθογώνια που ονομάζονται κυψελίδες *(cells).* Η θέση αυτών περιγράφεται με τη μορφή γραμμών, στηλών και στρωμάτων.

Η στάθμη του υπογείου νερού υπολογίζεται για ένα σημείο της κάθε κυψελίδας που ονομάζεται κόμβος. Στην προσομοίωση με το MODFLOW ο υπολογισμός του φορτίου γίνεται στο κέντρο των κυψελίδων (block-centered).

Σε κατάσταση μη μόνιμης ροής η χρονική παράγωγος επιτυγχάνεται με τη μέθοδο της προς τα πίσω διαφοράς (backward difference).

Οι τύποι των κυψελίδων, που χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν τις συνθήκες στα όρια, είναι οι ακόλουθοι:

α) σταθερού φορτίου (constant head). Στα όρια αυτά η στάθμη παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αποδίδονται με τον κωδικό **-1.**

06/07/2010 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

β) κυψελίδες μηδενικής ροής (no flow boundary ή inactive). Στα όρια μηδενικής ροής περιλαμβάνονται οι κυψελίδες, όπου καμία ρο ή νερο ύ από και προς αυτές δεν λαμβάνει χώρα, δηλαδή όταν οι εισροές είναι μηδενικές. Αποδίδονται με τον κωδικό **0**.

γ) κυψελίδες μεταβαλλόμενου φορτίου (variable head cell). Ο τύπος κυψελίδων μεταβαλλόμενου φορτίου είναι αυτός, κατά τον οποίο η στάθμη μεταβάλλεται με το χρόνο. Αποδίδονται με τον κωδικό **1**.

δ) κυψελίδες σταθερής εισροής ή constant flux ή GHB (general head boundaries). Στα όρια αυτά η εισροή παραμένει σταθερή και η στάθμη μεταβάλλεται ανάλογα με τις μεταβολές στις γειτονικές κυψελίδες.

Το μέγεθος του μοντέλου προσδιορίζεται με τον αριθμό γραμμών, τον αριθμό στηλών και τον αριθμό στρωμάτων (NROW, NCOL, NLAY).

Τα υδροφόρα στρώματα είναι δυνατόν να προσομοιωθούν σαν υπό πίεση ή ελεύθερα ή σαν συνδυασμός και των δύο.

6.6 Βασικά υποπρογράμματα του MODFLOW

Τα πακέτα που συνήθως χρησιμοποιούνται κατά την προσομοίωση των υπογείων ροών είναι τα εξής (Βουδούρης, 2004) :

1) *Βασικό πακέτο (Basic Package, BAS)*

Τα δεδομένα που εισάγονται στο βασικό πακέτο αφορούν:

- τον αριθμό των γραμμών και στηλών
- τον αριθμό των υδροφόρων στρωμάτων
- τη χρονική περίοδο προσομοίωσης και το βήμα κάθε περιόδου
- τον καθορισμό των μονάδων μέτρησης
- τις οριακές συνθήκες σε κάθε κόμβο του κανάβου

Ως αρχική συνθήκη εισάγεται η πιεζομετρία, στην αρχή της χρονικής περιόδου, που προέρχεται από μετρήσεις πεδίου.

2) *Block-Centered Flow Package (BCF)*

Στο πακέτο αυτό εισάγονται πληροφορίες που αφορούν:

- τον τύπο του υδροφόρου (ελεύθερος, υπό πίεση, ημιελεύθερος)
- τις συνθήκες ροής (μόνιμη ή μη μόνιμη κατάσταση ροής)
- τις διαστάσεις των κυψελίδων κατά τη διεύθυνση των αξόνων χ και ψ
- τις συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας για τους ελεύθερους υδροφόρους ορίζοντες ή της μεταβιβαστικότητας για τους υπό πίεση υδροφόρους ορίζοντες
- το συντελεστή αποθηκευτικότητας ή το ενεργό πορώδες

Απαραίτητη προϋπόθεση είναι κάθε κόμβος να εντοπίζεται στο κέντρο κάθε κυψελίδας του μοντέλου.

3) *Εμπλουτισμός (Recharge Package, RCH)*

Το πακέτο αυτό προσομοιώνει την επιφανειακή κατανομή του εμπλουτισμού προς το υπόγειο υδροφόρο σύστημα. Ο εμπλουτισμός αναφέρεται, είτε στην κατείσδυση από τις βροχοπτώσεις, είτε σε τεχνητό εμπλουτισμό.

Ο εμπλουτισμός μπορεί να εισαχθεί μόνο στο ανώτερο στρώμα (top layer). Έτσι, δεν χρειάζεται ο υπολογισμός του εμπλουτισμού που λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα σε πολλαπλά επίπεδα μιας κατακόρυφης στήλης, επειδή ο φυσικός εμπλουτισμός εισέρχεται στον υδροφορέα από την επιφάνεια του εδάφους.

4) *Γεωτρήσεις (Well Package)*

Το πακέτο αυτό αναφέρεται στα δεδομένα των γεωτρήσεων άντλησης ή εμπλουτισμού σε ένα υδροφορέα για μια δεδομένη περίοδο. Οι θετικές τιμές της παροχής υποδηλώνουν εμπλουτισμό, ενώ οι αρνητικές κατάσταση άντλησης. Ο ρυθμός άντλησης θεωρείται ανεξάρτητος, τόσο από την έκταση της κυψελίδας, όσο και από την πιεζομετρική στάθμη σ' αυτήν.

5) *Υδρορεύματα (Rivers, RIV)*

Το πακέτο αυτό προσομοιώνει τη ροή νερού μεταξύ υδρορεύματος (ποταμού, λίμνης) και υδροφόρου. Τα υδρορεύματα τροφοδοτούν τον υδροφόρο ή τροφοδοτούνται από αυτόν, ανάλογα την υδραυλική κλίση μεταξύ του επιφανειακού υδάτινου σώματος και του υδροφόρου. Το πακέτο «Rivers» απαιτεί τις κάτωθι πληροφορίες για κάθε κυψελίδα που περιέχει όριο ποταμού:

- Το υψόμετρο της στάθμης του υδρορεύματος, το οποίο μπορεί να αλλάζει με το χρόνο.
- Το υψόμετρο του πυθμένα του υδρορεύματος (υψόμετρο κοίτης).
- Την αγωγιμότητα (C). Είναι μια αριθμητική παράμετρος, που αντιπροσωπεύει την αντίσταση στη ροή μεταξύ υδρορεύματος και υδροφόρου. Υπολογίζεται από το μήκος του υδρορεύματος ανά κυψελίδα (L), το πλάτος του υδρορεύματος ανά κυψελίδα (W), το πάχος του υποστρώματος της κοίτης (M) και την υδραυλική αγωγιμότητά τους (K).

Έτσι, η αγωγιμότητα δίνεται από τη σχέση:

$$C = \frac{K.L.W}{M}$$

6) *Ισχυρά πεπλεγμένη μέθοδος (Strongly Implicit Procedure Package, SIP)*

Το πακέτο αυτό συνιστά μια μέθοδο επίλυσης του συστήματος γραμμικών εξισώσεων, που προκύπτει με τη χρήση επαναληπτικών διαδικασιών. Όπως έχει προαναφερθεί, για κάθε κυψελίδα χρησιμοποιείται μια εξίσωση πεπερασμένων διαφορών. Το σύνολο των εξισώσεων του κανάβου πρέπει να επιλύεται ταυτόχρονα σε κάθε βήμα. Η επίλυση συνίσταται στη λήψη μιας τιμής της πιεζομετρικής στάθμης για κάθε κόμβο.

7) *General Head Boundary (G.H.B.)*

Το πακέτο αυτό χρησιμοποιείται, κυρίως, για να προσομοιώσει την υπόγεια υδραυλική επικοινωνία γειτονικών υδροφορέων. Έτσι, αυτό το πακέτο μπορεί να προσομοιώσει την υδραυλική σύνδεση με έναν υδροφορέα που βρίσκεται εκτός των ορίων της προσομοιούμενης περιοχής και υποδηλώνει την ύπαρξη μιας πλευρικής τροφοδοσίας.

Η παροχή τροφοδοσίας είναι ανάλογη προς τη διαφορά της στάθμης ανάμεσα στην εξωτερική αυτή πηγή και σε κάθε κυψελίδα στην περιοχή του μοντέλου. Η παροχή αυτή επίσης εξαρτάται από την αγωγιμότητα *(conductance)* των υλικών ανάμεσα στην εξωτερική πηγή και στην κυψελίδα ή τις κυψελίδες του μοντέλου με

τις οποίες γειτνιάζει. Η αγωγιμότητα είναι μια αριθμητική παράμετρος και ορίζεται ως η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα της κυψελίδας πολλαπλασιαζόμενη με την εγκάρσια διατομή αυτής και διαιρούμενη με την απόστασή της από την εξωτερική πηγή τροφοδοσίας.

Το πακέτο αυτό απαιτεί για κάθε κυψελίδα:

- Το γενικό φορτίο: Είναι το επίπεδο της υδάτινης επιφάνειας στο όριο. Αυτό μπορεί να είναι φυσικά καθορισμένο όπως, για παράδειγμα, η επιφάνεια μιας λίμνης ή μπορεί να ληφθεί από τη ρύθμιση του μοντέλου.
- Την αγωγιμότητα: Αντιπροσωπεύει την αντίσταση της ροής ανάμεσα στο όριο γενικού φορτίου και τα υπόγεια νερά της προσομοιούμενης περιοχής.

8) *Constant head*

Τα όρια σταθερού φορτίου μένουν αμετάβλητα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτό προϋποθέτει ότι στην έναρξη και στο τέλος της προσομοίωσης τα φορτία είναι σταθερά.

9) *Evapotranspiration (ET)*

Το πακέτο αυτό προσομοιώνει τα αποτελέσματα της διαπνοής των φυτών και της εξάτμισης από την επιφάνεια του εδάφους. Στο GMS MODFLOW η εξατμισοδιαπνοή εισάγεται στην οροφή του ανώτερου στρώματος.

10) *Drains*

Αυτό έχει σχεδιασθεί να προσομοιώνει τα αποτελέσματα της επιστροφής του αρδευτικού νερού στον υδροφόρο ορίζοντα.

11) *Output Control*

Στο πακέτο αυτό καθορίζεται ο τρόπος και η μορφή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Έχει τη δυνατότητα σύνδεσης με άλλα βοηθητικά προγράμματα για τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

06/07/2010 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

6.7 Φάσεις της προσομοίωσης.

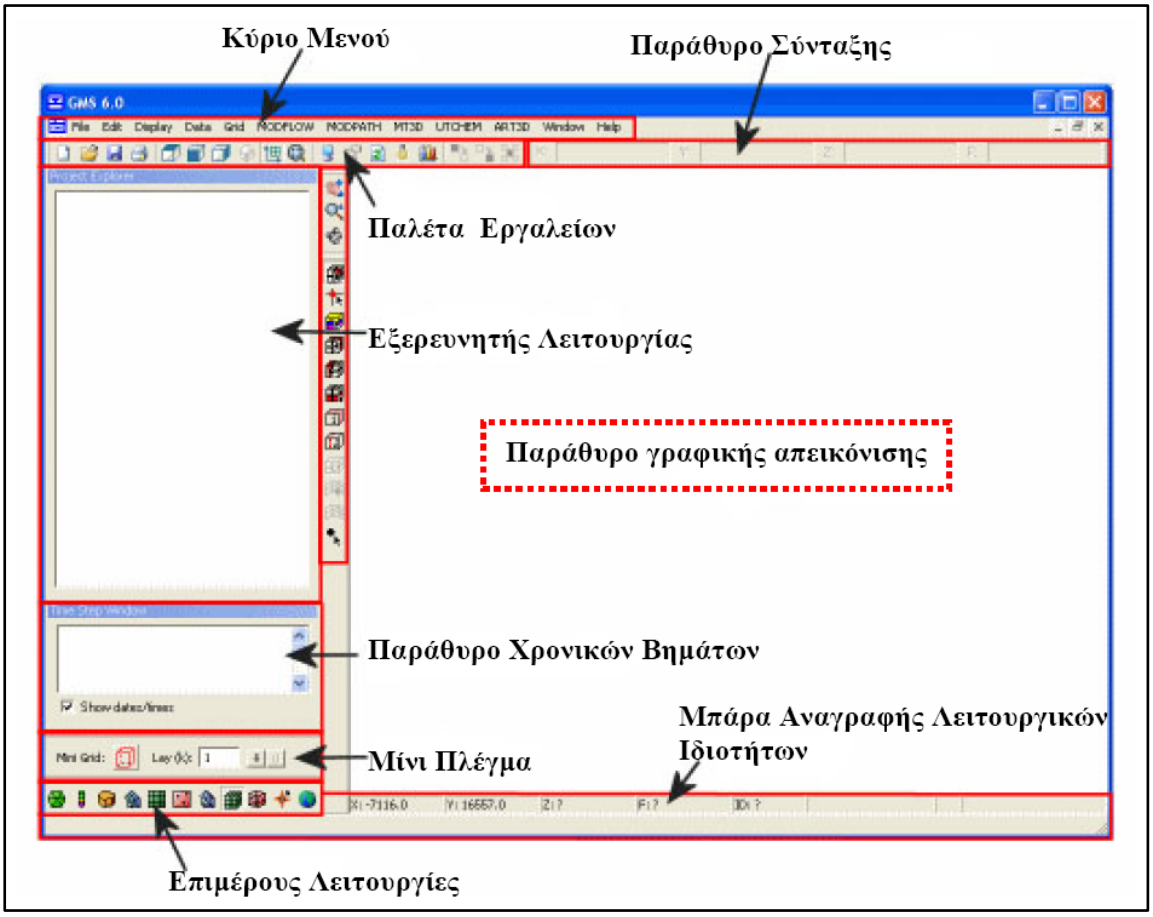
Όπως έχει προαναφερθεί, οι διάφορες φάσεις ανάπτυξης των μοντέλων υπόγειας ροής περιλαμβάνουν (Walton, 1991):

- Οριοθέτηση του προβλήματος που μελετάται.
- Συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων.
- Προγραμματισμός του μοντέλου.
- Εξειδίκευση του μοντέλου εισάγοντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, τις διαστάσεις, τις υδραυλικές παραμέτρους, τα όρια και τις αρχικές συνθήκες.
- Έλεγχος αξιοπιστίας του μοντέλου.
- Ρύθμιση του προκαταρκτικού μοντέλου, καθώς και οριστικοποίησή του.
- Ανάλυση της ευαισθησίας του προκαταρκτικού μοντέλου.
- Εκτέλεση ασκήσεων προσομοίωσης, που αποσκοπούν στην επίλυση του προβλήματος.
- Ανάλυση των προσομοιούμενων πληροφοριών.
- Παρουσίαση τεκμηριωμένων συμπερασμάτων.

06/07/2010 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

7. ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ GMS 6.0

Στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται μια σύντομη περιγραφή του περιβάλλοντος εργασίας του λογισμικού GMS 6.0. Το παράθυρο εργασίας του GMS είναι οργανωμένο στους ακόλουθους τομείς της εικόνας 7.1:



Εικόνα 7.1 Το παράθυρο εργασίας του λογισμικού GMS 6.0.

7.1 Το κύριο μενού.

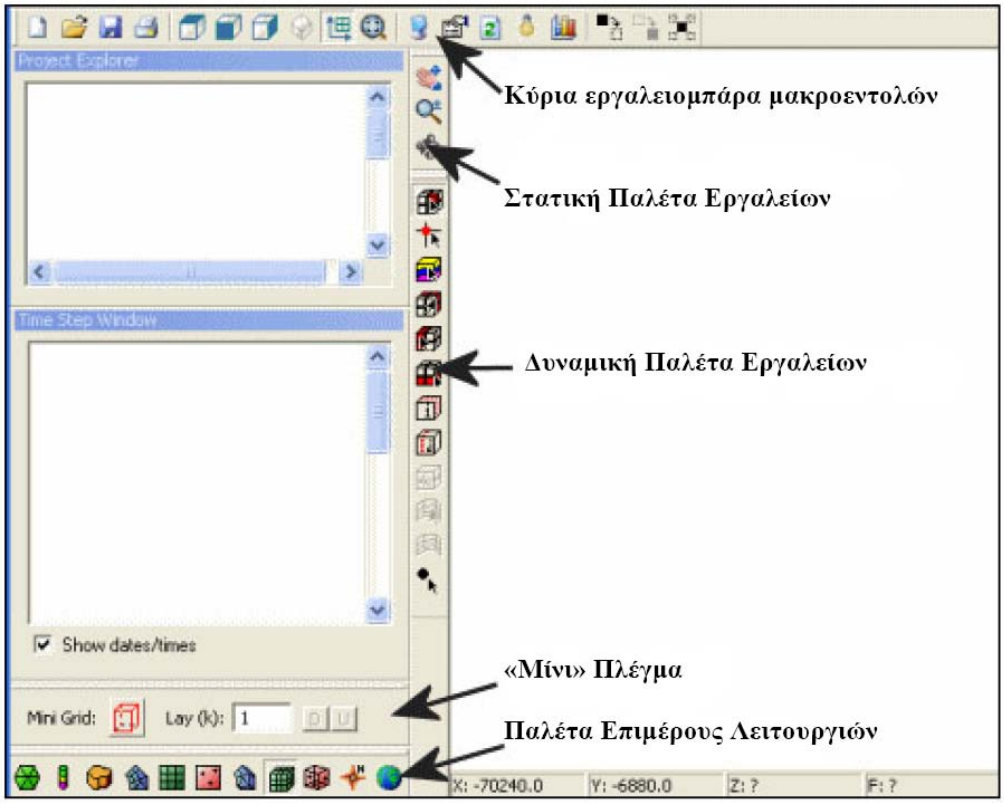
Οι επιλογές στο λογισμικό GMS 6.0 πραγματοποιούνται μέσω συρόμενων μενού τα οποία βρίσκονται στη μπάρα του κύριου μενού. Κάθε μενού δύναται να προσεγγιστεί με χρήση του δρομέα ή κρατώντας πατημένο το πλήκτρο ALT και επιλέγοντας το υπογραμμισμένο γράμμα που αντιστοιχεί στην επιθυμητή εντολή του κυρίου μενού. Από τη στιγμή που κάποιο μενού είναι ορατό, οι ανεξάρτητες εντολές

είναι δυνατόν να επιλεχθούν με χρήση του δρομέα ή των βελών του πληκτρολογίου και επιλέγοντας το πλήκτρο «ENTER».

Η κάθε επιμέρους λειτουργία έχει το δικό της σύνολο εντολών στο κύριο μενού. Οι τρεις πρώτες επιλογές, (Φάκελος- File, Σύνταξη- Edit, Εμφάνιση- Display) είναι οι ίδιες, ανεξάρτητα της επιλεγμένης λειτουργίας, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες.

7.2 Η παλέτα εργαλείων.

Η παλέτα εργαλείων περιλαμβάνει εργαλεία τα οποία αλληλεπιδρούν με τα δεδομένα και υποδιαιρείται σε πέντε μέρη, όπως φαίνεται στην εικόνα 7.2:



Εικόνα 7.2 Η παλέτα εργαλείων.

- **Η κύρια εργαλειομπάρα μακροεντολών:** Η κύρια εργαλειομπάρα μακροεντολών περιλαμβάνει συντομεύσεις σε συχνά χρησιμοποιούμενες εντολές (Εικόνα 7.3):

Εικόνα 7.3 Η κύρια εργαλειομπάρα μακροεντολών της παλέτας εργαλείων.

Η επεξήγηση των εικονιδίων της κύριας εργαλειομπάρας έχει ως εξής:

(1) : Δημιουργία νέου κενού αρχείου

(2) : Άνοιγμα υπάρχοντος αρχείου στο τρέχον ή σε νέο αρχείο

(3) : Αποθήκευση τρέχοντος αρχείου

(4) : Εκτύπωση του παραθύρου γραφικής απεικόνισης

(5) : Παρατήρηση κάτοψης

(6) : Παρατήρηση εμπρόσθιας όψης

(7) : Παρατήρηση πλάγιας όψης

(8) : Παρατήρηση λοξής όψης

(9) : Παρατήρηση ορθογώνιας όψης

(10): Παρατήρηση σε πλαίσιο

(11): Επιλογές εμφάνισης

(12): Ιδιότητες

(13): Ανανέωση απεικόνισης

(14): Χρησιμοποίηση πηγής φωτός

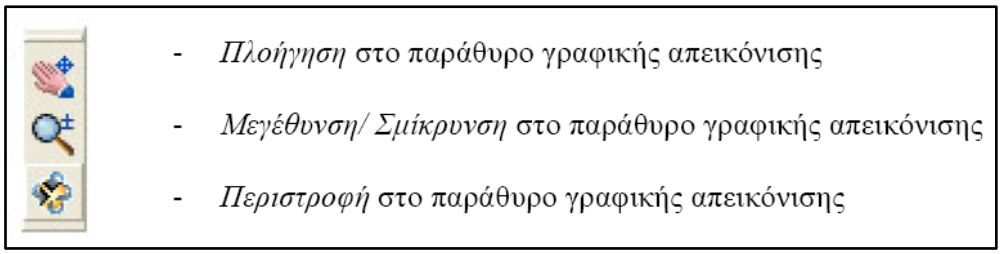
(15): Οδηγός διαγραμμάτων

(16): Απόκρυψη αντικειμένου

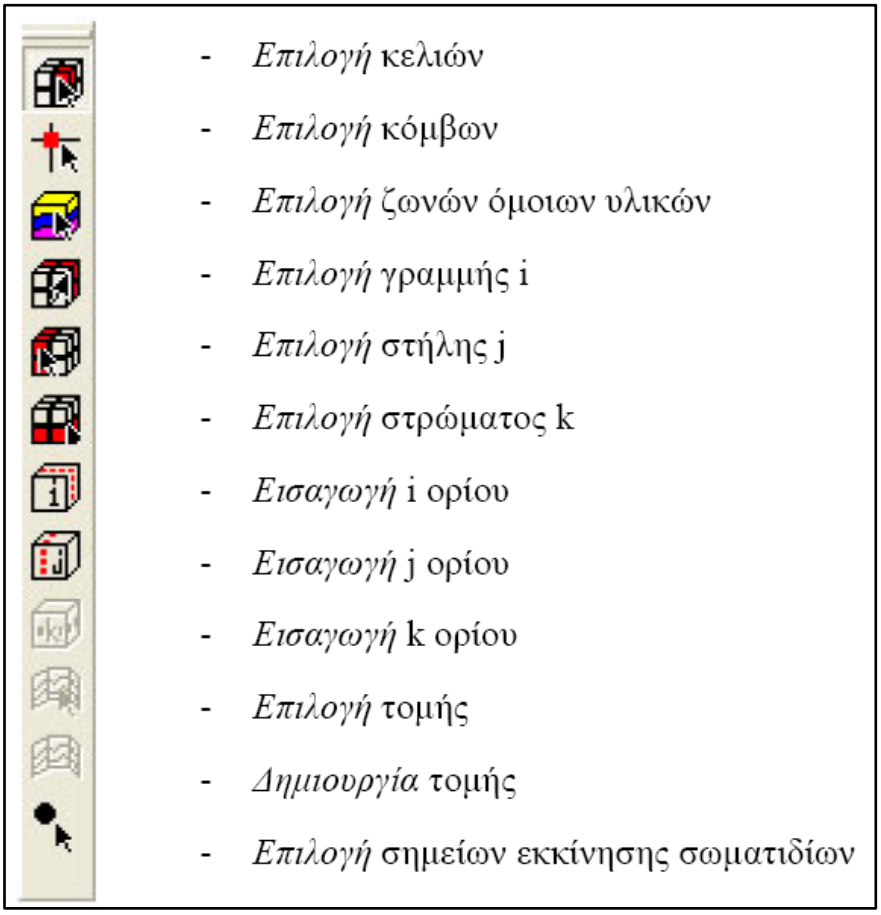
(17): Εμφάνιση αντικειμένου

(18): Αποκλειστική εμφάνιση αντικειμένου

- **Η στατική και η δυναμική παλέτα εργαλείων:** Η ενέργεια που λαμβάνει χώρα κατά το «κλικάρισμα» στο παράθυρο γραφικών, εξαρτάται από το ποιο εργαλείο είναι ενεργό. Τα εργαλεία είναι οργανωμένα σε δυο ομάδες. Η πρώτη διάταξη των τριών εικόνων έχει να κάνει με το χειρισμό της απεικόνισης (Στατική παλέτα εργαλείων - Εικόνα 7.4). Η δεύτερη διάταξη εικόνων είναι μια ομάδα εργαλείων καθορισμένων λειτουργιών (modules) που χρησιμεύουν στη δημιουργία και τη σύνταξη αντικειμένων στο παράθυρο γραφικών (Δυναμική παλέτα εργαλείων - Εικόνα 7.5). Η διάταξη των εικόνων που παρουσιάζεται σε αυτό το τμήμα της παλέτας εργαλείων, εξαρτάται από τις ενεργές επιμέρους λειτουργίες (modules). Για κάθε επιμέρους λειτουργία, παρέχεται μια μοναδική διάταξη εργαλείων.



Εικόνα 7.4 Η στατική παλέτα εργαλείων.

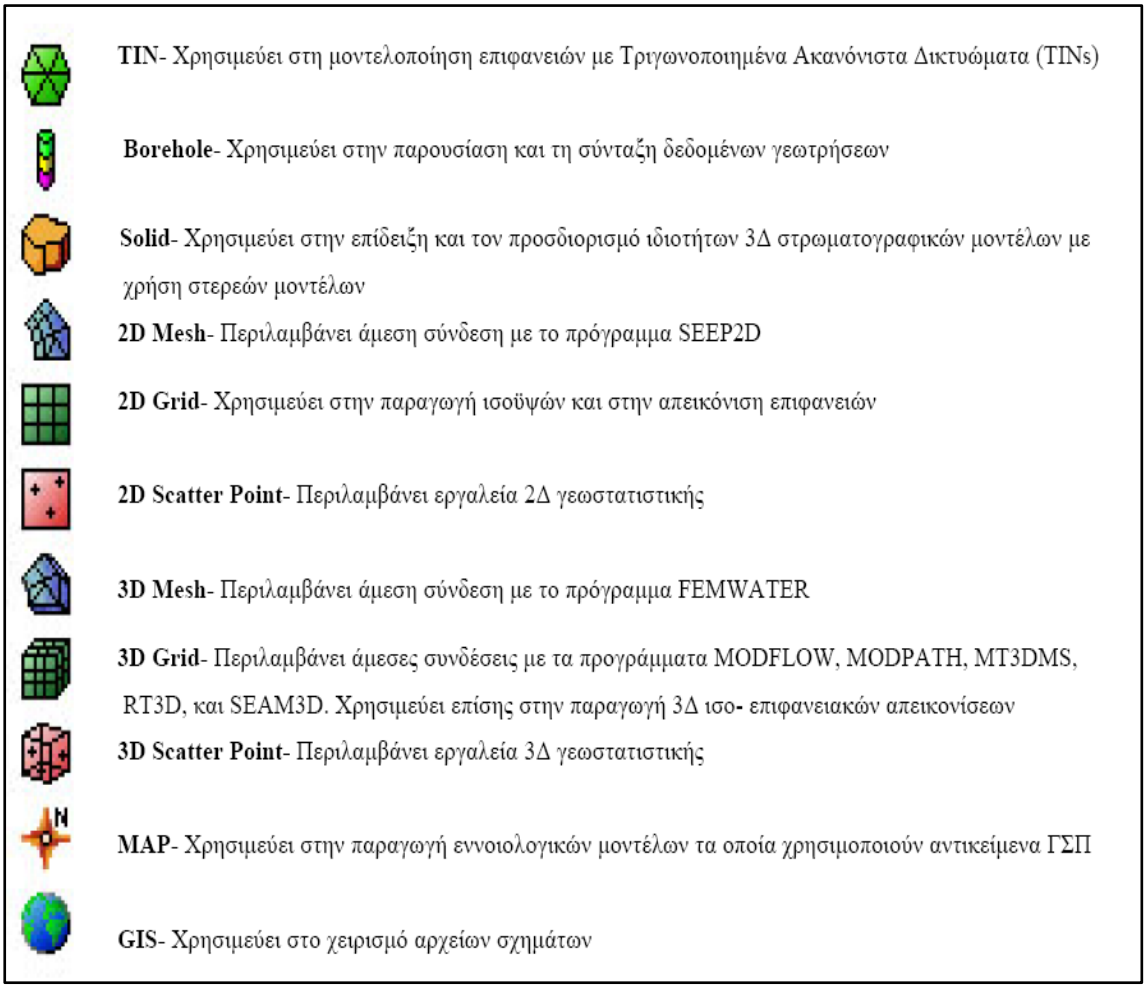


Εικόνα 7.5 Η δυναμική παλέτα εργαλείων όπως εμφανίζεται για την επιμέρους λειτουργία του 3Δ πλέγματος (3D Grid).

- **Το «μίνι» πλέγμα:** Η απεικόνιση του «μίνι» πλέγματος χρησιμεύει στην περιήγηση σε 3Δ πλέγματα (Εικόνα 7.6). Ο προκαθορισμένος τρόπος απεικόνισης στις επιμέρους λειτουργίες του 3Δ πλέγματος είναι ο «ορθογωνικός», δηλαδή η απεικόνιση μιας γραμμής, στήλης ή επιπέδου του πλέγματος τη φορά. Η λειτουργία του «μίνι» πλέγματος χρησιμεύει στον έλεγχο τού ποιά γραμμή ή στήλη ή ποιά επίπεδο εξετάζεται.

Εικόνα 7.6 Το παράθυρο περιήγησης στο πλέγμα.

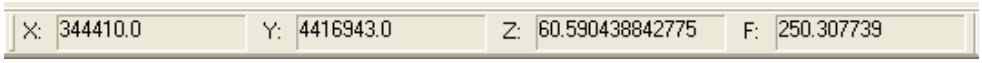
- **Η παλέτα των επιμέρους λειτουργιών:** Το GMS είναι οργανωμένο σε έντεκα επιμέρους λειτουργίες (modules). Κάθε επιμέρους λειτουργία συνδέεται με ένα συγκεκριμένο τύπο αντικειμένου. Μόνο μια λειτουργία μπορεί να είναι ενεργή σε δεδομένη χρονική στιγμή. Κατά την εναλλαγή μεταξύ των επιμέρους λειτουργιών παρουσιάζονται οι κατάλογοι (μενού) και τα εργαλεία που συνδέονται με την εκάστοτε λειτουργία που παραμένει ενεργή. Στην εικόνα 7.7 επιχειρείται μια σύντομη επεξήγηση των επιμέρους λειτουργιών.



Εικόνα 7.7 Οι έντεκα επιμέρους λειτουργίες (modules).

7.3 Το παράθυρο σύνταξης.

Το παράθυρο σύνταξης, στην κορυφή του παραθύρου του GMS, χρησιμεύει στη σύνταξη των συντεταγμένων του εκάστοτε επιλεγμένου αντικειμένου (σημεία, κόμβοι, κορυφές), καθώς και των τιμών που αυτά μπορούν να πάρουν (Εικόνα 7.8). Οι τιμές μεταβάλλονται πληκτρολογώντας τις νέες τιμές στα αντίστοιχα παράθυρα και επιλέγοντας στη συνέχεια το πλήκτρο «ENTER» ή το πλήκτρο «TAB».

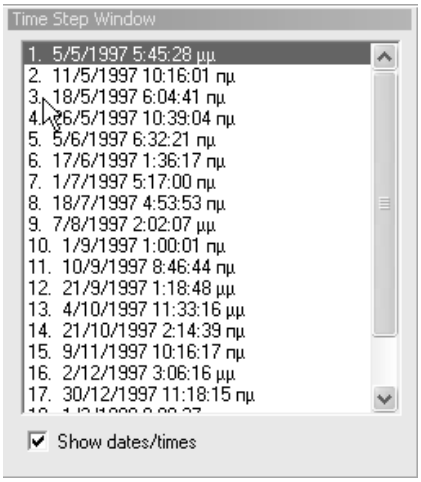


Εικόνα 7.8 Το παράθυρο σύνταξης.

7.4 Το παράθυρο των χρονικών βημάτων.

Το παράθυρο των χρονικών βημάτων βρίσκεται στην προεπιλεγμένη θέση κάτωθεν του εξερευνητή λειτουργίας, δύναται όμως να μετατοπιστεί οπουδήποτε στο παράθυρο. Μπορεί, επίσης, να αλλάξει διαστάσεις σύροντας με το δρομέα τις άκρες του παραθύρου.

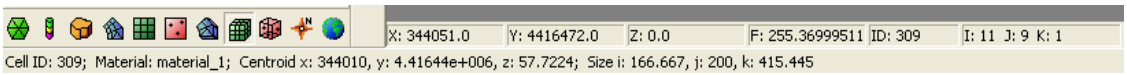
Το παράθυρο των χρονικών βημάτων εμφανίζεται μόνο, όταν επιλέγονται από τον εξερευνητή λειτουργίας δεδομένα τα οποία μεταβάλλονται με το χρόνο. Η παρουσίαση των χρονικών βημάτων είναι δυνατή στη μορφή ημερομηνία / ώρα ή σε κάποια άλλη σχετική μορφή επιλέγοντας το διακόπτη κάτω από το παράθυρο των χρονικών βημάτων (Εικόνα 7.9).



Εικόνα 7.9 Το παράθυρο των χρονικών βημάτων.

7.5 Η μπάρα ιδιοτήτων.

Η μπάρα ιδιοτήτων χρησιμεύει στην απεικόνιση δεδομένων που σχετίζονται με κάποιο επιλεγμένο αντικείμενο, καθώς και με πληροφορίες κατάστασης που αντιστοιχούν στη θέση του δρομέα (Εικόνα 7.10).

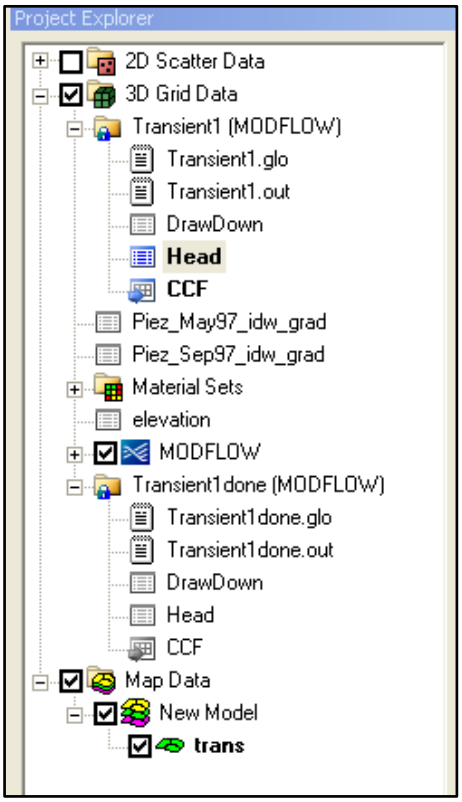


Εικόνα 7.10 Η μπάρα ιδιοτήτων.

7.6 Ο Εξερευνητής λειτουργίας.

Ο εξερευνητής λειτουργίας (Project Explorer) περιλαμβάνει μια ιεραρχική απεικόνιση των δεδομένων που σχετίζονται με το σχέδιο κάποιου μοντέλου (Εικόνα 7.11).

Ο εξερευνητής λειτουργίας χρησιμεύει για την ενεργοποίηση κάποιου συνόλου δεδομένων, TIN (Triangulated Irregular Network), συνόλου σημείων διασποράς, καθώς και κάποιας συγκεκριμένης κάλυψης.



Εικόνα 7.11 Ο εξερευνητής λειτουργίας.

Τα περισσότερα αντικείμενα στον εξερευνητή λειτουργίας μπορούν να μετακινηθούν και να οργανωθούν σε φακέλους. Ακόμη, η προβολή ή όχι των αντικειμένων στο παράθυρο γραφικών μπορεί να επιλεχθεί με τη χρήση του αντίστοιχου διακόπτη δίπλα από το αντικείμενο στον εξερευνητή λειτουργίας.

Πολλές εντολές - σχετικές με δεδομένα στο GMS - μπορούν να εκτελεστούν κάνοντας δεξί «κλικ» στον εξερευνητή λειτουργίας. Η πραγματοποίηση γενικών εντολών ή ακόμη και η δημιουργία νέων αντικειμένων δεδομένων είναι δυνατή με δεξί «κλικ» στην κενή περιοχή του εξερευνητή λειτουργίας και επιλογή της κατάλληλης εντολής του αναδυόμενου μενού.

7.7 Το παράθυρο γραφικής απεικόνισης.

Όλα τα γραφικά στοιχεία εισόδου και εξόδου του GMS παρουσιάζονται στο παράθυρο γραφικής απεικόνισης. Η ενέργεια που πραγματοποιείται κατά την αλληλεπίδραση με το παράθυρο γραφικής απεικόνισης, έχει να κάνει με το ποιο είναι το επιλεγμένο εργαλείο.

Οποιοδήποτε αντικείμενο, το οποίο μπορεί να επιλεχθεί μέσα από το παράθυρο γραφικής απεικόνισης, αντιστοιχεί και σε ένα μενού το οποίο εμφανίζεται κάνοντας δεξί «κλικ» στο αντικείμενο. Τα μενού αυτά περιλαμβάνουν εντολές οι οποίες επιτρέπουν στο χρήστη το χειρισμό των δεδομένων, καθώς και τη διαχείριση της απεικόνισης των επιλεγμένων αντικειμένων.

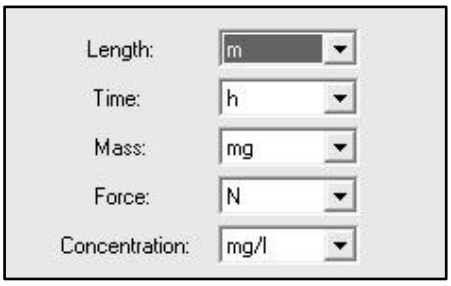
06/07/2010 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

8. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ

8.1 Γενικά.

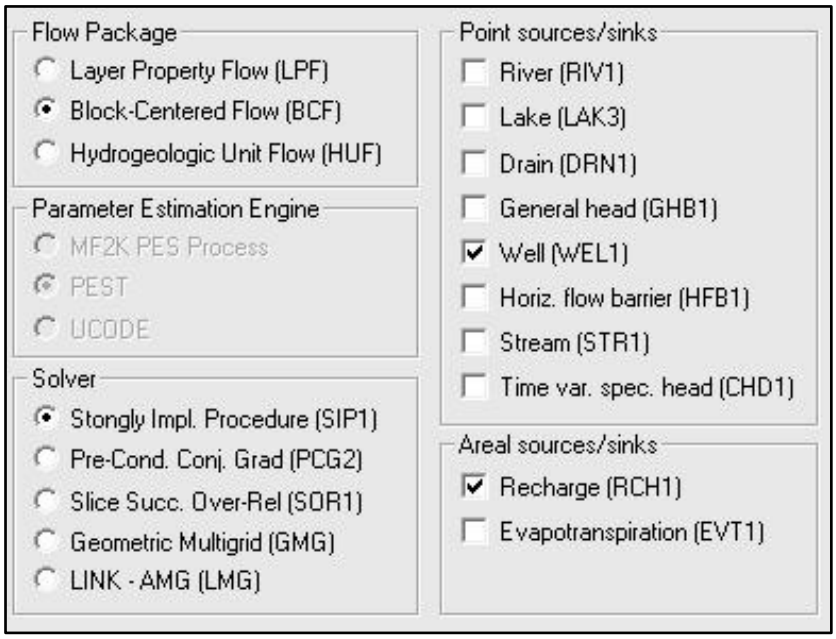
Σ' αυτήν την ενότητα αναλύεται ο τρόπος δημιουργίας του κανάβου, καθώς και όλες οι επιλογές για τη δημιουργία του μοντέλου.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως οι επιλεγμένες μονάδες που ισχύουν σε όλο το μοντέλο , είναι για το μήκος τα μέτρα (m), και για το χρόνο η ώρα (h). Επίσης ως σύστημα γεωαναφοράς χρησιμοποιείται το GreekEGSA 87.



Εικόνα 8.1 Παράθυρο επιλογής των μονάδων.

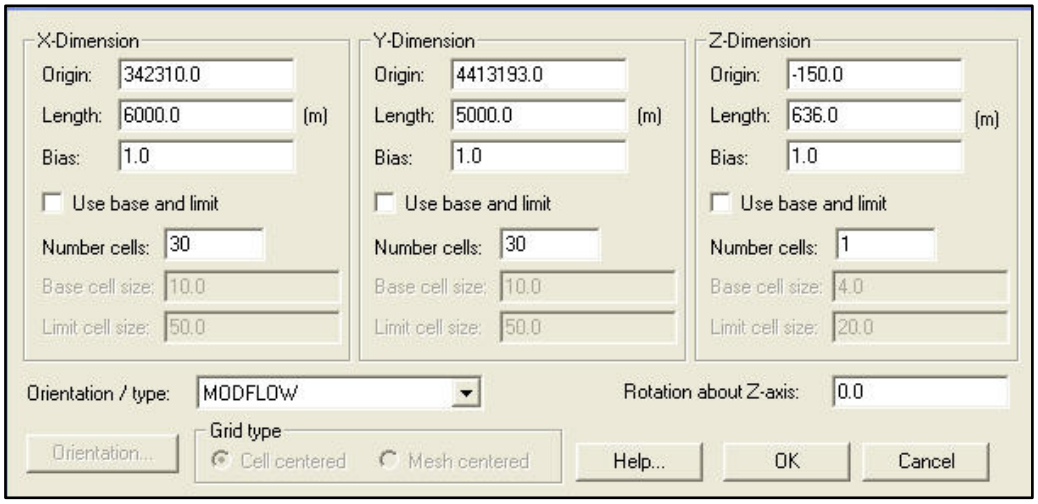
Τα πακέτα του MODFLOW (MODFLOW packages) - βάσει των οποίων γίνεται το μοντέλο - είναι τα block centered flow, well, recharge και strongly implicit Procedure (SIP1), όπως φαίνεται στην εικόνα 8.2 που ακολουθεί.



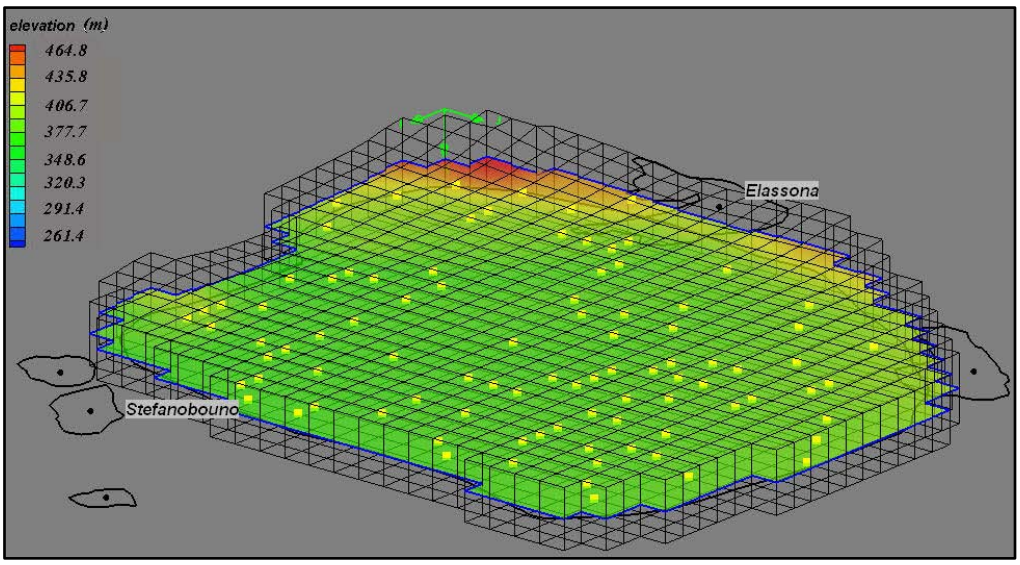
Εικόνα 8.2 Παράθυρο επιλογής των πακέτων.

8.2 Σχηματοποίηση και διακριτοποίηση του υδροφορέα.

Η γεωμετρία του υδροφορέα εξετάζεται και καθορίζεται στο 5° κεφάλαιο της παρούσας εργασίας. Εκεί, προσδιορίζεται ως έκτασή του μία επιφάνεια περίπου 22,36 km^{2}. Από την εξέταση της γεωλογίας της περιοχής (3° Κεφάλαιο), προκύπτει ότι η λεκάνη Ελασσόνας – Τσαρίτσανης θεωρείται ως ένα ενιαίο υδροφόρο στρώμα πάχους 415 m κατά μέσο όρο. Βάσει των παραπάνω, καθορίζονται τα όρια και η δομή του υδροφορέα στο περιβάλλον προσομοίωσης του MODFLOW, όπως παρουσιάζονται στην εικόνα 8.3.

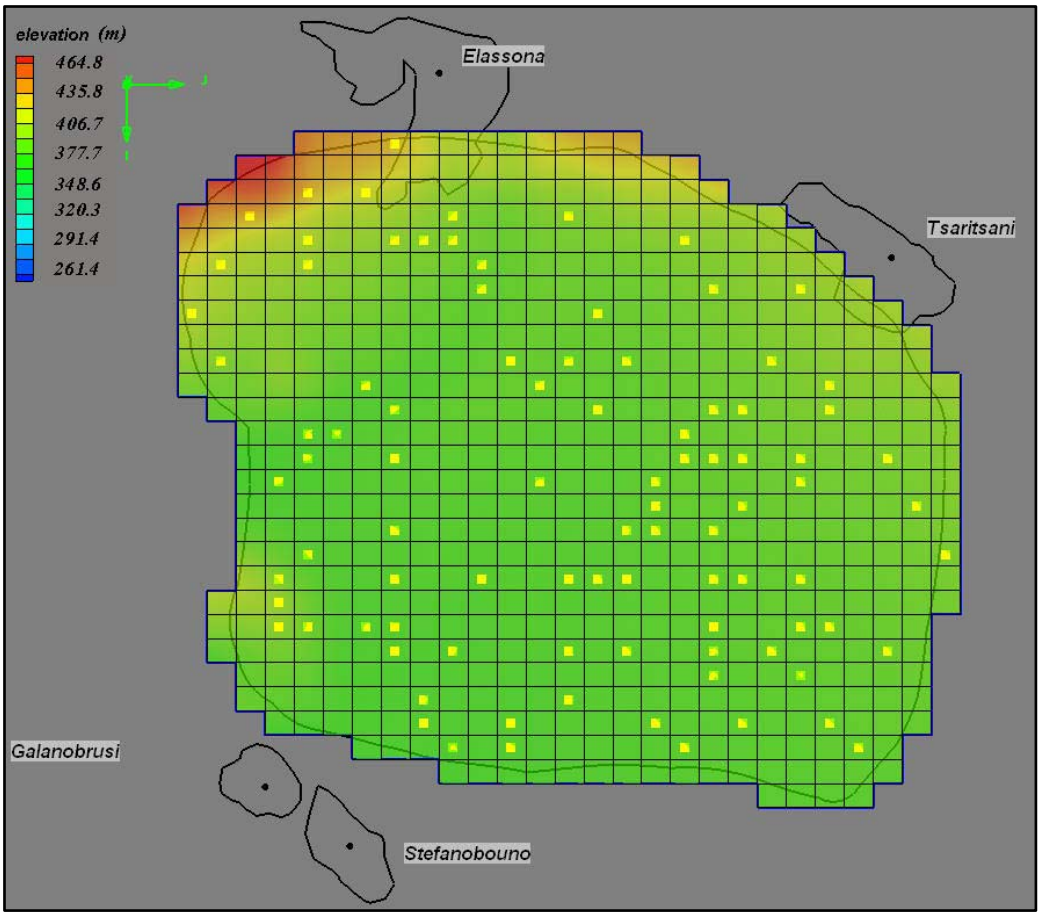


Εικόνα 8.3 Παράθυρο επιλογής των κριτηρίων του κανάβου.



Εικόνα 8.4 Τρισδιάστατη αναπαράσταση της γεωμορφολογίας της περιοχής στο περιβάλλον προσομοίωσης του Modflow.

Η μορφολογία του πυθμένα του υδροφορέα, ένας σημαντικός παράγοντας διαμόρφωσης των συνθηκών της υπόγειας ροής, είναι όπως φαίνεται και στη γεωλογική τομή της περιοχής (εικόνα 3.1) γύρω στα 150 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Επομένως, στο Bottom elevation επιλέγεται για όλο τον κάναβο -150 m.

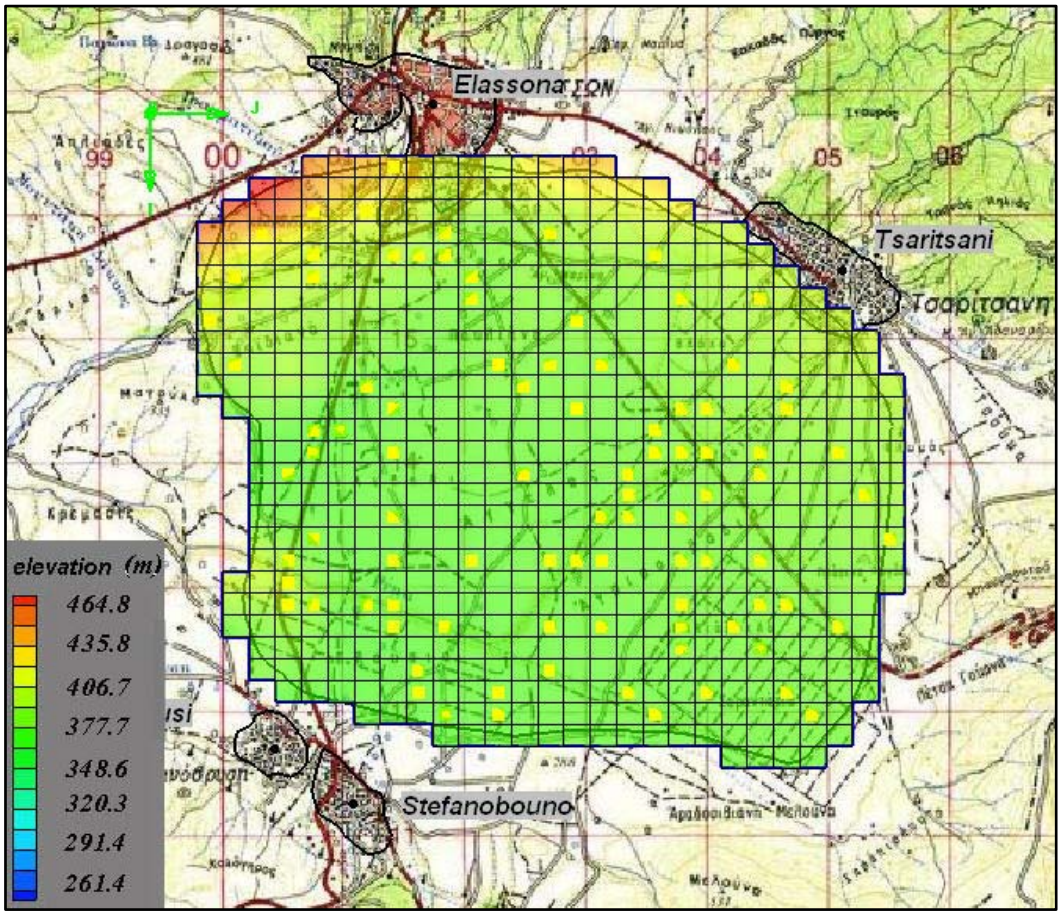


Εικόνα 8.5 Αναπαράσταση της γεωμορφολογίας της περιοχής στο περιβάλλον προσομοίωσης του Modflow.

Στην κάτοψη της εικόνας 8.5 παρουσιάζονται οι ισοϋψείς καμπύλες της επιφάνειας του υδροφόρου (Top elevation). Ο προσδιορισμός τους γίνεται με τη βοήθεια του λογισμικού ArcGIS.

Η ακρίβεια καθορισμού των ορίων του υδροφορέα - σύμφωνα με προηγούμενο κεφάλαιο - είναι σημαντική. Αυτό πετυχαίνεται ως εξής. Με τη βοήθεια του λογισμικού ArcGIS κατασκευάζεται ένας χάρτης που περιλαμβάνει τα πλεγματικά επίπεδα πληροφοριών (raster image) του τοπογραφικού χάρτη της περιοχής (1:50.000) και το διανυσματικό επίπεδο πληροφορίας των ορίων του

υδροφορέα (αρχείο shape file). Ο χάρτης αυτός τοποθετείται ως οπτικό υπόβαθρο στο παράθυρο εργασίας του GMS (εικόνα 8.6). Βάσει αυτού αλλά και των ορίων της λεκάνης γίνεται ο διαχωρισμός μεταξύ ενεργών και ανενεργών κελιών.



Εικόνα 8.6 Διακριτοποίηση στο Modflow με τη βοήθεια πλεγματικού υποβάθρου – Αναπαράσταση της περιοχής μελέτης.

Επιπλέον, στο πλεγματικό αυτό αρχείο δεν χρειάζεται να γίνει εκ νέου γεωαναφορά, καθώς το GMS αναγνωρίζει τη γεωαναφορά στο προβολικό συστήματος συντεταγμένων GreekEGSA 87 που έχει γίνει στο ArcGIS. Το ίδιο ισχύει και για οποιοδήποτε αρχείο shape file χρειάζεται να εισαχθεί στο GMS.

Όσον αφορά τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα κατά την κατακόρυφη διεύθυνση χρησιμοποιείται μόνο ένα layer, καθώς παρά την λιθολογική ετερογένεια (εικόνα 3.1), θεωρούμε ότι σε τοπική κλίμακα διαμορφώνεται ένας υδροφορέας. Αυτό απλοποιεί την προσομοίωση του υδροφορέα, μιας και οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι μέσες και αντιστοιχούν σε όλα τα υδροφόρα στρώματα. Επιπλέον, από τα στοιχεία της πιεζομετρίας προκύπτει μία απλή

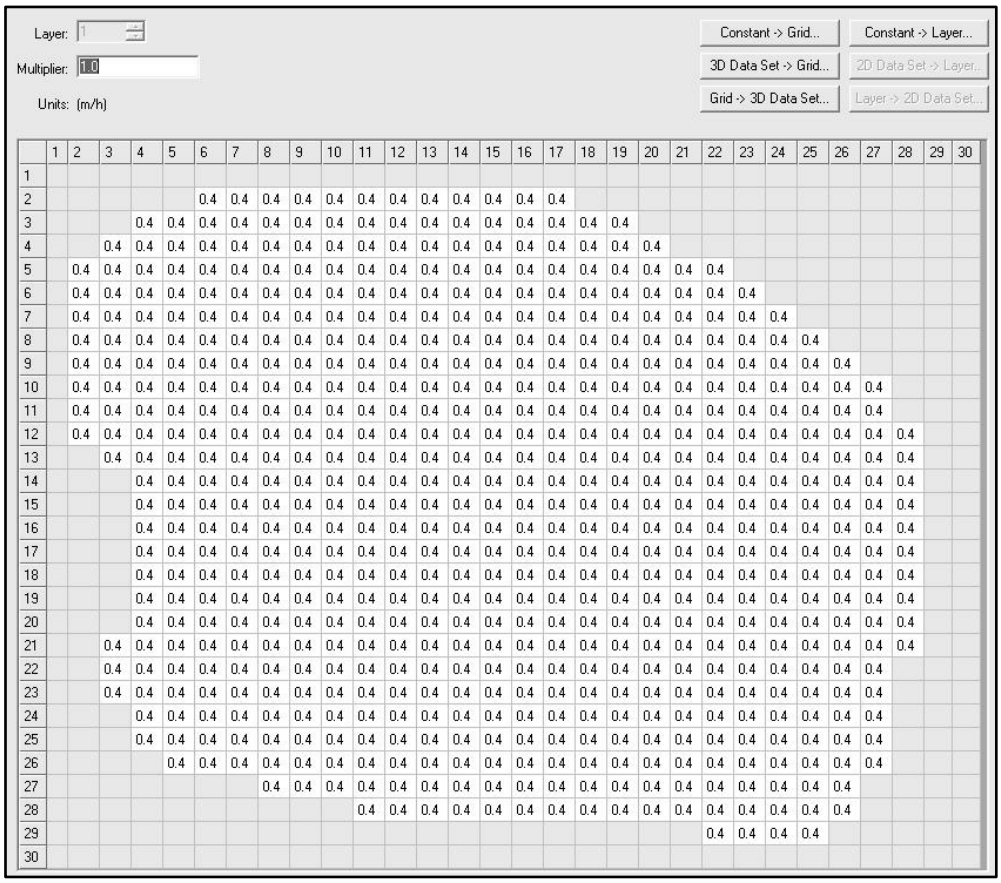
πιεζομετρική επιφάνεια. Έτσι σύμφωνα με όσα έχουν ήδη αναλυθεί, το υδροφόρο στρώμα καθορίζεται ως ***τύπου 1***. Στον κώδικα MODFLOW το υδροφόρο στρώμα ***τύπου 1*** είναι ένα ελεύθερο (unconfined) στρώμα.

Η διακριτοποίηση του υδροφορέα γίνεται με τετραγωνικά κελιά διαστάσεων 200x166,6 m όπως φαίνεται παραπάνω (εικόνα 8.6).

8.3 Προσδιορισμός των υδραυλικών χαρακτηριστικών του υδροφορέα.

➢ Προσδιορισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας

Με βάσει τα γεωτρητικά προφίλ του Ι.Γ.Μ.Ε., από δεκαέξι γεωτρήσεις, υπολογίζεται η υδραυλική αγωγιμότητα με τη μέθοδο Breddin (βλ. 5^{ο} κεφάλαιο) . Ο μέσος όρος της υδραυλικής αγωγιμότητας, για την υπό μελέτη λεκάνη, είναι **k = 1.1 × 10^{-5} m/s**, συνεπώς, **k=0.4 m/h**.

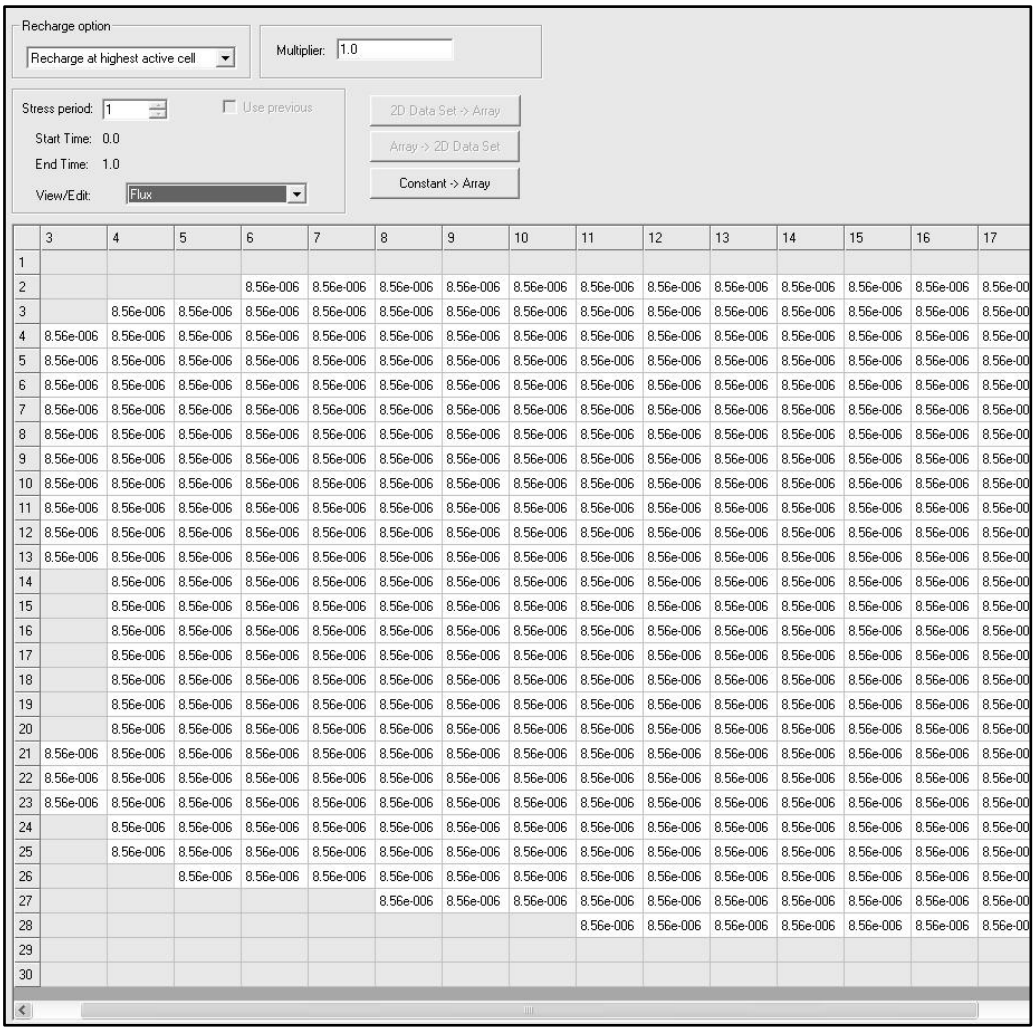


	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1																														
2						0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4													
3				0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4											
4			0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4										
5		0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4								
6		0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4							
7		0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4						
8		0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4					
9		0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4				
10		0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4			
11		0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4			
12		0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4		
13			0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4		
14				0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4		
15				0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4		
16				0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4		
17				0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4		
18				0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4		
19				0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4		
20				0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4		
21			0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4		
22			0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4			
23			0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4			
24				0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4			
25				0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4			
26					0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4			
27								0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4				
28											0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4				
29																						0.4	0.4	0.4	0.4					
30																														

Εικόνα 8.7 Παράθυρο επιλογής της Οριζόντιας Υδραυλικής Αγωγιμότητας (k).

- **Προσδιορισμός της κατείσδυσης (Recharge).**

Όπως αναφέρεται στο 4^{ο} κεφάλαιο, ο μέσος όρος των κατακρημνισμάτων ανά έτος είναι 499,62 mm, δηλαδή περίπου 500 mm/y και από αυτό – με βάση την λιθολογία – θεωρούμε ότι μόνο το 15% κατεισδύει προς τον υδροφορέα. Επομένως κατεισδύουν 75 mm/y, δηλαδή $8{,}56 \cdot 10^{-6}$ m/h. Και επειδή όλη η λεκάνη αποτελείται κυρίως από αλλουβιακές αποθέσεις, χρησιμοποιείται ως κατείσδυση σε όλο τον κάναβο η τιμή των **$8{,}56 \cdot 10^{-6}$ m/h**, όπως φαίνεται και στην εικόνα 8.8 που ακολουθεί.



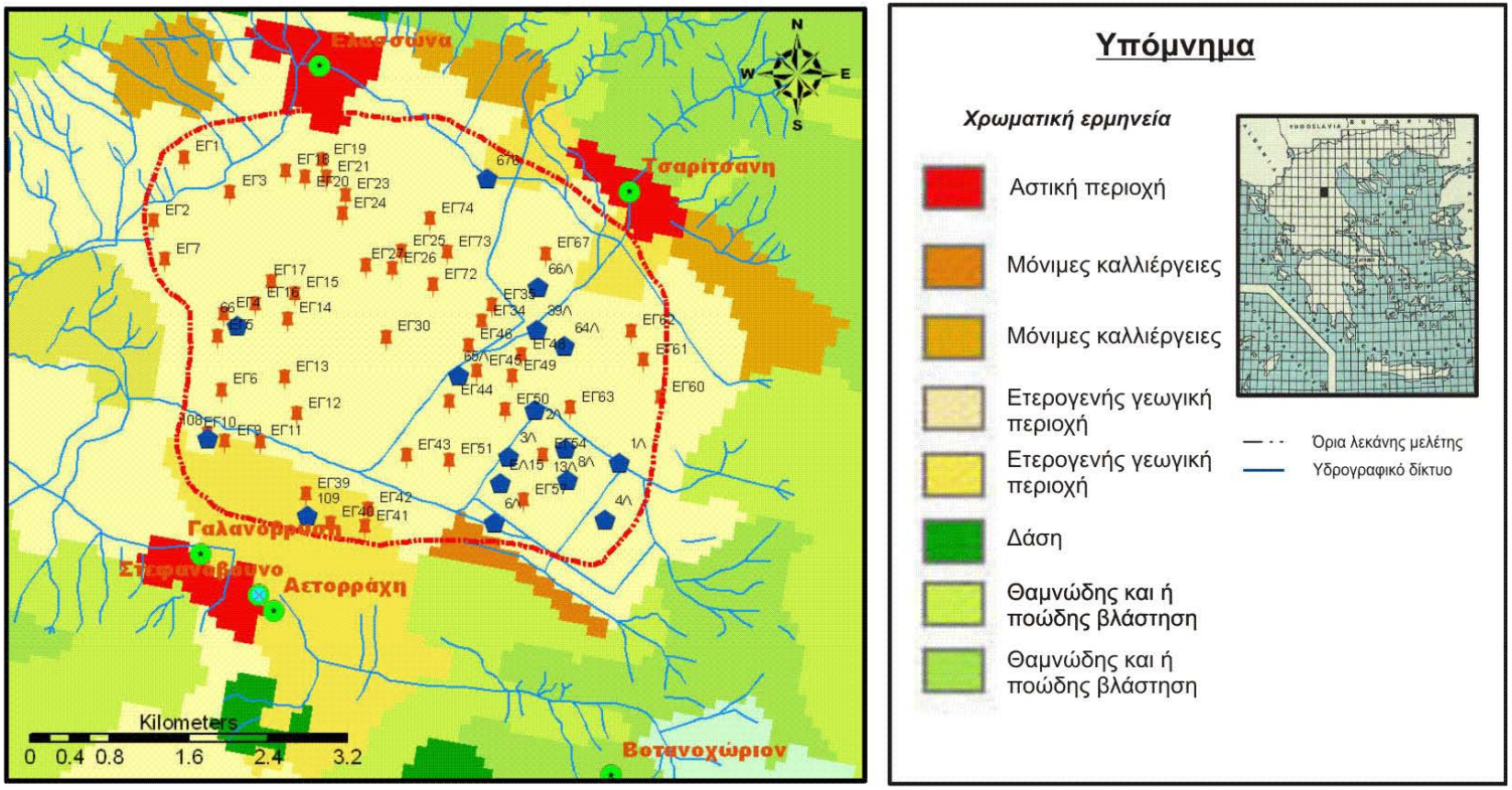
Εικόνα 8.8 Παράθυρο επιλογής της κατείσδυσης (Recharge).

- **Προσδιορισμός των γεωτρήσεων εκροής και εισροής.**

- <u>Γεωτρήσεις εκροής.</u>

Στην περιοχή καλλιεργούνται, συνήθως, σιτάρι, καλαμπόκι, καπνός και τριφύλλι. Η κάλυψη των αρδευτικών τους αναγκών γίνεται κύρια από ένα εκτεταμένο

Χάρτης χρήσης Γης για τη λεκάνη Ελασσόνας - Τσαρίτσανης



Χάρτης 8.1

δίκτυο υδρογεωτρήσεων. Λόγω του ότι δεν διατίθενται στοιχεία από αντλήσεις, χρησιμοποιούνται βιβλιογραφικές αναφορές σε συνδυασμό με τις ήδη υπάρχουσες καλλιέργειες. Έτσι, ως μέση κατανάλωση προκύπτουν τα 300 m^3 ανά στρέμμα, άρα για τη λεκάνη μελέτης 6,710 ^{6} m^3 τα οποία μοιράζονται ισόποσα στις 71 γεωτρήσεις της περιοχής. Συνεπώς από κάθε γεώτρηση αντλούνται περίπου **11 m^3/h.**

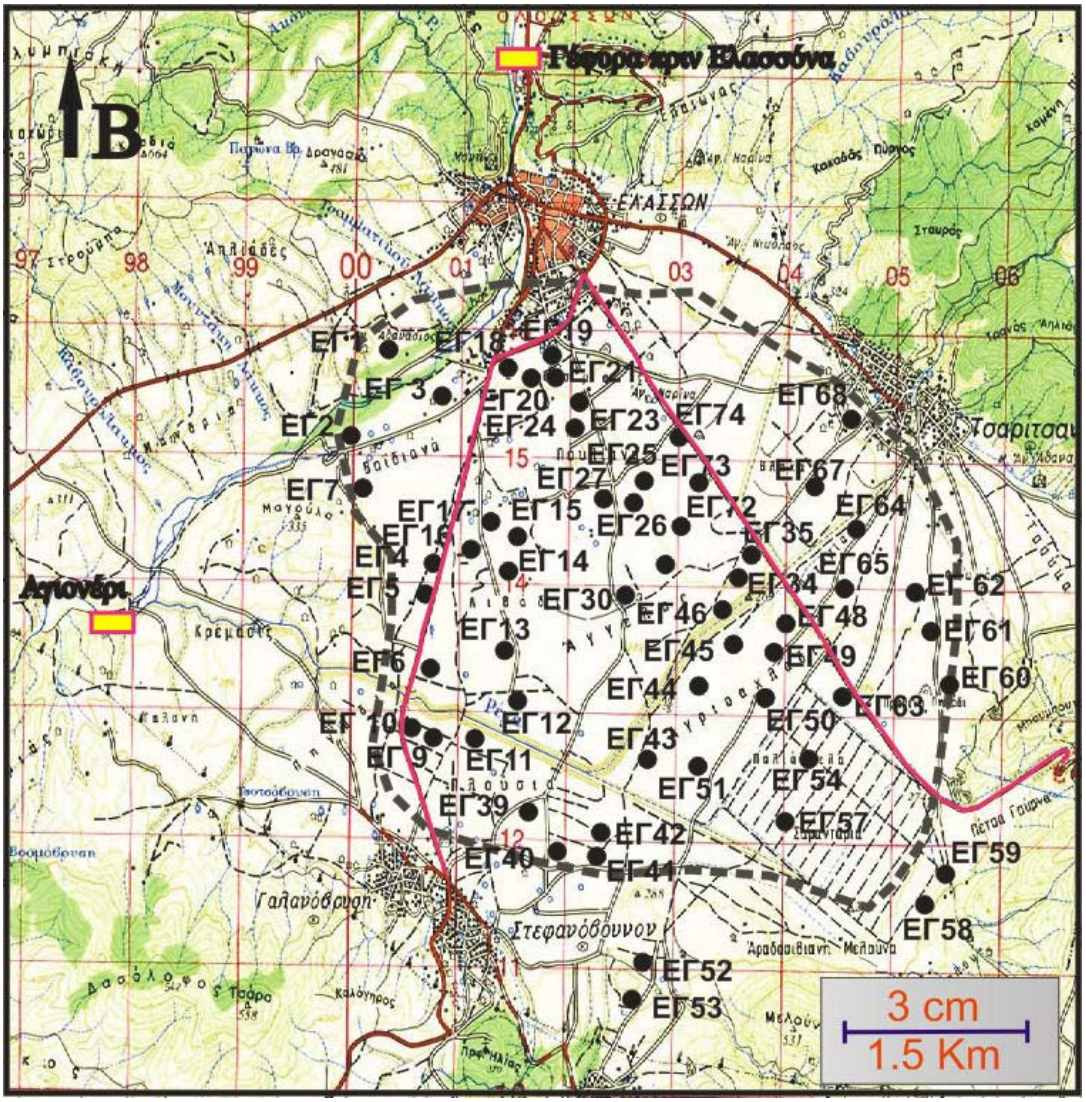
- Γεωτρήσεις εισροής.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται λόγω ελλιπών στοιχείων, τόσο για τον Ελασσονίτικο ποταμό, όσο και για τα ρέματα που διασχίζουν τη λεκάνη, ώστε να αποδοθούν στον υδροφόρο ορίζοντα οι εισροές από τα ποτάμια, αλλά και από τις γειτονικές περιοχές.

Για τον Ελασσονίτικο ποταμό διατίθενται τα παρακάτω στοιχεία επιφανειακής απορροής (πίνακας 8-1). Οι μετρήσεις έχουν γίνει από το Ι.Γ.Μ.Ε. στα σημεία που φαίνονται στο χάρτη 8.2.

Πίνακας 8-1 Στοιχεία επιφανειακής απορροής 1991 (Μανάκος Ι.Γ.Μ.Ε.).

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΓΕΦΥΡΑ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΕΛΑΣΣΟΝΑ (m^3/h)	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΑΓΙΟΝΕΡΙ (m^3/h)
25/1/1991	81.6	23/1/1991	395
28/2/1991	600.5	27/2/1991	819.5
29/3/1991	636.6	1/3/1991	750.2
25/4/1991	1232.8	25/4/1991	1470.9
31/5/1991	619.9	31/5/1991	763.1
28/6/1991	0	28/6/1991	34
26/7/1991	0	26/7/1991	0
30/8/1991	5	30/8/1991	57.9
27/9/1991	63.6	27/9/1991	153.7
25/10/1991	41	25/10/1991	83.6
29/11/1991	65.4	29/11/1991	172
20/12/1991	82.2	20/12/1991	149.9



Χάρτης 8.2 Τοπογραφικός χάρτης οπού φαίνονται τα σημεία λήψης των δεδομένων της παροχής του Ελασσονίτικου ποταμού.

Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα και άλλα στοιχεία, σχετικά με την περιοχή, συμπεραίνεται πως η ποσότητα του νερού που εισέρχεται στον υδροφόρο, τόσο από τον Ελασσονίτικο ποταμό και το ρέμα, όσο και από τις γειτονικές περιοχές, αλλά και τις επιστροφές από τις αρδεύσεις ανέρχεται στα 5.256.000 m^3/y, δηλαδή **600 m^3/h** . Αυτή η ποσότητα διανέμεται σε 21 γεωτρήσεις, από τις οποίες οι 5 στον Ελασσονίτικο ποταμό με 60 m^3/h και οι 16 στο ρέμα με 15m^3/h η κάθε μια - εκτός από μία γεώτρηση που βρίσκεται στο κελί i=20 j= 5 k=1 και έχει 75m^3/h .

Stress period: 1 Use

Start Time: 0.0

End Time: 1.0

	i	j	k	Name	flow (m^3/h)
1	2	9	1	w0	60.0
2	4	6	1	w0	60.0
3	4	8	1	w0	60.0
4	5	4	1	w0	-11.0
5	5	11	1	w1	-11.0
6	5	15	1	w2	-11.0
7	6	6	1	w1	60.0
8	6	9	1	w3	-11.0
9	6	10	1	w4	-11.0
10	6	11	1	w5	-11.0
11	6	19	1	w6	-11.0
12	7	3	1	w2	60.0
13	7	6	1	w7	-11.0
14	7	12	1	w8	-11.0
15	8	12	1	w9	-11.0
16	8	20	1	w0	15.0
17	8	23	1	w10	-11.0
18	9	2	1	w11	-11.0
19	9	16	1	w12	-11.0

Εικόνα 8.9 Τμήμα παράθυρου επιλογής γεωτρήσεων.

8.4 Προσδιορισμός των αρχικών πιεζομετριών (Starting Heads) και των σημείων παρατήρησης (Observation Points).

Ο προσδιορισμός των πιεζομετριών (Starting Heads) γίνεται για λόγους κυρίως ευκολίας, έτσι ώστε το πρόγραμμα να έχει να κάνει λιγότερες πράξεις. Στην εφαρμογή του κώδικα MODFLOW χρησιμοποιείται η πιεζομετρία του Μαΐου του 1997, όπως φαίνεται στον πίνακα 5.6 στις σελίδες 39 – 40.

Η εισαγωγή των δεδομένων έγινε εύκολα μέσω του ArcGIS.

Layer: 1

Multiplier: 1.0

Units: (m)

Constant -> Grid... | Constant -> Layer... | 3D Data Set -> Grid... | 2D Data Set -> Layer... | Grid -> 3D Data Set... | Layer -> 2D Data Set...

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1										
2						325.42611694336	318.83157348633	312.21139526367	304.34359741211	296.081115
3				333.44635009766	325.06036376953	317.85278320313	311.80426025391	305.6852722168	298.07669067383	289.693420
4			333.71450805664	325.43099975586	316.91110229492	310.05142211914	304.82507324219	299.25509643555	291.88833618164	283.198730
5		333.43087768555	325.34683227539	317.09387207031	308.59103393555	302.20324707031	297.34710693359	292.43826293945	285.46893310547	276.575775
6		325.1217956543	316.47714233398	308.13610839844	300.56280517578	294.90863037109	289.33590698242	284.03024291992	276.9501953125	269.442810
7		316.88284301758	307.19543457031	298.58380126953	292.9821472168	287.82974243164	281.46713256836	275.16027832031	268.27145385742	262.330078
8		308.5085144043	297.8030090332	287.85632324219	283.9264831543	279.73452758789	272.98718261719	266.67486572266	260.78839111328	256.443298
9		298.72277832031	287.44400024414	275.81582641602	270.31915283203	268.03753662109	262.2087097168	256.80627441406	253.91619873047	252.382247
10		287.716796875	276.30966186523	264.89184570313	255.88870239258	251.7561340332	250.11936950684	249.24534606934	249.19523620605	249.612487
11		281.27862548828	270.14456176758	257.27420043945	246.87944030762	244.08134460449	246.28392028809	247.72413635254	247.90017700195	248.837188
12		274.80960083008	263.64053344727	251.52195739746	244.01916503906	242.65948486328	245.74761962891	247.62773132324	247.53436279297	248.464706
13			258.50042724609	250.38845825195	245.48356628418	242.75170898438	245.84339904785	246.54374694824	248.05661010742	248.428909
14				254.87431335449	248.98545837402	243.51153564453	246.82165527344	246.99644470215	247.84428405762	247.722961
15				262.55447387695	254.68321228027	246.94451904297	245.89929199219	247.91659545898	248.53143310547	247.247024
16				271.64761352539	261.69110107422	253.60673522949	251.38623046875	250.02586364746	248.52079772949	246.799743
17				283.96597290039	276.52917480469	270.62661743164	263.30917358398	254.81793212891	249.40393066406	246.374191
18				296.02032470703	297.00619506836	293.88772583008	275.81323242188	256.82327270508	249.58168029785	246.858978
19				299.97381591797	301.32843017578	299.55755615234	282.16275024414	260.97732543945	252.47203063965	249.423507
20				295.60015869141	295.7724609375	292.58410644531	279.5329284668	263.64831542969	254.01316833496	250.521957
21			285.69290161133	283.3310546875	282.46426391602	279.67965698242	269.7395324707	260.86889648438	254.0719909668	250.424362
22			273.97760009766	270.24020385742	269.11267089844	268.51782226563	259.68713378906	254.11991882324	252.23025512695	249.095565
23			263.19885253906	260.17712402344	259.64944458008	258.77456665039	254.33352661133	249.64469909668	247.98547363281	246.156890
24				251.76538085938	250.88304138184	250.20223999023	248.42414855957	246.24209594727	246.2008972168	245.443756
25				244.30018615723	243.48498535156	243.30867004395	243.28237915039	244.05770874023	246.01208496094	245.526382
26					237.59652709961	238.26458740234	239.60130310059	242.19857788086	244.1665802002	243.544448
27								240.06620788574	241.62609863281	241.616302
28										
29										

Εικόνα 8.9 Τμήμα παραθύρου αρχικής πιεζομετρίας.

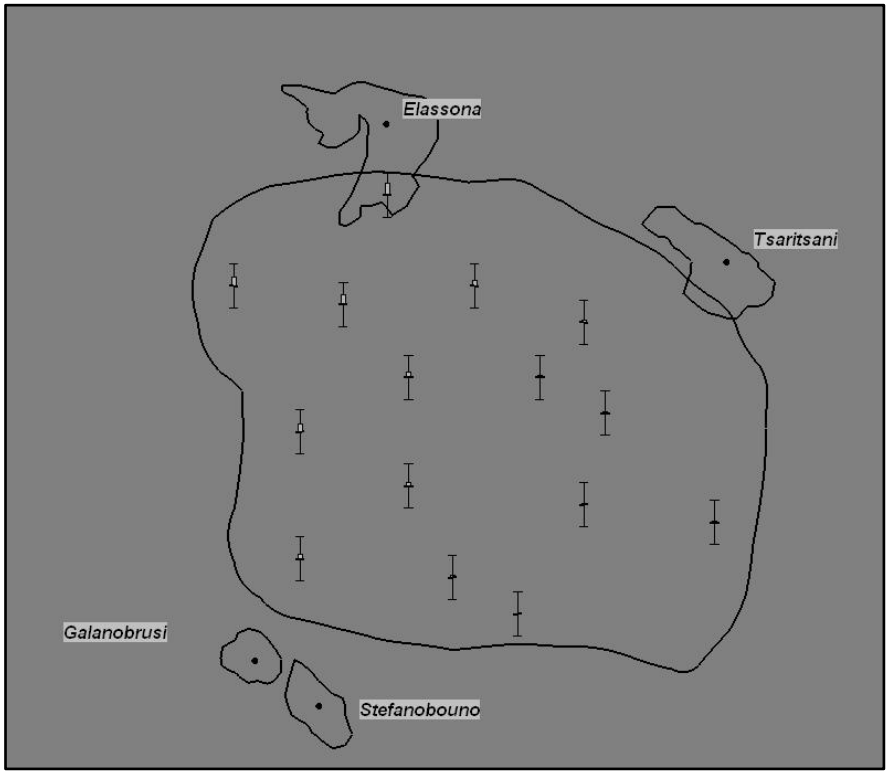
Feature type: Points | Show: All | BC type: obs. pt

☐ Show point coordinates

ID	Name	Type	Color	Obs. Head	Obs. Head interval	Obs. Head conf(%)	Obs. Head std. dev	Computed Head	Residual Head
All									
1	1	obs. pt		249.797	1.0	99	0.3882244830322	250.0565	0.2595
2	1	obs. pt		249.7138	1.0	99	0.3882244830322	249.8372	0.1234
3	1	obs. pt		249.7093	1.0	99	0.3882244830322	249.8029	0.0936
4	1	obs. pt		249.5912	1.0	99	0.3882244830322	249.6508	0.0596
5	1	obs. pt		249.7973	1.0	99	0.3882244830322	249.9506	0.1533
6	1	obs. pt		249.4976	1.0	99	0.3882244830322	249.5637	0.0661
7	1	obs. pt		249.7518	1.0	99	0.3882244830322	249.8407	0.0889
8	1	obs. pt		249.7531	1.0	99	0.3882244830322	249.7547	0.0016
9	1	obs. pt		250.0425	1.0	99	0.3882244830322	250.5826	0.5401
10	1	obs. pt		250.3943	1.0	99	0.3882244830322	250.8083	0.414
11	1	obs. pt		250.0173	1.0	99	0.3882244830322	250.4289	0.4116
12	1	obs. pt		249.561	1.0	99	0.3882244830322	249.6093	0.0483
13	1	obs. pt		249.8538	1.0	99	0.3882244830322	250.0685	0.2147
14	1	obs. pt		249.8361	1.0	99	0.3882244830322	250.1647	0.3286
15	1	obs. pt		249.8103	1.0	99	0.3882244830322	250.0601	0.2498

Εικόνα 8.10 Παράθυρο επιλογής των σημείων παρατήρησης (observation points). Στο συγκεκριμένο φαίνονται και τα αποτελέσματα που έβγαλε το MODFLOW (Computed Head) αλλά και η απόκλιση που έχουν από τα πραγματικά δεδομένα (residual head).

Τα σημεία παρατήρησης (observation points) αποτελούν σημεία, σύμφωνα με τα οποία γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων που βγάζει ο MODFLOW με την πιεζομετρία. Γι' αυτόν το λόγο επιλέγονται δεκαπέντε τυχαία σημεία σε όλο το εύρος της περιοχής για καλύτερη κατανομή στο χώρο.

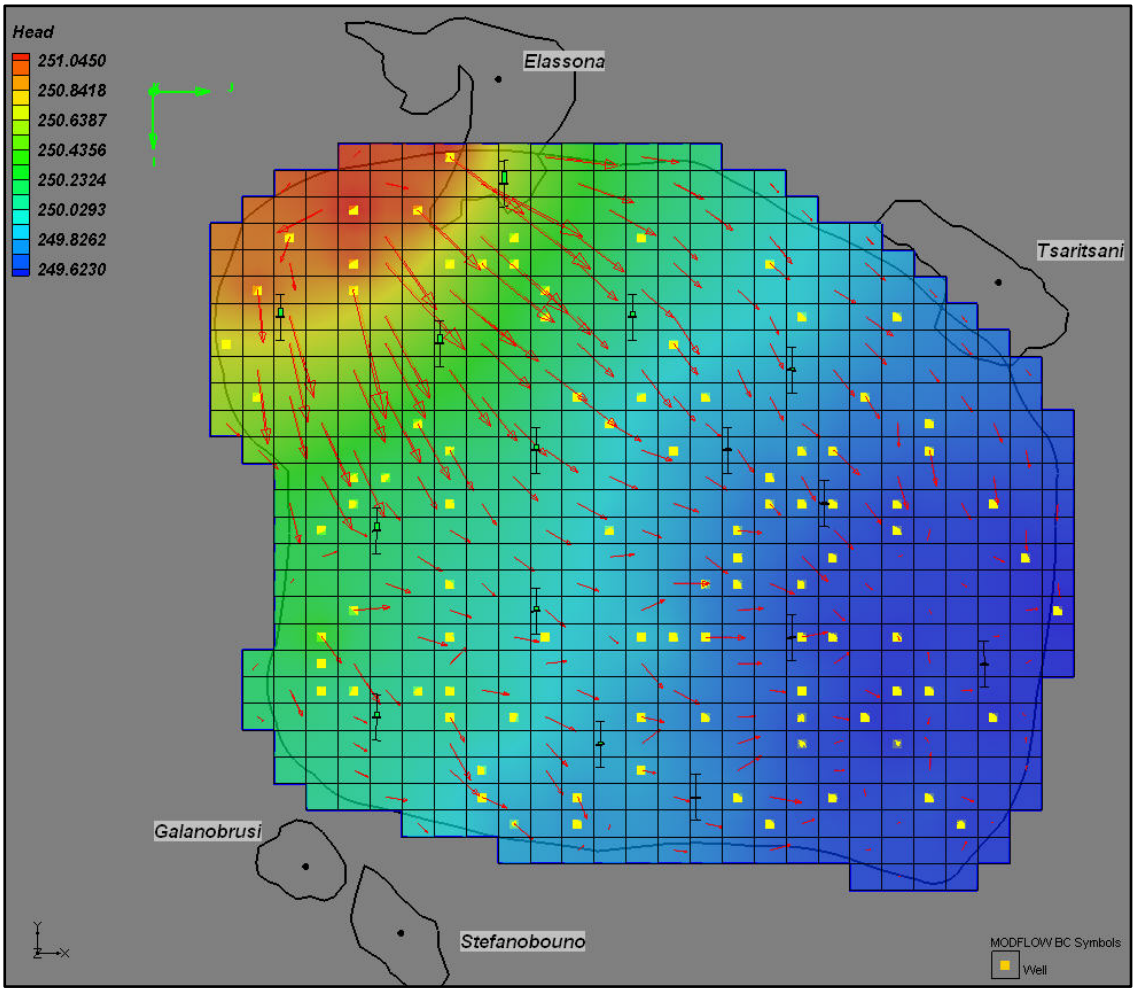


Εικόνα 8.11 Τα σημεία παρατήρησης επάνω στον χάρτη.

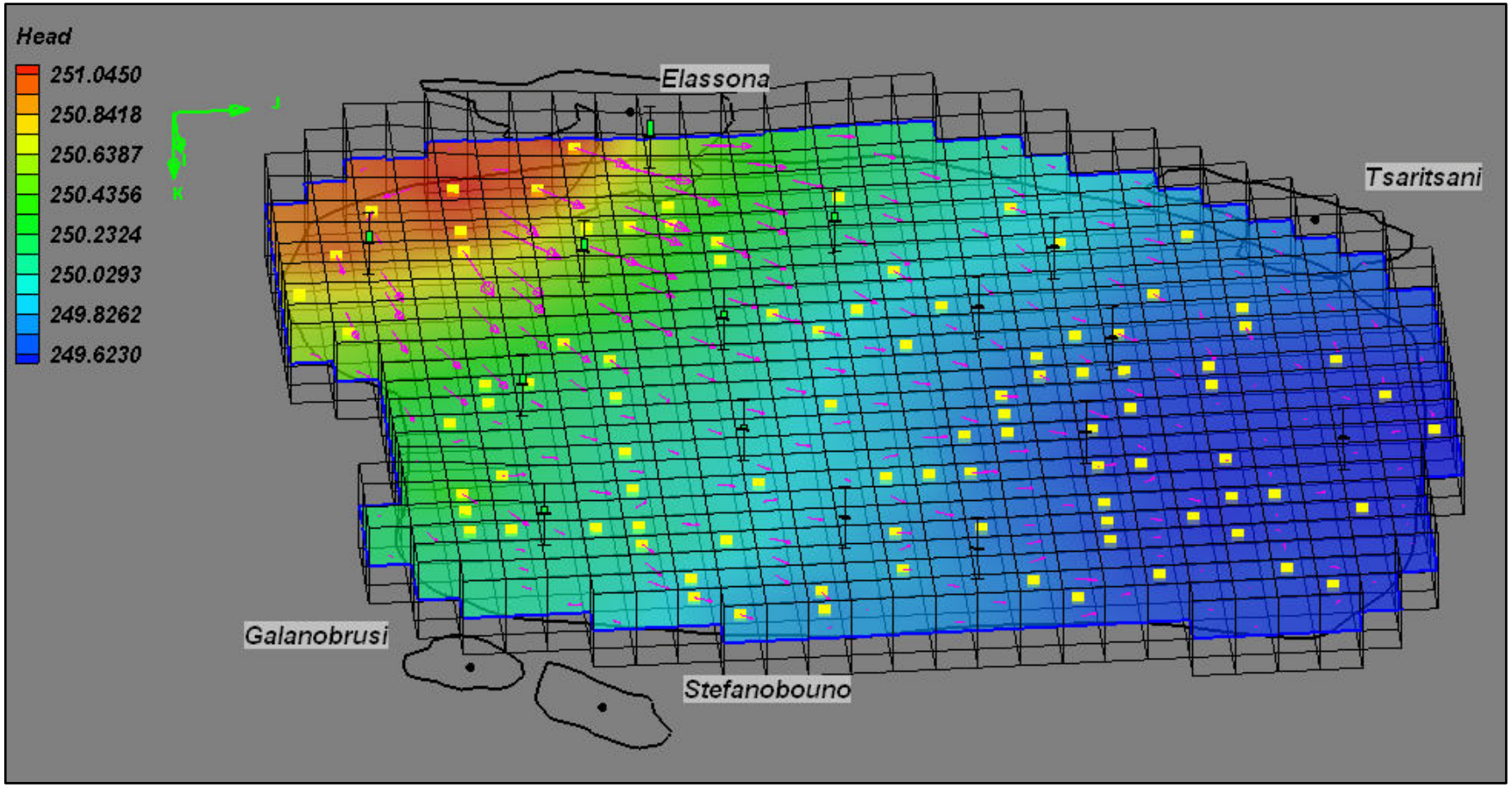
9. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ MODFLOW.

9.1 *Εφαρμογή σε σταθερές συνθήκες (Steady State).*

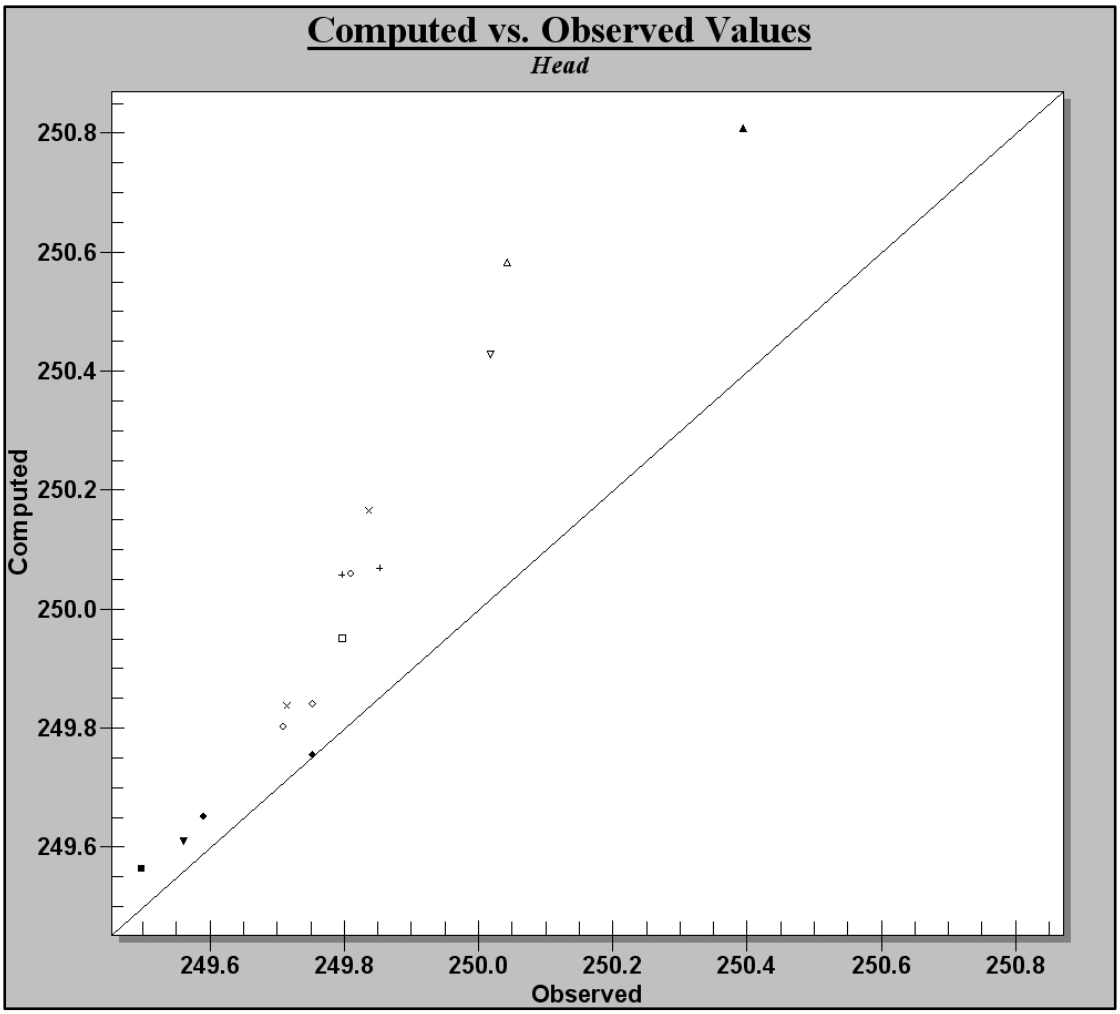
Αφού έχει «μονταριστεί» το μοντέλο και όλες του οι παράμετροι, ελέγχονται τα δεδομένα εισόδου με την εντολή “check simulation”. Έπειτα ακολουθεί χρήση του MODFLOW. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν φαίνονται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 9.1 Κάτοψη της υπολογιζόμενης πιεζομετρίας και της διεύθυνσης ροής.



Εικόνα 9.2 Τρισδιάστατη απεικόνιση της υπολογιζόμενης πιεζομετρίας και της διεύθυνσης ροής.



Εικόνα 9.3 Διάγραμμα των υπολογισμένων προς τις παρατηρούμενες τιμές.

Από το διάγραμμα της εικόνας 9.3 συμπεραίνεται ότι οι διαφορές μεταξύ των τιμών παρατήρησης και αυτών του πρόγραμματος κυμαίνονται από 0,001 m μέχρι 0,5 m. Η διακύμανσή τους αυτή δείχνει ότι το μοντέλο ανταποκρίνεται σχεδόν ιδανικά στις πραγματικές συνθήκες. Επίσης στις εικόνες 9.1 & 9.2 τα κόκκινα βέλη δείχνουν τη ροή του νερού η οποία είναι αντίστοιχη με την υπόγεια ροή όπως προκύπτει από τους πιεζομετρικούς χάρτες (χάρτες 5.4 έως 5.9).

Στον πίνακα 9-1 παρουσιάζονται οι εισροές και οι εκροές του συστήματος. Λοιπόν, φαίνεται σ' αυτόν, ότι υπάρχει μια ισορροπία μεταξύ των εισροών και των εκροών, με μια απόλυα της τάξης του 0,26 %, κάτι το οποίο ισχύει καθώς η πτώση της πιεζομετρικής στάθμης στο χρόνο δεν είναι ιδιαίτερη.

Πίνακας 9-1 Ισορροπίας μεταξύ εισροών και εκροών από το σύστημα.

Budget Term	Flow (m^3/h)
Flow Budget for Zone 1	
IN:	
Constant heads	0.0
Wells	600.0
Recharge	178.90401998162
Total IN	778.90401998162
OUT:	
Constant heads	0.0
Wells	781.0
Recharge	0.0
Total OUT	781.0
SUMMARY:	
IN - OUT	-2.095980018377
Percent Discrepancy	0.2690934909319

Έτσι βάσει αυτού του μοντέλου γίνονται τέσσερα υποθετικά σενάρια τα οποία αναλύονται παρακάτω.

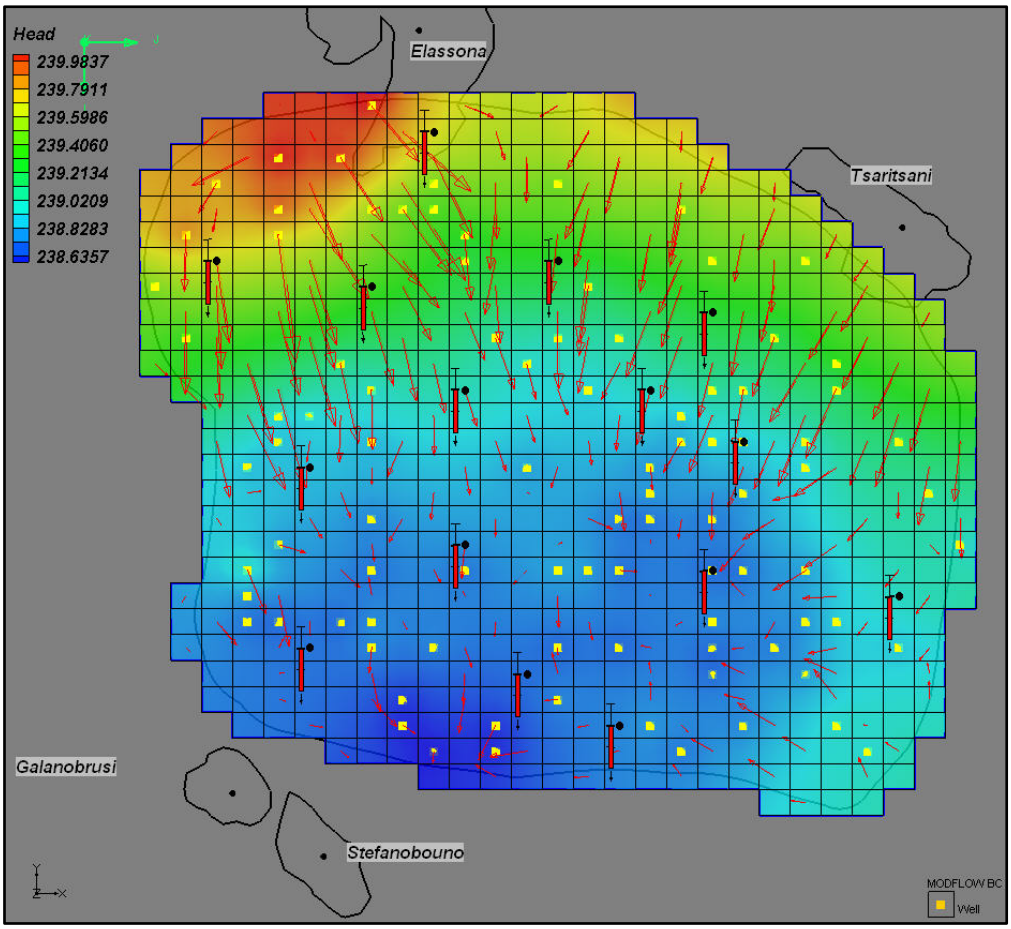
9.2 *Υποθετικά σενάρια.*

Τα υποθετικά σενάρια είναι κάποιες υποθέσεις κατά τις οποίες αλλάζουν οι συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή εφαρμογής του μοντέλου. Ο λόγος διεξαγωγής αυτών των υποθέσεων είναι για να φανεί εάν το μοντέλο είναι ευαίσθητο στην αλλαγή κάποιων παραμέτρων, όπως για παράδειγμα, στις παροχές άντλησης, στις εισροές από τη βροχή κ.α.

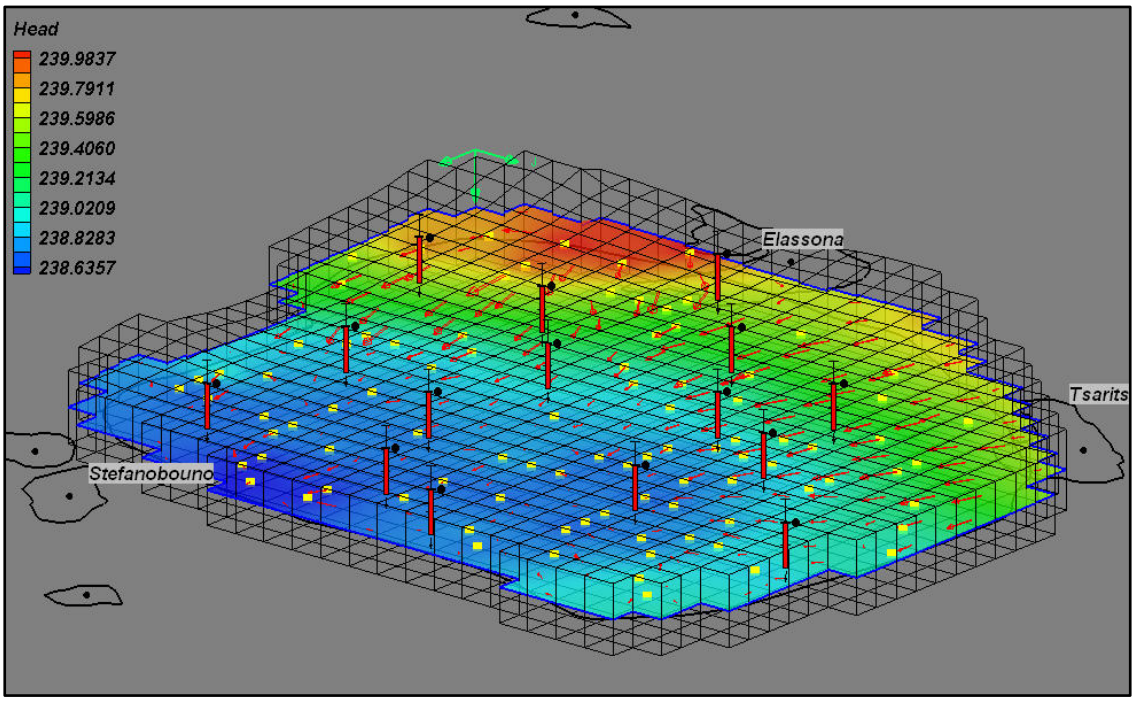
- ***Σενάριο 1^{ο}***

Στο πρώτο σενάριο διπλασιάζονται οι παροχές άντλησης στις γεωτρήσεις εκροής. Δηλαδή, τα 765,75 m^3/h γίνονται πλέον 1531,5 m^3/h και διαμοιράζονται εξίσου σε 71 γεωτρήσεις. Συνεπώς, κάθε γεώτρηση έχει παροχή άντλησης περίπου 22 m^3/h.

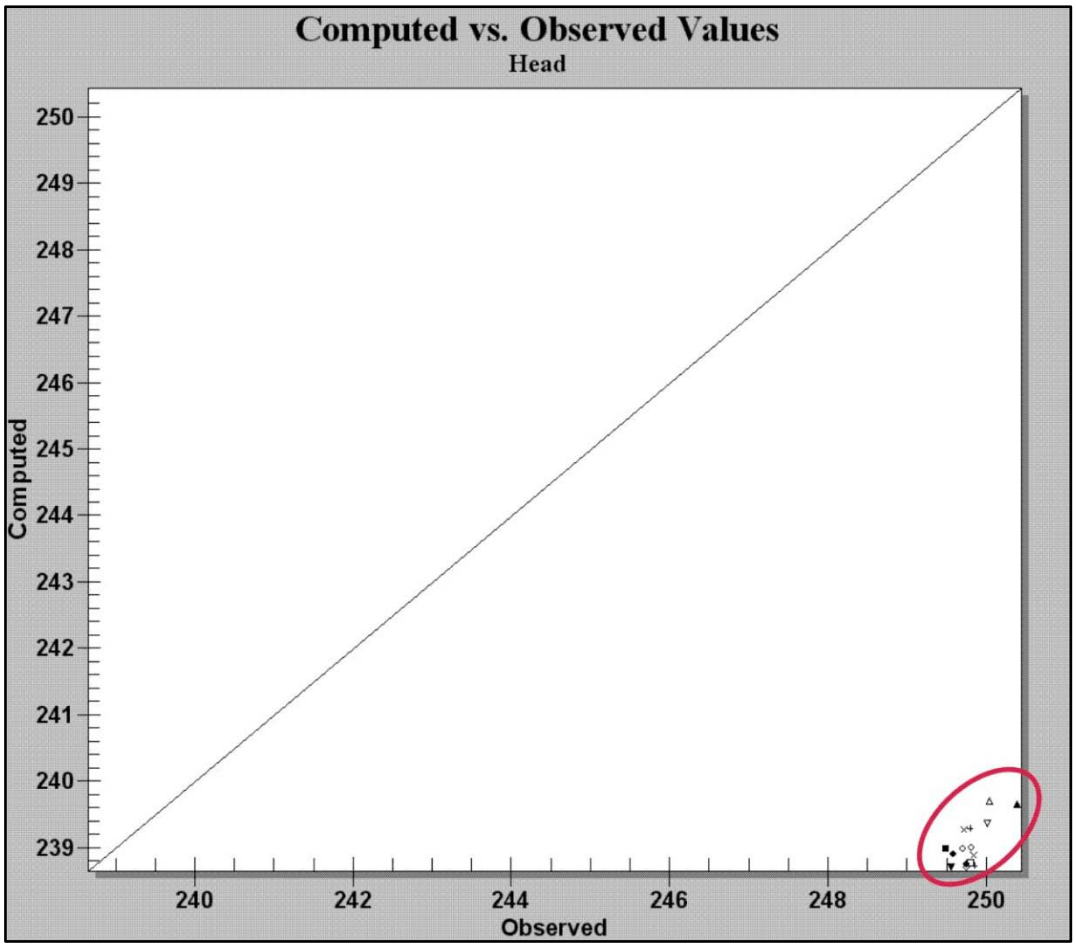
Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του παραπάνω σεναρίου παραθέτονται στις εικόνες 9.4 έως 9.6 και στον πίνακα 9-2 που ακολουθούν.



Εικόνα 9.4 Κάτοψη της υπολογιζόμενης πιεζομετρίας και της διεύθυνσης ροής.



Εικόνα 9.5 Τρισδιάστατη απεικόνιση της υπολογιζόμενης πιεζομετρίας και της διεύθυνσης ροής.



Εικόνα 9.6 Διάγραμμα των υπολογισμένων προς τις παρατηρούμενες τιμές.

Πίνακας 9-2 Ισορροπίας μεταξύ εισροών και εκροών από το σύστημα.

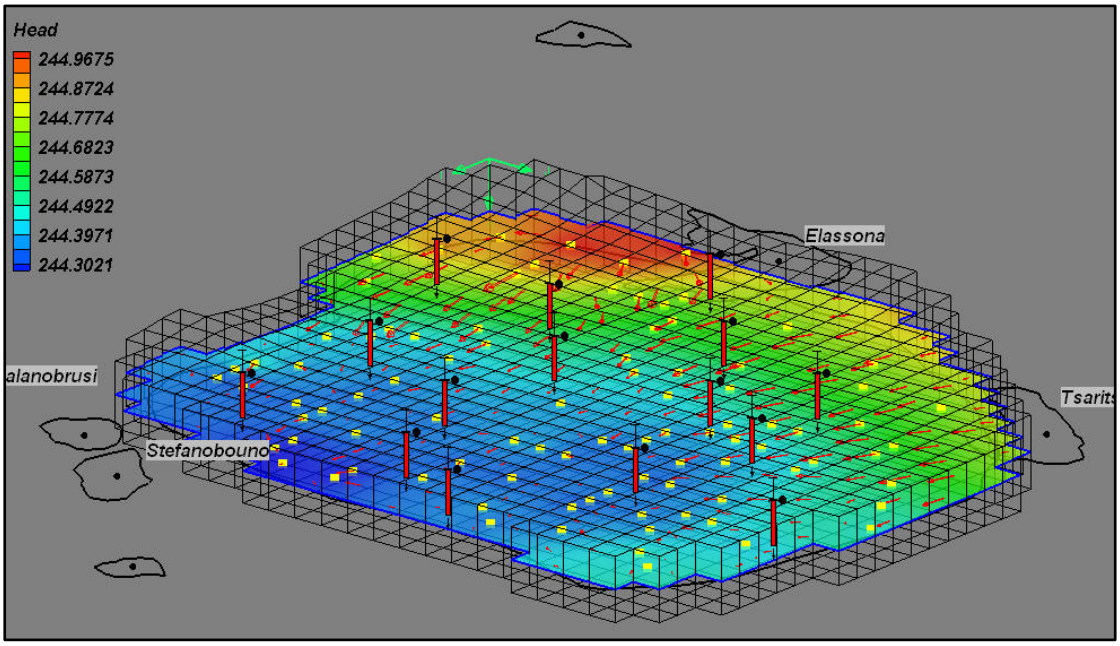
Budget Term	Flow (m^3/h)
Flow Budget for Zone 1	
IN:	
Constant heads	0.0
Wells	600.0
Recharge	178.90401998162
Total IN	778.90401998162
OUT:	
Constant heads	0.0
Wells	1562.0
Recharge	0.0
Total OUT	1562.0
SUMMARY:	
IN - OUT	-783.0959800184
Percent Discrepancy	100.53818698186

Παρατηρώντας τις παραπάνω εικόνες συμπεραίνεται πως σε περίπτωση που διπλασιαστούν οι παροχές άντλησης , δημιουργείται μια τελείως διαφορετική εικόνα στην πιεζομετρία της περιοχής. Πλέον η υπόγεια ροή έχει διεύθυνση από τα Βόριο Δυτικά κυρίως, αλλά και τα Βόριο Ανατολικά προς τα Νότια, και παρατηρείται ένα έλλειμμα στο ισοζύγιο τής τάξης των 783 m^3/h, δηλαδή - 100,5% . Επίσης, στο διάγραμμα της εικόνας 9.6 γίνεται φανερό πως συντελείται μια πτώση στάθμης που κυμαίνεται μεταξύ 10 - 12 m.

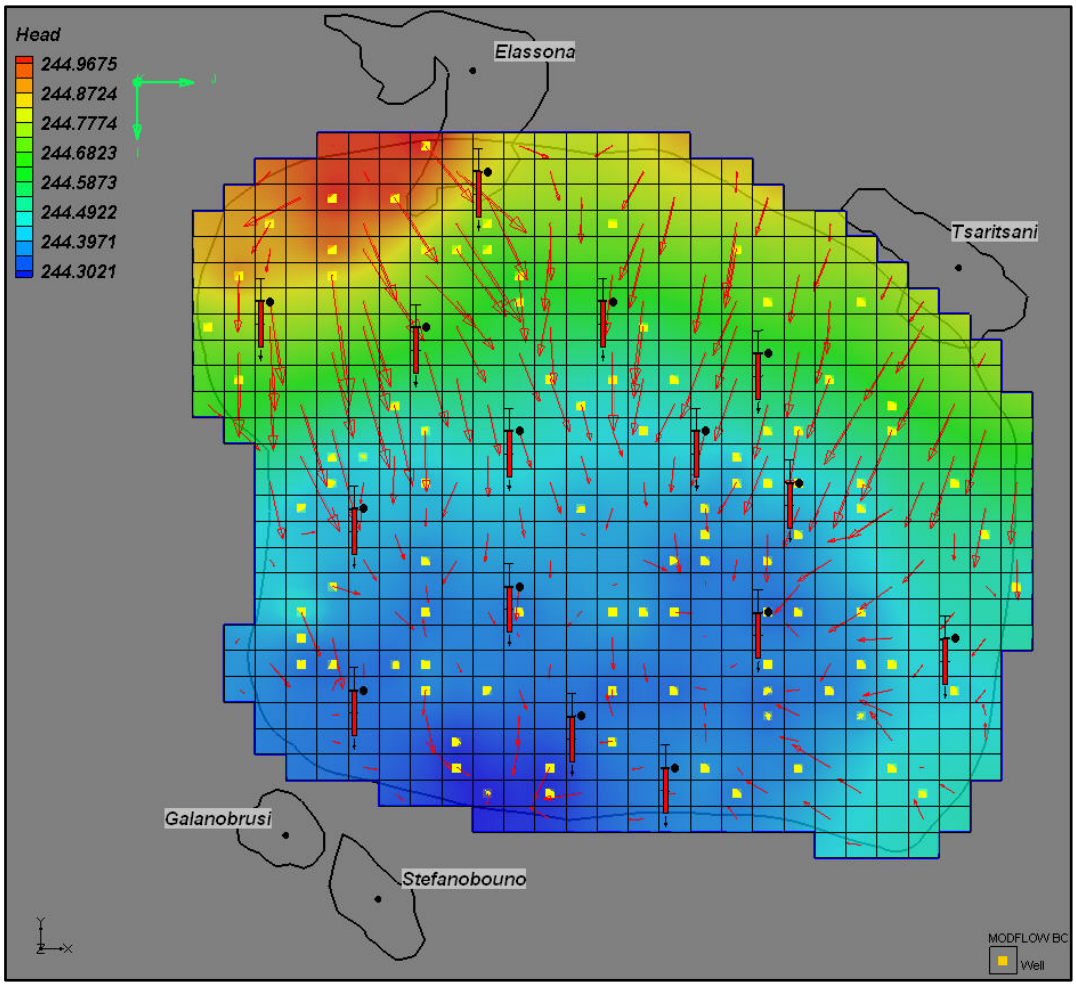
- ***<u>Σενάριο 2°</u>***

Στο δεύτερο σενάριο μειώνεται η βροχόπτωση κατά 50%. Επομένως, τόσο οι εισροές από τη βροχή, όσο και οι εισροές από το ποτάμι και τα ρέματα έχουν μια πτώση τής τάξης του 50%. Έτσι, οι εισροές από τη βροχή διαμορφώνονται σε $4{,}28 \cdot 10^{-6}$ m/h, συνεπώς, οι εισροές από το ποτάμι και τα ρέματα σε 30 m^3/h στον Ελασσονίτικο και 7,5 m^3/h στο ρέμα. Εξαίρεση αποτελεί η γεώτρηση στο κελί {i=20 j= 5 k=1}, όπου οι εισροές διαμορφώνεται στα 37,5 m^3/h.

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του παραπάνω σεναρίου παραθέτονται στις εικόνες 9.7 έως 9.9 και στον πίνακα 9-3 που ακολουθούν.



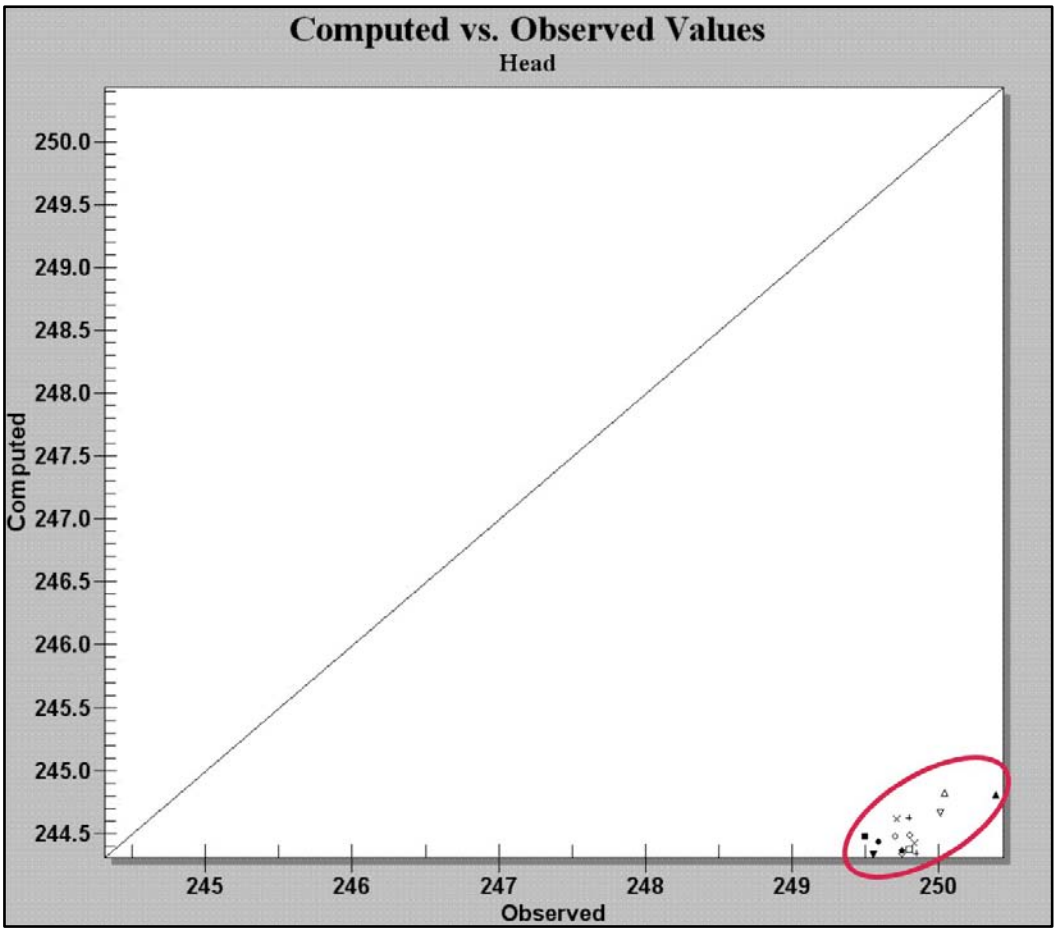
Εικόνα 9.7 Τρισδιάστατη απεικόνιση της υπολογιζόμενης πιεζομετρίας και της διεύθυνσης ροής.



Εικόνα 9.8 Κάτοψη της υπολογιζόμενης πιεζομετρίας και της διεύθυνσης ροής.

Πίνακας 9-3 Ισορροπίας μεταξύ εισροών και εκροών από το σύστημα.

Budget Term	Flow (m^3/h)
Flow Budget for Zone 1	
IN:	
Constant heads	0.0
Wells	300.0
Recharge	89.452009990811
Total IN	389.45200999081
OUT:	
Constant heads	0.0
Wells	781.0
Recharge	0.0
Total OUT	781.0
SUMMARY:	
IN - OUT	-391.5479900092
Percent Discrepancy	100.53818698186



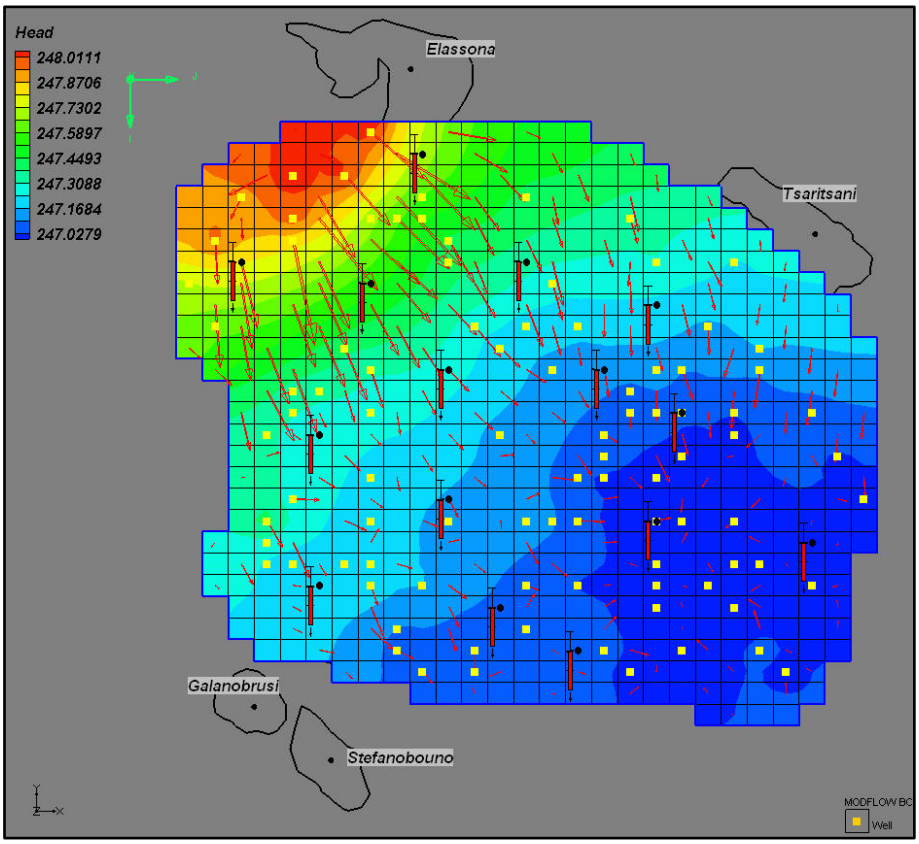
Εικόνα 9.9 Διάγραμμα των υπολογισμένων προς τις παρατηρούμενες τιμές.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν - σχετικά με την υπόγεια ροή - από το δεύτερο σενάριο, όπου μειώνονται οι βροχοπτώσεις κατά 50%, συμπίπτουν με αυτά του πρώτου, μόνο που εδώ η μεταβολή της πιεζομετρικής κατάστασης είναι πιο ήπια. Σ' αυτήν την εκδοχή το ισοζύγιο παρουσιάζει έλλειμμα, το οποίο ισούται με 391,54 m^3/h και η πτώση στάθμης (εικόνα 9.9) κυμαίνεται περίπου στα 5 m.

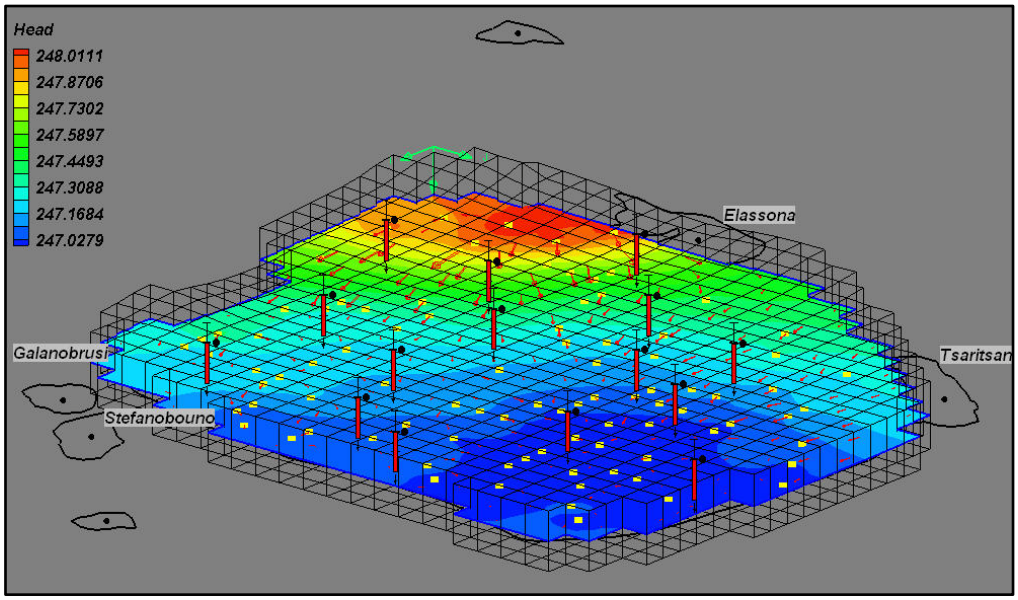
- ***<u>Σενάριο 3°</u>***

Στο τρίτο σενάριο μειώνεται η βροχόπτωση κατά 25%. Επομένως, τόσο στις εισροές από τη βροχή, όσο και στις εισροές από το ποτάμι και τα ρέματα παρατηρείται μια πτώση της τάξης του 25%. Έτσι, οι εισροές από τη βροχή διαμορφώνονται σε $6,410^{-6}$ m/h, ενώ οι εισροές από το ποτάμι και τα ρέματα διαμορφώνονται σε 45m^3/h στον Ελασσονίτικο και 11,25 m^3/h στο ρέμα. Εξαίρεση αποτελεί η γεώτρηση στο κελί {i=20 j= 5 k=1}, όπου οι εισροή διαμορφώνεται στα 56,25 m^3/h.

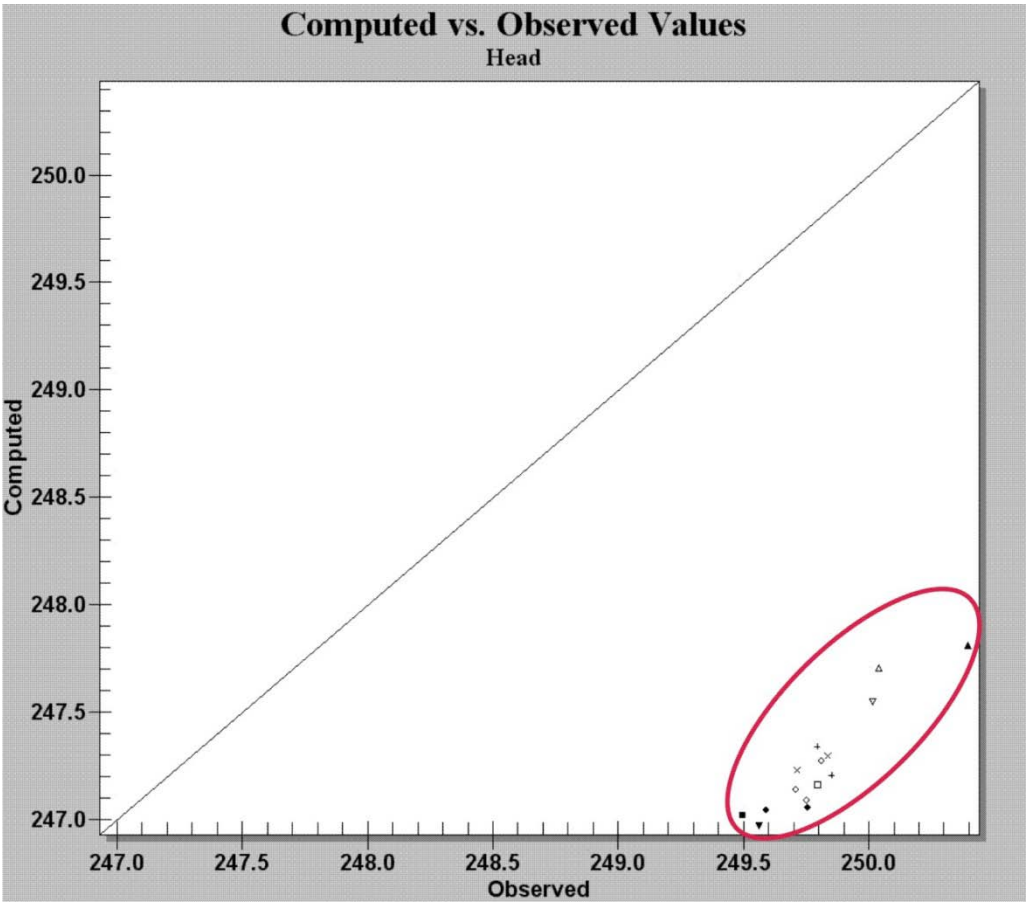
Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του παραπάνω σεναρίου παραθέτονται στις εικόνες 9.10 έως 9.12 και στον πίνακα 9-4.



Εικόνα 9.10 Κάτοψη της υπολογιζόμενης πιεζομετρίας και της διεύθυνσης ροής.



Εικόνα 9.11 Τρισδιάστατη απεικόνιση της υπολογιζόμενης πιεζομετρίας και της διεύθυνσης ροής.



Εικόνα 9.12 Διάγραμμα των υπολογισμένων προς τις παρατηρούμενες τιμές.

Πίνακας 9-4 Ισορροπίας μεταξύ εισροών και εκροών από το σύστημα.

Budget Term	Flow (m^3/h)
Flow Budget for Zone 1	
IN:	
Constant heads	0.0
Wells	450.0
Recharge	133.76000323892
Total IN	583.76000323892
OUT:	
Constant heads	0.0
Wells	781.0
Recharge	0.0
Total OUT	781.0
SUMMARY:	
IN - OUT	-197.2399967611
Percent Discrepancy	33.787857281541

Για το σενάριο με την παραδοχή ότι η βροχόπτωση μειώθηκε κατά 25% η εικόνα του πιεζομετρικού χάρτη και των υπογείων ροών παραμένει σχεδόν ίδια με την αρχική. Υπό τις νέες αυτές συνθήκες παρατηρείται ότι υπάρχουν μόνο κάποιες

μικρές ανωμαλίες στη ροή των υπογείων υδάτων και πως το ισοζύγιο παρουσιάζει έλλειμμα 197,2 m^3/h , δηλαδή περίπου 33,7%. Επίσης, η στάθμη του υπογείου νερού έχει μια πτώση η οποία όμως είναι περίπου 1,5 m.

Όλα αυτά δείχνουν πως σε μία ενδεχόμενη περίοδο ξηρασίας η μεταβολή της πιεζομετρικής κατάστασης στη λεκάνη είναι σχετικά μικρή, με την προϋπόθεση της μη ταυτόχρονης αύξησης των αρδεύσεων.

- ***Σενάριο 4ο***

Το τέταρτο σενάριο αποτελεί έναν τεχνητό εμπλουτισμό σε τρείς υποθετικές γεωτρήσεις.

Ορισμός του τεχνητού εμπλουτισμού.

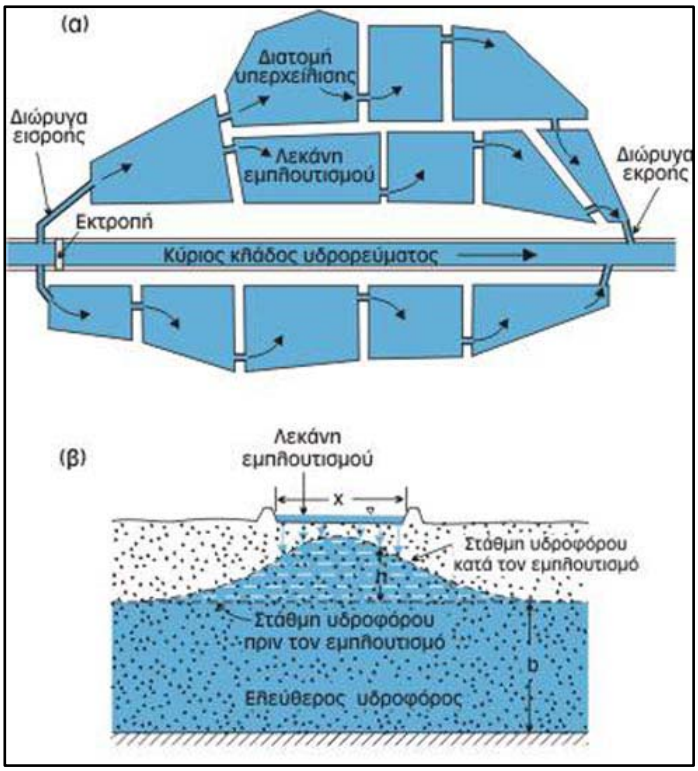
Στο σημείο αυτό είναι θεμιτό να γίνει μια σύντομη αναφορά στον τεχνητό εμπλουτισμό.

Ως τεχνητός εμπλουτισμός των υδροφόρων στρωμάτων χαρακτηρίζεται η αύξηση των ποσοτήτων μετεωρικού νερού που εισέρχεται στα υδροφόρα στρώματα με χρήση διαδικασιών, τεχνικών, εγκαταστάσεων – διατάξεων από τον άνθρωπο. Σε πιο ευρεία έννοια, τεχνητός εμπλουτισμός είναι η εισαγωγή πρόσθετων ποσοτήτων νερού στο(-α) υδροφόρο(-α) στρώμα(-τα). Το πρόσθετο αυτό νερό μπορεί να προέρχεται από επιφανειακό νερό ή από νερό παρακείμενου υδροφόρου στρώματος, είτε ακόμα και από επεξεργασμένα υδάτινα λύματα (Σούλιος 2004) .

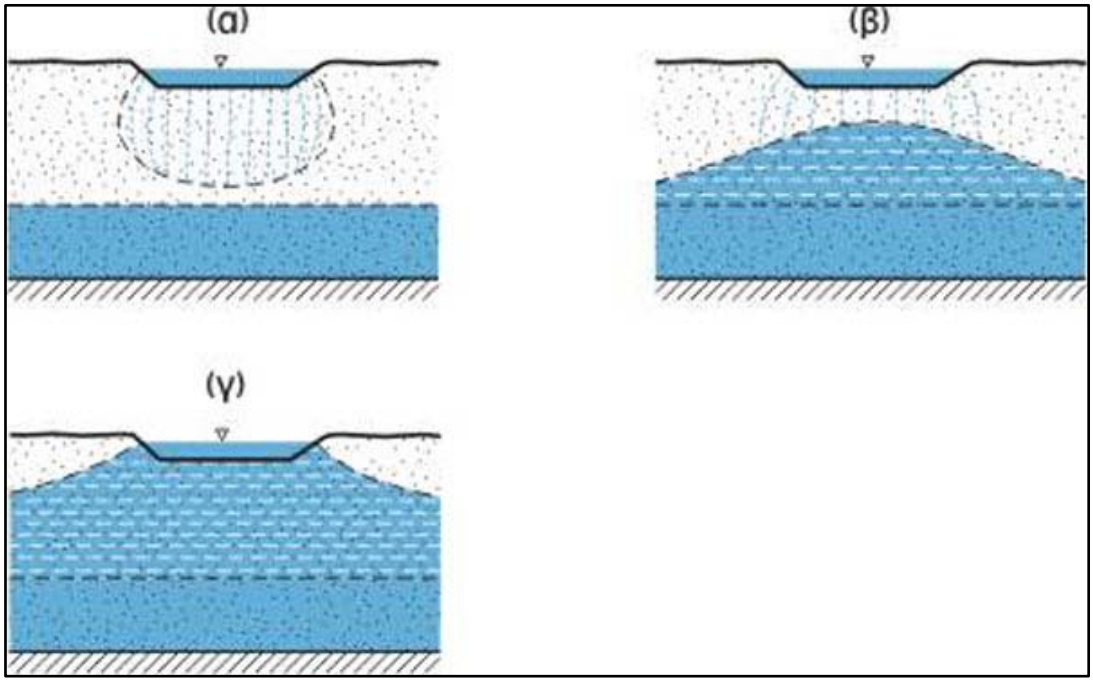
Με βάση τα γεωμετρικά – μορφολογικά κριτήρια ακολουθούν οι εξής κατηγορίες:

Κατηγορία εμπλουτισμού από επιφάνειες - διάφορες επιφάνειες κατακλύζονται με νερό που έχει γενικά μικρό πάχος.

Κατηγορία εμπλουτισμού από τάφρους, αύλακες, ορύγματα, λάκκους - χρησιμοποιούνται οποιωνδήποτε μορφών τεχνητές εκσκαφές - χωρίς ιδιαίτερα μεγάλο βάθος - από τις οποίες γίνεται εμπλουτισμός. Το νερό σε αυτές τις εκσκαφές έχει πάχος λίγα μέτρα.

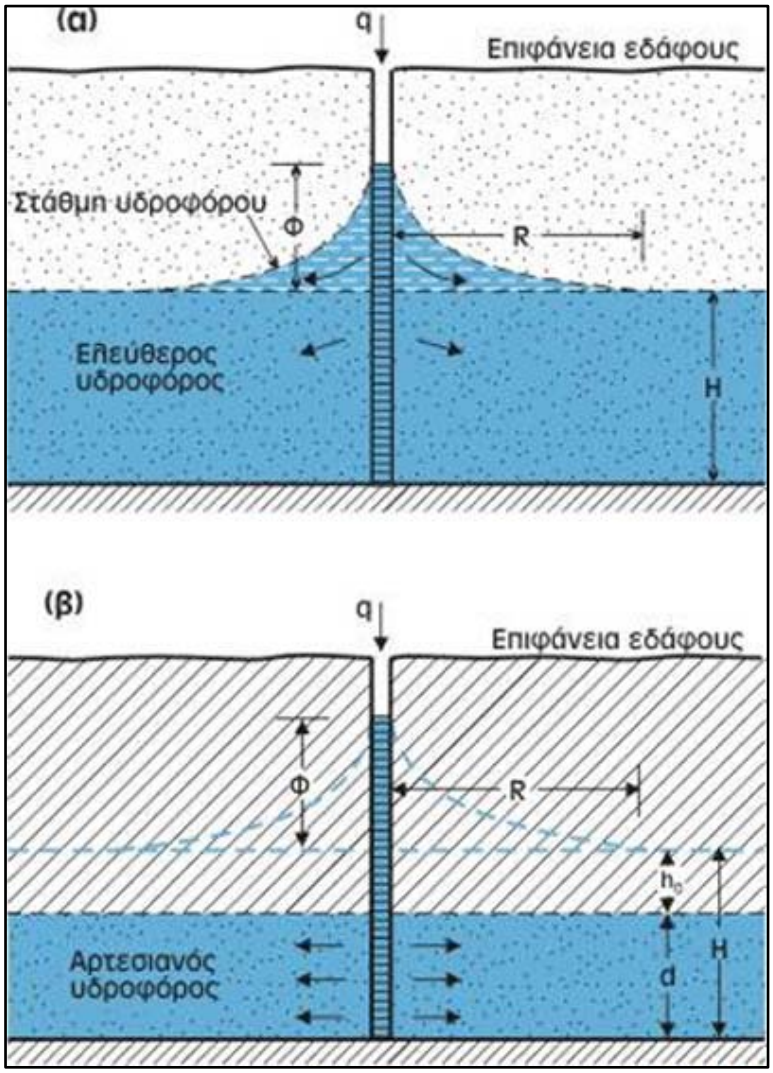


Εικόνα 9.13 Τεχνητός εμπλουτισμός με κατάκλυση λεκανών. (α) κάτοψη, (β) τομή κάτω από μια λεκάνη πλάτους x (Καλλέργης 2001 κατά Todd 1980).



Εικόνα 9.14 Η εξέλιξη του εμπλουτισμού από μία τάφρο (Σούλιος 2004).

Κατηγορία εμπλουτισμού από γεωτρήσεις και φρέατα. Μπορεί να γίνει σε μεγάλο βάθος με άσκηση υδραυλικού φορτίου με οριζόντια ροή του εισπιεζόμενου νερού.

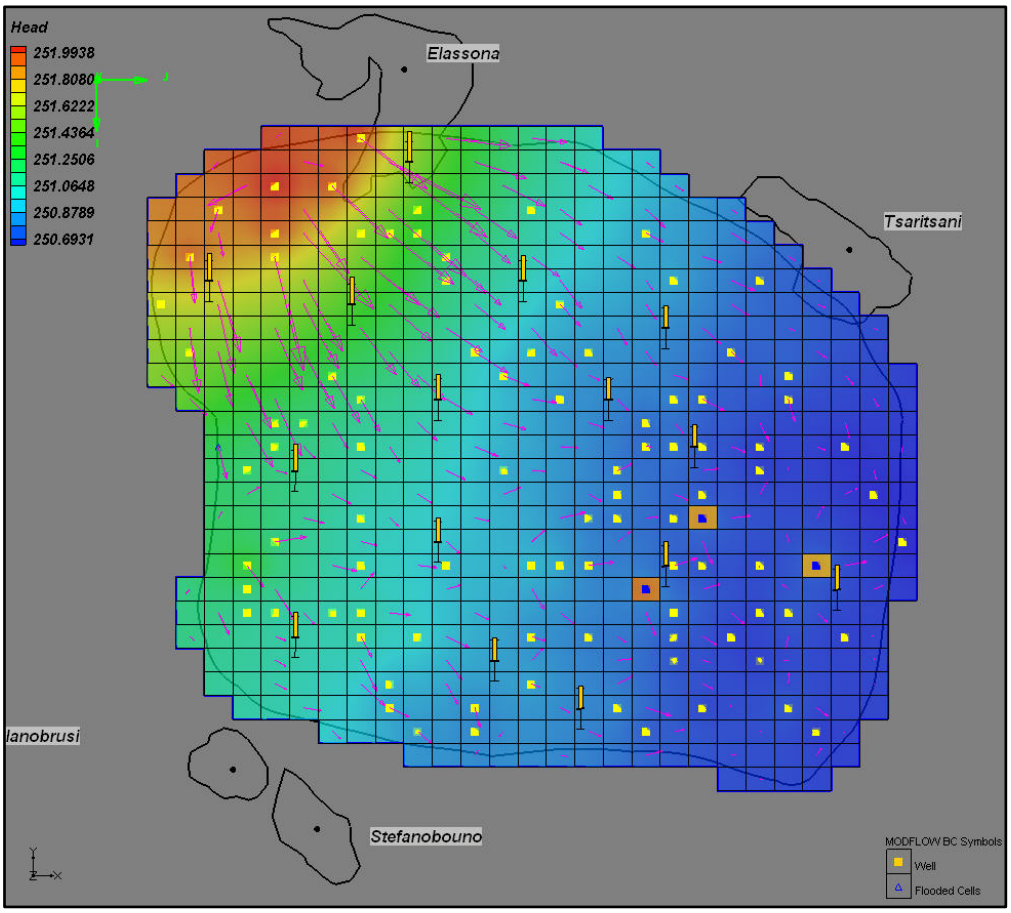


Εικόνα 9.15 Τεχνητός εμπλουτισμός από γεώτρηση (α) ελεύθερο υδροφόρο στρώμα (β) υπό πίεση υδροφόρο στρώμα (Σούλιος 2004).

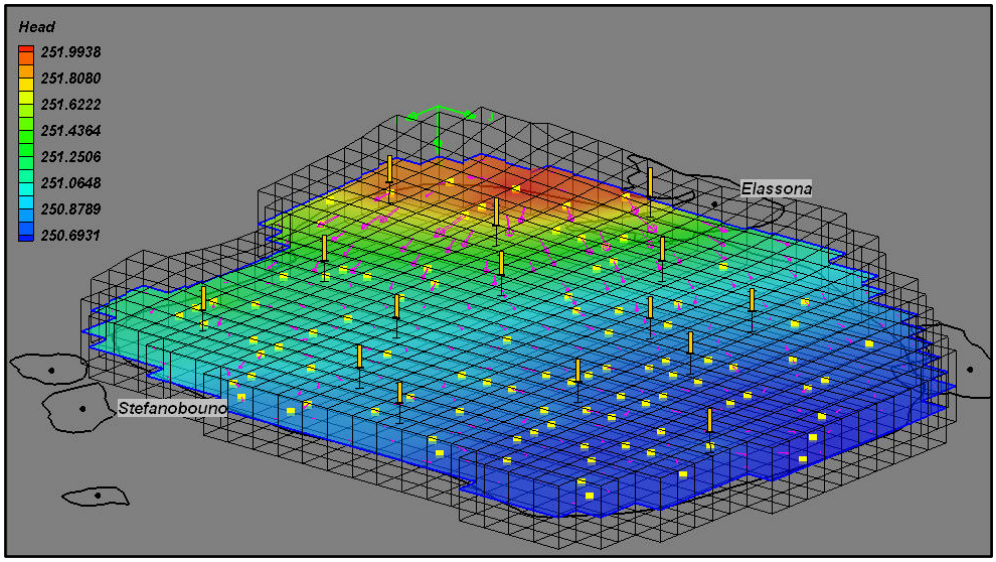
<u>Υποθετική εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού στη λεκάνη μελέτης.</u>

Το τέταρτο σενάριο αποτελεί έναν υποθετικό τεχνητό εμπλουτισμό σε τρείς γεωτρήσεις. Ως γεωτρήσεις όπου γίνεται εμπλουτισμός επιλέγονται τυχαία τα κελιά {i=18 j= 21 k=1},{ i=21 j= 19 k=1} και {i=20 j= 25 k=1} που βρίσκονται στην περιοχή με τις περισσότερες αρδεύσεις (όπως φαίνεται και στην εικόνα 9.16) και τροφοδοτούνται με 25 m^3/h η καθεμία.

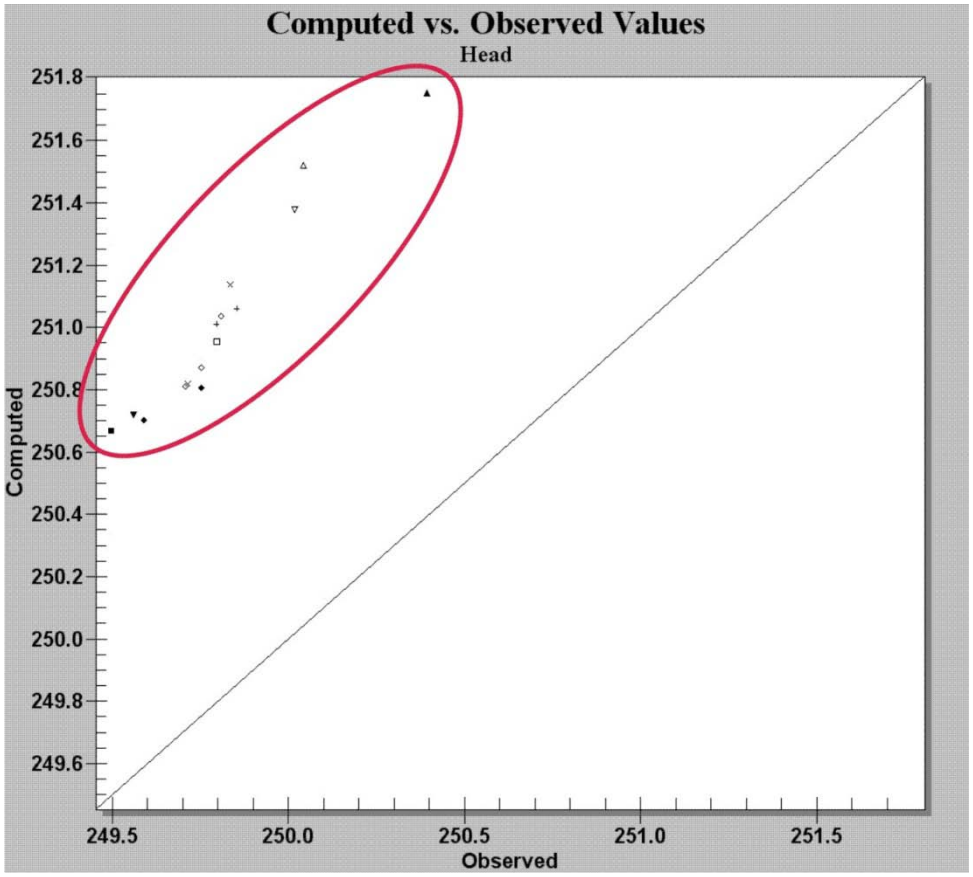
Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του παραπάνω σεναρίου παραθέτονται στις εικόνες 9.16 έως 9.18 και στον πίνακα 9-5.



Εικόνα 9.16 Κάτοψη της υπολογιζόμενης πιεζομετρίας και της διεύθυνσης ροής.



Εικόνα 9.17 Τρισδιάστατη απεικόνιση της υπολογιζόμενης πιεζομετρίας και της διεύθυνσης ροής.



Εικόνα 9.18 Διάγραμμα των υπολογισμένων προς τις παρατηρούμενες τιμές.

Πίνακας 9-5 Ισορροπίας μεταξύ εισροών και εκροών από το σύστημα.

Budget Term	Flow (m^3/h)
Flow Budget for Zone 1	
IN:	
Constant heads	0.0
Wells	675.0
Recharge	178.90401998162
Total IN	853.90401998162
OUT:	
Constant heads	0.0
Wells	781.0
Recharge	0.0
Total OUT	781.0
SUMMARY:	
IN - OUT	72.904019981623
Percent Discrepancy	8.5377300347165

Τα αποτελέσματα του τέταρτου σεναρίου, όπου εφαρμόζεται ο κώδικας MODFLOW, είναι πολύ ενθαρρυντικά για μελλοντικό τεχνητό εμπλουτισμό στην περιοχή.

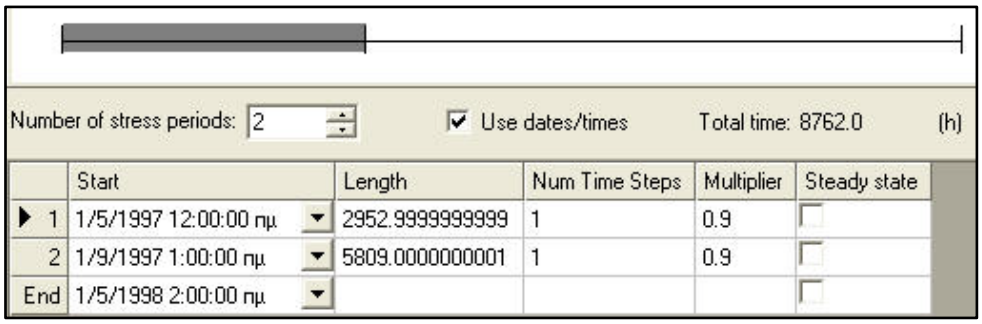
Η γενικότερη πιεζομετρία της λεκάνης παραμένει σταθερή, με εξαίρεση τις ανωμαλίες που δημιουργούνται από τους κώνους ανόδου της στάθμης. Οι κώνοι αυτοί εμφανίζονται στις γεωτρήσεις όπου γίνεται ο τεχνητός εμπλουτισμός (γεωτρήσεις εισόδου). Το ισοζύγιο παρουσιάζει πλεόνασμα 72,0 m^3/h, της τάξης δηλαδή του 8,5% και η πιεζομετρική στάθμη ανεβαίνει από 1,5 έως 1,8 m.

9.3 *Εφαρμογή σε μεταβαλλόμενες συνθήκες (Transient case)* .

Κατά την εφαρμογή του μοντέλου σε μεταβαλλόμενες συνθήκες (Transient case), οι γενικές ρυθμίσεις του μοντέλου - κατά την εφαρμογή του σε σταθερές συνθήκες (Steady state) - παραμένουν οι ίδιες. Οι αλλαγές, οι οποίες επιτρέπουν το μοντέλο να λειτουργεί πλέον ως μοντέλο μεταβαλλόμενων συνθηκών, αναφέρονται παρακάτω.

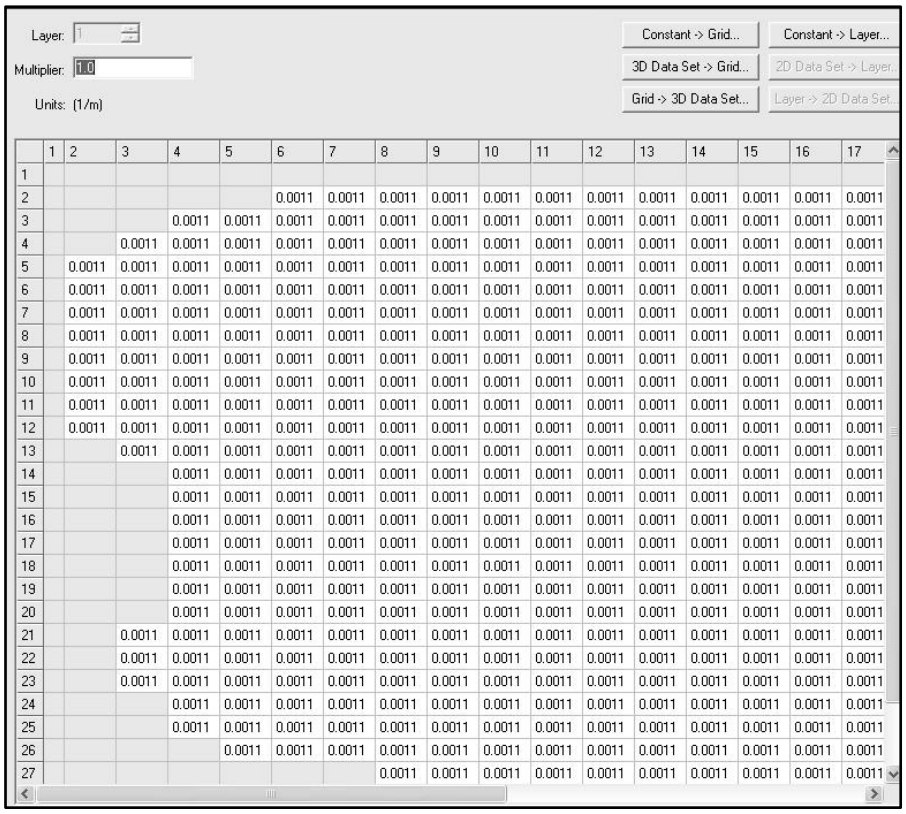
➢ ***Ρύθμιση του μοντέλου σε μεταβαλλόμενες συνθήκες (Transient case).***

Για τη συγκεκριμένη λεκάνη μελέτης το μοντέλο χωρίζεται χρονικά σε δύο περιόδους (Stress Periods). Η μια περίοδος ξεκινάει στις 1 Μαΐου του 1997 και τελειώνει στις 1 Σεπτεμβρίου του 1997 και η άλλη ξεκινάει από 1 Σεπτεμβρίου του 1997 και τελειώνει στις 1 Μαΐου του 1998 (εικόνα 9.19).

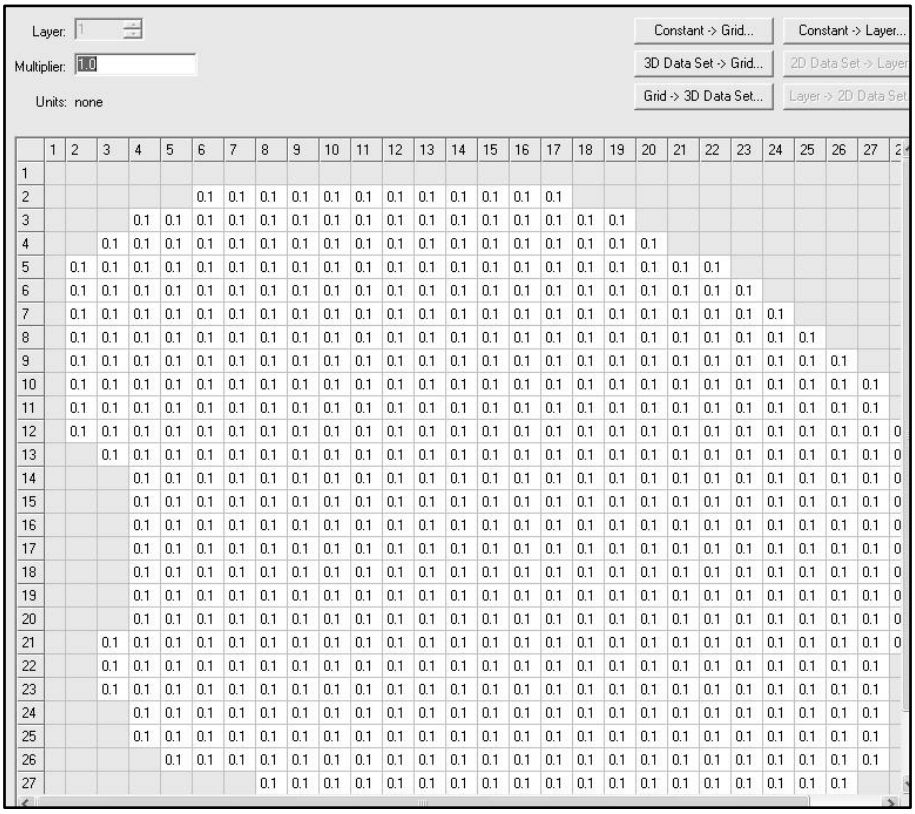


Εικόνα 9.19 Διαχωρισμός του μοντέλου σε δύο περιόδους.

Κατά τη ρύθμιση του μοντέλου σε μεταβαλλόμενες συνθήκες υπεισέρχονται δύο νέα στοιχεία τα όποια ορίζονται ως εξής: το ένα ως ειδική υδροχωρητικότητα (Specific storage) και το άλλο ως ειδική απόδοση (Specific Yield). Η ειδική υδροχωρητικότητα, από τη βιβλιογραφία (Βουδούρης 2004), προκύπτει ότι για



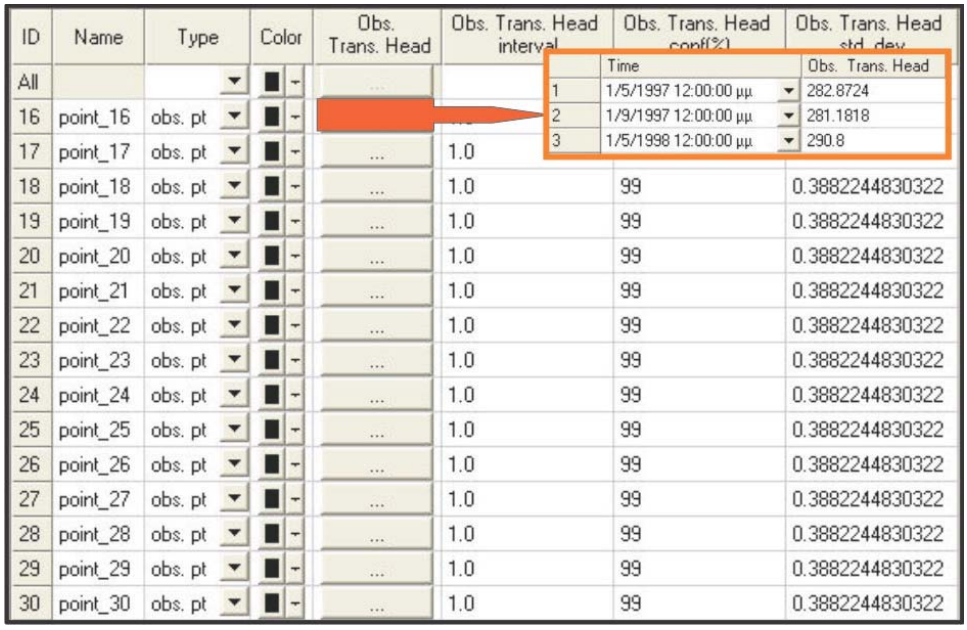
Εικόνα 9.20 Παράθυρο επιλογής τής ειδική υδροχωρητικότητα **(S_s).**



Εικόνα 9.21 Παράθυρο επιλογής τής ειδική απόδοση (S_y).

ελεύθερους υδροφόρους ισούται από 10^{-3} έως $1,25 \cdot 10^{-3}$ m^{-1}. Για το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιείται η τιμή $1,1 \cdot 10^{-3}$ m^{-1} για όλο τον κάναβο. Από την άλλη, η ειδική απόδοση, για ελεύθερους υδροφόρους, προκύπτει ότι ισούται από 0,09 έως 0,12 και χρησιμοποιείται η τιμή 0,1 για όλο τον κάναβο (εικόνες 9.20 & 9.21).

Στη συνέχεια γίνεται αλλαγή στα σημεία παρατήρησης (observation points) σύμφωνα με τις δύο περιόδους (Stress Periods), όπως φαίνεται στην εικόνα 9.22.



ID	Name	Type	Color	Obs. Trans. Head	Obs. Trans. Head interval	Obs. Trans. Head conf(%)	Obs. Trans. Head std. dev
All				...			
16	point_16	obs. pt					
17	point_17	obs. pt		...	1.0		
18	point_18	obs. pt		...	1.0	99	0.3882244830322
19	point_19	obs. pt		...	1.0	99	0.3882244830322
20	point_20	obs. pt		...	1.0	99	0.3882244830322
21	point_21	obs. pt		...	1.0	99	0.3882244830322
22	point_22	obs. pt		...	1.0	99	0.3882244830322
23	point_23	obs. pt		...	1.0	99	0.3882244830322
24	point_24	obs. pt		...	1.0	99	0.3882244830322
25	point_25	obs. pt		...	1.0	99	0.3882244830322
26	point_26	obs. pt		...	1.0	99	0.3882244830322
27	point_27	obs. pt		...	1.0	99	0.3882244830322
28	point_28	obs. pt		...	1.0	99	0.3882244830322
29	point_29	obs. pt		...	1.0	99	0.3882244830322
30	point_30	obs. pt		...	1.0	99	0.3882244830322

	Time	Obs. Trans. Head
1	1/5/1997 12:00:00 μμ	282.8724
2	1/9/1997 12:00:00 μμ	281.1818
3	1/5/1998 12:00:00 μμ	290.8

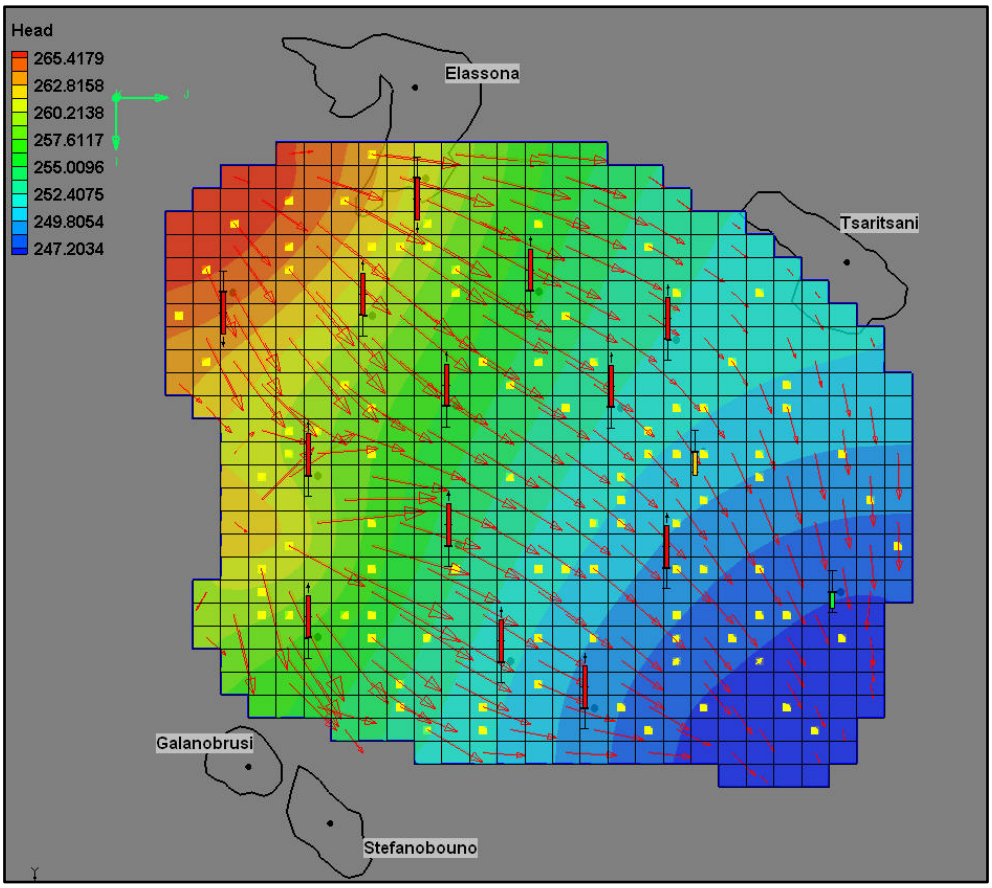
Εικόνα 9.22 Παράθυρο επιλογής των σημείων παρατήρησης (observation points).

Με την ολοκλήρωση των παραπάνω, επόμενο βήμα συνιστά η αλλαγή της κατείσδυσης, των εισροών και των εκροών.

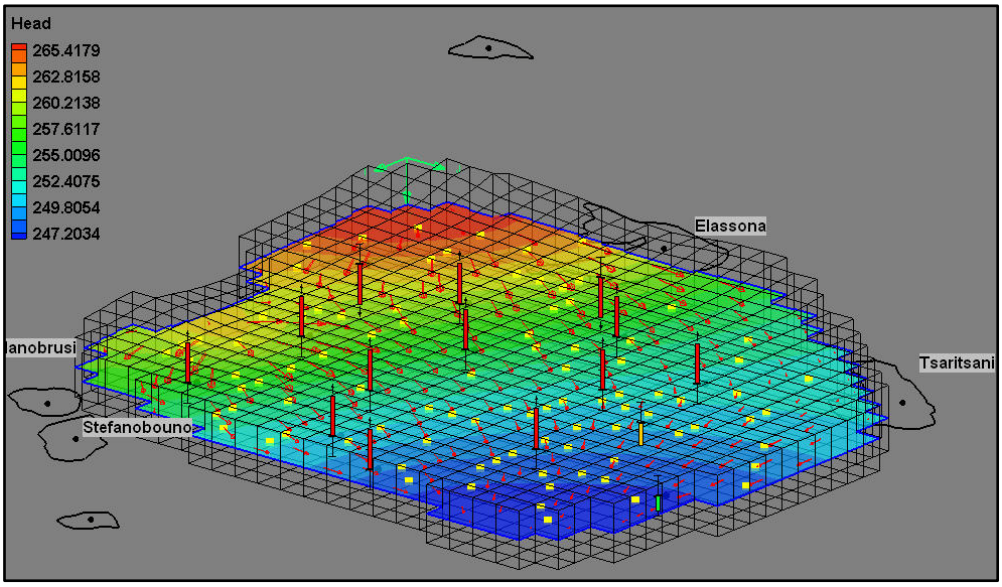
- ***<u>Πρώτη περίοδος (Stress Period 1).</u>***

- Κατείσδυση, $7,4 \cdot 10^{-6}$ m/h
- Εισροές, για τον Ελασσονίτικο 10,6 m^3/h, για το ρέμα 2,6 m^3/h και για το κελί {i=20 j= 5 k=1} 13,2 m^3/h.
- Εκροές, 9,16 m/h και για τις 71 γεωτρήσεις.

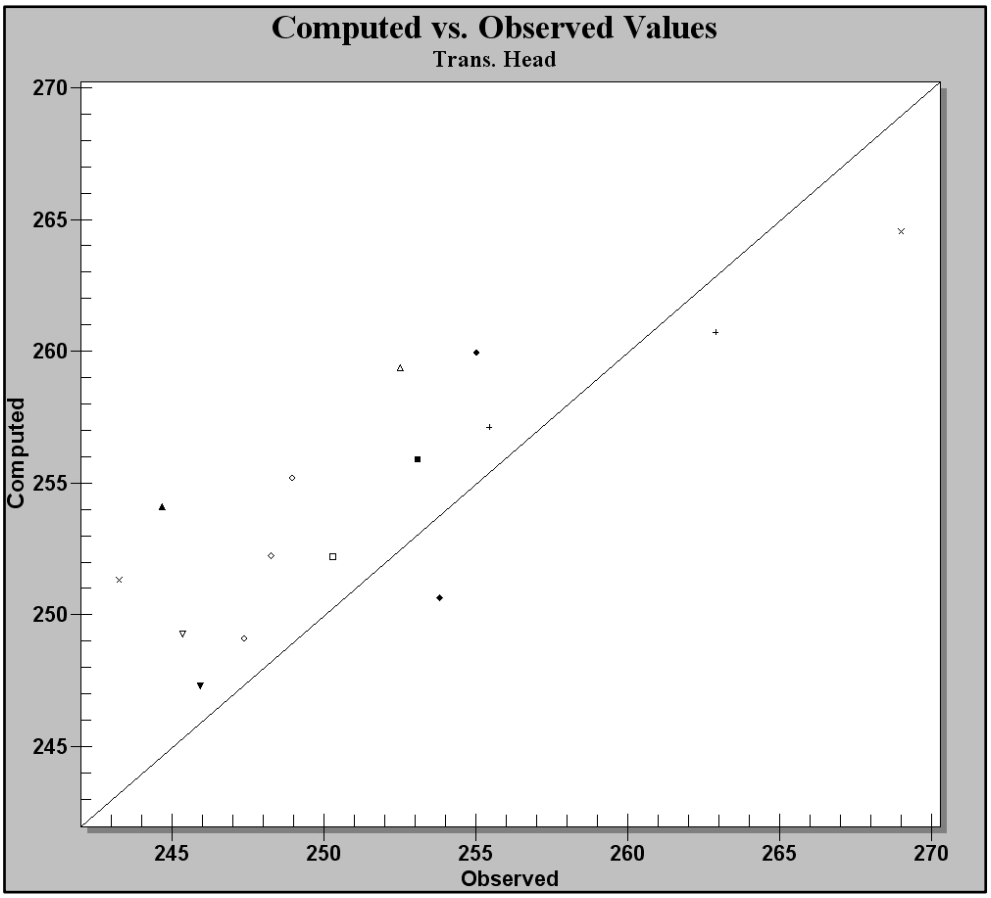
Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή των προηγούμενων, παρατίθενται στις εικόνες 9.23 έως 9.25 και τον πίνακα 9-6.



Εικόνα 9.23 Κάτοψη της υπολογιζόμενης πιεζομετρίας και της διεύθυνσης ροής.



Εικόνα 9.24 Τρισδιάστατη απεικόνιση της υπολογιζόμενης πιεζομετρίας και της διεύθυνσης ροής.



Εικόνα 9.25 Διάγραμμα των υπολογισμένων προς τις παρατηρούμενες τιμές.

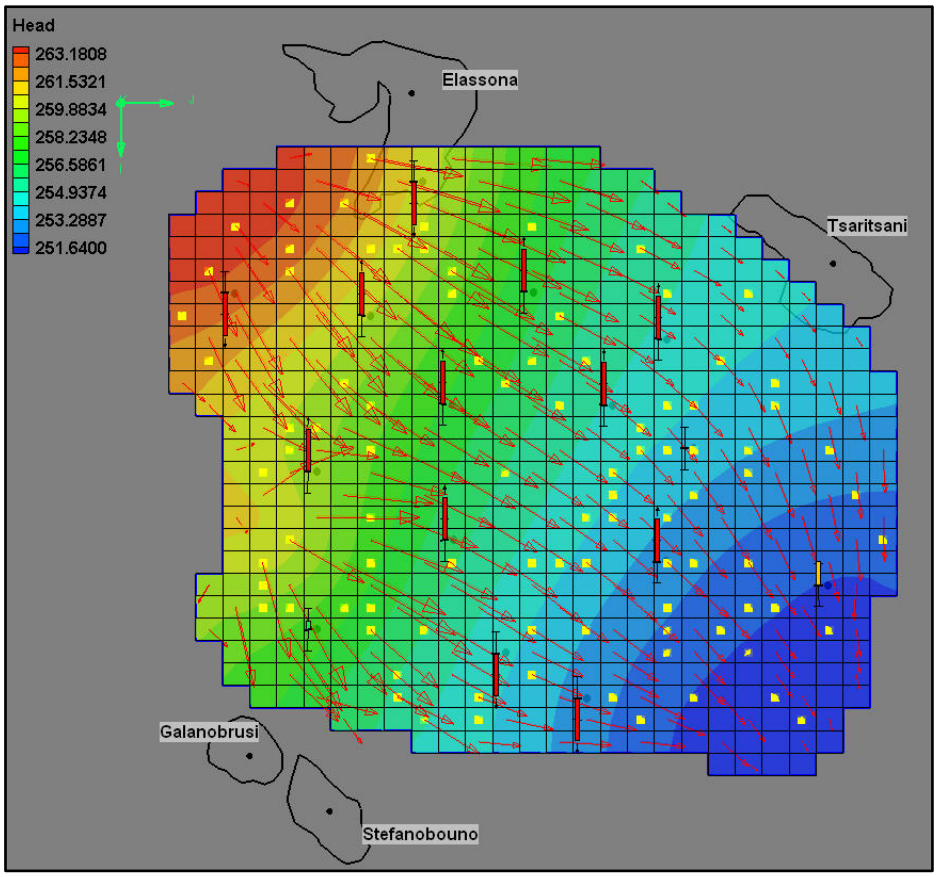
Πίνακας 9-6 Ισορροπίας μεταξύ εισροών και εκροών από το σύστημα.

Budget Term	Flow (m^3/h)
Flow Budget for Zone 1	
IN:	
Storage	4980.6434694082
Constant heads	0.0
Wells	105.2000002861
Recharge	154.66000199318
Total IN	5240.5034716874
OUT:	
Storage	4585.4398233294
Constant heads	0.0
Wells	650.35998916626
Recharge	0.0
Total OUT	5235.7998124957
SUMMARY:	
IN - OUT	4.7036591917276
Percent Discrepancy	0.0897558644344

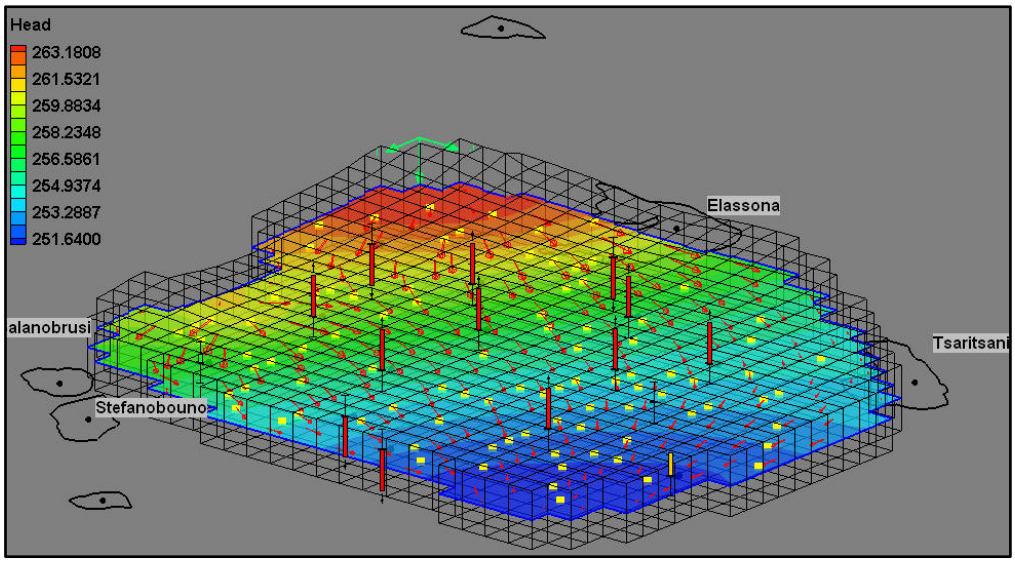
➢ ***Δεύτερη περίοδος (Stress Period 2).***

- Κατείσδυση, $9{,}22 \cdot 10^{-6}$ m/h.
- Εισροές, για τον Ελασσονίτικο 49,4 m^3/h, για το ρέμα 12,36 m^3/h και για το κελί {i=20 j= 5 k=1} 61,7 m^3/h.
- Εκροές, 1,6 m/h και για τις 71 γεωτρήσεις.

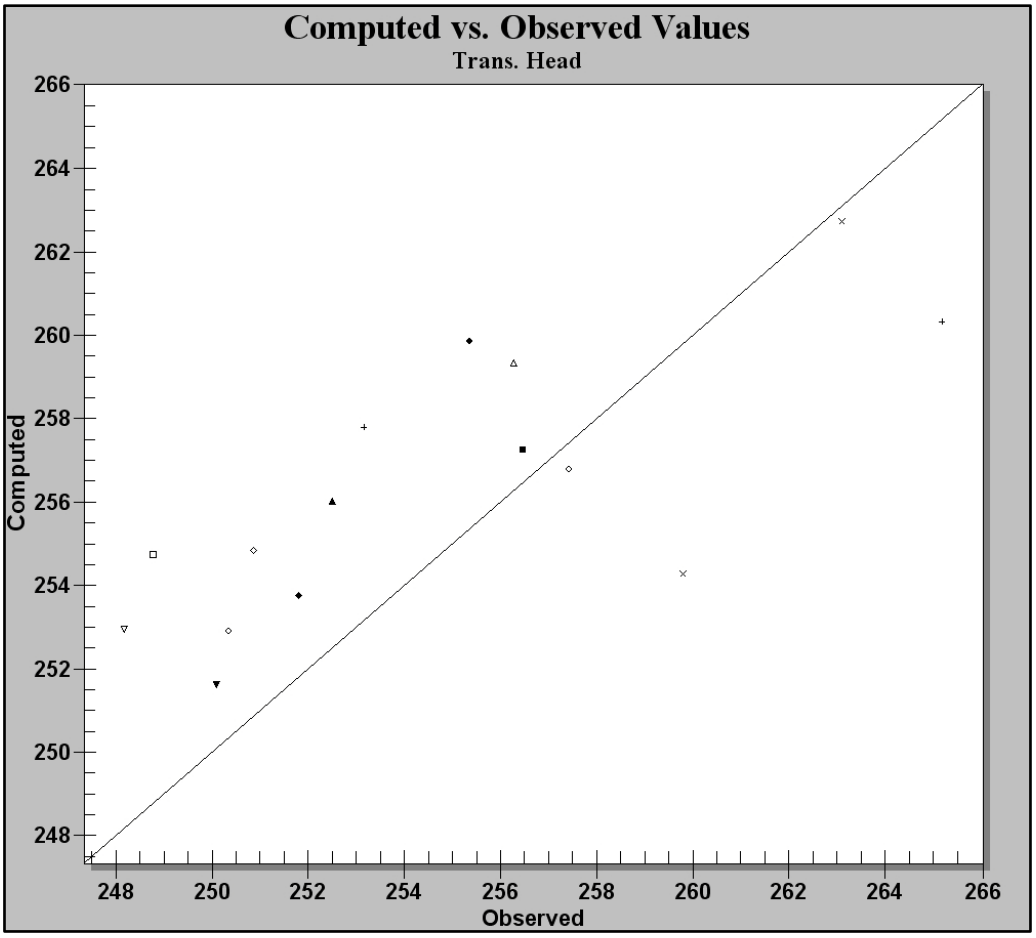
Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή των προηγούμενων, παρατίθενται στις εικόνες 9.26 έως 9.28 και τον πίνακα 9-7.



Εικόνα 9.26 **Κάτοψη της υπολογιζόμενης πιεζομετρίας και της διεύθυνσης ροής.**



Εικόνα 9.27 **Τρισδιάστατη απεικόνιση της υπολογιζόμενης πιεζομετρίας και της διεύθυνσης ροής.**



Εικόνα 9.28 **Διάγραμμα των υπολογισμένων προς τις παρατηρούμενες τιμές.**

Πίνακας 9-7 Ισορροπίας μεταξύ εισροών και εκροών από το σύστημα.

Budget Term	Flow (m^3/h)
Flow Budget for Zone 1	
IN:	
Storage	2543.8683047891
Constant heads	0.0
Wells	509.10000324249
Recharge	117.04000049829
Total IN	3170.0083085299
OUT:	
Storage	3036.1762077846
Constant heads	0.0
Wells	113.60000169277
Recharge	0.0
Total OUT	3149.7762094773
SUMMARY:	
IN - OUT	20.232099052519
Percent Discrepancy	0.6382348903654

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παραπάνω, από την εφαρμογή του κώδικα MODFLOW σε μεταβαλλόμενες συνθήκες και για τις δύο περιόδους, είναι πολύ ικανοποιητικά. Εδώ πρέπει να τονιστεί, πως τα σημεία παρατήρησης - σύμφωνα με τα οποία γίνονται τα διαγράμματα - είναι τιμές του υδρολογικού έτους 1997-1998. Πρόκειται, όπως φαίνεται και στον πίνακα 4-2 σελίδα 25, για ένα μέτριο προς ξηρό έτος. Επομένως, το να είναι οι υπολογισμένες τιμές, λίγο μεγαλύτερες από τις τιμές των σημείων παρατήρησης, είναι φυσιολογικό.

Παρ' όλα αυτά, όμως, είναι καλύτερο να μη δοθεί βάση στο μοντέλο που έγινε σε μεταβαλλόμενες συνθήκες, καθώς σε ένα τέτοιο μοντέλο, είναι προτιμότερο οι καταγραφές στοιχείων που εισάγονται να είναι σε μηνιαία βάση.

10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Γεωμορφολογία – Γεωλογία – Τεκτονική.

- Η συνολική έκταση τής περιοχής μελέτης είναι 22,36 km^2 με ομοιόμορφη κατανομή στα διάφορα υψόμετρα. Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης ανέρχεται σε +265 m. Η συνολική έκτασή της είναι πεδινή με πολύ ήπιο ανάγλυφο και το υψόμετρό της κυμαίνεται από 251 έως 299 m.
- Στα επιφανειακά στρώματα της λεκάνης συναντώνται κυρίως Αλλουβιακές αποθέσεις, ενώ το υπόβαθρο εμφανίζεται από τα -150 m (απόλυτο υψόμετρο) και είναι κυρίως Γνευσιοσχιστόλιθοι, γνεύσιοι, σχιστόλιθοι, με ενστρώσεις ορθογνεύσιων και μαρμάρων.
- Οι γεωλογικοί σχηματισμοί, που απαντούν στην περιοχή, έχουν υποστεί τεκτονική καταπόνηση η οποία προέρχεται από ρήγματα που έχουν ως κύριες διευθύνσεις, τα παλαιότερα ΒΔ – ΝΑ και τα νεότερα ΒΑ – ΝΔ.

Υδρογεωλογία.

- Στην ευρύτερη περιοχή της Ελασσόνας, το μέσο ύψος των κατακρημνισμάτων είναι 499,62 mm (περίοδος 1971 – 1999) και παρατηρείται ένα μέγιστο με 818 mm, κατά το έτος 1979 και ένα ελάχιστο με 229,5 mm ύψος βροχής, το έτος 1989.
- Η μέση θερμοκρασία της λεκάνης είναι περίπου 13,96 ^oC εμφανίζοντας μέγιστη τιμή τον Ιούλιο 24,9 ^oC και ελάχιστη τιμή τον Ιανουάριο 4,9 ^oC.
- Ο όγκος νερού που συμμετέχει στις διαδικασίες απορροής και κατείσδυσης υπολογίζεται στα $2,4 \times 10^6$ m^3 και ανέρχεται σε 21,2 % του συνολικού ύψους της βροχόπτωσης. Συγκεκριμένα, αυτός που εξατμίζεται και διαπνέεται είναι $8,9 \times 10^6$ m^3, δηλαδή ανέρχεται σε 78,8 % του συνολικού ύψους βροχόπτωσης.
- Στους κοκκώδεις γεωλογικούς σχηματισμούς αναπτύσσονται επάλληλα υδροφόρα στρώματα που συνίστανται κυρίως από αμμοχάλικα και κροκάλες.
- Στην νοτιοανατολική περίμετρό του αναπτύσσεται ο σημαντικός, σε ότι αφορά την υδροδυναμικότητά του, καρστικός υδροφορέας Τυρνάβου – Δαμασίου, ο οποίος αποστραγγίζεται από τις μεγάλες καρστικές πηγές Μάτι Τυρνάβου και Αγίας Άννας.

- Γενικά, στη λεκάνη οι συντελεστές διαπερατότητας (k) και υδραυλικής αγωγιμότητας (T) αντιστοιχούν σε υδροπερατά στρώματα. Εξαίρεση αποτελεί μια ζώνη περίπου στο κέντρο τις λεκάνης, όπου οι συντελεστές είναι μικρότεροι.
- Η τροφοδοσία των προσχωματικών υδροφόρων στρωμάτων εξασφαλίζεται, εν μέρει, με απ' ευθείας κατείσδυση των κατακρημνισμάτων, με διήθηση νερού από τον Ελασσονίτικο ποταμό, τους χειμάρρους και με τροφοδοσία από τις τεκτονικές δομές των μεταμορφωμένων πετρωμάτων που δομούν το βόρειο και βορειοανατολικό ημιορεινό τμήμα της υδρολογικής λεκάνης, καθώς και από επιστροφές του νερού των αρδεύσεων.
- Η υπόγεια τροφοδοσία πραγματοποιείται κύρια από Βόρεια προς Νότια και με νοτιοανατολική διεύθυνση δηλαδή προς τα μάρμαρα του καρστικού υδροφορέα Δαμασίου – Τυρνάβου, τα οποία στραγγίζουν τα υπόγεια νερά του προσχωματικού υδροφορέα σε βάθος 76 m
- Η πιεζομετρική στάθμη του υδροφορέα κυμαίνεται από +230 m έως + 270 m, ενώ οι ετήσιες εποχιακές διακυμάνσείς της ανέρχονται έως 5 m.
- Στην περιοχή μελέτης υπάρχει μια ζώνη, οριοθετούμενη στο κεντρικό – νοτιοανατολικό τμήμα όπου δημιουργείται ένας κώνος κατάπτωσης, λόγω αυξημένων αντλήσεων.
- Τα ρυθμιστικά αποθέματα της λεκάνης ανέρχονται σε $W_R = 6,95 \times 10^6\ m^3$, τα μόνιμα αποθέματα σε $W_p = 119,3 \times 10^6\ m^3$ και τα εκμεταλλεύσιμα αποθέματα ισούνται με $W_E = 11,6 \times 10^6\ m^3$.

Αποτελέσματα από την εφαρμογή του κώδικα MODFLOW.

Εφαρμογή σε σταθερές συνθήκες

Οι διαφορές μεταξύ των τιμών παρατήρησης και αυτών που υπολογίζονται από το πρόγραμμα κυμαίνονται από 0,001 m μέχρι 0,5 m, κάτι το οποίο δείχνει ότι το μοντέλο ανταποκρίνεται σχεδόν ιδανικά στις πραγματικές συνθήκες. Επίσης η ροή του υπογείου νερού είναι αντίστοιχη με την υπόγεια ροή των πιεζομετρικών χαρτών και υπάρχει μια ισορροπία μεταξύ των εισροών και των εκροών, με μια απώλεια της τάξης του 0,26 %, κάτι το οποίο ισχύει καθώς η πτώση της πιεζομετρικής στάθμης στο χρόνο δεν είναι ιδιαίτερη.

Υποθετικά σενάρια.

- *Σενάριο 1° :* Σε περίπτωση που διπλασιαστούν οι παροχές άντλησης, δημιουργείται μια τελείως διαφορετική εικόνα στην πιεζομετρία της περιοχής. Πλέον η υπόγεια ροή έχει διεύθυνση από τα Βόριο Δυτικά κυρίως, αλλά και τα Βόριο Ανατολικά προς τα Νότια. Επίσης, παρατηρείται ένα έλλειμμα στο ισοζύγιο της τάξης των 783 m^3/h, δηλαδή - 100,5%, και μια πτώση στάθμης, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 10 - 12 m.
- *Σενάριο 2° :* Με τη μείωση των βροχοπτώσεων κατά 50%, τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι παρόμοια μ' αυτά του πρώτου σεναρίου - σχετικά με την υπόγεια ροή - μόνο που εδώ η μεταβολή της πιεζομετρικής κατάστασης εμφανίζεται πιο ήπια. Σ' αυτή την εκδοχή το ισοζύγιο παρουσιάζει έλλειμμα, το οποίο ισούται με 391,5 m^3/h και η πτώση στάθμης κυμαίνεται περίπου στα 5 m.
- *Σενάριο 3° :* Σε περίπτωση μείωσης της βροχόπτωσης κατά 25%, η εικόνα του πιεζομετρικού χάρτη και των υπογείων ροών παραμένει σχεδόν ίδια με την αρχική. Υπό τις νέες αυτές συνθήκες, παρατηρούνται μόνο κάποιες μικρές ανωμαλίες στη ροή των υπογείων υδάτων και το ισοζύγιο παρουσιάζει έλλειμμα 197,2 m^3/h, δηλαδή περίπου 33,7%. Επίσης, η στάθμη του υπογείου νερού παρουσιάζει πτώση περίπου 1,5 m.

Όλα αυτά δείχνουν, πως σε μία ενδεχόμενη περίοδο ξηρασίας η μεταβολή της πιεζομετρικής κατάστασης στη λεκάνη είναι σχετικά μικρή, αν υποτεθεί ότι δεν αυξάνονται ταυτόχρονα οι αρδεύσεις.

- *Σενάριο 4° :* Τα αποτελέσματα, από την εφαρμογή του τέταρτου σεναρίου στον κώδικα MODFLOW, είναι πολύ ενθαρρυντικά για μελλοντικό τεχνητό εμπλουτισμό στην περιοχή.

  Η γενικότερη πιεζομετρία της λεκάνης παραμένει σταθερή, με εξαίρεση τις ανωμαλίες που φαίνονται στους κώνους ανόδου της στάθμης, οι οποίοι δημιουργούνται στις γεωτρήσεις όπου γίνεται ο τεχνητός εμπλουτισμός (γεωτρήσεις εισόδου). Το ισοζύγιο παρουσιάζει πλεόνασμα 72,0 m^3/h, της τάξης δηλαδή του 8,5% και η πιεζομετρική στάθμη ανεβαίνει από 1,5 έως 1,8 m.

Εφαρμογή σε μεταβαλλόμενες συνθήκες.

Τα αποτελέσματα, από την εφαρμογή του κώδικα MODFLOW σε μεταβαλλόμενες συνθήκες και για τις δύο περιόδους, είναι πολύ ικανοποιητικά. Παρ' όλα αυτά, όμως, είναι καλύτερο να μη δοθεί βάση στο μοντέλο που έγινε σε

μεταβαλλόμενες συνθήκες, καθώς σε ένα τέτοιο μοντέλο, είναι προτιμότερο οι καταγραφές στοιχείων που εισάγονται να είναι σε μηνιαία βάση.

06/07/2010 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

11. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνόγλωσση:

ΒΟΥΔΟΥΡΗΣ, Κ., (2004). Μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης υπογείων ροών. Α.Π.Θ. Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας. Θεσσαλονίκη.

ΒΟΥΔΟΥΡΗΣ, Κ., (2003). Μεθοδολογίες πρόβλεψης της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. 9ο Πανελλήνιο Συνέδριο Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Θεσσαλονίκη, 2- 5 Απριλίου 2003.

ΒΟΥΔΟΥΡΗΣ, Κ., ΓΙΑΝΝΑΤΟΣ, Γ., ΔΙΑΜΑΝΤΟΠΟΥΛΟΥ, Π., ΖΑΝΝΗΣ, Π., (2001): Πιλοτικό πρόγραμμα τεχνητού εμπλουτισμού στη ΒΙΠΕ Πατρών. Αδημοσίευτη τεχνική έκθεση. ΒΙΠΕΤΒΑ.

ΒΟΥΔΟΥΡΗΣ, Κ., ΦΡΑΓΚΟΣ, Σ., (1999): Εφαρμογή ενός ολοκληρωμένου παραμετρικού μοντέλου για τη διαχείριση των υδατικών πόρων στη ΒΔκή Αχαΐα. Πρακτικά 4ου Εθνικού Συνεδρίου της ΕΕΔΥΠ. Βόλος. Τεύχος Β’, σελ. 3-10.

ΔΗΜΟΠΟΥΛΟΣ, Γ., (1986) Τεχνική Γεωλογία με βασικές έννοιες βραχομηχανικής και γεωλογικές μελέτες τεχνικών έργων. Γιαχούδη – Γιαπούδη. Θεσσαλονίκη.

ΔΙΑΜΑΝΤΗΣ, ΙΩΑΝ., (1999). Επιλεγμένα θέματα υδρογεωλογίας. Πανεπιστημιακό Σύγγραμμα, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνική Σχολή Ξάνθης, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

ΘΕΟΔΟΣΙΟΥ, Ν., (1994): Μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης και διαχείρισης υπόγειων υδροφορέων. Εφαρμογή στον υδροφορέα Κοκκινοχωρίων Κύπρου. Διδ. Διατριβή. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

ΚΑΦΟΥΣΙΑΣ, Ν., (2001): Υπολογιστική Ρευστομηχανική Ι και ΙΙ. Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών.

ΛΑΤΙΝΟΠΟΥΛΟΣ, Π., (1986): Υδραυλική υπόγειων ροών. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

ΜΑΝΑΚΟΣ, Α., ΒΟΥΔΟΥΡΗΣ Κ., (2006): Διαχείριση υδατικών πόρων και προστασία περιβάλλοντος, σύγχρονες θεωρήσεις, προβλήματα και προοπτικές.

Πρακτικά 10ου Πανελληνίου επιστημονικού συνεδρείου Ε.Υ.Ε.. Ξάνθη 2006. Τόμος Α΄, σελ. 445 – 452.

ΜΙΜΙΚΟΥ, Μ., (1990): Τεχνολογία υδατικών πόρων. Αθήνα.

ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΣ, Α., ΓΙΑΝΝΑΤΟΣ, Γ., ΖΑΝΝΗΣ, Π., (1999): Χρήση μαθηματικών ομοιωμάτων στη διαχείριση υπόγειων υδατικών πόρων. Η περίπτωση της ΒΙΠΕ Πατρών. Πρακτικά 5ου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου (υπό έκδοση).

ΠΛΙΑΚΑΣ, Φ., ΠΕΤΑΛΑΣ, Χ., ΔΙΑΜΑΝΤΗΣ, Ι., (1999): Εφαρμογή του προγράμματος Modflow για την προσομοίωση τεχνητά εμπλουτιζόμενου υπόγειου υδροφορέα στην περιοχή Πολύσιτου του Νομού Ξάνθης. Πρακτικά 5ου Πανελληνίου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου. Λευκωσία.

ΣΟΥΛΙΟΣ, Γ., (2004): Γενική υδρογεωλογία. Τρίτος τόμος. Αποθέματα και διαχείριση του υπόγειου νερού. Εκδοτικός οίκος Αδελφών Κυριακίδη. Θεσσαλονίκη.

ΣΟΥΛΙΟΣ, Γ., (1986): Γενική υδρογεωλογία. Πρώτος τόμος. Επιφανειακή υδρολογία, Αποθήκευση και κατανομή του υπογείου νερού, Οι ροές του υπογείου νερού. University Studio Press. Θεσσαλονίκη.

ΤΟΛΙΚΑΣ, Δ., (1990): Υπόγεια Υδραυλική. Αριστοτέλειο Παν. Θεσσαλονίκης.

ΤΣΑΚΙΡΗΣ, Γ., ΠΑΡΙΤΣΗΣ, Σ., ΚΑΪΜΑΚΗ, Σ., (1993): Ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης υδατικών πόρων Ανατολικής Κρήτης. Πρακτικά διημερίδας "Διαχείριση Υδατικών Πόρων Κρήτης". ΓΕΩΤΕΕ.

ΦΡΑΓΚΟΣ, Σ., (1995): Ολοκληρωμένο παραμετρικό μοντέλο για τη διαχείριση των υδατικών πόρων. Πειραματική εφαρμογή στο φυσικό σύστημα της ΒΔκής Αχαΐας. Διδ. διατριβή. Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας.

ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ, Χ., ΣΩΚΡΑΤΟΥΣ, Γ., (1991): Μαθηματικό μοντέλο για τη βέλτιστη ανάπτυξη των υδατικών πόρων της Κύπρου. Τεχνικά Χρονικά, Τόμος 11, τεύχος 2, 87-106.

ΨΙΛΟΒΙΚΟΣ, Α., ΜΟΥΤΣΟΠΟΥΛΟΣ, Κ., ΤΖΙΜΟΠΟΥΛΟΣ, Χ., ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ, Σ., (1996). Προσδιορισμός του υδατικού ισοζυγίου του υδροφορέα Ειδομένης - Ευζώνων με τη χρήση του μοντέλου Modflow. 2ο

Πανελλήνιο Συνέδριο Εγγειοβελτιωτικά Έργα, Διαχείριση υδατικών πόρων, Εκμηχάνιση Γεωργίας. Λάρισα, 24- 27 Απριλίου 1996.

Ξενόγλωσση:

ANDERSON, M.D. AND WOESSNER, W.W., (1992): Applied Ground Water Modelling: Simualion of flow and advective transport.Academic Press, INC.

BADU, D.K., PINDER, G.F., NIEMI, A., AHLFELD, D.P., STOTHOFF, S.A., (1997): Chemical transport by three-dimensional groundwater flows.

BEAR, J., (1979): Hydraulics of groundwater, McGraw-Hill, New York, N.Y.

BISWAS, A. K., (1976): Mathematical modelling and water resours decision-making, Systems approach to water management, Mc Graw-Hill, pp. 398-411.

BUTCHER, W.S., HAIMES, Y.V., HALL, W.A., (1969): Dynamic programming for the optimal sequencing of water projects. Water Resour. Research, Vol. 5, No 6, pp. 1196-1204.

CASTANY, G., (1973): Prospection et exploitation des eaux souterraines. Dunod, Paris.

CHOW, V. T., (1964): Hadbook of Applied Hydrology. Mc Graw-Hill Inc., New York.

CRICHLOW, HENRY B., (1977). Modern reservoir engineering - A simulation approach, Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall Inc., 354 p.

DAVIS, A.D., (1986): Deterministic modeling of dispersion in heterogeneous permeable media. Ground Water, 24, (5), pp. 609-615.

Davis, JC, (1986). Statistics and Data Analysis in Geology. John Wiley & Sons, NewYork

DEUTSCH, C.V. AND JOURNEL, A.G., (1992). GSLIB: geostatistical software library and user's guide. Oxford University Press, New York

FETTER, C.W., (1994): Applied Hydrogeology (third edition). Prentice-Hall, Inc.

GORELICK, S.M., 1983. A review of distributed parameter groundwater management modeling methods, Water Resources Research, Vol. 19, No 2, pp. 305-319

GREENWALD R. M., (1994). MODFLOW MANagement: An Optimization Module for Modflow, IGWMC- FOS 76 PC, Version 3.02

HARRAR, WG, SONNERBORG, TO, HENRIKSEN, HJ., (2003): Capture zone, travel time, and solute-transport predictions using inverse modeling and different geological models. Hydrogeology Journal (2003) Vol. 11, Number 5, pp. 536-548.

JACOBY, H.D., LOUCKS, P.P., (1972): Combined use of optimization and simulation methods in river basin planning. Water Resour. Research, Vol. 8, No 6, pp. 1401-1414.

KINZELBACH W., (1986). Groundwater modeling - An introduction with Sample Programs in Basic. Developments in Water Science, 25, Elsevier Science Publishers, Amsterdam

LINSLEY, P. K., KOHLER, M. A. and PAULHUS, J. L. M., (1975): Hydrology for Engineers, 2nd ed., Mc Graw-Mill Inc., New York. N. Y.

McDONALD M. AND HARBAUGH A., (1988). Techniques of Water- Resources Investigations of the United States Geological Survey, Chapter A1: A modular threedimensional finite- difference ground- water flow model. United States Government Printing Office, Washington

MOUTSOPOULOS, C., TZIMOPOULOS, C., (1194), Department of Rural Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, 1994. Ground water flow simulation: a comparison between the method of multiple cells and the FEM, Hydrosoft, Porto Carras Chalkidiki, Greece

MYLOPOULOS, I., P. LATINOPOULOS, AND N. THEODOSSIOU, (1991). A combined use of simulation and optimization techniques in the solution of aquifer restoration problems, In: Water pollution, Measuring and Prediction, L.C. Wrobel and C.A. Brebbia (Eds), Proc. First Inter. Conference on Water Pollution, Southampton, pp.59- 72

PEACEMAN, DONALD W., (1977). Fundamentals of numerical reservoir simulation. Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 176 p.

PHILIP, G. M., WATSON, D. F., (1986). Matheronian geostatistics - Quo vadis?

Mathematical Geology, Volume 18, Number 1, pp. 93- 117, Springer Netherlands

REMSON, IRWIN, HORNBERGER, GEORGE M. AND MOLZ, FRED J., (1971). Numerical methods in subsurface hydrology. Wiley-Interscience, New York, 389 p.

RAYNE, TW, BRADBURY, KR, MULDOON, MA, (2001). Delineation of capture zones for municipal wells in fractured dolomite, Sturgeon Bay, Wisconsin, USA. Hydrogeology Journal (2001): Vol. 9, Number 5, pp. 432-450.

RUSHTON, K.R. and WEDDERBURN, L.A., (1973): Starting conditions for aquifer simulations. Ground Water, Vol. 11, No 1, pp. 37-42.

STOTHOFF, S.A., (1997): Princeton Transport Code Tutorial.

TZIMOPOULOS, C., GINIDI, P., (2005). Optimized aquifer management, using linear programming. An application to the Agia Varvara aquifer, Drama, Greece. Global NEST Journal, Vol. 7, No 3, pp 395- 404

VOUDOURIS, K., (2002): Time series analysis using ARIMA models of the groundwater table in Patras industrial area aquifer system (NW Peloponnese, Greece). Proc. 8th Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology, Berlin, Germany. Volume 1, pp. 335-340.

WANG, H.F, ANDERSON, M.P., (1982): Introduction to groundwater modeling. New York, W.H. Freeman and Company.

06/07/2010 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

12. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Εικόνα 12.1 Ελασσονίτικος ποταμός.

Εικόνα 12.2 Ελασσονίτικος ποταμός.

Εικόνα 12.3 Ελασσονίτικος ποταμός.

Εικόνα 12.4 Καλλιέργεια τριφυλλιού.

Εικόνα 12.5 Το ΒΔ όριο της λεκάνης (Γνευσιοσχιστόλιθοι, Γνεύσιοι και Σχιστόλιθοι) και καλλιέργεια σιταριού.

Εικόνα 12.6 Το Δυτικό όριο της λεκάνης (Γνευσιοσχιστόλιθοι, Γνεύσιοι και Σχιστόλιθοι) και καλλιέργειες τριφυλλιού και οπωροφόρων δέντρων.

Εικόνα 12.7 Το Νοτιοδυτικό όριο της λεκάνης (Γνευσιοσχιστόλιθοι, Γνεύσιοι και Σχιστόλιθοι) και καλλιέργειες τριφυλλιού.

Εικόνα 12.8 Το Νοτιοδυτικό όριο της λεκάνης (Γνευσιοσχιστόλιθοι, Γνεύσιοι και Σχιστόλιθοι) και καλλιέργειες τριφυλλιού - σιταριού.

Εικόνα 12.9 Το Νοτιοδυτικό όριο της λεκάνης (Γνευσιοσχιστόλιθοι, Γνεύσιοι και Σχιστόλιθοι) και καλλιέργειες σιταριού – καλαμποκιού.

Εικόνα 12.10 Το Ν-Νοτιοδυτικό όριο της λεκάνης (Γνευσιοσχιστόλιθοι, Γνεύσιοι και Σχιστόλιθοι) και καλλιέργειες σιταριού - καλαμποκιού.

Εικόνα 12.11 Το Νοτιοανατολικό όριο της λεκάνης (μάρμαρα) και καλλιέργειες σιταριού – καλαμποκιού.

Εικόνα 12.12 Το Νοτιοανατολικό όριο της λεκάνης (μάρμαρα) και καλλιέργειες σιταριού – καλαμποκιού.

Εικόνα 12.13 Γεώτρηση στην περιοχή της Ελασσόνας.

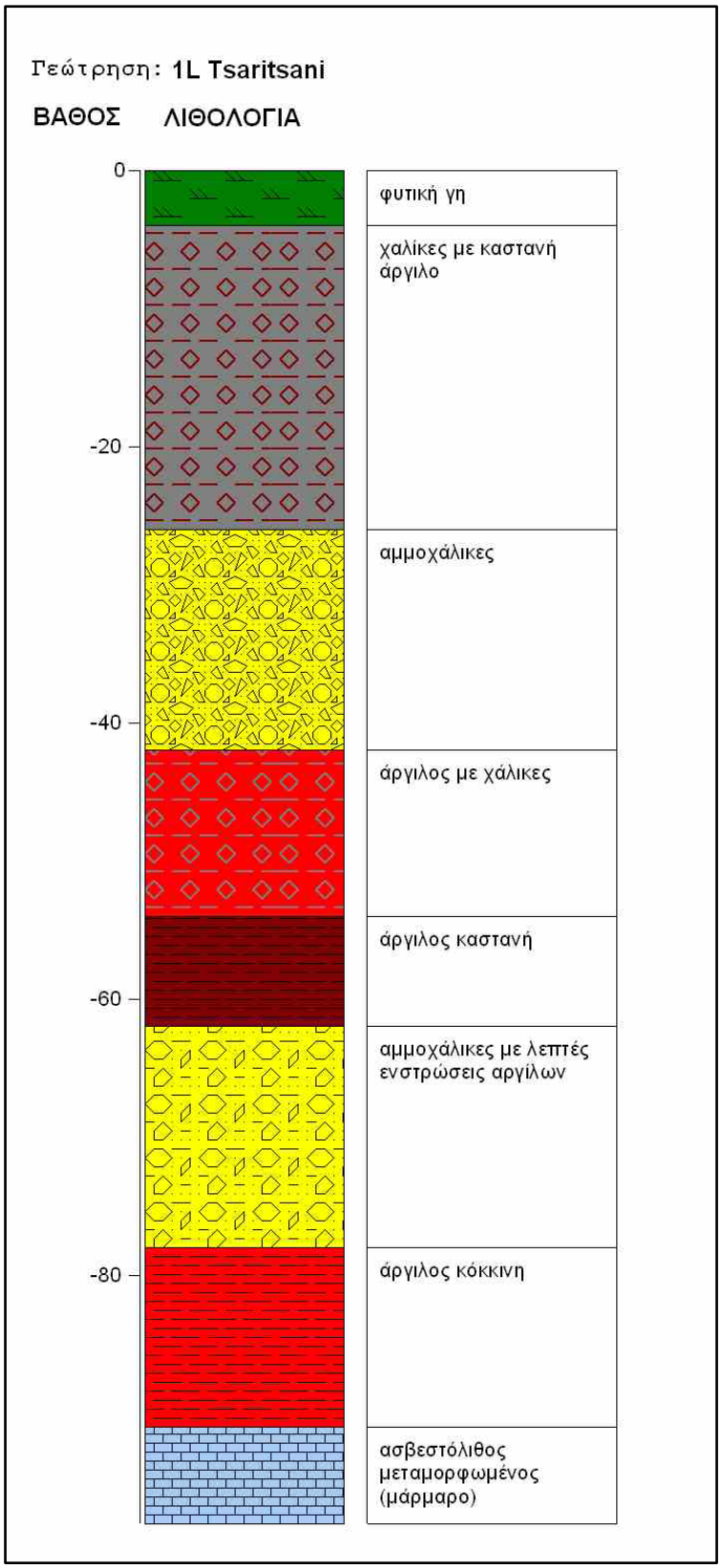
Εικόνα 12.14 Μέτρηση της στάθμης σε γεώτρηση της ευρύτερης περιοχής της Τσαρίτσανης.

Εικόνα 12.15 Το Ανατολικό - Νοτιοανατολικό όριο της λεκάνης (μάρμαρα) και καλλιέργειες σιταριού.

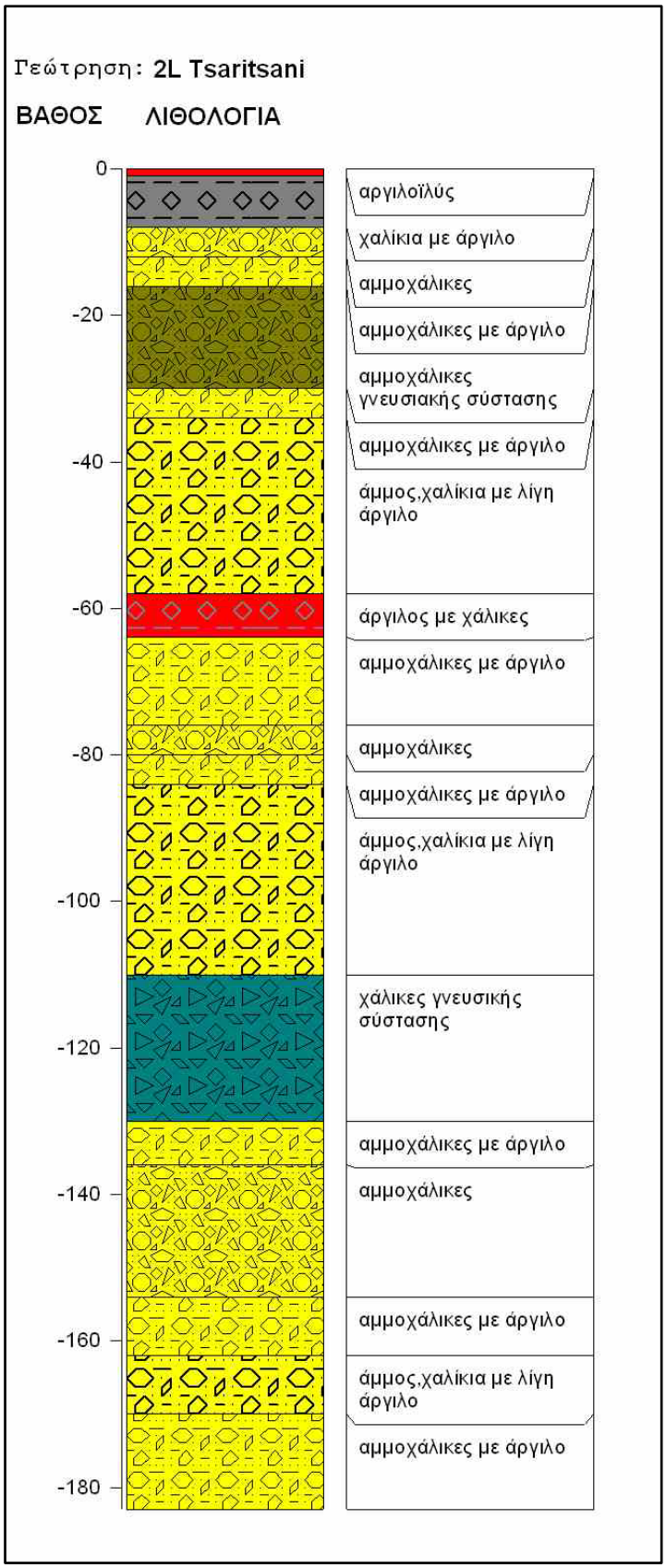
Εικόνα 12.16 Το Ανατολικό - Νοτιοανατολικό όριο της λεκάνης (μάρμαρα) και καλλιέργειες σιταριού.

Εικόνα 12.17 Καλλιέργειες καπνού.

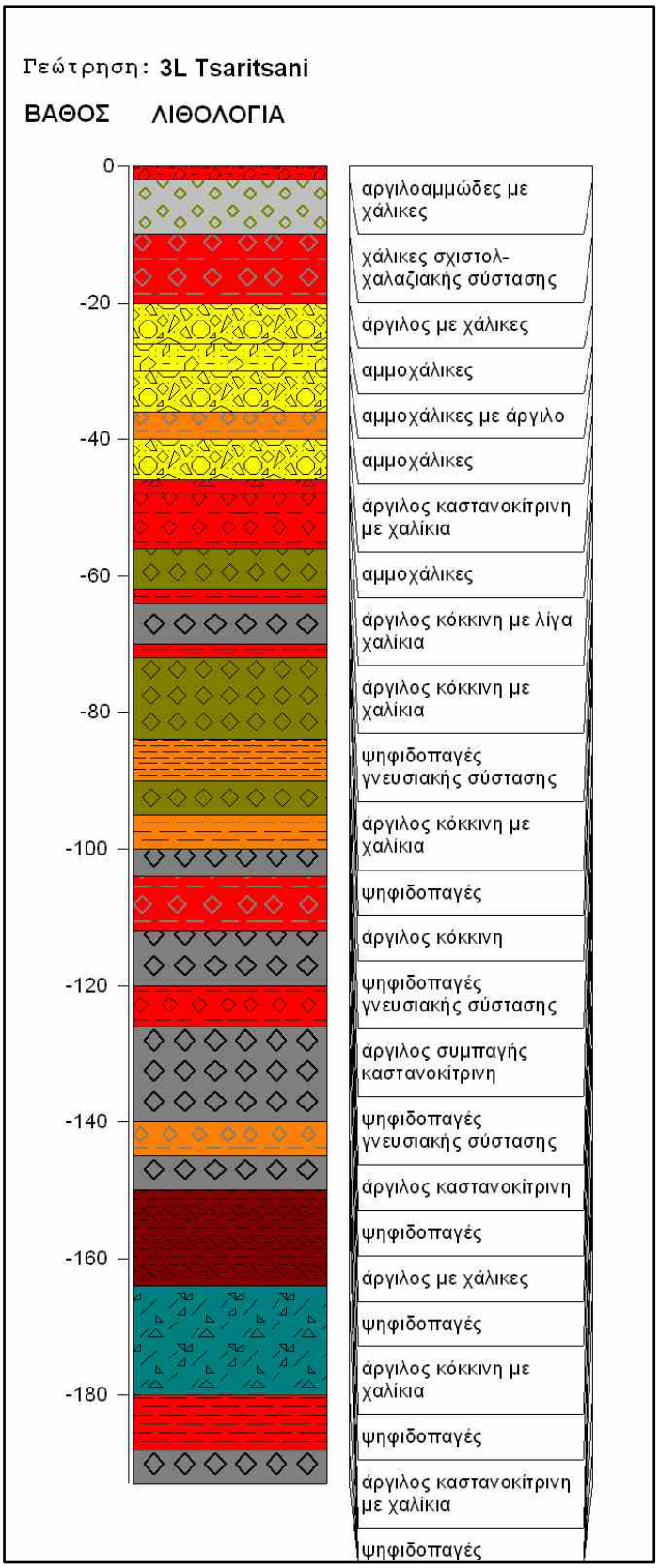
Εικόνα 12.18 Σφραγισμένη γεώτρηση στην ευρύτερη περιοχή της Γαλανόβρυσης.



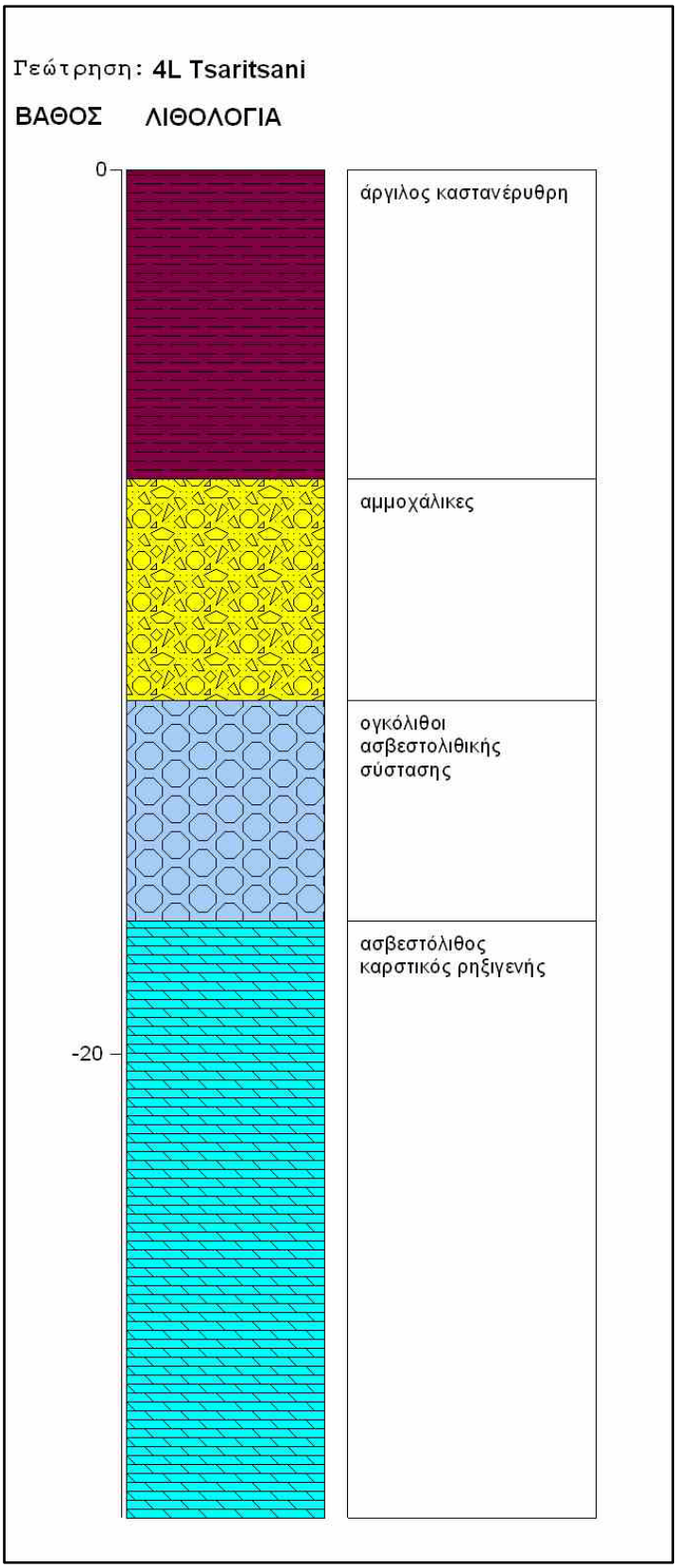
Εικόνα 12.19 Γεωλογικό προφίλ της γεώτρησης 1 Λ Τσαρίτσανης.



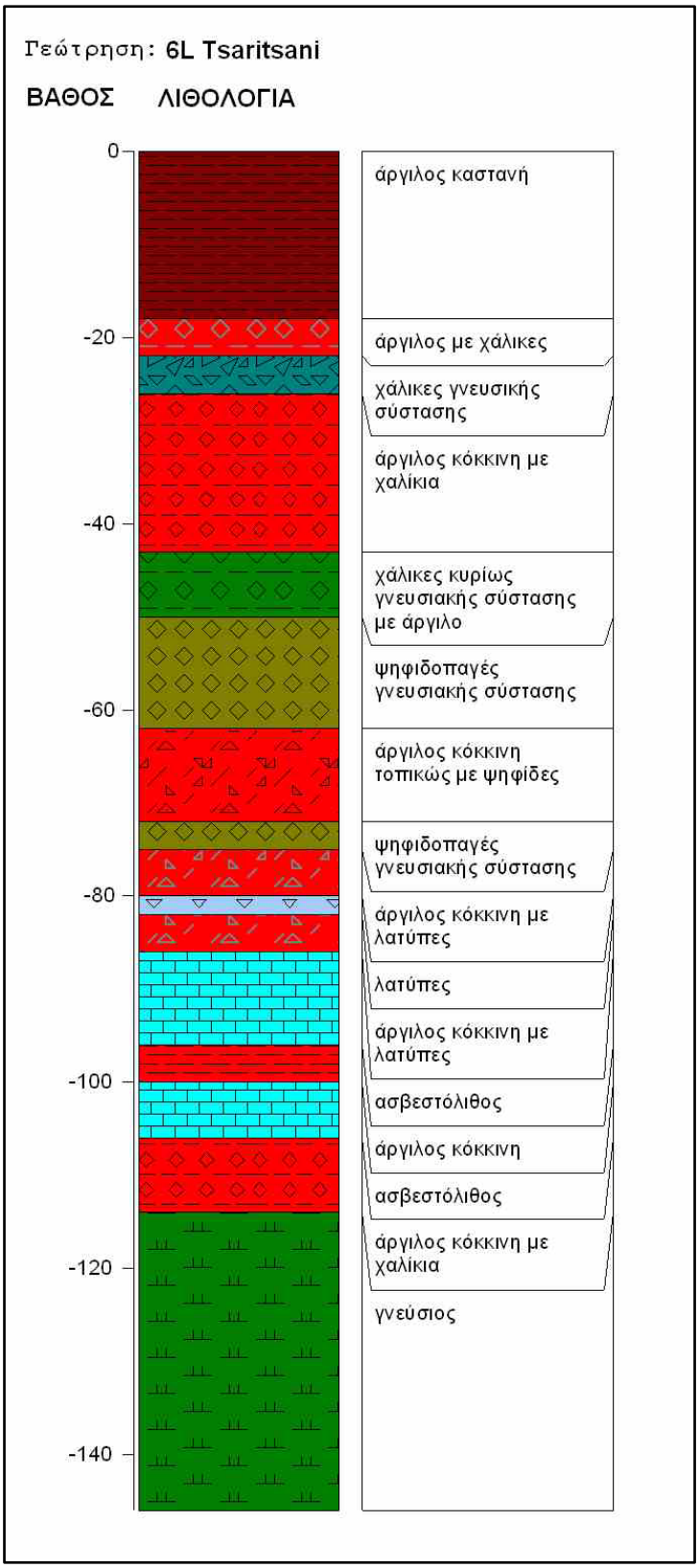
Εικόνα 12.20 Γεωλογικό προφίλ της γεώτρησης 2 Λ Τσαρίτσανης.



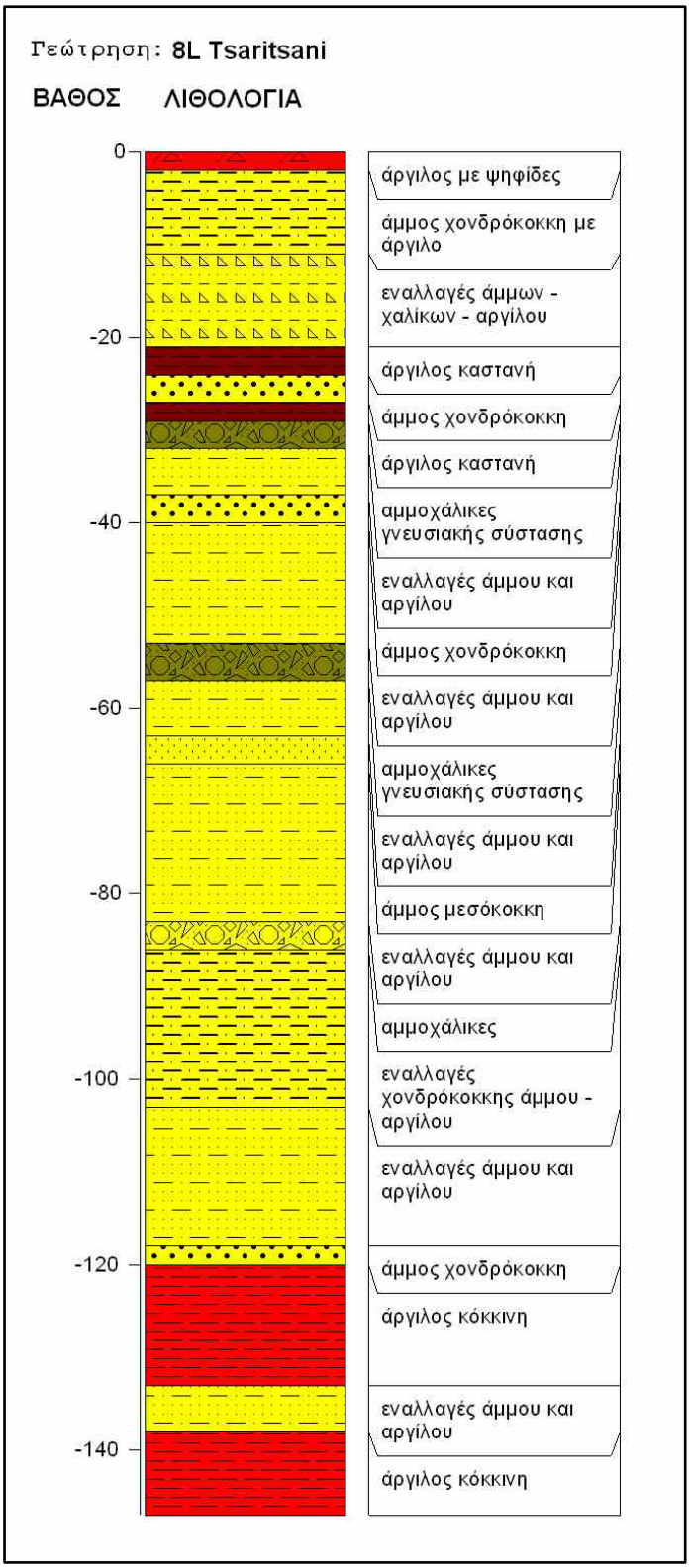
Εικόνα 12.21 Γεωλογικό προφίλ της γεώτρησης 3 Λ Τσαρίτσανης.



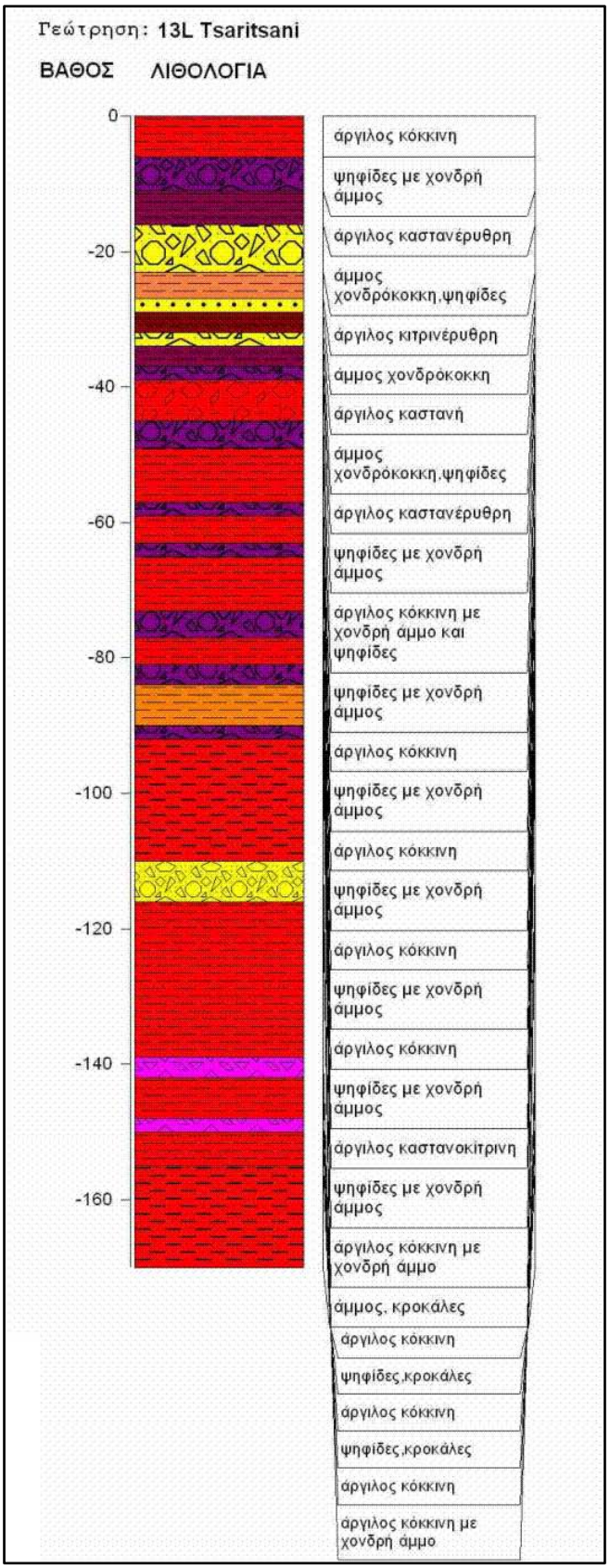
Εικόνα 12.22 Γεωλογικό προφίλ της γεώτρησης 4 Λ Τσαρίτσανης.



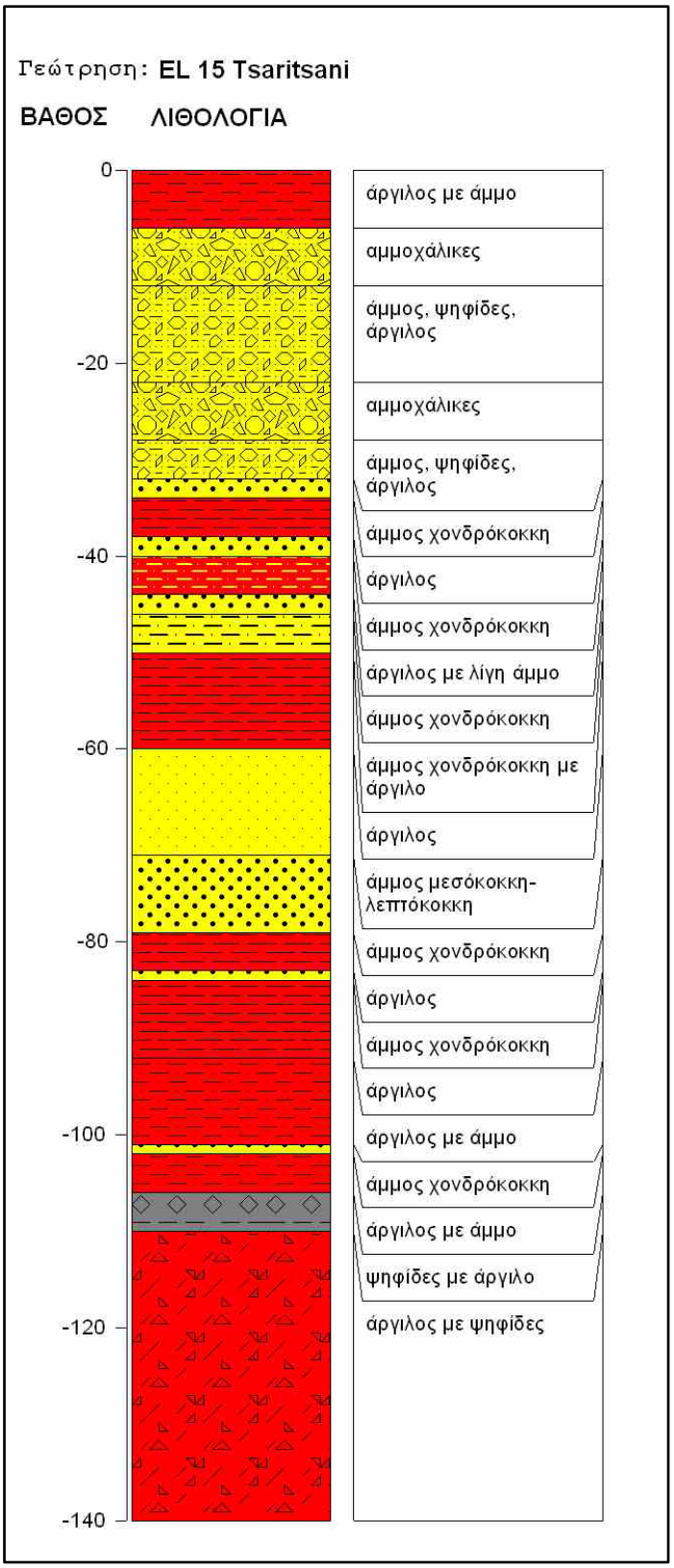
Εικόνα 12.23 Γεωλογικό προφίλ της γεώτρησης 6 Λ Τσαρίτσανης.



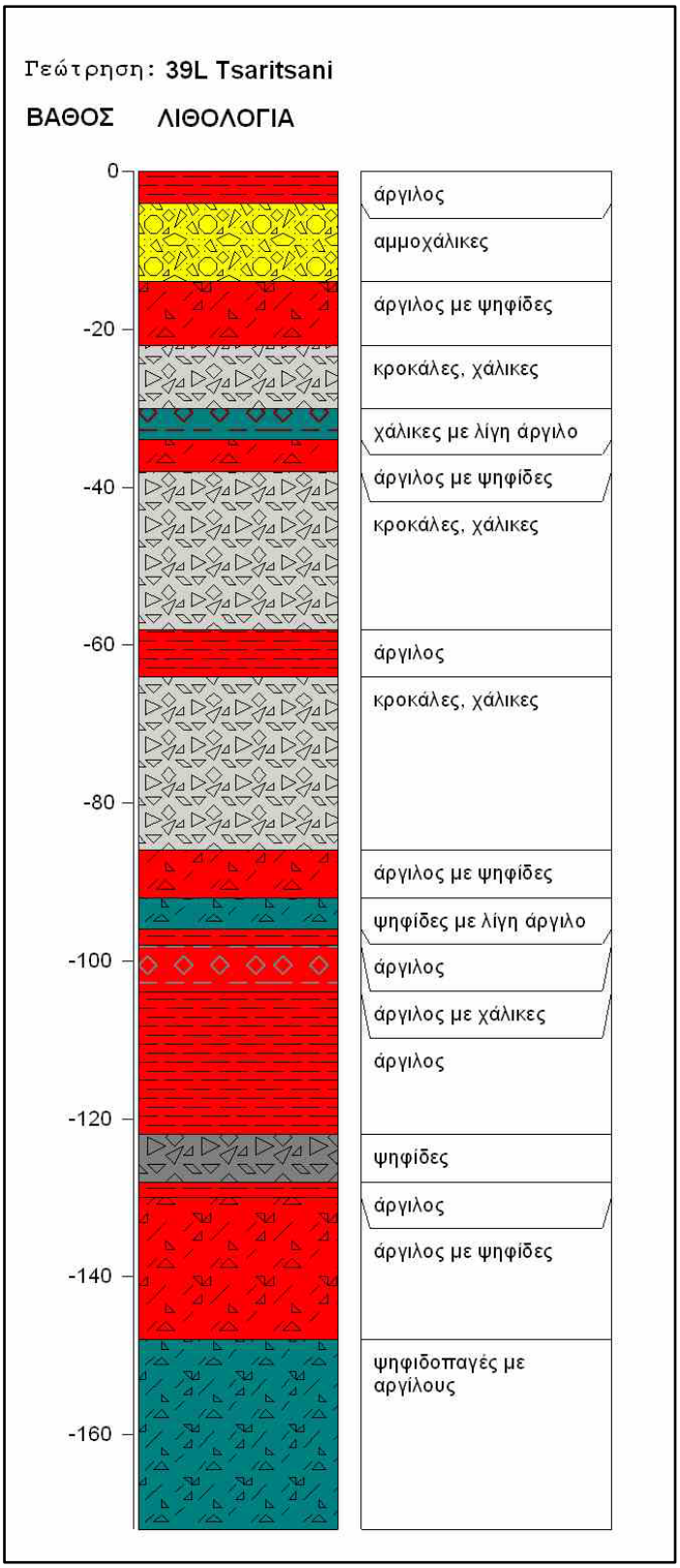
Εικόνα 12.24 Γεωλογικό προφίλ της γεώτρησης 8 Λ Τσαρίτσανης.



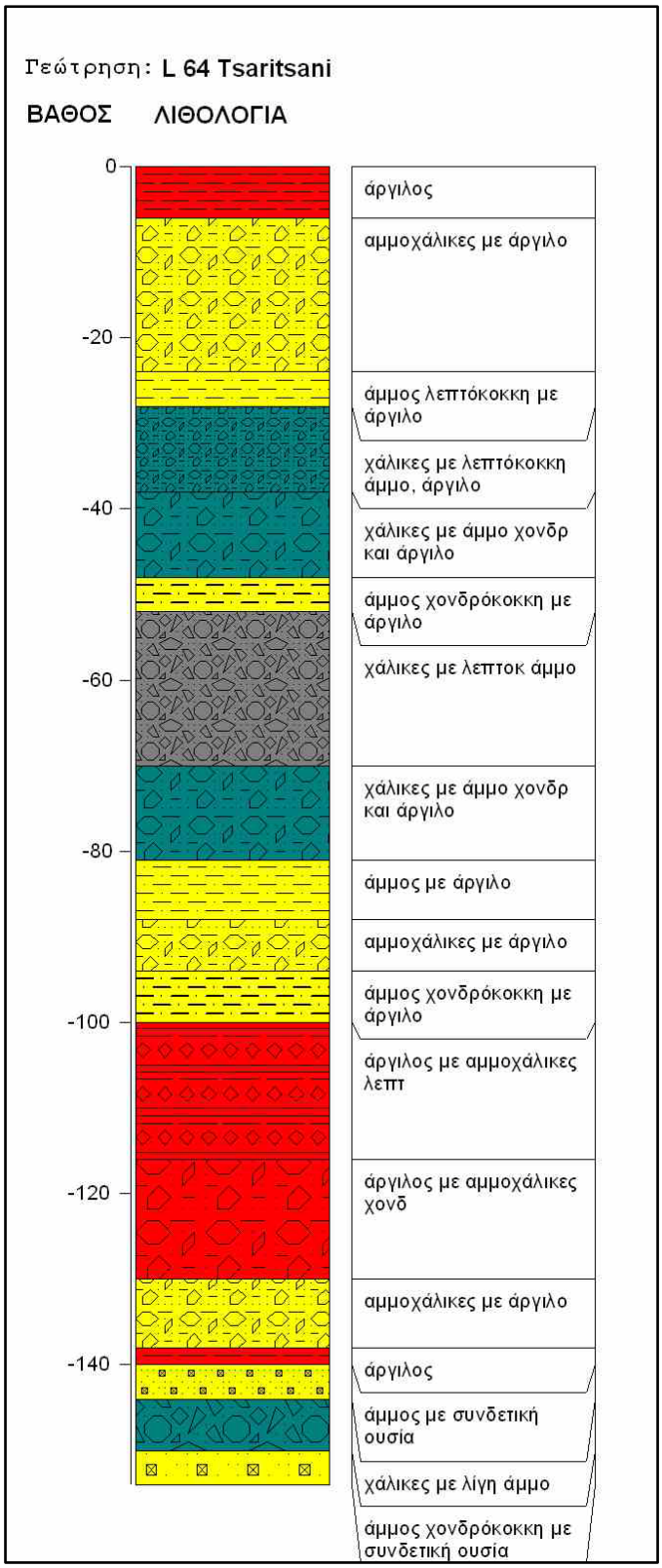
Εικόνα 12.25 Γεωλογικό προφίλ της γεώτρησης 13 Λ Τσαρίτσανης.



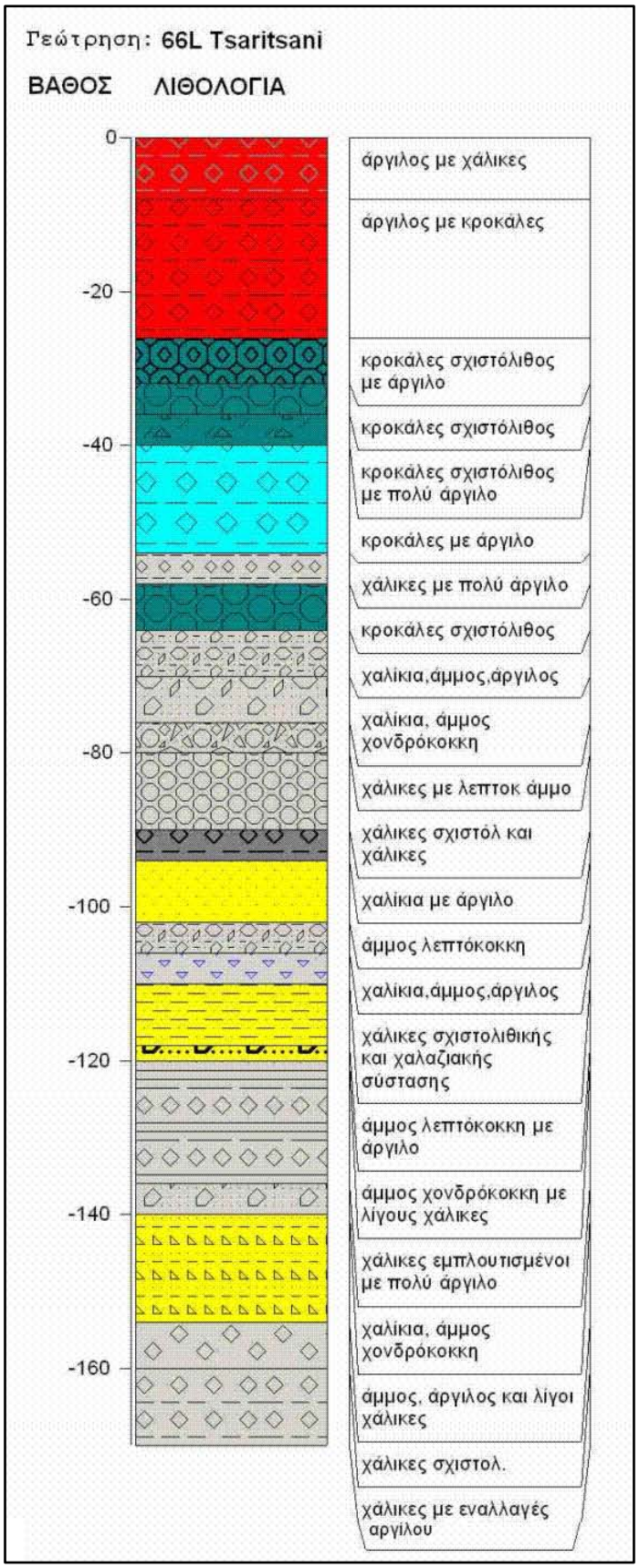
Εικόνα 12.26 Γεωλογικό προφίλ της γεώτρησης ΕΛ 15 Τσαρίτσανης.



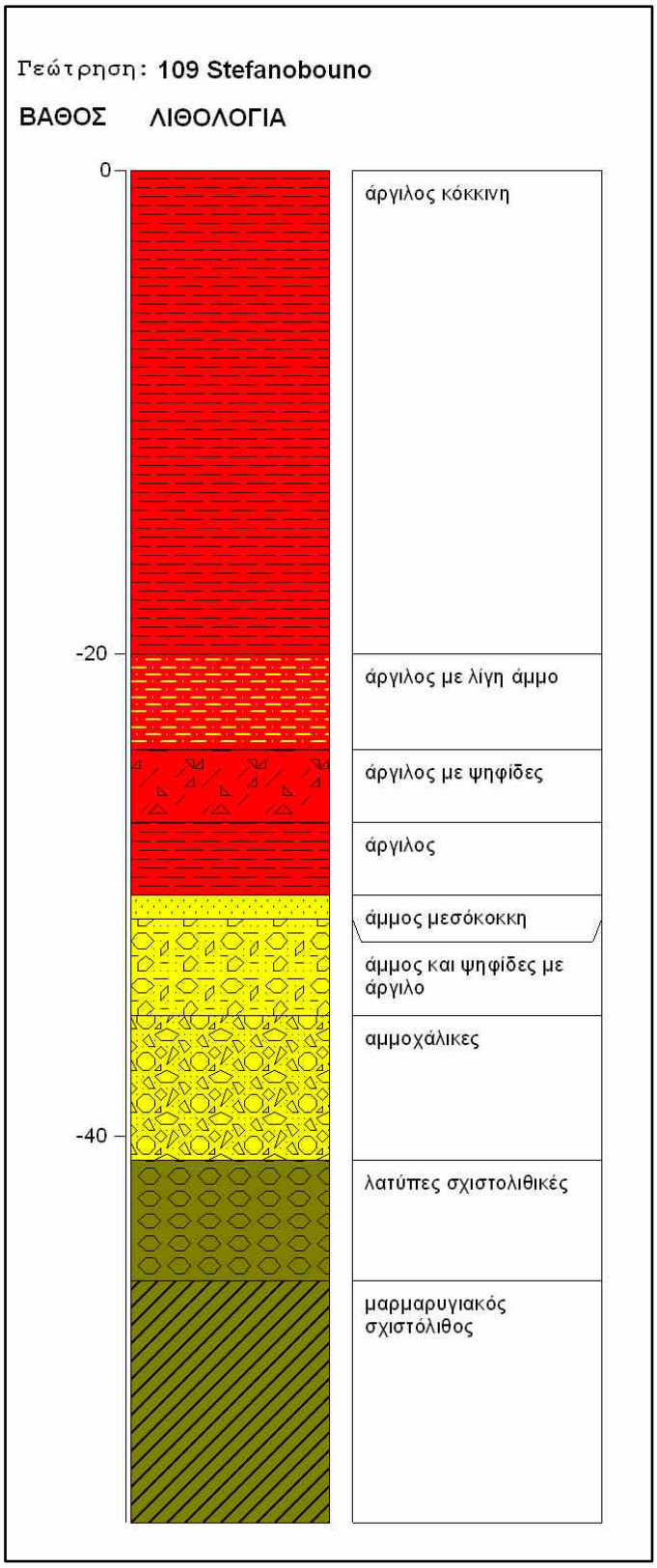
Εικόνα 12.27 Γεωλογικό προφίλ της γεώτρησης 39 Λ Τσαρίτσανης.



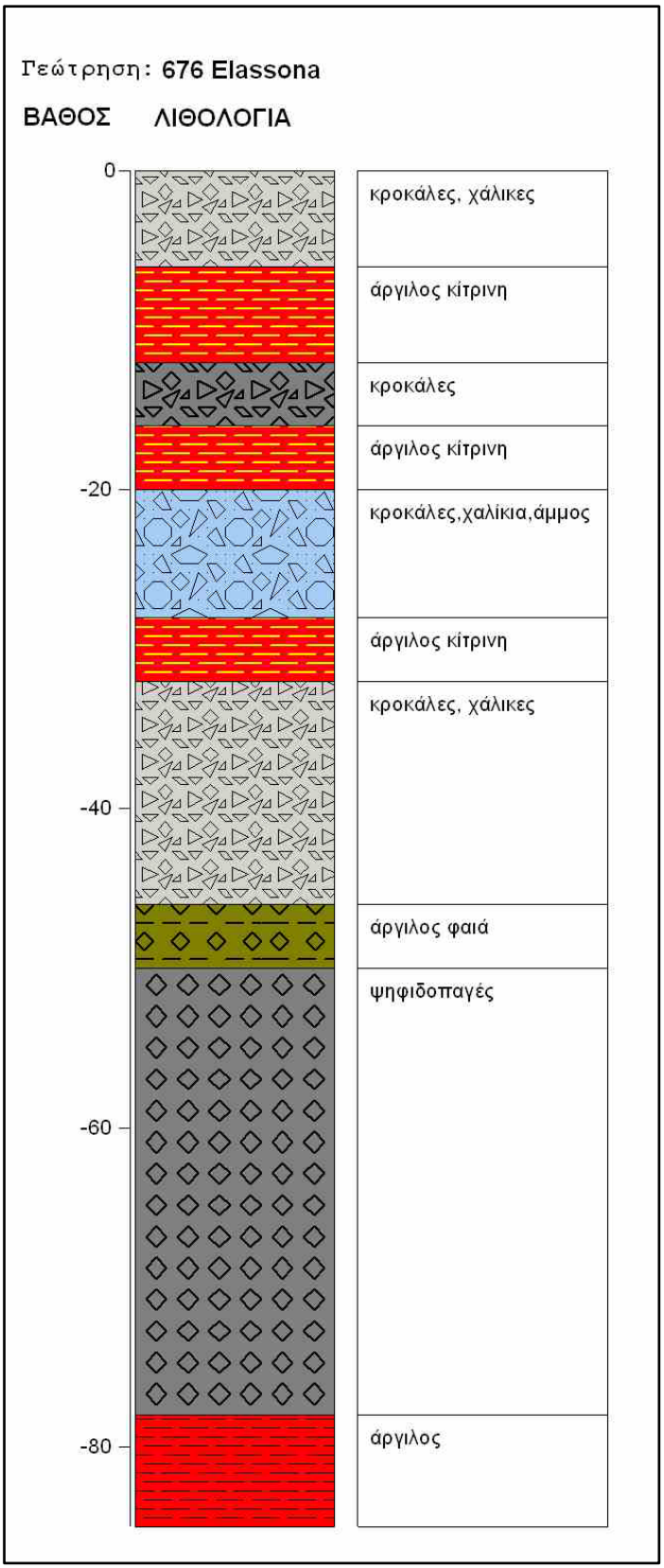
Εικόνα 12.28 Γεωλογικό προφίλ της γεώτρησης Λ 64 Τσαρίτσανης.



Εικόνα 12.29 Γεωλογικό προφίλ της γεώτρησης 66 Λ Τσαρίτσανης.



Εικόνα 12.30 Γεωλογικό προφίλ της γεώτρησης 109 Στεφανόβουνο.



Εικόνα 12.31 Γεωλογικό προφίλ της γεώτρησης 676 Ελασσόνα.