



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ – ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

***“ Μοντελοποίηση της υπόγειας ροής της ευρύτερης περιοχής της
υδρογεωλογικής λεκάνης Κουρταλιώτη - Επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής ”***

ΙΩΑΝΝΑ Κ. ΑΓΓΕΛΗ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Καθηγητής Καρατζάς Γεώργιος (Επιβλέπων)

Καθηγητής Νικολαΐδης Νικόλαος

Αναπληρωτής Καθηγητής Παρανυχιανάκης Νικόλαος

**Χανιά,
Οκτώβριος 2019**

Μαρία Ιωσήφ Κολοκοτρωνάκη.

Συμβολαιογράφος Ρεθύμνου.

ΒΕΒΑΙΩΣΗ

Βεβαιώνω ότι η μεταπτυχιακή διατριβή με τίτλο **"Μοντελοποίηση της υπόγειας ροής της ευρύτερης περιοχής της υδρογεωλογικής λεκάνης Κουρταλιώτη - Επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής"**, έχει κατατεθεί σε μένα από την Ιωάννα Αγγέλη του Κωνσταντίνου, με την με αριθμό **11.201/ 25-10-2019** πράξη μου, κατάθεσης και θεώρησης εγγράφων, έλαβε βεβαία χρονολογία και κατοχυρώθηκε σαν πνευματική ιδιοκτησία αυτής έναντι πάντων, προστατευόμενη, από τις σχετικές διατάξεις της Νομοθεσίας "περί προστασίας της πνευματικής ιδιοκτησίας".

Ρέθυμνο 25-10-2019

Η συμβολαιογράφος Ρεθύμνου



Ευχαριστίες

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή εκπονήθηκε στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών “Περιβαλλοντική Μηχανική” της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης με κατεύθυνση Υδατικοί Πόροι και Κλιματική Αλλαγή υπό την επίβλεψη του Καθηγητή της Σχολής κ. Καρατζά Γεώργιο.

Αρχικώς, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Καρατζά για την άριστη συνεργασία, τη συνεχή καθοδήγηση και τις πολύτιμες επιστημονικές συμβουλές του καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα θέμα ερευνητικού ενδιαφέροντος μου.

Στην συνέχεια, θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στον κ.Σιμιτζί Βασίλειο, γεωλόγο του Οργανισμού Ανάπτυξης Κρήτης, για την ευγενική παροχή όλων αυτών των απαραίτητων και πολύ σημαντικών γνώσεων για την περιοχή μελέτης καθώς και για την υπόδειξη αυτής.

Πρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ.Βότσογλου Νικόλαο, γεωλόγο του Τμήματος Υδροοικονομίας της Περιφερειακής Ενότητας Ρεθύμνου για την παροχή των στοιχείων όπου δίχως αυτών δεν θα ήταν δυνατή η υλοποίηση της παρούσας εργασίας.

Ευχαριστίες θα ήθελα επίσης να απευθύνω στον κ.Κοινάκη Ιωάννη, γεωλόγο της Περιφερειακής Μονάδας του Ι.Γ.Μ.Ε στην Κρήτη, για την συνδρομή σημαντικών πληροφοριών για την περιοχή μελέτης.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου που ήταν δίπλα μου στην προσπάθεια μου αυτή.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων αποτελεί επιτακτική ανάγκη και τα μέτρα που θα πρέπει να ληφθούν απαιτείται να είναι πλήρως εναρμονισμένα με πιθανές επερχόμενες μεταβολές του κλίματος. Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή είχε ως απώτερο σκοπό την μοντελοποίηση της υπόγειας ροής της ευρύτερης περιοχής της υδρογεωλογικής λεκάνης Κουρταλιώτη καθώς και την εξέταση τεσσάρων υποθετικών κλιματικών σεναρίων για τον έλεγχο της απόκρισης του συστήματος. Η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα ArgusONE και το τρισδιάστατο υβριδικό μοντέλο προσομοίωσης υπόγειας ροής PTC.

Η περιοχή μελέτης που επιλέχθηκε βρίσκεται στο κεντρικό-νότιο τμήμα του Νομού Ρεθύμνης, εκτεινόμενη μέχρι τα νότια παράλια. Συγκεκριμένα, καταλαμβάνει έκταση 184km² και διοικητικά υπάγεται στον Δήμο Αγίου Βασιλείου. Στην υπό μελέτη περιοχή περιλαμβάνεται ένα πολύ μεγάλο τμήμα της υδρογεωλογικής λεκάνης του Κουρταλιώτη, η οποία παρουσιάζει έντονο υδρογεωλογικό ενδιαφέρον. Η πολύπλοκη γεωλογική δομή σε συνδυασμό με την τεκτονική, συνδιαμορφώνουν τις υπάρχουσες υδρογεωλογικές συνθήκες. Τα στοιχεία που παρατίθενται σχετικά με την περιοχή μελέτης αφορούν την γεωλογία, τεκτονική, υδρογεωλογία, τις χρήσεις γης και το δίκτυο Natura 2000 όπου ανήκει.

Στο πρώτο μέρος της μεταπτυχιακής διατριβής, παρουσιάζονται οι βασικές αρχές και οι νόμοι της υπόγειας ροής όπως επίσης και οι θεμελιώδεις εξισώσεις για τον μαθηματικό προσδιορισμό της. Αναφορά επίσης γίνεται στην κλιματική αλλαγή και στις συνέπειες που απορρέουν λόγω αυτής με ιδιαίτερη έμφαση στα υπόγεια ύδατα. Ακολουθεί η εισαγωγή και επεξεργασία των δεδομένων στο μοντέλο PTC όπως και η διαδικασία της βαθμονόμησης. Τα αποτελέσματα από την βαθμονόμηση κατέδειξαν πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ των τιμών των υδραυλικών υψών του πεδίου και του μοντέλου.

Έπειτα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την μοντελοποίηση και τα υποθετικά κλιματικά σενάρια για την περιοχή μελέτης. Συμπερασματικά, στα τρία πρώτα σενάρια το σύστημα κατέδειξε χαμηλό βαθμό ευαισθησίας σε αλλαγές των παραμέτρων της βροχόπτωσης, των πλευρικών εισροών και αύξησης των αντλήσεων μέχρι ενός ορίου. Αντίθετα, στο τέταρτο και ακραίο σενάριο μια περαιτέρω αύξηση της παροχής των αντλήσεων σε συνδυασμό με την μείωση των βροχοπτώσεων και πλευρικών εισροών είχε σημαντικότερες επιπτώσεις στον υδροφόρα. Τέλος, λόγω των μεγάλων υδάτινων αποθεμάτων που διαθέτει η εν λόγω περιοχή προτείνεται η εκπόνηση ενός γενικού σχεδίου για την ορθότερη διαχείριση και αξιοποίηση τους όπου θα μπορούσαν να καλύψουν σημαντικές υδρευτικές και αρδευτικές ανάγκες του Νομού.

Λέξεις κλειδιά: PTC, Κουρταλιώτης, Προσομοίωση, Υδροφορέας, Υδρογεωλογία

ABSTRACT

A rational management of water resources is required nowadays more than ever and the plans that have to be devised must be fully harmonized with the potential upcoming changes in the climate. The aim of this present Thesis was about modeling the groundwater flow of the extended area of the hydrogeological basin of Kourtaliotis in order to examine the impacts of climate change to the system through four climate scenarios. The modeling was performed with the ArgusONE program and the three-dimensional hybrid PTC simulation model for groundwater flow.

The study area is located in the central-south part of Rethymnon Prefecture and extends up to the south coast. Specifically, it covers an area of 184km² and pertains to the Municipality of Agios Vasilios. The study area includes a large part of the hydrogeological basin of Kourtaliotis, which is of great hydrogeological interest. The complex geological structure combined with the tectonics, form the existing hydrogeological conditions. The data that are provided for the study area relate to geology, tectonic, hydrogeology, land uses and the Natura 2000 network which belongs.

In the first part of this master's thesis, the basic principles and laws of underground flow are presented as well as the fundamental equations for its mathematical approach. Reference was also made in climate change and its consequences, with particular emphasis on groundwater systems. Next, data input and processing followed in the model PTC in order to simulate the study area. The calibration of the model showed a very good correlation between the values in hydraulic head of the field with these from the model.

Afterwards, the results of modeling and from the hypothetical climate scenarios for the study area are presented. In conclusion, in the first three scenarios the system appeared to have a low degree of sensitivity to changes in parameters such as infiltration, lateral inflows and in increasing the pumping rates up to a limit. In contrast, at the fourth and last extreme scenario, a further increase in pumping and in combination with a decrease in infiltration and lateral inflows had significant impacts on the aquifer. Finally, due to the large groundwater reserves that the area has, a development of a general plan is proposed for better management and utilization of them where they could satisfy the demands in water supply and irrigation in the Prefecture.

Key words: PTC, Kourtaliotis, Simulation, Aquifer, Hydrogeology

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	III
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	IV
ABSTRACT	V
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	VIII
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	IX
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	IX
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ	IX
1. ΥΠΟΓΕΙΑ ΡΟΗ	1
1.1 Γενικά	1
1.2 Κατηγορίες εδαφικού νερού	2
1.3 Κατακόρυφη κατανομή του υπόγειου νερού.....	4
1.4 Υπόγειοι Υδροφορείς.....	5
1.5 Ιδιότητες και υδραυλικά χαρακτηριστικά των υδροφορέων.....	7
1.6 Βασικές αρχές της υπόγειας ροής	14
1.7 Τρωτότητα Υπόγειων Υδροφορέων	17
1.8 Ρύπανση των υπόγειων υδάτων.....	19
1.9 Διαχείριση και υφιστάμενη κατάσταση των υπόγειων υδατικών συστημάτων στην Ελλάδα.....	21
1.9.1 Διαχείριση και υφιστάμενη κατάσταση στο υδατικό διαμέρισμα της Κρήτης	24
2. ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ ΚΑΙ ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ.....	26
2.1 Κλιματική αλλαγή.....	26
2.2 Παρατηρούμενες μεταβολές λόγω κλιματικής αλλαγής	28
2.3 Κλιματική αλλαγή και επιπτώσεις στους υδατικούς πόρους	30
2.3.1 Επιπτώσεις στα υπόγεια ύδατα	33
3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ.....	35
3.1 Η συμβολή του μοντέλου	35
3.2 Κατηγορίες μοντέλων υπόγειας ροής	36
3.3 Μαθηματικά μοντέλα	37
3.3.1 Αριθμητικές Μέθοδοι.....	38
3.3.2 Οριακές συνθήκες	39
3.4 Μεθοδολογία μοντελοποίησης.....	40
3.5 Μαθηματικές προσεγγίσεις της υπόγειας ροής	43
3.6 Σφάλματα στην μοντελοποίηση.....	46

3.7 Ευρέως διαδεδομένα μοντέλα υπόγειας ροής	47
4. ΜΟΝΤΕΛΟ ΡΤC	50
4.1 Γενικά για το μοντέλο	50
4.2 Θεμελιώδεις εξισώσεις μοντέλου ΡΤC	51
4.2.1 Αλγόριθμος επίλυσης ΡΤC	52
4.3 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων	54
4.4 Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών	55
4.4.1 Κάθετη παράγωγος	55
4.4.2 Παράγωγος του χρόνου	57
4.5 Οριακές συνθήκες	57
5. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	59
5.1 Περιγραφή της περιοχής μελέτης	59
5.2 Γεωλογία.....	61
5.3 Τεκτονική	68
5.4 Υδρογεωλογία	71
5.5 Υδρολιθολογία.....	74
5.6 Κλιματικά Στοιχεία	76
5.7 Χρήσεις γης.....	77
5.8 Δίκτυο Natura 2000	79
6. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	81
6.1 Εισαγωγή δεδομένων στο ΡΤC	81
6.1.1 Γεωτρήσεις	84
6.1.2 Γενικές παράμετροι	87
6.1.3 Ειδικές παράμετροι	88
6.1.4 Αρχικές και Οριακές συνθήκες	90
6.1.5 Βροχόπτωση	92
6.2 Βαθμονόμηση.....	92
6.2.1 Έλεγχος Αξιοπιστίας	93
7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	96
7.1 Προσομοίωση της υπόγειας ροής.....	96
7.2 Σενάρια κλιματικής αλλαγής και ανάλυση ευαισθησίας.....	98
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	104
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	106

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Κατανομή του νερού της Γής (Πηγή: Shiklomanov,1993).	1
Εικόνα 1.2: Οι δύο βασικές κατηγορίες υπόγειων υδροφορέων(Πηγή: Βουδούρης, Θέματα Υδρογεωλογίας Περιβάλλοντος)	6
Εικόνα 1.3: Σχηματική απεικόνιση της δομής ενός πετρώματος με το πορώδες για διάφορες περιπτώσεις (Πηγή: Meinzer,1923).	8
Εικόνα 1.4: Εναποθηκευτικότητα σε ελεύθερους και υπό πίεση υδροφόρους ορίζοντες (Πηγή: μεταφρασμένο από Heath, USGS Water Supply Paper 2220)	12
Εικόνα 1.5: Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής στήλης του Darcy(Πηγή: Brown, 2002)	14
Εικόνα 1.6: Κατανομή της ποιοτικής και ποσοτικής κατάστασης των υπόγειων υδάτων (Πηγή: Έκθεση Κατάστασης Περιβάλλοντος 2018, ΕΚΠΑ).	23
Εικόνα 1.7: Το Υδατικό Διαμέρισμα της Κρήτης με τα 91 οριοθετημένα Υπόγεια Υδατικά Συστήματα(Πηγή: Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017).	24
Εικόνα 2.1: Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στους υδάτινους πόρους(Πηγή: μεταφρασμένο από Demuth S. ppt, UNESCO)	32
Εικόνα 5.1: Δορυφορική άποψη του Νομού Ρεθύμνης(Πηγή: Google Earth).	59
Εικόνα 5.2: Απεικόνιση της περιοχής μελέτης(Πηγή: Google Earth).	59
Εικόνα 5.3: Η γεωλογική δομή της περιοχής μελέτης σύμφωνα με τους γεωλογικούς χάρτες του Ι.Γ.Μ.Ε (Φύλλα Ρέθυμνο, Πέραμα, Σελλιά, Μέλαμπες).	66
Εικόνα 5.4: Απόσπασμα από τον γεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ φύλλο Μέλαμπες 1:50.000 στο οποίο παρουσιάζεται η ρηξιγενής ζώνη Σπηλίου – Αγίας Φωτιάς – Κισσού- Κρύα Βρύση.	70
Εικόνα 5.5: Καθρέπτης του ρήγματος Αγίας Φωτιάς Σπηλίου.	70
Εικόνα 5.6: Απεικόνιση της υδρογεωλογικής λεκάνης του Κουρταλιώτη εντός του κόκκινου πλαισίου(Πηγή: Steiakakis et al.,2011)	71
Εικόνα 5.7: Υδρολιθολογικός χάρτης περιοχής μελέτης(Πηγή: Περιφέρεια Κρήτης, 2009)	75
Εικόνα 5.8: Οι χρήσεις γης και οι αντίστοιχοι κωδικοί τους(Πηγή: Corine Land Cover, 2012)	77
Εικόνα 5.9 : Οι σκιαγραφημένες περιοχές με μπλε χρώμα αντιστοιχούν στις Ζώνες Ειδικής Προστασίας (SPA) ενώ με το κόκκινο χρώμα στις Ειδικές Ζώνες Διατήρησης (SCI).	80
Εικόνα 6.1: Αποτύπωση των γεωτρήσεων και των πηγών στην περιοχή μελέτης στο πρόγραμμα ArcGis.	81
Εικόνα 6.2: Το περίγραμμα της περιοχής μελέτης με τις γεωτρήσεις και τις πηγές.	82
Εικόνα 6.3: Οι ισοϋψείς και οι γεωλογικοί σχηματισμοί της περιοχής μελέτης.	82
Εικόνα 6.4: Οι δύο τομές στην περιοχή μελέτης.	85
Εικόνα 6.5 : Τομή A-A1-A2	85
Εικόνα 6.6 : Τομή B-B1	86
Εικόνα 6.7: Συγκεντρωτικά οι λιθολογικές τομές των γεωτρήσεων της περιοχής μελέτης.	86
Εικόνα 6.8: Καθορισμός γενικών παραμέτρων του PTC.	87
Εικόνα 6.9: Αρχικές παράμετροι του PTC.	88
Εικόνα 6.10: Εισαγωγή υδραυλικής αγωγιμότητας 1^{ou} στρώματος στο PTC.	89
Εικόνα 6.11: Οριακές συνθήκες στην περιοχή μελέτης στο PTC.	91
Εικόνα 7.1: Υδραυλικά ύψη (m) της τελευταίας εαρινής περιόδου.	96
Εικόνα 7.2: Ταχύτητες ροής (m/d) της τελευταίας εαρινής περιόδου.	97
Εικόνα 7.3: Απεικόνιση των υδραυλικών υψών (m) για το πρώτο υποθετικό σενάριο.	99
Εικόνα 7.4: Απεικόνιση των υδραυλικών υψών (m) για το τέταρτο ακραίο υποθετικό σενάριο.	102

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Ενδεικτικές τιμές πορώδους για πετρώματα και μη συμπαγή ιζήματα(Πηγή: Freeze and Cheery, 1979).	8
Πίνακας1.2: Ποιοτική και ποσοτική κατάσταση των υπόγειων υδατικών συστημάτων της Ελλάδας(Πηγή: Ελλάδα Έκθεση Κατάστασης Περιβάλλοντος 2018, ΕΚΠΑΑ)	23
Πίνακας 1.3: Απολήψεις από τα υπόγεια υδατικά συστήματα του υδατικού διαμερίσματος της Κρήτης (Πηγή: Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017).	25
Πίνακας 5.1: Βροχομετρικά δεδομένα των σταθμών Λευκόγεια και Σπηλίου(Πηγή: Κατσανικάκης, 2013).....	76
Πίνακας 5.2: Ποσοστό κατανομής των διαφόρων χρήσεων γης στην περιοχή μελέτης.....	78
Πίνακας5.3: Προστατευόμενες Περιοχές Natura 2000 εντός της περιοχής μελέτης(Πηγή: Σαμαριτάκης,2018).....	80
Πίνακας 6.1: Τιμές αρχικών υδραυλικών αγωγιμοτήτων που εισήχθησαν στο PTC.....	90
Πίνακας 6.2: Οι στατιστικοί δείκτες του μοντέλου και τα εύρη διακυμάνσεων τους.....	95
(Πηγή: Moriasi et al., 2007,2015).	95
Πίνακας 7.1: Ποσοστιαίες μεταβολές στα υδραυλικά ύψη των τεσσάρων σεναρίων σε σχέση με την αρχική κατάσταση του συστήματος.....	103

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Τύποι του νερού μέσα στο έδαφος(Πηγή: Θεοχάρης,2015).	3
Σχήμα1.2: Σχηματική απεικόνιση της κατακόρυφης κατανομής του υπόγειου νερού(Πηγή: Λατινόπουλος, 1986).....	4
Σχήμα1.3: Απεικόνιση δύο διαφορετικών στρωμάτων για την εύρεση της συνολικής περατότητας(Πηγή: Καρατζάς,2002).....	11
Σχήμα 3.1: Μέρη ενός μαθηματικού μοντέλου (Πηγή: Essink,2000).	36
Σχήμα 3.2: Πρωτόκολλο μοντελοποίησης για την εφαρμογή ενός μοντέλου(Πηγή: μεταφρασμένο από Anderson and Woessner, 1992).....	40
Σχήμα 4.1: Πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών(Πηγή: Pinder,2002).	53
Σχήμα 4.2: Σχηματική απεικόνιση οριζόντιων πλεγμάτων των πεπερασμένων στοιχείων(Πηγή: Babu et al.,1997).....	56
Σχήμα 4.3: Κομβική κατανομή της ροής q_n ενός στοιχείου μήκους L (Πηγή: Babu et al.,1997).	58
Σχήμα 5.1: Γεωλογική τομή στην περιοχή μελέτης (Πηγή: Στειακάκης και Βαβαδάκης,2012)	67

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Γράφημα 6.1: Απεικόνιση των πραγματικών τιμών στάθμης στο πεδίο σε σχέση με τις τιμές του μοντέλου.	95
Γράφημα 7.1: Ποσοστιαίες μεταβολές των υδραυλικών υψών του πρώτου και του δεύτερου σεναρίου σχετικά με την αρχική κατάσταση όπου με κόκκινο χρώμα συμβολίζεται η μεταβολή μεταξύ των δύο σεναρίων.	100
Γράφημα 7.2: Απεικόνιση των ποσοστιαίων μεταβολών των υδραυλικών υψών σε σχέση με την αρχική κατάσταση για κάθε σενάριο.	103

1. ΥΠΟΓΕΙΑ ΡΟΗ

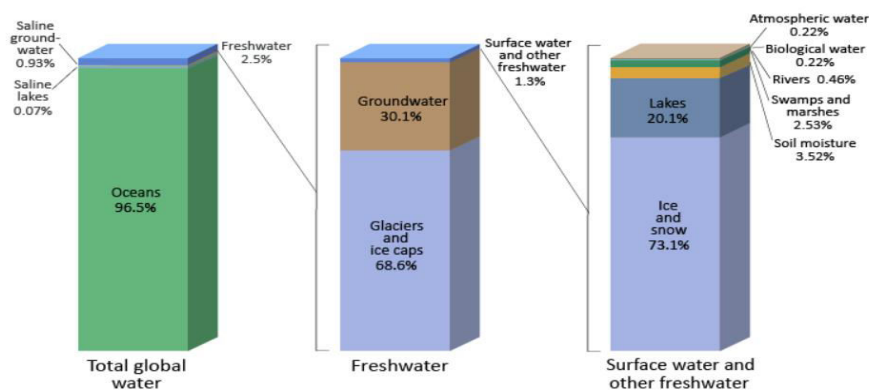
1.1 Γενικά

Το υπόγειο νερό βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της γης, κυκλοφορεί και αποθηκεύεται εντός ορισμένων γεωλογικών σχηματισμών, οι οποίοι επιτρέπουν την διέλευση του νερού εντός της μάζας τους. Αυτοί οι γεωλογικοί σχηματισμοί ορίζονται ως υδροφορείς και το νερό εισέρχεται, κυκλοφορεί και εξέρχεται αυτών δια μέσου των κενών των πετρωμάτων. Τονίζεται ότι το υπόγειο νερό αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα στον υδρολογικό κύκλο με το μεγαλύτερο μέρος του να προέρχεται από την κατείσδυση των βροχοπτώσεων.

Η υπόγεια ροή, επομένως περιγράφεται ως η κίνηση του νερού στο υπέδαφος και συγκεκριμένα στους υδροφορείς. Η ροή του νερού ως κίνηση διέπεται από τις βασικές αρχές της κίνησης όπως είναι η ταχύτητα και η επιτάχυνση. Ανάλογα με τον αν παραμένουν σταθερά ή όχι τα χαρακτηριστικά της ροής στο χώρο και στο χρόνο η ροή διακρίνεται σε δύο τύπους, στην μόνιμη και στην μη μόνιμη ροή. Στην περίπτωση της μόνιμης ροής, η ροή είναι αποκλειστικά συνάρτηση των συντεταγμένων στο σημείο (x,y,z) ενώ στην μη μόνιμη ροή είναι συναρτήσει και του χρόνου δηλαδή των (x,y,z,t) (Στουρνάρας, 2007).

Αναφέρεται ότι, η ανακάλυψη των υπόγειων νερών καθώς και η εκμετάλλευσή τους αποτέλεσε μια από τις πρωταρχικές ανάγκες του ανθρώπου και υπήρξε αντικείμενο συνεχούς αναζήτησης δια μέσου των αιώνων και των διαφόρων πολιτισμών. Επισημαίνεται ότι η κατανομή του νερού στη γη είναι άνιση, καθώς υπάρχουν περιοχές, χώρες ολόκληρες, όπου οι βροχοπτώσεις είναι περιορισμένες και οι επιφανειακοί υδάτινοι πόροι ανεπαρκείς με αποτέλεσμα το υπόγειο νερό να αποτελεί την μοναδική πηγή γλυκού νερού.

Είναι αδιαμφισβήτητο ότι τα υπόγεια ύδατα συγκαταλέγονται στους πιο ανεκτίμητους φυσικούς πόρους που διαθέτει η Γή. Πιο αναλυτικά, από την παγκόσμια κατανομή του συνολικού νερού που υπάρχει στη Γή, μόνον το 3% αντιπροσωπεύει το συνολικό γλυκό νερό. Περίπου το 68% του συνολικού γλυκού νερού, βρίσκεται δεσμευμένο στα παγοκαλύμματα (παγόβουνα) όπου καθίσταται σε μεγάλο βαθμό μη διαθέσιμο προς χρήση. Μετά τα παγοκαλύμματα, τα υπόγεια ύδατα αποτελούν τα αμέσως επόμενα μεγαλύτερα αποθέματα γλυκού νερού στον πλανήτη καταλαμβάνοντας το υπόλοιπο 30% ενώ τα επιφανειακά ύδατα καταλαμβάνουν ένα ποσοστό μόλις 1,3% του συνολικού γλυκού νερού και βρίσκονται σε ποτάμια, λίμνες και βάλτους (εικ. 1.1)(Shiklomanov,1993).



Εικόνα 1.1: Κατανομή του νερού της Γής (Πηγή: Shiklomanov,1993).

1.2 Κατηγορίες εδαφικού νερού

Η συμπεριφορά του νερού μέσα στο έδαφος είναι συναρτήσει πολλών μεταβαλλόμενων παραγόντων τόσο χωρικά, όπως είναι οι φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους, το βάθος όσο και χρονικά ανάλογα με το κλίμα (O'Geen, 2012). Ανάλογα με τις δυνάμεις που συγκρατούν και μετακινούν το νερό μέσα στο έδαφος διακρίνονται οι κάτωθι κατηγορίες (σχήμα 1.1).

Ι. Νερό συγκράτησης ή κατακράτησης:

Ως νερό συγκράτησης ορίζεται εκείνο το είδος του νερού για το οποίο δεν υφίστανται οι νόμοι της βαρύτητας και επομένως δεν μετέχει στην υπόγεια κυκλοφορία. Με βάση τις δυνάμεις που δρουν διακρίνεται σε υγροσκοπικό, υμενώδες και τριχοειδές.

α) Υγροσκοπικό νερό

Εντοπίζεται στους μικροπόρους και στις μικροαυλακώσεις των κόκκων σχηματίζοντας απομονωμένα τμήματα νερού. Το νερό αυτό δεν κινείται υπό την επίδραση της βαρύτητας και δεν μεταβιβάζει την υδροστατική πίεση καθώς συγκρατείται από τους κόκκους με ισχυρές απορροφητικές δυνάμεις. Η κοκκομετρική σύσταση του υλικού, η θερμοκρασία και η πίεση ρυθμίζουν την ποσότητα του νερού αυτού ενώ η απομάκρυνση γίνεται μόνο μέσω της εξάτμισης, σαν ατμός.

Το υγροσκοπικό νερό καταλαμβάνει ένα τμήμα του ολικού πορώδους, το οποίο εξαρτάται από την κοκκομετρική σύσταση του υλικού. Για παράδειγμα, σε λεπτόκοκκο υλικό όπως άργιλος, ιλύς, το ποσοστό συμμετοχής του υγροσκοπικού νερού είναι αρκετά μεγάλο και τείνει να ισούται με το ολικό πορώδες. Ενώ για χοντρόκοκκους σχηματισμούς και ρωγμώδη πετρώματα καταλαμβάνει ένα πολύ μικρό τμήμα του ολικού πορώδους από δέκατα της μονάδας μέχρι μερικές μονάδες.

β) Υμενώδες Νερό

Χαρακτηρίζεται υμενώδες το νερό που επικαλύπτει με ένα πολύ λεπτό υδάτινο υμένιο τους κόκκους του εδάφους. Συγκρατείται από δυνάμεις συνάφειας και ως εκ τούτο χαρακτηρίζεται και ως νερό συνάφειας. Ομοίως με το υγροσκοπικό, η κίνηση του δεν επηρεάζεται από την βαρύτητα και δεν μεταβιβάζει την υδροστατική πίεση. Η απομάκρυνση του μπορεί να επιτευχθεί με φυγοκέντρωση και εξάτμιση. Βέβαια, μπορεί να μετατοπισθεί από κόκκο σε κόκκο λόγω μοριακών έλξεων. Καταλαμβάνει ένα τμήμα του πορώδους συναρτήσει της κοκκομετρικής σύστασης του υλικού, όπως και το υγροσκοπικό νερό.

γ) Τριχοειδές Νερό

Είναι το νερό που συγκρατείται με τριχοειδείς δυνάμεις και καταλαμβάνει πόρους και κενά με τριχοειδή διάμετρο. Επισημαίνεται ότι η ποσότητα του τριχοειδούς νερού ή αλλιώς το ύψος της τριχοειδούς ζώνης εξαρτάται άμεσα από την κοκκομετρική σύσταση του εδάφους. Όταν η διάμετρος των κόκκων μειώνεται, η ποσότητα του τριχοειδούς νερού αυξάνεται, αυτό βέβαια συμβαίνει μέχρι ένα ορισμένο σημείο καθότι με περαιτέρω μείωση της διαμέτρου, μειώνεται και η ποσότητα του τριχοειδούς νερού. Διακρίνεται σε δύο κατηγορίες, στο ανοικτό ή απομονωμένο ή ασυνεχές τριχοειδές νερό και στο κλειστό ή συνεχές τριχοειδές.

- Ανοικτό ή απομονωμένο τριχοειδές νερό

Βρίσκεται πάνω από το κλειστό τριχοειδές χωρίς να αποτελεί συνέχεια του, συμπληρώνοντας μερικά μόνο τριχοειδή κενά καθώς στα υπόλοιπα παρεμβάλλεται αέρας. Ομοίως με το υγροσκοπικό και το υμενώδες, το τριχοειδές νερό δεν κινείται υπό την βαρύτητα, μεταβιβάζει όμως την υδροστατική πίεση. Απομακρύνεται από το έδαφος με φυγοκέντρωση.

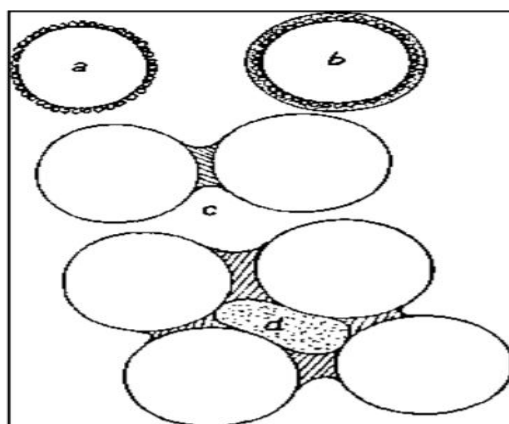
- Κλειστό ή συνεχές τριχοειδές νερό

Αποτελεί το κορυφαίο τμήμα του υδροφόρου ορίζοντα, βρίσκεται δηλαδή πάνω από την στάθμη του υδροφόρου καταλαμβάνοντας το σύνολο των κενών που έχουν τριχοειδή διάμετρο. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες κατηγορίες κινείται υπό την επίδραση της βαρύτητας, μεταβιβάζει την υδροστατική πίεση και απομακρύνεται από το έδαφος με φυσική αποστράγγιση. Το νερό αυτό υπάγεται στην κατηγορία του νερού βαρύτητας.

II. Νερό βαρύτητας:

Νερό βαρύτητας ονομάζεται το νερό που καταλαμβάνει τους μεγάλους πόρους, κινείται μέσω της βαρύτητας ελεύθερα για αυτό και χαρακτηρίζεται και ως ελεύθερο νερό. Επιπλέον μεταβιβάζει την υδροστατική πίεση και απομακρύνεται είτε με τεχνικές μεθόδους (άντληση) είτε με φυσικό τρόπο μέσω της ροής (πηγές). Το βαρυτικό νερό και το κλειστό τριχοειδές νερό συνιστούν το υπόγειο νερό που κινείται ελεύθερα στο έδαφος ανάλογα βέβαια με τους γεωλογικούς σχηματισμούς και τις υδραυλικές συνθήκες.

Το νερό βαρύτητας δεν καταλαμβάνει ποτέ τον όγκο του ολικού πορώδους, παρά μόνο ένα τμήμα του. Συγκεκριμένα, το τμήμα του ολικού πορώδους που καταλαμβάνει το βαρυτικό νερό είναι το ενεργό πορώδες, το οποίο όπως αναλύεται παρακάτω αποτελείται από το σύνολο των διακενών που επιτρέπουν την διέλευση του νερού.



Σχήμα 1.1: Τύποι του νερού μέσα στο έδαφος. Οι σκιαγραφημένες περιοχές περιγράφουν το α) υγροσκοπικό νερό, β) υμενώδες, γ) τριχοειδές και δ) το νερό βαρύτητας.

(Πηγή: Θεοχάρης, 2015).

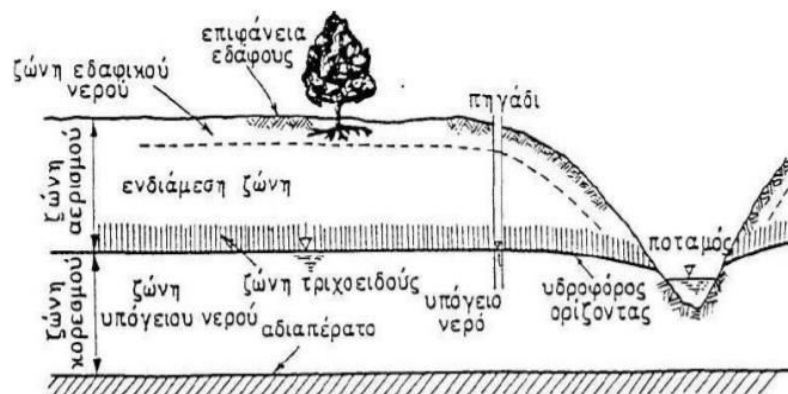
1.3 Κατακόρυφη κατανομή του υπόγειου νερού

Όπως προαναφέρθηκε μια ποσότητα του νερού κατεισδύσεως συγκρατείται από τις δυνάμεις του εδάφους και μια άλλη κινείται ελεύθερα υπό την επίδραση της βαρύτητας. Σε μια κατακόρυφη κατανομή του υπόγειου νερού στο υπέδαφος διακρίνονται δύο ζώνες, η ζώνη αερισμού ή ακόρεστη ζώνη και η ζώνη κορεσμού (σχήμα 1.2). Η ροή στην ζώνη αερισμού είναι διφασική καθώς τα διάκενα κατέχονται εν μέρει από αέρα και νερό ενώ στην ζώνη κορεσμού είναι μονοφασική διότι τα διάκενα των πετρωμάτων καταλαμβάνονται μόνο από νερό, το οποίο κινείται ελεύθερα.

Η ζώνη αερισμού υποδιαιρείται σε τρεις υποζώνες, στην υποζώνη εδαφικού νερού, στην ενδιάμεση υποζώνη και στην τριχοειδή. Η υποζώνη του εδαφικού νερού αποτελεί το ανώτερο τμήμα του εδάφους και ορίζεται από την επιφάνεια μέχρι την ενδιάμεση ζώνη. Το πάχος της ζώνης αυτής εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους, την βλάστηση και τους κλιματικούς παράγοντες (θερμοκρασία, βροχοπτώσεις κλπ), οι οποίοι κατ' επέκταση επηρεάζουν ανάλογα την υγρασία. Το νερό που περιέχεται σε αυτή την υποζώνη είναι νερό συγκρατήσεως (υγροσκοπικό και υμενώδες).

Η ενδιάμεση υποζώνη βρίσκεται κάτω από την υποζώνη εδαφικού νερού και το πάχος της εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους. Η υποζώνη αυτή περιέχει νερό συγκρατήσεως (υγροσκοπικό και τριχοειδές). Η τριχοειδής υποζώνη επηρεάζεται από τον τύπο του εδάφους και συγκεκριμένα, το ύψος της είναι αντιστρόφως ανάλογο με το μέγεθος των διακενών. Το νερό της τριχοειδής υποζώνης σχετίζεται άμεσα με το νερό του υδροφόρου ορίζοντα.

Η ζώνη κορεσμού είναι η βαθύτερη ζώνη και αντιπροσωπεύει ουσιαστικά το υδροφόρο στρώμα με την ανώτερη επιφάνεια να θεωρείται ο ορίζοντας του υπόγειου νερού. Χαρακτηρίζεται ως κορεσμένη λόγω του ότι τα διάκενα των πετρωμάτων της ζώνης αυτής καταλαμβάνονται μόνο από νερό. Από το νερό που περιέχεται στην ζώνη κορεσμού, ένα μέρος αντιστοιχεί στο κλειστό τριχοειδές νερό και το υπόλοιπο στο νερό βαρύτητας. Επισημαίνεται ότι η κορεσμένη ζώνη έχει ιδιαίτερη σημασία για την υδρογεωλογία καθότι είναι η μόνη που μπορεί να τροφοδοτήσει τα υδροληπτικά έργα (γεωτρήσεις, πηγάδια κλπ).



Σχήμα 1.2: Σχηματική απεικόνιση της κατακόρυφης κατανομής του υπόγειου νερού.
(Πηγή: Λατινόπουλος, 1986)

1.4 Υπόγειοι Υδροφορείς

Ως υδροφορέας ή υδροφόρος χαρακτηρίζεται κάθε γεωλογικός σχηματισμός, ο οποίος μπορεί να αποθηκεύσει μια επαρκή ποσότητα νερού και να τη μεταβιβάσει με ρυθμό υδρολογικά σημαντικό (Dingman, 1994). Από τα παραπάνω προκύπτει ότι τα κύρια χαρακτηριστικά των υδροφορέων είναι η ικανότητα τους να αποθηκεύουν το νερό και να επιτρέπουν την διέλευση του εντός της μάζας τους. Η ροή του νερού στους υπόγειους υδροφορείς γίνεται συνήθως μέσω των πόρων για αυτό και συχνά αναφέρεται και ως ροή σε πορώδη μέσα, δύναται όμως να γίνει και μέσω των διαφόρων ασυνεχειών (ρήγματα, διακλάσεις).

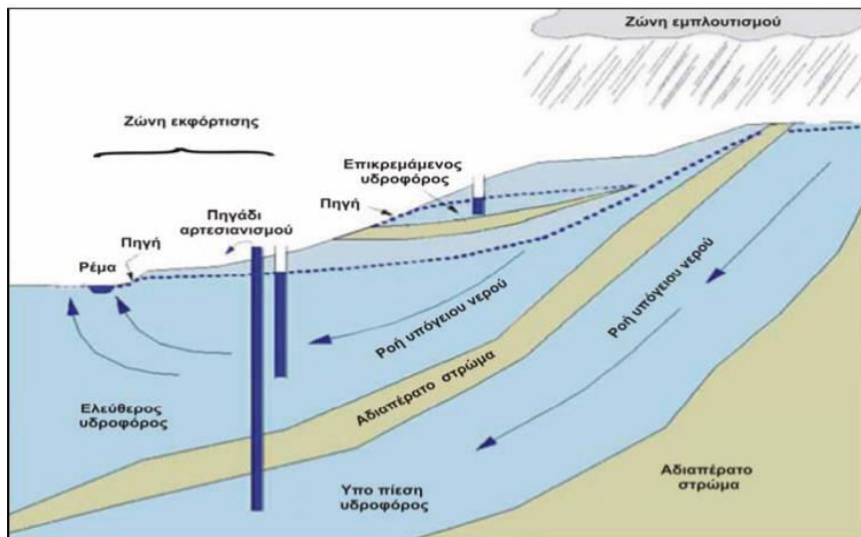
Με βάση τους γεωλογικούς σχηματισμούς και τις υδραυλικές συνθήκες οι υπόγειοι υδροφορείς ταξινομούνται σε τέσσερις κατηγορίες, οι οποίες περιλαμβάνουν τους ελεύθερους ή φρεάτιους υδροφορείς, τους περιορισμένους ή υπό πίεση, τους μερικώς υπό πίεση και τους ημιελεύθερους. Επισημαίνεται ότι ο χαρακτηρισμός ενός υδροφορέα προκύπτει από την περατότητα του γεωλογικού σχηματισμού που βρίσκεται άνωθεν του υδροφορέα.

Όταν το άνω όριο του υδροφορέα είναι η ελεύθερη επιφάνεια του υπόγειου νερού (φρεάτιος ορίζοντας) τότε χαρακτηρίζεται ως **ελεύθερος ή φρεάτιος υδροφορέας**. Συνήθως οι ελεύθεροι υδροφορείς παρατηρούνται σε μικρά βάθη, μέσα σε προσχώσεις ή αλλουβιακές αποθέσεις. Η πίεση του υπόγειου νερού ισούται με την ατμοσφαιρική πίεση καθώς πρόκειται για ένα σύστημα ανοικτό στην επιφάνεια και επομένως ο αέρας και το νερό έρχονται σε απευθείας επαφή μέσω των πόρων. Οι ελεύθεροι υδροφορείς τροφοδοτούνται απευθείας από το νερό που κατεισδύει από την επιφάνεια του εδάφους ενώ η εκμετάλλευση τους γίνεται μέσω της διάνοιξης πηγαδιών (φρεάτων).

Όταν τα άνω και κάτω όρια ενός υδροφορέα περιορίζονται από σχηματισμούς πρακτικά αδιαπέρατους τότε ο υδροφορέας λέγεται **περιορισμένος ή υπό πίεση**. Σε αυτή την περίπτωση η πίεση του νερού είναι μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής πίεσης καθώς το σύστημα δεν είναι ανοικτό στην επιφάνεια και έτσι ο αέρας και το νερό δεν έρχονται σε άμεση επαφή μέσω των πόρων. Εάν ανορυχθεί μια γεώτρηση μέσα σε έναν περιορισμένο υδροφορέα, η πιεζομετρική επιφάνεια (δηλαδή η επιφάνεια που ορίζεται από το υψόμετρο του νερού) θα βρίσκεται υψηλότερα από το όριο της επαφής του υδροφορέα με τον υπερκείμενο αδιαπέρατο σχηματισμό.

Πρόσθετα, υπό ορισμένες συνθήκες δύναται το νερό από τις γεωτρήσεις εντός των περιορισμένων υδροφορέων να αναβλύζει από μόνο του χωρίς τη χρήση κάποιου αντλητικού συγκροτήματος εξαιτίας της μεγάλης πίεσης που έχει. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αρτεσιανισμός και ο υδροφορέας χαρακτηρίζεται ως αρτεσιανός. Δεδομένου του υπερκείμενου αδιαπέρατου σχηματισμού, η τροφοδοσία σε έναν περιορισμένο υδροφορέα γίνεται διαμέσου της πλευρικής ροής των υπόγειων υδάτων από περιοχές όπου ο υδροφορέας είναι εκτεθειμένος στην επιφάνεια χωρίς να μεσολαβεί κάποιο αδιαπέρατο στρώμα.

Ένα συγκριτικό πλεονέκτημα των περιορισμένων υδροφορέων, εν αντιθέσει με τους ελεύθερους, αποτελεί το γεγονός ότι είναι λιγότερο τρωτοί όσον αφορά την μικροβιακή μόλυνση, λόγω της αδιαπερατότητας του υπερκείμενου σχηματισμού, η οποία αποτελεί ένα φυσικό φραγμό αλλά και του αργού ρυθμού ροής του υπόγειου νερού. Αυτοί οι δύο παράγοντες δρουν ανασταλτικά για τις μολυσματικές ουσίες επηρεάζοντας τον χρόνο παραμονής τους στο υπέδαφος.



Εικόνα 1.2: Οι δύο βασικές κατηγορίες υπόγειων υδροφορέων.
(Πηγή: Βουδούρης, Θέματα Υδρογεωλογίας Περιβάλλοντος)

Έκτος από τις προαναφερθέντες δύο κύριες κατηγορίες υδροφορέων, οι οποίες αποτελούν και τον βασικό διαχωρισμό των υδροφορέων, οι επόμενες δύο κατηγορίες προέρχονται από διαφοροποιήσεις των πρώτων. Πολύ συχνά παρατηρούνται εναλλαγές στρωμάτων με διαφορετική λιθολογική σύσταση και επομένως διαφορετική περατότητα.

Πιο συγκεκριμένα, εάν ο υπερκείμενος του υδροφορέα σχηματισμός έχει περατότητα πολύ μικρότερη από αυτόν, τότε ο υδροφορέας χαρακτηρίζεται ως **μερικώς υπό πίεση υδροφορέας**. Η διαφορά με τους περιορισμένους ή υπό πίεση υδροφορείς έγκειται στο γεγονός ότι το υπερκείμενο στρώμα δεν είναι αδιαπέρατο αλλά έχει μια μικρή περατότητα. Εάν η περατότητα του υπερκείμενου σχηματισμού είναι μεγαλύτερη από εκείνη της προηγούμενης περίπτωσης, μικρότερη όμως από την περατότητα του υδροφορέα τότε ο υδροφορέας χαρακτηρίζεται **ημιελεύθερος**.

Ξεχωριστή περίπτωση αποτελεί ο **επικρεμάμενος υδροφορέας**, όπου πρόκειται για έναν απομονωμένο και μικρό υδροφορέα, τοπικού χαρακτήρα, πάνω από τον κύριο υδροφόρο ορίζοντα της περιοχής. Αναπτύσσεται στην ζώνη αερισμού, έχει δική του στάθμη και εκφορτίζεται μέσω κάποιας πηγής. Κάτωθεν του επικρεμάμενου υδροφορέα βρίσκεται αδιαπέρατος σχηματισμός.

Οι υπόγειοι υδροφορείς, πέραν της άνωθεν ταξινόμησης, πετρογραφικά διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, στους καρστικούς και τους πορώδεις. Οι καρστικοί υδροφορείς αναπτύσσονται στους ανθρακικούς σχηματισμούς και οι πορώδεις στους κοκκώδεις (τεταρτογενείς και νεογενείς αποθέσεις).

1.5 Ιδιότητες και υδραυλικά χαρακτηριστικά των υδροφορέων

Ανάμεσα στις πιο σημαντικές παραμέτρους, υδραυλικές και μη, που χαρακτηρίζουν έναν υδροφορέα είναι το πορώδες(n), το υδραυλικό φορτίο(h) και η υδραυλική κλίση(i), η υδραυλική αγωγιμότητα(k), η μεταβιβαστικότητα(T) και ο συντελεστής εναποθήκευσης (S).

Πορώδες (n)

Το (ολικό) πορώδες ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των διακενών (V_v) ενός πετρώματος ή πορώδους μέσου προς τον συνολικό όγκο του πετρώματος ή του πορώδους μέσου (V_t) και εκφράζεται ως:

$$n = \frac{V_t - V_s}{V_t} = \frac{V_v}{V_t} \quad (1.1)$$

όπου, ο όγκος των διακενών (V_v) προκύπτει από την αφαίρεση του όγκου των στερεών (V_s) από τον συνολικό όγκο (V_t). Το πορώδες αποτελεί βασική παράμετρο καθότι παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ποσότητα ύδατος που μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα γεωλογικό σχηματισμό και ως εκ τούτου, επομένως επιδρά στην αποθηκευτικότητα των υπόγειων υδροφορέων.

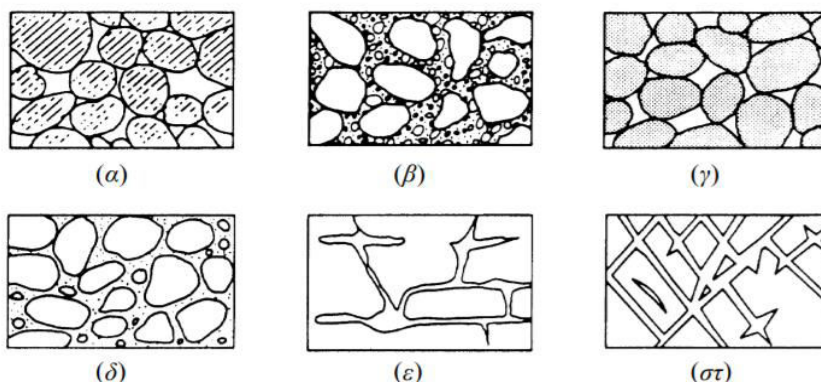
Ανάλογα με την αιτία προέλευσης, το πορώδες διακρίνεται σε πρωτογενές και δευτερογενές. Το πρωτογενές πορώδες οφείλεται στα κενά μεταξύ των κόκκων κατά την δημιουργία του πετρώματος ενώ το δευτερογενές πορώδες οφείλεται στα κενά που σχηματίζονται λόγω διαφόρων διεργασιών που υφίσταται το πέτρωμα μετά την δημιουργία του όπως θραύση, τεκτονισμός, διάλυση (πχ καρστικοί ασβεστόλιθοι), αποσάθρωση. Εάν ένα πέτρωμα εμφανίζει και πρωτογενές και δευτερογενές πορώδες τότε αυτό αναφέρεται ως διπλό πορώδες.

Με βάση το πορώδες, τα πετρώματα διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στα κοκκώδη πετρώματα όπου η κίνηση του νερού γίνεται μέσα από τους πόρους και στα ρωγμώδη πετρώματα όπου το νερό κινείται μέσα από ένα σύστημα ρωγμών και εγκοίλων (καρστικοί ασβεστόλιθοι). Επισημαίνεται ότι υπάρχουν πετρώματα που εμφανίζουν συνδυασμό των παραπάνω δυο, δηλαδή πόρους και ρωγμές.

Στα κοκκώδη πετρώματα το πορώδες εξαρτάται από την διάταξη των κόκκων, το σχήμα των κόκκων καθώς και από την ομοιομορφία τους. Η διάταξη των κόκκων αποτελεί ουσιαστικό παράγοντα στην διαμόρφωση του πορώδους σε ένα πέτρωμα καθότι στην κυβική διάταξη παρατηρείται το μεγαλύτερο πορώδες (47,6%) ενώ στην ρομβοεδρική διάταξη το μικρότερο (25,9%). Όσον αφορά το σχήμα, οι γωνιώδεις κόκκοι εμφανίζουν μικρότερο πορώδες σε σχέση με τους σφαιρικούς κόκκους. Σχετικά με την ομοιομορφία, όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός ανομοιομορφίας, δηλαδή διαφορετικά μεγέθη κόκκων σε ένα σχηματισμό, τόσο μικρότερο είναι το πορώδες καθότι οι μικρότεροι κόκκοι τείνουν να καταλαμβάνουν το κενό ανάμεσα στους μεγαλύτερους κόκκους.

Στα ρωγμώδη πετρώματα το πορώδες εξαρτάται από την πυκνότητα και το μέγεθος εμφάνισης των ρωγμών και των εγκοίλων. Οι ρωγμές αποτελούν την κύρια αιτία εμφάνισης πορώδους στα ρωγμώδη πετρώματα και συνιστούν το δευτερογενές πορώδες. Συγκεκριμένα, το άνοιγμα των ρωγμών είναι που καθορίζει το πορώδες σε αυτού του

είδους τα πετρώματα. Για παράδειγμα σε έναν ανθρακικό σχηματισμό, το νερό εισέρχεται εντός των ρωγμών και τις διευρύνει λόγω διάλυσης των τοιχωμάτων τους δημιουργώντας καρστικά έγκοιλα εν αντιθέσει με άλλα πετρώματα όπως πχ αργιλικά όπου οι ρωγμές δεν διευρύνονται και δεσμεύονται από την συσσώρευση υλικών. Στην εικόνα (1.3) που ακολουθεί απεικονίζεται η συσχέτιση ανάμεσα στην διάταξη των κόκκων και διάκενων με το πορώδες.



Εικόνα 1.3: Σχηματική απεικόνιση της δομής ενός πετρώματος με το πορώδες για διάφορες περιπτώσεις α) Καλά ταξινομημένη ιζηματογενής απόθεση με υψηλό πορώδες β) ελάχιστα ταξινομημένη απόθεση με χαμηλό πορώδες γ) καλά ταξινομημένη ιζηματογενής απόθεση που αποτελείται από πορώδεις κόκκους με υψηλό συνολικό πορώδες δ) καλά ταξινομημένη ιζηματογενής απόθεση με χαμηλό πορώδες λόγω της πλήρωσης των διακενών από ορυκτά υλικά ε) πορώδες λόγω χημικής διάλυσης στ) πορώδες λόγω ρηγματώσης (Πηγή: Meinzer, 1923).

Παρακάτω παρατίθενται στον πίνακα (1.1) χαρακτηριστικές τιμές του πορώδους για διάφορα γεωλογικά μέσα.

Πέτρωμα	Πορώδες
Ρηγματώδης Βασάλτης	0.05-0.50
Καρστικός Ασβεστόλιθος	0.05-0.50
Ψαμμίτης	0.05-0.30
Ασβεστόλιθος, Δολομίτης	0.00-0.20
Σχιστόλιθος	0.00-0.10
Ρηγματώδης Κρυσταλλικό πέτρωμα	0.00-0.10
Μη συμπαγή ιζήματα	
Χαλίκι	0.25-0.40
Άμμος	0.25-0.50
Ιλύς	0.35-0.50
Πηλός	0.40-0.70

Πίνακας 1.1: Ενδεικτικές τιμές πορώδους για πετρώματα και μη συμπαγή ιζήματα. (Πηγή: Freeze and Cheery, 1979).

Για την υδρογεωλογία, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει κυρίως το ενεργό πορώδες ή ειδική απόδοση S_y (Specific yield), που εκφράζει τον όγκο του συνόλου των κενών μέσω των οποίων κινείται το νερό ελεύθερα, υπό την επίδραση της βαρύτητας, προς τον συνολικό όγκο. Η διαφορά ανάμεσα στο ενεργό πορώδες (S_y) και στο ολικό πορώδες(n) είναι ότι στο ενεργό πορώδες δεν συμπεριλαμβάνονται οι πόροι (διάκενα) που είναι απομονωμένοι και επομένως χωρίς υδραυλική επικοινωνία μεταξύ τους καθότι δεν ευνοούν στην κίνηση του υπόγειου νερού. Το ενεργό πορώδες είναι πάντα μικρότερο ή ίσο του ολικού πορώδους ανάλογα με το υλικό, παραδείγματος χάριν, στους χονδρόκοκκους σχηματισμούς εν γένει ισούται με το ολικό πορώδες ενώ στους λεπτόκοκκους μπορεί να αποτελεί το 10-20% του ολικού πορώδους.

Μια άλλη παράμετρος που σχετίζεται με το ολικό πορώδες είναι η ειδική κατακράτηση S_r (Specific Retention), η οποία περιγράφει τον όγκο των πόρων που πληρούνται από νερό κατακράτησης (υγροσκοπικό νερό), το οποίο δεν επηρεάζεται από την βαρύτητα και δεν συμμετέχει στην υπόγεια κυκλοφορία, προς τον συνολικό όγκο. Είναι εμφανές ότι το βαρυτικό νερό συνδέεται με το ενεργό πορώδες και το υγροσκοπικό νερό με την ειδική κατακράτηση.

Ισχύει ότι :

$$\text{Πορώδες } (n) = \text{Ενεργό πορώδες } (S_y) + \text{Ειδική Κατακράτηση } (S_r)$$

Υδραυλικό φορτίο (h) και Υδραυλική κλίση (i)

Η κλίση ενός υδροφόρου ορίζοντα υποδεικνύει την κατεύθυνση της κίνησης των υπόγειων υδάτων. Η ροή (κίνηση) των υπόγειων υδάτων οφείλεται στην διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο θέσεων, που είναι η διαφορά στο υδραυλικό φορτίο. Το συνολικό υδραυλικό φορτίο (h) εκφράζει την συνολική ενέργεια ανά μονάδα όγκου (βάρους) του νερού και προκύπτει από το άθροισμα της κινητικής, της δυναμικής και της υδροστατικής ενέργειας. Η εξίσωση για το συνολικό υδραυλικό φορτίο ορίζεται ως:

$$h = v^2/2g + z + P/\rho g \quad (1.2)$$

Επειδή όμως η κινητική ενέργεια είναι πολύ μικρή λόγω, της βραδείας κίνησης του υπόγειου νερού και μπορεί να απαιλειφτεί, η σχέση (1.2) γράφεται ως:

$$h = z + P/\gamma_w \quad (1.3)$$

όπου z είναι το φορτίο θέσης, δηλαδή η απόσταση ενός σημείου πάνω από ένα επίπεδο αναφοράς (από το 1929 ως επίπεδο αναφοράς έχει καθοριστεί η επιφάνεια της θάλασσας), P η υδροστατική πίεση και γ_w το ειδικό βάρος του νερού (ισχύει $\gamma_w = \rho g$). Επισημαίνεται ότι το υδραυλικό φορτίο εκφράζεται σε μονάδες μήκους.

Το συνολικό υδραυλικό φορτίο h μειώνεται προς την διεύθυνση κίνησης του υπόγειου νερού, δηλαδή από θέσεις υψηλού υδραυλικού φορτίου προς θέσεις χαμηλού φορτίου. Επομένως, η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου (dh) ανά μονάδα μήκους (dl) κατά την κίνηση του νερού ονομάζεται υδραυλική κλίση(i) και υπολογίζεται από την σχέση:

$$i = dh/dl \quad (1.4)$$

Υδραυλική Αγωγιμότητα (Συντελεστής Περαιτότητας k)

Ο πρώτος που εισήγαγε την έννοια της υδραυλικής αγωγιμότητας ήταν ο Henry Darcy, ενώ είναι αδιαμφισβήτητο ότι αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους όσον αφορά την υπόγεια ροή. Η υδραυλική αγωγιμότητα (Hydraulic Conductivity) εκφράζει την ικανότητα των γεωλογικών σχηματισμών να επιτρέπουν την διείσδυση και την κυκλοφορία του νερού εντός της μάζας τους. Περιγράφει τον όγκο του νερού που διέρχεται ανά μονάδα επιφάνειας – διατομής του υδροφόρου ορίζοντα ανά μονάδα μεταβολής της υδραυλικής κλίσης. Υπολογίζεται μέσω του νόμου του Darcy (1.5) όπου Q η παροχή, A η επιφάνεια διατομής, i η υδραυλική κλίση και έχει μονάδες σε m/sec.

$$k = Q A i \quad (1.5)$$

Η υδραυλική αγωγιμότητα εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά του πορώδους μέσου (πχ κοκκομετρική διαβάθμιση, διάταξη) όσο και από τις ιδιότητες του ρευστού (πχ πυκνότητα, ιξώδες). Επισημαίνεται ότι δεν θα πρέπει να συγχέεται με την ειδική διαπερατότητα (intrinsic permeability) k_s , η οποία αποτελεί ιδιότητα μόνο για το πορώδες μέσο. Η διαπερατότητα k_s συνδέεται με την υδραυλική αγωγιμότητα k με την παρακάτω σχέση (1.6) όπου μ είναι το ιξώδες του ρευστού, ρ η πυκνότητα του ρευστού και g η επιτάχυνση της βαρύτητας.

$$k_s = k \mu / \rho g \quad (1.6)$$

Η υδραυλική αγωγιμότητα ή περατότητα ποικίλλει καθώς η υδρογεωλογική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών είναι διαφορετική. Αναφέρεται ότι η υδρογεωλογική συμπεριφορά ενός σχηματισμού είναι απόρροια πολλών παραγόντων όπως η ιζηματολογία, η γεωλογία και η τεκτονική. Ως εκ τούτου, με βάση την συμπεριφορά των σχηματισμών ως προς την περατότητα, οι λιθολογικοί σχηματισμοί διακρίνονται σε διαπερατοί, ημιπερατοί και αδιαπέρατοι.

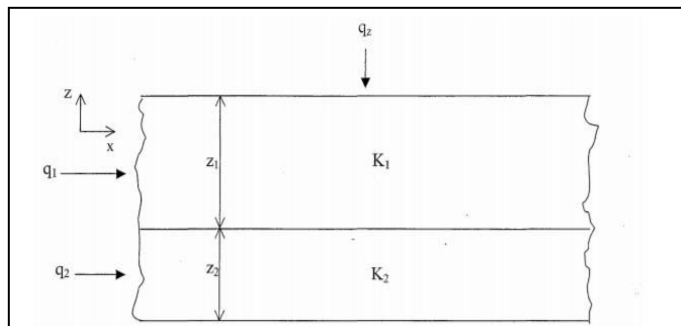
Διαπερατοί χαρακτηρίζονται όταν ο συντελεστής περατότητας k λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες ή ίσες της τάξεως 10^{-5} m/sec, δηλαδή $k \geq 10^{-5}$ m/sec. Αντίστοιχα ημιπερατοί χαρακτηρίζονται όταν ο συντελεστής περατότητας κυμαίνεται από 10^{-5} μέχρι 10^{-7} m/sec δηλαδή $10^{-5} > k > 10^{-9}$ m/sec ενώ αδιαπέρατοι ή υδατοστεγείς για k μικρότερο του 10^{-9} δηλαδή $k < 10^{-9}$ m/sec.

Η υδραυλική αγωγιμότητα στα φυσικά εδάφη δεν παραμένει σταθερή αλλά μεταβάλλεται χωρικά, από σημείο σε σημείο αλλά και ως προς την διεύθυνση. Αυτό βέβαια υποδηλώνει ότι η υδραυλική αγωγιμότητα συσχετίζεται με την ύπαρξη ομοιογένειας ή μη και της ισοτροπίας ή μη. Συγκεκριμένα, στους ετερογενείς υδροφορείς η υδραυλική αγωγιμότητα αλλάζει από θέση σε θέση και στους ανισότροπους υδροφορείς μεταβάλλεται ανά διεύθυνση και επομένως απαιτείται ο προσδιορισμός της στις τρεις κύριες διευθύνσεις.

Πρόσθετα, όταν υπάρχουν εναλλαγές διαφορετικών λιθολογικά στρωμάτων, όπως συμβαίνει για παράδειγμα στις προσχωσιγενείς λεκάνες, τότε υπάρχουν και διαφορετικοί συντελεστές περατότητας k για κάθε ένα στρώμα. Λόγω της διάταξης αυτής, ο συντελεστής περατότητας k είναι διαφορετικός στις διευθύνσεις παράλληλα προς την στρώση και κάθετα προς αυτήν. Επομένως, για την εύρεση της περατότητας των στρωμάτων συνολικά,

θα πρέπει ο συντελεστής περατότητας k να προσδιοριστεί κάθετα και παράλληλα προς την στρώση.

Πιο αναλυτικά, εάν θεωρήσουμε ότι έχουμε δύο διαφορετικά στρώματα με διαφορετικά πάχη z_1, z_2 και διαφορετικές υδραυλικές αγωγιμότητες k_1, k_2 για την εύρεση της συνολικής περατότητας, k_x παράλληλα προς την στρώση και k_z κάθετα προς αυτή, ισχύει (σχήμα 1.3):



Σχήμα 1.3: Απεικόνιση δύο διαφορετικών στρωμάτων για την εύρεση της συνολικής περατότητας.
(Πηγή: Καρατζάς, 2002)

$$K_x = \frac{K_1 z_1 + K_2 z_2}{z_1 + z_2}$$

$$K_z = \frac{z_1 + z_2}{\frac{z_1}{K_1} + \frac{z_2}{K_2}}$$

Μεταβιβαστικότητα (T)

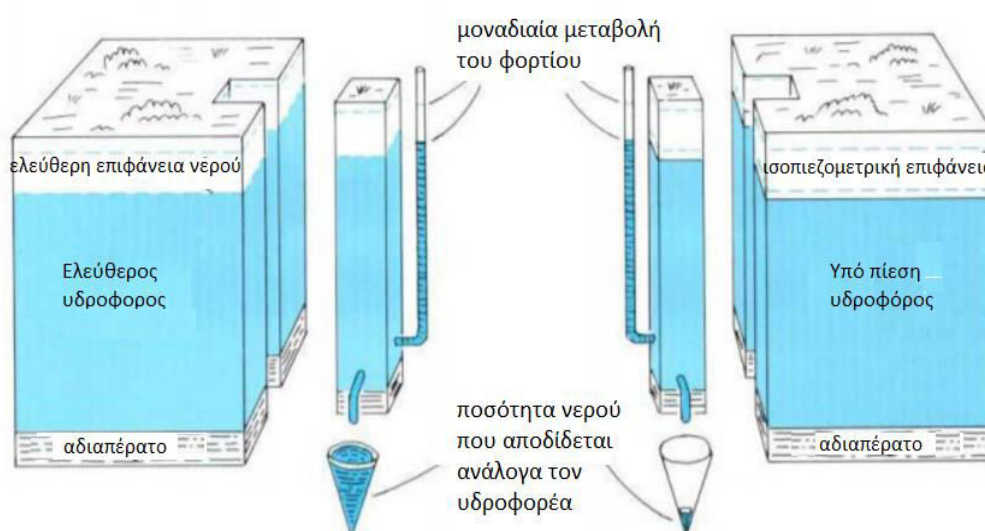
Αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές υδραυλικές παραμέτρους σε έναν υδροφόρο ορίζοντα καθότι αντιπροσωπεύει την ικανότητα του υδροφόρου να μεταβιβάζει το νερό, επιτρέποντας, επομένως την διέλευση του νερού μέσα σε αυτόν. Η μεταβιβαστικότητα ορίζεται ως το γινόμενο της υδραυλικής αγωγιμότητας (K) επί το κορεσμένο πάχος (b) του υδροφόρου ορίζοντα, όπου:

$$T = K \cdot b \quad (1.7)$$

Πρόκειται για μια ιδιότητα που χρήζει περαιτέρω ανάλυσης και ουσιαστικής κατανόησης καθώς καθορίζει την συνολική απόδοση των υπόγειων υδάτων. Ένας υδροφόρος ορίζοντας μπορεί να έχει μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα (K) αλλά μικρό κορεσμένο πάχος (b) με αποτέλεσμα την περιορισμένη απόδοση υδάτων (Davis et al., 2003). Επειδή η μεταβιβαστικότητα εξαρτάται τόσο από την υδραυλική αγωγιμότητα όσο και από το κορεσμένο πάχος, τα οποία δεν παραμένουν σταθερά, αλλά μεταβάλλονται από περιοχή σε περιοχή μέσα στον ίδιο υδροφόρο, κατά συνέπεια μεταβάλλεται και η τιμή της μεταβιβαστικότητας.

Αποθηκευτικότητα - Συντελεστής εναποθήκευσης (S)

Ο συντελεστής εναποθήκευσης S , εκφράζεται ως ο όγκος του νερού που μπορεί ένας υδροφόρος να αποθηκεύσει ή να αποδεσμεύσει ανά μονάδα επιφάνειας του υδροφόρου ανά μονάδα μεταβολής του φορτίου (Λέκκας και Αλεξόπουλος, 2009). Συνιστά μια εξίσου σημαντική υδραυλική παράμετρο των υδροφόρων οριζόντων όπου το μέγεθος της αποθηκευτικότητας εξαρτάται από το είδος του υδροφόρου (εικ.1.4). Πιο συγκεκριμένα, η αποθηκευτικότητα για τους ελεύθερους υδροφόρους ορίζοντες περιγράφεται με τον όρο ενεργό πορώδες ή ειδική παροχή S_y ενώ για τους υπό πίεση υδροφόρους με τον όρο ειδική αποθήκευση S_s (Specific Storage).



Εικόνα 1.4: Εναποθηκευτικότητα σε ελεύθερους και υπό πίεση υδροφόρους ορίζοντες.
(Πηγή: μεταφρασμένο από Heath, USGS Water Supply Paper 2220)

Στους υπό πίεση υδροφόρους ορίζοντες ο όγκος του αποθηκευμένου νερού που αποδίδεται από την πτώση της στάθμης προέρχεται από την διαστολή του νερού και την συμπίεση του υδροφορέα. Πιο αναλυτικά, η μείωση της πίεσης που προκαλείται από την πτώση της στάθμης επιφέρει την ελαστική διόγκωση του νερού, που αποτελεί τον ένα μηχανισμό απόδοσης νερού στους υπό πίεση υδροφόρους. Ο δεύτερος μηχανισμός, όπως προαναφέρθηκε είναι η συμπύκνωση του υδροφορέα με μείωση του συνολικού όγκου των πόρων. Αυτό εξηγείται καθώς στην επαφή του υπερκείμενου αδιαπέρατου στρώματος με τον υδροφόρο ορίζοντα το συνολικό φορτίο που ασκείται στον υδροφορέα απορροφάται μερικώς από τους κόκκους του υδροφορέα και μερικώς από το νερό των πόρων. Όταν μειώνεται η πίεση του νερού τότε όλο και περισσότερο φορτίο πρέπει να απορροφηθεί από τους κόκκους με αποτέλεσμα την παραμόρφωση των κόκκων και την μείωση του όγκου των κενών. Το νερό που εξέρχεται από τους πόρους όταν μειώνεται ο όγκος τους αντιπροσωπεύει ένα μέρος του συντελεστή εναποθήκευσης λόγω συμπίεσης του υδροφορέα.

Η ειδική αποθήκευση (S_s) στους υπό πίεση υδροφόρους δίνεται από την σχέση:

$$S_s = \rho g(\alpha + n\beta) \quad (1.8)$$

Όπου (ρ) είναι η πυκνότητα του νερού, (g) η επιταχυνση της βαρύτητας, (α) η συμπιεστότητα του υδροφορέα, (β) η συμπιεστότητα του νερού και (n) το πορώδες. Από την παραπάνω σχέση γίνεται φανερό ότι ο συντελεστής εναποθήκευσης εξαρτάται από την συμπιεστότητα του νερού και του υδροφορέα. Στους περισσότερους υπό πίεση υδροφόρους, ο συντελεστής εναποθήκευσης κυμαίνεται από 10^{-5} και 10^{-3} .

Στους ελεύθερους υδροφόρους ορίζοντες ο συντελεστής εναποθήκευσης ταυτίζεται με το ενεργό πορώδες. Στην περίπτωση αυτή, ο όγκος του νερού που αποδίδεται από την διαστολή του νερού και την συμπίεση του υδροφόρου θεωρείται αμελητέος. Σε έναν ελεύθερο υδροφόρο ο όγκος του αποθηκευμένου νερού αποστραγγίζεται δια της βαρύτητας έπειτα από πτώση της στάθμης. Ο συντελεστής εναποθηκευτικότητας εξαρτάται από τα κενά των κόκκων και επομένως ισούται με το ενεργό πορώδες, λαμβάνοντας τιμές από 0,1 έως 0,3 περίπου.

Η γενική έκφραση για την αποθηκευτικότητα S περιλαμβάνει το άθροισμα και των δύο προαναφερθέντων όρων, του ενεργού πορώδους ή ειδικής παροχής (S_y) και της ειδικής αποθήκευσης (S_s), όπου:

$$S = S_y + S_s \cdot D \quad (1.9)$$

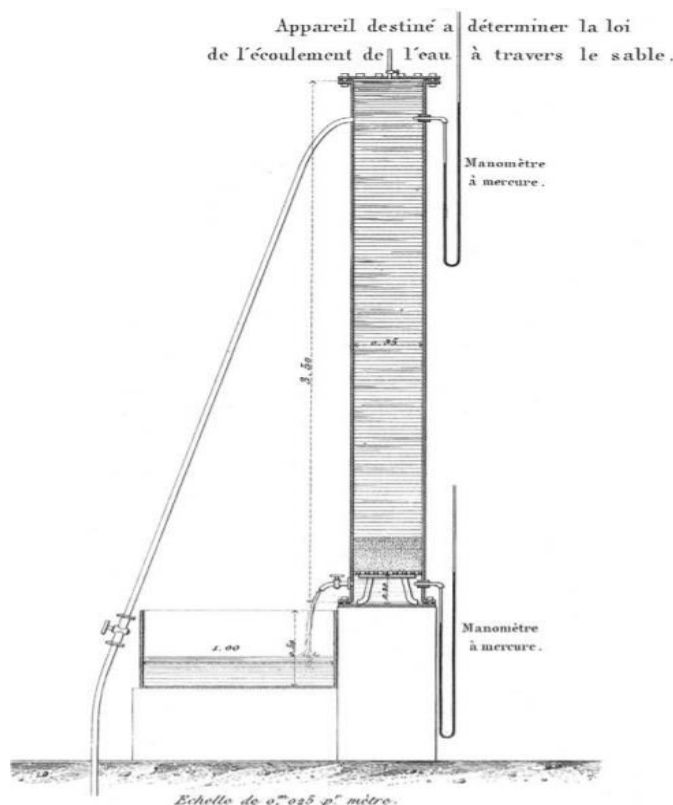
(S_y) είναι ο όγκος του νερού αποδιδόμενος δια της βαρύτητας ανά μονάδα όγκου του υδροφόρου, (S_s) ο όγκος νερού αποδιδόμενος ανά μονάδα όγκου του υδροφόρου συναρτήσει της συμπιεστότητας του υδροφόρου και της διόγκωσης του νερού και (D) το πάχος του υδροφόρου. Ένας υπό πίεση υδροφόρος παραμένει κορεσμένος σε όλο του το πάχος επομένως η ειδική παροχή S_y είναι μηδέν οπότε $S=S_s \cdot D$ ενώ σε έναν ελεύθερο υδροφόρο ισχύει $S=S_y$ καθώς η ειδική αποθήκευση S_s θεωρείται αμελητέα. Αναφέρεται ότι λόγω των διαφορετικών μηχανισμών απόδοσης του αποθηκευμένου όγκου νερού, ο συντελεστής εναποθήκευσης στους ελεύθερους υδροφόρους ορίζοντες είναι 100 έως 1000 φορές μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο συντελεστή των υπό πίεση υδροφόρων οριζόντων. Οι διαφορές στους συντελεστές εναποθήκευσης ανάμεσα στους ελεύθερους και υπό πίεση υδροφόρους είναι σημαντικές για τον προσδιορισμό της απόκρισης των υδροφόρων σε διάφορες συνθήκες πίεσης.

1.6 Βασικές αρχές της υπόγειας ροής

Η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου οποιουδήποτε συστήματος στηρίζεται στις γνωστές γενικές εξισώσεις. Οι γενικές εξισώσεις είναι οι διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες προκύπτουν από τις θεμελιώδεις αρχές της φυσικής που διέπουν το σύστημα που πρόκειται να μοντελοποιηθεί. Για την υπόγεια ροή, οι σχετικές αρχές είναι ο νόμος του Darcy και η εξίσωση διατήρησης της μάζας. Από τον μαθηματικό συνδυασμό αυτών των εξισώσεων προκύπτει η γενική εξίσωση της υπόγειας ροής, η οποία είναι μια μερική διαφορική εξίσωση.

1.6.1 Ο Νόμος του Darcy

Ο Henry Darcy (1803-1858) ήταν ο πρώτος που εξέφρασε τις μαθηματικές σχέσεις για την κίνηση του υπόγειου νερού σε πορώδη μέσα. Ο Νόμος του H.Darcy προέκυψε μέσω πειραμάτων, τα οποία κατά βάση αποτελούνταν από μια κάθετη στήλη χάλυβα πληρωμένη με πορώδες υλικό και σφραγισμένη στις άκρες από βιδωτές πλάκες. Η είσοδος του νερού στο σύστημα γινόταν διαμέσου ενός σωλήνα τοποθετημένου στο ανώτερο τμήμα της στήλης ενώ η απορροή επιτυγχανόταν μέσω μιας βρύσης στο κατώτερο τμήμα. Επιπλέον, στην δεξιά πλευρά της στήλης τοποθετήθηκαν μανόμετρα υδραργύρου για τον υπολογισμό των υδραυλικών υψών (εικ. 1.5).



Εικόνα 1.5: Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής στήλης του Darcy.

(Πηγή: Brown, 2002)

Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων του, ο H.Darcy, παρατήρησε ότι η ογκομετρική ροή είναι ανάλογη με, την απώλεια του υδραυλικού φορτίου (h_1-h_2), την διατομή της στήλης (A), τον συντελεστή περατότητας (K) και αντιστρόφως ανάλογη με το μήκος της στήλης (L). Σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτει ότι η παροχή Q εξαρτάται από την υδραυλική κλίση i και την περατότητα K. Επομένως, η παροχή Q που περνάει μέσα από μια διατομή A σε μια μονάδα χρόνου εκφράζεται μαθηματικά από την παρακάτω σχέση, η οποία αποτελεί και τον νόμο του Darcy.

$$Q = K A \frac{h_1 - h_2}{L} \quad \text{ή} \quad Q = - K A \frac{h_2 - h_1}{L} \quad (1.10)$$

Το αρνητικό πρόσημο στην εξίσωση του Darcy υποδηλώνει ότι η ροή γίνεται από περιοχές υψηλού υδραυλικού φορτίου σε περιοχές χαμηλού φορτίου. Επισημαίνεται ότι ο νόμος του Darcy έχει εφαρμογή μόνο για μικρές τιμές στην διαφορά φορτίου h_1-h_2 καθώς όταν η διαφορά αυτή αυξάνει αποκτώντας μεγάλες τιμές η αύξηση της παροχής δεν είναι ανάλογη (Λέκκας και Αλεξόπουλος, 2009). Γενικότερα, ο νόμος αυτός έχει ισχύ για μέσο ομογενές και ισότροπο και για συνθήκες γραμμικής ροής δηλαδή η ροή να είναι στρωτή και όχι τυρβώδης.

Ως κριτήριο για το είδος της ροής είναι ο αριθμός Reynolds όπου όταν λαμβάνει τιμές από 1 έως 10, δηλαδή για $1 \leq Re \leq 10$, έχει ισχύς ο νόμος του Darcy. Αναφέρεται ότι η τιμή 10 αποτελεί το ανώτατο όριο ισχύς του νόμου αν και η υπόγεια ροή στα περισσότερα πορώδη μέσα έχει αριθμό Reynolds ίσο με 1 (Λέκκας και Αλεξόπουλος, 2009). Ο αριθμός Reynolds εκφράζεται από την κάτωθι σχέση (1.11).

$$Re = \frac{\rho d v}{\mu} \quad (1.11)$$

όπου, (ρ) είναι η πυκνότητα του ρευστού, (d) η μέση διάμετρος των κόκκων, (v) η ταχύτητα του νόμου Darcy και (μ) το ιξώδες του ρευστού.

1.6.2 Γενική εξίσωση της υπόγειας ροής

Η γενική εξίσωση της υπόγειας ροής εκφράζεται με διάφορους τύπους ανάλογα την εκάστοτε περίπτωση, εάν πρόκειται παραδείγματος χάριν για δυσδιάστατη ή τρισδιάστατη ροή, σταθερή ή ασταθής, καθώς και από το είδος του μέσου, ομοιογενές ή ανομοιογενές, ισότροπο ή ανισότροπο κα. Παρακάτω παρουσιάζονται οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες βασικές εξισώσεις για την υπόγεια ροή (Zhang, 2016).

❖ Τρισδιάστατη ροή

Από τον νόμο του Darcy, την εξίσωση της διατήρησης της μάζας σε συνδυασμό με την παράμετρο της ειδικής αποθηκευτικότητας Ss για **περιορισμένο υδροφόρα**, η γενική εξίσωση της υπόγειας ροής εκφράζεται ως:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(Kx \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(Ky \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(Kz \frac{\partial h}{\partial z} \right) = Ss \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1.12)$$

Η εξίσωση (1.12) είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη **εξίσωση τρισδιάστατης ροής για ανομοιογενή και ανισότροπα μέσα** ($Kx \neq Ky \neq Kz$).

Εάν το μέσο είναι **ομογενές και ισότροπο** δηλαδή $K_x = K_y = K_z$ τότε η (1.12) γράφεται ως:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \nabla^2 = \frac{Ss}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1.13)$$

όπου ∇^2 είναι ο τελεστής του Laplace, και εν συντομία είναι το άθροισμα των δεύτερων παραγώγων δηλαδή, $\nabla^2() = \frac{\partial^2(\quad)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\quad)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(\quad)}{\partial z^2}$.

Στις εξισώσεις (1.12) και (1.13) περιλαμβάνεται ο όρος της αποθηκευτικότητας ($Ss \frac{\partial h}{\partial t}$), ο οποίος ισχύει μόνο για την περίπτωση που η **ροή είναι ασταθής ή μη μόνιμη** ($\frac{\partial h}{\partial t} \neq 0$).

Εάν η **ροή είναι σταθερή ή μόνιμη** ($\frac{\partial h}{\partial t} = 0$), τότε το δεξιό σκέλος των παραπάνω εξισώσεων μηδενίζεται. Για παράδειγμα, υπό σταθερή ροή η (1.13) γράφεται:

$$\nabla^2 h = 0 \quad (1.14)$$

Η (1.14) είναι η γνωστή διαφορική **εξίσωση του Laplace** με ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών στην ροή ρευστών, θερμική αγωγιμότητα κα.

Για **ελεύθερο υδροφορέα, ανομοιογενή και ανισότροπο** το δεξιό σκέλος της εξίσωσης (1.12) μηδενίζεται λόγω του ότι η ειδική αποθηκευτικότητα Ss θεωρείται περίπου ίση με μηδέν.

❖ Δισδιάστατη ροή

Συχνά η υπόγεια ροή μοντελοποιείται στις δύο διαστάσεις, στο οριζόντιο επίπεδο. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι στους περισσότερους υδροφορείς, οι διαστάσεις τους είναι εκατοντάδες φορές μεγαλύτερες οριζοντίως από ότι καθέτως. Έτσι η z συνιστώσα της ταχύτητας θεωρείται πολύ μικρή, πρακτικώς αμελητέα. Συνεπώς η δισδιάστατη ανάλυση της υπόγειας ροής γίνεται σε συσχέτιση με την μεταβιβαστικότητα υποθέτοντας ότι $h = h(x, y, t)$ και $\partial h / \partial z = 0$. Αναφέρεται ότι η γενική εξίσωση για την δισδιάστατη (οριζόντια) ροή προκύπτει από την εξίσωση της μονοδιάστατης ροής (Zhang, 2016).

Η γενική εξίσωση για **δισδιάστατη ροή σε έναν υδροφορέα που παρουσιάζει ετερογένεια και ανισοτροπία** ως προς την μεταβιβαστικότητα δίνεται από την παρακάτω σχέση.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + N = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1.15)$$

Εάν υπάρχει **ομοιογένεια και ισοτροπία** ως προς την μεταβιβαστικότητα δηλαδή $T_x = T_y = T = \text{σταθερό}$ τότε ισχύει,

$$T \left[\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right] + N = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1.16)$$

Για την ροή σε ομογενείς και ισότροπους ελεύθερους υδροφορείς όπου ισχύει $h=b$ και επομένως $T=Kh$ η σχέση (1.15) εκφράζεται ως,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{N}{K} = \frac{S_y}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1.17)$$

Εάν οι διαρροές είναι αμελητέες τότε η παραπάνω σχέση (1.8) γράφεται ως,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = \frac{S_y}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1.18)$$

Η εξίσωση (1.18) είναι γνωστή και ως **εξίσωση του Boussinesq**, η οποία όπως και η (1.17) είναι μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις και η επίλυση τους είναι πολύ πιο δύσκολη σε σχέση με τις γραμμικές.

1.7 Τρωτότητα Υπόγειων Υδροφορέων

Η τρωτότητα (vulnerability) χαρακτηρίζεται ως μια εσωτερική ιδιότητα των υπόγειων υδάτων και περιγράφει την ευαισθησία ή την επιδεκτικότητα αυτών στις ανθρωπογενείς ή φυσικές μεταβολές. Η έννοια της τρωτότητας προτάθηκε για πρώτη φορά από τον J.Margat το 1968, όπου όρισε την τρωτότητα ως τον βαθμό προστασίας που μπορεί το φυσικό περιβάλλον να προσφέρει στην ρύπανση των υπόγειων νερών.

Έκτοτε ακολούθησαν πολλές προσπάθειες ορισμού της έννοιας της τρωτότητας από αρκετούς ερευνητές, ενδεικτικά αναφέρονται οι Villumsen et al. (1983) οι οποίοι κατέταξαν την τρωτότητα ως δείκτη για την ποιότητα των υπόγειων υδάτων και πρότειναν τον ορισμό της ως τον κίνδυνο από τη χρήση χημικών ουσιών, ικανών να προκαλέσουν μεταβολές στην ποιότητα του υπόγειου νερού ενώ οι Bachmat and Collin (1987) όρισαν την τρωτότητα ως την ευαισθησία του υπόγειου νερού στις ανθρωπογενείς δραστηριότητες, από τις οποίες μπορεί να προκύψουν κίνδυνοι στην χρήση των υδάτων.

Σύμφωνα με τον Στουρνάρα (2007) η τρωτότητα των υπόγειων υδάτων στηρίζεται στην παραδοχή, ότι από το ίδιο το φυσικό περιβάλλον δύναται να υπάρξει κάποιος βαθμός προστασίας στα υπόγεια ύδατα από ρύπους ή μολυσματικές ουσίες που μπορούν να εισέλθουν ή και να εισχωρήσουν μέσα στο έδαφος. Η τρωτότητα συνδέεται με την ευκολία, με την οποία μπορεί ένας ρύπος να εισέλθει στο υπέδαφος και να φτάσει στον υδροφόρο ορίζοντα.

Ο βαθμός τρωτότητας ενός υπόγειου υδατικού συστήματος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του συστήματος, από τα χαρακτηριστικά του ρύπου και το φορτίο ρύπανσης, την απόσταση από την εστία ρύπανσης καθώς και από διάφορους περιβαλλοντικούς παράγοντες (π.χ. θερμοκρασία). Το 1991 η Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των Η.Π.Α (EPA) διαχώρισε την επιδεκτικότητα των υδροφορέων σε δύο κατηγορίες, σε αυτή που αναφέρεται αποκλειστικά στα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα ορίζοντας την ως ευαισθησία του υδροφορέα ή εσωτερική τρωτότητα και σε αυτήν που λαμβάνει υπόψη όλους τους παράγοντες (είδος ρυπαντή, ποσότητα κα)

συμπεριλαμβανομένων και των υδραυλικών χαρακτηριστικών, ορίζοντας την ως τρωτότητα υδροφορέα.

Αναφέρεται ότι η τρωτότητα θα πρέπει να διαχειρίζεται σε τρία διαφορετικά στάδια (Στουρνάρας, 1996). Στο στάδιο της εισόδου του ρύπου στο υδατικό σύστημα, η οποία είναι άμεσα εξαρτώμενη από τις υδρογεωλογικές συνθήκες καθώς και από την αλληλεπίδραση του ρύπου με αυτές. Στο στάδιο της παραμονής του ρύπου εντός του υδατικού συστήματος, που σχετίζεται τόσο από τις φυσικοχημικές ιδιότητες του ρύπου όσο και από τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα. Αν υπάρχει υδροληπτικό έργο τότε η διαχείριση της τρωτότητας θα πρέπει να γίνεται στο στάδιο άφιξης του ρύπου στο υδροληπτικό έργο.

Επισημαίνεται ότι η τρωτότητα αποκτά ιδιαίτερη σημασία όταν πρόκειται για καρστικά μέσα σε σχέση με τα υπόλοιπα. Η δομή και οι φυσικές ιδιότητες ενός κάρστ, λειτουργούν ανασταλτικά όσον αφορά τους φυσικούς μηχανισμούς αντιμετώπισης των ρύπων, καθιστώντας το ιδιαίτερα ευπαθή και τρωτό στην είσοδο ρύπων. Συγκεκριμένα μηχανισμοί όπως είναι η προσρόφηση, κατακράτηση, διήθηση τείνουν να εκλείπουν ή εμφανίζονται σε μικρό βαθμό ενώ υπερτερεί σημαντικά ο μηχανισμός της αραίωσης. Οι μεγάλες ταχύτητες ροής που αναπτύσσονται στους καρστικούς σχηματισμούς, έχουν ως αποτέλεσμα την γρήγορη αραίωση των ρύπων αλλά και την μεταφορά τους σε μεγάλες αποστάσεις. Ως εκ τούτου τα καρστικά νερά είναι περισσότερο ευπαθή λόγω της απουσίας των μηχανισμών εξουδετέρωσης κατά την είσοδο του ρύπου στο σύστημα όσο και κατά την μεταφορά του ρύπου στο εσωτερικό.

Η τρωτότητα μπορεί να αποδοθεί γραφικώς μέσα από τους χάρτες τρωτότητας για συγκεκριμένους σκοπούς και χρήσεις για συγκεκριμένες περιοχές. Πρόκειται για μια ξεχωριστή κατηγορία υδρογεωλογικών χαρτών παρέχοντας πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα των υπόγειων νερών, την κατάσταση των υδροφόρων συστημάτων, την μεταβολή στο ρυπαντικό φορτίο κ.α. Η σύνταξη χαρτών για την εκτίμηση της τρωτότητας συνιστά μια πολύπλοκη διαδικασία καθότι απαιτείται η συγκέντρωση πολλών και βασικών πληροφοριών, παραδείγματος χάριν τοπογραφικά δεδομένα, υδρολογικά και υδρογεωλογικά στοιχεία, υδροχημικά χαρακτηριστικά υδάτων, ιδιότητες και χαρακτηριστικά του ρύπου, χρήσεις γης κ.α. Είναι φυσικό ότι οι χάρτες αυτοί δεν δύναται να έχουν μακρά ισχύ καθότι η τρωτότητα μεταβάλλεται λόγω μεταβολής του ρύπου (αλλαγή στο φορτίο και στην συμπεριφορά), της κατάστασης του υδροφορέα, των υδρολογικών και άλλων παραμέτρων του περιβάλλοντος (Στουρνάρας, 2007).

Μέθοδοι Εκτίμησης Τρωτότητας

Εκτός των χαρτών, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι και λογισμικά για την ποσοτικοποίηση της τρωτότητας, οι οποίες διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο του μέσου (πορώδες ή καρστικό). Στα πορώδη μέσα ενδεικτικά αναφέρεται η μέθοδος του Legrand (1964), η οποία στηρίζεται σε παραμέτρους όπως, οριζόντια απόσταση εστίας ρύπων-σημείο υδροληψίας, κατακόρυφη απόσταση εστίας ρύπων – επιφάνειας υδροφόρου ορίζοντα, πάχος ακόρεστης ζώνης, υδραυλική αγωγιμότητα, υδραυλική κλίση, μηχανισμοί προσρόφησης και απορρόφησης στην ακόρεστη ζώνη, από τις οποίες προκύπτει μια συνολική βαθμολογία με απώτερο σκοπό τον χαρακτηρισμό της εκάστοτε περιοχής ως προς τον βαθμό τρωτότητας.

Μια άλλη ευρέως γνωστή μεθοδολογία για την εκτίμηση της τρωτότητας είναι η μέθοδος DRASTIC, όπου κάθε γράμμα της λέξης αυτής υποδηλώνει και μια παράμετρο. Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνεται υπόψη το βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού (D), η τροφοδοσία του υδροφόρου (R), το είδος του υδροφόρου (A), το έδαφος (S), η τοπογραφία (T), η επίδραση της ακόρεστης ζώνης(I) και ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας (C).

Όπως προαναφέρθηκε οι καρστικοί υδροφορείς είναι πιο τρωτοί και χρήζουν ιδιαίτερης μεταχείρισης σε σύγκριση με τα πορώδη μέσα, επομένως αποτελούν μια ξεχωριστή κατηγορία ως προς την εκτίμηση της τρωτότητας. Έχουν αναπτυχθεί αρκετές μεθοδολογίες για την εκτίμηση της εσωτερικής τρωτότητας των καρστικών υδροφόρων όπως είναι η μέθοδος COP, η οποία είναι συνδυασμός τεσσάρων παραμέτρων, των υπερκείμενων στρωμάτων, της συγκέντρωσης ροής, των κατακρημνισμάτων και του βαθμού καρστικοποίησης του δικτύου, ενώ ακολουθούν και άλλες παρόμοιες μέθοδοι όπως είναι η EPIK, η VULK η RISKE κ.α.

1.8 Ρύπανση των υπόγειων υδάτων

Οι μεταβολές στην ποιότητα και στην ποσότητα ενός υδατικού συστήματος μπορεί να προέρχονται είτε από φυσικές διεργασίες είτε από ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Η υποβάθμιση των υδάτων περιγράφεται από τους όρους ρύπανση και μόλυνση. Ειδικότερα, ως μόλυνση ορίζεται η ύπαρξη παθογόνων μικροοργανισμών στο νερό, καθιστώντας το ακατάλληλο για χρήση ενώ ως ρύπανση, η είσοδος μη αποδεκτών ουσιών στο νερό, οι οποίες δύναται να προκαλέσουν ανεπιθύμητες παρενέργειες στον άνθρωπο ή στο περιβάλλον.

Η ρύπανση στα υπόγεια νερά, εν αντιθέσει με τα επιφανειακά, είναι δυσκολότερο να ανακαλυφθεί και ακόμα περισσότερο να τεθεί υπό έλεγχο. Αναλυτικά, λόγω των ιδιοτεροτήτων που εμφανίζουν τα υπόγεια ύδατα όπως για παράδειγμα, η απουσία του φωτός και η αδυναμία ανανέωσης του οξυγόνου, η διαχείριση της ρύπανσης τους καθίσταται ιδιαίτερα δυσχερής. Οι ουσίες που ρυπαίνουν το υπόγειο νερό είναι πάρα πολλές, με τους πιο συνηθισμένους τύπους ρυπαντών να είναι οι οργανικές ή ανόργανες χημικές ενώσεις, θρεπτικές ενώσεις, τα λιπάσματα, φυτοφάρμακα, βαρέα μέταλλα, οι ραδιενεργές ουσίες και τα άλατα (υφαλμύρισης).

Οι βασικότερες πηγές και αιτίες ρύπανσης του υπόγειου νερού, από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, ανάλογα με την προέλευση τους χωρίζονται σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες, στις αστικές, βιομηχανικές, γεωργικές και άλλες (ποικίλες). Στην αστική ρύπανση περιλαμβάνεται η διάθεση στερεών και υγρών αστικών αποβλήτων στο έδαφος και το υπέδαφος όπως είναι οι Χ.Υ.Τ.Α, ο εμπλουτισμός των υδροφόρων από επαναχρησιμοποιημένα νερά, η διοχέτευση αποβλήτων σε γεωτρήσεις έκχυσης κα. Στις βιομηχανικές πηγές ανήκουν τα απόβλητα από βιομηχανίες, τα οποία περιέχουν βαρέα μέταλλα και επικίνδυνες ενώσεις. Συνηθίζεται τα επικίνδυνα και τοξικά βιομηχανικά απόβλητα να απορρίπτονται σε βαθιές γεωτρήσεις κάτω από τους υδροφόρους ορίζοντες, η απόρριψη τους όμως σε αβαθείς λάκκους προκαλεί σοβαρές ρυπάνσεις στο υπόγειο νερό.

Στις γεωργικές πηγές και αιτίες ρύπανσης συγκαταλέγονται τα λιπάσματα και τα βελτιωτικά των εδαφών, τα φυτοφάρμακα, τα ζιζανιοκτόνα και τα απόβλητα των ζώων από ποιμνιοστάσια και κτηνοτροφικές μονάδες. Τα λιπάσματα αποτελούνται κυρίως από νιτρικά, φωσφορικά και καλιούχα άλατα. Τα νιτρικά σε αντίθεση με τα υπόλοιπα δύο προαναφερθέντα, είναι εκείνα που αποτελούν την σημαντικότερη πηγή ρύπανσης του υπόγειου νερού.

Πρόσθετα, τα νιτρικά ιόντα έχουν μεγάλη κινητικότητα, δεν προσροφούνται από τα σωματίδια του εδάφους και έτσι μπορούν να ρυπάνουν μέχρι και τους πιο βαθείς υδροφορείς (Balderacchi et al, 2013). Επίσης, η επιστροφή του αρδευτικού νερού αποτελεί πηγή ρύπανσης, καθότι το νερό αυτό έχει 3 έως 10 φορές αυξημένη αλατότητα από ότι το χρησιμοποιούμενο νερό (Λέκκας και Αλεξόπουλος, 2009).

Στις διάφορες πηγές που μπορεί κατά περίπτωση να προκληθεί ρύπανση του υπόγειου νερού περιγραμματα αναφέρονται η ρύπανση από διαφυγές λυμάτων, από το πλύσιμο των αεροσκαφών και αυτοκινήτων, τις συγκοινωνίες, από ατυχήματα κατά την μεταφορά καυσίμων και από την εισροή του θαλασσινού νερού σε παράκτιους υδροφορείς λόγω υπεράντλησης.

Τα χαρακτηριστικά κάθε πηγής ρύπανσης καθορίζουν το βαθμό της ρύπανσης, την επικινδυνότητα, καθώς και τον τρόπο αντιμετώπισης. Πέρα από το είδος και την φύση του ρύπου, άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά αποτελούν η γεωμετρία της πηγής ρύπανσης, εάν δηλαδή πρόκειται για σημειακή, γραμμική ή διάχυτη ρύπανση, ο ρυθμός ρυπάνσεως είτε είναι συνεχής, περιοδικός ή ακανόνιστος, η ποσότητα του ρύπου καθώς και ο βαθμός επεξεργασίας του ρύπου. Επισημαίνεται ότι η επεξεργασία του ρύπου πιο πριν καθιστά την αντιμετώπιση του ευκολότερη μειώνοντας το μέγεθος των επιπτώσεων.

Τα γεωλογικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδάτινου συστήματος, επίσης καθορίζουν το μέγεθος και το σχήμα της ρύπανσης. Για παράδειγμα, αν η ταχύτητα με την οποία κινείται το υπόγειο νερό είναι μεγάλη, τότε το σχήμα της ρύπανσης είναι επίμηκες ενώ αν είναι μικρή τότε ο ρύπος απλώνεται ομοιόμορφα γύρω από την πηγή ρύπανσης (Λέκκας και Αλεξόπουλος, 2009). Ακόμα, η αλληλεπίδραση ανάμεσα στον ρύπο και τον αποδέκτη είναι πολύ σημαντική. Εάν ο ρύπος είναι ευδιάλυτος στο νερό και δεν προσροφάται από τον σχηματισμό του υδροφόρου τότε στην περίπτωση αυτή αλληλεπιδρά με το νερό, γίνεται ανθεκτικός και κινείται με την ταχύτητα που κινείται το νερό.

1.9 Διαχείριση και υφιστάμενη κατάσταση των υπόγειων υδατικών συστημάτων στην Ελλάδα

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει μια νέα πολιτική σχετικά με την διαχείριση και την προστασία των υδάτων, συγκεκριμένα πρόκειται για την Οδηγία Πλαίσιο 2000/60/EK, η οποία έχει εναρμονιστεί με την Ελληνική Νομοθεσία με το Ν. 3199/2003 (ΦΕΚ Α' 280) και το Π.Δ. 51/2007 (ΦΕΚ Α' 54). Η Οδηγία αυτή αναφέρεται στους υδατικούς πόρους όλων των κατηγοριών (ποτάμια, λίμνες, μεταβατικά, παράκτια και υπόγεια ύδατα) ενώ ειδικότερα με την συμπληρωματική οδηγία 2006/118 θέτονται οι αρχές και τα μέτρα για την προστασία των υπόγειων υδάτων από την ρύπανση και την υποβάθμιση.

Η Ελλάδα διαθέτει πληθώρα υδατικών αποθεμάτων (επιφανειακών, υπόγειων) και θεωρείται ευνοημένη λόγω του ότι ο βροχομετρικός της δείκτης είναι μεγαλύτερος σε σχέση με άλλες χώρες της Μεσογείου που έχουν το ίδιο γεωγραφικό πλάτος (Στουρνάρας Γ.). Έχει διαχωριστεί σε 14 υδατικά διαμερίσματα (Περιοχές Λεκανών Απορροής Ποταμών) όπου για το κάθε ένα έχει εκπονηθεί και το αντίστοιχο Σχέδιο Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών. Αναφέρεται ότι κάθε Σχέδιο Διαχείρισης περιλαμβάνει και την αξιολόγηση της κατάστασης των υπόγειων υδάτων.

Για τον χαρακτηρισμό της κατάστασης ενός υπόγειου υδατικού συστήματος κρίνεται απαραίτητη η αξιολόγηση τόσο της ποιοτικής (χημικής) όσο και της ποσοτικής κατάστασης του. Η χημική κατάσταση αποτελεί βασική παράμετρο για την προστασία των υπόγειων υδάτων αντικατοπτρίζοντας την υποβάθμιση και την ρύπανση που δύναται να έχει υποστεί ένα υπόγειο υδατικό σύστημα ενώ η ποσοτική κατάσταση υποδηλώνει τα διαθέσιμα υδάτινα αποθέματα καθώς και τον βαθμό εκμετάλλευσης, υπεράντληση ή μη, του υδροφορέα.

Στην Ελλάδα υπάρχουν 591 υπόγεια υδατικά συστήματα (233 καρστικά, 216 κοκκώδη, 102 ρωγμώδη, 40 μεικτά) κατανεμημένα στις 14 Περιοχές Λεκανών Απορροής Ποταμών, τα οποία έχουν αξιολογηθεί και επικαιροποιηθεί για την συνολική κατάσταση τους με το πλαίσιο της 1^{ης} Αναθεώρησης των Σχεδίων Διαχείρισης. Επισημαίνεται ότι τα αποτελέσματα για την κατάσταση τους προέκυψαν σύμφωνα με το Εθνικό Δίκτυο Παρακολούθησης για τα ύδατα, το οποίο περιλαμβάνει 1392 σημεία - σταθμούς παρακολούθησης των υπόγειων υδάτων σε όλη την χώρα.

Το Εθνικό Δίκτυο Παρακολούθησης ελέγχει και καταγράφει την ποσοτική και ποιοτική κατάσταση των υπόγειων υδατικών συστημάτων με απώτερο σκοπό τον έλεγχο της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων, από τα νιτρικά ιόντα λόγω εντατικής γεωργικής εκμετάλλευσης και των ιόντων χλωρίου λόγω θαλάσσιας διείσδυσης, καθώς και την θεσμοθέτηση ευπρόσβλητων ζωνών ως προς την νιτρορύπανση και την υφαλμύριση αντίστοιχα. Η ποσοτική κατάσταση των υπόγειων υδάτων παρακολουθείται για τον έλεγχο της στάθμης στους υδροφορείς προκειμένου να διερευνηθεί ο τρόπος εκμετάλλευσης τους (υπεράντληση ή μη) και για την εξαγωγή συμπερασμάτων για το υδατικό ισοζύγιο της χώρας.

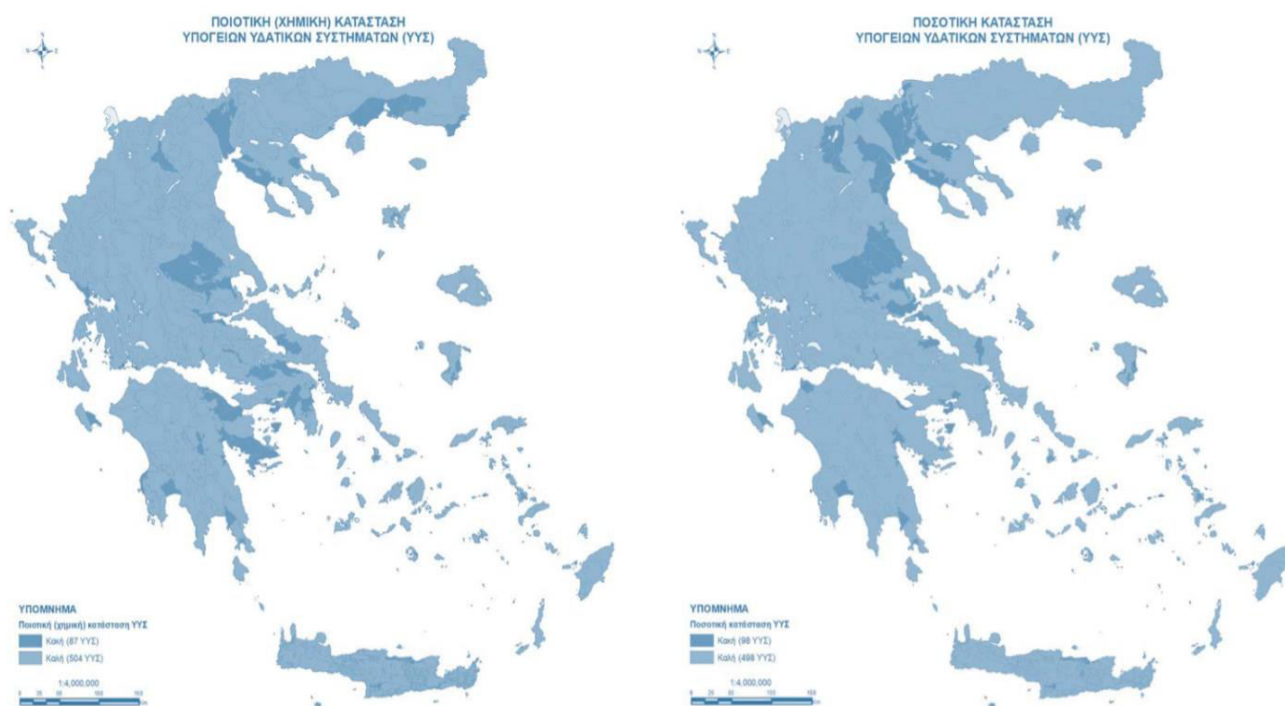
Η ποιοτική κατάσταση συνθέτεται από τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά, όπως είναι η αγωγιμότητα, το διαλυμένο οξυγόνο, η θερμοκρασία, το pH, και από τις χημικές παραμέτρους οι οποίες αφορούν την ύπαρξη ή μη θειικών ιόντων και ιόντων χλωρίου, αζωτούχων ενώσεων, βαρέων μετάλλων, φυτοφαρμάκων κα. Αναφέρεται ότι η Ελλάδα έχει θεσπίσει μέγιστες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις για τα νιτρικά, τα βαρέα μέταλλα, τις δραστικές ουσίες των φυτοφαρμάκων, όπως επίσης μεταξύ άλλων και για τα στοιχεία Ni, Cr, NO₂, NO₃, Al, οι οποίες είναι πλήρως εναρμονισμένες με τα πρότυπα ποιότητας της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η ποιοτική και ποσοτική κατάσταση των υπόγειων συστημάτων για κάθε ένα υδατικό διαμέρισμα όπως προέκυψαν από τα Σχέδια Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών. Σύμφωνα με την έκθεση αποτίμησης του Εθνικού Κέντρου Περιβάλλοντος και Αειφόρου Ανάπτυξης (ΕΚΠΑΑ) η πλειοψηφία των υπόγειων υδατικών συστημάτων της χώρας δηλαδή ένα ποσοστό της τάξης του 80% εμφανίζει καλή ποσοτική κατάσταση ενώ το υπόλοιπο 20% παρουσιάζει κακή ποσοτική κατάσταση. Όσον αφορά την ποιότητα των υπόγειων υδατικών συστημάτων, το 85% έχει καλή ποιοτική (χημική) κατάσταση και το υπόλοιπο 15% κακή.

Αναφέρεται ότι η ποιότητα του υπόγειου νερού έχει υποβαθμιστεί σε αρκετές περιοχές όπως στον Θεσσαλικό κάμπο, κάμπο Αργολίδας κλπ λόγω ρύπανσης από νιτρικά, φυτοφάρμακα και αγροχημικά. Επομένως, αυτή η κακή χημική κατάσταση των υπόγειων υδάτων σε ποσοστό 15% οφείλεται κατά κόρον στην αλόγιστη χρήση αζωτούχων ενώσεων, βελτιωτικών εδαφών, φυτοφαρμάκων όπως και στην υπέρβαση των επιτρεπτών ορίων νιτρικών ιόντων λόγω υπερεντατικής καλλιέργειας. Όσον αφορά την υπέρβαση ορίων για τα ιόντα χλωρίου, η οποία επίσης συνιστά ποιοτική υποβάθμιση, λόγω υφαλμύρινσης αναφέρεται ότι οφείλεται στην υπερεκμετάλλευση των γεωτρήσεων στις παράκτιες περιοχές. Τα ανωτέρω παρουσιάζονται και γραφικώς στην εικόνα (1.6) που ακολουθεί.

ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ				
Υδατικό Διαμέρισμα	Ποιοτική Κατάσταση		Ποσοτική Κατάσταση	
	Καλή	Κακή	Καλή	Κακή
EL01	25	2	25	2
EL02	24	9	24	9
EL03	25	9	25	9
EL04	25	1	24	2
EL05	38	2	38	2
EL06	16	8	16	8
EL07	38	5	34	9
EL08	29	4	22	11
EL09	51	3	42	12
EL10	31	6	27	10
EL11	14	1	14	1
EL12	14	0	14	4
EL13	82	9	81	10
EL14	88	28	88	28
Σύνολο	500	91	474	117

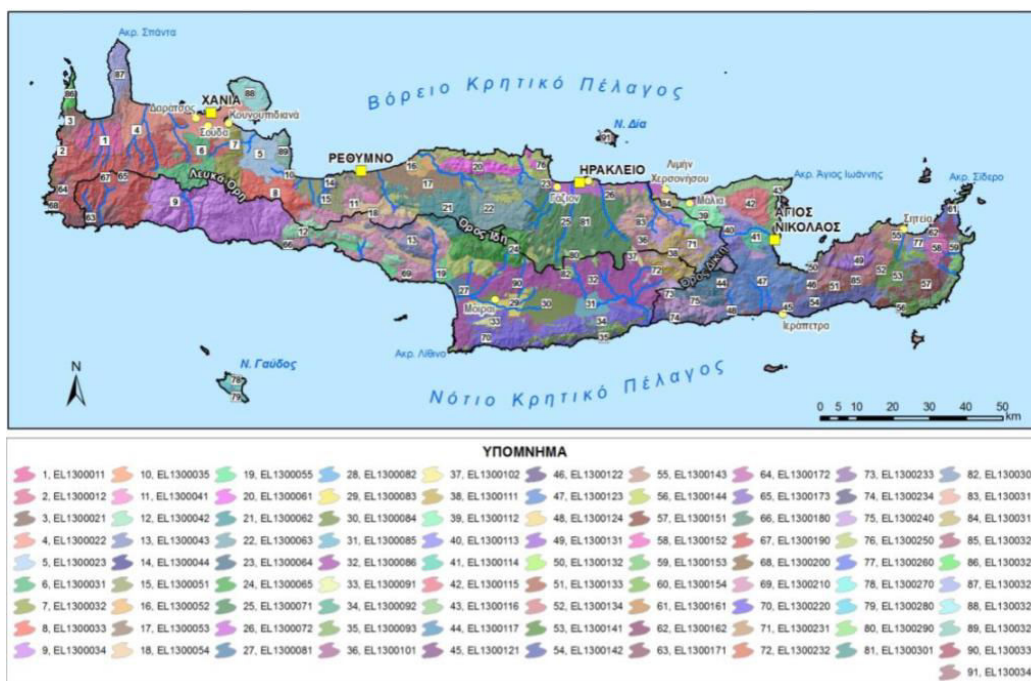
Πίνακας 1.2: Ποιοτική και ποσοτική κατάσταση των υπόγειων υδατικών συστημάτων της Ελλάδας.
(Πηγή: Ελλάδα Έκθεση Κατάστασης Περιβάλλοντος 2018, ΕΚΠΑΑ)



Εικόνα 1.6: Κατανομή της ποιοτικής και ποσοτικής κατάστασης των υπόγειων υδάτων.
(Πηγή: Ελλάδα Έκθεση Κατάστασης Περιβάλλοντος 2018, ΕΚΠΑΑ).

1.9.1 Διαχείριση και υφιστάμενη κατάσταση στο υδατικό διαμέρισμα της Κρήτης

Σύμφωνα με τον διαχωρισμό των Υδατικών Διαμερισμάτων της Ελλάδας, η Κρήτη αποτελεί το 13ο Υδατικό Διαμέρισμα από τα 14 συνολικά Υδατικά Διαμερίσματα με κωδικό ΕΛ13. Το ΥΔ της Κρήτης με βάση το Σχέδιο Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών, περιλαμβάνει 91 οριοθετημένα υπόγεια υδατικά συστήματα κατανεμημένα σε τρεις λεκάνες απορροής. Συγκεκριμένα πρόκειται για τις λεκάνες, ρεμάτων βόρειου τμήματος Χανίων – Ρεθύμνου – Ηρακλείου, ρεμάτων νότιου τμήματος Χανίων–Ρεθύμνου–Ηρακλείου και ρεμάτων Ανατολικής Κρήτης (εικ.1.7).



Εικόνα 1.7: Το Υδατικό Διαμέρισμα της Κρήτης με τα 91 οριοθετημένα Υπόγεια Υδατικά Συστήματα. (Πηγή: Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017).

Στην Κρήτη οι απολήψεις από τα υπόγεια υδατικά συστήματα γίνονται κυρίως για λόγους ύδρευσης και άρδευσης. Συγκεκριμένα το μεγαλύτερο ποσοστό των απολήψεων αυτών, περίπου το 83% αφορά στην κάλυψη των αρδευτικών αναγκών του νησιού ενώ το υπόλοιπο 16.5% αντιστοιχεί στην ύδρευση. Αναφέρεται ότι οι περισσότερες υδροληψίες για άρδευση παρατηρούνται στις περιοχές με καλλιέργειες, οι οποίες εδράζονται σε πορώδη υπόγεια υδατικά συστήματα (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017).

Αντίστοιχα, για την ύδρευση το μεγαλύτερο μέρος των υδροληψιών παρατηρείται στο βόρειο τμήμα του νησιού, κυρίως στις μεγάλες πόλεις όπου επί προσθέτως υπάρχουν και οι μεγάλες τουριστικές μονάδες, καθώς και στο νότιο τμήμα του Νομού Ηρακλείου στην περιοχή του κάμπου της Μεσσαράς. Επιπλέον, επισημαίνεται ότι σημαντικά λιγότερες είναι οι απολήψεις από τα υπόγεια υδατικά συστήματα που αφορούν τους τομείς της κτηνοτροφίας και της βιομηχανίας καταγράφοντας ποσοστά 0.39% και 0.09% αντίστοιχα. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά οι απολήψεις από τα υπόγεια υδατικά συστήματα του Υδατικού Διαμερίσματος της Κρήτης για κάθε μια Λεκάνη Απορροής και ανά χρήση (άρδευση, ύδρευση, κτηνοτροφία, βιομηχανία).

Λεκάνη Απορροής	Απολήψεις (10 ⁶ m ³)			
	Άρδευση	Υδρευση	Κτηνοτροφία	Βιομηχανία
EL1339	190.22	59.32	1.09	0.28
EL1340	145.42	5.96	0.66	0.12
EL1341	108.17	22.94	0.33	0.08
Συνολικά	443.81	88.21	2.08	0.48

Πίνακας 1.3: Απολήψεις από τα υπόγεια υδατικά συστήματα του υδατικού διαμερίσματος της Κρήτης (Πηγή: Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017).

Όσον αφορά την αξιολόγηση της κατάστασης των υπόγειων υδατικών συστημάτων της Κρήτης, σύμφωνα με την Ειδική Επιτροπή Υδάτων στο πλαίσιο της 1^{ης} αναθεώρησης του Σχεδίου Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών για το Υδατικό Διαμέρισμα της Κρήτης, αναφέρεται ότι από τα 91 υπόγεια υδατικά συστήματα, 8 εμφανίζουν κακή χημική και ποσοτική κατάσταση, 1 βρίσκεται σε κακή χημική και 1 σε κακή ποσοτική κατάσταση.

Η ποιοτική και ποσοτική κατάσταση αυτών των 8 υπόγειων υδατικών συστημάτων οφείλεται σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες, οι οποίες προέρχονται από την υπεράντληση των παράκτιων υδροφόρων (πχ βόρειο τμήμα Ηρακλείου) και την εντατική καλλιέργεια (πχ Κάμπος Μεσσαράς). Από αυτά τα 8 συστήματα, τα έξι έχουν κακή κατάσταση λόγω αυξημένων συγκεντρώσεων ιόντων χλωρίου και επομένως έχουν χαρακτηριστεί από υφαλμύριση ενώ για τα υπόλοιπα δύο η κακή κατάσταση οφείλεται στις αυξημένες συγκεντρώσεις νιτρικών ιόντων. Παρακάτω αναφέρονται ενδεικτικά τα 8 υπόγεια υδατικά συστήματα της Κρήτης που παρουσιάζουν κακή κατάσταση τόσο ποσοτικός όσο και ποιοτικώς.

- Καρστικό Κέρης – Τυλίσσου
- Πορώδες παράκτιο βορείου Ηρακλείου
- Καρστικό παράκτιο Ηρακλείου- Γουβών- Χερσονήσου
- Πορώδες παράκτιο Τυμπακίου
- Πορώδες Μοιρών
- Πορώδες Ρουσοχωρίων
- Πορώδες Γαύδου
- Πορώδες Γουδούρα

Επισημαίνεται ότι οι κύριες πιέσεις που ασκούνται εν γένει στα υπόγεια υδατικά συστήματα της Κρήτης προέρχονται από τα ελαιοτριβεία, τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, τους χώρους υγειονομικής ταφής και ανεξέλεγκτης διάθεσης αποβλήτων και τα ξενοδοχεία. Στα περισσότερα υπόγεια υδατικά συστήματα, τα ελαιοτριβεία αποτελούν την κύρια και σε ορισμένες περιπτώσεις και την μοναδική αιτία επιβάρυνσης αυτών. Πρόσθετα, τονίζεται ότι είναι αρκετοί υδροφορείς οι οποίοι υφίστανται τοπικά υπερεκμετάλλευση με τα αντίστοιχα συνεπακόλουθα.

2. ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ ΚΑΙ ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ

2.1 Κλιματική αλλαγή

Τις τελευταίες δεκαετίες το ενδιαφέρον των επιστημόνων εστιάζεται στην κλιματική αλλαγή καθώς αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές αλλαγές παγκοσμίως με επιπτώσεις τόσο σε κοινωνικό, οικονομικό όσο και περιβαλλοντικό επίπεδο. Σύμφωνα με την Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) ως κλιματική αλλαγή ορίζεται οποιαδήποτε αλλαγή στο κλίμα σε οποιοδήποτε χρόνο, η οποία προκαλείται είτε από φυσικές διεργασίες είτε από ανθρωπογενείς δραστηριότητες.

Επισημαίνεται ότι το κλίμα της γης δεν ήταν πότε σταθερό καθώς άλλαζε ανά τις γεωλογικές περιόδους. Αναφέρεται ότι μόνο τα τελευταία 650.000 χρόνια, έχουν καταγραφεί επτά κύκλοι παγετώνων ενώ το τέλος της τελευταίας παγετώδους εποχής ήταν περίπου 7.000 χρόνια πριν σηματοδοτώντας την έναρξη μιας νέας εποχής. Οι παράγοντες που ευθύνονται για την κλιματική αλλαγή είναι πολλοί και όχι πάντα κατανοητοί, ωστόσο μπορούμε να τους κατατάξουμε σε δύο κατηγορίες. Αυτούς που οφείλονται σε εξωγενείς διεργασίες (όπως είναι η απόσταση από τον ήλιο, αλλαγές στην τροχιά της γης) και αυτούς που προκαλούνται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες (όπως η καταστροφή της στιβάδας του όζοντος, τα αέρια θερμοκηπίου).

Όσον αφορά τις εξωγενείς διεργασίες και την συμβολή τους στην κλιματική αλλαγή επισημαίνεται ότι η αρχή και το τέλος μιας παγετώδους εποχής καθορίζεται από τις περιοδικές μεταβολές στον άξονα περιστροφής της γης και στην τροχιά της. Αυτές οι μεταβολές αναφέρονται και ως κύκλοι του Milankovitch, σύμφωνα με τους οποίους εξηγούνται οι εναλλαγές από τις παγετώδεις περίοδοι στις μεσοπαγετώδεις και αντίστροφα. Πρόσθετα η κλίση του άξονα περιστροφής της γης υφίσταται λόξωση (απόκλιση), η οποία μεταβάλλεται κάθε 41.000 χρόνια.

Διακυμάνσεις στην κλίση του άξονα, οι οποίες κυμαίνονται από 22.1° έως 24.5°, προκαλούν σημαντικές μεταβολές στο κλίμα με τις εποχές να διαφοροποιούνται ανάλογα. Τονίζεται, ότι οι εποχές οφείλονται στην κλίση των 23.4° του άξονα περιστροφής με την κάθετο του επιπέδου τροχιάς της γης γύρω από τον ήλιο. Εάν ο άξονας περιστροφής ήταν κάθετος στο επίπεδο τροχιάς, τότε δεν θα υπήρχαν εποχές (Gribbin, 1992). Μια αύξηση στην κλίση θα είχε ως αποτέλεσμα ακραίες εποχές δηλαδή θερμότερα καλοκαίρια και πιο κρύους χειμώνες ενώ αντίθετα μείωση της κλίσης θα είχε ως συνέπεια εποχές με λιγότερα έντονα χαρακτηριστικά, με ήπια καλοκαίρια και ήπιους χειμώνες. Βέβαια, αναφέρεται ότι οι αλλαγές στην κλίση επηρεάζουν περισσότερο τους πόλους και λιγότερο τις τροπικές περιοχές.

Οι εποχές επηρεάζονται από την εκκεντρότητα της τροχιάς της γης γύρω από τον ήλιο. Συγκεκριμένα, η τροχιά της γης είναι ελλειπτική με εκκεντρότητα που μεταβάλλεται περιοδικά μεταξύ 100.000 και 400.000 χρόνων. Η μεταβολή στην εκκεντρότητα επηρεάζει την απόσταση της γης από τον ήλιο και επομένως και την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται η γη. Η θεωρία του Milankovitch (1941) καταλήγει στο ότι, καθώς η γη κινείται στο διάστημα υπάρχει ο συνδυασμός τριών στοιχείων με περιοδικές μεταβολές (λόξωση άξονα, ταλάντευση, εκκεντρότητα), τα οποία ευθύνονται για την μεταβολή στην ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στη γη.

Επιπλέον, θεωρείται ότι ο ήλιος αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα στην κλιματική αλλαγή και πιθανά με πολύ μεγαλύτερη επιρροή από ότι οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως παραδείγματος χάρη τα αέρια που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι έχουν παρατηρηθεί συγκεκριμένες διεργασίες στην επιφάνεια του ήλιου που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την θερμοκρασία της γης (Gribbin,1992). Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον ήλιο δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται συνεχώς σε όλα τα μήκη κύματος και σε όλες τις χρονικές περιόδους. Η ηλιακή δραστηριότητα παρουσιάζει περιοδικές μεταβολές με κύκλους των 11, 22, 75 και 200 ετών.

Με βάση τις μετρήσεις που έγιναν τόσο στο έδαφος όσο και από δορυφόρους, βρέθηκε ότι η διαφορά στην ηλιακή ακτινοβολία από το μέγιστο στο ελάχιστο σε έναν κύκλο 11 ετών κυμαίνεται περίπου στο 0.1%. Η διαφορά αυτή θεωρείται αμελητέα, όμως μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στο κλίμα της γης, ειδικά αν ληφθεί υπόψη η τεράστια ποσότητα ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τον ήλιο (Gribbin,1992). Υπάρχουν όμως και αρκετοί ερευνητές οι οποίοι υποστηρίζουν ότι η ηλιακή δραστηριότητα επιδρά δευτερογενώς στην αλλαγή του κλίματος, δηλαδή μπορεί να συμβάλλει σε μικρές μόνο αλλαγές διάρκειας λίγων αιώνων (Τράπεζα της Ελλάδος,2011).

Αναφέρεται ότι η διαφορά στις αλλαγές που προκλήθηκαν από τον άνθρωπο σε σχέση με τις αλλαγές που προκλήθηκαν από την φύση έχει ως αποτέλεσμα μια μονότονη αλλά ραγδαία αποσταθεροποίηση του κλίματος. Η παρέμβαση του ανθρώπου στην σύνθεση της ατμόσφαιρας είναι τρομερή καθώς τα τελευταία 30 χρόνια, ο άνθρωπος αύξησε κατά 30% τα αέρια του θερμοκηπίου δημιουργώντας πολλά προβλήματα όπως για παράδειγμα η όξινη βροχή, η τροποποίηση του μικροκλίματος στην πόλη κ.α. Είναι αξιοσημείωτο ότι αυτά τα 30 χρόνια ο άνθρωπος κατέστρεψε το όζον που παράγει η φύση σε 2 δισεκατομμύρια χρόνια (Fifor,1992).

Τα αέρια του θερμοκηπίου απορροφούν την μεγάλη μήκους κύματος γήινη ακτινοβολία, εκπέμποντας ένα μεγάλο μέρος της πίσω στην επιφάνεια της γης περιορίζοντας την απώλεια θερμότητας και συμβάλλοντας επομένως στην διατήρηση της μέσης επιφανειακής θερμοκρασίας της γης. Όμως, οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες αύξησαν σημαντικά την συγκέντρωση των αερίων του θερμοκηπίου προκαλώντας την επακόλουθη άνοδο της θερμοκρασίας.

Από τα αέρια του θερμοκηπίου την σημαντικότερη μεταβολή παρουσιάζει το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), του οποίου η συγκέντρωση έχει αυξηθεί από 280ppm που ήταν πριν την βιομηχανική εποχή σε 400ppm σήμερα. Η μεγαλύτερη έκλυση διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα προέρχεται από την καύση ορυκτών καυσίμων (πετρελαίου, άνθρακα, βενζίνης κ.α) και προκύπτει από δραστηριότητες που αφορούν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, την βιομηχανία, την μεταφορά και την θέρμανση.

Η IPCC (2014) στην πέμπτη της αξιολόγηση για την κλιματική αλλαγή θεωρεί πλέον πιθανό και με μεγάλη βεβαιότητα ότι αυτή η άνοδος της θερμοκρασίας οφείλεται κατά 95% στις ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Σημειωτέον, η προηγούμενη αξιολόγηση της IPCC το 2007 εκτιμούσε αυτό το ποσοστό συμβολής του ανθρώπου στην κλιματική αλλαγή σε 90%. Η διαφορά ανάμεσα στα ποσοστά έγκειται στο ότι το 2007 η IPCC επικεντρώθηκε μόνο στα

αέρια του θερμοκηπίου από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες ενώ το 2014 αναφερόταν σε όλες τις επιρροές του ανθρώπου στο κλίμα.

2.2 Παρατηρούμενες μεταβολές λόγω κλιματικής αλλαγής

Σύμφωνα με τα δεδομένα των δορυφόρων που βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τη γη και με την ανάπτυξη της τεχνολογίας, οι επιστήμονες έχουν συλλέξει πολλές και διαφορετικές πληροφορίες σχετικά με τον πλανήτη και το κλίμα παγκοσμίως. Τα στοιχεία αυτά έχουν συλλεχθεί για πολλά χρόνια και καταδεικνύουν την αλλαγή του κλίματος. Στοιχεία που έχουν συλλεχθεί από τα παγοκαλύμματα της Γροιλανδίας και Ανταρκτικής δείχνουν ότι το κλίμα επηρεάζεται από την αύξηση των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου. Δεδομένα επίσης συλλέγονται από κοραλλιογενείς υφάλους, ιζήματα ωκεανών, παλαιό ακτογραμμές κλπ και εν γένει επισημαίνεται ότι όλα τα επιστημονικά στοιχεία που έχουν συλλεχθεί για την υπερθέρμανση του πλανήτη είναι αναμφισβήτητα. Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά μερικά γεγονότα που συνηγορούν στην αλλαγή του κλίματος.

❖ Αύξηση της θερμοκρασίας

Έχει αποδειχθεί ότι η μέση θερμοκρασία της γης έχει αυξηθεί κατά 0.9°C σε σχέση με το τέλος του 19ου αιώνα (Πηγή: i). Σύμφωνα με τις ήδη υπάρχουσες καταγραφές, αναφέρεται ότι στις τρεις τελευταίες δεκαετίες η θερμοκρασία παρουσίαζε μια ανοδική τάση. Η Διακυβερνητική Επιτροπή για το Κλίμα (IPCC) εκτιμά ότι αυτή η άνοδος της θερμοκρασίας του πλανήτη χρήζει ιδιαίτερης σημασίας επειδή σε μεγάλο ποσοστό η άνοδος αυτή προκαλείται από τις ανθρωπίνες δραστηριότητες και εξακολουθεί να συνεχίζεται με ρυθμό που δεν υπάρχει ανάλογος στο παρελθόν ειδικά τα τελευταία 1.300 έτη.

Πρόσθετα, η IPCC εκτιμά ότι η αύξηση στην θερμοκρασία λόγω των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων για τα επόμενα 80 χρόνια θα κυμαίνεται μεταξύ των 1.8 και 4.0 βαθμών Κελσίου (IPCC,2007). Η άνοδος της θερμοκρασίας παγκοσμίως δεν αποτελεί μόνο τωρινό γεγονός καθώς αυτό συνέβαινε στις γεωλογικές περιόδους. Η διαφορά είναι ότι αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας τότε μπορούσε να αποδοθεί σε διάφορα γεωλογικά γεγονότα ή να συσχετιστεί με εκείνα (πχ αλλαγές στην τροχιά της γης, μεταβολές στην ηλιακή ακτινοβολία κλπ) ενώ για αυτή την σημερινή αύξηση φαίνεται να μην υπάρχει κάποια συγκεκριμένη αιτία ή έστω συσχέτιση με κάποιο σημαντικό γεγονός (Τράπεζα της Ελλάδας ΕΜΕΚΑ,2011).

❖ Άνοδος της στάθμης της θάλασσας

Η ανύψωση της στάθμης της θάλασσας γίνεται πολύ νωρίτερα από ότι αναμενόταν και ήδη αποτελεί απειλή για περίπου ένα δισεκατομμύριο ανθρώπους σε όλο τον κόσμο που ζουν σε παραλίμνιες και παράκτιες περιοχές. Η αύξηση της θερμοκρασίας αναμένεται να έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θαλάσσιας στάθμης καθώς θα λιώνουν τα παγοκαλύμματα και τα μικρά παγόβουνα. Σύμφωνα με τα κλιματικά μοντέλα, τα δορυφορικά δεδομένα και τις υδρογραφικές παρατηρήσεις δεν καταγράφεται εξίσου άνοδος της στάθμης της θάλασσας σε όλο τον κόσμο ενώ αναφέρεται ότι η στάθμη της θάλασσας έχει αυξηθεί περίπου κατά 20 εκατοστά τον τελευταίο αιώνα (Πηγή: i).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι το ποσοστό ανόδου της στάθμης της θάλασσας, κατά την διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, είναι σχεδόν διπλάσιο από ότι του προηγούμενου αιώνα (Church and White, 2006). Τα μοντέλα πρόβλεψης για την κλιματική αλλαγή καταδεικνύουν μια σημαντική μεταβολή σε μελλοντική άνοδο της θαλάσσιας στάθμης τόσο σε παγκόσμιο όσο και σε τοπικό επίπεδο ενώ η IPCC καταλήγει στο ότι το αποτέλεσμα της μεταβολής αυτής θα είναι εξαιρετικά αρνητικό. Η περαιτέρω άνοδος της στάθμης θα έχει ως συνέπεια τον κατακλυσμό των υγροτόπων και πεδιάδων, τον αφανισμό των παραλιών όπως και την αύξηση της αλατότητας σε ποτάμια, κολπίσκους και υπόγεια ύδατα.

❖ Συρρίκνωση των πάγων

Σύμφωνα με τους επιστήμονες, τα παγοκαλύμματα της Γροιλανδίας και της Ανταρκτικής λιώνουν με πολύ πιο γρήγορο ρυθμό από ότι αναμενόταν και μάλιστα ο ρυθμός αυτός τείνει να αυξάνεται. Έρευνες της NASA έδειξαν ότι η Γροιλανδία έχασε κατά μέσο όρο περίπου 286 δισεκατομμύρια τόνους πάγου ετησίως μεταξύ των ετών 1993 και 2016 ενώ η Ανταρκτική περίπου 127 δισεκατομμύρια τόνους πάγου αντίστοιχα (Πηγή: i). Πρόσθετα, συγκεκριμένα για την Γροιλανδία οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι ο ρυθμός με τον οποίο λιώνουν οι πάγοι είναι τέσσερις φορές ταχύτερος από ότι ήτανε το 2003. Όσον αφορά για την Ανταρκτική εκτιμάται ότι ο ρυθμός με τον οποίο λιώνουν οι πάγοι είναι έξι φορές γρηγορότερος σε σχέση με το 1980 όπου το αντίστοιχο ήτανε 44 δισεκατομμύρια τόνοι.

Τονίζεται ότι τα παγοκαλύμματα αποτελούν τους πιο άμεσους δέκτες της κλιματικής αλλαγής και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο όγκος τους αυξάνει όταν το κλίμα είναι ψυχρό και ελαττώνεται όταν είναι θερμό. Οι Ambach and Kuhn (1989) μελέτησαν την συσχέτιση ανάμεσα στο ρυθμό ελάττωσης του όγκου των πάγων με τα φυσικά φαινόμενα όπως η θερμοκρασία και οι βροχοπτώσεις και παρατήρησαν ότι παρόλο που η θερμοκρασία αποτελεί τον πιο σημαντικό παράγοντα που καθορίζει την έκταση και τον όγκο των παγοκαλυμμάτων, εξίσου σημαντικά επηρεάζουν και οι αλλαγές στον εποχιακό κύκλο, στην βροχόπτωση και στην νέφωση.

❖ Ωκεανοί

Οι ωκεανοί αποτελούν τους αποδέκτες όλων αυτών των αλλαγών στο κλίμα καθώς αναφέρεται ότι λόγω της ποσότητας του διοξειδίου του άνθρακα που εισήλθε στους ωκεανούς από την ατμόσφαιρα είχε ως αποτέλεσμα μια μέση μείωση του pH κατά 0.1 μονάδες. Το ποσοστό του διοξειδίου του άνθρακα που έχει απορροφηθεί από το ανώτερο στρώμα των ωκεανών αυξάνεται κατά δύο δισεκατομμύρια τόνους ετησίως (Sabine et al, 2004). Σύμφωνα με προβλέψεις που έχουν γίνει αναμένεται η οξύτητα των ωκεανών να αυξηθεί περαιτέρω, πιο συγκεκριμένα, προβλέπεται το συνολικό μέσο pH των ωκεανών να μειωθεί μεταξύ 0.14 και 0.35 μονάδες. Αυτή η προοδευτική αύξηση στην οξύτητα των ωκεανών αναμένεται να έχει αρνητικές επιπτώσεις για τους θαλάσσιους οργανισμούς.

❖ Ακραία καιρικά γεγονότα

Όσον αφορά την κλιματική αλλαγή και την επίδραση της στην εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων αναμένονται πιο συχνά και έντονα ακραία γεγονότα όπως πλημμύρες, καταστροφικές πυρκαγιές και ξηρασίες. Επισημαίνεται ότι ακραίο χαρακτηρίζεται ένα καιρικό φαινόμενο λόγω συχνής εμφάνισης ή μεγάλης έντασης ή και διάρκειας. Για παράδειγμα, στις Ηνωμένες Πολιτείες, μόνο σε ένα έτος καταγράφηκαν έντεκα πολύ σοβαρά καιρικά και κλιματικά γεγονότα, τα οποία προκάλεσαν καταστροφικές απώλειες και ζημιές. Εν γένει στα ακραία καιρικά φαινόμενα εντάσσονται μουσώνες, τροπικοί και εξωτροπικοί κυκλώνες, το φαινόμενο El Niño, πλημμύρες, ξηρασίες και κατολισθήσεις (IPCC, 2014). Η IPCC εκτιμά ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη θα έχει ως επακόλουθο την αύξηση των ακραίων κλιματικών και καιρικών γεγονότων ενώ αναμένεται μέχρι το τέλος του αιώνα οι πλημμύρες και οι ξηρασίες να είναι συχνότερες.

2.3 Κλιματική αλλαγή και επιπτώσεις στους υδατικούς πόρους

Η μελέτη και κατανόηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στους υδατικούς πόρους και στην υδρολογία εν γένει, κρίνεται άκρως απαραίτητη και επιτακτική για την επίλυση σημαντικών θεμάτων που αφορούν την διαχείριση του υδατικού δυναμικού και των υδατικών αποθεμάτων, την διασφάλιση της ποιότητας των υδάτων αλλά και ευρύτερα την προστασία των υδάτινων οικοσυστημάτων. Συγκεκριμένα, επισημαίνεται ότι οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στους υδατικούς πόρους δεν σχετίζονται μόνο με τις αλλαγές στον όγκο, στην ποιότητα και στην αναπλήρωση των υδάτων αλλά αφορούν και τα χαρακτηριστικά του συστήματος, τις πιέσεις που δέχεται, την διαχείριση της εξέλιξης του καθώς και τα μέτρα προσαρμογής που θα πρέπει να εφαρμοστούν.

Την τελευταία δεκαετία και κυρίως τα τελευταία χρόνια έχουν δημοσιευτεί αρκετές έρευνες και μελέτες σχετικά με τις πιθανές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στον υδρολογικό κύκλο και κατ' επέκταση στους υδατικούς πόρους, αν και βέβαια αναφέρεται ότι υπάρχουν ακόμα πολλά κενά και αβεβαιότητες. Η εκτίμηση των δυνητικών επιπτώσεων έχει γίνει για κάθε μια παράμετρο του υδρολογικού κύκλου ενώ έχει ληφθεί επίσης υπόψη και η διακύμανση τους μέσα στον χρόνο.

Ο υδρολογικός κύκλος περιλαμβάνει μια αέναη και συνεχή σειρά διεργασιών, επηρεαζόμενος άμεσα από τις αλλαγές στην ατμόσφαιρα ενώ ο χαρακτηρισμός του ως κύκλος υποδηλώνει ότι δεν έχει αρχή και τέλος. Οι αλλαγές στον υδρολογικό κύκλο παρατηρούνται μέσα από τις μεταβολές στην βροχόπτωση, εξάτμιση, υγρασία εδάφους και επιφανειακή απορροή.

Η βροχόπτωση αποτελεί την κύρια κατευθυντήρια παράμετρο στο υδατικό ισοζύγιο και οποιαδήποτε μεταβολή στην βροχόπτωση έχει πολύ σημαντικές συνέπειες στους υδατικούς πόρους. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι ένα μέρος των κατακρημνισμάτων εξατμίζεται, ένα μέρος απορρέει επιφανειακά ενώ το απομένον κατεισδύει στην εδαφική και υπεδαφική ζώνη. Η άνοδος στην θερμοκρασία θα προκαλέσει μεταβολές στα κατακρημνίσματα και επομένως στην εξατμισοδιαπνοή και την επιφανειακή απορροή. Οι οποίες εν συνεχεία θα έχουν επιπτώσεις στην υγρασία του εδάφους, στα υπόγεια ύδατα και εν τέλει στο υδατικό ισοζύγιο.

Εκτός από τις αλλαγές στον υδρολογικό κύκλο, η αλλαγή του κλίματος αναμένεται να επηρεάσει και την ποιότητα των υδάτων. Σύμφωνα με τους Feenstra et al.(1998), η κλιματική αλλαγή μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα του νερού με τους παρακάτω τρεις τρόπους. Πρώτον, η μείωση των κατακρημνισμάτων θα έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των υδατικών πόρων, πρωτίστως των επιφανειακών.

Αυτή η μείωση στην επιφανειακή απορροή και κατ' επέκταση στον ρυθμό ανανέωσης των υδάτων έχει ως άμεσο αντίκτυπο την υποβάθμιση της ποιότητας τους. Για παράδειγμα, όταν ο ρυθμός ανανέωσης των υδάτων είναι πολύ αργός ή αυτά παραμένουν στάσιμα για μεγάλους περιόδους, δεν εμφανίζουν τα ίδια ποιοτικά χαρακτηριστικά όπως εάν υπήρχε ανανέωση στη ροή ή η ροή ήταν συνεχής.

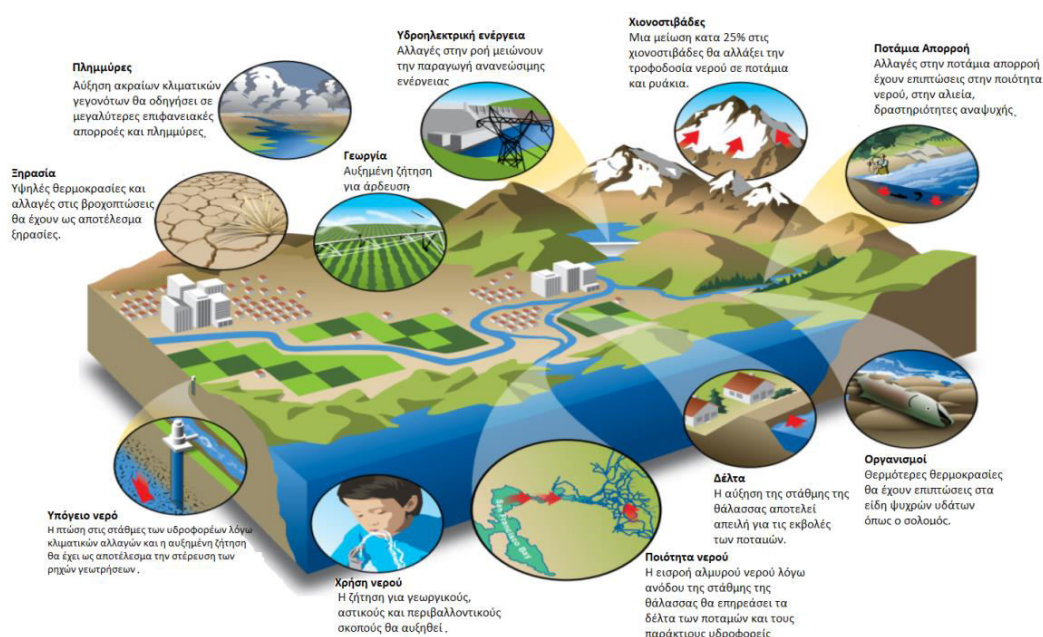
Δεύτερον, οι υψηλές θερμοκρασίες αναμένεται να μειώσουν την συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου που περιέχεται στα υδάτινα συστήματα. Για παράδειγμα, αναφέρεται ότι η μείωση των επιπέδων του διαλυμένου οξυγόνου λόγω αύξησης της θερμοκρασίας της θάλασσας καθώς και του εμπλουτισμού σε οργανική ύλη θα έχει ως αποτέλεσμα την εξάπλωση ασθενειών στους θαλάσσιους οργανισμούς, την πρόκληση ζημιών στις υδατοκαλλιέργειες και αλιείες όπως επίσης και την ραγδαία αύξηση εμφάνισης των αλγών στις παράκτιες περιοχές.

Τονίζεται ότι το διαλυμένο οξυγόνο βοηθά στην αραίωση και αποδόμηση των ρύπων και συνεπώς η μείωση του επιδρά σημαντικά στην ποιότητα των υδάτων. Όσον αφορά τον τρίτο τρόπο, σχετικά με την ποιότητα των υδάτων λόγω κλιματικής αλλαγής αναφέρεται ότι οι χρήσεις ύδατος, και ιδίως εκείνες που συνδέονται με γεωργικές και αγροτικές δραστηριότητες, μπορεί να αυξήσουν τις συγκεντρώσεις των ρύπων στα υδάτινα συστήματα.

Επισημαίνεται ότι οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής είναι πολυδιάστατες καθώς πέρα από τους υδατικούς πόρους, αυτούς καθαυτούς αναμένεται να επηρεάσουν και άλλους τομείς που έχουν σχέση με το νερό, είτε άμεση είτε έμμεση, όπως είναι η γεωργία και η παραγωγή τροφίμων, η βιομηχανία, η ενέργεια και άλλα παρεχόμενα αγαθά και υπηρεσίες με εν τέλει αντίκτυπο στην οικονομία και την κοινωνία.

Ιδιαίτερως μεγάλη βαρύτητα δίδεται στον τομέα της γεωργίας καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής κατανάλωσης νερού παγκοσμίως χρησιμοποιείται για άρδευση. Η αύξηση της θερμοκρασίας και της εξατμισοδιαπνοής σε συνδυασμό με την μεταβλητότητα των βροχοπτώσεων αναμένεται να έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της ζήτησης του νερού στον τομέα της γεωργίας. Σε συνέχεια των ανωτέρω, η κλιματική αλλαγή αναμένεται να επηρεάσει και την παραγωγή τροφίμων καθώς τα ακραία καιρικά φαινόμενα και η μείωση στην διαθεσιμότητα του νερού μπορεί να έχουν ως συνέπεια τη μείωση της παραγωγής.

Εν γένει σύμφωνα με ανάλογη μελέτη της IPCC, για την κλιματική αλλαγή και τους υδατικούς πόρους, εκτιμάται αύξηση στην συχνότητα εμφάνισης των ακραίων φαινομένων όπως πλημμύρες και ξηρασίες, μείωση στην παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, υποβάθμιση των υδατικών συστημάτων ενώ είναι πολύ πιθανό να υπάρχουν και επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου λόγω υποβάθμισης της ποιότητας των υδάτων (Bates et al, 2008). Στην παρακάτω εικόνα περιγράφονται συνοπτικώς τα προαναφερθέντα όσον αφορά τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στους υδατικούς πόρους είτε αυτές αφορούν τους υδατικούς πόρους άμεσα πχ ποιότητα υδάτων είτε τις χρήσεις του νερού στους διάφορους τομείς (εικ.2.1).



Εικόνα 2.1: Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στους υδατικούς πόρους.
(Πηγή: μεταφρασμένο από Demuth S. ppt, UNESCO)

2.3.1 Επιπτώσεις στα υπόγεια ύδατα

Οι αλλαγές στα χαρακτηριστικά (συχνότητα, ένταση) των βροχοπτώσεων σε συνδυασμό με την αύξηση στην εξατμισοδιαπνοή, ως απόρροια των αυξημένων θερμοκρασιών, θα επηρεάσουν τους ρυθμούς αναπλήρωσης των υπόγειων υδάτων και επομένως και τις στάθμες των υδροφόρων οριζόντων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αναπλήρωση των υδροφόρων γίνεται κυρίως μέσω των βροχοπτώσεων και από την αλληλεπίδραση τους με τα επιφανειακά υδάτινα συστήματα, οπότε οποιαδήποτε αλλαγή στις βροχοπτώσεις και συνεπώς και στα επιφανειακά ύδατα αυτομάτως θα επηρεάσει και τα υπόγεια.

Σύμφωνα με τον Shah (2009), η αύξηση των βροχοπτώσεων σε περιοχές όπου το κλίμα χαρακτηρίζεται από υψηλή σχετική υγρασία (υγρό κλίμα) πιθανά θα έχει αρνητικές επιπτώσεις στην φυσική αναπλήρωση. Αντίθετα, μια τέτοια αύξηση σε περιοχές με άνυδρο και ημιάνυδρο κλίμα θα έχει ως επακόλουθο την αυξημένη αναπλήρωση των υπόγειων υδάτων. Αυτό συμβαίνει επειδή μια βροχόπτωση με υψηλή ένταση, σε περιοχές με ξερά και ημί ξερά κλίματα, κατεισδύει γρήγορα πριν αρχίσει η εξάτμιση (Bates et al, 2009). Αναφέρεται βέβαια ότι σε αυτό συμβάλλουν και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των εδαφών των περιοχών αυτών.

Σε σύγκριση με τα επιφανειακά ύδατα, οι υδροφορείς επηρεάζονται λιγότερο από τις αλλαγές στο κλίμα και μπορούν να αποθηκεύσουν νερό κατά την διάρκεια ξηρών περιόδων (Shah, 2009). Η υπόγεια ροή σε αβαθείς υδροφορείς αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα του υδρολογικού κύκλου και επηρεάζεται από τις κλιματικές μεταβολές καθώς και από τις ανθρώπινες δραστηριότητες σε πολλούς τομείς (Chen et al, 2002). Η IPCC εκτιμά ότι οι στάθμες των υδροφόρων παγκοσμίως παρουσιάζουν μια μειούμενη τάση τις τελευταίες δεκαετίες, η οποία οφείλεται στην υπερεκμετάλλευση των υπόγειων υδάτων, που υπερβαίνει τα ποσοστά αναπλήρωσης και όχι στην μείωση των ποσοτήτων αναπλήρωσης λόγω της κλιματικής αλλαγής.

Όσον αφορά την αναπλήρωση και τα επίπεδα των υπόγειων υδάτων τόσο στις ανεπτυγμένες όσο και στις αναπτυσσόμενες χώρες οι πληροφορίες είναι συγκεχυμένες ενώ λίγες μελέτες έχουν διεξαχθεί σχετικά με τις μελλοντικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα υπόγεια ύδατα. Αναμένεται στα υψηλά γεωγραφικά πλάτη ως απόρροια της συρρίκνωσης των πάγων και των αλλαγών στην επιφανειακή απορροή να υπάρχουν αλλαγές τόσο στην ποιότητα όσο και στην ποσότητα των υπόγειων υδάτων.

Πρόσθετα, με βάση τα σενάρια που έχουν εκπονηθεί από την IPCC αναμένεται, η αναπλήρωση των υπόγειων υδάτων να μειωθεί μέχρι το 2050 σε ποσοστό πάνω από 70% σε περιοχές όπως η βορειοανατολική Βραζιλία, νοτιοδυτική Αφρική και στις νότιες παράκτιες χώρες της Μεσογείου. Βέβαια αναφέρεται στα σενάρια αυτά δεν έχει ληφθεί υπόψη η αύξηση στις βροχοπτώσεις επομένως, η μείωση αυτή πιθανώς να είναι υπερεκτιμημένη. Αντίθετα, σε περιοχές όπως η ζώνη του Σάχελ στην Αφρική, η Εγγύς Ανατολή, βόρεια Κίνα, Σιβηρία και δυτικά των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής, η αναπλήρωση των υπόγειων υδάτων αναμένεται να έχει αυξηθεί πάνω από 30% μέχρι το 2050.

Ένα μεγάλο μέρος του νερού που κατεισδύει στο έδαφος συμβάλλει στην αναπλήρωση των υπόγειων υδάτων. Η κλιματική αλλαγή μπορεί να προκαλέσει αλλαγές στα χαρακτηριστικά των εδαφών. Τα χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως η εδαφική υγρασία, ρυθμίζουν και επηρεάζουν την ροή του νερού μέσα στο έδαφος. Οι μεταβολές στην υγρασία του εδάφους μπορούν να προβλεφθούν μέσα από τα μοντέλα για την κλιματική αλλαγή. Αναμένεται η εδαφική υγρασία να επηρεαστεί και να μεταβληθεί τόσο λόγω των άμεσων συνεπειών της κλιματικής αλλαγής όσο και των έμμεσων, όπως η αλλαγή των χαρακτηριστικών του εδάφους.

Για παράδειγμα, η ικανότητα συγκράτησης του νερού από το έδαφος αποτελεί ένα πολύ σημαντικό παράγοντα για την υγρασία συγκεκριμένα αποτελεί ισοδύναμο της εδαφικής υγρασίας. Εδάφη με χαμηλή ικανότητα συγκράτησης επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τις αλλαγές στο κλίμα. Πρόσθετα, εκτός από την ικανότητα συγκράτησης, μια επερχόμενη αλλαγή στο κλίμα μπορεί να επηρεάσει και την ικανότητα διήθησης του εδάφους, παραδείγματος χάρη συχνές και απότομες αλλαγές στην θερμοκρασία του εδάφους (ψύξη) επηρεάζουν την ικανότητα διήθησης (Kumar,2012).

Όσον αφορά την κλιματική αλλαγή και την αναπλήρωση των υδροφορέων, αναμένεται να επηρεάσει διαφορετικώς τους ελεύθερους και περιορισμένους υδροφορείς. Αναφέρεται ότι οι ελεύθεροι υδροφορείς είναι πολύ πιο τρωτοί σε επερχόμενες αλλαγές στο κλίμα σε τοπική κλίμακα ενώ οι περιορισμένοι δεν φαίνεται να επηρεάζονται στον ίδιο βαθμό. Η ευπάθεια των ελεύθερων υδροφορέων στις αλλαγές του κλίματος συνιστάται στο γεγονός ότι είναι περισσότερο εκτεθειμένοι έναντι των περιορισμένων. Αναφέρεται όμως ότι η αναπλήρωση των υδροφορέων δεν σχετίζεται μόνο με την κλιματική αλλαγή αλλά και από τα ειδικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα και του εδάφους.

Το ποσοστό της αναπλήρωσης των υπόγειων υδάτων μπορεί να προβλεφθεί μόνο μέσω των μαθηματικών μοντέλων. Βέβαια, η μοντελοποίηση θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη όλες τις πιθανές παραμέτρους που εμπλέκονται για είναι επιτυχής. Η ορθότητα των αποτελεσμάτων εξαρτάται από την διαθεσιμότητα των κλιματικών και υδρογεωλογικών δεδομένων. Η πρόβλεψη των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στα υπόγεια ύδατα συνιστά μια πολύπλοκη και πολύ δύσκολη διεργασία καθώς πέραν των πολλών παραμέτρων που συμβάλλουν στην υπόγεια ροή, θα πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη και η κατανομή των κλιματικών ζωνών.

Σοβαρά προβλήματα μπορεί να προκύψουν στις παράκτιες περιοχές όπου οι παράκτιοι υδροφορείς αποτελούν το μόνο απόθεμα γλυκού νερού. Μια ενδεχόμενη εισροή αλμυρού νερού (υφαλμύριση) στους υδροφορείς μπορεί να έχει μη αναστρέψιμες επιπτώσεις για τις περιοχές αυτές. Η άνοδος της στάθμης της θάλασσας, ως απόρροια της κλιματικής αλλαγής, συμβάλλει στην υφαλμύριση των παράκτιων υδροφορέων με τους πιο αβαθείς υδροφορείς να είναι οι πλέον τρωτοί.

3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ

3.1 Η συμβολή του μοντέλου

Η μοντελοποίηση των υπόγειων υδάτων αποτελεί ένα σημαντικό μέσο στην διαχείριση, προστασία και αποκατάσταση των υπόγειων συστημάτων. Η προσομοίωση της υπόγειας ροής συνιστά έναν τρόπο, με τον οποίο ένα σύστημα δύναται να αναπαρασταθεί σε μια άλλη μορφή προκειμένου να διερευνηθεί η απόκριση του συστήματος στις διάφορες συνθήκες και μεταβολές όπως επίσης και να προβλεφθεί η συμπεριφορά του στο μέλλον. Γενικά, αναφέρεται ότι ένα μοντέλο αποτελεί μια απλοποιημένη αναπαράσταση ύπαρξης ή λειτουργίας ενός συστήματος. Για παράδειγμα, ένα μοντέλο υπόγειας ροής απλοποιεί τις ήδη υπάρχουσες υδρογεωλογικές γνώσεις και τις εκφράζει με μια γραπτή μορφή όπως διαγράμματα ροής, πίνακες, διατομές κλπ.

Σκοπός της μοντελοποίησης στην υδρογεωλογία είναι η πρόβλεψη της τιμής μιας άγνωστης παραμέτρου (πχ υδραυλικού ύψους, συγκέντρωση ρύπου) ή ακόμα και οι συνέπειες από την μη ορθολογική χρήση των υδατικών πόρων (πχ υπεράντληση). Βέβαια, η εγκυρότητα των προβλέψεων εξαρτάται από τον βαθμό προσέγγισης των συνθηκών στο πεδίο. Ειδικά όταν πρόκειται για προβλέψεις, απαιτούνται όσο το δυνατόν περισσότερα δεδομένα πεδίου καθώς και ο συνεχής εμπλουτισμός τους.

Τα μοντέλα εφαρμόζουν μαθηματικές εξισώσεις για την περιγραφή και προσέγγιση των φυσικών συστημάτων και επομένως η χρησιμότητα και η συμβολή τους εξαρτάται από το πόσο καλά αυτές οι εξισώσεις περιγράφουν το φυσικό σύστημα που πρόκειται να μοντελοποιηθεί. Η υπόγεια ροή και η μεταφορά μάζας ρύπων εκφράζονται μέσω μαθηματικών εξισώσεων οι οποίες βασίζονται σε απλουστευμένες παραδοχές. Τέτοιες παραδοχές παραδείγματος χάρι, αφορούν την γεωμετρία του υδροφορέα, την ετερογένεια ή την ανισοτροπία των γεωλογικών σχηματισμών, την διεύθυνση της ροής, τους μηχανισμούς μεταφοράς των ρύπων καθώς και τις χημικές αντιδράσεις.

Η μοντελοποίηση αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία κατά την οποία θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όλες οι πιθανές παράμετροι. Ανάλογα με τους σκοπούς, τις ανάγκες και τις ιδιαιτερότητες έχουν αναπτυχθεί πολλά και διαφορετικά μοντέλα. Ενδεικτικά, υπάρχουν μοντέλα τα οποία εφαρμόζονται για την ροή στην ακόρεστη ζώνη, για φαινόμενα διείσδυσης του θαλασσινού νερού στις παράκτιες περιοχές, διάχυσης και διασποράς των ρύπων και άλλα. Παρόλο που τα μοντέλα είναι ατελή και λόγω των αβεβαιοτήτων που μπορεί να εμπεριέχουν, οι οποίες μπορεί να οφείλονται σε ελλιπή δεδομένα, μη επαρκείς γεωλογικές και υδρογεωλογικές πληροφορίες για την περιοχή μελέτης, σφάλματα στο μοντέλο, αποτελούν χρήσιμες τεχνικές στην επιστήμη της υδρογεωλογίας.

3.2 Κατηγορίες μοντέλων υπόγειας ροής

Όπως προαναφέρθηκε έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι μοντέλων για την προσομοίωση της υπόγειας ροής και της μεταφοράς των ρύπων.

- Φυσικά μοντέλα

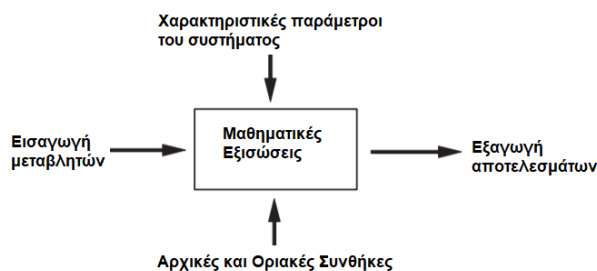
Τα φυσικά μοντέλα αναπτύσσονται στο εργαστήριο με στόχο την διερεύνηση και την μελέτη συγκεκριμένων προβλημάτων που σχετίζονται με την ροή των υπόγειων υδάτων και της μεταφοράς των ρύπων. Επιπλέον, τα μοντέλα αυτά μπορούν να αναπαραστήσουν διάφορα υδρογεωλογικά φαινόμενα, όπως π.χ. η αρτεσιανή ροή, προσεγγίζοντας σε ικανοποιητικό βαθμό τις φυσικές συνθήκες. Παρόλο που η δημιουργία και η ρύθμιση των φυσικών μοντέλων συνιστά μια εύκολη διεργασία, τα φυσικά μοντέλα δεν μπορούν να χειριστούν πολύπλοκα προβλήματα της πραγματικότητας, το οποίο αποτελεί ένα από τα βασικά μειονεκτήματά τους.

- Αναλογικά μοντέλα

Το πιο γνωστό αναλογικό μοντέλο είναι το μοντέλο ροής του ηλεκτρικού ρεύματος, το οποίο είναι ανάλογο με το μοντέλο ροής των υπόγειων υδάτων. Δυο συστήματα είναι ανάλογα όταν υπάρχει αντιστοιχία ένα προς ένα μεταξύ των χαρακτηριστικών εξισώσεων που περιγράφουν κάθε σύστημα. Η εξίσωση που περιγράφει την υπόγεια ροή σε ένα ισότροπο, ομογενές, πορώδες μέσο είναι η εξίσωση του Laplace, η οποία συναντάται σε προβλήματα που συνδέονται με δυναμικά και πεδία και έχει φυσικό-μαθηματικές εφαρμογές όπως είναι η ροή θερμότητας και ο ηλεκτρισμός. Η ροή του υπόγειου νερού σε ένα πορώδες μέσο είναι ανάλογη με την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος σε δίκτυο αντιστάτη- πυκνωτή. Οι αντιστάτες αναπαριστούν την αντίσταση στην υπόγεια ροή ενώ οι πυκνωτές λειτουργούν ως δεξαμενές αποθήκευσης νερού. Άλλα αναλογικά μοντέλα μπορούν εύκολα να δημιουργηθούν για την μελέτη της κίνησης του υπόγειου νερού, στις περισσότερες περιπτώσεις δεν μπορούν όμως να εφαρμοστούν και για την προσομοίωση μεταφοράς των ρύπων στο υπόγειο νερό.

- Μαθηματικά μοντέλα

Μετά την εμφάνιση των υπολογιστών και την ταχεία ανάπτυξη των επεξεργαστών τους, τα μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούνται περισσότερο τις τελευταίες δεκαετίες και είναι ευρέως διαδεδομένα είναι τα μαθηματικά μοντέλα. Ένα μαθηματικό μοντέλο αναπαριστά την συμπεριφορά ενός συστήματος μέσα από ένα σύνολο εξισώσεων, εκφράζοντας τις σχέσεις ανάμεσα σε μεταβλητές και παραμέτρους (Clarke, 1973) (σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Μέρη ενός μαθηματικού μοντέλου (Πηγή: Essink, 2000).

3.3 Μαθηματικά μοντέλα

Αναφέρεται ότι ένα μαθηματικό μοντέλο προσομοιώνει έμμεσα την υπόγεια ροή, μέσα από εξισώσεις που θεωρούνται ότι αντιπροσωπεύουν τις φυσικές διεργασίες που συμβαίνουν στο σύστημα σε συνδυασμό με εξισώσεις που περιγράφουν τις ροές κατά μήκος των ορίων του μοντέλου (Anderson and Woessner, 1992). Η **μεθοδολογία επίλυσης των μαθηματικών μοντέλων** μπορεί να είναι είτε **αναλυτική** (αναλυτικά μοντέλα) είτε **αριθμητική** (αριθμητικά μοντέλα).

Οι αναλυτικές επιλύσεις έχουν εφαρμογή μόνο σε απλοποιημένα προβλήματα υπόγειας ροής και μεταφοράς ρύπων. Στα πλεονεκτήματα των αναλυτικών μοντέλων συγκαταλέγονται η απλή και εύκολη εφαρμογή τους καθώς και η δυνατότητα τους να αποδίδουν συνεχή αποτελέσματα σε απλά προβλήματα. Εν αντιθέσει, με τις αριθμητικές επιλύσεις, οι αναλυτικές επιλύσεις δίδουν συνεχόμενα αποτελέσματα για οποιοδήποτε σημείο του προβλήματος. Εξαιτίας της απλοϊκότητας τους οι αναλυτικές επιλύσεις δεν μπορούν να διαχειριστούν πολύπλοκα προβλήματα αν και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορούν να λειτουργήσουν ως μέσο επαλήθευσης σε προβλήματα που έχουν επιλυθεί με αριθμητική μέθοδο. Τα πεδία εφαρμογής των αναλυτικών μεθόδων επίλυσης περιλαμβάνουν απλά προβλήματα και καταστάσεις όπως π.χ. ομογενείς υδροφόρους, μια ή δυο διαστάσεις, σταθερή ροή κα.

Οι αριθμητικές μέθοδοι αναπτύχθηκαν για να επιλύσουν πολύπλοκα προβλήματα των υπόγειων συστημάτων που δεν μπορούσαν να επιλυθούν με τις αναλυτικές λύσεις. Με την ραγδαία ανάπτυξη των μικροεπεξεργαστών, η εφαρμογή των αριθμητικών επιλύσεων αυξήθηκε αντικαθιστώντας σχεδόν ολοκληρωτικά τις αναλυτικές μεθόδους επίλυσης. Σε ένα αριθμητικό μοντέλο, οι αριθμητικές μέθοδοι περιλαμβάνουν ένα σύνολο από αλγεβρικές εξισώσεις με διακριτές τιμές.

Αναφέρεται ότι όλα τα αριθμητικά μοντέλα των υπόγειων υδάτων επιλύουν ένα σύνολο από μερικές διαφορικές εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν την υπόγεια ροή, την ταχύτητα και την μεταφορά μάζας ρύπων. Επισημαίνεται ότι για την μοντελοποίηση της υπόγειας ροής υπάρχουν πέντε αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης. Πρόκειται για τις μεθόδους πεπερασμένων διαφορών, πεπερασμένων στοιχείων, ολοκληρωμένων πεπερασμένων διαφορών, ολοκληρωμένης οριακής εξίσωσης και αναλυτικών στοιχείων. Από αυτές οι πιο διαδεδομένες, για την επίλυση προβλημάτων υπόγειας ροής και μεταφοράς μάζας, είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών (Anderson and Woessner, 1992).

3.3.1 Αριθμητικές Μέθοδοι

Όπως προαναφέρθηκε από τις αριθμητικές μεθόδους, οι πιο εύχρηστες και διαδεδομένες είναι οι μέθοδοι των πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων, οι οποίες και αναλύονται παρακάτω. Οι μέθοδοι ολοκληρωμένης οριακής εξίσωσης και των αναλυτικών στοιχείων δεν είναι τόσο διαδεδομένες και αποτελούν νεότερες τεχνικές σε σχέση με τις υπόλοιπες ενώ η μέθοδος των ολοκληρωμένων πεπερασμένων διαφορών σχετίζεται αρκετά με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Ένας κώδικας ή ένα υπολογιστικό πρόγραμμα επιλύει μια σειρά από αλγεβρικές εξισώσεις που προκύπτουν από την προσέγγιση των μερικών διαφορικών εξισώσεων (θεμελιώδεις εξισώσεις, οριακές και αρχικές συνθήκες) οι οποίες συνιστούν το μαθηματικό μοντέλο. Αυτό το σύνολο των αλγεβρικών εξισώσεων, με τις μεθόδους των πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων, μπορούν να εκφραστούν ως συνάρτηση πινάκων και επομένως να επιλυθούν γρήγορα από έναν υπολογιστή.

Η επιλογή ανάμεσα σε αυτές τις δύο κύριες μεθόδους εξαρτάται από το πρόβλημα το οποίο πρόκειται να επιλυθεί και από τον χρήστη. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι πιο απλή και ευκατανόητη και γενικά δεν απαιτούνται πολλά δεδομένα για την κατασκευή του πλέγματος των πεπερασμένων διαφορών. Αναφέρεται όμως ότι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να προσεγγίσει καλύτερα τα όρια ακανόνιστου σχήματος από ότι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών. Πρόσθετα, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να διαχειριστεί καλύτερα εσωτερικά όρια όπως είναι ζώνες ρηγμάτων και μπορεί να προσομοιώσει καλύτερα σημειακές πηγές, καταβόθρες και διαρροές από ότι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών. Οι Pinder και Gray (1977) απέδειξαν ότι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών αποτελεί ειδική περίπτωση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, παρά ταύτα οι δύο μέθοδοι παρουσιάζουν διαφορές.

Η βασική διαφορά των δύο μεθόδων απορρέει από την φιλοσοφία με την οποία έχουν δομηθεί. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών υπολογίζει μια τιμή για το υδραυλικό ύψος σε έναν κόμβο, η οποία επίσης είναι η μέση τιμή του υδραυλικού ύψους για το κελί το οποίο περιβάλλει τον κόμβο. Με τον τρόπο αυτό δεν υπάρχουν περιθώρια για το πώς κυμαίνεται το υδραυλικό ύψος από τον έναν κόμβο στον επόμενο. Αντίθετα, με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων καθορίζεται η μεταβολή του υδραυλικού ύψους μέσα σε ένα στοιχείο με συναρτήσεις. Για λόγους ευκολίας το υδραυλικό ύψος υπολογίζεται στους κόμβους και με τις συναρτήσεις ορίζεται παντού (Anderson and Woessner, 1992).

3.3.2 Οριακές συνθήκες

Τα μαθηματικά μοντέλα συνιστώνται από τις θεμελιώδεις εξισώσεις, τις οριακές και αρχικές συνθήκες. Οι οριακές συνθήκες αποτελούν την μαθηματική έκφραση για τον προσδιορισμό της εξαρτώμενης μεταβλητής (υδραυλικό ύψος) ή της παράγωγου της εξαρτώμενης μεταβλητής (ροή) στα όρια της περιοχής μελέτης. Ο καθορισμός των οριακών συνθηκών είναι απαραίτητος για τον σχεδιασμό του μοντέλου και ως εκ τούτου απαιτείται προσεκτική μελέτη και σωστή επιλογή οριακών συνθηκών καθώς σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση μπορεί να υπάρξουν σφάλματα στο μοντέλο και τα αποτελέσματα να μην είναι αντιπροσωπευτικά για την περιοχή μελέτης.

Αναφέρεται ότι υπάρχουν δύο ειδών όρια για τα υπόγεια συστήματα, τα φυσικά και τα υδραυλικά. Τα φυσικά όρια των υπόγειων συστημάτων ορίζονται από την παρουσία ενός αδιαπέρατου γεωλογικού στρώματος ή από ένα μεγάλο επιφανειακό υδάτινο σώμα. Γενικά, συνιστάται περισσότερο η χρήση φυσικών ορίων, όπου αυτό είναι εφικτό, καθώς μπορούν εύκολα να εντοπιστούν και να καθοριστούν και επομένως να εισαχθούν στο εννοιολογικό μοντέλο.

Άλλα όρια ορίζονται ως αποτέλεσμα υδρολογικών συνθηκών και είναι μη εμφανή. Πρόκειται για τα υδραυλικά όρια που περιλαμβάνουν υπόγεια χωρίσματα και γραμμές ροής. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των υδραυλικών ορίων και που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι η μη σταθερότητα τους. Συγκεκριμένα μπορεί να μεταβληθούν ή να απαλειφτούν εάν αλλάξουν οι υδρολογικές συνθήκες.

Τα όρια εκφράζονται με τους ακόλουθους τρεις τύπους μαθηματικών συνθηκών, συγκεκριμένα, πρόκειται για τους τύπους I, II, III (Anderson and Woessner, 1992).

- Τύπος I (Συνθήκες Dirichlet)

Περιγράφει όρια καθορισμένου υδραυλικού ύψους όταν το υδραυλικό ύψος είναι καθορισμένο. Τα όρια καθορισμένου υδραυλικού ύψους αντιπροσωπεύουν μια συνεχής εισροή νερού χωρίς να μεταβάλλεται το υδραυλικό ύψος στο όριο.

- Τύπος II (Συνθήκες Neumann)

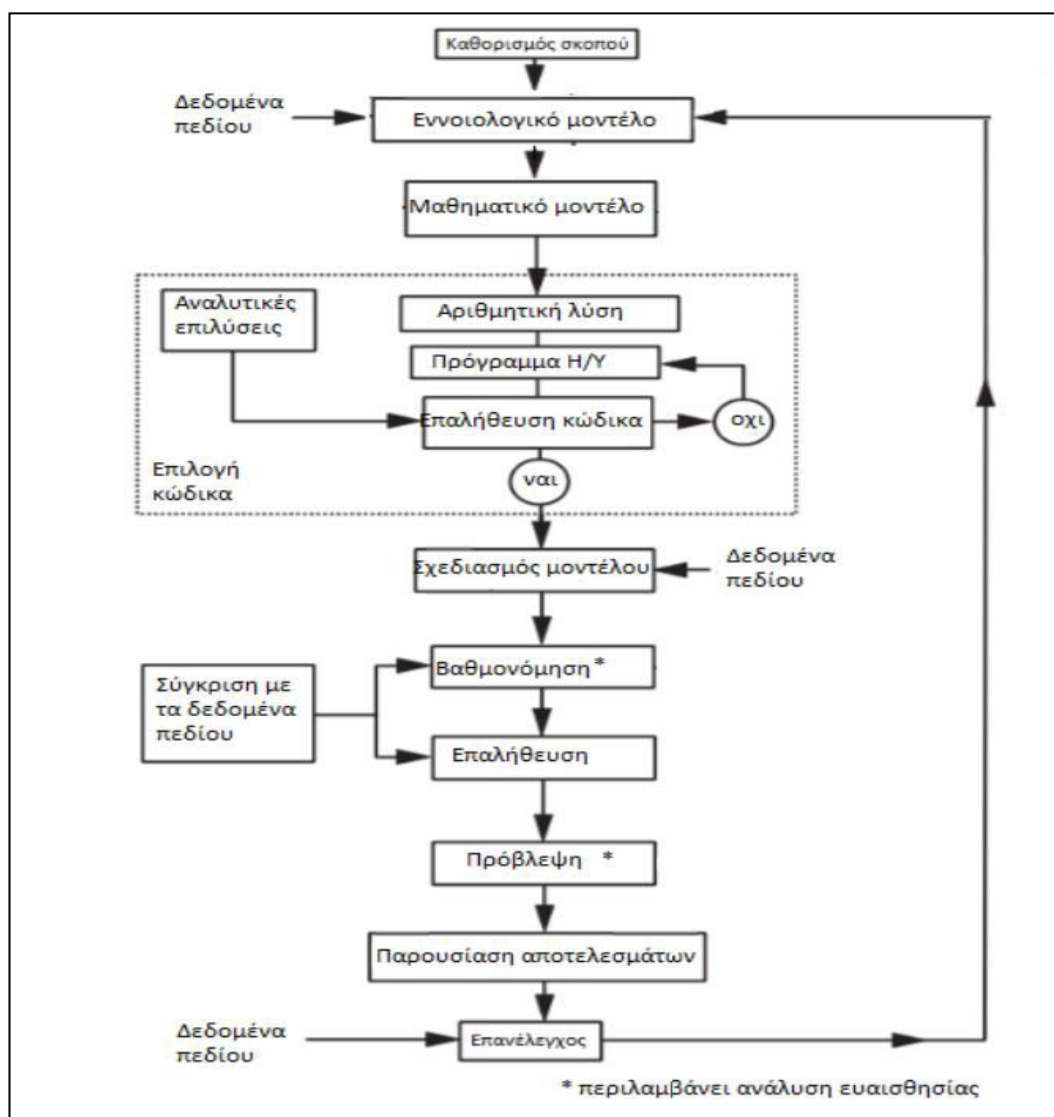
Πρόκειται για όρια καθορισμένης ροής, όπου η ροή (η παράγωγος του υδραυλικού ύψους) κατά μήκος του ορίου είναι δεδομένη. Παραδείγματα ορίων καθορισμένης ροής είναι η φυσική επαναφόρτιση υδροφορέα, πηγάδια άντλησης κα. Μια ειδική συνθήκη αποτελεί η συνθήκη μηδενικής ροής, δηλαδή η ροή είναι ίση με μηδέν.

- Τύπος III (Συνθήκες Cauchy ή μεικτές συνθήκες)

Περιγράφει οριακές συνθήκες ροής εξαρτώμενες από το υδραυλικό ύψος, όπου η ροή κατά μήκος του ορίου υπολογίζεται για μια δεδομένη τιμή του υδραυλικού ύψους στο όριο. Ως εκ τούτου αυτή η συνθήκη ονομάζεται και μεικτή οριακή συνθήκη καθώς υπάρχει συσχετισμός ανάμεσα στις οριακές συνθήκες υδραυλικού ύψους (τύπου I) και ροής (τύπου II). Εξαρτάται από την διαφορά στη τιμή του υδραυλικού ύψους, που έχει εισαχθεί από τον χρήστη στην μια άκρη του ορίου και στην τιμή που έχει υπολογιστεί από το μοντέλο στην άλλη άκρη του ορίου.

3.4 Μεθοδολογία μοντελοποίησης

Απαιτείται να τηρηθεί και να εφαρμοστεί μια συγκεκριμένη διαδικασία για την μοντελοποίηση της υπόγειας ροής, η οποία συνιστάται από διαφορετικά στάδια. Σύμφωνα με το πρωτόκολλο της μοντελοποίησης ορίζεται κάθε ένα στάδιο ανάπτυξης ενός μοντέλου. Για την λήψη ορθών αποτελεσμάτων προϋποθέτεται η ορθή εφαρμογή της μεθοδολογίας μοντελοποίησης. Όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα προηγούνται πολλά στάδια πριν από το στάδιο της προσομοίωσης σε μια αλληλουχία το ένα με το άλλο. Κανένα στάδιο δεν θα πρέπει να παραλείπεται καθότι όλα μαζί συνθέτουν την αξιοπιστία ενός μοντέλου. Παρακάτω ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή των σταδίων της μοντελοποίησης (σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2: Πρωτόκολλο μοντελοποίησης για την εφαρμογή ενός μοντέλου.
(Πηγή: μεταφρασμένο από Anderson and Woessner, 1992)

I. Καθορισμός στόχου μοντελοποίησης

Το στάδιο αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς ορίζει τα θεμέλια της προσπάθειας μοντελοποίησης. Γίνεται διασαφήνιση του στόχου και του σκοπού της μελέτης, του επιδιωκόμενου αποτελέσματος όπως επίσης του είδους αλλά και της ζητούμενης εφαρμογής του μοντέλου. Τα μοντέλα των υπόγειων υδάτων, ανάλογα με τους στόχους της μοντελοποίησης, μπορεί να είναι ερμηνευτικά – διερευνητικά, πρόβλεψης και γενικά. Επομένως, το αντικείμενο του στόχου της μοντελοποίησης καθορίζει την επιλογή του μοντέλου.

II. Ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου

Ένα εννοιολογικό μοντέλο αποτελεί μια περιγραφική αναπαράσταση ενός υπόγειου συστήματος που ενσωματώνει γεωλογικές και υδρολογικές συνθήκες όπως επίσης και πληροφορίες σχετικά με το υδατικό ισοζύγιο. Το στάδιο αυτό είναι από πιο τα σημαντικά στάδια στο πρωτόκολλο της μοντελοποίησης. Για την ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου απαιτούνται πολύ καλές πληροφορίες σχετικά με την γεωλογία, την υδρολογία, τις οριακές συνθήκες, τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά του υδρολογικού συστήματος και των υδραυλικών παραμέτρων (π.χ. υδραυλική αγωγιμότητα, μεταβιβαστικότητα, πορώδες, αποθηκευτικότητα κ.α).

III. Επιλογή των κυρίαρχων εξισώσεων και του κώδικα

Μετά την ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου θα πρέπει να επιλεγθεί το κατάλληλο λογισμικό. Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία από υπάρχοντες κώδικες για την εφαρμογή διαφόρων προβλημάτων. Είναι σημαντικό ο κώδικας που θα χρησιμοποιηθεί να έχει επαληθευτεί με συγκρίσεις μεταξύ των αριθμητικών επιλύσεων που παράγονται από τον κώδικα και των αναλυτικών επιλύσεων, εάν υπάρχουν. Η διαδικασία όπου δοκιμάζεται και ελέγχεται ο κώδικας για προβλήματα που έχουν υπάρχοντες λύσεις ονομάζεται επαλήθευση. Η επαλήθευση του κώδικα αποτελεί μια περιορισμένη ένδειξη αξιοπιστίας του μοντέλου.

IV. Σχεδιασμός μοντέλου

Στο στάδιο αυτό το εννοιολογικό μοντέλο μετατρέπεται στην κατάλληλη μορφή προκειμένου να εφαρμοστεί ο επιλεγμένος κώδικας. Περιλαμβάνει τον σχεδιασμό του πλέγματος, την επιλογή του χρονικού βήματος, τον καθορισμό των αρχικών και οριακών συνθηκών και τις αρχικές τιμές των παραμέτρων του συστήματος.

V. Βαθμονόμηση

Η διαδικασία της συνεχούς μεταβολής των παραμέτρων του συστήματος προκειμένου να αντιστοιχηθούν οι τιμές του μοντέλου με τις πραγματικές τιμές (τιμές πεδίου) ορίζεται ως βαθμονόμηση. Η βαθμονόμηση συνιστά ένα από τα πιο σημαντικά βήματα στην εφαρμογή των μοντέλων. Για την σωστή βαθμονόμηση προϋποθέτεται αρχικά, ο σωστός χαρακτηρισμός των συνθηκών και η ορθή λήψη των δεδομένων στο πεδίο καθώς ή μη τήρηση των ανωτέρω έχει ως αποτέλεσμα το μοντέλο να έχει βαθμονομηθεί σε ένα σύνολο συνθηκών που να μην είναι αντιπροσωπευτικό των πραγματικών συνθηκών στο πεδίο.

Έπειτα, απαιτούνται αλλαγές στις παραμέτρους του μοντέλου (πχ υδραυλική αγωγιμότητα, οριακές συνθήκες κλπ) έως ότου υπάρξει η όσο το δυνατόν καλύτερη σύγκλιση μεταξύ των μετρηθέντων τιμών και τιμών του μοντέλου. Παρόλο που μια μεγάλη απόκλιση αναντιστοιχίας μεταξύ των τιμών καταδεικνύει λάθη στο μοντέλο, εντούτοις μια καλή αντιστοιχία από μόνη της δεν αρκεί για να επικυρώσει την αξιοπιστία και την ακρίβεια του μοντέλου (Konikow and Bredehoeft 1992). Η διαδικασία της βαθμονόμησης διαφέρει γενικά από μοντέλο σε μοντέλο και γίνεται είτε με την μέθοδο δοκιμής και σφάλματος (trial and error) είτε με αυτοματοποιημένους κώδικες εκτίμησης παραμέτρων ή και συνδυαστικά.

VI. Ανάλυση ευαισθησίας

Η βαθμονόμηση συνιστά μια δύσκολη διεργασία καθότι οι τιμές των υδραυλικών παραμέτρων, των τάσεων και των οριακών συνθηκών είναι συνυφασμένες με την αβεβαιότητα. Πρόσθετα, υπάρχει αβεβαιότητα σχετικά και με άλλα χαρακτηριστικά του συστήματος όπως την λιθολογία και την στρωματογραφία. Προκειμένου να μειωθεί ο βαθμός αβεβαιότητας, στο ήδη υπάρχον βαθμονομημένο μοντέλο, είναι απαραίτητη η διενέργεια ανάλυσης ευαισθησίας της βαθμονόμησης.

Απώτερος στόχος της ανάλυσης ευαισθησίας είναι η ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας σε ένα βαθμονομημένο μοντέλο. Αναφέρεται ότι από την ανάλυση ευαισθησίας προκύπτουν οι παράμετροι που έχουν την μεγαλύτερη επιρροή στο μοντέλο και επομένως θα πρέπει να προσεγγιστούν με ιδιαίτερη προσοχή κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης.

VII. Επαλήθευση μοντέλου

Λόγω ύπαρξης πολλών αβεβαιοτήτων καθώς και για την αξιοπιστία της βαθμονόμησης, το μοντέλο θα πρέπει να ελεγχθεί από μια δεύτερη ανεξάρτητη σειρά δεδομένων. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται επαλήθευση ή επικύρωση του μοντέλου. Η επαλήθευση επιτυγχάνεται όταν η ακρίβεια και η προβλεψιμότητα του μοντέλου βρίσκονται εντός των αποδεκτών πλαισίων σφάλματος. Ένα μοντέλο επαληθεύεται όταν δεν χρειάζονται αλλαγή οι βαθμονομημένες τιμές. Η επαλήθευση συχνά είναι ανέφικτη κυρίως λόγω μη ύπαρξης δεύτερου συνόλου δεδομένων.

VIII. Πρόβλεψη

Με την πρόβλεψη ποσοτικοποιείται η απόκριση του συστήματος σε μελλοντικά γεγονότα και επομένως οι εκτιμήσεις μεταβολής των παραμέτρων είναι απαραίτητες. Η αξιοπιστία των προβλέψεων του μοντέλου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης, την επαλήθευση και την ανάλυση ευαισθησίας. Ένα σημαντικό θέμα που τίθεται είναι ο καθορισμός του χρόνου που θα γίνει η πρόβλεψη (βραχυχρόνια, μακροχρόνια) των υδρολογικών συνθηκών στο μέλλον.

IX. Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στο στάδιο αυτό γίνεται αναφορά στα αποτελέσματα που εξήχθησαν από το μοντέλο όπως και η παρουσίαση ολόκληρης της προσπάθειας μοντελοποίησης. Κυρίως τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις χρησιμοποιούνται μετέπειτα για τον σχεδιασμό μελλοντικών αλλαγών στις υδρολογικές διαδικασίες.

Χ. Επανάλεγχος

Ο επανάλεγχος και η επαλήθευση του τελικού αποτελέσματος της μοντελοποίησης εξετάζει την ακρίβεια του μοντέλου που προσομοιώθηκε πριν από χρόνια (το λιγότερο μια δεκαετία ούτως ώστε να μεσολαβήσει αρκετός χρόνος στο υδρολογικό σύστημα από την βαθμονομημένη λύση). Καθώς προκύπτουν νέα δεδομένα με τα χρόνια, κρίνεται απαραίτητη η επαναξιολόγηση του εννοιολογικού μοντέλου και οποιαδήποτε αλλαγή σε αυτό θα πρέπει να ενσωματωθεί και στο αριθμητικό μοντέλο (Essink, 2000).

3.5 Μαθηματικές προσεγγίσεις της υπόγειας ροής

Πριν από το στάδιο του μαθηματικού μοντέλου και των κυριάρχων εξισώσεων για την υπόγεια ροή προηγείται, όπως προαναφέρθηκε, η ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου. Υπάρχουν δυο εννοιολογικές προσεγγίσεις όσον αφορά τα υπόγεια συστήματα, η **προσέγγιση υδροφορέα (aquifer viewpoint)** και η **προσέγγιση συστήματος ροής (flow system viewpoint)** (Anderson and Woessner, 1992).

Η **προσέγγιση υδροφορέα** βασίζεται στις έννοιες του περιορισμένου και του ελεύθερου υδροφορέα. Ένας υδροφορέας είναι μια μονάδα πορώδους υλικού που χαρακτηρίζεται από τις ιδιότητες της αποθήκευσης και της μεταφοράς επαρκών ποσοτήτων νερού στα πηγάδια. Πάνω από τον περιορισμένο υδροφορέα υπέρκειται ένας αδιαπέρατος σχηματισμός που επιβραδύνει την κίνηση του νερού ενώ αντίθετα, στον ελεύθερο υδροφορέα το ανώτατο όριο είναι ο υδροφόρος ορίζοντας. Κυρίως, η μέθοδος προσέγγισης του υδροφορέα, χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις ανάλυσης της ροής στα πηγάδια άντλησης. Αναφέρεται ότι η μέθοδος αυτή αποτελεί την βάση για πολλές αναλυτικές επιλύσεις συμπεριλαμβανομένων των μεθόδων των Thiem, Theis και Jacob.

Στην περίπτωση αυτή υπάρχουν δύο παραδοχές, συγκεκριμένα θεωρείται, πρώτον ότι η υπόγεια ροή είναι αυστηρώς οριζόντια μέσα στους υδροφορείς και δεύτερον αυστηρώς κάθετη εντός των αδιαπέρατων σχηματισμών. Στην προσέγγιση υδροφορέα, η υδραυλική αγωγιμότητα συμπεριλαμβάνεται στην κάθετη διάσταση. Η μεταβιβατικότητα σε έναν περιορισμένο υδροφορέα είναι σταθερή όταν ο υδροφορέας είναι ομοιογενής και ενιαίου πάχους ενώ αντίθετα σε έναν ελεύθερο υδροφορέα είναι μεταβαλλόμενη. Σχεδόν πάντα, οι υδροφορείς είναι ετερογενείς επομένως τόσο η υδραυλική αγωγιμότητα όσο και η μεταβιβατικότητα μεταβάλλονται χωρικά.

Η μέθοδος προσέγγισης υδροφορέα χρησιμοποιείται για την προσομοίωση δισδιάστατης και οριζόντιας ροής σε περιορισμένους και ελεύθερους υδροφορείς. Οι περιορισμένοι υδροφορείς με διαρροές μπορούν να προσομοιωθούν με μια τρισδιάστατη προσέγγιση σύμφωνα με την οποία η κάθετη ροή εντός των αδιαπέρατων σχηματισμών εκφράζεται με τον όρο της διαρροής. Το μέγεθος της διαρροής εξαρτάται από την υδραυλική κλίση, το πάχος και την κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα του αδιαπέρατου στρώματος.

Ακολουθεί η γενική μορφή της κυρίαρχης εξίσωσης που εκφράζει την μέθοδο της προσέγγισης υδροφορέα:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} - R + L \quad (3.1)$$

Όπου,

$$L = -K'_z \frac{h_{source} - h}{b'}$$

Αναφέρεται ότι οι όροι στο αριστερό μέρος της εξίσωσης (3.1) εκφράζουν την οριζόντια ροή εντός του περιορισμένου υδροφορέα όπου h είναι το υδραυλικό ύψος, και T_x και T_y οι συντελεστές μεταβιβαστικότητας στις διευθύνσεις x και y αντίστοιχα. Οι συντελεστές T_x και T_y υποδηλώνουν την χωρική μεταβολή της μεταβιβαστικότητας λόγω ετερογένειας και ανισοτροπίας. Πρόσθετα, S είναι ο συντελεστής εναποθήκευσης, R είναι ένας όρος που περιγράφει εμπλουτισμό ή άντληση, και είναι θετικός στην περίπτωση εμπλουτισμού του υδροφορέα ενώ στην περίπτωση της άντλησης ισχύει $R = -W$. Με τον όρο L περιγράφεται η διαρροή εντός του αδιαπέρατου στρώματος όπου K'_z είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στην κάθετη διεύθυνση και b' το πάχος.

Παρατηρείται ότι στην εξίσωση (3.1) δεν υπάρχει η συνιστώσα της μεταβιβαστικότητας στην z διεύθυνση. Αυτό συμβαίνει επειδή η μεταβιβαστικότητα στρογγυλοποιείται στην κάθετη διεύθυνση και η ροή θεωρείται δισδιάστατη επομένως δεν ορίζεται μεταβιβαστικότητα στην διεύθυνση αυτή. Η υδραυλική αγωγιμότητα ωστόσο περιγράφει τις ιδιότητες της μεταφοράς σε ένα σημείο του υδροφορέα και επομένως έχει συνιστώσες και στις τρεις διευθύνσεις.

Για τους ελεύθερους υδροφορείς ισχύουν οι αρχές του Dupuit. Πιο αναλυτικά, θεωρείται, πρώτον ότι οι γραμμές ροής είναι οριζόντιες και οι ισοδυναμικές γραμμές κάθετες και δεύτερον η οριζόντια υδραυλική κλίση ισούται με την κλίση του υδροφόρου ορίζοντα και είναι ανεξάρτητη από το βάθος. Εάν στην εξίσωση (3.1) εφαρμοστούν οι σχέσεις $T_x = K_x \cdot h$ και $T_y = K_y \cdot h$ όπου h το κορεσμένο πάχος, προκύπτει η μη γραμμική εξίσωση Boussinesq (3.2) όπως έχει προαναφερθεί.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S_y \frac{\partial h}{\partial t} - R \quad (3.2)$$

Όπου ο όρος L είναι ίσος με μηδέν και ο συντελεστής εναποθήκευσης S ίσος με την ειδική απόδοση S_y . Εάν αντικατασταθούν οι κάτωθι σχέσεις 3.3 στην 3.2, προκύπτει η μη γραμμική εξίσωση 3.4.

$$\frac{\partial h^2}{\partial x} = 2h \frac{\partial h}{\partial x} \quad \text{και} \quad \frac{\partial h^2}{\partial y} = 2h \frac{\partial h}{\partial y} \quad (3.3)$$

Όπου,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h^2}{\partial y} \right) = 2S_y \frac{\partial h}{\partial t} - 2R \quad (3.4)$$

Η εξίσωση 3.4 είναι μη γραμμική επειδή ο όρος h εμφανίζεται να είναι υψωμένος στην δεύτερη δύναμη στο αριστερό μέρος της εξίσωσης και στην πρώτη δύναμη στο δεξιό τμήμα.

Η **προσέγγιση συστήματος ροής**, εν αντιθέσει με την προσέγγιση υδροφορέα, δεν εστιάζει στους υδροφορείς και στα αδιαπέρατα στρώματα ως αυτά καθαυτά αλλά στην κατασκευή μιας τρισδιάστατης κατανομής των υδραυλικών υψών, υδραυλικών αγωγιμοτήτων και των ιδιοτήτων εναποθήκευσης σε όλο το σύστημα. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τόσο τις κάθετες όσο και τις οριζόντιες συνιστώσες ροής στο σύστημα καθώς και την διαχείριση της ροής σε δύο ή τρεις διαστάσεις (Anderson and Woessner, 1992).

Η γενική μορφή της κυρίαρχης εξίσωσης για την προσέγγιση συστήματος ροής είναι:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R \quad (3.5)$$

Όπου K_x , K_y , K_z είναι οι συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας, S_s η ειδική εναποθήκευση και R ένας γενικός όρος ο οποίος είναι θετικός (εμπλουτισμός) που περιγράφει την εισροή στο σύστημα ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα ανά μονάδα χρόνου. Για την προσομοίωση της εκροής (άντλησης) ισχύει $R=-W$.

Η διαφορά ανάμεσα στις δύο αυτές προσεγγίσεις έγκειται στα υδραυλικά ύψη. Στην προσέγγιση υδροφορέα τα υδραυλικά ύψη των αδιαπέρατων σχηματισμών είναι εκτός ενδιαφέροντος και επομένως δεν υπολογίζονται κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Συνεπώς ένα αριθμητικό μοντέλο υπολογίζει την κατανομή των υδραυλικών υψών μόνο για τους περιορισμένους υδροφορείς και όχι για τα αδιαπέρατα στρώματα.

Τα υδραυλικά ύψη των ελεύθερων υδροφορέων δεν υπολογίζονται παρότι χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της υδραυλικής κλίσης. Αντίθετα, στην προσέγγιση συστήματος ροής, το αριθμητικό μοντέλο υπολογίζει την κατανομή των υδραυλικών υψών για κάθε στρώμα, συγκεκριμένα, οι ισοδυναμικές γραμμές δημιουργούνται και για τους υδροφορείς αλλά και για τα αδιαπέρατα στρώματα.

3.6 Σφάλματα στην μοντελοποίηση

Όπως προαναφέρθηκε τα μοντέλα συνιστούν μια απλοποιημένη αναπαράσταση της πραγματικότητας, είναι ατελή και είναι πολύ πιθανό να εμπεριέχουν σφάλματα. Λάθη και σφάλματα μπορούν να προκύψουν σε οποιοδήποτε στάδιο κατά την διαδικασία της μοντελοποίησης (Mercer, 1991). Η ύπαρξη σφαλμάτων αποτελεί ένα πολύ κοινό πρόβλημα για αυτό και απαιτούνται πολύ προσεκτικοί χειρισμοί σε όλη τη διάρκεια της μοντελοποίησης.

Το πιο σημαντικό λάθος στην μοντελοποίηση παρατηρείται στο στάδιο ανάπτυξης του εννοιολογικού μοντέλου. Εάν το εννοιολογικό μοντέλο είναι λανθασμένο (π.χ. δεν αντιπροσωπεύει τις διεργασίες της ροής και μεταφοράς ρύπανσης) τότε και τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης θα είναι λανθασμένα ανεξάρτητα από την ακρίβεια των δεδομένων και την προσέγγιση στην μοντελοποίηση. Όσο καλό και αν είναι ένα μαθηματικό μοντέλο δεν μπορεί να αναδιαρθρώσει ένα λανθασμένο εννοιολογικό μοντέλο (Zheng and Bennett, 2002).

Τα πιο συνηθισμένα σφάλματα και λάθη που έχουν καταγραφεί κατά την διάρκεια της μοντελοποίησης, διαχωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες (Mercer and Faust, 1981).

a. Λανθασμένη ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου

Τα πιο συχνά λάθη στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνουν ακατάλληλη προσέγγιση των αρχικών και οριακών συνθηκών, λανθασμένες προσεγγίσεις των παραμέτρων του υδροφορέα, μη σωστή οριοθέτηση της περιοχής μελέτης, λάθος επιλογή γεωμετρίας του μοντέλου όπως και λανθασμένες υποθέσεις σχετικά με συγκεκριμένες διεργασίες ειδικά σε περιπτώσεις μεταφοράς ρύπων.

b. Ακατάλληλη επιλογή κώδικα επίλυσης του μοντέλου

Η σωστή επιλογή του κώδικα είναι πολύ σημαντική για την επίτευξη μιας καλής επίλυσης. Διάφοροι κώδικες εμπεριέχουν διαφορετικές μαθηματικές εξισώσεις που αρμόζουν σε ένα συγκεκριμένο πρόβλημα. Η μη σωστή προσέγγιση των χαρακτηριστικών της εξεταζόμενης περιοχής έχει ως αντίκτυπο την λανθασμένη επιλογή κώδικα. Πρόσθετα, ένα άλλο κοινό σφάλμα όσον αφορά τους κώδικες είναι η επιλογή ενός κώδικα που δεν έχει επαληθευτεί και δοκιμαστεί.

c. Εσφαλμένη διαδικασία μοντελοποίησης και εφαρμογής του μοντέλου

Συνήθως αφορά εσφαλμένες τιμές παραμέτρων και μεταβλητών ή άλλων δεδομένων εισόδου στο μοντέλο λόγω της μη σωστής αξιολόγησης τους ή και έλλειψης αυτών. Πρόσθετα οι αρχικές ή οριακές συνθήκες μπορεί να μην έχουν κατανεμηθεί ή εισαχθεί σωστά στο αρχείο δεδομένων εισόδου, όπως για παράδειγμα λόγω σφαλμάτων στην διακριτοποίηση της υδρολογικής διαδικασίας.

Σφάλματα επίσης προκύπτουν λόγω λανθασμένης επιλογής μεγέθους του πλέγματος και χρονικών βημάτων, τα οποία είναι εξίσου σημαντικά και θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη κατά την διαδικασία της μοντελοποίησης. Επίσης τα περισσότερα λάθη παρατηρούνται στο στάδιο της βαθμονόμησης, όπως είναι τα σφάλματα παρεμβολής

δηλαδή οι τιμές βαθμονόμησης να μην συμπίπτουν με τους κόμβους, αναντιστοιχία επιδράσεων που μπορεί να υπήρχαν στο πεδίο αλλά να μην ελήφθησαν υπόψη στο μοντέλο πχ ετερογένειες μικρής κλίμακας κα.

d. Λανθασμένη ερμηνεία αποτελεσμάτων

Αφορά κυρίως την εσφαλμένη υδρολογική ερμηνεία των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από το μοντέλο όπως και την μη επίτευξη του ισοζυγίου μάζας. Ακόμα, μπορεί να πρόκειται και για λανθασμένες προβλέψεις, οι οποίες μπορεί να οφείλονται στην βαθμονόμηση του μοντέλου υπό διαφορετικές συνθήκες.

3.7 Ευρέως διαδεδομένα μοντέλα υπόγειας ροής

Όπως προαναφέρθηκε, η μοντελοποίηση των υπόγειων υδάτων αποτελεί μια σημαντική μεθοδολογία για τον σχεδιασμό και την διαχείριση θεμάτων που σχετίζονται με τα υπόγεια ύδατα. Υπάρχουν πολλοί και διαφορετικοί κώδικες για την μοντελοποίηση της υπόγειας ροής και μεταφοράς μάζας με διάφορες δυνατότητες, χαρακτηριστικά και περιορισμούς. Τις τελευταίες δεκαετίες πολλά μαθηματικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί όπου τα περισσότερα από αυτά εφαρμόζουν τις μεθόδους των πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων. Παρακάτω παρουσιάζονται τα πιο κοινά και ευρείας χρήσης μαθηματικά μοντέλα για την προσομοίωση της υπόγειας ροής και μεταφοράς ρύπων.

1. MODFLOW

Πρόκειται για το πιο ευρέως διαδεδομένο αριθμητικό μοντέλο υπόγειας ροής καθώς έχει την ικανότητα να προσομοιώνει πληθώρα συστημάτων. Είναι ένα μοντέλο το οποίο έχει καθιερωθεί για την μοντελοποίηση τρισδιάστατης ροής και χρησιμοποιείται για την προσομοίωση συστημάτων παροχής νερού και περιορισμού της ρύπανσης. Το MODFLOW προσομοιώνει την υπόγεια ροή σε έναν οποιοδήποτε υδροφόρα (πχ ελεύθερος, περιορισμένος, με διαρροές), εφαρμόζοντας την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Πρόσθετα προσομοιώνονται και εξωτερικές ροές όπως οι ροές στα πηγάδια, πλευρικές τροφοδοσίες, ποτάμιες εκροές κα. Ένα από τα πλεονεκτήματα αυτού του μοντέλου είναι η δυνατότητα που παρέχει στον χρήστη να εξειδικεύσει τα χαρακτηριστικά του υδρολογικού συστήματος που πρόκειται να μοντελοποιηθεί (Kumar,2004).

Γενικά στα πλεονεκτήματα του MODFLOW συγκαταλέγονται μεταξύ των άλλων η συνεχής ανάπτυξη και αναβάθμιση με σκοπό την προσθήκη νέων δυνατοτήτων, η συμβατότητα με άλλα προγράμματα, η εύκολη ανταλλαγή δεδομένων λόγω της τυποποιημένης τους μορφής, η διαθεσιμότητα του κώδικα και το χαμηλό κόστος. Ωστόσο, αναφέρεται ότι στο MODFLOW δεν περιλαμβάνεται η προσομοίωση της επιφανειακής απορροής και της ροής στην ακόρεστη ζώνη και επομένως δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις παροδικών προβλημάτων (Kumar,2004).

2. MT3D

Είναι ένα ολοκληρωμένο τρισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο για την προσομοίωση της μεταφοράς ρύπων σε πολύπλοκα υδρογεωλογικά συστήματα. Ο σχεδιασμός του μοντέλου αυτού είναι δομημένος με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να επιτρέπει την προσομοίωση των διαδικασιών που αφορούν την μεταφορά μάζας ρύπων ανεξάρτητα μεταξύ τους ή σε συνδυασμό. Έχει την ικανότητα να προσομοιώνει σε πολύπλοκα πεδία, σε συνθήκες σταθερής ή μεταβατικής ροής, ανισοτροπικής διασποράς, γραμμική και μη γραμμική προσρόφηση, αντιδράσεις σε πλουμίο (plume) κ.α. Αναφέρεται ότι συνδέεται με το μοντέλο προσομοίωσης της υπόγειας ροής MODFLOW όταν απαιτείται.

3. FEFLOW

Το FEFLOW είναι ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση δισδιάστατης και τρισδιάστατης πυκνότητας ροής ρευστού, μεταφοράς μάζας ρύπων και θερμότητας στο υπέδαφος. Μπορεί να προσομοιώσει υπόγεια υδατικά συστήματα με ή χωρίς ελεύθερες επιφάνειες (φρεάτιους υδροφόρους, επικρεμάμενους κ.α), κορεσμένες ή ακόρεστες ζώνες καθώς και διάφορες άλλες πολύπλοκες γεωμετρικές και παραμετρικές καταστάσεις. Αναφέρεται ότι ανήκει στα μοντέλα, τα οποία ενσωματώνουν στην μοντελοποίηση δεδομένα που προέρχονται από μια βάση πληροφοριών (GIS)(kumar,2004).

4. PTC

Το PTC, το οποίο αναλύεται εκτενώς στο κεφάλαιο που ακολουθεί, είναι ένα τρισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο που προσομοιώνει την υπόγεια ροή και την μεταφορά των ρύπων σε πορώδη μέσα εφαρμόζοντας τις μεθόδους των πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών. Οι μερικές διαφορικές εξισώσεις που χρησιμοποιεί αναπαριστούν την υπόγεια ροή στην κορεσμένη ζώνη, η οποία περιγράφεται από το υδραυλικό ύψος, τις συνιστώσες της ταχύτητας και την μεταφορά ρύπων (Karatzas,2017).

5. SEAWAT

Το πρόγραμμα SEAWAT αναπτύχθηκε για την μοντελοποίηση τρισδιάστατης μεταβατικής ροής σε πορώδη μέσα. Ο κώδικας για το SEAWAT προέκυψε από τον συνδυασμό των MODFLOW και MT3DMS με σκοπό σε ένα ενιαίο πρόγραμμα να προσομοιώνεται η υπόγεια ροή και η μεταφορά μάζας ρύπων (Kumar,2015). Διαθέτει το πλεονέκτημα ότι νέες δυνατότητες μπορούν να προστεθούν με μόνο μικρές αλλαγές στο κυρίως πρόγραμμα. Επισημαίνεται ότι έχει χρησιμοποιηθεί πολλές φορές σε προβλήματα που σχετίζονται με υπαλάμυνση υδροφορέων (Karatzas,2017).

6. SUTRA

Πρόκειται για ένα δισδιάστατο μοντέλο μεταφοράς ρύπων στην κορεσμένη και ακόρεστη ζώνη καθώς και μεταφοράς ενέργειας. Εφαρμόζει την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών για να περιγράψει τις κυρίαρχες εξισώσεις που διέπουν το σύστημα που πρόκειται να μοντελοποιηθεί είτε πρόκειται για την υπόγεια ροή στην κορεσμένη ή ακόρεστη ζώνη, την μεταφορά των διαλυμένων ουσιών στο υπόγειο νερό είτε την μεταφορά ενέργειας.

7. 3DFEMFAT

Το 3DFEMFAT είναι ένα τρισδιάστατο μοντέλο που εφαρμόζει την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση της υπόγειας ροής και μεταφοράς ρύπων για κορεσμένο και ακόρεστο μέσο. Το μοντέλο αυτό εφαρμόζεται κυρίως σε θέματα που αφορούν διείσδυση θαλασσινού νερού σε υδροφορείς, προστασία γεωτρήσεων, χώρους υγειονομικής ταφής και επικίνδυνων αποβλήτων, ρύπανση από φυτοφάρμακα κα. Σε σχέση με τα συμβατικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών που υπάρχουν, το μοντέλο 3DFEMFAT εμφανίζει αρκετά πλεονεκτήματα όπως για παράδειγμα, μπορεί να εφαρμοστεί για πλέγματα αριθμών που κυμαίνονται από το 0 μέχρι το άπειρο (αδιάστατος αριθμός Peclet), χρησιμοποιεί μεγάλα χρονικά βήματα ενώ η προσέγγιση των πεπερασμένων στοιχείων των Lagrangian-Eulerian που εφαρμόζεται είναι καλύτερη από τις αντίστοιχες μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών. Λόγω των ανωτέρω εφαρμόζεται κυρίως σε πεδία που έχουν μεγάλα προβλήματα (Kumar, 2004).

8. HYDRUS

Είναι ένα αριθμητικό μοντέλο που εφαρμόζει την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση δισδιάστατης και τρισδιάστατης υπόγειας ροής, θερμότητας και ρύπων σε ποικίλα κορεσμένα μέσα. Επιλύει την εξίσωση Richard για την ροή στην κορεσμένη-ακόρεστη ζώνη και τις εξισώσεις μεταφοράς – διασποράς για την μεταφορά θερμότητας και μάζας ρύπων. Οι κυρίαρχες εξισώσεις επιλύονται αριθμητικά με μια γραμμική μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων τύπου Galerkin, η οποία εφαρμόζεται με ένα πλέγμα τριγωνικών στοιχείων.

4. MONTEΛΟ PTC

4.1 Γενικά για το μοντέλο

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία χρησιμοποιήθηκε το αριθμητικό μοντέλο PTC (Princeton Transport Code). Το PTC είναι ένα τρισδιάστατο μοντέλο το οποίο προσομοιώνει την ροή των υπόγειων υδάτων και την μεταφορά ρύπων συνδυάζοντας τις μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων (finite element method) και πεπερασμένων διαφορών (finite difference method). Έχει γραφτεί σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN 77 και μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί σε συνδυασμό με το λογισμικό Argus One.

Το λογισμικό Argus One είναι ένα γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών (GIS) με ευρεία εφαρμογή σε θέματα μοντελοποίησης των υπόγειων υδάτων χρησιμοποιώντας αριθμητικές μεθόδους για την επίλυση τους. Διαθέτει πληθώρα δυνατοτήτων επιτρέποντας στον χρήστη να εισάγει και να επεξεργαστεί τα δεδομένα με απλό και εύκολο γραφικό τρόπο. Επίσης, παρέχεται η δυνατότητα εισαγωγής ψηφιακών χαρτών, καθορισμού των ορίων της υπό μελέτης περιοχής, συνδυασμού μεταβλητών είτε στο πλέγμα είτε στους κόμβους όπως για παράδειγμα αρχικές και οριακές συνθήκες, τιμές συγκεντρώσεων κ.α. Επισημαίνεται ότι το πρόγραμμα αυτό δίνει την ικανότητα στον χρήστη να δημιουργήσει διάφορα επίπεδα (layers) όπου το καθένα μπορεί να περιέχει διάφορες πληροφορίες όπως χρήσεις γης, τοπογραφία, πηγές, γεωτρήσεις, οριακές συνθήκες κλπ.

Το συγκεκριμένο λογισμικό είναι ιδιαίτερα δημοφιλές καθώς υποστηρίζει έναν αρκετά μεγάλο αριθμό μοντέλων που υπάρχουν για τα υπόγεια ύδατα. Χρησιμοποιείται ευρέως για την μοντελοποίηση υδροφορέων και άλλων περιβαλλόντων και επιτρέπει στους χρήστες να εξειδικεύσουν και να συνθέσουν τις πληροφορίες με απεριόριστους τρόπους. Ενδεικτικά τα μοντέλα τα οποία υποστηρίζει εκτός από το PTC είναι το MODFLOW, NAPL, SUTRA, HST3D κ.α. Αναφέρεται όμως, ότι το μεγαλύτερο και κυριότερο τμήμα σε μια μοντελοποίηση διεκπεραιώνεται από τον εκάστοτε αλγόριθμο, στην παρούσα περίπτωση από το PTC, που περιβάλλεται από το λογισμικό Argus One.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι κυριότερες, μεταξύ άλλων, δυνατότητες του προγράμματος PTC (Babu et al., 1997).

- Δισδιάστατες και πλήρως τρισδιάστατες προσομοιώσεις
- Δυνατότητα δημιουργίας χρονικών βημάτων
- Δυνατότητα υπολογισμού ισοζυγίου μάζας υπόγειας ροής και μεταφοράς ρύπων
- Καθορισμός συνθηκών υπόγειας ροής, διαρροών, συγκέντρωσης κ.α. σε οποιοδήποτε κόμβο
- Καθορισμός συνθηκών βροχόπτωσης σε κάθε στοιχείο στο ανώτερο στρώμα
- Εισαγωγή παραμέτρων ανά στοιχείο ή ανά κόμβο
- Αναλυτική ολοκλήρωση στοιχειωδών συναρτήσεων
- Δυνατότητα δημιουργίας ψηφιακών δεδομένων και επεξεργασίας αυτών
- Εξασφάλιση επανάληψης και επαλήθευσης των δεδομένων
- Εξαγωγή αποτελεσμάτων για πακέτα γραφικών

4.2 Θεμελιώδεις εξισώσεις μοντέλου PTC

Το μοντέλο PTC επιλύει τις κάτωθι μερικές διαφορικές εξισώσεις (4.2 και 4.3) για τον **προσδιορισμό της υπόγειας ροής**, που περιγράφεται από το υδραυλικό ύψος και την ταχύτητα, καθώς και την ακόλουθη διαφορική εξίσωση (4.4) για **την μεταφορά των ρύπων**, η οποία περιγράφεται από την συγκέντρωση.

▪ Υδραυλικό ύψος:

(4.2)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + \sum_{i=1}^r Q_i \cdot \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i) = 0$$

Όπου,

h το υδραυλικό ύψος [L],

K_{xx} είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στην x οριζόντια διεύθυνση [LT^{-1}],

K_{yy} είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στην y οριζόντια διεύθυνση [LT^{-1}],

K_{zz} είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στην z κάθετη διεύθυνση [LT^{-1}],

S ο συντελεστής ειδικής εναποθήκευσης [L^{-1}],

Q_i είναι ο όρος εκροής / κατείσδυσης σε μια τοποθεσία i [L^3T^{-1}],

δ η συνάρτηση δέλτα του Dirac

r ο αριθμός των σημείων εκροών/ κατείσδυσης

Για λόγους ευκολίας ο τελευταίος όρος στην (4.2) γράφεται εν συντομία ως Q. Η εξίσωση 4.2 επιλύεται αριθμητικά από το μοντέλο με την εφαρμογή των μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών, όπως αναλύεται παρακάτω.

▪ Ταχύτητα:

$$V_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}, V_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}, V_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (4.3)$$

Όπου, V_x, V_y, V_z οι συνιστώσες της ταχύτητας του Darcy [LT^{-1}] στις διευθύνσεις x,y,z αντίστοιχα.

▪ Μεταφορά μάζας / ρύπων:

(4.4)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial C}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial C}{\partial z} \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{zx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial C}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial C}{\partial z} \right] - \left[V_x \frac{\partial C}{\partial x} + V_y \frac{\partial C}{\partial y} + V_z \frac{\partial C}{\partial z} \right] \\ + Q(C^w - C) - \theta[1 + E(C)] \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right) = 0 \end{aligned}$$

Όπου,

C η συγκέντρωση του ρύπου στο σημείο (x,y,z) σε χρόνο t [M/L³],

θ το πορώδες του υδροφορέα [αδιάστατο],

C^w η συγκέντρωση του αντλούμενου ρευστού στο σημείο (x_i,y_i,z_i),

E (C) είναι η συνάρτηση χημικής προσρόφησης,

D_{ij} είναι οι όροι διασποράς στις διευθύνσεις x,y,z, [L²/T]

Οι όροι διασποράς στην (4.4) διευκρινίζονται ως (Burnett and Frind, 1987):

$$D_{xx} = (a_L V_x^2 + a_T V_y^2 + a_V V_z^2) / V + D_M$$

$$D_{yy} = (a_T V_x^2 + a_L V_y^2 + a_V V_z^2) / V + D_M$$

$$D_{zz} = (a_V V_x^2 + a_V V_y^2 + a_L V_z^2) / V + D_M$$

$$D_{yx} = D_{xy} = (a_L - a_T) V_x V_y / V$$

$$D_{yz} = D_{zy} = (a_L - a_V) V_y V_z / V$$

$$D_{zx} = D_{xz} = (a_L - a_V) V_z V_x / V$$

Όπου,

D_M ο συντελεστής μοριακής διάχυσης [L²/T]

a_L η διαμήκης διασπορά [L]

a_T η εγκάρσια διασπορά [L]

a_V η κάθετη διασπορά [L]

V το μέγεθος του διανύσματος της ταχύτητας [L/T]

Αναφέρεται ότι, οι παραπάνω εξισώσεις απορρέουν από την αρχή διατήρησης της μάζας και το νόμο του Darcy. Η επίλυση αυτών των διαφορικών εξισώσεων επιτυγχάνεται με την ακόλουθη σειρά. Αρχικά επιλύεται η εξίσωση (4.2) ως προς τα υδραυλικά ύψη h, έπειτα υπολογίζονται οι ταχύτητες Darcy V_x, V_y, V_z (4.3) και τελευταία επιλύεται η εξίσωση μεταφοράς μάζας (4.4) για την συγκέντρωση C των ρύπων (Babu et al, 1997).

4.2.1 Αλγόριθμος επίλυσης PTC

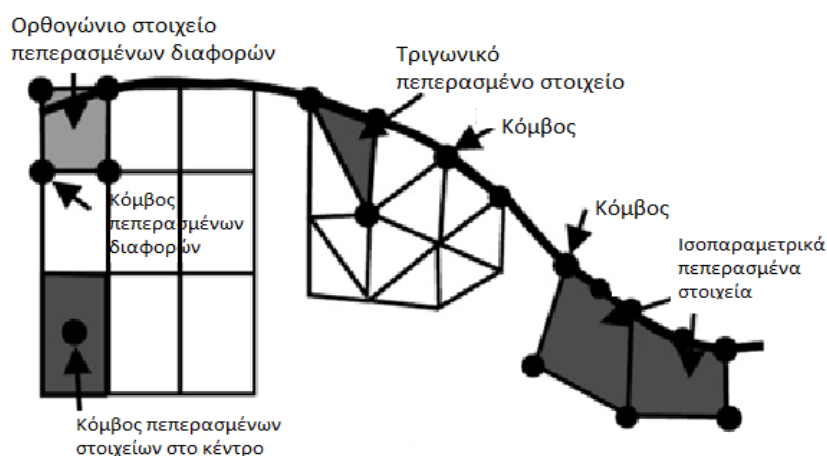
Οι αριθμητικές μέθοδοι είναι απαραίτητες για την επίλυση των παραπάνω θεμελιωδών εξισώσεων για τα πολύπλοκα και σύνθετα φυσικά συστήματα. Ειδικότερα, για σύστημα με κλίμακα πεδίου, η αριθμητική επίλυση των τρισδιάστατων εξισώσεων απαιτεί πολύ μεγάλο υπολογιστικό φόρτο. Το PTC διαθέτει έναν μοναδικό αλγόριθμο διαχωρισμού για την πλήρη επίλυση αυτών των τρισδιάστατων εξισώσεων μειώνοντας ουσιαστικά τον υπολογιστικό φόρτο (Babu et al., 1997).

Ο αλγόριθμος αυτός διαχωρίζει το πεδίο ορισμού κατά προσέγγιση σε παράλληλα οριζόντια επίπεδα. Σε κάθε ένα επίπεδο εφαρμόζεται διακριτοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων για την ακριβή απεικόνιση των πεδίων με ακανόνιστο σχήμα (Pinder and Gray, 1977). Τα επίπεδα συνδέονται μεταξύ τους κάθετα με την διακριτοποίηση των πεπερασμένων διαφορών. Όλοι οι υπολογισμοί που πραγματοποιούνται μπορούν να διαιρεθούν σε δύο στάδια.

Στο πρώτο στάδιο επιλύονται όλοι οι οριζόντιοι διαχωρισμοί των πεπερασμένων στοιχείων, ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλον ενώ στο δεύτερο στάδιο επιλύονται οι κάθετες εξισώσεις των πεπερασμένων διαφορών, με τις οποίες συνδέονται τα επίπεδα (Babu et al.,1997). Αναλυτικότερα, στην οριζόντια διάσταση (X,Y) ο κώδικας PTC εφαρμόζει την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και στην κατακόρυφη (Z) την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών.

Η περιοχής μελέτης υφίσταται διακριτοποίηση όπου δημιουργείται το αντίστοιχο πλέγμα (grid), το οποίο μπορεί να έχει ορθογώνιο ή τριγωνικό σχήμα. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών χρησιμοποιείται μόνο για ορθογώνια πλέγματα ενώ η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων για τρίγωνα ή και ορθογώνια που έχουν όμως καμπύλες πλευρές. Τα τελευταία ονομάζονται ισοπαραμετρικά πεπερασμένα στοιχεία.

Αναφέρεται ότι η σημασία των τριγωνικών ή ισοπαραμετρικών στοιχείων έγκειται στο γεγονός ότι μπορούν να αναπαραστήσουν ακανόνιστα όρια, ακανόνιστες περιοχές με διαφορετική υδραυλική αγωγιμότητα ή με μεγάλες πιέσεις. Στο σχήμα 4.1 που ακολουθεί απεικονίζονται οι μέθοδοι των πεπερασμένων διαφορών και στοιχείων. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, στην μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών οι κόμβοι μπορεί να είναι είτε στις κορυφές του ορθογωνίου είτε στο κέντρο (κεντρικός κόμβος) (Pinder,2002).



Σχήμα 4.1: Πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών.
(Πηγή: Pinder,2002).

4.3 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Η διαδικασία που εφαρμόζεται από το μοντέλο PTC για την επίλυση της εξίσωσης (4.2) περιλαμβάνει τον καθορισμό των όρων που περιέχουν τις παραγώγους x και y , δια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (Babu et al.,1997). Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων στηρίζεται στην παραδοχή ότι υπάρχει ένα σύνολο άπειρων συναρτήσεων, που μπορούν άρτια να αντιπροσωπεύσουν την επίλυση στην μερική διαφορική εξίσωση που περιγράφει την υπόγεια ροή.

Μία προσεγγιστική έκφραση της πεπερασμένης σειράς είναι,

$$h \sim \hat{h} = \sum_{i=1}^N h_i(z, t) w_i(x, y) \quad (4.5)$$

όπου,

h το υδραυλικό ύψος [L],

\hat{h} η σειρά προσέγγισης του h [L],

h_i ένας μη καθορισμένος συντελεστής [L],

w_i η συνάρτηση βάσης,

N ο αριθμός των κόμβων στο πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων

Γίνεται αντιληπτό ότι η παραπάνω σειρά (4.5) αποκτά μεγαλύτερη ακρίβεια όταν το N τείνει στο άπειρο. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της αποδοτικότητας της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η εφαρμογή συνεχών συναρτήσεων βάσης, τμηματικά, οι οποίες είναι μη μηδενικές σε μια μόνο μικρή υπό-περιοχή της περιοχής μελέτης. Αν και χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι συναρτήσεων βάσης (Lapidus and Pinder, 1982) το μοντέλο PTC εφαρμόζει γραμμικές συναρτήσεις βάσης, τμηματικά, ανάμεσα σε γειτονικούς κόμβους πεπερασμένων στοιχείων.

Σημειώνεται ότι στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, ο διαφορικός τελεστής L (π.χ. της 4.2) που περιέχει το h ισούται με το μηδέν ενώ όταν ο L περιέχει την προσεγγιστική συνάρτηση τότε παρουσιάζεται σφάλμα. Επομένως, μαθηματικά απαιτείται η επαναδιατύπωση της (4.2) ως, $L(h) = 0$ ενώ $L(\hat{h}) = R$ όπου R είναι το υπολειμματικό σφάλμα.

Για την επίλυση της (4.5) είναι απαραίτητη η ελαχιστοποίηση του υπολειμματικού σφάλματος R . Για την επίτευξη του ανωτέρου, λαμβάνεται υπόψη ένα ολοκληρωμένο σύνολο συναρτήσεων w_j . Εάν επιτευχθεί το υπολειμματικό σφάλμα R να είναι ορθογωνικό σε όλες τις πιθανές τιμές του w_j τότε το R αποκτά μηδενική τιμή και συνεπώς καθίσταται δυνατή η επίλυση της (4.5). Πιο συγκεκριμένα, ισχύει $L(\hat{h}) = L(h)$ για $R = 0$.

Εν γένει, διαμέσου διαφόρων διαδικασιών προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση (4.6) της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για διακριτοποίηση.

$$\iint_{\Omega} \left[K_{xx} \left(\sum_{j=1}^N h_j \frac{\partial w_j}{\partial x} \right) \frac{\partial w_i}{\partial x} + K_{yy} \left(\sum_{j=1}^N h_j \frac{\partial w_j}{\partial y} \right) \frac{\partial w_i}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial}{\partial z} \sum_{j=1}^N h_j w_j \right) w_i + S \frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_{j=1}^N h_j w_j \right) w_i - Q w_i \right] dx dy - \int_{\sigma} \left[K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} l_y \right] w_i d\sigma = 0 \quad (4.6)$$

Όπου,

$i = 1, 2, \dots, N$

Ω η περιοχή ολοκλήρωσης,

l_x, l_y τα συνημίτονα κατεύθυνσης των γωνιών ανάμεσα στο κανονικό προς διατμητικό όριο σ στους x, y άξονες αντίστοιχα.

4.4 Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών

Η εξίσωση (4.6) μπορεί να γραφτεί σε μορφή πίνακα όπου τα κεφαλαία γράμματα αναπαριστούν τους τετράγωνους πίνακες ενώ τα πεζά τα διανύσματα στήλης, όπως φαίνεται στην παρακάτω μορφή (Babu et al., 1997).

$$Ah + B \frac{\partial h}{\partial t} - v + f = 0 \quad (4.7)$$

Συγκεκριμένα τα A και B είναι $(N \times N)$ πίνακες και τα $h, \partial h / \partial t, v, f$ τα διανύσματα στήλης μήκους N . Τα στοιχεία A, B, f και v προκύπτουν από τις κάτωθι εξισώσεις,

$$A_{ij} = \iint_{\Omega} \left[K_{xx} \frac{\partial w_i}{\partial x} \frac{\partial w_j}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial w_i}{\partial y} \frac{\partial w_j}{\partial y} \right] dx dy \quad (4.8)$$

$$B_{ij} = \iint_{\Omega} S w_i w_j dx dy \quad (4.9)$$

$$f_i = - \iint_{\Omega} Q w_i dx dy - \int_{\sigma} \left[K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} l_y \right] w_i d\sigma \quad (4.10)$$

$$v_i = \sum_{j=1}^N \left[\iint_{\Omega} \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h_j}{\partial z} \right) w_i w_j dx dy \right] \quad (4.11)$$

4.4.1 Κάθετη παράγωγος

Ένα από τα πιο βασικά χαρακτηριστικά του κώδικα PTC είναι η εφαρμογή ενός κεντρικού σχεδίου διάκρισης των χωρικών παραγώγων στην κατεύθυνση z για την επίλυση της (4.11). Η κάθετη διακριτοποίηση πραγματοποιείται με την επανάληψη αντιγραφής των οριζόντιων πλεγμάτων των πεπερασμένων στοιχείων σε στρώματα με κόμβους, που τοποθετούνται το ένα πάνω από το άλλο (Σχήμα 4.2). Συνεπώς για την προσέγγιση της εξίσωσης της (4.11), στην κάθετη κατεύθυνση μπορεί να εφαρμοστεί μια μονοδιάστατη διαφορική εξίσωση πεπερασμένων διαφορών (Babu et al., 1997).

Θέτοντας ως k τον κάθετο δείκτη, με $k=1$ για το κατώτατο στρώμα, η προσέγγιση αυτή μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$v \cong C_k^+(h_{k+1} - h_k) - C_k^-(h_k - h_{k-1}) \quad (4.12)$$

όπου, ο αρμονικός μέσος των ιδιοτήτων των γειτονικών στρωμάτων χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των στοιχείων του C_k^+ κάθετου όρου μεταξύ των στρωμάτων k και $k+1$, και του C_k^- κάθετου όρου μεταξύ των στρωμάτων k και $k-1$.

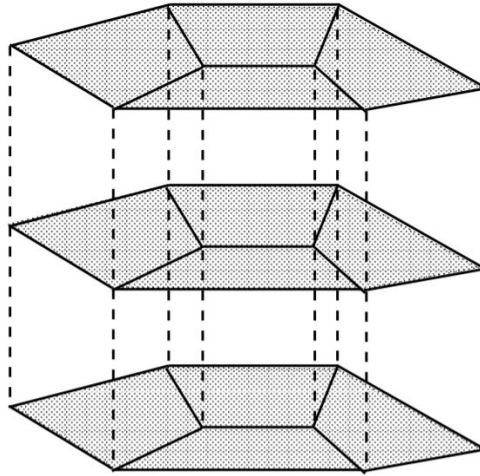
$$C_{ij,k}^{\pm} = \iint_{\Omega} \frac{2}{\Delta z_k \left[(\Delta z / K_{ZZ})_{k \pm 1} + (\Delta z / K_{ZZ})_k \right]} w_i w_j d_x d_y \quad (4.13)$$

Στην παραπάνω εξίσωση ο όρος (Δz_k) αντιπροσωπεύει το πάχος του $k^{\text{ου}}$ στρώματος στο σημείο προσέγγισης. Επισημαίνεται ότι ο αρμονικός μέσος χρησιμοποιείται λόγω του ότι παρέχει τα πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα σε ετερογενείς καταστάσεις (Babu et al., 1997).

Εάν αντικαταστήσουμε την εξίσωση (4.12) στην (4.7) προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση για ένα τυπικό k^{o} στρώμα.

$$A_k h_k + B_k \frac{\partial h_k}{\partial t} - [C_k^+(h_{k+1} - h_k) - C_k^-(h_k - h_{k-1})] + f_k = 0 \quad (4.14)$$

με το h_k να αντιπροσωπεύει το διάνυσμα h των υδραυλικών υψών στο k^{o} στρώμα όπου $k=1,2,\dots,M$ και M ο αριθμός των στρωμάτων στην Z διάσταση.



Σχήμα 4.2: Σχηματική απεικόνιση οριζόντιων πλεγμάτων των πεπερασμένων στοιχείων.
(Πηγή: Babu et al., 1997).

4.4.2 Παράγωγος του χρόνου

Έχει αποδειχθεί ότι η προσέγγιση της χρονικής παραγώγου παρέχει την πιο ασφαλή επίλυση σε προβλήματα υπόγειας ροής. Για την προσέγγιση αυτή γίνονται διορθώσεις και μετατροπές και οι χωρικές παράγωγοι εκφράζονται στο νέο επίπεδο χρόνου. Εφαρμόζοντας τα παραπάνω στην εξίσωση (4.14) για κάθε ένα στρώμα προκύπτει η ανάλογη εξίσωση.

$$A_k h_k^{(t+\Delta t)} + \frac{(B_D)_k}{\Delta t} [h_k^{(t+\Delta t)} - h_k^t] - [C_k^+ (h_{k+1} - h_k) - C_k^- (h_k - h_{k-1})]^{t+\Delta t} + f_k^t = 0 \quad (4.15)$$

Η εξίσωση (4.15) είναι η πλήρης διακριτοποίηση της (4.2) δίνοντας $M \times N$ εξισώσεις για τους N αγνώστους της (4.5) για κάθε M στρώμα (Babu et al., 1997).

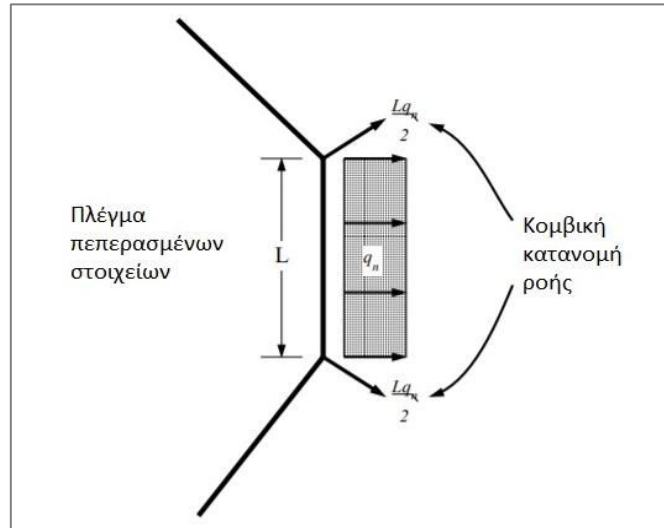
4.5 Οριακές συνθήκες

Το μοντέλο PTC μπορεί να υποστηρίξει **τρία είδη οριακών συνθηκών για την εξίσωση της ροής**. Συγκεκριμένα, πρόκειται για τις συνθήκες Dirichlet (καθορισμένου υδραυλικού ύψους – 1^{ου} είδους), Neumann (καθορισμένης ροής – 2^{ου} είδους) καθώς και μια ακόμη που αφορά την διαρροή (3^{ου} είδους). Στο PTC, παρέχεται η δυνατότητα στον χρήστη να αλλάξει τις οριακές συνθήκες κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Η προεπιλεγμένη οριακή συνθήκη για όλα τα όρια είναι μηδενικής ροής χαρακτηρίζοντας συνεπώς έναν περιορισμένο υδροφορέα με αδιαπέρατο δάπεδο και χωρίς παράπλευρες διαρροές. Προσθέτως, με την επιλογή διαφορετικών οριακών συνθηκών εντός της περιοχής μελέτης, ο χρήστης έχει την ικανότητα να αναπαραστήσει άλλες υδρολογικές συνθήκες (Babu et al., 1997).

Οι οριακές συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους (1^{ου} είδους) ορίζονται από τους επιλεγμένους κόμβους και τις τιμές των υδραυλικών υψών που έχουν οριστεί σε αυτούς. Αυτόματα, ο κώδικας υπολογίζει τις γραμμές και τις στήλες του πίνακα συντελεστών που σχετίζεται με τους κόμβους αυτούς. Όταν απαλειφθούν οι κόμβοι σταθερού υδραυλικού ύψους από την εξίσωση του πίνακα τότε θα απομείνουν $(N \times M - N_c)$ εξισώσεις με $(N \times M - N_c)$ αγνώστους, όπου N_c είναι ο ολικός αριθμός των κόμβων για τις οριακές συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους στην περιοχή μελέτης (Babu et al., 1997).

Όσον αφορά **τις οριακές συνθήκες σταθερούς ροής (2^{ου} είδους)** η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων παρέχει έναν πολύ απλό τρόπο για τον καθορισμό τους. Στην παρακάτω εξίσωση (4.16), ο όρος q_n αντιπροσωπεύει την κανονική ροή κατά μήκος μιας επιφάνειας (ύψος \times μήκος) του κάθετου ορίου σ . Για σταθερή ροή q_n κατά μήκος ενός στοιχείου μήκους L , με την ολοκλήρωση της παρακάτω διαφορικής εξίσωσης (4.16) υπολογίζονται οι κομβικές κατανομές ροής (σχήμα 4.3).

$$- \int_{\sigma} \left[K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} l_y \right] w_i d\sigma = - \int_{\sigma} q_n w_i d\sigma \quad (4.16)$$



Σχήμα 4.3: Κομβική κατανομή της ροής q_n ενός στοιχείου μήκους L
(Πηγή: Babu et al.,1997).

Επομένως ο χρήστης θα πρέπει να καθορίσει την ογκομετρική ροή σε ένα κόμβο για την αναπαράσταση της ροής κατά μήκος του ορίου. Αναφέρεται ότι οι ροές λόγω άντλησης εισάγονται μαθηματικά με τον ίδιο τρόπο (εξίσωση 4.10). Για την απλοποίηση της εισαγωγής ομοιόμορφης κατείσδυσης ο κώδικας PTC επιτρέπει τον καθορισμό μιας κομβικής ροής κατείσδυσης. Έπειτα η ολοκλήρωση της περιοχής για τον προσδιορισμό της ογκομετρικής ροής επιτυγχάνεται αυτόματα από το μοντέλο (Babu et al.,1997).

Οι οριακές συνθήκες διαρροής (3^{ου} είδους) προκύπτουν αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4.10) την παρακάτω σχέση Q .

$$Q = k_L(h_{j,L}^t - h_{j,k}^t) \quad (4.17)$$

Όπου,

$h_{j,k}^t$ το άγνωστο υδραυλικό ύψος στον κόμβο j στο στρώμα k και σε χρόνο t ,

$h_{j,L}^t$ το αντίστοιχο υδραυλικό ύψος στο σημείο αναφοράς της διαρροής,

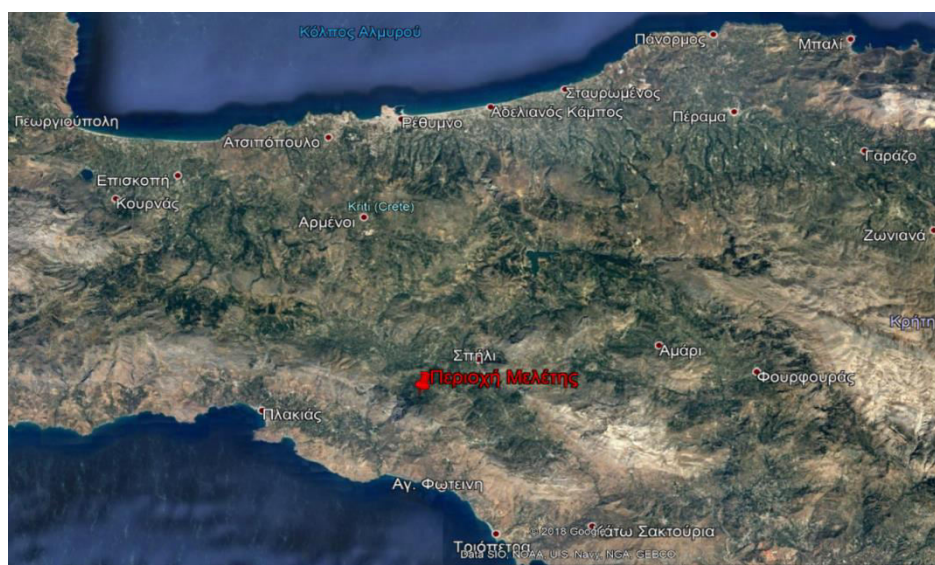
k_L όρος της διαρροής (υδραυλική αγωγιμότητα δια την απόσταση)

Ο όρος της αγωγιμότητας εντάσσεται στην περιοχή μελέτης και επομένως αντιπροσωπεύει έμμεσα την κατακόρυφη διαρροή. Με τους κατάλληλους χειρισμούς από τον χρήστη, η σταθερά k_L μπορεί να προσδιορίσει την διαρροή για οποιαδήποτε κατεύθυνση (Babu et al.,1997).

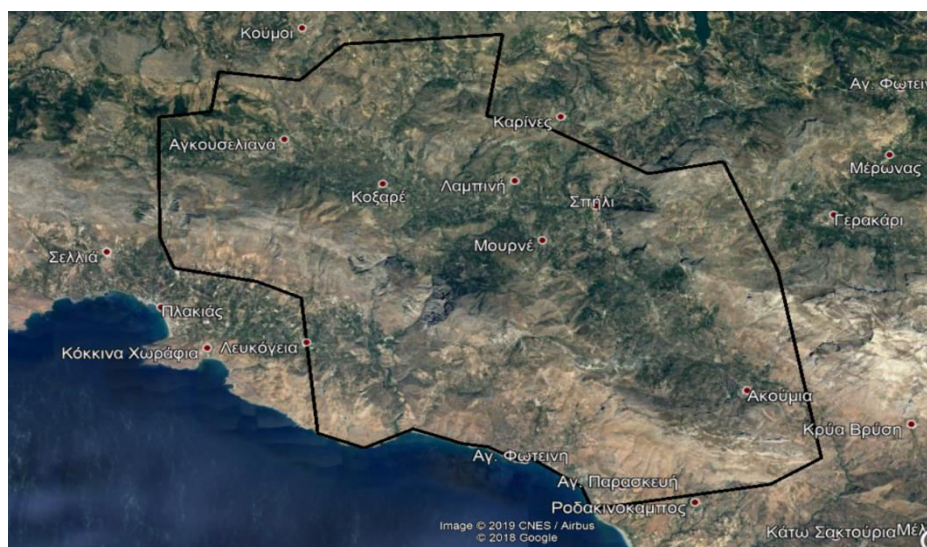
5. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

5.1 Περιγραφή της περιοχής μελέτης

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο κεντρικό - νότιο τμήμα του Νομού Ρεθύμνης εκτεινόμενη μέχρι τα νότια παράλια (εικ.4.1,4.2). Οι συντεταγμένες της περιοχής έρευνας κατά ΕΓΣΑ 87, κυμαίνονται για Χ από 535930 έως 553832 και για Υ από 3902847 έως 3889329. Διοικητικά υπάγεται στον Δήμο Αγίου Βασιλείου, ο οποίος περιλαμβάνει 26 τοπικές κοινότητες ή 52 οικισμούς και συνορεύει με τους Δήμους Αμαρίου, Ρεθύμνου, Φαιστού και Σφακίων ενώ στην νότια πλευρά του βρέχεται από το Λιβυκό Πέλαγος. Η έκταση που καταλαμβάνει ο Δήμος Αγίου Βασιλείου είναι περίπου 220.000 στρέμματα και έχει πληθυσμό μόνιμων κατοίκων, σύμφωνα με την απογραφή του 2011, περίπου 7.440 άτομα (Πηγή: ii).



Εικόνα 5.1: Δορυφορική άποψη του Νομού Ρεθύμνης.
(Πηγή: Google Earth)



Εικόνα 5.2: Απεικόνιση της περιοχής μελέτης.
(Πηγή: Google Earth)

Συγκεκριμένα για την περιοχή έρευνας το ανάγλυφο χαρακτηρίζεται από παραθαλάσσιο και ημιορεινό έως ορεινό με μέσο υψόμετρο τα 650m. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η περιοχή μελέτης περιλαμβάνει μερικά από τα πιο σημαντικά Όρη του Νομού όπως είναι το Όρος Κουρούπα με μέγιστο υψόμετρο τα 970m, Ασιδέρωτας με 1.077m αντίστοιχα καθώς και ένα μικρό τμήμα δυτικά του Ορεινού όγκου Κέδρους. Οι πεδινές εκτάσεις (κάμποι) στην περιοχή μελέτης εκτείνονται από την Παλαιόλουτρα, Αγκουσελιανά στα δυτικά μέχρι τους οικισμούς Παλέ και Κοξαρέ ανατολικά σε υψόμετρο 270 με 400m. Αναφέρεται ότι την περιοχή έρευνας διατρέχουν δύο πολύ μεγάλα ποτάμια του Νομού, ο Σπηλιανός και ο Κουρταλιώτης με το ομώνυμο φαράγγι.

Η υπό μελέτη περιοχή βρίσκεται ευρύτερα της υδρογεωλογικής λεκάνης Κουρταλιώτη καταλαμβάνοντας το κεντρικό – νότιο τμήμα του Νομού Ρεθύμνης, έκτασης 184km². Πιο αναλυτικά εκτείνεται από Άγιο Ιωάννη, Κάνεβο στα δυτικά μέχρι βορειοδυτικά του Όρους Κέδρου, Κισσού κάμπος, Κεντροχώρι στα ανατολικά και βόρεια από Καράβελα, Φωτεινό, Καρίνες μέχρι τα νότια παράλια. Εν γένει, οι σημαντικότεροι οικισμοί που περιλαμβάνονται στην περιοχή μελέτης εκτός των παραπάνω είναι Ατσιπάδες, Κοξαρέ, Αγία Πελαγία, Λαμπινή, Μουρνέ, Μυζόρρουμα, Σπήλι, Ακτούντα, Κεραμές, Ανώματος και Γιαννιού.

Επισημαίνεται ότι ο λόγος για τον οποίο η περιοχή μελέτης βρίσκεται σε τόσο μεγάλη έκταση γύρω από την υδρογεωλογική λεκάνη Κουρταλιώτη είναι για να ενταχθούν περισσότερες γεωτρήσεις που υπάρχουν ευρύτερα με σκοπό την πληρέστερη περιγραφή της περιοχής έρευνας. Η συγκεκριμένη περιοχή μελέτης επιλέχθηκε λόγω του έντονου υδρογεωλογικού ενδιαφέροντος που παρουσιάζει καθώς διαθέτει τεράστιο υδάτινο δυναμικό. Ενδεικτικά, αναφέρεται σύμφωνα με τους Στειακάκης και Βαβαδάκης (2012), ότι τα ρυθμιστικά (ενεργά) αποθέματα της υδρογεωλογικής λεκάνης του Κουρταλιώτη εκτιμώνται σε 43·10⁶m³. Επομένως, από τα ανωτέρω προκύπτει ότι πρόκειται για μια περιοχή η οποία χρήζει ιδιαίτερης σημασίας και προσέγγισης.

5.2 Γεωλογία

Στο νομό Ρεθύμνης εμφανίζονται όλες οι ενότητες και οι σχηματισμοί που συνιστούν την γεωλογική δομή της Κρήτης. Εν γένει, η γεωλογική δομή της νήσου Κρήτης απαρτίζεται από δύο βασικά συστήματα, το αυτόχθονο και το αλλόχθονο. Το αυτόχθονο σύστημα αποτελείται από την ενότητα Μάνης (Plattenkalk). Στην ενότητα αυτή περιλαμβάνονται τα αρχαιότερα πετρώματα της Κρήτης ενώ είναι γνωστή και ως ζώνη της Ίδης (Bonneau, 1973) καθώς έχει πλήρη εμφάνιση στον Ψηλορείτη όπως και στα Ταλέα όρη.

Το αλλόχθονο σύστημα συνιστάται από μια αλληλουχία τεκτονικών καλυμμάτων (εξωτερικών και εσωτερικών ζωνών) επωθημένων με τεκτονική διάταξη επάνω στο αυτόχθονο σύστημα. Τα καλύμματα αυτά με βάση την τεκτονική διάταξη είναι η ενότητα Δυτικής Κρήτης –Τρυπαλί, η ενότητα Φυλλιτών –Χαλαζιτών, η ενότητα Τρίπολης, η ενότητα Πίνδου – Εθιάς, καθώς και τα τεκτονικά καλύμματα των εσωτερικών ζωνών (καλύμματα Άρβης, Μιαμού, Βάτου, Άστερουσίων) με ανώτερο το τεκτονικό κάλυμμα των οφιολίθων. Τέλος, επάνω σε αυτά τα δύο συστήματα, στο αυτόχθονο και στο αλλόχθονο, έχουν αποθεθεί οι σχηματισμοί του Νεογενούς και Τεταρτογενούς.

Ειδικότερα για τον νομό Ρεθύμνης, οι ορεινοί όγκοι αποτελούνται κυρίως από ανθρακικά πετρώματα του αυτόχθονου συστήματος (π.χ. Ψηλορείτης) και των τεκτονικών καλυμμάτων της ενότητας της Τρίπολης (π.χ. Κρυονερίτης) και της ενότητας της Πίνδου–Εθιάς (π.χ. Κέδρος) ενώ οι πεδινές περιοχές καλύπτονται από νεότερους σχηματισμούς του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς, καταλαμβάνοντας αρκετά μεγάλη έκταση κυρίως στο βόρειο τμήμα του νομού. Σε μικρότερο βαθμό παρατηρούνται εμφανίσεις σχιστολίθων κυρίως στο κεντρικό τμήμα και λιγότερο στο βόρειο(π.χ. Πάνορμο) και νότιο. Πρόσθετα αναφέρεται σε πολύ μικρό βαθμό, η εμφάνιση των τεκτονικών καλυμμάτων εσωτερικών ζωνών όπως κάλυμμα Άρβης, Μιαμού, Βάτου, Αστερουσίων και το οφιολιθικό κάλυμμα.

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι γεωτεκτονικές ενότητες που καταγράφονται στην Κρήτη και κυρίως στο νομό Ρεθύμνης, κατά την τεκτονική τάξη από τα παλαιότερα προς τα νεότερα.

Αυτόχθονο

Ενότητα Μάνης (Plattenkalk)

Η ενότητα αυτή συνιστά το αυτόχθονο σύστημα του νησιού, αποτελώντας το υπόβαθρο της με μια αρκετά καλά ορισμένη στρωματογραφία. Η εμφάνιση εξολοκλήρου της ενότητας αυτής παρατηρήθηκε στα Ταλέα Όρη καθώς είναι η μοναδική περιοχή σε όλη τη Κρήτη όπου εντοπίστηκαν οι βαθύτεροι ορίζοντες της. Συγκεκριμένα, οι σχηματισμοί Φόδελε και Σίσσες συνιστούν τους κατώτερους ορίζοντες της ηλικίας Πέρμιο και Σκύθιο αντίστοιχα. Οι σχηματισμοί αυτοί υποδηλώνουν μια ρηχή ανθρακική πλατφόρμα και χωρίζονται με μια ελαφρά ασυμφωνία από το ανώτερο τμήμα της ενότητας.

Γενικά, η ενότητα Μάνης περιλαμβάνει συμπαγή λευκά μάρμαρα, σχιστόλιθους και πυριτικούς κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους, τους καθεαυτό πλακώδεις κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους (Plattenkalk), κάποιους κλαστικούς κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους και πολύχρωμα σιπολινομάρμαρα στην μετάβαση προς τον ελαφρά μεταμορφωμένο φλύσχη. Στην Κρήτη, ο σχηματισμός που απαντάται περισσότερο από την ενότητα αυτή, είναι οι πλακώδεις κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι (Plattenkalk). Βασικό γνώρισμα των κρυσταλλικών ασβεστολίθων είναι οι ενστρώσεις πυριτόλιθων κυρίως στο μεσαίο τμήμα των πλακωδών ασβεστολίθων (Bonneau et al, 1977).

Πρόκειται για μια ενότητα χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης με έντονη τεκτονικότητα. Ισοκλινείς ημιανεστραμμένες πτυχές καταγράφονται σε όλη την Κρήτη με το μέγεθος τους να κυμαίνεται από εκατοστά έως χιλιόμετρα. Τόσο στην Κρήτη όσο και στην Πελοπόννησο εμφανίζεται με την μορφή τεκτονικών παραθύρων. Στο νομό Ρεθύμνης, η ενότητα Μάνης πέραν του ότι εμφανίζεται στον Ψηλορείτη, παρατηρείται στο κεντρικό – ανατολικό τμήμα του νομού, καθώς και στα σύνορα με το νομό Χανίων ενώ στο νότιο τμήμα του νομού έχει πολύ μικρότερη εμφάνιση.

Αλλόχθονο

Ενότητα Δυτικής Κρήτης - Τρυπάλι

Πάνω από την ενότητα της Μάνης, στην Κρήτη βρίσκεται η ενότητα Δυτικής Κρήτης - Τρυπάλι. Η ενότητα Τρυπαλίου περιλαμβάνει δολομίτες, δολομιτικούς ασβεστόλιθους, κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους έως μάρμαρα νηρητικής φάσης καθώς και γύψους – ραουβάκες. Αργότερα επήλθε η διάκριση της ενότητας Δυτικής Κρήτης, η οποία στο ανώτερο τμήμα της εμπεριέχει την ενότητα Τρυπάλι και υποκείμενους σχηματισμούς ηφαιστειο-ιζηματογενείς ακολουθίες του Άνω Παλαιοζωικού- Μέσου Τριαδικού (Ραπανικόλαου, 1988). Η ηλικία της ενότητας Τρυπαλίου δεν είναι απολύτως προσδιορισμένη, γενικά τοποθετείται στο Ανω Παλαιοζωικό ή στο Μέσο και Κατώτερο Μεσοζωικό.

Όσον αφορά την παλαιογεωγραφική της θέση, υπάρχουν διάφορες απόψεις καθώς πολλοί ερευνητές θεωρούν ότι πρόκειται για μια διαφοροποιημένη παλαιογεωγραφικά και τεκτονικά ενότητα ενώ σύμφωνα με άλλους ερευνητές (Karakitsios 1979, Bonneau 1984) η ενότητα αυτή αποτελεί ένα είδος εφίπλευσης ενός μέρους της ενότητας της Μάνης (το κατώτερο) πάνω στην ίδια την ενότητα. Η ενότητα Δυτικής Κρήτης – Τρυπάλι εμφανίζεται μόνο στην Δυτική Κρήτη κυρίως στο κεντρικό τμήμα της. Στο νομό Ρεθύμνης η ενότητα αυτή έχει πολύ μικρή εμφάνιση και παρατηρείται στο νοτιοδυτικό τμήμα του νομού.

Ενότητα φυλλιτών - χαλαζιτών

Όπως προαναφέρθηκε η ενότητα αυτή βρίσκεται επωθημένη στην ενότητα Κρήτης – Μάνης (πλακωδών ασβεστολίθων) του αυτόχθονου συστήματος της Κρήτης. Η ενότητα αυτή παρεμβάλλεται ανάμεσα στην υποκείμενη ενότητα Κρήτης – Μάνης και στην υπερκείμενη ενότητα της Τρίπολης.

Πρόκειται για μια ενότητα που έχει μεταμορφωθεί σε συνθήκες υψηλών πιέσεων – χαμηλών θερμοκρασιών (Seidel, 1978) όπου στο κατώτατο τμήμα της περιλαμβάνει δολομιτικούς ασβεστόλιθους, ψαμμίτες, σχιστόλιθους και στο ανώτατο τμήμα φυλλίτες, χαλαζίτες, μάρμαρα και μεταβασάλτες (Creuzburg and Siedel, 1975). Χαρακτηριστικό της ενότητας φυλλιτών χαλαζιτών αποτελεί η έντονη παραμόρφωση η οποία εκφράζεται κυρίως μέσω των ισοκλινών πτυχών. Η ηλικία της ενότητας φυλλιτών χαλαζιτών δεν είναι καλά προσδιορισμένη κυρίως λόγω της μη διατήρησης των απολιθωμάτων, γενικά όμως χρονολογείται στο παλαιοζωικό. Όσον αφορά το πάχος της ενότητας αυτής στην Κρήτη, έχει αναφερθεί ότι, για την Δυτική Κρήτη είναι γύρω στα 2000 - 2800m (Krahl et al, 1983), στην Κεντρική Κρήτη 700m (Epting et al, 1972) και στην Ανατολική Κρήτη περίπου στα 600m (Wachendorf et al, 1974).

Ενότητα Τρίπολης

Η ενότητα της Τρίπολης βρίσκεται κάτω από το τεκτονικό κάλυμμα της Πίνδου και πάνω από την ενότητα φυλλιτών - χαλαζιτών. Η στρωματογραφική κολόνα της Τρίπολης περιλαμβάνει τρεις σχηματισμούς από κάτω προς τα πάνω, συγκεκριμένα αναφέρονται τα στρώματα τυρού – σχηματισμός ραβδούχων, η ανθρακική ακολουθία και ο φλύσχη. Γενικά στο σύνολο της πρόκειται για μια σχετικά μονότονη λιθολογικά ενότητα καθώς στο μεγαλύτερο μέρος της αποτελείται από νηριτικούς ασβεστόλιθους ηλικίας ανώτερου Τριαδικού έως ανώτερου Ηώκαινου.

Μεγάλο ενδιαφέρον εστιάζεται στην βάση της κολόνας της Τρίπολης, στα στρώματα Τυρού (σχηματισμός ραβδούχων στην Κρήτη), όπου αναφέρονται ως μια ηφαιστειοϊζηματογενή ακολουθία με ηφαιστειακά, κλαστικά και ανθρακικά πετρώματα ανωπαλαιοζωικής – ανωτριάδικης ηλικίας (Καρακίτσιος και Ζαμπετάκη, 2011). Αυτό το πολύ ελαφρά μεταμορφωμένο ηφαιστειο-ιζηματογενές σύμπλεγμα που παρατηρείται κάτω από τους ασβεστόλιθους της Τρίπολης αποτελεί τους κατώτερους ορίζοντες, δηλαδή τη βάση της ενότητας της Τρίπολης και όχι το υπόβαθρο της (Thiebault and Kozur, 1979).

Η ανθρακική ακολουθία περιλαμβάνει εναλλαγές μεσοπλακωδών και παχυπλακωδών ασβεστολίθων, δολομίτες και δολομιτικούς ασβεστόλιθους ηλικίας ανώτερο Τριαδικό έως ανώτερο Ηώκαινο. Όσον αφορά τον φλύσχη είναι πηλιτοψαμμιτικός και χαρακτηρίζεται από την παρουσία ολισθοστρωμάτων στους ανώτερους ορίζοντες του συνιστώντας έναν ιδιόμορφο σχηματισμό γνωστό ως άγριο φλύσχη (Καρακίτσιος και Ζαμπετάκη, 2011).

Στην Κρήτη απαντούν όλοι οι σχηματισμοί της ενότητας της Τρίπολης, από τους οποίους οι δολομίτες και δολομιτικοί ασβεστόλιθοι του Τριαδικού καθώς και του ανώτερου Κρητιδικού έχουν μεγάλη εξάπλωση ενώ οι κάτω Κρητιδικού και οι νουμουλιτοφόροι ασβεστόλιθοι καταλαμβάνουν μικρότερη έκταση (Παπασταματίου, 1954). Όσον αφορά τον σχηματισμό των ραβδούχων, παρατηρούνται στη Δυτική Κρήτη στην ομώνυμη τοποθεσία στα Χανιά, στην Κεντρική Κρήτη στην περιοχή Πλακιά – Σελλίων καθώς και στην Ανατολική Κρήτη στην Σητεία.

Ενότητα Πίνδου (Εθιάς)

Αποτελεί το πιο τυπικό κάλυμμα στην Ελλάδα και είναι από τα πρώτα που περιγράφηκαν με εμφανίσεις και στην Κρήτη. Βέβαια, στην Κρήτη δεν παρουσιάζει τον ίδιο βαθμό εξάπλωσης όπως οι προηγούμενες ενότητες. Πρόκειται για μια λεπιωμένη ενότητα, η οποία είναι επωθημένη πάνω στην ενότητα της Τρίπολης ενώ πάνω στα ιζήματα της, στην Κρήτη, βρίσκονται επωθημένα τα τεκτονικά καλύμματα των εσωτερικών ζωνών.

Σύμφωνα με τους Robertson et al (1991), η ενότητα της Πίνδου αποτελούσε μια βαθιά λεκάνη η οποία σχηματίστηκε στο βόρειο περιθώριο της Απούλιας μικροπλάκας. Πρόσθετα, ο Παπανικολάου (2015) αναφέρει ότι είναι πιθανό να αποτελούσε μια βαθιά αύλακα χωρίς όμως να συσχετίζεται άμεσα με την ωκεάνια λεκάνη της Πίνδου καθώς η τοποθέτηση της μέσα στον ωκεανό Πίνδου – Κυκλάδων βρίσκεται ακόμα υπό συζήτηση. Χαρακτηριστικό της ενότητας Πίνδου, και λόγω των ανωτέρω, αποτελεί η πυριτική ή ανθρακική πελαγική ιζηματογένεση όπως ραδιολαρίτες και άλλοι πυριτόλιθοι, πελαγικοί ασβεστόλιθοι κα.

Η στρωματογραφική κολόνα της Πίνδου περιλαμβάνει επιγραμματικά από κάτω προς τα πάνω έξι σχηματισμούς. Αρχικά περιλαμβάνονται, το κλασικό Τριαδικό (έναν σχηματισμό από εναλλαγές μαργών, ψαμμιτών και ασβεστολίθων), οι ασβεστόλιθοι με ενδιαστρώσεις πυριτιολίθων, οι κάθε αυτό ραδιολαρίτες, οι πελαγικοί ασβεστόλιθοι (γνωστοί και ως ασβεστόλιθοι με *Globotruncanes*), τα μεταβατικά στρώματα προς τον φλύσχη και τέλος ο φλύσχη.

Στην Κρήτη η ενότητα της Πίνδου εμφανίζεται με αρκετές παραλλαγές, οι οποίες συνιστούν τις ενότητες Εθιάς και Μαγκασά. Η ενότητα Εθιάς έχει τυπική εμφάνιση στα Αστερούσια και διαφέρει από την ενότητα της Πίνδου στην ηλικία έναρξης της φλυσχογένεσης (στην Εθιά η φλυσχογένεση είναι μετέπειτα) ενώ η ενότητα Μαγκασά εμφανίζεται στην Ανατολική Κρήτη και διαφέρει από την ενότητα Εθιάς λόγω της απουσίας ραδιολαριτών (Παπανικολάου, 2015). Στο νομό Ρεθύμνης, η ενότητα Πίνδου παρατηρείται κυρίως στο κεντρικό και νότιο τμήμα του νομού πχ Όρος Κέδρος, Αγ. Παύλος, Αμάρι κα.

Καλύμματα Εσωτερικών Ελληνίδων

Πάνω από την ενότητα Πίνδου βρίσκεται επωθημένο το ανώτατο κάλυμμα της Κρήτης, το οποίο αποτελείται από ένα σύνολο ενοτήτων που κατατάσσονται στις εσωτερικές ζώνες. Τα καλύμματα αυτά περιλαμβάνουν μαξιλαροειδείς βασαλτικές λάβες, γάββρους, περιδοτίτες, αμφιβολίτες, γνεύσιους, μάρμαρα, οφιολίθους κα. Η τεκτονική τους διάταξη από το κατώτατο προς το νεότερο είναι το κάλυμμα της Άρβης, Μιαμούς, Βάτου, Αστερουσίων και τέλος το οφιολιθικό κάλυμμα. Στον νομό Ρεθύμνης, το οφιολιθικό κάλυμμα παρατηρείται στην περιοχή του Σπηλίου και στις κοινότητες Αρδρακτός, Μουρνέ και Καρίνες, το κάλυμμα Αστερουσίων βόρεια των κοινοτήτων Μέλαμπες και Σακτούρια, το κάλυμμα Βάτου στην περιοχή Λεπρές και το κάλυμμα Άρβης στους Μέλαμπες.

Νεογενείς και Τεταρτογενείς σχηματισμοί

Όσον αφορά τα ιζήματα του Νεογενούς στην Κρήτη, έχουν αναγνωριστεί δεκάδες λιθολογικές ενότητες, οι οποίες δύναται να ταξινομηθούν σε έξι ομάδες και οι περισσότερες από αυτές εμφανίζονται σε όλο το νησί (Meulenkamp et al. 1979). Συνοπτικά πρόκειται για τις ομάδες Πρίνα, Τεφελίου, Βρύσες, Ελληνικό, Φοινικιά και Αγίας Γαλήνης. Συγκεκριμένα, ευρύτερα για τον νομό Ρεθύμνης και μέρος του νομού Χανίων, ο Meulenkamp (1969) αναγνώρισε οχτώ λιθολογικούς σχηματισμούς, εκ των οποίων είναι οι σχηματισμοί Παντάνασσα, Αποστόλων, Ρεθύμνου, Γάλλου, Μυλοπόταμου, Δράμια, Αστερίου και Φραγκοκάστελλου.

Οι Τεταρτογενείς σχηματισμοί βρίσκονται πάνω από τους αλπικούς σχηματισμούς και τους σχηματισμούς του Νεογενούς και αποτελούνται από χερσαίες, θαλάσσιες έως λιμναίες αποθέσεις, κροκάλες και χαλίκια. Συγκεκριμένα, στους Τεταρτογενείς σχηματισμούς ανήκουν οι παράκτιες και αλλουβιακές αποθέσεις, τα κορήματα και οι κώνοι κορημάτων, υλικά ποταμών και θαλάσσιων αναβαθμίδων κα.

Ειδικότερα για την περιοχή μελέτης:

Η περιοχή μελέτης, σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη παρακάτω, αποτελείται από τις ενότητες φυλλιτών-χαλαζιτών, Τρίπολης, Πίνδου, Βάτου, από το οφιολιθικό κάλυμμα καθώς και από τους σχηματισμούς του Νεογενούς και Τεταρτογενούς. Η κατώτερη τεκτονική ενότητα είναι η ενότητα των φυλλιτών χαλαζιτών, η οποία παρατηρείται κυρίως στο νότιο τμήμα της περιοχής. Η ενότητα αυτή, ηλικίας πιθανά Τριαδικής, περιλαμβάνει σχιστόλιθους, χαλαζίτες, μάρμαρα και μεταβασάλτες.

Η αμέσως επόμενη ενότητα κατά την τεκτονική τάξη είναι η ενότητα της Τρίπολης, η οποία καταλαμβάνει ένα αρκετά σημαντικό τμήμα στην περιοχή μελέτης κυρίως στο κεντρικό – δυτικό τμήμα. Περιλαμβάνει ασβεστόλιθους με ενδιαστρώσεις δολομιτών ηλικίας που κυμαίνεται από το ανώτερο Τριαδικό έως το ανώτερο Ηώκαινο. Πρόκειται για μια μονότονη λιθολογικά ακολουθία αρκετά μεγάλου πάχους, όπως για παράδειγμα αναφέρονται οι ασβεστόλιθοι του ανώτερου Τριαδικού- ανώτερου Ιουρασικού που έχουν πάχος 400m. Επίσης παρατηρούνται ορισμένες εμφανίσεις του φλύσχη της Τριπόλεως στο δυτικό τμήμα της περιοχής πχ Ατσιπάδες, ηλικίας κατώτερο Πριαμπόνιο έως Ολιγόκαινο.

Η ενότητα της Πίνδου στην περιοχή μελέτης περιλαμβάνει ασβεστόλιθους, κερατόλιθους ενώ επίσης παρατηρείται και μια μικρή εμφάνιση φλύσχη, ο οποίος είναι ψαμμιτό ιλυολιθικός ηλικίας Ηωκαίνου. Αναφέρεται ότι το Όρος Ασιδέρωτα δομείται αποκλειστικά από πετρώματα της ενότητας Πίνδου όπως επίσης εμφανίσεις της ενότητας αυτής παρατηρούνται ανατολικά του χωριού Κεραμέ.

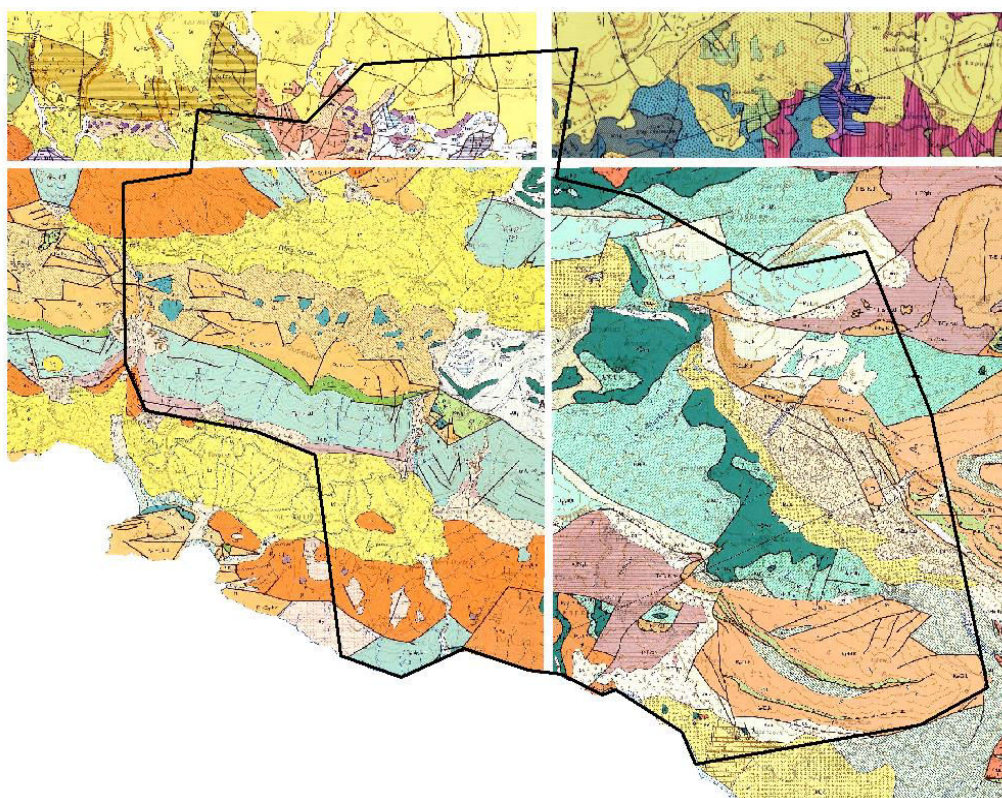
Στην υπό μελέτη περιοχή επίσης, εμφανίζονται τα καλύμματα των εσωτερικών ζωνών όπως είναι το κάλυμμα Βάτου και το οφιολιθικό κάλυμμα. Το κάλυμμα Βάτου αποτελείται από μεταιζήματα, μεταβασάλτες, σχιστόλιθους και οφιολιθικά ολισθοστρώματα. Αναφέρεται ότι κυρίως επικρατεί ο σχηματισμός των σχιστολίθων ηλικίας ανώτερο Ιουρασικό-κατώτερο Κρητιδικό, ο οποίος περιλαμβάνει εναλλαγές τεφρών μαργών και πάγκων πολύ ψαμμιτικών ασβεστολίθων. Τυπικές εμφανίσεις του καλύμματος Βάτου εκτός από την ομώνυμη

τοποθεσία και την ευρύτερη περιοχή, όπου σημειωτέον εντοπίζεται με μια αρκετά μεγάλη εμφάνιση, παρατηρούνται δυτικά και νοτιοδυτικά του χωριού Κεραμέ.

Όσον αφορά το οφιολιθικό κάλυμμα, το οποίο συνιστά το ανώτερο τεκτονικό κάλυμμα στην περιοχή μελέτης, αποτελείται από γάββρους, δολερίτες και σερπεντινωμένους περιδοτίτες ηλικίας ανώτερο Ιουρασικό-κατώτερο Κρητιδικό. Εμφάνσεις του οφιολιθικού συμπλέγματος σημειώνονται στις περιοχές Μυζόρρουμα, Μουρνέ, Σπήλι και Άρδρακτος.

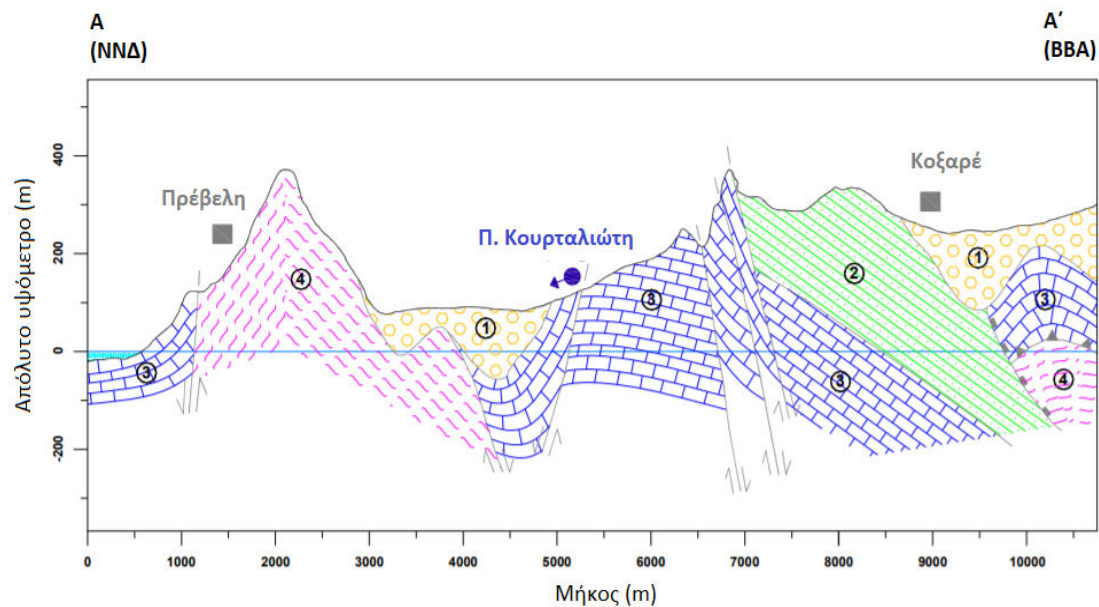
Οι σχηματισμοί του Νεογενούς στην υπό μελέτη περιοχή περιλαμβάνουν κυρίως χερσαίες αποθέσεις του Μειοκαίνου όπως κροκαλοπαγή, άμμους, ψαμμίτες και παρατηρούνται στο βόρειο τμήμα στις περιοχές Αγκουσελιανά, Κοξαρέ, Λαμπινή κα. Οι τεταρτογενείς σχηματισμοί, συνιστώνται από παράκτιες αποθέσεις, αλλούβια και πλευρικά κορήματα, σε μικρές μεμονωμένες εμφανίσεις, με την μεγαλύτερη εμφάνιση να σημειώνεται στην ευρύτερη περιοχή του Κισσού και Κισσού κάμπος.

Η γεωλογική δομή της περιοχής μελέτης αποτυπώνεται στους παρακάτω γεωλογικούς χάρτες του Ι.Γ.Μ.Ε όπου καταλαμβάνει έκταση και στα τέσσερα γεωλογικά φύλλα του Νομού (Φύλλα Ρέθυμνο, Πέραμα, Σελλιά, Μέλαμπες) όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 5.3. Αναφέρεται ότι λόγω του διαφορετικού χρόνου δημιουργίας τους και των διαφόρων ερευνητών τα φύλλα αυτά δεν συμπίπτουν επ' ακριβώς μεταξύ τους στις ραφές.



Εικόνα 5.3: Η γεωλογική δομή της περιοχής μελέτης σύμφωνα με τους γεωλογικούς χάρτες του Ι.Γ.Μ.Ε (Φύλλα Ρέθυμνο, Πέραμα, Σελλιά, Μέλαμπες).

Για την καλύτερη αποτύπωση της γεωλογίας της περιοχής μελέτης παρατίθενται η γεωλογική τομή ΑΑ΄ από τους Στειακάκης και Βαβαδάκης, 2012. Η τομή αυτή είναι διεύθυνσης ΝΝΔ-ΒΒΑ, με κατεύθυνση από Πρέβελη προς Κοξαρέ, εγκάρσια της λεκάνης Κουρταλιώτη.



Σχήμα 5.1: Γεωλογική τομή στην περιοχή μελέτης όπου 1: Σχηματισμοί του Νεογενούς και Τεταρτογενούς, 2: Φλύσχης εν. Τρίπολης, 3: Ασβεστόλιθοι, δολομίτες εν. Τρίπολης, 4: φυλλίτες – χαλαζίτες (Πηγή: Στειακάκης και Βαβαδάκης, 2012).

5.3 Τεκτονική

Η τεκτονική συνδέεται άμεσα με την υδρογεωλογία καθορίζοντας σε σημαντικό βαθμό τις υδρογεωλογικές συνθήκες. Στην παρούσα εργασία η τεκτονική λήφθηκε υπόψη υπό την έννοια ότι στην μοντελοποίηση συμπεριλήφθηκε ένα μεγάλο τμήμα της ρηξιγενούς ζώνης που υπάρχει στο ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης, όπως αναλύεται παρακάτω (εικ.5.4,5.5).

Όσον αφορά τα γεγονότα τεκτονικής που επέδρασαν στην Κρήτη, έχουν αλλοιωθεί τόσο για το αυτόχθονο όσο και για τις αλλόχθονες ενότητες λόγω των μεγάλων τεκτονικών κινήσεων που συνέβησαν καθώς και των επιμέρους κινήσεων μεταξύ των τεκτονικών καλυμμάτων. Επομένως, πρωτογενείς δομές δεν είναι εύκολο να ανευρεθούν καθότι οι νεότερες επιδράσεις απάλειψαν πολλά χαρακτηριστικά τους.

Στην Κρήτη αρχικά επέδρασε η πτυχωσιγενής τεκτονική ενώ στην συνέχεια ακολούθησε η ρηγματογενής. Στην πτυχωσιγενή τεκτονική, οι πτυχωσιγενείς δυνάμεις ενέργησαν από βορρά προς νότο με διευθύνσεις των αξόνων των πτυχών ABA-ΔΝΔ και ANA-ΔΒΔ. Οι αλλόχθονες ενότητες πτυχώθηκαν πρωτογενώς στον χώρο που βρισκόντουσαν αρχικά δηλαδή στον χώρο προέλευσης τους, πριν την απόσπαση και άφιξη τους στον σημερινό χώρο της Κρήτης. Όταν τα αλλόχθονα καλύμματα έφθασαν στην βόρεια ζώνη, η πτύχωση στην Κρήτη είχε εξελιχθεί στο στάδιο των πτυχωσιγενών ρηγμάτων. Οι αλλόχθονοι σχηματισμοί επηρεάστηκαν από την δημιουργηθείσα τεκτονική μορφολογία με την επίδραση των τελικών πτυχωσιγενών τάσεων. Η τεκτονική δομή των αλλόχθονων ενοτήτων ποικίλλει και οι διευθύνσεις των αξόνων των πτυχών τους εμφανίζουν διάφορες κλίσεις. Βέβαια, η σημερινή τους θέση οφείλεται εν μέρει και στο μετέπειτα στάδιο της ρηγματογενούς τεκτονικής (Φυτρολάκης,1980).

Η ρηγματογενής τεκτονική που επακολούθησε, έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς λόγω αυτής διαμορφώθηκε η σημερινή μορφολογική εικόνα του νησιού. Ως γνωστόν, η Κρήτη κατατμήθηκε από ρήγματα διεύθυνσης Β-Ν και Α-Δ. Εκτός από τα ανωτέρω ρήγματα, δημιουργήθηκαν και μεταγενέστερα κατά την διάρκεια του Νεογενούς με διευθύνσεις, οι οποίες ποικίλλουν. Στο Νεογενές έδρασαν κυρίως δυνάμεις εφελκυσμού σχηματίζοντας ρήγματα κανονικά και ανάστροφα (Φυτρολάκης,1980). Η νεοτεκτονική αποτελεί την τελευταία παραμορφωτική φάση που υπέστη το νησί και η οποία βέβαια συνεχίζεται μέχρι και σήμερα.

Σύμφωνα με τους Paranikolaou and Vasilakis (2010) οι τεκτονικές επαφές μεταξύ των ενοτήτων της Κρήτης συνιστώνται από επωθήσεις, ρήγματα εφελκυστικής αποκόλλησης και κανονικά / οριζόντιας ολίσθησης ρήγματα. Ως απόρροια των ανωτέρω διέκριναν τρεις φάσεις παραμόρφωσης, όπου η πρώτη περιλαμβάνει μια συμπίεστική φάση παραμόρφωσης, η δεύτερη μια εφελκυστική φάση με ρήγματα αποκόλλησης διεύθυνσης Α-Δ και η τρίτη ομοίως εφελκυστικής φάσης παραμόρφωσης με ρήγματα μεγαλύτερης κλίσης. Αναφέρεται ότι οι μεταμορφωμένες ενότητες διακρίνονται από τις αμεταμόρφωτες με τα ρήγματα αποκόλλησης, τα οποία έχουν σημαντική δράση στο χώρο της Κρήτης με τη δημιουργία λεκανών όπως είναι η λεκάνη της Μεσσαράς.

Όσον αφορά τον **Νομό Ρεθύμνης** παρατηρούνται εν γένει όλα τα χαρακτηριστικά της πτυχωσιγενούς και ρηγματογενούς τεκτονικής τόσο στο αυτόχθονο (πχ Ψηλορείτης) όσο και στο αλλόχθονο. Τονίζεται ότι οι πλακώδεις κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι εμφανίζονται σε αρκετό βαθμό πτυχωμένοι και κατακερματισμένοι. Στον Ψηλορείτη, οι εμφανίσεις αυτές είναι πολύ εντονότερες με χαρακτηριστικές πολύ μεγάλες πτυχές κυρίως στο Δυτικό τμήμα.

Η ενότητα φυλλιτών-χαλαζιτών εμφανίζεται επίσης πολυπτυχωμένη με λεπιώσεις και άλλες δομές οι οποίες συνηγορούν στη γενική καταπόνηση του σχηματισμού (Κνιθάκης,1995). Η ενότητα της Τρίπολης έχει υποστεί δύο φάσεις πτύχωσης καθώς και μια τεκτονική λεπίωση. Στην ενότητα της Πίνδου, παρατηρούνται πτυχές όμοιες με αυτές της Τρίπολης, με την διαφορά όμως ότι είναι πιο πυκνές λόγω της λιθολογίας. Επισημαίνεται ότι στην ενότητα αυτή, εμφανίζονται αρκετές εφιππεύσεις με αποτέλεσμα την επανάληψη των λιθολογιών.

Νεότερα ρήγματα κερμάτισαν και τους σχηματισμούς των καλυμμάτων, με αποτέλεσμα τμήματα τους να βυθιστούν και να δημιουργηθεί το αντίστοιχο ανάγλυφο κάλυψης και πλήρωσης (περιοχή Αμαρίου). Βέβαια, τονίζεται ότι τα ρήγματα αυτά κατακερμάτισαν τα ήδη κερματισμένα ανθρακικά συμβάλλοντας στην έντονη και άμεση καρστικοποίηση τους. Στους ορεινούς όγκους (Κέδρος, Σάμιτος, Ασιδέρωτα) έχουν παρατηρηθεί πολλά ανάστροφα ρήγματα και μικρές εφιππεύσεις με επαναλήψεις των λιθολογιών, οι οποίες καθορίζουν και επηρεάζουν τις υδρογεωλογικές συνθήκες. Πρόσθετα, ανάμεσα στους κύριους ορεινούς όγκους των Λευκών Ορέων και του Ψηλορείτη δημιουργήθηκαν μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες όπως είναι οι Κουρνά-Επισκοπής, Σφακιά-Πλακιά, η τεκτονική λεκάνη Αμαρίου και η τεκτονική αύλακα Σπηλίου (Κνιθάκης,1995).

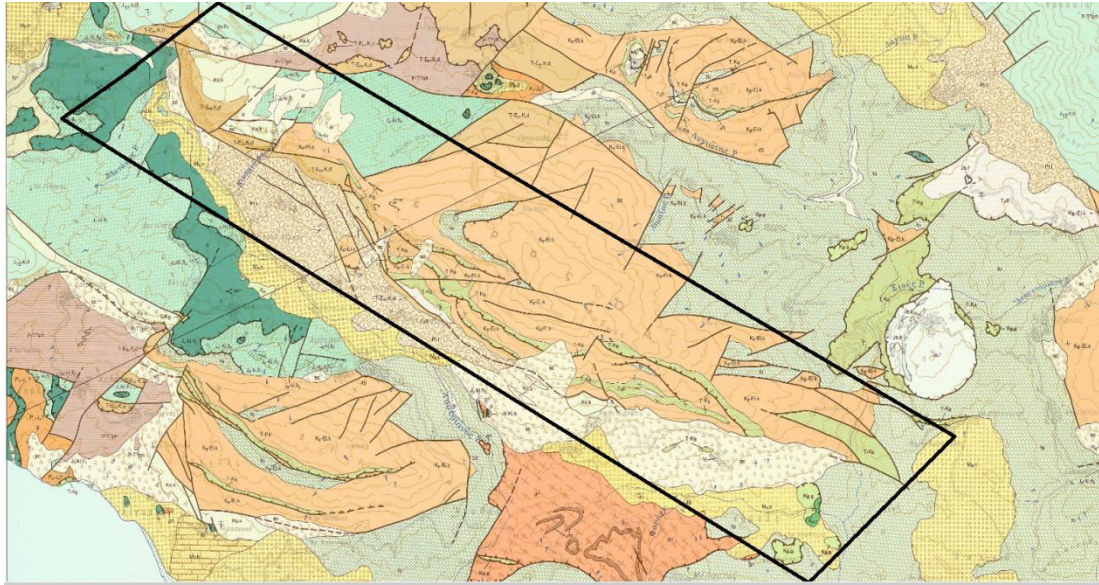
Ειδικότερα για την περιοχή μελέτης:

Ο Καρακίτσιος (1986) στην εργασία του μεταξύ άλλων αναφέρεται εκτενώς στα τεκτονικά χαρακτηριστικά των ενοτήτων φυλλιτών – χαλαζιτών και Τρίπολης για την περιοχή των Σελλίων, στα νότια του Νομού Ρεθύμνης. Αναφέρει ότι η βάση της ενότητας Τρίπολης και οι φυλλίτες έχουν υποστεί μια αρχική φάση πτύχωσης με ισοκλινείς πτυχές και διεύθυνση άξονα Β 0°- 20° Α. Στην βάση της ενότητας Τρίπολης οι πτυχές είναι δεκαμετρικές ενώ προς τα κατώτερα τμήματα είναι μικρότερες ίδιας διεύθυνσης που προοδευτικά γίνονται δεκατομετρικές.

Στη συνέχεια, οι ισοκλινείς πτυχές ξαναπτυχώνονται από μια δεύτερη φάση πτύχωσης με άξονα Β 60°-90°Α, δίνοντας ορισμένες φορές όμοιες ισοπαχείς πτυχές και άλλοτε σε λοξές ζώνες, όπως για παράδειγμα στους σχιστόλιθους πάνω από την Πίσω Μονή Πρέβελη. Το κάλυμμα της Τρίπολης στην περιοχή αυτή εκτός των άλλων υπέστη τοπικές λεπιώσεις, ενώ μια κύρια φάση λεπίωσης φαίνεται να διαχωρίζει τους φυλλίτες από την ενότητα της Τρίπολης. Η λεπίωση αυτή είναι απόρροια της εφαιπτομενικής τεκτονικής και οφείλεται στην διαφορετική σύσταση των σχηματισμών των προαναφερθέντων ενοτήτων (Καρακίτσιος,1986).

Όπως προαναφέρθηκε, στην υπό μελέτη περιοχή απαντώνται πάρα πολλά ρήγματα είτε μεσαία είτε μεγάλα συνιστώντας μια σημαντική ρηξιγενή ζώνη. Αυτή η ρηξιγενής ζώνη παρατηρείται κατά μήκος του Σπηλίου, Αγίας Φωτιάς, Κισσό, Κρύα Βρύση και Άγιο Ευστρατίο. Επισημαίνεται ότι τα ρήγματα αυτά συμβάλλουν και ορίζουν τις

υδρογεωλογικές συνθήκες στις περιοχές αυτές επηρεάζοντας τα πετρώματα του υδροφορέα. Οι διευθύνσεις τους είναι κυρίως ΒΔ-ΝΑ και ΒΑ-ΝΔ ως απόρροια της θραυσιγενούς τεκτονικής που έδρασε στις περιοχές αυτές όπως και στην υπόλοιπη Κρήτη. Ένα τμήμα της ζώνης αυτής εισήχθη στο μοντέλο ως οριακή συνθήκη καθώς κατά την διάρκεια της βαθμονόμησης παρατηρήθηκε ότι μετέβαλλε σημαντικά τα υδραυλικά ύψη της εκεί περιοχής.



Εικόνα 5.4: Απόσπασμα από τον γεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ φύλλο Μέλαμπες 1:50.000 στο οποίο παρουσιάζεται η ρηξιγενής ζώνη Σπηλίου – Αγίας Φωτιάς – Κισσού- Κρύα Βρύση.

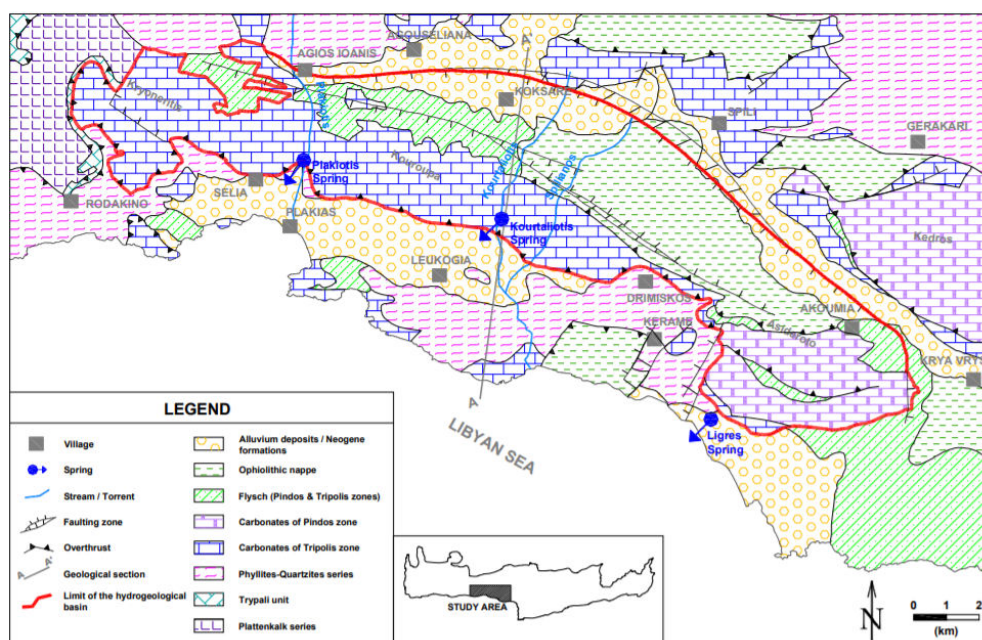


Εικόνα 5.5: Καθρέπτης του ρήγματος Αγίας Φωτιάς Σπηλίου.

5.4 Υδρογεωλογία

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, η περιοχή μελέτης περιλαμβάνει ένα αρκετά μεγάλο τμήμα της υδρογεωλογικής λεκάνης Κουρταλιώτη, η οποία αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές λεκάνες στον Νομό Ρεθύμνης λόγω τόσο των ιδιοτεροτήτων που εμφανίζει όσο και των υδάτινων αποθεμάτων της. Συγκεκριμένα για την υδρογεωλογική λεκάνη του Κουρταλιώτη, είναι μια καρστική λεκάνη, ένα σύστημα με πολύ καλά καθορισμένα τα όρια της περατότητας (εικ.5.6).

Στο Νότιο –Νοτιοανατολικό τμήμα της λεκάνης, τα όρια της περατότητας ορίζονται από μια τεκτονική επαφή ανάμεσα στα ανθρακικά και στους φυλλίτες χαλαζίτες. Στο Βόρειο τμήμα τα όρια είναι επίσης πολύ καλά καθορισμένα λόγω ύπαρξης σχηματισμών με χαμηλή περατότητα (οφιόλιθοι κα). Οι ανθρακικοί σχηματισμοί εντός της λεκάνης έχουν μια διεύθυνση ΔΒΔ-ΑΝΑ κατά μήκος των Όρεων Κρουονερίτη, Κούρουπα και Ασιδέρωτο και τροφοδοτούν την πηγή του Κουρταλιώτη (Steiakakis et al,2011).



Εικόνα 5.6: Απεικόνιση της υδρογεωλογικής λεκάνης του Κουρταλιώτη εντός του κόκκινου πλαισίου. (Πηγή: Steiakakis et al.,2011)

ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ

Η τροφοδοσία στην περιοχή μελέτης προέρχεται πρωτογενώς από τις βροχοπτώσεις και τις χιονοπτώσεις (απευθείας κατείσδυση). Επίσης πιθανόν να υπάρχουν και πλευρικές μεταγγίσεις από τα ανατολικά, δηλαδή εισροή νερού από γειτονικό υδροφορέα. Εκτός από την απευθείας κατείσδυση, το σύστημα τροφοδοτείται και από τις διαρροές των ποταμών που ρέουν κατά μήκος της λεκάνης από τον βορά προς τον νότο (δευτερογενής τροφοδοσία) (Steiakakis et al,2011). Στην περιοχή μελέτης αναφέρεται ότι, τα κύρια ποτάμια που ρέουν είναι ο Κουρταλιώτης και ο Σπηλιανός. Ο Μέγας ποταμός συγκεντρώνει τα επιφανειακά νερά της ευρύτερης περιοχής, του Κουρταλιώτη και του Σπηλιανού ενώ στην κοίτη του κοντά στην θάλασσα σχηματίζει την γνωστή λίμνη Πρέβελη.

Ο Κουρταλιώτης ποταμός ρέει κατά μήκος της ομώνυμης λεκάνης, με ετήσια απορροή $15.5 \cdot 10^6 \text{m}^3$, τροφοδοτώντας τον υδροφορέα μέσω της περατότητας των ανθρακικών πετρωμάτων. Ανάντη της πηγής του Κουρταλιώτη έχει παρατηρηθεί ότι η απορροή του ποταμού, ένα μέρος της τροφοδοτεί τον υδροφορέα. Αναλυτικότερα, ένα μέρος της επιφανειακής απορροής μειώνεται μεταξύ της εισόδου του ποταμού στο φαράγγι και ανάντη της πηγής σύμφωνα με το σημείο μέτρησης της ροής που έχει τοποθετηθεί. Επομένως, στα ανάντη και για περίπου ένα χιλιόμετρο, ο Κουρταλιώτης ποταμός θεωρείται πως λειτουργεί ως ένα ποτάμι εισροής νερού, μέσω του οποίου δηλαδή εισέρχεται νερό στο σύστημα ενώ στα κατάντη ως ένα ποτάμι εκροής δηλαδή διαφεύγοντος νερού. **Εκτιμάται ότι ο Κουρταλιώτης ποταμός τροφοδοτεί τον υδροφορέα περίπου με $3.1 \cdot 10^6 \text{m}^3/\text{yr}$, δηλαδή με ένα ποσοστό της τάξεως του 20% της μετρούμενης απορροής (Steiakakis et al, 2011).**

Όσον αφορά τον Σπηλιανο ποταμό, ομοίως ρέει κατά μήκος της λεκάνης του Κουρταλιώτη, με ετήσια απορροή $14.7 \cdot 10^6 \text{m}^3$, τροφοδοτώντας τον υδροφορέα. Σύμφωνα με μετρήσεις το **25% της επιφανειακής απορροής του Σπηλιανού ποταμού καταλήγει στον υδροφορέα, με την τροφοδοσία επομένως να εκτιμάται περίπου στα $4.59 \cdot 10^6 \text{m}^3/\text{yr}$.** Η διαφορά ανάμεσα στα δυο ποτάμια έγκειται στο γεγονός ότι το μήκος της ροής Σπηλιανου ποταμού στους ανθρακικούς σχηματισμούς είναι μεγαλύτερη (Steiakakis et al, 2011).

ΚΑΤΕΙΣΔΥΣΗ

Σύμφωνα με τους Steiakakis et al. 2011, για την υδρογεωλογική λεκάνη του Κουρταλιώτη, η απευθείας κατείσδυση από τις βροχοπτώσεις εκτιμήθηκε σε $36.6 \cdot 10^6 \text{m}^3/\text{yr}$ και η δευτερογενής, δηλαδή οι διαρροές από τα ποτάμια, σε $8.1 \cdot 10^6 \text{m}^3/\text{yr}$. Πρόσθετα, εκτιμήθηκε ο συντελεστής κατείσδυσης για τα ανθρακικά πετρώματα της λεκάνης του Κουρταλιώτη σε 51.3%.

ΠΗΓΕΣ

Εντός της περιοχής μελέτης βρίσκονται ορισμένες από τις πιο αξιόλογες πηγές του Νομού Ρεθύμνης με αρκετά μεγάλες παροχές. Πρόκειται για καρστικές πηγές των ανθρακικών πετρωμάτων, οι οποίες στο σύνολο τους υφίστανται εκμετάλλευση καλύπτοντας υδρευτικές και αρδευτικές ανάγκες. Οι προαναφερόμενες πηγές είναι οι πηγές του Κουρταλιώτη, Σπηλίου, Αγίας Φωτιάς και Λίγκρες. Επισημαίνεται ότι λόγω της μεγάλης παροχής τους και εν γένει της σημαντικότητας τους στο γενικό υδάτινο δυναμικό της περιοχής, οι πηγές αυτές ελήφθησαν σημαντικά υπόψιν στην μοντελοποίηση της περιοχής μελέτης.

Οι πηγές του Κουρταλιώτη βρίσκονται ανατολικά της κοίτης του ομώνυμου ποταμού σε υψόμετρο περίπου 135m με μέση ετήσια εκροή $38.8 \cdot 10^6 \text{m}^3$ (Steiakakis, 2018), η οποία αντιστοιχεί περίπου σε $1.2 \text{m}^3/\text{sec}$. Από όλες τις πηγές (Κουρταλιώτης, Πλακιώτης, Λίγκρες) που αποστραγγίζουν την υδρογεωλογική λεκάνη του Κουρταλιώτη, το 85% του συνολικού όγκου εκροής προέρχεται μόνον από τις πηγές του Κουρταλιώτη. Το μέγιστο της εκροής παρατηρείται κατά τους μήνες Απρίλιο – Μάιο ενώ το ελάχιστο τους μήνες Σεπτέμβριο – Οκτώβριο (Steiakakis, 2018).

Αυτές οι πηγές αναβλύζουν από τα ανθρακικά πετρώματα της ενότητας της Τρίπολης, ενώ θεωρείται ότι υδροφορέας τους είναι το Ξηρό Όρος, το Όρος Κουρούπα καθώς και ένα τμήμα από τον Κρυονερίτη (Κριτσωτάκης και Παυλίδου,2013). Σύμφωνα με το Τμήμα Υδροοικονομίας της Περιφέρειας Κρήτης (2018), μια ποσότητα νερού των πηγών του Κουρταλιώτη καλύπτει υδρευτικές και αρδευτικές ανάγκες των γύρω περιοχών ενώ το υπόλοιπο μένει ανεκμετάλλευτο, απορρέοντας επιφανειακά προς την θάλασσα.

Η πηγή του Σπηλίου είναι μια πηγή συνεχούς ροής που εκφορτίζεται μέσω κορήματων σε υψόμετρο περίπου 405m. Παρόλο που δεν εντοπίζεται η εκφόρτιση της από τα ανθρακικά της ενότητας Τρίπολης, θεωρείται όμως ότι αυτό μπορεί να συμβαίνει σε μεγαλύτερο υψόμετρο και να εκδηλώνεται από τα κορήματα στο υψόμετρο των 405m. Οι εκροές της εκτιμώνται περίπου στα $3 \cdot 10^6 \text{m}^3$ ανά υδρολογικό έτος (Κριτσωτάκης και Παυλίδου,2013). Η πηγή του Σπηλίου και της κάτωθι Αγίας Φωτιάς, καλύπτουν τις υδρευτικές και αρδευτικές ανάγκες της ομώνυμης περιοχής.

Όσον αφορά την πηγή της Αγίας Φωτιάς, η οποία αναβλύζει κοντά στην πηγή του Σπηλίου, εκφορτίζει σε υψόμετρο περίπου 435m από τα ανθρακικά πετρώματα της ενότητας Τρίπολης με εκροές περίπου $1.2 \cdot 10^6 \text{m}^3$ ανά υδρολογικό έτος (Κριτσωτάκης και Παυλίδου,2013). Δίπλα στην πηγή βρίσκεται η γεώτρηση της Αγίας Φωτιάς, η οποία είναι γεώτρηση αναρρύθμισης της πηγής και καλύπτει επίσης υδρευτικές και αρδευτικές ανάγκες της ευρύτερης περιοχής.

Στο νοτιοδυτικό τμήμα του ορεινού όγκου Ασιδέρωτα επί των ανθρακικών πετρωμάτων της ενότητας Πίνδου αναπτύσσεται μεμονωμένη υδροφορία, η οποία εκδηλώνεται μέσω της πηγής στην τοποθεσία Λίγκρες στην Κεραμινή Γιαλιά (Κριτσωτάκης και Παυλίδου,2013). Η πηγή αυτή βρίσκεται σε υψόμετρο περίπου 85m και έχει εξίσου αξιόλογη εκροή, σύμφωνα με παλαιότερες μετρήσεις, περίπου $1.45 \cdot 10^6 \text{m}^3$ ετησίως. Το νερό της πηγής αυτής χρησιμοποιείται κυρίως για άρδευση και δευτερευόντως για ύδρευση του οικισμού Αγία Παρασκευή και Κεραμινή Γιαλιά (Περιφέρεια Κρήτης, 2018).

5.5 Υδρολιθολογία

Από υδρολιθολογικής πλευράς, η περιοχή μελέτης εν γένει, όπως και η λεκάνη του Κουρταλιώτη, αποτελείται τόσο από χαμηλής περατότητας έως πρακτικά αδιαπέρατους σχηματισμούς (πχ οφιόλιθοι, φλύσχης Τρίπολης) όσο και από μέτριας έως υψηλής περατότητας (πχ ανθρακικά Τρίπολης) όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα 5.7.

Στους Νεογενείς σχηματισμούς, η περατότητα εξαρτάται από την σύσταση των λιθολογικών σχηματισμών καθότι αποτελούνται από περατά και αδιαπέρατα πετρώματα. Διαπερατοί σχηματισμοί είναι τα κροκαλοπαγή, οι ψαμμίτες ενώ αδιαπέρατοι θεωρούνται οι μάργες και οι άργιλοι. Τα νεογενή στην περιοχή μελέτης καταλαμβάνουν αρκετή έκταση ενώ στην λεκάνη του Κουρταλιώτη εντοπίζονται στο βορειοκεντρικό και νοτιοανατολικό τμήμα της.

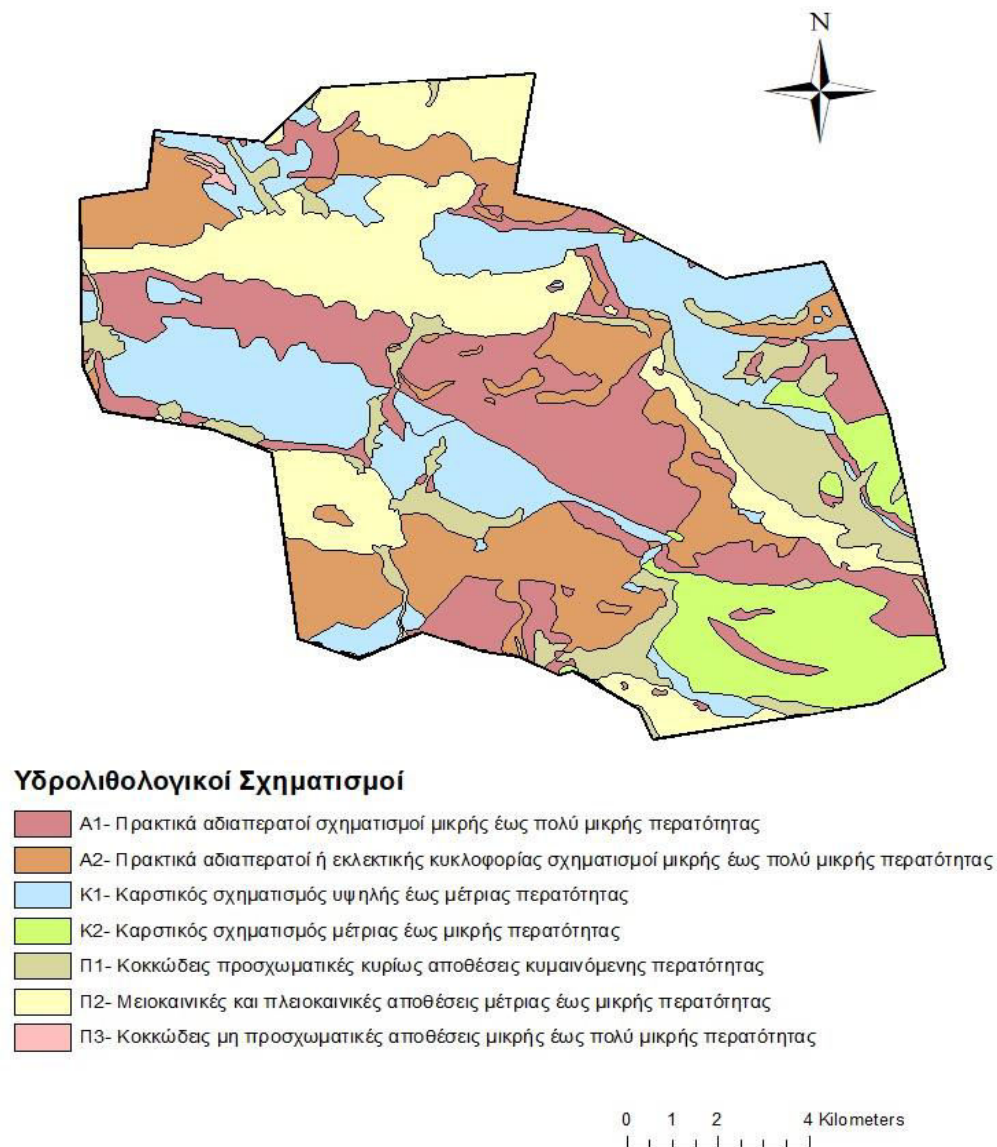
Το οφιολιθικό κάλυμμα και το κάλυμμα της ενότητας Βάτου που υπέρκεινται των ασβεστολίθων είναι χαμηλής περατότητας και αδιαπέρατοι σχηματισμοί αντίστοιχα. Η θέση τους στην οποία βρίσκονται, σε μεγάλα υψόμετρα και σε απότομες κλίσεις δεν ευνοούν την ύπαρξη υδροφοριών. Γενικά, τέτοιου είδους σχηματισμοί δύναται να αναπτύξουν ασθενείς υπόγειες υδροφορίες μόνο στο σαθρό τμήμα τους και σε ρωγμές. Για την περιοχή μελέτης, οι σχηματισμοί αυτοί δεν ελήφθησαν υπόψιν καθότι θεωρήθηκαν ασήμαντοι.

Η ενότητα της Πίνδου στην περιοχή μελέτης εμφανίζεται με δύο σχηματισμούς, τον φλύσχη και τα ανθρακικά πετρώματα. Ο φλύσχος της Πίνδου (όπως και της Τρίπολης) θεωρείται χαμηλής περατότητας ή και αδιαπέρατος σχηματισμός ενώ τα ανθρακικά θεωρούνται μέτριας περατότητας. Τονίζεται ότι τα ανθρακικά της ενότητας Πίνδου έχουν χαμηλότερη περατότητα από τα ανθρακικά της Τρίπολης ($K_{\text{Πίνδου}} < K_{\text{Τρίπολης}}$) λόγω της έντονης λεπίωσης που εμφανίζει η ενότητα της Πίνδου καθώς και των εναλλαγών στην λιθολογία της (ραδιολαρίτες κλπ). Στην υδρογεωλογική λεκάνη του Κουρταλιώτη, η ενότητα της Πίνδου εντοπίζεται στο νοτιοανατολικό τμήμα της (Όρος Ασιδέρωτο) καθώς και στο ανατολικό τμήμα της ευρύτερης περιοχής μελέτης (τμήμα του Όρους Κέδρους).

Τα ανθρακικά πετρώματα της Τρίπολης, τα οποία καταλαμβάνουν μια πολύ μεγάλη έκταση εντός της λεκάνης, είναι μέτριας έως υψηλής περατότητας συναρτήσει της τεκτονικής που έχει δράσει στην περιοχή, έχοντας υποστεί έντονη καρστικοποίηση, αποκτώντας επομένως ιδιαίτερο υδρογεωλογικό ενδιαφέρον. Σε αυτό συμβάλλει και η θέση τους καθώς υπέρκεινται των φυλλιτών χαλαζιτών, οι οποίοι είναι πολύ χαμηλής περατότητας έως πρακτικά αδιαπέρατοι.

Επισημαίνεται ότι οι φυλλίτες χαλαζίτες λόγω της ορυκτολογικής δομής και σύστασης τους δεν επιτρέπουν την ανάπτυξη υδροφοριών εντός τους, ευνοείται όμως η δημιουργία υδροφόρων σε υπερκείμενους υδροπερατούς σχηματισμούς. Οι φυλλίτες χαλαζίτες έχουν αρκετά μεγάλη εμφάνιση στην ευρύτερη περιοχή μελέτης στα νότια, κατά μήκος του Κουρταλιώτικου Φαραγγιού (πχ Κάτω Μονή Πρέβελη, Πίσω Μονή Πρέβελη) εμποδίζοντας την κίνηση των υπόγειων υδάτων. Πρόσθετα, επισημαίνεται ότι λόγω της ύπαρξης των φυλλιτών χαλαζιτών δημιουργήθηκαν οι πηγές στα νότια.

Η υδρολιθολογική ταξινόμηση των γεωλογικών σχηματισμών στην περιοχή μελέτης έγινε σε τρεις κατηγορίες. Συγκεκριμένα, σε καρστικούς (ανθρακικούς) σχηματισμούς, πορώδεις και αδιαπέρατους. Στη συνέχεια, σε κάθε μια κατηγορία οι σχηματισμοί διαχωρίστηκαν σύμφωνα με την διακύμανση της περατότητας τους (πχ μέτριας έως υψηλής κλπ). Στην εικόνα 5.7 παρουσιάζεται ο υδρολιθολογικός χάρτης για την περιοχή μελέτης.



Εικόνα 5.7: Υδρολιθολογικός χάρτης περιοχής μελέτης.
(Πηγή: Περιφέρεια Κρήτης, 2009)

5.6 Κλιματικά Στοιχεία

Το κλίμα στον Νομό Ρεθύμνης όπως και στην υπόλοιπη Κρήτη χαρακτηρίζεται ως ήπιο μεσογειακό, με ήπιους χειμώνες και θερμά καλοκαίρια. Ενδότερα του Νομού και κυρίως προς τις ορεινές περιοχές, το κλίμα αποκτά χαρακτηριστικά ηπειρωτικού κλίματος δεν παύει όμως να θεωρείται ήπιο. Οι περισσότερες βροχοπτώσεις παρατηρούνται κατά την διάρκεια του χειμώνα ενώ τους θερινούς μήνες επικρατεί η ανομβρία. Σχετικά με την θερμοκρασία δεν παρατηρούνται απότομες και ακραίες μεταβολές με την μέση θερμοκρασία να καταγράφεται στους 19.5°C (Γρηγοράκη,2009).

Όσον αφορά τις βροχοπτώσεις για την υπό μελέτη περιοχή, πληροφορίες δίδονται από τους δύο μετεωρολογικούς σταθμούς που υπάρχουν εντός, και συγκεκριμένα πρόκειται για τους σταθμούς Λευκόγεια και Σπηλίου. Στον παρακάτω πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα μετεωρολογικά δεδομένα των σταθμών της περιοχής και ειδικότερα οι μέσες μηνιαίες βροχοπτώσεις για μια χρονική περίοδο από το 1969 έως το 2009 (Κατσανικάκης,2013).

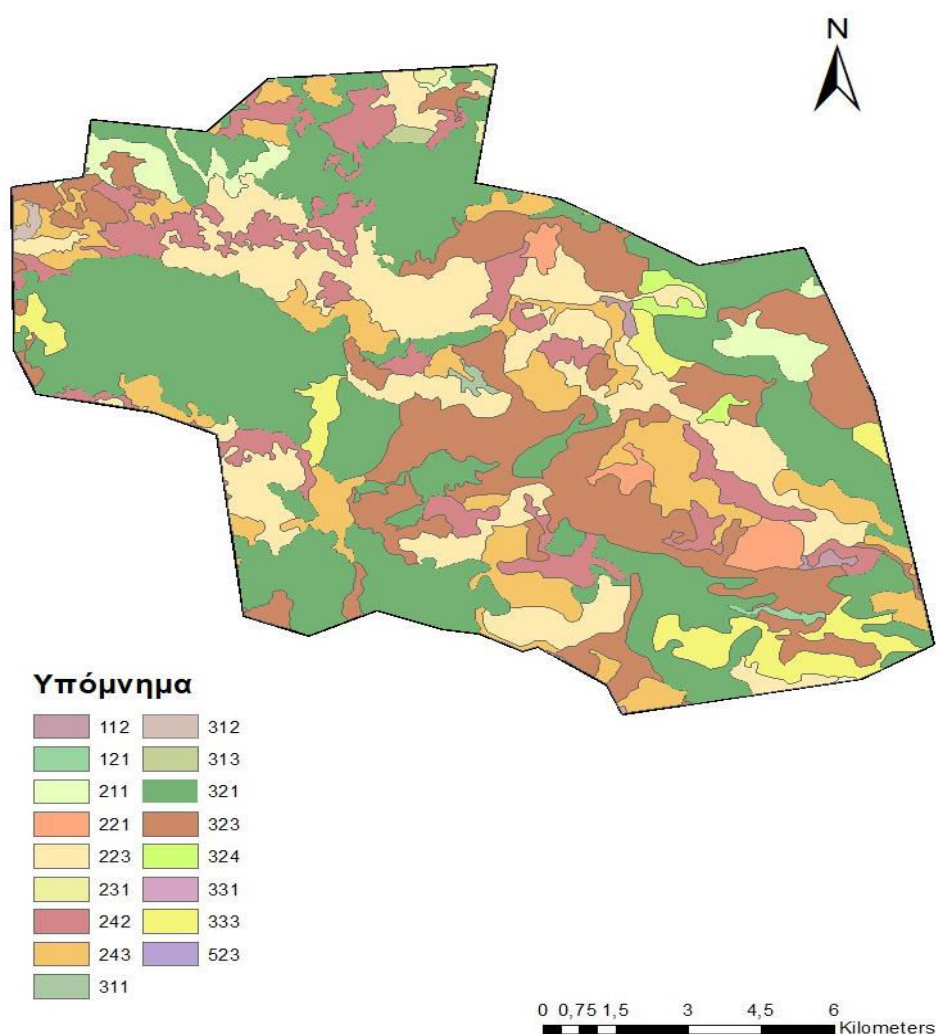
ΜΕΣΕΣ ΜΗΝΙΑΙΕΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΙΣ (mm)		
ΜΗΝΕΣ	ΣΤΑΘΜΟΣ ΛΕΥΚΟΓΕΙΑ	ΣΤΑΘΜΟΣ ΣΠΗΛΙΟΥ
Ιανουάριος	168	233
Φεβρουάριος	129	182
Μάρτιος	82	124
Απρίλιος	35	52
Μάιος	16	24
Ιούνιος	1	4
Ιούλιος	0	2
Αύγουστος	0	3
Σεπτέμβριος	10	21
Οκτώβριος	63	93
Νοέμβριος	134	171
Δεκέμβριος	184	238
Αθροιστικά Ετησίως	822	1146

Πίνακας 5.1: Βροχομετρικά δεδομένα των σταθμών Λευκόγεια και Σπηλίου.
(Πηγή: Κατσανικάκης, 2013)

Από τον πίνακα 5.1 εξάγεται το συμπέρασμα ότι τα ύψη των βροχοπτώσεων που παρατηρούνται στον σταθμό Σπηλίου είναι υψηλότερα σε σχέση με τον σταθμό Λευκόγεια, για την ίδια χρονική περίοδο. Αυτό οφείλεται στο διαφορετικό μικροκλίμα κάθε περιοχής καθώς και στο υψόμετρο. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι η περιοχή του Σπηλίου χαρακτηρίζεται ως ορεινή ενώ τα Λευκόγεια ως πεδινή. Το μέγιστο ύψος των βροχοπτώσεων και για τους δύο σταθμούς παρατηρείται τον μήνα Δεκέμβριο με 184mm για τον σταθμό Λευκόγεια και 238mm για τον σταθμό Σπηλίου ενώ το ελάχιστο τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο.

5.7 Χρήσεις γης

Στην παρακάτω εικόνα 5.8 αποτυπώνονται οι χρήσεις γης για την υπό μελέτη περιοχή όπως επίσης παρουσιάζονται και οι επεξηγήσεις των αντίστοιχων κωδικών. Ο χάρτης προέκυψε σύμφωνα με τα δεδομένα του προγράμματος **Corine Land Cover 2012**, από το ΕΚΧΑ Α.Ε. Η πληροφόρηση που παρέχεται μέσω των διαφόρων μορφών κάλυψης και χρήσεων γης έχει ως στόχο την ορθότερη και καταλληλότερη διαχείριση του περιβάλλοντος καθώς και την μελέτη των όποιων μεταβολών και βιοφυσικών μεταβλητών κ.α. Οι χρήσεις γης θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όσον αφορά τους υδροφόρους και ειδικότερα σε θέματα ρύπανσης τους. Για παράδειγμα, η φυτοκάλυψη παρέχει σε ένα σημαντικό βαθμό προστασία στο έδαφος και κατ' επέκταση στα υπόγεια συστήματα, από τη ρύπανση καθώς αναφέρεται ότι μέσω του ριζικού συστήματος υπάρχει συγκράτηση των ρύπων στην ακόρεστη ζώνη.



Εικόνα 5.8: Οι χρήσεις γης και οι αντίστοιχοι κωδικοί τους.
(Πηγή: Corine Land Cover, 2012)

Όπου,

Κωδικός	Επεξήγηση	Ποσοστό κατανομής στην περιοχή μελέτης
112	Μη συνεχής αστικός ιστός	0.27%
121	Βιομηχανικές ή εμπορικές μονάδες	0.17%
211	Μη αρδευόμενες καλλιεργήσιμες εκτάσεις	2.56%
221	Αμπελώνες	1.48%
223	Ελαιώνες	16.27%
231	Λιβάδια	0.2%
242	Σύνθετες πρότυπες καλλιέργειες	9.12%
243	Γεωργικές εκτάσεις με σημαντική φυσική βλάστηση	11.06%
311	Πλατύφυλλα δάση	0.16%
312	Κωνοφόρα δάση	0.15%
313	Μεικτά δάση	0.18%
321	Φυσικά λιβάδια	35.29%
323	Σκληρόφυλλη βλάστηση	18.49%
324	Δασώδεις – θαμνώδεις μεταβατικές περιοχές	0.64%
331	Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	0.01%
333	Περιοχές με αραιή βλάστηση	3.94%
523	Παράκτια ζώνη	0.01%

Πίνακας 5.2: Ποσοστό κατανομής των διαφόρων χρήσεων γης στην περιοχή μελέτης.

Με την χρήση των κατάλληλων εντολών του προγράμματος Arcmap 10.2.2 εξήχθησαν τα ποσοστά κατανομής έκτασης για κάθε μια κατηγορία χρήσης γης για την περιοχή μελέτης. Στην περιοχή μελέτης παρατηρείται ότι δεν υπάρχουν δραστηριότητες που να συνδέονται με την βιομηχανία ή εμπορικές μονάδες καθώς το ποσοστό αυτό (0.17%) θεωρείται αμελητέο. Επίσης δεν πρόκειται για κάποια πυκνοκατοικημένη περιοχή καθώς ο μη συνεχής αστικός ιστός καταλαμβάνει ένα ποσοστό της τάξης του 0.27%.

Αντίθετα, στην περιοχή μελέτης το μεγαλύτερο ποσοστό καταλαμβάνεται από φυσικά λιβάδια (35.29%), ενώ ένα σημαντικό τμήμα καταλαμβάνουν η σκληρόφυλλη βλάστηση (18.49%), οι ελαιώνες (16.27%), οι γεωργικές εκτάσεις με σημαντική φυσική βλάστηση (11.06%) και οι σύνθετες πρότυπες καλλιέργειες (9.12%). Το υπόλοιπο 9.77% αποτελείται κυρίως από περιοχές με αραιή βλάστηση (3.94%), μη αρδευόμενες καλλιεργήσιμες εκτάσεις (2.56%) και από αμπελώνες (1.48%). Επισημαίνεται ότι ένα αρκετά μεγάλο τμήμα στην περιοχή μελέτης έχει χαρακτηριστεί όπως αναλύεται παρακάτω ως περιοχή Natura, επομένως είναι εύλογο να υπάρχει περιορισμός ως προς τις χρήσεις γης και τις δραστηριότητες στην περιοχή αυτή.

5.8 Δίκτυο Natura 2000

Το Ευρωπαϊκό οικολογικό δίκτυο Natura 2000 είναι ένα δίκτυο προστατευόμενων περιοχών, το οποίο αναπτύχθηκε έχοντας ως κυρίαρχο στόχο την διασφάλιση και την διατήρηση των πολύτιμων αλλά και απειλούμενων ειδών και ενδιαιτημάτων. Συγκεκριμένα, αποτελεί το βασικό νομοθετικό πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την προστασία και την διατήρηση της βιοποικιλότητας και βασίζεται σε δύο οδηγίες.

Η οδηγία 92/43/ΕΟΚ αναφέρεται στην διατήρηση της άγριας πανίδας (εξαιρουμένης της ορνιθοπανίδας) και χλωρίδας και είναι γνωστή ως οδηγία οικοτόπων ενώ η οδηγία 2009/147/ΕΚ στην διατήρηση των άγριων πτηνών (ορνιθοπανίδα). Έτσι, θεσμοθετήθηκαν οι αντίστοιχες Ειδικές Ζώνες Διατήρησης (Special Areas of Conservation – SACs /ΕΖΔ), οι οποίες προέκυψαν από τους Τόπους Κοινοτικής Σημασίας (Sites of Community Importance – SCI/ΤΚΣ) για τους οικοτόπους, την πανίδα και την χλωρίδα, και οι Ζώνες Ειδικής Προστασίας (Special Protection Areas – SPAs/ΖΕΠ) για την άγρια ορνιθοπανίδα.

Στην Ελλάδα, το δίκτυο Natura 2000 αρχικά περιελάμβανε 419 περιοχές, ενώ μέχρι σήμερα αριθμεί 441, από τις οποίες οι 239 χαρακτηρίζονται ως Ειδικές Ζώνες Διατήρησης και οι υπόλοιπες 202 ως Ζώνες Ειδικής Προστασίας. Στην Κρήτη έχουν ενταχθεί 54 περιοχές στο δίκτυο των προστατευόμενων περιοχών Natura 2000, οι οποίες αποτελούν το 30% της χέρσου του νησιού. Από αυτές τις 54 περιοχές, οι 25 έχουν χαρακτηριστεί ως Ζώνες Ειδικής Προστασίας, οι 28 ως Τόποι Κοινοτικής Σημασίας – Ειδικές Ζώνες Διατήρησης ενώ μια ανήκει και στις δύο κατηγορίες (Σαμαριτάκης, 2018).

Στην περιοχή μελέτης, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.7, περιλαμβάνονται εξ ολοκλήρου οι περιοχές Natura με κωδικό GR4330003, GR4330007 όπως επίσης περιλαμβάνεται και το δυτικό τμήμα των περιοχών με κωδικό GR4330002 και GR4330006. Η περιοχή με κωδικό GR 4330003, έχει χαρακτηριστεί ως Ειδική Ζώνη Διατήρησης και αναφέρεται στο Κουρταλιώτικο φαράγγι, Μονή Πρέβελη και στην ευρύτερη εν γένει περιοχή, με οικοτόπους προτεραιότητας τα λιβάδια ποσειδωνίας (*Posidonia oceanica*) και το φοινικόδασος των ειδών του γένους *Phoenix*. Όσον αφορά την περιοχή με κωδικό GR4330007, η οποία καταλαμβάνει και το μεγαλύτερο μέρος στην περιοχή μελέτης, έχει χαρακτηριστεί ως Ζώνη Ειδικής Προστασίας για την ορνιθοπανίδα, αναφερόμενη στις περιοχές Κουρταλιώτικο Φαράγγι και Φαράγγι Πρέβελης με είδη προτεραιότητας τα *Gypaetus barbatus*, *Gyps Fulvus* και *Aquila fasciata*.

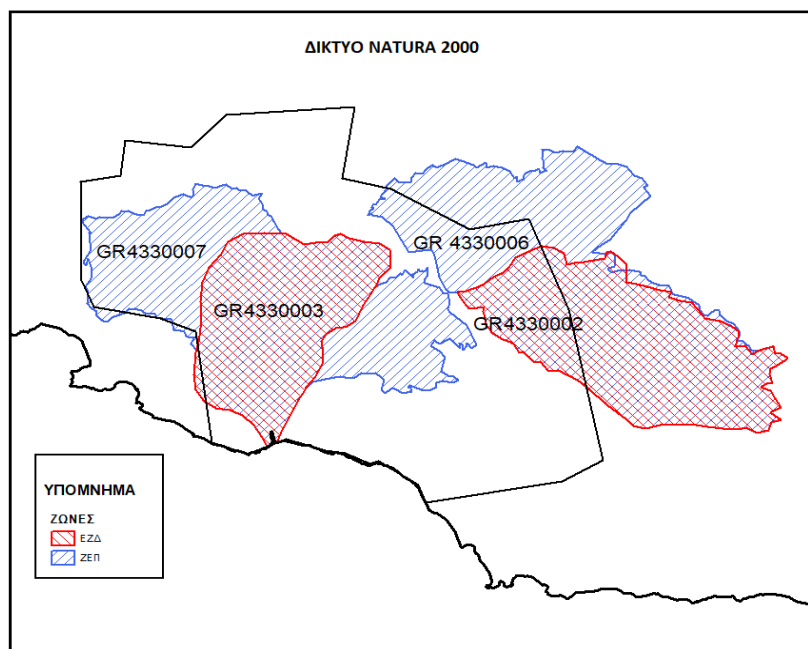
Επισημαίνεται ότι το Κουρταλιώτικο φαράγγι και η ευρύτερη περιοχή Πρέβελη, διαθέτουν αξιόλογη βιολογική και γεωλογική ποικιλότητα. Τονίζεται ότι το φοινικόδασος του Πρέβελη είναι το δεύτερο μεγαλύτερο φοινικόδασος στην Κρήτη μετά το Βάι στον Άγιο Νικόλαο, με φοίνικες που ανήκουν στο γένος *Phoenix*. Επίσης αναφέρεται η ύπαρξη σημαντικής και σπάνιας ορνιθοπανίδας όπως είναι το σπάνιο είδος *Gypaetus barbatus* που αποικεί στην Κρήτη και το οποίο είναι είδος προτεραιότητας στην περιοχή μελέτης.

Οι περιοχές Natura που καταλαμβάνουν ένα μικρό τμήμα στην ανατολική πλευρά της περιοχής μελέτης, αναφέρονται στο Όρος Κέδρος (GR4330002) και στις περιοχές Σωρός-Αγκάθι-Κέδρος (GR4330006) όπου η μεν πρώτη έχει χαρακτηριστεί ως Ειδική Ζώνη Διατήρησης ενώ οι δεύτερες ως Ζώνες Ειδικής Προστασίας με είδη προτεραιότητας τα *Gypaetus barbatus*, *Gyps Fulvus* και *Aquila fasciata*. Τα ανωτέρω παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα 5.3 που ακολουθεί ενώ στην εικόνα 5.9 παρατηρείται το μέγεθος της έκτασης που καταλαμβάνουν οι προστατευόμενες περιοχές του δικτύου Natura 2000 στην περιοχή μελέτης.

ΚΩΔΙΚΟΣ	ΚΑΤΗΓ.	ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	ΕΚΤΑΣΗ (ha)	ΟΙΚ. ΠΡΟΤ.*	ΕΙΔΗ ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ
GR4330002	ΕΖΔ	Όρος Κέδρος	4.700		
GR4330003	ΕΖΔ	Κουρταλιώτικο Φαράγγι Μονή Πρέβελη, Ευρύτερη περιοχή	3.643	1120, 9370	
GR4330006	ΖΕΠ	Σωρός -Αγκάθι-Κέδρος	8.129		<i>Gypaetus barbatus</i> , <i>Gyps fulvus</i> , <i>Aquila fasciata</i>
GR4330007	ΖΕΠ	Κουρταλιώτικο Φαράγγι Φαράγγι Πρέβελη	7.595		<i>Gypaetus barbatus</i> , <i>Gyps fulvus</i> , <i>Aquila fasciata</i>

Πίνακας 5.3: Προστατευόμενες Περιοχές Natura 2000 εντός της περιοχής μελέτης.

(Πηγή: Σαμαριτάκης,2018)



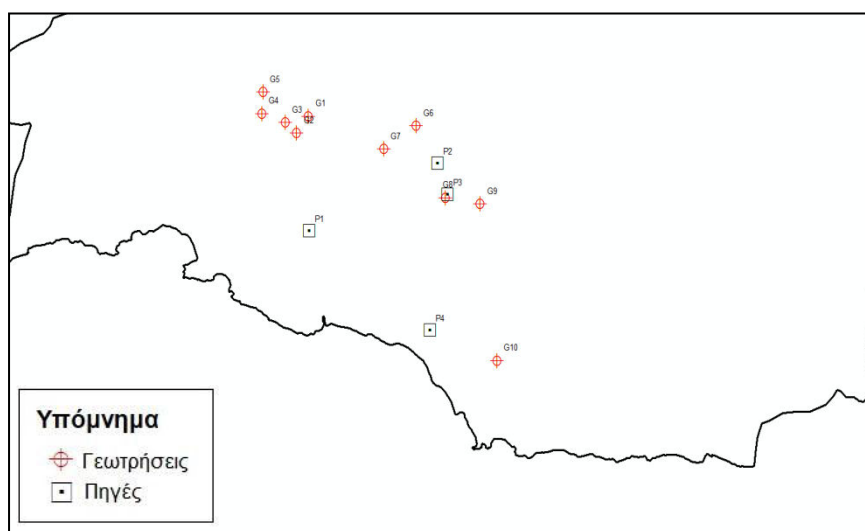
Εικόνα 5.9 : Οι σκιαγραφημένες περιοχές με μπλε χρώμα αντιστοιχούν στις Ζώνες Ειδικής Προστασίας (SPA) ενώ με το κόκκινο χρώμα στις Ειδικές Ζώνες Διατήρησης (SCI).

6. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

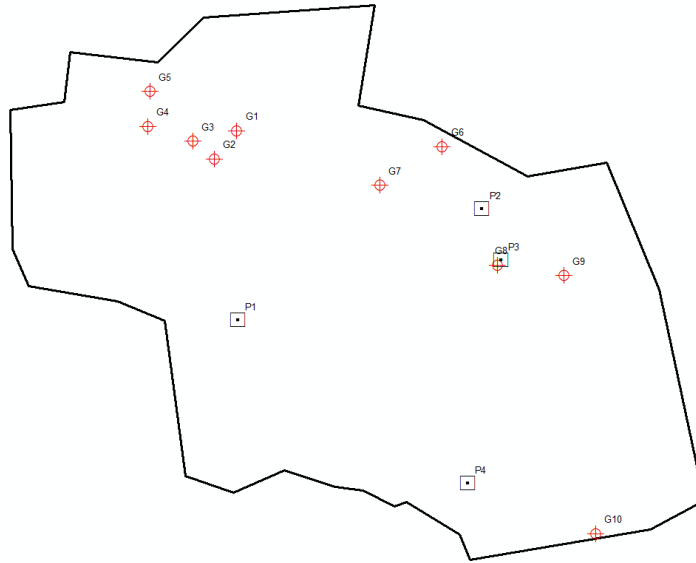
6.1 Εισαγωγή δεδομένων στο PTC

Πριν την εισαγωγή των δεδομένων στο μοντέλο PTC, αναφέρεται ότι η επεξεργασία και διαχείριση τους έγινε με το λογισμικό ArcGIS. Το ArcGIS Desktop της ESRI είναι ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (ΓΣΠ) με ευρεία εφαρμογή σε θέματα που αφορούν την επεξεργασία, σχεδιασμό, ανάλυση και διαχείριση των γεωγραφικών πληροφοριών όπως χρήσεις γης, περιβαλλοντική διαχείριση κα. Επισημαίνεται ότι λόγω των ανωτέρω τα ΓΣΠ χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην μοντελοποίηση της υπόγειας ροής, απλοποιώντας και διευκολύνοντας την διαχείριση των δεδομένων στα διάφορα μοντέλα. Για τις ανάγκες της παρούσης εργασίας, δημιουργήθηκαν αρχεία Shape file με σκοπό την περιγραφή και ομαδοποίηση όλων των διαθέσιμων πληροφοριών για την περιοχή μελέτης και την μετέπειτα εισαγωγή τους στο μοντέλο.

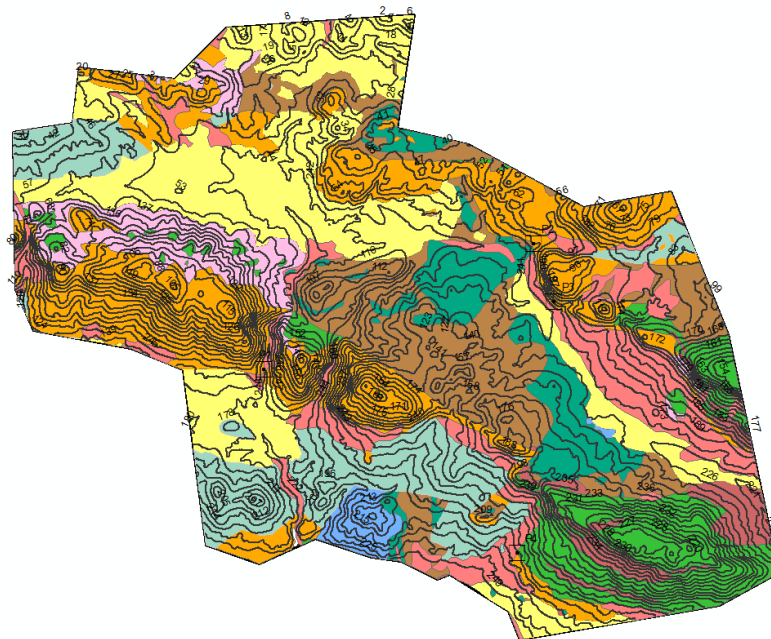
Αρχικά έγινε η ψηφιοποίηση τοπογραφικών και γεωλογικών χαρτών και δημιουργήθηκαν τα κάτωθι αρχεία Sharpefiles. Πρόκειται για αρχεία που περιείχαν γεωτρήσεις (με τις συντεταγμένες Χ,Υ, τις στάθμες και τις αντλήσεις), πηγές, τους γεωλογικούς σχηματισμούς της περιοχής μελέτης, την υδρογεωλογική λεκάνη του Κουρταλιώτη, το περίγραμμα της περιοχής καθώς και τις ισοϋψείς (εικ. 6.1,6.2,6.3). Αναφορικά με το αρχείο των ισοϋψών, αρχικά εξήχθησαν από ψηφιακό μοντέλο εδάφους (Digital Elevation Model) και στην συνέχεια έγινε η επεξεργασία τους σε αρχείο shaperefile για την μετέπειτα εισαγωγή στο μοντέλο. Η ψηφιοποίηση των ανωτέρω δεδομένων έγινε με σημεία (points) για γεωτρήσεις και πηγές, με γραμμές (polyline) για τις ισοϋψείς και με πολύγωνα (polygons) για τους γεωλογικούς σχηματισμούς και τα όρια της περιοχής. Αναφέρεται ότι η γεωαναφορά των δεδομένων έγινε στο προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ'87 (greek grid). Οι γεωχωρικές πληροφορίες ομαδοποιήθηκαν σε διάφορα επίπεδα (layers) για την απεικόνιση τους πάνω στους χάρτες.



Εικόνα 6.1: Αποτύπωση των γεωτρήσεων και των πηγών στην περιοχή μελέτης στο πρόγραμμα ArcGis.



Εικόνα 6.2: Το περίγραμμα της περιοχής μελέτης με τις γεωτρήσεις και τις πηγές.



Εικόνα 6.3: Οι ισοϋψείς και οι γεωλογικοί σχηματισμοί της περιοχής μελέτης.

Τα ανωτέρω Shape Files, λοιπόν εισήχθησαν στο μοντέλο PTC στα αντίστοιχα επίπεδα (layers). Το PTC διαθέτει διάφορα επίπεδα για την εισαγωγή ποικίλων πληροφοριών από τον χρήστη. Ενδεικτικά γίνεται αναφορά, στα επίπεδα τα οποία διαθέτει το μοντέλο και στα οποία εισήχθησαν πληροφορίες για την εργασία αυτή. Αναφέρεται ότι στο μοντέλο PTC κάθε επίπεδο (1,2,3 κοκ) αντιπροσωπεύει ένα μόνο γεωλογικό στρώμα, όμως παρέχεται η δυνατότητα στον χρήστη να εισάγει γεωλογικούς σχηματισμούς και κατ επέκταση τα χαρακτηριστικά τους πέρα από αυτά του επικρατούντος στρώματος, με τη μορφή φακών.

➤ PTC Domain Outline

Στο επίπεδο αυτό καθορίζονται τα όρια της περιοχής μελέτης, δηλαδή το περίγραμμα της, ένα κλειστό πολύγωνο και ορίζεται η πυκνότητα (density) των στοιχείων του πλέγματος. Στην εργασία αυτή, για την πυκνότητα δόθηκε η τιμή 2000.

➤ PTC Mesh

Σε αυτό το επίπεδο δημιουργείται το πλέγμα με τους κόμβους, το οποίο μπορεί να είναι είτε τριγωνικό είτε τετραγωνικό ανάλογα με τον εκάστοτε σκοπό, στην προκειμένη περίπτωση επιλέχθηκε τριγωνικό πλέγμα.

➤ PTC Data

Αφότου έχει γίνει η μοντελοποίηση, από το επίπεδο αυτό γίνεται η εισαγωγή των αποτελεσμάτων για να την απεικόνιση τους μετέπειτα στο επίπεδο PTC Output Graphs.

➤ Maps

Στο επίπεδο αυτό, εισάγονται οι ψηφιοποιημένοι χάρτες, στην προκειμένη ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης.

➤ PTC Output Graphs

Δημιουργούνται γραφικά για τα υδραυλικά ύψη και τις συγκεντρώσεις ρύπων σύμφωνα με την προεργασία από το επίπεδο PTC Data.

➤ Rain

Εισαγωγή δεδομένων βροχόπτωσης της περιοχής μελέτης, για την υγρή και ξηρή περίοδο αντίστοιχα.

➤ Bottom Elevation

Στο επίπεδο αυτό προσδιορίζεται το υψόμετρο του δαπέδου του κατώτερου γεωλογικού στρώματος (bottom layer).

➤ Elevation

Προσδιορίζεται το υψόμετρο κάθε γεωλογικού στρώματος, το οποίο προκύπτει από τα πάχη των στρωμάτων και από τις τομές των γεωτρήσεων.

➤ Conductivity

Πρόκειται για το επίπεδο στο οποίο εισάγονται τιμές για την υδραυλική αγωγιμότητα κάθε σχηματισμού. Περιέχει τρεις συνιστώσες, μια για κάθε διεύθυνση x,y,z. Στην εργασία αυτή θεωρήθηκε ότι $K_x=K_y$ ενώ για την κάθετη διεύθυνση ότι είναι κατά 90% μικρότερη δηλαδή $K_z=0.1 \cdot K_x$. Εάν υπάρχουν στρώματα – φακοί διαφορετικής υδραυλικής αγωγιμότητας από εκείνη του γενικού επιπέδου, τότε ο χρήστης μπορεί αρχικώς να τα εισάγει με μορφή Shape Files στο επίπεδο και μετά να προσδιορίσει ειδικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας για εκείνα πέραν της γενικής τιμής της υδραυλικής αγωγιμότητας του επιπέδου.

➤ Initial heads

Εισάγονται τα αρχικά υδραυλικά ύψη των γεωτρήσεων όπως μετρήθηκαν στο πεδίο. Τα αρχικά υδραυλικά ύψη είναι σταθερά και επομένως έχουν ίδια τιμή σε όλα τα επίπεδα των Initial heads (Initial heads L1, Initial heads L2 κλπ).

➤ BC Flow

Στο επίπεδο αυτό καθορίζονται οι οριακές συνθήκες της ροής, συγκεκριμένα στο πεδίο Type εισάγεται μια τιμή, 1 ή 2 ανάλογα το είδος. Εάν πρόκειται για οριακή συνθήκη 1^{ου} είδους δηλαδή σταθερού υδραυλικού ύψους δίνεται η τιμή 1 ενώ για οριακή συνθήκη 2^{ου} είδους, δηλαδή σταθερής ροής δίνεται η τιμή 2. Πρόσθετα, στο πεδίο αυτό αντιγράφονται οι γεωτρήσεις στα διάφορα επίπεδα BC Flow (πχ BC Flow L1, BC Flow L2) ανάλογα με το στρώμα από το οποίο αντλούν νερό.

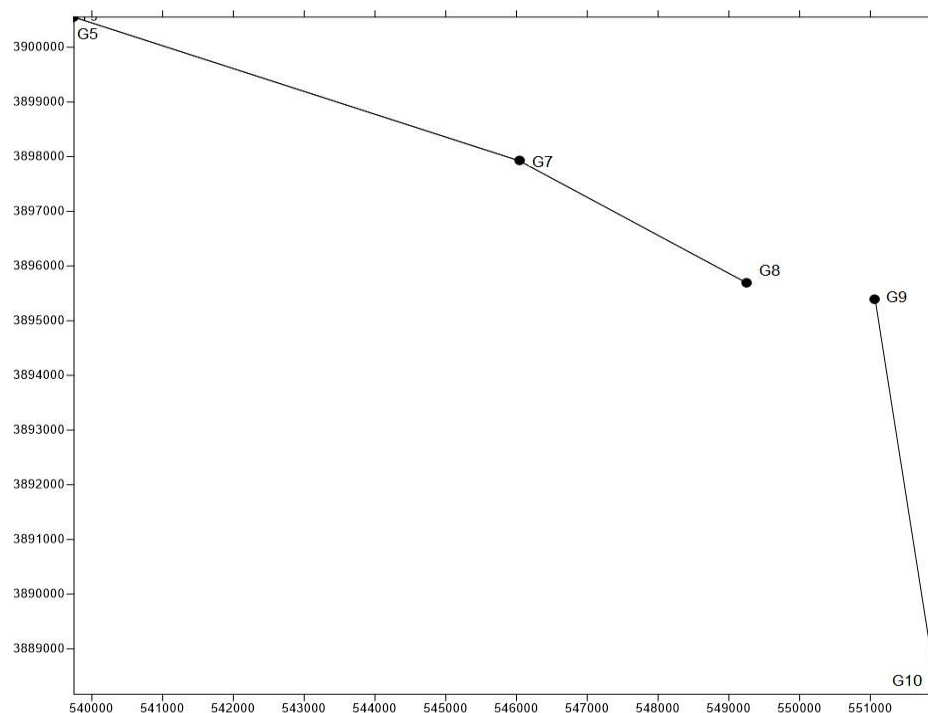
➤ Porosity

Εισάγεται μια εκτιμώμενη γενική τιμή για το πορώδες για κάθε γεωλογικό στρώμα, εάν υπάρχουν φακοί ομοίως ακολουθείται η ίδια διαδικασία όπως περιγράφηκε στο επίπεδο Conductivity δίνοντας ειδικές τιμές για το πορώδες.

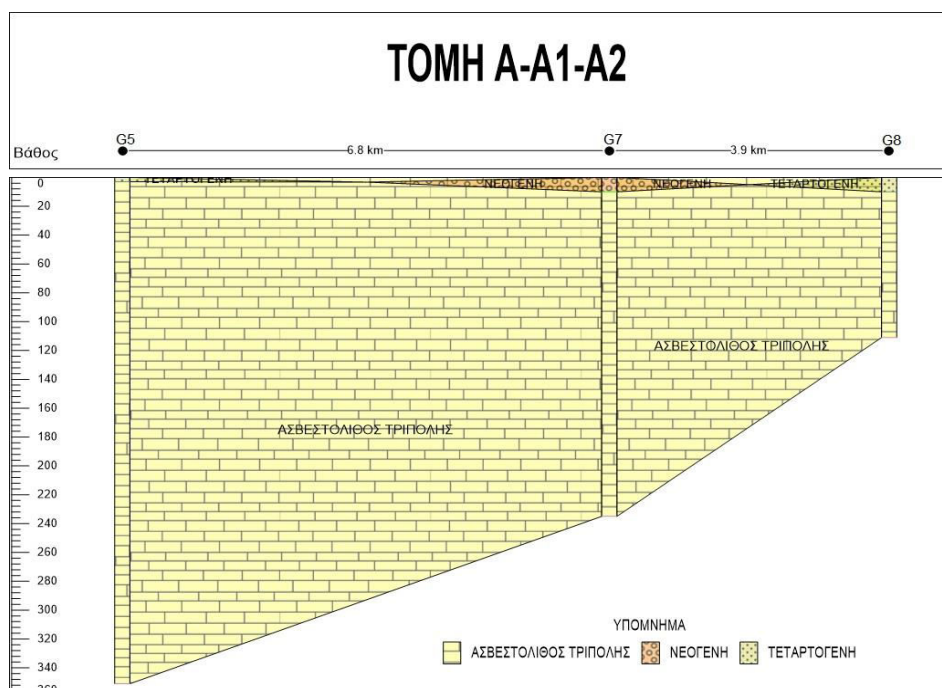
6.1.1 Γεωτρήσεις

Για την περιοχή μελέτης, ελήφθησαν δεδομένα από 10 γεωτρήσεις που βρίσκονται σε διάφορα σημεία της. Οι πληροφορίες που περιλάμβαναν τα δεδομένα των γεωτρήσεων ήταν το υψόμετρο στο οποίο βρίσκονται, το βάθος, η υδροστατική στάθμη, η παροχή άντλησης, οι παρατηρήσεις ενώ για ορισμένες από αυτές υπήρχαν και λιθολογικές τομές. Επισημαίνεται, ότι οι λιθολογικές τομές των γεωτρήσεων αποτέλεσαν ένα πολύ σημαντικό στοιχείο για την καλύτερη αποτύπωση της στρωματογραφίας της περιοχής μελέτης.

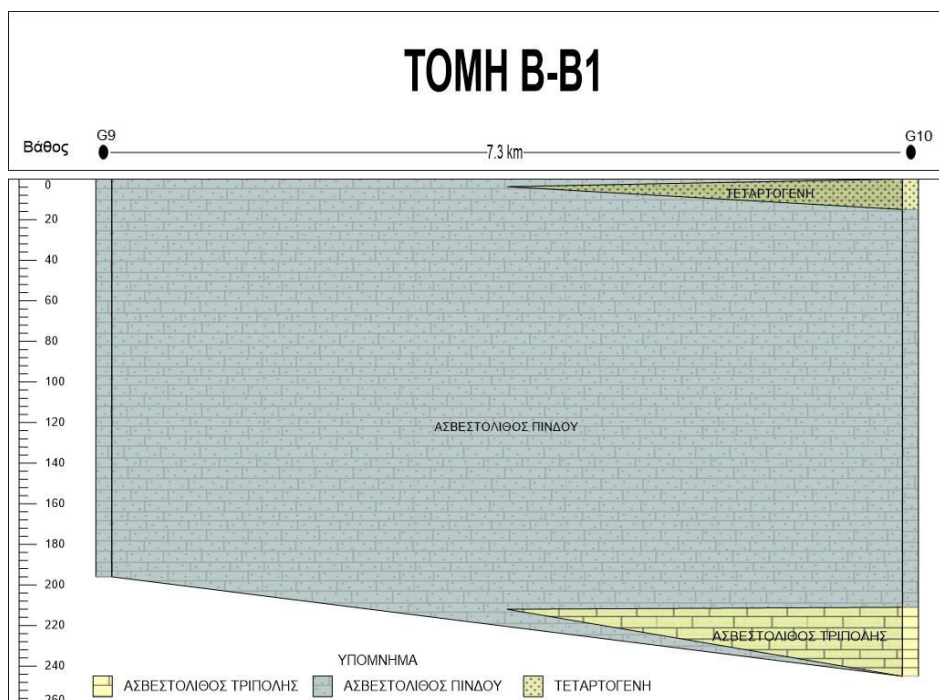
Σύμφωνα με τους λιθολογικούς σχηματισμούς που διατρήθηκαν στις γεωτρήσεις επομένως, δημιουργήθηκαν δύο τομές για μια πιο ολοκληρωμένη αντίληψη του υπεδάφους καθώς και για τον μετέπειτα καθορισμό του αριθμού των στρωμάτων στο μοντέλο. Οι τομές αυτές δημιουργήθηκαν με τη χρήση του προγράμματος Strater 5 και έχουν διεύθυνση η μια ΒΔ-ΝΑ (τομή Α-Α1-Α2) και η άλλη περίπου Β-Ν (τομή Β-Β1). Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται η θέση των γεωλογικών τομών στο πεδίο μελέτης καθώς και η στρωματογραφία τους ενώ στην εικόνα 6.7 απεικονίζονται οι λιθολογικές τομές των γεωτρήσεων συγκεντρωτικά.



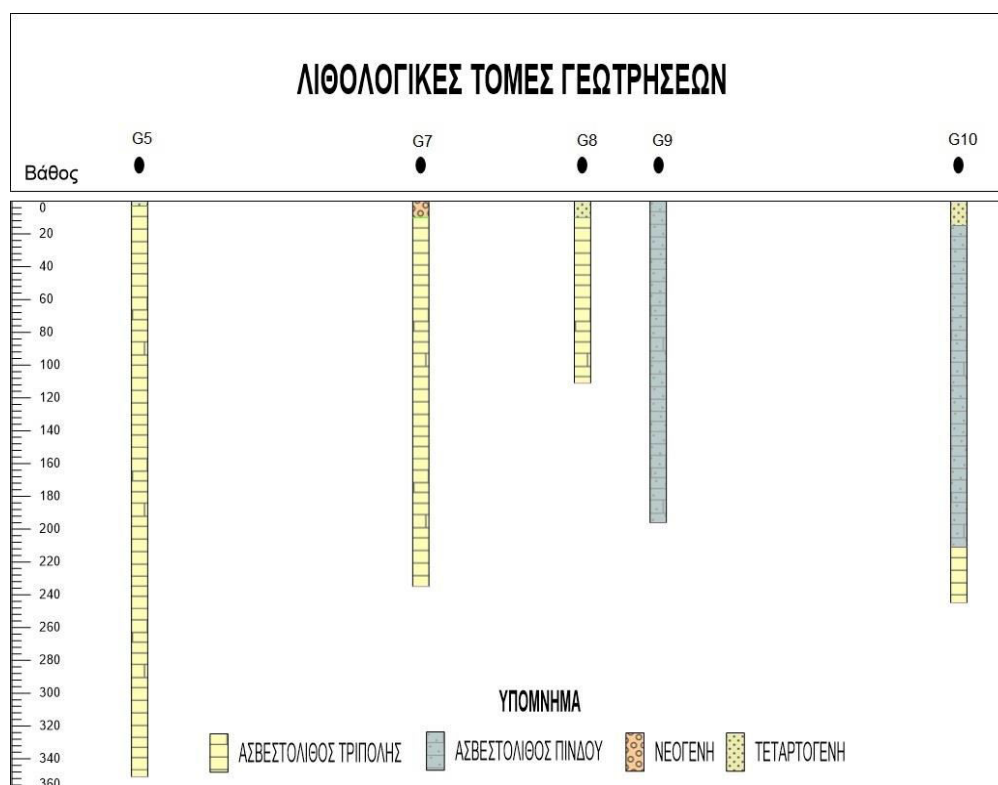
Εικόνα 6.4: Οι δύο τομές στην περιοχή μελέτης.



Εικόνα 6.5 : Τομή A-A1-A2



Εικόνα 6.6 : Τομή Β-Β1



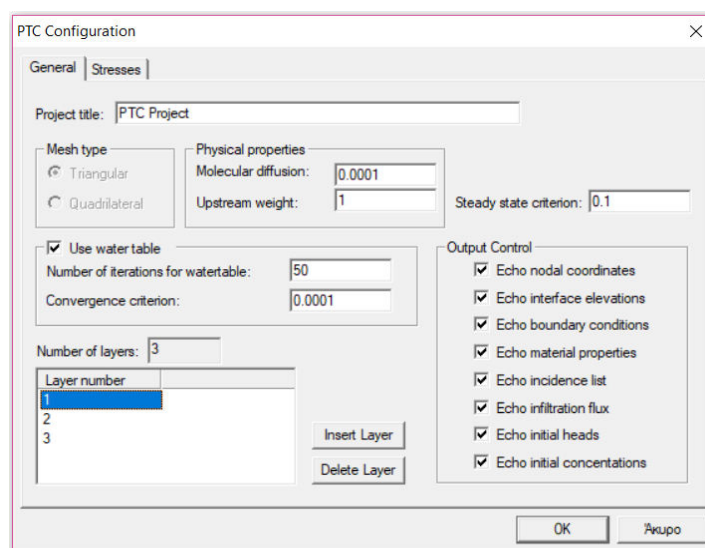
Εικόνα 6.7: Συγκεντρωτικά οι λιθολογικές τομές των γεωτρήσεων της περιοχής μελέτης.

Με βάση τις ανωτέρω γενικευμένες τομές ορίστηκε ο αριθμός των στρωμάτων στο μοντέλο σε τρεις, όπου το τρίτο στρώμα είναι το επιφανειακό και αναπαριστά τα νεογενή και τα τεταρτογενή, το δεύτερο αντιπροσωπεύει τους ασβεστόλιθους της ενότητας Πίνδου ενώ το πρώτο και βαθύτερο στρώμα τους ασβεστόλιθους της ενότητας Τρίπολης. Τυχόν αδιαπέρατοι σχηματισμοί που διατρήθηκαν στις γεωτρήσεις είχαν μικρό πάχος και δεν ελήφθησαν υπόψη στην μοντελοποίηση.

6.1.2 Γενικές παράμετροι

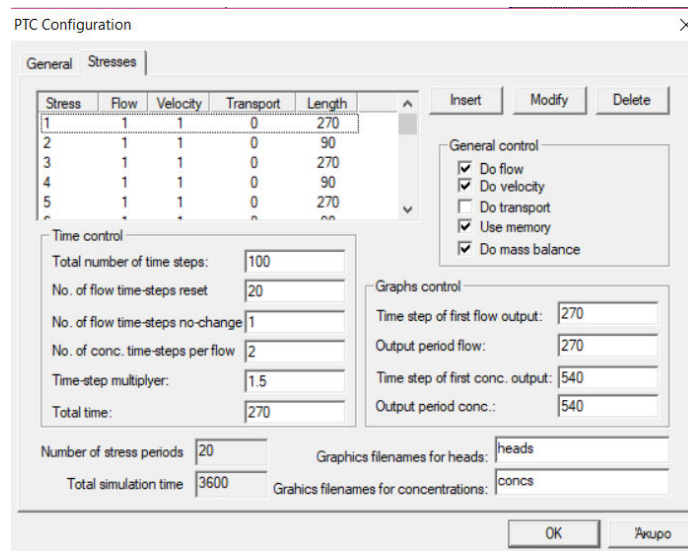
Έπειτα από τον καθορισμό των γεωλογικών στρωμάτων, σύμφωνα με τις τομές των γεωτρήσεων, ξεκίνησε η διαδικασία εισαγωγής των γενικών παραμέτρων του μοντέλου. Αρχικά εκκινώντας το πρόγραμμα Argus One από την καρτέλα PTEs επιλέγουμε την εντολή New PTC Project. Στο παράθυρο PTC Configuration που εμφανίζεται και στην καρτέλα General εισάγονται οι γενικές παράμετροι που αφορούν το είδος του πλέγματος δηλαδή αν πρόκειται για τριγωνικό ή τετραγωνικό, το είδος του υδροφορέα αν είναι ελεύθερος ή περιορισμένος, ο αριθμός των γεωλογικών στρωμάτων – επίπεδα (layers) όπως και το κριτήριο σύγκλισης σταθερούς κατάστασης (Steady state criterion). Το κριτήριο αυτό αναφέρεται στην σύγκλιση που θα πρέπει να υπάρχει στην διαφορά της τιμής του υδραυλικού ύψους μιας χρονικής περιόδου από την αμέσως προηγούμενη της.

Στην εργασία αυτή επιλέχτηκε τριγωνικό πλέγμα έναντι τετραγωνικού για μεγαλύτερη ακρίβεια το οποίο αποτελούνταν από 1022 κόμβους και 1921 στοιχεία. Πρόσθετα, ο αριθμός των στρωμάτων - επιπέδων της περιοχής μελέτης καθορίστηκε σε τρεις. Το 1^ο στρώμα είναι το κατώτατο και το 3^ο το επιφανειακό. Η εισαγωγή το στρωμάτων έγινε από την επιλογή Insert Layer. Όσον αφορά στην τιμή του κριτηρίου σύγκλισης ορίστηκε να είναι στο 0.1 (εικ.6.8).



Εικόνα 6.8: Καθορισμός γενικών παραμέτρων του PTC.

Από την καρτέλα Stresses του ίδιου παραθύρου ορίζεται το χρονικό διάστημα για το οποίο θα γίνει η προσομοίωση. Αναλυτικότερα, καθορίστηκε ο αριθμός των χρονικών περιόδων και το διάστημα αυτών, τα συνολικά χρονικά βήματα (Total number of time steps) και οι ιδιότητες αυτών (εικ.6.9). Συγκεκριμένα, η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε για 10 χρόνια και με δεδομένο ότι για κάθε υδρολογικό έτος στο μοντέλο υπάρχουν δύο περίοδοι, η υγρή και η ξηρή, αναφέρεται ότι στην παρούσα εργασία επομένως συμπεριλήφθηκαν 20 περίοδοι (stresses).

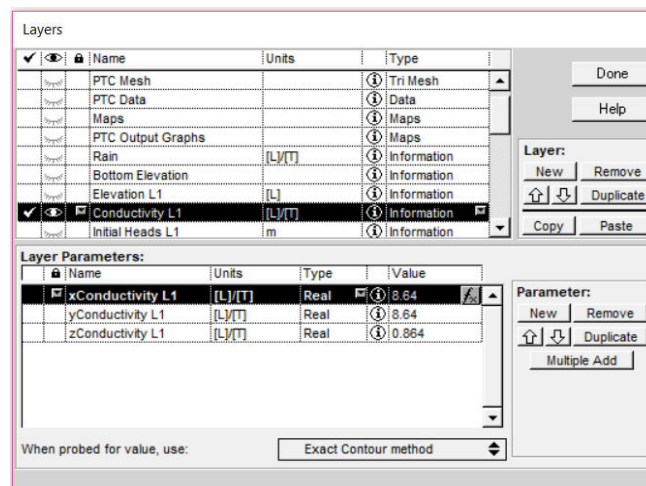


Εικόνα 6.9: Αρχικές παράμετροι του PTC.

6.1.3 Ειδικές παράμετροι

Αναφέρεται ότι οι κύριες μονάδες στο μοντέλο για τις παραμέτρους εισήχθησαν σε μέτρα (m) για το μήκος και ημέρες (d) για το χρόνο. Στις ειδικές παραμέτρους του μοντέλου εντάσσονται η υδραυλική αγωγιμότητα και το πορώδες. Η εκτίμηση της υδραυλικής αγωγιμότητας έγινε και για τις τρεις διευθύνσεις x, y, z με την υδραυλική αγωγιμότητα στην διεύθυνση z να είναι μειωμένη κατά 90% σε σχέση με τις υπόλοιπες δύο.

Οι τιμές για την υδραυλική αγωγιμότητα προσδιορίστηκαν με βάση τους γεωλογικούς σχηματισμούς και τις βιβλιογραφικές αναφορές. Επισημαίνεται ότι η υδραυλική αγωγιμότητα, όπως και το πορώδες, ορίστηκε ξεχωριστά για κάθε γεωλογικό στρώμα στο αντίστοιχο επίπεδο. Σύμφωνα με πολλούς ερευνητές ο συντελεστής της υδραυλικής αγωγιμότητας των ασβεστολίθων της ενότητας Τρίπολης κυμαίνεται από 10^{-4} έως 10^{-5} m/sec (Κατσανικάκης, 2013). Επομένως και δεδομένου των ανωτέρω η υδραυλική αγωγιμότητα του $1^{ου}$ γεωλογικού στρώματος - επιπέδου (layer) στο μοντέλο ορίστηκε σε 10^{-4} m/sec δηλαδή σε 8.64 m/day για τις διευθύνσεις x,y και 0.864 m/day για την διεύθυνση z.



Εικόνα 6.10: Εισαγωγή υδραυλικής αγωγιμότητας 1^{ου} στρώματος στο PTC.

Εν συνεχεία ορίστηκε η υδραυλική αγωγιμότητα του 2^{ου} στρώματος, το οποίο συνιστάται από ασβεστόλιθους της ενότητας Πίνδου, σε 10^{-5} m/sec. Αυτή η διαφορά μιας τάξης περίπου στις υδραυλικές αγωγιμότητες μεταξύ των ασβεστολίθων των δύο ενότητων έγκειται στο γεγονός ότι η υδραυλική αγωγιμότητα των ασβεστολίθων της Πίνδου είναι αρκετά μικρότερη από την αντίστοιχη της Τρίπολης.

Η ενότητα της Πίνδου παρουσιάζει λεπιώσεις και άλλα εν γένει χαρακτηριστικά τόσο στην δομή όσο και στην λιθοστρωματογραφία της (πχ λεπτοπλακώδεις ασβεστόλιθοι) με αποτέλεσμα η περατότητα των ασβεστολίθων να είναι μειωμένη. Γενικά οι παράγοντες αυτοί δεν ευνοούν την δημιουργία και ανάπτυξη μεγάλων καρστ όπως αυτά παρατηρούνται στην ενότητα της Τρίπολης. Τα παραπάνω ελήφθησαν υπόψη για την εκτίμηση και εισαγωγή της υδραυλικής αγωγιμότητας του 2^{ου} στρώματος του μοντέλου.

Όσον αφορά το 3^ο επίπεδο το οποίο κατά κόρον αποτελείται από νεογενή η υδραυλική αγωγιμότητα προσδιορίστηκε σε 10^{-6} m/sec. Η τιμή αυτή δόθηκε λόγω του ότι ο σχηματισμός των νεογενών στην περιοχή μελέτης αποτελείτο εν γένει από κροκαλοπαγή, άμμους, ψαμμίτες, αργίλους και ασβεστόλιθους. Οι ασβεστόλιθοι και τα κροκαλοπαγή ανήκουν στους υδροπερατούς σχηματισμούς εν αντιθέσει με τους ψαμμίτες που έχουν μέτρια έως χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα και τους αργίλους που έχουν ομοίως πολύ χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα. Ενδεικτικά για τους ψαμμίτες αναφέρεται ότι η υδραυλική αγωγιμότητα κυμαίνεται περίπου από 10^{-10} m/sec έως 10^{-6} m/sec (Freeze and Cherry, 1979).

Όπως έχει προαναφερθεί στο 3ο στρώμα περιλαμβάνονται με μορφή φακών ο σχηματισμός των τεταρτογενών. Λόγω του ότι τα τεταρτογενή έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά και επομένως διαφορετικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας και πορώδους από το επικρατές στρώμα (νεογενή) προσδιορίστηκαν και εισήχθησαν οι αντίστοιχες τιμές τους. Τα τεταρτογενή στην περιοχή μελέτης περιλαμβάνουν αλλουβιακές αποθέσεις, πλευρικά κορήματα και κώνους κορημάτων. Επειδή πρόκειται για σχηματισμούς με υψηλή περατότητα, η υδραυλική αγωγιμότητα προσδιορίστηκε στα 10^{-3} m/sec. Από τον γεωλογικό χάρτη της περιοχής που εισήχθη στο μοντέλο, οριοθετήθηκε ο σχηματισμός των τεταρτογενών και επομένως σχεδιάστηκαν οι φακοί στα επίπεδα Conductivity L3 και Porosity L3. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι ανωτέρω

υδραυλικές αγωγιμότητες των στρωμάτων, οι οποίες μετατράπηκαν σε m/day για την εισαγωγή τους στο μοντέλο.

Σχηματισμοί	Αγωγιμότητα (m/day)		
	Kx	Ky	Kz
Ασβεστόλιθοι εν. Τρίπολης	8.64	8.64	0.864
Ασβεστόλιθοι εν. Πίνδου	0.864	0.864	0.0864
Νεογενή	0.0864	0.0864	0.00864
Τεταρτογενή	86.4	86.4	8.64

Πίνακας 6.1: Τιμές αρχικών υδραυλικών αγωγιμοτήτων που εισήχθησαν στο PTC.

Ομοίως, προσδιορίστηκαν οι τιμές για το πορώδες κάθε γεωλογικού σχηματισμού στα επίπεδα Porosity L1,L2,L3. Λόγω του ότι ο ασβεστόλιθος της ενότητας Τρίπολης είναι καρστικοποιημένος δόθηκε υψηλότερη τιμή πορώδους σε σχέση με τον ασβεστόλιθο της ενότητας Πίνδου. Σχετικά με τα νεογενή δόθηκε μια γενική τιμή για το πορώδες λαμβάνοντας υπόψη τα πορώδη των σχηματισμών από τα οποία αποτελούνταν ενώ για τα τεταρτογενή εισήχθησαν οι αντίστοιχες τιμές στους φακούς.

6.1.4 Αρχικές και Οριακές συνθήκες

Για την επίλυση των εξισώσεων του μοντέλου, όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, απαιτούνται κάποιες αρχικές μεταβλητές, στην προκειμένη περίπτωση για την υπόγεια ροή είναι το υδραυλικό ύψος. Το υδραυλικό ύψος των γεωτρήσεων προέκυψε από την αφαίρεση της υδροστατικής στάθμης από το υψόμετρο της γεώτρησης. Κατόπιν τα υδραυλικά ύψη, εισήχθησαν στο επίπεδο Initial heads L1,L2 και L3.

Έπειτα κρίνεται απαραίτητος ο προσδιορισμός των οριακών συνθηκών για την εκτέλεση του μοντέλου. Επομένως, εισήχθησαν οι οριακές συνθήκες για την ροή στα επίπεδα BC Flow L1,L2 και L3. Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν, για την εργασία αυτή, ήταν 2 ειδών, συγκεκριμένα 1^{ου} είδους με σταθερό υδραυλικό ύψος και 2^{ου} με σταθερή ροή.

▪ 1^{ου} είδους

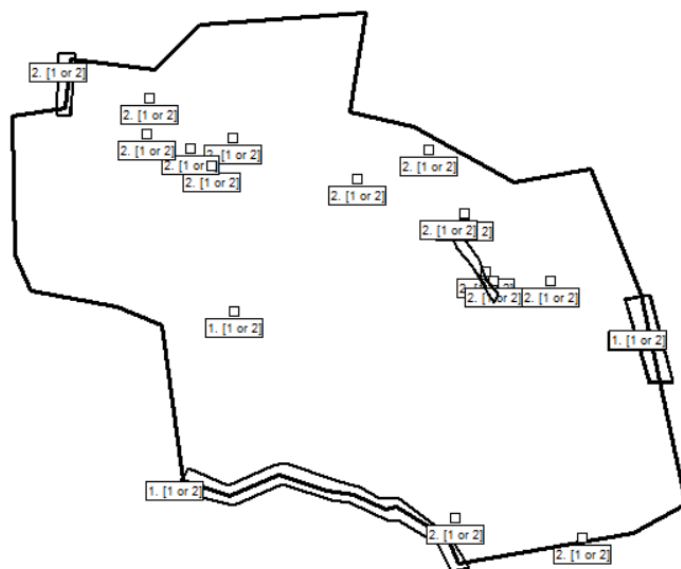
Οι οριακές συνθήκες πρώτου είδους είναι κατά μήκος της ακτογραμμής, όπου το υδραυλικό ύψος του νερού είναι η στάθμη της θάλασσας, η οποία ορίστηκε στα 0m. Για την εισαγωγή της συνθήκης σχεδιάστηκε ένα πολύγωνο κατά μήκος της ακτογραμμής και έπειτα αντιγράφηκε στα υπόλοιπα BC Flow επίπεδα. Κατά την βαθμονόμηση, εισήχθη μια επιπλέον οριακή συνθήκη 1ου είδους στο μέσο του ανατολικού ορίου της περιοχής μελέτης. Το πολύγωνο αυτό που σχεδιάστηκε αναπαριστά την εισροή νερού πλευρικά έξω από την περιοχή μελέτης. Αναφέρεται ότι πιθανά να υπάρχει πλευρική τροφοδοσία στα ανατολικά της περιοχής μελέτης από κάποιο υποσύστημα του γειτονικού καρστικού υδροφορέα, η οποία και λήφθηκε υπόψη στην μοντελοποίηση με την εισαγωγή της

αντίστοιχης οριακής συνθήκης. Λόγω των μεγάλων ποσοτήτων που κατεισδύουν στον υδροφορέα αυτό ετησίως, επιλέχθηκε η οριακή συνθήκη να εισαχθεί ως 1^{ου} είδους δηλαδή με σταθερό υδραυλικό ύψος το οποίο δεν θα έπρεπε να υπερβαίνει το υψόμετρο της περιοχής. Ομοίως αυτή η οριακή συνθήκη αντιγράφηκε και στα υπόλοιπα επίπεδα BC Flow. Επίσης, η πηγή του Κουρταλιώτη (P1) εισήχθη ως οριακή συνθήκη 1^{ου} είδους.

▪ 2^{ου} είδους

Οι οριακές συνθήκες δευτέρου είδους είναι όλες οι αντλούμενες γεωτρήσεις, οι υπόλοιπες πηγές καθώς και κάποια πολύγωνα που σχεδιάστηκαν, ομοίως, για την εισροή νερού. Όσον αφορά τις γεωτρήσεις κατανεμήθηκαν με βάση τους γεωλογικούς σχηματισμούς από τους οποίους αντλούν νερό στα αντίστοιχα επίπεδα BC Flow. Επισημαίνεται ότι εισήχθησαν αρνητικές τιμές αντλήσεων λόγω του ότι το νερό αντλείται. Λόγω της υδρομάστευσης των πηγών για την κάλυψη διαφόρων αναγκών (άρδευση, ύδρευση, αναψυχής) ομοίως, εισήχθησαν αρνητικές τιμές εκροών.

Πρόσθετα εισήχθη μια οριακή συνθήκη 2^{ου} είδους με τον σχεδιασμό ενός πολυγώνου στο άνω δυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης. Ο λόγος για τον οποίο εισήχθη αυτή η συνθήκη είναι γιατί υπάρχει τροφοδοσία στα δυτικά από τον Κρυονερίτη. Κατά την βαθμονόμηση αποφασίστηκε να εισαχθεί μια επιπλέον οριακή συνθήκη 2^{ου} είδους, συγκεκριμένα τμήμα της ρηξιγενούς ζώνης, στην περιοχή Αγίας Φωτιάς-Σπήλι λόγω του ότι επηρεάζει τις υδρογεωλογικές συνθήκες στην περιοχή αυτή. Επομένως σχεδιάστηκε ένα πολύγωνο στην θέση του ρήγματος για την απεικόνιση αυτού. Στην εικόνα 6.11 που ακολουθεί απεικονίζονται και τα δύο είδη των οριακών συνθηκών για την περιοχή μελέτης όπως και το ρήγμα.



Εικόνα 6.11: Οριακές συνθήκες στην περιοχή μελέτης στο PTC.

6.1.5 Βροχόπτωση

Η επόμενη παράμετρος που εισήχθη στο μοντέλο είναι η βροχόπτωση, σύμφωνα και με τα δεδομένα των δύο μετεωρολογικών σταθμών που υπάρχουν στην περιοχή μελέτης, τα οποία και προαναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Επισημαίνεται ότι η παράμετρος της βροχόπτωσης δεν αναφέρεται στην βροχή αυτή καθ' αυτή αλλά στην κατείσδυση λόγω βροχόπτωσης. Για την εύρεση του όγκου της βροχόπτωσης που κατεisdύει ελήφθησαν υπόψη οι συντελεστές κατείσδυσης των σχηματισμών, η έκταση που καταλαμβάνουν στην περιοχή μελέτης όπως και ο μέσος όρος βροχόπτωσης των δύο σταθμών στην περιοχή μελέτης.

Ο συντελεστής κατείσδυσης για τα νεογενή και τεταρτογενή θεωρήθηκε ίσος με 15%, για τους σχιστόλιθους και εν γένει για τους αδιαπέρατους σχηματισμούς 5% και για τα ασβεστολιθικά της ενότητας Τρίπολης 50%. Αναφέρεται ότι οι υδροπερατοί σχηματισμοί κυμαινόμενης περατότητας καταλαμβάνουν έκταση περίπου το 60.89% στην περιοχή μελέτης ενώ το υπόλοιπο 39.08% καταλαμβάνεται από αδιαπέρατους ή πολύ χαμηλής περατότητας σχηματισμούς.

Επιπλέον, ορίστηκαν οι μήνες οι οποίοι θα αποτελούσαν την υγρή και ξηρή χρονική περίοδο. Αναλυτικά, οι μήνες από Σεπτέμβριο μέχρι και Μάιο αποτέλεσαν την υγρή περίοδο (χειμερινή) ενώ οι υπόλοιποι τρεις μήνες την ξηρή περίοδο (εαρινή), δηλαδή από Ιούνιο μέχρι και Αύγουστο.

6.2 Βαθμονόμηση

Προκειμένου να επιτευχθεί επιτυχώς η προσομοίωση των υδραυλικών υψών του πεδίου με αυτά του μοντέλου, είναι απαραίτητη η συνεχής εναλλαγή των αρχικών παραμέτρων που εισήχθησαν στο μοντέλο όπως η υδραυλική αγωγιμότητα των γεωλογικών σχηματισμών, η θέση και οι τιμές των οριακών συνθηκών έως ότου υπάρξει η απαιτούμενη σύγκλιση μεταξύ των υδραυλικών υψών. Αναφέρεται ότι η βαθμονόμηση συνιστά μια κρίσιμη και απαιτητική διεργασία καθότι σφάλματα και αποκλίσεις στο στάδιο αυτό επιδρούν αρνητικά στον βαθμό αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων του μοντέλου μετέπειτα.

Για τον λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε πληθώρα επαναλήψεων και σύγκριση κάθε φορά των υδραυλικών υψών, τα οποία εξήχθησαν από τα δεδομένα της Περιφερειακής Ενότητας Ρεθύμνης, Τμήμα Υδροοικονομίας, με τα υδραυλικά ύψη του μοντέλου. Αρχικά, από τις πρώτες επαναλήψεις στο μοντέλο παρατηρήθηκε μια αρκετά καλή σύγκλιση μεταξύ των υδραυλικών υψών του πεδίου με του μοντέλου για τις γεωτρήσεις G1,G4 και G5 ενώ μεγάλη απόκλιση υπήρξε στις υπόλοιπες. Για την καλύτερη δυνατή προσέγγιση στις γεωτρήσεις G1,G4,G5 αποφασίστηκε η μείωση στην παροχή της οριακής συνθήκης 2^{ου} είδους που ήταν τοποθετημένη στο άνω δυτικό άκρο του περιγράμματος της περιοχής μελέτης. Όσον αφορά τις υπόλοιπες γεωτρήσεις, οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρατηρήθηκαν στις G9 και G8 όπως και στις πηγές P2 και P3 εκεί κοντά.

Αλλάζοντας την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας στα επίπεδα Conductivity L1 και L2, μέσα στα αποδεκτά όρια τιμών για τους ασβεστόλιθους, η προσέγγιση των υδραυλικών υψών για τις ανωτέρω γεωτρήσεις και πηγές παρέμενε μη ικανοποιητική ενώ μετέβαλλε και

τα υδραυλικά ύψη στις γεωτρήσεις G1,G4,G5,G6 και G7. Έπειτα από μια προσεκτικότερη μελέτη της γενικότερης περιοχής των γεωτρήσεων G8,G9 διαπιστώθηκε ότι πρέπει να υπάρχει μια πλευρική τροφοδοσία στα ανατολικά από γειτονικό καρστικό υδροφορέα, η οποία δεν λήφθηκε υπόψη εξ αρχής κατά την εισαγωγή των οριακών συνθηκών στο μοντέλο. Λόγω των ποσοτήτων που κατεισδύουν στο καρστικό αυτό σύστημα, η οριακή συνθήκη που εισήχθηκε ήταν 1^{ου} είδους δηλαδή με σταθερό υδραυλικό ύψος. Εν συνεχεία, για την καλύτερη δυνατή προσέγγιση στο υδραυλικό ύψος της G9 γεώτρησης και της πηγής P3 αποφασίστηκε να εισαχθεί τμήμα της ρηξιγενούς ζώνης που υπάρχει στην περιοχή και το οποίο εκτιμάται ότι επηρεάζει τις υδρογεωλογικές συνθήκες εκεί ως οριακή συνθήκη 2^{ου} είδους.

Εν τέλει, ύστερα από πολλές επαναλήψεις, αποφασίστηκε ότι η βέλτιστη τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας για την προσέγγιση των υδραυλικών υψών, για το 1^ο στρώμα ήταν στα 5.7 m/day από ότι 8.64 m/day που είχε οριστεί αρχικώς και για το 2^ο στρώμα ομοίως στα 0.09 m/day από 0.864 m/day. Αναφέρεται ότι η μεταβολή αυτή στις υδραυλικές αγωγιμότητες είναι εντός των αποδεκτών ορίων ενώ οι υδραυλικές αγωγιμότητες στα νεογενή και τεταρτογενή παρέμειναν ίδιες. Από τις παραπάνω μεταβολές και ελέγχοντας συνεχώς τους δείκτες που παρουσιάζονται παρακάτω, επετεύχθη ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ των υδραυλικών υψών πεδίου και μοντέλου με εξαίρεση την γεώτρηση G10 όπου δεν υπήρξε ικανοποιητική συσχέτιση μεταξύ των τιμών. Για τον λόγο αυτό η γεώτρηση αυτή απορρίφθηκε από την μοντελοποίηση.

6.2.1 Έλεγχος Αξιοπιστίας

Πριν την εξέταση των τεσσάρων κλιματικών σεναρίων και της εξαγωγής συμπερασμάτων για την περιοχή μελέτης έγινε έλεγχος της αξιοπιστίας του μοντέλου (επαλήθευση) με τους κατάλληλους στατιστικούς δείκτες. Οι δείκτες αυτοί συγκρίνουν τις προσομοιωμένες τιμές του μοντέλου με τις μετρηθείσες τιμές στο πεδίο καταδεικνύοντας επομένως τον βαθμό προσαρμογής του μοντέλου στο πεδίο. Επισημαίνεται ότι η προσομοίωση για την παρούσα εργασία έγινε με βάση τα υδραυλικά ύψη τα οποία ελέγχθηκαν παρακάτω.

Ειδικότερα, για την εκτίμηση της αξιοπιστίας στα υδρολογικά μοντέλα, υπάρχουν συγκεκριμένοι στατιστικοί δείκτες που μπορούν να ελεγχθούν, όπως ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2), ο συντελεστής αποδοτικότητας των Nash and Sutcliffe (NSE), το μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE), το συστηματικό σφάλμα επί τοις εκατό (PBIAS), ο δείκτης (RSR) κα. Στην παρούσα εργασία οι στατιστικοί δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της επίδοσης του μοντέλου ήταν οι δείκτες NSE, PBIAS, R^2 , RSR όπως αναλύονται ακολούθως.

▪ NSE

Ο δείκτης NSE είναι ένας δείκτης απόδοσης που αναπτύχθηκε από τους Nash and Sutcliffe, 1970 για την εκτίμηση του βαθμού σύγκλισης της προσομοιωμένης με την μετρηθείσα χρονοσειρά και εκφράζεται από τον παρακάτω τύπο.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (6.1)$$

Όπου Q_{obs} η μετρηθείσα χρονοσειρά, Q_{sim} η προσομοιωμένη χρονοσειρά και \bar{Q}_{obs} ο αριθμητικός μέσος της μετρηθείσας χρονοσειράς. Οι τιμές στις οποίες κυμαίνεται ο δείκτης NSE είναι από το $-\infty$ μέχρι το 1, όπου για τιμές από 0 έως 1 θεωρείται γενικά καλή απόδοση με το 1 να είναι η βέλτιστη τιμή ενώ για τιμές μικρότερες του 0 θεωρείται μη αποδεκτή απόδοση. Για το μοντέλο ο δείκτης NSE υπολογίστηκε σε **0.956**.

▪ PBIAS

Ο δείκτης PBIAS υπολογίζει την μέση τάση των προσομοιωμένων τιμών, αν είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από τις αντίστοιχες μετρηθείσες (Gurta et al., 1999) και εκφράζεται από την σχέση (6.2),

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i}) * 100}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i})} \quad (6.2)$$

Όπου, PBIAS είναι η απόκλιση επί τοις εκατό μεταξύ των παρατηρούμενων τιμών (Q_{obs}) και των μοντελοποιημένων (Q_{sim}). Ο δείκτης αυτός έχει ένα αρκετά μεγάλο εύρος τιμών, αρνητικών και θετικών, με την βέλτιστη τιμή να είναι στο μηδέν καθώς το μηδέν καταδεικνύει καλύτερη απόδοση του μοντέλου. Οι θετικές τιμές δείχνουν ότι το μοντέλο υποεκτιμά τις παρατηρούμενες τιμές ενώ οι αρνητικές το αντίθετο (Gurta et al., 1999). Στο μοντέλο ο δείκτης PBIAS υπολογίστηκε σε **3.70**.

▪ RSR

Ο δείκτης RMSE (ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος) αποτελεί έναν από τους πιο ευρέως διαδεδομένους στατιστικούς δείκτες για τον έλεγχο αξιοπιστίας των μοντέλων. Όσο πιο μικρές τιμές λαμβάνει ο δείκτης αυτός, τόσο καλύτερη η προσομοίωση του μοντέλου. Ο δείκτης RSR προκύπτει από τον λόγο του (RMSE) και της τυπικής απόκλισης των τιμών του πεδίου (STDEV) και υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο (6.3).

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs,i})^2}} \quad (6.3)$$

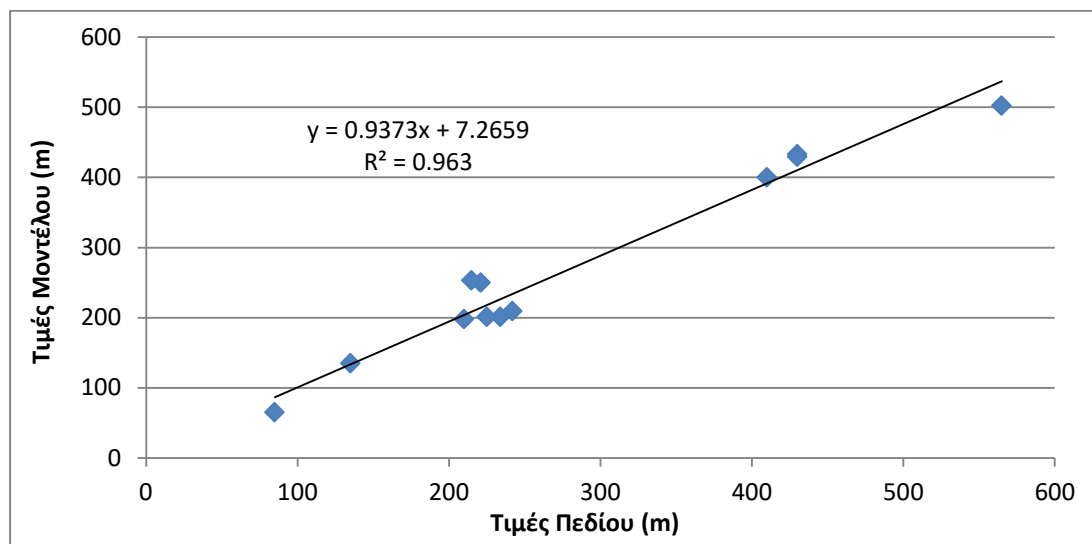
Το εύρος των τιμών για τον δείκτη αυτό κυμαίνεται από το 0 μέχρι το ∞ , με το 0 να θεωρείται η βέλτιστη τιμή υποδεικνύοντας τέλεια μοντελοποίηση ενώ για τιμές μέχρι 0.63 η μοντελοποίηση κρίνεται ικανοποιητική (Moriasi et al., 2007). Στην παρούσα εργασία ο δείκτης RSR υπολογίστηκε σε **0.208**.

▪ R^2

Ο δείκτης προσδιορισμού R^2 χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορα υδρολογικά μοντέλα για την εκτίμηση του βαθμού αξιοπιστίας τους. Περιγράφει την γραμμική σχέση μεταξύ των μετρηθέντων τιμών και των τιμών του μοντέλου και εκφράζεται από τον παρακάτω τύπο (6.4).

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2}} \right]^2 \quad (6.4)$$

Το εύρος των τιμών για τον συντελεστή αυτό κυμαίνεται από το 0 μέχρι το 1, όπου για τιμές κοντά στο 1 το μοντέλο έχει καλύτερη απόδοση καθώς το 1 θεωρείται η βέλτιστη τιμή. Ο δείκτης R^2 στην προσομοίωση αυτή υπολογίστηκε σε **0.963**, όπως φαίνεται και στο γράφημα 6.1.



Γράφημα 6.1: Απεικόνιση των πραγματικών τιμών στάθμης στο πεδίο σε σχέση με τις τιμές του μοντέλου.

Στον πίνακα 6.2 παρατίθενται οι επιλεγμένοι στατιστικοί δείκτες, οι τιμές τους όπως υπολογίστηκαν κατά την βαθμονόμηση καθώς και τα κριτήρια αξιολόγησης των εκάστοτε δεικτών σύμφωνα με τους Moriasi et al., 2015. Αναφέρεται ότι τα κριτήρια αξιολόγησης των δεικτών ποικίλουν ανάλογα με το είδος της έρευνας πχ αν πρόκειται για ιζήματα ή για ροή κλπ, στην προκειμένη παρουσιάζονται τα κριτήρια για την ροή.

Δείκτης	Τιμές στο μοντέλο	Κριτήρια Αξιολόγησης Απόδοσης			
		Πολύ καλή	Καλή	Ικανοποιητική	Μη ικανοποιητική
NSE	0.956	$NSE > 0.80$	$0.70 < NSE \leq 0.80$	$0.50 < NSE \leq 0.70$	$NSE \leq 0.50$
PBIAS (%)	3.70	$PBIAS < \pm 5$	$\pm 5 \leq PBIAS < \pm 10$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$PBIAS \geq \pm 15$
RSR	0.208	$0 < RSR < 0.50$	$0.50 < RSR < 0.60$	$0.60 < RSR < 0.70$	$RSR > 0.70$
R^2	0.963	$R^2 > 0.85$	$0.75 < R^2 \leq 0.85$	$0.60 < R^2 \leq 0.75$	$R^2 \leq 0.60$

Πίνακας 6.2: Οι στατιστικοί δείκτες του μοντέλου και τα εύρη διακυμάνσεων τους.

(Πηγή: Moriasi et al., 2007, 2015).

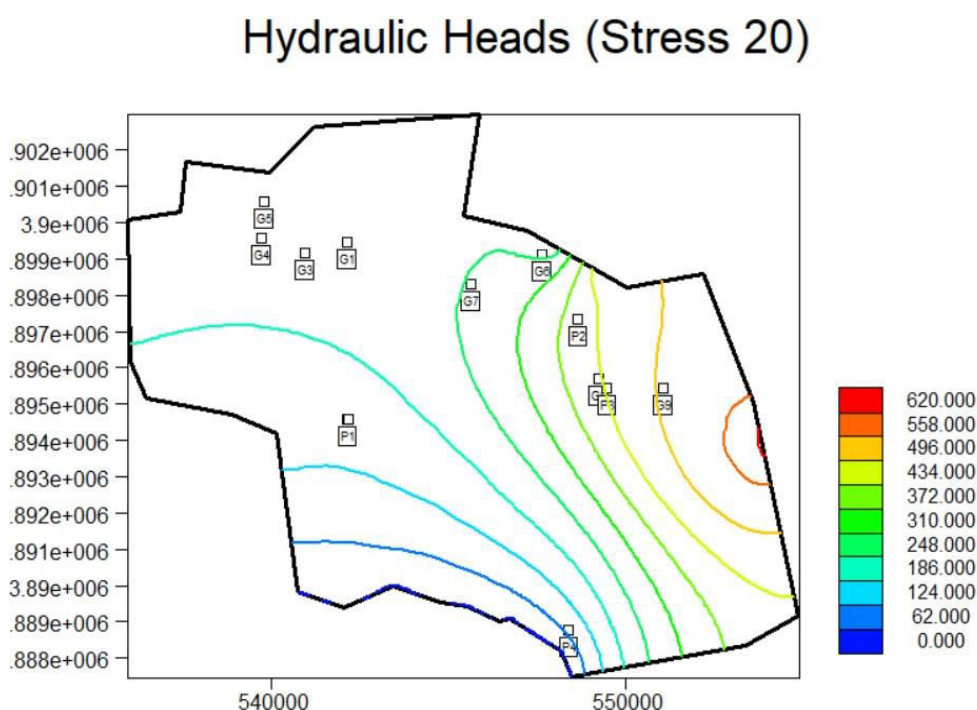
Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα και ελέγχοντας τα αποδεκτά εύρη για την ροή, εξάγεται το συμπέρασμα ότι το μοντέλο είχε πολύ καλή απόκριση σε σχέση με τα πραγματικά δεδομένα του πεδίου εξάγοντας τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια.

7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

7.1 Προσομοίωση της υπόγειας ροής

Έπειτα από την διαδικασία της βαθμονόμησης, εξήχθησαν τα ακόλουθα αποτελέσματα για την προσομοίωση της υπόγειας ροής με βάση τα υδραυλικά ύψη στην παρούσα εργασία. Αναφέρεται ότι το μοντέλο PTC εκτελέστηκε για χρονικό διάστημα 10 υδρολογικών ετών, όπου το κάθε έτος περιλάμβανε δύο περιόδους, την χειμερινή και την θερινή. Συγκρίνοντας τα υδραυλικά ύψη της εαρινής περιόδου (Stress 20) του μοντέλου, όπου το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία, με τα αντίστοιχα από το πεδίο, αναφέρεται ότι υπήρξε μια ικανοποιητική προσέγγιση. Η υψηλότερη στάθμη καταγράφηκε στην γεώτρηση G9 ενώ χαμηλότερη στις γεωτρήσεις G4 και G3 όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα 7.1.

- Εαρινή περίοδος (Ιούνιος – Αύγουστος)

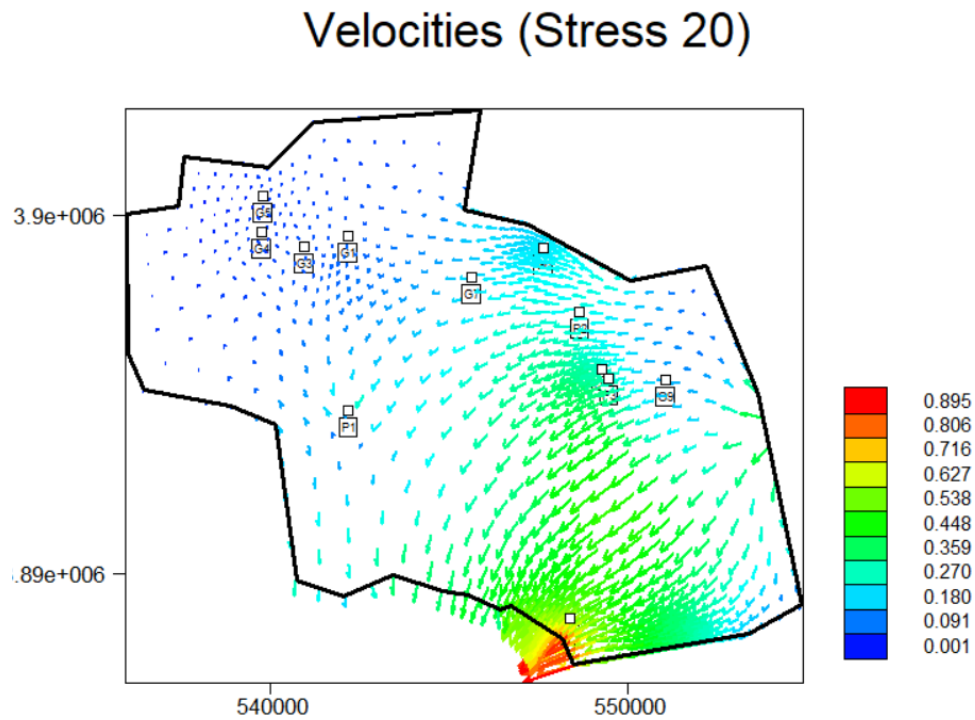


Εικόνα 7.1: Υδραυλικά ύψη (m) της τελευταίας εαρινής περιόδου.

Γενικά, αναφέρεται ότι η διαφορά στα υδραυλικά ύψη μεταξύ της χειμερινής και εαρινής περιόδου ήταν μικρή. Την χειμερινή περίοδο όπως ήταν αναμενόμενο τα υδραυλικά ύψη ήταν ελαφρώς αυξημένα σε σχέση με την εαρινή τόσο λόγω των βροχοπτώσεων όσο και των μεγαλύτερων πλευρικών εισροών. Οι γεωτρήσεις G5, G4, G3 που βρίσκονταν κοντά σε οριακές συνθήκες που αναπαριστούν πλευρικές εισροές εμφάνισαν ελαφρώς περισσότερο αυξημένα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τις υπόλοιπες την χειμερινή περίοδο.

Εν συνεχεία στην εικόνα 7.2 παρουσιάζονται οι ταχύτητες ροής για την τελευταία εαρινή περίοδο. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου παρατηρείται ότι το ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης εμφανίζει υψηλότερες ταχύτητες υπόγειας ροής σε σχέση με το δυτικό όπου παρατηρείται χαμηλή κινητικότητα. Πρόσθετα, αναφέρεται ότι η κατεύθυνση της ροής στο ανατολικό τμήμα είναι από τα ανατολικά προς τα νοτιοδυτικά.

Έπειτα εντοπίζεται μια ομαλή ροή προς την θάλασσα στο δυτικό τμήμα και πολύ εντονότερη εκφόρτιση στο ανατολικό.



Εικόνα 7.2: Ταχύτητες ροής (m/d) της τελευταίας εαρινής περιόδου.

Επισημαίνεται ότι καθώς υπήρξε μια καλή συσχέτιση μεταξύ των υδραυλικών υψών του πεδίου και του μοντέλου, τα υδραυλικά ύψη που εξήχθησαν από την προσομοίωση και συγκεκριμένα εκείνα της τελευταίας εαρινής περιόδου (Stress 20) χρησιμοποιήθηκαν ως αρχική κατάσταση για τα διάφορα κλιματικά σενάρια που εξετάστηκαν στη συνέχεια.

7.2 Σενάρια κλιματικής αλλαγής και ανάλυση ευαισθησίας

Έπειτα από την προσομοίωση των υδραυλικών υψών της περιοχής μελέτης, ακολούθησε η διερεύνηση και εξέταση του συστήματος κατά την μεταβολή ορισμένων παραμέτρων. Στην παρούσα εργασία, το μοντέλο κατασκευάστηκε για την ευρύτερη περιοχή της υδρογεωλογικής λεκάνης του Κουρταλιώτη και η ανάλυση ευαισθησίας αφορούσε την απόκριση του μοντέλου σε πιθανές μεταβολές υπό το πρίσμα της κλιματικής αλλαγής. Για τον λόγο αυτό, εξετάστηκαν τέσσερα υποθετικά σενάρια, κατά τα οποία οι κύριες παράμετροι που λήφθηκαν υπόψη και ελέγχτηκαν ήταν η κατείδδυση από τις βροχοπτώσεις, οι πλευρικές εισροές- οριακές συνθήκες (BC Flow) και οι παροχές άντλησης.

Αναλυτικότερα, για τα τέσσερα σενάρια που εξετάστηκαν, το πρώτο υποθετικό σενάριο περιελάμβανε 10% μείωση στην κατείδδυση από τις βροχοπτώσεις, 10% μείωση στις πλευρικές εισροές (BC Flow) με τις αντλήσεις να παραμένουν οι ίδιες. Στο δεύτερο σενάριο υφίστανται οι συνθήκες του πρώτου σεναρίου με την διαφορά ότι οι αντλήσεις στο σενάριο αυτό έχουν αυξηθεί κατά 10%. Εν συνεχεία, το τρίτο σενάριο αφορούσε την μείωση κατά 15% στην κατείδδυση από τις βροχοπτώσεις, μείωση 15% στις πλευρικές εισροές και αύξηση των αντλήσεων κατά 20%. Το τέταρτο και τελευταίο αποτέλεσε ένα ακραίο σενάριο, το οποίο περιλάμβανε 20% μείωση στην κατείδδυση από τις βροχοπτώσεις, 20% μείωση στις πλευρικές εισροές και 50% αύξηση στην παροχή των αντλήσεων. Ο λόγος για τον οποίο επιλέχτηκε αυτό το ακραίο σενάριο ήταν για την εξέταση της απόκρισης του υδροφορέα και του συστήματος εν γένει σε υποθετικές μελλοντικές συνθήκες.

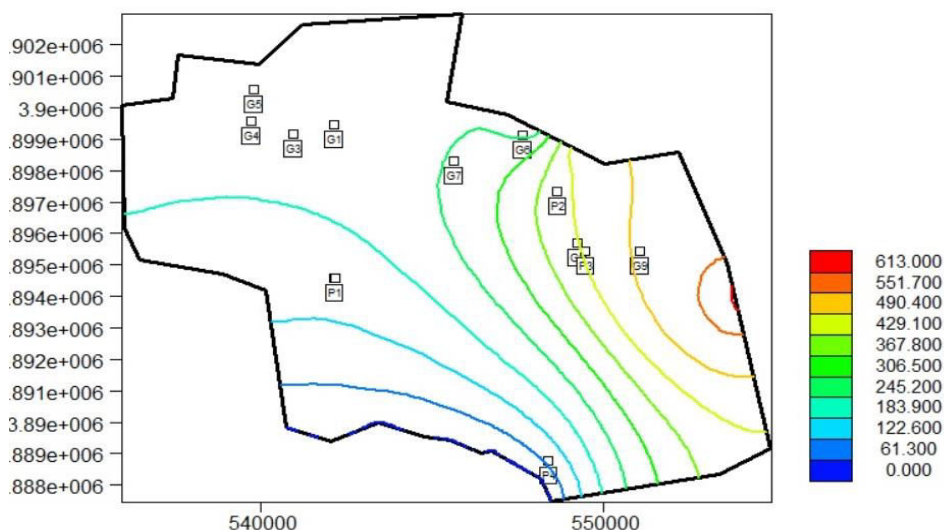
Αναφέρεται ότι σε κάθε ένα σενάριο γινόταν έλεγχος και σύγκριση μεταξύ των υδραυλικών υψών όπως αυτά εξήχθησαν κατά την εκτέλεση του μοντέλου και των υδραυλικών υψών που προέκυψαν από τις μεταβολές των ανωτέρω παραμέτρων. Τονίζεται ότι η σύγκριση των σεναρίων έγινε με την τελευταία ξηρή περίοδο (Stress 20) όπου το σύστημα βρίσκεται σε συνθήκες σταθερής κατάστασης (Steady State). Επομένως, η ανάλυση ευαισθησίας στην παρούσα εργασία προέκυψε από τον βαθμό τον οποίο επηρεάζονται οι στάθμες από την αλλαγή στην βροχόπτωση, στις πλευρικές εισροές και στην παροχή άντλησης. Επίσης, οι πηγές, οι οποίες αξιοποιούνται καλύπτοντας υδρευτικές και αρδευτικές ανάγκες, στην προκειμένη περίπτωση θεωρήθηκαν ως σημεία ελέγχου για την περαιτέρω ανάλυση ευαισθησίας.

❖ 1^ο Σενάριο : Μείωση της βροχόπτωσης κατά 10% και μείωση των πλευρικών εισροών κατά 10%.

Η μείωση κατά 10% στην κατείδδυση των βροχοπτώσεων καθώς και στις πλευρικές εισροές στην περιοχή μελέτης είχε ως αποτέλεσμα μια γενική πτώση στις στάθμες των σημείων όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα 7.3. Η στάθμη στις περισσότερες γεωτρήσεις μειώθηκε περίπου 1 έως 2.5m, με την μικρότερη μεταβολή να παρατηρείται στο σημείο ελέγχου P2 όπου η στάθμη μειώθηκε 23 εκατοστά και την μεγαλύτερη αντίστοιχα στην γεώτρηση G9 όπου σημειώθηκε πτώση στάθμης 4m.

Επισημαίνεται ότι τα σημεία που ήταν κοντά στις οριακές συνθήκες που αναπαριστούν τις πλευρικές εισροές είχαν μεγαλύτερη πτώση στάθμης από τα σημεία που βρίσκονταν σε μεγαλύτερη απόσταση και επομένως είχαν μικρότερη μεταβολή. Οι γεωτρήσεις G5, G4, G3, G1 που ήταν πλησίον σε οριακή συνθήκη εμφάνισαν πτώση 1.87, 1.93, 1.86, 1.77 αντίστοιχα ενώ ενδιαφέρον παρουσιάζεται στα σημεία G8, P3 όπου η μείωση ήταν 2 με 2.5 μέτρα. Αναφέρεται ότι η ποσοστιαία μεταβολή μεταξύ του πρώτου σεναρίου και της αρχικής κατάστασης είχε αρνητικό πρόσημο (λόγω μείωσης της άντλησης) και κυμάνθηκε από 0.06 έως 1.48%.

1ο Scenario - Hydraulic Heads



Εικόνα 7.3: Απεικόνιση των υδραυλικών υψών (m) για το πρώτο υποθετικό σενάριο.

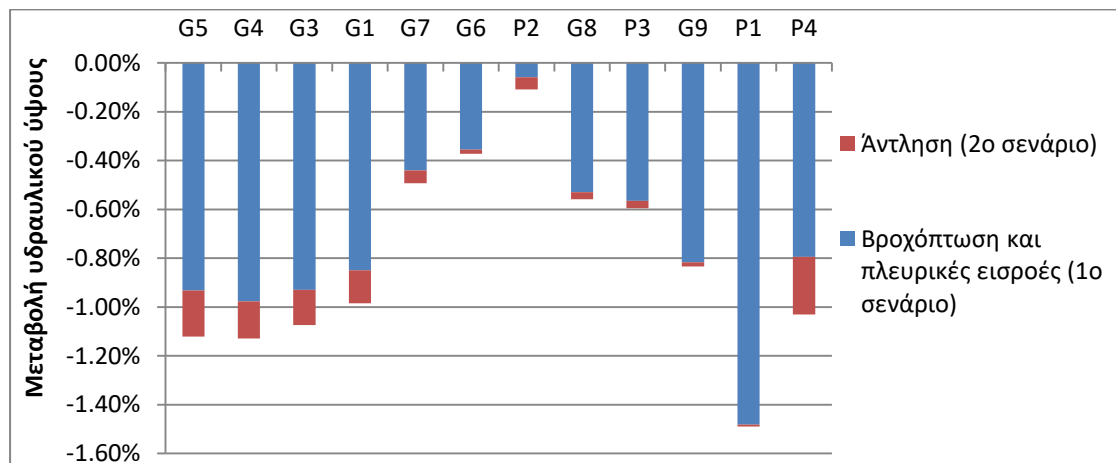
❖ 2ο Σενάριο: Μείωση της βροχόπτωσης κατά 10%, μείωση των πλευρικών εισροών κατά 10%, αύξηση των αντλήσεων κατά 10%.

Το σενάριο αυτό περιλαμβάνει τις παραμέτρους του πρώτου σεναρίου και επιπλέον την παράμετρο της παροχής με αύξηση της άντλησης κατά 10%. Αυτή η αύξηση προκάλεσε μια περαιτέρω μείωση στις στάθμες των σημείων, χωρίς όμως να παρατηρείται μεγάλου βαθμού μεταβολή σε σύγκριση με το πρώτο σενάριο. Συγκεκριμένα, η διαφορά στα υδραυλικά ύψη ανάμεσα στο πρώτο και το δεύτερο σενάριο κυμάνθηκε από ένα έως περίπου 40 εκατοστά (πχ γεώτρηση G5).

Δηλαδή, σε ορισμένες γεωτρήσεις πχ G6, G9 η αύξηση των αντλήσεων κατά 10% δεν προκάλεσε ουσιώδη μεταβολή στην ήδη μειωμένη στάθμη ενώ σε κάποιες άλλες όπως στις G3, G1 προκάλεσε μια μείωση 29 και 28 εκατοστά αντίστοιχα, σε σχέση με το πρώτο σενάριο. Οι γεωτρήσεις G5, G3, G1 όπως έχει ήδη προαναφερθεί, βρίσκονται κοντά σε περιοχή που έχει οριστεί ως οριακή συνθήκη και δεδομένου της μείωσης των πλευρικών εισροών ύδατος αλλά και της αύξησης των αντλήσεων, είναι αναμενόμενο λοιπόν η στάθμη εκεί να επηρεάζεται περισσότερο.

Σύμφωνα με τα παραπάνω και δεδομένου ότι το δεύτερο σενάριο συνιστάται από τις ίδιες παραμέτρους του πρώτου σεναρίου με μια επιπλέον αλλαγή στην παροχή άντλησης, προκύπτει το συμπέρασμα ότι το σύστημα επηρεάστηκε περισσότερο από την μείωση στην κατείδυση των βροχοπτώσεων και των πλευρικών εισροών από ότι από την αύξηση της παροχής των αντλήσεων κατά 10% καθώς η διαφορά στο υδραυλικό ύψος είναι μεγαλύτερη ανάμεσα στην αρχική κατάσταση και στο πρώτο σενάριο από ότι μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου σεναρίου.

Ανάγοντας αυτές τις διαφορές σε ποσοστά προκύπτει ότι η ποσοστιαία μεταβολή στα υδραυλικά ύψη μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου σεναρίου σημείωσε πτώση που κυμάνθηκε από 0.01 μέχρι 0.24%, ποσοστό το οποίο οφείλεται αποκλειστικώς στην αύξηση της παροχής άντλησης. Αντίστοιχα, η ποσοστιαία μεταβολή ανάμεσα στην αρχική κατάσταση και το δεύτερο σενάριο ήταν από 0.11 έως 1.5%, στην οποία τονίζεται ότι εμπεριέχεται και η ποσοστιαία μεταβολή του πρώτου σεναρίου αφού αποτελεί συνέχεια του (πίνακας 7.1). Επειδή το δεύτερο σενάριο συνιστάται και από παραμέτρους του πρώτου, αναφέρεται ότι το ποσοστό συμμετοχής στην ποσοστιαία μεταβολή των υδραυλικών υψών της αρχικής κατάστασης και του δεύτερου σεναρίου οφείλεται σε ένα μεγάλο ποσοστό, περίπου 77 με 99.5% στην μεταβολή των παραμέτρων του πρώτου σεναρίου (βροχόπτωση, εισροές) και κατά 0.5 έως 23% στην αλλαγή της παροχής. Από τα ανωτέρω προκύπτει το συμπέρασμα ότι η αύξηση κατά 10% των αντλήσεων δεν επέφερε σημαντικές μεταβολές στα υδραυλικά ύψη του δεύτερου σεναρίου.



Γράφημα 7.1: Ποσοστιαίες μεταβολές των υδραυλικών υψών του πρώτου και του δεύτερου σεναρίου σχετικά με την αρχική κατάσταση όπου με κόκκινο χρώμα συμβολίζεται η μεταβολή μεταξύ των δύο σεναρίων.

❖ 3ο Σενάριο: Μείωση της βροχόπτωσης κατά 15%, μείωση των πλευρικών εισροών κατά 15%, αύξηση των αντλήσεων κατά 20%.

Στο τρίτο σενάριο, οι παράμετροι της βροχόπτωσης και των πλευρικών εισροών μειώθηκαν από 10 σε 15% και οι αντλήσεις αυξήθηκαν από 10 σε 20%. Η στάθμη και σε αυτό το σενάριο μειώθηκε περαιτέρω, γεγονός αναμενόμενο καθώς όσο μειώνεται το ποσοστό κατείσδυσης των βροχοπτώσεων και των πλευρικών εισροών και παράλληλα αυξάνεται η παροχή των αντλήσεων ο υδροφόρεας επηρεάζεται περισσότερο. Σε σύγκριση με το προηγούμενο σενάριο, η διαφορά στο υδραυλικό ύψος κυμάνθηκε από μερικά εκατοστά μέχρι πάνω από μισό μέτρο, δηλαδή περίπου 72 εκατοστά. Η μεγαλύτερη μείωση στην στάθμη και σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται στις γεωτρήσεις G5, G4, G3, G1 που ήταν κοντά σε οριακή συνθήκη καταγράφοντας μια πτώση 71, 72, 68 και 67 εκατοστά αντίστοιχα σε σχέση με το δεύτερο σενάριο.

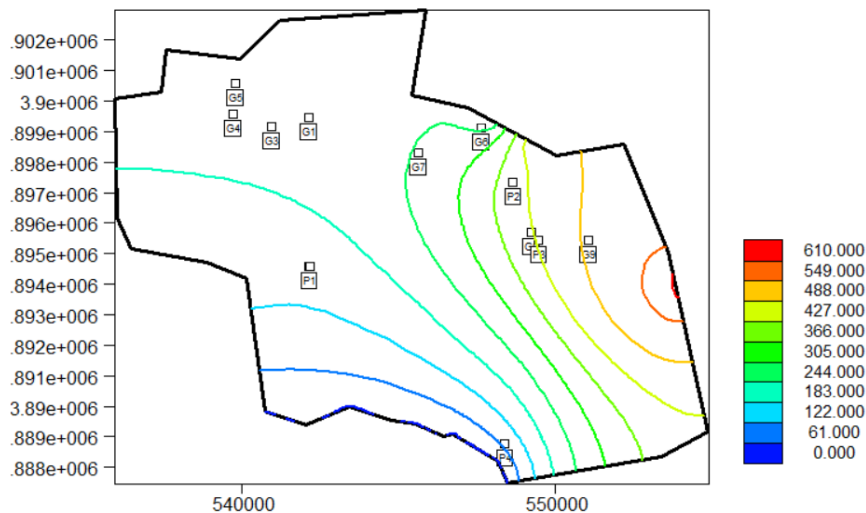
Συγκριτικά με την αρχική κατάσταση του συστήματος, δηλαδή όταν το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία, η αντίστοιχη διαφορά στο υδραυλικό ύψος ήταν πολύ μεγαλύτερη περίπου από μισό έως 4.10 μέτρα. Σε αρκετές γεωτρήσεις όπως οι G5, G4, G3, G1, G8 η στάθμη μειώθηκε 2.96, 2.95, 2.83, 2.72 και 2.74 μέτρα αντίστοιχα σε σχέση με την αρχική κατάσταση. Όσον αφορά την ποσοστιαία μεταβολή στο υδραυλικό ύψος μεταξύ του τρίτου σεναρίου και της αρχικής κατάστασης σημειώθηκε πτώση που κυμάνθηκε από 0.15 έως 1.52% ενώ μεταξύ του τρίτου και του δεύτερου σεναρίου η αντίστοιχη μεταβολή ήταν από 0.02 έως 0.37%.

Σχετικά με την διαφορά στο υδραυλικό ύψος μεταξύ των τριών σεναρίων παρατηρήθηκε ότι οι γεωτρήσεις που ήταν κοντά σε οριακή συνθήκη που αναπαριστά πλευρικές εισροές επηρεάστηκαν σαφώς περισσότερο, ενώ οι γεωτρήσεις G6 και G9 επηρεάστηκαν λιγότερο από τις αλλαγές των προαναφερθέντων παραμέτρων περίπου 20 και 10 εκατοστά αντίστοιχα. Σχετικά με τις πηγές ως σημεία ελέγχου, το σημείο P1 εμφάνισε την μικρότερη μεταβολή ενώ το σημείο P4 την μεγαλύτερη.

❖ 4ο Σενάριο: Μείωση της βροχόπτωσης κατά 20%, μείωση των πλευρικών εισροών κατά 20%, αύξηση των αντλήσεων κατά 50%.

Στο σενάριο αυτό το ποσοστό μείωσης της κατείσδυσης από τις βροχοπτώσεις ορίστηκε σε 20% όπως και των πλευρικών εισροών ενώ παράλληλα η παροχή των αντλήσεων των γεωτρήσεων αυξήθηκε κατά το ήμισυ δηλαδή κατά 50%. Παρότι αποτελείται σε σχέση με τα προηγούμενα τρία σενάρια από έντονες αλλαγές στις υπό εξέταση παραμέτρους και κυρίως της παροχής άντλησης εντούτοις επιλέχτηκε για μια πιο ολοκληρωμένη αντίληψη της απόκρισης του υδροφόρεα και κυρίως προσέγγισης του βαθμού ανοχής – ευαισθησίας του (εικ.7.4).

4o Scenario - Hydraulic Heads



Εικόνα 7.4: Απεικόνιση των υδραυλικών υψών (m) για το τέταρτο ακραίο υποθετικό σενάριο.

Σε σύγκριση με το προηγούμενο σενάριο, παρατηρήθηκε μια αρκετά μεγάλη διαφορά στα υδραυτικά ύψη από ένα έως 3 μέτρα με τις περισσότερες διαφορές να εντοπίζονται στα 2.5 μέτρα. Στις γεωτρήσεις G5, G4, G3, G1 πλησίον της οριακής συνθήκης στα δυτικά της περιοχής μελέτης καταγράφηκε μια σημαντική πτώση 2.58, 2.42, 2.39 και 2.4 μέτρα αντίστοιχα. Εν γένει, την μεγαλύτερη διαφορά στο υδραυλικό ύψος σε σχέση με το τρίτο σενάριο παρουσίασε η γεώτρηση G8 σημειώνοντας μια πτώση 2.96 μέτρα ενώ την μικρότερη το σημείο ελέγχου P1 με 1.08 μέτρα αντίστοιχα.

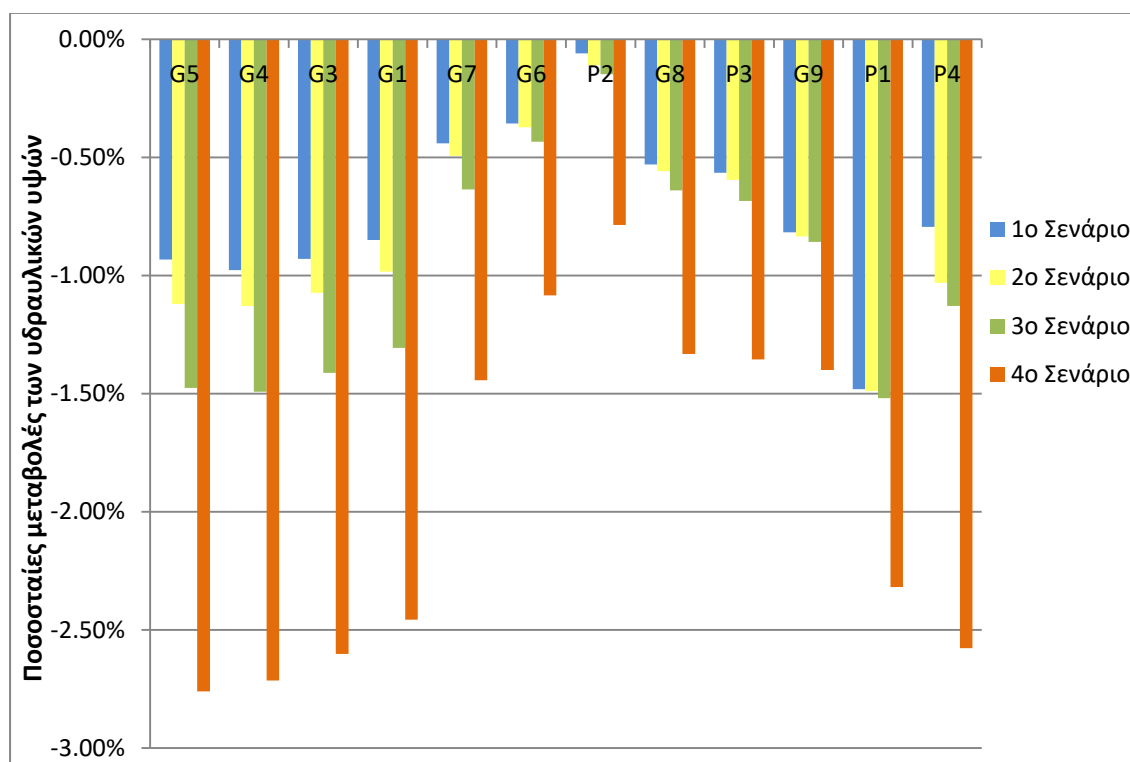
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι διαφορές στα υδραυτικά ύψη μεταξύ της αρχικής κατάστασης και του ακραίου σεναρίου. Στην περίπτωση αυτή η διαφορά ήταν πολύ μεγαλύτερη καταγράφοντας μια πολύ έντονη πτώση σε όλες τις γεωτρήσεις και τα σημεία ελέγχου. Η πτώση στις στάθμες στις περισσότερες γεωτρήσεις κυμάνθηκε από 5 έως 7 μέτρα με την μεγαλύτερη πτώση των 7.01 μέτρων να παρατηρείται στην γεώτρηση G9. Όπως ήταν αναμενόμενο οι γεωτρήσεις πλησίον των συνθηκών επηρεάστηκαν περισσότερο λόγω και της περαιτέρω μείωσης των πλευρικών εισροών. Αναφορικά με τις ποσοστιαίες μεταβολές σε σχέση με την αρχική κατάσταση σημειώθηκε αρνητική μεταβολή, η οποία κυμάνθηκε από 0.79 έως 2.76%.

Εν τέλει, από τα τέσσερα υποθετικά κλιματικά σενάρια εξάγεται το συμπέρασμα ότι για τα μεν τρία πρώτα σενάρια όπου οι αλλαγές στις υπό εξέταση παραμέτρους ήταν σταδιακές και όχι απότομες, το σύστημα δεν επηρεάστηκε σε μεγάλο βαθμό από την αύξηση των αντλήσεων κατά 10% ενώ επηρεάστηκε περισσότερο, όπως αναμενόταν, με την περαιτέρω μείωση της βροχόπτωσης σε 15% και την αύξηση των αντλήσεων σε 20% σε σχέση με την αρχική κατάσταση υποδηλώνοντας αρχικά έναν χαμηλό βαθμό ευαισθησίας. Στο τέταρτο και τελευταίο όμως σενάριο, η περαιτέρω μείωση της βροχόπτωσης σε 20 % όπως και των πλευρικών εισροών αλλά κυρίως η αύξηση των αντλήσεων κατά 50% σε σχέση με την αρχική κατάσταση επέφερε σημαντικές και έντονες πτώσεις στις στάθμες καταδεικνύοντας ότι το σύστημα επηρεάζεται σε έναν αρκετά αξιοσημείωτο βαθμό. Στον πίνακα 7.1 παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες μεταβολές σε σχέση με την αρχική κατάσταση για τα τέσσερα σενάρια και στο γράφημα 7.2 γίνεται η απεικόνισή τους.

Σημεία Ελέγχου	Ποσοστιαίες μεταβολές υδραυλικού ύψους (%)			
	1° Σενάριο	2° Σενάριο	3° Σενάριο	4° Σενάριο
G5	-0,93%	-1,12%	-1,47%	-2,76%
G4	-0,98%	-1,13%	-1,49%	-2,71%
G3	-0,93%	-1,07%	-1,41%	-2,60%
G1	-0,85%	-0,98%	-1,31%	-2,46%
G7	-0,44%	-0,49%	-0,64%	-1,44%
G6	-0,36%	-0,37%	-0,43%	-1,08%
P2	-0,06%	-0,11%	-0,15%	-0,79%
G8	-0,53%	-0,56%	-0,64%	-1,33%
P3	-0,56%	-0,59%	-0,68%	-1,35%
G9	-0,82%	-0,83%	-0,86%	-1,40%
P1	-1,48%	-1,49%	-1,52%	-2,32%
P4	-0,79%	-1,03%	-1,13%	-2,58%

* Το (-) υποδηλώνει την μείωση στις στάθμες.

Πίνακας 7.1: Ποσοστιαίες μεταβολές στα υδραυλικά ύψη των τεσσάρων σεναρίων σε σχέση με την αρχική κατάσταση του συστήματος.



Γράφημα 7.2: Απεικόνιση των ποσοστιαίων μεταβολών των υδραυλικών υψών σε σχέση με την αρχική κατάσταση για κάθε σενάριο.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή έγινε προσομοίωση της υπόγειας ροής για την ευρύτερη περιοχή της υδρογεωλογικής λεκάνης του Κουρταλιώτη με το μοντέλο PTC και με χρονικό διάστημα προσομοίωσης τα 10 έτη. Κατά την βαθμονόμηση υπήρξε μια ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ των υδραυλικών υψών του πεδίου και του μοντέλου με εξαίρεση την γεώτρηση G10 στην οποία το μοντέλο απέτυχε να προσεγγίσει το αντίστοιχο υδραυλικό ύψος και έτσι απορρίφθηκε από την διαδικασία της προσομοίωσης. Στις υπόλοιπες γεωτρήσεις οι διαφορές στα υδραυλικά ύψη δεν ήταν αρκετά σημαντικές ενώ λίγο μεγαλύτερη διαφορά παρουσιάστηκε στις γεωτρήσεις G7 και G9.

Πρόσθετα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατηρήθηκαν αρκετά υψηλές ταχύτητες της υπόγειας ροής και επομένως μεγάλη κινητικότητα στο ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης σε σχέση με το δυτικό. Πιθανά αυτό να οφείλεται σε κάποια μεγάλη πλευρική τροφοδοσία από τα ανατολικά στην περιοχή μελέτης, ίσως από κάποιο γειτονικό υδροφορέα. Επιπρόσθετα, αναφέρεται ότι οι σχηματισμοί που ελήφθησαν υπόψη στην μοντελοποίηση είναι υδροπερατοί και κυρίως οι ασβεστόλιθοι της ενότητας της Τρίπολης, οι οποίοι είναι έντονα καρστικοποιημένοι με αρκετά υψηλή υδραυλική αγωγιμότητα και επομένως οι υψηλές ταχύτητες της υπόγειας ροής ήταν αναμενόμενες.

Τα τέσσερα υποθετικά κλιματικά σενάρια τα οποία εξετάστηκαν επιλέχτηκαν με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να υπάρχει μια πιο ολοκληρωμένη αντίληψη σχετικά με την απόκριση του συστήματος σε συντηρητικές καταστάσεις και μη. Αρχικά, θεωρήθηκαν συντηρητικά σενάρια κλιματικής αλλαγής, όπως ήταν τα τρία πρώτα, όπου παρατηρήθηκε μια πτώση στον υδροφορέα περίπου πάνω από δύο μέτρα, όμως σε περίπτωση χειρότερης κατάστασης όπως ήταν το τέταρτο και τελευταίο σενάριο οι επιπτώσεις στον υδροφορέα ήταν πιο έντονες και σημαντικές, όπου σημειώθηκε πτώση 5 έως 7 μέτρων.

Τα τρία σενάρια κατέδειξαν χαμηλό βαθμό ευαισθησίας του υδροφορέα, παρουσιάζοντας την ανοχή σε μεταβολές της βροχόπτωσης, των πλευρικών εισροών και αύξησης της παροχής των αντλήσεων μέχρι ένα ποσοστό της τάξης του 20%. Εντούτοις, με το ακραίο σενάριο όμως κατεδείχθη ότι ο υδροφορέας δεν εξακολουθεί να παρουσιάζει τον ίδιο χαμηλό βαθμό ευαισθησίας, υποδεικνύοντας χαμηλή επιδεκτικότητα σε περαιτέρω αύξηση των αντλήσεων και σε συνδυασμό με την μείωση των βροχοπτώσεων.

Επισημαίνεται ότι η περιοχή μελέτης διαθέτει ένα πολύ μεγάλο υδάτινο δυναμικό καθώς η υδρογεωλογική λεκάνη του Κουρταλιώτη διαθέτει τεράστια υδάτινα αποθέματα. Σε αυτό συμβάλλει η γεωλογική δομή της περιοχής όσο και η τεκτονική, δημιουργώντας τις ανάλογες υδρογεωλογικές συνθήκες. Για παράδειγμα αναφέρεται ότι η περιοχή μελέτης αποτελείται στο υπόβαθρο της από τους αδιαπέρατους σχηματισμούς της ενότητας φυλλιτών-χαλαζιτών, οι οποίοι δημιουργούν ένα μπαράζ, εγκλωβίζοντας τα ύδατα.

Βέβαια, τονίζεται ότι στην υπό μελέτη περιοχή δεν υπάρχουν πολλές γεωτρήσεις ούτε επομένως και πολλές λιθολογικές τομές για μια πιο αντιπροσωπευτική προσέγγιση του υπεδάφους. Επομένως με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα και τα αποτελέσματα των κλιματικών σεναρίων, εξάγεται το συμπέρασμα ότι παρόλο που η περιοχή μελέτης διαθέτει μεγάλα υδάτινα αποθέματα και στα πρώτα σενάρια το σύστημα δεν έδειξε μεγάλη μεταβολή μέχρι ενός ορίου μείωσης των βροχοπτώσεων και αύξησης των αντλήσεων, μια

υποθετικά ακραία κλιματική αλλαγή συνοδευόμενη από μείωση των βροχοπτώσεων και των πλευρικών εισροών και ταυτόχρονη σημαντικά αύξηση των αντλήσεων κατά το ήμισυ θα επηρέαζε έντονα την περιοχή μελέτης με σημαντικές επιπτώσεις στον υδροφορέα.

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί πραγματικότητα καθώς υπάρχουν σαφέστατες ενδείξεις ότι το κλίμα μεταβάλλεται με αποτέλεσμα η ορθολογική και βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων να αποτελεί επιτακτική ανάγκη. Αλλαγές στην συχνότητα των βροχοπτώσεων όπως φάνηκε και στην παρούσα μοντελοποίηση επηρεάζουν τα διαθέσιμα υδάτινα αποθέματα και ειδικά όταν πρόκειται και για ταυτόχρονη αύξηση της παροχής άντλησης των γεωτρήσεων σε σημαντικό βαθμό.

Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής δεν είναι ίδιες αλλά διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή και επομένως μια περιοχή η οποία μπορεί να έχει υπερεπάρκεια σε υδάτινα αποθέματα σε μια πιθανά μελλοντική αλλαγή του κλίματος δεν θα μείνει ανεπηρέαστη. Λόγω της κλιματικής αλλαγής λοιπόν και των άγνωστων επιπτώσεων τους απαιτείται ορθή και βιώσιμη διαχείριση, ειδικά για την περίπτωση του Κουρταλιώτη, όπου μεγάλες ποσότητες νερού παραμένουν αναξιοποίητες και χάνονται στη θάλασσα μέχρι και σήμερα ενώ θα μπορούσαν να καλύψουν σημαντικά υδρευτικές και αρδευτικές ανάγκες του Νομού. Για τον λόγο αυτό κρίνεται επιτακτική η εκπόνηση ενός γενικού σχεδίου που θα αποσκοπεί και θα επιβλέπει στην ορθή διαχείριση των υδατινών αποθεμάτων της υδρογεωλογικής λεκάνης Κουρταλιώτη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ambach W., Kuhn M. 1989. Altitudinal Shift of the Equilibrium Line in Greenland Calculated from Heat Balance Characteristics, in J. Oerlemans (ed.), *Glacier Fluctuations and Climatic Change*, Kluwer Acad. Publ. Dordrecht, The Netherlands.

Anderson M.P., Woessner W.W. 1992. *Applied Groundwater Modeling*, Academic Press.

Babu D., Pinder G., Niemi A., Ahlfeld D., Stothoff S. 1997. *Chemical Transport by Three – Dimensional Groundwater Flows*.

Bachmat Y., Collin M. 1987. Mapping to assess groundwater vulnerability to pollution. Proc. And Information No 38. *TNO Committee on Hydrogeology Research*. Hague. Netherlands, 297-307.

Balderacchi, M., Benoit, P., Cambier, P., Eklo, O. M., Gargini, A., Gemitzi, A., Trevisan, M. 2013. Groundwater pollution and quality monitoring approaches at the european level. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 43(4), 323-408.

Bates B.C., Kundzewicz Z.W., Wu S. and Palutikof J.P., Eds., 2008. *Climate Change and Water*. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp.

Bonneau M. 1973. Les differentes series ophiolithiques de la Crete: une mise au point. *C. R. Acad. Sc. D*, 276. Paris.

Bonneau M. 1984. Correlation of the Hellenide nappes in the southeast Aegean and their tectonic reconstruction, *Geol. Soc. London Spec. Publ.*, 17, 517-530, Oxford.

Bonneau M., Angelier J., Epting M. 1977. Reunion extraordinaire de la Societe geologique de France en Grece. *Bull. Soc. Geol.* (7), 19. France.

Brown G.O. 2002. Henry Darcy and the making of a law. *Water Resources Research*, Vol.38, No.7, 1106, 10.1029/2001WR000727.

Burnett R.D., Frind E.O. 1987. Simulation of Contaminant Transport in Three Dimension 2. Dimensionality Effects, *Water Resources*. 23(4), pp 695-705.

Church J. A., White N. J. 2006. A 20th century acceleration in global sea-level rise, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L01602, doi:10.1029/2005GL024826.

Clarke R.T. 1973. Mathematical models in hydrology. *Irrigation and drainage paper* 19. FAO, Rome.

Creutzburg N., Seidel E. 1975. Zum Stand der Geologie des präneogens auf Kreta. *N. Jb. Geo. Palaont. Abh.*, Vol. 149, pp. 363-383

Davis G., Nichols D M., Spear J M. 2003. *California's groundwater bulletin 118*. State of California, The Resources Agency, Department of Water Resources.

Demuth S. Assessment of Climate Change Impacts on Water Resources and How to Adapt. Division of Water Sciences Hydrological Systems and Global Change Section. ppt. UNESCO, Paris.

Dingman S.L. 1994. *Physical Hydrology*. New York: Macmillan. 575 pp.

- Epting H., Kudrass H.R., Schafer A. 1972. Stratigraphie et position des series metamorphiques aux Talea Ori/Crete. *Z. Deutch. Geol. Ges.*
- Essink G.H.P. 2000. *Groundwater Modelling*. Utrecht University.
- Feenstra J., Burton I., Smith, J.B., and Tol R. (Eds.) 1998. *Handbook on Methods for Climate Change Impact Assessment and Adaptation Strategies*. UNEP and Institute for Environmental Studies, University Amsterdam.
- Fifor J. 1992. *Η ατμόσφαιρα αλλάζει, μια παγκόσμια πρόκληση*. Εκδόσεις Π. Τραυλός – Ε. Κωσταράκη. Αθήνα
- Freeze R. A. and Cherry J. A. 1979. *Groundwater*. New York: Prentice-Hall.
- Gribbin R. J. 1992. *Hothouse Earth: The Greenhouse Effect And Gaia*. Ed. Random House.
- Gupta, H. V., Sorooshian, S., Yapo, P. O. 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *J. Hydrol. Eng.*, 4(2), 135-143.
- Heath R. C. 1983. Basic ground-water hydrology: *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2220*, 86 p.
- IPCC. 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp
- IPCC. 2007. Summary for policymakers. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). *Cambridge University Press*, Cambridge, UK and New York.
- Karakitsios V. 1979. Contribution a l' etude geologique des Hellenides, Etude de la region de Sellia (Crete moyenne-occidentale, Grece), These 3e cycle, Paris.
- Karatzas G. 2017. Developments on Modeling of Groundwater Flow and Contaminant Transport. *Water Resources Management* 31(10). DOI: 10.1007/s11269-017-1729-z
- Konikow L. F., Bredehoeft J. D. 1992. Ground water models cannot be validated. *Adv. Wat. Resour.* 15, 75-81.
- Krahl J., Kauffmann G., Kozur H., Richter D., Förster O., Heinritzi F. 1983. Neue Daten zur Biostratigraphie und zur tektonischen Lagerung der PhyllitGruppe und der Trypali-Gruppe auf der Insel Kreta (Griechenland). *Geologische rundschau*, Vol. 72.
- Kumar C.P. 2004. Groundwater flow models. *Researchgate*.
- Kumar C.P. 2015. Modeling of groundwater flow and data requirements. *International Journal Science Engineering Technology* 2 (2): 18-27
- Kumar, C. P. and Surjeet Singh. 2012. Impact of Climate Change on Groundwater Resources – Status of Research Studies, *Proceedings of 3rd International Conference on Climate Change and Sustainable Management of Natural Resources*, 5-7 February 2012, Gwalior.
- Lapidus L., Pinder G.F. 1982. *Numerical Solution of Partial Differential Equations in Science and Engineering*, John Wiley, New York.

- LeGrand H.E., 1964. System for evolution of contamination potential of some waste disposal sites, *Journal Amer. Water Works Association*, Vol. 56, 959-974
- Margat J. 1968. Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution. Base de la cartographie, Doc. BRGM, 68 SGL 198 HYD. Orlean, France
- Meinzer O. E., 1923. Outline of ground-water hydrology, with definitions: *U. S. Geol. Survey, Water-Supply Paper* 494.
- Mercer J.W, Faust C.R. 1981. Ground-Water Modeling. National Water Well Association (NWWA), Worthington, Ohio.
- Mercer, J.W. 1991. Common Mistakes in Model Applications. *Proc. ASCE Symposium on Ground Water*, Nashville, Tennessee.
- Meulenkamp J.E, Dermitzakis M.D, Georgiades – Dikeoulia E., Jonkers H.A, Boger H. 1979. *Field guide to the Neogene of Crete*. Publ. of the Department of Geology and Paleontology, Univ. of Athens, ser. A.
- Meulenkamp J.E. 1969. Stratigraphy of Neogene deposits in the Rethymnon province, Crete, with special reference to the phylogeny of uniserial *Uvigerina* from the Mediterranean region, *Utrecht micropalaeontological bull.*, 2,168p.
- Milankovitch, M. 1941. Canon of Insolation and the Ice Age Problem. Royal Serbian Sciences, Special Publication 132, Section of Mathematical and Natural Sciences, 33: p. 633, Belgrade.
- Moriasi D., Arnold J., Van Liew M., Bingner R., Harmel R., & Veith, T. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.
- Moriasi D.N, Gitau M.W.,Pai N., Daggupati P. 2015. *Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evalutaion Criteria*. Vol. 58(6): 1763-1785 2015 American Society of Agricultural and Biological Engineers ISSN 2151-0032 DOI 10.13031.
- O'Geen, A. T. 2012. Soil Water Dynamics. *Nature Education Knowledge* 3(6):12
- Papanikolaou D.1988. Introduction to the geology of Crete and Field guide, *IGCP Project No276*, October 1988, Field Meeting in Crete, 765-778.
- Papanikolaou D., Vasilakis E., 2010. Thrust faults and extensional detachment faults in Cretan tectono - stratigraphy: Implications for Middle Miocene extension. *Tectonophysics*, vol.448, Is.1-4, pp.233-247.
- Pinder G.F. 2002. *Groundwater modeling using geographical information systems*, University of Vermont, Canada.
- Pinder,G.F. and Gray W.G., 1977. Finite Element Simulation in Surface and Subsurface Hydrology, *Academic Press*, New York.
- Robertson A.H.F., Clift P.D., Degan P.J., Jones G. 1991. Palaeogeographic and palaeotectonic evolution of the Eastern Mediterranean Neotethys. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 87, 289-343.
- Seidel E.1978. Zur petrologie der Phyllit – Quarzit-Serie Kretas. *Habilitationsschrift Techn. Univ. Braunschweig*. 145 p.
- Shah T. 2009. Climate change and groundwater: India's opportunities for mitigation and adaptation *Environ. Res. Lett.* 4 035005.

Shiklomanov I. 1993. World Freshwater Resources. In: Gleick, P.H., Ed., Water in Crisis: A Guide to World's Freshwater Resources.

Steiakakis E., Monopolis D., Vavadakis D., Lambrakis N., 2011. Effective infiltration assessment in Kourtaliotis karstic basin (S. Crete). In *Proceedings of the 9th International Hydrogeological Congress, Advances in the Research of Aquatic Environment*, v.1, DOI: 10.1007/978-3-642-19902-8, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

Steiakakis E, 2018. Evaluation of Exploitable Groundwater Reserves in Karst Terrain: A Case Study from Crete, Greece. *Geosciences* 2018, 8, 19; DOI:10.3390/geosciences8010019.

Thiebault F., Kozur H. 1979. Précisions sur l' age de formation de Tyros (Paléozoïque supérieur-Carnien) et de la base de la série de Gavrovo-Tripolitza (Carnien). *C.R.Acad. Sc.Paris*, 288, 23-26.

Villumsen A., Jacobsen O.S., Sonderskov, C.1983: *Mapping of vulnerability of groundwater reservoirs with regard to surface pollution*. Year book 1982, Geological Survey of Denmark, Copenhagen, 17-38.

Wachendorf H., Baumann A. Gwosdz W., Schneider W. 1974. Die Phyllit –serie Ostkretas – eine Melange. *Z. Geol. Ges.*125, 237-251. Deutsch.

Zhang Ye. 2016. *Groundwater Flow and Solute Transport Modeling*. Dept. of Geology and Geophysics, University of Wyoming.

Zheng C., Bennett G. 2002. Applied Contaminant Transport Modeling. *Wiley InterScience*: New York, NY. 2nd ed. 621 p.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βουδούρης Κ. Σημειώσεις ηλεκτρονικού μαθήματος, Θέματα Υδρογεωλογίας Περιβάλλοντος. Βασικές Έννοιες Υδρογεωλογίας –Ορολογία. Τμήμα Γεωλογίας. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Γρηγοράκη Α. 2009. *Ανάλυση και αξιολόγηση τοπίου περιοχής Πρέβελη νομού Ρεθύμνης με σκοπό την ανάπτυξη εναλλακτικών μορφών τουρισμού*. Πτυχιακή εργασία. Παράρτημα Δράμας –Τμήμα Αρχιτεκτονικής Τοπίου, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Καβάλας, Δράμα.

Εθνικό Κέντρο Περιβάλλοντος και Αειφόρου Ανάπτυξης. 2018. *Ελλάδα Έκθεση Κατάστασης Περιβάλλοντος 2018*.

Ειδική Γραμματεία Υδάτων, Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2017. *1^η Αναθεώρηση του σχεδίου διαχείρισης λεκανών απορροής ποταμών του υδατικού διαμερίσματος Κρήτης (ΕΛ13)*.

Θεοχάρης Μ., 2015. Σημειώσεις μαθήματος *Στραγγίσεις (θεωρία)*. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Ηπείρου.

Καρακίτσος Β., 1986. Οι λιθοστρωματογραφικές, μεταμορφικές και τεκτονικές σχέσεις μεταξύ των φυλλιτών και της ανθρακικής σειράς της Τρίπολης στην Κεντροδυτική Κρήτη. *Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας*. Τόμος XVIII, σελ. 31-58.

Καρακίτσος Β., Ζαμπετάκη –Λέκκα Α. 2011. *Σημειώσεις Εργαστηρίου Στρωματογραφίας*. Εκδόσεις Τομέα Ιστορικής Γεωλογίας και Παλαιοοντολογίας, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 17σ, Αθήνα.

Καρατζάς Γ., 2002. *Υπόγεια Υδραυλική*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Πολυτεχνείου Κρήτης.

- Κατσανικάκης Ε. 2013. *Υδρογεωλογική έρευνα λεκάνης Κουρταλιώτη*. Διπλωματική εργασία. Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Κνιθάκης Μ. 1995. *Υδρογεωλογική έρευνα περιοχής Νομού Ρεθύμνου*. Ερευνητικό έργο. Ι.Γ.Μ.Ε, παράρτημα Κρήτης.
- Κριτσωτάκης Μ., Παυλίδου Σ., 2013. *Κατάσταση υπόγειων υδροφόρων Κρήτης*. Αποκεντρωμένη Διοίκηση Κρήτης, Γενική Δ/ση Χωροταξικής και Περιβαλλοντικής Πολιτικής, Διεύθυνση Υδάτων.
- Λατινόπουλος Π., 1986. *Υδραυλική των υπόγειων ροών*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
- Λέκκας Σ., Αλεξόπουλος Α. 2009. *Εισαγωγή στην υδρογεωλογία*. Πανεπιστήμιο Αθηνών. Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Αθήνα.
- Παπανικολάου Δ. 2015. *Γεωλογία της Ελλάδας*. Εκδόσεις Πατάκη, Αθήνα.
- Παπασταματίου Ι. Ν. 1954. Περί της παρουσίας αλβιτών εις ανθρακικά τίνα πετρώματα της Κρήτης και της γενέσεως αυτών. *Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας*. Τομ.2.
- Περιφέρεια Κρήτης. Τμήμα Υδροοικονομίας. 2018. Χορήγηση στοιχείων γεωτρήσεων και πηγών.
- Σαμαριτάκης Β. 2018. *Τεχνικός Ερμηνευτικός Οδηγός για τις οικοσυστημικές υπηρεσίες των Προστατευόμενων Περιοχών NATURA 2000 στην Κρήτη*. Αποκεντρωμένη Διοίκηση Κρήτης, Ηράκλειο, 24 σελ.
- Στειακάκης Ε., Βαβαδάκης Δ. 2012. Εκτίμηση των υδατικών αποθεμάτων της υδρογεωλογικής λεκάνης Κουρταλιώτη (Κρήτη). *Ορυκτός πλούτος / Mineral Wealth* 163/2012.
- Στουρνάρας Γ. Κλιματικές Αλλαγές και Επιπτώσεις στα Μεσογειακά και Ελλαδικά Υπόγεια Υδατικά Συστήματα.
- Στουρνάρας Γ. 1996. Ειδικά θέματα Υδρογεωλογίας. Τμήμα Γεωλογίας Πανεπιστημίου Αθηνών.
- Στουρνάρας Γ. 2007. *Νερό. Περιβαλλοντική Διάσταση και Διαδρομή*, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
- Τράπεζα της Ελλάδος. 2011. Οι περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην Ελλάδα. Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής.
- Φυτρολάκης Ν. 1980. *Η γεωλογική δομή της Κρήτης – προβλήματα, παρατηρήσεις και συμπεράσματα* (μεθ' ενός τεκτονικού χάρτου εκτός κειμένου), Διατριβή, Εκδ. Έδρας Ορυκτολογίας – Πετρογραφίας – Γεωλογίας Ε.Μ.Π, Αθήνα, σελ. 91-115.

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[i] <https://climate.nasa.gov>

[ii] <http://www.agios-vasilios.gr/municipality.htm>