



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΜΕ
ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ
ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ**

Ευγενία Κολτσίδα

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»**

**Επιβλέπων: Α. Καλλιώρας,
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

Αθήνα, Οκτώβριος 2017

Πρόλογος

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του Διατμηματικού – Διεπιστημονικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το θέμα που πραγματεύεται η συγκεκριμένη εργασία, είναι η προσομοίωση της υπόγειας ροής της παράκτιας περιοχής της Ροδόπης με τη χρήση ελεύθερου λογισμικού ανοικτού κώδικα.

Η επίβλεψη της μεταπτυχιακής εργασίας έγινε από τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Ανδρέα Καλλιώρα, τον οποίο ευχαριστώ θερμά για την εύρεση και την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος καθώς και για τη βοήθεια και την καθοδήγηση που μου προσέφερε καθ'όλο το διάστημα εκπόνησης της εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Χρήστο Πουλιάρη, υποψήφιο διδάκτορα του T.U. Darmstadt, του οποίου οι υποδείξεις ήταν καθοριστικές για την ολοκλήρωση αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ειδικότερα οι συμβουλές του στο κεφάλαιο της ανάλυσης ευαισθησίας.

Επίσης ευχαριστίες οφείλω στην κ. Μάρθα Περδικάκη, υποψήφια διδάκτορα της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π., για τη συνεισφορά της στην κατανόηση του τρόπου λειτουργίας και χειρισμού του λογισμικού FREEWAT.

Ευχαριστώ τους φίλους μου για την κατανόηση και την ηθική υποστήριξη που μου προσέφεραν κατά τη διεκπεραίωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να αφιερώσω ολόψυχα τη συγκεκριμένη εργασία στους γονείς μου, για την αγάπη και τη συμπαράσταση τους σε κάθε βήμα της ζωής μου.

Περίληψη

Η χρήση αριθμητικών μοντέλων στην προσομοίωση υδατικών πόρων συμβάλλει στην αποτελεσματικότερη κατανόηση των σύνθετων υδρολογικών και υδρογεωλογικών συνθηκών και ενισχύει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων και στρατηγικών σχεδιασμού. Η προσομοίωση της υπόγειας ροής της παράκτιας περιοχής του Νομού Ροδόπης πραγματοποιήθηκε με την πλατφόρμα FREEWAT, η οποία ενσωματώνει τους κώδικες αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης ροής υπόγειων νερών (MODFLOW, USGS) στο ελεύθερο και ανοιχτού κώδικα λογισμικό QGIS.

Το υπόγειο σύστημα της περιοχής προσομοιώθηκε και ρυθμίστηκε για την περίοδο Απρίλιος - Οκτώβριος 2003. Η αναπαράσταση του εννοιολογικού μοντέλου επιτεύχθηκε με τις οριακές συνθήκες: σταθερής εισροής, ποταμού, κατείσδυσης από ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, εξατμισοδιαπνοής και άντλησης. Μετά την πρώτη ρύθμιση του μοντέλου, εφαρμόστηκε ο κώδικας UCODE_2014 για τις διαδικασίες της ανάλυσης ευαισθησίας και της παραμετροποίησης. Για τη σύγκριση των προσομοιωμένων τιμών στάθμης με τις πραγματικές μετρήσεις υπαίθρου, χρησιμοποιήθηκε το Head Observation Package (HOB) το οποίο δημιουργήθηκε με τη βοήθεια του Observation Analysis Tool (OAT) κατά το οποίο 41 πηγάδια χρησιμοποιήθηκαν ως πηγάδια παρακολούθησης. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με τις μεθόδους Fit independent statistics (Dimensionless scaled sensitivity, Composite scaled sensitivity, Parameter correlation coefficient, Leverage) και τους δείκτες Nash-Sutcliffe και mass balance error.

Οι παράμετροι που εμφάνισαν τη μεγαλύτερη ευαισθησία (μεγαλύτερη τιμή Composite scaled sensitivity, CSS) ήταν η υδραυλική αγωγιμότητα και ο εμπλουτισμός από ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, οι οποίες επιλέχθηκαν να εκτιμηθούν κατά την παραμετροποίηση του μοντέλου. Μετά τη ρύθμιση των εν λόγω παραμέτρων, οι υπολογισμένες τιμές στάθμης παρουσίασαν ταύτιση με τις μετρημένες τιμές στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής έρευνας, με εξαίρεση μικρές αποκλίσεις στο κέντρο της περιοχής όπου εμφανίζεται ο κώνος κατάπτωσης του υδροφόρου συστήματος. Η παρούσα εργασία αποτελεί μία παρουσίαση των δυνατοτήτων του λογισμικού FREEWAT και αποδεικνύει περαιτέρω τη δυνατότητα εφαρμογής του σε θέματα προσομοίωσης υδατικών πόρων.

Extended Abstract

Water resources management can be enhanced by numerical models to achieve a more effective understanding of complex natural systems and improve planning strategies. Integrating GIS and hydrological codes, facilitates the use of complex modeling environments, allowing to store, manage and visualize large spatial datasets. FREEWAT (Free and open source software tools for water resource management; Rossetto et al., 2015) is a public domain, QGIS-integrated platform, developed to simulate several hydrological processes in order to address decision making in water resource management (De Filippis et al., 2016).

The groundwater flow simulation of a sedimentary aquifer, located in Northern Greece, at the south-west coastal part of the Prefecture of Rhodope, was achieved by the application of the FREEWAT platform and the MODFLOW-2005 code (Harbaugh, 2005). The modules for data pre-processing and model implementation, which were used in the present postgraduate thesis are mentioned below.

- The AkvaGIS module provides several tools for the analysis and interpretation of hydrogeological data and generation of thematic maps for implementation of conceptual models
- The Observation Analysis Tool (OAT) is a pre-processing tool allowing to import, analyze and visualize time-series data which are then can be used for model calibration
- MODFLOW-2005 (Harbaugh, 2005) is a code developed by USGS and is implemented to perform groundwater flow simulation in the saturated and unsaturated zones
- Sensitivity analysis and parameter estimation are performed using the UCODE-2014 (Poeter et al., 2014) which improves the model fit, by reducing the difference between model-simulated heads and flows and the observed data

The conceptual model consists of two layers: an upper layer, which includes impermeable formations and provides the confined conditions of the aquifer system and the underlying formation which is composed of permeable alluvial deposits (approximately 50 m). The bottom of the aquifer system is composed of a grey-green clay layer, which extends up to the whole area of investigation. The recharge of the

aquifer system is achieved by direct infiltration from precipitation, irrigation returns, percolation from surface water bodies of the area and the lateral hydraulic contact with the northern alluvial cone of Kompsatos river (Kallioras, 2008).

The simulation involves the period between April-October 2003 and the model is divided into two stress periods. The 1st SP (steady-state) lasts one day, during which no stresses (recharge, pumping wells, etc.) affect the hydrogeological system. The 2nd SP (transient) lasts 181 days, during which 411 pumping wells penetrating the deepest layer are activated. The simulation was accomplished by the use of the following packages:

- General head boundaries (GHB) for the parts of the aquifer which are in hydraulic connection with the alluvial cone of Kompsatos river, at the parts of Vistonida lagoon inlet and at the southern part of Lake Ismarida.
- River boundaries (RIV) across the Vozvozis river
- Well Package to simulate wells that withdraw water from the aquifer at a constant rate during a stress period (WELL)
- Recharge Package (RCH) to simulate the direct infiltration from precipitation
- Evapotranspiration Package (EVT) to simulate the conjunctive effects of plant transpiration and direct evaporation from groundwater
- No flow boundaries at the parts of the aquifer where no flow occurs (inflow or outflow)

In order to evaluate the results and compare the simulated values with observed values, the Head Observation Package (HOB) was developed using the Observation Analysis Tool (OAT) where 41 wells were used as monitoring wells.

After the first run of the model, a sensitivity analysis was performed using the UCODE_2014 code (Poeter et al., 2014) to gain information on the quantitative relationship between parameters and observations. The parameters taken into consideration are: hydraulic conductivity (HK) which was divided in 4 zones, specific storage (SS) and direct infiltration from precipitation (RCH). The statistical analysis of the results was carried out using a series of fit independent statistics (Hill and Tiedman, 2007) such as: dimensionless scaled sensitivity, composite scaled sensitivity, parameter correlation coefficient and leverage. The most important

parameters with the highest css values affecting the results were the first zone of hydraulic conductivity of the aquifer (HK1), followed by the direct infiltration from precipitation (RCH) and the second zone of hydraulic conductivity (HK2).

A parameter estimation was conducted with the same code, to obtain the set of parameters which give the best fit between observed and simulated values of the square weighted residuals regression (Foglia et al., 2017). Parameter estimation refers to the process of optimizing a selected set of parameters using a nonlinear regression which minimize the objective function. The objective function was defined as the sum of squared weighted residuals. In the parameter estimation process, the three parameters with the highest css values were used. The parameters SS, HK3 and HK4 were excluded from further estimation because of their low sensitivity. The high correlation between HK1 and RCH was addressed by imposing constraints based on existing data.

After the parameter estimation, the Nash-Sutcliffe coefficient and the mass balance error accounted for 0.74 and 0.8 respectively, indicating that the simulated level values are slightly greater than the observed values. The calculated values were compared with the measured values of 13 October 2003 and it was concluded that at the eastern, NE, western, NW and southern boundaries of the study area a coincidence of measured and calculated groundwater levels occurred. On average, the model results were within 4.15 m of the measured heads. Small declinations between the calculated and the measured groundwater levels were observed at the central part of the area at the point of formation of the cone of depression (wel_33), at the south-west part of Vistonida lake (wel_44, wel_11) and at the south part of Aspropotamos river (wel_43).

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	ii
Περίληψη.....	iv
Extended Abstract	v
Περιεχόμενα	viii
Κατάλογος Σχημάτων.....	xi
Κατάλογος Πινάκων.....	xiv
1. Εισαγωγή.....	1
1.1. Παρουσίαση λογισμικού FREEWAT.....	1
1.2. Αντικείμενο της εργασίας.....	2
1.3. Διάρθρωση της εργασίας.....	3
2. Μεθοδολογία προσομοίωσης ροής υπόγειων νερών.....	4
2.1. Εισαγωγή.....	4
2.2. Μεθοδολογία εφαρμογής και ανάπτυξης μοντέλων.....	4
2.3. Προσδιορισμός στόχων μοντέλου	6
2.4. Εννοιολογικό μοντέλο	7
2.5. Ταξινόμηση μοντέλων υπόγειων υδάτων.....	7
2.5.1 Φυσικά μοντέλα.....	7
2.5.2. Αναλογικά μοντέλα	8
2.5.3. Μαθηματικά μοντέλα	8
2.6. Υπολογιστικός κώδικας MODFLOW	10
2.6.1. Μαθηματική περιγραφή	10
2.6.2. Χωρική διακριτοποίηση	11
2.6.3. Χρονική διακριτοποίηση	15
2.6.4. Εξίσωση πεπερασμένης διαφοράς.....	16
2.6.5. Νόμος Darcy.....	16
2.6.6. Απαιτήσεις δεδομένων	17
2.6.7. Οριακές συνθήκες.....	18
2.7. Ρύθμιση μοντέλου (Calibration).....	29
2.8. Επαλήθευση μοντέλου (Verification).....	29
2.9. Ανάλυση ευαισθησίας (Sensitivity analysis).....	29
2.10. Πρόβλεψη.....	30
2.11. Επανεκτίμηση στόχων προβλήματος	30

2.12. Αναφορά μοντέλου.....	30
2.13. Λογισμικά προσομοίωσης υπόγειων υδάτων	31
2.13.1. Εισαγωγή.....	31
2.13.2. Γραφικά περιβάλλοντα εργασίας (GUIs) για τον κώδικα του MODFLOW	32
3. Εφαρμογή FREEWAT στην περιοχή μελέτης - Μέρος Α΄	36
3.1 Γενική περιγραφή.....	36
3.1.1. Γεωγραφικό πλαίσιο.....	36
3.1.2. Χρήσεις Γης.....	37
3.1.3. Δημογραφικά χαρακτηριστικά Νομού Ροδόπης.....	41
3.2. Γεωμορφολογικές - Γεωλογικές συνθήκες.....	46
3.2.1. Γεωμορφολογικές συνθήκες.....	46
3.2.2. Γεωλογικές συνθήκες	52
3.3. Επιφανειακή υδρολογία.....	58
3.3.1. Υδρομετεωρολογικοί σταθμοί.....	58
3.3.2. Βροχομετρικά δεδομένα.....	60
3.3.3. Θερμοκρασιακά δεδομένα.....	64
3.3.4. Υπολογισμός Εξατμισοδιαπνοής.....	66
3.3.5 Κλιματική κατάταξη της περιοχής έρευνας.....	70
3.3.6. Όγκοι κατακρημνισμάτων περιόδου 1954 – 2005.....	70
3.4. Υδρογεωλογικές συνθήκες.....	71
3.4.1. Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά σχηματισμών	71
3.4.2. Υδραυλικά χαρακτηριστικά υδροφόρου	73
3.4.3. Στοιχεία ισοζυγίου του υδροφόρου συστήματος.....	77
3.4.4. Πιεζομετρικές συνθήκες.....	80
4. Εφαρμογή FREEWAT στην περιοχή έρευνας - Μέρος Β΄	82
4.1. Εισαγωγή.....	82
4.2. Ανάπτυξη εννοιολογικού μοντέλου.....	82
4.3. Προσομοίωση υπόγειας ροής περιοχής μελέτης	84
4.3.1. Καθορισμός φυσικών μεγεθών.....	86
4.3.2. Χωρική διακριτοποίηση	86
4.3.3. Καθορισμός γεωμετρίας	86
4.3.4. Ορισμός αρχικών συνθηκών.....	92
4.3.5. Εισαγωγή υδραυλικών παραμέτρων.....	92
4.3.6. Χρονική διακριτοποίηση	93

4.3.7. Οριακές Συνθήκες	93
4.3.8. Στοιχεία ισοζυγίου των υπόγειων νερών του μοντέλου	93
4.3.9. Πακέτα FREEWAT	97
4.3.10. Περίοδοι φόρτισης.....	103
4.3.11. Αποτελέσματα ρύθμισης μοντέλου	103
4.3.12. Ανάλυση Ευαισθησίας (Sensitivity Analysis Module).....	109
5. Συμπεράσματα.....	125
Βιβλιογραφικές Αναφορές	130
Ελληνικές αναφορές.....	130
Ξενόγλωσσες αναφορές.....	131
Ιστότοποι	136
Παράρτημα.....	137

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2. 1. Μεθοδολογία προσομοίωσης (Reilly and Harbaugh, 2004 με τροποποιήσεις)	5
Σχήμα 2. 2. Διακριτοποιημένο τμήμα υδροφορέα (Harbaugh, 2005 με τροποποιήσεις)	11
Σχήμα 2. 3. Διαφορές στην αναπαράσταση του παράκτιου συστήματος του Long Island της Νέας Υόρκης (Buxton and Reilly, 1987)	13
Σχήμα 2. 4. Κανάλι υψηλής υδραυλικής αγωγιμότητας το οποίο αναπαρίσταται ασυνεχές εξαιτίας του μεγάλου μεγέθους κελιών (Reilly and Harbaugh, 2004)	13
Σχήμα 2. 5. Σχήματα κατακόρυφης διακριτοποίησης (Α) διατομή υδροφορέα, (Β) διατομή υδροφορέα με ομοιόμορφο δίκτυο, (C) διατομή υδροφορέα με παραμορφωμένο δίκτυο (Reilly and Harbaugh, 2004)	14
Σχήμα 2. 6. Σχέση ρυθμού άντλησης και χρόνου για διαφορετικά χρονικά βήματα (Reilly and Harbaugh, 2004)	15
Σχήμα 2. 7. Εφαρμογή του Νόμου του Darcy σε πρίσμα από πορώδες υλικό (McDonald and Harbaugh, 1988)	17
Σχήμα 2. 8. Υποθετικό πρόβλημα το οποίο παρουσιάζει τις περιπτώσεις εμπλουτισμού του υδροφορέα (McDonald and Harbaugh, 1988)	20
Σχήμα 2. 9. Απεικόνιση αρχής λειτουργίας του πακέτου GHB (Harbaugh, 2005 με τροποποιήσεις)	22
Σχήμα 2. 10. Απεικόνιση ροής μεταξύ της εξωτερικής πηγής και του κελιού του συστήματος (Harbaugh, 2005)	22
Σχήμα 2. 11. (Α) Διατομή υδροφορέα και (Β) Εννοιολογική αναπαράσταση (McDonald and Harbaugh, 1988)	23
Σχήμα 2. 12. Τμήμα πυθμένα ποταμού (McDonald and Harbaugh, 1988)	24
Σχήμα 2. 13. Διατομές ποταμού που απεικονίζουν τη σχέση μεταξύ του φορτίου του πυθμένα του ποταμού και το φορτίου στο κελί (Harbaugh, 2005)	25
Σχήμα 2. 14. Απεικόνιση ροής μεταξύ του ποταμού και του κελιού του συστήματος (Harbaugh, 2005)	26
Σχήμα 2. 15. Απώλεια εξατμισοδιαπνοής συναρτήσει του φορτίου του κελιού (Harbaugh, 2005)	27
Σχήμα 2. 16. Σύγκριση οριακών συνθηκών (Harbaugh, 2005)	28
Σχήμα 2. 17. Ενότητες πλατφόρμας Freewat (De Filippis et al., 2017)	35
Σχήμα 2. 18. Δομή πλατφόρμας Freewat (De Filippis et al., 2017)	35
Σχήμα 3. 1. Δορυφορική εικόνα περιοχής έρευνας (Google Earth © 2017)	36
Σχήμα 3. 2. Ποσοστιαία διάρθρωση των εκτάσεων του Νομού Ροδόπης ανάλογα με τις χρήσεις γης (ΕΛΣΤΑΤ, 2011)	38
Σχήμα 3. 3. Χρήσεις γης περιοχής έρευνας κατά CORINE LANDCOVER (CLC) 2012	40
Σχήμα 3. 4. Διακύμανση πληθυσμών Νομού Ροδόπης κατά τα έτη 1971, 1981, 1991, 2001 και 2011 (ΕΛΣΤΑΤ, 2011)	42
Σχήμα 3. 5. Διακύμανση πληθυσμών Δ.Ε. Κομοτηνής κατά τα έτη 1971, 1981, 1991, 2001 και 2011 (ΕΛΣΤΑΤ, 2011)	42
Σχήμα 3. 6. Μεταβολή πληθυσμών οικισμών της περιοχής έρευνας κατά τα έτη 1971, 1981, 1991, 2001 και 2011 (ΕΛΣΤΑΤ, 2011)	44
Σχήμα 3. 7. Κατανομή πληθυσμού των οικισμών της περιοχής έρευνας για το έτος 2011 (ΕΛΣΤΑΤ, 2011)	45
Σχήμα 3. 8. Γεωμορφολογικός χάρτης περιοχής έρευνας (Google Earth © 2017)	47

Σχήμα 3. 9. Υδρογραφικό δίκτυο περιοχής έρευνας (Καλλιώρας, 2008 με τροποποιήσεις) ..	49
Σχήμα 3. 10. Γεωλογικός χάρτης περιοχής μελέτης (Πεταλάς, 1997 με σύνθεση και τροποποίηση από γεωλογικό χάρτη Ι.Γ.Μ.Ε., Γεωλογικός χάρτης Ελλάδας, 1:500.000).....	57
Σχήμα 3. 11. Θέσεις υδρομετεωρολογικών σταθμών Νομού Ροδόπης και περιοχής έρευνας (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth © 2017).....	58
Σχήμα 3. 12. Διακύμανση της ετήσιας βροχής για την περίοδο 1954-2005	62
Σχήμα 3. 13. Διακύμανση της μέσης, ελάχιστης και μέγιστης μηνιαίας τιμής ύψους βροχής (mm) για την περίοδο 1954-2005	63
Σχήμα 3. 14. Διακύμανση της ετήσιας τιμής ύψους βροχής (mm) κατά τη διάρκεια της περιόδου ηρεμίας και της περιόδου άντλησης για την περίοδο 1954-2005	63
Σχήμα 3. 15. Διακύμανση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (°C) στο σταθμό Νέου Σιδηροχωρίου για την περίοδο 1966-1999	64
Σχήμα 3. 16. Διακύμανση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (°C) στο σταθμό Αμπελουργικού Φυτωρίου για την περίοδο 1966-1999.....	64
Σχήμα 3. 17. Διακύμανση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (°C) στο σταθμό Κομοτηνής για την περίοδο 1955-2002.....	65
Σχήμα 3. 18 Διακύμανση της μέσης, ελάχιστης και μέγιστης μηνιαίας θερμοκρασίας (°C) στο σταθμό Νέου Σιδηροχωρίου για την περίοδο 1966-1999	65
Σχήμα 3. 19. Διακύμανση της μέσης, ελάχιστης και μέγιστης μηνιαίας θερμοκρασίας (°C) στο σταθμό Αμπελουργικού για την περίοδο 1966-1999	66
Σχήμα 3. 20. Διακύμανση της μέσης, ελάχιστης και μέγιστης μηνιαίας θερμοκρασίας (°C) στο σταθμό Κομοτηνής για την περίοδο 1955-2002.....	66
Σχήμα 3. 21. Διακύμανση της ετήσιας τιμής δυνητικής εξατμισοδιαπνοής ET_p στο σταθμό Νέου Σιδηροχωρίου για την περίοδο 1966 - 1999	67
Σχήμα 3. 22. Διακύμανση της ετήσιας τιμής δυνητικής εξατμισοδιαπνοής ET_p στο σταθμό Αμπελουργικού Φυτωρίου για την περίοδο 1966 – 1999	68
Σχήμα 3. 23. Διακύμανση της ετήσιας τιμής δυνητικής εξατμισοδιαπνοής ET_p στο σταθμό Κομοτηνής για την περίοδο 1955 - 2002	68
Σχήμα 3. 24. Διακύμανση της μηνιαίας τιμής δυνητικής εξατμισοδιαπνοής ET_p στο σταθμό Νέου Σιδηροχωρίου για την περίοδο 1966 - 1999	69
Σχήμα 3. 25. Διακύμανση της μηνιαίας τιμής δυνητικής εξατμισοδιαπνοής ET_p στο σταθμό Αμπελουργικού Φυτωρίου για την περίοδο 1966 – 1999	69
Σχήμα 3. 26. Διακύμανση της μηνιαίας τιμής δυνητικής εξατμισοδιαπνοής ET_p στο σταθμό Κομοτηνής για την περίοδο 1955 - 2002	69
Σχήμα 3. 27. Διακύμανση ετήσιου όγκου βροχοπτώσεων (m^3) (σταθμός Πόρπης) για την περίοδο 1954-2005	70
Σχήμα 3. 28. Συνολικό δίκτυο παραγωγικών γεωτρήσεων περιοχής έρευνας (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth © 2017)	72
Σχήμα 3. 29. Δίκτυο εγκαταλειμμένων γεωτρήσεων περιοχής έρευνας (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth © 2017)	73
Σχήμα 3. 30. Θέσεις γεωτρήσεων δοκιμαστικών αντλήσεων (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth © 2017)	75
Σχήμα 3. 31. Χωρική κατανομή μεταβιβαστικότητα $T(\times 10^{-3} m^2/sec)$ (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth © 2017)	75
Σχήμα 3. 32. Χωρική κατανομή υδραυλικής αγωγιμότητας $K(\times 10^{-5} m/sec)$ (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth © 2017)	76

Σχήμα 3. 33. Χωρική κατανομή υδροχωρητικότητας $S (\times 10^{-4}$ αδιάστατο) (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth © 2017)	76
Σχήμα 3. 34. Πιεζομετρικός χάρτης Απριλίου 2003 (Καλλιώρας, 2008 με τροποποιήσεις) ..	81
Σχήμα 3. 35. Πιεζομετρικός χάρτης Οκτωβρίου 2003 (Καλλιώρας, 2008 με τροποποιήσεις)	81
Σχήμα 4. 1. Μεθοδολογία προσομοίωσης υπόγειων νερών της περιοχής έρευνας.....	85
Σχήμα 4. 2. Περιβάλλον εργασίας της βάσης δεδομένων AkvaGIS (Google Earth © 2017) .	88
Σχήμα 4. 3. Οροφή υδροφόρου στρώματος περιοχής έρευνας (Google Earth © 2017).....	88
Σχήμα 4. 4. Πάχος υδροφόρου στρώματος περιοχής έρευνας (Google Earth © 2017)	89
Σχήμα 4. 5. Πυθμένας υδροφόρου στρώματος περιοχής έρευνας (Google Earth © 2017).....	89
Σχήμα 4. 6. Ψηφιοποιημένο υδρογραφικό υπόβαθρο της περιοχής μελέτης	90
Σχήμα 4. 7 Δημιουργία κανάβου και ορίου του μοντέλου ροής στο περιβάλλον του QGIS ..	90
Σχήμα 4. 8. Κατασκευή μοντέλου της περιοχής	91
Σχήμα 4. 9. Κατασκευή μοντέλου της περιοχής και παρουσίαση της πλατφόρμας FREEWAT	91
Σχήμα 4. 10 Αρχικές πιεζομετρικές συνθήκες μοντέλου (Καλλιώρας, 2008 με τροποποιήσεις)	92
Σχήμα 4. 11. Εννοιολογικό μοντέλο και οριακές συνθήκες του μοντέλου ροής.....	94
Σχήμα 4. 12. Οριακές συνθήκες κατείσδυσης από ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και εξατμισοδιαπνοής της περιοχής έρευνας.....	95
Σχήμα 4. 13. Συνολικό δίκτυο γεωτρήσεων άντλησης της περιοχής έρευνας	96
Σχήμα 4. 14. Θέσεις σημείων παρατήρησης σε πλέγμα πεπερασμένων διαφορών με τη χρήση των παραμέτρων ROFF και COFF (Hill et al., 2000)	98
Σχήμα 4. 15 Δομή πακέτου OAT (Foglia et al., 2017).....	101
Σχήμα 4. 16. Δεδομένα αισθητήρα OAT (Foglia et al., 2017).....	101
Σχήμα 4. 17. Δεδομένα αισθητήρα OAT (Observation Analysis Tool).....	102
Σχήμα 4. 18. Κατασκευή γεωτρήσεων παρακολούθησης (HOB) με τη βοήθεια δεδομένων του εργαλείου OAT.....	102
Σχήμα 4. 19 Διάγραμμα συσχέτισης υπολογισμένων και μετρημένων τιμών στάθμης	107
Σχήμα 4. 20. Διαφορές προσομοιωμένων-μετρημένων τιμών στάθμης (residuals).....	107
Σχήμα 4. 21. Πιεζομετρικές καμπύλες για τη μέτρηση στις 13/10/2003 (Καλλιώρας, 2008 με τροποποιήσεις)	108
Σχήμα 4. 22. Προσομοιωμένες τιμές πιεζομετρικού φορτίου για τη μέτρηση στις 13/10/2003	108
Σχήμα 4. 23. Ζώνες υδραυλικής αγωγιμότητας που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ανάλυση ευαισθησίας.....	112
Σχήμα 4. 24. Αποτελέσματα Composite Scaled Sensitivity για τις παραμέτρους του μοντέλου	113
Σχήμα 4. 25. 1 ^η μεγαλύτερη τιμή Dimensionless Scaled Sensitivity για κάθε παράμετρο ...	113
Σχήμα 4. 26. 2 ^η μεγαλύτερη τιμή Dimensionless Scaled Sensitivity για κάθε παράμετρο ...	113
Σχήμα 4. 27. Αποτελέσματα Dimensionless Scaled Sensitivity για τις παραμέτρους του μοντέλου.....	114
Σχήμα 4. 28. Σχέση συσχέτισης παραμέτρων HK1, RCH, HK3 και HK4.....	115
Σχήμα 4. 29. Γεωτρήσεις παρακολούθησης που επικρατούν στον υπολογισμό μίας παραμέτρου	115
Σχήμα 4. 30. Διάγραμμα συσχέτισης αρχικής τιμής παραμέτρου και υπολογισμένης τιμής	117

Σχήμα 4. 31. Αθροίσματα τετραγώνων σταθμισμένων διαφορών (residuals) μετρημένων και υπολογισμένων τιμών στάθμης για κάθε επανάληψη	117
Σχήμα 4. 32 Διάγραμμα συσχέτισης υπολογισμένων και μετρημένων τιμών στάθμης	119
Σχήμα 4. 33 Διάγραμμα συσχέτισης υπολογισμένων και μετρημένων τιμών στάθμης	120
Σχήμα 4. 34 Διαφορές υπολογισμένων-μετρημένων τιμών στάθμης (residuals)	120
Σχήμα 4. 35 Διαφορές υπολογισμένων-μετρημένων τιμών στάθμης (residuals)	120
Σχήμα 4. 36. Διαφορές μετρημένων και υπολογισμένων τιμών στάθμης για τη μέτρηση στις 13/10/2003.....	121
Σχήμα 4. 37. Υπολογισμένες τιμές πιεζομετρικού φορτίου για τη μέτρηση στις 13/10/2003	122
Σχήμα 4. 38. Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές στάθμης για τη μέτρηση στις 13/10/2003	122
Σχήμα 4. 39. Τομές σύμφωνα με τη μέτρηση της 13/10/2003	123
Σχήμα 4. 40. Προφίλ πιεζομετρικής επιφάνειας κατά μήκος του άξονα Α-Α΄	124
Σχήμα 4. 41. Προφίλ πιεζομετρικής επιφάνειας κατά μήκος του άξονα Β-Β΄	124

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2. 1. Λογισμικά προσομοίωσης υπόγειων υδάτων.....	31
Πίνακας 3. 1. Κατανομή της έκτασης (σε km ²) με βάση τη μορφολογία του εδάφους (ΕΛΣΤΑΤ, 2011).....	37
Πίνακας 3. 2. Κατανομή γεωργικών περιοχών του Νομού Ροδόπης, της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας & Θράκης και του συνόλου της χώρας (σε km ²) (ΕΛΣΤΑΤ, 2011).....	37
Πίνακας 3. 3. Κατανομή δασών και υδατοκαλυμμένων εκτάσεων του Νομού Ροδόπης, της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας & Θράκης και του συνόλου της χώρας (σε km ²) (ΕΛΣΤΑΤ, 2011).....	38
Πίνακας 3. 4. Κατανομή τεχνητών περιοχών του Νομού Ροδόπης, της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας & Θράκης και του συνόλου της χώρας (σε km ²) (ΕΛΣΤΑΤ, 2011).....	38
Πίνακας 3. 5. Δομημένη έκταση (εκτάσεις κύριων οικισμών) περιοχής έρευνας (ΕΛΣΤΑΤ, 2011).....	39
Πίνακας 3. 6. Πληθυσμοί δήμων του Ν. Ροδόπης για το έτος 2011(ΕΛΣΤΑΤ, 2011)	41
Πίνακας 3. 7. Πληθυσμιακή εξέλιξη κατά δημοτική ενότητα του Ν. Ροδόπης (ΕΛΣΤΑΤ, 2011).....	41
Πίνακας 3. 8. Πληθυσμιακά στοιχεία των οικισμών της περιοχής έρευνας (ΕΛΣΤΑΤ, 2011)	43
Πίνακας 3. 9. Πληθυσμιακές μεταβολές των οικισμών της περιοχής έρευνας (ΕΛΣΤΑΤ, 2011).....	44
Πίνακας 3. 10. Εκτάσεις κυριότερων λεκανών απορροής της στενής και της ευρύτερης περιοχής έρευνας (Πεταλάς, 1997)	48
Πίνακας 3. 11. Υδρομετεωρολογικοί σταθμοί Νομού Ροδόπης.....	58
Πίνακας 3. 12 Κυριότερες υδρολογικές λεκάνες Νομού Ροδόπης (Πεταλάς, 1997)	59
Πίνακας 3. 13. Προδιαγραφές πυκνότητας βροχομετρικών σταθμών (WMO).....	59
Πίνακας 3. 14. Ύψη βροχής (mm) για την περίοδο 1954 - 2005	60

Πίνακας 3. 15. Στατιστικά χαρακτηριστικά υψών βροχής (mm) καταγεγραμμένα στο βροχομετρικό σταθμό Πόρπης (Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ.) για την περίοδο 1954-2005	62
Πίνακας 3. 16. Στατιστικά στοιχεία σταθμών Νέου Σιδηροχωρίου, Αμπελουργικού Φυτωρίου και Κομοτηνής για την περίοδο λειτουργίας τους.....	68
Πίνακας 3. 17. Υδραυλικές παράμετροι περιοχής έρευνας (Πεταλάς, 1997)	74
Πίνακας 4. 1. Περίοδοι φόρτισης και χρονικά βήματα του μοντέλου.....	103
Πίνακας 4. 2. Ισοζύγιο υπόγειων νερών για την περιοχή μελέτης μετά το τέλος της προσομοίωσης	104
Πίνακας 4. 3. Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές στάθμης των γεωτρήσεων της ρύθμισης του μοντέλου για τις 13/10/2003	105
Πίνακας 4. 4. Στατιστικά χαρακτηριστικά των διαφορών παρατηρημένων και προσομοιωμένων τιμών στάθμης (residuals)	106
Πίνακας 4. 5. Αρχικές τιμές παραμέτρων για την ανάλυση ευαισθησίας	111
Πίνακας 4. 6. Αποτελέσματα Composite Scaled Sensitivity (CSS).....	112
Πίνακας 4. 7. Αρχικές και τελικές τιμές παραμέτρων μετά την παραμετροποίηση.....	116
Πίνακας 4. 8. Αθροίσματα τετραγώνων σταθμισμένων διαφορών (residuals) μετρημένων και υπολογισμένων τιμών στάθμης για κάθε επανάληψη	117
Πίνακας 4. 9. Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές στάθμης των γεωτρήσεων της ρύθμισης του μοντέλου για τις 13/10/2003	118
Πίνακας 4. 10. Στατιστικά χαρακτηριστικά των διαφορών παρατηρημένων και προσομοιωμένων τιμών στάθμης (residuals)	119

1. Εισαγωγή

1.1. Παρουσίαση λογισμικού FREEWAT

Η αειφόρος διαχείριση των υπόγειων και επιφανειακών υδατικών πόρων ενισχύεται με τη χρήση αριθμητικών μοντέλων για την κατανόηση των σύνθετων φυσικών συστημάτων και τη βελτίωση των σχεδίων διαχείρισης. Η χρήση όμως προηγμένων τεχνολογιών και η απαιτούμενη εξειδίκευση, οδηγεί στην έλλειψη συμμετοχικής προσέγγισης στη λήψη αποφάσεων για τη διαχείριση των υδατικών πόρων (Refsgaard et al., 2010). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τον ανεπαρκή συντονισμό μεταξύ τεχνικού και επιστημονικού προσωπικού, πολιτικών και υπεύθυνων λήψης αποφάσεων καθώς και των διαφόρων ενδιαφερόμενων μελών που συμμετέχουν στην παρακολούθηση και διαχείριση των υδατικών πόρων. Επομένως, για να αντιμετωπιστεί αυτή η καθαρά τεχνική προσέγγιση στην αντιμετώπιση σύνθετων προβλημάτων, είναι απαραίτητο να εισαχθεί η συμμετοχική προσέγγιση (Rossetto et al., 2015).

Οι τεχνικές προσομοίωσης σε συνδυασμό με τα εργαλεία για την ανάλυση γεωχωρικών δεδομένων μπορούν να συνεισφέρουν στην αποτελεσματική διαχείριση της εκτεταμένης χρήσης επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, στην αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ των διαφόρων χρηστών και στη διατήρηση των οικοσυστημάτων (Rossetto et al., 2013). Συνεπώς, η ανάπτυξη καινοτόμων εργαλείων λογισμικού για θέματα διαχείρισης υδατικών πόρων είναι απαραίτητη, ενόψει της ορθής εφαρμογής της Οδηγίας Πλαίσιο 2000/60 για τα ύδατα και άλλων σχετικών με το νερό Οδηγιών.

Η πλατφόρμα λογισμικού FREEWAT (Free and Open Source Software Tools for Water Resource Management) αποσκοπεί στην απλούστευση της εφαρμογής των Οδηγιών της ΕΕ για τα ύδατα, ενσωματώνοντας τους κώδικες αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης ροής υπόγειων νερών και μεταφοράς ρύπων (MODFLOW, USGS) στο ελεύθερο και ανοιχτού κώδικα λογισμικό QGIS για το σχεδιασμό και τη διαχείριση των επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων. Το FREEWAT χρηματοδοτείται ως Ευρωπαϊκό Ερευνητικό Πρόγραμμα (HORIZON 2020), στο πλαίσιο της προκήρυξης 4a WATER INNOVATION: BOOSTING ITS VALUE FOR EUROPE. Η δυνατότητα αποθήκευσης, διαχείρισης και οπτικοποίησης μεγάλων

χωρικών δεδομένων θα διευκολύνει την ευρεία χρήση σύνθετων περιβαλλόντων προσομοίωσης. Ο βασικός στόχος είναι η παροχή βοήθειας στη λήψη αποφάσεων και στη χάραξη πολιτικής, παρέχοντας δεδομένα και καινοτόμα εργαλεία ανάλυσης δεδομένων καθώς και ενίσχυση της συμμετοχικής προσέγγισης (De Filippis et al., 2016).

1.2. Αντικείμενο της εργασίας

Το λογισμικό FREEWAT χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της ροής των υπόγειων υδάτων της παράκτιας περιοχής του Νομού Ροδόπης, χρησιμοποιώντας τον κώδικα MODFLOW-2005 (Harbaugh, 2005), που αναπτύσσεται από το USGS και προσομοιώνει την υπόγεια ροή σε κορεσμένες και ακόρεστες ζώνες. Η πλατφόρμα του λογισμικού FREEWAT αποτελεί ένα πρόσθετο πρόγραμμα στο λογισμικό QGIS (QGIS Development Team, 2009), το οποίο συνδιάζει τις δυνατότητες των εργαλείων geo-processing (γεω-επεξεργασίας) και post-processing (μετα-επεξεργασίας) στη χωρική ανάλυση δεδομένων, με τις δυνατότητες των μοντέλων προσομοίωσης.

Η επιλογή της περιοχής μελέτης έγινε εξαιτίας της μακρόχρονης ερευνητικής ενασχόλησης του Εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης, μέσω ερευνητικών προγραμμάτων, μελετών και των διδακτορικών διατριβών των κ. Α. Καλλιώρα, Ι. Διαμαντή και Χ. Πεταλά.

Για την ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου της περιοχής έρευνας πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση για τις υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής μέσα από παλαιότερες μελέτες και διπλωματικές εργασίες (Καλλιώρας 2010, Καλλιώρας 2008, Καλλιώρας 2006 (a, b, c), Ζαγκλιαβού 2005, Πεταλάς 1997, Διαμαντής 1994). Για την επίτευξη της προσομοίωσης, καθοριστικά δεδομένα λήφθηκαν από τη διδακτορική διατριβή του Καλλιώρα (2008) για το παράκτιο τμήμα του Νομού Ροδόπης.

Η προσομοίωση του υπόγειου συστήματος της περιοχής αφορά την περίοδο Απριλίου - Οκτωβρίου 2003 (αντλητική περίοδος) και πραγματοποιήθηκε με στόχο την κατανόηση της λειτουργίας του υπόγειου υδροφορέα ως προς τα υδραυλικά του χαρακτηριστικά και την διερεύνηση των συνθηκών τροφοδοσίας αυτού με τα υδάτινα σώματα της περιοχής. Η σύγκριση των προσομοιωμένων τιμών στάθμης με τις

μετρημένες τιμές υπαίθρου επιτεύχθηκε με το Head Observation Package (HOB) το οποίο δημιουργήθηκε με τη βοήθεια του Observation Analysis Tool (OAT) κατά το οποίο 41 πηγάδια χρησιμοποιήθηκαν ως πηγάδια παρακολούθησης.

Μετά την πρώτη ρύθμιση του μοντέλου, εφαρμόστηκε ο κώδικας UCODE_2014 (Poeter et al., 2014) για την ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του μοντέλου και για την παραμετροποίηση με στόχο τη βελτίωση της σχέσης των μετρημένων και των υπολογισμένων τιμών στάθμης. Για την εκτίμηση της ευαισθησίας των παραμέτρων χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι fit independent statistics (Hill and Tiedman, 2007). Κατά τη διαδικασία της παραμετροποίησης, οι παράμετροι με τη μεγαλύτερη ευαισθησία εξετάστηκαν. Στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης ήταν η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των διαφορών μετρημένων και υπολογισμένων τιμών στάθμης (Hill and Tiedman 2007, Poeter et al. 2014). Οι νέες υπολογισμένες τιμές στάθμης που προέκυψαν μετά την παραμετροποίηση, συγκρίθηκαν με τις μετρημένες τιμές στάθμης και αξιολογήθηκαν.

1.3. Διάρθρωση της εργασίας

Η μεταπτυχιακή εργασία απαρτίζεται από πέντε κεφάλαια, εκ των οποίων το πρώτο είναι το παρόν (Εισαγωγή).

Στο Κεφάλαιο 2, παρουσιάζονται οι βασικές αρχές προσομοίωσης υπόγειων υδάτων.

Στο Κεφάλαιο 3, περιγράφεται το γεωγραφικό πλαίσιο της περιοχής έρευνας καθώς και οι γεωλογικές, γεωμορφολογικές, υδρολογικές και υδρογεωλογικές της συνθήκες.

Στο Κεφάλαιο 4, γίνεται η εφαρμογή του λογισμικού FREEWAT για την προσομοίωση της ροής των υπόγειων νερών του υπόγειου υδροφόρου συστήματος.

Στο Κεφάλαιο 5, συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη συγκεκριμένη μελέτη και αναφέρονται ορισμένα σημεία που χρήζουν περαιτέρω έρευνας.

2. Μεθοδολογία προσομοίωσης ροής υπόγειων νερών

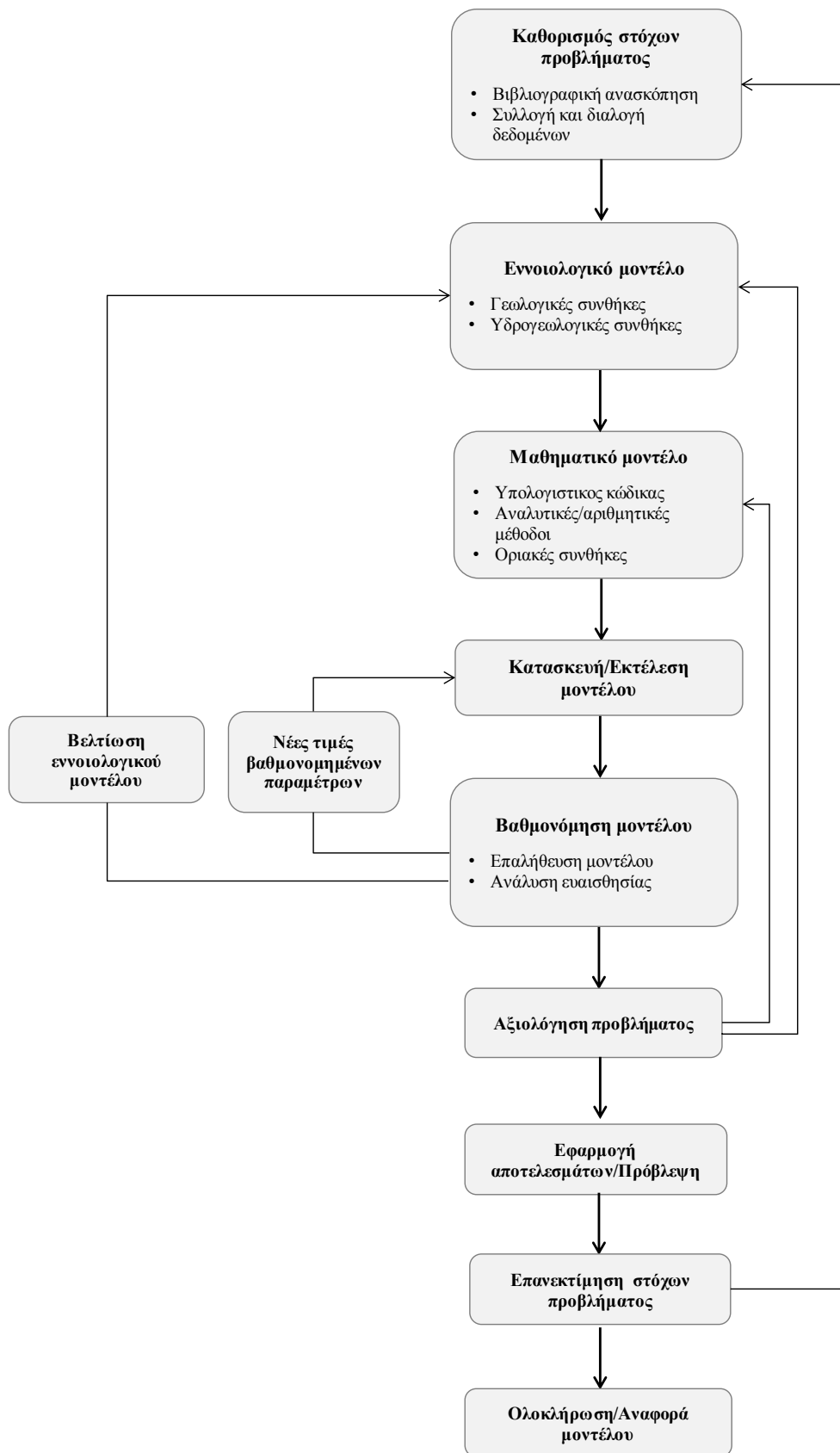
2.1. Εισαγωγή

Η προσομοίωση υπόγειων υδατικών πόρων με τη χρήση ομοιωμάτων αποτελεί συνήθη πρακτική στον τομέα της υδρολογίας. Τα μοντέλα χρησιμοποιούνται για διάφορους σκοπούς, όπως η εκπαίδευση, η υδρολογική έρευνα και η διαχείριση των υδατικών πόρων. Η εφαρμογή ή η χρησιμότητα ενός μοντέλου εξαρτάται από την ακρίβεια των μαθηματικών εξισώσεων στην προσέγγιση του φυσικού συστήματος που προσομοιώνεται (Harbaugh, 2005). Για την εκτίμηση της εφαρμογής ή της χρησιμότητας ενός μοντέλου είναι απαραίτητη η πλήρης κατανόηση του φυσικού συστήματος. Τα μοντέλα υπόγειων νερών προσομοιώνουν την υπόγεια ροή χρησιμοποιώντας μαθηματικές εξισώσεις, οι οποίες βασίζονται σε απλοποιημένες παραδοχές. Εξαιτίας των απλοποιημένων παραδοχών που ενσωματώνονται στις μαθηματικές εξισώσεις και της αβεβαιότητας των τιμών των δεδομένων που απαιτούνται από το μοντέλο, ένα μοντέλο πρέπει να θεωρείται ως μία προσέγγιση και όχι ως μία ακριβής αναπαράσταση των συνθηκών υπαίθρου (Baalousha, 2011). Συνεπώς, ένα μοντέλο συνιστά μία απλοποιημένη αναπαράσταση ενός πραγματικού συστήματος υπόγειων υδάτων, εκφραζόμενο με μαθηματικές εξισώσεις που επιλύονται από ένα πρόγραμμα υπολογιστή (Reilly and Harbaugh, 2004).

2.2. Μεθοδολογία εφαρμογής και ανάπτυξης μοντέλων

Τα υδρογεωλογικά μοντέλα έχουν ως στόχο την έρευνα της απόκρισης του συστήματος κατά τη διάρκεια συγκεκριμένων συνθηκών ή της πρόβλεψης της συμπεριφοράς του στο μέλλον.

Η μεθοδολογία της προσομοίωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1. Το πρώτο βήμα είναι ο προσδιορισμός των στόχων του μοντέλου. Η συλλογή και η επεξεργασία των δεδομένων είναι ένα βασικό θέμα στη διαδικασία προσομοίωσης. Το πιο ουσιαστικό και θεμελιώδες βήμα όμως είναι η κατασκευή του εννοιολογικού μοντέλου (conceptualization). Η ρύθμιση (calibration), επαλήθευση (verification) και η ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis) εφαρμόζονται μετά την ολοκλήρωση του μοντέλου και την πρώτη ρύθμιση του (Reilly and Harbaugh, 2004).



Σχήμα 2. 1. Μεθοδολογία προσομοίωσης (Reilly and Harbaugh, 2004 με τροποποιήσεις)

2.3. Προσδιορισμός στόχων μοντέλου

Τα μοντέλα υπόγειων νερών λειτουργούν ως συστήματα υποστήριξης αποφάσεων σχετικά με την ποιότητα ή την ποσότητα του νερού. Ανάλογα με το σκοπό του μοντέλου το είδος της προσέγγισης και τη κατηγορία του μοντέλου μπορούν να διαφέρουν. Τα μοντέλα χωρίζονται σε ερμηνευτικά (interpretive), προγνωστικά (predictive) ή γενικού τύπου (generic) (Baalousha, 2011). Τα ερμηνευτικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για τη μελέτη μίας συγκεκριμένης περίπτωσης και για την ανάλυση της ροής των υπόγειων υδάτων ή τη μεταφορά των ρύπων. Τα προγνωστικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της μεταβολής των φορτίων των υπόγειων υδάτων ή της συγκέντρωσης της διαλυτής ουσίας στο μέλλον. Τα μοντέλα γενικού τύπου χρησιμοποιούνται για την ανάλυση διαφορετικών σεναρίων σχετικά με τη διαχείριση των υδατικών πόρων.

Οι στόχοι των μοντέλων υπόγειων υδάτων αναφέρονται ως εξής:

- Πρόβλεψη της υπόγειας ροής και της μεταβολής των φορτίων χρονικά και χωρικά
- Διερεύνηση της επίδρασης της άντλησης των υπόγειων υδάτων από γεωτρήσεις στο υδρολογικό ισοζύγιο και η πρόβλεψη της αναμενόμενης πτώσης στάθμης
- Διερεύνηση της επίδρασης των ανθρώπινων δραστηριοτήτων (απόρριψη αποβλήτων, γεωργικές δραστηριότητες, χώροι υγειονομικής ταφής) στην ποιότητα των υπόγειων υδάτων
- Ανάλυση διαφορετικών διαχειριστικών σεναρίων σε συστήματα υπόγειων υδάτων, ποσοτικά και ποιοτικά

Ανάλογα με το αντικείμενο της μελέτης, την περιοχή έρευνας και το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα, η επιλογή του μοντέλου και οι απαιτήσεις των δεδομένων μεταβάλλονται. Για παράδειγμα αν το αντικείμενο της μελέτης είναι μία περιφερειακή εκτίμηση της ροής των υπόγειων υδάτων, τότε ένα λιγότερο λεπτομερές μοντέλο (coarse) μπορεί να είναι ικανοποιητικό. Αντίθετα αν η περιοχή έρευνας είναι μικρή, τότε ένα λεπτομερές δίκτυο (fine-grid model) με υψηλής πυκνότητας δεδομένα είναι απαραίτητα.

2.4. Εννοιολογικό μοντέλο

Ένα εννοιολογικό μοντέλο είναι μία περιγραφική αναπαράσταση ενός υπόγειου συστήματος, το οποίο ερμηνεύει τις γεωλογικές και υδρολογικές του συνθήκες. Ο καθορισμός του εννοιολογικού μοντέλου είναι το επόμενο στάδιο μετά τον προσδιορισμό του αντικειμένου του μοντέλου. Για τη δόμηση ενός εννοιολογικού μοντέλου είναι απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τη γεωλογία, την υδρολογία, τις οριακές συνθήκες και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα. Ένα ικανοποιητικό εννοιολογικό μοντέλο πρέπει να περιγράφει την πραγματικότητα με έναν απλό τρόπο που να ικανοποιεί τους στόχους της προσομοίωσης και τις διαχειριστικές απαιτήσεις (Bear and Verruijt, 1987).

Τα βασικά στοιχεία τα οποία θα πρέπει να περιλαμβάνει ένα εννοιολογικό μοντέλο είναι τα ακόλουθα:

- Γεωμετρία υδροφορέα
- Οριακές συνθήκες
- Υδραυλικά χαρακτηριστικά υδροφορέα
- Συνθήκες τροφοδοσίας
- Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα

Μόλις κατασκευαστεί το εννοιολογικό μοντέλο, μπορεί να ρυθμιστεί το μαθηματικό μοντέλο. Το μαθηματικό μοντέλο αντιπροσωπεύει το εννοιολογικό μοντέλο και τις παραδοχές που έγιναν με τη μορφή μαθηματικών εξισώσεων που μπορούν να λυθούν είτε αναλυτικά είτε αριθμητικά.

2.5. Ταξινόμηση μοντέλων υπόγειων υδάτων

Σύμφωνα με τον (Rausch, 2010) τα μοντέλα ταξινομούνται σε 3 κατηγορίες: φυσικά, αναλογικά και μαθηματικά.

2.5.1 Φυσικά μοντέλα

Τα φυσικά μοντέλα κατασκευάζονται σε εργαστήρια για τη μελέτη συγκεκριμένων προβλημάτων ροής ή μεταφοράς ρύπων. Παράδειγμα φυσικού μοντέλου είναι οι δεξαμενές άμμου. Είναι χρήσιμα και εύκολα να κατασκευαστούν, δεν μπορούν όμως να διαχειριστούν πολύπλοκα προβλήματα.

2.5.2. Αναλογικά μοντέλα

Το πιο γνωστό αναλογικό μοντέλο είναι η ροή ηλεκτρικής ενέργειας. Βασίζεται στην ομοιότητα μεταξύ του Νόμου Ohm για τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος και του Νόμου του Darcy για την κίνηση των υπόγειων υδάτων. Όπως το ηλεκτρικό ρεύμα κινείται από την υψηλότερη τάση στη χαμηλότερη, ομοίως κινείται και το υπόγειο νερό από τα υψηλότερα προς τα χαμηλότερα φορτία.

2.5.3. Μαθηματικά μοντέλα

Τα μαθηματικά μοντέλα αναδιατυπώνουν ένα υπόγειο σύστημα υδάτων με μαθηματικές εξισώσεις. Αυτές οι εξισώσεις διαμορφώνονται με βάση τις οριακές συνθήκες, τις αρχικές συνθήκες και τις φυσικές ιδιότητες του υδροφορέα. Τα μαθηματικά μοντέλα επιτρέπουν μία γρήγορη και εύκολη διαχείριση σύνθετων καταστάσεων. Μετά την κατασκευή τους, οι προκύπτουσες εξισώσεις μπορούν να λυθούν είτε με αναλυτικές είτε με αριθμητικές μεθόδους.

2.5.3.1. Αναλυτικές μέθοδοι

Εφαρμόζονται για απλοποιημένα προβλήματα υπόγειων νερών και μεταφοράς ρύπων. Τα πλεονεκτήματα των αναλυτικών μεθόδων είναι ότι είναι εύκολο να εφαρμοστούν και να παράγουν συνεχή και ακριβή αποτελέσματα για απλά προβλήματα. Ωστόσο, χαρακτηρίζονται από πολλές παραδοχές ως προς την ανισοτροπία και την ομοιογένεια του υδροφόρου με αποτέλεσμα να μην μπορούν να διαχειριστούν σύνθετα υπόγεια συστήματα.

2.5.3.2. Αριθμητικές μέθοδοι

Οι αναλυτικές μέθοδοι πραγματοποιούν αρκετές παραδοχές, απλοποιήσεις και εκτιμήσεις οι οποίες δεν είναι ρεαλιστικές με αποτέλεσμα να μην μπορούν να εφαρμοσθούν σε σύνθετα προβλήματα. Οι αριθμητικές μέθοδοι αναπτύχθηκαν για να διαχειριστούν την πολυπλοκότητα των υπόγειων συστημάτων. Περιλαμβάνουν αριθμητικές λύσεις ενός συνόλου αλγεβρικών εξισώσεων σε διακριτές τιμές φορτίων σε επιλεγμένους κόμβους. Οι πιο γνωστές αριθμητικές μέθοδοι είναι οι αυτές των πεπερασμένων διαφορών και των πεπερασμένων στοιχείων.

2.5.3.2.1. Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών

Χρησιμοποιείται στις μελέτες υπόγειων νερών από τις αρχές του 1960. Μελετήθηκε από τους Newton, Gauss, Bessel και Laplace (Pinder and Gray, 1977). Με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών FDM, το συνεχές σύστημα αντικαθίσταται από διακριτά σημεία στο χώρο και στο χρόνο και οι μερικές παράγωγοι αντικαθίστανται από όρους που υπολογίζονται από τις διαφορές στις τιμές της στάθμης στα σημεία αυτά. Προκύπτουν συστήματα γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων, η επίλυση των οποίων παρέχει τιμές της στάθμης σε ορισμένα σημεία και χρόνους. Αυτές οι τιμές στάθμης απαρτίζουν μία προσέγγιση των πραγματικών τιμών της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα σε σχέση με το χρόνο.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών είναι ότι είναι εύκολο να εφαρμοσθεί, τεκμηριώνεται εύκολα και παράγει καλά αποτελέσματα. Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι η δυσκολία προσαρμογής σε ακανόνιστα όρια μοντέλων. Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο υπογείων υδάτων που βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών είναι το MODFLOW (Harbaugh and McDonald, 1996).

2.5.3.2.2. Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων το πεδίο του μοντέλου (model domain) διαχωρίζεται σε στοιχεία. Τα στοιχεία μπορούν να είναι τριγωνικά, ορθογώνια ή πρισματικά. Τα βασικά χαρακτηριστικά της μεθόδου είναι ότι οι ιδιότητες καταχωρούνται στους κόμβους και οι κόμβοι τοποθετούνται στα όρια της ροής (flux boundaries). Το κυρίαρχο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η καλύτερη προσαρμογή σε ακανόνιστα όρια και σε συνθήκες ανισοτροπίας. Παρόλα αυτά το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων είναι δύσκολο να κατασκευασθεί και απαιτεί χρόνο, ειδικά σε σύνθετα προβλήματα. Τα πιο γνωστά μοντέλα υπόγειων υδάτων με πεπερασμένα στοιχεία είναι τα Feflow (Diersch, 2005) και MODFE (Torak, 1993).

2.6. Υπολογιστικός κώδικας MODFLOW

Ο κώδικας MODFLOW αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για τον προσομοίωση της υπόγειας ροής με τη χρήση μεθόδων πεπερασμένων διαφορών και συνδιάζοντας το Νόμο του Darcy και την εξίσωση συνέχειας. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο κώδικα είναι δυνατό να προσομοιωθούν προβλήματα μονοδιάστατης, διδιάστατης ή τριδιάστατης ροής όπως επίσης και μόνιμης ή μη μόνιμης ροής.

2.6.1. Μαθηματική περιγραφή

Η τρισδιάστατη κίνηση των υπόγειων νερών σταθερής πυκνότητας μέσω του πορώδους γεωλογικού υλικού μπορεί να περιγραφεί για τους ελεύθερους υδροφόρους ορίζοντες από την εξίσωση (Harbaugh, 2005):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z h \frac{\partial h}{\partial z} \right) \pm W = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.1)$$

Ενώ για τους υπό πίεση υδροφόρους από την εξίσωση (Harbaugh, 2005):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(T_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \pm W = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.2)$$

όπου:

K_x , K_y και K_z , οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας κατά μήκος των x , y και z αξόνων συντεταγμένων, που θεωρούνται παράλληλοι προς τους κυρίους άξονες της υδραυλικής αγωγιμότητας (LT^{-1}),

T_x , T_y και T_z , οι τιμές της μεταβιβαστικότητας κατά μήκος των x , y και z αξόνων συντεταγμένων, που θεωρούνται παράλληλοι προς τους κυρίους άξονες της μεταβιβαστικότητας (L^2T^{-1}),

h , το υδραυλικό φορτίο (L),

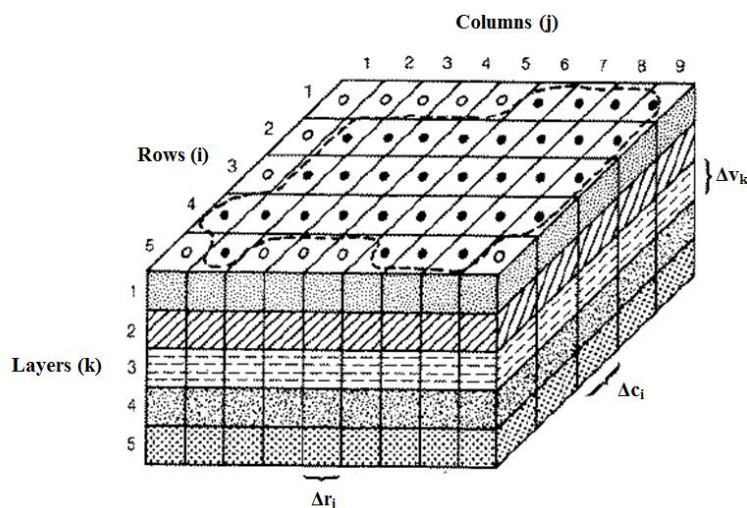
W , η ογκομετρική ροή (flux) ανά μονάδα όγκου και αναπαριστά εισροές και /ή εκροές του νερού (LT^{-1}),

S , ο συντελεστής υδροχωρητικότητας, S_y η ειδική απόδοση του πορώδους υλικού και t ο χρόνος (T).

2.6.2. Χωρική διακριτοποίηση

Το βασικό χαρακτηριστικό των αριθμητικών μοντέλων είναι η αναπαράσταση του φυσικού συστήματος από διακριτούς όγκους υλικού (discrete volumes of material). Στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών οι διακριτοί όγκοι ονομάζονται κελιά (cells) και το μέγεθος τους καθορίζει την ακρίβεια του μοντέλου (Reilly και Harbaugh, 2004). Η διακριτοποίηση του πεδίου ορισμού του μοντέλου (model domain) υλοποιείται υποδιαιρώντας τη συνολική επιφάνεια σε επιμέρους κελιά. Το μέγεθος κάθε κελιού ορίζεται από το χειριστή κατά τη διάρκεια της προεπεξεργαστικής διαδικασίας (model – preprocessing) και θεωρείται ομοιογενές τόσο κατά σειρά όσο και κατά στήλη.

Το Σχήμα 2.2, παρουσιάζει τη χωρική διακριτοποίηση ενός υδροφορέα με ένα πλέγμα κελιών τα οποία περιγράφονται από σειρές (i), στήλες (j) και γραμμές (k). Οι τιμές που αντιστοιχούν στα κελιά του πλέγματος αντιπροσωπεύουν τη γεωμετρία του συστήματος, τις ιδιότητες του υδροφορέα, τις οριακές συνθήκες, τις αρχικές συνθήκες και τις πιέσεις που εφαρμόζονται στο σύστημα για την αναπαράσταση των πραγματικών συνθηκών υπαίθρου.



Σχήμα 2. 2. Διακριτοποιημένο τμήμα υδροφορέα (Harbaugh, 2005 με τροποποιήσεις)

Όπου:

- - - - Όριο υδροφορέα
- Ενεργό κελί
- Ανενεργό κελί

Δr_j πλάτος κελιού στη διεύθυνση της σειράς (ο δείκτης j υποδηλώνει τον αριθμό των στηλών)

Δc_i πλάτος κελιού στη διεύθυνση της στήλης (ο δείκτης i υποδηλώνει τον αριθμό των γραμμών)

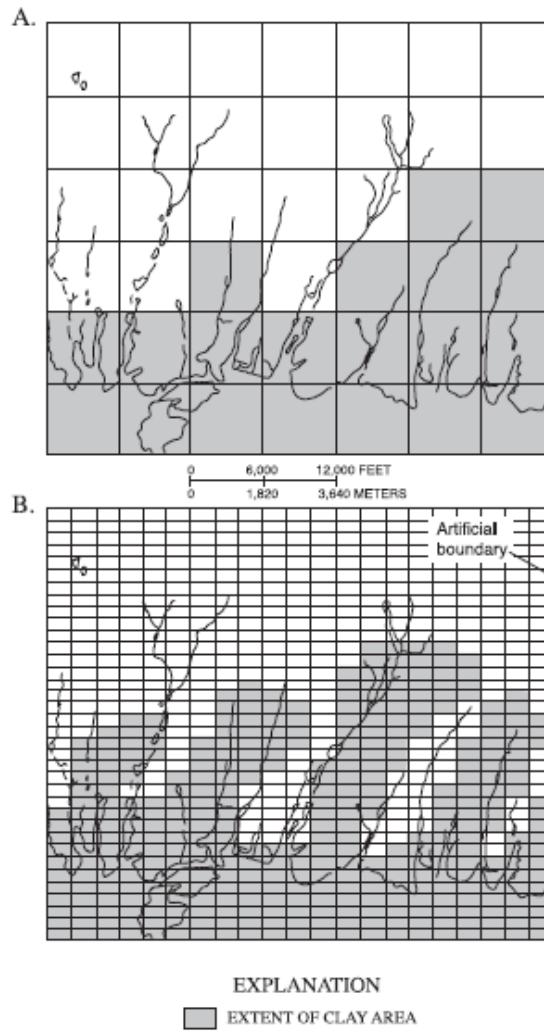
Δv_k πάχος κελιού

$\Delta r_j * \Delta c_i * \Delta v_k$ Όγκος κελιού με συντεταγμένες (i, j, k)

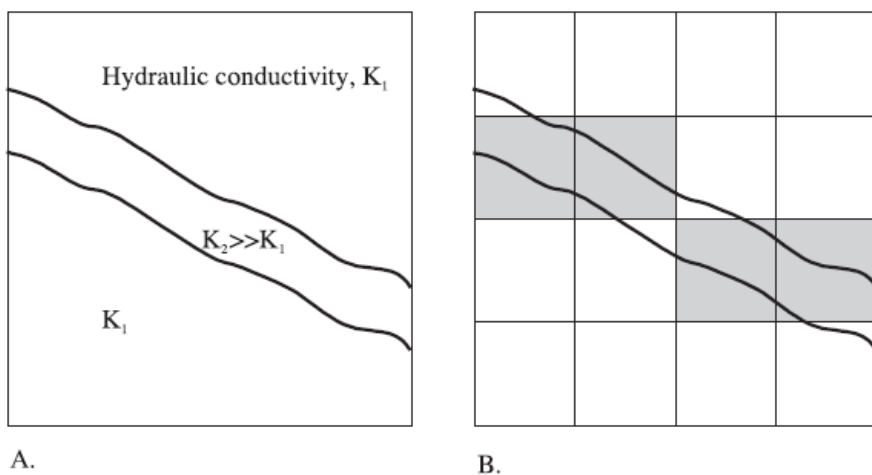
Το μέγεθος των κελιών καθορίζει την έκταση στην οποία οι υδραυλικές ιδιότητες μπορούν να ποικίλουν σε όλη την περιοχή μελέτης. Τα υδραυλικά χαρακτηριστικά ορίζονται για κάθε κελί, έτσι ώστε όσο περισσότερα είναι τα κελιά, τόσο μεγαλύτερη να είναι η δυνατότητα μεταβολής των υδραυλικών παραμέτρων. Επίσης, αν το μέγεθος του κελιού είναι πολύ μεγάλο, τότε σημαντικά χαρακτηριστικά μπορεί να περιγραφούν ανεπαρκώς.

Για παράδειγμα στο Σχήμα 2.3, παρουσιάζονται οι διαφορές στην αναπαράσταση του παράκτιου συστήματος του Long Island της Νέας Υόρκης (Buxton and Reilly, 1987). Παρατηρείται ότι στην περίπτωση B, όπου το δίκτυο αποτελείται από μικρότερου μεγέθους κελιά σε σχέση με την περίπτωση A, οι θέσεις τις αργίλου, όπου απουσιάζουν στην περίπτωση A, αντιπροσωπεύονται με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Επιπλέον, το μεγάλο μέγεθος των κελιών μπορεί να διαταράξει τη συνέχεια των γεωλογικών σχηματισμών. Για παράδειγμα στο Σχήμα 2.4, παρουσιάζεται ένα κανάλι μεγάλης υδραυλικής αγωγιμότητας το οποίο γίνεται ασυνεχές όταν διακριτοποιείται με κελιά πεπερασμένης διαφοράς που είναι πολύ μεγάλου μεγέθους για να καθορίσουν με λεπτομέρεια τα σημαντικά χαρακτηριστικά του καναλιού. Συνεπώς, σε ένα μοντέλο με αυτή τη διακριτοποίηση η επίδραση του αγωγού υψηλής υδραυλικής αγωγιμότητας δεν αντιπροσωπεύεται επαρκώς, επειδή δεν αναπαρίσταται ως κανάλι αλλά ως ένα σύνολο ασυνεχών κελιών υψηλής υδραυλικής αγωγιμότητας.

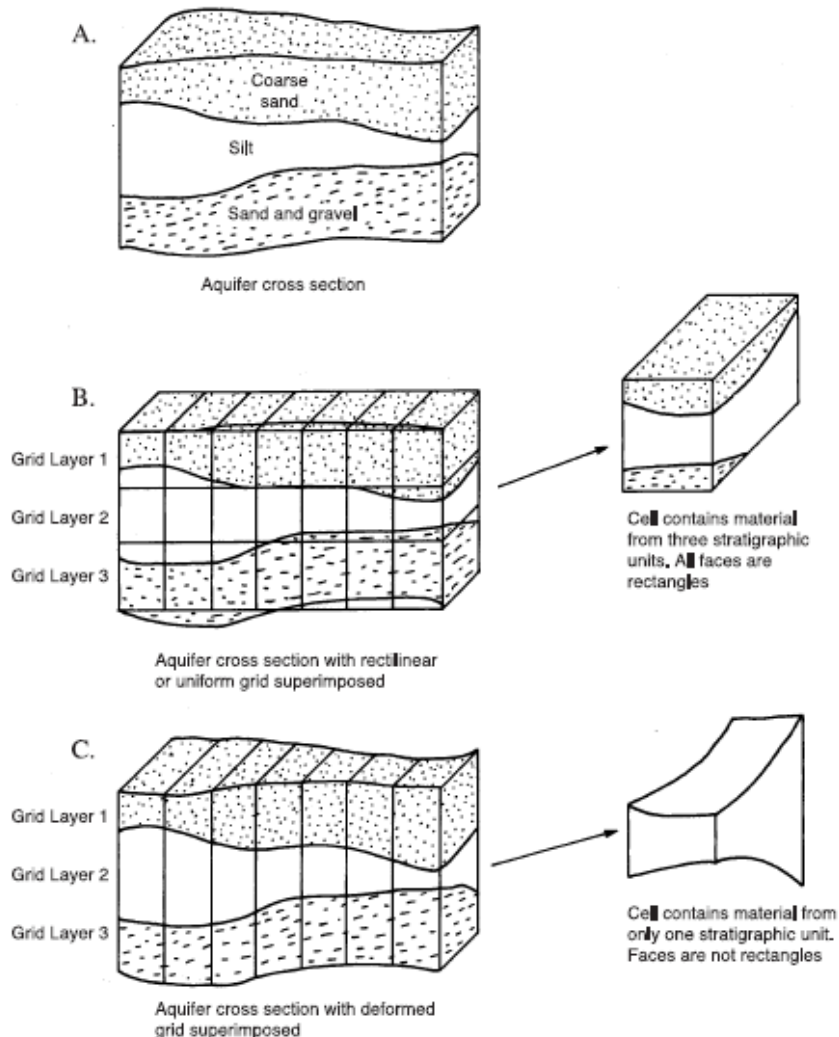


Σχήμα 2. 3. Διαφορές στην αναπαράσταση του παράκτιου συστήματος του Long Island της Νέας Υόρκης (Buxton and Reilly, 1987)



Σχήμα 2. 4. Κανάλι υψηλής υδραυλικής αγωγιμότητας το οποίο αναπαρίσταται ασυνεχές εξαιτίας του μεγάλου μεγέθους κελιών (Reilly and Harbaugh, 2004)

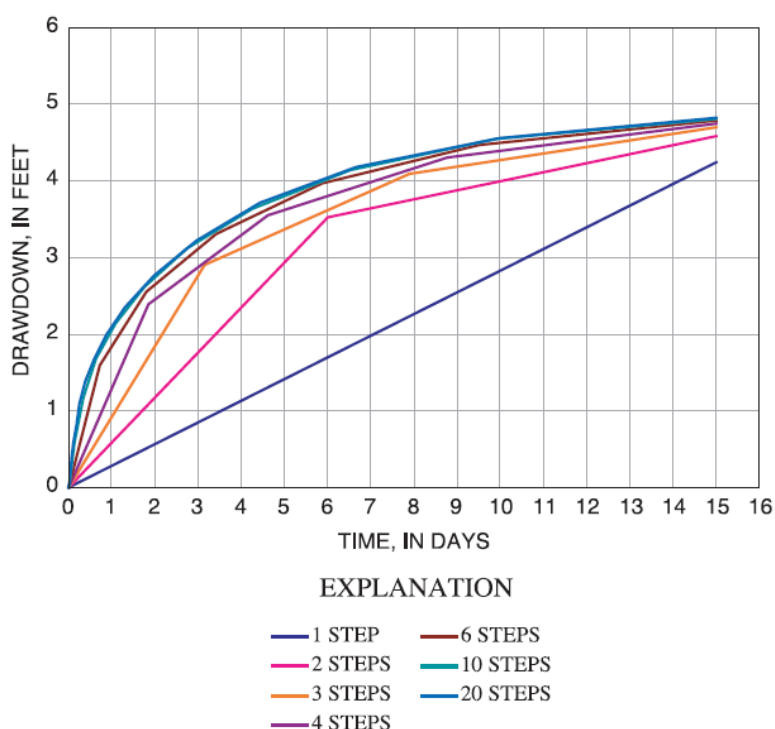
Τα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών επιτρέπουν τα πλάτη των σειρών και των στηλών να μεταβάλλονται. Η χρήση δικτύων μεταβλητού διαστήματος (variable grid spacing) σε σχέση με τα δίκτυα οριζόντιου διαστήματος (horizontal grid spacing), επιτρέπει ευελιξία ως προς το μέγεθος των κελιών. Στην κατακόρυφη διεύθυνση χρησιμοποιούνται δύο προσεγγίσεις για την αναπαράσταση του υδρογεωλογικού πλαισίου μιας περιοχής, τα ομοιόμορφα στρώματα (uniform model layers) (ευθύγραμμο πλέγμα) και τα παραμορφωμένα στρώματα (deformed model layers) τα οποία απεικονίζονται στο Σχήμα 2.5. Τα παραμορφωμένα στρώματα, επιτρέπουν την οριζόντια συνέχεια να διατηρηθεί με λιγότερα κελιά, εισάγοντας όμως σφάλμα στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών.



Σχήμα 2. 5. Σχήματα κατακόρυφης διακριτοποίησης (Α) διατομή υδροφορέα, (Β) διατομή υδροφορέα με ομοιόμορφο δίκτυο, (C) διατομή υδροφορέα με παραμορφωμένο δίκτυο (Reilly and Harbaugh, 2004)

2.6.3. Χρονική διακριτοποίηση

Η προσομοίωση του υδρογεωλογικού συστήματος εφαρμόζεται για σταθερή κατάσταση και συνθήκες μεταβαλλόμενης ροής. Στην προσομοίωση σταθερής κατάστασης, οι τιμές εισόδου όσο και οι τιμές εξόδου του μοντέλου παραμένουν σταθερές. Στην προσομοίωση της μεταβαλλόμενης ροής, οι τιμές εισόδου και οι τιμές εξόδου του μοντέλου μεταβάλλονται με το χρόνο. Ο χρόνος χωρίζεται σε χρονικά βήματα (time steps) και το υδραυλικό φορτίο υπολογίζεται στο τέλος κάθε χρονικού βήματος. Για την προσομοίωση μίας σύνθετης κατάστασης απαιτούνται πολλαπλά χρονικά βήματα (Reilly and Harbaugh, 2004). Στο Σχήμα 2.6, παρουσιάζεται η επίδραση των διαφορετικών αριθμών χρονικών βημάτων για την προσομοίωση ενός πηγαδιού άντλησης. Κάθε χρονικό βήμα είναι 1.5 φορές μεγαλύτερο από το προηγούμενο χρονικό βήμα. Η χρήση έξι ή περισσότερων χρονικών βημάτων παράγει σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα, αλλά τέσσερα ή λιγότερα χρονικά βήματα παράγουν πολύ διαφορετικά αποτελέσματα, ειδικά σε πρώιμο στάδιο.



Σχήμα 2. 6. Σχέση ρυθμού άντλησης και χρόνου για διαφορετικά χρονικά βήματα (Reilly and Harbaugh, 2004)

2.6.4. Εξίσωση πεπερασμένης διαφοράς

Η εξίσωση πεπερασμένης διαφοράς του MODFLOW θεωρώντας σταθερή την πυκνότητα του υγρού είναι η ακόλουθη (Harbaugh, 2005):

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V \quad (2.3)$$

Όπου:

Q_i , ο συνολικός ρυθμός παροχής σε κάθε block (L^3T^{-1})

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

Δh , η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου για χρονικό διάστημα Δt

ΔV , ο όγκος του συγκεκριμένου block (L^3)

2.6.5. Νόμος Darcy

Ο Νόμος του Darcy ορίζει τη μονοδιάστατη ροή σε ένα πρίσμα από πορώδες υλικό (Σχήμα 2.7) ως εξής:

$$Q = \frac{KA(h_1 - h_2)}{L} \quad (2.4)$$

Όπου,

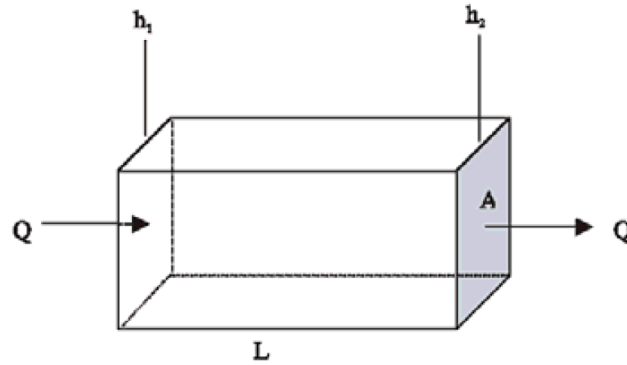
Q , ο συνολικός ρυθμός παροχής σε κάθε block (L^3T^{-1})

K , η υδραυλική αγωγιμότητα (hydraulic conductivity) του υλικού στην κατεύθυνση της ροής (LT^{-1})

A , η επιφάνεια εγκάρσιας διατομής κάθετα στη ροή (L^2)

$h_1 - h_2$, η διαφορά υδραυλικού φορτίου κατά μήκος του πρίσματος παράλληλα στη ροή (L)

L , το μήκος του πρίσματος παράλλη με τη διεύθυνση της ροής (L)



Σχήμα 2. 7. Εφαρμογή του Νόμου του Darcy σε πρίσμα από πορώδες υλικό (McDonald and Harbaugh, 1988)

Ο όρος της μεταβιβαστικότητας (conductance) ορίζεται ως:

$$C = \frac{KA}{L} \quad (2.5)$$

Επομένως ο Νόμος του Darcy προκύπτει ως εξής:

$$Q = C(h_1 - h_2) \quad (2.6)$$

2.6.6. Απαιτήσεις δεδομένων

Μετά την κατασκευή του δικτύου της περιοχής μελέτης, πρέπει να καθορισθούν οι υδραυλικές ιδιότητες κάθε κελιού. Κατά την προσομοίωση ενός πραγματικού συστήματος, δεν είναι γνωστές οι υδραυλικές παράμετροι για κάθε κελί του δικτύου, επομένως πρέπει να γίνει παρεμβολή των περιορισμένων μετρήσεων υπαίθρου. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι παρεμβολής (μέθοδος πλησιέστερου γείτονα, μέθοδος των βαρών, μέθοδος αντιστρόφου απόστασης) η καθεμία από τις οποίες παράγει διαφορετικές κατανομές παραμέτρων. Σύμφωνα με τους (Reilly and Harbaugh, 2004) είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται η απλούστερη μέθοδος παρεμβολής η οποία να είναι σύμφωνη με τα γνωστά δεδομένα.

Τα απαραίτητα δεδομένα για την ορθή απεικόνιση του υδρογεωλογικού συστήματος είναι η μεταβιβαστικότητα (T) και η υδραυλική αγωγιμότητα (K). Σημαντική είναι η εισαγωγή του πάχους του υδροφορέα ή των γεωλογικών στρωμάτων της περιοχής έρευνας. Επίσης, ανάλογα με το είδος του υδροφόρου (υπό – πίεση και ελεύθερος) υπολογίζεται ο συντελεστής αποθηκευτικότητας (S) και/ή η ειδική απόδοση (μ).

2.6.7. Οριακές συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες (Harbaugh, 2005):

- Σταθερού φορτίου (specified head) (ονομάζεται επίσης όριο Dirichlet ή όριο τύπου I). Μπορεί να εκφραστεί με μαθηματική έκφραση ως: $h(x, y, z, t) = \text{σταθερό}$
- Σταθερής ροής (specified flow) (ονομάζεται επίσης όριο Neumann ή όριο τύπου II). Με μαθηματική μορφή εκφράζεται ως: $\nabla h(x, y, z, t) = \text{σταθερό}$
- Μεταβαλλόμενης ροής, εξαρτώμενη από το φορτίο (head-dependent flow) (ονομάζεται επίσης όριο Cauchy ή όριο τύπου III). Η μαθηματική του έκφραση είναι: $\nabla h(x, y, z, t) + a * h = \text{σταθερό}$ (όπου “a” είναι μια σταθερά)

Η επιλογή των οριακών συνθηκών αλλά και η αριθμητική ή μαθηματική τους αναπαράσταση στο μοντέλο είναι ιδιαίτερα σημαντική και εξαρτάται από το αντικείμενο της εκάστοτε μελέτης (Franke et al., 1987; Reilly and Harbaugh, 2004).

Η στάθμη του υπόγειου νερού υπολογίζεται σε ένα σημείο της κυψελίδας το οποίο ονομάζεται κόμβος. Στην προσομοίωση με block – centered σύστημα οι κόμβοι βρίσκονται στο κέντρο των κυψελίδων. Ο Reilly (2001) διερεύνησε διάφορα είδη φυσικών χαρακτηριστικών και τις ισοδύναμες μαθηματικές τους εκφράσεις.

- Κυψελίδες σταθερού φορτίου (constant – head): στις κυψελίδες σταθερού φορτίου η στάθμη διατηρεί σταθερή την τιμή της κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, ενώ η ποσότητα του νερού που εισέρχεται ή εξέρχεται από την κυψελίδα μεταβάλλεται ανάλογα με τη στάθμη των γειτονικών κυψελίδων
- Κυψελίδες χωρίς ροή (no flow/inactive): στις κυψελίδες χωρίς ροή οι εισροές προς το σύστημα είναι μηδενικές και καμία ροή νερού δεν πραγματοποιείται
- Κυψελίδες μεταβαλλόμενου φορτίου (variable – head): στις κυψελίδες μεταβαλλόμενου φορτίου η στάθμη δεν έχει σταθερή τιμή και μεταβάλλεται ελεύθερα με το χρόνο
- Κυψελίδες σταθερής εισροής (constant – flux/general head boundaries): στις κυψελίδες σταθερής εισροής, η εισροή παραμένει σταθερή για την κυψελίδα αλλά η στάθμη μεταβάλλεται ανάλογα με τις μεταβολές στις γειτονικές κυψελίδες

Ο κώδικας MODFLOW ορίζει ένα σταθερό όριο του πιεζομετρικού φορτίου (Συνθήκη Dirichlet). Δύναται όμως η δυνατότητα προσομοίωσης των οριακών συνθηκών για συστήματα με σταθερή ροή ή ακόμα και στην περίπτωση του Προβλήματος Neumann, χρησιμοποιώντας εξωτερικές πηγές στο εσωτερικό των ορίων.

2.6.7.1. Οριακές συνθήκες γεωτρήσεων (Well Package, WEL)

Οι οριακές συνθήκες αυτού του πακέτου, χρησιμοποιούνται για να προσομοιώσουν γεωτρήσεις που είτε απομακρύνουν είτε προσθέτουν μία καθορισμένη εισροή στον υδροφόρο ορίζοντα με σταθερό ρυθμό κατά τη διάρκεια μίας περιόδου φόρτισης.

Ο χρήστης πρέπει να καθορίσει για κάθε περίοδο φόρτισης, τη σειρά, τη στήλη και τον αριθμό του στρώματος στο οποίο εφαρμόζεται η γεώτρηση και το ρυθμό άντλησης. Η παροχή ορίζεται σε μονάδες μήκους προς χρόνο (L^3/T). Αρνητικές τιμές παροχής χρησιμοποιούνται για πηγάδια άντλησης ενώ θετικές τιμές παροχής για πηγάδια επαναφόρτισης.

2.6.7.2. Οριακές συνθήκες εμπλουτισμού (Recharge Package, RCH)

Οι οριακές συνθήκες του πακέτου εμπλουτισμού, χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση μίας συγκεκριμένης εισροής, η οποία κατανέμεται στην κορυφή του μοντέλου και καθορίζεται σε μονάδες μήκους προς χρόνο [L/T]. Στη συνέχεια, αυτοί οι ρυθμοί πολλαπλασιάζονται με την οριζόντια έκταση των κελιών $DELR_j DELC_i$ προκειμένου να υπολογισθούν οι ρυθμοί ογκομετρικής ροής [L^3/T].

Ο εμπλουτισμός που εφαρμόζεται στο μοντέλο ορίζεται ως:

$$QR_{i,j} = I_{i,j} DELR_j DELC_i \quad (2.7)$$

Όπου,

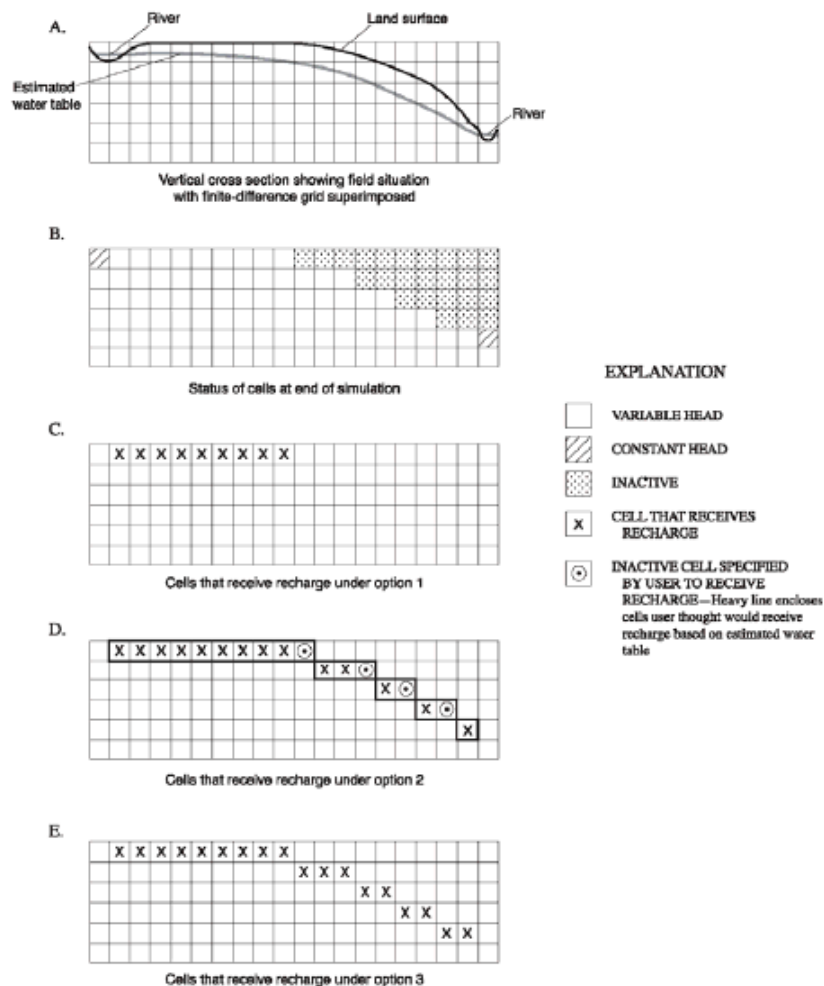
$QR_{i,j}$, ο συνολικός ρυθμός παροχής (L^3T^{-1})

$I_{i,j}$, ο ρυθμός επαναφόρτισης (LT^{-1}) που εφαρμόζεται στην περιοχή έρευνας $DELR_j DELC_i$

Υπάρχουν τρεις περιπτώσεις για τον καθορισμό του ρυθμού επαναφόρτισης κάθε κελιού σε κάθε κατακόρυφη στήλη κελιών: (i) εφαρμογή του εμπλουτισμού στο

πρώτο στρώμα, (ii) εφαρμογή του εμπλουτισμού σε οποιοδήποτε κελί της κατακόρυφης στήλης και (iii) εφαρμογή του εμπλουτισμού στο ανώτερο κελί μεταβλητού φορτίου στην κατακόρυφη στήλη, με την προϋπόθεση να μην βρίσκεται κανένα κελί σταθερού φορτίου πάνω από το κελί μεταβλητού φορτίου.

Στις περιπτώσεις (i), (ii) αν το κελί που έχει ορισθεί να δεχθεί εμπλουτισμό έχει οριακή συνθήκη σταθερού φορτίου (constant-head) ή δεν εμφανίζει ροή (no-flow) τότε δεν προστίθεται εμπλουτισμός. Στην περίπτωση (iii) αν το κελί που έχει ορισθεί να δεχθεί εμπλουτισμό έχει οριακή συνθήκη σταθερού φορτίου (constant-head) και πάνω από αυτό δεν βρίσκεται άλλο κελί με οριακή συνθήκη μεταβλητού φορτίου τότε δεν προστίθεται εμπλουτισμός. Στο Σχήμα 2.8, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα των τριών περιπτώσεων.



Σχήμα 2. 8. Υποθετικό πρόβλημα το οποίο παρουσιάζει τις περιπτώσεις εμπλουτισμού του υδροφόρα (McDonald and Harbaugh,1988)

Το Σχήμα 2.8-C αντιπροσωπεύει την περίπτωση (i). Σύμφωνα με αυτή την περίπτωση, ο εμπλουτισμός επιτρέπεται μόνο στο ανώτερο στρώμα του μοντέλου και όχι στα κελιά που δεν χαρακτηρίζονται από ροή.

Το Σχήμα 2.8-D αντιπροσωπεύει την περίπτωση (ii) στην οποία ο χρήστης καθορίζει πριν από την προσομοίωση τα κελιά στα οποία θα εφαρμοσθεί εμπλουτισμός, τα οποία διαφέρουν ελάχιστα από αυτά που προκύπτουν από την προσομοίωση. Τέσσερα από τα κελιά που έχει ορίσει ο χρήστης έχουν μετατραπεί σε κελιά μηδενικής ροής με αποτέλεσμα να μη δέχονται εμπλουτισμό.

Το Σχήμα 2.8-E αντιπροσωπεύει την περίπτωση (iii) όπου ο εμπλουτισμός πραγματοποιείται στο ανώτερο κελί μεταβλητού φορτίου, εκτός από τα κελιά σταθερού φορτίου που αντιπροσωπεύουν το ποτάμι και βρίσκονται πάνω από τα κελιά μεταβλητού φορτίου. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται μία συνεχής κατανομή του εμπλουτισμού και επομένως είναι η πιο κατάλληλη επιλογή.

2.6.7.3. Οριακές συνθήκες σταθερής εισροής (General Head Boundary Package, GHB)

Η συνάρτηση του πακέτου σταθερής εισροής προσομοιώνει τη ροή που εισέρχεται ή εξέρχεται σε ένα κελί από μία οποιαδήποτε εξωτερική πηγή (πχ. ένα επιφανειακό σώμα νερού) ανάλογα της υδραυλικής κλίσης μεταξύ της ίδιας της πηγής και του υπόγειου υδατικού συστήματος. Η ροή μεταξύ της εξωτερικής πηγής και του υδροφορέα στην κυψελίδα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$QB_n = CB_n (HB_n - h_{i,j,k}) \quad (2.8)$$

Όπου:

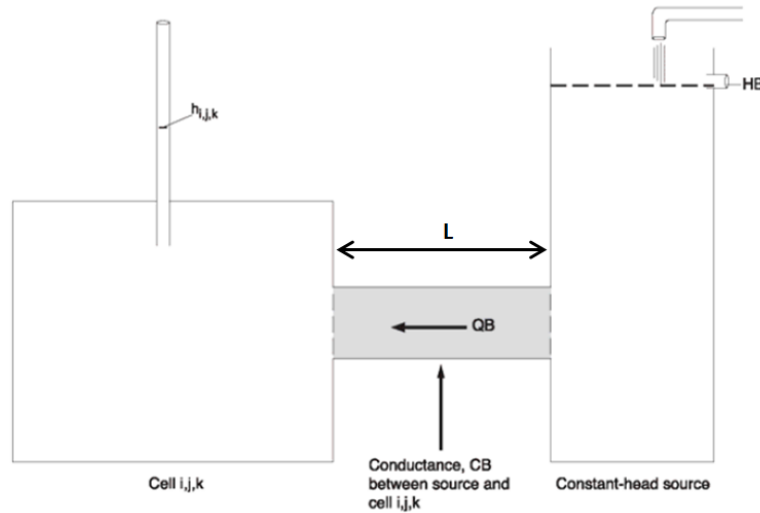
QB_n , η ροή στο κελί από το όριο του υδροφορέα (L^3T^{-1})

CB_n , η μεταβιβαστικότητα (conductance) μεταξύ της εξωτερικής πηγής και του κελιού η οποία καθορίζεται από το χρήστη (L^2T^{-1})

HB_n , το φορτίο της εξωτερικής πηγής το οποίο καθορίζεται από το χρήστη (L)

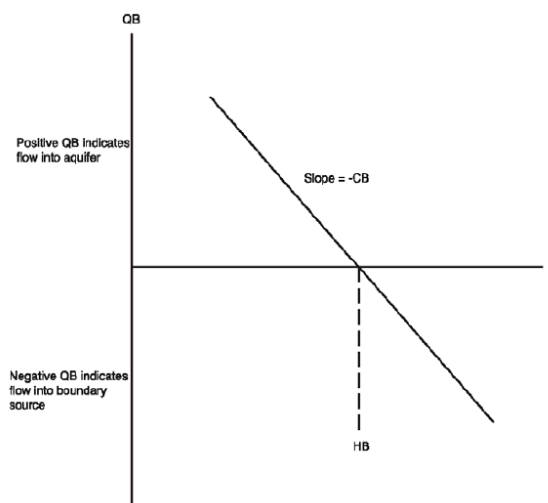
$h_{i,j,k}$, το φορτίο του κόμβου της κυψελίδας (L)

Η σχέση μεταξύ της εξωτερικής πηγής και του κελιού i, j, k παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.9. Η εξωτερική πηγή και το κελί επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ενός τεμαχίου (block) από πορώδες υλικό που έχει μεταβιβαστικότητα CB_n .



Σχήμα 2. 9. Απεικόνιση αρχής λειτουργίας του πακέτου GHB (Harbaugh, 2005 με τροποποιήσεις)

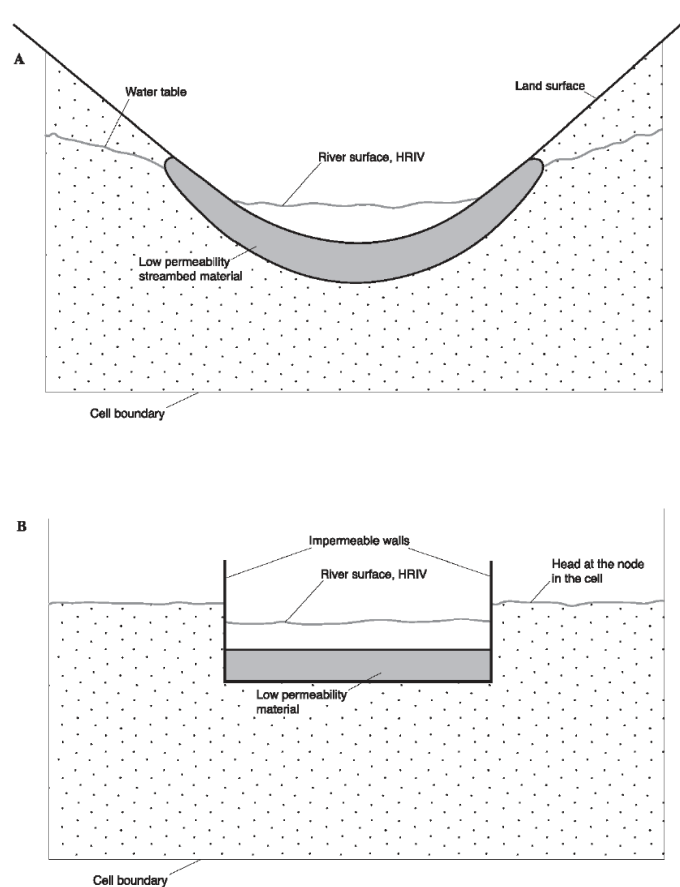
Οι οριακές συνθήκες σταθερής εισροής, χαρακτηρίζονται από μία γραμμική σχέση μεταξύ της ροής εντός (ή εκτός) του υπόγειου συστήματος και του φορτίου στο κάθε κελί i, j, k όπως απεικονίζεται στο γράφημα του Σχήματος 2.10. Όπως παρατηρείται, όσο η διαφορά του φορτίου στο κελί του υδροφόρου και του φορτίου της εξωτερικής πηγής αυξάνεται, τόσο αυξάνεται η ροή εντός ή εκτός του συστήματος.



Σχήμα 2. 10. Απεικόνιση ροής μεταξύ της εξωτερικής πηγής και του κελιού του συστήματος (Harbaugh, 2005)

2.6.7.4. Οριακές συνθήκες ποταμού (River Package, RIV)

Το πακέτο ποταμού προσομοιώνει τη ροή του ποταμού/υδροφόρου ανάλογα με την υδραυλική κλίση μεταξύ του ποταμού και του υδροφόρου συστήματος. Στο Σχήμα 2.11, παρουσιάζεται μία διατομή ενός υδροφορέα που περιλαμβάνει ένα ποτάμι (A) και η εννοιολογική αναπαράσταση αυτού (B). Η κοίτη του ποταμού αποτελείται από υλικό χαμηλής διαπερατότητας, το οποίο διαχωρίζει το ποτάμι από το υπόγειο σύστημα, και η στάθμη του υδροφόρου παραμένει πάνω από τον πυθμένα του ποταμού.



Σχήμα 2. 11. (A) Διατομή υδροφορέα και (B) Εννοιολογική αναπαράσταση (McDonald and Harbaugh, 1988)

Συνεπώς, η ροή μεταξύ του ποταμού και του υδροφορέα υπολογίζεται από την σχέση:

$$QRIV_n = CRIV_n (HRIV_n - h_{i,j,k}) \quad (2.9)$$

Όπου:

$QRIV_n$, η ροή μεταξύ του ποταμού και του υδροφορέα (L^3T^{-1})

$CRIV_n$, η μεταβιβαστικότητα (conductance) του υλικού της κοίτης του ποταμού η οποία καθορίζεται από το χρήστη (L^2T^{-1})

$HRIV_n$, η στάθμη του ποταμού η οποία καθορίζεται από τον χρήστη (L)

$h_{i,j,k}$, το φορτίο στον κόμβο του κελιού (L)

Στο Σχήμα 2.12, απεικονίζεται ένα εξιδανικευμένο τμήμα του πυθμένα ενός ποταμού. Ο όρος $CRIV_n$ εξαρτάται από την υδραυλική αγωγιμότητα και την γεωμετρία της κοίτης του ποταμού σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$CRIV_n = \frac{K_n L_n W_n}{M_n} \quad (2.10)$$

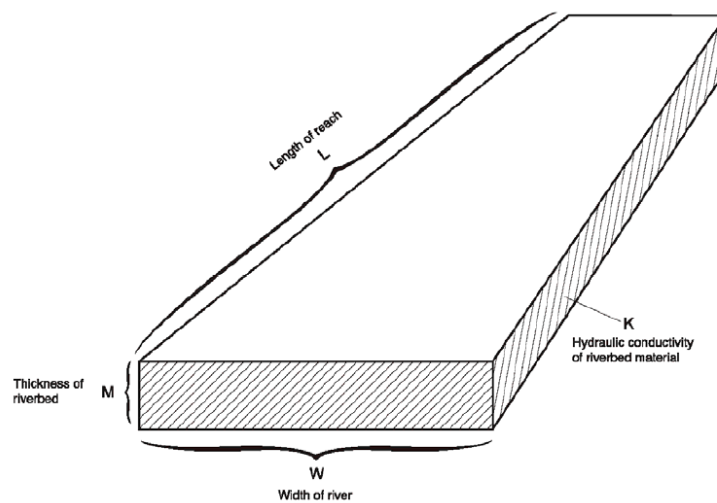
Όπου:

K_n , η υδραυλική αγωγιμότητα του υλικού της κοίτης του ποταμού

L_n , το μήκος του ποταμού

W_n , το πλάτος του ποταμού

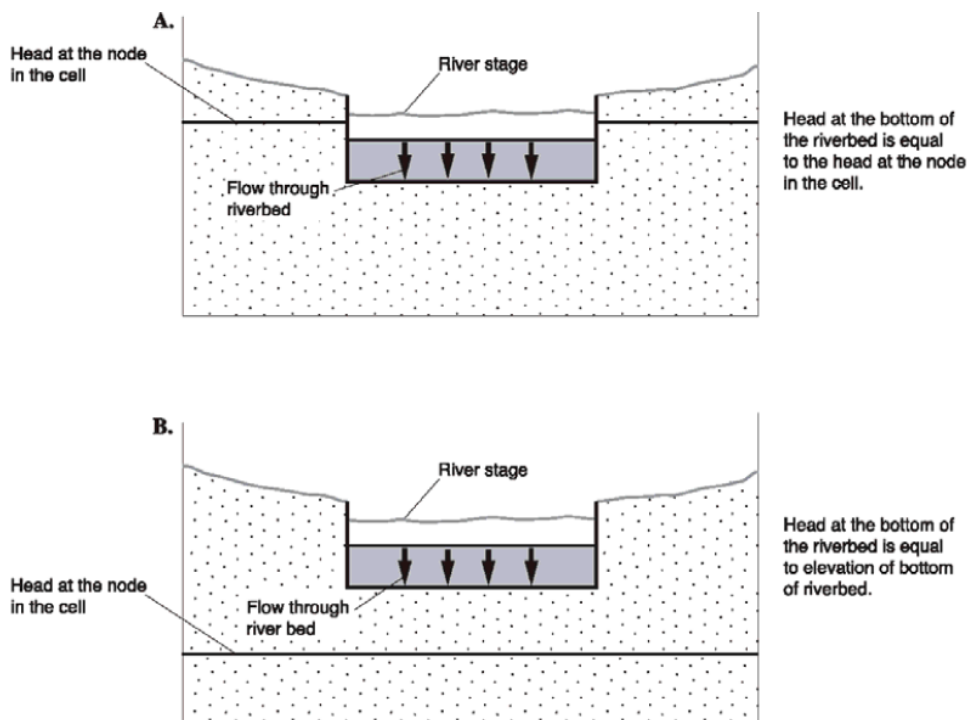
M_n , η πυκνότητα του υλικού της κοίτης του ποταμού



Σχήμα 2. 12. Τμήμα πυθμένα ποταμού (McDonald and Harbaugh, 1988)

Στο Σχήμα 2.13-A, παρουσιάζεται η περίπτωση όπου η στάθμη του υδροφόρου βρίσκεται πάνω από τον πυθμένα του ποταμού και η ροή υπολογίζεται από την εξίσωση 2.9. Στο Σχήμα 2.13-B παρουσιάζεται η περίπτωση όπου η στάθμη του υδροφόρου τοποθετείται κάτω από τον πυθμένα του ποταμού. Ο όρος $h_{i,j,k}$ έχει αντικατασταθεί από τον όρο $RBOT_n$ που αποτελεί το υψόμετρο του πυθμένα του ποταμού. Η σχέση για τον υπολογισμό της ροής μετασχηματίζεται ως εξής:

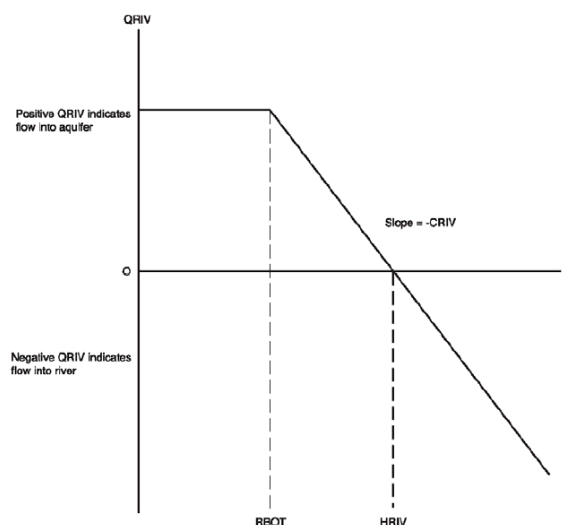
$$QRIV_n = CRIV_n (HRIV_n - RBOT_n) \quad (2.11)$$



Σχήμα 2. 13. Διατομές ποταμού που απεικονίζουν τη σχέση μεταξύ του φορτίου του πυθμένα του ποταμού και το φορτίου στο κελί (Harbaugh, 2005)

Στο γράφημα του Σχήματος 2.14, απεικονίζεται η ροή από το ποτάμι ως συνάρτηση του φορτίου h του κελιού. Η ροή είναι μηδενική όταν το φορτίο h του κελιού είναι ίσο με τη στάθμη $HRIV$ του ποταμού. Για τιμές του φορτίου h μεγαλύτερες από τη στάθμη του ποταμού $HRIV$, η ροή θα εξέλθει από το σύστημα. Για τιμές του φορτίου h μικρότερες από τη στάθμη του ποταμού $HRIV$, η ροή θα εισέλθει στο σύστημα. Αυτή η ροή αυξάνεται γραμμικά όσο το φορτίο h στο κελί μειώνεται, μέχρι το σημείο όπου το φορτίο φτάνει τον πυθμένα του ποταμού $RBOT$ και από εκεί και πέρα η ροή παραμένει σταθερή. Επομένως, το πακέτο ποταμού

λειτουργεί όμοια με το πακέτο σταθερής εισροής, όσο το φορτίο h είναι μεγαλύτερο από τον πυθμένα του ποταμού RBOT.



Σχήμα 2. 14. Απεικόνιση ροής μεταξύ του ποταμού και του κελιού του συστήματος (Harbaugh, 2005)

2.6.7.5. Οριακές συνθήκες εξατμισοδιαπνοής, (Evapotranspiration Package, EVT)

Οι οριακές συνθήκες εξατμισοδιαπνοής χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση των επιπτώσεων της διαπνοής των φυτών και της άμεσης εξάτμισης από το υπόγειο σύστημα υδάτων. Η απώλεια λόγω εξατμισοδιαπνοής από τον υδροφόρο: (i) πραγματοποιείται σε μέγιστο βαθμό, όταν ο υδροφόρος ορίζοντας είναι πάνω από ένα συγκεκριμένο ύψος στάθμης (επιφάνεια εξατμισοδιαπνοής – ET surface), (ii) λαμβάνει κενές τιμές (null values) όταν το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα είναι κάτω από την επιφάνεια εξατμισοδιαπνοής (ET surface) και ξεπερνά ένα συγκεκριμένο διάστημα το οποίο ονομάζεται βάθος εξαφάνισης της εξατμισοδιαπνοής (extinction depth) και (iii) μεταβάλλεται γραμμικά με την ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα μεταξύ αυτών των ορίων (Shah et al., 2007) .

$$RET = EVTR \text{ όταν } h_{i,j,k} > SURF \quad (2.12)$$

$$RET = 0 \text{ όταν } h_{i,j,k} < (SURF - EXDP) \quad (2.13)$$

$$RET = EVTR \left[h_{i,j,k} - \frac{(SURF - EXDP)}{EXDP} \right] \text{ όταν } (SURF - EXDP) \leq h_{i,j,k} \leq SURF \quad (2.14)$$

Όπου:

RET , ο ρυθμός απώλειας ανά μονάδα επιφάνειας του υδροφορέα λόγω εξατμισοδιαπνοής (L/T^{-1}).

$EVTR$, η μέγιστη δυνατή τιμή της απώλειας εξατμισοδιαπνοής, η οποία καθορίζεται από το χρήστη (L/T^{-1}).

$SURF$, το ύψος της επιφάνειας της εξατμισοδιαπνοής, το οποίο καθορίζεται από το χρήστη (L).

$EXDP$, το βάθος απόσβεσης της εξατμισοδιαπνοής (extinction depth) το οποίο καθορίζεται από το χρήστη (L).

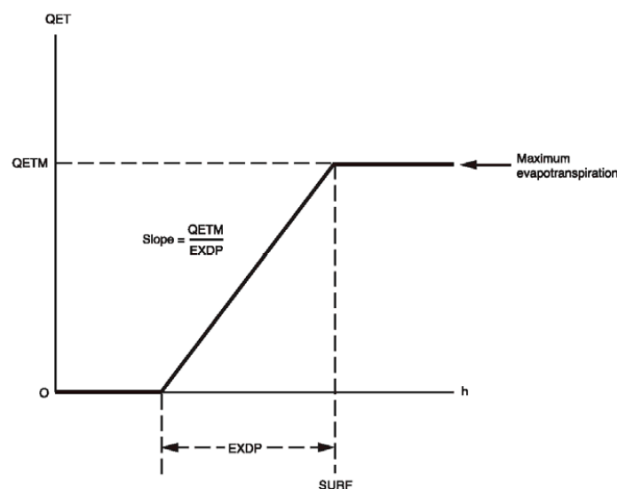
$h_{i,j,k}$, το φορτίο στον κόμβο του κελιού (L).

Στη συνέχεια, αυτοί οι ρυθμοί πολλαπλασιάζονται με την οριζόντια έκταση των κελιών $DEL R_j DEL C_i$ προκειμένου να υπολογισθούν οι ρυθμοί ογκομετρικής ροής [L^3/T].

$$QET = RET(DEL R_j DEL C_i) \quad (2.15)$$

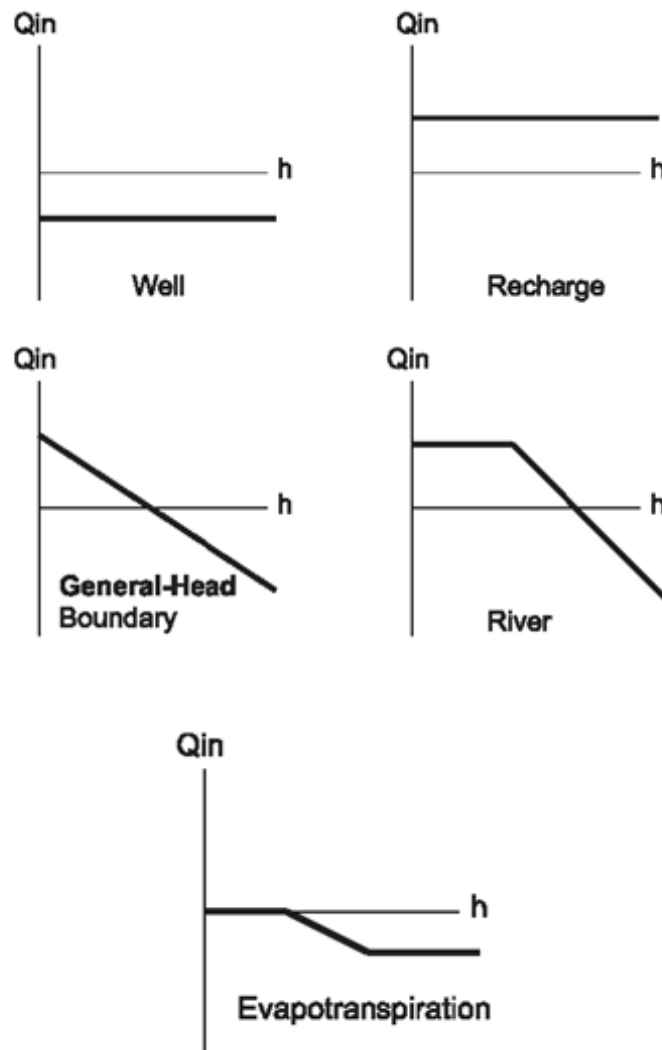
Όπου: QET , η απώλεια εξατμισοδιαπνοής σε μονάδες (L^3/T^{-1}).

Στο γράφημα του Σχήματος 2.15, απεικονίζεται η απώλεια εξατμισοδιαπνοής. Σε σύγκριση με το γράφημα του Σχήματος 2.14, παρατηρείται ότι οι δύο συναρτήσεις είναι μαθηματικά όμοιες, με εξαίρεση ότι το γραμμικό τμήμα της συνάρτησης της εξατμισοδιαπνοής διακόπτεται στην αρχή και στο τέλος από σταθερές τιμές.



Σχήμα 2. 15. Απώλεια εξατμισοδιαπνοής συναρτήσει του φορτίου του κελιού (Harbaugh, 2005)

Στο Σχήμα 2.16, παρουσιάζονται τα γραφήματα των οριακών συνθηκών για τα πακέτα γεωτρήσεων (WELL), εμπλουτισμού (Recharge), σταθερής ειροής (General-Head boundary), ποταμού (River) και εξατμισοδιαπνοής (Evapotranspiration). Παρατηρείται ότι τα γραφήματα των γεωτρήσεων και του εμπλουτισμού είναι ανεξάρτητα από το υδραυλικό φορτίο στο κελί του μοντέλου, ενώ οι υπόλοιπες συνθήκες εξαρτώνται από το φορτίο στο κελί του μοντέλου.



Σχήμα 2. 16. Σύγκριση οριακών συνθηκών (Harbaugh, 2005)

2.7. Ρύθμιση μοντέλου (Calibration)

Μετά την πρώτη ρύθμιση του μοντέλου (first run), οι υπολογισμένες τιμές ίσως να διαφέρουν από τις μετρήσεις υπαίθρου. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η χρήση ομοιωμάτων αποτελεί μία απλούστευση της πραγματικότητας και οι παραδοχές και τα υπολογιστικά λάθη είναι αναπόφευκτα.

Η διαδικασία της ρύθμισης έχει ως στόχο οι υπολογισμένες τιμές φορτίου να προσεγγίσουν τις μετρημένες τιμές. Αυτό επιτυγχάνεται μεταβάλλοντας τις παραμέτρους του μοντέλου (υδραυλικά χαρακτηριστικά, τροφοδοσίες). Ορίζοντας ως $(h_{ob})_i$ τις μετρημένες τιμές φορτίου και ως $(h_{sim})_i$ τις υπολογισμένες τιμές φορτίου στο σημείο παρατήρησης i , το μέσο τετραγωνικό σφάλμα ορίζεται ως εξής:

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_{ob} - h_{sim})^2 \right]^{1/2} \quad (2.16)$$

Η ρύθμιση περιλαμβάνει μία διαδικασία βελτιστοποίησης για την ελαχιστοποίηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE). Επιτυγχάνεται είτε με την κλασική μέθοδο της δοκιμής και αποτυχίας (trial and error) είτε με τη χρήση πολυπλοκότερων μεθόδων αυτόματης ρύθμισης (inverse modelling). Λογισμικά όπως το PEST (Doherty et al., 2010) και το UCODE (Poeter et al., 2014) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτόματη ρύθμιση.

2.8. Επαλήθευση μοντέλου (Verification)

Η επαλήθευση του μοντέλου είναι το επόμενο στάδιο μετά τη ρύθμιση. Ο στόχος της επαλήθευσης είναι να καθορισθεί εάν το βαθμονομημένο μοντέλο μπορεί να εφαρμοσθεί για οποιοδήποτε σύνολο δεδομένων.

2.9. Ανάλυση ευαισθησίας (Sensitivity analysis)

Η ανάλυση ευαισθησίας είναι σημαντική για τη ρύθμιση, τη βελτιστοποίηση, την αξιολόγηση κινδύνου και τη συλλογή δεδομένων. Η ανάλυση ευαισθησίας υποδηλώνει την παράμετρο ή τις παραμέτρους που έχουν την μεγαλύτερη επιρροή στα αποτελέσματα του μοντέλου. Οι παράμετροι με την μεγαλύτερη επιρροή πρέπει να έχουν τη μεγαλύτερη προσοχή στη διαδικασία της ρύθμισης και της συλλογής δεδομένων.

2.10. Πρόβλεψη

Κατά τη διαδικασία της πρόβλεψης παράγονται υποθετικά σενάρια για την απόκριση της συμπεριφοράς του συστήματος στο μέλλον. Το μοντέλο εκτελείται διατηρώντας σταθερές τις παραμέτρους που έχουν προκύψει από τη ρύθμιση και μεταβάλλοντας τις παραμέτρους που εκτιμώνται ότι θα αλλάξουν στο μέλλον.

2.11. Επανεκτίμηση στόχων προβλήματος

Διεξάγεται μετά τη ρύθμιση του μοντέλου. Νέα δεδομένα υπαίθρου συλλέγονται για να εκτιμηθεί εάν οι προβλέψεις ήταν σωστές. Εάν αυτές ήταν σωστές τότε το μοντέλο επαληθεύεται για τη συγκεκριμένη περιοχή ενδιαφέροντος αλλιώς αναθεωρούνται οι αρχικοί στόχοι του προβλήματος.

2.12. Αναφορά μοντέλου

Μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και οι τυχόν περιορισμοί στην αναπαράσταση του μοντέλου καθώς και η επιρροή αυτών στα τελικά αποτελέσματα.

Επισημαίνεται ότι τα μοντέλα υπόγειων νερών πρέπει να αξιολογούνται για να διασφαλίζεται ότι δεν υπάρχουν σφάλματα στα δεδομένα εισόδου και ότι το εννοιολογικό μοντέλο αντιπροσωπεύει με ακρίβεια το πραγματικό σύστημα υπόγειων υδάτων ώστε να ανταποκρίνεται στους στόχους της μελέτης. Σύμφωνα με τους (Reilly and Harbaugh, 2004) τα αντικείμενα που πρέπει να αξιολογούνται είναι: η καταλληλότητα εφαρμογής του εκάστοτε προγράμματος, η διακριτοποίηση και η αναπαράσταση του γεωλογικού πλαισίου, η αναπαράσταση των οριακών συνθηκών, η αναπαράσταση των αρχικών συνθηκών και η σχέση των προσομοιωμένων τιμών υδραυλικού φορτίου με τις πραγματικές μετρήσεις υπαίθρου.

2.13. Λογισμικά προσομοίωσης υπόγειων υδάτων

2.13.1. Εισαγωγή

Τα λογισμικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ενός μοντέλου αποτελούνται από δύο συνιστώσες: τον κώδικα του μοντέλου και το γραφικό περιβάλλον εργασίας (graphical user interface, GUI) το οποίο συμβάλλει στη δημιουργία αρχείων εισόδου για τον κώδικα του μοντέλου και στην οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων.

Υπάρχουν διάφοροι διαθέσιμοι κώδικες για την προσομοίωση των υπόγειων υδάτων (Πίνακας 2.1) οι οποίοι διαφέρουν ως προς τα λειτουργικά χαρακτηριστικά (χωρική κατανομή του μοντέλου, μονοδιάστατη, δισδιάστατη, τριαδιάστατη απεικόνιση, συνθήκες ροής, μεταφοράς ρύπων, γεωχημείας) τους περιορισμούς του συστήματος και τη διαθεσιμότητα τους (εμπορικά πακέτα/λογισμικά ανοιχτού κώδικα).

Πίνακας 2. 1. Λογισμικά προσομοίωσης υπόγειων υδάτων

Λογισμικά ανοιχτού κώδικα	Εμπορικά λογισμικά
MODFLOW (USGS)	MODHMS (Hydrogeologic Inc)
SUTRA (USGS)	MODFLOW-SURFACT
VS2DI (USGS)	FEFlow (Wasy Ltd.)
MT3DMS (University of Alabama)	MikeSHE (DHI Water and Environment)
PHAST (USGS)	HYDROGEOSPHERE
RT3D (Pacific Northwest Laboratory)	GFLOW
TOUGH2 (Lawrence Berkeley National Laboratory)	AnAqSim

Το MODFLOW είναι ένας ανοιχτός κώδικας ο οποίος αναπτύχθηκε το 1984 από την USGS και ενημερώνεται συνεχώς. Επιλύει τις εξισώσεις ροής σε 3-D υδροφορείς με μεταβλητά υδραυλικά χαρακτηριστικά και οριακές συνθήκες. Αποτελείται από το κυρίως πρόγραμμα και από ανεξάρτητες υπορουτίνες (πακέτα) οι οποίες ελέγχουν ένα χαρακτηριστικό του υδρολογικού συστήματος. Ο διαχωρισμός του προγράμματος σε πακέτα επιτρέπει στο χρήστη να επιλύει ανεξάρτητα ένα συγκεκριμένο υδρολογικό χαρακτηριστικό του μοντέλου. Το πακέτο MODPATH χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της κίνησης των σωματιδίων για τον καθορισμό της κίνησης του ρύπου στο χώρο και στο χρόνο. Πακέτα όπως το MT3DMS (Zheng και Wang, 1999) και το RT3D (Clement, 1997) προσομοιώνουν

τις διαδικασίες μεταφοράς/διασποράς ρύπων. Μία προσαρμοσμένη έκδοση του MT3DMS είναι το SEAM3D το οποίο επιλύει πολύπλοκα προβλήματα βιοαποικοδόμησης. Σύγχρονα GUI έχουν αναπτυχθεί για την εισαγωγή των δεδομένων και την αναπαράσταση των αποτελεσμάτων τα οποία διακρίνονται σε εμπορικά όπως το GMS, το Visual MODFLOW, το Ground Water Vistas και το PMWIN 3D αλλά και σε ανοιχτού κώδικα όπως το MODELMOUSE και το PMWIN 1/2D.

2.13.2. Γραφικά περιβάλλοντα εργασίας (GUIs) για τον κώδικα του MODFLOW

2.13.2.1. Εμπορικά πακέτα GUI

Groundwater Vistas (GV)

Το Groundwater Vistas (GV) είναι ένα εξελιγμένο γραφικό περιβάλλον εργασίας το οποίο χρησιμοποιεί τους κώδικες MODFLOW MODPATH, MT3DMS, MODFLOWT, MODFLOWSURFACT, MODFLOW2000, GFLOW, RT3D, PATH3D, SEAWAT and PEST για την προσομοίωση υπόγειων υδάτων και για τη μεταφορά ρύπων. Η ενσωμάτωση του κώδικα PEST καθιστούν το GV ένα καλό εργαλείο ρύθμισης (calibration) για την ανάλυση ευαισθησίας. Το GV προβάλλει το μοντέλο τόσο σε πλάγια όσο και σε εγκάρσια τομή ταυτόχρονα και παρουσιάζει τα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας ισοϋψείς και διανύσματα ροής.

Groundwater Modeling System (GMS)

Το Groundwater Modeling System (GMS) είναι ένα λογισμικό προσομοίωσης υπόγειων υδάτων το οποίο παρέχει εργαλεία για την δημιουργία του μοντέλου, τη βαθμονόμηση και τη μετα-επεξεργασία του. Το GMS υποστηρίζει τόσο τα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών όσο και των πεπερασμένων στοιχείων όπως τα MODFLOW, MODPATH, MT3D, RT3D, FEMWATER, SEAM3D, SEEP2D, PEST, UTCHEM και UCODE.

Visual Modflow Flex

Το Visual Modflow Flex είναι γραφικό περιβάλλον εργασίας για την προσομοίωση των υπόγειων υδάτων και τη μεταφορά των ρύπων χρησιμοποιώντας τους κώδικες MODFLOW-2000, MODPATH, MT3DMS και RT3D. Συνδιάζει τα

βασικά εργαλεία προσομοίωσης για την ανάλυση και τη βαθμονόμηση των μοντέλων με τις δυνατότητες του GIS σε ένα ενιαίο περιβάλλον λογισμικού.

2.13.2.2. Πακέτα GUI ανοιχτού κώδικα

ModelMuse (USGS)

Το ModelMuse αποτελεί ένα γραφικό περιβάλλον εργασίας το οποίο χρησιμοποιεί τους κώδικες των MODFLOW-2005, MODFLOW-LGR, MODFLOW-LGR2, MODFLOW-NWT, MODFLOW-CFP, MODFLOW-OWHM, MODPATH, ZONEBUDGET, PHAST, SUTRA και MT3DMS. Στο ModelMuse τα χωρικά δεδομένα είναι ανεξάρτητα από το πλέγμα/κάνναβο (grid) του μοντέλου και τα χρονικά δεδομένα είναι ανεξάρτητα από τις περιόδους φόρτισης. Αυτό επιτρέπει στο χρήστη να επαναπροσδιορίσει τη χωρική και τη χρονική διακριτοποίηση κατά βούληση. Το ModelMuse δίνει τη δυνατότητα για τρισδιάστατη απεικόνιση του μοντέλου και διαθέτει εργαλεία για τη δημιουργία και την επεξεργασία του πλέγματος (grid). Επίσης, περιλαμβάνει ένα μεγάλο πλήθος μεθόδων παρεμβολής και εντολών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καθορίσουν τη χωρική κατανομή του μοντέλου.

ModelMate (USGS)

Το ModelMate είναι ένα γραφικό περιβάλλον εργασίας το οποίο χρησιμοποιεί τον κώδικα του MODFLOW και τον κώδικα του UCODE. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προετοιμασία αρχείων εισόδου, για την εκτέλεση του UCODE και για την εμφάνιση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Αποθηκεύει δεδομένα για τον ορισμό των παραμέτρων και των παρατηρήσεων για τον έλεγχο της εκτέλεσης του κώδικα UCODE. Το ModelMate μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο του ή σε συνδιασμό με το ModelMuse.

Processing Modflow for Windows (PMWIN)

Το PMWIN αποτελεί ένα γραφικό περιβάλλον εργασίας το οποίο χρησιμοποιεί τους κώδικες του MODFLOW και του MODPATH για προσομοίωση υδατικών πόρων, τους κώδικες των MT3D, MT3DMS, RT3D και MOC3D για μεταφορά ρύπων, τον κώδικα του PMPATH για την παρακολούθηση σωματιδίων και τους κώδικες των UCODE και PEST-ASP για αυτόματη ρύθμιση του μοντέλου.

MODFLOW-GUI PIE/Argus ONE

Το Argus ONE είναι ένα λογισμικό το οποίο συνδιάζει τις δυνατότητες του GIS με αυτές των αριθμητικών μοντέλων. Ενσωματώνει κώδικες όπως το MODFLOW/MOC3D, HST3D, SUTRA, NAPL, LandUse Analyst, PTC και RiverFLO-2D σαν πρόσθετα (Plug-In Extensions, PIEs). Το πρόσθετο MODFLOW-GUI PIE επιτρέπει στο χρήστη να εισάγει όλα τα δεδομένα GIS, να δημιουργήσει το μοντέλο και να απεικονίσει τα αποτελέσματα από το περιβάλλον του Argus ONE.

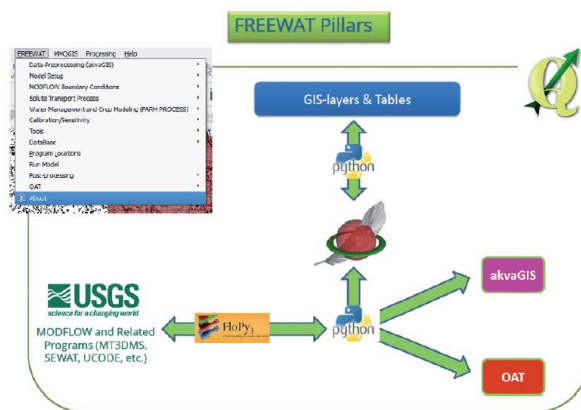
FREEWAT

Η πλατφόρμα FREEWAT αποτελεί ένα πρόσθετο στο λογισμικό QGIS (QGIS Development Team, 2009), το οποίο συνδιάζει τις δυνατότητες των εργαλείων geo-processing (γεω-επεξεργασίας) και post-processing (μετα-επεξεργασίας) στη χωρική ανάλυση δεδομένων, με αυτές των μοντέλων προσομοίωσης (Σχήμα 2.17). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα περιβάλλον προσομοίωσης, στο οποίο συνυπάρχουν χωρικά σύνολα δεδομένων που μπορούν να αποθηκευτούν, να διαχειριστούν και να απεικονιστούν και κώδικες προσομοίωσης (που ανήκουν στο πλαίσιο του USGS MODFLOW) οι οποίοι μπορούν να προσομοιώσουν υδρολογικές, υδροχημικές ή οικονομικο-κοινωνικές διαδικασίες. Τα δεδομένα εισόδου και εξόδου διαχειρίζονται μέσω της SpatialLite βάσης δεδομένων (SpatialLite Development Team, 2011).

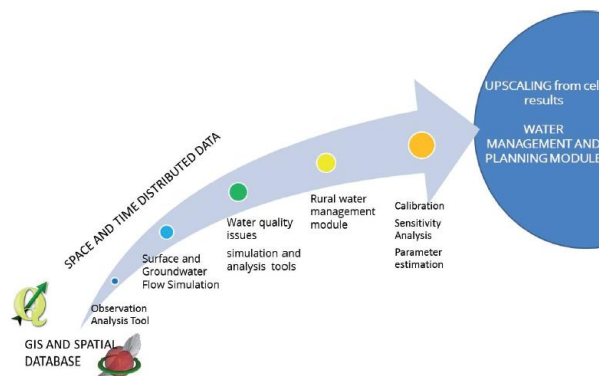
Η πλατφόρμα περιλαμβάνει τους παρακάτω τομείς επεξεργασίας δεδομένων που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.18.

- Η ενότητα AkvaGIS (Serrano et al., 2017) επιτρέπει την παραγωγή διαγραμμάτων και θεματικών χαρτών για την ανάλυση και ερμηνεία των υδροχημικών και υδρογεωλογικών δεδομένων με σκοπό την εκτίμηση της ποιότητας των υπόγειων υδάτων.
- Η ενότητα Observation Analysis Tool (OAT) (Cannata et al., 2017), παρέχει δυνατότητες επεξεργασίας και ανάλυσης δεδομένων χρονοσειρών για την υποστήριξη της κατασκευής και της βαθμονόμησης των μοντέλων.
- Η προσομοίωση ροής υπόγειων υδάτων μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας το λογισμικό MODFLOW-2005 (Harbaugh, 2005), έναν κώδικα που αναπτύσσεται από το USGS και προσομοιώνει την υπόγεια ροή σε κορεσμένες και ακόρεστες ζώνες.

- Η μεταφορά των ρύπων μπορεί να προσομοιωθεί με τον κώδικα MT3DMS (Zheng and Wang, 1999). Η ενσωμάτωση του κώδικα SEAWAT (Langevin et al., 2007) στην πλατφόρμα του Freewat επιτρέπει την προσομοίωση των ροών που εξαρτώνται από το ιξώδες και την πυκνότητα. Τέτοιες δυνατότητες είναι ιδιαίτερα σημαντικές για την προσομοίωση των διεργασιών θαλάσσιας διείσδυσης.
- Η διαχείριση των υδατικών πόρων επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση του προγράμματος MODFLOW-OWHM (Hanson et al., 2014). Μέσω της διαδικασίας Farm Process, καθορίζονται οι ανάγκες και οι απαιτήσεις σε νερό των καλλιεργειών.
- Το εργαλείο UCODE_2014 (Roeter et al., 2014) εφαρμόζεται για την εκτέλεση ανάλυσης ευαισθησίας και την εκτίμηση παραμέτρων για τη βελτίωση της προσαρμογής του μοντέλου.



Σχήμα 2. 17. Ενότητες πλατφόρμας Freewat (De Filippis et al., 2017)



Σχήμα 2. 18. Δομή πλατφόρμας Freewat (De Filippis et al., 2017)

3. Εφαρμογή FREEWAT στην περιοχή μελέτης - Μέρος Α΄

3.1 Γενική περιγραφή

3.1.1. Γεωγραφικό πλαίσιο

Η περιοχή μελέτης αποτελεί τμήμα του Νομού Ροδόπης με πρωτεύουσα την Κομοτηνή. Ο Νομός Ροδόπης υπάγεται στην Περιφέρεια Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης και καταλαμβάνει το κεντρικό τμήμα του γεωγραφικού διαμερίσματος της Θράκης. Συνορεύει στα βόρεια με την Βουλγαρία, δυτικά με το Νομό Ξάνθης, στα ανατολικά με το Νομό Έβρου και στα νότια βρέχεται από το Θρακικό Πέλαγος.

Η συνολική έκταση του Νομού Ροδόπης είναι 2.543,1 km² από τα οποία τα 37 km² είναι τμήμα υδάτινης περιοχής. Η περιοχή μελέτης, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1 που ακολουθεί, ανήκει στο δυτικό παράκτιο τμήμα του Νομού Ροδόπης και οριοθετείται από τις λίμνες Βιστωνίδα και Ισμαρίδα (από δυτικά προς ανατολικά).



Σχήμα 3. 1. Δορυφορική εικόνα περιοχής έρευνας (Google Earth © 2017)

3.1.2. Χρήσεις Γης

Από τη συνολική έκταση του Νομού Ροδόπης (2.543,1 km²), τα 956,9 km² αντιστοιχούν σε πεδινή περιοχή, τα 825,6 km² αντιστοιχούν σε ημιορεινή περιοχή και τα 760,6 km² αντιστοιχούν σε ορεινή περιοχή όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3. 1. Κατανομή της έκτασης (σε km²) με βάση τη μορφολογία του εδάφους (ΕΛΣΤΑΤ, 2011)

Εκτάσεις (km ²)	Σύνολο Χώρας	Περιφέρεια Αν. Μακ. & Θράκης	Νομός Ροδόπης
Πεδινές	37.891,1	4.867,9	956,9
Ημιορεινές	38.271,9	3.687,7	825,6
Ορεινές	55.794,4	5.602,2	760,6
Σύνολο	131.957,4	14.157,8	2.543,1

Η κατανομή της έκτασης του Νομού Ροδόπης με βάση τις χρήσεις γης φαίνεται στο Σχήμα 3.2 και στους Πίνακες 3.2, 3.3, και 3.4 που ακολουθούν σύμφωνα με τα Προαπογραφικά στοιχεία της Απογραφής Γεωργίας - Κτηνοτροφίας 1999/2000.

Πίνακας 3. 2. Κατανομή γεωργικών περιοχών του Νομού Ροδόπης, της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας & Θράκης και του συνόλου της χώρας (σε km²) (ΕΛΣΤΑΤ, 2011)

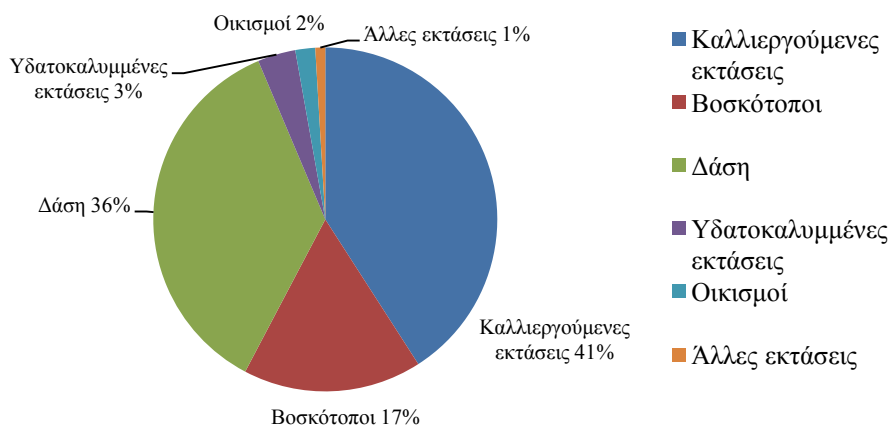
ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΝΟΜΟΣ	ΓΕΩΡΓΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ					
	Αρόσιμη γη	Μόνιμες καλλιέργειες	Βοσκότοποι - Μεταβατικές δασώδεις/θαμνώδεις εκτάσεις	Βοσκότοποι - Συνδιασμοί θαμνώδους και / ή ποώδους βλάστησης	Βοσκότοποι - Εκτάσεις με αραή ή καθόλου βλάστηση	Ετερογενείς γεωργικές περιοχές
ΣΥΝΟΛΟ ΧΩΡΑΣ	21.181.4	7.491.8	880.0	9.151.7	4.420.5	22.011.0
ΑΝΑΤ. ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ ΚΑΙ ΘΡΑΚΗ	4.388.7	148.7	412.6	476.1	50.0	794.6
ΝΟΜΟΣ ΡΟΔΟΠΗΣ	947.0	18.8	84.5	47.1	3.6	111.3

Πίνακας 3. 3. Κατανομή δασών και υδατοκαλυμμένων εκτάσεων του Νομού Ροδόπης, της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας & Θράκης και του συνόλου της χώρας (σε km²) (ΕΛΣΤΑΤ, 2011)

ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΝΟΜΟΣ	ΔΑΣΗ ΗΜΙ-ΦΥΣΙΚΕΣ ΕΚΤΑΣΕΙΣ				ΥΔΑΤΟΚΑΛΥΜΜΕΝΕΣ ΕΚΤΑΣΕΙΣ		
	Δάση	Μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις	Συνδυασμοί θαμνώδους και / ή ποώδους βλάστησης	Εκτάσεις με αραϊή ή καθόλου βλάστηση	Χερσαία ύδατα	Εσωτερικές υγρές ζώνες	Παραθαλάσσιες υγρές ζώνες
ΣΥΝΟΛΟ ΧΩΡΑΣ	22.411.6	11.606.9	23.949.7	4.509.9	1.196.9	108.2	484.5
ΑΝΑΤ. ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ ΚΑΙ ΘΡΑΚΗ	4.151.2	1.535.1	1.273.7	409.5	129.8	0.7	219.7
ΝΟΜΟΣ ΡΟΔΟΠΗΣ	500.9	330.7	282.7	105.6	33.5	0.0	49.1

Πίνακας 3. 4. Κατανομή τεχνητών περιοχών του Νομού Ροδόπης, της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας & Θράκης και του συνόλου της χώρας (σε km²) (ΕΛΣΤΑΤ, 2011)

ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΝΟΜΟΣ	ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ				
	Αστική οικοδόμηση	Βιομηχανικές και εμπορικές ζώνες	Δίκτυα συγκοινωνιών	Ορυχεία, χώροι απόρριψης απορριμμάτων και εργοτάξια	Τεχνητές, μη γεωργικές ζώνες πρασίνου, χώροι αθλητικών/πολιτιστικών δραστηριοτήτων
ΣΥΝΟΛΟ ΧΩΡΑΣ	1.913.0	212.6	156.3	270.5	25.3
ΑΝΑΤ. ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ ΚΑΙ ΘΡΑΚΗ	151.8	26.1	1.8	9.1	0.4
ΝΟΜΟΣ ΡΟΔΟΠΗΣ	27.5	7.4	0.0	0.2	0.4



Σχήμα 3. 2. Ποσοστιαία διάρθρωση των εκτάσεων του Νομού Ροδόπης ανάλογα με τις χρήσεις γης (ΕΛΣΤΑΤ, 2011)

Σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία προκύπτει ότι το σύνολο του εδάφους του Νομού Ροδόπης χαρακτηρίζεται από ανομοιογένεια. Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο τμήμα της έκτασης του νομού το καταλαμβάνουν οι καλλιέργειες και έπειτα τα δάση και οι βοσκότοποι.

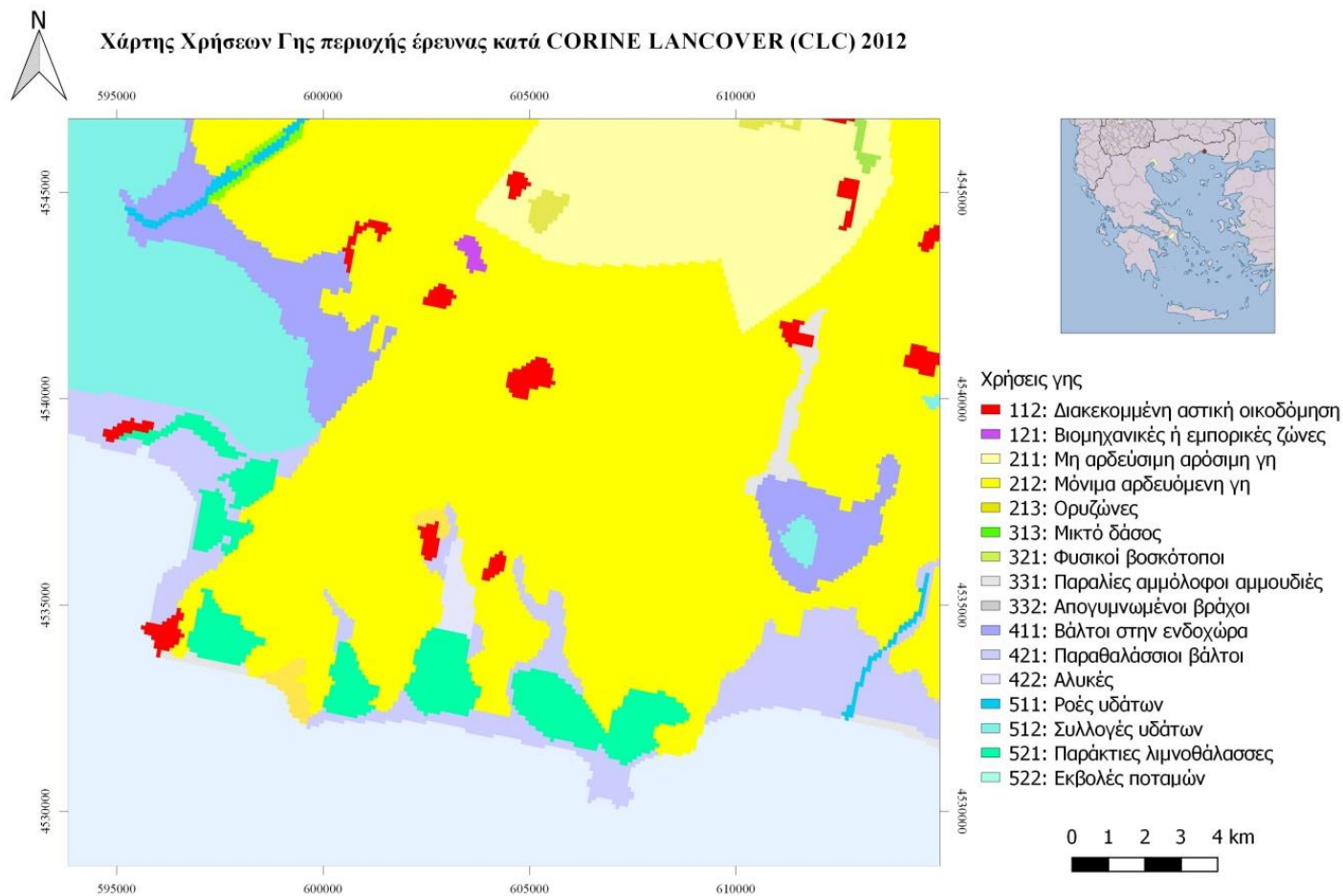
3.1.2.1. Χρήσεις γης περιοχής μελέτης

Η περιοχή μελέτης στο μεγαλύτερο σύνολο της χρησιμοποιείται εντατικά για γεωργικές δραστηριότητες. Η έκταση της ανέρχεται στα 165.1 km², συμπεριλαμβάνοντας και τις δομημένες εκτάσεις οι οποίες έχουν έκταση 2.7 km² και καταλαμβάνουν ένα μικρό τμήμα της τάξης του 1.6% όπως απεικονίζεται στον Πίνακα 3.5.

Πίνακας 3. 5. Δομημένη έκταση (εκτάσεις κύριων οικισμών) περιοχής έρευνας (ΕΛΣΤΑΤ, 2011)

Οικισμός	Έκταση (km ²)	Οικισμός	Έκταση (km ²)
Φανάρι	0.1086	Νέα Καλλίστη	0.1381
Μέση	0.2591	Παλλάδιο	0.05469
Γλυφάδα	0.2324	Παραδημή	0.3518
Πόρπη	0.3329	Αίγειρος	0.5535
Γλυκονέρι	0.1200	Μεγάλο Κρανοβούνι	0.1724
Καλλίστη	0.04065	Μικρό Κρανοβούνι	0.1218
		Παγούρια	0.2163
Σύνολο 2.702 (km ²)			

Η περιοχή μελέτης αποτελεί μία αμιγώς γεωργική περιοχή, σχεδόν εξ ολοκλήρου καλυμμένη από καλλιεργημένες εκτάσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3 που ακολουθεί.



Σχήμα 3.3. Χρήσεις γης περιοχής έρευνας κατά CORINE LANDCOVER (CLC) 2012

3.1.3. Δημογραφικά χαρακτηριστικά Νομού Ροδόπης

Σύμφωνα με την απογραφή του 2011, ο πληθυσμός του Νομού Ροδόπης ανέρχεται στους 112.039 κατοίκους παρουσιάζοντας μία μικρή αυξητική τάση της τάξης του 0.72% σε σχέση με τον αντίστοιχο πληθυσμό του 2001 (111.237 κάτοικοι). Επισημαίνεται ότι το 2011 εφαρμόστηκε το Πρόγραμμα Καλλικράτης, ο Ελληνικός νόμος 3852/2010, με τον οποίο μεταρρυθμίστηκε η διοικητική διαίρεση της Ελλάδας και επανακαθορίστηκαν τα όρια των αυτοδιοικητικών μονάδων, ο τρόπος εκλογής των οργάνων και οι αρμοδιότητές τους. Οι δήμοι και οι πληθυσμοί του Νομού Ροδόπης για το 2011 μετά την εφαρμογή του Προγράμματος Καλλικράτης καθώς και η πληθυσμιακή εξέλιξη κατά δημοτική ενότητα απεικονίζονται στους Πίνακες 3.6 και 3.7 αντίστοιχα που ακολουθούν.

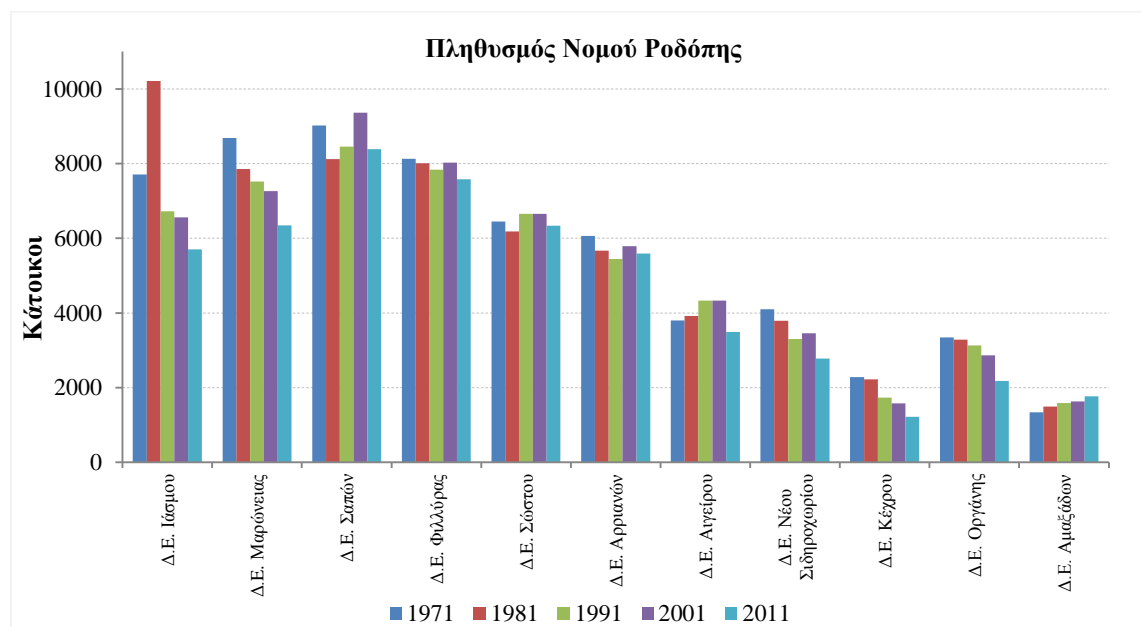
Πίνακας 3. 6. Πληθυσμοί δήμων του Ν. Ροδόπης για το έτος 2011 (ΕΛΣΤΑΤ, 2011)

Δήμοι	Πληθυσμός
Δ. Αρριανών	16.577
Δ. Ιάσμου	13.810
Δ. Κομοτηνής	66.919
Δ. Μαρώνειας - Σαπών	14.733

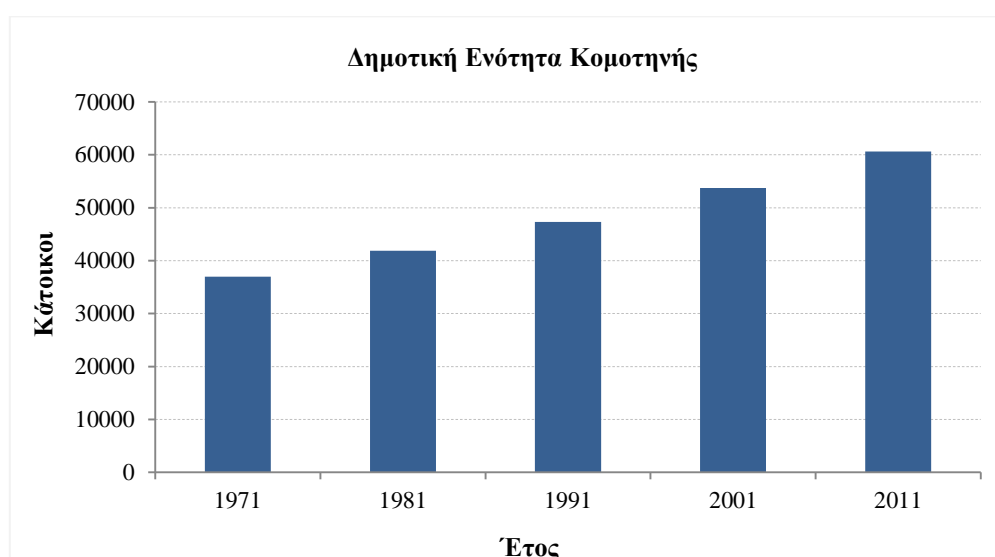
Πίνακας 3. 7. Πληθυσμιακή εξέλιξη κατά δημοτική ενότητα του Ν. Ροδόπης (ΕΛΣΤΑΤ, 2011)

Δημοτική Ενότητα / Έτος	1971	1981	1991	2001	2011
Δ.Ε. Κομοτηνής	36951	41865	47336	53719	60.648
Δ.Ε. Ιάσμου	7709	10212	6723	6564	5.703
Δ.Ε. Μαρώνειας	8688	7856	7519	7261	6.350
Δ.Ε. Σαπών	9023	8124	8453	9365	8.383
Δ.Ε. Φιλύρας	8129	8005	7834	8028	7.583
Δ.Ε. Σώστου	6447	6187	6657	6657	6.334
Δ.Ε. Αρριανών	6065	5668	5450	5789	5.589
Δ.Ε. Αιγείρου	3797	3922	4334	4328	3.493
Δ.Ε. Νέου Σιδηροχωρίου	4104	3790	3305	3454	2.778
Δ.Ε. Κέχρου	2282	2225	1737	1577	1.222
Δ.Ε. Οργάνης	3350	3287	3135	2865	2.183
Δ.Ε. Αμαξιάδων	1340	1493	1590	1630	1.773

Στο γράφημα του Σχήματος 3.4 που ακολουθεί παρουσιάζεται η πληθυσμιακή εξέλιξη κάθε δημοτικής ενότητας του Νομού Ροδόπης και στο Σχήμα 3.6 που αφορά τη δημοτική ενότητα Κομοτηνής παρατηρείται μία αυξητική τάση του πληθυσμού για την περίοδο 1971-2011.



Σχήμα 3. 4. Διακύμανση πληθυσμών Νομού Ροδόπης κατά τα έτη 1971, 1981, 1991, 2001 και 2011 (ΕΛΣΤΑΤ, 2011)



Σχήμα 3. 5. Διακύμανση πληθυσμών Δ.Ε. Κομοτηνής κατά τα έτη 1971, 1981, 1991, 2001 και 2011 (ΕΛΣΤΑΤ, 2011)

3.1.3.1. Δημογραφικά χαρακτηριστικά περιοχής μελέτης

Η περιοχή μελέτης αποτελείται από τους οικισμούς Αιγείρου, Αρωγής, Γλυκονερίου, Γλυφάδας, Καλλίστης, Μεγάλου Κρανοβουνίου, Μέσης, Μικρού Κρανοβουνίου, Νέας Καλλίστης, Παγουριών, Παλλαδίου, Παραδήμης, Φαναρίου, Πόρπης και Παραλίας της Μέσης. Ο πληθυσμός αυτών των οικισμών σύμφωνα με την απογραφή του 2011 ανέρχεται στους 4622 κατοίκους, εμφανίζοντας μείωση της τάξης του 15.2% σε σχέση με τον αντίστοιχο πληθυσμό (5482 κάτοικοι) της απογραφής του 2001.

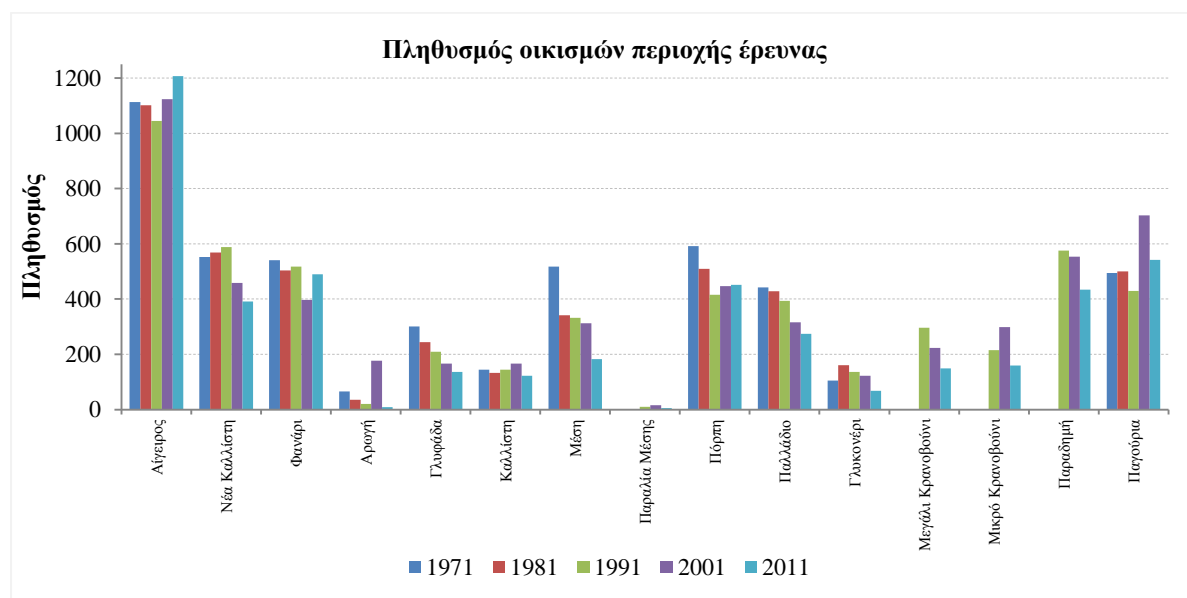
Στους Πίνακες 3.8 και 3.9 απεικονίζονται τα πληθυσμιακά στοιχεία των οικισμών της περιοχής μελέτης, σύμφωνα με τις απογραφές των ετών 1971, 1981, 1991, 2001 και 2011. Συγκεκριμένα για τους οικισμούς Νέας Καλλίστης, Φαναρίου, Αρωγής, Γλυφάδας, Καλλίστης, Μέσης, Παραλίας Μέσης, Πόρπης, Παλλαδίου και Γλυκονερίου παρουσιάζεται μια πτωτική τάση του πληθυσμού, για την περίοδο 1971-2011, με μεγαλύτερη αυτή της Αρωγής (86.36%). Οι υπόλοιποι οικισμοί καταγράφουν αυξητική τάση με μεγαλύτερη αυτή των Παγουριών (9.72%). Στα Σχήματα 3.6 και 3.7, απεικονίζεται η διακύμανση του πληθυσμού κάθε οικισμού της περιοχής έρευνας σύμφωνα με τις απογραφές των ετών 1971, 1981, 1991, 2001 και 2011.

Πίνακας 3. 8. Πληθυσμιακά στοιχεία των οικισμών της περιοχής έρευνας (ΕΛΣΤΑΤ, 2011)

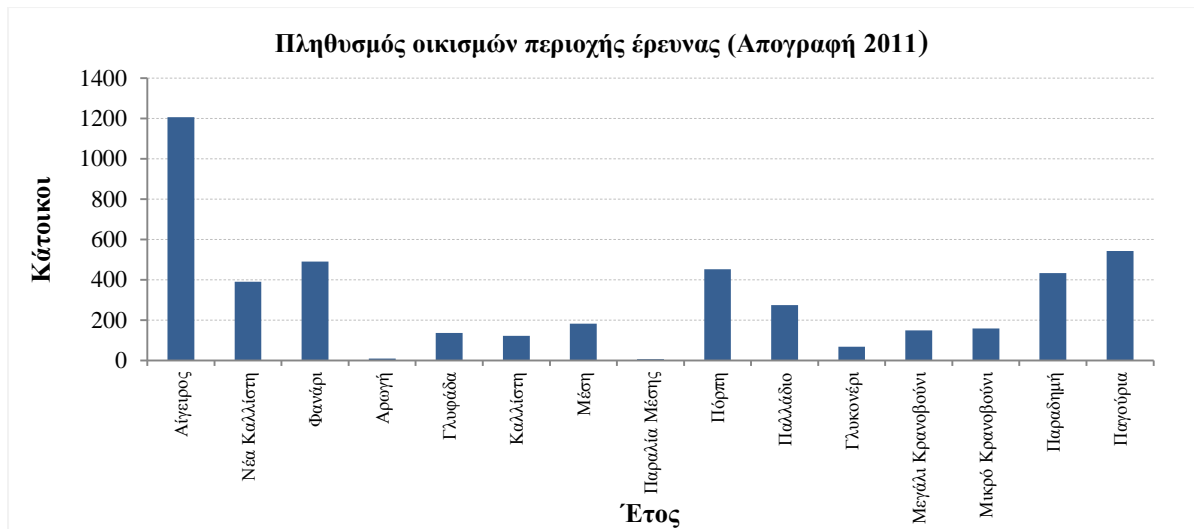
Οικισμός/Έτος	1971	1981	1991	2001	2011
Αίγειρος	1113	1102	1045	1123	1207
Νέα Καλλίστη	552	568	588	459	391
Φανάρι	541	504	518	397	490
Αρωγή	66	36	21	177	9
Γλυφάδα	301	244	209	166	136
Καλλίστη	145	133	145	167	122
Μέση	517	341	332	313	183
Παραλία Μέσης	-	1	10	16	6
Πόρπη	592	509	415	447	452
Παλλάδιο	442	428	394	316	274
Γλυκονέρι	105	161	136	122	68
Μεγάλι Κρανοβούνι	-	-	296	223	149
Μικρό Κρανοβούνι	-	-	215	299	159
Παραδημή	-	-	575	554	434
Παγούρια	494	500	429	703	542

Πίνακας 3. 9. Πληθυσμιακές μεταβολές των οικισμών της περιοχής έρευνας (ΕΛΣΤΑΤ, 2011)

Οικισμός/Μεταβολή (%)	1981-1971	1991-1981	2001-1991	2011-2001	2011-1971
Αίγειρος	-0.99	-5.17	7.46	7.48	8.45
Νέα Καλλίστη	2.90	3.52	-21.94	-14.81	-29.17
Φανάρι	-6.84	2.78	-23.36	23.43	-9.43
Αρωγή	-45.45	-41.67	742.86	-94.92	-86.36
Γλυφάδα	-18.94	-14.34	-20.57	-18.07	-54.82
Καλλίστη	-8.28	9.02	15.17	-26.95	-15.86
Μέση	-34.04	-2.64	-5.72	-41.53	-64.60
Παραλία Μέσης	-	900.00	60.00	-62.50	-
Πόρπη	-14.02	-18.47	7.71	1.12	-23.65
Παλλάδιο	-3.17	-7.94	-19.80	-13.29	-38.01
Γλυκονέρι	53.33	-15.53	-10.29	-44.26	-35.24
Μεγάλι Κρανοβούνι	-	-	-24.66	-33.18	-
Μικρό Κρανοβούνι	-	-	39.07	-46.82	-
Παραδημή	-	-	-3.65	-21.66	-
Παγούρια	1.21	-14.20	63.87	-22.90	9.72



Σχήμα 3. 6. Μεταβολή πληθυσμών οικισμών της περιοχής έρευνας κατά τα έτη 1971, 1981, 1991, 2001 και 2011 (ΕΛΣΤΑΤ, 2011)



Σχήμα 3. 7. Κατανομή πληθυσμού των οικισμών της περιοχής έρευνας για το έτος 2011 (ΕΛΣΤΑΤ, 2011)

Από τα παραπάνω σχήματα παρατηρείται ότι οι οικισμοί του Αιγείρου και των Παγουριών έχουν το μεγαλύτερο αριθμό κατοίκων.

3.2. Γεωμορφολογικές - Γεωλογικές συνθήκες

3.2.1. Γεωμορφολογικές συνθήκες

3.2.1.1 Γεωμορφολογικό πλαίσιο

Η περιοχή μελέτης από γεωμορφολογική πλευρά, χαρακτηρίζεται από λοφώδες έως ημιλοφώδες ανάγλυφο με πολύ μικρές κλίσεις το οποίο διακόπτεται από ορισμένες πεδινές εκτάσεις. Η γεωμορφολογική αυτή εικόνα της περιοχής είναι αποτέλεσμα της λιθολογικής σύστασης των σχηματισμών, της δράσης των τεκτονικών δυνάμεων, της δημιουργίας αναγλύφου, της αποσάθρωσης και της διάβρωσης.

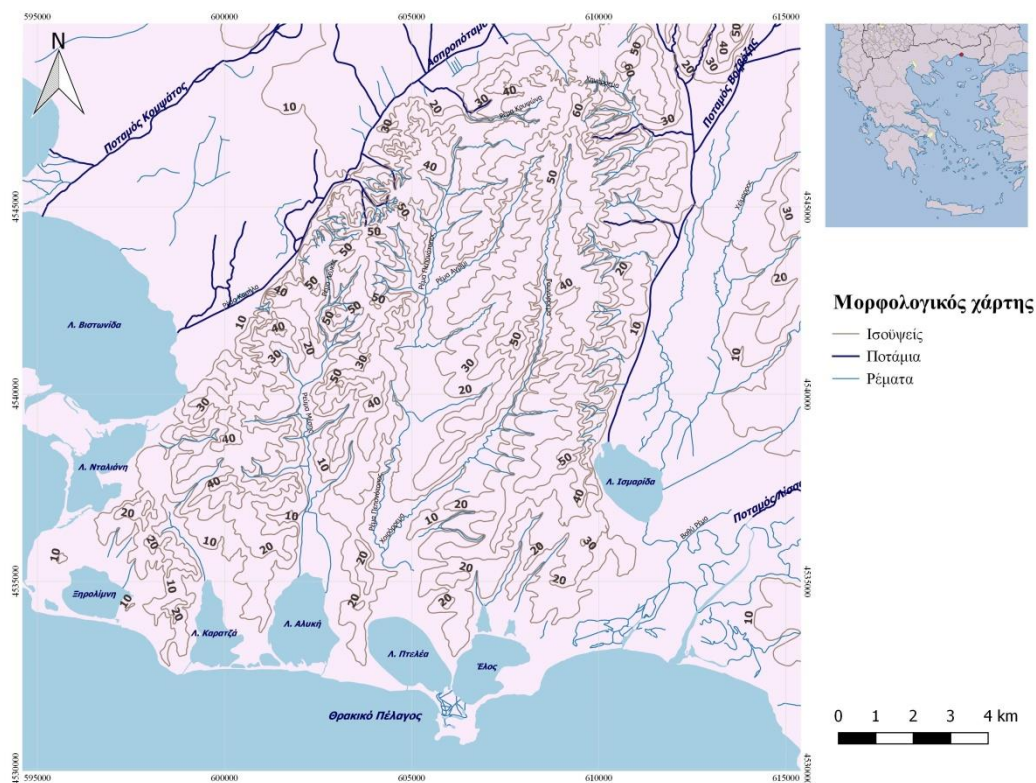
Ο κυριότερος παράγοντας διαμόρφωσης της περιοχής είναι οι αλλαγές στο επίπεδο της θάλασσας στο παρελθόν αλλά και στο παρόν. Η τεκτονική δραστηριότητα και οι μετακινήσεις της ακτογραμμής, συνέβαλαν στη δημιουργία υδροφόρων συστημάτων σημαντικής οικονομικής σπουδαιότητας, όπως αυτά του αλλουβιακού κώνου του Κομψάτου και της κυρίως περιοχής έρευνας.

Τα υψόμετρα της περιοχής κυμαίνονται μεταξύ +2 έως +65 m όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.8. Οι κλίσεις των λοφώδων περιοχών εμφανίζουν διακύμανση από 1% έως 20%.

Δυτικά και ανατολικά της περιοχής έρευνας διακρίνονται απότομες κλίσεις και διαφορά αναγλύφου, σχηματίζοντας την εικόνα αναβαθμίδας μέσου ύψους 10-15 m. Τα όρια της αναβαθμίδας είναι διακριτά κατά μήκος της λίμνης Ισμαρίδας, της δυτικής όχθης του ποταμού Βοζβόζη και μεταξύ Φαναρίου-Αιγείρου. Φανερώνει πρόσφατη δημιουργία ανάγλυφου, πιθανότατα από τεκτονικά αίτια και επίσης έντονη πλευρική ποτάμια διάβρωση (Διαμαντής κ.α., 1994). Στην περιοχή έρευνας συμπεριλαμβάνεται και ο χείμαρρος Βοζβόζης.

Στο νότιο παράκτιο τμήμα παρατηρούνται χαμηλού προφίλ ακτές τύπου Rias, με ακτογραμμή αποτελούμενη από εναλλαγές αμμωδών φραγμάτων και παράκτιων αναβαθμίδων. Τα εκτεταμένα αμμώδη φράγματα, απέκοψαν από τη θάλασσα και δημιούργησαν πλήθος παράκτιων λιμνών, όπως είναι η Ξηρολίμνη, η λ. Καρατζά, η Αλυκή, η λ. Πτελέα, το Έλος και η λ. Ισμαρίδα (Πεταλάς, 1997). Στα δυτικά της περιοχής έρευνας, εμφανίζεται η Βιστωνίδα, η μεγαλύτερη απο τις λιμνοθάλασσες.

Το σύστημα των παράκτιων λιμνοθαλασσών είναι αποδέκτης των νερών μιας συνολικής επιφάνειας περίπου 29 km². Σύμφωνα με (Πεταλάς, 1997) η μορφολογία της περιοχής είναι άμεσα ελεγχόμενη από την τεκτονική και η αναβαθμίδα μεταξύ Φαναρίου – Αιγείρου και λίμνης Ισμαρίδας – ποταμού Βοζβόζη αναπτύσσεται παράλληλα σε τεκτονικές γραμμές.



Σχήμα 3. 8. Γεωμορφολογικός χάρτης περιοχής έρευνας (Καλλιώρας, 2008 με τροποποιήσεις)

3.2.1.2 Υδρογραφικό δίκτυο

Η ορεινή μάζα του Νομού Ροδόπης, αποτελείται από ένα πυκνό υδρογραφικό δίκτυο, το σύνολο των ρεμάτων του οποίου, έχουν ως τελικούς αποδέκτες χειμάρρους. Οι χειμάρροι αυτοί, που καταλήγουν στην έξοδο της ορεινής μάζας προς τον κάμπο, δημιουργούν αυτόνομες λεκάνες απορροής.

Το υδρογραφικό δίκτυο της ευρύτερης περιοχής, με βάση τον τελικό αποδέκτη στον οποίον εκβάλλουν, διακρίνεται σε τρεις μεγάλες ομάδες:

- i. Στην ομάδα των κλάδων του Λίσσου, που εκβάλλει στη θάλασσα νοτιοδυτικά της κοινότητας Ιμέρου

- ii. Στην ομάδα της Βιστωνίδας (Κομψάτος, Ασπροπόταμος κ.α.) που εκβάλλει στη λίμνη Βιστωνίδα
- iii. Στην ομάδα της λίμνης Ισμαρίδας (Ποταμός Βοζβόζης, με τους επί μέρους κλάδους του όπως Χιονόρρεμα, χείμαρροι Καρυδιάς, Κάλχανρα, Τρελοχείμαρρος κ.α.) που εκβάλλει στη λίμνη Ισμαρίδα

Οι ορεινές λεκάνες απορροής οι οποίες έχουν άμεσο ενδιαφέρον για την περιοχή έρευνας είναι η λεκάνη του Κομψάτου, του Χιονορέματος και οι λεκάνες των χειμάρρων Καρυδιάς και Κάλχαντα όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.10. Τα νερά των λεκάνων Χιονορέματος, Καρυδιάς και Κάλχαντα συμβάλλουν στο ύψος του οικισμού Μεσοχωρίου, σχηματίζοντας τον ποταμό Βοζβόζη. Η λεκάνη απορροής του ποταμού Βοζβόζη καλύπτει μία έκταση 340 km² και το μήκος του ποταμού ανέρχεται στα 40 km. Ο ποταμός Βοζβόζης εκβάλλει στη λίμνη Ισμαρίδα και τροφοδοτείται από τα νερά του Τρελοχείμαρρου (λεκάνης απορροής 25 km²) και του χειμάρρου της Καρυδιάς (λεκάνη απορροής 45.880 km²). Οι υπόλοιπες λεκάνες είναι πολύ μικρού μεγέθους, χωρίς ουσιαστικό υδρολογικό ενδιαφέρον.

Πίνακας 3. 10. Εκτάσεις κυριότερων λεκανών απορροής της στενής και της ευρύτερης περιοχής έρευνας (Πεταλάς, 1997)

Λεκάνες Απορροής	Υπολεκάνες	Έκταση (km ²)
Ορεινή λεκάνη ποταμού Βοζβόζη	Χιονόρρεμα	57.500
	Καρυδιά	45.880
	Κάλχαντα	28.775
	υπόλοιπες	32.400
Ορεινή λεκάνη ποταμού Κομψάτου		556.700

Η περιοχή έρευνας όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.9, συγκριτικά με την ορεινή μάζα έχει πιο αραιό υδρογραφικό δίκτυο, το οποίο εξαρτάται από το χαμηλό πολύ ομαλό και ώριμο λοφώδες ανάγλυφο και την σύσταση και την κατάσταση των πετρωμάτων.

Η αποστράγγιση της περιοχής πραγματοποιείται κυρίως προς τα νότια της περιοχής. Το υδρογραφικό δίκτυο στο εσωτερικό της περιοχής έρευνας, έχει παράλληλη μορφή, διασχίζεται από ένα σημαντικό αριθμό ρεμάτων και μικρο-χειμάρρων, οι σπουδαιότεροι από αυτούς είναι τρεις (Μέσης, Πεπονότοπος, Γουρουνόρεμα) με διεύθυνση απορροής από Β-BBA προς Ν-ΝΝΔ. Στα περιθώρια των κοιτών εντοπίζονται μικρά ρέματα δενδριτικής κυρίως ανάπτυξης.

3.2.1.2.1. Υγροβιότοπος λίμνης Βιστωνίδας

Η λίμνη Βιστωνίδα εντοπίζεται στα όρια των νομών Ξάνθης και Ροδόπης, έχει έκταση περίπου 45 km² και είναι ο αποδέκτης όλων των χειμάρρων της βόρειας ορεινής περιοχής. Καταλαμβάνει το κεντρικό τμήμα της πεδιάδας Ξάνθης-Κομοτηνής, διαχωρίζεται από τη θάλασσα με ένα ηθμό από θίνες και επικοινωνεί με αυτή μέσω καναλιών.

Αποτελεί υγρότοπο διεθνούς σημασίας Ramsar, Τόπο Κοινοτικής Προστασίας (ΤΚΠ) για τύπους οικοτόπων και είδη φυτών και ζώων του Δικτύου NATURA 2000 – Ειδική Ζώνη Διατήρησης (ΕΖΔ) - GR1130009. Αποτελεί επίσης Ζώνη Ειδικής Προστασίας (ΖΕΠ) για τα πουλιά Δικτύου NATURA 2000 GR1130010 και μέρος της περιοχής αποτελεί: Καταφύγιο Άγριας Ζωής Περιοχής Λίμνη Βιστωνίδας – Λάγους (ΦΕΚ 666/10-8-78).

3.2.1.2.2 Υγροβιότοπος λίμνης Ισμαρίδας

Η λίμνη Ισμαρίδα εντοπίζεται στις εκβολές των ποταμών Βοζβόζη και Λίσσου, αναπτύσσεται σ' ένα περιβάλλον ήπιας μορφολογίας και έχει έκταση 2.543 km². Είναι η μοναδική λίμνη γλυκού νερού στην Θράκη. Φιλοξενεί αξιόλογο αριθμό ειδών και ενοτήτων βλάστησης, ενώ στη βόρεια πλευρά της λίμνης, ξεχωρίζει μικρό υδροχαρές δάσος.

Θεωρείται ο αποδέκτης των νερών των χειμάρρων Χιονόρεμα, Καρυδιάς και Κάλχαντα που συμβάλλουν μετά την Κομοτηνή και σχηματίζουν τον ποταμό Βοσβόζη. Βρίσκεται σε απόσταση 3 km από την θάλασσα όπου κυριαρχούν εναλλαγές αμμωδών και αργιλοϊλουχών υλικών, τα οποία είναι αποτέλεσμα της δελταϊκής δράσης.

Αποτελεί υγρότοπο διεθνούς σημασίας Ramsar και Τόπο Κοινοτικής Προστασίας (ΤΚΠ) για τύπους οικοτόπων και είδη φυτών και ζώων του Δικτύου

NATURA 2000 – Ειδική Ζώνη Διατήρησης (ΕΖΔ) - GR1130009. Αποτελεί επίσης Ζώνη Ειδικής Προστασίας (ΖΕΠ) για τα πουλιά Δικτύου NATURA 2000 GR1130010 και καταφύγιο Άγριας Ζωής Περιοχής «Μαυρομματίου» (ΦΕΚ 130/12-2-79).

3.2.1.2.3. Υγροβιότοπος Ξηρολίμνης

Η Ξηρολίμνη, ανήκει στο σύστημα των παράκτιων λιμνοθαλασσών, έχει έκταση 1.759 km², είναι αλμυρή και δεν τροφοδοτείται καθόλου από επιφανειακά γλυκά νερά, ενώ επικοινωνεί με τη θάλασσα στο νοτιοανατολικό μέρος της μέσω καναλιού.

Αποτελεί υγρότοπο διεθνούς σημασίας Ramsar και Τόπο Κοινοτικής Προστασίας (ΤΚΠ) για τύπους οικοτόπων και είδη φυτών και ζώων του Δικτύου NATURA 2000 – Ειδική Ζώνη Διατήρησης (ΕΖΔ) - GR1130009. Αποτελούν επίσης Ζώνη Ειδικής Προστασίας (ΖΕΠ) για τα πουλιά Δικτύου NATURA 2000 GR1130010 και Καταφύγιο Άγριας Ζωής Λίμνης Ξηρολίμνης.

3.2.1.2.4. Υγροβιότοπος λίμνης Πτελέας – Έλους

Οι λίμνες Πτελέα και Έλος έχουν έκταση 2.972 km² και 2.344 km² αντίστοιχα. Περιβάλλονται και οι δύο στο βόρειο και βορειοανατολικό τμήμα τους από αρδευόμενες καλλιέργειες, ενώ δεν επικοινωνούν μεταξύ του εξαιτίας της ύπαρξης αναχώματος που τις διαχωρίζει. Η λιμνοθάλασσα Πτελέα επικοινωνεί με τη θάλασσα δια μέσου στομίου στο νοτιοανατολικό της μέρος και η λιμνοθάλασσα Έλος επικοινωνεί με τη θάλασσα στο νότιο μέρος της.

Αποτελούν υγρότοπο διεθνούς σημασίας Ramsar και Τόπο Κοινοτικής Προστασίας (ΤΚΠ) για τύπους οικοτόπων και είδη φυτών και ζώων του Δικτύου NATURA 2000 – Ειδική Ζώνη Διατήρησης (ΕΖΔ) - GR1130009. Αποτελούν επίσης Ζώνη Ειδικής Προστασίας (ΖΕΠ) για τα πουλιά Δικτύου NATURA 2000 GR1130010 και Καταφύγια Άγριας Ζωής των Περιοχών Λίμνης Πτελέας & Λίμνης Έλους.

3.2.1.2.5. Υγροβιότοπος λιμνών Καρατζάς – Αλυκής

Οι δύο αυτές λιμνοθάλασσες έχουν έκταση 1.859 km² και 3.306 km² αντίστοιχα και δέχονται επιφανειακά γλυκά νερά μόνο από τις περιμετρικές αρδευόμενες εκτάσεις. Η λιμνοθάλασσα Καρατζά επικοινωνεί με τη θάλασσα στο νότιο μέρος της.

Αποτελεί υγρότοπο διεθνούς σημασίας Ramsar και Τόπο Κοινοτικής Προστασίας (ΤΚΠ) για τύπους οικοτόπων και είδη φυτών και ζώων του Δικτύου NATURA2000 – Ειδική Ζώνη Διατήρησης (ΕΖΔ) - GR1130009. Αποτελούν επίσης Ζώνη Ειδικής Προστασίας (ΖΕΠ) για τα πουλιά Δικτύου NATURA 2000 GR1130010 και Καταφύγιο Άγριας Ζωής Περιοχής Λίμνης Αλυκής.

3.2.2. Γεωλογικές συνθήκες

3.2.2.1. Γεωλογικό πλαίσιο

Η περιοχή μελέτης εντάσσεται στο γεωλογικό περιβάλλον της μάζας της Ροδόπης, η οποία εξαπλώνεται σε όλη την Ανατολική Μακεδονία και την Θράκη. Το δυτικό όριο της μάζας της Ροδόπης είναι ο ποταμός Στρυμόνας, ο οποίος και τη διαχωρίζει από τη Σερβομακεδονική μάζα. Εντοπίζεται στο παράκτιο τμήμα της Ροδόπης και περιλαμβάνει Τεταρτογενείς αποθέσεις, Νεογενή ιζήματα (Πλειοκαινικές – Άνω Μειοκαινικές αποθέσεις) και Παλαιογενείς σχηματισμούς.

3.2.2.1.1. Τεταρτογενείς αποθέσεις

Οι τεταρτογενείς αποθέσεις, όπου καταλαμβάνουν εκτάσεις πάχους μερικών δεκάδων μέτρων, εντοπίζονται στην ευρεία κοίτη των χειμάρρων και στις νοτιότερες παράκτιες περιοχές. Περιλαμβάνουν πηλούς, ψαμμούχους πηλούς κόκκινου χρώματος, χαλίκια, κροκάλες και άμμους και αποτελούν κυρίως χειμάρριες αποθέσεις.

Οι τεταρτογενείς αποθέσεις, οι οποίες εμφανίζονται σε πλήρη ανάπτυξη, εντοπίζονται στην πεδινή περιοχή της Αμβροσίας. Πρόκειται κυρίως για τις αποθέσεις του ποταμού Κομψάτου, οι οποίες περιλαμβάνουν χονδρόκοκκα υλικά (κροκάλες πάχους μεγαλύτερου των 120 m) τα οποία προς την περιφέρεια του εναλλάσσονται από στρώσεις αργίλων. Λόγω της μεγάλης διαπερατότητας των υλικών αυτών, η παρουσία αυτών των υλικών είναι σπουδαίας σημασίας για την τροφοδοσία των νεογενών υδροφόρων της περιοχής έρευνας.

3.2.2.1.2. Πλειοκαινικές αποθέσεις

Οι πλειοκαινικές αποθέσεις περιλαμβάνουν κυρίως χονδρόκοκκα υλικά, τα οποία εξαπλώνονται σε όλη σχεδόν την περιοχή μελέτης. Οι κύριοι σχηματισμοί από τους οποίους αποτελούνται οι πλειοκαινικές αποθέσεις είναι οι εξής (Διαμαντής κ.α., 1994):

- Άργιλος κιτρινωπή, ανοικτή καφέ, ιλυώδης και λεπτόκοκκη, αμμώδης, μαλακή πλαστική και ένυδρος
- Άμμος, χάλικες, κροκάλες γωνιώδεις έως στρογγυλοί που αποτελούνται από χαλαζία, θραύσματα μεταμορφωμένων πετρωμάτων, σκληρού ψαμμίτη και ηφαιστειακών πετρωμάτων
- Άμμος πολύ λεπτόκοκκη, αργιλώδης ή ιλυώδης και κατά περίπτωση άσπρη καολινιτική
- Άμμος μεσόκοκκη προς χονδρόκοκκη ή πορτοκαλόχρους υπογωνιώδης και χάλικες-κροκάλες από γνευσιακά ανδεσιτικά χαλαζιακά και ψαμμιτικά θραύσματα πολύ σκληρά
- Χάλικες-κροκάλες αποτελούμενες από χαλαζία ανοικτού κίτρινου χρώματος γωνιώδη και θραύσματα ηφαιστειακών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων
- Άμμος άσπρη από χαλαζία, καολινίτη, γλωρίτη και αστρίους

3.2.2.1.3. Μειοκαινικές αποθέσεις

Οι μειοκαινικές αποθέσεις αφορούν σχηματισμούς ηπειρωτικού χαρακτήρα (χαλίκια, άμμους, κροκάλες) οι οποίοι είναι διαπερατοί σε υψηλό βαθμό και αποτέθηκαν σε αλλουβιακό ή λιμναίο περιβάλλον. Η συνέχεια των προαναφερθέντων σχηματισμών διακόπτεται από στρώματα σκληρής ή μαλακής αργίλου, γκρί ή πράσινου χρώματος, καολινιτικής προέλευσης. Τα πιο συμπαγή υλικά αυτών των σχηματισμών είναι οι ψαμμίτες, οι οποίοι εμφανίζονται λεπτόκοκκοι έως χονδρόκοκκοι, διαβαθμισμένοι ή αδιαβάθμητοι με υψηλό πορώδες.

Το πάχος των αποθέσεων βαθμιαία ελαττώνεται προς τα όρια, ενώ η μείωση είναι πιο δραστική στα βόρεια και ανατολικά όρια της περιοχής όπου οι νεώτερες

αποθέσεις της γκριζοπράσινης αργίλου επιδεικνύουν πάχος λίγων έως δεκάδων μέτρων (Πεταλάς, 1997).

Από τα δεδομένα δειγματοληπτικών γεωτρήσεων, στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος (Διαμαντής κ.α., 1994) προέκυψε ότι οι μειοκαινικές αποθέσεις της περιοχής έρευνας περιλαμβάνουν:

- Ιζήματα που αποτέθηκαν στα πλαίσια της δράσης ενός διακλαδούμενου ποταμού και είναι χονδρόκοκκα ποικίλως διαβαθμισμένα σχετικά χαλαρά με διαγένεση σε αρχικό στάδιο και κυρίως από αργιλικά υλικά (κατά δεύτερο λόγο ασβεστίτικο) καθώς και ποικίλου βαθμού στρογγυλότητας.
- Σχηματισμοί που αποτέθηκαν σε ένα "ήρεμο περιβάλλον" εκτός των παλαιογεωγραφικών αξόνων ροής με τα εξής χαρακτηριστικά: (i) Από πλευράς μεγέθους των κόκκων πρόκειται κυρίως για λεπτόκοκκα υλικά όπως άργιλοι χρώματος γκριζού ή πορτοκαλόχρου και σπανιότερα καφέ, οι οποίοι εναλλάσσονται με μεγάλη συχνότητα κυρίως με ιλυόλιθους χαλαρούς καθώς και μετρίως ταξινομημένους ψαμμίτες λεπτόκοκκους έως μεσαίους με συνδετικό υλικό κυρίως αργιλικό και κατά δεύτερο λόγο ασβεστίτικο και (ii) οι στρώσεις των σχηματισμών αυτών είναι συνήθως πάχους μικρότερου των 2 m.

Η περιοχή χαρακτηρίζεται από την εναλλαγή λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων ιζημάτων, γεγονός που υποδηλώνει ήρεμο περιβάλλον ιζηματογένεσης (λιμναίο). Επίσης, η ύπαρξη λεπτών στρώσεων αργίλων επηρεάζει αρνητικά την κατείδυση του νερού.

Οι (Διαμαντής κ.α., 1994) κατόπιν μελέτης δεδομένων γεωλογικών τομών 400 περίπου υδρογεωτρήσεων της περιοχής, κατέληξαν στην αποδοχή της ύπαρξης διακλαδούμενου ποταμού με μεγάλες παροχές, κατά την περίοδο των εποχών του Μειόκαινου και του Πλειόκαινου, μέρος της κοίτης του οποίου είναι σήμερα διακριτό στην παραλία της Γλυφάδας.

Τα χονδρόκοκκα υλικά (άμμοι, χάλικες, κροκάλες) εμφανίζονται σε ενιαία στρώματα πάχους 50-70 m τα οποία διαχωρίζονται μεταξύ τους από αργιλικές ενστρωματώσεις. Οι αργιλικοί σχηματισμοί αποδίδουν τον σχηματισμό τους στη δημιουργία λιμναίου περιβάλλοντος παράλληλα με το αλλουβιακό. Στα όρια της περιοχής έρευνας, στην περιοχή των Παγουριών, οι ενστρωματώσεις των

χονδρόκοκκων υλικών εμφανίζονται πολυπληθέστερες και διακόπτονται συνεχώς από αργιλικές στρώσεις, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την εξασθένηση της υδρογεωλογικής λεκάνης με την ανάπτυξη οριακών συνθηκών για την περιοχή έρευνας.

3.2.2.1.4. Παλαιογενείς σχηματισμοί

Οι παλαιογενείς σχηματισμοί περιλαμβάνουν κυρίως εναλλαγές αργιλίτη και ψαμμίτη και εντοπίζονται στο βόρειο και ανατολικό όριο της περιοχής έρευνας. Η μετάβαση από τους νεότερους προς τους παλαιότερους σχηματισμούς γίνεται με την εμφάνιση της γκριζοπράσινης αργίλου.

Οι (Διαμαντής κ.α., 1994) αναφέρουν αναλυτικά ότι στα πρώτα 200 m περίπου επικρατούν οι εξής σχηματισμοί:

- άργιλος καφέ, γκρί-πρασινωπή, πλαστική,
- άργιλος πράσινη πλαστική και αμμώδης κατά περίπτωση καφετίζουσα,
- άμμοι, χάλικες και κροκάλες γκρί και πράσινοι,
- λιγνίτης, σκοτεινόχρους, καφετίζον, μαύρος, μαλακός,
- χάλικες, κροκάλες και άμμος γωνιώδης, υποστρογγλυμένη από θραύσματα μεταμορφωμένων πετρωμάτων και με αιματίτη κατά περίπτωση,
- ψαμμίτης πολύ λεπτόκοκκος, αργιλώδης, καολινιτικός, πράσινος, μαλακός, χαλαρός με ορυκτά mica,
- ιλυόλιθος, κίτρινος, καφέ, μαλακός και χωρίς ασβεστίτη κατά περίπτωση πράσινος, συμπαγής.
- άργιλος γκρι-μεσόκοκκη, κατά περίπτωση χαλικώδης χωρίς στρώσεις, γωνιώδης, συνιστάμενη από χαλαζία καθαρό ή γαλακτώδη, θραύσματα χαλαζιτών και γνευσίων, χλωρίτη, καολινίτη, γλαυκονίτη,
- άργιλος πράσινη - άσπρη, αμμώδης πολύ καολινιτική με ορυκτά mica,
- ψαμμίτης πολύ μαλακός διαβαθμισμένος ή αδιαβάθμητος και ημιγωνιώδης έως ημιστρογγυλευμένος και τέλος,

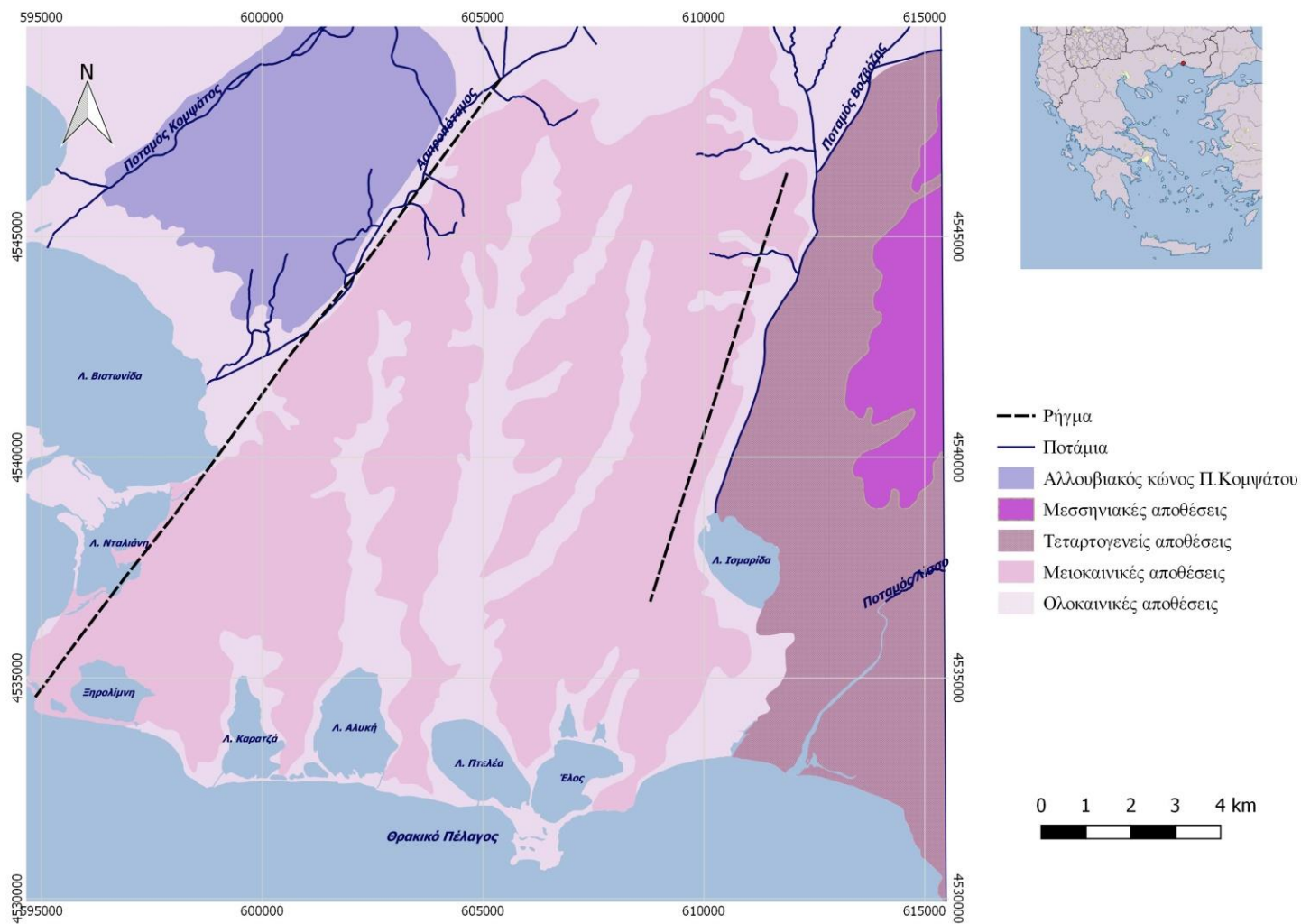
– ασβεστόλιθος - κρητίς, άσπρος, μεσόκοκκος, σκληρός, εύθρυπτος κατά περίπτωση μαλακός κονιοποιημένος.

Οι παραπάνω σχηματισμοί, οι οποίοι απεικονίζονται στο Σχήμα 3.10, εντοπίζονται σε στρώσεις πάχους 2 έως 4 m. Η συχνή εμφάνιση λεπτόκοκκων ίζημάτων μεταξύ των χονδρόκοκκων εμποδίζει την υδραυλική επικοινωνία των σχηματισμών αυτών.

3.2.2.2. Τεκτονικές συνθήκες

Η περιοχή έρευνας και ειδικότερα το τμήμα που εντοπίζεται μεταξύ Ασπροπόταμου και Βοζβόζη βρίσκεται σε ανοδική κίνηση. Μετά το τέλος των συμπιεστικών τάσεων από το Μειόκαινο μέχρι σήμερα, σχηματίσθηκε ένα ορθογώνιο σύστημα από ΒΑ και ΒΔ κάθετα ρήγματα.

Τα σημαντικότερα ρήγματα που αξίζει να επισημανθούν είναι αυτά που αναπτύσσονται κατά μήκος των ορίων της περιοχής έρευνας και τα οποία συμβάλλουν στη δημιουργία οριακών συνθηκών. Αυτά είναι τα ακόλουθα: (i) ρήγμα παράλληλο με τον Ασπροπόταμο (άξονας Γλυκονέρι–Νέα Καλλίστη– Παλλάδιο– Αίγειρος, (ii) ρήγμα παράλληλο με την κοίτη του ποταμού Βοσβόζη (άξονας Ισμαρίδα–Παγούρια–Μεγάλο Κρανοβούνι) και (iii) ρήγμα στο βόρειο-βορειοανατολικό όριο της περιοχής έρευνας (άξονας Αίγειρος–Μεγάλο Κρανοβούνι).



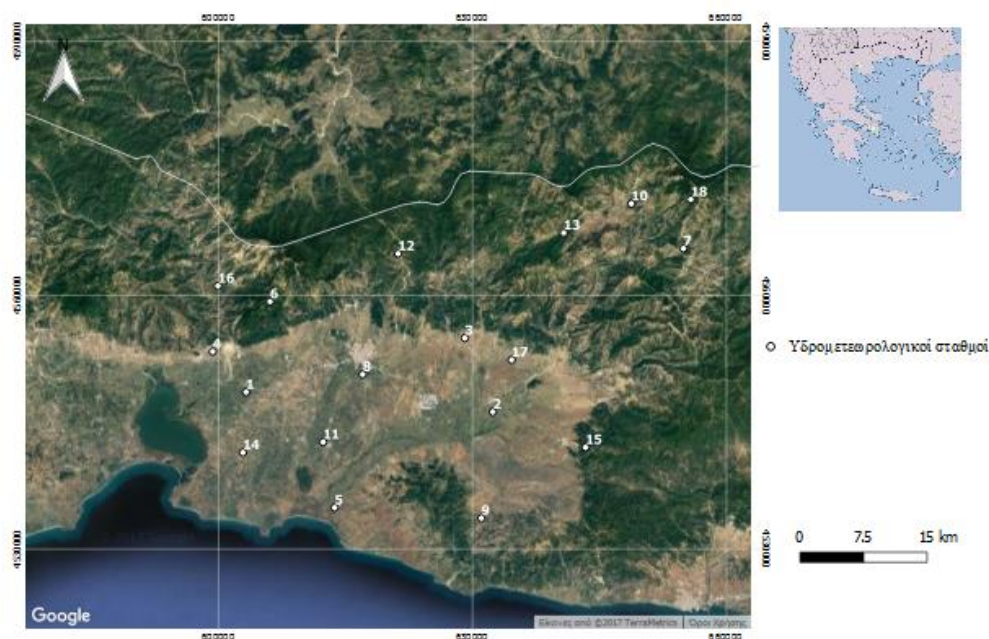
Σχήμα 3. 10. Γεωλογικός χάρτης περιοχής μελέτης (Πεταλάς, 1997 με σύνθεση και τροποποίηση από γεωλογικό χάρτη Ι.Γ.Μ.Ε., Γεωλογικός χάρτης Ελλάδας, 1:500.000)

3.3. Επιφανειακή υδρολογία

3.3.1. Υδρομετεωρολογικοί σταθμοί

Οι υδρομετεωρολογικοί σταθμοί του Νομού Ροδόπης, οι οποίοι παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.11, χαρακτηρίζονται από ικανοποιητική κατανομή σε σχέση με τη συνολική έκταση του νομού. Οι μετρήσεις των 18 σταθμών που αναφέρονται στον Πίνακα 3.11, είναι αντιπροσωπευτικές για το πεδινό και για το ορεινό τμήμα, με τις αντίστοιχες υδρολογικές λεκάνες (Πίνακας 3.12).

Ο βροχομετρικός σταθμός από τον οποίο αντλήθηκαν τα βροχομετρικά δεδομένα είναι ο σταθμός της Πόρπης, ο οποίος τοποθετείται στο κέντρο της περιοχής έρευνας, ανήκει στο ΥΠΕΚΑ και εμφανίζεται με τον κωδικό 14 στο Σχήμα 3.11.



Σχήμα 3. 11. Θέσεις υδρομετεωρολογικών σταθμών Νομού Ροδόπης και περιοχής έρευνας (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth © 2017)

Πίνακας 3. 11. Υδρομετεωρολογικοί σταθμοί Νομού Ροδόπης

a/a	Σταθμός	a/a	Σταθμός	a/a	Σταθμός
1	Αμπελουργικός	7	Κέχρος	13	Οργάνη
2	Αρίσβη	8	Κομοτηνή	14	Πόρπη
3	Γρατινή	9	Κρωβύλη	15	Σάπες
4	Ίασμος	10	Μυρτίσκη	16	Τρίκορφο
5	Ίμερος	11	Νέο Σιδηροχώρι	17	Φιλλύρα
6	Κερασέα	12	Νυμφαία	18	Χλόη

Πίνακας 3. 12 Κυριότερες υδρολογικές λεκάνες Νομού Ροδόπης (Πεταλάς, 1997)

Λεκάνη απορροής	Έκταση Λ.Α (km ²)
π. Λίσσου	1407.2
π. Κομψάτου	556.4
π. Βοζβόζη	164.6

Ο Παγκόσμιος Μετεωρολογικός Οργανισμός (WMO) όσον αφορά στην πυκνότητα του δικτύου σε σχέση με τις γενικότερες υδρομετεωρολογικές συνθήκες έχει προτείνει τα εξής:

- Ένα βροχογράφο ανά 600 – 900 km² σε επίπεδες περιοχές για ήπιες μεσογειακές και τροπικές ζώνες
- Ένα βροχογράφο ανά 100 – 250 km² σε ορεινές περιοχές για ήπιες μεσογειακές και τροπικές ζώνες
- Ένα βροχογράφο ανά 25 km² σε ημιορεινές περιοχές για ήπιες μεσογειακές και τροπικές ζώνες
- Ένα βροχογράφο ανά 1500 – 10000 km² σε ξηρές και πολικές ζώνες

Η πυκνότητα των σταθμών βροχομετρικών παρατηρήσεων σε σχέση με την έκταση γεωργικών υδρολογικών λεκανών σύμφωνα με τον WMO αναλύεται στον Πίνακα 3.13 που ακολουθεί:

Πίνακας 3. 13. Προδιαγραφές πυκνότητας βροχομετρικών σταθμών (WMO)

Έκταση υδρολογικής λεκάνης (στρέμματα)	Αναλογία km ² /σταθμό	Ελάχιστος αριθμός σταθμών
0 - 120	0.13	1
120 - 400	0.20	2
400 - 800	0.25	3
800 - 2000	0.40	1 ανά 0.4 km ²
2000 - 10000	1.00	1 ανά 1 km ²
10000 - 20000	2.50	1 ανά 2.5 km ²
> 20000	7.50	1 ανά 7.5 km ²

Από τα παραπάνω και με δεδομένο ότι η περιοχή έρευνας έχει έκταση ίση με 160 km², προκύπτει ως συμπέρασμα ότι ο σταθμός της Πόρπης με υψόμετρο +32.1 m, συνιστά ικανοποιητική πηγή βροχομετρικών δεδομένων σε σχέση με τις υδρομετεωρολογικές συνθήκες και την έκταση της περιοχής έρευνας.

Επισημαίνεται επίσης, ότι ο αριθμός και ο τύπος των οργάνων που πρέπει να τοποθετηθούν σε μια λεκάνη είναι συνάρτηση οικονομικών, κλιματικών και τοπογραφικών παραγόντων και ότι η πυκνότητα του δικτύου μιας λεκάνης πρέπει να καθορίζεται κυρίως από το βαθμό ανομοιομορφίας των κατακρημνισμάτων και το σκοπό που πρόκειται να εξυπηρετήσει.

3.3.2. Βροχομετρικά δεδομένα

Η περιοχή έρευνας χαρακτηρίζεται ως τυπική πεδινή μεσογειακή περιοχή, με σχετικά ξηρά και υγρά καλοκαίρια και υγρούς και ψυχρούς χειμώνες. Στον Πίνακα 3.14 που ακολουθεί απεικονίζονται οι τιμές των ύψων βροχής για τα έτη 1954 – 2005 καταγεγραμμένα από το σταθμό της Πόρπης.

Πίνακας 3. 14. Ύψη βροχής (mm) για την περίοδο 1954 - 2005

ΕΤΟΣ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠΤ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	ΣΥΝΟΛΟ (mm/year)
1954	99.9	59.1	80.8	15.2	20.7	4.5	10.3	13.4	27.8	238.4	213.4	108	891.5
1955	113.1	34	55.5	44	26	67.8	67	16.5	66	115	90.5	55.5	750.9
1956	43.9	36	79.4	23.5	97.2	84.7	3.5	1.5	0	30.5	132	57.2	589.4
1957	41.5	21.5	22	37.5	95.5	22	8.5	0	24.3	57.8	46.2	68.4	445.2
1958	163.5	10.6	75.5	61.9	2	36.5	18	9.8	36.8	17.5	63	17.2	512.3
1959	107.3	5	15.7	39.9	15.2	15.6	20.5	2.7	23.4	18.2	54.6	66.7	384.8
1960	200.6	34.7	46.5	18.8	98.6	101.5	19	6	0	7.5	187.3	133.9	854.4
1961	102.3	16	14.9	28.5	50.9	66.5	13.8	0	7.6	0	60.4	127.5	488.4
1962	10.2	42.2	136.1	51.7	28.5	7	69.9	0	18.7	63.8	98.3	96.3	622.7
1963	85.9	106.2	79.5	24	95.1	79.8	10	0	41.1	58	53.8	70.7	704.1
1964	20.6	43.4	0	50.6	47.1	16.5	23.8	17.6	79.6	78.2	23.8	72.3	473.5
1965	39.7	124.5	24	21.3	29.4	6.9	0	0	0	0.2	74.5	116.4	436.9
1966	58.2	17.5	65.4	56	60.5	27	1.9	0	69.1	81.3	191.5	215.3	843.7
1967	39.6	24.3	32	33.4	31.1	17.7	20.8	0	9.8	39.1	64.1	89.9	401.8
1968	129.5	70.5	19.2	10.5	0.6	25.5	0.3	8.5	54.3	10.5	111.4	46.1	486.9
1969	115.2	102.5	63.8	38.7	14.4	32.5	3.7	5.5	10.1	0.2	19.5	323.4	729.5
1970	108.2	42.8	62.9	31.2	43.1	8.7	8.4	11.4	3.8	43.4	17.7	63.5	445.1
1971	45	79.9	95.9	41.8	36.6	57.8	87.6	16.4	51.9	25	32.8	60.1	630.8
1972	28.4	82.4	9.8	77.6	20.8	19.4	19.4	40.6	63	228	16.5	13.7	619.6

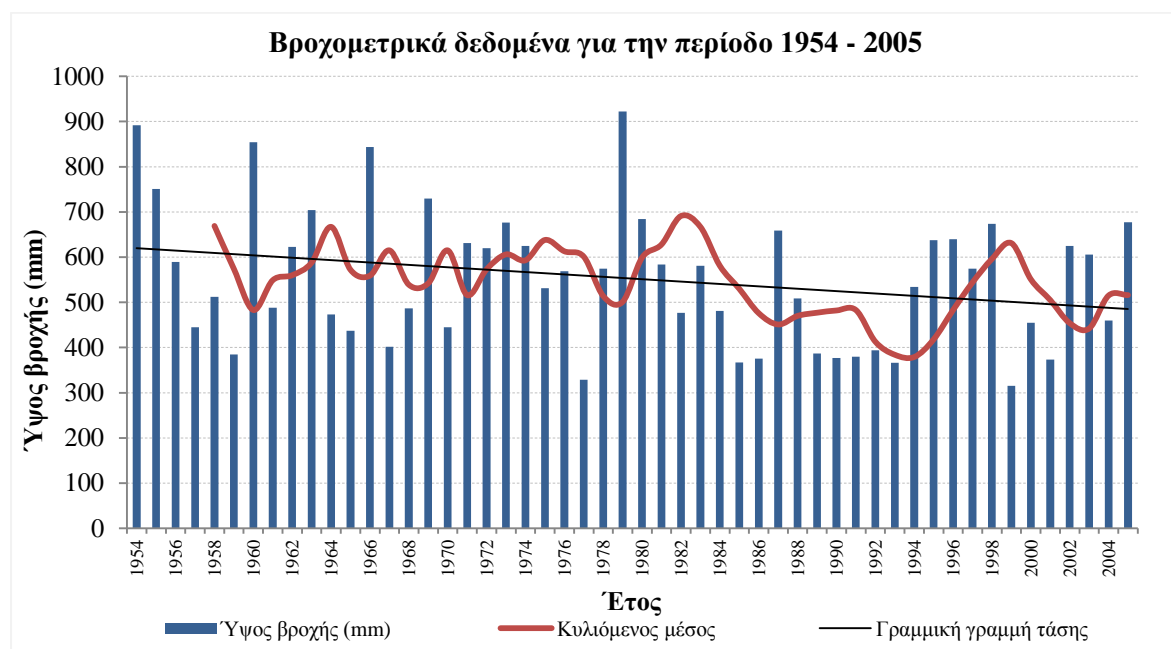
ΕΤΟΣ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠΤ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	ΣΥΝΟΛΟ (mm/year)
1973	131.2	64.3	66.4	61.6	22.6	45.7	21	0	116.6	39.1	31.3	77	676.8
1974	14.9	37.1	72.7	31.7	34.5	53.5	61.7	0	24.4	20.5	63.8	210.3	625.1
1975	52.7	23.3	10.1	57.8	69.1	109.7	9	59.2	0	37.5	39.1	63.9	531.4
1976	9.3	35.5	17.8	13.1	30.3	43.2	41.4	37.4	13.2	194.3	91.5	42.1	569.1
1977	54.5	46.1	11.3	5.9	48.3	10.9	0.5	1.4	91.9	7.5	30.4	20.3	329
1978	40.7	54.7	45	66.1	71.2	20	1.3	6.1	71.5	73.1	70.8	54.3	574.8
1979	173.1	132	14.5	87.1	56	8.6	59.5	11.8	47.7	79.6	189.6	62.5	922
1980	86.5	3	37.8	86.1	65	60.2	25.2	10.1	24.2	36.1	126.2	123.8	684.2
1981	148.2	50.8	17.2	4.5	12.3	11.2	24	23.9	3.3	87	83.5	117.7	583.6
1982	4.4	94.7	41.6	79.4	44.8	0.2	20	8.9	2.7	43.8	67.5	68.7	476.7
1983	9.4	18.4	39.6	17.9	79.4	130.2	74.1	17.5	22.3	20	92.5	59.2	580.5
1984	74.1	15.7	113.3	49.8	4.5	11.2	25.4	37.3	2.4	13.6	79.1	54.6	481
1985	47	59.8	44.8	12.8	7.3	14.4	2	27.2	9.7	23.8	107.3	10.6	366.7
1986	55.7	171.6	4	10.4	43.4	27.4	4	0	0	7.3	32.7	19.2	375.7
1987	22.9	44.2	46.5	98.8	14.6	95.2	6.5	10.5	0	26.7	173.3	119.2	658.4
1988	10.4	60	103.5	39.1	19.3	50.7	7.4	0	23.3	23.3	111.1	60.2	508.3
1989	0	0	69.8	14.3	22.5	62.5	8.6	5.3	66.1	41	65.1	31.9	387.1
1990	0	8.7	11.3	42.9	17.3	22.2	4	0	39.4	64.7	29.6	136.5	376.6
1991	1.8	33.1	23.4	64.4	69.8	28.6	51.4	18.6	5	26.9	40.5	16.2	379.7
1992	4.2	1.2	41.1	57	16.6	49.9	4.9	0	0.5	27.4	82.6	108.4	393.8
1993	13.2	0	31.2	29.1	26.6	20.2	4.5	6.3	4.8	16.5	133.7	80.2	366.3
1994	80.1	28.2	22.7	38.7	4.5	54.7	23.3	10.2	0	39.9	37.2	194.6	534.1
1995	76.40	19.5	132.4	35.5	9.2	9	43.2	14.6	86.3	6.9	106.7	97.9	637.6
1996	62.9	95.5	35.6	48.4	36.5	6.5	0	12.8	79	15.9	101.9	144.5	639.5
1997	50.8	12.9	33.2	46.1	10	6	8.3	38.2	2.5	84.2	90.5	191.6	574.3
1998	68.3	132.3	34	0.4	58	20.9	28.4	0.6	51.8	72.5	127.8	78.3	673.3
1999				14	20.5	21	40.5	24.5	20.5	16.5	80.5	77.5	315.5
2000	56.5	49	55.5	39.5	16.5	7.5	6	0	30.5	58	65.5	70.5	455
2001	68	11	11	71	17	5	9	56	45.5	0	33.5	46.5	373.5
2002	38	25	48	7.5	0	8.5	106	8	82.5	165.5	93	43	625
2003	122	23	14	12	81	0	17	0	66	102	38	130.5	605.5
2004	59	0	42.5	22	45	20	125	2.5	4.5	30	27	82	459.5
2005	58	107	22	9	18.5	4	56	96	0	128	126	53	677.5

Στον Πίνακα 3.15, παρουσιάζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των υψών βροχής για την περίοδο 1954 – 2005. Παρατηρείται ότι η μέση ετήσια βροχόπτωση είναι 555.3 mm και οι τιμές της ελάχιστης και της μέγιστης ετήσιας βροχόπτωσης είναι 315.5 mm και 922 mm αντίστοιχα.

Πίνακας 3. 15. Στατιστικά χαρακτηριστικά υψών βροχής (mm) καταγεγραμμένα στο βροχομετρικό σταθμό Πόρπης (Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ.) για την περίοδο 1954-2005

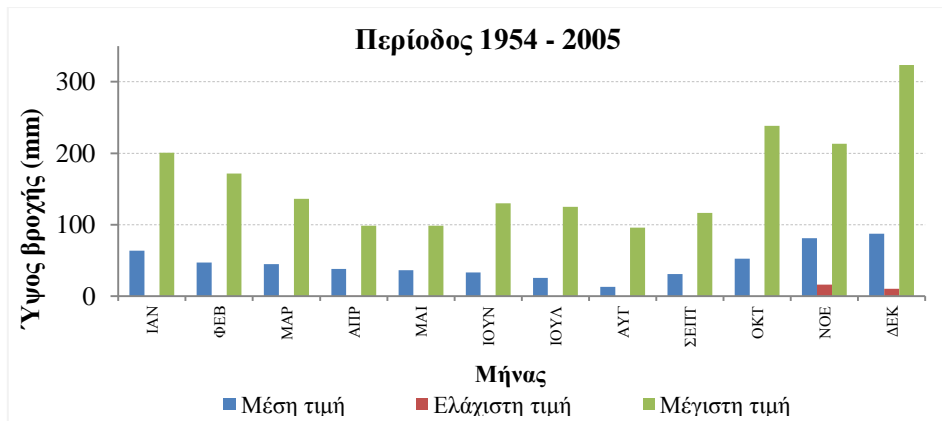
ΕΤΟΣ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠΤ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	Σύνολο
Μέση τιμή	63.7	47.3	45.0	38.1	36.6	33.4	25.5	13.4	31.3	52.7	81.2	87.5	552.5
Ελάχιστη τιμή	0	0	0	0.4	0	0	0	0	0	0	16.5	10.6	315.5
Μέγιστη τιμή	200.6	171.6	136.1	98.8	98.6	130.2	125	96	116.6	238.4	213.4	323.4	922
Τυπική απόκλιση	48.6	40.2	32.6	24.1	27.5	31.1	28.7	18.5	30.9	54.8	48.9	59.2	148.9

Στο Σχήμα 3.12 απεικονίζεται η διακύμανση της ετήσιας βροχόπτωσης του σταθμού Πόρπης για την περίοδο 1954 – 2005. Παρατηρείται ότι για τη συνολική περίοδο εμφανίζεται μια πτωτική τάση της τάξης των 100 mm του συνολικού ετήσιου ύψους βροχής ενώ ο κυλιόμενος μέσος 4 περιόδων παρουσιάζει αύξουσα τάση για την περίοδο 2003 – 2005.



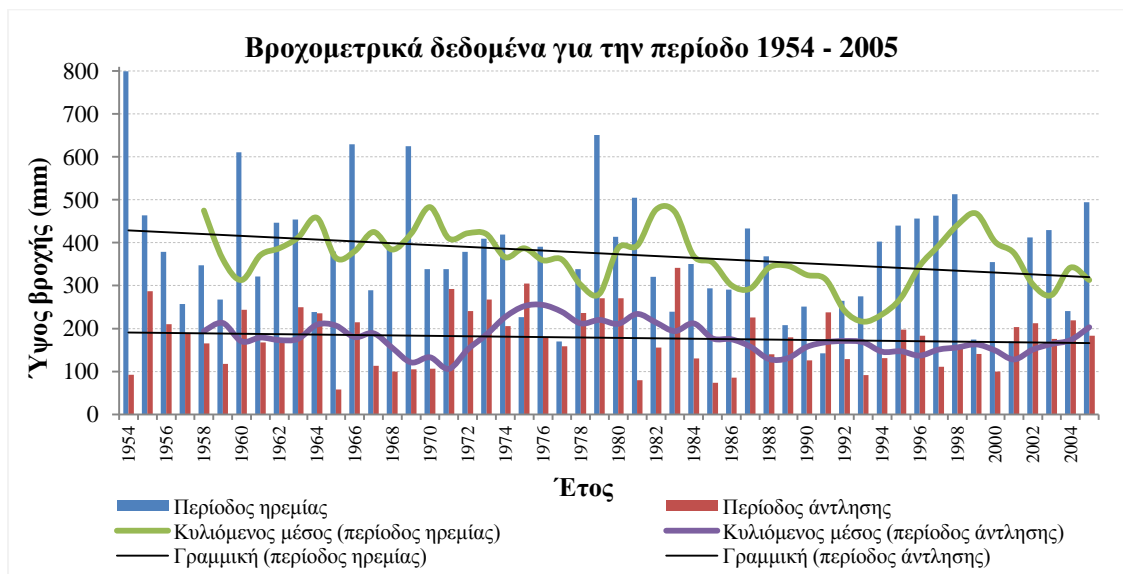
Σχήμα 3. 12. Διακύμανση της ετήσιας βροχής για την περίοδο 1954-2005

Στο Σχήμα 3.13, παρουσιάζεται η διακύμανση των μέσων, ελάχιστων και μέγιστων μηνιαίων τιμών βροχής για την περίοδο 1954 – 2005. Διακρίνεται ότι η περίοδος Οκτώβριος – Μάρτιος περιλαμβάνει τους βροχερότερους μήνες, ενώ η περίοδος Απρίλιος – Σεπτέμβριος περιλαμβάνει τους ξηρότερους μήνες, με επισήμανση τον μήνα Αύγουστο.



Σχήμα 3. 13. Διακύμανση της μέσης, ελάχιστης και μέγιστης μηνιαίας τιμής ύψους βροχής (mm) για την περίοδο 1954-2005

Στο Σχήμα 3.14 απεικονίζεται η διακύμανση της ετήσιας τιμής ύψους βροχής (mm) κατά τη διάρκεια της περιόδου ηρεμίας (Οκτώβριος – Μάρτιος) και της περιόδου άντλησης (Απρίλιος – Σεπτέμβριος) για το διάστημα 1954 – 2005. Παρατηρείται ότι για την περίοδο ηρεμίας η κλίση της γραμμής τάσης χαρακτηρίζεται από πτωτική τάση, όμως ο κυλιόμενος μέσος περίοδου 4 ετών εμφανίζει αυξητική τάση τα τελευταία 3 έτη. Επίσης, η κλίση της γραμμής τάσης της αντλητικής περιόδου εμφανίζει πτωτική τάση, μικρότερης κλίσης από την περίοδο ηρεμίας, όμως ο κυλιόμενος μέσος περίοδου 4 ετών εμφανίζει αυξητική τάση κατά τη διάρκεια της τελευταίας τετραετίας.

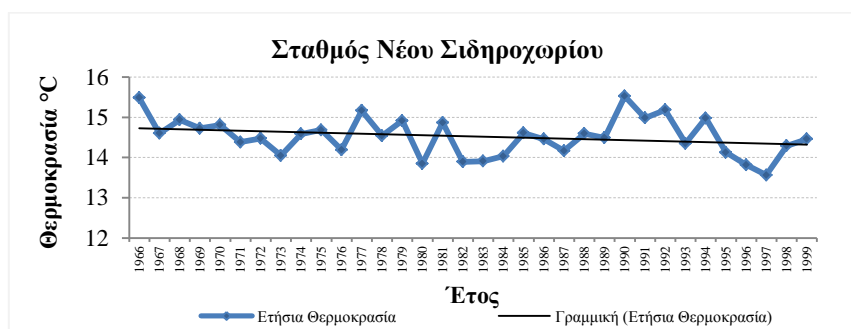


Σχήμα 3. 14. Διακύμανση της ετήσιας τιμής ύψους βροχής (mm) κατά τη διάρκεια της περιόδου ηρεμίας και της περιόδου άντλησης για την περίοδο 1954-2005

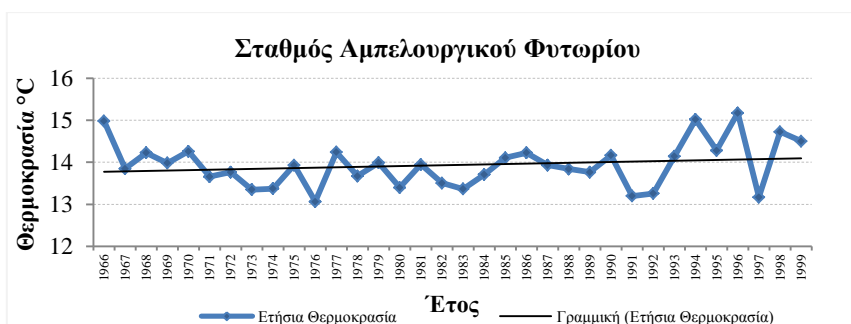
Τονίζεται ότι για μια περιοχή η οποία βασίζεται στις καλλιέργειες και χαρακτηρίζεται από καθεστώς εντατικής άντλησης, η συχνότητα και το ύψος βροχής είναι καθοριστικές για την αύξηση των εισροών του υδατικού ισοζυγίου της περιοχής. Για την εξασφάλιση ενός συνεχούς εμπλουτισμού στο υδροφόρο σύστημα και για την μείωση των αντλήσεων, σημαντικό είναι να διατηρούνται έστω και χαμηλά ύψη βροχής κατά τη διάρκεια των αντλητικών περιόδων.

3.3.3. Θερμοκρασιακά δεδομένα

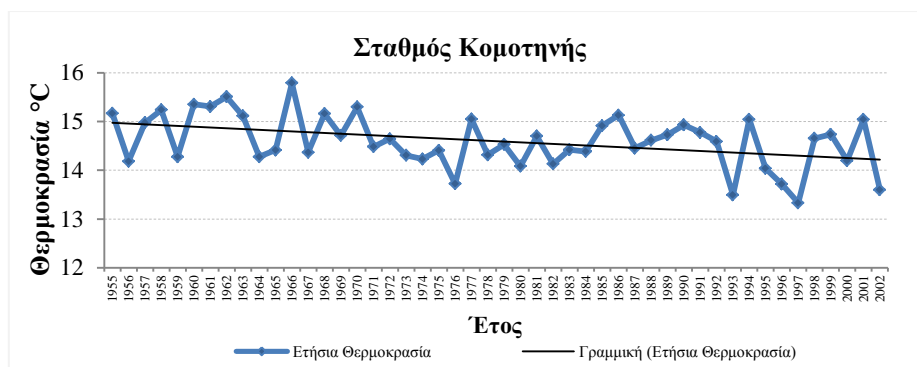
Για τον υπολογισμό της ετήσιας θερμοκρασίας (Σχήματα 3.15, 3.16, 3.17) χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τους σταθμούς του Νέου Σιδηροχωρίου, του Αμπελουργικού Φυτωρίου και της Κομοτηνής. Η θέση αυτών των σταθμών απεικονίζεται στο Σχήμα 3.11 και η περίοδος που αφορά αυτούς τους σταθμούς συνδέεται με την περίοδο λειτουργίας τους. Επισημαίνεται ότι στο σταθμό της Πόρπης, δεν καταγράφονται τιμές θερμοκρασίας.



Σχήμα 3. 15. Διακύμανση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (°C) στο σταθμό Νέου Σιδηροχωρίου για την περίοδο 1966-1999



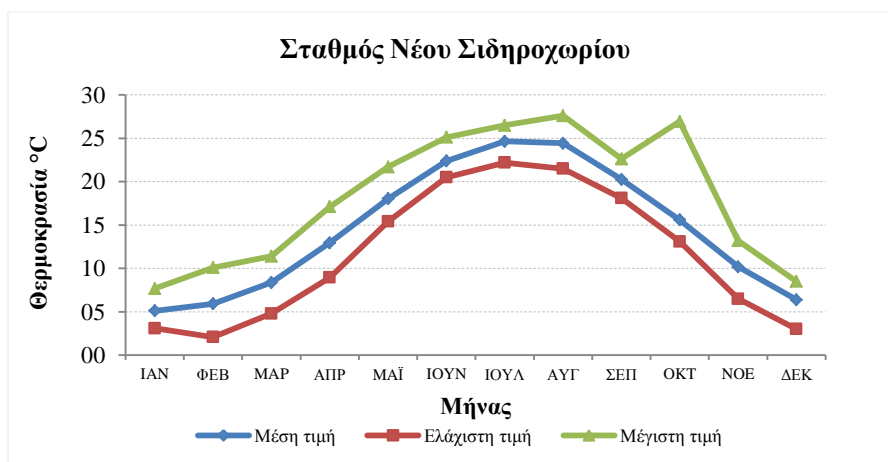
Σχήμα 3. 16. Διακύμανση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (°C) στο σταθμό Αμπελουργικού Φυτωρίου για την περίοδο 1966-1999



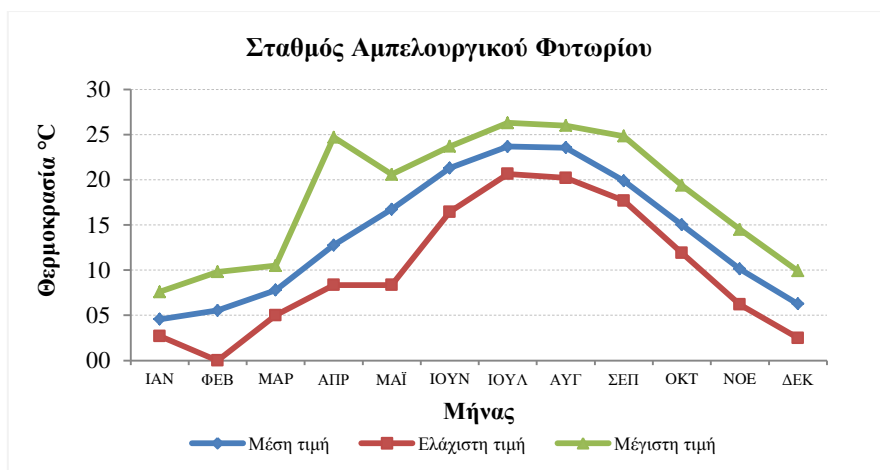
Σχήμα 3. 17. Διακύμανση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (°C) στο σταθμό Κομοτηνής για την περίοδο 1955-2002

Από τα παραπάνω σχήματα παρατηρείται ότι οι μέσες ετήσιες θερμοκρασίες παρουσιάζουν για το σταθμό του Νέου Σιδηροχωρίου πτωτική τάση μικρότερης του 0.5 °C, για το σταθμό του Αμπελουργικού Φυτωρίου μικρή αυξητική τάση ίση με 0.3 °C και για το σταθμό της Κομοτηνής πτωτική τάση, της τάξης του 1 °C.

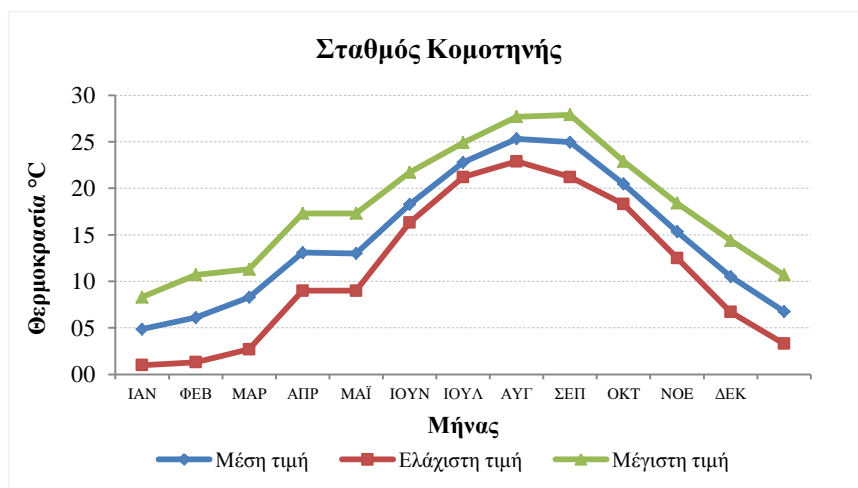
Στα Σχήματα 3.18, 3.19 και 3.20 που ακολουθούν, απεικονίζεται η μέση, ελάχιστη και μέγιστη μηνιαία τιμή θερμοκρασίας στους παραπάνω σταθμούς. Διακρίνεται ότι η μέγιστη τιμή θερμοκρασίας για το σταθμό του Νέου Σιδηροχωρίου είναι 27.6 °C (Αύγουστος 1992), για το σταθμό του Αμπελουργικού Φυτωρίου 26.3 °C (Ιούλιος 1987) και για το σταθμό της Κομοτηνής 27.7 °C (Ιούλιος 1987). Αντίστοιχα, η ελάχιστη θερμοκρασία είναι 2.1 °C (Φεβρουάριος 1993) για το σταθμό του Νέου Σιδηροχωρίου, 0 °C (Φεβρουάριος 1991) για το σταθμό του Αμπελουργικού Φυτωρίου και 1 °C (Ιανουάριος 1967) για το σταθμό της Κομοτηνής.



Σχήμα 3. 18 Διακύμανση της μέσης, ελάχιστης και μέγιστης μηνιαίας θερμοκρασίας (°C) στο σταθμό Νέου Σιδηροχωρίου για την περίοδο 1966-1999



Σχήμα 3. 19. Διακύμανση της μέσης, ελάχιστης και μέγιστης μηνιαίας θερμοκρασίας (°C) στο σταθμό Αμπελουργικού για την περίοδο 1966-1999



Σχήμα 3. 20. Διακύμανση της μέσης, ελάχιστης και μέγιστης μηνιαίας θερμοκρασίας (°C) στο σταθμό Κομοτηνής για την περίοδο 1955-2002

3.3.4. Υπολογισμός Εξατμισοδιαπνοής

Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής εφαρμόστηκε η μέθοδος Thornthwaite χρησιμοποιώντας ως δεδομένα εισόδου τις μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας. Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$ET_p = 16 \left(\frac{10 \cdot t_i}{J} \right)^a \frac{\mu N}{360} \quad (5.1)$$

Όπου:

ET_p η δυνητική εξατμισοδιαπνοή (mm/μήνα)

t_i , η μέση μηνιαία θερμοκρασία σε °C

μ , ο αριθμός ημερών κάθε μήνα

J , ο ετήσιος δείκτης θερμοκρασίας ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση (5.2)

$$J = \sum_{j=1}^{12} j_i$$

j_i , ο μηνιαίος δείκτης θερμοκρασίας που προσδιορίζεται από τη σχέση

$$j_i = 0.09t_i^{3/2} \quad (5.3)$$

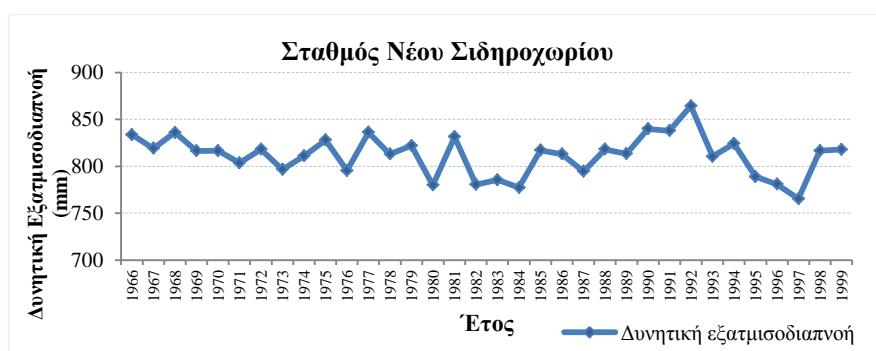
a , εμπειρική παράμετρος η οποία υπολογίζεται από τη σχέση $a = 0.016J + 0.5$ (5.4)

N , η μέση αστρονομική διάρκεια της ημέρας σύμφωνα με τη σχέση (5.5)

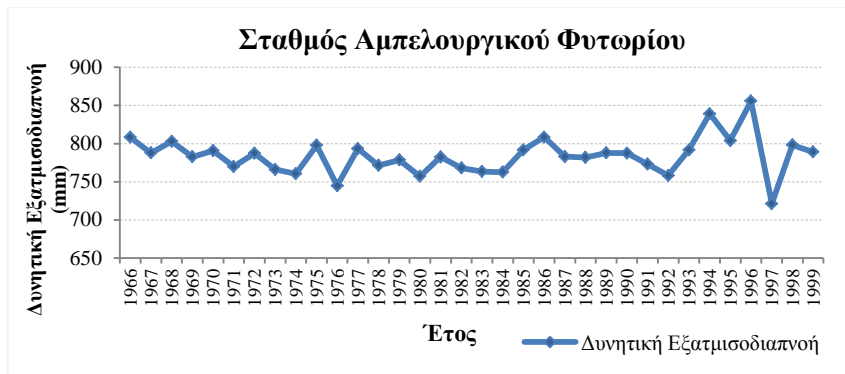
$$N = 1.46 * P_i$$

P_i , ποσοστό ωρών ημέρας κάθε μήνα που δίνεται από πίνακα με γραμμική παρεμβολή ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος κάθε λεκάνης

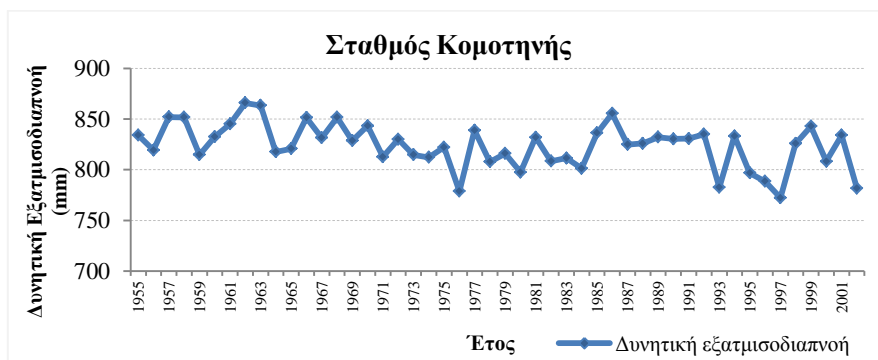
Στα Σχήματα 3.21, 3.22 και 3.23 που ακολουθούν παρουσιάζεται η ετήσια διακύμανση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής σύμφωνα με την παραπάνω μέθοδο για τους σταθμούς του Νέου Σιδηροχωρίου, του Αμπελουργικού Φυτωρίου και της Κομοτηνής.



Σχήμα 3. 21. Διακύμανση της ετήσιας τιμής δυνητικής εξατμισοδιαπνοής ET_p , στο σταθμό Νέου Σιδηροχωρίου για την περίοδο 1966 - 1999



Σχήμα 3. 22. Διακύμανση της ετήσιας τιμής δυνητικής εξατμισοδιαπνοής ET_p , στο σταθμό Αμπελουργικού Φυτωρίου για την περίοδο 1966 – 1999



Σχήμα 3. 23. Διακύμανση της ετήσιας τιμής δυνητικής εξατμισοδιαπνοής ET_p , στο σταθμό Κομοτηνής για την περίοδο 1955 - 2002

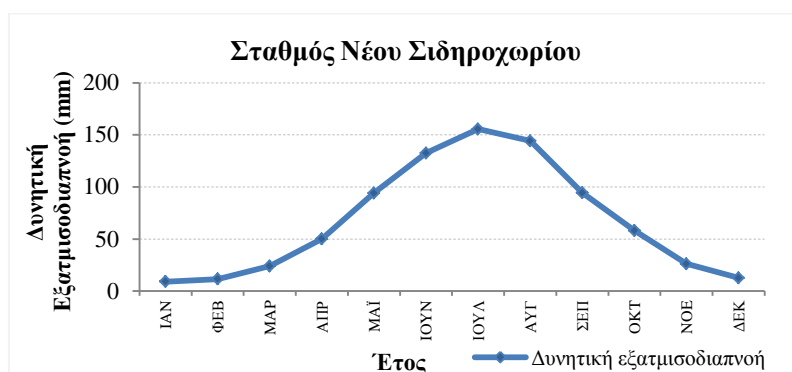
Στον Πίνακα 3.16, παρουσιάζονται τα στατιστικά στοιχεία της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής για τους παραπάνω σταθμούς.

Πίνακας 3. 16. Στατιστικά στοιχεία σταθμών Νέου Σιδηροχωρίου, Αμπελουργικού Φυτωρίου και Κομοτηνής για την περίοδο λειτουργίας τους

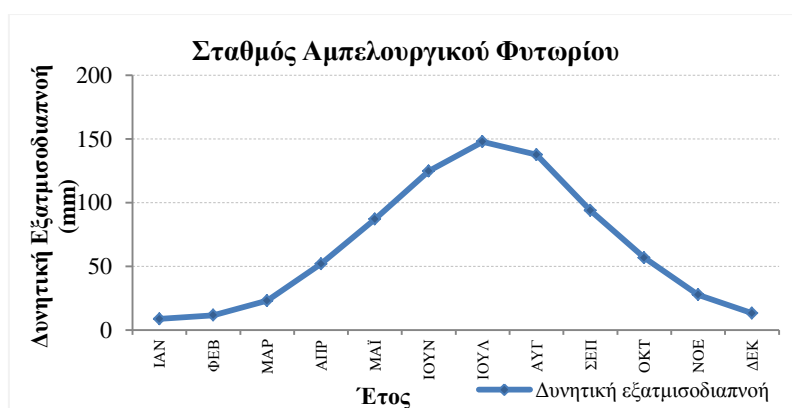
Σταθμοί	Νέο Σιδηροχώρι	Αμπελουργικός	Κομοτηνή
Μέση τιμή	811.87	783.72	823.83
Ελάχιστη τιμή	765.377	721.193	772.334
Μέγιστη τιμή	864.406	855.659	865.929
Τυπική απόκλιση	21.627	24.759	21.951

Στα Σχήματα 3.24, 3.25 και 3.26 απεικονίζεται η μηνιαία διακύμανση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή δυνητικής εξατμισοδιαπνοής για το σταθμό του Νέου Σιδηροχωρίου είναι 172.73 mm (Αύγουστος 1992), για το σταθμό του Αμπελουργικού Φυτωρίου 172.56 mm (Ιούλιος 1987) και για το σταθμό της Κομοτηνής 185.95 mm (Ιούλιος 1987). Αντίστοιχα, η

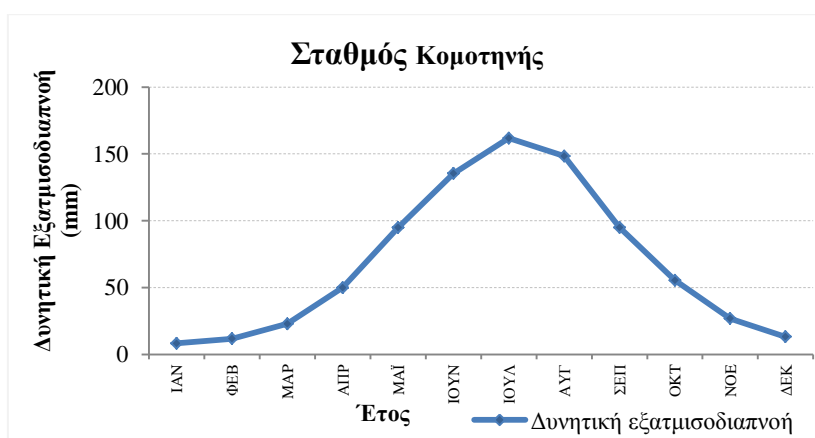
ελάχιστη τιμή είναι 2.12 mm (Φεβρουάριος 1993) για το σταθμό του Νέου Σιδηροχωρίου, 0 mm (Φεβρουάριος 1991) για το σταθμό του Αμπελουργικού Φυτωρίου και 0.66 mm (Ιανουάριος 1967) για το σταθμό της Κομοτηνής.



Σχήμα 3. 24. Διακύμανση της μηνιαίας τιμής δυνητικής εξατμισοδιαπνοής ET_p , στο σταθμό Νέου Σιδηροχωρίου για την περίοδο 1966 - 1999



Σχήμα 3. 25. Διακύμανση της μηνιαίας τιμής δυνητικής εξατμισοδιαπνοής ET_p , στο σταθμό Αμπελουργικού Φυτωρίου για την περίοδο 1966 - 1999



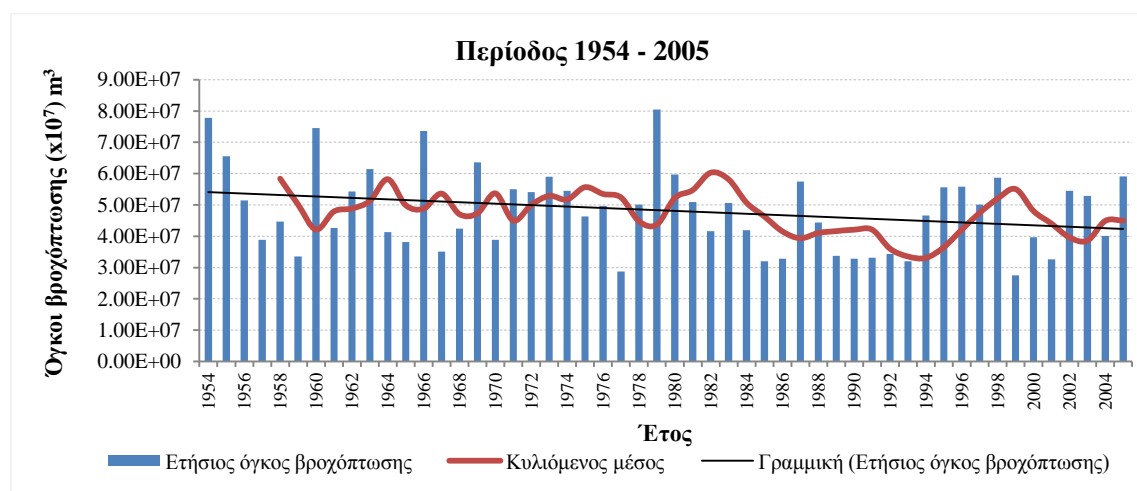
Σχήμα 3. 26. Διακύμανση της μηνιαίας τιμής δυνητικής εξατμισοδιαπνοής ET_p , στο σταθμό Κομοτηνής για την περίοδο 1955 - 2002

3.3.5 Κλιματική κατάταξη της περιοχής έρευνας

Το Ετήσιο Θερμοκρασιακό Εύρος, αποτελεί τη διαφορά μεταξύ της μέσης θερμοκρασίας του ψυχρότερου μήνα, T_{ψ} , ενός έτους και της μέσης θερμοκρασίας του θερμότερου μήνα, T_{θ} , του ίδιου έτους. Για τους σταθμούς Νέου Σιδηροχωρίου, Αμπελουργικού Κομοτηνής η τιμή του Ε.Θ.Ε. κυμαίνεται μεταξύ 16.7 - 24.9 °C, 16.7 - 24.3 °C και 17.8 - 25.2 °C αντίστοιχα. Σύμφωνα με την κλιματική κατάταξη κατά Köppen η περιοχή έρευνας ανήκει στον κλιματικό τύπο Csa ο οποίος αντιστοιχεί σε μεσογειακό τύπο κλίματος ή μεσόθερμο τύπο κλίματος με ξηρό και θερμό θέρος και θερμοκρασιακά χαρακτηριστικά $-2 < T_{\psi} < 18$ °C και $T_{\theta} > 22$ °C.

3.3.6. Όγκοι κατακρημνισμάτων περιόδου 1954 – 2005

Η έκταση της περιοχής έρευνας ανέρχεται στα 165.1 km², συμπεριλαμβάνοντας και τις δομημένες εκτάσεις οι οποίες έχουν έκταση 2.7 km² και καταλαμβάνουν ένα μικρό τμήμα της τάξης του 1.6%. Με βάση την έκταση της περιοχής μελέτης και τα βροχομετρικά δεδομένα που παρατίθενται στον Πίνακα 3.14 υπολογίζεται ο όγκος των βροχοπτώσεων για την περίοδο 1954 – 2005 η διακύμανση του οποίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.27 που ακολουθεί. Η μέση τιμή ανέρχεται στα 48.197×10⁶ m³, η ελάχιστη στα 27.524×10⁶ m³ (έτος εμφάνισης: 1999) και η μέγιστη στα 80.435×10⁶ m³ (έτος εμφάνισης: 1979). Παρατηρείται ότι η διακύμανση του κυλιόμενου μέσου εμφανίζει αυξητική πορεία από το 2003, ενώ η κλίση του παρουσιάζει μία πτωτική τάση για τη συνολική περίοδο, το οποίο επιβεβαιώνεται και από το Σχήμα 3.12 με τη διακύμανση των υψών βροχής για την ίδια περίοδο.



Σχήμα 3. 27. Διακύμανση ετήσιου όγκου βροχοπτώσεων (m³) (σταθμός Πόρπης) για την περίοδο 1954-2005

3.4. Υδρογεωλογικές συνθήκες

3.4.1. Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά σχηματισμών

3.4.1.1. Τεταρτογενείς αποθέσεις

Οι Τεταρτογενείς αποθέσεις συνορεύουν με το βόρειο τμήμα της περιοχής έρευνας. Τα υλικά των τεταρτογενών αποθέσεων περιλαμβάνουν πηλούς, ψαμμούχους πηλούς, χαλίκια, κροκάλες και άμμους. Χαρακτηρίζονται από μεγάλη περατότητα και τροφοδοτούν τις νεογενείς αποθέσεις της στενής περιοχής έρευνας.

3.4.1.2. Νεογενείς αποθέσεις

Οι Νεογενείς αποθέσεις καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής έρευνας και δομούνται κυρίως από αλλουβιακές αποθέσεις οι οποίες περιλαμβάνουν χονδρόκοκκα υλικά, άμμους, χαλίκια και κροκάλες. Ο βαθμός ετερογένειας των παραπάνω υλικών ποικίλλει ανάλογα με την περιοχή με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται αδιαβάθμητα αλλά παράλληλα και διαβαθμισμένα (Διαμαντής κ.α., 1994).

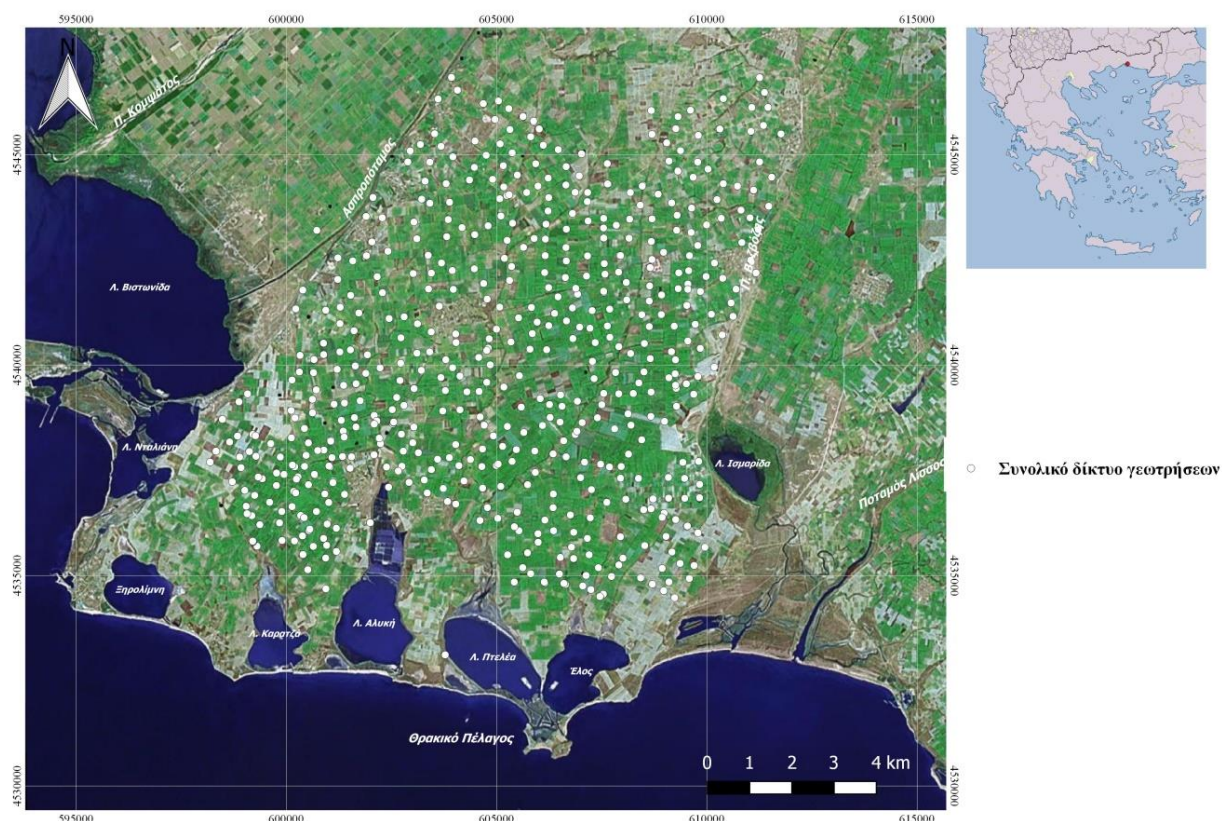
Τα χονδρόκοκκα υλικά, τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγάλη περατότητα, αποτελούν το υδροφόρο στρώμα της περιοχής έρευνας, ο πυθμένας του οποίου αποτελείται από στρώμα γκρι – πράσινης αργίλου. Συχνό φαινόμενο, το οποίο γίνεται εντονότερο στο νότιο περιθώριο της περιοχής έρευνας, είναι η παρεμβολή λεπτών ενστρωματώσεων ενδιάμεσα του υδροφόρου στρώματος. Τα στρώματα αυτά παρουσιάζουν υδραυλική επικοινωνία μεταξύ τους και δημιουργούν ποικίλες συνθήκες υδραυλικής αγωγιμότητας του σχηματισμού τόσο στην οριζόντια όσο και στην κατακόρυφη διεύθυνση.

3.4.1.3. Παλαιογενείς αποθέσεις

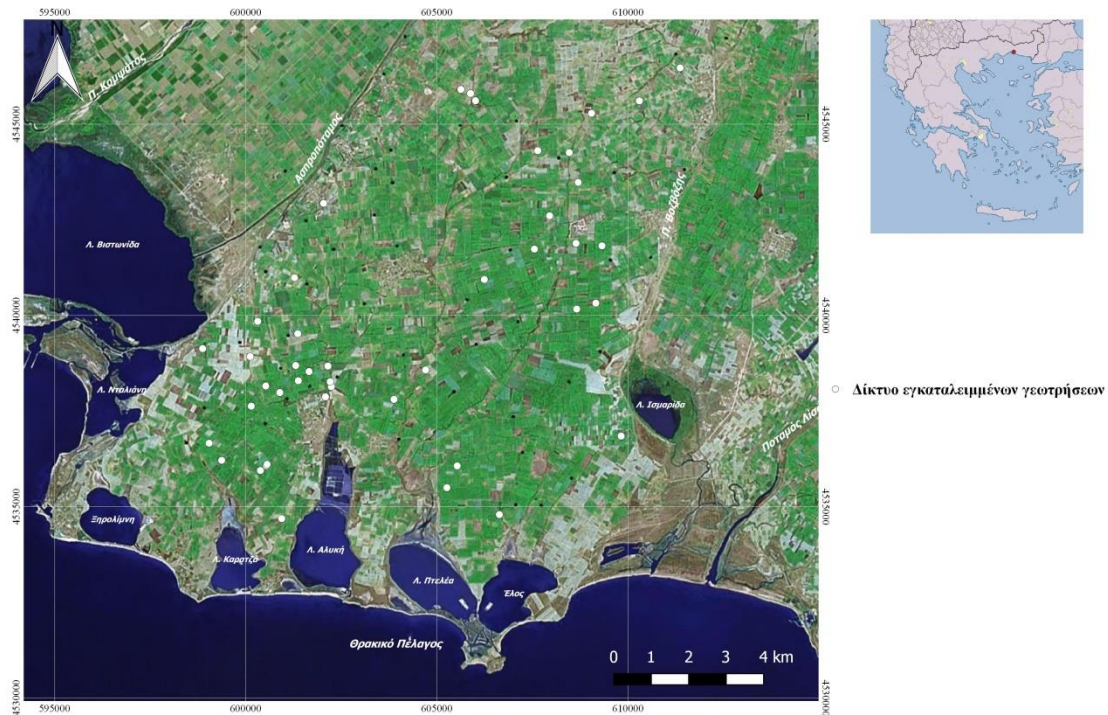
Τα παλαιογενή ιζήματα συναντώνται στο βορειοανατολικό όριο της περιοχής έρευνας και θεωρούνται υπόβαθρο της ευρύτερης περιοχής. Αποτελούνται από μεσόκοκκες – χονδρόκοκκες άμμους, ψαμμίτες και μικροκροκαλοπαγή. Ενδιάμεσα αυτών των σχηματισμών παρεμβάλλονται αδιαπέρατα στρώματα αργίλων που επηρεάζουν αρνητικά τις συνθήκες τροφοδοσίας. Εξαιτίας της παρουσίας λιγνιτικών στρωμάτων και λεπτόκοκκων υλικών, χαρακτηριστική είναι η ποιοτική επιβάρυνση των υπόγειων νερών που φιλοξενούνται σε αυτούς τους σχηματισμούς.

Από το σύνολο των υδροφόρων και των στεγανών σχηματισμών ($9.424 \times 10^6 \text{ m}^3$) οι υδροφόροι σχηματισμοί καταλαμβάνουν περίπου $5.201 \times 10^6 \text{ m}^3$ δηλαδή ποσοστό 55.9%, ενώ το μέσο πάχος των υδροφόρων της περιοχής είναι 48.1 m (Διαμαντής κ.α., 1994, Πεταλάς, 1997).

Η περιοχή έρευνας, αποτελείται από ένα πυκνό δίκτυο γεωτρήσεων (600) από τις οποίες λειτουργούν μόνο οι αρδευτικού σκοπού, καθώς εξαιτίας της ευρείας ποιοτικής υποβάθμισης του υδροφόρου συστήματος, οι υδρευτικές γεωτρήσεις έχουν πλέον εγκαταληφθεί. Το συνολικό δίκτυο γεωτρήσεων και το σύνολο των εγκαταλειμμένων γεωτρήσεων παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.28 και 3.29 αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι οι εγκαταλειμμένες γεωτρήσεις αφορούν στα ποιοτικά επιβαρημένα τμήματα της περιοχής, δηλαδή στα νότια, νοτιοδυτικά και ανατολικά – βορειοανατολικά όρια της περιοχής.



Σχήμα 3. 28. Συνολικό δίκτυο παραγωγικών γεωτρήσεων περιοχής έρευνας (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth © 2017)



Σχήμα 3. 29. Δίκτυο εγκαταλεημένων γεωτρήσεων περιοχής έρευνας (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth © 2017)

3.4.2. Υδραυλικά χαρακτηριστικά υδροφόρου

Τα βασικά υδραυλικά χαρακτηριστικά ενός γεωλογικού σχηματισμού είναι η υδραυλική αγωγιμότητα ή υδροπερατότητα, K (σε m/sec) (Hydraulic Conductivity), ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας ή μεταφορικότητα, T (σε m^2/sec) (Coefficient of Transmissivity) και ο συντελεστής εναποθήκευσης ή αποθηκευτικότητας ή υδροχωρητικότητας, S (αδιάστατο μέγεθος) (Storage Coefficient ή Coefficient of Storage).

Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από έντονη γεωλογική και υδρογεωλογική ετερογένεια των σχηματισμών με αποτέλεσμα το μεγάλο εύρος τιμών των υδραυλικών παραμέτρων των υδροφόρων. Τα υδραυλικά χαρακτηριστικά της περιοχής έρευνας που παρουσιάζονται στη συνέχεια στον Πίνακα 3.17, προέκυψαν από 18 δοκιμαστικές αντλήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο ερευνητικού προγράμματος του Εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας του Δ.Π.Θ. (Διαμαντής κ.α., 1994) και επίσης στο πλαίσιο εκπόνησης παλαιότερης διδακτορικής διατριβής (Πεταλάς, 1997).

Πίνακας 3. 17. Υδραυλικές παράμετροι περιοχής έρευνας (Πεταλάς, 1997)

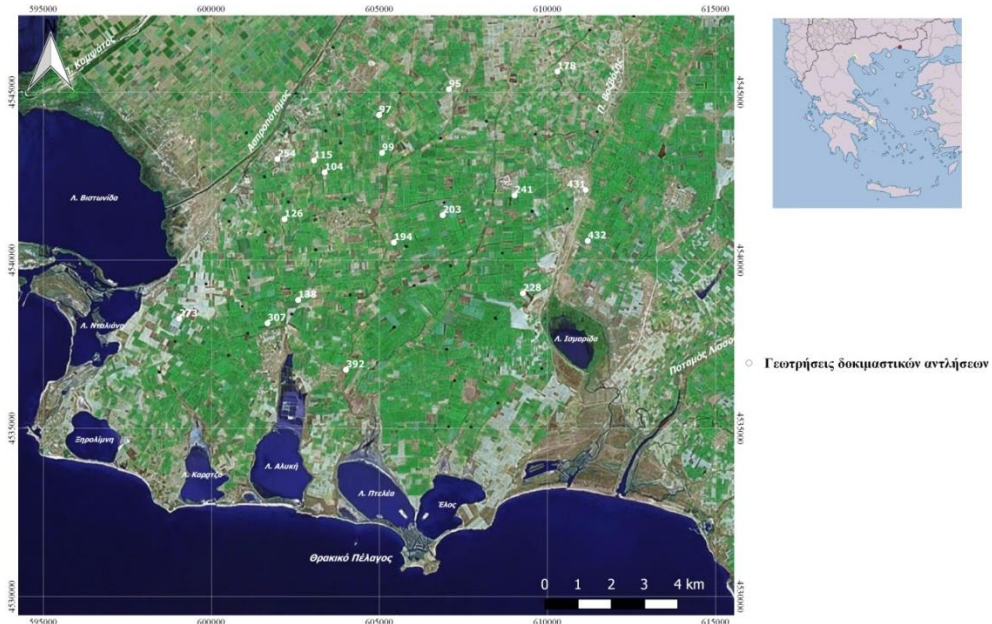
Γεώτρηση	Πάχος υδροφόρου, b (m)	Μεταβιβαστικότητα, T ($\times 10^{-3}$) (m ² /s)	Υδραυλική αγωγιμότητα, K ($\times 10^{-5}$) (m/s)	Συντελεστής εναποθήκευσης, S ($\times 10^{-3}$)
203	69	27,91	40,44	5,00
431	39	18,26	46,83	29,00
138	51	1,34	2,63	0,13
241	48	63,85	133,03	2,00
115	57	35,73	62,68	1,90
104	43	5,23	12,17	3,00
95	46	1,15	2,49	8,90
178	73,5	3,14	4,27	2,30
97	46	18,56	40,36	4,90
99	45	99,71	221,58	1,50
126	70	75,54	107,92	1,90
254	70	2,47	3,53	9,10
432	64	23,34	36,48	1,20
194	71	16,08	22,64	0,49
392	48,1	21,88	45,48	0,82
228	46	1,50	3,27	0,56
273	50	3,39	6,78	0,18
307	25,5	12,07	47,34	0,13
Μέση τιμή		23,95	46,66	5,06
Ελάχιστη τιμή		1,15	2,49	0,13
Μέγιστη τιμή		99,71	221,58	29,00

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι οι τιμές της μεταβιβαστικότητας, T, κυμαίνονται μεταξύ των 1.15×10^{-3} και 9.971×10^{-2} m²/sec, με μέση τιμή τα 2.395×10^{-2} m²/sec, γεγονός που υποδηλώνει πολύ καλό δυναμικό υδροφόρων στρωμάτων της περιοχής (Καλλιώρας, 2008).

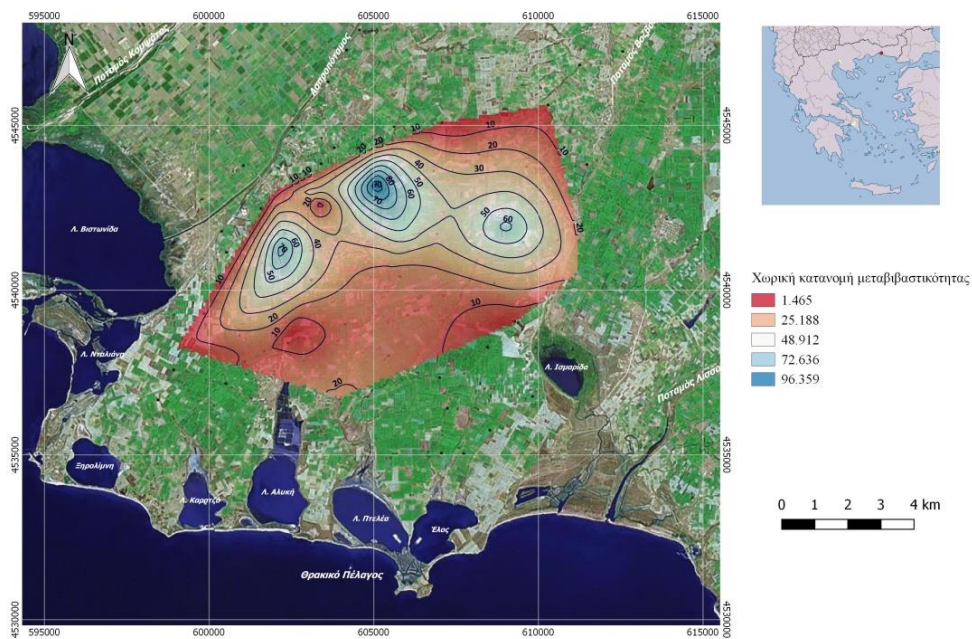
Διακρίνεται ότι οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας, K, κυμαίνονται μεταξύ των 2.49×10^{-5} και 2.22×10^{-3} m/sec, με μέση τιμή τα 4.67×10^{-4} m/sec. Οι σχηματισμοί της περιοχής έρευνας, χαρακτηρίζονται ως υδροπερατά πετρώματα (Καλλέργης, 2000) επειδή η τιμή της υδραυλικής τους αγωγιμότητας κυμαίνεται μεταξύ 10^{-6} και 10^{-1} m/sec, με μεγάλη υδροπερατότητα η οποία αφορά σε καθαρές άμμους και χαλίκια επειδή η τιμή της υδραυλικής του αγωγιμότητας κυμαίνεται μεταξύ 10^{-5} και 10^{-2} m/sec.

Επίσης, οι τιμές του συντελεστή εναποθήκευσης, S, της περιοχής έρευνας κυμαίνονται μεταξύ 1.3×10^{-4} (ή 0.13×10^{-3}) και 2.9×10^{-2} (ή 29.00×10^{-3}) και μέση τιμή 5.06×10^{-3} . Αναφέρεται ότι στους αρτεσιανούς υδροφόρους η τιμή του συντελεστή κυμαίνεται μεταξύ 5×10^{-3} και 5×10^{-5} (Καλλέργης, 2000).

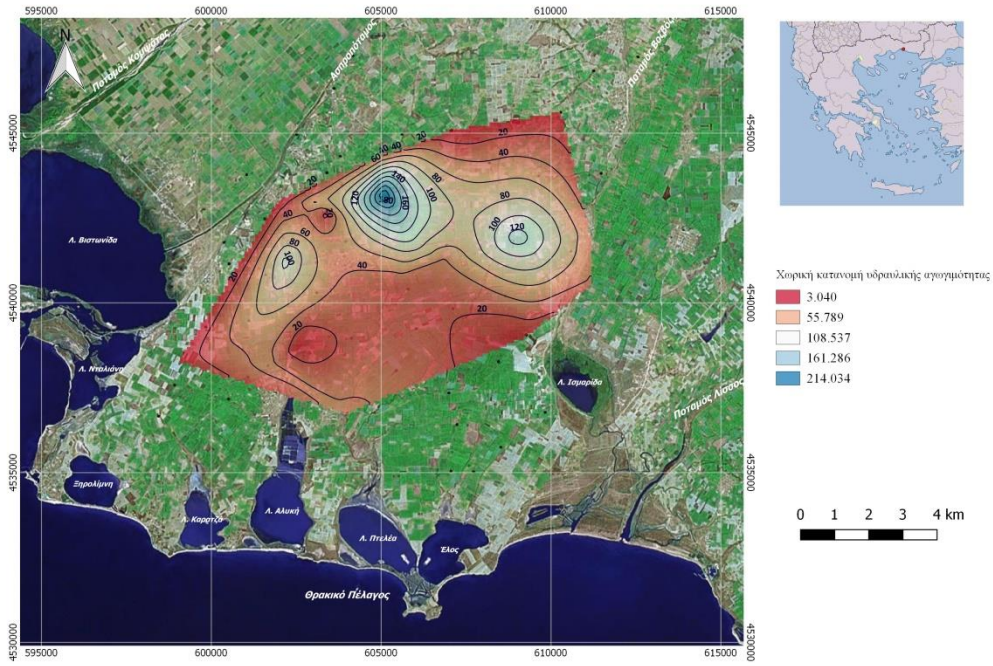
Οι θέσεις των γεωτρήσεων στις οποίες πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικές αντλήσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.30 και η χωρική κατανομή της μεταβιβαστικότητα, της υδραυλικής αγωγιμότητας και της υδροχωρητικότητας απεικονίζεται στα Σχήματα 3.31, 3.32 και 3.33.



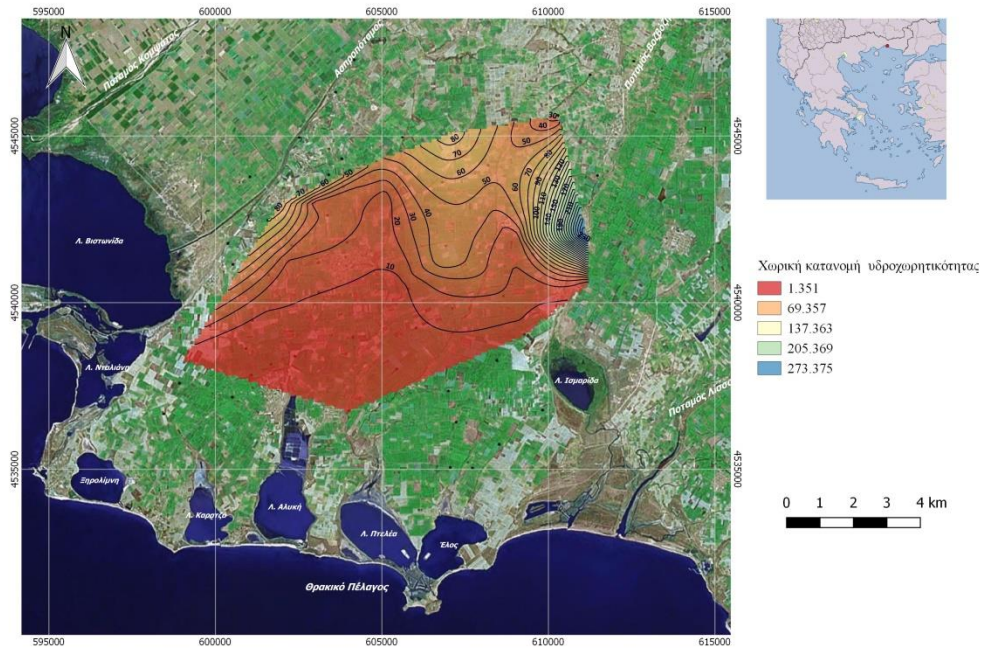
Σχήμα 3. 30. Θέσεις γεωτρήσεων δοκιμαστικών αντλήσεων (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth © 2017)



Σχήμα 3. 31. Χωρική κατανομή μεταβιβαστικότητας $T(\times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec})$ (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth © 2017)



Σχήμα 3. 32. Χωρική κατανομή υδραυλικής αγωγιμότητας $K(\times 10^{-5} \text{ m/sec})$ (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth © 2017)



Σχήμα 3. 33. Χωρική κατανομή υδροχωρητικότητας $S(\times 10^{-4} \text{ αδιάστατο})$ (Δορυφορική εικόνα-υπόβαθρο από Google Earth © 2017)

3.4.3. Στοιχεία ισοζυγίου του υδροφόρου συστήματος

3.4.3.1. Κατείδυση ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων

Οι αλλουβιακοί σχηματισμοί, οι οποίοι αποτελούν το υδροφόρο στρώμα της περιοχής, καλύπτονται από εναλλαγές λεπτών στρώσεων αργίλων, ιλυολίθων και ψαμμιτών, τα οποία δημιουργούν υπό πίεση συνθήκες στον υδροφόρο και επηρεάζουν αρνητικά την κατείδυση της βροχής. Στα τμήματα της περιοχής, όπου έχει επιδράσει η διάβρωση και έχουν αποκαλυφθεί τα αλλουβιακά ιζήματα προς την επιφάνεια, η κατείδυση επιδρά σε μεγαλύτερο βαθμό στον εμπλουτισμό του υδροφόρου.

Ο Καλλιώρας (2008) υπολόγισε τις μέσες μηνιαίες τιμές κατείδυσης ($\times 10^6 \text{ m}^3$) για την περίοδο 1954-2005 από την εφαρμογή μίας εμπειρικής σχέσης που ανέπτυξαν οι Κωνσταντινίδης και Περγιαλιώτης (1984) η οποία συνδέει την κατείδυση με την βροχόπτωση και η οποία αναφέρεται και στον Πεταλά (1997).

$$R = 0.138 \times P - 1.277$$

όπου R, η κατείδυση σε mm και P η βροχόπτωση σε mm.

Από την εφαρμογή της παραπάνω σχέσης για την περιοχή μελέτης προέκυψε ότι οι ποσότητες νερού που κατειδύουν παρουσιάζουν μέση ετήσια τιμή της τάξης των $5.506 \times 10^6 \text{ m}^3$ (10% του συνόλου), με ακραίες τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 2.796×10^6 και $9.771 \times 10^6 \text{ m}^3$.

3.4.3.2. Επιστροφές άρδευσης

Σύμφωνα με τον Καλλέργη (2001) περίπου το 30% των ποσοτήτων του νερού άρδευσης επιστρέφει στους ελεύθερους υδροφόρους. Αναφέρεται επίσης, ότι στην περιοχή μελέτης, οι ποσότητες νερού που εμπλουτίζουν τον υδροφόρο από τις επιστροφές άρδευσης εκτιμώνται στα ίδια επίπεδα με αυτές της κατείδυσης. Η εκτίμηση των ποσοτήτων νερού που αντλούνται στην περιοχή έρευνας ($38.182 \times 10^6 \text{ m}^3$) υπολογίστηκε μέσω της επεξεργασίας των αναγκαίων ποσοτήτων νερού άρδευσης που απαιτούνται για τα συγκεκριμένα είδη καλλιέργειας της περιοχής (Καλλιώρας, 2008).

3.4.3.3. Διηθήσεις χειμάρρων

Στην περιοχή μελέτης ο ποταμός Βοζβόζης τροφοδοτείται από τους χείμαρρους Κάλχαντα, Καρυδιάς και Χιονορέματος και εκβάλλει στη λίμνη Ισμαρίδα. Σύμφωνα με τη Ζιαγκλιαβού (2005), από μετρήσεις σε διάφορα σημεία του ποταμού, παρατηρούνται απώλειες ροής, γεγονός που υποδηλώνει εμπλουτισμό των υπόγειων νερών από τη ροή του ποταμού που κυμαίνεται από 77.8 m³/h έως 2.326,1 m³/h, ενώ θεωρώντας ότι κατά τη διάρκεια Ιουνίου-Οκτωβρίου δεν παρατηρούνται σημαντικές παροχές στον ποταμό, τότε την υπόλοιπη χρονική περίοδο (Νοέμβριος-Ιούνιος) με μέση τιμή απωλειών της ροής τα 900 m³/h, προκύπτει εμπλουτισμός των υπόγειων νερών που ανέρχεται στα 4.544x10⁶ m³. Πρόκειται για διηθήσεις που συμβαίνουν στην ανατολική τεταρτογενή υδροφορία του Νέου Σιδηροχωρίου

Επίσης, ο Ασπροπόταμος είναι ένας από τους βασικότερους χείμαρρους που απαντώνται στην περιοχή με λεκάνη έκτασης 178 km². Από παλαιότερες έρευνες του Εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας του Δ.Π.Θ. (Διαμαντής κ.α., 1994), μετρήσεις της ροής του Ασπροποτάμου κατά τη διάρκεια ενός έτους, έδειξαν ότι η περίπτωση εμπλουτισμού του υδροφόρου συστήματος της περιοχής έρευνας διαμέσου διηθήσεων από τον Ασπροπόταμο θεωρείται απίθανη. Η υδραυλική απομόνωση του Ασπροποτάμου, με την περιοχή έρευνας ενισχύθηκε και από τη διενέργεια γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής του Καλλιώρα (2008), οι οποίες κατέδειξαν την επικράτηση αργιλικών υλικών τα οποία καθορίζουν τις διηθήσεις από το χείμαρρο αυτό.

3.4.3.4. Αλλουβιακός κώνος ποταμού Κομψάτου

Ο Καλλιώρας (2008), από την ερμηνεία των πιεζομετρικών καμπυλών, τις αυξομειώσεις της στάθμης κατά μήκος του άξονα του Ασπροποτάμου και την ποιοτική ανάλυση των υπόγειων νερών της περιοχής αυτής, παρατήρησε ότι ο αλλουβιακός κώνος του ποταμού Κομψάτου πρόκειται για την κυριότερη πηγή εμπλουτισμού του υδροφόρου συστήματος έρευνας.

Το σύστημα του ποταμού Κομψάτου εμπλουτίζεται από τις απορροές της ορεινής ζώνης και από την άμεση κατείσδυση των βροχοπτώσεων. Οι Διαμαντής κ.α., (1994) αναφέρουν ότι οι τεταρτογενείς υδροφόροι του αλλουβιακού κώνου του ποταμού Κομψάτου δέχονται τροφοδοσία περίπου 60.3x10⁶ m³ ετησίως από τα οποία

τα $33.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ καλύπτουν τις ετήσιες αρδευτικές ανάγκες 61.250 στρεμμάτων της ευρύτερης περιοχής, ενώ τα υπόλοιπα $26.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ μαζί με τις περιορισμένες διηθήσεις του Βοσβόζη ($1.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ σε συνολική απορροή $23.3 \times 10^6 \text{ m}^3$) και την άμεση κατείσδυση προς τους νεογενείς υδροφόρους από τις βροχοπτώσεις ($1.8 \times 10^6 \text{ m}^3$), (δηλαδή συνολικά $29.7 \times 10^6 \text{ m}^3$) συνεισφέρουν στον εμπλουτισμό του υδροφόρου συστήματος της περιοχής έρευνας.

3.4.3.5. Ανατολικό τεταρτογενές υδροφόρο σύστημα

Στο βόρειο τμήμα του ποταμού Βοσβόζη παρατηρείται τροφοδοσία από το τεταρτογενές υδροφόρο σύστημα. Από γεωηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις στο πλαίσιο διατριβής του Καλλιώρα (2008) παρατηρήθηκε ότι υπάρχουν κατάλληλοι γεωλογικοί σχηματισμοί (χαλίκια, κροκάλες και άμμοι) οι οποίοι δημιουργούν ευνοϊκές συνθήκες για μεταφορά ποσοτήτων νερού (διηθήσεις ή πλευρικές μεταγίσεις).

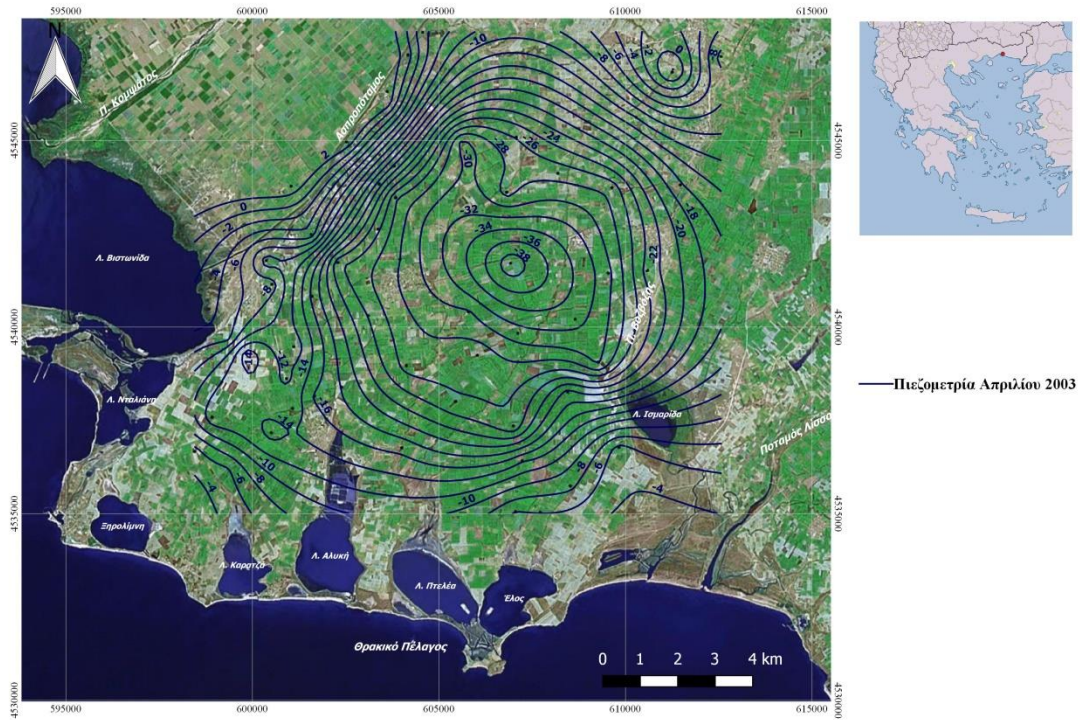
3.4.4. Πιεζομετρικές συνθήκες

Η παρουσίαση των δικτύων ροής σε χάρτες (πιεζομετρικοί, ισοπιεζομετρικοί, ισοσταθμικοί, χάρτες υδροϊσουψών) επιτρέπει όχι μόνο τη μελέτη της μορφολογίας της πιεζομετρικής επιφάνειας, του τύπου του υδροφόρου και της ροής του υπόγειου νερού, αλλά ακόμα και την εκτίμηση των υδραυλικών χαρακτηριστικών του υδροφόρου (Καλλέργης, 2001).

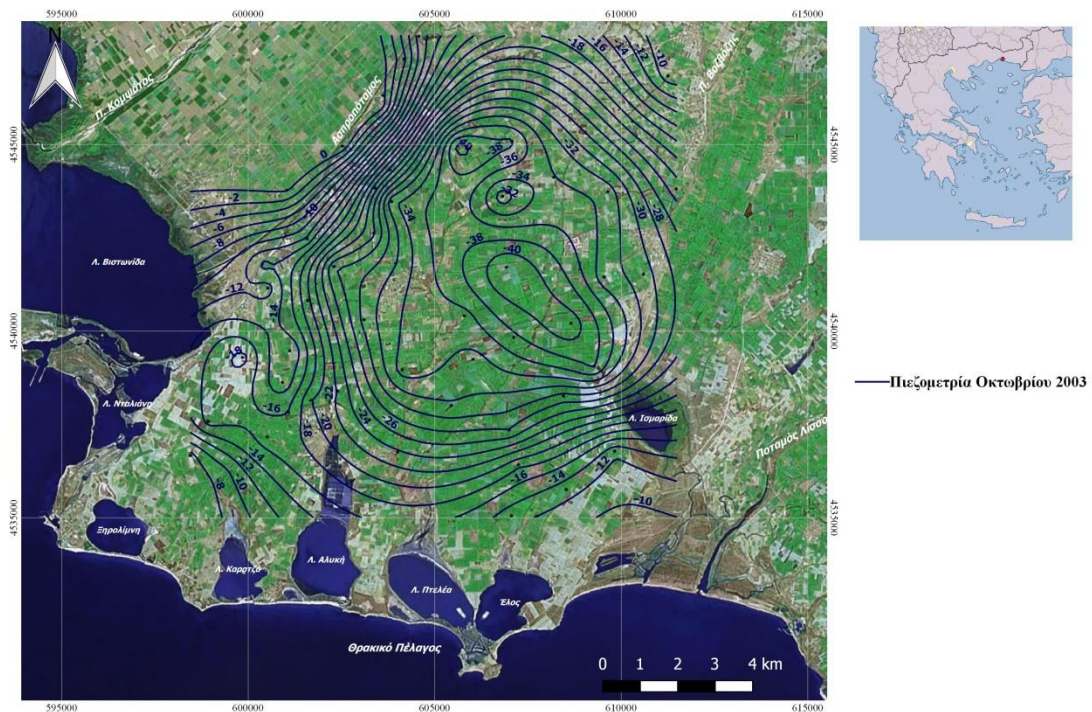
Παρουσιάζονται στη συνέχεια πιεζομετρικοί χάρτες (Σχήματα 3.34, 3.35) από μετρήσεις στάθμης που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο εκπόνησης διδακτορικής διατριβής (Καλλιώρας, 2008). Οι μετρήσεις στάθμης πραγματοποιήθηκαν κατά περίπτωση σε μηνιαία και διμηνιαία βάση μεταξύ των χρονικών ορίων Απρίλιος 2001 και Οκτώβριος 2005.

Από τα παραπάνω σχήματα διακρίνονται ένας άξονας τροφοδοσίας στο βόρειο – ανατολικό όριο της περιοχής έρευνας και δύο άξονες τροφοδοσίας στο βόρειο – δυτικό τμήμα λόγω τροφοδοσίας από τον αλλουβιακό κώνο του ποταμού Κομψάτου. Κατά μήκος του Ασπροπόταμου, παρατηρείται πύκνωση των πιεζομετρικών καμπύλων το οποίο οφείλεται στην ύπαρξη ρήγματος, το οποίο φέρνει σε επικοινωνία το υδροφόρο σύστημα της περιοχής έρευνας και του αλλουβιακού κώνου του Κομψάτου. Η τροφοδοσία μέσω διηθήσεων από τον ποταμό Ασπροπόταμο, μπορεί να αποκλειστεί εξαιτίας της ύπαρξης μεγάλης ποσότητας αργιλικών υλικών, τα οποία απομονώνουν υδραυλικά τον ποταμό από την περιοχή έρευνας. Επίσης, παρατηρούνται τρεις άξονες τροφοδοσίας στο νότιο – δυτικό, νότιο και νοτιο – ανατολικό περιθώριο της περιοχής έρευνας, οι οποίοι αποτελούν άξονες εμπλουτισμού από τη θάλασσα. Επισημαίνεται ότι η πύκνωση των πιεζομετρικών γραμμών κατά μήκος του ποταμού Βοζβόζη οφείλεται ομοίως στην ύπαρξη ρήγματος, το οποίο δημιουργεί συνθήκες υδραυλικής απομόνωσης μεταξύ του ποταμού Βοζβόζη και της περιοχής έρευνας.

Σχετικά με τις τιμές του υδραυλικού φορτίου, παρατηρείται ότι στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής έρευνας εμφανίζονται αποκλειστικά αρνητικές τιμές απόλυτης στάθμης (απόλυτο υψόμετρο) ενώ εμφανής είναι η παρουσία κώνου κατάπτωσης στο κέντρο της περιοχής έρευνας εξαιτίας της εντατικής υπεράντλησης.



Σχήμα 3. 34. Πιεζομετρικός χάρτης Απριλίου 2003 (Καλλιώρας, 2008 με τροποποιήσεις)



Σχήμα 3. 35. Πιεζομετρικός χάρτης Οκτωβρίου 2003 (Καλλιώρας, 2008 με τροποποιήσεις)

4. Εφαρμογή FREEWAT στην περιοχή έρευνας - Μέρος Β΄

4.1. Εισαγωγή

Το λογισμικό FREEWAT χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της ροής των υπόγειων υδάτων της περιοχής μελέτης, χρησιμοποιώντας τον κώδικα MODFLOW-2005 (Harbaugh, 2005), που αναπτύσσεται από το USGS και προσομοιώνει την υπόγεια ροή σε κορεσμένες και ακόρεστες ζώνες.

Όπως προαναφέρθηκε, η πλατφόρμα του FREEWAT αποτελεί ένα πρόσθετο πρόγραμμα στο λογισμικό QGIS (QGIS Development Team, 2009), το οποίο συνδιάζει τις δυνατότητες των εργαλείων geo-processing (γεω-επεξεργασίας) και post-processing (μετα-επεξεργασίας) στη χωρική ανάλυση δεδομένων, με τις δυνατότητες των μοντέλων προσομοίωσης. Συνεπώς, συνιστά ένα περιβάλλον προσομοίωσης, στο οποίο συνυπάρχουν χωρικά σύνολα δεδομένων που μπορούν να αποθηκευτούν, να διαχειριστούν και να απεικονιστούν και κώδικες προσομοίωσης, οι οποίοι μπορούν να προσομοιώσουν υδρολογικές, υδροχημικές ή οικονομικο-κοινωνικές διαδικασίες.

Η προσομοίωση του υπόγειου συστήματος της περιοχής αφορά την περίοδο Απριλίου - Οκτωβρίου 2003 (αντλητική περίοδος) και πραγματοποιήθηκε με στόχο την κατανόηση της λειτουργίας του υπόγειου υδροφορέα ως προς τα υδραυλικά του χαρακτηριστικά και την διερεύνηση των συνθηκών τροφοδοσίας αυτού με τα υδάτινα σώματα της περιοχής. Στη συνέχεια επιτεύχθηκε η ρύθμιση (calibration) του μοντέλου με δεδομένα του 2003 και έγινε εφαρμογή του κώδικα UCODE_2014 (Poeter et al., 2014) για την Ανάλυση Ευαισθησίας με σκοπό την εύρεση των πιο ευαίσθητων παραμέτρων του μοντέλου.

4.2. Ανάπτυξη εννοιολογικού μοντέλου

Ένα εννοιολογικό μοντέλο αποτελεί μία απλοποιημένη αναπαράσταση ενός πραγματικού συστήματος το οποίο ερμηνεύει τις γεωλογικές και υδρολογικές του συνθήκες (Reilly και Harbaugh, 2004). Για την ανάπτυξη του είναι απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τη γεωλογία, την υδρολογία, τις οριακές συνθήκες, τη γεωμετρία και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα καθώς και τις συνθήκες τροφοδοσίας.

Για τη δόμηση του εννοιολογικού μοντέλου πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση για τις υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής μέσα από παλαιότερες μελέτες και διπλωματικές εργασίες (Καλλιώρας, 2008, Ζαγκλιαβού, 2005, Πεταλάς, 1997, Διαμαντής, 1994). Για την επίτευξη της προσομοίωσης, καθοριστικά δεδομένα λήφθηκαν από τη διδακτορική διατριβή του Καλλιώρα (2008) για το παράκτιο τμήμα του Νομού Ροδόπης.

Για την αναπαράσταση του υδροφόρου συστήματος έγιναν ορισμένες παραδοχές σχετικά με τα χαρακτηριστικά των γεωλογικών σχηματισμών που απαρτίζουν το υδροφόρο σύστημα το οποίο θεωρείται ως υπό πίεση (Καλλιώρας, 2008). Ως προς την έκταση του, τα υδρογεωλογικά όρια του μοντέλου καθορίστηκαν σύμφωνα με το γεωλογικό χάρτη της περιοχής (Σχήμα 3.10). Το ανώτερο γεωλογικό στρώμα (με μέσο πάχος 5 m) το οποίο υπέρκειται του κυρίως υδροφόρου στρώματος περιλαμβάνει σχετικά στεγανά υλικά όπως ιλυόλιθους, ψαμμίτες, μικροκροκαλοπαγή και αργίλους, τα οποία δημιουργούν τις υπό πίεση συνθήκες. Το υδροφόρο στρώμα της περιοχής (με μέσο πάχος 50m) περιέχει αλλουβιακές αποθέσεις που αποτελούνται από χονδρόκοκκα υλικά (άμμους, χαλίκια και κροκάλες). Ο υδροφορέας ως προς το βάθος αποτελείται από ένα στρώμα γκριζοπράσινης αργίλου, το οποίο καθορίστηκε βάσει των ισοβαθών καμπυλών του πυθμένα, από δεδομένα της διδακτορικής διατριβής του Καλλιώρα (2008).

Επίσης για την ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου, είναι απαραίτητο να καθοριστούν οι συνθήκες τροφοδοσίας για τη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης οι οποίες είναι οι ακόλουθες:

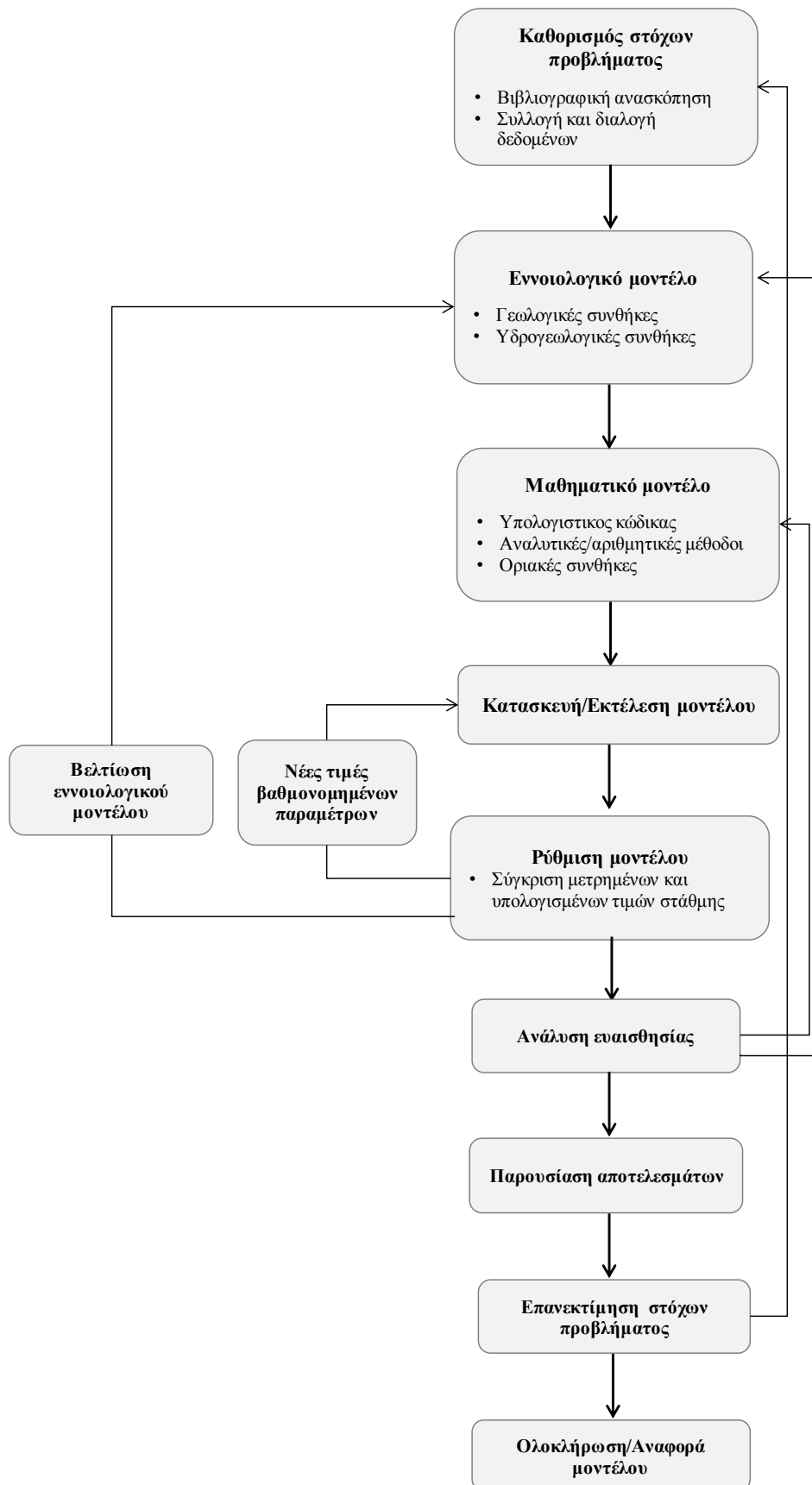
- Υπόγειες πλευρικές εισροές
- Διηθήσεις
- Επιστροφές άρδευσης (έμμεσος εμπλουτισμός)
- Κατείσδυση από βροχοπτώσεις (φυσικός εμπλουτισμός)

4.3. Προσομοίωση υπόγειας ροής περιοχής μελέτης

Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την προ-επεξεργασία (pre-processing) δηλαδή τη συλλογή όλων των δεδομένων GIS (vector/raster) που αναφέρονται στην περιοχή μελέτης. Δημιουργήθηκε χάρτης υπόβαθρο (basemap) με τη χρήση του QGIS 2.14.8 ο οποίος περιέχει το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής, το συνολικό δίκτυο γεωτρήσεων και το σύνολο των γεωτρήσεων παρακολούθησης στάθμης που υπάρχει στην περιοχή. Η γεωαναφορά του χάρτη και η ψηφιακή καταγραφή των χωρικών οντοτήτων της περιοχής πραγματοποιήθηκε στο σύστημα GGRS87/Greek Grid. Τα διακριτά στοιχεία (πολύγωνα, γραμμές, σημεία) που είναι απαραίτητα για την αναπαράσταση του υδροφορέα και των οριακών συνθηκών εισάγονται ως αρχεία shapefile (vector) ενώ η αναπαράσταση επιφανειών με ανομοιογενή χαρακτηριστικά (ψηφιακό μοντέλο εδάφους) επιτυγχάνεται με την εισαγωγή αρχείων tiff (raster).

Αφού ολοκληρωθεί αυτό το στάδιο ακολουθεί η κατασκευή του υδρολογικού μοντέλου και της αντίστοιχης γεωβάσης (Spatialite geodatabase). Ορίζεται η χωρική και χρονική διακριτοποίηση του συστήματος, καθορίζονται τα στρώματα του μοντέλου και τα υδραυλικά τους χαρακτηριστικά. Στη συνέχεια, επιλέγονται οι οριακές συνθήκες για την κατάλληλη προσομοίωση του συστήματος ανάλογα με το στόχο της μελέτης. Έπειτα, εισάγονται στο μοντέλο γεωτρήσεις παρακολούθησης στάθμης προκειμένου να γίνει η σύγκριση των υπολογισμένων και μετρημένων τιμών στάθμης και πραγματοποιείται η πρώτη ρύθμιση του μοντέλου. Μετά την ολοκλήρωση αυτών των σταδίων, ακολουθεί η ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του μοντέλου καθώς και η οπτικοποίηση/μετα-επεξεργασία (post-processing) των αποτελεσμάτων.

Στο γράφημα του Σχήματος 4.1 που ακολουθεί, παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής με τα βήματα που εφαρμόστηκαν για την επίτευξη της προσομοίωσης της περιοχής μελέτης.



Σχήμα 4. 1. Μεθοδολογία προσομοίωσης υπόγειων νερών της περιοχής έρευνας

4.3.1. Καθορισμός φυσικών μεγεθών

Οι μονάδες των φυσικών μεγεθών που περιλαμβάνονται κατά την έναρξη της ανάπτυξης του μοντέλου είναι οι εξής:

- Μήκος: m
- Χρόνος: day
- Υδραυλική αγωγιμότητα: m/day
- Ρυθμός άντλησης: m³/day
- Εμπλουτισμός: m/day

4.3.2. Χωρική διακριτοποίηση

Δημιουργείται δίκτυο καννάβου (Σχήμα 4.7) σύμφωνα με την έκταση της περιοχής το οποίο περιλαμβάνει 35 γραμμές και 40 στήλες, με κυψελίδες διαστάσεων 400x400 m.

4.3.3. Καθορισμός γεωμετρίας

Το μοντέλο προσομοίωσης αποτελείται από δύο στρώματα (Σχήματα 4.8, 4.9). Ένα μικρό επιφανειακό στρώμα από ημιπερατά υλικά (πάχους 5 m) αργίλου το οποίο περιλαμβάνει τα στεγανά υλικά που δημιουργούν τις υπό πίεση συνθήκες και το κυρίως υπό προσομοίωση στρώμα (αλλουβιακές αποθέσεις) μέχρι την οροφή της γκριζοπράσινης.

Με βάση τα δεδομένα του Καλλιώρα (2008), δημιουργήθηκαν οι ισοβαθείς του πυθμένα και οι ισοϋψείς της επιφάνειας του εδάφους του υδροφόρου στρώματος με το πρόγραμμα Golden Software Surfer 12. Έπειτα, επεξεργάστηκαν με το QGIS 2.14.8, μετατράπηκαν σε αρχεία raster και εισήχθησαν στο μοντέλο. Το ψηφιοποιημένο υδρογραφικό υπόβαθρο της περιοχής μελέτης και οι γεωτρήσεις άντλησης απεικονίζονται στο Σχήμα 4.6.

4.3.3.1. Υδρογεωλογική ανάλυση με τη βάση δεδομένων AkvaGIS

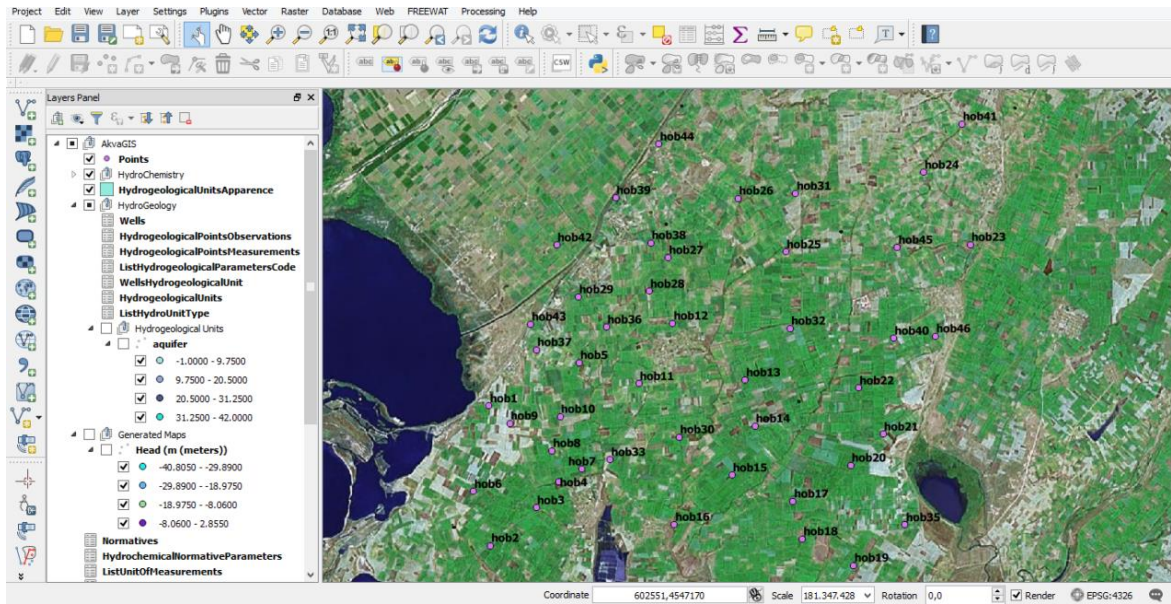
Η βάση δεδομένων AkvaGIS Database παρέχει τη δυνατότητα αποθήκευσης ενός μεγάλου εύρους υδρογεωλογικών πληροφοριών όπως χαρακτηριστικά γεωτρήσεων (βάθος, μήκος, διάμετρος), χωροχρονικά δεδομένα (πιεζομετρικά φορτία, ρυθμοί άντλησης) καθώς και δεδομένα για τον καθορισμό της γεωμετρίας των υδρογεωλογικών ενοτήτων (οροφή, δάπεδο, πάχος σχηματισμών). Το

συγκεκριμένο σύνολο εργαλείων είναι ενσωματωμένο στο λογισμικό FREEWAT και ενισχύει τη διαχείριση, απεικόνιση και ερμηνεία των υδρογεωλογικών δεδομένων συμβάλλοντας στη δημιουργία πιεζομετρικών χαρτών, στη στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων και στη διερεύνηση του πάχους/βάθους των διαφόρων υδρογεωλογικών ενοτήτων (Serrano et al., 2017). Η υδρογεωλογική ανάλυση πραγματοποιείται με τις παρακάτω εντολές:

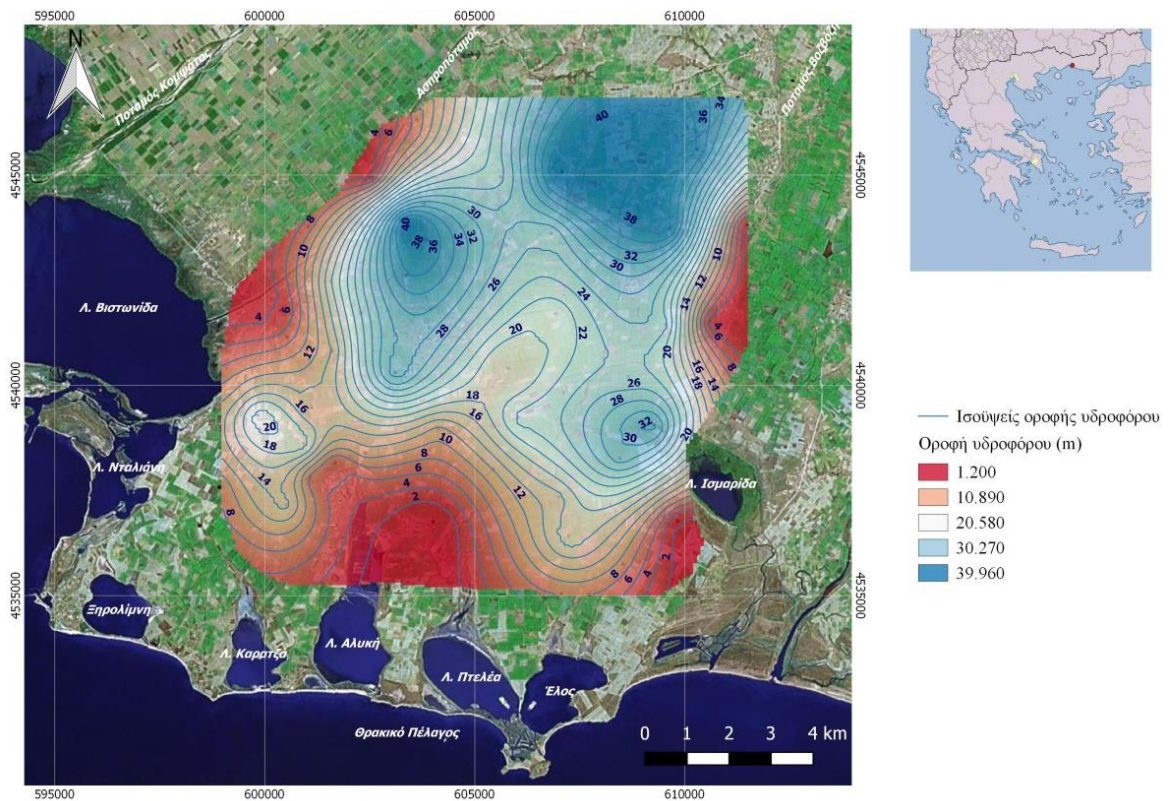
- Hydrogeological spatial query: το συγκεκριμένο εργαλείο επιτρέπει την επεξεργασία/διερεύνηση υδρογεωλογικών μετρήσεων (πιεζομετρικά φορτία, άντλησης, διαστάσεις σχηματισμών) για ένα επιλεγμένο χρονικό διάστημα
- Hydrogeological parameter map: αυτή εντολή δημιουργεί θεματικούς χάρτες (πιεζομετρικούς) για δεδομένα που έχουν προκύψει από την εφαρμογή της εντολής Hydrogeological spatial query και υπολογίζει αυτόματα τα στατιστικά τους αποτελέσματα
- Hydrogeological unit maps: η συγκεκριμένη εντολή δημιουργεί χάρτες με τις διαστάσεις και τη γεωμετρία ενός επιλεγμένου υδρογεωλογικού σχηματισμού που ορίζεται από τις γεωτρήσεις της περιοχής

Οι χάρτες που προκύπτουν από τις παραπάνω εντολές απεικονίζονται με τη μορφή σημειών τα οποία στη συνέχεια μπορούν να επεξεργαστούν με τις επιλογές χωρικής παρεμβολής του QGIS για τη δημιουργία χαρτών raster. Αυτά τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν περαιτέρω για τον καθορισμό της γεωμετρίας των υδρογεωλογικών ενοτήτων κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης στο FREEWAT.

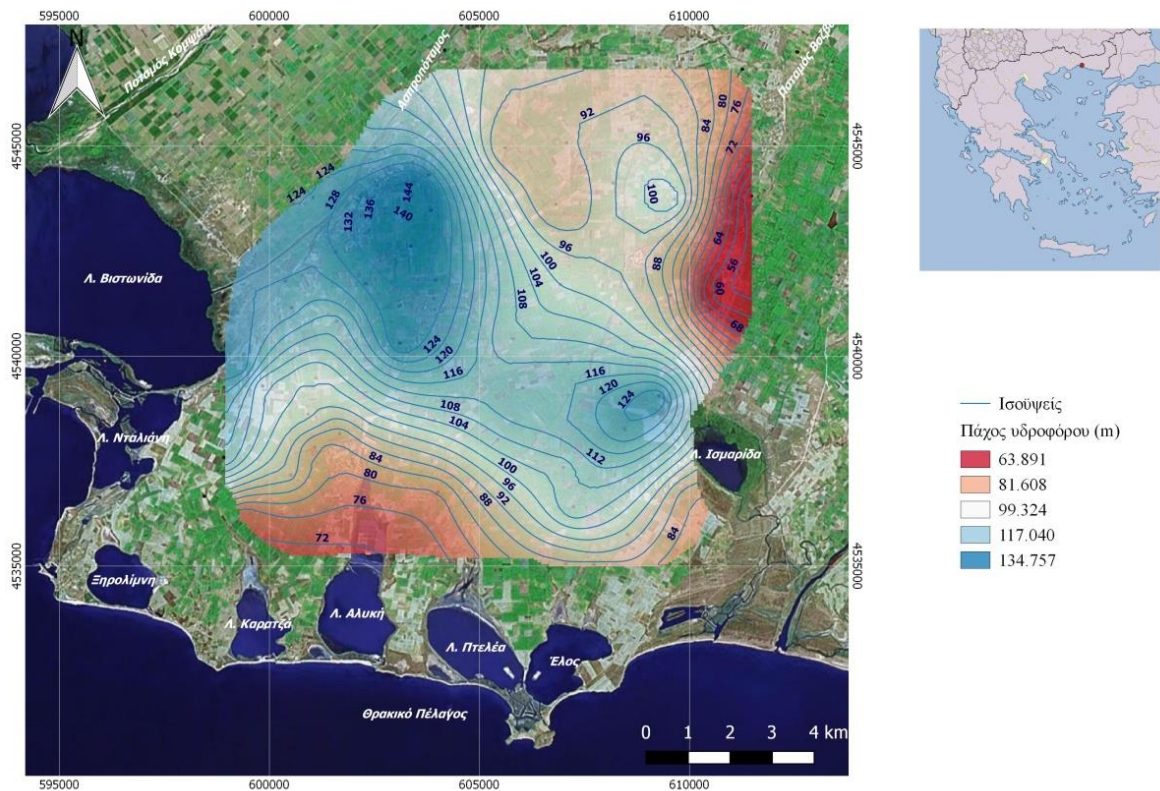
Το εργαλείο υδρογεωλογικής ανάλυσης της βάσης δεδομένων AkvaGIS χρησιμοποιήθηκε για την απεικόνιση της γεωμετρίας του κύριου υδροφόρου στρώματος της περιοχής έρευνας. Στα Σχήματα (4.2 - 4.5) παρουσιάζονται το περιβάλλον εργασίας του AkvaGIS, η οροφή, το πάχος και ο πυθμένας του υδροφόρου στρώματος.



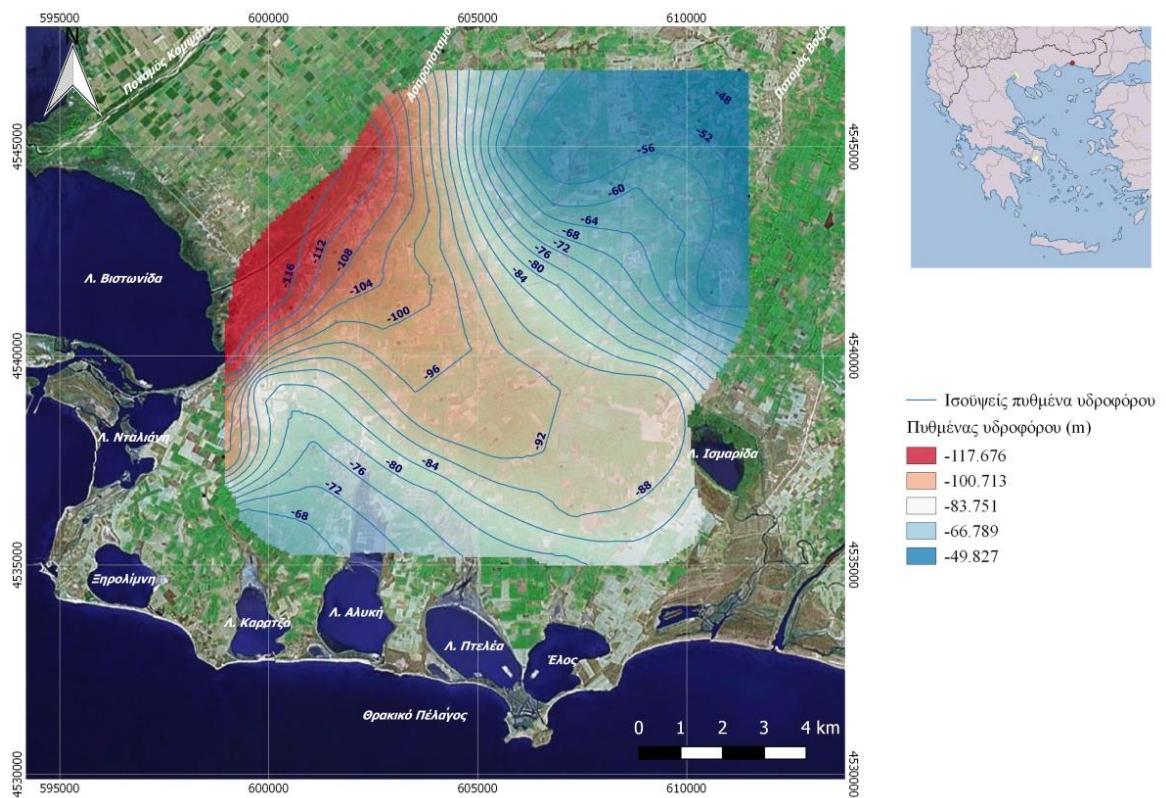
Σχήμα 4. 2. Περιβάλλον εργασίας της βάσης δεδομένων AkvaGIS (Google Earth © 2017)



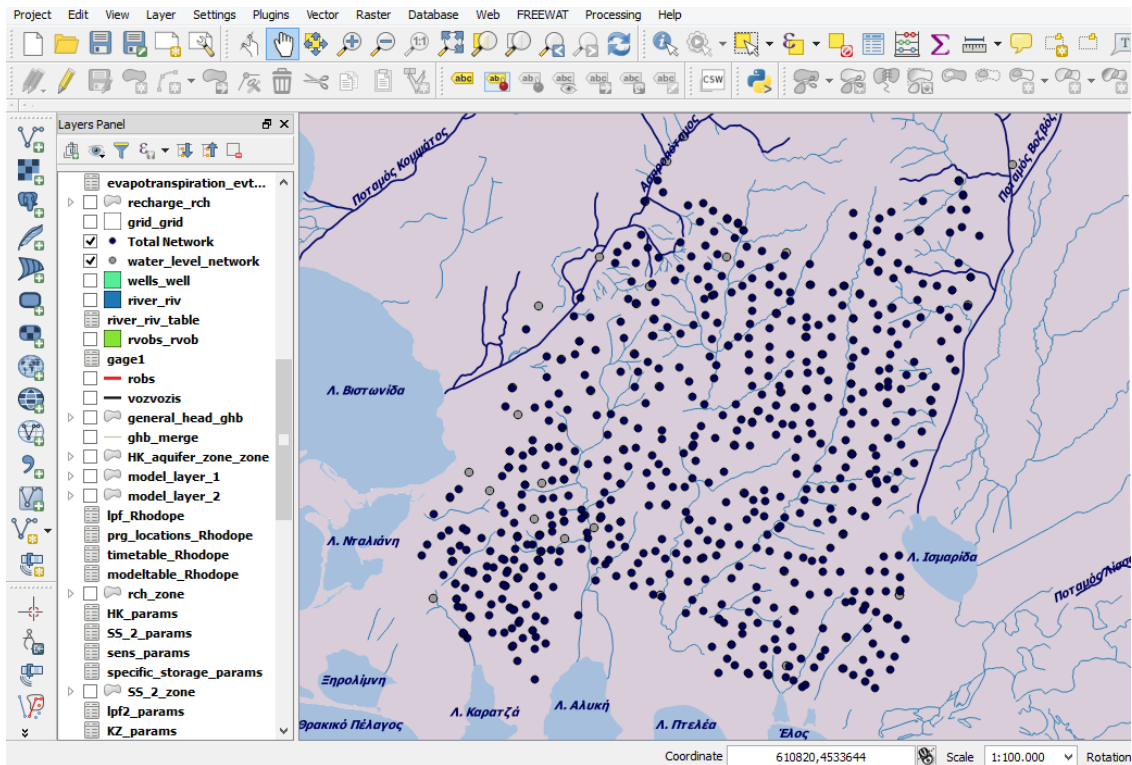
Σχήμα 4. 3. Οροφή υδροφόρου στρώματος περιοχής έρευνας (Google Earth © 2017)



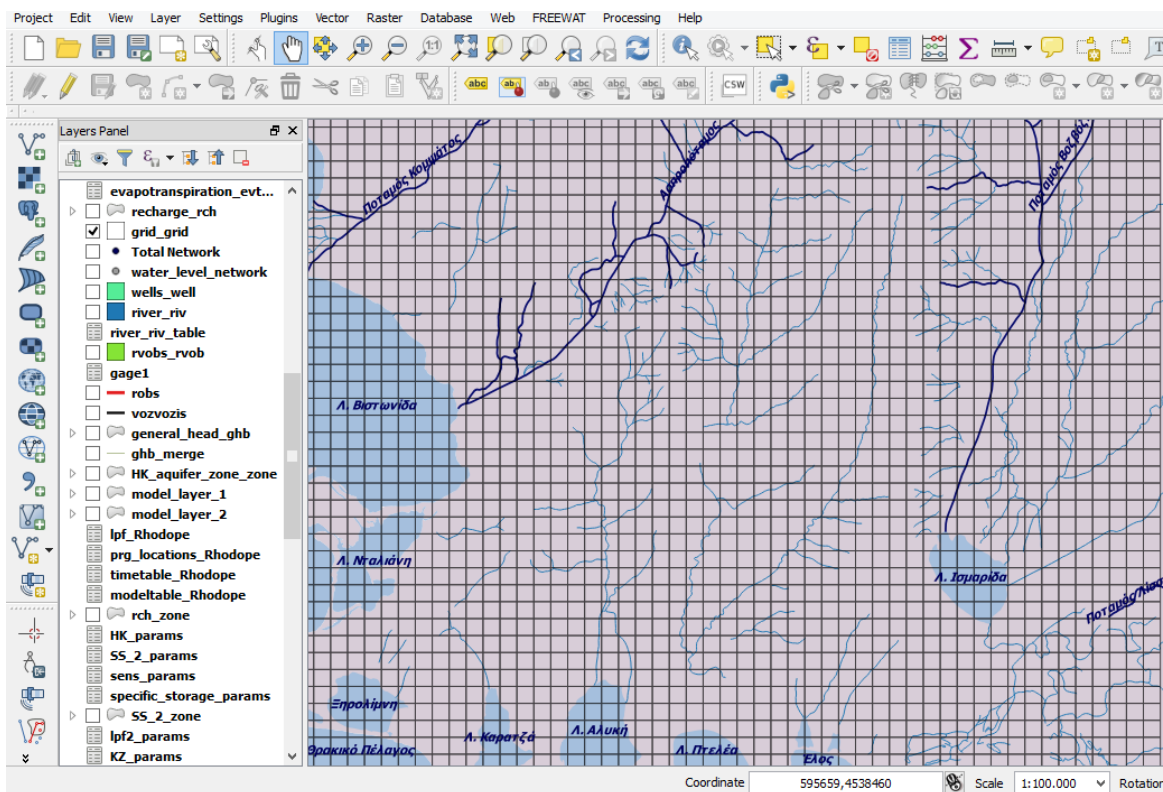
Σχήμα 4. 4. Πάχος υδροφόρου στρώματος περιοχής έρευνας (Google Earth © 2017)



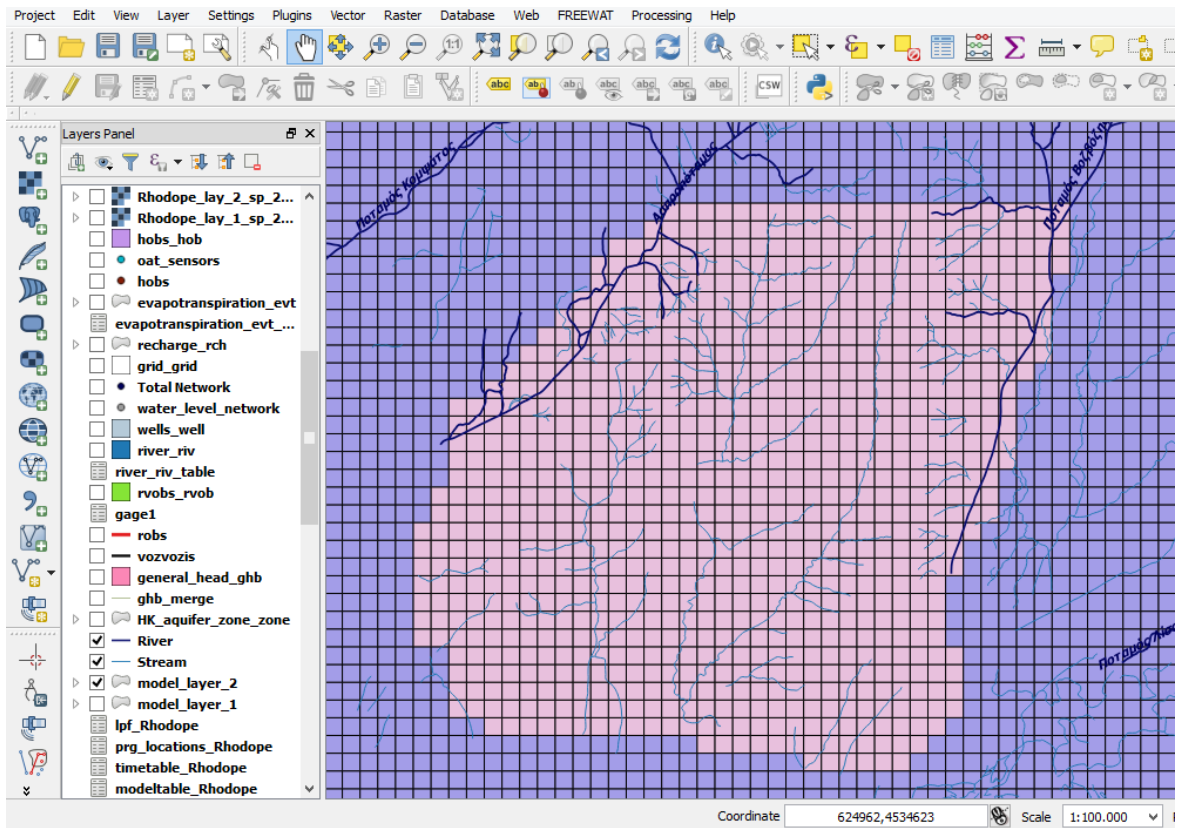
Σχήμα 4. 5. Πυθμένας υδροφόρου στρώματος περιοχής έρευνας (Google Earth © 2017)



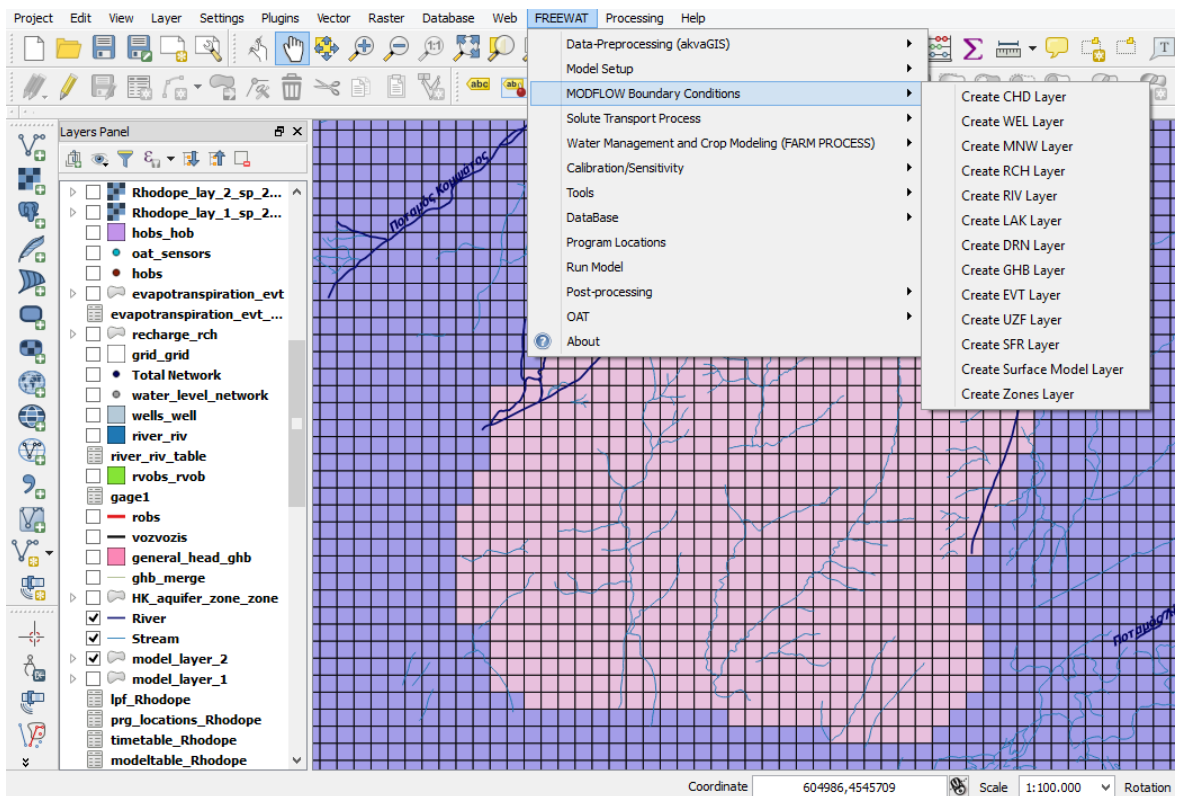
Σχήμα 4. 6. Ψηφιοποιημένο υδρογραφικό υπόβαθρο της περιοχής μελέτης



Σχήμα 4. 7 Δημιουργία κανάβου και ορίου του μοντέλου ροής στο περιβάλλον του QGIS



Σχήμα 4. 8. Κατασκευή μοντέλου της περιοχής



Σχήμα 4. 9. Κατασκευή μοντέλου της περιοχής και παρουσίαση της πλατφόρμας FREEWAT

4.3.6. Χρονική διακριτοποίηση

Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για μία χρονική περίοδο διάρκειας 6 μηνών για την οποία ήταν γνωστές οι αρχικές και οι τελικές συνθήκες. Η περίοδος ξεκινάει τον Απρίλιο του 2003 και τελειώνει τον Οκτώβριο του ίδιου έτους. Η προσομοίωση αφορά τη ξηρή περίοδο στην οποία οι αντλήσεις νερού από τον υδροφορέα για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών είναι ιδιαίτερα αυξημένες. Η συνολική διάρκεια είναι 181 ημέρες και τα χρονικά βήματα (time steps) για την περίοδο είναι έξι (ανά μήνα). Στο συγκεκριμένο μοντέλο επιλέχθηκε η επίλυση σε συνθήκες μη μόνιμης ροής.

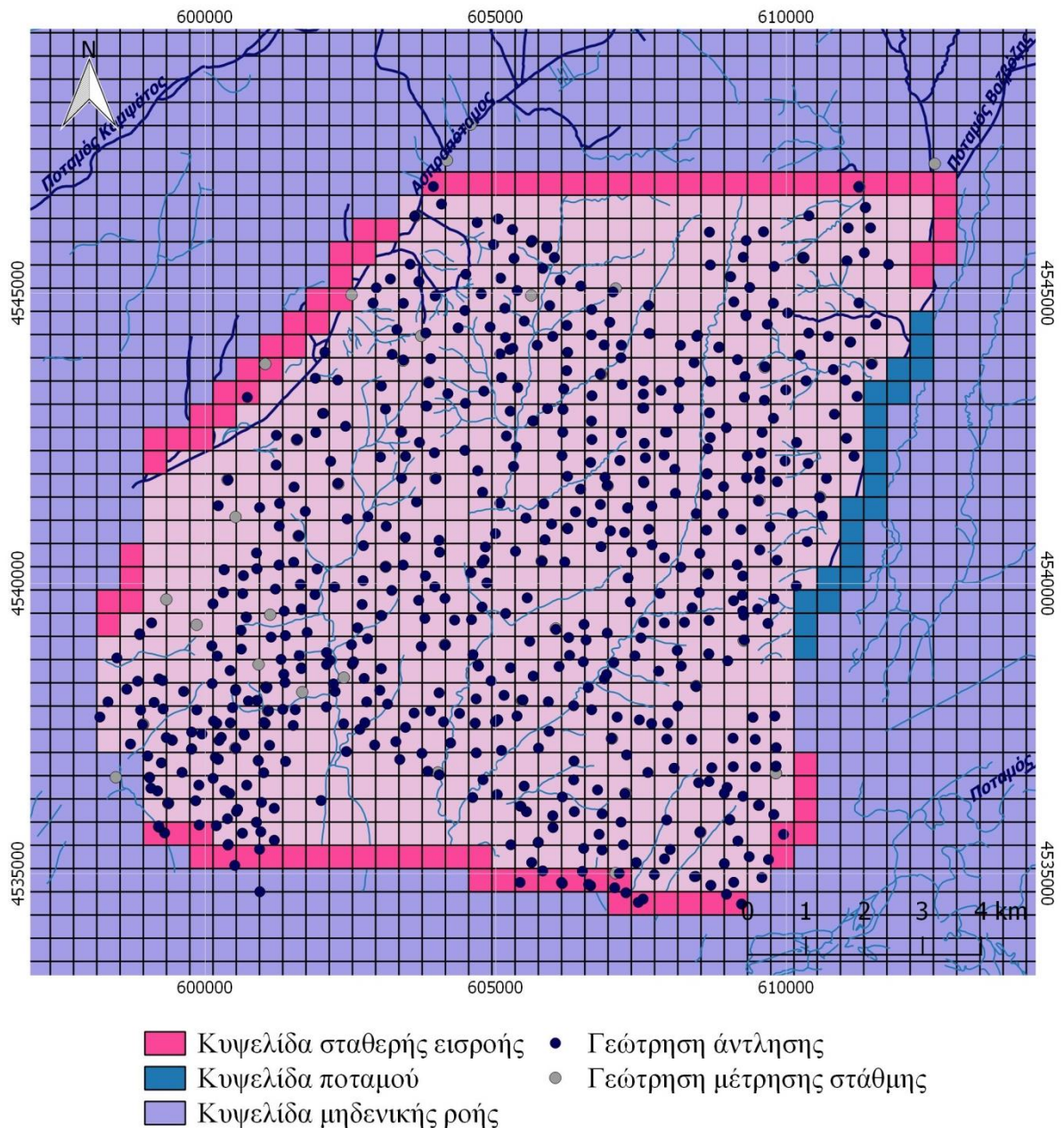
4.3.7. Οριακές Συνθήκες

Οι τύποι των οριακών συνθηκών που χρησιμοποιήθηκαν για την επίτευξη της προσομοίωσης της συγκεκριμένης περιοχής (Σχήμα 4.11) είναι οι εξής:

- Οριακές συνθήκες σταθερής εισροής (General Head Boundary Package, GHB) για τα τμήματα του υδροφόρου που βρίσκονται σε υδραυλική επικοινωνία με τον αλλουβιακό κώνο του ποταμού Κομπάτου καθώς και στα τμήματα του όρμου της λίμνης Βιστωνίδα και στο νότιο τμήμα της λίμνης Ισμαρίδας
- Οριακές συνθήκες ποταμού (River Package, RIV) για το τμήμα της περιοχής κατά μήκος του ποταμού Βοζβόζη
- Οριακές συνθήκες μηδενικής ροής για τα τμήματα της περιοχής όπου δεν εμφανίζεται εισροή ή εκροή υπόγειου νερού

4.3.8. Στοιχεία ισοζύγιου των υπόγειων νερών του μοντέλου

Όπως περιγράφηκε αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 3.4.3, ο εμπλουτισμός του υδροφόρου επιτυγχάνεται από την κατείσδυση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, τις επιστροφές άρδευσης, τις διηθήσεις χειμάρρων και την πλευρική υδραυλική επικοινωνία βόρεια, με τον αλλουβιακό κώνο του ποταμού Κομπάτου και από το ανατολικό τεταρτογενές υδροφόρο σύστημα.



Σχήμα 4. 11. Εννοιολογικό μοντέλο και οριακές συνθήκες του μοντέλου ροής

4.3.8.1. Κατεΐσδυση ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων

Ο εμπλουτισμός του υδροφόρου από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη τα μέσα μηνιαία ύψη βροχής που καταγράφηκαν στο βροχομετρικό σταθμό Πόρπης για την περίοδο Απρίλιος - Οκτώβριος 2003 (191 mm). Πολλαπλασιάζοντας με την έκταση της περιοχής μελέτης (143.84km²), εκτιμήθηκε ο όγκος βροχόπτωσης, ο οποίος κατανεμήθηκε ισόποσα για κάθε μία από

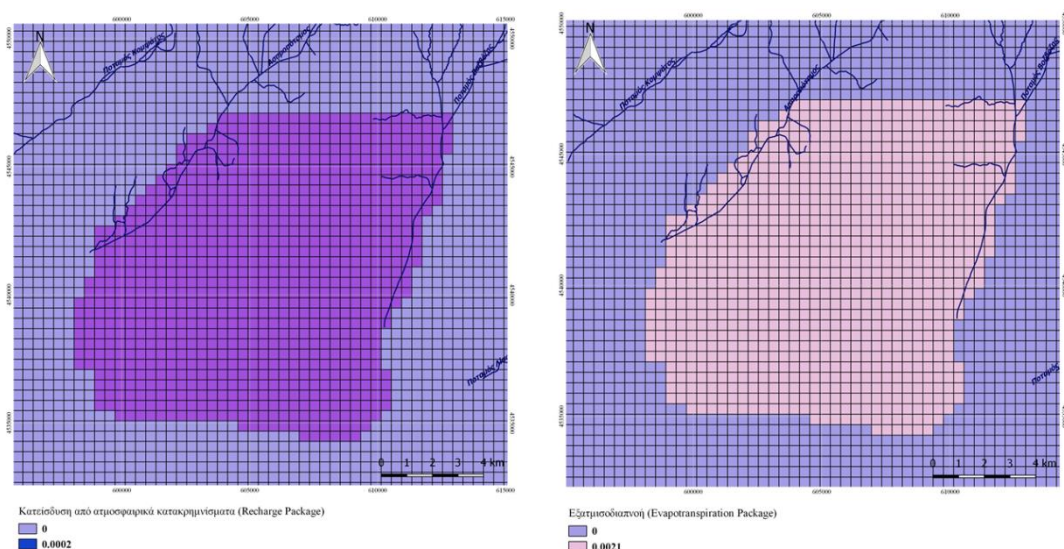
τις 181 ημέρες της περιόδου. Θεωρώντας ως κατείδυση περίπου το 10% αυτού του όγκου, η ημερήσια επιφανειακή τροφοδοσία είναι 0.000063 m/day.

4.3.8.2. Επιστροφές άρδευσης

Η ποσότητα του νερού που αντλείται από τον υδροφόρο για την κάλυψη των αναγκών των ειδών καλλιέργειας της περιοχής ανέρχεται στα 38.2 hm³ (Καλλιώρας, 2008). Θεωρώντας ότι περίπου το 20-30% των ποσοτήτων του νερού άρδευσης επιστρέφει στους ελεύθερους υδροφόρους (Καλλέργης, 2001) υπολογίζονται οι επιστροφές άρδευσης. Οι επιστροφές άρδευσης προστέθηκαν στον εμπλουτισμό από την κατείδυση της βροχόπτωσης για το διάστημα Απριλίου-Οκτωβρίου 2003. Συνεπώς, η συνολική επιφανειακή τροφοδοσία (Recharge Package, RCH) που εισάγεται στο μοντέλο λόγω κατείδυσης ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και επιστροφές άρδευσης είναι 0.0002 m/day.

4.3.8.3. Εξατμισοδιαπνοή

Η εξατμισοδιαπνοή εισάγεται στο μοντέλο με το Evapotranspiration Package, (EVT). Ο ρυθμός εξατμισοδιαπνοής για τη συγκεκριμένη περίοδο αντιστοιχεί σε 0.0021 m/day. Οι οριακές συνθήκες τροφοδοσίας και εξατμισοδιαπνοής παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.12.



Σχήμα 4. 12. Οριακές συνθήκες κατείδυσης από ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και εξατμισοδιαπνοής της περιοχής έρευνας

4.3.8.4. Αντλήσεις

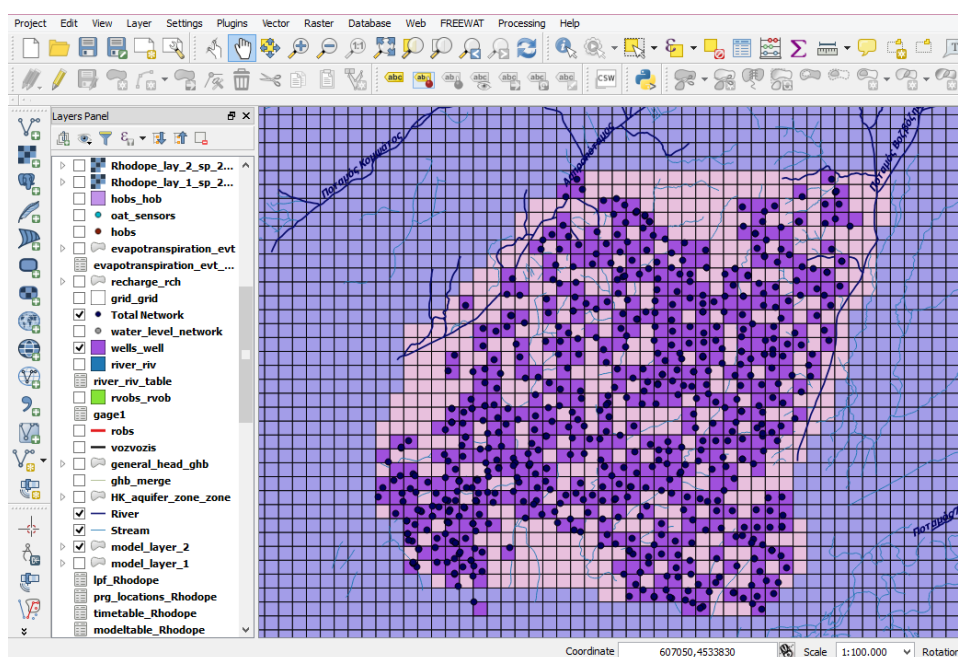
Οι γεωτρήσεις εισάγονται στο μοντέλο με το Well Package (WELL). Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 411 πηγάδια τα οποία ικανοποιούν αρδευτικούς σκοπούς. Η θέση των γεωτρήσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.13. Τη συγκεκριμένη περίοδο προσομοίωσης η συνολική ποσότητα των αντλήσεων έφτασε τα 39.3 hm^3 . Οι ρυθμοί άντλησης είναι πολύ μικροί κοντά στην ακτή ($-20 \text{ m}^3/\text{hr}$) ενώ προς την ενδοχώρα αυξάνονται ($-40 \text{ m}^3/\text{day}$).

4.3.8.5. Διηθήσεις χειμάρρων

Οι διηθήσεις από τον ποταμό Βοζβόζη εισάγονται στο μοντέλο με το River Package (RIV). Σύμφωνα με τη Ζιαγκλιαβού (2005), από μετρήσεις σε διάφορα σημεία του ποταμού, υπολογίστηκε για την χρονική περίοδο (Νοέμβριος-Ιούνιος) μία μέση τιμή απωλειών ροής $900 \text{ m}^3/\text{h}$ που αντιστοιχεί σε εμπλουτισμό $4.544 \times 10^6 \text{ m}^3$.

4.3.8.6. Πλευρική υδραυλική επικοινωνία με τον αλλουβιακό κώνο του ποταμού Κομψάτου και το ανατολικό τεταρτογενές υδροφόρο σύστημα

Οι εισροές από τον ποταμό Κομψάτο και το τεταρτογενές σύστημα εισάγονται στο μοντέλο με το General Head Boundary Package (GHB). Αυτές εκτιμήθηκαν με βάση το υποκεφάλαιο 3.4.3 (Στοιχεία ισοζυγίου του υδροφόρου συστήματος).



Σχήμα 4.13. Συνολικό δίκτυο γεωτρήσεων άντλησης της περιοχής έρευνας

4.3.9. Πακέτα FREEWAT

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και τη σύγκριση των προσομοιωμένων τιμών φορτίου με τις εκτιμημένες τιμές φορτίου χρησιμοποιήθηκε το Head Observation Package (HOB) το οποίο δημιουργήθηκε με τη βοήθεια του Observation Analysis Tool (OAT) κατά το οποίο 41 πηγάδια χρησιμοποιήθηκαν ως πηγάδια παρακολούθησης. Τα δύο πακέτα που χρησιμοποιήθηκαν αναλύονται στη συνέχεια.

4.3.9.1. Πακέτο παρακολούθησης πηγαδιών (Head observation package, HOB)

Ο κώδικας MODFLOW (Harbaugh, 2005) παρέχει τη δυνατότητα σύγκρισης των προσομοιωμένων τιμών φορτίων και παροχών με τις μετρημένες τιμές δεδομένων. Αυτή η δυνατότητα σύγκρισης των τιμών, αποτελεί τη Διαδικασία Παρατήρησης (Observation Process, OBS) η οποία όμως δεν περιλαμβάνει χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την απόδοση βάρους στις παρατηρήσεις (Hill et al., 2000). Αυτό εφαρμόζεται στον κώδικα UCODE_2014 που θα αναλυθεί στη συνέχεια. Η διαδικασία OBS συνιστά το πρώτο βήμα στην ρύθμιση ενός μοντέλου και στην εφαρμογή της ανάλυσης ευαισθησίας στην πλατφόρμα του FREEWAT.

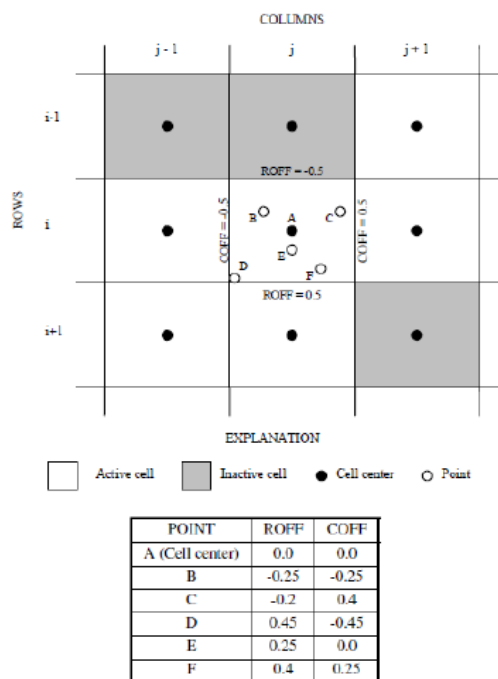
Το πακέτο παρακολούθησης πηγαδιών επιτρέπει τη σύγκριση των υπολογισμένων τιμών φορτίου, που έχουν προκύψει από το μοντέλο, με τις μετρημένες τιμές φορτίου από τις μετρήσεις υπαίθρου. Για την εφαρμογή αυτού του πακέτου, εισάγονται οι θέσεις των σημείων παρακολούθησης με τη μορφή αρχείου shapefile (σημείο, γραμμή ή πολύγωνο ανάλογα με το είδος της παρατήρησης). Έπειτα, εισάγονται αρχεία csv. που περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με την ημερομηνία και την ώρα της παρατηρημένης τιμής, την τιμή της παρατήρησης, τη στατιστική μέθοδο απόδοσης βαρών και τη τιμή των βαρών.

Εναλλακτικά το πακέτο HOB μπορεί να δημιουργηθεί από τα δεδομένα ενός αισθητήρα (sensor) μέσω του πακέτου OAT (Observation Analysis Tool) το οποίο θα αναφερθεί στο επόμενο υποκεφάλαιο.

Οι μετρημένες τιμές υδραυλικών φορτίων μπορούν να ορισθούν σε οποιαδήποτε θέση μέσα στο πλέγμα (grid) του μοντέλου. Όταν μία παρατηρημένη τιμή δεν τοποθετείται στο κέντρο του κελιού και δεν αντιστοιχεί άμεσα σε έναν

κόμβο, εφαρμόζεται χωρική παρεμβολή. Στο Σχήμα 4.14, απεικονίζονται 6 θέσεις φορτίων (A-F) στα οποία πρέπει να εφαρμοστεί παρεμβολή. Για κάθε θέση καθορίζονται συντεταγμένες οι οποίες ορίζουν τη θέση της παρατήρησης μέσα σε ένα κελί σε σχέση με το κέντρο του κελιού. Αυτές οι συντεταγμένες περιλαμβάνουν μία παράμετρο αντιστάθμισης σειράς (row offset, ROFF) και μία παράμετρο αντιστάθμισης στήλης (column offset, COFF) που κυμαίνονται από -0.5 έως +0.5 με τη τιμή 0.0 να δηλώνει ότι δεν υπάρχει μετατόπιση. Το αρνητικό πρόσημο δείχνει την κατεύθυνση μείωσης των αριθμών στηλών/σειρών. Η χρήση των παραμέτρων ROFF και COFF παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.14.

Επίσης, ο χρόνος της παρατήρησης (IREFSP) καθορίζεται σε σχέση με την εκάτοστε περίοδο φόρτισης (stress period) μαζί με μία παράμετρο χρονικής μετατόπισης (TOFFSET). Ο χρόνος της παρατήρησης περιλαμβάνει το χρόνο στην αρχή της περιόδου φόρτισης συν τη χρονική μετατόπιση. Η παράμετρος χρονικής μετατόπισης μπορεί να υπερβαίνει το μήκος της περιόδου φόρτισης, εφόσον ο προκύπτων χρόνος της παρατήρησης δεν είναι μεταγενέστερος της τελικής περιόδου φόρτισης. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει να αλλάζει το μήκος και ο αριθμός των περιόδων φόρτισης χωρίς να αλλάζει ο χρόνος της παρατήρησης.



Σχήμα 4. 14. Θέσεις σημείων παρατήρησης σε πλέγμα πεπερασμένων διαφορών με τη χρήση των παραμέτρων ROFF και COFF (Hill et al., 2000)

Παρόμοια με το πακέτο παρακολούθησης πηγαδιών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πακέτα παρακολούθησης της ροής για άλλους τύπους παρατηρήσεων. Αυτά περιλαμβάνουν το Πακέτο παρακολούθησης ποταμών (River observation package, RVOB), το Πακέτο παρακολούθησης σταθερής εισροής (General head boundary observation package, GBOB) και το Πακέτο παρακολούθησης σταθερού φορτίου (Constant head observation package, CHOBS). Στην παρούσα διπλωματική κατά τη διαδικασία της παραμετροποίησης χρησιμοποιήθηκε εκτός από το πακέτο παρακολούθησης πηγαδιών (HOB) και το πακέτο παρακολούθησης ποταμού (RVOB).

4.3.9.2. Πακέτο παρακολούθησης και επεξεργασίας (Observation Analysis Tool, OAT)

Το Observation Analysis Tool (OAT) είναι ένα πρόσθετο πακέτο του FREEWAT το οποίο παρέχει προηγμένες δυνατότητες επεξεργασίας χρονοσειρών οι οποίες είναι χρήσιμες για τη ρύθμιση ενός μοντέλου (calibration).

Έχει σχεδιαστεί με σκοπό να διευκολύνει:

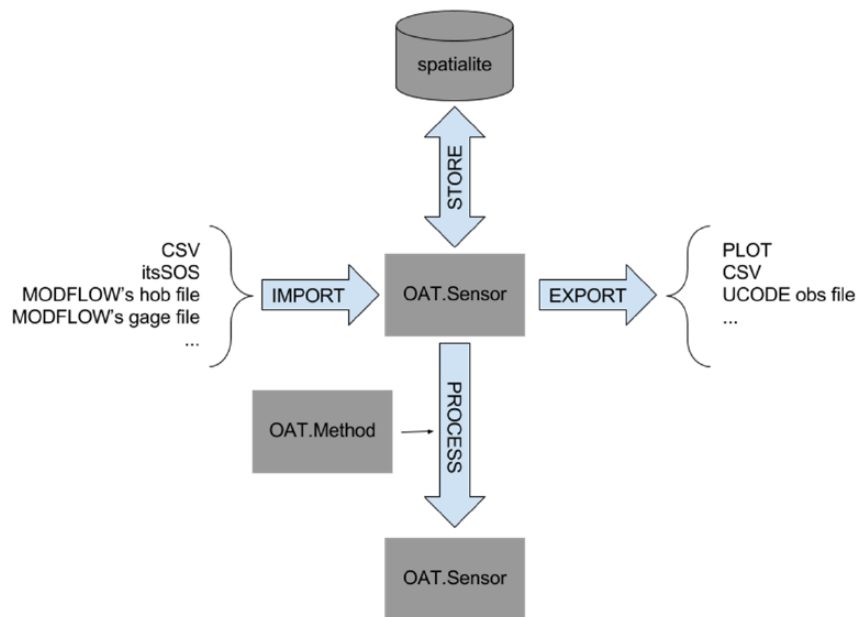
- την εισαγωγή δεδομένων χρονοσειρών απευθείας στην πλατφόρμα του FREEWAT
- τη διαχείριση, απεικόνιση και επεξεργασία των δεδομένων
- τη χρήση αυτών των δεδομένων στη δημιουργία και τη ρύθμιση του μοντέλου

Το πακέτο OAT αποτελείται από έναν αισθητήρα (sensor) που διαχειρίζεται τα δεδομένα χρονοσειρών και μία μέθοδο επεξεργασίας. Η εισαγωγή των δεδομένων μπορεί να επιτευχθεί μέσω ενός istSOS server (Cannata et al., 2015), από αρχεία csv ή βάσεις δεδομένων απευθείας στο περιβάλλον του QGIS καθώς και από αποτελέσματα του μοντέλου MODFLOW (αρχεία list, HOB, gage). Ο αισθητήρας που δημιουργείται αποθηκεύεται στη βάση δεδομένων του FREEWAT. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν μπορούν να απεικονισθούν με τη μορφή διαγραμμάτων, να αποθηκευτούν σε αρχεία csv για περαιτέρω επεξεργασία ή να χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία αρχείων παρατηρήσεων για την εκτέλεση του κώδικα UCODE. Η γενική δομή του πακέτου παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.15.

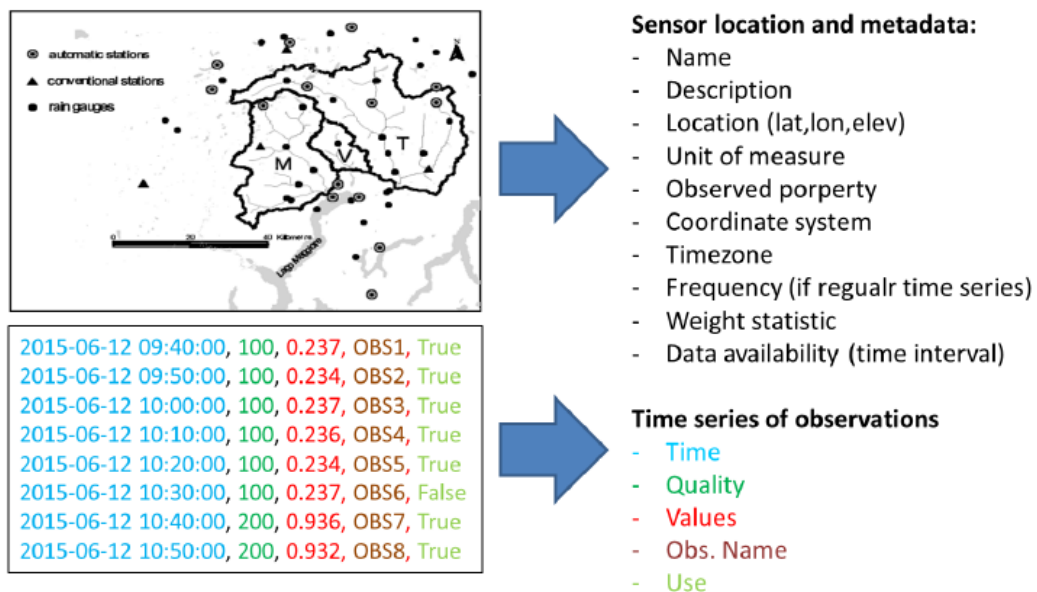
Ο αισθητήρας αποτελείται από δεδομένα για τον προσδιορισμό του σημείου παρατήρησης τα οποία περιλαμβάνουν το όνομα της παρατήρησης, την τοποθεσία (γεωγραφικό μήκος, πλάτος, υψόμετρο), την ιδιότητα της παρατήρησης, τη μονάδα μέτρησης, το σύστημα συντεταγμένων, τη ζώνη ώρας, τη στατιστική μέθοδο για την απόδοση βάρους και το χρονικό διάστημα της παρατήρησης. Αυτά τα δεδομένα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.16.

Επίσης, μία άλλη δυνατότητα του πακέτου OAT είναι η δημιουργία αρχείων παρατηρήσεων HOB (Head Observation Package). Τα αρχεία HOB είναι απαραίτητα για την ρύθμιση ενός μοντέλου στο FREEWAT μέσω του κώδικα UCODE. Για την κατασκευή αυτών των αρχείων ο αισθητήρας θα πρέπει να περιέχει εκτός από τα δεδομένα που αναφέρθηκαν στο Σχήμα 4.16, το είδος της στατιστικής μεθόδου που

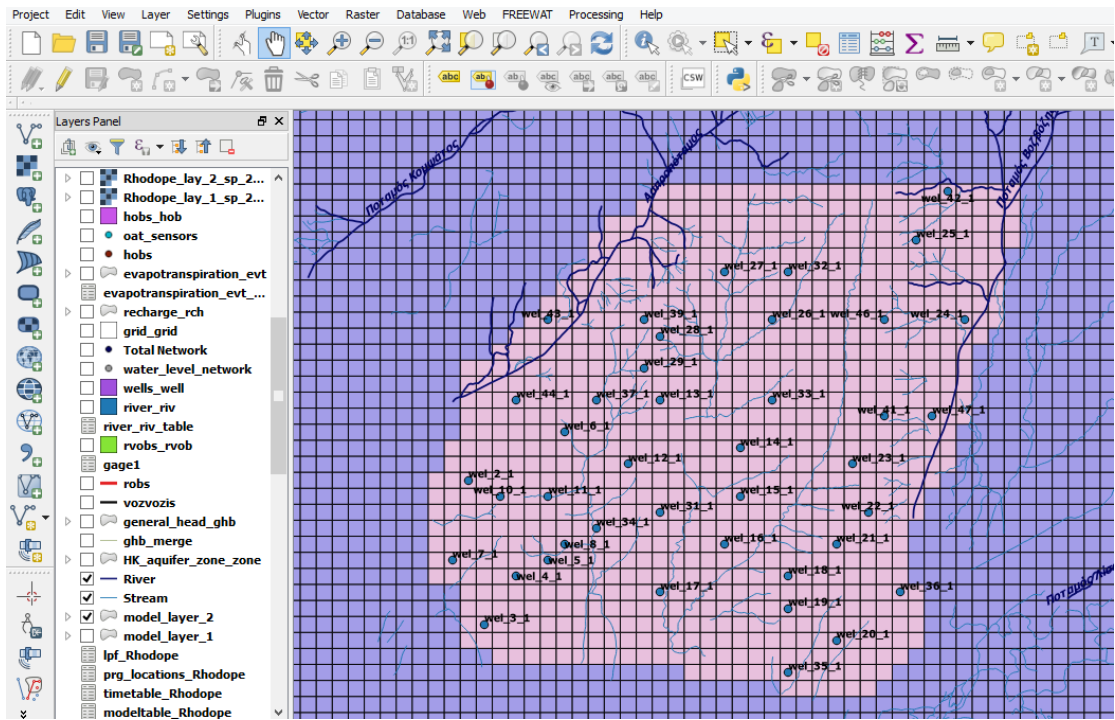
είναι κατάλληλη για κάθε είδος παρατήρησης καθώς και την οροφή και το δάπεδο της κάθε γεώτρησης. Η διαδικασία αυτή εφαρμοσθήκε στην παρούσα διπλωματική για την κατασκευή του πακέτου HOB. Οι θέσεις των αισθητήρων OAT και οι γεωτρήσεις παρακολούθησης (HOB) παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.17 και 4.18 αντίστοιχα.



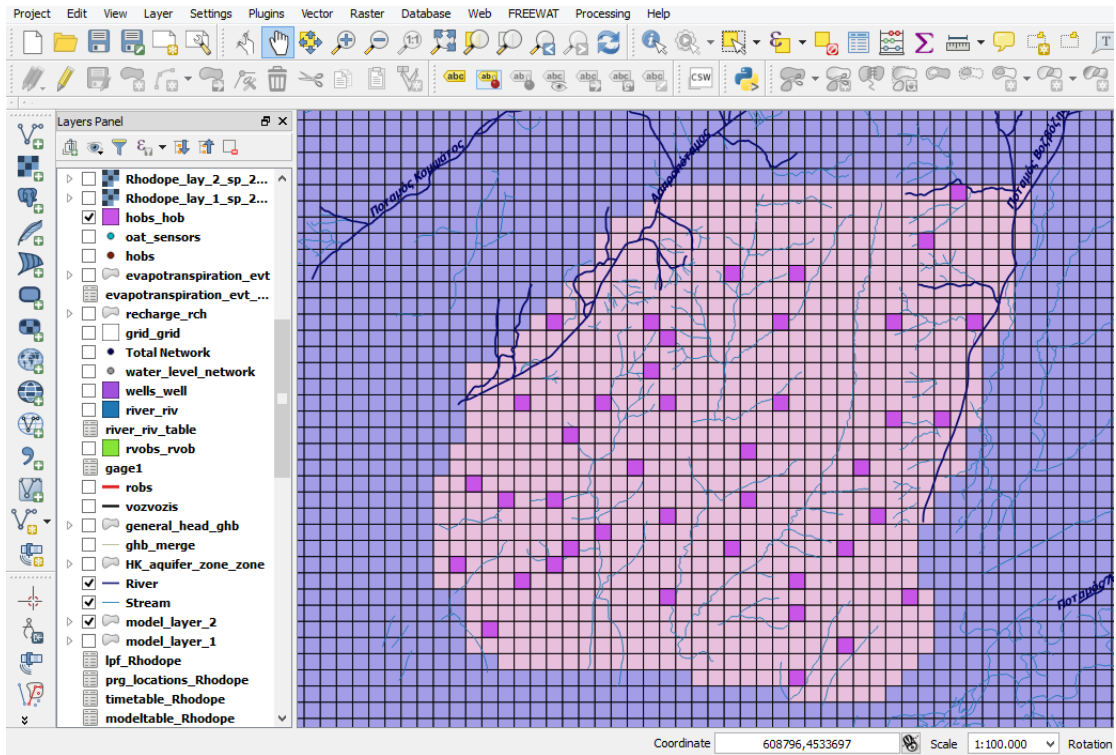
Σχήμα 4. 15 Δομή πακέτου OAT (Foglia et al., 2017)



Σχήμα 4. 16. Δεδομένα αισθητήρα OAT (Foglia et al., 2017)



Σχήμα 4. 17. Δεδομένα αισθητήρα OAT (Observation Analysis Tool)



Σχήμα 4. 18. Κατασκευή γεωτρήσεων παρακολούθησης (HOB) με τη βοήθεια δεδομένων του εργαλείου OAT

4.3.10. Περίοδοι φόρτισης

Το μοντέλο περιλαμβάνει μία περίοδο φόρτισης (SP_1) με χρονικό βήμα μίας ημέρας σε συνθήκες μόνιμης ροής και μία περίοδο φόρτισης (SP_2) με διάρκεια 181 ημέρες με 6 μηνιαία χρονικά βήματα σε συνθήκες μη μόνιμης ροής. Οι περίοδοι φόρτισης και τα χρονικά βήματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4. 1. Περίοδοι φόρτισης και χρονικά βήματα του μοντέλου

Περίοδος φόρτισης (SP)	Χρονικό βήμα (TS)	Ημερολογιακή περίοδος
SP_1	TS_1	15/04/2003
SP_2	TS_1	16/04/2003-16/05/2003
	TS_2	17/05/2003-16/06/2003
	TS_3	17/06/2003-16/07/2003
	TS_4	17/07/2003-16/08/2003
	TS_5	17/08/2003-16/09/2003
	TS_6	17/09/2003-13/10/2003

4.3.11. Αποτελέσματα ρύθμισης μοντέλου

Οι εισροές στο μοντέλο κατά την περίοδο προσομοίωσης περιλαμβάνουν:

- Υπόγειες πλευρικές εισροές από τον αλλουβιακό κώνο του ποταμού Κομψάτου (Οριακές συνθήκες σταθερής εισροής General Head Boundary Package, GHB στο βορειοδυτικό όριο του εννοιολογικού μοντέλου του Σχήματος κατά μήκος του Ασπροπόταμου)
- Πλευρικές υπόγειες εισροές από την τεταρτογενή υδροφορία του Νέου Σιδηροχωρίου (Οριακές συνθήκες σταθερής εισροής General Head Boundary Package, GHB στο βόρειο-ανατολικό όριο του εννοιολογικού μοντέλου του Σχήματος)
- Υπόγειες εισροές υφάλμυρου νερού στον όρμο της λίμνης Βιστωνίδας (δυτικά) και στο νότιο τμήμα της λίμνης Ισμαρίδας (ανατολικά) (Οριακές συνθήκες σταθερής εισροής General Head Boundary Package, GHB του εννοιολογικού μοντέλου του Σχήματος)
- Διήθηση από τον ποταμό Βοζβόζη (Οριακές συνθήκες ποταμού River Package, RIV στο ανατολικό όριο του εννοιολογικού μοντέλου του Σχήματος, κατά μήκος του ποταμού Βοζβόζη)
- Κατείσδυση από ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (φυσικός εμπλουτισμός) και επιστροφές άρδευσης (έμμεσος εμπλουτισμός) (Recharge Package, RCH)

Οι εκροές από το μοντέλο την ίδια περίοδο περιλαμβάνουν:

- Αντλήσεις κατά την αρδευτική περίοδο (Well Package, WELL)
- Απώλειες εξατμισοδιαπνοής (Evapotranspiration Package, EVT)
- Πλευρικές εκροές για τα τμήματα του υδροφόρου που βρίσκονται σε υδραυλική επικοινωνία με τον αλλουβιακό κώνο του ποταμού Κομψάτου καθώς και στα τμήματα του όρμου της λίμνης Βιστωνίδας και στο νότιο τμήμα της λίμνης Ισμαρίδας (Οριακές συνθήκες σταθερής εισροής (General Head Boundary Package, GHB)

Στον Πίνακα 4.2 αναφέρεται αναλυτικά το υδατικό ισοζύγιο της περιοχής μελέτης για την περίοδο προσομοίωσης μετά τη διαδικασία ρύθμισης του μοντέλου. Παρατηρείται ότι οι συνολικές ποσότητες νερού που εισρέουν στο υδροφόρο ανέρχονται σε 39.937.380 m³ ενώ οι ποσότητες που αντλούνται σε 39.937.388 m³.

Πίνακας 4. 2. Ισοζύγιο υπόγειων νερών για την περιοχή μελέτης μετά το τέλος της προσομοίωσης

Οριακή συνθήκη		Αθροιστικοί όγκοι (L³)	Παροχές/Χρόνο (L³/T)
Εισροή	Αποθήκευση	401376.3438	1.87E-03
	Αντλήσεις	0	0
	Ποτάμι	473274.9375	2600.4119
	Εξατμισοδιαπνοή	0	0
	Συνθήκες GHB	33844272	188377.5781
	Κατείσδυση από βροχή	5218457.5	28736
	Συνολική εισροή	39937380	219713.9844
Εκροή	Αποθήκευση	0	0
	Αντλήσεις	39768236	219714
	Ποτάμι	0	0
	Εξατμισοδιαπνοή	81476.7422	0
	Συνθήκες GHB	87674.4219	0
	Κατείσδυση από βροχή	0	0
	Συνολική εκροή	39937388	219714
Εισροή-Εκροή		-8	-1.5625E-02

Στον Πίνακα 4.3 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μετρημένες και οι υπολογισμένες τιμές στάθμης όπως προέκυψαν μετά τη ρύθμιση του μοντέλου στις 13/10/2003. Αυτές οι τιμές προβάλλονται σε διάγραμμα συσχέτισης όπου φαίνεται η προσέγγιση που παρουσιάζουν οι σχετικές τιμές στάθμης (Σχήματα 4.19, 4.20).

Πίνακας 4. 3. Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές στάθμης των γεωτρήσεων της ρύθμισης του μοντέλου για τις 13/10/2003

Γεώτρηση παρατήρησης	Υπολογισμένες τιμές (m)	Μετρημένες τιμές (m)	Διαφορά (m)
wel_35	-22.361	-12.71	9.651
wel_20	-23.274	-12.84	10.434
wel_19	-27.346	-18.22	9.126
wel_17	-28.205	-23.65	4.555
wel_36	-23.705	-12.3	11.405
wel_18	-30.757	-27.8	2.957
wel_16	-31.718	-31.59	0.128
wel_21	-34.341	-28.99	5.351
wel_31	-33.049	-34.82	-1.771
wel_22	-36.098	-38.12	-2.022
wel_15	-35.273	-33.1	2.173
wel_23	-37.789	-41.1	-3.311
wel_14	-37.241	-35.12	2.121
wel_3	-24.678	-9.32	15.358
wel_4	-27.645	-17.1	10.545
wel_7	-28.118	-16.78	11.338
wel_5	-28.882	-16.02	12.862
wel_8	-29.564	-19.98	9.584
wel_34	-30.345	-22.05	8.295
wel_10	-29.586	-18.75	10.836
wel_11	-30.737	-12	18.737
wel_2	-29.114	-16.29	12.824
wel_12	-33.576	-30.63	2.946
wel_6	-31.810	-19.57	12.240
wel_44	-29.405	-14.58	14.825
wel_37	-32.704	-27.82	4.884
wel_13	-35.973	-31.94	4.033
wel_29	-34.747	-25.6	9.147
wel_28	-35.345	-33.55	1.795
wel_43	-15.000	0.32	15.320
wel_39	-33.683	-23.01	10.673
wel_27	-37.332	-40.78	-3.448
wel_41	-37.843	-32.8	5.043
wel_47	-36.763	-30.97	5.793
wel_33	-39.159	-42.12	-2.961
wel_26	-39.338	-30.63	8.708
wel_46	-37.655	-33.22	4.435
wel_24	-34.199	-23.02	11.179
wel_32	-38.413	-38.32	0.093
wel_25	-34.436	-20.2	14.236
wel_42	-24.881	-8.8	16.081

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν οι δείκτες Nash-Sutcliffe (NS) και mass balance error. Ο δείκτης Nash-Sutcliffe (NS) υπολογίζεται από τον τύπο (Nash and Sutcliffe, 1970):

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (q_{sim,i} - q_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^n q_{obs,i}^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n q_{obs,i})^2} \quad 4.1$$

Όπου q_{sim} είναι οι προσομοιωμένες τιμές και q_{obs} είναι παρατηρημένες τιμές. Όταν οι παρατηρημένες τιμές ταυτίζονται με τις προσομοιωμένες τιμές τότε ο δείκτης NS ισούται με την τιμή 1. Όσο η τιμή του δείκτη προσεγγίζει τη μονάδα τόσο μεγαλώνει η ακρίβεια του μοντέλου.

Ο δείκτης mass balance error (m) υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

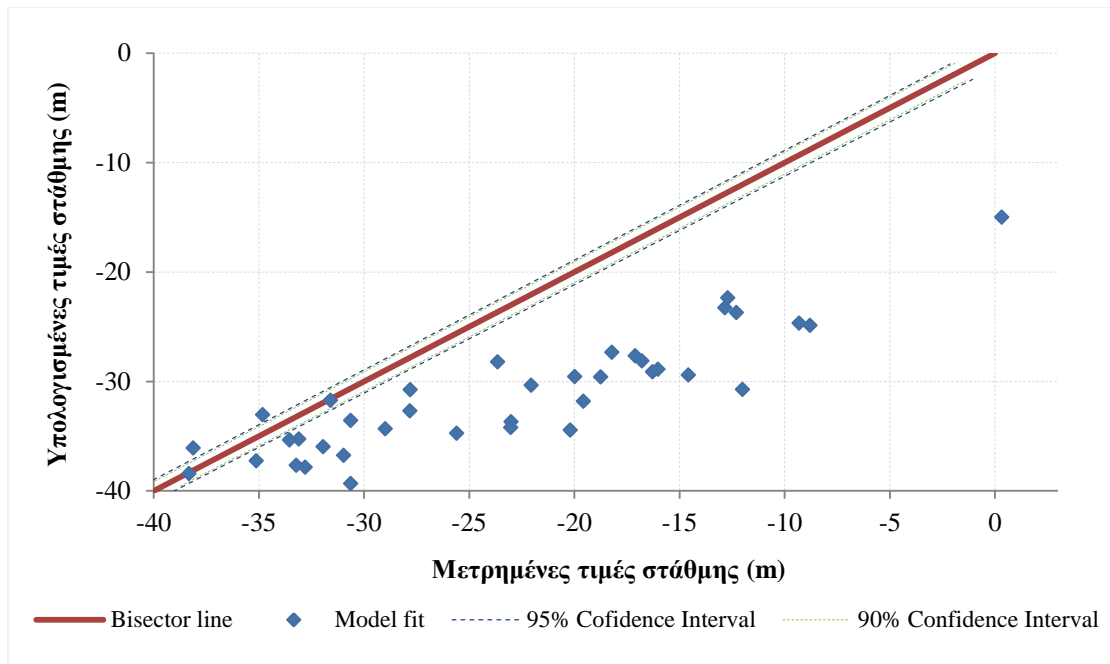
$$m = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (q_{sim,i} - q_{obs,i})}{\sum_{i=1}^n q_{obs,i}} \quad 4.2$$

Όπου q_{sim} είναι οι προσομοιωμένες τιμές και q_{obs} είναι παρατηρημένες τιμές ομοίως. Όταν οι παρατηρημένες τιμές ταυτίζονται με τις προσομοιωμένες τιμές τότε ο δείκτης ισούται με την τιμή 0. Η τιμή του m μπορεί να είναι θετική ή αρνητική. Οι θετικές τιμές του δείκτη υποδηλώνουν ότι οι προσομοιωμένες τιμές είναι μεγαλύτερες από τις παρατηρημένες. Οι αρνητικές τιμές υποδηλώνουν ότι οι προσομοιωμένες τιμές είναι μικρότερες από τις παρατηρημένες.

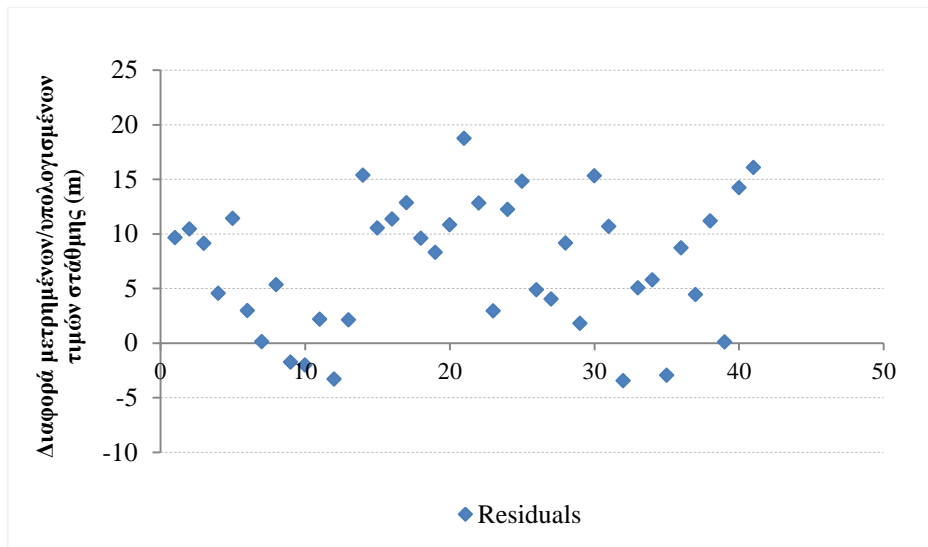
Σύμφωνα με τις μετρήσεις του Πίνακα 4.3, ο δείκτης Nash-Sutcliffe είναι NS=0.2 και ο δείκτης mass balance error είναι m=29.4. Όπως παρατηρείται και από το διάγραμμα συσχέτισης 4.19, οι προσομοιωμένες τιμές φορτίων είναι μεγαλύτερες από τις παρατηρημένες τιμές της μέτρησης στις 13/10/2003. Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των διαφορών (residuals).

Πίνακας 4. 4. Στατιστικά χαρακτηριστικά των διαφορών παρατηρημένων και προσομοιωμένων τιμών στάθμης (residuals)

Absolute Residual Mean	7.827
Standard error of the estimate	0.929
Residual RMS	7.151
Normalized RMS	0.168
Pearson Correlation Coefficient	0.893

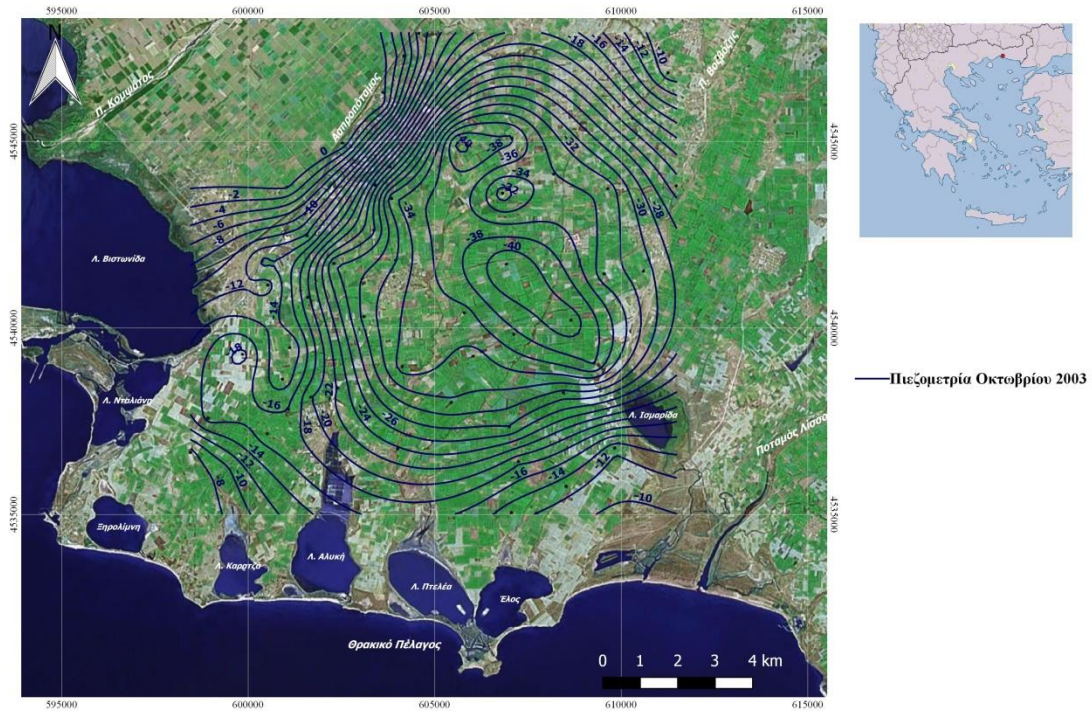


Σχήμα 4. 19 Διάγραμμα συσχέτισης υπολογισμένων και μετρημένων τιμών στάθμης

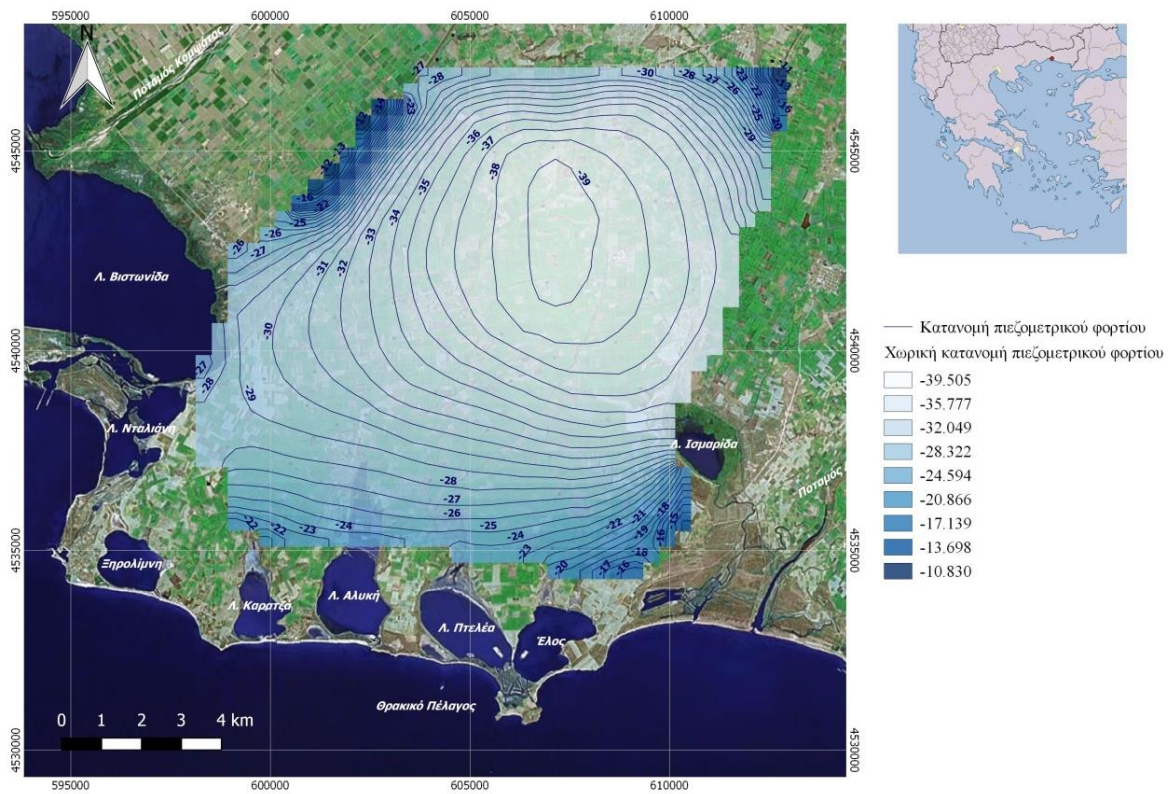


Σχήμα 4. 20. Διαφορές προσομοιωμένων-μετρημένων τιμών στάθμης (residuals)

Στο Σχήμα 4.21 παρουσιάζεται ο πιεζομετρικός χάρτης για τις μετρημένες τιμές στάθμης της μέτρησης 13/10/2003 και στο Σχήμα 4.22 παρουσιάζεται ο χάρτης για τις αντίστοιχες υπολογισμένες τιμές στάθμης. Από τη σύγκριση των δύο σχημάτων παρατηρείται ταύτιση των μετρημένων και των υπολογισμένων τιμών στάθμης στο βορειοανατολικό όριο του μοντέλου και στο κεντρικό τμήμα της περιοχής, όπου εντοπίζεται ο κώνος κατάπτωσης του υδροφόρου συστήματος. Αποκλίσεις μεταξύ των παραπάνω τιμών παρατηρούνται στο δυτικό και βορειοδυτικό όριο της περιοχής.



Σχήμα 4. 21. Πιεζομετρικές καμπύλες για τη μέτρηση στις 13/10/2003 (Καλλιώρας, 2008 με τροποποιήσεις)



Σχήμα 4. 22. Προσομοιωμένες τιμές πιεζομετρικού φορτίου για τη μέτρηση στις 13/10/2003

4.3.12. Ανάλυση Ευαισθησίας (Sensitivity Analysis Module)

4.3.12.1. Ο κώδικας UCODE

Ο κώδικας UCODE (Poeter et al., 2005, 2014) αναπτύχθηκε από την U.S. Geological Survey και εφαρμόζεται για την ανάλυση ευαισθησίας. Αποτελεί ένα λογισμικό ελεύθερου κώδικα και διατίθεται δωρεάν από το IGWMC (Integrated Groundwater Modeling Center, <http://igwmc.mines.edu/>).

Άλλοι κώδικες που αναπτύσσονται από τη U.S. Geological Survey είναι ο κώδικας PEST ++ (Welter et al., 2012) και ο bgaPEST (Fienen et al., 2013). Υπάρχουν επίσης, μία σειρά ελεύθερα διαθέσιμων προγραμμάτων εκτός της U.S. Geological Survey με παρόμοιες δυνατότητες όπως το PEST (Doherty, 2010) και το OSTRICH (Matott, 2010).

4.3.12.2. Στατιστικές μέθοδοι

Οι στατιστικές μέθοδοι για την ανάλυση ευαισθησίας διακρίνονται σε εκείνες που εφαρμόζονται σε ένα μοντέλο που δεν έχει προηγουμένως ρυθμιστεί (Fit-independent statistics) και σε εκείνες όπου εφαρμόζονται αφού το μοντέλο ρυθμιστεί (Fit-dependent statistics) και χρησιμοποιούν τις διαφορές υπολογισμένων με μετρημένων τιμών (residuals).

Οι μέθοδοι που μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα μη βαθμολογημένο μοντέλο (Fit-independent statistics) δεν χρησιμοποιούν τις διαφορές μετρημένων-υπολογισμένων τιμών (residuals), ώστε η ανάλυση να μπορεί να εφαρμοσθεί και στην περίπτωση όπου οι υπολογισμένες τιμές δεν προσεγγίζουν τις μετρημένες τιμές. Αντιπροσωπεύουν το είδος, την ώρα και την τοποθεσία της παρατήρησης αλλά όχι την παρατηρημένη τιμή. Στην παρούσα διπλωματική γίνεται αναφορά στις Fit-independent μεθόδους (Hill and Tiedeman, 2007) οι οποίες αναλύονται παρακάτω:

Η παράμετρος Dimensionless scaled sensitivity (DSS) υποδεικνύει τη σημασία μίας παρατήρησης στην εκτίμηση μίας παραμέτρου. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του DSS τόσο μεγαλύτερη είναι η σημασία της παρατήρησης. Υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$DSS_{ij} = \left(\partial y'_i / \partial b_j \right) \Big|_b b_j \omega_{ii}^{1/2} \quad i = 1, n \quad j = 1, p \quad 4.3$$

Όπου

i , ο δείκτης της παρατήρησης

y'_i , η προσομοιωμένη τιμή που αντιστοιχεί σε κάθε παρατήρηση

b_j , η τιμή της παραμέτρου j

ω_{ii} , η τιμή βάρους που αποδίδεται σε κάθε παρατήρηση i

n , ο αριθμός των παρατηρήσεων

p , ο αριθμός των παραμέτρων

Η παράμετρος Composite scaled sensitivity (CSS) υποδηλώνει τη σημασία των παρατηρήσεων ως σύνολο για την εκτίμηση μίας παραμέτρου. Αν η τιμή του CSS για μία παράμετρο j είναι περισσότερο από περίπου 2 τάξεις μεγέθους μικρότερη από την τιμή του μεγαλύτερου CSS, η παλινδρόμηση μπορεί να δυσκολεύει την εκτίμηση της παραμέτρου. Η παράμετρος CSS χρησιμοποιεί την παράμετρο DSS που αναφέρθηκε παραπάνω. Επειδή είναι αδιάστατο μέγεθος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συγκρίνει πληροφορίες που προέρχονται από διαφορετικούς τύπους παραμέτρων. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του μοντέλου θα είναι πιο ευαίσθητα σε παραμέτρους με μεγάλη τιμή CSS. Υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$CSS_j = \left[\sum_{i=1}^n (DSS_{i,j})^2 \Big|_b / n \right]^{1/2} \quad j = 1, p \quad 4.4$$

Όπου, ο όρος $DSS_{i,j}$ προκύπτει από την εξίσωση 4.3.

Ο συντελεστής συσχέτισης (parameter correlation coefficients, PCC) κυμαίνεται από -1.0 έως 1.0 και απόλυτες τιμές μεγαλύτερες από 0.95 μπορεί να υποδεικνύουν έναν πιθανό υψηλό βαθμό συσχέτισης. Εάν υπάρχει υπερβολική συσχέτιση μεταξύ των παραμέτρων, ο συντελεστής συσχέτισης θα είναι κοντά στο 1.0 ή -1.0. Ένας χαμηλός βαθμός συσχέτισης υποδηλώνει ότι η δράση μίας παραμέτρου είναι ανεξάρτητη από τη δράση μιας άλλης παραμέτρου σε σχέση με την τιμή του αποτελέσματος. Υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$PCC_{k,l} = cov(b_k, b_l) / [var(b_k)^{1/2} var(b_l)^{1/2}] \quad k = 1, p \quad l = 1, p \quad 4.5$$

Όπου,

$cov(b_k, b_l)$, η συνδιασπορά των μεταβλητών b_k, b_l

$var(b_k)$, η διασπορά της μεταβλητής b_k

$var(b_l)$, η διασπορά της μεταβλητής b_l

Η διακύμανση V του b ορίζεται από τον τύπο:

$$V_{(b)} = \sigma^2 (X^T \omega X)^{-1} \quad 4.6$$

Όπου,

σ^2 , η διασπορά (calculated error variance, CEV)

X , το μητρώο $n \times p$

ω , το μητρώο βάρους $n \times n$

Η παράμετρος leverage της παρατήρησης i ορίζεται ως εξής:

$$h_{ii} = x_i^T (X^T X)^{-1} x_i \quad i = 1, n \quad 4.7$$

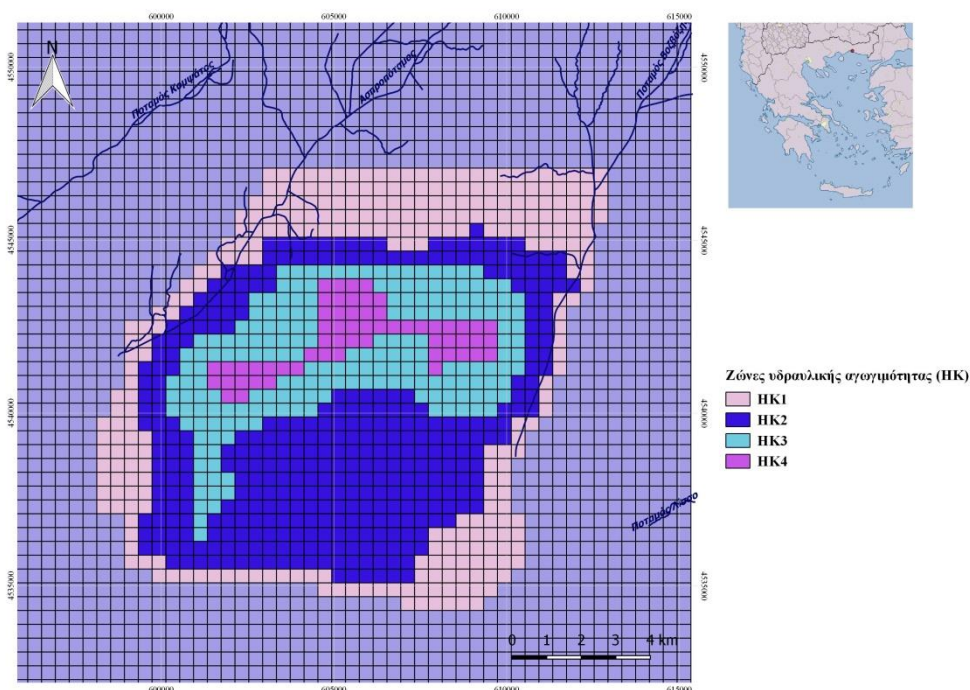
Οι τιμές του h_{ii} κυμαίνονται από 0.0 έως 1.0. Μεγαλύτερες τιμές προσδιορίζουν τις παρατηρήσεις που είναι περισσότερο σημαντικές για την εκτίμηση των τιμών των παραμέτρων.

4.3.12.3. Εφαρμογή κώδικα UCODE στην περιοχή μελέτης

Κατά την διαδικασία ανάλυσης ευαιθησίας εξετάζονται παράμετροι οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις βασικές διεργασίες που επηρεάζουν τη ρύθμιση του μοντέλου. Η επιλογή αυτών των παραμέτρων εξαρτάται από το είδος και τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του υδροφόρου στρώματος και από τις συνθήκες τροφοδοσίας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση οι παράμετροι που εξετάζονται είναι η υδραυλική αγωγιμότητα (HK) (η οποία διαιρέθηκε σε 4 ζώνες, Σχήμα 4.23), η ειδική χωρητικότητα (SS) και ο εμπλουτισμός από ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (RCH) (Πίνακας 4.5).

Πίνακας 4. 5. Αρχικές τιμές παραμέτρων για την ανάλυση ευαιθησίας

Παράμετρος	Αρχική τιμή	Παράμετρος	Αρχική τιμή
HK1 (m/day)	5	HK4 (m/day)	80
HK2 (m/day)	25	SS (m ⁻¹)	2.6*10 ⁻⁵
HK3 (m/day)	40	RCH (m/day)	0.0002



Σχήμα 4. 23. Ζώνες υδραυλικής αγωγιμότητας που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ανάλυση ευαισθησίας

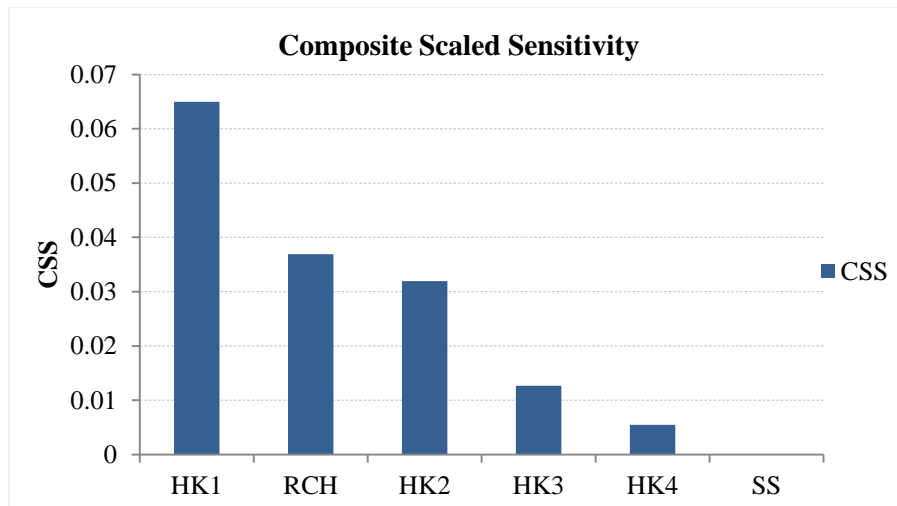
4.3.12.4. Αποτελέσματα Ανάλυσης Ευαισθησίας

4.3.12.4.1. Composite Scaled Sensitivity (CSS)

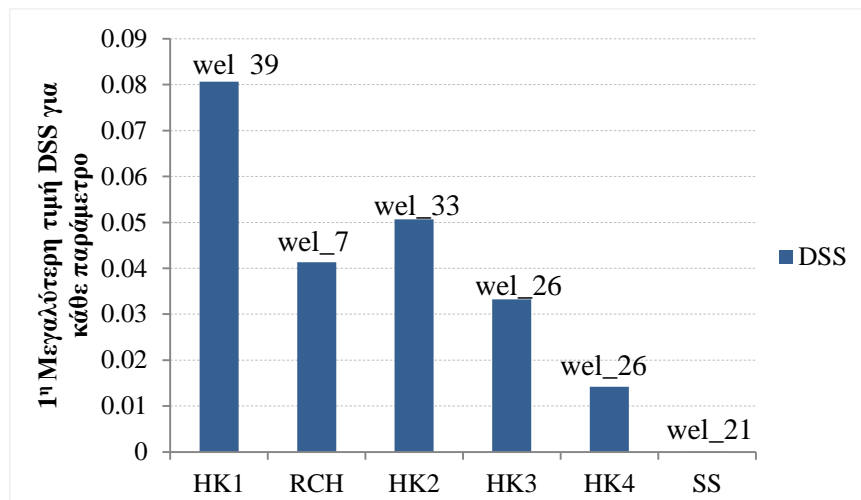
Η μέθοδος Composite scaled sensitivity (CSS) όπως αναφέρθηκε αναπαριστά την ευαισθησία μίας παραμέτρου ως προς το σύνολο των παρατηρήσεων και συνεπώς την επίδραση της παραμέτρου στη ρύθμιση του μοντέλου. Από τον Πίνακα 4.6 παρατηρείται ότι οι παράμετροι HK1, RCH και HK2 έχουν τη μεγαλύτερη τιμή CSS και επομένως είναι οι παράμετροι με τη μεγαλύτερη ευαισθησία. Επίσης, στον Πίνακα 4.6 δίπλα από κάθε παράμετρο παρουσιάζονται οι μεγαλύτερες τιμές της μεθόδου Dimensionless scaled sensitivity και η γεώτρηση παρατήρησης στην οποία αντιστοιχεί. Τα παραπάνω αποτελέσματα απεικονίζονται στα Σχήματα 4.24, 4.25 και 4.26 που ακολουθούν.

Πίνακας 4. 6. Αποτελέσματα Composite Scaled Sensitivity (CSS)

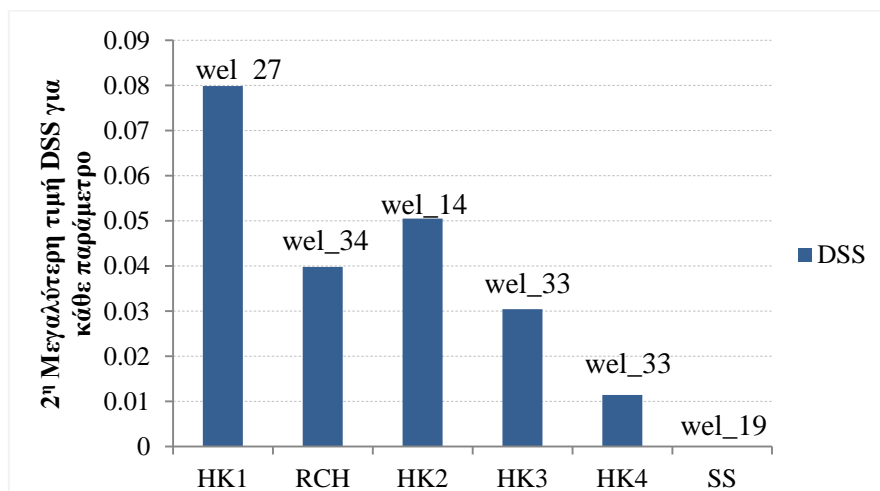
Παράμετρος	Composite scaled sensitivity (CSS)	1η μεγαλύτερη τιμή DSS	Γεώτρηση παρατήρησης	2η μεγαλύτερη τιμή DSS	Γεώτρηση παρατήρησης
HK1	0.064	0.080	wel_39	0.079	wel_27
RCH	0.036	0.041	wel_7	0.039	wel_34
HK2	0.031	0.051	wel_33	0.050	wel_14
HK3	0.012	0.033	wel_26	0.030	wel_33
HK4	0.005	0.014	wel_26	0.011	wel_33
SS	8.425E-07	3.814E-06	wel_21	1.907E-06	wel_19



Σχήμα 4. 24. Αποτελέσματα Composite Scaled Sensitivity για τις παραμέτρους του μοντέλου



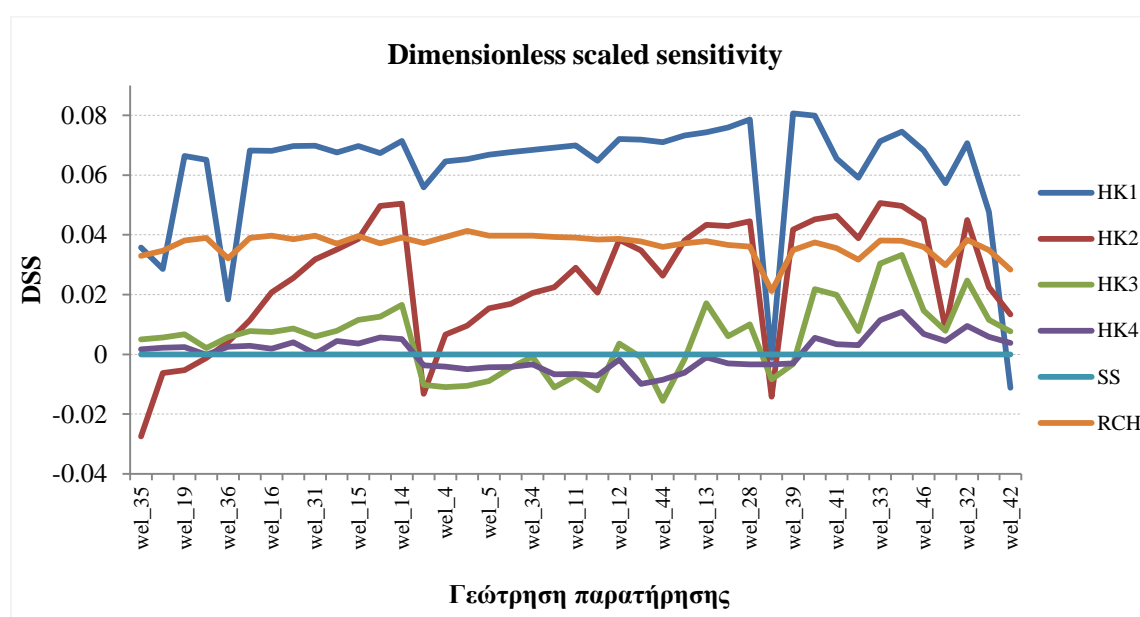
Σχήμα 4. 25. 1^η μεγαλύτερη τιμή Dimensionless Scaled Sensitivity για κάθε παράμετρο



Σχήμα 4. 26. 2^η μεγαλύτερη τιμή Dimensionless Scaled Sensitivity για κάθε παράμετρο

4.3.12.4.2. Dimensionless Scaled Sensitivity (DSS)

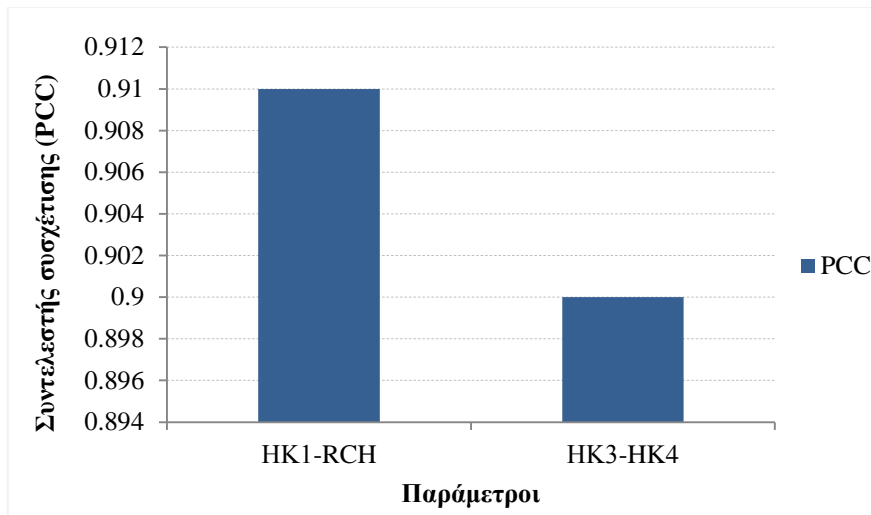
Η μέθοδος Dimensionless scaled sensitivity (DSS) υποδεικνύει το πόσο ευαίσθητη είναι μία παράμετρος σε κάθε παρατήρηση, δηλαδή ποιά παρατήρηση παρέχει τις περισσότερες πληροφορίες για κάθε παράμετρο. Στο Σχήμα 4.27 παρουσιάζονται οι τιμές DSS για όλες τις παραμέτρους για κάθε γεώτρηση παρακολούθησης. Για την παράμετρο HK1, που εμφανίζει την μεγαλύτερη ευαισθησία, παρατηρείται ότι οι γεωτρήσεις που έχουν τη μεγαλύτερη σημασία για την εκτίμηση της παραμέτρου είναι οι wel_14, wel_12, wel_6, wel_44, wel_37, wel_13, wel_29, wel_28, wel_39, wel_27, wel_33, wel_26 και wel_32.



Σχήμα 4. 27. Αποτελέσματα Dimensionless Scaled Sensitivity για τις παραμέτρους του μοντέλου

4.3.12.4.3. Συντελεστής Συσχέτισης (Parameter Correlation Coefficient, PCC)

Ο συντελεστής συσχέτισης καθορίζει κατά πόσο τα δεδομένα είναι κατάλληλα για να υπολογίσουν ανεξάρτητα τις παραμέτρους του μοντέλου. Εάν $|PCC| > \sim 0.95$ τότε η δράση μίας παραμέτρου εξαρτάται από την επίδραση μίας άλλης παραμέτρου για την τιμή του αποτελέσματος. Στο Σχήμα 4.28 που ακολουθεί παρατηρείται ότι οι παράμετροι HK1 και RCH έχουν συντελεστή $PCC=0.91$ και οι παράμετροι HK3 και HK4 έχουν συντελεστή $PCC=0.90$.



Σχήμα 4. 28. Σχέση συσχέτισης παραμέτρων HK1, RCH, HK3 και HK4

4.3.12.4.4. Leverage

Ο όρος leverage αναπαριστά την πιθανή επιρροή/επικράτηση μίας παρατήρησης στον υπολογισμό μίας παραμέτρου. Οι γεωτρήσεις παρακολούθησης με τη μεγαλύτερη τιμή leverage είναι οι wel_21 και wel_35 που αφορούν την παράμετρο HK1 και η wel_42 που αφορά την παράμετρο RCH όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.29.



Σχήμα 4. 29. Γεωτρήσεις παρακολούθησης που επικρατούν στον υπολογισμό μίας παραμέτρου

4.3.12.5. Παραμετροποίηση (Parameter Estimation)

Η παραμετροποίηση αποτελεί τη διαδικασία βελτιστοποίησης ενός επιλεγμένου συνόλου παραμέτρων. Η αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται ως το άθροισμα των τετραγώνων των σταθμισμένων διαφορών παρατηρημένων και προσομοιωμένων τιμών (residuals) και υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση (4.8) (Hill and Tiedeman, 2007):

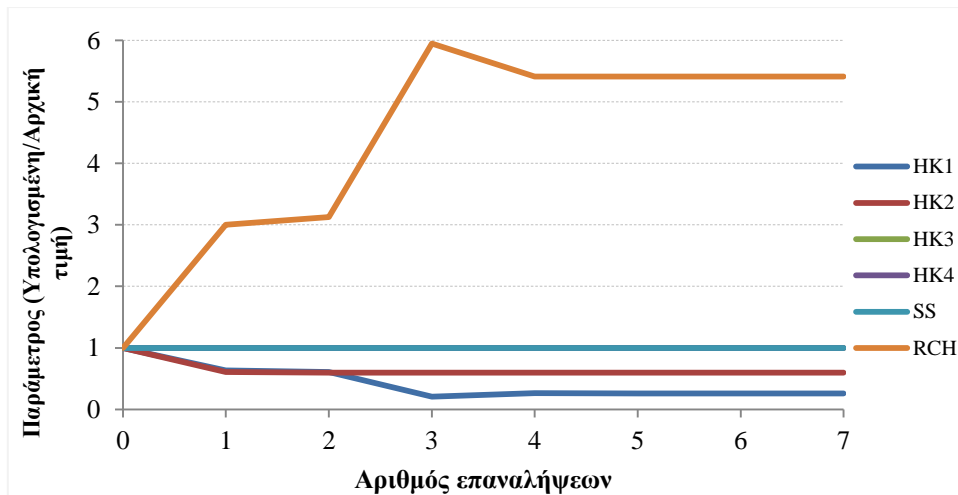
$$S(b) = \sum_{i=1}^{nh} \omega_i (h_i - h'_i(b))^2 + \sum_{i=1}^{nq} \omega_i (q_i - q'_i(b))^2 + \sum_{i=1}^{npr} \omega_i (P_i - P'_i(b))^2$$

Όπου $S(b)$ η αντικειμενική συνάρτηση, b η επιλεγμένη παράμετρος, ω_i το βάρος της παρατήρησης, h_i η παρατηρημένη τιμή φορτίου, h'_i η προσομοιωμένη τιμή φορτίου, q_i η παρατηρημένη τιμή παροχής, q'_i η προσομοιωμένη τιμή παροχής, P_i η παρατηρημένη τιμή πρωταρχικής πληροφορίας και P'_i η προσομοιωμένη τιμή πρωταρχικής πληροφορίας.

Η διαδικασία της παραμετροποίησης έχει ως στόχο την επιλογή παραμέτρων που βελτιώνουν τη σχέση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών και ελαχιστοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση λήφθηκαν υπόψη οι πιο ευαίσθητες παράμετροι HK1, HK2 και RCH. Για την αντιμετώπιση προβλημάτων συσχέτισης μεταξύ των παραμέτρων τοποθετήθηκαν περιορισμοί (αποδεκτά άνω και κάτω όρια) για κάθε παράμετρο. Οι αρχικές και τελικές τιμές των παραμέτρων καθώς και η μεταξύ τους σχέση παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.7 και στο Σχήμα 4.30. Στον Πίνακα 4.8 παρουσιάζονται τα αθροίσματα των τετραγώνων των σταθμισμένων διαφορών για κάθε επανάληψη (αντικειμενική συνάρτηση) τα οποία στη συνέχεια απεικονίζονται στο Σχήμα 4.31.

Πίνακας 4. 7. Αρχικές και τελικές τιμές παραμέτρων μετά την παραμετροποίηση

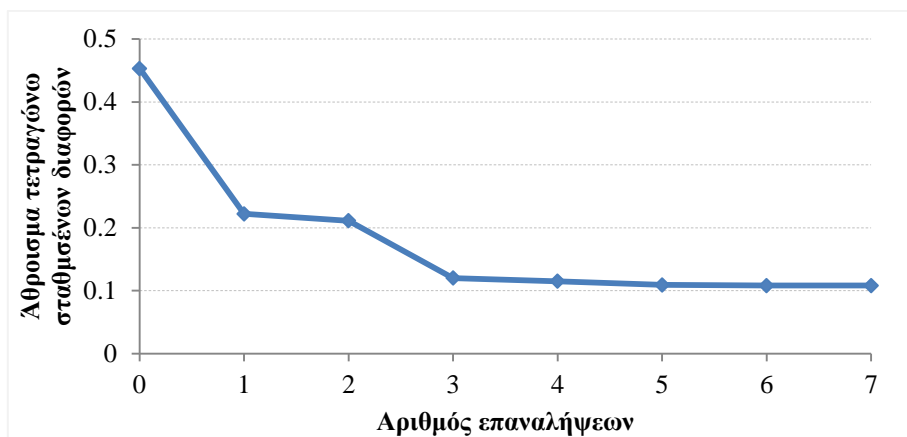
Επανάληψη	HK1	HK2	HK3	HK4	SS	RCH
0	5	25	40	80	0.000026	0.0002
1	3.167	15.24	40	80	0.000026	0.0006
2	3.045	15	40	80	0.000026	0.000625
3	1.028	15	40	80	0.000026	0.001189
4	1.327	15	40	80	0.000026	0.001082
5	1.305	15	40	80	0.000026	0.001082
6	1.307	15	40	80	0.000026	0.001082
7	1.3	15	40	80	0.000026	0.001082



Σχήμα 4. 30. Διάγραμμα συσχέτισης αρχικής τιμής παραμέτρου και υπολογισμένης τιμής

Πίνακας 4. 8. Αθροίσματα τετραγώνων σταθμισμένων διαφορών (residuals) μετρημένων και υπολογισμένων τιμών στάθμης για κάθε επανάληψη

Επανάληψη	Άθροισμα τετραγώνων σταθμισμένων διαφορών
0	0.453
1	0.222
2	0.211
3	0.12
4	0.115
5	0.109
6	0.108
7	0.108



Σχήμα 4. 31. Αθροίσματα τετραγώνων σταθμισμένων διαφορών (residuals) μετρημένων και υπολογισμένων τιμών στάθμης για κάθε επανάληψη

Στον Πίνακα 4.9 παρουσιάζονται οι μετρημένες και οι υπολογισμένες τιμές στάθμης για τη μέτρηση στις 13/10/2003 όπως προέκυψαν μετά την παραμετροποίηση και τη βελτίωση των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 4. 9. Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές στάθμης των γεωτρήσεων της ρύθμισης του μοντέλου για τις 13/10/2003

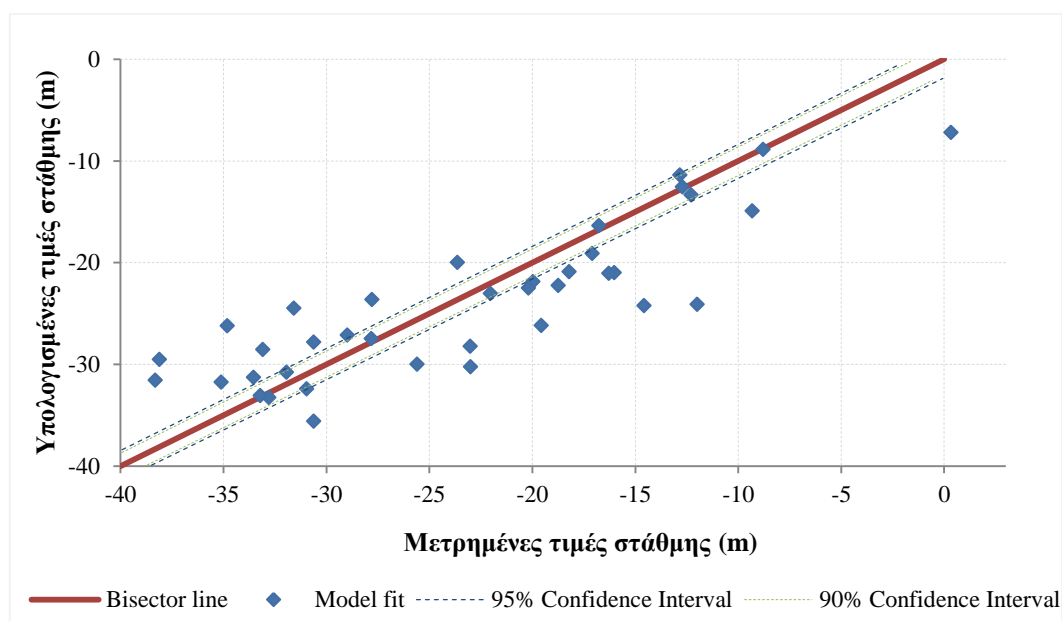
Γεώτρηση παρατήρησης	Υπολογισμένες τιμές (m)	Μετρημένες τιμές (m)	Διαφορά (m)
wel_35	-12.53525	-12.71	0.17475
wel_20	-11.37547	-12.84	1.46453
wel_19	-20.87292	-18.22	-2.65292
wel_17	-19.97091	-23.65	3.67909
wel_36	-13.34082	-12.3	-1.04082
wel_18	-23.63106	-27.8	4.16894
wel_16	-24.45944	-31.59	7.13056
wel_21	-27.10386	-28.99	1.88614
wel_31	-26.20252	-34.82	8.61748
wel_22	-29.49363	-38.12	8.62637
wel_15	-28.52485	-33.1	4.57515
wel_23	-32.498	-41.1	8.602
wel_14	-31.75406	-35.12	3.36594
wel_3	-14.89692	-9.32	-5.57692
wel_4	-19.08215	-17.1	-1.98215
wel_7	-16.36698	-16.78	0.41302
wel_5	-20.99338	-16.02	-4.97338
wel_8	-21.86946	-19.98	-1.88946
wel_34	-23.02445	-22.05	-0.97445
wel_10	-22.2378	-18.75	-3.4878
wel_11	-24.09944	-12	-12.09944
wel_2	-21.03124	-16.29	-4.74124
wel_12	-27.82105	-30.63	2.80895
wel_6	-26.17017	-19.57	-6.60017
wel_44	-24.2248	-14.58	-9.6448
wel_37	-27.45363	-27.82	0.36637
wel_13	-30.7753	-31.94	1.1647
wel_29	-29.99291	-25.6	-4.39291
wel_28	-31.26118	-33.55	2.28882
wel_43	-7.188486	0.32	-7.508486
wel_39	-30.23002	-23.01	-7.22002
wel_27	-33.42041	-40.78	7.35959
wel_41	-33.25393	-32.8	-0.45393
wel_47	-32.40004	-30.97	-1.43004
wel_33	-34.67377	-42.12	7.44623
wel_26	-35.57222	-30.63	-4.94222
wel_46	-33.06802	-33.22	0.15198
wel_24	-28.21743	-23.02	-5.19743
wel_32	-31.55597	-38.32	6.76403
wel_25	-22.50314	-20.2	-2.30314
wel_42	-8.855541	-8.8	-0.055541

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν οι δείκτες Nash-Sutcliffe (NS) και mass balance error οι τύποι των οποίων αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο. Για τις τιμές στάθμης του Πίνακα 4.9 προέκυψε τιμή NS=0.74 και $m=0.8$ το οποίο υποδηλώνει ότι οι προσομοιωμένες τιμές στάθμης είναι ελάχιστα μεγαλύτερες από τις παρατηρημένες τιμές. Στον Πίνακα 4.10 απεικονίζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των διαφορών προσομοιωμένων-παρατηρημένων τιμών στάθμης.

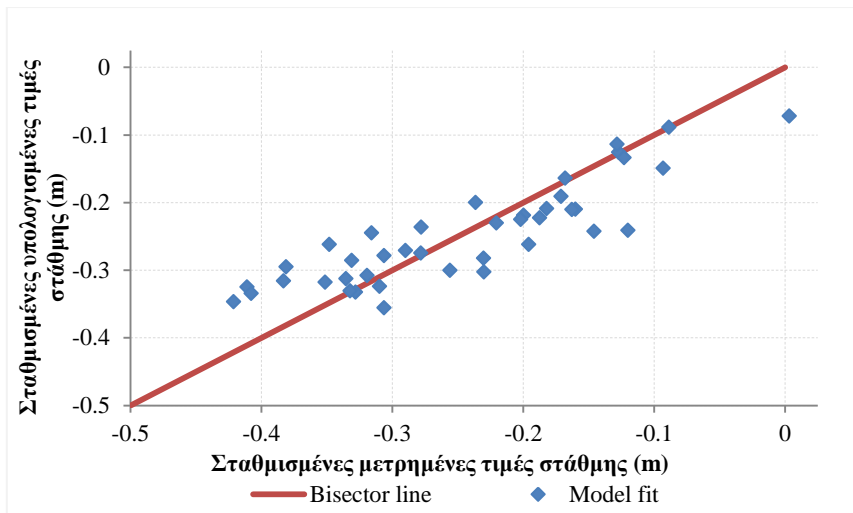
Πίνακας 4. 10. Στατιστικά χαρακτηριστικά των διαφορών παρατηρημένων και προσομοιωμένων τιμών στάθμης (residuals)

Absolute Residual Mean	4.188
Standard error of the estimate	0.811
Residual RMS	0.421
Normalized RMS	0.009
Pearson Correlation Coefficient	0.874

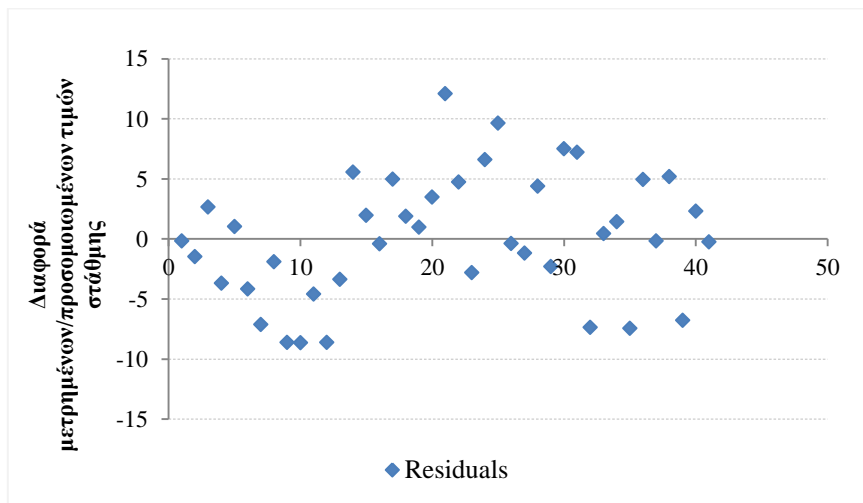
Στη συνέχεια ακολουθούν τα Διαγράμματα συσχέτισης των προσομοιωμένων και των παρατηρημένων τιμών στάθμης (Σχήματα 4.32, 4.33) καθώς και τα Διαγράμματα των διαφορών υπολογισμένων-μετρημένων τιμών στάθμης (Σχήματα 4.34, 4.35) μετά την παραμετροποίηση. Από τα ακόλουθα Σχήματα παρατηρείται η βελτιωμένη συσχέτιση των μετρημένων-υπολογισμένων τιμών.



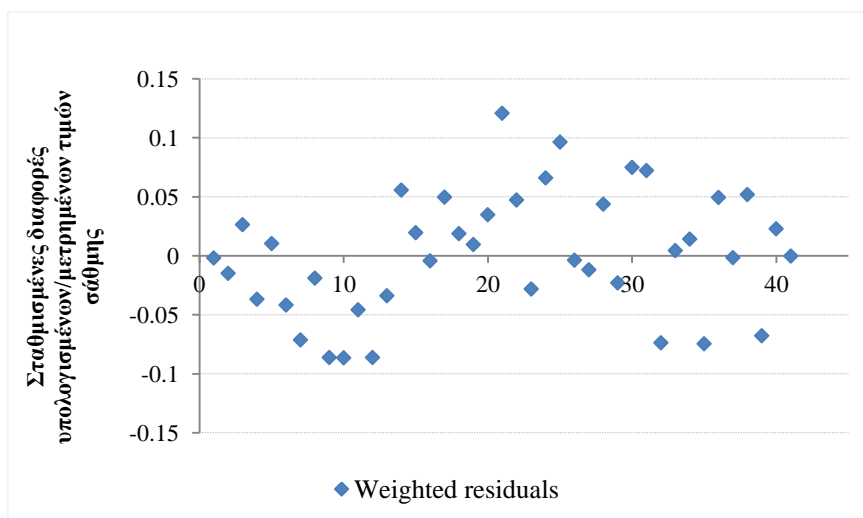
Σχήμα 4. 32 Διάγραμμα συσχέτισης υπολογισμένων και μετρημένων τιμών στάθμης



Σχήμα 4. 33 Διάγραμμα συσχέτισης υπολογισμένων και μετρημένων τιμών στάθμης



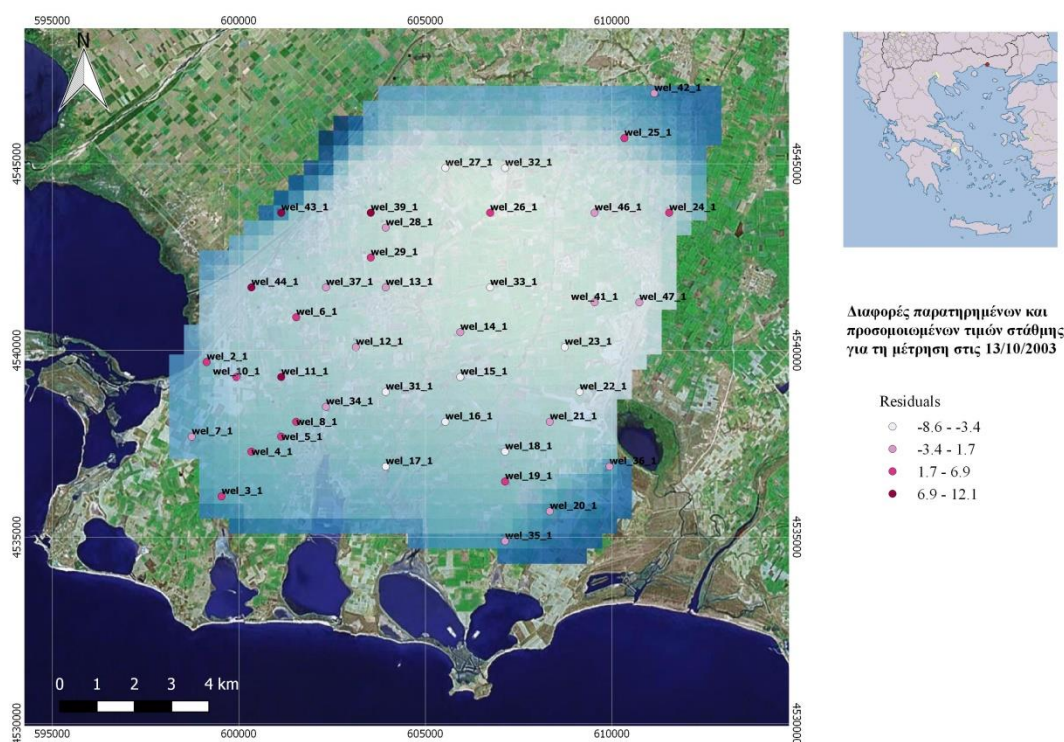
Σχήμα 4. 34 Διαφορές υπολογισμένων-μετρημένων τιμών στάθμης (residuals)



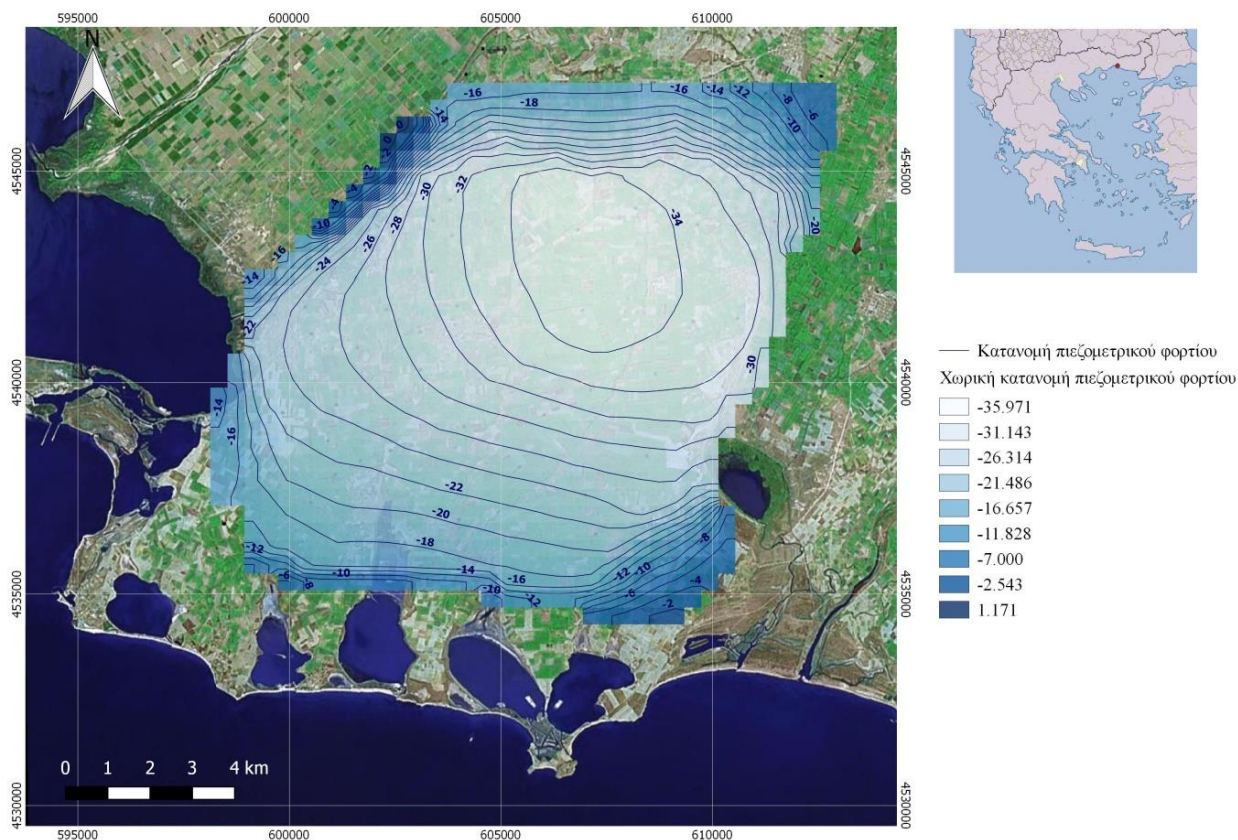
Σχήμα 4. 35 Διαφορές υπολογισμένων-μετρημένων τιμών στάθμης (residuals)

Στο Σχήμα 4.36 απεικονίζονται οι διαφορές μετρημένων και υπολογισμένων τιμών στάθμης για κάθε γεώτρηση παρατήρησης. Παρατηρείται ότι οι μεγαλύτερες τιμές διαφορών εμφανίζονται στο κεντρικό τμήμα (wel_33_1), στο νοτιοδυτικό όριο κατά μήκος της λίμνης Βιστωνίδας (wel_44_1, wel_11_1) και στο νότιο τμήμα του ποταμού Ασπροπόταμου (wel_43_10).

Στο Σχήμα 4.37 παρουσιάζεται ο πιεζομετρικός χάρτης για τις υπολογισμένες τιμές στάθμης της μέτρησης 13/10/2003 όπως έχουν προκύψει μετά την παραμετροποίηση. Σε σύγκριση με τις μετρημένες τιμές στάθμης του Σχήματος 4.21 και τις υπολογισμένες τιμές του Σχήματος 4.22 που προέκυψαν από την αρχική ρύθμιση του μοντέλου, παρατηρείται ταύτιση των μετρημένων και των υπολογισμένων τιμών στάθμης στο ανατολικό, βορειοανατολικό, δυτικό, βορειοδυτικό και νότιο όριο της περιοχής. Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των παραπάνω τιμών παρατηρούνται στο νοτιοδυτικό περιθώριο και στο κεντρικό τμήμα της περιοχής, όπου εντοπίζεται ο κώνος κατάπτωσης του υδροφόρου συστήματος.

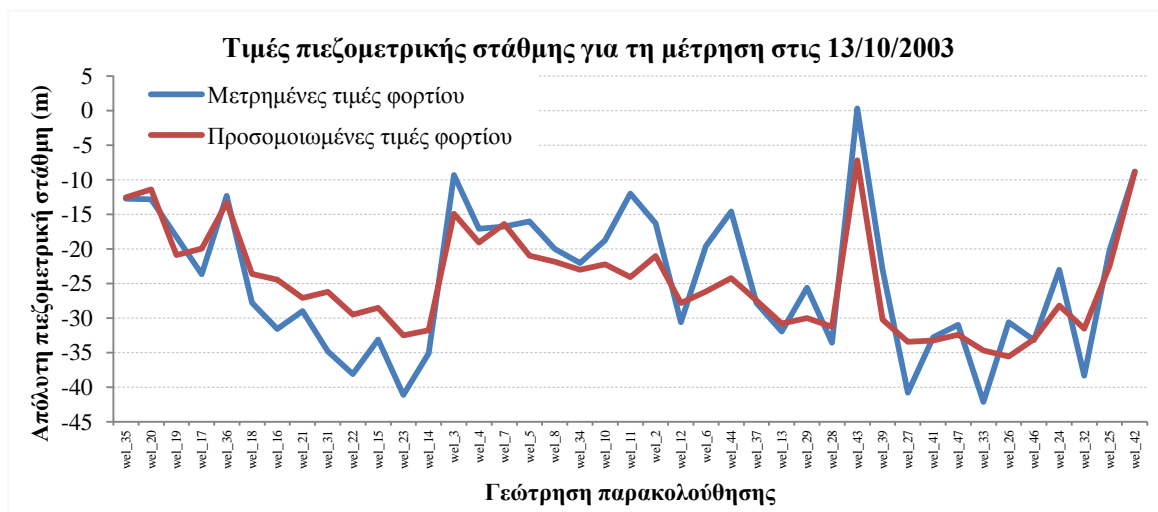


Σχήμα 4. 36. Διαφορές μετρημένων και υπολογισμένων τιμών στάθμης για τη μέτρηση στις 13/10/2003



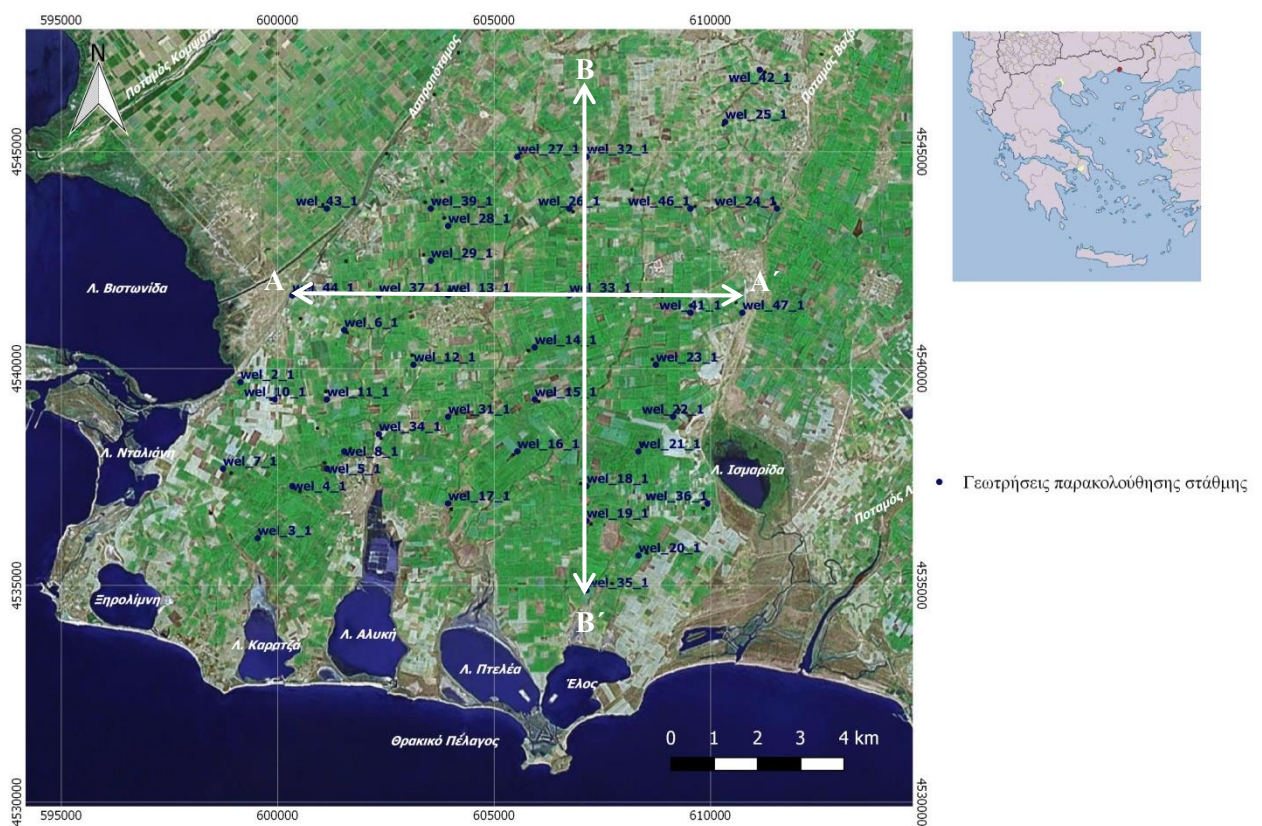
Σχήμα 4. 37. Υπολογισμένες τιμές πιεζομετρικού φορτίου για τη μέτρηση στις 13/10/2003

Στο Σχήμα 4.38 απεικονίζεται η διακύμανση της στάθμης για τις μετρημένες τιμές και για τις υπολογισμένες τιμές στις 13/10/2003. Παρατηρείται επίσης ότι οι μεγαλύτερες τιμές διαφορών αντιστοιχούν στις γεωτρήσεις που εμφανίζονται στο νοτιοδυτικό όριο της περιοχής κατά μήκος της λίμνης Βιστωνίδα και στο νότιο τμήμα του ποταμού Ασπροπόταμου.

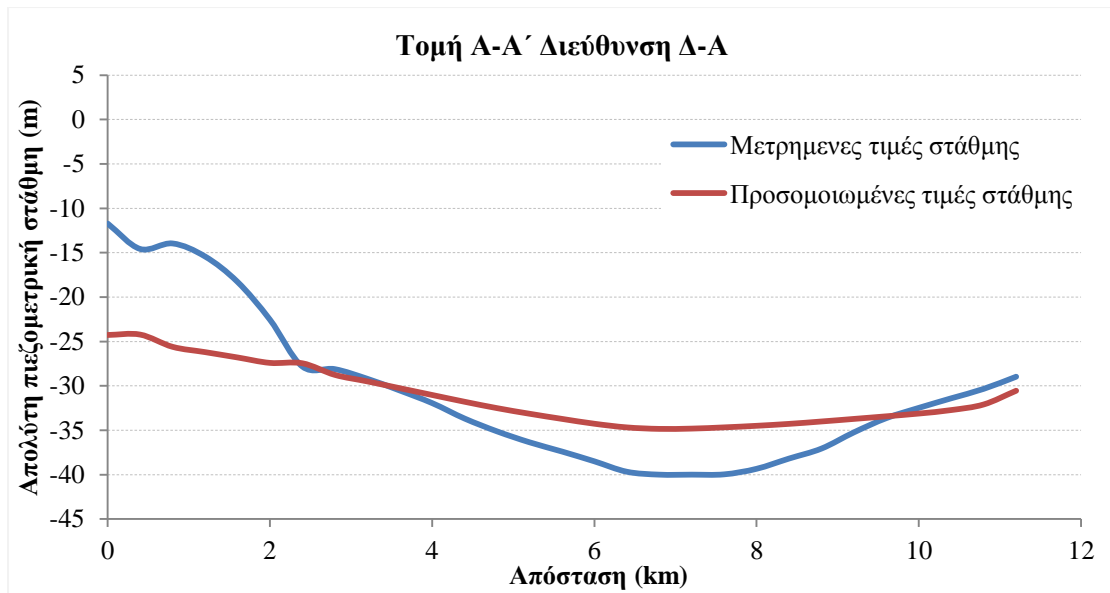


Σχήμα 4. 38. Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές στάθμης για τη μέτρηση στις 13/10/2003

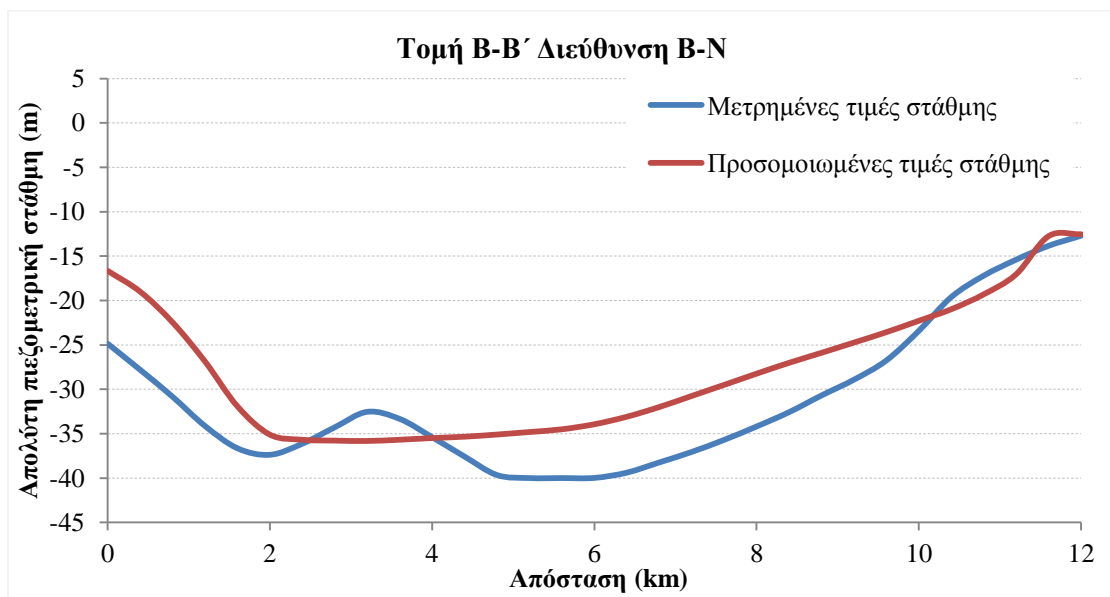
Το Σχήμα 4.39 απεικονίζει τους άξονες A-A' και B-B' κατά τις διευθύνσεις A-Δ και B-N οι τομές των οποίων παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.40 και 4.41. Οι τομές που ακολουθούν αφορούν τις μετρημένες τιμές στάθμης και τις υπολογισμένες τιμές στάθμης του υδροφόρου μετά το τέλος της προσομοίωσης στις 13/10/2003 και αποσκοπούν στην εκτίμηση του βάθους του κώνου κατάπτωσης της περιοχής μελέτης. Σύμφωνα με τις τομές ο κώνος κατάπτωσης του υδροφόρου εμφανίζεται σε βάθος στάθμης -36 m. Κατά μήκος του κεντρικού τμήματος του άξονα παρατηρείται ταύτιση των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών στάθμης του μοντέλου ενώ αποκλίσεις παρατηρούνται στα δυτικά της περιοχής.



Σχήμα 4. 39. Τομές σύμφωνα με τη μέτρηση της 13/10/2003



Σχήμα 4. 40. Προφίλ πιεζομετρικής επιφάνειας κατά μήκος του άξονα Α-Α'



Σχήμα 4. 41. Προφίλ πιεζομετρικής επιφάνειας κατά μήκος του άξονα Β-Β'

5. Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας επιχειρήθηκε αρχικά μια ολοκληρωμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση της γενικής περιγραφής της περιοχής από την οποία προέκυψαν οι παρακάτω παρατηρήσεις:

- Η περιοχή έρευνας ανήκει στο νότιο-δυτικό παράκτιο τμήμα του Νομού Ροδόπης. Η έκταση της ανέρχεται στα 165.1 km², συμπεριλαμβάνοντας και τις δομημένες εκτάσεις οι οποίες έχουν έκταση 2.7 km² και καταλαμβάνουν ένα μικρό τμήμα. Στο μεγαλύτερο σύνολο της χρησιμοποιείται εντατικά για γεωργικές δραστηριότητες.
- Από γεωμορφολογικής πλευράς, χαρακτηρίζεται από λοφώδες έως ημιλοφώδες ανάγλυφο με πολύ μικρές κλίσεις το οποίο διακόπτεται από ορισμένες πεδινές εκτάσεις και από μικρές παράκτιες λιμνοθάλασσες. Η αποστράγγιση πραγματοποιείται κυρίως προς τα νότια της περιοχής.
- Εντάσσεται στο γεωλογικό περιβάλλον της μάζας της Ροδόπης και περιλαμβάνει Τεταρτογενείς αποθέσεις, Νεογενή ιζήματα (Πλειοκαινικές – Άνω Μειοκαινικές αποθέσεις) και Παλαιογενείς σχηματισμούς. Τα σημαντικότερα ρήγματα αναπτύσσονται κατά μήκος των ορίων της περιοχής έρευνας και συμβάλλουν στη δημιουργία οριακών συνθηκών.
- Στο κέντρο της περιοχής υπάρχει βροχομετρικός σταθμός ο οποίος υπάγεται στο Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. και παρέχει στοιχεία σχετικά με τα βροχομετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής για την περίοδο 1954-2005. Για την περίοδο 1954-2005, η μέση ετήσια βροχόπτωση ανέρχεται στα 555.3 mm. Η περιοχή έρευνας χαρακτηρίζεται ως τυπική πεδινή μεσογειακή περιοχή, με σχετικά ξηρά και υγρά καλοκαίρια και υγρούς και ψυχρούς χειμώνες.
- Αποτελείται από ένα πυκνό δίκτυο γεωτρήσεων από τις οποίες λειτουργούν μόνο οι αρδευτικού σκοπού. Από υδρογεωλογικής άποψης, το ανώτερο γεωλογικό στρώμα περιλαμβάνει υλικά όπως ιλύλιθους, ψαμμίτες και μικροκροκαλοπαγή τα οποία διαμορφώνουν τις υπό πίεση συνθήκες του υδροφόρου. Το ενδιάμεσο στρώμα, αποτελεί το κύριο υδροφόρο στρώμα της περιοχής και αποτελείται από αλλουβιακές αποθέσεις, χονδρόκοκκα υλικά, άμμους, χαλίκια και κροκάλες. Ο πυθμένας του συστήματος ορίζεται από τη αδιαπέρατη γκριζοπράσινη άργιλο. Η έντονη γεωλογική και υδρογεωλογική

ετερογένεια των σχηματισμών έχει ως αποτέλεσμα το μεγάλο εύρος τιμών των υδραυλικών παραμέτρων των υδροφόρων.

- Σχετικά με τις τιμές του υδραυλικού φορτίου, παρατηρείται ότι στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής έρευνας εμφανίζονται αποκλειστικά αρνητικές τιμές απόλυτης στάθμης ενώ εμφανής είναι η παρουσία κώνου κατάπτωσης στο κέντρο της περιοχής εξαιτίας συνθηκών εντατικής υπεράντλησης.
- Ο εμπλουτισμός του υδροφόρου επιτυγχάνεται από την κατείσδυση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, από διηθήσεις του ποταμού Βοζβόζη, από τον αλλουβιακό κώνο του ποταμού Κομπάτου, από το ανατολικό τεταρτογενές υδροφόρο σύστημα και από επιστροφές άρδευσης.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα κύρια συμπεράσματα από την εφαρμογή του λογισμικού FREEWAT και του κώδικα MODFLOW-2005 (Harbaugh, 2005) για την προσομοίωση της υπόγειας ροής της περιοχής μελέτης:

- Η πλατφόρμα FREEWAT είναι ένα λογισμικό ελεύθερου κώδικα το οποίο χρησιμοποιεί τον κώδικα MODFLOW-2005 και εφαρμόζεται στο περιβάλλον του QGIS. Συνδιάζει τις δυνατότητες χωρικής ανάλυσης δεδομένων με τις δυνατότητες των μοντέλων προσομοίωσης.
- Το εννοιολογικό μοντέλο της περιοχής περιλαμβάνει δύο γεωλογικά στρώματα. Το ανώτερο γεωλογικό στρώμα, που υπέρκειται του κυρίως υδροφόρου στρώματος, χαρακτηρίζεται από μικρό πάχος (<10m) και περιλαμβάνει στεγανά υλικά τα οποία δημιουργούν τις υπό πίεση συνθήκες. Το άμεσα υποκείμενο στρώμα αποτελείται από υλικά μεγάλης περατότητας τα οποία αποτελούν το κυρίως υδροφόρο στρώμα της περιοχής και το οποίο εμφανίζει μέσο πάχος της τάξης των 50m περίπου. Ο πυθμένας του συστήματος οριοθετείται από την γκριζοπράσινη άργιλο. Για την επίτευξη της προσομοίωσης, καθοριστικά δεδομένα λήφθηκαν από τη διδακτορική διατριβή του Καλλιώρα (2008) για το παράκτιο τμήμα του Νομού Ροδόπης.
- Η τροφοδοσία του υδροφόρου επιτυγχάνεται από υπόγειες πλευρικές εισροές, διηθήσεις, επιστροφές άρδευσης και κατείσδυση από βροχοπτώσεις.
- Οι τύποι των οριακών συνθηκών που χρησιμοποιήθηκαν για την επίτευξη της προσομοίωσης της συγκεκριμένης περιοχής είναι οι εξής:

- Οριακές συνθήκες σταθερής εισροής (General Head Boundary Package, GHB)
 - Οριακές συνθήκες ποταμού (River Package, RIV)
 - Οριακές συνθήκες πηγαδιών (Well Package, WELL)
 - Οριακές συνθήκες εμπλουτισμού από ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (Recharge Package, RCH)
 - Οριακές συνθήκες εξατμισοδιαπνοής (Evapotranspiration Package, EVT)
 - Οριακές συνθήκες μηδενικής ροής
- Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για μία χρονική περίοδο διάρκειας έξι μηνών για την οποία ήταν γνωστές οι αρχικές και οι τελικές συνθήκες. Η περίοδος ξεκινάει τον Απρίλιο του 2003 και τελειώνει τον Οκτώβριο του ίδιου έτους. Η προσομοίωση αφορά τη ξηρή περίοδο στην οποία οι αντλήσεις νερού από τον υδροφορέα για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών είναι ιδιαίτερα αυξημένες. Η συνολική διάρκεια είναι 181 ημέρες και τα χρονικά βήματα (time steps) για την περίοδο είναι έξι (ανά μήνα). Στο συγκεκριμένο μοντέλο επιλέχθηκε η επίλυση σε συνθήκες μη μόνιμης ροής.
- Η ρύθμιση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με δεδομένα υπαίθρου του 2003. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και τη σύγκριση των προσομοιωμένων τιμών φορτίου με τις εκτιμημένες τιμές φορτίου χρησιμοποιήθηκε το Head Observation Package (HOB) το οποίο δημιουργήθηκε με τη βοήθεια του Observation Analysis Tool (OAT) κατά το οποίο 41 πηγάδια χρησιμοποιήθηκαν ως πηγάδια παρακολούθησης.
- Από τη σύγκριση των μετρημένων τιμών στάθμης και των υπολογισμένων τιμών από την πρώτη ρύθμιση του μοντέλου, παρατηρήθηκε ταύτιση του πιεζομετρικού φορτίου στο βορειοανατολικό όριο του μοντέλου και στο κεντρικό τμήμα της περιοχής, όπου εντοπίζεται ο κώνος κατάπτωσης του υδροφόρου συστήματος. Αποκλίσεις μεταξύ των παραπάνω τιμών παρατηρήθηκαν στο δυτικό και βορειοδυτικό όριο της περιοχής και κατά μέσο όρο οι τιμές των διαφορών στάθμης κυμάνθηκαν στα 7.88 m.

Έπειτα, αναφέρονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του κώδικα UCODE_2014 (Poeter et al., 2014) μέσω της πλατφόρμας του FREEWAT για τη διαδικασία της ανάλυσης ευαισθησίας και της παραμετροποίησης:

- Οι παράμετροι που εξετάστηκαν είναι η υδραυλική αγωγιμότητα (HK) η οποία διαιρέθηκε σε 4 ζώνες, η ειδική χωρητικότητα (SS) και ο εμπλουτισμός από ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (RCH) και αντιπροσωπεύουν τις βασικές διεργασίες που επηρεάζουν τη ρύθμιση του μοντέλου.
- Για την εκτίμηση της ευαισθησίας των παραμέτρων χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι Fit independent statistics. Οι παράμετροι με τη μεγαλύτερη ευαισθησία στη ρύθμιση του μοντέλου (μεγαλύτερη τιμή Composite scaled sensitivity) είναι η υδραυλική αγωγιμότητα (ζώνες HK1, HK2) και η άμεση κατείσδυση από βροχοπτώσεις (RCH).
- Για τη βελτίωση της σχέσης των μετρημένων/υπολογισμένων τιμών στάθμης που προέκυψαν από την πρώτη ρύθμιση του μοντέλου, εφαρμόστηκε η διαδικασία της παραμετροποίησης (Parameter estimation). Στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης ήταν η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των σταθμισμένων διαφορών (residuals) μετρημένων και υπολογισμένων τιμών.
- Κατά τη διαδικασία της παραμετροποίησης, εκτιμήθηκαν οι παράμετροι HK1, HK2 και RCH που εμφάνισαν τη μεγαλύτερη τιμή Composite scaled sensitivity. Οι υπόλοιπες παράμετροι (HK3, HK4 και SS) χαρακτηρίζονται από μικρή ευαισθησία και δεν συμπεριλήφθηκαν. Για την αντιμετώπιση προβλημάτων συσχέτισης μεταξύ των παραμέτρων τοποθετήθηκαν περιορισμοί (αποδεκτά άνω και κάτω όρια).
- Οι νέες υπολογισμένες τιμές στάθμης που προέκυψαν μετά την παραμετροποίηση, συγκρίθηκαν με τις μετρημένες τιμές. Παρατηρήθηκε ταύτιση των μετρημένων και των υπολογισμένων τιμών στάθμης στο ανατολικό, βορειοανατολικό, δυτικό, βορειοδυτικό και νότιο όριο της περιοχής. Η τιμή του δείκτη Nash-Sutcliffe έλαβε την τιμή NS=0.74 κρίνοντας την προσομοίωση ως ικανοποιητική και κατά μέσο όρο οι τιμές των διαφορών στάθμης κυμάνθηκαν στα 4.15 m. Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των παραπάνω τιμών παρατηρήθηκαν στο κεντρικό τμήμα (wel_33_1), στο νοτιοδυτικό όριο κατά μήκος της λίμνης Βιστωνίδας (wel_44_1, wel_11_1) και στο νότιο τμήμα του ποταμού Ασπροπόταμου (wel_43_1).

Συνοψίζοντας, επισημαίνεται ότι τα μοντέλα υπόγειων νερών πρέπει να αξιολογούνται για να διασφαλίζεται ότι το εννοιολογικό μοντέλο αντιπροσωπεύει με ακρίβεια το πραγματικό σύστημα υπόγειων υδάτων ώστε να ανταποκρίνεται στους στόχους της μελέτης (Reilly and Harbaugh, 2004). Από την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, προκύπτουν ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα:

- Είναι αναγκαίο να γίνουν νέες μετρήσεις υπαίθρου και δοκιμαστικές αντλήσεις για την αναθεώρηση της δομής, των υδραυλικών χαρακτηριστικών και των υδρογεωλογικών συνθηκών της περιοχής. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης εξαρτάται από την ποιότητα και τη χωρική κατανομή των δεδομένων εισόδου και των μετρήσεων υπαίθρου που χρησιμοποιούνται κατά τη διαδικασία της ρύθμισης του μοντέλου.
- Προτείνεται η αναθεώρηση του εννοιολογικού μοντέλου της περιοχής, η διερεύνηση της υδραυλικής επικοινωνίας με την ακτή και ο υπολογισμός των υπόγειων πλευρικών εισροών από τις λίμνες Βιστωνίδα και Ισμαρίδα. Επίσης, να γίνει νέα καταγραφή των γεωτρήσεων της περιοχής καθώς και των ειδών καλλιέργειας και των αναγκαίων τους ποσοτήτων νερού άρδευσης για την εκτίμηση του νερού που αντλείται στην περιοχή. Οι περιορισμοί του λογισμικού προσομοίωσης, οι παραδοχές/απλουστεύσεις κατά την ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου, τα αποτελέσματα της ρύθμισης και της ανάλυσης ευαισθησίας είναι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την αξιοπιστία του μοντέλου σε μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες. Ο σωστός σχεδιασμός του μοντέλου και οι καλύτερες εκτιμήσεις εισροών, εκροών και μεταβαλλόμενων χωρικών δεδομένων (χρήσεις γης) μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τους παραπάνω περιορισμούς.
- Σημαντική είναι η αναδιατύπωση της χωρικής διακριτοποίησης (μέγεθος grid) του μοντέλου για να αντιπροσωπεύονται με μεγαλύτερη ακρίβεια τα υδραυλικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Η χωρική και η χρονική διακριτοποίηση του μοντέλου μπορούν να αποτελέσουν άλλη μία πηγή σφάλματος. Η χρήση ενός διακριτοποιημένου μοντέλου εισάγει περιορισμούς για τα χαρακτηριστικά που εμφανίζονται σε κλίμακες μικρότερες από τη διακριτοποίηση. Οι αλλαγές σε μικρότερες χρονικές κλίμακες δεν προσομοιώνονται και επομένως δεν διακρίνονται στα αποτελέσματα του μοντέλου.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

Ελληνικές αναφορές

- Διαμαντής, Ι. και Πεταλάς, Χ. (1994). Υδρογεωλογική ταξινόμηση και προσαρμογή κατάλληλου μαθηματικού ομοιώματος για τη διαχείριση των υπόγειων νερών σε ένα ευρύ ετερογενές και γειτονικό με τη θάλασσα πεδίο, Έρευνα που εκπονήθηκε για το Υπουργείο Β.Ε.Τ. στα πλαίσια του ΠΕΝΕΔ 1989, Ξάνθη, σελ.133.
- Ζαγκλιαβού, Σ. (2005). Μετρήσεις παροχών και φυσικοχημικών παραμέτρων στο υδατικό σύστημα Βοζβόζη - Ισμαρίδας. Προπτυχιακή διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, σελ.138.
- Καλλέργης, Γ. (2000). Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία. Αθήνα, Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, Δεύτερη Έκδοση, Τόμος Β, σελ. 345.
- Καλλέργης Γ. (2001). Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία. Αθήνα, Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, Δεύτερη Έκδοση, Τόμος Γ, σελ. 432..
- Καλλιώρας, Α. (2008). Διαχείριση υπόγειων υδατικών πόρων σε υδροφόρους που υπόκεινται σε καθεστώς θαλάσσιας διείσδυσης. Η περίπτωση του δυτικού παράκτιου τμήματος του Ν. Ροδόπης. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, σελ. 338.
- Κωνσταντινίδης, Δ. και Περγιαλιώτης, Π. (1984). Ανάπτυξη απόγειων υδάτων Θεσσαλίας. Αναρρύθμιση υδρολογικού μοντέλου. Υπουργείο Γεωργίας, Διεύθυνση Γεωλογίας- Υδρολογίας, Μ.Μ.84.1
- Πεταλάς, Χ. (1997). Ανάλυση υδροφόρων συστημάτων στο ετερογενές και παράκτιο πεδίο Ν. Ροδόπης, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, σελ. 288.

Ξενόγλωσσες αναφορές

- Baalousha H. (2011). Fundamentals of Groundwater Modelling. In: L. F. König and J. L. Weiss, ed., Modelling, Management and Contamination, Nova Publisher, pp.113-130.
- Bear, J. and Verruijt, A. (1987) Modeling Groundwater Flow and Pollution. Springer, Dordrecht, p. 432.
- Buxton, H.T., and Reilly, T.E. (1987). A technique for analysis of ground-water systems at regional and subregional scales, applied on Long Island, New York: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2310, pp. 129-142.
- Cannata, M., Neumann, J., Cardoso, M., Rossetto, R., and Foglia, L. (2016). Observation analysis tool for the FREEWAT GIS environment for water resources management. PeerJ Preprints, 4, e2127v2. Open Source Geospatial Research and Education Symposium (OGRS).
- Cannata, M., Neumann, J., and Cardoso, M. (2017). FREEWAT User Manual, Volume 5 - Observation Analysis Tool, version 0.4, March 31st, 2017.
- Clement, T.P. (1997). RT3D - A Modular Computer Code for Simulating Reactive Multi-Species Transport in 3-Dimensional Groundwater Aquifers. PNNL-11720 Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington, p. 59.
- De Filippis, G., Borsi, I., Foglia, L., Cannata, M., Velasco Mansilla, V. and Rossetto R. (2016). THE H2020 FREEWAT PROJECT FOR DEVELOPING A GIS-INTEGRATED PLATFORM FOR WATER RESOURCE MANAGEMENT. Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Bologna, Italy.
- De Filippis, G., Borsi, I., Foglia, L., Cannata, M., Velasco Mansilla, V., Vasquez-Suñe, E., Ghetta, M. and Rossetto, R. (2017). Software tools for sustainable water resources management: the GIS-integrated FREEWAT platform. Rendiconti Online Società Geologica Italiana, 42, pp. 59-61.
- De Filippis, G., Ghetta, M., Neumann, J., Cardoso, M., Cannata, M., and Rossetto, R. (2017). FREEWAT User Manual, Volume 1 - Groundwater modeling using MODFLOW-OWHM (One Water Hydrologic Flow Model), version 0.4, March 31st, 2017.
- Diersch, H.J. (2005). Finite element subsurface flow and transport simulation system. Reference Manual, Feflow, Version 5.3, Wasy GmbH, Berlin, p. 292.

- Doherty, J. (2010). PEST, Model-independent parameter estimation User manual (5th ed., with slight additions) and addendum: Brisbane, Australia, Watermark Numerical Computing. <http://www.sspa.com/PEST/index.html>
- EU (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the Community action in the field of water policy. Official Journal (OJ L 327) on 22 December 2000
- Fienen, M.N., D’Oria, Marco, Doherty, J.E., and Hunt, R.J. (2013). Approaches in highly parameterized inversion: bgaPEST, a Bayesian geostatistical approach implementation with PEST Documentation and instructions: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 7, section C9, 86 p., available online at <http://pubs.usgs.gov/tm/07/c09>
- Foglia, L., Hill, M.C., Mehl, S.W., and Burlando, P. (2009). Sensitivity analysis, calibration , and testing of a distributed hydrological model using error-based weighting and one objective function. *Water Resources Research*, 45, W06427, pp.1–18.
- Foglia, L., Toegl, A., and Mehl, S. (2017). FREEWAT User Manual, Volume 6 - MODFLOW OBServation process, version 0.4, March 31st, 2017.
- Franke, O.L., Reilly, T.E. and Bennett, G.D., (1987). Definition of boundary and initial conditions in the analysis of saturated ground-water flow systems – An introduction: *Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey*, Book 3, Chapter B5, p. 15.
- Hanson, R.T., Boyce, S.E., Schmid, W., Hughes, J.D., Mehl, S.M., Leake, S.A., Maddock, T. and Niswonger R.G. (2014). One-Water Hydrologic Flow Model (MODFLOW-OWHM). U.S. Geological Survey, Techniques and Methods 6-A51, p. 134.
- Harbaugh, A. and McDonald, M. (1996). User's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey Open-File Report 96-485, p. 56.
- Harbaugh, A.W. (2005). MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model - the Ground-Water Flow Process. U.S. Geological Survey, Techniques and Methods 6-A16, p. 253.
- Hill, M.C., Banta, E.R., Harbaugh, A.W., and Anderman, E.R. (2000). MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model – User guide to the Observation, Sensitivity, and Parameter-Estimation Processes and three post-processing programs: U.S. Geological Survey Open-File Report 00-184, p. 210.

- Hill, M.C. and Tiedman, C.R. (2007). Effective groundwater model calibration, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, p.384.
- Kallioras, A., Pliakas, F., Diamantis, I., Emmanouil M. (2006a). Application of Geographical Information Systems (GIS) for the management of coastal aquifers subjected to seawater intrusion, *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, Taylor & Francis, Inc., Philadelphia, USA, Vol. A41, No.9, pp. 2027-2044.
- Kallioras, A., Pliakas, F., Diamantis, I. (2006b). Conceptual model of a coastal aquifer system in northern Greece and assessment of saline vulnerability due to seawater intrusion conditions, *Journal of Environmental Geology*, Vol. 51, n. 3, pp. 349-361.
- Kallioras, A. Pliakas, F., Diamantis, I. and Kallergis, G. (2006c). Seawater intrusion and management of coastal aquifers in Greece. The case study of Rhodope western coastal aquifer, *International Water Association, IWA, 10th International Conference on Diffuse Pollution, Istanbul, Turkey, 18 – 22 September 2006*.
- Kallioras, A., Pliakas, F. and Diamantis, I. (2010). Simulation of groundwater flow in a sedimentary aquifer system subjected to overexploitation. *Water, Air, and Soil Pollution*, 211(1–4), pp.177–201.
- Kumar, C.P. (2006). Groundwater Flow Models: An Overview. In: N. C. Ghosh & K. D. Sharma, ed., *Groundwater Modelling and Management*, Capital Publishing Company, New Delhi, pp. 153-178.
- Langevin, C.D., Thorne, D.T. Jr., Dausman, A.M., Sukop, M.C. and Guo, Weixing (2007). SEAWAT Version 4: A Computer Program for Simulation of Multi-Species Solute and Heat Transport. *U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A22*, p. 39.
- Matott, L. S. (2010). OSTRICH: An Optimization Software Tool. Available at <http://www.civil.uwaterloo.ca/lsmatott/Ostrich/OstrichMain.html>
- McDonald, M.G., and Harbaugh, A.W. (1988). A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. *Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Book 6, Chapter A1*, p. 586.
- Merritt, M.L. and Konikow, L.F. (2000). Documentation of a Computer Program to Simulate Lake-Aquifer Interaction Using the MODFLOW Ground-Water Flow Model and the MOC3D Solute-Transport Model. *U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 00-4167*, p. 153.

- Nash, J. E., and Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I—A discussion of principles, *J. Hydrol.*, 10(3), pp. 282– 290.
- Pinder, G.F. and Gray, W.G. (1977). *Finite Element Simulation in Surface and Subsurface Hydrology*. Academic Press, New York, p. 295.
- Poeter, E.P., Hill, M.C., Banta, E.R., Mehl, S., and Christensen, S. (2005). *UCODE_2005 and Six Other Computer Codes for Universal Sensitivity Analysis, Calibration, and Uncertainty Evaluation: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A11*, p. 283.
- Poeter E.P., Hill, M.C., Lu, D., Tiedeman, C.R. and Mehl, S. (2014). *UCODE_2014, with new capabilities to define parameters unique to predictions, calculate weights using simulated values, estimate parameters with SVD, evaluate uncertainty with MCMC, and more. Integrated Groundwater Modeling Center Report Number GWMI 2014-02.*
- Rausch, R. (2010). *Groundwater Modelling: An introduction to groundwater flow and solute transport modelling with applications*, Technische Universität Darmstadt.
- Refsgaard, J.C., Højberg, A.L., Møller, I., Hansen, M. & Søndergaard, V. (2010). *Groundwater Modeling in Integrated Water Resources Management—Visions for 2020. Ground Water*, 48, (5), pp. 633–648.
- Reilly, T. (2001) *System and Boundary conceptualization in ground-water flow simulation. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, Book 3, Chapter B8*, p. 26.
- Reilly, T. and Harbaugh, A. (2004). *Guidelines for evaluating Ground-Water flow. Scientific Investigations Report 2004-5038. U.S. Department of Interior, U.S. Geological Survey*, pp.1-30.
- Rossetto, R., Borsi, I., Schifani, C., Bonari, E., Mogorovich, P. and Primicerio, M. (2013). *SID&GRID: Integrating hydrological modeling in GIS environment. Rendiconti Online Società Geologica Italiana*, 24, pp. 282-283.
- Rossetto, R., Borsi, I. and Foglia, L. (2015). *FREEWAT: FREE and open source software tools for WATER resource management. Rendiconti Online Società Geologica Italiana*, 35, pp. 252-255.
- Serrano, A., Criollo, R., Velasco, V., Riera, C., and Vázquez-Suñé, E. (2017). *FREEWAT User Manual, Volume 4 - AkvaGIS (Hydrochemical Analysis Tools and Hydrogeological Analysis Tools), version 0.3.1, January 31st, 2017.*

- Shah, N., Nachabe, M. and Ross, M. (2007). Extinction Depth and Evapotranspiration from Ground Water under Selected Land Covers. *Ground Water*, 45 (3), pp. 329-338.
- Torak, L.J. (1993). A MODular Finite-Element model (MODFE) for areal and axisymmetric ground-water-flow problems, Part 1: Model description and User's manual. *Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey*, Book 6, Chapter A3, p. 163.
- Welter, D.E., Doherty, J.E., Hunt, R.J., Muffels, C.T., Tonkin, M.J., and Schreder, W.A. (2012). Approaches in highly parameterized inversion: PEST++, a Parameter ESTimation code optimized for large environmental models. *U.S. Geological Survey Techniques and Methods*, book 7, section C5, p. 47, <http://wi.water.usgs.gov/models/pestplusplus>.
- Zheng, C. and Wang, P.P. (1999). MT3DMS, A modular three-dimensional multi-species transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems. U.S. Army Engineer Research and Development Center Contract Report SERDP-99-1, Vicksburg, MS, p. 202.

Ιστότοποι

Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, <http://stratus.meteo.noa.gr/> [Ανακτήθηκε: 17/06/2017].

Εθνικός κατάλογος ανοικτών δεδομένων, <http://geodata.gov.gr/> [Ανακτήθηκε: 15/06/2017].

Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, <http://www.hnms.gr/> [Ανακτήθηκε: 17/06/2017].

Ελληνική Στατιστική Αρχή, <http://www.statistics.gr/> [Ανακτήθηκε: 02/05/2017].

ITIA Ερευνητική Ομάδα, <https://www.itia.ntua.gr/> [Ανακτήθηκε: 15/06/2017].

Υδροσκόπιο, Εθνική Τράπεζα Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας, <http://main.hydroscope.gr/> [Ανακτήθηκε: 15/06/2017].

Υπουργείο Εσωτερικών, <http://www.ypes.gr/> [Ανακτήθηκε: 20/05/2017].

Copernicus, Land Monitoring Service, <http://land.copernicus.eu/> [Ανακτήθηκε: 10/05/2017].

FREEWAT, Free and Open Source Software Tools for Water Resource Management, <http://www.freewat.eu/> [Ανακτήθηκε: 01/11/2016].

Groundwater, University of California, Division of Agriculture and Natural Resources, <http://groundwater.ucdavis.edu/> [Ανακτήθηκε: 15/07/2016].

IGMC, Integrated Groundwater Modeling Center, Colorado School of Mines, <http://igwmc.mines.edu/> [Ανακτήθηκε: 15/08/2016].

QGIS Development Team, (2009). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project, <http://qgis.osgeo.org/> [Ανακτήθηκε: 12/12/2016].

Spatialite Development Team, (2011). The Gaia-SINS federated projects home-page, <http://www.gaia-gis.it/gaia-sins/> [Ανακτήθηκε: 12/12/2016].

USGS, U.S. Geological Survey, <https://www.usgs.gov/> [Ανακτήθηκε: 01/11/2016].

Παράρτημα

Αποτελέσματα αρχικής ρύθμισης μοντέλου

Volumetric budget for entire model at the end of Time Step 1, Stress Period 1

CUMULATIVE VOLUMES (L ³)			RATES FOR THIS TIME STEP (L ³ /T)	
BOUND CONDITION	IN	OUT	IN	OUT
STORAGE	0	0	0	0
WELLS	0	0	0	0
RIVER LEAKAGE	2600.4119	0	2600.4119	0
ET	0	81476.7422	0	81476.7422
HEAD DEP BOUNDS	149309.1406	87674.4219	149309.1406	87674.4219
RECHARGE	17241.6016	0	17241.6016	0
TOTAL	169151.1562	169151.1562	169151.1562	169151.1562
IN-OUT	0		0	

Volumetric budget for entire model at the end of Time Step 1, Stress Period 2

CUMULATIVE VOLUMES (L ³)			RATES FOR THIS TIME STEP (L ³ /T)	
BOUND CONDITION	IN	OUT	IN	OUT
STORAGE	383930.9375	0	12726.9922	0
WELLS	0	6628039	0	0
RIVER LEAKAGE	81046.1719	0	2600.4119	219714
ET	0	81476.7422	0	0
HEAD DEP BOUNDS	5448102	87674.4219	175650.5938	0
RECHARGE	884110.9375	0	28736	0
TOTAL	6797190	6797190	219714	0
IN-OUT	0		219714	

Volumetric budget for entire model at the end of Time Step 2, Stress Period 2

CUMULATIVE VOLUMES (L ³)			RATES FOR THIS TIME STEP (L ³ /T)	
BOUND CONDITION	IN	OUT	IN	OUT
STORAGE	400601.8125	0	552.6259	0
WELLS	0	13256078	0	219714
RIVER LEAKAGE	159491.9375	0	2600.4119	0
ET	0	81476.7422	0	0
HEAD DEP BOUNDS	11114154	87674.4219	187824.9531	0
RECHARGE	1750980.25	0	28736	0
TOTAL	13425228	13425229	219713.9844	219714
IN-OUT	-1		-1.5625E-02	

Volumetric budget for entire model at the end of Time Step 3, Stress Period 2

CUMULATIVE VOLUMES (L ³)			RATES FOR THIS TIME STEP (L ³ /T)	
BOUND CONDITION	IN	OUT	IN	OUT
STORAGE	401341.8125	0	24.5302	0
WELLS	0	19884116	0	219714
RIVER LEAKAGE	237937.6875	0	2600.4119	0
ET	0	81476.7422	0	0
HEAD DEP BOUNDS	16796138	87674.4219	188353.0469	0
RECHARGE	2617849	0	28736	0
TOTAL	20053268	20053268	219713.9844	219714
IN-OUT	0		-1.5625E-02	

Volumetric budget for entire model at the end of Time Step 4, Stress Period 2

CUMULATIVE VOLUMES (L ³)			RATES FOR THIS TIME STEP (L ³ /T)	
BOUND CONDITION	IN	OUT	IN	OUT
STORAGE	401374.8125	0	1.0934	0
WELLS	0	26512156	0	219714
RIVER LEAKAGE	316383.4375	0	2600.4119	0
ET	0	81476.7422	0	0
HEAD DEP BOUNDS	22478828	87674.4219	188376.4844	0
RECHARGE	3484718.75	0	28736	0
TOTAL	26681304	26681308	219713.9844	219714
IN-OUT	-4		-1.5625E-02	

Volumetric budget for entire model at the end of Time Step 5, Stress Period 2

CUMULATIVE VOLUMES (L ³)			RATES FOR THIS TIME STEP (L ³ /T)	
BOUND CONDITION	IN	OUT	IN	OUT
STORAGE	401376.2812	0	4.9043E-02	0
WELLS	0	33140196	0	219714
RIVER LEAKAGE	394829.1875	0	2600.4119	0
ET	0	81476.7422	0	0
HEAD DEP BOUNDS	28161550	87674.4219	188377.5312	0
RECHARGE	4351588	0	28736	0
TOTAL	33309344	33309348	219713.9844	219714
IN-OUT	-4		-1.5625E-02	

Volumetric budget for entire model at the end of Time Step 6, Stress Period 2

CUMULATIVE VOLUMES (L ³)			RATES FOR THIS TIME STEP (L ³ /T)	
BOUND CONDITION	IN	OUT	IN	OUT
STORAGE	401376.3438	0	1.87E-03	0
WELLS	0	39768236	0	219714
RIVER LEAKAGE	473274.9375	0	2600.4119	0
ET	0	81476.7422	0	0
HEAD DEP BOUNDS	33844272	87674.4219	188377.5781	0
RECHARGE	5218457.5	0	28736	0
TOTAL	39937380	39937388	219713.9844	219714
IN-OUT	-8		-1.5625E-02	

Αποτελέσματα παραμετροποίησης μοντέλου

Volumetric budget for entire model at the end of Time Step 1, Stress Period 1

CUMULATIVE VOLUMES (L ³)			RATES FOR THIS TIME STEP (L ³ /T)	
BOUND CONDITION	IN	OUT	IN	OUT
STORAGE	0	0	0	0
WELLS	0	0	0	0
RIVER LEAKAGE	2600.4119	0	2600.4119	0
ET	0	69423.1094	0	69423.1094
HEAD DEP BOUNDS	102726.1094	53145.0156	102726.1094	53145.0156
RECHARGE	17241.6016	0	17241.6016	0
TOTAL	122568.1250	122568.1250	122568.1250	122568.1250
IN-OUT	0		0	

Volumetric budget for entire model at the end of Time Step 1, Stress Period 2

CUMULATIVE VOLUMES (L ³)			RATES FOR THIS TIME STEP (L ³ /T)	
BOUND CONDITION	IN	OUT	IN	OUT
STORAGE	495405.5938	76.1697	16422.2852	2.5250
WELLS	0	6628039	0	219714
RIVER LEAKAGE	81046.1719	0	2600.4119	0
ET	0	141280.3906	0	2382.0093
HEAD DEP BOUNDS	1751078.8750	220451.8281	54641.5273	5546.0825
RECHARGE	4662316.5000	0	153980.3906	0
TOTAL	6989847	6989847	227644.6094	227644.6250
IN-OUT	0		-1.5625E-02	

Volumetric budget for entire model at the end of Time Step 2, Stress Period 2

CUMULATIVE VOLUMES (L ³)			RATES FOR THIS TIME STEP (L ³ /T)	
BOUND CONDITION	IN	OUT	IN	OUT
STORAGE	616953.1875	76.1697	4029.2026	0
WELLS	0	13256078	0	219714
RIVER LEAKAGE	159491.9375	0	2600.4119	0
ET	0	186259.1562	0	1491.0089
HEAD DEP BOUNDS	3663958	305381.6250	63410.3594	2815.3530
RECHARGE	9307392	0	153980.3906	0
TOTAL	13747795	13747795	224020.3594	224020.3594
IN-OUT	0		0	

Volumetric budget for entire model at the end of Time Step 3, Stress Period 2

CUMULATIVE VOLUMES (L ³)			RATES FOR THIS TIME STEP (L ³ /T)	
BOUND CONDITION	IN	OUT	IN	OUT
STORAGE	673405.1875	76.1697	1871.3365	0
WELLS	0	19884116	0	219714
RIVER LEAKAGE	237937.6875	0	2600.4119	0
ET	0	213656.5469	0	908.2007
HEAD DEP BOUNDS	5608178	374137.9688	64449.2812	2279.2156
RECHARGE	13952467	0	153980.3906	0
TOTAL	20471988	20471986	222901.4219	222901.4219
IN-OUT	2		0	

Volumetric budget for entire model at the end of Time Step 4, Stress Period 2

CUMULATIVE VOLUMES (L ³)			RATES FOR THIS TIME STEP (L ³ /T)	
BOUND CONDITION	IN	OUT	IN	OUT
STORAGE	687009.0625	76.1697	450.9572	0
WELLS	0	26512156	0	219714
RIVER LEAKAGE	316383.4375	0	2600.4119	0
ET	0	224289.1875	0	352.4635
HEAD DEP BOUNDS	7568852	433265	64994.7188	1960.0127
RECHARGE	18597542	0	153980.3906	0
TOTAL	27169788	27169786	222026.4688	222026.4688
IN-OUT	2		0	

Volumetric budget for entire model at the end of Time Step 5, Stress Period 2

CUMULATIVE VOLUMES (L ³)			RATES FOR THIS TIME STEP (L ³ /T)	
BOUND CONDITION	IN	OUT	IN	OUT
STORAGE	689052.9375	76.1697	67.7521	0
WELLS	0	33140196	0	219714
RIVER LEAKAGE	394829.1875	0	2600.4119	0
ET	0	231597.4688	0	242.2634
HEAD DEP BOUNDS	9537064	491694.3750	65244.5977	1936.8856
RECHARGE	23242616	0	153980.3906	0
TOTAL	33863564	33863564	221893.1406	221893.1562
IN-OUT	0		-1.5625E-02	

Volumetric budget for entire model at the end of Time Step 6, Stress Period 2

CUMULATIVE VOLUMES (L ³)			RATES FOR THIS TIME STEP (L ³ /T)	
BOUND CONDITION	IN	OUT	IN	OUT
STORAGE	689963.1875	76.1697	30.1745	0
WELLS	0	39768236	0	219714
RIVER LEAKAGE	473274.9375	0	2600.4119	0
ET	0	238642.8906	0	233.5499
HEAD DEP BOUNDS	11506104	550081.1250	65272.0469	1935.4727
RECHARGE	27887692	0	153980.3906	0
TOTAL	40557036	40557036	221883.0156	221883.0156
IN-OUT	0		0	