

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



Διπλωματική εργασία:

Προσομοίωση της υπόγειας ροής στην προσχωματική λεκάνη
Βιάννου Ηρακλείου Κρήτης και εξέταση σεναρίων μεταβολής
υδροληπτικών και βροχομετρικών συνθηκών με χρήση του
μοντέλου Visual Modflow

Γεώργιος Γιαννόπουλος

Εξεταστική επιτροπή:

Γεώργιος Καρατζάς (Επιβλέπων)
Νικόλαος Νικολαΐδης
Νικόλαος Παρανυχιανάκης

Χανιά, Οκτώβριος 2011

Ευχαριστίες

Με την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Γεώργιο Καρατζά, καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος για την ανάθεση της εργασίας, την πολύτιμη βοήθεια του και τη συνολική εμπιστοσύνη του στο πρόσωπο μου. Επίσης ευχαριστώ ιδιαίτερα τον κ. Μ. Βαρουχάκη για τις χρήσιμες συμβουλές του και την εξαιρετική συνεργασία, καθώς και τον κ. Γ. Τριχάκη για τις αξιόλογες παρατηρήσεις του, προς βελτίωση της παρούσας εργασίας. Ευχαριστίες εκφράζονται και προς τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής κ. Ν. Νικολαΐδη και κ. Ν. Παρανυχιανάκη.

Αφιερωμένη στην εκλιπούσα γιαγιά μου, Σωτηρία.

Περίληψη

Η ολοκληρωμένη και ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων αποτελεί σημαντικό παράγοντα προστασίας του φυσικού περιβάλλοντος και εξασφαλίζει την επάρκεια των πόρων αυτών σε βάθος χρόνου. Η υπερεκμετάλλευση των υδατικών πόρων, είτε αυτοί είναι επιφανειακοί είτε υπόγειοι, προκαλεί σημαντική μείωση των αποθεμάτων νερού. Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις έγκυρων μελετών, και τις σημαντικές κλιματικές αλλαγές που έχουν παρατηρηθεί παγκόσμια τις τελευταίες δεκαετίες, η θερμοκρασία αναμένεται να παρουσιάσει άνοδο τα επόμενα έτη ενώ παράλληλα προβλέπεται να μειωθούν αισθητά οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις. Αρνητικές επιπτώσεις των μεταβολών της θερμοκρασίας και των βροχοπτώσεων, παρατηρούνται παγκοσμίως τα τελευταία.

Συγκεκριμένα για τους υπόγειους υδατικούς πόρους, σε πολλές περιοχές του πλανήτη, εφαρμόζονται ήδη σχέδια προστασίας της ποιότητας και αύξησης της ποσότητας των υπόγειων υδάτων. Το φυσικό σύστημα μελέτης της παρούσας εργασίας αποτελεί μία σημαντική πηγή υπογείων υδάτων για την ευρύτερη περιοχή. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, η απαίτηση εφαρμογής ολοκληρωμένου σχεδίου διαχείρισης των υδατικών πόρων της υπό μελέτη λεκάνης, θεωρείται πλέον επιτακτική ανάγκη. Για το σκοπό αυτό, στην παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της υπόγειας ροής στην προσχωματική λεκάνη ενδιαφέροντος στο Δήμο Βιάννου Ηρακλείου Κρήτης, ενώ ταυτόχρονα εξετάστηκαν και σενάρια μείωσης των βροχοπτώσεων με παράλληλη αύξηση των αντλήσεων στις υπάρχουσες γεωτρήσεις στην εν λόγω περιοχή. Η παρούσα μελέτη, στηρίχθηκε στα αποτελέσματα του άρθρου «Severe climate-induced water shortage and extremes in Crete» (2011), των Tsanis et al., σύμφωνα με τα οποία, τη χρονική περίοδο 2010 – 2040, αναμένεται μείωση των βροχοπτώσεων σε ολόκληρη την Κρήτη κατά 12 % με σφάλμα ± 25 % ετησίως. Σε συνδυασμό με τις ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις αρδευτικού και υδρευτικού νερού στην περιοχή μελέτης και σε ολόκληρη την Κρήτη, αναπτύχθηκαν τα σενάρια αύξησης των αντλητικών ποσοτήτων ύδατος με ταυτόχρονη σταδιακή μείωση των βροχοπτώσεων. Τα σενάρια διαμορφώθηκαν με χρήση ως βασικού άξονα, την αρχική αποτύπωση της κίνησης των υπογείων υδάτων στο φυσικό σύστημα υπόγειας ροής της λεκάνης.

Για την προσομοίωση και την ανάπτυξη των σεναρίων, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Visual Modflow. Αρχικά συγκεντρώθηκαν τα γεωγραφικά, γεωλογικά, υδρολογικά και κλιματολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής και στη συνέχεια διατυπώθηκε το υδρολογικό ισοζύγιο του υδροφορέα της υπό μελέτη λεκάνης. Σύμφωνα με τα άνωθεν στοιχεία, κατασκευάστηκε το μοντέλο προσομοίωσης στον κώδικα Visual Modflow και εν συνεχεία δημιουργήθηκαν τα σενάρια αύξησης των υδροληπτικών και μείωσης των βροχοπτώσεων. Στα δύο τελευταία κεφάλαια της παρούσας μελέτης,

παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και των υποθετικών σεναρίων ενώ ακολουθεί σχολιασμός των αποτελεσμάτων και διατύπωση προτάσεων για την εξοικονόμηση υπόγειου υδατικού δυναμικού στην περιοχή.

Συμπερασματικά μέσω της μεθόδου προσομοίωσης της υπόγειας ροής ενός υδροφόρου συστήματος, τίθενται οι βάσεις για τον μετέπειτα ολοκληρωμένο σχεδιασμό της βέλτιστης διαχείρισης των υδατικών πόρων του προσομοιωμένου συστήματος.

Abstract

The integrated and rational management of water resources is an important component for the protection of the natural environment. It also ensures the adequacy of these resources over time. The overexploitation of water resources, whether they are surface or underground, causes significant water scarcity. According recent studies and the significant climate changes that they have occurred worldwide in recent decades, a temperature rise is expected in coming years with a precipitation reduction. Negative effects of changes in temperature and precipitation have been observed all over the world over recent years.

Regarding the groundwater resources, there are management plans for many regions, which are implemented to protect groundwater quality and quantity. The physical system that is studied in this work is an important groundwater source for the region. As a result, the need for implementing a comprehensive management plan for the groundwater resources in the area is imperative. For this purpose, in this study, a groundwater flow simulation was performed for Viannos alluvial basin which is located in the Municipality of Viannos at Heraklion Prefecture in Crete. In addition, scenarios of future precipitation decrease and increase of pumping at existing wells in that area were examined. This study considers the results of the article “Severe climate-induced water shortage and extremes in Crete” by Tsanis et al., where it is reported that, during the time period 2010 – 2040 it is expected a rainfall reduction across the island by 12% with an error $\pm 25\%$ per annum. According to the continuous increase of the demands of irrigation water in the study area and across the island, they were developed scenarios of increase quantities of water which is pumped while simultaneously it was considered a gradual reduction in rainfall. The scenarios which were developed were based on the initial recording of the movement of groundwater in the flow basin.

For the simulation and the development of scenarios, it was used the Visual Modflow model. First the geographical, geological, hydrological and climatic characteristics of the area are presented followed by the hydrological balance of the aquifer of the study basin. The simulation model was constructed on Visual Modflow code followed by the scenarios of increasing pumping and decreasing rainfall. In the last two chapters of this study, detailed results of the simulation and the hypothetical scenarios are presented, followed by discussion and suggestions for protecting groundwater resources in the region.

As a conclusion, the simulation of the groundwater flow in an aquifer, creates a strong base for the subsequent integrated design of the optimal management of the area’s groundwater resources.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	1
1.1. Σκοπός της παρούσας εργασίας.....	1
1.2. Θέση περιοχής μελέτης.....	3
1.3. Προηγούμενες υδρογεωλογικές έρευνες στην υπό μελέτη περιοχή.....	8
1.4. Δομή της εργασίας.....	13
2. Γεωλογία περιοχής μελέτης.....	14
2.1. Γεωλογικό υπόβαθρο της υπό μελέτη περιοχής.....	14
2.2. Γεωτεκτονική εξέλιξη των Μετα-αλπικών ιζημάτων.....	16
2.3. Σχηματισμοί του νεογενούς.....	16
2.3.1. Σειρά μαργών.....	16
2.3.2. Προσχωματικά υλικά στις πεδινές ζώνες.....	17
2.3.3. Σύγχρονες αλλουβιακές αποθέσεις.....	17
3. Υδρογεωλογία της περιοχής μελέτης.....	18
3.1. Μη συνεκτικοί υδροπερατοί σχηματισμοί - αδιαπέρατοι σχηματισμοί.....	19
3.2. Εννοιολογικό μοντέλο του υδροφορέα.....	20
3.2.1. Γεωμετρία του προσχωματικού υδροφορέα και χαρακτηριστικά του κανάβου προσομοίωσης.....	22
3.2.2. Ανάλυση των υδραυλικών χαρακτηριστικών του υδροφορέα και διαθεσιμότητα δεδομένων.....	24
3.2.3. Υδραυλικά φορτία του υδροφορέα και υδραυλικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών του.....	27
3.2.4. Αρδευτικές και υδρευτικές υδροληψίες.....	28
3.2.5. Συνθήκες τροφοδοσίας του υδροφορέα.....	30
4. Υδρολογία επιφάνειας της περιοχής μελέτης – Κλιματολογία.....	31
4.1. Ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις στη λεκάνη.....	32
4.2. Σχέση υψόμετρου – βροχόπτωσης στην ευρύτερη περιοχή.....	34
4.3. Θερμοκρασία στην περιοχή.....	35
4.4. Φαινόμενο εξάτμισης στην περιοχή.....	36
4.5. Ηλιακή ακτινοβολία.....	36
4.6. Ηλιοφάνεια.....	37
4.7. Άνεμοι.....	38
4.8. Ατμοσφαιρική υγρασία.....	39
4.9. Επιφανειακή απορροή.....	40
5. Υδρολογικό ισοζύγιο του υδροφορέα.....	41
5.1. Εξατμισοδιαπνοή.....	41

5.2. Δυναμική ή δυνητική εξατμισοδιαπνοή βάση υπολογισμών.....	41
5.3. Πραγματική εξατμισοδιαπνοή βάση υπολογισμών.....	44
5.4. Συντελεστής επιφανειακής απορροής.....	45
5.5. Κατείσδυση.....	46
5.5.1. Κατείσδυση στην πεδινή ζώνη.....	47
5.6. Υδατικό ισοζύγιο εισροών – εκροών υδροφορέα λεκάνης.....	48
6. Αριθμητική προσομοίωση της ροής του υπόγειου νερού στον υδροφορέα.....	51
6.1. Γενικά.....	51
6.2. Εξίσωση ροής και λοιπές εξισώσεις κίνησης ύδατος.....	54
6.3. Αντικειμενικός στόχος της προσομοίωσης της υπόγειας ροής.....	58
6.4. Εννοιολογικό μοντέλο.....	59
6.5. Επιλογή κατάλληλου υπολογιστικού λογισμικού.....	60
6.6. Λογισμικό πακέτο Visual Modflow.....	61
6.7. Οριακές συνθήκες ροής.....	71
6.8. Σχεδιασμός και αναλυτική ανάπτυξη του μοντέλου προσομοίωσης.....	73
6.8.1. Ανάλυση γεωμετρικών χαρακτηριστικών και χωρική διακριτοποίηση...	74
6.8.2. Υδρογεωλογικό ισοζύγιο του υδροφορέα.....	76
6.8.3. Διαμόρφωση του μοντέλου προσομοίωσης σε περιβάλλον Visual Modflow με χρήση υπορουτίνων.....	77
6.8.4. Ρύθμιση του μοντέλου σε συνθήκες μόνιμης ροής.....	104
6.9. Παρουσίαση και ανάλυση σεναρίων μεταβολής υδροληπτικών και βροχομετρικών συνθηκών με χρήση του μοντέλου.....	108
7. Αποτελέσματα προσομοίωσης – σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	117
7.1. Ετήσια προσομοίωση.....	118
7.2. Σενάριο 1 ^ο , αύξηση αντλήσεων κατά 10 %.....	121
7.3. Σενάριο 2 ^ο , αύξηση αντλήσεων κατά 20 %.....	124
7.4. Σενάριο 3 ^ο , αύξηση αντλήσεων κατά 10 % και μείωση βροχής κατά 10 %.	127
7.5. Σενάριο 4 ^ο , αύξηση αντλήσεων κατά 20 % και μείωση βροχής κατά 10 %.	131
8. Συμπεράσματα – Προτάσεις.....	135
Βιβλιογραφία.....	142
Παράρτημα.....	144

1. Εισαγωγή.

1.1. Σκοπός της παρούσας εργασίας.

Σχετικά με τους υπόγειους υδατικούς πόρους, τα όρια των υπόγειων υδροφόρων συστημάτων είναι φυσικά και όχι τοπογραφικά ενώ βασικές παράμετροι των συστημάτων αυτών αποτελούν τα μεγέθη των υδραυλικών φορτίων στα οποία υπόκεινται τα εδάφη αλλά και η υδραυλική αγωγιμότητα του εκάστοτε εδαφικού υλικού. Επιπλέον οι υπόγειοι υδατικοί πόροι δεν είναι ευδιάκριτοι. Συχνά η διάκριση ακόμα και μεταξύ τους καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολη λόγω της ιδιομορφίας που παρατηρείται σε κάθε υδροφόρο σύστημα.

Σύμφωνα και με τα άνωθεν, υπό φυσικές συνθήκες, ένα υδροφόρο σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση δυναμικής ισορροπίας – Theis (1938) – στην περίπτωση που ένας μεταβλητός όγκος νερού εμπλουτίζει τον υδροφόρο και ένας ομοίως μεταβλητός όγκος νερού εκφορτίζεται από το υδροφόρο σύστημα (Καλλέργης, 2000). Ο ρυθμός τροφοδοσίας του υπεδάφους καθορίζεται από το ποσοστό κατείσδυσης των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, το ποσοστό κατείσδυσης της επιφανειακής απορροής, τη μεταβιβαστικότητα καθώς και από την πιεζομετρία στο υδροφόρο σύστημα.

Η διαθεσιμότητα των υπογείων υδάτων καθώς και η ορθολογική και αειφόρος εκμετάλλευση αυτών, αποτελούν σημαντικότερη συνιστώσα προστασίας της ισορροπίας του υδρολογικού κύκλου ενώ ταυτόχρονα η σωστή διαχείριση των υδατικών πόρων, προσφέρει στην ανθρώπινη κοινωνία τη δυνατότητα άρδευσης και ύδρευσης σε βάθος χρόνου. Η αειφόρος εκμετάλλευση των υπόγειων υδάτων στηρίζεται σε τρεις βασικές αρχές (Καλλέργης, 2000):

- Στην προστασία της ποιότητας των υπόγειων υδάτων.
- Στην αύξηση της ποσότητας των υπόγειων υδάτων.
- Στην χρησιμοποίηση των υπόγειων υδάτων με σκοπό την ιεραρχική κάλυψη εκείνων των αναγκών της κοινωνίας, που διακρίνονται από την υψηλότερη προτεραιότητα.

Στην παρούσα εργασία, παρουσιάζεται αναλυτικά το υδρολογικό ισοζύγιο του προσχωματικού υδροφορέα της λεκάνης Βιάννου Ηρακλείου στην Κρήτη. Παράλληλα αναφέρονται αναλυτικά τα γεωλογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα, πραγματοποιείται προσομοίωση της υπόγειας ροής στον υδροφορέα για ένα υδρολογικό έτος με χρήση του υπολογιστικού κώδικα Visual Modflow. Ο στόχος της προσομοίωσης και συνολικά της εκπόνησης της παρούσας

εργασίας, είναι η **αποτύπωση του φυσικού συστήματος** υπόγειας ροής στη λεκάνη Βιάννου Ηρακλείου με αναλυτική αναφορά στις επιμέρους υδροληπτικές εργασίες που λαμβάνουν χώρα στην υπό μελέτη λεκάνη αλλά και στις τροφοδοσίες που εμπλουτίζουν τον υδροφορέα. Για την εκπόνηση της μελέτης, επιλέχθηκε ένα από τα πλέον αξιόπιστα μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης υπόγειας ροής, το Visual Modflow. Εντός της εργασίας, αναπτύσσονται τα λειτουργικά πλεονεκτήματα του εν λόγω μοντέλου και παρουσιάζεται η μεθοδολογία χρήσης του για την προσομοίωση της κίνησης των υπογείων υδάτων στη λεκάνη.

Επιπρόσθετα, σημαντική δυνατότητα που προσφέρει η χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου, αποτελεί η ανάπτυξη πιθανών μελλοντικών σεναρίων περί μεταβολής των κλιματολογικών συνθηκών και κατά συνέπεια των υδραυλικών φορτίων του συστήματος. Μεταβολή μπορεί να παρατηρηθεί επίσης και στις ποσότητες ύδατος που αντλούνται στην υπό μελέτη περιοχή, γεγονός το οποίο μας οδηγεί στην ανάπτυξη υποθετικών σεναρίων σε σχέση με τη διακύμανση των αντλούμενων ποσοτήτων ύδατος. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με το άρθρο «Severe climate-induced water shortage and extremes in Crete» (2011), Tsanis et al., κατά την επερχόμενη περίοδο 2010 – 2040, αναμένεται ποσοστό μείωσης, $12 (\pm 25) \%$ της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης στην Κρήτη και ταυτόχρονα αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας κατά $1,9 (\pm 0,8) ^\circ\text{C}$. Συμπερασματικά, τα επόμενα χρόνια θα παρατηρηθεί σημαντική πτωτική τάση των ποσοτήτων βροχόπτωσης στην Κρήτη καθώς και ανοδική τάση της θερμοκρασίας. Φαινόμενα τα οποία δικαιολογούν απόλυτα τις υποθέσεις περί “ερημοποίησης” στις επόμενες δεκαετίες, των Μεσογειακών περιοχών της Ευρώπης.

Σύμφωνα με τα άνωθεν, κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, επιλέχθηκε η **εξέταση τεσσάρων χαρακτηριστικών σεναρίων αύξησης των ποσοτήτων αντλούμενου ύδατος και σταδιακής μείωσης της βροχόπτωσης** σε βάθος πέντε χρόνων, στη λεκάνη Βιάννου Ηρακλείου. Πιο αναλυτικά, βάση των ολοένα αυξανόμενων απαιτήσεων ύδρευσης και άρδευσης στην εν λόγω περιοχή αλλά και γενικότερα σε ολόκληρο τον Ελλαδικό χώρο, συντάχθηκαν δύο χαρακτηριστικά σενάρια υποβιβασμού του υδροφόρου ορίζοντα, λόγω υπεράντλησης των υδατικών αποθεμάτων του υδροφορέα. Η ανάπτυξη των σεναρίων αυτών, βασίστηκε ουσιαστικά στην πιθανή μελλοντική ανεξέλεγκτη ανθρώπινη υπερεκμετάλλευση του υπόγειου υδατικού δυναμικού της περιοχής. Επίσης, βάση του άρθρου «Severe climate-induced water shortage and extremes in Crete» (2011), Tsanis et al., συντάχθηκαν δύο επιπλέον σενάρια, τα οποία περιείχαν τις περιπτώσεις αυξημένης άντλησης που προαναφέρθηκαν, με επιπρόσθετη την πτωτική τάση των ποσοτήτων βροχόπτωσης στη λεκάνη ενδιαφέροντος και γενικότερα στην Κρήτη, η οποία — σύμφωνα με το άρθρο που επισημάνθηκε — προσεγγίζει το 10% της συνολικής βροχόπτωσης για κάθε χρόνο.

Αναλυτικά τα μελλοντικά σενάρια αύξησης των υδροληψιών και μείωσης των βροχοπτώσεων, που αναπτύχθηκαν για την υπό μελέτη περιοχή, είναι τα παρακάτω:

- Αύξηση των ποσοτήτων αντλούμενου ύδατος, κατά 10 %, σε βάθος χρόνου πέντε ετών, κατά την καλοκαιρινή περίοδο.
- Αύξηση των ποσοτήτων αντλούμενου ύδατος, κατά 20 %, σε βάθος χρόνου πέντε ετών, κατά την καλοκαιρινή περίοδο.
- Αύξηση των ποσοτήτων αντλούμενου ύδατος, κατά 10 %, κατά την καλοκαιρινή περίοδο και παράλληλη μείωση της βροχόπτωσης και του κατεισδυόμενου ύδατος στην περιοχή, κατά 10 %, σε βάθος χρόνου πέντε ετών για ολόκληρο το υδρολογικό έτος.
- Αύξηση των ποσοτήτων αντλούμενου ύδατος, κατά 20 %, κατά την καλοκαιρινή περίοδο και παράλληλη μείωση της βροχόπτωσης και του κατεισδυόμενου ύδατος στην περιοχή, κατά 10 %, σε βάθος χρόνου πέντε ετών για ολόκληρο το υδρολογικό έτος.

Εν κατακλείδι, αποτελεί επιτακτική ανάγκη η απόδοση μεγαλύτερης έμφασης στη διαχείριση των επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων χωρίς τα αποθέματα αυτών να θεωρούνται πλέον δεδομένα. Οι ολόενα αυξανόμενες καταναλώσεις με την ταυτόχρονη κλιματική αλλαγή, επιβαρύνουν σημαντικά τους υδροφορείς με αποτέλεσμα τη σταδιακή μείωση του υδατικού δυναμικού τους.

Η ανάπτυξη λοιπόν των παραπάνω σεναρίων, αποσκοπεί στην απόδοση μίας ρεαλιστικής μελλοντικής κατάστασης των υδρολογικών και υδροληπτικών συνθηκών της λεκάνης ενδιαφέροντος, βάση της οποίας το υδροφόρο σύστημα θα έχει επιβαρυνθεί από αξιοσημείωτα έως σημαντικά. Τα σενάρια αυτά, παρουσιάζουν συνθήκες υποβιβασμού του υδροφόρου ορίζοντα και κατ'επέκταση έλλειψης αρδευτικών και υδρευτικών ποσοτήτων νερού. Σύμφωνα με τα εξαγόμενα αποτελέσματα και συμπεράσματα της υλοποίησης των σεναρίων, δύναται ο σχεδιασμός μίας προνοητικής εκμετάλλευσης των υπογείων υδάτων στην περιοχή, με σκοπό την εξοικονόμηση υδατικών αποθεμάτων ούτως ώστε να μην παρατηρηθούν σε βάθος χρόνου τουλάχιστον πέντε ετών, φαινόμενα λειψυδρίας. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατή η εξασφάλιση της αειφόρου εκμετάλλευσης του υδροφόρου συστήματος βάση ενός ορθολογικά σχεδιασμένου προγράμματος άντλησης των υδατικών πόρων της περιοχής.

1.2. Θέση περιοχής μελέτης.

Ο Δήμος Βιάννου αποτελεί δήμο της περιφέρειας Κρήτης. Υπάγεται στο Νομό Ηρακλείου και στην ομώνυμη επαρχία. Ιδρύθηκε το 1997 με το Νόμο 2539/97 (Νόμος ή Σχέδιο Καποδίστρια) και παρέμεινε αμετάβλητος με την εφαρμογή του προγράμματος “Καλλικράτης”. Έχει έκταση περίπου 2,7 % της συνολικής έκτασης της Κρήτης η οποία

είναι 8.335 Km², και 6.463 κατοίκους (απογραφή 2001). Βρίσκεται στα νοτιοανατολικά του Νομού Ηρακλείου και έχει έδρα την Άνω Βιάννο.

Πιο συγκεκριμένα διαιρείται σε δεκαέξι δημοτικά διαμερίσματα και αποτελείται συνολικά από 47 χωριά. Τα δημοτικά διαμερίσματα είναι η Άνω Βιάννος που ταυτόχρονα έχει θέση έδρας του Δήμου όπως προαναφέρθηκε, ο Άγιος Βασίλειος, τα Αμिरά, το Αφρατί, ο Βαχός, η Έμπαρος, το Καλάμι, η Κάτω Βιάννος, η Κάτω Σύμη, το Κεφαλοβρύσι, η Μάρθα, το Μηλιαράδω, ο Ξενιάκος, ο Πεύκος, ο Συκολόγος και ο Χόνδρος.

Επιπλέον συνορεύει ανατολικά με τους Δήμους Ιεράπετρας και Οροπεδίου Λασιθίου, δυτικά με το Δήμο Αρκαλοχωρίου και βόρεια με τους Δήμους Αρκαλοχωρίου και Οροπεδίου Λασιθίου (Δήμος Βιάννου, <http://www.dviannos.gr/>). Το νότιο σύνορό της είναι η ακτογραμμή όπου λήγει στο Λιβυκό πέλαγος. Ακόμη ο Δήμος Βιάννου έχει έκταση όπως αναφέρθηκε, περίπου 2,7 % της συνολικής έκτασης της Κρήτης, άρα η έκταση του Δήμου υπολογίζεται στα 221.000 Km² ενώ ο συνολικός πληθυσμός, ανέρχεται σήμερα στους 7.000 κάτοικους. Αποτελεί το δεύτερο σε έκταση Δήμο του Νομού Ηρακλείου και τον πέμπτο σε πληθυσμό. Ο πιο πολυκατοικημένος οικισμός είναι η Άνω Βιάννος όπου συγκεντρώνονται και οι περισσότερες υπηρεσίες όπως για παράδειγμα το Δημαρχείο, το Κέντρο Εξυπηρέτησης Πολιτών, τράπεζες, το σχολείο κ.λπ.. Οι υπηρεσίες εξυπηρέτησης επισκεπτών δεν είναι ιδιαίτερα αναπτυγμένες, με αποτέλεσμα σε μη εργάσιμες ημέρες και ώρες να είναι δύσκολη η εξυπηρέτηση από κάποια από τις υφιστάμενες υπηρεσίες.

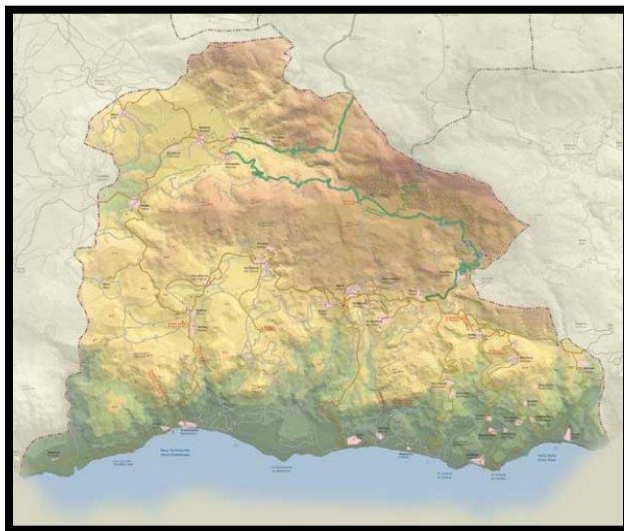
Σχετικά με την έδρα του Δήμου, την **Άνω Βιάννο**, πιο αναλυτικά αποτελεί ένα γραφικό κεφαλοχώρι το οποίο είναι κτισμένο αμφιθεατρικά στις νότιες υπώρειες της Δίκτης (Όρη Λασιθίου) και το οποίο βρίσκεται 65 χιλιόμετρα νοτιοανατολικά από το Ηράκλειο. Επίσης αποτελεί σε γενικές γραμμές ένα παραδοσιακό Κρητικό χωριό με παλιά σπίτια, αρκετές σε αριθμό πετρόκτιστες βρύσες – πηγές και ιδιαίτερα σημαντική βλάστηση από πλάτανους. Η Άνω Βιάννος έχει περίπου 900 μόνιμους κατοίκους.



Εικόνα 1.2.1 Πανοραμική άποψη του χωριού Άνω Βιάννος Ηρακλείου.
(Google Earth)

Πιο συγκεκριμένα σχετικά με τη **γεωγραφία** του Δήμου, η Βιάννος αποτελεί έναν από τους πιο ορεινούς δήμους της Κρήτης. Ταυτόχρονα όμως, συνδυάζει πρόσβαση στη θάλασσα και μάλιστα είναι ο Δήμος με το μεγαλύτερο μήκος ακτών στη νότια Κρήτη (περίπου 15 km). Με βάση το υψόμετρο και τη γεωμορφολογία της, διακρίνεται σε τέσσερις ζώνες. Η ορεινή και η ημιορεινή, καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο τμήμα του Δήμου. Οι παραπάνω δύο ζώνες συμπληρώνονται από την πεδινή και την παραλιακή ζώνη (Δήμος Βιάννου, <http://www.dviannos.gr/>).

Επιπλέον σύμφωνα με την ηλεκτρονική πηγή Google Earth, ο οικισμός Άνω Βιάννου στην περιοχή ενδιαφέροντος, έχει συντεταγμένες 35°03'14,19'' Βόρεια και 25°24'36,20'' Ανατολικά ενώ το υψόμετρο στο οποίο βρίσκεται ο οικισμός είναι στα 564 m. Η Κάτω Βιάννος σύμφωνα με την ίδια πηγή έχει συντεταγμένες 35°02'50,14'' Βόρεια ενώ Ανατολικά έχει 25°23'18,35''. Το υψόμετρο στον οικισμό Κάτω Βιάννου είναι στα 500 m.



Εικόνα 1.2.2 Γεωμορφολογικός χάρτης Δήμου Βιάννου.
(Δήμος Βιάννου, <http://www.dviannos.gr/>)

Η **ορεινή ζώνη** ξεκινάει περίπου από το νότιο τμήμα του πετάλου του όρους Δίκτη και περιλαμβάνει κορυφές όρων άνω των 1.000 m όπως για παράδειγμα ο Αφέντης Χριστός (στα 2.140 m) και οι δύο κορυφές στα νότιά του (στα 2.025 m και στα 2.005 m), ο Κισσός (στα 1.090 m), ο Παντούρας (1.512 m), η κορυφή δυτικά της τοποθεσίας Βουρλίδια (1.417 m), η Παπούρα (1.827 m), η κορυφή ανάμεσα στην κορυφή Κυνηγού και στην κορυφή Τουρλού (1.342 m), η Κούπα (1.190 m) καθώς και άλλες.

Όπως είναι αναμενόμενο στη εν λόγω ζώνη δε συναντάμε οικισμούς γιατί εκτός των άγονων εδαφών, τη χειμερινή περίοδο η κάλυψη από το χιόνι είναι ιδιαίτερα εκτεταμένη και παρατεταμένη. Επιπλέον στην ορεινή ζώνη δεσπόζουν τα άγρια τοπία και οι ιδιόμορφοι γεωλογικοί σχηματισμοί όπως πόλγες, δολίνες, σπήλαια, απόκρημνες χαράδρες, γλυφές και άλλα εξωκαρστικά φαινόμενα, καθώς και σπουδαία οικοσυστήματα όπως ένα από τα μεγαλύτερα πευκοδάση της Κρήτης στην ευρύτερη περιοχή της Σύμης.

Η **ημιορεινή ζώνη** περιλαμβάνει μικρότερα όρη τα οποία συνορεύουν με τον παραπάνω ορεινό όγκο και κυμαίνονται υψομετρικά από τα 400 έως τα 800 m. Πρόκειται για τις λοφοσειρές των Απλίκι, Καντηλιώρου, Ρουσκοκεφάλας, Κορακιάς, Κεφάλας, Σύμης, Αγίου Θεοδώρου, Κεράτου κ.α.. Στους πρόποδες και στις πλαγιές των βουνών είναι χτισμένοι οι περισσότεροι οικισμοί του Δήμου, για λόγους προστασίας από τους κατακτητές και πειρατές που εφορμούσαν από τη θάλασσα. Επίσης από εδώ ξεκινάνε τα περισσότερα φαράγγια που βρίσκονται στο Δήμο Βιάννου.

Η **πεδινή ζώνη** καταλαμβάνει μια λεπτή λωρίδα γης στα νότια του δήμου και αποτελεί την πιο εύφορη συγκριτικά με τις υπόλοιπες, καθώς εδώ καταλήγουν τα ρέματα και τα ποτάμια που διασχίζουν την ορεινή και ημιορεινή ζώνη, τα οποία αφενός εμπλουτίζουν τα εδάφη με τις πλούσιες σε συστατικά προσχώσεις τους, αφετέρου τα ποτίζουν. Σε συνδυασμό με το άριστο κλίμα, διαμορφώνονται ιδανικές συνθήκες για τις καλλιέργειες. Έτσι στη ζώνη αυτή βρίσκονται οι περισσότερες καλλιέργειες και όπως είναι αναμενόμενο, τα περισσότερα θερμοκήπια που δημιουργήθηκαν τα τελευταία 50 χρόνια.

Η **παραλιακή ζώνη** τέλος, ταυτίζεται με την ακτογραμμή (προς τη πλευρά του Λιβυκού Πελάγους όπως προαναφέρθηκε). Στη ζώνη αυτή έχουν κτιστεί οι υπόλοιποι οικισμοί του δήμου, κάποιοι παλαιότεροι και κάποιοι νεότεροι που δημιουργήθηκαν σχετικά πρόσφατα κυρίως λόγω της ανάπτυξης του τουρισμού και των καλλιεργειών με την κατασκευή θερμοκηπίων.

Σχετικά με την **υδρογεωλογία** της περιοχής, το Δήμο Βιάννου διαρρέουν δύο βασικά ποτάμια, ο Κερατόκαμπος και ο Έργανας που ποτίζει την εύφορη κοιλάδα της Εμπάρου. Επίσης την περιοχή διαρρέουν και άλλοι μικρότεροι χείμαρροι που ρέουν εποχιακά και διαμορφώνουν βαθιές χαράξεις στο ανάγλυφο οι οποίες αποτελούν ουσιαστικά τα αρκετά επισκέψιμα φαράγγια της περιοχής. Τα φαράγγια αυτά αποτελούν δείγματα των φυσικών διεργασιών που έχουν συντελεστεί στη Βιάννο, αλλά και σε ολόκληρη την Κρήτη, οι οποίες συνδυάζουν τις υποβαθμίσεις του εδάφους λόγω τεκτονικών παραμορφώσεων και τη διαβρωτική δράση των ποταμών που ξεκινούν την πορεία τους από τα ορεινά συμπλέγματα του όρους Δίκτη, ανατολικά της περιοχής μελέτης. Λόγω των άφθονων νερών και της σύστασης των πετρωμάτων, η Βιάννος έχει πάμπολλες πηγές νερού με σημαντικότερες της Άνω Βιάννου όπως προαναφέρθηκε, του Κεφαλοβρυσίου και της Σύμης.



Εικόνα 1.2.3 Γεωμορφολογική άποψη της λεκάνης Βιάννου Ηρακλείου με απεικόνιση των συνόρων της.
(Google Earth)

1.3. Προηγούμενες υδρογεωλογικές έρευνες στην υπό μελέτη περιοχή.

Σημαντική υδρογεωλογική έρευνα που διενεργήθηκε στην υπό μελέτη περιοχή αποτελεί η: **Ποιοτική εκτίμηση ρίσκου ρύπανσης των υπόγειων νερών με τη χρήση μαθηματικών προσομοιωμάτων. Μια περίπτωση από την Κρήτη (Προσχωματική λεκάνη Βιάννου).** Η συγκεκριμένη έρευνα πραγματοποιήθηκε από τους Παπαμαστοράκη Δ., Κριτσωτάκη Μ. και Ζαχαριουδάκη Γ. το 2002 και αποτελεί μία από τις σημαντικότερες βάσεις δεδομένων για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στα πλαίσια εκπόνησης της εν λόγω μελέτης δημιουργήθηκε ένα μαθηματικό προσομοίωμα πεπερασμένων διαφορών για την απεικόνιση της ροής των υπόγειων νερών στην προσχωματική λεκάνη της Άνω Βιάννου. Επιπλέον θα πρέπει να αναφερθεί ότι στην παρούσα εργασία ουσιαστικά διερευνήθηκε η χρήση του ομοιώματος ως βάση για μία “συντηρητική”, ποιοτική προσέγγιση προσδιορισμού του ρίσκου ρύπανσης στον υδροφόρο ορίζοντα και στις υδροληψίες με εφαρμογή της μεθόδου παρακολούθησης της κίνησης υποθετικών αδρανών σωματιδίων (particle tracking analysis).

Τέλος στα συμπεράσματα της προαναφερθείσας μελέτης, σημειώνεται ότι η χρήση του μαθηματικού προσομοιώματος πραγματοποιήθηκε με αρκετές ελλείψεις πρωτογενών δεδομένων οι οποίες συμπληρώθηκαν μέσω εμπειρικών εκτιμήσεων και βιβλιογραφικών αναφορών. Παρόλη την αβεβαιότητα στην εκτίμηση των παραμέτρων, το προσομοίωμα θεωρήθηκε ότι απεικονίζει ικανοποιητικά τους μηχανισμούς κίνησης με τα υπάρχοντα δεδομένα.

Το Τμήμα Παρακολούθησης και Ελέγχου της Ποιότητας και Ποσότητας των Υδάτων της Περιφέρειας Κρήτης, του οποίου αντικείμενο ήταν η χαρτογράφηση των ζωνών προστασίας υδροληψιών, στα πλαίσια του ευρωπαϊκού διαπεριφερειακού προγράμματος Interisk, πραγματοποίησε μελέτη το υδρολογικό έτος 2009 (1^η Μαΐου 2009 έως 30^η Σεπτεμβρίου 2009) με παρατηρήσεις που προήλθαν από τη χρήση των σταθμών παρακολούθησης των υπόγειων υδροφορέων η οποία ουσιαστικά παρουσίαζε την **κατάσταση των υπόγειων υδροφορέων της Κρήτης**. Όπως προαναφέρθηκε η μελέτη πραγματοποιήθηκε από το Τμήμα Παρακολούθησης των Υδάτων της Περιφέρειας Κρήτης και ουσιαστικά παρουσιάζει το υδατικό δυναμικό των κυριότερων υδρογεωλογικών ενοτήτων νεογενούς – προσχωσιγενούς υδροφορίας της Κρήτης.

Πιο αναλυτικά σημαντική έκταση στην υδρογεωλογική δομή της Κρήτης καταλαμβάνουν οι νεογενείς – προσχωσιγενείς λεκάνες, στις οποίες αναπτύσσονται σημαντικοί υδροφορείς μικρού βάθους, οι οποίοι είναι συνήθως εκείνοι οι οποίοι βρίσκονται σε εντατική εκμετάλλευση. Η συνολική τους έκταση υπολογίζεται σε 2.598 Km², επίσης δέχονται ένα μέσο ετήσιο ύψος βροχής 693 mm και ο όγκος του νερού που

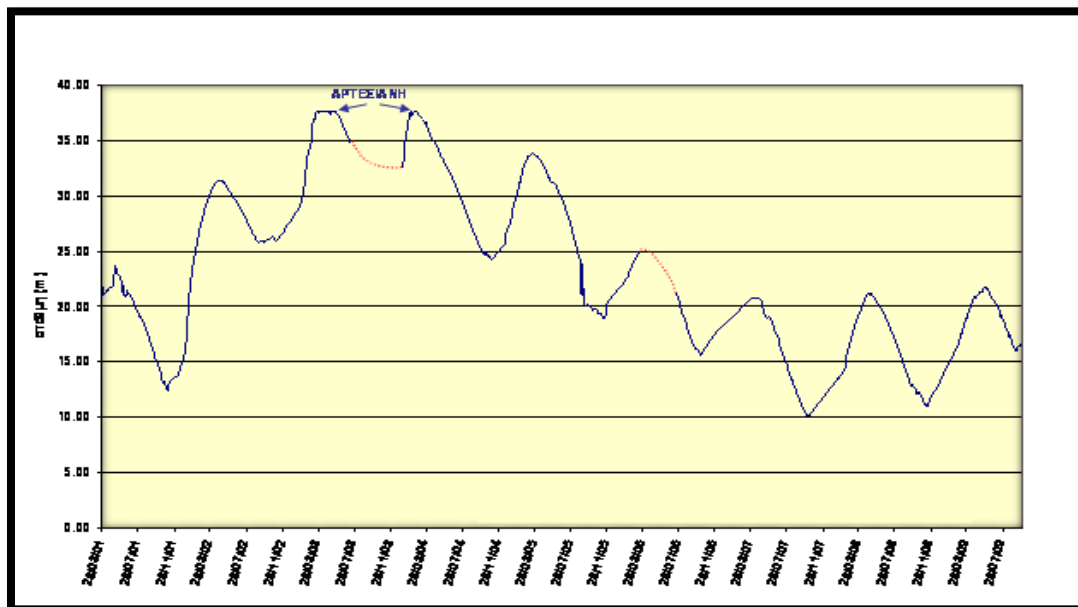
κατεισδύει – το οποίο τροφοδοτεί τους υπόγειους υδροφορείς – ανέρχεται στα $364 \cdot 10^6 \text{ m}^3 / \text{year}$.

Συγκεκριμένα όσον αφορά τη λεκάνη της Άνω Βιάννου, αναφέρεται στην εν λόγω μελέτη ότι πρόκειται για προσχωματική λεκάνη μικρής έκτασης και η διαχείρισή της γίνεται εξολοκλήρου από τον ΤΟΕΒ Βιάννου. Σημαντική πληροφορία που περιέχεται στη μελέτη αποτελεί το γεγονός πως έχει εγκατασταθεί ένας σταθμός κατάστασης του υπόγειου υδροφορέα στο κέντρο της λεκάνης.

Από το διάγραμμα διακύμανσης της στάθμης το οποίο παρουσιάζεται στη μελέτη αυτή προκύπτει ότι η κατανάλωση νερού, κατά την καλοκαιρινή περίοδο του υδρολογικού έτους 2008 – 2009, ήταν η μισή περίπου της αναπλήρωσης του ίδιου έτους. Επίσης αναφέρεται πως οι βροχοπτώσεις του έτους 2009 που σημειώθηκαν στις αρχές Σεπτεμβρίου, βοήθησαν στην έναρξη της αναπλήρωσης του υδροφορέα για το έτος 2009, αποτρέποντας μάλιστα την ίδια χρονική περίοδο την άντληση νερού για άρδευση.

Τέλος στη μελέτη αυτή αναφέρεται πως ο ΤΟΕΒ θα πρέπει να συνεχίσει τη διαχείριση του αρδευτικού νερού προς την ίδια κατεύθυνση.

Η παρακάτω εικόνα που προέρχεται από την εν λόγω μελέτη, παρουσιάζει τη διακύμανση της στάθμης στο σταθμό Βιάννου η οποία μετρήθηκε από το σημείο τοποθέτησης του αισθητήρα.



Εικόνα 1.3.1 Διάγραμμα διακύμανσης στάθμης του σταθμού Βιάννου.

(..... περίοδος κατά την οποία το αισθητήριο του σταθμού ήταν εκτός λειτουργίας.)

(Κατάσταση των Υπόγειων Υδροφορέων της Κρήτης – 2009)

Σύμφωνα με τη μελέτη «Κατάσταση των Υπόγειων Υδροφορέων της Κρήτης», 2009, σχετικά με το διάγραμμα της Εικόνας 1.3.1, ο αισθητήρας μέτρησης στάθμης ύδατος του σταθμού Βιάννου έχει τοποθετηθεί σε βάθος 37,5 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Το διάγραμμα της Εικόνας 1.3.1, απεικονίζει σύμφωνα με την ίδια μελέτη το ύψος στάθμης ύδατος από το σημείο τοποθέτησης του αισθητήρα. Εξετάζοντας λοιπόν το παραπάνω διάγραμμα για τη χρονική περίοδο 28/01/2002 έως 28/11/2002, δηλαδή για το υδρολογικό έτος για το οποίο πραγματοποιήθηκε η μελέτη των Παπαμαστοράκη, Κριτσωτάκη και Ζαχαριουδάκη, παρατηρούμε ότι στις 28/03/2002 η στάθμη από το σημείο τοποθέτησης του αισθητήρα είναι στα 31 m ενώ στις 28/09/2002 η στάθμη από το σημείο τοποθέτησης του αισθητήρα είναι στα 25 m. Συμπερασματικά σύμφωνα με το βάθος τοποθέτησης του αισθητήρα (37,5 m από το έδαφος), η στάθμη ύδατος στο απεικονιζόμενο διάγραμμα είναι στις 28/03/2002 στα 6,5 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και στις 28/09/2002 στα 12,5 m κάτω από την εδαφική επιφάνεια. Επιπλέον σύμφωνα με το εν λόγω διάγραμμα τα επόμενα έτη έως και το 2008, παρουσιάζεται μία πτωτική τάση του ύψους στάθμης ύδατος. Συγκεκριμένα στις 28/03/2007 παρατηρείται στάθμη ύδατος από το σημείο τοποθέτησης του αισθητήρα στα 20 m ενώ στις 28/09/2007 στα 10 m. Σύμφωνα λοιπόν με το βάθος τοποθέτησης του αισθητήρα, στις 28/03/2007 παρατηρούμε βάθος στάθμης κάτω από την εδαφική επιφάνεια στα 17,5 m ενώ στις 28/09/2007 στα 27,5 m. Εν κατακλείδι, εφόσον η επιλογή των στοιχείων σχετικά με το εποχιακό βάθος στάθμης ύδατος στο σταθμό Βιάννου για την παρούσα προσομοίωση υπόγειας ροής, πραγματοποιήθηκε για το έτος 2002 βάση της μελέτης των Παπαμαστοράκη κ.α., δικαιολογείται πλήρως η αποδοχή μέσου βάθους στάθμης για τους χειμερινούς μήνες στα 8 m κάτω από την εδαφική επιφάνεια και για τους θερινούς μήνες στα 17 m κάτω από την εδαφική επιφάνεια. Οι εν λόγω τιμές επιλέχθηκαν όπως προαναφέρθηκε βάση της μελέτης των Παπαμαστοράκη κ.α. και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.8.3.2 ακόλουθης παραγράφου της παρούσας εργασίας, συνοδευόμενες από την απαραίτητη αιτιολόγηση για την επιλογή τους βάσει των συνθηκών μεγάλης και μικρής άντλησης που έχουν παρατηρηθεί στη λεκάνη μελέτης. Σύμφωνα λοιπόν με τις τιμές βάθους στάθμης ύδατος στις 28/03/2002 (χειμερινή περίοδος) και στις 28/09/2002 (θερινή περίοδος) στα 6,5 m και στα 12,5 m αντίστοιχα και βάση της πτωτικής τάσης του ύψους στάθμης ύδατος που παρατηρείται στο διάγραμμα της Εικόνας 1.3.1 για τα ακόλουθα έτη του 2002, η επιλογή βάθους στάθμης στα 8 m για τη χειμερινή περίοδο και στα 17 m για την καλοκαιρινή περίοδο είναι δυνατόν να θεωρηθεί απόλυτα δικαιολογημένη.

Επιπλέον σύμφωνα με την Τεχνική Υπηρεσία του Δήμου Βιάννου που εδρεύει στην Άνω Βιάννο έχει εκπονηθεί αποκλειστικά για το Δήμο Βιάννου **μελέτη για την κατασκευή Χ.Υ.Τ.Α. καθώς επίσης και μελέτη Ε.Ε.Λ.** (Εταιρία Ελεύθερου Λογισμικού).

Ο Π. Χαντζής και οι συνεργάτες τους από την Τεχνική Εταιρία προσομοίωσης της κίνησης των υπογείων νερών και ρύπων Groundwater, έχουν εκπονήσει υδρογεωλογική μελέτη στην περιοχή ενδιαφέροντος. Πιο συγκεκριμένα η μελέτη αυτή είχε ως τίτλο: **Εκπόνηση μαθηματικού προσομοιώματος σταθερής ροής με τον κώδικα Modflow στον προσχωματικό υδροφορέα περιοχής Βιάννου Κρήτης.** Επιπλέον με την προαναφερθείσα μελέτη πραγματοποιήθηκε και εφαρμογή μεθόδων προσομοίωσης με τον κώδικα Flowpath για την χαρτογράφηση των ζωνών προστασίας υδροληψιών στην λεκάνη Άνω Βιάννου.

Τέλος σχετικά με τις προαναφερθείσες μελέτες, είναι χρήσιμο να αναφερθεί πως βάση της μελέτης «Κατάσταση των Υπόγειων Υδροφορέων της Κρήτης», η οποία πραγματοποιήθηκε το έτος 2009 από το Τμήμα Παρακολούθησης και Ελέγχου της Ποιότητας και της Ποσότητας των Υδάτων με απόφαση της Περιφέρειας Κρήτης, επιβλήθηκαν περιοριστικά μέτρα στη χρήση του νερού, με απόφαση του Περιφερειάρχη Κρήτης, σε πολλές περιοχές του νησιού, προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη διαχείριση και η μέγιστη προστασία του υδάτινου δυναμικού.

Η νέα απόφαση (ΑΠ 1595 / 30 – 6 – 2009 ΦΕΚ Β 1333 / 3 – 7 – 2009) αφορά μέτρα που ρυθμίζουν και περιορίζουν τις χρήσεις και τη λειτουργία των έργων αξιοποίησης υδατικών πόρων και έχουν ως στόχο τη διατήρηση των υδατικών πόρων (δηλαδή της ποσοτικής επάρκειας) και την προστασία τους (δηλαδή την ποιοτική υποβάθμιση π.χ. ρύπανση, υφαλμύριση κ.λπ.) μέσα στα πλαίσια της «αιιφόρου» ανάπτυξης της περιοχής.

- Ειδικότερα στο άρθρο 1 περιγράφονται οι περιοχές ανά Δήμο στις οποίες ισχύουν απαγορευτικά μέτρα για την ανόρυξη γεωτρήσεων – πηγαδιών, την άντληση νερού και γενικά για τη μεταβολή της υφιστάμενης κατάστασης.
- Στο άρθρο 2 περιγράφονται τα περιοριστικά μέτρα που ισχύουν σε όλες τις περιοχές της Κρήτης και αφορούν τις ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ των υδροληψιών, τις ελάχιστες εκτάσεις καλλιεργειών, και γενικότερα τους όρους και τις προϋποθέσεις για τη χρήση των επιφανειακών και υπόγειων νερών.
- Στο άρθρο 3 αναφέρονται οι εξαιρέσεις των άρθρων 1 και 2 και αφορούν έργα υδροληψίας για την κάλυψη πραγματικών ατομικών ή οικογενειακών υδρευτικών αναγκών, την κατασκευή νέων γεωτρήσεων ύδατος των ΟΤΑ, την κατασκευή νέων γεωτρήσεων ύδατος σε φορείς σημαντικών επενδύσεων και τη χρήση υφάλμυρων νερών από μονάδες αφαλάτωσης και κολυμβητικές δεξαμενές.

- Στο άρθρο 4 αναφέρονται τα λοιπά ρυθμιστικά μέτρα και στα άρθρα 5 και 6 οι όροι για την αντικατάσταση και την εκβάθυνση υφισταμένων γεωτρήσεων – πηγαδιών.
- Στο άρθρο 7 αναφέρεται η παρακολούθηση και έλεγχος εφαρμογής των κανόνων και των όρων της χρήσης του νερού καθώς και οι διοικητικές και ποινικές κυρώσεις στους παραβάτες.

Σχετικά με το Δήμο Βιάννου, η παραπάνω απόφαση περιοριστικών μέτρων με τα 7 άρθρα που τη συνοδεύουν, ισχύει για τις παρακάτω περιοχές του Δήμου.

- Περιοχή των Τ.Δ. Αμιρών, Αγίου Βασιλείου, Πεύκου, Καλαμίου και Συκολόγου που περικλείεται από την ακτή και έως απόσταση 3 km από αυτή με εξαίρεση τα δημοτικά έργα υδροληψίας.
- Η λεκάνη Ρούσου Λάκου του Τ.Δ. Αγίου Βασιλείου και Πεύκου.
- Η προσχωματική λεκάνη της Εμπάρου (Τ.Δ. Εμπάρου) και της Άνω Βιάννου (Τ.Δ. Άνω Βιάννου).

Παρακάτω παρατίθεται ο χάρτης της Κρήτης με ευκρινώς προσδιορισμένες τις ζώνες στις οποίες ισχύουν τα ληφθέντα απαγορευτικά μέτρα.



Εικόνα 1.3.2 Χάρτης με ισχύοντα απαγορευτικά μέτρα στην επιφάνεια της Κρήτης.
(Περιοριστικά και λοιπά ρυθμιστικά μέτρα για την προστασία και τη διαχείριση των υδάτων της Κρήτης – Απόφαση Γ.Γ. Περιφέρειας Κρήτης)
(Κατάσταση των Υπόγειων Υδροφορέων της Κρήτης – 2009)

1.4. Δομή της εργασίας.

Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζεται συνοπτικά, η δομή ολόκληρης της διπλωματικής εργασίας ενώ παράλληλα τονίζονται τα σημαντικότερα σημεία της. Συγκεκριμένα στο εισαγωγικό κεφάλαιο, αναπτύσσεται ο στόχος εκπόνησης της εργασίας ενώ παρατίθενται και τα χαρακτηριστικότερα γεωγραφικά στοιχεία της περιοχής μελέτης. Γίνεται επίσης αναφορά στις προηγούμενες υδρογεωλογικές έρευνες που πραγματοποιήθηκαν στην υπό μελέτη περιοχή.

Στο επόμενο κεφάλαιο εξετάζεται διεξοδικά η γεωλογία της περιοχής και ταυτόχρονα γίνεται εκτενής αναφορά στους νεογενείς σχηματισμούς του υπεδάφους της λεκάνης απορροής. Στο 3^ο κατά σειρά κεφάλαιο, αναπτύσσεται η υδρογεωλογία της περιοχής με αναφορές στους υδροπερατούς και αδιαπέρατους σχηματισμούς του υπό μελέτη υδροφορέα, στα γεωμετρικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα αλλά και στα υδραυλικά φορτία που δέχεται το υδροφόρο σύστημα. Επιπλέον αναπτύσσεται το εννοιολογικό μοντέλο του υδροφορέα και παρατίθενται στοιχεία για τις αρδευτικές και υδρευτικές υδροληψίες της περιοχής.

Το επόμενο κεφάλαιο, 4^ο κατά σειρά, περιλαμβάνει όλα τα υδρολογικά στοιχεία της λεκάνης όπως για παράδειγμα τη μέση ετήσια βροχόπτωση και παράλληλα το ποσοστό κατείσδυσης ύδατος. Επιπρόσθετα υδρολογικά αλλά και κλιματολογικά στοιχεία που εντάσσονται στο κεφάλαιο αυτό είναι το φαινόμενο εξάτμισης, η ηλιακή ακτινοβολία, οι άνεμοι της περιοχής, η θερμοκρασία αλλά και η ατμοσφαιρική υγρασία.

Το 5^ο κεφάλαιο αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα της παρούσας εργασίας, καθώς περιλαμβάνει την αναλυτική ανάπτυξη του υδρολογικού ισοζυγίου του υδροφορέα της περιοχής. Συγκεκριμένα εκτός από αναφορές σχετικά με την εξάτμισοδιαπνοή αλλά και την κατείσδυση, περιλαμβάνονται τα είδη τροφοδοσιών αλλά και οι τιμές αυτών που αντιστοιχούν στις εισροές του υδροφόρου συστήματος καθώς και οι συνολικές εκροές του συστήματος.

Στο 6^ο κατά σειρά κεφάλαιο, επιλέγεται το υπολογιστικό μοντέλο Visual Modflow για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης και γίνεται πλήρης αναφορά σχετικά με τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά του επιλεγμένου κώδικα. Έπειτα αναπτύσσεται το μοντέλο με συγκεκριμένες και λεπτομερές αναφορές στα βήματα που ακολουθήθηκαν για την κατασκευή του. Το εν λόγω κεφάλαιο, περιέχει και παράγραφο σχετική με την επιθυμητή βαθμονόμηση του μοντέλου, καθώς και αναλυτική αναφορά των επιλεχθέντων σεναρίων, που εξετάστηκαν βάση των αντίστοιχων αποτελεσμάτων του μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα εξετάστηκαν τέσσερα σενάρια μεταβολής των ποσοτήτων άντλησης και των βροχομετρικών δεδομένων στην περιοχή. Λεπτομερέστερη αναφορά για τα σενάρια αυτά γίνεται στις τελευταίες παραγράφους του 6^{ου} κεφαλαίου.

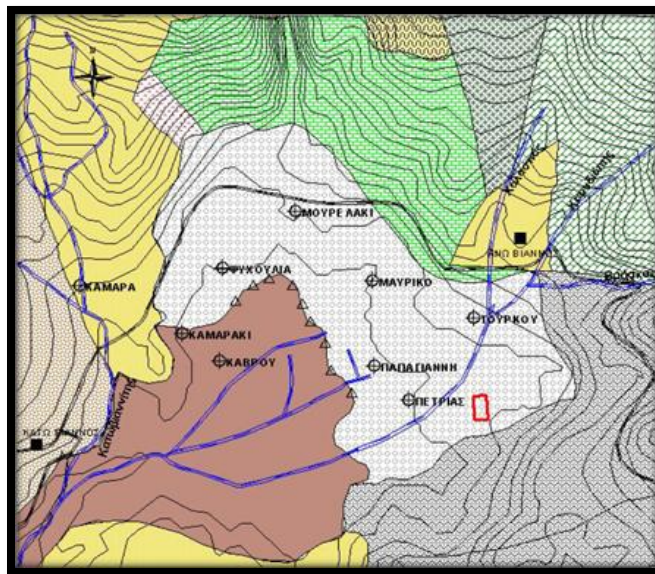
Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αλλά και της υλοποίησης των υποθετικών σεναρίων και στο ίδιο κεφάλαιο – 7^ο κατά σειρά – ακολουθεί σχολιασμός των αποτελεσμάτων. Στο τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας παρατίθενται τα βασικά συμπεράσματα που εξάγονται από τη διαδικασία της προσομοίωσης και των σεναρίων που εφαρμόστηκαν. Το κεφάλαιο κλείνει με αναφορά προτάσεων για την βέλτιστη χρήση των υδροληψιών της περιοχής, με σκοπό την ορθολογική χρήση των αποθεμάτων υπόγειου ύδατος και γενικότερα τη διατήρηση της αειφορίας στη λεκάνη μελέτης.

2. Γεωλογία περιοχής μελέτης.

2.1. Γεωλογικό υπόβαθρο της υπό μελέτη περιοχής.

Η γεωλογική δομή της Κρήτης γενικότερα, χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη κυρίως αλπικών και προαλπικών πετρωμάτων που συνθέτουν ένα πολύπλοκο οικοδόμημα τεκτονικών καλυμμάτων. Επιπλέον χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση πολλών μεταλπικών ιζημάτων που καλύπτουν τις λεκάνες που χωρίζουν τα ψηλά βουνά. Το οικοδόμημα αυτό δημιουργείται από έναν αριθμό ενοτήτων που τοποθετούνται η μία πάνω στην άλλη (Σαλούστρου Α., 2010).

Σχετικά με το γενικότερο γεωλογικό υπόβαθρο το οποίο παρατηρείται στην υπό μελέτη περιοχή, θα πρέπει να αναφερθεί πως οι βασικές αποθέσεις και σχηματισμοί που συναντάμε είναι: Τεταρτογενείς και Νεογενείς αποθέσεις και Αλπικοί σχηματισμοί.



Εικόνα 2.1.1 Γεωλογικός Χάρτης της περιοχής μελέτης.
(Παπαμαστοράκης κ.α., 2002)



Υπόμνημα Εικόνας 2.1.1 Γεωλογικός χάρτης περιοχής μελέτης.
(Παπαμαστοράκης κ.α., 2002)

Όσον αφορά τους **Προνεογενείς σχηματισμούς**, έχουν παρατηρηθεί στην υπό μελέτη περιοχή, σχηματισμοί της Αλπικής Ορογενετικής Φάσης, οι οποίοι ανήκουν στη φυλλιτική – χαλαζιτική σειρά. Επιπλέον οι σχηματισμοί αυτοί ανήκουν και στις ενότητες Τρίπολης και Πίνδου, ενώ στα δυτικά και νοτιοδυτικά της περιοχής ενδιαφέροντος, εμφανίζονται μέλη του οφιολιθικού συμπλέγματος.

Σχετικά με την ενότητα Τρίπολης παρατηρείται ότι αντιπροσωπεύεται στην εν λόγω περιοχή κυρίως από άστρωτους, παχυστρωματώδεις βιτουμενιούχους ασβεστόλιθους οι οποίοι μάλιστα σε ορισμένες περιπτώσεις είναι ανάλογα με τη θέση τους δολομιτικοί. Οι εν λόγω ασβεστόλιθοι εμφανίζονται κυρίως στα βόρεια της περιοχής και είναι κρητιδικής ηλικίας. Επίσης το συνολικό πάχος των ασβεστόλιθων δεν ξεπερνά στην υπό μελέτη περιοχή, τα 400 m. (Παπαμαστοράκης κ.α., 2002).

Στα βόρεια και βορειοδυτικά της περιοχής μελέτης, συναντάμε τη φυλλιτική – χαλαζιτική σειρά, η οποία αποτελείται από ένα συνδυασμό φυλλιτών, χαλαζιτών, σχιστόλιθων, μεταβασάλτων και αμφιβολιτών περμο – τριαδικής ηλικίας. Το συνολικό πάχος της σειράς αυτής δεν ξεπερνά τα 200 m ενώ η βάση του παραπάνω σχηματισμού αποτελείται κυρίως από γύψους και εβαπορίτες Καρνίου ηλικίας.

Στα βόρεια και νότια της περιοχής ενδιαφέροντος συναντάμε σχηματισμούς της ενότητας Πίνδου οι οποίοι αποτελούνται κυρίως από φλύσχη και ασβεστόλιθους. Ο φλύσχος είναι παλαιοκαϊνικής ηλικίας και εμφανίζεται στα βορειοδυτικά καθώς και στα νότια και νοτιοανατολικά της υπό μελέτη περιοχής. Επίσης αποτελείται από ψαμμίτες με ολισθόλιθους ασβεστόλιθων, μεταβασάλτων και ραδιολαριτών. Οι ασβεστόλιθοι είναι τριαδικής – κρητιδικής ηλικίας και εμφανίζονται στα βορειοανατολικά της υπό μελέτη περιοχής με τη μορφή μικρών τεμαχίων.

Τέλος ανατολικά και νοτιοανατολικά της περιοχής ενδιαφέροντος, εμφανίζονται οι οφιόλιθοι με τη μορφή *mélange*. Η σειρά αυτή έχει πάχος περίπου 200 m και ουσιαστικά αποτελεί ένα πολυγεννητικό σύστημα από σερπεντινίτες, διαβάσεις και περιδοτίτες.

2.2. Γεωτεκτονική εξέλιξη των Μετα – αλπικών ιζημάτων.

Σχετικά με τους μετα – αλπικούς σχηματισμούς, σύμφωνα με τη μελέτη των Παπαμαστοράκη, Κριτσωτάκη και Ζαχαριουδάκη «Ποιοτική εκτίμηση ρίσκου ρύπανσης των υπόγειων νερών με τη χρήση μαθηματικών προσομοιωμάτων», υπήρξε επιτόπια επίσκεψη στην περιοχή και παράλληλα με την ανάλυση λιθολογικών δεδομένων των γεωτρήσεων της προσχωματικής λεκάνης, προέκυψε ότι επικρατούν αλλουβιακές αποθέσεις.

2.3. Σχηματισμοί του νεογενούς .

Το Νεογενές χωρίζεται σε δύο εποχές, το Μειόκαινο και το Πλειόκαινο ενώ διάκριση στις παραπάνω εποχές γίνεται κυρίως με βάση παλαιοντολογικά δεδομένα, αν και ο διαχωρισμός αυτός, πολλές φορές είναι πρακτικά αδύνατος.

Στους σχηματισμούς αυτούς, συνήθως συναντάμε τη σειρά μαργών, τις Τυρρήνιες αναβαθμίδες, τα πλευρικά κορήματα και τους παλαιούς και νέους κώνους κορημάτων καθώς επίσης και προσχωματικά υλικά πεδινών ζωνών. Επίσης παρατηρούνται παράκτιοι σχηματισμοί αλλά και σύγχρονες αλλουβιακές αποθέσεις. Παρακάτω αναλύονται τρεις βασικοί σχηματισμοί από τους προαναφερθέντες.

2.3.1. Σειρά μαργών.

Η σειρά μαργών, πρόκειται ουσιαστικά για αποθέσεις υφάλμυρης έως λιμναίας φάσης πλειο – πλειστοκαινικής ηλικίας. Στην περίπτωση της σειρά αυτής, επικρατεί η λιμναία φάση στα ανώτερα τμήματα της. Σύμφωνα με γεωλογικές τομές γεωτρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί σε διάφορες υπό μελέτη περιοχές κατά το παρελθόν, ο σχηματισμός αυτός αποτελείται συνήθως από υποκίτρινες έως λευκές και ορισμένες φορές κυανίζουσες ή ανοικτότεφρες μάργες με παρεμβολές ψαμμιτών κατά τόπους. Επιπλέον παρεμβολές παρατηρούνται από κροκαλοπαγείς, ψηφιτοπαγείς και μαργαϊκούς ασβεστόλιθους (Τάντος Β., 2006).

Οι σειρά αυτή αποτελεί το υπόβαθρο κυρίως των προσχωματικών αλλά και νεότερων αποθέσεων στις παραλιακές πεδινές ζώνες και συναντάται σε λοφώδεις περιοχές. Μάργες στη μορφή ψαμμιτών συναντώνται σε ορισμένες περιπτώσεις στα νοτιοανατολικά της λεκάνης μελέτης καθώς και στα βορειοδυτικά στις περιοχές που παρατηρείται και ο σχηματισμός του φλύσχη.

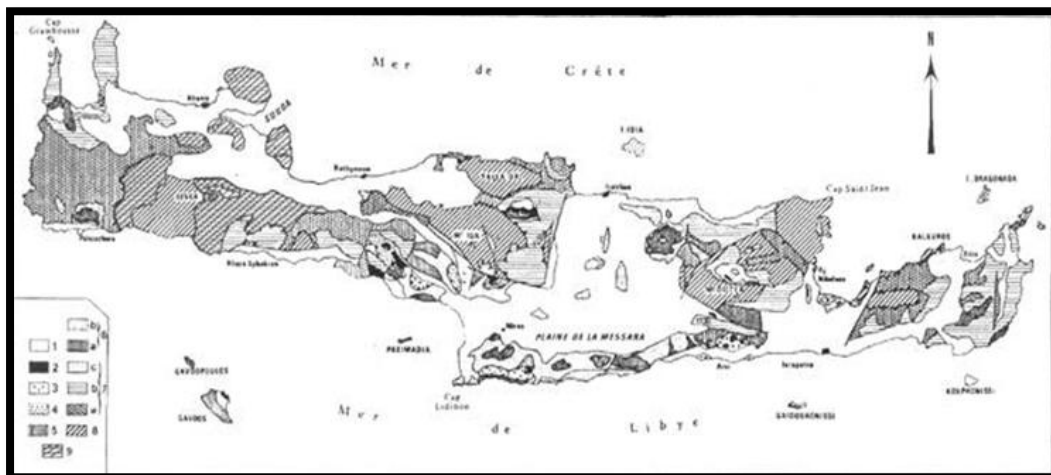
2.3.2. Προσχωματικά υλικά στις πεδινές ζώνες.

Τα υλικά αυτά αποτελούν υλικά αποσάθρωσης και εξαλλοίωσης σχηματισμών μεγάλης ηλικίας τα οποία έχουν μεταφερθεί από μικρές αποστάσεις. Επιπλέον συνήθως αποτελούνται από πηλούς, άμμους, αργίλους και κροκάλες και είναι ελαφρά συνδεδεμένα μεταξύ τους (Τάντος Β., 2006). Τα παραπάνω υλικά συναντώνται σε διάφορες αναλογίες και συνηθίζεται να παρατηρούνται σε πεδινές περιοχές. Τα υλικά αυτά συναντώνται κατά τόπους σε όχι ιδιαίτερα σημαντικές ποσότητες στο κεντρικό και ταυτόχρονα πεδινό τμήμα της λεκάνης ενδιαφέροντος, στην περιοχή δηλαδή που συναντώνται οι λεπτόκοκκες και οι αδρομερείς αλλουβιακές αποθέσεις.

2.3.3. Σύγχρονες αλλουβιακές αποθέσεις.

Οι αλλουβιακές αποθέσεις οι οποίες επικρατούν στην περιοχή ενδιαφέροντος, είναι κυρίως ποταμοχειμάριας προέλευσης και ουσιαστικά συνίστανται από άμμους, κροκαλοατύπες και αργίλους. Η γεωμορφολογική θέση της λεκάνης ενδιαφέροντος και ο τρόπος πλήρωσης της με τη συμβολή του υδρογραφικού δικτύου, δικαιολογούν την εμφάνιση των αλλουβιακών αποθέσεων. (Παπαμαστοράκης κ.α., 2002).

Επιπλέον λεπτόκοκκες αλλουβιακές αποθέσεις εμφανίζονται στο κεντρικό και νοτιοδυτικό τμήμα της λεκάνης ενώ στο βόρειο και βορειοανατολικό τμήμα επικρατούν κυρίως αδρομερείς αποθέσεις οι οποίες αποτελούνται από κροκάλες και χαλαρούς χάλικες.



Εικόνα 2.1.2 Γεωλογικός χάρτης της Κρήτης.
(EMERIC, <http://emeric.ims.forth.gr/>)

- 1) Νεογενή και Τεταρτογενή ιζήματα .
- 2) Οφιόλιθοι .
- 3) Κάλυμμα Αστερουσιών .
- 4) Κάλυμμα Βάτον .
- 5) Κάλυμμα Σπηλίων και Πρέβελι .
- 6) Κάλυμμα Πίνδου (ασβεστόλιθοι , ραδιολαρίτες και φλύσχης) .
- 7) Κάλυμμα Τρίπολης (ασβεστόλιθοι , φλύσχης) .
- 7α) Κάλυμμα Φυλλιτών - Χαλαζιτών .
- 8) Κάλυμμα Πλακωδών ασβεστολίθων .
- 9) Κάλυμμα Τριπαλίου .

Υπόμνημα Εικόνας 2.1.2 Γεωλογικός χάρτης της Κρήτης.
(EMERIC, <http://emeric.ims.forth.gr/>)

3. Υδρογεωλογία της περιοχής μελέτης.

Σχετικά με την υδρογεωλογία της περιοχής, όπως έχει προαναφερθεί το Δήμο Βιάννου διαρρέουν δύο βασικά ποτάμια, ο Κερατόκαμπος και ο Έργανας ο οποίος εν τέλει ποτίζει την κοιλάδα της Εμπάρου. Την περιοχή διαρρέουν και μικρότεροι χείμαρροι που ρέουν εποχιακά και διαμορφώνουν βαθιές χαράξεις στο ανάγλυφο οι οποίες αποτελούν φαράγγια της περιοχής. Τα φαράγγια αυτά είναι αποτέλεσμα των φυσικών διεργασιών που έχουν συντελεστεί σε ολόκληρη την Κρήτη, που συνδυάζουν τις υποβαθμίσεις του εδάφους λόγω των τεκτονικών παραμορφώσεων και τη διαβρωτική δράση των ποταμών που ξεκινούν την πορεία τους από το όρος Δίκτη.

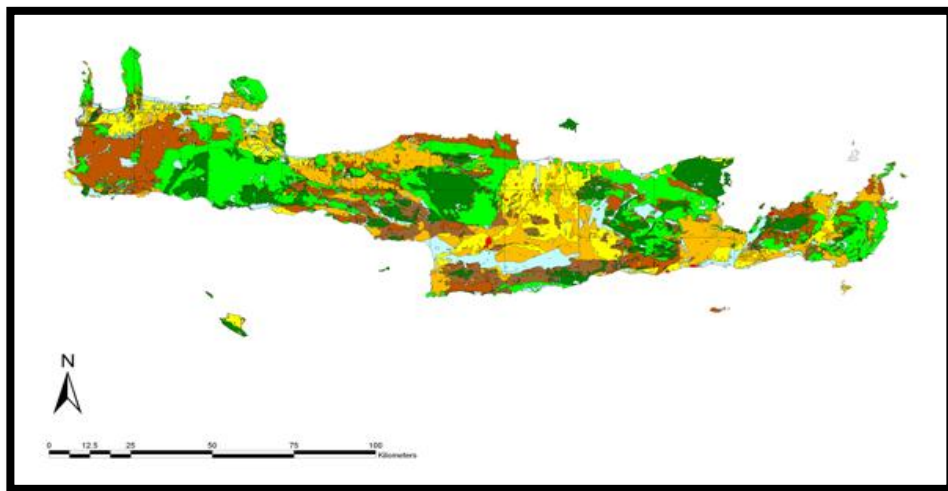
Λόγω της σύστασης των πετρωμάτων και των άφθονων νερών , η Βιάννος έχει υπεράριθμες πηγές νερού με σημαντικότερες της Άνω Βιάννου όπως προαναφέρθηκε, του Κεφαλοβρυσίου και της Σύμης.



Εικόνα 3.1 Τηλεμετρικό δίκτυο περιφέρειας Κρήτης , σταθμοί παρακολούθησης.
(Κατάσταση των Υπόγειων Υδροφορέων της Κρήτης – 2009)

Επιπλέον πραγματοποιήθηκε **διάκριση των υδρολιθολογικών σχηματισμών**. Πιο συγκεκριμένα, ο διαχωρισμός αυτός βασίστηκε στα λιθολογικά χαρακτηριστικά των γεωλογικών σχηματισμών τα οποία προσδίδουν σε αυτούς, την εκάστοτε ιδιαίτερη υδρογεωλογική συμπεριφορά.

Οι ενότητες που διακρίνονται γενικότερα στο νησί της Κρήτης καθώς και συγκεκριμένα στην περιοχή ενδιαφέροντος αλλά και η κατανομή τους στο χώρο, απεικονίζονται στον παρακάτω γεωλογικό χάρτη. Οι σχηματισμοί διακρίθηκαν σε υδροπερατούς και υδροστεγανούς.

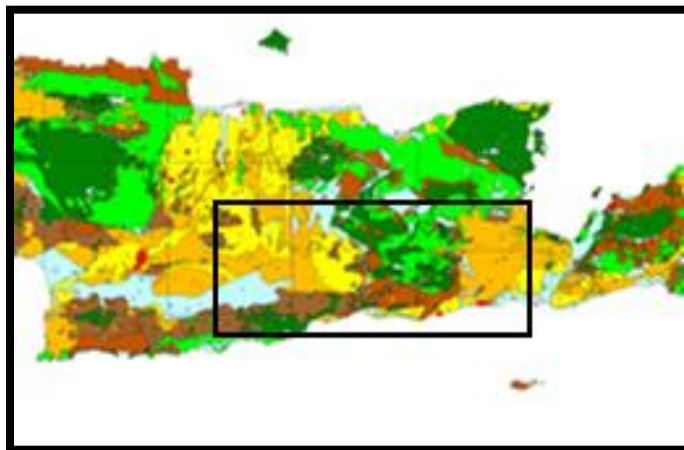


Εικόνα 3.2 Υδρολιθικός χάρτης Κρήτης.
(Κατάσταση των Υπόγειων Υδροφορέων της Κρήτης – 2009)

3.1. Μη συνεκτικοί υδροπερατοί σχηματισμοί – αδιαπέρατοι σχηματισμοί.

Στην κατηγορία αυτή, κατατάσσονται οι τριαδικοί γύψοι και οι αλλουβιακές αποθέσεις. Επίσης θα πρέπει να αναφερθεί ότι εκτός από τους υδροπερατούς πορώδεις σχηματισμούς, συναντάμε στην περιοχή και καρστικούς σχηματισμούς οι οποίοι αποτελούνται από τους ασβεστόλιθους της ενότητας Πίνδου και της ενότητας Τρίπολης. Επιπλέον παρατηρείται ότι οι αλλουβιακές αποθέσεις, αποτελούν το κύριο τμήμα του υδροφορέα της λεκάνης (Παπαμαστοράκης κ.α., 2002).

Στους αδιαπέρατους σχηματισμούς κατατάσσονται οι χαλαζίτες, οι φυλλίτες, ο σχηματισμός Βιάννου, ο σχηματισμός του φλύσχη καθώς και η οφιολιθική ακολουθία. Οι προαναφερθέντες σχηματισμοί είναι δυνατόν να αποθηκεύσουν τοπικές ή επιφανειακές υδροφορίες, έστω κι αν θεωρούνται υδρολιθολογικά αδιαπέρατοι. Οι υδροφορίες οι οποίες είναι δυνατόν να αποθηκευτούν, συνήθως σχετίζονται με την ύπαρξη αποσαθρωμένων επιφανειών, ψαμμιτών ή τοπικών ζωνών έντονου τεκτονισμού.



Εικόνα 3.1.1 Υδρολιθικός χάρτης περιοχής ενδιαφέροντος.
(Κατάσταση των Υπόγειων Υδροφορέων της Κρήτης – 2009)

	A1 - Πρακτικά αδιαπέρατοι σχηματισμοί.
	A2 - Πρακτικά αδιαπέρατοι ή εκλεκτικής κυκλοφορίας σχηματισμοί.
	g - Γύψοι, Υψηλού δυναμικού υδροφορία λόγω διάλυσης τους.
	K1 - Καρστικός σχηματισμός υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας.
	K2 - Καρστικός σχηματισμός μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας.
	K3 - Μειοκαινικά ασβεστολιθικά λατυποκροκαλοπαγή Τοπολίων, μέτριας έως υψηλής υδροπερατότητας.
	P1 - Κοκκώδεις προσχωματικές κυρίως αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας.
	P2 - Μειοκαινικές και Πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας.
	P3 - Κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας.

Υπόμνημα Εικόνων 3.1.1 και 3.2.

(Κατάσταση των Υπόγειων Υδροφορέων της Κρήτης – 2009)

3.2. Εννοιολογικό μοντέλο του υδροφορέα.

Όπως έχει προαναφερθεί το κύριο τμήμα του υδροφορέα αποτελείται από αλλουβιακές αποθέσεις και επιπλέον ο υδροφορέας της προσχωματικής λεκάνης θεωρείται ενιαίος. Επίσης οι εν λόγω αλλουβιακές αποθέσεις αποτελούνται από χάλικες με μικρές ενστρώσεις λεπτόκοκκου αμμώδους ή αργιλικού υλικού καθώς και από κροκάλες. Οι αποθέσεις αυτές θεωρούνται ετερογενείς ενώ η ετερογένεια μεταβάλλεται

πλευρικά προς τα κατάντη αλλά και κατακόρυφα. Προς τα κατάντη επικρατεί αργιλικό, λεπτόκοκκο υλικό με ενστρώσεις χαλαρών χάλικων.

Σύμφωνα με τι λιθολογικές τομές των γεωτρήσεων, το υπόβαθρο της λεκάνης θεωρείται οριζόντιο και αδιαπέρατο. Η παραπάνω παρατήρηση δικαιολογείται λόγω της ύπαρξης νεογενών μαργών στα δυτικά αλλά και φλύσχη στα ανατολικά της λεκάνης. Στα ανάντη επικρατούν οι χάλικες ενώ ο υδροφόρος ορίζοντας είναι ελεύθερος και θεωρείται σε συνθήκες υπό πίεση στα κατάντη.

Σύμφωνα λοιπόν με τις παραπάνω πληροφορίες, το νερό που εισέρχεται στον υδροφορέα, αναμένεται να ακολουθεί τη γενική τοπογραφική κλίση και να εκφορτίζεται στα νοτιοδυτικά της προσχωματικής λεκάνης. Επιπλέον σύμφωνα με τη μελέτη των Παπαμαστοράκη κ.α., τα νερά που εισέρχονται στον υδροφορέα, εκφορτίζονται στην περιοχή του Χόνδρου, δηλαδή στα νοτιοδυτικά της λεκάνης.

Η λεκάνη ενδιαφέροντος ουσιαστικά τροφοδοτείται και εμπλουτίζεται με νερό, πλευρικά στα ανάντη, από τους τριαδικούς γύψους καθώς και από τους ασβεστόλιθους της ενότητας Τρίπολης και Πίνδου. Η τροφοδοσία αυτή, ουσιαστικά διαμορφώνει τη **σχέση του υδροφορέα με τους αλπικούς σχηματισμούς**. Όπως έχει προαναφερθεί, ο φλύσχη, οι φυλλίτες – χαλαζίτες και οι οφιόλιθοι, θεωρούνται αδιαπέρατοι σχηματισμοί και δεν αναμένεται καμία υδραυλική επικοινωνία με τη λεκάνη ενδιαφέροντος. Λόγω λοιπόν της ύπαρξης των σχηματισμών των ασβεστόλιθων και των γύψων – οι οποίοι είναι υδροπερατοί – αναμένεται υδραυλική επικοινωνία μεταξύ της λεκάνης ενδιαφέροντος και αυτών.

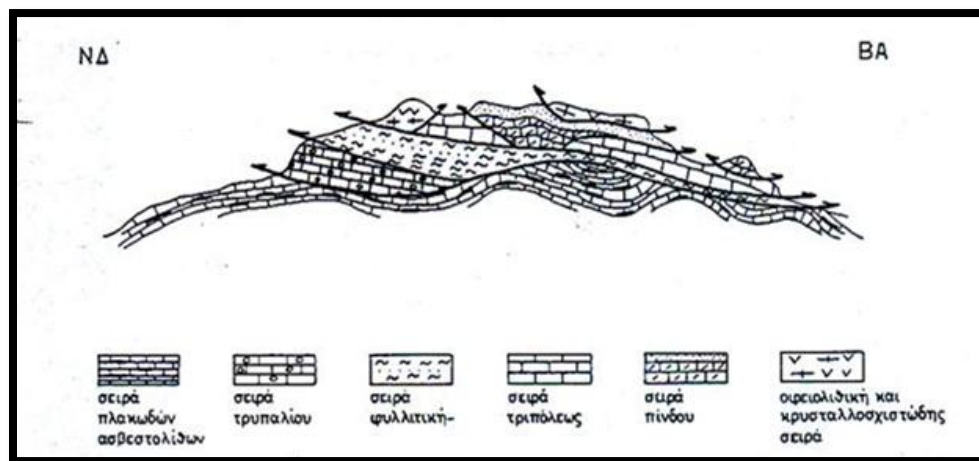
Όπως προκύπτει από το μεγάλο εύρος της ετήσιας διακύμανσης της στάθμης που είναι περίπου στα 50 μέτρα, στη γεώτρηση Καμάρα (Παπαμαστοράκης κ.α., 2002) καθώς και από τη μικρή απόδοση της συγκεκριμένης πηγής που είναι περίπου στα $1.000 \text{ m}^3 / \text{year}$, ο μειοκαινικός σχηματισμός Βιάννου θεωρείται ημιπερατός, με αρκετά μικρό υπόγειο υδατικό δυναμικό. Η ημιπερατότητα του σχηματισμού αυτού, διαμορφώνει ουσιαστικά τη **σχέση του υδροφορέα με τους μετα – αλπικούς σχηματισμούς**. Επιπλέον ο σχηματισμός Βιάννου, για τις ανάγκες του εννοιολογικού μοντέλου, θεωρείται αδιαπέρατος.

Σχετικά με την **επιφανειακή απορροή στη λεκάνη** ενδιαφέροντος και ουσιαστικά τη σχέση του υδροφορέα με τους χειμάρρους, η τροφοδοσία των χειμάρρων που διατρέχουν τη λεκάνη, πραγματοποιείται από τις πηγές Λουτρακίου οι οποίες βρίσκονται περίπου σε απόσταση 500 μέτρων από τα βορειοανατολικά κράσπεδα της λεκάνης. Επιπλέον οι πηγές Λουτρακίου βρίσκονται επίσης σε απόσταση περίπου 500 μέτρων από τις επιφανειακές απορροές στους αδιαπέρατους σχηματισμούς των φυλλιτών – χαλαζιτών και του φλύσχη που βρίσκονται στα βόρεια της λεκάνης. Σημαντική πληροφορία αποτελεί το γεγονός ότι δεν έχει παρατηρηθεί σημαντική επιφανειακή

απορροή στην έξοδο της λεκάνης ενδιαφέροντος (Παπαμαστοράκης κ.α., 2002), φαινόμενο το οποίο στηρίζει σημαντικά τη θεώρηση ότι ο υδροφορέας τροφοδοτείται σε μεγάλο βαθμό από τους χείμαρρους.

Τέλος σχετικά με την **επίδραση των αντλήσεων στη λεκάνη**, παρατηρείται υποβιβασμός των υδραυλικών φορτίων λόγω της μείωσης του υδατικού δυναμικού της λεκάνης από τη χρήση των αντλήσεων. Επιπλέον στην επαφή των αδρομερών αποθέσεων με τις λεπτόκοκκες, εμφανίζεται ένα μέτωπο πηγών όπου παρατηρούνται ταυτόχρονα υψηλότερα υδραυλικά φορτία. Το παραπάνω φαινόμενο ενισχύεται στις περιόδους που οι αντλήσεις είναι μειωμένες, όπως για παράδειγμα την χρονική περίοδο 1980 – 1985, όπου παρατηρούνται τα πρώτα στάδια εκμετάλλευσης της λεκάνης ενδιαφέροντος. Λόγω λοιπόν της διαφοράς μεταβιαστικότητας ύδατος του λεπτόκοκκου υλικού τη λεκάνης και των αδρομερών αποθέσεων, διαμορφώνονται οι πηγές στη συγκεκριμένη τοποθεσία.

Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα, παρουσιάζεται το εννοιολογικό μοντέλο των υδρολογικών και υδρογεωλογικών συνθηκών καθώς και των συνθηκών ροής που επικρατούν στη λεκάνη ενδιαφέροντος. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η σύνθεση ενός ποσοτικοποιημένου, θεωρητικού ισοζυγίου.



Εικόνα 3.2.1 Σχηματική απεικόνιση της γεωλογικής δομής της Κρήτης , με τα αλληπάλληλα τεκτονικά καλύμματα.
(EMERIC, <http://emeric.ims.forth.gr/>)

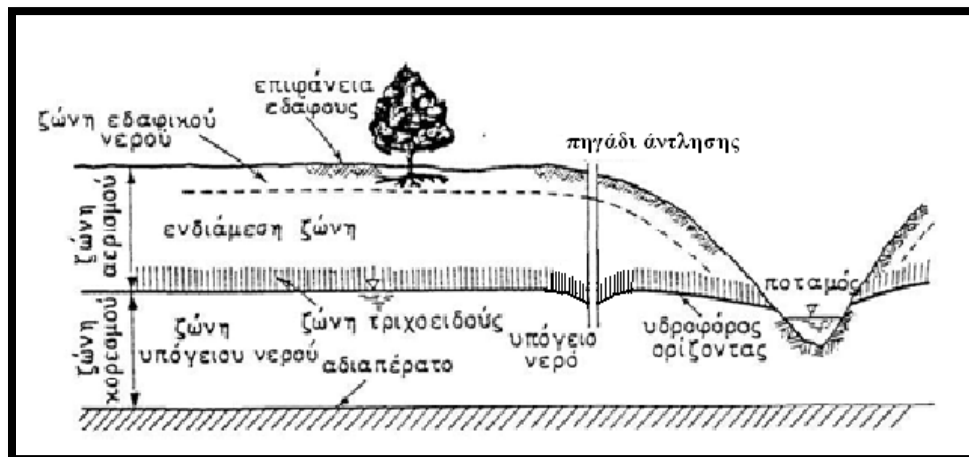
3.2.1. Γεωμετρία του προσχωματικού υδροφορέα και χαρακτηριστικά του κανάβου προσομοίωσης.

Σχετικά με τη γεωμετρία του υπό μελέτη υδροφορέα, το συνολικό πάχος του υδροφορέα κυμαίνεται από 565 m όπως για παράδειγμα στην εκβολή της λεκάνης απορροής, έως 660 m όπως στα βορειοανατολικά και βόρεια της λεκάνης απορροής όπου το υψόμετρο λαμβάνει υψηλές τιμές.

Η λεκάνη απορροής εκτείνεται από την Άνω Βιάννο βορειοανατολικά της περιοχής έως την θέση Καμάρα και ψηλότερα, βορειοδυτικά της περιοχής καθώς επίσης από τη θέση Πετριά νοτιοανατολικά της περιοχής και χαμηλότερα έως την Κάτω Βιάννο, νοτιοδυτικά της περιοχής.

Πιο συγκεκριμένα, ο υδροφορέας της λεκάνης ενδιαφέροντος, δε διαχωρίστηκε σε επίπεδα για τις ανάγκες της προσομοίωσης, με αποτέλεσμα το συνολικό πάχος να αποτελεί ένα ενιαίο στρώμα.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στον υδροφορέα υπάρχουν **7 γεωτρήσεις άντλησης** καθώς και μία γεώτρηση παρατήρησης στη θέση Πετριά. Επίσης η γεώτρηση Καμαράκι έχει χρησιμοποιηθεί και ως γεώτρηση παρατήρησης, καθώς σε μικρή απόσταση δυτικά της γεώτρησης αυτής, υπάρχει σε σημείο της περιοχής η οποία έχει ληφθεί ως ανενεργή υδραυλικά, επιπλέον γεώτρηση παρατήρησης στη θέση Καμάρα.



Εικόνα 3.2.1.1 Κατακόρυφη τομή ελεύθερου υδροφορέα αντίστοιχου της υπό μελέτη περιοχής.

(Λατινόπουλος και Θεοδοσίου, 2007)

(Διδακτικές σημειώσεις, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.)

Η περιοχή στην οποία βρίσκεται η λεκάνη απορροής έχει συνολική επιφάνεια, αν θεωρήσουμε παραλληλόγραμμο το οποίο περιέχει αυτήν, περίπου $5.764.400 \text{ m}^2$ με διαστάσεις $2.665 \text{ m} * 2.163 \text{ m}$. Η λεκάνη ενδιαφέροντος η οποία θεωρείται και υδραυλικά ενεργή στην προσομοίωση, έχει συνολική επιφάνεια $2.852.222,646 \text{ m}^2$. Ο κάνναβος προσομοίωσης έχει διαστάσεις κυψελίδας $50 * 50$ με συνολικά 2.500 κυψελίδες από τις οποίες οι 1237 είναι ενεργές. Επιπλέον, οι διαστάσεις της κάθε κυψελίδας με ακρίβεια είναι: $43,26 \text{ m} * 53,3 \text{ m}$ ενώ η συνολική επιφάνεια κάθε κυψελίδας είναι $2.305,758 \text{ m}^2$.

υδραυλικά ενεργή περιοχή της λεκάνης καθώς επίσης και η διαθεσιμότητα των δεδομένων.

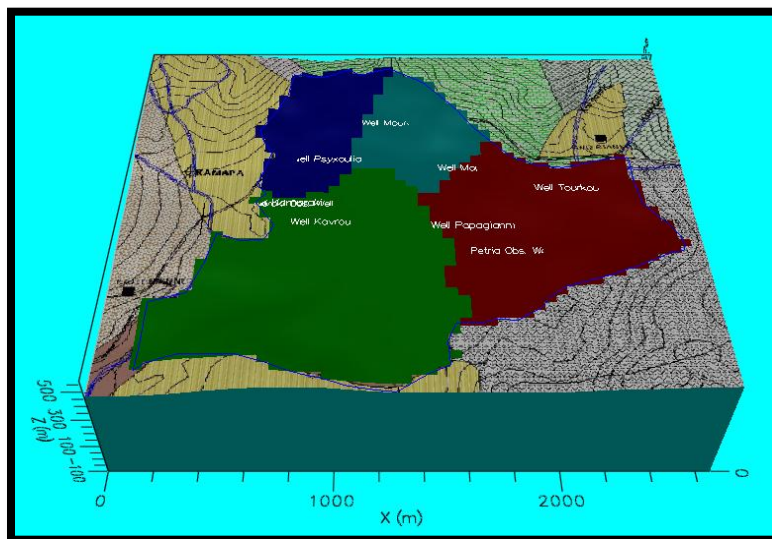
Επιπλέον θα πρέπει να αναφερθούν τα υδραυλικά φορτία τα οποία συνδράμουν στην τροφοδοσία και γενικότερα στον εμπλουτισμό του υπόγειου υδροφορέα καθώς επίσης και οι υδροληψίες, δηλαδή τα υδροληπτικά αρδευτικά ή υδρευτικά έργα της περιοχής αλλά και οι ποσότητες ύδατος που αντλούνται από τις εν λόγω υδροληψίες.

Όπως έχει προαναφερθεί, η υδραυλικά ενεργή περιοχή στη λεκάνη ενδιαφέροντος, χαρακτηρίζεται από δύο κύριους σχηματισμούς, τις Αλλουβιακές λεπτόκοκκες αποθέσεις και τις Αλλουβιακές αδρομερείς αποθέσεις. Σύμφωνα με τη μελέτη των Παπαμαστοράκη κ.α., επειδή δεν υπάρχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά υδραυλικής αγωγιμότητας για τη λεκάνη, λαμβάνονται οι τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας 20 m/d για τη ζώνη των Αλλουβιακών αδρομερών αποθέσεων (βορειοανατολικά της περιοχής) και 1 m/d για τη ζώνη των Αλλουβιακών λεπτόκοκκων αποθέσεων (νοτιοδυτικά της περιοχής).

Στην παρούσα διπλωματική, στα αρχικά στάδια της διαδικασίας κατασκευής του μοντέλου, οι **τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας** που επιλέχθηκαν για τους προαναφερθέντες σχηματισμούς είναι: 0,1 m/d για το σχηματισμό των Αλλουβιακών λεπτόκοκκων αποθέσεων ενώ για το σχηματισμό των Αλλουβιακών αδρομερών αποθέσεων, η εν λόγω ζώνη, διαχωρίστηκε σε τρεις περιοχές παρόμοιας μεταξύ τους υδραυλικής αγωγιμότητας. Πιο συγκεκριμένα η πρώτη περιοχή της ζώνης των αδρομερών αποθέσεων, η οποία καλύπτει το νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής των αδρομερών καθώς επίσης και τη γεώτρηση ρύθμισης στη θέση Πετριά, είχε λάβει αρχικά κατά την κατασκευή του μοντέλου υδραυλική αγωγιμότητα 1 m/d, η κεντρική περιοχή της εν λόγω ζώνης είχε 1 m/d ομοίως, ενώ η τελευταία περιοχή – μικρότερη συγκριτικά με τις προηγούμενες – της ζώνης των αδρομερών στα βορειοδυτικά, για τις ανάγκες του παρόντος μοντέλου έλαβε την τιμή 0,7 m/d.

Στη συνέχεια, με την ολοκλήρωση της κατασκευής του μοντέλου για την προσομοίωση της υπόγειας ροής στην περιοχή, πραγματοποιήθηκε η τελική βαθμονόμηση του με στόχο την επίτευξη των κατάλληλων κριτηρίων ρύθμισης, τα οποία βασίζονταν σε πληροφορίες σχετικά με τη στάθμη ύδατος σε γνωστά σημεία ρύθμισης (Πετριά, Καμαράκι), προερχόμενες πάντα από την μελέτη των Παπαμαστοράκη κ.α..

Σύμφωνα με τα **τελικά αποτελέσματα, της ρύθμισης του μοντέλου** προσομοίωσης, η περιοχή ενδιαφέροντος και πιο αναλυτικά οι διαμορφωμένες ζώνες της περιοχής, έλαβαν τις παρακάτω τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας: Η πρώτη περιοχή της ζώνης των αδρομερών αποθέσεων, στο νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής των αδρομερών, έλαβε τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας 0,864 m/d, η κεντρική περιοχή της εν λόγω ζώνης έλαβε τιμή 0,864 m/d ομοίως, η περιοχή της ζώνης των αδρομερών στα βορειοδυτικά, έλαβε τιμή 0,69 m/d ενώ η περιοχή των Αλλουβιακών λεπτόκοκκων αποθέσεων, έλαβε τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας 0,0864 m/d.



Εικόνα 3.2.2.1 Τρισδιάστατη απεικόνιση του υδροφορέα της περιοχής μελέτης. (Με εμφανή διάκριση των ζωνών υδραυλικής αγωγιμότητας καθώς και των θέσεων των γεωτρήσεων.)

Ζώνη	Χρωματισμός ζώνης	Υδραυλική Αγωγιμότητα (m/sec)
1	Blue	0,000008
2	Green	0,000001
3	Yellow	0,00001
4	Red	0,00001

Υπόμνημα Εικόνας 3.2.2.1 Ζώνες υδραυλικής αγωγιμότητας και αντίστοιχες τιμές.

Σχετικά με τη **διαθεσιμότητα δεδομένων**, σύμφωνα με τη μελέτη των Παπαμαστοράκη κ.α., για τη χωρική κατανομή των υδραυλικών φορτίων, δεν υπάρχουν διαθέσιμοι χάρτες πιεζομετρίας για την περιοχή ενδιαφέροντος. Επιπλέον σχετικά με τα υδρογραφήματα των γεωτρήσεων, υπάρχουν δεδομένα για το πιεζόμετρο Πετριάς από το 1981 έως το 1998 ενώ από το 2001 έχει τοποθετηθεί αυτόματος τηλεμετρικός σταθμηγράφος με ωριαίο βήμα καταγραφής. Επίσης για τις εισροές στη λεκάνη, υπολογίζονται οι εισροές από τους χειμάρρους οι οποίοι τροφοδοτούνται από τις πηγές Λουτρακίου και εκτιμώνται οι επιφανειακές απορροές των γεωλογικών σχηματισμών. Σχετικά με τις υπόγειες πλευρικές τροφοδοσίες, δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία ενώ για τις εκροές από τη λεκάνη, οι αντλήσεις ποσοτικοποιούνται με στοιχεία του ΤΟΕΒ και του Δήμου Βιάννου.

Τέλος σχετικά με τα υδραυλικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών της περιοχής, χρησιμοποιούνται μετρήσεις παρόμοιων υδρολιθολογικών καθεστώτων (Παπαμαστοράκης κ.α., 2002) ενώ για την απευθείας κατείσδυση από τη βροχόπτωση,

συλλέγονται στοιχεία από βιβλιογραφικές αναφορές καθώς και από επί τόπου υπολογισμούς οι οποίοι έχουν πραγματοποιηθεί στην περιοχή.

3.2.3. Υδραυλικά φορτία του υδροφορέα και υδραυλικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών του.

Σχετικά με τα **υδραυλικά φορτία** στην περιοχή, η Υπηρεσία Εγγείων Βελτιώσεων (Υ.Ε.Β.) της Περιφέρειας Κρήτης, παρακολουθεί τη στάθμη δύο γεωτρήσεων, στις θέσεις: Πετριά, Άνω Βιάννου και Καμάρα, Κάτω Βιάννου από το 1982 σε εξαμηνιαίο βήμα (χειμερινή και καλοκαιρινή περίοδος). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η γεώτρηση παρατήρησης στη θέση Καμάρα, βρίσκεται εκτός των ορίων της υπόγειας υδραυλικά ενεργής λεκάνης, ωστόσο κατά τη διαδικασία κατασκευής του μοντέλου στην παρούσα διπλωματική, η συγκεκριμένη γεώτρηση παρατήρησης λήφθηκε υπόψη, καθώς με τον τρόπο αυτό εξασφαλίστηκε ένα ακόμα σημείο ρύθμισης για τη διαδικασία προσομοίωσης, εκτός του ήδη υπάρχοντος σημείου ρύθμισης στη θέση Πετριά. Πιο συγκεκριμένα, η γεώτρηση Καμαράκι η οποία βρίσκεται εντός των ορίων της λεκάνης, θεωρήθηκε ως σημείο ρύθμισης εκτός από αντλητική γεώτρηση η οποία είναι. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίστηκε ένα ακόμα σημείο ρύθμισης το οποίο είναι αρκετά κοντά στο ήδη υπάρχον σημείο ρύθμισης της θέσης Καμάρα. Η μικρή βορειοδυτική περιοχή της ζώνης των αδρομερών Αλλουβιακών αποθέσεων, έλαβε τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας κατά μία τάξη μικρότερη από τις τιμές του εν λόγω μεγέθους των υπόλοιπων περιοχών της ζώνης των αδρομερών, με στόχο την ορθή βαθμονόμηση του μοντέλου προσομοίωσης.

Για τη γεώτρηση στη θέση Πετριά της Άνω Βιάννου, υπάρχουν μετρήσεις από το 1982 έως το 1997, με βάση τις οποίες παρατηρείται μία τάση υποβιβασμού της στάθμης κατά τα ξηρά έτη 1991 – 1994, ενώ τα επόμενα έτη παρατηρείται μία τάση επαναφοράς της (Παπαμαστοράκης κ.α., 2002). Το εύρος της ετήσιας διακύμανσης της στάθμης μεταξύ καλοκαιρινής και χειμερινής περιόδου, αυξάνεται σταδιακά προς το τέλος της χρονοσειράς και κυμαίνεται από 8 έως 11 m.

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει αναφορά για τις υδραυλικές κλίσεις στη λεκάνη, ενώ κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, σε υπερετήσια βάση, η υδροστατική στάθμη στην προσχωματική λεκάνη της Βιάννου κυμαίνεται από 7 έως 30 m.

Επιπλέον θα πρέπει να αναφερθεί, πως κατά την πρώτη ρύθμιση σύμφωνα με τη μελέτη των Παπαμαστοράκη κ.α., στη θέση Πετριά, κατά τη χρονική περίοδο 1990 έως 1998, ο μέσος όρος βάθους στάθμης, ήταν στα 17 m ενώ η μέση ετήσια διακύμανση της στάθμης ήταν στα 10,2 m. Κατά τη δεύτερη ρύθμιση στην ίδια θέση (Πετριά), σύμφωνα με την ίδια μελέτη, τις χρονολογίες από 1982 έως 1985, ο μέσος όρος βάθους στάθμης ήταν στα 8 m ενώ η μέση ετήσια διακύμανση της στάθμης ήταν στα 5 m. Εάν λοιπόν

λάβουμε υπόψη μας τους δύο μέσους όρους βάθους στάθμης για τις παραπάνω χρονικές περιόδους, τότε ο μέσος όρος των δύο αυτών τιμών (17 μέτρα και 8 μέτρα) είναι: 12,5 μέτρα βάθος υδροστατικής στάθμης, κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Για το λόγο αυτό, κατά την κατασκευή του παρόντος μοντέλου και την εισαγωγή των δεδομένων που αφορούν τις υδροληψίες, λάβαμε μέσο όρο υδροστατικής στάθμης σε βάθος κάτω από την εδαφική επιφάνεια, 12,5 m, για κάθε αρδευτική – υδρευτική γεώτρηση αλλά και για τις γεωτρήσεις παρατήρησης (Pump Wells και Observation Wells στον κώδικα Modflow).

Σχετικά με τα **υδραυλικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών**, από τις υπάρχουσες λιθολογικές τομές γεωτρήσεων καθώς και από τη γεωμορφολογική κατάσταση της περιοχής, διακρίνονται δύο ζώνες στον υδροφορέα. Η μία ζώνη εμφανίζεται στο κέντρο και προς τα κατάντη της λεκάνης απορροής και χαρακτηρίζεται από αμμοιλλύες και αργιλικά υλικά με μικρές ενστρώσεις χαλαρών κροκαλοπαγών και άμμων. Ενώ η δεύτερη ζώνη εμφανίζεται στα βορειοδυτικά, βόρεια και βορειοανατολικά της λεκάνης και αποτελείται από αμμοχάλικες, κροκάλες και χαλαρά κροκαλοπαγή. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι λιθολογικές τομές υπάρχουν για τις γεωτρήσεις Τούρκου, Μαυρίκο, Καμαράκι, Πετριά, Μουρελάκι και Κάβρου, ενώ σχετικά με την πρώτη ζώνη, η εμφάνιση των προαναφερθέντων υλικών, σχετίζεται με το υδρογραφικό δίκτυο, ως παράγοντα που διαμορφώνει την απορροή με γενική διεύθυνση από βορειοανατολικά προς νοτιοδυτικά.

Σύμφωνα με τη μελέτη των Παπαμαστοράκη κ.α., η τιμή της υδαταγωγιμότητας (T), για την προσχωματική λεκάνη της Βιάννου, είναι $4,32 \text{ m}^2/\text{day}$, για κορεσμένο πάχος υδροφορέα. Από τις υπάρχουσες βιβλιογραφικές αναφορές, δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία από δοκιμαστικές αντλήσεις ή κι ακόμη εκτιμήσεις των υδραυλικών παραμέτρων από γεωτρήσεις στην περιοχή. Η προαναφερθείσα τιμή προέκυψε μετά από τη βαθμονόμηση μαθηματικού προσομοιώματος στη λεκάνη απορροής.

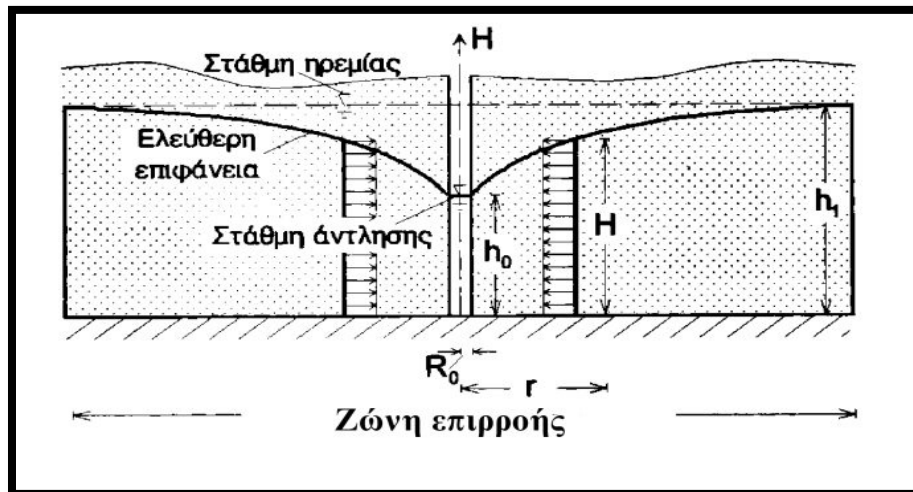
Επίσης σύμφωνα με τη μελέτη των Παπαμαστοράκη κ.α., δοκιμαστικές αντλήσεις σε παρόμοιους χαλαρούς σχηματισμούς στη λεκάνη του ποταμού Ληθαίου στα Νότια της Κρήτης, έδωσαν τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας μέσου όρου 15 m/d και εύρους 3 έως 35 m/d .

3.2.4. Αρδευτικές και υδρευτικές υδροληψίες.

Οι γεωτρήσεις αποτελούν μέθοδο διατήρησης του εδάφους σε σημαντικό βάθος με τη διάνοιξη οπών κατάλληλης διαμέτρου με σκοπό την έρευνα και την αξιοποίηση των πόρων του υπεδάφους, αλλά κυρίως την απευθείας άντληση νερού. Κατά τη λειτουργία των αντλητικών γεωτρήσεων, ο υδροφόρος ορίζοντας υποβιβάζεται ανάλογα

με την παροχή άντλησης της γεώτρησης. Ο κώνος πτώσης στάθμης στον υδροφορέα, διαμορφώνει την ακτίνα επιρροής της αντλητικής γεώτρησης.

Στην περίπτωση μάλιστα ταυτόχρονης λειτουργίας δύο ή περισσότερων αντλητικών γεωτρήσεων των οποίων οι ζώνες επιρροής συμπίπτουν σε κάποια εσωτερικά σημεία του υδροφόρου συστήματος., παρατηρείται αθροιστική πτώση του υδροφόρου ορίζοντα στα εν λόγω σημεία.



Εικόνα 3.2.4.1 Κατακόρυφη τομή ελεύθερου υδροφορέα σε σημείο γεώτρησης άντλησης και απεικόνιση της ακτίνας επιρροής.

(Λατινόπουλος και Θεοδοσίου, 2007)

(Διδακτικές σημειώσεις, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.)

Στη λεκάνη ενδιαφέροντος, σημειώνονται επτά συνολικά γεωτρήσεις, εκ των οποίων τέσσερις από αυτές χρησιμοποιούνται για άρδευση και είναι υπό τη διαχείριση του ΤΟΕΒ Άνω Βιάννου (Τοπικός Οργανισμός Εγγείων Βελτιώσεων), ενώ οι υπόλοιπες τρεις χαρακτηρίζονται από υδρευτικούς σκοπούς. Τέλος, η γεώτρηση στη θέση Πετριά, δεν εκμεταλλεύεται για αρδευτικούς ή υδρευτικούς σκοπούς και η Περιφέρεια της Κρήτης τη χρησιμοποιεί ως πιεζόμετρο παρακολούθησης της στάθμης των υπογείων υδάτων. Επιπλέον γεώτρηση παρατήρησης της στάθμης των υπογείων υδάτων αποτελεί και η γεώτρηση στη θέση Καμάρα, όμως η συγκεκριμένη γεώτρηση βρίσκεται εκτός των ορίων της λεκάνης απορροής.

Ο ΤΟΕΒ Άνω Βιάννου, μετρά το συνολικό ετήσιο αντλούμενο όγκο νερού προς άρδευση, σε 1.000.000 m³/year. Επιπλέον σύμφωνα με την τεχνική υπηρεσία του Δήμου Βιάννου, οι παροχές άντλησης των υδρευτικών γεωτρήσεων, ανέρχονται σε 44.840 m³/year. Επίσης θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχουν πληροφορίες για τον ακριβή όγκο άντλησης κάθε γεώτρησης, ο οποίος όμως απαιτείται για τις ανάγκες της παρούσας προσομοίωσης. Ο υπολογισμός της αντλούμενης ποσότητας κάθε γεώτρησης,

πραγματοποιήθηκε με καταμερισμό της συνολικής ποσότητας άντλησης, με χρήση της ηλεκτρικής κατανάλωσης των αντλιών (Παπαμαστοράκης κ.α., 2002).

Ο προαναφερθέν υπολογισμός, στηρίχθηκε στη θεώρηση ότι οι αντλίες των γεωτρήσεων, χαρακτηρίζονται από τον ίδιο βαθμό απόδοσης και μεταφέρουν νερό στην ίδια απόσταση από τη γεώτρηση καθώς και στο ίδιο υψόμετρο. Κατά συνέπεια, υπάρχει αναλογία μεταξύ της κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας και του αντλούμενου όγκου νερού. Παρακάτω παρουσιάζεται ο Πίνακας, υδροληψιών και παροχών αντλήσεων στη λεκάνη Βιάννου Ηρακλείου.

Γεώτρηση	Τετμημένη (X)	Τεταγμένη (Y)	Χρήση	Ετήσια Παροχή (m ³ / year)
Τούρκου	628268	3879368	Άρδευση	124220
Παπαγιάννη	627809	3879147	Άρδευση	506980
Μουρελάκι	627449	3879861	Άρδευση	103724
Μαυρικό	627803	3879540	Άρδευση	265074
Καβρού	627098	3879169	Ύδρευση	38000
Ψυχούλια	627112	3879599	Ύδρευση	1680
Καμαράκι	626926	3879293	Ύδρευση	5160

Πίνακας 3.2.4.1 Υδροληψίες και παροχές αντλήσεων στη λεκάνη Άνω Βιάννου.
(Χρησιμοποιείται σύστημα Συντεταγμένων ΕΓΣΑ 87)
(Παπαμαστοράκης κ.α., 2002)

3.2.5. Συνθήκες τροφοδοσίας του υδροφορέα.

Η τροφοδοσία ενός υδροφορέα μπορεί να πραγματοποιείται με διάφορους τρόπους. Για το συγκεκριμένο υδροφορέα σημαντική τροφοδοσία πραγματοποιείται από την απευθείας κατείσδυση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Ο συντελεστής κατείσδυσης επιλέχθηκε σε 10 % των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων τα οποία ανέρχονται σε 874 mm/year, δηλαδή αντιστοιχεί σε 87,4 mm/year κατεισδύμενου νερού (Παπαμαστοράκης κ.α., 2002). Η κατείσδυση παίρνει τις μέγιστες τιμές κυρίως κατά τη χειμερινή περίοδο, παρά την ύπαρξη σποραδικών βροχοπτώσεων κατά τη θερινή περίοδο, για τα οποία εκτιμάται ότι δεν συνεισφέρουν σημαντικά στην τροφοδοσία του υπόγειου υδροφορέα.

Ένας άλλος πολύ σημαντικός παράγοντας τροφοδοσίας του συστήματος είναι η διήθηση των επιφανειακών απορροών από τις κοίτες των ποταμών και των άλλων χειμάρρων που διαρρέουν την περιοχή, συνεισφέροντας συνολικά σε 58.837 m³ ύδατος ετησίως. Ο παράγοντας αυτός είναι ιδιαίτερης σημασίας κυρίως κατά τη χειμερινή περίοδο ενώ εκτιμάται ότι συνεισφέρει στην επαναφόρτισή του υδροφορέα και κατά τη

θερινή περίοδο, όταν παρατηρείται στις κοίτες απορροή από βροχοπτώσεις. Κατείσδυση υδάτων προερχόμενων από επιφανειακές απορροές, παρατηρείται κυρίως στα δυτικά της λεκάνης όπου ο ποταμός Κατωβιανίτης, εισέρχεται στην επιφάνεια της υδραυλικά ενεργής περιοχής του υδροφορέα, προερχόμενος από την επιφάνεια των αδιαπέρατων σχηματισμών Βιάννου και φλύσχη Πίνδου. Επίσης κατείσδυση επιφανειακών απορροών, παρατηρείται και στα ανατολικά και βορειοανατολικά της λεκάνης ενδιαφέροντος, όπου σύμφωνα και με το γεωλογικό χάρτη που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο, σημειώνεται είσοδος υδατορέματος προερχόμενο από την αδιαπέρατη επιφάνεια των σχηματισμών φλύσχη Πίνδου και το σχηματισμό των Φυλλιτών. Κατά την ανάπτυξη του μοντέλου προσομοίωσης στο 6^ο κεφάλαιο, περιγράφεται αναλυτικά η διαίρεση της συνολικής κατεισδυόμενης ποσότητας ύδατος – που προέρχεται από επιφανειακές απορροές – σε δύο ίσες ποσότητες. Στη συνέχεια οι ποσότητες αυτές, εισάγονται στον υδροφορέα ως πλευρικές τροφοδοσίες, στα σημεία που ήδη προαναφέρθηκαν, δηλαδή στα ανατολικά και βορειοανατολικά της λεκάνης (1^η), και στα δυτικά της λεκάνης (2^η) στο σημείο δηλαδή που εισέρχεται ο ποταμός Κατωβιανίτης στην υπό μελέτη λεκάνη.

Επιπλέον, ένας από τους κυριότερους παράγοντες τροφοδοσίας είναι οι πλευρικές εισροές από τα ανάντη της λεκάνης ενδιαφέροντος στα βορειοανατολικά της περιοχής, συνεισφέροντας συνολικά σε 172.474 m³ ύδατος ετησίως. Αυτός ο παράγοντας εστιάζεται κυρίως στις βορειοανατολικές περιοχές της λεκάνης των σχηματισμών ασβεστόλιθου Τρίπολης, ασβεστόλιθου Πίνδου και φλύσχης Πίνδου, οι οποίες φαίνεται να διαδραματίζουν αρκετά σημαντικό ρόλο στην επαναφόρτιση του συστήματος.

Τέλος, ένας ακόμα παράγοντας τροφοδοσίας του υπόγειου υδροφορέα της λεκάνης ενδιαφέροντος, αποτελούν οι υπάρχουσες πηγές στην περιοχή. Πιο συγκεκριμένα μέχρι το 1989 (με μετέπειτα εξαίρεση το 1996), εμφανιζόταν ένα μέτωπο πηγών στο όριο των αδρομερών σχηματισμών με τους λεπτόκοκκους σχηματισμούς, στην περίπτωση που δεν υπήρχαν σημαντικές αντλήσεις. Στα βορειοανατολικά, βρίσκονται εκτός των ορίων της λεκάνης, οι πηγές Λουτρακίου και Χαλασιά, οι οποίες εκφορτίζουν τον ασβεστολιθικό όγκο της ζώνης Πίνδου. Οι πηγές αυτές παίζουν σημαντικό ρόλο στο υδρογεωλογικό καθεστώς της υπό μελέτη περιοχής, επειδή εκφορτίζουν σημαντικό όγκο νερού που απορρέει, εισέρχεται στη λεκάνη απορροής και την εμπλουτίζει. Σύμφωνα με τη μελέτη των Παπαμαστοράκη κ.α., η μέση ετήσια παροχή των πηγών για τη χρονική περίοδο 1971 – 1990, υπολογίζεται σε 1.331.000 m³/year.

4. Υδρολογία επιφάνειας της περιοχής μελέτης – Κλιματολογία.

Το κλίμα της Βιάννου είναι εύκρατο του θαλάσσιου μεσογειακού τύπου, γεγονός που σημαίνει ότι οι βροχές περιορίζονται στο χειμώνα, ενώ το καλοκαίρι επικρατεί ξηρασία, δηλαδή ανομβρία με υψηλή θερμοκρασία. Η γεωμορφολογική της ποικιλία

συνεπάγεται ασφαλώς διαφορετικές κατά τόπους κλιματολογικές συνθήκες. Στα ορεινά οι βροχές είναι περισσότερες και σημειώνεται και εκτεταμένη χιονοκάλυψη, κάτι άγνωστο για την πεδινή – παραλιακή ζώνη που θεωρείται ως η πιο θερμή και ξηρή περιοχή της Ελλάδος, με το πιο ήπιο και υγιεινό κλίμα της Ευρώπης. Δεν είναι τυχαίο ότι αποτελεί τη μοναδική περιοχή της Κρήτης όπου καλλιεργούνται οπωροκηπευτικά κατά τη διάρκεια ολόκληρου του έτους. Παρά τις κατά τόπους θερμοκρασιακές διακυμάνσεις. Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται περίπου στους 20 °C, χωρίς σημαντικές μεταβολές. Τα βασικά κλιματολογικά δεδομένα της περιοχής παρουσιάζονται τα παρακάτω:

- Μέση ετήσια θερμοκρασία: 19,6 °C.
- Μέση σχετική υγρασία: 65 %.
- Μέση ετήσια ηλιοφάνεια: 265 ημέρες.

Μήνες	Μέση θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου	Μέση θερμοκρασία νερού σε βαθμούς Κελσίου	Ώρες λιακάδας	Βροχερές μέρες
Ιανουάριος	8,7 έως 15,6	16	3,4	12
Φεβρουάριος	8,8 έως 16,2	15	4,7	7
Μάρτιος	9,6 έως 17,1	16	5,7	8
Απρίλιος	11,6 έως 20,1	16	8,1	4
Μάιος	14,8 έως 23,7	19	10,2	2
Ιούνιος	19,1 έως 27,5	22	11,6	1
Ιούλιος	21,7 έως 29	24	12,7	0
Αύγουστος	21,7 έως 29,2	25	11,8	0
Σεπτέμβριος	19,1 έως 29,6	24	9,7	2
Οκτώβριος	16,2 έως 23,5	23	6,5	6
Νοέμβριος	13,5 έως 20,8	20	5,7	6
Δεκέμβριος	10,8 έως 17,4	17	4	10

Πίνακας 4.1 Βασικά κλιματολογικά δεδομένα της περιοχής ενδιαφέροντος.
(Δήμος Βιάννου, <http://www.dviannos.gr/>)

4.1. Ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις στη λεκάνη.

Σύμφωνα με τη συσχέτιση ιστορικών βροχομετρικών δεδομένων από γειτονικούς σταθμούς της περιοχής ενδιαφέροντος, ο μέσος ετήσιος όρος βροχόπτωσης, υπολογίζεται στα 874 mm. Ο υπολογισμός αυτός, αποτελεί ουσιαστικά την αναμιγμένη επιφανειακή βροχόπτωση στην υπό μελέτη λεκάνη. Επιπλέον ο υπολογισμός πραγματοποιήθηκε με

μηνιαίο βήμα για τη χρονική περίοδο 1977 – 1997 (Παπαμαστοράκης κ.α., 2002). Ο Πίνακας 4.1 μας πληροφορεί ακόμη για τον αριθμό των ημερών που παρουσιάζεται το φαινόμενο της βροχόπτωσης, σε κάθε μήνα. Κατά τους χειμερινούς μήνες, παρατηρείται αυξημένος αριθμός ημερών κατά τις οποίες παρουσιάζεται βροχή, γεγονός το οποίο δικαιολογείται από το υψόμετρο της περιοχής ενδιαφέροντος.

Συμπερασματικά από τα προαναφερθέντα, παρατηρείται σχετικά αυξημένη βροχόπτωση στην περιοχή ενδιαφέροντος κατά τη διάρκεια ολόκληρου του υδρολογικού έτους. Η βροχόπτωση αυτή τροφοδοτεί με επιπλέον ποσότητες ύδατος τον υδροφορέα μέσα από το φαινόμενο της απευθείας κατείσδυσης καθώς και της κατείσδυσης ύδατος λόγω δημιουργίας σημαντικών επιφανειακών απορροών.

Σχετικά με τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις στην περιοχή ενδιαφέροντος, με χρήση βροχομετρικών δεδομένων που συλλεχθήκαν από βάση δεδομένων που αφορά το αεροδρόμιο Ηρακλείου Κρήτης, παρατηρείται ότι τα βροχομετρικά δεδομένα τα οποία παρουσιάστηκαν προηγουμένως, συμπίπτουν σε ικανοποιητικό βαθμό με τα βροχομετρικά δεδομένα τα οποία σχετίζονται με την περιοχή αεροδρομίου του Ηρακλείου.

Έτος	Μέσο ετήσιο επιφανειακό ύψος βροχής (mm)
1975	525,53
1976	1137,68
1977	615,2
1978	424,64
1979	519,41
1980	475,75
1981	620,04
1982	498,09
1983	626,12
1984	868,43
1985	428,52

Πίνακας 4.1.1 Μέσο ετήσιο επιφανειακό ύψος βροχής σε mm στην περιοχή αεροδρομίου Ηρακλείου Κρήτης τη χρονική περίοδο 1975 – 1985.

(Μετεωρολογική ιστοσελίδα, <http://www.tutiempo.net/>)

Σύμφωνα με την παραπάνω πηγή πληροφοριών, παρατηρείται πως ο μέσος ετήσιος όρος βροχόπτωσης στην περιοχή του αεροδρομίου Ηρακλείου Κρήτης, είναι 612,67 mm για τη χρονική περίοδο 1975 – 1985. Η τιμή αυτή, προσεγγίζει ικανοποιητικά το μέσο ετήσιο όρο βροχόπτωσης στην περιοχή ενδιαφέροντος (874 mm), αν λάβουμε υπόψη μας και την απόσταση μεταξύ της περιοχής ενδιαφέροντος και του αεροδρομίου Ηρακλείου καθώς και το γεγονός πως η υπό μελέτη περιοχή βρίσκεται σε υψόμετρο

μεγαλύτερο των 450 m, δηλαδή αρκετά μεγαλύτερο της τοποθεσίας του αεροδρομίου Ηρακλείου.

Επίσης θα πρέπει να παρατηρηθεί το γεγονός πως η χρονική περίοδος 1975 – 1985, έστω και μικρότερη της χρονικής περιόδου 1977 – 1997, περιέχεται σε αυτήν και καλύπτει σημαντικά ικανοποιητικό ποσοτικά χρονικό διάστημα από την τελευταία.

4.2. Σχέση υψόμετρου – βροχόπτωσης στην ευρύτερη περιοχή.

Ο βασικότερος παράγοντας που επηρεάζει το ετήσιο ύψος βροχόπτωσης μιας περιοχής είναι το υψόμετρο της επιφάνειας του εδάφους. Άλλοι παράγοντες μικρότερης όμως σημασίας θεωρούνται η έκθεση του σταθμού στις αέριες μάζες, ο προσανατολισμός και η υψομετρική διαφορά μεταξύ του σταθμού και του υψηλότερου σημείου από το σταθμό σε ακτίνα 5 μιλίων κ.α.. Εντούτοις, θεωρήθηκε ότι οι παράγοντες αυτοί δεν επιδρούν στη διαμόρφωση του ετησίου ύψους βροχόπτωσης και μοναδικός παράγοντας αποτελεί το υψόμετρο (Τάντος Β., 2006).

Η μαθηματική σχέση που συνδέει τα δύο αυτά μεγέθη είναι μία εξίσωση πρώτου βαθμού, της μορφής $y = a * x + b$, με ανεξάρτητη μεταβλητή το απόλυτο υψόμετρο των σταθμών και εξαρτημένη μεταβλητή το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης. Η σχέση αυτή ονομάζεται εξίσωση της βροχοβαθμίδας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του βροχομετρικού χάρτη μιας περιοχής.

Στην περίπτωση της παρούσας διπλωματικής, τα δεδομένα για τον προσδιορισμό της παραπάνω σχέσης, είναι τα ακόλουθα:

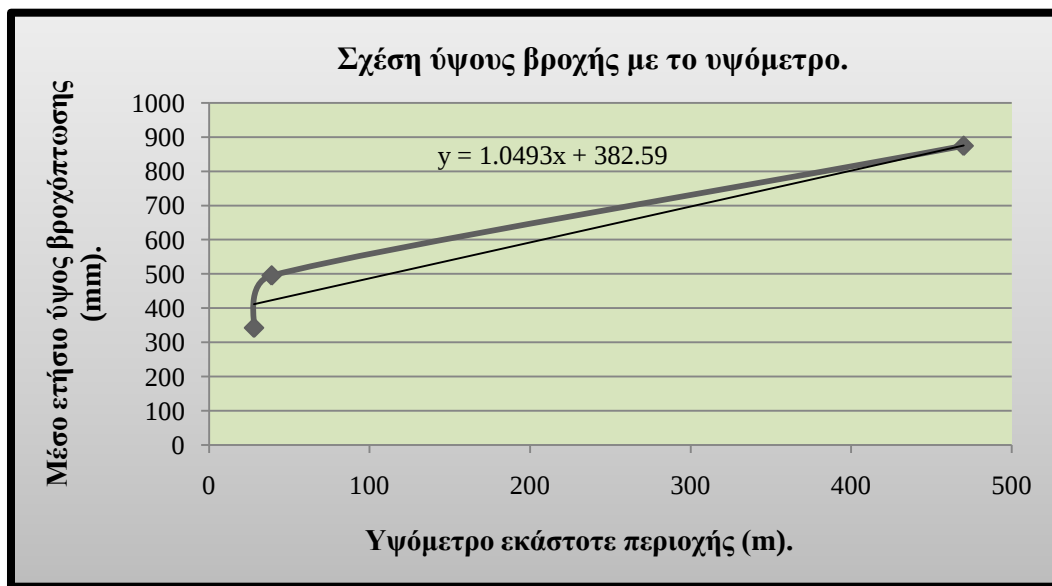
Περιοχές	Υψόμετρο (m)	Μέση ετήσια βροχόπτωση για τη χρονική περίοδο (1977 - 1997) (mm)
Λεκάνη Βιάννου	470	874
Αεροδρόμιο Ηρακλείου	39	495,12
Σητεία	28	342,15

Πίνακας 4.2.1 Σχέση υψόμετρου περιοχής με Μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης για τη χρονική περίοδο 1977 – 1997.

(Παπαμαστοράκης κ.α., 2002)

(Μετεωρολογική ιστοσελίδα, <http://www.tutempo.net/>)

Η επιλογή των περιοχών, πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη διαθεσιμότητα των δεδομένων σε αυτές, καθώς και τη μικρή μεταξύ τους απόσταση που χαρακτηρίζει τις θέσεις των παραπάνω περιοχών. Επομένως, η σχέση διαμορφώνεται ως εξής:



Εικόνα 4.2.1 Σχέση υψόμετρου περιοχής με Μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης για τη χρονική περίοδο 1977 – 1997.

Από την εφαρμογή της μεθόδου στην περιοχή έρευνας προέκυψε ότι η βροχοβαθμίδα στην περιοχή ενδιαφέροντος (Εικόνα 4.2.1) είναι μία εξίσωση της μορφής: $y = (1,0493) \cdot x + 382,59$ όπου x είναι το υψόμετρο (m) και y το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης (mm).

Από την εξίσωση αυτή φαίνεται ότι το ύψος βροχόπτωσης αυξάνεται, περίπου κατά 104,9 mm ανά 100 m υψομετρικής διαφοράς ενώ το Μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης στο επίπεδο της θάλασσας είναι 382,6 mm.

4.3. Θερμοκρασία στην περιοχή.

Σχετικά με τη θερμοκρασία στην περιοχή ενδιαφέροντος, παρατηρούμε σύμφωνα με τον Πίνακα 4.1 ότι δεν υπάρχουν σημαντικές αυξομειώσεις, κατά τη διάρκεια του έτους. Η ελάχιστη θερμοκρασία που παρατηρείται σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα, είναι 8,7 °C και σημειώνεται το μήνα Ιανουάριο, ενώ η μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρείται στη διάρκεια ολόκληρου του έτους, είναι 29,6 °C και σημειώνεται το μήνα Σεπτέμβριο. Η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι 19,6 °C ενώ οι θερμοκρασίες οι οποίες σημειώνονται σε κάθε μήνα κατά τη διάρκεια ολόκληρου του έτους, παρουσιάζουν ένα φυσιολογικό εύρος τιμών για μία ημι – ορεινή περιοχή όπως είναι η λεκάνη της Βιάννου.

Επιπλέον παρατηρείται μία φυσιολογική μείωση της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας κατά τους χειμερινούς μήνες, καθώς και μία φυσιολογική αύξηση της κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών. Τα δεδομένα τα οποία συλλέχθηκαν για την περιοχή αεροδρομίου Ηρακλείου σχετικά με τη μέση ετήσια θερμοκρασία, επιβεβαιώνουν τις τιμές θερμοκρασιών που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1, αν

λάβουμε υπόψη μας και το υψηλό υψόμετρο της περιοχής ενδιαφέροντος καθώς και το σχετικά έντονο φαινόμενο της βροχόπτωσης στην περιοχή. Επιπλέον παράγοντας για την παρατήρηση σχετικά χαμηλών θερμοκρασιών αποτελεί και η αυξημένη ατμοσφαιρική υγρασία η οποία αιτιολογείται λόγω των προαναφερθέντων. Στο παράρτημα της παρούσας μελέτης παρατίθεται πίνακας των μέσων ετήσιων θερμοκρασιών που παρατηρήθηκαν στην περιοχή του αεροδρομίου Ηρακλείου Κρήτης για τη χρονική περίοδο 1985 έως 1995.

4.4. Φαινόμενο εξάτμισης στην περιοχή.

Οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις ακολουθούνται από απευθείας κατείσδυση ύδατος στον υδροφορέα της περιοχής, καθώς και από το φαινόμενο της εξάτμισης. Επιπλέον, δημιουργούνται επιφανειακές απορροές στη λεκάνη ενδιαφέροντος, οι οποίες με τη σειρά τους προκαλούν τη δημιουργία χειμάρρων και την περαιτέρω κατείσδυση ύδατος στον υδροφορέα. Στην περίπτωση της λεκάνης Βιάννου, θεωρήθηκε ότι οι επιφανειακές απορροές οι οποίες προέρχονται από τα βόρεια και βορειοανατολικά, κυρίως δηλαδή από τις ενότητες Τρίπολης και Πίνδου, κατεισδύουν στο σύνολο τους στον υπόγειο υδροφορέα της λεκάνης ενδιαφέροντος.

Πιο συγκεκριμένα όσον αφορά το φαινόμενο της εξάτμισης, παρατηρείται απευθείας κατείσδυση ύδατος που ακολουθεί τη βροχόπτωση σε ποσοστό 10 %. Συνεπώς, η απευθείας κατείσδυση των βροχοπτώσεων υπολογίζεται στα 87,4 mm ετησίως ή 227.888 m³/year. Συμπερασματικά, το υπόλοιπο ποσοστό ύδατος το οποίο προέρχεται από το φαινόμενο της βροχόπτωσης, είτε διαμορφώνει μικρές επιφανειακές απορροές οι οποίες σταδιακά κατεισδύουν με τη σειρά τους στον υπόγειο υδροφορέα, είτε εξατμίζεται επιφανειακά από τη λεκάνη ενδιαφέροντος.

Παρατηρούμε λοιπόν πως το φαινόμενο της εξάτμισης, απομακρύνει με τη σειρά του σημαντικό ποσοστό ύδατος από την επιφάνεια της λεκάνης. Το ποσοστό αυτό υπολογίζεται μικρότερο από το 90 % της συνολικής ποσότητας ύδατος που καταλήγει στην επιφάνεια της λεκάνης λόγω των βροχοπτώσεων και διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη συνολική μείωση του εισερχόμενου ύδατος στον υπόγειο υδροφορέα (Παπαμαστοράκης κ.α.,2002).

4.5. Ηλιακή ακτινοβολία.

Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί τον σπουδαιότερο παράγοντα διαμόρφωσης του κλίματος της Γης, εξαιτίας της άνισης κατανομής της στην επιφάνεια αυτής. Είναι παρούσα σε όλες τις φυσικές και χημικές διεργασίες, καθώς και των φαινομένων που συμβαίνουν στη φύση.

Η άνιση θέρμανση της Γης συντελεί στη δημιουργία των ανέμων και στην κυκλοφορία της ατμόσφαιρας. Επιπλέον συντελεί στην εξάτμιση του νερού και το σχηματισμό νεφών, βροχής, καθώς και ποταμών. Επίσης διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη φωτοσύνθεση των φυτών αλλά και στη δημιουργία αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων.

Σχετικά με τη λεκάνη ενδιαφέροντος, η ηλιακή ακτινοβολία, προκαλεί ουσιαστικά το φαινόμενο της εξάτμισης όπως αναφέρθηκε παραπάνω, συντελεί στην ανάπτυξη ανέμων στην υπό μελέτη περιοχή και συμμετέχει καταλυτικά στην ανάπτυξη των φωτοσυνθετικών οργανισμών είτε αυτοί ανήκουν σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες (ελεγχόμενες αγροκηπευτικές καλλιέργειες), είτε ανήκουν στην υπόλοιπη χλωρίδα του εδάφους της υπό μελέτη λεκάνης. Επίσης λόγω της τοποθεσίας στην οποία βρίσκεται η περιοχή μελέτης (νότια Νομού Ηρακλείου Κρήτης), σημειώνεται ότι η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στην ατμόσφαιρα με αρκετά μικρότερη κλίση (σχεδόν κάθετα), συγκριτικά με τις υπόλοιπες περιοχές του Ελλαδικού καθώς και Ευρωπαϊκού χώρου, γεγονός το οποίο συντελεί θετικά στο φαινόμενο της εξάτμισης αλλά και στη δημιουργία ανέμων στην περιοχή. Συνεπώς παρατηρείται ακόμα μεγαλύτερη εξάτμιση επιφανειακού ύδατος στην εν λόγω περιοχή, συγκριτικά με αρκετές υπόλοιπες περιοχές της Κρήτης καθώς και της υπόλοιπης Ελλάδας.

Συμπερασματικά η ηλιακή ακτινοβολία διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη δημιουργία και εξέλιξη βασικών φυσικών φαινομένων στη λεκάνη, τα οποία επηρεάζουν αρκετά το υδατικό ισοζύγιο που χαρακτηρίζει τον υπόγειο υδροφόρα, της λεκάνης ενδιαφέροντος.

4.6. Ηλιοφάνεια.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ηλιακή ακτινοβολία κατέχει σημαντικότερο ρόλο στη διαμόρφωση των φυσικών και χημικών φαινομένων που παρατηρούνται στη λεκάνη απορροής. Ουσιαστικά δημιουργεί και εξελίσσει φαινόμενα όπως της βροχόπτωσης, των ανέμων στην περιοχή, της εξάτμισης κ.α.. Η δημιουργία και περαιτέρω διαμόρφωση των φαινομένων αυτών, εξαρτάται όμως κι από το ποσοστό ηλιακής ακτινοβολίας το οποίο εισέρχεται στην ατμόσφαιρα και καταφθάνει στην επιφάνεια του εδάφους.

Το ποσοστό ηλιακής ακτινοβολίας το οποίο καταλήγει στην επιφάνεια της λεκάνης ενδιαφέροντος, εξαρτάται κατά συνέπεια από το φαινόμενο της ηλιοφάνειας, δηλαδή τον όγκο των νεφών που εξαπλώνονται πάνω από την επιφάνεια της λεκάνης απορροής και στη συνέχεια το ποσοστό ηλιακής ακτινοβολίας το οποίο καταφέρνει να φθάσει έως το επιφανειακό έδαφος της λεκάνης.

Από τον Πίνακα 4.1, παρατηρούμε ότι κατά τη διάρκεια του έτους, σημειώνονται αρκετές μέρες σημαντικής ηλιοφάνειας ιδίως κατά τους θερινούς μήνες. Πιο συγκεκριμένα, τους θερινούς μήνες η ηλιοφάνεια είναι αρκετά έντονη και κατά τον Ιούλιο, παρατηρείται η μέγιστη ηλιοφάνεια για ολόκληρο το έτος, 12,7 ώρες λιανικά

ημερησίως, δηλαδή ηλιοφάνεια σχεδόν ολόκληρη τη μέρα. Κατά τους χειμερινούς μήνες, παρατηρείται και πάλι σημαντική ηλιοφάνεια, ενώ η ελάχιστη που σημειώνεται είναι 3,4 ώρες λιακάδας ημερησίως το μήνα Ιανουάριο, δηλαδή σχεδόν το 1/3 της διάρκειας της ημέρας.

Η μέση τιμή είναι 7,84 ώρες λιακάδας ημερησίως για ολόκληρο το έτος, γεγονός το οποίο υποδηλώνει τη σημαντικότητα της ηλιοφάνειας και κατ'επέκταση της ηλιακής ακτινοβολίας στη διαμόρφωση των φυσικοχημικών φαινομένων της περιοχής ενδιαφέροντος. Λόγω της τιμής αυτής, κατανοούμε το υψηλό ποσοστό ηλιοφάνειας στην περιοχή, καθώς επίσης αιτιολογείται το υψηλό ποσοστό ύδατος που εξατμίζεται από την επιφάνεια του εδάφους της λεκάνης και μεταβάλλει σημαντικά το υδρολογικό ισοζύγιο το οποίο χαρακτηρίζει τη λεκάνη. Συνεπώς λόγω της έντονης λιακάδας σε ολόκληρη τη διάρκεια του έτους, δικαιολογείται το ποσοστό κατείσδυσης των υδάτων που προέρχονται από τη βροχόπτωση (10 %) και στη συνέχεια το ποσοστό ύδατος που εξατμίζεται από τη λεκάνη το οποίο είναι λίγο μικρότερο από το 90 % του συνολικού ύδατος που εισέρχεται στη λεκάνη απορροής, λόγω των βροχοπτώσεων.

4.7. Άνεμοι.

Όπως προαναφέρθηκε, οι άνεμοι που αναπτύσσονται στην περιοχή, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο, στη διαμόρφωση του κλίματος και κατ'επέκταση στο υδρολογικό ισοζύγιο της λεκάνης απορροής. Συγκεκριμένα οι άνεμοι προκαλούν κατά τόπους νεφώσεις ή απομακρύνουν νεφώσεις από μία περιοχή, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ή όχι, βροχοπτώσεων.

Σχετικά με την περιοχή ενδιαφέροντος, δεν κατέσται δυνατό να συλλεχθούν μετεωρολογικά δεδομένα που αφορούν τους ανέμους. Σύμφωνα με τη γεωγραφική θέση της περιοχής μελέτης αλλά και το υψόμετρο της, δύναται να υποτεθεί ότι οι άνεμοι που πνέουν στην επιφάνεια της λεκάνης, θα είναι μέτριας έντασης κατά τους θερινούς μήνες και λίγο μεγαλύτερης κατά τους χειμερινούς μήνες.

Εφόσον δεν απέβη δυνατή η συλλογή στοιχείων για την ένταση και κατεύθυνση των ανέμων, στην εν λόγω περιοχή, γίνεται μία ενδεικτική αναφορά της έντασης των ανέμων που επικρατούν στο αεροδρόμιο Ηρακλείου Κρήτης. Η μέση τιμή των ετήσιων ταχυτήτων ανέμου στην περιοχή αεροδρομίου Ηρακλείου για τη χρονική περίοδο 1985 – 1995, είναι 16,1 km/hour (Μετεωρολογική ιστοσελίδα, <http://www.tutiempo.net/>), γεγονός το οποίο υποδηλώνει πως στη συγκεκριμένη περιοχή, δεν αναπτύσσονται ιδιαίτερα ισχυροί άνεμοι. Αν λάβουμε υπόψη μας την απόσταση μεταξύ του αεροδρομίου Ηρακλείου Κρήτης και της περιοχής που βρίσκεται υπό μελέτη καθώς και την υψομετρική τους διαφορά – η περιοχή ενδιαφέροντος βρίσκεται σε υψόμετρο τουλάχιστον 450 μέτρων ενώ το αεροδρόμιο βρίσκεται σε αρκετά χαμηλότερο υψόμετρο

– συμπεραίνουμε ότι οι άνεμοι που θα αναπτύσσονται στην υπό μελέτη περιοχή θα είναι ισχυρότεροι συγκριτικά με την περιοχή αεροδρομίου.

Τέλος δεν είναι δυνατή μία ακριβή εκτίμηση για την ταχύτητα των ανέμων που αναπτύσσονται στην περιοχή ενδιαφέροντος, αλλά μπορούμε να θεωρήσουμε μία ικανοποιητική προσέγγιση των 20 – 30 Km/hour, που μεταφράζονται σε 3 έως 5 Beaufort. Επιπλέον στο παράρτημα παρατίθεται πίνακας των μέσων ετήσιων ταχυτήτων ανέμου που παρατηρήθηκαν στην περιοχή του αεροδρομίου Ηρακλείου Κρήτης για τη χρονική περίοδο 1985 έως 1995.

4.8. Ατμοσφαιρική υγρασία.

Σχετικά με τις υγρομετρικές παραμέτρους, η περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε υδρατμούς μπορεί να εκφραστεί με διάφορους τρόπους. Υπάρχουν δυο βασικές ομάδες υγρομετρικών παραμέτρων. Εκείνες οι οποίες εξαρτώνται μόνο από το ποσό των υδρατμών στον αέρα και είναι γνωστές σαν απόλυτης μέτρησης και εκείνες που εξαρτώνται όχι μόνο από το ποσό των υδρατμών, αλλά επίσης και από τη θερμοκρασία του αέρα. Οι τελευταίες είναι γνωστές σαν σχετικής μετρήσεις (Τάντος Β., 2006).

Την πιο κοινή έκφραση της ατμοσφαιρικής υγρασίας αποτελεί η σχετική υγρασία του αέρα. Αυτή χαρακτηρίζει το λόγο των υδρατμών που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα σε μια δεδομένη τιμή θερμοκρασίας και πίεσης σε σχέση με την μέγιστη ποσότητα των υδρατμών την οποία ο αέρας είναι ικανός να κρατήσει στις ίδιες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας.

Στην περίπτωση της υπό εξέταση περιοχής, παρατηρούμε από τα βασικά δεδομένα του Πίνακα 4.1, ότι η ατμοσφαιρική υγρασία λαμβάνει σχετικά υψηλές τιμές, κάτι το οποίο είναι απόλυτα φυσιολογικό με δεδομένη τη μικρή απόσταση της λεκάνης ενδιαφέροντος από την ακτογραμμή αλλά και το σχετικά υψηλό υψόμετρο της λεκάνης. Το παραπάνω συμπέρασμα, όπως προαναφέρθηκε, εξάγεται από τις τιμές μέσης θερμοκρασίας νερού στον Πίνακα 4.1 καθώς και από την πληροφορία ότι η σχετική υγρασία στην περιοχή φτάνει σε ποσοστό 65 %.

Επιπλέον πληροφορία σχετικά με την ατμοσφαιρική υγρασία, προαναφέρεται στη εισαγωγή του κεφαλαίου, καθώς σημειώνεται ότι το χειμώνα παρατηρούνται έντονες βροχοπτώσεις κατά τη διάρκεια ολόκληρου του έτους, γεγονός το οποίο συντελεί στην αύξηση της ατμοσφαιρικής υγρασίας. Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί ότι σύμφωνα με τις βιβλιογραφικές πηγές, η ατμοσφαιρική υγρασία κατά τους θερινούς μήνες, δε σημειώνει αρκετά υψηλές τιμές στην περιοχή ενδιαφέροντος (Δήμος Βιάννου, <http://www.dviannos.gr/>).

4.9. Επιφανειακή απορροή.

Το φαινόμενο της επιφανειακής απορροής αποτελεί ουσιαστικά την κίνηση του νερού της βροχής πάνω στην επιφάνεια της γης από υψηλότερα σημεία προς χαμηλότερα εξαιτίας της βαρύτητας.

Πιο αναλυτικά μέρος των κατακρημνισμάτων που πέφτουν πάνω στο έδαφος, κυλούν επιφανειακά προς τα ποτάμια, σχηματίζοντας την επιφανειακή απορροή. Στην πραγματικότητα τα πράγματα είναι πιο περίπλοκα, καθώς τα ποτάμια κερδίζουν και χάνουν νερό μέσω του εδάφους.

Συνήθως, τμήμα της βροχής που πέφτει, ποτίζει το έδαφος, αλλά όταν το έδαφος είναι κορεσμένο ή αδιαπέρατο, το νερό αρχίζει να ρέει προς τα χαμηλά με τη μορφή απορροής. Το νερό στην πορεία του προς τα ποτάμια, κυλά μέσω αυλακιών στο έδαφος (Τάντος Β., 2006).

Οι φυλλίτες και ο φλύσχης της ενότητας Πίνδου που βρίσκονται ανάντη της λεκάνης, εμφανίζουν επιφανειακή απορροή η οποία τροφοδοτεί τα υδατορέματα της λεκάνης. Έχει εκτιμηθεί ότι το 20% του ετήσιου όγκου βροχόπτωσης, στους σχηματισμούς αυτούς, δημιουργεί επιφανειακές απορροές, εκ των οποίων το 20% δύναται να τροφοδοτήσει τον υδροφορέα (Παπαμαστοράκης κ.α., 2002).

Πάνω στο νεογενή σχηματισμό Βιάννου που είναι σχετικά αδιαπέρατος ρέει ο Κατωβιανίτης. Κατά την πορεία του όμως προς τα κατάντη της λεκάνης εισέρχεται στην οριοθετημένη επιφάνεια του υδραυλικά ενεργού υπόγειου τμήματος του υδροφορέα, γεγονός το οποίο συνδράμει στην τροφοδοσία του υδροφόρου ορίζοντα με κατεισδύμενο νερό λόγω της επιφανειακής απορροής. Όπως προαναφέρθηκε, η τροφοδοσία αυτή, εισάγεται στο μοντέλο προσομοίωσης ως πλευρική τροφοδοσία, ενώ για την εισαγωγή της χρησιμοποιήθηκε η υπορουτίνα – εντολή του μοντέλου, G.H.B. (Groundwater Head Boundary). Η ίδια εντολή χρησιμοποιήθηκε και για την εισαγωγή των πλευρικών τροφοδοσιών, που παρατηρούνται στα βορειοανατολικά όρια της λεκάνης (ανάντη), τα οποία αντιστοιχούν στην ζώνη των Αλλουβιακών αδρομερών αποθέσεων.

Επιπλέον από παρατηρήσεις πεδίου, έχει εκτιμηθεί ότι το 44,5 % της μέσης ετήσιας απορροής των πηγών κατεισδύει στη λεκάνη. Επίσης θεωρούμε ότι υπάρχει 80% κατεισδυση τους χειμερινούς μήνες, ενώ η παραπάνω εκτιμήσεις προέκυψαν από παρατηρήσεις της επιφανειακής απορροής των χειμάρρων οι οποίοι τροφοδοτούνται αποκλειστικά από τις πηγές Λουτρακίου (Παπαμαστοράκης κ.α., 2002). Οι πηγές αυτές απορρέουν πάνω στο σχηματισμό του φλύσχη στα ανάντη της λεκάνης, σε μεγάλες τοπογραφικές κλίσεις και έπειτα εισέρχονται στη λεκάνη. Τέλος δεν παρατηρείται επιφανειακή απορροή στην έξοδο της λεκάνης.

5. Υδρολογικό ισοζύγιο του υδροφορέα.

5.1. Εξατμισοδιαπνοή.

Με τον όρο εξατμισοδιαπνοή (evapotranspiration) ET, εννοείται το σύνολο του ύδατος το οποίο μετατρέπεται από την υγρή φάση στην αέρια φάση και περιλαμβάνει την εξάτμιση μέσω υδάτινων επιφανειών, την εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους καθώς και τη διαπνοή των φυτών.

Όπως έχει προαναφερθεί, η εξατμισοδιαπνοή, υπολογίζεται μικρότερη σε ποσότητα του 90 % του συνολικού ύδατος το οποίο καταλήγει στη λεκάνη απορροής και προέρχεται από τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις. Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής, δηλαδή του νερού που διαφεύγει από την επιφανειακή εξάτμιση καθώς και από τη διαπνοή των φυτών, χρησιμοποιούνται διάφορα μοντέλα τα οποία διακρίνονται σε αναλυτικές και εμπειρικές μεθόδους (Τμήμα Γεωλογίας Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, Βασικές Έννοιες Υδρογεωλογίας – Ορολογία, <http://www.geo.auth.gr/>).

Οι αναλυτικές μέθοδοι είναι η μέθοδος ισοζυγίου νερού σε λεκάνη απορροής και η μέθοδος με χρήση λυσίμετρου. Οι εμπειρικές μέθοδοι διακρίνονται σε μεθόδους υπολογισμού της δυναμικής ή αλλιώς δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και σε μεθόδους υπολογισμού της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής.

5.2. Δυναμική ή δυνητική εξατμισοδιαπνοή βάση υπολογισμών.

Με τον όρο δυνητική εξατμισοδιαπνοή ET_p , εννοείται το σύνολο του νερού το οποίο μετατρέπεται από την υγρή φάση στην αέρια αν υπήρχε στο έδαφος ικανοποιητική υγρασία για την κανονική ανάπτυξη των φυτών.

Τα κυριότερα μοντέλα – εμπειρικές μέθοδοι – τα οποία χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής είναι των: Thornthwaite και Blaney – Criddle.

Ο Thornthwaite, για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής πρότεινε μια εμπειρική σχέση μεταξύ της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής και της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας του αέρα (Τάντος Β., 2006). Η σχέση του Thornthwaite παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε υγρές περιοχές με επαρκή βλάστηση.

Η σχέση αυτή έχει την ακόλουθη εκθετική μορφή:

$$ET_p = 1,6 \cdot (10 T / I)^a$$

Σχέση (5.2.1)

Στην περίπτωση των Blaney – Criddle , η μηνιαία εξατμισοδιαπνοή ET_p , δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$ET_p = k * f \quad \text{Σχέση (5.2.2)}$$

Όπου:

k: Μηνιαίος φυτικός συντελεστής – για συγκεκριμένη καλλιέργεια – (δίνεται σε πίνακες).

$$f = [(0,457) * t + (8,128)] * P \quad \text{Σχέση (5.2.3)}$$

t: Μέση μηνιαία θερμοκρασία.

P: Μηνιαίο ποσοστό ωρών ημέρας του έτους το οποίο δίδεται από πίνακες.

Στην περίπτωση χρήσης της σχέσης του Thornthwaite , ισχύουν τα παρακάτω:

$$ET_p = 1,6 * (10 T / I)^\alpha$$

ET_p : Μέση μηνιαία τιμή της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής σε mm.

T: Μέση μηνιαία θερμοκρασία σε $^{\circ}C$ του αέρα.

$$\alpha = (675) * 10^{-9} * I^3 - (7,71) * 10^{-7} * I^2 + (0,01792) * I + (0,49239) \quad \text{Σχέση (5.2.4)}$$

I: Αποτελεί τον ετήσιο θερμικό δείκτη (annual heat index) και δίνεται από το άθροισμα των 12 μηνιαίων θερμικών δεικτών , δηλαδή:

$$I = \sum [(T / 5) * (1,514)] \quad \text{Σχέση (5.2.5)}$$

Για τον υπολογισμό της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής γνωρίζουμε ότι ισχύει:

Μήνες	Θερμοκρασία από	έως	Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία σε °C
Ιανουάριος	8,7	15,6	12,15
Φεβρουάριος	8,8	16,2	12,5
Μάρτιος	9,6	17,1	13,35
Απρίλιος	11,6	20,1	15,85
Μάιος	14,8	23,7	19,25
Ιούνιος	19,1	27,5	23,3
Ιούλιος	21,7	29	25,35
Αύγουστος	21,7	29,2	25,45
Σεπτέμβριος	19,1	29,6	24,35
Οκτώβριος	16,2	23,5	19,85
Νοέμβριος	13,5	20,8	17,15
Δεκέμβριος	10,8	17,4	14,1

Πίνακας 5.2.1 Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες σε °C στη λεκάνη ενδιαφέροντος.

Συμπερασματικά θα ισχύει:
 $I = 67,4184$ (Ετήσιος θερμικός δείκτης).
 $\alpha = 1,9038$ (Εκθέτης στην εκθετική συνάρτηση).

Άρα θα ισχύει ο παρακάτω πίνακας:

Μήνες	Από	Έως	Μέσο μηνιαίο T (°C)	I (i)	ET _p (i) (mm)
Ιανουάριος	8,7	15,6	12,15	3,6790	4,9104
Φεβρουάριος	8,8	16,2	12,5	3,7850	5,1833
Μάρτιος	9,6	17,1	13,35	4,0423	5,8749
Απρίλιος	11,6	20,1	15,85	4,7993	8,1457
Μάιος	14,8	23,7	19,25	5,8289	11,7929
Ιούνιος	19,1	27,5	23,3	7,0552	16,9628
Ιούλιος	21,7	29,0	25,35	7,6759	19,9169
Αύγουστος	21,7	29,2	25,45	7,7062	20,0667
Σεπτέμβριος	19,1	29,6	24,35	7,3731	18,4478
Οκτώβριος	16,2	23,5	19,85	6,0105	12,5025
Νοέμβριος	13,5	20,8	17,15	5,1930	9,4647
Δεκέμβριος	10,8	17,4	14,1	4,2694	6,5192

Πίνακας 5.2.2 Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες σε °C, μηνιαίες τιμές δυναμικής εξατμισοδιαπνοής (ET_p) σε (mm) στη λεκάνη ενδιαφέροντος.

Άρα τελικά η ετήσια δυναμική – δυναμική εξατμισοδιαπνοή σύμφωνα με τον Πίνακα 5.2.2, θα είναι:

$$ET_p (\text{ετήσιο}) = 139,788 \text{ mm} \approx 140 \text{ mm}$$

5.3. Πραγματική εξατμισοδιαπνοή βάση υπολογισμών.

Οι εμπειρικές μέθοδοι που αφορούν τον υπολογισμό της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής είναι η μέθοδος Turc καθώς και η μέθοδος Coutagne.

Σύμφωνα με την πρώτη μέθοδο (Turc), η πραγματική εξατμισοδιαπνοή δίνεται από τη σχέση:

$$ET = P / [(0,9) + (P / L)^2]^{1/2} \quad \text{Σχέση (5.3.1)}$$

Στην περίπτωση υπολογισμού της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής με τη μέθοδο Turc, ισχύουν τα παρακάτω:

P: Μέσο ετήσιο ύψος βροχής σε mm.

$$L = 300 + (25 * T) + (0,05) * T^3 \quad \text{Σχέση (5.3.2)}$$

T: Μέση ετήσια θερμοκρασία σε ($^{\circ}\text{C}$).

Ενώ στη μέθοδο Coutagne, η σχέση που χρησιμοποιείται είναι η παρακάτω :

$$ET = P * (1 - (P / l)) \quad \text{Σχέση (5.3.3)}$$

Όπου:

$$l = 800 + (140 * T) \quad \text{Σχέση (5.3.4)}$$

Σύμφωνα λοιπόν με τη μέθοδο Turc θα ισχύει:

$$T = 18,55 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$L = 1083,2243$$

$$P = 874 \text{ mm}$$

Άρα τελικά, η πραγματική εξατμισοδιαπνοή σύμφωνα με τον Turc, υπολογίζεται για τη λεκάνη ενδιαφέροντος σε: $ET = 701,7825 \text{ mm}$

Η τιμή 701,7825 mm πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, αποτελεί το 80,3 % του συνολικού ετήσιου ύψους βροχόπτωσης στην περιοχή, στα 874 mm. Το ποσοστό κατείσδυσης των συνολικών ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στον υδροφορέα, επιλέχθηκε στα 10 %, επομένως το ποσοστό στα 9,7 % που υπολείπεται εφόσον αφαιρέσουμε το ποσοστό της εξατμισοδιαπνοής στα 80,3 % και το ποσοστό της κατείσδυσης στα 10 %, θεωρητικά αντιστοιχεί σε επιφανειακές απορροές. Σύμφωνα με τη μελέτη των Παπαμαστοράκη κ.α. το ποσοστό κατείσδυσης επιλέχθηκε 10 % ενώ όπως προαναφέρθηκε στην παρούσα εργασία το εν λόγω ποσοστό παρέμεινε ίδιο. Βάση λοιπόν των άνωθεν η επιλογή ποσοστού κατείσδυσης στα 10 % δικαιολογείται ικανοποιητικά, εφόσον η υπολογισμένη ποσότητα ύδατος που αντιστοιχεί στην εξατμισοδιαπνοή καταλαμβάνει ποσοστό 80,3 % (< 90 %) ενώ ταυτόχρονα η υπολειπόμενη ποσότητα ύδατος που αντιστοιχεί σε επιφανειακές απορροές καταλαμβάνει 9,7 % της συνολικής ετήσιας βροχόπτωσης στην περιοχή, ποσοστό το οποίο αιτιολογεί πλήρως τις αρκετά μικρές ή μηδενικές ποσότητες ύδατος επιφανειακών απορροών που παρατηρούνται στα κατάντη της λεκάνης μελέτης σύμφωνα με τους Παπαμαστοράκη κ.α..

Βάση λοιπόν των παραπάνω το ποσοστό που υπολείπεται της κατείσδυσης υδάτων και το οποίο προσδιορίστηκε στα 90 %, περιλαμβάνει την πραγματική εξατμισοδιαπνοή που παρατηρείται στην περιοχή, με αποτέλεσμα να μην είναι απαραίτητη η εισαγωγή τιμής σχετικά με την εξατμισοδιαπνοή στο περιβάλλον εργασίας του μοντέλου προσομοίωσης. Ο κώδικας Visual Modflow παρέχει τη δυνατότητα εισαγωγής τιμής της εξατμισοδιαπνοής βάση της υπορουτίνας Evapotrans. η οποία όμως δε χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα προσομοίωση.

5.4. Συντελεστής επιφανειακής απορροής.

Η επιφανειακή απορροή αποτελεί το τμήμα των βροχοπτώσεων που εμφανίζεται στα επιφανειακά ρεύματα είτε είναι παροδικού είτε μόνιμου χαρακτήρα. Η άμεση απορροή είναι εκείνη που καταγράφεται σε ρεύματα αμέσως μετά τη βροχόπτωση και αποτελεί συνάρτηση τόσο της επιφανειακής όσο και της υπόγειας απορροής.

Η βασική απορροή συνίσταται από τη ροή των ρευμάτων στα διαστήματα μεταξύ των βροχοπτώσεων και αποτελείται κυρίως από την υπόγεια απορροή.

Τέλος, ο **συντελεστής απορροής**, αποτελεί το λόγο της ποσότητας του νερού το οποίο εκρέει από το σημείο εκβολής μίας λεκάνης προς το ύψος της βροχής που έπεσε στη λεκάνη, σε μία δεδομένη χρονική περίοδο.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή απορροής γνωρίζουμε ότι η μέση Ετήσια Παροχή στο σημείο εκβολής της λεκάνης, λόγω βροχοπτώσεων, είναι ίση με:

$$Q = 227.888 \text{ m}^3 / \text{year} = 0,0072 \text{ m}^3 / \text{sec}$$

Η λεκάνη ενδιαφέροντος σύμφωνα με την παρούσα προσομοίωση δίνει λίγο μεγαλύτερη έκταση άρα και λίγο μεγαλύτερο όγκο κατεισδύμενου νερού συγκριτικά με τις τιμές της μελέτης των Παπαμαστοράκη κ.α.. Ωστόσο κρατήθηκε η τιμή της βροχόπτωσης και το ποσοστό κατείσδυσης της, από την προαναφερθείσα μελέτη προκειμένου να μην επιβαρυνθεί με πρόσθετο νερό ο υδροφορέας και κατά συνέπεια προκαλέσουμε αναξιόπιστη αύξηση της εισερχόμενης ποσότητας ύδατος στο υδρολογικό ισοζύγιο της λεκάνης.

Το ύψος τη βροχής ετησίως φτάνει τα:

$$i = 874 \text{ mm}$$

Η έκταση της λεκάνης απορροής, όπου βρίσκεται και ο υδραυλικά ενεργός υδροφορέας είναι:

$$A = 2.852.223 \text{ m}^2$$

Το ύψος παροχής ανά μονάδα επιφάνειας είναι:

$$Q / A = [(227.888) / (2.852.223)] \text{ m} / \text{year} = 0,07989 \text{ m} / \text{year} \approx 79,9 \text{ mm} / \text{year}$$

Άρα ο συντελεστής απορροής C , θα υπολογίζεται:

$$C = 79,9 \text{ mm} / 874 \text{ mm} \rightarrow C = 0,09141 \approx 0,1$$

5.5. Κατείσδυση.

Η κατείσδυση αποτελεί το ποσοστό των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που διαπερνάει την επιφάνεια του εδάφους φτάνοντας στα υπόγεια υδροφόρα στρώματα. Ο ρυθμός αναπλήρωσης των υπόγειων αποθεμάτων νερού μέσω κατείσδυσης αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο του υδρολογικού κύκλου και καθορίζεται από την διαπερατότητα του εδάφους και του υπεδάφους, τη λιθολογική τους σύσταση καθώς επίσης και από την κλίση του εδάφους, τη βλάστηση, το υψόμετρο, την κατανομή και ένταση των κατακρημνισμάτων κ.α. (Καρατζάς, 2009).

Στην περίπτωση της λεκάνης ενδιαφέροντος γνωρίζουμε ότι η μέση ετήσια βροχόπτωση, φθάνει τα 874 mm ενώ η κατείσδυση έχει ποσοστό επί αυτής 10 %,

σύμφωνα με τη μελέτη των Παπαμαστοράκη κ.α., (2002). Συμπερασματικά η συνολική κατείσδυση, ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που θα παρατηρείται στον υπόγειο υδροφορέα θα είναι 87,4 mm ετησίως. Θα πρέπει να σημειωθεί ακόμη ότι για την περιοχή δεν υπάρχουν πρωτογενή στοιχεία για τον υπολογισμό τιμών κατείσδυσης, ενώ ο Παρίτσης δημιούργησε συνθετικές χρονοσειρές εξατμισοδιαπνοής με μαθηματική προσομοίωση, και υπολόγισε τη μέση ετήσια κατείσδυση για τη χρονική περίοδο 1962 – 1992 σε 117 mm. Σημαντική παρατήρηση αποτελεί το γεγονός ότι η τιμή αυτή αποτελεί το 13,5 % της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης το οποίο προσεγγίζει ικανοποιητικά το επιλεγθέν ποσοστό που είναι 10 %.

Επιπλέον, η κατείσδυση σε μία περιοχή διακρίνεται σε δύο κύριες συνιστώσες. Η μία συνιστώσα περιλαμβάνει την ποσότητα του νερού των βροχοπτώσεων, που κατεisdύει άμεσα εντός της κορεσμένης ζώνης των γεωλογικών σχηματισμών (ID), και ονομάζεται άμεση κατείσδυση (direct infiltration).

Η δεύτερη συνιστώσα αντιστοιχεί στην ποσότητα του νερού της επιφανειακής απορροής, που κατεisdύει στην κορεσμένη ζώνη, μέσω των αδρομερών υλικών της κοίτης των ποταμοχειμάρρων (streambed), οπότε μπορεί να ονομαστεί έμμεση κατείσδυση (indirect infiltration), (Τάντος Β., 2006).

Η άμεση κατείσδυση σε μία περιοχή εξαρτάται από ένα μεγάλο αριθμό παραγόντων, όπως η λιθολογία των σχηματισμών, το ποσό, η ένταση και κατανομή των βροχοπτώσεων, η εξατμισοδιαπνοή, η βλάστηση, οι χρήσεις γης, η κλίση της εδαφικής επιφάνειας κ.λπ.. Μέτρο της άμεσης κατείσδυσης είναι ο συντελεστής κατείσδυσης (infiltration coefficient), ο οποίος εκφράζει το ποσοστό του νερού της βροχόπτωσης, που κατεisdύει σε κάθε γεωλογικό σχηματισμό. Αυτός μπορεί να εκφραστεί σε ποσοστό επί της εκατό της βροχόπτωσης αλλά και σε mm ύψους βροχής. Η άμεση κατείσδυση επηρεάζεται άμεσα από το μέσο υψόμετρο και την υδρογραφική πυκνότητα κάθε σχηματισμού.

5.5.1. Κατείσδυση στην πεδινή ζώνη.

Στην πεδινή ζώνη του υπό εξέταση προσχωματικού υδροφορέα, λόγω της παρουσίας λεπτόκοκκων Αλλουβιακών αποθέσεων, στην επιφάνεια του εδάφους αναμένεται μειωμένη διηθητικότητα και μικρός συντελεστής κατείσδυσης (Παπαμαστοράκης κ.α., 2002). Σε αντιστάθμισμα όμως η σχεδόν επίπεδη και σχεδόν οριζόντια επιφάνεια του εδάφους στην πεδινή ζώνη, καθώς και η σχεδόν πλήρης φυτοκάλυψη της από κυρίως ελεγχόμενες θερμοκηπιακές καλλιέργειες, ευνοεί την κατείσδυση και η διήθηση αναμένεται να πλησιάζει το σύνολο του πλεονάσματος νερού (βροχόπτωση μείον εξατμισοδιαπνοή).

Το ποσοστό αυτό κατείσδυσης μπορεί να διαφοροποιείται ελαφρά από έτος σε έτος συναρτήσει της έντασης των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων.

Με βάση τα παραπάνω υπολογίζουμε ότι για την πεδινή έκταση της περιοχής ενδιαφέροντος, ο όγκος νερού που κατεισδύει και απορρέει επιφανειακά, δηλαδή το πλεονάσμα ύδατος, ανέρχεται σε:

- Επιφάνεια πεδινής ζώνης, περίπου ίση με $1.482.000 \text{ m}^2$
- Μέση ετήσια βροχόπτωση: 874 mm
- Όγκος νερού βροχόπτωσης, ετησίως: $1.295.250 \text{ m}^3$
- Πραγματική εξατμισοδιαπνοή: $701,7825 \text{ mm}$
- Όγκος νερού, πραγματικής εξατμισοδιαπνοής: $1.040.041 \text{ m}^3$

Τελικά, ισχύει:

- Όγκος πλεονάσματος ύδατος: 255.209 m^3

Από την παραπάνω ποσότητα, το μεγαλύτερο τμήμα όγκου ύδατος κατεισδύει στην έκταση της πεδινής ζώνης, δηλαδή των Αλλουβιακών λεπτόκοκκων αποθέσεων. Συγκεκριμένα, τουλάχιστον ένα τμήμα της τάξης των 200.000 m^3 κατεισδύει στην υπό μελέτη ζώνη, με αποτέλεσμα, το ποσοστό κατείσδυσης στην πεδινή ζώνη της περιοχής, να ανέρχεται κοντά στο 15 %, της συνολικής βροχόπτωσης σε αυτήν. Το ποσοστό αυτό, προσεγγίζει ικανοποιητικά, το επιλεχθέν ποσοστό της τάξης του 10 %, για την κατείσδυση της βροχόπτωσης, σε ολόκληρη την υπό μελέτη περιοχή, δηλαδή στην προσχωματική λεκάνη της Βιάννου.

5.6. Υδατικό ισοζύγιο εισροών – εκροών υδροφορέα λεκάνης.

Ο υδροφορέας της υπό μελέτη λεκάνης, δέχεται εισροές που προέρχονται από την απευθείας κατείσδυση, από τις πηγές, από τις επιφανειακές απορροές καθώς επίσης δέχεται και πλευρικές τροφοδοσίες (Παπαμαστοράκης κ.α., 2002). Ως εκροές από τη λεκάνη θεωρούνται οι απολήψεις από τα υδροληπτικά έργα (αντλήσεις) καθώς επίσης και οι υπόγειες πλευρικές εκροές προς τα νοτιοδυτικά της λεκάνης.

■ Πιο συγκεκριμένα σχετικά με τις **εισροές** θα έχουμε:

- Από απευθείας κατείσδυση των βροχοπτώσεων, τροφοδοσία $87,4 \text{ mm}$ ή 227.888 m^3 ύδατος ετησίως. Η κατείσδυση αυτή πηγάζει από το ποσοστό 10 % επί της βροχόπτωσης στη λεκάνη απορροής το οποίο είναι 874 mm ετησίως.
- Από τις πηγές, τροφοδοσία όγκου 585.640 m^3 ύδατος ετησίως.
- Από τις επιφανειακές απορροές, στα ανάντη της λεκάνης, τροφοδοσία όγκου 58.837 m^3 ύδατος ετησίως.

- Από τους ασβεστόλιθους Πίνδου, Τρίπολης και τους τριαδικούς γύψους, πλευρικές τροφοδοσίες όγκου 172.474 m^3 ύδατος ετησίως. Ο όγκος αυτός ύδατος, υπολογίστηκε χωρίς να ποσοτικοποιηθεί το ποσοστό τροφοδοσίας του κάθε σχηματισμού ξεχωριστά και επιπλέον ώστε να επιτευχθούν συνθήκες ισορροπίας στην περίπτωση συνθηκών σταθερής ροής. Επίσης κατά την προσομοίωση του μοντέλου, οι πλευρικές αυτές τροφοδοσίες, εισέρχονται στο σύστημα του υπόγειου υδροφορέα ως ύψος νερού με κατάλληλη εντολή του κώδικα Modflow (Groundwater Head Boundary) από τα ανάντη της λεκάνης στα βορειοανατολικά της.

Με τον τρόπο αυτό εισροής των πλευρικών τροφοδοσιών στον υπόγειο υδροφορέα, κατανοούμε ότι υπάρχει πιθανότητα, ο όγκος των τροφοδοσιών αυτών να μεταβληθεί κατά τη διαδικασία προσομοίωσης και να επαναπροσδιοριστεί.

■ Σχετικά με τις **εκροές** του συστήματος, θα έχουμε:

- Απολήψεις από τα υδροληπτικά έργα (υδρευτικές και αρδευτικές αντλήσεις) ετήσιου όγκου συνολικά $1.044.840 \text{ m}^3$ ύδατος.
- Πλευρικές υπόγειες εκροές στα κατάντη της λεκάνης, στα νοτιοδυτικά της περιοχής, ο όγκος των οποίων ισούται με την υπόλοιπη ποσότητα ύδατος που απομένει εάν αφαιρεθούν από τις συνολικές εισροές οι αντλούμενες ποσότητες ύδατος.

Για το υδρολογικό ισοζύγιο του υδροφορέα της λεκάνης ισχύει η παρακάτω εξίσωση σε ετήσια βάση:

$$K + P + A + S_{in} = E + S_{out} \quad \text{Σχέση (5.6.1)}$$

Όπου:

K: Ετήσια κατείσδυση νερού βροχόπτωσης.

P: Ετήσια συνεισφορά πηγών.

A: Ετήσια συνεισφορά μέσω κατείσδυσης επιφανειακών απορροών.

S_{in} : Ετήσιες πλευρικές τροφοδοσίες.

E: Ετήσιες αρδευτικές και υδρευτικές αντλήσεις.

S_{out} : Ετήσιες πλευρικές υπόγειες εκροές.

Επιπλέον θα πρέπει να αναφερθεί ότι κατά την εισαγωγή των παραπάνω δεδομένων στον κώδικα Modflow, για την πραγματοποίηση της διαδικασίας προσομοίωσης, οι προαναφερθείσες τροφοδοσίες – εκτός των πλευρικών τροφοδοσιών και των επιφανειακών απορροών – μετατράπηκαν σε ύψος ύδατος για κάθε μοναδιαία επιφάνεια (κυψελίδα) του κανάβου προσομοίωσης.

Πιο συγκεκριμένα, η κάθε κυψελίδα έχει διαστάσεις $43,26 \text{ m} * 53,3 \text{ m}$ ενώ η συνολική επιφάνεια κάθε κυψελίδας είναι $2.305,758 \text{ m}^2$. Επίσης στην περίπτωση των εισροών, για κάθε είδος τροφοδοσίας ξεχωριστά – πλην των πλευρικών τροφοδοσιών και των επιφανειακών απορροών – χρησιμοποιήθηκε συγκεκριμένος αριθμός κυψελίδων για την εισαγωγή του ανάλογου όγκου ύδατος στο μοντέλο προσομοίωσης. Ομοίως για τις αντίστοιχες εκροές συνέβη το ίδιο εκτός βέβαια των εκροών που αντιστοιχούσαν στις πλευρικές εισροές και στην κατείσδυση των επιφανειακών απορροών.

Ο αριθμός κυψελίδων που χρησιμοποιήθηκε για την εισαγωγή του ανάλογου όγκου ύδατος για κάθε τροφοδοσία ξεχωριστά αναφέρεται παρακάτω:

- Για τη βροχόπτωση: 1.143 ενεργές κυψελίδες.
- Για τις πηγές: 9 ενεργές κυψελίδες.

Τέλος για την εκροή του παραπάνω συνολικού όγκου ύδατος χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω κυψελίδες.

- Για την εκροή: 16 ενεργές κυψελίδες.

Πιο αναλυτικά για τη μετατροπή του κάθε όγκου ύδατος σε ύψος ύδατος, χρειάστηκε η διαίρεση του κάθε όγκου ύδατος αρχικά με τον αντίστοιχο αριθμό χρησιμοποιούμενων κυψελίδων. Π.χ. για τις πηγές: $585.640 \text{ m}^3 / 9 \text{ κυψελίδες} = 65.071,11 \text{ m}^3 / 1 \text{ κυψελίδα}$.

Έπειτα η ποσότητα αυτή διαιρέθηκε με την επιφάνεια της κάθε κυψελίδας: Π.χ. $65.071,11 \text{ m}^3 / 2.305,758 \text{ m}^2 = 28,2211 \text{ m} = 28.221,1 \text{ mm} / \text{year} \approx 28.220 \text{ mm} / \text{year}$. Τέλος, η τελευταία ποσότητα ουσιαστικά αντιστοιχούσε ως ύψος νερού για κάθε κυψελίδα ετησίως. Κατά την εισαγωγή όμως των ανάλογων τροφοδοσιών ύδατος, στον αντίστοιχο αριθμό κυψελίδων του μοντέλου προσομοίωσης, ακολουθήθηκε μία τελευταία υπολογιστική διαδικασία η οποία αναπτύσσεται αναλυτικά στο 6^ο κεφάλαιο.

Συγκεκριμένα επιλύθηκε ένα σύστημα εξισώσεων για κάθε είδος τροφοδοσίας καθώς και για τις ποσότητες αντλήσεων, προκειμένου να εξαχθούν ρεαλιστικά ποσοστά υδάτων τα οποία θα αντιστοιχούσαν στις εποχιακές συνθήκες ενός υδρολογικού έτους. Για παράδειγμα θεωρήσαμε τους παρακάτω συμβολισμούς για την περίπτωση της τροφοδοσίας των πηγών:

Πχ : Ποσότητα Πηγών το χειμώνα.

Πκ : Ποσότητα Πηγών το καλοκαίρι.

Π(μέσο) = $28.221 \text{ mm} / \text{year}$

Έπειτα επιλύθηκε το σύστημα των παρακάτω εξισώσεων:

$$Πχ * (0,3) = Πκ * (0,7) \quad \text{Σχέση (5.6.2)}$$

$$(Πχ + Πκ) / 2 = Π(\text{μέσο}) = 28.221 \text{ mm / year} \quad \text{Σχέση (5.6.3)}$$

Με άγνωστες παραμέτρους τα $Πχ$, $Πκ$.

Η επίλυση του παραπάνω συστήματος αναλύεται στο 6^ο κεφάλαιο. Επίσης ανάλογα συστήματα εξισώσεων χρησιμοποιήθηκαν για την περίπτωση των τροφοδοσιών από την κατείσδυση των βροχοπτώσεων, για την κατείσδυση υδάτων από τις επιφανειακές απορροές, για τις πλευρικές τροφοδοσίες καθώς επίσης και για τις ποσότητες αντλούμενου ύδατος από τις γεωτρήσεις της περιοχής.

6. Αριθμητική προσομοίωση της ροής του υπόγειου νερού στον υδροφορέα.

6.1. Γενικά.

Στην περίπτωση προσομοίωσης της υπόγειας ροής σε ένα υδροφόρο σύστημα, επιβάλλεται η ορθή επιστημονικά κατασκευή ενός μοντέλου προσομοίωσης το οποίο θα αποδίδει αξιόπιστα αποτελέσματα καθώς και αντικειμενικά αποδεκτές λύσεις σε υποθετικά σενάρια μεταβολής των βασικών παραμέτρων του προσομοιώματος. Με τον όρο μαθηματικό μοντέλο, εννοείται η όσο το δυνατόν πειστικότερη αποτύπωση του συνόλου των λειτουργιών ενός φυσικού συστήματος. Μέσω αυτής της αποτύπωσης, καθίσταται δυνατή η απεικόνιση των βασικών λειτουργιών του φυσικού συστήματος, σε απλοποιημένη μορφή. Επίσης παρέχεται και η δυνατότητα μεταβολής των χαρακτηριστικών παραμέτρων του συστήματος με σκοπό την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων σχετικά με την ευαισθησία του πραγματικού συστήματος στις μεταβαλλόμενες παραμέτρους.

Συγκεκριμένα για τα υπόγεια συστήματα, η ροή ύδατος στο εσωτερικό των υδροφορέων, περιγράφεται από ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες βασίζονται στην αρχή διατήρησης τη μάζας και διαφοροποιούνται ανάλογα με το είδος του υδροφορέα (εδafικό υλικό, υδραυλική αγωγιμότητα) καθώς και κατ'επέκταση τις συνθήκες ροής. Για τα πορώδη μέσα, η θεωρία της υπόγειας ροής ύδατος στηρίζεται στο νόμο του Darcy. Στα μαθηματικά μοντέλα, κατά βάση προσδιορίζεται μία σχέση μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών και της εξαρτημένης μεταβλητής ενδιαφέροντος (Παππά Α., 2010). Πιο συγκεκριμένα η εξαρτημένη μεταβλητή, αποτελεί συνάρτηση των βασικών παραμέτρων του συστήματος καθώς και των συναρτήσεων ελέγχου. Για

παράδειγμα όσον αφορά την υπόγεια ροή σε υδροφορείς, το υδραυλικό φορτίο αποτελεί την εξαρτημένη μεταβλητή ενώ ανεξάρτητες θεωρούνται μεταβλητές όπως οι χωρικές διαστάσεις και ο χρόνος.

Για προβλήματα υπόγειας ροής αλλά και μεταφοράς ουσιών με ρυπαντικές και διαλυτικές ιδιότητες στο εσωτερικό υδροφορέων, τα μαθηματικά μοντέλα, αποτελούν την πλέον κατάλληλη μέθοδο επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν υδροφόρα φυσικά συστήματα. Αυτά τα μοντέλα κατά την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων, εφαρμόζουν την αναλυτική ή την αριθμητική μέθοδο επίλυσης ενώ χρησιμοποιούνται από ηλεκτρονικούς υπολογιστές, γεγονός το οποίο παρέχει τη δυνατότητα εξέλιξης και βελτίωσης τους παράλληλα με αυτήν των υπολογιστών. Το ολοκλήρωμα με καθορισμένα όρια, αποτελεί για παράδειγμα την απλούστερη μέθοδο επίλυσης του προβλήματος αντιστροφής της παραγωγίσις μίας συνάρτησης. Η επίλυση αυτή, βασίζεται στο συνδυασμό αναλυτικών και αριθμητικών μεθόδων.

Το σημαντικότερο πρόβλημα που παρουσιάζεται κατά τη σύνταξη ενός μαθηματικού μοντέλου είναι η κατά προσέγγιση μεταφορά των δεδομένων από την κλίμακα του φυσικού συστήματος στην κλίμακα του μοντέλου. Ως αποτέλεσμα της προσέγγισης αυτής, τα εισαγόμενα στοιχεία, προέρχονται από εκτιμήσεις που συχνά απέχουν αρκετά από την πραγματικότητα. Προφανώς το ίδιο πρόβλημα εμφανίζεται και στην περίπτωση προέκτασης των συμπερασμάτων εργασιών εργαστηριακής κλίμακας, προς την κλίμακα του φυσικού συστήματος.

Λόγω της αβεβαιότητας για κάποιες παραμέτρους και μηχανισμούς του συστήματος όπως έχει προαναφερθεί, αναγκαστικά τίθεται υπό αμφισβήτηση ο βαθμός αξιοπιστίας ενός ικανοποιητικά ρυθμισμένου προσομοιώματος (Παπαμαστοράκης κ.α., 2002). Υπό αυτές τις προϋποθέσεις, ένα μαθηματικό προσομοίωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τους παρακάτω λόγους:

- Να χρησιμεύσει ως ένα εργαλείο για μία διερεύνηση των μηχανισμών του δικτύου ροής.
- Να χρησιμοποιηθεί ως μία πρώτη προσέγγιση για την ποιοτική εκτίμηση της πιθανότητας ρύπανσης και επιβάρυνσης του υδροφορέα.
- Να διερευνηθεί το πλήθος των επιλύσεων που συμφωνούν με το προτεινόμενο εννοιολογικό μοντέλο.
- Να αποτελέσει υπόβαθρο για τον προσδιορισμό των αναγκών σε επιπλέον δεδομένα και μια βάση για επικαιροποίηση όταν νέα δεδομένα γίνουν διαθέσιμα.

Τα μοντέλα που κατασκευάζονται με σκοπό τη μελέτη της υπόγειας ροής σε υδροφορείς και ταυτόχρονα διακρίνονται από τη δυνατότητα απόδοσης υποθετικών μελλοντικών συνθηκών, κατατάσσονται σε τρεις βασικές κατηγορίες, τα μαθηματικά

μοντέλα, τα φυσικά και τα αναλογικά μοντέλα (Τάντος Β., 2006). Αναλυτικότερα περιγράφονται παρακάτω:

- Μαθηματικά μοντέλα:

Τα μαθηματικά μοντέλα στοχεύουν στην προσομοίωση της κίνησης του υπόγειου ύδατος με χρήση και κατ'επέκταση επίλυση διαφορικών εξισώσεων. Ευρεία χρήση τους παρατηρείται στον τομέα της υδρογεωλογίας. Βασικές διαφορικές εξισώσεις που επιλύουν είναι η εξίσωση (νόμος) του Darcy, η εξίσωση της συνέχειας, η εξίσωση ροής του νερού καθώς και η εξίσωση Laplace. Τέλος τα μαθηματικά μοντέλα θεωρούνται κατάλληλα για την επίλυση προβλημάτων που αφορούν υδροφορείς με φυσική γεωμετρία και με μεταβαλλόμενες παραμέτρους όπως για παράδειγμα το υδραυλικό φορτίο αλλά και το ρυθμό άντλησης από υδροληψίες.

- Φυσικά μοντέλα:

Τα φυσικά μοντέλα, λαμβάνουν χώρα σε εργαστηριακό περιβάλλον και αποτελούν κατά βάση μία αξιόπιστη αναπαράσταση των φυσικών λειτουργιών και φαινομένων ενός φυσικού συστήματος. Με τον τρόπο αυτό πραγματοποιείται η προσομοίωση του υπό μελέτη φυσικού συστήματος σε κλίμακα μικρότερη αυτής του φυσικού περιβάλλοντος. Στην πραγματικότητα όμως θα πρέπει να αναφερθεί ότι το βασικό μειονέκτημα των μοντέλων αυτών αποτελεί η γενίκευση των διαδικασιών και αποτελεσμάτων του μοντέλου, για το κατά πολύ μεγαλύτερης κλίμακας προσομοιωμένο σύστημα.

- Αναλογικά μοντέλα:

Τα μοντέλα αυτά αποτελούν εργαστηριακές προσομοιώσεις φυσικών συστημάτων, για τα οποία η αναλυτική επεξεργασία τους δεν είναι εύκολη. Η προσομοίωση τους όμως βασίζεται σε μερικές διαφορικές εξισώσεις αλλά και σε οριακές συνθήκες οι οποίες χαρακτηρίζουν το φυσικό σύστημα. Γνωστότερα μοντέλα αυτού του είδους αποτελούν τα ηλεκτρικά ομοιώματα ενώ είναι αναγκαίο να αναφερθεί ότι τα τελευταία χρόνια τα αναλογικά μοντέλα έχουν ουσιαστικά αντικατασταθεί από τα κατά πολύ αποτελεσματικότερα μαθηματικά μοντέλα.

Όσον αφορά τη **μεταβλητή κατάσταση** του εξεταζόμενου συστήματος, τα προσομοιώματα διακρίνονται σε: Ροής υπογείων υδάτων, Μεταφοράς διαλυτών ουσιών, Μεταφοράς θερμότητας και τέλος Παραμορφώσεων και Καθιζήσεων. Τα παραπάνω μοντέλα περιγράφονται από ένα σύνολο εξισώσεων. Για παράδειγμα τα μοντέλα ροής

υπογείων υδάτων, περιλαμβάνουν μία χαρακτηριστική εξίσωση κατάλληλη να υπολογίσει το υδραυλικό φορτίο, ενώ τα μοντέλα μεταφοράς διαλυτών ουσιών, περιγράφονται από μία παραπάνω συμπληρωματική εξίσωση η οποία δύναται να υπολογίσει τις συγκεντρώσεις των διαλυτών ουσιών μέσα στο φυσικό σύστημα.

6.2. Εξίσωση ροής και λοιπές εξισώσεις κίνησης ύδατος.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή του υπόγειου νερού σε πορώδη μέσα και γενικότερα σε υδροφόρους σχηματισμούς ποικίλουν ανάλογα με το είδος της ροής και το είδος του υδροφόρου σχηματισμού. Οι βασικότερες περιπτώσεις ροής είναι η μονοδιάστατη, η δυσδιάστατη, η τριδιάστατη καθώς και η ακτινική ροή.

Επίσης η ροή διακρίνεται σε ροή σταθερής κατάστασης ή μόνιμη ροή και σε ροή ασταθούς κατάστασης ή μη μόνιμη ροή. Οι υδροφόροι σχηματισμοί διακρίνονται σε υπό πίεση υδροφορείς (confined), ελεύθερους υδροφορείς (unconfined) και μερικώς υπό πίεση υδροφορείς (leaky). Για καθεμιά από τις παραπάνω περιπτώσεις ή για συνδυασμούς τους, περιγράφονται στη διεθνή και Ελληνική βιβλιογραφία οι ανάλογες εξισώσεις ή ακριβέστερα τα αντίστοιχα μαθηματικά μοντέλα.

Το βασικό μαθηματικό μοντέλο ροής προκύπτει από την εφαρμογή της παρακάτω εξίσωσης (Καλλέργης, 2000):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[T_z \frac{\partial h}{\partial z} \right] - \frac{\partial h}{\partial t} = q[x, y, z, t] \quad \text{Σχέση (6.2.1)}$$

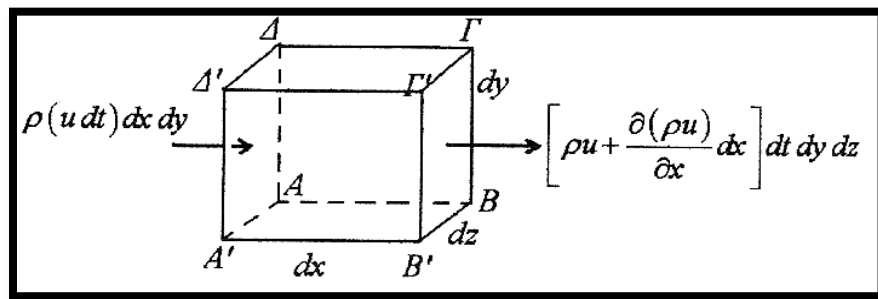
Όπου:

T_x, T_y, T_z : Μεταβιβασιμότητα στους άξονες x, y, z (m^2 / sec).

h : Υδραυλικό φορτίο (m).

q : Ταχύτητα Darcy (παροχή ύδατος ανά μονάδα επιφάνειας διατομής) (m / sec).

Σύμφωνα με την προαναφερθείσα εξίσωση ροής σε πορώδες μέσο, η οποία στηρίζεται στην αρχή διατήρησης της μάζας, η μάζα ύδατος που εισέρχεται σε έναν διαφορικό όγκο ισούται με τη μεταβολή της μάζας στο διαφορικό όγκο συν τη μάζα ύδατος που εξέρχεται από τον όγκο αυτό (Καρρά Θ., 2011). Σχηματικά, η παραπάνω διατύπωση της εξίσωσης συνέχειας (εξίσωση διατήρησης της μάζας), απεικονίζεται βάση του διαφορικού όγκου στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 6.2.1 Διαφορικός όγκος αναφοράς για την εξίσωση ροής ύδατος σε πορώδες μέσο.

(Καρρά Θ., 2011)

Ο διαφορικός όγκος του παραπάνω σχήματος, αποτελεί ουσιαστικά έναν κύβο μοναδιαίων διαστάσεων, μέσω του οποίου διέρχεται η μεταφερόμενη μάζα ύδατος. Σύμφωνα με την παραπάνω απεικόνιση του μοναδιαίου διαφορικού όγκου, η εξίσωση κίνησης ύδατος, περιγράφεται μαθηματικά βάσει της **πυκνότητας** και του **πορώδους** του ρευστού από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{\partial(\rho \cdot q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot q_z)}{\partial z} = -\frac{\partial(\rho \cdot n)}{\partial t} \quad \text{Σχέση (6.2.2)}$$

Όπου:

q_x, q_y, q_z : Ταχύτητα Darcy ή διαφορετικά, Ειδική Παροχή στους άξονες x, y, z (m / sec).

ρ : Πυκνότητα ρευστού (kg / m³).

n : Εδαφικό πορώδες.

Επιπλέον σημαντική εξίσωση για τη μελέτη της κίνησης των υπογείων υδάτων αποτελεί ο νόμος του Darcy. Ο νόμος του Darcy, είναι δυνατόν να διατυπωθεί με την παρακάτω μορφή:

Νόμος του Darcy (Καρατζάς, 2009):

$$q = \frac{Q}{A} = K \cdot J \quad \text{Σχέση (6.2.3)}$$

Όπου:

q: Ταχύτητα Darcy (παροχή ύδατος ανά μονάδα επιφάνειας διατομής) (m / sec).

K: Υδραυλική Αγωγιμότητα (m / sec).

J: Υδραυλική κλίση.

Το J στην παραπάνω εξίσωση, αποτελεί την υδραυλική κλίση και δίνεται από την εξίσωση:

$$J = \Delta\Phi / L \quad \text{Σχέση (6.2.4)}$$

Όπου:

L: Μήκος (m).

Φ: Πιεζομετρικό φορτίο.

Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι στην περίπτωση ελεύθερου υδροφορέα, το Πιεζομετρικό φορτίο Φ, προτιμάται να συμβολίζεται ως h (m), δηλαδή ως ύψος υδραυλικής ροής στον υδροφορέα (ύψος υδροφόρου ορίζοντα).

Στην περίπτωση τρισδιάστατης ροής, σε ομογενές ισότροπο πορώδες μέσο, ο νόμος του Darcy, διατυπώνεται αναλυτικότερα ως εξής (Καρατζάς, 2009):

$$q_x = K \cdot J_x = -K \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} = n \cdot V_x \quad \text{Σχέση (6.2.5)}$$

$$q_y = K \cdot J_y = -K \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y} = n \cdot V_y \quad \text{Σχέση (6.2.6)}$$

$$q_z = K \cdot J_z = -K \cdot \frac{\partial \phi}{\partial z} = n \cdot V_z \quad \text{Σχέση (6.2.7)}$$

Όπου:

n: Πορώδες.

V: Ταχύτητα ρευστού.

Φ: Πιεζομετρικό φορτίο (υδραυλικό φορτίο).

Σχετικά με το νόμο του Darcy, κατά την πρακτική χρήση του στην επίλυση ασκήσεων σχετικά με την κίνηση των υπογείων υδάτων, χρησιμοποιείται μία πιο αναλυτική και εφαρμόσιμη μορφή της εξίσωσης. Τέτοιου είδους εκδοχή, της εν λόγω εξίσωσης, αποτελεί η παρακάτω:

$$Q = k A \frac{\Delta h}{L} \quad \text{Σχέση (6.2.8)}$$

Τέλος όσον αφορά την εξίσωση ροής η οποία παρουσιάστηκε στην αρχή της παρούσας παραγράφου, θα πρέπει να επισημανθεί, ότι στην περίπτωση **μόνιμης ροής σε ομοιογενή και ισότροπο υδροφορέα**, ισχύουν οι παρακάτω εξισώσεις:

Για την Εξίσωση Συνέχειας θα έχουμε (Καρατζάς, 2009):

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad \text{Σχέση (6.2.9)}$$

Επιπλέον εξίσωση που αναφέρεται στην κίνηση ύδατος και η οποία επιλύεται από τα μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης υπόγειας ροής αποτελεί η εξίσωση Laplace. Με την προϋπόθεση μελέτης ομοιογενούς και ισότροπου υδροφορέα σε σταθερή κατάσταση, δηλαδή μόνιμης ροής, επιλύεται και η ακόλουθη εξίσωση:

Εξίσωση Laplace:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 h}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 h}{\partial^2 z} = 0 \quad \text{Σχέση (6.2.10)}$$

6.3. Αντικειμενικός στόχος της προσομοίωσης της υπόγειας ροής.

Η ανάλυση ενός φυσικού συστήματος, αποσκοπεί κυρίως στη συστηματική οργάνωση και διεξοδική ανάλυση των σχετικών στοιχείων με το υπό μελέτη σύστημα και κατά συνέπεια στην καταλληλότερη εκμετάλλευση του πλήθους των πληροφοριών. Απώτερος στόχος, της ανάλυσης αυτής είναι η ορθολογική προσέγγιση των βασικών λειτουργιών του συστήματος καθώς και η αντικειμενικότερη διευθέτηση των παραμέτρων με κύριο γνώμονα την όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστη διατύπωση του εξεταζόμενου φυσικού συστήματος.

Δύο είναι οι βασικές μέθοδοι ανάλυσης συστημάτων, η **προσομοίωση και η βελτιστοποίηση**. Η προσομοίωση ως μέθοδο ανάλυσης ενός συστήματος, αποτελεί ποσοτική μέθοδο που αναπαριστά τη συμπεριφορά του συστήματος. Η βελτιστοποίηση αποτελεί επίσης ποσοτική μέθοδος η οποία όμως αξιολογεί τις εναλλακτικές λύσεις ενός προβλήματος με αυτόματο τρόπο (Παππά Α., 2010). Ουσιαστικά αποσκοπεί στην εύρεση της βέλτιστης λύσης χωρίς δοκιμές με την απαίτηση όμως υπολογιστικού χρόνου. Στην περίπτωση της βελτιστοποίησης, χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι βελτιστοποίησης εκ των οποίων οι πιο διαδεδομένοι είναι ο γραμμικός προγραμματισμός και ο δυναμικός προγραμματισμός.

Η μελέτη ενός υδροφόρου συστήματος, με στόχο την προσομοίωση της υπόγειας ροής, βασίζεται στον καθορισμό του συστήματος με την επιλογή των γεωγραφικών ορίων και τον προσδιορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Απαιτεί επιπλέον τη συλλογή των σχετικών γεωλογικών και υδρολογικών πληροφοριών καθώς και τον καθορισμό των φυσικών περιορισμών αλλά και τον καθορισμό του μεγέθους των βασικών φυσικών μεταβλητών (π.χ. υδραυλικό φορτίο). Εν κατακλείδι, η επιστημονικά ολοκληρωμένη μελέτη απαιτεί, το σχεδιασμό πιθανών μελλοντικών σεναρίων και την αξιολόγηση της αξιοπιστίας της διαδικασίας προσομοίωσης.

Σχετικά με το παρόν μοντέλο, η κατασκευή, ουσιαστικά αποσκοπεί στην όσο το δυνατόν αντικειμενικότερη αποτύπωση του φυσικού υδρολογικού συστήματος του υπόγειου υδροφορέα της λεκάνης ενδιαφέροντος και στη δημιουργία ενός υδρολογικού ισοζυγίου συνολικών εισροών και εκροών στον υδροφορέα, το οποίο εφόσον μεταβληθεί κατάλληλα, δύναται να αποδώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα για πιθανές μελλοντικές συνθήκες της υπόγειας ροής στη λεκάνη.

Κατά την κατασκευή του προσομοιώματος, απαραίτητη διαδικασία αποτέλεσε η κατάλληλη ρύθμιση των υδραυλικών παραμέτρων καθώς επίσης και η τελική βαθμονόμηση των δεδομένων με σκοπό τη ρεαλιστική απεικόνιση της υπόγειας ροής καθώς και της πιεζομετρίας στον υδροφορέα.

6.4. Εννοιολογικό μοντέλο.

Η μετατροπή των υδρολογικών, υδρογεωλογικών και γεωλογικών χαρακτηριστικών του υπό μελέτη υδροφορέα σε μαθηματική μορφή αποδεκτή από το επιλεγθέν λογισμικό πακέτο και παράλληλα σε μορφή η οποία επιτρέπει την ποσοτική τους επεξεργασία, αποτελεί το βασικό στόχο υλοποίησης του εννοιολογικού μοντέλου.

Το εννοιολογικό μοντέλο του υδροφορέα, έχει αναπτυχθεί αναλυτικότερα στην παράγραφο 3.2 της παρούσας εργασίας, με αναφορά στα βασικά γεωλογικά χαρακτηριστικά του υπό εξέταση φυσικού συστήματος ενώ επιπλέον στην ίδια παράγραφο παρουσιάζονται τα βασικά είδη υδραυλικών φορτίων που εμπλουτίζουν το υδροφόρο σύστημα. Στην παρούσα παράγραφο, γίνεται μία συνοπτική θεωρητική αναφορά του εννοιολογικού μοντέλου και παρατίθενται τα κύρια υδραυλικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα.

Το θεωρητικό υπόβαθρο του εννοιολογικού μοντέλου περιλαμβάνει τις παραμετρικές σχέσεις που αναπαριστούν τις κύριες υδρολογικές διεργασίες. Φυσική συνέπεια της προσομοίωσης βάση του διαμορφωμένου εννοιολογικού μοντέλου, είναι η σχετικότητα της βαρύτητας και αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων, εφόσον οι παράμετροι θεωρούνται αντιπροσωπευτικές των μακροσκοπικών χαρακτηριστικών της υπό μελέτη λεκάνης (Τάντος Β., 2006).

Τα υδρολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής περιλαμβάνουν παραμέτρους όπως η βροχόπτωση, η κατείσδυση υδάτων επιφανειακής απορροής, οι πλευρικές εισροές, η είσοδος ή η εκροή υδάτων λόγω αντίστοιχων πηγών καθώς και αντλητικές γεωτρήσεις. Τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής τα οποία εισάγονται στο μοντέλο είναι τα φυσικά και υδραυλικά όρια του υδροφόρου ορίζοντα καθώς και το είδος και η έκταση των διαφόρων σχηματισμών του υδροφορέα. Στα βασικά γεωλογικά χαρακτηριστικά τα οποία χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου, παρατηρούμε το πάχος του υδροφορέα, την οριοθέτηση των αδιαπέρατων σχηματισμών και γενικότερα την κατανομή και διαμόρφωση των εκάστοτε υδροφόρων σχηματισμών στο εσωτερικό του υπό μελέτη υδροφορέα.

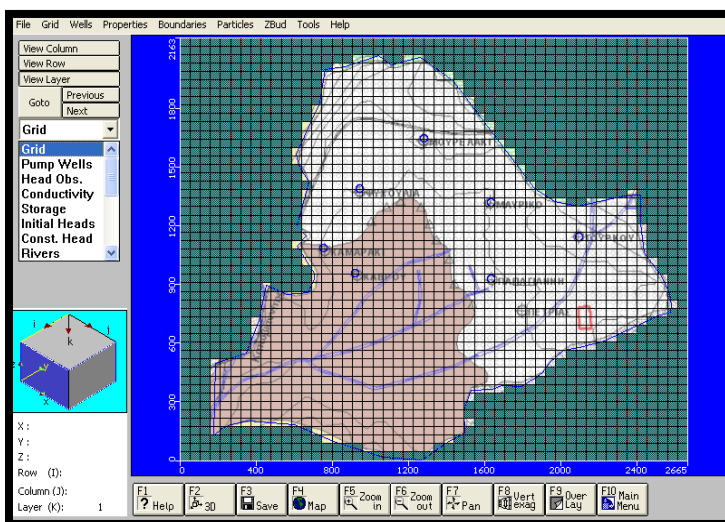
Στο εννοιολογικό μοντέλο ουσιαστικά αναπτύσσονται όλα τα βασικά χαρακτηριστικά και οι μηχανισμοί λειτουργίας των υδροφόρων σχηματισμών. Κατά συνέπεια βάση των διαθέσιμων στοιχείων εισάγονται οι υπολογισμένες τιμές των υδραυλικών παραμέτρων, όπως για παράδειγμα η τιμή της μεταβιβαστικότητας, της υδραυλικής αγωγιμότητας και της υδροχωρητικότητας. Τέλος είναι εξαιρετικά σημαντικό να αναφερθεί πως το εννοιολογικό μοντέλο, δύναται να παρουσιάσει με ικανοποιητική προσέγγιση τις συνθήκες ροής στον υδροφορέα, χωρίς όμως να καθίσταται εφικτή η απόλυτα αντικειμενική απεικόνιση των συνθηκών υδάτινης ροής που επικρατούν υπόγεια της υπό μελέτη λεκάνης.

6.5. Επιλογή κατάλληλου υπολογιστικού λογισμικού.

Το υπολογιστικό πακέτο Visual Modflow αποτελεί το πληρέστερο και πιο εύχρηστο κώδικα μοντελοποίησης για τα επαγγελματικών προδιαγραφών τρισδιάστατα μοντέλα υπόγειας ροής τα οποία δύναται να περιλαμβάνουν και την περίπτωση μεταφοράς ρυπαντικών παραγόντων. Στο πακέτο περιλαμβάνονται τα λογισμικά Modflow, Modpath και MT3DMS. Το πακέτο Visual Modflow, παρουσιάστηκε αρχικά τον Αύγουστο του 1994 και επιπλέον χρησιμοποιείται και από τη U.S.G.S. (Αμερικάνικη Υπηρεσία Γεωλογικών Ερευνών) καθώς και από τη U.S.E.P.A. (Αμερικάνικη Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος) (Παππά Α., 2010).

Το μαθηματικό προσομοίωμα της λεκάνης της Άνω Βιάννου, αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας το εμπορικό πακέτο Waterloo Hydro geologic Software (1995 – 2006) Visual Modflow, με εφαρμογή μαθηματικού κώδικα πεπερασμένων διαφορών (Modflow). Το προσομοίωμα αναπαριστά την υπόγεια ροή και τα υδραυλικά φορτία στην κορεσμένη ζώνη του υδροφορέα της λεκάνης, σε συνθήκες σταθερής ροής (steady state flow), χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η συνεισφορά της εναποθηκευτικότητας.

Η συνεισφορά των επιφανειακών νερών και των υπόγειων πλευρικών τροφοδοσιών αναλύεται ξεχωριστά, ενώ δε λαμβάνονται υπόψη οι μηχανισμοί ροής στην ακόρεστη ζώνη. Ο υδροφορέας απεικονίζεται με ένα στρώμα με χαρακτηριστικά ελεύθερου υδροφόρου ορίζοντα. Κριτήριο σύγκλισης του προσομοιώματος σε επίλυση αποτελεί η διαφορά υπολογισμένων υδραυλικών φορτίων, μεταξύ δύο διαδοχικών δοκιμασιών – iterations.



Εικόνα 6.5.1 Περιβάλλον εργασίας του λογισμικού Visual Modflow με διάκριση του καταλόγου υπορουτίνων – εντολών, στα αριστερά της επιφάνειας εργασίας.

6.6. Λογισμικό πακέτο Visual Modflow.

Το Modflow αποτελεί ένα πρόγραμμα που περιλαμβάνει διάφορες «υπορουτίνες», δηλαδή ανεξάρτητα υπολογιστικά «πακέτα» που δύναται να εκτελέσουν τις απαραίτητες λειτουργίες προσομοίωσης, οι οποίες στηρίζονται στη μέθοδο των «πεπερασμένων διαφορών».

Το Modflow ουσιαστικά αποτελεί ένα πρόγραμμα προσομοίωσης υδροφόρων συστημάτων. Ως υπολογιστικό πακέτο, δεν είναι κατάλληλο για τη διαχείριση υδατικών πόρων. Επιπλέον για την εφαρμογή του, είναι απαραίτητη η πλήρης γνώση των υδρολογικών, υδρογεωλογικών και υδραυλικών χαρακτηριστικών των υπό μελέτη υδροφόρων συστημάτων.

Πιο αναλυτικά το Modflow της U.S.G.S., δηλαδή της Αμερικανικής Υπηρεσίας Γεωλογικών Ερευνών, στην πραγματικότητα αποτελεί το πιο διαδεδομένο μοντέλο προσομοίωσης της ροής σε έναν υπόγειο υδροφορέα. Το πρόγραμμα βασίζεται στην αριθμητική επίλυση μίας διαφορικής εξίσωσης, που προκύπτει από την εφαρμογή του νόμου του Darcy και παράλληλα από τη χρήση της εξίσωσης διατήρησης της μάζας. Η ονομασία του εν λόγω υπολογιστικού πακέτου, στηρίζεται στην ολοκληρωμένη έκφραση του: Modular three dimensional finite difference ground water flow model.

Όπως αναφέρθηκε, το μοντέλο στηρίζεται στην εφαρμογή της μεθόδου των «πεπερασμένων διαφορών» και η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων, λαμβάνει χώρα στο κέντρο των κυψελίδων (κελιών) του σχηματισμένου κανάβου. Η παραπάνω διαδικασία προσομοιώνει την κίνηση του υπόγειου νερού σε πορώδες μέσο. Η προσομοίωση πραγματοποιείται στην κορεσμένη ζώνη του πορώδους μέσου.

Αναλυτικότερα, η **μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών** αποτελεί μία από τις πιο αξιόπιστες υπολογιστικές τεχνικές επίλυσης μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η μερική διαφορική εξίσωση, ορίζεται σε ένα σύνολο σημείων πεπερασμένου αριθμού (R_h) το οποίο αντικαθιστά το συνεχές πεδίο ορισμού R στο οποίο οριζόταν αρχικά. Κατά ανάγκη ισχύει $R_h \subseteq R$. Παράλληλα το όριο S του αρχικού πεδίου ορισμού αντικαθίσταται από ένα πεπερασμένο αριθμό σημείων S_h . Για κάθε σημείο P του R_h διατυπώνεται μια αλγεβρική εξίσωση που περιλαμβάνει την τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής στο σημείο P και σε γειτονικά σημεία του P . Η αλγεβρική εξίσωση ονομάζεται εξίσωση πεπερασμένων διαφορών και αποτελεί προσέγγιση της μερικής διαφορικής εξίσωσης στο σημείο P . Η μεθοδολογία διατύπωσης και η μορφή της αλγεβρικής εξίσωσης εξαρτώνται άμεσα από την εφαρμοζόμενη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών. Εάν υπάρχουν N σημεία στο R_h , προκύπτει ένα σύστημα N αλγεβρικών εξισώσεων με N αγνώστους. Εάν το σύστημα έχει μοναδική λύση, που συνήθως έχει, οι τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής που προκύπτουν θεωρούνται προσεγγιστικές σε

σχέση με αυτές της αναλυτικής λύσης. (Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, <http://www.mie.uth.gr/labs/lscs/>)

Η βασική εξίσωση πεπερασμένης διαφοράς που χρησιμοποιεί το Modflow θεωρώντας ότι η πυκνότητα του υγρού παραμένει σταθερή είναι:

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \Delta V \quad \text{Σχέση (6.6.1)}$$

Όπου:

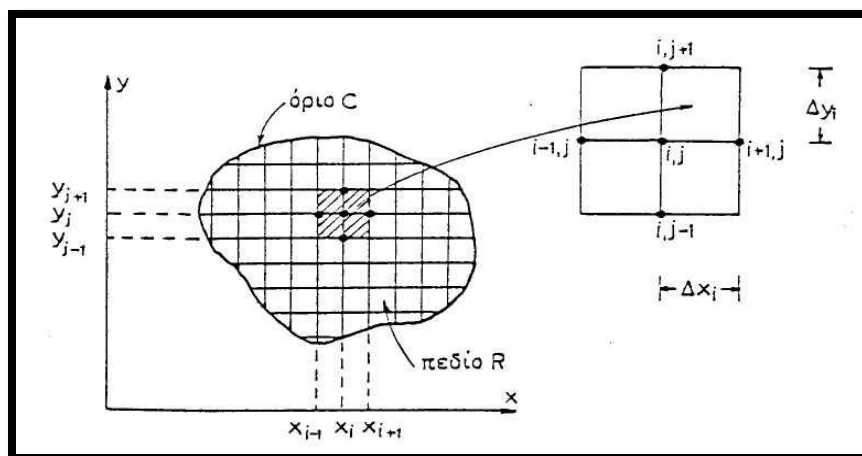
S_s : η ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους υλικού (m^{-1}).

Q_i : ο συνολικός ρυθμός παροχής σε κάθε κυψελίδα (m^3 / sec).

ΔV : ο όγκος της κυψελίδας (m^3).

$\Delta \Phi$: η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου για χρονικό διάστημα Δt (m).

Επιπλέον στην απλοποιημένη περίπτωση ενός μονοδιάστατου προβλήματος και εφαρμογής της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών για την επίλυση του, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί το ανάπτυγμα της σειράς Taylor για την εξαρτημένη μεταβλητή. Συγκεκριμένα εάν θεωρήσουμε τη συνάρτηση $f = f(x)$, με ανεξάρτητη μεταβλητή το x και εξαρτημένη το f , ο κánaβος των πεπερασμένων διαφορών διαμορφώνεται ως έχει παρακάτω:



Εικόνα 6.6.1 Τυπική μορφή κánaβου πεπερασμένων διαφορών.

(Λατινόπουλος και Θεοδοσίου, 2007)

(Διδακτικές σημειώσεις, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.)

Το ανάπτυγμα της f σε σειρά Taylor για τον κানাβο πεπερασμένων διαφορών, θα είναι το παρακάτω:

$$f(x + \Delta x) = f(x) + \Delta x \frac{df(x)}{dx} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \cdot \frac{d^2 f(x)}{dx^2} + \dots \quad \text{Σχέση (6.6.2)}$$

Σύμφωνα με τις βασικές αρχές λειτουργίας του λογισμικού πακέτου καθώς και την εξέλιξη του την τελευταία δεκαετία, η χρήση του με σκοπό την προσομοίωση ομοιογενών υδροφόρων συστημάτων, θεωρείται ως η πλέον κατάλληλη από το σύνολο της επιστημονικής κοινότητας.

Ο κώδικας διέπεται από ένα σύνολο **βασικών αρχών**, οι οποίες αναφέρονται παρακάτω επιγραμματικά: Η σημαντικότερη αρχή του υπολογιστικού μοντέλου, είναι η δυνατότητα προσομοίωσης του υδροφόρου συστήματος για συνθήκες σταθερής κατάστασης (steady state case). Επιπλέον δεν παρατηρείται ροή, εκτός της προκαθορισμένης οριοθέτησης του υπό μελέτη υδροφόρου συστήματος ενώ όπως έχει ήδη προαναφερθεί, το υπολογιστικό πακέτο, στηρίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών για το κέντρο κάθε κελιού του μοντέλου (Waterloo Hydrogeologic Inc., 1995 – 2006). Το μοντέλο κατά την προσομοίωση είναι δυνατόν να περικλείει διάφορους συνδυασμούς υδροφόρων συστημάτων, όπως για παράδειγμα ελεύθερα ή περιορισμένα υδροφόρα συστήματα, ενώ το πορώδες μέσω το οποίο προσομοιώνεται μπορεί να είναι ομοιογενές ή ανισότροπο. Τέλος κατά το σχεδιασμό του εννοιολογικού μοντέλου, στην περίπτωση συνδυασμού διαφορετικού είδους υδροφόρων στρωμάτων, το ανώτερο στρώμα συνίσταται να σχεδιάζεται ως ελεύθερο.

Σχετικά με τα σημαντικά **πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα** του μοντέλου, θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο εν λόγω υπολογιστικός κώδικας, συνοδεύεται από πλήρες εγχειρίδιο χρήσης ενώ υποστηρίζεται και από το United States Geological Survey. Επιπρόσθετο σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί και η δυνατότητα συνεργασίας του με το G.I.S. καθώς και με το Surfer. Η χρήση του πακέτου Modpath η οποία παρατηρείται κυρίως κατά την προσομοίωση της μεταφοράς ρύπων σε υδροφόρα συστήματα, προσφέρει τρισδιάστατη απεικόνιση των γραμμών ροής, στην περίπτωση μόνιμης ροής.

Σχετικά με τα μειονεκτήματα της χρήσης του μοντέλου, θα πρέπει να αναφερθεί αρχικά, πως η αξιοπιστία της προσομοίωσης με χρήση του Modflow, κατά βάση εξαρτάται από την ομοιογένεια του υδροφόρου συστήματος το οποίο προσομοιώνεται καθώς επίσης και από την αξιοπιστία των εισαγόμενων στοιχείων στο υπολογιστικό πακέτο. Οι υδρολογικές και υδραυλικές παράμετροι, το εισαγόμενο υδραυλικό φορτίο, και οι οριακές συνθήκες, διαδραματίζουν κατά συνέπεια σημαντικό ρόλο στην εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων και αντικειμενικά αποδεκτών λύσεων στην περίπτωση

επίλυσης προβλημάτων ρύπανσης ή προβλημάτων σταδιακής μεταβολής των υδρολογικών παραμέτρων. Ως αποτέλεσμα των προαναφερθέντων, η ενδεχόμενη αναξιοπιστία ενός εισαγόμενου στοιχείου δύναται να επηρεάσει σε σημαντικό βαθμό το τελικό αποτέλεσμα της προσομοίωσης και είναι αρκετή να καταστήσει αναξιόπιστη ολόκληρη τη διαδικασία.

Οι **βασικές παραδοχές** που ισχύουν κατά την κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης βάση του Modflow, περιλαμβάνουν την περίπτωση, άπειρης έκτασης του υπό μελέτη υδροφόρου συστήματος αλλά και την περίπτωση των προκαθορισμένων ορίων του υδροφορέα. Ακόμη στην περίπτωση περιορισμένης διαθεσιμότητας των πρωτογενών μετρήσεων, χρησιμοποιούνται διάφορα εργαλεία τα οποία συνδυάζουν γεωλογικά και στατιστικά στοιχεία, που στηρίζονται στην εφαρμογή της μεθόδου της γραμμικής παρεμβολής. Ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα τέτοιου είδους τεχνικής, αποτελεί η μέθοδος kriging, που εφαρμόζεται κατά τη σύνταξη χαρτών των οποίων βασικό χαρακτηριστικό είναι η απόδοση ισοϋψών ή ισοπιεζομετρικών γραμμών. Η μέθοδος αυτή συναντάται κυρίως ως υπορουτίνα διαφόρων προγραμμάτων όπως για παράδειγμα των Surfer και Grapher. Σχετικά με τις ιδιότητες του ύδατος το οποίο βρίσκεται σε κίνηση στο εσωτερικό του υδροφόρου συστήματος το οποίο προσομοιώνεται, ως βασικές παραδοχές λαμβάνονται η σταθερότητα της πυκνότητας του νερού, η τρισδιάστατη κίνηση του υπόγειου ύδατος αλλά και η ομοιόμορφη και ομοιογενής κατανομή των ιδιοτήτων του κάθε κελιού σε ολόκληρο το εσωτερικό της ίδιας της κυψελίδας (Waterloo Hydrogeologic Inc., 1995 – 2006).

Το ύψος της επιφάνειας του υπόγειου νερού, κατά τη χρήση του μοντέλου Modflow, υπολογίζεται στο κέντρο της κάθε κυψελίδας το οποίο ονομάζεται κόμβος. Τα χωρικά αυτά τμήματα, δηλαδή τα καθορισμένων διαστάσεων τετράγωνα ή ορθογώνια κελιά, διαμορφώνουν τη **χωρική διακριτοποίηση** του υδροφόρου συστήματος με το σχεδιασμό ενός δικτύου εφαπτόμενων κυψελίδων, το οποίο παρουσιάζεται στο μοντέλο ως κάναβος. Το δίκτυο που έχει σχηματιστεί, εμφανίζεται στο μοντέλο ως ένας «πίνακας» αποτελούμενος από παράλληλες γραμμές, παράλληλες στήλες και εφαπτόμενα στρώματα. Οι κυψελίδες που δύναται να χρησιμοποιηθούν κατά την προσομοίωση, αναφέρονται ως ενεργές κυψελίδες καθώς στο εσωτερικό τους, πραγματοποιείται ροή υπογείου νερού (Τάντος Β., 2006). Πιο συγκεκριμένα, στα όρια του καθορισμένου υδροφορέα, παρατηρούνται ενεργά κελιά με αμετάβλητο υδραυλικό φορτίο (σταθερό φορτίο), αλλά και κελιά μηδενικής ροής (no flow cells) στα οποία δε λαμβάνει χώρα καμία εισροή νερού και κατά συνέπεια καμία υπόγεια ροή.

Κατά την **είσοδο στον κώδικα Modflow**, ο χρήστης δύναται να επιλέξει από τον κύριο κατάλογο (main menu), τη δημιουργία ενός νέου μοντέλου (project) αλλά και το άνοιγμα ενός παλαιότερου ήδη αποθηκευμένου στη μνήμη του ηλεκτρονικού

υπολογιστή. Οι άνωθεν επιλογές, παρουσιάζονται στην ένδειξη File. Επιπλέον επιλογές του κύριου καταλόγου αποτελούν, η ένδειξη Input με επιλογή της οποίας εισάγονται τα μεγέθη και τα είδη των βασικών υδρογεωλογικών παραμέτρων του φυσικού συστήματος και η ένδειξη Setup βάση της οποίας δύναται η αλλαγή βασικών χαρακτηριστικών του διαμορφωμένου μοντέλου, όπως για παράδειγμα ο απαιτούμενος χρόνος προσομοίωσης για την επίτευξη σταθερής κατάστασης (steady state simulation time) αλλά και ο τύπος ροής. Τέλος συναντάμε τις ενδείξεις Run και Output, οι οποίες αφορούν την εκτέλεση της προσομοίωσης και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης αντίστοιχα. Το μοντέλο παρέχει και συμβουλευτική ένδειξη Help, προορισμένη για τη διευκόλυνση του εκάστοτε χρήστη στην περίπτωση ελλειπούς κατανόησης των εντολών και των λειτουργιών του (Waterloo Hydrogeologic Inc., 1995 – 2006).

Ο κώδικας Modflow, όπως έχει προαναφερθεί περιλαμβάνει επιμέρους υπολογιστικά πακέτα τα οποία διαμορφώνονται στο εσωτερικό του μοντέλου σε μορφή λίστας, εκ των οποίων το κάθε ένα, εκτελεί μία συγκεκριμένη εργασία προσομοίωσης. Τα υπολογιστικά αυτά πακέτα αποτελούν ουσιαστικά τις **υπορουτίνες του συνολικού υπολογιστικού προγράμματος Modflow**. Η εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων στο μοντέλο, όπως για παράδειγμα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα, τα υδραυλικά φορτία τα οποία διαμορφώνουν την κίνηση του υπόγειου ύδατος αλλά και επίσης οι αρχικές συνθήκες πιεζομετρίας στον υδροφορέα (αρχικά υδραυλικά φορτία – initial heads), γίνεται με τη χρήση των εν λόγω «υπορουτίνων». Κατά την εφαρμογή του κώδικα Modflow σε μία περιοχή, οι συχνά χρησιμοποιούμενες υπορουτίνες, παρουσιάζονται και αναλύονται παρακάτω:

- Πλευρική τροφοδοσία με σταθερό εξωτερικό ύψος ύδατος (G.H.B.).

Η υπορουτίνα G.H.B., αποτελεί την πλευρική τροφοδοσία του υδροφορέα, εφόσον προκαθοριστεί ένα σταθερό υδραυλικό ύψος στα όρια της περιοχής των ενεργών κυψελίδων του υπό εξέταση υδροφόρου συστήματος. Η χρήση του πακέτου G.H.B. (Groundwater Head Boundary), απαιτεί την επίλυση της εξίσωσης Dupuit, για την περιοχή του υδροφορέα που έχει επιλεγεί να τροφοδοτηθεί πλευρικά και κατά συνέπεια, τη γνώση σημαντικών υδραυλικών παραμέτρων όπως της υδραυλικής αγωγιμότητας αλλά επίσης και τη γνώση της κατεύθυνσης της ροής. Ουσιαστικά το πακέτο αυτό χρησιμοποιείται κυρίως για την προσομοίωση της υπόγειας υδραυλικής επικοινωνίας γειτονικών υδροφορέων. Η υδραυλική παροχή όπως είναι κατανοητό, είναι αντιστρόφως ανάλογη της υδραυλικής αγωγιμότητας της εκάστοτε περιοχής και επίσης ανάλογη με τη διαφορά των υδραυλικών υψών, ανάμεσα στην εξωτερική πηγή τροφοδοσίας και την εσωτερικά παρατηρούμενη στάθμη ύδατος σε κάθε σημείο ενδιαφέροντος του υδροφορέα.

Επιπλέον η υδραυλική αγωγιμότητα εξαρτάται σύμφωνα με την εξίσωση Dupuit, από τις διαστάσεις της περιοχής που τροφοδοτείται πλευρικά. Πιο συγκεκριμένα η αγωγιμότητα είναι ανάλογη του μήκους που παρατηρείται μεταξύ του εξωτερικού σημείου γνωστής στάθμης ύδατος και του εσωτερικού σημείου γνωστού υδραυλικού ύψους, αλλά και αντιστρόφως ανάλογη του πλάτους της πλευρικής εισαγωγής νερού.

Το συγκεκριμένο πακέτο, προσφέρει με τη σειρά του τη δυνατότητα διαμόρφωσης χρονικών περιόδων τροφοδοσίας και για να την ανάπτυξη του, απαιτεί τη γνώση της στάθμης ύδατος της εξωτερικής πηγής, για παράδειγμα μίας λίμνης, αλλά και τη γνώση της υδραυλικής αγωγιμότητας στην περιοχή ενδιαφέροντος.

- Εισαγωγή ύδατος με εμπλουτισμό (Recharge).

Ο εμπλουτισμός του υδροφορέα με χρήση αυτού του πακέτου, περιλαμβάνει κυρίως την κατείσδυση από τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις, την κατείσδυση επιφανειακά απορρεόντων υδάτων σε περιοχές γνωστού ποσοστού κατεισδύμενου ύδατος προερχόμενου από επιφανειακές απορροές, καθώς επίσης και την τροφοδοσία του υδροφορέα από εσωτερικές πηγές οι οποίες εμπλουτίζουν το σύστημα. Η κατείσδυση με τη χρήση αυτής της υπορουτίνας, μπορεί να σημειωθεί μόνο στο ανώτερο στρώμα του υδροφορέα. Σύμφωνα με το προαναφερθέν, ο εμπλουτισμός σημειώνεται στην επιφάνεια του εδάφους, όπως στην πραγματικότητα παρατηρείται κατά την κατείσδυση επιφανειακών υδάτων.

- Γεωτρήσεις άντλησης, εμπλουτισμού και παρατήρησης (Pump – observation wells).

Η υπορουτίνα αυτή χρησιμοποιείται για την εισαγωγή δεδομένων γεωτρήσεων άντλησης (αρδευτικές, υδρευτικές) ή εμπλουτισμού σε έναν υδροφορέα. Η χρήση του πακέτου προσφέρει τη δυνατότητα καθορισμού συγκεκριμένων χρονικών περιόδων άντλησης ή εμπλουτισμού του υδροφορέα. Κατά τη χρήση του, η άντληση ύδατος είναι δυνατή με την προσθήκη αρνητικού προσήμου στις εισαγόμενες τιμές παροχής των γεωτρήσεων, ενώ στον αντίποδα, οι θετικές εισαγόμενες τιμές υποδηλώνουν τον εμπλουτισμό του υδροφορέα. Τέλος είναι δυνατόν να απενεργοποιηθεί η διαδικασία άντλησης ή εμπλουτισμού οποιασδήποτε γεώτρησης για ορισμένο επιθυμητό χρονικό διάστημα, χωρίς να είναι απαραίτητη η απομάκρυνση της γεώτρησης (inactive well).

Σχετικά με τις γεωτρήσεις παρατήρησης, είναι δυνατός, ο καθορισμός της θεωρητικά απαιτούμενης στάθμης ύδατος, σε συγκεκριμένα σημεία, για τα οποία σύμφωνα με τα υπάρχοντα δεδομένα, η πιεζομετρία του υδροφορέα είναι γνωστή.

- Σταθερό υδραυλικό φορτίο (Constant head).

Στο πακέτο αυτό παρατηρείται αμετάβλητη ποσότητα εισερχόμενου ύδατος κατά τη διάρκεια ολόκληρης της προσομοίωσης. Τα φορτία στα επιλεγθέντα ενεργά κελιά, παρουσιάζουν σταθερό υδραυλικό φορτίο από την έναρξη της προσομοίωσης έως και το πέρας της. Συγκεκριμένα κατά τη χρήση του μοντέλου και της υπορουτίνας constant head, προσφέρεται η δυνατότητα εισαγωγής σταθερού υδραυλικού ύψους κατά την έναρξη μίας χρονικής περιόδου αλλά και η δυνατότητα εισαγωγής σταθερού φορτίου στο πέρας της ίδιας χρονικής περιόδου.

- Υδατορέματα (Rivers, streams).

Στην περίπτωση αυτή, τα υδατορέματα επηρεάζουν υδραυλικά τον υδροφορέα ή επηρεάζονται τα ίδια από τον υδροφορέα. Σύμφωνα με την υπορουτίνα αυτή, πραγματοποιείται προσομοίωση της υπόγειας ροής που λαμβάνει χώρα μεταξύ των ρεμάτων και του υδροφορέα. Ανάλογα με την υδραυλική κλίση που παρατηρείται μεταξύ του υδατορέματος και του υδροφόρου ορίζοντα, σημειώνεται τροφοδοσία του υδροφόρου ορίζοντα από τα υδατορέματα ή ανάποδα, τροφοδοσία των ρεμάτων από τον υδροφόρο ορίζοντα.

- Τοίχος αποστράγγισης (Drain).

Η συγκεκριμένη υπορουτίνα, χρησιμεύει στην εξαγωγή υδάτων από το σύστημα, με τρόπο τέτοιο ώστε να είναι δυνατή η συγκράτηση ύδατος στο εσωτερικό του υδροφορέα στην περίπτωση που αυτό είναι αναγκαίο (π.χ. αυξημένες αντλητικές συνθήκες και απαίτηση επαναφοράς ύδατος). Επιπρόσθετα το πακέτο αυτό προσφέρει και τη δυνατότητα απελευθέρωσης σημαντικής ποσότητας ύδατος συνήθως στα κατάντη του υδροφόρου συστήματος ούτως ώστε σε περίπτωση που κρίνεται αναγκαίο για την ορθή βαθμονόμηση του μοντέλου να είναι δυνατή η πτώση της στάθμης ύδατος στο εσωτερικό του υδροφορέα. Κατά κύριο λόγο, ο σχεδιασμός του πακέτου αυτού στηρίζεται στην απαίτηση επιστροφής του αρδευτικού νερού στον υδροφόρο ορίζοντα.

- Αρχικά υδραυλικά ύψη (Initial heads).

Στην περίπτωση προσομοίωσης ενός συστήματος και εφόσον επιλεγθεί σταθερή κατάσταση (steady state), παρατηρείται ικανοποιητική αναπλήρωση του υδροφορέα με την προϋπόθεση ότι δε μεταβάλλονται σημαντικά τα αρχικά υδραυλικά φορτία. Επίσης προκειμένου να παρατηρηθεί ομαλή εξέλιξη της υπόγειας ροής κατά τη διάρκεια της

προσομοίωσης με αποφυγή μίας αρχικής αδικαιολόγητης απότομης πτώσης του μέσου υδραυλικού ύψους, κρίνεται απαραίτητη η επιλογή των αρχικών υψών του νερού στον υδροφορέα. Με τη χρήση της υπορουτίνας των αρχικών υδραυλικών υψών και την κατάλληλη επιλογή της αρχικής στάθμης, αποφεύγεται οποιαδήποτε αναίτια αρχική πτώση ή ακόμα και αδικαιολόγητη άνοδος του υδροφόρου ορίζοντα κατά την έναρξη της προσομοίωσης.

- Εξαγωγή αποτελεσμάτων (Output control).

Το πακέτο αυτό, έχει τη δυνατότητα σύνδεσης με βοηθητικά προγράμματα γραφικής απεικόνισης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Κατά βάση, στο πακέτο λαμβάνει χώρα ο καθορισμός της μορφής των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Εκτός της αναφοράς των παραπάνω υπορουτίνων και των δυνατοτήτων τους, είναι εξαιρετικά σημαντικό να αναφερθεί πως ο κώδικας Modflow, παρέχει τη δυνατότητα **καθορισμού χρονικών περιόδων** στο εσωτερικό των υπορουτίνων και ορισμένων ανάλογων επιθυμητών υδραυλικών παραμέτρων (π.χ. μεταβολή παροχής αντλητικών γεωτρήσεων χρονικά αλλά όχι χρονική μεταβολή υδραυλικής αγωγιμότητας), με σκοπό το σχεδιασμό υποθετικών σεναρίων χρονικής μεταβολής των παραμέτρων αυτών.

Εν ολίγοις, όπως παρουσιάζεται και στην παρούσα διπλωματική, η χρήση του μοντέλου Modflow παρέχει τη δυνατότητα σχεδιασμού και υλοποίησης υποθετικών σεναρίων. Τα υποθετικά σενάρια αποτελούν συνήθως μελλοντικές υποθέσεις οι οποίες αποσκοπούν στο να διερευνηθεί η ευαισθησία του μοντέλου στη μεταβολή βασικών ή μη παραμέτρων. Σύμφωνα με τα προεπιλεγθέντα σενάρια, μεταβάλλονται υποθετικά οι συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή εφαρμογής του μοντέλου. Οι ενδεικτικότερες προς μεταβολή παράμετροι είναι οι παροχές άντλησης των γεωτρήσεων και η ποσότητα κατεισδυόμενου ύδατος βροχόπτωσης. Με τη χρήση τέτοιου είδους σεναρίων επιτρέπεται να μελετηθεί οποιαδήποτε υποθετική κατάσταση και να γίνει αξιόπιστη πρόβλεψη της εξέλιξης διαφόρων ανθρωπογενών αλλά και φυσικών φαινομένων. Παραδείγματα τέτοιων υποθετικών σεναρίων, αποτελούν, η σταδιακή αύξηση της παροχής των αντλήσεων λόγω αυξημένης απαίτησης αρδευτικού ή υδρευτικού ύδατος, η υφαλμύριση υπογείων υδάτων, η μείωση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων καθώς και η ρύπανση υπογείων υδάτων.

Είναι αρκετά σημαντικό να σημειωθεί, ότι κατά την κατασκευή του μοντέλου, θα πρέπει να επιλεγθούν βασικές παράμετροι, οι οποίες θα παραμείνουν αναλλοίωτες κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης αλλά και κατά τη διάρκεια χρήσης των εκάστοτε υπορουτίνων για την εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων. Στα αρχικά

κατασκευαστικά βήματα ενός Project σε Modflow περιβάλλον, χρησιμοποιούνται δύο βασικά πακέτα, καθορισμού των αρχικών βασικών συνιστωσών, βάση των οποίων δομείται το υπό κατασκευή μοντέλο.

- Βασικό πακέτο.

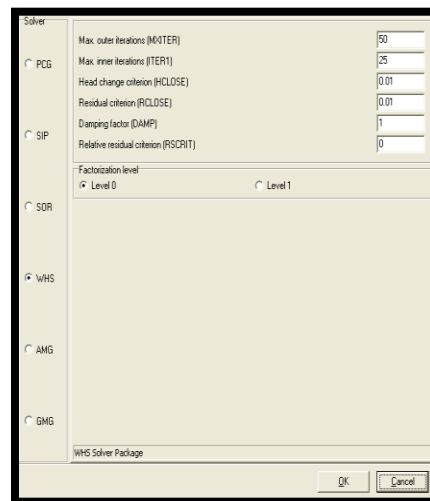
Κατά την κατασκευή του μοντέλου, στο βασικό πακέτο δύναται να επιλεγθούν οι μονάδες μέτρησης των παραμέτρων που συναντώνται στο μοντέλο. Ακόμη το βασικό πακέτο περιλαμβάνει εντολές διαμόρφωσης του κανάβου (αριθμός στηλών, αριθμός γραμμών) καθώς και εντολές επιλογής του αριθμού των στρωμάτων του υδροφορέα. Επίσης γίνεται καθορισμός της χρονικής περιόδου προσομοίωσης αλλά και των οριακών συνθηκών σε κάθε κόμβο των κυψελίδων που διαμορφώνουν τον κানাβο της υπό μελέτη περιοχής. Κατά την εμφάνιση των τριών πρώτων παραθύρων – του βασικού πακέτου – όταν ξεκινά η κατασκευή του μοντέλου, μπορούμε επιπλέον να επιλέξουμε τον τύπο υπόγειας ροής για την επιθυμητή προσομοίωση (flow type) από την ένδειξη flow simulation, την περίπτωση ύπαρξης μεταφερόμενης προσομοίωσης (transport simulation) όταν παρατηρείται μεταφορά ρύπου μέσω της υπόγειας ροής, καθώς επίσης και την επιθυμητή φωτογραφία της υπό εξέταση περιοχής (bitmap).

- Κεντροβαρική διάταξη ροής.

Κατά τη χρήση του πακέτου αυτού, εισάγονται πληροφορίες που αφορούν το μέγεθος της μεταβιβασιμότητας για την περίπτωση των περιορισμένων υδροφορέων καθώς και το μέγεθος της υδραυλικής αγωγιμότητας στην περίπτωση των ελεύθερων υδροφορέων. Ακόμη εισάγονται τιμές του συντελεστή εναποθηκευτικότητας και του ενεργού πορώδους.

Στη διαδικασία επίλυσης, το πρόγραμμα Modflow χρησιμοποιεί επαναληπτικές μεθόδους εκ των οποίων οι τέσσερις σημαντικότερες είναι οι ακόλουθες:

- Υπό προϋποθέσεις επαναληπτική διαδικασία συζυγών κλίσεων P.C.G. (Preconditioned Conjugate Gradient).
- Ισχυρά πεπλεγμένη διαδικασία S.I.P. (Strongly Implicit Procedure).
- Διαδοχική υπερχαλάρωση S.O.R. (Successive Over Relaxation).
- Μηχανή επίλυσης W.H.S. (Waterloo Hydrogeologic Software).



Εικόνα 6.6.2 Παράθυρο επιλογής μεθόδου επίλυσης, με επιλεγμένη τη μηχανή επίλυσης WHS (4^η κατά σειρά), όπως παρουσιάζεται στο περιβάλλον του λογισμικού Visual Modflow.

Το μοντέλο Modflow επιλύει αριθμητικά τη διαφορική εξίσωση της υπόγειας ροής (όπως αυτή έχει αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο) με εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών (Finite Differences Method – F.D.M) (Hildebrand B. F., Finite - Difference Equations and Simulations, Section 2.2, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1968). Η επίλυση πραγματοποιείται σε τρεις διαστάσεις και σε συνθήκες μόνιμης αλλά και μη μόνιμης ροής. Για την αποτελεσματική λειτουργία της παραπάνω διαδικασίας επίλυσης, το υπολογιστικό πακέτο Modflow, χρησιμοποιεί διάφορα πακέτα επίλυσης (solver packages), εκ των οποίων τα βασικότερα είναι τα παρακάτω:

- WHS solver package.
- PCG solver package.

Το μοντέλο το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας μελέτης, είναι η έκδοση Visual του υπολογιστικού πακέτου Modflow, η οποία υποστηρίζει πλέον τις νέες μηχανές επίλυσης GMG και SAMG. Αυτές οι μηχανές επίλυσης, είναι ταχύτερες κατά τρείς έως έντεκα ώρες από τον βασικό πακέτο επίλυσης PCG, στην περίπτωση μεσαίου μεγέθους μοντέλου. Ακόμη έχει αποδειχθεί ότι τα πακέτα επίλυσης GMG και SAMG είναι ταχύτερα από την παραδοσιακή μηχανή επίλυσης PCG και για τα μεγάλα μοντέλα που περιέχουν συνολικό αριθμό κυψελίδων, μεγαλύτερο του ενός εκατομμυρίου (Waterloo Hydrogeologic Inc., 1995 – 2006).

Στο παρόν μοντέλο, ως μηχανή επίλυσης επιλέχθηκε το πακέτο επίλυσης WHS. Πιο συγκεκριμένα, η **μηχανή επίλυσης WHS**, χρησιμοποιεί μέθοδο επαναλήψεων, και προσεγγίζει επαναληπτικά το αποτέλεσμα της επίλυσης ενός συνόλου μερικών διαφορικών εξισώσεων, βάση μίας προσεγγιστικής επίλυσης (Παππά Α., 2010). Για τη μηχανή επίλυσης WHS είναι διαθέσιμα δύο επίπεδα παραγοντισμού (factorization levels), το πρώτο είναι το επίπεδο 0 και το δεύτερο το επίπεδο 1. Η μητρική εξίσωση για τη ροή του υπόγειου νερού είναι αρχικά «ανεπαρκούς συνθήκης», κατά αυτό τον τρόπο, για αποτελεσματική επίλυση, είναι αναγκαία μία ενεργή προϋπόθεση για αυτές τις εξισώσεις. Το πακέτο επίλυσης WHS, πρακτικά χρησιμοποιεί τη ρουτίνα επιτάχυνσης της σταθερής συζυγούς βαθμίδας ενώ αξιοσημείωτο αποτελεί το γεγονός, ότι η απαιτούμενη μνήμη για την πραγματοποίηση της επίλυσης, αυξάνει με την αύξηση του επιπέδου παραγοντισμού παράλληλα όμως με την αύξηση του επιπέδου, παρατηρείται και σύγκλιση της επίλυσης με λιγότερες επαναλήψεις.

Στην περίπτωση χρησιμοποίησης, του **πακέτου επίλυσης PCG** (Preconditioned Conjugate Gradient Solver), η μηχανή επίλυσης χρησιμοποιεί τη μέθοδο της συζυγούς βαθμίδας με σκοπό την επίλυση των εξισώσεων του μοντέλου. Το πακέτο αυτό περιλαμβάνει δύο επιλογές όσον αφορά τη βασική προϋπόθεση επίλυσης (Αμερικάνικη Υπηρεσία Γεωλογικών Ερευνών, <http://water.usgs.gov/>):

- Την επιλογή της πολωνυμικής προϋπόθεσης, κατά την οποία απαιτείται περιορισμένη εκμετάλλευση μνήμης του ηλεκτρονικού υπολογιστή.
- Την επιλογή της προϋπόθεσης Cholesky.

Η σύγκλιση της επίλυσης στην περίπτωση της μηχανής επίλυσης PCG, καθορίζεται με τη χρήση των μεταβολών των υδραυλικών φορτίων αλλά και τη χρήση των κριτηρίων υπολοίπου. Επιπλέον δύναται να πραγματοποιηθεί προσομοίωση γραμμικών καθώς και μη γραμμικών συνθηκών ροής. Συγκεκριμένα στην περίπτωση των μη γραμμικών προβλημάτων, κατά την επίλυση χρησιμοποιούνται επαναλήψεις Picard, βάση των οποίων είναι δυνατή η εξασφάλιση της ύπαρξης αλλά και της μοναδικότητας των λύσεων σε 1^{ης} τάξης εξισώσεις, για τις οποίες οι αρχικές συνθήκες θεωρούνται δεδομένες (Παππά Α., 2010).

6.7. Οριακές συνθήκες ροής.

Η κατάλληλη επιλογή των οριακών συνθηκών, αποτελεί βασική προϋπόθεση για την κατασκευή ενός αξιόπιστου μοντέλου, το οποίο θα είναι ικανό να αποδώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα, αντιπροσωπευτικά των πραγματικών συνθηκών που επικρατούν στην υπό μελέτη περιοχή. Με τη χρήση οριακών συνθηκών, καθορίζουμε τη

στάθμη ύδατος (εξαρτημένη μεταβλητή) αλλά είναι δυνατόν να καθοριστεί επιπλέον και η παράγωγος της μεταβλητής αυτής, δηλαδή η ροή ύδατος (flux). Ο παραπάνω καθορισμός λαμβάνει χώρα στα όρια της περιοχής μελέτης.

Θα πρέπει να επισημανθεί πως τα υδρογεωλογικά όρια των υδροφόρων συστημάτων, σχηματίζονται από φυσικές παρουσίες οι οποίες ουσιαστικά καθορίζουν την έκταση αλλά και το βάθος του ενεργού τμήματος του υδροφορέα ενδιαφέροντος, ενώ ταυτόχρονα διαμορφώνουν και τις συνθήκες εμπλουτισμού του υδροφόρου ορίζοντα και κατά συνέπεια, της υπόγειας ροής στο υδροφόρο σύστημα. Τέτοιου είδους φυσικά όρια, αποτελούν τα αδιαπέρατα στρώματα, καθώς επίσης και τα υπόγεια ή επιφανειακά υδρολογικά φαινόμενα, όπως για παράδειγμα η ύπαρξη ενός ποταμού αλλά και η ύπαρξη υπόγειων ρηγμάτων καρστικού ή μη χαρακτήρα.

Στην περίπτωση προσομοίωσης σε συνθήκες σταθερής κατάστασης (steady state case), η επιλογή των οριακών συνθηκών, αποκτά ακόμα μεγαλύτερη σημασία διότι το είδος της υπόγειας ροής και η πιθανότητα εμφάνισης σφάλματος στα αποτελέσματα της προσομοίωσης, εξαρτώνται σε μεγαλύτερο πλέον βαθμό από την καταλληλότητα των επιλεγθέντων οριακών συνθηκών.

Οι οριακές συνθήκες, που συναντώνται στα κλασσικά μοντέλα προσομοίωσης υπόγειας ροής, είναι στο σύνολο τους τρεις και εκφράζονται σε μαθηματική μορφή όπως παρακάτω (Παππά Α., 2010):

- Οριακή συνθήκη Dirichlet.

Το εν λόγω όριο, αναφέρεται στον καθορισμό του υδραυλικού ύψους το οποίο κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης, θεωρείται δεδομένο.

- Οριακή συνθήκη Neumann.

Το συγκεκριμένο όριο, αναφέρεται στον καθορισμό της ροής (flux). Η συνθήκη καθορισμένης ροής επιλέγεται κατά μήκος μιας συνοριακής επιφάνειας που η ροή αποτελεί συνάρτηση του χρόνου και της θέσης. Στην περίπτωση ενός υδραυλικά αδιαπέρατου φράγματος, η ροή τίθεται μηδενική.

- Οριακή συνθήκη Cauchy.

Στην συνθήκη αυτή, η ροή εξαρτάται από το υδραυλικό ύψος στα όρια. Συγκεκριμένα η ροή διαμέσου μιας οριακής επιφάνειας εξαρτάται από την εκάστοτε μεταβολή του υδραυλικού φορτίου, εγκάρσια της οριακής επιφάνειας. Η συνθήκη αποκαλείται και συνθήκη μεταβλητού φορτίου ή μικτού ορίου. Σχετικά με τον τελευταίο

χαρακτηρισμό, αυτός αποδίδεται λόγω της συσχέτισης της υπόγειας ροής με τις τιμές της στάθμης ύδατος, στα όρια.

Στην παρούσα προσομοίωση υπόγειας ροής, κατά την κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης στον κώδικα Visual Modflow, χρησιμοποιήθηκε η οριακή συνθήκη Dirichlet, δηλαδή η συνθήκη καθορισμένου υδραυλικού ύψους.

6.8. Σχεδιασμός και αναλυτική ανάπτυξη του μοντέλου προσομοίωσης.

Για τον ολοκληρωμένο σχεδιασμό της προσομοίωσης, απαιτείται η εισαγωγή των ποσοτήτων του υδρολογικού ισοζυγίου του υδροφορέα της λεκάνης στο μοντέλο προσομοίωσης καθώς και η μετατροπή του μεγέθους των βασικών γεωμετρικών και υδραυλικών παραμέτρων σε μορφή αναγνωρίσιμη από το υπολογιστικό μοντέλο στο οποίο θα εισαχθούν. Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενες παραγράφους διαφορετικών κεφαλαίων, κατά την κατασκευή ενός μοντέλου προσομοίωσης, αρχικά επιλέγουμε βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου όπως για παράδειγμα τον τύπο ροής, το μέγεθος του κανάβου προσομοίωσης, τις μονάδες των μεταβλητών που χρησιμοποιεί το μοντέλο κ.α.. Οι επιλογές αυτές πραγματοποιούνται στα αρχικά παράθυρα που εμφανίζονται κατά την κατασκευή του μοντέλου και παραμένουν αμετάβλητες σε ολόκληρη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Βασικά βήματα ανάπτυξης του μοντέλου, αποτελούν η ανάλυση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του υπό μελέτη υδροφορέα, η παρουσίαση και ανάλογη επεξεργασία του υδρολογικού ισοζυγίου και η κατάλληλη χρήση των υπορουτίνων του υπολογιστικού κώδικα για την εισαγωγή των απαραίτητων για την εκτέλεση της προσομοίωσης δεδομένων.

Σχετικά με το περιβάλλον εργασίας στο μοντέλο Visual Modflow, στον κύριο κατάλογο επιλογών, συναντάμε όπως έχει προαναφερθεί, την επιλογή εισαγωγής δεδομένων (Input) στην οποία περιέχονται οι υπορουτίνες, την επιλογή εκτέλεσης της προσομοίωσης (Run) στην οποία είναι δυνατόν να επιλέξουμε τη μηχανή επίλυσης που θα χρησιμοποιηθεί, την επιλογή εξαγωγής αποτελεσμάτων (Output) καθώς και την επιλογή (Setup) με την οποία διαμορφώνουμε τα βασικά χαρακτηριστικά της προσομοίωσης. Τέλος σημαντική παράμετρος κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης αποτελεί ο παράγοντας επίλυσης (multiplier) που χρησιμοποιείται από την εκάστοτε μηχανή επίλυσης του υπολογιστικού μοντέλου. Ο παράγοντας αυτός καθορίζεται στην επιλογή εκτέλεσης της προσομοίωσης (Run) και για την παρούσα προσομοίωση έλαβε τιμή 1.

Στα αρχικά στάδια κατασκευής του μοντέλου πραγματοποιήθηκαν τα παρακάτω, κατά σειρά εμφάνισης στο περιβάλλον εργασίας του κώδικα:

- Άνοιγμα καινούργιου φακέλου στην επιφάνεια εργασίας.
- Άνοιγμα του προγράμματος Modflow και επιλογή New από την επιλογή File που εμφανίζεται πάνω στη γραμμή «εργαλείων» (toolbar) του μοντέλου.
- Άνοιγμα του καινούργιου φακέλου από την επιφάνεια εργασίας μέσω του μοντέλου και καταχώρηση ονομασίας της εργασίας (Project) ως: Viannos – Project. Κατόπιν αυτού αποθηκεύσαμε το Project (Επιλογή Save).
- Επιλογή χρόνου προσομοίωσης για σταθερή κατάσταση (Steady – State Simulation Time): 1000 μέρες.
- Επιλογή των μονάδων των μεταβλητών (Units). Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν τα default. Όπως δηλαδή παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Παράμετροι	Μονάδες
Μήκος	m
Χρόνος	day
Υδραυλική Αγωγιμότητα	m / sec
Παροχή	m ³ / sec
Εμπλουτισμός	mm / year
Μάζα	kg
Συγκέντρωση	mg / lit

Πίνακας 6.8.1 Μονάδες μεταβλητών του μοντέλου προσομοίωσης.

- Επιλογή από την ένδειξη Flow Simulation για το Flow type: Saturated Constant Density, δηλαδή σταθερή πυκνότητα σε κορεσμένο πορώδες.
- Επιλέγουμε στον τύπο εκτέλεσης (Run – Type): Transient Flow, λόγω της ύπαρξης χρονικών περιόδων και μεταβλητών παραμέτρων σε αυτές (π.χ. υδραυλικών φορτίων).

Σύμφωνα με τα άνωθεν, διαμορφώθηκαν τα κύρια χαρακτηριστικά της προσομοίωσης και μετέπειτα χρησιμοποιήθηκε η επιλογή των εισαγόμενων παραμέτρων (Input) για τη κατασκευή του μοντέλου.

6.8.1. Ανάλυση γεωμετρικών χαρακτηριστικών και χωρική διακριτοποίηση.

Η λεκάνη απορροής εκτείνεται από την Άνω Βιάννο βορειοανατολικά της περιοχής έως την θέση Καμάρα βορειοδυτικά, και από τη θέση Πετριά νοτιοανατολικά της περιοχής έως την Κάτω Βιάννο, νοτιοδυτικά της περιοχής.

Για την ανάλυση και μετέπειτα εισαγωγή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του υδροφορέα στο μοντέλο προσομοίωσης, χρησιμοποιήθηκε το αρχικό πακέτο κατασκευής του μοντέλου. Στα πρώτα βήματα δημιουργίας του επιλέξαμε τα παρακάτω:

- Επιλογή από την ένδειξη Grid του βασικού πακέτου (αρχικά στάδια κατασκευής):
 - Στήλες κανάβου: (Columns) (j): 50
 - Γραμμές κανάβου (Rows) (i): 50
 - Επίπεδα (Layers): 1
 - Τελικό βάθος του υδροφορέα (Zmin): - 100(m)
 - Εναρκτήριο σημείο μετρήσεων υψομέτρου στον υδροφορέα (Zmax): 0(m)

Επιπλέον έγινε καταχώρηση του χάρτη (bitmap) στο μοντέλο, καθώς επίσης η γεωαναφορά του αλλά και η εισαγωγή του υψομέτρου της περιοχής.

- Επιλογή: Import a site map κι από την ένδειξη Browse επιλέξαμε τον χάρτη vianos.bmp.
- Για τη γεωαναφορά του χάρτη επιλέξαμε δύο σημεία γεωαναφοράς: 1^ο τη γεώτρηση Τούρκου και 2^ο τη γεώτρηση Παπαγιάννη. Έπειτα συμπληρώσαμε τις απαιτούμενες συντεταγμένες για κάθε σημείο γεώτρησης (X1 , Y1) και (X2 , Y2) αντίστοιχα.
- Για την καταχώρηση του υψομέτρου της περιοχής στο μοντέλο, επιλέξαμε Import Elevation κι έπειτα στην ένδειξη Layer surface, επιλέξαμε Ground Surface (Επιφάνεια εδάφους). Στη συνέχεια για τις παρακάτω ενδείξεις επιλέξαμε τα αντίστοιχα:

- Options: Import data
- Interpolator: Inverse Distance
- Data source: Επιλογή του χάρτη elev_viannos.shp

- Επίσης επιλέξαμε ως μονάδα υψομέτρου το μέτρο (Elevation units: Meters).

Πιο αναλυτικά, το συνολικό πάχος του υπό μελέτη υδροφορέα διαμορφώθηκε τελικά από τα συνολικά 565 m που συναντώνται στην εκβολή της λεκάνης απορροής, έως και τα 660 m συνολικά, που συναντώνται στα βορειοανατολικά και βόρεια της λεκάνης απορροής όπου το υψόμετρο αυξάνεται σημαντικά.

Η περιοχή στην οποία βρίσκεται η λεκάνη απορροής, έχει συνολική επιφάνεια 5.764.400 m² με διαστάσεις 2.665 m * 2.163 m. Ο κάνναβος προσομοίωσης έχει διαστάσεις κυψελίδας 50 * 50 με συνολικά 2.500 κυψελίδες από τις οποίες οι 1237 είναι

ενεργές. Επιπλέον, οι διαστάσεις της κάθε κυψελίδας με ακρίβεια είναι: 43,26 m * 53,3 m ενώ η συνολική επιφάνεια κάθε κυψελίδας είναι 2.305,758 m². Η λεκάνη ενδιαφέροντος η οποία θεωρείται και υδραυλικά ενεργή στην προσομοίωση, έχει συνολική επιφάνεια 2.852.223 m².

Τέλος όπως έχει προαναφερθεί, η λεκάνη ενδιαφέροντος σύμφωνα με την παρούσα προσομοίωση παρουσιάζει μεγαλύτερη επιφάνεια κατείσδυσης ύδατος, άρα και μεγαλύτερο όγκο κατεισδύμενου νερού συγκριτικά με τις τιμές της μελέτης των Παπαμαστοράκη κ.α.. Ωστόσο κρατήθηκε η τιμή της βροχόπτωσης και το ποσοστό κατείσδυσης της, από την ως άνω μελέτη, με στόχο την αποφυγή επιβάρυνσης του υδροφορέα με επιπλέον ποσότητα κατεισδύμενου νερού.

6.8.2. Υδρογεωλογικό ισοζύγιο του υδροφορέα.

Το υδρογεωλογικό ισοζύγιο που απαντάται στον υδροφορέα της λεκάνη Βιάννου Ηρακλείου, περιέχει ως εισροές πλευρικές τροφοδοσίες, κατεισδύμενα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, πηγές εμπλουτισμού και κατεισδύμενες επιφανειακές απορροές. Οι εκροές του ισοζυγίου περιλαμβάνουν τις αντλήσεις από τις γεωτρήσεις της περιοχής αλλά και πλευρικές απώλειες στα κατάντη της λεκάνης στα νοτιοδυτικά της περιοχής.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για την έκφραση του υδρογεωλογικού ισοζυγίου του υδροφορέα της λεκάνης ισχύει η παρακάτω εξίσωση σε ετήσια βάση:

$$K + P + A + S_{in} = E + S_{out}$$

Σχέση (5.6.1)

Όπου:

- Για τις εισροές ισχύει:
 - $K = 227.888 \text{ m}^3 / \text{year}$
(Ετήσια κατείσδυση νερού βροχόπτωσης)
 - $P = 585.640 \text{ m}^3 / \text{year}$
(Ετήσια συνεισφορά πηγών)
 - $A = 58.837 \text{ m}^3 / \text{year}$
(Ετήσια συνεισφορά μέσω κατείσδυσης επιφανειακών απορροών)
 - $S_{in} = 172.474 \text{ m}^3 / \text{year}$
(Ετήσιες πλευρικές τροφοδοσίες)

- Για τις εκροές ισχύει:
- $E = 1.044.840 \text{ m}^3 / \text{year}$
(Ετήσιες αρδευτικές και υδρευτικές αντλήσεις)
- S_{out} : Μεταβαλλόμενες ετήσιες πλευρικές εκροές εποχιακά και ανάλογα με τη ρύθμιση του μοντέλου.

Θα πρέπει να σημειωθεί όπως αναλυτικότερα έχει αναφερθεί και στο 5^ο κεφάλαιο, ότι η ποσότητα υδάτων που κατεισδύει στη λεκάνη λόγω βροχοπτώσεων, εξαρτάται από το επιλεγμένο ποσοστό κατεισδυσής το οποίο είναι 10 %, σύμφωνα με τη μελέτη των Παπαμαστοράκη κ.α. Το ύψος βροχόπτωσης είναι 874 mm άρα η ποσότητα νερού που κατεισδύει είναι 87,4 mm. Επιπλέον οι πλευρικές τροφοδοσίες προέρχονται από τους ασβεστόλιθους Πίνδου, Τρίπολης και τους τριαδικούς γύψους οι οποίοι βρίσκονται στα βορειοανατολικά της λεκάνης.

Τέλος, είναι εξαιρετικά σημαντικό να υπογραμμιστεί, ότι **οι τροφοδοσίες λόγω των επιφανειακών απορροών** για την επιστημονικά ορθή εισαγωγή τους στο μοντέλο, επιλέχθηκε να εισαχθούν ως πλευρικές τροφοδοσίες σε δύο τμήματα του υδροφορέα τα οποία βρίσκονται στα δυτικά της λεκάνης και στα βορειοανατολικά. Συγκεκριμένα όπως θα αναφερθεί αναλυτικότερα και στην παράγραφο 6.8.3, η συνολική ποσότητα των επιφανειακών απορροών που τροφοδοτούν τον υδροφορέα, χωρίστηκε σε δύο ισόποσα τμήματα. Το 1^ο τμήμα τοποθετήθηκε ως πλευρική τροφοδοσία στο σημείο της λεκάνης στο οποίο εισέρχεται ο ποταμός Κατωβιανίτης δυτικά της περιοχής, και το 2^ο τοποθετήθηκε ως πλευρική τροφοδοσία στα βορειοανατολικά της λεκάνης, στο σημείο δηλαδή που απορρέουν οι αδιαπέρατοι σχηματισμοί των Φυλλιτών και του φλύσχη Πίνδου (Παπαμαστοράκης κ.α., 2002).

6.8.3. Διαμόρφωση του μοντέλου προσομοίωσης σε περιβάλλον Visual Modflow με χρήση υπορουτίνων.

Στην παρούσα παράγραφο αναπτύσσεται αναλυτικά η διαδικασία κατασκευής του μοντέλου προσομοίωσης με χρήση των εντολών – υπορουτίνων του κώδικα Modflow. Οι υπορουτίνες που χρησιμοποιήθηκαν κατά σειρά είναι οι ακόλουθες:

- Pump Wells (Γεωτρήσεις άντλησης).
- Head Observation Wells (Γεωτρήσεις παρατήρησης βάθους στάθμης ύδατος).
- Conductivity (Υδραυλική Αγωγιμότητα).
- Initial Heads (Αρχικά υδραυλικά ύψη).
- Groundwater Head Boundary (Πλευρικά εισρέον υδραυλικό φορτίο).

- Drain (Τοίχος αποστράγγισης).
- Recharge (Εμπλουτισμός).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η 1^η υπορουτίνα που συναντάται στον υπολογιστικό κώδικα με την είσοδο στην επιλογή Input, είναι η εντολή Grid δηλαδή η επιλογή διαμόρφωσης του πλέγματος του κανάβου, του αριθμού των επιπέδων κ.α. Στην εν λόγω εντολή δεν πραγματοποιήθηκε κάποια αλλαγή.

Η χρήση των παραπάνω υπορουτινών και η εισαγωγή των δεδομένων σε αυτές παρουσιάζεται παρακάτω:

- Pump Wells (Γεωτρήσεις άντλησης).
 - Επεξεργασία στοιχείων πριν την εισαγωγή τους στο μοντέλο.

Οι συντεταγμένες των θέσεων των γεωτρήσεων της περιοχής καθώς και η ετήσια παροχή τους, παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.2.4.1 του 3^{ου} κεφαλαίου. Στον εν λόγω πίνακα χρησιμοποιείται το ΕΓΣΑ 87, δηλαδή το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Συντεταγμένων του 87. Σύμφωνα λοιπόν με τους Παπαμαστοράκη κ.α. έχουμε τα ακόλουθα:

Γεώτρηση	Τετμημένη (X)	Τεταγμένη (Y)	Χρήση	Ετήσια Παροχή (m ³ / year)
Τούρκου	628268	3879368	Άρδευση	124220
Παπαγιάννη	627809	3879147	Άρδευση	506980
Μουρελάκι	627449	3879861	Άρδευση	103724
Μαυρικό	627803	3879540	Άρδευση	265074
Καβρού	627098	3879169	Ύδρευση	38000
Ψυχούλια	627112	3879599	Ύδρευση	1680
Καμαράκι	626926	3879293	Ύδρευση	5160

Πίνακας 3.2.4.1 Υδροληψίες και παροχές αντλήσεων στη λεκάνη Άνω Βιάννου.
(Παπαμαστοράκης κ.α., 2002)

Όπως έχει προαναφερθεί επιλύθηκε ένα σύστημα εξισώσεων για κάθε είδος τροφοδοσίας αλλά και άντλησης, με σκοπό την εξαγωγή ρεαλιστικών ποσοστών υδάτων τα οποία θα αντιστοιχούσαν στις δύο εποχιακές περιόδους ενός υδρολογικού έτους (χειμερινή και θερινή). Στην περίπτωση των αντλήσεων, θεωρήσαμε τους παρακάτω συμβολισμούς:

Α_χ: Ποσότητα Άντλησης το χειμώνα για κάθε γεώτρηση.
 Α_κ: Ποσότητα Άντλησης το καλοκαίρι για κάθε γεώτρηση.
 Α(μέσο): Παροχή (m³ / day) εκάστοτε γεώτρησης.

Έπειτα επιλύθηκε το σύστημα των παρακάτω εξισώσεων:

$$Ακ * (0,3) = Αχ * (0,7) \quad \text{Σχέση (6.8.3.1)}$$

$$(Ακ + Αχ) / 2 = Α(μέσο) = \text{Παροχή εκάστοτε γεώτρησης (m}^3 \text{ / day)} \quad \text{Σχέση (6.8.3.2)}$$

Με άγνωστες παραμέτρους τα Α_κ, Α_χ.

Από τον Πίνακα 3.2.4.1 μετατρέπουμε αρχικά την παροχή όλων των γεωτρήσεων από (m³ / year) σε (m³ / day) διαιρώντας τις αντίστοιχες τιμές με τον αριθμό των ημερών σε ένα έτος (365). Στη συνέχεια επιλύουμε το σύστημα των δύο παραπάνω εξισώσεων για κάθε γεώτρηση ξεχωριστά. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα:

Γεωτρήσεις Άντλησης	Μέση παροχή γεωτρήσεων (m ³ / day) Α(μέσο)	Παροχή γεωτρήσεων το χειμώνα (m ³ / day). Α _χ = Α(μέσο) / (1,665)	Παροχή γεωτρήσεων το καλοκαίρι (m ³ / day). Α _κ = Α(μέσο) * (1,399)
Τούρκου	340,33	204,402	476,257
Παπαγιάννη	1388,98	834,222	1943,737
Μουρελάκι	284,17	170,672	397,667
Μαυρίκο	726,23	436,174	1016,285
Κάβρου	104,109	62,5279	145,69
Ψυχούλια	4,603	2,764	6,441
Καμαράκι	14,137	8,4906	19,7833
	Συνολική εποχιακή άντληση:	1719,254	4005,862

Πίνακας 6.8.3.1 Εποχιακές Παροχές των γεωτρήσεων άντλησης με επίλυση του συστήματος εξισώσεων για Α_κ και Α_χ.

Πριν την εισαγωγή των παραπάνω δεδομένων στο μοντέλο με χρήση της υπορουτίνας Pump Wells και εφόσον δεν κατέσται δυνατή η εύρεση συγκεκριμένων στοιχείων από βιβλιογραφικές πηγές, αποφασίστηκε το τελικό σημείο κάθε γεώτρησης να φτάνει στα 100 μέτρα σε βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Το βάθος των

100 μέτρων αποφασίστηκε με γνώμονα το μικρό βάθος από την επιφάνεια του εδάφους της στάθμης ύδατος σε όλες τις γεωτρήσεις (έως 30 μέτρα σύμφωνα με τους Παπαμαστοράκη κ.α.). Ως αποτέλεσμα για κάθε γεώτρηση, αφαιρέθηκαν από το υψόμετρο της θέσης του πηγαδιού 100 μέτρα με σκοπό την εύρεση του τελικού του βάθους. Για παράδειγμα στη θέση Τούρκου, το τελικό βάθος της γεώτρησης αποφασίστηκε να λάβει την τιμή 432,4 m από την επιφάνεια της θάλασσας, εφόσον το υψόμετρο στην εν λόγω θέση είναι 532,4 m από την επιφάνεια της θάλασσας.

Επιπλέον εξαιρετικά σημαντικό είναι να αιτιολογηθεί η επιλογή του **μέσου βάθους στάθμης ύδατος** που χρησιμοποιήθηκε κατά την εισαγωγή των δεδομένων στην υπορουτίνα Pump Wells. Σύμφωνα με τη μελέτη των Παπαμαστοράκη κ.α., στην παράγραφο που αναφέρεται στην ρύθμιση του ομοιώματος, παρουσιάζονται στοιχεία για το μέσο όρο βάθους στάθμης για τις Σημερινές Συνθήκες Άντλησης (Συνθήκες Μεγάλης Άντλησης) με βάση τα δεδομένα της χρονικής περιόδου 1990 – 1998. Επιπλέον στοιχεία για το μέσο όρο βάθους στάθμης, παρουσιάζονται με βάση τις Συνθήκες Μικρής Άντλησης οι οποίες περιγράφονται καλύτερα από τη χρονική περίοδο 1982 – 1985.

Αναλυτικά ισχύει :

	Μέσος όρος βάθους στάθμης (m) από την επιφάνεια του εδάφους.
Συνθήκες Μεγάλης Άντλησης (1990 – 1998):	17
Συνθήκες Μικρής Άντλησης (1982 – 1985):	8

Πίνακας 6.8.3.2 Μέσος όρος βάθους στάθμης από την επιφάνεια του εδάφους για συνθήκες μεγάλης και μικρής άντλησης.
(Παπαμαστοράκης κ.α., 2002)

Κατά συνέπεια ο μέσος όρος των δύο παραπάνω περιόδων θα είναι τα 12,5 m από την επιφάνεια του εδάφους για κάθε γεώτρηση.

Ως αποτέλεσμα των προαναφερθέντων, το **βάθος στάθμης ύδατος** για κάθε αντλητικό πηγάδι, επιλέχθηκε να εισαχθεί στο μοντέλο της παρούσας μελέτης ως 12,5 μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

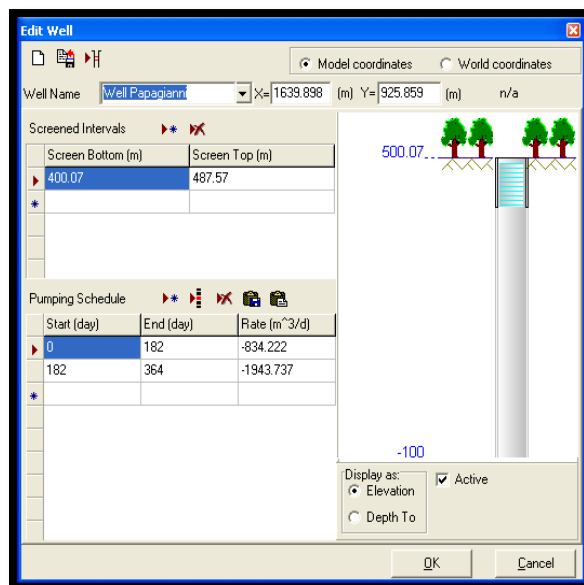
Τέλος θα πρέπει να υπογραμμιστεί ότι το υδρολογικό έτος για όλες τις περιπτώσεις αντλήσεων και τροφοδοσιών, διαχωρίστηκε σε δύο περιόδους : τη χειμερινή που αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα από 0 έως 182 μέρες και τη θερινή που αντιστοιχεί στο διάστημα από 182 έως 364 μέρες. Η παρατήρηση αυτή θα επαναληφθεί και στην ανάλυση των επόμενων εντολών – υπορουτίνων του κώδικα.

- Εισαγωγή στοιχείων στο μοντέλο.

Κατά την εισαγωγή των παραπάνω στοιχείων στο περιβάλλον του μοντέλου, επιλέχθηκε η ένδειξη Add Well από την υπορουτίνα Pump Wells και σημειώθηκε στο χάρτη η θέση της κάθε γεώτρησης. Ταυτόχρονα κατά τον προσδιορισμό της θέσης κάθε γεώτρησης, εμφανιζόταν το παράθυρο εισαγωγής των στοιχείων που αφορούσαν την αντίστοιχη γεώτρηση.

Για κάθε αντλητικό πηγάδι επιλέχθηκαν τα επόμενα:

- Model coordinates.
- Display as: Elevation.
- State: Active.
- Screen Bottom (m): - 100 m από το υψόμετρο του εδάφους της θέσης.
- Screen Top (m): - 12,5 m από το υψόμετρο του εδάφους της θέσης.



Εικόνα 6.8.3.1 Παράθυρο εισαγωγής στοιχείων αντλητικής γεώτρησης (Ως παράδειγμα επιλέχθηκε η θέση Παπαγιάννη).

Θα πρέπει να σημειωθεί, όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα ότι κατά την εισαγωγή της απαιτούμενης τιμής παροχής άντλησης στις περιόδους του μοντέλου, τοποθετείται αρνητικό πρόσημο εφόσον όλες οι γεωτρήσεις της περιοχής εκτελούν αντλητικό έργο και δεν εμπλουτίζουν τον υδροφορέα.

- Head Observation Wells (Γεωτρήσεις παρατήρησης βάθους στάθμης ύδατος).
 - Επεξεργασία στοιχείων πριν την εισαγωγή τους στο μοντέλο.

Στην περιοχή μελέτης, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο υπάρχουν δύο πηγάδια παρατήρησης του βάθους στάθμης ύδατος. Το πρώτο πηγάδι παρατήρησης βρίσκεται στη θέση Πετριά ενώ το δεύτερο βρίσκεται στη θέση Καμάρα. Η θέση **Πετριά** είναι εντός ορίων της λεκάνης ενδιαφέροντος βάση της οποίας διαμορφώθηκαν και τα όρια του υπό εξέταση υδροφορέα, ενώ η θέση Καμάρα βρίσκεται ελάχιστα έξω από τα όρια της λεκάνης δυτικά της αντλητικής γεώτρησης Καμαράκι. Για την καλύτερη βαθμονόμηση του μοντέλου, όπως έχει ήδη διατυπωθεί και σε προηγούμενη παράγραφο, η θέση **Καμαράκι** εκτός από αντλητική γεώτρηση θεωρήθηκε και γεώτρηση παρατήρησης. Η υπόθεση αυτή δικαιολογείται λόγω της μικρής απόστασης που χωρίζουν τις δύο γεωτρήσεις άντλησης και παρατήρησης στη θέση Καμαράκι και στη θέση Καμάρα αντίστοιχα. Για την επιστημονική ορθότητα της εν λόγω θεώρησης, η περιοχή βόρεια της θέσης Καμαράκι, έλαβε τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας μικτότερη από το υπόλοιπο τμήμα των Αδρομερών Αλλουβιακών Αποθέσεων, διότι η πραγματική γεώτρηση παρατήρησης στη θέση Καμάρα, βρίσκεται σε θεωρητικά αδιαπέρατο εδαφικό υλικό του υπεδάφους της περιοχής μελέτης.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 6.8.3.2, σε **Συνθήκες Μεγάλης Άντλησης**, ο μέσος όρος βάθους στάθμης είναι στα 17 μέτρα ενώ σε **Συνθήκες Μικρής Άντλησης**, ο μέσος όρος βάθους στάθμης είναι στα 8 μετρά (Παπαμαστοράκης κ.α., 2002). Βάση των παραπάνω στοιχείων, οι Συνθήκες Μεγάλης Άντλησης αντιστοιχήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής, στις **Θερινές Συνθήκες Άντλησης**, ενώ οι Συνθήκες Μικρής Άντλησης αντιστοιχήθηκαν στις **Χειμερινές Συνθήκες Άντλησης**.

Άρα θα έχουμε, μέσο όρο βάθους στάθμης για τις Θερινές Συνθήκες Άντλησης 17 μέτρα και για τις Χειμερινές Συνθήκες Άντλησης 8 μέτρα. Σύμφωνα με τα άνωθεν, για τις δύο γεωτρήσεις παρατήρησης, προσδιορίστηκε η στάθμη ύδατος σε βάθος 17 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους για την περίοδο του καλοκαιριού και σε βάθος 8 μέτρων από το έδαφος για την περίοδο του χειμώνα.

Γεώτρηση Παρατήρησης	Υψόμετρο από την επιφάνεια της θάλασσας (m)	Βάθος στάθμης ύδατος (m) Χειμώνας (0 - 182) days (Υψόμετρο – 8 m)	Βάθος στάθμης ύδατος (m) Καλοκαίρι (182 - 364) days (Υψόμετρο – 17 m)
Πετριά	500	492	483
Καμαράκι	503	495	486

Πίνακας 6.8.3.3 Βάθος στάθμης ύδατος από την επιφάνεια του εδάφους στα πηγάδια παρατήρησης της περιοχής (Πετριά και Καμαράκι).

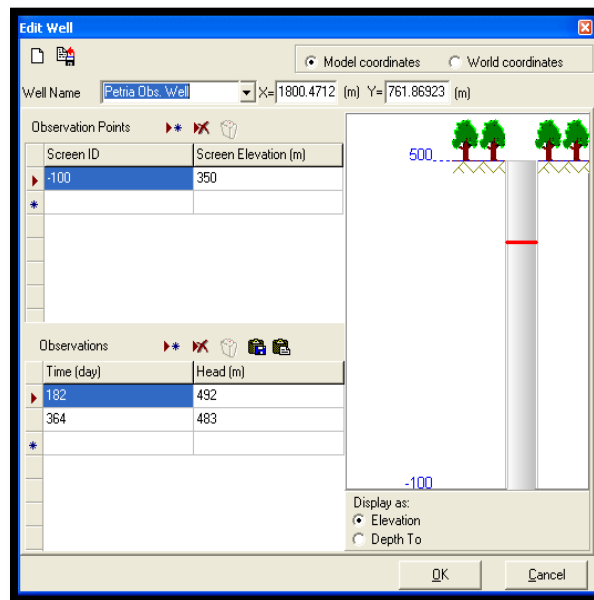
Επιπλέον, το βάθος των γεωτρήσεων παρατήρησης επιβάλλεται να είναι λίγο μεγαλύτερο από το βάθος των αντλητικών γεωτρήσεων το οποίο είναι στα 100 μέτρα. Εφόσον δεν κατέσται δυνατή η εύρεση αξιόπιστων βιβλιογραφικών στοιχείων, σύμφωνα με τα άνωθεν, θεωρήθηκε σε υψόμετρο 350 m από την επιφάνεια της θάλασσας και για τα δύο πηγάδια παρατήρησης. Δηλαδή σε βάθος 150 m και 153 m από την επιφάνεια του εδάφους στις θέσεις Πετριά και Καμαράκι αντίστοιχα.

- Εισαγωγή στοιχείων στο μοντέλο.

Για κάθε πηγάδι παρατήρησης επιλέχθηκαν τα επόμενα:

- Model coordinates.
- Display as: Elevation.
- Screen ID: - 100 m
- Screen Elevation: 350 m

Τέλος εισήχθηκαν και οι τιμές μέσου βάθους στάθμης ύδατος, στις ανάλογες εποχιακές περιόδους βάσει του Πίνακα 6.8.3.3.



Εικόνα 6.8.3.2 Παράθυρο εισαγωγής στοιχείων γεώτρησης παρατήρησης (Ως παράδειγμα επιλέχθηκε η θέση Πετριά).

- Conductivity (Υδραυλική Αγωγιμότητα).

Σύμφωνα με τα **τελικά αποτελέσματα, της ρύθμισης του μοντέλου** προσομοίωσης, οι διαμορφωμένες ζώνες της περιοχής, έλαβαν τις παρακάτω τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας: Η πρώτη περιοχή της ζώνης των αδρομερών αποθέσεων, στο νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής των αδρομερών, έλαβε τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας 0,864 m/d, η κεντρική περιοχή της εν λόγω ζώνης έλαβε τιμή 0,864 m/d ομοίως, η περιοχή της ζώνης των αδρομερών στα βορειοδυτικά, έλαβε τιμή 0,69 m/d ενώ η περιοχή των Αλλουβιακών λεπτόκοκκων αποθέσεων, έλαβε τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας 0,0864 m/d.

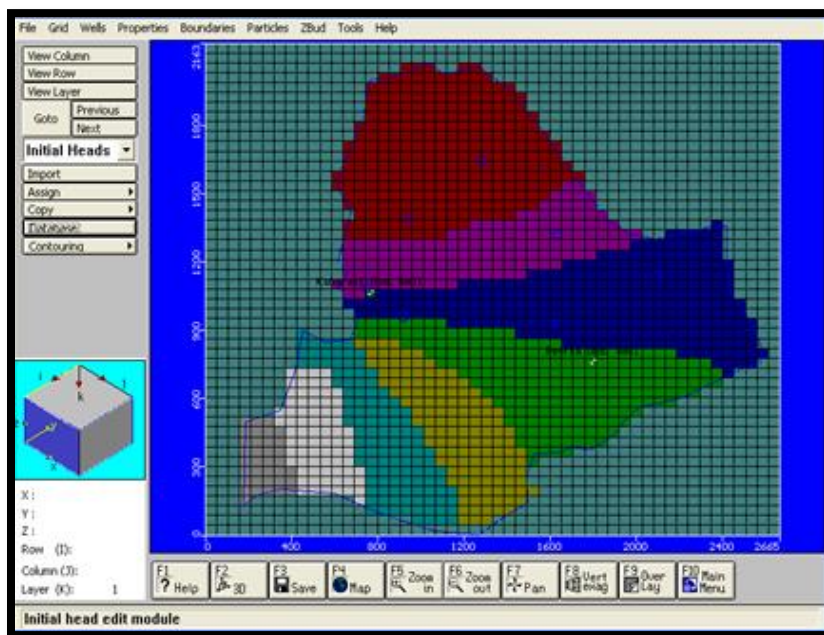
Στο 3^ο κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά σχετικά με τις τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας των ζωνών της περιοχής, ενώ επιπλέον παρουσιάζεται η Εικόνα 3.2.2.1 με το ακόλουθο υπόμνημα βάση της οποίας εισήχθηκαν στο μοντέλο οι προαναφερθέντες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας.

- Initial Heads (Αρχικά υδραυλικά ύψη).

Τα αρχικά υδραυλικά ύψη, στον υδροφορέα μελέτης αρχικά διαμορφώθηκαν σε ολόκληρη τη λεκάνη βάση του **επιλεγμένου μέσου βάθους στάθμης ύδατος** το οποίο είναι στα 12,5 μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο παρόν κεφάλαιο σχετικά με τη χρήση της υπορουτίνας Pump Wells. Συγκεκριμένα ολόκληρη η λεκάνη μελέτης διαχωρίστηκε σε ζώνες αρχικού υδραυλικού ύψους, το

οποίο διαμορφώθηκε βάση της διακύμανσης του υψομέτρου εφόσον αφαιρέθηκαν από αυτό 12,5 μέτρα βάθους. Με τον τρόπο αυτό διαμορφώθηκε μία πρώτη ενδεικτική απεικόνιση των αρχικών υδραυλικών υψών που παρατηρούνται στη λεκάνη.

Στη συνέχεια, εφόσον δημιουργήθηκε ολόκληρο το μοντέλο προσομοίωσης – με χρήση και των υπόλοιπων υπορουτίνων π.χ. G.H.B. – εκτελέστηκε η προσομοίωση και **επαναπροσδιορίστηκαν τα αρχικά υδραυτικά ύψη** στη λεκάνη σύμφωνα με τα υδραυτικά ύψη που εξήχθησαν ως αποτελέσματα της εκτέλεσης της προσομοίωσης. Απλούστερα, τα αποτελέσματα της 1^{ης} προσομοίωσης, τα οποία βασίστηκαν στις ζώνες των αρχικών υδραυλικών υψών που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια ως αρχικά υδραυτικά ύψη για τη βελτίωση της προσομοίωσης και των αποτελεσμάτων αυτής. Έπειτα η προσομοίωση εκτελέστηκε κανονικά παρέχοντας τα τελικά αποδεκτά αποτελέσματα όσον αφορά τα υδραυτικά ύψη στη λεκάνη.



Εικόνα 6.8.3.3 Παρουσίαση των τελικών ζωνών, αρχικών υδραυλικών υψών, στο περιβάλλον εργασίας της υπορουτίνας Initial Heads.

Ζώνες Αρχικών Υδραυλικών Υψών	Αρχικό υδραυλικό ύψος (m)
	490
	488
	486
	483,5
	481
	475
	462,5
	455

Υπόμνημα Εικόνας 6.8.3.3 Ζώνες Αρχικών Υδραυλικών Υψών και αντίστοιχες τιμές.

- Groundwater Head Boundary (Πλευρικά εισρέον υδραυλικό φορτίο).
- Επεξεργασία στοιχείων πριν την εισαγωγή τους στο μοντέλο.

Στην περίπτωση εισαγωγής στο μοντέλο, των **πλευρικών εισροών** και της τροφοδοσίας λόγω των **επιφανειακών απορροών**, χρησιμοποιήθηκε η υπορουτίνα του κώδικα Modflow, Groundwater Head Boundary (G.H.B.). Όπως έχει αναφερθεί, για κάθε είδος τροφοδοσίας, πριν την εισαγωγή της στο μοντέλο επιλύθηκε ένα σύστημα εξισώσεων με σκοπό την εξαγωγή αντικειμενικών εποχιακών ποσοστών. Με τον τρόπο αυτό, υπολογίστηκαν ποσοστά τροφοδοσίας ανάλογα με την εποχή (χειμερινή, θερινή) με στόχο την ρεαλιστικότερη αποτύπωση του συστήματος υπόγειας ροής στην περιοχή.

- Για τις **πλευρικές τροφοδοσίες** επιλύθηκε το παρακάτω σύστημα:

ΠΤχ: Πλευρική Τροφοδοσία το χειμώνα στα βορειοανατολικά της λεκάνης.

ΠΤκ: Πλευρική Τροφοδοσία το καλοκαίρι στα βορειοανατολικά της λεκάνης.

ΠΤ(μέσο): Ετήσια Πλευρική Τροφοδοσία (m^3 / year).

Το σύστημα των εξισώσεων είναι το ακόλουθο:

$$\text{ΠΤκ} * (0,8) = \text{ΠΤχ} * (0,2) \quad \text{Σχέση (6.8.3.3)}$$

$$(\text{ΠΤκ} + \text{ΠΤχ}) / 2 = \text{ΠΤ(μέσο)} = \text{Ετήσια Πλευρική Τροφοδοσία} (\text{m}^3 / \text{year}) \quad \text{Σχέση (6.8.3.4)}$$

Με άγνωστες παραμέτρους τα ΠΤκ, ΠΤχ.

□ Για την τροφοδοσία των **επιφανειακών απορροών** επιλύθηκε το παρακάτω σύστημα:

ΕΑχ: Τροφοδοσία συνολικών Επιφανειακών Απορροών το χειμώνα.

ΕΑκ: Τροφοδοσία συνολικών Επιφανειακών Απορροών το καλοκαίρι.

ΕΑ(μέσο): Ετήσια Τροφοδοσία συνολικών Επιφανειακών Απορροών (m^3 / year).

Το σύστημα των εξισώσεων είναι το ακόλουθο:

$$\text{ΕΑκ} * (0,8) = \text{ΕΑχ} * (0,2) \quad \text{Σχέση (6.8.3.5)}$$

$$(\text{ΕΑκ} + \text{ΕΑχ}) / 2 = \text{ΕΑ(μέσο)} (\text{m}^3 / \text{year}) \quad \text{Σχέση (6.8.3.6)}$$

Με άγνωστες παραμέτρους τα ΕΑκ, ΕΑχ.

Με την επίλυση του συστήματος εξισώσεων για την περίπτωση των Πλευρικών Τροφοδοσιών, προέκυψαν οι ποσότητες Πλευρικών Τροφοδοσιών για κάθε εποχή (χειμερινή, θερινή). Στη συνέχεια οι μονάδες μέτρησης των ποσοτήτων αυτών, μετατράπηκαν από (m^3 / year) σε (m^3 / sec). Η μετατροπή αυτή πραγματοποιήθηκε, λόγω της μετέπειτα εισαγωγής των εποχιακών ποσοτήτων στη **σχέση Dupuit**, προκειμένου η μονάδα μέτρησης της ογκομετρικής παροχής να είναι συμβατή με τη μονάδα μέτρησης της υδραυλικής αγωγιμότητας. Ομοίως, με την επίλυση του συστήματος εξισώσεων για την τροφοδοσία των Επιφανειακών Απορροών, πραγματοποιήθηκε μετατροπή της μονάδας μέτρησης των υπολογισμένων εποχιακών ποσοτήτων από (m^3 / year) σε (m^3 / sec). Η μετατροπή αυτή όπως και στην περίπτωση των Πλευρικών Τροφοδοσιών, έγινε με σκοπό τη μετέπειτα εισαγωγή των εποχιακών ποσοτήτων στη σχέση Dupuit.

Εξαιρετικά σημαντική παρατήρηση αποτελεί το γεγονός ότι οι υπολογισμένες εποχιακές ποσότητες των Πλευρικών Τροφοδοσιών, πριν την εισαγωγή τους στη σχέση Dupuit, διαιρέθηκαν σε τρία ίσα μέρη με στόχο την **ισόποση κατανομή των συνολικών Πλευρικών Τροφοδοσιών** στις τρεις ζώνες διαφορετικής υδραυλικής αγωγιμότητας στα βορειοανατολικά της λεκάνης, οι οποίες αποτελούν την περιοχή των Αλλουβιακών Αδρομερών Αποθέσεων.

Πιο αναλυτικά σύμφωνα με την εντολή – υπορουτίνα του κώδικα Visual Modflow G.H.B. (Groundwater Head Boundary), η πλευρική τροφοδοσία ύδατος που εισέρχεται σε ένα σύστημα υπόγειας ροής ως ύψος νερού (χρήση υπορουτίνας G.H.B.),

πρακτικά τροφοδοτεί τον υδροφορέα βάση ισόποσης κατανομής στα μοναδιαία τμήματα πλάτους (W) κατά μήκος των συνόρων του τμήματος του υδροφορέα το οποίο τροφοδοτείται από την εξωτερική στάθμη ύδατος (π.χ. λίμνη).

Βάση των προαναφερθέντων, είναι δυνατή η διαίρεση της περιοχής των Αλλουβιακών Αδρομερών Αποθέσεων σε **τρία τμήματα ίσου πλάτους** μεταξύ τους, κατά μήκος των βορειοανατολικών συνόρων της περιοχής των Αδρομερών Αποθέσεων. Η διαίρεση αυτή πραγματοποιήθηκε βάση των τριών διαμορφωμένων ζωνών υδραυλικής αγωγιμότητας στην περιοχή των Αδρομερών. Με τον τρόπο αυτό η γραμμή των συνόρων στα βορειοανατολικά της λεκάνης, που αντιστοιχεί στις Αδρομερείς Αποθέσεις, διαιρέθηκε σε τρία ίσα τμήματα, από τα οποία κάθε ένα αντιστοιχεί σε μία από τις τρεις ζώνες υδραυλικής αγωγιμότητας. Έτσι κατέστη δυνατή η εφαρμογή της σχέσης Dupuit, ξεχωριστά για κάθε μία ζώνη υδραυλικής αγωγιμότητας.

Σχετικά με τις τροφοδοσίες των Επιφανειακών Απορροών, όπως έχει ήδη αναφερθεί, επιλέχθηκε να τοποθετηθούν στα δυτικά της περιοχής στο σημείο εισόδου του ποταμού Κατωβιανίτη στη λεκάνη απορροής αλλά και στα βορειοανατολικά της λεκάνης, στη μία από τις τρεις ζώνες διαφορετικής υδραυλικής αγωγιμότητας της περιοχής των Αδρομερών Αποθέσεων. Η ζώνη που επιλέχθηκε περιέχει το πηγάδι παρατήρησης στη θέση Πετριά, ενώ σύμφωνα με το γεωλογικό χάρτη της Εικόνας 2.1.1, η ζώνη αυτή συνορεύει με τους αδιαπέρατους σχηματισμούς των Φυλλιτών και του Φλύσχη Πίνδου, οι οποίοι απορρέουν στα ανάντη της λεκάνης (Παπαμαστοράκης, 2002). Λόγω της απουσίας κατατοπιστικών πληροφοριών από τις βιβλιογραφικές πηγές, σχετικά με τα ποσοστά τροφοδοσίας ύδατος Επιφανειακών Απορροών σε κάθε περιοχή της λεκάνης, επιλέχθηκε η **διαίρεση των συνολικών Επιφανειακών Απορροών σε δύο ίσα τμήματα**, κάθε ένα από τα οποία τοποθετήθηκε αντίστοιχα στα δυτικά της λεκάνης (Κατωβιανίτης) και στα βορειοανατολικά σύνορα της λεκάνης (Πετριά).

Τα αποτελέσματα της επίλυσης των δύο συστημάτων εξισώσεων για τις Πλευρικές Τροφοδοσίες και για τις Επιφανειακές Απορροές, αλλά και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων αυτών σύμφωνα με τα άνωθεν, παρατίθενται στους ακόλουθους πίνακες:

Πλευρικές Τροφοδοσίες.	Ετήσια Πλευρική Τροφοδοσία. ΠΤ(μέσο)	Ποσότητα Πλευρικής Τροφοδοσίας το χειμώνα. ΠΤχ = (1,6) * ΠΤ(μέσο)	Ποσότητα Πλευρικής Τροφοδοσίας το καλοκαίρι. ΠΤκ = ΠΤ(μέσο) / (2,5)
(m ³ / year)	172474	275958,4	68989,6
(m ³ / sec)	0,0054691	0,0087505	0,0021876
Εποχιακές Τροφοδοσίες διαιρεμένες σε τρία ισόποσα τμήματα. {ΠΤχ / 3 και ΠΤκ / 3}	~ ~ ~	0,0029168	0,0007292

Πίνακας 6.8.3.4 Υπολογισμός εποχιακών Πλευρικών Τροφοδοσιών με επίλυση του συστήματος εξισώσεων με αγνώστους τα ΠΤχ, ΠΤκ και κατάλληλη επεξεργασία των ποσοτήτων αυτών.

Ετήσια Τροφοδοσία από Επιφανειακές Απορροές. (m ³ / year)	Ετήσια Τροφοδοσία διαιρεμένη σε δύο ισόποσα τμήματα. ΕΑ(μέσο) (m ³ / year)	Τροφοδοσία διαιρεμένη σε δύο ισόποσα τμήματα. ΕΑ(μέσο) (m ³ / sec)	Ποσότητα Τροφοδοσίας Επιφανειακής Απορροής το χειμώνα. ΕΑχ = (1,6)*ΕΑ(μέσο)	Ποσότητα Τροφοδοσίας Επιφανειακής Απορροής το καλοκαίρι. ΕΑκ = ΕΑ(μέσο) / (2,5)
58837	29418,5	0,0009328	0,0014925	0,0003731

Πίνακας 6.8.3.5 Υπολογισμός εποχιακών Τροφοδοσιών Επιφανειακής Απορροής με επίλυση του αντίστοιχου συστήματος εξισώσεων και διαίρεση των ποσοτήτων αυτών.

Κατά την χρήση της υπορουτίνας G.H.B., για την εισαγωγή των Πλευρικών Τροφοδοσιών και των Τροφοδοσιών που αντιστοιχούν στις Επιφανειακές Απορροές, απαιτείται η χρήση της **εξίσωσης Dupuit**. Σύμφωνα με την εξίσωση αυτή, στην περίπτωση τροφοδοσίας ενός υδροφορέα από εξωτερική δεξαμενή ύδατος, η διαφορά του τετραγώνου του υδραυλικού ύψους της εξωτερικής πηγής (π.χ. στάθμη λίμνης) από το τετράγωνο του υδραυλικού φορτίου σε εσωτερικό σημείο του υδροφορέα, είναι ανάλογη της ογκομετρικής παροχής της συνολικής υπόγειας εισροής ύδατος (Q) καθώς επίσης και της απόστασης μεταξύ της εξωτερικής δεξαμενής και του επιλεγμένου

εσωτερικού σημείου του υδροφορέα. Επιπλέον η προαναφερθείσα διαφορά τετραγώνων είναι αντιστρόφως ανάλογη της υδραυλικής αγωγιμότητας του τροφοδοτούμενου υδροφορέα.

Εξίσωση Dupuit (Καρατζάς, 2009):

$$\frac{Q}{[Πλάτος]} = (1/2) \cdot K \frac{h_1^2 - h_2^2}{L} \quad \text{Σχέση (6.8.3.7)}$$

Σύμφωνα με την εξίσωση Dupuit, είναι δυνατή η εύρεση του αρχικού υδραυλικού ύψους (h_1) το οποίο αντιστοιχεί στην εξωτερική δεξαμενή τροφοδοσίας, εφόσον είναι γνωστό το υδραυλικό ύψος στο εσωτερικό σημείο του τροφοδοτούμενου υδροφορέα (h_2). Για την επίλυση της εξίσωσης Dupuit είναι απαραίτητη η γνώση της αντίστοιχης υδραυλικής αγωγιμότητας στο τροφοδοτούμενο τμήμα (K), καθώς επίσης η γνώση της παροχής υπόγειας εισροής (Q), του πλάτους εισροής και του μήκους (L) μεταξύ των δύο υδραυλικών υψών.

Προφανώς σύμφωνα με την εξίσωση σε διαφορετικές περιπτώσεις, είναι δυνατός ο υπολογισμός άλλων παραμέτρων όπως για παράδειγμα της υδραυλικής αγωγιμότητας (K) εφόσον είναι γνωστά τα δύο υδραυτικά ύψη (h_1 , h_2) καθώς και οι υπόλοιπες μεταβλητές της εξίσωσης.

Στην παρούσα εργασία, η εξίσωση Dupuit χρησιμοποιήθηκε με σκοπό την εύρεση του αρχικού υδραυλικού ύψους (h_1), εφόσον κατά τις δοκιμές ρύθμισης του μοντέλου προσδιορίστηκαν όλες οι απαιτούμενες παράμετροι για την επίλυση της εξίσωσης. Σχετικά με τον προσδιορισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας σε κάθε ζώνη των Αδρομερών αλλά και στην περιοχή των Λεπτόκοκκων αποθέσεων, παρουσιάζεται εκτενής αναφορά στην Παράγραφο 3.2.2 αλλά και στην ακόλουθη παράγραφο του παρόντος Κεφαλαίου, 6.8.4.

Τα στοιχεία που παρουσιάζονται παρακάτω σχετικά με τη χρήση της εξίσωσης Dupuit, αναφέρονται στην **τελευταία ρύθμιση** του μοντέλου προσομοίωσης και στον τελικό προσδιορισμό των τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας των εκάστοτε ζωνών των Αδρομερών Αποθέσεων αλλά και της περιοχής των Λεπτόκοκκων Αποθέσεων. Επιπλέον τα αρχικά υδραυτικά φορτία που υπολογίζονται αντιστοιχούν ομοίως στην τελική ρύθμιση του μοντέλου.

Περιοχές με υπόγεια τροφοδοσία ύδατος βάση της εξίσωσης Dupuit.	Πλάτος συνόρων υπόγειας εισροής. (m)	Μήκος (L) μεταξύ των υδραυλικών φορτίων h_1 και h_2 . (εξίσωση Dupuit). (m)	Υδραυλική Αγωγιμότητα. (K) (m / sec)	Υδραυλικό ύψος h_2 . (Χειμώνας) (m)	Υδραυλικό ύψος h_2 . (Καλοκαίρι) (m)
1η ζώνη Αδρομερών (Καμαράκι).	600	1200	0,000008	495	486
2η ζώνη Αδρομερών (Ενδιάμεση).	600	800	0,00001	494	485
3η ζώνη Αδρομερών (Πετριά).	600	700	0,00001	492	483
Περιοχή Λεπτόκοκκων (Κατωβιανίτης).	400	200	0,000001	473	464

Πίνακας 6.8.3.6 Τιμές παραμέτρων για την επίλυση της εξίσωσης Dupuit ως προς το αρχικό υδραυλικό ύψος (h_1), για τις περιπτώσεις των ζωνών των Αδρομερών και της περιοχής των Λεπτόκοκκων.

Όπως αναφέρθηκε για την εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων στην εντολή – υπορουτίνα G.H.B. κατά τη χρήση της για κάθε περιοχή που αναφέρεται στον Πίνακα 6.8.3.6, επιβάλλεται η επίλυση της εξίσωσης Dupuit ως προς το αρχικό υδραυλικό ύψος h_1 . Η εξίσωση Dupuit, ως προς την παράμετρο h_1 επιλύεται ως εξής:

Επίλυση ως προς h_1 :

$$h_1 = \left[2 \cdot \frac{Q \cdot L}{[Πλάτος] \cdot K} + h_2^2 \right]^{1/2} \quad \text{Σχέση (6.8.3.8)}$$

Επιπλέον είναι εξαιρετικά σημαντικό να αναφερθεί ότι στην περίπτωση επίλυσης της παραπάνω εξίσωσης για κάθε περιοχή, η **ογκομετρική παροχή ύδατος (Q)** λάμβανε τιμή ανάλογη της συνολικής ποσότητας υπόγειας τροφοδοσίας που είχε θεωρηθεί αρχικά, όπως παρουσιάζεται αναλυτικά στους Πίνακες 6.8.3.4 και 6.8.3.5. Πιο συγκεκριμένα

στην περιοχή που περιλαμβάνει τη θέση Καμαράκι, ως συνολική παροχή (Q) θεωρήθηκε η **διαιρεμένη σε τρία ισόποσα τμήματα Πλευρική Τροφοδοσία**, όπως αυτή εξάγεται από τον Πίνακα 6.8.3.4. Ομοίως συνέβη για την ενδιάμεση περιοχή, δηλαδή ως παροχή ύδατος στη ζώνη της περιοχής των Αδρομερών μεταξύ της θέσης Καμαράκι και της θέσης Πετριά, θεωρήθηκε η διαιρεμένη στα τρία, ποσότητα Πλευρικών Τροφοδοσιών σύμφωνα και πάλι με τον Πίνακα 6.8.3.4.

Στην περίπτωση της περιοχής των Λεπτόκοκκων Αποθέσεων, ως παροχή ύδατος (Q) η οποία τροφοδοτεί υπόγεια τον υδροφορέα στο σημείο εισόδου του ποταμού Κατωβιανίτη στη λεκάνη απορροής, θεωρήθηκε η **διαιρεμένη σε δύο ισόποσα τμήματα συνολική τροφοδοσία** λόγω κατείσδυσης των επιφανειακών απορροών. Με τον τρόπο αυτό εισήχθησαν οι επιφανειακές απορροές ως πλευρική τροφοδοσία στον υδροφορέα μελέτης. Η εξαγωγή της παροχής (Q) που αναφέρθηκε στηρίζεται στον Πίνακα 6.8.3.5.

Στην περίπτωση της ζώνης των Αδρομερών που περιλαμβάνει τη θέση Πετριά, ως συνολική ογκομετρική παροχή ύδατος (Q), θεωρήθηκε το **άθροισμα** της διαιρεμένης στα τρία συνολικής Πλευρικής Τροφοδοσίας με τη διαιρεμένη στα δύο τροφοδοσία λόγω της κατείσδυσης των επιφανειακών απορροών. Στην περίπτωση αυτή, συνδυάστηκαν τα αποτελέσματα και των δύο Πινάκων: 6.8.3.4 και 6.8.3.5.

Τα άνωθεν παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Περιοχές με υπόγεια τροφοδοσία ύδατος βάση της εξίσωσης Dupuit.	Συνολική ογκομετρική παροχή ύδατος για κάθε περιοχή (Χειμώνας) (Q) (m^3/sec).	Συνολική ογκομετρική παροχή ύδατος για κάθε περιοχή (Καλοκαίρι) (Q) (m^3/sec).	Υπολογισμένο υδραυλικό ύψος h_1 βάση Dupuit. (Χειμώνας) (m)	Υπολογισμένο υδραυλικό ύψος h_1 βάση Dupuit. (Καλοκαίρι) (m)
1η ζώνη Αδρομερών (Καμαράκι).	0,0029168	0,0007292	496,5	486,5
2η ζώνη Αδρομερών (Ενδιάμεση).	0,0029168	0,0007292	495	485,5
3η ζώνη Αδρομερών (Πετριά).	(0,0029168) + (0,0014925)	(0,0007292) + (0,0003731)	493	483,5
Περιοχή Λεπτόκοκκων (Κατωβιανίτης).	0,0014925	0,0003731	474,5	464,5

Πίνακας 6.8.3.7 Τιμές υπολογισμένου αρχικού υδραυλικού ύψους h_1 .

Μετά τον υπολογισμό των υδραυλικών υψών h_1 με χρήση της εξίσωσης Dupuit, απαιτείται ο προσδιορισμός ορισμένων ακόμα παραμέτρων προκειμένου να καταστεί δυνατή η χρήση της υπορουτίνας G.H.B.. Συγκεκριμένα απαιτείται ο προσδιορισμός της απόστασης μεταξύ της εξωτερικής δεξαμενής ύδατος και των συνόρων του τροφοδοτούμενου υδροφορέα (Boundary distance). Σε κάθε περίπτωση των προαναφερθέντων περιοχών (Πίνακας 6.8.3.7) για τις οποίες χρησιμοποιείται η υπορουτίνα G.H.B., η απόσταση αυτή (Boundary distance) είναι διαφορετική.

Αναλυτικότερα ισχύει:

- Πλάτος κυψελίδας στον κάναβο προσομοίωσης: 43,26 m.
- Μήκος κυψελίδας στον κάναβο προσομοίωσης: 53,3 m.
- Υποτείνουσα των δύο πλευρών κάθε κυψελίδας στον κάναβο προσομοίωσης: 68,5 m.

Κατά τη χρήση της υπορουτίνας G.H.B., για κάθε περιοχή του Πίνακα 6.8.3.7, διαμορφώθηκε μία **λεπτή ζώνη κυψελίδων κατά μήκος των συνόρων** των περιοχών αυτών με την περιβάλλουσα ανενεργή υδραυλικά ζώνη της λεκάνης μελέτης. Η ζώνη αυτή αποτέλεσε ουσιαστικά το τμήμα μεταξύ της εξωτερικής δεξαμενής ύδατος και του τροφοδοτούμενου υδροφορέα. Κατά συνέπεια η μεταβλητή Boundary distance, προσδιορίστηκε βάση της τιμής του πλάτους της προαναφερθείσας ζώνης.

- 1η ζώνη Αδρομερών (Καμαράκι).

Υπόγεια εισροή ύδατος με κατεύθυνση: Βόρεια προς Νότια.

Επιλογή για μεταβλητή Boundary distance: Πλάτος κυψελίδας 43,26 m $\approx$ 43,25 m

- 2η ζώνη Αδρομερών (Ενδιάμεση).

Υπόγεια εισροή ύδατος με κατεύθυνση: Βορειοανατολικά προς Νοτιοδυτικά.

Επιλογή για μεταβλητή Boundary distance: Υποτείνουσα κυψελίδας 68,5 m

- 3η ζώνη Αδρομερών (Πετριά).

Υπόγεια εισροή ύδατος με κατεύθυνση: Βορειοανατολικά προς Νοτιοδυτικά.

Επιλογή για μεταβλητή Boundary distance: Υποτείνουσα κυψελίδας 68,5 m

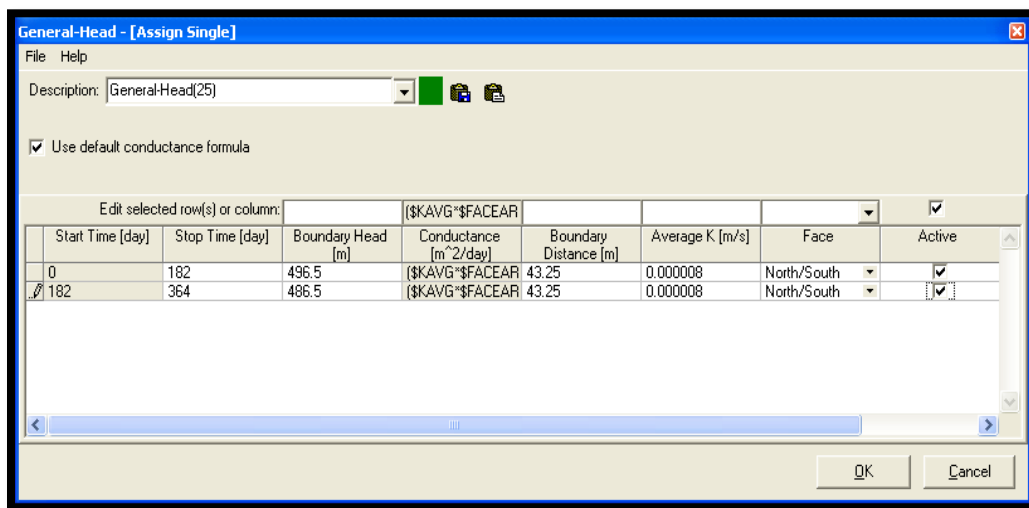
- Περιοχή Λεπτόκοκκων (Κατωβιανίτης).

Υπόγεια εισροή ύδατος με κατεύθυνση: Δυτικά προς Ανατολικά.

Επιλογή για μεταβλητή Boundary distance: Μήκος κυψελίδας 53,3 m $\approx$ 53 m

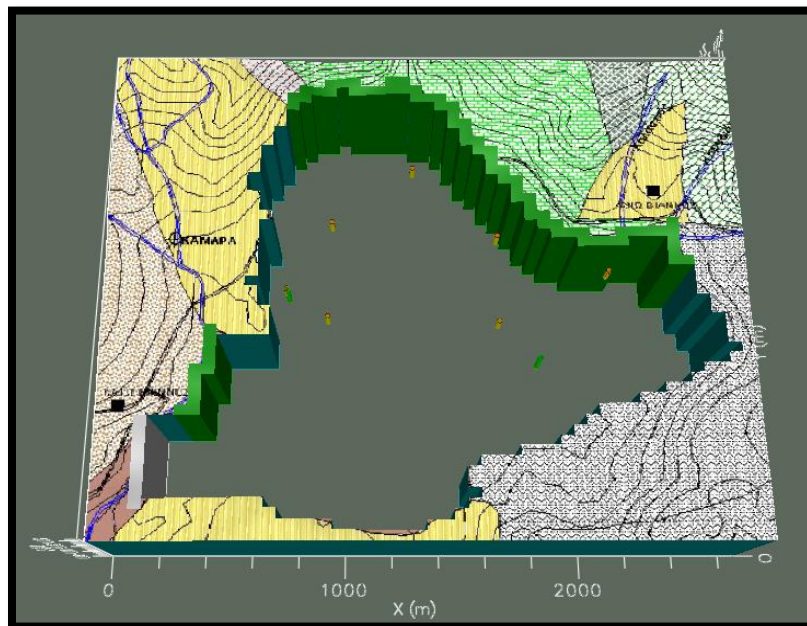
- Εισαγωγή στοιχείων στο μοντέλο.

Με την επιλογή της εντολής Assign από τον κατάλογο της υπορουτίνας G.H.B., στο μοντέλο Visual Modflow, δύναται η εισαγωγή όλων των προαναφερθέντων στοιχείων, όπως των αρχικών υδραυλικών υψών h_1 , των τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας της εκάστοτε περιοχής, των τιμών της μεταβλητής Boundary distance, της κατεύθυνσης υπόγειας εισροής ύδατος στον τροφοδοτούμενο υδροφορέα αλλά και των χρονικών περιόδων προσομοίωσης στον παρόν μοντέλο. Οι χρονικές περίοδοι του παρόντος μοντέλου, έχουν διαμορφωθεί όπως έχει ήδη αναφερθεί σε δύο εποχιακές περιόδους, τη χειμερινή και τη θερινή, με χρονικό διάστημα 0 έως 182 μέρες και 182 έως 364 μέρες αντίστοιχα. Τέλος με την επιλογή Assign δύναται ο σχεδιασμός της λεπτής ζώνης τροφοδοσίας του υδροφορέα, η οποία βρίσκεται ενδιάμεσα στην εξωτερική πηγή και σε αυτόν. Στο ακόλουθο σχήμα παρατίθεται παράδειγμα παραθύρου εισαγωγής των απαραίτητων στοιχείων και συνολικής διαμόρφωσης της εντολής G.H.B..



Εικόνα 6.8.3.4 Παράθυρο διαμόρφωσης της εντολής G.H.B. μέσω της επιλογής Assign (Ως παράδειγμα επιλέχθηκε η 1^η ζώνη των Αδρομερών – Καμαράκι).

Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζεται η διαμόρφωση των ζωνών πλευρικής εισαγωγής υπόγειου ύδατος στα σύνορα των περιοχών που αναφέρονται παραπάνω (Πίνακας 6.8.3.7), με χρήση της εντολής G.H.B.. Οι ζώνες αυτές διακρίνονται με **πράσινο χρώμα** βορειοανατολικά της λεκάνης καθώς και στα δυτικά της στο σημείο εισόδου του ποταμού Κατωβιανίτη κάτω από τη θέση Καμάρα.



Εικόνα 6.8.3.5 Ζώνες εισαγωγής πλευρικά εισρέοντος ύδατος στον υδροφορέα με χρήση της εντολής G.H.B (Βορειοανατολικά και Δυτικά της λεκάνης με πράσινο χρώμα).

- Drain (Τοίχος αποστράγγισης).

Στην περίπτωση χρήσης της υπορουτίνας – εντολής Drain απαιτείται ο προσδιορισμός του ύψους τοίχους αποστράγγισης για κάθε εποχιακή περίοδο. Επιπλέον απαιτείται η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας για την περιοχή στην οποία τοποθετείται το τοίχος αποστράγγισης (Drain).

Η υδραυλική αγωγιμότητα της περιοχής των Λεπτόκοκκων Αλλουβιακών Αποθέσεων στην οποία τοποθετείται το τοίχος Drain, είναι 0,000001 m/sec η οποία μετατρέπεται σε 0,086 m/day και εισάγεται στην επιλογή Assign της υπορουτίνας Drain. Το ύψος του τοίχους για τη **χειμερινή περίοδο** επιλέχθηκε στα 460 m, δηλαδή περίπου στα 10 μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, με στόχο την εξαγωγή των πλευρικών εκροών ύδατος στα κατάντη του υδροφορέα.

Κατά την **καλοκαιρινή περίοδο** το ύψος Drain, επιλέχθηκε στα 450 m. Η επιλογή για τη θερινή περίοδο, έγινε με στόχο την ορθή και αξιόπιστη ρύθμιση του μοντέλου προσομοίωσης καθώς λογικά θα έπρεπε να επιλέξουμε μεγαλύτερο ύψος αποστράγγισης από τα 450 m, προκειμένου ο υδροφορέας να ανατροφοδοτείται και να αντισταθμίζονται οι σημαντικές απώλειες ύδατος που οφείλονται στις υδρευτικές και αρδευτικές απολήψεις. Σύμφωνα όμως με τα υπάρχοντα βιβλιογραφικά στοιχεία τα οποία αναφέρονται στις παροχές των αντλητικών γεωτρήσεων και στη στάθμη ύδατος που παρατηρείται εποχιακά στον υδροφορέα, επιλέχθηκε ύψος τοίχους Drain στα 450 m για τη θερινή περίοδο, προκειμένου να ρυθμιστεί κατάλληλα το μοντέλο προσομοίωσης ώστε να εξάγει τιμές υδραυλικού φορτίου αντίστοιχες των παρατηρούμενων τιμών στα πηγάδια παρατήρησης. Τα προαναφερθέντα ουσιαστικά υποδηλώνουν τον προσεγγιστικό υπολογισμό των παροχών των αντλητικών πηγιδιών στις βιβλιογραφικές πηγές. Σύμφωνα με τη ρύθμιση του παρόντος μοντέλου, παρατηρείται σημαντική πιθανότητα, οι παροχές των αντλήσεων να είναι μεγαλύτερες στην πραγματικότητα από τις τιμές που χρησιμοποιήθηκαν από τη βιβλιογραφία, οπότε και να εξάγεται μεγαλύτερη ποσότητα ύδατος από τον υδροφορέα.

Στην Εικόνα 6.8.3.5 απεικονίζεται με γκρι χρώμα, η λεπτή ζώνη του τοίχους Drain στα κατάντη της λεκάνης στα νοτιοδυτικά της περιοχής.

- Recharge (Εμπλουτισμός).
 - Επεξεργασία στοιχείων πριν την εισαγωγή τους στο μοντέλο.

Στην περίπτωση των τροφοδοσιών από τις **πηγές** και της **κατείσδυσης της βροχόπτωσης**, χρησιμοποιήθηκε η υπορουτίνα Recharge. Όπως έχει αναφερθεί για κάθε είδος τροφοδοσίας, επιλύθηκε ένα σύστημα εξισώσεων.

- Για τις τροφοδοσίες από τις **πηγές**, επιλύθηκε το παρακάτω σύστημα:

Πχ: Τροφοδοσία Πηγών το χειμώνα.

Πκ: Τροφοδοσία Πηγών το καλοκαίρι.

Π(μέσο): Ετήσια Τροφοδοσία Πηγών ($m^3/year$).

Το σύστημα των εξισώσεων είναι το ακόλουθο:

$$\Pi_k * (0,7) = \Pi_\chi * (0,3)$$

Σχέση (6.8.3.9)

$$(\Pi_k + \Pi_\chi) / 2 = \Pi(\text{μέσο}) = \text{Ετήσια Τροφοδοσία Πηγών (m}^3 / \text{year)}$$

Σχέση (6.8.3.10)

Με άγνωστες παραμέτρους τα Π_k , Π_χ .

- Για την **κατείσδυση της βροχόπτωσης** επιλύθηκε το παρακάτω σύστημα:

B_χ : Κατείσδυση βροχόπτωσης το χειμώνα.

B_k : Κατείσδυση βροχόπτωσης το καλοκαίρι.

$B(\text{μέσο})$: Ετήσια Κατείσδυση βροχόπτωσης (m^3 / year).

Το σύστημα των εξισώσεων είναι το ακόλουθο:

$$B_k * (0,8) = B_\chi * (0,2)$$

Σχέση (6.8.3.11)

$$(B_k + B_\chi) / 2 = B(\text{μέσο}) (\text{m}^3 / \text{year})$$

Σχέση (6.8.3.12)

Με άγνωστες παραμέτρους τα B_k , B_χ .

Για τη χρήση της υπορουτίνας Recharge απαιτείται η μετατροπή της παροχής εισερχόμενου ύδατος (m^3 / year), το οποίο εμπλουτίζει τον υδροφόρα μελέτης σε **ύψος ύδατος** (mm / year) για κάθε κυψελίδα που τροφοδοτείται. Η διαδικασία της μετατροπής αυτής παρουσιάζεται στα ακόλουθα:

- **Πηγές:**

Ετήσια Τροφοδοσία Πηγών: $585640 \text{ m}^3 / \text{year}$

Αριθμός κυψελίδων εμπλουτισμού: 9

Εμβαδόν επιφάνειας κυψελίδας: $2305,758 \text{ m}^2$

Ύψος ύδατος που αντιστοιχεί σε κάθε κυψελίδα εμπλουτισμού:

$$[(585640 / 9) / 2305,758] [(\text{m}^3 / \text{m}^2) / \text{year}] = 28,221136 \text{ m} / \text{year} =$$

28221,136 mm / year

▫ **Κατείσδυση βροχόπτωσης:**

Ετήσια Κατείσδυση βροχόπτωσης: $227888 \text{ m}^3 / \text{year}$

Αριθμός κυψελίδων εμπλουτισμού: 1143

Εμβαδόν επιφάνειας κυψελίδας: $2305,758 \text{ m}^2$

Στην περίπτωση της Κατείσδυσης της βροχόπτωσης θα πρέπει να σημειωθεί ότι κατείσδυση ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων παρατηρείται και στις εννέα κυψελίδες που χρησιμοποιούνται για τον εμπλουτισμό του υδροφορέα μέσω των Πηγών. Σύμφωνα με την παρατήρηση αυτή κατά τον υπολογισμό του ύψους ύδατος που κατεισδύει σε κάθε κυψελίδα του κανάβου της λεκάνης, θα πρέπει να συμπεριληφθούν και οι 9 επιπλέον κυψελίδες που αντιστοιχούν στην τροφοδοσία των Πηγών.

Επίσης κατά τη διαμόρφωση της εντολής G.H.B., όπως προαναφέρθηκε παραπάνω, προσδιορίστηκε μία **λεπτή ζώνη κυψελίδων** στα σύνορα των περιοχών για τις οποίες χρησιμοποιήθηκε η εν λόγω εντολή. Η ζώνη αυτή ουσιαστικά αποτέλεσε το σύνορο μεταξύ της εξωτερικής δεξαμενής ύδατος και του υδροφορέα. Οι κυψελίδες οι οποίες επιλέχθηκαν κατά τη διαμόρφωση των ζωνών μεταφοράς του πλευρικά εισρέοντος υπόγειου ύδατος, σύμφωνα με τις λειτουργίες το μοντέλου και τα αποτελέσματα της ολοκληρωμένης προσομοίωσης, ουσιαστικά επιβαρύνονται από τις πλευρικές τροφοδοσίες περισσότερο από όλες τις υπόλοιπες κυψελίδες του κανάβου του υδροφορέα. Στα αποτελέσματα λοιπόν της προσομοίωσης, παρατηρείται αρκετά υψηλό υδραυλικό φορτίο στις ζώνες των κυψελίδων που αντιστοιχούν στην εντολή G.H.B.. Για το λόγο αυτό προτιμήθηκε να μην τοποθετηθεί επιπρόσθετος εμπλουτισμός των κυψελίδων των εν λόγω ζωνών μέσω της εντολής Recharge, για την περίπτωση της κατεισδυόμενης βροχόπτωσης, προκειμένου να αποφευχθεί η υπερβολική τροφοδοσία ύδατος των συγκεκριμένων κυψελίδων και κατά συνέπεια το υδραυλικό φορτίο να παραμείνει σε λογικά πλαίσια και πάντα σε ύψος στάθμης μικρότερο από το υψόμετρο της εδαφικής επιφάνειας. Στην Εικόνα 6.8.3.6 διακρίνονται εμφανώς οι ζώνες κυψελίδων που αντιστοιχούν στην εντολή G.H.B., οι οποίες δεν φέρουν επιπλέον εμπλουτισμό μέσω της εντολής Recharge.

Για την ορθότητα όμως της κατασκευής του μοντέλου προσομοίωσης θεωρήθηκε ένας μικρός αριθμός επιπλέον κυψελίδων οι οποίες δέχονται κατεισδυόμενα ύδατα λόγω βροχόπτωσης. Η θεώρηση αυτή έχει ως σκοπό την αντιστάθμιση του αριθμού των κυψελίδων των ζωνών G.H.B που εξαιρέθηκαν από τον εμπλουτισμό με ύδατα βροχόπτωσης, προκειμένου να μην επιβαρυνθούν σημαντικά από τις πλευρικές τροφοδοσίες και την ταυτόχρονη κατείσδυση των υδάτων βροχόπτωσης.

Σύμφωνα με τα άνωθεν θεωρήθηκε ένας επιπλέον αριθμός 20 κυψελίδων οι οποίες δέχονται βροχόπτωση και κατά συνέπεια κατείσδυση υδάτων.

Σύμφωνα με τα παραπάνω:

Αριθμός κυψελίδων κατείσδυσης βροχόπτωσης: $1143 + 9 + 20 = 1172$

Ύψος ύδατος που αντιστοιχεί σε κάθε κυψελίδα εμπλουτισμού:
 $[(227888 / 1172) / 2305,758] [(m^3 / m^2) / year] = 0,084329 m / year =$
84,329 mm / year

Άρα ισχύει:

- **Πηγές:**

Ετήσιο ύψος ύδατος εμπλουτισμού για κάθε κυψελίδα: 28221,136 mm / year

- **Κατείσδυση βροχόπτωσης:**

Ετήσιο ύψος ύδατος εμπλουτισμού για κάθε κυψελίδα: 84,329 mm / year

Με την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων 6.8.3.9 και 6.8.3.10 εξάγονται τα αποτελέσματα του παρακάτω πίνακα:

Ετήσιο ύψος ύδατος εμπλουτισμού για κάθε κυψελίδα. (mm / year)	Τροφοδοσία Πηγών το καλοκαίρι σε ύψος ύδατος για κάθε κυψελίδα. (mm / year)	Τροφοδοσία Πηγών το χειμώνα σε ύψος ύδατος για κάθε κυψελίδα. (mm / year)
Πηγές(μέσο)	$\Pi_k = \text{Πηγές(μέσο)} / (1,665)$	$\Pi_\chi = \text{Πηγές(μέσο)} * (1,3994)$
28221,136	16949,63	39492,65

Πίνακας 6.8.3.8 Υπολογισμός εποχιακών Τροφοδοσιών Πηγών σε ύψος ύδατος, με επίλυση του συστήματος εξισώσεων με αγνώστους τα Π_χ , Π_k .

Με την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων 6.8.3.11 και 6.8.3.12 εξάγονται τα αποτελέσματα του παρακάτω πίνακα:

Ετήσιο ύψος ύδατος εμπλουτισμού για κάθε κυψελίδα. (mm / year)	Τροφοδοσία Κατείσδυσης βροχόπτωσης το καλοκαίρι σε ύψος ύδατος για κάθε κυψελίδα. (mm / year)	Τροφοδοσία Κατείσδυσης βροχόπτωσης το χειμώνα σε ύψος ύδατος για κάθε κυψελίδα. (mm / year)
Βροχόπτωση(μέσο)	$B_k = B(\text{μέσο}) / (2,5)$	$B_\chi = B(\text{μέσο}) * (1,6)$
84,329	33,7316	134,9264

Πίνακας 6.8.3.9 Υπολογισμός εποχιακών Τροφοδοσιών Κατείσδυσης βροχόπτωσης σε ύψος ύδατος (B_k , B_χ).

Έπειτα από την εξαγωγή των παραπάνω αποτελεσμάτων, θα πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω της αδυναμίας του κώδικα Visual Modflow να εισαγάγει πολλαπλές τιμές εμπλουτισμού σε μία επιλεγμένη κυψελίδα, χρειάστηκε κατά την τοποθέτηση του εμπλουτισμού (Recharge) των τροφοδοσιών των Πηγών στις εννέα προεπιλεγμένες κυψελίδες, να συμπεριληφθεί και το ύψος ύδατος κατεισδυόμενης ποσότητας βροχόπτωσης που αντιστοιχεί στις κυψελίδες αυτές.

Συμπερασματικά, το τελικό ύψος ύδατος τροφοδοσίας των Πηγών, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη διαμόρφωση της εντολής Recharge στις εννέα κυψελίδες που παρατηρείται εμπλουτισμός λόγω Πηγών, παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Συνολική τροφοδοσία Πηγών το καλοκαίρι σε ύψος ύδατος για κάθε κυψελίδα. (mm / year) $\Pi_k(\text{συνολικό}) = \Pi_k + B_k$	Συνολική τροφοδοσία Πηγών το χειμώνα σε ύψος ύδατος για κάθε κυψελίδα. (mm / year) $\Pi_\chi(\text{συνολικό}) = \Pi_\chi + B_\chi$
$(16949,63) + (33,7316) =$ 16983,37	$(39492,65) + (134,9264) =$ 39627,56

Πίνακας 6.8.3.10 Συνολικές εποχιακές Τροφοδοσίες Πηγών σε ύψος ύδατος με προσθήκη της αντίστοιχης κατεισδυόμενης ποσότητας βροχόπτωσης.

Για την ολοκληρωμένη χρήση της υπορουτίνας Recharge, εφόσον υπολογίστηκαν οι εποχιακές τροφοδοσίες που αντιστοιχούν στον εμπλουτισμό μέσω Πηγών και στον εμπλουτισμό μέσω της Κατείσδυσης της βροχόπτωσης, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των αντίστοιχων **εκροών στα κατάντη** της λεκάνης στα νοτιοδυτικά της περιοχής.

Η διαδικασία υπολογισμού των **εποχιακών εκροών** στα κατάντη της λεκάνης, που αντιστοιχούν στις εποχιακές τροφοδοσίες του υδροφορέα μέσω εμπλουτισμού (Recharge), παρουσιάζεται παρακάτω:

▫ **Θερινή εκροή του αντίστοιχου συνολικού εμπλουτισμού:**

• **Πηγές:**

Αριθμός κυψελίδων εμπλουτισμού: 9

Τροφοδοσία Πηγών το καλοκαίρι σε ύψος ύδατος για κάθε κυψελίδα:

16949,63 mm / year = 16,94963 m / year

• **Κατείσδυση βροχόπτωσης:**

Αριθμός κυψελίδων εμπλουτισμού: 1172

Τροφοδοσία Κατείσδυσης βροχόπτωσης το καλοκαίρι σε ύψος ύδατος για κάθε κυψελίδα: 33,7316 mm / year = 0,0337316 m / year

Εμβαδόν επιφάνειας κυψελίδας: 2305,758 m²

Άρα ισχύει για κάθε κυψελίδα:

Θερινή τροφοδοσία Πηγών: $(16,94963) * (2305,758) \text{ m}^3 / \text{year} = 39081,7449 \text{ m}^3 / \text{year}$

Θερινή τροφοδοσία βροχής: $(0,0337316) * (2305,758) \text{ m}^3 / \text{year} = 77,7769 \text{ m}^3 / \text{year}$

Για το σύνολο των κυψελίδων ισχύει:

Συνολική θερινή τροφοδοσία Πηγών (9 κυψελίδες):

$(39081,7449) * 9 = 351735,7041 \text{ m}^3 / \text{year}$

Συνολική θερινή τροφοδοσία Βροχής (1172 κυψελίδες):

$(77,7769) * 1172 = 91154,5268 \text{ m}^3 / \text{year}$

Συνολική θερινή εκροή του εμπλουτισμού (Recharge):

$351735,7041 + 91154,5268 \text{ m}^3 / \text{year} = 442890,2309 \text{ m}^3 / \text{year}$

▫ **Χειμερινή εκροή του αντίστοιχου συνολικού εμπλουτισμού:**

• **Πηγές:**

Αριθμός κυψελίδων εμπλουτισμού: 9

Τροφοδοσία Πηγών το χειμώνα σε ύψος ύδατος για κάθε κυψελίδα:

39492,65 mm / year = 39,49265 m / year

• **Κατείσδυση βροχόπτωσης:**

Αριθμός κυψελίδων εμπλουτισμού: 1172

Τροφοδοσία Κατείσδυσης βροχόπτωσης το χειμώνα σε ύψος ύδατος για κάθε κυψελίδα:

134,9264 mm / year = 0,1349264 m / year

Εμβαδόν επιφάνειας κυψελίδας: 2305,758 m²

Άρα ισχύει για κάθε κυψελίδα:

Χειμερινή τροφοδοσία Πηγών: (39,49265) * (2305,758) m³ / year =

91060,4936 m³ / year

Χειμερινή τροφοδοσία βροχής: (0,1349264) * (2305,758) m³ / year =

311,10762 m³ / year

Για το σύνολο των κυψελίδων ισχύει:

Συνολική χειμερινή τροφοδοσία Πηγών (9 κυψελίδες):

(91060,4936) * 9 = 819544,4424 m³ / year

Συνολική χειμερινή τροφοδοσία Βροχής (1172 κυψελίδες):

(311,10762) * 1172 = 364618,13064 m³ / year

Συνολική χειμερινή εκροή του εμπλουτισμού (Recharge):

819544,4424 + 364618,13064 m³ / year = **1184162,57304 m³ / year**

Κατά τη διαδικασία χρήσης της υπορουτίνας Recharge, προσδιορίστηκε και η περιοχή από την οποία θα διαφεύγουν οι ποσότητες εκροής των τροφοδοσιών εμπλουτισμού. Η περιοχή αυτή τοποθετήθηκε στα κατάντη της λεκάνης (νοτιοδυτικά) και αποτελείται από 16 κυψελίδες. Για τον ακριβή υπολογισμό της ποσότητας ύδατος σε ύψος ύδατος που εξέρχεται εποχιακά από την εκροή της εντολής Recharge, ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

▫ **Θερινή εκροή του συνολικού εμπλουτισμού σε ύψος ύδατος:**

Συνολική θερινή εκροή του εμπλουτισμού (Recharge): $442890,2309 \text{ m}^3 / \text{year}$

Αριθμός κυψελίδων εκροής: 16

Εμβαδόν επιφάνειας κυψελίδας: $2305,758 \text{ m}^2$

Ύψος ύδατος που αντιστοιχεί σε κάθε κυψελίδα εκροής:

$$[(442890,2309 / 16) / 2305,758] [(m^3 / m^2) / \text{year}] = 12,005006 \text{ m} / \text{year} = 12005,006 \text{ mm} / \text{year} \approx \mathbf{12005,01 \text{ mm} / \text{year}}$$

▫ **Χειμερινή εκροή του συνολικού εμπλουτισμού σε ύψος ύδατος:**

Συνολική χειμερινή εκροή του εμπλουτισμού (Recharge): $1184162,57304 \text{ m}^3 / \text{year}$

Αριθμός κυψελίδων εκροής: 16

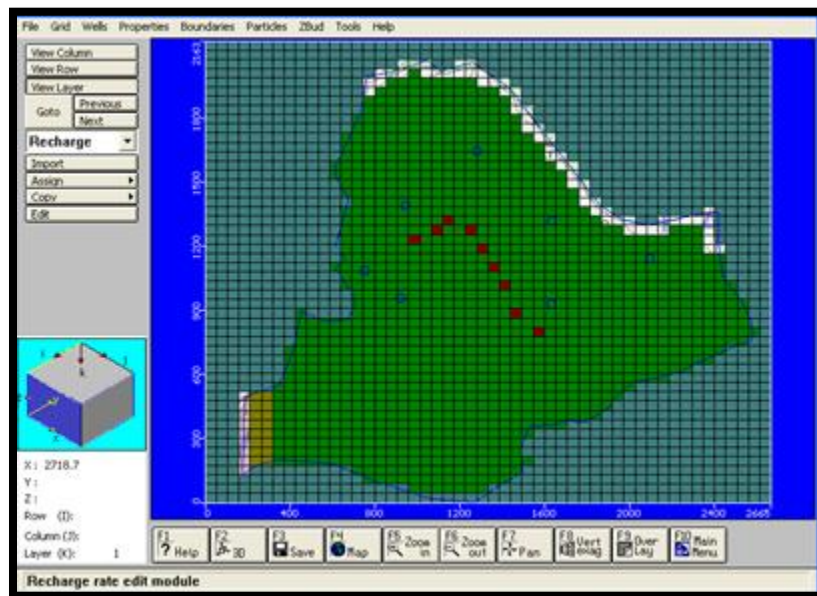
Εμβαδόν επιφάνειας κυψελίδας: $2305,758 \text{ m}^2$

Ύψος ύδατος που αντιστοιχεί σε κάθε κυψελίδα εκροής:

$$[(1184162,57304 / 16) / 2305,758] [(m^3 / m^2) / \text{year}] = 32,09796 \text{ m} / \text{year} = \mathbf{32097,96 \text{ mm} / \text{year}}$$

Σημαντική παρατήρηση αποτελεί το γεγονός πως κατά τη χρήση της εντολής Recharge για τη διαμόρφωση της εκροής του εμπλουτισμού, επιβάλλεται η εισαγωγή **αρνητικού προσήμου** στις τιμές ύψους ύδατος που τοποθετούνται στο παράθυρο διαμόρφωσης της υπορουτίνας. Με τον τρόπο αυτό υποδηλώνεται η εξαγωγή του αντίστοιχου ύψους ύδατος από κάθε κυψελίδα της εκροής, ενώ με θετικό πρόσημο υποδηλώνεται ο εμπλουτισμός κάθε κυψελίδας.

- Εισαγωγή στοιχείων στο μοντέλο.



Εικόνα 6.8.3.6 Περιβάλλον εργασίας της υπορουτίνας Recharge στο μοντέλο Visual Modflow.

Στην παραπάνω εικόνα, παρουσιάζεται το περιβάλλον εργασίας της εντολής Recharge. Πιο συγκεκριμένα διακρίνονται οι ζώνες κυψελίδων που αντιστοιχούν στην εντολή G.H.B. οι οποίες δε φέρουν εμπλουτισμό Recharge, στα βορειοανατολικά της λεκάνης. Επίσης διακρίνονται στο κέντρο της λεκάνης οι εννέα κυψελίδες εμπλουτισμού των Πηγών με κόκκινο χρώμα, ενώ στα κατάντη της λεκάνης με χρώμα όχρα διακρίνεται η ζώνη συνολικής εκροής του εμπλουτισμού.

Τέλος η υπόλοιπη περιοχή πράσινου χρώματος αντιστοιχεί στον εμπλουτισμό με κατείσδυση βροχόπτωσης μόνο, ενώ σημαντική παρατήρηση για οποιοδήποτε επιπλέον υπολογισμό, αποτελεί το γεγονός ότι ο συνολικός αριθμός ενεργών κυψελίδων στο παρόν μοντέλο είναι 1237.

6.8.4. Ρύθμιση του μοντέλου σε συνθήκες μόνιμης ροής.

Κατά τη ρύθμιση του υπολογιστικού μοντέλου, αναζητούνται οι κατάλληλες τιμές των χαρακτηριστικών παραμέτρων και φορτιών του συστήματος, ούτως ώστε κατά την εκτέλεση του κώδικα, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να προσεγγίζουν με αξιοπιστία τις δεδομένες τιμές των μεταβλητών κατάστασης, οι οποίες απεικονίζουν τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του φυσικού συστήματος. Όσον αφορά τη μελέτη υπόγειων υδροφορέων, η ρύθμιση του μοντέλου, αποσκοπεί κυρίως στη διαμόρφωση της πιεζομετρίας του υδροφόρου συστήματος σύμφωνα με τα καθορισμένα κριτήρια βαθμονόμησης (Τάντος Β., 2006).

Η ρύθμιση ενός μαθηματικού μοντέλου, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί μέσω δύο βασικών μεθόδων. Η πρώτη μέθοδος είναι η εκτέλεση αυτοματοποιημένης βελτιστοποίησης, με χρήση των ανάλογων αλγορίθμων βελτιστοποίησης. Στη δεύτερη μέθοδο ακολουθούμε τη διαδικασία της δοκιμής και σφάλματος. Στο παρόν μοντέλο η ρύθμιση πραγματοποιήθηκε με την εφαρμογή της 2^{ης} μεθόδου.

Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου δοκιμής και σφάλματος, εξαρτάται σημαντικά από τον επιθυμητό βαθμό αξιοπιστίας των εξαγόμενων στοιχείων καθώς και από την ικανότητα λεπτομερούς και αντικειμενικά αποδεκτής εφαρμογής της προαναφερθείσας τεχνικής από τον εκάστοτε μελετητή. Επιπλέον η μέθοδος αυτή παρουσιάζει το πλεονέκτημα, ότι δεν απαιτεί τη χρήση πρόσθετου λογισμικού εκτός αυτής του ίδιου του μοντέλου προσομοίωσης.

Η εν λόγω μέθοδος έχει εφαρμοστεί ευρύτατα στο παρελθόν, ωστόσο παρουσιάζει μειονεκτήματα έναντι των αυτοματοποιημένων μεθόδων ρύθμισης. Για παράδειγμα σε πολλές περιπτώσεις, παρουσιάζεται το πρόβλημα μη μοναδικότητας της λύσης, βάση της οποίας κατά τη ρύθμιση του μοντέλου, διαπιστώνεται από το μελετητή η ύπαρξη δύο ή περισσότερων διαφορετικών μεταξύ τους σετ δεδομένων εισόδου, μέσω των οποίων επιτυγχάνονται οι στόχοι της βαθμονόμησης.

Λεπτομερέστερα για τις αυτοματοποιημένες μεθόδους βελτιστοποίησης, είναι γνωστό ότι βασίζονται σε αλγόριθμους, οι οποίοι αναζητούν το βέλτιστο σύνολο παραμέτρων για την επιθυμητή ρύθμιση του μοντέλου προσομοίωσης (Τάντος Β., 2006). Οι εν λόγω αλγόριθμοι βασίζονται σε παραλλαγές της μεθόδου Gauss – Newton και η κλασσικότερη αυτοματοποιημένη ρύθμιση ενός μοντέλου υπόγειας ροής, είναι η διαδικασία P.EST (Model – Independent Parameter Estimation) και περιέχεται στα λογισμικά Modflow αλλά και G.M.S. (Groundwater Modeling Software).

Σχετικά με τη βαθμονόμηση του παρόντος μοντέλου, σύμφωνα με τη μελέτη των Παπαμαστοράκη κ.α., λαμβάνονται τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας 20 m/d για τη ζώνη των Αλλουβιακών αδρομερών αποθέσεων βορειοανατολικά της περιοχής, και 1 m/d για τη ζώνη των Αλλουβιακών λεπτόκοκκων αποθέσεων, νοτιοδυτικά της περιοχής.

Κατά τη διαδικασία κατασκευής του παρόντος μοντέλου, οι τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας που επιλέχθηκαν για τους δύο χαρακτηριστικούς σχηματισμούς του υπό μελέτη υδροφορέα παρατίθενται παρακάτω. Πιο συγκεκριμένα στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τρεις **βασικές δοκιμές** ρύθμισης του παρόντος μοντέλου προσομοίωσης, οι επιλεγθείσες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας για κάθε γεωλογική περιοχή του υδροφόρου συστήματος αλλά και το εύρος σφαλμάτων που προέκυψε από τη σύγκριση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων της εκτέλεσης της προσομοίωσης για κάθε δοκιμή, με τα δεδομένα στοιχεία υδραυλικού ύψους των δύο γεωτρήσεων παρατήρησης στην λεκάνη μελέτης.

Δοκιμές	Υδραυλική αγωγιμότητα Περιοχή Λεπτόκοκκων Αποθέσεων (m / day)	Υδραυλική αγωγιμότητα Περιοχή Αδρομερών Αποθέσεων 1η ζώνη (Καμαράκι) (m / day)	Υδραυλική αγωγιμότητα Περιοχή Αδρομερών Αποθέσεων 2η ζώνη (Ενδιάμεση) (m / day)	Υδραυλική αγωγιμότητα Περιοχή Αδρομερών Αποθέσεων 3η ζώνη (Πετριά) (m / day)	Εύρος σφαλμάτων (%)
1η	1	20	20	20	0,5 έως 1,0
2η	0,1	0,7	1	1	0,2 έως 0,7
3η (Τελική)	0,0864	0,69	0,864	0,864	0,1 έως 0,6

Πίνακας 6.8.3.11 Βασικές δοκιμές ρύθμισης του μοντέλου προσομοίωσης με τα αντίστοιχα εύρη σφαλμάτων.

Στον παραπάνω πίνακα διακρίνουμε τις δοκιμές βαθμονόμησης του μοντέλου προσομοίωσης, ενώ τα σφάλματα που παρουσιάζονται, προέκυψαν έπειτα από σύγκριση του υπολογισμένου υδραυλικού ύψους ύδατος από τον υπολογιστικό κώδικα με τις τιμές υδραυλικού ύψους που έχουν παρατηρηθεί στα πηγάδια παρατήρησης της λεκάνης. Όπως έχει αναφερθεί, τα πηγάδια παρατήρησης βρίσκονται στις θέσεις Πετριά και Καμαράκι, ενώ τα σφάλματα υπολογιστήκαν με τη χρήση της παρακάτω εξίσωσης:

$$\text{Σφάλμα (\%)} = \frac{\text{Παρατηρούμενη Τιμή} - \text{Υπολογισμένη Τιμή}}{\text{Παρατηρούμενη Τιμή}} \cdot 100 \% \quad \text{Σχέση (6.8.3.13)}$$

Για την παραπάνω σχέση, στην περίπτωση που ο αριθμητής υπολογίζεται αρνητικός, προκειμένου το κλάσμα και κατά συνέπεια το ποσοστιαίο σφάλμα να έχει θετικό πρόσημο, θέτουμε την αφαίρεση της Υπολογισμένης Τιμής από την Παρατηρούμενη Τιμή σε απόλυτη τιμή. Επίσης όσον αφορά την **αρχική δοκιμή**, θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας που χρησιμοποιήθηκαν προέκυψαν από τις εκτιμήσεις της μελέτης των Παπαμαστοράκη κ.α.. Συγκεκριμένα, για το σχηματισμό των Αλλουβιακών Λεπτόκοκκων αποθέσεων η υδραυλική αγωγιμότητα έλαβε αρχική τιμή 1 m/d, ενώ ο σχηματισμός των Αλλουβιακών Αδρομερών αποθέσεων, έλαβε αρχική τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας 20 m/d. Σύμφωνα

με τις προαναφερθείσες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας, χρησιμοποιώντας τις ποσότητες πλευρικών τροφοδοσιών που αναφέρονται και πάλι στη μελέτη των Παπαμαστοράκη κ.α., το αρχικό υδραυλικό ύψος h_1 το οποίο προκύπτει από την επίλυση της εξίσωσης του Dupuit για την περίπτωση χρήσης της υπορουτίνας G.H.B. στην περιοχή των Αδρομερών αποθέσεων, λαμβάνει τιμές ελάχιστα μεγαλύτερες από τις παρατηρούμενες τιμές υδραυλικού ύψους στα πηγάδια παρατήρησης. Αποτέλεσμα της εκτέλεσης της προσομοίωσης με χρήση των αρχικών υδραυλικών υψών h_1 που προσεγγίζουν αρκετά τις παρατηρούμενες τιμές στάθμης ύδατος, είναι η σημαντική πτώση του υδραυλικού ύψους σε ολόκληρο τον υδροφορέα και κατά συνέπεια η αύξηση του σφάλματος που υπολογίζεται για τις γεωτρήσεις παρατήρησης ακόμη και σε 1 % (Περίπτωση της θέσης Καμαράκι τη Θερινή Περίοδο). Στη μελέτη των Παπαμαστοράκη κ.α. για τη μείωση του σφάλματος μεταβλήθηκαν οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας των περιοχών των Λεπτόκοκκων και των Αδρομερών αποθέσεων ενώ παράλληλα αυξήθηκαν οι συνολικές πλευρικές τροφοδοσίες σημαντικά.

Στην περίπτωση της παρούσας προσομοίωσης επιλέχθηκε να παραμείνουν σταθερές οι τιμές των συνολικών πλευρικών τροφοδοσιών, όπως ακριβώς αναφέρονται στο υδρογεωλογικό ισοζύγιο της μελέτης των Παπαμαστοράκη κ.α., ενώ για τη μείωση του σφάλματος προτιμήθηκε η μεταβολή των τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας στις περιοχές της λεκάνης. Συγκεκριμένα, στη **2^η βασική δοκιμή** ρύθμισης, η υδραυλική αγωγιμότητα για σχηματισμό των Αλλουβιακών Λεπτόκοκκων αποθέσεων, έλαβε τιμή 0,1 m/d, ενώ ο σχηματισμός των Αλλουβιακών Αδρομερών αποθέσεων, διαχωρίστηκε σε τρεις ζώνες υδραυλικής αγωγιμότητας. Η 1^η ζώνη των Αδρομερών αποθέσεων, η οποία περιλαμβάνει πηγάδι παρατήρησης στη θέση Πετριά, έλαβε τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας 1 m/d, ομοίως η ενδιάμεση ζώνη 1 m/d, ενώ η τελευταία περιοχή της ζώνης των Αδρομερών που περιλαμβάνει πηγάδι παρατήρησης στη θέση Καμαράκι, έλαβε τιμή 0,7 m/d. Με τη χρήση των παραπάνω τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας το σφάλμα μειώθηκε σημαντικά και κυμάνθηκε από 0,2 % σε 0,7 %.

Τα **τελικά αποτελέσματα**, της ρύθμισης του μοντέλου, παρείχαν τις ακόλουθες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας για τις περιοχές της λεκάνης: Η πρώτη περιοχή της ζώνης των Αδρομερών αποθέσεων, στο νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής των αδρομερών, έλαβε τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας 0,864 m/d, η κεντρική περιοχή της εν λόγω ζώνης έλαβε τιμή 0,864 m/d ομοίως, η περιοχή της ζώνης των αδρομερών στα βορειοδυτικά, έλαβε τιμή 0,69 m/d ενώ η περιοχή των Αλλουβιακών Λεπτόκοκκων αποθέσεων, έλαβε τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας 0,0864 m/d.

Σχετικά με τον υπολογισμό των σφαλμάτων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.8.3.11 για την 3^η και τελική δοκιμή, παρατίθεται ο παρακάτω πίνακας με τις υπολογισμένες και παρατηρούμενες τιμές υδραυλικού ύψους στις γεωτρήσεις ρύθμισης της λεκάνης.

Γεωτρήσεις παρατήρησης ύψους στάθμης.	Εποχιακές Περίοδοι.	Υδραυλικά ύψη. Παρατηρούμενη τιμή - Υπολογισμένη τιμή (m)	Υδραυλικό ύψος (~) Παρατηρούμενη τιμή (m)	Σφάλμα (%)
Πετριά	Χειμώνας	0,5	492	0,1
	Καλοκαίρι	1,5	483	0,3
Καμαράκι	Χειμώνας	2,25	495	0,45
	Καλοκαίρι	3	486	0,61

Πίνακας 6.8.3.12 Παρατηρούμενες και υπολογισμένες τιμές υδραυλικών υψών και σφάλματα για τις γεωτρήσεις ρύθμισης (Πετριά, Καμαράκι).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα το σφάλμα που προκύπτει στην τελική δοκιμή ρύθμισης κυμαίνεται από 0,1 % έως 0,6 %. Το εύρος του σφάλματος είναι αποδεκτό ενώ οι τιμές σφάλματος που προκύπτουν για κάθε εποχιακή περίοδο στην εκάστοτε γεώτρηση παρατήρησης, θεωρούνται ικανοποιητικές. Για ολόκληρη τη λεκάνη προσομοίωσης, το μέσο χειμερινό σφάλμα είναι: $(0,1 \% + 0,45 \%) / 2 = 0,27 \%$, ενώ το μέσο θερινό σφάλμα είναι: $(0,3 \% + 0,61 \%) / 2 = 0,45 \%$.

6.9. Παρουσίαση και ανάλυση σεναρίων μεταβολής υδροληπτικών και βροχομετρικών συνθηκών με χρήση του μοντέλου.

Όπως έχει αναφερθεί αναλυτικά στο σκοπό της παρούσας εργασίας, σύμφωνα με το άρθρο «Σημαντικές κλιματικές μεταβολές λόγω της έλλειψης νερού και ακραία σενάρια στην Κρήτη», Severe climate-induced water shortage and extremes in Crete – 2011 των Tsanis et al., κατά τη χρονική περίοδο 2010 – 2040, αναμένεται μείωση στην Κρήτη, της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης κατά $12 (\pm 25) \%$ και παράλληλα αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας κατά $1,9 (\pm 0,8) ^\circ\text{C}$. Κατά συνέπεια, τις επόμενες δεκαετίες, θα παρατηρηθεί σημαντική μείωση των ετήσιων ποσοτήτων βροχόπτωσης αλλά και σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας σε ολόκληρη την Κρήτη. Βάση των προαναφερθέντων και σύμφωνα με τη δυνατότητα διαμόρφωσης μελλοντικών σεναρίων που παρέχει το υπολογιστικό μοντέλο Visual Modflow, επιλέχθηκε η κατασκευή και μελέτη **τεσσάρων σεναρίων** αύξησης των ποσοτήτων αντλούμενου ύδατος και μείωσης της βροχόπτωσης σε βάθος πέντε ετών, για τη λεκάνη προσομοίωσης στη Βιάννο Ηρακλείου. Πιο συγκεκριμένα κατασκευάστηκαν δύο σενάρια υποβιβασμού της στάθμης ύδατος στον υδροφορέα της λεκάνης, λόγω υπεράντλησης των υδατικών αποθεμάτων και στη συνέχεια, κατασκευάστηκαν δύο επιπλέον σενάρια, τα οποία περιελάμβαναν τις περιπτώσεις αυξημένης άντλησης που προαναφέρθηκαν, με ταυτόχρονη μείωση των ποσοτήτων βροχόπτωσης στη λεκάνη ενδιαφέροντος.

Επιπλέον πριν την κατασκευή των σεναρίων, βάση της ολοκληρωμένης ετήσιας προσομοίωσης της υπόγειας ροής στη λεκάνη μελέτης, συντάχθηκε μία περίπτωση **πενταετούς διάρκειας** κατά την οποία οι τροφοδοσίες ύδατος στον υδροφορέα της λεκάνης καθώς και οι παροχές άντλησεων από τις γεωτρήσεις, δε μεταβλήθηκαν καθόλου και παρέμειναν ως είχαν στο αρχικό ετήσιο μοντέλο προσομοίωσης έως και το 5^ο έτος. Η περίπτωση αυτή συντάχθηκε προκειμένου να εξακριβωθεί βάση των αποτελεσμάτων του μοντέλου προσομοίωσης, η αξιοπιστία του κώδικα κατά τη διαδικασία αναπλήρωσης του υδροφορέα σε βάθος πενταετούς διάρκειας, εφόσον το υδραυλικό φορτίο αυτού μειώνεται σημαντικά έπειτα από κάθε θερινή περίοδο των αυξημένων ποσοτήτων άντλησης ύδατος των γεωτρήσεων της περιοχής. Στην προκειμένη περίπτωση, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου, αποδείχθηκε ότι ο υδροφορέας της περιοχής αναπληρώνεται πλήρως κατά τη χειμερινή περίοδο ενώ για τη θερινή περίοδο παρατηρείται ότι ο υδροφόρος ορίζοντας υποβιβάζεται σύμφωνα με την αναμενόμενη πτώση στάθμης και δεν παρουσιάζει περαιτέρω μείωση υδραυλικού ύψους στις γεωτρήσεις ρύθμισης έως και τον τελευταίο χρόνο της συνολικά πενταετούς προσομοίωσης. Εφόσον τα αποτελέσματα του 5^{ου} χρόνου για την περίπτωση αυτή δεν αποκλίνουν καθόλου από τα αποτελέσματα της αρχικής προσομοίωσης με διάρκεια ενός έτους, είναι δυνατόν να αποδεχθούμε την αξιοπιστία του μοντέλου σχετικά με την διαδικασία αναπλήρωσης του υδροφόρου συστήματος, ως απολύτως ικανοποιητική.

Αναλυτικά τα σενάρια αύξησης των ποσοτήτων άντλησης και μείωσης της βροχόπτωσης για την περιοχή μελέτης στην παρούσα εργασία, παρουσιάζονται παρακάτω:

- Αύξηση των ποσοτήτων άντλησης, κατά 10 %, σε βάθος χρόνου πέντε ετών, για την καλοκαιρινή περίοδο μόνο.
- Αύξηση των ποσοτήτων άντλησης, κατά 20 %, σε βάθος χρόνου πέντε ετών, για την καλοκαιρινή περίοδο μόνο.
- Αύξηση των ποσοτήτων άντλησης, κατά 10 %, για την καλοκαιρινή περίοδο και ταυτόχρονη μείωση της βροχόπτωσης και του κατεισδυόμενου ύδατος στη λεκάνη, κατά 10 %, σε βάθος χρόνου πέντε ετών για ολόκληρο το υδρολογικό έτος.
- Αύξηση των ποσοτήτων άντλησης, κατά 20 %, για την καλοκαιρινή περίοδο και ταυτόχρονη μείωση της βροχόπτωσης και του κατεισδυόμενου ύδατος στη λεκάνη, κατά 10 %, σε βάθος χρόνου πέντε ετών για ολόκληρο το υδρολογικό έτος.

Η κατασκευή των σεναρίων αυτών, έχει ως στόχο την απόδοση μίας μελλοντικής κατάστασης των υδρολογικών και υδροληπτικών συνθηκών της λεκάνης μελέτης. Οι συνθήκες αυτές ουσιαστικά θα διαμορφώνουν μία πτωτική τάση του υδροφόρου

ορίζοντα και κατά συνέπεια μείωση των υδατικών αποθεμάτων του συστήματος. Τα αποτελέσματα των σεναρίων, προσφέρουν τη δυνατότητα σχεδιασμού μίας ορθολογικής άντλησης των υπογείων υδάτων στην περιοχή, ούτως ώστε να εξασφαλιστεί σε βάθος πέντε ετών, η διατήρηση των αποθεμάτων στους υπόγειους υδατικούς πόρους της λεκάνης.

Σχετικά με τα μελλοντικά σενάρια που συντάχθηκαν, είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι η συνολική χρονική διάρκεια βάση της οποίας εισήχθηκαν στο περιβάλλον εργασίας του μοντέλου Visual Modflow, διαχωρίστηκε σε 10 εποχιακές περιόδους που αποτελούσαν κατ'επανάληψη, τη χειμερινή και θερινή περίοδο πέντε συνολικά ετών. Συγκεκριμένα στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι εποχιακές περίοδοι πέντε ετών, για τις οποίες εκτελέστηκαν τα τέσσερα μελλοντικά σενάρια.

Έτη μελλοντικών σεναρίων.	Εποχιακές περίοδοι.	Από (μέρες)	Έως (μέρες)
1 ^ο	Χειμώνας	0	182
	Καλοκαίρι	182	364
2 ^ο	Χειμώνας	364	546
	Καλοκαίρι	546	728
3 ^ο	Χειμώνας	728	910
	Καλοκαίρι	910	1092
4 ^ο	Χειμώνας	1092	1274
	Καλοκαίρι	1274	1456
5 ^ο	Χειμώνας	1456	1638
	Καλοκαίρι	1638	1820

Πίνακας 6.9.1 Εποχιακές περίοδοι πέντε ετών βάση των οποίων διαμορφώθηκαν τα σενάρια της εργασίας.

Τα σενάρια που κατασκευάστηκαν, **βασίστηκαν στην αρχική ετήσια προσομοίωση** της υπόγειας ροής στη λεκάνη μελέτης. Πιο αναλυτικά εφόσον εκτελέστηκε η προσομοίωση της ροής υπογείων υδάτων στον υπό μελέτη υδροφορέα για χρονική διάρκεια ενός έτους, αναπτύχθηκαν τα μελλοντικά σενάρια σε τέσσερα διαφορετικά μοντέλα βάση των αποτελεσμάτων της ετήσιας προσομοίωσης κατά την οποία δε μεταβλήθηκαν οι τροφοδοσίες ύδατος και οι ποσότητες αντλήσεων του συστήματος. Τα αποτελέσματα της αρχικής ετήσιας προσομοίωσης αποτέλεσαν ουσιαστικά τα αρχικά εποχιακά υδραυλικά ύψη για την ανάπτυξη σε βάθος χρόνου πέντε ετών, των τεσσάρων διαφορετικών μελλοντικών σεναρίων. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν για τη διαδικασία αυτή παρουσιάζονται παρακάτω:

- Εκτέλεση της ετήσιας προσομοίωσης με αμετάβλητες παραμέτρους.
- Είσοδος στο περιβάλλον εργασίας του μοντέλου (επιλογή Input) και κατασκευή του μελλοντικού σεναρίου για χρονική διάρκεια πέντε ετών.
- Είσοδος στην παράθυρο εκτέλεσης Run και επιλογή κατά σειρά των ακολούθων: Modflow 2000 → Initial Heads → Previous MODFLOW Run (From ground elevation).
- Επιλογή Open του μοντέλου – project που εμφανίζεται.
- Επιλογή Ok στο παράθυρο Select Output Time που εμφανίζεται και περιλαμβάνει δύο εποχιακές περιόδους.
- Επιλογή κατά σειρά των ακολούθων: Modflow 2000 → Time Steps και εν συνεχεία καθορισμός του παράγοντα επίλυσης και των συνθηκών ροής για κάθε χρονική περίοδο από τις 10 διαμορφωμένες.

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη παράγραφο ο παράγοντας επίλυσης για την περίπτωση της αρχικής ετήσια προσομοίωσης, έλαβε τιμή 1. Ομοίως για την περίπτωση των σεναρίων τέθηκε τιμή 1 για τον παράγοντα (multiplier). Επιπλέον για κάθε εποχιακή περίοδο των σεναρίων πενταετούς διάρκειας, επιλέχθηκαν συνθήκες σταθερής ροής (Steady state). Τέλος εφόσον ακολουθήθηκαν τα παραπάνω βήματα, τα σενάρια εκτελέστηκαν μέσω της επιλογής Run για 10 χρονικές περιόδους.

- Κατασκευή μελλοντικών σεναρίων.

Για την κατασκευή των σεναρίων χρειάστηκε να πραγματοποιηθούν σημαντικές αλλαγές στο εσωτερικό περιβάλλον εργασίας του αρχικού μοντέλου προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα οι υπορουτίνες Grid, Head Observation Wells, Conductivity και Initial Heads παρέμειναν ως είχαν στο αρχικό ετήσιο μοντέλο προσομοίωσης. Οι υπορουτίνες G.H.B. και Drain μεταβλήθηκαν ως προς τη συνολική χρονική περίοδο για την οποία χρησιμοποιήθηκαν χωρίς να πραγματοποιηθούν μεταβολές στις τιμές των υδραυλικών παραμέτρων που είχαν εισαχθεί στο αρχικό ετήσιο μοντέλο, ενώ οι υπορουτίνες Pump Wells και Recharge μεταβλήθηκαν ως προς τις τιμές των υδραυλικών παραμέτρων αλλά και ως προς τη χρονική περίοδο προσομοίωσης. Το περιβάλλον εργασίας του μοντέλου Visual Modflow παρουσιάζεται αναλυτικά με επεξήγηση των λειτουργιών και της χρήσης των υπορουτίνων – εντολών του, στην παράγραφο 6.8.3. Βάση των προαναφερθέντων στην εν λόγω παράγραφο του 6^{ου} Κεφαλαίου, συντάχθηκαν τα τέσσερα διαφορετικά μελλοντικά σενάρια, εφόσον αρχικά υπολογίστηκαν οι απαραίτητες τιμές υδροληπτικών παροχών και βροχομετρικών ποσοτήτων που αντιστοιχούν στα πενταετούς διάρκειας σενάρια. Σύμφωνα λοιπόν με τον Πίνακα 6.9.1, οι υπορουτίνες G.H.B. και Drain διαμορφώθηκαν χρονικά σε 10 χρονικές περιόδους των συνολικά 5 ετών. Οι υπορουτίνες Pump Wells και Recharge διαμορφώθηκαν ομοίως

βάση του Πίνακα 6.9.1 και ταυτόχρονα μεταβλήθηκαν ως προς τις υδραυλικές παραμέτρους τους σύμφωνα με τους ακόλουθους πίνακες.

- Σενάρια αύξησης των αντλήσεων κατά 10 % και 20 % σε διάρκεια πέντε ετών για τη θερινή περίοδο.

Για τα δύο πρώτα σενάρια, χρειάστηκε ο υπολογισμός της κατά 10 % και 20 % αυξημένης ποσότητας αντλούμενου ύδατος για κάθε αντλητική γεώτρηση της περιοχής για τη θερινή περίοδο μόνο, σε βάθος πέντε ετών. Πιο συγκεκριμένα για τον εν λόγω υπολογισμό οι ποσότητες αντλούμενου ύδατος αυξάνονταν κατά 10 % για κάθε καλοκαιρινή περίοδο συγκριτικά με την αμέσως προηγούμενη καλοκαιρινή περίοδο, ενώ οι αντλητικές ποσότητες στην περίπτωση αύξησης κατά 20 %, ομοίως αυξάνονταν κατά 20 % για κάθε γεώτρηση της περιοχής σε κάθε θερινή περίοδο συγκριτικά με την αμέσως προηγούμενη θερινή περίοδο. Η κατά 10 % και 20 % αύξηση των ποσοτήτων άντλησης το καλοκαίρι συγκριτικά με τις τιμές αντλήσεων του αμέσως προηγούμενου καλοκαιριού, διαμορφώνει ουσιαστικά μία ανοδική τάση των συνολικά αντλούμενων ποσοτήτων ύδατος στη λεκάνη μελέτης. Οι υπολογισμένες τιμές που εισήχθηκαν στην υπορουτίνα Pump Wells παρατίθενται παρακάτω:

Γεωτρήσεις περιοχής.	Αρχική τιμή αντλούμενης ποσότητας. (Καλοκαίρι) (m ³ / day)	1 ^ο Καλοκαίρι + 10 % αρχικής τιμής (m ³ / day)	2 ^ο Καλοκαίρι + 10 % προηγ. τιμής (m ³ / day)	3 ^ο Καλοκαίρι + 10 % προηγ. τιμής (m ³ / day)	4 ^ο Καλοκαίρι + 10 % προηγ. τιμής (m ³ / day)	5 ^ο Καλοκαίρι + 10 % προηγ. τιμής (m ³ / day)
Τούρκου	476,257	523,882	576,271	633,898	697,287	767,016
Παπαγιάννη	1943,737	2138,110	2351,921	2587,113	2845,825	3130,407
Μαυρίκο	1016,285	1117,913	1229,704	1352,675	1487,942	1636,737
Μουρελάκι	397,667	437,433	481,177	529,294	582,224	640,446
Ψυχούλια	6,441	7,085	7,793	8,573	9,430	10,373
Καμαράκι	19,7833	21,761	23,937	26,331	28,964	31,861
Καβρού	145,69	160,259	176,285	193,913	213,304	234,635

Πίνακας 6.9.2 Σενάριο 1^ο, αύξηση κατά 10 % των αντλήσεων – Υπολογισμένες τιμές αντλούμενων ποσοτήτων για το καλοκαίρι σε όλες τις γεωτρήσεις της περιοχής.

Γεωτρήσεις περιοχής.	Αρχική τιμή αντλούμενης ποσότητας. (Καλοκαίρι) (m ³ / day)	1 ^ο Καλοκαίρι + 20 % αρχικής τιμής (m ³ / day)	2 ^ο Καλοκαίρι + 20 % προηγ. τιμής (m ³ / day)	3 ^ο Καλοκαίρι + 20 % προηγ. τιμής (m ³ / day)	4 ^ο Καλοκαίρι + 20 % προηγ. τιμής (m ³ / day)	5 ^ο Καλοκαίρι + 20 % προηγ. τιμής (m ³ / day)
Τούρκου	476,257	571,508	685,810	822,972	987,566	1185,079
Παπαγιάννη	1943,737	2332,484	2798,981	3358,777	4030,533	4836,639
Μαυρίκο	1016,285	1219,542	1463,450	1756,140	2107,368	2528,842
Μουρελάκι	397,667	477,200	572,640	687,168	824,602	989,522
Ψυχούλια	6,441	7,729	9,275	11,130	13,356	16,027
Καμαράκι	19,7833	23,739	28,487	34,185	41,022	49,227
Καβρού	145,69	174,828	209,793	251,752	302,102	362,523

Πίνακας 6.9.3 Σενάριο 2^ο, αύξηση κατά 20 % των αντλήσεων – Υπολογισμένες τιμές αντλούμενων ποσοτήτων για το καλοκαίρι σε όλες τις γεωτρήσεις της περιοχής.

ο Σενάρια αύξησης των αντλήσεων κατά 10 % και 20 % σε διάρκεια πέντε ετών για τη θερινή περίοδο και ταυτόχρονης μείωσης της βροχόπτωσης και του κατεισδυόμενου ύδατος σε όλη την περιοχή κατά 10 % για ολόκληρο το υδρολογικό έτος.

Για τα δύο τελευταία σενάρια, χρειάστηκε ο υπολογισμός της κατά 10 % μείωσης του κατεισδυόμενου ύδατος στη λεκάνη για ολόκληρο το υδρολογικό έτος, σε βάθος πέντε ετών. Για τον υπολογισμό αυτό οι ποσότητες κατεισδυόμενου ύδατος μειώνονταν κατά 10 % για κάθε χειμερινή και θερινή περίοδο συγκριτικά με την αμέσως προηγούμενη χειμερινή και θερινή περίοδο. Η κατά 10 % μείωση των ποσοτήτων κατεισδυόμενου ύδατος για ολόκληρη τη διάρκεια κάθε έτους, συγκριτικά με τις τιμές κατεισδυόμενου ύδατος του αμέσως προηγούμενου έτους, διαμορφώνει ουσιαστικά μία πτωτική τάση των συνολικών κατεισδυόμενων ποσοτήτων ύδατος στη λεκάνη.

Πριν την παρουσίαση και επεξήγηση των υπολογισμών για την κατά 10 % μείωση του νερού κατεισδυσης, θα πρέπει να επισημανθεί ότι στα σενάρια μείωσης της κατεισδυόμενης βροχόπτωσης, επιλέχθηκε το ποσοστό 10 % προκειμένου να διατηρηθεί η πτωτική τάση των ετήσιων κατεισδυόμενων ποσοτήτων ύδατος στη λεκάνη, σε λογικά πλαίσια, συγκριτικά πάντα με την πτωτική τάση που θα διαμόρφωνε η χρήση ποσοστού 12 % το οποίο προέρχεται από βιβλιογραφικές πηγές («Σημαντικές κλιματικές μεταβολές λόγω της έλλειψης νερού και ακραία σενάρια στην Κρήτη», Tsanis et al., 2011). Ακόμη

και για το επιλεγμένο ποσοστό μείωσης 10 %, η πτωτική τάση των ποσοτήτων κατεισδύμενου ύδατος που θα διαμορφωθεί σε βάθος πενταετίας, θα είναι αρκετά σημαντική, με αποτέλεσμα η αξιοπιστία και αντικειμενικότητα των μοντέλων που αντιστοιχούν στα τελευταία σενάρια να δύναται να τεθούν υπό αμφισβήτηση.

Προκειμένου η πτωτική τάση του κατεισδύμενου ύδατος που θα διαμορφώσει το ποσοστό μείωσης στα 10 %, να μην προκαλέσει σημαντικές απώλειες υδατικού δυναμικού στον υδροφορέα της λεκάνης σε βάθος χρόνου πέντε ετών, αποφασίστηκε να μειωθεί σε μικρό βαθμό ο συνολικός αριθμός κυψελίδων του κανάβου προσομοίωσης που περιλαμβάνονται στους υπολογισμούς της ετήσιας εκροής των συνολικών τροφοδοσιών που δέχεται το σύστημα λόγω εμπλουτισμού. Ο αριθμός των κυψελίδων που δέχονται κατεισδύμενα ύδατα λόγω βροχόπτωσης παρέμεινε ίδιος, ωστόσο ο αριθμός των κυψελίδων που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς της εκροής που αντιστοιχεί στις συνολικές ποσότητες εμπλουτισμού των τελευταίων σεναρίων, μειώθηκε σε μικρό βαθμό με αποτέλεσμα να μειωθεί η ετήσια εκροή. Με τον τρόπο αυτό, το υδροφόρο σύστημα, συγκράτησε μία επιπλέον μικρή ποσότητα κατεισδύμενου ύδατος λόγω εμπλουτισμού, γεγονός το οποίο συνετέλεσε στο να αποφευχθεί η παρατήρηση έντονα απότομης κλίσης της πτωτικής τάσης των υδάτων βροχόπτωσης που κατεισδύουν σε βάθος πέντε χρόνων.

Όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο 6.8.3, υπήρξε ένας **μικρός αριθμός κυψελίδων** που δέχονται βροχόπτωση αλλά προκειμένου να μην τροφοδοτηθούν υπερβολικά λόγω της χρήσης τους στις ζώνες της εντολής G.H.B., επιλέχθηκε να μην τοποθετηθεί σε αυτές εμπλουτισμός λόγω κατείσδυσης βροχόπτωσης με χρήση της εντολής Recharge. Ο αριθμός των κυψελίδων αυτών είναι 20 και στην περίπτωση των δύο τελευταίων σεναρίων, δεν περιλήφθηκε στους υπολογισμούς της εκροής των τροφοδοσιών εμπλουτισμού.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι υπολογισμένες τιμές εποχιακού ύψους ύδατος που κατεισδύει στον υδροφορέα μελέτης, εφόσον έχουν πραγματοποιηθεί οι απαραίτητοι υπολογισμοί μείωσης της ετήσιας κατείσδυσης βροχής κατά 10 % σε βάθος χρόνου πέντε ετών.

Εποχιακές Περίοδοι σε βάθος 5 ετών για μείωση 10 % της κατείσδυσης.	Εποχιακή κατείσδυση βροχής. (m)	Εποχιακή κατείσδυση βροχής. (mm)
Αρχική τιμή κατείσδυσης (Χειμώνας)	0,1349264	134,9264
1 ^{ος} Χειμώνας, - 10 % αρχικής τιμής	0,1214337	121,4337
2 ^{ος} Χειμώνας, - 10 % προηγούμενης τιμής	0,1092903	109,2903
3 ^{ος} Χειμώνας, - 10 % προηγούμενης τιμής	0,0983613	98,3613
4 ^{ος} Χειμώνας, - 10 % προηγούμενης τιμής	0,0885252	88,5252
5 ^{ος} Χειμώνας, - 10 % προηγούμενης τιμής	0,0796726	79,6726
Αρχική τιμή κατείσδυσης (Καλοκαίρι)	0,0337316	33,7316
1 ^ο Καλοκαίρι, - 10 % αρχικής τιμής	0,0303584	30,3584
2 ^ο Καλοκαίρι, - 10 % προηγούμενης τιμής	0,0273225	27,3225
3 ^ο Καλοκαίρι, - 10 % προηγούμενης τιμής	0,0245903	24,5903
4 ^ο Καλοκαίρι, - 10 % προηγούμενης τιμής	0,0221313	22,1313
5 ^ο Καλοκαίρι, - 10 % προηγούμενης τιμής	0,0199181	19,9181

Πίνακας 6.9.4 Σενάρια 3^ο και 4^ο, μείωση κατά 10 % της κατείσδυσης βροχής. Υπολογισμένες τιμές κατείσδυσης στην περιοχή για το καλοκαίρι και το χειμώνα σε βάθος πέντε ετών.

Σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις υπολογίστηκαν οι συνολικές εποχιακές εκροές των μοντέλων των δύο τελευταίων σεναρίων, που αντιστοιχούν στις εποχιακές τροφοδοσίες ύψους ύδατος λόγω κατείσδυσης βροχόπτωσης. Στις σχέσεις που παρατίθενται περιλαμβάνεται και η εποχιακή τροφοδοσία των πηγών.

$$Εκροή Χειμώνα = \frac{[Εποχιακή κατείσδυση βροχής (m)] \cdot 1143 \cdot 2305,758 + 39,62756 \cdot 9 \cdot 2305,758}{16 \cdot 2305,758}$$

Σχέση (6.9.1)

$$Εκροή Καλοκαίρι = \frac{[Εποχιακή κατείσδυση βροχής (m)] \cdot 1143 \cdot 2305,758 + 16,98337 \cdot 9 \cdot 2305,758}{16 \cdot 2305,758}$$

Σχέση (6.9.2)

Στις παραπάνω σχέσεις η εποχιακή κατείδυση βροχής, αντικαθίσταται από τη χειμερινή κατείδυση για την περίπτωση της εκροής του χειμώνα και από τη θερινή κατείδυση στην περίπτωση της καλοκαιρινής εκροής. Η αντικαταστάσεις γίνονται βάση του Πίνακα 6.9.4.

Στη Σχέση (6.9.1) παρατηρούμε στον αριθμητή, ότι η χειμερινή κατείδυση βροχόπτωσης μετατρέπεται από ύψος ύδατος σε όγκο ύδατος μέσω του γινομένου της με την επιφάνεια της κυψελίδας ($2305,758 \text{ m}^2$). Έπειτα υπολογίζεται η συνολική τροφοδοσία κατεισδυόμενης βροχόπτωσης μέσω του πολλαπλασιασμού με τον αριθμό των κυψελίδων στις οποίες παρατηρείται κατείδυση βροχής (1143). Στον αριθμητή επίσης παρατηρούμε και τη μετατροπή του ύψους ύδατος της συνολικής τροφοδοσίας των πηγών ($39,62756 \text{ m}$) που προέρχεται από τον Πίνακα 6.8.3.10 σε όγκο ύδατος μέσω του γινομένου με την επιφάνεια της κυψελίδας. Στη συνέχεια υπολογίζεται η συνολική χειμερινή τροφοδοσία των πηγών μέσω πολλαπλασιασμού με τον αριθμό των κυψελίδων που αντιστοιχούν σε θέσεις πηγών (9). Τέλος ο όγκος ύδατος που έχει προσδιοριστεί στον αριθμητή μετατρέπεται και πάλι σε ύψος ύδατος με διαίρεση του όγκου αυτού με την επιφάνεια της κυψελίδας και στη συνέχεια με τον αριθμό των κυψελίδων που αντιστοιχούν στην εκροή του μοντέλου (16).

Στη Σχέση (6.9.2) παρατηρείται η ίδια διαδικασία υπολογισμών που προαναφέρθηκε με μόνη διαφορά τη συνολική τροφοδοσία των πηγών που προέρχεται από τον Πίνακα 6.8.3.10. Συγκεκριμένα για την εν λόγω σχέση χρησιμοποιήθηκε η καλοκαιρινή τιμή ύψους ύδατος ($16,98337 \text{ m}$). Τα αποτελέσματα των παραπάνω υπολογισμών παρατίθενται παρακάτω:

Εποχιακές Περίοδοι.	Εκροή συνολικού εμπλουτισμού σε ύψος ύδατος για 10 % μείωση της κατείδυσης. (m)	Εκροή συνολικού εμπλουτισμού σε ύψος ύδατος για 10 % μείωση της κατείδυσης. (mm)
1 ^{ος} Χειμώνας	30,96543	30965,43
2 ^{ος} Χειμώνας	30,09793	30097,93
3 ^{ος} Χειμώνας	29,31719	29317,19
4 ^{ος} Χειμώνας	28,61452	28614,52
5 ^{ος} Χειμώνας	27,98212	27982,12
~ ~ ~	~ ~ ~	~ ~ ~
1 ^ο Καλοκαίρι	11,72188	11721,88
2 ^ο Καλοκαίρι	11,50500	11505,00
3 ^ο Καλοκαίρι	11,30982	11309,82
4 ^ο Καλοκαίρι	11,13415	11134,15
5 ^ο Καλοκαίρι	10,97605	10976,05

Πίνακας 6.9.5 Σενάρια 3^ο και 4^ο, υπολογισμένες τιμές εκροής για το καλοκαίρι και το χειμώνα σε βάθος πέντε ετών (μείωση κατά 10 % της κατείδυσης βροχής).

7. Αποτελέσματα προσομοίωσης – σχολιασμός αποτελεσμάτων.

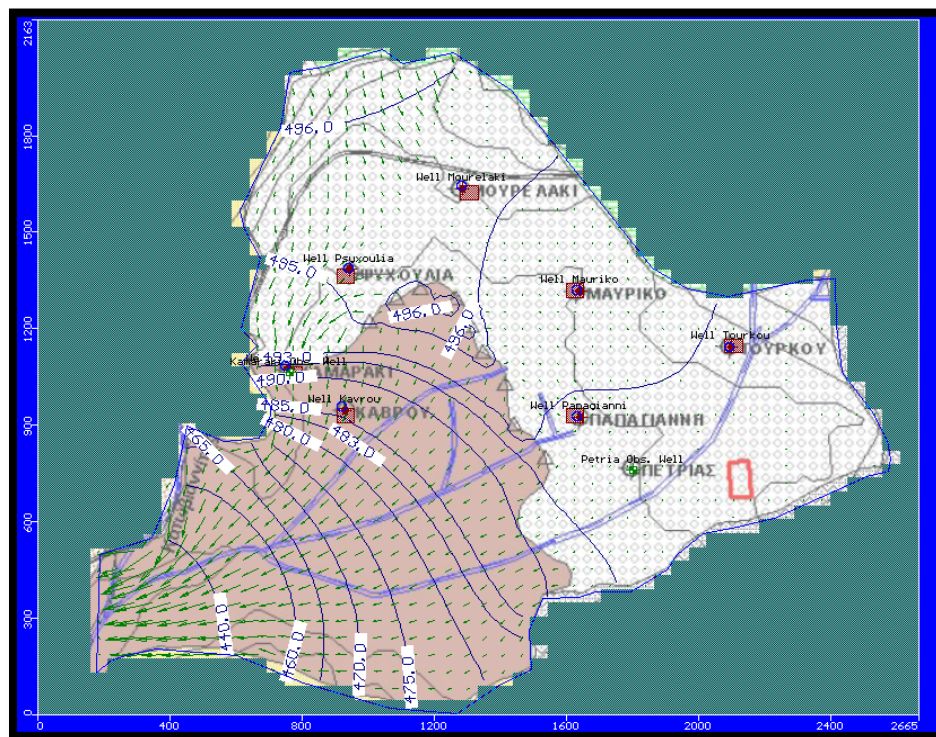
Συνοπτικά για το 6^ο κεφάλαιο, στην παράγραφο 6.8 παρουσιάστηκε η μέθοδος κατασκευής του ετήσιου μοντέλου προσομοίωσης υπόγειας ροής στη λεκάνη ενδιαφέροντος, ενώ στην παράγραφο 6.9 παρουσιάστηκαν τα σενάρια μεταβολής υδροληπτικών και βροχομετρικών συνθηκών για την εν λόγω περιοχή. Πιο συγκεκριμένα σύμφωνα με το 6^ο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκαν έξι συνολικά προσομοιώσεις υπόγειας ροής βάση του κώδικα Visual Modflow για τη λεκάνη μελέτης. Οι προσομοιώσεις αυτές αναφέρονται επιγραμματικά παρακάτω:

- Προσομοίωση της υπόγειας ροής στη λεκάνη Βιάννου Ηρακλείου, για ένα υδρολογικό έτος με δύο εποχιακές περιόδους (χειμερινή, θερινή).
- Προσομοίωση της υπόγειας ροής στη λεκάνη Βιάννου Ηρακλείου, για πέντε υδρολογικά έτη με δύο εποχιακές περιόδους για κάθε έτος (χειμερινή, θερινή). Στην προσομοίωση αυτή δε μεταβλήθηκαν οι τιμές των εισαγόμενων στο μοντέλο υδραυλικών παραμέτρων της αρχικής ετήσιας προσομοίωσης και πρακτικά παρέμειναν ίδιες σε βάθος χρόνου πέντε ετών.
- Σενάριο 1^ο, μελέτη της υπόγειας ροής στη λεκάνη Βιάννου Ηρακλείου στην περίπτωση αύξησης των αντλήσεων κατά 10 % για τη θερινή περίοδο, σε βάθος χρόνου πέντε ετών.
- Σενάριο 2^ο, μελέτη της υπόγειας ροής στη λεκάνη Βιάννου Ηρακλείου στην περίπτωση αύξησης των αντλήσεων κατά 20 % για τη θερινή περίοδο, σε βάθος χρόνου πέντε ετών.
- Σενάριο 3^ο, μελέτη της υπόγειας ροής στη λεκάνη Βιάννου Ηρακλείου για την περίπτωση αύξησης των αντλήσεων κατά 10 % για τη θερινή περίοδο και μείωσης της βροχόπτωσης σε ποσοστό 10 % για ολόκληρο το υδρολογικό έτος, σε βάθος χρόνου πέντε ετών.
- Σενάριο 4^ο, μελέτη της υπόγειας ροής στη λεκάνη Βιάννου Ηρακλείου για την περίπτωση αύξησης των αντλήσεων κατά 20 % για τη θερινή περίοδο και μείωσης της βροχόπτωσης σε ποσοστό 10 % για ολόκληρο το υδρολογικό έτος, σε βάθος χρόνου πέντε ετών.

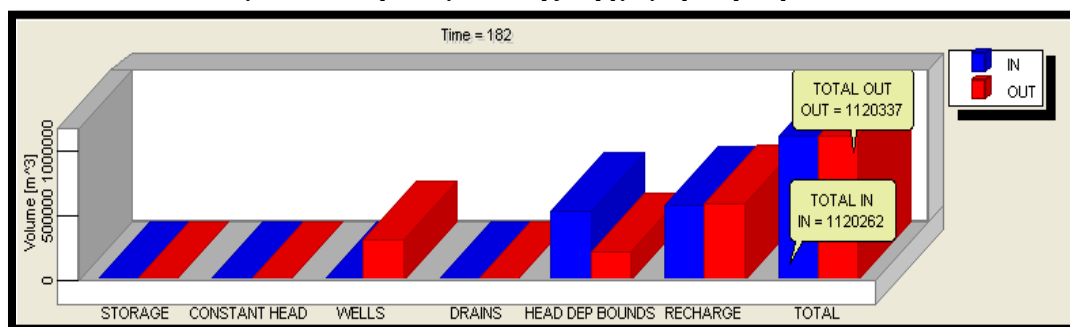
Τα αποτελέσματα των παραπάνω προσομοιώσεων καθώς και ο σχολιασμός αυτών παρατίθενται στα ακόλουθα:

7.1. Ετήσια προσομοίωση.

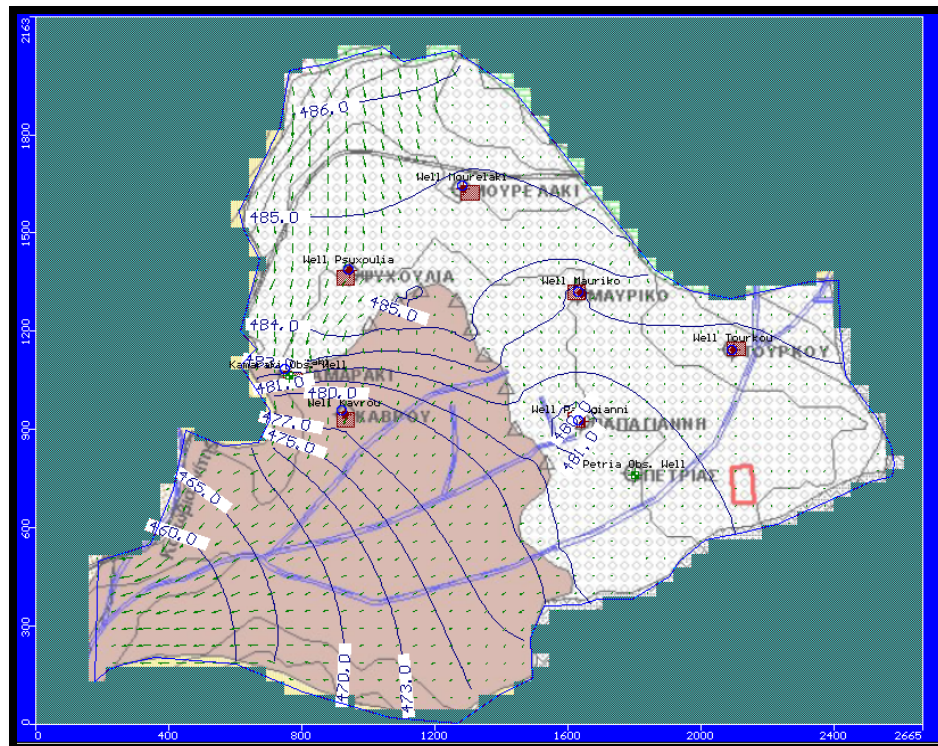
Στις ακόλουθες εικόνες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αρχικής ετήσιας προσομοίωσης υπόγειας ροής στη λεκάνη μελέτης. Επίσης θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα της πενταετούς προσομοίωσης κατά την οποία οι τιμές των υδραυλικών παραμέτρων του μοντέλου παρέμειναν ίδιες με αυτές του αρχικού ετήσιου μοντέλου προσομοίωσης, είναι ίδια με τα αποτελέσματα του αρχικού μοντέλου.



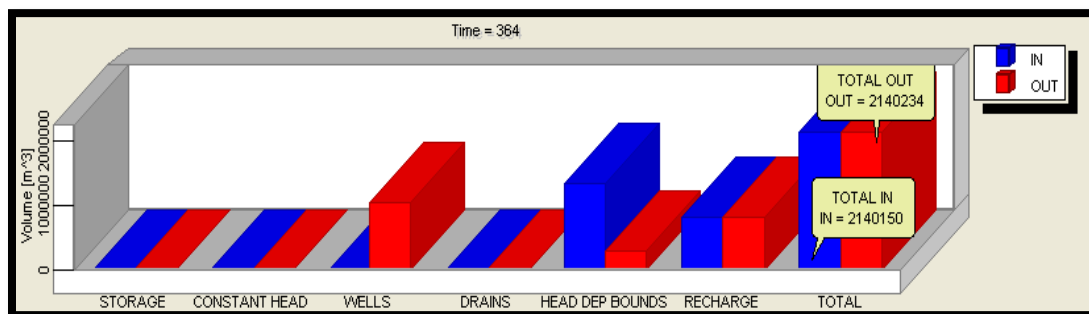
Εικόνα 7.1.1 Αποτελέσματα υδραυλικού φορτίου στη λεκάνη μελέτης για το ετήσιο μοντέλο προσομοίωσης τη χειμερινή περίοδο.



Εικόνα 7.1.2 Υδρογεωλογικό ισοζύγιο της λεκάνης μελέτης για το ετήσιο μοντέλο προσομοίωσης στο πέρας της χειμερινής περιόδου (Time = 182 days).



Εικόνα 7.1.3 Αποτελέσματα υδραυλικού φορτίου στη λεκάνη μελέτης για το ετήσιο μοντέλο προσομοίωσης την καλοκαιρινή περίοδο.



Εικόνα 7.1.4 Υδρογεωλογικό ισοζύγιο της λεκάνης μελέτης για το ετήσιο μοντέλο προσομοίωσης στο πέρας της καλοκαιρινής περιόδου και συνεπώς ολόκληρου του υδρολογικού έτους (Time = 364 days).

- Σχολιασμός αποτελεσμάτων.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα αποτελέσματα σχετικά με το υδραυλικό φορτίο στην περιοχή μελέτης που αντιστοιχούν στο αρχικό, αμετάβλητο ως προς τις παραμέτρους πενταετές μοντέλο, είναι ίδια με τα αποτελέσματα του αρχικού ετήσιου μοντέλου. Στην Εικόνα 7.1.1 παρουσιάζονται τα υδραυλικά ύψη καθώς και η

κατεύθυνση των ταχυτήτων ύδατος στην περιοχή μελέτης για τη χειμερινή περίοδο στην περίπτωση του ετήσιου μοντέλου προσομοίωσης. Ίδια ακριβώς εικόνα λαμβάνουμε και για κάθε χειμερινή περίοδο στην περίπτωση του πενταετούς μοντέλου. Στην Εικόνα 7.1.3 παρουσιάζονται τα υδραυλικά φορτία και η κατεύθυνση των ταχυτήτων ύδατος στην περιοχή, για την καλοκαιρινή περίοδο στην περίπτωση του ετήσιου μοντέλου προσομοίωσης. Ίδια εικόνα λαμβάνουμε και για κάθε καλοκαιρινή περίοδο στην περίπτωση του πενταετούς μοντέλου. Σύμφωνα με την Εικόνα 7.1.1 το υδραυλικό φορτίο στην περιοχή κυμαίνεται από τα 460 m έως τα 496 m ενώ σύμφωνα με την Εικόνα 7.1.3 το υδραυλικό φορτίο κυμαίνεται από τα 460 m έως τα 486 m. Το βάθος στάθμης ύδατος κάτω από την εδαφική επιφάνεια είναι δυνατόν να προσδιοριστεί στις θέσεις Πετριά και Καμαράκι. Για τις εν λόγω γεωτρήσεις παρατήρησης σύμφωνα με τα στοιχεία που συλλέχθηκαν, είναι δυνατόν να παρατεθεί ο παρακάτω πίνακας αποτελεσμάτων.

Γεωτρήσεις παρατήρησης ύψους στάθμης.	Εποχιακές Περίοδοι.	Υψόμετρο στις γεωτρήσεις παρατήρησης στάθμης ύδατος (m)	Υδραυλικό ύψος Παρατηρούμενη τιμή (m)	Υδραυλικό ύψος Υπολογισμένη τιμή (m)
Πετριά	Χειμώνας	500	492	492,50
	Καλοκαίρι	500	483	481,50
Καμαράκι	Χειμώνας	503	495	492,75
	Καλοκαίρι	503	486	482,90

Πίνακας 7.1.1 Υδραυλικά ύψη και εδαφικό υψόμετρο στις θέσεις των γεωτρήσεων παρατήρησης της λεκάνης.

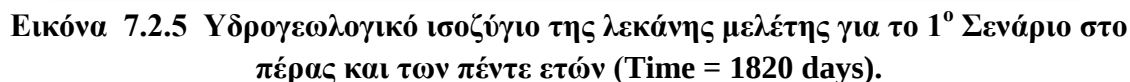
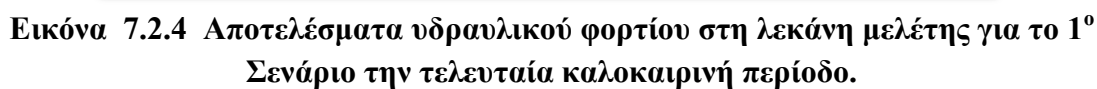
Στον Πίνακα 6.8.3.12 του 6^{ου} κεφαλαίου, παρουσιάζονται αναλυτικά τα σφάλματα που προκύπτουν λόγω της διαφοράς μεταξύ των παρατηρούμενων και των υπολογισμένων τιμών υδραυλικού ύψους στις θέσεις των γεωτρήσεων παρατήρησης. Οι υπολογισμένες τιμές υδραυλικού φορτίου σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις παρατηρούμενες τιμές στα πηγάδια παρατήρησης.

Σχετικά με τις Εικόνες 7.1.2 και 7.1.4 παρατηρούμε ότι το υδρογεωλογικό ισοζύγιο των συνολικών εισροών και εκροών, στο πέρας της χειμερινής περιόδου και στο πέρας της καλοκαιρινής περιόδου και κατά συνέπεια ολόκληρου του έτους αντίστοιχα, είναι σταθερό. Συγκεκριμένα σύμφωνα με την Εικόνα 7.1.2, οι χειμερινές συνολικές εισροές είναι 1120262 m³ ενώ οι χειμερινές συνολικές εκροές είναι 1120337 m³. Επιπλέον σύμφωνα με την Εικόνα 7.1.4, οι συνολικές ετήσιες εισροές είναι 2140150 m³ ενώ οι συνολικές ετήσιες εκροές είναι 2140234 m³. Η διαφορά μεταξύ των συνολικών ετήσιων εισροών και εκροών είναι αρκετά μικρή.

Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι τιμές των συνολικών ετήσιων εισροών και των συνολικών ετήσιων εκροών για την περίπτωση κάθε έτους της πενταετούς

7.2. Σενάριο 1^ο, αύξηση αντλήσεων κατά 10 %.

121



- Σχετικά με τις Εικόνες 7.2.1 και 7.2.2, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του 1^{ου} και του 2^{ου} Σεναρίου, τα υπολογισμένα υδραυλικά ύψη στη λεκάνη μελέτης για τις πέντε χειμερινές περιόδους και των δύο σεναρίων, είναι ίδια μεταξύ τους καθώς και με τα υδραυλικά ύψη της χειμερινής περιόδου του ετήσιου μοντέλου προσομοίωσης. Για τις Εικόνες 7.2.1 και 7.2.2 το υδραυλικό φορτίο κυμαίνεται από τα 460 m έως τα 496 m ενώ για τις γεωτρήσεις παρατήρησης σύμφωνα με τα αποτελέσματα του 1^{ου} και του 2^{ου}

Σεναρίου για τις χειμερινές περιόδους και των πέντε ετών, προκύπτουν τα στοιχεία σχετικά με τις χειμερινές περιόδους του Πίνακα 7.1.1.

Σχετικά με τις Εικόνες 7.2.3 και 7.2.4 παρατηρούμε τα υπολογισμένα από τον κώδικα υδραυλικά ύψη, στη λεκάνη μελέτης για το 1^ο Σενάριο στην 1^η καλοκαιρινή περίοδο και στην τελευταία καλοκαιρινή περίοδο. Το υδραυλικό φορτίο στις εν λόγω εικόνες κυμαίνεται από τα 460 m έως τα 486 m. Σχετικά με την 1^η καλοκαιρινή περίοδο και την τελευταία καλοκαιρινή περίοδο για το 1^ο Σενάριο, παρατίθεται ο παρακάτω πίνακας υδραυλικών υψών, ο οποίος αναφέρεται στις γεωτρήσεις παρατήρησης καθώς επίσης και στις δύο γεωτρήσεις της περιοχής οι οποίες αντλούν τις μεγαλύτερες ποσότητες ύδατος συγκριτικά με όλα τα υπόλοιπα πηγάδια της λεκάνης (Παπαγιάννη, Μαυρίκο).

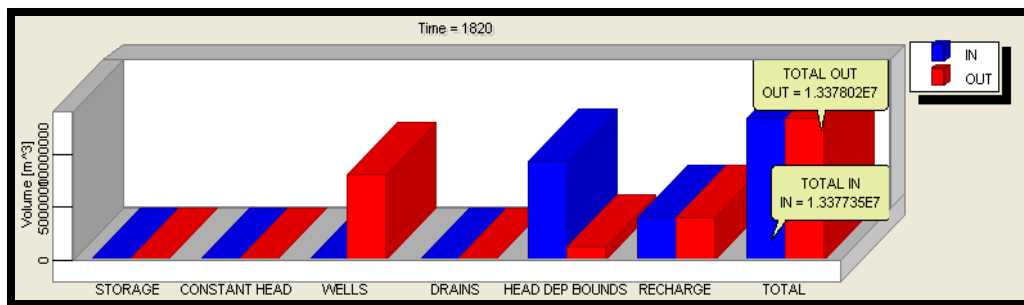
Γεωτρήσεις παρατήρησης και πηγάδια μεγάλης άντλησης.	1 ^ο Καλοκαίρι και τελευταίο Καλοκαίρι (1 ^ο Σενάριο)	Εδαφικό υψόμετρο. (m)	Υδραυλικό ύψος Υπολογισμένη τιμή (m)	Βάθος στάθμης ύδατος. (m)
Πετριά	1 ^ο Καλοκαίρι	500	481,2	18,8
	5 ^ο Καλοκαίρι	500	480,0	20,0
Καμαράκι	1 ^ο Καλοκαίρι	503	482,8	20,2
	5 ^ο Καλοκαίρι	503	482,0	21,0
Παπαγιάννη	1 ^ο Καλοκαίρι	500	479,5	20,5
	5 ^ο Καλοκαίρι	500	477,1	22,9
Μαυρίκο	1 ^ο Καλοκαίρι	500,5	482,5	18,0
	5 ^ο Καλοκαίρι	500,5	481,3	19,2

Πίνακας 7.2.1 Υπολογισμένα υδραυλικά ύψη και εδαφικό υψόμετρο για τις γεωτρήσεις παρατήρησης και τις γεωτρήσεις μεγάλων αντλήσεων στο 1^ο Σενάριο της 1^{ης} και της τελευταίας Καλοκαιρινής περιόδου.

Σχετικά με την Εικόνα 7.2.5 παρατηρούμε ότι το υδρογεωλογικό ισοζύγιο των συνολικών εισροών και εκροών, στο πέρας ολόκληρης της πενταετίας παραμένει σχεδόν σταθερό. Συγκεκριμένα σύμφωνα με την Εικόνα 7.2.5, οι συνολικές εισροές είναι 11839030 m³ ενώ οι συνολικές εκροές είναι 11839600 m³.

7.3. Σενάριο 2^ο, αύξηση αντλήσεων κατά 20 %.

Στις ακόλουθες εικόνες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του 2^{ου} σεναρίου αύξησης των ποσοτήτων άντλησης κατά 20 % την καλοκαιρινή περίοδο, σε βάθος χρόνου πέντε ετών.



Εικόνα 7.3.3 Υδρογεωλογικό ισοζύγιο της λεκάνης μελέτης για το 2^ο Σενάριο στο πέρας και των πέντε ετών (Time = 1820 days).

- Σχολιασμός αποτελεσμάτων.

Όπως αναφέρθηκε, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του 1^{ου} και του 2^{ου} Σεναρίου, τα υπολογισμένα υδραυλικά ύψη στη λεκάνη μελέτης για τις πέντε χειμερινές περιόδους και των δύο σεναρίων, είναι ίδια. Το υδραυλικό φορτίο για τις χειμερινές περιόδους σχετικά με το 2^ο Σενάριο παρουσιάζεται στις Εικόνες 7.2.1 και 7.2.2, κυμαίνεται από τα 460 m έως τα 496 m και επιπλέον παρατίθεται για τις γεωτρήσεις παρατήρησης στον Πίνακα 7.1.1.

Σχετικά με τις Εικόνες 7.3.1 και 7.3.2 παρατηρούμε τα υπολογισμένα υδραυλικά ύψη, στη λεκάνη μελέτης για το 2^ο Σενάριο στην 1^η καλοκαιρινή περίοδο και στην τελευταία καλοκαιρινή περίοδο. Το υδραυλικό φορτίο στις εν λόγω εικόνες κυμαίνεται από τα 460 m έως τα 486 m. Σχετικά με την 1^η καλοκαιρινή περίοδο και την τελευταία καλοκαιρινή περίοδο για το 2^ο Σενάριο, παρατίθεται ο παρακάτω πίνακας υδραυλικών υψών, ο οποίος αναφέρεται στις γεωτρήσεις παρατήρησης και στις γεωτρήσεις της περιοχής οι οποίες αντλούν τις μεγαλύτερες ποσότητες ύδατος (Παπαγιάννη, Μαυρίκο).

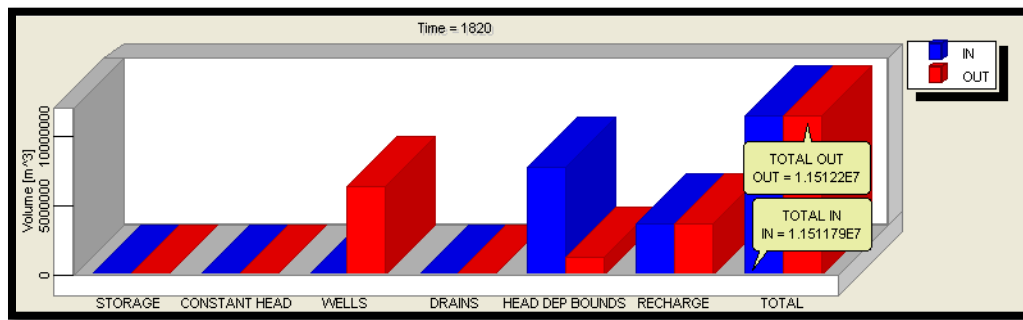
Γεωτρήσεις παρατήρησης και πηγάδια μεγάλης άντλησης.	1 ^ο Καλοκαίρι και τελευταίο Καλοκαίρι. (2 ^ο Σενάριο)	Εδαφικό υψόμετρο. (m)	Υδραυλικό ύψος Υπολογισμένη τιμή (m)	Βάθος στάθμης ύδατος. (m)
Πετριά	1 ^ο Καλοκαίρι	500	481,0	19,0
	5 ^ο Καλοκαίρι	500	477,8	22,2
Καμαράκι	1 ^ο Καλοκαίρι	503	481,2	21,8
	5 ^ο Καλοκαίρι	503	479,6	23,4
Παπαγιάννη	1 ^ο Καλοκαίρι	500	478,9	21,1
	5 ^ο Καλοκαίρι	500	473,3	26,7
Μαυρίκο	1 ^ο Καλοκαίρι	500,5	482,2	18,3
	5 ^ο Καλοκαίρι	500,5	479,3	21,2

Πίνακας 7.3.1 Υπολογισμένα υδραυλικά ύψη και εδαφικό υψόμετρο για τις γεωτρήσεις παρατήρησης και τις γεωτρήσεις μεγάλων αντλήσεων στο 2^ο Σενάριο της 1^{ης} και της τελευταίας Καλοκαιρινής περιόδου.

Σχετικά με την Εικόνα 7.3.3 παρατηρούμε ότι το υδρογεωλογικό ισοζύγιο των συνολικών εισροών και εκροών, στο πέρας ολόκληρης της πενταετίας για το 2^ο Σενάριο παραμένει σχετικά σταθερό. Συγκεκριμένα σύμφωνα με την Εικόνα 7.3.3, οι συνολικές εισροές είναι 13377350 m³ ενώ οι συνολικές εκροές είναι 13378020 m³.

7.4. Σενάριο 3^ο, αύξηση αντλήσεων κατά 10 % και μείωση βροχής κατά 10 %.

Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του 3^{ου} σεναρίου αύξησης των ποσοτήτων άντλησης κατά 10 % την καλοκαιρινή περίοδο και παράλληλης μείωσης των κατεισδυόμενων υδάτων βροχόπτωσης κατά 10 % για ολόκληρο το υδρολογικό έτος, σε βάθος χρόνου πέντε ετών.



Εικόνα 7.4.5 Υδρογεωλογικό ισοζύγιο της λεκάνης μελέτης για το 3^ο Σενάριο στο πέρας και των πέντε ετών (Time = 1820 days).

- Σχολιασμός αποτελεσμάτων.

Το υδραυλικό φορτίο για τις χειμερινές περιόδους σχετικά με το 3^ο Σενάριο παρουσιάζεται στις Εικόνες 7.4.1 και 7.4.2 και κυμαίνεται από τα 450 m έως τα 496 m. Τα υδραυλικά ύψη για τις καλοκαιρινές περιόδους για το 3^ο Σενάριο παρουσιάζονται στις Εικόνες 7.4.3 και 7.4.4 ενώ κυμαίνονται από τα 450 m έως τα 486 m.

Σχετικά με την 1^η χειμερινή περίοδο και την τελευταία χειμερινή περίοδο καθώς επίσης και την 1^η καλοκαιρινή περίοδο και την τελευταία καλοκαιρινή περίοδο για το 3^ο Σενάριο, παρατίθενται οι παρακάτω πίνακες υδραυλικών υψών, που αναφέρονται στις γεωτρήσεις παρατήρησης και στις γεωτρήσεις μεγάλης άντλησης στην περιοχή.

Γεωτρήσεις παρατήρησης και πηγάδια μεγάλης άντλησης.	1 ^{ος} Χειμώνας και τελευταίος Χειμώνας. (3 ^ο Σενάριο)	Εδαφικό υψόμετρο (m)	Υδραυλικό ύψος Υπολογισμένη τιμή (m)	Βάθος στάθμης ύδατος (m)
Πετριά	1 ^{ος} Χειμώνας	500	492,5	7,5
	5 ^{ος} Χειμώνας	500	492,5	7,5
Καμαράκι	1 ^{ος} Χειμώνας	503	492,7	10,3
	5 ^{ος} Χειμώνας	503	491,0	12,0
Παπαγιάννη	1 ^{ος} Χειμώνας	500	492,3	7,7
	5 ^{ος} Χειμώνας	500	492,2	7,8
Μαυρίκο	1 ^{ος} Χειμώνας	500,5	493,8	6,7
	5 ^{ος} Χειμώνας	500,5	493,7	6,8

Πίνακας 7.4.1 Υπολογισμένα υδραυλικά ύψη και εδαφικό υψόμετρο για τις γεωτρήσεις παρατήρησης και τις γεωτρήσεις μεγάλων αντλήσεων στο 3^ο Σενάριο της 1^{ης} και της τελευταίας Χειμερινής περιόδου.

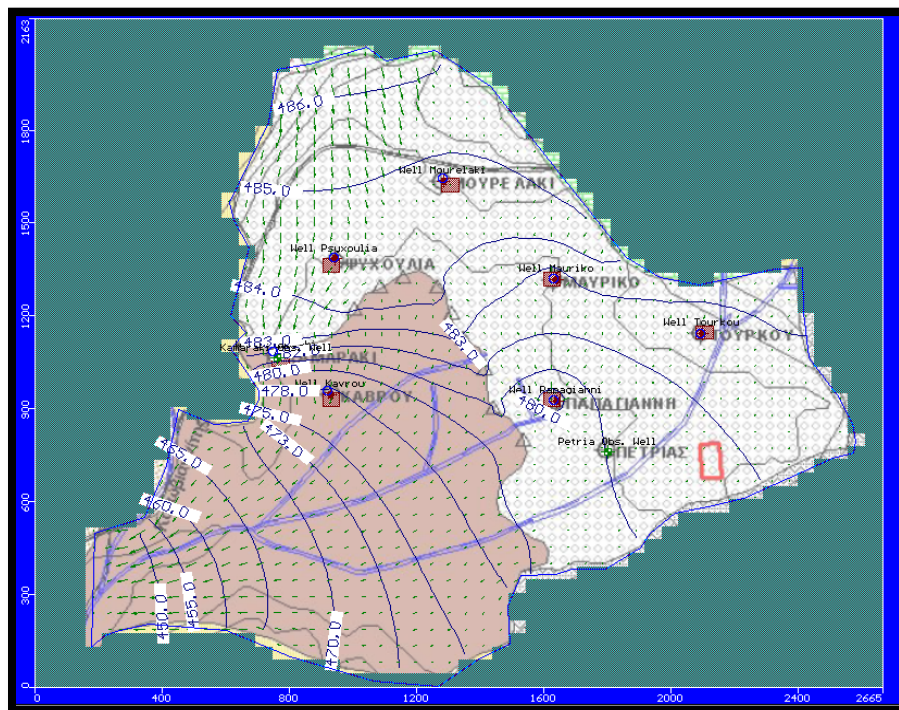
Γεωτρήσεις παρατήρησης και πηγάδια μεγάλης άντλησης.	1 ^ο Καλοκαίρι και τελευταίο Καλοκαίρι. (3 ^ο Σενάριο)	Εδαφικό υψόμετρο (m)	Υδραυλικό ύψος Υπολογισμένη τιμή (m)	Βάθος στάθμης ύδατος (m)
Πετριά	1 ^ο Καλοκαίρι	500	481,2	18,8
	5 ^ο Καλοκαίρι	500	479,9	20,1
Καμαράκι	1 ^ο Καλοκαίρι	503	482,8	20,2
	5 ^ο Καλοκαίρι	503	482,0	21,0
Παπαγιάννη	1 ^ο Καλοκαίρι	500	479,4	20,6
	5 ^ο Καλοκαίρι	500	477,0	23,0
Μαυρίκο	1 ^ο Καλοκαίρι	500,5	482,5	18,0
	5 ^ο Καλοκαίρι	500,5	481,3	19,2

Πίνακας 7.4.2 Υπολογισμένα υδραυλικά ύψη και εδαφικό υψόμετρο για τις γεωτρήσεις παρατήρησης και τις γεωτρήσεις μεγάλων αντλήσεων στο 3^ο Σενάριο της 1^{ης} και της τελευταίας Καλοκαιρινής περιόδου.

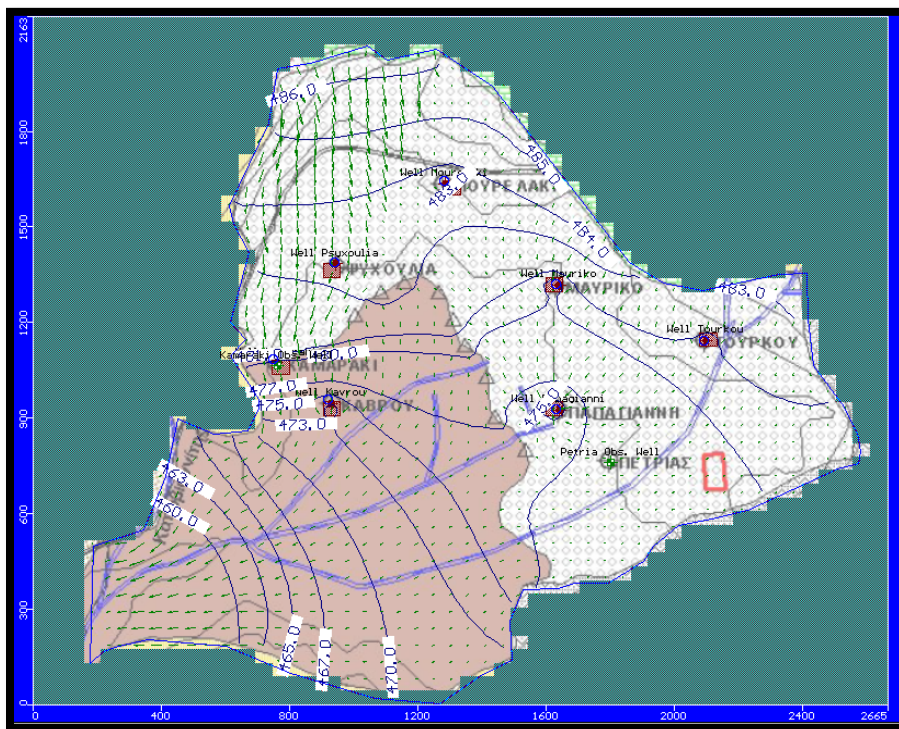
Σχετικά με την Εικόνα 7.4.5, το υδρογεωλογικό ισοζύγιο των συνολικών εισροών και εκροών, στο πέρας ολόκληρης της πενταετίας για το 3^ο Σενάριο παραμένει σταθερό. Οι συνολικές εισροές σε ολόκληρη την πενταετία είναι 11511790 m³ ενώ οι συνολικές εκροές για την πενταετία είναι 11512200 m³.

7.5. Σενάριο 4^ο, αύξηση αντλήσεων κατά 20 % και μείωση βροχής κατά 10 %.

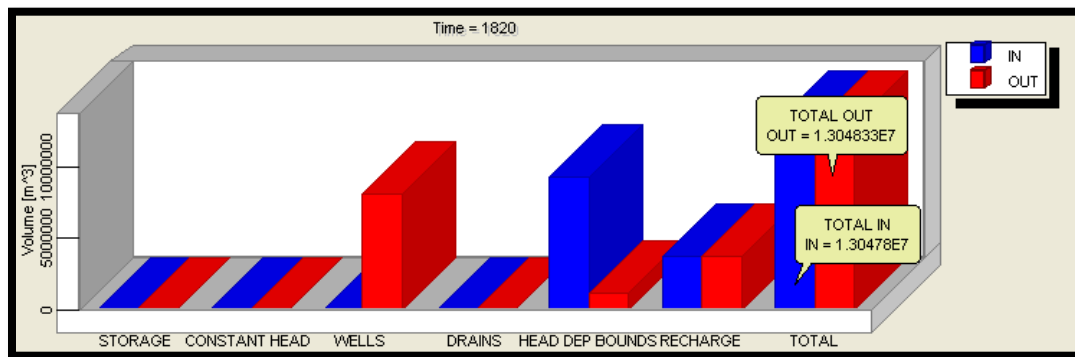
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του 4^{ου} σεναρίου αύξησης των ποσοτήτων άντλησης κατά 20 % την καλοκαιρινή περίοδο και παράλληλης μείωσης των κατεισδυόμενων υδάτων βροχόπτωσης κατά 10 % για ολόκληρο το υδρολογικό έτος, σε βάθος χρόνου πέντε ετών.



Εικόνα 7.5.3 Αποτελέσματα υδραυλικού φορτίου στη λεκάνη μελέτης για το 4^ο Σενάριο την 1^η καλοκαιρινή περίοδο.



Εικόνα 7.5.4 Αποτελέσματα υδραυλικού φορτίου στη λεκάνη μελέτης για το 4^ο Σενάριο την τελευταία καλοκαιρινή περίοδο.



Εικόνα 7.5.5 Υδρογεωλογικό ισοζύγιο της λεκάνης μελέτης για το 4^ο Σενάριο στο πέρας και των πέντε ετών (Time = 1820 days).

- Σχολιασμός αποτελεσμάτων.

Το υδραυλικό φορτίο για τις χειμερινές περιόδους για το 4^ο Σενάριο παρουσιάζεται στις Εικόνες 7.5.1 και 7.5.2 και κυμαίνεται από τα 450 m έως τα 496 m. Τα υδραυλικά φορτία για τις καλοκαιρινές περιόδους για το 4^ο Σενάριο παρουσιάζονται στις Εικόνες 7.5.3 και 7.5.4 ενώ κυμαίνονται από τα 460 m έως τα 486 m.

Σχετικά με την 1^η χειμερινή περίοδο και την τελευταία χειμερινή περίοδο και την 1^η καλοκαιρινή περίοδο και την τελευταία καλοκαιρινή περίοδο για το 4^ο Σενάριο, παρατίθενται οι παρακάτω πίνακες υδραυλικών υψών, που αναφέρονται στις γεωτρήσεις παρατήρησης και στα πηγάδια μεγάλης άντλησης στην περιοχή.

Γεωτρήσεις παρατήρησης και πηγάδια μεγάλης άντλησης.	1 ^{ος} Χειμώνας και τελευταίος Χειμώνας. (4 ^ο Σενάριο)	Εδαφικό υψόμετρο (m)	Υδραυλικό ύψος Υπολογισμένη τιμή (m)	Βάθος στάθμης ύδατος (m)
Πετριά	1 ^{ος} Χειμώνας	500	492,5	7,5
	5 ^{ος} Χειμώνας	500	492,5	7,5
Καμαράκι	1 ^{ος} Χειμώνας	503	492,7	10,3
	5 ^{ος} Χειμώνας	503	491,0	12,0
Παπαγιάννη	1 ^{ος} Χειμώνας	500	492,3	7,7
	5 ^{ος} Χειμώνας	500	492,2	7,8
Μαυρίκο	1 ^{ος} Χειμώνας	500,5	493,8	6,7
	5 ^{ος} Χειμώνας	500,5	493,7	6,8

Πίνακας 7.5.1 Υπολογισμένα υδραυλικά ύψη και εδαφικό υψόμετρο για τις γεωτρήσεις παρατήρησης και τις γεωτρήσεις μεγάλων αντλήσεων στο 4^ο Σενάριο της 1^{ης} και της τελευταίας Χειμερινής περιόδου.

Γεωτρήσεις παρατήρησης και πηγάδια μεγάλης άντλησης.	1 ^ο Καλοκαίρι και τελευταίο Καλοκαίρι. (4 ^ο Σενάριο)	Εδαφικό υψόμετρο (m)	Υδραυλικό ύψος Υπολογισμένη τιμή (m)	Βάθος στάθμης ύδατος (m)
Πετριά	1 ^ο Καλοκαίρι	500	480,9	19,1
	5 ^ο Καλοκαίρι	500	477,7	22,3
Καμαράκι	1 ^ο Καλοκαίρι	503	481,2	21,8
	5 ^ο Καλοκαίρι	503	479,1	23,9
Παπαγιάννη	1 ^ο Καλοκαίρι	500	478,9	21,1
	5 ^ο Καλοκαίρι	500	473,1	26,9
Μαυρίκο	1 ^ο Καλοκαίρι	500,5	482,2	18,3
	5 ^ο Καλοκαίρι	500,5	479,3	21,2

Πίνακας 7.5.2 Υπολογισμένα υδραυλικά ύψη και εδαφικό υψόμετρο για τις γεωτρήσεις παρατήρησης και τις γεωτρήσεις μεγάλων αντλήσεων στο 4^ο Σενάριο της 1^{ης} και της τελευταίας Καλοκαιρινής περιόδου.

Στην Εικόνα 7.5.5, το υδρογεωλογικό ισοζύγιο των συνολικών εισροών και εκροών, στο πέρας ολόκληρης της πενταετίας για το 4^ο Σενάριο παραμένει σχεδόν σταθερό. Οι συνολικές εισροές είναι 13047800 m³ ενώ οι συνολικές εκροές είναι 13048330 m³.

8. Συμπεράσματα – Προτάσεις.

• Συμπεράσματα

Σχετικά με το ετήσιο μοντέλο προσομοίωσης το οποίο περιλαμβάνει δύο εποχιακές περιόδους, τη χειμερινή και τη θερινή περίοδο, οι υπολογισμένες τιμές υδραυλικών υψών δεν διαφέρουν σημαντικά από τις παρατηρούμενες τιμές στις γεωτρήσεις παρατήρησης στις θέσεις Πετριά και Καμαράκι στη λεκάνη μελέτης. Συγκεκριμένα για τη γεώτρηση παρατήρησης στη θέση Πετριά, το χειμώνα παρατηρούμε διαφορά μεταξύ του υπολογισμένου από τον κώδικα υδραυλικού ύψους και του παρατηρούμενου, στα 0,5 m, ενώ το καλοκαίρι για την ίδια γεώτρηση παρατήρησης η διαφορά είναι στα 1,5 m. Στην περίπτωση της γεώτρησης παρατήρησης στη θέση Καμαράκι το χειμώνα παρατηρούμε διαφορά υπολογισμένου υδραυλικού ύψους και παρατηρούμενου στα 2,25 m ενώ το καλοκαίρι στα 3 m. Κατά συνέπεια, το σφάλμα υπολογισμού του υδραυλικού ύψους στη θέση παρατήρησης Πετριά είναι στο 0,1 % για τη χειμερινή περίοδο και στο 0,3 % για την καλοκαιρινή περίοδο, ενώ στη θέση

Καμαράκι παρατηρούμε σφάλμα 0,45 % τη χειμερινή περίοδο και 0,61 % την καλοκαιρινή περίοδο.

Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα, ο υπολογισμός των υδραυλικών υψών στη λεκάνη μελέτης βάσει του ετήσιου μοντέλου προσομοίωσης χαρακτηρίζεται από ένα μέσο σφάλμα 0,275 % κατά τη χειμερινή περίοδο και 0,455 % κατά την καλοκαιρινή περίοδο. Κατά συνέπεια, οι τιμές του μέσου χειμερινού και του μέσου θερινού σφάλματος δεν ξεπερνούν το 0,5 %, γεγονός το οποίο οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα της ετήσιας προσομοίωσης της υπόγειας ροής στην υπό μελέτη λεκάνη είναι δυνατόν να χαρακτηριστούν ως αξιόπιστα.

Σχετικά με τα τέσσερα σενάρια μεταβολής των υδροληπτικών και των βροχομετρικών συνθηκών στην υπό μελέτη λεκάνη, προκειμένου να εξαχθούν αξιόπιστα συμπεράσματα για την επίδραση των μεταβολών αυτών στα υδατικά αποθέματα του υδροφορέα, καθίσταται αναγκαίος ο υπολογισμός της διαφοράς του βάθους στάθμης ύδατος για το 1^ο έτος με το βάθος στάθμης ύδατος του τελευταίου έτους, σε κάθε μία από τις τέσσερις περιπτώσεις μελλοντικού σεναρίου. Οι υπολογισμοί για τα τέσσερα σενάρια πραγματοποιήθηκαν βάσει των τιμών βάθους στάθμης ύδατος στις γεωτρήσεις παρατήρησης και στις γεωτρήσεις μεγάλης άντλησης (Πίνακες 7^ο Κεφαλαίου). Τα αποτελέσματα παρατίθενται παρακάτω:

▪ **Σενάριο 1^ο:**

Πηγάδια παρατήρησης και μεγάλης άντλησης.	Διαφορά βάθους στάθμης ύδατος 5 ^ο Καλοκαιριού και 1 ^ο Καλοκαιριού (m)
Πετριά	1,2
Καμαράκι	0,8
Παπαγιάννη	2,4
Μαυρίκο	1,2
Μέση πτώση στάθμης (m)	1,4

Πίνακας 8.1 Υπολογισμός μέσης πτώσης στάθμης ύδατος στον υδροφορέα στο 1^ο Σενάριο.

Σύμφωνα με το 1^ο Σενάριο, πραγματοποιήθηκε αύξηση των αντλήσεων στη λεκάνη μελέτης κατά 10 % την καλοκαιρινή περίοδο σε βάθος χρόνου πέντε ετών. Λόγω του ότι δεν υπήρξαν μεταβολές των υδροληπτικών και των βροχομετρικών συνθηκών κατά τις χειμερινές περιόδους του 1^ο Σεναρίου, δεν παρατηρήθηκε διαφορά μεταξύ του βάθους στάθμης ύδατος του 1^ο χειμώνα και του 5^ο χειμώνα στις γεωτρήσεις παρατήρησης και μεγάλης άντλησης της περιοχής. Σύμφωνα με τον παραπάνω Πίνακα (8.1), η μέση πτώση στάθμης ύδατος στη λεκάνη μελέτης στην περίπτωση αύξησης των αντλήσεων κατά 10 % τη θερινή περίοδο είναι 1,4 m.

▪ **Σενάριο 2^ο:**

Πηγάδια παρατήρησης και μεγάλης άντλησης.	Διαφορά βάθους στάθμης ύδατος 5 ^{ου} Καλοκαιριού και 1 ^{ου} Καλοκαιριού (m)
Πετριά	3,2
Καμαράκι	1,6
Παπαγιάννη	5,6
Μαυρίκο	2,9
Μέση πτώση στάθμης (m)	3,325

Πίνακας 8.2 Υπολογισμός μέσης πτώσης στάθμης ύδατος στον υδροφορέα στο 2^ο Σενάριο.

Σύμφωνα με το 2^ο Σενάριο, πραγματοποιήθηκε αύξηση των αντλήσεων στη λεκάνη μελέτης κατά 20 % την καλοκαιρινή περίοδο σε βάθος χρόνου πέντε ετών. Λόγω του ότι δεν υπήρξαν μεταβολές των υδροληπτικών και των βροχομετρικών συνθηκών κατά τις χειμερινές περιόδους του 2^{ου} Σεναρίου, δεν παρατηρήθηκε διαφορά μεταξύ του βάθους στάθμης ύδατος του 1^{ου} χειμώνα και του 5^{ου} χειμώνα στις γεωτρήσεις παρατήρησης και μεγάλης άντλησης της περιοχής. Σύμφωνα με τον Πίνακα 8.2, η μέση πτώση στάθμης ύδατος στη λεκάνη μελέτης στην περίπτωση αύξησης των αντλήσεων κατά 20 % τη θερινή περίοδο είναι 3,325 m. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι στην περίπτωση του 2^{ου} Σεναρίου η μέση πτώση στάθμης στη λεκάνη είναι μεγαλύτερη κατά 1,925 m $\approx$ 2 m συγκριτικά με τη μέση πτώση στάθμης που παρατηρείται στην περίπτωση του 1^{ου} Σεναρίου.

▪ **Σενάριο 3^ο:**

Πηγάδια παρατήρησης και μεγάλης άντλησης.	Διαφορά βάθους στάθμης ύδατος 5 ^{ου} Χειμώνα και 1 ^{ου} Χειμώνα (m)	Διαφορά βάθους στάθμης ύδατος 5 ^{ου} Καλοκαιριού και 1 ^{ου} Καλοκαιριού (m)
Πετριά	0	1,3
Καμαράκι	1,7	0,8
Παπαγιάννη	0,1	2,4
Μαυρίκο	0,1	1,2
Μέση πτώση στάθμης (m)	0,475	1,425

Πίνακας 8.3 Υπολογισμός μέσης πτώσης στάθμης ύδατος στον υδροφορέα στο 3^ο Σενάριο.

Σύμφωνα με το 3^ο Σενάριο, πραγματοποιήθηκε αύξηση των αντλήσεων στη λεκάνη μελέτης κατά 10 % την καλοκαιρινή περίοδο και μείωση της βροχόπτωσης κατά 10 % για ολόκληρο το χρόνο σε βάθος χρόνου πέντε ετών. Σύμφωνα με τον Πίνακα 8.3, η μέση πτώση στάθμης ύδατος στη λεκάνη μελέτης στην περίπτωση του 3^{ου} Σεναρίου είναι 0,475 m για το χειμώνα και 1,425 m για το καλοκαίρι. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι η μείωση της βροχόπτωσης κατά 10 % τις χειμερινές περιόδους των πέντε ετών μειώνει τη μέση στάθμη ύδατος κατά 0,475 m $\approx$ 0,5 m, ενώ η αύξηση των αντλήσεων κατά 10 % το καλοκαίρι και η ταυτόχρονη μείωση κατά 10 % της βροχής προκαλούν πτώση στάθμης 2,5 cm μεγαλύτερη συγκριτικά με την παρατηρούμενη στο 1^ο Σενάριο. Εν κατακλείδι, η διαφορά των 0,025 m σε χρονικό διάστημα 5 ετών, είναι αρκετά μικρή ώστε η μείωση της βροχόπτωσης κατά 10 % να θεωρηθεί σημαντικός παράγοντας πτώσης στάθμης για τις θερινές περιόδους.

▪ **Σενάριο 4^ο:**

Πηγάδια παρατήρησης και μεγάλης άντλησης.	Διαφορά βάθους στάθμης ύδατος 5 ^{ου} Χειμώνα και 1 ^{ου} Χειμώνα (m)	Διαφορά βάθους στάθμης ύδατος 5 ^{ου} Καλοκαιριού και 1 ^{ου} Καλοκαιριού (m)
Πετριά	0	3,2
Καμαράκι	1,7	2,1
Παπαγιάννη	0,1	5,8
Μαυρίκο	0,1	2,9
Μέση πτώση στάθμης (m)	0,475	3,5

Πίνακας 8.4 Υπολογισμός μέσης πτώσης στάθμης ύδατος στον υδροφορέα στο 4^ο Σενάριο.

Σύμφωνα με το 4^ο Σενάριο, πραγματοποιήθηκε αύξηση των αντλήσεων στη λεκάνη μελέτης κατά 20 % την καλοκαιρινή περίοδο και μείωση της βροχόπτωσης κατά 10 % για ολόκληρο το χρόνο σε βάθος χρόνου πέντε ετών. Σύμφωνα με τον Πίνακα 8.4, η μέση πτώση στάθμης ύδατος στη λεκάνη μελέτης στην περίπτωση του 4^{ου} Σεναρίου είναι 0,475 m για το χειμώνα και 3,5 m για το καλοκαίρι. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι η μέση πτώση στάθμης ύδατος για τις χειμερινές περιόδους του 3^{ου} και του 4^{ου} Σεναρίου είναι ίδια. Επιπλέον η αύξηση των αντλήσεων κατά 20 % το καλοκαίρι και η ταυτόχρονη μείωση κατά 10 % της βροχής προκαλούν πτώση στάθμης 17,5 cm μεγαλύτερη συγκριτικά με την παρατηρούμενη στο 2^ο Σενάριο. Συμπερασματικά, στην περίπτωση του 4^{ου} Σεναρίου, η μείωση της βροχόπτωσης κατά 10 %, σε συνδυασμό με την αύξηση των αντλήσεων στη λεκάνη κατά 20 % το καλοκαίρι, προκαλούν μία μέση πτώση στάθμης ύδατος, μεγαλύτερη κατά 17,5 cm συγκριτικά με τη μέση πτώση στάθμης που

παρατηρείται κατά τη θερινή περίοδο, στην περίπτωση της αύξησης των αντλήσεων της περιοχής κατά 20 % το καλοκαίρι χωρίς όμως την ταυτόχρονη μείωση της βροχόπτωσης κατά 10 % (περίπτωση 2^{ου} Σεναρίου).

Σχετικά με το **υδρογεωλογικό ισοζύγιο των συνολικών εισροών και εκροών**, στο πέρας ολόκληρης της πενταετίας για κάθε σενάριο, παρατηρούμε πολύ μικρή διαφορά όγκου ύδατος μεταξύ των εισροών και των εκροών. Συγκεκριμένα για το 1^ο Σενάριο παρατηρείται διαφορά 570 m³, για το 2^ο Σενάριο παρατηρείται διαφορά 670 m³, για το 3^ο Σενάριο διαφορά 410 m³ και για το 4^ο διαφορά 530 m³. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η διαφορά εισροών και εκροών και στις τέσσερις περιπτώσεις δεν ξεπερνά τα 1000 m³. Συμπερασματικά, εφόσον οι συνολικές εισροές για κάθε σενάριο είναι της τάξης των 10000000 m³, το σφάλμα που προκύπτει για το υδρογεωλογικό ισοζύγιο κατά την κατασκευή των τεσσάρων σεναρίων δεν ξεπερνά το $(1000/10000000)*100\% = 0,01\%$.

- Προτάσεις

Σύμφωνα με τα στοιχεία της μελέτης των Παπαμαστοράκη κ.α. (2002), όπως έχει προαναφερθεί, στη λεκάνη μελέτης παρατηρούνται 7 συνολικά γεωτρήσεις, εκ των οποίων οι τέσσερις χρησιμοποιούνται για αρδευτικούς σκοπούς και οι τρεις για υδρευτικούς σκοπούς. Βάσει των τιμών παροχής που εξήχθησαν από την ίδια μελέτη για τις εν λόγω γεωτρήσεις, στις θέσεις Παπαγιάννη και Μαυρίκο παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές ετήσιων παροχών στο σύνολο των πηγών. Συγκεκριμένα στη γεώτρηση Παπαγιάννη παρατηρούμε αντλητική παροχή μεγέθους 1392,8 m³ / day. Επιπλέον στη γεώτρηση Μαυρίκο παρατηρούμε παροχή μεγέθους 728,2 m³ / day, ενώ στις υπόλοιπες αντλητικές γεωτρήσεις η παροχή δεν ξεπερνά τα 342 m³ / day. Εφόσον στα εν λόγω πηγάδια (Παπαγιάννη, Μαυρίκο) παρατηρείται υπεράντληση των υδατικών αποθεμάτων του υδροφορέα της περιοχής, προτείνεται η σημαντική μείωση των τιμών της παροχής για τις γεωτρήσεις αυτές. Παράλληλα, προκειμένου να αντισταθμιστεί η μείωση της παροχής στα πηγάδια που παρατηρείται υπεράντληση, είναι δυνατή η ελεγχόμενη αύξηση των αντλήσεων στα πηγάδια της λεκάνης στα οποία παρατηρούνται μικρές τιμές παροχών. Συγκεκριμένα στη γεώτρηση Καβρού παρατηρείται παροχή μεγέθους 104,4 m³ / day, ενώ στη γεώτρηση Καμαράκι παρατηρείται παροχή 14,17 m³ / day. Τα εν λόγω πηγάδια αντλούν σαφώς μικρότερες ποσότητες ύδατος από τα πηγάδια Παπαγιάννη και Μαυρίκο. Επίσης οι γεωτρήσεις στις θέσεις Καβρού και Καμαράκι είναι δυνατόν να εκμεταλλευτούν σημαντικές ποσότητες ύδατος από το υδατικό δυναμικό του υδροφορέα, καθώς αντλούν σε μικρή απόσταση από τις εσωτερικές πηγές του υδροφορέα, νοτιοδυτικά αυτών. Όπως έχει αναφερθεί, οι εσωτερικές πηγές στην περιοχή

αποτελούν ένα αρκετά σημαντικό παράγοντα εμπλουτισμού του υδροφορέα λόγω των μεγάλων τροφοδοσιών τους στο υπόγειο υδατικό δυναμικό της λεκάνης.

Επιπρόσθετα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των σεναρίων που εξετάστηκαν στην παρούσα διπλωματική, στην περίπτωση αύξησης των ποσοτήτων άντλησης κατά 20 % τους θερινούς μήνες και ταυτόχρονης μείωσης της βροχόπτωσης στην περιοχή κατά 10 % για ολόκληρο το υδρολογικό έτος, σε βάθος χρόνου πέντε ετών, παρατηρείται μέση πτώση στάθμης ύδατος στα 3,5 m το καλοκαίρι και στα 0,475 m το χειμώνα. Η εν λόγω πτώση στάθμης σε χρονικό διάστημα 5 ετών δεν θεωρείται εξαιρετικά σημαντική, αντιθέτως όμως σε βάθος χρόνου 10 ετών και παραπάνω, στην περίπτωση που ο ρυθμός αύξησης των αντλήσεων και συνεπώς πτώσης στάθμης ύδατος παραμένει ίδιος, είναι δυνατόν να προκληθεί σημαντική μείωση των υδατικών αποθεμάτων του υδροφορέα, με αποτέλεσμα να καταστεί ελλιπής η μελλοντική κάλυψη των αρδευτικών και υδρευτικών αναγκών της περιοχής. Στον αντίποδα στην περίπτωση του 3^{ου} Σεναρίου, δηλαδή της αύξησης των αντλήσεων κατά 10 % τους θερινούς μήνες και μείωσης της βροχόπτωσης κατά 10 % για ολόκληρο το υδρολογικό έτος, σε βάθος χρόνου πέντε ετών, παρατηρούμε μέση πτώση στάθμης ύδατος στα 1,425 m το καλοκαίρι και στα 0,475 m το χειμώνα. Η πτώση στάθμης που παρατηρείται στο 4^ο Σενάριο τους θερινούς μήνες, είναι τουλάχιστον διπλάσια της προαναφερθείσας του 3^{ου} Σεναρίου, συνεπώς η πτώση στάθμης στα 1,425 m σε χρονικό διάστημα 5 ετών, δεν θεωρείται αρκετά σημαντική. Επιπλέον, στην περίπτωση που ο ρυθμός αύξησης των αντλήσεων τους καλοκαιρινούς μήνες παραμένει σε ποσοστό 10 % για βάθος χρόνου 10 ετών με παράλληλη μείωση της βροχόπτωσης κατά 10 %, η πτώση στάθμης ύδατος που θα παρατηρηθεί στην περιοχή δεν θα επιφέρει εξαιρετικά σημαντική μείωση των υπόγειων υδατικών αποθεμάτων της λεκάνης. Βάσει των παραπάνω, στην περίπτωση αύξησης των αντλήσεων στις γεωτρήσεις της περιοχής, το ποσοστό αύξησης προτείνεται να μην ξεπερνά το 10 % των αντλούμενων ποσοτήτων ύδατος για κάθε γεώτρηση, ιδίως μάλιστα τους θερινούς μήνες.

Τέλος, σύμφωνα με την Εικόνα 1.2.3, κεντρικά της λεκάνης μελέτης παρατηρείται σημαντικός αριθμός καλλιεργειών, οι οποίες είναι δυνατόν να τροφοδοτηθούν με αρδευτικό νερό το οποίο θα προέρχεται από τις σημαντικές ποσότητες ύδατος των εσωτερικών πηγών που εμπλουτίζουν τον υδροφορέα. Σημεία εμπλουτισμού του υδροφορέα από εσωτερικές πηγές, σύμφωνα με την Εικόνα 2.1.1, παρατηρούνται στα κεντρικά της λεκάνης. Συνεπώς, βάσει των παραπάνω, προτείνονται η διάνοιξη νέων αρδευτικών γεωτρήσεων στα κεντρικά της λεκάνης μελέτης στα σημεία εμπλουτισμού του υδροφορέα από τις πηγές και η παράλληλη μείωση των αντλούμενων ποσοτήτων ύδατος στις ήδη υπάρχουσες γεωτρήσεις της περιοχής. Με τη διάνοιξη νέων γεωτρήσεων στα προαναφερθέντα σημεία καθίσταται δυνατή η εκμετάλλευση του υψηλού υπόγειου υδατικού δυναμικού που παρατηρείται στην κεντρική περιοχή της λεκάνης λόγω εμπλουτισμού του υδροφορέα από τις εσωτερικές πηγές χωρίς ταυτόχρονη σημαντική

επιβάρυνση των υπόλοιπων περιοχών του υδροφορέα, όσον αφορά το μέσο επίπεδο
στάθμης ύδατος σε αυτές.

Βιβλιογραφία.

- Ελληνική Βιβλιογραφία:
 - Καλλέργης Γ., Εφαρμοσμένη – Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία, 2η Έκδοση, Τόμος 2^{ος}, 2000.
 - Καρατζάς Γ., Διδακτικές σημειώσεις, Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων – Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2009.
 - Καρρά Θ., Προσομοίωση παράκτιου υδροφορέα Σαντορίνης με το SEAWAT, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διπλωματική Εργασία, 2011.
 - Λατινόπουλος Π. και Θεοδοσίου Ν., Διδακτικές σημειώσεις - Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., 2007.
 - Παπαμαστοράκης Δ., Κριτωτάκης Μ. και Ζαχαριουδάκης Γ., Ποιοτική εκτίμηση ρίσκου ρύπανσης των υπόγειων νερών με τη χρήση μαθηματικών προσομοιωμάτων. Μία περίπτωση από την Κρήτη (Προσχωματική λεκάνη Βιάννου), 2002.
 - Παππά Α., Βέλτιστη διαχείριση παράκτιου υδροφορέα με χρήση μοντέλου προσομοίωσης και του μοντέλου βελτιστοποίησης GWM (Ground Water Management), Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Διπλωματική Εργασία, 2010.
 - Σαλούστρου Α., Μελέτη του σχεδίου «Ξενοκράτης – Σεισμοί» και προτάσεις για την πόλη Άγιος Νικόλαος (Ν. Λασιθίου), Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Πτυχιακή Εργασία, 2010.
 - Τάντος Β., Περιβαλλοντική υδρογεωλογική έρευνα του Προσχωματικού υδροφόρου της περιοχής Κιάτου – Κορίνθου. Κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης της υπόγειας ροής, Σχολή Θετικών Επιστημών – Διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών στις Περιβαλλοντικές Επιστήμες, Πανεπιστήμιο Πατρών, Διπλωματική Εργασία, 2006.
 - Τμήμα Παρακολούθησης και Ελέγχου της Ποιότητας και Ποσότητας των Υδάτων της Περιφέρειας Κρήτης (Ευρωπαϊκό διαπεριφερειακό πρόγραμμα: Interisk), Κατάσταση των υπόγειων υδροφορέων της Κρήτης, 2009.
- Διεθνής Βιβλιογραφία:
 - Hildebrand B. F., Finite - Difference Equations and Simulations, Section 2.2, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1968.
 - Rackham O. n' Moody J., The making of the Cretan landscape, Manchester University Press, 1995.

- Tsanis I., Koutroulis A., Daliakopoulos I., Jacob D., Severe climate-induced water shortage and extremes in Crete, Climatic Change, Vol.106(4), 667 – 677, 2011.
- Waterloo Hydrogeologic Inc., Visual Modflow Premium Demo Tutorial, 1995 – 2006.
- Ηλεκτρονικές πηγές (Δικτυογραφία):
 - Τμήμα Γεωλογίας Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, Βασικές Έννοιες Υδρογεωλογίας – Ορολογία, <http://www.geo.auth.gr/>
Ημερομηνία προσπέλασης: 03/07/11
 - Δήμος Βιάννου, <http://www.dviannos.gr/>
Ημερομηνία προσπέλασης: 10/05/11
 - Google earth
Ημερομηνία προσπέλασης: 07/05/11
 - EMERIC, <http://emerich.ims.forth.gr/>
Ημερομηνία προσπέλασης: 12/06/11
 - Μετεωρολογική ιστοσελίδα, <http://www.tutiempo.net/>
Ημερομηνία προσπέλασης: 25/06/11
 - Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Διδακτικές σημειώσεις, <http://www.mie.uth.gr/labs/lscs/>
Ημερομηνία προσπέλασης: 04/07/11
 - Αμερικάνικη Υπηρεσία Γεωλογικών Ερευνών, <http://water.usgs.gov/>
Ημερομηνία προσπέλασης: 05/07/11
 - Ηλεκτρονική ιστοσελίδα, <http://www.waterinfo.gr/eedyp/papers/GKallergis.html>
Ημερομηνία προσπέλασης: 20/06/11

Παράρτημα.

Έτος	Μέση ετήσια θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου
1985	18,4
1986	18,3
1987	18,0
1988	18,4
1989	18,0
1990	18,5
1991	17,9
1992	17,7
1993	18,2
1994	18,9
1995	18,4

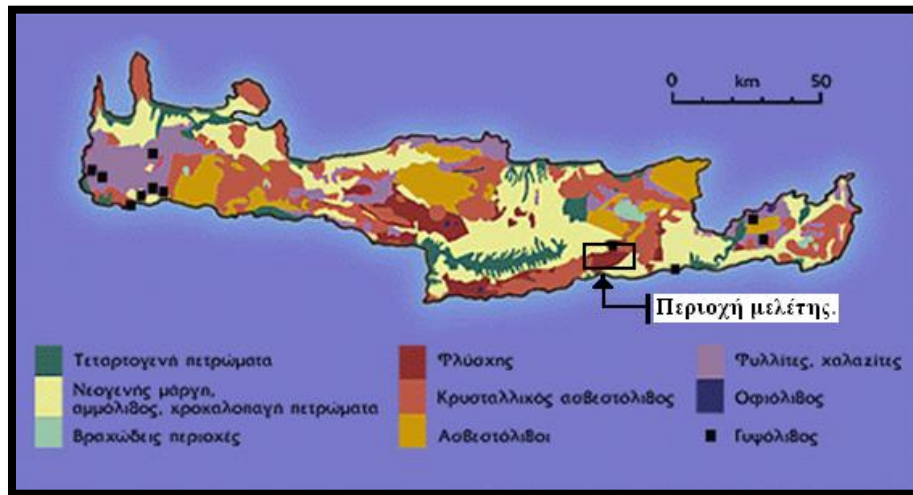
Πίνακας μέσης ετήσιας θερμοκρασίας σε βαθμούς Κελσίου στην περιοχή αεροδρομίου Ηρακλείου Κρήτης τη χρονική περίοδο 1985 – 1995.

(Μετεωρολογική ιστοσελίδα, <http://www.tutiempo.net/>)

Έτος	Μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου (km / hour)
1985	17,3
1986	17,1
1987	17,4
1988	15,1
1989	14,5
1990	14,9
1991	16,0
1992	15,6
1993	15,9
1994	17,2
1995	15,9

Πίνακας μέσης ετήσιας ταχύτητας ανέμου (km / hour) στην περιοχή αεροδρομίου Ηρακλείου Κρήτης τη χρονική περίοδο 1985 – 1995.

(Μετεωρολογική ιστοσελίδα, <http://www.tutiempo.net/>)



Γεωλογικός χάρτης της Κρήτης με προσδιορισμό της θέσης της περιοχής μελέτης στην οποία επικρατεί ο σχηματισμός του φλύσχη.

(Rackham O. n' Moody J., The making of the Cretan landscape, Manchester University Press, 1995)