



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**ΕΦΑΡΜΟΓΗ – ΑΝΑΛΥΣΗ
ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΤΟΥ
ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥ
ΜΟΝΤΕΛΟΥ MODFLOW
ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΗΣ
ΜΕΣΣΑΡΑΣ**

Μιχάλης Παπαμικρούλης

Επιβλέπων καθηγητής: Ε. Μπαλτάς

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»**

Αθήνα, Οκτώβριος 2018

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**ΕΦΑΡΜΟΓΗ – ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΤΟΥ
ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ MODFLOW
ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΗΣ ΜΕΣΣΑΡΑΣ**

Μιχάλης Παπαμικρούλης

Επιβλέπων καθηγητής: Ευάγγελος Μπαλτάς

Το περιεχόμενο της ανά χείρας μεταπτυχιακής εργασίας αποτελεί προϊόν της δικής μου πνευματικής προσπάθειας. Η ενσωμάτωση σε αυτήν υλικού τρίτων, δημοσιευμένου ή μη, γίνεται με δόκιμη αναφορά στις πηγές, που δεν επιτρέπει ασάφειες ή παρερμηνείες.

Υπογραφή

Αθήνα, Οκτώβριος 2018

στους γονείς μου

“If there is magic on this planet, it is contained in water”

(Loren Eiseley, 1907 – 1977)

*“We don’t know what we don’t know,
and we can’t measure errors that we don’t know we’ve made”*

(Oreskes and Belitz (2001), ‘*Philosophical issues in model assessment*’)

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού – Διεπιστημονικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών με τίτλο «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων» της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ) στην Αθήνα.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Ευάγγελο Μπαλτά για την ανάθεση της συγκεκριμένης εργασίας και την άριστη συνεργασία που είχαμε. Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Γεώργιο Καρατζά για την εμπιστοσύνη και την παράδοση όλων των απαραίτητων δεδομένων.

Οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Δρ. Εμμανουήλ Βαρουχάκη για την τεράστια και πολύτιμη βοήθειά του από την αρχή μέχρι και την ολοκλήρωση της εργασίας αλλά και για την άριστη και καθημερινή συνεργασία που είχαμε.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής για την αξιολόγηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ όλους όσους με βοήθησαν πρακτικά και ηθικά κατά τη διάρκεια της φοίτησής μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	iii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	ix
ABSTRACT.....	ix
EXTENDED SUMMARY	x
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Γενικά στοιχεία.....	1
1.2 Υδρολογικός κύκλος.....	2
1.3 Υδρολογικό Ισοζύγιο.....	3
1.4 Αναγκαιότητα εκπόνησης μελέτης.....	5
2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	8
2.1 Γεωλογική δομή λεκάνης Μεσσαράς.....	8
2.2 Υδρογεωλογικές συνθήκες Μεσσαράς.....	12
2.3 Περιοχή των Μοιρών.....	21
3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ MODFLOW.....	31
3.1 Βασικές έννοιες και εξισώσεις υπόγειας ροής.....	31
3.2 Γενικά στοιχεία προσομοίωσης υπόγειας ροής.....	44
3.3 Visual MODFLOW	57
4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ – ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	62
4.1 Κύριες πιέσεις στην περιοχή μελέτης.....	62

4.2	Διαδικασία προσομοίωσης υπόγειας ροής.....	64
4.3	Βαθμονόμηση μοντέλου	76
4.4	Επαλήθευση μοντέλου.....	79
4.5	Κλιματικά σενάρια και επιστροφές άντλησης	80
4.6	Αποτελέσματα βαθμονόμησης μοντέλου	85
4.7	Αποτελέσματα επαλήθευσης μοντέλου	91
4.8	Μελλοντική εκτίμηση της ποσοτικής κατάστασης στην περιοχή μελέτης....	93
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	108
5.1	Βασικά συμπεράσματα	108
5.2	Προτάσεις - Μελλοντική έρευνα.....	112
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	114

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα: 1 Υδρολογικός Κύκλος (https://water.usgs.gov/edu/watercyclegreek.html)	3
Σχήμα: 2 Γεωλογικός χάρτης λεκάνης Μεσσαράς (Κριτσωτάκης, 2009).....	10
Σχήμα: 3 Απόσπασμα γεωλογικού χάρτη λεκάνης Μεσσαράς	11
Σχήμα: 4 Υδρογεωλογικός Χάρτης Κρήτης, Διαχειριστική Μελέτη Κρήτης (Κριτσωτάκης, 2009).....	12
Σχήμα: 5 Υδρολιθολογικός χάρτης της λεκάνης της Μεσσαράς (Κριτσωτάκης, 2009).....	17
Σχήμα: 6 Υδρογεωλογικός Χάρτης περιοχής Μεσσαράς (Κριτσωτάκης, 2009)	18
Σχήμα: 7 Λεκάνη Μεσσαράς - αλλουβιακός και πλειστοκαινικός υδροφορέας (Κριτσωτάκης, 2009).....	20
Σχήμα: 8 Θέση λεκάνης Μεσσαράς στην Κρήτη (SRTM, 2009).....	22
Σχήμα: 9 Γεωγραφικός χάρτης περιοχής μελέτης (IGME).....	22
Σχήμα: 10 Υδρογραφικό δίκτυο περιοχής μελέτης (geodata.gov.gr)	23
Σχήμα: 11 Γεωγραφικός - γεωμορφολογικός χάρτης της περιοχής μελέτης (SRTM, 2009) ...	24
Σχήμα: 12 Υψογραφικός - τοπογραφικός χάρτης της περιοχής μελέτης (Κρίνης, 2009).....	24
Σχήμα: 13 Μηνιαίες θερμοκρασίες υδρολογικού έτους 2009-2010, από μετεωρολογικό σταθμό Πετροκεφάλι Μοιρών (Μοσχοπούλου, 2017).....	25
Σχήμα: 14 Ετήσιος μέσος όρος βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης	26
Σχήμα: 15 Χάρτης κατανομής του μέσου ετήσιου ύψους βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης (Κρίνης, 2009)	27
Σχήμα: 16 Ετήσιος ρυθμός άντλησης στη λεκάνη των Μοιρών (Βαρουχάκης, 2015).....	28
Σχήμα: 17 Είδη υδροφόρων οριζόντων (Χαραλάμπους, 2016).....	32

Σχήμα: 18 Ταξινόμηση Υδροφορέων (Μακρόπουλος και Κουτσογιάννης, 2016)	32
Σχήμα: 19 Χαρακτηριστικές περιπτώσεις ομοιογένειας και ανισοτροπίας (τροποποιημένο από Freeze and Cherry, 1979)	37
Σχήμα: 20 Πειραματική διάταξη Darcy (Bear, 2001)	38
Σχήμα: 21 Διαφορικός όγκος αναφοράς (Freeze and Cherry, 1979)	41
Σχήμα: 22 Πρωτόκολλο κατάρτισης ενός μοντέλου υπόγειων νερών (τροποποιημένο από Anderson & Woessner, 1992)	47
Σχήμα: 23 Διακριτοποίηση ενός υποθετικού συστήματος υδροφορέων (τροποποιημένο από McDonald, M.G., & A.W. Harbaugh, 1988)	50
Σχήμα: 24 Εισροή στο κελί (i,j,k) από το κελί (i,j-1,k) (Καβαλιεράτου, 2007)	52
Σχήμα: 25 Χαρακτηριστικά ενός συστήματος υδροφορέων που μπορούν να προσομοιωθούν με το Modflow (USGS, 2007)	59
Σχήμα: 26 Χωρική διακριτοποίηση, απεικόνιση πηγαδιών άντλησης και παρατήρησης, απεικόνιση οριακών συνθηκών	65
Σχήμα: 27 Ζώνες υδραυλικής αγωγιμότητας	66
Σχήμα: 28 Ζώνες εμπλουτισμού (recharge) μέσω ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων	66
Σχήμα: 29 Εφαρμογή μεθόδου του πλησιέστερου φυσικού γείτονα (Natural Neighbors)	69
Σχήμα: 30 Εκτίμηση ετήσιων κατακρημνίσεων έως το 2100 (Tsanis et al., 2011)	82
Σχήμα: 31 Γράφημα υπολογισμένης τιμής - παρατηρημένης τιμής υγρής περιόδου	88
Σχήμα: 32 Γράφημα υπολογισμένης τιμής - παρατηρημένης τιμής ξηρής περιόδου	89
Σχήμα: 33 Διεύθυνση υπόγειας ροής, υγρή περίοδος 2008	90
Σχήμα: 34 Ξηρή περίοδος έτους 2017 – 2018	97

Σχήμα: 35 Υγρή περίοδος έτους 2020 – 2021	99
Σχήμα: 36 Ξηρή περίοδος έτους 2020 - 2021.....	100
Σχήμα: 37 Υγρή περίοδος έτους 2025 – 2026	101
Σχήμα: 38 Ξηρή περίοδος έτους 2025 - 2026.....	103
Σχήμα: 39 Υγρή περίοδος έτους 2030 – 2031	104
Σχήμα: 40 Ξηρή περίοδος έτους 2030 – 2031	105

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Ταξινόμηση υδρογεωλογικών ενοτήτων της νήσου Κρήτης (Παπαρηγορίου κα 2001, Περλέρος 2003).....	13
Πίνακας 2 Μέσο ετήσιο υδρολογικό ισοζύγιο κύριων υδρολογικών ενοτήτων Κρήτης (Κριτσωτάκης, 2009).....	16
Πίνακας 3 Τιμές υδραυλικές αγωγιμότητας (Καλλέργης, 1999).....	34
Πίνακας 4 Ενδεικτικές Τιμές ολικού πορώδους σε πετρώματα (Καλλέργης, 1999).....	36
Πίνακας 5 Μονάδες μέτρησης VISUAL MODFLOW	64
Πίνακας 6 Αρχικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας.....	69
Πίνακας 7 Στοιχεία πηγαδιών άντλησης	71
Πίνακας 8 Στοιχεία πηγαδιών παρατήρησης.....	73
Πίνακας 9 Αρχικές οριακές συνθήκες.....	75
Πίνακας 10 Ετήσια ύψη βροχόπτωσης 2008 - 2018.....	76
Πίνακας 11 Αποτελέσματα βαθμονόμησης υδρολογικού έτους 2008.....	86
Πίνακας 12 Αποτελέσματα επαλήθευσης υδρολογικού έτους 2009.....	91

Πίνακας 13 Υδραυλικά ύψη (2008 - 2018)	95
Πίνακας 14 Υδραυλικά ύψη κομβικών ετών (ανατολικό, δυτικό και κεντρικό τμήμα)	106

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αυξημένη ζήτηση σε νερό έχει οδηγήσει στην υπερεκμετάλλευση του υπόγειου υδατικού δυναμικού. Ιδιαίτερα, σε περιοχές με αυξημένη γεωργική δραστηριότητα οι ανάγκες σε νερό για άρδευση είναι μεγάλες. Η πεδιάδα των Μοιρών, η οποία βρίσκεται στο νησί της Κρήτης, έχει περιθωριακούς πόρους υπόγειων υδάτων που χρησιμοποιούνται ευρέως για γεωργικές δραστηριότητες και ανθρώπινη κατανάλωση. Η αξιοποίηση των υπόγειων υδάτων της λεκάνης των Μοιρών πραγματοποιείται σχεδόν αποκλειστικά από γεωτρήσεις άντλησης, γεγονός που δυσχεραίνει τον εμπλουτισμό του υδροφορέα. Επιπλέον, η μελλοντική τάση για μείωση των βροχοπτώσεων στην περιοχή μπορεί να προκαλέσει ακόμα μεγαλύτερα προβλήματα στα αποθέματα των υπόγειων υδάτων. Η μελέτη αυτή αρχικά προσομοιώνει τις υδρολογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες της λεκάνης απορροής αξιοποιώντας τα πιο πρόσφατα διαθέσιμα στοιχεία με χρήση του λογισμικού πακέτου Visual MODFLOW. Στη συνέχεια εξετάζεται η ευαισθησία του συστήματος στις ποσοτικές πιέσεις που δέχεται η περιοχή. Επιπλέον, εκτιμάται η μελλοντική κατάσταση του υπόγειου δυναμικού βάσει κλιματικών σεναρίων που έχουν αναπτυχθεί για τη περιοχή της Μεσογείου σε συνδυασμό με τις υφιστάμενες πρακτικές διαχείρισης που εφαρμόζονται στη λεκάνη των Μοιρών. Βάσει των αποτελεσμάτων της μελέτης προκύπτει ότι η λεκάνη απορροή των Μοιρών επηρεάζεται σημαντικά από τις αντλήσεις όταν ο υδροφορέας δεν εμπλουτίζεται επαρκώς. Σημαντικότερος παράγοντας που συμβάλει στην τροφοδοσία του υδροφορέα βρέθηκε ότι είναι οι επιστροφές άντλησης και όχι οι ετήσιες κατακρημνίσεις. Θεωρώντας ότι ο ταμιευτήρας της περιοχής (Φράγμα Φανερωμένης) μπορεί να λειτουργήσει σωστά, παρά την μελλοντική μείωση των βροχοπτώσεων, ο υδροφορέας της λεκάνης θα παρουσιάσει άνοδο μετά το έτος 2020.

ABSTRACT

Increased demand in water has led to overexploitation of groundwater potential. In particular, in areas with increased agricultural activity the water requirements for irrigation are high. The Mires Basin, which is located on the Island of Crete, has marginal groundwater resources that are extensively used for agricultural activities and human consumption. The exploitation of the underground waters of Mires basin is made almost exclusively by pumping wells, which makes the enrichment of the aquifer difficult. In addition, the future trend to reduce rainfall in the area can cause even greater problems in groundwater reserves. This study reviews the hydrological and hydrogeological settings of the basin with the most recent available data by using the Visual MODFLOW package software. Subsequently, sensitivity of the system to the quantitative pressures of the region is examined. In addition, the future condition of the underground potential is estimated based on climate scenarios, developed for the Mediterranean region, and based on the existing management practices applied in Mires basin. The present study findings show that Mires basin is susceptible to pumping when the aquifer is not sufficiently enriched. The most important factor contributing to the supply of the aquifer was found to be return irrigation and not annual precipitation. Considering that the reservoir of the area (Dam of Faneromeni) will work properly, despite the future reduction of precipitation, the basin aquifer will rise after the year 2020.

EXTENDED SUMMARY

The Mires valley as well as the region of the Messara Valley, is the most important rural area of Crete. Part of the island's economy and development is based on the primary (rural) sector by growing intensive aquatic crops. The dry-warm climatic conditions prevailing in the area create from these activities a staggered demand in water mainly during the summer period, which to date has been covered exclusively by the underground aquatic potential of the aquifer of Mires basin. The annual irrigation water needs for Mires valley are 5.000.000 m³.

Groundwaters of Mires basin have undergone very significant pressures the last 20 years, with most important the (quantitative) exploitation over the quality (pollution) resulting environmental and economic impacts in the area. Also, in line with the institutional framework governing water (Directive 2000/60 / EC), immediate action is needed to reverse the trends of the quantitative and qualitative negative situation in order to achieve the "good status" of the waters of Mires basin and the Messara region. Addressing and remedying this problem requires considerable time and cost. It is urgent and necessary to make sustainable use of water resources by formulating appropriate management plans. The drawing of such plans is based on the use of mathematical models to simulate the behaviour of aquifers.

This postgraduate diploma thesis studies firstly the underground flow in the region of Mires in Heraklion and then studies the sensitivity of the quantitative pressures that the area receives and estimates the quantitative status of the basin in the future using the Visual MODFLOW package software. Thesis is structured in three key parts. The first part focuses on the theoretical background with references to hydrology and the description of the study area. The second part describes the Visual MODFLOW mathematical model and presents the simulation, sensitivity analysis and the future assessment of the situation. Finally, the third part presents the results of the model, analyses the conclusions that come out and suggests proposals for good practices in the study area as well as proposals for future research.

Mires valley catchment is located in the southern-western part of the Messara basin and is formed by submerged graben from the Messara basin. It is set between the forerunners of Phaistos and Vayionia. At the eastern boundary of the basin, lateral groundwater in-flow in the basin occurs from the Vayionia basin to the east of the Mires, whereas groundwater inflow is likely to also occur from the neogenic formations to the north-northwest, while at the western boundary there are groundwater escapes to the basin of Tympaki through the strait of Phaistos. Mires basin consists of other smaller claws of different levels on which floating thick plural and alluvial formations are impacted. Although a large number of pumping wells have been blasted into the basin, they do not provide details to be used to construct its geological structure. An important role in the hydrogeological conditions of the Mires basin is played by the rifts that run through it. Mires valley catchment covers an area of 50,3 Km² and the boundaries of the hydrogeological basin are identical with the boundaries of the lowland area and are bounded by submerged graben in which the aquifers of pleistocene formations are maintained at a satisfactory thickness and alluvial deposits with good hydrogeological properties in many zones.

The groundwater calibration was carried out for the year 2008, in which there were available data for water pumping from pumping wells, hydraulic head data from the observation wells of the area, known constant head conditions for lateral inflows and groundwater escapes (drain), hydraulic conductivity data and annual rainfall. Firstly, when the model was calibrated, the necessary parameters were introduced into the model and it simulated the underground flow of the basin. The hydraulic heads that the model was computed in the observation wells were compared to the known values of the same wells and the error was calculated. In particular, the quantitative error was calculated for the calibration of the model according to the equation below.

$$\text{Error} = \frac{\text{Observed value} - \text{Calculated value}}{\text{Observed value}}\%$$

When calibrating a model, the acceptable error is up to 10%. As shown in the table below, the average value (%) of the errors in the calibration is satisfactory. Specifically, for the wet period of 2008, the average value of errors was estimated at 6%, while the average value of errors for the dry period was estimated at 7%.

Table 1 Calibration results and errors

Observation Well	Hydraulic head data (m)		Calibration results (m)		Error (%)	
	0 - 180 days	180 - 360 days	0 - 180 days	180 - 360 days	0 - 180 days	180 - 360 days
M3	44,27	26,7	45,37	23,51	2%	12%
M6	42,37	21,8	45,75	22,59	8%	4%
M11	56,41	37,3	56,64	39,77	0%	7%
99	61,27	46,6	59,3	44,29	3%	5%
M7	48,96	35,1	52,4	39,11	7%	11%
M8	70,17	54,7	70,9	53,47	1%	2%
M-A2	45,98	30,6	47,82	27,19	4%	11%
M1	47,35	29,4	49,23	29,91	4%	2%
M12	30,27	19,7	36,19	19,94	20%	1%
M4	31,8	16,8	35,29	19,05	11%	13%
M5	35,42	20,8	33,96	18,41	4%	11%
A.V.					6%	7%

The model was validated for the year 2009 for which we have known rainfall and hydraulic heads data from the observation wells. The results of the model were compared with the known hydraulic heads of the observation wells and the error calculated based on the above equation. The acceptable error when validating a model is 20%. The following table shows the results of the model validation as well as the calculated errors.

Table 2 Validation results

Observation Well	Hydraulic head data (m)		Validation results (m)		Error (%)	
	360 - 540 days	540 - 720 days	360 - 540 days	540 - 720 days	360 - 540 days	540 - 720 days
M3	45,4	21,45	46,82	22,84	3%	6%
M6	46,8	23,75	47,39	22,46	1%	5%
M11	55,14	41,2	56,67	39,55	3%	4%
99	58,35	45,68	59,19	44,17	1%	3%
M7	51,78	40,1	53,17	39,63	3%	1%
M8	69,84	52	70,58	53,20	1%	2%
M-A2	50,57	25	51,14	25,98	1%	4%
M1	54,65	26,58	53,43	28,10	2%	6%
M12	38,88	20,24	38,26	19,30	2%	5%
M4	36,45	18,72	37,21	18,28	2%	2%
M5	34,25	16,75	35,86	17,68	5%	6%
A.V.					2%	4%

From this process firstly emerged that the model is reliable as it simulates the system of the Mires valley catchment correctly and gives values similar to the real ones. It is therefore suitable to estimate the status of groundwater in the future, for years which no data are available.

Through the process of calibration and validation of the model, known facts for the study area were confirmed regarding the direction of the underground flow, the water speeds and the hydraulic heads in parts of the area of greatest interest. More specifically, the direction of water flow follows the course from east to west with higher flow rates in the eastern part. Higher hydraulic heads values occur at the eastern boundary of the basin where there are lateral groundwater in-flows from the Vayionia basin, while lower values take the western boundary where we have groundwater escapes (leaks) to the Tympaki basin via the strait of Phaistos. Subsequently, the model continued the simulation until the year 2018 where there were known available data on annual rainfall. Until 2017, the results of the model for each year showed a similar situation to previous years.

For the year 2018, which was expected to cover a large part of the needs of the reservoir water the dam of Faneromeni, pumpings were modified. In particular, the water level of the reservoir was reduced considerably and it was not feasible to supply water to the area. Also, the year 2018 it is a dry year with reduced rainfall. According to the local Organization of Rehabilitation Organization (TOEB) in the area, the needs would also be covered by the private pumping wells in the area, which we had not included in the model. However, the pumpings of the private wells were known and so we could incorporate them into the existing pumping wells. Therefore, we increased the volume of pumping water by 80%. The results of this year showed a decrease in the aquifer level in the central part by 8 m in the wet period and by 16.5 m in the dry period. In addition, during the dry period the level at the western boundary was reduced by 7 m. Following measurements made in July 2018 in the central part of the basin at wells B (B1, B6 etc.), the hydraulic head in this area was 6.5 m. This value is also confirmed by the model. The following figure shows the dry period of year 2018, where the 6.5 m equipotential head is observed, as well as the ground water flow data mentioned above.

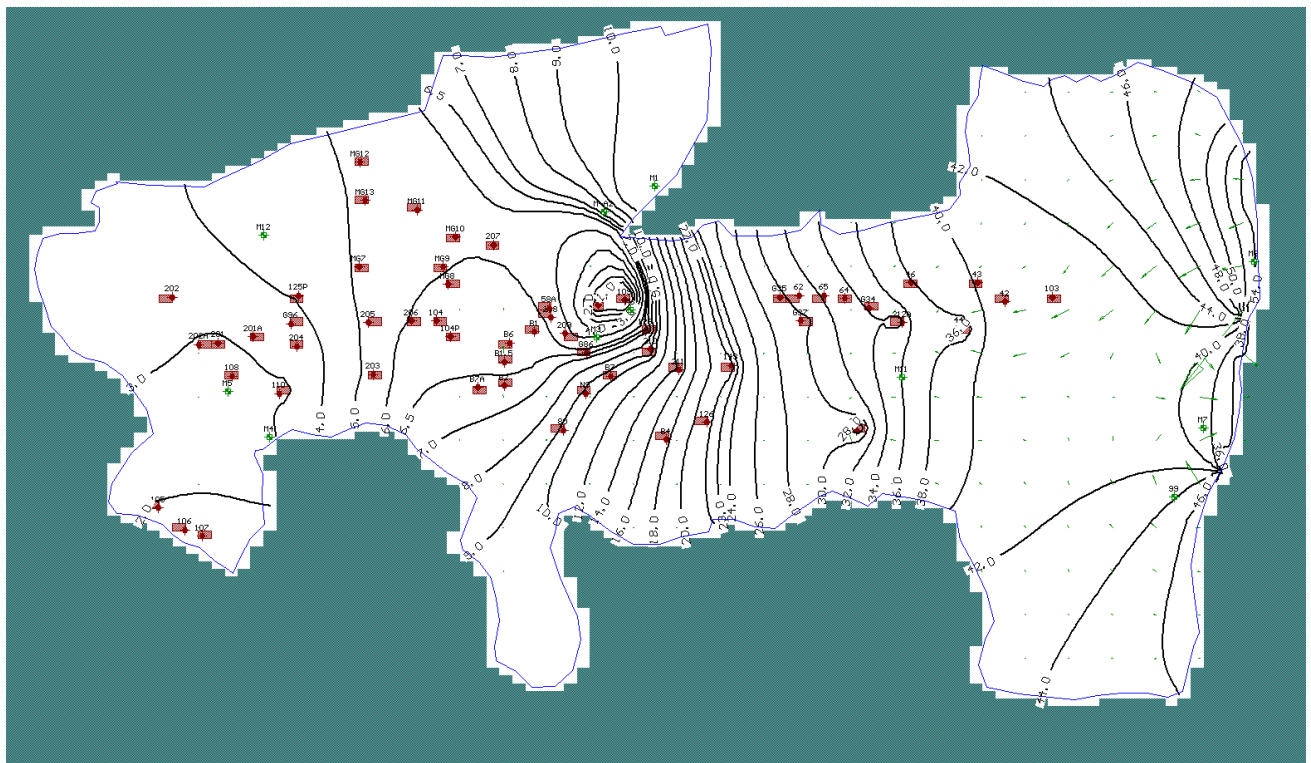


Figure 1 Dry period 2018

Subsequently, the sensitivity of the system to the quantitative pressures it receives and its quantitative status in the future was studied. The years studied were 2020-2021, 2025-2026 and 2030-2031. The annual rainfall rates were obtained from a scientific survey chart which estimates the trend of the annual rainfall in the study area by 2100. For the assessment of this trend, climatic scenarios B1, A1 and A1b were used. From other studies that characterize whether a hydrological year is wet, dry or intermediate on the basis of annual precipitation heights, desirable years were classified as wet years, but the last two years are marginal to this category. In addition, considering the River Basin Management Plan of the Water Department of Crete (GR13) and the practices of TOEB, for a wet year the needs in the area should be

covered by 80% from the reservoir of Faneromeni Dam and the remaining 20% from existing pumping wells. Therefore, in our estimation we consider that the reservoir will have water and will function adequately in the years to come. The results of the model for the examined years showed an increase in the level of the aquifer in the central part, which has the largest number of pumping wells and does not receive any lateral groundwater in-flows from another basins. Moreover, based on the results it was found that the two boundaries of the basin (east and west) maintained the hydraulic heads of the years 2008-2017. In the following table are given the hydraulic heads of the eastern, western and central section of the basin that calculated the model at the crucial years.

Table 3 Crucial years results

Crucial year	East - Wet (m)	Middle - Wet (m)	West - Wet (m)	East - Dry (m)	Middle - Dry (m)	West - Dry (m)
2020-2021	76	55	12	52	39,5	10
2025-2026	76	54	12	52	39	10
2030-2031	76	54	12	52	37,5	10
A.V.	76	54,3	12	52	38,7	10

Indicatively, in the following figure shows the simulation of the dry period of 2030 - 2031, in which the equipotential heads and the groundwater flow directions are presented.

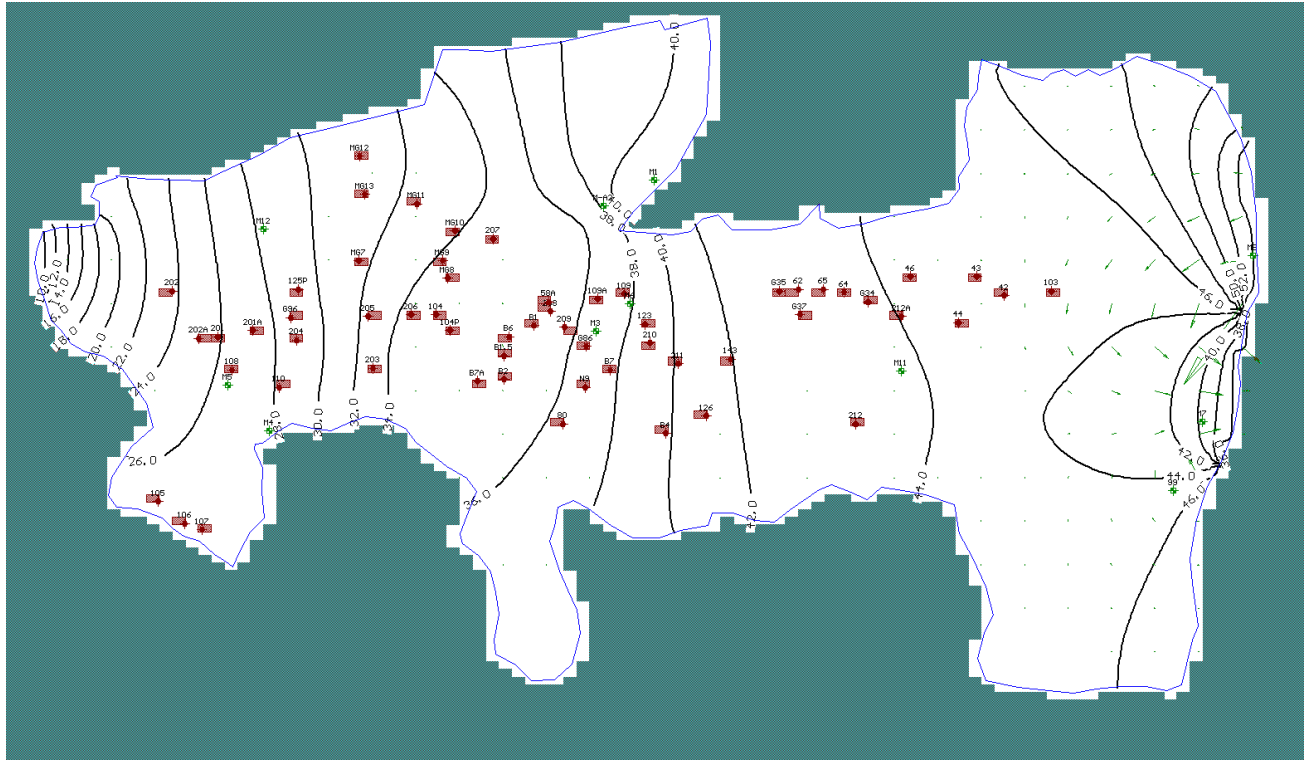


Figure 2 Dry period 2030-2031

The main conclusion that emerged from the study of this thesis is the initial sensitivity of Mires basin to the quantitative pressures it receives. Additionally, despite the fact that the trend of future rainfall is decreasing and despite the reduction in rainfall days, the model estimates that the level of the aquifer in the area will increase. This is due to the fact that the system is primarily affected by enrichment through return irrigation from the reservoir water (Dam of Faneromeni) and secondarily, by the enrichment due to precipitation. Therefore, it is necessary that the reservoir at Faneromeni dam will function properly to give water to the valley of Mires and cover the irrigation needs. In this way, the basin aquifer will be enriched and there will be sufficient water for pumping in the case of a dry year in which the needs will be covered by pumping. Therefore, the objectives set out in Directive 2000/60 / EC can be met in the future through good practices and management of the area's reservoir.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά στοιχεία

Το νερό είναι ένας φυσικός πόρος υψηλής σημασίας καθώς συνιστά έναν από τους βασικούς παράγοντες για τη ζωή και την ανάπτυξη. Η επιφάνεια της Γης καλύπτεται κατά το πλείστον με νερό σε ποσοστό περίπου 70,9% το οποίο μπορεί να είναι σε υγρή, στερεή (πάγος) ή αέρια (υδρατμός) μορφή. Το 96,5% του νερού της Γης βρίσκεται στους ωκεανούς και τις θάλασσες, το 1,7% στα επιφανειακά νερά (λίμνες, ποτάμια, έλη, κτλ.), το 1,7% στα παγοκαλύμματα και στις παγωμένες σπηλιές της Ανταρκτικής και της Γροιλανδίας, ενώ το 0,001% βρίσκεται ως υγρασία στα σύννεφα της ατμόσφαιρας. Μόνο το 2,5% του νερού της Γης είναι γλυκό και το 98,8% του πόσιμου νερού βρίσκεται στα παγοκαλύμματα και στα υπόγεια ύδατα. Λιγότερο από 0,3% του γλυκού νερού της Γης βρίσκεται σε ποτάμια, λίμνες και στην ατμόσφαιρα, ενώ ακόμα μικρότερο ποσοστό (0,003%) περιέχεται στα σώματα των βιολογικών όντων και σε ανθρώπινης παραγωγής προϊόντα (Gleick, 1993). Συνεπώς, ένα μικρό ποσοστό του γλυκού νερού υπό τη μορφή υπόγειου νερού, λιμνών και υδατορεμάτων είναι άμεσα εκμεταλλεύσιμο.

Σε παγκόσμια κλίμακα το 69% του αξιοποιήσιμου γλυκού νερού χρησιμοποιείται στην αγροτική παραγωγή κυρίως μέσω της άρδευσης. Η βιομηχανία εκμεταλλεύεται το 23% ενώ το υπόλοιπο 8% καταναλώνεται για οικιακές χρήσεις. Μέχρι το 2050, η σίτιση του πλανήτη με πληθυσμό περίπου 9 δισεκατομμυρίων ανθρώπων θα απαιτήσει 50% αύξηση της γεωργικής παραγωγής και 15% αύξηση των αντλήσεων νερού (The Data Blog, 2018). Λόγω των αυξανόμενων απαιτήσεων των ανθρώπων σε νερό για την κάλυψη των αναγκών τους, έχει παρατηρηθεί το φαινόμενο της λειψυδρίας και του περιορισμού των επιφανειακών νερών σε ποσότητα και ποιότητα σε πολλές περιοχές του πλανήτη. Η υπάρχουσα κατάσταση σε συνδυασμό με τα μελλοντικά σενάρια περί έλλειψης του πόσιμου νερού, επιτείνουν την καλύτερη δυνατή διαχείριση των υπόγειων υδάτων (Μοσχοπούλου, 2017).

Στην Ελλάδα οι υπόγειοι υδροφορείς δέχονται μεγάλες πιέσεις κυρίως λόγω της αγροτικής δραστηριότητας. Σύμφωνα με το Υπουργείο Ανάπτυξης οι ποσότητες άρδευσης έχουν διπλασιαστεί την τελευταία 20ετία, οδηγώντας στην υποβάθμιση του υπόγειου ορίζοντα. Σημαντικό πρόβλημα αποτελεί και η πληθώρα μη αδειοδοτούμενων γεωτρήσεων που επιβαρύνει το πρόβλημα και την αντιμετώπισή του. Επομένως κρίνεται αναγκαία, η ορθή εφαρμογή των σχεδίων διαχείρισης των υπογείων υδάτων, προκειμένου να καλύπτονται οι ανάγκες σε διαθέσιμο νερό με την προϋπόθεση της αειφόρου διατήρησης του πόρου.

1.2 Υδρολογικός κύκλος

Ο υδρολογικός κύκλος, ή αλλιώς ο κύκλος του νερού, περιγράφει την παρουσία και την κυκλοφορία του νερού στην επιφάνεια της Γης, καθώς και κάτω και πάνω απ' αυτή. Κατά τη διάρκεια του κύκλου, το νερό μεταπίπτει σε όλες τις δυνατές καταστάσεις, την υγρή, στερεά (χιόνι, χαλάζι) και την αέρια (υδρατμοί). Μέσω του κύκλου αυτού, πραγματοποιείται μεταφορά νερού, προσωρινή αποθήκευσή του και μεταβολή της κατάστασής του (Water.usgs.gov, 2016).

Σαν κύκλος που είναι, ο υδρολογικός κύκλος δεν έχει αρχή, αλλά προς δική μας διευκόλυνση θα θεωρήσουμε ως αρχή του κύκλου τη θάλασσα ώστε να περιγραφεί η κίνηση του νερού. Ο ήλιος θερμαίνει το νερό της θάλασσας το οποίο εν μέρη εξατμίζεται και ανυψώνεται με τη μορφή ατμού στον αέρα. Νερό εξατμίζεται ακόμα από τις λίμνες, τα ποτάμια και το έδαφος. Η διαπνοή των φυτών είναι μία ακόμη λειτουργία που αποδίδει υδρατμούς στην ατμόσφαιρα. Η εξατμηση και διαπνοή από την ξηρά συχνά δεν διακρίνονται και έτσι μιλούμε για εξατμισοδιαπνοή. Μια μικρή ποσότητα υδρατμών στην ατμόσφαιρα προέρχεται από την εξάχνωση, μέσω της οποίας μόρια από πάγους και χιόνια μετατρέπονται απευθείας σε υδρατμούς χωρίς να περάσουν από την υγρή μορφή. Ανοδικά ρεύματα αέρα ανεβάζουν τους υδρατμούς στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, όπου οι μικρότερες πιέσεις που επικρατούν έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της θερμοκρασίας. Επειδή όμως σε χαμηλή θερμοκρασία ο αέρας δεν μπορεί πια να συγκρατεί όλη τη μάζα των υδρατμών, ένα μέρος τους συμπυκνώνεται και σχηματίζει τα σύννεφα. Τα ρεύματα του αέρα κινούν τα σύννεφα γύρω απ' την υδρόγειο. Παράλληλα τα σταγονίδια νερού που σχηματίζουν τα σύννεφα συγκρούονται και μεγαλώνουν, και τελικά πέφτουν απ' τον ουρανό ως κατακρημνίσματα, η συχνότερη μορφή των οποίων είναι η βροχή. Ως ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις εννοούνται όλες οι μορφές με τις οποίες το νερό φτάνει στη γη όπως βροχή, χαλάζι, χιόνι κτλ. Η μεγαλύτερη ποσότητα κατακρημνισμάτων πέφτει απευθείας στους ωκεανούς. Από την ποσότητα που πέφτει στη στεριά, ένα σημαντικό μέρος καταλήγει και πάλι στους ωκεανούς ρέοντας υπό την επίδραση της βαρύτητας, ως επιφανειακή απορροή. Η μεγαλύτερη ποσότητα της επιφανειακής απορροής μεταφέρεται στους ωκεανούς από τα ποτάμια, με τη μορφή ροής σε υδατορέματα. Η επιφανειακή απορροή μπορεί ακόμη να καταλήξει στις λίμνες, που αποτελούν, μαζί με τους ποταμούς, τις κυριότερες αποθήκες γλυκού νερού. Ωστόσο, το νερό των κατακρημνισμάτων δεν ρέει αποκλειστικά μέσα στους ποταμούς. Κάποιες ποσότητες διαπερνούν το έδαφος με τη λειτουργία της διήθησης και σχηματίζουν το υπόγειο νερό. Μέρος του νερού αυτού μπορεί να ξαναβρεί το δρόμο του προς τα επιφανειακά υδάτινα σώματα (και τους ωκεανούς) ως εκφόρτωση υπόγειου νερού. Όταν βρίσκεται διόδους προς την επιφάνεια της γης εμφανίζεται με τη μορφή πηγών. Ένα άλλο μέρος του υπόγειου νερού πηγαίνει βαθύτερα και εμπλουτίζει τους υπόγειους υδροφορείς, οι οποίοι μπορούν να αποθηκεύσουν τεράστιες ποσότητες νερού για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Ακόμα και το νερό αυτό όμως συνεχίζει να κινείται και με τη πάροδο του χρόνου μέρος του ξαναμπαίνει στους ωκεανούς όπου ο κύκλος του νερού ολοκληρώνεται και ξεκινάει εκ νέου (Water.usgs.gov, 2016).

Οι διεργασίες του υδρολογικού κύκλου που αναλύθηκαν παραπάνω, απεικονίζονται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα: 1 Υδρολογικός Κύκλος (<https://water.usgs.gov/edu/watercyclegreek.html>)

1.3 Υδρολογικό Ισοζύγιο

Υδρολογικό ισοζύγιο ονομάζουμε τη μαθηματική έκφραση που διέπει τη διατήρηση της μάζας του νερού για έναν συγκεκριμένο όγκο ελέγχου. Η εξίσωση προκύπτει από τη διαφορά της εισροής και της εκροής σε μία λεκάνη απορροής με το ρυθμό αλλαγής της αποθήκευσης του νερού στη λεκάνη σε καθορισμένο χρόνο.

$$\Delta M = M_{in} - M_{out} \quad (1)$$

Όπου ΔM : η μεταβολή της περιεχόμενης μάζας για ένα χρονικό διάστημα

M_{in}, M_{out} : η εισρέουσα και εκρέουσα μάζα αντίστοιχα από τον όγκο ελέγχου για το χρονικό διάστημα που μελετάται.

Η κυκλοφορία και κατανομή του νερού στην ατμόσφαιρα και τη γη, εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση, που αποτελεί την γενική αναλυτική εξίσωση του υδρολογικού ισοζυγίου:

$$P = R + E + I \quad (2)$$

Όπου P: τα ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις
R: η επιφανειακή απορροή
E: η πραγματική εξατμισοδιαπνοή
I: η κατεΐσδυση

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις περιλαμβάνονται όλες οι μορφές (βροχή, χιόνι, χαλάζι κτλ.) με τις οποίες τα μετεωρικά ύδατα μπορούν να επιστρέψουν από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της Γης. Όλες οι μορφές των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων ανάγονται σε ισοδύναμο ύψος βροχής (Καρατζάς, 2012).

Με τον όρο επιφανειακή απορροή ονομάζουμε την κίνηση του νερού κατά μήκος του εδαφικού ανάγλυφου λόγω βαρύτητας. Το νερό προέρχεται από τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις και ποτίζει το έδαφος. Όταν το σύνολο των πόρων του εδάφους καταλαμβάνεται από νερό, τότε το νερό ρέει πραγματοποιώντας κατακόρυφη κίνηση. Το ένα τρίτο των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων καταλήγει στη θάλασσα, ενώ το υπόλοιπο είτε εξατμίζεται είτε διηθείται. Ένα μέρος της επιφανειακής απορροής χρησιμοποιείται από τον άνθρωπο για την κάλυψη των αναγκών του (Perlman, 2005).

Η επιφανειακή απορροή εξαρτάται από μία σειρά παραγόντων οι κυριότεροι από τους οποίους είναι οι ακόλουθοι (Τσιούνια, 2012):

- Η διαπερατότητα των σχηματισμών που αναπτύσσονται στην λεκάνη απορροής (δηλαδή αν είναι υδροπερατοί ή αδιαπέρατοι)
- Ο βαθμός κορεσμού των σχηματισμών
- Η διάρκεια, η ένταση και η κατανομή των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων
- Η βλάστηση
- Η κλίση της μορφολογίας της λεκάνης
- Η γεωμετρία του υδρογραφικού δικτύου
- Το βάθος της ελεύθερης επιφάνειας του υπόγειου νερού
- Οι ανθρώπινες επεμβάσεις

Η διαδικασία της εξατμισοδιαπνοής του νερού είτε από φυτοκαλυμμένες ή μη επιφάνειες εδάφους είτε από ελεύθερες υδάτινες επιφάνειες, αποτελεί μια από τις σημαντικότερες συνιστώσες του κύκλου του νερού. Η εξάτμιση αποτελεί το φαινόμενο κατά το οποίο τα μόρια ενός σώματος μεταπίπτουν από την υγρή ή στερεά φάση στην αέρια. Με τον όρο διαπνοή περιγράφεται η διαδικασία κατά την οποία τα φυτά απορροφούν νερό από το έδαφος μέσω των ριζών τους και στη συνέχεια το μεταβιβάζουν πίσω στην ατμόσφαιρα με την μορφή υδρατμών από τα στόματα των φυλλωμάτων τους. Η διαπνοή διαφέρει από την εξάτμιση, διότι τα φυτά έχουν την δυνατότητα να ελέγχουν την ποσότητα του νερού που διαπνέεται από το φύλλωμά τους. Ως πραγματική εξατμισοδιαπνοή E, ορίζεται η ταυτόχρονη εξάτμιση από το έδαφος και η διαπνοή των φυτών, κατά την οποία αφαιρείται ποσότητα νερού από μια καλλιεργούμενη επιφάνεια. Παρατηρούνται διαφορές στον ρυθμό εξατμισοδιαπνοής μεταξύ των καλλιεργειών,

καθώς αυτή επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Καθοριστικό ρόλο παίζει το είδος της καλλιέργειας, η φυτοκάλυψη του εδάφους, το στάδιο ανάπτυξής της, η θερμοκρασία εδάφους και αέρα, η υγρασία, η ταχύτητα του ανέμου, η ηλιακή ακτινοβολία, το πορώδες κ.ά. Η κατείσδυση I περιγράφει την ποσότητα των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, η οποία διαπερνά το έδαφος και καταλήγει στα υπόγεια υδροφόρα στρώματα. Με την διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται η ανανέωση των αποθεμάτων των υπόγειων υδροφορέων, συμβάλλοντας έτσι στην υδροοικονομία της περιοχής. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την κατείσδυση μιας περιοχής είναι η υγρασία του εδάφους, η γεωλογική δομή, η φυτοκάλυψη, η ένταση και κατανομή των βροχοπτώσεων (Μπαλτάς, 2017).

1.4 Αναγκαιότητα εκπόνησης μελέτης

Τα υπόγεια ύδατα αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους πόρους, διότι εξασφαλίζουν τις ανάγκες τόσο σε πόσιμο νερό όσο και άλλων χρήσεων όπως είναι η άρδευση. Λόγω της αυξανόμενης ζήτησης, έχει παρατηρηθεί η ποσοτική και ποιοτική υποβάθμιση των υπόγειων υδάτων, επηρεάζοντας άμεσα ή έμμεσα τον άνθρωπο και τα οικοσυστήματα που εξαρτώνται από αυτά. Η αντιμετώπιση και αποκατάσταση του προβλήματος αυτού απαιτούν αρκετό χρόνο και σημαντικό κόστος. Καθίσταται άμεση και αναγκαία η αειφορική αξιοποίηση των υδατικών πόρων με τη διαμόρφωση κατάλληλων σχεδίων διαχείρισης. Η κατάρτιση τέτοιων σχεδίων βασίζεται στη χρήση μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης της συμπεριφοράς του υδροφορέα.

Η αυξημένη ζήτηση σε νερό έχει οδηγήσει στην υπερεκμετάλλευση του υπόγειου υδατικού δυναμικού. Στις μεσογειακές χώρες ιδιαίτερα όπου το κλίμα τους χαρακτηρίζεται από χαμηλά ύψη βροχόπτωσης, η ανάπτυξη των καλλιεργειών και η άρδευσή τους βασίζεται σχεδόν αποκλειστικά στα υπόγεια ύδατα. Λόγω της μικρής διάρκειας των βροχοπτώσεων, η περίοδος άντλησης από τον υπόγειο υδροφορέα είναι μεγάλη (6-8 μήνες) και ο ρυθμός άντλησης ανεξέλεγκτος και μη ορθολογικός, με συνέπειες τόσο περιβαλλοντικές όσο και οικονομικές. Η ανεξέλεγκτη άντληση των υπογείων υδάτων οδηγεί συχνά σε μείωση των αποθεμάτων του υπόγειου υδροφορέα σε σημείο τέτοιο, που να μην καθίσταται δυνατή η επαναφόρτισή του και η επαναφορά του στα αρχικά επίπεδα. Το παραπάνω πρόβλημα συναντάται στην υδρογεωλογική λεκάνη της πεδιάδας της Μεσσαράς, στην οποία εστιάζεται η παρούσα εργασία. (Αποστολάκη, 2005).

Οι δύο βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τους διαθέσιμους υδάτινους πόρους της Κρήτης είναι η εντατική γεωργία και η υψηλή τουριστική δραστηριότητα. Η γεωργία αποτελεί την βασικότερη απειλή του εδάφους, καθώς η ποσότητα του νερού που προορίζεται για άρδευση αποτελεί το 82% της συνολικής κατανάλωσης, ενώ γενικά η κατανάλωση νερού αυξάνεται κατά 4% το χρόνο (LEDDRA Project, 2013). Το πρόβλημα αυτό οξύνεται λόγω της υπεράντλησης των υπογείων υδάτων, της υπερβολικής άρδευσης, των εσφαλμένων συστημάτων άντλησης και των παρατεταμένων ξηρών κλιματολογικών συνθηκών.

Πιο συγκεκριμένα, η κύρια πηγή αρδευτικού νερού στη Μεσσαρά είναι τα υπόγεια ύδατα, αν και υπάρχει μικρή ροή επιφανειακού ύδατος κατά τους χειμερινούς μήνες (Vardavas et al., 1997). Τα υπόγεια ύδατα είναι ο βασικός πόρος που ελέγχει την οικονομική ανάπτυξη της περιοχής, καθώς η ζήτηση του νερού αυξάνεται με το χρόνο. Η αύξηση της ζήτησης νερού, είτε για οικιακή, είτε για αγροτική χρήση, δεν μπορεί πάντα να ικανοποιηθεί παρά την επαρκή κατά μέσο όρο βροχόπτωση, καθώς δεν υπάρχει ισορροπία νερού. Αυτή η ανισορροπία του νερού είναι συχνό φαινόμενο στην περιοχή εξαιτίας των χρονικών και χωρικών διακυμάνσεων της βροχόπτωσης, της αυξημένης ζήτησης νερού κατά τους θερινούς μήνες καθώς και της δυσκολίας μεταφοράς νερού από άλλες περιοχές. Εξαιτίας των διαδοχικών ξηρών ετών κατά τη δεκαετία του 1990, για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών πραγματοποιήθηκε πιο εντατική άντληση, με αποτέλεσμα το 2000 η στάθμη των υπόγειων υδάτων να φτάσει τα 45 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας (Tsanis & Apostolaki, 2008). Επιπλέον τα τελευταία χρόνια η απορροή του ποταμού Γεροπόταμου είναι σχεδόν μηδενική. Λόγω των παραπάνω, τον τελευταίο καιρό έχουν υπάρξει αυξανόμενες ανησυχίες για την πιθανή εξάντληση ή υποβάθμιση της ποιότητας των υπόγειων υδάτων στη λεκάνη της Μεσσαράς.

Η ελληνική γεωργία με την ένταξη της στην Ευρωπαϊκή Οικονομική Κοινότητα το 1981, αποτέλεσε αντικείμενο της Κοινής Αγροτικής Πολιτικής (Common Agricultural Policy, CAP). Ο στόχος της CAP μέχρι το 1992 ήταν να αυξήσει την παραγωγή και να παρέχει φθηνά αγροτικά προϊόντα που να συνοδεύονται από λογικά αγροτικά εισοδήματα. Συνέπεια αυτού ήταν η εντατικοποίηση και η εκμηχάνιση της γεωργικής παραγωγής, η αντικατάσταση ορισμένων γηγενών ποικιλιών από υβρίδια σύμφωνα με τις ανάγκες της παγκόσμιας αγοράς και η υιοθέτηση μονοκαλλιιεργειών, που οδήγησαν ως ένα βαθμό στην απώλεια της αυτάρκειας. Επιπλέον, η περιφερειακή ανάπτυξη, τα έργα υποδομής, οι πολιτικές χωροταξίας και η εφαρμογή των Ολοκληρωμένων Μεσογειακών Προγραμμάτων (Integrated Mediterranean Programmes, IMPs) έχουν επηρεάσει σημαντικά την εκμετάλλευση των φυσικών πόρων στην περιοχή της Μεσσαράς (Tsanis & Daliakopoulos, 2015).

Η πεδιάδα της Μεσσαράς αποτελεί την κύρια αγροτική περιοχή της Κρήτης, με καλλιέργειες που αρδεύονται σχεδόν εξ' ολοκλήρου από τα αντλούμενα υπόγεια ύδατα. Επιπλέον, μεγάλο κομμάτι της οικονομίας του νησιού στηρίζεται στην αγροτική δραστηριότητα της πεδιάδας της Μεσσαράς. Συνεπώς το βασικό θέμα ανησυχίας έγκειται στην υποβάθμιση των υπόγειων υδάτων της λεκάνης της Μεσσαράς, σε βαθμό τέτοιο που τα αποθέματα δεν θα επαρκούν μελλοντικά για την κάλυψη των αναγκών για άρδευση. Επίσης, η κοιλάδα της Μεσσαράς απειλείται από ερημοποίηση, λόγω της κακής διαχείρισης των υπόγειων υδάτων για άρδευση, η οποία έχει προκαλέσει πτώση της στάθμης των υπόγειων υδάτων κατά 20 m την τελευταία δεκαετία.

Η μελέτη επικεντρώνεται στην υδρογεωλογική λεκάνη των Μοιρών, που αποτελεί τμήμα της λεκάνης της Μεσσαράς, για δύο βασικούς λόγους. Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί πολύ σημαντική πτώση στάθμης του υδάτινου όγκου καθώς και πολύ υψηλή γεωργική παραγωγικότητα. Τόσο οι ανάγκες σε νερό για άρδευση, όσο και η παραγωγικότητα της ευρύτερης περιοχής, αναμένεται να αυξηθούν τα επόμενα χρόνια. Ο δεύτερος λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε η παρούσα περιοχή είναι το γεγονός ότι υπάρχει διαθεσιμότητα υδρογεωλογικών δεδομένων και συνεπώς είναι εφικτό να πραγματοποιηθούν έρευνες και μελέτες. Βάσει όλων των παραπάνω, κρίθηκε πολύ σημαντικό η παρούσα μελέτη να εκπονηθεί στην συγκεκριμένη περιοχή με σκοπό την κατάρτιση κατάλληλων σχεδίων διαχείρισης των υπόγειων υδάτων για την ευρύτερη πεδιάδα της Μεσσαράς.

2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

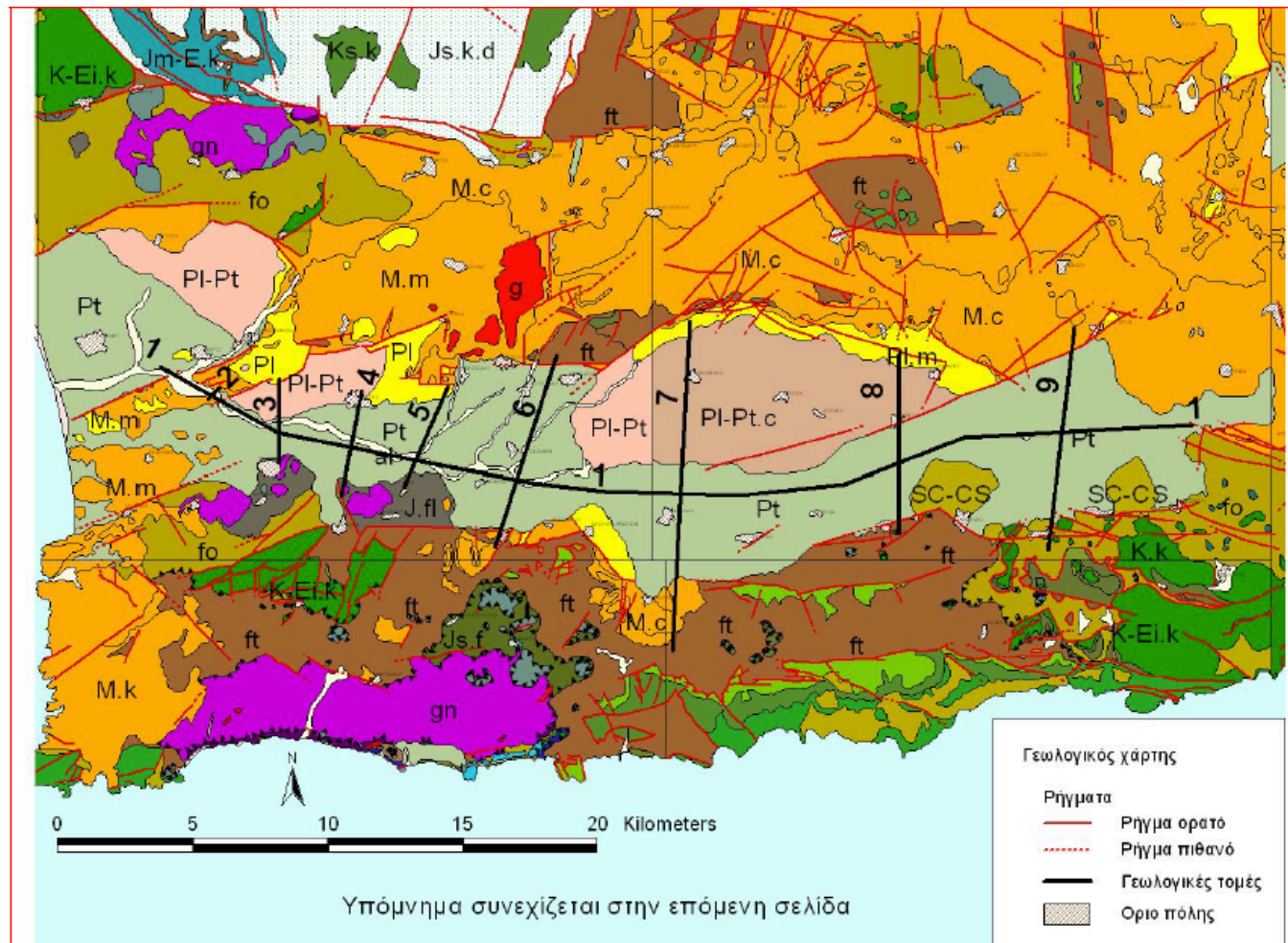
Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται αρχικά τα γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης της Μεσσαράς και στη συνέχεια παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης (περιοχή των Μοιρών) καθώς και τα βασικά χαρακτηριστικά της. Πιο συγκεκριμένα, για την περιοχή μελέτης δίνονται γενικά στοιχεία, περιγράφονται οι κλιματολογικές συνθήκες, στοιχεία του φυσικού περιβάλλοντος, η γεωλογική της δομή, οι υδρογεωλογικές συνθήκες καθώς και στοιχεία που αφορούν τη λεκάνη των Μοιρών.

2.1 Γεωλογική δομή λεκάνης Μεσσαράς

Η λεκάνη της Μεσσαράς και η ευρύτερη πεδιάδα εκτείνεται κατά διεύθυνση από τα ανατολικά προς τα δυτικά στο νότιο τμήμα της λεκάνης του Ηρακλείου. Η λεκάνη αυτή αποτελεί μια τεκτονική τάφρο που ορίζεται από τις ρηξιγενείς ζώνες Μαλεβυζίου - Καμαρών - Γέργερης στα δυτικά από τα ρήγματα Καστελίου - Χερσονήσου - Ξενιάκου (ανατολικά) και των Αστερουσίων ορέων (νότια). Αναλυτικότερα, η περιοχή μελέτης μπορεί να διακριθεί σε δυο επιμέρους τεκτονικές ενότητες. Στην πρώτη περιλαμβάνονται οι τεταρτογενείς και οι νεογενείς σχηματισμοί της λεκάνης της Μεσσαράς και στη δεύτερη ενότητα τοποθετούνται οι προνεογενείς σχηματισμοί των οροσειρών του Ψηλορείτη, της Δίκτης και των Αστερουσίων ορέων, οι οποίες καταλαμβάνουν τα όρια της λεκάνης. Στην περιοχή μπορούν να εντοπισθούν δύο τεκτονικές ενότητες, με την πρώτη να περιλαμβάνει τους τεταρτογενείς και νεογενείς σχηματισμούς της λεκάνης και την δεύτερη τους προνεογενείς σχηματισμούς των οροσειρών του Ψηλορείτη, της Δίκτης και των Αστερουσίων ορέων, που αποτελούν και τα όρια της λεκάνης της Μεσσαράς. Σύμφωνα με τη γεωλογική τομή η μελετώμενη περιοχή αποτελείται από τις παρακάτω στρωματογραφικές και τεκτονικές ενότητες (από τις νεότερες προς τις παλαιότερες) (Κριτσωτάκης, 2009):

- Ολόκαινο: Αλουβιακές αποθέσεις, προϊόντα αποσάθρωσης, καλύπτουν μικρές εσωτερικές λεκάνες καθώς και κοίτες υδρορεμάτων. Κώνοι κορημάτων και πλευρικά κορήματα.
- Πλειοστόκαινο - Ολόκαινο: ποταμολιμναία κροκαλοπαγή, άμμοι, υλιόλιθοι και αργιλικά στρώματα αποτελούμενα κυρίως από μεταφερόμενα υλικά, καλύπτοντας κυρίως το κεντρικό πεδινό τμήμα της λεκάνης.
- Ανώτερο Πλειόκαινο - Πλειοστόκαινο: Σχηματισμός της «Αγίας Γαλήνης» κυρίως στην περιοχή Μοίρες - Καλυβιανή.
- Νεογενές:
 - Κατώτερο πλειόκαινο: σχηματισμός Φοινικιάς, αποτελείται κυρίως από λευκές μάργες με παρεμβολές αργίλων και άμμων, ασβεστόλιθοι, άργιλοι, κροκαλοπαγή, εμφανίζεται βορειοανατολικά των Μοιρών.
 - Ανώτερο Τορτόνιο - Μεσσήνιο: σχηματισμός της Αγίας Βαρβάρας, αποτελείται από βιοκλαστικούς, τοπικά κροκαλοπαγείς ή λατυποπαγείς ασβεστόλιθοι, μαργαικοί ασβεστόλιθοι και εναλλαγές ασβεστικών μαργών ή μαργαικών ασβεστόλιθων με παρεμβολές γύψων. Στο ανώτερο τμήμα του σχηματισμού εντοπίζονται ψαμμίτες και κροκαλοπαγή.

-
- Τορτόνιο: σχηματισμός Αμπελούζου, ακανόνιστες εναλλαγές από θαλάσσια, υφάλμυρα, ποτάμια κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, ιλυόλιθους, μάργες και λιγνίτες).
 - Ανώτερο Σερβάλιο: σχηματισμός Σκινιά, αποτελείται από καλά στρωμένες θαλάσσιες και ιλυώδους αργίλους με παρεμβολές ψαμμιτών.
 - Μέσο Μειόκαινο: σχηματισμός Βιάννου, αποτελείται από σκούρες στρωματώδεις αργίλους με παρεμβολές ψαμμιτών και ασβεστόλιθων. Στα ανώτερα στρώματα του σχηματισμού παρατηρούνται παρεμβολές κροκαλοπαγών.
- Προνεογενείς σχηματισμοί:
 - Το νότιο τμήμα της λεκάνης της Μεσσαράς, αποτελείται από Μεσοζωικά πετρώματα και επικρατεί κυρίως ο φλύσχος και τα ανθρακικά της ζώνης της Τρίπολης. Συναντώνται επίσης έντονα ρηγματωμένοι και ελαφρώς καρστικοποιημένοι ασβεστόλιθοι της ζώνης της Πίνδου.
 - Στο βορειοδυτικό τμήμα της λεκάνης της Μεσσαράς συναντώνται μεσοζωικά πετρώματα της ενότητας της Τρίπολης, της ενότητας των Φυλλιτών - χαλαζιτών και πετρώματα της Ιονίου ζώνης, πλακώδεις ασβεστόλιθοι και ασβεστικοί σχιστόλιθοι. Στα χαμηλότερα υψόμετρα εντοπίζονται πλευρικά κορήματα (λατύπες)



Σχήμα: 2 Γεωλογικός χάρτης λεκάνης Μεσσαράς (Κριτσοτάκης, 2009)

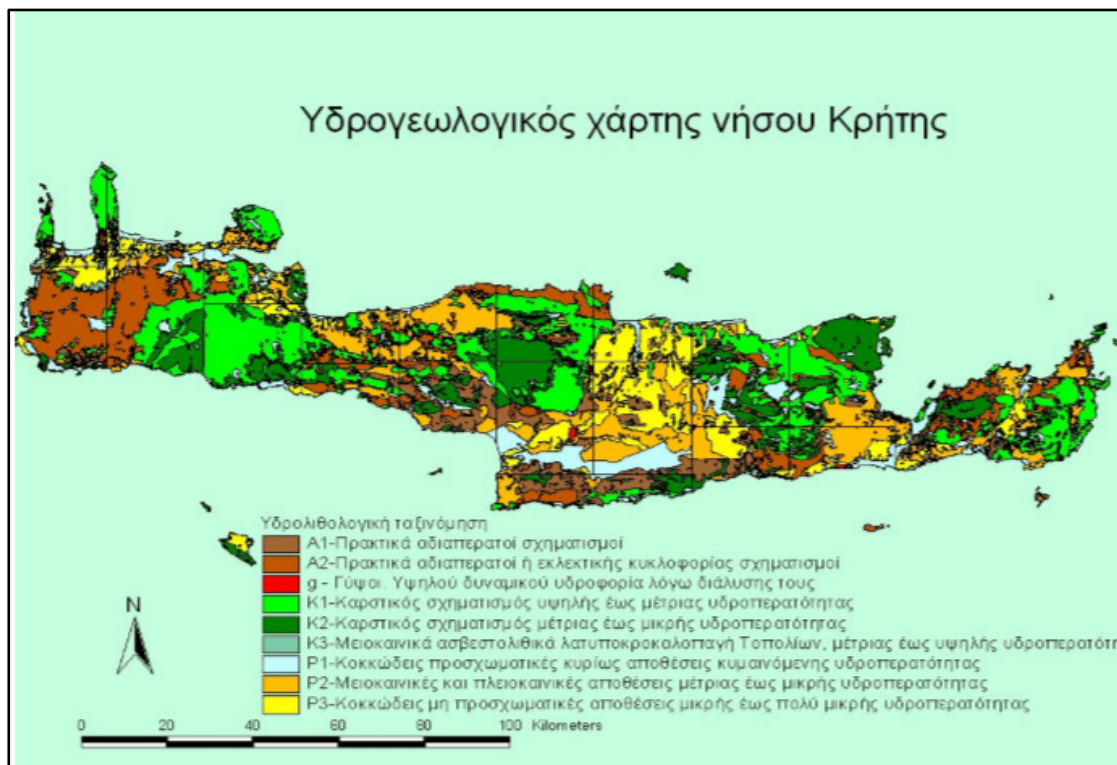
Απόσπασμα υπομνήματος γεωλογικού χάρτη	
	ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ
cd	Παράκτιες αποθέσεις.
al	Αλλουβιακές αποθέσεις.
SC-CS	Πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων.
Pt	Πλειστόκαινο αδιαίρετο (κροκαλολατυποπαγή, άμμοι, μάργες, ψαμμίτες, άργιλοι, βιοκλαστικοί ασβεστόλιθοι)
	ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ - ΝΕΟΓΕΝΕΣ
PI-Pt	Κυρίως μάργες, αλλά και άμμοι, κροκαλοπαγή κλπ.
PI-Pt.c	Σχηματισμός Αγ. Γαλήνης. Κροκαλοπαγή, άμμοι, ιλυόλιθοι, άργιλοι.
	ΝΕΟΓΕΝΕΣ
PI	Πλειοκαινικές αποθέσεις. Κατά θέσεις επικράτηση των μαργών (m), των μαργαϊκών ασβεστολίθων (k) και των κροκαλοπαγών (c).
M	Μειοκαινικές αποθέσεις. Κατά θέσεις επικράτηση των μαργών (m), των μαργαϊκών ασβεστολίθων (k) και των κροκαλοπαγών (c).
M.br	Λατυποκροκαλοπαγή Τοπολίων (Μειόκαινο)
	ΑΛΠΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ
o	Οφιόλιθοι. Σερπεντινίτες, περιδοτίτες, διαβάσες, διορίτες και αμφιβολίτες.
	ΚΑΛΥΜΜΑ ΑΣΤΕΡΟΥΣΙΩΝ
gn	Γνεύσιοι αμφιβολίτες και χαλαζίτες με ενδιαστρώσεις μαρμάρων.
	ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΛΥΜΜΑ ΖΩΝΗΣ ΠΙΝΔΟΥ
fo	Φλύσχος.
K-Ei.k	Ασβεστόλιθοι πλακώδεις, με κονδύλους και ενστρώσεις πυριτολίθων και λεπτές ενστρώσεις αργιλικών σχιστολίθων.
	ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΛΥΜΜΑ ΖΩΝΗΣ ΤΡΙΠΟΛΗΣ
ft	Φλύσχος.
E.k, P-E.k, Ks-E.k, Ks.k, Js-K.k,d, Js.k, T-E.k,d, T-Js.k, T.d	Ασβεστόλιθοι (k) και δολομίτες (d).
T.sch	Ασβεστιτικοί μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι σε εναλλαγές με λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθους.
	ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΛΥΜΜΑ ΦΥΛΛΙΤΩΝ – ΧΑΛΑΖΙΤΩΝ
Ph	Φυλλίτες, χαλαζίτες, σχιστόλιθοι.
	ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΛΥΜΜΑ ΟΜΑΛΟΥ – ΤΡΥΠΑΛΙΟΥ
Ts-Ji.mr,d	Ανθρακικά Τρυπαλίου. Περιλαμβάνει ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους έως μάρμαρα, δολομίτες,
	ΑΥΤΟΧΘΟΝΗ ΣΕΙΡΑ - ΙΟΝΙΟΣ ΖΩΝΗ
E.fi	Ασβεστιτικοί σχιστόλιθοι με λεπτές ενδιαστρώσεις ψαμμιτών και κρυσταλλικών ασβεστολίθων.
Jm-E.k	Πλακώδεις ασβεστόλιθοι (Plattenkalk), ανακρυσταλλωμένοι, κατά θέσεις μάρμαρα.
J.sch	Σχιστόλιθοι, ανθρακικοί, χαλαζιακοί, αργιλικοί.
Ts-Ji.k,d	Ασβεστόλιθοι και δολομίτες με λεπτές φυλλιτικές διαστρώσεις και οριζόντες συνεκτικών λατυποπαγών.
g	Γύψος.

Σχήμα: 3 Απόσπασμα γεωλογικού χάρτη λεκάνης Μεσσαράς

2.2 Υδρογεωλογικές συνθήκες Μεσσαράς

2.2.1 Υδρογεωλογία

Οι υδρογεωλογικές συνθήκες μιας περιοχής εξαρτώνται άμεσα από τις αντίστοιχες γεωλογικές, τεκτονικές και μορφολογικές συνθήκες. Η τεκτονική δομή και η στρωματογραφία (εναλλαγές διαπερατών και αδιαπέρατων σχηματισμών) συμμετέχουν στη διαμόρφωση και στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των υδρογεωλογικών λεκανών. Με βάση, αρχικά, την υδρολιθολογική ταξινόμηση των γεωλογικών σχηματισμών και σε συνδυασμό με τους προαναφερόμενους παράγοντες γίνεται ο διαχωρισμός της νήσου Κρήτης σε τρεις κύριες υδρογεωλογικές ενότητες: α) των καρστικών (ανθρακικών) συστημάτων β) των πορωδών σχηματισμών και γ) των αδιαπέρατων πετρωμάτων (Περλέρος κα 2003). Στο σχήμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται ο υδρογεωλογικός χάρτης της Κρήτης.



Σχήμα: 4 Υδρογεωλογικός Χάρτης Κρήτης, Διαχειριστική Μελέτη Κρήτης (Κριτσωτάκης, 2009)

Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον από υδρογεωλογική άποψη παρουσιάζουν οι τρεις μεγάλες σε έκταση ανθρακικές ενότητες που αναπτύσσονται στους ορεινούς όγκους των Λευκών Ορέων, του Ψηλορείτη και της Δίκτης – Σελένας και δευτερευόντως οι καρστικές ενότητες Σητείας. Οι ασβεστολιθικοί αυτοί όγκοι τροφοδοτούν μεγάλο αριθμό αξιόλογων πηγών στην περίμετρο τους.

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό στην Κρήτη είναι η ύπαρξη μεγάλων παράκτιων και υποθαλάσσιων υφάλμυρων καρστικών πηγών μαζί με τις αντίστοιχα μεγάλες καρστικές πηγές με καλής ποιότητας υπόγειο νερό. Η ανυπαρξία γεωλογικών φραγμών στις εκτεταμένες ανθρακικές εμφανίσεις προς τη θάλασσα σε συνδυασμό με παλαιογεωγραφικά αίτια έχουν συντελέσει στην υφαλμύριση σημαντικών καρστικών υδροφορέων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ιδιαίτερο ρόλο διαδραματίζουν στην εμφάνιση των πηγών η ύπαρξη των ρηξιγενών ζωνών καθώς οι φυσικές πηγές τόσο των καρστικών συστημάτων όσο και των προσχωματικών υδροφορέων κείνται πάνω σε ρήγματα (Κριτσωτάκης, 2009).

2.2.2 Ταξινόμηση υδρογεωλογικών ενοτήτων Κρήτης

Με βάση το σύστημα ταξινόμησης των σχηματισμών δίνεται στον ακόλουθο πίνακα η κατάταξη των διάφορων σχηματισμών καθώς και το εύρος των συντελεστών κατείσδυσης.

Πίνακας 1 Ταξινόμηση υδρογεωλογικών ενοτήτων της νήσου Κρήτης (Παπαρηγορίου κα 2001, Περγέρου 2003)

Λιθολογική κατάταξη	Κατείσδυση (%)
Ανθρακικοί σχηματισμοί	
Καρστικοί σχηματισμοί υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας (K1)	50 - 55
Μειοκαινικά ασβεστολιθικά λατυποκροκαλοπαγή, μέτριας έως υψηλής υδροπερατότητας (K3)	55
Καρστικοί σχηματισμοί μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (K2)	40 - 45
Πορώδεις σχηματισμοί	
Κοκκώδεις προσχωματικές κυρίως αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας (Π1)	20
Μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (Π2)	25
Κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας (Π3)	10
Αδιαπέρατοι σχηματισμοί	
Πρακτικά αδιαπέρατοι σχηματισμοί μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας (A1)	5
Πρακτικά αδιαπέρατοι ή εκλεκτικής κυκλοφορίας σχηματισμοί μικρής έως πολύ μικρής διαπερατότητας (A2)	5 - 8

2.2.2.1 Ανθρακικοί σχηματισμοί

Σε αυτούς τους σχηματισμούς η κυκλοφορία του νερού γίνεται μέσω του δευτερογενούς πορώδους (ρωγμές, καρστικά κενά). Διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες (Κριτσωτάκης, 2009):

- Υψηλής ως μέτριας διαπερατότητας (Κ1) ασβεστόλιθοι, δολομίτες, κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, μάρμαρα υψηλής ως μέτριας υδροπερατότητας. Σε αυτά τα συστήματα αναπτύσσονται υψηλού δυναμικού υπόγειες υδροφορίες, οι οποίες εκφορτίζονται μέσω μεγάλων καρστικών πηγών.
- Μέτριας ως μικρής υδροπερατότητας (Κ2) ασβεστόλιθοι μέτριας ως μικρής υδροπερατότητας. Η κυκλοφορία του νερού στους σχηματισμούς αυτούς ελέγχεται από τις παρεμβολές πυριτόλιθων, κερατόλιθων και αργιλικών σχιστόλιθων. Αναπτύσσονται μέσου ως μικρού δυναμικού υπόγειες υδροφορίες.
- Μεικταινικά ασβεστολιθικά λατυποκροκαλοπαγή μέτριας ως υψηλής υδροπερατότητας (Κ3), παρουσιάζουν τόσο πρωτογενές όσο και δευτερογενές πορώδες. Αναπτύσσονται σημαντικές υδροφορίες που εκφορτίζονται μέσω αξιόλογων πηγών.

2.2.2.2 Πορώδεις σχηματισμοί

Σε αυτούς τους σχηματισμούς η κυκλοφορία του νερού γίνεται μέσω του πρωτογενούς πορώδους (πορώδες κόκκων). Διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες (Κριτσωτάκης, 2009):

- Κοκκώδεις προσχωματικές αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας (Π1), κατατάσσονται κυρίως αλλουβιακές αποθέσεις, οι ποτάμιες και θαλάσσιες αναβαθμίσεις, τα κροκαλοπαγή. Στους σχηματισμούς αυτούς αναπτύσσονται αξιόλογες φρεάτιες υδροφορίες.
- Μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας ως μικρής υδροπερατότητας (Π2), εντάσσονται κροκαλοπαγή και μαργαικοί ασβεστόλιθοι των νεογενών σχηματισμών. Εντοπίζονται στις παρυφές ορεινών ασβεστολιθικών όγκων και κάποιες φορές τροφοδοτούνται από αυτούς αν το επιτρέπει η πιεζομετρία της περιοχής. Αναπτύσσονται και σε αυτούς τους σχηματισμούς υδροφορίες μέσου ως μικρού δυναμικού.
- Κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις μικρής ως πολύ μικρής υδροπερατότητας (Π3), εδώ κατατάσσονται πλειοκαινικές και μειοκαινικές μάργες όπως και ο αδιαίρετος σχηματισμός του νεογενούς. Αναμένεται η ανάπτυξη υδροφοριών στον αδιαίρετο σχηματισμό.

2.2.2.3 Αδιαπέρατοι σχηματισμοί

- Πρακτικά αδιαπέρατοι σχηματισμοί μικρής ως πολύ μικρής υδροπερατότητας (A1), κατατάσσονται οι σχηματισμοί του φλύσχη και αργίλικα ιζήματα. Αναπτύσσονται κατά τόπους υδροφορίες μικρού ως μέσου δυναμικού.
- Πρακτικά αδιαπέρατοι ή εκλεκτικής κυκλοφορίας σχηματισμοί μικρής έως πολύ μικρής διαπερατότητας (A2), περιλαμβάνονται μεταμορφωμένα και πυριγενή πετρώματα. Αναπτύσσονται και εδώ επιμέρους τοπικού χαρακτήρα υδροφορίες (Κριτσωτάκης, 2009).

2.2.3 Ισοζύγια υδρογεωλογικών ενοτήτων Κρήτης

Με βάση τα επιμέρους ισοζύγια των υδρογεωλογικών ενοτήτων και λεκανών που αναπτύσσονται στην Κρήτη προέκυψε ο παρακάτω πίνακας στον οποίο παρουσιάζονται ανά είδος υδροφορέα ο μέσος όγκος κατακρημνισμάτων και οι μέσες ετήσιες διακινούμενες υπόγειες ποσότητες νερού για το σύνολο των υδρογεωλογικών ενοτήτων της Κρήτης (Περλέρος Β. κα, 2003).

Συγκεντρωτικά για το σύνολο της Κρήτης, στις ανωτέρω εμφανίσεις συνολικής έκτασης 6.303 km², διακινούνται υπογείως κατά μέσο όρο περί τα 2.233·10⁶ m³/έτος. Από τις παράκτιες καρστικές λεκάνες ένα μέρος των ανωτέρω διακινούμενων υπογείως ποσοτήτων αναμειγνύεται στους κατώτερους παράκτιους ορίζοντες με θαλασσινό νερό και απορρέει ως υφάλμυρο. Οι κύριες υφάλμυρες πηγές, των οποίων η παροχή τους παρακολουθείται, διακινούν ετησίως περί τα 450·10⁶ m³/έτος. Εκτιμάται ότι η συνολική ποσότητα υφάλμυρου νερού μαζί με τις υποθαλάσσιες εκφορτίσεις ανέρχεται σε 800-1.000·10⁶ m³/έτος (Περλέρος Β. κα 2003).

Η συνολική έκταση της Κρήτης που περιλαμβάνει και τα μικρά νησιά ανέρχεται σε 8.341,51 km². Η υπόλοιπη έκταση των περίπου 2.000 km² που υπολείπεται με βάση το άθροισμα των υδρογεωλογικών λεκανών αναφέρεται κυρίως στα αναπτύγματα των φυλλιτών – χαλαζιτών και φλύσχη αλλά και σε μικρές εμφανίσεις ανθρακικών και κοκκωδών σχηματισμών (νεογενή – τεταρτογενή) που δεν συνδέονται με τις ανωτέρω λεκάνες.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται το μέσο ετήσιο υδρολογικό ισοζύγιο των κύριων υδρολογικών ενοτήτων της Κρήτης.

Πίνακας 2 Μέσο ετήσιο υδρολογικό ισοζύγιο κύριων υδρολογικών ενοτήτων Κρήτης (Κριτσωτάκης, 2009)

Είδος υδροφορέα	Μέσος όγκος κατακρημνισμάτων/μέσες ετήσιες διακινούμενες υπόγειες ποσότητες
Καρστικές εμφανίσεις που περιλαμβάνουν τις επιμέρους υδρογεωλογικές ενότητες, έκτασης 2.730 km ²	Δέχονται μέσο ετήσιο ύψος βροχής 1300 mm και διακινούνται υπογείως 1.788·10 ⁶ m ³ /έτος με μέσο συντελεστή κατείσδυσης 50%
Νεογενείς – Προσχωματικές εμφανίσεις έκτασης 2.597 km ²	Δέχονται μέσο ετήσιο ύψος βροχής 693 mm και διακινούνται υπογείως 365·10 ⁶ m ³ /έτος με μέσο συντελεστή κατείσδυσης 20%
Άλλες πολύμεικτες υδροφορίες (Βιάννου, Αχεντριά, Αντισκάρι, Παλαιόχωρα) έκτασης 976 km ²	Δέχονται μέσο ετήσιο ύψος βροχής 780 mm και διακινούνται υπογείως 80·10 ⁶ m ³ /έτος με μέσο συντελεστή κατείσδυσης 10%

2.2.4 Υδρογεωλογικές συνθήκες λεκάνης Μεσσαράς

Με βάση την ταξινόμηση των γεωλογικών σχηματισμών της Κρήτης διακρίνουμε τις παρακάτω υδρολιθολογικές ενότητες στην περιοχή μελέτης (Κριτσωτάκης, 2009):

Καρστικοί σχηματισμοί οι οποίοι συνίστανται από τα ανθρακικά πετρώματα των ενοτήτων της Πίνδου, της Τρίπολης και της Αυτόχθονου σειράς και καταλαμβάνουν τα όρια της λεκάνης της Μεσσαράς. Βόρεια δομούν την οροσειρά της Ίδης και νότια την οροσειρά των Αστερουσίων ορέων όπου εκεί έχουμε μικρότερες εμφανίσεις. Μικρό ποσοστό του υπόγειου δυναμικού του καρστικού υδροφορέα της Ίδης απορρέει από τις πηγές της Γέργερης με αποδέκτη την υδρολογική λεκάνη του Ληθαίου - Γεροποτάμου και από τις πηγές του Ζαρού με αποδέκτη την υδρολογική λεκάνη του Τυμπακίου. Το μεγαλύτερο ποσοστό του υπόγειου δυναμικού του καρστικού συστήματος της Ίδης απορρέει βόρεια στην υφάλμυρη πηγή του Αλμυρού Ηρακλείου. Οι καρστικές εμφανίσεις των Αστερουσίων φιλοξενούν περιορισμένους υδροφόρους ορίζοντες με μικρό δυναμικό και το νερό τους χρησιμοποιείται κυρίως για την ύδρευση των οικισμών.

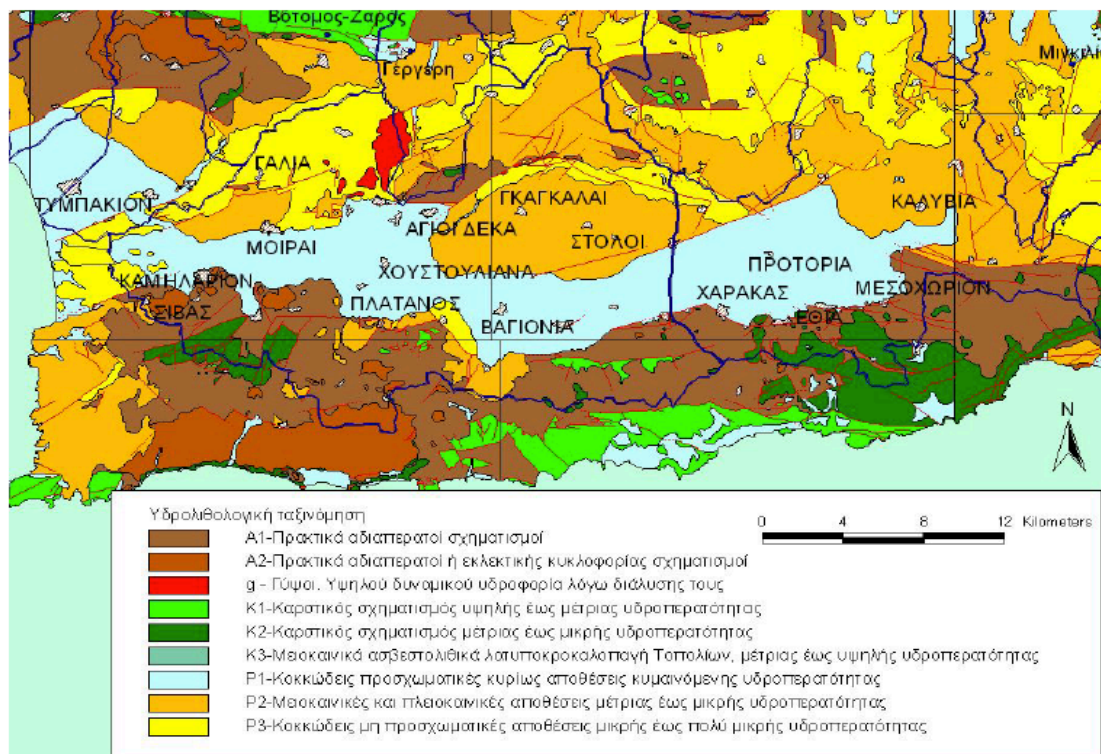
Προσχωματικές αποθέσεις που καταλαμβάνουν το κεντρικό πεδινό τμήμα της λεκάνης της Μεσσαράς και αποτελούν το σημαντικότερο υδροφορέα της περιοχής μελέτης. Συνίστανται από ποταμολιμναίες αλλουβιακές αποθέσεις. Επίσης συναντώνται μικρού πάχους και έκτασης αποθέσεις κατά μήκος των υδρορευμάτων.

Πλειστοκαινικές αποθέσεις που καταλαμβάνουν σημαντική έκταση στο βόρειο τμήμα της πεδινής περιοχής.

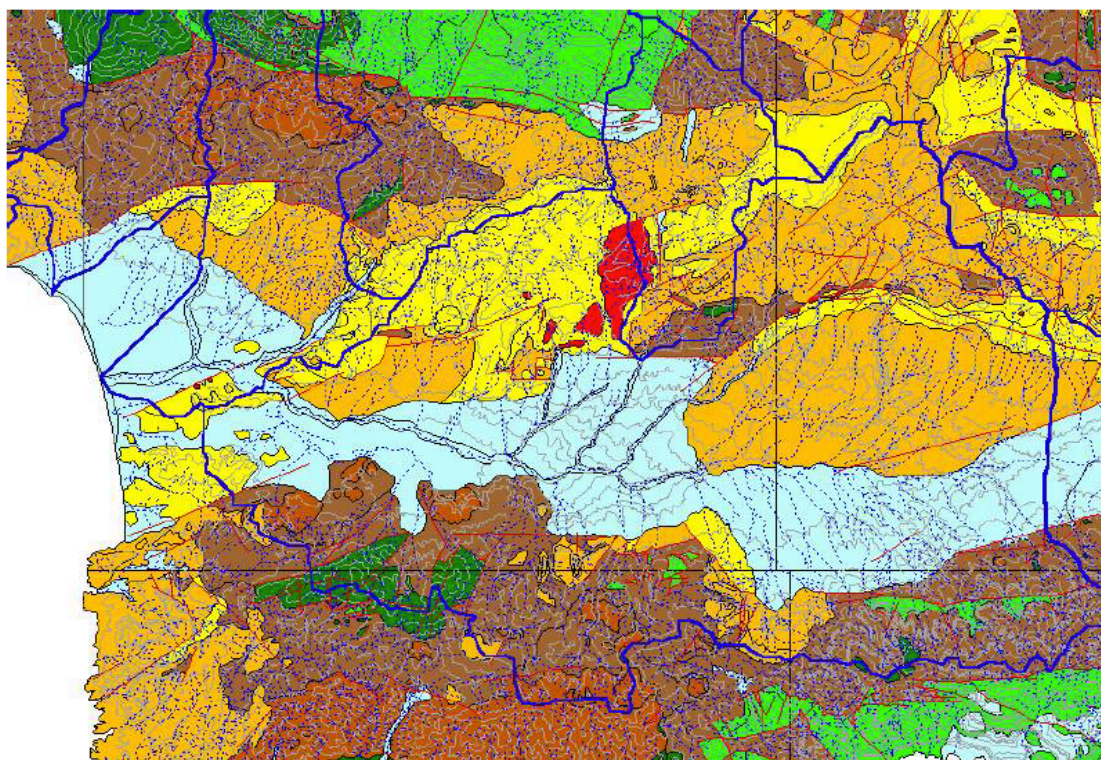
Νεογενείς σχηματισμοί που καταλαμβάνουν ένα μεγάλο τμήμα της περιοχής μελέτης βόρεια των προσχωματικών – πλειστοκαινικών αποθέσεων και σχηματίζουν το λοφώδες ανάγλυφο.

Οι σημαντικότεροι υδροφορείς στην περιοχή μελέτης κατά σειρά δυναμικότητας είναι ο αλλουβιακός, ο πλειστοκαινικός και ο νεογενής. Επίσης στα περιθώρια της λεκάνης απαντούν ανθρακικοί σχηματισμοί που φιλοξενούν καρστικές υδροφορίες. Οι καρστικοί υδροφορείς των Αστερουσιών σχηματίζουν μικρές αποκομμένες λεκάνες, λόγω του έντονου τεκτονισμού και το νερό τους χρησιμοποιείται κυρίως για την ύδρευση των οικισμών. Ποσότητα από το νερό του καρστικού συστήματος του Ψηλορείτη εξέρχεται από τις δύο πηγές της Γέργερης και του Ζαρού.

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται ο υδρολιθολογικός και ο υδρογεωλογικός χάρτης της λεκάνης της Μεσσαράς.



Σχήμα: 5 Υδρολιθολογικός χάρτης της λεκάνης της Μεσσαράς (Κριτσωτάκης, 2009)



Σχήμα: 6 Υδρογεωλογικός Χάρτης περιοχής Μεσσαράς (Κριτσωτάκης, 2009)

2.2.5 Αλλουβιακός υδροφορέας λεκάνης Μεσσαράς

Ο αλλουβιακός υδροφορέας έχει επίμηκες σχήμα, καταλαμβάνει το κεντρικό πεδινό τμήμα της λεκάνης της Μεσσαράς και συνίσταται από σύγχρονες ποταμολιμναίες αποθέσεις κροκαλοπαγών, άμμων, ιλυολίθων και αργίλων. Ο υδροφορέας αυτός συνίσταται από αποθέσεις διαφορετικής στρωματογραφικής ηλικίας και διαφορετικών τύπων απόθεσης και σύστασης και επομένως διαφορετικών υδρογεωλογικών ιδιοτήτων. Σε όλες σχεδόν τις υδρογεωλογικές μελέτες, λόγω απλοποίησης και προσέγγισης των υδρογεωλογικών συνθηκών της περιοχής αντιμετωπίζεται ως ενιαίος. Στην παρούσα εργασία, βάσει της υδρογεωλογικής ανάλυσης που ακολουθεί διακρίνεται σε μεγάλα τμήματα τα οποία εμφανίζουν σχετική ομοιομορφία και μεταξύ των υπάρχει υδραυλική επικοινωνία. Ο αλλουβιακός υδροφορέας δύναται να διακριθεί σε τρεις κατηγορίες: αποθέσεις στις τάφρους διάβρωσης οι οποίες καταλαμβάνουν μια ζώνη γύρω από τα κύρια υδρορέματα (Γεροπόταμος, Αναποδάρης και Λιθαίος), κώνοι κορημάτων και πλευρικά κορήματα που καταλαμβάνουν κύρια τις νότιες υπόγειες περιοχές και αποθέσεις που καλύπτουν την υπόλοιπη λεκάνη.

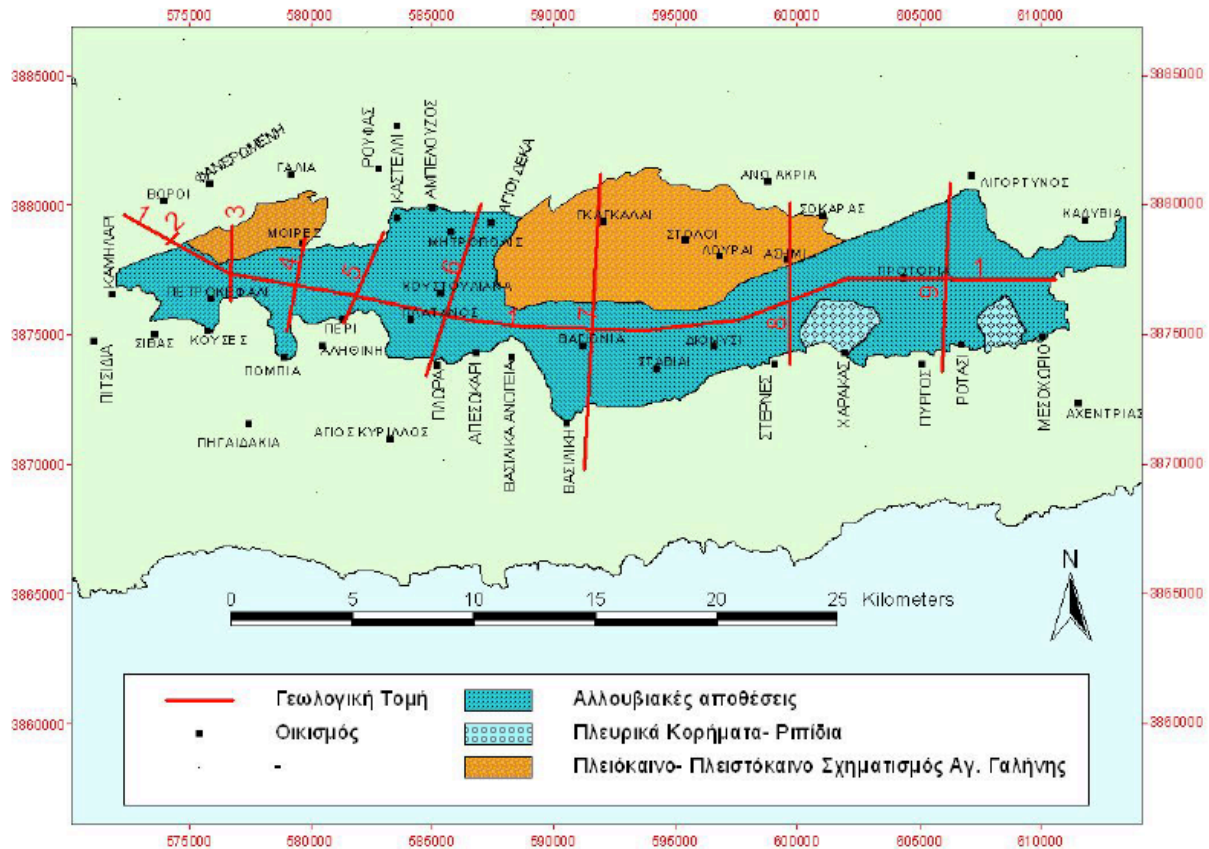
Η ηλικία του αλλουβιακού μανδύα τοποθετείται στο Ολόκαινο - Ανώτερο Πλειστόκαινο και είναι δύσκολο να προσδιορισθεί στα καρότα των γεωτρήσεων η ζώνη μετάβασης από τα Ολοκαινικά ιζήματα στα Άνω Πλειστοκαινικά. Ακόμα κατά θέσεις είναι δυσκολότερο να διακριθεί η μετάβαση στις αποθέσεις του κατώτερου Πλειστοκαίνου επειδή συνίστανται από ίδια υλικά και έχουν το ίδια ανοιχτά κίτρινα και κοκκινωπά χρώματα και στερούνται από απολιθώματα, διάκριση που είναι σημαντική στην υδρογεωλογική ανάλυση καθώς οι αποθέσεις αυτές χαρακτηρίζονται από διαφορετικές ιδιότητες. Οι αποθέσεις κατώτερου

Πλειστοκαίνου αν και αποτελούνται από υλικά της ίδιας σύστασης με τα του Ολοκαίνου - ανώτερου Πλειστοκαίνου συνήθως έχουν μεγαλύτερο βαθμό συμπίκνωσης και τσιμεντοποίησης με αποτέλεσμα να έχουν μικρότερο συντελεστή υδροπερατότητας και συντελεστή αποθηκευτικότητας. Οι αλλουβιακές αποθέσεις των τάφρων διάβρωσης αποτελούνται από εναλλαγές στρώσεων χαλίκων, αργίλου και ιλύος. Στρώσεις άμμων είναι σπάνιες και συνήθως η άμμος είναι αναμεμιγμένη με τα άλλα υλικά. Το κυρίαρχο χρώμα είναι γκριζό, καφετί γκριζό και γκριζόμαυρο.

Οι κώνοι κορημάτων και τα πλευρικά κορήματα ποικίλουν ανάλογα με την προέλευση τους και την θέση τους. Τα υλικά είναι περισσότερο χοντρόκοκκα και λατυποπαγή κοντά στις υπώρειες νότιες περιοχές. Κατά θέσεις τα κενά των χοντρόκοκκων πληρώνονται από λεπτόκοκκα υλικά με αποτέλεσμα να ελαττώνουν τις ιδιότητες του υδροφορέα (υδροπερατότητα, αποθηκευτικότητα). Οι κώνοι κορημάτων που προέρχονται από παλαιότερα πετρώματα των ορεινών όγκων έχουν συνήθως κοκκινωπό χρώμα και είναι δύσκολο να διακριθούν τα νεότερα από τα παλαιότερα (Πλειστόκαινα) ιζήματα και γενικά χαρακτηρίζονται με μεγάλο πορώδες. Τα πλευρικά κορήματα που προέρχονται από νεογενή πετρώματα συνίστανται από λεπτόκοκκα υλικά και γενικά περικλείουν ασθενείς υδροφορίες. Το αλλουβιακό κάλυμμα του υπόλοιπου πεδινού τμήματος κυμαίνεται σε σύσταση και χαρακτηριστικά ανάλογα με τον τύπο πετρώματος που επικρατεί στα περιθώρια του. Στις περιοχές που επικρατούν Πλειστοκαινικές αποθέσεις (σχηματισμός Αγ. Γαλήνης) υπάρχει ένα λεπτό κάλυμμα από αποσαθρωμένα Πλειστόκαινα υλικά. Στις περιοχές που επικρατούν οι νεογενείς σχηματισμοί το αλλουβιακό κάλυμμα συνίσταται από μάργες (ιλύς - άργιλος) το οποίο είναι δύσκολο να διακριθεί από το διαβρωμένο Νεογενές. Όμως η διάκριση αυτή δεν έχει ιδιαίτερη σημασία από υδρογεωλογική σκοπιά (Κριτσωτάκης, 2009).

2.2.6 Πλειστοκενικός υδροφορέας λεκάνης Μεσσαράς

Τα πλειστοκαινικά ιζήματα εναποτέθηκαν στα ρηξιτεμάχη των νεογενών σχηματισμών κάτω από ηπειρωτικές συνθήκες (ποταμολιμναία φάση). Το πλειστόκαινο στα κατώτερα (υψομετρικά) ρηξιτεμάχη, όπως της λεκάνης των Μοιρών και του Χάρακα, διατηρείται σε σχετικά καλή κατάσταση σε αντίθεση με των ανώτερων υψομέτρων που σχεδόν διαβρώθηκε και διατηρείται μόνο μια στρώση πολύ μικρού πάχους (λεκάνη Βαγιονιάς). Επιφανειακά απαντούν στην περιοχή Καλυβιανής και των Γκαγκαλών. Το επίπεδο της στάθμης της θάλασσας μετά την εναπόθεση των πλειστοκαινικών σχηματισμών ήταν σε κατώτερο υψόμετρο από ότι σήμερα και νέες τάφροι σχηματίστηκαν από την διάβρωση των κυρίων υδρορευμάτων του Γεροπόταμου, του Λιθαίου και του Αναποδάρη. Το μέγιστο βάθος των τάφρων αυτών καταγράφηκε στα 75 μέτρα κάτω από τη σημερινή στάθμη της θάλασσας στην περιοχή των Μοιρών και το μέγιστο που έχει καταγραφεί στην ευρύτερη περιοχή είναι 80μ στην περιοχή του Πλατύ (όμορη λεκάνη δυτικότερα του Τυμπακίου). Στη έξοδο του Γεροποτάμου στη θάλασσα (Τυμπάκι) το βάθος της τάφρου είναι της τάξης των 100 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους που ελαττώνεται προς τα ανάντη και στο ύψωμα της Φαιστού είναι 60 μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους. Στις τάφρους αυτές εναποτέθηκαν οι τεταρτογενής αλλουβιακές αποθέσεις (Κριτσωτάκης, 2009).



Σχήμα: 7 Λεκάνη Μεσσαράς - αλλουβιακός και πλειστοκαινικός υδροφορέας (Κριτσωτάκης, 2009)

2.2.7 Νεογενής υδροφορέας λεκάνης Μεσσαράς

Οι νεογενείς σχηματισμοί της λεκάνης της Μεσσαράς αποτελούν το υπόβαθρο των τεταρτογενών αποθέσεων και χαρακτηρίζονται από πετρώματα διαφορετικής σύστασης και στρωματογραφίας. Το χαρακτηριστικό του νεογενούς είναι οι ρηξιγενείς ζώνες οι οποίες μετακίνησαν κατακόρυφα τα ρηξιτεμάχια και σχημάτισαν διάφορες λεκάνες μέσα στις οποίες εναποτέθηκαν οι σύγχρονες αποθέσεις. Το μεγαλύτερο μέρος των νεογενών σχηματισμών συνίστανται από εναλλαγές στρώσεων μεγάλου πάχους ιλύολιθων, αργίλων και μαργών. Επίσης απαντούν και ενστρώσεις μικρότερου πάχους αποτελούμενες από άμμο, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή και μαργαϊκούς ασβεστολίθους οι οποίες εμφανίζουν μικρό υδρογεωλογικό ενδιαφέρον καθώς φιλοξενούν ασθενείς υδροφορίες που είναι υπό πίεση. Οι υδροφόροι αυτοί εκμεταλλεύονται από αριθμό γεωτρήσεων βάθους 200-350 μέτρων κυρίως στις περιοχές που έχουμε έλλειψη άλλων υδατικών πόρων (περιοχή Βαγιονιάς). Η παροχή των γεωτρήσεων αυτών είναι μικρή (5-15 m³/h) Συχνά όμως διατηρούνται στρώσεις οι οποίοι περιέχουν νερό κακής ποιότητας (υψηλή αλατότητα) που το καθιστούν ακατάλληλο για οποιαδήποτε χρήση. Κατά θέσεις απαντούν μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι (περιοχή βόρεια των Μοιρών) ή και γύψοι (περιοχή βόρεια των Μοιρών και των Γκαγκαλών) πετρώματα που χαρακτηρίζονται από την εμφάνιση μικρής υδροφορίας. Κατά το τέλος του τριτογενούς έλαβαν χώρα κατακόρυφες κινήσεις ανυψώνοντας τα διάφορα ρηξιτεμάχια οποία στη συνέχεια υπέστησαν έντονη διάβρωση σχηματίζοντας τάφρους μέσα στις οποίες εναποτέθηκαν τα ποταμολιμναία στρώματα του Πλειστοκαινού (Κριτσωτάκης, 2009).

2.3 Περιοχή των Μοιρών

2.3.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Η περιοχή μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας περιλαμβάνει τμήμα της πεδιάδας της Μεσσαράς και συγκεκριμένα την υδρογεωλογική λεκάνη των Μοιρών. Γεωγραφικά η πεδιάδα της Μεσσαράς ανήκει στο Διαμέρισμα Κρήτης και διοικητικά στην Περιφέρεια Κρήτης και πιο συγκεκριμένα στο νομό Ηρακλείου όπου και τοποθετείται στο νότιο τμήμα του.

Η λεκάνη απορροής της Μεσσαράς καλύπτει συνολικά μία περιοχή με έκταση περίπου 398 Km² και εκτείνεται από ανατολικά προς δυτικά. Οριοθετείται κυρίως από: α) το όρος Ίδη (2456 m) στο βορειοδυτικό τμήμα της, β) το όρος Δίκη (2148 m) στο ανατολικό και βορειοανατολικό τμήμα της, γ) τα Αστερούσια όρη (1231 m) στο νότιο τμήμα, δ) την περιοχή της Φαιστού στο δυτικό τμήμα και ε) το χωριό Δεμάτι στο νοτιοανατολικό τμήμα.

Η πεδιάδα της Μεσσαράς αποτελεί την μεγαλύτερη πεδιάδα του νησιού και την πιο παραγωγική, καθώς στο μεγαλύτερο μέρος της είναι έντονη η γεωργική δραστηριότητα. Περίπου το 38% (250 Km²) της πεδιάδας καλλιεργείται εκ του οποίου το 75% καταλαμβάνουν ελαιόδεντρα, 10% αμπέλια, 2% εσπεριδοειδή και 13% οπωροκηπευτικά (Βαρουχάκης, 2015). Μόλις το 1% της περιοχής συνιστά πυκνή δασική έκταση ενώ το 4,5% αποτελεί εκτάσεις πάρα πολύ αραιής βλάστησης και σχεδόν απογυμνωμένου βράχου. Το υπόλοιπο τμήμα περιλαμβάνει κυρίως δασώδεις περιοχές ποώδους και θαμνώδους βλάστησης και δευτερευόντως λιβάδια, βοσκότοπους και περιοχές με συνδυασμό φυσικής βλάστησης δάσους και γεωργικής γης (Κρίνης, 2009).

Όσον αφορά πληθυσμιακά στοιχεία, σύμφωνα με την Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛΣΤΑΤ), η περιοχή της λεκάνης της Μεσσαράς έχει συνολικά πληθυσμό περίπου 55000 κατοίκους. Θεωρείται σχετικά αραιοκατοικημένη όντας μία επαρχιακή αγροτική περιοχή με πληθυσμιακή πυκνότητα 55 κατοίκους/Km². Οι μεγαλύτερες κωμοπόλεις που ανήκουν στην πεδιάδα της Μεσσαράς είναι οι Μοίρες και το Τυμπάκι. Διοικητικά περιλαμβάνει σύμφωνα με το Πρόγραμμα Καλλικράτης ολόκληρο το Δήμο Φαιστού, μέρος του Δήμου Γόρτυνας (εξολοκλήρου τις Δημοτικές Ενότητες Ρούβα, Γόρτυνας και Κόφινας) και μέρος του Δήμου Αρχανών – Αστερουσίων (εξολοκλήρου τη Δημοτική Ενότητα Αστερουσίων). Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η θέση της λεκάνης της Μεσσαράς στην Κρήτη.



Σχήμα: 8 Θέση λεκάνης Μεσαράς στην Κρήτη (SRTM, 2009)

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ο γεωγραφικός χάρτης της περιοχής μελέτης σύμφωνα με το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ).



Σχήμα: 9 Γεωγραφικός χάρτης περιοχής μελέτης (ΙΓΜΕ)

Από το πεδινό τμήμα της λεκάνης της Μεσσαράς διέρχονται δύο μεγάλοι ποταμοί, ο Γεροπόταμος (38,4 Km) και ο Αναποδιάρης (46 Km) που αποστραγγίζουν τις λεκάνες της δυτικής και ανατολικής Μεσσαράς αντίστοιχα. Άλλοι σημαντικοί ποταμοί που διέρχονται και αποστραγγίζουν τμήμα της λεκάνης της Μεσσαράς είναι οι δύο παραπόταμοι του Γεροποτάμου, ο Κουτσουλίδης (22,8 Km) και ο Ληθαίος (17,1 Km) και οι δύο παραπόταμοι του Αναποδιάρη, ο Βαρύτης (22,6 Km) και ο Κολοκυθάς (26,8 Km). Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης όπου και σημειώνονται οι κυριότεροι ποταμοί και παραπόταμοί της.



Σχήμα: 10 Υδρογραφικό δίκτυο περιοχής μελέτης (geodata.gov.gr)

Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης της Μεσσαράς είναι συνολικά 445 m και η μέση κλίση 23,7%. Η διακύμανση του ανάγλυφου είναι αρκετά έντονη με ήπιες έως μηδενικές κλίσεις στο πεδινό τμήμα της λεκάνης (κεντρικό, δυτικό και νοτιοανατολικό), έντονες κλίσεις στα πιο ορεινά τμήματα της λεκάνης της όπως το βορειοδυτικό (όρος Ίδη) και νότιο τμήμα (Αστερούσια όρη) και πολύ έντονες κλίσεις στο ανατολικό τμήμα (όρος Δίκη). Τα παραπάνω παρουσιάζονται στα δύο σχήματα που ακολουθούν.



Σχήμα: 11 Γεωγραφικός - γεωμορφολογικός χάρτης της περιοχής μελέτης (SRTM, 2009)



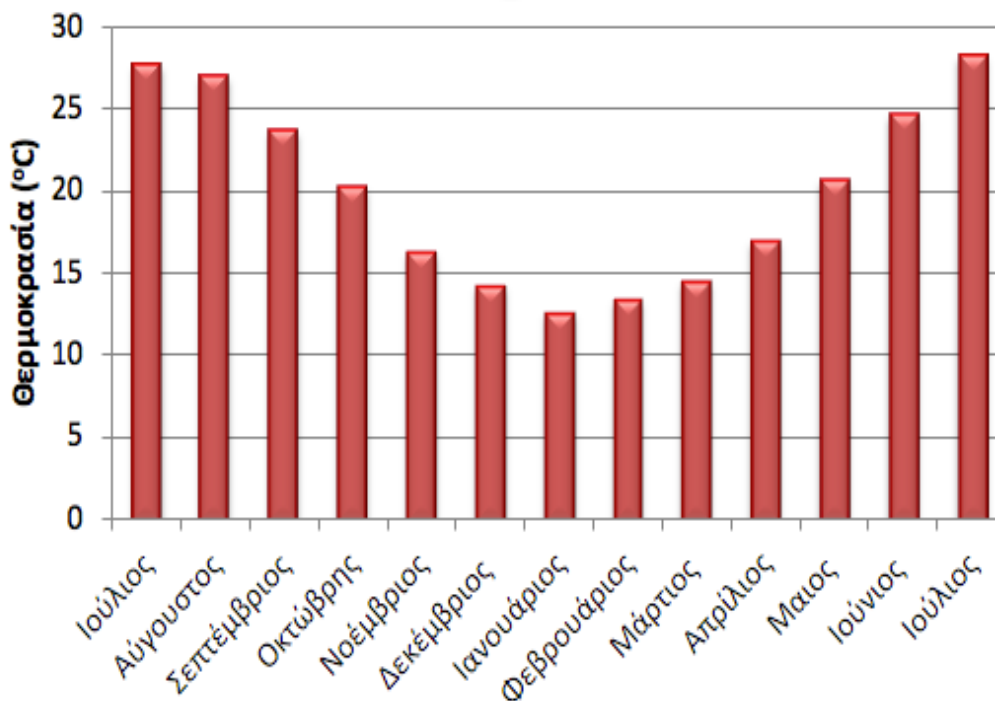
Σχήμα: 12 Υψογραφικός - τοπογραφικός χάρτης της περιοχής μελέτης (Κρίνης, 2009)

2.3.2 Κλιματολογικές συνθήκες

Το κλίμα της Κρήτης χαρακτηρίζεται ως εύκρατο μεσογειακό, ενώ στους ορεινούς όγκους τείνει προς το ηπειρωτικό. Κατά τους χειμερινούς μήνες η μέση θερμοκρασία κυμαίνεται στους 12°C, ενώ τους καλοκαιρινούς στους 28 °C. Ηλιοφάνεια παρατηρείται όλους τους μήνες του έτους και η εμφάνιση νεφώσεων είναι μικρή και μειώνεται από τα ανατολικά προς τα δυτικά. Το ποσοστό της σχετικής υγρασίας βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα, τον χειμώνα είναι περίπου 70% ενώ το καλοκαίρι είναι 60%. Στην Κρήτη παρατηρείται διακύμανση στην ετήσια βροχόπτωση, η οποία μεταβάλλεται γεωγραφικά δηλαδή αυξάνεται από τα ανατολικά προς τα δυτικά και από τα νότια προς τα βόρεια. Σύμφωνα με τελευταίες μελέτες από τον όγκο του νερού

των βροχοπτώσεων το μεγαλύτερο ποσοστό 82% χάνεται λόγω της εξατμισοδιαπνοής, το 18% εμπλουτίζει τον υπόγειο υδροφόρα, ενώ το ποσοστό αυτού που διαρρέει επιφανειακά θεωρείται αμελητέο.

Η περιοχή μελέτης έχει ένα μεταβατικό τύπο κλίματος μεταξύ του χερσαίου Μεσογειακού και του ερημοειδούς Μεσογειακού, στο οποίο υπάγεται και η νοτιοανατολική Κρήτη. Χαρακτηριστικό γνώρισμα των χειμερινών μηνών αυτού του τύπου κλίματος είναι η ηπιότητα που παρουσιάζουν κυρίως λόγω της άφιξης στην περιοχή θερμών και υγρών νοτιοδυτικών ανέμων. Ο Ιανουάριος χαρακτηρίζεται ως ο ψυχρότερος και υγρότερος μήνας με μέση ελάχιστη θερμοκρασία 12 °C. Το καλοκαίρι είναι ιδιαίτερα ξηρό με θερμότερους μήνες τον Ιούλιο και τον Αύγουστο όπου η μέση θερμοκρασία είναι 27 °C. Στο παρακάτω σχήμα δίνονται οι μηνιαίες θερμοκρασίες για το υδρολογικό έτος 2009-2010 από τον μετεωρολογικό σταθμό στο Πετροκεφάλι Μοιρών (Κυλίλη-Πολυχρονάκη, 2001).



Σχήμα: 13 Μηνιαίες θερμοκρασίες υδρολογικού έτους 2009-2010, από μετεωρολογικό σταθμό Πετροκεφάλι Μοιρών (Μοσχοπούλου, 2017)

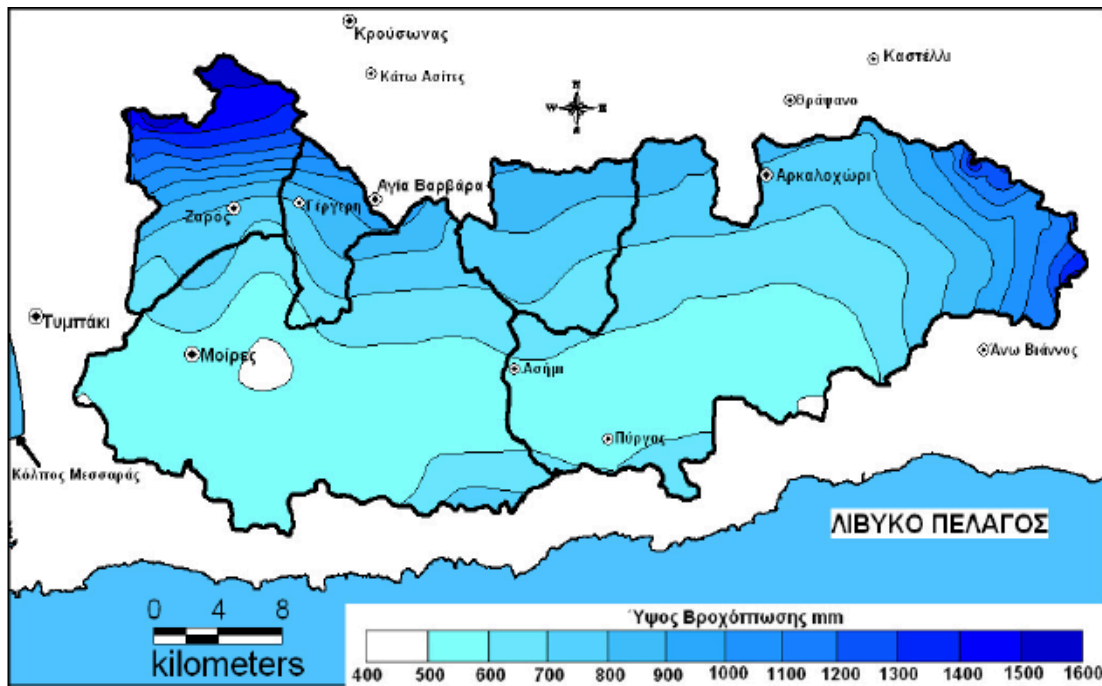
Το υδρολογικό έτος της Μεσσαράς μπορεί να διαιρεθεί σε υγρή και ξηρά εποχή. Περίπου 40% της βροχόπτωσης εμφανίζεται τους μήνες του Δεκεμβρίου και του Ιανουαρίου ενώ από τον Ιούνιο μέχρι τον Αύγουστο υπάρχουν αμελητέες βροχοπτώσεις. Οι βροχοπτώσεις αυξάνουν με το υψόμετρο από περίπου 500 mm στα πεδινά σε περίπου 800 mm στις πλαγιές της κοιλάδας ενώ στον ορεινό όγκο της Ίδης η ετήσια βροχόπτωση ανέρχεται σε περίπου 2000 mm και στα Αστερούσια είναι 1100 mm. Στην περιοχή μελέτης δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν από 11 βροχομετρικούς σταθμούς οι οποίοι βρίσκονται στις εξής περιοχές: 1) Αγία Βαρβάρα, 2) Άγιος Κύριλλος, 3) Ασήμι, 4) Βαγιονιά, 5) Βορίζια, 6) Γέργερη, 7) Ζαρός, 8) Καπετανιανά, 9)

Λαγολί, 10) Μορόνι, 11) Μοίρες. Παρακάτω δίνεται το διάγραμμα που παρουσιάζει τον ετήσιο μέσο όρο της βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης για τα υδρολογικά έτη 2000-2001 έως και 2017-2018.



Σχήμα: 14 Ετήσιος μέσος όρος βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης

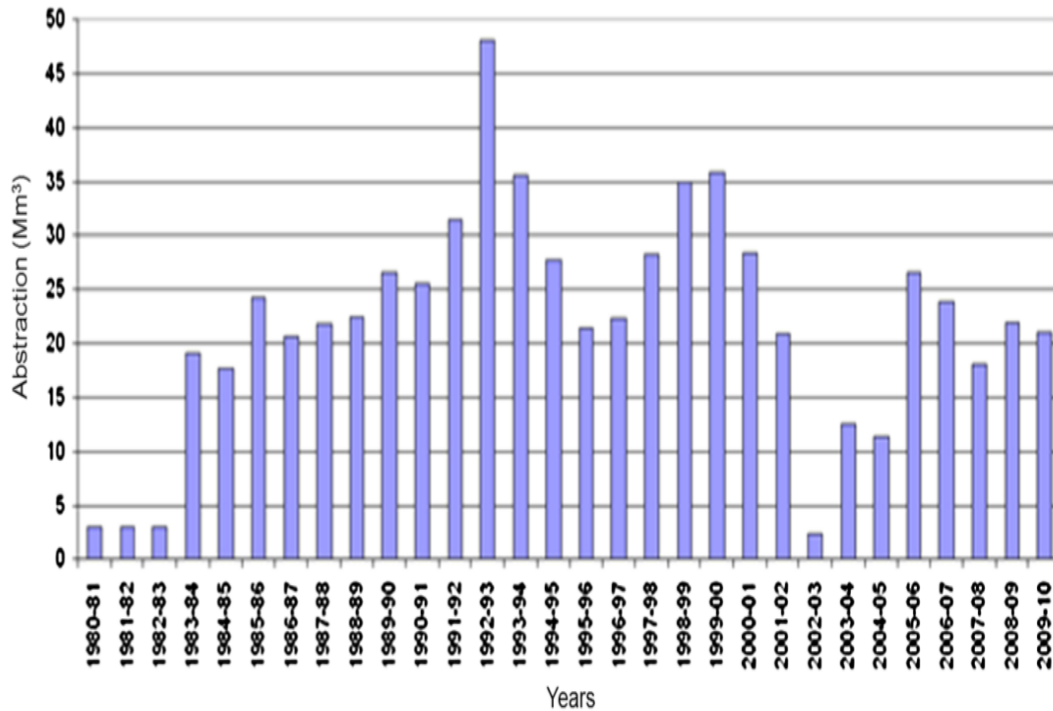
Βάσει του παραπάνω διαγράμματος, το μέσο ετήσιο ύψος των κατακρημνισμάτων που δέχεται η περιοχή είναι 700 mm. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η κατανομή του μέσου ετήσιου ύψους βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης.



Σχήμα: 15 Χάρτης κατανομής του μέσου ετήσιου ύψους βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης (Κρίνης, 2009)

Όπως προκύπτει από τον παραπάνω χάρτη, η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης είναι πολύ ετερογενής. Το πεδινό τμήμα της λεκάνης δέχεται περίπου 500 έως 600 mm ύψους βροχής ετησίως.

Εξαιτίας της μεγάλης αγροτικής δραστηριότητας οι ανάγκες σε άρδευση στην περιοχή μελέτης είναι αυξημένες. Έτσι τα τελευταία χρόνια η περιοχή αντιμετωπίζει το πρόβλημα της λειψυδρίας, καθώς και οι βροχοπτώσεις είναι περιορισμένες ιδιαίτερα την θερινή περίοδο. Στο σχήμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται ο ετήσιος ρυθμός άντλησης στη λεκάνη των Μοιρών για τα έτη 1980-2010.



Σχήμα: 16 Ετήσιος ρυθμός άντλησης στη λεκάνη των Μοιρών (Βαρουχάκης, 2015)

2.3.3 Γεωλογική και υδρογεωλογική δομή της λεκάνης των Μοιρών

Η λεκάνη των Μοιρών έχει σχήμα ασύμμετρο τριγωνικό με μέσο μήκος ανατολή-δύση περίπου 12 Km και πλάτος 600 m στα δυτικά και 4 Km στα ανατολικά και η έκτασή της ανέρχεται σε 50,3 Km². Τα όρια της υδρογεωλογικής λεκάνης ταυτίζονται περίπου με τα όρια της πεδινής ζώνης και οριοθετείται από βυθισμένα ρηξιτεμάχη στα οποία οι υδροφόροι πλειστοκαινικοί σχηματισμοί διατηρούνται με ικανοποιητικό πάχος και επικάθηνται σε αυτά αλλουβιακές αποθέσεις με υδρογεωλογικές ιδιότητες «πολύ καλές» σε πολλές ζώνες. Το βόρειο όριο περιγράφεται από τη νοητή γραμμή Αγ. Δέκα – Καστέλι - Μοίρες – στένεμα Φαιστού, το νότιο όριο περίπου ακολουθεί τη νοητή γραμμή Πλάτανος – Πέρι - Πετροκεφάλι - Άγιος Ιωάννης, και το δυτικό όριο περιγράφεται από τη λοφώδη ζώνη της Φαιστού. Το ανατολικό όριο δεν περιγράφεται τόσο ευδιάκριτα και ορίζεται από το ανυψωμένο ρηξιτέμαχος της Βαγιονιάς και ευρίσκεται περίπου στην νοητή γραμμή Αγ. Δέκα - Απεσωκάρι. Ο σημαντικότερος υδροφορέας της λεκάνης των Μοιρών είναι οι αλλουβιακές αποθέσεις, οι οποίες καταλαμβάνουν μια ζώνη γύρω από τα κύρια υδρορεύματα του Γεροποτάμου και του Λιθαίου, και επίσης ο μικρότερης σημασίας υδροφορέας των πλειστοκαινικών σχηματισμών. Ο αλλουβιακός αυτός υδροφορέας αποτελεί μια βαθιά και πλατιά τάφρο, όπου στο δυτικό όριο της λεκάνης διεισδύει στο στένεμα της Φαιστού. Λόγω της ανύψωσής του σε σχέση με τις λεκάνες των Μοιρών και του Τυμπακίου, τις διαχωρίζει και τις απομονώνει υδρογεωλογικά. Το στένεμα αυτό, προσεγγίζεται ως φαράγγι και είναι ο μόνος τρόπος σύνδεσης των επιφανειακών και υπόγειων νερών μεταξύ των δυο λεκανών. Το ύψωμα της Φαιστού θεωρείται ως αδιαπέρατος σχηματισμός, εμποδίζοντας την διαφυγή των υπόγειων νερών εκτός της λεκάνης των Μοιρών εκτός από το στένεμα αυτό. Όσον αφορά τη σύσταση του αλλουβιακού υδροφορέα, αυτή μεταβάλλεται από ανατολικά προς τα δυτικά. Συγκεκριμένα, στο ανατολικό

τιμήμα της λεκάνης παρατηρούνται κυρίως χονδρόκοκκα υλικά (υδροφόρο) με ενστρώσεις αργιλικών και ιλύος (ανυδροφόρο), με πάχος μικρότερο των 5 m. Στο τμήμα αυτό το επιφανειακό στρώμα αποτελείται κυρίως από χαλίκια και άμμο ευνοώντας έτσι την κατείσδυση. Από το κεντρικό τμήμα της λεκάνης και δυτικότερα μεταβάλλεται το πάχος και αυξάνεται το ποσοστό των ανυδροφόρων, έτσι το επιφανειακό στρώμα γίνεται περισσότερο αργιλικό με πάχος μεταξύ 20 – 30 m. Σύμφωνα με την ανάλυση των καρότων από τις γεωτρήσεις αλλά και της γεωτεκτονικής κατάστασης της περιοχής, παρατηρήθηκε η ύπαρξη πηγών οι οποίες συνδέονται άμεσα με τα ρήγματα της περιοχής (Κριτσωτάκης, 2009).

Παρακάτω παρουσιάζονται οι σημαντικότεροι υδροφορείς της λεκάνης των Μοιρών.

2.3.3.1 Αλλουβιακός υδροφορέας λεκάνης Μοιρών

Ο αλλουβιακός υδροφορέας της λεκάνης των Μοιρών καλύπτει όλη τη λεκάνη με αποθέσεις κυμαινόμενου πάχους με το μεγαλύτερο πάχος να εμφανίζεται σε μια ζώνη κατά μήκος του Γεροποτάμου και του Λιθαίου η οποία έχει έκταση περίπου 13,6 Km² και οριοθετεί το σημαντικότερο υδροφορέα όσο αφορά την υπόγεια αποθήκευση και απόδοση.

Ο Αλλουβιακός υδροφορέας του Γεροποτάμου απαντά σε μια μάλλον βαθειά και πλατιά τάφρο που κόβει κύρια τους κάτω πλειστοκαινικούς σχηματισμούς. Η τάφρος αυτή δεν ταυτίζεται με τη σημερινή ροή του Γεροποτάμου, στο ανατολικό τμήμα της λεκάνης ευρίσκεται βόρεια του ποταμού ενώ στο δυτικό τμήμα του νότια. Στο δυτικό όριο της λεκάνης ο αλλουβιακός υδροφορέας διεισδύει στο στένεμα της Φαιστού και ενώνει τη λεκάνη των Μοιρών με του Τυμπακίου.

Υπάρχει αβεβαιότητα καθορισμού του ορίου μεταξύ των αλλουβιακών αποθέσεων και των πλειστοκαινικών σχηματισμών στα κατώτερα ρηξιτεμάχη (περιοχή δυτικά των Μοιρών) (αναφέρεται στις γεωλογικές τομές «πλειστόκαινο»). Η ζώνη αυτή εντάχθηκε υδρογεωλογικά στις αλλουβιακές αποθέσεις λόγω των παραπλήσιων ιδιοτήτων του (υδροπερατότητα, υδροχωρητικότητα). Ο συνολικός όγκος των αλλουβιακών αποθέσεων του Γεροποτάμου ανέρχεται σε 692,3 Mm³ ο οποίος αποτελείται, σε συνθήκες μη εκμετάλλευσης του από: 50,8 Mm³ ακόρεστης ζώνης και 641,5 Mm³ κορεσμένης ζώνης από την οποία τα 263,2 Mm³ συνίσταται από χαλίκια και άμμο αντιπροσωπεύοντας ένα «καλό υδροφόρο» και τα υπόλοιπα 378,3 Mm³ από άργιλο και ιλύς που αντιπροσωπεύει το ανυδροφόρο της κορεσμένης ζώνης. Εάν υποθέσουμε ότι το ενεργό πορώδες για το υδροφόρο σχηματισμό είναι 10% και για το ανυδροφόρο είναι 3% τότε η υδροχωρητικότητα του αλλουβιακού υδροφορέα του Γεροποτάμου ανέρχεται στο ύψος των 38 Mm³ (Κριτσωτάκης, 2009).

Γενικότερα, το ολικό πορώδες των υλικών σε κοιλάδες τεκτονικής προέλευσης κυμαίνεται από 25 έως 60%, ενώ η ειδική απόδοση (ενεργό πορώδες) κυμαίνεται από 3 έως 40% και η τιμή τους εξαρτάται από την κοκκομετρία τη διαβάθμιση, τη συμπίεση κλπ. Γενικά οι ειδικές αποδόσεις για χαλαρούς σχηματισμούς μεγάλου πάχους τείνουν να κατέβουν στο 7 με 15% (Καλλέργης 1986) πράγμα που οφείλεται στη ανάμειξη υλικών κυμαινόμενης κοκκομετρικής σύνθεσης. Μείωση επίσης της ειδικής απόδοσης παρατηρείται με το βάθος λόγω συμπύκνωσης των υλικών.

Η σύσταση του αλλουβιακού υδροφορέα του Γεροποτάμου μεταβάλλεται από ανατολικά προς τα δυτικά. Στα ανατολικά τα υλικά των αποθέσεων είναι γενικά περισσότερο χοντρόκοκκα (υδροφόρο) με ενστρώσεις αργιλικών και ιλύος (ανυδροφόρο) πάχους συνήθως μικρότερο από 5 m. Το επιφανειακό στρώμα συνίσταται κυρίως από χαλίκια και άμμο και επιτρέπει υψηλή κατείσδυση. Η σύσταση του αλλουβιακού υδροφορέα αποτελείται από υλικά χοντρόκοκκα (υδροφόρο) με ενστρώσεις αργιλικών και ιλύος (ανυδροφόρο) συνήθως μικρού πάχους. Το επιφανειακό στρώμα συνίσταται κυρίως από χαλίκια και άμμο επιτρέποντας την υψηλή κατείσδυση (Κριτσωτάκης,2009).

2.3.3.2 Πλειστοκαινικός υδροφορέας λεκάνης Μοιρών

Ο πλειστοκαινικός υδροφορέας, σχηματισμός Αγ. Γαλήνης, επιφανειακά απαντάται στη περιοχή που περικλείεται από τους οικισμούς Καλυβιανή, Μοίρες και Γαλιά. Η έκταση του είναι μικρή, ανέρχεται σε 8,6 Km² και το πάχος του αναφέρεται, στα ελλιπή δεδομένα των γεωλογικών τομών των υδρογεωτρήσεων που έχουν ανορυχθεί σε αυτόν, από 35 m έως 70 m. Σημαντικότερα πλειστοκαινικά στρώματα ευρίσκονται στη λεκάνη κάτω από τις αλλουβιακές αποθέσεις. Η τεκτονική αρχικά επέδρασε στη γεωμετρία και στο βάθος των αποθέσεων αυτών και στη συνέχεια η διάβρωση που έλαβε χώρα (Κριτσωτάκης,2009).

2.3.3.3 Νεογενής υδροφορέας λεκάνης Μοιρών

Οι νεογενείς σχηματισμοί υπόκεινται των πλειστοκαινικών στη λεκάνη των Μοιρών. Υδρογεωλογικά ταξινομούνται ως ανυδροφόρος σχηματισμός λόγω της μαργαϊκής αργιλικής σύστασης τους και αποτελούν το υπόβαθρο της λεκάνης. Μεμονωμένες γεωτρήσεις έχουν ανορυχθεί ως το βάθος των 250 m και δεν συναντήθηκαν εντός του σχηματισμού στρώσεις με υδροφόρους σχηματισμούς (ψαμμίτες, κροκαλοπαγή κλπ.). Στο ανατολικό τμήμα συναντήθηκαν στρώσεις στο ανώτερο τμήμα των νεογενών με κροκαλοπαγή (χαλίκια ελαφρά τσιμεντωμένα) σε δύο διαφορετικά βάθη πάχους περίπου 5 – 15 m (υδροφόρο) με υδρογεωλογικές ιδιότητες ανάλογες με τα στρώματα του πλειστοκαινίου (Κριτσωτάκης,2009).

3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ MODFLOW

3.1 Βασικές έννοιες και εξισώσεις υπόγειας ροής

3.1.1 Υδροφορείς και παράμετροι

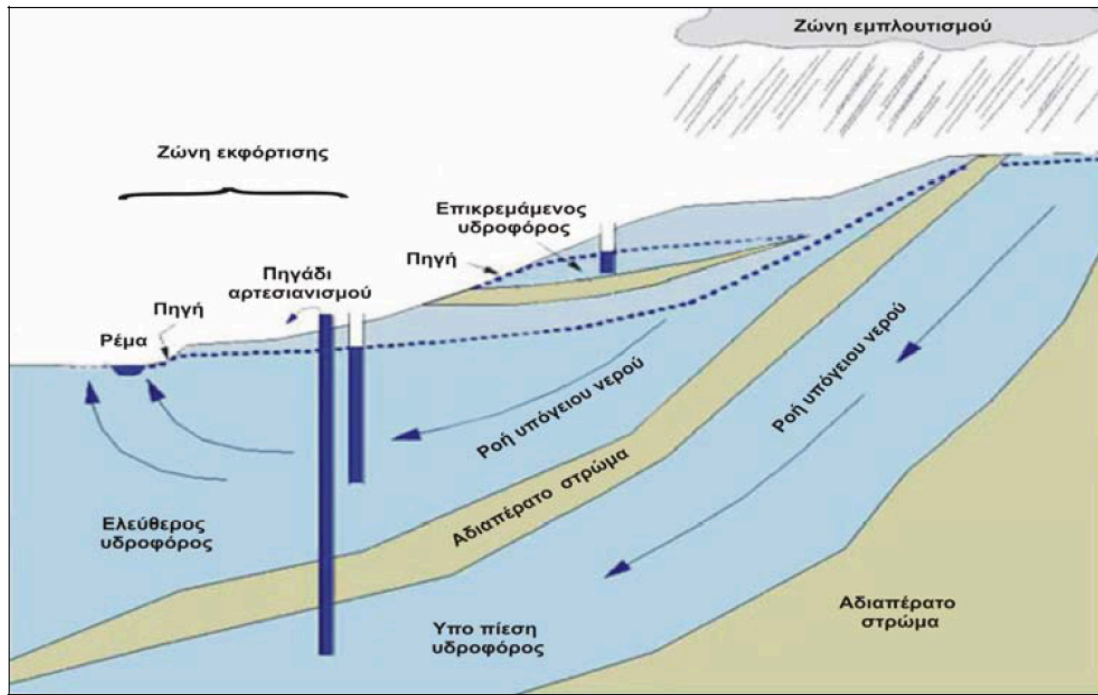
Τα υπόγεια νερά είναι μέρος του υδρολογικού κύκλου. Βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια της γης και μπορούν να συλλεχθούν μέσω φρεάτων, σπηράγγων ή αποστραγγιστικών αγωγών ή ρέουν φυσικά προς την επιφάνεια μέσω πηγών. Η ροή των υπόγειων νερών γίνεται μέσω των υδροφορέων. Πρόκειται για γεωλογικούς σχηματισμούς που περιέχουν νερό και επιτρέπουν την κίνηση σημαντικών ποσοτήτων νερού (Δημητριάδης, 2013). Το υδροφόρο στρώμα αποτελείται από τον γεωλογικό σχηματισμό και το υπεδαφικό νερό, που βρίσκεται σε βαρυτική μορφή και ως νερό συγκράτησης. Ως υδροφόρος ορίζοντας θεωρείται η άνω επιφάνεια του υδροφόρου. Ανάλογα με τη θέση του υδροφόρου ορίζοντα οι υδροφορείς διακρίνονται σε ελεύθερους ή φρεατικούς, περιορισμένους ή αρτεσιανούς και στον ενδιάμεσο τύπο των ημι-αρτεσιανών.

Στους ελεύθερους υδροφορείς το κάτω όριο αποτελεί ένα αδιαπέρατο στρώμα, ενώ το άνω όριο είναι η ελεύθερη επιφάνεια του υπόγειου νερού. Η υδροστατική πίεση στην ελεύθερη επιφάνεια ταυτίζεται με την ατμοσφαιρική πίεση. Οι υδροφορείς αυτοί τροφοδοτούνται απευθείας με διηθούμενο νερό από την επιφάνεια του εδάφους. Οι αυξομειώσεις που παρατηρούνται στο ύψος του υδροφορέα αντιστοιχούν και σε αυξομειώσεις του όγκου του ύδατος που είναι αποθηκευμένο στον υδροφορέα.

Στους περιορισμένους υδροφορείς τα όρια στα οποία περικλείεται το υπόγειο ύδωρ είναι αδιαπέρατα, με αποτέλεσμα να επικρατούν πιέσεις μεγαλύτερες της ατμοσφαιρικής. Η κατάσταση αυτή μπορεί να διαπιστωθεί αν στην περιοχή υπάρχει κάποιο πηγάδι, τότε η στάθμη του νερού σε αυτό βρίσκεται σε υψηλότερα επίπεδα από το άνω όριο του υδροφορέα.

Οι ημιαρτεσιανοί ή υπό μερικοί πίεση υδροφορείς αποτελούν υπόγειους υδροφορείς ανάλογους με τους υπό πίεση με τη διαφορά ότι το υπερκείμενο στρώμα είναι ημιπερατό, παρουσιάζει δηλαδή μικρή υδροπερατότητα. Από πετρογραφικής άποψης διακρίνονται δύο μεγάλες κατηγορίες υδροφορέων: οι καρστικοί που αναπτύσσονται στα ανθρακικά πετρώματα και οι πορώδεις που αναπτύσσονται σε κοκκώδεις σχηματισμούς (Χαραλάμπους, 2016).

Στα σχήματα που ακολουθούν απεικονίζονται τα διάφορα είδη υδροφορέων καθώς και η ταξινόμησή τους.



Σχήμα: 17 Είδη υδροφόρων οριζόντων (Χαραλάμπους, 2016)



Σχήμα: 18 Ταξινόμηση Υδροφορέων (Μακρόπουλος και Κουτσογιάννης, 2016)

Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά οι παράμετροι που παρατηρούνται σε έναν υπόγειο υδροφορέα.

Πιεζομετρικό ύψος (h): Το πιεζομετρικό ύψος, (ή πιεζομετρικό φορτίο), θεωρείται η ενέργεια που ισούται με το άθροισμα του φορτίου πίεσης P/γ και του φορτίου ύψους (ή θέσης) της απόστασης από το επίπεδο αναφοράς z . Συγκεκριμένα, το πιεζομετρικό ύψος δίνεται από την εξίσωση $h = (P/\gamma) + z$, όπου P είναι η υδροστατική πίεση και γ το ειδικό βάρος του νερού που ισούται με το γινόμενο της πυκνότητας του και της επιτάχυνσης της βαρύτητας ($\gamma = \rho \cdot g$). Επιπρόσθετα, μετρείται κάθετα από την επιφάνεια του αδιαπέρατου στρώματος του υπεδάφους του υδροφόρου ορίζοντα με φορά προς τα πάνω και συμβολίζεται με L (m). Το φορτίο h αναφέρεται και ως πιεζομετρικό φορτίο ή πιεζομετρικό δυναμικό και ταυτίζεται με το απόλυτο υψόμετρο της στάθμης του υπόγειου νερού σε μια γεώτρηση ανορυγμένη σε ελεύθερο υδροφορέα. Στους υπό πίεση υδροφορείς το φορτίο είναι το απόλυτο υψόμετρο που θα έφτανε το νερό, αν ο σωλήνας της γεώτρησης επεκτεινόταν πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Συμπεραίνεται ότι, η κίνηση του υπόγειου νερού σε ένα πορώδες μέσο οφείλεται στην υδροστατική πίεση και στη θέση του ως προς το επίπεδο αναφοράς. Η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου ανά μονάδα μήκους κατά τη διεύθυνση της υπόγειας ροής ονομάζεται υδραυλική κλίση και δίνεται από τη σχέση: $i=dH/dL$. Το υδραυλικό φορτίο H σε ένα σημείο του πορώδους μέσου πολλαπλασιασμένο με την επιτάχυνση της βαρύτητας g , δίνει το δυναμικό ροής Φ στο σημείο αυτό, δηλαδή $\Phi = H \cdot g$. Εν κατακλείδι, το Φ είναι η ενέργεια ανά μονάδα μάζας και το H η ενέργεια ανά μονάδα βάρους. Το υδραυλικό φορτίο δεν μένει σταθερό, αλλά μειώνεται κατά την κίνηση του υπόγειου νερού, λόγω απωλειών όπως οι τριβές.

Υδραυλική αγωγιμότητα (k): Η υδροπερατότητα ή υδραυλική αγωγιμότητα k χρησιμοποιείται στην Υδρογεωλογία για να χαρακτηριστεί η ευκολία της κίνησης του νερού δια μέσω ενός πορώδους μέσου. Συγκεκριμένα, ένα μέσο έχει υδραυλική αγωγιμότητα ίση με τη μονάδα, όταν μεταβιβάζει στη μονάδα του χρόνου κάθετα στη διεύθυνση της υπόγειας ροής, τη μονάδα του όγκου του νερού από μοναδιαία διατομή με υδραυλική κλίση ίση με τη μονάδα και την επικράτηση του κινηματικού ιξώδους. Το κινηματικό ιξώδες σχετίζεται με την εσωτερική τριβή και την αντίσταση του υγρού στην υπόγεια ροή. Η υδραυλική αγωγιμότητα έχει διαστάσεις ταχύτητας LT^{-1} .

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί χαρακτηρίζονται ως ακολούθως (Canstany, 1963):

- Υψηλής υδροπερατότητας $\rightarrow k \geq 10^{-2}$ m/s
- Μέτριας υδροπερατότητας $\rightarrow 10^{-6} < k < 10^{-2}$ m/s
- Μικρής υδροπερατότητας $\rightarrow 10^{-9} < k < 10^{-6}$ m/s
- Πρακτικά στεγανοί $\rightarrow k \leq 10^{-9}$ m/s

Η υδραυλική αγωγιμότητα υπολογίζεται με επιτόπου πειραματικές μετρήσεις δοκιμαστικές αντλήσεις, κοκκομετρία με τη βοήθεια εμπειρικών τύπων, εργαστηριακές μεθόδους και με ιχνηθετίσεις. Η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα, ως μέτρο κίνησης του νερού σε ακόρεστο μέσο, είναι μικρότερη από την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας σε κορεσμένο μέσο. Με βάση την περιεκτικότητα του νερού, η υδραυλική αγωγιμότητα ενός ακόρεστου μέσου (k

unsat) σε σχέση με την κορεσμένη τιμή (k) δίνεται από τη σχέση: $k_{unsat} = k [(S_s - S_o) / (1 - S_o)]^3$, όπου: S_s είναι ο βαθμός κορεσμού και S_o είναι ο υπολειμματικός κορεσμός που αντιπροσωπεύει το νερό των πόρων που είναι ακίνητο και δεσμεύεται από τις τριχοειδείς δράσεις (Χαραλάμπους, 2016).

Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας διάφορων γεωλογικών σχηματισμών.

Πίνακας 3 Τιμές υδραυλικές αγωγιμότητας (Καλλέργης, 1999)

Υλικό	Υδραυλική αγωγιμότητα (k)
Αργίλος	$2,3 \cdot 10^{-9}$
Γλύς	$9,2 \cdot 10^{-7}$
Λεπτόκοκκη Άμμος	$2,9 \cdot 10^{-5}$
Μεσόκοκκη Άμμος	$1,4 \cdot 10^{-4}$
Χονδρόκοκκη Άμμος	$5,2 \cdot 10^{-4}$
Χαλίκια μικρού μεγέθους	$5,2 \cdot 10^{-3}$
Χαλίκια μεσαίου μεγέθους	$3,1 \cdot 10^{-3}$
Μεγάλα χαλίκια	$1,7 \cdot 10^{-3}$

Απορροή (q): Απορροή είναι ο όγκος ρέοντος νερού ανά μονάδα χρόνου στο υδροφόρο στρώμα, και έχει διαστάσεις L^2T^{-1} . Για να γίνει όγκος ανά μονάδα χρόνου αρκεί να πολλαπλασιαστεί με το πλάτος του υδροφορέα. Κατά τον υπολογισμό του συγκεκριμένου μεγέθους στο σημείο εξόδου του υδροφορέα, λαμβάνεται υπόψη η συνολική απορροή ανά μονάδα χρόνου.

Ρυθμός επαναφόρτισης (r): Είναι ο ρυθμός φόρτισης των νερών του υπόγειου υδροφορέα λόγω κατείσδυσης (κατακρημνίσματα που διαπερνούν την επιφάνεια του εδάφους) και έχει διαστάσεις ταχύτητας LT^{-1} .

Μήκος (L): Είναι το μήκος του υδροφόρου ορίζοντα και έχει διαστάσεις L.

Μεταβιβαστικότητα (T): Είναι το γινόμενο της υδραυλικής αγωγιμότητας (k) επί το πάχος του υδροφόρου στρώματος (D) και δίνεται από την εξίσωση: $T = k \cdot D$. Η μεταβιβαστικότητα εκφράζει τον όγκο νερού που διαπερνά μια μοναδιαία διατομή του υδροφόρου στρώματος με υδραυλική κλίση ίση με τη μονάδα και την επικράτηση του κινηματικού ιξώδους.

Αποθηκευτικότητα (S): Ο συντελεστής αποθηκευτικότητας ή υδροχωρητικότητας (S) είναι ο όγκος νερού που δύναται να ληφθεί ή να αποθηκευτεί από ένα κατακόρυφο πρίσμα ενός

υδροφόρου στρώματος με μοναδιαία επιφάνεια ανά μονάδα μεταβολής του φορτίου. Η αποθηκευτικότητα ορίζεται από τη σχέση: $S=dV/(Adh)$, όπου dV είναι ο όγκος νερού που απελευθερώνεται ή προστίθεται από τη μονάδα οριζόντιας επιφάνειας A , εξαιτίας μοναδιαίας μείωσης ή αύξησης του φορτίου dh . Από τον ορισμό αυτό προκύπτει ότι ο ρυθμός ταπείνωσης (μείωσης) της στάθμης ($dh/\Delta t$) σε έναν υπόγειο υδροφορέα επιφάνειας A και συντελεστή αποθηκευτικότητας S , για άντληση με παροχή q , χωρίς να συμβαίνει εμπλουτισμός, δίνεται από τη σχέση: $dh/\Delta t = q/(S \cdot A)$. Στους ελεύθερους υπόγειους υδροφορείς ο συντελεστής αποθηκευτικότητας είναι καθαρός αριθμός και παίρνει τιμές που κυμαίνονται από 1% - 30%, ενώ στους υπό πίεση υδροφορείς κυμαίνεται από 0,0001% - 0,5%. Η μεγάλη αυτή διαφορά οφείλεται στον διαφορετικό μηχανισμό απελευθέρωσης νερού από τα δύο είδη υδροφορέων. Στους υπό πίεση υδροφορείς η αφαίρεση ή η προσθήκη νερού οφείλεται σε διόγκωση του νερού και συμπίεση του υδροφορέα, επομένως η αποθηκευτικότητα συναρτάται με την ελαστικότητα του υδροφορέα και τη συμπιεστότητα του περιεχομένου σ' αυτόν υπόγειου νερού. Πρακτικά αυτό συνεπάγεται ότι για να εξαχθούν αξιόλογες ποσότητες νερού από τα υπό πίεση υδροφόρα στρώματα, απαιτούνται μεγάλες μειώσεις της πιεζομετρικής στάθμης σε μεγάλη έκταση του υπόγειου υδροφορέα. Ο συντελεστής αποθηκευτικότητας S στους ελεύθερους υδροφορείς συμπίπτει με το ενεργό πορώδες, ενώ στους υπό πίεση υπόγειους υδροφορείς ισχύει η ακόλουθη εξίσωση: $S = \gamma \cdot D \cdot (\alpha + \beta S_y)$, όπου γ είναι το ειδικό βάρος του νερού, D το πάχος του υδροφορέα, S_y το ενεργό πορώδες, α ο συντελεστής συμπιεστότητας του υδροφορέα και β ο συντελεστής συμπιεστότητας του νερού.

Κλίση (α): ορίζεται η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του επιπέδου του υδροφόρου ορίζοντα και του οριζόντιου επιπέδου.

Πορώδες (n): Το πορώδες (n) ή ολικό πορώδες είναι ένα μέτρο των διακένων, δηλαδή των πόρων, των κενών και των ρωγμών που υπάρχουν σε ένα πέτρωμα ή έδαφος και εκφράζεται με το λόγο του συνολικού όγκου των διακένων (V_k) προς τον συνολικό όγκο του πετρώματος ή εδάφους ($V_{ολ.}$), συνεπώς εκφράζεται από την σχέση: $n = V_k/V_{ολ.}$. Μερικοί εδαφικοί και γενικότερα γεωλογικοί σχηματισμοί επιτρέπουν τη διείσδυση και κυκλοφορία του νερού δια μέσω των διακένων. Από την υδραυλική σκοπιά εντάσσονται στη γενική κατηγορία του πορώδους μέσου. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν ιζηματογενή, μη πλήρως στερεοποιημένα εδάφη ή και στερεοποιημένα πετρώματα που έχουν όμως πρώτα αποκτήσει ρωγμές, είτε από χημική διάβρωση, όπως οι ασβεστόλιθοι, είτε από ρηγμάτωση, όπως είναι τα εκρηξιγενή και μεταμορφωσιγενή εδάφη. Τα πορώδη αυτά μέσα χαρακτηρίζονται από στατικές και δυναμικές υδραυλικές ιδιότητες. Χαρακτηρίζοντας τα ως δεξαμενές νερού έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό τη χωρητικότητα τους, ενώ ως γνωστοί αγωγοί διέλευσης νερού χαρακτηρίζονται από τις αντιστάσεις που προβάλλουν στην κίνηση του νερού. Όπως προκύπτει με βάση τα πιο πάνω, δεν υφίσταται απόλυτα συμπαγές πέτρωμα, δηλαδή συμπαγής στερεά φάση για δείγμα με διαστάσεις της τάξης των μερικών m^3 ή μερικών δεκάδων m^3 . Αντιθέτως, οι σχηματισμοί πετρωμάτων παρουσιάζουν περισσότερες ή λιγότερες ασυνέχειες, πόρους και γενικότερα κενά διαφόρων τύπων. Γενικά ο βαθμός και η ένταση με τα οποία παρουσιάζονται αυτά τα κενά εκφράζεται με μία υδρογεωλογική παράμετρο, ονομαζόμενη πορώδες. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται ενδεικτικές τιμές του ολικού πορώδες από 0 μέχρι 60% (Χαραλάμπους, 2016).

Πίνακας 4 Ενδεικτικές Τιμές ολικού πορώδους σε πετρώματα (Καλλέργης, 1999)

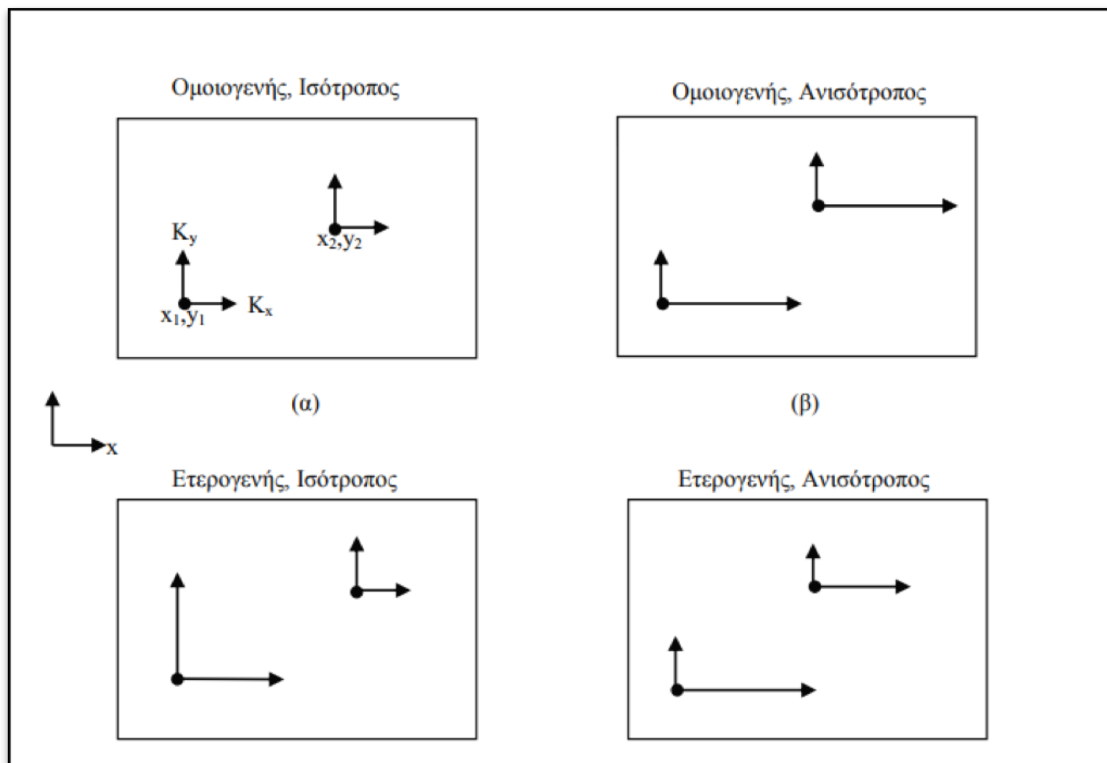
Προσχώσεις	Πορώδες (%)	Ιζηματογενή πετρώματα	Πορώδες (%)	Κρυσταλλικά πετρώματα	Πορώδες (%)
Μικρά χαλίκια	24 - 36	Ψαμμίτες	5 - 30	Ρωγματωμένα	0 - 10
Μεγάλα χαλίκια	25 - 38	Ιλυόλιθοι	21 - 40	Μη ρωγματωμένα	0 - 5
Χονδρόκοκκη άμμος	31 - 48	Ασβεστόλιθοι	0 - 40	Βασάλτες	3 - 35
Λεπτόκοκκη άμμος	26 - 53	Καρστικοποιημένοι ασβεστόλιθοι	0 - 40	Αποσαθρωμένοι γρανίτες	34 - 57
Ϊλύς	34 - 61	Σχιστόλιθοι	0 - 10		
Άργιλος	34 - 60				

3.1.2 Ομοιογένεια και ανισοτροπία υδροφορέων

Ένας υδροφορέας χαρακτηρίζεται ως ομοιογενής όταν η υδραυλική αγωγιμότητά του, διατηρείται σταθερή για κάθε διεύθυνση σε κάθε σημείο. Συνήθως συναντώνται ετερογενείς υδροφορείς καθώς οι υδραυλικές ιδιότητές τους μεταβάλλονται χωρικά.

Ισότροπος χαρακτηρίζεται ένας υδροφόρος ορίζοντας, ο οποίος σε ορισμένο σημείο του εμφανίζει την ίδια υδραυλική αγωγιμότητα σε όλες τις κατευθύνσεις. Στην περίπτωση που σε ένα συγκεκριμένο σημείο του υδροφορέα παρατηρούνται διαφορετικές υδραυλικές ιδιότητες σε κάθε κατεύθυνση τότε αυτός χαρακτηρίζεται ως ανισότροπος.

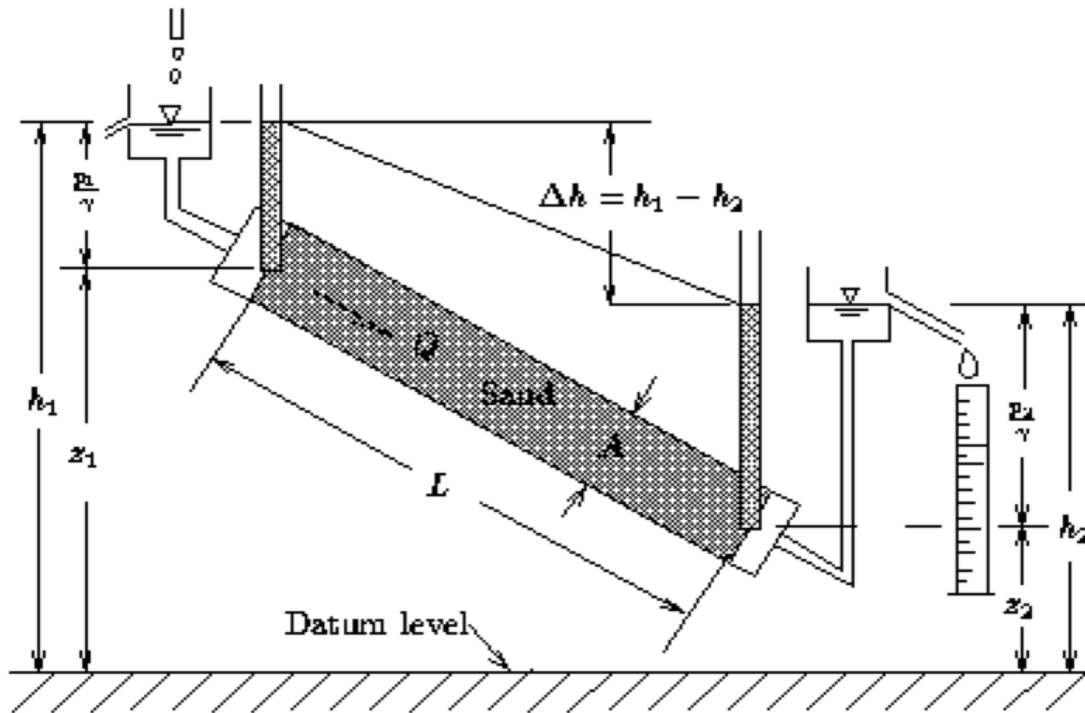
Η ύπαρξη ανομοιογένειας ή ανισοτροπίας σε έναν υδροφορέα δυσχεραίνει την επίλυση του προβλήματος. Παρατηρείται βαθμιαία ή και απότομη μεταβολή των τιμών των μεγεθών αυτών, και έτσι συνηθίζεται η παραδοχή ομοιογενούς ή ισότροπου υδροφορέα.



Σχήμα: 19 Χαρακτηριστικές περιπτώσεις ομοιογένειας και ανισοτροπίας (τροποποιημένο από Freeze and Cherry, 1979)

3.1.3 Ο νόμος του Darcy

Οι κινήσεις των υπόγειων νερών πραγματοποιούνται από θέσεις υψηλότερων ενεργειακών σταθμών σε θέσεις χαμηλότερων ενεργειακών σταθμών. Η θέση και η πίεση είναι δύο σημαντικοί παράγοντες που συμβάλουν στον καθορισμό της ενεργειακής στάθμης στα υπόγεια ύδατα, καθώς η κινητική ενέργεια είναι πρακτικά ασήμαντη λόγω των μικρών ταχυτήτων των υπόγειων νερών. Η κίνηση του νερού χάνει ενέργεια λόγω των τριβών στα τοιχώματα του στερεού εδαφικού σκελετού, ενώ η απώλειά της ανά μονάδα μήκους έχει βρεθεί πειραματικά ότι είναι ανάλογη της ταχύτητας του υπόγειου νερού για στρωτή ροή. Ο Γάλλος μηχανικός υδραυλικής Henry Darcy το 1856 μελέτησε την κίνηση του νερού διαμέσου οριζοντίων στρωμάτων άμμου, τα οποία χρησιμοποιούνται συνήθως σαν φίλτρα. Αναλυτικότερα, ανάμεσα σε δύο δεξαμενές υπήρχε ένας σωλήνας με εμβαδόν διατομής A γεμάτος με πορώδες υλικό (άμμο) κορεσμένο σε νερό. Εξαιτίας της υψομετρικής διαφοράς που υπήρχε στις στάθμες του νερού στις δύο δεξαμενές, η κίνηση του νερού παρατηρήθηκε από το μεγαλύτερο προς το μικρότερο πιεζομετρικό φορτίο. Ένα ογκομετρικό δοχείο μετά τον εκχειλιστή της δεύτερης δεξαμενής χρησίμευε για την μέτρηση της παροχής Q , που περνούσε μέσα από πορώδες υλικό. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε από τον Darcy.



Σχήμα: 20 Πειραματική διάταξη Darcy (Bear,2001)

Η μελέτη αυτή οδήγησε τον Darcy στο συμπέρασμα ότι ο ρυθμός ροής (Q/A) μέσω ενός πορώδους μέσου είναι ανάλογος των απωλειών φορτίου, ανάλογος ενός συντελεστή K που χαρακτηρίζει το πορώδες υλικό και αντιστρόφως ανάλογος του μήκους πορείας της ροής. Η διατύπωση αυτή αποτελεί το Νόμο του Darcy, θεμελιώδη νόμο κίνησης της υπόγειας υδραυλικής, και εκφράζεται από την ακόλουθη μαθηματική σχέση:

$$\frac{Q}{A} = -K \frac{\Delta h}{L} \quad \text{ή} \quad q = -K \frac{\Delta h}{L} \quad (3)$$

Όπου: Q : παροχή, [L^3/T]

A : επιφάνεια, [L^2]

K : υδραυλική αγωγιμότητα, [L/T]

Δh : απώλεια φορτίου που εκφράζεται ως $\left(\frac{p_1}{\gamma+z_1}\right) - \left(\frac{p_2}{\gamma+z_2}\right)$, [L]

L : το μήκος της στήλης, [L]

q: η ταχύτητα του Darcy ή ειδική παροχή, [L/T]

Στην παραπάνω εξίσωση (3), το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ότι η ταχύτητα της ροής είναι προς την κατεύθυνση που έχουμε μείωση του φορτίου.

Ο όρος $\Delta h/L$ συμβολίζεται με J και είναι η υδραυλική κλίση η οποία εκφράζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$J = \frac{h_1 - h_2}{L} = \frac{\Delta h}{L} \quad (4)$$

Ως εμπειρικός νόμος, ο νόμος του Darcy, έχει περιορισμένα όρια εφαρμογής. Βασικό κριτήριο χρήσης του είναι ο αριθμός Reynolds, που θα πρέπει να παίρνει τιμές μικρότερες της κρίσιμης. Ο αριθμός Reynolds για τη ροή των ρευστών μέσα σε πορώδες υλικό ορίζεται από τη σχέση (Νάνου – Γιάνναρου, 2017):

$$Re = \frac{V_D d_{10}}{\nu} \quad (5)$$

Όπου V_D : η ταχύτητα διαστάλαξης,

ν : η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού

d_{10} : η χαρακτηριστική μέση διάμετρος των κόκκων του πορώδους υλικού

Έτσι ο νόμος του Darcy ορίζεται όταν ο αριθμός Reynolds είναι μικρότερος της μονάδας $Re < 1$, δηλαδή για στρωτή ροή. Στην περίπτωση των υπόγειων υδάτων λόγω των μικρών παροχών ισχύει ο περιορισμός αυτός, πράγμα που εξασφαλίζει την χρήση του νόμου χωρίς καμία προϋπόθεση, πλην των περιπτώσεων που συναντάται μεγάλη υδραυλική κλίση π.χ. κοντά σε φρέαρ άντλησης και σε περιπτώσεις τυρβώδους ροής π.χ. όταν υπάρχει βασάλτης ή ασβεστόλιθος με μεγάλα ανοίγματα (Καρατζάς, 2012).

3.1.3.1 Νόμος Darcy σε ισότροπα μέσα

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 3.1.2, ισότροπος χαρακτηρίζεται ένας υδροφόρος ορίζοντας ο οποίος σε ορισμένο σημείο του εμφανίζει την ίδια υδραυλική αγωγιμότητα σε όλες τις κατευθύνσεις. Για την πλήρη τρισδιάστατη περιγραφή της υπόγειας ροής σε ισότροπα μέσα προκύπτει (Bear, 2012):

$$\begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\partial h}{\partial y} \\ \frac{\partial h}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Αναλυτικότερα για τρισδιάστατη ροή ομογενούς ισότροπου πορώδους μέσου n , ο νόμος του Darcy διατυπώνεται ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} q_x &= KJ_x = -K \frac{\partial h}{\partial x} = nV_x \\ q_y &= KJ_y = -K \frac{\partial h}{\partial y} = nV_y \\ q_z &= KJ_z = -K \frac{\partial h}{\partial z} = nV_z \end{aligned} \quad (7)$$

Όπου n : το πορώδες του υφιστάμενου εδάφους

V : η ταχύτητα του νερού και

h : το πιεζομετρικό φορτίο

3.1.4 Νόμος Darcy σε ανισότροπα μέσα

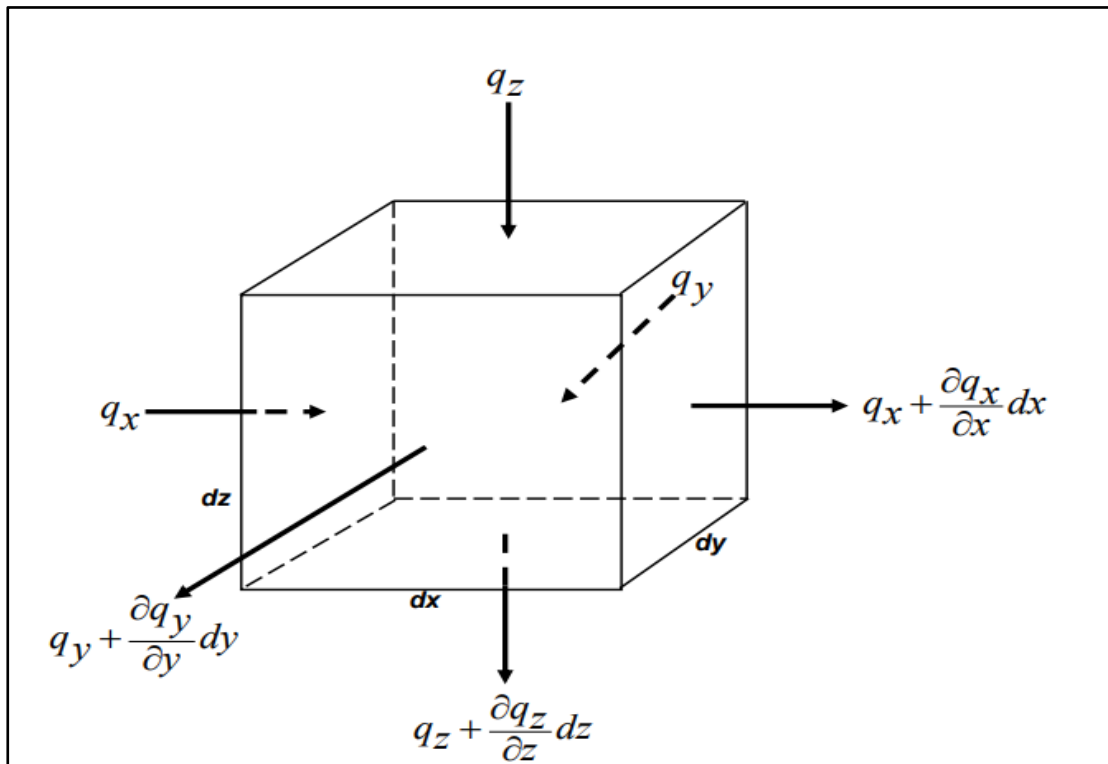
Στην περίπτωση που ο εδαφικός σχηματισμός είναι ανισότροπος, δηλαδή η υδραυλική αγωγιμότητα μεταβάλλεται από κατεύθυνση σε κατεύθυνση, αλλάζει η μορφή του νόμου του Darcy. Αυτό συμβαίνει διότι σε ένα ανισότροπο μέσο η ειδική παροχή σε μια διεύθυνση δεν εξαρτάται μόνο από υδραυλική κλίση στην κατεύθυνση αυτή, αλλά και από τις αντίστοιχες υδραυλικές κλίσεις στις κάθετες διευθύνσεις. Έτσι για ανισότροπα μέσα ο νόμος του Darcy εμφανίζεται στην γενική του μορφή:

$$\begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\partial h}{\partial y} \\ \frac{\partial h}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (8)$$

3.1.5 Η εξίσωση της συνέχειας

3.1.5.1 Γενική εξίσωση μόνιμης ροής

Η ροή σε πορώδη μέσα περιγράφεται από την εξίσωση της συνέχειας ή εξίσωση διατήρησης της μάζας. Η εξίσωση αυτή νοεί ότι η μάζα του νερού σε διαφορικό όγκο διατηρείται, δηλαδή η μάζα που εισέρχεται όταν αφαιρεθεί από την μάζα που εξέρχεται ανά μονάδα χρόνου ισούται με την μεταβολή της μάζας στον διαφορικό αυτό όγκο που φαίνεται και στην πιο κάτω αναπαράσταση.



Σχήμα: 21 Διαφορικός όγκος αναφοράς (Freeze and Cherry, 1979)

Η εξίσωση της συνέχειας από μαθηματικής πλευράς διατυπώνεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 \text{Παροχή μάζας}_{in} &= \text{Παροχή μάζας}_{out} \rightarrow \\
 q_x dz dy + q_y dz dx + q_z dx dy & \\
 &= \left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) dz dy + \left(q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \right) dx dz \\
 &+ \left(q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \right) dx dy \\
 &\rightarrow -\frac{\partial q_x}{\partial x} dx dy dz - \frac{\partial q_y}{\partial y} dx dy dz - \frac{\partial q_z}{\partial z} dx dy dz = 0 \rightarrow \\
 \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} &= 0
 \end{aligned} \tag{9}$$

Συνδυάζοντας την εξίσωση (9) και την εξίσωση (6), προκύπτει η γενική εξίσωση μόνιμης ροής (steady state) σε ομοιογενείς και ισότροπους υδροφορείς:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \tag{10}$$

3.1.5.2 Γενική εξίσωση μη μόνιμης ροής

Όταν οι συνθήκες ροής ενός μέσου δεν είναι μόνιμες, τότε σημαντικό ρόλο στην επίλυση των παραπάνω εξισώσεων έχει η ειδική αποθηκευτικότητα S_o . Για μονοδιάστατη ροή, η ειδική παροχή που εισέρχεται στον μοναδιαίο όγκο ελέγχου του παραπάνω σχήματος (Σχήμα 21) είναι q_x , ενώ η παροχή που εξέρχεται είναι $q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx$.

Η μεταβολή στην αποθηκευμένη μάζα νερού για μη μόνιμες συνθήκες δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\Delta V = S_o V \frac{\partial h}{\partial t} dt \tag{11}$$

Βάση της αρχής διατήρησης της μάζας προκύπτουν οι εξής εξισώσεις:

$$\begin{aligned}
 m &= m_{in} - m_{out} \rightarrow \Delta m \\
 &= \rho \left(\left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) dy dz \right) dt - \rho (q_x dy dz) dt \\
 \Delta m &= \rho \Delta V = \rho S_o V \frac{\partial h}{\partial t} dt = \rho S_o dx dy dz \frac{\partial h}{\partial t} dt
 \end{aligned} \tag{12}$$

Από τις δύο εξισώσεις (11) και (12), προκύπτει η εξίσωση συνέχειας για μονοδιάστατη ροή η οποία είναι:

$$S_o \frac{\partial h}{\partial t} = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x}\right) \quad (13)$$

Αν στην εξίσωση (13) αντικατασταθεί η ειδική παροχή q από την εξίσωση του νόμου Darcy (3) τότε προκύπτει η εξίσωση μονοδιάστατης ροής για ισότροπο και ομοιογενές μέσο:

$$S_o \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial h}{\partial x} \right) \rightarrow \frac{S_o \partial h}{K \partial t} = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \quad (14)$$

Στην περίπτωση ανισότροπου μέσου ισχύει η παραπάνω εξίσωση με την προϋπόθεση ότι η διεύθυνση στην οποία εξελίσσεται η ροή ταυτίζεται με μία από τις τρεις διεύθυνσης διαπερατότητας του πορώδους μέσου. Σύμφωνα με τις εξισώσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω μπορεί να δοθεί και η γενική εξίσωση ροής σε τρισδιάστατη ροή. Επομένως η γενική εξίσωση ροής για ομοιογενές και ισότροπο μέσο σε μη σταθερές συνθήκες είναι η εξής:

$$\frac{S_o \partial h}{K \partial t} = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \quad (15)$$

Τέλος, η γενική εξίσωση ροής για ετερογενές και ανισότροπο μέσο σε μη σταθερές συνθήκες είναι η παρακάτω:

$$S_o \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - R \quad (16)$$

Όπου R : ο ρυθμός άντλησης ή εμπλουτισμού του υπόγειου υδροφορέα [LT^{-1}].

Για την εφαρμογή της παραπάνω εξίσωσης (16) θα πρέπει οι κύριοι άξονες της υδραυλικής αγωγιμότητας να ταυτίζονται με τις καρτεσιανές συντεταγμένες του συστήματος.

3.2 Γενικά στοιχεία προσομοίωσης υπόγειας ροής

Η προσομοίωση της υπόγειας ροής έχει ως στόχο την κατασκευή ενός ομοιώματος των υπόγειων υδάτων ώστε να αναπαραστήσει ένα φυσικό υδροδυναμικό σύστημα υπόγειων νερών με ένα μαθηματικό ισοδύναμο. Η ανάπτυξη προσομοιώσεων καθώς και η διεξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων εξαρτώνται από την σωστή εννοιολογική προσέγγιση του υδρογεωλογικού συστήματος και την επιλογή της βέλτιστης μαθηματικής αναπαράστασης των φυσικών χαρακτηριστικών. Τα μαθηματικά μοντέλα υπόγειων νερών προσομοιώνουν την κίνηση του νερού έμμεσα, χρησιμοποιώντας μια εξίσωση αντιπροσωπευτική των φυσικών διαδικασιών του συστήματος, μαζί με εξισώσεις που περιγράφουν το φορτίο ή την παροχή στα όρια του μοντέλου (οριακές συνθήκες). Αν το πρόβλημα είναι εξαρτώμενο και από το χρόνο, χρησιμοποιείται και μια εξίσωση που περιγράφει την αρχική κατανομή του φορτίου στο σύστημα (αρχική συνθήκη).

Πληθώρα μαθηματικών μοντέλων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τα επιθυμητά αποτελέσματα ή ακόμα και να συνδυαστούν. Τα εργαλεία που παρέχει το κάθε μοντέλο εκτελούν διαφορετικές λειτουργίες όπως είναι ο χαρακτηρισμός της θέσης, η κατασκευή του εννοιολογικού μοντέλου, η βαθμονόμηση, η δημιουργία καννάβου, η τελική επεξεργασία και η αναπαράσταση. Ο χρήστης δύναται με την επιλογή ενός ή πληθώρας σημείων (κελιών) να εισάγει και να τροποποιήσει τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά και τις οριακές συνθήκες της περιοχής μελέτης. Τέλος, τα αποτελέσματα είναι γενικευμένα παρέχοντας στον χρήστη την ικανότητα να συνδέει το προς επίλυση πρόβλημα με την αντίστοιχη γραφική απεικόνιση.

Το σύνολο των εντολών που χρησιμοποιούνται για την επίλυση ενός μοντέλου με υπολογιστή αποτελούν το πρόγραμμα ή κώδικα. Το πρόγραμμα είναι γενικής χρήσης, ενώ ένα νέο μοντέλο σχεδιάζεται για κάθε εφαρμογή και περιλαμβάνει τις αρχικές και οριακές συνθήκες, το δίκτυο υπολογισμών και τις τιμές των παραμέτρων του προγράμματος συγκεκριμένα για την περιοχή εφαρμογής και τις υδρολογικές πιέσεις που ασκούνται στο υπό μελέτη σύστημα. Τα μαθηματικά μοντέλα υπόγειων νερών χρησιμοποιούνται ως πλαίσιο εργασίας για την οργάνωση δεδομένων πεδίου, καθώς και ως εργαλεία για τον προσδιορισμό της θέσης και των χαρακτηριστικών των ορίων του, την αποτίμηση της δυναμικότητάς του. Στις περισσότερες περιπτώσεις στόχος της κατάρτισης ενός μοντέλου υπόγειων νερών είναι η πρόβλεψη των συνεπειών μιας προτεινόμενης δράσης και με αυτή την έννοια τα μοντέλα υπόγειων νερών είναι αναπόσπαστο και ιδιαίτερης σημασίας κομμάτι οποιουδήποτε σχεδίου διαχείρισης υδατικών πόρων (Wasson et al., 2003, Irvine et al., 2004).

3.2.1 Ταξινόμηση μοντέλων προσομοίωσης

Η επίλυση των προβλημάτων προσομοίωσης της υπόγειας ροής πραγματοποιείται είτε με φυσικά μοντέλα είτε με την χρήση υπολογιστή. Με τα φυσικά μοντέλα γίνεται άμεση αναπαράσταση του υπό εξέταση προβλήματος στο εργαστήριο, σε μικρότερη ή μεγαλύτερη κλίμακα από αυτό. Μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η δυσκολία εφαρμογής της, λόγω της πολυπλοκότητας των φυσικών συστημάτων. Χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικό υπολογιστή, το πρόβλημα μπορεί να λυθεί αναλυτικά (αναλυτικά μοντέλα) ή μέσω αριθμητικής μεθόδου (αριθμητικά μοντέλα). Όσο αφορά το αναλυτικά μοντέλα, αυτά εφαρμόζονται κυρίως σε απλοποιημένα συστήματα, δηλαδή μόνιμη μονοδιάστατη ροή με ενιαίες υδρολογικές και χημικές ιδιότητες. Λόγω των προϋποθέσεων αυτών η χρήση τους περιορίστηκε σε προβλήματα πολύ μικρής κλίμακας. Έτσι για πολυπλοκότερες συνθήκες όπως ακανόνιστα γεωμετρικά όρια, ανισοτροπία συστήματος, χωρικά μεταβαλλόμενοι παράμετροι, ρυθμοί άντλησης και τροφοδοσίας, χρησιμοποιούνται τα αριθμητικά μοντέλα. Για την απλούστευση της επίλυσης των προβλημάτων, χρησιμοποιούνται αριθμητικές μέθοδοι με συνηθέστερες τις πεπερασμένες διαφορές και τα πεπερασμένα σημεία (Καβαλιεράτου, 2007).

3.2.2 Μεθοδολογία εφαρμογής μοντέλων προσομοίωσης

Ο σχεδιασμός και η εφαρμογή ενός μοντέλου ακολουθεί μία σειρά διαδικασιών η οποία περιλαμβάνει επιλογή και επαλήθευση του κώδικα, σχεδιασμό του μοντέλου, βαθμονόμηση, ανάλυση ευαισθησίας και τελικά πρόβλεψη. Συχνά τα μοντέλα χρησιμοποιούνται χωρίς να είναι γνωστή εκ των προτέρων η αξιοπιστία των προβλέψεών τους ή παραβιάζοντας τις παραδοχές και τις οριακές συνθήκες που ενυπάρχουν σ' αυτά (ASTM, 1992). Για το λόγο αυτό πολύ σημαντική συμβολή στη σύνθεση της διαδικασίας κατάρτισης ενός μοντέλου υπόγειων νερών, υπήρξε το πρωτόκολλο των Anderson και Woessner (1992) (Σχήμα 22). Το πρωτόκολλο αυτό περιγράφει τα κύρια σημεία μιας μεθοδολογίας για όλα τα στάδια δημιουργίας ενός μοντέλου. Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά τα βασικά σημεία που ακολουθεί μία μεθοδολογία για την δημιουργία ενός μοντέλου προσομοίωσης υπόγειων υδάτων (ASTM, 1992).

Καθορισμός στόχων μοντέλου: Οι στόχοι αυτοί καθορίζουν τις αντίστοιχες εξισώσεις και το λογισμικό που θα χρησιμοποιηθεί.

Ανάπτυξη εννοιολογικού μοντέλου του συστήματος: ορισμός των υδροστρωματογραφικών ενοτήτων και ορίων συστήματος. Συγκεντρώνονται τα δεδομένα υπαίθρου, καθορίζονται οι υδραυλικές παράμετροι που επικρατούν και εκτιμώνται ποσοτικά οι διάφορες συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου.

Επιλογή της αντίστοιχης εξίσωσης και του κατάλληλου λογισμικού: η επιλογή αυτή γίνεται εφόσον επαληθευτεί πως το λογισμικό που επιλέχθηκε είναι κατάλληλο να περιγράψει τους μηχανισμούς που λαμβάνουν χώρα στο πορώδες μέσο του υπό εξέταση προβλήματος. Η επαλήθευση αυτή μπορεί να γίνει με τη σύγκριση της αριθμητικής και της αναλυτικής λύσης, αν η δεύτερη υπάρχει, ώστε να αποδειχθεί ότι επιλύει ορθά τις εξισώσεις που συνιστούν το μαθηματικό μοντέλο.

Σχεδιασμός-κατασκευή μοντέλου: κατά τη διαδικασία αυτή, καθορίζονται οι αρχικές και οριακές συνθήκες, και επιλέγονται οι υδραυλικές παράμετροι με σκοπό τη χωρική διακριτοποίηση.

Βαθμονόμηση (calibration): κατά την διαδικασία αυτή, τροποποιούνται οι παράμετροι εισόδου που είχαν δοθεί στο πρόγραμμα προκειμένου να προσεγγιστούν καλύτερα τα υδραυλικά δεδομένα του υπό εξέταση υδροφορέα. Η βαθμονόμηση πραγματοποιείται είτε με την μέθοδο της δοκιμής και σφάλματος (trial and error) είτε με τη χρήση πολυπλοκότερων μαθηματικών μεθόδων αυτόματης βαθμονόμησης (inverse modelling) όπως είναι οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης.

Επαλήθευση μοντέλου (validation): χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους που προέκυψαν κατά τη βαθμονόμηση του μοντέλου δημιουργείται ένα δεύτερο σύνολο αποτελεσμάτων, ώστε να ελεγχθεί η αξιοπιστία του μοντέλου.

Ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis): σκοπός της διαδικασίας αυτής είναι να διαπιστωθεί η αβεβαιότητα της προσομοίωσης μεταβάλλοντας τα δεδομένα εισόδου. Αν η μεταβολή μιας παραμέτρου ή οριακής συνθήκης διαφοροποιεί σημαντικά το αποτέλεσμα του μοντέλου, αυτό σημαίνει πως το μοντέλο παρουσιάζει ευαισθησία στην παράμετρο αυτή ή την συνθήκη.

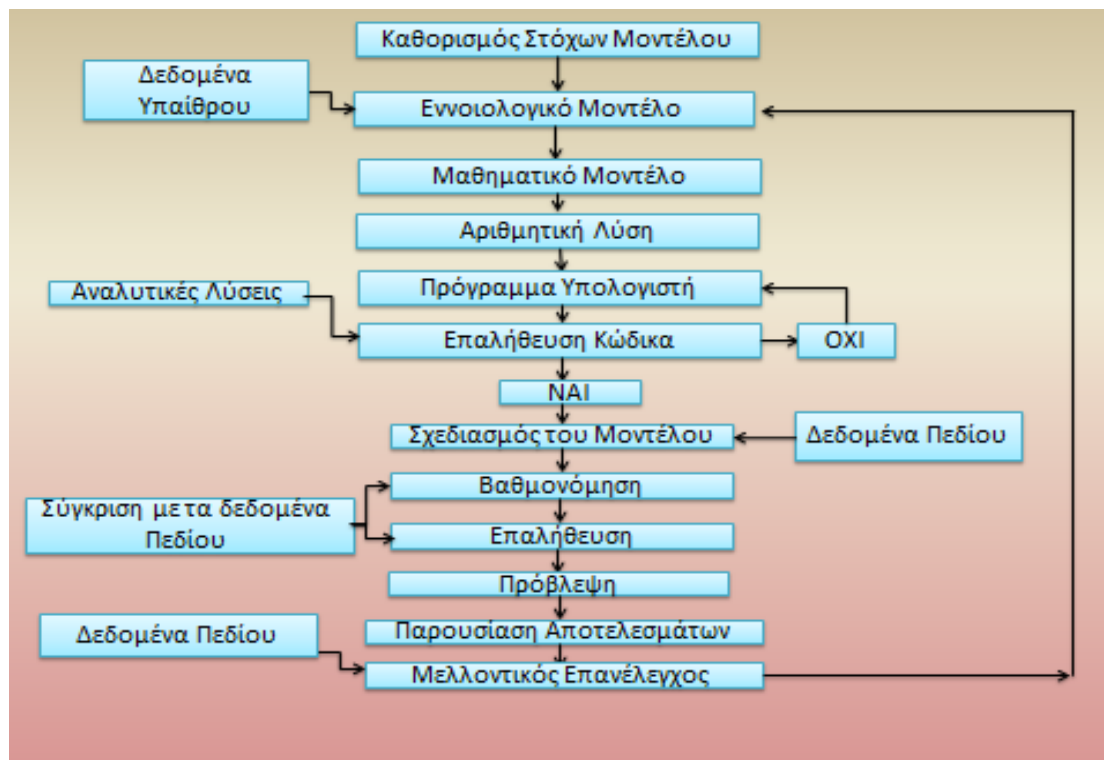
Πρόβλεψη (prediction): με την ολοκλήρωση των παραπάνω διαδικασιών το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μελλοντικά σενάρια. Κατά την διαδικασία αυτή το μοντέλο εκτελείται με σταθερές παραμέτρους ρύθμισης αλλά διαφοροποιώντας τις πιέσεις που εκτιμάται ότι θα αλλάξουν στο μέλλον. Οι προβλέψεις που γίνονται από το μοντέλο αποτελούν εκτιμήσεις και συνήθως εμπεριέχουν σφάλματα

Προγνωστική ανάλυση ευαισθησίας: για να ποσοτικοποιήσει την επίδραση της αβεβαιότητας στις τιμές των παραμέτρων της πρόβλεψης. Πεδία εκτιμώμενων μελλοντικών πιέσεων προσομοιώνονται για να ελέγξουν τον αντίκτυπο στην πρόβλεψη του μοντέλου.

Παρουσίαση του μοντέλου και των αποτελεσμάτων: απαραίτητη η περιγραφή και γραφική απεικόνιση τόσο της όλης διαδικασίας όσο και των αποτελεσμάτων.

Επανέλεγχος του μοντέλου: η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα ύστερα από ένα μεγάλο χρονικό διάστημα από την ρύθμιση του μοντέλου. Συλλέγονται δεδομένα υπαίθρου και ελέγχεται αν οι προβλέψεις αποδειχθούν σωστές, έτσι το μοντέλο επαληθεύεται για το χρονικό διάστημα που εξετάζεται.

Επανασχεδιασμός του μοντέλου (Model redesign): στην περίπτωση που ο επανέλεγχος του μοντέλου οδηγήσει σε διαφοροποιήσεις στην συμπεριφορά του συστήματος τότε είναι απαραίτητη η αλλαγή του εννοιολογικού μοντέλου ή των παραμέτρων προσομοίωσης.



Σχήμα: 22 Πρωτόκολλο κατάρτισης ενός μοντέλου υπόγειων νερών (τροποποιημένο από Anderson & Woessner,1992)

3.2.3 Αριθμητικές μέθοδοι προσομοίωσης

Η επίλυση των προβλημάτων προσομοίωσης των υπόγειων υδροφορέων πραγματοποιείται με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων, λόγω της ευκολίας χρήσης έναντι των αναλυτικών. Στη μοντελοποίηση των υπόγειων υδάτων χρησιμοποιούνται οι παρακάτω πέντε αριθμητικές μέθοδοι:

- Πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference Method)
- Πεπερασμένων στοιχείων (Finite Elements Method)
- Ολοκληρωμένων πεπερασμένων διαφορών (Integrated Finite Difference Method)
- Μέθοδος ολοκληρωμένης οριακής εξίσωσης (Boundary Integral Equation Method)
- Αναλυτικών στοιχείων (Analytic Elements Method)

Οι μέθοδοι των πεπερασμένων διαφορών και των πεπερασμένων στοιχείων είναι αυτές που χρησιμοποιούνται περισσότερο κατά την προσομοίωση των υπόγειων υδάτων. Η επιλογή μεταξύ των μεθόδων αυτών εξαρτάται από τη φύση του προβλήματος καθώς και την προτίμηση του χρήστη. Μεγαλύτερη ευκολία στη χρήση, την κατανόησή της και τον προγραμματισμό παρουσιάζει η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών. Επιπλέον, η συγκεκριμένη μέθοδος απαιτεί λιγότερα δεδομένα και στοιχεία για την κατασκευή του πλέγματος. Όσον αφορά την μέθοδο των πεπερασμένων σημείων, προσεγγίζει καλύτερα τα όρια ενός ακανόνιστου σχήματος διότι διαχειρίζεται καλύτερα τις ελαττωματικές ζώνες και προσομοιώνει σημειακές πηγές και επιφάνειες με διαρροή.

Παρά το γεγονός πως η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι μια ειδική περίπτωση της μεθόδου των πεπερασμένων σημείων, οι δύο αυτές μέθοδοι παρουσιάζουν διαφορές κυρίως στη φιλοσοφία επίλυσης. Με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών υπολογίζεται μια τιμή για το υδραυλικό ύψος σε κάθε κόμβο, η τιμή αυτή αποτελεί ταυτόχρονα και το υδραυλικό ύψος του κελιού γύρω από τον κόμβο αυτό. Δεν ορίζεται ο τρόπος μεταβολής του υδραυλικού ύψους από τον έναν κόμβο στον άλλον. Αντίθετα, στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, ορίζεται ακριβώς ο τρόπος που μεταβάλλεται το υδραυλικό ύψος μέσα σε ένα στοιχείο με την βοήθεια πολλαπλασιαστικών συναρτήσεων. Τα υδραυτικά ύψη υπολογίζονται για ευκολία από τους κόμβους, αλλά το υδραυλικό ύψος ορίζεται παντού μέσω των βασικών συναρτήσεων. Η μέθοδος ολοκληρωμένης οριακής εξίσωσης, και αναλυτικών στοιχείων είναι σχετικά νέες τεχνικές και δεν έχουν ακόμα χρησιμοποιηθεί ευρέως. Η μέθοδος των ολοκληρωμένων πεπερασμένων διαφορών σχετίζεται στενά με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (Βελεγράκη, 2004).

3.2.4 Χωρική διακριτοποίηση

Για την εφαρμογή της αριθμητικής μεθόδου σχεδιάζεται το δίκτυο υπολογισμών το οποίο αποτελείται από κόμβους. Στα δίκτυα πεπερασμένων διαφορών οι κόμβοι βρίσκονται είτε στα κέντρα των αντίστοιχων κελιών (block-centered grid) είτε στις κορυφές τους (mesh-centered grid). Οι δύο τύποι δικτύου διαφέρουν κυρίως στον τρόπο που χειρίζονται τα όρια του μοντέλου. Όταν οι κόμβοι βρίσκονται στα κέντρα των αντίστοιχων κελιών, τότε τα κελιά σχεδιάζονται έτσι ώστε το αδιαπέρατο όριο να συμπίπτει με την εξωτερική πλευρά του κελιού, ενώ το όριο γνωστού φορτίου να συμπίπτει με τον κόμβο (μέσο του κελιού). Όταν οι κόμβοι βρίσκονται στις κορυφές των κελιών τους, τότε και τα δύο είδη ορίων συμπίπτουν με τους οριακούς κόμβους του δικτύου. Στα μοντέλα υπόγειων νερών οι περισσότεροι κώδικες πεπερασμένων διαφορών χρησιμοποιούν τον πρώτο τύπο δικτύου υπολογισμών (block-centered) γιατί αυτός ο τρόπος ορισμού των ορίων είναι πιο εύκολος στο χειρισμό του από μαθηματική άποψη (Anderson and Woessner, 1992).

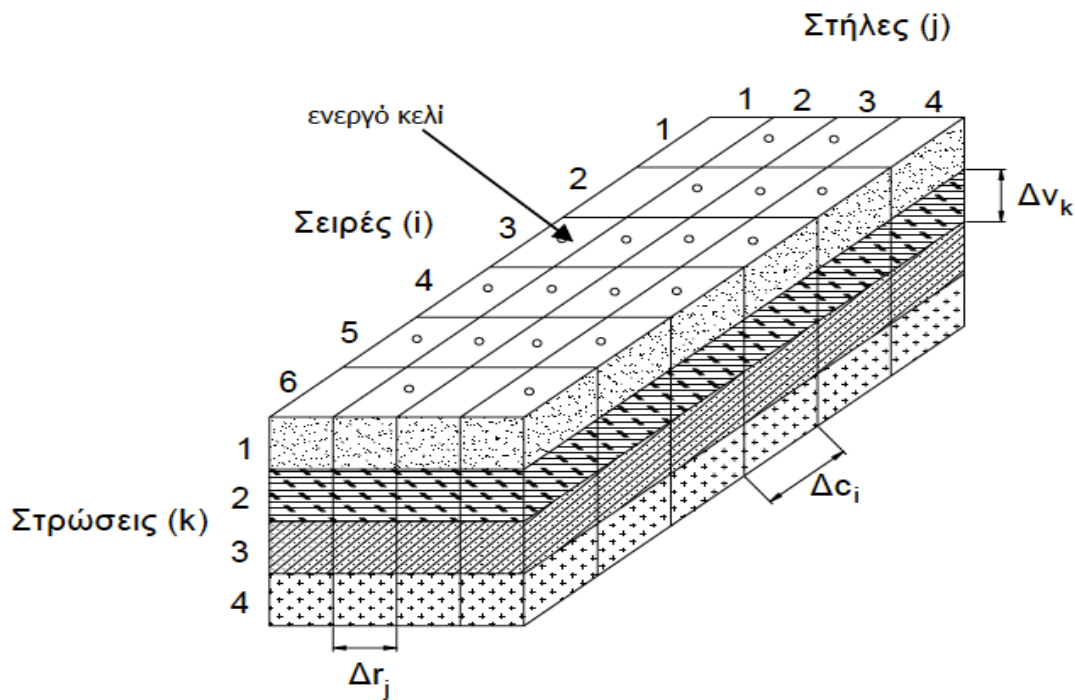
Ο προσανατολισμός των δικτύων πεπερασμένων διαφορών πρέπει να είναι τέτοιος ώστε οι x και y διευθύνσεις να είναι παράλληλες με τις κύριες διευθύνσεις της ροής. Αυτό συντελεί στο να ελαχιστοποιείται το σφάλμα στο ισοζύγιο νερού (Wylie, 2003).

Η επιλογή του βήματος της χωρικής διακριτοποίησης παίζει σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό του δικτύου και στην αποτελεσματικότητα του μοντέλου να προσεγγίσει την ελεύθερη επιφάνεια του νερού στον υδροφόρο (ή την πιεζομετρική επιφάνεια). Γενικά, η αναμενόμενη κλίση του φορτίου σε κάθε διεύθυνση καθορίζει το μέγεθος του επιλεγόμενου βήματος, σε συνδυασμό με το μέγεθος της έκτασης που καταλαμβάνει το μοντέλο. Επίσης, το χωρικό βήμα καθορίζεται και από τα υδρολογικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά του συστήματος που πρέπει να προσομοιωθούν. Για παράδειγμα, στο θεμελιώδες μοντέλο ένα ρέμα απεικονίζεται με μια γραμμή, ενώ στο δίκτυο υπολογισμών από μια συνέχεια κελιών που πρέπει να είναι σε επαφή μεταξύ τους. Το μέγεθος των κελιών θα καθορίσει το πόσο αντιπροσωπευτική είναι αυτή η απεικόνιση. Το βήμα κατά μήκος των διευθύνσεων x και y μπορεί να είναι το ίδιο ή διαφορετικό. Επίσης, το βήμα κάθε διεύθυνσης μπορεί να είναι σταθερό ή μεταβαλλόμενο κατά μήκος της διεύθυνσης. Στην περίπτωση που μεταβάλλεται, ο λόγος της διάστασης σ' αυτή τη

διεύθυνση δύο γειτονικών κελιών (μεγαλύτερο/μικρότερο) δεν πρέπει να ξεπερνά το 1.5 (Anderson and Woessner, 1992).

Εξίσου σημαντική είναι και η επιλογή του χρονικού βήματος στα μοντέλα μη μόνιμης ροής. Κάποιες τεχνικές επίλυσης δεν επιτρέπουν την αύξηση του χρονικού βήματος πέρα από ένα όριο γιατί η λύση γίνεται ασταθής. Η επίδραση της χρονικής διακριτοποίησης πρέπει να ελέγχεται δοκιμάζοντας διαφορετικά χρονικά βήματα και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του μοντέλου. Το μέγεθος του χρονικού βήματος δεν είναι απαραίτητο να είναι σταθερό σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Επειδή η λύση είναι πιο ευαίσθητη στις αυξομειώσεις του φορτίου που οφείλονται στη μεταβολή των πιέσεων που ασκούνται στο σύστημα, μια πρακτική που εφαρμόζεται σε πολλούς κώδικες είναι η χρήση μικρότερων χρονικών βημάτων όταν εισάγεται μια νέα ή μεταβάλλεται μια από τις ήδη ασκούμενες πιέσεις και η σταδιακή αύξηση του χρονικού βήματος στη συνέχεια. Τα χρονικά βήματα αυξάνονται με γεωμετρική πρόοδο, συνήθως με λόγο 1.2 - 1.5. Το 2 θεωρείται από κάποιους ερευνητές μια καλή επιλογή (Anderson and Woessner, 1992).

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η χωρική διακριτοποίηση ενός υποθετικού συστήματος υδροφορέων η οποία συνίσταται από ένα πλέγμα ή δίκτυο υπολογισμών (grid), αποτελούμενο από κελιά, η θέση των οποίων καθορίζεται με βάση τις σειρές, τις στήλες και τις στρώσεις του πλέγματος. Χρησιμοποιείται ένα σύστημα τριών δεικτών, i, j, k , όπου, για ένα σύστημα που αποτελείται από "nrow" σειρές, "ncol" στήλες και "nlay" στρώσεις, i είναι ο δείκτης των σειρών ($i = 1, 2, \dots, nrow$), j είναι ο δείκτης των στηλών ($j = 1, 2, \dots, ncol$) και k είναι ο δείκτης των στρώσεων ($k = 1, 2, \dots, nlay$). Επιπλέον, φαίνονται οι διαστάσεις των κελιών στις τρεις διευθύνσεις: Δx_i στη διεύθυνση x (κατά μήκος των σειρών), Δy_j στη διεύθυνση y (κατά μήκος των στηλών) και Δz_k στη διεύθυνση z (κατά μήκος των στρώσεων). Το φορτίο υπολογίζεται σε κάθε κόμβο, όπου κόμβος το κέντρο κάθε κελιού.



Σχήμα: 23 Διακριτοποίηση ενός υποθετικού συστήματος υδροφορέων (τροποποιημένο από McDonald, M.G., & A.W. Harbaugh, 1988)

Η εξίσωση ροής του υπόγειου νερού με τη μορφή πεπερασμένων διαφορών προκύπτει με την εφαρμογή της εξίσωσης συνέχειας, σύμφωνα με την οποία το αλγεβρικό άθροισμα των εισερχόμενων και εξερχόμενων παροχών σε κάθε κελί, πρέπει να ισούται με το ρυθμό μεταβολής του όγκου του νερού που είναι αποθηκευμένο στο κελί, με την παραδοχή ότι η πυκνότητα του υπόγειου νερού είναι σταθερή. Αυτό εκφράζεται μαθηματικά με τη σχέση:

$$\sum Q_i = SS \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V \quad (17)$$

Όπου Q_i : η παροχή που εισρέει σε κάθε κελί

SS : η ειδική αποθηκευτικότητα για μοναδιαία αύξηση του φορτίου

ΔV : ο όγκος του κελιού

Δh : η μεταβολή του φορτίου στο χρονικό διάστημα Δt

Συνδυάζοντας την παραπάνω εξίσωση με την εξίσωση του Darcy (εξίσωση 3) και χρησιμοποιώντας προς τα πίσω διαφορές για την προσέγγιση της παραγώγου ως προς το χρόνο, προκύπτει η ακόλουθη γενική μορφή της εξίσωσης ροής του υπόγειου νερού με τη μορφή πεπερασμένων διαφορών, για το κελί (i,j,k) , όπως εφαρμόζεται και στο MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988):

$$\begin{aligned}
& CR_{i,j-\frac{1}{2},k} (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j+\frac{1}{2},k} (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) \\
& + CC_{i-\frac{1}{2},j,k} (h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i+\frac{1}{2},j,k} (h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) \\
& + CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) \\
& + P_{i,j,k} h_{i,j,k}^m Q_{i,j,k} = SS_{i,j,k} (\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}}
\end{aligned} \quad (18)$$

Όπου:

$h_{i,j,k}^m, h_{i-1,j,k}^m, h_{i,j-1,k}^m, h_{i,j,k-1}^m, h_{i+1,j,k}^m, h_{i,j+1,k}^m, h_{i,j,k+1}^m$: τα φορτία στο κελί (i,j,k) και τα γειτονικά του για τρέχον χρονικό βήμα

$h_{i,j,k}^{m-1}$: το φορτίο στο κελί (i,j,k) για το προηγούμενο χρονικό βήμα

t_m : το τρέχον χρονικό βήμα

t_{m-1} : το προηγούμενο χρονικό βήμα

$\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$: ο όγκος του κελιού (i,j,k)

$SS_{i,j,k}$: η ειδική αποθηκευτικότητα του κελιού (i,j,k)

$P_{i,j,k} h_{i,j,k}^m$: παροχές που εισέρχονται/εξέρχονται στο κελί (i,j,k) και εξαρτώνται από το φορτίο, από πηγές όπως επαφή με τον πυθμένα ποταμού ή λίμνης, εξατμισοδιαπνοή κλπ

$Q_{i,j,k}$: παροχές εμπλουτισμού ή άντλησης, δεν εξαρτώνται από το φορτίο όπως οι γεωτρήσεις.

Οι συντελεστές των όρων των φορτίων καλούνται "αγωγιμότητες" (conductances), αντιπροσωπεύουν σταθερούς όρους που συνδυάζουν τις συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας σε κάθε διεύθυνση και τις διαστάσεις του πλέγματος και δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$CR_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \frac{\Delta c_i \Delta v_k}{\Delta r_{j-1/2}}$$

$$CR_{i,j+1/2,k} = KR_{i,j+1/2,k} \frac{\Delta c_i \Delta v_k}{\Delta r_{j+1/2}}$$

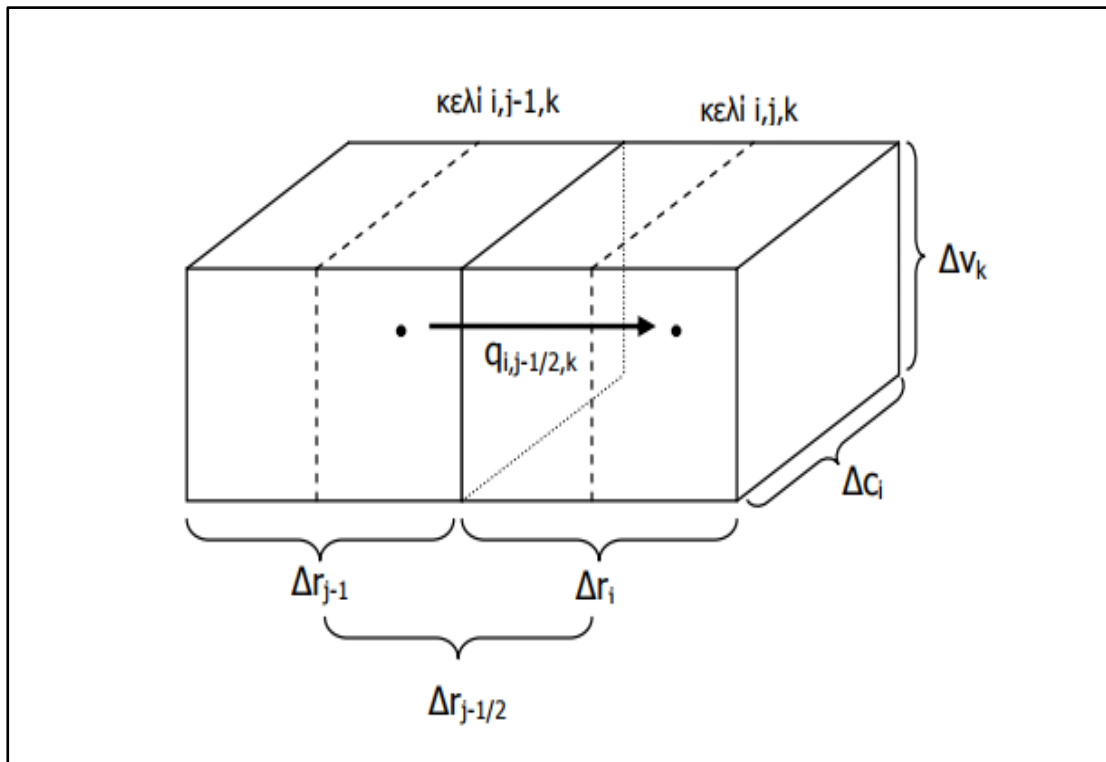
$$CC_{i-1/2,j,k} = KC_{i-\frac{1}{2},j,k} \frac{\Delta r_j \Delta v_k}{\Delta c_{i-1/2}}$$

$$CC_{i+1/2,j,k} = KC_{i+\frac{1}{2},j,k} \frac{\Delta r_j \Delta v_k}{\Delta c_{i+1/2}}$$

$$CV_{i,j,k-1/2} = KV_{i,j,k-\frac{1}{2}} \frac{\Delta r_j \Delta c_i}{\Delta v_{k-1/2}}$$

$$CV_{i,j,k+1/2} = KV_{i,j,k+\frac{1}{2}} \frac{\Delta r_j \Delta c_i}{\Delta v_{k+1/2}}$$

Όπου $KR_{i,j-\frac{1}{2},k}$ ορίζεται η υδραυλική αγωγιμότητα κατά μήκος της σειράς i μεταξύ των κόμβων i,j,k και $i,j-1,k$ όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. Όμοια ορίζονται και οι υδραυλικές αγωγιμότητες για τις υπόλοιπες συνιστώσες.



Σχήμα: 24 Εισροή στο κελί (i,j,k) από το κελί $(i,j-1,k)$ (Καβαλιεράτου, 2007)

3.2.5 Οριακές συνθήκες

Τα φυσικά υδρολογικά και γεωλογικά όρια του υπό μελέτη συστήματος, καθώς και τα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος που μπορούν να παίξουν το ρόλο ορίων, έχουν προσδιοριστεί στα πλαίσια της ανάπτυξης του θεμελιώδους μοντέλου. Τα φυσικά όρια μπορούν να αναπαρασταθούν μαθηματικά με διάφορους τρόπους. Στο στάδιο της κατάρτισης του μαθηματικού μοντέλου επιλέγεται η μαθηματική έκφραση των ορίων η οποία θεωρείται καταλληλότερη για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εφαρμογής. Ανάλογες μαθηματικές εκφράσεις χρησιμοποιούνται και για τα τεχνητά όρια. Η ορθή επιλογή των οριακών συνθηκών αποτελεί βασικό παράγοντα κατασκευής ενός αξιόπιστου και αντιπροσωπευτικού μοντέλου για την εξεταζόμενη περιοχή. Με τη χρήση οριακών συνθηκών καθορίζεται η εξαρτημένη μεταβλητή στάθμη (head) καθώς και η παράγωγος αυτής, η ροή του ύδατος (flux), στα όρια της περιοχής του προβλήματος. Πρέπει να επισημανθεί πως τα υδρογεωλογικά όρια των υδροφόρων συστημάτων σχηματίζονται από φυσικές παρουσίες οι οποίες και καθορίζουν την έκταση και το βάθος του υδροφορέα, ενώ ταυτόχρονα καθορίζουν και τις συνθήκες εμπλουτισμού του. Ως φυσικά όρια χαρακτηρίζονται τα αδιαπέρατα στρώματα καθώς και επιφανειακά και υπόγεια νερά όπως ποτάμια και ρήγματα καρστικού ή μη χαρακτήρα (Reilly, 2001).

Κατά τη μοντελοποίηση της υπόγειας ροής σε συνθήκες σταθερής κατάστασης (steady state case) η επιλογή των οριακών συνθηκών αποκτά μεγαλύτερη σημασία καθώς το είδος της υπόγειας ροής αλλά και η πιθανή εμφάνιση αποκλίσεων στα αποτελέσματα της προσομοίωσης εξαρτώνται από την επιλογή των οριακών συνθηκών. Γενικά οι οριακές συνθήκες κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες (Franke et al, 1987):

- Συνθήκες γνωστού φορτίου 1^{ης} Τάξης (Dirichlet)

Κατά τη συνθήκη αυτή εισάγεται ανά κόμβο η σταθερή τιμή του υδραυλικού ύψους. Το πρόγραμμα αυτόματα ορίζει ως σταθερούς όρους τις γραμμές και στήλες του πίνακα των συντελεστών, που σχετίζονται με αυτούς τους κόμβους και λαμβάνει υπόψη την κάθετη μεταβολή του υδραυλικού ύψους ανάλογα με το βάθος. Αυτό το είδος οριακής συνθήκης παρέχει μια ανεξάντλητη πηγή νερού για το σύστημα. Για παράδειγμα, όσο κι αν αυξηθούν οι αντλήσεις το όριο γνωστού φορτίου θα παρέχει την απαιτούμενη ποσότητα νερού για τη διατήρηση του φορτίου στη δεδομένη τιμή, όσο υπερβολική κι αν είναι αυτή η ποσότητα για το σύστημα. Αυτό το χαρακτηριστικό θα πρέπει να ελέγχεται κατά την εφαρμογή του μοντέλου (Franke et al, 1987).

-
- Συνθήκες γνωστής παροχής 2^{ης} Τάξης (Neumann)

Η ροή κατά μήκος ενός στοιχείου θεωρείται σταθερή, η ολοκλήρωση των σχέσεων δίνει τις κομβικές κατανομές.

- Συνθήκες μικτού τύπου ή παροχής εξαρτώμενης από το φορτίο 3^{ης} Τάξης (Cauchy)

Η συνθήκη αυτή συσχετίζει τις οριακές τιμές της στάθμης με τη ροή. Η ροή κατά μήκος του ορίου υπολογίζεται με δεδομένη μια τιμή του υδραυλικού ύψους στο όριο αυτό.

Η επίδραση των οριακών συνθηκών μπορεί να ελεγχθεί αλλάζοντας το όριο γνωστού φορτίου σε όριο γνωστής παροχής και το αντίστροφο. Αν η επίδραση στα οριακά φορτία και παροχές είναι ασήμαντη, οι οριακές συνθήκες δεν επηρεάζουν σημαντικά τη λύση (Anderson and Woessner, 1992).

Αν οι οριακές συνθήκες ενός μοντέλου εξαρτώνται από τις ασκούμενες πιέσεις, το μοντέλο δεν μπορεί να θεωρηθεί ως εργαλείο γενικής χρήσης και θα πρέπει να τροποποιηθεί αν οι ασκούμενες πιέσεις μεταβληθούν (Franke et al, 1987).

3.2.6 Αρχικές συνθήκες

Στα μοντέλα που προσομοιώνουν μη μόνιμες ροές, εκτός από τον ορισμό των οριακών συνθηκών απαιτείται και ο ορισμός της αρχικής συνθήκης, δηλαδή του αρχικού φορτίου σε όλη την περιοχή ροής που καλύπτει το δίκτυο υπολογισμών. Ως αρχική συνθήκη είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται η κατανομή του φορτίου που προκύπτει από την εφαρμογή ενός ρυθμισμένου μοντέλου σταθερής κατάστασης. Αυτό εξασφαλίζει ότι το αρχικό φορτίο είναι σύμφωνο με τις χρησιμοποιούμενες παραμέτρους και τα υδρολογικά δεδομένα που εισάγονται στο μοντέλο. Διαφορετικά, στα πρώτα χρονικά βήματα η αντίδραση του μοντέλου θα οφείλεται όχι μόνο στις ασκούμενες υδρολογικές πιέσεις αλλά και στην τάση να εξαλειφθεί η ασυμφωνία του αρχικού φορτίου με το μοντέλο (Franke et al, 1987).

Όταν δεν υπάρχει ένα ρυθμισμένο μοντέλο από το οποίο να μπορεί να υπολογιστεί η αρχική κατανομή του φορτίου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια αυθαίρετη κατανομή, η οποία συνήθως προκύπτει με παρεμβολή σε υπάρχουσες μετρήσεις φορτίου. Μετά τη διαδικασία ρύθμισης του μοντέλου της μη μόνιμης ροής, τα υπολογιζόμενα από αυτό φορτία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν αρχική συνθήκη σε εκτελέσεις πρόβλεψης (Watts, 1989). Αυτή η τεχνική στηρίζεται στο ότι η επίδραση της αρχικής συνθήκης ελαττώνεται όσο προχωρά η προσομοίωση, οπότε τα σφάλματα που σχετίζονται με την πιθανά λανθασμένη αρχική κατανομή του φορτίου θα είναι μικρά αν η προσομοίωση έχει διαρκέσει αρκετό χρόνο. Ένας τρόπος για να ελεγχθεί η σημασία και η διάρκεια της επίδρασης μιας λανθασμένης αρχικής συνθήκης είναι η εκτέλεση του μοντέλου με διαφορετικές αρχικές συνθήκες. Αν όλες δίνουν τα ίδια αποτελέσματα μετά από κάποια χρονικά βήματα, μπορούμε να υποθέσουμε ότι η

επίδραση της αρχικής συνθήκης είναι αμελητέα αν τα αποτελέσματα που μας ενδιαφέρουν δεν εμπίπτουν σ' αυτά τα πρώτα χρονικά βήματα (Καβαλιεράτου, 2007).

Ένας άλλος τρόπος ελέγχου της διάρκειας επίδρασης της αρχικής συνθήκης στηρίζεται στον υπολογισμό της χρονικής σταθεράς T (time constant) του υπό μελέτη συστήματος, η οποία όμως ορίζεται για ομογενή υδροφορέα, κλειστό (Domenico and Schwartz, 1998) ή ελεύθερο (Reilly and Harbaugh, 2004):

- Κλειστός υδροφορέας

$$T = \frac{S_s L^2}{K} \quad (19)$$

- Ελεύθερος υδροφορέας

$$T = \frac{S_y L^2}{BK} \quad (20)$$

Όπου T (T) είναι η χρονική σταθερά, S_s (L^{-1}) είναι ο συντελεστής ειδικής αποθήκευσης ενός κλειστού υδροφορέα, L (L) είναι ένα χαρακτηριστικό μήκος του συστήματος, K (m/T) είναι η υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφορέα, S_y είναι η ειδική απόδοση ενός ελεύθερου υδροφορέα και B (m) είναι το πάχος του. Ως L συνήθως επιλέγεται η απόσταση μεταξύ των ορίων του μοντέλου. Τα φυσικά συστήματα σπάνια είναι ομογενή, η χρονική σταθερά όμως μπορεί να δώσει μια εκτίμηση της τάξης μεγέθους του χρόνου πέρα από τον οποίο δεν παρατηρείται στα αποτελέσματα η επίδραση της αρχικής συνθήκης. Ο χρόνος που μεσολαβεί από την αρχική συνθήκη μέχρι την περίοδο για την οποία ενδιαφερόμαστε πρέπει να είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τη χρονική σταθερά.

3.2.7 Ανάλυση ευαισθησίας

Διάφορες μέθοδοι ανάλυσης ευαισθησίας (Frey and Patil, 2001) έχουν αναπτυχθεί και εφαρμόζονται σε διάφορα επιστημονικά πεδία, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη και εφαρμογή μοντέλων. Στα πλαίσια των μαθηματικών μοντέλων υπόγειων νερών, η ανάλυση ευαισθησίας συνήθως αναφέρεται στη διαδικασία κατά την οποία η τιμή κάθε μιας από τις παραμέτρους του μοντέλου μεταβάλλεται με συστηματικό τρόπο, μέσα στα όρια των αποδεκτών τιμών της, ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν σταθερές. Το μέγεθος της μεταβολής του φορτίου από τη βασική κατάσταση, που προκύπτει από τη μεταβολή της παραμέτρου, είναι ένα μέτρο της ευαισθησίας της λύσης ως προς τη συγκεκριμένη παράμετρο. Η "βασική κατάσταση" αναφέρεται στις τιμές των παραμέτρων που προέκυψαν από τη ρύθμιση του μοντέλου. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας εκφράζονται με την αντίστοιχη μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης που χρησιμοποιήθηκε για τη ρύθμιση του μοντέλου. Σύμφωνα με τους Anderson και Woessner (1992), θα πρέπει να εξετάζεται και η επίδραση στη χωρική

κατανομή των υπολοίπων του φορτίου, αλλά αυτό συνήθως δε συναντάται στις διάφορες εφαρμογές.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται είτε γραφικά είτε με μορφή πινάκων. Η χρήση πινάκων δεν ενδείκνυται για μεγάλο αριθμό παραμέτρων. Η γραφική παρουσίαση μπορεί να περιλαμβάνει:

- Γραφική παράσταση της αντικειμενικής συνάρτησης (ή της ποσοστιαίας μεταβολής της) ως προς την ποσοστιαία μεταβολή των παραμέτρων
- Γραφική παράσταση των καμπυλών του φορτίου κατά μήκος μιας σειράς ή στήλης του δικτύου υπολογισμών για τις διαφορετικές τιμές μιας παραμέτρου
- Σε μοντέλα μη μόνιμης ροής, γραφική παράσταση των καμπυλών του φορτίου σε έναν κόμβο ως προς τον χρόνο για τις διάφορες τιμές των παραμέτρων

Μια περισσότερο μεθοδική ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιείται με τον υπολογισμό των συντελεστών ευαισθησίας, με βάση τους οποίους σχεδιάζονται χάρτες ευαισθησίας, στους οποίους φαίνονται ευκρινώς οι περιοχές όπου το μοντέλο είναι πιο ευαίσθητο σε μεταβολές μιας συγκεκριμένης παραμέτρου (Hill et al, 2000).

Και στις δύο περιπτώσεις, κατά την αυθαίρετη συστηματική μεταβολή των τιμών των παραμέτρων και τον υπολογισμό συντελεστών ευαισθησίας, δεν ελέγχεται η συνδυασμένη επίδραση δύο ή περισσότερων παραμέτρων, η οποία μπορεί να είναι σημαντική (Frey and Patil, 2001). Η συνδυασμένη ανάλυση δίνει τη δυνατότητα να οριστεί ένα ευρύτερο πεδίο αληθοφανών λύσεων (Anderson and Woessner, 1992).

Η ανάλυση ευαισθησίας παίζει σημαντικό ρόλο και κατά τη διάρκεια της ρύθμισης του μοντέλου. Όταν η ρύθμιση γίνεται με τη μέθοδο δοκιμής και σφάλματος, η ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου ως προς τις τρέχουσες τιμές των παραμέτρων μιας δοκιμής βοηθά στον προσδιορισμό των παραμέτρων που η μεταβολή τους θα οδηγήσει σε καλύτερη προσέγγιση των μετρήσεων φορτίου, καθώς και στον προσδιορισμό του μεγέθους αυτής της μεταβολής. Πολλές από τις μεθόδους αυτόματης ρύθμισης λαμβάνουν επίσης υπόψη τους την ευαισθησία των παραμέτρων προκειμένου να προσδιορίσουν τη διεύθυνση προς την οποία θα κινηθούν με στόχο τη μείωση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης (Καβαλιεράτου, 2007).

3.3 Visual MODFLOW

3.3.1 Γενικά

Στην παρούσα διπλωματική εργασία για την προσομοίωση της υδροδυναμικής κατάστασης της λεκάνης της Μεσσαράς επιλέχθηκε το λογισμικό πακέτο Visual MODFLOW (Modular three dimensional finite ground water flow model) της Αμερικανικής Υπηρεσίας Γεωλογικών Ερευνών (U.S.G.S). Το συγκεκριμένο υπολογιστικό πρόγραμμα προσομοίωσης της ροής του υπόγειου νερού εκδόθηκε για πρώτη φορά το 1984 και είναι γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN.

Ο κώδικας MODFLOW αποτελεί ένα μαθηματικό ντετερμινιστικό αριθμητικό μοντέλο πεπερασμένων διαφορών. Δηλαδή, για να περιγράψει στοιχεία της υπόγειας ροής χρησιμοποιεί μαθηματικές εξισώσεις, οι οποίες σχηματίζονται βάσει των φυσικών νόμων που διέπουν την υπόγεια ροή (ντετερμινιστικό μοντέλο) (Κύρκου, 2008). Το πρόγραμμα στηρίζεται στην αριθμητική επίλυση μιας κύριας διαφορικής εξίσωσης όπως προκύπτει από την εφαρμογή της εξίσωσης διατήρησης της μάζας και του νόμου του Darcy. Η επίλυση των εξισώσεων γίνεται στο κέντρο των κυψελίδων του κανάβου (block-centered), όπου προσομοιώνεται η κίνηση του υπόγειου νερού στην κορεσμένη ζώνη πορώδους μέσου (Γιαννέλη, 2009). Επιτυγχάνεται έτσι η περιγραφή ολόκληρης της υπόγειας ροής του περιβάλλοντος που εξετάζεται, δίνοντας λύσεις για όσα σημεία του κανάβου επιθυμεί ο χρήστης (Παππά, 2010).

3.3.2 Θεμελιώδης εξίσωση ροής στο MODFLOW

Το MODFLOW προσομοιώνει σταθερή και μη σταθερή ροή σε ένα σύστημα ροής ακανόνιστου σχήματος, ενώ τα υδροφόρα στρώματα μπορεί να είναι περιορισμένα, ελεύθερα, ή ένας συνδυασμός αυτών των δύο. Οι ροές από εξωτερικά φορτία, όπως η ροή από και προς πηγάδια, η επιφανειακή φόρτιση, η εξατμισοδιαπνοή, η ροή προς σωλήνες αποστράγγισης, καθώς και η ροή μέσω των κοιτών των ποταμών μπορεί να προσομοιωθεί. Οι υδραυλικές αγωγιμότητες ή μεταφορικότητες για κάθε στρώμα μπορεί να διαφέρουν.

Η θεμελιώδης εξίσωση τρισδιάστατης ροής που χρησιμοποιείται από το MODFLOW (McDonald και Harbaugh, 1988 και Harbaugh, et.al., 2000) συνδυάζει τον νόμο του Darcy και την αρχή διατήρησης της μάζας μέσω της παρακάτω εξίσωσης:

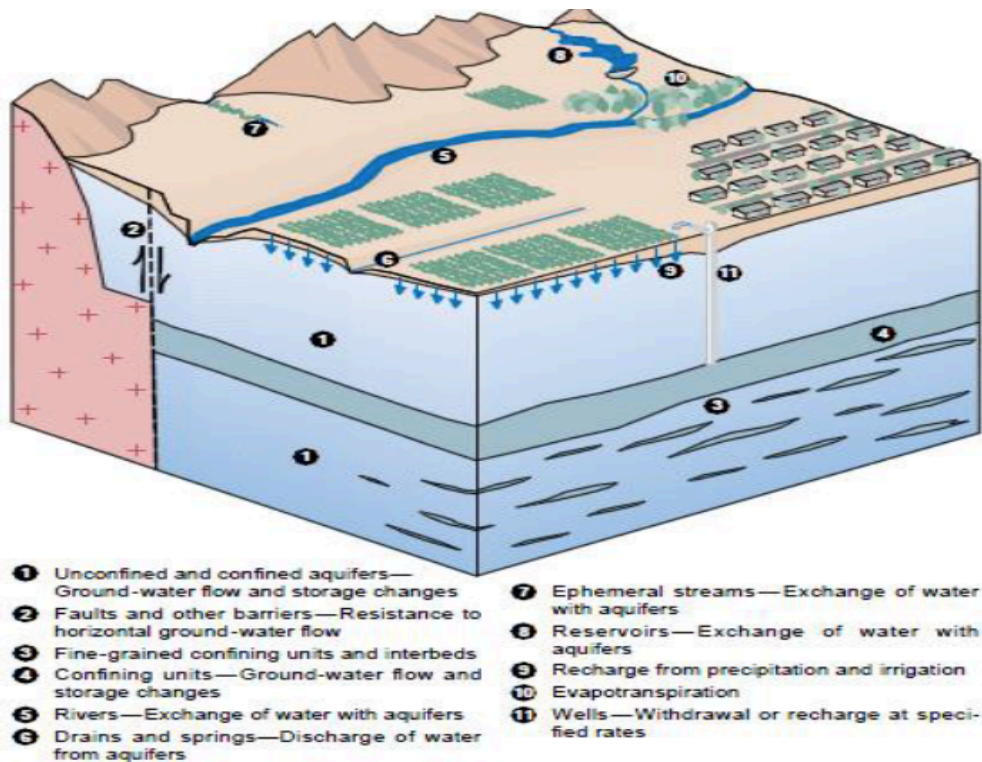
$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W \quad (21)$$

Όπου:

- K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} : οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας κατά μήκος των x , y , z αξόνων συντεταγμένων, οι οποίες θεωρούνται πως είναι παράλληλοι προς τους κύριους άξονες της υδραυλικής αγωγιμότητας (L^2T^{-1})
- h : το υδραυλικό φορτίο (L)
- W : η παροχή ανά μονάδα χρόνου που προέρχεται από εισροές ή εκροές του νερού (T^{-1})
- S_s : ειδική απόδοση του πορώδους μέσου (L^{-1})
- t : ο χρόνος (T)

Στη μέθοδο αυτή η διακριτοποίηση του χώρου μελέτης γίνεται σε πλέγμα ορθογωνικής μορφής και η επίλυση των εξισώσεων γίνεται επάνω στους κόμβους του πλέγματος είτε στο κέντρο κάθε κελιού (block centered grid) είτε στις κορυφές (mesh centered grid). Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται με επιτυχία στα προβλήματα δυο ή τριών διαστάσεων, με τον κάρναβο να είναι ορθογωνικής μορφής. Σε ότι αφορά την αριθμητική τεχνική που χρησιμοποιεί η μέθοδος αυτή είναι απλή, κατανοητή και από υπολογιστική άποψη άμεσα εφαρμόσιμη. Με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών το συνεχές σύστημα που περιγράφεται από την Εξίσωση 21 προσομοιώνεται ως ένας πεπερασμένος αριθμός σημείων στο χώρο και το χρόνο. Οι μερικές παράγωγοι αντικαθίστανται από όρους που υπολογίζονται από τις διαφορές φορτίου στα σημεία αυτά. Η διαδικασία καταλήγει σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων, το οποίο με την επίλυση του δίνει ως αποτελέσματα τιμές φορτίου στα συγκεκριμένα χωρικά και χρονικά σημεία του κάρναβου. Οι τιμές αυτές αποτελούν μια προσέγγιση της αναλυτικής λύσης της μερικής διαφορικής εξίσωσης (Εξίσωση 21).

Στο σχήμα που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά ενός συστήματος υδροφορέων που μπορούν να προσομοιωθούν με το MODFLOW.



Σχήμα: 25 Χαρακτηριστικά ενός συστήματος υδροφορέων που μπορούν να προσομοιωθούν με το Modflow (USGS, 2007)

3.3.3 Τύποι οριακών συνθηκών στο MODFLOW

Οι τύποι των κελιών (cells) που χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν τις συνθήκες στα όρια, είναι οι ακόλουθοι:

- α) Κελιά σταθερού φορτίου (constant head). Στα όρια αυτά η στάθμη παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αποδίδονται με τον κωδικό -1.
- β) Κελιά μηδενικής ροής (no flow boundary ή inactive). Στα όρια μηδενικής ροής περιλαμβάνονται τα κελιά όπου καμία ροή νερού από και προς αυτά δεν λαμβάνει χώρα, δηλαδή όταν οι εισροές είναι μηδενικές. Αποδίδονται με τον κωδικό 0.
- γ) Κελιά μεταβαλλόμενου φορτίου (variable head cell). Ο τύπος κελιών μεταβαλλόμενου φορτίου είναι αυτός κατά τον οποίο η στάθμη μεταβάλλεται με το χρόνο. Αποδίδονται με τον κωδικό 1.
- δ) Κελιά σταθερής εισροής ή constant flux ή GHB (general head boundaries). Στα όρια αυτά η εισροή παραμένει σταθερή και η στάθμη μεταβάλλεται ανάλογα με τις μεταβολές στις γειτονικές κυψελίδες.

Το πλήθος των κελιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση μιας περιοχής περιορίζεται μόνο από τη διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ. Το μέγεθος του μοντέλου προσδιορίζεται με τον αριθμό γραμμών, τον αριθμό στηλών και τον αριθμό στρωμάτων (NROW, NCOL, NLAY) (Παππά, 2010).

3.3.4 Μέθοδοι για την επίλυση των αλγεβρικών εξισώσεων από το MODFLOW

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

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

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

3.3.5 Κύριες υπορουτίνες του MODFLOW

Με σκοπό την απλούστευση της χρήσης του λογισμικού και για την επίτευξη ακριβέστερων αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, έχουν δημιουργηθεί κατάλληλες υπορουτίνες. Ο χρήστης δύναται να επιλέξει με βάση τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, τα πακέτα που θα επιφέρουν την βέλτιστη προσομοίωση. Τα κυριότερα πακέτα είναι τα ακόλουθα (McDonald et. al. (1988), Καραπλάφης (2008), Παππά Α. (2010), Πλιάκας (1998)):

Βασικό πακέτο (Basic Package, BAS): Τα δεδομένα που εισάγονται στο βασικό πακέτο έχουν να κάνουν με τον αριθμό των γραμμών και στηλών, τον αριθμό των υδροφόρων στρωμάτων, τη χρονική περίοδο προσομοίωσης και το βήμα κάθε περιόδου, τον καθορισμό των μονάδων μέτρησης και τις οριακές συνθήκες σε κάθε κόμβο του κανάβου. Ως αρχική συνθήκη εισάγεται η πιεζομετρία στην αρχή της χρονικής περιόδου που προέρχεται από μετρήσεις πεδίου.

Πακέτο κεντροβαρικής διάταξης της ροής (Block-Centered Flow Package, BCF): Στο πακέτο αυτό εισάγονται πληροφορίες που αφορούν τον τύπο του υδροφορέα(ελεύθερος, υπό πίεση, ημιελεύθερος), τις συνθήκες ροής (μόνιμη ή μη μόνιμη κατάσταση ροής), τις διαστάσεις των κελιών κατά τη διεύθυνση των αξόνων x και y , τις συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας για τους ελεύθερους υδροφόρους ορίζοντες ή της μεταβιβαστικότητας για τους υπό πίεση υδροφόρους ορίζοντες, το συντελεστή αποθηκευτικότητας ή το ενεργό πορώδες. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι κάθε κόμβος να εντοπίζεται στο κέντρο κάθε κελιού του μοντέλου.

Εμπλουτισμός (Recharge Package, RCH): Το πακέτο αυτό προσομοιώνει την επιφανειακή κατανομή του εμπλουτισμού προς το υπόγειο υδροφόρο σύστημα. Ο εμπλουτισμός αναφέρεται είτε στη διήθηση από τις βροχοπτώσεις είτε σε τεχνητό εμπλουτισμό. Ο εμπλουτισμός μπορεί να εισαχθεί μόνο στο ανώτερο στρώμα (top layer). Έτσι δεν χρειάζεται ο υπολογισμός του εμπλουτισμού που λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα σε πολλαπλά επίπεδα μιας κατακόρυφης

στήλης, επειδή ο φυσικός εμπλουτισμός εισέρχεται στον υδροφορέα από την επιφάνεια του εδάφους.

Γεωτρήσεις (Well Package): Το πακέτο αυτό αναφέρεται στα δεδομένα των γεωτρήσεων άντλησης ή εμπλουτισμού σε έναν υδροφορέα για μια δεδομένη περίοδο. Οι θετικές τιμές της παροχής υποδηλώνουν εμπλουτισμό, ενώ οι αρνητικές κατάσταση άντλησης. Ο ρυθμός άντλησης θεωρείται ανεξάρτητος τόσο από την έκταση των κελιών του κανάβου όσο και από την πιεζομετρική στάθμη.

Όριο γενικού φορτίου (General Head Boundary, G.H.B.): Το πακέτο αυτό χρησιμοποιείται κυρίως για να προσομοιώσει την υπόγεια υδραυλική επικοινωνία γειτονικών υδροφορέων. Έτσι, αυτό το πακέτο μπορεί να προσομοιώσει υδραυλική σύνδεση με έναν υδροφορέα που βρίσκεται εκτός των ορίων της περιοχής και υποδηλώνει την ύπαρξη μιας πλευρικής τροφοδοσίας. Η παροχή τροφοδοσίας είναι ανάλογη προς τη διαφορά της στάθμης ανάμεσα στην εξωτερική πηγή και σε κάθε κελί στην περιοχή του μοντέλου. Η παροχή αυτή εξαρτάται από την αγωγιμότητα (conductance) των υλικών ανάμεσα στην εξωτερική πηγή και τα κελιά του κανάβου με τα οποία γειτνιάζει. Η αγωγιμότητα είναι μια αριθμητική παράμετρος και ορίζεται ως η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα του κελιού πολλαπλασιαζόμενη με την εγκάρσια διατομή αυτής και διαιρούμενη με την απόστασή της από την εξωτερική πηγή τροφοδοσίας. Το πακέτο αυτό απαιτεί για κάθε κελί:

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

Σταθερό φορτίο (Constant head): Τα όρια σταθερού φορτίου μένουν αμετάβλητα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτό προϋποθέτει ότι στην έναρξη και στο τέλος της προσομοίωσης τα φορτία είναι σταθερά.

Εξατμισοδιαπνοή Evapotranspiration (ET): Το πακέτο αυτό προσομοιώνει τα αποτελέσματα της διαπνοής των φυτών και της εξάτμισης από την επιφάνεια του εδάφους.

Drains: Το πακέτο αυτό χρησιμοποιείται για την προσομοίωση των ορίων ροής που είναι εξαρτώμενα από το υδραυλικό φορτίο. Σε αυτό το πακέτο αν το φορτίο πέσει κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο, η ροή από τον αγωγό του κελιού πέφτει στο μηδέν.

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

4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ – ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Κύριες πιέσεις στην περιοχή μελέτης

4.1.1 Ποσοτική κατάσταση των υδάτων της Μεσσαράς - Πιέσεις

Η πεδιάδα της Μεσσαράς, που είναι το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, είναι η μεγαλύτερη πεδιάδα της Κρήτης και μια περιοχή με μεγάλη αγροτική παραγωγή. Σε ετήσια βάση, οι ανάγκες της πεδιάδας σε νερό για άρδευση είναι 5.000.000 m³. Η κάλυψη των υδατικών αναγκών της, μέχρι σήμερα, πραγματοποιείται κυρίως από το υπόγειο δυναμικό του προσχωματικού υδροφορέα ο οποίος διαχρονικά έχει υποστεί μεγάλες πιέσεις. Η βασική πίεση που έχουν υποστεί τα ύδατα της λεκάνης της Μεσσαράς είναι ποσοτικού χαρακτήρα και αφορά τις υπερετήσιες απολήψιμες ποσότητες οι οποίες υπερβαίνουν τον υπερετήσιο εμπλουτισμό του υδρογεωλογικού συστήματος. Η εκμετάλλευση των υπόγειων υδάτων στη λεκάνη της Μεσσαράς πραγματοποιείται από γεωτρήσεις εκ των οποίων πολλές είναι παράνομες με αποτέλεσμα να καθίσταται ακόμη δυσκολότερος ο έλεγχος. Η υπερεκμετάλλευση του υπόγειου υδροφορέα με ανεξέλεγκτο και μη ορθολογικό ρυθμό άντλησης, σε συνδυασμό με τις επικρατούσες υδρογεωλογικές συνθήκες, είχε σαν άμεσο επακόλουθο τη μείωση των υπόγειων υδάτων.

Με σκοπό την μείωση του προβλήματος αυτού και λόγω των αυξανόμενων αναγκών σε νερό για άρδευση, κατασκευάστηκε από το πρώην Υπουργείο Γεωργίας το Φράγμα της Φανερωμένης το οποίο ολοκληρώθηκε το 2005. Το φράγμα έγινε στον χείμαρρο Κουτσουλίδη, παραπόταμο του ποταμού Γεροπόταμου. Ο όγκος του νερού του ταμιευτήρα όταν είναι πλήρης, είναι 19.760.000 m³ και οι απολήψιμες ποσότητες ανά έτος είναι περίπου 8,7·10⁶ m³ (για περίοδο επαναφοράς 10 ετών). Με το νερό του ταμιευτήρα αρδεύονται επίσης 40.000 στρέμματα θερμοκηπιακών εκτάσεων του κάμπου της Μεσσαράς, αποτελούμενα από 60% ελαιόδεντρα, 30% κηπευτικά και 10% από διάφορα άλλα. Επιπλέον, το φράγμα προσφέρει καταφύγιο σε σπάνια πουλιά και ζώα αποτελώντας και πόλο έλξης για πολλούς επισκέπτες. Από το 2010, έτος που πληρώθηκε ο ταμιευτήρας, οι απαιτήσεις σε νερό για άρδευση στην περιοχή της Μεσσαράς καλύπτονταν τόσο από τις υφιστάμενες γεωτρήσεις όσο και από το νερό του φράγματος της Φανερωμένης. Η λεκάνη των Μοιρών αναμενόταν να δεχτεί το νερό του ταμιευτήρα το υδρολογικό έτος 2017-2018 ώστε να μειωθεί η ποσότητα του υπόγειου νερού που αντλείται από τις γεωτρήσεις. Ωστόσο, το υδρολογικό έτος 2016-2017, το νερό του ταμιευτήρα μειώθηκε σημαντικά φτάνοντας μόλις τα 3 εκατομμύρια κυβικά τον Απρίλιο του 2018. Επιπλέον, το συγκεκριμένο υδρολογικό έτος είναι ξηρό με μειωμένες βροχοπτώσεις. Με σκοπό να καλυφθούν οι ετήσιες ανάγκες της περιοχής (5.000.000 m³), λειτούργησαν στην περιοχή οι ιδιωτικές γεωτρήσεις τις οποίες ωστόσο δεν έχουμε εισάγει στο μοντέλο. Παρόλα αυτά, διαθέτουμε δεδομένα των παροχών άντλησης αυτών των γεωτρήσεων. Βάσει αυτών, αυξήσαμε τον όγκο του νερού άντλησης κατά 80%. Ως αποτέλεσμα αυτού ήταν οι ποσοτικές πιέσεις στην περιοχή να αυξηθούν

4.1.2 Ποιοτική κατάσταση υδάτων Μεσσαράς – πιέσεις

Η γεωργική δραστηριότητα αποτελεί τη σοβαρότερη ίσως αιτία υποβάθμισης του περιβάλλοντος στη Μεσσαρά και ειδικότερα του εδάφους και των υδάτινων αποδεκτών (υπόγεια και επιφανειακά νερά) η οποία μάλιστα δύσκολα αντιμετωπίζεται στο βαθμό που οι γεωργικές καλλιέργειες είναι εκτεταμένες χωρικά. Το πρόβλημα της γεωργικής ρύπανσης στη λεκάνη της Μεσσαράς κυρίως εντοπίζεται στις πεδινές περιοχές και ειδικότερα στις περιοχές όπου υπάρχουν καλλιεργήσιμες εκτάσεις και εντείνεται εκεί που δεν ακολουθούνται οι ορθές γεωργικές πρακτικές. Γενικότερα, η υπερβολική έως αλόγιστη χρήση φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων εξαιτίας της αύξησης της παραγωγής, καθώς και η υπερβολική κατανάλωση νερού, μπορεί να προκαλέσει σοβαρές διαταραχές τόσο στο φυσικό περιβάλλον, όσο και στον ίδιο τον άνθρωπο. Το μέρος των λιπασμάτων που δεν απορροφάται από τα φυτά συσσωρεύεται στο έδαφος και δύναται να καταλήξει στα υπόγεια νερά, δημιουργώντας προβλήματα ρύπανσης στους εν λόγω αποδέκτες. Παρόμοιες πορεία ακολουθούν και τα φυτοφάρμακα, καθώς η ποιότητα των υπεδάφειων υποστρωμάτων διευκολύνει την διείσδυση μέσω του εδάφους, με αποτέλεσμα την επιβάρυνση της ποιότητας των υπόγειων νερών (Κριτσωτάκης, 2009).

4.1.3 Άλλες πιέσεις

Η τροφοδοσία του υδρογεωλογικού συστήματος της Μεσσαράς πραγματοποιείται με τους ακόλουθους τρόπους:

- α) με απευθείας κατείσδυση από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα,
- β) με διηθήσεις των επιφανειακών απορροών από τους περιφερειακούς χειμάρρους που καταλήγουν στη λεκάνη,
- γ) με επιστροφές άντλησης και
- δ) με (πιθανές) διαρροές από τις αποχετεύσεις ή τους σηπτικούς/ απορροφητικούς βόθρους των οικισμών.

Όπως είναι φυσιολογικό, σημαντικότεροι από τους παραπάνω τρόπους είναι η τροφοδοσία από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και οι διηθήσεις από τους περιφερειακούς χειμάρρους που καταλήγουν στη λεκάνη. Το βασικό υδατόρεμα της περιοχής είναι ο Γεροπόταμος ο οποίος διατρέχει τη Μεσσαρά κατά μήκος του κεντρικού της τμήματος και τροφοδοτεί τη λεκάνη. Στη φυσική του κατάσταση, ο Γεροπόταμος ρέει συνεχώς και διατηρεί έναν υγρότοπο κοντά στην έξοδο της λεκάνης ενώ παράλληλα την εμπλουτίζει κατά μήκος της πορείας του. Την προηγούμενη δεκαετία, η Κρήτη αντιμετώπισε αυξημένο αριθμό ξηρασιών (Koutroulis et al., 2010b) με αποτέλεσμα τόσο οι βροχοπτώσεις όσο και η στάθμη του ποταμού Γεροπόταμου να μειωθούν. Ως άμεσο επακόλουθο ήταν να μειωθεί και η τροφοδοσία του υδρογεωλογικού συστήματος της Μεσσαράς. Σημαντική πίεση για την περιοχή δύναται να αποτελέσει η κλιματική αλλαγή τόσο στα επιφανειακά σώματα που εμπλουτίζουν την λεκάνη της Μεσσαράς, όσο και στα υπόγεια ύδατα. Αναλυτικά, οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και οι πιέσεις που θα δεχτεί η ευρύτερη περιοχή, εξετάζονται στην ενότητα 4.5.

4.2 Διαδικασία προσομοίωσης υπόγειας ροής

Κατά το πρώτο στάδιο για την διαδικασία προσομοίωσης της υπόγειας ροής (κατασκευή μοντέλου), η περιοχή μελέτης ψηφιοποιείται με χρήση του προγράμματος ArcGIS δημιουργώντας ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Στη συνέχεια, το ψηφιοποιημένο αρχείο εισάγεται στο πρόγραμμα VISUAL MODFLOW και επιλέγονται οι βασικοί παράμετροι του εννοιολογικού μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα, ορίζονται οι μονάδες των μεταβλητών (Πίνακας 5) καθώς και ο τύπος της ροής σε Transient flow διότι έχουμε μεταβαλλόμενη ροή κατά τη διάρκεια των περιόδων μελέτης. Επίσης επιλέγεται ο χρόνος προσομοίωσης για σταθερή κατάσταση (steady state simulation time) ώστε να είναι ίσος με 1000 ημέρες. Επιπλέον, εισάγεται στο πρόγραμμα αρχείο με τα υψόμετρα της περιοχής μελέτης μετά από ψηφιοποίηση με χρήση του προγράμματος ArcGIS.

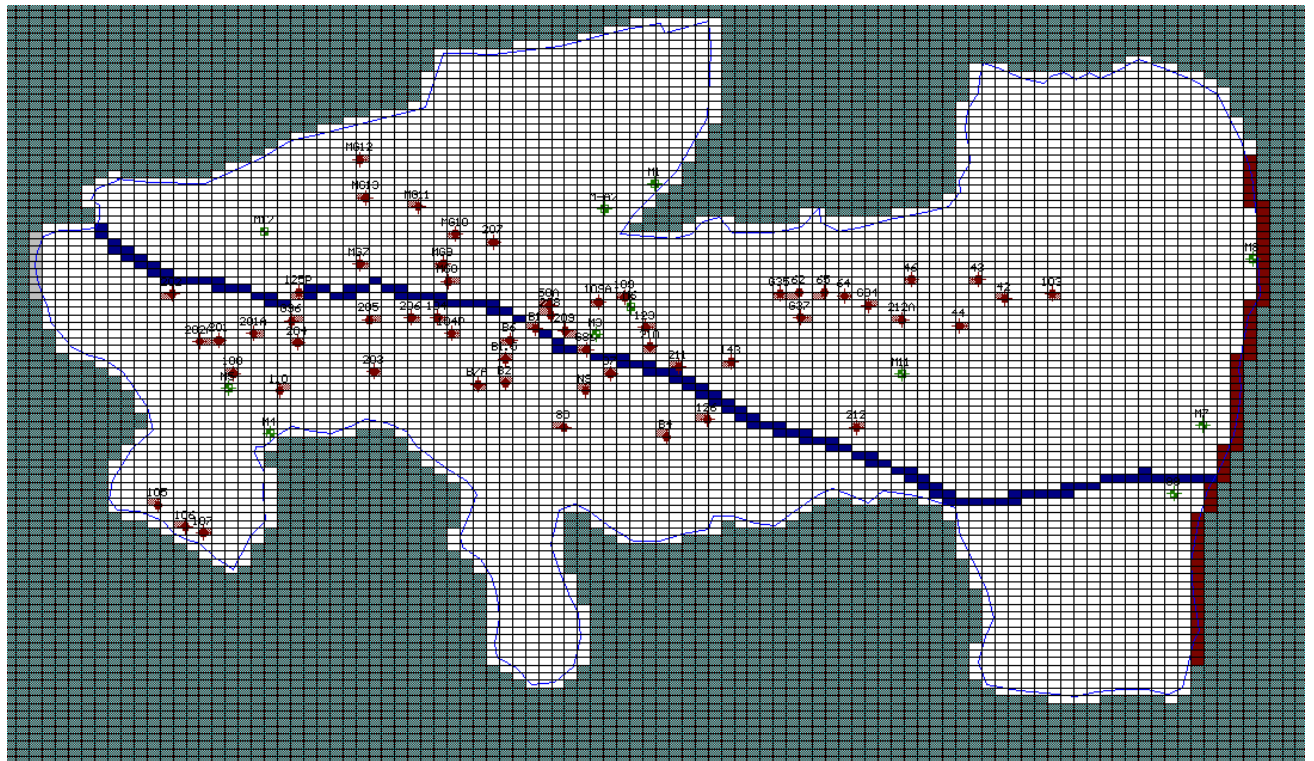
Πίνακας 5 Μονάδες μέτρησης VISUAL MODFLOW

Παράμετροι	Μονάδες
Μήκος	meters
Χρόνος	days
Υδραυλική αγωγιμότητα	m/sec
Παροχή	m ³ /sec
Εμπλουτισμός	mm/year
Μάζα	kilogram
Συγκέντρωση	milligrams/litre

Μετά την είσοδο της περιοχής μελέτης στο VISUAL MODFLOW, η διαδικασία της προσομοίωσης περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

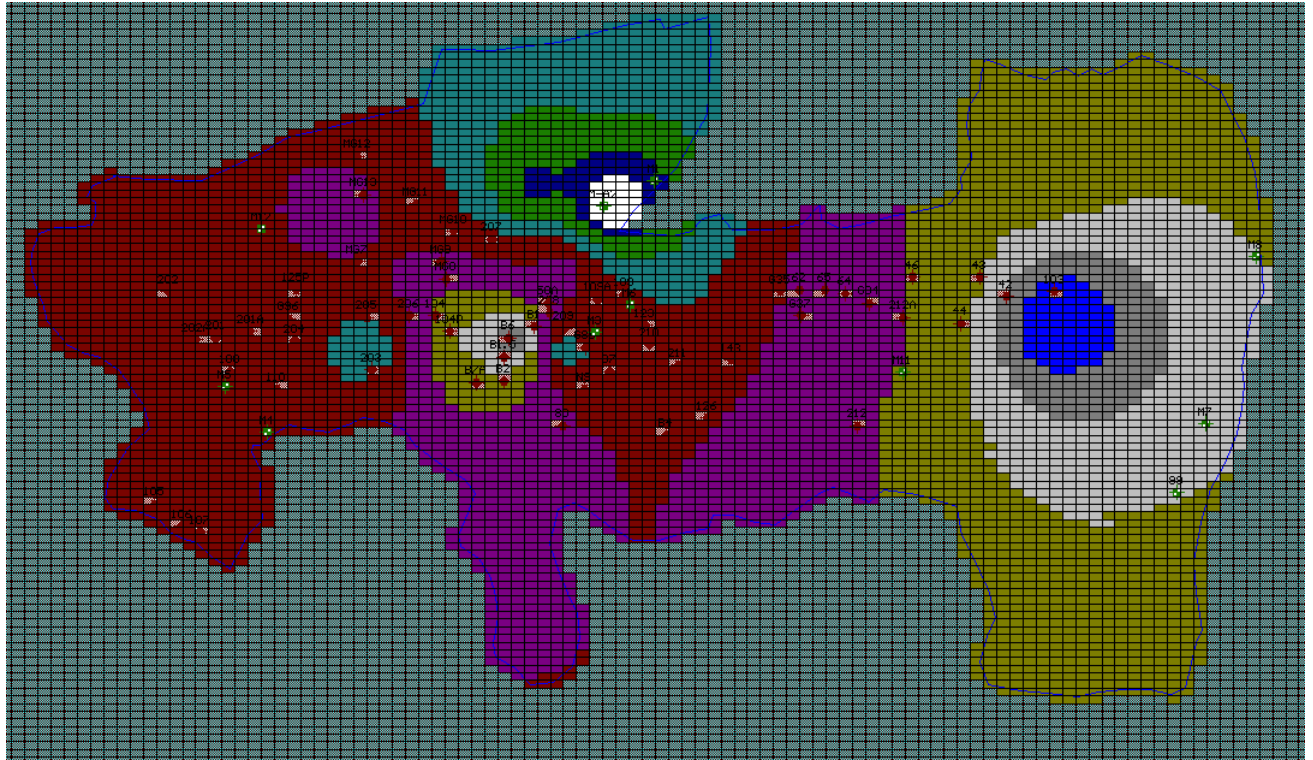
1. Χωρική διακριτοποίηση του υδροφορέα
2. Προσέγγιση της υδραυλικής αγωγιμότητας
3. Εισαγωγή των πηγαδιών άντλησης
4. Εισαγωγή των πηγαδιών παρατήρησης
5. Καθορισμό των οριακών συνθηκών

Στα σχήματα που ακολουθούν, παρουσιάζεται ο κάρναβος μετά την εκτέλεση των σταδίων προσομοίωσης.

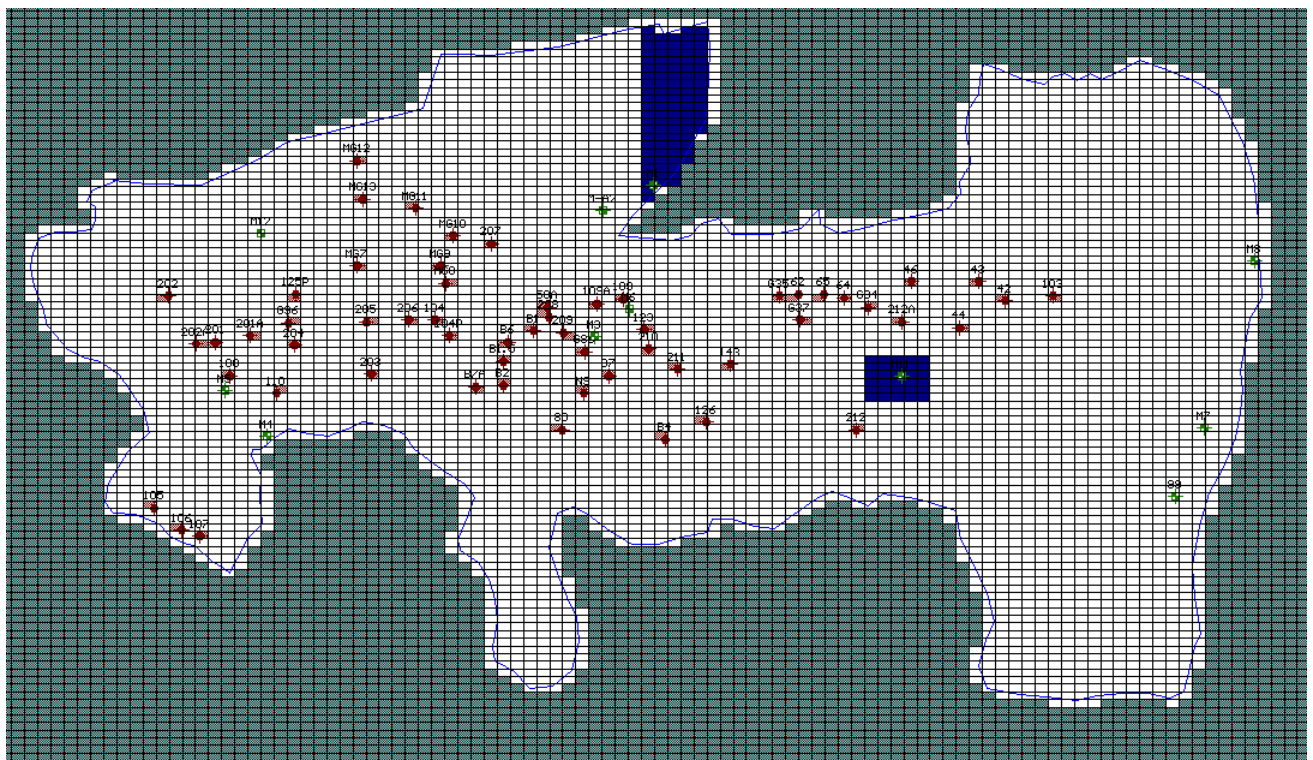


Σχήμα: 26 Χωρική διακριτοποίηση, απεικόνιση πηγαδιών άντλησης και παρατήρησης, απεικόνιση οριακών συνθηκών

Στο σχήμα 26, ο κάνναβος προσομοίωσης παρουσιάζει τα όρια της περιοχής μελέτης, τα πηγάδια άντλησης (58 στο σύνολο), τα πηγάδια παρατήρησης (11 στο σύνολο) και τον ποταμό Γεροπόταμο που ρέει κατά μήκος της λεκάνης με κατεύθυνση από ανατολικά προς δυτικά. Επιπλέον, στα άκρα της περιοχής μελέτης, με κόκκινο χρώμα ανατολικά απεικονίζονται τα υδραυλικά φορτία (constant head) και δυτικά με γκρι χρώμα το ύψος του τοίχους αποστράγγισης (drain).



Σχήμα: 27 Ζώνες υδραυλικής αγωγιμότητας



Σχήμα: 28 Ζώνες εμπλουτισμού (recharge) μέσω ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων

Στο σχήμα 28, διακρίνονται δύο ζώνες εμπλουτισμού. Η πρώτη, καταλαμβάνει το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης και έχει άσπρο χρώμα, ενώ η δεύτερη περιλαμβάνει συγκεκριμένα σημεία και έχει μπλε χρώμα.

Ο βασικός κατάλογος των επιλογών του προγράμματος, προσφέρει στον χρήστη τη δυνατότητα τόσο να επιλέξει την εισαγωγή δεδομένων (Input), όπου σχεδιάζεται, τροποποιείται, αστικοποιείται το μοντέλο και ρυθμίζονται επιπλέον παράμετροι, όσο και να εκτελέσει την προσομοίωση μέσω της επιλογής Run. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα μέσω του Output, ο χρήστης να δει τα αποτελέσματα, όπως αυτά προέκυψαν από την εκτέλεση του μοντέλου. Επίσης, δίνεται η επιλογή Setup μέσω της οποίας μπορούν να διαμορφωθούν τα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης όπως είναι τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα, οι αρχικές και οριακές συνθήκες, ο χρόνος προσομοίωσης καθώς και άλλα. Δημιουργείται έτσι ένα ομοίωμα της εξεταζόμενης περιοχής μελέτης και το πρόγραμμα υπολογίζει το υδραυλικό ύψος, την ταχύτητα και τη διεύθυνση της κίνησης του υπόγειου νερού. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικά τα στάδια για τη διαδικασία της προσομοίωσης του υπόγειου νερού.

4.2.1 Χωρική διακριτοποίηση υδροφορέα

Στο πρώτο στάδιο, ο υδροφορέας διακριτοποιείται χωρικά σε ένα πλέγμα (κάνναβος) κελιών όπου το κέντρο κάθε κελιού (κόμβος) αποτελεί το σημείο προσδιορισμού του υδραυλικού φορτίου (block – centered formulation). Η λεκάνη απορροής της Μεσσαράς καλύπτει έκταση 398 Km² και με δεδομένες τις διαστάσεις αυτές καθώς και για την εξαγωγή αποτελεσμάτων μεγαλύτερης ακρίβειας, η αναπαράσταση του υδροφορέα γίνεται σε κάνναβο 100 γραμμών (κατά τον άξονα x) και 100 στηλών (κατά τον άξονα y). Επιπλέον, ορίστηκε ένα επίπεδο-layer (κατακόρυφος άξονας) με τελικό βάθος του υδροφορέα την τιμή $Z_{\min} = -100$ m και εναρκτήριο σημείο μετρήσεων $Z_{\max} = 0$ m. Ο κώδικας MODFLOW χρησιμοποιεί την αριθμητική μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών για την κατασκευή του καννάβου.

Μετά την χωρική διακριτοποίηση του υδροφορέα, γίνεται καταχώρηση του χάρτη της περιοχής μελέτης μέσω της επιλογής Import a site map. Ο χάρτης αυτός έχει προηγουμένως ψηφιοποιηθεί με χρήση του προγράμματος ArcGIS. Αφού εισαχθεί ο χάρτης, συμπληρώνονται οι κατάλληλες συντεταγμένες (X,Y). Τέλος, γίνεται καταχώρηση του υψομέτρου της περιοχής μελέτης με την επιλογή Import Elevation. Το αρχείο που εισάγεται έχει ψηφιοποιηθεί επίσης με χρήση του προγράμματος ArcGIS και το πάχος της περιοχής διαμορφώνεται από τα 60 m που εμφανίζονται στην εκβολή της λεκάνης στα ανατολικά, έως και τα 200 m που εμφανίζονται στα βορειανατολικά της λεκάνης.

Η επίλυση των εξισώσεων από το μοντέλο θα πραγματοποιηθεί μόνο στα επιθυμητά κελιά τα οποία βρίσκονται εντός των ορίων της περιοχής μελέτης (βλέπε σχήμα 26). Τα υπόλοιπα κελιά (πράσινο χρώμα) απενεργοποιούνται (inactive cells).

4.2.2 Προσέγγιση υδραυλικής αγωγιμότητας

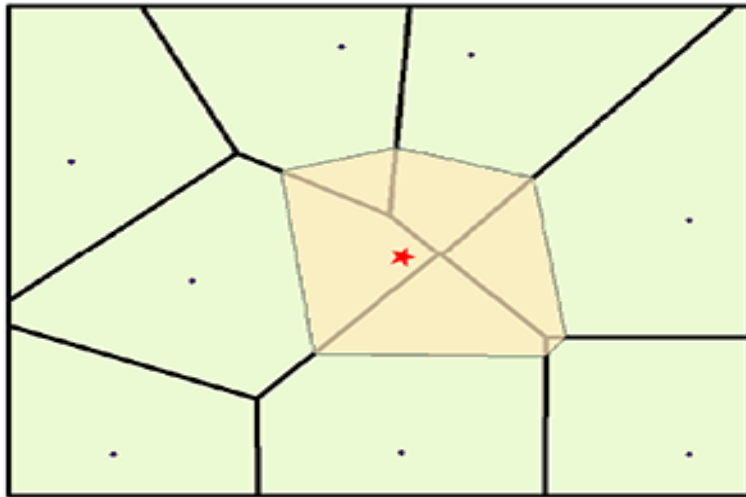
Τα δεδομένα των τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας λήφθηκαν από προηγούμενη μελέτη στη περιοχή (Βαρουχάκης, 2015) και προέκυψαν έπειτα από μετρήσεις στα πηγάδια άντλησης. Στο πρόγραμμα, έγινε εισαγωγή των δεδομένων από αρχείο excel και στη συνέχεια παρεμβολή (interpolation) στις υδραυλικές αγωγιμότητες με τη μέθοδο του πλησιέστερου φυσικού γείτονα (Natural Neighbors). Η παρεμβολή πραγματοποιήθηκε ώστε σε όλη την υδρογεωλογική λεκάνη να υπάρχει χωρική κατανομή της υδραυλικής αγωγιμότητας με βάσει τις μετρήσεις που πάρθηκαν από τα καρότα των πηγαδιών άντλησης.

Γενικότερα, το Visual MODFLOW χρησιμοποιεί μια ενσωματωμένη παρεμβολή δεδομένων, τα κελιά καθώς και ένα διαμορφωμένο περίγραμμα για την εισαγωγή και την παρεμβολή δεδομένων πεδίου. Η χωρική παρεμβολή αποτελεί μια διαδικασία εκτίμησης της τιμής ενός χαρακτηριστικού σε σημεία που δεν ανήκουν στο δείγμα, με βάση τις μετρήσεις στα σημεία του δείγματος. Οι μέθοδοι παρεμβολής που χρησιμοποιεί το MODFLOW είναι οι εξής:

- α) Μέθοδος των σταθμισμένων αντίστροφων αποστάσεων (Inverse Distance)
- β) Μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής (Kriging)
- γ) Μέθοδος του πλησιέστερου φυσικού γείτονα (Natural Neighbors)

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε η μέθοδος του πλησιέστερου φυσικού γείτονα η οποία επινοήθηκε από τον Watson το 1994 και βασίζεται στη μέθοδο πολυγώνου Thiessen. Η συγκεκριμένη μέθοδος βρίσκει την κοντινότερη ομάδα δειγμάτων υδραυλικής αγωγιμότητας στο σημείο αναζήτησης και τους προσδίδει βαρύτητα. Πρόκειται για τοπική χωρική παρεμβολή διότι χρησιμοποιεί μόνο σημεία που είναι γύρω από το σημείο αναζήτησης. Οι φυσικοί γείτονες κάθε σημείου είναι αυτοί που σχετίζονται με τα πολύγωνα Thiessen. Ένα νέο πολύγωνο σχηματίζεται γύρω από το σημείο που παρεμβάλλεται. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθόδου. Γύρω από ένα σημείο γνωστής υδραυλικής αγωγιμότητας, σχηματίζεται το πολύγωνο Thiessen και οι περιοχές που ανήκουν εντός αυτού (ολόκληρες ή τμήμα) παίρνουν ίδιες τιμές με βάση την γνωστή (Waterloohydrogeologic.com, n.d.).

Στο σχήμα 27 (βλέπε σελ. 66) απεικονίζονται οι ζώνες υδραυλικής αγωγιμότητας όπως αυτές δημιουργήθηκαν μετά από παρεμβολή (interpolation). Σημειώνεται ότι η υδραυλική αγωγιμότητα παίρνει ίδιες τιμές για τις κατευθύνσεις x και y, ενώ για την διεύθυνση z οι τιμές ελαττώνονται κατά μια τάξη μεγέθους. Συνολικά, μετά την παρεμβολή, δημιουργήθηκαν 10 ζώνες υδραυλικής αγωγιμότητας. Τα κελιά της ίδιας ζώνης λαμβάνουν παραπλήσιες τιμές μεταξύ τους βάσει των τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας που εισήχθησαν από αρχείο excel.



Σχήμα: 29 Εφαρμογή μεθόδου του πλησιέστερου φυσικού γείτονα (Natural Neighbors)

Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται οι αρχικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας που εισήχθησαν στο πρόγραμμα.

Πίνακας 6 Αρχικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας

Kx	Ky	Kz	X	Y
0,000509	0,000509	$5,09 \cdot 10^{-5}$	583986	3879460
0,0509	0,0509	0,00509	584107	3877850
0,000743	0,000743	$7,43 \cdot 10^{-5}$	582790	3878270
$7,43 \cdot 10^{-5}$	$7,43 \cdot 10^{-5}$	$7,43 \cdot 10^{-6}$	582330	3878220
$1,01 \cdot 10^{-6}$	$1,01 \cdot 10^{-6}$	$1,01 \cdot 10^{-7}$	578796	3879210
$1,005 \cdot 10^{-7}$	$1,005 \cdot 10^{-7}$	$1,005 \cdot 10^{-8}$	579575	3879050
0,000109	0,000109	$1,09 \cdot 10^{-5}$	579027	3878310
0,0109	0,109	0,0109	578555	3877650
0,00109	0,00109	0,000109	578072	3877660
0,0000109	0,0000109	0,00000109	577063	3877550
$1,09 \cdot 10^{-5}$	$1,09 \cdot 10^{-5}$	$1,09 \cdot 10^{-6}$	579093	3877550
0,0001005	0,0001005	$1,01 \cdot 10^{-5}$	576777	3878940
$1,01 \cdot 10^{-5}$	$1,01 \cdot 10^{-5}$	$1,01 \cdot 10^{-6}$	579597	3880410

4.2.3 Εισαγωγή των πηγαδιών άντλησης (Pumping Wells)

Στο επόμενο στάδιο έγινε εισαγωγή των πηγαδιών άντλησης. Συνολικά στην περιοχή μελέτης υπήρχαν δεδομένα για 58 πηγάδια με γνωστές τις συντεταγμένες (X,Y) και το ρυθμό άντλησης σε μονάδες m^3/d . Με σκοπό την ορθή εισαγωγή των δεδομένων στο μοντέλο, έγινε η θεώρηση πως κατά την υγρή περίοδο μεταξύ Οκτωβρίου και Μαρτίου (0 – 180 days), ο ρυθμός άντλησης αντιστοιχεί στο 30% της δεδομένης τιμής, ενώ κατά την ξηρή περίοδο μεταξύ Απριλίου και Σεπτεμβρίου (180 – 360 days) ο ρυθμός άντλησης αντιστοιχεί στο 70%. Αυτό συμβαίνει διότι κατά την ξηρή περίοδο οι ανάγκες είναι αυξημένες και συνεπώς οι ρυθμοί άντλησης είναι πολύ μεγαλύτεροι από ότι κατά την υγρή περίοδο.

Η εισαγωγή των πηγαδιών έγινε απευθείας στον κάρναβο χωρίς εισαγωγή αρχείου, με βάση τις γνωστές συντεταγμένες κάθε πηγαδιού. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται χρήση της επιλογής Add Well της υπορουτίνας Pump Wells από το Input του προγράμματος, όπου στην εισαγωγή των στοιχείων άντλησης συμπληρώνονται τα απαραίτητα στοιχεία κάθε πηγαδιού. Τα απαραίτητα στοιχεία κάθε πηγαδιού είναι οι συντεταγμένες (X,Y), η ονομασία του, το ύψος του φίλτρου της γεώτρησης το οποίο αντλεί το νερό και τέλος ορίζεται το πρόγραμμα των αντλήσεων με τη χρονική διάρκεια σε ημέρες (αρχή και τέλος άντλησης) και ο ρυθμός άντλησης. Σε όλες τις γεωτρήσεις ορίστηκαν τα ύψη για το πάνω και κάτω τμήμα) του φίλτρου ώστε να έχουν τις τιμές -92,28 m και -30,52 m αντίστοιχα με βάση το απόλυτο υψόμετρο της θάλασσας.

Τέλος, επισημαίνεται ότι η απαιτούμενη τιμή της παροχής άντλησης σε κάθε περίοδο εισάγεται με αρνητικό πρόσημο το οποίο δηλώνει ότι γίνεται απομάκρυνση ποσότητας νερού από τον υδροφόρο. Το σύνολο των γεωτρήσεων παρουσιάζεται με κόκκινο χρώμα (κουκίδες) στο σχήμα 26 (βλέπε σελ. 65). Όπως απεικονίζεται, ο μεγαλύτερος αριθμός των πηγαδιών άντλησης βρίσκεται στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης των Μοιρών διότι σε αυτό το τμήμα οι αγροτική παραγωγή είναι μεγαλύτερη.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα στοιχεία των πηγαδιών άντλησης.

Πίνακας 7 Στοιχεία πηγαδιών άντλησης

Well name	Easting (m)	Northing (m)	Abstraction rate (m ³ /d)
202	575059	3878133	100
202A	575334	3877647	90
201	575529	3877663	120
201A	575886	3877728	100
108	575675	3877323	100
105	574913	3875977	20
106	575034	3878556	20
107	575367	3875685	20
110	576161	3877144	150
204	576340	3877631	100
G96	576275	3877858	50
125P	576356	3878150	60
MG12	576980	3879512	20
MG13	577037	3879122	30
MG7	576972	3878441	25
205	577069	3877874	80
203	577118	3877339	100
206	577507	3877890	80
MG11	577572	3879025	15
MG10	577961	3878749	25
MG9	577831	3878441	50
MG8	577880	3878263	60
104	577767	3877890	80
104P	577913	3877728	80
207	578350	3878668	100
B7A	578188	3877209	80
B2	578464	3877225	150
B1.5	578464	3877468	80
B6	578512	3877663	150
B1	578772	3877777	120
208	578934	3877922	100
58A	578917	3878020	40
80	579064	3876771	80
N9	579291	3877144	80
B7	579550	3877323	80
G86	579307	3877566	80
209	579080	3877760	120
109A	579421	3878052	90
109	579696	3878101	80
123	579907	3877793	50
210	579956	3877598	60
211	580248	3877387	50
B4	580118	3876674	12
126	580539	3876852	150

143	580783	3877436	60
G35	581285	3878133	40
62	581480	3878150	40
G37	581496	3877890	60
65	581739	3878150	50
64	581950	3878117	50
G34	582193	3878020	50
212	582064	3876771	70
212A	582534	3877874	30
46	582631	3878279	50
44	583118	3877809	25
43	583312	3878279	30
42	583588	3878085	25
103	584075	3878133	25

4.2.4 Εισαγωγή των πηγαδιών παρατήρησης (Observation Wells)

Στο στάδιο αυτό εισάγονται τα πηγάδια παρατήρησης που υπάρχουν στην περιοχή μελέτης. Τα πηγάδια αυτά είναι ανενεργά, δηλαδή δεν πραγματοποιείται άντληση υπόγειου νερού ούτε εμπλουτισμός. Σκοπός των πηγαδιών είναι η εξαγωγή πληροφοριών όπως τα πιεζομετρικά φορτία μέσω της στάθμης του νερού που παρατηρείται στο φίλτρο του πηγαδιού. Για την περιοχή μελέτης πάρθηκαν δεδομένα από 11 πηγάδια παρατήρησης. Η εισαγωγή των πηγαδιών αυτών πραγματοποιήθηκε με χρήση της επιλογής Add Observation της υπορουτίνας Head Observation μέσω του Input του προγράμματος. Τα απαραίτητα στοιχεία κάθε πηγαδιού κατά την εισαγωγή τους είναι οι συντεταγμένες (X,Y), το ύψος (βάθος) του φίλτρου από το οποίο παρατηρείται το πιεζομετρικό φορτίο και το όνομα του πηγαδιού. Επιπλέον, δίνεται ο χρόνος παρατήρησης σε ημέρες και το αντίστοιχο πιεζομετρικό φορτίο σε m. Τα πηγάδια παρατήρησης παρουσιάζονται με πράσινο χρώμα (κουκίδες) στο σχήμα 26 (βλέπε σελ. 65).

Στον ακόλουθο πίνακα δίνονται τα στοιχεία των πηγαδιών παρατήρησης.

Πίνακας 8 Στοιχεία πηγαδιών παρατήρησης

Well name	X	Y	Groundwater level above sea level (m) - 2008 Wet period	Groundwater level above sea level (m) - 2008 Dry period	Groundwater level above sea level (m) - 2009 Wet period	Groundwater level above sea level (m) - 2009 Dry period
M12	575999	3878771	30,27	19,71	18,5	14,8
M5	575630	3877172	35,42	20,8	24,2	19,36
M4	576052	3876704	31,8	16,83	16,24	12,5
M1	580004	3879268	47,35	29,4	38,08	28,6
M-A2	579485	3879009	45,98	30,6	42,3	32,6
M6	579755	3878002	42,37	21,8	25	19,3
M3	579403	3877722	44,27	26,7	32,5	21,8
M11	582531	3877315	56,41	37,3	38,7	35,2
M8	586136	3878492	70,17	54,7	65,3	54,9
M7	585619	3876792	48,96	35,1	41	27,5
99	585323	3876090	61,27	46,6	58	38,9

4.2.5 Καθορισμός των οριακών συνθηκών (*Boundary Condition*)

4.2.5.1 Σταθερό φορτίο (*Constant Head*)

Στο παρόν στάδιο πραγματοποιείται εισαγωγή των υδραυλικών υψών τα οποία αντιπροσωπεύουν το υδραυλικό ύψος του υπόγειου νερού που εισέρχεται στην λεκάνη των Μοιρών.

Στο ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης, η λεκάνη των Μοιρών συνορεύει με την λεκάνη της Βαγιονιάς. Το όριο των δύο λεκανών ορίζεται από το βυθισμένο ρηξιτέμαχος των Μοιρών και βρίσκεται περίπου στη νοητή γραμμή Αγ. Δέκα – Απεσωκάρι. Τα ρήγματα αυτά δεν είναι (επιφανειακά) ορατά και βρίσκονται κάτω από τις αλλουβιακές αποθέσεις (Κριτσωτάκης, 2009). Μέσω των ρηγμάτων, επιτρέπεται η κίνηση του υπόγειου νερού (πλευρική εισροή) από την λεκάνη της Βαγιονιάς προς την λεκάνη των Μοιρών. Επομένως, το υδραυλικό ύψος του νερού που εισέρχεται στην περιοχή μελέτης προσδιορίστηκε στο ανατολικό όριο, στο σημείο των ρηγμάτων.

Με σκοπό η προσέγγιση να δώσει τα καλύτερα επιθυμητά αποτελέσματα, δημιουργήθηκαν τρεις ομάδες (groups) όπου κάθε μία έχει τιμές παραπλήσιες των υδραυλικών υψών από τα κοντινότερα πηγάδια παρατήρησης. Όπως φαίνεται στο σχήμα 26 (βλέπε σελ. 65), με κόκκινη γραμμή στα ανατολικά της οριοθετημένης περιοχής προσδιορίζεται το σταθερό φορτίο. Τα κοντινότερα πηγάδια παρατήρησης είναι τα M8, M7 και 99 βάσει των οποίων δημιουργήθηκαν οι τρεις ομάδες όπου ο αριθμός των κελιών κάθε ομάδας είναι τυχαίος. Η εισαγωγή του σταθερού φορτίου πραγματοποιήθηκε χειροκίνητα μέσω της επιλογής Assign (single) της υπορουτίνας Constant Head από το Input του προγράμματος. Σημειώνεται ότι οι αρχικές τιμές εισάγονται για κάθε περίοδο, υγρή και ξηρή, αλλά στη συνέχεια τροποποιήθηκαν με σκοπό την βαθμονόμηση του μοντέλου.

4.2.5.2 Τοίχος αποστράγγισης (*Drain*)

Η οριακή συνθήκη Drain αναφέρεται στο υδραυλικό ύψος των υπόγειων διαφυγών από τη λεκάνη της περιοχής μελέτης. Στο δυτικό τμήμα που οριοθετείται η λεκάνη των Μοιρών, υπάρχει το στένεμα της Φαιστού διαμέσου του οποίου το νερό περνάει προς τον υδροφορέα της λεκάνης του Τυμπακίου.

Το ρηξιτέμαχος της Φαιστού οριοθετείται από παράλληλα ρήγματα τα οποία διαχωρίζουν τον αλλουβιακό σχηματισμό πάχους 60 m του στενέματος Φαιστού από αυτό της λεκάνης των Μοιρών πάχους μεγαλύτερου των 100 m. Λόγω αυτού του στενέματος και της αβαθούς υδροστατικής στάθμης (Κριτσωτάκης, 2009), συμβαίνει απορροή του υπόγειου νερού στο δυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης. Στο σχήμα 26 (βλέπε σελ. 65), με γκρι γραμμή προσδιορίζεται το τοίχος αποστράγγισης. Η εισαγωγή του πραγματοποιήθηκε με χρήση της επιλογής Assign (single) της υπορουτίνας Drain μέσω του Input του προγράμματος. Το αρχικό υδραυλικό ύψος των υπόγειων διαφυγών προσδιορίστηκε 14,5 m και 17,5 m για την υγρή και ξηρή περίοδο αντίστοιχα για το υδρολογικό έτος 2008 αλλά στη συνέχεια τροποποιήθηκε κατά τη βαθμονόμηση του μοντέλου.

Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται οι αρχικές τιμές των οριακών συνθηκών για υγρή και ξηρή περίοδο.

Πίνακας 9 Αρχικές οριακές συνθήκες

	Constant Head (m)	Drain (m)
Υγρή περίοδος	73,03	14,5
Ξηρή περίοδος	55,2	17,5

4.2.5.3 Εμπλουτισμός (Recharge)

Ο υδροφόρος ορίζοντας της περιοχής μελέτης εμπλουτίζεται μέσω των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που καταλήγουν στην επιφάνεια του εδάφους. Βάσει των δεδομένων από τους μετεωρολογικούς σταθμούς της περιοχής, η βροχόπτωση κατά το έτος 2008 ήταν $P = 947 \text{ mm/year}$. Θεωρούμε πως ο όγκος της βροχόπτωσης κατανέμεται ομοιόμορφα στην περιοχή μελέτης. Στο σχήμα 28 (βλέπε σελ. 66) παρουσιάζονται οι ζώνες της βροχόπτωσης σε δύο ομάδες με χρώματα άσπρο και μπλε. Το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής ανήκει στη ζώνη με άσπρο χρώμα όπου η βροχόπτωση έλαβε τις τιμές από τους μετεωρολογικούς σταθμούς. Η δεύτερη ζώνη (μπλε χρώμα) δημιουργήθηκε κατά τη βαθμονόμηση του μοντέλου με σκοπό την καλύτερη προσέγγιση.

Εκτιμάται ότι από το ετήσιο ύψος βροχής, το 65% παρατηρείται κατά την υγρή περίοδο (0 – 180 days) και το 35% κατά την ξηρή (180 – 360 days). Επιπλέον, βάση υδρογεωλογικών μελετών συγκεκριμένα για την λεκάνη των Μοιρών, έχει εκτιμηθεί ότι το 82% της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης απομακρύνεται μέσω της εξατμισοδιαπνοής, το 18 % κατεισδύει ενώ η επιφανειακή απορροή είναι απειροελάχιστη (Κυλίλη-Πολυχρονάκη, 2001). Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω, υπολογίστηκε η επιφανειακή τροφοδοσία (εμπλουτισμός) που αντιστοιχεί στην υγρή και ξηρή περίοδο. Αναλυτικά, δίνεται ως παράδειγμα ο υπολογισμός του εμπλουτισμού κάθε περιόδου για το υδρολογικό έτος 2008.

$$\begin{aligned}
 R &= P - \text{εξατμισοδιαπνοή} \Rightarrow \\
 R &= 947 \frac{\text{mm}}{\text{year}} - 82\% \cdot 947 \frac{\text{mm}}{\text{year}} \Rightarrow \\
 R &= 170,46 \text{ mm/year}
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

Συνεπώς, αφού για την υγρή περίοδο αντιστοιχεί το 65%, τότε η τροφοδοσία θα ισούται με 110,8 mm, ενώ για την ξηρή περίοδο (35%) θα ισούται με 59,66 mm. Οι τιμές αυτές εισάγονται στο πρόγραμμα με χρήση της επιλογής Assign της υπορουτίνας Recharge από το Input. Στον παρακάτω πίνακα, δίνονται τα δεδομένα για τα ετήσια ύψη των κατακρημνισμάτων στην περιοχή μελέτης.

Πίνακας 10 Ετήσια ύψη βροχόπτωσης 2008 - 2018

Υδρολογικό έτος	Ετήσιο ύψος βροχόπτωσης (mm)
2008-09	947.7625
2009-10	803.04
2010-11	658.15
2011-12	950.55
2012-13	477.2
2013-14	500.125
2014-15	659.3
2015-16	660.6
2016-17	755.10234
2017-18	394.05

4.3 Βαθμονόμηση μοντέλου

Η βαθμονόμηση ή ρύθμιση (calibration) του μοντέλου έχει ως βασικό στόχο την εξαγωγή αποτελεσμάτων με τις μικρότερες δυνατές αποκλίσεις από τα αντίστοιχα μετρούμενα δεδομένα. Έχοντας εκτελέσει τα προηγούμενα στάδια της ενότητας 4.2, έχουν οριστεί στο μοντέλο όλες οι απαραίτητες παράμετροι που αφορούν την περιοχή μελέτης. Οι κυριότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση ενός μαθηματικού μοντέλου είναι:

- α) Αυτοματοποιημένη βελτιστοποίηση με χρήση κατάλληλων αλγορίθμων βελτιστοποίησης (inverse modeling)
- β) Διαδικασία δοκιμής και σφάλματος (trial and error)

Για τη βαθμονόμηση του μοντέλου της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της διαδικασίας δοκιμής και σφάλματος. Γενικότερα, κατά τη διαδικασία αυτή το φορτίο που υπολογίζεται με την εφαρμογή του μοντέλου συγκρίνεται με τις υπάρχουσες μετρήσεις φορτίου. Οι παράμετροι μεταβάλλονται και η διαδικασία επαναλαμβάνεται ωσότου η προσέγγιση υπολογιζόμενων φορτίων και μετρήσεων να θεωρηθεί ικανοποιητική. Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάθε τύπο προβλήματος. Η επιτυχία της βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην εμπειρία και ικανότητα του μελετητή. Απαιτούνται πολύ καλή γνώση του υπό εξέταση υδροφορέα και ικανοποιητικές αρχικές εκτιμήσεις των παραμέτρων του μοντέλου.

Κάποιοι εμπειρικοί κανόνες που βοηθούν στη ρύθμιση με τη μέθοδο δοκιμής και σφάλματος είναι οι ακόλουθοι (Hill 1998, Pinder 2002):

- Οι χάρτες ισοπιεζομετρικών καμπυλών που βασίζονται σε μετρήσεις φορτίου στην περιοχή μελέτης, είναι ενδεικτικοί της διεύθυνσης και του μεγέθους της υπόγειας ροής: η διεύθυνση της ροής είναι κάθετη στις καμπύλες και το μέγεθός της είναι αντιστρόφως ανάλογο της απόστασης δύο διαδοχικών καμπυλών.
- Στις περιοχές όπου η απόσταση μεταξύ των ισοπιεζομετρικών καμπυλών είναι μικρότερη, αναμένεται η διοχετευτικότητα να έχει μικρότερη τιμή από ότι σε περιοχές που οι καμπύλες απέχουν περισσότερο μεταξύ τους, εφόσον το πάχος του υδροφορέα δεν μεταβάλλεται σημαντικά.
- Απότομη μεταβολή της υδραυλικής αγωγιμότητας έχει ως αποτέλεσμα ραγδαία μεταβολή της κλίσης του φορτίου.
- Όταν απαιτούνται μεγάλης κλίμακας διορθώσεις στα υπολογιζόμενα φορτία, αυτό συχνά υποδεικνύει ότι απαιτείται διόρθωση των οριακών συνθηκών.
- Σε προβλήματα ασταθούς ροής, αύξηση της μεταβολής του φορτίου με το χρόνο επιτυγχάνεται με αύξηση της παροχής ή ελάττωση της διοχετευτικότητας.
- Αν η απόκλιση των υπολογιζόμενων φορτίων από τις μετρήσεις αυξάνεται ή μειώνεται με το χρόνο, η τιμή του συντελεστή αποθήκευσης είναι η πιθανότερη αιτία.
- Τοπικές μεταβολές της τιμής της υδραυλικής αγωγιμότητας έχουν δυσανάλογα μικρή επίδραση στο υπολογιζόμενο φορτίο.

Οι απαραίτητες παράμετροι που εισήχθησαν στο μοντέλο της παρούσας εργασίας καθώς και οι διάφορες τιμές των παραμέτρων αυτών, πάρθηκαν για το υδρολογικό έτος 2008. Κατά τη βαθμονόμηση του μοντέλου μεταβλήθηκαν οι αρχικές παράμετροι τόσο για την υγρή όσο και για την ξηρή περίοδο του έτους. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη βαθμονόμηση κρίθηκε αναγκαία η αλλαγή του εμπλουτισμού της περιοχής τοπικά σε συγκεκριμένα σημεία, αλλαγή στις οριακές συνθήκες (drain) και αλλαγή στα πηγάδια άντλησης.

4.3.1 Αλλαγές στις παραμέτρους

Λειτουργώντας το μοντέλο παρατηρήθηκε ότι κατά την υγρή περίοδο υπήρχε συσσώρευση νερού στον υδροφορέα και οι στάθμες ήταν πολύ υψηλότερες από τις πραγματικές. Βασική παράμετρος που επηρεάζει τα υδραυλικά φορτία του υδροφορέα, είναι ο εμπλουτισμός από τα κατακρημνίσματα. Η ετήσια βροχόπτωση για το 2008 ήταν ίση με 947 mm και μετρήθηκε από 12 σταθμούς. Ωστόσο, οι σταθμοί αυτοί δεν ανήκουν στην περιοχή μελέτης, πλην ενός, αλλά βρίσκονται κοντά σε αυτή. Επιπλέον, η τιμή αυτή αφορούσε τη βροχόπτωση για το έτος μαζί με την ποσότητα του νερού που κατεισδύει από τα βουνά της ευρύτερης περιοχής. Δεν γνωρίζουμε όμως πόση είναι η πραγματική ποσότητα που κατεισδύει και φτάνει στον υπόγειο υδροφορέα και πόσος όγκος νερού καταλήγει στον ποταμό Γεροπόταμο. Επίσης, η κατεισδυση δεν είναι ομοιόμορφη διότι η υδραυλική αγωγιμότητα διαφέρει σε κάθε τμήμα. Βάσει αυτών προκύπτει το συμπέρασμα πως η τιμή 947 mm για την ετήσια βροχόπτωση δεν ήταν λάθος, ωστόσο το ποσοστό αυτού του αριθμού που καταλήγει στον υπόγειο υδροφορέα είναι μικρότερο από το 18% (αφού 82% θεωρούμε πως είναι η εξατμισοδιαπνοή). Τελικά, για την υγρή περίοδο, ο εμπλουτισμός μειώθηκε από 110,8 mm σε 70 mm για την πρώτη ζώνη (λευκό

χρώμα), ενώ τοπικά των πηγαδιών παρατήρησης M1 και M11, όπου η συσσώρευση ήταν αρκετά μεγαλύτερη, ο εμπλουτισμός μειώθηκε από 50 mm σε 2 mm. Αντίστοιχα για την ξηρή περίοδο τροποποιήθηκε ο εμπλουτισμός τοπικά του πηγαδιού M1 που αντιστοιχεί στη δεύτερη ζώνη (μπλε χρώμα). Στο σχήμα 28 (βλέπε σελ. 66), παρουσιάζονται οι δύο ζώνες του εμπλουτισμού μέσω των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Ένας πολύ σημαντικός λόγος για τον οποίο δημιουργήθηκε η δεύτερη ζώνη (μπλε χρώμα) τοπικά, είναι ότι στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης υπάρχει τροφοδοσία από παραπόταμο του Γεροπόταμου καθώς και εμπλουτισμός από μικρό φράγμα που υπάρχει στη περιοχή αυτή. Συγκεκριμένα, το έτος 1995 κατασκευάστηκε από το Υπουργείο Γεωργίας μικρό φράγμα εκτροπής κοντά στην κοίτη του ποταμού στον Γεροπόταμο στην περιοχή Λύσματα κατάντι του οικισμού Πέρι του Δήμου Μοιρών, με σκοπό τον εμπλουτισμό του υδροφορέα της Γ' ζώνης Μεσσαράς, από όπου με πλευρικό κανάλι διοχέτευαν το νερό σε παλιά υφιστάμενα κανάλια αποστράγγισης μήκους περίπου 2-3 χλμ. Επιπλέον, στο βόρειο τμήμα της λεκάνης υπάρχει τροφοδοσία από δεύτερο παραπόταμο του Γεροπόταμου. Συνεπώς, στις δύο αυτές περιοχές τοπικά υπάρχει εμπλουτισμός και το μοντέλο παρουσίαζε ότι υπάρχει συσσώρευση νερού σε αυτά τα σημεία. Ωστόσο, η περιοχή της λεκάνης απορροής των Μοιρών, έχει συνολικά περίπου 1000 γεωτρήσεις (δημοτικές, ιδιωτικές) και ειδικά στο κεντρικό τμήμα τις περισσότερες εξ' αυτών. Επειδή όμως για τις επιπλέον γεωτρήσεις δεν είχαμε διαθέσιμα δεδομένα, επιλέξαμε, αντί να αυξήσουμε τις παροχές άντλησης σε κάθε γεώτρηση που έχουμε εισάγει στο μοντέλο, να μειώσουμε τον εμπλουτισμό (recharge). Επομένως δημιουργήθηκε κατά τη βαθμονόμηση του μοντέλου δεύτερη ζώνη τοπικά.

Μία ακόμα παράμετρος που επηρεάζει σημαντικά είναι το τοίχος αποστράγγισης (drain). Όπως αναλύθηκε στην ενότητα 4.2.5.2, το τοίχος αποστράγγισης δηλώνει το υδραυλικό ύψος των υπόγειων διαφυγών προς την λεκάνη του Τυμπακίου. Κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου κρίθηκε ότι το drain πρέπει να μειωθεί. Για την υγρή περίοδο μειώθηκε από 14,5 m σε 10 m ενώ για την ξηρή σε 8 m. Σημειώνεται ότι οι τιμές του σταθερού φορτίου (Constant Head) παρέμειναν ίδιες.

Τέλος, πραγματοποιήθηκαν αλλαγές στα πηγάδια άντλησης τόσο κατά την υγρή όσο και κατά την ξηρή περίοδο. Το βασικό πρόβλημα εμφανίστηκε γύρω από το πηγάδι παρατήρησης M11, όπου τα υδραυλικά φορτία ήταν πολύ υψηλά και παρά τις αλλαγές στον εμπλουτισμό και το τοίχος αποστράγγισης, οι τιμές παρέμεναν μεγάλες. Αυτό συνέβη διότι, τα δεδομένα που έχουμε για τα πηγάδια άντλησης αφορούν γεωτρήσεις του Δήμου. Ωστόσο, περίξ του πηγαδιού παρατήρησης M11 υπάρχουν 30 επιπλέον ιδιωτικές γεωτρήσεις οι οποίες είναι καταγεγραμμένες στην περιφέρεια τις περιοχής. Επιπλέον, είναι γνωστή η παροχή και ο όγκος του νερού που αντλούν. Βάσει αυτών, μοιράστηκε το νερό που αντλούν οι ιδιωτικές γεωτρήσεις και υπολογίστηκε εκ νέου η ποσότητα άντλησης των πηγαδιών πλησίον του M11.

Κάνοντας τις παραπάνω αλλαγές, το μοντέλο έδωσε εκ νέου αποτελέσματα τα οποία συγκρίθηκαν με τα γνωστά δεδομένα. Πιο συγκεκριμένα, συγκρίθηκαν τα υδραυλικά ύψη των πηγαδιών παρατήρησης που έδωσε το μοντέλο με τις αντίστοιχες τιμές των δεδομένων και προέκυψε το σφάλμα. Η διαδικασία υπολογισμού των σφαλμάτων καθώς και η αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων της ρύθμισης του μοντέλου παρατίθενται στην ενότητα 4.6. Σημειώνεται πως προκειμένου να «τρέξει» το μοντέλο ώστε να προσομοιώσει τη λεκάνη της

περιοχής, γίνεται χρήση της επιλογής Run. Από εκεί επιλέγονται οι ημέρες τρεξίματος του μοντέλου (time steps) μέσω της υπορουτίνας Modflow 2000 και μέσω της υπορουτίνας Run πραγματοποιείται εκκίνηση των υπολογισμών.

4.4 Επαλήθευση μοντέλου

Ένα μοντέλο υπόγειων νερών είναι πιθανό, παρά τη ρύθμισή του, να μην αντιπροσωπεύει ικανοποιητικά φυσική κατάσταση ενός υδρολογικού συστήματος, όταν οι συνθήκες είναι διαφορετικές από αυτές κατά τις οποίες το μοντέλο ρυθμίστηκε. Η επαλήθευση (validation) ενός μοντέλου αναφέρεται στη σύγκριση των αποτελεσμάτων που δίνει το μοντέλο, με τις γνωστές μετρήσεις πεδίου που αφορούν μια περίοδο διαφορετική από αυτή της ρύθμισης. Αν κατά την επαλήθευση η προσέγγιση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της εξαρτημένης μεταβλητής δεν είναι ικανοποιητική, θα πρέπει η ρύθμιση να επαναληφθεί συμπεριλαμβάνοντας και τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την επαλήθευση. Σ' αυτήν την περίπτωση, για την επαλήθευση της νέας ρύθμισης πρέπει να συλλεχθούν νέα δεδομένα.

Όταν η επαλήθευση ενός μοντέλου δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί λόγω έλλειψης δεδομένων, το ρυθμισμένο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προβλέψεις, η αβεβαιότητα όμως αυτών των προβλέψεων θεωρείται αυξημένη (Anderson and Woessner, 1992). Η αξιοπιστία ενός μοντέλου, ακόμα και μετά την επαλήθευσή του, θα πρέπει να ελέγχεται. Σύμφωνα με τους Faust et al. (1981) ένα μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιείται για μελλοντικές προβλέψεις για μια περίοδο όχι μεγαλύτερη από το διπλάσιο της περιόδου για την οποία ρυθμίστηκε. Στην πράξη, για τη διαχείριση ενός υδροφορέα είναι απαραίτητο να υπάρχει εκτός από το μοντέλο και ένα δίκτυο παρακολούθησης της κατάστασης του υδροφορέα και των συνθηκών που την επηρεάζουν. Τα δεδομένα που συλλέγονται θα πρέπει περιοδικά να χρησιμοποιούνται για να επιβεβαιώνεται η αξιοπιστία του μοντέλου. Αν λόγω της μεταβολής των συνθηκών, η προβλεπόμενη από το μοντέλο συμπεριφορά του συστήματος πάψει να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, θα πρέπει να ρυθμιστεί ξανά το μαθηματικό μοντέλο ή ακόμα και να αναθεωρηθεί το θεμελιώδες μοντέλο στο οποίο βασίστηκε.

Στην παρούσα εργασία, μετά την ολοκλήρωση της βαθμονόμησης και της εξαγωγής των αποτελεσμάτων, πραγματοποιήθηκε επαλήθευση του μοντέλου με σκοπό να ελεγχθεί η αξιοπιστία του. Κατά την διαδικασία αυτή, συγκρίνονται τα αποτελέσματα του μοντέλου με αντίστοιχες μετρήσεις για διαφορετική χρονική περίοδο από αυτή της βαθμονόμησης. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της επαλήθευσης με τις μετρούμενες τιμές, φανερώνει ότι το μοντέλο είναι αξιόπιστο για την εκτίμηση της ποσοτικής κατάστασης των υπόγειων υδάτων της λεκάνης των Μοιρών, για έτη στα οποία δεν υπάρχουν γνωστά δεδομένα. Η επαλήθευση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε εξετάζοντας τα δεδομένα για το υδρολογικό έτος 2009, όπου παρέχονται τιμές για την υγρή και ξηρή περίοδο. Το χρονικό διάστημα της επαλήθευσης ξεκινά με το τέλος της ρύθμισης και συνεχώς ως αρχική συνθήκη θεωρείται η κατανομή του φορτίου της τελευταίας μέρας της βαθμονόμησης (360 days). Κατά την διαδικασία της επαλήθευσης εισάγονται τα δεδομένα βροχόπτωσης για το έτος 2009, οι τιμές άντλησης για κάθε περίοδο και προσαρμόζονται οι οριακές συνθήκες του μοντέλου.

Βάσει των δεδομένων της βροχόπτωσης, οι κατακρημνίσεις για το υδρολογικό έτος 2009 ήταν $P = 803,04 \text{ mm/year}$. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία (βλέπε ενότητα 4.2.5.3), υπολογίστηκε ο εμπλουτισμός κάθε περιόδου. Όσον αφορά τα πηγάδια άντλησης, οι τιμές άντλησης κάθε περιόδου ήταν οι αντίστοιχες κάθε περιόδου κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου. Τέλος, οι οριακές συνθήκες πήραν τις ίδιες τιμές με αυτές που ορίστηκαν μετά την βαθμονόμηση. Μετά το πέρας των παραπάνω τροποποιήσεων, το μοντέλο «έτρεξε» την επόμενη υδρολογική περίοδο (2009) για την οποία έχουμε γνωστά τα υδραυλικά ύψη από τα πηγάδια παρατήρησης. Τα γνωστά υδραυλικά ύψη συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα που υπολόγισε το μοντέλο και προέκυψε το σφάλμα. Η διαδικασία υπολογισμού των σφαλμάτων καθώς και η αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων της επαλήθευσης του μοντέλου παρατίθενται στην ενότητα 4.7.

4.5 Κλιματικά σενάρια και επιστροφές άντλησης

Με σκοπό την μελλοντική εκτίμηση των ποσοτικών πιέσεων των υπογείων υδάτων και την εξέταση της ευαισθησίας του συστήματος της περιοχής της Μεσσαράς σε πιθανές κλιματικές αλλαγές, χρησιμοποιήθηκαν κλιματικά σενάρια. Βάσει των κλιματικών σεναρίων, τροποποιήθηκαν στο μοντέλο οι παράμετροι που αφορούν την ετήσια βροχόπτωση, την άντληση νερού από τις γεωτρήσεις καθώς και ο εμπλουτισμός διότι λαμβάνεται πλέον υπόψιν και το νερό που προέρχεται από το φράγμα της Φανερωμένης. Οι πιθανές μελλοντικές πιέσεις και η εκτίμηση της ποσοτικής κατάστασης των υπογείων υδάτων στη λεκάνη των Μοιρών εξετάστηκαν για τα κομβικά έτη 2020-2021, 2025-2026 και 2030-2031.

4.5.1 Κλιματική αλλαγή, σενάρια και πιέσεις

Η αλλαγή του κλίματος αναμένεται να επηρεάσει τα πρότυπα της βροχόπτωσης και της εξατμισοδιαπνοής (Tsanis et al., 2011) με αποτέλεσμα να διαταραχθεί η τοπική διαθεσιμότητα των υδάτων, η εκπλήρωση των ποταμών και η εποχιακή διαθεσιμότητα ύδρευσης (Arnell et al., 2011). Σύμφωνα με τελευταίες μελέτες που αφορούν την αλλαγή του κλίματος στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου από τους Ludwig et al. (2011) στηριζόμενοι σε κλιματικά μοντέλα, υπάρχει έντονη ευαισθησία στην αλλαγή των υδρολογικών καθεστώτων, αυξανόμενη έλλειψη πηγών ύδατος και επακόλουθες απειλές για τη διαθεσιμότητα και διαχείριση του νερού. Αυτές οι προβλέψεις ενισχύουν την ανάγκη για πιο ισχυρές πολιτικές διαχείρισης των υδάτων προκειμένου να εξασφαλιστεί επαρκής μελλοντική παροχή ύδατος (García-Ruiz et al., 2011).

Ενδεικτικό της μεταβολής του κλίματος στη Μεσόγειο είναι οι επιπτώσεις στο νησί της Κρήτης, όπου η ανάλυση των κλιματικών μοντέλων δείχνει πως η κατακρήμνιση κατά μέσο όρο είναι πιθανό να είναι λιγότερο συχνή αλλά πιο έντονη και οι ξηρασίες είναι πιθανό να γίνουν συχνότερες και πιο σοβαρές σε ορισμένες περιοχές (Koutroulis et al., 2010, 2011; Tsanis et al., 2011). Η μετατόπιση των εποχών, δηλαδή η εμφάνιση περιόδων χειμώνα νωρίτερα του αναμενομένου, καθώς και γρηγορότερη εμφάνιση περιόδων βροχόπτωσης, δύναται να

επηρεάσουν σοβαρά τους υδάτινους πόρους προκαλώντας σημαντική μείωση της διαθεσιμότητας του νερού με ευρείες συνέπειες για τις τοπικές κοινωνίες και τα οικοσυστήματα. Είναι ενδεικτικό ότι κατά την τελευταία δεκαετία, η Κρήτη αντιμετώπισε αυξημένο αριθμό ξηρασιών (Koutroulis et al., 2011). Ως εκ τούτου, θεωρείται απαραίτητη η αντιμετώπιση των ολοένα και πιο σοβαρών προβλημάτων ύδατος που αντιμετωπίζει το νησί, μέσω στρατηγικών πολιτικών που υιοθετούν την αλλαγή του κλίματος με τη χρήση ολοκληρωμένων συστημάτων διαχείρισης των υδάτων.

Η Τρίτη έκθεση αξιολόγησης της IPCC (TAR) δημοσίευσε ένα σύνολο σεναρίων εκπομπών, που ονομάζεται Ειδική Έκθεση για τα Σενάρια Εκπομπών (SRES). Τα σενάρια με τίτλο A1, A2, B1 και B2, ήταν το αποτέλεσμα της ανάλυσης διαφορετικών δυνατών μελλοντικών λύσεων για τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και θείου μέσω των κυριότερων δημογραφικών, οικονομικών και τεχνολογικών κινητήριων μοχλών (Parry et al., 2004 Nakic'epovic' et al., 2000). Η παρούσα διπλωματική εργασία βασίστηκε στα κλιματικά σενάρια εκπομπών B1, A2 και A1b. Παρακάτω, γίνεται περιγραφή των σεναρίων (Ipc.c.h, n.d.).

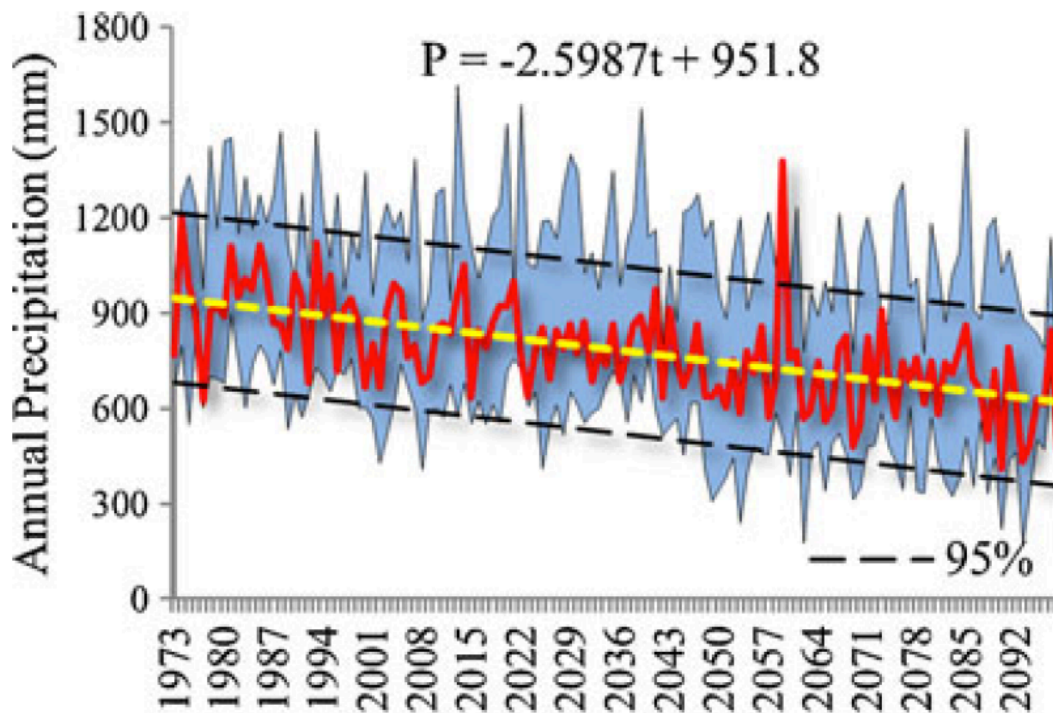
Σενάριο B1: Το σενάριο βασίζεται στην ανάπτυξη περιβαλλοντικής και κοινωνικής συνείδησης σε συνδυασμό με μία συνολικά συνεκτική προσέγγιση με σκοπό την βιώσιμη ανάπτυξη. Η αυξημένη περιβαλλοντική συνείδηση μπορεί να προέλθει από σαφείς ενδείξεις ότι οι επιπτώσεις της χρήσης φυσικών πόρων, όπως η αποψίλωση των δασών, η εξάντληση του εδάφους, η υπεραλίευση και η παγκόσμια και περιφερειακή ρύπανση, αποτελούν σοβαρή απειλή για τη συνέχιση της ανθρώπινης ζωής στη Γη. Στο σενάριο αυτό οι κυβερνήσεις, οι επιχειρήσεις, τα μέσα ενημέρωσης και το κοινό δίνουν μεγαλύτερη προσοχή στις περιβαλλοντικές και κοινωνικές πτυχές της ανάπτυξης.

Σενάριο A1: Το σενάριο περιγράφει έναν μελλοντικό κόσμο με πολύ ταχεία οικονομική ανάπτυξη, αυξημένο αριθμό του παγκόσμιου πληθυσμού στα μέσα του αιώνα αλλά μείωση στη συνέχεια και τέλος αναφέρει την ταχεία εισαγωγή και χρήση νέων αποδοτικότερων τεχνολογιών. Βασίζεται στην σύγκλιση μεταξύ των περιφερειών, την ανάπτυξή τους καθώς και στις αυξημένες πολιτιστικές και κοινωνικές αλληλεπιδράσεις με σημαντική μείωση των διαφορών από περιφέρεια σε περιφέρεια στο κατά κεφαλήν εισόδημα.

Σενάριο A1b: Αποτελεί υποομάδα του σεναρίου A1 και αναφέρει πως μελλοντικά θα υπάρχει ισορροπία στη χρήση πηγών. Η ισορροπία ορίζεται στο ότι η τεχνολογία δεν θα στηρίζεται υπερβολικά σε μια συγκεκριμένη πηγή ενέργειας. Δηλαδή δεν θεωρεί πως θα υπάρχουν άφθονες πηγές ενέργειας ούτε όμως θα γίνεται χρήση μονάχα μη ορυκτών πηγών.

4.5.1.1 Ενσωμάτωση κλιματικών σεναρίων στο μοντέλο

Σύμφωνα με τους Tsanis et al. (2011), μετά από ανάλυση δεδομένων και δημιουργία μοντέλων βάσει των κλιματικών σεναρίων B1, A1 και A1b, για την περίοδο 1970-2100 στην Κρήτη, τα ετήσια ύψη βροχής για τα κομβικά έτη 2020-2021, 2025-2026 και 2030-2031 θα είναι 930 mm, 720 mm και 700 mm αντίστοιχα. Αναλυτικά, τα ετήσια ύψη βροχής έως το 2100 βάσει της ίδιας μελέτης, παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα: 30 Εκτίμηση ετήσιων κατακρημνίσεων έως το 2100 (Tsanis et al., 2011)

Οι κόκκινες γραμμές αντιπροσωπεύουν το σύνολο των μέσων ετήσιων κατακρημνίσεων όλων των κλιματικών μοντέλων για την Κρήτη, η κίτρινη διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει το συνολικό ετήσιο ύψος των κατακρημνίσεων και τέλος, η μπλε περιοχή προσδιορίζει το πλάτος των ετήσιων κατακρημνίσεων (μέγιστα και ελάχιστα).

4.5.2 Επιστροφές άρδευσης

Σύμφωνα με τον Βαρουχάκη (2015) ένα υδρολογικό έτος στη λεκάνη της Μεσσαράς μπορεί να χαρακτηριστεί υγρό, ξηρό ή ενδιάμεσο βάσει των ετήσιων υψών βροχόπτωσης. Ο χαρακτηρισμός του υδρολογικού έτους γίνεται ως εξής:

- Υγρό έτος > 681 mm
- Ξηρό έτος < 552 mm
- Ενδιάμεσο έτος μεταξύ 552 και 681 mm

Συνεπώς και τα τρία κομβικά έτη χαρακτηρίζονται ως υγρά υδρολογικά έτη αφού και τα τρία έχουν ετήσιο ύψος βροχής μεγαλύτερο από 681 mm. Οι ετήσιες ανάγκες της περιοχής σε νερό για άρδευση είναι 5 εκατομμύρια m³. Σύμφωνα με τα συμπεράσματα του Σχεδίου Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης (GR13), ανάλογα με το είδος του υδρολογικό έτους ο όγκος του νερού θα προέρχεται από τις γεωτρήσεις και τον ταμιευτήρα της Φανερωμένης με συγκεκριμένα ποσοστά. Πιο συγκεκριμένα από τα 5 εκατομμύρια m³ που απαιτούνται κάθε έτος η αναλογία θα είναι η εξής:

- Υγρό έτος → 20% από γεωτρήσεις, 80% από ταμιευτήρα
- Ξηρό έτος → 65% από γεωτρήσεις, 35% από ταμιευτήρα
- Ενδιάμεσο έτος → 35% από γεωτρήσεις, 65% από ταμιευτήρα

Επομένως, αφού τα κομβικά έτη που εξετάζονται έχουν χαρακτηριστεί ως υγρά έτη, η αναγκαία ποσότητα για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών της περιοχής θα προέρχεται από τις γεωτρήσεις σε ποσοστό 20% και από τον ταμιευτήρα του φράγματος της Φανερωμένης σε ποσοστό 80%. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να αυξηθεί η ποσότητα του νερού επιστρέφει στον υδροφορέα αφού κατά τον υπολογισμό του εμπλουτισμού (recharge) λαμβάνεται πλέον υπόψιν και το ύψος του νερού που προέρχεται μετά το πότισμα από το νερό του ταμιευτήρα (επιστροφές άντλησης). Παρακάτω παρουσιάζεται ο υπολογισμός του συνολικού εμπλουτισμού καθώς και η νέα παροχή άντλησης κάθε γεώτρησης για κάθε κομβικό έτος.

4.5.3 Υπολογισμοί

Κομβικό έτος 2020 – 2021

Σύμφωνα με τα αναφερόμενα στις ενότητες 4.5.1.1 και 4.5.2 το συγκεκριμένο έτος θα είναι υγρό έτος και συνεπώς η ετήσια ανάγκη των 5 εκατομμυρίων m³ νερού θα καλυφθούν από τις γεωτρήσεις σε ποσοστό 20% και από τον ταμιευτήρα σε ποσοστό 80%.

Γεωτρήσεις: Οι γεωτρήσεις θα αντλήσουν το συγκεκριμένο έτος ποσότητα ίση με $5.000.000 \text{ m}^3 \cdot 20\% = 1.000.000 \frac{\text{m}^3}{\text{year}}$. Άρα για κάθε περίοδο (υγρή, ξηρή) όλες οι γεωτρήσεις μαζί θα αντλήσουν ποσότητα ίση με $\frac{1.000.000}{2} = 500.000 \text{ m}^3$. Τέλος, αφού η περιοχή έχει συνολικά 58 γεωτρήσεις, κάθε γεώτρηση θα αντλεί σε κάθε περίοδο ποσότητα ίση με $\frac{500.000}{58} = 8621 \text{ m}^3$. Αφού κάθε περίοδος αποτελείται από 180 ημέρες, τότε κάθε γεώτρηση θα αντλεί 47,89 m³/day σε κάθε περίοδο.

Ταμιευτήρας: Από τον ταμιευτήρα θα απαιτηθούν συνολικά $5.000.000 \text{ m}^3 \cdot 80\% = 4.000.000 \frac{\text{m}^3}{\text{year}}$ νερού για άρδευση. Για να υπολογιστούν οι επιστροφές άντλησης που αφορούν το νερό από τον ταμιευτήρα, η ετήσια ποσότητα του νερού διαιρείται με την έκταση της λεκάνης των Μοιρών που είναι 50,3 Km². Μετά από πράξεις και κάνοντας κατάλληλες μετατροπές, υπολογίστηκε ότι το ετήσιο ύψος νερού από τον ταμιευτήρα είναι ίσο με 7,95 mm/year. Επομένως, αφού το ετήσιο ύψος βροχής είναι ίσο με 930 mm, τότε το συνολικό ετήσιο ύψος νερού θα ισούται με 937,95 mm/year. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση 22 και την

αντίστοιχη μεθοδολογία (βλέπε σελ. 75), υπολογίζεται ο εμπλουτισμός κάθε περιόδου. Για την υγρή περίοδο ο εμπλουτισμός θα είναι ίσος με 109,74015 mm ενώ για την ξηρή περίοδο 59,09085 mm. Οι παραπάνω υπολογισμοί εισάγονται στο μοντέλο το οποίο και «τρέχει» μέχρι την ξηρή περίοδο του έτους που αντιστοιχεί σε 4500 ημέρες από την έναρξη λειτουργίας του μοντέλου, δηλαδή από το έτος 2008.

Κομβικό έτος 2025 – 2026

Βάσει των αναφερομένων στις ενότητες 4.5.1.1 και 4.5.2 το συγκεκριμένο έτος θα είναι υγρό έτος και συνεπώς η ετήσια ανάγκη των 5 εκατομμυρίων m³ νερού θα καλυφθεί από τις γεωτρήσεις σε ποσοστό 20% και από τον ταμιευτήρα σε ποσοστό 80%.

Πραγματοποιώντας την ίδια διαδικασία με το προηγούμενο κομβικό έτος, προκύπτει πως οι γεωτρήσεις θα αντλούν την ίδια ποσότητα (47,89 m³/d), ενώ οι συνολικές επιστροφές άρδευσης από το νερό του φράγματος και το αντίστοιχο ετήσιο ύψος βροχής θα είναι ίσες με 85,17015 mm για την υγρή περίοδο και 45,86085 mm για την ξηρή περίοδο. Τα δεδομένα αυτά εισάγονται στο μοντέλο, το οποίο «τρέχει» μέχρι την ξηρή περίοδο του έτους που αντιστοιχεί σε 6120 ημέρες.

Κομβικό έτος 2030 – 2031

Σύμφωνα με τα αναφερόμενα στις ενότητες 4.5.1.1 και 4.5.2 το συγκεκριμένο έτος θα είναι υγρό έτος και συνεπώς η ετήσια ανάγκη των 5 εκατομμυρίων m³ νερού θα καλυφθεί από τις γεωτρήσεις σε ποσοστό 20% και από τον ταμιευτήρα σε ποσοστό 80%.

Εφαρμόζοντας την ίδια διαδικασία όπως και στα προηγούμενα κομβικά έτη, προκύπτει πως οι γεωτρήσεις θα αντλούν την ίδια ποσότητα (47,89 m³/d), ενώ οι συνολικές επιστροφές άρδευσης από το νερό του φράγματος και το αντίστοιχο ετήσιο ύψος βροχής θα είναι ίσες με 82,83015 mm κατά την υγρή περίοδο και 44,60085 mm κατά την ξηρή περίοδο. Τα δεδομένα αυτά εισάγονται στο μοντέλο, επιλέγονται οι ημέρες που θα τρέξει το μοντέλο (time steps) να είναι έως και την ξηρή περίοδο του κομβικού έτους (7740 ημέρες).

4.6 Αποτελέσματα βαθμονόμησης μοντέλου

Βάσει της διαδικασίας που εφαρμόστηκε και παρουσιάζεται αναλυτικά στις ενότητες 4.2 και 4.3 για τη μοντελοποίηση της υπόγειας ροής της περιοχής μελέτης κατά το έτος 2008, προέκυψαν τιμές υδραυλικού ύψους στα πηγάδια παρατήρησης. Οι τιμές αυτές συγκρίνονται με τις πραγματικές τιμές των πηγαδιών παρατήρησης σύμφωνα με τα δεδομένα της περιοχής και υπολογίζεται το σφάλμα. Για τον υπολογισμό του σφάλματος χρησιμοποιείται ο παρακάτω μαθηματικός τύπος:

$$\text{Ποσοτικό σφάλμα} = \frac{\text{παρατηρημένη τιμή} - \text{υπολογισμένη τιμή}}{\text{παρατηρημένη τιμή}} \% \quad (23)$$

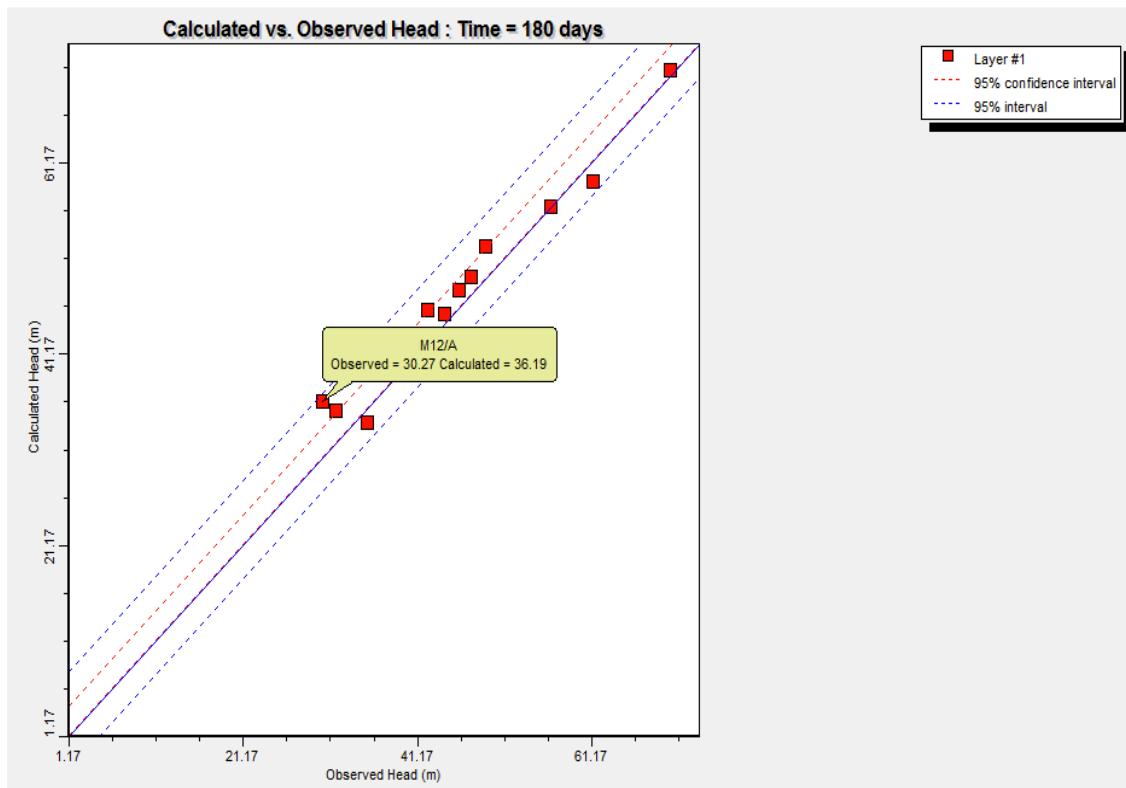
Το επιθυμητό σφάλμα κατά την προσομοίωση ενός μοντέλου είναι το χαμηλότερο δυνατό, δηλαδή κοντά στο 0%. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο του Visual MODFLOW, το αποδεκτό σφάλμα κατά την βαθμονόμηση ενός μοντέλου είναι αυτό που λαμβάνει τιμές μικρότερες μεταξύ του 10 με 15%. Εφαρμόζοντας την εξίσωση 23, προέκυψαν τα σφάλματα των δύο περιόδων (υγρή περίοδος 0-180 days, ξηρή περίοδος 180-360) κατά τη βαθμονόμηση του μοντέλου τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 11.

Πίνακας 11 Αποτελέσματα βαθμονόμησης υδρολογικού έτους 2008

Observation Well	Δεδομένες τιμές (m)		Αποτελέσματα βαθμονόμησης (m)		Ποσοτικό σφάλμα (%)	
	0 - 180 days	180 - 360 days	0 - 180 days	180 - 360 days	0 - 180 days	180 - 360 days
M3	44,27	26,7	45,37	23,51	2%	12%
M6	42,37	21,8	45,75	22,59	8%	4%
M11	56,41	37,3	56,64	39,77	0%	7%
99	61,27	46,6	59,3	44,29	3%	5%
M7	48,96	35,1	52,4	39,11	7%	11%
M8	70,17	54,7	70,9	53,47	1%	2%
M-A2	45,98	30,6	47,82	27,19	4%	11%
M1	47,35	29,4	49,23	29,91	4%	2%
M12	30,27	19,7	36,19	19,94	20%	1%
M4	31,8	16,8	35,29	19,05	11%	13%
M5	35,42	20,8	33,96	18,41	4%	11%
M.O.					6%	7%

Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα, ο μέσος όρος των σφαλμάτων κάθε περιόδου είναι μικρότερος από 10%. Συγκεκριμένα για την υγρή περίοδο ο μέσος όρος είναι 6% ενώ για την ξηρή περίοδο 7%. Σε όλα τα πηγάδια παρατήρησης, πλην του M12, τα σφάλματα ήταν χαμηλά και κυμάνθηκαν από 0 έως 11%. Όσον αφορά το σφάλμα στο πηγάδι M12, είναι μεγάλο με τιμή 20% για τους εξής δύο βασικούς λόγους: α) υπάρχει έλλειψη περισσότερων δεδομένων όσον αφορά γεωτρήσεις τοπικά του συγκεκριμένου πηγαδιού παρατήρησης, β) δεν υπάρχουν επιπλέον υδρογεωλογικά δεδομένα ώστε να προσεγγιστεί τοπικά καλύτερα το υδραυλικό φορτίο. Εξαιτίας αυτών, κατά την προσομοίωση φαίνεται ότι υπάρχει συσσώρευση νερού τοπικά του M12. Αναλύοντας περαιτέρω τους λόγους που συμβαίνει αυτό, αναφέρουμε ότι η τιμή των ετήσιων κατακρημνίσεων (947 mm/year) προέρχεται από 12 βροχομετρικούς σταθμούς από τους οποίους μόνο ο ένας ανήκει στην περιοχή μελέτης. Επιπλέον, η τιμή αυτή αφορά τον μέσο όρο των 12 σταθμών και προσεγγίζει τις κατακρημνίσεις σε ολόκληρη την επιφάνεια μαζί με το νερό που προέρχεται από τα βουνά. Ως εκ τούτου, δεν γνωρίζουμε πόσο νερό κατείσδυει και πόσο νερό καταλήγει στο ποτάμι. Η κατείσδυση δεν είναι ομοιόμορφη σε όλη την περιοχή μελέτης διότι η υδραυλική αγωγιμότητα αλλάζει από τμήμα σε τμήμα. Η πραγματική κατείσδυση λοιπόν είναι μικρότερη από αυτή που ορίσαμε στο μοντέλο και επομένως η τοπική συσσώρευση νερού γύρω από το συγκεκριμένο πηγάδι παρατήρησης είναι φυσιολογική και το σφάλμα μπορούμε να το αποδεχτούμε. Κατά την ξηρή περίοδο, τα σφάλματα είναι χαμηλά σε όλα τα πηγάδια παρατήρησης και κυμαίνονται από 1 έως 12%. Συνεπώς κρίνουμε πως η βαθμονόμηση του μοντέλου είναι αποδεκτή.

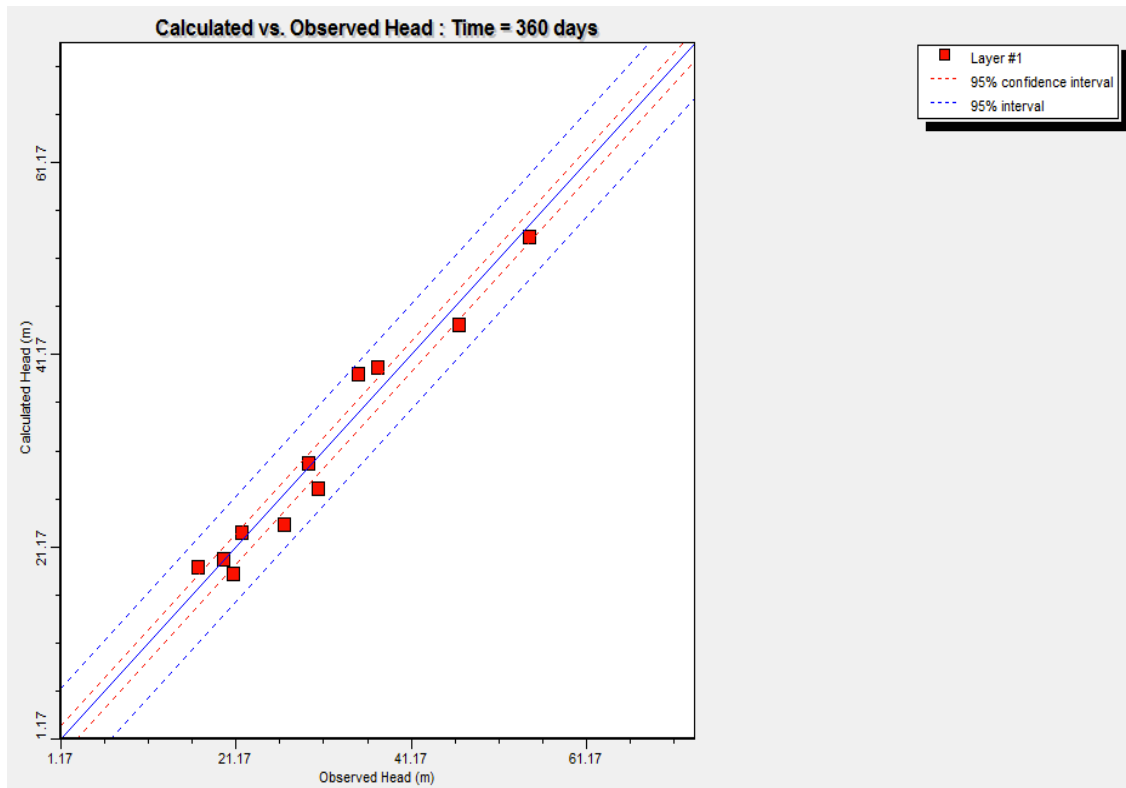
Από το Output του προγράμματος διαλέγουμε την επιλογή Graphs, στη συνέχεια Calibration και μέσω της επιλογής Head βλέπουμε το γράφημα που προκύπτει. Στο σχήμα 31 παρουσιάζεται το γράφημα.



Σχήμα: 31 Γράφημα υπολογισμένης τιμής - παρατηρημένης τιμής υγρής περιόδου

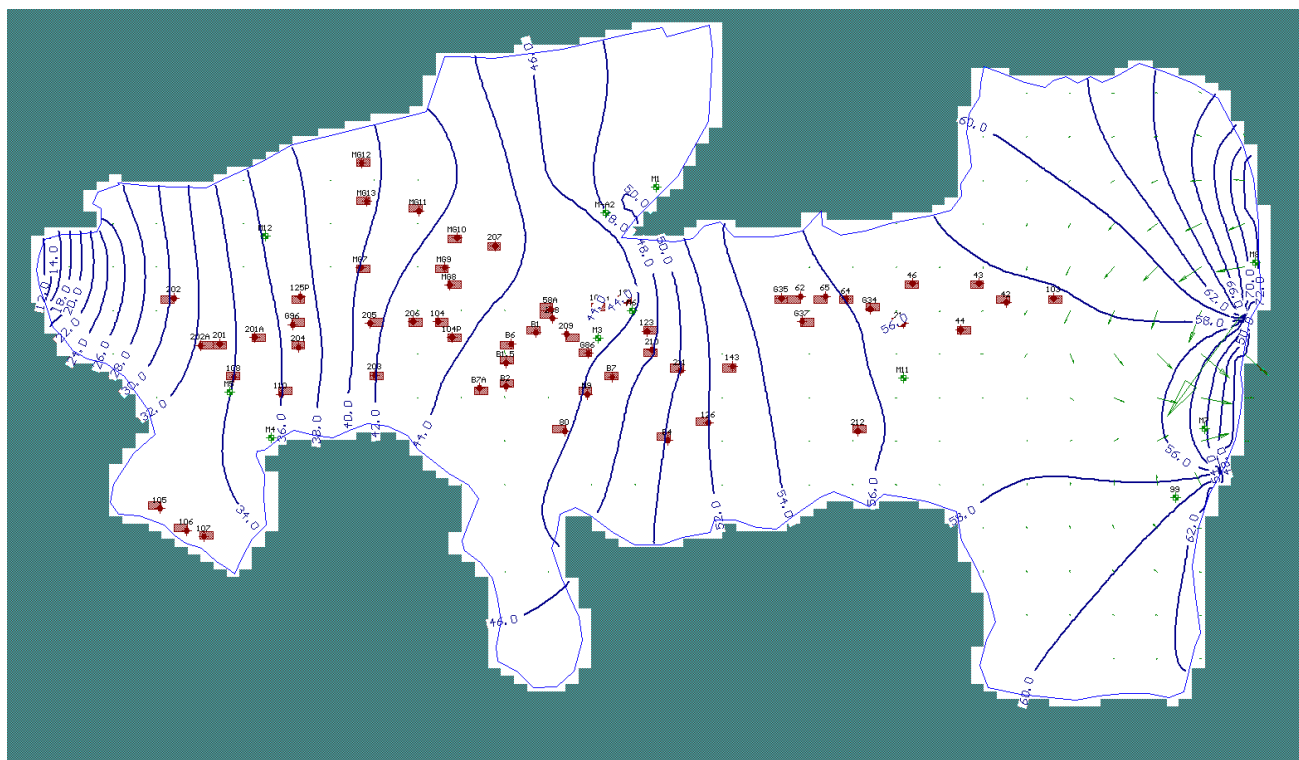
Στο γράφημα του σχήματος 31, ο άξονας των y έχει τις υπολογισμένες τιμές των υδραυλικών υψών των πηγαδιών παρατήρησης για την υγρή περίοδο, ενώ ο άξονας των x έχει τις πραγματικές τιμές από τα δεδομένα για το έτος 2008. Τα πηγάδια παρατήρησης παριστάνονται με τα κόκκινα τετράγωνα. Όσο πιο κοντά στην μωβ γραμμή είναι ένα πηγάδι παρατήρησης, τόσο μικρότερο ποσοτικό σφάλμα έχει. Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή δηλώνει το διάστημα εμπιστοσύνης (confidence interval) το οποίο αφορά το στατιστικό κομμάτι και συγκεκριμένα το στατιστικό σφάλμα. Από το διάγραμμα διακρίνεται πως όλα τα πηγάδια παρατήρησης στην υγρή περίοδο είναι κοντά στην μωβ γραμμή και συνεπώς επιβεβαιώνονται τα σφάλματα του Πίνακα 11. Επιπλέον, διακρίνεται και το πηγάδι M12 το οποίο είχε μεγαλύτερο σφάλμα σε σύγκριση με τα υπόλοιπα, για τους λόγους που εξηγήθηκαν παραπάνω.

Στο σχήμα 32 που ακολουθεί, παρουσιάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα για την ξηρή περίοδο, όπου επιβεβαιώνονται επίσης τα αποτελέσματα του Πίνακα 11. Όλα τα πηγάδια παρατήρησης έχουν πολύ μικρό σφάλμα και βρίσκονται κοντά στην μωβ γραμμή.



Σχήμα: 32 Γράφημα υπολογισμένης τιμής - παρατηρημένης τιμής ξηρής περιόδου

Σύμφωνα με τα γεωμορφολογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης όπως αυτά αναλύθηκαν στην ενότητα 2.3.3, η κίνηση του υπόγειου νερού πραγματοποιείται από τις περιοχές με μεγαλύτερο υψόμετρο σε αυτές με μικρότερο. Δηλαδή, το νερό κινείται από την ανατολική πλευρά, όπου και υπάρχουν πλευρικές εισροές μέσω της λεκάνης της Βαγιονιάς προς τη λεκάνη των Μοιρών, προς τη δυτική πλευρά όπου το νερό διαφεύγει από το στένεμα της Φαιστού και περνάει στον υδροφορέα της λεκάνης του Τυμπακίου. Η ακριβέστερη κίνηση που ακολουθεί το υπόγειο νερό απεικονίζεται στο σχήμα 33 με τα βέλη διεύθυνσης ταχύτητας ροής.



Σχήμα: 33 Διεύθυνση υπόγειας ροής, υγρή περίοδος 2008

Στο ανατολικό όριο παρατηρείται αναστροφή του νερού, δηλαδή κινείται προς τα ανατολικά, γεγονός που δικαιολογείται από την ύπαρξη ορεινών όγκων στα βόρεια και νότια της περιοχής αυτής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το νερό να οδηγείται και προς την λεκάνη της Βαγιονάς. Η μέγιστη τιμή υδραυλικού ύψους που συναντάται στο ανατολικό όριο της λεκάνης κατά την υγρή περίοδο του 2008 είναι 72 m, ενώ η ελάχιστη που συναντάται στο δυτικό όριο της λεκάνης είναι 12 m. Τέλος, επισημαίνεται πως το μέγεθος στα βελάκια διεύθυνσης της ταχύτητας ροής δηλώνει την ταχύτητα ροής του υπόγειου νερού. Στα σημεία όπου τα βέλη είναι μικρά, η ταχύτητα του νερού είναι μικρή ενώ αντίθετα όπου τα βέλη είναι μεγαλύτερα, η ταχύτητα είναι μεγάλη. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι σύμφωνα με το πρόγραμμα, η μέγιστη ταχύτητα που συναντάται στην περιοχή μελέτης ισούται με 0,00058 m/s και αφορά το ανατολικό τμήμα.

4.7 Αποτελέσματα επαλήθευσης μοντέλου

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 4.4, η επαλήθευση του μοντέλου έχει ως στόχο να ελέγξει την αξιοπιστία του. Κατά τη διαδικασία της επαλήθευσης εξετάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου για μία περίοδο διαφορετική από εκείνη της βαθμονόμησης. Η περίοδος βάσει της οποίας πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος είναι το υδρολογικό έτος 2009. Οι παράμετροι που άλλαξαν στο μοντέλο είναι ο εμπλουτισμός, σύμφωνα με το ετήσιο ύψος βροχής για το αντίστοιχο έτος. Οι παροχές άντλησης στις γεωτρήσεις παρέμειναν ίδιες με τις αντίστοιχες τιμές μετά το τέλος της βαθμονόμησης του μοντέλου όπως επίσης και οι οριακές συνθήκες (constant head και drain). Το μοντέλο «έτρεξε» μέχρι και την ξηρή περίοδο του 2009 (720 ημέρες) δίνοντας τιμές υδραυλικού ύψους στα πηγάδια παρατήρησης. Οι τιμές αυτές συγκρίθηκαν με τις πραγματικές τιμές αυτού του έτους από τα δεδομένα και υπολογίστηκε το ποσοτικό σφάλμα βάσει της εξίσωσης 23 (βλέπε σελ. 85). Τα αποτελέσματα της επαλήθευσης του μοντέλου και τα σφάλματα για τις δύο περιόδους του έτους παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 12.

Πίνακας 12 Αποτελέσματα επαλήθευσης υδρολογικού έτους 2009

Observation Well	Δεδομένες τιμές (m)		Αποτελέσματα επαλήθευσης (m)		Ποσοτικό σφάλμα (%)	
	360 - 540 days	540 - 720 days	360 - 540 days	540 - 720 days	360 - 540 days	540 - 720 days
M3	45,4	21,45	46,82	22,84	3%	6%
M6	46,8	23,75	47,39	22,46	1%	5%
M11	55,14	41,2	56,67	39,55	3%	4%
99	58,35	45,68	59,19	44,17	1%	3%
M7	51,78	40,1	53,17	39,63	3%	1%
M8	69,84	52	70,58	53,20	1%	2%
M-A2	50,57	25	51,14	25,98	1%	4%
M1	54,65	26,58	53,43	28,10	2%	6%
M12	38,88	20,24	38,26	19,30	2%	5%
M4	36,45	18,72	37,21	18,28	2%	2%
M5	34,25	16,75	35,86	17,68	5%	6%
M.O.					2%	4%

Όπως και κατά την βαθμονόμηση, έτσι και κατά την επαλήθευση ενός μοντέλου, το σφάλμα που επιθυμούμε να επιτύχουμε είναι το μικρότερο δυνατό. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα, όλα τα υπολογισμένα σφάλματα είναι πολύ χαμηλά. Επιπλέον, ο μέσος όρος των σφαλμάτων είναι και αυτός πολύ ικανοποιητικός και συνεπώς η προσομοίωση της υπόγειας ροής της περιοχής μελέτης πραγματοποιήθηκε σωστά και με μεγάλη ακρίβεια. Πιο συγκεκριμένα, ο μέσος όρος των σφαλμάτων της υγρής περιόδου είναι 2%. Το σφάλμα στα πηγάδια παρατήρησης κυμάνθηκε από 1 έως 5%. Αντίστοιχα, κατά την ξηρή περίοδο ο μέσος όρος είναι 4% ενώ το σφάλμα στα πηγάδια κυμάνθηκε από 1 έως 6%.

Για τον υπολογισμό των σφαλμάτων χρησιμοποιήθηκαν τα πραγματικά υδραυλικά ύψη κάθε περιόδου του 2009, ενώ τα υπολογισμένα υδραυλικά ύψη πάρθηκαν απευθείας από το Output του προγράμματος επιλέγοντας αρχικά το Tools και στη συνέχεια το Cell Inspector. Από εκεί χειροκίνητα μεταβαίνουμε σε κάθε πηγάδι παρατήρησης με τον κέρσορα και ελέγχουμε το υδραυλικό ύψος (head). Επισημαίνεται πως όπως και κατά το προηγούμενο υδρολογικό έτος, έτσι και σε αυτό η διεύθυνση ροής των υπόγειων υδάτων ακολουθεί την πορεία από το ανατολικό όριο προς το δυτικό όριο της λεκάνης των Μοιρών. Παρατηρείται επίσης αναστροφή του νερού στο ανατολικό τμήμα όπως και στο προηγούμενο έτος, ενώ επίσης παρόμοια εικόνα εμφανίζουν και οι ταχύτητες ροής οι οποίες είναι μεγαλύτερες ανατολικά συγκριτικά με το δυτικό κομμάτι. Συγκρίνοντας περαιτέρω τα υδρολογικά έτη 2008 και 2009, δεν παρατηρείται σημαντική πτώση στάθμης στον υδροφορέα της λεκάνης παρά το γεγονός ότι το ετήσιο ύψος βροχής μειώθηκε από 947 σε 803,04 mm. Αναλυτικά, η σύγκριση των δύο ετών παρουσιάζεται στην ενότητα 4.8.1.

Βάσει των παραπάνω, το μοντέλο που εξετάζει την υπόγεια ροή της λεκάνης των Μοιρών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της ποσοτικής κατάστασης των υπόγειων υδάτων για υδρολογικά έτη στα οποία δεν έχουμε δεδομένα. Βάσει των μικρών σφαλμάτων κατά την επαλήθευση του μοντέλου, κρίνεται πως μία μελλοντική εκτίμηση της κατάστασης στην περιοχή μελέτης, όπως αυτή που εξετάζεται στην παρούσα μελέτη, θα δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα.

4.8 Μελλοντική εκτίμηση της ποσοτικής κατάστασης στην περιοχή μελέτης

Έχοντας επαληθεύσει και επιβεβαιώσει πως το μοντέλο μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα, πραγματοποιείται εκτίμηση της ποσοτικής κατάστασης των υπόγειων υδάτων της λεκάνης των Μοιρών για τα επόμενα χρόνια. Αρχικά, παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή του υδραυλικού ύψους στον υδροφορέα από το αρχικό έτος δημιουργίας του μοντέλου έως και σήμερα εστιάζοντας στο ανατολικό και δυτικό όριο της περιοχής μελέτης. Στη συνέχεια, έχοντας λάβει υπόψιν κλιματικά σενάρια, γίνεται σύγκριση τριών ετών, τα οποία καλούνται κομβικά έτη, και είναι το 2020-2021, 2025-2026 και 2030-2031. Αρχικά, «τρέξαμε» το μοντέλο από το έτος της βαθμονόμησης (2009) έως το έτος 2018. Για το διάστημα αυτό, υπήρχαν δεδομένα ετήσιων υψών βροχόπτωσης. Οι παροχές άντλησης των γεωτρήσεων παρέμειναν ίδιες με τα προηγούμενα έτη πλην του υδρολογικού έτους 2017-2018. Το υδρολογικό έτος 2017-2018 ο όγκος του νερού άντλησης αυξήθηκε κατά 80%. Αυτό συνέβη για τους εξής λόγους:

- α) Το νερό του ταμιευτήρα στο φράγμα της Φανερωμένης που θα κάλυπτε μέρος των αναγκών κατά το συγκεκριμένο έτος δεν δόθηκε καθώς ο ταμιευτήρας δεν είχε νερό.
- β) Το συγκεκριμένο έτος είναι ξηρό με χαμηλή βροχόπτωση και προκειμένου να καλυφθούν οι ετήσιες ανάγκες (5.000.000 m³) λειτούργησαν και οι ιδιωτικές γεωτρήσεις της περιοχής τις οποίες όμως δεν έχουμε εισάγει στο μοντέλο. Οι παροχές άντλησης αυτών των γεωτρήσεων είναι γνωστές και τις ενσωματώσαμε στις παροχές άντλησης των υφιστάμενων γεωτρήσεων.

Εν συνεχεία, ανάλογα με το επιθυμητό κομβικό έτος που εξετάζεται, προστέθηκαν οι αντίστοιχες ημέρες τρεξίματος του μοντέλου (time steps) και βάσει της διαδικασίας που εφαρμόστηκε και παρουσιάζεται αναλυτικά στην ενότητα 4.5 προέκυψαν τα κάτωθι αποτελέσματα.

4.8.1 Μεταβολή υδραυλικού ύψους για τα έτη 2008 - 2018

Στον Πίνακα 13 παρουσιάζονται οι τιμές του υδραυλικού ύψους από το υδρολογικό έτος 2008 (έτος έναρξης του μοντέλου) έως και το 2018 για τα οποία υπήρχαν δεδομένα του ετήσιου ύψους βροχόπτωσης. Για κάθε έτος δίνονται τρεις τιμές κάθε μία από τις οποίες αφορά το ανατολικό και το δυτικό όριο της λεκάνης καθώς και το κεντρικό τμήμα αντίστοιχα. Η σύγκριση μεταξύ των δύο ορίων αφορά το γεγονός ότι στο δυτικό τμήμα της λεκάνης εμφανίζεται μεγαλύτερη γεωργική δραστηριότητα αφού εκεί βρίσκεται η μεγαλύτερη πεδιάδα της λεκάνης των Μοιρών. Επιπρόσθετα, στο δυτικό όριο πραγματοποιείται η εκφόρτση του υπόγειου νερού από τη λεκάνη των Μοιρών προς τη λεκάνη του Τυμπακίου μέσω του στενέματος της Φαιστού. Συνεπώς σε αυτό το σημείο, οι τιμές των υδραυλικών υψών αναμένονται να είναι μικρότερες. Αντίθετα, στο ανατολικό τμήμα η γεωργική δραστηριότητα είναι μικρότερη καθώς και ο αριθμός των γεωτρήσεων. Συνεπώς οι ανάγκες σε νερό άρδευσης είναι λιγότερες. Επιπλέον, στο όριο αυτό η λεκάνη των Μοιρών δέχεται πλευρικές εισροές από τη λεκάνη της Βαγιονιάς και επομένως τα υδραυλικά ύψη αναμένονται να είναι μεγαλύτερα. Στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης των Μοιρών βρίσκεται ο μεγαλύτερος αριθμός των γεωτρήσεων και συνεπώς εκεί οι αντλήσεις είναι μεγαλύτερες. Στο τμήμα αυτό επομένως είναι αναγκαίο να διατηρούνται τα υδραυλικά ύψη σε υψηλές τιμές. Τέλος, σε κάθε επόμενο έτος και για τα τρία τμήματα υπολογίζεται η μεταβολή του υδραυλικού έτους συγκρινόμενο με το προηγούμενο.

Πίνακας 13 Υδραυλικά ύψη (2008 - 2018)

Υδρολογικό Έτος	Wet - East (m)	Διαφορά (m)	Dry-East (m)	Διαφορά (m)	Wet-Middle (m)	Διαφορά (m)	Dry-Middle (m)	Διαφορά (m)	Wet-West (m)	Διαφορά (m)	Dry-West (m)	Διαφορά (m)
2008 - 2009	72	-	52	-	44	-	24	-	12	-	10	-
2009 - 2010	72	0	54	2	46	2	24	0	12	0	10	0
2010 - 2011	72	0	54	0	46	0	23	-1	12	0	10	0
2011 - 2012	74	2	52	-2	49	3	25	2	12	0	10	0
2012 - 2013	76	2	52	0	45	-4	27	2	12	0	10	0
2013 - 2014	76	0	54	2	45	0	22	-5	12	0	10	0
2014 - 2015	76	0	54	0	46	1	23	1	12	0	10	0
2015 - 2016	76	0	54	0	46	0	23	0	12	0	10	0
2016 - 2017	76	0	54	0	47	1	23	0	12	0	10	0
2017 - 2018	76	0	54	0	39	-8	6.5	-16.5	12	0	3	-7
M.O	74,6		53,4		45,3		22,05		12		9,3	

Από τις τιμές του υδραυλικού ύψους που παρουσιάζονται στον Πίνακα 13 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

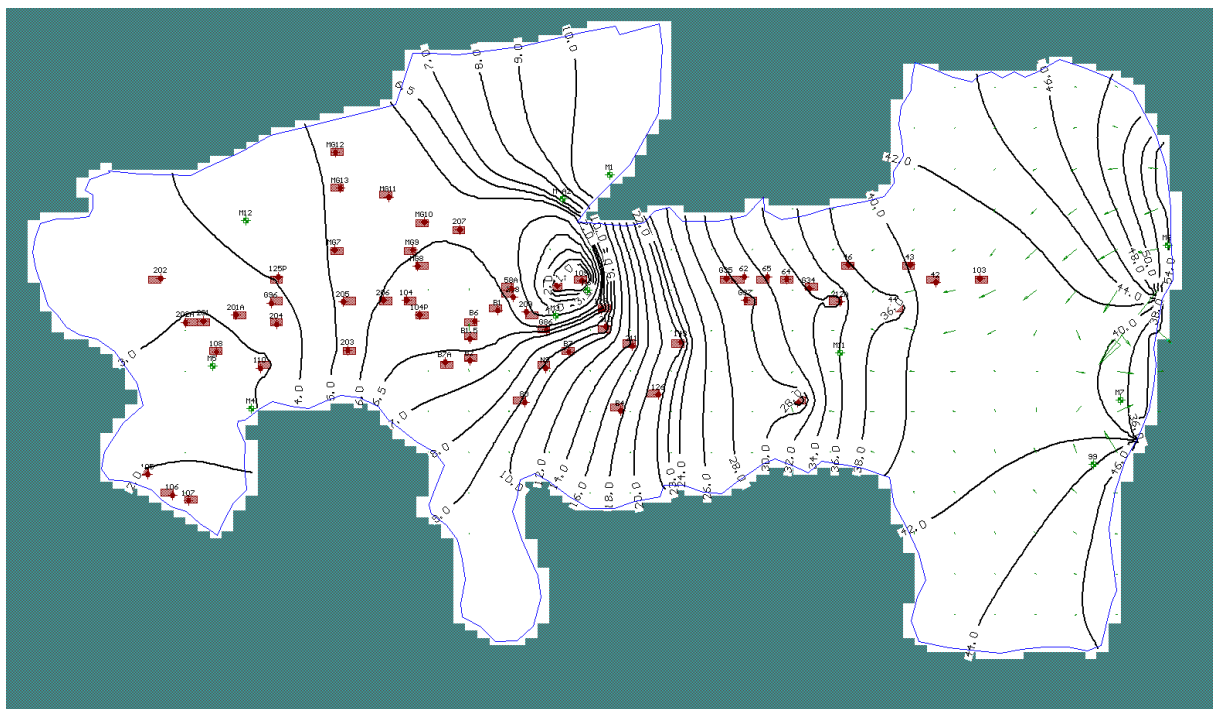
Το ανατολικό τμήμα της λεκάνης των Μοιρών εμφανίζει τις υψηλότερες τιμές υδραυλικών φορτίων σε κάθε περίοδο κατά την δεκαετία 2008-2018 με μέγιστη τιμή τα 76 m και ελάχιστη τιμή τα 72 m στην υγρή περίοδο. Αντίστοιχα, την ξηρή περίοδο οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 54 και 52 m. Αντίθετα, οι μικρότερες τιμές εμφανίζονται στο δυτικό τμήμα όπου κατά την υγρή περίοδο τα υδραυλικά ύψη παίρνουν τιμές σταθερές στα 12 m ενώ την ξηρή περίοδο οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 10 και 3 m. Στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης, το υδραυλικό ύψος έχει σε κάθε περίοδο τιμές ενδιάμεσες των τιμών που έχουν τα δύο όρια της λεκάνης. Πιο συγκεκριμένα, την υγρή περίοδο οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 39 και 49 m, ενώ την ξηρή περίοδο μεταξύ 6,7 με 27 m. Τα αποτελέσματα αυτά αρχικά επιβεβαιώνουν την διεύθυνση της ροής του υπόγειου νερού στον υδροφορέα της λεκάνης από το ανατολικό τμήμα προς το δυτικό. Επίσης, γίνεται σαφές πως οι υψηλές τιμές στο ανατολικό όριο οφείλονται αφενός στη μικρή γεωργική δραστηριότητα και τον μικρό αριθμό γεωτρήσεων και αφετέρου λόγω των πλευρικών εισροών που δέχεται η λεκάνη των Μοιρών από την λεκάνη της Βαγιονιάς. Ως εκ τούτου, στο δυτικό όριο επαληθεύονται οι μικρές τιμές υδραυλικού ύψους εξαιτίας της αυξημένης γεωργικής δραστηριότητας και των υπόγειων διαφυγών του νερού προς τη λεκάνη του Τυμπακίου διαμέσων του στενέματος της Φαιστου. Τέλος, το κεντρικό τμήμα εμφανίζει τιμές ανάμεσα στις τιμές των δύο ορίων που οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη του μεγαλύτερου μέρους των γεωτρήσεων καθώς και στο γεγονός ότι δεν δέχεται σε αυτό το σημείο εισροές από άλλη λεκάνη.

Συγκρίνοντας τις δύο περιόδους (υγρή και ξηρή) κάθε τμήματος, προκύπτει πως κατά την υγρή περίοδο τα υδραυλικά ύψη είναι μεγαλύτερα από ότι την ξηρή περίοδο. Αυτό είναι λογικό αφού οι ανάγκες κατά την ξηρή περίοδο είναι πολύ μεγαλύτερες και συνεπώς οι παροχές άντλησης είναι αυξημένες. Μεγαλύτερη διαφορά, ανάμεσα στους μέσους όρους κάθε περιόδου, εμφανίζει το κεντρικό τμήμα με τιμή 23,25 m. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ύπαρξη πολλών γεωτρήσεων στο κομμάτι αυτό, οι οποίες ιδιαίτερα κατά την ξηρή περίοδο αντλούν πολύ περισσότερο νερό. Στο δυτικό όριο, οι διαφορά μεταξύ κάθε περιόδου δεν είναι μεγάλη διότι οι παροχές άντλησης και στις δύο περιόδους είναι περίπου ίδιες εξαιτίας της αυξημένης γεωργικής δραστηριότητας που υπάρχει.

Κατά τα έτη 2008 έως 2017, η διαφορά στην τιμή του υδραυλικού ύψους σε κάθε τμήμα της λεκάνης είναι πολύ μικρή. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως στην ξηρή περίοδο του δυτικού ορίου, δεν υπάρχει καμία διαφορά. Σημαντικές διαφορές στις τιμές υδραυλικού ύψους διακρίνει κανείς κατά το υδρολογικό έτος 2017-2018. Πιο συγκεκριμένα, οι διαφορές αυτές εμφανίζονται κυρίως στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης όπου κατά την υγρή περίοδο ο υδροφορέας, σε σύγκριση με το προηγούμενο έτος, είναι 8 m χαμηλότερα. Αντίστοιχα, κατά την ξηρή περίοδο ο υδροφορέας είναι χαμηλότερα κατά 16,5 m. Επιπλέον, αρκετά μεγάλη διαφορά παρουσιάζει το δυτικό όριο στην ξηρή περίοδο, όπου ο υδροφορέας είναι χαμηλότερα κατά 7 m σε σύγκριση με το προηγούμενο έτος. Τα παραπάνω οφείλονται σε δύο λόγους. Πρώτον, η λεκάνη των Μοιρών δεν τροφοδοτήθηκε με νερό από τον ταμιευτήρα του φράγματος της Φανερωμένης καθώς ο ταμιευτήρας ήταν σχεδόν άδειος και υπήρχε αδυναμία κάλυψης των 50.000.000 m³ νερού που απαιτεί η περιοχή ετησίως. Ο όγκος του νερού του

ταμειυτήρα, ήδη από το 2017 είχε μειωθεί από τα 19 εκατομμύρια κυβικά στα 3 τον Απρίλιο. Μάλιστα, κατά τον Οκτώβριο του 2017, ο όγκος μειώθηκε στα 800.000 m³. Επιπλέον, το υδρολογικό έτος 2017-2018 είναι ένα ξηρό έτος με μειωμένη βροχόπτωση. Προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες της περιοχής έπρεπε να λειτουργήσουν και οι ιδιωτικές γεωτρήσεις τις οποίες ωστόσο δεν έχουμε εισάγει στο μοντέλο. Γνωρίζοντας όμως τις παροχές άντλησης, μπορούμε να τις ενσωματώσουμε στις παροχές άντλησης των υφιστάμενων γεωτρήσεων. Ως αποτέλεσμα αυτών, αυξήσαμε όγκο του νερού άντλησης κατά 80% συγκριτικά με τα προηγούμενα έτη. Εξαιτίας της αύξησης της παροχής, η στάθμη του υδροφορέα μειώθηκε στα σημεία που υπάρχει μεγαλύτερη γεωργική δραστηριότητα και μεγαλύτερος αριθμός γεωτρήσεων. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται πως το σύστημα της λεκάνης των Μοιρών παρουσιάζει ευαισθησία ως προς τις ποσοτικές πιέσεις που δέχεται, καθώς η αύξηση των αντλήσεων στα τμήματα όπου η γεωργική δραστηριότητα είναι μεγάλη, οδήγησε σε μείωση του ύψους του υδροφορέα.

Τέλος, κρίνεται σημαντικό να επισημανθεί πως το μοντέλο προσομοίωσε σωστά την κατάσταση της περιοχής για την ξηρή περίοδο του 2018. Βάσει μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν τον Ιούλιο του 2018, το υδραυλικό ύψος στο κεντρικό τμήμα και συγκεκριμένα κοντά στα πηγάδια Β (B1, B6 κτλ.) μετρήθηκε 6,5 m. Σύμφωνα με το σχήμα 34, από το τμήμα αυτό διέρχεται η πιεζομετρική καμπύλη των 6,5 m.



Σχήμα: 34 Ξηρή περίοδος έτους 2017 – 2018

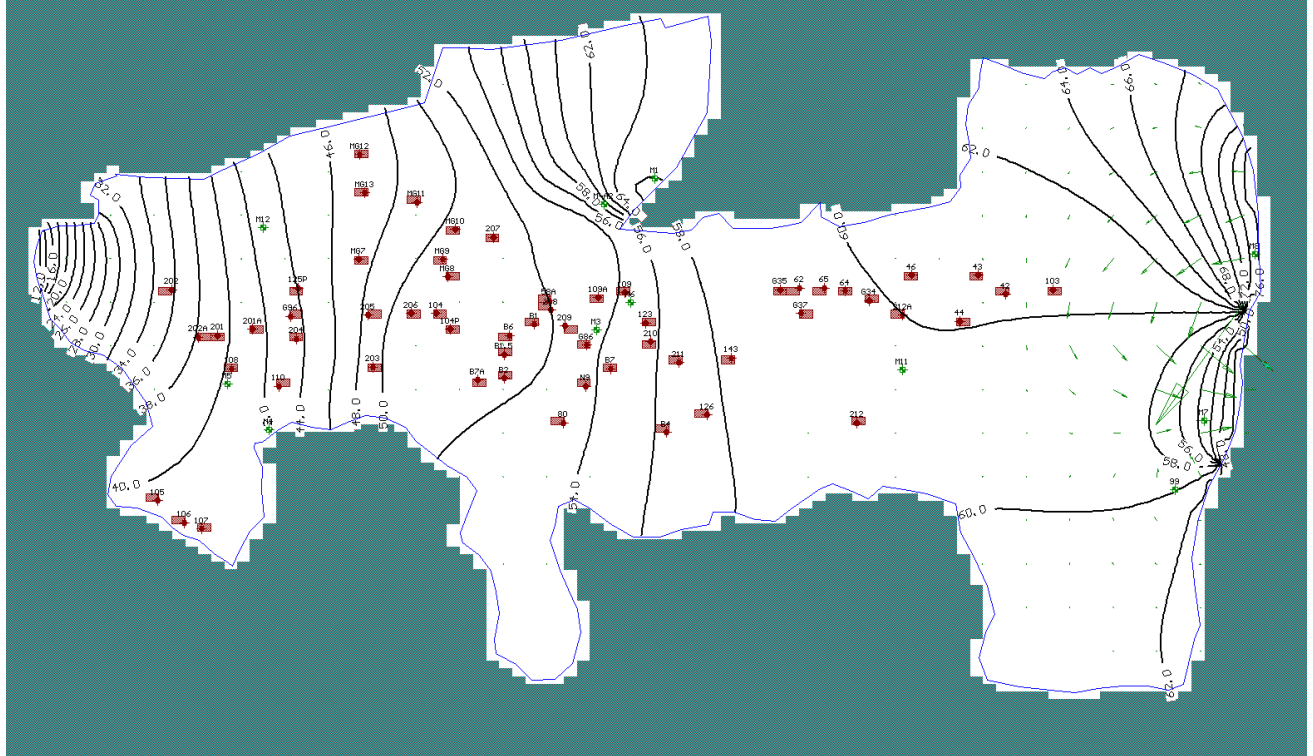
4.8.2 Σύγκριση κομβικών ετών

Με σκοπό τη μελλοντική εκτίμηση της ποσοτικής κατάστασης των υπογείων υδάτων στη λεκάνη των Μοιρών για έτη στα οποία δεν υπάρχουν δεδομένα, λάβαμε υπόψιν κλιματικά σενάρια για τη συγκεκριμένη περιοχή. Τα έτη που εξετάζονται επιλέχθηκαν τυχαία και είναι τα εξής: 2020-2021, 2025-2026 και 2030-2031. Όπως αναλύθηκε στην ενότητα 4.5.1.1, βάσει των κλιματικών σεναρίων B1, A1 και A1b έχει εκτιμηθεί το ετήσιο ύψος βροχόπτωσης έως το 2100 (βλέπε σχήμα 30). Για τα εξεταζόμενα έτη το ετήσιο ύψος βροχόπτωσης αναμένεται να είναι 930 mm, 720 mm και 700 mm αντίστοιχα. Σύμφωνα με τα όσα αναλύθηκαν στην ενότητα 4.5.2, ανάλογα με το ετήσιο ύψος βροχόπτωσης κάθε υδρολογικό έτος χαρακτηρίζεται υγρό, ξηρό ή ενδιάμεσο. Τα τρία επιλεγμένα έτη χαρακτηρίζονται ως υγρά έτη, ωστόσο τα έτη 2025-2026 και 2030-2031 ανήκουν οριακά σε αυτή τη κατηγορία. Τέλος, σύμφωνα με το Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης (GR13) και του Τοπικού Οργανισμού Εγγείων Βελτιώσεων (TOEB), για την περιοχή των Μοιρών σε ένα υγρό υδρολογικό έτος οι ανάγκες νερού άρδευσης θα καλύπτονται από το νερό του ταμιευτήρα (Φράγμα Φανερωμένης) σε ποσοστό 80% και από τις γεωτρήσεις σε ποσοστό 20%. Συνεπώς και για τα τρία εξεταζόμενα έτη, από τα 5.000.000 m³ νερού ετησίως που χρειάζεται η περιοχή, τα 4.000.000 m³ θα δοθούν από τον ταμιευτήρα και το 1.000.000 m³ από τις 58 γεωτρήσεις της περιοχής. Αναλυτικά στην ενότητα 4.5.3 υπολογίστηκαν οι παροχές κάθε γεώτρησης καθώς και οι συνολικές επιστροφές άντλησης (return irrigation) που οφείλονται στις κατακρημνίσεις και στο νερό του ταμιευτήρα.

Συνολικά στο μοντέλο τροποποιήθηκαν οι παράμετροι που αφορούν τις παροχές άντλησης των γεωτρήσεων και ο συνολικός εμπλουτισμός (recharge). Οι υπόλοιπες παράμετροι του μοντέλου (σταθερό φορτίο, τοίχος αποστράγγισης) παρέμειναν σταθερές λαμβάνοντας τις ίδιες τιμές όπως και τα προηγούμενα έτη (2008-2018). Για κάθε ένα επιθυμητό κομβικό έτος, συμπληρώθηκαν οι κατάλληλες ημέρες τρεξίματος του μοντέλου (time steps) ώστε να εξετασθεί σε κάθε ένα τόσο η υγρή όσο και η ξηρή περίοδος του. Για κάθε ένα κομβικό έτος παρουσιάζονται παρακάτω τα αποτελέσματα. Εκτός των συμπερασμάτων που προκύπτουν, πραγματοποιείται και σύγκριση τόσο μεταξύ των προηγούμενων ετών, όσο και μεταξύ των κομβικών ετών.

4.8.2.1 Κομβικό έτος 2020 – 2021

Η κατάσταση που προέκυψε για την ξηρή περίοδο του κομβικού έτους παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα 35.



Σχήμα: 35 Ξηρή περίοδος έτους 2020 – 2021

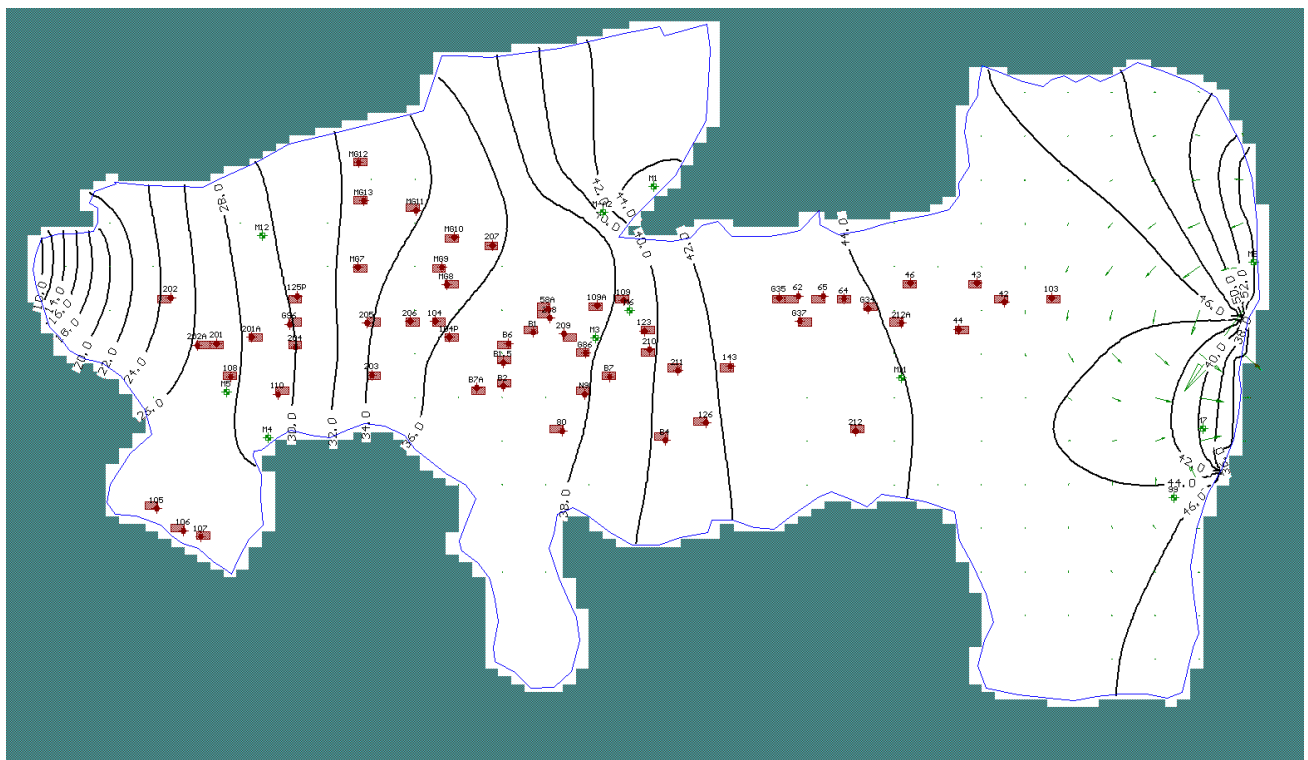
Βάσει των πιεζομετρικών καμπυλών, διακρίνεται πως στο ανατολικό όριο η τιμή υδραυλικού ύψους είναι 76 m ενώ στο δυτικό όριο 12 m. Επιπλέον, στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης, τα υδραυλικά ύψη κυμαίνονται από 58 έως 52 m. Συνεπώς, η κίνηση της υπόγειας ροής διατηρείται όπως και στα προηγούμενα έτη ακολουθώντας την πορεία από το ανατολικό όριο προς το δυτικό. Επιπροσθέτως, οι ταχύτητες ροής είναι υψηλότερες στο ανατολικό τμήμα όπου τα βέλη διεύθυνσης ροής είναι μεγαλύτερα, ενώ επίσης παρατηρείται αναστροφή του νερού, δηλαδή κινείται προς τα ανατολικά, γεγονός που δικαιολογείται από την ύπαρξη ορεινών όγκων στα βόρεια και νότια της περιοχής αυτής.

Οι τιμές του υδραυλικού ύψους στα δύο όρια της λεκάνης είναι παρόμοιες με τις αντίστοιχες τιμές κατά τη δεκαετία 2008-2018. Στο ανατολικό όριο της λεκάνης αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αφενός δεν υπάρχει έντονη γεωργική δραστηριότητα και συνεπώς οι αντλήσεις και ο εμπλουτισμός από τις αρδεύσεις είναι μικρός, και αφετέρου λόγω των πλευρικών εισροών από τη λεκάνη της Βαγιονιάς. Αντίστοιχα, στο δυτικό όριο, υπάρχει μεν μεγαλύτερη γεωργική δραστηριότητα, ωστόσο αυξάνεται ο εμπλουτισμός του υδροφορέα από το νερό που προέρχεται από το φράγμα της Φανερωμένης. Επίσης, στο δυτικό όριο πραγματοποιούνται οι υπόγειες διαφυγές μέσω του στενέματος της Φαιστού προς τη λεκάνη του Τυμπακίου και

επομένως το νερό που εμπλουτίζεται διαφεύγει διατηρώντας τα υδραυλικά ύψη σε αυτά τα επίπεδα.

Αντίθετα, διαφοροποίηση παρατηρείται στο κεντρικό τμήμα της περιοχής όπου τα υδραυλικά ύψη είναι αρκετά υψηλότερα από τον μέσο όρο των ετών 2008 έως 2018. Πιο συγκεκριμένα, βάσει του Πίνακα 13, ο μέσος όρος της υγρής περιόδου αυτών των ετών στο κεντρικό τμήμα ήταν 45,3 m. Στο εξεταζόμενο κομβικό έτος το αντίστοιχο υδραυλικό ύψος κυμαίνεται μεταξύ 52 και 58 m. Συνεπώς υπάρχει αύξηση της στάθμης του υδροφορέα κατά 6,7 με 12,7 m. Παρά το γεγονός ότι το κεντρικό κομμάτι λαμβάνει μεγάλες ποσοτικές πιέσεις λόγω της ύπαρξης πολύ μεγάλου αριθμού γεωτρήσεων και έντονης γεωργικής δραστηριότητας, ο υδροφορέας δείχνει να εμπλουτίζεται παραπάνω από όσο νερό αντλείται. Το γεγονός αυτό οφείλεται σε δύο λόγους. Αρχικά το εξεταζόμενο κομβικό έτος είναι ένα υγρό υδρολογικό έτος με ετήσια βροχόπτωση 930 mm η οποία είναι αρκετά υψηλότερη από τον μέσο όρο των ετών 2008-2018 με τιμή 680,588 mm. Επίσης, για το συγκεκριμένο έτος λαμβάνουμε υπόψιν ότι ο ταμιευτήρας θα έχει νερό και θα μπορεί να τροφοδοτήσει τη λεκάνη των Μοιρών και συνεπώς το 80% του αρδευτικού νερού θα προέρχεται από το φράγμα της Φανερωμένης. Ως αποτέλεσμα αυτών των δύο είναι αφενός να αντλείται λιγότερο νερό από τις γεωτρήσεις και αφετέρου ο υδροφορέας να εμπλουτίζεται περισσότερο από το αρδευόμενο νερό του ταμιευτήρα και από τις αυξημένες κατακρημνίσεις.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η ξηρή περίοδος του κομβικού έτους.



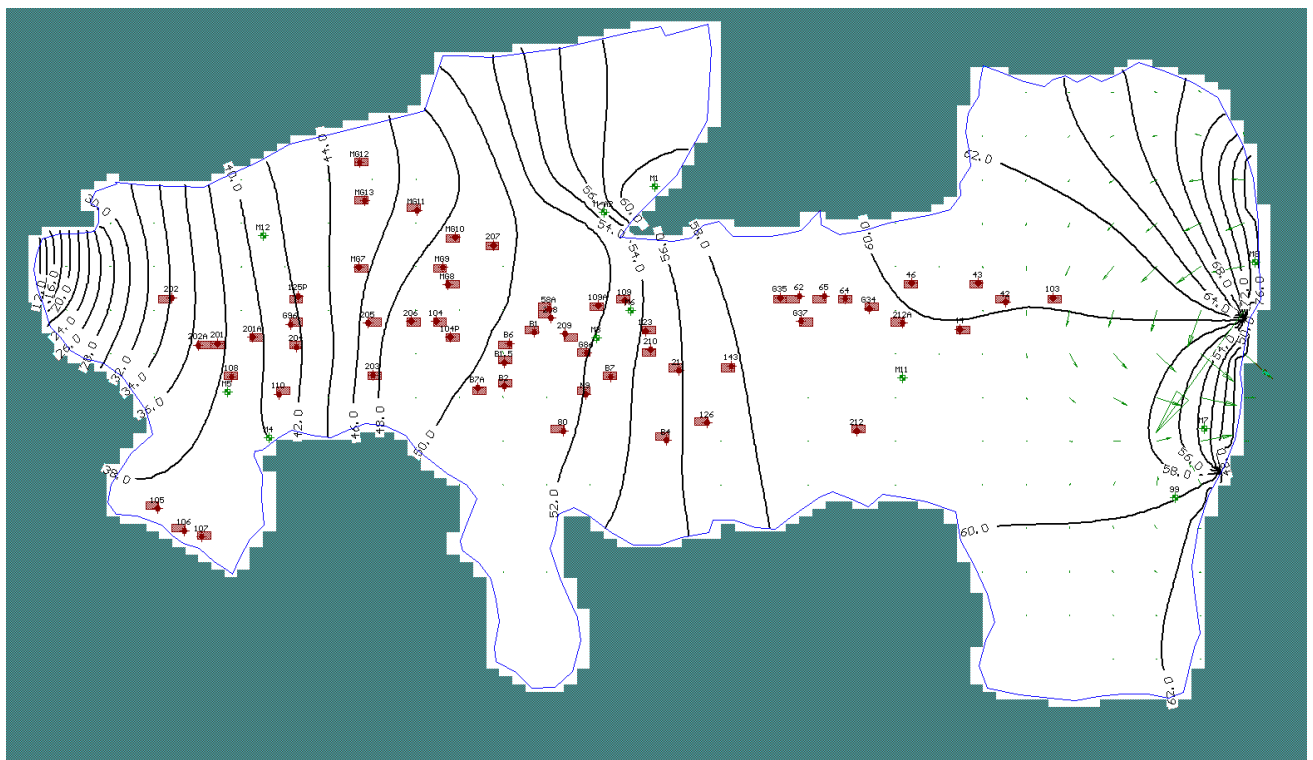
Σχήμα: 36 Ξηρή περίοδος έτους 2020 - 2021

Σύμφωνα με τις πιεζομετρικές καμπύλες της ξηρής περιόδου, στο ανατολικό τμήμα το μέγιστο υδραυλικό ύψος λαμβάνει τιμή 52 m ενώ στο δυτικό όριο το υδραυλικό ύψος είναι 10 m. Οι τιμές αυτές είναι όμοιες με τις αντίστοιχες τιμές των προηγούμενων ετών. Πιο συγκεκριμένα βάσει του Πίνακα 13, κατά τα έτη 2008-2018 ο μέσος όσος της ξηρής περιόδου για το ανατολικό τμήμα ήταν 53,4 m ενώ για το δυτικό 9,3 m. Όπως και κατά την υγρή περίοδο, έτσι και στην ξηρή περίοδο οι λόγοι για τους οποίους τα υδραυλικά ύψη λαμβάνουν παρόμοιες τιμές είναι οι ίδιοι.

Στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης, τα υδραυλικά ύψη λαμβάνουν τιμές μεταξύ 37 και 42 m οι οποίες είναι εμφανώς υψηλότερες από τον μέσο όρο των προηγούμενων ετών με τιμή 22,05 m. Δηλαδή ο υδροφορέας κατά την ξηρή περίοδο του κομβικού έτους, είναι υψηλότερα κατά 14,95 με 19,95 m. Οι ενδείξεις αυτές επιβεβαιώνουν τα συμπεράσματα της υγρής περιόδου κατά τα οποία ο υδροφορέας της λεκάνης εμπλουτίζεται περισσότερο από όσο νερό αντλείται και συνεπώς τα υδραυλικά ύψη αυξάνουν. Σημειώνεται, πως το κεντρικό τμήμα της περιοχής δεν συνορεύει με κάποια λεκάνη και συνεπώς σε αυτό το σημείο δεν έχουμε ούτε πλευρικές εισροές ούτε υπόγειες διαφυγές. Το τμήμα αυτό δέχεται τα υπόγεια νερά που κινούνται από ανατολικά προς δυτικά, τις κατακρημνίσεις και τον εμπλουτισμό άρδευσης του νερού του ταμιευτήρα.

4.8.2.2 Κομβικό έτος 2025 – 2026

Το μοντέλο για την υγρή περίοδο του έτους έδωσε την παρακάτω εικόνα.



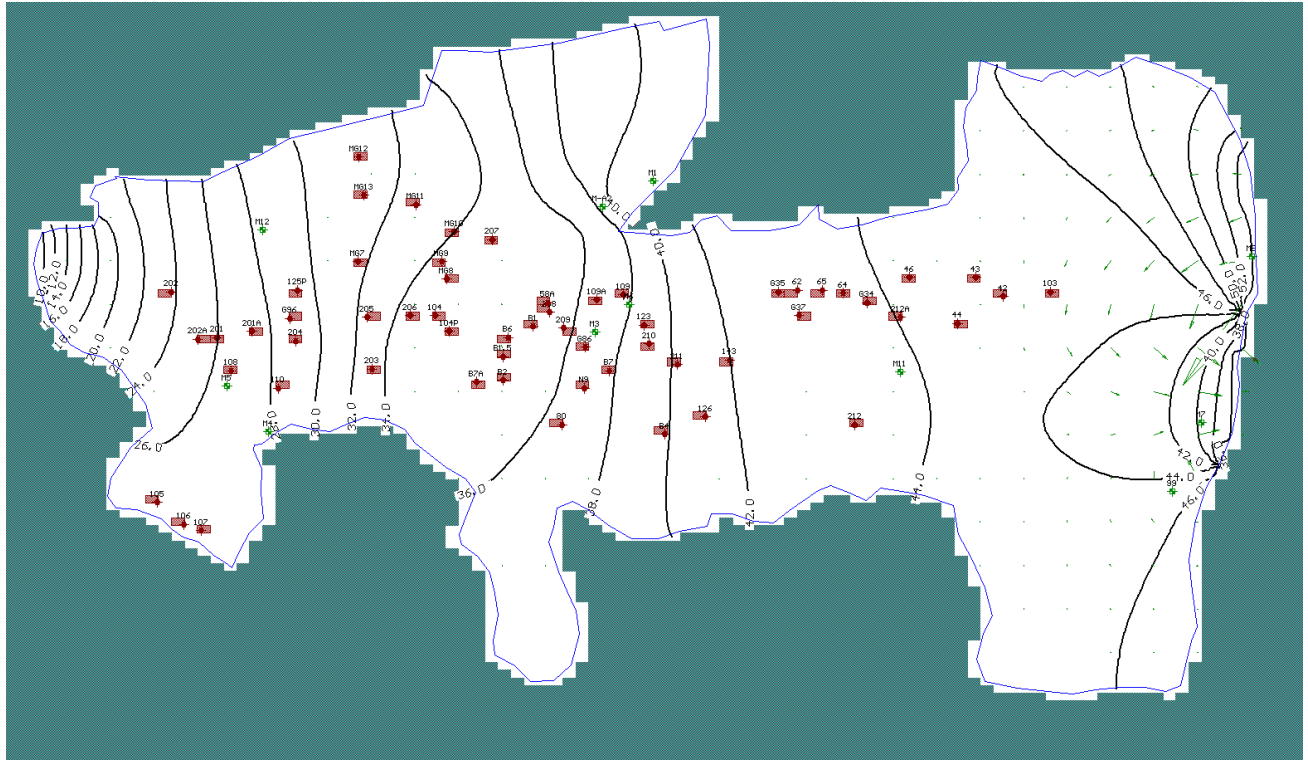
Σχήμα: 37 Υγρή περίοδος έτους 2025 – 2026

Παρατηρώντας τις πιεζομετρικές καμπύλες στο ανατολικό όριο της λεκάνης παρατηρούμε πως το μέγιστο υδραυλικό ύψος είναι 76 m. Στο δυτικότερο όριο της λεκάνης το ύψος καταλήγει να λαμβάνει τιμή 12 m. Επιπλέον, στο κεντρικό τμήμα τα ύψη κυμαίνονται μεταξύ 50 και 58 m. Ως εκ τούτου, η διεύθυνση της υπόγειας ροής εμφανίζει την ίδια πορεία (ανατολικά προς δυτικά) όπως στα έτη 2008-2018 και στο προηγούμενο κομβικό έτος. Επιπροσθέτως, παρατηρείται και στο συγκεκριμένο κομβικό έτος η αναστροφή της πορείας του νερού για τους ίδιους λόγους καθώς επίσης παρατηρείται και η αντίστοιχη εικόνα της ταχύτητας του υπόγειου νερού η οποία είναι μεγαλύτερη στο ανατολικό τμήμα.

Συγκριτικά με την δεκαετία 2008-2018, το εξεταζόμενο κομβικό έτος εμφανίζει παρόμοιες τιμές υδραυλικού ύψους στα όρια της λεκάνης. Πιο συγκεκριμένα βάσει του Πίνακα 12, ο μέσος όρος των υψών ήταν 74,6 m στο ανατολικό όριο και 12 m στο δυτικό όριο. Σύμφωνα με τον ίδιο πίνακα, στο κεντρικό τμήμα ο μέσος όρος είναι 45,3 m, τιμή μικρότερη από τις τιμές 50 έως 58 που προκύπτουν στην υγρή περίοδο του κομβικού έτους. Η εικόνα αυτή οφείλεται στους ίδιους λόγους που αναλύθηκαν στην υγρή περίοδο του προηγούμενου κομβικού έτους (ενότητα 4.8.2.1). Συγκρίνοντας την υγρή περίοδο των δύο κομβικών ετών, δεν υπάρχει καμία διαφορά στις τιμές του υδραυλικού ύψους στα όρια της λεκάνης ενώ στο κεντρικό τμήμα η διαφορά είναι πολύ μικρή.

Παρά το γεγονός ότι το συγκεκριμένο κομβικό έτος είναι οριακά υγρό έτος, βάσει της κατάταξης όπως αναλύεται στην ενότητα 4.5.2, η κατάσταση των υπόγειων υδάτων κατά την υγρή περίοδο είναι ίδια με αυτή του προηγούμενου κομβικού έτους στο οποίο η ετήσια βροχόπτωση ήταν πολύ μεγαλύτερη (720 mm έναντι 930 mm). Αυτό οφείλεται σε δύο βασικούς λόγους. Αρχικά, το νερό που δίνεται από τον ταμιευτήρα εμπλουτίζει πολύ ικανοποιητικά τον υδροφόρα της λεκάνης. Κατά δεύτερον η πρακτική που ακολουθείται οι γεωτρήσεις να καλύπτουν μόνο το 20% των αρδευτικών αναγκών οδηγεί στη μείωση των αντλήσεων και συνεπώς τα υδραυλικά ύψη παραμένουν υψηλά. Επίσης εικάζεται ότι τα ενδιάμεσα στα δύο κομβικά έτη (2022 – 2024) πιθανώς δεν ήταν ξηρά έτη, αλλά πιθανώς ήταν οριακά υγρά έτη και συνεπώς δεν ήταν επιτακτικό οι ανάγκες να καλυφθούν από τα πηγάδια άντλησης. Υπενθυμίζεται ότι αν ένα έτος χαρακτηριζόταν ξηρό, τότε οι ανάγκες θα καλύπτονταν κατά 65% από τις γεωτρήσεις και 35% από τον ταμιευτήρα.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η κατάσταση κατά την ξηρή περίοδο του κομβικού έτους σύμφωνα με τους υπολογισμούς του μοντέλου.



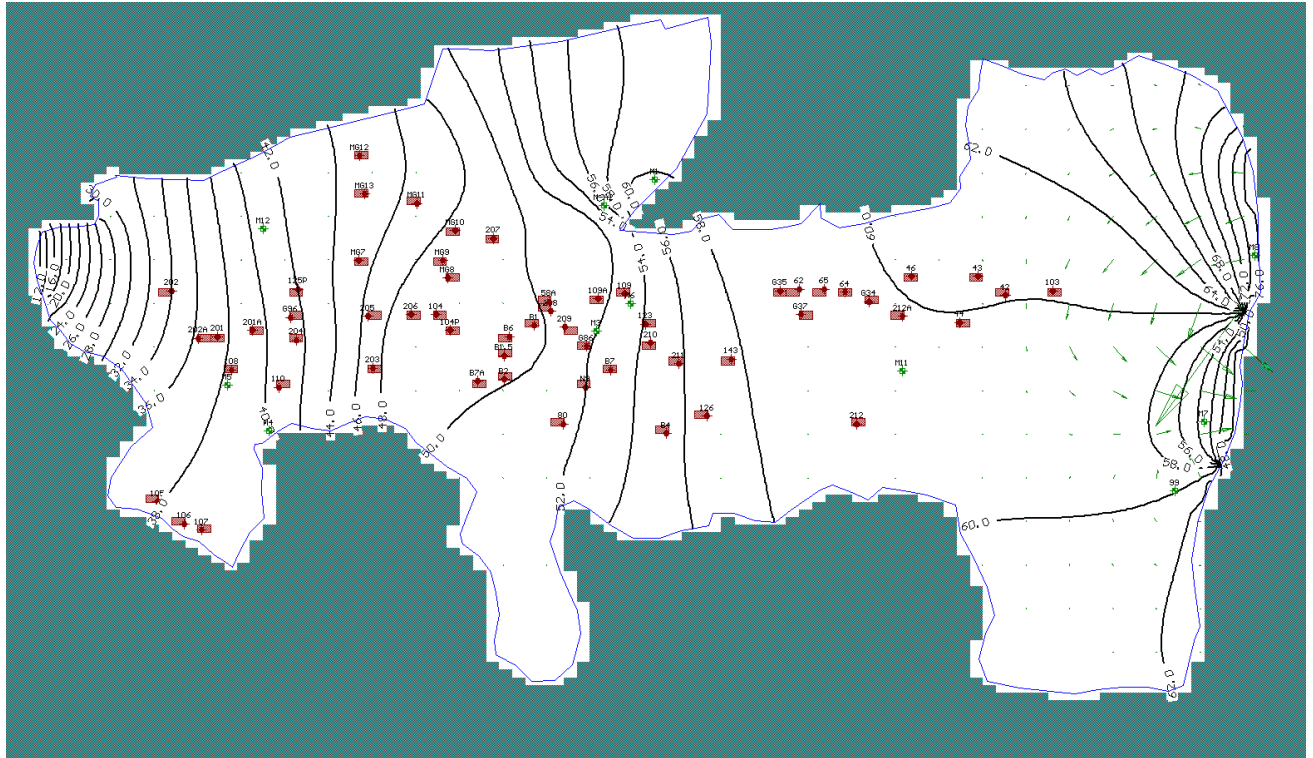
Σχήμα: 38 Ξηρή περίοδος έτους 2025 - 2026

Βάσει των πιεζομετρικών καμπυλών του σχήματος 38, το ανατολικό όριο λαμβάνει μέγιστη τιμή υδραυλικού ύψους 52 m, ενώ στο δυτικότερο όριο ο υδροφορέας καταλήγει σε ύψος 10 m. Όσον αφορά το κεντρικό κομμάτι στο οποίο βρίσκεται ο μεγαλύτερος αριθμός των γεωτρήσεων, τα υδραυλικά ύψη κυμαίνονται από 36 έως 42 m. Η πορεία της υπόγειας ροής διατηρεί την κατεύθυνση ανατολή προς δύση με μεγαλύτερες ταχύτητες στο ανατολικό κομμάτι. Τα υδραυλικά ύψη στα δύο όρια της λεκάνης λαμβάνουν παρόμοιες τιμές με την δεκαετία 2008-2018, ενώ το κεντρικό τμήμα παρουσιάζει αύξηση. Πιο συγκεκριμένα, ο υδροφορέας στο κεντρικό τμήμα είναι υψηλότερα κατά 13,95 με 19,95 m. Το γεγονός αυτό οφείλεται στους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν και στην ξηρή περίοδο του προηγούμενου κομβικού έτους.

Τα δύο κομβικά έτη δεν εμφανίζουν διαφορές μεταξύ τους στην ξηρή περίοδο σε κανένα τμήμα της λεκάνης. Η τροφοδοσία του υδροφορέα από το νερό του ταμιευτήρα είναι μεγάλη και η στάθμη των υπόγειων νερών διατηρείται στα ίδια επίπεδα παρά το γεγονός ότι το έτος 2025-2026 είναι οριακά υγρό έτος και συνεπώς η βροχόπτωση αναμένεται να είναι λιγότερη.

4.8.2.3 Κομβικό έτος 2030 – 2031

Το τελευταίο έτος που εξετάζεται η ποσοτική κατάσταση των υδάτων στη λεκάνη των μοιρών είναι το 2030-2031. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου για την υγρή περίοδο αυτού του έτους.



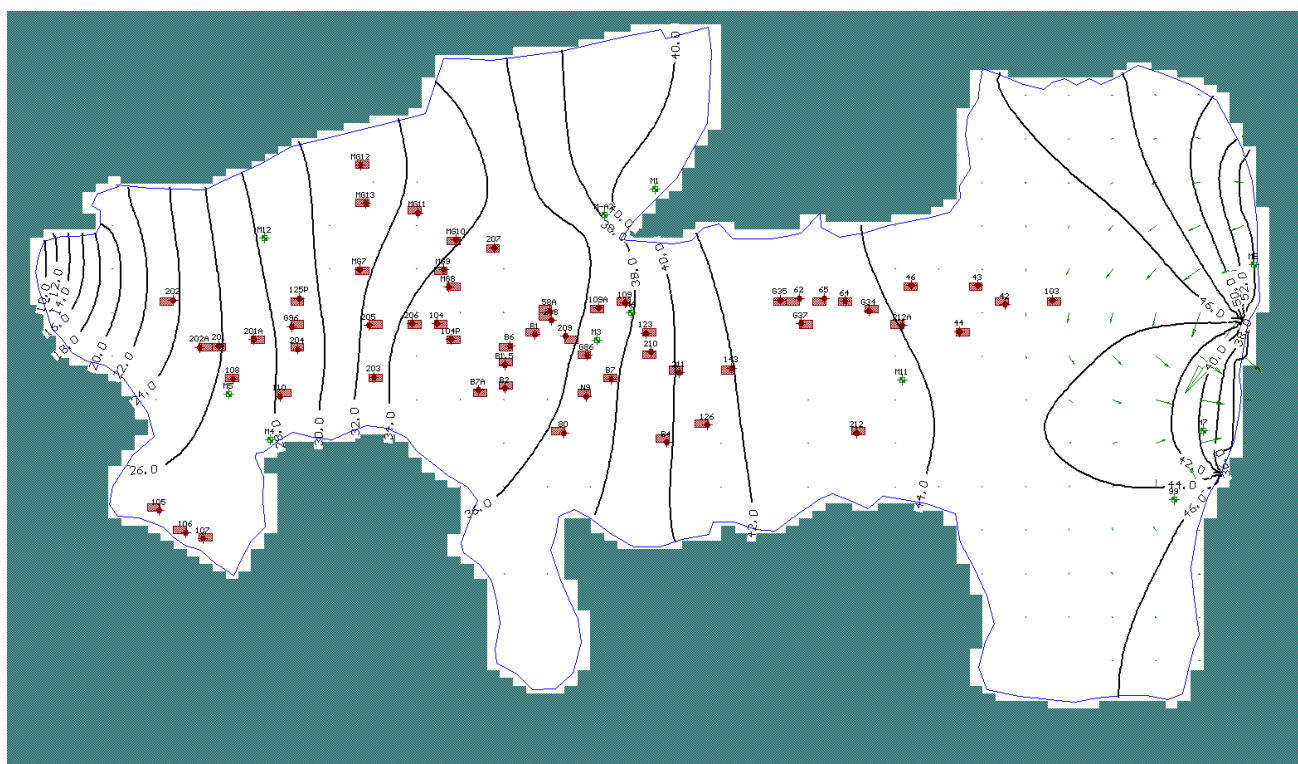
Σχήμα: 39 Υγρή περίοδος έτους 2030 – 2031

Από τις πιεζομετρικές καμπύλες προκύπτει ότι στο ανατολικό όριο το μέγιστο υδραυλικό ύψος είναι 76 m. Στο δυτικό όριο, το υπόγειο νερό προτού διαφύγει έχει υδραυλικό ύψος 12 m. Το κεντρικό τμήμα της λεκάνης λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 50 και 58 m. Η διεύθυνση της υπόγειας ροής διατηρείται όπως σε όλα τα προηγούμενα εξεταζόμενα έτη από το ανατολικό τμήμα (πλευρικές εισροές) προς το δυτικό τμήμα (υπόγειες διαφυγές). Μεγαλύτερες τιμές στη ταχύτητα του νερού παρατηρούνται στο ανατολικό όριο όπως ακριβώς συμβαίνει και στα προηγούμενα έτη. Επιπλέον, παρατηρείται το ίδιο φαινόμενο κατά το οποίο συμβαίνει αναστροφή του υπόγειου νερού στο δυτικό τμήμα εξαιτίας της ύπαρξης ορεινών όγκων στα βόρεια και νότια της περιοχής αυτής.

Συγκρίνοντας την υγρή περίοδο αυτού του έτους με τις αντίστοιχες περιόδους της δεκαετίας 2008-2018, είναι αντιληπτό ότι διαφορές εμφανίζονται μόνο στο κεντρικό τμήμα της περιοχής. Πιο συγκεκριμένα, βάσει του Πίνακα 13 ο μέσος όρος σε αυτό το τμήμα είναι 45,3 m, δηλαδή χαμηλότερα από το συγκεκριμένο κομβικό έτος. Συνεπώς, ο υδροφορέας βρίσκεται υψηλότερα 4,7 με 12,7 m. Οι κύριοι λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτό αναλύονται στην υγρή περίοδο του πρώτου κομβικού έτους (ενότητα 4.8.2.1).

Η υγρή περίοδος μεταξύ των τριών εξεταζόμενων κομβικών ετών παρουσιάζει όμοια εικόνα. Τα τρία έτη δίνουν ίδιες τιμές υδραυλικού ύψους στο δυτικό όριο (12 m) και ίδιες στο ανατολικό όριο (76 m). Παρόμοια κατάσταση εμφανίζεται και στο κεντρικό τμήμα αφού οι τιμές για το έτος 2030-2031 είναι πολύ κοντινές. Πιο συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στο παρόν κομβικό έτος οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 50 και 58 m. Κατά το κομβικό έτος 2020-2021 οι αντίστοιχες τιμές είναι 52 – 58 m, ενώ κατά το έτος 2025-2026 είναι 50 – 58 m. Τα δύο τελευταία κομβικά έτη έχουν ακριβώς ίδιες τιμές οι οποίες είναι ελάχιστα μικρότερες συγκρινόμενες με το πρώτο κομβικό έτος. Αυτή η μικρή διαφορά πιθανόν οφείλεται στο γεγονός ότι το έτος 2020-2021 ήταν ξεκάθαρα ένα υγρό έτος, ενώ τα δύο επόμενα χαρακτηρίζονταν οριακά ως υγρά έτη.

Για την ξηρή περίοδο του τελευταίου κομβικού έτους το μοντέλο έδωσε την ακόλουθη εικόνα.



Σχήμα: 40 Ξηρή περίοδος έτους 2030 – 2031

Παρατηρώντας τις πιεζομετρικές καμπύλες της ξηρής περιόδου προκύπτει ότι στο ανατολικό όριο της λεκάνης η μέγιστη τιμή υδραυλικού ύψους είναι 52 m. Στο δυτικό όριο, το ύψος του υδροφορέα, προτού το υπόγειο νερό περάσει στη λεκάνη του Τυμπακίου, λαμβάνει την τιμή 10 m. Όσον αφορά το κεντρικό τμήμα της περιοχής, το υδραυλικό ύψος κυμαίνεται από 35 έως 40 m. Βάσει των καμπυλών, η διεύθυνση ροής των υπόγειων υδάτων διατηρεί την πορεία από τα ανατολικά προς τα δυτικά με μεγαλύτερες ταχύτητες στο ανατολικό όριο. Επιπλέον, στα ανατολικά της λεκάνης εμφανίζεται το φαινόμενο της αναστροφής του νερού, όπως ακριβώς συμβαίνει και στα προηγούμενα έτη. Οι τιμές των υδραυλικών υψών συγκρινόμενες με τη δεκαετία 2008-2018, παρουσιάζουν ίδια εικόνα αφού ο μέσος όρος εκείνης της περιόδου στο ανατολικό όριο είναι 53,4 m, ενώ στο δυτικό 9.3 m. Διαφορά παρατηρείται στο κεντρικό τμήμα

όπου ο υδροφορέας παρουσιάζει άνοδο 12,95 με 17,95 m η οποία οφείλεται στους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κομβικά έτη.

Συγκρίνοντας την ξηρή περίοδο αυτού του έτους με τις ξηρές περιόδους των δύο άλλων κομβικών ετών, παρατηρείται ότι τα υδραυλικά ύψη σε κάθε τμήμα της λεκάνης λαμβάνουν τις ίδιες τιμές. Πιο συγκεκριμένα, στο ανατολικό όριο το υδραυλικό ύψος παραμένει στα 52 m, στο κεντρικό τμήμα κυμαίνεται από 35 έως 42 m και στο δυτικό όριο παραμένει στα 10 m.

4.8.2.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κομβικών ετών

Ο πίνακας που ακολουθεί παρουσιάζει συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα κάθε κομβικού έτους με τις τιμές υδραυλικού ύψους στο ανατολικό, δυτικό και κεντρικό τμήμα της λεκάνης των Μοιρών.

Πίνακας 14 Υδραυλικά ύψη κομβικών ετών (ανατολικό, δυτικό και κεντρικό τμήμα)

Κομβικό έτος	East - Wet (m)	Middle - Wet (m)	West - Wet (m)	East - Dry (m)	Middle - Dry (m)	West - Dry (m)
2020 - 2021	76	55	12	52	39,5	10
2025 - 2026	76	54	12	52	39	10
2030 - 2031	76	54	12	52	37,5	10
M.O.	76	54,3	12	52	38,7	10

Βάσει των τιμών του Πίνακα 14 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

1. Το ανατολικό όριο της λεκάνης διατηρεί τις τιμές υδραυλικού ύψους που εμφανίζονται στα έτη 2008 έως 2018 και στις δύο περιόδους (υγρή και ξηρή).
2. Το δυτικό όριο της λεκάνης διατηρεί επίσης τα ίδια ύψη με τα αντίστοιχα για τα έτη 2008 έως 2018, πλην της ξηρής περιόδου του έτους 2018 στο οποίο οι γεωτρήσεις αντλούσαν όλο το χρόνο κατά 80% περισσότερο νερό.
3. Το κεντρικό τμήμα εμφανίζει κατά μέσο όρο υψηλότερες τιμές. Βάσει των αντίστοιχων μέσων τιμών του Πίνακα 13, ο υδροφορέας είναι υψηλότερα κατά 9 m την υγρή περίοδο και 16,6 m την ξηρή περίοδο.

Μελετώντας περαιτέρω τις διαφορές που παρουσιάζει το κεντρικό τμήμα, γίνεται σύγκριση με τα έτη 2008-2017 όπου οι γεωτρήσεις αντλούν φυσιολογικά καθώς και με το έτος 2017-2018 όπου οι αντλήσεις είναι αυξημένες κατά 80%. Για την υγρή περίοδο των ετών 2008-2017, ο μέσος όρος στα υδραυλικά ύψη που προκύπτει από τον Πίνακα 13 είναι 46 m. Για το έτος 2017-2018 το υδραυλικό ύψος είναι 39 m. Βάσει του Πίνακα 14, ο μέσος όρος του υδραυλικού ύψους στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης κατά την υγρή περίοδο είναι 54,3. Επομένως, στα κομβικά έτη ο υδροφορέας είναι υψηλότερα κατά $54,3 - 46 = 8,3$ m συγκριτικά με την περίοδο 2008-

2017. Αντίστοιχα, συγκριτικά με το έτος 2017-2018 ο υδροφορέας είναι υψηλότερα κατά $54,3 - 39 = 15,3$ m. Για την ξηρή περίοδο των ετών 2008-2017, ο μέσος όρος στο υδραυλικό ύψος που προκύπτει από τον Πίνακα 13 είναι 23,8 m. Το υδρολογικό έτος 2017-2018 το υδραυλικό ύψος είναι 6,5 m. Σύμφωνα με τις τιμές του Πίνακα 14, κατά την ξηρή περίοδο ο μέσος όρος του υδραυλικού ύψους στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης ισούται με 38,7 m. Συνεπώς, στην ξηρή περίοδο των κομβικών ετών ο υδροφορέας είναι υψηλότερα κατά $38,7 - 23,8 = 14,9$ m σε σχέση με την περίοδο 2008-2017 και υψηλότερα κατά $38,7 - 6,5 = 32,2$ m συγκριτικά με το έτος 2017-2018.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1 Βασικά συμπεράσματα

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, προσομοιώθηκε αρχικά η κίνηση των υπογείων υδάτων της λεκάνης των Μοιρών και στη συνέχεια μελετήθηκε πρώτα η ευαισθησία της περιοχής στις πιέσεις που δέχεται καθώς και η ποσοτική κατάσταση του υδροφορέα στο μέλλον με τη χρήση του λογισμικού πακέτου Visual MODFLOW. Η περιοχή μελέτης, που αποτελεί πολύ σημαντική γεωργική περιοχή, έχει ετήσιες ανάγκες σε άρδευση 5.000.000 m³ νερό. Μέσω του λογισμικού πακέτου, αναπτύχθηκε μοντέλο που προσομοιώνει την υπόγεια ροή στον υδροφορέα της λεκάνης βάσει δεδομένων για το υδρολογικό έτος 2008. Κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου τα σφάλματα ήταν χαμηλά με μέσο όρο τιμών 6% και 7% για την υγρή και ξηρή περίοδο του έτους αντίστοιχα (Πίνακας 11) και συνεπώς το μοντέλο προσομοιώνει πολύ ικανοποιητικά τα υπόγεια ύδατα της περιοχής. Στη συνέχεια ελέγχθηκε η αποτελεσματικότητα και αξιοπιστία του μοντέλου για το επόμενο υδρολογικό έτος (2009). Μεταβάλλοντας κάποιες από τις παραμέτρους, το μοντέλο προσομοίωσε την υδρολογική κατάσταση της λεκάνης για το έτος 2009, στο οποίο είχαμε γνωστά δεδομένα υδραυλικών ύψων από τα πηγάδια παρατήρησης. Τα ύψη που υπολόγισε το μοντέλο συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες πραγματικές τιμές από τα δεδομένα και προέκυψαν τα σφάλματα της βαθμονόμησης. Σύμφωνα με τον Πίνακα 12, το ποσοτικό σφάλμα του μοντέλου κατά την επαλήθευσή του ήταν πολύ ικανοποιητικό. Πιο συγκεκριμένα, για τις δύο περιόδους του έτους τα σφάλματα υπολογίστηκαν 2% και 4%. Από τα σφάλματα της βαθμονόμησης και της επαλήθευσης του μοντέλου, συμπεραίνουμε πως το μοντέλο προσομοίωσης της υπόγειας ροής στη λεκάνη των Μοιρών είναι αξιόπιστο και κατάλληλο ώστε να προσομοιώσει την υδρολογική κατάσταση της περιοχής σε μελλοντικά έτη στα οποία δεν υπάρχουν δεδομένα. Επιπλέον, προέκυψαν συμπεράσματα σχετικά με τα υδραυλικά ύψη που αναπτύσσονται στον υδροφορέα καθώς και με την διεύθυνση της υπόγειας ροής. Βάσει του σχήματος 33, η διεύθυνση ροής του υδροφορέα είναι από την ανατολή προς τη δύση, παρόμοια δηλαδή με τη διεύθυνση ροής του ποταμού Γεροπόταμου. Στο ανατολικό όριο της λεκάνης τα υδραυλικά ύψη είναι μεγαλύτερα, διότι σε αυτό το σημείο η λεκάνη δέχεται πλευρικές εισροές από την λεκάνη της Βαγιονιάς, ενώ στο δυτικό όριο τα υδραυλικά ύψη είναι χαμηλότερα, καθώς στο τμήμα αυτό πραγματοποιούνται υπόγειες διαφυγές του νερού προς τη λεκάνη του Τυμπακίου μέσω του στενέματος της Φαιστού. Επιπροσθέτως, στο ανατολικό όριο της λεκάνης δημιουργείται αναστροφή του νερού που δικαιολογείται από την ύπαρξη ορεινών όγκων στα βόρεια και νότια της περιοχής αυτής. Τέλος, οι ταχύτητες ροής του υπόγειου νερού είναι μεγαλύτερες στο ανατολικό τμήμα της λεκάνης και μικρότερες στο κεντρικό και δυτικό.

Με σκοπό την μελλοντική εκτίμηση της ποσοτικής κατάστασης στην περιοχή μελέτης, αρχικά θέλαμε να φτάσει το μοντέλο έως το έτος για το οποίο υπήρχαν δεδομένα, δηλαδή έως το έτος 2018. Διατηρώντας τις παραμέτρους του μοντέλου ίδιες με αυτές που προέκυψαν από την βαθμονόμηση και επαλήθευση αυτού, και αλλάζοντας τον εμπλουτισμό βάσει του ετήσιου ύψους βροχής, το μοντέλο προσομοίωσε τη λεκάνη για τα επόμενα έτη. Τα έτη 2008-2017 δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους αφού όλοι οι παράμετροι, πλην του ετήσιου ύψους βροχής, παρέμειναν ίδιοι. Σημαντική διαφοροποίηση ωστόσο παρουσιάζεται κατά το έτος 2017-2018 στο οποίο ο όγκος του νερού άντλησης είναι αυξημένος κατά 80%. Βασικός λόγος που συνέβη αυτό είναι η αδυναμία του ταμιευτήρα στο Φράγμα της Φανερωμένης να τροφοδοτήσει με νερό τη λεκάνη των Μοιρών εξαιτίας της πτώσης στάθμης του. Ο συγκεκριμένος ταμιευτήρας παρότι πληρώθηκε το 2010, αναμενόταν να εξυπηρετήσει τις ανάγκες της περιοχής των Μοιρών το έτος 2017-2018 καθώς τα προηγούμενα έτη δεν είχαν ολοκληρωθεί τα έργα των σωληνώσεων τροφοδοσίας. Ωστόσο, ήδη από τον Απρίλιο του 2017 η στάθμη του ταμιευτήρα μειώθηκε από τα 19 εκατομμύρια m³ σε μόλις 3 εκατομμύρια m³, ενώ τον Οκτώβριο του ίδιου έτους ο ταμιευτήρας διέθετε μόνο 800.000 m³ νερό. Επιπλέον, το συγκεκριμένο υδρολογικό έτος ήταν ξηρό με μειωμένες βροχοπτώσεις. Προέκυψε έτσι έκτακτη ανάγκη να καλυφθεί το νερό που θα προερχόταν από τον ταμιευτήρα από τις ιδιωτικές γεωτρήσεις οι οποίες δεν είχαν ενσωματωθεί στο μοντέλο. Γνωρίζοντας ωστόσο τις παροχές των αντλήσεων των ιδιωτικών γεωτρήσεων, αυξήσαμε τον όγκο του νερού άντλησης κατά 80%. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του έτους 2017-2018, υπήρξε μεγάλη πτώση στάθμης κυρίως στο κεντρικό τμήμα της περιοχής, στο οποίο υπάρχει ο μεγαλύτερος αριθμός γεωτρήσεων (βλέπε Σχήμα 26). Πιο συγκεκριμένα, κατά την υγρή περίοδο η πτώση στάθμης συγκριτικά με το προηγούμενο έτος ήταν 8 m, ενώ κατά την ξηρή περίοδο 16,5 m (Πίνακας 13). Το συμπέρασμα που προκύπτει από το συγκεκριμένο έτος είναι πως το σύστημα της λεκάνης των Μοιρών παρουσιάζει ευαισθησία στις ποσοτικές πιέσεις που δέχεται. Πιο συγκεκριμένα, το κεντρικό τμήμα της λεκάνης το οποίο δεν δέχεται πλευρικές εισροές από άλλη λεκάνη, περιλαμβάνει τις περισσότερες γεωτρήσεις και έχει υψηλή γεωργική δραστηριότητα, επηρεάζεται σημαντικά κατά την αύξηση των παροχών άντλησης. Εκτός του κεντρικού τμήματος, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 13, κατά την ξηρή περίοδο του ίδιου έτους, στο δυτικό όριο της λεκάνης ο υδροφορέας μειώνεται κατά 7 m. Αυτό συμβαίνει διότι πρώτον σε αυτό το τμήμα υπάρχει πολύ έντονη γεωργική δραστηριότητα (πεδινό τμήμα) και δεύτερον το υπόγειο νερό διαφεύγει προς τη λεκάνη του Τυμπακίου. Συνεπώς και το δυτικό όριο της λεκάνης των Μοιρών παρουσιάζει ευαισθησία ως προς τις ποσοτικές πιέσεις που δέχεται η περιοχή μελέτης.

Σε συνέχεια της μελέτης γίνεται εκτίμηση της ποσοτικής κατάστασης της περιοχής μελέτης στο μέλλον και διερευνάται περαιτέρω η ευαισθησία του συστήματος ως προς τις ποσοτικές πιέσεις που δέχεται. Έγινε επιλογή (τυχαία) τριών ετών στα οποία διερευνήθηκαν τα παραπάνω. Τα έτη αυτά, που καλούνται κομβικά, είναι το 2020-2021, 2025-2026 και 2030-2031. Για τα έτη αυτά δεν υπήρχαν δεδομένα ετήσιου ύψους βροχόπτωσης και για αυτό κάναμε χρήση τριών κλιματικών σεναρίων (B1, A1, A1b). Βάσει μελετών που στηρίχτηκαν στα κλιματικά σενάρια, πραγματοποιήθηκε εκτίμηση της τάσης του ετήσιου ύψους βροχής τα επόμενα έτη. Σύμφωνα με τους Tsanis et al. 2011, προκύπτει ότι υπάρχει τάση μείωσης των βροχοπτώσεων στην περιοχή μελέτης για τα επόμενα χρόνια. Βασιζόμενοι στο διάγραμμα του σχήματος 30, λήφθηκαν οι τιμές του ετήσιου ύψους βροχόπτωσης για τα επιθυμητά κομβικά έτη. Επιπλέον, σύμφωνα με τον Βαρουχάκη 2015, κάθε υδρολογικό έτος χαρακτηρίζεται υγρό,

ξηρό ή ενδιάμεσο βάσει του ετήσιου ύψους βροχόπτωσης. Τα επιλεγμένα κομβικά έτη χαρακτηρίζονται ως υγρά έτη, ωστόσο τα έτη 2025-2026 και 2030-2031 είναι οριακά υγρά έτη. Στηριζόμενοι στο Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης (GR13) και στον Τοπικό Οργανισμό Εγγείων Βελτιώσεων (ΤΟΕΒ), υιοθετήθηκε η πρακτική που αναφέρει πως σε ένα υγρό υδρολογικό έτος, οι ανάγκες της περιοχής μελέτης σε νερό άρδευσης θα καλύπτονται κατά 80% από το Φράγμα της Φανερωμένης και κατά 20% από τις υφιστάμενες γεωτρήσεις. Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω και τροποποιώντας τις αντίστοιχες παραμέτρους στο μοντέλο, προσομοιώσαμε την κατάσταση του συστήματος για τα επιλεγμένα κομβικά έτη. Με βάση τα αποτελέσματα που παρατίθενται στον Πίνακα 14, προκύπτει ότι το ανατολικό και δυτικό όριο της περιοχής μελέτης διατηρεί μελλοντικά, παρόμοια υδραυλικά ύψη με τα αντίστοιχα της δεκαετίας 2008-2018. Διαφοροποίηση παρατηρείται στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης όπου ο υδροφορέας είναι υψηλότερα και στα τρία κομβικά έτη σε σχέση με την περίοδο 2008-2018. Με βάσει τα αποτελέσματα των κομβικών ετών, τα κύρια συμπεράσματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

Τα κλιματικά σενάρια δείχνουν μία τάση μείωσης του ετήσιου ύψους βροχόπτωσης στην περιοχή η οποία συνδυάζεται με μείωση των ημερών βροχής συγκριτικά με τα προηγούμενα έτη. Συνεπώς, ο εμπλουτισμός του υδροφορέα από τις κατακρημνίσεις μειώνεται και θα αναμενόταν μείωση της στάθμης του υδροφορέα. Ωστόσο, τα αποτελέσματα του μοντέλου δείχνουν αύξηση του υδραυλικού ύψους της περιοχής στο κεντρικό τμήμα στο οποίο ο αριθμός των γεωτρήσεων είναι μεγαλύτερος και κυριαρχεί έντονη γεωργική δραστηριότητα. Αυτό συνέβη διότι για την προσέγγιση της κατάστασης, θεωρήσαμε ότι ο ταμιευτήρας στο Φράγμα της Φανερωμένης θα λειτουργεί σωστά και επαρκώς. Άμεση συνέπεια της ορθής λειτουργίας του ταμιευτήρα είναι πρώτον η μείωση των αντλήσεων από τις γεωτρήσεις της περιοχής και δεύτερον ο εμπλουτισμός του υδροφορέα από τις επιστροφές άρδευσης (return irrigation) του νερού του ταμιευτήρα. Ο ταμιευτήρας, έχει κατά την πλήρωσή του συνολικό όγκο νερού 19.760.000 m³ ενώ η πεδιάδα των Μοιρών χρειάζεται ετησίως 5.000.000 m³ νερό για άρδευση. Βάσει του διαχειριστικού σχεδίου, σε ένα υγρό έτος ο ταμιευτήρας θα καλύπτει το 80% των αναγκών, σε ένα ξηρό το 35% ενώ σε ένα ενδιάμεσο έτος το 65%.

Η πρακτική λοιπόν, ο ταμιευτήρας να τροφοδοτεί νερό την λεκάνη των Μοιρών σε συνδυασμό με τον εμπλουτισμό από τις ετήσιες κατακρημνίσεις και τις πλευρικές εισροές από την λεκάνη της Βαγιονιάς δύναται να οδηγήσουν σε αύξηση της ποσότητας του υπόγειου νερού παρά το γεγονός ότι τα κλιματικά σενάρια προβλέπουν αρνητικά αποτελέσματα για την περιοχή. Συνεπώς, κρίνεται ότι το σύστημα της λεκάνης των Μοιρών παρουσιάζει ευαισθησία ως προς τις ποσοτικές πιέσεις που δέχεται η ευρύτερη περιοχή. Βασικός παράγοντας που επηρεάζει τη λεκάνη είναι οι αντλήσεις από τις γεωτρήσεις και ο εμπλουτισμός. Όταν ο εμπλουτισμός στον υδροφορέα δεν είναι επαρκής και είναι μικρότερος από την ποσότητα του αντλούμενου νερού, τότε η στάθμη του υδροφορέα μειώνεται. Κύρια παράμετρος που επηρεάζει την επανατροφοδοσία του συστήματος κρίνεται πως είναι οι επιστροφές νερού από την άρδευση (return irrigation) και όχι οι κατακρημνίσεις. Η χρήση του νερού από τον ταμιευτήρα ενισχύει τον εμπλουτισμό με άμεση συνέπεια την αύξηση της στάθμης του υδροφορέα.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, τα σημαντικότερα συμπεράσματα από την παρούσα μελέτη είναι τα εξής:

1. Το λογισμικό πακέτο Visual MODFLOW προσομοιώνει πολύ ικανοποιητικά τον υδροφορέα της υδρολογικής λεκάνης Μοιρών Ηρακλείου, καθώς τόσο το σφάλμα βαθμονόμησης (7% ξηρή περίοδος και 6% υγρή περίοδος) όσο και αυτό της επαλήθευσης (4% ξηρή περίοδος και 2% υγρή περίοδος) κυμαίνονται μέσα στα επιτρεπτά όρια που καθορίζει το εγχειρίδιο του λογισμικού Visual MODFLOW.
2. Πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας στις ποσοτικές παραμέτρους (αντλήσεις, εμπλουτισμός) της λεκάνης που φανερώνουν μεγάλη ευαισθησία στο κεντρικό τμήμα, όπου υπάρχει υψηλός αριθμός γεωτρήσεων, και στο δυτικό τμήμα όπου η γεωργική δραστηριότητα είναι μεγάλη. Το ανατολικό τμήμα της λεκάνης δεν επηρεάζεται στις πιέσεις που δέχεται εξαιτίας του μικρού αριθμού γεωτρήσεων και της χαμηλής γεωργικής δραστηριότητας.
3. Βασική παράμετρος που επηρεάζει το σύστημα της λεκάνης των Μοιρών είναι η επανατροφοδοσία (εμπλουτισμός) του υδροφορέα μέσω του νερού που προέρχεται από τις αρδεύσεις.
4. Οι επιστροφές, μετά από άρδευση, με νερό που θα προέρχεται από τον ταμιευτήρα στο φράγμα της Φανερωμένης, συνεισφέρουν στον επαναεμπλουτισμό του υδροφορέα σε βαθμό μεγαλύτερο από ότι οι ετήσιες κατακρημνίσεις.
5. Με τη χρήση κλιματικών σεναρίων και ορθή χρήση του φράγματος της Φανερωμένης, καταλήγουμε ότι έως το υδρολογικό έτος 2030-2031, στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης ο υδροφορέας θα είναι σε υψηλότερα επίπεδα στάθμης (μεγαλύτερα αποθέματα), ενώ στο δυτικό και ανατολικό τμήμα ο υδροφορέας θα παραμείνει στα σημερινά επίπεδα.
6. Με βασική προϋπόθεση ότι ο ταμιευτήρας θα καλύπτει μέρος των ετήσιων αναγκών της πεδιάδας των Μοιρών, έως το 2031 ο υδροφορέας στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης (περιοχή υψηλού αριθμού γεωτρήσεων και γεωργικής δραστηριότητας) θα είναι υψηλότερα κατά 9 m την υγρή περίοδο και κατά 16,6 m την ξηρή.

5.2 Προτάσεις - Μελλοντική έρευνα

5.2.1 Προτάσεις

Στηριζόμενοι στα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, κρίνεται αναγκαίο να ακολουθούνται οι πρακτικές που αφορούν τη διαχείριση των υπόγειων υδάτων στη λεκάνη των Μοιρών. Πιο σημαντική πρακτική είναι να λειτουργήσει ορθά και ικανοποιητικά ο ταμιευτήρας της Φανερωμένης, έτσι ώστε να τροφοδοτεί την πεδιάδα με νερό καλύπτοντας το μεγαλύτερο μέρος των αναγκών, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για υγρά υδρολογικά έτη. Κατά αυτόν τον τρόπο, ο υδροφορέας της λεκάνης θα εμπλουτίζεται επαρκώς και θα διαθέτει τις απαραίτητες ποσότητες νερού ώστε πρώτον να καλύπτονται οι ανάγκες μέσω των γεωτρήσεων σε ξηρές περιόδους και δεύτερον να μην μειώνεται σημαντικά η στάθμη του όταν συμβαίνει αυτό. Η παραπάνω ορθή τακτική θα οδηγήσει επίσης στο να επιτευχθούν οι στόχοι της «καλής ποσοτικής κατάστασης» που έχει θεσπίσει η Ευρωπαϊκή Ένωση μέσω της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ. Η χρήση νερού από τον ταμιευτήρα θα ενισχύσει επίσης ακόμα περισσότερο την τοπική οικονομία για δύο λόγους: α) θα υπάρξει επαρκές νερό για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών και επομένως θα μειωθούν τα προβλήματα της αγροτικής παραγωγής και β) θα μειωθεί το κόστος των γεωτρήσεων και της συντήρησής τους. Επιπλέον, δεν θα απαιτείται η δημιουργία νέων γεωτρήσεων μεγαλύτερου βάθους οι οποίες έχουν και μεγάλο οικονομικό κόστος.

5.2.2 Μελλοντική έρευνα

1. Ως προς τις δυνατότητες μελλοντικής έρευνας, αρχικά μπορούν να εκτιμηθούν στην περιοχή μελέτης εκ νέου οι ποσοτικές πιέσεις που θα δεχθεί στο μέλλον, χωρίς να ληφθεί υπόψη η ορθή λειτουργία του ταμιευτήρα. Με βάσει τις υφιστάμενες συνθήκες η στάθμη του ταμιευτήρα είναι σε χαμηλά επίπεδα και συνεπώς το νερό δεν επαρκεί για να καλύψει τις ανάγκες στη λεκάνη των Μοιρών. Οι ανάγκες θα συνεχίσουν να καλύπτονται από τις υφιστάμενες γεωτρήσεις, γεγονός που σημαίνει ότι α) αξιοποιούνται μόνο οι υπόγειοι υδάτινοι πόροι με άμεση συνέπεια πιθανή μείωση της στάθμης του υδροφορέα, β) παύει να εμπλουτίζεται ο υδροφορέας με νερό που προερχόταν από τον ταμιευτήρα.
2. Επιπλέον, θα μπορούσε να μελετηθεί η ποιοτική κατάσταση της λεκάνης σε αντίστοιχα κομβικά έτη. Έμφαση μπορεί να δοθεί στις συγκεντρώσεις νιτρικών που έχουν προκύψει από την αλόγιστη χρήση λιπασμάτων και φαρμακευτικών ουσιών. Επιπλέον, μπορεί να μελετηθεί η ευαισθησία του συστήματος στις ποιοτικές πιέσεις που δέχεται από διάφορες ουσίες όπως η χρήση ζιζανιοκτόνων. Τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης και εκτίμησης θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό ορθολογικής χρήσης λιπασμάτων ώστε να αποφευχθούν δυσμενείς μελλοντικές επιπτώσεις.

3. Μία ακόμα έρευνα που θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί είναι η διερεύνηση της καταλληλότητας της περιοχής για τεχνητό εμπλουτισμό. Οι ποσοτικές πιέσεις που δέχεται η πεδιάδα των Μοιρών είναι μεγάλες και η πιθανή αστοχία του ταμιευτήρα να τροφοδοτεί με νερό την περιοχή μπορεί να προκαλέσει μεγάλη μείωση της στάθμης του υδροφορέα. Μία ευρέως διαδομένη και συνεχώς αναπτυσσόμενη μέθοδος εμπλουτισμού των υδροφορέων, είναι ο τεχνητός εμπλουτισμός. Τεχνητός εμπλουτισμός μπορεί να πραγματοποιηθεί με τις εξής μεθόδους:

- Απευθείας στην επιφάνεια
- Απευθείας στο υπέδαφος
- Συνδυασμός επιφανειακού και υπεδαφικού εμπλουτισμού
- Έμμεσος εμπλουτισμός (πχ επαγωγικός εμπλουτισμός)
- Εμπλουτισμός με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα

Τα κύρια πλεονεκτήματα του τεχνητού εμπλουτισμού είναι:

- η ενίσχυση του υπόγειου δυναμικού
- η αντιμετώπιση της εξάντλησης των υδροφορέων αποκαθιστώντας την υδρολογική ισορροπία
- η βελτίωση της ποιότητας του νερού
- αναστροφή της διεύθυνσης του θαλασσινού νερού στους παράκτιους υδροφορείς
- η μείωση των απωλειών νερού από εξάτμιση, καθώς η αποθήκευση του νερού πραγματοποιείται υπόγεια.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

American Society for Testing and Materials (ASTM), 1992, "Standard practice for evaluating mathematical models for the environmental fate of chemicals," ASTM E 978-92, ASTM, West Conshohocken, PA.

Anderson M.P. and W.W. Woessner, 1992, '*Applied Groundwater Modelling*', Academic Press Inc.

Angelier J., Lyberis N., Le Pichon X., Barrier E., Huchon P., (1982). *The tectonic development of the Hellenic arc and the sea of Crete, a synthesis*. Tectonophysics 86 159-196.

Arnell, N.W., van Vuuren, D.P., Isaac, M., 2011. The implications of climate policy for the impacts of climate change on global water resources. *Global Environ. Change* 21 (2), 592–603.

Bear, J. (2001). *Dynamics of Fluids in Porous Media*. 1st ed. Dover Publications.

Bear, J. (2012). *Hydraulics of Groundwater*. Dover Publications.

Bonneau M. (1984). *Correlation of the Hellenide nappes in the south –east Aegean and their tectonics reconstruction*. *J. Geol. Soc. Sp. Publ.*, 17, 517-526.

Domenico, P.A., and F.W. Schwartz, 1998, *Physical and Chemical Hydrogeology*, Second Edition, John Wiley and Sons, New York.

Fassoulas C., Kiliadis A. & Moyntrakis D. (1994). Post-nappe stacking extension and exhumation of the HP/LT rocks in the island of Crete, Greece. *Tectonics*, 13, 121-132.

Fassoulas C., Kiliadis A., Moyntrakis D., Markopoulos T. (1995). *Late tertiary tectonic evolution of central Crete: Post-nappe stacking extension and exhumation of High pressure / low temperature rocks*. In: *Proc. Workshop "deep drilling on the top of the Hellenic subduction zone in the island of Crete, Greece"*, Technical University of Crete, Chania.

Fassoulas C. (1999). *The structural evolution of central Crete: Insight into the tectonic evolution of the South Aegean (Greece)*. *J. Geodynamics*, 27/1, 23-43.

Franke, O.L., T.E. Reilly, G.D. Bennett, 1987, '*Definition of boundary and initial conditions in the analysis of saturated ground-water flow systems - an introduction*', U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, Book 3, Chapter B5.

Faust, C.R., L.R. Silka, J.W. Mercer, 1981, '*Computer modelling and groundwater protection*', *Ground Water*, 19(4), 362-365.

Freeze, A. and Cherry, J. (1979). *Groundwater*. Waterloo, Ontario: Englewood Cliffs, New Jersey, p. 33.

Frey, C.H., and S.R. Patil, 2001, '*Identification and review of sensitivity analysis methods*', Civil Engineering Department, North Carolina State University.

García-Ruiz, J.M., López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Lasanta-Martínez, T., Beguería, S., 2011. Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth – Sci. Rev.* 105 (3-4), 121–139.

Gleick, P.H., επιμ. (1993). *Water in Crisis: A Guide to the World's Freshwater Resources*. Oxford University Press, σελ. 13, Table 2.1 "Water reserves on the earth".

Harbaugh, A.W., E.R. Banta, M.C. Hill, M.G. McDonald, (2000), MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model - User guide to modularization concepts and the ground-water flow process, U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92.

Hill, M.C., 1998, 'Methods and guidelines for effective model calibration', U.S. Geological Survey Investigations Report 98-4005.

Hill, M.C., E.R. Banta, A.W. Harbaugh, E.R. Anderman, (2000), 'Modflow-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model - User guide to the observation, sensitivity and parameter-estimation processes and three post-processing programs', U.S. Geological Survey Open-File Report 00-184.

Ippc.ch. (n.d.). Emissions Scenarios. [online] Available at:
<http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.php?idp=94> [Accessed 29 Sep. 2018].

IPCC, Third Assessment Report Available at:
http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg2/pdf/wg2TAR_annexB.pdf [Accessed 29 Sep. 2018].

Irvin, K., P. Mills, M. Bruen, W. Walley, M. Hartnett, A. Black, S. Tynan, R. Duck, O. Gragg, J. Rowan, J. Wilson, P. Johnston and C. O'Toole, 2004. '*The use of mathematical models to support the implementation of the Water Framework Directive*', Modelling and monitoring issues for River Basin Management, National Hydrology Seminar.

Koutroulis, A.G., Tsanis, I.K., 2010. A method for estimating flash flood peak discharge in a poorly gauged basin: case study for the 13–14 January 1994 flood, Giofyros basin, Crete. *J. Hydrol.* 385, 150–164.

Koutroulis, A.G., Tsanis, I.K., Daliakopoulos, I.N., 2010. Seasonality of floods hydrometeorologic characteristics in the island of Crete. *J. Hydrol.* 394 (1–2), 90–100 (Special issue on Flash Floods).

Koutroulis, A.G., Vrochidou, A., Tsanis, I.K., 2011. Spatial and temporal characteristics of droughts for the island of Crete. *J. Hydrometeorol.* 12 (2), 206–226.

Land and Ecosystem Degradation and Desertification (LEDDRA) Project. (2013). Land and ecosystem degradation and desertification. Land and ecosystem degradation and desertification.

Ludwig, R., Roson, R., Zografos, C., Kallis, G., 2011. Towards an inter-disciplinary research agenda on climate change, water and security in Southern Europe and neighboring countries. *Environ. Sci. Policy* 14 (7), 794–803.

McDonald, M.G., and A.W. Harbaugh, 1988, '*A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*', U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chapter A1.

Nakic'enovic', N. et al., 2000. Special Report on Emissions Scenarios A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge.

Parry, M.L., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Livermore, M., Fischer, G., 2004. Assessing the effects of climate change on global food production under differing socio-economic scenarios. *Global Environ. Change* 14 (1), 53–67.

Perlman, H., (2005). *The Water Cycle: Water Storage in Ice and Snow*. U.S. Department of Interior, U.S. Geological Survey.

Pinder, G.F., 2002, 'Groundwater modelling using Geographical Information Systems', John Wiley & Sons, Inc, New York.

Rackham, O. and Moody, J. (1996). *The making of the Cretan landscape*. Manchester: Manchester University Press.

Reilly, T.E., 2001, '*System and boundary conceptualization in ground-water flow simulation*', U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, Book 3, Applications of Hydraulics, Chapter B8.

Reilly, T.E. and A.W. Harbaugh, 2004, Guidelines for evaluating ground-water flow models, U.S. Scientific Investigations Report 2004-5038.

Seidel E., (1978) '*Zur petrologie der phyllite-quartzit-serie Kretas*', Technische Universität Braunschweig. p. 145.

The Data Blog. (2018). *Chart: Globally, 70% of Freshwater is Used for Agriculture*. [online] Available at: <http://blogs.worldbank.org/opendata/latinamerica/chart-globally-70-freshwater-used-agriculture> [Accessed 8 Aug. 2018].

Tsanis, I. K., & Apostolaki, M. G. (2008). 'Estimating groundwater withdrawal in poorly gauged agricultural basins. *Water Resources Management*', 23(6), 1097–1123. <http://doi.org/10.1007/s11269-008-9317-x>.

Tsanis, I., & Daliakopoulos, I. (2015). WP 3: State of Degradation & Conservation in the RECARE Case Study Sites D3.1: Case Study descriptions. RECARE Project.

Tsanis, I.K., Koutroulis, A.G., Daliakopoulos, I.N., Jacob, D., 2011. Severe climate-induced water shortage and extremes in Crete. *Clim. Change* 106 (4), 667–677.

Vardavas, I. M., Papamastorakis, J., Fountoulakis, A., & Manousakis, M. (1997). 'Water resources in the desertification-threatened Messara Valley of Crete: Estimation of potential lake evaporation. *Ecological Modelling*', 102(2–3), 363–374. [http://doi.org/10.1016/S0304-3800\(97\)00070-7](http://doi.org/10.1016/S0304-3800(97)00070-7).

Wasson, J., M. Tusseau-Vuillemin, V. Andréassian, C. Perrin, J. Faure, O. Barreteau, M. Bousquet, B. Chastan, 2003, '*What kind of water models are needed for the implementation of the EU WFD? Examples from France*', *International Journal of River Basin Management*, 1(2), 125-135.

Waterloohydrogeologic.com. (n.d.). *Visual MODFLOW Help*. [online] Available at: https://www.waterloohydrogeologic.com/help/vmod/index.html?vmod_apb2.htm [Accessed 23 Sep. 2018].

Water.usgs.gov. (2016). *The Water Cycle: Summary*, from USGS Water-Science School. [online] Available at: <https://water.usgs.gov/edu/watercyclegreek.html> [Accessed 11 Aug. 2018].

Wylie, A., 2003, Model grid and grid orientation, Eastern Snake Plain Model Aquifer Model Enhancement, Model Design and Calibration Document Number DDM-015

Αλεξόπουλος Α. (1990) Διδακτορική διατριβή, Ε.Κ.Π.Α, τμήμα Γεωλογίας

Αποστολάκη, Μ. (2005). 'Υπολογισμός όγκου αντλήσεων στη λεκάνη Γεροπόταμου, με συνεχή 20ετή προσομοίωση της διαδικασίας διήθησης των επιφανειακών υδάτων και συσχέτισή τους με το υπόγειο υδατικό δυναμικό της λεκάνης'. Μεταπτυχιακή διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Βαρουχάκης, Ε. (2015). *‘Integrated Water Resources Analysis at Basin Scale: A Case Study in Greece’*. American Society of Civil Engineers.

Βελεγράκη, Φ. (2004). *‘Η μοντελοποίηση της υπόγειας ροής και μεταφοράς ρύπων ως εργαλείο εξειδίκευσης της αρχής «Ο ρυπαίνων πληρώνει»’*. Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Γιαννέλη Χ., (2009). Υδρολογική έρευνα λεκανών του ελληνικού χώρου: παράδειγμα από τη λεκάνη Αγίων Αναργύρων (Καστοριά), Θεσσαλονίκη.

Δημητριάδης, Θ. (2013), *‘Προσομοίωση της υπόγειας ροής και μεταφοράς νιτρικών στον παράκτιο υδροφορέα του πλατύ ποταμού στο νομό Ρεθύμνου’*, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά

Καλλέργης Γ., (1986) Εφαρμοσμένη υδρογεωλογία, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα.

Καλλέργης, Γ. (1999). *Εφαρμοσμένη - περιβαλλοντική υδρογεωλογία*. 1st ed. Αθήνα: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας.

Καραπλάφης Δ., (2008). *‘Προσομοίωση της υπόγειας ροής με τον κώδικα Modflow. Εφαρμογή σε υδροφορείς του Ελληνικού χώρου. (Προσχωματικής λεκάνη Ελασσόνας-Τσαρίτσανης Νομού Λάρισας)’*. Διατριβή ειδίκευσης. ΠΜΣ Εφαρμοσμένης και Περιβαλλοντικής Γεωλογίας. Τμήμα Γεωλογίας. ΑΠΘ. Θεσσαλονίκη.

Καρατζάς, Γ. Π. (2012). *Ροή Υπόγειων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων*. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Κυλίλη-Πολυχρονάκη, Α. (2001). *Υδρογεωλογική Μελέτη Περιοχής Δήμου Μοιρών του Νομού Ηρακλείου*. Ι.Γ.Μ.Ε, Ρέθυμνο.

Κύρκου Α., (2008). *‘Μαθηματική προσομοίωση υπόγειου υδροφορέα περιοχής Αχελώου-Λυσιμαχείας- Τριχωνίδας’*. Διπλωματική εργασία. ΠΜΣ Επιστήμης και τεχνολογίας υδατικών πόρων. ΕΜΠ. Αθήνα.

Κρίνης, Π. (2009), *‘Εφαρμογή μοντέλων βροχόπτωσης – απορροής σε λεκάνες του ελληνικού χώρου (Λεκάνη Μεσσαράς του νομού Ηρακλείου, νότια Κρήτη)’*, Διατριβή Ειδίκευσης, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Θεσσαλονίκη.

Κριτωτάκης, Μ. Ν. (2009). *‘Διαχείριση Υδάτινων Πόρων Μεσσαράς Κρήτης. Διδακτορική διατριβή’*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Μακρόπουλος, Χ., Κουτσογιάννης, Δ. (2016). *Υδραυλική και Υδραυλικά Έργα*. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Μοσχοπούλου, Ε. (2017), *Μοντελοποίηση της Υπόγειας Ροής και Μεταφοράς Ρύπου στην πεδιάδα των Μοιρών Ηρακλείου με χρήση του προσομοιωτή Visual MODFLOW*, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Μπαλτάς, Ε. (2017). *Προχωρημένη Υδρολογία*. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Νάνου – Γιάνναρου, Α. (2017). *Υπόγεια Υδρολογία και Μεταφορά Ρύπων*. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Παπαγρηγορίου Σ., Καϊμάκη Σ., Νιάδας Ι., Γκουβάτσου Ε., Περγλέρος Β. (2001). *Μελέτη Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων Κρήτης*, Αθήνα.

Περγλέρος Β., Παπαμαστοράκης Δ., Κριτσωτάκης Μ., Μπουλουκάκης Η., (2003) Το υπόγειο υδατικό δυναμικό της Κρήτης, Συνέδριο ΓΕΩΤΕΕ, Ηράκλειο.

Πλιάκας Φ., (1998). *Έρευνα επί των κατάλληλων μεθόδων τεχνητού εμπλουτισμού σε ετερογενείς υδροφορείς αλλουβιακών σχηματισμών. Εφαρμογές σε υδροφορείς του πεδινού τμήματος Ξάνθης*, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΔΠΘ, Ξάνθη.

Τσιούνια, Α. (2012), *Εκτίμηση των παραμέτρων του υδρολογικού ισοζυγίου της λεκάνης απορροής του ποταμού Αποσελέμη (Ν. Κρήτη)*, Πτυχιακή Εργασία, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα.

Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης (GR13). (2015), Ειδική Γραμματεία Υδάτων, Αθήνα.

Φυτρολάκης Ν. (1980) *Η γεωλογική δομή της Κρήτης*. Προβλήματα, παρατηρήσεις και συμπεράσματα. Θέση επί υφηγεσία Ε.Μ.Π. Αθήνα, σελ. 143.

Χαραλάμπος, Σ., (2016), *Προσεγγιστική λύση της εξίσωσης Boussinesq σε οριζόντιο υδροφορέα*, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου, Λεμεσός.