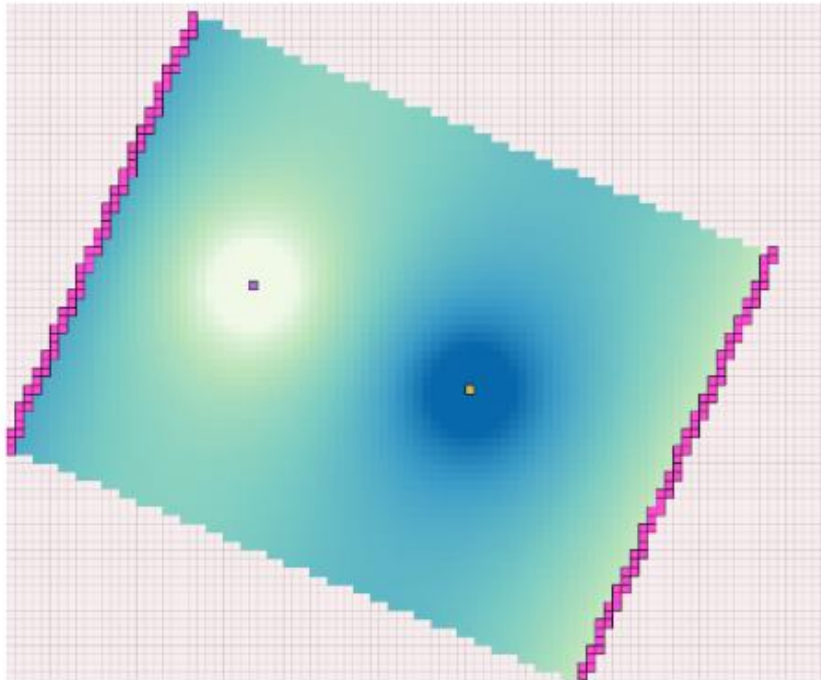




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ
ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΒΑΘΟΥΣ
ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ



Καμπούρογλου Ιουλιανή

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΚΑΛΛΙΩΡΑΣ ΑΝΔΡΕΑΣ

ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2019

Πρόλογος

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής και το περαιτέρω ενδιαφέρον για την εμπάθυνση στο αντικείμενο των αβαθών γεωθερμικών συστημάτων ξεκινά από τα μαθήματα της Επιστήμης και Τεχνολογίας Γεωθερμικών Πεδίων και της Εφαρμοσμένης Υδρογεωλογίας, όπου στο πρώτο γνώρισα πιο αναλυτικά το επιστημονικό πεδίο της γεωθερμίας, ενώ στο δεύτερο έμαθα πιο αναλυτικά τους νόμους που διέπουν ένα γεωθερμικό ταμειυτήρα από υδρογεωλογική σκοπιά, αλλά και τις βασικές λειτουργίες της πλατφόρμας του FREEWAT στο QGIS που τη χρησιμοποίησα για την προσομοίωση του μοντέλου της διπλωματικής μου.

Η ολοκλήρωση και η παράδοση της διπλωματικής μου ήρθε ουσιαστικά σε ένα διάστημα που περάτωσα και τις υπόλοιπες υποχρεώσεις στη σχολή μου στο χρόνο που ήθελα. Κατάφερα να την ολοκληρώσω σε ένα εύλογο χρονικό διάστημα με επιμονή δική μου αλλά και όλων όσων εμπλέκονταν στη διεκπεραίωσή της, παρόλη τη δυσκολία που υπήρχε στο πώς έπρεπε να τη διαμορφώσουμε καθώς δεν υπήρχε αντίστοιχη δουλειά που θα μας βοηθούσε να πορευτούμε ανάλογα.

Για να φτάσω σε αυτό το σημείο προφανώς δεν ήμουν μόνη μου. Θέλω να ευχαριστήσω πρώτα και κύρια τον υπεύθυνο καθηγητή μου, Καλλιώρα Ανδρέα, που μου έδωσε αρκετό υλικό για να εξοπλιστώ κατάλληλα πάνω στο θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτούσε η περάτωση της διπλωματικής μου, με βοήθησε να κατανοήσω καλύτερα τη λειτουργία του FREEWAT και ιδιαίτερα των κωδίκων που χρησιμοποίησαμε πάνω σε αυτό, MODFLOW και MT3DMS, και παρακολουθούσε την πρόοδο μου όλο αυτό το διάστημα για να με καθοδηγήσει κατάλληλα στο να βγει ένα καλό αποτέλεσμα.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω το Γιώργο Φραγκογιάννη, που δουλεύει πάνω στην εγκατάσταση και λειτουργία αντλιών θερμότητας αβαθών γεωθερμικών συστημάτων και μας παρείχε αρκετά δεδομένα πεδίου (στοιχεία για την περιοχή έρευνάς μας από μελέτες κλπ) για τους Θρακομακεδόνες, αλλά και λειτουργικών χαρακτηριστικών μια αντλίας θερμότητας που δούλευε σε ένα οικόπεδο στην περιοχή, έτσι ώστε να εκτελέσουμε την προσομοίωση όσο γίνεται καλύτερα πάνω σε ρεαλιστικά σενάρια λειτουργίας.

Ιδιαίτερα θέλω να ευχαριστήσω και το Χρήστο Πουλιάρη, που με υπομονή μου υποδείκνυε τρόπους και χρήσιμα εργαλεία του QGIS και του FREEWAT έτσι ώστε να κάνω πιο εύκολα και αποτελεσματικά τη δουλειά μου.

Μεγάλη συμβολή στην επίμονη δουλειά μου είχαν και οι γονείς μου, Γιάννης και Κυριακή, που ενώ αρχικά δεν ήταν πολύ χαρούμενοι με την επιλογή μου να σπουδάσω Μηχανικός Μεταλλείων – Μεταλλουργών, δεν τέθηκε καν συζήτηση στο εάν θα με στήριζαν στην επιλογή μου να πάω να σπουδάσω το αντικείμενο που αγαπώ περισσότερο μακριά από τον τόπο μου. Ειδικά καθώς περνούσαν τα χρόνια, βλέποντάς με να μου αρέσει αυτό που σπουδάζω ενθουσιάστηκαν και αυτοί σιγά σιγά και παρόλες τις δυσκολίες της εποχής έχουν τη διάθεση να με στηρίξουν στην προσπάθειά μου να εμβαθύνω περισσότερο σε αυτόν τον κλάδο. Μαζί με τα αδέρφια μου, Αναστασία και Δημήτρη, είναι αυτοί οι άνθρωποι που εξαρχής και όλα αυτά τα χρόνια ήταν και είναι βέβαιοι ότι θα τα καταφέρω σε ότι θέλω να πετύχω, φροντίζοντας να μου το υπενθυμίζουν συνεχώς.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω όλους του φίλους μου και τους ανθρώπους που βρίσκονταν δίπλα μου, και με στήριζαν με τη σιγουριά ότι θα αξιοποίησω κάθε δυνατότητα που έχω για να το πετύχω, επειδή γνωρίζουν ότι μου αρέσει πολύ το αντικείμενό μου.

Περίληψη

Η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας είναι ένα ζήτημα που απασχολεί την επιστημονική κοινότητα, καθώς στον τομέα της ενέργειας η αξιοποίησή της αριθμεί αρκετά πλεονεκτήματα. Σε αυτήν την εργασία θα ασχοληθούμε ιδιαίτερα με την προσομοίωση μοντέλων ροής και μεταφοράς θερμότητας αβαθούς γεωθερμικού συστήματος ανοιχτού κυκλώματος. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της πλατφόρμας FREEWAT, που έχει τη δυνατότητα χρήσης αρκετών κωδικών για την προσομοίωση υδρογεωλογικών συστημάτων. Για την προσομοίωση της ροής του υπόγειου νερού χρησιμοποιήθηκε ο υπολογιστικός κώδικας MODFLOW-2005, που επιλύει την εξίσωση της ροής με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, ενώ για την προσομοίωση των φαινομένων μεταφοράς ο υπολογιστικός κώδικας MT3DMS, που επιλύει την εξίσωση μεταφοράς διαλυμένης μάζας επίσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών.

Το πεδίο έρευνας το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως πεδίο εφαρμογής της προσομοίωσης βρίσκεται στους Θρακομακεδόνες και έχει ως γεωλογικό υπόβαθρο (τουλάχιστον ως το βάθος των 100m) προσχωματικούς και νεογενείς σχηματισμούς με μέτρια ως μικρή περατότητα συνολικά. Το οικοδομικό συγκρότημα γύρω από το οποίο εκτείνεται το πεδίο εφαρμογής διαθέτει μια γεωθερμική αντλία θερμότητας ανοιχτού κυκλώματος. Η ΓΑΘ για τη λειτουργία της αξιοποιεί το υπόγειο νερό του ελεύθερου υδροφόρου που βρίσκεται στο υπέδαφος και έχει μια σταθερή θερμοκρασία περίπου 17°C ενώ διαθέτει γεώτρηση παραγωγής και γεώτρηση επανεισαγωγής.

Η προσομοίωση περιλαμβάνει 10 διαφορετικά σενάρια τα οποία κατηγοριοποιούνται κατάλληλα με βάση τα είδη της χρήσης της ΓΑΘ (οικιακή ή βιομηχανική) και στα σενάρια με βάση το χρόνο λειτουργίας της ΓΑΘ. Στην πρώτη κατηγορία έγιναν 5 σενάρια με μικρή μεταβολή της παροχής (3-7m³/h) για οικιακή χρήση και 1 σενάριο με μία μεγαλύτερη παροχή (20m³/h) για βιομηχανική χρήση, όλα σε διάστημα λειτουργίας της αντλίας 8 ωρών. Στη δεύτερη κατηγορία έγιναν 4 σενάρια ίδιας παροχής (5m³/h) για διαφορετικά διαστήματα συνεχούς λειτουργίας, 5, 10, 15 και 20 ημερών. Σε όλα τα σενάρια, λόγω και της μικρής απόστασης των οριακών συνθηκών, η μείωση του υδραυλικού φορτίου (μοντέλο ροής) γύρω από την παραγωγική γεώτρηση περιορίστηκε στην πτώση περίπου 3-4 μέτρων τις περισσότερες φορές. Όσον αφορά στη μεταβολή της θερμοκρασίας στα μοντέλα μεταφοράς θερμότητας, στην πρώτη κατηγορία λόγω και του μικρού χρονικού διαστήματος λειτουργίας πτώση θερμοκρασίας επήλθε μόνο σε μια μικρή ακτίνα γύρω από τη γεώτρηση επανεισαγωγής, ενώ στη δεύτερη με την πάροδο του χρόνου η μείωση αυτή διευρυνόταν περισσότερο με την αύξηση του χρόνου λειτουργίας.

Abstract

Exploitation of geothermal energy is a matter of concern to the scientific community, as its use in the energy sector has several advantages. In this work we will particularly deal with the simulation of a shallow open circuit geothermal system flow and heat transfer. The simulation was conducted using the FREEWAT platform, which incorporates several codes of the USGS “MODFLOW Family” for simulating hydrogeological systems. For the simulation of the groundwater flow, MODFLOW-2005 code was used, which refers to the groundwater flow equation by the finite differences method, while for the heat transfer model, the MT3DMS computation code, which also uses the finite difference method, was used.

The field site that was used for the simulation purposes is located in Thrakomakedones and has a hydrogeological setting (at least down to 100m depth) of an unconfined aquifer formation - composed of neogene deposits- with an overall low to medium permeability. The field site contains an open-circuit geothermal heat pump (GHP) that utilizes the groundwater resources of this local aquifer system, having has an average annual temperature of 17°C. The GHP has a involved both a pumping as well an injection well.

In the simulation we ran 10 different scenarios which we categorized into different classes based on the types of use of the GHP (domestic or industrial) and scenarios based on the time of operation of the GHP. In the first category there were 5 scenarios with a minimal change in pumping rate (3-7m³/h) for domestic use and 1 scenario with a higher pumping rate (20m³/h) for industrial use, all during an 8-hour pump operation. In the second category 4 scenarios with the same flow rate (5m³/h) were made for different continuous (5, 10, 15 and 20 days) intervals. For all scenarios, due to the short distance with the hydraulic boundary conditions, the reduction of the hydraulic head (flow model) around the production well was limited to approximately 3-4 meters in most scenarios. Regarding the changes in temperature, during the heat transfer modeling, these were classified into two main categories: (a) in the first category due to the limited operating time of the GHP, temperature decreases were only observed within a small radius around the injection well, while (b) in the second category this decrease became more pronounced over time, as we increased the operating time (i.e. pumping period) of the GHP.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	2
Περίληψη	3
Abstract	4
Ευρετήριο εικόνων	8
Ευρετήριο πινάκων	10
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
1.1 Εκμετάλλευση αβαθούς γεωθερμίας.....	12
1.1.1 Συστήματα αξιοποίησης της Αβαθούς Γεωθερμίας.....	12
1.2 Προσομοίωση γεωθερμικών πεδίων.....	14
1.2.1 Υδρογεωλογικά ομοιώματα	14
1.2.2 Ταξινόμηση των μοντέλων	15
1.2.2.1 Φυσικά μοντέλα.....	15
1.2.2.2 Αναλογικά μοντέλα	16
1.2.2.3 Μαθηματικά μοντέλα.....	16
1.2.3 Σκοπός της προσομοίωσης.....	21
1.2.4 Βελτιστοποίηση	22
1.2.5 Περιορισμοί των μοντέλων	25
1.2.6 Εννοιολογικό μοντέλο - Ορισμός	26
1.2.6.1 Οριακές συνθήκες εννοιολογικού μοντέλου.....	27
1.2.6.2 Υδρογεωλογικές συνθήκες	28
1.2.6.3 Διεύθυνση ροής.....	28
1.2.6.4 Ισοζύγιο Υπόγειου νερού (Groundwater Budget Components)	30
2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ	32
2.1 Γεωγραφικά – Κλιματικά στοιχεία	32
2.1.1 Μορφολογία.....	32
2.1.2 Κλιματικά – Υδρομετεωρολογικά στοιχεία.....	32
2.2 Γεωλογικά στοιχεία.....	33
2.2.1 Αλπικοί-προαλπικοί σχηματισμοί:	34
2.2.2 Μεταλπικοί σχηματισμοί:	35
2.3 Τεκτονική της περιοχής.....	36
2.4 Υδρογεωλογικά στοιχεία.....	38
2.4.1 Προσχώσεις	38

2.4.2 Νεογενής σχηματισμός	39
2.4.3 Ασβεστόλιθοι.....	39
2.4.4. Παλαιοζωϊκό.....	40
3. ΚΩΔΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ	41
3.1 Λογισμικά/κώδικες προσομοίωσης ροής γεωθερμικών πεδίων	41
3.1.1 MODFLOW	41
3.1.2 Micro-Fem	44
3.1.3 SHARP & SWIP	45
3.1.4 SUTRA.....	45
3.1.5 MOC3D.....	46
3.1.6 MOCDENS3D	46
3.1.7 FEFLOW.....	48
3.1.8 Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.....	48
3.2 Λογισμικά/κώδικες προσομοίωσης μεταβολής θερμοκρασίας γεωθερμικών πεδίων	49
3.2.1 Κύριες εξισώσεις στην προσομοίωση της μεταφοράς θερμότητας με το MT3DMS	52
3.2.2 Προσαρμοστικοί συντελεστές και η συμπερίληψή τους στο MT3DMS	54
3.3 Γενική περιγραφή πλατφόρμας FREEWAT	56
3.3.1 Διάγραμμα ροής του FREEWAT.....	59
3.3.2 Προσομοίωση Υπόγειας ροής.....	61
3.3.3 Solute transport.....	62
3.3.4 Ενότητα διαχείρισης νερού - Water Management Module	66
3.3.5 AkvaGIS (Hydrochemical Analysis Tools and Hydrogeological Analysis Tools).....	67
3.3.6 Εργαλείο Παρατήρησης-Ανάλυσης (Observation Analysis Tool - OAT).....	70
3.3.7 Ενότητα Βαθμονόμησης και Ευαισθησίας (Calibration and Sensitivity module)	72
4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΒΑΘΟΥΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ	74
4.1 Πεδίο μοντέλου	75
4.1.1 Δημιουργία του νέου υδρολογικού μοντέλου.....	75
4.1.2 Διακριτοποίηση χώρου και χρόνου.....	78
4.2 Οριακές συνθήκες	86
4.2.1 Συγκεκριμένο φορτίο χρονικά μεταβαλλόμενο (Time-Variant Specified Head – CHD)	87
4.2.2 Γεώτρηση συγκεκριμένης ροής (WEL - specified-flux)	89
4.3 Αρχεία εισόδου του MODFLOW και προσομοίωση ροής Υ.Ν.	91

4.4 Ανάπτυξη μοντέλου μεταφοράς (transport model) με τον κώδικα MT3DMS	93
4.4.1 Δημιουργία νέου μοντέλου μεταφοράς	93
4.4.2 Εκτέλεση μοντέλου μεταφοράς	96
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	98
5.1 Σενάρια με βάση τη χρήση της αντλίας θερμότητας.....	100
5.1.1 Σενάρια για οικιακή χρήση (λειτουργία αντλίας 8 ώρες).....	100
5.1.2 Σενάριο για βιομηχανική χρήση (παροχή 20 m³/h)	109
5.2 Σενάρια με βάση το χρόνο λειτουργίας της αντλίας θερμότητας για οικιακή χρήση (παροχή 5 m³/h για 5 μέρες, για 10 μέρες, για 15 μέρες και για 20 μέρες)	110
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ	115
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	116

Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 1: Ανοιχτό σύστημα ΓΑΘ.....	13
Εικόνα 2: Κλειστό οριζόντιο σύστημα ΓΑΘ	13
Εικόνα 3: Κλειστό κάθετο σύστημα ΓΑΘ	14
Εικόνα 4: Ενδεικτικά εννοιολογικά μοντέλα υδροφορέων.....	28
Εικόνα 5: Σχηματικό διάγραμμα απεικόνισης κατευθύνσεων υπόγειας ροής και χώροι αποθήκευσης νερού σε μια ξηρή τοποθεσία (Νότια Αριζόνα, ΗΠΑ) (Healy et al., 2007).	29
Εικόνα 6: Σχηματικό διάγραμμα που απεικονίζει το Long Island, Νέα Υόρκη, ΗΠΑ, και το υδρολογικό ισοζύγιο (πίνακας στα αριστερά) και το ισοζύγιο του υπόγειου νερού (πίνακας στα δεξιά) κάτω από συνθήκες προδιαμόρφωσης. Και στα δύο δεν υπάρχει καμία μεταβολή στο αποθηκευμένο νερό (Alley et al., 1999).....	31
Εικόνα 7: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής των Θρακομακεδόνων (Κατά Γ. ΚΑΤΣΙΚΑΤΣΟ, με συμπληρώσεις. In G. ΚΑΤΣΙΚΑΤΣΟΣ et al., 1986).	34
Εικόνα 8: Οι τρεις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας (I,II,III) στις οποίες χωρίστηκε ο Ελληνικός χώρος, όπως δίνεται στον αναθεωρημένο ΕΑΚ 2004.....	37
Εικόνα 9: ροή μεταξύ των blocks του μοντέλου.	43
Εικόνα 10: Το μενού του FREEWAT αναλυτικά.....	57
Εικόνα 11: Διασυνδέσεις μεταξύ των εργαλείων και ενοτήτων του FREEWAT.....	58
Εικόνα 12: Βασικά στοιχεία της πλατφόρμας FREEWAT	58
Εικόνα 13: Διάγραμμα ροής κατασκευής υδρογεωλογικού μοντέλου στο περιβάλλον του FREEWAT.....	60
Εικόνα 14: Μια σχηματική απεικόνιση της σύζευξης UZB-USB για την εκτίμηση της συγκέντρωσης που φτάνει στη στάθμη του υδροφόρου (τροποποιημένο από τους Nisworgen et al., 2006).	65
Εικόνα 15: Περιβάλλον με τις διαφορετικές υποενότητες εργαλείων προπαρασκευής δεδομένων (data pre-processing tools-AkvaGIS) ενσωματωμένων την πλατφόρμα του FREEWAT στο QGIS. Τα εργαλεία Υδροχημικής Ανάλυσης πλαισιώνονται με μπλε χρώμα.	70
Εικόνα 16: Το σχεδιάγραμμα ανάκτησης, επεξεργασίας, αποθήκευσης και εξαγωγής δεδομένων του OAT.....	71
Εικόνα 17: Σχηματική απεικόνιση των λειτουργιών του UCODE και των απαραίτητων φακέλων για να τρέξει το λογισμικό.....	73
Εικόνα 18: Δορυφορική εικόνα της περιοχής έρευνας	74
Εικόνα 19: Το αρχείο shapefile για το ευρύτερο πεδίο μοντέλου στην περιοχή.....	75
Εικόνα 20: Εντολή δημιουργίας καινούριου μοντέλου.....	76
Εικόνα 21: Παράθυρο δημιουργίας καινούριου μοντέλου.....	77
Εικόνα 22: Οι πίνακες modeltable_thrak, timetable_thrak και prg_locations_thrak.	78
Εικόνα 23: Εντολή δημιουργίας καννάβου.....	78
Εικόνα 24: Παράθυρο δημιουργίας καννάβου.....	79
Εικόνα 25: Κάνναβος grid_grid	80
Εικόνα 26: Εντολή δημιουργίας στρώματος.....	81
Εικόνα 27: Παράθυρο δημιουργίας νέου στρώματος του μοντέλου.....	82
Εικόνα 28: Το 1 ^ο δημιουργούμενο στρώμα (lay1).....	82
Εικόνα 29: Πίνακας χαρακτηριστικών lpf_thrak.....	84
Εικόνα 30: Εντολή πρόσθεσης καινούριας περιόδου φόρτισης.....	85
Εικόνα 31: Παράθυρο πρόσθεσης καινούριας περιόδου.....	86

Εικόνα 32: Μενού δημιουργίας πακέτων του FREEWAT	87
Εικόνα 33: Γραμμές – οδηγοί (κίτρινο χρώμα) για τη δημιουργία πακέτου CHD	87
Εικόνα 34: Παράθυρο εργαλείου Select by location	88
Εικόνα 35: Πίνακας χαρακτηριστικών του στρώματος boundaries_chd.....	89
Εικόνα 36: Πίνακας χαρακτηριστικών wells_well	90
Εικόνα 37: Το ολοκληρωμένο μοντέλο λίγο πριν την προσομοίωση: με μπλε χρώμα τα κελιά των στρωμάτων που είναι ενεργά (στα οποία οι τιμές των υδραυλικών φορτίων, δηλαδή το STRT, μπορούν να μεταβληθούν), με κόκκινο το στρώμα boundaries_chd και με γαλάζιο οι δύο γεωτρήσεις (wells_well).....	91
Εικόνα 38: Εντολή προσομοίωσης μοντέλου	92
Εικόνα 39: Επιλογές για την καρτέλα Groundwater flow στο παράθυρο προσομοίωσης του μοντέλου	92
Εικόνα 40: Αριστερά: παράθυρο ενημέρωσης επιτυχούς προσομοίωσης. Δεξιά: παράθυρο ενημέρωσης μη επιτυχούς προσομοίωσης.....	93
Εικόνα 41: Παράθυρο δημιουργίας μοντέλου μεταφοράς.....	94
Εικόνα 42: Παράθυρο δημιουργίας στρωμάτων μοντέλου μεταφοράς.....	95
Εικόνα 43: Παράθυρο δημιουργίας πακέτων οριακών συνθηκών για το μοντέλο μεταφοράς.....	96
Εικόνα 44: Επιλογές για την καρτέλα Solute Transport στο παράθυρο προσομοίωσης του μοντέλου	97
Εικόνα 45: Εντολή απεικόνισης αποτελεσμάτων μοντέλου	98
Εικόνα 46: Παράθυρο απεικόνισης αποτελεσμάτων μοντέλου.....	99
Εικόνα 47: Παροχή 3 m ³ /h για 8 ώρες	102
Εικόνα 48: Παροχή 4 m ³ /h για 8 ώρες	103
Εικόνα 49: Παροχή 5 m ³ /h για 8 ώρες	104
Εικόνα 50: Παροχή 6 m ³ /h για 8 ώρες	105
Εικόνα 51: Παροχή 7 m ³ /h για 8 ώρες	106
Εικόνα 52: Παροχή 5 m ³ /h για 8 ώρες – Εμφάνιση στο FREEWAT.....	107
Εικόνα 53: Παροχή 5 m ³ /h για 8 ώρες, μοντέλο μεταφοράς θερμότητας για κανονικές τιμές θερμοκρασίας (13°C/286K – 17°C/290K).....	108
Εικόνα 54: Παροχή 20 m ³ /h για 8 ώρες	109
Εικόνα 55: Παροχή 5 m ³ /h για 5 μέρες	111
Εικόνα 56: Παροχή 5 m ³ /h για 10 μέρες	112
Εικόνα 57: Παροχή 5 m ³ /h για 15 μέρες	113
Εικόνα 58: Παροχή 5 m ³ /h για 20 μέρες	114

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 1: Ομοιότητες μεταβλητών υπόγειου νερού με τον ηλεκτρισμό και τη θερμότητα	16
Πίνακας 2: Αριθμητικοί κώδικες κατάλληλοι για την προσομοίωση μεταφοράς θερμότητας αβαθών γεωθερμικών συστημάτων λαμβάνοντας υπόψη την υπόγεια ροή.....	50
Πίνακας 3: Συντεταγμένες πολυγώνου περιοχής.....	74
Πίνακας 4: Υδρογεωλογικά στρώματα περιοχής.....	81
Πίνακας 5: Σενάρια με βάση το είδος της χρήσης.....	99
Πίνακας 6: Σενάρια με βάση το χρόνο λειτουργίας της ΓΑΘ (οικιακή χρήση).....	100

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με τον όρο «γεωθερμία» εκφράζεται η φυσική θερμότητα της γης, ενώ με τον όρο «γεωθερμική ενέργεια» η θερμότητα που προέρχεται από το εσωτερικό της γης, κυρίως το μέρος της που μπορεί να εκμεταλλευτεί και να αξιοποιήσει ο άνθρωπος. Η γεωθερμική ενέργεια ανήκει στην κατηγορία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, και μπορεί να παίξει ένα δευτερεύοντα ρόλο στο παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο, αλλά πρωταγωνιστικό σε τοπικό επίπεδο ως μια εγχώρια πηγή ενέργειας (Ι.Καρυδάκης, 2005).

Στο εσωτερικό της γης υπάρχουν υψηλές θερμοκρασίες που στην επιφάνειά της εκδηλώνονται με τα ηφαίστεια, θερμές πηγές, ατμίδες κλπ. Η θερμότητα αυτή, αν και μετρήσιμη, δεν είναι όλη εκμεταλλεύσιμη. Περιοχές γεωθερμικού ενδιαφέροντος χαρακτηρίζονται εκείνες που παρουσιάζουν αυξημένη θερμική ροή ($1,43 \mu\text{cal}/\text{cm}^2\text{s}$ και πάνω) σε σχετικά μικρό βάθος. Τέτοιες περιοχές έχουν σχέση με την κίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών και τις μαγματικές διεισδύσεις. Για να χαρακτηριστεί μια περιοχή γεωθερμικού ενδιαφέροντος -και με οικονομικά κριτήρια- πρέπει να υπάρχουν: αυξημένη θερμική ροή, κυκλοφορία ρευστών και ειδικές γεωλογικές συνθήκες (στεγανό κάλυμμα, υδροπερατοί σχηματισμοί, κατάλληλη τεκτονική και μια εστία θερμότητας σε μικρό βάθος). Μια τέτοια γεωθερμική περιοχή χαρακτηρίζεται ως «γεωθερμικό πεδίο». Από την άλλη, «γεωθερμικός ταμιευτήρας» νοείται ο όγκος των γεωλογικών σχηματισμών που περιέχει γεωθερμικά ρευστά σε χρήσιμη θερμοκρασία (Ι.Καρυδάκης, 2005).

Η εκμετάλλευση ενός γεωθερμικού πεδίου ξεκινάει πρώτα με την εκτέλεση ερευνητικών γεωτρήσεων, ώστε να εντοπιστούν οι γεωλογικοί σχηματισμοί του υπεδάφους, το βάθος και η έκταση του ταμιευτήρα και να προσδιοριστούν οι θερμικές παράμετροι, ο χημισμός των ρευστών, τα ποσοτικά και ποιοτικά τους στοιχεία και οι υδραυλικές τους παράμετροι. Έπειτα εκτελούνται οι παραγωγικές γεωτρήσεις που έχουν σκοπό την αξιοποίηση των γεωθερμικών ρευστών μέσω της άντλησής τους. Συνήθως, μαζί με τις γεωτρήσεις παραγωγής εκτελούνται παράλληλα και γεωτρήσεις επανεισαγωγής των γεωθερμικών ρευστών στον ταμιευτήρα. Οι γεωτρήσεις αυτές βοηθούν στη διάθεση των γεωθερμικών αποβλήτων, στην αποφυγή φαινομένων καθίζησης, στη διατήρηση της βαθμίδας πίεσης (αποφυγή εισροής κρύου επιφανειακού νερού στον ταμιευτήρα), στην τροφοδοσία του με ρευστά και στην ανάκτηση της θερμότητας από τα πετρώματά του. Για τη διάνοιξη των γεωτρήσεων χρησιμοποιούνται συνήθως γεωτρώπανα (Ι.Καρυδάκης, 2005).

Για την αποτελεσματική μεταφορά της θερμότητας από τον ταμιευτήρα χρησιμοποιούνται συνήθως εναλλάκτες θερμότητας, όπου στο πρώτο κύκλωμα κυκλοφορεί το γεωθερμικό ρευστό και στο δεύτερο νερό καλής ποιότητας ή αέρας, που διοχετεύεται στους χώρους θέρμανσης. Οι εναλλάκτες θερμότητας χρησιμοποιούνται για την εναλλαγή της θερμότητας μεταξύ δύο ρευστών που διαχωρίζονται με ένα στερεό τοίχωμα (συνήθως μεταλλικό), ενώ η μετάδοσή της γίνεται με επαφή των ρευστών με την επιφάνεια θέρμανσης. Ο συνήθης τύπος γεωθερμικού εναλλάκτη αποτελείται από ένα σύστημα διπλής σωλήνωσης τοποθετημένης εντός της γέωτρησης, όπου κυκλοφορεί καθαρό νερό με φυσική ροή ή με τη βοήθεια αντλίας. Η χρήση αυτής της μεθόδου περιορίζεται συνήθως για θέρμανση οικιών και εμπορικών συγκροτημάτων, αλλά και για τη θέρμανση νερού οικιακής χρήσης (Ι.Καρυδάκης, 2005).

Τέλος, για την εκμετάλλευση ενός γεωθερμικού ταμιευτήρα απαιτείται ο προσδιορισμός δύο μοντέλων, του υδραυλικού και του θερμικού. Το πρώτο προσδιορίζεται με την κατανομή του φορτίου του ταμιευτήρα με τη βοήθεια της εξίσωσης της συνέχειας, ενώ το δεύτερο με τη χρήση εξισώσεων διατήρησης της ενέργειας που διέπουν το σύστημα.

1.1 Εκμετάλλευση αβαθούς γεωθερμίας

Αβαθής γεωθερμία ονομάζεται η ενέργεια που συγκεντρώνεται μόνιμα ή εποχικά στις επιφανειακές λιθογραφικές μάζες και δεν παρουσιάζει τιμή θερμοκρασίας μεγαλύτερη από τη μέση ετήσια του αέρα της κάθε περιοχής. Βασίζεται στην αρχή ότι κάτω από το βάθος των 5-6m μέσα στη γη η θερμοκρασία παραμένει σταθερή και ισούται με τη μέση ετήσια θερμοκρασία του περιβάλλοντος εξωτερικού χώρου. Στη χώρα μας αυτό σημαίνει ότι σε τέτοιο βάθος η θερμοκρασία βρίσκεται ανάμεσα στους 18-20°C. Συχνή εφαρμογή βρίσκει με τις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (ΓΑΘ) για οικιακή χρήση (Αμανατίδης).

Λόγω της θερμοχωρητικότητας του υπεδάφους η αποθηκευμένη ηλιακή ενέργεια, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση κατοικιών και γενικά κλειστών χώρων, όπου ζούμε και εργαζόμαστε. Η δυνατότητα αυτή έχει εξαιρετικό ενδιαφέρον, γιατί εξοικονομείται έτσι σημαντική ποσότητα καυσίμου για τη θέρμανση κατοικημένων χώρων προς όφελος της οικονομίας, αλλά και του περιβάλλοντος. Στην εύκρατη ζώνη η αξιοποίηση της αβαθούς γεωθερμίας έχει ακόμη μεγαλύτερη σημασία, διότι παρέχει τη δυνατότητα θέρμανσης το χειμώνα και ψύξης το καλοκαίρι. Εφαρμογές, λοιπόν, στην ελληνική επικράτεια παρουσιάζουν το πλεονέκτημα αξιοποίησής της σε όλη τη διάρκεια του έτους, και επειδή περίπου όση ενέργεια καταναλώνεται στην περίοδο της θέρμανσης αποδίδεται κατά την περίοδο της ψύξης, δεν υπάρχει ανάγκη αποκατάστασης ισορροπίας του αβαθούς γεωθερμικού πεδίου (ΠοσειδώνΕνεργειακή, 2007).

Η πηγή αυτή ενέργειας έχει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Είναι καθαρή και φιλική προς το περιβάλλον.
- Είναι διαθέσιμη σε οποιοδήποτε σημείο.
- Μπορεί να προσφέρει θέρμανση, ψύξη και ζεστό νερό χρήσης.

Οι μοναδικές επιπτώσεις της αβαθούς γεωθερμίας και των υπόγειων εναλλακτών (εφόσον έχουν σχεδιαστεί σωστά) είναι οι εξής:

- Μόνο προσωρινές οχλήσεις από τις τεχνικές εργασίες.
- Δεν παράγονται κανενός είδους ρύποι.
- Πλήρης αποκατάσταση τοπίου – Απουσία οποιασδήποτε εξωτερικής μονάδας. (ΠοσειδώνΕνεργειακή, 2007)

1.1.1 Συστήματα αξιοποίησης της Αβαθούς Γεωθερμίας

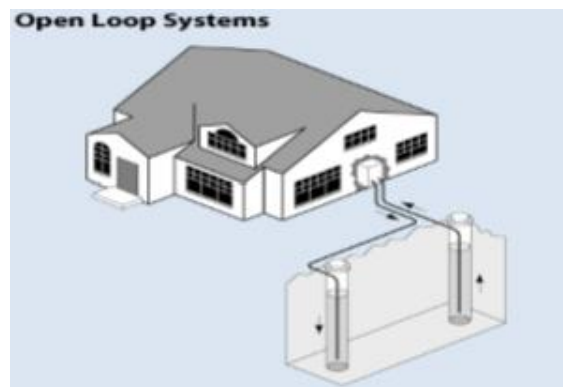
Η εκμετάλλευση της αβαθούς γεωθερμικής ενέργειας γίνεται με τη χρήση γεωθερμικών αντλιών θερμότητας - ΓΑΘ (Geothermal Heat Pumps, GHP). Οι αντλίες θερμότητας είναι ένα θερμοδυναμικό σύστημα εκτόνωσης και συμπίεσης ενός κατάλληλου ψυκτικού μέσου, που απορροφά (εξατμιζόμενο) θερμική ενέργεια από το γεωθερμικό ρευστό και τη μεταφέρει (συμπυκνούμενο) σε ένα άλλο μέσο (νερό ή αέρας). Για τη λειτουργία του συστήματος απαιτείται η χρήση ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο, ρευστά με θερμοκρασία μικρότερη των 35°C μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ψύξη και για θέρμανση. Το σύστημα μιας τυπικής αντλίας θερμότητας αποτελείται από τον εξατμιστή, το συμπιεστή, το συμπυκνωτή, τη βαλβίδα εκτόνωσης και τον κυκλοφορητή (Αβραμίδου, 2011).

Συνήθως χρησιμοποιούνται αντλίες θερμότητας νερού/νερού (water-to-water), οι οποίες παράγουν θερμό ή ψυχρό νερό και μπορούν να συνδυαστούν είτε με τερματικές μονάδες ανεμιστήρα/στοιχείου (fan-coil units) είτε με κεντρικές κλιματιστικές μονάδες (AHU). Χρησιμοποιούνται επίσης αντλίες θερμότητας νερού/αέρα (water-to-air), που παράγουν θερμό ή ψυχρό αέρα και συνδέονται απευθείας με δίκτυο αεραγωγών (ΠοσειδώνΕνεργειακή, 2007).

Τα συστήματα αβαθούς γεωθερμίας διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

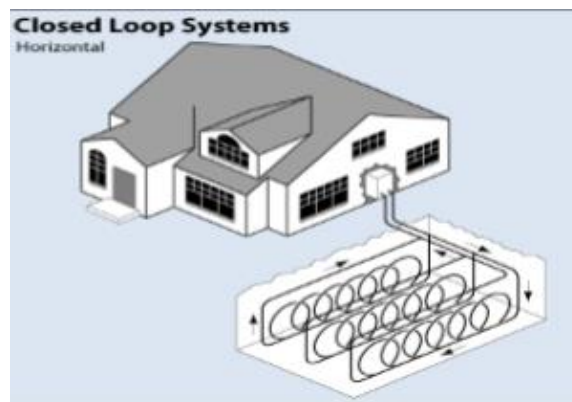
- στα συστήματα ανοικτού κύκλου (open loop) και
- στα συστήματα κλειστού κύκλου (closed loop)

Τα συστήματα ανοικτού κύκλου χρησιμοποιούν το νερό υδρογεωλογικών σχηματισμών της περιοχής εγκατάστασης για την τροφοδοσία του πρωτεύοντος κυκλώματος της αντλίας θερμότητας, το οποίο στη συνέχεια επαναπροωθείται στον υδροφόρο ορίζοντα της περιοχής (ΠοσειδώνΕνεργειακή, 2007).

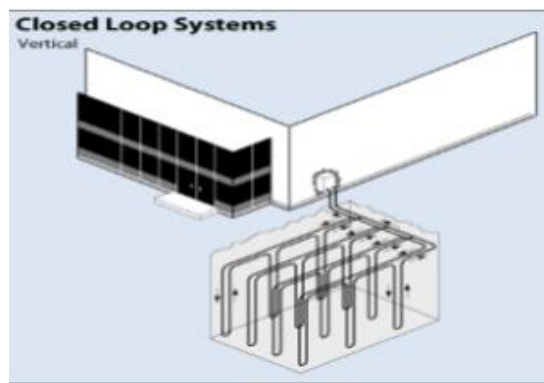


Εικόνα 1: Ανοιχτό σύστημα ΓΑΘ

Τα συστήματα κλειστού κύκλου αποτελούνται από ένα κλειστό δίκτυο σωληνώσεων, το οποίο βρίσκεται εγκαταστημένο στο έδαφος σε κάθετη ή οριζόντια διάταξη ή είναι ποντισμένο σε κάποιο επιφανειακό υδάτινο σώμα. Το δίκτυο σωληνώσεων στην περίπτωση αυτή ονομάζεται γεωεναλλάκτης, μέσα στον οποίο κυκλοφορεί νερό ή διάλυμα νερού/αντιπηκτικού ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας (ΠοσειδώνΕνεργειακή, 2007).



Εικόνα 2: Κλειστό οριζόντιο σύστημα ΓΑΘ



Εικόνα 3: Κλειστό κάθετο σύστημα ΓΑΘ

1.2 Προσομοίωση γεωθερμικών πεδίων

1.2.1 Υδρογεωλογικά ομοιώματα

Το "μοντέλο" αποτελεί ένα εξειδικευμένο μέσο έρευνας με το οποίο μπορούμε να προσεγγίσουμε ένα φυσικό φαινόμενο που μεταβάλλεται στο χώρο και το χρόνο (Καλλιώρας, 2015). Τα μοντέλα είναι χρήσιμα σε αναγνωριστικές μελέτες, σε μελέτες ερμηνείας και σε μελέτες πρόβλεψης (Mercer and Faust, 1980). Ένα εννοιολογικό μοντέλο ενός υδρογεωλογικού συστήματος απλοποιεί και συνοψίζει τι είναι γνωστό για την υδρογεωλογία με τη μορφή γραπτού κειμένου, διαγραμμάτων ροής, τομών, σχηματικών διαγραμμάτων και πινάκων. Ένα εννοιολογικό μοντέλο είναι μία έκφραση της παρελθοντικής και της παροντικής κατάστασης του συστήματος, βασισμένη σε δεδομένα πεδίου από την τοποθεσία, και γνώσεων που διατίθενται από παρόμοιες θέσεις. Ένα πιο ολοκληρωμένο υδρογεωλογικό μοντέλο είναι αυτό που αναπαριστά υδραυλικά φορτία στο χώρο και χρόνο σε μια απλοποιημένη αναπαράσταση των σύνθετων υδρογεωλογικών συνθηκών του υπεδάφους (Mary P.Anderson, 2015). Τα τρία κύρια χαρακτηριστικά τα οποία μετατρέπουν τα μοντέλα των υπόγειων νερών σε πολύ πρακτικά εργαλεία είναι (Prickett, 1979):

- η δυνατότητά τους να επιλύουν υπερβολικά σύνθετα προβλήματα ροής των υπόγειων νερών,
- η ευκολία διάθεσής τους σε οποιονδήποτε, που ασχολείται με τα υπόγεια νερά χωρίς κανένα περιορισμό,
- η δυνατότητα μεταβίβασης, με πολύ απλό τρόπο μέσω των Η/Υ, της εμπειρίας που έχει αποκτηθεί σε ένα ευρύ φάσμα ανθρώπων, συμβάλλοντας έτσι στην επίλυση των ιδιαίτερων προβλημάτων που αντιμετωπίζουν (Καλλιώρας, 2015).

Οι κυριότερες εφαρμογές των μοντέλων υπόγειων νερών, αφορούν στα παρακάτω (Oude Essink, 2000):

- Πρόβλεψη και προσομοίωση συγκεκριμένων μετρήσεων και υδρολογικών μεταβλητών,
- Σχεδιασμός και αποτίμηση διαφόρων σεναρίων και στρατηγικών,
- Βελτιστοποίηση της χρήσης των υδατικών πόρων (Καλλιώρας, 2015).

Σήμερα η εφαρμογή των διαφόρων μοντέλων δίνει λύσεις σε ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων όπως (Πεταλάς, 1997):

- στην προσομοίωση υδροφορέων για την αναγνώριση περιοχών εμπλουτισμού και εκφόρτισης νερού (Freeze et al., 1968),
- στη μελέτη της συμπεριφοράς των υδροφόρων συστημάτων για μεγάλα χρονικά διαστήματα κάτω από ρεαλιστικές συνθήκες εκμετάλλευσης, καθώς και κάτω από πιθανές μελλοντικές συνθήκες εκμετάλλευσης (Prickett et al., 1971),
- στη μελέτη της αλληλεπίδρασης των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και των ταμειυτήρων του υπόγειου νερού, καθώς και την αξιολόγηση της επίδρασης των υπόγειων υδροφορέων στη βασική ροή υδατορευμάτων (Stephenson et al., 1974),
- σε εδαφικές υποχωρήσεις (Narasimhan et al., 1979),
- στη μελέτη της θαλάσσιας διείσδυσης στους παράκτιους υδροφορείς (Voss, 1984),
- στην προσομοίωση μεταφοράς ρύπων στα υπόγεια νερά (Ackerer, 1988).

Η εφαρμογή των υδρογεωλογικών μοντέλων κατηγοριοποιείται ανάλογα με το είδος του υπό-εξέταση προβλήματος, για παράδειγμα αν αυτό είναι ποσοτικό ή ποιοτικό. Η ποσοτική ομοίωση, τα λεγόμενα υδραυλικά μοντέλα, αφορούν στη χρήση μαθηματικών εξισώσεων για την ανάλυση και ερμηνεία της ροής του υπόγειου νερού, όπως ο Νόμος του Darcy και η εξίσωση συνέχειας. Για την ανάπτυξη ομοιώματος ποιοτικών παραμέτρων, υπεισέρχεται η εφαρμογή της εξίσωσης μεταγωγής-διασποράς (advection-dispersion), για την προσομοίωση της μεταφοράς ρύπων, συμπεριλαμβάνοντας τις χημικές και φυσικές αντιδράσεις (Oude Essink, 2000). Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι τα ποιοτικά μοντέλα, ασχολούνται επίσης με την μεταφορά θερμότητας στο υδρογεωλογικό σύστημα με την εφαρμογή της εξίσωσης συναγωγής-διάχυσης (convection-diffusion) (Καλλιώρας, 2015).

1.2.2 Ταξινόμηση των μοντέλων

Κατά το παρελθόν, η συμπεριφορά της ροής του υπόγειου νερού, έχει μελετηθεί με τη χρήση φυσικών μοντέλων, αναλογικών μοντέλων όπως επίσης με αναλυτικές μεθόδους. Αφενός λόγω του ότι υπεισέρχονται σημαντικοί περιορισμοί στην εφαρμογή τους, και αφετέρου λόγω της ραγδαίας εξέλιξης της επιστήμης των ηλεκτρονικών υπολογιστών, η χρήση των φυσικών μοντέλων για την ομοίωση της ροής του υπόγειου νερού, σταδιακά ελαττώθηκε. Εντούτοις, μερικά μοντέλα αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα, για την ομοίωση της μεταφοράς ρυπαντών σε υδρογεωλογικά συστήματα.

Οι δυνατότητες που παρέχει η χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή, έχει σαν αποτέλεσμα την εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων στα πλαίσια μιας εμπειριστατωμένης ομοίωσης της ροής του υπόγειου νερού και της κίνησης των ρυπαντών μέσα σ' αυτό (Καλλιώρας, 2015).

1.2.2.1 Φυσικά μοντέλα

Τα φυσικά μοντέλα αποτελούν πανομοιότυπα αντίγραφα συστημάτων ροής υπόγειου νερού (συνήθως απλουστευμένες συνθήκες υδροφορίας), τα οποία λαμβάνουν χώρα σε εργαστηριακό περιβάλλον. Για παράδειγμα η στήλη εδάφους (soil column) και η δεξαμενή άμμου (sand tank) αποτελούν φυσικά μοντέλα. Ο Oude Essink (2000), αναφέρει ότι για την αλληλοσύνδεση του πρωτότυπου και του φυσικού μοντέλου χρησιμοποιούνται κλιμακωτές σχέσεις, όπως για παράδειγμα $U_{\xi} = \xi_m / \xi$, όπου U ο λόγος μεταξύ της παραμέτρου ξ_m του μοντέλου και της παραμέτρου ξ του πραγματικού υδροφόρου (Καλλιώρας, 2015).

1.2.2.2 Αναλογικά μοντέλα

Τα αναλογικά μοντέλα βασίζονται στο γεγονός ότι διάφορες φυσικές διαδικασίες υπόκεινται σε μαθηματικές εκφράσεις και νόμους οι οποίοι παρουσιάζουν ομοιότητες με αυτούς της ροής των υπόγειων νερών (Πίνακας 3.1). Παρ' όλα αυτά, τα αναλογικά μοντέλα περιορίζονται μόνο στις υδραυλικές παραμέτρους των υπόγειων νερών, και η χρήση τους δεν αφορά την ομοίωση της κίνησης των ρυπαντών του υπόγειου νερού (Oude Essink, 2000).

Πίνακας 1: Ομοιότητες μεταβλητών υπόγειου νερού με τον ηλεκτρισμό και τη θερμότητα

Μεταβλητή	Υπόγειο νερό	Ηλεκτρισμός	Θερμότητα
Δυναμικό	Φορτίο, ϕ [m]	Ηλεκτρική τάση, V[Volt]	Θερμοκρασία, T [°C]
Μεταφερόμενη ποσότητα	Παροχή νερού, $[m^3/s]$	Ηλεκτρικό φορτίο, [Coulomb]	Θερμότητα, [Calorie, Joule]
Φυσική ιδιότητα του μέσου	Υδραυλική αγωγιμότητα, k [m/s]	Ηλεκτρική αγωγιμότητα, σ [ohms/m]	Θερμική αγωγιμότητα, λ [Joule/(ms°C)]
Σχέση μεταξύ δυναμικού και πεδίου ροής	Νόμος του Darcy [m/s]: $q = -k \text{grad} \phi$	Νόμος του Ohm [Ampere/m ²]: $i = -\sigma \text{grad} V$	Νόμος του Fourier [Joule/(m ² s)]: $q = -\lambda \text{grad} T$
Αποθηκευμένη ποσότητα	Ειδική αποθηκευτικότητα υδροφόρου, S_s [1/m]	Χωρητικότητα πυκνωτή, C[microfarad]	Θερμική χωρητικότητα, c_v [Joule/(m ³ °C)]

Μερικά παραδείγματα αναλογικών μοντέλων:

Μοντέλο Hele Shaw

Η χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου περιορίζεται στην προσομοίωση χαμηλής ροής παχύρρευστου υγρού, διαμέσω στενού διαστήματος ανάμεσα σε δυο παράλληλες πλάκες. Εφαρμόζεται κυρίως για προβλήματα free-boundary, transient flow, όπως για παράδειγμα η έγχυση επεξεργασμένου νερού σε υδρογεωλογικό σύστημα υφάλμυρων νερών.

Ηλεκτρικό μοντέλο

Το ηλεκτρικό μοντέλο έγκειται στην αναλογία μεταξύ της κίνησης του υπόγειου νερού διαμέσου πορώδους μέσου (Νόμος του Darcy) και της κίνησης των ηλεκτρονίων σε αγωγίμο υλικό (Νόμος του Ohm). Οι ιδιότητες του υδροφόρου (π.χ. αγωγιμότητα, αποθηκευτικότητα, μεταβιβαστικότητα) προσομοιώνονται με αυτές ενός ηλεκτρονικού εξαρτήματος (π.χ. αντιστάτης, πυκνωτής).

Θερμικό μοντέλο

Το θερμικό μοντέλο βασίζεται στην ομοιότητα μεταξύ της θερμικής ροής σε ένα ομοιόμορφο σώμα και της ροής του υπόγειου νερού διαμέσω υδροφόρου (Καλλιώρας, 2015).

1.2.2.3 Μαθηματικά μοντέλα

Σε γενικές γραμμές τα μαθηματικά μοντέλα αποσκοπούν στην επίλυση υδρογεωλογικών προβλημάτων με τη χρήση (μερικώς) διαφορικών εξισώσεων (π.χ. ροή υπόγειου νερού εξαρτώμενη από την πυκνότητα, μεταφορά θερμότητας και ρυπαντών), καθώς επίσης και της γεωμετρίας του συστήματος, των οριακών συνθηκών και των αρχικών συνθηκών της μεταβατικής

διαδικασίας. Η χρήση των παραπάνω εξισώσεων συνοδεύεται από την εφαρμογή αναλυτικών ή αριθμητικών μεθόδων (Καλλιώρας, 2015).

1) Αναλυτικές μέθοδοι

Οι αναλυτικές μέθοδοι, αποτέλεσαν χρήσιμο εργαλείο στην επίλυση υδρογεωλογικών προβλημάτων στο παρελθόν. Η αποτελεσματικότητα της εφαρμογής τους περιορίζεται στο 20% περίπου του συνόλου των περιπτώσεων .

Μια τυπική εφαρμογή των αναλυτικών μεθόδων αποτελεί η επίλυση εξισώσεων άμεσα και συνεχόμενα στο χωροχρόνο, του πιεζομετρικού φορτίου ϕ και της παροχής Q του υπόγειου νερού. Οι Ogata et al. (1961), Shamir et al. (1966) και Kinzelbach (1986, 1987), κατέληξαν σε αναλυτική επίλυση της μονοδιάστατης ροής του υπόγειου νερού και της κίνησης των διαλυμένων ουσιών. Ο Bear (1972, 1979) παραθέτει διάφορες αναλυτικές μεθόδους για προβλήματα που αφορούν την υδροδυναμική διασπορά.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των αναλυτικών μεθόδων, κατά τον Essink (2000), αποτελεί το γεγονός ότι παρέχουν αποτελεσματική επίλυση διαφόρων φυσικών παραμέτρων του υδροφόρου όπως η μεταβιβασιμότητα και η αποθηκευτικότητα. Παρόλαυτά, η εφαρμογή τους περιορίζεται σε απλά και σχηματοποιημένα προβλήματα, όπως περιπτώσεις ομογενών υδροφόρων, μονοδιάστατης ή δισδιάστατης ροής, και διεπιφάνεια αλμυρού-γλυκού νερού σταθερής κατάστασης (Καλλιώρας, 2015).

2) Αριθμητικές μέθοδοι

Στην περίπτωση πολυσύνθετων υδρογεωλογικών φαινομένων (π.χ. ανομοιογενείς και ανισότροποι υδροφόροι, σχηματισμός επαλληλίας υδροφόρων με ημιπερατά στρώματα, ανομοιόμορφα δίκτυα παραγωγικών υδρογεωτρήσεων, παρουσία ποταμών και χειμάρρων κ.α.), το πρόβλημα περιπλέκεται τόσο ώστε η εφαρμογή αναλυτικής μεθόδου να εμφανίζεται ανεπαρκής. Στο σημείο αυτό κρίνεται αναγκαία η χρήση των αριθμητικών μεθόδων και κατ' επέκταση των ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Με τα αριθμητικά μοντέλα (Bear, 1979, Freeze, 1971, Freeze et al., 1979, Pinder et al., 1977, Remson et al., 1972) επιδιώκεται η προσομοίωση των φυσικών φαινομένων σε ένα σύστημα υπόγειων νερών, όπου αφού καθοριστούν όσο πιο αξιόπιστα γίνεται οι γεωλογικές και υδρογεωλογικές παράμετροι του υπό μελέτη πεδίου και προσδιορισθούν οι κύριες φυσικές διεργασίες που επικρατούν, στη συνέχεια επιλέγονται ανάλογα οι φυσικοί νόμοι που τις διέπουν και που εκφράζονται με μαθηματικό τρόπο μέσω των καταλλήλων διαφορικών εξισώσεων. Στη συνέχεια οι εξισώσεις αυτές, των οποίων η αναλυτική λύση είναι στην πλειονότητα των περιπτώσεων αδύνατη, επιλύονται με αριθμητικές μεθόδους.

Ο σκοπός των αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης είναι η μελέτη και η πρόγνωση της εξέλιξης σύνθετων φαινομένων σχετικών με τις υπόγειες ροές (π.χ. εκμετάλλευση και διαχείριση υπόγειων πόρων, προστασία από την υπαφυμύριση παράκτιων υδροφορέων, υποβιβασμός στάθμης για αποστράγγιση εδαφών, κλπ) (Καλλιώρας, 2015).

Η ανάγκη χρήσης αριθμητικών μεθόδων προσομοίωσης προκύπτει από την αδυναμία των αναλυτικών λύσεων να καλύψουν με αξιοπιστία τα πρακτικά προβλήματα των διαφόρων εφαρμογών. Ως τέτοιες περιπτώσεις μπορούν να αναφερθούν:

- η αδυναμία σύνταξης αναλυτικών λύσεων για τις γενικές μορφές των διαφορικών εξισώσεων ροής στους υπόγειους υδροφορείς, ιδίως για δισδιάστατα και τρισδιάστατα προβλήματα,

- η αδυναμία περιγραφής πεδίων ροής με σύνθετη ή ακανόνιστη γεωμετρία ορίων,
- η δυσκολία επίλυσης προβλημάτων που έχουν σχέση με την έντονη ετερογένεια των παραμέτρων, τη λειτουργία συστημάτων πηγαδιών κ.λ.π (Καλλιώρας, 2015).

Οι μερικές διαφορικές εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να περιγράψουν ένα μεγάλο αριθμό προβλημάτων στην υδρολογία των υπόγειων νερών. Μόνο ένα απλοποιημένο υποσύνολο των γενικών εξισώσεων μπορεί να λυθεί με αναλυτικές μεθόδους και αυτό συχνά περιγράφει εξιδανικευμένες καταστάσεις με περιορισμένη εφαρμογή. Για το λόγο αυτό οι αριθμητικές λύσεις αυτών των εξισώσεων με τη χρησιμοποίηση ψηφιακών υπολογιστών υψηλής ταχύτητας προσφέρουν μια λογική εναλλακτική μέθοδο (Faust and Mercer, 1980). Με τη βοήθεια των αριθμητικών μεθόδων επιλύονται οι διαφορικές εξισώσεις ροής σύμφωνα με την εξής διαδικασία:

- διακριτοποίηση του πεδίου μελέτης,
- μετατροπή των διαφορικών εξισώσεων σε αλγεβρικές εξισώσεις πεπερασμένων διαφορών,
- επίλυση του συστήματος των αλγεβρικών εξισώσεων με τη βοήθεια Η/Υ (Καλλιώρας, 2015).

Οι αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης διαφορικών εξισώσεων διακρίνονται σε τρεις κύριες κατηγορίες:

2α. Μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (finite difference method) (Bear et al., 1987, Franz et al., 1990, Huyakorn et al., 1983, Λατινόπουλος, 1995, Leahy, 1982, Mc Donald et al., 1988, Prickett et al., 1971).

Στη μέθοδο αυτή η διακριτοποίηση του χώρου μελέτης γίνεται σε πλέγμα ορθογωνικής μορφής και η επίλυση των εξισώσεων γίνεται επάνω στα σημεία του πλέγματος. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται με επιτυχία σε προβλήματα δύο ή και τριών διαστάσεων. Γενικά όμως δε θεωρείται η καλύτερη λόγω της δέσμησης που θέλει τον κανάβο να είναι ορθογωνικής μορφής, αλλά και της δυσκολίας, σε ορισμένες περιπτώσεις, στην ακριβή αριθμητική διακριτοποίηση των εξισώσεων. Σε ό,τι αφορά την αριθμητική τεχνική που χρησιμοποιείται, η μέθοδος είναι η πιο απλή, κατανοητή και από υπολογιστική άποψη, άμεσα εφαρμόσιμη (Καλλιώρας, 2015).

2β. Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite element method) (Huyakorn et al., 1983, Istok, 1989, Kinzelbach, 1986, Λατινόπουλος, 1995, Townley, 1980, Townley et al., 1980, Wilson et al., 1979, Zienkiewicz, 1977).

Κατά τη μέθοδο αυτή, το πεδίο εφαρμογής αντιμετωπίζεται σαν σύνολο υποπεριοχών (πεπερασμένα στοιχεία). Οι εξισώσεις επιλύονται στο εσωτερικό κάθε στοιχείου με τη βοήθεια του λογισμού των διαφορών ή με τη μέθοδο των σταθμισμένων υπολοίπων. Στη συνέχεια η σύνθεση των επιμέρους στοιχείων οδηγεί στο αλγεβρικό πρόβλημα.

Τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου που την καθιστούν πολύ εύχρηστη και ιδιαίτερα αποτελεσματική, είναι ότι:

- αναπαριστάνονται, με φυσικό τρόπο, τα ακανόνιστα γεωμετρικά όρια των πεδίων και οι οριακές συνθήκες,
- προσομοιώνονται η ακρίβεια, η ετερογένεια και η ανισοτροπία των πεδίων ροής,
- προσομοιώνονται με ακρίβεια ειδικές περιοχές όπου υπάρχουν ή αναμένονται έντονες μεταβολές του φορτίου αφού είναι πολύ εύκολη η τοπική μόνο πύκνωση των σημείων του κανάβου.

Η μέθοδος εφαρμόζεται με επιτυχία τόσο σε διδιάστατα όσο και σε τριδιάστατα προβλήματα. Ειδικά στα διδιάστατα προβλήματα, το πεδίο ροής μπορεί να είναι είτε οριζόντιο είτε κατακόρυφη τομή και κατά συνέπεια καλύπτεται όλο το φάσμα των πρακτικών εφαρμογών, ενώ επιτρέπει μια σημαντικά πιο ευέλικτη διακριτοποίηση του πεδίου και των ορίων του, σε σύγκριση με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Μειονεκτήματα της μεθόδου είναι η πολυπλοκότητα των τελικών αλγορίθμων και η δυσκολία προγραμματισμού (Καλλιώρας, 2015).

2γ. Μέθοδος των οριακών στοιχείων (boundary element method) (Latinopoulos, 1986, Λατινόπουλος, 1995, Latinopoulos et al., 1991, Liggett et al., 1983).

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου σε σχέση με τις μεθόδους πεδίου, όπως χαρακτηρίζονται οι μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων, είναι:

- η μεγάλη ακρίβεια των αποτελεσμάτων στο εσωτερικό του πεδίου,
- η χαρακτηριστική απλότητα εισαγωγής δεδομένων του φυσικού προβλήματος,
- το μικρό μέγεθος των συστημάτων αλγεβρικών εξισώσεων που προκύπτουν από τη διακριτοποίηση των διαφορικών εξισώσεων.

Στα μειονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνονται η δυσκολία περιγραφής έντονα ετερογενών πεδίων και η έλλειψη απλότητας στην επίλυση μη μόνιμων ροών. Τελικά, η μέθοδος είναι ιδιαίτερα εύχρηστη σε ειδικές κατηγορίες προβλημάτων και ιδιαίτερα όταν λειτουργούν συστήματα πηγαδιών. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η μείωση των διαστάσεων του προβλήματος κατά μια (π.χ. ένα δισδιάστατο πρόβλημα λύνεται σαν μονοδιάστατο). Η μέθοδος αποτελεί την καλύτερη επιλογή σε περιπτώσεις μόνιμων φαινομένων σε υδροφορείς που οι υδρογεωλογικές παράμετροι παρουσιάζουν ομοιογένεια σε μεγάλες εκτάσεις (Καλλιώρας, 2015).

Παρά την τεράστια εξέλιξη στην υπολογιστική διαδικασία και στις τεχνικές των πεπερασμένων διαφορών και στοιχείων (Anderson, 1986, Boutwell et al., 1986, Buxton, 1989, Marsily, 1986, Moore, 1979, Walton, 1985, Walton, 1991, Wang et al., 1982) και τη δυνατότητα παραγωγής υψηλής ευκρίνειας δεδομένων πεδίου, έτσι ώστε ο ενδιαφερόμενος να είναι ικανός να αντιμετωπίσει σύνθετα προβλήματα της ροής των υπόγειων νερών, είναι ανάγκη να εξελιχθεί η έρευνα στο πεδίο των αριθμητικών μεθόδων και να συμπεριλάβει (Narasimhan, 1982):

- την εισαγωγή της άλγεβρας των πιθανολογικών κατανομών μέσα στα υπάρχοντα ντετερμινιστικά μοντέλα και
- την ανάπτυξη νέων τεχνικών οι οποίες θα επιβεβαιώνουν από τη δική τους σκοπιά την εγκυρότητα των αριθμητικών μοντέλων (Καλλιώρας, 2015).

Τα αριθμητικά μοντέλα, με βάση τη χρήση τους, διακρίνονται σε μοντέλα (Ράππη, 1995):

- πρόβλεψης, που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της εξέλιξης ενός υδροφόρου συστήματος στο χρόνο και απαιτούνται συχνές μετρήσεις για τη διόρθωσή του (Andersen et al., 1984, Gerharst et al., 1988, Karanjac et al., 1977),
- ερμηνείας, που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή και μελέτη της υδροδυναμικής κατάστασης ενός συστήματος, καθώς και για την οργάνωση των δεδομένων υπαίθρου (Jamieson et al., 1983, Krabbenhoft et al., 1986, Remson et al., 1980, Stephens, 1983),
- ανάλυσης, που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των υπόγειων ροών σε συγκεκριμένα υδρογεωλογικά συστήματα (Carsel et al., 1988, Hensel et al., 1990, Winter, 1976).

Για την εφαρμογή ενός αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης των υπόγειων νερών ακολουθούνται τα στάδια (Anderson et al., 1992, National Research Council, 1990, Ράπτη, 1995):

1. καθορισμός του σκοπού εφαρμογής του μοντέλου,
2. προσδιορισμός του εννοιολογικού μοντέλου, που αναφέρεται στον καθορισμό, με βάση τα δεδομένα υπαίθρου, των υδρογεωλογικών ενοτήτων, του τύπου των υδροφόρων στρωμάτων, των υδραυλικών παραμέτρων, των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του υδροφορέα, των οριακών συνθηκών,
3. επιλογή της κυρίαρχης εξίσωσης και του υπολογιστικού προγράμματος,
4. σχεδιασμός του μοντέλου, που περιλαμβάνει το σχεδιασμό του κανάβου, την επιλογή των βημάτων χρόνου, τον προσδιορισμό των αρχικών και οριακών συνθηκών και την εισαγωγή στον αριθμητικό κώδικα των υδρολογικών δεδομένων και υδρογεωλογικών παραμέτρων,
5. ρύθμιση του μοντέλου, με την οποία γίνεται επεξεργασία των δεδομένων υπαίθρου που έχουν εισαχθεί στον αριθμητικό κώδικα, ενώ χρησιμοποιούνται κυρίως δύο τεχνικές: (i) η τεχνική δοκιμής και σφάλματος που αποτελεί μια διαδικασία επαναληπτικού τύπου με διαδοχικές τροποποιήσεις των παραμέτρων του μοντέλου και κατά περίπτωση και των αρχικών συνθηκών μετά από κάθε επίλυση του προγράμματος (Freyberg, 1988, Maclay et al., 1988, Peters, 1987), (ii) η αυτόματη αντιστροφή με τη χρησιμοποίηση των μοντέλων αντιστροφής που μπορούν να προσδιορίσουν και τροποποιήσουν τις υδραυλικές παραμέτρους με αυτόματες διαδικασίες (Carrera, 1988, Carrera et al., 1986a, Cooley et al., 1990, Peck et al., 1988),
6. επαλήθευση του μοντέλου, όπου προσδιορίζεται η δυνατότητα του μοντέλου να προσομοιάσει την υδροδυναμική κατάσταση του συστήματος μελέτης,
7. εφαρμογή του μοντέλου, με σκοπό την ερμηνεία και την πρόβλεψη της εξέλιξης του συστήματος στο χρόνο και στο χώρο ή την ανάλυση των υπόγειων ροών στην περιοχή μελέτης,
8. παρουσίαση των αποτελεσμάτων (Καλλιώρας, 2015).

Παρότι τα διαθέσιμα λογισμικά (software) των υδρογεωλογικών μοντέλων είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα, στην πράξη συχνά αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της σωστής και επαρκούς ενημέρωσής τους μέχρι και της ελεύθερης διάθεσής τους. Επίσης τα αριθμητικά υδρογεωλογικά μοντέλα, παρόλο ότι είναι κατασκευασμένα να επιλύουν το πρόβλημα για το οποίο σχεδιάστηκαν, μερικές φορές αποβαίνουν όχι τόσο φιλικά προς το χρήστη. Τέλος υπάρχει και η δυσκολία μερικών από αυτά που σχεδιάστηκαν για ειδικούς τύπους Η/Υ της προσαρμογής και εφαρμογής τους σε νέο περιβάλλον με νέα κατά περίπτωση δεδομένα με αποτέλεσμα να προκύπτει η ανάγκη για το χρήστη να δημιουργεί από την αρχή νέο αριθμητικό μοντέλο. Παρ' όλες τις προηγούμενες δυσκολίες, τα αριθμητικά μοντέλα, όταν συνδυάζονται σωστά με την ανάλογη γεωλογική έρευνα και υδρολογική ανάλυση, αποτελούν δυνατά "εργαλεία" στα χέρια του ερευνητή – μελετητή (Guymon, 1985).

Σε εφαρμογές τεχνητού εμπλουτισμού υδροφορέων χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά τα αριθμητικά μοντέλα (Alaa et al., 1995, Brothers et al., 1995, Marino, 1975, McDonald et al., 1988, Phraner, 1991, Stefanescu et al., 1996., Trescott, 1976, Wright et al., 1996). Ο βαθμός της σωστής εκτίμησης της υδραυλικής φόρτισης κατά την εφαρμογή του T.E., με τη βοήθεια των αριθμητικών μεθόδων, εξαρτάται κατά πρώτον από τη σωστή "εννοιολογική" (με τη σημασία που δόθηκε στον όρο από τις προηγούμενες παραγράφους) σύλληψη του προβλήματος και κατά δεύτερον από την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου. Τα αριθμητικά μοντέλα, με την

προσαρμοστικότητα και την αξιοπιστία τους, είτε χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας είτε σε μικρότερης έκτασης έρευνες, αποτελούν εξαιρετικής χρησιμότητας μέσα πρόβλεψης. Τα μοντέλα αυτά έχουν ήδη και συνεχίζουν να συμβάλουν ουσιαστικά και αποτελεσματικά στο σχεδιασμό και την υλοποίηση μεγάλων εφαρμογών Τ.Ε. (Oaksford, 1985).

Εδώ μπορούν να αναφερθούν κάποια παραδείγματα από τις περίπλοκες υδρολογικές συνθήκες που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της εφαρμογής κάποιων κατά περίπτωση τύπων Τ.Ε., όπως (Appel, 1976, Asano, 1985, Oaksford, 1985, Trewweek, 1985):

- συνθήκες ροής σε φρεάτιους υδροφόρους με σχετικά μεγάλες μεταβολές στην κορεσμένη ζώνη,
- συνθήκες ροής σε μερικώς κορεσμένα συστήματα, όπου πέρα από μοντέλα υπόγειας ροής έχουμε συνδυασμό ανάλογων μοντέλων επιφανειακής υδρολογίας (βροχοπτώσεις- απορροές) και εδαφικής υγρασίας,
- συνθήκες ροής σε περίπλοκα συνδυασμένα συστήματα υπόγειου - επιφανειακού νερού,
- αλληλεπίδραση υδρολογικών και οικονομικών παραγόντων,
- μεταφορά ρυπαντών στον υδροφόρο (Καλλιώρας, 2015).

1.2.3 Σκοπός της προσομοίωσης

Η αρχή για κάθε εφαρμογή υπόγειας προσομοίωσης υπόγειων νερών είναι να αναγνωρίσουμε το σκοπό του μοντέλου. Ο πιο συνηθισμένος σκοπός είναι η πρόγνωση των επιδράσεων μιας μελλοντικής δράσης ή υδρογεωλογικής συνθήκης, αλλά τα μοντέλα συνηθίζεται επίσης να χρησιμοποιούνται για να αναπαράξουν προηγούμενες συνθήκες (hindcasting) και ως ερμηνευτικά εργαλεία. Οι Reilly και Harbaugh (2004) προσδιορίζουν πέντε ευρείς κατηγορίες προβλημάτων για την προσομοίωση υπόγειων υδάτων: τη βασική κατανόηση των υπόγειων υδροφόρων συστημάτων, την εκτίμηση των ιδιοτήτων του υδροφορέα, την κατανόηση του παρόντος, την κατανόηση του παρελθόντος και την πρόγνωση του μέλλοντος. Κατατάσσουμε τις τρεις πρώτες κατηγορίες στα ερμηνευτικά μοντέλα και τις δύο τελευταίες στα μοντέλα πρόγνωσης (Mary P.Anderson, 2015).

Μοντέλα πρόγνωσης

Το αντικείμενο της πλειοψηφίας των μοντέλων που εξετάζουμε είναι η πρόβλεψη ή η πρόγνωση μιας προτεινόμενης πράξης/αδράνειας. Προτιμάται ο όρος πρόγνωση (forecast) κι όχι η πρόβλεψη (prediction) για να δοθεί έμφαση στο ότι η πρόγνωση πάντα εμπεριέχει κάποια αβεβαιότητα. Για παράδειγμα, μια πρόγνωση καιρού συνοδεύεται πάντα με όρους πιθανότητας (για παράδειγμα βροχής). Στο θέμα που εξετάζουμε τώρα, οι παράμετροι προσαρμόζονται μέσα σε αποδεκτά όρια μέχρι τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης, κυρίως τα φορτία και η ροή, δώσουν μια ικανοποιητική αντιστοιχία στις παρατηρούμενες τιμές του πεδίου. Το ρυθμισμένο μοντέλο έπειτα χρησιμοποιείται ως μοντέλο-βάση για προσομοιώσεις πρόγνωσης (Mary P.Anderson, 2015).

Τα μοντέλα 'εκ των υστέρων' (hindcasting) χρησιμοποιούνται για να αναπαράγουν παρελθοντικές συνθήκες-καταστάσεις. Μπορεί να εμπεριέχουν και ένα μοντέλο ροής υπόγειου νερού και ένα μοντέλο μεταφοράς της ρύπανσης για να προσομοιώσουν την κίνηση ενός ρυπαντικού φορτίου. Οι εφαρμογές 'εκ των υστέρων' αποτελούν «μοναδική πρόκληση» (Clement, 2011) επειδή δεν

είναι εφικτό να γίνει συλλογή πρόσθετων παρατηρήσεων ώστε να αυξηθεί η υπάρχουσα βάση δεδομένων, που είναι συνήθως περιορισμένη (Mary P.Anderson, 2015).

Ερμηνευτικά μοντέλα

Τα ερμηνευτικά μοντέλα αποτελούνται από αυτά που χρησιμοποιούνται ως: (1) αριθμομηχανές μηχανικής που δίνουν γρήγορα μια απάντηση σε ένα πρόβλημα που αφορά τη μηχανική, (2) μοντέλα διαλογής που βοηθάνε τον επιστήμονα να διαμορφώσει μια αρχική κατανόηση του υπόγειου συστήματος ρευστών και/ή να δοκιμάσει κάποιες υποθέσεις για αυτό, (3) γενικά μοντέλα που ερευνούν διαδικασίες για γενικότερες υδρογεωλογικές ρυθμίσεις. Τα πρώτα και τα τελευταία συνήθως δε βαθμονομούνται, ενώ τα δεύτερα μπορεί και να βαθμονομούνται, μπορεί και όχι (Mary P.Anderson, 2015).

Ένα παράδειγμα εφαρμογής ενός ερμηνευτικού μοντέλου που χρησιμοποιείται ως αριθμομηχανή μηχανικής είναι η χρήση αναλυτικών και αριθμητικών μοντέλων για να προσδιοριστούν οι παράμετροι ενός υδροφόρου από δεδομένα που έχουν ληφθεί από μια ερευνητική γεώτρηση άντλησης. Τα αναλυτικά μοντέλα και ορισμένες φορές τα αριθμητικά μοντέλα χρησιμοποιούνται ως αριθμομηχανές μηχανικής για να επικυρώσουν νέους κώδικες (Mary P.Anderson, 2015).

Ένα μοντέλο διαλογής μπορεί να βοηθήσει στο σχεδιασμό ενός πιο πολύπλοκου αριθμητικού μοντέλου. Για παράδειγμα, οι Hunt et al. (1998) διαμόρφωσαν ένα διδιάστατο μοντέλο αναλυτικών στοιχείων ως ένα μοντέλο διαλογής για να διαμορφώσει οριακές συνθήκες για ένα τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων διαφορών. Τα ερμηνευτικά μοντέλα επίσης χρησιμοποιούνται για να γίνει αναπαράσταση της δυναμικής του συστήματος. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια μίας μεγάλης πετρελαιοκηλίδας, προερχόμενης από την αστοχία μίας γεώτρησης στον Κόλπο του Μεξικού (2011), αναπτύχθηκε ερμηνευτικό μοντέλο βασισμένο στον κώδικα MODFLOW (που υιοθετήθηκε για να γίνει προσομοίωση της ροής σε έναν ταμιευτήρα πετρελαίου) για να διερευνηθεί το ενδεχόμενο ρύπανσης από αστοχίες κατά την ανόρυξη σχετικών γεωτρήσεων. Τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για τη λήψη απόφασης να μην πραγματοποιηθεί σωλήνωση της γεώτρησης για να μειωθεί η πίεση του ταμιευτήρα, που αποδείχτηκε ότι ήταν η σωστή δράση (Mary P.Anderson, 2015).

Τα γενικά μοντέλα είναι ερμηνευτικά μοντέλα που εφαρμόζονται για να εξιδανικεύονται τα υπόγεια υδατικά συστήματα. Τα γενικά μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν στις απαρχές των αριθμητικών μοντέλων της υπόγειας ροής και συνεχίζουν να είναι χρήσιμα. Για παράδειγμα, οι Freeze και Witherspoon (1967) και οι Zlotnik et al.(2011) χρησιμοποίησαν διδιάστατα γενικά μοντέλα για να μελετήσουν τις επιδράσεις της ετερογένειας σε περιφερειακή υπόγεια ροή σε διατομές. Οι Woessner (2000) και Sawyer et al (2012) χρησιμοποίησαν γενικά μοντέλα για να μελετήσουν την ανταλλαγή μεταξύ υπόγειας ροής και ρεμάτων τον υδροφόρο (Mary P.Anderson, 2015).

1.2.4 Βελτιστοποίηση

Βελτιστοποίηση (optimization) είναι η διαδικασία που αποσκοπεί στον προσδιορισμό της βέλτιστης δυνατής λύσης, δηλαδή της λύσης που καθορίζεται με βάση κάποιο κριτήριο και υπακούει σε διάφορους περιορισμούς. Το κριτήριο αυτό εκφράζεται με κάποια μαθηματική συνάρτηση (*αντικειμενική συνάρτηση*), ώστε να εκφράζει ακριβώς το φυσικό πρόβλημα. Η βέλτιστη λύση προφανώς είναι η λύση που ικανοποιεί τόσο τις συνθήκες του φυσικού προβλήματος όσο και τον σκοπό που έχει τεθεί (Βουδούρης, 2017).

Η εύρεση βέλτιστης λύσης γίνεται με τις κατάλληλες μεθόδους, ανάλογα με τη μορφή που έχουν οι εξισώσεις της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών. Οι μέθοδοι αυτές είναι (Βουδούρης, 2017):

α) Μέθοδος γραμμικού προγραμματισμού

Τα προβλήματα διαχείρισης, στα οποία η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί είναι γραμμικές συναρτήσεις των **μεταβλητών απόφασης** (εισερχόμενα του υδροφορέα) αναφέρονται ως προβλήματα **γραμμικού προγραμματισμού** (linear programming). Οι γενικές εξισώσεις των προβλημάτων αυτών εκφράζονται ως εξής:

Να μεγιστοποιηθεί ή ελαχιστοποιηθεί το

$$\sum_{j=1}^n C_j X_j$$

με συνθήκες περιορισμού:

$$\sum_{j=1}^n a_{i,j} x_j \leq b_i \quad \text{για } i = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$x_j \geq 0 \quad \text{για } j = 1, 2, 3, \dots, n$$

όπου:

C_j = συντελεστής της αντικειμενικής συνάρτησης,

$a_{i,j}$ = συντελεστής των περιοριστικών σχέσεων,

b_i = σταθερά.

Η μέθοδος του γραμμικού προγραμματισμού μπορεί να δώσει βέλτιστες λύσεις κατά το σχεδιασμό των υδατικών συστημάτων, με την προϋπόθεση ότι αυτά μπορεί να παρασταθούν με μαθηματική ακρίβεια και αυστηρότητα. Σήμερα χρησιμοποιείται ευρύτατα η μέθοδος **Simplex** για την επίλυση προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού, κατά την οποία ξεκινώντας από μια αρχική λύση εξετάζονται οι συνδυασμοί εκείνοι των μεταβλητών απόφασης που οδηγούν σε καλύτερη λύση.

β) Μέθοδος μη γραμμικού προγραμματισμού – Δυναμικού προγραμματισμού

Μη γραμμικό μοντέλο (nonlinear model) λέγεται εκείνο στο οποίο είτε η αντικειμενική συνάρτηση είτε κάποιος από τους περιορισμούς δεν είναι γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών απόφασης. Μη γραμμικά μοντέλα χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις που οι απλουστεύσεις από τη γραμμικοποίηση οδηγούν σε ανακριβή συμπεράσματα.

Για την επίλυση προβλημάτων μη γραμμικού προγραμματισμού έχουν προταθεί πολλές μέθοδοι (Lagrange, Newton, Rosenbrock κ.ά.), χωρίς καμία να καθιερωθεί ως γενική μέθοδος επίλυσης. Αυτό κυρίως οφείλεται στην πολυπλοκότητα των εξισώσεων. Το πρόγραμμα **MINOS** (Murtagh and Saunders, 1987) επιλύει προβλήματα μη γραμμικού προγραμματισμού και έχει εφαρμοστεί από το Θεοδοσίου (1994) για τη λειτουργία του υδροφορέα των Κοκκινοχωριών (Κύπρος).

Ο **δυναμικός προγραμματισμός** (dynamic programming) αποτελεί μια ειδική περίπτωση του μη γραμμικού προγραμματισμού. Σε αντίθεση με το μη γραμμικό προγραμματισμό δεν υπάρχει μια τυποποιημένη μαθηματική διαμόρφωση του προβλήματος. Έτσι, χωρίς τα μειονεκτήματα του γραμμικού προγραμματισμού που αφορούν τις απλουστεύσεις για την κατάστρωση των

γραμμικών σχέσεων, ο δυναμικός προγραμματισμός ενδείκνυται σε σύνθετα προβλήματα και ιδιαίτερα σε αυτά που σχετίζονται με χρονικό προγραμματισμό.

Ένα πρόβλημα δυναμικού προγραμματισμού μπορεί να θεωρηθεί ως μια ακολουθία προβλημάτων απόφασης, των οποίων οι λύσεις συνθέτουν η μια μετά την άλλη τη ζητούμενη βέλτιστη λύση. Οι συγκεκριμένες εξισώσεις που χρησιμοποιούνται πρέπει να προσαρμόζονται σε κάθε συγκεκριμένο υδατικό σύστημα. Αυτό απαιτεί κάποιο βαθμό διορατικότητας και εμπειρίας, ώστε να αναγνωρίζεται τότε ένα πρόβλημα μπορεί να λυθεί με διαδικασίες δυναμικού προγραμματισμού και πώς γίνεται αυτό. Οι γενικές σχέσεις στο δυναμικό προγραμματισμό περιγράφονται ως εξής:

Να μεγιστοποιηθεί το

$$\sum_{j=1}^n f_j(x_j)$$

με συνθήκες περιορισμού:

$$\sum_{j=1}^n g_j(x_j) \leq b$$

Στις ανωτέρω σχέσεις οι όροι είναι συναρτήσεις των μεταβλητών απόφασης, αντί των απλών σχέσεων αναλογίας που ισχύουν στο γραμμικό προγραμματισμό. Αυτό αποτελεί και το μειονέκτημα των προβλημάτων δυναμικού προγραμματισμού, γιατί περιορίζει τη δυνατότητα χειρισμού μεγάλου αριθμού μεταβλητών απόφασης.

Στις τεχνικές διαχείρισης υδατικών πόρων περιλαμβάνονται και διάφορες εμπειρικές προσεγγίσεις, καθώς και η πολυκριτηριακή ανάλυση. Στην πολυκριτηριακή ανάλυση γίνεται αξιολόγηση διάφορων σεναρίων στα οποία η βελτίωση ενός κριτηρίου (π.χ. οικονομικού) μπορεί να υποβαθμίσει κάποιο άλλο (π.χ. περιβαλλοντικό).

Το **MODMAN** (MODflow MANagement) είναι ένα διαχειριστικό μοντέλο που συνδέει το MODFLOW με το πρόγραμμα βελτιστοποίησης LINDO (επιλύει γραμμικά και μη γραμμικά προβλήματα προγραμματισμού). Έχει εφαρμοστεί από τους Τζιμόπουλο και Μπάλλα (2005) στην περιοχή Ελασσόνας – Πυθίου (νομός Λάρισας).

γ) Μέθοδος αλγορίθμων μικτού ακέραιου προγραμματισμού

Πρόκειται για εξειδικευμένη περίπτωση γραμμικού προγραμματισμού. Όταν οι μεταβλητές είναι της μορφής 0 ή 1, αντιπροσωπεύοντας το ΝΑΙ ή ΟΧΙ, το να ΓΙΝΕΙ ή να ΜΗ ΓΙΝΕΙ, ονομάζονται προβλήματα 0-1 μικτού ακέραιου προγραμματισμού.

Στις μεθόδους επίλυσης των ανωτέρω προβλημάτων γίνονται συνδυασμοί ακέραιων τιμών μεταξύ των μεταβλητών, μέχρις ότου επιτευχθεί μια αποδεκτή και όχι κατ' ανάγκη βέλτιστη λύση. Αυτό σημαίνει ότι αυτός που παίρνει την απόφαση είναι διατεθειμένος να αποδεχθεί μια τέτοια λύση, αν η βέλτιστη απαιτεί μεγάλο χρόνο για τον υπολογισμό της.

Για την εφαρμογή του μικτού ακέραιου προγραμματισμού στην επίλυση προβλημάτων διαχείρισης υδατικών πόρων, αρχικά απαιτείται κάποιος μικρός σχετικά αριθμός μεταβλητών (παροχές αγωγών, απόφαση αν θα προταθούν έργα αποθήκευσης νερού, χωρητικότητα των έργων κ.λπ.).

Προχωρημένες μέθοδοι βελτιστοποίησης είναι: οι γενετικοί αλγόριθμοι (genetic algorithms) και εξελικτικός προγραμματισμός (evolutionary programming). Οι **γενετικοί αλγόριθμοι** κάνουν αναζήτηση σε πολλά σημεία ταυτόχρονα, χρησιμοποιώντας μόνο την αντικειμενική συνάρτηση και καμία επιπρόσθετη πληροφορία (Μιμίκου, 2007). Τα πλεονεκτήματά τους είναι ότι επιλύουν δύσκολα προβλήματα γρήγορα και αξιόπιστα, μπορούν να συνδεθούν με υπάρχοντα μοντέλα και είναι ευέλικτοι και εύκολα επεκτάσιμοι. Εφαρμογή των γενετικών αλγορίθμων έγινε από την Αρβανιτίδου (2014) για την προσομοίωση του παράκτιου υπόγειου υδροφορέα της Επανομής, σε συνδυασμό με άλλα υδροδυναμικά μοντέλα.

Τέλος, έχουν αναπτυχθεί **Συστήματα Υποστήριξης Λήψης Αποφάσεων** (Decision Support System, DSS) για να συμβάλλουν στη βιώσιμη ανάπτυξη του αγροτικού τομέα και τη διαχείριση των υπόγειων νερών (Manos et al., 2010). Τα συστήματα αυτά βασίζονται σε ένα πολυκριτηριακό μαθηματικό προγραμματισμό και μπορεί να πετύχουν τη βέλτιστη αγροτική παραγωγή συνδυάζοντας διαφορετικά κριτήρια υπό διάφορες προϋποθέσεις που αφορούν: το είδος τη καλλιέργειας, το κόστος, τη διαθεσιμότητα και την ποιότητα του νερού, την προστασία του περιβάλλοντος κ.λπ.

1.2.5 Περιορισμοί των μοντέλων

Τα μοντέλα υπόγειας ροής μερού είναι απλοποιήσεις της πραγματικότητας, οπότε περιορίζονται από απλοποιημένες προσεγγίσεις, όπως επίσης και από τη μη μοναδικότητα (nonuniqueness) και την αβεβαιότητα. Τα μοντέλα αυτά που αναπαριστούν το φυσικό κόσμο έχουν ένα επίπεδο αβεβαιότητας το οποίο πρέπει να εκτιμηθεί και να γίνει αναφορά του. Με αυτό το σκεπτικό, οι προσομοιώσεις πρόγνωσης για την υπόγεια ροή μοιάζει με την πρόγνωση καιρού (Mary P. Anderson, 2015).

A) Μη μοναδικότητα

Μη μοναδικότητα στα μοντέλα υπόγειας ροής σημαίνει ότι πολλοί διαφορετικοί συνδυασμοί από εισαγωγές σε μοντέλα παράγουν αποτελέσματα που αντιστοιχούν σε μετρήσεις πεδίου – δεδομένα πεδίου (field-measured data). Επομένως πάντα θα υπάρχει παραπάνω από ένα πιθανώς λογικό μοντέλο. Από τη μία, ή πολλαπλά ρυθμισμένα μοντέλα μεταφέρονται προς ανάλυση ή ο σχεδιαστής επιλέγει ένα ρυθμισμένο μοντέλο και κατασκευάζει περιορισμούς σφάλματος ώστε να καταλήξει σε εξαγόμενα αποτελέσματα. Σε κάθε περίπτωση, είναι αναγνωρισμένο ότι ένα μοντέλο υπόγειας ροής δεν μπορεί να δώσει μία και μοναδική αληθινή απάντηση (Mary P. Anderson, 2015).

Αν και τα μοντέλα είναι κρίσιμα εργαλεία, η κρίση του μηχανικού, καθοδηγούμενη από τη διαίσθησή του στην προσομοίωση και από τις αρχές της υδρογεωλογίας, απαιτείται πάντα κατά τη διάρκεια μιας έρευνας μοντελοποίησης. Η αναγνώριση της αβεβαιότητας του μοντέλου και η μη μοναδικότητα παρακινεί την παρακάτω φιλοσοφία της μοντελοποίησης: «ένα μοντέλο δεν μπορεί να υποσχεθεί τη σωστή απάντηση. Ωστόσο, αν έχει δομηθεί σωστά, ένα μοντέλο μπορεί να υποσχεθεί ότι η σωστή απάντηση βρίσκεται μέσα στα όρια αβεβαιότητας που βρίσκονται στην ευθύνη του να κατασκευαστούν» (Doherty, 2011) (Mary P. Anderson, 2015).

B) Αβεβαιότητα

Η αβεβαιότητα στα μοντέλα υπόγειας ροής προκύπτει από έναν αριθμό παραγόντων που σχετίζονται με αντιπροσωπευτικές διαδικασίες υπόγειας ροής. Στην επιλογή ενός συγκεκριμένου κώδικα, ο σχεδιαστής εμμέσως φτιάχνει υποθέσεις για τις υδρογεωλογικές διεργασίες που είναι σημαντικές για το σκοπό της μοντελοποίησης, επειδή η επιλογή ενός κώδικα περιορίζει όλες τις

διαδικασίες μόνο σε αυτές που εμπεριέχονται στον κώδικα. Περαιτέρω, οι παροντικές και μελλοντικές συνθήκες που αναπαρίστανται σε ένα μοντέλο δε γίνεται να περιγραφούν πλήρως ή να ποσοτικοποιηθούν. Ο Bredehoeft (2005) προειδοποίησε τους σχεδιαστές να προσδοκούν την «έκπληξη» του μοντέλου που απορρέει όταν καινούρια δεδομένα αποκαλύπτουν αντιδράσεις του συστήματος που προήλθαν από μη μοντελοποιημένες υδρολογικές διαδικασίες. Για παράδειγμα, σε ένα μοντέλο πρόγνωσης υπάρχει αβεβαιότητα σε μελλοντικές υδρολογικές συνθήκες (πχ ρυθμοί αποφόρτισης) όπως επίσης και μελλοντικούς ρυθμούς άντλησης και τοποθεσίες καινούριων πηγαδιών, που εξαρτώνται από αβέβαιους κοινωνικούς και οικονομικούς παράγοντες (Mary P.Anderson, 2015).

Αν και κάποια είδη προγνώσεων είναι πιο αβέβαια από κάποια άλλα, η αβεβαιότητα μπορεί απλά να περιοριστεί και ποτέ να εξαλειφθεί. Όπως και να 'χει, οι σχεδιαστές μοντέλων υπόγειας ροής πρέπει να έχουν επίγνωση των αβεβαιοτήτων που επηρεάζουν τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης. Οι διαδικασίες μοντελοποίησης και τα αποτελέσματα πρέπει να υπόκεινται σε αυστηρές «αναλύσεις ευαισθησίας» που απορρέουν από βασικές υδρογεωλογικές αρχές (Mary P.Anderson, 2015).

1.2.6 Εννοιολογικό μοντέλο - Ορισμός

Για να επιλυθεί ένα οποιοδήποτε πρόβλημα υπόγειας ροής, ο ερευνητής πρέπει να συλλέξει και να αναλύσει/επεξεργαστεί τα σχετικά δεδομένα πεδίου ώστε να διατυπώσει σημαντικά χαρακτηριστικά του υπόγειου υδροφόρου συστήματος. Η σύνθεση του τι είναι γνωστό για την περιοχή λέγεται εννοιολογικό μοντέλο (Kresic and Mikszewski, 2013).

Ένα εννοιολογικό μοντέλο συνήθως δημιουργείται για ένα τοπικού ενδιαφέροντος υδρογεωλογικό σύστημα (site-specific hydrogeological setting), αλλά μπορεί να σχεδιαστεί και για μια πιο γενική περίπτωση ενός υδρογεωλογικού συστήματος (generic geologic setting). Τα περισσότερα προβλήματα υπόγειας ροής απευθύνονται σε ένα μαθηματικό μοντέλο που διαμορφώθηκε από το εννοιολογικό μοντέλο. Γενικότερα, όσο πιο πολύ το εννοιολογικό μοντέλο προσεγγίζει την κατάσταση στο πεδίο έρευνας, τόσο περισσότερο το αριθμητικό μοντέλο θα δίνει λογικές προβλέψεις. Το εύρος των απαραίτητων λεπτομερειών αποφασίζεται από την ίδια τη διαδικασία της μοντελοποίησης, τα διαθέσιμα δεδομένα του πεδίου, και τα πρακτικά όρια της ενσωμάτωσης της συνθετότητας στο αριθμητικό μοντέλο. Στην πράξη, Είναι επιθυμητό να επιτευχθεί η οικονομία στο σχεδιασμό του εννοιολογικού μοντέλου, κάτι το οποίο υποδηλώνει ότι το εννοιολογικό μοντέλο απλοποιείται ώστε να εμπεριέχονται μόνο οι πιο σημαντικές διεργασίες, αλλά να υπάρχει και η βέλτιστη συνθετότητα που να αντιπροσωπεύει παρόμοιες συμπεριφορές του συστήματος (Mary P.Anderson, 2015).

Σύμφωνα με τους Zheng και Bennett (2002), η διαμόρφωση ενός εννοιολογικού μοντέλου είναι «συνώνυμη με το χαρακτηρισμό της τοποθεσίας» ώστε το εννοιολογικό μοντέλο να είναι μια ενσωμάτωση σχετικών τοπικών και περιφερειακών υδρογεωλογικών πληροφοριών κάνοντας χρήση απλοποιημένων υποθέσεων και ποιοτικών ερμηνειών της ροής της περιοχής και των διαδικασιών μεταφοράς (Mary P.Anderson, 2015).

Προσδιορίζουμε ένα εννοιολογικό μοντέλο ως μία ποιοτική αναπαράσταση ενός συστήματος υπόγειας ροής που συμμορφώνεται σύμφωνα με τις υδρογεωλογικές αρχές και βασίζεται σε γεωλογικές, γεωφυσικές, υδρογεωλογικές και άλλες βοηθητικές πληροφορίες. Ο σχεδιασμός ενός εννοιολογικού μοντέλου τυπικά πρέπει να λαμβάνει υπόψη του τις εξής πηγές δεδομένων: τη γεωμορφολογία, τη γεωλογία, τη γεωφυσική, το κλίμα, τη βλάστηση, τα εδάφη, την υδρολογία, την υδροχημεία και κάποιους ανθρωπογενείς παράγοντες (Kolm, 1996). Επομένως, ένα

εννοιολογικό μοντέλο εμπεριέχει και το υδρογεωλογικό υπόβαθρο και το υδρολογικό σύστημα (Mary P.Anderson, 2015).

Κατά τη διαμόρφωση ενός εννοιολογικού μοντέλου ο σχεδιαστής οργανώνει, αναλύει, και συνθέτει σχετικά υδρογεωλογικά δεδομένα, συχνά με τη βοήθεια μίας βάσης δεδομένων όπως ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (geographical information system - GIS). Περιεχόμενα-κλειδιά ενός εννοιολογικού μοντέλου αποτελούν τα όρια, η υδροστρωματογραφία και εκτιμήσεις των υδρογεωλογικών παραμέτρων, γενικές κατευθύνσεις της υπόγειας ροής και των εισόδων-εξόδων νερού, και το απόθεμα του υδροφόρου σε νερό βασισμένο σε δεδομένα πεδίου. Αν και τα δεδομένα για ένα εννοιολογικό μοντέλο μπορεί να αποθηκεύονται σε ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών, το εννοιολογικό μοντέλο εν τέλει παρουσιάζεται σε μια σειρά διαγραμμάτων, εμπεριέχοντας διατομές και πίνακες (Mary P.Anderson, 2015).

1.2.6.1 Οριακές συνθήκες εννοιολογικού μοντέλου

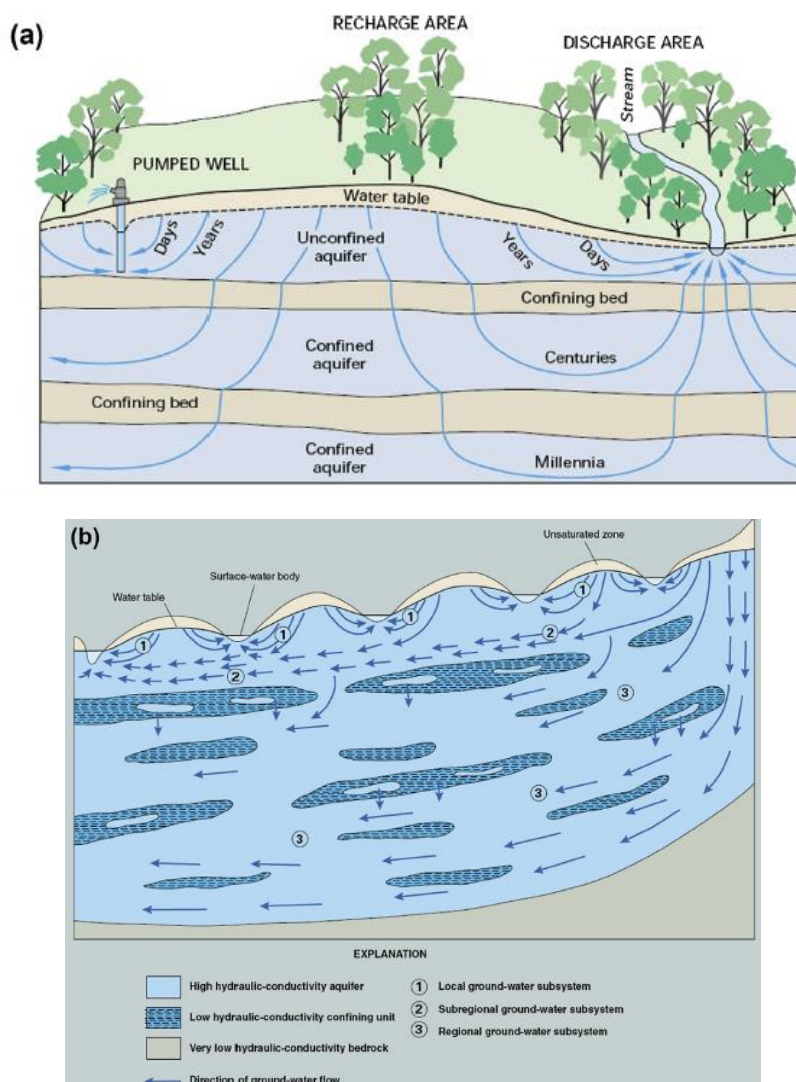
Οι υδρολογικές συνθήκες μαζί με τα όρια του εννοιολογικού μοντέλου καθορίζουν τις μαθηματικές οριακές συνθήκες του αριθμητικού μοντέλου. Οι οριακές συνθήκες είναι ένα περιεχόμενο-κλειδί ενός μαθηματικού μοντέλου και επηρεάζει σημαντικά τις κατευθύνσεις της ροής που υπολογίζονται από ένα αριθμητικό μοντέλο σταθερής κατάστασης και των περισσότερων παραδοικών μοντέλων (Mary P.Anderson, 2015).

Τα όρια περιλαμβάνουν υδρολογικά χαρακτηριστικά όπως ο διαχωρισμός των υπόγειων νερών και φυσικά χαρακτηριστικά όπως φορείς των επιφανειακών νερών και σχετικά αδιαπέρατοι σχηματισμοί. Η στάθμη του υπόγειου νερού συνήθως διαμορφώνει το άνω όριο ενός τριδιάστατου αριθμητικού μοντέλου. Ίδανικά, τα πλευρικά και τα κατώτερα όρια θα έπρεπε να είναι ευθυγραμμισμένα με τα φυσικά ή τα υδραυλικά χαρακτηριστικά που δεν αλλάζουν καθώς αλλάζουν οι υδρολογικές συνθήκες. Αυτά περιλαμβάνουν σχετικά σταθεροποιημένους διαφορετικούς τύπους υπόγειου νερού, τον ωκεανό και τη σχετικά σταθεροποιημένη διεπιφάνεια αλατόνευρου/γλυκού νερού σε έναν παράκτιο υδροφόρο, μεγάλες λίμνες και ποτάμια που διασυνδέονται με ένα σύστημα υπόγειας ροής και σχετικά αδιαπέρατα πετρώματα (πχ αδιατάρακτος γρανίτης, σχιστόλιθος, άργιλος). Ωστόσο, ο σχεδιαστής θα πρέπει να λαμβάνει υπόψιν του ότι σε μερικές ρυθμίσεις οι ζώνες των υπογείων νερών μπορεί να μετακινηθούν ανάλογα και με την άντληση (e.g., Sheets et al., 2005) ή με τις αλλαγές στην επανεισαγωγή. Παρομοίως, οι στάθμες του νερού σε λίμνες και ποτάμια (Konikow, 2011), μπορεί να αλλάξουν ανάλογα με την άντληση, την κλιματική αλλαγή και τις αλλαγές στη χρήση γης. Ο σχεδιαστής πρέπει να είναι ικανός να εκτιμήσει την πιθανότητα ότι οι αλλαγές στις οριακές συνθήκες θα συμβιβαστούν με τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης, παραδοικές αλλαγές στην περιοχή και τις υδραυλικές συνθήκες μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα αριθμητικό μοντέλο εφόσον έχουν υπολογιστεί (κάτι που συνήθως είναι δύσκολο να γίνει) (Mary P.Anderson, 2015).

Τα όρια προσδιορίζονται από πιεζομετρικούς, τοπογραφικούς και γεωλογικούς χάρτες της περιοχής και της θέσης. Μπορεί να μην είναι εφικτό ή βολικό να περιγράψουμε ολόκληρο το πρόβλημα με υδραυλικά ή φυσικά χαρακτηριστικά. Αν δεν υπάρχουν υδραυλικά ή φυσικά χαρακτηριστικά κοντά στην περιοχή ενδιαφέροντος που μπορούν να αξιοποιηθούν στα όρια, τότε ορίζεται ένα εννοιολογικό μοντέλο μιας ευρύτερης περιοχής. Έπειτα, το αριθμητικό μοντέλο θα διαθέτει δύο τύπους πληροφοριών, με μεγαλύτερες λεπτομέρειες για την κύρια περιοχή του προβλήματος και με λιγότερες λεπτομέρειες στο ευρύτερο περιφερειακό σύστημα υπόγειας ροής (Mary P.Anderson, 2015).

1.2.6.2 Υδρογεωλογικές συνθήκες

Συνήθως ένα σύστημα υπόγειας ροής χαρακτηρίζεται από ένα υδροφόρο στρώμα (aquifer) ή μία αλληλουχία υδροφορέων και υπό πίεση στρωμάτων (confining beds). Υδροφόρο στρώμα ονομάζεται μια γεωλογική ενότητα, ή μια σειρά γεωλογικών ενοτήτων συνδεδεμένων υδραυλικά, που αποθηκεύει και μεταδίδει σημαντικές ποσότητες υπόγειου νερού (το σημαντικές αναφέρεται στο σκοπό και τη χρήση) (Mary P.Anderson, 2015).



Εικόνα 4: Ενδεικτικά εννοιολογικά μοντέλα υδροφορέων

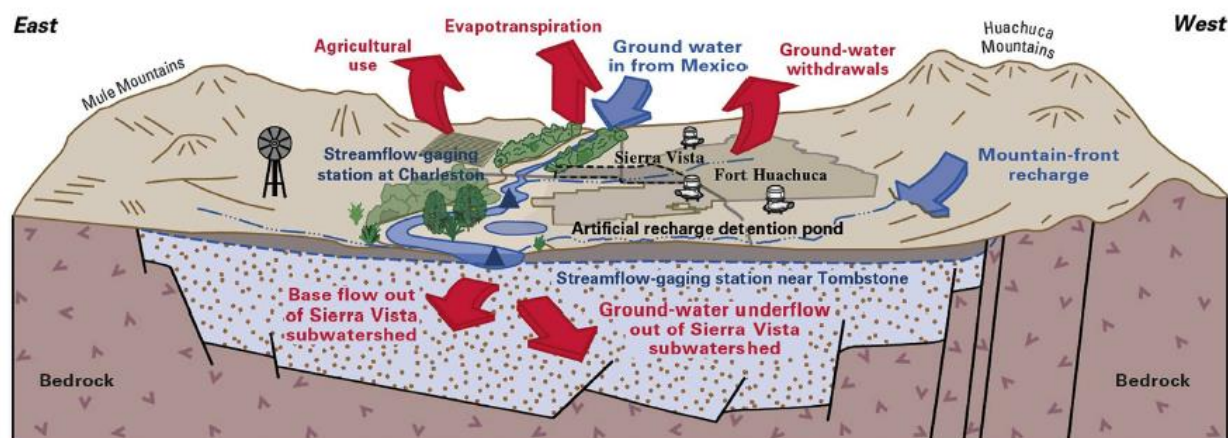
1.2.6.3 Διεύθυνση ροής

Η υπόγεια ροή μέσα στο εννοιολογικό μοντέλο απεικονίζεται από τις καμπύλες υπόγειας ροής σε πιεζομετρικούς χάρτες ή σε υδρογεωλογικές τομές. Οι γενικές διευθύνσεις της ροής απεικονίζονται μέσω πιεζομετρικών χαρτών (contour maps) της στάθμης του νερού (water table) και της πιεζομετρικής επιφάνειας, αν διατίθενται, ή από πληροφορίες πάνω στα επίπεδα του νερού, όρια, και περιοχές φόρτισης ή εκφόρτισης. Αν υπάρχουν περισσότεροι από έναν

υδροφορείς, οι διευθύνσεις της ροής απεικονίζονται για κάθε ένα υδροφόρο στρώμα ξεχωριστά (Mary P.Anderson, 2015).

Τα υδρογραφήματα των διακυμάνσεων της στάθμης του νερού σε ερευνητικά πηγάδια, ειδικά σε πηγάδια μακροπρόθεσμης παρακολούθησης (Taylor and Alley, 2002; Feinstein et al., 2004), θα πρέπει να συλλέγονται, να αναλύονται και να αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων του εννοιολογικού μοντέλου.

Η αναπαράσταση της ανταλλαγής του νερού μεταξύ των επιφανειακών και του υπόγειου νερού είναι ένα κρίσιμο στάδιο για τη σχεδίαση του αριθμητικού μοντέλου. Ευτυχώς, οι κώδικες προσομοίωσης υπόγειου νερού τυπικά περιέχουν επιλογές για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης επιφανειακού-υπόγειου νερού. Σε υγρά κλίματα, οι μορφές του επιφανειακού νερού είναι συχνά καλά συνδεδεμένα με ρηχά υπόγεια συστήματα και αποτελούν σημαντικές περιοχές αποφόρτισης (και/ή επαναφόρτισης). Ωστόσο, μορφές επιφανειακού νερού, κυρίως σε ξηρά κλίματα, δύναται να είναι υδραυλικά διαχωρισμένα από τα υπόγεια συστήματα λόγω μιας ακόρεστης ζώνης και να έχουν ελάχιστη ή μηδαμινή επίδραση στην υπόγεια ροή. Σε τέτοιες καταστάσεις ο βαθμός αλληλεπίδρασης μεταξύ του επιφανειακού νερού και του υποκείμενου υπόγειου νερού καθορίζεται από τις υδραυλικές ιδιότητες της ακόρεστης ζώνης και το στάδιο του νερού της επιφάνειας. Ωστόσο, υπάρχει η πιθανότητα το νερό από ένα βαθύτερο γειτονικό υπόγειο σύστημα να επαναφορτίζεται σε μια κοντινή επιφανειακή περιοχή επαναφόρτισης και/ή να εκφορτίζεται σε υπερκείμενα υπόγεια συστήματα κοντά σε μια περιοχή αποφόρτισης επιφανειακού νερού. Επομένως, μπορεί να είναι απαραίτητο να συμπεριληφθούν αυτά τα βαθύτερα συστήματα ροής, ή τουλάχιστον η συνεισφορά αυτών των συστημάτων, σε ένα μοντέλο που θα επικεντρώνεται σε μια ρηχή υπόγεια ροή (Mary P.Anderson, 2015).



Εικόνα 5: Σχηματικό διάγραμμα απεικόνισης κατευθύνσεων υπόγειας ροής και χώροι αποθήκευσης νερού σε μια ξηρή τοποθεσία (Νότια Αριζόνα, ΗΠΑ) (Healy et al., 2007).

Όταν διαμορφώνεται το εννοιολογικό μοντέλο, πληροφορίες σχετικά με ρυθμούς εμπλουτισμού, άντλησης, εξατμισοδιαπνοής, πηγαίας ροής αλλά και άλλων οριακών ροών συλλέγονται ή υπολογίζονται μαζί με πληροφορίες για τη χρονική και χωρική μεταβλητότητα των συνθηκών επαναφόρτισης/αποφόρτισης. Αυτή η πληροφορία χρησιμοποιείται επίσης για τη διαμόρφωση εισόδων μοντέλου με στόχο τη βαθμονόμηση (Mary P.Anderson, 2015).

1.2.6.4 Ισοζύγιο Υπόγειου νερού (Groundwater Budget Components)

Κατά τη διάρκεια της ρύθμισης του αριθμητικού μοντέλου, η περιεχόμενη ποσότητα υπόγειου νερού που υπάρχει στο πεδίο δύναται να συγκριθεί με την ποσότητα του υπόγειου νερού που έχει υπολογίσει το αριθμητικό μοντέλο. Η αποθηκευμένη ποσότητα υπόγειου νερού διαμορφώνεται ανάλογα με την περιοχή ή τον όγκο που αναπαριστάται από το εννοιολογικό μοντέλο και για μια συγκεκριμένη περίοδο χρόνου, π.χ. μέρες, μήνες, χρόνια, ή ακόμη και δεκαετίες, ή για εποχικές ή ετήσιες μέσες συνθήκες (Mary P.Anderson, 2015).

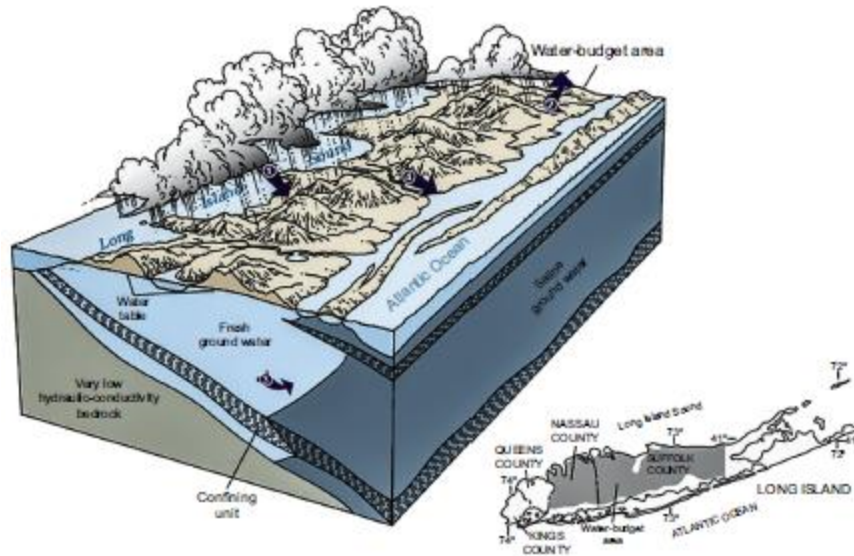
Η εξίσωση του ισοζυγίου του νερού στην πιο απλοποιημένη μορφή του είναι η εξής:

$$\text{Εισροές} = \text{Εκροές} \pm \text{Αλλαγές στην Αποθήκευση (Storage)} \quad (1.1)$$

Ένα περιεκτικό ισοζύγιο νερού για ολόκληρο το υδρολογικό σύστημα μπορεί να διαμορφωθεί επιπρόσθετα μαζί με την περιεχόμενη ποσότητα σε υπόγειο νερό. Το υδρολογικό ισοζύγιο περιέχει κατακρημνίσματα, εξάτμιση, εξατμισοδιαπνοή και επιφανειακές ροές νερού μαζί με υπόγειες ροές. Για ένα ισοζύγιο υπόγειων νερών, οι εισροές περιλαμβάνουν εμπλουτισμό από κατακρημνίσεις ή άλλες πηγές, διαρροές από επιφανειακά σώματα νερού, ροή προς το υπόγειο σύστημα μέσω του γεωλογικού υποβάθρου ή υδρογεωλογικών ενοτήτων έξω από τα όρια του μοντέλου, επαναφόρτιση από την άρδευση, επανεισαγωγή νερού μέσω γεωτρήσεων, και οποιαδήποτε άλλη προσθήκη νερού στο σύστημα. Οι εκροές περιλαμβάνουν υπόγεια εκφόρτιση σε επιφανειακά σώματα νερού, εξατμισοδιαπνοή, άντληση, πηγές, εκφόρτιση μέσω διαρροής σε κλιτύες, και κάθε άλλη απώλεια νερού από το σύστημα. Μεταβολή στο αποθηκευμένο υδατικό δυναμικό προκύπτει όταν οι εισροές δεν αντιστοιχούν με τις εκροές, καταλήγοντας είτε σε απώλεια είτε σε προσθήκη στο περιεχόμενο υπόγειο νερό (Mary P.Anderson, 2015).

Η εύρεση του ισοζυγίου αυτού για ένα εννοιολογικό μοντέλο βοηθά τον ερευνητή να εκτιμήσει εάν όλα τα σημαντικά συστατικά και διαδικασίες του υπόγειου συστήματος έχουν ληφθεί υπόψη και εάν (και πώς) αυτά αλληλεπιδρούν. Ωστόσο, η ακριβής εκτίμηση είναι δύσκολη και συνοδεύεται από αβεβαιότητα, ιδιαίτερα εάν οι κύριες πηγές πληροφόρησης είναι βιβλιογραφικές τιμές και η επαγγελματική κρίση. Για αυτό το λόγο, τα εννοιολογικά μοντέλα συχνά βασίζονται σε λογικά εύρη περιεχόμενου νερού ή μπορεί να περιλαμβάνουν και μια εκτίμηση σφάλματος που σχετίζεται με κάθε συστατικό και διαδικασία (Mary P.Anderson, 2015).

OVERALL PREDEVELOPMENT WATER-BUDGET ANALYSIS		GROUND-WATER PREDEVELOPMENT WATER-BUDGET ANALYSIS	
INFLOW TO LONG ISLAND HYDROLOGIC SYSTEM	CUBIC FEET PER SECOND	INFLOW TO LONG ISLAND GROUND-WATER SYSTEM	CUBIC FEET PER SECOND
1. Precipitation	2,475	7. Ground-water recharge	1,275
OUTFLOW FROM LONG ISLAND HYDROLOGIC SYSTEM		OUTFLOW FROM LONG ISLAND GROUND-WATER SYSTEM	
2. Evapotranspiration of precipitation	1,175	8. Ground-water discharge to streams	500
3. Ground-water discharge to sea	725	9. Ground-water discharge to sea	725
4. Streamflow discharge to sea	525	10. Evapotranspiration of ground water	25
5. Evapotranspiration of ground water	25	11. Spring flow	25
6. Spring flow	25	Total outflow	1,275
Total outflow	2,475		



Εικόνα 6: Σχηματικό διάγραμμα που απεικονίζει το Long Island, Νέα Υόρκη, ΗΠΑ, και το υδρολογικό ισοζύγιο (πίνακας στα αριστερά) και το ισοζύγιο του υπόγειου νερού (πίνακας στα δεξιά) κάτω από συνθήκες προδιαμόρφωσης. Και στα δύο δεν υπάρχει καμία μεταβολή στο αποθηκευμένο νερό (Alley et al., 1999).

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

2.1 Γεωγραφικά – Κλιματικά στοιχεία

Ο Δήμος Θρακομακεδόνων (η περιοχή έρευνας της παρούσας διπλωματικής εργασίας) αποτελεί βόρειο προάστιο των Αθηνών, εντάσσεται στη διοικητική αρμοδιότητα της Νομαρχίας Ανατολικής Αττικής και βρίσκεται πλησίον στους νοτιοανατολικούς πρόποδες της Πάρνηθας. Έχει έκταση 3,6 km², πρόκειται για αρκετά αραιοκατοικημένο Δήμο (πυκνότητα πληθυσμού 2.220 κάτοικοι / km²) και έχει καθαρά οικιστικό χαρακτήρα (Ν.Σιέμος, 2009).

2.1.1 Μορφολογία

Η κυρίως οροσειρά της Πάρνηθας εκτείνεται μεταξύ των Τεταρτογενών τεκτονικών τάφρων του Κορινθιακού Κόλπου και του Ευβοϊκού Κόλπου αντιστοίχως. Η οροσειρά σχηματίστηκε από την ανύψωση που λαμβάνει χώρα διαμέσου του κάτω τεμάχους των κύριων κανονικών ρηγμάτων ΔΒΔ-ΑΝΑ διεύθυνσης, όπως επίσης και από τα ΒΑ-ΝΔ διεύθυνσης ρήγματα. Το αποτέλεσμα αυτό διασυνδέεται αναμφίβολα με τις εφελκυστικές τάσεις που άρχισαν κατά το Ολιγόκαινο με τον σχηματισμό των συμπλεγμάτων μεταμορφικού πυρήνα του Αττικο-Κυκλαδικού πεδίου και, ειδικότερα κατά την διάρκεια του Μειοκαινού με την βύθιση των Μειο-Πλειοκαινικών σειρών εντός των δημιουργουμένων εφελκυστικών λεκανών (Meulenkaamp κ.ά. 1988, Jolivet κ.ά. 2003). Εξ' άλλου η παρουσία των Μειοκαινικών σχηματισμών στο κάτω τέμαχος των ρηγμάτων της Πάρνηθας αποτελεί απόδειξη της ανύψωσης αυτής. Εντός αυτού του μεταλπικού ρηξιγενούς βυθίσματος, που έχει πληρωθεί από ποταμοχερσαίες και λιμναίες φάσεις, εγγράφεται η περιοχή των Θρακομακεδόνων (η περιοχή έρευνας που μας ενδιαφέρει), η οποία οριοθετείται Δυτικά και Βόρεια από τις νότιες υπώρειες της οροσειράς της Πάρνηθας, ανατολικά από τις παρόχθιες εκτάσεις του Κηφισού Ποταμού και νότια διασυνδέεται με το κυρίως τμήμα του Λεκανοπεδίου των Αθηνών που αποτελεί τμήμα του μεγάλου ρηξιγενούς μεταλπικού βυθίσματος, γενικής διεύθυνσης ΒΒΑ-ΝΝΔ και ανοιχτού προς το θαλάσσιο χώρο του Σαρωνικού (Αδ.Φωτιάδης, 2008).

2.1.2 Κλιματικά – Υδρομετεωρολογικά στοιχεία

Οι κλιματικές συνθήκες της περιοχής εμπίπτουν στο Μεσογειακό τύπο κλίματος που χαρακτηρίζεται από τους σχετικά υγρούς, ήπιους χειμώνες και τα θερμά και ξηρά καλοκαίρια. Η άνοιξη χαρακτηρίζεται από καιρική αστάθεια με συχνές εναλλαγές ημερών με χαρακτηριστικά χειμώνα και ημερών με χαρακτηριστικά θέρους. Αντίθετα, το φθινόπωρο είναι συνήθως μικρής χρονικής διάρκειας και η μετάβαση στο χειμώνα γίνεται μάλλον σταθερά. Σαν θερμή περίοδος θεωρείται το διάστημα Ιουνίου – Σεπτεμβρίου και σαν ψυχρή το διάστημα Οκτωβρίου – Μαΐου αν και οι μήνες Οκτώβριος και Μαΐος μπορούν λόγω των χαρακτηριστικών τους να θεωρηθούν σαν μεταβατικοί μήνες (Ν.Σιέμος, 2009).

Με βάση στοιχεία του σταθμού της ΕΜΥ στο Τατόϊ, για την περίοδο 1956-2001, το μέσο ετήσιο ύψος βροχής ανέρχεται σε 433 mm. Το μεγαλύτερο μέρος των βροχοπτώσεων (349 mm) συμβαίνει μεταξύ Οκτωβρίου και Μαρτίου, με το Δεκέμβριο να είναι ο μήνας με το μεγαλύτερο ύψος βροχής (77,4 mm) (Ν.Σιέμος, 2009).

Η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι 16,5 °C με ψυχρότερο μήνα τον Ιανουάριο (7,4 °C), θερμότερο μήνα τον Ιούλιο (26,9 °C) και μέσο ετήσιο θερμοκρασιακό εύρος 19,5 °C.

Η απόλυτα ελάχιστη θερμοκρασία έχει φθάσει σε $-8,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ τον Ιανουάριο και η απόλυτα μέγιστη σε $48\text{ }^{\circ}\text{C}$ τον Ιούλιο, ενώ ο ολικός παγετός είναι ένα σπάνιο φαινόμενο και η συμπεριφορά αυτή μπορεί να αποδοθεί και στην πρόοδο της αστικοποίησης στο Λεκανοπέδιο της Αθήνας.

Η μέση ετήσια σχετική υγρασία δεν υπερβαίνει το 63% με υγρότερο μήνα του έτους τον Δεκέμβριο (78% περίπου) και ξηρότερο τον Ιούλιο (45% περίπου) (Ν.Σιέμος, 2009).

2.2 Γεωλογικά στοιχεία

Πραγματοποιήθηκαν εργασίες πεδίου για να διαχωριστούν οι εμπλεκόμενοι μεταλπικοί και προνεογενείς σχηματισμοί της περιοχής και για να κατασκευαστεί ο γεωλογικός χάρτης σε κλίμακα 1:5.000.

Η οροσειρά της Πάρνηθας και κατ'επέκταση η περιοχή των Θρακομακεδόνων συνίσταται από αλπικούς σχηματισμούς της **αμεταμόρφωτης Πελαγονικής ζώνης**, η οποία υπέρκειται τεκτονικά της **μεταμορφωμένης Πελαγονικής ζώνης** που περιλαμβάνει την οροσειρά Πεντέλης, Υμηττού και Λαυρεωτικής, αποτελώντας την Ενότητα Αττικής. Θεωρείται ως η κατώτερη σχετικά τεκτονική ενότητα της Αττικής. Πρόκειται για μια μεταμορφωμένη και έντονα παραμορφωμένη αλπική ενότητα, αποτελούμενη από μεγάλη μάζα μαρμάρων, συχνά δολομιτικών και σχιστολίθων, μαρμαρυγιακών, αμφιβολιτικών με λεπτούς ορίζοντες μαρμάρων. Μέσα στους σχιστόλιθους υπάρχουν βασικά και υπερβασικά μεταμορφωμένα πετρώματα. Πρόσφατες εργασίες, με βάση τα στρωματογραφικά και τα τεκτονο-μαγματικά δεδομένα, απέδειξαν ότι η σχετικώς «αυτόχθονη ενότητα» Αττικής εντάσσεται γεωδυναμικά στις ισοπικές τεκτονικές ζώνες των Εσωτερικών Ελληνίδων (Photiades & Carras 2001 and references therein; Photiades & Saccani 2006).

Η επαφή ανάμεσα στις δύο αλπικές ενότητες της περιοχής εντοπίζεται στο ανατολικό περιθώριο του γεωλογικού χάρτη των Θρακομακεδόνων (βλ. υποθετικές επωθήσεις που χαράχθηκαν με βάση τα γεωλογικά χαρτογραφικά δεδομένα από Κατσιάτσο 2000, 2002) και αντιπροσωπεύει μια σημαντική και μεγάλης κλίμακας τεκτονική ασυνέχεια, ενδεχομένως παράλληλη του Κηφισού Ποταμού που διασχίζει από ΒΑ προς ΝΔ/κά το ανατολικό τμήμα της περιοχής (Φωτιάδης, 2008). Η επαφή αυτή μεταφράζεται ως μια σημαντική ρηγματογενής ζώνη εφελκυστικής αποκόλλησης (detachment, Παπανικολάου κ.ά., 2004α).



Εικόνα 7: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής των Θρακομακεδόνων (Κατά Γ. ΚΑΤΣΙΚΑΤΣΟ, με συμπληρώσεις. In G. KATSIKATSOS et al., 1986).

Από τη λεπτομερή γεωλογική χαρτογράφηση σε κλίμακα 1:5.000 της περιοχής των Θρακομακεδόνων προέκυψαν τα ακόλουθα στοιχεία:

2.2.1 Αλπικοί-προαλπικοί σχηματισμοί:

Στα περιθώρια του οικιστικού συγκροτήματος των Θρακομακεδόνων, του ορεινού όγκου της Πάρνηθας και δυτικότερα που το περιβάλλει, απαντώνται αλπικοί σχηματισμοί τμήματος της αμεταμόρφωτης Πελαγονικής γεωτεκτονικής ζώνης. Πρόκειται για μια αμεταμόρφωτη ενότητα της οποίας η στρωματογραφική ακολουθία αποτελείται από νηριτικούς ασβεστολίθους ηλικίας μέσου-ανωτέρου Τριαδικού έως Ιουρασικού. Στην εξεταζόμενη περιοχή, λόγω διαβρώσεων, δεν

διατηρούνται εμφανίσεις οφιολίθων, ασβεστολίθων Κρητιδικής ηλικίας και ο φλύσχης (Φωτιάδης, 2008).

Οι ανθρακικοί σχηματισμοί της περιοχής που συνθέτουν τη τριαδικο-ιουρασική πλατφόρμα αποτελούνται από ανοιχτότεφρους έως βαθύτεφρους ασβεστολίθους, ασβεστολιθικούς δολομίτες και δολομίτες, άστρωτους έως παχυ-μεσοστρωματώδεις, ισχυρά τεκτονισμένους, νηριτικής φάσης και που τοπικά αναπτύσσουν ισχυρή ανακρυστάλλωση. Το πάχος τους μπορεί να φτάσει τα 400 μέτρα (Αδ.Φωτιάδης, 2008) (Δ.Γαλανάκης, 2009).

Προς τη βάση της παραπάνω ανθρακικής πλατφόρμας αναπτύσσονται κατά θέσεις, βασικής σύστασης ηφαιστειακά πετρώματα με χαλαζιακούς κερατοφύρες και τόφρους, μέσο Τριαδικής ηλικίας. Ο ορίζοντας των ηφαιστειακών παρεμβάλλεται ανάμεσα στα ανθρακικά ιζήματα της πλατφόρμας και στον υποκείμενο κλαστικό σχηματισμό Περμο-Τριαδικής ηλικίας. Στο ανώτερο Παλαιοζωικό - κατώτερο Τριαδικό, παρατηρείται γενικά ένας ιλυολιθικός-ψαμμιτικός κλαστικός σχηματισμός, ο οποίος περιέχει ολισθολίθους μαύρων ασβεστόλιθων Περμικής ηλικίας (Κατσικάτσος 2000, 2002). Ο κλαστικός σχηματισμός συνίσταται από αργιλικούς σχιστολίθους, φυλλίτες, μεταψαμμίτες και σπάνιες ενστρώσεις ηφαιστιτών και ασβεστολίθων. Τα αργιλοψαμμιτικά υλικά αποτελούνται από λεπτο- έως αδροκοκκώδεις ψαμμίτες, αρκόζες, γραουβάκες, αργιλικούς σχιστολίθους, ιλυολίθους και οι οποίοι εγκλείουν συχνά ενστρώσεις ψηφιδοπαγών και κροκαλοπαγών με κροκαλολατύπες χαλαζίτη και υποπράσινων-ιωδών ηφαιστειακών πετρωμάτων (Αδ.Φωτιάδης, 2008).

2.2.2 Μεταλτικοί σχηματισμοί:

Οι μεταλτικοί σχηματισμοί της περιοχής αποτελούνται από ηπειρωτικούς σχηματισμούς τόσο του **Νεογενούς**, όσο και του **Τεταρτογενούς**. Οι νεογενείς σχηματισμοί περιλαμβάνουν λιμναίες έως λιμνοχερσαίες αποθέσεις οι οποίες κατά θέσεις περιέχουν απολιθώματα της Πικερμικής πανίδας (Πύργος Βασιλίσσης). Επί όλων των προηγούμενων σχηματισμών επικάθονται Τεταρτογενείς αποθέσεις, στις οποίες συμμετέχουν τα φερτά υλικά των ποταμών, οι ποτάμιες αναβαθμίδες, οι πλευρικές αποθέσεις κορημάτων, τα ριπίδια και οι κώνοι κορημάτων των περιφερειακών ορεινών όγκων (Αδ.Φωτιάδης, 2008).

Τεταρτογενές:

Πρόκειται για ηπειρωτικούς σχηματισμούς **ριπιδίων χειμαρρωδών αποθέσεων και κώνων κορημάτων**, Πλειστοκαινικής ηλικίας, που εμφανίζονται στους πρόποδες του ορεινού όγκου της Πάρνηθας και πάνω στους οποίους είναι δομημένο το μεγαλύτερο τμήμα των Θρακομακεδόνων. Συνιστούν ένα ιδιότυπο σχηματισμό (με πάχος που κυμαίνεται από 20μ μέχρι και 100μ.) με συχνές και απότομες πλευρικές και κατακόρυφες μεταβάσεις ανάμεσα σε συνεκτικά ή ημισυνεκτικά κορήματα και χαλαρούς σχηματισμούς (Αδ.Φωτιάδης, 2008). Αυτοί οι χαλαροί σχηματισμοί αποτελούνται από αμμοχάλικα, λατύπες και κροκάλες ασβεστολιθικής σύστασης με διαστρώσεις ιλύων και αργίλων. Είναι υλικά χρώματος ερυθρού έως καστανού, μέτρια και κατά θέσεις ισχυρά συγκολλημένα (Δ.Γαλανάκης, 2009). Αν και κατά θέσεις επικρατούν διαφορετικοί λιθολογικοί τύποι, σε γενικές γραμμές μπορούν να διακριθούν δύο διαφορετικά τμήματα. Ένα βόρειο όπου επικρατούν τα πιο συνεκτικά μέλη των κορημάτων, με περιορισμένο πάχος και ένα μεσαίο και νότιο τμήμα που χαρακτηρίζεται κυρίως από τις περισσότερες χαλαρές φάσεις με μεγαλύτερο πάχος (Δ.Γαλανάκης, 2009).

Νεογενές:

Οι εμφανίσεις των νεογενών **ηπειρωτικών – λιμναίων σχηματισμών** του **Ανωτέρου Μειοκαίνου** συνιστούν το υπόβαθρο των κώνων κορημάτων και αποτελούνται από σχετικά συνεκτικές φάσεις όπως μάργες, μαργαϊκούς ασβεστολίθους, αργίλους και κροκαλοπαγή.

Στα βαθύτερα μέλη (περιοχή Τατοΐου-Κηφισού), οι νεογενείς αποθέσεις αρχίζουν με λευκές μάργες και πλακώδεις μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, μέσα στους οποίους παρεμβάλλονται ενστρώσεις μαργών, ημισυνεκτικών καστανού χρώματος. Τα ανώτερα μέλη των αποθέσεων αυτών εξελίσσονται σε αμμούχες μάργες και μαργαϊκούς ασβεστολίθους, μέσα στα οποία παρεμβάλλονται ενστρώσεις κροκαλοπαγών. Στη συνέχεια τα ιζήματα αυτά μεταβαίνουν προς τα πάνω σε μη συνεκτικά κροκαλοπαγή, που εναλλάσσονται με ενστρώσεις κροκαλών με άμμους, καθώς και με αμμούχους πηλούς ανοικτού χακί χρώματος (Αδ.Φωτιάδης, 2008).

Το μέγεθος των κροκαλών ποικίλλει από ένστρωση σε ένστρωση φτάνοντας μέχρι και τα 30 cm. Το είδος των κροκαλών είναι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, σχιστόλιθοι, ασβεστόλιθοι της Πάρνηθας, καθώς και ψαμμίτες του Παλαιοζωικού. Οι κλίσεις των ιζημάτων είναι γενικά ήπιες, με διεύθυνση προς νότο και παράταξη στρωμάτων περίπου Α-Δ, που γρήγορα αλλάζει εξαιτίας της μικρής πτύχωσης των στρωμάτων (Αδ.Φωτιάδης, 2008).

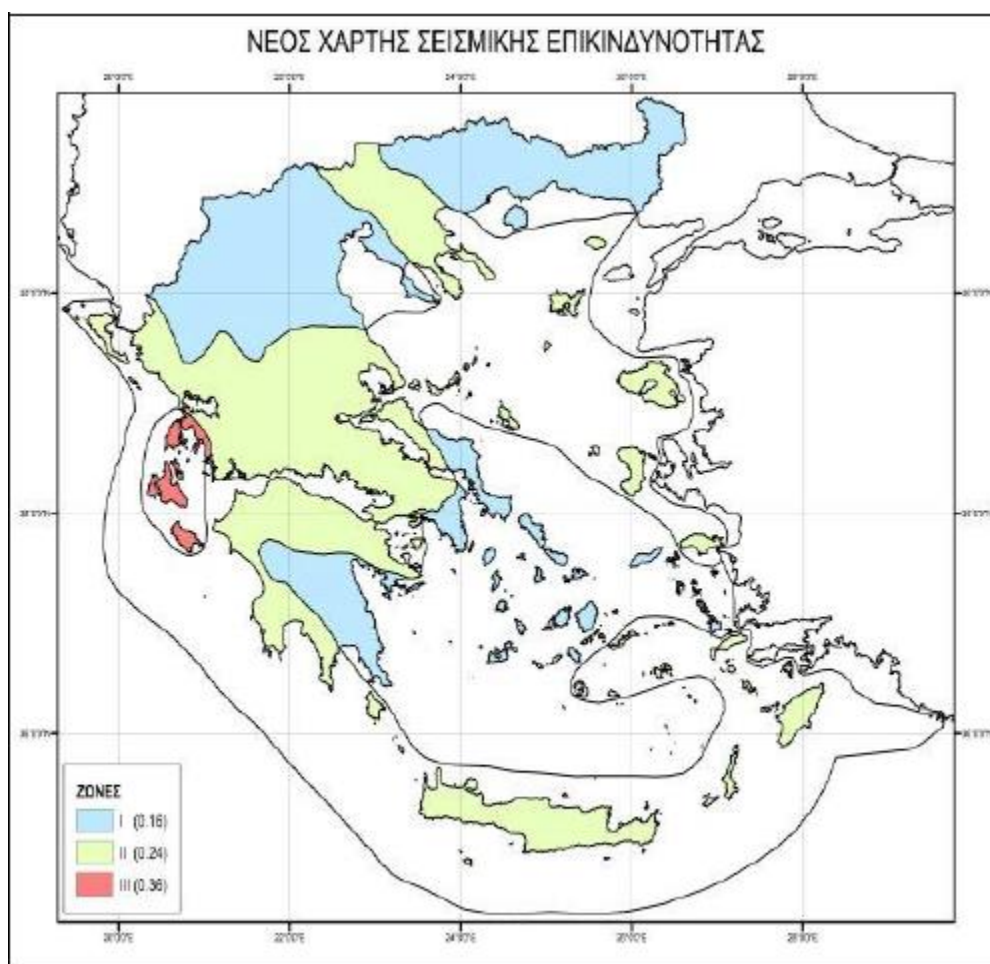
Καθώς βαίνουμε προς τα ανώτερα μέλη, τα ιζήματα έχουν ανοικτό χρώμα και στη συνέχεια μεταβαίνουν πλευρικά και προς τα πάνω στις καστανοκόκκινες ποταμοχερσαίες αποθέσεις της περιοχής. Οι τελευταίες αποτελούνται από εναλλαγές συνεκτικών καστανών αργίλων και ιλυο-αμμούχων υλικών. Μέσα στα υλικά αυτά απαντούν ενστρώσεις με μικρές κροκάλες που αποσφηνώνονται πολύ γρήγορα, καθώς και αραιές κροκάλες όχι καλά αποστρογγυλωμένες. Το ρέμα του Κηφισού τέμνει τις καστανοκόκκινες αποθέσεις σε μεγάλο πάχος, φαίνεται καθαρά ότι τα κροκαλοπαγή και τα αργιλούχα ή πηλούχα υλικά εναλλάσσονται τόσο κατά την οριζόντια όσο και κατά την κατακόρυφο. Χαρακτηριστικό των αποθέσεων αυτών είναι η μικρή κλίση, η απουσία τεκτονισμού (Αδ.Φωτιάδης, 2008).

2.3 Τεκτονική της περιοχής

Η οροσειρά της Πάρνηθας εκτείνεται μεταξύ των Τεταρτογενών ρηξιγενών τάφρων του Κορινθιακού Κόλπου στα Δυτικά και του Ευβοϊκού Κόλπου. Διαφαίνεται ότι η ανύψωση της Πάρνηθας ελέγχεται από την άνοδο του κάτω τεμάχους των κύριων κανονικών ρηγμάτων με διεύθυνση ΔΒΔ-ΑΝΑ και ΒΑ-ΝΔ. Οι Ganas κ.ά (2007) υποστηρίζουν ότι οι ΔΒΔ-ΑΝΑ/κής διεύθυνσης κανονικές ρηξιγενείς δομές που οριοθετούν την Πάρνηθα, είναι σε μεγαλύτερο βαθμό ενεργές κατά την διάρκεια του ανωτέρου Τεταρτογενούς. Επίσης, η αξονική τάση προς τα ΒΒΑ/κά χαρακτηρίστηκε ως συμβατή με τον εστιακό μηχανισμό του σεισμού που έπληξε το ΒΔ τμήμα της λεκάνης των Αθηνών το 1999. Για την περιοχή των Θρακομακεδόνων εκδηλώθηκαν μόνο δευτερογενή καταστροφικά φαινόμενα, όπως καταπτώσεις, κατολισθήσεις, καθιζήσεις, επιφανειακές διαρρήξεις και χαλάρωση διακλάσεων, διαρρήξεων και άλλων ασυνεχειών στη βραχομάζα. Από την κατανομή των δευτερογενών καταστροφικών φαινομένων, προκύπτει ότι το σεισμογόνο ρήγμα έχει μια γενική διεύθυνση ΑΒΑ-ΔΝΔ με κλίση προς τα ΝΝΑ/κά και εντοπίζεται στον ορεινό όγκο της Πάρνηθας, βόρεια από τη Φυλή. Το ρήγμα αυτό βρίσκεται στην προέκταση των, αντίστοιχης διεύθυνσης, ενεργών και σεισμικών ρηγμάτων που εντοπίζονται στον ευρύτερο χώρο του Ανατολικού Κορινθιακού κόλπου, υπεύθυνα για καταστροφικούς σεισμούς από τους ιστορικούς χρόνους μέχρι σήμερα (Αρχαία Κόρινθος, Κόρινθος, Αλκυονίδες κλπ.). Τα νεοτεκτονικά και μορφοτεκτονικά στοιχεία της ζώνης αυτής, από τον Ανατολικό Κορινθιακό μέχρι και την Αττική, φανερώνουν ότι τα περισσότερο ενεργά τμήματα εντοπίζονται στο χώρο του Αν.

Κορινθιακού, ενώ προς τα Δυτικά (Αττική) η δραστηριότητα αυτή γίνεται μικρότερη (Αδ.Φωτιάδης, 2008).

Η διαπίστωση αυτή ερμηνεύει το γεγονός ότι στον χώρο της Αττικής δεν εντοπίζονται μεγάλα και εντυπωσιακά ρήγματα αυτής της διεύθυνσης (με κατοπτρικές επιφάνειες, κορήματα, τεκτονικά λατυποπαγή κλπ.) και μόνο τα μορφοτεκτονικά στοιχεία συνηγορούν για κάτι τέτοιο. Αυτό φαίνεται και από το Χάρτη Ζωνών Σεισμικής Επικινδυνότητας του Ελληνικού Χώρου (Εικ. 6), που αναφέρεται στο Νέο Αντισεισμικό Κανονισμό, η βόρεια και νότια Αττική ανήκει αντίστοιχα στις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας II και I (Δ.Γαλανάκης, 2009). Αντίθετα, στο χώρο του Αν. Κορινθιακού, η παρουσία μεγάλων και εντυπωσιακών ρηγμάτων με μεγάλες κατοπτρικές επιφάνειες και με επαναδραστηριοποιήσεις είναι πολύ συχνή (Αδ.Φωτιάδης, 2008). Γενικά η ευρύτερη περιοχή των Αθηνών επηρεάζεται από τρεις κύριες σεισμικές ζώνες, που οριοθετούνται με βάση νεοτεκτονικά και σεισμολογικά κριτήρια. Οι ζώνες αυτές είναι ο Κορινθιακός κόλπος, ο Ευβοϊκός και η περιοχή της Αταλάντης (Δρακόπουλος και Μακρόπουλος, 1983).



Εικόνα 8: Οι τρεις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας (I,II,III) στις οποίες χωρίσθηκε ο Ελληνικός χώρος, όπως δίνεται στον αναθεωρημένο ΕΑΚ 2004.

Πιο συγκεκριμένα, το ρήγμα THR 1 που οριοθετεί τον ορεινό όγκο της Πάρνηθας με διεύθυνση Α-Δ έως ΒΒΑ-ΝΝΔ και κλίση προς τα νότια, φέρνει σε επαφή το αλπικό υπόβαθρο με τα νεογενή ιζήματα αλλά και με τα ανω-πλειστοκαινικά ριπίδια και τα πλευρικά κορήματα. Το ρήγμα THR 2

είναι παράλληλο με το THR 1, κόβει αποκλειστικά τους αλπικούς σχηματισμούς, δεν έχει σημάδια πρόσφατης δραστηριοποίησης και για το λόγο αυτό θεωρείται δυναμικά ενεργό. Το μήκος του φθάνει τα 7,5 χλμ. Το ρήγμα THR 3 με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ και κλίση προς ΝΔ, αποτελεί τμήμα του ρήγματος Αγ. Γεωργίου (Rondoyanni Th., et al, (2000), πρόκειται για σεισμικό ρήγμα και έχει συνολικό μήκος 22 χλμ. Λαμβάνοντας υπόψη τα σεισμοτεκτονικά χαρακτηριστικά (μέγιστο μήκος και άλμα), συνάγεται το συμπέρασμα ότι τα ρήγματα THR 1 και THR 3 έχουν τη δυνατότητα να εκδηλώσουν σεισμούς μεγέθους έως 5,6 R και 6,4 R αντίστοιχα. Λαμβάνοντας υπόψη τις γεωμετρικές παραμέτρους των ρηγμάτων (μήκος 7,5 χλμ και 22 χλμ αντίστοιχα), οι μέγιστες κατακόρυφες εδαφικές μετατοπίσεις που μπορούν να δημιουργηθούν από μια μελλοντική του ενεργοποίηση, υπολογίζονται ότι μπορούν να φθάσουν τα 32 και 65 cm αντίστοιχα (Wells, D.L. and Corpersmith, K.J., 1994), ενώ σε θέσεις που τα ρήγμα φέρνουν σε επαφή το αλπικό υπόβαθρο με τις χαλαρές μειο-πλειστοκαινικές αποθέσεις η μετατόπιση μπορεί να είναι ακόμη μεγαλύτερη (Δ.Γαλανάκης, 2009).

Επίσης σημαντικό ρόλο στην δραστηριότητα των επιμέρους τμημάτων της μεγάλης αυτής, Α-Δ περίπου, ζώνης (Μέττος 1992), διαδραματίζουν κάποιες άλλες, σχεδόν εγκάρσιες, ρηξιγενείς ζώνες με ΒΑ-ΝΔ διεύθυνση, που ταυτίζονται, στην περιοχή μελέτης, με τον φυσικό ρου του Κηφισού Ποταμού και που συμπίπτει με τα ανατολικά όρια της περιοχής μελέτης. Η διεύθυνση αυτή ταυτίζεται με μια μεγάλης κλίμακας και αντίστοιχης διεύθυνσης, τεκτονική δομή (επαφή μεταμορφωμένων Πεντέλης – Υμηττού με τα αμεταμόρφωτα Πάρνηθας – Αιγάλεω). Το ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης εδράζεται ανάμεσα σε δύο αλπικές ενότητες (βλ. πιθανές επωθήσεις, με βάση τα γεωλογικά χαρτογραφικά δεδομένα από Κατσικάτσο 2000, 2002) που εφάπτονται στον χώρο αυτό, διαμέσου μιας σημαντικής και μεγάλης κλίμακας τεκτονική ασυνέχεια, ενδεχομένως παράλληλη του Κηφισού Ποταμού και που διασχίζει από ΒΑ προς ΝΔ/κά το ανατολικό τμήμα της περιοχής (Αδ.Φωτιάδης, 2008). Η επαφή αυτή μεταφράζεται ως μια σημαντική ρηγματογενής ζώνη εφελκυστικής αποκόλλησης (detachment, Παπανικολάου κ.ά., 2004α).

2.4 Υδρογεωλογικά στοιχεία

Οι υδρογεωλογικές συνθήκες των επί μέρους γεωλογικών σχηματισμών που δομούν την περιοχή ενδιαφέροντος έχουν ως εξής:

2.4.1 Προσχώσεις

Από υδρογεωλογικής άποψης συμπεριφέρονται ως μέτρια περατός σχηματισμός με υδροφορία ενδοπορικής ροής και εγκατάστασης, ενιαία, ελεύθερου τύπου και υδραυλικά συνεχόμενη με τις ανώτερες και αδρομερέστερες στοιβάδες του νεογενούς, το οποίο πάντως επιβάλλει μεγαλύτερες υδραυλικές κλίσεις. Η αναμενόμενη γενική περατότητα εκτιμάται μεταξύ 10-5 m/sec και 10-3 m/sec ενώ η αποθηκευτικότητα μεταξύ 5% και 12% (Ν.Σιέμος, 2009).

Συντηρεί υδροφορία με υψόμετρο στάθμης μεταξύ 210 m και 350 m περίπου. Η μορφολογία της στάθμης είναι ελαφρά συγκλίνουσα κατάντη του οικισμού των Θρακομακεδόνων με κλίση από 30‰ έως 50‰, σε μέσο υψόμετρο 280 m και βάθος στάθμης κυμαινόμενο κυρίως μεταξύ 10 και 45 m, ενώ η μέση ετήσια κύμανση της ανέρχεται περίπου σε 2,8m (σχετικά μικρή) (Ν.Σιέμος, 2009).

Η τροφοδοσία του υδροφορέα γίνεται από την άμεση κατείσδυση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και έμμεσα από επιφανειακές απορροές του βόρειου υψηλού τοπίου, ενώ δεν

θα πρέπει να αποκλεισθεί και υπόγεια πλευρική μετάγγιση ασβεστολιθικής υδροφορίας (N.Σιέμος, 2009).

Ειδικότερα έγινε απογραφή 20 υδροσημείων (11 γεωτρήσεις και 9 πηγάδια), στα οποία έγιναν μετρήσεις στάθμης και ελήφθησαν δείγματα νερού για ποιοτικό έλεγχο, για την αποτύπωση της ποιοτικής κατάστασης της υπόγεια υδροφορίας. Οι μετρήσεις στάθμης αφορούν το βάθος της στάθμης από το έδαφος. Όλες οι μετρήσεις στάθμης και ποιότητας των υπογείων νερών έχουν κατά το δυνατόν ληφθεί σε κατάλληλες χρονικές περιόδους, ώστε να επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή απεικόνιση των συνθηκών μεταβολής τους (N.Σιέμος, 2009).

Εκ των γραφημάτων προέκυψε σχετικά ομοιόμορφη εικόνα (pattern) της διακύμανσης της στάθμης της υδροφορίας και η οποία αποδίδεται στη σχετικά ομοιογενή λιθολογική φύση της ακόρεστης ζώνης καθώς και σε μη σημαντικές διαφοροποιήσεις στην χωροταξική κατανομή των απολήψεων νερού από τον υδροφόρο ορίζοντα. Σημειώθηκε, επίσης, η μικρή διαχρονική διαφοροποίηση στα υπόγεια υδατικά αποθέματα κάτι το οποίο αποδίδεται στις σχετικά περιορισμένες απολήψεις υπόγειου νερού, αλλά και στον χαρακτήρα της υπόγεια ροής (ενδοπορική ροή, χαμηλές ταχύτητες υπόγεια αποστράγγισης) (N.Σιέμος, 2009).

2.4.2 Νεογενής σχηματισμός

Η περατότητά του είναι γενικά μικρή, λόγω της συμμετοχής λεπτομερούς μέλους σε όλες τις λιθολογικές φάσεις, ενώ από την όλη γεωλογική – υδρογεωλογική εικόνα αναμένεται σημαντική διαφορά μεταξύ της οριζόντιας και κατακόρυφης περατότητας, με μεγαλύτερη πάντως την οριζόντια συνιστώσα.

Αντιθέτως, η υδροχωρητικότητα, λόγω του σημαντικού αναπτύγματος του σχηματισμού, είναι αυξημένη. Το πορώδες είναι κυρίως πρωτογενές και λιγότερο δευτερογενές από κατατμήσεις.

Ανεξάρτητα, πάντως, του μέτριου υδρογεωλογικά χαρακτήρα του, στον εν λόγω σχηματισμό συντηρείται υδροφορία στους αδρομερείς, υπό πίεση, ορίζοντες με αθροιστική στάθμη ηρεμίας ανυψωμένη στα έργα υδροληψίας.

Ο σχηματισμός χαρακτηρίζεται από ενδοπορική ροή και μόνο τοπικά, σε συνεκτικά μέλη αυτού, μπορεί να προστεθεί η ενδορωγματική ροή.

Οι πλέον αποδοτικοί ορίζοντες αναμένονται μετά το βάθος των 50 m με δυναμικότητα αυξανόμενη μετά του αναπτύγματος και της αδρομέρειας των οριζόντων.

Η τροφοδοσία του σχηματισμού γίνεται από εκτεταμένη σχετικά επιφάνεια, κυρίως από άμεση συνιστώσα κατείδυσης και ενδεχομένως από πλευρικές μεταγγίσεις ανθρακικών σχηματισμών (N.Σιέμος, 2009).

2.4.3 Ασβεστόλιθοι

Έχουν γενικά καλή περατότητα λόγω της ρωγμάτωσής τους η οποία έχει διευρυνθεί από την καρστική διεργασία. Χαρακτηρίζονται από δευτερογενές πορώδες μικρό έως μέτριο (~ 4%) αλλά η συνολική υδροχωρητικότητα λόγω του αναπτύγματός τους είναι μεγάλη.

Εμφανίζονται στο υψηλό τοπίο και αποτελούν το κάλυμμα του Παλαιοζωϊκού επάρματος της Πάρνηθας στην περιοχή του οποίου η υδροφορία τους αποστραγγίζεται γρήγορα μέσω πηγών ενώ στη χαμηλότερη περιοχή και καθώς προσεγγίζεται η οριακή τους ζώνη με τους κοκκώδεις σχηματισμούς (Τεταρτογενές, Νεογενές) το βάθος συντήρησης της υδροφορίας συναρτάται με το Παλαιοζωϊκό υπόστρωμα, το οποίο αποτελεί υδραυλική βάση και ρυθμιστή της κυκλοφορίας στον

ανθρακικό σχηματισμό, γεγονός όμως, το οποίο ενίοτε δυσχεραίνει τη συντήρηση κορεσμένης ζώνης (N.Σιέμος, 2009).

2.4.4. Παλαιοζωϊκό

Το Παλαιοζωϊκό υπόβαθρο παρουσιάζει ποικίλη υδρογεωλογική συμπεριφορά αλλά γενικά συμπεριφέρεται ως άνυδρος σχηματισμός ή υδροεπιβραδυντής και μόνο τοπικά όπου πυκνώνει η ανθρακική παρεμβολή καθίσταται ημιυδροφόρος με τη στραγγιστική, όμως, λειτουργία των ευνοϊκών μελών ασθενέστατη εξ αιτίας του ισχυρού υδραυλικού αποκλεισμού τους από το σχιστολιθικό περιβάλλον. Λόγω της μικρής γενικής του περατότητας λειτουργεί ως βάση της υδροφορίας του ανθρακικού του καλύμματος.

Η θέση ως προς τη στάθμη της θάλασσας της οριακής του επιφάνειας με το ανθρακικό κάλυμμα, ρυθμίζει τη γενική κυκλοφορία και καθορίζει τις ζώνες συγκλίσεως ή αποκλίσεως των ροών (N.Σιέμος, 2009).

3. ΚΩΔΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ

3.1 Λογισμικά/κώδικες προσομοίωσης ροής γεωθερμικών πεδίων

3.1.1 MODFLOW

Το MODFLOW αποτελεί έναν από τους πιο ευρέως χρησιμοποιούμενους υπολογιστικούς κώδικες στη διερεύνηση και ερμηνεία της ροής του υπόγειου νερού στα πλαίσια της επιστήμης της υδρογεωλογίας. Είναι ο πλέον γνωστός κώδικας για πορώδεις υδροφορείς και έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε πολλές χώρες, καθώς και στην Ελλάδα.

Με τη χρήση του παραπάνω κώδικα, το υπό εξέταση υδρογεωλογικό σύστημα προσομοιώνεται με ένα σύνολο μαθηματικών εκφράσεων οι οποίες αναπαριστούν τόσο το φαινόμενο της ροής, όσο και τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά του υδρογεωλογικού συστήματος. Με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών εφαρμόζεται συνδυασμός της εξίσωσης ροής του Darcy και της εξίσωσης συνέχειας. Ο κώδικας MODFLOW δύναται να προσομοιώσει ροή σταθερής κατάστασης όπως επίσης και συνθήκες μεταβατικής ροής τόσο σε μονοδιάστατη απεικόνιση όσο και δισδιάστατη αλλά και τρισδιάστατη (Καλλιώρας, 2015).

Αρχή του κώδικα MODFLOW

Η αρχή του μαθηματικού μοντέλου του κώδικα MODFLOW εμπεριέχει ένα σύνολο μαθηματικών απλοποιήσεων και υποθέσεων αποβλέποντας στο να μετατρέψει τα πραγματικά δεδομένα του υδρογεωλογικού συστήματος σε ένα μαθηματικό υδρογεωλογικό σύστημα στον υπολογιστή. Για παράδειγμα κάποιες αρχές του κώδικα έχουν ως εξής (Oude Essink, 2000):

- Το υδρογεωλογικό σύστημα δύναται να προσομοιωθεί για σταθερή κατάσταση και συνθήκες μεταβλητής ροής,
- Το μαθηματικό υδρογεωλογικό σύστημα εφαρμόζει και αξιοποιεί την αρχή των πεπερασμένων διαφορών για ένα block-center,
- Δεν υφίσταται ροή πέρα από τα όρια του μοντέλου,
- Το μέσο (κατά πρώτιστα πορώδες) το οποίο πρόκειται να προσομοιωθεί δύναται να είναι ομοιογενές,
- Το μέσο (κατά πρώτιστα πορώδες) το οποίο πρόκειται να προσομοιωθεί δύναται να είναι ανισοτροπικό,
- Το σύστημα ροής ενδέχεται να έχει ακανόνιστο σχήμα, περικλείοντας ελεύθερο, μερικώς υπό-πίεση ή υπό-πίεση υδροφόρο καθώς και συνδυασμό των παραπάνω,
- Η ροή μπορεί να προσομοιωθεί πλήρως σε τρισδιάστατη μορφή ή απεικόνιση.

Μερικές από τις υποθέσεις του κώδικα MODFLOW, παρατίθενται παρακάτω:

- Η πυκνότητα του υπόγειου νερού θεωρείται σταθερή,
- Η κίνηση του υπόγειου νερού λαμβάνει χώρα σε τρεις διαστάσεις (x,y,z) (ορθογωνικά),

- Οι ιδιότητες κάθε block υποτίθεται ότι κατανέμονται ομοιόμορφα και ομοιογενώς (Καλλιώρας, 2015).

Διακριτοποίηση του πεδίου ορισμού του μοντέλου

Ο υπολογιστικός κώδικας MODFLOW και συγκεκριμένα το πεδίο ορισμού του μοντέλου (model domain) διακριτοποιείται κατ' απόλυτο διάστημα υποδιαιρώντας τη συνολική επιφάνεια σε επιμέρους στοιχεία. Το μέγεθος κάθε στοιχείου, στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση, θεωρείται ομοιογενές τόσο κατά σειρά όσο και κατά στήλη, και καθορίζονται από το χειριστή κατά τη διάρκεια την προ-επεξεργαστικής διαδικασίας. Με τον παραπάνω τρόπο παρέχεται η δυνατότητα μιας πολυποίκιλης χωρικής ανάλυσης για την περιοχή έρευνας. Τα στοιχεία του μοντέλου μπορούν να διαφέρουν μεταξύ τους ως προς το μέγεθος και τον όγκο τους, αλλά η κατανομή των υδραυλικών παραμέτρων καθενός από αυτά θεωρείται ομοιογενής (Καλλιώρας, 2015).

Προσομοίωση του χρονικού παράγοντα

Όσον αφορά στην προσομοίωση σταθερής κατάστασης, τόσο οι εισαγόμενες όσο και οι εξαγόμενες τιμές του μοντέλου παραμένουν σταθερές. Στην περίπτωση της μεταβατικής ροής, τα εισαγόμενα στοιχεία του μοντέλου, οι εξαγόμενες πηγές καθώς επίσης και τα εξαγόμενα στοιχεία του μοντέλου μεταβάλλονται με το χρόνο. Η μεταβολή του ρυθμού φυσικού εμπλουτισμού κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου αποτελεί τυπικό παράδειγμα των χρονικά εξαρτώμενων στοιχείων εισόδου του μοντέλου (Καλλιώρας, 2015).

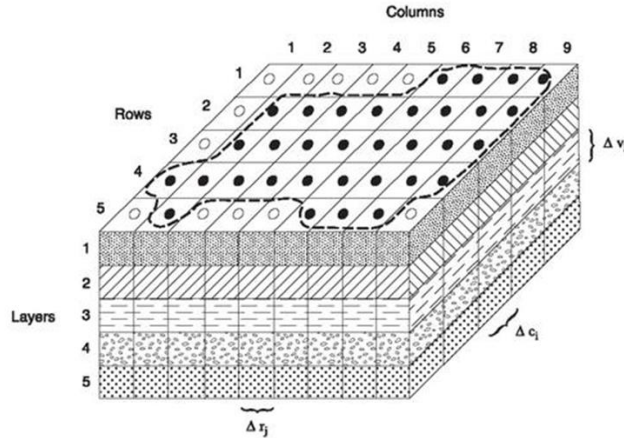
Εξίσωση πεπερασμένων διαφορών

Η εξίσωση πεπερασμένων διαφορών του MODFLOW, θεωρώντας σταθερή την πυκνότητα του υγρού, έχει ως εξής (Harbaugh 2005) (εικ.9):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.1)$$

όπου:

- K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} : υδραυλικές αγωγιμότητες
- h : πιεζομετρικό φορτίο
- W : ογκομετρική ροή ανά μονάδα όγκου (sources/sinks)
- S_s : Συντελεστής αποθήκευσης του πορώδους μέσου
- T : χρόνος



Εικόνα 9: ροή μεταξύ των blocks του μοντέλου.

Υδραυλική αγωγιμότητα

Η μαθηματική έκφραση που περιγράφει ποσοτικά το μέγεθος της υδραυλικής αγωγιμότητας ορίζεται ως εξής (Essink, 2000):

$$CR_{I,J+1/2,K} = \frac{k_{i,j+1/2,k} \Delta y \Delta z}{\Delta x} \quad (3.2)$$

όπου:

$CR_{i, j+1/2,k}$ + η υδραυλική αγωγιμότητα μεταξύ των κομβικών σημείων (ή κόμβων) $[i, j,k]$ και $[i, j+1,k]$ στην κατεύθυνση της γραμμής. Παρόμοια μαθηματική διαδικασία ακολουθείται και κατά τη διεύθυνση των στηλών και των στρωμάτων. Η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας εξαρτάται άμεσα από τα στρωματικά χαρακτηριστικά και το ρυθμό κορεσμού, ενώ ο ακριβής προσδιορισμός αυτής δίνεται από τους McDonald και Harbaugh (1984; 1988) (Καλλιώρας, 2015).

Υδατικό ισοζύγιο

Ο υπολογιστικός κώδικας MODFLOW υπολογίζει το υδατικό ισοζύγιο για το συνολικό πεδίο ορισμού του μοντέλου έτσι ώστε να επιβεβαιώσει την εγκυρότητα και αξιοπιστία της μαθηματικής επίλυσης αλλά επίσης και να παρέχει μια συνολική απεικόνιση του συστήματος ροής (Καλλιώρας, 2015).

Οριακές συνθήκες

Ο υπολογιστικός κώδικας MODFLOW, ορίζει ένα σταθερό όριο του πιεζομετρικού φορτίου, το λεγόμενο *Πρόβλημα Dirichlet*. Παρ' όλα αυτά, παρέχεται η δυνατότητα προσομοίωσης των οριακών συνθηκών για υδρογεωλογικά συστήματα με σταθερή ροή ή ακόμα και στην περίπτωση του *Προβλήματος Neumann*, χρησιμοποιώντας εξωτερικές πηγές στο εσωτερικό των ορίων (Καλλιώρας, 2015).

Απαιτήσεις δεδομένων

Δεδομένα όπως η μεταβιβαστικότητα και η υδραυλική αγωγιμότητα θεωρούνται ως τα πλέον απαραίτητα στοιχεία κάθε στοιχείου του κανάβου, για μια εμπειριστατωμένη απεικόνιση του υδρογεωλογικού συστήματος. Εκτός από τις παραπάνω παραμέτρους του εδαφικού ή του υδροφόρου σώματος, θεωρείται επίσης αναγκαία η εισαγωγή του πάχους του υδροφόρου στρώματος ή των γεωλογικών στρωμάτων της υπό εξέταση περιοχής. Στην περίπτωση που αναλύεται και κατ' επέκταση προσομοιώνεται η μεταβατική ροή του συστήματος, τότε υπεισέρχεται ο υπολογισμός του συντελεστή μεταβιβαστικότητας S και/ή η ειδική απόδοση μ , ανάλογα με το είδος του υδροφόρου (υπό-πίεση και ελεύθερος αντίστοιχα) (Καλλιώρας, 2015).

Μαθηματική περιγραφή

Ο υπολογιστικός κώδικας MODFLOW, εξισώνει και επεξεργάζεται μαθηματικά τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- εξωτερικές πηγές σε block,
- τύπους στρωμάτων,
- οριακές συνθήκες,
- αριθμητικές επιλύσεις της εξίσωσης ροής του υπόγειου νερού (Καλλιώρας, 2015).

3.1.2 Micro-Fem

Ο υπολογιστικός κώδικας Micro-Fem (Hemker & Elburg, 1988: v. 2.0; Hemker & Nijssken, 1996: v. 3.1) χρησιμοποιείται για την ανάλυση και ομοίωση της ροής του υπόγειου νερού σε πολλαπλά και επάλληλα υδρογεωλογικά συστήματα. Το Micro-Fem έχει τη δυνατότητα ομοίωσης της οριζόντιας ροής του υπόγειου νερού σε δισδιάστατη απεικόνιση για πολλαπλά υδροφόρα στρώματα με τη μέθοδο (ή προσέγγιση) των πεπερασμένων στοιχείων. Επίσης ομοιώνει με μονοδιάστατη απεικόνιση την κάθετη ροή του υπόγειου νερού ανάμεσα σε διαδοχικά στρώματα χρησιμοποιώντας την τεχνική των πεπερασμένων διαφορών. Η εφαρμογή του εν λόγω υπολογιστικού κώδικα επεκτείνεται στην ομοίωση αποστραγγιστικών αυλακιών, χειμάρρων, εξατμισοδιαπνοής, ετερογενών υδροφόρων και ανυδροφόρων συστημάτων ακόμα και στην περίπτωση ανισότροπων συνθηκών. Το συγκεκριμένο λογισμικό υποστηρίζει τη δημιουργία πλέγματος, προετοιμασία εισαγωγής δεδομένων, υπολογισμό μοντέλου, μετεπεξεργασία γραφικών και σχεδιασμό γραφημάτων των αποτελεσμάτων (Καλλιώρας, 2015).

Ο υπολογιστικός κώδικας Micro-Fem συνοδεύεται από μία σειρά προγραμμάτων όπως τα ακόλουθα:

- FemGrid

Για τη δημιουργία τριγωνικού πλέγματος ακανόνιστων γεωμετρικών χαρακτηριστικών.

- FemCalc

Για τον υπολογισμό κομβικών υδραυλικών φορτίων καθώς επίσης εσωτερικών και εξωτερικών αυξομειώσεων ή διακυμάνσεων.

- FeModel

Προεπεξεργαστικό μέρος: για τροποποίηση του κανάβου, εντοπισμό και αλλαγή των παραμέτρων του υδροφόρου σώματος, εκφόρτιση και άντληση του υδροφόρου, ανάλυση των οριακών συνθηκών και τέλος γραφική απεικόνιση των εισαγόμενων δεδομένων.

Μετεπεξεργαστικό μέρος: για εξέταση, ανάλυση, παρουσίαση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων του μοντέλου.

- FemPlot

Για το σχεδιασμό του κανάβου του πλέγματος, της κατανομής των υδραυλικών φορτίων, των ιδιοτήτων του υδροφόρου και των ισογραμμών ροής (flowlines).

- FeMerge

Για τη σύνθεση νέου μοντέλου βασιζόμενο στο αρχικό μοντέλο αλλά με τη χρήση νέων δεδομένων πλέγματος (Καλλιώρας, 2015).

3.1.3 SHARP & SWIP

Οι υπολογιστικοί κώδικες SHARP και SWIP, αφορούν αφ' ενός το μηχανισμό ανάπτυξης μιας αιχμηρής διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού νερού και αφ' ετέρου τη μεταγωγική-διανομητική μεταφορά με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών αντίστοιχα. Ο κώδικας SHARP αποτελεί λογισμικό της Γεωλογικής Επισκόπησης των Η.Π.Α. (U.S. Geological Survey) (Essaid, 1990), ενώ ο SWIP είναι προσαρμοσμένος σε κώδικα της βιομηχανίας πετρελαίου από τη Γεωλογική Επισκόπηση των Η.Π.Α. (INTERA). Το SHARP αποτελεί ημι-τριδιάστατο μαθηματικό ομοίωμα, ενώ το SWIP ομοιώνει τις υδρογεωλογικές συνθήκες της υπό-εξέτασης περιοχής με εξ' ολοκλήρου τρισδιάστατη απόδοση. Και οι δυο παραπάνω κώδικες δύνανται να ομοιώσουν μαθηματικά τη μεταβατική απλή-φάση κορεσμένης ροής υπόγειου νερού (ελεύθερου ή υπό-πίεση υδροφόρου) εξαρτώμενη από την πυκνότητα, ακόμα και σε περιπτώσεις συνθηκών μεταφοράς (Merritt, 1999). Το SWIP παρέχει επίσης τη δυνατότητα ομοίωσης της μεταφοράς μη ισοθερμικών διαλυμένων στερεών με γραμμική ρόφηση, χημικές αντιδράσεις πρώτου βαθμού και μεταφορά θερμότητας. Ειδικότερα για το SHARP οφείλεται να σημειωθεί ότι κρίνεται αποτελεσματικό όσον αφορά στη μαθηματική ομοίωση της ροής υπόγειου νερού σε παράκτιους υδροφορείς, καθώς επιτυγχάνεται η έρευνα, εξέταση, ανάλυση, ομοίωση και ερμηνεία της επίδρασης της δυναμικής του θαλάσσιου νερού στο υδρογεωλογικό σύστημα του γλυκού νερού που εμπεριέχεται στον παράκτιο υδροφόρο (Καλλιώρας, 2015).

3.1.4 SUTRA

Το SUTRA αποτελεί αρκτικόλεξο για την κορεσμένη-ακόρεστη μεταφορά (**S**aturated- **U**nsaturated **T**RAnsport) (Voss, 1984), ο οποίος αρχικά χρησιμοποιήθηκε σαν κώδικας πεπερασμένων στοιχείων για τη μαθηματική επίλυση απλής-φάσης ροής υπεδαφικών υγρών και γενικότερα για τα απλά προβλήματα ροής τους. Κατά την ανάπτυξη καθώς και τη βελτίωση του λογισμικού, η εφαρμογή του επικεντρώθηκε στη χρήση αριθμητικών μεθόδων και ειδικότερα αυτών των πεπερασμένων στοιχείων ή ακόμα και των πεπερασμένων διαφορών (Καλλιώρας, 2015).

Εφαρμογές του κώδικα SUTRA

Ο κώδικας SUTRA έχει αποτελέσει μαθηματικό εργαλείο για την αποτίμηση της ροής του υπόγειου νερού τόσο σε διαπερατές ζώνες ρωγματομένων πετρωμάτων (Andersson et al., 1991) όσο και σε έρευνες πεδίου (Cherkauer et al., 1991). Σε γενικές γραμμές θεωρείται ότι η εφαρμογή του όσον αφορά στην έρευνα της ροής του υπόγειου νερού σε ακόρεστα μέσα (Herbert, 1992) είναι περιορισμένη σε σχέση με την έρευνα των κορεσμένων μέσων. Επίσης έχει επιτυχώς χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση και ερμηνεία της μεταφοράς ρυπαντών σε περιπτώσεις πεδίου (Cherkauer, 1992), μεταφοράς ρυπαντών από καύσιμα αεροπλάνων με τη μέθοδο της βιο-εξυγίανσης (Chepelle et al., 1996) και της επίδρασης των ετερογενών πεδίων στη μεταφορά ρυπαντών (Duffy et al., 1992; Sainers et al., 1994; Bajracharaya et al., 1997). Επιπρόσθετα, η

χρήση του στη μαθηματική ομοίωση της μεταφοράς ρυπαντών σε δοκιμές δεικτών (tracer tests) (Hyndman et al., 1994; White, 1994; Lessof et al., 1997) καθώς επίσης και στην αλληλεπίδραση μεταξύ υδροφόρων και παραγωγικών υδρογεωτρήσεων (Reilly et al., 1993) θεωρήθηκε αποτελεσματική ως προς την εφαρμογή της (Καλλιώρας, 2015).

3.1.5 MOC3D

Ο υπολογιστικός κώδικας MOC3D απεικονίζει τρισδιάστατα τη ροή του υπόγειου νερού και αναπτύχθηκε από την Γεωλογική Επισκόπηση των Η.Π.Α. Η εξίσωση ροής του υπόγειου νερού επιλύεται με την υπολογιστική υπομονάδα MODFLOW του μοντέλου, ενώ η εξίσωση κίνησης-διασποράς επιλύεται με τη μέθοδο των χαρακτηριστικών της υπολογιστικής υπομονάδας MOC (Konikow, et al., 1996). Η κινητική μεταφορά των διαλυμένων ουσιών ομοιώνεται μαθηματικά με την παρακολούθηση και τον εντοπισμό των σωματιδίων ενώ η διασπορική μεταφορά προσομοιώνεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών (Καλλιώρας, 2015).

Χαρακτηριστικά του MOC3D

Ο υπολογιστικός κώδικας MOC3D απαρτίζεται από δυο διαφορετικές υπολογιστικές υπομονάδες οι οποίες αλληλοσυμπληρώνονται και αλληλοκαλύπτονται όσον αφορά στις υπολογιστικές μεθόδους που χρησιμοποιούν. Πρόκειται για τις υπομονάδες MODFLOW και MOC που αναφέρθηκαν παραπάνω. Μερικά από τα χαρακτηριστικά τα οποία συνθέτουν τη συνολική λειτουργία του MOC3D έχουν ως εξής (Essink, 2000):

- ο κώδικας λαμβάνει υπ' όψη τόσο την υδροδυναμική διασπορά (μοριακή διάχυση και μηχανική διασπορά) όσο και χημικές αντιδράσεις όπως η ρόφηση (με την έννοια του συντελεστή επιβράδυνσης) και η ραδιενεργή εξασθένηση.
- η μεταφορά των διαλυμένων ουσιών πραγματοποιείται με το διαχωρισμό της εξίσωσης κίνησης-διασποράς σε δύο συνιστώσες: (α) με τη συνιστώσα της κίνησης η οποία επιλύεται με την τεχνική του εντοπισμού των σωματιδίων (γνωστή ως μέθοδος των χαρακτηριστικών-Method Of Characteristics, MOC) και (β) με τη διασπορική συνιστώσα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Έτσι το MOC3D παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να χρησιμοποιήσει διάφορες αριθμητικές μεθόδους ακόμα και στην περίπτωση που δεν ικανοποιούνται οι συνθήκες της χωρικής διακριτοποίησης, μια και δεν υφίσταται η εφαρμογή των πρότυπων μεθόδων των πεπερασμένων στοιχείων ή πεπερασμένων διαφορών (Grid-Peclet-Number).
- Η μεταβολή του όγκου των πόρων των στοιχείων οφείλει να είναι σχετικά μικρή, ειδάλλως δεν ικανοποιείται η συνθήκη της διατήρησης της μάζας των διαλυμένων. Το συγκεκριμένο αριθμητικό χαρακτηριστικό αφορά την τεχνική του εντοπισμού των σωματιδίων, και συσχετίζεται άμεσα με την ανάλυση και ερμηνεία της μεταφοράς ρυπαντών (Zheng, 1990).
- Παρ' όλους τους περιορισμούς που υπεισέρχονται κατά την εφαρμογή της μεθόδου της αριθμητικής διασποράς, ενδέχεται να υφίστανται παρεκκλίσεις όσον αφορά στο ισοζύγιο μάζας της μεταφοράς ρυπαντών (Καλλιώρας, 2015).

3.1.6 MOCDENS3D

Ο υπολογιστικός κώδικας MOC αναπτύχθηκε αρχικά με σκοπό την ανάλυση και ερμηνεία της ροής του υπόγειου νερού μέσω οριζόντιας και δισδιάστατης απεικόνισης. Στη συνέχεια θεωρήθηκε εφικτή όσο και αποτελεσματική η προσαρμογή του στην ομοίωση της ροής του υπόγειου νερού διαμέσω υδρογεωλογικών συστημάτων με ανομοιογενώς κατανομημένη

πυκνότητα. Το 1981 ο Lebbe (1983) ήταν ο πρωτεργάτης της προσαρμογής του μοντέλου για περιπτώσεις που αφορούν στην κατακόρυφη ροή του υπόγειου νερού σε συνδυασμό με το φαινόμενο της διαφοράς και μεταβολής πυκνοτήτων. Το 1990 ο Oude Essink προσάρμοσε το μοντέλο αναπτύσσοντας την βελτιωμένη έκδοση MOC 3.0 (1989), βασιζόμενος στις θεωρίες του Lebbe (1981; 1983) και του van der Eem (1987) (Καλλιώρας, 2015).

Παράμετροι του MOCDENS3D

Οι παράμετροι που υπεισέρχονται στον υπολογιστικό κώδικα MOCDENS3D αφορούν το αρχείο εισαγωγής δεδομένων με σκοπό τόσο τον ακριβή προσδιορισμό και υπολογισμό της κατανομής των πιεζομετρικών φορτίων του υπόγειου νερού, όσο και την κατανομή της πυκνότητας των διαλυμένων ουσιών και των ταχυτήτων (σε οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο) σαν συνάρτηση συγκεκριμένων χρονικών περιόδων. Μια συνοπτική περιγραφή των παραπάνω παραμέτρων αφορά τα ακόλουθα:

- Παράμετροι μοντέλου, για τον αρχικό προσδιορισμό της δομής του υπολογισμού
- Υπεδαφικοί παράμετροι, για τον προσδιορισμό της γεωμετρίας και υδρογεωλογίας της ήδη σχηματοποιημένης διατομής
- Αρχικές και οριακές συνθήκες (Καλλιώρας, 2015).

Τροποποιήσεις των οριζόντιων παραμέτρων του κώδικα

Η τροποποίηση του *οριζόντιου κώδικα* στον προσαρμοσμένο πλέον *κατακόρυφο κώδικα* επιδρά άμεσα στις υπεδafικές παραμέτρους του μοντέλου. Κατά την εφαρμογή του μαθηματικού ομοιώματος το πάχος κορεσμού b του υδροφόρου το οποίο δύναται να ποικίλλει χωρικά, απεικονίζει το πάχος του υδροφόρου κάθετα στο κατακόρυφο σκαρίφημα. Σαν συνέπεια, ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας i k συσχετίζεται μαθηματικά με την μεταβιβατικότητα ii T μέσω της σχέσης:

$$T_{ii} = bk_i \quad (3.3)$$

Ο συντελεστής αποθηκευτικότητας S ο οποίος εφαρμόζεται στο MOC αποτελεί την ειδική αποθηκευτικότητα S_s του MOCDENS3D, καθώς το κορεσμένο πάχος b του υδροφόρου ισούται με 1ft (Καλλιώρας, 2015).

Τύποι οριακών συνθηκών του MOCDENS3D

Οι οριακές συνθήκες οι οποίες απαιτούνται από τον κώδικα MOCDENS3D δια χωρίζονται στις δυο παρακάτω κατηγορίες:

- Στο όριο ενός σταθερού πιεζομετρικού φορτίου, γνωστό ως Πρόβλημα Dirichlet. Καθώς το MOCDENS3D υπολογίζει το φορτίο του γλυκού νερού, το όριο του πιεζομετρικού φορτίου οφείλεται να μετατραπεί σε πιεζομετρικό φορτίο γλυκού νερού στην περίπτωση που η πυκνότητα διαφέρει από αυτή του γλυκού υπόγειου νερού.
- Στο όριο της σταθερής ροής, γνωστό ως Πρόβλημα Neumann. Ο συγκεκριμένος οριακός τύπος υπολογίζεται με τη χρήση δυο διαφορετικών εργαλείων: (α) “απόληψη και κατείσδυση” (π.χ. γραμμές γεωτρήσεων απόληψης και έγχυσης), και (β) “επαναφόρτιση και εκφόρτιση” (π.χ. φυσικός εμπλουτισμός υπόγειου νερού στο υδρογεωλογικό σύστημα) (Καλλιώρας, 2015).

Μετατροπή σε φορτίο γλυκού νερού

Η μαθηματική ομοίωση της κατανομής της ανομοιογενούς πυκνότητας στο σύστημα ροής του υπόγειου νερού προϋποθέτει τη μετατροπή των υδραυλικών φορτίων του γλυκού, υφάλμυρου ή αλμυρού νερού σε φορτίο γλυκού νερού ϕ_f . Ο προσδιορισμός του υδραυλικού φορτίου του γλυκού νερού επιτυγχάνεται με τη χρήση της παρακάτω μαθηματικής έκφρασης:

$$\phi_f = (h - z_{obs}) \frac{\rho_{obs}}{\rho_f} + z_{obs} \quad (3.4)$$

όπου:

- ϕ_f το πιεζομετρικό φορτίο του γλυκού νερού σε υδρογεώτρηση παρακολούθησης σε σχέση με το επίπεδο αναφοράς
- h το παρατηρούμενο πιεζομετρικό φορτίο σε σχέση με το επίπεδο αναφοράς
- z_{obs} η ανύψωση του σημείου παρατήρησης σε σχέση με το επίπεδο αναφοράς
- ρ_{obs} η πυκνότητα της στήλης του νερού στην υδρογεώτρηση παρακολούθησης (Καλλιώρας, 2015).

3.1.7 FEFLOW

Ο υπολογιστικός κώδικας FEFLOW (Finite – Element FLOW) αποτελεί πακέτο προσομοίωσης της δισδιάστατης και τρισδιάστατης ροής του υπόγειου νερού εξαρτημένη από την πυκνότητα, με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων, λαμβάνοντας υπόψη τις διαδικασίες μεταφοράς μάζας και θερμότητας (Diersch, 1988). Ο κώδικας FEFLOW, έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει (Sorek et al., 1999):

- συστήματα υπόγειων νερών με ή χωρίς ελεύθερη επιφάνεια (φρεάτιοι και υπό-πίεση υδροφόροι, κρεμαστοί υδροφόροι),
- προβλήματα στην κορεσμένη και στην ακόρεστη ζώνη,
- φαινόμενα ροής όπου η μεταφορά των ρυπαντών εξαρτάται από την αλμυρότητα και τη θερμοκρασία (thermohaline flow),
- σύνθετες συνθήκες γεωμετρικών και υδραυλικών παραμέτρων (Καλλιώρας, 2015).

3.1.8 Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

Τέλος, χρησιμοποιούνται και τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (artificial neural networks) για την πρόβλεψη της στάθμης του υπόγειου νερού σε καθεστώς άντλησης, την απόκριση καρστικών συστημάτων, την προσομοίωση της βροχής-απορροής κ.λπ. (Daliakopoulos et al., 2004; Lallahem et al., 2005; Nikolos et al., 2008; Feng et al., 2008; Trichakis et al., 2009; Sahoo and Jha, 2013) (Βουδούρης, 2017).

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα αποτελούν ένα χρήσιμο εργαλείο για τον προσδιορισμό της στάθμης του υπόγειου νερού, χωρίς την προϋπόθεση της γνώσης του φυσικού συστήματος που καλούνται να προσομοιώσουν (Trichakis et al., 2009; Πάντου κ.ά., 2014). Έτσι, σε αντίθεση με άλλα αριθμητικά μοντέλα, έχουν το πλεονέκτημα της χρήσης μόνο των υδρολογικών δεδομένων της περιοχής έρευνας ως δεδομένα εισόδου χωρίς την αναγκαιότητα γνώσης του γεωλογικού

υποβάθρου. Ιδιαίτερα σε περιοχές που η γεωλογία είναι είτε περίπλοκη (πχ καρστικά ή διαρρηγμένα πετρώματα) είτε άγνωστη μπορούν να αποδειχθούν ιδιαίτερα αποτελεσματικά. Εφαρμογή έγινε από τους Πάντου κ.ά. (2014) για τον προσδιορισμό του υδραυλικού φορτίου σε υδροφορέα της περιοχής Μεσσαράς Κρήτης με ικανοποιητικά αποτελέσματα (Βουδούρης, 2017).

3.2 Λογισμικά/κώδικες προσομοίωσης μεταβολής θερμοκρασίας γεωθερμικών πεδίων

Η αριθμητική μοντελοποίηση (numerical modelling) έχει γίνει ένα χρήσιμο στοιχείο για το σχεδιασμό τεχνολογιών αβαθούς γεωθερμίας. Χρησιμοποιείται σε διάφορα πεδία που σχετίζονται με τη χρήση γεωθερμικής ενέργειας, από την προσομοίωση των μηχανικών συστημάτων στην πρόβλεψη γεωφυσικών διαδικασιών. Την τελευταία δεκαετία μάλιστα έχει αναπτυχθεί ένας μεγάλος αριθμός των μοντέλων σε Η/Υ που σχετίζονται με γεωθερμικά ενεργειακά συστήματα. Το πεδίο εφαρμογής τους ποικίλει: από τον υπολογισμό της μεταφοράς θερμότητας μέσα σε μια γεώτρηση ή την πρόβλεψη της μεταφοράς θερμότητας μέσα στο έδαφος (Méndez, 2008).

Από τη μεγάλη διαθεσιμότητα αριθμητικών κωδικών, μας ενδιαφέρουν αυτοί που αντιμετωπίζουν τα παρακάτω δύο χαρακτηριστικά: α) προσομοιώσεις των κλειστών συστημάτων ή/και οι γεωτρήσεις άντλησης/επανεισαγωγής θερμότητας (ανοιχτά συστήματα) και, β) η μετάδοση και μεταγωγή θερμότητας (heat conduction and convection) σε πορώδη μέσα. Για την πρώτη περίπτωση, ο κώδικας πρέπει να είναι ικανός να αναπαριστά τη γεωμετρία των σωλήνων των γεωθερμικών συστημάτων σε ένα καλό επίπεδο. Επίσης πρέπει να επιτρέπει στο χρήστη να περιλαμβάνει θεμελιώδεις παραμέτρους εισαγωγής θερμότητας και ρυθμούς εξαγωγής ή/και επανεισαγωγής θερμότητας. Για τη δεύτερη περίπτωση, ο κώδικας θα πρέπει να είναι ικανός να εξετάζει τη μεταβίβαση και τη μεταγωγή της θερμότητας στο μέσο, όπως για παράδειγμα τη μεταφορά θερμότητας σε κανονικούς ή υπό πίεση υδροφόρους. Υπάρχουν κάποια χαρακτηριστικά για την κατάταξη αυτών των κωδικών, όπως η εφαρμοσμένη αριθμητική μέθοδος, ο συνδυασμός διαδικασιών, ο αυτο-υπολογισμός (self calculation) του πεδίου της ροής και η διαθεσιμότητα του κώδικα (εμπορικός κώδικας ή ανοιχτός-δωρεάν) (Méndez, 2008).

Στον πίνακα 3.1 παρατίθενται αριθμητικοί κώδικες για την προσομοίωση της μεταφοράς θερμότητας. Όλοι έχουν κοινό στοιχείο ότι λαμβάνουν υπόψη το πεδίο της ροής και επομένως, τις επιδράσεις της υπόγειας ροής στην απόδοση του γεωθερμικού ενεργειακού συστήματος. Κάποιοι από αυτούς όπως οι THOUGH2, HS2D/3D, SHEMAT και FEFLOW χρησιμοποιούνται ευρέως για το χαρακτηρισμό γεωθερμικών συστημάτων (ρηχών και βαθιών) (Méndez, 2008).

AST (Aquifer storage balance)/TWO (Schmidt and Hellström, 2005): Αυτός ο κώδικας έχει ως αντικείμενο το ισοζύγιο θερμότητας μιας γεώτρησης εξαγωγής θερμότητας (ανοιχτά συστήματα). Υπολογίζει τη θερμοκρασία του εξαγόμενου νερού και τη θερμοκρασία στον υδροφόρο και στα περιβάλλοντα στρώματα. Η ροή του πεδίου πρέπει προηγουμένως να έχει προσομοιωθεί με έναν κώδικα ομοίωσης υπόγειου νερού. Ο κώδικας TWO, είναι μια επέκταση για δύο γεωτρήσεις, μία παραγωγής και μία επανεισαγωγής (Méndez, 2008).

Πίνακας 2: Αριθμητικοί κώδικες κατάλληλοι για την προσομοίωση μεταφοράς θερμότητας αβαθών γεωθερμικών συστημάτων λαμβάνοντας υπόψη την υπόγεια ροή

Όνομα κωδικού	Αριθμητική μέθοδος	Υπολογισμός ροής	Συνδυασμός διαδικασιών	Διαθεσιμότητα	Σχόλια
AST/TWOW	FD	Όχι	Υπόγεια ροή και μεταφορά θερμότητας	Ιδιωτική	
COMSOL	FE	Ναι	Υπόγεια ροή, μεταφορά θερμότητας και μάζας	Εμπορική	Δύναται να συνδυαστούν πολλές διεργασίες
CONFLOW	Εντοπισμός στοιχείων (Particle tracking)	Ναι	Υπόγεια ροή και μεταφορά θερμότητας	Ιδιωτική	
FEFLOW	FE	Ναι	Υπόγεια ροή, μεταφορά θερμότητας, solute transport	Εμπορική	
FRACTure	FE	Ναι	Υπόγεια ροή, μεταφορά θερμότητας	Ιδιωτική	Hot Dry Rock assessments
GEOSYS/ROCKFLOW	FE	Ναι	Υπόγεια ροή, μεταφορά θερμότητας, solute transport	Ιδιωτική	
HST2D/3D	FD	Ναι	Υπόγεια ροή, μεταφορά θερμότητας, solute transport	Εμπορική	Ανθεκτικό λογισμικό και ευρέως χρησιμοποιούμενο
SEAWAT	FD	Όχι	Υπόγεια ροή, solute transport	Ελεύθερος κώδικας	Λογισμικό USGS
SHEMAT	FD	Ναι	Υπόγεια ροή, μεταφορά θερμότητας, solute transport	Εμπορική	Κατάλληλο για εφαρμογές γεωεπιστημών
THETA	FD	Ναι	Μεταφορά θερμότητας και solute transport	Ιδιωτική	
TOUGH2	FD	Ναι	Υπόγειο νερό, υδρατμοί, μη συμπυκνωμένο νερό και	Εμπορική	Από τους πιο διαδεδομένους κώδικες για τις

			μεταφορά θερμότητας		γεωθερμικές τεχνολογίες
TRADIKON 3D	FD	Ναι	Υπόγεια ροή, μεταφορά θερμότητας	Ελεύθερος κώδικας	

gw= υπόγειο νερό; FD: μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών; FE: μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

COMSOL (Holzbecher and Kohfahl, 2008): Ένα μαθηματικό εργαλείο λογισμικού για τη συνδυαστική προσομοίωση διάφορων φυσικών διαδικασιών που αναπαρίστανται από μερικώς διαφορικές εξισώσεις (PDE). Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ή να χειριστεί διαφορετικές μορφές των μερικώς διαφορικών εξισώσεων. Για την προσομοίωση της μεταφοράς θερμότητας, υπάρχει μία συγκεκριμένη ενότητα, η “Heat Transfer Module” (Méndez, 2008).

CONFLOW (Schmidt and Hellström, 2005): Αυτός ο κώδικας προσομοιώνει το θερμικό προφίλ σε έναν υδροφόρο χωρίς να λαμβάνει υπόψη τη διάχυση θερμότητας και τη θερμική διασπορά. Εμφανίζει με γραφικό τρόπο στην οθόνη τα σχέδια της υπόγειας ροής περιλαμβάνοντας και τα θερμικά προφίλ (Méndez, 2008).

FEFLOW (Diersch, 2002): Ένα εκλεπτυσμένο πακέτο λογισμικού για την προσομοίωση της ροής του ρευστού και τη μεταφορά διαλελυμένων συστατικών και/ή τις διαδικασίες μεταφοράς θερμότητας στην υπόγεια επιφάνεια (κορεσμένες ή ακόρεστες συνθήκες). Περιλαμβάνει διαδραστικά γραφήματα, μια διεπαφή GIS, περιφερειοποίηση δεδομένων (data regionalization), εργαλεία βελτιστοποίησης και έναν παραγωγό κανάβου. Το πεδίο εφαρμογής του ποικίλλει από απλές τοπικής κλίμακας ή ευρύτερης κλίμακας προσομοιώσεις (Méndez, 2008).

FRACTure (Kohl and Hopkirk, 1995): Διαμορφώθηκε με συγκεκριμένο στόχο τη μελέτη συνδυαστικών διαδικασιών στις γεωεπιστήμες (geosciences), ειδικά αυτών που σχετίζονται με την μακροπρόθεσμη συμπεριφορά του Hot Dry Rock (HDR, γεωθερμική ενέργεια βαθιών πεδίων). Ο κώδικας ωστόσο δύναται να εφαρμοστεί και σε αβαθή γεωθερμικά συστήματα. Είναι προγραμματισμένος στην FORTRAN 77 (Méndez, 2008).

GEOSYS/ROCKFLOW V3.0 (Kolditz et al., 2001): Ένας κώδικας πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση ροής, μεταφοράς θερμότητας και solute transport σε πορώδη και ρωγματώδη μέσα. Εμπεριέχει ενότητα για διαδικασία αναμόρφωσης, πολυφασικές ροές, ροή αερίων και συνδυασμένες θερμικές, υδραυλικές και μηχανικές διαδικασίες (Méndez, 2008).

HST2D/3D (Kipp, 1986): Ένα πακέτο προσομοίωσης μεταφοράς θερμότητας και solute transport, που διαμορφώθηκε αρχικά από την USGS και τώρα ανήκει στην IF Technology. Το HST2D/3D είναι ένας πολυδύναμος κώδικας και αποτελείται από τέσσερα (4) ανεξάρτητα προγράμματα: έναν επεξεργαστή εισόδου, έναν προσομοιωτή, έναν επεξεργαστή εξόδου και ένα πρόσθετο πρόγραμμα χρησιμότητας. Οι διαδικασίες συνδυάζονται μέσω της διάμεσης ταχύτητας των πόρων, της εξάρτησης της πυκνότητας του υγρού από την πίεση, τη θερμοκρασία, το κλάσμα διαλυτής μάζας, και την εξάρτηση του ιξώδους του υγρού από τη θερμοκρασία και το κλάσμα διαλυτής μάζας (solute-mass fraction) (Méndez, 2008).

SEAWAT (Langevin et al., 2007): Μια συζευγμένη έκδοση των MODFLOW/MT3DMS σχεδιασμένη να προσομοιώνει τρισδιάστατα την υπόγεια ροή σε κορεσμένη ζώνη, μεταβλητής πυκνότητας. Ο κώδικας επιτρέπει την προσομοίωση υπόγειας ροής και μεταφοράς θερμότητας και εμπεριέχει την επίδραση των διάφορων εκδοχών του ιξώδους του υγρού. Αν και δεν είναι

σχεδιασμένο αποκλειστικά για την προσομοίωση της μεταφοράς θερμότητας, η θερμοκρασία δύναται να προσομοιωθεί ως ένα είδος εισάγοντας τους κατάλληλους συντελεστές μεταφοράς (Méndez, 2008).

SHEMAT (Clauser, 2003): Ένας κώδικας για την προσομοίωση στατικών και παροδικών διαδικασιών σε γεωθερμικούς ταμιευτήρες σε δύο ή τρεις διαστάσεις. Υπολογίζει τη ροή του υγρού, τη μεταφοράς θερμότητας και μάζας ως συζευγμένες ή ανεξάρτητες διαδικασίες σε πορώδη μέσα. Εμπριέχει επίσης μια ενότητα χημικών αντιδράσεων (Méndez, 2008).

THETA (Kangas and Lund, 1995): Αυτός ο κώδικας προσομοιώνει τρισδιάστατα και συζευγμένα την ροή, τη μεταφορά θερμότητας και το solute transport σε πορώδη μέσα και επίσης εκτιμά την αποθηκευσιμότητα του υδροφόρου σε θερμική ενέργεια (Méndez, 2008).

TOUGH2 (Pruess et al., 1996): Ένα πρόγραμμα αριθμητικής προσομοίωσης γενικού σκοπού πολυδιάστατων ροών υγρού και θερμότητας για πολυφασικά μίγματα ρευστών σε πορώδη και ρωγματώδη μέσα. Κύρια πεδία εφαρμογής είναι η μηχανική των γεωθερμικών ταμιευτήρων, οι μελέτες απομόνωσης πυρηνικών αποβλήτων, περιβαλλοντική εκτίμηση και αποκατάσταση, και η ροή και η μεταφορά σε πολλαπλά κορεσμένα μέσα και υδροφόρους. Οι δυνατότητες προσομοίωσης αυτού του κώδικα είναι αρκετά διαφοροποιημένες και εκλεπτυσμένες, μια ενότητα για τριφασική, τριών συστατικών, μη ισοθερμική ροή νερού, αέρα και μιας πτητικής οργανικής ένωσης (VOC), και μία ενότητα για ισχυρά συζευγμένη ροή και μεταφορά σε δισδιάστατα συστήματα με μεταβλητή αλμυρότητα και υδροδυναμική διασπορά, είναι μόνο δύο από αυτές. Είναι προγραμματισμένος στη FORTRAN77 (Méndez, 2008).

TRADIKON-3D (Brehm, 1989): Αυτός ο κώδικας ενεργοποιεί την προσομοίωση μεταφοράς μάζας και θερμότητας σε ετερογενή πορώδη μέσα. Το μοντέλο επιτρέπει την προσομοίωση της υπόγειας ροής σε ένα ανισότροπο πορώδες μέσο που το διαπερνούν πολλαπλά φρέατα και γεωτρήσεις (Méndez, 2008).

3.2.1 Κύριες εξισώσεις στην προσομοίωση της μεταφοράς θερμότητας με το MT3DMS

Η μερική διαφορική εξίσωση για τη μεταφορά διαλυτής ουσίας των συστημάτων παροδικής (transient) υπόγειας ροής που επιλύονται από το MT3DMS είναι η ακόλουθη (Zheng and Wang, 1999):

$$\left[1 + \frac{\rho_b K_d}{n}\right] n \frac{\partial C^k}{\partial t} = \text{div}(n(D_m + \alpha_s v_a) \text{grad} C^k) - \text{div}(v_a n C^k) + q_{ss} C_{ss} - \lambda n C^k \quad (3.5)$$

όπου:

C^k : συγκέντρωση διαλελυμένων στερεών	[kg m ⁻³]
D_m : μοριακός συντελεστής διάχυσης	[m ² s ⁻¹]
n : ολικό πορώδες	[-]
α_s : συντελεστής διάχυσης διαλυτής ουσίας	[m]
v_a : ταχύτητα διαρροής	[m s ⁻¹]
q_{ss} : ρυθμός ογκομετρικής ροής ανά μονάδα όγκου του υδροφόρου που αναπαριστά τις εισόδους και τις εξόδους	[m ³ s ⁻¹ m ⁻³]
C_{ss} : συγκέντρωση των εισόδων και των εξόδων	[kg m ⁻³]
λ : ρυθμός αντίδρασης	[s ⁻¹]

ρ_b : πυκνότητα κύριου μέρους [kg m⁻³]
 K_d : συντελεστής κατανομής [m⁻³ kg]

Ο όρος από το αριστερό μέρος της εξίσωσης είναι ο παροδικός όρος (transient term), ο οποίος πολλαπλασιάζεται από τον παράγοντα επιβράδυνσης R . Αυτός ο αδιάστατος παράγοντας αναπαριστά το λόγο μεταξύ της ολικής συγκέντρωσης της διαλυτής ουσίας και της κινούμενης συγκέντρωσης που δίνεται από την κατανομή της ρυπαντικής ουσίας στη ρευστή και στη στερεή φάση (Méndez, 2008).

$$R = 1 + \frac{\rho_b K_d}{\theta} \quad (3.6)$$

Ο πρώτος όρος από τη δεξιά πλευρά είναι ο όρος υδροδυναμικής διασποράς, που περιλαμβάνει την αμιγώς μοριακή διάχυση (Dm) και τη μηχανική διασπορά ($\alpha_s v_a$). Ο δεύτερος όρος αναπαριστά τη διαδικασία της οριζόντιας μεταγωγής (advection) και ο τρίτος και ο τέταρτος όρος αναπαριστούν τις εισόδους και τις εξόδους και τον όρο της χημικής αποσύνθεσης αντίστοιχα (Méndez, 2008).

Τώρα, συζητιέται η εξίσωση μεταφοράς θερμότητας. Αυτή η εξίσωση μπορεί να χαρακτηριστεί από την εξίσωση της διατήρησης θερμότητας, συμπεριλαμβάνοντας τη μεταφορά και τη μεταγωγή (conduction and convection) (Marsily, 1986):

$$n\rho_w C_w \frac{\partial T}{\partial t} + (1-n)\rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \text{div}((k_{Tm} + n\rho_w C_w \alpha_h v_a) \text{grad}T) - \text{div}(n\rho_w C_w v_a T) + q_h \quad (3.7)$$

όπου:

ρ_w : πυκνότητα του νερού [kg m⁻³]
 C_w : ειδική θερμότητα νερού [W s kg⁻¹ K⁻¹]
 ρ_s : πυκνότητα στερεού [kg m⁻³]
 C_s : ειδική θερμοχωρητικότητα στερεού [W s kg⁻¹ K⁻¹]
 T : θερμοκρασία νερού [K]
 T_s : θερμοκρασία στερεού [K]
 k_{Tm} : θερμική αγωγιμότητα κύριου μέσου [W m⁻¹ K⁻¹]
 α_h : συντελεστής θερμικής διασποράς [m]
 q_h : Επανεισαγωγή/εξαγωγή θερμότητας [W m⁻³]

Υποθέτοντας ότι η θερμοκρασία του νερού και του εδάφους είναι η ίδια, ο όρος στο αριστερό μέρος της εξίσωσης μεταφοράς θερμότητας εκφράζεται ως εξής (Méndez, 2008):

$$n\rho_w C_w \frac{\partial T}{\partial t} + (1-n)\rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \rho_m C_m \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.8)$$

Επιπλέον, η παραπάνω εξίσωση απλοποιείται ως εξής:

$$\rho_m C_m \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}((k_{T_m} + n\rho_w C_w \alpha_h v_a) \text{grad}T) - \text{div}(n\rho_w C_w v_a T) + q_h \quad (3.9)$$

όπου ο παράγοντας $\rho_m C_m$ είναι η ογκομετρική θερμοχωρητικότητα του πορώδους μέσου, που εκφράζεται ως εξής:

$$\rho_m C_m = n\rho_w C_w + (1-n)\rho_s C_s = n\rho_w C_w + \rho_b C_s \quad (3.10)$$

ρ_m : πυκνότητα του πορώδους μέσου [kg m⁻³]
 C_m : ειδική θερμότητα του πορώδους μέσου [W s kg⁻¹K⁻¹]

Περιλαμβάνοντας την ανταλλαγή θερμότητας με την επιφάνεια όπου η σταθερά αναλογίας εξαρτάται από την αγωγιμότητα του μέσου, το πάχος του υδροφόρου και το βάθος της στάθμης του νερού (Μυτνυκ, 1978):

$$\frac{\lambda_1}{HF} \Delta T' = \text{ανταλλαγή θερμότητας με την επιφάνεια}$$

όπου:

λ_1 : θερμική αγωγιμότητα του ακόρεστου εδάφους [W m⁻¹ K⁻¹]
 H : πάχος του υδροφόρου [m]
 F : βάθος της στάθμης του νερού [m]
 $\Delta T' = T - T_{\text{επιφάνειας}}$ [K]

Χρησιμοποιώντας αυτόν τον όρο στην απλοποιημένη εξίσωση (3.9) έχουμε:

$$\left(\frac{\rho_m C_m}{n\rho_w C_w} \right) n \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} \left(n \left(\frac{k_{T_m}}{n\rho_w C_w} + \alpha_h v_a \right) \text{grad}T \right) - \text{div}(n v_a T) + \frac{q_h}{\rho_w C_w} - \frac{\lambda_1}{\rho_w C_w HF} \Delta T' \quad (3.11)$$

όπου $D = \frac{k_T}{n\rho_w C_w} + \alpha_h v_a$ είναι ο συντελεστής διασποράς θερμότητας

και $R = \frac{\rho_m C_m}{n\rho_w C_w}$ είναι ο παράγοντας επιβράδυνσης.

3.2.2 Προσαρμοστικοί συντελεστές και η συμπερίληψή τους στο MT3DMS

Όπως αναφέρθηκε πριν, οι διαδικασίες μεταφοράς θερμότητας και διαλυμένης ουσίας στο υπόγειο νερό μπορούν να περιγραφούν με παρόμοιες διαφορικές εξισώσεις. Με στόχο να συσχετίσουμε τις εξισώσεις (3.5) και (3.11), οι συντελεστές συγκρίνονται ως εξής (Méndez, 2008):

Solute transport equation:

$$\left[1 + \frac{\rho_b K_d}{n} \right] n \frac{\partial C}{\partial t} = \text{div}(n(D_m + \alpha_s v_a) \text{grad}C) - \text{div}(v_a n C) + q_{ss} C_{ss} - \lambda n C$$

Solute sorption

Solute diffusion and

Advection

Sources and sinks

Chemical reaction

Heat transport equation:

$$\left(\frac{\rho_m C_m}{n \rho_w C_w}\right) n \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} \left(n \left(\frac{k_{Tm}}{n \rho_w C_w} + \alpha_h v_a \right) \text{grad} T \right) - \text{div}(n v_a T) + \frac{q_h}{\rho_w C_w} - \frac{\lambda_1}{\rho_w C_w H F} \Delta T'$$

Thermal equilibrium
Solute diffusion and dispersion
Convection
Heat injection-extraction
Heat exchange

Έπειτα, θα γίνει περιγραφή κάθε όρου και της συμπερίληψής του στο MT3DMS λεπτομερώς (Méndez, 2008):

- Παράγοντας επιβράδυνσης και συντελεστής κατανομής (Θερμικό ισοζύγιο)

Ο παράγοντας επιβράδυνσης και ο συντελεστής κατανομής, που αναπαριστώνται στην εξίσωση μεταφοράς διαλυτής ουσίας ως απορρόφηση διαλυτής ουσίας, μπορούν να εκφραστούν ισοδύναμα στην εξίσωση μεταφοράς θερμότητας ως θερμικό ισοζύγιο, που αναπαριστά την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ στερεού και νερού.

Στον πρώτο όρο της εξίσωσης μεταφοράς θερμότητας, ο παράγοντας επιβράδυνσης για τη θερμότητας δίνεται ως ο λόγος μεταξύ της ογκομετρικής θερμοχωρητικότητας του πορώδους μέσου (ολική φάση) και της ογκομετρικής θερμοχωρητικότητας του νερού (κινητή φάση):

$$R = \frac{\rho_m C_m}{n \rho_w C_w}$$

Εξισώνοντας τους παράγοντες επιβράδυνσης των μεταφορών θερμότητας και διαλυμένης ουσίας, ο συντελεστής κατανομής εκφράζεται ως μία εξίσωση θερμικών παραμέτρων όπως φαίνεται παρακάτω:

$$1 + \frac{\rho_b K_d}{\theta} = \frac{\rho_m C_m}{n \rho_w C_w} \rightarrow K_d = \frac{\rho_m C_m}{(\rho_w C_w) \rho_b} - \frac{n}{\rho_b}$$

$$K_d = \frac{C_s}{(\rho_w C_w)} \quad [m^3 kg^{-1}]$$

Αυτό σημαίνει ότι ο ρυθμός ανταλλαγής θερμοκρασίας μεταξύ του στερεού και του ρευστού θα είναι σταθερός σε όλα τα θερμοκρασιακά εύρη.

Ο νέος συντελεστής διάχυσης για τη μεταφορά θερμότητας ενσωματώνεται στο MT3DMS στο πακέτο Χημικής Αντίδρασης (*Chemical Reaction Package*) και ο τύπος της απορρόφησης πρέπει να οριστεί στο πεδίο *linear isotherm* (*ISOTHM=1*).

- Συντελεστές διάχυσης και διασποράς

Στον όρο διάχυσης και διασποράς της μερικής διαφορικής εξίσωσης για τη μεταφορά διαλυμένης ουσίας (θ), εντοπίζονται δύο μέρη:

$$(D_m + \alpha_s v_a)$$

Ένας όρος αμιγούς μοριακής διάχυσης (D_m) που αναπαριστά μια διαδικασία που επηρεάζεται μόνο από τη βαθμίδα συγκέντρωσης. Είναι ίσος με τη θερμική διάχυση στην εξίσωση μεταφοράς θερμότητας, η οποία σε αυτήν την περίπτωση επηρεάζεται από τη βαθμίδα θερμοκρασίας:

$$D_m = \frac{k_{Tm}}{n \rho_w c_w} \quad [m^2 s^{-1}]$$

Ο δεύτερος όρος, $\alpha_s \nu_\alpha$, ο οποίος είναι η υδροδυναμική διασπορά, μια διαδικασία που επηρεάζεται από τις διαφορές στις ταχύτητες της ροής. Για την ενσωμάτωσή του στο MT3DMS ο συντελεστής διασποράς της διαλυμένης ουσίας απλά αντικαθίσταται από το συντελεστή διασποράς θερμότητας.

$$\alpha_s = \alpha_h \quad [m]$$

Οι νέοι συντελεστές διάχυσης και διασποράς ενσωματώνονται στο πακέτο Διασποράς (*Dispersion Package*).

- Είσοδοι και Έξοδοι (Sources and Sinks)

Ο όρος εισόδου και εξόδου στην εξίσωση μεταφοράς διαλυμένης ουσίας αναπαριστά τη μάζα που εισέρχεται ή εξέρχεται από το πεδίο μέσω εισόδων και εξόδων. Στην εξίσωση μεταφοράς θερμότητας, οι όροι εισόδου και εξόδου υποδεικνύουν την εισαγωγή ή εξαγωγή θερμότητας.

$$q_{ss} C_{ss} = \frac{q_h}{\rho_w c_w} \quad [K s^{-1}]$$

Για να είμαστε τυπικοί με τις μονάδες μέτρησης που σχετίζονται με τη μεταφορά ρυπαντικής ουσίας και θερμότητας, η μονάδα μέτρησης Κελβίν [K] είναι ίση με τη συγκέντρωση [$kg m^{-3}$]. Αυτό σημαίνει ότι: [$K s^{-1}$] = [$kg m^{-3} s^{-1}$], που είναι ένα φορτίο μάζας ανά μονάδα όγκου του υδροφόρου.

Ο νέος όρος εισόδων και εξόδων για τη μεταφορά θερμότητας ενσωματώνεται στο MT3DMS στο πακέτο *Sink & Source Mixing* και ο τύπος της πηγής πρέπει να οριστεί ως πηγή φορτίου μάζας (*mass-loading source*) (*ITYPE0=15*).

- Ανταλλαγή θερμότητας με την επιφάνεια

Για την ποσοτικοποίηση της ανταλλαγής θερμότητας με την επιφάνεια πάνω από την ακόρεστη ζώνη, ορίζεται ο παρακάτω προσαρμοστικός συντελεστής για το ρυθμό της αντίδρασης:

$$\lambda = \frac{\lambda_1}{\rho_w C_w H F} \quad [s^{-1}]$$

Ο νέος όρος αντίδρασης για τη μεταφορά θερμότητας ενσωματώνεται στο MT3DMS στο πακέτο Αντιδράσεων (*Reaction Package*) και ένα τρισδιάστατο μοντέλο μεταφοράς θερμότητας πρέπει να εκχωρηθεί μόνο στο ανώτερο στρώμα.

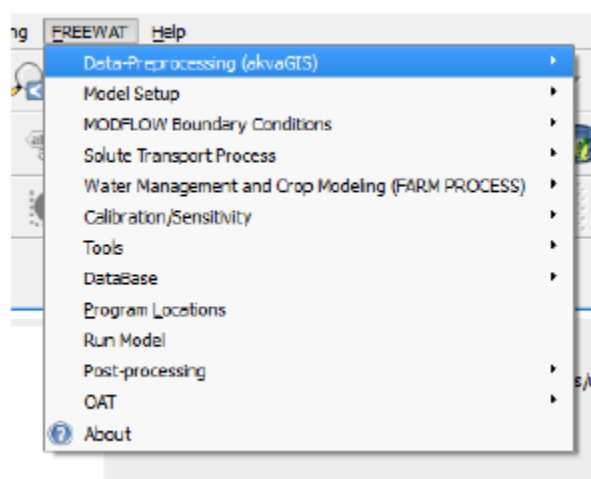
Πρέπει επίσης να τονιστεί ότι αυρός ο όρος δεν περιλαμβάνεται στην επαλήθευση του MT3DMS, αλλά είναι μία σημαντική πλευρά για μελλοντική μελέτη.

3.3 Γενική περιγραφή πλατφόρμας FREEWAT

Το FREEWAT (FREE and Open Source Software Tools for WATer Resource Management) είναι ένα σύνθετο plugin για το γνωστό λογισμικό ανοικτού κώδικα QGIS (GIS open source desktop software). Η επιλεγόμενη έκδοση του QGIS που θα γίνεται αναφορά είναι η έκδοση QGIS 2.14 (I. Borsi, 2017).

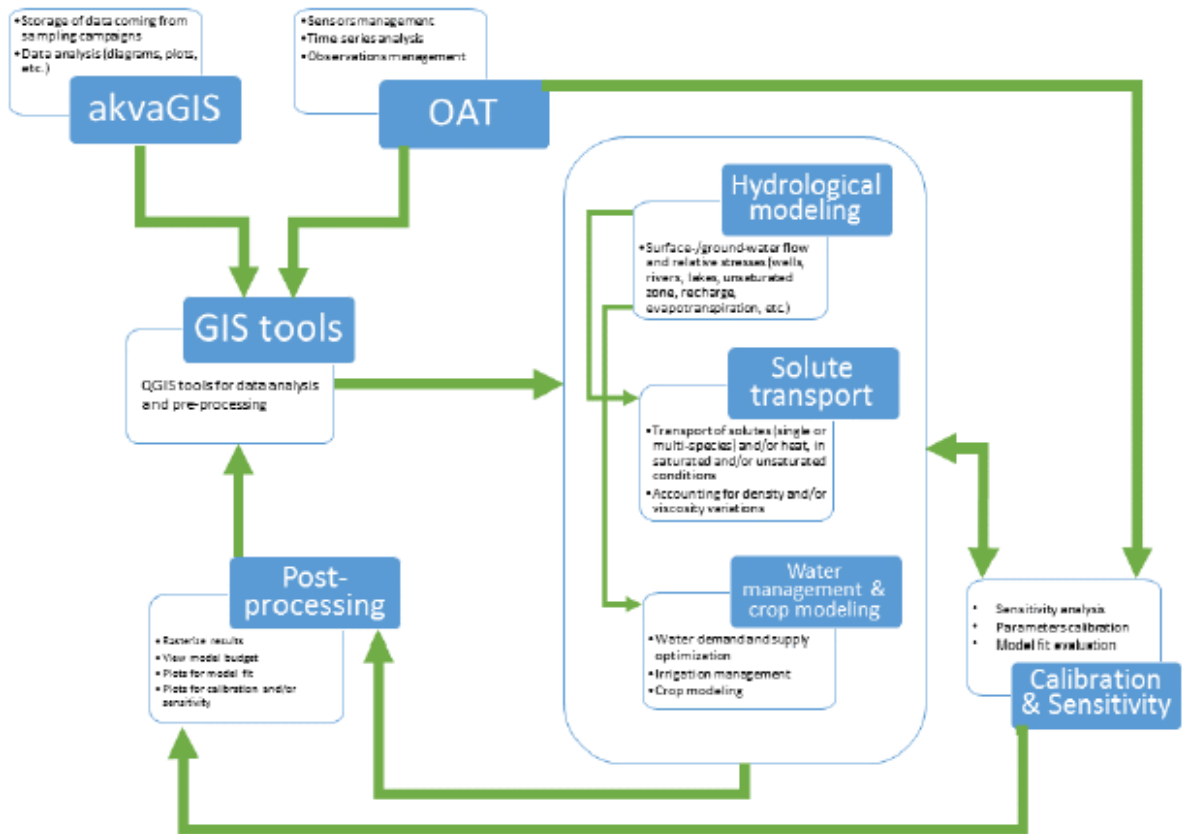
Ως σύνθετο plugin, το FREEWAT είναι σχεδιασμένο να εμπεριέχει τα παρακάτω εργαλεία:

- Εργαλεία για την ανάλυση, ερμηνεία και την απεικόνιση υδρογεωλογικών και υδροχημικών δεδομένων και ποιοτικών στοιχείων, όπως επίσης και η επικέντρωση σε προχωρημένη ανάλυση χρονικής σειράς, που είναι ενσωματωμένα στην ενότητα του akvaGIS.
- Προσομοίωση μοντέλων που σχετίζονται με τον υδρολογικό κύκλο και τη διαχείριση υδατικών πόρων: μοντέλα ροής, μεταφοράς θερμότητας, ανάπτυξης καλλιέργειας, μοντέλα διαχείρισης και βελτιστοποίησης (που σχετίζονται επίσης με διαχείριση άρδευσης και αστικά ζητήματα).
- Εργαλεία για τη ρύθμιση, ανάλυση ευαισθησίας και αβεβαιότητας.
- Πρόσθετα εργαλεία για γενικές λειτουργίες Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) με σκοπό την προετοιμασία δεδομένων εισόδου και λειτουργικότητες μετ-επεξεργασίας (ενότητα OAT – Observation and Analysis Tool) (I. Borsi, 2017).

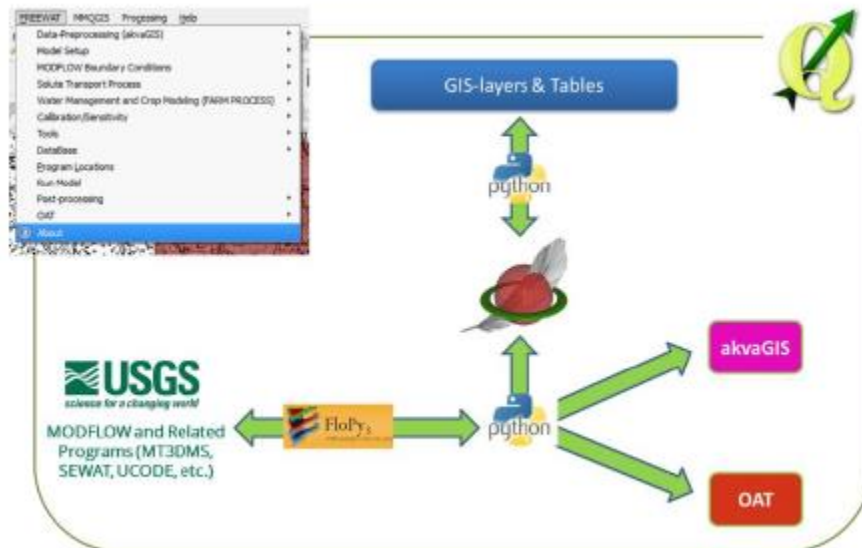


Εικόνα 10: Το μενού του FREEWAT αναλυτικά

Η αρχιτεκτονική του FREEWAT βασίζεται στην ενσωμάτωση διαφορετικών λογισμικών εργαλείων σε βάση δεδομένων της SQLITE, εξωτερικοί (ελεύθεροι και ανοιχτοί) κώδικες όπως το MODFLOW και άλλα σχετικά προγράμματα όπως επίσης και κώδικες που έχουν διαμορφωθεί αποκλειστικά για το FREEWAT. Ο τρόπος διασύνδεσης τέτοιων εργαλείων γίνεται μέσω της γλώσσας προγραμματισμού Python, με εκτεταμένη χρήση της βιβλιοθήκης της Python, το FloPy (I. Borsi, 2017). Μια σχηματική απεικόνιση των FREEWAT pillars και των διασυνδέσεών τους φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 11: Διασυνδέσεις μεταξύ των εργαλείων και ενοτήτων του FREEWAT



Εικόνα 12: Βασικά στοιχεία της πλατφόρμας FREEWAT

3.3.1 Διάγραμμα ροής του FREEWAT

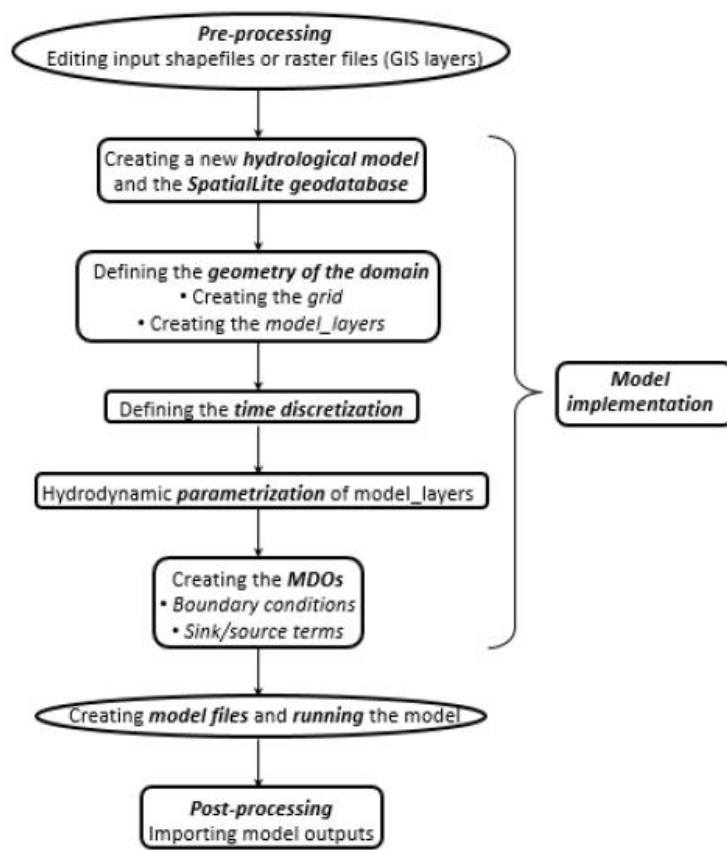
Ο ερευνητής μπορεί να χρησιμοποιήσει το FREEWAT για να ενσωματώσει το μοντέλο, να εκτελέσει προσομοιώσεις και να εμφανίσει και να επεξεργαστεί αποτελέσματα μέσα σε περιβάλλον GIS (π.χ., στην επιφάνεια εργασίας του QGIS). Κάθε επεξεργασία βασίζεται σε μια καλά κωδικοποιημένη διαδικασία: από ένα γενικό στρώμα GIS (GIS layer), σε ένα στρώμα μοντέλου (model layer)/Αντικείμενο Δεδομένων Μοντέλου (Model Data Object) και τέλος σε ένα φάκελο απαραίτητο για τις εκτελέσεις του προγράμματος (G. De Filippis, 2017).

Η ορολογία του FREEWAT είναι η εξής (G. De Filippis, 2017):

- GIS layer – υποδεικνύει ένα γενικό γεωγραφικό πληροφοριακό στρώμα (vector/raster layer), όχι ακόμα επεξεργασμένο για τη διαδικασία της μοντελοποίησης;
- model layer – το διακεκριμένο πεδίο ορισμού χωρίζεται σε στρώματα (model layers) που αντιστοιχούν στις υδροστρωματογραφικές μονάδες που εντοπίζονται στο εννοιολογικό μοντέλο;
- Model Data Object (MDO) – δεν είναι τίποτα άλλο από το στρώμα GIS επεξεργασμένο σύμφωνα με τις ιδιότητες του μοντέλου και εμπεριέχοντας τουλάχιστον πληροφορίες και στη χωρική (σειρές και στήλες) και στη χρονική διακριτοποίηση (Stress Period - SP);
- model file – είναι ένας φάκελος που παράγεται από το MDO και απαιτείται για να εκτελεστεί η προσομοίωση.

Ο χρήστης πρέπει να οργανώσει όλα τα δεδομένα του GIS (vector και raster) που αναφέρονται στην περιοχή έρευνας. Αυτό σημαίνει ότι η εισαγωγή ή η δημιουργία κάθε στρώματος στο QGIS πρέπει να γίνεται σε ένα κατάλληλο Σύστημα Συντεταγμένων Αναφοράς (Coordinate Reference System-CRS), συνδέοντάς το σύμφωνα με την έκταση της περιοχής έρευνας (G. De Filippis, 2017).

Επιπλέον, τα model layers και τα MDO είναι προσωρινά αποθηκευμένα σε μια βάση δεδομένων Spatialite. Μόλις ολοκληρωθεί το πρώτο βήμα, ο χρήστης είναι έτοιμος να αρχίσει να κατασκευάζει το μοντέλο. Πρώτα πρέπει να κατασκευαστεί ένα νέο υδρογεωλογικό μοντέλο και η σχετική βάση δεδομένων (geodatabase). Έπειτα, θα προσδιοριστούν η χωρική και η χρονική διακριτοποίηση, συμπεριλαμβανομένης και της παραμετροποίησης των υδροδυναμικών ιδιοτήτων κάθε στρώματος. Θα προσδιοριστούν οι οριακές συνθήκες (boundary conditions) και τα στοιχεία sink/source, δημιουργώντας κατάλληλα MDO από τα διαθέσιμα στρώματα GIS. Τέλος, μόλις επιλεγθούν όλα τα πακέτα που θα πρέπει να ενεργοποιηθούν για τους στόχους της προσομοίωσης, όλα τα model layers και τα MDO μεταφράζονται σε φακέλους εισόδου MODFLOW και το μοντέλο μπορεί να τρέξει. Δύναται να γίνει και η απεικόνιση και η μετα-επεξεργασία των αποτελεσμάτων (π.χ. του προσομοιωμένου υδραυλικού φορτίου) (G. De Filippis, 2017).



Εικόνα 13: Διάγραμμα ροής κατασκευής υδρογεωλογικού μοντέλου στο περιβάλλον του FREEWAT

Περιορισμοί - Limitations

Σχετικά με τη δημιουργία των model files για το MODFLOW, το FREEWAT παρουσιάζει κάποιους περιορισμούς που σχετίζονται με μερικά 'flags' και επιλογές, υποθέτοντας προκαθορισμένες τιμές που ο χρήστης δεν μπορεί να αλλάξει. Ο στόχος είναι να γίνει ευκολότερη η ενσωμάτωση του μοντέλου. Οι ακόλουθοι περιορισμοί αφορούν επιτακτικούς φακέλους εισόδου MODFLOW (G. De Filippis, 2017):

- η ετικέτα (flag) LAYCBD στο φάκελο Διακριτοποίηση (DIS) ορίζεται ως 0: αυτό σημαίνει ότι τα υδατοστεγανά στρώματα δε γίνεται να προσομοιωθούν;

- οι προκαθορισμένες εναλλακτικές για το φάκελο Layer Property Flow (LPF) είναι οι εξής:

- η τιμή $-1E+30$ m εκχωρείται σε προκαθορισμένα σε κελιά του καννάβου τα οποία στραγγίζονται σε μετατρέψιμα στρώματα του μοντέλου στο τέλος της προσομοίωσης. Αυτό μπορεί να προκαλέσει μια δυσκολία στην απεικόνιση της κατανομής του υδραυλικού φορτίου αυτού του στρώματος ως ένα χάρτη χρωματισμένης κλίμακας, καθώς αυτή η συγκεκριμένη τιμή ($-1e+30$) δεν είναι αναγνωρίσιμη στο QGIS, καθώς είναι μια τιμή ανυπαρξίας δεδομένων. Αν προκύψει αυτό, ο χρήστης μπορεί να ορίσει μια τιμή ως μία πρόσθετη τιμή ανυπαρξίας δεδομένων, εκχωρώντας μια 100% διαφάνεια σε όλα τα στραγγισμένα κελιά του καννάβου όπου έχει εκχωρηθεί.

– η ετικέτα CHANI ορίζεται ως 1: αυτό σημαίνει ότι οι ισοτροπικές συνθήκες προκύπτουν σε κάθε στρώμα πάνω στους άξονες X και Y.

* η ετικέτα LAYVKA ορίζεται ως 0: αυτό σημαίνει ότι δεν μπορεί να προσδιοριστεί καμία κατακόρυφη ανισοτροπία. Αν είναι έτσι, ο χρήστης πρέπει να εισάγει τιμές και για την οριζόντια και για την κατακόρυφη αγωγιμότητα σε κάθε κελί;

• οι προκαθορισμένες επιλογές για το φάκελο Output Control Option (OC) είναι οι εξής:

– το υδραυλικό φορτίο, η παροχή που διαρρέει από κελί σε κελί, όλα αυτά αποθηκεύονται στο τέλος κάθε χρονικού βήματος (Time Step, TS) με εξωτερικούς δυαδικούς φακέλους;

– και η ισορροπία του μοντέλου και το προσομοιούμενο υδραυλικό φορτίο αποτυπώνονται στην έξοδο του φακέλου Listing (LST) στο τέλος κάθε TS. Αυτό μερικές φορές μπορεί να καταλήγει σε ένα υπερφορτωμένο φάκελο.

Αυτοί οι περιορισμοί αφορούν μόνο το GUI. Ο προχωρημένος User μπορεί να επεξεργαστεί τους κατασκευασμένους φακέλους εισόδου του MODFLOW και να ορίσει τις ετικέτες και τις παραμέτρους όπως τις χρειάζεται.

3.3.2 Προσομοίωση Υπόγειας ροής

Το κύριο περιεχόμενο του FREEWAT αποτελείται από μια «σουίτα» εργαλείων μοντελοποίησης για προσομοίωση υπόγειας ροής και άλλων σχετικών διεργασιών. Το υδρολογικό μοντέλο που εφαρμόζεται στο FREEWAT επιτρέπει την προσομοίωση ολόκληρου του υδρολογικού κύκλου, εξασφαλίζοντας ότι κλιματικά δεδομένα, όπως οι βροχοπτώσεις και η θερμοκρασία, θα είναι διαθέσιμα. Ωστόσο, είναι επίσης πιθανή η εστίαση μόνο σε επιλεγμένα μέρη του μοντέλου (I. Borsi, 2017).

Οι διαδικασίες προσομοίωσης που αναφέρονται σε αυτήν την ενότητα είναι:

• η υπόγεια ροή στην κορεσμένη ζώνη, εμπειρεύοντας αλληλεπίδραση με επιφανειακά νερά (όπως ποτάμια, λίμνες, αποχετεύσεις);

• κατακόρυφη ροή διαμέσου της ακόρεστης ζώνης και κάτω από επιφανειακούς χείμαρους (I. Borsi, 2017).

Λειτουργίες πίσω από τη μοντελοποίηση της υπόγειας ροής στο FREEWAT

Η δομή του μοντέλου βασίζεται στον παγκοσμίως γνωστό τριδιάστατο κώδικα υπόγειας ροής πεπερασμένων διαφορών MODFLOW και σε άλλους σχετικούς κώδικες (McDonald and Harbaugh, 1988), ενσωματώνοντας κυρίως την έκδοση MODFLOW-2005 (Harbaugh, 2005). Το MODFLOW είναι ένας κώδικας βασισμένος φυσικά και χωρικά κατανεμημένος της USGS, που προσομοιώνει τη δυναμική της υπόγειας ροής σε κορεσμένες και ακόρεστες ζώνες, σε υπό πίεση αλλά και σε ελεύθερους υδροφορείς με σταθερό ή μεταβλητό πάχος και τιμές μεταβιβατικότητας, σε σταθερής κατάστασης (steady-state) ή μεταβαλλομενες (transient) συνθήκες. Στις εφαρμογές του MODFLOW, ο χώρος διακριτοποιείται στο σχήμα ενός κανονικού κάρναβου (grid), ενώ ο χρόνος σε περιόδους φόρτισης (stress periods), που με τη σειρά τους μπορούν να διαχωριστούν σε μικρότερα χρονικά βήματα (time steps). Ο κώδικας MODFLOW είναι γραμμένος στη FORTRAN και διατίθεται δωρεάν στο διαδίκτυο (I. Borsi, 2017).

Το MODFLOW έχει ένα μεγάλο εύρος διαφορετικών συνοδευτικών πακέτων (Packages) που του επιτρέπουν να προσομοιώνει αρκετές διαδικασίες. Το υπάρχον FREEWAT plugin περιλαμβάνει

την πλειοψηφία αυτών των πακέτων που είναι χρήσιμα για την προσομοίωση των κύριων υδρολογικών και υδρογεωλογικών διαδικασιών (I. Borsi, 2017).

Παρακάτω παρατίθενται μια λίστα των πακέτων του MODFLOW (Harbaugh, 2005), ομαδοποιημένων σε κατηγορίες (I. Borsi, 2017):

- Βασικά πακέτα (basic packages):
 - Basic (BAS)
 - Discretization-Διακριτοποίηση (DIS)
 - Layer Property Flow-Ιδιότητες ροής στρωμάτων (LPF)
- Υδρογεωλογικές διαδικασίες (hydrogeological processes):
 - όρια καθορισμένου φορτίου (specified-head boundaries)
 - Time-Variant Specified Head (CHD)
 - όρια καθορισμένης ροής (specified-flux boundaries)
 - Recharge-Επαναφόρτιση (RCH)
 - Well-Φρέαρ (WEL)
 - φορτίο που εξαρτάται από τη ροή (head-dependent flux)
 - Unsaturated Zone Flow-Ροή ακόρεστης ζώνης (UZF)
 - River-Ποτάμι (RIV)
 - Lake-Λίμνη (LAK)
 - Drain-Ξηρασία (DRN)
 - General-Head Boundary-Όρια γενικό φορτίου (GHB)
 - Evapotranspiration-Εξατμισοδιαπνοή (EVT)
 - Multi-Node Well (MNW)
 - Stream Flow Routing (SFR2)

3.3.3 Solute transport

Στο FREEWAT το υδρολογικό μοντέλο δύναται να συνδυαστεί και με ένα μοντέλο μεταφοράς διαλυτής ουσίας (solute transport), για να προσομοιώσει φαινόμενα μεταφοράς διαφόρων ειδών, στην ακόρεστη και στην κορεσμένη ζώνη. Δίνεται και η δυνατότητα να προσομοιωθεί ροή εξαρτώμενη από το ιξώδες και την πυκνότητα (ροή μεταβλητής πυκνότητας). Τέτοιες δυνατότητες είναι ιδιαίτερα σχετικές με την προσέγγιση μελετών σε διαδικασίες διείσδυσης θαλασσινού νερού, ή για την υποστήριξη γεωθερμικών μονάδων χαμηλής και μέσης ενθαλπίας. Η προσομοίωση της μεταφοράς θερμότητας (επίσης συνδυαστικά με πρόσθετα χημικά στοιχεία) είναι πιθανή με την αντιμετώπιση της θερμότητας ως ένα είδος και τον προσδιορισμό συντελεστή διάχυσης και άλλων παραμέτρων με συναφή τρόπο (I. Borsi, 2017).

Λειτουργίες του solute transport στο FREEWAT

Το solute transport επιλύεται στο FREEWAT με την εφαρμογή του γνωστού κώδικα MT3DMS (Modular Three-Dimensional Multi-species Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems) (I. Borsi, 2017).

Επιπλέον, ροές εξαρτώμενες από το ιξώδες και την πυκνότητα επιλύονται με την εφαρμογή του SEAWAT (Simulation of Three-Dimensional Variable-Density Ground-Water Flow and Transport), που είναι μια αναθεωρημένη έκδοση συνδυάζοντας το MODFLOW μαζί με το MT3DMS, λαμβάνοντας υπόψη αλλαγές στο ιξώδες και την πυκνότητα κατά την αριθμητική επίλυση της εξίσωσης της υπόγειας ροής (Langevin et al., 2007).

Τέλος, προβλήματα που συνδυάζουν φαινόμενα μεταφοράς στην ακόρεστη ζώνη δύναται να επιλυθούν με δύο τρόπους (I. Borsi, 2017):

- Μια απλοποιημένη προσέγγιση, υπολογίζοντας μια εκτίμηση της εκροής ρύπων από την επιφάνεια του εδάφους έως τη στάθμη του νερού: εδώ η ποσότητα της αποτελεσματικής συγκέντρωσης χρησιμοποιείται ως οριακή συνθήκη για τον κώδικα MT3DMS στην κορεσμένη ζώνη. Αυτή η προσέγγιση είναι το αντικείμενο της ενότητας USB (Unsaturated Solute Balance), που παρατίθεται στην επόμενη ενότητα.
- Ενεργοποιώντας στο μοντέλο μεταφοράς το πακέτο UZT (Unsaturated Zone Transport), που εμπεριέχεται στον κώδικα MT3D-USGS (Bedekar et al., 2016), μία αναβαθμισμένη έκδοση του κώδικα MT3DMS. Κάποιες πρόσθετες αναφορές για αυτό γίνονται παρακάτω.

Οι επακόλουθες διαδικασίες που είναι ενεργές στην κορεσμένη ζώνη (καθεμία από αυτές ανταποκρίνεται σε ένα συγκεκριμένο πακέτο του κώδικα MT3DMS ή του SEAWAT) είναι ενσωματωμένες στο FREEWAT (I. Borsi, 2017):

- ADV (Advection package).
- DSP (Hydrodynamic Dispersion), που λαμβάνει υπόψη του τη μηχανική διασπορά και φαινόμενα διάχυσης μορίων.
- SSM (Sinks and Sources Terms), το οποίο προσομοιώνει τη μεταφορέμονη μάζα από και προς το πεδίο του μοντέλου.
- RCT (Chemical Reactions), που προσομοιώνει ισοζύγια γραμμικής ή μη γραμμικής ρόφησης (sorption) και πρώτης τάξης αντιδράσεις που αναπαριστούν τη ραδιενεργή αποσύνθεση ή παρέχουν μια κατά προσέγγιση αναπαράσταση της βιοαποικοδόμησης. Δεν μπορεί να γίνει καμία αντίδραση μεταξύ διαφορετικών ειδών (δηλαδή καμία γεωχημική αντίδραση).
- VDF (Variable Density Flow)
- VCS (Viscosity-dependent Flow)

Τα ακόλουθα πακέτα/επιλογές δεν ενεργοποιούνται κατευθείαν από την πλατφόρμα του FREEWAT (για να ενεργοποιηθούν, ο χρήστης πρέπει να εισαγάγει ή να τροποποιήσει φακέλους που δημιουργούνται από το FREEWAT) (I. Borsi, 2017):

- Το πακέτο RCT (Chemical Reactions) μπορεί να ενεργοποιηθεί μόνο σε περίπτωση προσομοίωσης ενός μόνο είδους.
- Το πακέτο HSS (Hydrocarbon Spill Source) δεν είναι ενσωματωμένο στο FREEWAT.
- Η εφαρμογή του SEAWAT (density- and viscosity-dependent flow) είναι εφικτή μόνο στην κορεσμένη ζώνη.

Περιορισμοί - Limitations

Τα ακόλουθα πακέτα/επιλογές δεν ενεργοποιούνται απ' ευθείας από την πλατφόρμα του FREEWAT (για να γίνει αυτό, ο χρήστης πρέπει να εισάγει ή να τροποποιήσει αρχεία εισόδου που παράχθηκαν από το FREEWAT) (Borsi, 2017):

- Πακέτο RCT (Χημικές Αντιδράσεις - Chemical Reactions): ενεργοποιείται σε περίπτωση μόνο προσομοιώσεων μονού είδους (προσωρινός περιορισμός).
- Πακέτο HSS (Hydrocarbon Spill Source – Πηγή Διαρροής Υδρογονανθράκων): χρησιμοποιείται για τη σύνδεση του κώδικα MT3DMS με το Μοντέλο Διαρροής Υδρογονανθράκων (Hydrocarbon Spill Screening Model-HSSM) και δεν είναι ενσωματωμένο στο FREEWAT.
- Η εφαρμογή του SEAWAT αφορά μόνο στην κορεσμένη ζώνη.
- Το UZT (Unsaturated Zone Transport) μπορεί να εφαρμοστεί σε πρόβλημα πολλαπλών ειδών, αλλά δεν έχει γίνει ενδελεχής έλεγχος αυτής της εφαρμοσιμότητας μέχρι τώρα (γι' αυτό ενδέχεται να υπάρχουν κάποια μειονεκτήματα σε τέτοια προβλήματα με ενεργό το UZT).
- Ο νέος κώδικας MT3D-USGS μπορεί να εφαρμοστεί μόνο για τη μεταφορά στην ακόρεστη ζώνη (UZT). Άλλα εμπειροχόμενα πακέτα στο MT3D-USGS μέχρι τώρα δεν υποστηρίζονται.
- Κάποια μοντέλα δοκιμής παρουσίασαν προβλήματα στην εκτέλεση του MT3D-USGS όταν μια συγκεκριμένη ποσότητα επιφανειακής διαρροής παράγεται από το πακέτο UZF (αναμένεται νέα έκδοση).

Επιλογή ενεργοποίησης του UZT (Unsaturated Zone Transport)

Το UZT (Unsaturated Zone Transport) απαιτεί την εφαρμογή του κώδικα MT3D-USG (Bedekar et al., 2016), σε συνδυασμό με την ενεργοποίηση του πακέτου UZF (Unsaturated Zone Flow) στο μοντέλο της ροής. Το τελευταίο πρέπει να επιλυθεί μέσω μια ειδικής έκδοσης του MODFLOW, το MODFLOW-NWT, αντί του συνηθισμένου MODFLOW-2005. Επομένως, για μια επιτυχημένη ενεργοποίηση του πακέτου UZT, ο χρήστης πρέπει να κατεβάσει αυτόν τον κώδικα και να εισάγει το μονοπάτι του εκτελέσιμου φακέλου του (executable file) μέσα στον πίνακα της Τοποθεσίας των Προγραμμάτων (Program Locations table). Η ιδιαιτερότητα αυτής της διαδικασίας εντοπίζεται στην αποθήκευση ροή επίσης σχετικής με το ακόρεστο κομμάτι, δηλαδή αυτό που ευπολογίζεται από το πακέτο UZF (μονοδιάστατη προσομοίωση της ζώνης vadose, κάνοντας χρήση της προσέγγισης κινηματικής κυμάτων), και σχεδιάζοντάς το στον κানাβο του MODFLOW για χρήση από το MT3D-USGS. Το UZT απαιτεί την εισαγωγή: αρχικού πάχους κορεσμένης ζώνης, αρχικού περιεχόμενου νερού, συγκέντρωσης που έχει να κάνει με τη ροή διήθησης, συγκέντρωσης που έχει να κάνει με τη ροή εξατμισοδιαπνοής (I. Borsi, 2017).

Υφίστανται οι ακόλουθοι περιορισμοί στο UZT που εμπιρεύεται στην πλατφόρμα του FREEWAT (I. Borsi, 2017):

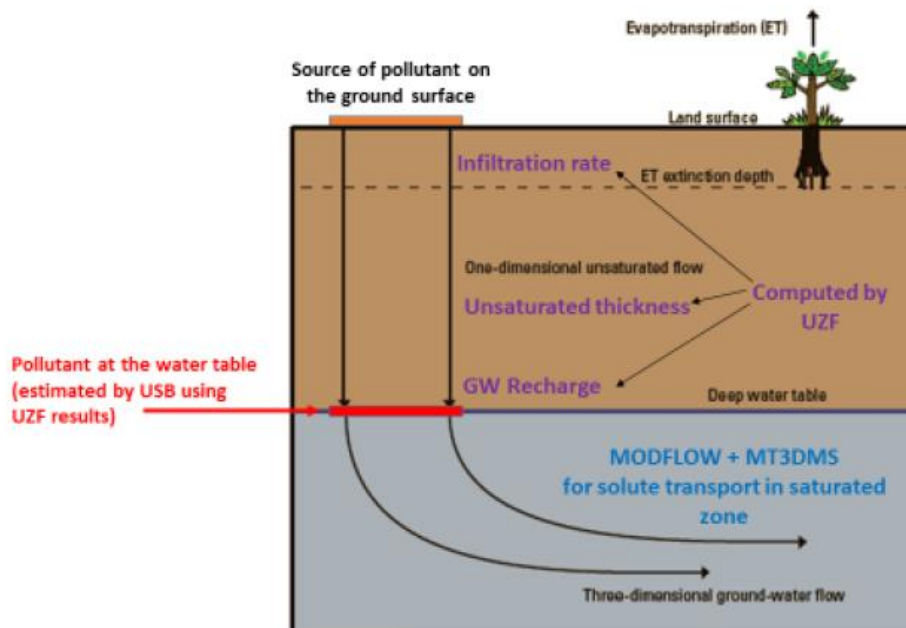
- Το UZT δύναται να εφαρμοστεί επίσης σε ένα πρόβλημα πολλαπλών ειδών, αλλά δεν έχει περατωθεί μία ευρεία δοκιμή τέτοιας εφαρμοσιμότητας έως τώρα. Επομένως, οι χρήστες μπορεί να λαμβάνουν πείρα κάποιων μειονεκτημάτων σε προβλήματα πολλαπλών ειδών με ενεργό το UZT: σε τέτοιες περιπτώσεις καλό είναι να ανατροφοδοτούν αυτά τα προβλήματα στους κατασκευαστές του FREEWAT.
- Κάποια δοκιμαστικά μοντέλα παρουσίασαν προβλήματα στη φόρτωση του MT3D-USGS όταν μία συγκεκριμένη ποσότητα επιφανειακής διαρροής προκαλείται από το πακέτο UZF.

Οι κατασκευαστές του FREEWAT είναι σε επαφή με τους κατασκευαστές του MT3D-USGS, που προσπαθούν να επιλύσουν τέτοια προβλήματα σε μία νέα έκδοση εντελώς.

Λειτουργία του USB (Unsaturated Solute Balance)

Το USB επιλύει το ακόλουθο πρόβλημα: αν μία (ή περισσότερες) περιοχή στην επιφάνεια του εδάφους επηρεάζεται από την παρουσία μια ρυπαντικής ουσίας, είναι απαραίτητο να εκτιμηθεί (για κάθε stress period του μοντέλου) η ποσότητα της συγκέντρωσης αυτού του ρύπου που φτάνει στον υδροφόρο ορίζοντα, και επομένως διαδίδεται ακολουθώντας την υπόγεια ροή του νερού. Το USB θα υπολογίσει αυτήν την εκτίμηση, ακολουθώντας την παρακάτω ακολουθία (I. Borsi, 2017):

1. Προσδιορισμός της ζώνης ρύπανσης (contamination zone) στο ανώτερο στρώμα του μοντέλου (που αντιπροσωπεύει την επιφάνεια του εδάφους).
2. Τρέξιμο του μοντέλου MODFLOW περιλαμβανομένου του πακέτου UZF (Niswonger et al., 2006) για να εκτιμηθεί ο υψηλότερος ρυθμός κατείσδυσης, το πάχος της ακόρεστης ζώνης και ο ρυθμός εμπλουτισμού του υδροφορέα (και αποθήκευση όλων αυτών των πληροφοριών σε κάθε κελί του μοντέλου όπου είναι τοποθετημένη η πηγή).
3. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση μεταγωγής για την ακόρεστη ζώνη, υπολογίζοντας τη λύση μέσω μιας διαφορικής εξίσωσης. Αυτή η εξίσωση δεν ισχύει για φαινόμενα διασποράς, καθώς ο ρυθμός της αποσύνθεσης προσδιορίζεται από το χρήστη.
4. Λαμβάνοντας τη λύση (για κάθε κελί, για κάθε stress period) ως δεδομένο για τον όρο Constant Concentration στο πακέτο SSM του MT3DMS (Zeng and Wang, 1999).



Εικόνα 14: Μια σχηματική απεικόνιση της σύζευξης UZF-USB για την εκτίμηση της συγκέντρωσης που φτάνει στη στάθμη του υδροφόρου (τροποποιημένο από τους Niswonger et al., 2006).

3.3.4 Ενότητα διαχείρισης νερού - Water Management Module

Το FREEWAT εμπεριέχει δυνατότητες για τη διαχείριση υδατικών πόρων. Ο ειδικός τους στόχος είναι να γίνει εκμετάλλευση της 'εξόδου' (output) ενός αριθμητικού μοντέλου για την επίλυση προβλημάτων ελέγχου παροχής χρήσης και βελτιστοποίησης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί αυξάνοντας την κλίμακα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης στα κελιά του κανάβου, για να ληφθεί το απόθεμα του νερού και η χρήση του, επικεντρώνοντας σε μία (ή περισσότερες) ζώνη της περιοχής του μοντέλου (model domain) (I. Borsi, 2017).

Το FREEWAT προσομοιώνει ζητήματα διαχείρισης νερού εφαρμόζοντας το MODFLOW-OWHM (Hanson et al., 2014), το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για να εμπεριέχει τον ακριβή υπολογισμό της ζήτησης του νερού από αγροτικά συστήματα και καλλιεργούμενες εκτάσεις (I. Borsi, 2017).

Λειτουργία του Water Management στο FREEWAT

i) Μονάδες ζήτησης νερού (Water Demand Units)

Η βασική έννοια στο MODFLOW-OWHM είναι η μονάδα ζήτησης νερού (Water Demand Unit - WDU), δηλαδή μια «ολότητα» (entity) που καταναλώνει νερό (σε αστική ζώνη, βιομηχανική ζώνη, φάρμες, περιοχές φυσικής βλάστησης, κ.λπ.). Σε κάθε WDU ο χρήστης μπορεί να αντιστοιχήσει μία ή περισσότερες πηγές/εξόδους νερού, που ποικίλουν στο χρόνο. Στο τέλος της προσομοίωσης, παράγεται μια συγκεκριμένη ποσότητα για κάθε WDU επιπλέον στη συνολική ποσότητα για όλο το μοντέλο. Από την οπτική της μοντελοποίησης, ένα WDU είναι μια υποπεριοχή του μοντέλου, κατασκευασμένο από ένα σύμπλεγμα κελιών του πρώτου στρώματος του μοντέλου (top layer). Έτσι, ολόκληρος ο κανάβος είναι διαχωρισμένος σε ένα ή περισσότερα WDU εκχωρώντας σε κάθε κελί ένα WDU ID. Επιπρόσθετα, το μέρος του κανάβου που δεν έχει καταληφθεί από κάποιο WDU πρέπει να προσδιοριστεί με ένα WDU ID (I. Borsi, 2017).

ii) Όροι ζήτησης νερού (Terms of Water Demand)

Για κάθε WDU, εκχωρείται ή υπολογίζεται μια συνολική ζήτηση νερού, με την πιθανότητα να λαμβάνονται υπόψη διάφοροι τρόποι προσδιορισμού διαφορετικών ορών ζήτησης νερού, δηλαδή (I. Borsi, 2017):

- Απαιτούμενο νερό για καλλιέργεια (σε περίπτωση που μοντελοποιούνται αγροτικές περιοχές ή περιοχές φυσικής βλάστησης). Η ολότητα «καλλιέργεια» (crop) μπορεί να αναπαριστά όχι μόνο σοδειές, αλλά και χρήσεις γης (αστικό περιβάλλον, κ.λπ.) που προσδιορίζονται ως «εικονικές καλλιέργειες» (virtual crops) (Schmid et al., 2006; Schmid et al., 2009; Hanson et al., 2014).
- Δημοτική και βιομηχανική απαίτηση νερού που προσδιορίζεται ως «αρνητικές προμήθειες» (negative supplies).

iii) Όροι παροχής νερού (Terms of Water Supply)

Για κάθε WDU, για κάθε stress period, ο κώδικας επιχειρεί να ικανοποιήσει την Απαίτηση Συνολικής Ζήτησης (Total Demand Requirement) με έναν ή περισσότερους όρους αποστολής, σύμφωνα με την ακόλουθη ιεραρχία (I. Borsi, 2017):

- 1^η προτεραιότητα από τα μη κατευθυνόμενα περιεχόμενα παροχής (non-routed supply components).
- 2^η προτεραιότητα από τις ημιτελείς ή ολοκληρωμένους δρόμους αποστολής (επιφανειακό νερό: μεταφορά νερού σε/από ένα WDU μέσω ενός συστήματος χειμάρων (ολοκληρωμένο) ή προσδιορίζοντας σημεία διαχωρισμού από το κύριο κανάλι (ημιτελές)).

Η διαδρομή του δικτύου χειμάρων προσομοιώνεται μέσω του πακέτου SFR του MODFLOW.

- 3^η προτεραιότητα: υπόγεια άντληση (γεωτρήσεις) απαραίτητη για την ικανοποίηση της απαίτησης συνολικής ζήτησης.

iv) Περιορισμοί στην παροχή νερού (constraints on water supply)

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να προσδιορίσει, για κάθε WDU, επιφανειακές ή υπόγειες κατανομές-μερίδια, για να αναπαραστήσει δικαιώματα νερού (water-rights). Περιορισμοί κατανομής που αντιπροσωπεύουν την ιεραρχία των δικαιωμάτων νερού μπορούν να οριστούν ως κατανομές επιφανειακού νερού.

Μέσα σε ένα WDU, οι υπόγειες κατανομές αναφέρονται σε ένα ολόκληρο WDU. Παράλληλα, για κάθε γεώτρηση που αντιστοιχεί σε ένα WDU, ο χρήστης επιβάλλει μια μέγιστη τιμή για το ρυθμό άντλησης. Αυτή είναι μια πρόσθετη εναλλακτική για την υπαγόρευση συγκεκριμένων δικαιωμάτων νερού για ένα WDU, αλλά που αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία (I. Borsi, 2017).

v) Βελτιστοποίηση αλγορίθμων σε περίπτωση Ελλειμματικού Σεναρίου (Deficit Scenario) Μόλις υπολογιστούν η ζήτηση και παροχή νερού (για κάθε stress period), λαμβάνοντας υπόψη πιθανούς περιορισμούς, ο κώδικας συγκρίνει τους δύο όρους Ζήτηση και Παροχή. Αν η Ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την Παροχή, τότε το WDU βρίσκεται σε ελλειμματικό σενάριο. Σε αυτήν την περίπτωση, ο κώδικας επιτρέπει την εκτίμηση βέλτιστων κατανομών παροχής για να αντιμετωπίσει αυτό το έλλειμμα. Ο χρήστης μπορεί να εφαρμόσει δύο μεθόδους βελτιστοποίησης: μία που είναι βασισμένη στην προτεραιότητα της σοδειάς (crop priority-based) και μία οικονομική βελτιστοποίηση (με βάση ποιας καλλιέργειας η παραγωγή θα επιφέρει κέρδος-Economic optimization) (I. Borsi, 2017).

Ενσωμάτωση στο FREEWAT

Οι δυνατότητες του water management του FREEWAT μπορούν να εφαρμοστούν μόνο εάν έχει στηθεί το υδρολογικό μοντέλο (δηλαδή το μοντέλο του MODFLOW) κι έχει τρέξει. Σε αυτό το στάδιο, ο χρήστης πρέπει να είναι σίγουρος για τα χαρακτηριστικά-κλειδιά του μοντέλου, όπως: η σύγκλιση του μοντέλου, οι τιμές των παραμέτρων (συνήθως επιλεγόμενες από τα εργαλεία ευαισθησίας και βαθμονόμησης), σταθερότητα των αποθεμάτων νερού του μοντέλου. Αν αυτά είναι ορθά, ο χρήστης μπορεί να προχωρήσει στην εισαγωγή των απαιτούμενων πληροφοριών για να τρέξει τα εργαλεία διαχείρισης στο MODFLOW-OWHM. Όλες αυτές οι λειτουργικότητες είναι προσβάσιμες στο υπομενού FREEWAT > Water Management and Crop Modeling (FARM PROCESS) (I. Borsi, 2017).

3.3.5 AkvaGIS (Hydrochemical Analysis Tools and Hydrogeological Analysis Tools)

Υπάρχει ένα ειδικό εργαλείο που εμπεριέχεται στο FREEWAT για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας χημισμού του εννοιολογικού μοντέλου χρησιμοποιώντας υδροχημικά δεδομένα (Εργαλεία Υδροχημικής Ανάλυσης - Hydrochemical Analysis Tools, υποενότητα των εργαλείων του AkvaGIS) (I. Borsi, 2017).

Η ποιότητα του υπόγειου νερού μπορεί να επηρεαστεί από ένα μεγάλο σύνολο παραγόντων, όπως η βιομηχανοποίηση, η αστικοποίηση, η άρδευση, κ.λπ. (Foster, 2001; Vázquez-Suñé et al., 2005). Έτσι, μια περιληπτική αξιολόγηση των αρνητικών επιπτώσεων αυτών των πιθανών δραστηριοτήτων είναι ουσιαστική στην προστασία των υπόγειων σωμάτων νερού και των εμπλεκόμενων οικοσυστημάτων (I. Borsi, 2017).

Για να εξασφαλιστεί η συμμόρφωση με τους καθορισμένους ρυθμιστικούς οδηγούς, απαιτούνται συνεχής παρακολούθηση, αξιολόγηση και ερμηνείες ενός μεγάλου αριθμού φυσικών και χημικών παραμέτρων. Τέτοιες σειρές δεδομένων πρέπει να παρέχονται και να αποτυπώνονται από εταιρίες διαχείρισης νερού και αντίστοιχους φορείς για να δίδονται απαντήσεις σε ερωτήματα όπως: (α) οι διαδικασίες που ελέγχουν τη χημική σύνθεση του υπόγειου νερού και η αντίστοιχη χωρική και χρονική κατανομή, (β) αξιολόγηση της υπάρχουσας ποιότητας του υπογείου νερού και η επίτευξη καλής χημικής κατάστασης βασισμένη σε εθνικές τιμές ποιότητας νερού (e.g. Water Frame Directive (WFD), 2009) ή (γ) η ευρύτερη σύνθεση του υποβάθρου του υπόγειου νερού (Mendizabal and Stuyfzand, 2009), μεταξύ άλλων (I. Borsi, 2017).

Πρέπει να διαμορφωθούν νέες δυνατότητες που θα αντιμετωπίζουν: (i) την απαίτηση για χειρισμό μεγάλων σειρών δεδομένων που έχουν συλλεχθεί μέσα στα χρόνια (Velasco et al., 2014); (ii) την ενσωμάτωση δεδομένων που απορρέουν από διαφορετικές πηγές με διαφορετικές μεθόδους συλλογής; (iii) τη διαχείριση δεδομένων με μεταβλητό χρονικό και χωρικό μέγεθος; και (iv) την ενσωμάτωση πληροφοριών ποιότητας υπόγειου νερού μαζί με άλλες σχετικές πληροφορίες όπως περαιτέρω υδρογεωλογικά δεδομένα (π.χ. υδραυλικά φορτία) και την προπαρασκευή τέτοιων δεδομένων ειδικά για την ρεαλιστικοποίηση των μοντέλων υπόγειας ροής (I. Borsi, 2017).

Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, έχει δημιουργηθεί η υποενότητα των εργαλείων Υδροχημικής Ανάλυσης για να συμπληρώσει τις λειτουργικότητες της πλατφόρμας του FREEWAT στο περιβάλλον του QGIS. Λειτουργεί κιάλας χωρίς κανένα πρόβλημα για τις υποκατάστατες εκδόσεις (π.χ. 2.16 και 2.18) (I. Borsi, 2017).

Η υποενότητα των Εργαλείων Υδροχημικής Ανάλυσης (Hydrochemical Analysis Tools) είναι μέρος της ενότητας AkvaGIS, που είναι πλήρως ενσωματωμένη στην πλατφόρμα του FREEWAT. Συντίθεται από μία γεωχωρική βάση δεδομένων ενσωματωμένη στο Spatialite και από μία σειρά εργαλείων για τη βελτίωση της εναρμόνισης, ολοκλήρωσης, τυποποίησης, οπτικοποίησης και απεικόνισης των υδροχημικών δεδομένων. Κάποια από αυτά τα διαμορφωμένα εργαλεία είναι: υπολογισμοί ισοζυγίων ιόντων, χημική ανάλυση χρονικής σειράς, συσχετισμός χημικών παραμέτρων και υπολογισμός διαφόρων κοινών υδροχημικών διαγραμμάτων (Salinity, Schöeller-Berkaloff, Piper, και Stiff), μεταξύ άλλων. Επιπλέον, η υποενότητα επιτρέπει την παραγωγή χαρτών της χωρικής κατανομής παραμέτρων, διαγραμμάτων και θεματικών χαρτών για τις μετρημένες παραμέτρους στην εξεταζόμενη περιοχή και ταξινομημένες σύμφωνα με τα όρια που δόθηκαν από έναν επίσημο οδηγό (I. Borsi, 2017).

Λειτουργία της υποενότητας AkvaGIS

Αυτή η υποενότητα του AkvaGIS, ενότητα του FREEWAT, σχεδιάστηκε έχοντας στο νου τα διαφορετικά εργαλεία και μεθοδολογίες με τις οποίες οι διαχειριστές νερού χρησιμοποιούν για να διεξάγουν μια ολοκληρωμένη υδρογεωλογική ανάλυση και ανάλυση ποιότητας συμπεριλαμβανομένου του ελέγχου των δεδομένων, διαγραμμάτων και ιονικών αναλογιών, απεικόνισης, προεπεξεργασίας και αποτύπωσης των υδροχημικών δεδομένων. Παρακάτω γίνεται παρουσίαση των τεχνικών προϋποθέσεων και προδιαγραφών και πώς ενσωματώνονται στην ενότητα του FREEWAT (I. Borsi, 2017).

Μια αποτελεσματική μεθοδολογία για την ενσωμάτωση υδρογεωχημικών δεδομένων στην προσομοίωση υπόγειας ροής πρέπει να τηρεί τις παρακάτω τεχνικές προϋποθέσεις (I. Borsi, 2017):

1. Αποθήκευση, ενσωμάτωση και διαχείριση χωρικών χαρακτηριστικών και χρονικά εξαρτημένων δεδομένων σε μια γεωχωρική βάση δεδομένων (geospatial database), που θα υποστηρίζει:

1.1. Διαχείριση διαφορετικών δεδομένων που προέρχονται και από αναλύσεις δειγμάτων νερού στο εργαστήριο και από δοκιμές πεδίου.

1.2. Ενσωμάτωση διαφορετικών ειδών πληροφορίας (π.χ. ονομαστικά όρια που έχουν οριστεί για μια δεδομένη υδροχημική παράμετρο, υδραυλικά φορτία, γεωμετρία υδροφόρου, κ.λπ.).

1.3. Τυποποίηση και εναρμόνιση δεδομένων, περιεχομένων των ειδικών μηχανισμών που θα διευκολύνουν την αντιγραφή δεδομένων, τη διαχείριση διαφορετικών μορφών, Standardization and harmonization of data, including specific mechanisms to facilitate την έκδοση δεδομένων και τη μετατροπή μονάδων.

1.4. Εξαγωγή αποθηκευμένων υδροχημικών δεδομένων σε διαφορετικές μορφές όπως το format .ods, για να χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω αναφορά υπολογισμών σε άλλο λογισμικό (π.χ. openOffice).

2. Επεξεργασία δεδομένων και ανάλυση των αποθηκευμένων δεδομένων στη γεωχωρική βάση δεδομένων κάνοντας χρήση:

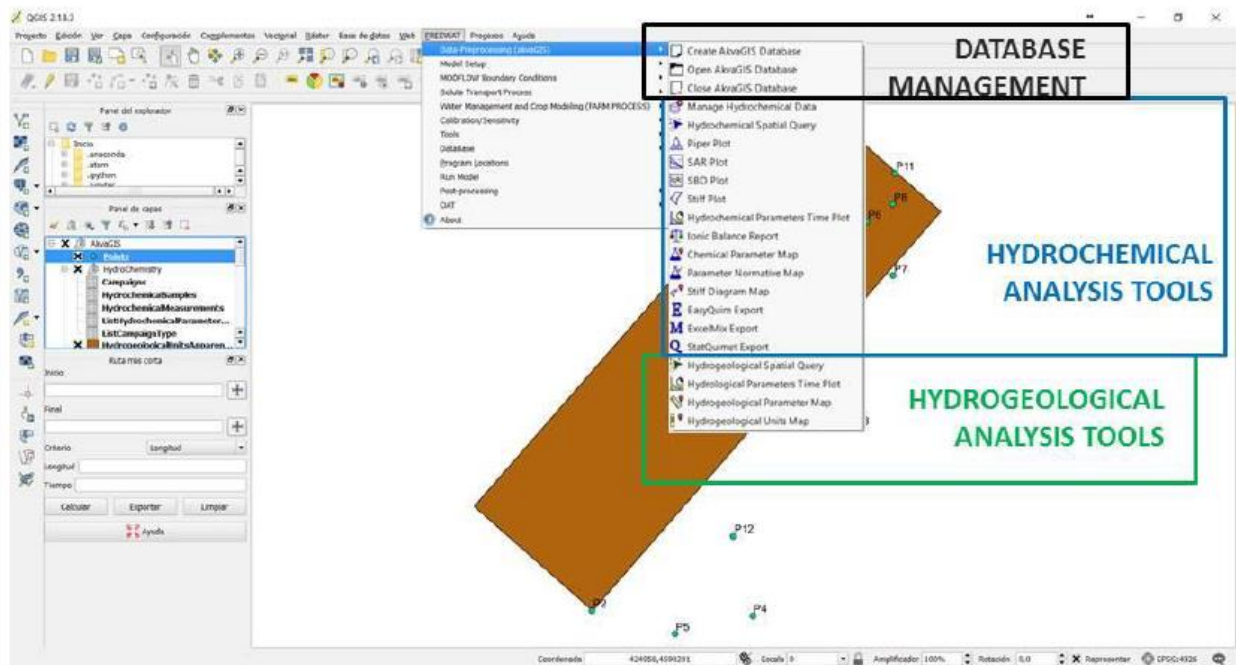
2.1. Του περιβάλλοντος GIS (π.χ. το QGIS) που παρέχει εργαλεία για: (1) την εκτίμηση/υπολογισμό της χωρικής κατανομής των χημικών/φυσικών συστατικών; (2) την ενσωμάτωση διαφορετικών ειδών ρυθμίσεων δεδομένων; (3) τη δημιουργία διαδραστικού χάρτη; (4) τη διεξαγωγή μιας αποδοτικής αξιολόγησης συνοχής και συσχέτισης των δεδομένων εισόδου; (5) την παραδοχή της χωρικής ανάλυσης με παραιτέρω εργαλεία ανάλυσης.

2.2. Ειδικά εργαλεία για τη διευκόλυνση της υδρογεωχημικής ανάλυσης κάνοντας χρήση ποιοτικούς πίνακες δεδομένων (data quality control) και συμβατικών γραφικών τεχνικών ανάλυσης (π.χ. διαγράμματα Piper και Stiff).

2.3. Εργαλεία για τη διευκόλυνση της παραγωγής χαρτών που υποδεικνύουν τις χωρικές κατανομές διαφορετικών φυσικο-χημικών παραμέτρων και θεματικών χαρτών για τις παρατηρούμενες τιμές στην εξεταζόμενη περιοχή ταξινομημένων σύμφωνα με τα όρια που δίδονται από έναν επίσημο οδηγό (π.χ. Water Framework Directive.)

2.4. Εργαλεία για τη διευκόλυνση οπτικοποίησης των υδροχημικών δεδομένων (π.χ. δημιουργία των χρονικά εξελικτικών κατανομών).

2.5. Γενικότερα εργαλεία προ-επεξεργασίας και υπολογισμού δεδομένων.



Εικόνα 15: Περιβάλλον με τις διαφορετικές υποενότητες εργαλείων προπαρασκευής δεδομένων (data pre-processing tools-AkvaGIS) ενσωματωμένων την πλατφόρμα του FREEWAT στο QGIS. Τα εργαλεία Υδροχημικής Ανάλυσης πλαισιώνονται με μπλε χρώμα.

3.3.6 Εργαλείο Παρατήρησης-Ανάλυσης (Observation Analysis Tool - OAT)

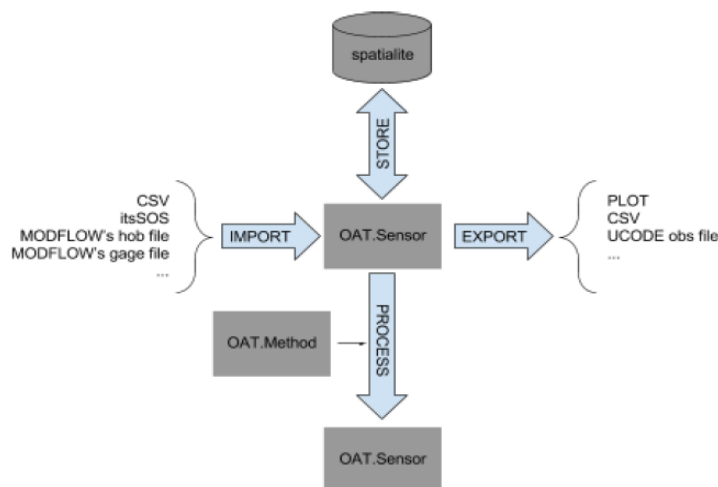
Το OAT είναι ένα εργαλείο για την εισαγωγή, την εξαγωγή και την επεξεργασία δεδομένων χρονικής σειράς, ενσωματωμένο μέσα στο περιβάλλον του FREEWAT στο GIS. Το OAT είναι ένα πακέτο της Python που ολοκληρώθηκε στο περιβάλλον του FREEWAT. Μέσα στο plugin του FREEWAT, το OAT ικανοποιεί τη λειτουργία ενός εργαλείου για γενικότερες εργασίες προετοιμασίας δεδομένων εισόδου ή χρονοσειρές δεδομένων, όπως επίσης ειδικά για αισθητήρες (sensors). Επιπρόσθετα, το OAT παρέχει έναν απευθείας σύνδεσμο για το υπομήμα δημιουργίας παρατήρησης (observation creation portion) του τμήματος ανάλυσης ευαισθησίας.

Λειτουργία του OAT και ενσωμάτωση στο FREEWAT

Η βιβλιοθήκη του OAT (OAT library) ενσωματώνει δύο κύριες κατηγορίες: την κατηγορία των Αισθητήρων (Sensor class) που έχει σχεδιαστεί για να χειρίζεται δεδομένα χρονικής σειράς και μεταδεδομένα και την κατηγορία των Μεθόδων (Method class) που έχει σχεδιαστεί για να αναπαριστά μία μέθοδο επεξεργασίας. Η βιβλιοθήκη εφαρμόζει ένα πρότυπο συμπεριφοράς σε αυτόν που την επισκέπτεται που της επιτρέπει το διαχωρισμό ενός αλγορίθμου από το αντικείμενο το οποίο χειρίζεται: χάρη σε αυτό το σχεδιαστικό πρότυπο είναι εφικτό να προστεθεί μια νέα δυνατότητα επεξεργασίας απλώς επεκτείνοντας την κατηγορία των Μεθόδων χωρίς να απαιτείται η τροποποίηση της κατηγορίας των Αισθητήρων. Από την πλευρά της εξάρτησης, το OAT εκμεταλλεύεται τα πακέτα PANDAS, NUMPY και SCIPY (I. Borsi, 2017).

Η κατηγορία των Αισθητήρων εμπνεύστηκε από το πρότυπο Υπηρεσία Αισθητήρων Παρατήρησης (Sensor Observation Service) και είναι ενσωμάτωση του istSOS (Cannata & Antonovic, 2010), με μια συγκεκριμένη απλοποίηση για να γίνει εύκολη η χρήση του. Η δεύτερη κύρια κατηγορία του OAT είναι οι δυνατότητες επεξεργασίας του, που βασίστηκαν αρχικά στο

TSPROC (Time Series Processing) που διαμορφώθηκε από τους Westenbroek et al. (2012) (I. Borsi, 2017).



Εικόνα 16: Το σχεδιάγραμμα ανάκτησης, επεξεργασίας, αποθήκευσης και εξαγωγής δεδομένων του OAT.

Κάθε αντικείμενο Αισθητήρα χαρακτηρίζεται από μια μοναδικά χρονική σειρά που αναπαριστάται από ένα τμήμα δεδομένων που αποτελείται από μια χρονική σειρά του PANDA και ένα τμήμα τοποθεσίας/μεταδεδομένων. Κάθε αντικείμενο αισθητήρα του OAT μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα spatialite DB και να γίνει επαναφόρτωσή του ξανά στον αισθητήρα OAT με τα δικά του δεδομένα και μεταδεδομένα. Για κάθε αισθητήρα, το 'τμήμα μεταδεδομένων' εμπεριέχει το όνομα, την περιγραφή, την τοποθεσία, τη μονάδα μέτρησης, την παρατηρούμενη ιδιότητα, το σύστημα συντεταγμένων, τη ζώνη ώρας, τη συχνότητα, τα στατιστικά βάρους και τη διαθεσιμότητα των δεδομένων (time interval). Το 'τμήμα δεδομένων' εμπεριέχει το χρόνο, τα δεδομένα, το όνομα και την ένδειξη της ποιότητας, όπως επίσης και μια επικέτα που σημαδεύει πότε μια ανεξάρτητη παρατήρηση στη σειρά θα χρησιμοποιηθεί ή όχι. Επιπρόσθετα, το OAT μπορεί να ανακτά δεδομένα αποθηκευμένα σε τοπικούς φακέλους ή βάσεις δεδομένων μέσα περιβάλλον του FREEWAT GIS για περαιτέρω χρήση. Επίσης, μπορούν να εισαχθούν αποτελέσματα μοντελοποίησης ως αισθητήρες OAT για περαιτέρω ανάλυση χρονικής σειράς (I. Borsi, 2017).

Κατά την προετοιμασία για τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου, η δυνατότητα επεξεργασίας τους του OAT είναι ιδιαίτερα σημαντική. Βασικά, από τη στιγμή που τα διαθέσιμα δεδομένα δε θα έχουν την ίδια χρονική διακριτοποίηση με τον επιλεγόμενο χρόνο μοντελοποίησης, διάφορα φίλτρα ή μέθοδοι διόρθωσης δεδομένων είναι διαθέσιμα για τη δημιουργία νέων, αλλά στατιστικά σωστών, χρονικών σειρών για να εισαχθούν ως δεδομένα εισόδου μοντέλου (I. Borsi, 2017).

Το OAT συνενώνει τα μετεπεξεργασμένα αποτελέσματα του μοντέλου δημιουργώντας αισθητήρες με κατάλληλη χρονική διακριτοποίηση για την απεικόνιση και περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων του μοντέλου ως χρονική σειρά. Τα φορτία του MODFLOW και οι παρατηρήσεις της ροής, παραθέτοντας φακέλους με το ογκομετρικό απόθεμα (είτε ως συσσωρευτικό απόθεμα είτε ως ρυθμό), και τα αρχεία gage είναι υποστηριζόμενες μορφές. Η απεικόνιση της χρονικής σειράς επιτυγχάνεται μέσω της ενότητας Python Matplotlib. Διάφορα στοιχεία του ογκομετρικού αποθέματος νερού για ένα μοντέλο MODFLOW δύναται να φορτωθούν ως αισθητήρες και να απεικονιστούν και συγκριθούν με άλλα παρόμοια στοιχεία ή άλλες σχετικές

χρονικές σειρές ή παρατηρήσεις. Οι παρατηρήσεις του υπόγειου υδραυλικού φορτίου μπορεί να ενσωματωθεί στο πρότυπο πακέτο παρακολούθησης υδραυλικού φορτίου του MODFLOW χρησιμοποιώντας το OAT και τα προσομοιωμένα φορτία μπορούν να φορτωθούν από τα αποτελέσματα του μοντέλου (I. Borsi, 2017).

3.3.7 Ενότητα Βαθμονόμησης και Ευαισθησίας (Calibration and Sensitivity module)

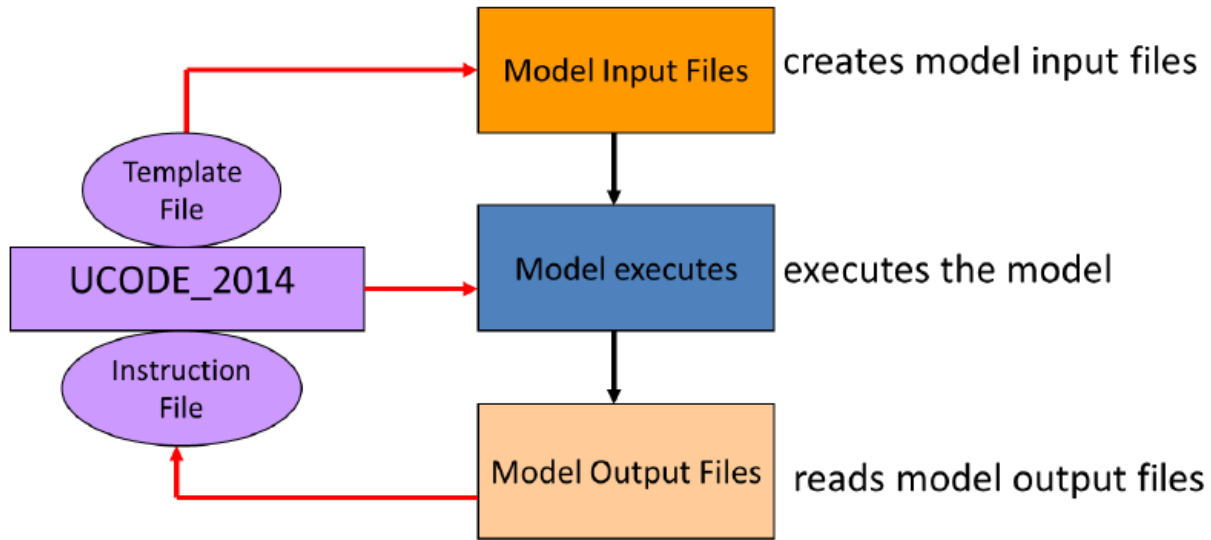
Το UCODE_2014 είναι ένα παγκόσμιο λογισμικό εργαλείο σχεδιασμένο για να διεξάγει αναλύσεις ευαισθησίας, αναλύσεις αβεβαιότητας και βαθμονόμηση του μοντέλου (εκτίμηση παραμέτρων), αλλά παρέχει επίσης βοηθητικά εργαλεία για την ανάλυση της αξίας των δεδομένων και βόηθεια για τις ανάγκες των δεδομένων. Το UCODE_2014 έχει σχεδιαστεί για να δουλεύει με αρχεία εισόδων και εξόδων, και επομένως να μπορεί να αλληλεπιδρά με μοντέλα προσομοίωσης με γενικότερο τρόπο. Το UCODE_2014 αυτοματοποιεί τη διαδικασία προσαρμογής των τιμών των παραμέτρων του μοντέλου, προσομοιώνοντας τα μοντέλα και εξετάζοντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (η επεξεργασία συνήθως γίνεται χειρωνακτικά). Αυτοματοποιώντας αυτήν τη συχνά επίπονη διαδικασία και παρέχοντας έναν κοινό κορμό για τη σύγκριση και των μοντέλων και των παραμέτρων, μαζί με τις αβεβαιότητές τους, το τελικό αποτέλεσμα θα πρέπει να είναι περισσότερο ακριβή και ρεαλιστικά μοντέλα (I. Borsi, 2017).

Πώς μπορεί το UCODE_2014 να βοηθήσει στην αξιολόγηση των μοντέλων και των αποτελεσμάτων τους; Η ανάλυση ευαισθησίας και η βαθμονόμηση μπορούν να παρέχουν απαντήσεις απαντώντας στις παρακάτω ερωτήσεις (I. Borsi, 2017):

- i. Ποιες παράμετροι υποστηρίζονται από τις παρατηρήσεις;
- ii. Υπάρχουν παράμετροι που 'κυριαρχούνται' από μία μοναδική παρατήρηση;
- iii. Ποιες παράμετροι του μοντέλου είναι σημαντικές για αυτά για τα οποία πρέπει να γίνει προσομοίωση;
- iv. Ποια δεδομένα πρέπει να συλλεχθούν για να βελτιωθούν οι προβλέψεις;
- v. Ποιο εννοιολογικό μοντέλο του συστήματος θα δώσει τις βέλτιστες προβλέψεις;
- vi. Πόση αβεβαιότητα έχουν οι προβλέψεις;

Όπως περιγράφεται γραφικά στο παρακάτω σχήμα, η ενότητα της βαθμονόμησης και της ανάλυσης ευαισθησίας είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ενότητα του OAT (χρησιμοποιώντας το OAT είναι εφικτή η δημιουργία των φακέλων παρατηρήσεων για το UCODE) κι έπειτα αλληλεπιδρά με όλες τις άλλες ενότητες. Μόλις το κύριο φυσικό μοντέλο διαμορφωθεί, τότε η επόμενη κίνηση ιδανικά θα είναι η χρήση των φακέλων παρατήρησης που έχουν δημιουργηθεί από το OAT και έπειτα η εκκίνηση της ανάλυσης ευαισθησίας του μοντέλου και της βαθμονόμησης χρησιμοποιώντας το UCODE. Έπειτα, αναμένεται ότι το UCODE θα παρέχει προτάσεις για τη βελτίωση του φυσικού μοντέλου και επομένως ολόκληρη η διαδικασία μπορεί να διαμορφωθεί ξανά μέχρι τα αποτελέσματα του μοντέλου να είναι ικανοποιητικά (I. Borsi, 2017).

Με το UCODE ενσωματωμένο στο FREEWAT, οι φάκελοι εισόδου (input file), περιγράμματος (template file) και οδηγίων (instruction file) του UCODE δημιουργούνται αυτόματα βασισμένοι σε μια επιλογή παραμέτρων και παρατηρήσεων. Στην παρούσα ενσωμάτωση, το UCODE_2014 μπορεί να τρέξει τρία μοντέλα: 1) το forward (προσομοίωση του βασικού μοντέλου), 2) την ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis), ή 3) την εκτίμηση/βελτιστοποίηση παραμέτρων (I. Borsi, 2017).



Εικόνα 17: Σχηματική απεικόνιση των λειτουργιών του UCODE και των απαραίτητων φακέλων για να τρέξει το λογισμικό.

Το UCODE_2014, όπως προαναφέρθηκε, είναι βασισμένο στην τοπική ανάλυση ευαισθησίας και υποστηρίζει τη χρήση της βαθμονόμησης βάσει σφάλματος στη διαμόρφωση των μοντέλων. Καθώς η τοπική ανάλυση ευαισθησίας δεν καλύπτει κάποιες πλευρές της μη γραμμικότητας που καλύπτουν άλλες μέθοδοι, όπως τα τοπικά ελάχιστα, η πείρα έχει αποδείξει ότι πολλά μοντέλα φυσικών συστημάτων είναι αρκετά γραμμικά για να είναι χρήσιμες οι μέθοδοι τοπικής ανάλυσης ευαισθησίας (I. Borsi, 2017).

4. ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΑΒΑΘΟΥΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η περιοχή έρευνας βρίσκεται στο δημοτικό συγκρότημα των Θρακομακεδόνων στην Αττική. Αφορά ένα οικοδομικό τετράγωνο 1123.01m², στο οποίο υπάρχει μία γεωθερμική αντλία θερμότητας, με μία παραγωγική γεώτρηση και μία γεώτρηση επανεισαγωγής, που χρησιμοποιείται για τις ανάγκες θέρμανσης και ψύξης του οικοδομικού συγκροτήματος που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Οι δύο γεωτρήσεις έχουν βάθος 80m.



Εικόνα 18: Δορυφορική εικόνα της περιοχής έρευνας

Πίνακας 3: Συντεταγμένες πολυγώνου περιοχής

A/A	X	Y
0	478886.35	4219792.67
1	478941.65	4219764.63
2	478934.50	4219747.16
3	478879.20	4219777.06
4	478881.06	4219781.56

Το βάθος στάθμης του υπόγειου νερού του υδροφορέα ο οποίος προμηθεύει το σύστημα με το απαιτούμενο νερό για τις θερμαντικές ανάγκες του βρίσκεται στα 40m. Με το υψόμετρο της συγκεκριμένης τοποθεσίας πάνω από τη στάθμη της θάλασσας να είναι στα 350m, η στάθμη του γεωθερμικού υδροφόρου βρίσκεται στο υψόμετρο των 310m. Η γεώτρηση επανεισαγωγής λειτουργεί όταν λειτουργεί και η παραγωγική γεώτρηση.

4.1 Πεδίο μοντέλου

4.1.1 Δημιουργία του νέου υδρολογικού μοντέλου

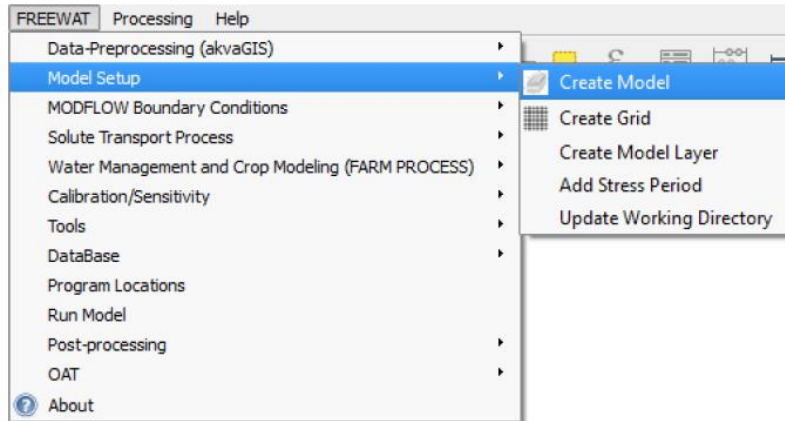
Το πεδίο του μοντέλου επιλέχθηκε στο αναφορικό σύστημα συντεταγμένων (CRS) GGRS87/Greek Grid (με κωδική ταυτότητα – ID το EPSG:2100) και σε μια ευρύτερη περιοχή του αρχικού οικοπέδου ενδιαφέροντος, έτσι ώστε να υπάρχει μια πιο διευρυμένη εικόνα της επιρροής της άντλησης και της επανεισαγωγής του γεωθερμικού ρευστού στο γεωθερμικό σύστημα. Πάνω στο συγκεκριμένο CRS θα γίνουν και όλες οι διεργασίες στη συνέχεια για την προσομοίωση. Αυτή η διευρυμένη περιοχή στην ουσία είναι ένα αρχείο μορφής πολυγωνικού shapefile που δημιουργείται πάνω στο προαναφερόμενο CRS και θα χρειαστεί για τη δημιουργία του καννάβου πεπερασμένων διαφορών στη συνέχεια. Η διευρυμένη περιοχή έχει έκταση 15.416,83 m².



Εικόνα 19: Το αρχείο shapefile για το ευρύτερο πεδίο μοντέλου στην περιοχή.

Η προσομοίωση ενός νέου υδρολογικού σεναρίου το οποίο θα αξιοποιεί τα δεδομένα της περιοχής ενδιαφέροντος απαιτεί ένα νέο υδρολογικό μοντέλο και μια νέα βάση δεδομένων (DB) για το μοντέλο. Για να δημιουργηθεί ένα νέο υδρολογικό μοντέλο, πρέπει να χρησιμοποιηθεί το ακόλουθο μενού (G. De Filippis, 2017):

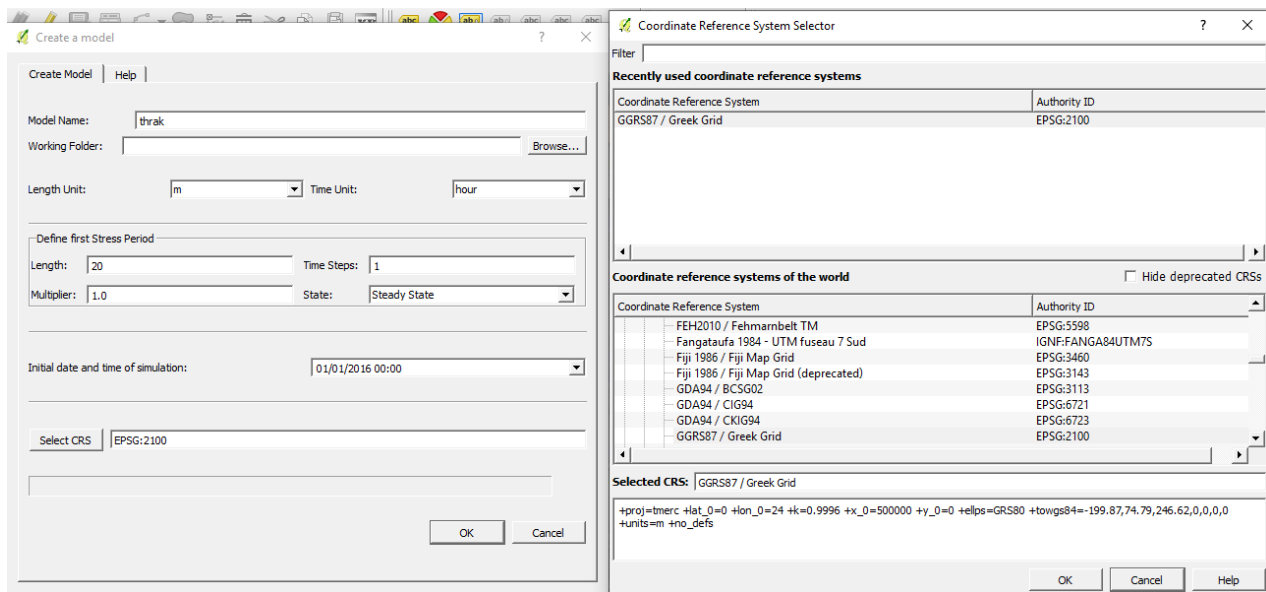
FREEWAT -> Model Setup -> Create Model



Εικόνα 20: Εντολή δημιουργίας καινούριου μοντέλου

Στο παράθυρο δημιουργίας μοντέλου απαιτούνται κάποια συγκεκριμένα δεδομένα. Αυτά παρατίθενται παρακάτω μαζί με τις επιλογές που θα γίνουν για το δικό μας μοντέλο στις επερχόμενες παρενθέσεις:

- Model Name: το όνομα του νέου υδρολογικού μοντέλου (thrak)
- Working Folder: ο φάκελος στον οποίο η βάση δεδομένων, οι φάκελοι εισόδου του MODFLOW και οι αντίστοιχοι φάκελοι εξόδου θα αποθηκεύονται
- Length Unit: η μονάδα μήκους που θα χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης (m);
- Time Unit: η μονάδα χρόνου που θα χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης (hour);
- στον τομέα προσδιορισμού της πρώτης χρονικής περιόδου (Define first Stress Period):
 - Length: διάρκεια του πρώτου SP σε χρονικές μονάδες (20);
 - Time Steps: αριθμός των TS της πρώτης SP (1);
 - Multiplier: ο πολλαπλασιαστής για τον υπολογισμό της διάρκειας του κάθε TS κατά τη διάρκεια της πρώτης SP (1);
 - State: δύο διαθέσιμες επιλογές, το Steady State (Σταθερή κατάσταση), αν η μεταβλητή του μοντέλου, π.χ. το υδραυλικό φορτίο, δεν αλλάζει με την πάροδο του χρόνου, και το Transient (μεταβαλλόμενη ροή), αν προσομοιώνεται η εξέλιξη του υδραυλικού φορτίου με την πάροδο του χρόνου
- Initial date and time of simulation: η ημερομηνία και ώρα εκκίνησης της προσομοίωσης (dd/mm/YYYY και hh:mm:ss αντίστοιχα);
- επιλέγοντας το Select CRS, εμφανίζεται το παράθυρο Coordinate Reference System Selector για την επιλογή του κατάλληλου CRS.

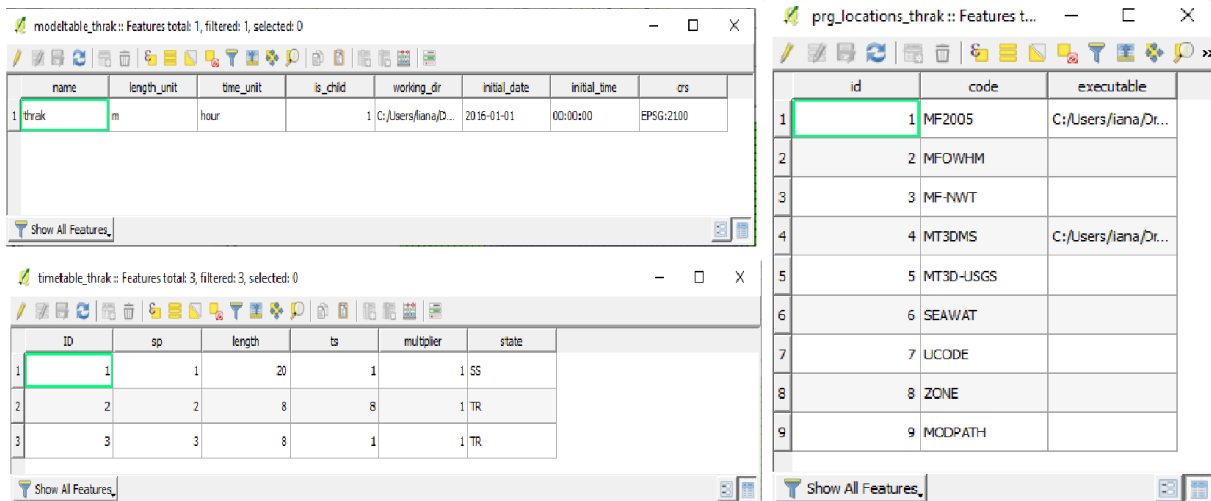


Εικόνα 21: Παράθυρο δημιουργίας καινούριου μοντέλου

Μόλις δημιουργηθεί το νέο μοντέλο, δημιουργείται και το αντίστοιχο Spatialite στη DB με το όνομα model_name.sqlite (εδώ thrak.sqlite) και ένα παράθυρο ενημέρωσης εμφανίζεται που αναφέρει ότι το DB του μοντέλου έχει αποθηκευτεί στον επιλεγόμενο φάκελο εργασίας.

Όλοι οι πίνακες, τα στρώματα του μοντέλου και τα δημιουργούμενα MDOs αποθηκεύονται μόνιμα στη DB του μοντέλου, ακόμη και αν διαγραφούν από τον Πίνακα Στρωμάτων (Layers Panel). Η DB του μοντέλου δύναται να εξερευνηθεί χρησιμοποιώντας εργαλεία του QGIS.

Δημιουργούνται τρεις πίνακες στον Πίνακα Στρωμάτων και αποθηκεύονται στη DB του μοντέλου με τη δημιουργία του, το modeltable_thrak (που περιέχει πληροφορίες για τα δεδομένα που εισήχθησαν στο παράθυρο Create Model όσον αφορά τις μονάδες μέτρησης και το CRS), το timetable_thrak (που περιέχει τις πληροφορίες για την πρώτη SP και στον οποίο θα εμφανίζονται και οι επόμενες) και το prg_locations_thrak (που περιέχει τους κώδικες που δύναται να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση του μοντέλου και τους εκτελέσιμους φακέλους τους).



Εικόνα 22: Οι πίνακες modeltable_thrak, timetable_thrak και prg_locations_thrak.

Αν ο πίνακας prg_locations_thrak διαγραφεί από τον Πίνακα Στρωμάτων, γίνεται να ανακτηθεί από τη DB του μοντέλου (όπου είναι μόνιμα αποθηκευμένο) χρησιμοποιώντας το plugin DB Manager. Αν ο πίνακας prg_locations_thrak διαγραφεί και από τον Πίνακα Στρωμάτων και από τη DB του μοντέλου, τότε μπορεί να εισαχθεί ξανά μέσω του παρακάτω μενού:

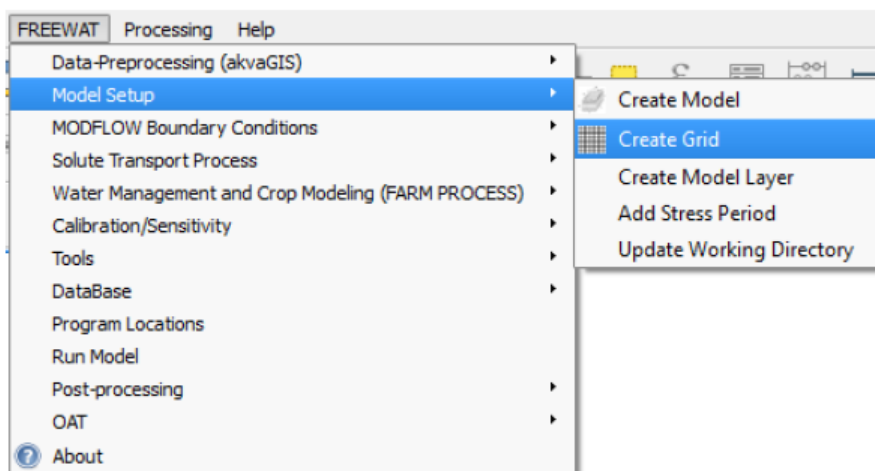
FREEWAT -> Program Locations

Στο παράθυρο του Program Locations, απαιτείται μόνο το όνομα του μοντέλου (δηλαδή το όνομα του υδρολογικού μοντέλου που μόλις έχει δημιουργηθεί, το thrak).

4.1.2 Διακριτοποίηση χώρου και χρόνου

Αρχικά γίνεται η δημιουργία του καννάβου, με τη χρήση του παρακάτω μενού (G. De Filippis, 2017):

FREEWAT -> Model Setup -> Create Grid



Εικόνα 23: Εντολή δημιουργίας καννάβου

Στο παράθυρο δημιουργίας νέου καννάβου απαιτούνται τα παρακάτω δεδομένα:

- Στο τμήμα εύρους του καννάβου (Grid extent section):

- το πολυγωνικό αρχείο shapfile που είχε δημιουργηθεί, το οποίο περιέχει τους εύρους της περιοχής μελέτης (εδώ: Domain);

- Τα X Min, X Max, Y Min και Y Max είναι οι χωρικές συντεταγμένες των κορυφών του πολυγώνου και σύμφωνα με τις οποίες θα δημιουργηθεί και ο κάνναβος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα γίνει φόρτωσή τους από το προαναφερόμενο αρχείο (Update extents from layer). Αλλιώς υπάρχει η δυνατότητα να εισαχθούν και χειρωνακτικά;

- Στο τμήμα ανάλυσης του καννάβου (Grid resolution):

- η ανάλυση του καννάβου (σε μονάδες μήκους) κατά τους άξονες X και Y, δηλαδή το μέγεθος κάθε κελιού. Αν το κουτί του λόγου 1:1 είναι επιλεγμένο, θα δημιουργηθούν τετραγωνικά κελιά. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα φτιαχτούν κελιά μήκους 2×2m (συνολικά 7410 κελιά);

- στο τμήμα εξόδου (Output):

- Model Name: το όνομα του υδρολογικού μοντέλου (thrak);

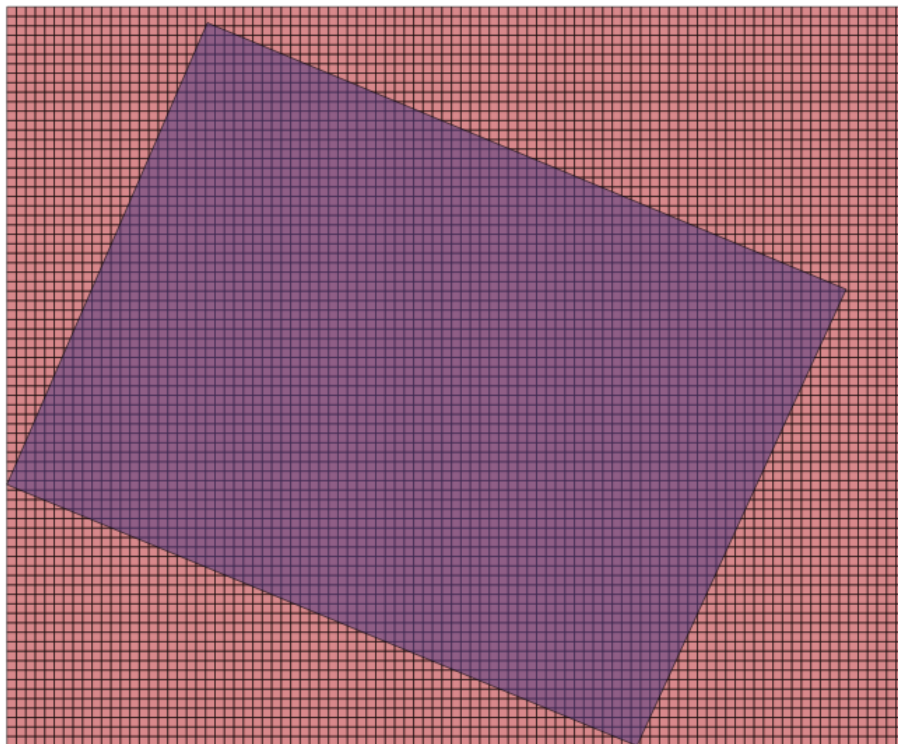
- Grid Name: το όνομα που θα δοθεί στο MDO του καννάβου (grid); το συγκεκριμένο MDO θα εμφανιστεί στον Πίνακα Στρωμάτων μετά τη δημιουργία του καννάβου, με το όνομα grid_grid και θα αποθηκευτεί και στη DB.

The screenshot shows the 'Create new grid' dialog box with the following details:

- Grid extent:** Fetch extents from existing layer: Domain. Buttons: Update extents from layer, Update extents from canvas. X Min: 478828.690996, Y Min: 4219689.24757, X Max: 479017.719371, Y Max: 4219846.15031. Note: maximum values of X and Y will be adjusted to obtain exact resolution.
- Grid resolution (in map unit):** X: 2,00, Y: 2,00, 1:1 ratio (checked). Estimated number of grid cells: 7410.
- Load grid from TXT file:** Unchecked. Fields: TXT file, Decimal separator: ., Column separator: ., Import grid information from TXT button.
- Output:** Model Name: thrak, Grid Name: grid, Load layer after creation (checked).

Εικόνα 24: Παράθυρο δημιουργίας καννάβου

Δημιουργήθηκε ο παρακάτω κάνναβος με 78 σειρές και 95 στήλες:



Εικόνα 25: Κάνναβος grid_grid

Ο πίνακας χαρακτηριστικών (Attribute Table) του MDO του κανάβου μπορεί να εμπεριέχει αρκετές σειρές, ανάλογα με τον αριθμό των κελιών, και τα παρακάτω πεδία:

- PKUID: ο αριθμός του κελιού (δεν τροποποιείται);
- ID: το κύριο κλειδί της βάσης δεδομένων (δεν τροποποιείται);
- ROW: η γραμμή στην οποία ανήκει το κελί;
- COL: η στήλη στην οποία ανήκει το κελί.

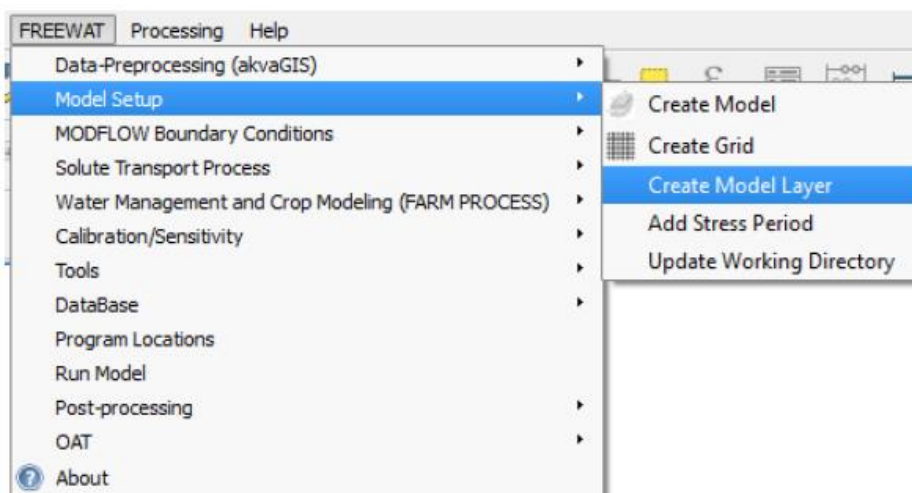
Μόλις δημιουργηθεί ο συγκεκριμένος κάνναβος θα χρησιμοποιηθεί για να δημιουργηθούν τα στρώματα του μοντέλου και άλλα MDO. Αυτά τα model layers πρέπει να αντιστοιχούν στις υδροστρωματογραφικές μονάδες που εντοπίζονται στο εννοιολογικό μοντέλο. Κάθε model layer απηθεύεται στη DB του μοντέλου ως ένα MDO σχετικό με τον κάνναβο, που σημαίνει ότι οι ιδιότητές του (ειδικά οι υδραυλικές) εκχωρούνται σε κάθε κελί του καννάβου. Καθώς η άντληση γίνεται στα 80m βάθος, επιλέγεται να δημιουργηθούν πέντε (5) στρώματα μέχρι τα 100m βάθος. Το πρώτο στρώμα θα έχει πάχος 50m (από τα 350m έως τα 300m) για να λαμβάνεται υπόψη η στάθμη ηρεμίας, ως αρχικό υδραυλικό φορτίο, τα επόμενα τρία θα έχουν πάχος 10m (300-290m, 290-280m, 280-270m), με το τέταρτο να φτάνει στο βάθος της γεώτρησης στα 80m, ενώ το τελευταίο θα έχει πάχος 20m κάτω από τις γεωτρήσεις. Όλα τα στρώματα θα λειτουργούν ως κανονικοί υδροφορείς, εκτός από το τελευταίο κάτω από τη γεώτρηση που θα λειτουργεί ως υπό πίεση υδροφορέας.

Πίνακας 4: Υδρογεωλογικά στρώματα περιοχής

Στρώμα	Οροφή (m)	Δάπεδο (m)	Πάχος (m)	Υπό πίεση υδροφόρος
1	350	300	50	Όχι
2	300	290	10	Όχι
3	290	280	10	Όχι
4	280	270	10	Όχι
5	270	250	20	Ναι

Για τη δημιουργία ενός στρώματος, χρησιμοποιείται το παρακάτω μενού (G. De Filippis, 2017):

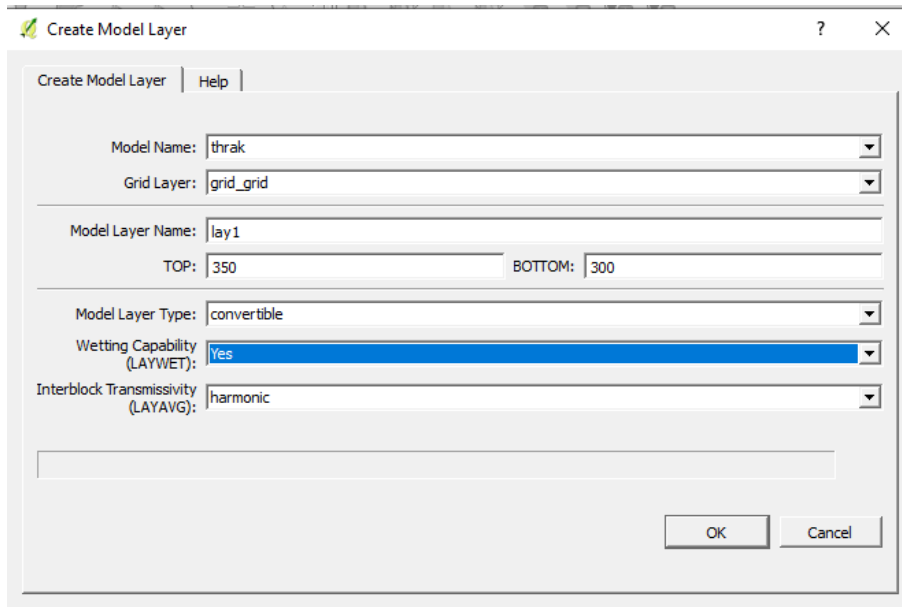
FREEWAT -> Model Setup -> Create Model Layer



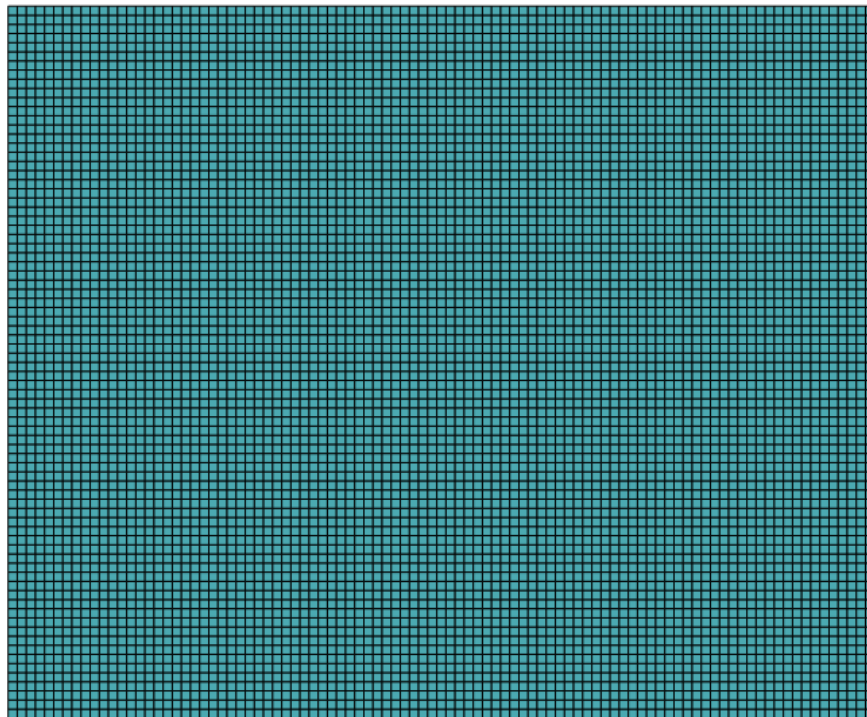
Εικόνα 26: Εντολή δημιουργίας στρώματος

Απαιτούνται τα παρακάτω δεδομένα στο παράθυρο δημιουργίας στρώματος (αφορά το πρώτο στρώμα):

- Model Name: το όνομα του υδρολογικού μοντέλου (thrak);
- Grid Layer: το όνομα του MDO του καννάβου (grid_grid);
- Model Layer Name: το όνομα που θα δοθεί στο στρώμα που είναι να δημιουργηθεί (lay1);
- TOP: το υψόμετρο της επιφάνειας της οροφής του στρώματος σε m (350);
- BOTTOM: το υψόμετρο της επιφάνειας του δαπέδου του στρώματος σε m (300);
- Model Layer Type: δύο διαθέσιμες επιλογές, confined για τους υπό πίεση, convertible για τους ελεύθερους (για το πρώτο στρώμα επιλέγεται το convertible);
- Wetting Capability (LAYWET): δύο διαθέσιμες επιλογές, το Yes (ναι) αν τα κελιά στραγγίζουν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης δύναται να την ανακτήσουν, αλλιώς το No (όχι);
- Interblock Transmissivity (LAYAVG): η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της οριζόντιας μεταφοράς (harmonic).



Εικόνα 27: Παράθυρο δημιουργίας νέου στρώματος του μοντέλου



Εικόνα 28: Το 1^ο δημιουργούμενο στρώμα (lay1)

Οι πίνακες χαρακτηριστικών ενός στρώματος μπορεί να περιέχουν αρκετές τιμές, ανάλογα με τον αριθμό των κελιών, και τα παρακάτω πεδία:

- PKUID: κύριο κλειδί της βάσης δεδομένων (δεν τροποποιείται);
- ID: κύριο κλειδί της βάσης δεδομένων (δεν τροποποιείται);

- ROW: η σειρά στην οποία αντιστοιχεί το κελί;
- COL: η στήλη στην οποία αντιστοιχεί το κελί;
- BORDER: ακέραια τιμή που επιτρέπει τη διάκριση μεταξύ ενός κελιού που βρίσκεται στα όρια της περιοχής (BORDER=1) και ενός στο εσωτερικό της (BORDER=0);
- ACTIVE: ακέραια τιμή που αντιστοιχεί στη σημαία IBOUND του MODFLOW (Harbaugh, 2005), που επιτρέπει τη διάκριση μεταξύ ενεργών κελιών μεταβλητού φορτίου (που θα υπολογίζεται σε κάθε επανάληψη - ACTIVE=1), μη ενεργών κελιών (που δε θα επιλύεται η εξίσωση της ροής - ACTIVE=0) και ενεργών κελιών συγκεκριμένου φορτίου (που το υδραυλικό φορτίο είναι προσδιορισμένο και δε μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης - ACTIVE=-1);
- TOP: το υψόμετρο της επιφάνειας της οροφής του στρώματος [m];
- BOTTOM: το υψόμετρο της επιφάνειας του δαπέδου του στρώματος [m];
- THICKNESS: το πάχος του στρώματος, υπολογιζόμενο από την τιμή του TOP μείον την τιμή του BOTTOM σε κάθε κελί [m];
- STRT: το υδραυλικό φορτίο που εκχωρείται σε κάθε κελί στην αρχή της προσομοίωσης (αρχική συνθήκη) [m];
- KX: υδραυλική αγωγιμότητα κατά μήκος του άξονα X [m/h];
- KY: υδραυλική αγωγιμότητα κατά μήκος του άξονα Y [m/h];
- KZ: υδραυλική αγωγιμότητα κατά μήκος του άξονα Z [m/h];
- SS: Συντελεστής αποθηκευτικότητας [m^{-1}];
- SY: Ειδική απόδοση;
- NT: ολικό πορώδες;
- NE: ενεργό πορώδες;
- WETDRY: ένδειξη ότι το κελί μπορεί να ανακτήσει υγρασία χάρη στην ανταλλαγή νερού με το κελί από κάτω του (WETDRY<0), ή με το κελί από κάτω και τα τέσσερα γειτονικά οριζόντια κελιά (WETDRY>0). Παίρνει την τιμή 0 αν το κελί δεν μπορεί να ανακτήσει την υγρασία του.

Αφού δημιουργηθεί το πρώτο στρώμα, δημιουργείται ταυτόχρονα και ένας πίνακας ονομαζόμενος `lrf_model_thrak`, αποθηκευμένος στη DB του μοντέλου και εμφανιζόμενος στον Πίνακα Στρωμάτων. Ενημερώνεται με τη δημιουργία κάθε νέου στρώματος και όλες οι τιμές του δύναται να τεθούν υπό επεξεργασία. Αυτός ο πίνακας περιέχει τα παρακάτω πεδία:

- name: το όνομα κάθε στρώματος;
- type: τον τύπο του στρώματος (confined ή convertible) που προσδιορίζεται κατά τη δημιουργία του αντίστοιχου στρώματος;
- layavg: η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της οριζόντιας μεταφερσιμότητας μεταξύ των κελιών (LAYAVG - harmonic), που επίσης προσδιορίζεται κατά τη δημιουργία;
- chani: ακέραια τιμή, που ορίζει την οριζόντια ανισοτροπία του αντίστοιχου στρώματος;

• laywet: ένδειξη εάν η ικανότητα ανάκτησης υγρασίας είναι ενεργή (Yes) ή όχι (No), ανάλογα με το τι έχει προσδιοριστεί κατά τη δημιουργία του στρώματος.

Αντίστοιχα δημιουργούνται και τα υπόλοιπα 4 στρώματα (lay2, lay3, lay4 και lay5), αποθηκεύονται στη DB και εμφανίζονται στον Πίνακα Στρωμάτων. Το πέμπτο και βαθύτερο στρώμα επιλέγεται να είναι υπό πίεση (confined) και με μη ενεργή την ικανότητα ανάκτησης υγρασίας. Όλα θα έχουν αρχικό υδραυλικό φορτίο ίσο με 210m (STRT = 240), εκεί δηλαδή που είναι η αρχική στάθμη του υδροφόρου, και με ενεργό πορώδες ίσο με 15% (NE = 0.15). Οι τιμές των KX, KY, KZ, SS και SY θα μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Μετά τη δημιουργία των 5 στρωμάτων ο ενημερωμένος πίνακας lpf_thrak θα είναι ο εξής:

	name	type	layavg	chani	laywet
1	lay1	convertible	harmonic	1	Yes
2	lay2	convertible	harmonic	1	Yes
3	lay3	convertible	harmonic	1	Yes
4	lay4	convertible	harmonic	1	Yes
5	lay5	confined	harmonic	1	No

Εικόνα 29: Πίνακας χαρακτηριστικών lpf_thrak

Τα δεδομένα εισόδου των στρωμάτων, τα υδραυλικά χαρακτηριστικά τους δηλαδή, τα έχουμε πάρει από παραγωγικές αντλήσεις που έχουν γίνει από το ΙΓΜΕ σε αυτήν την περιοχή, για τη μελέτη του γεωλογικού και υδρογεωλογικού υποβάθρου. Τα υδραυλικά χαρακτηριστικά από αυτές τις μελέτες που αξιοποιήθηκαν στους πίνακες χαρακτηριστικών (attribute tables) των στρωμάτων για την προσομοίωση του μοντέλου, είναι τα εξής:

- Υδραυλική αγωγιμότητα: $K_x = K_y = 0.0018 \text{ m/min} = 0.108 \text{ m/h}$
- Υδραυλική αγωγιμότητα: $K_z = 0.00018 \text{ m/min} = 0.0108 \text{ m/h}$
- $S_y = 0.0004$
- $S_s = 2 \times 10^{-6}$
- Ενεργό πορώδες: $n_e = 0.15$ (15%)

Και οι δύο τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας παραπέμουν σε αμμώδη εδάφη, κάτι που ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, καθώς εντοπίζονται προσχωματικά εδάφη στην περιοχή. Επίσης, οι δύο τιμές των S_y και S_s επιλέχθηκαν με βάση την εξίσωση της απορροφητικότητας S:

$$S = S_y + S_s \times D$$

όπου D είναι το πάχος του υδροφόρου στρώματος. Αυτό που έχουμε ως δεδομένα από τις μελέτες είναι μόνο το S, που βρέθηκε ίσο με 0.0004 (αδιάστατο μέγεθος). Για την ευκολία στην επιλογή των δύο μεγεθών, αφού το D είναι για το 1^ο στρώμα 50m, για τα επόμενα τρία 10m και για το τελευταίο 20m, δίνουμε στο S_s μια πολύ μικρή τιμή, ώστε ο δεύτερος όρος να μη λαμβάνεται πολύ

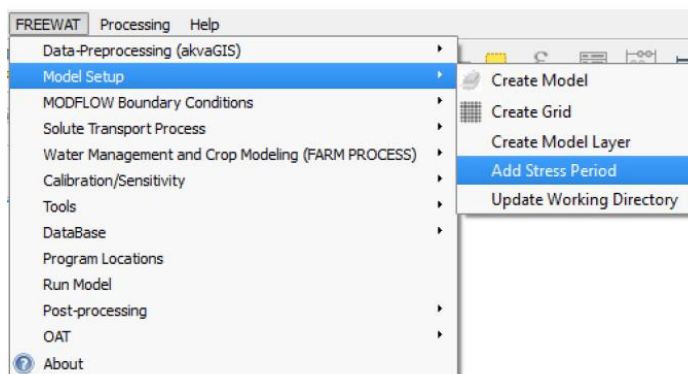
υπόψη στο τελικό αποτέλεσμα και ο όρος S να προσεγγίζει τον όρο S_y , οπότε και δίνουμε στο S_y την τιμή 0.0004.

Όλες οι μονάδες μέτρησης ανάγονται σε m και h διότι αυτές είναι οι μονάδες μήκους και χρόνου αντίστοιχα που επιλέχθηκαν στην αρχή της κατασκευής του μοντέλου στο περιβάλλον του FREEWAT.

Μετά τη διακριτοποίηση του χώρου έπεται η διακριτοποίηση του χρόνου: στο MODFLOW αυτό γίνεται με τον ορισμό των περιόδων φόρτισης (Stress Periods, SP), χρονικές περίοδοι μέσα στις οποίες οι οριακές συνθήκες και οι όροι sink/source είναι συνεχής. Κάθε SP μπορεί να τμηθεί περαιτέρω σε n χρονικά βήματα (Time Steps, TS), κατά τη διάρκεια των οποίων επιλύεται η λύση μέσα σε κάθε κελί της ενεργής περιοχής (G. De Filippis, 2017).

Το πρώτο SP της προσομοίωσης όπως προαναφέρθηκε προσδιορίζεται όταν δημιουργείται το μοντέλο. Για την προσθήκη μιας SP, χρησιμοποιείται το παρακάτω μενού (G. De Filippis, 2017):

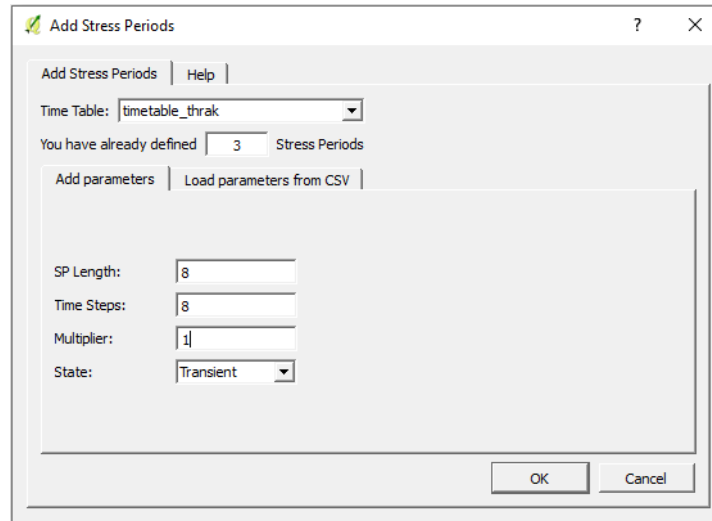
FREEWAT -> Model Setup -> Add Stress Period



Εικόνα 30: Εντολή πρόσθεσης καινούριας περιόδου φόρτισης

Στο παράθυρο προσθήκης SP απαιτούνται τα ακόλουθα δεδομένα:

- Time Table: το όνομα του πίνακα χαρακτηριστικών (timetable_thrak);
- στον τομέα Add parameters:
 - SP Length: διάρκεια της SP [h] που πρόκειται να προστεθεί;
 - Time Steps: ο αριθμός των TSs;
 - Multiplier: ο πολλαπλασιαστής για τον υπολογισμό της διάρκειας [h] κάθε TS;
 - State: δύο διαθέσιμες επιλογές: σταθερής κατάστασης (Steady State) ή μεταβαλλόμενης (Transient).



Εικόνα 31: Παράθυρο πρόσθεσης καινούριας περιόδου

Η πρώτη SP ήταν σταθερής κατάστασης (steady state), με διάρκεια 20 ωρών και 1 TS. Για την προσομοίωση των συνθηκών στην περιοχή μελέτης προστίθενται ακόμη δύο SP: η μία διαρκεί 8 ώρες, έχει 8 TS και είναι μεταβαλλόμενης κατάστασης (transient), έτσι ώστε να συγκριθεί το αποτέλεσμα της προσομοίωσης με αυτό που παρατηρείται στην πραγματικότητα, ενώ η επόμενη διαρκεί 8 ώρες και έχει 1 TS για την επαναφορά του συστήματος (επίσης transient). Ο πίνακας timetable_thrak ενημερώνεται ανάλογα μετά από αυτές τις προσθήκες.

4.2 Οριακές συνθήκες

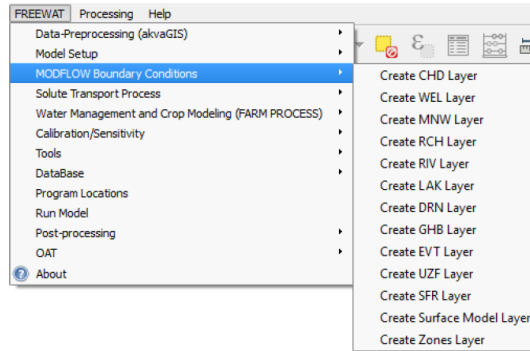
Μόλις προσδιοριστεί η γεωμετρία του προβλήματος και η υδροδυναμική παραμετροποίηση κάθε στρώματος, πρέπει να προσδιοριστούν οι οριακές υδραυλικές συνθήκες, σύμφωνα με το εννοιολογικό μοντέλο. Αυτό σημαίνει την προσομοίωση, με τον κατάλληλο μαθηματικό φορμαλισμό, διαδικασιών που εμπεριέχονται στον υδρολογικό κύκλο (G. De Filippis, 2017).

Στο FREEWAT, μπορούν να προσδιοριστούν τα ακόλουθα είδη οριακών συνθηκών: ειδικό φορτίο που βασίζεται στη μεταβολή του χρόνου, ειδική παροχή, ροή βασιζόμενη στο φορτίο. Η ενσωμάτωση κάθε διεργασίας απαιτεί τη 'μετάφραση' ενός στρώματος GIS σε ένα MDO και έπειτα σε ένα αρχείο εισόδου MODFLOW. Μια τέτοια διαδικασία αφορά στα παρακάτω βήματα (G. De Filippis, 2017):

1. φόρτωση του στρώματος GIS;
2. μεταποίηση του στρώματος GIS σε ένα MDO;
3. παραγωγή του αντίστοιχου αρχείου εισόδου MODFLOW.

Τα πακέτα Οριακών Συνθηκών ενεργοποιούνται μέσα από το παρακάτω μενού (G. De Filippis, 2017):

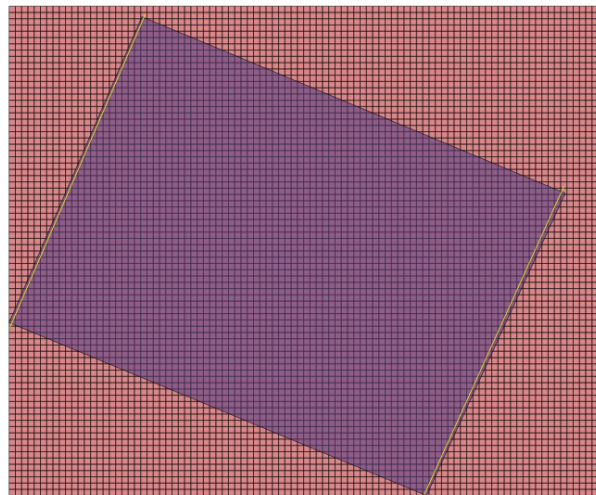
FREEWAT -> MODFLOW Boundary Conditions



Εικόνα 32: Μενού δημιουργίας πακέτων του FREEWAT

4.2.1 Συγκεκριμένο φορτίο χρονικά μεταβαλλόμενο (Time-Variant Specified Head – CHD)

Το πακέτο MODFLOW CHD επιτρέπει την προσομοίωση οριακής συνθήκης συγκεκριμένου φορτίου. Η ενεργοποίηση αυτού του πακέτου απαιτεί την επιλογή κελιών από το MDO του καννάβου στα οποία πρέπει να εκχωρηθούν οι οριακές συνθήκες, ή να έχει γίνει επεξεργασία ενός αρχείου γραμμών shapfile που θα τέμνουν τα κελιά του καννάβου στα οποία πρέπει να εκχωρηθούν οι οριακές συνθήκες. Για την κατασκευή του αρχείου CHD στην περίπτωση μας, χρησιμοποιείται ο δεύτερος τρόπος, με την κατασκευή ενός αρχείου γραμμών shapfile στη βορειοδυτική και στη νοτιοανατολική πλευρά του domain (οι κατευθύνσεις που ορίζουν την κατεύθυνση της υπόγειας φυσικής ροής του ταμιευτήρα, ΒΔ-ΝΑ) που το ονομάζουμε lines. Το αρχείο αυτό φορτώνεται στο περιβάλλον του QGIS και φαίνεται παρακάτω (με κίτρινο χρώμα):



Εικόνα 33: Γραμμές – οδηγοί (κίτρινο χρώμα) για τη δημιουργία πακέτου CHD

Για να επιλεγθούν τα κελιά τα οποία τέμνουν οι δύο γραμμές για τη δημιουργία του στρώματος CHD, χρησιμοποιείται το ακόλουθο μενού:

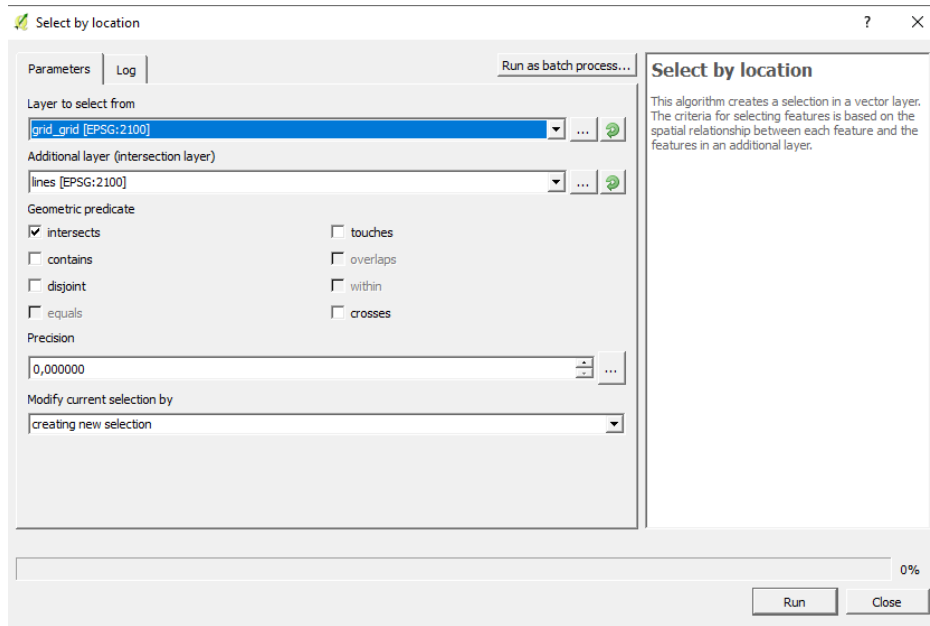
Processing -> Toolbox -> QGIS algorithms -> Vector selection tools -> Select by location

Στο παράθυρο Select by location τώρα, έχουμε τα ακόλουθα πεδία:

- Layer to select from: το στρώμα από το οποίο θέλουμε να επιλεγθούν τα κελιά για τις οριακές συνθήκες (grid_grid εδώ);

- Additional layer (intersectional layer): το στρώμα βάσει του οποίου θα επιλεγθούν τα επιθυμητά κελιά (lines);
- Geometric predicate: ο τρόπος μέσω του οποίου θα επιλεγθούν τα κελιά (επιλέγουμε το intersects – διάτμηση).

Αφού εκτελεστεί αυτός ο αλγόριθμος, τα επιλεγόμενα κελιά του καννάβου θα πάρουν κίτρινο χρώμα.



Εικόνα 34: Παράθυρο εργαλείου Select by location

Για την ενεργοποίηση του Πακέτου CHD τώρα, πρέπει να χρησιμοποιηθεί το ακόλουθο μενού (G. De Filippis, 2017):

FREEWAT -> MODFLOW Boundary Conditions -> Create CHD Layer

Στο παράθυρο δημιουργίας στρώματος για το πακέτο CHD, πάμε στην επιλογή Simple CHD, εφόσον τα κελιά του καννάβου στα οποία πρόκειται να εκχωρηθούν οι οριακές συνθήκες έχουν επιλεγθεί χειρωνακτικά με κάποιο αλγόριθμο επιλογής. Σε αυτήν την επιλογή απαιτούνται τα ακόλουθα δεδομένα:

- Model Name: όνομα του υδρολογικού μοντέλου (thrak);
- Grid Layer: το MDO του καννάβου (grid_grid);
- Name of new layer: όνομα του MDO για το στρώμα CHD που πρέπει να δημιουργηθεί (boundaries).

Ένα νέο MDO, ονομαζόμενο boundaries_chd, δημιουργείται, αποθηκεύεται στη DB του μοντέλου και φορτώνει στον Πίνακα Στρωμάτων. Το εμφανιζόμενο στρώμα πάνω στον κάνναβο φαίνεται στην εικόνα στην υποενότητα 4.2.2, μαζί με το στρώμα που αντιστοιχεί στις γεωτρήσεις του οικοπέδου.

Ο πίνακας χαρακτηριστικών ενός τέτοιου MDO μπορεί να περιέχει αρκετές τιμές, σύμφωνα με τον αριθμό των κελιών στα οποία εφαρμόστηκε το πακέτο, αλλά και τα ακόλουθα πεδία:

- PKUID: κύριο κλειδί της βάσης δεδομένων (δεν τροποποιείται);
- ID: κύριο κλειδί της βάσης δεδομένων (δεν τροποποιείται);
- ROW: η σειρά του καννάβου στην οποία αντιστοιχεί το συγκεκριμένο κελί;
- COL: η στήλη του καννάβου στην οποία ανήκει το συγκεκριμένο κελί;
- from_lay: ο αριθμός του ανώτατου στρώματος που θα εφαρμοστεί η οριακή συνθήκη συγκεκριμένου φορτίου (εδώ το 1);
- to_lay: ο αριθμός του βαθύτερου στρώματος που θα εφαρμοστεί η οριακή συνθήκη συγκεκριμένου φορτίου (εδώ το 4);
- τα ακόλουθα πεδία επαναλαμβάνονται σύμφωνα με τον αριθμό των ενσωματωμένων SP (το n αναφέρεται στον αριθμό μιας SP):
 - n_shead: συγκεκριμένο φορτίο [m] στην αρχή της n-οστής SP;
 - n_thead: συγκεκριμένο φορτίο [m] στο τέλος της n-οστής SP.

Τα πεδία n_shead και n_thead έχουν προκαθορισμένες τιμές, που τροποποιούνται χρησιμοποιώντας εργαλεία επιλογής του QGIS. Η υπόγεια ροή αναφέραμε ότι έχει διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ, με σχεδόν αμελητέα κλίση. Επιλέγοντας τα κελιά του boundaries_chd που βρίσκονται στα ΒΔ με το εργαλείο Select features by area, τα ενεργοποιούμε έπειτα στον Πίνακα Χαρακτηριστικών και ορίζουμε την τιμή 311 [m]. Αφού επιλέγουμε την εντολή deselect all, επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία για τα κελιά στα ΝΑ, αλλά εκεί ορίζουμε την τιμή 310 [m]. Με αυτήν τη μικρή διαφορά στα φορτία στις δύο πλευρές, προσομοιώνεται αυτή η ροή του υπόγειου νερού.

PKUID	ID	ROW	COL	from_lay	to_lay	1_shead	1_thead	2_shead	2_thead	3_shead	3_thead
1	0	78	67	1	4	310	310	310	310	310	310
2	0	77	67	1	4	310	310	310	310	310	310
3	0	77	68	1	4	310	310	310	310	310	310
4	0	76	68	1	4	310	310	310	310	310	310
5	0	75	68	1	4	310	310	310	310	310	310
6	0	75	69	1	4	310	310	310	310	310	310
7	0	74	69	1	4	310	310	310	310	310	310
8	0	73	69	1	4	310	310	310	310	310	310
9	0	72	69	1	4	310	310	310	310	310	310
10	0	72	70	1	4	310	310	310	310	310	310
11	0	71	70	1	4	310	310	310	310	310	310

Εικόνα 35: Πίνακας χαρακτηριστικών του στρώματος boundaries_chd.

4.2.2 Γεώτρηση συγκεκριμένης ροής (WEL - specified-flux)

Το Πακέτο WEL του MODFLOW επιτρέπει την προσομοίωση εμπλουτισμού του υδροφόρου ή την άντληση του υπόγειου νερού, προσδιορίζοντας μια συγκεκριμένη θετική ή αρνητική παροχή αντίστοιχα, σε μεμονωμένα κελιά. Για την ενεργοποίηση αυτού του πακέτου έχουν προεπιλεχθεί τα δύο κελιά του καννάβου που βρίσκονται στην πραγματική θέση των γεωτρήσεων άντλησης και επανεισαγωγής (G. De Filippis, 2017).

Για την ενεργοποίηση του πακέτου WEL, χρησιμοποιείται το ακόλουθο μενού:

FREEWAT -> MODFLOW Boundary Conditions -> Create WEL Layer

Τα ακόλουθα δεδομένα απαιτούνται στο παράθυρο δημιουργίας στρώματος για το WEL:

- Model Name: το όνομα του υδρολογικού μοντέλου (thrak);
- Grid Layer: το MDO του καννάβου (grid_grid);
- Name of new layer: το όνομα του MDO των γεωτρήσεων που θα δημιουργηθεί (wells).

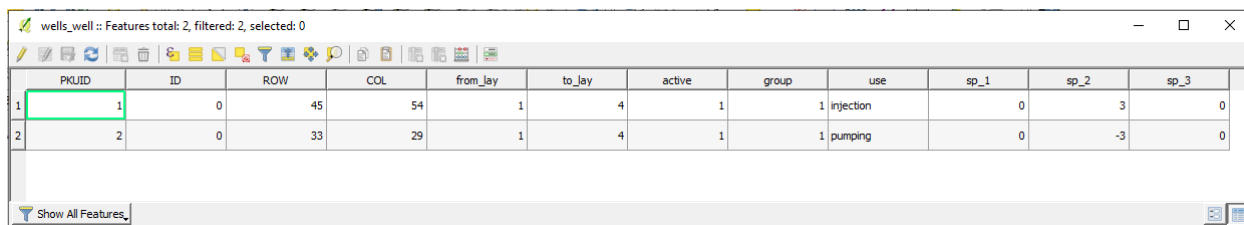
Ένα νέο MDO, ονομαζόμενο wells_well, δημιουργείται, αποθηκεύεται στη DB του μοντέλου και αποθηκεύεται στον Πίνακα Στρωμάτων.

Ο πίνακας χαρακτηριστικών ενός τέτοιου MDO περιέχει τόσες τιμές, σύμφωνα με τον αριθμό των κελιών στα οποία εφαρμόζεται το πακέτο, και τα ακόλουθα πεδία:

- PKUID: κύριο κλειδί της βάσης δεδομένων (δεν τροποποιείται);
- ID: κύριο κλειδί της βάσης δεδομένων (δεν τροποποιείται);
- ROW: η σειρά του καννάβου στην οποία ανήκει το κελί;
- COL: η στήλη του καννάβου στην οποία ανήκει το κελί;
- from_lay: ο αριθμός του ανώτατου στρώματος στο οποίο θα λειτουργούν οι γεωτρήσεις άντλησης και επανεισαγωγής (1);
- to_lay: ο αριθμός του βαθύτερου στρώματος στο οποίο θα λειτουργούν οι γεωτρήσεις άντλησης και επανεισαγωγής (4 – το δάπεδό του αντιστοιχεί στο βάθος των 80m);
- active: ακέραια τιμή ενεργοποίησης (active=1) ή μη (active=0) της αντίστοιχης γεώτρησης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης;
- group: ακέραια τιμή που χρησιμοποιείται ως ετικέτα για το διαχωρισμό των υποσυνόλων της γεώτρησης;
- use: πλαίσιο κειμένου που χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό διαφορετικών υποσυνόλων των γεωτρήσεων ανάλογα με τη χρήση τους(εδώ: injection για την επανεισαγωγή, pumping για την άντληση);
- το ακόλουθο πεδίο επαναλαμβάνεται ανάλογα με τον αριθμό των ενσωματωμένων SP (το n αναφέρεται στον αριθμό της SP):

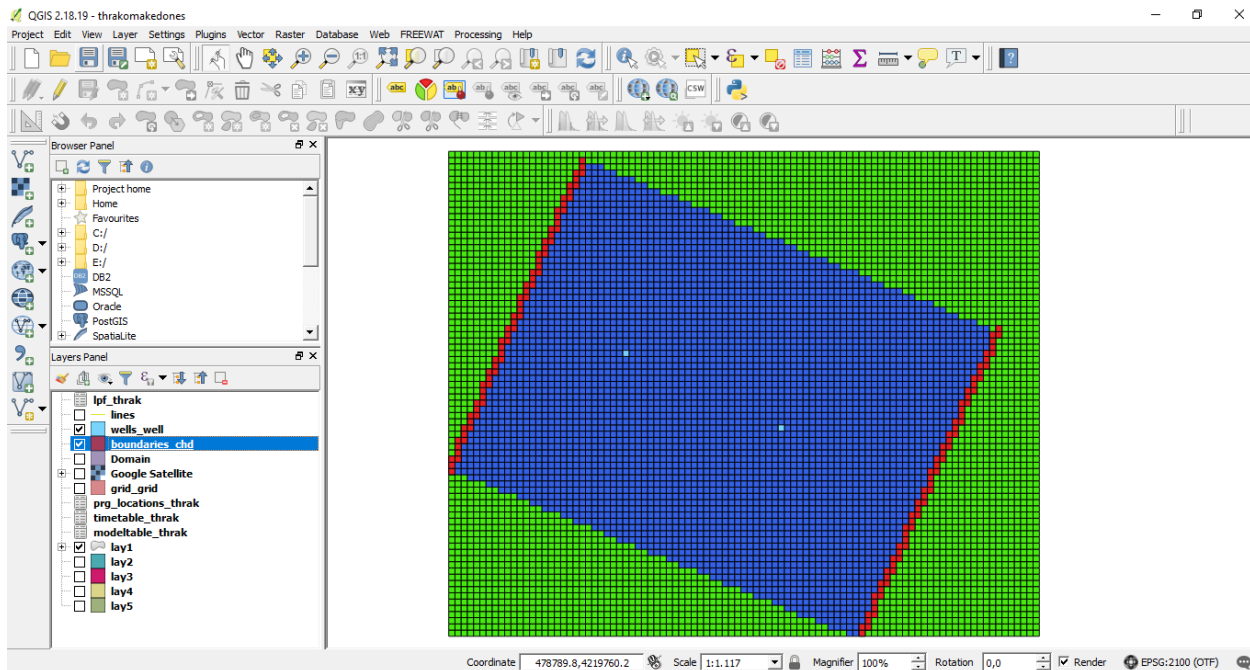
– sp_n: συγκεκριμένος ρυθμός επανεισαγωγής/άντλησης [m^3/h] κατά τη διάρκεια της n-οστής SP.

Στον παρακάτω πίνακα χαρακτηριστικών του wells_well φαίνεται οι τιμές των sp_n για κάθε γεώτρηση.



PKUID	ID	ROW	COL	from_lay	to_lay	active	group	use	sp_1	sp_2	sp_3	
1	1	0	45	54	1	4	1	1	injection	0	3	0
2	2	0	33	29	1	4	1	1	pumping	0	-3	0

Εικόνα 36: Πίνακας χαρακτηριστικών wells_well

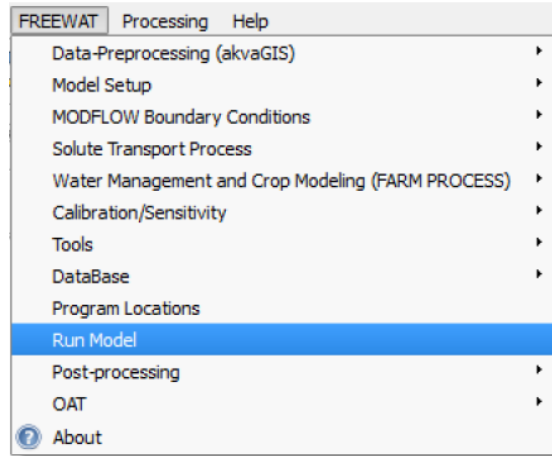


Εικόνα 37: Το ολοκληρωμένο μοντέλο λίγο πριν την προσομοίωση: με μπλε χρώμα τα κελιά των στρωμάτων που είναι ενεργά (στα οποία οι τιμές των υδραυλικών φορτίων, δηλαδή το STRT, μπορούν να μεταβληθούν), με κόκκινο το στρώμα boundaries_chd και με γαλάζιο οι δύο γεωτρήσεις (wells_well).

4.3 Αρχεία εισόδου του MODFLOW και προσομοίωση ροής Υ.Ν.

Όλα τα δεδομένα που έχουν ενσωματωθεί έως τώρα (δηλαδή η γεωμετρία του πεδίου εφαρμογής, οι υδροδυναμικές ιδιότητες του υδρογεωλογικού συστήματος και η διακριτοποίηση των εμπλεκόμενων διαδικασιών) αποθηκεύονται μέσα στη βάση δεδομένων του μοντέλου σε μια μορφή που δε γίνεται να γίνει απευθείας επεξεργασία της από τον κώδικα προσομοίωσης. Επομένως, πριν τρέξει το μοντέλο, είναι απαραίτητη η μετάφραση τέτοιων συνόλων δεδομένων σε αρχεία μοντέλου που οι αριθμητικοί κώδικες μπορούν να αναγνώσουν. Στο FREEWAT, μια τέτοια διαδικασία τελείται αυτόματα όταν τρέχει η προσομοίωση (G. De Filippis, 2017).

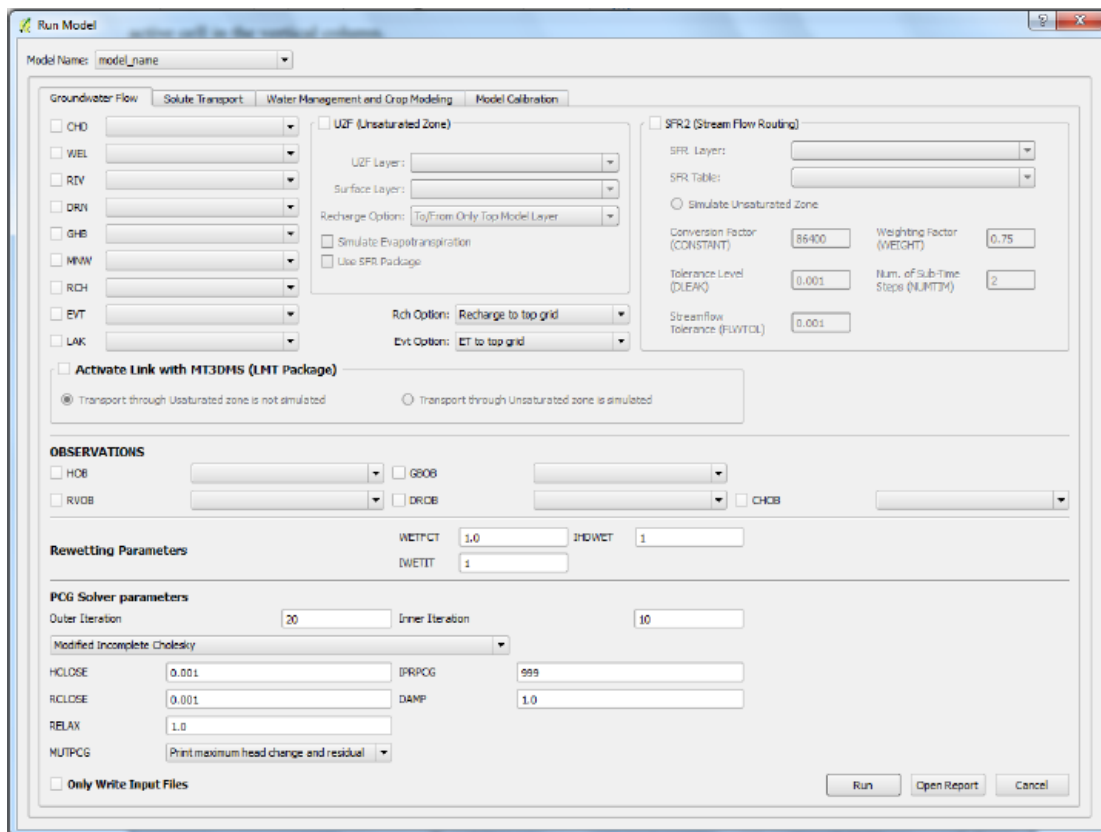
Το τρέξιμο του μοντέλου της ροής γίνεται μέσω του ακόλουθου μενού (G. De Filippis, 2017):
FREEWAT -> Run Model



Εικόνα 38: Εντολή προσομοίωσης μοντέλου

Οι διαδικασίες που μπορούν να προσομοιωθούν είναι οι εξής:

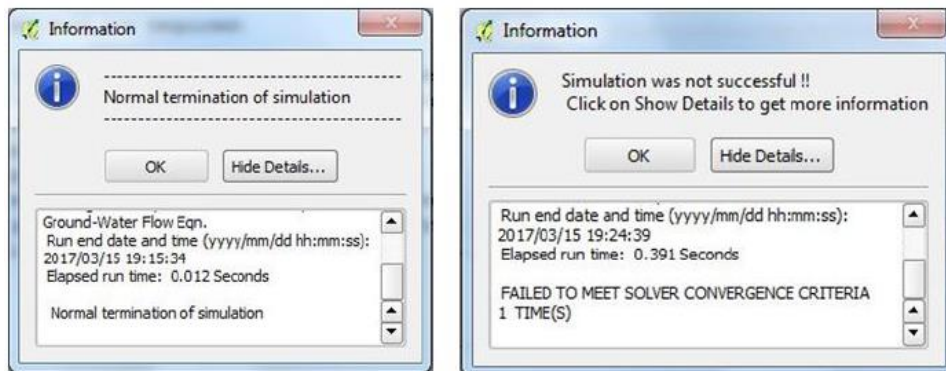
- Groundwater Flow;
- Solute Transport;
- Water Management and Crop Modeling;
- Model Calibration.



Εικόνα 39: Επιλογές για την καρτέλα Groundwater flow στο παράθυρο προσομοίωσης του μοντέλου

Στην καρτέλα της υπόγειας ροής (Groundwater Flow tab) απαιτείται να γίνει επιλογή των πεδίων CHD και WEL, με επιλογή των MDO boundaries_chd και wells_well αντίστοιχα. Έπειτα δεν επιλέγουμε κανένα άλλο πεδίο, και με inner και outer iteration επιλέγουμε την τιμή 500 (πολλές επαναλήψεις του κώδικα). Τέλος, πατάμε το κουμπί Run Model για την εκτέλεσή του.

Μόλις δημιουργηθούν τα αρχεία εισόδου του MODFLOW, εμφανίζεται ένα παράθυρο ενημέρωσης για τρέξιμο του εκτελέσιμου αρχείου του MODFLOW. Μόλις επιβεβαιωθεί, ξεκινάει η προσομοίωση και εμφανίζονται τα παρακάτω ενημερωτικά παράθυρα για το εάν επιτεύχθηκε η προσομοίωση ή όχι. Στη δεύτερη περίπτωση, η επιλογή Show Details... μπορεί να βοηθήσει στην κατανόηση γιατί δεν ήταν επιτυχής η ενημέρωση (G. De Filippis, 2017).



Εικόνα 40: Αριστερά: παράθυρο ενημέρωσης επιτυχούς προσομοίωσης. Δεξιά: παράθυρο ενημέρωσης μη επιτυχούς προσομοίωσης

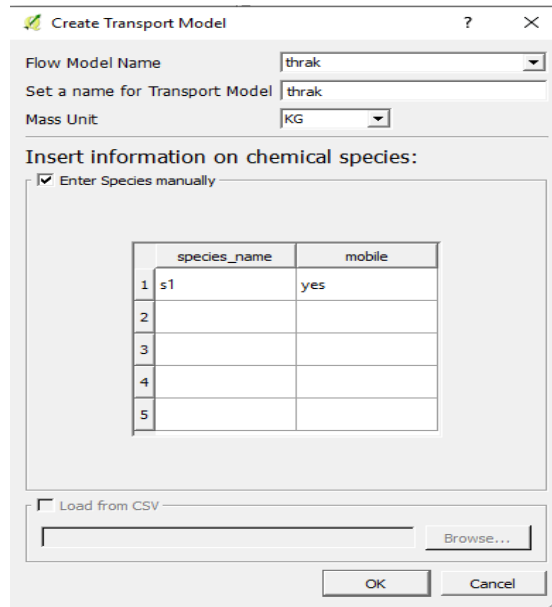
4.4 Ανάπτυξη μοντέλου μεταφοράς (transport model) με τον κώδικα MT3DMS

Εφόσον έχει τρέξει το μοντέλο του MODFLOW (που επιλύει την εξίσωση της υπόγειας ροής) μπορεί να γίνει εκτέλεση του μοντέλου μεταφοράς. Ο κώδικας MT3DMS είναι αυτός που θα πάρει τον αρχικό φάκελο της ροής του νερού που δημιουργήθηκε από το MODFLOW (FTL file) ως ένα φάκελο εισόδου για το solver της εξίσωσης μεταφοράς (Zheng and Wang, 1999) (Borsi, 2017).

Ως εκ τούτου, έχει θεωρηθεί ότι ο χρήστης έχει ήδη δημιουργήσει ένα μοντέλο (που σχετίζεται με το SpatialLite DB), κι έχει φορτωθεί στο κατάλληλο project του QGIS. Επίσης, θεωρείται ότι το μοντέλο της ροής έχει τρέξει με την ενεργοποίηση του πακέτου LMT, επιλέγοντας το κουτί Activate Link with MT3DMS (LMT) (Borsi, 2017).

4.4.1 Δημιουργία νέου μοντέλου μεταφοράς

Το πρώτο βήμα είναι η δημιουργία ενός νέου μοντέλου μεταφοράς, επιλέγοντας το μενού FREEWAT -> Solute Transport Process -> Create Transport Model, που εμφανίζει το παρακάτω παράθυρο:



Εικόνα 41: Παράθυρο δημιουργίας μοντέλου μεταφοράς

Το συγκεκριμένο παράθυρο απαιτεί τις παρακάτω πληροφορίες:

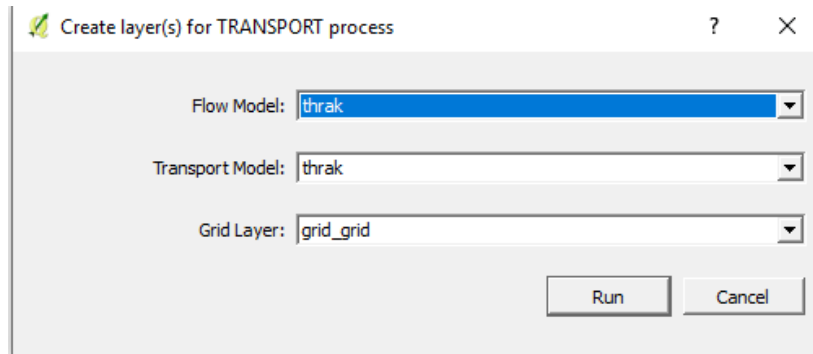
- Επιλογή του μοντέλου της υπόγειας ροής (thrak) που ο χρήστης θέλει να το συνδυάσει με τη διαδικασία της μεταφοράς.
- Εισαγωγή του ονόματος του νέου μοντέλου μεταφοράς (thrak).
- Επιλογής της μονάδας μέτρησης μάζας (Kg).

Μόλις εκτελεστεί αυτή η εντολή, δημιουργούνται δύο νέοι πίνακες στη DB του μοντέλου:

1. Ο πίνακας transport_thrak, στον οποίο υπάρχει μία λίστα των μοντέλων μεταφοράς που συνδέονται με το μοντέλο υπόγειας ροής thrak. Αν ο χρήστης επιθυμεί να κατασκευάσει περισσότερα μοντέλα μεταφοράς για το συγκεκριμένο μοντέλο ροής, αυτός ο πίνακας ανανεώνεται ανάλογα.
2. Ο πίνακας species_thrak, ο οποίος περιέχει το επιλεγόμενο είδος του μοντέλου για μεταφορά.

Μόλις οριστεί το μοντέλο, ο χρήστης πρέπει να ορίσει τις βασικές ιδιότητες, όπως οι αρχικές συνθήκες, ενεργά και μη ενεργά κελιά, ενεργό πορώδες. Τέτοιου είδους πληροφορίες μεταφέρονται στο μοντέλο ορίζοντας νέα MDOs, τα στρώματα μεταφοράς (transport layers): είναι μια απομίμηση των στρωμάτων του αντίστοιχου μοντέλου υπόγειας ροής, και χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό βασικών ιδιοτήτων, όπως περιγράφεται παρακάτω (Borsi, 2017).

Από την επιλογή του μενού: FREEWAT -> Solute Transport Process -> Create Transport Layer(s), εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο:



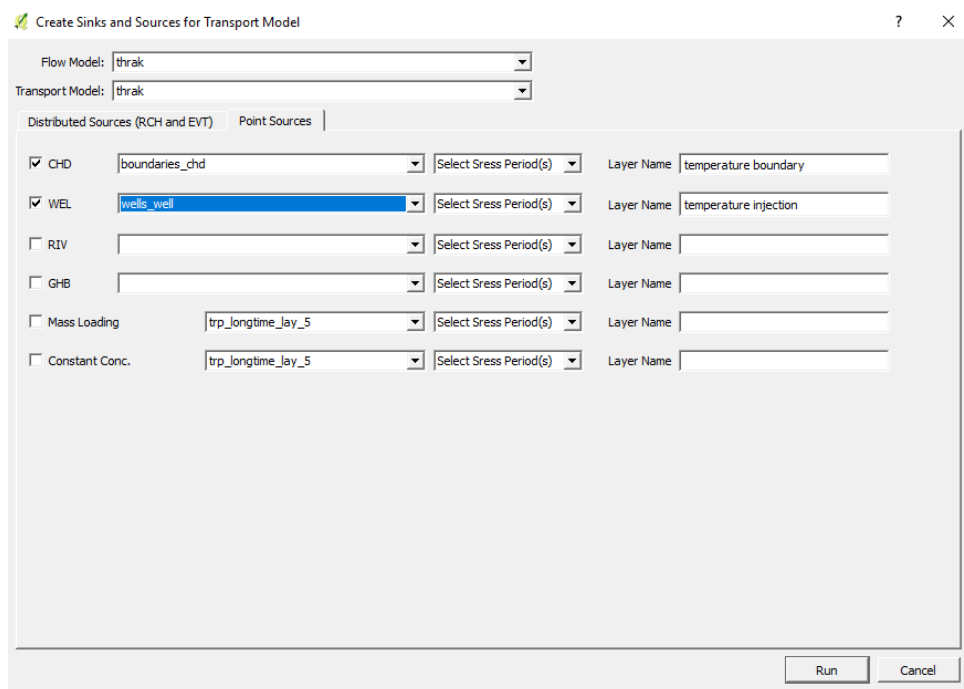
Εικόνα 42: Παράθυρο δημιουργίας στρωμάτων μοντέλου μεταφοράς

Μόλις επιλεγεί εντολή Run, ο αλγόριθμος δημιουργεί τόσα MDO όσα και ο αριθμός των στρωμάτων του μοντέλου ροής, με ονόματα thrak_lay_1, thrak_lay_2, ..., thrak_lay_5. Κάθε transport layer περιέχει στον πίνακα χαρακτηριστικών τα παρακάτω πεδία:

- ACTIVE: παίρνει τις τιμές -1, 0 or 1, για να οριστεί το κελί ως σταθερής συγκέντρωσης, ανενεργό, ή ενεργό αντίστοιχα.
- LONG_D: παίρνει την τιμή 0.5 (σχετίζεται με την κάθετη διασπορά).
- TRPT: λόγος της οριζόντιας διασποράς, προς το LONG_D (= 0.1).
- TRPV: λόγος της κατακόρυφης και οριζόντιας προς το LONG_D (= 0.1).
- Για κάθε είδος:
 1. SCONC: αρχική συγκέντρωση (= 290K = 17°C).
 2. DMCOEFF: συντελεστής μοριακής διάχυσης (= 2.15×10^{-11}).

Αφού στο μοντέλο της ροής υπάρχουν δύο πακέτα εισόδων-εξόδων (WEL και CHD), ο χρήστης πρέπει να 'μεταφέρει' αυτές τις συμπεριφορές και στο μοντέλο της μεταφοράς, καθώς αναπαριστούν έναν όρο εισόδου/εξόδου για την εξίσωση της μεταφοράς (Zeng and Wang, 1999). Σε αυτήν την περίπτωση, πρέπει να δημιουργηθούν δύο αντίστοιχα MDO (WEL και CHD) στο μοντέλο μεταφοράς (Borsi, 2017).

Για την εισαγωγή τέτοιων πληροφοριών, επιλέγεται το μενού FREEWAT -> Solute Transport Process -> Create Sink and Source Layer και εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο:

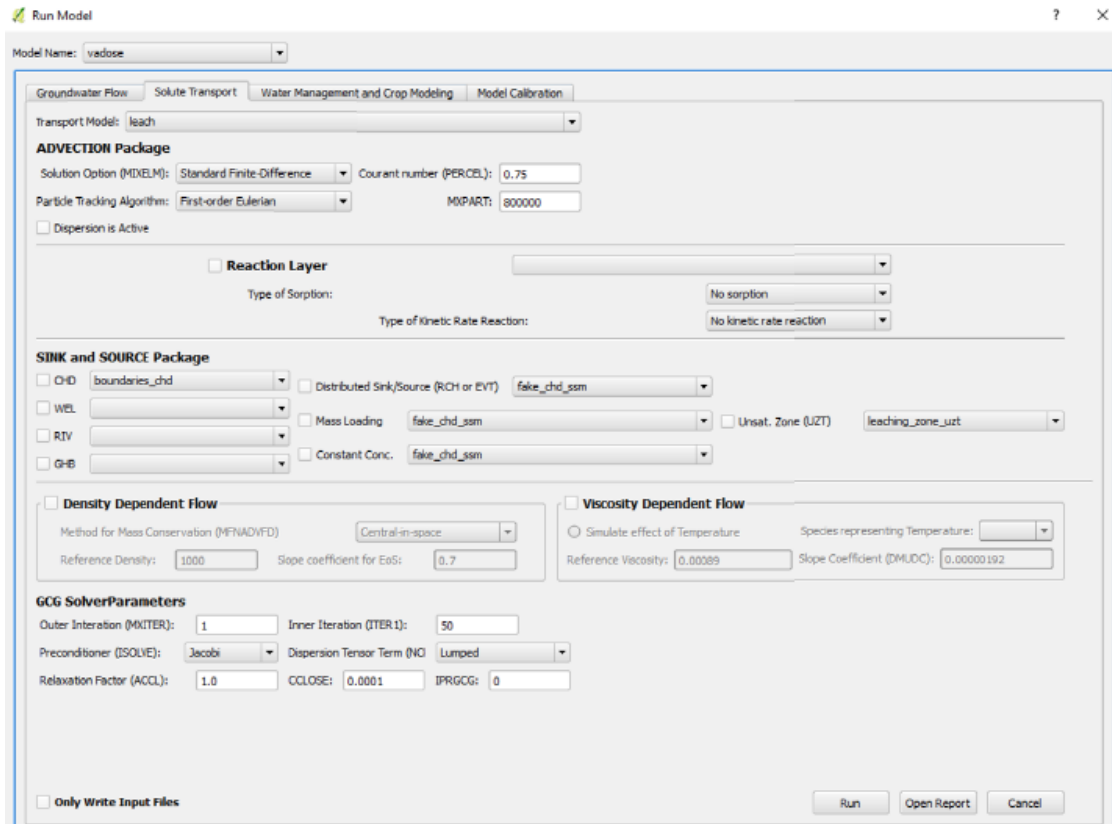


Εικόνα 43: Παράθυρο δημιουργίας πακέτων οριακών συνθηκών για το μοντέλο μεταφοράς

Για την επιλογή των δύο τύπων εισόδου/εξόδου (WEL και CHD), επιλέγονται τα δύο αντίστοιχα MDO που δημιουργήθηκαν για το μοντέλο της ροής (wells_well και boundaries_chd). Επιπλέον, επιλέγονται τα αντίστοιχα SP για κάθε πακέτο κατά τη διάρκεια της οποίας είναι ενεργό. Τα δύο νέα MDO τα ονομάζουμε temperature_injection και temperature_boundary αντίστοιχα. Στον πίνακα χαρακτηριστικών του πρώτου MDO εισάγουμε την τιμή 286K (= 13°C) στο πεδίο CSSMS_sp2_spec, που αναπαριστά τη θερμοκρασία επανεισαγωγής, ενώ στο δεύτερο στα πεδία CSSMS_sp1_spec, CSSMS_sp2_spec και CSSMS_sp3_spec την τιμή 300K (= 17°C), που αναπαριστά την αρχική θερμοκρασία του υδροφόρου.

4.4.2 Εκτέλεση μοντέλου μεταφοράς

Μόλις δημιουργηθεί το μοντέλο μεταφοράς, ακολουθώντας το μενού FREEWAT → Run Model και γίνει επιλογή της καρτέλας Solute Transport, εμφανίζεται η παρακάτω εικόνα:



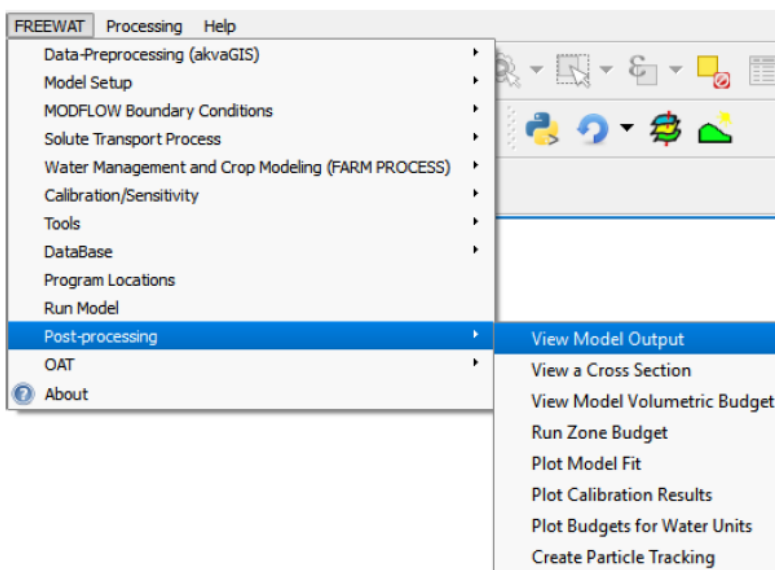
Εικόνα 44: Επιλογές για την καρτέλα Solute Transport στο παράθυρο προσομοίωσης του μοντέλου

Επιλέγοντας τα πεδία Dispersion is Active, CHD και WEL, και επιλέγοντας για τα δύο τελευταία τα MDO temperature_boundary και temperature_injection αντίστοιχα κι έπειτα βάζοντας την τιμή 500 για το inner iteration, έχει ολοκληρωθεί και η εκτέλεση του μοντέλου μεταφοράς.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Μόλις η προσομοίωση της ροής του Υ.Ν. και των φαινομένων μεταφοράς έχουν ολοκληρωθεί με επιτυχία, το υδραυλικό φορτίο που έχει προσομοιωθεί για κάθε model layer (ή αν έχει ολοκληρωθεί η προσομοίωση της συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας) γίνεται να απεικονιστεί μέσω του ακόλουθου μενού (G. De Filippis, 2017):

FREEWAT -> Post-processing -> View Model Output

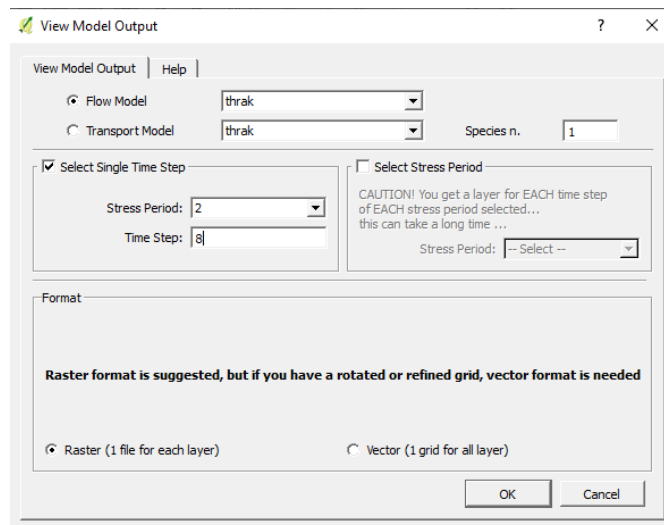


Εικόνα 45: Εντολή απεικόνισης αποτελεσμάτων μοντέλου

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να απεικονίσει την κατανομή του προσομοιούμενου υδραυλικού φορτίου (ή της συγκέντρωσης από τη μεταφορά) για κάθε στρώμα του μοντέλου, στο τέλος ενός συγκεκριμένου χρονικού βήματος TS μιας επιλεγόμενης περιόδου φόρτισης SP, ή στο τέλος κάθε χρονικού βήματος TS μέσα σε επιλεγόμενη(-ες) περιόδους φόρτισης SP(s), κατ' ευθείαν (G. De Filippis, 2017).

Απαιτούνται τα ακόλουθα δεδομένα στο παράθυρο Εμφάνισης Αποτελεσμάτων Μοντέλου (View Model Output window):

- το όνομα του μοντέλου που προηγουμένως είχε δημιουργηθεί, πρέπει να επιλεγεί από το μενού επιλογής αφού έχει γίνει έλεγχος του εάν είναι ένα Flow Model ή ένα Transport Model (υδραυλικό φορτίο για το πρώτο, συγκέντρωση για το δεύτερο);
- στον τομέα Select Single Time Step (πρέπει να επιλεγεί):
 - Stress Period: ο αριθμός της SP στην οποία θα εμφανιστεί το προσομοιούμενο υδραυλικό φορτίο (ή συγκέντρωση) για κάθε model layer;
 - Time Step: ο αριθμός του TS, μέσα στην επιλεγόμενη SP, στο οποίο θα εμφανιστεί το προσομοιούμενο υδραυλικό φορτίο (ή συγκέντρωση) για κάθε model layer.



Εικόνα 46: Παράθυρο απεικόνισης αποτελεσμάτων μοντέλου

Τα σενάρια προσομοίωσης για το συγκεκριμένο οικόπεδο, φορούν στο είδος της χρήσης της αντλίας θερμότητας και στο χρόνο λειτουργίας της. Η πρώτη κατηγορία αφορά σε δύο υποκατηγορίες, παροχές άντλησης που αντιστοιχούν για οικιακή χρήση και μια τιμή παροχής άντλησης που αντιστοιχεί σε βιομηχανική χρήση, ενώ στη δεύτερη κατηγορία επιλέχθηκε μια τιμή παροχής οικιακής χρήσης με την οποία η αντλία θερμότητας λειτουργεί για μεγαλύτερα διαστήματα χρόνου (ημερών). Στους πίνακες 5.1 και 5.2 φαίνονται αρχικά τα σενάρια που εκτελέστηκαν για την πρώτη κατηγορία και στον επόμενο πίνακα για τη δεύτερη.

Πίνακας 5: Σενάρια με βάση το είδος της χρήσης

Είδος χρήσης	Παροχή (m ³ /h)	Περίοδοι φόρτισης – SP (h) / Time steps - TS	Κατάσταση φόρτισης (SS: Steady state, TR: Transient)
Οικιακή χρήση	3	3 SP (20h, 8h και 8h) / (1 TS, 8 TS και 1TS αντίστοιχα)	1 ^ο SP: SS 2 ^ο SP: TR 3 ^ο SP: TR
	4	3 SP (20h, 8h και 8h) / (1 TS, 8 TS και 1TS)	1 ^ο SP: SS 2 ^ο SP: TR 3 ^ο SP: TR
	5	3 SP (20h, 8h και 8h) / (1 TS, 8 TS και 1TS)	1 ^ο SP: SS 2 ^ο SP: TR 3 ^ο SP: TR
	6	3 SP (20h, 8h και 8h) / (1 TS, 8 TS και 1TS)	1 ^ο SP: SS 2 ^ο SP: TR 3 ^ο SP: TR
	7	3 SP (20h, 8h και 8h) / (1 TS, 8 TS και 1TS)	1 ^ο SP: SS 2 ^ο SP: TR 3 ^ο SP: TR
Βιομηχανική	20	3 SP (20h, 8h και 8h) / (1 TS, 8 TS και 1TS)	1 ^ο SP: SS 2 ^ο SP: TR 3 ^ο SP: TR

Πίνακας 6: Σενάρια με βάση το χρόνο λειτουργίας της ΓΑΘ (οικιακή χρήση)

Παροχή (m ³ /h)	Χρόνος λειτουργίας (μέρες)	Περίοδοι φόρτισης – SP (h) / Time steps - TS	Κατάσταση φόρτισης (SS: Steady state, TR: Transient)
5	5	4 SP (20h, 8h, 8h και 120h) / (1 TS, 8 TS, 1TS και 5 TS)	1 ^ο SP: SS 2 ^ο SP: TR 3 ^ο SP: TR 4 ^ο SP: TR
5	10	4 SP (20h, 8h, 8h και 240h) / (1 TS, 8 TS, 1TS και 10 TS)	1 ^ο SP: SS 2 ^ο SP: TR 3 ^ο SP: TR 4 ^ο SP: TR
5	15	4 SP (20h, 8h, 8h και 360h) / (1 TS, 8 TS, 1TS και 15 TS)	1 ^ο SP: SS 2 ^ο SP: TR 3 ^ο SP: TR 4 ^ο SP: TR
5	20	4 SP (20h, 8h, 8h και 480h) / (1 TS, 8 TS, 1TS και 20 TS)	1 ^ο SP: SS 2 ^ο SP: TR 3 ^ο SP: TR 4 ^ο SP: TR

Οι περίοδοι φόρτισης για όλα τα σενάρια έχουν τις ίδιες καταστάσεις λειτουργίας για την αντλία θερμότητας. Συγκεκριμένα, στην 1^η περίοδο φόρτισης που είναι σταθερής κατάστασης απλά αποτυπώνονται οι φυσικές συνθήκες του πεδίου και δεν πραγματοποιείται ούτε άντληση αλλά ούτε και επανεισαγωγή. Στη 2^η περίοδο λειτουργούν ταυτόχρονα και η παραγωγική γεώτρηση και η γεώτρηση επανεισαγωγής, για 8 ώρες, με σταθερή παροχή για κάθε σενάριο. Κατά τη διάρκεια της 3^{ης} περιόδου, που διαρκεί και 8 ώρες, στην ουσία είναι περίοδος ανάκτησης, ώστε το υπόγειο σύστημα να επανέλθει στις αρχικές φυσικές συνθήκες, ενώ κατά τη διάρκειά της δε λειτουργεί καμία από τις δύο γεωτρήσεις. Τέλος, στην 4^η περίοδο που υπάρχει μόνο στη δεύτερη κατηγορία σεναρίων, γίνεται και άντληση και επανεισαγωγή αδιάκοπα σε όλη τη διάρκειά της, με σταθερή παροχή λειτουργίας.

5.1 Σενάρια με βάση τη χρήση της αντλίας θερμότητας

5.1.1 Σενάρια για οικιακή χρήση (λειτουργία αντλίας 8 ώρες)

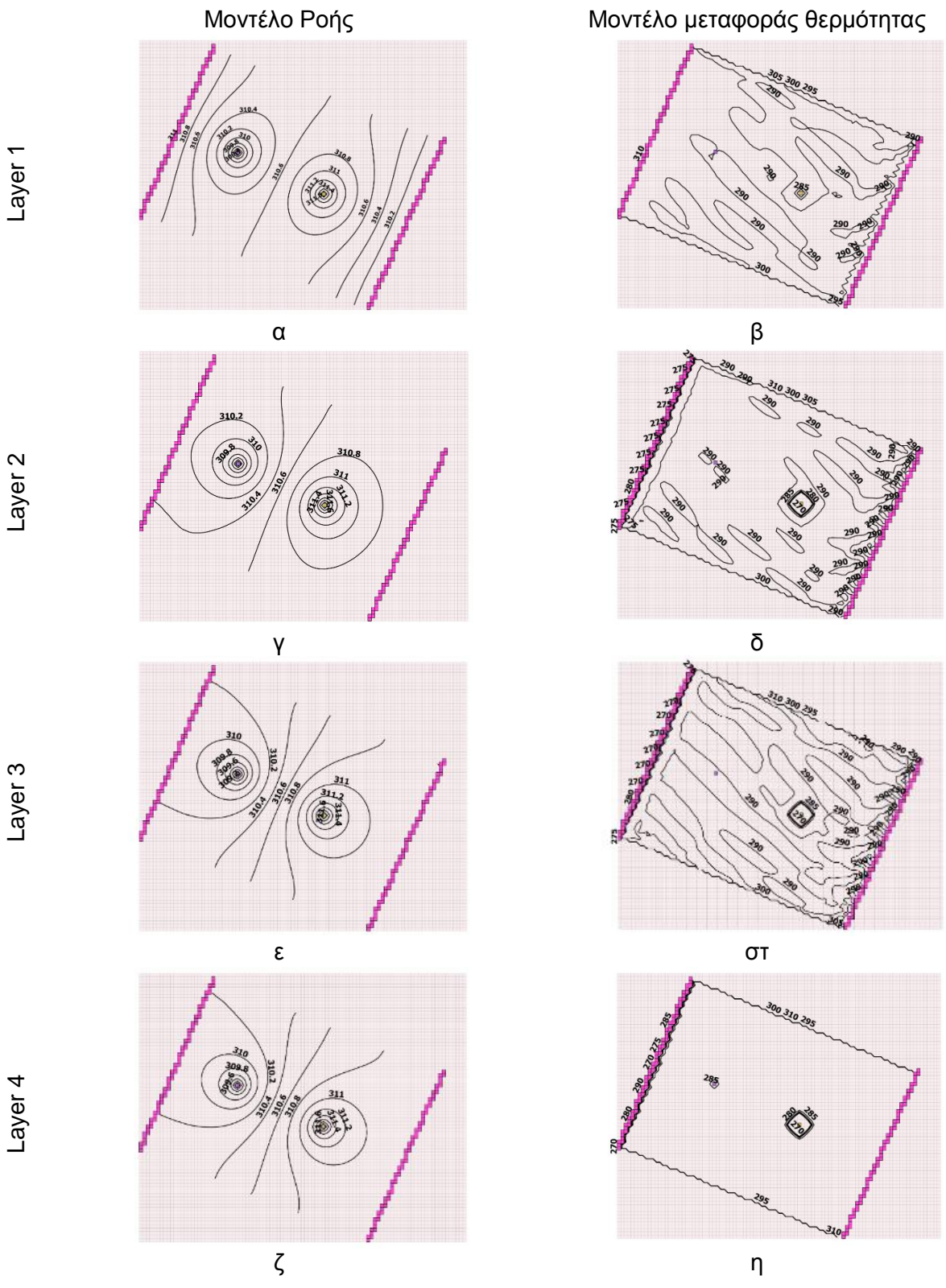
Υλοποιήσαμε πέντε (5) προσομοιώσεις μοντέλων ροής, για πέντε διαφορετικές τιμές παροχών κοντά η μία στην άλλη (3, 4, 5, 6 και 7m³/h) αλλά και άλλες τόσες προσομοιώσεις μοντέλων μεταφοράς θερμότητας για αυτές τις παροχές. Αυτή η μικρή μεταβολή οφείλεται στο ότι τέτοιες παροχές για το πεδίο που εξετάζουμε αντιστοιχούν σε οικιακή χρήση της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας, και θέλουμε να μελετήσουμε τη μεταβολή του υδραυλικού φορτίου στα 4 πρώτα στρώματα για κάθε τιμή παροχής, αλλά και τη μεταβολή της θερμοκρασίας του υδροφόρου, καθώς στη γεώτρηση επανεισαγωγής το νερό εισέρχεται με χαμηλότερη θερμοκρασία στο υπέδαφος από ότι εξέρχεται από τη γεώτρηση άντλησης.

Γενικά, και για τις 5 τιμές παροχών παρατηρείται πολύ μικρή μεταβολή του υδραυλικού φορτίου μετά από 8 ώρες (ts 8 της sp 2) παραγωγικής άντλησης με ταυτόχρονη επανεισαγωγή του θερμού ρευστού. Αυτό είναι φυσιολογικό να γίνεται για ένα βάθος υδροφόρου 40 m, με παροχές τόσο

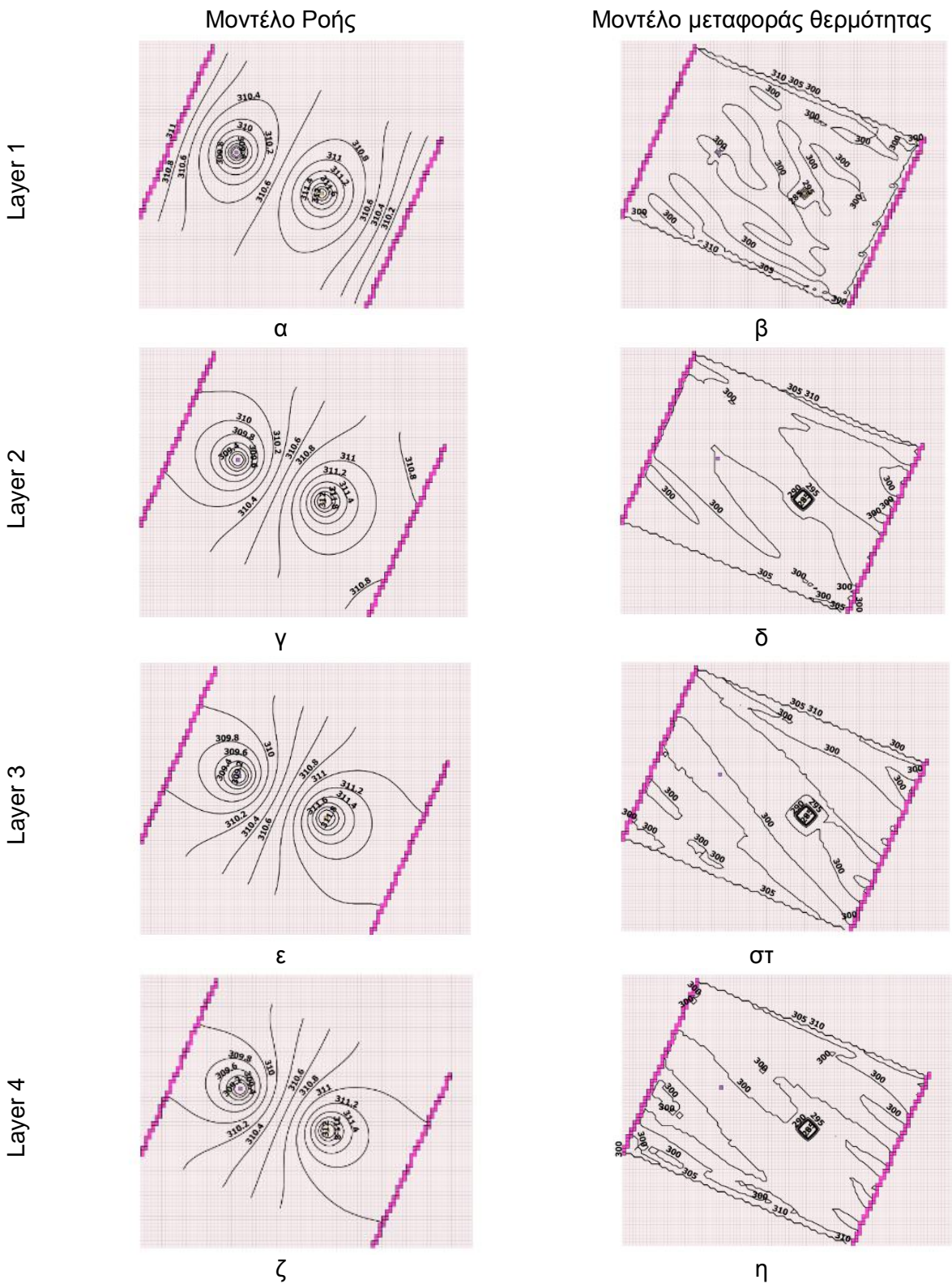
μικρές και για τόσο μικρό χρονικό διάστημα. Ειδικά στο πεδίο που εμείς εξετάζουμε, στο οποίο οι οριακές συνθήκες (το constant head δηλαδή) είναι πολύ κοντά η μία με την άλλη.

Όσον αφορά τώρα το μοντέλο της μεταφοράς θερμότητας για το ίδιο TS της ίδιας χρονικής περιόδου, η μεταβολή της θερμοκρασίας είναι επίσης αμελητέα γύρω από τις δύο γεωτρήσεις, κάτι αναμενόμενο δεδομένου της μικρής μεταβολής στο υδραυλικό φορτίο, αλλά και της μικρής διαφοράς της θερμοκρασίας άντλησης και της θερμοκρασίας επανεισαγωγής (17°C και 13°C αντίστοιχα). Ο δεύτερος παράγοντας ωστόσο δεν παίζει σημαντικό ρόλο στο τελικό αποτέλεσμα, καθώς ακόμη και όταν μεταβάλλαμε τις θερμοκρασίες έτσι ώστε να έχουν μεγαλύτερη διαφορά (300K/27°C για άντληση και 273K/0°C για επανεισαγωγή) η μεταβολή της θερμοκρασίας την ίδια χρονική περίοδο ήταν ακριβώς η ίδια. Δηλαδή η διαφορά των θερμοκρασιών άντλησης και επανεισαγωγής έχει μικρή επίδραση στο θερμικό ισοζύγιο του υπόγειου συστήματος. Από τα αποτελέσματα ωστόσο, παρατηρείται ότι οι μικρές μεταβολές παροχής δεν επηρεάζουν ιδιαίτερα την υδρογεωλογική κατάσταση του οικοπέδου.

Σε όλες τις δοκιμές αυτού του σεναρίου, διατηρούμε για το μοντέλο μεταφοράς θερμότητας τις θερμοκρασίες 300K και 273K, εφόσον δεν επιφέρουν καμία ουσιαστική μεταβολή. Στις εικόνες 48-55 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της μεταβολής της ροής και της θερμοκρασίας για κάθε παροχή, καθώς επίσης και το άμεσο εικονικό αποτέλεσμα του τρεξίματος των κωδίκων MODFLOW και MT3DMS για την παροχή των 5 m³/h, ενώ στην εικόνα 55 το μοντέλο μεταφοράς θερμότητας για την παροχή των 5 m³/h στις κανονικές θερμοκρασίες (17°C/290K και 13°C/286K).



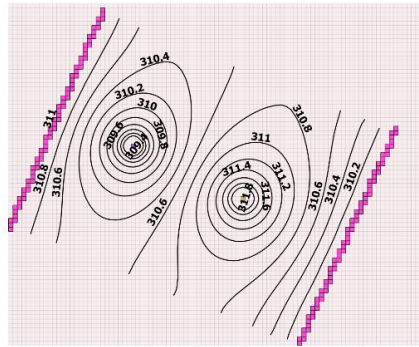
Εικόνα 47: Παροχή 3 m³/h για 8 ώρες



Εικόνα 48: Παροχή 4 m³/h για 8 ώρες

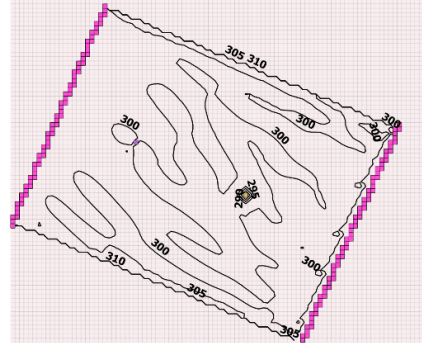
Layer 1

Μοντέλο Ροής



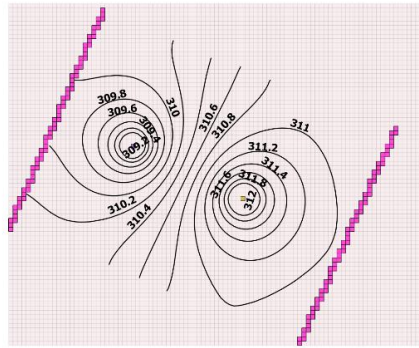
α

Μοντέλο μεταφοράς θερμότητας

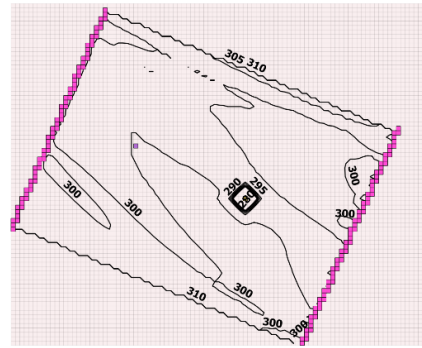


β

Layer 2

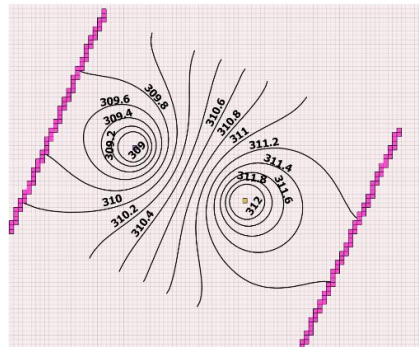


γ

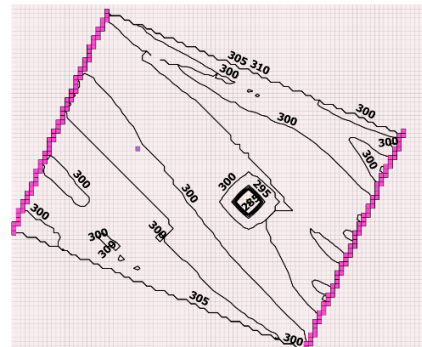


δ

Layer 3

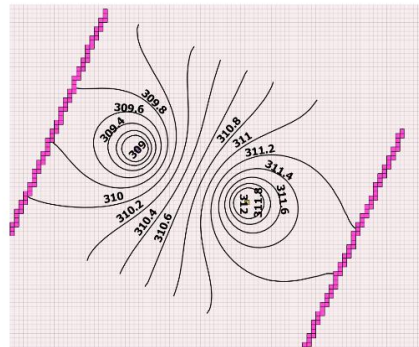


ε

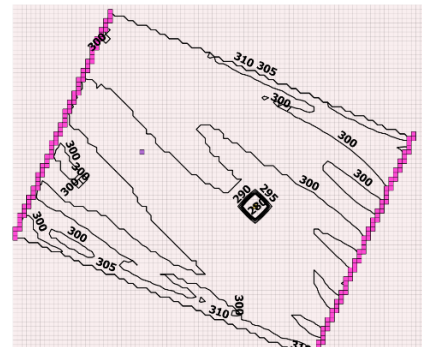


στ

Layer 4

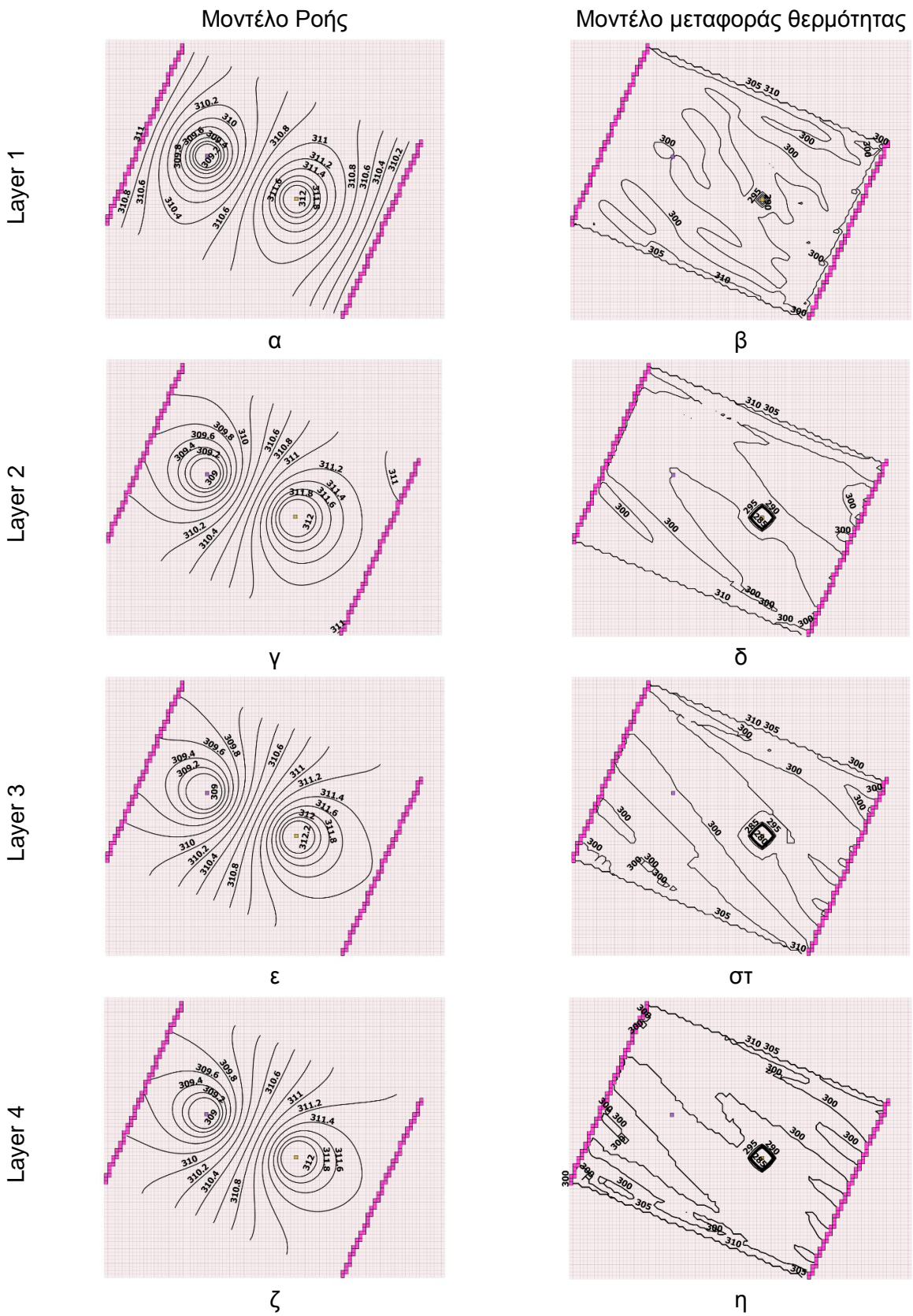


ζ

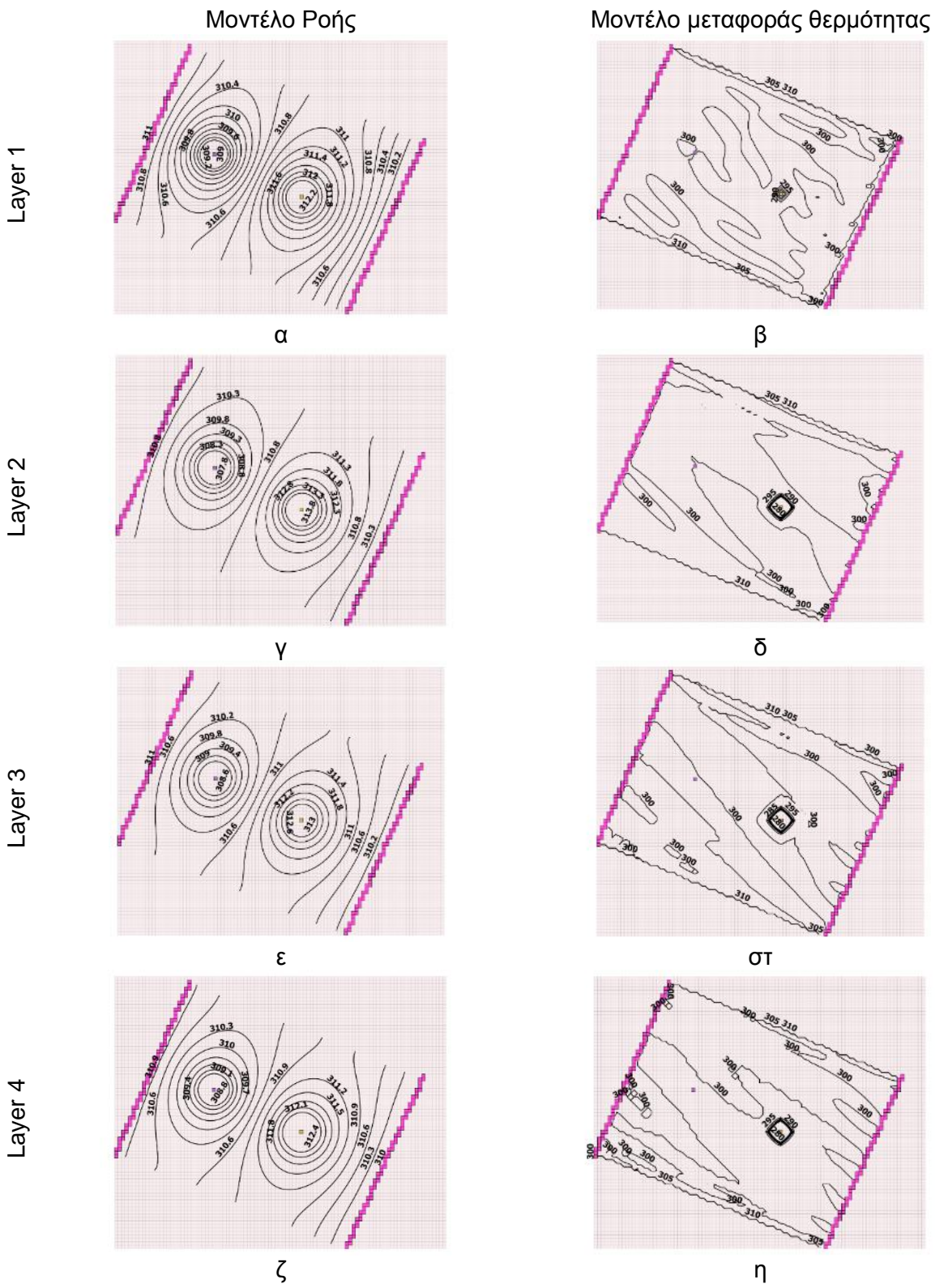


η

Εικόνα 49: Παροχή 5 m³/h για 8 ώρες



Εικόνα 50: Παροχή 6 m³/h για 8 ώρες

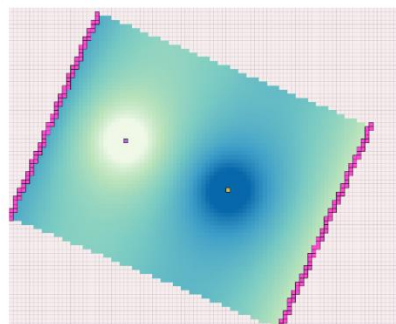


Εικόνα 51: Παροχή 7 m³/h για 8 ώρες

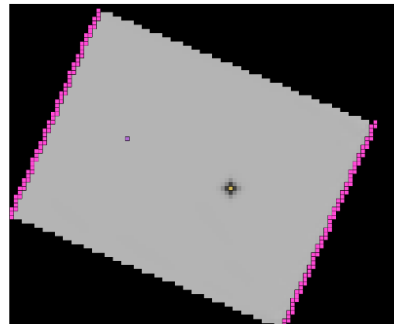
Μοντέλο Ροής (MODFLOW)

Μοντέλο μεταφοράς θερμότητας (MT3DMS)

Layer 1

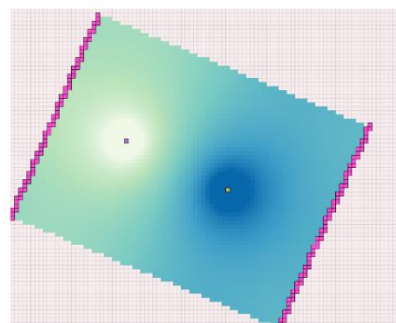


α

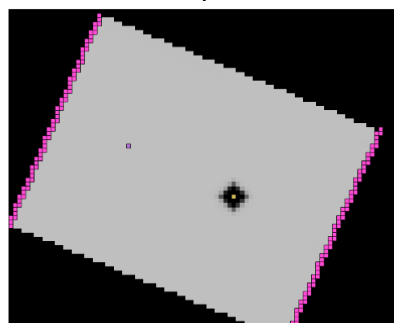


β

Layer 2

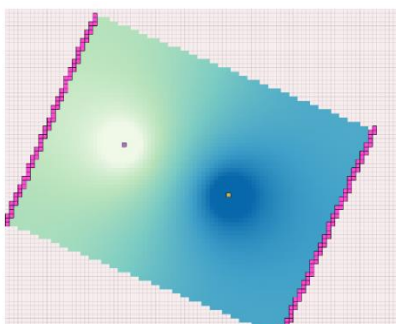


γ

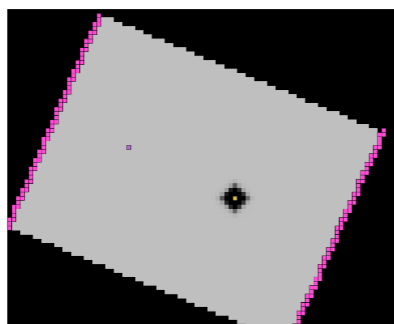


δ

Layer 3

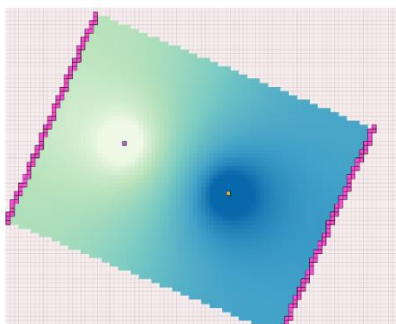


ε

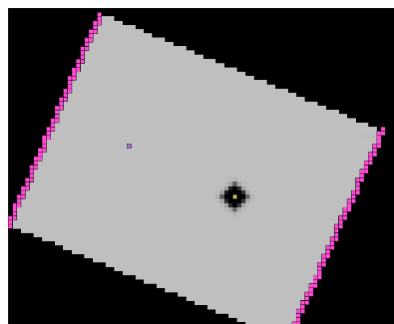


στ

Layer 4

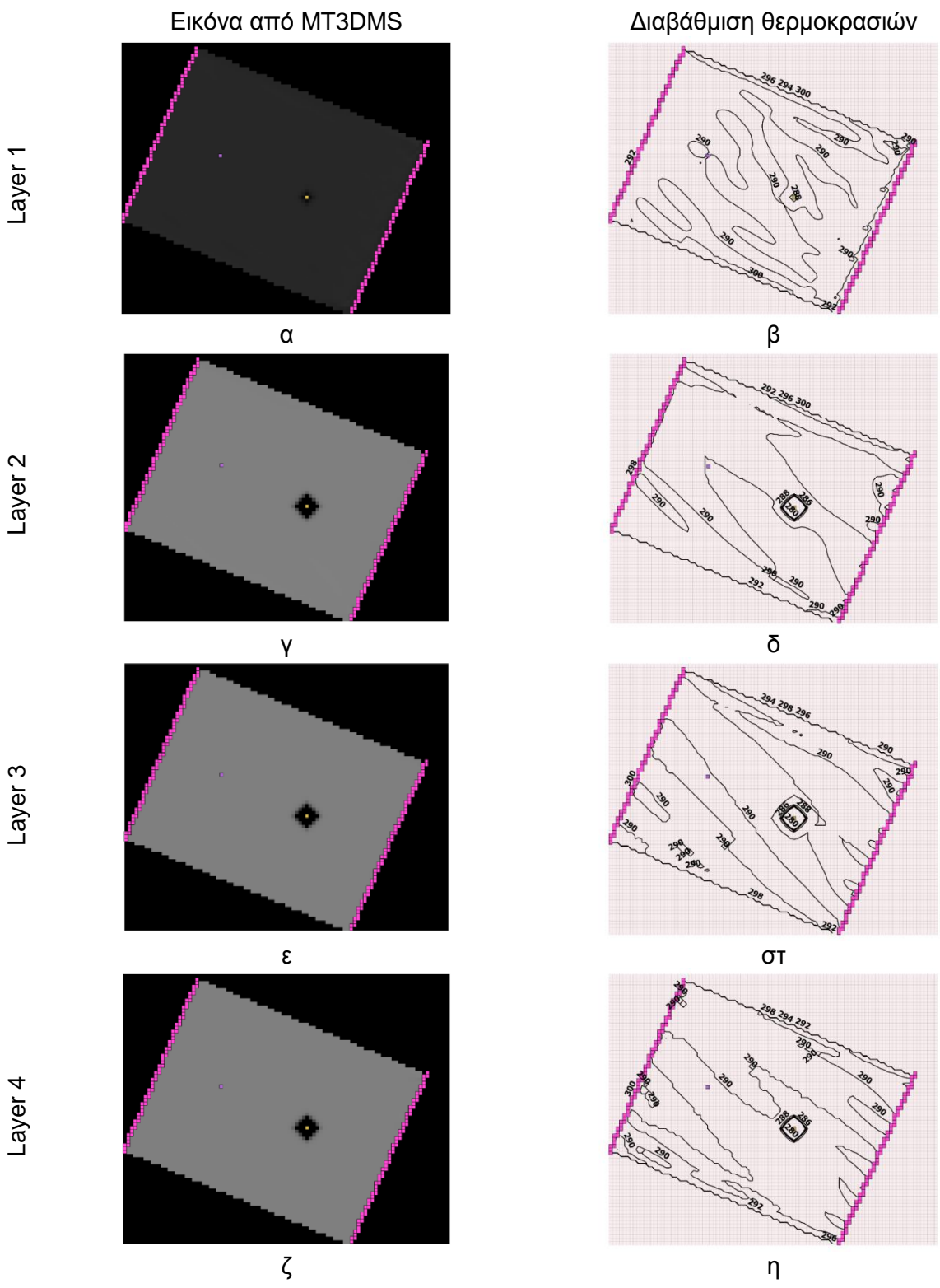


ζ



η

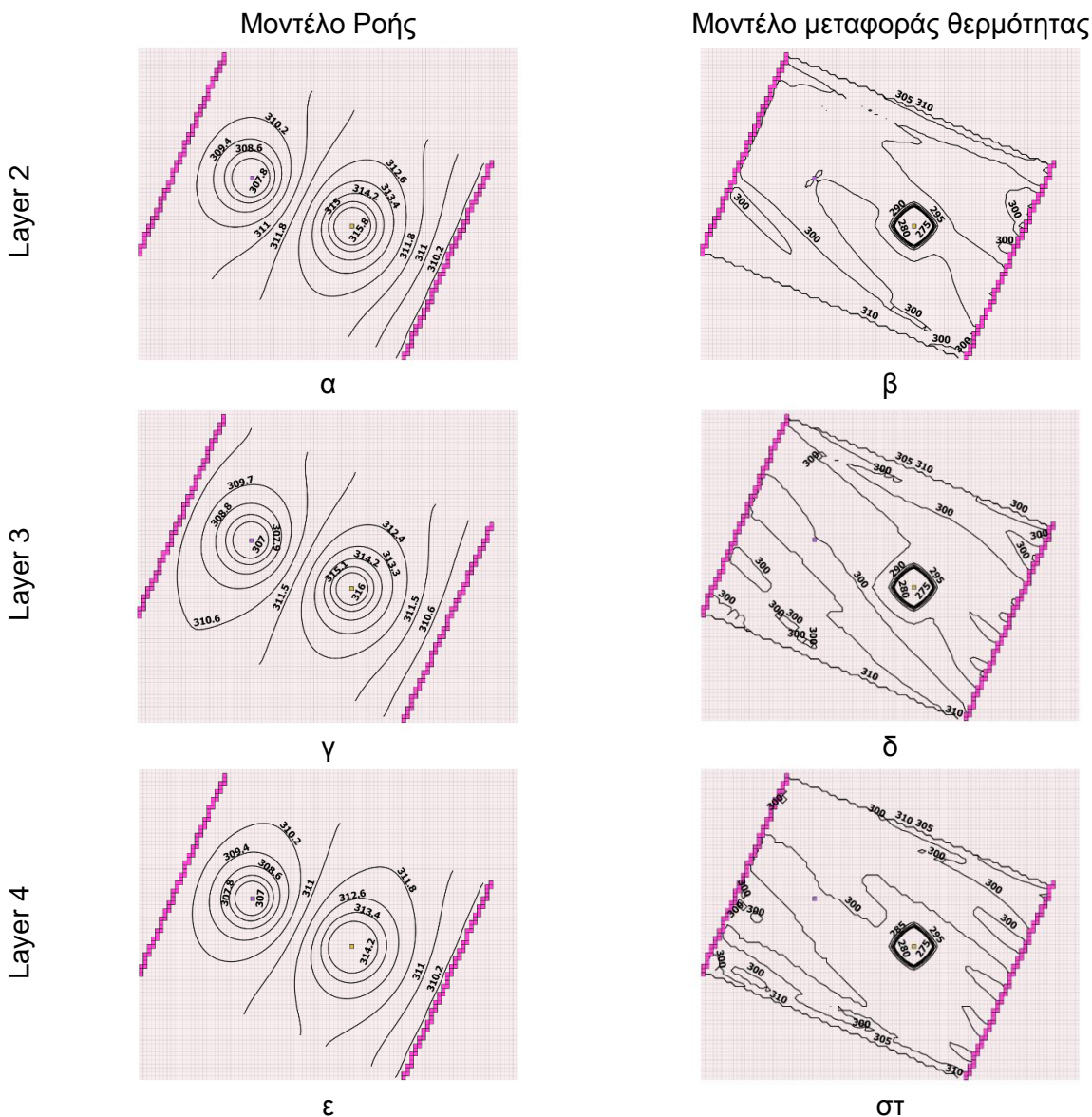
Εικόνα 52: Παροχή 5 m³/h για 8 ώρες – Εμφάνιση στο FREEWAT



Εικόνα 53: Παροχή 5 m³/h για 8 ώρες, μοντέλο μεταφοράς θερμότητας για κανονικές τιμές θερμοκρασίας (13°C/286K – 17°C/290K)

5.1.2 Σενάριο για βιομηχανική χρήση (παροχή 20 m³/h)

Ως τελευταία προσομοίωση για αυτήν την κατηγορία σεναρίων, τρέξαμε και ένα μοντέλο με παροχή 20 m³/h για λειτουργία 8 ωρών. Μια παροχή τέτοιου μεγέθους, που επιφέρει και μεγαλύτερη μεταβολή στο υδραυλικό φορτίο και τη θερμοκρασία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συγκεκριμένη αντλία θερμότητας για βιομηχανική χρήση, δηλαδή για τη θέρμανση – ψύξη μεγαλύτερου οικοπέδου, στο οποίο θα λειτουργούσε μια βιοτεχνία (π.χ. έκτασης 1000m²). Η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου και του θερμοκρασιακού προφίλ φαίνεται παρακάτω για τα 4 ανώτερα στρώματα (στο τέλος της SP 2, στο TS 8). Αυτό που παρατηρείται για αυτήν την τιμή της παροχής είναι ότι αδειάζει το 1^ο στρώμα (δηλαδή η στάθμη του υδροφόρου πέφτει στα 50m – πτώση στάθμης για 10m).

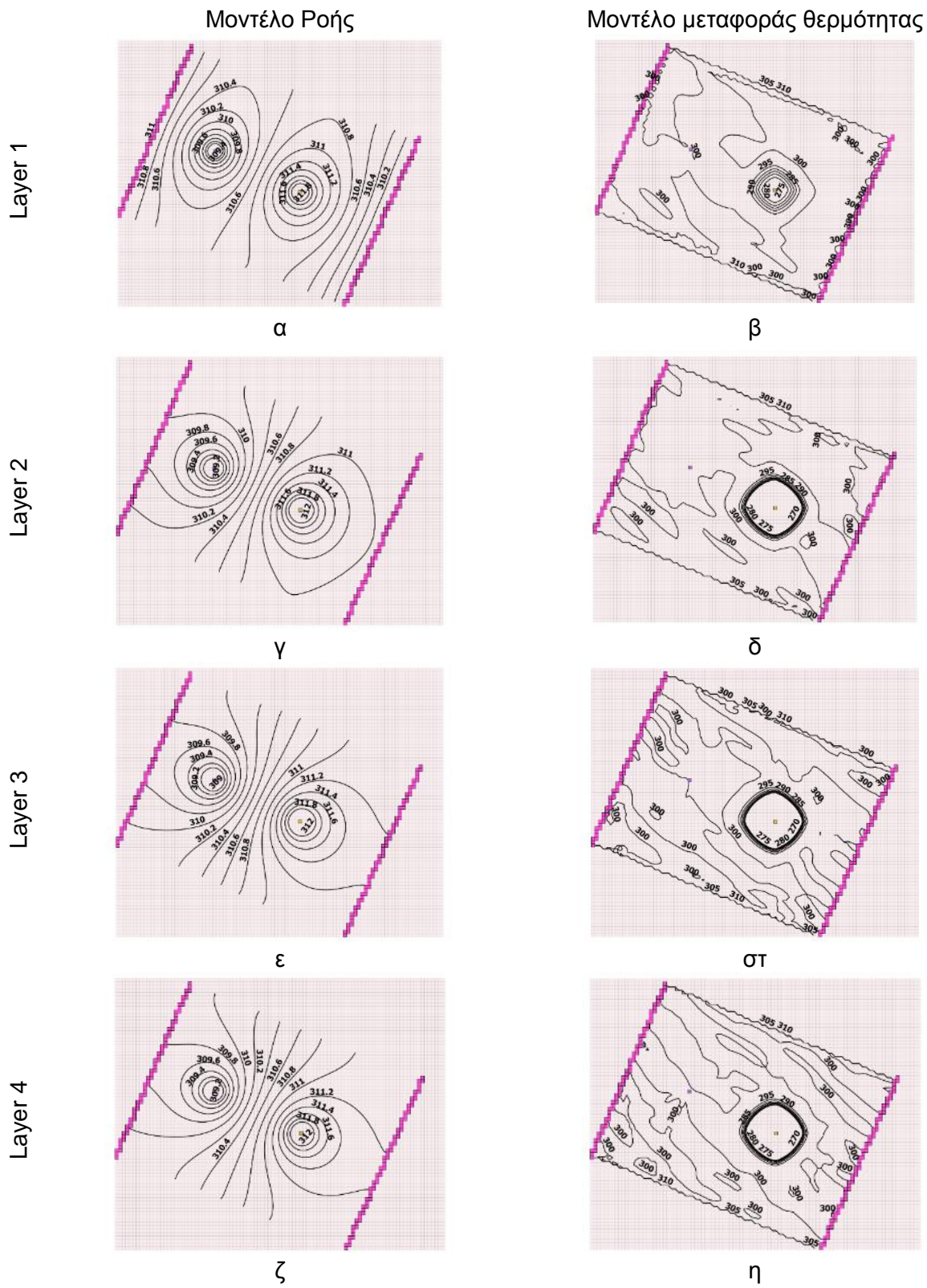


Εικόνα 54: Παροχή 20 m³/h για 8 ώρες

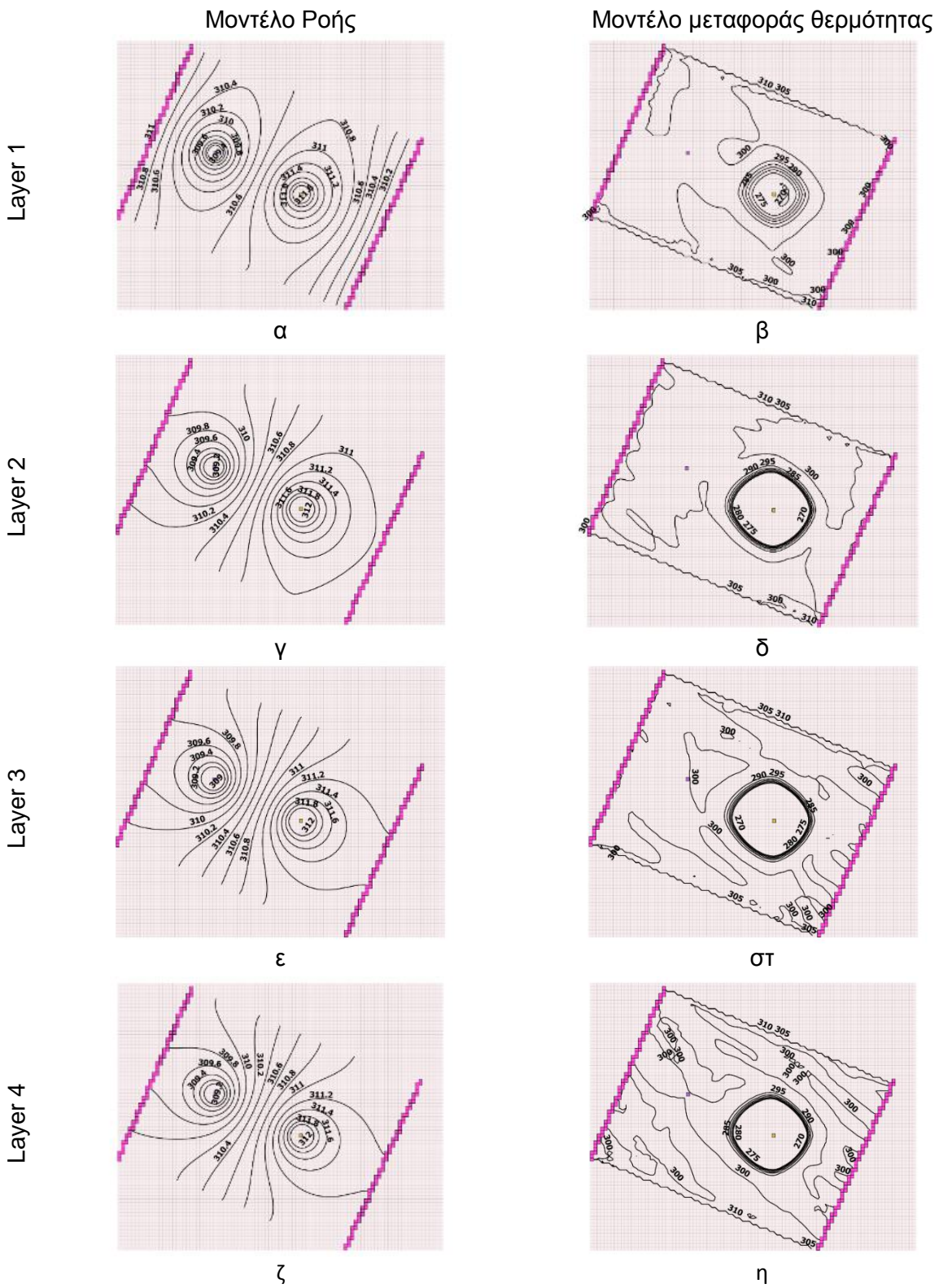
5.2 Σενάρια με βάση το χρόνο λειτουργίας της αντλίας θερμότητας για οικιακή χρήση (παροχή 5 m³/h για 5 μέρες, για 10 μέρες, για 15 μέρες και για 20 μέρες)

Επειδή μέσα σε 8 ώρες φαίνεται να μην υπάρχει μεγάλη πτώση του υδραυλικού φορτίου για τις παροχές άντλησης με μικρές διαφορές μεταξύ τους (σενάρια οικιακής χρήσης), αποφασίσαμε να τρέξουμε μία ακόμη SP (4^η) μακροπρόθεσμη για τιμη παροχής 5 m³/h (μέση τιμή των πέντε παροχών προσομοίωσης της οικιακής χρήσης), για 5, 10, 15 και 20 μέρες, με 5, 10, 15 και 20 TS αντίστοιχα για την κάθε περίπτωση. Αυτό γίνεται για να δούμε εάν μια άντληση με μεγάλη διάρκεια θα επηρεάσει περισσότερο την υδρογεωλογική κατάσταση του υπεδάφους.

Στο πέρας και των τεσσάρων αυτών προσομοιώσεων οι μεταβολές στο υδραυλικό φορτίο ήταν ακριβώς οι ίδιες για όλες, και δεν έχει μεγάλη διαφορά με τις μεταβολές στο υδραυλικό φορτίο για την ίδια παροχή, για λειτουργία 8 ωρών. Αυτό βέβαια συμβαίνει διότι το constant head, οι οριακές συνθήκες είναι πολύ κοντά η μία στην άλλη και η επιρροή από τα μεγαλύτερα διαστήματα άντλησης ή τις μεγαλύτερες παροχές είναι λογικό να μη γίνεται να αποτυπωθούν, καθώς αυτό σημαίνει ότι κανονικά φτάνει έξω από το όρια των συνθηκών που ορίσαμε εμείς με τα ενεργά κελιά του καννάβου. Βέβαια, η μεταβολή στη θερμοκρασία ήταν αρκετά μεγάλη για τα 4 διαφορετικά σενάρια, ακόμη και εάν η πτώση του υδραυλικού φορτίου ήταν ακριβώς η ίδια. Αυτό που γίνεται εμφανές για το μοντέλο της μεταφοράς θερμότητας είναι ότι με το πέρας του χρόνου «εξαπλώνεται» η μείωση της θερμοκρασίας όλο και περισσότερο γύρω από τη γεώτρηση επανεισαγωγής.



Εικόνα 55: Παροχή $5 \text{ m}^3/\text{h}$ για 5 μέρες

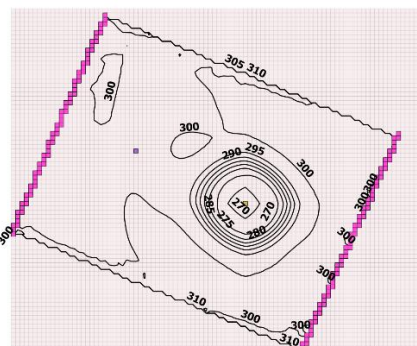
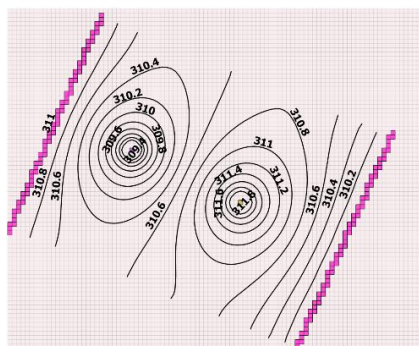


Εικόνα 56: Παροχή 5 m³/h για 10 μέρες

Μοντέλο Ροής

Μοντέλο μεταφοράς θερμότητας

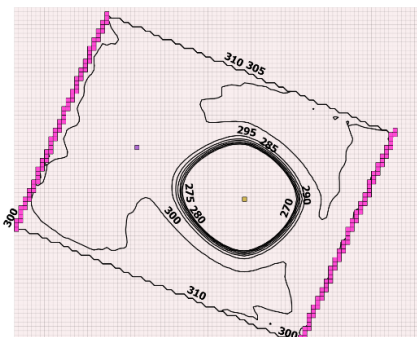
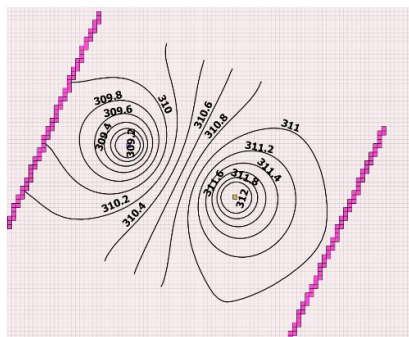
Layer 1



α

β

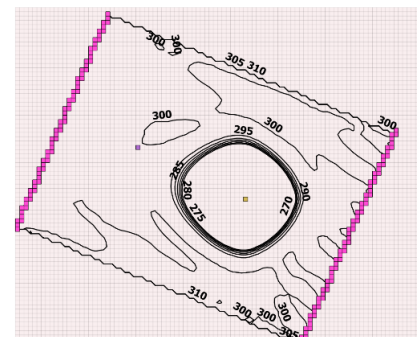
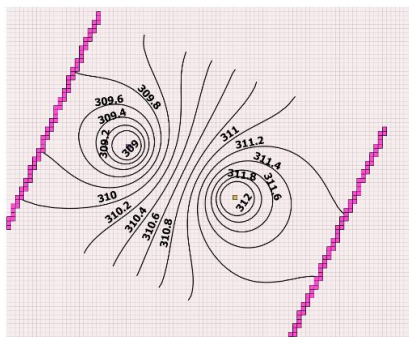
Layer 2



γ

δ

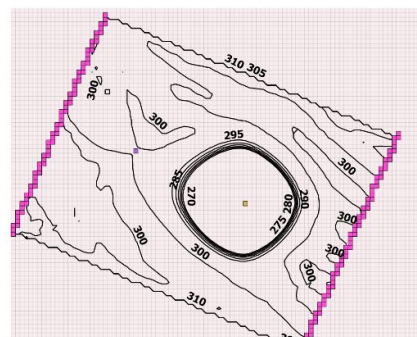
Layer 3



ε

στ

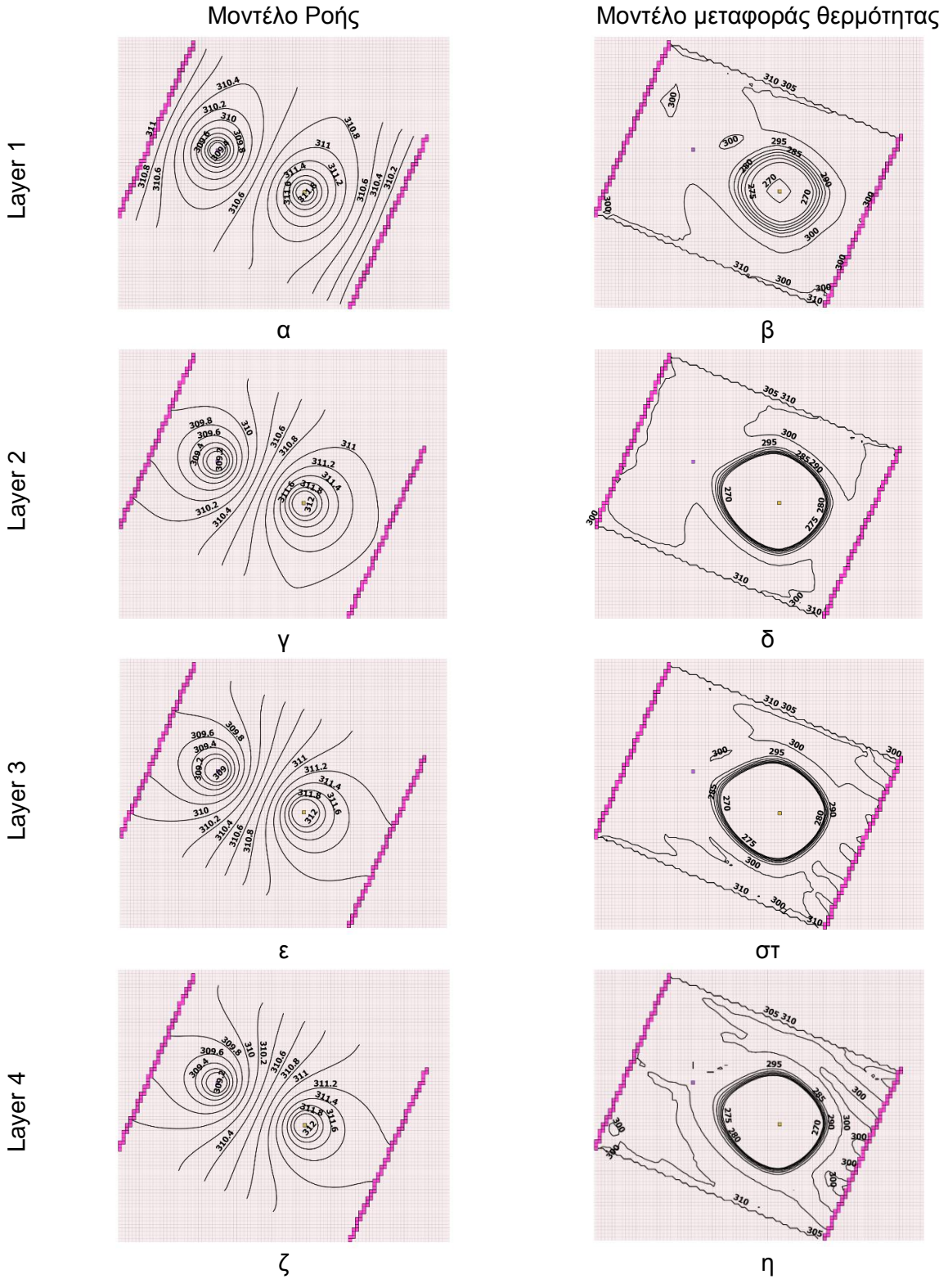
Layer 4



ζ

η

Εικόνα 57: Παροχή 5 m³/h για 15 μέρες



Εικόνα 58: Παροχή 5 m³/h για 20 μέρες

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

Η ανά χείρας διπλωματική εργασία πραγματεύεται την προσομοίωση της ροής του υπόγειου νερού και της μεταφοράς θερμότητας σε αβαθές ή κανονικό γεωθερμικό πεδίο, ελεύθερου υδροφορέα με τη χρήση αριθμητικών μοντέλων με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Στόχος της εργασίας είναι η διαπίστωση της επιρροής/αλληλεπίδρασης γεωτρήσεων άντλησης και επανεισαγωγής, κατά τη διάρκεια λειτουργίας γεωθερμικής αντλίας θερμότητας σε διαφορετικά σενάρια λειτουργίας.

Το πεδίο έρευνας το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως περιοχή εφαρμογής της προσομοίωσης βρίσκεται στους Θρακομακεδόνες και έχει ως γεωλογικό υπόβαθρο (τουλάχιστον ως το βάθος των 100m) προσχωματικούς και νεογενείς σχηματισμούς με μέτρια ως μικρή περατότητα συνολικά. Το οικοδομικό συγκρότημα γύρω από το οποίο εκτείνεται το πεδίο εφαρμογής διαθέτει μια γεωθερμική αντλία θερμότητας ανοιχτού κυκλώματος. Η ΓΑΘ για τη λειτουργία της αξιοποιεί το υπόγειο νερό του ελεύθερου υδροφορέα που βρίσκεται στο υπέδαφος και έχει μια σταθερή θερμοκρασία περίπου 17°C ενώ διαθέτει γεώτρηση παραγωγής και γεώτρηση επανεισαγωγής.

Η προσομοίωση περιέλαβε 10 διαφορετικά σενάρια τα οποία αφορούν σε διάφορες χρήσεις της ΓΑΘ (οικιακή ή βιομηχανική) και στα σενάρια με βάση το χρόνο λειτουργίας της ΓΑΘ. Στην πρώτη κατηγορία έγιναν 5 σενάρια με μικρή μεταβολή της παροχής (3-7m³/h) για οικιακή χρήση και 1 σενάριο με μία μεγαλύτερη παροχή (20m³/h) για βιομηχανική χρήση, όλα σε διάστημα λειτουργίας της αντλίας 8 ωρών. Στη δεύτερη κατηγορία αναπτύχθηκαν 4 σενάρια σταθερής παροχής (5m³/h) για διαφορετικά διαστήματα συνεχούς λειτουργίας, 5, 10, 15 και 20 ημερών. Σε όλα τα σενάρια, λόγω και της μικρής απόστασης των οριακών συνθηκών από τα σημεία άντλησης/επανεισαγωγής, η μείωση του υδραυλικού φορτίου (μοντέλο ροής) γύρω από τη γεώτρηση άντλησης περιορίστηκε στην πτώση περίπου 3-4 μέτρων τις περισσότερες φορές. Όσον αφορά στη μεταβολή της θερμοκρασίας στο μοντέλο μεταφοράς θερμότητας, στην πρώτη κατηγορία λόγω και του μικρού χρονικού διαστήματος λειτουργίας πτώση θερμοκρασίας επήλθε μόνο σε μια μικρή ακτίνα γύρω από τη γεώτρηση επανεισαγωγής, ενώ στη δεύτερη με την πάροδο του χρόνου η μείωση αυτή διευρυνόταν περισσότερο με την αύξηση του χρόνου λειτουργίας.

Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της πλατφόρμας FREEWAT, που έχει τη δυνατότητα χρήσης κατάλληλων κωδικών για την προσομοίωση υδρογεωλογικών/γεωθερμικών συστημάτων. Για την προσομοίωση της ροής του υπόγειου νερού χρησιμοποιήθηκε ο υπολογιστικός κώδικας MODFLOW-2005, που επιλύει την εξίσωση της ροής με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, ενώ για την προσομοίωση των φαινομένων μεταφοράς ο υπολογιστικός κώδικας MT3DMS, που επιλύει την εξίσωση μεταφοράς διαλυμένης μάζας επίσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- A. Ogata, R. B. (1961). *A solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media*. United States Geological Survey.
- A. Peck, S. G. (1988). *Consequences of spatial variability in aquifer properties and data limitation for groundwater modelling practice*. International Association of Hydrological Sciences.
- Ackerer, P. (1988). *Random-walk method to simulate pollutant transport in alluvial aquifers or fractured rocks*. Boston.
- Alley, W., Reilly, T., & Franke, O. (1999). *Sustainability of Ground-Water Resources*. U.S. Geological Survey.
- Anderson, J. E., Ekman, L., Nordqvist, R., & Winberg, A. (1991). Hydraulic testing and modeling of a low-angle fracture zone at Finnsjon, Sweden. *Hydrology*, 45-77.
- Anderson, M. (1986). *Field validation of ground water models*.
- Appel, C., & Bredehoeft, J. (1976). *Status of ground-water modeling in the U.S. Geological Survey*. U.S. Geological Survey.
- B.R. Hensel, R. B. (1990). *Numerical estimates of potential for groundwater contamination from land burial of municipal wastes in Illinois*. Illinois.
- Bajracharaya, K., & Barry, D. A. (1997). None equilibrium solute transport parameters and their physical significance: numerical and experimental results. *Contaminant Hydrology*, 185-204.
- Bear, J. (1972). *Dynamics of fluids in Porous Media*. New York: American Elsevier Publishing Company Inc.
- Bear, J. (1979). *Hydraulics of Groundwater*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Borsi, I. (2017). *FREEWAT User Manual - Volume 2, Heat and Solute Transport in Subsurface Water Flow*.
- Brehm, D. (1989). *Development, validation and application of a 3-dimensional, coupled flow and transport finite differences model*.
- Buxton, B. (1989). Geostatistical, sensitivity, and uncertainty methods for groundwater-flow and radionuclide transport modeling. *U.S. Department of Energy and Atomic Energy of Canada* (σ 670). Columbus, Ohio: Batelle Press.
- Carrera, J. (1988). *State of the art of the inverse problem applied to the flow and solute transport equation*. D. Reidel Publ. Co.
- Chapelle, F. H., Landmeyer, J. E., & Bradley, P. M. (1996). *Assessment of intrinsic bioremediation of jet fuel contamination in a shallow Aquifer, Beaufort, South Carolina*. USGS.
- Cherkauer, D. S., & McKereghan, P. F. (1991). Groundwater discharge to lakes: focusing in embayments. *Groundwater*, 72-80.
- Cherkauer, D. S., McKereghan, P. F., & Schalch, L. H. (1990). Delivery of chloride and nitrate by groundwater to the Great-Lakes- Case study for the Door Peninsula Wisconsin. *Groundwater*, 885-894.

- Clauser, C. (2003). *Numerical Simulation of Reactive Flow in Hot Aquifers, SHEMAT and Processing SHEMAT*. Berlin.
- Clement, T. (1997). *A Modular Computer Model for Simulating Reactive Multi-species Transport in Three-Dimensional Ground Water Systems*. Washington.
- Council, N. R. (1990). *Ground water models: scientific and regulatory applications*. National Academic Press.
- D.P. Krabbenhoft, M. A. (1986). *Use of a groundwater model for hypotheses testing*.
- Daliakopoulos, I., Coulibaly, P., & Tsanis, I. (2004). Groundwater level forecasting using artificial neural networks. *Journal of Hydrology*, 229-240.
- Diersch, H. (2002). *FEFLOW 5- User's Manual*. Berlin.
- Doherty, J. (2011). Modeling: Picture perfect or abstract art? *Groundwater*, 455.
- Drakopoulos, J., & Makropoulos, C. (1982). *Seismology, seismotectonics, seismic hazard and earthquake prediction. National report of Greece*. Unesco.
- Esink, J. H. (2000). *Groundwater Modelling*. Utrecht: Utrecht University.
- Essaid, H. I. (1990). *The computer model SHARP, a quasi-three dimensional finite-difference model to simulate freshwater and saltwater flow in layered coastal aquifer systems*. USGS.
- Faust J. W., F. G. (1980). *Ground-Water Modeling Applications*.
- Feinstein, D., Hart, D., & Krohelski, J. (2004). *The Value of Long-term Monitoring in the Development of Ground-Water Flow Models*. U.S. Geological Survey.
- Freeze R.A., W. P. (1968). *Theoretical analysis of regional ground-water flow*.
- Freeze, R. (1971). *Three-dimensional, transient, saturated-unsaturated flow in a groundwater basin*.
- Freeze, R., & Witherspoon, P. (1967). 2. Effect of water table configuration and subsurface permeability variations. Στο P. W. R.A Freeze, *Theoretical analysis of regional ground-water flow* (σσ. 623-624).
- Freyberg, D. (1988). *An exercise in ground-water model calibration and prediction*.
- G. De Filippis, M. G. (2017). *FREEWAT User Manual - Volume 1, Groundwater modeling using MODFLOW-OWHM (One Water Hydrologic Flow Model)*.
- G.F Pinder, W. G. (1977). *Finite element simulation in surface and subsurface Hydrology*. New York: Academic Press.
- G.L. Guymon, T. H. (1985). *Modeling of groundwater response to artificial recharge*.
- G.R. Jamieson, R. F. (1983). *Determining hydraulic conductivity distributions in a mountainous area using mathematical modeling*.

- H.A. Alaa, R. P. (1995). Efficient use of artificial recharge in groundwater pump and treat remediation systems. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater* (σσ. 679-287). New York, USA: ASCE.
- H.F. Wang, M. A. (1982). *Introduction to Groundwater Modeling-Finite Difference and Finite Element Methods*. San Francisco.
- Healy, R., Winter, T., LaBaugh, J., & Franke, O. (2007). *Water Budgets: Foundations for Effective Water-Resources and Environmental Management*. U.S. Geological Survey.
- Hemker, C. J., & Elburg, H. (1988). *Micro-Fem. MicroComputer MultiLayer Steady State Finite Element GroundWater Modeling*. Amsterdam.
- Herbert, J., & Roger, B. (1992). Evaluating the effectiveness of a mine tailing cover. Στο *Nordic Hydrology* (σσ. 193-208).
- Holzbecher, E., & Kohfahl, C. (2008). *Geothermic modelling using COMSOL multiphysics-manual course*. Berlin.
- Hunt, R., Anderson, M., & Kelson, V. (1998). *Improving a complex finite difference groundwater-flow model through the use of an analytic element screening model*. Ανάκτηση από Groundwater: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.1998.tb02108.x>.
- I. Borsi, L. F.-S. (2017). *FREEWAT User Manual – Volume 0, Reference Manual*.
- I. Remson, G. H. (1972). *Numerical methods in subsurface Hydrology*. New York: Wiley-Interscience.
- I. Remson, S. G. (1980). *Computer models in ground-water exploration*.
- J. Bear, A. V. (1987). *Modeling groundwater flow and pollution*. D. Reidel Publishing Co.
- J. Karanjac, M. A. (1977). *Mathematical model of Uluova Plain, Turkey. A training and management tool*.
- J.A. Liggett, P. L. (1983). *The boundary integral equation method for porous media flow*.
- J.L. Wilson, L. T. (1979). *Mathematical development and verification of a finite element aquifer flow model: Aquifem-1*. M.I.T.
- K. Brothers, A. B. (1995). Artificial ground-water recharge in Las Vegas Valley, Clark County, Nevada: model prediction. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater* (σσ. 669-678). New York, USA: ASCE.
- Kangas, M., & Lund, P. (1995). *THETA - An Advanced Simulation Program for 3D Fluid, Heat, and Solute Transfer in Porous Media*. Helsinki University of Technology.
- Kinzelbach, W. (1986). *Groundwater Modeling: An introduction with sample programs in BASIC*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers.
- Kipp, K. (1986). *HST3D – A computer code for simulation of heat and solute transport in 3D ground water flow systems*. U.S. Geological Survey,.

- Kohl, T., & Hopkirk, R. (1995). FRACTure- A simulation code for forced fluid flow and transport in fractured, porous rock. Στο *Geothermics* (σσ. 333-343).
- Kolditz, O., Habbar, A., Kaiser, R., Rother, T., Thorenz, C., Kohlmeier, M., & Moenickes, S. (2001). *ROCFLOW user's manual release 3.5*. Hannover: Institute of fluid mechanics and computer applications in civil engineering. University of Hannover.
- Kolm, K. (1996). Conceptualization and characterization of ground-water systems using Geographic Information Systems. *Engineering Geology*, 111-118.
- Konikow, L. (2011). *Contribution of global groundwater depletion since 1900 to sea-level rise*.
- Konikow, L. F., Goode, D. J., & Hornberger, G. Z. (1996). *A three dimensional method of characteristics solute transport model (MOC3D)*. USGS.
- Kresic, N., & Mikszewski, A. (2013). *Hydrogeological Conceptual Site Models: Data Analysis and Visualization*. CRC Press.
- L.R. Townley, J. W. (1980). *Description of and user's manual for a finite element aquifer flow model Aquifem-1*. M.I.T.
- Langevin, C., Thorne, J. D., Dausman, A., Sukop, M. D., & Weixing, G. (2007). SEAWAT version 4: A computer program for simulation of multi-species solute and heat transport. Στο *U.S. Geological Survey Techniques and method book 6* (σ. 39).
- Latinopoulos, P. (1986). *A boundary element approach for modeling groundwater*.
- Leahy, P. (1982). *A three-dimensional ground-water-flow model modified to reduce computer memory requirements and simulate confining-bed and aquifer pinchouts*. USGS.
- Lebbe, L. C. (1981). The subterranean flow of fresh and saltwater underneath the Western Belgian Beach. (σσ. 193-219). Bari, Italy: 8th Salt Water Intrusion Meeting.
- Lessoff, S. C., & Konikow, L. F. (1997). Ambiguity in measuring matrix diffusion with singlewell injection recovery tracer tests. *Groundwater*, 166-176.
- M.P. Anderson, W. W. (1992). *Applied Groundwater modelling; Simulation of flow and advective transport*. San Diego. California: Academic Press.
- Manos, B., Papathanasioy, J., Bournaris, T., & Voudouris, K. (2010). A multicriteria model for planning agricultural regions within a context of groundwater rational management. *Journal of Environmental Management* , 1591-1600.
- Marsily, G. (1986). *Quantitative Hydrogeology*. Orlando: Academic Press.
- Mary P.Anderson, W. W. (2015). *Applied Groundwater Modeling - Simulation of Flow and Advective Transport*. Academic Press.
- McDonald, M., & Harbaugh, A. (1988). *A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model*. U.S. Geological Survey.

- Méndez, J. H. (2008). *Implementation and verification of the USGS solute transport code MT3DMS for groundwater heat transport modelling*. Tubingen.
- Merritt, M. L. (1996). *Assessment of Saltwater Intrusion in Southern Coastal Broward County, Florida*. USGS.
- Meulenkaamp, J., Wortel, M., Van Wamel, W., & Spakman, W. H. (1988). *On the Hellenic Subduction zone and the geodynamical evolution of Crete since the late Middle Miocene*.
- Moore, J. (1979). Contribution of ground-water modeling to planning. *Journal of Hydrology*, 121-128.
- Narasimhan T. N., G. K. (1979). *A preliminary simulation of land subsidence at the Wairakei geothermal field, New Zealand*. Stanford, California: 5th Annual Geothermal Workshop, Stanford University.
- Nikolos, I., Stergiadi, M., Papadopoulou, M., & Karatzas, G. (2008). *Artificial neural networks as an alternative approach to groundwater numerical modeling and environmental design*.
- Oaksford, E. (1985). *Artificial recharge: methods, hydraulics and monitoring*. Butterworth Publishers.
- Oude Essink, J. (2000). *Groundwater Modelling*. Utrecht: Utrecht University, Institute of Earth Sciences, Department of Geophysics.
- P. Latinopoulos, K. K. (1991). *A boundary element and particle tracking model for advective transport in zoned aquifers*.
- P.S. Huyakorn, G. D. (1983). *Computational methods in subsurface flow*. Academic Press.
- Peters, J. (1987). *Description and comparison of selected models for hydrologic analysis of ground-water flow, St. Joseph River Basin, Indiana*. USGS.
- Photiades, A., & Carras, N. (2001). *Stratigraphy and geological structure of the Lavrion area (Attica, Greece)*.
- Photiades, A., & Sacconi, E. (2006). *Geochemistry and Tectono-Magmatic Significance of HP/LT Metaophiolites of the Attic-Cycladic Zone in the Lavrion Area (Attica, Greece)*.
- Phraner, R. (1991). *hydrogeological evaluation and feasibility analysis of artificial groundwater recharge and recovery in Eastern Pauba Valley*.
- Prickett. (1979). *Ground-water computer models-State of the art*.
- Prickett T. A., L. C. (1971). *Selected digital computer techniques for groundwater resource evaluation*.
- Pruess, K., Oldenburg, C., & Moridis, G. (1996). *THOUGH2 User's Guide, Version 2.0*. Lawrence Berkeley National Laboratory Report.
- R.F. Carsel, R. J. (1988). A simulation procedure for groundwater quality assessments of pesticides. *Journal of Contaminant Hydrology*, 125-138.
- R.W. Maclay, L. L. (1988). *Simulation of groundwater flow in the Edwards aquifer, San Antonio region, Texas, and refinement of storage and flow concepts*. USGS.

- Reilly, T. E., & Gibs, J. (1993). Effects of physical and chemical heterogeneity on water quality samples obtained from wells. *Groundwater*, 805-813.
- Reilly, T., & Harbaugh, A. (2004). *Guidelines for Evaluating Ground-Water Flow Models. U.S. Geological Survey Scientific Investigation Report*. Ανάκτηση από USGS: <http://pubs.usgs.gov/sir/2004/5038/>
- Rondoyanni, T., Mettos, A., Galanakis, D., & Georgiou, C. (2000). *The Athens earthquake of September 7, 1999. Its setting and effects*.
- S.H. Boutwell, S. B. (1986). *Modeling remedial actions at uncontrolled hazardous waste sites*. New Jersey: Noyes Publications.
- S.M. Gerharst, G. L. (1988). *Evaluation of the ground-water resources of the Lower Susquehanna River Basin, Pennsylvania and Maryland*. USGS.
- Sawyer, A., Cardenas, M., & Buttlers, J. (2012). *Hyporheic temperature dynamics and heat exchange near channel-spanning logs*.
- Schmidt, T., & Hellström, G. (2005). *Ground source cooling - working paper on usable tools and methods*.
- Sheets, R., Dumouchelle, D., & Feinstein, D. (2005). *Ground-Water Modeling of Pumping Effects Near Regional Ground-Water Divides and River/Aquifer Systems e Results and Implications of Numerical Experiments*. U.S. Geological Survey.
- Stefanescu, C., & Dassargues, A. (1996). Simulation of pumping and artificial recharge in a phreatic aquifer near Bucharest, Romania. *Hydreology Journal*, 72-83.
- Stephens, D. (1983). Groundwater flow and implications for groundwater contamination north of Prewitt, New Mexico, USA. *Journal of Hydrology*, 391-408.
- Stephenson G. R., F. R. (1974). *Mathematical simulation of subsurface flow contributions to snow-melt runoff, Reynolds Creek Watershed, Idaho*.
- T. Franz, N. G. (1990). *Flowpath, two-dimensional horizontal aquifer simulation model*.
- Taylor, C., & Alley, W. (2002). *Ground-Water-Level Monitoring and the Importance of Long-term Water-Level Data*. U.S. Geological Circular.
- Trescott, P. (1976). *Documentation of finite-difference model for simulation of three-dimensional ground-water flow*. U.S. Geological Survey.
- Treweek, G. (1985). *Pretreatment processes for groundwater recharge*. Butterworth Publ.
- Trichakis, I., Nikolos, I., & G.P., K. (2009). Optimal selection of artificial neural network parameters for the prediction of a karstic aquifer's response. *Hydrological Processes*, 2956-2969.
- U. Shamir, D. H. (1966). *Numerical and analytical solutions of dispersion problems in homogeneous and layered aquifers*. M.I.T.
- van der Eem, J. P. (1987). *Adaption Konikow-Bredehoeft for Density Differences*.

- Voss, C. I. (1984). *A finite-element simulation model for saturated-unsaturated fluid-density-dependent ground-water flow with energy-transport or chemically-reactive single-species solute transport*. U.S. Geological Survey.
- Walton, W. (1985). *Practical aspects of groundwater modeling*.
- Wells, D., & Coppersmith, K. (1994). *New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement*.
- Winter, T. (1976). *Numerical simulation of the interaction of lakes and ground water*. USGS.
- Woessner, W. (2000). Stream and fluvial plain ground water interactions: Rescaling hydrogeologic thought. *Groundwater*, 423-429.
- Wright, A., & du Toit, I. (1996). Artificial recharge of urban wastewater, the key component in the development of an industrial town on the arid West Coast of South Africa. *Hydrology Journal*, 118-129.
- Zheng, C. (1990). *MT3D: A modular three-dimensional transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reaction of contaminants in groundwater systems*.
- Zienkiewicz, O. (1977). *Finite element method*. McGraw-Hill, London.
- Zlotnik, V., Cardenas, M., & Toundykov, D. (2011). Effects of multiscale anisotropy on basin and hyperheic groundwater flow. *Groundwater*, 576-583.
- Αβραμίδου, Ν. (2011). *Γεωθερμία*. Θεσσαλονίκη: Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα.
- Αδ.Φωτιάδης. (2008, Νοέμβρης). *Γεωλογική μελέτη της αστικής και περιαστικής περιοχής Θρακομακεδόνων, Ν.Αττικής*. Αχαρναί: ΙΓΜΕ.
- Αμανατίδης, Ε. (χ.χ.). *Ήπιες μορφές ενέργειας*. Πάτρα: Σχολή Χημικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Βουδούρης, Κ. Σ. (2017). *Μαθηματικά μοντέλα και τεχνικές διαχείρισης των υπόγειων υδροφορέων*. Στο Κ. Σ. Βουδούρης, *Εκμετάλλευση και διαχείριση υπογείου νερού*. Εκδόσεις Τζιόλα.
- Δ.Γαλανάκης, Χ. (2009, Μάιος). *Νεοτεκτονική μελέτη αστικής-περιαστικής περιοχής Θρακομακεδόνων, Ν.Αττικής (Πιλοτική εφαρμογή)*. Αχαρναί: ΙΓΜΕ.
- Θεοδοσίου, Ν. (1994). *Μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης και διαχείρισης υπόγειων υδροφορέων*. *Εφαρμογή στον υδροφορέα Κοκκινοχωρίων Κύπρου*. Θεσσαλονίκη: ΑΠΘ.
- Ι.Καρυδάκης. (2005). *Γεωθερμική ενέργεια*. Αθήνα: Αθλότυπο.
- Καλλιώρας, Α. (2015). *Ειδικά θέματα αξιοποίησης και διαχείρισης των υπόγειων νερών - Υδρογεωλογικά μοντέλα και υπολογιστικοί κώδικες*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Κατσικάτσος. (2000). *Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας, φύλλο Ερέτρια, κλίμακας 1:50.000*. Αθήνα: ΙΓΜΕ.
- Λατινόπουλος, Π. (1995). *Υδρολογία υπόγειων νερών*. Αθήνα.

- Μέττος, Α. (1992). *Γεωλογική και Παλαιογεωγραφική Μελέτη των ηπειρωτικών νεογενών και τεταρτογενών σχηματισμών ΒΑ/κής Αττικής και ΝΑ/κής Βοιωτίας*.
- Μιμίκου, Μ. (2007). *Τεχνολογία Συστημάτων Υδατικών Πόρων*. Παπασωτηρίου.
- Ν.Σιέμος, Ι. (2009). *Υδρογεωλογική έρευνα αστικής και περιαστικής περιοχής Θρακομακεδόνων Ν.Αττικής*. Αχαρναί: ΙΓΜΕ.
- Πάντου, Θ., Τάπογλου, Ε., & Καρατζάς, Γ. (2014). Προσομοίωση του υδραυλικού ύψους του υδροφορέα στην περιοχή Μεσσαράς Κρήτης με ANN και διαφορετικούς αλγορίθμους εκπαίδευσης. *Πρακτικά 10ου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου*. Θεσσαλονίκη.
- Παπανικολάου, Λ. Σ. (2004). *Η γεωλογική δομή του Αλλόχθονου συστήματος των «σχιστολίθων Αθηνών»*.
- Πεταλάς, Χ. (1997). *Ανάλυση υδροφόρων συστημάτων στο παράκτιο πεδίο του Ν. Ξάνθη*.
- ΠοσειδώνΕνεργειακή. (2007). *Ποσειδών Ενεργειακή Α.Ε.* Ανάκτηση από Ποσειδών Ενεργειακή Α.Ε. - Τι κάνουμε - Αβαθής Γεωθερμία: <http://www.poseidonenergy.gr/products.htm>
- Ράπτη, Δ. (1995). *Υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής Σκύδρας-Επισκοπής (Μακεδονία)*. Εφαρμογή μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης των υδροφόρων στρωμάτων. Θεσσαλονίκη: Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ.