



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ, ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Π.Μ.Σ : «ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ»

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ
ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ-ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΚΑΡΛΑΣ ΣΕ
ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗ ΖΗΤΗΣΗ ΝΕΡΟΥ**

Όνοματεπώνυμο: Γκουτής Δ. Αντώνιος

Βόλος 2013

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η λεκάνη της Κάρλας βρίσκεται στο ΝΑ άκρο της Θεσσαλικής πεδιάδας, και έχει μορφή κλειστού επιμήκους λεκάνης μήκους 35 km και πλάτους 9-15 km. Η λεκάνη έχει όρια, στο βορρά τον ποταμό Πηνειό και τον ορεινό όγκο της Όσσας, στην ανατολή τους ορεινούς όγκους του Μαυροβουνίου και του Πηλίου, στο νότο το Χαλκοδόνιο όρος δυτικά εκτείνεται ο κάμπος της Θεσσαλίας.

Η φυσική λεκάνη της Κάρλας έχει συνολική έκταση 1663 km², αλλά, μετά την κατασκευή της συλλεκτήριας τάφρου Σ1 στα δυτικά της λεκάνης το 1950, η έκτασή της μειώθηκε σε 1171 km². Στο μέσο της λεκάνης αυτής βρίσκεται το βαθύτερο τμήμα της Θεσσαλικής πεδιάδας, τα χαμηλότερα τμήματα της οποίας μέχρι το 1961 κάλυπταν τα νερά της λίμνης, που αποτελούσε πριν από την εκτέλεση των έργων και τον κύριο αποδέκτη της. Διοικητικά η περιοχή υπάγεται στους νομούς Λαρίσης και Μαγνησίας. Το κλίμα στην περιοχή κατατάσσεται στο ηπειρωτικό ημίξηρο, χαρακτηριζόμενο από θερμό και ξηρό καλοκαίρι και ψυχρό και υγρό χειμώνα. Η μέση θερμοκρασία είναι πάντα πάνω από το μη- δέν, αλλά η χαμηλότερη θερμοκρασία που παρατηρήθηκε κατά το χειμώνα είναι -21,6 °C. Η μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρήθηκε το καλοκαίρι ήταν 45,2 °C.

Η παλιά λίμνη της Κάρλας κατείχε το μεγαλύτερο μέρος της ανατολικής πεδιάδας της Θεσσαλίας, μέχρι το 1962 που ήταν η χρονιά αποξήρανσης της. Η ενέργεια αυτή έγινε χωρίς να ληφθεί κανένα μέτρο για τον περιορισμό των επιπτώσεων και την προστασία του περιβάλλοντος με αποτέλεσμα να προκληθούν σωρεία προβλημάτων στο οικολογικό σύστημα. Αυτό σε συνδυασμό με την εκτεταμένη παραγωγή υδρόφιλων καλλιεργειών (όπως το βαμβάκι) οδήγησε στη ραγδαία πτώση της υπόγειας υδροφορίας και την εισχώρηση θαλάσσιου μετώπου στον ευρύτερο χώρο της περιοχής. Η κατασκευή ενός μικρότερου ταμιευτήρα στη θέση του φυσικού, συνοδευόμενος με μία σειρά έργων, παρά την καθυστέρηση τόσων χρόνων, θα βοηθήσει στο φυσικό εμπλουτισμό του υποκείμενου υδροφορέα και τη μείωση της άντλησης του υπόγειου νερού που έχει ταπεινώσει το επίπεδο στάθμης του έως και 200 m κάτω από το έδαφος στα νότια της πεδιάδας.

Σε αυτή την εργασία επιχειρείται μέσω τεχνικών διαχείρισης των υδατικών πόρων και της αξιοποίησης του ταμιευτήρα της Κάρλας η εκτίμηση της βέλτιστης αξιοποίησης των ανανεώσιμων υδάτων του προχωματικού υδροφορέα της Λίμνης Κάρλας ώστε να ικανοποιούνται οι αρδευτικές και οι υδρευτικές ανάγκες σε νερό, αλλά ταυτόχρονα να επανακάμψει και η στάθμη του υδροφορέα σε μία ικανοποιητική στάθμη σε μέλλοντα χρόνο. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός συνδυαστικού μοντέλου προσομοίωσης-βελτιστοποίησης που αποτελείται από το μαθηματικό κώδικα προσομοίωσης της υπόγειας ροής MODFLOW της USGS και το μοντέλο διαχείρισης της υπόγειας ροής GWM (Groundwater-Water Management process) της USGS. Το μοντέλο υπόγειας ροής προσομοίωσε τη λειτουργία του υπόγειου υδροφορέα τόσο για την ιστορική περίοδο 1987 έως 2012 όσο και για την περίοδο διαχείρισης 2012-2044 και στη συνέχεια το μοντέλο διαχείρισης GWM εκτίμησε τις βέλτιστες παροχές άντλησης και τις θέσεις των πηγαδιών άντλησης, ουσιαστικά

επιλύοντας ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με στόχο τη βιώσιμη διαχείριση του υπόγειου υδροφορέα. Οι βέλτιστες τιμές αυτές εισήχθησαν στο μοντέλο υπόγειας ροής από το οποίο προέκυψαν χάρτες με ισοδυναμικές γραμμές των υδραυλικών υψών του υδροφορέα και υδατικά ισοζύγια. Το έτος 2044 αποτελεί «ορόσημο» για του μελετητές του έργου επανασύστασης της λίμνης Κάρλας διότι εκτιμούν πως θα επανέλθει η στάθμη του υδροφορέα σε προτεραιία κατάσταση, χωρίς όμως να δηλώνουν αναφέρουν την στάθμη «στόχο». Εξετάστηκαν εναλλακτικά σενάρια διαχείρισης που είχαν σαν αντικείμενο να δώσουν λύση σε ένα ακόμη πρόβλημα υπερεκμετάλλευσης του υπόγειου υδροφορέα: την εγκατάσταση 40 νέων γεωτρήσεων της ΔΕΥΑΜΒ στη νότια περιοχή, στην οποία παρατηρείται η μεγαλύτερη ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα. Αρχικά εξετάστηκε μέσω 4 σεναρίων το κατά πόσο η λειτουργία των νέων υδρευτικών πηγαδιών επηρεάζουν την βέλτιστη άντληση του ανανεώσιμου ύδατος του υδροφορέα για δύο διαφορετικές στάθμες επανόρθωσης - «στόχους» του υδροφορέα οι οποίες είναι: i) για στάθμη ίση με την επιφάνεια της θάλασσας στα 0 μέτρα και ii) στάθμη αντίστοιχης με αυτή της 1/1987, για το έτος στόχο 2044. Η επιλογή του έτους 1987 δεν έγινε τυχαία, αλλά αμέσως μετά ξεκινά η εκμετάλλευση των μη ανανεώσιμων υδάτων του υδροφορέα δηλαδή ξεκινά η περίοδος υπερ-εκμετάλλευσης του, η οποία συνεχίζεται μέχρι σήμερα. Στη λύση διαχείρισης συμμετείχαν όλες οι αρδευτικές γεωτρήσεις πλην εκείνων που είναι στη ζώνη όπου βρίσκονται και οι υδρευτικές αλλά και γεωτρήσεις σε άλλες αρδευτικές ζώνες. Έπειτα εξετάστηκαν σενάρια αλλαγής θέσης των νέων υδρευτικών πηγαδιών σε άλλες ζώνες για δύο τις διαφορετικές στάθμες «στόχους» του, για το έτος 2044. Οι νέες υδρευτικές γεωτρήσεις καθώς και εκείνες οι αρδευτικές γεωτρήσεις που ήταν εκτός των αρδευτικών ζωνών συμμετείχαν στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Στο τέλος, συγκρίθηκαν αποτελέσματα μεταξύ των εναλλακτικών σεναρίων διαχείρισης, που έχουν να κάνουν αφετέρου με το συνολικό όγκο απολήψεων νερού, ώστε να ικανοποιηθούν οι αρδευτικές και υδρευτικές ανάγκες της ευρύτερης περιοχής, αλλά και αποτελέσματα που σχετίζονται με την επαναφορά της στάθμης των υπόγειων υδάτων σε βιώσιμες στάθμες το έτος 2044.

ABSTRACT

The basin of Karla is located in the southern eastern edge of the Thessaly plain, and has a closed elongated basin of 35 km length and 9-15 km width. The basin is bounded to the north, by the river Peneus and the mountain Ossa, to the east by the mountains of Mavrovouni and Pelion, to the south by the mountains Chalkodonio.

The natural basin of Karla has a total area of 1663 km², but after the construction of the S1 collector channel in the west of the basin in 1950, the area was reduced to 1171 km². The deepest part of the Thessaly plain is in the middle of the basin, the lower part of which was covered by the lake until 1961. Before the execution of the works the lake was the main recipient of the basin's water. The climate is classified in semiarid continental, characterized by warm-dry summers and cool-wet winters. The average temperature is always above zero, but the lowest temperature recorded during winter is -21,6 °C. The maximum temperature observed in summer was 45,2 °C.

The former Lake Karla occupied most of the eastern part of Thessaly plain until 1962, year of the lake's drainage. This action took place without taking any action to mitigate and protect the environment which caused many problems in the ecological system. This, combined with the extensive production of hydrophilic crops (such as cotton) led to the rapid drawdown of groundwater aquifers and sea water intrusion in the wider region. The construction of a smaller reservoir in the natural location of the former, accompanied by a series of projects, despite the delay of so many years, will help the natural recharge of the underlying aquifer and reduce the groundwater extraction by irrigation wells which have reduced groundwater's level more than 200 m below the land surface at the southern area of the basin.

The aim of this study is to attempt through technical management of water resources and operation of Karla reservoir to assess the optimal exploitation of renewable groundwater of Lake Karla watershed in order to cover the water supply and irrigation needs, but also to restore aquifer's water table at a satisfactory level in future time. This is achieved by using a conjunctive optimization-simulation model comprised of the mathematical simulation groundwater flow model MODFLOW of USGS and the groundwater management flow model GWM (Groundwater-Water Management process) of USGS. The groundwater flow model simulated the operation of the alluvial aquifer for both the historical period from 1987 to 2012 and for the 2012-2044 management period. Then the management model GWM estimated the best pumping rates and locations of pumping wells effectively by solving an optimization problem for the sustainable management of the aquifer. Optimal values were inserted into the groundwater flow model which resulted hydraulic head maps of the alluvial aquifer and its volumetric budgets. The year 2044 is a "milestone" by project designers for the reconstitution of Lake Karla as they consider to restore the water level of the aquifer in a previous situation, without declaring the state level "goal." Alternative management scenarios were examined which have to provide a solution to another problem of aquifer overexploitation: the installation of 40 new pumping wells for water supply at the south, in which there is the greatest drawdown of the aquifer. Initially, 4 management scenarios have examined whether the operation of the new water supply affects the optimum extraction of groundwater of for two different levels of remediation – “goals” of the aquifer which are: i) to an equal level with the surface of the sea at 0 m and ii) level corresponding to that of 1/1987, in the year of 2044. In management solution involving all irrigation wells except those in zone where the new supply wells will be installed and in other irrigation zones) have been considered. Water supply wells did not join the management process too. Then alternative scenarios examined the position of new water supply wells in other areas for two different levels of ‘targets’, for the year of 2044. The new water supply wells and the irrigation wells which are located outside of the new irrigation zones were taken part in the optimization problem. In the end, the results concerning the total volume of abstracted water in order to meet the irrigation and water supply needs of the region and the restoration of groundwater levels in viable levels in the year 2044, have been compared between alternative management scenarios.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	9
1.1 Εισαγωγή	9
1.2 Η λίμνη Κάρλα.....	10
1.3 Κλίμα και υδρολογία της περιοχής.....	12
1.4 Γεωλογική δομή	14
1.4.1 Γεωμορφολογία.....	14
1.4.2 Στρωματογραφία και τεκτονική.....	16
1.4.3 Εδαφολογικά δεδομένα.....	18
1.5 Υδρογεωλογία και εκμετάλλευση υπόγειων υδάτων.....	21
1.5.1 Υδροφόροι σχηματισμοί.....	21
1.5.2 Υδροφορία προσχωματικού και πεδινού τμήματος της Κάρλας.....	24
1.5.3 Τροφοδοσία και πιεζομετρία	25
1.5.4 Εκμετάλλευση και απόδοση των υδροφορέων.....	28
1.5.5 Χρήσεις γης και αρδευτική και υδρευτική εκμετάλλευση του υπόγειου υδροφορέα.....	31
1.6 Αποξήρανση και επανασύσταση της λίμνης Κάρλας.....	34
1.6.1 Αποξήρανση της λίμνης Κάρλας.....	34
1.6.2 Έργα που κατασκευάστηκαν κατά την αποξήρανση.....	36
1.6.2.1 Αρδευτικά έργα.....	36
1.6.2.2 Έργα αποστράγγισης και αντιπλημμυρικής προστασίας.....	36
1.6.3 Επανασύσταση της λίμνης Κάρλας	39
1.6.4 Κατασκευαζόμενα έργα.....	42
1.6.5 Σημερινή κατάσταση της λίμνης Κάρλας.....	43
2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ – ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ.....	47
2.1 Εισαγωγή	47
2.2 Η τεχνική με μητρώο απόκρισης	49
2.3 Συνδυαστικά προβλήματα διαχείρισης υπογείων υδάτων και ταμιευτήρων.....	56
3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΡΟΩΝ (GROUNDWATER MODELING SYSTEM – GMS 6.0).....	65
3.1 Εισαγωγή	65
3.2 Ο Κώδικας Modflow.....	66
3.2.1 Μαθηματικό Υπόβαθρο του Modflow	66
3.2.2 Διακριτοποίηση.....	68
3.2.3 Εξίσωση Πεπερασμένων Διαφορών	70
3.2.4 Ο καθορισμός των οριακών συνθηκών.....	76
3.2.5 Πακέτα υποστήριξης του MODFLOW	77
3.2.6 Σχεδιασμός του καννάβου	81
3.3 Τρόποι προσέγγισης του MODFLOW	81
3.3.1 Προσέγγιση Καννάβου	82
3.3.2 Προσέγγιση του Εννοιολογικού Μοντέλου.....	82
3.4 Ρύθμιση του μοντέλου	85
4 GWM - ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ (GROUND- WATER MANAGEMENT PROCESS FOR THE U.S. GEOLOGICAL SURVEY).....	89
4.1 Εισαγωγή	89
4.2 Διατύπωση προβλημάτων διαχείρισης υπόγειων υδάτων με το GWM.....	90
4.2.1 Μεταβλητές απόφασης	91

4.2.1.1	Μεταβλητές απόφασης που σχετίζονται με την παροχή (flow-rate decision variables)	91
4.2.2	Αντικειμενική συνάρτηση.....	92
4.2.3	Περιορισμοί	94
4.2.3.1	Περιορισμοί στο υδραυλικό φορτίο.....	94
4.2.4	Πλήρης κατάσταση ενός προβλήματος διαχείρισης υπόγειων υδάτων που μπορεί να επιλυθεί από το GWM	97
4.3	Επίλυση προβλημάτων διαχείρισης υπόγειων υδάτων με το GWM	98
4.3.1	Γραμμικά προβλήματα.....	99
4.3.1.1	Υπολογισμός των συντελεστών απόκρισης.....	101
4.3.1.2	Ορθότητα και ακρίβεια των συντελεστών απόκρισης.....	102
4.3.1.3	Ο αλγόριθμος Simplex.....	104
4.3.1.4	Μαθηματικό υπόβαθρο του αλγόριθμου Simplex που χρησιμοποιεί το GWM 106	
4.3.2	Μη γραμμικά προβλήματα.....	108
4.4	Δεδομένα εισόδου και αρχεία εξόδου.....	113
4.4.1	Name file.....	113
4.4.2	Αρχεία της διαδικασίας GWM	114
4.4.2.1	Περιγραφή των επιλεγμένων συνθηκών, επιλογών, και μεταβλητών στο GWM.....	115
4.4.2.2	Το αρχείο GWM	120
4.4.2.3	Το αρχείο των μεταβλητών απόφασης (DECVAR)	121
4.4.2.4	Το αρχείο της αντικειμενική συνάρτησης (OBJFNC).....	125
4.4.2.5	Αρχεία περιορισμών	127
4.4.2.6	Αρχείο λύσεων και παραμέτρων που ελέγχουν τα αποτελέσματα (SOLN) 132	
4.4.3	Αρχεία εξόδου.....	139
5	ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ-ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΗΣ ΚΑΡΛΑΣ.....	144
5.1	Παρουσίαση της προσομοιωμένης περιοχής	144
5.2	Παράμετροι και δεδομένα που εισήχθησαν στο μοντέλο προσομοίωσης του υπόγειου υδροφορέα	146
5.3	Ρύθμιση του μοντέλου προσομοίωσης του υπόγειου υδροφορέα.	157
5.4	Παράμετροι και δεδομένα που εισήχθησαν στο μοντέλο βελτιστοποίησης του προβλήματος διαχείρισης.....	159
5.5	Εναλλακτικά σενάρια διαχείρισης.....	162
5.5.1	Σενάρια διαχείρισης Ομάδας Α	167
5.5.1.1	1 ^ο Σενάριο διαχείρισης.....	168
5.5.1.2	2 ^ο Σενάριο διαχείρισης.....	170
5.5.1.3	3 ^ο Σενάριο διαχείρισης.....	173
5.5.1.4	4 ^ο Σενάριο διαχείρισης.....	175
5.5.2	Σενάρια διαχείρισης Ομάδας Β.....	177
5.5.2.1	5 ^ο Σενάριο διαχείρισης.....	179
5.5.2.2	6 ^ο Σενάριο διαχείρισης.....	181
5.5.2.3	7 ^ο Σενάριο διαχείρισης.....	183
5.5.2.4	8 ^ο Σενάριο διαχείρισης.....	185
5.5.2.5	9 ^ο Σενάριο διαχείρισης.....	187
5.5.2.6	10 ^ο Σενάριο διαχείρισης.....	189
6	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	191
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	202

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο **Κεφάλαιο 1** γίνεται εκτενής παρουσίαση της λεκάνης απορροής της λίμνης Κάρλας στην οποία ανήκει ο προσχωματικός υδροφορέας της λίμνης Κάρλας. Παρουσιάζονται τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά στην οποία βρίσκεται και η περιοχή μελέτης, γίνεται αναφορά στο κλίμα και στην υδρολογία της περιοχής, την γεωλογική σύσταση του ανάγλυφου και του υπόβαθρου της, στους τύπους υδροφορέων που συναντώνται καθώς και στις αρδευτικές και υδρευτικές ανάγκες της ευρύτερης λεκάνης, παρουσιάζεται το ιστορικό αποξήρανσης της λίμνης καθώς και τα προβλήματα, περιβαλλοντικά αλλά και κοινωνικά που προέκυψαν. Στη συνέχεια, γίνεται εκτεταμένη αναφορά στις μελέτες που πρότειναν την ανασύσταση της λίμνης, στα προτεινόμενα έργα, συμπεριλαμβανομένης της λειτουργίας του ταμιευτήρα και τέλος στη σημερινή κατάσταση της λίμνης.

Στο **Κεφάλαιο 2** αναλύεται η εφαρμογή των τεχνικών προσομοίωσης-βελτιστοποίησης για τη διαχείριση των υπόγειων υδάτων. Αρχικά περιγράφεται η δομή ενός τέτοιου μοντέλου και στη συνέχεια αναλύονται οι διάφορες τεχνικές σύνδεσης ενός μοντέλου προσομοίωσης με ένα μοντέλο βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια κατηγοριοποιούνται τα προβλήματα διαχείρισης των υπόγειων υδάτων που έχουν απασχολήσει εδώ και χρόνια ερευνητές και μελετητές, αναφέροντας για κάθε κατηγορία χαρακτηριστικά παραδείγματα ερευνών που έχουν διεξαχθεί ανά τα χρόνια. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται σε έρευνες που εφάρμοσαν την τεχνική με μητρώο απόκρισης για τη σύνδεση μοντέλων προσομοίωσης με μοντέλα βελτιστοποίησης σε διάφορα προβλήματα διαχείρισης. Τέλος, παρουσιάστηκαν αντιπροσωπευτικά παραδείγματα μελετών που είχαν σαν επιπλέον δεδομένο τη διαχείριση ενός ταμιευτήρα νερού.

Στο **Κεφάλαιο 3** περιγράφεται ο μαθηματικός κώδικας προσομοίωσης της υπόγειας ροής MODFLOW. Αναλύεται διεξοδικά πως προκύπτει η κύρια διαφορική εξίσωση της υπόγειας ροής και πως αυτή επιλύεται μέσω των πεπερασμένων διαφορών. Αναλύονται τα πακέτα που υποστηρίζουν το πρόγραμμα και τέλος η στοχαστική προσομοίωση που πραγματοποιείται μέσα από αυτό.

Στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφεται το μοντέλο διαχείρισης της υπόγειας ροής GWM. Αναλύονται τα επιμέρους στοιχεία που το αποτελούν και ο τρόπος υπολογισμού όλων εκείνων των παραμέτρων που επιλύουν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, είτε γραμμικό είτε μη γραμμικό. Τέλος, περιγράφονται όλα τα δεδομένα εισόδου και εξόδου που χρησιμοποιούνται σε όλα τα στάδια της διαδικασίας επίλυσης.

Στο **Κεφάλαιο 5** καταστρώνεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης με βάση το οποίο θα επιτευχθεί η ανάκαμψη και αειφορική διαχείριση του υδροφορέα για τη μελλοντική περίοδο. Γίνεται η εφαρμογή των δύο προγραμμάτων MODFLOW και GWM σε ένα συνδυαστικό μοντέλο προσομοίωσης-βελτιστοποίησης του προσχωματικού υπόγειου υδροφορέα της λεκάνης της Κάρλας. Η κατάσταση του προβλήματος βελτιστοποίησης περιλαμβάνει: i) τις μεταβλητές απόφασης που είναι οι παροχές άντλησης των γεωτρήσεων, ii) την αντικειμενική συνάρτηση, η οποία μεγιστοποιεί το σταθμισμένο άθροισμα των μεταβλητών απόφασης, και iii) τους

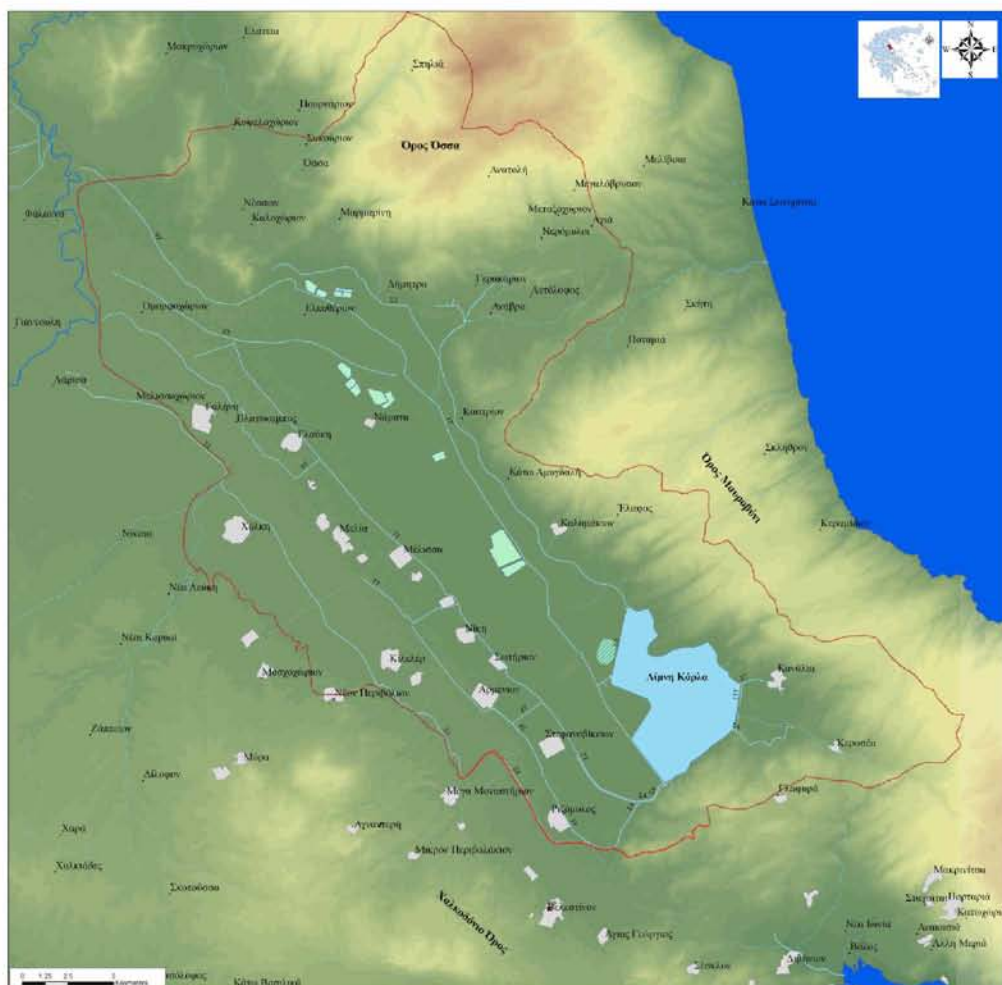
περιορισμούς στους οποίους υπόκειται η αντικειμενική συνάρτηση και αφορούν το υδραυλικό φορτίο και το ρυθμό άντλησης. Αναφέρονται όλοι οι παράμετροι και τα δεδομένα που εισήχθησαν στα δύο μοντέλα καθώς και ο τρόπος που συνεργάζονται μεταξύ τους. Τέλος, παρουσιάστηκαν και εφαρμόστηκαν εναλλακτικά σενάρια διαχείρισης με σκοπό την ικανοποίηση όλων των αρδευτικών και υδρευτικών αναγκών αλλά ταυτόχρονα και την ανύψωση του υπόγειου υδροφορέα σε μία ικανοποιητική στάθμη στο μέλλον.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής των εναλλακτικών σεναρίων διαχείρισης και αξιολογούνται όσον αφορά την αποκατάσταση του υδροφόρου ορίζοντα. Από την ανάλυση και τη σύγκριση μεταξύ τους, εξάγονται και τα απαραίτητα συμπεράσματα.

1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

1.1 Εισαγωγή

Η λεκάνη της Κάρλας βρίσκεται στο ΝΑ άκρο της πεδιάδας της Λάρισας και παρουσιάζει μορφή κλειστής, επιμήκου λεκάνης, μήκους 35 km και πλάτους 9 - 15 km. Η λεκάνη έχει όρια στο Βορρά τον ποταμό Πηνειό και τον ορεινό όγκο της Όσσας, στην Ανατολή τους ορεινούς όγκους του Μαυροβουνίου και του Πηλίου, στο Νότο το Χαλκοδόνιο όρος και το Μεγαβούνι και στη Δύση το Φυλλήιον όρος. Στο μέσο της λεκάνης αυτής βρίσκεται το βαθύτερο τμήμα της Θεσσαλικής πεδιάδας, τα χαμηλότερα τμήματα της οποίας μέχρι το 1961, καλύπτονταν από τα νερά της λίμνης, που αποτελούσε πριν από την εκτέλεση των έργων και τον κύριο αποδέκτη της. Διοικητικά η περιοχή υπάγεται στους νομούς Λαρίσης και Μαγνησίας.



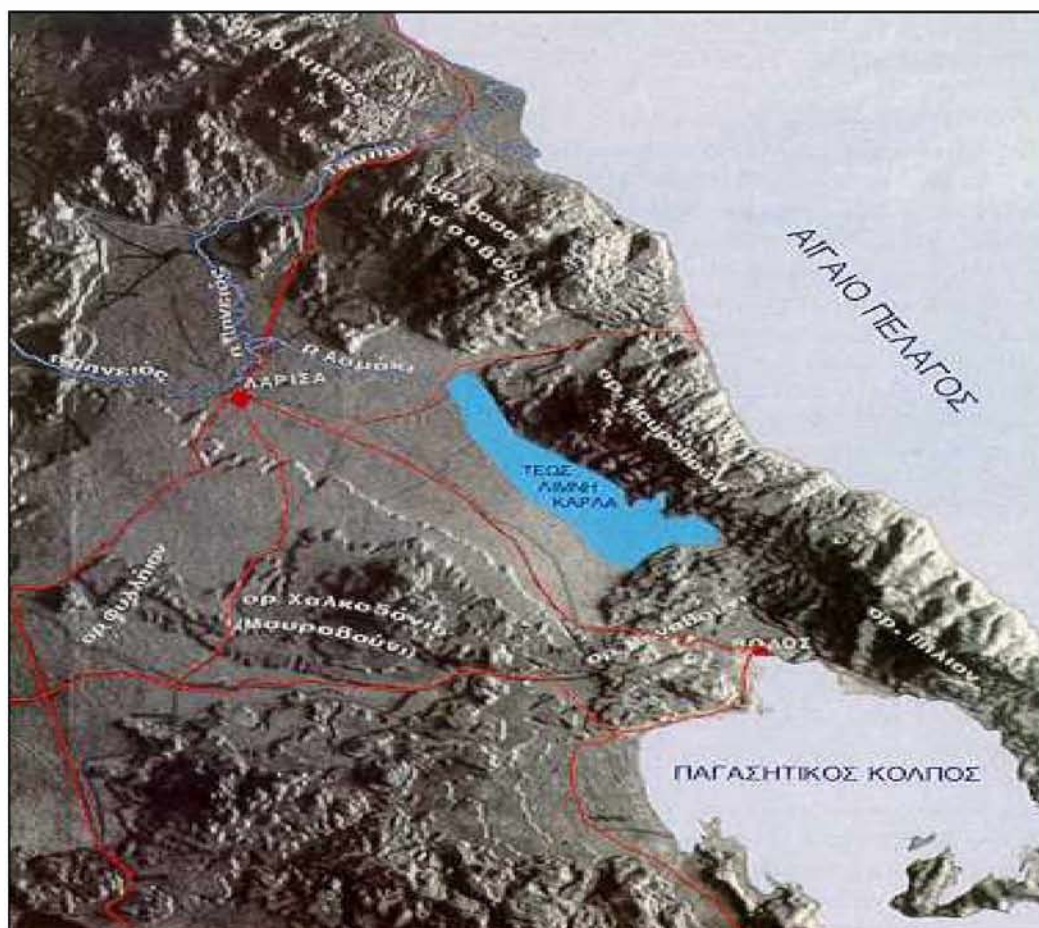
Εικόνα 1.1: Χάρτης περιοχής μελέτης (Σιδηρόπουλος Π. και Μυλόπουλος Ν., 2012).

Η φυσική λεκάνη της Κάρλας έχει συνολική έκταση 1663 km² ή 1.663.000 στρεμμάτων. Μετά το 1950 με την κατασκευή του Συλλεκτήρα Σ1 αποκόπηκε τμήμα της λεκάνης και η έκταση της λεκάνης απορροής της Κάρλας είναι πλέον 1100 km² (Εικ. 1.1). Το 1960 περατώθηκε η διάνοιξη της σήραγγας Κάρλας, ως πρώτο στάδιο έργων για την κατασκευή στην συνέχεια και του ταμιευτήρα της Κάρλας. Με τη

σήραγγα αποχετεύεται η κλειστή λεκάνη Κάρλας προς τον Παγασητικό. Την ίδια περίπου εποχή κατασκευάστηκαν οι τάφροι 1Τ, 2Τ και διάφορες άλλες δευτερεύουσες τάφροι που αποχετεύουν την πεδιάδα προς τη σήραγγα (βλέπε Κεφάλαιο 1.6.2). Προσφάτως ολοκληρώθηκαν και τα έργα κατασκευής του ταμιευτήρα, εκτάσεως 38 km², και έτσι έκλεισε η μεγάλη σε χρόνο περίοδος των έργων υποδομής της περιοχής (βλέπε Κεφάλαιο 1.6.4).

1.2 Η λίμνη Κάρλα

Η λίμνη Κάρλα, η αρχαία Βοιβηίς, υπήρξε μία από τις μεγαλύτερες και οικολογικά σημαντικότερες λίμνες της Ελλάδας. Σχηματιζόταν από τα ποτάμια που πήγάζαν κυρίως από την Όσσα. Βρίσκονταν στους πρόποδες της βόρειας προέκτασης της οροσειράς του Πηλίου που λέγεται Μαυροβούνι (Εικ. 1.2). Καταλάμβανε μία έκταση 200.000 στρεμμάτων. Η λίμνη οριοθετούνταν βορειοανατολικά από τις λοφώδεις εξάρσεις της οροσειράς Μαυροβουνίου, νότια από τις λοφώδεις εξάρσεις της οροσειράς του Πηλίου, ενώ βορειοδυτικά, δυτικά έως νοτιοδυτικά δεν ήταν σαφή τα όρια. Καταλάμβανε το χαμηλότερο σημείο του βαθύτερου τμήματος της θησαυλικής πεδιάδας.



Εικόνα 1.2: Γεωγραφική θέση της λίμνης Κάρλας (Μουστάκα Ε., 2002).

Το εμβαδόν που καταλάμβανε η λίμνη Κάρλα εξαρτώνταν από τις διακυμάνσεις στάθμης που καθορίζονταν από τις εισροές και τις αντίστοιχες εκροές υδάτων. Οι τακτικές εισροές υδάτων προέρχονταν από τις βροχοπτώσεις και οι έκτακτες από τα

υπερχειλίζοντα ύδατα του Πηνειού ποταμού κατά τις μεγάλες πλημμύρες του. Εισροές στη λίμνη υπήρχαν και από πηγές, με κυριότερη αυτή του Βελεστίνου αλλά και από άλλες μικρότερες που βρίσκονταν στο βόρειο τμήμα της λίμνης και αποστραγγίζονταν με το ρεύμα Ασμάκι. Οι εκροές υδάτων από τη λίμνη οφείλονταν αποκλειστικά σχεδόν στην εξάτμιση και ένα μικρό ποσοστό στις υπόγειες διαφυγές του πυθμένα. Η μικρή κλίση του πυθμένα της λίμνης είχε ως αποτέλεσμα, ανάλογα με τη σχέση εισροών-εκροών, το εμβαδόν της να κυμαίνεται μεταξύ 40 και 180 km². Έτσι, η παγίδευση πλημμυρικών υδάτων στη λίμνη συνοδευόταν από την κατάκλυση μεγάλων γεωργικών εκτάσεων γύρω από αυτή, ενώ παράλληλα δημιουργούσε προβλήματα στράγγισης και αύξησης της συγκέντρωσης αλάτων στα εδάφη της γύρω περιοχής.

Τη χρονιά 1938-1939 γίνεται η πρώτη οριοθέτηση ανωτάτης και κατωτάτης στάθμης με το Ν. 5800/1933 κατ' εφαρμογήν του άρθρου 2 του από 28/6/33 Ν.Δ/τος «Περί εξασφάλισης των δικαιωμάτων του Δημοσίου επί των αποκαλύπτων εν Μακεδονία γαιών». Σύμφωνα με τα συνταχθέντα τοπογραφικά διαγράμματα καθορίστηκαν ανωτάτη και κατώτατη στάθμη 48,50 m και 47,30 m που αντιστοιχούσαν σε 155.000 και 107.500 στρέμματα, αντίστοιχα.

Στη διάρκεια της περιόδου 1949-1961, η στάθμη ανήλθε σε μέγιστο υψόμετρο 47,65 m (15/5/1956) και ελάχιστο 44,71 m (31/10/1950) που αντιστοιχούσαν σε έκταση 115.000 στρέμματα και 40.000 στρέμματα.

Η ανάγκη για την αντιπλημμυρική προστασία της περιοχής και την απόκτηση γεωργικών εκτάσεων, αποτέλεσε την αιτία για την εκπόνηση διαφόρων μελετών που πραγματοποιήθηκαν μετά την απελευθέρωση της Θεσσαλίας, το 1881. Σύμφωνα με τις μελέτες, η αξιοποίηση της περιοχής συνδεόταν με την κατασκευή αντιπλημμυρικών και αποστραγγιστικών έργων, την αποξήρανση της λίμνης μέσω σήραγγας προς τον Παγασητικό Κόλπο και την κατασκευή ενός ταμειυτήρα σε τμήμα της παλιάς λίμνης. Ο ταμειυτήρας θα χρησίμευε για την ανάσχεση πλημμυρών και την αποταμίευση μέρους της χειμερινής παροχής του Πηνειού για άρδευση. Με την ολοκλήρωση των πρώτων έργων αντιπλημμυρικής προστασίας το 1949, που περιελάμβαναν τους ορεινούς συλλεκτήριους αγωγούς και τα αναχώματα του Πηνειού, περιορίσθηκε η λεκάνη απορροής της κατά το 1/3 και αποκόπηκε η τροφοδοσία της από τον ποταμό, με συνέπεια τη μείωση των εισροών και την υποβάθμιση του υγρότοπου της λίμνης.

Η τελική αποστράγγιση της λίμνης ολοκληρώθηκε το 1962, με την κατασκευή της σήραγγας αποστράγγισης και μέρους του αποστραγγιστικού δικτύου, ωστόσο όμως δεν έλυσε πλήρως τα προβλήματα, διότι δεν κατασκευάσθηκαν ο προβλεπόμενος από τις μελέτες ταμειυτήρας και τα συναφή έργα. Οι λόγοι για τους οποίους ο ταμειυτήρας αυτός δεν κατασκευάσθηκε αφορούσαν αντιρρήσεις ως προς τη θέση εγκατάστασης, την έκταση που θα καταλάμβανε, και το κατά πόσο πέρα από την αντιπλημμυρική προστασία θα χρησίμευε και για την αποθήκευση νερού για άρδευση. Η αναστολή των έργων κατασκευής του ταμειυτήρα δεν επέτρεψε να

ολοκληρωθούν τα έργα αντιπλημμυρικής προστασίας και αποθήκευσης νερού, με αποτέλεσμα την εμφάνιση σημαντικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Τα προβλήματα αυτά διογκώθηκαν με την πάροδο του χρόνου, και μόλις το 1982 εκπονήθηκε η προμελέτη για τον ταμιευτήρα της Κάρλας και τα συναφή έργα. Το επόμενο διάστημα εκπονήθηκαν και άλλες μελέτες για την επαναδημιουργία της λίμνης Κάρλας με συχνά αντικρουόμενες προτάσεις. Το 1995 εκπονήθηκε η «Οριστική Μελέτη Ταμιευτήρα Κάρλας και συναφών έργων» με βάση την προμελέτη του 1982. Τέλος, το 1999 εκπονήθηκε η Περιβαλλοντική Τεχνική Έκθεση, συνοδευμένη από μελέτη κόστους-οφέλους και υποστηρικτικές μελέτες, και δημοπρατήθηκε η κατασκευή των έργων.

Μέχρι σήμερα έχουν ολοκληρωθεί τα έργα για την κατασκευή του ταμιευτήρα και τα αντίστοιχα για την τροφοδοσία από τον Πηνειό, οπότε η επαναπλήρωση της λίμνης συνεχίζεται με στόχο την ανώτατη στάθμη άρδευσης, όπου θα μπορεί πλέον να ξεκινήσει η λειτουργία της άρδευσης. Έτσι η διαχείριση του συστήματος Ταμιευτήρας-Υδροφορέας που δημιουργείται, έχει ως σκοπό την αξιοποίηση του νέο-εισερχόμενου αρδευτικού νερού του ταμιευτήρα ώστε να μειωθεί η ποσότητα νερού που αντλείται από τις γεωτρήσεις και να χρησιμοποιηθεί μέρος αυτού για ύδρευση. Αυτό θα επιτευχθεί επιλύοντας ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με τη χρήση του μοντέλου GWM, στο οποίο θα γίνει η βελτιστοποίηση της κάλυψης του αρδευτικού νερού πρώτα από τον ταμιευτήρα και στη συνέχεια από τις γεωτρήσεις, και έπειτα η σύγκριση αυτής με τη σημερινή ζήτηση. Τέλος προκειμένου να επιτευχθεί ο βέλτιστος τρόπος λειτουργίας του υδατικού συστήματος θα εξετασθούν λύσεις που θα περιλαμβάνουν και σενάρια εναλλακτικά διαχείρισης.

1.3 Κλίμα και υδρολογία της περιοχής

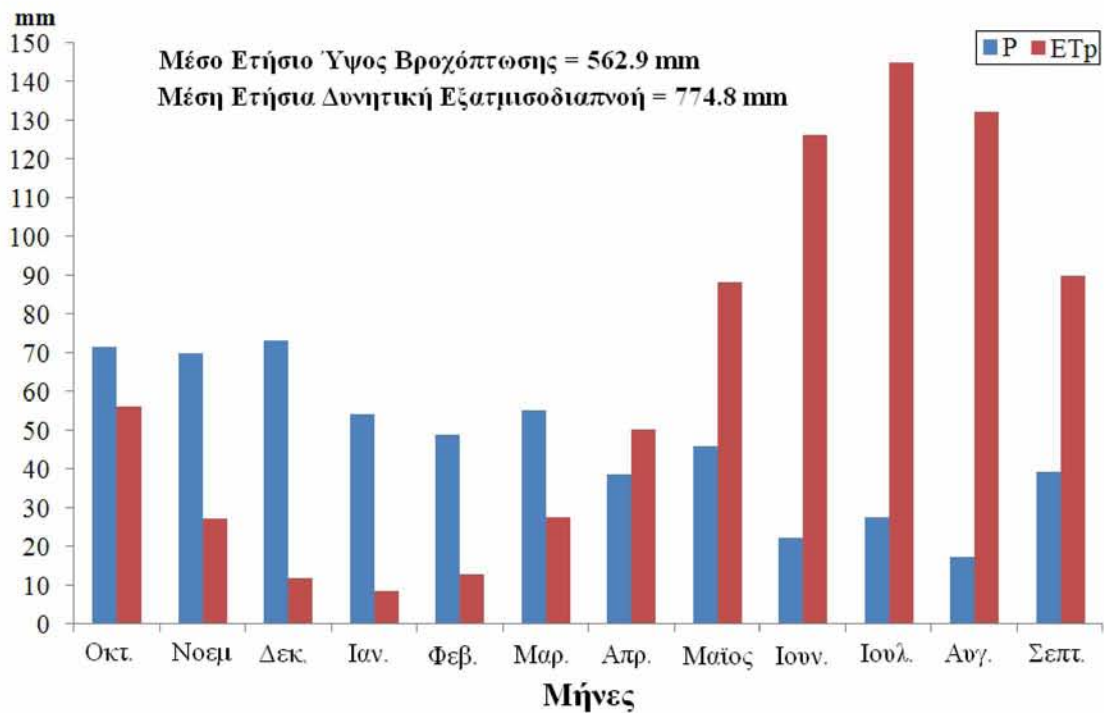
Η ευρύτερη περιοχή χαρακτηρίζεται από κλίμα Μεσογειακό, εύκρατο ηπειρωτικού χαρακτήρα. Χαρακτηριστικό αυτού του κλίματος είναι το ξερό και θερμό καλοκαίρι και ο ψυχρός και υγρός χειμώνας. Επηρεάζεται άμεσα από το αντικυκλωνικό σύστημα του Ατλαντικού μετά την επέκτασή του προς την ΝΑ Ευρώπη.

Στην περίπτωση της λεκάνης απορροής της Κάρλας η θερμοκρασία και τα κατακρυμνίσματα παίζουν το σημαντικότερο ρόλο, αφού συνδέονται με την επιφανειακή κυκλοφορία του νερού στους περιφερειακούς χειμάρρους της τέως λίμνης Κάρλας, οι οποίοι ευθύνονται για τη διαμόρφωση χαρακτηριστικών μορφών διάβρωσης και αποθέσεων στο χώρο που παλαιότερα φιλοξενούσε τη λίμνη.

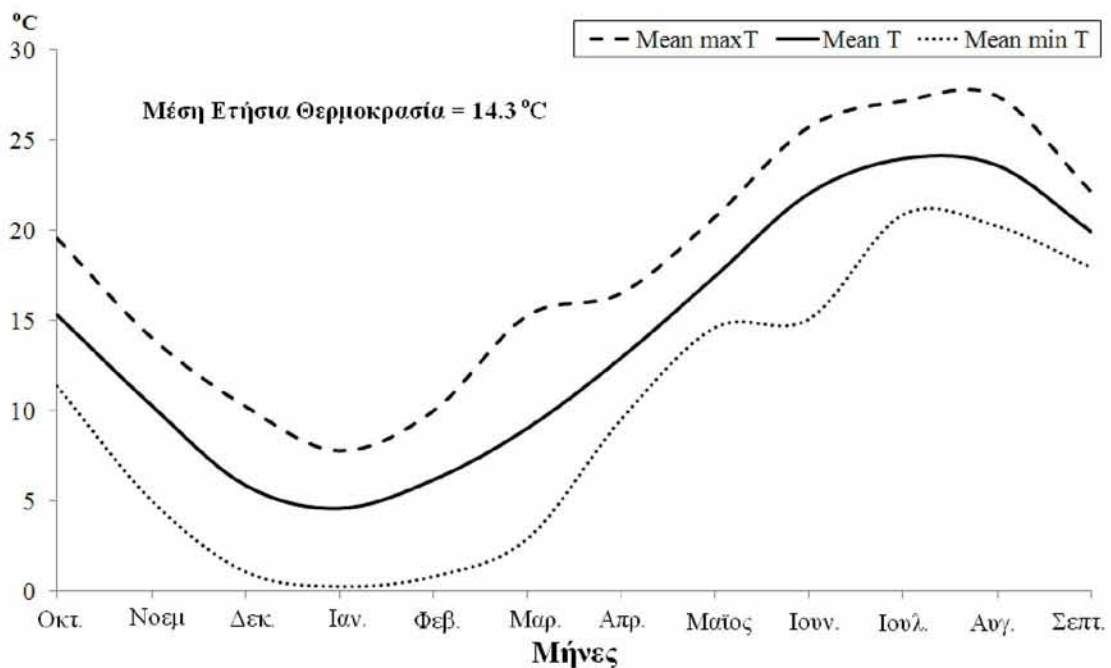
Τα στοιχεία από τους βροχομετρικούς σταθμούς της περιοχής δείχνουν αυξημένες βροχοπτώσεις πριν από την αποξήρανση της λίμνης. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής της περιοχής ανέρχεται στα 450 mm.

Η μέση θερμοκρασία είναι πάντα πάνω από το μηδέν, αλλά η χαμηλότερη θερμοκρασία που παρατηρήθηκε κατά το χειμώνα είναι $-21,6^{\circ}$ C. Η μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρήθηκε το καλοκαίρι ήταν $45,2^{\circ}$ C. Επίσης, στην περιοχή παρατηρούνται παγετοί κατά την περίοδο Δεκεμβρίου - Μαρτίου και σπανιότερα

κατά τους μήνες Νοέμβριο και Απρίλιο. Η μέση σχετική υγρασία στην περιοχή είναι 66%.



Εικόνα 1.3: Μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης και μέση ετήσια δονητική εξατμισοδιαπνοή για τη λεκάνη της Κάρλας (Σιδηρόπουλος Π. και συνεργάτες, 2012).



Εικόνα 1.4: Μέση ετήσια θερμοκρασία για τη λεκάνη της Κάρλας (Σιδηρόπουλος Π. και συνεργάτες, 2012).

1.4 Γεωλογική δομή

1.4.1 Γεωμορφολογία

Η ανατολική Θεσσαλία αποτελεί μία κλειστή πεδινή λεκάνη με το υψόμετρο να κυμαίνεται μεταξύ των 45 m με 65 m, αλλά στο νοτιοδυτικό όριο που εμφανίζεται το Χαλκοδόσιο Όρος παρατηρείται μια ανοδική κλίση του ανάγλυφου με μέγιστο υψόμετρο τα 130. Στην νοτιοανατολική της πλευρά, η οροσειρά του Μαυροβουνίου, με υψόμετρο 800 m. περίπου, σχηματίζει το φυσικό εμπόδιο προς τη θάλασσα του Αιγαίου Πελάγους. Βορειότερα, η οροσειρά αυτή προεκτείνεται και συνδέεται με τον Ορεινό όγκο της Όσσας και του Ολύμπου, που απομονώνουν το βορειοανατολικό τμήμα της λεκάνης από τη θάλασσα.

Υδρογραφικώς η ανατολική Θεσσαλία διαθέτει σήμερα μία μόνο έξοδο προς τη θάλασσα, την κοιλάδα των Τεμπών, μεταξύ Ολύμπου και Όσσας, από την οποία διέρχεται ο Πηνειός ποταμός. Σε παλαιότερους γεωλογικούς χρόνους, φαίνεται ότι από την κοιλάδα των Τεμπών διέφυγαν προς τη θάλασσα όλα τα νερά της ανατολικής Θεσσαλίας.

Μεταγενέστερα η περιοχή υπέστη μία γενική καθίζηση, που είναι πιθανό να συνεχίζεται και σήμερα, με αποτέλεσμα η επιφάνεια του εδάφους στο ΝΑ τμήμα της λεκάνης να βρεθεί σε χαμηλότερο υψόμετρο απ' ότι στη ΒΔ πλευρά της. Έτσι η ροή των επιφανειακών υδάτων δεν γινόταν πλέον προς την κοιλάδα των Τεμπών. Το ΝΑ τμήμα της ανατολικής Θεσσαλίας κατακλύστηκε από τα νερά, που σχημάτισαν τη λίμνη της Κάρλας. Κατά καιρούς η λεκάνη δεχόταν όχι μόνο τα νερά των χειμάρρων των γύρω ορεινών περιοχών που συγκλίνουν προς αυτήν, αλλά και τα νερά του Πηνειού ποταμού, που πλημμύριζαν την περιοχή της Λάρισας.

Η συνολική έκταση της φυσικής υδρολογικής λεκάνης της Κάρλας ανερχόταν παλαιότερα σε 1663 km². Η λεκάνη απορροής της Κάρλας από το 1937 και μετά μεταβλήθηκε από τα έργα τα οποία κατασκευάστηκαν στον Πηνειό για περιορισμό των υδάτων του που υπερχείλιζαν προς τη λίμνη. Αποτέλεσμα ήταν η μείωση της λεκάνης απορροής ως εξής:

- πριν το 1937 >1672 km²
- 1937-1945 1672 km²
- 1945-1949 1334 km²
- 1949-1952 1075 km²

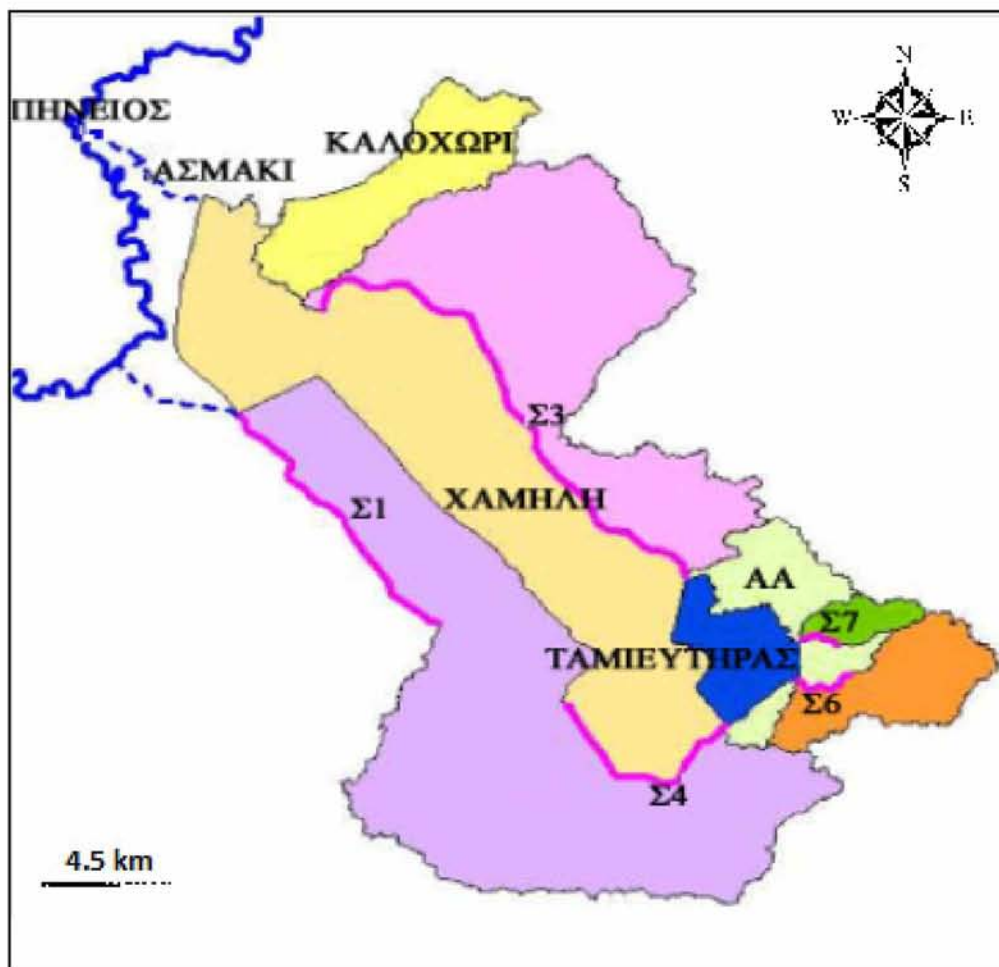
Η λεκάνη απορροής όπως τελικά είχε διαμορφωθεί, περιελάμβανε ορεινές και λοφώδεις περιοχές (μέχρι 1500 m υψόμετρο) σε ποσοστό 55,8 % και πεδινές περιοχές (μέχρι 100 m υψόμετρο) σε ποσοστό 44,2 %.

Η φυσική λεκάνη της Κάρλας, όπως προαναφέρθηκε, έχει συνολική έκταση 1663 km², αλλά, μετά την κατασκευή της συλλεκτήριας τάφρου Σ1 στα δυτικά της λεκάνης το 1950, η έκτασή της μειώθηκε σε 1093 km². Στο μέσο της λεκάνης αυτής βρίσκεται το βαθύτερο τμήμα της Θεσσαλικής πεδιάδας, τα χαμηλότερα τμήματα της οποίας μέχρι το 1961 κάλυπταν τα νερά της λίμνης, που αποτελούσε πριν από την εκτέλεση των έργων και τον κύριο αποδέκτη της.

Ο μέσος ετήσιος όγκος βροχής που δεχόταν η λεκάνη απορροής κατά τη χρονική περίοδο 1950-1954 ήταν 650.000 m^3 περίπου. Ένα ποσοστό σχεδόν 20% της ποσότητας αυτής κατέληγε στη λίμνη, κυρίως κατά τους μήνες Νοέμβριο με Απρίλιο. Ο όγκος των υδάτων της λίμνης εξαρτώνταν από τις απορροές της, την εξάτμιση και τις υπόγειες διαφυγές. Η ελάχιστη μηνιαία διαφυγή από τη λίμνη τη θερινή περίοδο, ήταν η ανώτερη των $5.000.000 \text{ m}^3$.

Η ισορροπία μεταξύ εισροών και εκροών εκφραζόταν με την αυξομείωση της στάθμης της λίμνης που καθόριζε κάθε φορά διαφορετική επιφάνεια και όγκο. Έτσι, με μέγιστη στάθμη 46,34 m το 1952 η λίμνη είχε επιφάνεια $85,50 \text{ km}^2$ και όγκο $128,28 * 106 \text{ m}^3$ ενώ με ελάχιστη στάθμη 45,08 m από το 1951 έως το 1953 είχε επιφάνεια 10 km^2 και όγκο $40,41 * 106 \text{ m}^3$ αντίστοιχα ενθάρρυναν τη λύση της αποξήρανσης της λίμνης.

Η αρχική φυσική λεκάνη υποδιαιρείται από γεωμορφολογική και υδρολογική άποψη σε έξι υδρολογικές υπολεκάνες (Εικ. 1.5). Δεν αποκλείεται μελλοντικά ορισμένες από αυτές τις υπολεκάνες να χρησιμοποιηθούν για τον τεχνητό εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφόρων οριζόντων (Μουστάκα, 2003).



Εικόνα 1.5: Οι υπολεκάνες και οι συλλεκτήρες της λεκάνης απορροής της Κάρλας (Μουστάκα Ε., 2002).

1.4.2 Στρωματογραφία και τεκτονική

Η ανατολική Θεσσαλία ανήκει κυρίως στην γεωτεκτονική ενότητα της Πελαγονικής ζώνης, ενώ ένα μικρό τμήμα της, στην περιοχή του Πηλίου, είναι πιθανόν να ανήκει στην Αττικοκυκλαδική Μάζα.

Η Πελαγονική ζώνη συγκροτείται από δύο μεγάλες ενότητες:

- Το υπόβαθρο, που σχηματίζεται από τα ημιμεταμορφωμένα πέρμιο - τριαδικά πετρώματα (φυλλίτες) και τη σχιστοκερατολιθική διάπλαση με οφιόλιθους.
- Τα ανθρακικά καλύμματα που αποτελούνται από ελαφρά μεταμορφωμένους ασβεστόλιθους Τριαδικού, Ιουραστικού και Κρητιδικού, που είναι επωθημένοι επάνω στους φυλλίτες και στους οφιόλιθους.

Η Αττικοκυκλαδική Μάζα αντιπροσωπεύεται από ισχυρώς μεταμορφωμένα πετρώματα (γνεύσιους και μάρμαρα), τα οποία βρίσκονται επωθημένα επάνω στους σχηματισμούς της Πελαγονικής ζώνης. Συχνά είναι δύσκολο να διαχωριστούν τα μάρμαρα της Αττικοκυκλαδικής από τους μεσοζωικούς ασβεστόλιθους της Πελαγονικής, που είναι επίσης ελαφρά μεταμορφωμένοι.

Το Νεογενές συνίσταται κυρίως από ερυθρή άργιλο, πηλό και αργιλοαμμώδη υλικά μικρής συνεκτικότητας, με διαστρώσεις κροκαλολατυποπαγών. Οι βαθύτεροι ορίζοντες αποτελούνται από μάργες, οι οποίες εναλλάσσονται με ερυθρά αργιλομαργαικά υλικά. Στην περιοχή Σέσκλου οι αποθέσεις παίρνουν χρώμα κιτρινοκόκκινο, λόγω εμπλουτισμού τους σε έγχρωμα κλαστικά υλικά από τους παρακείμενους γνεύσιους. Μέγιστο πάχος 100 m. περίπου.

Οι πρόσφατες τεταρτογενείς αποθέσεις καταλαμβάνουν το πεδινό τμήμα της λεκάνης Κάρλας (Εικ. 1.6). Αποτελούνται από υλικά ποικίλης κοκκομετρίας ποταμοχειμαρρόδους, ποτάμιας ή και λιμναίας προέλευσης. Το κοκκομετρικό μέγεθος των υλικών γενικά μειώνεται με την απομάκρυνση από τους κύριους κώνους των χειμάρρων που εκβάλλουν στην πεδινή ζώνη μεταφέροντας αδρομερή υλικά.

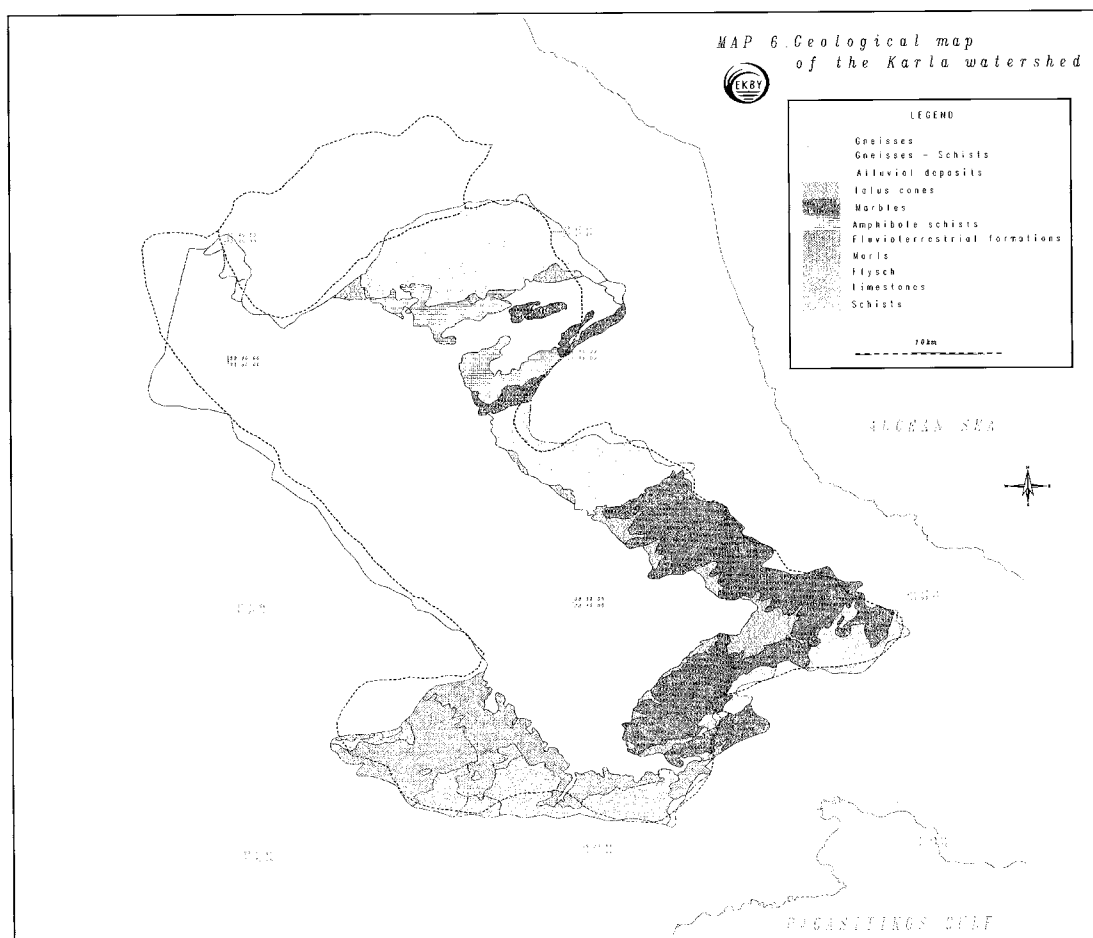
Η λεκάνη της Κάρλας σχηματίστηκε από ένα τεκτονικό βύθισμα, που συνέβη κατά το Πλειόκαινο ή Πλειστόκαινο, στην περιοχή μεταξύ Λάρισας και Βελεστίου. Το βύθισμα αυτό πληρώθηκε αργότερα με λιμναία ιζήματα και προσχώσεις που προήλθαν από την αποσάθρωση των γύρω οροσειρών. Μέσα στο βύθισμα σχηματίστηκε και η λίμνη Κάρλα. Φαίνεται ότι η απόθεση των προσχώσεων έγινε συγχρόνως με την καταβύθιση της περιοχής, με αποτέλεσμα τα πάχη των ιζημάτων να είναι αρκετά μεγάλο και σε ορισμένα σημεία να ξεπερνά τα 300 m. Η πεδιάδα, σήμερα, έχει υψόμετρο 44 – 65 m περίπου.

Το υπόβαθρο της λεκάνης αποτελείται από σχιστόλιθους και μάρμαρα. Τα μάρμαρα βρίσκονται κατά κανόνα εναποθεμένα επάνω στους σχιστόλιθους. Έτσι, η λεκάνη έχει σχηματισθεί επάνω σε αδιαπέραστους σχηματισμούς και είναι σχεδόν απομονωμένη από την θάλασσα του Παγασητικού κόλπου ή του Αιγαίου πελάγους. Όμως, η παρουσία καταβόθρων στην ανατολική πλευρά της λίμνης, από την οποία διέφευγαν τα νερά της προς γειτονικές περιοχές και πιθανότατα προς το Αιγαίο,

δείχνει ότι υπάρχει επικοινωνία (έστω και μικρή) μεταξύ θάλασσας και περιοχής της λίμνης.

Το πάχος των τεταρτογενών αποθέσεων της πεδιάδας της Κάρλας όπως προκύπτει από γεωφυσικές έρευνες (SOGREAH, 1974) ποικίλλει από τόπο σε τόπο και ξεπερνά κατά θέσεις τα 300 m (περιοχή Χάλκης – Αγιάς >550 m) εξαρτώμενο από την σύνθετη γεωμετρία του υποβάθρου εξαιτίας του τεκτονισμού.

Στη μελέτη της (SOGREAH, 1974) αναφέρεται ότι νοτιοδυτικά των λόφων της Πέτρας και της Μαγούλας, στην περιοχή Στεφανοβικείου, Ριζόμυλου και Βελεστίνου, σχηματίζεται ένα επίμηκες βύθισμα, του οποίου το υπόβαθρο βρίσκεται σε απόλυτο υψόμετρο -200 m Νοτιοδυτικά των Καναλιών, στο ανατολικότερο σημείο της λεκάνης, σχηματίζεται ένα άλλο βύθισμα, του οποίου το υπόβαθρο βρίσκεται σε απόλυτο υψόμετρο -200 m. Το δυτικό βύθισμα, στην περιοχή Στεφανοβικείου, λειτούργησε ως φραγμός για τα χονδρόκοκκα υλικά της διάβρωσης, εμποδίζοντας την μεταφορά τους ανατολικότερα. Μεταξύ των δύο αυτών βυθισμάτων παρατηρείται η αναθόλωση του υποβάθρου και η εμφάνιση των λόφων Πέτρας και Μαγούλας. Προφανώς, το έντονο ανάγλυφο του υποβάθρου οφείλεται σε μεγάλα γεωλογικά ρήγματα, που έχουν διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ, παράλληλα με τον γενικό άξονα της λεκάνης της Κάρλας.



Εικόνα 1.6: Υδρογεωλογικός χάρτης της Λεκάνης της Κάρλας (Σιδηρόπουλος Π. και Μυλόπουλος Ν., 2012).

Σήμερα στη λεκάνη της Κάρλας υπάρχουν γεωτρήσεις με γλυκά ή υφάλμυρα νερά. Φαίνεται ότι η υφαλμύρυνση δεν προέρχεται από σύγχρονες (σημερινές) εισροές θαλασσινού νερού, αλλά οφείλονται σε νερά της λίμνης, εμπλουτισμένα σε άλατα λόγω της συνεχούς εξάτμισης, τα οποία συγκεντρώθηκαν στον πυθμένα της λίμνης και εγκλωβίστηκαν μέσα στα μάρμαρα και στις προσχώσεις που τα κάλυψαν. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται κυρίως στο νότιο τμήμα της λεκάνης.

Πολλές από τις υφιστάμενες γεωτρήσεις έχουν διαπεράσει τόσο τις προσχώσεις, όσο και τα υποκείμενα μάρμαρα, με αποτέλεσμα να υπάρχει επικοινωνία σήμερα μεταξύ των προσχωσιγενών σχηματισμών και των καρστικών υδροφόρων οριζόντων. Έτσι είναι πολύ δύσκολο να εξακριβωθεί εάν υπάρχει ποιοτική διαφορά μεταξύ των νερών των δύο τύπων υδροφόρων οριζόντων.

Στο νοτιοδυτικό τμήμα της λεκάνης, στην περιοχή του Ριζόμυλου, φαίνεται ότι δεν έφθαναν τα υφάλμυρα νερά της λίμνης Κάρλας. Εδώ οι προσχώσεις έχουν πάχος που φθάνει τα 300 m, ενώ βαθύτερα υπάρχουν μάρμαρα και σχιστόλιθοι ή γνεύσιοι, που αποτελούν το βραχώδες υπόβαθρο της λεκάνης. Οι σχηματισμοί του υποβάθρου αναδύονται στην επιφάνεια και εμφανίζονται και στην ορεινή περιοχή που περιβάλλει την πεδιάδα. Στην περιοχή αυτή η ποιότητα των υπογείων νερών είναι πολύ καλή.

Λίγο ανατολικότερα, προς την σήραγγα, λόγω του πολύπλοκου διαμελισμού του υποβάθρου και του μεταβαλλόμενου πάχους των προσχώσεων, παρατηρούνται μεγάλες διαφορές στην στάθμη και στην ποιότητα των νερών των υφιστάμενων γεωτρήσεων. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα αισθητό στην μεταξύ Ριζόμυλου και Κάρλας περιοχή, όπου απότομα εμφανίζεται το φαινόμενο της υφαλμύρυνσης.

1.4.3 Εδαφολογικά δεδομένα

Τα εδάφη της περιοχής μελέτης διακρίνονται σε:

- Αλλούβια
- Κολλούβια
- Αυτόχθονα

Τα αλλούβια εδάφη κυριαρχούν στο χώρο. Καλύπτουν όλη τη χαμηλή περιοχή της πεδιάδας της Κάρλας, και είναι λεπτόκοκκα, με μεγάλο βάθος. Τα κολλούβια έχουν αναπτυχθεί στις περιοχές Καλαμακίου και Καναλίων, κατά μήκος των προπόδων του Πηλίου. Έχουν ποικίλο βάθος, μέση περίπου μηχανική σύσταση και σημαντική περιεκτικότητα χαλικιών διαφόρων διαμετρημάτων. Τα αυτόχθονα εδάφη συναντώνται στο δυτικότερο τμήμα της περιοχής μελέτης. Το βάθος τους κυμαίνεται μεταξύ 0,5 και 2 m περίπου, είναι μέσης κοκκομετρικής σύστασης και επικάθονται σε ασβεστολιθικά και σχιστολιθικά πετρώματα από την αποσάθρωση των οποίων προέρχονται.

Η εδαφοσειρά στην περιοχή της Κάρλας περιλαμβάνει εδάφη βαριάς σύστασης καθ' όλη την κατατομή τους. Καταλαμβάνει όλο το χώρο που καλυπτόταν μόνιμα και περιοδικά κατά το παρελθόν με νερό. Τα εδάφη της εδαφοσειράς αυτής παρουσιάζουν παθογένεια (αλατότητα-νατρίωση) στη μεγαλύτερη έκτασή τους. Σε ξηρά κατάσταση, τα εδάφη της σειράς αυτής είναι σκληρά ενώ σε υγρά κολλώδη.

Είναι φτωχά σε οργανική ουσία ενώ η παρουσία του ανθρακικού ασβεστίου είναι σημαντική, και αυξάνεται με το βάθος (10-40%). Η παρουσία του ασβεστίου είναι θετικός παράγοντας στην βελτίωση των νατριωμένων εδαφών όταν με αναστροφή του εδάφους, το ασβέστιο έλθει στην επιφάνεια και επικρατούν συνθήκες καλής στράγγισης. Η οξύτητά τους κυμαίνεται μεταξύ pH 7,3 και pH 8,6. Η διηθητικότητα και υδατοπερατότητα είναι μετρίως βραδεία έως βραδεία (0,5-6,5 cm/h). Η διαθέσιμη υγρασία είναι πολύ μεγάλη, κυμαινόμενη από 270 έως 425 mm για βάθος εδάφους 1,2 m. Τα εδάφη της σειράς αυτής είναι βαριά με κυρίαρχους τύπους τα αργιλώδη (C), αργιλοπηλώδη (CL) και ιλοαργιλώδη (SiC). Στην εδαφοσειρά καλλιεργούνται βαμβάκι, τεύτλα, αραβόσιτος, μηδική, βιομηχανική ντομάτα και λίγα φθινοπωρινά σιτηρά.

Η εδαφοσειρά της περιοχής του Ριζομούλου περιλαμβάνει αλλούβια εδάφη μεγάλου βάθους και βαριάς ως επί το πλείστον μηχανικής σύστασης. Η περιεκτικότητα σε CaCO₃ κυμαίνεται μεταξύ 10 και 44%. Δεν παρουσιάζουν παθογένεια. Η υπόγεια στάθμη του νερού βρίσκεται σε μεγάλο βάθος, υπερβαίνει τα 2 m. Είναι φτωχά σε οργανική ουσία. Η οξύτητά τους κυμαίνεται μεταξύ pH 7,3 και pH 8,4. Η διαθέσιμη υγρασία μέχρι βάθος 1,2 m κυμαίνεται μεταξύ 200 και 300 mm. Η διηθητικότητα και υδατοπερατότητα είναι μετρίως βραδεία (2,0-6,5 cm/h). Οι εδαφικοί τύποι που κυριαρχούν στην εδαφοσειρά αυτή είναι οι εξής: Βαρέα: αργιλώδη (C) και ιλοαργιλώδη (SiC). Μέσα προς Βαρέα: αργιλοπηλώδη (CL) και ιλοαργιλοπηλώδη (SiCL). Μέσα: πηλώδη (L) και ιλοπηλώδη (SiL) και Ελαφρά προς Μέσα: αμμοπηλώδη (SL). Στην εδαφοσειρά αυτή καλλιεργούνται: Βαμβάκι, τεύτλα, αραβόσιτος, μηδική, βιομηχανική ντομάτα, φθινοπωρινά σιτηρά και ελάχιστοι δενδρώνες, κυρίως αμυγδαλιές.

Η εδαφοσειρά της περιοχής Καλαμακίου – Καναλιών περιλαμβάνει κολλούβια εδάφη. Τα εδάφη της σειράς αυτής έχουν σχετικά μεγάλο βάθος με ανομοιόμορφη κατατομή και ελαφρώς ανώμαλο ανάγλυφο. Στην κατατομή τους εμφανίζονται χάλικες διαφόρων διαμετρημάτων και άμμος. Είναι φτωχά σε οργανική ουσία και δεν περιέχουν πολύ ανθρακικό ασβέστιο. Η οξύτητά τους είναι ελαφρώς αλκαλική (pH 7,5 – pH 7,9). Η διαθέσιμη υγρασία κυμαίνεται στα 100 – 150 mm για βάθος μέχρι 1,20 m. Η υπόγεια στάθμη του νερού είναι σε πολύ μεγάλο βάθος και δεν αποτελεί πρόβλημα. Η διηθητικότητα του εδάφους κυμαίνεται μεταξύ 10 και 20 cm/h. Της ίδιας τάξης είναι και η υδατοδιαπερατότητα. Οι εδαφικοί τύποι που κυριαρχούν στην εδαφοσειρά αυτή είναι: Αμμοαργιλώδεις (SC), Αμμοαργιλώδης πηλός (SCL) και Αμμόδης πηλός (SL). Καλλιεργούνται στην εδαφοσειρά αυτή δένδρωνες μέσα στους οποίους βρίσκονται και κάποια ελαιόδενδρα μικρής ηλικίας. Σε μικρότερη κλίμακα καλλιεργούνται βαμβάκι, αραβόσιτος, μηδική και κάποια κηπευτικά.

Η εδαφοσειρά της περιοχής Καναλιών – Κερασέας περιλαμβάνει αλλούβια εδάφη. Καταλαμβάνει το πεδινό τμήμα της περιοχής μεταξύ των Δ.Δ. Καναλιών και Κερασέας. Το βάθος των εδαφών της είναι μεγάλο και περιλαμβάνει κροκάλες σχετικά μεγάλων διαστάσεων (5-20 cm). Είναι φτωχά σε οργανική ουσία και ανθρακικό ασβέστιο. Η οξύτητά τους είναι ουδέτερη. Η διαθέσιμη υγρασία για βάθος

1,2 m είναι 100-150 mm. Η υπόγεια στάθμη του νερού είναι σε πολύ μεγάλο βάθος και δεν δημιουργεί προβλήματα. Η διηθητικότητα των εδαφών κυμαίνεται μεταξύ 10 και 25 cm/h. Οι εδαφικοί τύποι που κυριαρχούν στην περιοχή αυτή είναι: αμμοαργιλώδης (SC), αμμοαργιλώδης πηλός (SCL) και αμμώδης πηλός (SL). Οι καλλιέργειες της εδαφοσειράς αυτής είναι δενδρώδεις. Κυριαρχεί η αμυγδαλιά σε συμπαγή μορφή. Επίσης υπάρχουν αχλαδιές, μηλιές και κερασιές σε μικρότερες εκτάσεις.

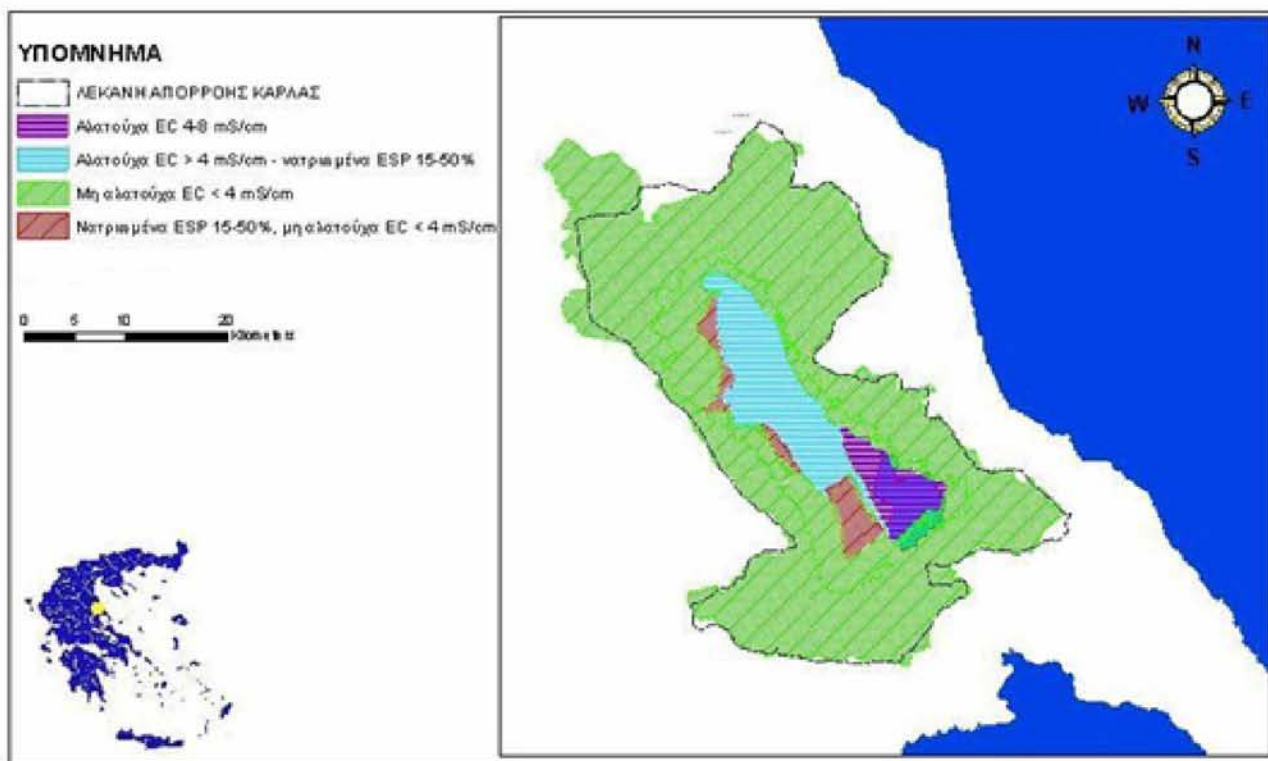
Η εδαφοσειρά της περιοχής Αγίου Γεωργίου – Βελεστίνου – Χλόης περιλαμβάνει αυτόχθονα εδάφη. Τα χαρακτηριστικά της είναι η διάβρωση και το ανώμαλο ανάγλυφό της. Τα εδάφη της από άποψη μηχανικής σύστασης ανήκουν στα μέσα προς ελαφρά. Το βάθος των εδαφών της έχει μεγάλες διακυμάνσεις ανάλογα με τον βαθμό διάβρωσης που έχουν υποστεί κατά περιοχές. Εκτιμάται ότι κυμαίνεται μεταξύ 0,5 και 2 m. Η διηθητικότητα και διαπερατότητά της κυμαίνεται μεταξύ 10 και 20 cm/h. Είναι φτωχά σε ανθρακικό ασβέστιο. Δεν έχουν οργανική ουσία. Υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας δεν υπάρχει. Η διαθέσιμη υγρασία του εδάφους μέχρι βάθους 1m είναι 80 – 100 mm. Το υπόβαθρο των εδαφών είναι ο ασβεστόλιθος και ο αργιλικός σχιστόλιθος, από την διάβρωση των οποίων προέρχονται. Η οξύτητά τους είναι ελαφρώς αλκαλική (pH 7,5 – pH 7,6). Οι εδαφικοί τύποι που κυριαρχούν στην εδαφοσειρά αυτή είναι: αμμοαργιλώδης πηλός (SCL), αμμοαργιλώδης (SC) και αμμοπηλώδης (SL). Η εδαφοσειρά αυτή καλλιεργείται με: φθινοπωρινά σιτηρά, βαμβάκι, μηδική, αραβόσιτο, λίγα κηπευτικά και αρκετούς δενδρώνες.

Η αλλαγή χρήσης υγροτοπικών εδαφών, και η μετατροπή τους σε καλλιεργητικά εδάφη, έχει αποδειχθεί ως επί το πλείστον αποτυχής κατά το παρελθόν, αφού η λειτουργία της παραγωγικότητας είναι συνήθως χαμηλή σε αυτά τα εδάφη. Επιπλέον η έκλυση μεγάλων ποσοτήτων οξειδίων του άνθρακα, μετά από αποξήρανση υγροτοπικών εδαφών συμβάλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Απεναντίας, η διατήρηση των υγροτοπικών εδαφών καθώς και η αποκατάσταση υγροτόπων, με έμφαση σε λειτουργίες όπως η παραγωγή ιχθυοκαλλιέργειας, συντελεί στην δημιουργία νέων και πιο επικερδών παρεχομένων υπηρεσιών, όπως η αλιεία και ο οικοτουρισμός. Οι εδαφολογικές μελέτες που έχουν γίνει κατά καιρούς στην περιοχή της λεκάνης απορροής Κάρλας δείχνουν ως κύρια αιτία υποβάθμισης της λειτουργίας της παραγωγικότητας των εδαφών την αλάτωση και την επακόλουθη νατρίωση, η οποία χωρικά προσδιορίζεται κυρίως στην εδαφοσειρά Κάρλας. Ωστόσο, τα αλατούχα-νατρωμένα εδάφη, δεν θεωρούνται υποβαθμισμένα για την στήριξη υγροτοπικών λειτουργιών, συνεπώς, μπορούν να προκύψουν υπηρεσίες υψηλής ποιότητας, όπως η αλιεία και ο οικοτουρισμός.

Τα αλατούχα-νατρωμένα εδάφη στην περιοχή Κάρλας δημιουργούνται λόγω της χαμηλής διηθητικότητας των εδαφών, της υψηλής υπόγειας στάθμης και της κακής στράγγισης. Οι βασικοί εδαφικοί δείκτες που προσδιορίζουν την υποβάθμιση λόγω αλάτωσης-νατρίωσης είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα στο νερό κορεσμού (ECe) και η επί τοις εκατό περιεκτικότητα σε νάτριο της εναλλακτικής φάσης (ESP). (Γ.Γ.Δ.Ε./Γ.Δ.Υ.Ε. Διεύθυνση Εγγειοβελτιωτικών Έργων (Δ7) 2010). Μετρήσεις των

παραπάνω δεικτών, σε εδαφολογικές μελέτες, έχουν προσδιορίσει υποβαθμισμένα εδάφη σε σχέση με τη λειτουργία της παραγωγικότητας σε συνολική έκταση γύρω στα 200.000 στρέμματα και αναλύονται όπως παρακάτω (Εικ. 1.7):

- Εδάφη αλατούχα $EC = 4-8$ ms/cm (50.000 στρ.)
- Εδάφη αλατούχα ($EC > 4$ m/cm), νατριωμένα $ESP = 15-50\%$ (130.000 στρ.)
- Εδάφη νατριωμένα ($ESP = 15-50\%$),
- μη αλατούχα ($EC < 4$ m/cm) (41.000 στρ.)



Εικόνα 1.7: Εδαφολογικός χάρτης παθογένειας εδαφών (Γ.Γ.Δ.Ε./Γ.Δ.Υ.Ε. Διεύθυνση Εγχειοβελτιωτικών Έργων (Δ7), 2010).

1.5 Υδρογεωλογία και εκμετάλλευση υπόγειων υδάτων

1.5.1 Υδροφόροι σχηματισμοί

Στην περιοχή της Κάρλας διακρίνουμε τρεις κυρίως υδροφόρους σχηματισμούς: τις **αργιλοαμμώδεις λιμναίες αποθέσεις**, τις **αδρομερείς προσχώσεις και κορήματα** και τα **μάρμαρα** (Μπεζές 2004, Υποστηρικτική Υδρογεωλογική Μελέτη 1999). Συνήθως οι σχηματισμοί αυτοί διατάσσονται στον χώρο με την σειρά που αναφέρθηκαν, από την επιφάνεια του εδάφους προς τα μεγαλύτερα βάθη.

Μέσα στους υδροφόρους σχηματισμούς, που αναφέρθηκαν παραπάνω, σχηματίζονται αντίστοιχα οι τρεις βασικοί υδροφόροι ορίζοντες:

- i) Ο υδροφόρος ορίζοντας των αργιλοαμμωδών λιμναίων αποθέσεων.
- ii) Ο υδροφόρος ορίζοντας των αδρομερών κροκαλολατυποπαγών.

iii) Ο υδροφόρος ορίζοντας των μαρμάρων (καρστικός).

Οι τρεις παραπάνω υδροφόροι ορίζοντες είναι τοποθετημένοι ο ένας επάνω στον άλλο (επάλληλοι ορίζοντες). Δεν συναντώνται σε όλες τις περιοχές της Κάρλας, αλλά από ορισμένες περιοχές είναι δυνατόν να απουσιάζει κάποιος ορίζοντας (όπως π.χ. ο καρστικός).

Η έκταση των τριών υδροφόρων οριζόντων, το πάχος των υδροφόρων στρωμάτων και το βάθος τους από την επιφάνεια του εδάφους δεν είναι ομοιόμορφα σε όλη την έκταση του πεδινού τμήματος της Κάρλας. Παρατηρούνται, κατά την οριζόντια και κατακόρυφη έννοια μεγάλες διαφοροποιήσεις από περιοχή σε περιοχή, οι οποίες μας υποχρεώνουν να υποδιαιρέσουμε την ευρύτερη περιοχή σε ζώνες, όπως περιγράφεται παρακάτω.

Οι **Αργιλοαμμώδεις Λιμναίες Αποθέσεις** αποτέθηκαν στον πυθμένα της λίμνης Κάρλας, στο πρόσφατο παρελθόν. Πρόκειται για προσχώσεις που περιέχουν αργίλους με ενδιαστρώσεις άμμων και λεπτών κροκάλων. Το στρώμα αυτό καλύπτει τον πυθμένα της αποξηραμένης λίμνης, έχει πάχος της τάξης των 80 - 100 m. τουλάχιστον και καταλαμβάνει ολόκληρη την έκταση της πρώην λίμνης Κάρλας, προεκτεινόμενο και νοτιοδυτικά του Στεφανοβικείου, μέχρι το Βελεστίνο. Τα υλικά που σχημάτισαν το στρώμα αυτό φαίνεται ότι προήλθαν από τα βόρεια και δυτικά, από την αποσάθρωση των Πλειο-πλειστοκαινικών σχηματισμών της λεκάνης της Θεσσαλίας.

Η περατότητα του στρώματος των αργιλικών επιφανειακών προσχώσεων είναι πολύ χαμηλή, όπως διαπιστώθηκε από πλήθος ερευνητικών γεωτρήσεων. Το στρώμα αυτό, σε πολύ μεγάλη έκταση της λεκάνης σχηματίζει την αδιαπέραστη οροφή των υποκειμένων υδροφόρων στρωμάτων. Τα τελευταία είναι εγκλωβισμένα και δίνουν την δυνατότητα να σχηματισθούν στο εσωτερικό τους υδροφόροι ορίζοντες υπό πίεση.

Ο υδροφόρος ορίζοντας των αργιλοαμμωδών λιμναίων αποθέσεων είναι επιφανειακός (φρεατικός). Η τροφοδοσία του υδροφόρου ορίζοντα γίνεται από τις βροχοπτώσεις και τις διηθήσεις από τα κανάλια. Η ποιότητα του νερού είναι καλή ή μέτρια, ανάλογα με την περιοχή, διότι πολλά από τα επιφανειακά εδάφη της λίμνης παλαιότερα ήταν αλμυρά. Ίσως, με την πάροδο του χρόνου, η κατάσταση να βελτιώνεται, διότι τα εδάφη αποπλένονται και απομακρύνονται τα άλατα.

Οι **Αδρομερείς προσχώσεις και τα κορήματα** βρίσκονται κάτω από το αργιλοαμμώδες στρώμα, με μεταβλητό πάχος εξαρτώμενο από το βάθος του παλαιοαναγλύφου της λεκάνης. Οι σχηματισμοί αυτοί δημιουργήθηκαν παλαιότερα, στις πλαγιές και το κατώτερο τμήμα των κοιλάδων. Πρόκειται για μεγάλες ασβεστολιθικές κροκάλες ή λατύπες, χαλίκια, άμμους και αργίλους, που προέρχονται από τη διάβρωση και αποσάθρωση των μαρμάρων και των σχιστόλιθων των περιφερειακών ορεινών όγκων. Τα υλικά αυτά μεταφέρθηκαν από τους χείμαρρους και αποτέθηκαν στον πυθμένα της λεκάνης, σε παλαιότερες εποχές, όταν το ανάγλυφο ήταν εντονότερο, δηλαδή συγχρόνως με την καταβύθιση της περιοχής.

Η έκταση που καταλαμβάνει το στρώμα των αδρομερών προσχώσεων, προς τα δυτικά, δεν μπορεί να προσδιορισθεί με ακρίβεια. Σίγουρα εκτείνεται μέχρι τις περιοχές Στεφανοβικείου, Αρμενίου και Ριζόμυλου, όπου εκατοντάδες αρδευτικών γεωτρήσεων εκμεταλλεύονται τον υδροφόρο ορίζοντα αυτού του στρώματος.

Οι κώνοι κορημάτων, λόγω των αδρομερών υλικών που περιέχουν και της έλλειψης σημαντικού ποσοστού αργίλου, εμφανίζουν μεγάλη περατότητα. Όπως έδειξαν τα αποτελέσματα ορισμένων γεωτρήσεων, καθώς και οι γεωφυσικές έρευνες, που έχουν γίνει στο παρελθόν, οι αδρομερείς αποθέσεις επεκτείνονται πέραν των κρασπέδων της λεκάνης προς το κέντρο της, σχηματίζοντας ένα στρώμα μεταξύ αργιλοαμμωδών αποθέσεων και των μαρμάρων του υποβάθρου.

Η περατότητα του στρώματος των αδρομερών προσχώσεων είναι πολύ υψηλή. Οι γεωτρήσεις, που εκμεταλλεύθηκαν τον υδροφόρο ορίζοντα αυτού του στρώματος απέδωσαν αρχικά πολύ υψηλές παροχές, μεγαλύτερες από 250 m³/h, με μικρή πτώση στάθμης. Είναι πιθανόν να υπάρχει υδραυλική επικοινωνία με τον υποκείμενο υδροφόρο ορίζοντα των μαρμάρων. Οι υψηλές αυτές παροχές οφείλονται επίσης στο γεγονός ότι αρχικά οι υδροφόροι ορίζοντες ήταν υπό πίεση και μπορούσαν να απελευθερώσουν μεγάλες ποσότητες νερού. Με την πάροδο όμως του χρόνου, επειδή το υδατικό ισοζύγιο έγινε αρνητικό, τα φορτία έπεσαν και ο υδροφόρος ορίζοντας μεταβλήθηκε σε ελεύθερο. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την μείωση του ενεργού πάχους του υδροφόρου στρώματος, την μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας T και, φυσικά, την μείωση των παροχών. Παρ' όλα αυτά το υδατικό ισοζύγιο παρέμεινε αρνητικό.

Ο υδροφόρος ορίζοντας των αδρομερών κροκαλολατυποπαγών συναντάται σε βάθη άνω των 25 – 50 m. Έχει υψηλή περατότητα και καλή ποιότητα νερού. Η τροφοδοσία του γίνεται πλευρικά, μέσω των κώνων των κορημάτων και των χειμάρρων της περιοχής. Λόγω της έντονης τροφοδοσίας και της συνεχούς ανανέωσης του υπόγειου νερού, ο υδροφόρος ορίζοντας αυτός έχει νερό πολύ καλής ποιότητας.

Τα **Μάρμαρα** είναι υδροπερατά πετρώματα. Το ασβεστολιθικό υλικό, από το οποίο αποτελούνται, είναι ευδιάλυτο στο νερό, με αποτέλεσμα το βρόχινο νερό που εισχωρεί στις ρωγμές του πετρώματος, να τις διευρύνει συνεχώς και να προσδίνει τελικά στο πέτρωμα μεγάλη περατότητα. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται καρστικοποίηση ή καρστ.

Η Κάρλα, στην ανατολική πλευρά της έρχεται σε επαφή με μάρμαρα. Παλαιότερα, τα νερά της, μη μπορώντας να διαφύγουν επιφανειακά προς την θάλασσα, αποχετεύονταν προς των εξωτερικό χώρο, υπογείως, μέσω καταβόθρων, που είχαν δημιουργηθεί στα μάρμαρα. Οι καταβόθρες διακρίνονται και σήμερα στην ανατολική πλευρά της. Η συνολική επιφάνεια των μαρμάρων που βρίσκονται μέσα στα όρια της λεκάνης της Κάρλας ανέρχεται σε 96,3 Km².

Εκτός όμως από την περιφέρεια της λεκάνης, μάρμαρα υπάρχουν και κάτω από τις προσχώσεις. Τα στρώματα αυτά αποτελούν προεκτάσεις των περιφερειακών

εμφανίσεων και σχηματίζουν το υπόβαθρο της λεκάνης στον ανατολικό και νότιο τομέα. Μέσα σ' αυτά αναπτύσσεται καρστικός υδροφόρος ορίζοντας. Η περατότητα των μαρμάρων είναι γενικά πολύ υψηλή και για τον λόγο αυτόν οι γεωτρήσεις, που εκμεταλλεύονται τον καρστικό υδροφόρο ορίζοντα δίνουν συνήθως υψηλές παροχές. Το πάχος των μαρμάρων κυμαίνεται από 20 έως 200 m.

1.5.2 Υδροφορία προσχωματικού και πεδινού τμήματος της Κάρλας

Στην περιοχή, κυρίως της παλιάς λίμνης, αναπτύσσεται ένας συνεχής ανώτερος ορίζοντας αργίλων και λεπτών άμμων κυμαινόμενου πάχους από 50-100 m., που επικάθεται πάνω σε πλέον αδρόκοκκα υλικά. Στα νότια τμήματα του ταμιευτήρα, κοντά στα κράσπεδα των μαρμάρων, το πάχος αυτό είναι σχετικά μικρότερο και φθάνει μέχρι τα 60 m. Κάτω από το επιφανειακό αυτό στρώμα αναπτύσσονται εναλλαγές αδρομερών με λεπτόκοκκους ορίζοντες υλικών και δημιουργούνται έτσι συνθήκες υπό πίεση στις εκεί συναντούμενες υδροφορίες. Στο νοτιοανατολικό τμήμα της πεδινής έκτασης, οι αδρομερείς αυτοί ορίζοντες ελαττώνονται σε πάχος και εδώ (παλιά λίμνη Κάρλας) κυριαρχούν, με μικρές εξαιρέσεις, τα αργιλοϊλυώδη στρώμα

Στα νότια περιθώρια της λίμνης Κάρλας, κοντά στην περιοχή διάνοιξης της αποστραγγιστικής σήραγγας, οι γεωτρήσεις κάτω από τα αργιλοϊλυώδη επιφανειακά υλικά έχουν εντοπίσει μεγάλου πάχους κροκαλολατυποπαγείς αποθέσεις, η υδροφορία των οποίων δεν πρέπει να βρίσκεται σε άμεση επικοινωνία με αυτή των μαρμάρων, όπως προκύπτει από τα παλιότερα γεωτρητικά δεδομένα. Η εκεί απόθεση των αδρομερών αυτών υλικών πρέπει να συνδέεται με τα πρώτα στάδια πλήρωσης της τεκτονικής τάφρου από τους περιβάλλοντες ορεινούς όγκους. Κατά τη φάση διάνοιξης της γεώτρησης SR79 (περί τα 2 km ΒΑ της εισόδου της σήραγγας) συναντήθηκαν οι αδρομερείς αυτές αποθέσεις και παρατηρήθηκε αρτεσιανισμός, που υποδηλώνει τη δυσκολία αποστράγγισης των προσχωματικών υδροφοριών στους διπλανούς ευρισκόμενους καρστικούς, η στάθμη στους οποίους ήταν πολύ χαμηλότερη όπως προκύπτει από παρατηρήσεις στην γεώτρηση 8K64 που διέτρησε το καρστ (10/73 SR79: +44,24, SR64: +14,64).

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των αλλούβιων της ευρύτερης περιοχής της Κάρλας είναι η ύπαρξη κατά θέσεις, αλατούχων αργίλων και λεπτόκοκκων άμμων, οι οποίοι επιβαρύνουν τα υπόγεια νερά με χλωριόντα. Η αυξημένη αυτή αλατότητα των υπογείων νερών δεν έχει σχέση με τη θάλασσα, αλλά οφείλεται στη διάλυση των αλατούχων εδαφών της παλιάς λίμνης.

Στο τμήμα αυτό της πεδιάδας δύο είναι οι κύριες ζώνες όπου εντοπίζεται σχετικό υδρογεωλογικό ενδιαφέρον : οι περιοχές Χάλκης και Αρμενίου -Στεφανοβίκειου - Ριζόμυλου. Στις περιοχές αυτές, οι οποίες βρίσκονται πλησιέστερα προς την κύρια πηγή τροφοδοσίας των πλέον αδρομερών αποθέσεων (κώννοι χειμάρρων - κορήματα), συναντώνται υδροφόρα στρώματα που αποτελούνται από άμμους και χαλίκια εντός των αργιλικών αποθέσεων. Στις ζώνες επίσης αυτές αναπτύσσεται και το μεγαλύτερο πάχος των συγχρόνων αποθέσεων που στη μεν Χάλκη ξεπερνά τα 550 m., στη δε ζώνη Αρμενίου - Στεφανοβίκειου Ριζόμυλου τα 280 m. Στη συνέχεια εξετάζεται η

υδροφορία Αρμενίου - Στεφανοβίκειου - Ριζόμυλου που βρίσκεται στην άμεση επιρροή των έργων επαναδημιουργίας της λίμνης Κάρλας.

1.5.3 Τροφοδοσία και πιεζομετρία

Η τροφοδοσία των βαθιών αυτών υπό πίεση υδροφορέων της ευρύτερης περιοχής Κάρλας είναι μικρή και πραγματοποιείται με δυσκολία από:

- την πλευρική τροφοδοσία των πλειοκαινικών λόφων και
- τους κώνους που σχηματίζουν οι μικροί χείμαρροι στα δυτικά και ανατολικά για το υπόλοιπο της πεδιάδας (Κουσμπασανιώτης, Ξεριάς, κλπ.).

Η τροφοδοσία από τη βροχή που πέφτει κατ' ευθείαν στο επιφανειακό ανάπτυγμα είναι πολύ μικρή εξ' αιτίας του μικρού συντελεστή κατείσδυσης στα λεπτόκοκκα επιφανειακά αλλούβια.

Η δυσκολία οφείλεται στη μείωση της διαπερατότητας, και συνεπώς της διαβιβαστικότητας των υλικών των κώνων και των πλευρικών κορημάτων προς το πεδινό τμήμα αλλά και στην αύξηση της ετερογένειας του υλικού με συνεχείς ουσιαστικές παρεμβολές αργιλικών στρωμάτων. Από τις μέχρι τώρα υδρογεωλογικές έρευνες στην περιοχή (SOGREAH, 1974), η υπόγεια υδροφορία του προσχωματικού πεδίου έχει μια γενική διεύθυνση ροής από τα ΝΔ προς τα ΒΑ - Α.

Πριν την μεγάλη ανάπτυξη των εκμεταλλεύσεων των υπογείων νερών, στο ύψος της γραμμής Αρμενίου - Σωτηρίου - Στεφανοβίκειου εμφανίζονταν πηγές μέσα στις προσχώσεις σε υψόμετρα από 55 έως 60 m. Οι πηγές αυτές ήταν αποτέλεσμα της δυσκολίας υπόγειας μετακίνησης τμήματος των υπογείων νερών, λόγω ανάπτυξης ανατολικότερα των πλέον λεπτομερών αργιλοίλυδων ιζημάτων της πεδιάδας.

Οι ανεπτυγμένοι καρστικοί σχηματισμοί που περιβάλλουν τα νοτιοανατολικά περιθώρια της πεδιάδας, δεν τροφοδοτούν τις υδροφορίες των αλλούβιων. Εδώ, ένα μέρος των νερών των σύγχρονων αποθέσεων μεταγγίζεται με υπερχειλίση (βραδέως) μέσα στην ακόρεστη ζώνη του καρστ, το οποίο κανονικά έχει εδώ χαμηλότερη πιεζομετρία και συνεπώς αποστραγγίζεται μαζί με τα καρστικά νερά προς τη θάλασσα.

Οι υπόγειες προσχωματικές υδροφορίες που αναπτύσσονται στην ευρύτερη πεδινή περιοχή της Κάρλας βρίσκονται κάτω από καθεστώς υπερεκμετάλλευσης.

Στην ευρύτερη περιοχή Αγ. Γεωργίου - Βελεστίνου - Ριζόμυλου και Στεφανοβίκειου έχει αναπτυχθεί μεγάλος αριθμός γεωτρήσεων που κατασκευάστηκαν κατά το παρελθόν. Η εικόνα της παρουσίας πλούσιας υπόγειας υδροφορίας στην περιοχή είναι όμως πλασματική. Όπως προκύπτει από την επεξεργασία όλων των πιεζομέτρων των προσχωματικών υδροφοριών, με εξαίρεση αυτών που είναι τοποθετημένα στα επιφανειακά στρώματα, υπάρχει συνεχής συστηματική και έντονη ταπείνωση της υπόγειας στάθμης χρόνο με το χρόνο. Η ταπείνωση αυτή οφείλεται στις μεγάλες ποσότητες αντλούμενων νερών έναντι της ελλιπούς τροφοδοσίας και επαναπλήρωσης των υδροφορέων στο σύνολό τους. Η

κατάσταση αυτή δεν επιτρέπει περαιτέρω αύξηση των εκμεταλλεύσεων, αλλά αντίθετα απαιτεί μεγάλη μείωση αυτών.

Η εκτίμηση αυτή βασίσθηκε στην επεξεργασία των υπάρχουσών περιοδικών και αξιόπιστων γενικά μετρήσεων της πιεζομετρικής στάθμης των υδροφορέων που πραγματοποιεί η Υ.Ε.Β. κάθε μήνα σε 40 γεωτρήσεις και πιεζόμετρα στο χώρο της ευρύτερης πεδινής περιοχής της Κάρλας (Πίνακας 1.1).

Εξαιτίας της έντονης πτώσης στάθμης που παρατηρείται στα πιεζόμετρα του προσχωματικού πεδίου, υπάρχει το ενδεχόμενο τοπικά η γενική αυτή κίνηση του υπόγειου νερού να αντιστραφεί και να προκύψει ροή κατά θέσεις του νερού του καρστ προς τις προσχώσεις. Η άποψη αυτή που διατυπώνεται τελευταία δεν είναι δυνατόν σήμερα να τεκμηριωθεί αξιόπιστα. Στο θέμα αυτό παραθέτουμε τις παρακάτω παρατηρήσεις (Μελέτη Επαναδημιουργίας Λίμνης Κάρλας – Υποστηρικτική Υδρογεωλογική Μελέτη, 1999):

Στην περιοχή των νοτίων καρστικών κρασπέδων της ευρύτερης πεδινής ζώνης της Κάρλας (περιοχή σήραγγας - Ριζόμυλου - Αγ. Γεωργίου) δεν υπάρχουν συνεχείς πιεζομετρικές παρατηρήσεις της διακύμανσης στάθμης των καρστικών υδροφοριών σε αντίθεση με τα βορειοανατολικά όρια της τέως λίμνης (περιοχή Καναλιών - Καλαμακίου). Στα νότια κράσπεδα, υπάρχουν μόνο στοιχεία κατά τη διάνοιξη των γεωτρήσεων κατά το παρελθόν, που έχουν διατρήσει τα εκεί αναπτυσσόμενα μάρμαρα.

Οι αρδευτικές γεωτρήσεις SR63 και SR64 (περιοχή σήραγγας), που κατασκευάστηκαν το 1973-74 και έχουν διατρήσει μάρμαρα, είχαν συναντήσει την υπόγεια υδροφορία σε απόλυτα υψόμετρα +17,07 m (3/74) και +14,64 m (10/73) αντίστοιχα. Αντίθετα, η γεώτρηση SR79 (2 km ΒΑ στομίου σήραγγας), που συνάντησε κάτω από τις αργιλοϊλυώδεις αποθέσεις της λίμνης και σε βάθος από 100 – 283 m κροκαλοπαγή, παρουσίαζε αρτεσιανισμό και απόλυτο υψόμετρο στάθμης +44,24 m. Το γεγονός αυτό, της τόσο μεγάλης υψομετρικής διαφοράς της υπόγειας στάθμης σε κοντινή θέση από τα καρστικοποιημένα μάρμαρα, υποδεικνύει ανεξαρτησία μεταξύ των υπογείων υδροφοριών των σύγχρονων αποθέσεων και των μαρμάρων. Η υψηλή αυτή στάθμη υποδηλώνει δυσκολία και παρεμπόδιση αποστράγγισης της υδροφορίας των σύγχρονων αποθέσεων στο καρστ.

A/A	Πιεζόμετρο	Δήμος ή Κοινότητα	Περίοδος αντλήσεων	Συνολική πτώση στάθμης (m) **
1.	E3	Βελεστίνο	4/72 – 8/90	19,12
2.	AG12	Γλαύκη	9/79 – 12/97	
3.	AG12α	Γλαύκη	9/79 – 12/97	0,31
4.	Π6Λ	Ελευθέριο	6/74 – 11/98	-0,42
5.	SR35	Ελευθέριο	11/72 – 11/98	0,27
6.	402	Καλαμάκι	5/72 – 7/94	5,4
7.	PZ64*	Καλαμάκι	2/80 – 4/98	6,55
8.	SR68*	Καλαμάκι	9/76 – 11/98	2,23
9.	LB202*	Καλαμάκι	8/79 – 11/98	3,95

10.	PZ65*	Καλαμάκι	11/80 – 11/98	8,32
11.	PZ45*	Καστρί	4/80 – 11/98	7,43
12.	SR32	Κυψέλη	12/72 – 11/98	75,13
13.	SR43	Κυψέλη	10/73 – 11/98	50,82
14.	PZ68	Μ. Μοναστήρι	2/80 – 4/94	18,07
15.	SR77	Μελισσοχώρι	6/74 – 11/98	22,26
16.	SR31	Μέλισσα	5/73 – 11/98	34,94
17.	PZ67	Μέλισσα	3/80 – 11/98	10,58
18.	AD11	Μοδεστός	12/72 – 11/98	37,43
19.	PZ50	Νάματα	3/80 – 11/98	0,93
20.	SR66	Νίκη	10/73 – 12/98	16,51
21.	AG14	Νίκη	12/11/98	21
22.	SR72	Ομορφοχώρι	1/74 – 11/98	27,63
23.	SR60	Ομορφοχώρι	5/84 – 10/97	20,73
24.	PZ7	Πλασιά	Σταθμηγράφος	7,29
25.	PZ7α	Πλασιά	3/84 – 11/98	2,97
26.	SR29	Πλατύκαμπος	12/72 – 11/98	34,7
27.	SR63α	Ριζόμυλος	10/73 – 11/98	21,68
28.	SR63b	Ριζόμυλος	10/73 – 11/98	18,65
29.	AG17	Ριζόμυλος	9/93 - 11/98	
30.	AG17α	Ριζόμυλος	12/72 – 8/96	49,69
31.	PZ15	Στεφανοβίκειο	1/74 – 11/98	44,78
32.	AD15α	Στεφανοβίκειο	12/72 – 4/94	
33.	LB310	Στεφανοβίκειο	8/80 – 12/97	31,13
34.	AD13	Στεφανοβίκειο	6/84 – 8/90	18,34
35.	AD13α	Στεφανοβίκειο	12/72 – 11/98	6,03
36.	AD15	Στεφανοβίκειο	6/84 – 4/90 και 12/97	4,79
37.	AD16	Χάλκη	12/92 – 11/98	18,38
38.	AD16α	Χάλκη	12/72 – 6/89	
39.	Π17Λ	Χάλκη	10/73 – 5/96	20,17
40.	SR30	Χάλκη	12/72 – 11/98	37,81

Πίνακας 1.1: Περιοδικές μετρήσεις στάθμης πιεζομέτρων ευρύτερης περιοχής Κάρλας (Μελέτη Επαναδημιουργίας Λίμνης Κάρλας, 1999).

* Πιεζόμετρα που αναφέρονται σε καρστικούς σχηματισμούς.

** Η πτώση στάθμης αναφέρεται στο μήνα Νοέμβριο της αρχικής μέτρησης μέχρι το Νοέμβριο της τελικής. Λαμβάνεται ο Νοέμβριος όπου η υπόγεια πιεζομετρία δεν βρίσκεται υπό την επίρεια των αντλήσεων και δεν έχει αρχίσει ακόμα η τροφοδοσία των υδροφοριών. APT(-), APT(+). Στη γεώτρηση υπήρχε αρτεσιανισμός που δεν παρατηρείται σήμερα APT(-) ή συνεχίζεται περιοδικά APT(+).

Ακόμα και στην περίπτωση που σήμερα αυτή η σχέση έχει διαταραχθεί σε θέσεις κοντά στην επαφή των ανεξάρτητων υδροφοριών, η αντιστροφή της κατεύθυνσης της ροής του υπογείου νερού, από τα μάρμαρα προς τις σύγχρονες αποθέσεις, είναι πολύ δύσκολη και θα έχει μόνο τοπικό χαρακτήρα εξαιτίας της πολύ μεγάλης διαφοράς στη διαπερατότητα των δύο μέσων.

Εξετάζοντας τις απόλυτες τιμές στάθμης των πιεζομέτρων των υδροφοριών των σύγχρονων αποθέσεων, παρατηρούμε ότι κατά την τελευταία κυρίως δεκαετία αυτές είναι χαμηλότερες κατά την περίοδο των αντλήσεων του +10 m, στη δε περίπτωση του πιεζόμετρου PZ15 η υπόγεια στάθμη λαμβάνει και αρνητικές τιμές. Στη συνέχεια οι τιμές αυτές επανέρχονται περίπου στο +15. Αν δεχθούμε ότι η στάθμη στο καρστ του νότιου κρασπέδου είναι περίπου στο +15 με βάση παλιότερες παρατηρήσεις, προκύπτει ότι υπάρχουν χρονικές περιόδους που η καρστική υδροφορία βρίσκεται ψηλότερα αυτής των σύγχρονων αποθέσεων. Στην περίπτωση όμως αυτή, η ροή νερού από το καρστ προς το εσωτερικό της πεδιάδας θα επηρεάσει μια πολύ μικρή ζώνη των αποθέσεων, λόγω της δυσκολίας πραγματοποίησης της εξαιτίας της μεγάλης διαφοράς διαπερατότητας μεταξύ των δύο διακριτών υδροφορέων.

Η μεγάλη τέλος πτώση στάθμης δεν παρατηρείται κυρίως στα περιθώρια της λεκάνης των σύγχρονων αποθέσεων, αλλά στα δυτικά όρια αυτής, όπου και τοποθετούνται οι κύριες ζώνες εντατικής εκμετάλλευσης.

1.5.4 Εκμετάλλευση και απόδοση των υδροφορέων

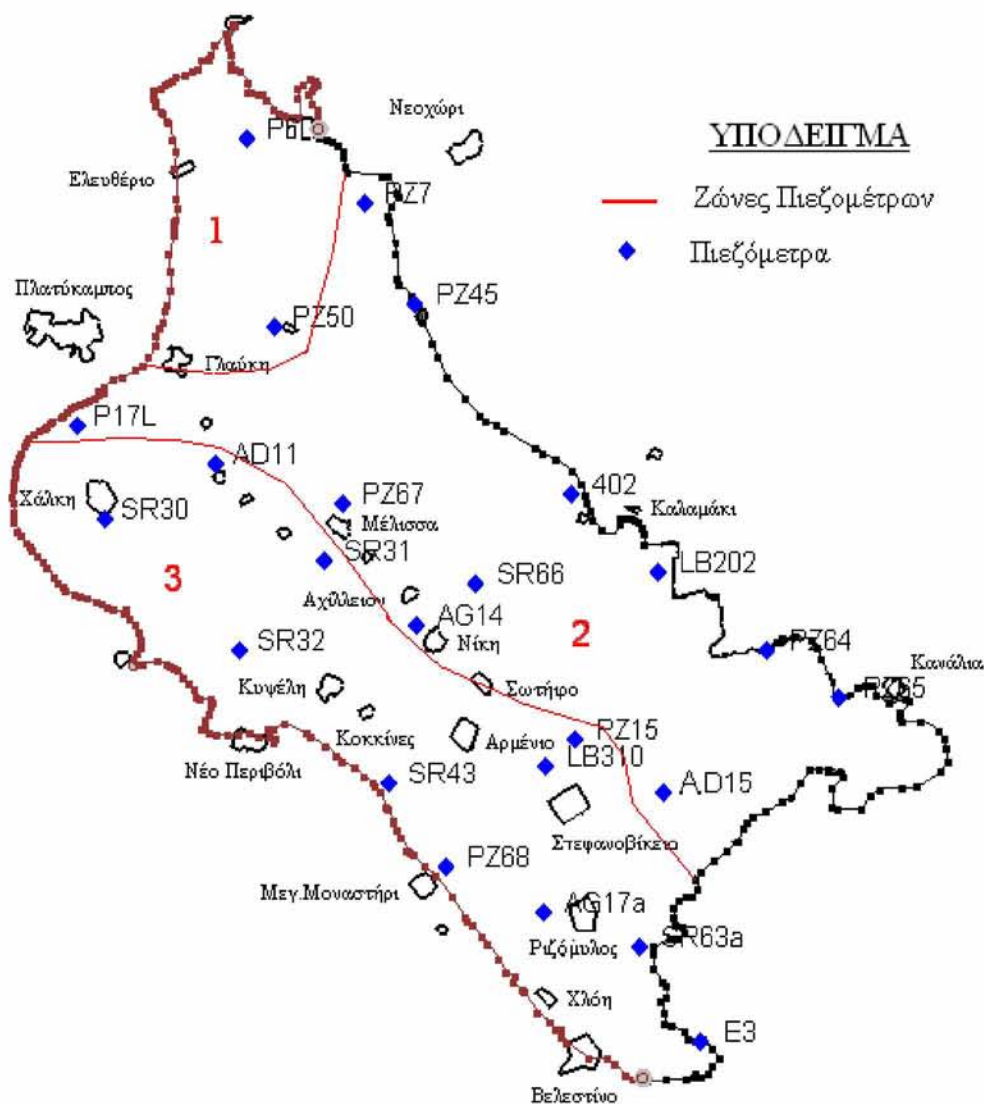
Από την επεξεργασία των μακροχρόνιων πιεζομετρικών παρατηρήσεων, (25 χρόνια περίπου) που πραγματοποίησε το ΥΠΕΧΩΔΕ (Μελέτη Επαναδημιουργίας Λίμνης Κάρλας – Υποστηρικτική Υδρογεωλογική Μελέτη, 1999) προκύπτει, ότι ο υπόγειος υδροφορέας του ευρύτερου πεδινού τμήματος βρίσκονται υπό καθεστώς εντατικής υπέρ - εκμετάλλευσης.

Διακρίνονται τρεις κύριες ομάδες πιεζομέτρων, ως προς τη μορφή ταπείνωσης της υπόγειας στάθμης:

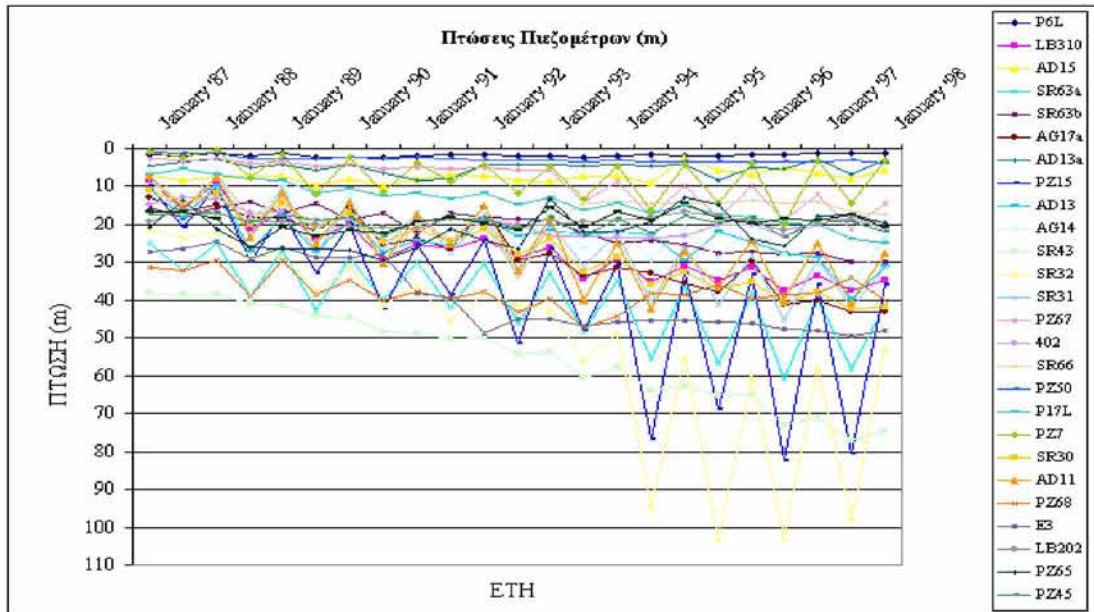
- Στην **πρώτη ομάδα πιεζομέτρων** η ταπείνωση είναι μικρή έως σχεδόν μηδενική, με τάσεις σταθεροποίησης. Σε αυτή ανήκουν τα πιεζόμετρα AD13A, AD15, PZ7α, AG12α, PZ50, PZ7, AD9α, Π6Λ, SR35, PZ67. Στις περιοχές τοποθέτησης των παραπάνω πιεζομέτρων (Βόρειο τμήμα Κάρλας) δεν υπάρχουν προοπτικές αύξησης των αντλήσεων γιατί δεν αναπτύσσονται αξιόλογες υδροφορίες.
- Στη **δεύτερη ομάδα πιεζομέτρων** η ταπείνωση είναι μεγάλη, όχι τόσο έντονη και κατά θέσεις παρατηρούνται τάσεις σταθεροποίησης της υπόγειας στάθμης, στα χαμηλά της σημερινά επίπεδα. Στην ομάδα αυτή ανήκουν τα πιεζόμετρα SR66, AG14, SR63β, Π17Λ, AD9, LB230 69Λ, Π16Λ, SR72, LB232, SR60, SR77. Τα πιεζόμετρα αυτά τοποθετούνται στο βορειοδυτικό τμήμα της Κάρλας (περιοχή Μέλισσα - Λάρισα στην κεντρική και δυτική ζώνη) κυρίως στο ανατολικό όριο ανάπτυξης των αξιόλογων υδροφοριών της περιοχής. Στις περιοχές αυτές οι υπόγειες υδροφορίες βρίσκονται υπό καθεστώς υπερεκμετάλλευσης. Στην ευρύτερη αυτή περιοχή όπου και τοποθετούνται τα πιεζόμετρα της κατηγορίας αναμένεται να αντικατασταθούν τα υπόγεια νερά των αρδεύσεων, από τα επιφανειακά νερά του Πηνειού της εκτροπής του Αχελώου.

- Στην **τρίτη ομάδα πιεζομέτρων** η ταπείνωση είναι μεγάλη και έντονη, χωρίς τάσεις σταθεροποίησης. Στην ομάδα αυτή ανήκουν τα πιεζόμετρα SR32, SR43, LB310, PZ15, AG17a, SR63A, SR30, AD16, PZ68, E3 AD11, SR29. Τα πιεζόμετρα αυτά τοποθετούνται στο δυτικό τμήμα της πεδινής έκτασης, όπου και αναπτύσσονται και οι κύριες αξιόλογες υδροφορίες της Χάλκης και της περιοχής Αρμενίου –Στεφανοβίκειου – Ριζόμυλου – Βελεστίνου – Αγ. Γεωργίου.

Στην Εικόνα 1.8 απεικονίζονται η θέση της κάθε ομάδας πιεζομέτρων και στην Εικόνα 1.9 οι πτώσεις στάθμης των πιεζομέτρων από το 1972 ως το 1998.



Εικόνα 1.8: Θέσεις της κάθε ομάδας πιεζομέτρων Α (ΥδροΜέντωρ, 2012).



Εικόνα 1.9: Διαγράμμα της πτώσης στάθμης των πιεζομέτρων από το 1972 ως το 1998 (ΥδροΜέντωρ, 2012).

1.5.5 Χρήσεις γης και αρδευτική και υδρευτική εκμετάλλευση του υπόγειου υδροφόρου

Στη λεκάνη της Κάρλας το σύνολο των καλλιεργούμενων εκτάσεων ανέρχεται στα 863236 στρέμματα, οι οποίες αρδεύονται σήμερα από επιφανειακά και υπόγεια νερά.



Εικόνα 1.10: Χρήσεις γης λεκάνης Κάρλας (ΥδροΜέντωρ, 2012).

Οι εκτάσεις και τα ποσοστά καλλιεργειών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.2, που ακολουθεί παρακάτω και παρουσιάζονται γραφικά στην Εικόνα 1.11 (ΥδροΜέντωρ, 2012).

Καλλιέργεια	Στρέμματα	Ποσοστό %
Βαμβάκι	162279.606	58.89
Ζαχαρότευτλα	4364.53	1.58
Ντομάτες προς μεταποίηση	9627.733	3.49
Αραβόσιτος ποτιστικός	10693.588	3.88
Ελαιώνες πιστοποιημένης ελαιοκαλλιέργειας	22518.264	8.17
Λοιπά σιτηρά	32768.439	11.89
Οσπριοειδή	528.961	0.19
Ροδάκινα και αχλάδια προς μεταποίηση	370.80	0.13
Αραβόσιτος ενσίρωσης	139.742	0.05
Λοιποί αμπελώνες για παραγωγή οίνου	578.139	0.21
Λοιποί αμπελώνες για επιτραπέζια χρήση	282.21	0.10
Κηπευτικά μακράς διάρκειας	3591.1	1.30
Λοιπές καλλιέργειες - Δενδρώσεις	27830.95	10.10

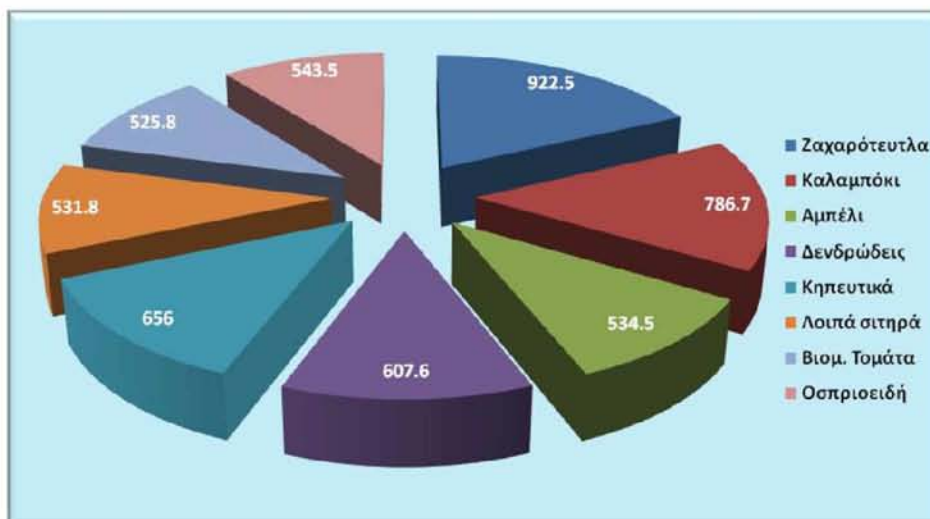
Πίνακας 1.2: Οι εκτάσεις και τα αντίστοιχα ποσοστά των καλλιεργειών (ΥδροΜέντωρ, 2012).



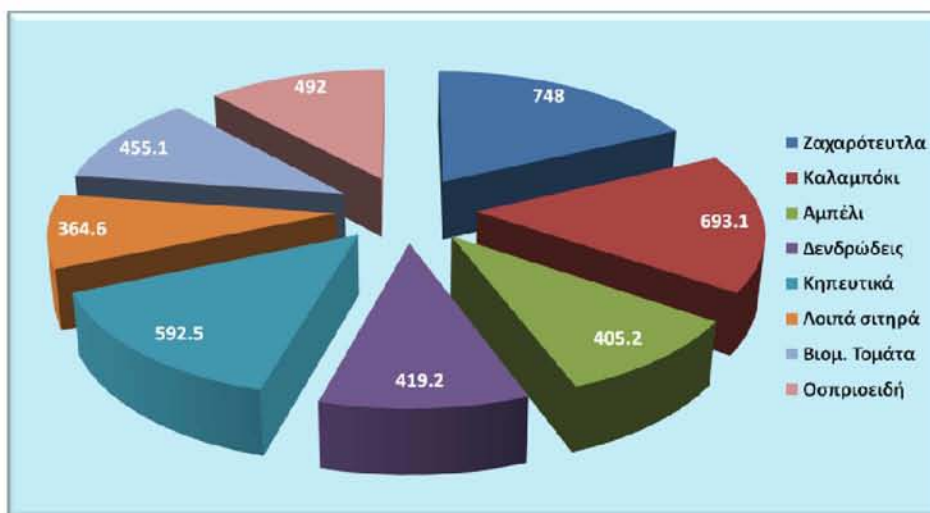
Εικόνα 1.11: Κατανομή καλλιεργειών στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κάρλας (ΥδροΜέντωρ, 2012).

Η γνώση των καλλιεργειών ανά περιοχή δύναται να συμβάλει: i) στον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής των καλλιεργειών (άρα και δυνητικά στο θεωρητικό υπολογισμό των μέγιστων αναγκών σε νερό), ii) να συνδυαστεί με τη γνώση του παρεχόμενου υδατικού δυναμικού της περιοχής και ii) στον υπολογισμό του κόστους, τη διάρκεια χρήσης.

Στην ετήσια έκθεση προόδου 2012 της ΥδροΜέντωρ, για την εκτίμηση των αναγκών σε νερό των καλλιεργειών της λεκάνης απορροής της Κάρλας χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα: i) Εκτάσεις καλλιεργειών με βάση δεδομένα των γεωργικών συνεταιρισμών, ii) κλιματικά δεδομένα για υπολογισμό εξατμισοδιαπνοής και ενεργού βροχόπτωσης από τον μετεωρολογικό σταθμό του Αγροκτήματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο Βελεστίνο, iii) το λογισμικό CropWat του FAO, έκδοση 8.0 για τον υπολογισμό των αναγκών σε νερό (μέθοδοι υπολογισμού: εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας: Penman-Monteith, ενεργός βροχόπτωση: USDA) και iv) φυτικοί συντελεστές Kc, και καλλιεργητικές περιόδους από το FAO, paper 56 (Allen κ.α., 1998) αλλά όπου υπήρχαν διαθέσιμα στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν συντελεστές που αφορούν τις Ελληνικές συνθήκες (Παπαζαφειρίου, 1999).



Εικόνα 1.12: Δυνητική (μέγιστη) εξατμισοδιαπνοή των καλλιεργειών σε mm/έτος (ΥδροΜέντωρ, 2012).



Εικόνα 1.13: Καθαρές ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών σε mm/έτος (ΥδροΜέντωρ, 2012).

Εάν ληφθεί υπόψη η έκταση κάθε καλλιέργειας, οι μέγιστες συνολικές ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών της λεκάνης της Κάρλας εκτιμώνται σε 165.943.916,24 m³/έτος (για το έτος 2008). Πρέπει να σημειωθεί πως οι ανάγκες σε νερό εξαρτώνται από τις κλιματικές συνθήκες επομένως αυτές που εκτιμήθηκαν έχουν αναφορά σε ένα συγκεκριμένο έτος και όχι σε κλιματικά δεδομένα (μέσους όρους σειράς ετών). Στην εκτίμηση αυτή δεν περιλαμβάνεται η αποτελεσματικότητα εφαρμογής του νερού (εξαρτάται από τον τύπο του συστήματος άρδευσης). Οι εκτιμήσεις θα αναθεωρηθούν με βάση τις νέες χρήσεις γης αλλά και τα μετεωρολογικά δεδομένα του τηλεμετρικού δικτύου.

1.6 Αποξήρανση και επανασύσταση της λίμνης Κάρλας

1.6.1 Αποξήρανση της λίμνης Κάρλας

Ο αρχικός σχεδιασμός δεν προέβλεπε την ολική αποξήρανση της λίμνης αλλά τη διατήρηση ενός ταμιευτήρα 64.700 στρεμμάτων. Οι βασικοί λόγοι ήταν η ανάγκη για αντιπλημμυρική προστασία, η απόκτηση περισσότερων γεωργικών εκτάσεων και η αντιμετώπιση προβλημάτων υγείας όπως ελονοσία που προερχόταν από το πλήθος των κουνουπιών της λίμνης. Η αποξήρανση ξεκίνησε το 1962 και ολοκληρώθηκε το 1964.

Η αποξήρανση της Κάρλας οδήγησε στην αύξηση του εισοδήματος από την παραγωγή στην πεδιάδα της Κάρλας, όχι μόνο λόγω της αύξησης στις καλλιεργούμενες περιοχές και της μείωσης στη ζημία πλημμυρών αλλά και λόγω της υψηλότερης ενδυνάμωσης των αγροοικοσυστημάτων. Η αύξηση αυτή όμως δεν κράτησε για αρκετό χρονικό διάστημα. Η άρδευση επεκτάθηκε σχεδόν σε όλες τις καλλιεργούμενες εκτάσεις. Το νερό άρδευσης προήλθε από τις βαθιές γεωτρήσεις. Όλοι οι ψαράδες έχασαν τις εργασίες τους. Τα λιγιστά ψάρια που παραμένουν θεωρούνται ακατάλληλα για την ανθρώπινη κατανάλωση λόγω της ρύπανσης των νερών. Οι σταθερές πτώσεις της στάθμης των υπόγειων νερών, είχαν ως αποτέλεσμα το υψηλής ποιότητας νερό άρδευσης που προέρχονταν από τις γεωτρήσεις να

συμπληρώνεται από χαμηλής ποιότητας νερό που προέρχονταν από υδραντλίες που το απορροφούσαν από το μικρό υγρότοπο και από τις διάφορες τάφρους κατά την περίοδο του καλοκαιριού. Η άντληση ήταν ανεξέλεγκτη. Τα αγροοικοσυστήματα έχασαν την ποικιλία καλλιεργειών. Τα προβλήματα αλατότητας των εδαφών θέτουν δυσκολίες λόγω της έλλειψης νερού. Η ζημία λόγω παγετού στις καλλιέργειες αυξάνεται και οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις στη Λάρισα διοχετεύουν μεγάλους όγκους των μη επεξεργασμένων αποβλήτων στις αποχετευτικές τάφρους (Zalidis and Gerakis 1999).

Μεγάλο μέρος των προβλημάτων που υφίστανται σήμερα στην περιοχή προήλθαν από την απώλεια των πολύτιμων λειτουργιών του υγροτόπου όπως είναι:

- η απομάκρυνση και η μετατροπή των θρεπτικών στοιχείων
- η παγίδευση των πλημμυρικών νερών
- ο εμπλουτισμός των υπόγειων υδροφορέων
- η αποθήκευση του νερού στην επιφάνεια της λίμνης και υπογείως για άρδευση
- η κατακράτηση των ιζημάτων και των τοξικών ουσιών
- η αποθήκευση και ελευθέρωση της θερμότητας
- η δέσμευση της ηλιακής ακτινοβολίας
- η στήριξη των τροφικών αλυσίδων (Gerakis. 1992, Zalidis et al. 1995, Μουστάκα 2002).

Οι αλλαγές των λειτουργιών του υγροτόπου οδήγησαν:

- στην πτώση της στάθμης των υπόγειων νερών
- στην εισβολή θαλασσινού νερού στα στρώματα του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα
- στην έλλειψη νερού άρδευσης
- στις συχνές πλημμύρες των πεδινών εκτάσεων
- στα προβλήματα αλατότητας και αλκαλικότητας των εδαφών
- στη ρύπανση των τάφρων και των υδάτινων πόρων από τα βιομηχανικά απόβλητα αποχέτευσης και από τα αγροχημικά
- στην διοχετευτικότητα του μολυσμένου νερού στο Κόλπο του Παγασητικού
- στην απώλεια των βιοτόπων του υγροτόπου
- στη μείωση της βιοποικιλότητας (Zalidis et al. 2005).

Λόγω της σωρευτικής επίδρασης των παραπάνω παραγόντων (υποβάθμιση της ποιότητας των εδαφών, υποβιβασμός της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα, ανεξέλεγκτες πλημμύρες κλπ) οι δείκτες κοινωνικής ευημερείας της περιοχής βρίσκονταν σε διαρκή πτωτική πορεία, η οποία οδηγεί σε τάσεις εγκατάλειψης της περιοχής (ΤΕΧΝΙΚΟ ΔΕΛΤΙΟ ΜΕΤΡΟΥ 8.2 - Μελέτη Επαναδημιουργίας λίμνης Κάρλας 2000).

1.6.2 Έργα που κατασκευάστηκαν κατά την αποξήρανση

Στα εγγειοβελτιωτικά έργα που κατασκευάστηκαν κατά τη φάση της αποξήρανσης περιλαμβάνονται έργα άρδευσης, αποστράγγισης και αντιπλημμυρικής προστασίας.

1.6.2.1 Άρδευτικά έργα

Τα αρδευτικά έργα που περιλαμβάνουν δίκτυα άρδευσης, αποχέτευσης-στράγγισης και αγροτικής οδοποιίας στην ευρύτερη περιοχή μελέτης δεν μπορούν να θεωρηθούν σημαντικά. Είναι απλά έργα που αποτελούν ατομικές ή ομαδικές προσπάθειες για άρδευση περιορισμένων εκτάσεων με τη χρησιμοποίηση νερού ιδιωτικών γεωτρήσεων ή γεωτρήσεων του Π.Α.Υ.Υ.Θ. (Περιβαλλοντική Αναπτυξιακή Υπηρεσία Υδάτων Θεσσαλίας) ή του νερού των αποχετευτικών και αποστραγγιστικών τάφρων. Επίσης χρησιμοποιείται το νερό ορισμένων υδατοδεξαμενών. Οι υδατοδεξαμενές αυτές είναι οι εξής:

- Ελευθερίου και Δήμητρας με ωφέλιμη χωρητικότητα $0,7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ η κάθε μία και καλύπτουν έκταση $0,3 \text{ km}^2$.
- Πλατυκάμπου με ωφέλιμη χωρητικότητα $0,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ και καλυπτόμενη έκταση $0,25 \text{ km}^2$.
- Ναμάτων με ωφέλιμη χωρητικότητα $1,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ και καλυπτόμενη έκταση $0,57 \text{ km}^2$.
- Στεφανοβικείου με ωφέλιμη χωρητικότητα $10 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ και καλυπτόμενη έκταση 4 km^2 .
- Καλαμακίου με ωφέλιμη χωρητικότητα $6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ και καλυπτόμενη έκταση 2 km^2 .

1.6.2.2 Έργα αποστράγγισης και αντιπλημμυρικής προστασίας

Τα σημαντικότερα αποστραγγιστικά και αντιπλημμυρικά έργα που κατασκευάστηκαν είναι τα αναχώματα του Πηνειού από τη Λάρισα μέχρι τη Γυρτώνη, οι συλλεκτήρες Σ1 και Σ5, οι τάφροι 1Τ, 2Τ, 3Τ, 4Τ, 5Τ, 6Τ, 7Τ και η Σήραγγα Κάρλας.

- Αναχώματα

Τα αναχώματα κατασκευάστηκαν από την εταιρία BOOT για να εγκιβωτίσουν τον Πηνειό και να προστατέψουν την πεδιάδα Λάρισας – Κάρλας από τα νερά του που ξεχειλίζουν και κατέκλυζαν μεγάλες εκτάσεις. Η διαμόρφωση των αναχωμάτων αυτών στο τμήμα του ποταμού από τη Λάρισα μέχρι τη Γυρτώνη έχει γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε η δημιουργούμενη κοίτη να έχει παροχετευτική ικανότητα $2000 \text{ m}^3/\text{sec}$. Τα αναχώματα αυτά λειτουργούν ικανοποιητικά μέχρι σήμερα και προστατεύουν την περιοχή από τις πλημμύρες του Πηνειού.



Εικόνα 1.14: Ανατολικό ανάχωμα (Παπανίκος, 2007.)

- Τάφρος 1Τ

Η τάφρος 1Τ είναι η κύρια τάφρος της Κάρλας η οποία συλλέγει τα νερά των χαμηλών εκτάσεων της πεδιάδας και τα κατευθύνει στη σήραγγα Κάρλας. Στο αρχικό τμήμα της τάφρου συμβάλλουν οι τάφροι 8Τ και 9Τ. Η τάφρος αυτή κατασκευάστηκε μεταγενέστερα από την τάφρο 2Τ και οι διαστάσεις της κοίτης αποδείχθηκαν επαρκείς για την εκπλήρωση των σκοπών της.



Εικόνα 1.15: Τάφρος 1Τ (Παπανίκος, 2007).

- Τάφρος 2Τ

Η τάφρος 2Τ συλλέγει τα νερά των Ν-Δ μεσαίων εκτάσεων της πεδιάδας και τα οδηγεί στη σήραγγα Κάρλας. Σε αυτήν καταλήγουν οι τάφροι 3Τ-7Τ που συλλέγουν τα νερά διαφόρων τμημάτων όλης της έκτασης. Αργότερα οι διατομές των τάφρων διευρύνθηκαν, με αποτέλεσμα να έχουν σήμερα επαρκή αποχετευτική ικανότητα.



Εικόνα 1.16: Τάφρος 2T (Παπανίκος, 2007).

▪ Σήραγγα Κάρλας

Η Σήραγγα Κάρλας αποτελεί τη μόνη διέξοδο για τα νερά της πεδιάδας Λάρισας – Κάρλας τα οποία οδηγούνται στον Παγασητικό Κόλπο. Τα κύρια χαρακτηριστικά της είναι:

- Μήκος : 10120 m.
- Επιφάνεια πεταλοειδούς διατομής : $4,35 \text{ m}^2$.
- Υψόμετρο εισόδου : 48,25 m.
- Κλίση : 0,15%
- Παροχευτική ικανότητα : 8,5 m/sec.

Η παροχευτική ικανότητα της Σήραγγας Κάρλας είναι τελείως ανεπαρκής για την απομάκρυνση όλων των υδάτων της λεκάνης απορροής της περιοχής Κάρλας που δεν μπορούν να κατευθυνθούν προς τον Πηνειό ποταμό και συγκεντρώνονται στις δύο κύριες τάφρους 1T και 2T. Η κατασκευή της σήραγγας έγινε από Έλληνες τεχνικούς με ακρίβεια. Η διάνοιξή της έγινε από δύο μέτωπα, που κινήθηκαν Β.ΒΔ το ένα και Ν.ΝΑ το άλλο. Οι δύο άξονες συνέπεσαν με αξιοθαύμαστη ακρίβεια, 0,015 m οριζοντιογραφικά και 0,002 m υψομετρικά.





Εικόνα 1.17: Είσοδος και έξοδος της Σήραγγας Κάρλας (Παπανίκος, 2007).

- Συλλεκτήρας Σ1

Ο συλλεκτήρας Σ1 συλλέγει τα νερά των περισσότερων ρευμάτων της Ν.Δ. λεκάνης και τα κατευθύνει τον Πηνειό, στις βόρειες παρυφές της Λάρισας. Το συνολικό μήκος του συλλεκτήρα αυτού είναι 37 km. Στο συλλεκτήρα Σ1 συμβάλλουν ο συλλεκτήρας Is της ΒΟΟΤ και ο χειμάρρος Νέας Λεύκης, ο οποίος λίγο πριν τη συμβολή του στον Σ1 δέχεται τα νερά του χειμάρρου Νέας Καρυάς. Ο συλλεκτήρας αυτός διευρύνθηκε από τη Χ.Θ. 0+200 έως τη Χ.Θ. 11+925 με ενιαία κατά μήκος κλίση πυθμένα $J=0,6\%$ και πλάτος πυθμένα κυμαινόμενο από $b=30\text{ m}$ $b=35\text{ m}$. Αλλά και η διευρυμένη διατομή του συλλεκτήρα δε φαίνεται να εξασφαλίζει την πλήρη προστασία της περιοχής, κυρίως στο τελευταίο τμήμα του αμέσως ανάντη της συμβολής του με τον ποταμό Πηνειό (Παπανίκος, 2007).

1.6.3 Επανάσσταση της λίμνης Κάρλας

Η αποξήρανση της λίμνης το 1962 έφερε μια πληθώρα δυσμενών αποτελεσμάτων και καταστάσεων για το βιοτικό και αβιοτικό περιβάλλον της περιοχής της λίμνης και γύρω από αυτή με αποτέλεσμα τα δυσμενή αυτά αποτελέσματα να οδηγούν στην ανάγκη για επανάσσταση της Κάρλας.

Η επαναδημιουργία της λίμνης Κάρλας και η εν μέρει τουλάχιστον αποκατάσταση των υδροτοπικών λειτουργιών της και της περιβαλλοντικής αξίας της λίμνης, συζητείται και σχεδιάζεται εδώ και είκοσι τουλάχιστον χρόνια. Σε όλη αυτή την περίοδο, οι στόχοι της επαναδημιουργίας τα τεχνικά χαρακτηριστικά και ο τρόπος λειτουργίας του ταμιευτήρα καθώς και η προτεινόμενη διαχείριση της ευρύτερης περιοχής, δεν ήταν πάντοτε ταυτόσημοι.

Τα τελευταία χρόνια η αυξανόμενη περιβαλλοντική ευαισθησία των πολιτών, η συρρίκνωση του εισοδήματος των κατοίκων της παρακάρλιας περιοχής αφού η αποξήρανση της λίμνης δεν απέδωσε υψηλής γεωργικής αξίας (παθογένεια εδαφών, υψηλά κόστη αντλήσεων κλπ) εκτάσεις στην περιοχή, η απαξίωση της περιοχής από πλευράς αισθητικής και περιβαλλοντικής καθώς και η διαφοροποίηση του προτύπου διαβίωσης των ανθρώπων (εξαφάνιση των ψαράδων, αρνητική δημογραφική εξέλιξη κλπ), οδήγησαν σε σύμπτωση πλέον των απόψεων όλων των εμπλεκόμενων φορέων για την επαναδημιουργία μέρους τουλάχιστον της λίμνης.

Στα πλαίσια αυτά, το ΥΠΕΧΩΔΕ εκπόνησε προμελέτη, μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων και οριστική μελέτη του έργου, μελέτη διαμόρφωσης της λίμνης, προμελέτες έργων περιβαλλοντικής αποκατάστασης και τελικά κατέληξε σε ένα προς υλοποίηση σχήμα.

Με βάση το σχήμα που προτάθηκε και μελετήθηκε, σκοπός των έργων επαναδημιουργίας της λίμνης Κάρλας είναι η αποκατάσταση της οικολογικής ισορροπίας της περιοχής της τέως λίμνης Κάρλας. Δευτερεύοντες στόχους του έργου αποτελούν, η αντιπλημμυρική προστασία της ευρύτερης περιοχής και η αποκατάσταση των, υποβαθμισμένων σήμερα, συνθηκών του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα των παρά την Κάρλα περιοχών με ταυτόχρονη εξασφάλιση επαρκών ποσοτήτων νερού από γεωτρήσεις για την ύδρευση του Βόλου. Ειδικότερα το έργο στοχεύει:

- Στη δημιουργία μιας μεγάλης υγροτοπικής έκτασης (λίμνης περιβαλλόμενης από ζώνες ειδικής διαχείρισης), κατάλληλης να υποστηρίξει τον φυσικό (μόνιμο ή εποχικό) εποικισμό της περιοχής με υγροφυτική βλάστηση, ιχθυοπανίδα και παρυδάτια ορνιθοπανίδα, ώστε να αποκατασταθεί μερικά τουλάχιστον το προϋπάρχον της αποξήρανσης οικοσύστημα (υγροβιότοπος) και να ελαχιστοποιηθεί η συμβολή των απορροών της λεκάνης Κάρλας στη ρύπανση του Παγασητικού κόλπου.
- Στη δημιουργία προϋποθέσεων και κανόνων για την ορθή διαχείριση του αναμενόμενου οικοσυστήματος που θα δημιουργηθεί και των διαθέσιμων υδατικών πόρων.
- Στην υποκατάσταση του υπόγειου νερού των αρδεύσεων με νερό της λίμνης, προκειμένου να δημιουργηθούν προϋποθέσεις ανάκαμψης της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, να βελτιωθεί η ποιότητα των εδαφικών πόρων και να ανασταλούν τα φαινόμενα απερίμωσης των πεδινών περιοχών.
- Στην ανάσχεση των πλημμυρικών απορροών στις πέριξ της λίμνης ορεινές περιοχές για την επιβράδυνση των διαβρωτικών διεργασιών.
- Στην ενίσχυση της ύδρευσης της μείζονος περιοχής Βόλου με καλής ποιότητας υπόγειο νερό.
- Στη δημιουργία υποδομών και ευνοϊκών συνθηκών για την πραγματοποίηση νέων, συμβατών με τη βιώσιμη ανάπτυξη, δραστηριοτήτων και απασχόλησης (Γ.Γ.Δ.Ε./ Γ.Δ.Υ.Ε. 2009).

Το έργο επαναδημιουργίας της λίμνης Κάρλας αφορά στη δημιουργία μιας μεγάλης υγροτοπικής έκτασης (λίμνης περιβαλλόμενης από ζώνες ειδικής διαχείρισης) και περιλαμβάνει συνοπτικά :

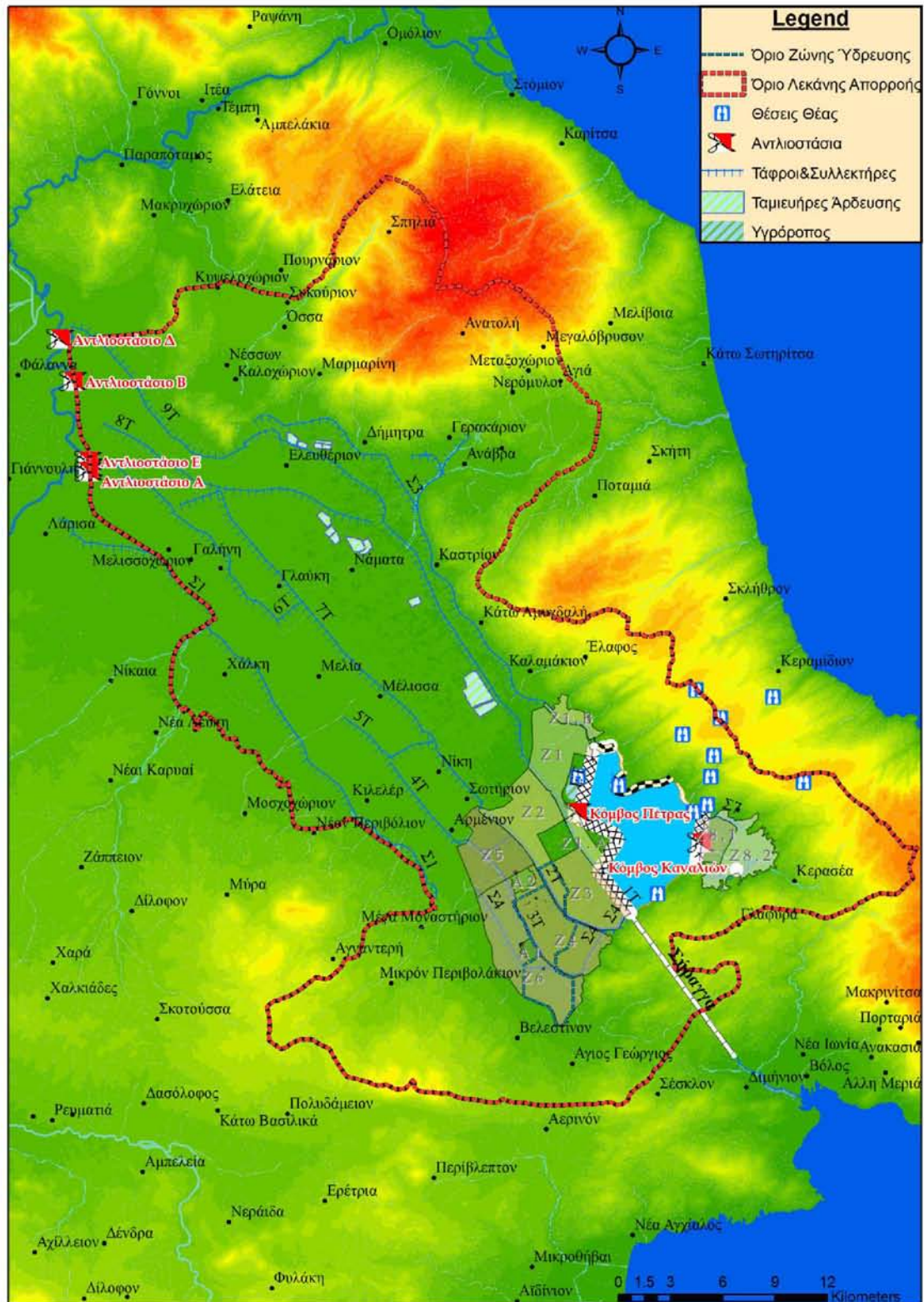
- Τη δημιουργία τεχνητής λίμνης, μέσου βάθους 4,5 m, έκτασης 3800 ha, στο χαμηλότερο τμήμα της άλλοτε λίμνης Κάρλας, τροφοδοτούμενης από τις απορροές των πέριξ λεκανών και από τα χειμερινά νερά του Πηνειού.

- Κατασκευή συλλεκτήρων με τους οποίους επιτυγχάνεται η τροφοδοσία της λίμνης με νερά των πέριξ ορεινών λεκανών και η αντιπλημμυρική προστασία των πεδινών περιοχών.
- Αντλιοστάσια για την άντληση των ομβρίων νερών των χαμηλών περιοχών γύρω από την λίμνη με στόχο την περαιτέρω τροφοδοσία της λίμνης και την αντιπλημμυρική προστασία των περιοχών αυτών.
- Έργα υδροδότησης της λίμνης από τα χειμερινά νερά του Πηνειού, με αντλιοστάσιο για την ανύψωση των νερών πάνω από τα αναχώματα αντιπλημμυρικής προστασίας του ποταμού.
- Έργα βελτιστοποίησης των λειτουργιών της λίμνης ως υγροβιότοπου (3 νησίδες, αβαθή υγρότοπο καθαρισμού νερών αποστράγγισης, έκτασης περίπου 45 ha, υγρότοπο στήριξης της φυσικής αναπαραγωγής ψαριών και αναπαράστασης του παραδοσιακού τρόπου διαβίωσης και αλιείας, παρόχθια φυτικά οικοσυστήματα), όπως καθορίζονται στους εγκεκριμένους Περιβαλλοντικούς Όρους του έργου.
- Έργα υποδομών οικότουριστικής ανάπτυξης με σκοπό την προσέλκυση επισκεπτών για περιβαλλοντική εκπαίδευση και ήπιες τουριστικές δραστηριότητες καθώς και την προβολή ενός προτύπου έργου πολλαπλού χαρακτήρα με ισχυρή περιβαλλοντική διάσταση, όπως καθορίζονται στους εγκεκριμένους Περιβαλλοντικούς Όρους του έργου.
- Έργα ορεινής υδρονομίας για την ανάσχεση των επιφανειακών διαβρώσεων των ορεινών πέριξ της λίμνης λεκανών με στόχο τον περιορισμό της μεταφοράς φερτών υλικών που καταλήγουν στο σύστημα συλλεκτήρες-λίμνη, όπως καθορίζονται στους εγκεκριμένους Περιβαλλοντικούς Όρους του έργου.
- Δημιουργία φυτικών οικοσυστημάτων στην εξωτερική πλευρά του δυτικού αναχώματος και στο περιμετρικό όριο των ανατολικών και νότιων ακτών της λίμνης σε σημεία που προσφέρονται για την ανάπτυξη της βλάστησης με στόχο την ολοκλήρωση της διαμόρφωσης του υγροτόπου.
- Έργα μεταφοράς νερού από τη λίμνη στις γειτνιάζουσες πεδινές περιοχές με σκοπό αφ' ενός την αξιοποίηση του για άρδευση υποκαθιστώντας τις αντλήσεις από τον υπόγειο υδροφόρα, αφ' ετέρου την ανανέωση των υδάτων της λίμνης.
- Άρδευτικά δίκτυα στις γύρω από τον λίμνη περιοχές συνολικής έκτασης περίπου 9.250 ha, που σήμερα αρδεύονται ως επί το πλείστον με υπόγεια νερά
- Έργα ενίσχυσης της ύδρευσης μείζονος περιοχής Βόλου από τα εξοικονομούμενα νερά του υπόγειου υδροφόρα.

1.6.4 Κατασκευαζόμενα έργα

Έχουν ήδη κατασκευαστεί ή βρίσκονται υπό κατασκευήν τα παρακάτω έργα σχετικά με τα μελετηθέντα:

- Ταμιευτήρας χωρητικότητας $184 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ στο χαμηλότερο τμήμα της παλιάς λίμνης Κάρλας, έκτασης περίπου 38000 στρεμμάτων με την κατασκευή αναχωμάτων (ανατολικού, μήκους 2700 m και του δυτικού, μήκους 13000 m). Προστατευτικά αναχώματα κατασκευάζονται και στο βόρειο τμήμα της λίμνης για τον έλεγχο των διαφυγών στα καρστικά μάρμαρα (συνολικού μήκους περίπου 6900 m).
Η στέψη των αναχωμάτων προσδιορίστηκε στα +52,50 m και το μέσο ύψος τους είναι 9,00 m.
Οι στάθμες λειτουργίας του ταμιευτήρα έχουν καθορισθεί ως εξής :
Κατώτατη στάθμη άρδευσης (ΚΣΑ) : +46,40 m
Ανώτατη στάθμη άρδευσης (ΑΣΑ) : +48,80 m
Ανώτατη στάθμη πλημμύρας (ΑΣΠ) : +50,00 m
- Έργα ασφαλείας υπερχειλίσης της λίμνης στον κόμβο Πέτρας παροχής $Q=500 \text{ m}^3/\text{sec}$ για την περίπτωση που υπερβεί η στάθμη της λίμνης το +50 m. Τα νερά που θα υπερχειλίσουν θα κατακλύζουν την χαμηλή περιοχή και θα απάγονται μέσω της υφιστάμενης αποστραγγιστικής σήραγγας Κάρλας προς τον Παγασητικό με τον ρυθμό που επιτρέπει η διοχετευτικότητά της ($8,5 \text{ m}^3/\text{sec}$).
- Περιφερειακοί συλλεκτήρες Σ3, Σ4, Σ6 και Σ7 για την εκτροπή των επιφανειακών απορροών ομβρίων προς τον ταμιευτήρα.
- Δύο αποχετευτικά αντλιοστάσια των χαμηλών περιοχών, DP1 παροχής $Q=24 \text{ m}^3/\text{sec}$ στον κόμβο Πέτρας (δυτικά της λίμνης) και DP2, παροχής $Q=3,6 \text{ m}^3/\text{sec}$ στον κόμβο Καναλίων (ανατολικά της λίμνης).
- Αποκατάσταση των επαρχιακών οδών Καλαμακίου – Καναλίων και Βελεστίνου – Καναλίων με την κατασκευή τμημάτων οδών μήκους περίπου 12,5 km.
- Ενωτική τάφρος ΕΤ στο ανατολικό όριο του ταμιευτήρα για την προσαγωγή των αποχετευόμενων νερών προς το αντλιοστάσιο DP1 και για την απαγωγή των πλημμυρικών παροχών προς την τάφρο 1Τ.
- Κτιριακά των αντλιοστασίων άρδευσης Α0 στον κόμβο Πέτρας και Α2 στον κόμβο Καναλίων, πλησίον των αντίστοιχων αντλιοστασίων αποχέτευσης.



Εικόνα 1.18: Χάρτης κύριων τεχνικών έργων.

1.6.5 Σημερινή κατάσταση της λίμνης Κάρλας

Στις 22 Δεκεμβρίου 2010 τέθηκαν σε λειτουργία τα πέντε αντλιοστάσια του Πηνειού για την τροφοδότηση της Λίμνης Κάρλας από τα νερά του Πηνειού. Στην πλήρη τους λειτουργία μπορούν να παρέχουν $14 \text{ m}^3/\text{s}$. Η λειτουργία των

αντλιοστασίων θα γίνεται κατά τους χειμερινούς και εαρινούς μήνες, έτσι ώστε να παροχετεύονται στη λίμνη οι χειμερινές και εαρινές απορροές του Πηνειού. Οι κύριες εισοδοί τροφοδοσίας από τον Πηνειό είναι :

- i) Η είσοδος από αντλιοστάσιο στην τοποθεσία Καραούλι στη Λάρισα, όπου το νερό οδηγείται στη Διώρυγα 2Δ, μετά στην 6Τ, στην 7Τ, στην 2Τ και τέλος καταλήγει στη Ν.Δ. είσοδο του ταμιευτήρα, όπου συμβάλει και ο Συλλεκτήρας Σ4. Η θέση του αντλιοστασίου στο Καραούλι βρίσκεται πλησίον της εξόδου του αγωγού που διαθέτει τα επεξεργασμένα λήμματα ο βιολογικός καθαρισμός της Λάρισας. Η Διώρυγα 2Δ είναι τραπεζοειδής υπενδεδυμένος ανοιχτός αγωγός, ενώ οι Τάφροι και ο Συλλεκτήρας Σ4 είναι χωματινές τάφοι, οι οποίες σε κάποια σημεία τους έχουν διευθετηθεί ενώ σε κάποια όχι. Έχουν σχήμα τραπεζοειδή και φέρουν αρκετή βλάστηση, γεγονός που απαιτεί συχνό καθαρισμό.
- ii) Η είσοδος από τον ποταμό Ασμάκι ή Τάφος Τ8 μετά στη 1Τ και καταλήγει στον αντλιοστάσιο DP1 στην ανατολική είσοδο του ταμιευτήρα στον κόμβο Πέτρα. Το αντλιοστάσιο DP1 έχει δυναμικότητα 24 m³/s. Η τάφος 1Τ είναι τραπεζοειδής χωματινός ανοιχτός αγωγός διευθετημένος στο μεγαλύτερο μήκος του. Λόγω της εμφάνισης της βλάστησης απαιτείται συχνός καθαρισμός.

Μέσω λοιπόν αυτών των 2 κύριων εισόδων συνεχίζεται η επαναπλήρωση της λίμνης Κάρλας με στόχο τα 141.14 hm³, τα οποία αντιστοιχούν στην Ανώτατη Στάθμη Άρδευσης υψομέτρου 48.8 m, όπου και θα μπορεί πλέον να ξεκινήσει η λειτουργία της άρδευσης. Στις 25/5/2011 το ύψος στάθμης ήταν στα 46.17 m όπου αντιστοιχούσε σε 50 hm³ περίπου.

Στην παρούσα φάση έχουν ολοκληρωθεί τα Έργα για την Κατασκευή του Ταμιευτήρα και τα αντίστοιχα για την τροφοδοσία του από τον Πηνειό.

Τα υπό κατασκευή έργα είναι:

- Η ολοκλήρωση κατασκευής των Συλλεκτήρων Σ3, Σ4, Σ6 και Σ7, ύστερα από κάποια προβλήματα που προέκυψαν όσον αφορά την Αρχαιολογία και την εξεύρεση πόρων. Ιδιαίτερης σημασίας χρήζει η μείωση του μήκους του συλλεκτήρα Σ4. Ο λόγος είναι ότι πλέον τα απορρέοντα ύδατα από τον ορεινό όγκο του Χαλκοδόνιου Όρους, όπως αυτά καταλήγουν μέσω του υδροκρίτη στην ΝΔ κάμφο, δεν θα συγκεντρώνονται στο Συλλεκτήρα Σ6 για την επαναπλήρωση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, αφού σε αυτήν την περιοχή προβλέπεται η εγκατάσταση των νέων γεωτρήσεων ύδρευσης της ΔΕΥΑΜΒ.
- Η κατασκευή έργων μεταφοράς και διανομής νερού Λίμνης Κάρλας «Α' Φάση» και αφορά ουσιαστικά την κατασκευή του δικτύου άρδευσης για 92500 στρέμματα. Με τα προβλεπόμενα έργα μεταφοράς και διανομής νερού θα εξυπηρετηθούν 84400 στρέμματα συνολικά και σύμφωνα με του περιβαλλοντικούς όρους των συγκεκριμένων έργων η ποσότητα νερού

που θα διατίθεται ετησίως από τη λίμνη Κάρλα για άρδευση δεν πρέπει να υπερβαίνει τα $46 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

- Η κατασκευή έργων ενίσχυσης της ύδρευση της μείζονος περιοχής Βόλου «Α' Φάση», όπου αφορά τη διάνοιξη των πρώτων 28 νέων γεωτρήσεων από τις 40 προβλεπόμενες και την αντικατάσταση των 5 παλαιών που ήδη υπήρχαν.
- Καθαρισμός Τάφρων 7Τ και 2Τ.
- Η κατασκευή των έργων ανάδειξης περιβάλλοντος της Λίμνης Κάρλας, που αφορούν τις αναγκαίες υποδομές ήπιας τουριστικής ανάδειξης και τις απαραίτητες φυτοτεχνικές παρεμβάσεις.

Τα έργα που ακόμη δεν έχουν ξεκινήσει είναι:

- Η κατασκευή έργων μεταφοράς και διανομής νερού Λίμνης Κάρλας «Β' Φάση» και αφορά ουσιαστικά την επέκταση του δικτύου άρδευσης της «Α' Φάσης» για 15500 στρέμματα.
- Η κατασκευή έργων ενίσχυσης της ύδρευση της μείζονος περιοχής Βόλου «Β' Φάση», όπου αφορά τη διάνοιξη των υπολειπόμενων 17 νέων γεωτρήσεων. Τονίζεται δε πως η πλήρης εκμετάλλευση όλων των γεωτρήσεων θα γίνει μετά από δέκα περίπου χρόνια λειτουργίας του δικτύου άρδευσης, όπου θα αναμένεται η ανόρθωση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα να πιάσει τα επιθυμητά επίπεδα.
- Η κατασκευή συμπληρωματικών αντιπλημμυρικών έργων και έργων ορεινής υδρονομίας στο πεδινό και ημιπεδινό των λεκανών της Αγιάς, του Καλαμακίου, των Καναλιών και της Κερασιάς.

Στις 23 Μαρτίου 2011 ο Φορέας Διαχείρισης της Περιοχής Οικοανάπτυξης Κάρλας – Μαυροβουνίου – Κεφαλόβρυσου - Βελεστίνου στελεχώθηκε με επιστημονικό προσωπικό και προσωπικό φύλαξης. Ο Φορέας Διαχείρισης της Περιοχής Οικοανάπτυξης Κάρλας - Μαυροβουνίου - Κεφαλόβρυσου - Βελεστίνου (Π.Ο.Κα.Μα.ΚεΒε.) είναι Νομικό Πρόσωπο Ιδιωτικού Δικαίου (Ν.Π.Ι.Δ.) και συστάθηκε το 2003 βάση του νόμου 2742/1999 όπως τροποποιήθηκε από τον 3044/2002. Σκοπός της δημιουργίας του Φορέα είναι η προστασία, διατήρηση και διαχείριση της φύσης και του τοπίου, ως φυσικής κληρονομιάς και πολύτιμου εθνικού φυσικού πόρου σε τμήματα της περιοχής φύσης της περιοχής Κάρλας – Μαυροβουνίου – Κεφαλόβρυσου Βελεστίνου.

Συνοπτικά, οι αρμοδιότητες του Φορέα είναι:

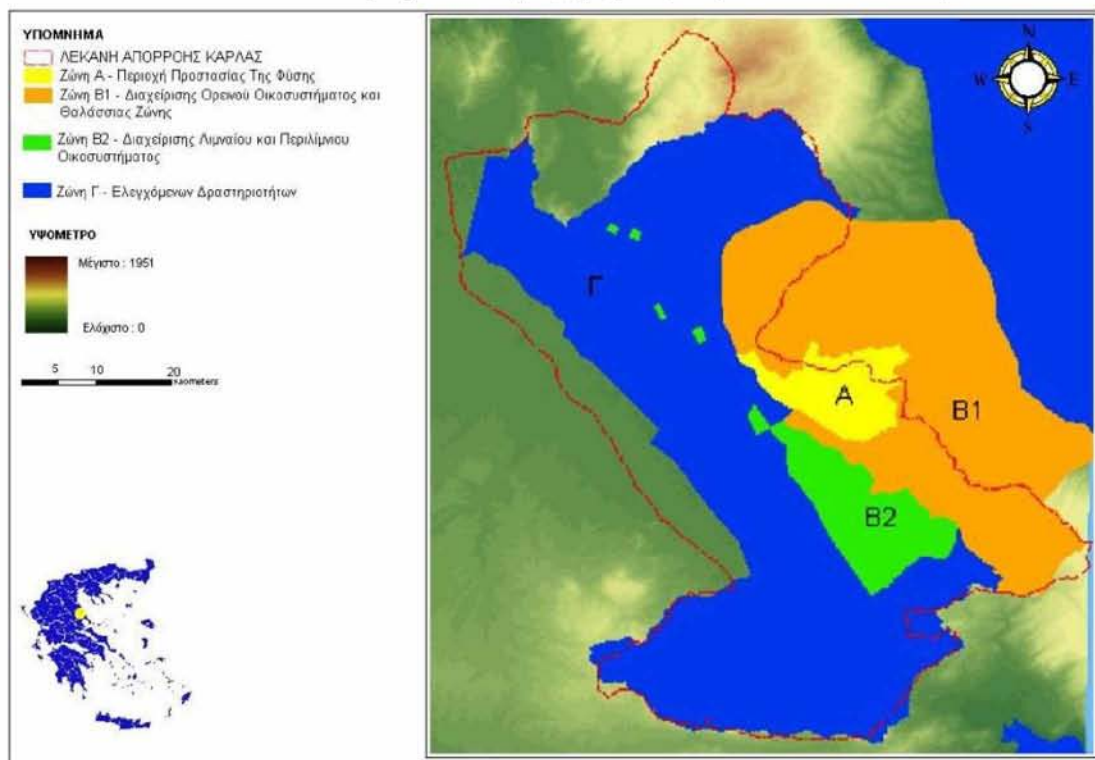
- Η σύνταξη σχεδίου διαχείρισης της περιοχής ευθύνης.
- Ο σχεδιασμός και προγραμματισμός των έργων και δραστηριοτήτων καθώς και των χρηματοοικονομικών μέσων που αυτά συνεπάγονται, που αποσκοπούν στην προστασία και ανάδειξη της περιοχής.
- Η κατάσταση ετησίου σχεδίου διάθεσης νερού που παρέχεται για άρδευση μέχρι την σύσταση και λειτουργία του φορέα προστασίας και διαχείρισης των υδάτων της υδρολογικής λεκάνης κατ' εφαρμογή της οδηγίας 2000/60/ΕΕ.

- Η διαχείριση των δημοσίων εκτάσεων της περιοχής Λίμνης Κάρλας και για την εύρυθμη Περιβαλλοντική λειτουργία των έργων της λίμνης Κάρλας καθώς και των υπολοίπων ταμιευτήρων της περιοχής.
- Η διενέργεια ελέγχων σύμφωνα με το άρθρο του ν. 1650/1986.
- Η γνωμοδότηση στις αρμόδιες υπηρεσίες για τη χορήγηση αδειών χρήσεως νερού και την κατασκευή και λειτουργία έργων εκμετάλλευσης του υδατικού δυναμικού της περιοχής.

Η περιοχή παρέμβασης χωρίζεται στις εξής ζώνες (Εικ. 1.19):

- Ζώνη Α: Περιοχή Προστασίας της Φύσης
- Ζώνη Β1: Ορεινού Όγκου Οικοσυστήματος και Θαλάσσιας Ζώνης
- Ζώνη Β2: Λιμναίων και Παραλιμναίων Οικοσυστημάτων
- Ζώνη Γ: Ελεγχόμενων Δραστηριοτήτων

Στη Περιοχή Προστασίας Οικοτόπων και Ειδών Κα.Μα.ΚεΒε περιλαμβάνονται και οι περιοχές με την επωνυμία «Κάρλα – Μαυροβούνι – Κεφαλόβρυσο Βελεστίνου - Νεοχώρι» με κωδικό GR 1420004 (SCI), «Όρος Μαυροβούνι», με κωδικό GR 1420006 (SPA), «Περιοχή ταμιευτήρων πρώην Λίμνης Κάρλας», με κωδικό GR 1430007 (SPA) & «Περιοχή Θεσσαλικού Κάμπου» με κωδικό GR 1420011 (SPA), του Ευρωπαϊκού Οικολογικού Δικτύου NATURA 2000 και οι οποίες έχουν ενταχθεί και στον εθνικό μας κατάλογο (άρθρο 9, παρ. 6 ν. 3937/2011).



Εικόνα 1.19: Ζώνες προστασίας της περιοχής οικoαναπτυξης της Κάρλας (Σχέδιο Κ.Υ.Α. 112839, 2000)

2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ – ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Ο στόχος ενός συνδυασμένου μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης-βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται στη διαχείριση ενός υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, είναι να ικανοποιήσει μία αντικειμενική συνάρτηση (objective function) που υπόκειται σε κάποιους περιορισμούς (constraints). Αυτοί οι περιορισμοί προέρχονται από τους διάφορους στόχους διαχείρισης και από τη φυσική συμπεριφορά του συστήματος. Για να διασφαλιστεί ότι η τελική λύση δε θα εναντιώνεται στους φυσικούς κανόνες του συστήματος, ενσωματώνεται στο μοντέλο διαχείρισης ένα μοντέλο που προσομοιώνει τη συμπεριφορά και την απόκριση του συστήματος. Στο πλαίσιο της διαχείρισης των υπογείων υδάτων, οι πόροι είναι συνήθως οι υπόγειοι και οι επιφανειακοί μιας λεκάνης και (ή) οι οικονομικοί πόροι των χρηστών που εξαρτώνται από το νερό. Οι στόχοι της διαχείρισης και οι περιορισμοί διατυπώνονται μαθηματικά με το μοντέλο βελτιστοποίησης (διαχείρισης). Αφού διατυπωθεί το μοντέλο βελτιστοποίησης, στη συνέχεια μέσω διαφόρων μαθηματικών τεχνικών προγραμματισμού, φτάνουμε στην επιθυμητή λύση (Amlan Das and Bithin Datta, 2001). Με άλλα λόγια αφού ένα μοντέλο βελτιστοποίησης επιλέξει τη βέλτιστη λύση διαχείρισης ανάμεσα από μια σειρά εναλλακτικών λύσεων του συστήματος, στη συνέχεια το μοντέλο προσομοίωσης εξετάζει εάν αυτή η λύση είναι φυσικά αποδεκτή. Η σύνδεση των παραπάνω μοντέλων γίνεται είτε χρησιμοποιώντας τους περιορισμούς που διέπουν την λειτουργία του συστήματος απ' ευθείας στο μοντέλο βελτιστοποίησης είτε χρησιμοποιώντας ένα μητρώο απόκρισης (Gorelick, 1983) ή ένα εξωτερικό μοντέλο προσομοίωσης. Η σύνδεση αυτή είναι μία πολύπλοκη και δύσκολη διαδικασία από την οποία εξάρταται η επιτυχία της επίλυσης.

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την ενσωμάτωση του μοντέλου προσομοίωσης (simulation model) μέσα στο μοντέλο διαχείρισης (management model) είναι η τεχνική ενσωμάτωσης (embedding technique) και η τεχνική προσέγγισης με μητρώο απόκρισης (response matrix approach).

Στην τεχνική ενσωμάτωσης, η πεπερασμένη διαφορά ή η πεπερασμένη μορφή του στοιχείου των κυρίαρχων εξισώσεων υπόγειας ροής και μεταφοράς των ρευστών, ενσωματώνεται απευθείας σαν μέρος των περιορισμών σε ένα τυπικό μαθηματικό μοντέλο διαχείρισης. Άλλοι φυσικοί και διαχειριστικοί περιορισμοί σε υδραυλικά φορτία, κλίσεις, ταχύτητες ή ρυθμούς άντλησης/εμπλουτισμού μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν. Κάποιες από τις άγνωστες μεταβλητές όπως τα υδραυλικά φορτία, οι απόλυτες τιμές συγκέντρωσης κλπ μπορούν να γίνουν μεταβλητές απόφασης (decision variables) στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Όταν χρησιμοποιείται μεγάλος αριθμός κελιών άντλησης και το πρόβλημα διαχείρισης είναι σταθερό (steady state) τότε η τεχνική ενσωμάτωσης απαιτεί μικρότερη υπολογιστική μνήμη, άρα μικρότερο χρόνο επεξεργασίας απ' ό,τι η μέθοδος με μητρώο απόκρισης (Peralta and Datta, 1990). Σε μη σταθερές περιπτώσεις (transient state) αυτό δεν ισχύει. Επίσης σε μη

γραμμικά συστήματα, η χρήση της τεχνικής ενσωμάτωσης είναι μονόδρομος. Παρόλα αυτά σε ιδιαίτερα μη γραμμικά προβλήματα, όπου η χρήση μητρώου απόκρισης δεν είναι εφαρμόσιμη, ένα μοντέλο διαχείρισης ακόμα και για μικρή περιοχή μελέτης μπορεί να είναι ιδιαίτερα μεγάλο σε διαστάσεις και άρα η επίτευξη λύσης να γίνεται πολύ δύσκολη.

Η τεχνική προσέγγισης με μητρώο απόκρισης (Gorelick, 1983) χρησιμοποιεί ένα εξωτερικό μοντέλο υπόγειας προσομοίωσης των υδάτων για να παράξει τις μονάδες απόκρισης. Η μονάδα απόκρισης περιγράφει την επίδραση μίας μονάδας αλλαγής μίας ανεξάρτητης μεταβλητής απόφασης (ή μεταβλητής σχεδιασμού) σε προκαθορισμένες θέσεις πηγαδιών, πάνω σε μια ποικιλία εξαρτημένων μεταβλητών ή άλλων μεταβλητών σχεδιασμού (όπως το υδραυλικό φορτίο, η ταχύτητα, η απόλυτη συγκέντρωση) σε συγκεκριμένες θέσεις παρατήρησης. Όλες αυτές οι μονάδες απόκρισης αποτελούν το μητρώο απόκρισης (response matrix) που περιλαμβάνεται στο μοντέλο διαχείρισης. Για να παραχθεί το μητρώο απόκρισης, ένα μοντέλο προσομοίωσης επιλυείται αρκετές φορές. Κάθε φορά με μία μονάδα πίεσης (unit stress) ή φορτία συγκέντρωσης (concentration loads) σε συγκεκριμένα σημεία. Η τεχνική αυτή βασίζεται στις αρχές της επαλληλίας και της γραμμικότητας. Είναι εφαρμόσιμη μόνο σε συστήματα γραμμικά ή σχεδόν γραμμικά και με ομοιογενείς οριακές συνθήκες. Σε μη γραμμικά συστήματα η εφαρμογή της τεχνικής αυτής κρίνεται ανεπαρκής (Rosenwald & Green 1974).

Πολλοί ερευνητές χρησιμοποιούν αυτές τις δύο τεχνικές σε συνδυασμό με μεθόδους μαθηματικού προγραμματισμού (linear programming, mixed-integer programming, nonlinear programming, differential dynamic programming κλπ) για την εύρεση λύσης στο πρόβλημα διαχείρισης. Προβλήματα διαχείρισης υπόγειων υδάτων που έχουν απασχολήσει εδώ και χρόνια τους ερευνητές είναι:

- Ο έλεγχος της πτώσης της στάθμης του νερού και της καθίζησης του εδάφους που θα μπορούσε να προκύψει από την άντληση υπόγειων υδάτων (Onta and Gupta 1995, Larson et al. 2001, Phillips et al. 2001, Chang et al. 2007, Chang et al. 2011).
- Η συνδυαστική διαχείριση των υπόγειων και των επιφανειακών υδατικών συστημάτων (Gorelick 1982, Heidari 1982, Willis and Liu 1984, Taghavi et al. 1994, Ahlfeld and Heidari 1994, Nishikawa 1998, Belaine et al. 1999, Chu et al. 2001, Pulido et al. 2002, Miller et al. 2003, Theodossiou 2004, Psilovikos 2005, Schoups et al. 2006, Pisinaras et al. 2007, Liu et al. 2008, Bharati et al. 2008, Chaolun et al. 2008, Safavi 2009, Ferreira et al. 2009, Sidiropoulos et al. 2011, Fayad et al. 2012, Shi et al. 2012, Li et al. 2012, Demirbas et al. 2012).
- Η σύλληψη και ο περιορισμός της κίνησης διαφόρων ρυπαντών (Fisher and Gorelick 1985, Gorelick 1990, Martínez and Albiac 2004, Almasri and Kaluarachchi 2005, Candela et al. 2008, Pulido-Velazquez et al. 2008, He et al. 2009, Penã-Haro et al. 2009, Chiu et al. 2010).

- Ο περιορισμός της εισβολής του θαλασσινού νερού (Finney et al. 1992, Hallaji and Yazicigil 1996, Emch and Yeh 1998, Cheng et al. 2000, Zhou et al. 2003, Park and Aral 2003, Bhattacharjya and Datta 2005, Uddameri and Kuchanur 2006, Ricciardi et al. 2007, Rejani et al. 2008, Sedki and Ouazar 2010, Abd-Elhamid and Javadi 2011).
- Ο προσδιορισμός της θέσης των πηγαδιών και των αντιστοίχων παροχών άντλησης (Tung and Chou 2004, Shen et al. 2004, Saffi and Cheddadi 2007, Ayvaz and Karahan 2008).

Η καταγραφή των εξελίξεων στη χρήση των συνδυαστικών μοντέλων προσομοίωσης-βελτιστοποίησης της διαχείρισης των υπόγειων υδάτων παρουσιάζεται από τους Gorelick (1983), Yeh (1992), Ahlfeld and Heidari (1994), Das and Datta (2001) and Peralta and Kalwij (2004).

2.2 Η τεχνική με μητρώο απόκρισης

Όπως αναφέρθηκε παράπανω τα μοντέλα διαχείρισης στην υπόγεια υδραυλική, δρούν σαν σύνδεσμο μεταξύ των μοντέλων προσομοίωσης και των μοντέλων βελτιστοποίησης (Ahlfeld, 2004). Χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες. Μία από αυτές βασίζεται στην τεχνική με μητρώο απόκρισης (response matrix method) που χρησιμοποιεί η πλειοψηφία των μοντέλων διαχείρισης. Σε αυτή τη μέθοδο, ο υπολογισμός του μητρώου απόκρισης βασίζεται στην αποδοχή της αρχής της επαλληλίας του χώρου για προβλήματα με σταθερή κατάσταση (steady state problems) ή στην αποδοχή της αρχής της επαλληλίας του χώρου σε συνδυασμό με το χρόνο για προβλήματα σε ασταθή κατάσταση (unsteady state problems). Σε αυτή τη μέθοδο, χρησιμοποιείται ένα εξωτερικό αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης για τον υπολογισμό των συντελεστών που αντιστοιχούν στον ρυθμό άντλησης σε ένα σημείο του υδροφορέα, συσχετισμένο με τις πτώσεις της στάθμης του υπόγειου νερού σε άλλα σημεία ελέγχου του υδροφορέα (control points). Το αποτέλεσμα οργάνωσης όλων αυτών των συντελεστών αποτελούν το μητρώο απόκρισης το οποίο συμπεριλαμβάνεται στο μοντέλο διαχείρισης ως υποκατάστατο του προβλήματος προσομοίωσης (Gorelick 1990, Psilovikos 1999, Psilovikos and Tzimopoulos 1998, Theodosiou 2004).

Οι Gorelick και Remson (1982) εισήγαγαν την σταθερής κατάστασης πεπερασμένη διαφορά της εξίσωσης μεταφοράς στους περιορισμούς. Μεγιστοποίησαν τη διάθεση των αποβλήτων σε δύο θέσεις ενώ παράλληλα προστάτησαν την ποιότητα του νερού στα πηγάδια παροχής, διατηρώντας την ίδια εγκατάσταση διάθεσης αποβλήτων. Η ανάλυση ευασθησίας της βέλτιστης λύσης (post-optimality analysis) έγινε με παραμετρικό προγραμματισμό. Ο σκοπός του δεύτερου προβλήματος που εξέτασαν ήταν να μπορεί να αναγνωρίζει όλες εκείνες τις θέσεις που ήταν κατάλληλες για τη διάθεση αποβλήτων. Για αυτό το λόγο, χρησιμοποίησαν γραμμικό προγραμματισμό ώστε να μπορούν να χειριστούν ταυτόχρονα πολλαπλές πηγές μόλυνσης. Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται κάθε γραμμικό μοντέλο προσομοίωσης της μεταφοράς για να παράξει μία μονάδα του μητρώου απόκρισης το οποίο στη συνέχεια θα ενσωματωθεί στο μοντέλο διαχείρισης.

Έτσι ερμηνεύοντας τις δύο λύσεις των προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού, θα ήταν δυνατό να εντοπιστούν όλες οι δυνατές θέσεις διάθεσης των αποβλήτων.

Ο Gorelick (1982) παρουσίασε ένα μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού για να μεγιστοποιήσει τη διάθεση αποβλήτων σε διάφορες εγκαταστάσεις κατά τη διάρκεια αρκετών περιόδων προγραμματισμού ενός έτους. Χρησιμοποίησε τη μέθοδο με μητρώο απόκρισης. Το μητρώο απόκρισης συντάχθηκε χρησιμοποιώντας το μοντέλο προσομοίωσης της μεταφοράς διαλυμένης ουσίας (Konikow and Bredehoeft 1978) με χαρακτηριστικά από το Αμερικάνικο Γεωλογικό Ινστιτούτο (USGS). Το μοντέλο διαχείρισης εφαρμόστηκε σε ένα υποθετικό σύνθετο σύστημα υπόγειας ροής. Αυτά τα μεγάλης κλίμακας μοντέλα διαχείρισης διαμορφώθηκαν σαν δύο γραμμικού προγραμματισμού προβλήματα, κάτι το οποίο μείωσε τις αριθμητικές τους δυσκολίες και το χρόνο επίλυσης τους. Τα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού επιλύθηκαν και με τη χρήση MINOS (Murtagh and Saunders 1993) και MPS/II (Keltron Inc. 1979). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η διάθεση αποβλήτων αυξήθηκε αισθητά παρά τη διατήρηση σταθερών ρυθμών διάθεσης τους σε διάφορες θέσεις. Η ανάλυση ευασθησίας της βέλτιστης λύσης (post-optimality analysis) έγινε με παραμετρικό προγραμματισμό.

Ο Heidari (1982) χρησιμοποίησε γραμμικό προγραμματισμό σε συνδυασμό με ένα μητρώο απόκρισης για τη διαχείριση του υπόγειου υδροφορέα στην λεκάνη απορροής Pawnee Valley του νότιου-κεντρικού Κάνσας. Χρησιμοποιείσαι το MINOS για να επιλύσει τα γραμμικά προβλήματα.

Ο Willis (1984) χρησιμοποίησε γραμμικό προγραμματισμό για να βρει το βέλτιστο σχέδιο άντλησης για τρεις συνεχόμενες περιόδους ώστε να ικανοποιήσει τις γεωργικές ανάγκες σε νερό. Οι στόχοι ήταν να μεγιστοποιήσει το ποσό των υδραυλικών φορτίων και να ελαχιστοποιήσει το συνολικό έλλειμμα. Ο υδροφορέας τοποθετείται στην λεκάνη Yun Lin στην Ταϊβάν και θεωρήθηκε απεριόριστος. Η εξίσωση ροής σχεδόν γραμμικοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το ανάπτυγμα της σειράς Taylor. Αυτό οδήγησε σε μία γραμμική προσέγγιση η οποία επιλύθηκε με την επαναληπτική διαδικασία. Χρησιμοποίησε τη μέθοδος με μητρώο απόκρισης.

Οι Atwood και Gorelick (1985) παρουσίασαν μία μεθοδολογία βασισμένη σε γραμμικό προγραμματισμό για τον έλεγχο της υδραυλικής κλίσης με σκοπό τον περιορισμό και την εξάλειψη ρύπων στα υπόγεια ύδατα. Χρησιμοποίησαν ένα μητρώο απόκρισης. Η διαδικασία του σχεδιασμού ακολούθουσε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, έγινε η προσομοίωση της κίνησης της διαλυμένης ουσίας για να προβλεφθεί η θέση της κηλίδας με την πάροδο του χρόνου, υποθέτωντας ότι η υδραυλική κλίση είχε απλωθεί αποτελεσματικά γύρω από την περιοχή της μολυσματικής κηλίδας. Στο δεύτερο στάδιο, με τη χρήση του μοντέλου προσομοίωσης-διαχείρισης, προσδιορίστηκε η βέλτιστη επιλογή των πηγαδιών καθώς και τα χρονοδιαγράμματα άντλησης/εμπλουτισμού.

Οι Lemoine et al. (1986) χρησιμοποίησαν μία μέθοδο με δύο ξεχωριστά μητρώα απόκρισης για να ενσωματώσουν τα αποτελέσματα από ένα παραμετρικό μοντέλο προσομοίωσης υπόγειων υδάτων σε ένα γεωργικό μοντέλο διαχείρισης. Το πρώτο

μητρώο αντιπροσωπεύει την «ενεργή» απόκριση της στάθμης των υπόγειων υδάτων στους τρέχοντες ρυθμούς άντλησης και εμπλουτισμού. Το δεύτερο αντιπροσωπεύει την «παθητική» ανάκτηση των επιπέδων νερού από παρεκκλίσεις σε συνθήκες σταθερής κατάστασης κατά την έναρξη μιας χρονικής περιόδου. Η μέθοδος εξαλείφει την ανάγκη για αποθήκευση των πληροφοριών ανάκτησης από προηγούμενες χρονικές περιόδους και έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε ένα πρόβλημα υδρολογικής/γεωργικής διαχείρισης στην κοιλάδα Salinas στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ. Η προσομοίωση με «ιδιωτική βελτιστοποίηση» (private optimization), δηλαδή η από έτος σε έτος μεγιστοποίηση του κέρδους από μεμονωμένες υποπεριοχές, στην Salinas Valley απέδωσε επίπεδα νερού σύμφωνα με τις ιστορικές τάσεις. Μία σύγκριση της βελτιστοποίησης σε επίπεδο λεκάνης απορροής (basin-wide optimization) με την «διαίτερη βελτιστοποίηση» (private optimization) παρέχει ένα μέτρο σύγκρισης για τα οφέλη της θεσμικής διαχείρισης της λεκάνης σαν μονάδα.

Οι Lall and Santini (1989) ασχολήθηκαν με τη διαχείριση ενός απεριόριστου και στρωματοποιημένου υδροφόρου συστήματος. Ένας μη περιορισμένος υδροφορέας παρουσιάζει δυσκολίες στην διατύπωση του, λόγω των μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων που τον διέπουν. Το δυναμικό Girinski χρησιμοποιήθηκε για να ξεπεραστούν αυτές οι δυσκολίες. Το δυναμικό Girinski επιτρέπει μια γραμμική προσέγγιση της εξίσωσης ροής σε ένα απεριόριστο και στρωματοποιημένο υδροφόρο σύστημα. Για τη διατύπωση των μοντέλων απόκρισης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος με μητρώο απόκρισης. Η αρχή της επαλληλίας σε συνδυασμό με το δυναμικό Girinski επέτρεψε τη δημιουργία μιας μονάδας απόκρισης του μητρώου. Ο παραπάνω συνδυασμός φαίνεται να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε χρονικά μεταβαλλόμενα γραμμικά συστήματα όπου εμπεριέχουν τις παραμέτρους της υδραυλικής αγωγιμότητας, του υδραυλικού φορτίου και του πάχους του στρώματος που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο. Έγιναν εφαρμογές και συγκρίσεις τριών συνθέσεων βελτιστοποίησης για την άντληση υπόγειων υδάτων από υποβαθμισμένο υδροφόρο ορίζοντα.

Οι Hallaji και Yazicigil (1996) χρησιμοποίησαν γραμμικό προγραμματισμό για τη διαχείριση ενός παράκτιου υδροφορέα στη νότια Τουρκία. Πρότειναν έξι μοντέλα γραμμικού προγραμματισμού για σταθερή (steady state) και χρονικά μεταβλητή κατάσταση (transient state), και ένα τετραγωνικό μοντέλο βελτιστοποίησης για τη διαχείριση ενός συστήματος υδροφορέα σε σταθερή κατάσταση. Οι γενικοί περιορισμοί ήταν: (i) περιορισμοί στη ζήτηση του νερού, (ii) περιορισμοί στην πτώση της στάθμης, (iii) περιορισμοί μέγιστου ρυθμού άντλησης, και (iv) περιορισμοί ελάχιστου ρυθμού άντλησης. Για να ικανοποιηθούν οι περιορισμοί στην πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του μητρώου απόκρισης. Ωστόσο, η υδραυλική της διείδυσης του θαλασσινού νερού στον υδροφορέα δεν συμπεριλήφθηκε στο μητρώο απόκρισης. Οι στόχοι διαχείρισης για την σταθερή κατάσταση ήταν: (i) η μεγιστοποίηση της άντλησης νερού από τα υπάρχοντα πηγάδια, (ii) η μεγιστοποίηση των αντλήσεων χωρίς τυχόν ανώτατο όριο στις αντλήσεις από τα πηγάδια, (iii) ελαχιστοποίηση του αθροίσματος της πτώσης στάθμης στα σημεία των πηγαδιών άντλησης και στα σημεία ελέγχου εισβολής

θαλασσινού νερού, και (iv) η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος της πτώσης στάθμης στα σημεία ελέγχου εισβολής θαλασσινού νερού κατά μήκος της ακτής. Οι στόχοι για τη χρονικά μεταβλητή κατάσταση ήταν: (i) η μεγιστοποίηση του αθροίσματος των μηνιαίων αντλήσεων, και (ii) η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος της πτώσης στάθμης στα πηγάδια άντλησης και στα σημεία ελέγχου εισβολής θαλασσινού νερού για όλες τις περιόδους άντλησης.

Οι Myloroulos et al. (1999) παρουσίασαν μια στοχαστική προσέγγιση βελτιστοποίησης για το σχεδιασμό αποκατάστασης ενός μολυσμένου υδροφόρου ορίζοντα με περιορισμένες υδρογεωλογικές πληροφορίες. Η στοχαστική προσομοίωση έγινε με την τεχνική Monte Carlo με μεταβλητή αβεβαιότητας την υδραυλική αγωγιμότητα. Το στοχαστικό μοντέλο προσομοίωσης της ροής και μεταφοράς συνδέθηκε με ένα μη γραμμικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης με τη χρήση ενός μητρώου απόκρισης. Η όλη η διαδικασία ενσωματώθηκε σε έναν αλγόριθμο που έχει εφαρμοστεί αποτελεσματικά στην περίπτωση του υδροφορέα της Καλαμαριάς Χαλκιδικής στην Βόρεια Ελλάδα. Η ανάλυση αξιοπιστίας έδωσε χρήσιμες πληροφορίες στους φορείς λήψης αποφάσεων σχετικά με την αξιοπιστία των βέλτιστων λύσεων. Ένα σημαντικό συμπέρασμα που κατέληξαν είναι ότι η χωρική μεταβολή της υδραυλικής αγωγιμότητας μπορεί να ασκεί μεγάλη επιρροή στα βέλτιστα συστήματα αποκατάστασης.

Οι Chu et al. (2001) ανέπτυξαν ένα συνδυαστικό μοντέλο διαχείρισης με σκοπό να προσδιορίσουν τις βέλτιστες λύσεις διαχείρισης των υδάτων στην πόλη Βαοτου της Κίνας. Το μοντέλο προσομοίωσης της υπόγειας ροής συνδέθηκε με ένα γραμμικό πρόγραμμα πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων, με χρήση της μεθόδου με μητρώο απόκρισης. Διαπιστώθηκε πως τα περισσότερα προβλήματα, όπως η έλλειψη νερού, η υπεράντληση υδάτων και η αλατότητα του εδάφους μπορούν να ελεγχθούν με την εκτέλεση αυτών των βέλτιστων λύσεων. Έτσι προτάθηκε από τους ερευνητές η εφαρμογή συνδυαστικής κατανομής των υπόγειων και επιφανειακών υδατικών πόρων της περιοχής, η εφαρμογή της αρχής της χρήσης του νερού με κριτήριο την προστασία των υπόγειων υδάτων, την αύξηση των επιφανειακών υδάτων και την εφαρμογή εναλλακτικών μεθόδων άρδευσης με σκοπό τη μείωση των αρδευτικών αναγκών.

Οι Zhou et al. (2003) χρησιμοποίησαν ένα μητρώο απόκρισης για τη διαχείριση ενός πολυσυστήματος υδροφόρου ορίζοντα στη χερσόνησο Leizhou στη νότια Κίνα. Αναπτύχθηκαν γραμμικά μοντέλα προγραμματισμού για την εκμετάλλευση των υπόγειων υδάτων εντός των δύο υδροφορέων. Στόχος ήταν η μεγιστοποίηση του ρυθμού άντλησης από τα πηγάδια διαχείρισης, ενώ παράλληλα έπρεπε να ελεγχθεί η διείσδυση θαλασσινού νερού από την ακτή. Διαπιστώθηκε πως η ανακατανομή του ρυθμού άντλησης στα πηγάδια είναι το βασικότερο βήμα για τη βελτιστοποίηση της χρήσης των υπόγειων υδάτων.

Οι Shen et al. (2004) ανέπτυξαν ένα μοντέλο βελτιστοποίησης για το προσδιορισμό της θέσης των πηγαδιών, καθώς και των αντίστοιχων ρυθμών άντλησης, σε ένα σύστημα δύο υδροφορέων με στόχο την προστασία της ποιότητας

του νερού του κάτω υδροφορέα από το μολυσμένο νερό του άνω υδροφορέα. Το μοντέλο διαχείρισης των δύο υδροφορέων βασίζεται σε ένα μητρώο απόκρισης. Διαπιστώθηκε πως, αν και το λεπτό στρώμα διαρροής που υπάρχει ανάμεσα στους δύο υδροφορείς παίζει σημαντικό ρόλο στο να σταματάει τη διαρροή του μολυσμένου νερού από το ανώτερο στο κατώτερο στρώμα, η μόλυνση αυτή δεν πρόκειται να αποφευχθεί αν η διαφορά στην πτώση στάθμης ανάμεσα στους δύο υδροφορείς είναι πολύ μεγάλη. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από την πόλη Qiqihar της πολιτείας Heilongjiang στην Κίνα για να προσδιοριστεί ο βέλτιστος ρυθμός άντλησης στα πηγάδια των δύο υδροφορέων χωρίς παράλληλα να μειωθεί η ποιότητα του νερού στον κάτω υδροφορέα. Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν ήταν ικανοποιητικά.

Ο Psilonikos (2006) παρουσίασε ένα αλγόριθμο που μειώνει το μέγεθος του μητρώου απόκρισης βασιζόμενος σε δύο υποθέσεις: Η πρώτη ήταν η προσθήκη του σταθερού κόστους που αντιπροσώπευε την παροχή άντλησης και η δεύτερη ήταν η αφαίρεση της υπερθέσεως του χρόνου. Η περιοχή μελέτης είναι ένας διασυνοριακός υδροφορέας στη Βόρεια Ελλάδα στην περιοχή της Ειδομένης, ένα μικρό χωριό ακριβώς στα σύνορα με τη ΠΓΔΜ. Η εμπειρική φόρμουλα που παράχθηκε δεν δίνει ιδιαίτερα σφάλματα για τη βέλτιστη λύση.

Οι Chaolun et al. (2008) ανέπτυξαν ένα πολυκριτηριακό μοντέλο διαχείρισης για ομοιογενείς, ισότροπους υδροφορείς. Το μοντέλο χρησιμοποιούσε την τεχνική του μητρώου απόκρισης που λαμβάνει υπόψη τις κατανεμημένες παραμέτρους και τις αρχικές και τις οριακές συνθήκες. Το μητρώο απόκρισης και το φυσικό υδραυλικό φορτίο προσδιορίστηκαν με αποσύνθεση του εννοιολογικού μοντέλου υπόγειας ροής. Η λύση από πειραματικά μοντέλα άρδευσης και η ωφέλιμη βροχόπτωση με πιθανότητα 50% προήλθαν από τον αλγόριθμο RGA. Αυτό το μοντέλο διαχείρισης των υπόγειων υδάτων μπορούσε να αποφασίσει την καλύτερη εναλλακτική λύση για τη φύτευση και να καθορίσει το λειτουργικό πρόγραμμα των αντλήσεων, οι τιμές των οποίων θα ανταποκρίνονταν καλύτερα στις αναμενόμενες διακυμάνσεις του υδροφόρου ορίζοντα. Η εφαρμογή αυτής της προτεινόμενης μεθόδου ήταν χρήσιμη τόσο για τους φορείς διαχείρισης των υδάτινων πόρων όσο και στην τοπική αυτοδιοίκηση για να αξιολογήσει την πολιτική των αντλήσεων και να ελέγξει περαιτέρω τα προβλήματα υποβάθμισης του εδάφους, λόγω υπερβόσκησης των λιβαδιών και υπερεκμετάλλευσης των υπόγειων υδάτων.

Οι Penã-Haro et al. (2009) ανέπτυξαν την εφαρμογή μιας μεθόδου που εξερευνεί τη βέλτιστη διαχείριση της νιτρορύπανσης των υπόγειων υδάτων από τη γεωργία. Το μοντέλο προτείνει το ρυθμό χρήσης λιπασμάτων, στο χώρο και το χρόνο, που μεγιστοποιεί τα καθαρά οφέλη στη γεωργία με περιορισμούς τις απαιτήσεις ποιότητας των υπογείων υδάτων σε συγκεκριμένα σημεία ελέγχου. Χρησιμοποιήθηκαν εξωτερικά αγρονομικά μοντέλα που μελετούν τη σχέση εδάφους-φυτών και μοντέλα προσομοίωσης μεταφοράς της διαλυμένης ουσίας, των οποίων τα αποτελέσματα ενσωματώθηκαν στο μοντέλο βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούσε ένα μητρώο απόκρισης της συγκέντρωσης του ρυπαντή υπό συνθήκες σταθερής ροής. Αυτό το μητρώο απόκρισης έδειχνε τη συγκέντρωση του ρυπαντή συναρτήσει του

χρόνου, σε διαφορετικά σημεία ελέγχου του υδροφόρου ορίζοντα, που προέρχονταν από πολλαπλές πηγές ρύπων κατανεμημένες στο χρόνο και στο χώρο. Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε σε ένα παράδειγμα για πέντε διαφορετικά σενάρια. Βρέθηκαν βέλτιστες λύσεις σε προβλήματα με διαφορετικές αρχικές συνθήκες, ορίζοντες σχεδιασμού και χρόνους ανάκτησης. Η μέλετη δείχνει πως τόσο ο επιλεγμένος ορίζοντας σχεδιασμού όσο και χρόνος αποκατάστασης μπορούν να επηρεάσουν έντονα το περιορισμό της χρήσης λιπασμάτων και το οικονομικό ευκαιριακό κόστος για την επίτευξη των περιβαλλοντικών προτύπων.

Οι Ferreira et al. (2009) χρησιμοποίησαν ένα πολλαπλών στόχων γραμμικό μοντέλο διαχείρισης από τη βιβλιογραφία (Cunha and Antunes 1997) για να καθορίσουν την καλύτερη απόφαση για την ανάπτυξη του υδροφορέα της Queirença-Silves στην Πορτογαλία. Εντοπίστηκαν αποδοτικές λύσεις για την τοποθεσία, και το σχεδιασμό των αντλιοστασίων και της λεκάνης απορροής τους για να παρέχουν ένα συγκεκριμένο αριθμό κέντρων ζήτησης, χωρίς να παραβλέπεται η επίδραση της διαχείρισης των υπόγειων υδάτων στην πιεζομετρική επιφάνεια των υδροφόρων ορίζοντων και των πολλών πτυχών της διαχείρισης των υδάτων. Το μοντέλο είχε δύο στόχους: την ελαχιστοποίηση του συνολικού ύψος ανύψωσης του νερού, και την ελαχιστοποίηση του συνολικού μήκους μεταφοράς νερού, σταθμισμένο με βάση τα ρεύματα που μεταφέρονται από τις εγκαταστάσεις των κέντρων. Η επίδραση της άντλησης υπόγειων υδάτων στην πιεζομετρική επιφάνεια του υδροφορέα διαμορφώνεται με τη μέθοδο του μητρώου απόκρισης, καθορίζοντας ανώτατες αναλήψεις για την αποφυγή της υπερεκμετάλλευσης.

Οι Chiu et al. (2010) ανέπτυξαν ένα συνδυαστικό μοντέλο προσομοίωσης-βελτιστοποίησης για να μειώσουν την υψηλή συγκέντρωση νιτρικών ενώ ταυτόχρονα να ικανοποιήσουν τη ζήτηση σε νερό, διατηρώντας την στάθμη των υπογείων υδάτων στα επιθυμητά επίπεδα για την υπόγεια λεκάνη του Warren. Το μοντέλο ήταν μηνιαίο οπότε μόνο οι εξισώσεις συνέχειας έπρεπε να ικανοποιούνται όσον αφορά την άντληση και την επαναφόρτιση στη διαμόρφωση του μοντέλου διαχείρισης. Τα μοντέλα προσομοίωσης υπόγειας ροής και μεταφοράς επαναρυθμίστηκαν χρησιμοποιώντας όλα τα διαθέσιμα δεδομένα από ένα παγκόσμιο-τοπικό σύστημα βελτιστοποίησης το οποίο περιελάμβανε έναν γενετικό αλγόριθμο (GA) και μία τροποποιημένη μέθοδο Gauss-Newton. Στη συνέχεια σχηματίστηκε ένα μοντέλο διαχείρισης για την ελαχιστοποίηση μια γραμμικής συνάρτησης κόστους που περιελάμβανε το κόστος άντλησης, επεξεργασίας και επαναφόρτισης. Η ελαχιστοποίηση αυτή υπόκειται σε ένα σύνολο γραμμικών και μη γραμμικών περιορισμών. Η ελαχιστοποίηση υπόκειται σε ένα σύνολο γραμμικών και μη γραμμικών περιορισμών συμπεριλαμβανομένων της στάθμης των υπογείων υδάτων, της συγκέντρωσης νιτρικών αλάτων, της ζήτησης νερού, και της διαθεσιμότητας του εισαγόμενου νερού. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του μητρώου απόκρισης για να συνδέθει το μοντέλο προσομοίωσης με το μοντέλο διαχείρισης. Το μητρώο απόκρισης παρήχθη με την μέθοδο του συντελεστή επιρροής. Λόγω της μη γραμμικότητας, το μήτρωο απόκρισης ενημερώθηκε και επιτεύχθηκε σύγκλιση με την επαναληπτική διαδικασία. Επίσης προτάθηκε μια συστηματική διαδικασία για να

δημιουργήθει μια εφικτή αρχική πολιτική. Επιλύθηκαν διαδοχικά τρία διαφορετικά σενάρια. Τα βέλτιστα αποτελέσματα έδειξαν τις συνδυαστικές επιδράσεις των συντελεστών ευαισθησίας, των διαφορετικών τιμών μονάδας άντλησης και επαναφόρτισης και του ποσοστού έκπτωσης. Η επίδραση των συντελεστών ευαισθησίας καθόρισαν την ενεργοποίηση των πηγαδιών άντλησης και των ταμιευτήρων εμπλουτισμού. Η τιμή της μονάδας έκανε την βελτιστοποιημένη λύση να ευνοήσει το χαμηλότερο κόστος και το αποτέλεσμα του ποσοστού έκπτωσης ήταν να προσπαθήσει να καθυστερήσει την ενεργοποίηση της άντλησης ή επαναφόρτισης, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η αντικειμενική συνάρτηση.

Οι Chang et al. (2011) παρουσίασαν ένα μοντέλο διαχείρισης των υπόγειων υδάτων που λαμβάνει σαφώς υπόψη την καθίζηση του εδάφους στους περιορισμούς. Για την ποσοτικοποίηση της σχέσης μεταξύ καθίζησης του εδάφους και ανάληψης, υιοθετήθηκε η μονοδιάστατη εξίσωση εξυγίανσης που ταυτόχρονα αντιπροσωπεύει την ελαστική και ανελαστική συμπίκνωση λόγω της άντλησης. Βάσει της τεχνικής του μητρώου απόκρισης μαζί με μια μονοδιάστατη εξίσωση εξυγίανσης, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο διαχείρισης της ποσότητας των υπογείων υδάτων, το οποίο επιτρέπει τον προσδιορισμό της μέγιστης συνολικής άντλησης με την προϋπόθεση ότι η καθίζηση του εδάφους δεν ξεπερνά την επιτρεπόμενη τιμή της. Το μοντέλο διαχείρισης που προέκυψε ήταν ένα μη ομαλό πρόβλημα βελτιστοποίησης οπότε μετατράπηκε σε μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (MILP), εισάγοντας δυαδικές μεταβλητές. Τα παραπάνω εφαρμόστηκαν σε ένα υποθετικό παράδειγμα και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η καθίζηση του εδάφους θα έπρεπε να ενσωματωθεί στους περιορισμούς του προβλήματος, διαφορετικά η βέλτιστη συνολική ποσότητα άντλησης θα μπορούσε να είχε υπερεκτιμηθεί. Επιπλέον, ήταν απαραίτητη η ταυτόχρονη εξέταση της ελαστικής και ανελαστικής συμπίκνωσης του εδάφους στη διαχείριση των υπογείων υδάτων, ιδιαίτερα όταν η διαφορά του αρχικού φορτίου και του φορτίου πριν την εξυγίανση είναι σημαντική.

Οι Derimbas et al. (2012) μελέτησαν την βέλτιστη αποστράγγιση μιας περιοχής ανασκαφής σε έναν μη περιορισμένο υδροφόρο ορίζοντα, χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμένο μοντέλο προσομοίωσης-βελτιστοποίησης. Χρησιμοποιήθηκε ένα μητρώο απόκρισης βάσει της γραμμικής επαλληλίας. Με το ModMan το οποίο καλούσε επανειλημμένως το MODFLOW για να παράξει το μητρώο απόκρισης, μετέτρεψαν το πρόβλημα διαχείρισης σε ένα ακέραιο πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού. Θεωρήθηκαν μία υποθετική περιοχή αποστράγγισης για να εξεταστούν τα αποτελέσματα της μη-γραμμικότητας λόγω αντλήσεως. Εφαρμόστηκαν δύο διαφορετικές επαναληπτικές μέθοδοι, αναθεωρημένες τιμές μονάδας και αναθεωρημένοι συντελεστές για να αντιμετωπιστεί η μη γραμμική απόκριση του μη περιορισμένου υδροφορέα στην άντληση. Η μελέτη έδειξε ότι μια τροποποιημένη γραμμική διαδικασία βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με MODFLOW παρέχει ένα χρήσιμο και αποδοτικό υπολογιστικά εργαλείο για την ανάλυση των προβλημάτων υποβάθμισης των υπόγειων υδάτων σε μη περιορισμένους υδροφορείς.

2.3 Συνδυαστικά προβλήματα διαχείρισης υπογείων υδάτων και ταμιευτήρων

Τα περισσότερα προβλήματα διαχείρισης υπογείων υδάτων περιλαμβάνουν και εξωτερικές πηγές εισαγωγής νερού (δεξαμενές, ταμιευτήρες, μονάδες αφαλάτωσης κλπ) οι οποίες είναι σημαντικοί παράμετροι στη διαχείριση. Μπορεί να αλληλεπιδρούν άμεσα με τον υδροφόρο ορίζοντα μέσω της διήθησης, εμπλουτίζοντάς τον ή έμμεσα, εφόσον αποτελούν εξωτερικές πηγές εισαγωγής νερού, μειώνοντας έτσι τις ανάγκες άντλησης υπογείων υδάτων. Όλα τα παραπάνω μπορούν να συναρτηθούν και με το οικονομικό κόστος. Έτσι εισάγοντας στο πρόβλημα διαχείρισης έναν ταμιευτήρα νερού έχουμε ένα πολύτιμο εργαλείο στην επίλυση προβλημάτων: Συνδυαστικής διαχείρισης των υπόγειων και των επιφανειακών υδατικών συστημάτων, εισβολής του θαλασσινού νερού στον υδροφόρο ορίζοντα, πτώσης της στάθμης του νερού και καθίζησης του εδάφους που θα μπορούσε να προκύψει από την υπεράντληση υπόγειων υδάτων, και ρύπανσης των υπογείων υδάτων. Αντιπροσωπευτικά παρουσιάζονται παρακάτω κάποια από αυτά:

Ο Nishikawa (1998) ανέπτυξε ένα συνδυαστικό μοντέλο προσομοίωσης-βελτιστοποίησης για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων στην πόλη της Santa Barbara της Καλιφόρνια σε περίοδο ξηρασίας. Οι αρχές της πόλης ανησυχούσαν για το αν το κόστος της ύδρευσης επαρκεί για να καλύψει τις ανάγκες της σε νερό αλλά και για τον έλεγχο εισβολής θαλασσινού νερού στον υδροφόρο ορίζοντα της περιοχής. Στόχος του μοντέλου ήταν να ελαχιστοποιήσει το κόστος της παροχής νερού σε ένα χρονικό ορίζοντα σχεδιασμού πέντε ετών, υποκείμενος όμως σε περιορισμούς χωρητικότητας, υδραυλικών φορτίων για το έλεγχο εισβολής του θαλασσινού νερού και τέλος σε περιορισμούς στη ζήτηση. Οι μεταβλητές απόφασεις είναι ποσότητες επιφανειακών υδάτων από τον ταμιευτήρα Gibraltar, τον ταμιευτήρα Cachuma, τον ταμιευτήρα μεταφοράς Cachuma, το κανάλι Mission, το κρατικό έργο ύδρευσης (SWP), αφαλατωμένο νερό και από τις αντλήσεις σε 13 πηγάδια. Οι μεταβλητές κατάστασης είναι τα υδραυλικά φορτία. Η αριθμητική επίλυση έγινε με το μοντέλο προσομοίωσης MODFLOW. Το μοντέλο βελτιστοποίησης διατυπώθηκε ως ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των συντελεστών απόκρισης για την εκτίμηση των υδραυλικών φορτίων. Το πρόγραμμα LINDO (Schrage 1991) έλυσε το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι όλοι οι περιορισμοί μπορούν να ικανοποιηθούν με ελάχιστο κόστος περίπου \$5,560,000 για πέντε χρόνια. Η πιο ακριβή πηγή νερού (το αφαλατωμένο νερό) είχε χαμηλή χρήση. Τα υψηλά κεφάλαια έναρξης του εργοστασίου αφαλάτωσης (τα οποία δεν συμπεριλήφθηκαν στο μοντέλο) μπορούν να αποτρέψουν την οικονομική του αποδοτικότητα. Η μέγιστη χωρητικότητα της φθηνότερης πηγής νερού (ταμιευτήρας) χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις προσομοιώσεις. Η άντληση από τα εγχώρια πηγάδια ήταν συνεχής, ενώ από τα παράκτια περιοδική. Οι επαναληπτικές λύσεις χρησιμοποιήθηκαν για την αντιμετώπιση της μη γραμμικότητας που προκάλεσαν τα στραγγιστήρια σε δύο επαναλήψεις, με μικρή αλλαγή στην αντικειμενική τιμή (0,8%) και τις ποσότητες νερού. Αυτά τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η επίδραση των μη γραμμικών στοιχείων ήταν αμελητέα. Οι αναλύσεις ευαισθησίας έγιναν στο βασικό σενάριο και έδειξαν ότι η αξία μεταφοράς νερού από

τον ταμιευτήρα Cachuma είναι μεγαλύτερη από εκείνη του κρατικού έργου ύδρευσης, ότι η μείωση της μέγιστης ετήσιας ζήτησης είναι οικονομικά αποδοτική, ότι εάν η πόλη είναι διατεθειμένη να αποδεχθεί μία αύξηση της εισβολής θαλασσινού νερού στον υδροφόρο ορίζοντα, μπορεί να πραγματοποιήσει μια ουσιαστική εξοικονόμηση κόστους κατά τη διάρκεια της 5-ετής διαχειριστικής περιόδου, ότι η μονάδα αφαλάτωσης μπορεί να μην χρειαστεί, με αποτέλεσμα μια ελαφρά αύξηση του κόστους (περίπου \$ 100,000) και ότι η ενσωμάτωση της μεταφοράς νερού από το κρατικό έργο ύδρευσης μπορεί να αποφέρει μια ελαφριά μείωση του κόστους (περίπου \$ 30,000). Δύο επιπλέον σενάρια δοκιμάστηκαν: Οι τρέχουσες και οι προτεινόμενες μηνιαίες διανομές νερού από τον ταμιευτήρα Gibraltar. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο χρόνος των διανομών νερού είναι πολύ σημαντικός. Αν ο χρόνος διανομής δεν αντιστοιχεί με τη ζήτηση (σημερινή διανομή), τότε το κόστος είναι μεγαλύτερο γιατί ακριβότερο νερό θα πρέπει να συμβάλλει στην ικανοποίηση των αναγκών αιχμής. Ενώ εάν ο χρόνος διανομής αντιστοιχεί με τη ζήτηση (προτεινόμενη κατανομή), θα προκύψει χαμηλότερο κόστος.

Οι Belaine et al. (1999) παρουσίασαν ένα μοντέλο προσομοίωσης-βελτιστοποίησης το οποίο ενσωματώνει τις γραμμικές συμπεριφορές του ταμιευτήρα, τις λεπτομερείς προσομοιώσεις της ροής του συστήματος ποταμού-υδροφόρου ορίζοντα, τις συνδυαστικές χρήσεις του επιφανειακού και του υπόγειου νερού, και της διανομής του νερού μέσω συστήματος καναλιών στους χρήστες. Προσπάθησαν να ελέγξουν την υπόθεση ότι σε ένα συνδυαστικό μοντέλο προσομοίωσης-βελτιστοποίησης (S/O model) η καλύτερη απεικόνιση των αλληλοεπιδράσεων μεταξύ των επιφανειακών υδάτων και του υδροφορέα (sw/a interactions) ενός συστήματος διανομής ποταμού-υδροφορέα-ταμιευτήρα (SARD system), βελτιώνει τη συνολική διαχείριση των νερού. Στην εργασία τους, οι κυριότερες συνιστώσες του συστήματος ήταν οι πηγές νερού (επιφανειακά και υπόγεια ύδατα), τα συστήματα μεταφοράς που παρέχουν το νερό στους χρήστες, και οι περιοχές χρήσης του νερού. Συμπέραναν πως όσο η ζήτηση του νερού αυξάνεται, τόσο αυξάνεται και η ανάγκη για καλύτερη χρήση των διαθέσιμων πόρων. Τα νέα μοντέλα αποτυπώνουν καλύτερα την ευαισθησία της ροής: στις απελευθερώσεις νερού από τον ταμιευτήρα, στις εκτροπές των ποταμών, και στην υπόγεια άντληση νερού, και περιγράφουν καλύτερα την επαναφόρτιση του υδροφορέα λόγω διήθησης του νερού άρδευσης και των απωλειών κατά τη μεταφορά. Το αποτέλεσμα αυτών των βελτιώσεων είναι η καλύτερη γνώση του πόσο νερό είναι διαθέσιμο για χρήση μέσα στο φυσικό σύστημα, κάτι το οποίο πιθανώς θα βελτιώσει τη διαχείριση και τη χρήση του νερού. Η εργασία τους θα ωφελήσει ιδιαίτερα τη γεωργία στις αρδευόμενες περιοχές όπου υπάρχει σημαντική ροή μεταξύ επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων. Επίσης, το βελτιωμένο μοντέλο S/O παριστά καλύτερα την διανομή του νερού και την κατανομή του μέσα σε μια περιοχή ελέγχου απ' ότι προηγούμενες δεξαμενές ή μοντέλα διαχείρισης S/A. Το μοντέλο S/O υπολογίζει τη βέλτιστη άντληση υπογείων υδάτων, τη δεξαμενή απελευθέρωσης, την εκτροπή της ροής, και τις προκύπτουσες αποκρίσεις του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των υδραυλικών φορτίων, της εμβέλια εκροής του ρέματος, και της λήξης αποθήκευσης στη δεξαμενή. Τα αποτελέσματα του

μοντέλου που εφαρμόστηκαν σε μία υποθετική περιοχή μελέτης σύμφωνα με διάφορα σενάρια, έδειξαν ότι όσο λεπτομερέστερη είναι η απεικόνιση του φυσικού συστήματος, τόσο καλύτερη γίνεται η συνδυαστική διαχείριση. Η πιο λεπτομερής απεικόνιση παρέχει 13% περισσότερο νερό από ότι στο λιγότερο λεπτομερές σύστημα. Η ροή κατάντη ήταν επίσης καλύτερα διαχειρίσιμη δεδομένου της μείωσης της άσκοπης ροής κατά 52%. Η περαιτέρω ενίσχυση του μοντέλου S/O ώστε να περιλαμβάνει την επαναφόρτιση του υδροφορέα από απώλειες μεταφοράς και από τη διήθηση του νερού άρδευσης επέτρεψε την αύξηση του νερού άντλησης κατά 80%. Ένας περιορισμός της παραπάνω προσέγγισης πηγάζει από τη χρήση γραμμικών σχέσεων για την εκτίμηση του υδραυλικού φορτίου συναρτήσεως των αντλήσεων υπογείων υδάτων και των εκτροπών της ροής. Όταν η προσέγγιση αυτή εφαρμόζεται σε ένα μη γραμμικό σύστημα (απεριόριστος υδροφορέας), το κορεσμένο πάχος πρέπει να είναι μεγάλο σε σχέση με την πτώση του υδραυλικού φορτίου. Τέλος το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του ταμιευτήρα (LDR) είναι πολύ απλό και συμπεριλήφθηκε για λόγους επεξήγησης. Η χρήση ενός καλύτερου θα μπορούσε να αυξήσει την αποδοτικότητα χρήσης του νερού.

Οι Pulido et al. (2002) ανέλυσαν αρκετά σενάρια συνδυαστικής διαχείρισης υπογείων και επιφανειακών υδάτων με σκοπό να βρουν τη βέλτιστη στρατηγική διαχείρισης των υδατικών πόρων στην παράκτια πεδιάδα Campo de Dalías της δυτικής Αλμερίας (Ισπανία). Αυτό έγινε με σκοπό την ελαχιστοποίηση των συνεπειών της υπερεκμετάλευσης, εισάγοντας νερό από τον ποταμό Adra River και μετεγκαθιστώντας τα φρεάτια άντλησης. Το σύστημα αποτελείται από τα υποσυστήματα: την Campo de Dalías (μία παράκτια πεδιάδα των 330 km²), τη Sierra de Gíddor και Adra River basin. Η υπεράντληση υδάτων για την ικανοποίηση των αυξανόμενων αρδευτικών αναγκών της περιοχής, λόγω της καλλιέργειας σιταριού, είχε σαν αποτέλεσμα την πτώση στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, την εισβολή σε αυτόν θαλασσινού νερού και την υποβάθμιση της ποιότητας του υπόγειου νερού. Το σύστημα προσομοιώθηκε από το μαθηματικό μοντέλο SIGMES, μέρος του Aquatool (Andreu et al.) που αναπτύχθηκε στο Πολυτεχνείο της Βαλένθια για πολύπλοκα συστήματα οργάνωσης και διαχείρισης του νερού. Η διαχείριση των υδάτων του συστήματος γίνονταν κάθε μήνα με τον ακόλουθο τρόπο: Η αστική ζήτηση του UDU Adra (ύψιστη προτεραιότητα) κάνει χρήση της εκροής κατά την άνοιξη. Εάν η εκροή αυτή είναι αρκετή για να ικανοποιήσει τη μηνιαία ζήτηση, τότε το πλεόνασμα ρέει προς τα κάτω. Εάν είναι ανεπαρκής, το νερό που απελευθερώνεται από τη δεξαμενή αυξάνεται σε αρκετή ποσότητα ώστε να ικανοποιήσει τη ζήτηση του UDU Adra, λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες διείσδυσης στον υδροφόρο ορίζοντα, όταν το νερό ρέει από το φαράγγι του Turon. Για κάθε εισαγωγή νερού άρδευσης στο ποτάμι με το δικαίωμα χρήσης του σαν επιφανειακό, το διαθέσιμο νερό προκύπτει από την άθροιση των εκροών από τις πηγές και από το νερό που απελευθερώνεται από τον ταμιευτήρα, αφαιρώντας το νερό που κατευθύνεται για την ικανοποίηση απαιτήσεων υψίστης προτεραιότητας (UDU Adra). Αν αυτό το νερό δεν επαρκεί, τότε η απελευθέρωση αυτή αυξάνεται με την ακριβή ποσότητα. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι το σύστημα λειτουργίας μπορεί να βελτιωθεί με τη

θέσπιση στοιχειωδών όγκων-στόχων που πρέπει να αποθηκεύονται σε στην άνω λεκάνη Adra και με την αναδιοργάνωση των αντλήσεων υπόγειων υδάτων.

Οι Schoups et al. (2006) ανέπτυξαν ένα μοντέλο προσομοίωσης-βελτιστοποίησης χωρικής κατανομής για αρδευτικό σύστημα που αποτελείται από πολλαπλούς ταμιευτήρες επιφανειακών υδάτων και ένα προσχωσιγενή υδροφόρο ορίζοντα. Το μοντέλο προσομοίωσης αποτελείται από τα φυσικά μοντέλα που περιγράφουν τη ροή του νερού μέσω των δεξαμενών, τα κανάλια άρδευσης, τον υδροφόρο ορίζοντα, καθώς και ένα αγρονομικό μοντέλο. Διαμορφώθηκε ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης του κέρδους και επιλύθηκε με μεγάλης κλίμακας βελτιστοποίηση που υπόκειται σε περιορισμούς. Το πρόβλημα που προέκυψε απαιτούσε μεγάλη υπολογιστική ισχύ, οπότε επιλύθηκε αποτελεσματικά αναλύοντας και κωδικοποιώντας τμήμα του Ιακωβιανού μητρώου και χρησιμοποιώντας μια διαδικασία σειριακής επίλυσης όπου η βελτιωμένη αρχική εκτίμηση βρέθηκε επιλύοντας πρώτα το πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς το μοντέλο των υπογείων υδάτων. Το μοντέλο εφαρμόστηκε σε ένα συνδυαστικό πρόβλημα διαχείρισης υπογείων και επιφανειακών υδάτων στην κοιλάδα Yaqui Valley, μία αγροτική περιοχή στη Sonora του Μεξικού. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το περαιτέρω κέρδος από τη γεωργία στην κοιλάδα δεν εξαρτάται μόνο από τη διαθεσιμότητα του νερού, αλλά και από τις αλλαγές στις τιμές των καλλιεργειών και το κόστος παραγωγής. Διερευνήθηκαν εναλλακτικές στρατηγικές διαχείρισης όπου εκτιμήθηκε η βιωσιμότητά τους. Διαπιστώθηκε ότι ο αντίκτυπος της ιστορικής ξηρασίας θα μπορούσε να είναι σημαντικά μικρότερος, χωρίς να επηρεάζονταν το κέρδος, εάν η διαχείριση των επιφανειακών και των υπόγειων υδατικών πόρων κατά τη διάρκεια των υγρών χρόνων ήταν διαφορετική. Ωστόσο οι εναλλακτικές στρατηγικές διαχείρισης δεν είναι βέβαιο ότι θα ήταν αποτελεσματικές και βιώσιμες για τη μελλοντική διαχείριση της κοιλάδας. Θα μπορούσαν επίσης να διερευνηθούν με αυτό το μοντέλο και άλλες στρατηγικές διαχείρισης όπως οι επενδύσεις σε πιο αποδοτικές τεχνολογίες άρδευσης ή η πρακτική του αρδευτικού ελλείμματος. Ωστόσο, αυτές δεν εξετάστηκαν εδώ λόγω των δύο ειδικών περιορισμών που υπάρχουν στην κοιλάδα Yaqui Valley.

Οι Rejani et al. (2008) προσπάθησαν να παρουσιάσουν σχέδια βέλτιστης καλλιέργειας και άντλησης νερού για υγρά, κανονικά και ξηρά χρόνια στην παράκτια ακτή Balasore της Orissa στην ανατολική Ινδία, η οποία είναι υπό τη σοβαρή απειλή της υπερανάληψης και υφαλμύρισης των υπογείων υδάτων της. Αναπτύχθηκαν δύο μοντέλα βελτιστοποίησης για την αποτελεσματική χρήση των υδατινών πόρων της λεκάνης κατά τη διάρκεια των μη μουσωνικών περιόδων: ένα μη γραμμικό μοντέλο διαχείρισης για τη βέλτιστη άντληση και ένα γραμμικό μοντέλο για το βέλτιστο σχέδιο καλλιέργειας σε συνδυασμό με ένα ρυθμισμένο και βαθμονομημένο μοντέλο προσομοίωσης της υπόγειας ροής. Όλα τα αποτελέσματα (τα χρονοδιαγράμματα της βέλτιστης άντλησης, οι τύποι καλλιέργειας και οι αντίστοιχες συνθήκες των υπόγειων υδάτων) παρουσιάστηκαν και για τα τρία εναλλακτικά σενάρια. Διαπιστώθηκε ότι τα βέλτιστα προγράμματα άντλησης όσο και τα αντίστοιχα σχέδια καλλιέργειας διέφεραν σημαντικά κάτω από τα τρία σενάρια. Επίσης τα επίπεδα των υπόγειων υδάτων βελτιώθηκαν σημαντικά κάτω από τις βέλτιστες υδραυλικές συνθήκες σε

σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση. Στα ξηρά έτη, τα επίπεδα των υπόγειων υδάτων, σύμφωνα με την παρούσα μορφή άντλησης και με τη βέλτιστη άντληση, έδειξαν ότι η άντληση νερού σε περίοδο μη-μουσώνων δεν πρέπει να υπερβαίνει τη βέλτιστη εφόσον απουσιάζουν διορθωτικά μέτρα στη λεκάνη. Το συμπέρασμα είναι ότι, για να εξασφαλιστεί η βιώσιμη εκμετάλλευση των υπόγειων υδάτων στη λεκάνη, θα πρέπει να υιοθετηθεί από τους αγρότες το βέλτιστο σχέδιο καλλιέργειας και το βέλτιστο πρόγραμμα άντλησης. Επιπλέον, η ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου βελτιστοποίησης έδειξε ότι το μοντέλο είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στις τιμές των υψηλής αξίας καλλιέργειας που ακολουθείται σύμφωνα με τη διαθεσιμότητα της γης, στο κόστος καλλιέργειας, και στη διαθεσιμότητα του νερού. Συνολικά, συνιστάται για τη λεκάνη Balasore η υιοθέτηση των βέλτιστων σχεδίων καλλιέργειας και του βέλτιστου προγράμματος άντλησης, σε συνδυασμό με την εκμετάλλευση του συλλεγόμενου βρόχινου νερού, προκειμένου να διασφαλιστεί η βιώσιμη διαχείριση των ζωτικών πόρων των υπόγειων υδάτων και την αύξηση της ετήσιας απόδοσης. Τα ευρήματα αυτής της μελέτης είναι επίσης πολύ χρήσιμα σε άλλες λεκάνες των παράκτιων υδάτων της Ινδίας, αφού έχουν σχεδόν παρόμοιες υδρολογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες.

Οι Pulido-Velazquez et al. (2008) βρήκαν ένα μικρό αριθμό μοντέλων που μεταβάλλονται χρονικά (transient models) και βελτιστοποιούν τη λειτουργία των ταμιευτήρων και των απεριόριστων υδροφορέων (unconfined aquifers) τους σε κλίμακα λεκάνης απορροής. Ένας περιορισμός στη χρήση μοντέλων με απεριόριστους υδροφορείς είναι το υπερβολικό υπολογιστικό κόστος της ενσωμάτωσης τους σε εκείνα τα προβλήματα διαχείρισης που αναλύονται για πολλές περιόδους διαχείρισης. Αυτή η επιρροή της προσέγγισης των απεριόριστων υδροφορέων σαν περιορισμένοι (με μικρότερες υπολογιστικές απαιτήσεις) σε συνδυαστικά προβλήματα διαχείρισης-βελτιστοποίησης (σε κλίμακα λεκάνης απορροής) αναλύεται για την περίπτωση της Adra-Campo de Dalías. Για την προσομοίωση της ροής του απεριόριστου υδροφορέα υιοθετήθηκε η μέθοδος του μητρώου απόκρισης, σε ένα μοντέλο διαχείρισης που χρησιμοποίησε σειριακό γραμμικό προγραμματισμό (SLP). Τα αποτελέσματα (όπως φαίνονται από τα στοιχεία των παροχών που ικανοποιούν τις απαιτήσεις του συστήματος) δείχνουν ότι, αν και η πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα είναι σημαντική σε σύγκριση με το κορεσμένο πάχος, τα αποτελέσματα διαχείρισης που προέκυψαν από τη προσομοίωση του υδροφορέα σαν να ήταν περιορισμένος, είναι παρόμοια με εκείνα που θα προέκυπταν για την περίπτωση που ήταν απεριόριστος. Οι επιπτώσεις της υιοθέτησης αυτού του αποτελέσματος σε άλλα προβλήματα διαχείρισης δεν μπορούν να εκτιμηθούν. Για να θεωρηθεί γραμμική η απόκριση του υδροφορέα κατά την κατασκευή ενός μοντέλου διαχείρισης το οποίο περιλαμβάνει έναν ελεύθερο υδροφόρο ορίζοντα, θα πρέπει να εξεταστούν λεπτομερώς οι επιπτώσεις της γραμμικής αυτής προσέγγισης στις θέσεις των περιορισμών και στη συνολική σύνθεση διαχείρισης. Όποτε είναι δυνατόν, η παραδοχή της γραμμικής απόκρισης, θα πρέπει να ελέγχεται κατά την επίλυση του προβλήματος σε απεριόριστο υδροφορέα χρησιμοποιώντας το GWM, οποίο μπορεί να επιλύσει συνδυαστικά προβλήματα

διαχείρισης χρησιμοποιώντας τις εξωτερικές μεταβλητές (external variables, βλέπε Κεφάλαιο 4). Όμως, λόγω της πολυπλοκότητας και των διαστάσεων των υδάτινων πόρων του συστήματος σε κλίμακα λεκάνης, η σύγκριση μεταξύ της λύσης σε απεριόριστο και περιορισμένο υδροφορέα, πρέπει να γίνεται για μικρή χρονική περίοδο διαχείρισης (εδώ μελετήθηκε με μηνιαίο βήμα 2 χρόνων). Αν τελικά η παραδοχή της γραμμικότητας μπορεί να εφαρμοστεί, η μείωση του υπολογιστικού κόστους μπορεί να καταστήσει δυνατή την εκτέλεση ανάλυσης σε εναλλακτικές επιλογές, με περισσότερες περιόδους διαχείρισης, ώστε να εξεταστεί η стоχαστική συμπεριφορά των εισροών από επιφανειακούς πόρους. Εάν θεωρηθούν περισσότεροι ταμιευτήρες και υδροφορείς στο σύστημα, τότε το υπολογιστικό κόστος θα ήταν ακόμα μεγαλύτερο. Στην περίπτωση της λεκάνης που μελετήθηκε, δεν υπάρχει άμεση επικοινωνία ποταμού και υδροφορέα, οπότε η επαναφόρτιση του υδροφορέα και η παροχή του ποταμού δεν εξαρτώνται από τα υδραυλικά φορτία του πρώτου (αυτό επιτεύχθηκε με τη χρήση εξωτερικών μεταβλητών απόφασης).

Οι Bharati et al. (2008) περιγράφουν την ανάπτυξη, ρύθμιση και προκαταρκτική εφαρμογή ενός δυναμικού μοντέλου οικονομικής-υδρολογικής προσομοίωσης-βελτιστοποίησης το οποίο αξιολογεί τη συνδυαστική χρήση των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων σε ένα σύστημα που περιλαμβάνει ένα μικρό ταμιευτήρα και αρδευτικά συστήματα άρδευσης στη λεκάνη της Volta Basin της Αφρικής. Έχουν επικεντρωθεί σε ένα μικρότερο σύστημα που βρίσκεται στη λεκάνη απορροής Antakiwi στην Γκάνα. Ο στόχος της έρευνας αυτής, η οποία έγινε στα πλαίσια του έργου GLOWA Volta project, ήταν η ανάπτυξη ενός συστήματος αποφάσεων υποστήριξης για τη βελτίωση της διαχείρισης της γης και των υδάτινων πόρων για την αντιμετώπιση πιθανών περιβαλλοντικών αλλαγών στη λεκάνη Volta. Το μοντέλο αποτελείται από ένα φυσικό μοντέλο υδρολογίας (Wasim-ETH) και ένα οικονομικό μοντέλο βελτιστοποίησης γραμμικό σε GAMS. Το Wasim-ETH είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την προσομοίωση ενός μεγάλο εύρους υδρολογικών μεταβλητών που απαιτούν οι μελέτες βελτιστοποίησης. Ωστόσο δεν έχει την ικανότητα επί του παρόντος να χρησιμοποιηθεί για να διαμορφώσει έναν ταμιευτήρα αποθήκευσης. Οπότε για να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός χρησιμοποιήθηκε το GAMS. Στην τρέχουσα μορφή του, η αντικειμενική βάση για την βελτιστοποίηση είναι περιορισμένη κατά κύριο λόγο στην αποτίμηση της αγοράς της φυτικής παραγωγής, που βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη σχέση καλλιέργεια-αρδευτικές απαιτήσεις. Οι τρέχουσες εργασίες ανάπτυξης του GAMS επικεντρώνονται στη βελτίωση του πλαισίου της οικονομικής ανάλυσης με επέκταση της συνάρτησης παραγωγής ώστε να περιλαμβάνει μια πιο λεπτομερή εκπροσώπηση της γεωργικής οικονομίας, συμπεριλαμβανομένων των πρόσθετων περιορισμένων πόρων, όπως η οικογενειακή εργασία. Τα αποτελέσματα περιελάμβαναν τη βέλτιστη αποθήκευση νερού και κατανομή των συστημάτων για την αρδευτική παραγωγή, δεδομένου της σύνδεσης επιφανειακών και υπόγειων συστημάτων νερού.

Οι Yang et al. (2008) αντιμετώπισαν την εξέταση του σταθερού κόστους και του χρονικά μεταβαλλόμενου λειτουργικού κόστους, τα οποία συνδέονται με την ταυτόχρονη συνδυαστική χρήση των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, σαν ένα

πρόβλημα με πολλαπλές αντικειμενικές συναρτήσεις (multi-objective problem) που όμως είναι ασύμμετροι μεταξύ τους. Η εφαρμογή των παραπάνω έγινε για την επίλυση ενός προβλήματος σχεδιασμού των υδάτινων πόρων (επιφανειακών και υπόγειων) στη νότια Ταϊβαν. Για την επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος, μία νέα προσέγγιση αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία, συγχωνεύοντας τον γενετικό αλγόριθμο πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων (Moga), τον υπό περιορισμό διαφορικό δυναμικό προγραμματισμό (CDDP) και ένα μοντέλο προσομοίωσης των υπόγειων υδάτων (ISOQUAD). Σε αντίθεση με ένα πρόβλημα με μία αντικειμενική συνάρτηση, η λύση ενός τέτοιου είδους προβλήματος δεν αποτελείται από ένα μοναδικό σημείο αλλά από μία οικογένεια σημείων που είναι γνωστά ως non-inferior solution set, ώστε ο μελετητής να έχει την πλήρη εικόνα των χαρακτηριστικών του προβλήματος πριν προσδιορίσει την τελική λύση. Ως εκ τούτου, ο κύριος στόχος αυτής της έρευνας ήταν να καταδείξει πώς ένα περίπλοκο multi-objective problem μπορεί να λυθεί με τη χρήση σύγχρονων συστημάτων βελτιστοποίησης. Εκτός από τη μεθοδολογία, ο άλλος στόχος ήταν να παρουσιάσει την εξισορρόπηση μεταξύ του κόστους (άυξηση του κόστους κεφαλαίου) και του οφέλους (μείωση του ελλείματος νερού) που προκαλείται από μια αύξηση της παραγωγικής ικανότητας του συστήματος. Για τη μείωση της πολυπλοκότητας του παραπάνω μοντέλου ανάπτυξης, πολλά στοιχεία του υφιστάμενου συστήματος ύδρευσης της μελέτης απλοποιήθηκαν. Επιπλέον, δεν υπήρχε σύστημα παροχής υπογείων υδάτων στην περιοχή αν και είναι στη λίστα εναλλακτικών λύσεων της κυβέρνησης για μελλοντική ανάπτυξη. Παρ' όλα αυτά, η μελέτη είχε ως στόχο να αποδείξει τη δυνατότητα του προτεινόμενου αλγόριθμου, και το υπάρχον σύστημα είναι μόνο ένα μόνο πλαίσιο εφαρμογής για τη μελέτη.

Οι Fayad et al. (2012) παρουσίασαν ένα μοντέλο προσομοίωσης-βελτιστοποίησης (S/O model) χρησιμοποιώντας τεχνητούς νευρωνικούς δικτυακούς προσομοιωτές (ANNs) και ένα γενετικό αλγόριθμο (GA) βελτιστοποίησης για ένα πρόβλημα διαχείρισης με πολλαπλές αντικειμενικές συναρτήσεις (multi-objective problem). Η διαφορά με άλλα μοντέλα είναι ότι το μοντέλο αυτό απευθύνεται ταυτόχρονα σε όλες τις σημαντικές ροές συμπεριλαμβανομένων των αλληλεπιδράσεων μεταξύ ταμιευτήρα, ποταμού, εκτροπής και υδροφορέα, με λεπτομερέστερο τρόπο. Το προτεινόμενο μοντέλο εφαρμόστηκε σε μία υποθετική περιοχή μελέτης. Η περιοχή περιελάμβανε ένα ποτάμι εισροής, έναν πολλαπλών χρήσεων ταμιευτήρα, ένα ποτάμι εκρόης, εκτροπές, πηγάδια άντλησης και δημοτικούς, βιομηχανικούς, και αρδευτικούς χρήστες νερού. Τα πηγάδια αντλούν από ένα ομοιογενές και ανισότροπο σύστημα υδροφόρου ορίζοντα δύο στρωμάτων, που προσομοιώθηκε από ένα μοντέλο πεπερασμένων διαφορών. Τα ANN networks που χρησιμοποιήθηκαν εδώ είναι ρυθμισμένα να παράγουν ορισμένα παρόμοια αποτελέσματα με αυτά που θα παρήγαγε ένα αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης πεπερασμένων διαφορών. Στη συνέχεια ενσωματώθηκαν στο μοντέλο S/O. Κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης ο γενετικός αλγόριθμος (GA) βελτιστοποίησης χρησιμοποιεί τα ANN, αντί του μοντέλου προσομοίωσης πεπερασμένων διαφορών. Εδώ ο στόχος ήταν η ταυτόχρονη μεγιστοποίηση της παροχής του νερού και της

παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας. Όμως οι δύο στόχοι ήταν δυσανάλογοι και αντικρουόμενοι, καθώς η μεγιστοποίηση της παροχής του νερού οδηγεί αυτόματα στη μεγιστοποίηση του νερού που εκτρέπεται από τον ταμιευτήρα. Οπότε η ποσότητα του νερού που είναι διαθέσιμη για την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας μειώνεται. Αυτό οδήγησε στη πτώση της παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας. Μετά τη βελτιστοποίηση, επιβεβαιώθηκε ότι προτεινόμενο μοντέλο προβλέπει με αποδεκτή ακρίβεια τις αποκρίσεις του συστήματος.

Οι Sidiropoulos et al. (2012) πρότειναν ένα εργαλείο προσομοίωσης και ποσοτικής διαχείρισης του υπόγειου υδροφορέα της λεκάνης απορροής της λίμνης Κάρλας της Θεσσαλίας. Ο υπόγειος υδροφορέας βρίσκεται σε κατάσταση εκμετάλλευσης του μη ανανεώσιμου αποθέματος του από τη δεκαετία του '80. Εκμεταλλεύοντας τη λειτουργία του ταμιευτήρα και τηρώντας το χρονοδιάγραμμα των προβλεπόμενων συνοδών έργων, προτάθηκε ο επιτρεπόμενος αντλούμενος όγκος υπόγειου νερού και οι επιτρεπόμενες για άντληση θέσεις, να είναι τέτοιες που να καλύπτουν τις λοιπές αρδευτικές ανάγκες, ώστε όχι μόνο να μην αντλούνται οι μη ανανεώσιμοι πόροι του, αλλά και να υπάρξει ανάταξη του υδροφόρου ορίζοντα σε εύλογο χρονικό διάστημα, λαμβάνοντας υπόψιν και σενάρια κλιματικής αλλαγής. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα συνδυασμένο σύστημα μοντέλων προσομοίωσης των υδάτινων πόρων της λεκάνης και ένα εργαλείο διαχείρισης του υπόγειου υδροφορέα. Στα μοντέλα προσομοίωσης συμπεριλαμβάνονται: Το μοντέλο επιφανειακής υδρολογίας UTHBAL (Loukas et al. 2005), το μοντέλο προσομοίωσης της λειτουργίας του ταμιευτήρα UTHRL (Loukas et al. 2005), το μοντέλο προσομοίωσης της επικοινωνίας ταμιευτήρα-υδροφορέα LAK3 (Merrit and Konikow 2000), και τέλος το μοντέλο προσομοίωσης της υπόγειας ροής (MODFLOW 2000), το οποίο αποτελούσε και τον πυρήνα του συστήματος. Τα σενάρια κλιματικής αλλαγής σχετικά με τη βροχόπτωση και τη θερμοκρασία αξιολογήθηκαν χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα του Καναδικού Κέντρου for Climate Model Analysis General Circulation Model (CGCMa2) και μία υβριδική στατιστική μέθοδος μειώμενης κλίμακας που συνδέει ένα πολλαπλό μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης (MLR) και ένα μοντέλο χρονοσειρών για δύο κοινωνικοοικονομικά σενάρια. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για την περίοδο 1987-2044 με τα αποτελέσματα των μοντέλων να είναι σε μηνιαίο βήμα. Τα δύο μοντέλα του ταμιευτήρα ξεκινούν από το 2012, διότι τότε ξεκινά και η λειτουργία του σύμφωνα με το χρονοδιάγραμμα του έργου. Όλα τα μοντέλα ρυθμίστηκαν έναντι δεδομένων εντός της ιστορικής περιόδου 1960-2002, με διαφορετικές περιόδους το καθένα, ανάλογα με τις διαθέσιμες παρατηρήσεις. Η επέκταση της χρονοσειράς από το 2002 ως το 2044 έγινε με επανάληψη της προηγούμενης 40ετίας 1960-2002. Η διαχειριστική περίοδος του υδροφορέα για την οποία εκτιμάται, μέσω του προβλήματος της βελτιστοποίησης, ο επιτρεπόμενος αντλούμενος όγκος νερού, είναι η 2012-2044. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύθηκε με τη χρήση αρχικά του σειριακού γραμμικού προγραμματισμού (SLP) του προγράμματος GWM-2000 της USGS, ο οποίος μετατρέπει τυχόν μη γραμμικές συσχετίσεις σε γραμμικές. Στη συνέχεια με τη χρήση του μοναδιαίου μητρώου απόκρισης και της μεθόδου Simplex επιλύθηκαν οι

εξισώσεις του προβλήματος διαχείρισης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής είναι σημαντική σχετικά με τη βέλτιστη διαχείριση των υπόγειων υδάτων, καθώς καθορίζει το βέλτιστο όγκο του εξαγόμενου νερού και τον αριθμό και τη θέση των υπόλοιπων αρδευτικών πηγαδιών. Η διαφορά των ανανεώσιμων πηγών νερού μεταξύ των δύο σεναρίων είναι σε θέση να οδηγήσει σε δύο διαφορετικά προβλήματα βελτιστοποίησης στον ίδιο υδροφόρο ορίζοντα, καθώς διαφέρουν ως προς τις περιοχές που είναι επιτρεπτή η άντληση νερού. Η μελέτη και η πρόβλεψη των αλλαγών του κλίματος έπαιξε σημαντικό ρόλο στη διαχείριση των υδάτινων πόρων, ανεξάρτητα του πόσο ακριβές είναι ένα εργαλείο διαχείρισης. Αν η πρόβλεψη έχει υψηλό βαθμό αβεβαιότητας, το εργαλείο διαχείρισης θα αποδεικνύονταν άχρηστο.

Οι Shi et al. (2012) είχαν ως πρωταρχικό στόχο στη μελέτη τους, να προσδιορίσουν τη βιώσιμη απόδοση των υπόγειων υδάτων, το οποίο είναι ένα βασικό σημείο αναφοράς για την ορθολογική ανάπτυξη τους, αλλά και ένα σύνθετο ζήτημα των υδρογεωλογικών επιστημών. Ένας σημαντικός περιορισμός για τον εντοπισμό της βιώσιμης απόδοσης των υπόγειων υδάτων είναι η έλλειψη ενός ενιαίου κριτηρίου αξιολόγησης, επειδή υπάρχουν πολλοί παράγοντες που εμπλέκονται στα υδρολογικά συστήματα και είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν. Αυτοί οι παράγοντες προέρχονται από τους πόρους, την οικολογία, τον κοινωνικό-οικονομικό τομέα, τον πολιτισμό, την επιστήμη και την τεχνολογία και από άλλους τομείς. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, δομήθηκε ένα ολοκληρωμένο μοντέλο αξιολόγησης για μια σειρά από λόγους, συμπεριλαμβανομένης της μέγιστης αποδοτικότητας χρήσης του νερού, το ενιαίο όφελος της ανάπτυξης και χρήσης, τη βέλτιστη περιβαλλοντική ζήτηση νερού και την ελάχιστη ανθρωπογενή επίδραση στο σύστημα των υπόγειων υδάτων. Αποτελείτο από ένα μοντέλο οφέλους, ένα μοντέλο προσομοίωσης την ανακύκλωσης του νερού και ένα μοντέλο βελτιστοποίησης. Το μοντέλο προσομοίωσης την ανακύκλωσης του νερού σε επίπεδο λεκάνης απορροής, ήταν ένα βασικό συστατικό για την προσομοίωση σεναρίων με διαφορετικούς περιορισμούς. Το ενιαίο μοντέλο οφέλους στη συνέχεια προσδιόρισε την καλύτερη αναπτυξιακή στρατηγική για τους υδάτινους πόρους. Αυτό το σύστημα αξιολόγησης δεν επιτρέπει μόνο τον εύκολο υπολογισμό της βιώσιμης απόδοσης των υπόγειων υδάτων, αλλά και ξεπερνά την ασάφεια και τη σύλληψη του ορισμού του. Ωστόσο, το σύστημα εξακολουθεί να έχει ορισμένους περιορισμούς όπως η απαίτηση μεγάλης βάσης δεδομένων και πολύπλοκους υπολογισμούς. Η περιοχή μελέτης που επιλέχθηκε για την εφαρμογή των παραπάνω είναι η λεκάνη απορροής του ποταμού Yinma σε μια Κινέζικη ημι-υγρή περιοχή. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η βελτιστοποιημένη απόδοση των υπόγειων υδάτων θα μπορούσε να υποστηριχθεί από την εντατική εκμετάλλευση του ταμιευτήρα και την ταυτόχρονη διατήρηση της κατάλληλης οικολογικής ζήτησης του νερού. Οι μελετητές πρότειναν μία στρατηγική αξιοποίησης των υπόγειων υδάτων στις οικονομικά αναπτυσσόμενες χώρες του κόσμου.

3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΡΟΩΝ (GROUNDWATER MODELING SYSTEM – GMS 6.0)

3.1 Εισαγωγή

Το Groundwater Modeling System είναι ένα περιεκτικότατο γραφικό περιβάλλον στο οποίο πραγματοποιούνται προσομοιώσεις υπόγειων ροών. Πρόκειται για ένα πλήρες σύστημα διαφορετικών τύπων μαθηματικών μοντέλων (δισδιάστατων ή τρισδιάστατων μοντέλων πεπερασμένων διαφορών). Αναφέρονται τα MODFLOW 2000, MODPATH, MT3DMS/RT3D, SEAM3D, ART3D, UTCHEM, FEMWATER, PEST, UCODE, MODAEM and SEEP2D.

Τα μοντέλα αυτά χωρίζονται στις παρακάτω ενότητες σύμφωνα με τις λειτουργίες τους:

- Δισδιάστατη ροή
 - Το MODAEM, βασιζόμενο σε αναλυτικές μεθόδους, προσομοιώνει εύκολα και γρήγορα προβλήματα δισδιάστατης ροής.
 - Το SEEP2D, βασιζόμενο στα πεπερασμένα στοιχεία, προσομοιώνει τη δισδιάστατη διαρροή, π.χ από φράγματα, από αναχώματα κ.α
- Τρισδιάστατη ροή
 - Το MODFLOW 2000, βασιζόμενο στις πεπερασμένες διαφορές, προσομοιώνει τη ροή του υπόγειου νερού στην κορεσμένη ζώνη.
 - Το FEMWATER, βασιζόμενο στα πεπερασμένα στοιχεία, προσομοιώνει τη ροή του υπόγειου νερού στην κορεσμένη και στην ακόρεστη ζώνη.
- Μεταφορά ρύπανσης
 - Το ART3D, βασιζόμενο σε αναλυτικές μεθόδους, προσομοιώνει απλά δισδιάστατα προβλήματα.
 - Τα MODPATH ή το FEMWATER, βασιζόμενα στα πεπερασμένα στοιχεία, προσομοιώνουν απλά τρισδιάστατα προβλήματα μεταφοράς.
 - Τα RT3D ή SEAM3D, βασιζόμενα στις πεπερασμένες διαφορές, προσομοιώνουν πολύπλοκα τρισδιάστατα προβλήματα μεταφοράς
 - Το UTCHEM, βασιζόμενο στις πεπερασμένες διαφορές, προσομοιώνει τρισδιάστατα προβλήματα μεταφοράς διαφορετικών φάσεων και στρωμάτων.
- Μοντέλα ρύθμισης PEST και UCODE, η παρουσίαση των οποίων θα γίνει παρακάτω.

Τα προηγούμενα αλληλοϋποστηρίζονται και καθένα παρέχει τη δυνατότητα να γίνεται κοινή χρήση της ίδιας πληροφορίας από διαφορετικά μοντέλα και διαφορετικούς τύπους δεδομένων. Τα παρεχόμενα εργαλεία των μοντέλων εκτελούν διαφορετικές λειτουργίες, οι βασικότερες των οποίων είναι ο χαρακτηρισμός της θέσης, η κατασκευή του εννοιολογικού μοντέλου, η βαθμονόμηση, η δημιουργία του καννάβου, η τελική επεξεργασία και η αναπαράσταση.

Σε ένα γραφικό περιβάλλον όπως αυτό του GMS 6.0, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα, μέσω της απλής επιλογής ενός σημείου (κελιού) ή συνόλου σημείων, να

εισάγει ή / και να τροποποιεί υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά και οριακές συνθήκες στα κατάλληλα πεδία των παραθύρων διαλόγου. Τα εκάστοτε δεδομένα είτε εισάγονται ως εγγραφές, είτε εισάγονται ως σειρές δεδομένων τυχαίων σημείων που «διαβάζονται» από το χρησιμοποιούμενο πρόγραμμα. Τα εξαγόμενα, τέλος, αποτελέσματα είναι γενικευμένα με τέτοιο τρόπο από το GMS, ώστε ο χρήστης να έχει στη διάθεσή του πλήθος επιλογών (μορφών αποτελεσμάτων) προκειμένου να συνδέει το προς επίλυση κάθε φορά πρόβλημα με την αντίστοιχη γραφική απεικόνιση της λύσης.

3.2 Ο Κώδικας Modflow

Για την προσομοίωση της υδροδυναμικής κατάστασης των υδροφορέων χρησιμοποιείται από πολλούς ερευνητές ο κώδικας **Modflow** (*Modular three dimensional finite difference ground water flow model*) της Αμερικανικής Υπηρεσίας Γεωλογικών Ερευνών (*U.S.G.S.*).

Το πρόγραμμα στηρίζεται στην αριθμητική επίλυση μιας κύριας διαφορικής εξίσωσης, η οποία προκύπτει από την εφαρμογή της εξίσωσης διατήρησης της μάζας και του νόμου του Darcy. Πρόκειται για ένα μοντέλο πεπερασμένων διαφορών με επίλυση των εξισώσεων στο κέντρο των κυψελίδων του καννάβου. Εφαρμόζεται τόσο σε μόνιμα, όσο και σε μη μόνιμα προβλήματα ροής και υπολογίζει τις μεταβολές του φορτίου στα σημεία πεδίου σε όλη τη διάρκεια του χρόνου για ομογενή – ετερογενή, ισότροπο ή ανισότροπο υδροφόρο. Επίσης έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης μεγάλου αριθμού πηγαδιών, της κατείδυσης, της επίδρασης στραγγιστηριών και ποταμών και λιμνών κ.α όπως θα παρουσιαστούν παρακάτω.

3.2.1 Μαθηματικό Υπόβαθρο του Modflow

Έστω ένας στοιχειώδης όγκος δV με περιεχόμενη μάζα δM . Η μεταβολή της μάζας αυτής ανά μονάδα όγκου και χρόνου είναι:

$$\frac{\partial(\delta M)}{\partial t} / \delta V \quad \text{Εξ. 3.1}$$

Έστω \vec{q} η ταχύτητα Darcy και ρ η πυκνότητα του ρευστού, τότε η ροή της μάζας ανά μονάδα χρόνου θα είναι $\rho \cdot \vec{q}$.

Αν το ρευστό εισέρχεται ή εξέρχεται από το χώρο κατά $W(x,y,z,t)$ ανά μονάδα χρόνου και μονάδα όγκου, η προστιθέμενη μάζα ανά μονάδα χρόνου και όγκου είναι $\rho \cdot W$.

Επειδή η μάζα διατηρείται, θα ισχύει:

$$\iint_{\delta V} \rho \cdot \vec{q} \cdot d\vec{S} + \iiint_V \rho \cdot W \cdot dV + \iiint_V \left(\frac{\partial(\delta M)}{\partial t} / \delta V \right) \cdot dV = 0 \quad \text{Εξ. 3.2}$$

Όπου ο πρώτος όρος είναι το επιφανειακό ολοκλήρωμα, που λαμβάνεται σε όλη την κλειστή επιφάνεια του δV και οι άλλοι δύο όροι ολοκληρώματα όγκου που

εκτείνονται στον όγκο του στοιχείου. Σύμφωνα με το θεώρημα της απόκλισης, το επιφανειακό ολοκλήρωμα μπορεί να γραφεί σαν ολοκλήρωμα όγκου:

$$-\oint \rho \cdot \vec{q} \cdot d\vec{S} = -\iiint \nabla(\rho \cdot \vec{q}) \cdot dV \quad \text{Εξ. 3.3}$$

Κατά τον Hantush (1964):

$$\frac{d(\delta M)}{\rho \cdot \delta V} = \frac{d(\delta V_w)}{\delta V} = S_s \cdot d\phi \quad \text{Εξ. 3.4}$$

όπου S_s είναι η ειδική αποθηκευτικότητα με διαστάσεις L^{-1} . Έτσι η Εξίσωση 3.2 γράφεται:

$$-\iiint \left\{ \nabla(\rho \cdot \vec{q}) - \rho \cdot W + \rho \cdot S_s \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} \right\} \cdot dV = 0 \quad \text{Εξ. 3.5}$$

ή

$$-\left[\frac{\partial(\rho \cdot q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot q_z)}{\partial z} \right] + \rho \cdot W = \rho \cdot S_s \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad \text{Εξ. 3.6}$$

Σύμφωνα με το Hantush (1964), η μεταβολή της πυκνότητας του νερού είναι πολύ μικρή και θεωρείται σταθερή στα περισσότερα προβλήματα υπόγειας υδραυλικής, οπότε μπορεί να παραληφθεί από την Εξίσωση 3.6. Οι συνιστώσες της ταχύτητας Darcy στις τρεις διαστάσεις, δίνονται από τη σχέση:

$$\left. \begin{aligned} q_x &= -K_{xx} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \\ q_y &= -K_{yy} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y} = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \\ q_z &= -K_{zz} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial z} = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad \text{Εξ. 3.7}$$

Η Εξίσωση 3.6, λόγω της 3.7 γίνεται:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{Εξ. 3.8}$$

όπου:

K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας κατά τις διευθύνσεις X, Y, Z αντίστοιχα σε μονάδες $[LT^{-1}]$.

h το πιεζομετρικό φορτίο σε [L].

W οι εξωτερικές εισροές ή εκροές νερού ανά μονάδα όγκου σε $[T^{-1}]$

S_s η ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους υλικού σε $[L^{-1}]$, ή το

αποτελεσματικό πορώδες ανά μέτρο βάθους το υδροφορέα

t ο χρόνος [T].

Η Εξίσωση 3.8 είναι η τρισδιάστατη διαφορική εξίσωση με μερικές παραγώγους, που περιγράφει την κίνηση του υπόγειου νερού σε υπό πίεση υδροφορείς και χρησιμοποιείται από μοντέλο **MODFLOW**. Η εξίσωση αυτή περιγράφει την κίνηση του υπόγειου νερού κάτω από συνθήκες μη μόνιμης ροής, σε ετερογενές και ανισότροπο μέσο, με την προϋπόθεση ότι οι κύριοι άξονες της υδραυλικής αγωγιμότητας, ταυτίζονται με τους άξονες του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων. Τα S_s , K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} στην Εξίσωση 8 μπορούν να είναι συναρτήσεις του χώρου ($S_s = S_s(x,y,z)$, $K_{xx} = K_{xx}(x,y,z)$, $K_{yy} = K_{yy}(x,y,z)$, $K_{zz} = K_{zz}(x,y,z)$) και το W συναρτήση του χώρου όσο και του χρόνου ($W = W(x,y,z,t)$).

Η Εξίσωση 3.8 σε συνδυασμό με τις οριακές συνθήκες στα όρια του υδροφορέα και με καθορισμό αρχικής συνθήκης πιεζομετρίας, αποτελεί ένα μαθηματικό μοντέλο ενός υπόγειου υδροφορέα. Εκτός από περιπτώσεις πολύ απλών συστημάτων υδροφορέων, αναλυτικές λύσεις της Εξίσωσης 3.8 είναι πολύ δύσκολο και τις περισσότερες φορές αδύνατο να επιτευχθούν. Γι' αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια μαθηματικά μοντέλα, που στηρίζονται σε αριθμητικές μεθόδους επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων και δίνουν προσεγγιστικές λύσεις. Τέτοιες αριθμητικές μέθοδοι είναι οι πεπερασμένες διαφορές, τα πεπερασμένα στοιχεία, τα πολλαπλά κελιά, τα οριακά στοιχεία κ.α.

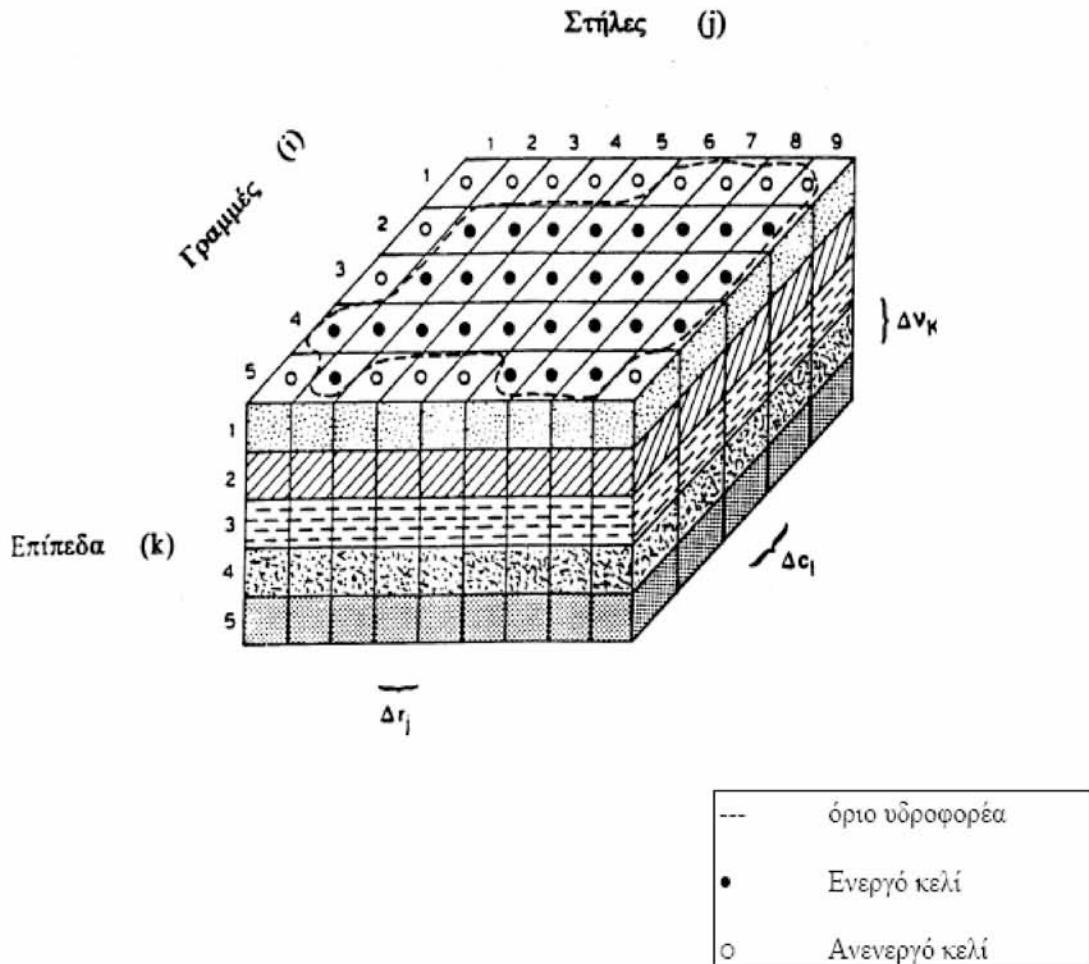
Το μοντέλο **MODFLOW** με τη βοήθεια του οποίου γίνεται η επίλυση της Εξίσωσης 3.8, χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών στις τρεις διαστάσεις όπου το συνεχές σύστημα που περιγράφεται από την Εξίσωση 3.8, αντικαθίσταται από ένα πεπερασμένο αριθμό διακριτών σημείων τόσο ως προς το χρόνο όσο και ως προς το χώρο. Οι μερικές παράγωγοι αντικαθίστανται από όρους που υπολογίζονται ως διαφορές στην πιεζομετρία για τα συγκεκριμένα αυτά σημεία και η διαδικασία αυτή τελικά οδηγεί σε συστήματα γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων με πεπερασμένες διαφορές και συγκεκριμένα πίσω διαφορές.

Η αριθμητική λύση των συστημάτων αυτών δίνει τιμές για το φορτίο σε συγκεκριμένα σημεία και για συγκεκριμένα χρονικά βήματα. Οι τιμές αυτές αποτελούν μία προσέγγιση της αναλυτικής λύσης της εξίσωσης η οποία, σε αντίθεση με την αριθμητική λύση, δίνει συνεχείς τιμές της κατανομής φορτίου, για οποιοδήποτε σημείο και για οποιοδήποτε χρόνο.

3.2.2 Διακριτοποίηση

Στην Εικόνα 3.1 φαίνεται η χωρική διακριτοποίηση ενός υδροφορέα, με ένα πλέγμα ορθογώνιων υποπεριοχών, προσανατολισμένων προς το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένου, που λέγονται κελιά (cells). Κάθε υποπεριοχή αποτελείται από ένα χαρακτηριστικό σημείο, το οποίο είναι το κέντρο βάρους του κελιού και στο οποίο ζητείται να υπολογιστεί η τιμή του h . Χρησιμοποιούνται δείκτες (i, j, k) όπου:

- $i = 1, 2, \dots, nrow$, αντιπροσωπεύει τον αριθμό των γραμμών,
 $j = 1, 2, \dots, ncol$, αντιπροσωπεύει τον αριθμό των στηλών,
 $k = 1, 2, \dots, nlay$, αντιπροσωπεύει τον αριθμό των επιπέδων στην κατακόρυφη διεύθυνση.



Εικόνα 3.1: Χωρική διακριτοποίηση ενός τρισδιάστατου υδροφορέα (Ψιλοβίκος Α., 1999).

Κατά τον σχηματισμό των εξισώσεων του μοντέλου, έγινε η σύμβαση ότι τα επίπεδα αντιπροσωπεύουν οριζόντιες υδρογεωλογικές μονάδες. Έτσι ο δείκτης k σημαίνει αλλαγές πάνω στον κατακόρυφο άξονα z με φορά από πάνω προς τα κάτω. Το ίδιο ισχύει και για τους άλλους δύο άξονες. Τόσο οι γραμμές, που είναι παράλληλες στον άξονα x όσο και οι στήλες που είναι παράλληλες στον y , δίνουν μεταβολές κατά τη διεύθυνση y και x αντίστοιχα. Έτσι το μήκος ενός κελιού κατά τη διεύθυνση των γραμμών σε μια δεδομένη στήλη j , γράφεται Δr_j , ενώ κατά τη διεύθυνση των στηλών σε μια δεδομένη γραμμή i , γράφεται Δc_i και το πάχος του κελιού για ένα δεδομένο επίπεδο Δv_k . Δηλαδή ένα κελί με συντεταγμένες $(i, j, k) = (4, 8, 3)$ έχει όγκο $\Delta V = \Delta r_8 \Delta c_4 \Delta v_3$.

3.2.3 Εξίσωση Πεπερασμένων Διαφορών

Η ανάπτυξη της Εξίσωσης 3.8 υπό μορφή πεπερασμένων διαφορών, απαιτεί την εφαρμογή της εξίσωσης συνέχειας. Με την προϋπόθεση ότι η πυκνότητα ρ του υπόγειου νερού είναι σταθερή, η εξίσωση συνέχειας που εκφράζει το ισοζύγιο της ροής για ένα κελί, δίνεται από την έκφραση:

$$\sum Q_i = S_s \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \Delta V \quad \text{Εξ. 3.9}$$

Όπου:

$\sum Q_i$ το σύνολο των πραγματοποιούμενων εισροών ή εκροών στα όρια του κελιού που προέρχονται από γειτονικά κελιά [L^3T^{-1}]

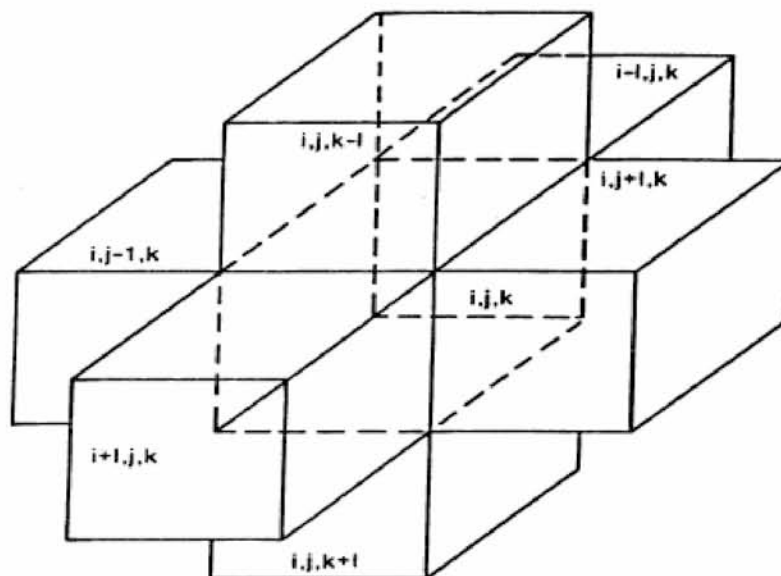
S_s η ειδική αποθηκευτικότητα ή το αποτελεσματικό πορώδες ανά μέτρο βάθους του υδροφορέα. Αυτή μπορεί να οριστεί και σαν ο όγκος του νερού, που αντλείται ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα και ανά μονάδα μεταβολής της πιεζομετρίας [L^{-1}]

ΔV ο όγκος του κελιού [L^3]

Δh η μεταβολή της πιεζομετρίας [L]

Δt το χρονικό βήμα [T]

Οι όροι στο δεξί μέλος της Εξίσωσης 3.9, είναι ισοδύναμοι με τον όγκο του νερού που αποθηκεύεται σ' ένα χρονικό διάστημα Δt , κατά το οποίο παρατηρείται αλλαγή της στάθμης κατά Δh . Σύμφωνα με την Εικόνα 3.2 από την διακριτοποίηση της Εξίσωσης 3.9 προκύπτει ένα κεντρικό κελί (i, j, k) , και έξι γειτονικά του τα $(i-1, j, k)$, $(i+1, j, k)$, $(i, j-1, k)$, $(i, j+1, k)$, $(i, j, k-1)$, $(i, j, k+1)$.



Εικόνα 3.2: Το κελί (i, j, k) και τα γειτονικά του (Ψιλοβίκος Α., 1999).

Η εισροή στο (i, j, k) λαμβάνεται με θετικό πρόσημο, ενώ η εκροή με αρνητικό. Σύμφωνα με το νόμο του Darcy, για τις ροές των 6 γειτονικών κελιών προς το κεντρικό (i, j, k) , θα ισχύει:

- 1) Ροή από το κελί $(i, j-1, k)$, στο (i, j, k) κατά τη διεύθυνση γραμμών (Εικ. 2.3):

$$q_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k \cdot \frac{(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j-1/2}} \quad \text{Εξ. 3.10}$$

όπου:

$h_{i,j,k}$ το φορτίο στον κόμβο (i, j, k) [L]

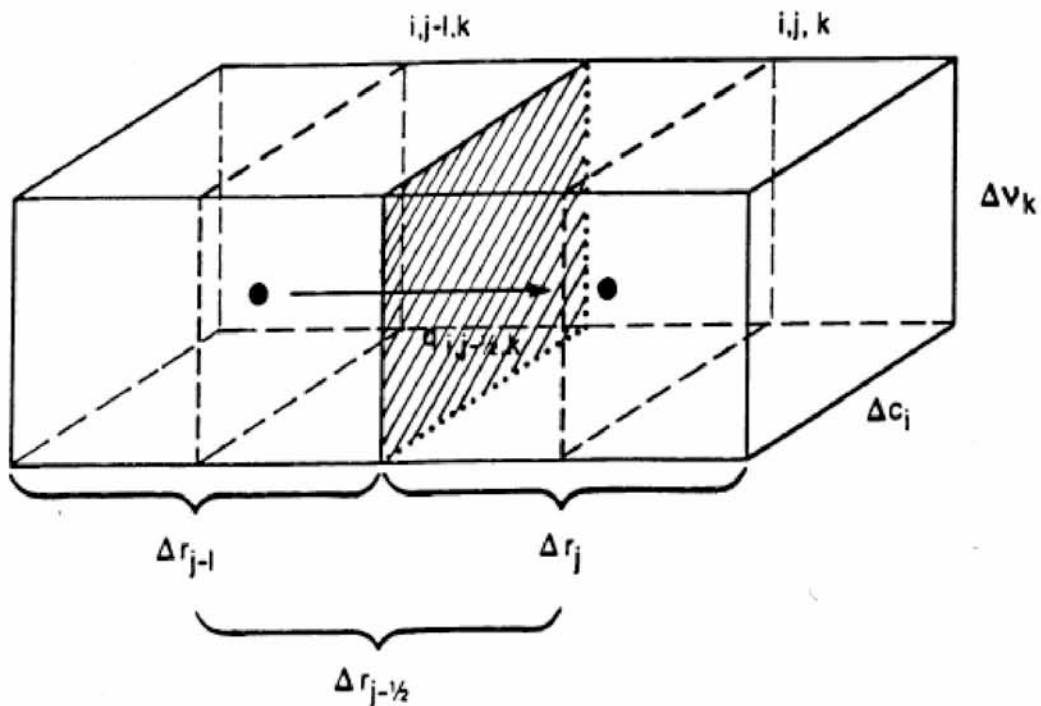
$h_{i,j-1,k}$ το φορτίο στον κόμβο $(i, j-1, k)$ [L]

$q_{i,j-1/2,k}$ η παροχή στην κοινή πλευρά των ορθογώνιων στοιχείων (i, j, k) και $(i, j-1, k)$ [L^3T^{-1}]

$KR_{i,j-1/2,k}$ η υδραυλική αγωγιμότητα κατά τη διεύθυνση των γραμμών, στην κοινή πλευρά των στοιχείων (i, j, k) και $(i, j-1, k)$ [LT^{-1}]

$\Delta c_i \Delta v_k$ το εμβαδό της πλευράς του στοιχείου που είναι κάθετη στη διεύθυνση των γραμμών [L^2]

$\Delta r_{j-1/2}$ η οριζόντια απόσταση ανάμεσα στα κέντρα των στοιχείων (i, j, k) και $(i, j-1, k)$ [L]



Εικόνα 3.3: Ροή από το κελί (i, j, k) στο $(i, j-1, k)$ κατά τη διεύθυνση των γραμμών (Ψιλοβίκος Α., 1999).

Παρόμοιες εκφράσεις μπορούν να γραφούν προσομοιώνοντας τις ροές προς το κελί (i,j,k) για τις υπόλοιπες 5 επιφάνειες, ως εξής :

2) Ροή από το κελί (i, j+1, k), στο (i, j, k) κατά τη διεύθυνση γραμμών:

$$q_{i,j+1/2,k} = KR_{i,j+1/2,k} \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k \cdot \frac{(h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j+1/2}} \quad \text{Εξ. 3.11}$$

3) Ροή από το κελί (i-1, j, k), στο (i, j, k) κατά τη διεύθυνση στηλών:

$$q_{i-1/2,j,k} = KC_{i-1/2,j,k} \cdot \Delta r_j \cdot \Delta v_k \cdot \frac{(h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k})}{\Delta c_{j-1/2}} \quad \text{Εξ. 3.12}$$

4) Ροή από το κελί (i+1,j,k), στο (i,j,k) κατά τη διεύθυνση στηλών:

$$q_{i+1/2,j,k} = KC_{i+1/2,j,k} \cdot \Delta r_j \cdot \Delta v_k \cdot \frac{(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k})}{\Delta c_{j+1/2}} \quad \text{Εξ. 3.13}$$

5) Ροή από το κελί (i,j,k-1), στο (i,j,k) κατά τη κατακόρυφη διεύθυνση:

$$q_{i,j,k-1/2} = KV_{i,j,k-1/2} \cdot \Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \frac{(h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k})}{\Delta v_{k-1/2}} \quad \text{Εξ. 3.14}$$

6) Ροή από το κελί (i,j,k+1), στο (i,j,k) κατά τη κατακόρυφη διεύθυνση:

$$q_{i,j,k+1/2} = KV_{i,j,k+1/2} \cdot \Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \frac{(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k})}{\Delta v_{k+1/2}} \quad \text{Εξ. 3.15}$$

όπου οι παράγοντες των παραπάνω γινομένων δικαιολογούνται ανάλογα με την Εξίσωση 3.10. Οι διαστάσεις των στοιχείων (Δr , Δc και Δv) και η υδραυλική αγωγιμότητα K , μπορούν να εκφραστούν με μία σταθερή ποσότητα αγωγιμότητας, με διαστάσεις μεταφορικότητας (transmissivity) [$L^2 T^{-1}$], ως εξής:

$$\left. \begin{aligned} CR_{i,j-1/2,k} &= KR_{i,j-1/2,k} \cdot \frac{\Delta c_i \cdot \Delta v_k}{\Delta r_{j-1/2}} \\ CR_{i,j+1/2,k} &= KR_{i,j+1/2,k} \cdot \frac{\Delta c_i \cdot \Delta v_k}{\Delta r_{j+1/2}} \\ CC_{i-1/2,j,k} &= KC_{i-1/2,j,k} \cdot \frac{\Delta r_j \cdot \Delta v_k}{\Delta c_{i-1/2}} \\ CC_{i+1/2,j,k} &= KC_{i+1/2,j,k} \cdot \frac{\Delta r_j \cdot \Delta v_k}{\Delta c_{i+1/2}} \\ CV_{i,j,k-1/2} &= KV_{i,j,k-1/2} \cdot \frac{\Delta r_j \cdot \Delta c_i}{\Delta v_{k-1/2}} \\ CV_{i,j,k+1/2} &= KV_{i,j,k+1/2} \cdot \frac{\Delta r_j \cdot \Delta c_i}{\Delta v_{k+1/2}} \end{aligned} \right\} \quad \text{Εξ. 3.16}$$

Οι Εξισώσεις 3.10 - 3.15 με τη βοήθεια της Εξίσωσης 3.16 μετατρέπονται σε μια λιγότερο πολύπλοκη μορφή:

$$\left. \begin{aligned} q_{i,j-1/2,k} &= CR_{i,j-1/2,k} \cdot (h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) \\ q_{i,j+1/2,k} &= CR_{i,j+1/2,k} \cdot (h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) \\ q_{i-1/2,j,k} &= CC_{i-1/2,j,k} \cdot (h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) \\ q_{i+1/2,j,k} &= CC_{i+1/2,j,k} \cdot (h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) \\ q_{i,j,k-1/2} &= CV_{i,j,k-1/2} \cdot (h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) \\ q_{i,j,k+1/2} &= CV_{i,j,k+1/2} \cdot (h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) \end{aligned} \right\} \text{Εξ. 3.17}$$

Οι Εξισώσεις 3.17 ισχύουν μόνο για εσωτερικές ροές από τα έξι στοιχεία προς το στοιχείο (i, j, k). Για την περίπτωση κατά την οποία συμβαίνουν εισροές ή εκροές από εξωτερικές πηγές όπως ποτάμια, λίμνες, πηγάδια, εξατμισοδιαπνοή και άλλα, οι ροές αυτές αντιπροσωπεύονται από την έκφραση:

$$a_{i,j,k,n} = p_{i,j,k,n} h_{i,j,k} + q_{i,j,k,n} \quad \text{Εξ. 3.18}$$

όπου :

$a_{i,j,k,n}$ αντιπροσωπεύει τη ροή από τη n-οστή εξωτερική πηγή στο κελί (i, j, k) σε $[L^3T^{-1}]$

$p_{i,j,k,n}$ σταθερή ποσότητα σε μονάδες $[L^2T^{-1}]$

$q_{i,j,k,n}$ σταθερή ποσότητα σε μονάδες $[L^3T^{-1}]$

Για το σύνολο των πραγματοποιούμενων εξωτερικών εισροών ή εκροών από N εξωτερικές πηγές προς το κελί (i, j, k), μπορεί να γραφτεί:

$$\sum_{n=1}^N a_{i,j,k,n} = \sum_{n=1}^N p_{i,j,k,n} \cdot h_{i,j,k} + \sum_{n=1}^N q_{i,j,k,n} \quad \text{Εξ. 3.19}$$

όπου καθένας από τους όρους της Εξίσωσης 3.19, είναι ίσος με:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{n=1}^N a_{i,j,k,n} &= QS_{i,j,k} \\ \sum_{n=1}^N p_{i,j,k,n} &= P_{i,j,k} \\ \sum_{n=1}^N q_{i,j,k,n} &= Q_{i,j,k} \end{aligned} \right\} \text{Εξ. 3.20}$$

άρα για το σύνολο των εξωτερικών ροών θα ισχύει:

$$QS_{i,j,k} = P_{i,j,k} h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} \quad \text{Εξ. 3.21}$$

Εφαρμόζοντας την Εξίσωση συνέχειας 3.9 για το στοιχείο (i,j,k) και λαμβάνοντας υπ' όψη τις ροές από τα έξι γειτονικά του στοιχεία (Εξ. 3.17) καθώς και το σύνολο των εξωτερικών ροών (Εξ. 3.21) προκύπτει:

$$Q_{i,j-1/2,k} + Q_{i,j+1/2,k} + Q_{i-1/2,j,k} + Q_{i+1/2,j,k} + Q_{i,j,k-1/2} + Q_{i,j,k+1/2} + QS_{i,j,k} = Ss_{i,j,k} \cdot \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \cdot \Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k \quad \text{Εξ. 3.22}$$

όπου :

$\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t}$ είναι η προσέγγιση της παραγώγου του φορτίου ως προς το χρόνο [LT⁻¹]

$Ss_{i,j,k}$ η ειδική αποθηκευτικότητα του στοιχείου (i,j,k) [L⁻¹]

$\Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k$ ο όγκος του στοιχείου (i,j,k) [L³]

Αν αντικατασταθούν οι Εξισώσεις 3.17 και 3.21 στην Εξίσωση 3.22 τότε η εξίσωση πεπερασμένων διαφορών γράφεται:

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-1/2,k} \cdot (h^m_{i,j-1,k} - h^m_{i,j,k}) + CR_{i,j+1/2,k} \cdot (h^m_{i,j+1,k} - h^m_{i,j,k}) + \\ & CC_{i-1/2,j,k} \cdot (h^m_{i-1,j,k} - h^m_{i,j,k}) + CC_{i+1/2,j,k} \cdot (h^m_{i+1,j,k} - h^m_{i,j,k}) + \\ & CV_{i,j,k-1/2} \cdot (h^m_{i,j,k-1} - h^m_{i,j,k}) + CV_{i,j,k+1/2} \cdot (h^m_{i,j,k+1} - h^m_{i,j,k}) \\ & + P_{i,j,k} \cdot h^m_{i,j,k} + Q_{i,j,k} = Ss_{i,j,k} \cdot \left(\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \right)^m \cdot \Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k \quad \text{Εξ. 3.23} \end{aligned}$$

όπου:

m το χρονικό βήμα

Αν αντικατασταθεί η προσέγγιση της παραγώγου του φορτίου με διαφορές ανάμεσα σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή t^m όπου το φορτίο είναι άγνωστο και ίσο με h^m_{i,j,k} και σε μία χρονική στιγμή αμέσως προηγούμενη, την t^{m-1} όπου το φορτίο είναι γνωστό και ίσο με h^{m-1}_{i,j,k}, θα προκύψει ένα σχήμα πίσω διαφορών ή πεπλεγμένο υπολογιστικό σχήμα:

$$\left(\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \right)^m = \frac{h^m_{i,j,k} - h^{m-1}_{i,j,k}}{t^m - t^{m-1}} \quad \text{Εξ. 3.24}$$

Άλλο σχήμα που μπορεί εναλλακτικά να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά, είναι το σχήμα των εμπρός διαφορών (forward differences) ή ρητό υπολογιστικό σχήμα:

$$\left(\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \right)^m = \frac{h^{m+1}_{i,j,k} - h^m_{i,j,k}}{t^{m+1} - t^m} \quad \text{Εξ. 3.25}$$

Στο σχήμα αυτό το φορτίο σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή t^{m+1} είναι άγνωστο και ίσο με $h^{m+1}_{i,j,k}$, ενώ σε μια χρονική στιγμή αμέσως προηγούμενη, την t^m , είναι γνωστό και ίσο με $h^m_{i,j,k}$. Το ρητό υπολογιστικό σχήμα είναι απλούστερο στην επίλυση, γιατί σε κάθε εξίσωση υπάρχει μόνο ένας άγνωστος και μπορεί να λυθεί απευθείας, δίνει όμως αστάθεια στις λύσεις με αποτέλεσμα η αριθμητική λύση να αποκλίνει τελείως από την αναλυτική. Αντίθετα, το πεπλεγμένο υπολογιστικό σχήμα, είναι μεν πιο πολύπλοκο, αφού κάθε εξίσωση έχει 7 αγνώστους και η λύση απαιτεί την ταυτόχρονη επίλυση ενός συστήματος εξισώσεων, αλλά δίνει ευσταθείς αριθμητικές λύσεις, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να συγκλίνουν.

Το πεπλεγμένο υπολογιστικό σχήμα ή πίσω διαφορών είναι ευσταθές άνευ όρων, όπως αποδεικνύεται παρακάτω στην ανάλυση ευστάθειας και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται στο μοντέλο **MODFLOW**.

Λαμβάνοντας υπόψη την Εξίσωση 3.24, η Εξίσωση 3.23 γράφεται:

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-1/2,k} \cdot (h^m_{i,j-1,k} - h^m_{i,j,k}) + CR_{i,j+1/2,k} \cdot (h^m_{i,j+1,k} - h^m_{i,j,k}) + \\ & CC_{i-1/2,j,k} \cdot (h^m_{i-1,j,k} - h^m_{i,j,k}) + CC_{i+1/2,j,k} \cdot (h^m_{i+1,j,k} - h^m_{i,j,k}) + \\ & CV_{i,j,k-1/2} \cdot (h^m_{i,j,k-1} - h^m_{i,j,k}) + CV_{i,j,k+1/2} \cdot (h^m_{i,j,k+1} - h^m_{i,j,k}) \\ & + P_{i,j,k} \cdot h^m_{i,j,k} + Q_{i,j,k} = Ss_{i,j,k} \cdot \frac{h^m_{i,j,k} - h^{m-1}_{i,j,k}}{t^m - t^{m-1}} \cdot \Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k \end{aligned} \quad \text{Εξ. 3.26}$$

Η Εξίσωση των πεπερασμένων διαφορών 3.26 αποτελεί μία προσομοίωση της διαφορικής εξίσωσης κίνησης του υπόγειου νερού στις τρεις διαστάσεις με μερικές παραγώγους. Όλοι οι συντελεστές είναι γνωστοί, καθώς επίσης και το φορτίο στην χρονική στιγμή $m-1$. Άγνωστοι είναι τα φορτία στο κελί (i, j, k) και στα 6 γειτονικά του τη χρονική στιγμή m , δηλαδή 7 άγνωστοι που πρέπει να βρεθούν στην χρονική στιγμή m . Αν το i παίρνει τιμές από 1 ως NROW, το j από 1 ως NCOL και το k από 1 ως NLAY, θα έχουμε ένα σύστημα εξισώσεων $(NROW-2) \cdot (NCOL-2) \cdot (NLAY-2)$ με αγνώστους $(NROW \cdot NCOL \cdot NLAY)$. Άρα χρειάζονται 6 επιπλέον εξισώσεις οι οποίες προκύπτουν από τις οριακές συνθήκες του προβλήματος. Επίσης χρειάζεται και μία αρχική συνθήκη που θα δίνει τα φορτία h στην χρονική στιγμή $m=1$. Επομένως η Εξίσωση 3.26 γράφεται για κάθε ένα από τα στοιχεία του πλέγματος και σε συνδυασμό με την αρχική συνθήκη πιεζομετρίας και τις 6 οριακές συνθήκες ροής (σταθερό φορτίο, αδιαπέρατο όριο, σταθερή ροή) στα όρια του υδροφορέα, προκύπτει τελικά ένα σύστημα n -αλγεβρικών εξισώσεων με n -αγνώστους. Αν στην παραπάνω σχέση χωρίσουμε γνωστούς από αγνώστους για το συγκεκριμένο στοιχείο (i, j, k) προκύπτει:

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-1/2,k} \cdot (h^m_{i,j-1,k}) + CR_{i,j+1/2,k} \cdot (h^m_{i,j+1,k}) + CC_{i-1/2,j,k} \cdot (h^m_{i-1,j,k}) \\ & + CC_{i+1/2,j,k} \cdot (h^m_{i+1,j,k}) + CV_{i,j,k-1/2} \cdot (h^m_{i,j,k-1}) + CV_{i,j,k+1/2} \cdot (h^m_{i,j,k+1}) \end{aligned}$$

$$- (CR_{i,j-1/2,k} + CR_{i,j+1/2,k} + CC_{i-1/2,j,k} + CC_{i+1/2,j,k} + CV_{i,j,k-1/2} + CV_{i,j,k+1/2} + HCOF_{i,j,k}) h_{i,j,k}^m = RHS_{i,j,k} \quad \text{Εξ. 3.27}$$

όπου:

$$HCOF_{i,j,k} = P_{i,j,k} - \frac{SCI}{t^m - t^{m-1}} \quad [L^2T^{-1}]$$

$$RHS_{i,j,k} = -Q_{i,j,k} + SCI_{i,j,k} \cdot \frac{h_{i,j,k}^{m-1}}{t^m - t^{m-1}} \quad [L^3T^{-1}]$$

$$SCI_{i,j,k} = S_{i,j,k} \Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k \quad [L^2] \quad \text{Εξ. 3.28}$$

η οποία γράφεται με τη μορφή μητρώων, για n-αριθμό στοιχείων (i,j,k) ως εξής :

$$[A] [h] = [q] \quad \text{Εξ. 3.29}$$

όπου:

- [A] το μητρώο των σταθερών συντελεστών των φορτίων
- [h] ο πίνακας - διάνυσμα των αγνώστων τιμών των φορτίων στο χρονικό βήμα m
- [q] ο πίνακας - διάνυσμα των σταθερών όρων και φορτίων που αντιστοιχούν στη χρονική στιγμή m-1 και περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία του πλέγματος.

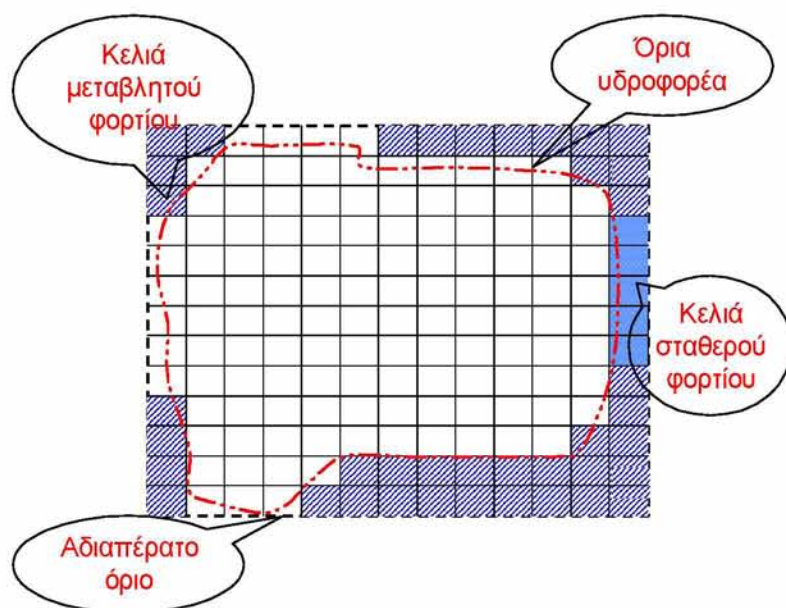
3.2.4 Ο καθορισμός των οριακών συνθηκών

Στο **MODFLOW**, για τις ανάγκες της εξομοίωσης των οριακών συνθηκών του εκάστοτε προβλήματος, τα κελιά που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Κελιά σταθερού φορτίου, όπου το υδραυλικό φορτίο καθορίζεται εκ των προτέρων και παραμένει σταθερό σε όλα τα βήματα της προσομοίωσης.
- Ανενεργά ή αδιαπέρατα κελιά, στα οποία η ροή δεν επιτρέπεται από ή προς αυτά καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.
- Κελιά μεταβλητού φορτίου. Είναι όλα τα υπόλοιπα, στα οποία τα φορτία δεν καθορίζονται, αλλά μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Οι οριακές συνθήκες ενός προβλήματος προσεγγίζονται μόνο από κελιά σταθερού φορτίου και ανενεργά ή αδιαπέραστα. Τα πρώτα μπορεί να προσομοιώνουν την επικοινωνία του υδροφορέα με επιφανειακούς πόρους (όπως λίμνες ή ποτάμια), ενώ τα δεύτερα κελιά τα έξω όρια του υδροφορέα ή τα αδιαπέραστα όριά του. Όπου υπάρχουν όρια σταθερής εισροής ή μεταβαλλόμενης με το φορτίο μπορούν να προσομοιωθούν ως εξωτερικές πηγές ή ως συνδυασμός αδιαπέραστων κελιών και

εξωτερικής πηγής. Στο αμέσως επόμενη εικόνα παρουσιάζεται η διακριτοποίηση ενός υποθετικού υδροφορέα με τις οριακές του συνθήκες.



Εικόνα 3.4: Τύποι κελιών και προσομοίωση οριακών συνθηκών (Σιδηρόπουλος Π., 2007).

3.2.5 Πακέτα υποστήριξης του MODFLOW

Στο **Modflow** εκτός από το κεντρικό πρόγραμμα περιλαμβάνεται και μια σειρά από ανεξάρτητα υποπρογράμματα (*packages*). Τα υποπρογράμματα συνίστανται από υπορουτίνες (*modules*). Η κάθε υπορουτίνα επιτελεί συγκεκριμένους υπολογισμούς. Με απλά λόγια τα modules έχουν ομαδοποιηθεί με τη μορφή «πακέτων» και κάθε πακέτο είναι μια ομάδα από modules, που σχετίζεται με μια φάση της προσομοίωσης.

Κατά το “τρέξιμο” του προγράμματος χρησιμοποιούνται μόνον εκείνα από τα προσφερόμενα πακέτα, τα οποία είναι απαραίτητα για τη συγκεκριμένη περίπτωση προσομοίωσης. Τα κυριότερα υποπρογράμματα (*packages*) είναι τα εξής:

- Basic package
- BCF2 (block centered flow) package
- River package ή Stream package
- Well package
- Recharge package
- Drain package
- Evapotranspiration package
- General-head package
- Constant head package
- SIP solution package

- SSOR solution package
- PCG2 solution package και Output control package

Μια γρήγορη παρουσίαση αυτών γίνεται παρακάτω:

1. Βασικό πακέτο (Basic Package, BAS)

Τα δεδομένα που εισάγονται στο βασικό πακέτο αφορούν:

- 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
- τις οριακές συνθήκες σε κάθε κόμβο του καννάβου

Ως αρχική συνθήκη εισάγεται η πιεζομετρία στην αρχή της χρονικής περιόδου, που προέρχεται από μετρήσεις πεδίου.

2. 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 κυψελίδων 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
- τον συντελεστή αποθηκευτικότητας ή το ενεργό πορώδες

Απαραίτητη προϋπόθεση είναι κάθε κόμβος να εντοπίζεται στο κέντρο κάθε κυψελίδας του μοντέλου.

3. Υδατορεύματα (Rivers, RIV)

Το πακέτο αυτό προσομοιώνει τη ροή νερού μεταξύ υδατορρέυματος (ποταμού, λίμνης) και υδροφορέα. Τα υδατορεύματα τροφοδοτούν τον υδροφορέα ή τροφοδοτούνται από αυτόν ανάλογα με την υδραυλική κλίση μεταξύ του επιφανειακού υδάτινου σώματος και του υδροφορέα.

Το πακέτο Rivers απαιτεί τις παρακάτω πληροφορίες για κάθε κυψελίδα που περιέχει όριο ποταμού:

- Το υψόμετρο της στάθμης του υδατορεύματος, το οποίο μπορεί να αλλάζει με το χρόνο
- Το υψόμετρο του πυθμένα του υδατορεύματος (υψόμετρο κοίτης)
- Την αγωγιμότητα (**C**). Είναι μια αριθμητική παράμετρος που αντιπροσωπεύει την αντίσταση στη ροή μεταξύ υδατορεύματος και υδροφόρου στρώματος. Υπολογίζεται από το μήκος του υδατορεύματος ανά κυψελίδα (**L**), το πλάτος του υδατορεύματος ανά κυψελίδα (**W**), το πάχος του υποστρώματος της κοίτης (**M**) και την υδραυλική αγωγιμότητά τους (**K**). Έτσι η αγωγιμότητα δίνεται από τη σχέση:

$$C = \frac{K \cdot L \cdot W}{M}$$

Εξ. 3.30

4. Γεωτρήσεις (Well Package)

Το πακέτο αυτό αναφέρεται στα δεδομένα των γεωτρήσεων άντλησης ή εμπλουτισμού σε ένα υδροφόρο για μια δεδομένη περίοδο. Θετικές τιμές της παροχής υποδηλώνουν εμπλουτισμό, ενώ οι αρνητικές κατάσταση άντλησης. Ο ρυθμός άντλησης θεωρείται ανεξάρτητος, τόσο από την έκταση της κυψελίδας, όσο και από την πιεζομετρική στάθμη σ' αυτή.

5. Εμπλουτισμός (Recharge Package, RCH)

Το πακέτο αυτό προσομοιώνει την επιφανειακή κατανομή του εμπλουτισμού προς το υπόγειο υδροφόρο σύστημα. Ο εμπλουτισμός αναφέρεται, είτε στην κατείσδυση 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 υδροφόρο από την επιφάνεια του εδάφους.

6. Στραγγιστήρια (Drains)

Το πακέτο αυτό έχει σχεδιασθεί για να προσομοιώνει τα αποτελέσματα της επιστροφής του αρδευτικού νερού στον υδροφόρο ορίζοντα. Τα δεδομένα εισόδου που απαιτεί είναι το βάθος των στραγγιστηρίων και η αγωγιμότητα C.

7. Evapotranspiration (ET)

Το πακέτο αυτό προσομοιώνει τα αποτελέσματα της διαπνοής των φυτών και της εξάτμισης από την επιφάνεια του εδάφους. Στο **MODFLOW** η εξάτμισιδιαπνοή εισάγεται στην οροφή του ανώτερου στρώματος το οποίο απαιτεί το ύψος της εξάτμισοδιαπνοής σε mm ή m σε κάποια χρονική μονάδα sec.

8. 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 την υδραυλική σύνδεση με έναν υδροφόρο, που βρίσκεται εκτός των ορίων της προσομοιούμενης περιοχής και υποδηλώνει την ύπαρξη μιας πλευρικής τροφοδοσίας. Τα αντικείμενα, για την προσομοίωση των οποίων χρησιμοποιείται το πακέτο αυτό, μπορούν να καθοριστούν με τη χρήση σημείων, τόξων ή πολυγώνων.

Η παροχή τροφοδοσίας είναι ανάλογος προς τη διαφορά της στάθμης ανάμεσα στην εξωτερική αυτή πηγή και σε κάθε κυψελίδα στην περιοχή του μοντέλου. Η παροχή αυτή επίσης εξαρτάται από την αγωγιμότητα (*conductance*) των υλικών ανάμεσα στην εξωτερική πηγή και στην κυψελίδα ή τις κυψελίδες του μοντέλου με τις οποίες γειτνιάζει. Η αγωγιμότητα είναι μια αριθμητική παράμετρος και ορίζεται ως η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα της κυψελίδας πολλαπλασιαζόμενη με την

εγκάρσια διατομή αυτής και διαιρούμενη με την απόστασή της από την εξωτερική πηγή τροφοδοσίας.

Το πακέτο αυτό απαιτεί, για κάθε κυψελίδα που περιέχει το όριο αυτό:

Το γενικό φορτίο: Αυτό το φορτίο είναι το επίπεδο της υδάτινης επιφάνειας στο όριο. Αυτό μπορεί να είναι φυσικά καθορισμένο όπως π.χ. 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 προσομοιούμενης περιοχής.

9. 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 ζητούνται απλά τιμές υδραυλικού φορτίου στα άκρα του ορίου.

10. Ισχυρά πεπλεγμένη μέθοδος (Strongly Implicit Procedure Package, SIP)

Το πακέτο αυτό συνιστά μια μέθοδο επίλυσης του συστήματος γραμμικών εξισώσεων, που προκύπτει με τη χρήση επαναληπτικών διαδικασιών. Όπως έχει προαναφερθεί για κάθε κυψελίδα χρησιμοποιείται μια εξίσωση πεπερασμένων διαφορών. Το σύνολο των εξισώσεων του καννάβου πρέπει να επιλύεται ταυτόχρονα σε κάθε βήμα. Η επίλυση συνίσταται στη λήψη μιας τιμής της πιεζομετρικής στάθμης για κάθε κόμβο.

11. Έλεγχος Αποτελεσμάτων (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.

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό από τα παραπάνω ότι τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου (*input data*) για την εφαρμογή του **Modflow** είναι:

- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα
- Αρχικές συνθήκες, δηλ. οι τιμές του πιεζομετρικού φορτίου σε όλους τους κόμβους του καννάβου.
- Οριακές συνθήκες είτε με τιμές πιεζομετρικού φορτίου, είτε με τη μορφή ροής στα όρια του καννάβου.
- Βάθη υδροφόρων στρωμάτων.
- Υδραυλικές παράμετροι (υδραυλική αγωγιμότητα, συντελεστής αποθηκευτικότητας κ.ά.).
- Παροχές αντλήσεων ή εμπλουτισμού.
- Δεδομένα κατείδυσης, που προκύπτουν από τις βροχοπτώσεις, την εξατμισοδιαπνοή και το είδος των γεωλογικών σχηματισμών.
- Διηθήσεις από ποταμούς ή χειμάρρους.
- Επιστροφές άρδευσης.

3.2.6 Σχεδιασμός του καννάβου

Χρησιμοποιούνται γραμμές καννάβου για να χωριστεί η περιοχή μελέτης σε κελιά, τα οποία είναι ορθογώνια κατά τις δύο διαστάσεις τους, αλλά η καθ' ύψος διάσταση μπορεί να ακολουθήσει τη γεωλογική δομή. Τα κελιά του καννάβου δεν χρειάζεται να είναι όλα του ίδιου μεγέθους, παρόλα αυτά καμιά σειρά ή στήλη δεν πρέπει να είναι κατά 50% μεγαλύτερη από γειτονική της. Η διαφορά στο μέγεθος επιβαρύνει το σφάλμα του μοντέλου και εάν η διαφορά στα μεγέθη εφαπτόμενων σειρών ή στηλών είναι πολύ μεγάλη, τα προκύπτοντα σφάλματα μπορεί να είναι σημαντικά.

Επειδή η επίλυση της προσομοίωσης του μοντέλου μπορεί να πάρει αρκετό χρόνο, είναι χρήσιμο να χρησιμοποιούνται μικρά κελιά μόνο σε εκείνα τα τμήματα του μοντέλου, στα οποία απαιτούνται λεπτομερή αποτελέσματα ή όπου οι κλίσεις είναι μάλλον απότομες. Πιο απότομες κλίσεις βρίσκονται κοντά στα πηγάδια άντλησης και σε άλλα σημεία απορροής. Αν ο υδροφορέας προς εξομοίωση είναι ανισότροπος, ο κάνναβος πρέπει να ευθυγραμμιστεί με τις διευθύνσεις της μεγαλύτερης και της μικρότερης υδραυλικής αγωγιμότητας. Διαφορετικά, ο κάνναβος θα πρέπει να ευθυγραμμιστεί με όποιον τρόπο είναι πιο βολικός.

Υπάρχει η δυνατότητα κάποια κελιά του καννάβου να καθοριστούν ως ανενεργά, με αποτέλεσμα να εξαιρούνται από το μοντέλο. Τα όρια του συστήματος ροής πρέπει να προσεγγιστούν από ένα κλειστό όριο. Εάν η επαναφόρτιση δεν είναι ομοιόμορφη, η περιοχή που εκτείνεται γύρω από κάθε ζώνη διαφορετικής επαναφόρτισης πρέπει να είναι κοντά στα πραγματικά της όρια, έτσι ώστε η ποσότητά της να είναι προσεγγιστικά σωστή.

3.3 Τρόποι προσέγγισης του MODFLOW

Τα μοντέλα προσομοίωσης του MODFLOW μπορούν να κατασκευαστούν με δύο εναλλακτικές προσεγγίσεις:

- Την προσέγγιση του καννάβου (Grid Approach). Αυτή συνεπάγεται την απευθείας εργασία πάνω στον τρισδιάστατο κάνναβο και την εφαρμογή των οριακών συνθηκών, καθώς και την εισαγωγή όλων των υπολοίπων παραμέτρων του μοντέλου από κελί σε κελί.
- Την προσέγγιση του εννοιολογικού μοντέλου (Conceptual Model Approach). Εδώ η εργασία προϋποθέτει τη χρήση εργαλείων προερχόμενων από τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών, πάνω σε ψηφιοποιημένο χάρτη της περιοχής που πρόκειται να προσομοιωθεί. Τα δεδομένα του εννοιολογικού μοντέλου εν συνεχεία αντιγράφονται στον κάνναβο.

Σημειώνεται ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η προσέγγιση του εννοιολογικού μοντέλου είναι αποτελεσματικότερη σε σχέση με την προσέγγιση του καννάβου. Εντούτοις, η πρώτη είναι χρήσιμη σε απλά προβλήματα ή σε ακαδημαϊκές ασκήσεις, όπου η εισαγωγή στοιχείων κελί προς κελί θεωρείται απαραίτητη.

3.3.1 Προσέγγιση Καννάβου

Τα βήματα της εργασίας στην προσέγγιση αυτή είναι τα ακόλουθα:

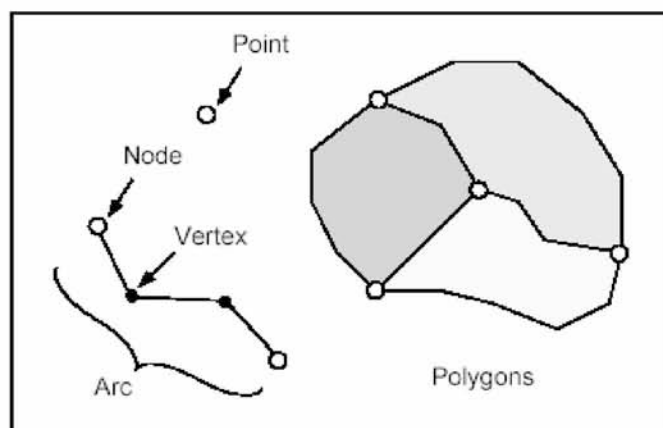
- Αρχικά δημιουργείται ο κάνναβος, ορίζοντας τις τρεις διαστάσεις του, αφού έχει επιλεγθεί η κατάλληλη μονάδα μέτρησης. Μαζί με αυτές, καθορίζεται και ο επιθυμητός αριθμός των κελιών για κάθε διάσταση.
- Στη συνέχεια εισάγονται οι βασικές επιδράσεις που δέχεται το μοντέλο (ντραίνα, πηγάδια, επαναφορτίσεις ή ό,τι άλλο περιλαμβάνει η εξεταζόμενη περιοχή), καθώς και τον τρόπο με τον οποίο θα γίνει ο υπολογισμός των αποτελεσμάτων.
- Το επόμενο βήμα είναι να καθοριστούν τα ενεργά, ανενεργά ή σταθερού φορτίου κελιά και έπειτα τα αρχικά φορτία, τα οποία χρησιμοποιούνται για την εξομοίωση μεταβαλλόμενης ροής. Εάν πρόκειται για εξομοίωση σταθερής ροής, μια αρχική τιμή του σταθερού φορτίου δε θα επηρέαζε προφανώς σημαντικά την τελική λύση. Εξάλλου, όσο πλησιέστερες είναι οι αρχικές τιμές φορτίου στις τελικές, τόσο γρηγορότερα καταλήγει το **Modflow** σε λύση. Επιπρόσθετα, για ορισμένους τύπους στρωμάτων, αν οι αρχικές τιμές είναι πολύ χαμηλές, το **Modflow** μπορεί να θεωρήσει τα εν λόγω κελιά “ξηρά”.
- Σε αυτό το σημείο εισάγονται τα δεδομένα που αφορούν τη ροή κάθε στρώματος. Βάσει αυτών υπολογίζονται οι αγωγιμότητες μεταξύ των κελιών του καννάβου και καθορίζονται οι εξισώσεις των πεπερασμένων διαφορών για τη ροή από κελί σε κελί. Το πρόγραμμα απαιτεί σε αυτή τη φάση – για τον υπολογισμό των παραπάνω αγωγιμοτήτων - τον καθορισμό ενός συνόλου παραμέτρων για κάθε επίπεδο, παράμετροι που εξαρτώνται σαφώς από το είδος του. Συνεπώς, ορίζονται το είδος, το πάνω και κάτω όριο, καθώς και την οριζόντια και κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα κάθε επιπέδου.
- Τελευταίο βήμα, η εισαγωγή της επαναφόρτισης του υδροφορέα εξαιτίας της βροχοπτώσης, συνεπώς και της κατείδυσης. Ομοίως, ορίζονται τα τυχόν ντραίνα με τα υψόμετρα και την αγωγιμότητά τους, καθώς και τα πηγάδια με τις αντλήσεις τους.
- Έπειτα από τα παραπάνω βήματα, αφού αποθηκευτεί – όπως πάντα σε αυτό το σημείο – η προσομοίωσή , εκτελείτε το πρόγραμμα. Το GMS “διαβάζει” αυτόματα τη λύση του **Modflow**, όταν κλείσει το παράθυρο διαλόγου του τελευταίου. Είναι ορατές πλέον οι ισοπιεζομετρικές καμπύλες της λύσης μας.

Το **Modflow** παρέχει τη δυνατότητα επιλογής του τρόπου εμφάνισης των αποτελεσμάτων, καθώς και πλήθος επιλογών για την ανάλυσή τους, όπως ιστογράμματα, δείκτες σφαλμάτων, κ.ά.

3.3.2 Προσέγγιση του Εννοιολογικού Μοντέλου

Όπως εισαγωγικά προαναφέρθηκε, το εννοιολογικό μοντέλο συνεπάγεται υλοποίηση μιας υψηλού επιπέδου και ταυτόχρονα απλοποιημένης αναπαράστασης

του μοντέλου με τη χρήση χαρακτηριστικών αντικειμένων της σχεδιαστικής υπορουτίνας (*Map module*), (Εικ. 3.5). Από τη στιγμή που το μοντέλο έχει καθοριστεί, ο κάρναβος δημιουργείται αυτόματα, ενώ επίσης αυτόματα το GMS αντιστοιχίζει τις οριακές συνθήκες και τις λοιπές παραμέτρους με τα κατάλληλα κελιά. Για τη διαμόρφωση του εννοιολογικού μοντέλου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν σχεδιαστικά εργαλεία σημεία, τόξα και πολύγωνα.



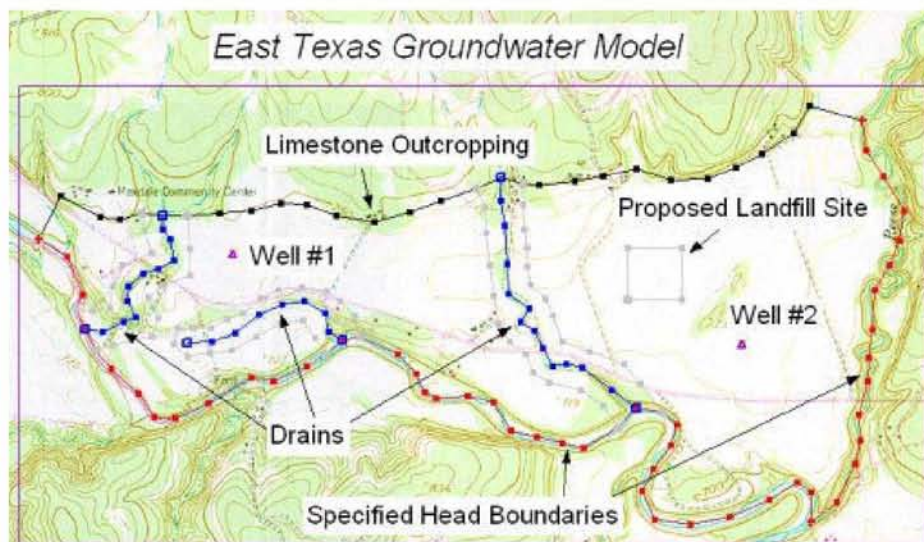
Εικόνα 3.5: Χαρακτηριστικά αντικείμενα του *Map module* (Σιδηρόπουλος Π., 2007).

Η δημιουργία του συγκεκριμένου μοντέλου απαιτεί δεδομένα που αφορούν:

- στην αναγνώριση των ορίων των υδρολογικών λεκανών.
- στην αναγνώριση των ορίων του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων και των υδραυλικών διαχωρισμάτων, των αδιαπέραστων ορίων και των περιοχών επαναφορτίσεων.
- στις ιδιότητες κάθε υδρολογικής μονάδας (παραμέτροι). Αυτές είναι η υδραυλική αγωγιμότητα, η μεταφορικότητα, η ειδική αποθηκευτικότητα, ο συντελεστής αποθηκευτικότητας, η ειδική απόδοση των φρεάτιων υδροφορέων.
- στην προέλευση του νερού του μοντέλου και την ποσότητά του, που μπορεί να αναφέρεται σε διαρροή από έναν άλλο υδροφόρο ή σε επαναφόρτιση του ίδιου του υδροφόρου.
- σε όλες τις τοποθεσίες και τις διαδικασίες μέσω των οποίων το νερό εγκαταλείπει το σύστημα, συμπεριλαμβανομένων των αντλήσεων των πηγαδιών, την απορροή προς τα ποτάμια ή τα ντράινα, την εξατμισιοδιαπνοή και τυχαίες άλλες διαδικασίες.
- στην εκτίμηση των ρυθμών επαναφόρτισης ή απορροής όλων των μηχανισμών.
- στις αρχικές συνθήκες, για περιπτώσεις προσομοίωσης μεταβαλλόμενης ροής.

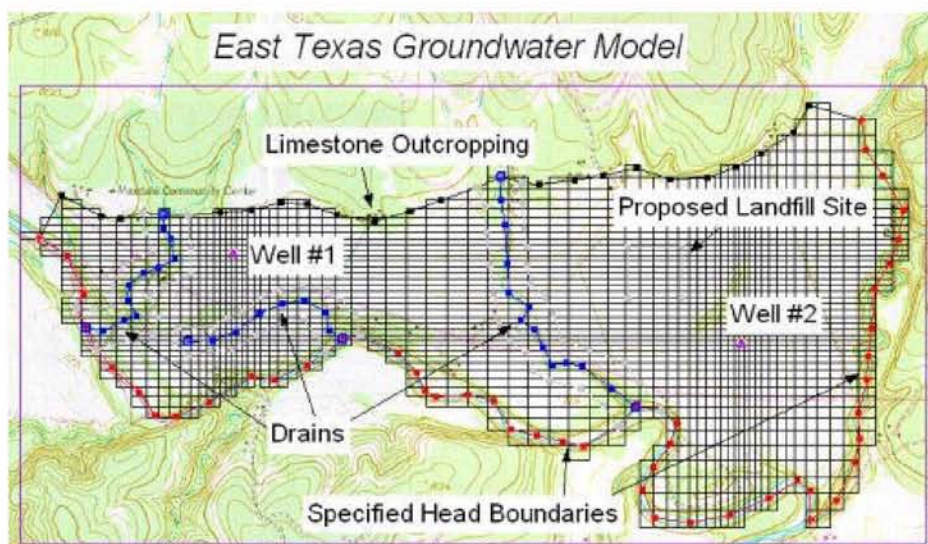
Τα βήματα που πραγματοποιούνται για τη δημιουργία ενός εννοιολογικού μοντέλου έχουν ως εξής:

- Σε πρώτη φάση εισάγεται ένας ψηφιοποιημένος χάρτης της υπό εξέταση περιοχής που πρόκειται να προσομοιωθεί.
- Στη συνέχεια, κατασκευάζεται η τοπική κάλυψη, η οποία περιλαμβάνει τα όρια της περιοχής αλλά και τα τοπικά χαρακτηριστικά -πηγές και φρέατα- συμπεριλαμβάνοντας πηγάδια, ποτάμια, ντραίνα και τα όρια των γενικών φορτίων (Εικ. 3.6).



Εικόνα 3.6: Δημιουργία εννοιολογικού μοντέλου (Σιδηρόπουλος Π., 2007).

- Σε αυτό το αρχικό σημείο, συνήθως ορίζονται οι μονάδες μέτρησης.
- Εφόσον έχει ολοκληρωθεί η κάλυψη της περιοχής με τις πηγές και τα φρέατά της, μπορεί πλέον να αντιγραφεί, δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο νέα επίπεδα (**coverages**), όμοια με το αρχικό της περιοχής, καθένα απ' τα οποία θα αντιπροσωπεύει διαφορετικό μηχανισμό του μοντέλου. Έτσι αντιστοιχεί ένα επίπεδο για κάθε υδροφόρα και ένα για την επαναφόρτιση της περιοχής.
- Έπειτα καθορίζονται οι επαναφορτίσεις, η υδραυλική αγωγιμότητα (οριζόντια και κάθετη), καθώς και τα άνω και κάτω όρια του κάθε επιπέδου, όλα στα αντίστοιχα πεδία των παραθύρων διαλόγου του καθενός.
- Αφού έχουν εισαχθεί όλα τα στοιχεία, τότε καθορίζεται ο κάρναβος του μοντέλου (Εικ. 3.7) και ορίζονται ως ενεργά τα κελιά που βρίσκονται μέσα στα όρια του μοντέλου, ενώ ανενεργά τα εξωτερικά. Εν συνεχεία, εάν δεν έχουν ορισθεί προηγουμένως τα υψόμετρα της επιφάνειας, να εισαχθούν με αρχείο και κατόπιν να υπολογιστούν αυτά των υδροφορέων.
- Αφού ολοκληρωθούν όλα τα παραπάνω, εκτελείται το πρόγραμμα.



Εικόνα 3.7: Δημιουργία καννάβου εννοιολογικού μοντέλου (Σιδηρόπουλος Π., 2007).

Αξίζει να τονισθεί ότι το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα του ελέγχου και της διόρθωσης των σφαλμάτων τόσο στα υψόμετρα, όσο και γενικότερα στις παραμέτρους και στα δεδομένα που έχουν εισαχθεί. Τέλος, όταν τελικά αποθηκευτεί η προσομοίωση, δεν αποθηκεύονται μόνο τα αρχεία Modflow, αλλά δημιουργείται και ένα αρχείο αποτελεσμάτων με όλα τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση.

3.4 Ρύθμιση του μοντέλου

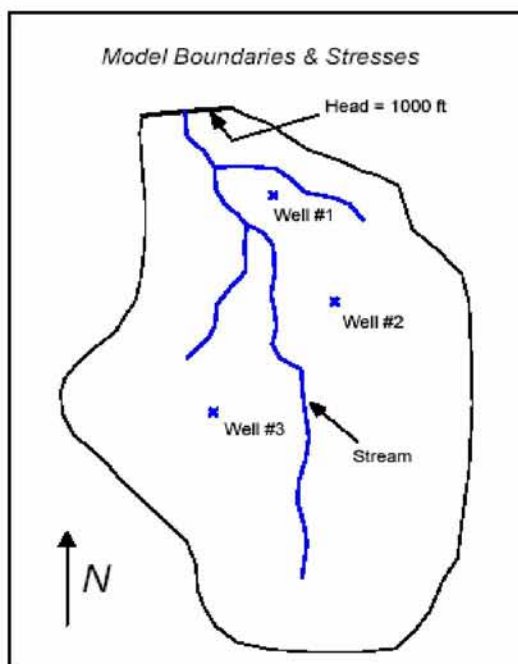
Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητο να τονισθεί ότι σημαντικό μέρος κάθε προσομοίωσης υπόγειων νερών αποτελεί η εργασία ρύθμισης του μοντέλου (Model Calibration), η οποία και διασφαλίζει την επιτυχή προσομοίωση της συμπεριφοράς του υδροφορέα. Πρόκειται για μια διαδικασία κατά την οποία ορισμένες από τις παραμέτρους του μοντέλου, όπως π.χ η επαναφόρτιση και η υδραυλική αγωγιμότητα, τροποποιούνται συστηματικά και το μοντέλο επαναπροσδιορίζεται συνεχώς, έως ότου η υπολογισμένη λύση ταιριάζει πλέον με τις παρατηρημένες τιμές του πεδίου, σε αποδεκτά επίπεδα ακριβείας.

Η ρύθμιση στοχεύει στη βελτιστοποίηση των παραμέτρων που υπεισέρχονται στην επίλυση του μοντέλου, ακολουθώντας την ανάστροφη μέθοδο προσέγγισης του προβλήματος, μέσα από μια συνεχή διαδικασία δοκιμής και επανάληψης. Η εργασία της ρύθμισης στην περίπτωση ενός μοντέλου Modflow που εξετάζουμε, γίνεται αφού έχει πραγματοποιηθεί η εννοιολογική προσέγγιση. Ωστόσο, τα εργαλεία της ρύθμισης στο GMS προορίζονται για γενική χρήση σε οποιοδήποτε μοντέλο.

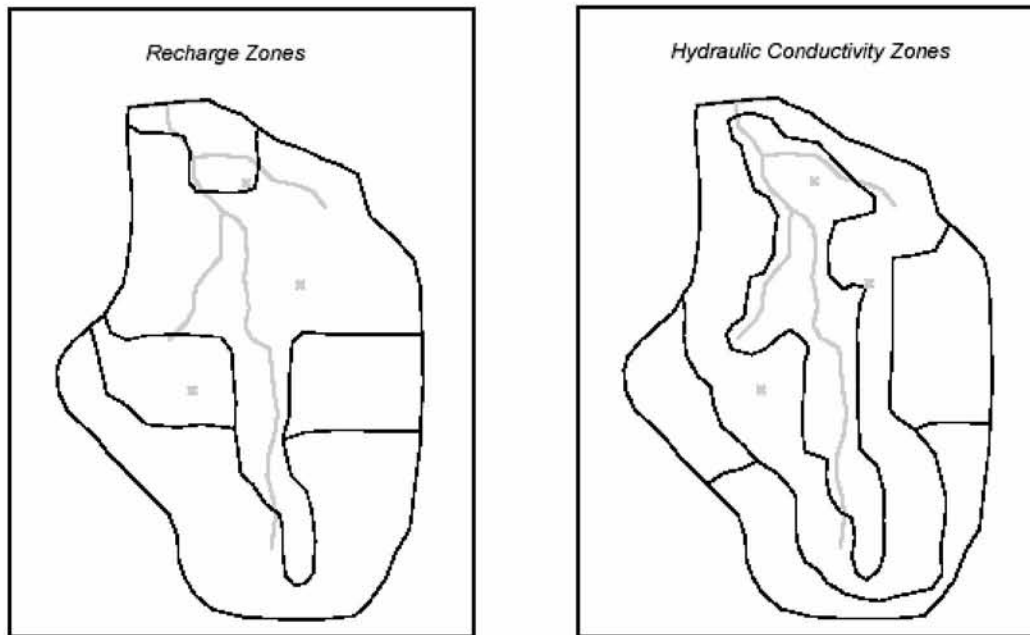
Δύο τύποι δεδομένων παρατήρησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία: παρατηρήσεις σημείων και ροής. Καθορίζονται στο μοντέλο του χάρτη και συσχετίζονται με σημεία, τόξα ή πολύγωνα. Τα σημεία αντιστοιχούν σε πηγάδια παρατήρησης και η αριθμητική τιμή του δεδομένου αντιστοιχεί στο υδραυλικό φορτίο του υδροφορέα στο σημείο αυτό. Οι ροές αναπαρίστανται με γραμμικά ή επιφανειακά στοιχεία, που αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα χείμαρρους ή δεξαμενές,

όπου η απώλεια ή το κέρδος για τον υδροφόρα αναφορικά με το αντικείμενο έχει μετρηθεί ή εκτιμηθεί (Εικ. 3.8).

Για την κατανόηση της διαδικασίας αναφέρεται το περιεχόμενο παράδειγμα του προγράμματος με την ακόλουθη σειρά ενεργειών: Εισήχθη ένα προϋπάρχον μοντέλο της περιοχής - ενός επιπέδου- που περιείχε μία αρχική εκτίμηση των υδραυλικών αγωγιμοτήτων και των επαναφορτίσεων (Εικ. 3.9). Επίσης εισήχθη η λύση που υπολογίστηκε βάσει αυτού του αρχικού μοντέλου και στη συνέχεια αναλύθηκε το σφάλμα της. Κατόπιν, με νέες πλέον τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας ή/και επαναφόρτισης, βρέθηκε νέα λύση και υπολογίστηκε εκ νέου το σφάλμα αυτής. Τα βήματα αυτά επαναλήφθηκαν μέχρις ότου το σφάλμα έγινε πρακτικά πολύ μικρό.

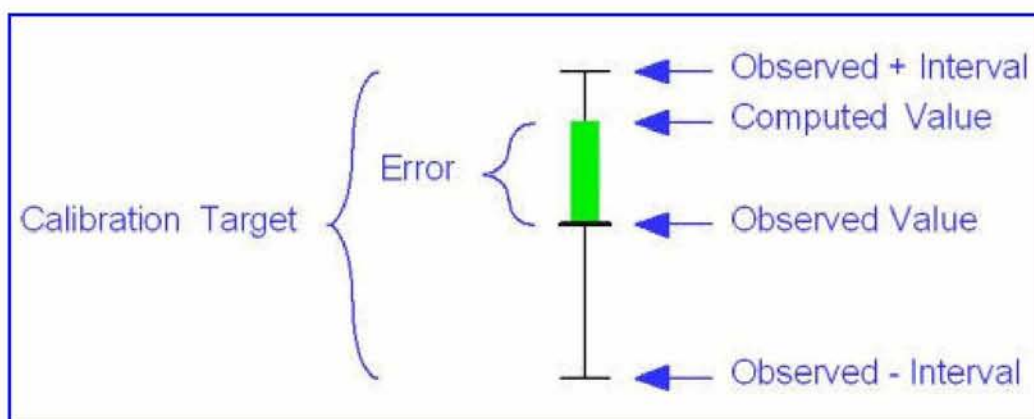


Εικόνα 3.8: Δείγμα μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για την εργασία της ρύθμισης μοντέλου MODFLOW – Σημειακά και γραμμικά στοιχεία (Σιδηρόπουλος Π., 2007).



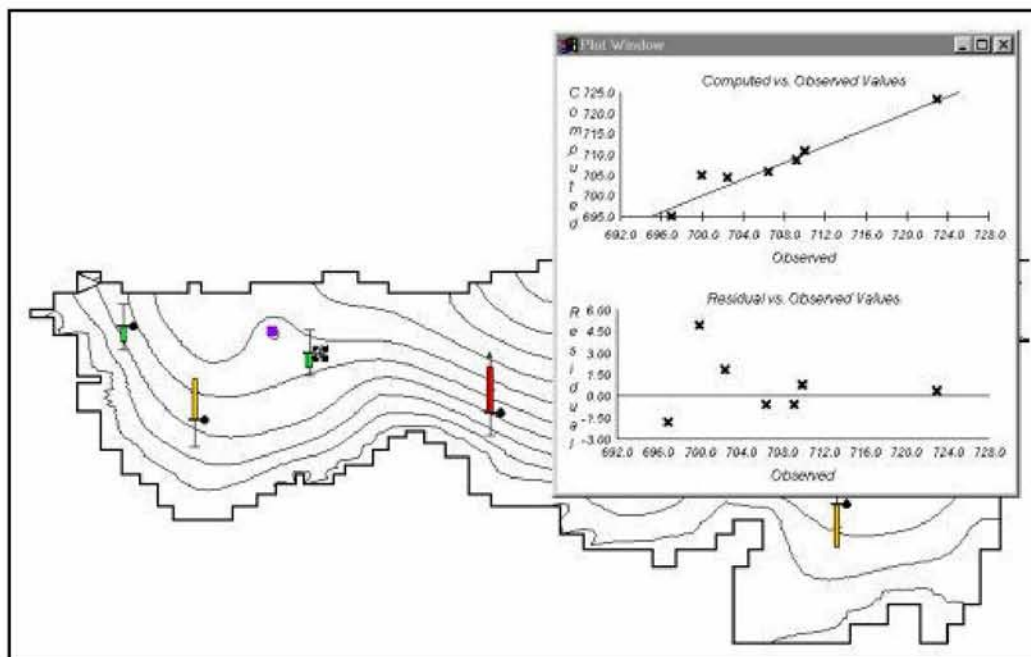
Εικόνα 3.9: Ζώνες επαναφόρτισης και υδραυλικής αγωγιμότητας (Σιδηρόπουλος Π., 2007).

Για κάθε νέα λύση, τα σφάλματα εμφανίζονται δίπλα στα επί μέρους σημεία παρατήρησης του μοντέλου, ως διαφορές μεταξύ υπολογισμένης και παρατηρημένης τιμής, ενώ αποδίδονται στο ίδιο γράφημα και τα όριά τους (Εικ. 3.10). Για να κατανοηθεί η έννοια του σφάλματος στην περίπτωση του Model Calibration αξίζει να σημειωθούν τα εξής: Κάθε σημείο παρατήρησης (π.χ. πηγάδι) προσδιορίζεται – εκτός από τις συντεταγμένες του – και από το υδραυλικό φορτίο του (*head*) και το εκτιμώμενο σφάλμα (\pm) (*interval*) αυτής της παρατηρημένης τιμής. Επίσης, γνωστή πρέπει να είναι και η τιμή της εμπιστοσύνης που ανταποκρίνεται στην παραπάνω εκτίμηση σφάλματος. Το εκτιμώμενο σφάλμα είναι αυτό που συνήθως χρησιμοποιείται ως “στόχος” της ρύθμισης (*Calibration Target*). Η ρύθμιση του μοντέλου επιτυγχάνεται όταν η τιμή φορτίου της λύσης βρίσκεται εντός του πεδίου: [παρατηρημένη τιμή – εκτιμώμενο σφάλμα]—[παρατηρημένη τιμή + εκτιμώμενο σφάλμα]



Εικόνα 3.10: Γραφική απεικόνιση σφάλματος με τα όρια του (Σιδηρόπουλος Π., 2007).

Το πρόγραμμα διαθέτει εκτός των άλλων και επιλογές γραφικής απόδοσης στατιστικών στοιχείων. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν εδώ τα γραφήματα που δείχνουν την πορεία της εργασίας της ρύθμισης και τη σύγκριση μεταξύ υπολογισμένων και καταγεγραμμένων τιμών, με βάση το αποδεκτό εύρος σφάλματος (Εικ. 3.11).



Εικόνα 3.11 Γραφήματα με εμφάνιση στατιστικών υπολογισμών (Σιδηρόπουλος Π., 2007).

Σε πολλές περιπτώσεις η ρύθμιση του μοντέλου επιτυγχάνεται γρηγορότερα με την εφαρμογή της αυτόματης εκτίμησης παραμέτρων ή αλλιώς με τη χρήση αντίστροφων μοντέλων. Το αντίστροφο μοντέλο είναι μία εσωτερική διαδικασία ή ένα εξωτερικό πρόγραμμα, που αυτοματοποιεί την εργασία της εκτίμησης των παραμέτρων, διότι συστηματικά προσαρμόζει μια ομάδα παραμέτρων εισόδου - καθορισμένων από το χρήστη- ωστόσο η διαφορά μεταξύ των υπολογισμένων και των παρατηρημένων τιμών να ελαχιστοποιηθεί. Οι επιλογές που δίνει το GMS είναι τρεις: MODFLOW 2000 PES process, PEST, και UCODE.

4 GWM - ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ (GROUND-WATER MANAGEMENT PROCESS FOR THE U.S. GEOLOGICAL SURVEY)

4.1 Εισαγωγή

Από τη δεκαετία του '60, τα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης γίνονται όλο και πιο χρήσιμα εργαλεία στην ανάλυση των συστημάτων των υπόγειων ροών. Πιο πρόσφατα, αυτά τα μοντέλα ροής έχουν συνδυαστεί με τεχνικές βελτιστοποίησης έτσι ώστε να προσδιοριστούν εκείνες οι στρατηγικές διαχείρισης των υδατικών πόρων που ανταποκρίνονται καλύτερα σε ένα σύνολο στόχων και περιορισμών. Οι τεχνικές βελτιστοποίησης είναι ένα σύνολο μαθηματικών προγραμμάτων που προσπαθούν να βρουν τη βέλτιστη (ή καλύτερη) κατανομή των πόρων σε ανταγωνιστικές χρήσεις. Στο πλαίσιο της διαχείρισης των υπογείων υδάτων, οι πόροι είναι συνήθως οι υπόγειοι και οι επιφανειακοί μιας λεκάνης και (ή) οι οικονομικοί πόροι των χρηστών που εξαρτώνται από το νερό. Οι στόχοι της διαχείρισης και οι περιορισμοί διατυπώνονται μαθηματικά με ένα μοντέλο βελτιστοποίησης (διαχείρισης). Συνδυαστικά μοντέλα προσομοίωσης υπόγειας ροής και βελτιστοποίησης έχουν εφαρμοστεί σε ποικίλα προβλήματα διαχείρισης υπόγειων υδάτων, συμπεριλαμβανομένων του ελέγχου της πτώσης της στάθμης του νερού και της καθίζησης του εδάφους που θα μπορούσε να προκύψει από την άντληση υπόγειων υδάτων, της συνδυαστικής διαχείρισης των υπόγειων και των επιφανειακών υδατικών συστημάτων, της σύλληψης και του περιορισμού της κίνησης διαφόρων ρυπαντών, και της εισβολής του θαλασσινού νερού.

Διάφοροι υπολογιστικοί κώδικες έχουν αναπτυχθεί κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών για να διευκολύνουν τη σύνδεση της ροής με μοντέλα βελτιστοποίησης σε υπόγεια υδατικά συστήματα ροής (Lefkoff και Gorelick, 1987; Greenwald, 1998; Zheng και Wang, 2002; Ahlfeld και Riefler, 2003; Peralta, 2004). Αυτοί οι κώδικες διαφέρουν ως προς το αριθμητικό μοντέλο που χρησιμοποιούν κάθε φορά για να αναπαραστήσουν το υπόγειο υδατικό σύστημα ροής, τα είδη των προβλημάτων διαχείρισης της υπόγειας ροής που χρήζουν επίλυσης, και τις προσεγγίσεις που χρησιμοποιούν για την επίλυση των προβλημάτων διαχείρισης.

Το GWM (Ground-Water Management Process) είναι μια νέα προσθήκη για το MODFLOW-2000 (Modular three dimensional finite difference ground water flow model, Harbaugh και άλλοι, 2000). Το GWM επιλύει πολλά είδη γραμμικών, μη γραμμικών, και μικτών δυαδικών γραμμικών προβλημάτων διαχείρισης της υπόγειας ροής. Το πακέτο RMS (Response Matrix Solution package), που έχει εφαρμοστεί ευρέως σε μοντέλα διαχείρισης υπόγειων υδάτων, χρησιμοποιείται εδώ για να μετατρέψει ένα πρόβλημα διαχείρισης υπόγειων υδάτων σε πρόβλημα βελτιστοποίησης που θα μπορεί να επιλυθεί από το GWM. Το GWM χρησιμοποιεί τους αλγόριθμους βελτιστοποίησης simplex και branch and bound για να επιλύσει το αποτέλεσμα της παραπάνω μετατροπής: αυτοί οι αλγόριθμοι έχουν κωδικοποιηθεί εντός του GWM σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN-90. Στην τρέχουσα μορφή του, το GWM μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο με τις λειτουργίες GWF (Ground-

Water Flow) και Global Processes του MODFLOW-2000: δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τις λειτουργίες Ground-Water Transport, Observation, Sensitivity, or Parameter-Estimation Processes. Έως και το 2005, το MODFLOW-2000 (Harbaugh και άλλοι, 2000) ήταν η πιο πρόσφατη έκδοση του κώδικα MODFLOW, που αναπτύχθηκε για πρώτη φορά στη δεκαετία του '80 (McDonald and Harbaugh, 1988; Harbaugh and McDonald, 1996). Έτσι στη συνέχεια ο όρος MODFLOW θα αναφέρεται στην έκδοση του κώδικα MODFLOW-2000, εκτός αν διευκρινίζεται αλλιώς.

Η προέλευση του GWM είναι ο κώδικας MODOFC που αναπτύχθηκε από τους Ahlfeld και Riefler (2003). Ο κώδικας MODOFC βασίζεται στην έκδοση MODFLOW-96 του MODFLOW (Harbaugh και McDonald, 1996). Αρκετές αλλαγές έχουν γίνει κατά τη μετάβαση από τον κώδικα MODOFC στον GWM. Πρώτον, οι τύποι των μεταβλητών απόφασης και των περιορισμών που μπορούσαν να διευκρινιστούν από ένα μοντέλο διαχείρισης έχουν τροποποιηθεί και επεκταθεί. Για παράδειγμα, σήμερα είναι δυνατόν να συμπεριληφθεί στο μοντέλο μια μεταβλητή απόφασης που αντιπροσωπεύει μια εξωτερική πηγή νερού. Δεύτερον, έχει τροποποιηθεί η δομή των αρχείων που εισάγουν δεδομένα (input files) και των αρχείων που παράγουν τα αποτελέσματα (output files). Με τη νέα μορφή των αρχείων, χρησιμοποιούνται ξεχωριστά input files κάθε φορά για να καθορίσουν τις μεταβλητές απόφασης, την αντικειμενική συνάρτηση, τους περιορισμούς και την τεχνική επίλυσης. Η νέα αυτή δομή επιδιώκει να διευκολύνει τη διαδικασία μετατροπής της κάθε μορφής διαχείρισης σε τέτοια που θα μπορεί να επιλυθεί από το GWM. Επίσης η αναθεωρημένη δομή πρέπει να καταστήσει ευκολότερη τη διαδικασία ανάπτυξης νέων δυνατοτήτων και νέων υπορουτίνων για το GWM. Τέλος, έγιναν πολλές αλλαγές στον αρχικό κώδικα MODOFC FORTRAN: σε αυτές τις αλλαγές περιλαμβάνεται η οργάνωση των υπορουτίνων σε ενότητες και τα πακέτα που συνάδουν με την όλη δομή του MODFLOW-2000.

4.2 Διατύπωση προβλημάτων διαχείρισης υπόγειων υδάτων με το GWM

Ένα πρόβλημα διαχείρισης υπόγειων υδάτων αποτελείται από τρία στοιχεία: τις μεταβλητές απόφασης (decision variables), την αντικειμενική συνάρτηση (objective function) και ένα σύνολο από περιορισμούς (constraints). Όλα αυτά μαζί καθορίζουν ένα μαθηματικό μοντέλο διαχείρισης και λήψης αποφάσεων (Ahlfeld and Mulligan, 2000; Hillier and Lieberman, 2001).

Οι μεταβλητές απόφασης (decision variables) ενός προβλήματος διαχείρισης είναι τα ποσοτικά στοιχεία ελέγχου (ή απόφασης) που θα καθοριστούν από το μοντέλο, όπως είναι οι τιμές άντλησης από ένα σύνολο ελεγχόμενων πηγαδιών (managed wells). Οι τιμές που θα καθοριστούν από το GWM για αυτές τις μεταβλητές ελέγχου καθορίζουν τη λύση του προβλήματος. Η αντικειμενική συνάρτηση (objective function) του προβλήματος, η οποία καθορίζεται από μία ή περισσότερες μεταβλητές απόφασης, είναι ένα μέτρο ελέγχου της απόδοσης της διαδικασίας σχεδιασμού. Χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει ανάμεσα σε πολλές πιθανές λύσεις την καλύτερη. Η συνάρτηση αυτή μπορεί να μεγιστοποιείται ή να ελαχιστοποιείται, ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή του GWM. Η τρίτη συνιστώσα

ενός προβλήματος διαχείρισης είναι ένα σύνολο από περιορισμούς (constraints) οι οποίοι θέτουν όρια στις τιμές που μπορούν να πάρουν οι μεταβλητές απόφασης. Η λύση ενός καλά διατυπωμένου προβλήματος διαχείρισης υπόγειων υδάτων περιέχει τις τιμές των μεταβλητών αποφάσεων που βελτιστοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση ενώ παράλληλα ικανοποιούν όλους τους περιορισμούς που έχουν τεθεί σε αυτές (Ahlfeld and Mulligan, 2000).

4.2.1 Μεταβλητές απόφασης

Το GWM υποστηρίζει τρεις τύπους μεταβλητών απόφασης: αυτές που συσχετίζονται με τη παροχή (flow-rate decision variables), τις εξωτερικές (external decision variables) και τις δυαδικές (binary variables). Στη συνέχεια θα εξεταστούν μόνο οι μεταβλητές απόφασης που σχετίζονται με την παροχή.

4.2.1.1 Μεταβλητές απόφασης που σχετίζονται με την παροχή (flow-rate decision variables)

Ο κύριος τύπος μεταβλητής απόφασης είναι μια παροχή άντλησης (αποφόρτισης) ή μια παροχή εμπλουτισμού (επαναφόρτισης) σε μια ελεγχόμενη θέση πηγαδιού, Q_{wn} . Όλες αυτές οι μεταβλητές αντιμετωπίζονται από το GWM σαν θετικές, είτε αντιπροσωπεύουν άντληση (withdrawal) είτε εμπλουτισμό (injection). Για αυτές που αντιπροσωπεύουν άντληση, το GWM μετατρέπει εσωτερικά στο σωστό πρόσημο με αυτό της διαδικασίας GWF του MODFLOW (Ground-Water Flow). Κάθε μεταβλητή απόφασης που αφορά παροχή μπορεί να επεκτείνεται σε περισσότερα από ένα κελιά του μοντέλου και μπορεί να είναι ενεργή σε περισσότερες από μία περιόδους άντλησης (stress periods). Οι περίοδοι άντλησης στις οποίες η μεταβλητή απόφασης έχει καθοριστεί να είναι ενεργή δεν είναι αναγκαίο να έχουν την ίδια διάρκεια. Στην απλούστερη περίπτωση, μία παροχή Q_{wn} είναι ο ρυθμός άντλησης ή εμπλουτισμού σε ένα μόνο κελί κατά τη διάρκεια μίας μόνο περιόδου άντλησης. Σε πιο σύνθετα προβλήματα, η παροχή Q_{wn} μπορεί να αποτελείται από ένα σύνολο κάθετων κελιών τα οποία προσομοιώνουν την άντληση από ένα πηγάδι που εκτείνεται σε αρκετά στρώματα του μοντέλου (model layers), ή από ένα σύνολο κελιών του ίδιου στρώματος που αντιπροσωπεύουν την αθροιστική άντληση από πολλά πηγάδια που ανήκουν σε μια υποπεριοχή του πεδίου ορισμού του μοντέλου. Αν και κάθε μεταβλητή απόφασης μπορεί να εκτείνεται σε πολλαπλά κελιά και για πολλές περιόδους άντλησης, η παροχή που έχει καθοριστεί για κάθε μεταβλητή απόφασης είναι μία ενιαία τιμή που είναι σταθερή για κάθε περίοδο άντλησης που αυτή είναι ενεργή, και έχει κατανεμηθεί σε κάθε κελί της περιοχής που εκτείνεται με βάση το ποσοστό που καθορίζεται από τον χρήστη.

Κάθε μεταβλητή απόφασης που αφορά παροχή αντιπροσωπεύει είτε άντληση είτε εμπλουτισμό στη θέση του πηγαδιού: μία μοναδική μεταβλητή απόφασης δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άντληση και για εμπλουτισμό. Ωστόσο, ο χρήστης μπορεί να καθορίσει δύο μεταβλητές για μια θέση, η οποία να έχει καθοριστεί από το ίδιο σύνολο κελιών και περιόδων άντλησης, με την πρώτη να αφορά άντληση πηγαδιού και τη δεύτερη εμπλουτισμό πηγαδιού. Επιπρόσθετα, για μη σταθερά μοντέλα στο χρόνο (transient models), μια μόνο θέση πηγαδιού μπορεί να συσχετίζεται με

περισσότερες από μία παροχές, όπου κάθε μία από αυτές θα καταλαμβάνει την ίδια θέση στην περιοχή αλλά θα παραμένει ενεργή σε διαφορετικές περιόδους άντλησης. Αυτή είναι μια συνήθη κατάσταση για τα πηγάδια στα οποία ο ρυθμός άντλησης τους μεταβάλλεται χρονικά.

Είναι σημαντικό να αναγνωρίζεται η διαφορά των ροών που έχουν προσομοιωθεί από το πακέτα Well (WEL) ή Multi-Node Well (MNW), από τις ροές που καθορίστηκαν σαν μεταβλητές απόφασης για ένα πρόβλημα του GWM. Για το σκοπό ενός προβλήματος βελτιστοποίησης, οι ροές που προσομοιώνονται από τα πακέτα WEL (Harbaugh et al., 2000) ή MNW (Halford and Hanson, 2002) και περιέχουν τιμές άντλησης ή εμπλουτισμού που έχει καθορίσει ο χρήστης, αναφέρονται ως μη ελεγχόμενα πηγάδια (unmanaged wells). Αυτά τα μη ελεγχόμενα πηγάδια άντλησης ή εμπλουτισμού θεωρούνται δευτερεύουσες πιέσεις (background stresses), με την έννοια ότι θα συνεισφέρουν στη συνολική πίεση του υπόγειου συστήματος ροής σε περίπτωση απουσίας ελεγχόμενων αντλήσεων ή εμπλουτισμών (managed withdraws or injections). Αντιθέτως, για μια μεταβλητή απόφασης συσχετισμένη με παροχή (flow-rate decision variable) καθορισμένη μέσα σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης η τιμή άντλησης ή εμπλουτισμού είναι άγνωστη στην αρχή του προβλήματος, και καθορίζεται σαν κομμάτι της τελικής λύσης. Οι παροχές που ορίζονται σαν μεταβλητές απόφασης αναφέρονται ως ελεγχόμενες ροές (managed flows), γιατί είναι μέρος της λύσης διαχείρισης του προβλήματος. Στην αρχή ενός προβλήματος, οι ελεγχόμενες ροές (managed flows) είναι υποψήφιες προς επιλογή για το τελικό σύνολο των ενεργών (που σημαίνει μη μηδενικών) μεταβλητών αποφάσεων που συσχετίζονται με τη ροή (flow-rate decision variables) οι οποίες συνθέτουν την τελική λύση. Είναι πιθανόν μερικές από τις υποψήφιες μεταβλητές απόφασης να μην επιλεγούν σαν μέρος της τελικής λύσης του προβλήματος, οπότε θα καταστούν ανενεργές (οι υπολογισμένες τιμές άντλησης ή εμπλουτισμού θα είναι μηδενικές).

Το GWM επιτρέπει την ταυτόχρονη χρήση των ελεγχόμενων και των μη ελεγχόμενων πηγαδιών στα κελιά του μοντέλου. Για παράδειγμα, ο χρήστης μπορεί να προσδιορίσει μία μη ελεγχόμενη τιμή άντλησης (που αποτελεί background stress) $1.0 \text{ ft}^3/\text{s}$ σε ένα συγκεκριμένο κελί με τη βοήθεια του πακέτου WEL: ο χρήστης όμως μπορεί επίσης να ορίσει και μία ελεγχόμενη τιμή άντλησης στο ίδιο κελί με τη χρήση μιας μεταβλητής απόφασης παροχής στο GWM. Η συνολική τιμή άντλησης σε αυτό το κελί στο τέλος του τρεξίματος του GWM θα ήταν ίση με το άθροισμα της μη ελεγχόμενης τιμής άντλησης που καθορίστηκε από το χρήστη ($1.0 \text{ ft}^3/\text{s}$) και της ελεγχόμενης τιμής άντλησης που θα υπολογίσει το GWM για τη μεταβλητή απόφαση που αντιπροσωπεύει.

Αν και οι μεταβλητές αποφάσεις παροχής που περιγράφηκαν αναφέρονταν μόνο σε πηγάδια (και προσομοιώνονται από το GWM με τον ίδιο χαρακτηριστικό τρόπο που προσομοιώνονται και από το πακέτο WEL του MODFLOW), αυτές μπορούν να αποτελέσουν και άλλους τύπους διαχειριζόμενων πιέσεων (managed stresses) σε ένα υπόγειο σύστημα υδάτων, όπως το ρυθμό επαναφόρτισης μιας τεχνητής λεκάνης εμπλουτισμού ή το ρυθμό διαρροής από ένα αρδευτικό δίκτυο.

4.2.2 Αντικειμενική συνάρτηση

Το GWM υποστηρίζει μία μόνο αντικειμενική συνάρτηση, η οποία ελαχιστοποιεί ή μεγιστοποιεί το σταθμισμένο άθροισμα των τριών τύπων μεταβλητών απόφασης:

$$\sum_{n=1}^N \beta_n Q_{w_n} T_{Q_{w_n}} + \sum_{m=1}^M \gamma_m Ex_m T_{Ex_m} + \sum_{l=1}^L \kappa_l I_l, \quad \text{Εξ.4.1}$$

Όπου:

- β_n το κόστος ή το όφελος ανά μονάδα όγκου νερού που αντλείται ή διοχετεύεται στο πηγάδι n
- γ_m το κόστος ή το όφελος ανά μονάδα όγκου νερού που εισάγεται ή εξάγεται σε ένα μέρος εκτός του συστήματος
- κ_l η μονάδα κόστους ή όφελους που συσχετίζεται με τη δυαδική μεταβλητή I_l
- $T_{Q_{w_n}}$ η συνολική διάρκεια της ροής στη θέση του πηγασιού n
- T_{Ex_m} η συνολική διάρκεια της ροής σε ένα μέρος εκτός συστήματος m και
- N,M,L ο συνολικός αριθμός των τριών τύπων μεταβλητών απόφασης, αντίστοιχα.

Τα $T_{Q_{w_n}}$ και T_{Ex_m} υπολογίζονται από το GWM προσθέτοντας την διάρκεια όλων των περιόδων άντλησης κατά την οποία οι n και m μεταβλητές απόφασης είναι ενεργές. (Το GWM δεν απαιτεί οι περίοδοι άντλησης που διευκρινίστηκαν στο MODFLOW να είναι ίδιας διάρκειας). Οι συντελεστές β_n , γ_m και κ_l ονομάζονται συντελεστές της αντικειμενικής συνάρτησης.

Η Εξίσωση 4.1 μπορεί να ληφθεί με όρους οικονομικού κόστους ή όφελους από την άντληση, τον εμπλουτισμό, την εισαγωγή, ή την εξαγωγή νερού στο μοντέλο διαχείρισης, έτσι ώστε κάθε ένας από τους τρεις τύπους των μεταβλητών απόφασης της Εξίσωσης 4.1 να είναι σε νομισματικές μονάδες. Ο πρώτος όρος στην Εξίσωση 4.1 είναι το κόστος (ή το όφελος) που προέρχεται από την άντληση ή τον εμπλουτισμό μιας θέσης με νερό και αφορά τις μεταβλητές απόφασης παροχής. Ο δεύτερος όρος είναι το κόστος (ή το όφελος) από την εισαγωγή ή την εξαγωγή νερού και αφορά τις εξωτερικές μεταβλητές απόφασης, και ο τρίτος όρος είναι το κόστος (ή το όφελος) να καταστούν οι δύο πρώτες μεταβλητές απόφασης που συσχετίζονται με κάθε δυαδική μεταβλητή ενεργές. Επισημαίνεται πως οι συντελεστές στους δύο πρώτους όρους της εξίσωσης (β_n και γ_m) υπονοούν ότι το κόστος (ή το όφελος) του νερού είναι γραμμικά ανάλογο με τον όγκο του νερού που αντλείται, διοχετεύεται, εισάγεται, ή εξάγεται.

Αν και η Εξίσωση 4.1 μπορεί να ληφθεί με νομισματικούς όρους, συχνά είναι δύσκολο να αναθέσεις οικονομικά κόστοι και οφέλη σε όλα τα στοιχεία ενός υδρολογικού προβλήματος διαχείρισης. Σε περιπτώσεις όπου τα οικονομικά κόστη και οφέλη είναι άγνωστα ή δεν χρειάζονται κατά τη διατύπωση του προβλήματος διαχείρισης, ο χρήστης μπορεί να ορίσει τους συντελεστές β_n και γ_m σαν σχετικά κόστη και οφέλη μεταξύ των διαφορετικών μεταβλητών παροχής ή εξωτερικών μεταβλητών. Για παράδειγμα, η αντικειμενική συνάρτηση πρέπει να μεγιστοποιήσει

την άντληση νερού σε n θέσεις πηγαδιών, οπότε οι συντελεστές β_n μπορούν να πάρουν αδιάστατες τιμές ίσες με 1.0. Τότε η Εξίσωση 4.1 θα γινόταν:

$$\text{Maximize} \sum_{n=1}^N 1.0 Q_{w_n} T_{Q_{w_n}}, \quad \text{Εξ. 4.2}$$

και το αποτέλεσμα της αντικειμενικής τιμής θα ήταν σύμφωνο με τη συνολικό όγκο του νερού που αντλήθηκε. Εναλλακτικά, ο χρήστης μπορεί να θέλει να τονίσει ότι το όφελος από την άντληση νερού από μία θέση είναι διπλάσιο από το όφελος άντλησης νερού από μία δεύτερη θέση, οπότε σε αυτή την περίπτωση η αντικειμενική συνάρτηση θα απλοποιούνταν στη μορφή:

$$\text{Maximize} 2.0 Q_{w_1} T_{Q_{w_1}} + 1.0 Q_{w_2} T_{Q_{w_2}}. \quad \text{Εξ. 4.3}$$

Ανεξάρτητα από την έννοια που αποδίδεται στους συντελεστές β_n , γ_m , και γ_n στην Εξίσωση 4.1, ο χρήστης πρέπει να εξασφαλίσει ότι οι μονάδες αυτών των συντελεστών είναι σταθερές. Όταν το GWM επιλύει το πρόβλημα διαχείρισης, το αντίστοιχο μέγεθος του κάθε όρου στην Εξίσωση 4.1 είναι αυτό που θα καθορίσει την τελική λύση.

4.2.3 Περιορισμοί

Το GWM υποστηρίζει τέσσερις τύπους περιορισμών (constraints) σε ένα πρόβλημα διαχείρισης. Αυτοί οι περιορισμοί μπορούν να χωριστούν γενικά σε δύο κατηγορίες: σε αυτούς για τους οποίους δεν χρειάζεται να δημιουργούνται οι συντελεστές απόκρισης (περιορισμοί απευθείας στις μεταβλητές απόφασης και γραμμικά αθροιστικοί περιορισμοί), και σε αυτούς που χρειάζονται συντελεστές απόκρισης μεταξύ των μεταβλητών απόφασης και των μεταβλητών κατάστασης του υπόγειου συστήματος ροής (περιορισμοί στο υδραυλικό φορτίο και στη ροή του ποταμού). Παρακάτω θα περιγραφτούν μόνο οι περιορισμοί που αφορούν το υδραυλικό φορτίο (hydraulic-head constraints).

4.2.3.1 Περιορισμοί στο υδραυλικό φορτίο

Το GWM υποστηρίζει τέσσερις τύπους περιορισμών στο υδραυλικό φορτίο. Ο πρώτος τύπος περιορισμού είναι ένα ελάχιστο και (ή) ένα μέγιστο κατά απόλυτη τιμή όριο που τοποθετείται σε ένα φορτίο σε μία συγκεκριμένη θέση για μια συγκεκριμένη περίοδο άντλησης:

$$h_{i,j,k,t} \geq h_{i,j,k,t}^l, \quad \text{Εξ. 4.4}$$

και

$$h_{i,j,k,t} \leq h_{i,j,k,t}^u, \quad \text{Εξ. 4.5}$$

όπου $h_{i,j,k,t}^l$ και $h_{i,j,k,t}^u$ είναι τα καθορισμένα ανώτερα και κατώτερα όρια του φορτίου στη θέση i, j, k (Εικ. 4.1A) στο τέλος της περιόδου άντλησης t (δηλαδή, στο

τελευταίο χρονικό βήμα της περιόδου άντλησης). Αυτοί οι περιορισμοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ελέγξουν την υπερβολική ταπείνωση (Εξ. 4.4) ή ανύψωση (Εξ. 4.5) της πιεζομετρικής επιφάνειας.

Ο δεύτερος τύπος περιορισμού αφορά την πτώση του υδραυλικού φορτίου (drawdown) σε συγκεκριμένη θέση και περίοδο άντλησης. Οι τιμές αυτές συμβολίζονται ως $dd_{i,j,k,t}$ και ισούται με τη διαφορά μεταξύ του αρχικού υδραυλικού φορτίου στη θέση i, j, k στο τέλος της περιόδου άντλησης t , $(h_{i,j,k,t})^0$, και του φορτίου που υπολογίζεται στην ίδια θέση στο τέλος της περιόδου άντλησης t μετά της εφαρμογή της βέλτιστης στρατηγικής διαχείρισης, $h_{i,j,k,t}$:

$$dd_{i,j,k,t} = (h_{i,j,k,t})^0 - h_{i,j,k,t}, \quad \text{Εξ. 4.6}$$

Οι περιορισμοί της πτώσης του υδραυλικού φορτίου γράφονται ως:

$$dd_{i,j,k,t} \geq dd_{i,j,k,t}^l \quad \text{Εξ. 4.7}$$

και

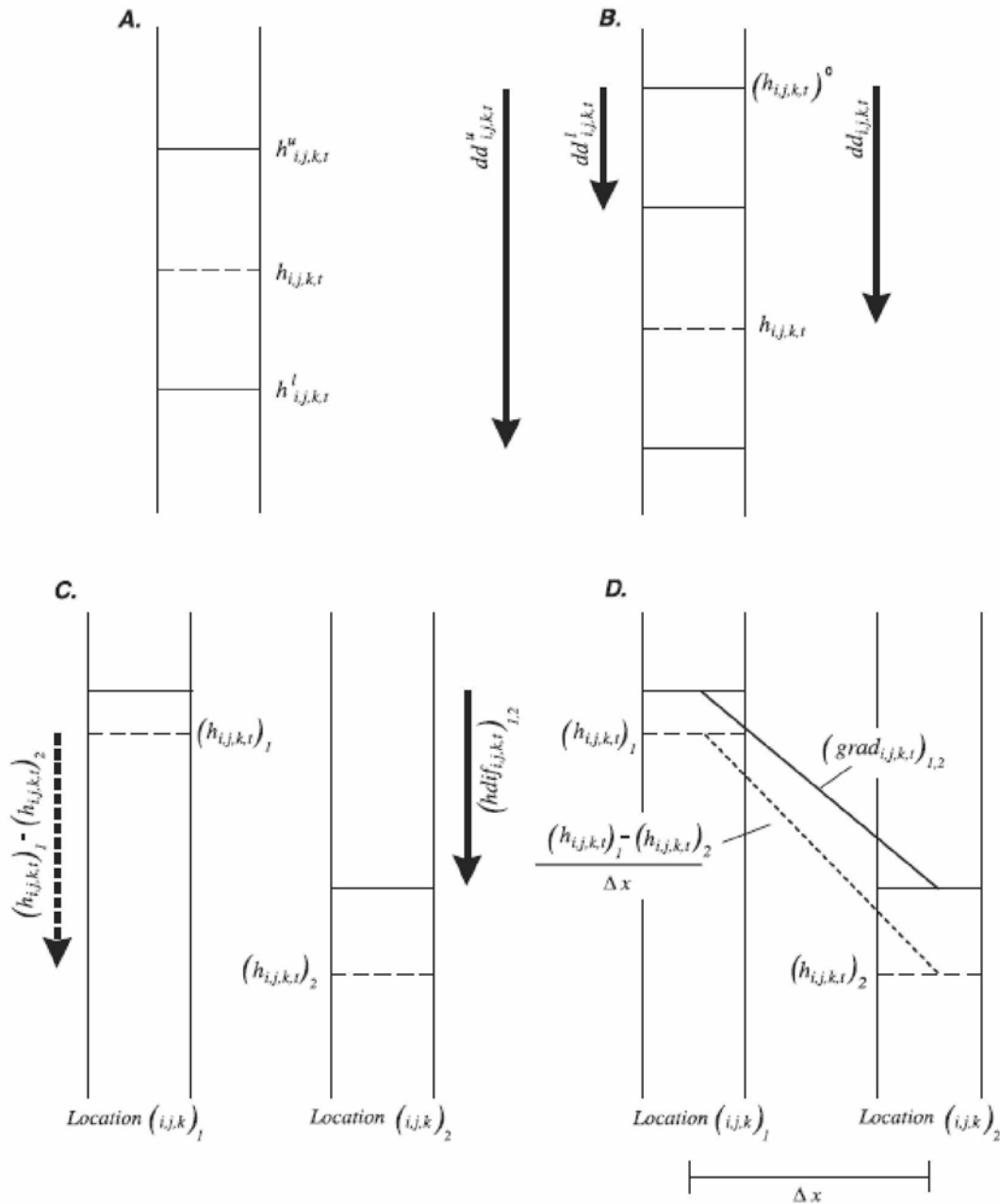
$$dd_{i,j,k,t} \leq dd_{i,j,k,t}^u, \quad \text{Εξ. 4.8}$$

όπου $dd_{i,j,k,t}^l$ και $dd_{i,j,k,t}^u$ είναι συγκεκριμένο μέγιστο και ελάχιστο όριο στην τιμή που θα προκύψει στην θέση i, j, k στο τέλος της περιόδου άντλησης t (Εικ. 4.1B). Η χρήση των περιορισμών στην πτώση του υδραυλικού φορτίου στο GWM προϋποθέτει την χρήση τιμών αναφοράς άντλησης και εμπλουτισμού σε κάθε υποψήφια θέση πηγαδιού. Αυτές οι τιμές αναφοράς χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό του αρχικού υδραυλικού φορτίου, $(h_{i,j,k,t})^0$, σε κάθε θέση που ισχύει ο περιορισμός.

Ο τρίτος τύπος περιορισμού είναι ένα ελάχιστο όριο στη διαφορά του υδραυλικού φορτίου μεταξύ δύο διαφορετικών θέσεων του μοντέλου $(i, j, k)_1$ και $(i, j, k)_2$ στο τέλος της περιόδου άντλησης t :

$$(h_{i,j,k,t})_1 - (h_{i,j,k,t})_2 \geq (hdif_{i,j,k,t})_{1,2}, \quad \text{Εξ. 4.9}$$

όπου $(h_{i,j,k,t})_1$ και $(h_{i,j,k,t})_2$ είναι τα υδραυλικά φορτία που υπολογίστηκαν για τις θέσεις $(i, j, k)_1$ και $(i, j, k)_2$ στο τέλος της περιόδου άντλησης t και $(hdif_{i,j,k,t})_{1,2}$ είναι μία συγκεκριμένη κατώτερη τιμή της διαφοράς των φορτίων στις θέσεις 1 και 2 στο τέλος της περιόδου άντλησης t (Εικ. 4.1C). Οι δύο αυτές θέσεις μπορεί να είναι κάθετα ή οριζόντια χωρίς να χρειάζεται να είναι σε γειτονικά κελιά. Το GWM προϋποθέτει ότι το υδραυλικό φορτίο στη δεύτερη θέση να είναι μικρότερο από αυτό της πρώτης κατά ένα ελάχιστο ποσό $(hdif_{i,j,k,t})_{1,2}$.



Εικόνα 4.1: Τύποι περιορισμών στο υδραυλικό φορτίο που υποστηρίζονται από το GWM (Ahfeld D.P. et. al., 2005)

Ο τέταρτος τύπος περιορισμού είναι ένα ελάχιστο όριο στην κλίση του υδραυλικού φορτίου μεταξύ δύο διαφορετικών θέσεων του μοντέλου $(i, j, k)_1$ και $(i, j, k)_2$ στο τέλος της περιόδου άντλησης t . Η κλίση του υδραυλικού φορτίου ανάμεσα σε δύο θέσεις του μοντέλου $((grad_{i,j,k,t})_{1,2})$ είναι:

$$\frac{(h_{i,j,k,t})_1 - (h_{i,j,k,t})_2}{\Delta x}, \quad \text{Εξ. 4.10}$$

όπου $(h_{i,j,k,t})_1$ και $(h_{i,j,k,t})_2$ είναι τα υδραυλικά φορτία που υπολογίστηκαν για τις θέσεις $(i, j, k)_1$ και $(i, j, k)_2$, και Δx η απόσταση ανάμεσα στις δύο θέσεις (Εικ. 4.1D). Ο περιορισμός που τίθεται σε εφαρμογή από το GWM είναι:

$$\frac{(h_{i,j,k,t})_1 - (h_{i,j,k,t})_2}{\Delta x} \geq (grad_{i,j,k,t})_{1,2}. \quad \text{Εξ. 4.11}$$

Ο χρήστης πρέπει να καθορίσει δύο θέσεις στο μοντέλο (με το υδραυλικό φορτίο της δεύτερης θέσης να είναι μικρότερο από της πρώτης), μια απόσταση μεταξύ των δύο θέσεων (η οποία μπορεί να είναι η απόσταση μεταξύ των κεντρικών σημείων των κελιών της κάθε θέσης), και ένα ελάχιστο όριο για την κλίση $((grad_{i,j,k,t})_{1,2})$. Οι δύο θέσεις του μοντέλου δεν απαιτείται να είναι γειτονικές.

4.2.4 Πλήρης κατάσταση ενός προβλήματος διαχείρισης υπόγειων υδάτων που μπορεί να επιλυθεί από το GWM

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα ολοκληρωμένο πρόβλημα διαχείρισης υπόγειων υδάτων που επιλύεται από το GWM, το οποίο συνδυάζει την αντικειμενική συνάρτηση και όλους τους δυνατούς περιορισμούς ενός προβλήματος διαχείρισης (ακόμα και εκείνους που δεν περιγράφηκαν αναλυτικά παραπάνω).

Μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση

$$\sum_{n=1}^N \beta_n Qw_n T_{Qw_n} + \sum_{m=1}^M \gamma_m Ex_m T_{Ex_m} + \sum_{l=1}^L \kappa_l I_l, \quad \text{Εξ. 4.12}$$

υποκείμενη στους περιορισμούς:

$$0 \leq Qw_n \leq Qw_n^u, \quad \text{Εξ. 4.13}$$

$$0 \leq Ex_m \leq Ex_m^u, \quad \text{Εξ. 4.14}$$

$$Qw_n \geq Qw_n^l I_l, \quad \text{Εξ. 4.15}$$

$$Ex_m \geq Ex_m^l I_l, \quad \text{Εξ. 4.16}$$

$$\sum_{p=1}^P a_p GV_p \leq b_p, \quad \text{Εξ. 4.17}$$

$$\sum_{p=1}^P a_p GV_p \geq b_p, \quad \text{Εξ. 4.18}$$

$$\sum_{p=1}^P a_p GV_p = b_p, \quad \text{Εξ. 4.19}$$

$$h_{i,j,k,t} \geq h_{i,j,k,t}^l, \quad \text{Εξ. 4.20}$$

$$h_{i,j,k,t} \leq h_{i,j,k,t}^u, \quad \text{Εξ. 4.21}$$

$$dd_{i,j,k,t} \geq dd_{i,j,k,t}^l, \quad \text{Εξ. 4.22}$$

$$dd_{i,j,k,t} \leq dd_{i,j,k,t}^u, \quad \text{Εξ. 4.23}$$

$$(h_{i,j,k,t})_1 - (h_{i,j,k,t})_2 \geq (hdif_{i,j,k,t})_{1,2}, \quad \text{Εξ. 4.24}$$

$$\frac{(h_{i,j,k,t})_1 - (h_{i,j,k,t})_2}{\Delta x} \geq (grad_{i,j,k,t})_{1,2}. \quad \text{Εξ. 4.25}$$

$$Qsf_r \geq Qsf_r^l, \quad \text{Εξ. 4.26}$$

$$Qsf_r \leq Qsf_r^u, \quad \text{Εξ. 4.27}$$

$$Qsd_r \geq Qsd_r^l, \quad \text{Εξ. 4.28}$$

και

$$Qsd_r \leq Qsd_r^u. \quad \text{Εξ. 4.29}$$

Αν δεν χρησιμοποιούνται οι δυαδικές μεταβλητές (binary variables), τότε κάθε μεταβλητή I_1 στις Εξισώσεις 4.12, 4.15 και 4.16 γίνεται 0. Αν υπάρχουν δυαδικές μεταβλητές, τότε το GWM αυτόματα προσθέτει περιορισμούς, που δεν παρουσιάζονται εδώ, οι οποίοι εξασφαλίζουν ότι οι δυαδικές μεταβλητές θα παίρνουν μόνο τις τιμές 0 ή 1, και οι άλλοι δύο τύποι μεταβλητών απόφασης θα παίρνουν μόνο μη μηδενικές τιμές όταν ή συνδεδεμένη με αυτές δυαδική μεταβλητή έχει την τιμή 1.

4.3 Επίλυση προβλημάτων διαχείρισης υπόγειων υδάτων με το GWM

Η πλήρης διατύπωση της διαχείρισης υπόγειων υδάτων περιλαμβάνει συνθέσεις γραμμικού προγραμματισμού (linear-programming), μη γραμμικού προγραμματισμού (nonlinear-programming), και δυαδικού προγραμματισμού (binary-programming). Ένα γραμμικό πρόγραμμα είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης στο οποίο η αντικειμενική συνάρτηση και όλοι οι περιορισμοί είναι γραμμικές εξισώσεις των μεταβλητών απόφασης. Μη γραμμικό πρόγραμμα είναι αυτό που η αντικειμενική συνάρτηση και (ή) ένας ή περισσότεροι περιορισμοί είναι μη γραμμικές εξισώσεις των μεταβλητών απόφασης. Ένα δυαδικό πρόγραμμα είναι αυτό που περιέχει δυαδικές μεταβλητές απόφασης, που σε αυτή την περίπτωση είναι οι I_1 μεταβλητές. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που συνδυάζει ένα γραμμικό πρόβλημα με δυαδικές μεταβλητές ονομάζεται μικτό-δυαδικό γραμμικό πρόβλημα (mixed-binary linear program). Το GWM παρέχει δυνατότητες για επίλυση γραμμικών, μη γραμμικών, και

μικτών-δύαδικών γραμμικών προβλημάτων. Μικτά-δύαδικά γραμμικά προβλήματα μπορούν επίσης να επιλυθούν αν οι μη γραμμικότητες του συστήματος είναι ήπιες. Ωστόσο, η παρουσία των δύαδικών μεταβλητών σε ένα μη γραμμικό πρόβλημα, μπορεί να κάνει τη διαδικασία επίλυσης δύσκολη, και μπορεί να οδηγήσει σε μη βέλτιστες λύσεις ή ψευδή αποτελέσματα.

Παρακάτω περιγράφεται ο τρόπος προσέγγισης που χρησιμοποιεί το πακέτο RMS (Response Matrix Solution) για να επιλύσει προβλήματα με γραμμικές συνθέσεις (linear formulations).

4.3.1 Γραμμικά προβλήματα

Αν το πρόβλημα διαχείρισης των υπόγειων υδάτων που θα επιλυθεί είναι γραμμικό, τότε μία πολύ αποτελεσματική, αξιόπιστη, και ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος επίλυσης γραμμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης που ονομάζεται μέθοδος simplex μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του. Η χρήση του αλγόριθμου προϋποθέτει ότι το σύστημα διαχείρισης υπόγειων υδάτων έχει διατυπωθεί με τη μορφή ενός γραμμικού προγράμματος. Αυτό σημαίνει, πρώτον, ότι οι μεταβλητές κατάστασης του συστήματος υπόγειων υδάτων (υδραυλικά φορτία και ροές ποταμών) ανταποκρίνονται γραμμικά στις πιέσεις που εκτίθενται οι μεταβλητές απόφασης της παροχής (flow-rate decision variables) και δεύτερον, ότι δεν θα υπάρχουν δύαδικές μεταβλητές στο σύστημα. Όσον αφορά την πρώτη προϋπόθεση που πρέπει να πληρείται, το σύστημα υπόγειας ροής πρέπει να προσομοιώνεται με σταθερό δείκτη μεταβλητότητας σε κάθε στρώμα (LAYCON ίσο με 0 ή 2), όλες οι οριακές συνθήκες πρέπει να είναι γραμμικές, και να απουσιάζουν τα πακέτα που περιέχουν άλλες μη γραμμικότητες. Υδραυλικά φορτία που εξαρτώνται από τις οριακές συνθήκες, όπως αυτά που μπορεί να παρουσιαστούν σε προσομοιωμένα ποτάμια, μπορούν να προκαλέσουν μη γραμμικές αποκρίσεις. Ως εκ τούτου, αν και ενδέχεται να υπάρχουν περιπτώσεις όπου τα ποσοστά διαρροής μεταξύ ενός συστήματος υπόγειων υδάτων και των παρακείμενων ποταμών να είναι γραμμικές (ή σχεδόν γραμμικές) εξισώσεις των υπόγειων υδραυλικών φορτίων και των αντίστοιχων παροχών, οι περιορισμοί στην τιμή της ροής των ποταμών και στη μείωση αυτή αποκλείονται από το πρόβλημα διαχείρισης από αυστηρώς γραμμικά προγράμματα.

Αφαιρώντας τις δύαδικές μεταβλητές από την αντικειμενική συνάρτηση (Εξ. 4.12) έχουμε:

Μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση

$$\sum_{n=1}^N \beta_n Q_{w_n} T_{Q_{w_n}} + \sum_{m=1}^M \gamma_m E_{x_m} T_{E_{x_m}}, \quad \text{Εξ. 4.30}$$

που υπόκειται στους περιορισμούς 4.13, 4.14 και 4.17-4.25.

Το τελευταίο βήμα για τον μετασχηματισμό του προβλήματος διαχείρισης σε μια μορφή που να μπορεί να επιλυθεί με τη μέθοδο simplex είναι η δημιουργία λειτουργικών σχέσεων μεταξύ των πιέσεων που επιβάλλονται στα ελεγχόμενα

πηγάδια (οι μεταβλητές απόφασης που αφορούν παροχές) και των επερχόμενων αλλαγών στα υδραυλικά φορτία στις θέσεις των περιορισμών. Αυτές οι σχέσεις, πρέπει να επαναδιατυπώσουν τους περιορισμούς στα υδραυλικά φορτία (Εξ. 4.20-4.25) υπό όρους μεταβλητών αποφάσεων παροχής. Για αυτή την μετατροπή θα χρησιμοποιηθεί μία επέκταση της σειράς Taylor πρώτης τάξης για να καθορίσει το υδραυλικό φορτίο σε κάθε θέση περιορισμού και περίοδο άντλησης, συναρτήσει των νέων πιέσεων άντλησης και εμπλουτισμού:

$$h_{i,j,k,t}(Q_w) = h_{i,j,k,t}^0(Q_w^0) + \sum_{n=1}^N \frac{\partial h_{i,j,k,t}}{\partial Q_{w_n}}(Q_w^0)(Q_{w_n} - Q_{w_n}^0), \text{ Εξ. 4.31}$$

όπου:

$h_{i,j,k,t}(Q_w)$ υδραυλικό φορτίο στη θέση περιορισμού i, j, k για την περίοδο άντλησης t για ένα νέο διάνυσμα (δηλαδή, ένα νεό σύνολο) από παροχές άντλησης και εμπλουτισμού Q_w που έχουν επιμέρους στοιχεία Q_{w_n} ,

$h_{i,j,k,t}^0(Q_w^0)$ υδραυλικό φορτίο στη θέση περιορισμού i, j, k για την περίοδο άντλησης t για ένα αρχικό διάνυσμα (δηλαδή, ένα αρχικό σύνολο που αποτελεί τη βάση) από παροχές άντλησης και εμπλουτισμού Q_w^0 που έχουν επιμέρους στοιχεία $Q_{w_n}^0$,

$\frac{\partial h_{i,j,k,t}}{\partial Q_{w_n}}(Q_w^0)$ η αλλαγή στο υδραυλικό φορτίο στη θέση περιορισμού i, j, k για την περίοδο άντλησης t για μία αλλαγή στην παροχή άντλησης ή εμπλουτισμού για τη νιοστή μεταβλητή απόφασης παροχής, που εκτιμάται στο αρχικό διάνυσμα παροχών Q_w^0 , και

N ο συνολικός αριθμός των μεταβλητών απόφασης παροχής.

Η Εξίσωση 4.31 αναφέρει ότι το υδραυλικό φορτίο σε κάθε θέση περιορισμού είναι ίσο: με το υδραυλικό φορτίο στην ίδια θέση για ένα σύνολο αρχικών τιμών άντλησης και εμπλουτισμού Q_w^0 συν το άθροισμα των όποιων αλλαγών στα υδραυλικά φορτία, που προέρχονται από τις αλλαγές στο ρυθμό άντλησης και εμπλουτισμού στις n θέσεις των πηγαδιών. Το γραμμικό άθροισμα που ορίζεται στο δεξιό μέλος της εξίσωσης αντανακλά την υποτιθέμενη γραμμικότητα του συστήματος ροής των υπογείων υδάτων και την επακόλουθη γραμμική απόκριση των υδραυλικών φορτίων στις μεταβολές των τιμών άντλησης ή εμπλουτισμού. Οι μερικοί παράγωγοι στην Εξίσωση 4.31, $(\frac{\partial h_{i,j,k,t}}{\partial Q_{w_n}})$, που ονομάζονται συντελεστές απόκρισης (response coefficients), παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την αντίδραση των υπόγειων υδραυλικών φορτίων στις πιέσεις που δέχονται σε κάθε θέση άντλησης ή εμπλουτισμού. Για τα γραμμικά συστήματα, κάθε μερική παράγωγος είναι σταθερή και η τιμή της δεν επηρεάζεται από τις αλλαγές στην κατανομή των τιμών άντλησης και εμπλουτισμού κατά μήκος όλου του υπόγειου συστήματος ροής.

Στην Εξίσωση 4.31 οι όροι των υδραυλικών φορτίων αντικαθίστανται κάθε φορά από τιμές που ορίζονται από τους περιορισμούς 4.20–4.21. Παρόμοιες αντικαταστάσεις γίνονται και σε άλλους, που αφορούν το ύψος του υδραυλικού φορτίου που περιγράφονται από τις σχέσεις 4.22-4.25.

4.3.1.1 Υπολογισμός των συντελεστών απόκρισης

Οι μερικοί παράγωγοι που καθορίζουν τους συντελεστές απόκρισης δεν υπολογίζονται απ' ευθείας. Αντ' αυτού προσεγγίζονται από μία πρώτη τάξης, μέθοδο διαταραχής πεπερασμένων διαφορών (finite-difference perturbation method). Η παράγωγος του υδραυλικού φορτίου σε σχέση με την κάθε μεταβλητή απόφασης παροχής προσεγγίζεται με την εξίσωση των εμπρός διαφορών (forward-difference equation)

$$\frac{\partial h_{i,j,k,t}}{\partial Qw_n} \approx \frac{\Delta h_{i,j,k,t}}{\Delta Qw_n} = \frac{h_{i,j,k,t}(Qw_{\Delta n}) - h_{i,j,k,t}^0(Qw^0)}{Qw_{\Delta n}}, \quad \text{Εξ. 4.32}$$

όπου $Qw_{\Delta n}$ είναι η τιμή διαταραχής για τη νιοστή μεταβλητή απόφασης παροχής και $h_{i,j,k,t}(Qw_{\Delta n})$ είναι το υδραυλικό φορτίο στη θέση περιορισμού i, j, k στην περίοδο άντλησης t που υπολογίζεται από ένα σύνολο περιορισμών στις τιμές άντλησης και εμπλουτισμού $Qw_{\Delta n}$ που διαφέρει από το αρχικό σύνολο Qw^0 μόνο στο νιοστό στοιχείο, κατά ποσότητα $Qw_{\Delta n}$.

Για να υπολογιστεί κάθε συντελεστής απόκρισης της Εξίσωσης 4.32, η προσομοίωση του υπόγειου προβλήματος πραγματοποιείται για $N+1$ φορές. Κατά την πρώτη προσομοίωση, που ονομάζεται προσομοίωση βασικής κατάστασης (base-condition run), το υδραυλικό φορτίο υπολογίζεται σε κάθε θέση περιορισμού για κάθε περίοδο άντλησης με βάση το σύνολο των αρχικών τιμών βάσης (που είναι, κάθε $h_{i,j,k,t}^0(Qw^0)$). Σε κάθε μία από τις επόμενες N προσομοιώσεις, το υδραυλικό φορτίο σε κάθε θέση περιορισμού υπολογίζεται με βάση την αλλαγή (διαταραχή) που υπέστη η τιμή άντλησης ή εμπλουτισμού για τη νιοστή μεταβλητή απόφασης παροχής. Για κάθε μία από αυτές τις προσομοιώσεις, η τιμή άντλησης ή εμπλουτισμού των υπολοίπων $N-1$ θέσεων διατηρείται στην αρχική τιμή βάσης. Από τις N προσομοιώσεις και τους συνακόλουθους υπολογισμούς των συντελεστών απόκρισης προκύπτει ένα μητρώο με συντελεστές απόκρισης που λύνει το πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Η τιμή διαταραχής (perturbation value) $Qw_{\Delta n}$ υπολογίζεται από την σχέση:

$$Qw_{\Delta n} = \delta^0 Qw_n^u, \quad \text{Εξ. 4.33}$$

όπου δ^0 είναι η μεταβλητή διαταραχής που καθορίζει ο χρήστης και Qw_n^u είναι το προκαθορισμένο άνω όριο της τιμής άντλησης ή εμπλουτισμού στη n θέση πηγαδιού. Η μεταβλητή δ^0 μπορεί να είναι θετική ή αρνητική: μια αρνητική τιμή δηλώνει

αύξηση στην παροχή $Q_{w_{\Delta n}}''$ (σχήμα των εμπρός διαφορών), ενώ μια αρνητική τιμή υποδηλώνει μία μείωση στην παροχή $Q_{w_{\Delta n}}''$ (σχήμα των πίσω διαφορών).

Όπως περιγράφηκε και παραπάνω, ο υπολογισμός των συντελεστών απόκρισης προϋποθέτει τη διενέργεια ενός τρεξίματος για να καθοριστούν οι τιμές βάσης των μεταβλητών και ενός επιπλέον τρεξίματος για κάθε μία από τις μεταβλητές διαταραχής των μεταβλητών απόφασης παροχής. Επειδή αυτά τα τρεξίματα γίνονται αυτόματα από το GWM, είναι σημαντικό τα τρεξίματα που παράγουν τα αρχεία εισόδου της επίλυσης της υπόγειας ροής να είναι σταθερά για ένα εύρος τιμών των μεταβλητών απόφασης παροχής. Αν η διαδικασία προσομοίωσης της ροής υπόκειται σε αποτυχία σύγκλισης, υπερβολική ξηρασία, ή άλλες αστάθειες, τότε ίσως το GWM δεν καταφέρει να υπολογίσει με επιτυχία τους συντελεστές απόκρισης.

Το GWM έχει μηχανισμούς για την αναπροσαρμογή της τιμής διαταραχής ώστε να μπορέσουν να ξεπεραστούν τα προβλήματα αστάθειας κατά τη επίλυση της υπόγειας ροής. Για κάθε ένα από τα τρεξίματα της προσομοίωσης της ροής, το GWM διενεργεί ελέγχους για την επιτυχή ολοκλήρωση αυτής. Αν ένα τρέξιμο διαταραχής αποτύχει, τότε το GWM αλλάζει την τιμή διαταραχής σύμφωνα με ένα προκαθορισμένο από το χρήστη παράγοντα και ξαναεκτελεί την προσομοίωση. Για μία μόνο μεταβλητή απόφασης παροχής, ή αναπροσαρμογή της τιμής διαταραχής μπορεί να επαναλαμβάνεται συνέχεια μέχρι να επιτευχθεί ένα πετυχημένο τρέξιμο ή να φτάσει σε μία προκαθορισμένη από το χρήστη μέγιστη τιμή.

4.3.1.2 Ορθότητα και ακρίβεια των συντελεστών απόκρισης

Οι συντελεστές απόκρισης που παράγονται από την προσομοίωση της υπόγειας ροής από το MODFLOW είναι ο κρίσιμος σύνδεσμος μεταξύ της φυσικής του συστήματος υπόγειας ροής και των αποτελεσμάτων ενός μοντέλου διαχείρισης υπόγειων υδάτων (δηλαδή το GWM). Συνεπώς, η ορθότητα (accuracy) και η ακρίβεια (precision) των συντελεστών απόκρισης παίζουν σημαντικό ρόλο στη λύση του προβλήματος διαχείρισης υπόγειων υδάτων. Η ορθότητα των συντελεστών απόκρισης – δηλαδή, η ικανότητα τους να απεικονίζουν την πραγματική απόκριση του υδροφορέα – εξαρτάται τουλάχιστον από δύο παράγοντες.

Πρώτον, η ορθότητα (accuracy) των υδραυλικών φορτίων που υπολογίζονται από το MODFLOW για ένα συγκεκριμένο σύστημα υπόγειας ροής, είναι ένας πρώτος δείκτης ακρίβειας με τον οποίο το γεωλογικό πλαίσιο, οι υδραυλικές ιδιότητες, οι οριακές συνθήκες και άλλα χαρακτηριστικά του συστήματος ροής είναι γνωστά και απεικονίζονται στο μοντέλο. Προφανώς, η ορθότητα των συντελεστών απόκρισης αυξάνεται όσο το επίπεδο κατανόησης του συστήματος και της αναπαράστασης του βελτιώνεται.

Το δεύτερο ζήτημα που επηρεάζει την ορθότητα των συντελεστών απόκρισης είναι η προσέγγιση της μερικής διαφορικής εξίσωσης της υπόγειας ροής από ένα σύνολο εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών. Η λύση των εξισώσεων των πεπερασμένων διαφορών που χρησιμοποιείται από το MODFLOW για να προσδιορίσει το υδραυλικό φορτίο σε κάθε κελί του μοντέλου δίνει μόνο

προσεγγιστικές τιμές της πραγματικής κατανομής του υδραυλικού φορτίου στον υδροφόρεα, όπως περιγράφεται και από την μερική διαφορική εξίσωση της υπόγειας ροής. Το σφάλμα που παράγει αυτή η προσέγγιση είναι ανάλογο του μεγέθους των κελιών του πλέγματος (grid cells) που συνθέτουν την περιοχή μελέτης και του μεγέθους των χρονικών βημάτων (time steps) που επιλέγονται σε συνθήκες μεταβλητές στο χρόνο (transient conditions). Γενικώς, το σφάλμα προσέγγισης αυξάνεται όσο ο κάρναβος γίνεται πιο συμπαγής και τα χρονικά βήματα μεγαλύτερα. Οπότε το σφάλμα μπορεί να μειωθεί, μειώνοντας το μέγεθος των κελιών του καννάβου και (ή) μειώνοντας το μέγεθος των χρονικών βημάτων, ενέργειες όμως που θα αυξήσουν τον υπολογιστικό χρόνο.

Η ακρίβεια (precision) των συντελεστών απόκρισης είναι μία ένδειξη της ικανότητας τους να απεικονίζουν την πραγματική επίδραση που δέχεται η υπολογιζόμενη κατάσταση του συστήματος στις αλλαγές των πιέσεων. Ένα μέτρο της ακρίβειας των συντελεστών απόκρισης είναι ο αριθμός των δεκαδικών τους ψηφίων. Η διατήρηση επαρκούς ακρίβειας στους συντελεστές απόκρισης είναι απαραίτητη για την επιτυχημένη λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης από το πακέτο RMS. Ακόμα και αν η διαδικασία υπολογισμού της ροής δεν είναι ιδιαίτερα ορθή, είναι σημαντικό να διατηρείται η ακρίβεια του κάθε συντελεστή απόκρισης. Η ακρίβεια αυτή επηρεάζεται μερικώς από το μέγεθος των περιορισμών στις τιμές άντλησης και εμπλουτισμού (δηλαδή, το μέγεθος των κάθε $Q_{w_{\Delta n}}$) που χρησιμοποιούνται στην Εξίσωση 4.32. Αν και οι συντελεστές απόκρισης για τα γραμμικά συστήματα που εξετάζονται εδώ είναι σταθεροί και οι τιμές τους είναι ανεξάρτητες από το μέγεθος των τιμών διαταραχής, η ακρίβεια τους, και επομένως και η ακρίβεια της λύσης στο πρόβλημα διαχείρισης, εξαρτάται από τον αριθμό των δεκαδικών ψηφίων που θα έχει κάθε πραγματικός αριθμός κατά τη διάρκεια του υπολογισμού του κάθε συντελεστή απόκρισης. Η σχέση μεταξύ του μεγέθους διαταραχής και της ακρίβειας του συντελεστή απόκρισης συνδέεται με το σφάλμα στρογγυλοποίησης όταν η διαφορά των υδραυλικών φορτίων λαμβάνεται στον αριθμητή της Εξίσωσης 4.32. Εάν τα δύο υπολογισμένα υδραυλικά φορτία είναι πολύ κοντά στην τιμή, τότε μπορεί να χαθεί σημαντική ακρίβεια. Ακόμα πιο μεγάλη σημασία αποκτά το ζήτημα αυτό όταν εξετάζεται η χρήση διαταραχής στον υπολογισμό των συντελεστών απόκρισης για περιορισμούς που αφορούν διαφορά υδραυλικών φορτίων ή κλίσεων (Εξ. 4.24 και Εξ. 4.25).

Οι περισσότεροι μέθοδοι που είναι διαθέσιμοι για την επίλυση των προβλημάτων ροής με χρήση των πεπερασμένων διαφορών είναι επαναληπτικοί. Συνεχώς παράγονται τιμές υδραυλικών φορτίων μέχρι η μέγιστη αλλαγή στο φορτίο σε οποιοδήποτε κελί του μοντέλου να είναι μικρότερη από ένα συγκεκριμένο κριτήριο σύγκλισης μεταξύ των επαναλήψεων. Η ακρίβεια των υδραυλικών φορτίων που προκύπτουν μπορεί να εκτιμηθεί ότι θα είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με αυτή του κριτηρίου σύγκλισης. Οπότε, η ακρίβεια των συντελεστών απόκρισης εξαρτάται από το κριτήριο σύγκλισης που χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια προσομοίωσης της ροής (flow process).

Υπάρχουν δύο τρόποι για να βελτιωθεί η ακρίβεια των παραγόμενων συντελεστών απόκρισης σε γραμμικά συστήματα. Ο πρώτος είναι να μειωθεί το φορτίο του κριτηρίου σύγκλισης του επαναληπτικού επιλυτή της προσομοίωσης της υπόγειας ροής, αν και κάτι τέτοιο θα μεγάλωνε τον υπολογιστικό χρόνο επίλυσης κάθε τρεξίματος που χρειάζεται η παραπάνω διαδικασία. Ένας δεύτερος τρόπος είναι να χρησιμοποιηθούν σχετικά μεγαλύτερες τιμές διαταραχής για να εξασφαλισθούν μεγαλύτερες διαφορές στον αριθμητή της Εξίσωσης 4.32 (Reifler και Ahlfeld, 1996). Προτείνονται τιμές διαταραχής μεγαλύτερες κατά 500% από τις αναμενόμενες σαν μια πρώτη εκτίμηση. Έτσι οι τιμές διαταραχής μπορεί να ποικίλουν σε ένα σύνολο προσομοιώσεων και έτσι να αξιολογηθεί πως επηρεάζονται οι διάφορες λύσεις στη διαχείριση (αν επηρεάζονται καθόλου) από το μέγεθος των διαταραχών στις τιμές των πιέσεων (stress-rate perturbations).

4.3.1.3 Ο αλγόριθμος Simplex

Η δημιουργία του μητρώου με τους συντελεστές απόκρισης από το πακέτο RMS ολοκληρώνει τη διαδικασία μετατροπής ενός προβλήματος διαχείρισης υπόγειων υδάτων σε μορφή που να μπορεί να επιλυθεί με τεχνικές γραμμικού προγραμματισμού. Η αναθεωρημένη σύνθεση του προβλήματος διαχείρισης των υπόγειων υδάτων αποτελείται από την αντικειμενική συνάρτηση (Εξ. 4.30), υποκείμενη σε κάποιους περιορισμούς (Εξ. 4.13, 4.14, 4.17-4.19), και σε κάποιους άλλους αναθεωρημένους περιορισμούς (Εξ. 3.20-3.25), στους οποίους τα υδραυλικά φορτία έχουν ξαναδιατυπωθεί σε όρους μεταβλητών απόφασης παροχής (Εξ. 4.31). Η αναδιατυπωμένη γραμμική εξίσωση μπορεί να εκφραστεί σε μία ισοδύναμη μορφή πίνακα ως

$$\text{Minimize } Z = c'x \quad \text{Εξ. 4.34}$$

$$\text{υποκείμενη σε } Ax = b \quad \text{Εξ. 4.35}$$

$$0 \leq x \leq u, \quad \text{Εξ. 4.36}$$

όπου Z είναι η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, c' είναι η μεταφορά σε διάνυσμα στήλης (column vector) των συντελεστών της αντικειμενικής συνάρτησης που συνδέονται με τις μεταβλητές απόφασης, x είναι ένα διάνυσμα στήλης των μεταβλητών απόφασης με άνω όρια u : A είναι το μητρώο των συντελεστών που περιλαμβάνει το μητρώο απόκρισης των υδραυλικών φορτίων: και b είναι ένα διάνυσμα στήλης του δεξιού μέλους των συντελεστών που συνδέονται με τους περιορισμούς. Περιορισμοί που είχαν τη μορφή ανισοτήτων μετατράπηκαν σε ισότητες με την εισαγωγή νέων μεταβλητών (μεταβλητές απόκλισης, slack/surplus variables). Το πακέτο RMS επιλύει το πρόβλημα ελαχιστοποίησης που περιγράφεται από τις Εξισώσεις 4.34-4.36. Για προβλήματα μεγιστοποίησης, το πακέτο πολλαπλασιάζει την αντικειμενική συνάρτηση ($c'x$) με το -1.

Το πακέτο RMS λύνει το πρόβλημα διαχείρισης των υπόγειων υδάτων με τη χρήση του αλγόριθμου simplex, χρησιμοποιώντας την επαναληπτική διαδικασία μέχρι να φτάσει στη βέλτιστη λύση x^* . Οι μαθηματικές λεπτομέρειες του αλγόριθμου

simplex όπως εφαρμόζεται στο GWM περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο. Αν και η μέθοδος simplex είναι αξιόπιστη και σταθερή, μπορεί να προκύψουν περιπτώσεις όπου ο αλγόριθμος θα κινείται γύρω από διάφορα σημεία χωρίς να συγκλίνει. Τέτοιες περιπτώσεις είναι σπάνιες σε καλοδιατυπωμένα γραμμικά προβλήματα, αλλά για να αποφευχθούν, ο χρήστης πρέπει να ορίσει ένα μέγιστο αριθμό επαναλήψεων (iterations) που θα μπορεί να φτάσει ο αλγόριθμος (μεταβλητή εισόδου LPITMAX). Μία προτεινόμενη τιμή για την LPITMAX είναι δέκα φορές τον αριθμό των περιορισμών, αν και η εμπειρία δείχνει ότι ο αλγόριθμος συγκλίνει σε αριθμό επαναλήψεων μικρότερο από δύο φορές τον αριθμό των λειτουργικών περιορισμών. (Ahlfeld and Mulligan, 2000). Οι λειτουργικοί περιορισμοί περιλαμβάνουν όλους εκείνους τους περιορισμούς που δεν είναι μόνο απλά όρια στις μεταβλητές απόφασης.

Υπάρχουν 4 πιθανά αποτελέσματα στη λύση κάθε γραμμικού προβλήματος.

- Το πρώτο περιλαμβάνει μία ενιαία βέλτιστη λύση για τα στοιχεία του διανύσματος των μεταβλητών απόφασης x που να ελαχιστοποιεί (ή μεγιστοποιεί) την αντικειμενική συνάρτηση ικανοποιώντας ταυτόχρονα όλους τους περιορισμούς. Πιο συγκεκριμένα, αυτή η λύση αποτελείται από ένα σύνολο βέλτιστων τιμών άντλησης και εμπλουτισμού για κάθε μεταβλητή απόφασης παροχής Qw_n και από ένα σύνολο βέλτιστων παροχών για κάθε εξωτερική μεταβλητή Ex_m .
- Στο δεύτερο πιθανό αποτέλεσμα δεν υπάρχει ένα σύνολο από μεταβλητές απόφασης που να ικανοποιεί ταυτόχρονα όλους τους περιορισμούς. Σε αυτή την περίπτωση η διατύπωση του προβλήματος λέγεται ότι είναι ανέφικτη.
- Το τρίτο αποτέλεσμα είναι εκείνο κατά το οποίο η διατύπωση του προβλήματος αποφασίζεται να μην περιέχει περιορισμούς και η βέλτιστη αντικειμενική συνάρτηση να τείνει θετικά ή αρνητικά στο άπειρο.
- Το τελευταίο πιθανό αποτέλεσμα περιλαμβάνει την περίπτωση όπου υπάρχουν πολλαπλές βέλτιστες λύσεις στο πρόβλημα, των οποίων οι μεταβλητές απόφασης θα είναι διαφορετικές και οι τιμές αντικειμενικής συνάρτησης θα είναι μοναδικές.

Οι Ahlfeld and Mulligan (2000) περιγράφουν κάποιες περιπτώσεις όπου εμφανίζονται τα τρία τελευταία αποτελέσματα σε προβλήματα διαχείρισης υπόγειων υδάτων, καθώς και τους τρόπους αποφυγής αυτών.

Ένα από τα πλεονεκτήματα της χρήσης της μεθόδου simplex στη λύση γραμμικών προγραμμάτων είναι ότι μπορεί να καθοριστεί εύκολα συγκεκριμένη πληροφορία για την ανάλυση ευαισθησίας, αξιοποιώντας την πληροφορία στην τελευταία επανάληψη του αλγόριθμου. Οι πληροφορίες αυτές περιλαμβάνουν την ευαισθησία της βέλτιστης λύσης στους συντελεστές της αντικειμενικής συνάρτησης και στις τιμές των περιορισμών που βρίσκονται στα δεξιά μέλη τους. Η ανάλυση ευαισθησίας τίθεται σε εφαρμογή στο GWM για γραμμικά προβλήματα και καταγράφεται μαζί με τη βέλτιστη λύση. Στο κεφάλαιο «Αρχεία εξόδου» παρατίθενται επιπλέον πληροφορίες που αφορούν τα αποτελέσματα του μοντέλου διαχείρισης.

4.3.1.4 Μαθηματικό υπόβαθρο του αλγόριθμου Simplex που χρησιμοποιεί το GWM

Το GWM περιέχει το πακέτο RMS (Response Matrix Solution) για να επιλύει προβλήματα βελτιστοποίησης. Αυτό το πακέτο περιέχει τους εξής τρεις αλγόριθμους επίλυσης: i) γραμμικού προγραμματισμού (linear programming), ii) branch and bound, και iii) διαδοχικού γραμμικού προγραμματισμού (sequential linear programming). Ο γραμμικός προγραμματισμός (LP) χρησιμοποιείται στην επίλυση προβλημάτων με γραμμικές αντικειμενικές συναρτήσεις και εξισώσεις περιορισμών. Όταν υπάρχουν δυαδικές μεταβλητές (binary variables), χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος branch and bound. Αυτός ο αλγόριθμος βασίζεται στη λύση μιας σειράς γραμμικών προγραμμάτων. Αν η αντικειμενική συνάρτηση ή οι περιορισμοί περιλαμβάνουν μη γραμμικές αποκρίσεις του συστήματος στις μεταβλητές απόφασης παροχής (flow-rate variables), τότε χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος διαδοχικού γραμμικού προγραμματισμού (SLP). Ο SLP λειτουργεί επιλύοντας διαδοχικά γραμμικά προγράμματα. Επειδή η λύση ενός γραμμικού προγράμματος αποτελεί τον πυρήνα και των τριών αλγόριθμων επίλυσης παρακάτω περιγράφεται μόνο η περίπτωση του γραμμικού προγραμματισμού.

GWM1SIMPLEX1 είναι μία ομάδα από υπορουτίνες FORTRAN που επιλύουν ένα γραμμικό πρόγραμμα (LP) χρησιμοποιώντας την αναθεωρημένη μέθοδο simplex διπλής φάσης (Dantzig, 1963; Gass, 1985). Αν υπάρχει βέλτιστη λύση η ανάλυση ευαισθησίας (ή ανάλυση εύρους) γίνεται επίσης από τον GWM1SIMPLEX1. Η GWM1SIMPLEX1 υποθέτει ότι το πρόβλημα παίρνει την μορφή που φαίνεται στις Εξισώσεις 4.34-4.36.

$$\text{Minimize } Z = c'x$$

$$\text{υποκείμενη σε } Ax = b$$

$$0 \leq x \leq u,$$

όπου x είναι το διάνυσμα των μεταβλητών απόφασης, c' είναι η μεταφορά σε διάνυσμα στήλης (column vector) των συντελεστών της αντικειμενικής συνάρτησης, A είναι το μητρώο $m \times n$ όπου m είναι ο αριθμός των περιορισμών και n είναι ο αριθμός των μεταβλητών απόφασης (περιλαμβάνονται και οι μεταβλητές απόκλισης-slack variables), b είναι ο συνολικός αριθμός των διαθέσιμων πόρων, και u είναι το διάνυσμα του άνω ορίου των μεταβλητών απόφασης. Άλλες μορφές γραμμικού προγραμματισμού μπορούν να μετατραπούν πολύ εύκολα στην μορφή των Εξισώσεων 4.34-4.36. Για παράδειγμα, μια αντικειμενική συνάρτηση μεγιστοποίησης μπορεί να μετατραπεί σε μία ισοδύναμη αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποίησης πολλαπλασιάζοντας τους συντελεστές της με το (-1). Η μετατροπή των περιορισμών ανισότητας σε περιορισμούς ισότητας επιτυγχάνεται με την προσθήκη μιας επιπλέον μεταβλητής ανά περιορισμό. Αυτές οι επιπλέον μεταβλητές υποδηλώνουν την διαφορά μεταξύ της ποσότητας των πόρων που χρησιμοποιεί μια συγκεκριμένη λύση και της ποσότητας των πόρων που είναι διαθέσιμη. Υπό αυτή την έννοια, οι μεταβλητές αντιπροσωπεύουν την έλλειψη (slack) ή το πλεόνασμα (surplus) ενός πόρου, και γι' αυτό ονομάζονται slack or surplus variables.

Το αρχικό LP που αποτυπώνεται στις Εξισώσεις 4.34-4.36 αντιπροσωπεύει ένα σύστημα n αγνώστων σε m εξισώσεις, όπου $n > m$. Η μέθοδος simplex προχωράει χτίζοντας $(n-m)$ μεταβλητές απόφασης και χρησιμοποιεί τους προς επίλυση περιορισμούς ισότητας για τις υπόλοιπες m μεταβλητές. Σε κάθε επανάληψη, οι μεταβλητές με τις νέες τιμές καλούνται μη βασικές μεταβλητές (nonbasic variables), x_N , ενώ οι υπόλοιπες m μεταβλητές ονομάζονται βασικές (basic variables), x_B . Μετά και τον καθορισμό των μητρώων B και N σαν στήλες του A που αντιστοιχούν στις βασικές και στις μη βασικές μεταβλητές, αντίστοιχα, το αρχικό LP μπορεί να γραφτεί ως:

$$\text{Minimize } Z = c_B' x_B + c_N' x_N \quad \text{Εξ. 4.37}$$

$$\text{υποκείμενη σε } Bx_B + Nx_N = b \quad \text{Εξ. 4.38}$$

$$0 \leq x_B \leq u_B, \quad \text{Εξ. 4.39}$$

$$0 \leq x_N \leq u_N, \quad \text{Εξ. 4.40}$$

όπου c_B , u_B και c_N , u_N είναι οι συντελεστές της αντικειμενικής συνάρτησης και τα άνω όρια για τις βασικές και τις μη βασικές μεταβλητές, αντίστοιχα. Υποθέτοντας ότι ή λίστα με τις βασικές μεταβλητές είναι γνωστή και ότι οι μη βασικές αντιστοιχήθηκαν σε συγκεκριμένες τιμές, τότε οι βασικές μεταβλητές καθορίζονται αναδιατυπώνοντας την Εξίσωση 4.38:

$$x_B = B^{-1} (b - Nx_N). \quad \text{Εξ. 4.41}$$

Ακόμα, αντικαθιστώντας την Εξίσωση 4.41 στην Εξίσωση 4.37, και αναδιατάσσοντας, η αντικειμενική συνάρτηση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{Minimize } Z = c_B' B^{-1} b + (c_N' + c_B' B^{-1} N) x_N. \quad \text{Εξ. 4.42}$$

Οι κανόνες για τον προσδιορισμό του συνόλου των βασικών μεταβλητών και η ανάθεση τιμών στις μη βασικές μεταβλητές αποτελούν βασικό συστατικό της μεθόδου simplex.

Η μέθοδος simplex προχωρά με την εύρεση μια σειράς από εφικτές λύσεις για το σύστημα των εξισώσεων (χρησιμοποιώντας τις Εξ. 4.34-4.36) ώσπου να βρει μια βέλτιστη λύση. Σε κάθε επανάληψη, οι μη βασικές μεταβλητές θεωρούνται σταθερές είτε στο άνω είτε στο κάτω τους όριο. Για να διασφαλιστεί η δυνατότητα αυτή, οι βασικές μεταβλητές υπολογίζονται από την Εξίσωση 4.41. Η Εξίσωση 4.42 χρησιμοποιείται για να ελέγξει αν ή λύση είναι βέλτιστη. Αν αυτή δεν είναι, τότε μία νέα επανάληψη ξεκινά και μια βασική μεταβλητή γίνεται μη βασική και αντιστρόφως.

Η μη βασική μεταβλητή που γίνεται βασική (δηλαδή εισάγεται στη βάση) επιλέγεται με βάση την επίδραση της στην αντικειμενική συνάρτηση. Η αντικειμενική συνάρτηση, όπως εκφράζεται στην Εξίσωση 4.42, εμπεριέχει έναν όρο που εξαρτάται μόνο από το x_N και έναν σταθερό όρο. Ο συντελεστής του x_N ονομάζεται μειωμένο κόστος (reduced cost). Η μη βασική μεταβλητή, που θα έχει την πιο ευνοϊκή επίδραση στην αντικειμενική συνάρτηση, δηλαδή το καλύτερο μειωμένο

κόστος, επιλέγεται σαν εισερχόμενη στη βάση. Η βασική μεταβλητή που φτάνει πρώτη το άνω ή κάτω όριο της όσο η μη βασική αλλάζει, αφήνει τη βάση, και γίνεται μη βασική.

Η μέθοδος simplex βρίσκει μια σειρά από εφικτές λύσεις, διαφοροποιώντας το σύνολο των βασικών μεταβλητών με μία μεταβλητή κάθε φορά μέχρι τα μειωμένα κόστη να δείξουν ότι δεν μπορεί να επιτευχθεί περαιτέρω προόδος. Σε αυτή τη φάση, η βέλτιστη λύση έχει βρεθεί. Σε πολλά LPs, η εύρεση μίας αρχικής εφικτής λύσης από την οποία να ξεκινήσει η αναζήτηση μιας βέλτιστης λύσης, μπορεί να είναι ένα σημαντικό πρόβλημα. Αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίζεται στο `GWM1SIMPLEX1` με τη χρήση της τροποποιημένης μεθόδου simplex 2-φάσεων (2-phase revised simplex method), όπου προωθείται στη φάση I αλλάζοντας το αρχικό πρόβλημα (Εξ. 4.34-4.36) με τέτοιο τρόπο ώστε μία αρχική εφικτή λύση στο τροποποιημένο πρόβλημα να είναι ασήμαντη και η βέλτιστη λύση της φάση I του προβλήματος να είναι μία εφικτή λύση στο αρχικό πρόβλημα.

4.3.2 Μη γραμμικά προβλήματα

Μη γραμμικότητες μπορεί να προκύψουν έμμεσα στο πρόβλημα διαχείρισης των υπογείων υδάτων (Εξ. 4.12-4.29) σαν αποτέλεσμα των δύο κοινών χαρακτηριστικών που έχουν τα μοντέλα υπόγειας ροής. Το πρώτο είναι η παρουσία των στρωμάτων (layers) στα οποία η μεταδοτικότητα (transmissivity) είναι συναρτήσει του υδραυλικού φορτίου (η `LAYCON` ισούται με 1 ή 3). Οι συνθήκες που επικρατούν στον υδροφόρο ορίζοντα προκαλούν μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ της θέσης του υδροφόρου ορίζοντα και των πιέσεων άντλησης ή εμπλουτισμού (withdrawal or injection stresses). Το δεύτερο χαρακτηριστικό είναι η παρουσία οριακών συνθηκών που εξαρτώνται από το υδραυλικό φορτίο όπως τα ρέματα (streams), τα ντρένα (drains), η εξατμισοδιαπνοή (evapotranspiration), κ.ο.κ. Αυτές οι οριακές συνθήκες μπορούν να δημιουργήσουν μη γραμμικές συσχετίσεις μεταξύ των υπόγειων υδραυλικών φορτίων και των παροχών από ή προς τα προσωμοιούμενα όρια. Και άλλα πακέτα της διαδικασίας GWF μπορούν να προκαλέσουν μη-γραμμικές αποκρίσεις.

Το πακέτο RMS παρέχει μία προσεγγιστική λύση σχεδιασμένη για την αντιμετώπιση πολλών εκ των μη-γραμμικών χαρακτηριστικών που μπορεί να προκύψουν σε προβλήματα διαχείρισης υπόγειων υδάτων. Για την περιγραφή αυτής της προσέγγισης, θα ληφθεί υπόψιν μόνο ένα μέρος του συνολικού προβλήματος διαχείρισης. Δηλαδή αποκλείονται οι δυαδικές μεταβλητές και το πρόβλημα θα αποτελείται από την αντικειμενική συνάρτηση της Εξίσωσης 4.30 υποκειμένη στους περιορισμούς των Εξισώσεων 4.13, 4.14, 4.17-4.25, και στους περιορισμούς της ροής των ποταμών και της εξάντλησης αυτών που περιγράφονται από τις Εξισώσεις 4.26-4.29.

Η προσέγγιση για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων βασίζεται στον αλγόριθμο σειριακού γραμμικού προγραμματισμού (SLP) και αναφέρεται ως προσέγγιση SLP. Βασίζεται στις επαναλαμβανόμενες γραμμικοποιήσεις των μη γραμμικών χαρακτηριστικών του προβλήματος διαχείρισης, και υλοποιείται με

επανυπολογισμό του μητρώου απόκρισης για κάθε διαδοχικό γραμμικό πρόγραμμα. Το ανάπτυγμα πρώτης τάξεως της σειράς Taylor για το υδραυλικό φορτίο που δίνεται από την Εξίσωση 4.31, υποτίθεται ότι είναι ακριβές για κάθε διαδοχικό γραμμικό πρόγραμμα, αλλά σε αντίθεση με τη γραμμική περίπτωση, ο συντελεστής των παροχών βάσης αλλάζει σε κάθε επανάληψη. Το υδραυλικό φορτίο σε κάθε θέση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$h_{i,j,k,t}(Q_w) = h_{i,j,k,t}^v(Q_w^v) + \sum_{n=1}^N \frac{\partial h_{i,j,k,t}^v}{\partial Q_w^v} (Q_w^v) (Q_{w_n} - Q_{w_n}^v), \quad \text{Εξ.4.43}$$

όπου ο εκθέτης v είναι ένα επίπεδο επανάληψης, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται το υδραυλικό φορτίο $h_{i,j,k,t}^v$ όταν εφαρμόζεται το σύνολο των παροχών άντλησης και εμπλουτισμού Q_w^v . Για τιμές των Q_w που είναι κοντά στις Q_w^v , το σφάλμα προσέγγισης είναι μικρό, και οι τιμές των $h_{i,j,k,t}$ που προκύπτουν από την εξίσωση είναι σχετικά ακριβής.

Ένα πρώτης τάξεως ανάπτυγμα της σειράς Taylor χρησιμοποιείται επίσης για τη δημιουργία λειτουργικών σχέσεων μεταξύ της ροής του ποταμού και των ελεγχόμενων πιέσεων άντλησης ή εμπλουτισμού. Αυτές οι σχέσεις είναι απαραίτητες για την επαναδιατύπωση των περιορισμών στις ροές των ποταμών υπό τους όρους των μεταβλητών απόφασης της παροχής. Η πρώτη τάξεως σειρά Taylor που προσεγγίζει τη ροή του ποταμού για κάθε διαδοχικό γραμμικό πρόγραμμα είναι:

$$Qsf_r(Q_w) = Qsf_r^v(Q_w^v) + \sum_{n=1}^N \frac{\partial Qsf_r^v}{\partial Q_w^v} (Q_w^v) (Q_{w_n} - Q_{w_n}^v), \quad \text{Εξ. 4.44}$$

όπου:

$Qsf_r(Q_w)$ είναι η ροή του ποταμού στο r κλάδο του υδρογραφικού δικτύου κατά την r περίοδο άντλησης για ένα νέο σύνολο παροχών άντλησης και εμπλουτισμού, Q_w , με επιμέρους στοιχεία Q_{w_n} ,

$Qsf_r^v(Q_w^v)$ είναι η ροή του ποταμού στο r κλάδο του υδρογραφικού δικτύου κατά την r περίοδο άντλησης για ένα σύνολο παροχών άντλησης και εμπλουτισμού στο επίπεδο επανάληψης v , Q_w^v , με επιμέρους στοιχεία $Q_{w_n}^v$,

$\frac{\partial Qsf_r^v}{\partial Q_w^v} (Q_w^v)$ είναι η αλλαγή στη ροή του ποταμού στο r κλάδο του υδρογραφικού δικτύου κατά την r περίοδο άντλησης για μία μεταβολή της παροχής άντλησης ή εμπλουτισμού για τη n μεταβλητή απόφασης της παροχής που συνδέεται με το σύνολο των παροχών άντλησης και εμπλουτισμού Q_w^v , και

N ο συνολικός αριθμός των μεταβλητών απόφασης παροχής.

Τα μερικά παράγωγα στην Εξίσωση 4.44, $\partial Q_s f_r^v / \partial Q_w^v$, είναι οι συντελεστές απόκρισης που αφορούν την αντίδραση της ροής του ποταμού στις πιέσεις σε κάθε θέση άντλησης ή εμπλουτισμού. Η Εξίσωση 3.44 αντικαθίσταται για κάθε όρο ροής ποταμού στους περιορισμούς 4.26 και 4.27. Παρόμοιες αντικαταστάσεις γίνονται και για τους περιορισμούς 4.28 και 4.29 που αφορούν την εξάντληση της ροής του ποταμού.

Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου SLP, κατασκευάζεται ένα γραμμικό πρόγραμμα με βάση την προσέγγιση πρώτης τάξης της σειράς Taylor και των αντίστοιχων συντελεστών απόκρισης, και το πρόβλημα λύνεται με τη μέθοδο simplex που περιγράφηκε προηγουμένως. Επειδή οι αποκρίσεις των υδραυλικών φορτίων και των ροών των ποταμών μπορεί να είναι μη γραμμικές, οι συντελεστές απόκρισης στις Εξισώσεις 4.43 και 4.44, $\partial h_{i,j,k,t}^v / \partial Q_w^v$ και $\partial Q_s f_r^v / \partial Q_w^v$, δεν μπορούν πλέον να είναι συνεχείς. Ως εκ τούτου, οι συντελεστές απόκρισης για τα υδραυλικά φορτία και οι παροχές των ποταμών πρέπει να υπολογίζονται εκ νέου σε κάθε επανάληψη v . Ο υπολογισμός αυτός χρησιμοποιεί ένα νέο σύνολο παροχών της βασικής κατάστασης το οποίο προέρχεται από τις βέλτιστες παροχές που προκύπτουν από την επίλυση του γραμμικού προγράμματος κατά την προηγούμενη επανάληψη.

Η διαδοχική διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθούν δύο κριτήρια σύγκλισης. Το πρώτο προϋποθέτει ότι η μεταβολή στις τιμές των μεταβλητών παροχής μεταξύ της προηγούμενης και της τρέχουσας επανάληψης δεν θα είναι μικρότερη από μία τάξη μεγέθους των μεταβλητών παροχής στην τρέχουσα επανάληψη:

$$\|Q_w^{v+1} - Q_w^v\| \leq \varepsilon_1 (1 + \|Q_w^{v+1}\|). \quad \text{Εξ. 4.45}$$

Χρησιμοποιείται η νόρμα άπειρο (infinity norm) και η τιμή της ε_1 καθορίζεται από το χρήστη από τη μεταβλητή εισόδου SLPVCRIT. Να σημειωθεί ότι στο δεξιό μέλος της Εξίσωσης 3.45 προστέθηκε στη νόρμα το 1. Ενώ είναι πιθανό στις περισσότερες περιπτώσεις η νόρμα των μεταβλητών απόφασης να είναι πολύ μεγαλύτερη του 1, μπορεί να υπάρξουν περιπτώσεις όπου θα είναι 0 ή κοντά στο 0. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η προσθήκη του 1 διασφαλίζει ότι χρησιμοποιείται ένα λογικό κριτήριο σύγκλισης. Η μεταβλητή εισόδου ε_1 μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα μέτρο που δείχνει τον αριθμό των σωστών στοιχείων που επιθυμούμε στη λύση. Για παράδειγμα, μία τιμή ίση με 10^{-5} δείχνει ότι η λύση θα είναι σωστή σε πέντε δεκαδικά ψηφία ή στην πέμπτη δεκαδική θέση, αν η νόρμα των μεταβλητών απόφασης είναι μικρότερη του 1 (Gill and others, 1981).

Το δεύτερο κριτήριο ορίζει ότι η μεταβολή στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, Z , θα είναι μικρότερη από μία τάξη μεγέθους της τιμής:

$$\|Z^{v+1} - Z^v\| \leq \varepsilon_2 (1 + \|Z^{v+1}\|). \quad \text{Εξ. 4.46}$$

Η τιμή της ε_2 καθορίζεται από το χρήστη από τη μεταβλητή εισόδου SLPVCRT.

Ο αλγόριθμος SLP συνοψίζεται ως εξής:

Βήμα 0: Όρισε $v=0$ και Qw^0 ,

Βήμα 1: Υπολόγισε τους συντελεστές απόκρισης από τις τιμές βάσης Qw^v ,

Βήμα 2: Συνόψισε και λύσε το γραμμικό πρόβλημα. Το σύνολο της λύσης εκχωρείται στις Qw^{v+1} ,

Βήμα 3: Αν ικανοποιούνται τα κριτήρια σύγκλισης (Εξ. 4.45 και 4.46), σταμάτα; αλλιώς,

Βήμα 4: Όρισε $v=v+1$ και πήγαινε στο Βήμα 1.

Οι συντελεστές απόκρισης υπολογίζονται για κάθε v επανάληψη με μία εξίσωση εμπρός διαφορών παρόμοια με αυτήν της Εξίσωσης 4.32. Για υδραυλικά φορτία, η εξίσωση αυτή γίνεται:

$$\frac{\Delta h_{i,j,k,t}^v}{\Delta Qw_n^v} = \frac{h_{i,j,k,t}^v(Qw_{\Delta n}^v) - h_{i,j,k,t}^v(Qw^v)}{Qw_{\Delta n}^v}, \quad \text{Εξ. 4.47}$$

όπου $Qw_{\Delta n}^v$ είναι η τιμή διαταραχής για τη n μεταβλητή απόφασης παροχής και για τη v επανάληψη, και $h_{i,j,k,t}^v(Qw_{\Delta n}^v)$ είναι το υδραυλικό φορτίο στη i, j, k θέση περιορισμού για την t περίοδο άντλησης που υπολογίστηκε από ένα σύνολο πιέσεων άντλησης και εμπλουτισμού $Qw_{\Delta n}^v$ που διαφέρει από το προηγούμενο σύνολο Qw^v μόνο ως προς το n στοιχείο, κατά ποσότητα $Qw_{\Delta n}^v$. Μία παρόμοια εξίσωση με αυτή της Εξίσωσης 4.47 διατυπώνεται επίσης και τους συντελεστές απόκρισης $\partial Qsf^v / \partial Qw_n^v$ που αφορούν τη ροή ποταμών.

Κατά την πρώτη επανάληψη ($v=0$), οι συντελεστές απόκρισης υπολογίζονται βάσει ενός συνόλου τιμών άντλησης και εμπλουτισμού της βασικής κατάστασης και οι αρχικές τιμές διαταραχής $(Qw_{\Delta n})_{initial}$ ορίζονται από το χρήστη με τον ίδιο τρόπο που ορίζονται και στα γραμμικά προβλήματα. Λόγω της μη-γραμμικότητας του προβλήματος και της ανάγκης για επίλυση με επαναλήψεις, οι προκαθορισμένες τιμές άντλησης και εμπλουτισμού της βασικής κατάστασης πρέπει να είσαι όσο το δυνατόν πιο κοντά σε αυτές της βέλτιστης λύσης.

Τα ίδια θέματα που επηρεάζουν την ορθότητα και την ακρίβεια των συντελεστών απόκρισης στα γραμμικά προβλήματα, ισχύουν και για τα μη-γραμμικά. Ωστόσο, λόγω της μη γραμμικότητας των συστημάτων, ο χρήστης πρέπει να είναι προσεκτικός και να επιλέγει αρχικές τιμές διαταραχής αρκετά μικρές ώστε να διασφαλίσει ότι οι συντελεστές απόκρισης (των υδραυλικών φορτίων και των ροών των ποταμών) που θα προκύψουν από τις εξισώσεις των εμπρός διαφορών θα είναι ακριβείς. Αν η τιμή διαταραχής είναι πολύ μεγάλη, τότε τα παράγωγα προσέγγισης μπορεί να είναι ελλιπή και έτσι να προκύψουν προβλήματα σύγκλισης κατά τη διαδικασία διαδοχικής

γραμμικοποίησης. Με μικρές τιμές διαταραχής, τα υδραυλικά φορτία πρέπει να υπολογίζονται με υψηλή ακρίβεια ώστε να διασφαλιστεί επαρκή ακρίβεια και στο μητρώο απόκρισης.

Λόγω της σημασίας που έχει η τιμή διαταραχής στην επιτυχία του αλγορίθμου SLP, παρέχονται πολλές δυνατότητες αυτόματης προσαρμογής της κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του αλγόριθμου. Σε κάθε επανάληψη, η τιμή διαταραχής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Qw_{\Delta n}^v = \delta^v Qw_n^u, \quad \text{Εξ. 4.48}$$

όπου δ^v είναι η μεταβλητή διαταραχή για κάθε επανάληψη v και Qw_n^u είναι η προκαθορισμένη μέγιστη τιμή άντλησης ή εμπλουτισμού στη n θέση του πηγαδιού. Όπως περιγράφεται και για τα γραμμικά προβλήματα, η αρχική τιμή της μεταβλητής της διαταραχής ορίζεται ως δ^0 . Πρόσθετες μεταβλητές εισόδου είναι διαθέσιμες για να αλλάξουν την τιμή διαταραχής στις επόμενες επαναλήψεις. Ο ακόλουθος τύπος (Minihane, 2002) υπολογίζει την τιμή διαταραχής σε κάθε επανάληψη:

$$\delta^v = \frac{\delta_{initial} - \delta_{minimum}}{(\delta_{scale})^v} + \delta_{minimum}, \quad \text{Εξ. 4.49}$$

όπου v είναι το επίπεδο επανάληψης, $\delta_{initial}$ είναι μία αρχική μεταβλητή διαταραχής για τη n θέση του πηγαδιού, $\delta_{minimum}$ είναι η ελάχιστη μεταβλητή διαταραχής για τη n θέση του πηγαδιού, και δ_{scale} είναι ένας συντελεστής κλίμακας που καθορίζει το ρυθμό μείωσης της μεταβλητής της διαταραχής. Να σημειωθεί ότι ο εκθέτης της δ_{scale} δηλώνει ύψωση σε δύναμη, ώστε όταν η δ_{scale} τεθεί μεγαλύτερη του 1, η τιμή διαταραχής να μειώνεται όσο η επαναληπτική διαδικασία προχωράει και προσεγγίζει την ελάχιστη τιμή $\delta_{minimum}$.

Κατά τη διάρκεια κάθε επανάληψης του αλγόριθμου SLP, παράγεται ένα μητρώο απόκρισης. Όπως περιγράφεται στην ενότητα 4.3.1.1 («Υπολογισμός των συντελεστών απόκρισης»), είναι πιθανόν μία προσομοίωση της ροής να αποτύχει. Αν αποτύχει χρησιμοποιώντας τις διαταραγμένες τιμές πίεσης (perturbed stress rates), τότε η τιμή διαταραχής αλλάζει αυτόματα. Αυτό όμως δεν επηρεάζει την τιμή διαταραχής της επόμενης επανάληψης. Και αυτό γιατί στην αρχή κάθε επανάληψης, η δ^v υπολογίζεται από τις Εξισώσεις 4.48 και 4.49 ανεξάρτητα από τις αλλαγές που μπορεί να έχουν γίνει στην τιμή διαταραχής της προηγούμενης επανάληψης.

Σε κάθε επανάληψη του αλγόριθμου SLP, οι συντελεστές απόκρισης υπολογίζονται κάθε φορά από ένα διαφορετικό σύνολο τιμών της βασικής κατάστασης. Αν η πρώτη βασική προσομοίωση ήταν επιτυχημένη αλλά μία επόμενη αποτύχει, τότε δίνεται η δυνατότητα της ρύθμισης του βασικού διανύσματος των μεταβλητών απόφασης της παροχής αντί του τερματισμού του αλγόριθμου. Αυτό επιτυγχάνεται με μία παράμετρο χαλάρωσης α , η οποία μετακινεί τη βασική λύση πιο κοντά στην προηγούμενη (επιτυχημένη) βασική λύση. Για κάθε μία από τις

μεταβλητές απόφασης της παροχής, υπολογίζεται μία προσωρινή βασική τιμή σύμφωνα με τη σχέση:

$$\bar{Q}w_{\Delta n}^v = (1 - a)\bar{Q}w_n^v + a\bar{Q}w_n^{v-1}, \quad \text{Εξ. 4.50}$$

όπου $\bar{Q}w_n$ είναι η προσωρινή τιμή της μεταβλητής απόφασης της παροχής. Η προσωρινή βασική λύση, η οποία αποτελείται από τιμές για κάθε μεταβλητή απόφασης της παροχής που έχει υπολογιστεί σύμφωνα με την Εξίσωση 4.50, χρησιμοποιείται σε μία νέα απόπειρα εύρεσης μίας επιτυχημένης βασικής λύσης. Αν η προσομοίωση αποτύχει πάλι, μία νέα προσωρινή βασική λύση καθορίζεται αντικαθιστώντας την προηγούμενη $\bar{Q}w_n^v$. Μία ακολουθία από εφαρμογές της Εξίσωσης 4.50 οδηγεί σε μία ακολουθία από προσωρινές βασικές λύσεις που πλησιάζουν την προηγούμενη βασική λύση $\bar{Q}w_n^{v-1}$.

4.4 Δεδομένα εισόδου και αρχεία εξόδου

Πριν από την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης με το GWM, ο χρήστης πρέπει να έχει ήδη αναπτύξει ένα μοντέλο υπόγειας ροής της περιοχής μελέτης μέσω του MODFLOW. Υπενθυμίζεται ότι το GWM μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο με τις διαδικασίες Global και GWF. Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τις διαδικασίες μεταφοράς υπόγειων υδάτων (Ground-Water Transport), παρατήρησης (Observation), ευαισθησίας (Sensitivity), ή εκτίμησης παραμέτρων (Parameter-Estimation). Αν ωστόσο, τα αρχεία εισόδου της διαδικασίας GWF περιέχουν παραμέτρους που προσδιορίζονται στη διαδικασία εκτίμησης παραμέτρων (Parameter-Estimation Process) και τα αρχεία εισόδου της διαδικασίας Sensitivity περιλαμβάνονται στο αρχείο name, τότε οι τιμές αυτών των παραμέτρων θα ληφθούν υπόψη στη διαδικασία GWF. Η διαδικασία Global ελέγχει τη λειτουργία όλου του προγράμματος και δημιουργεί δόμες δεδομένων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από όλες τις διαδικασίες του MODFLOW. Το name είναι το μόνο αρχείο της Global Process που χρειάζεται να τροποποιηθεί για ένα τρέξιμο του GWM. Στη συνέχεια περιγράφονται λεπτομερειακά αυτές οι τροποποιήσεις.

4.4.1 Name file

Το αρχείο name περιέχει τα ονόματα των περισσότερων αρχείων εισόδου και εξόδου που χρησιμοποιεί το MODFLOW, και αποφασίζει ποιες από τις επιλογές του θα είναι ενεργοποιημένες (Harbaugh and others, 2000). Το αρχείο name διαβάζεται στη μονάδα 99. Περιέχει μία καταγραφή πληροφοριών για κάθε αρχείο εισόδου και εξόδου (μία καταγραφή είναι μία γραμμή στο αρχείο). Κάθε γραμμή αποτελείται από τρεις μεταβλητές, οι οποίες διαβάζονται σε ελεύθερη μορφή. Το μήκος κάθε γραμμή πρέπει να είναι μέχρι 199 χαρακτήρες. Σχόλια στις γραμμή μπορούν να γίνουν στο αρχείο name και οπουδήποτε μέσα σε αυτό αρκεί να σημειώνονται με # στην πρώτη στήλη. Οποιοδήποτε χαρακτήρας κειμένου μπορεί να ακολουθήσει το # χαρακτήρα. Τα σχόλια δεν έχουν καμία επίδραση στο τρέξιμο του προγράμματος και σκοπός τους είναι να επιτρέπουν στους χρήστες να κρατάνε σημειώσεις.

Κάθε γραμμή έχει την ακόλουθη μορφή:

Ftype Nunit Fname

Επεξήγηση των μεταβλητών:

Ftype — είναι το είδος του αρχείου. Το Ftype μπορεί να γραφτεί με όλα τα κεφαλαία και μικρά γράμματα ή με οποιοδήποτε συνδυασμό αυτών.

Nunit — είναι η μονάδα της FORTRAN που χρησιμοποιείται κατά το διάβασμα ή το γράψιμο ενός αρχείου. Οποιοσδήποτε αριθμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκτός από τους 96-99. Επίσης, κάθε αριθμός είναι μοναδικός για κάθε αρχείο: Δηλαδή δεν μπορεί να είναι ίδιος με οποιοδήποτε άλλου αρχείου που προσδιορίζεται στο αρχείο name.

Fname — είναι το όνομα του αρχείου, που αποτελείται από χαρακτήρες. Διαδρομές των αρχείων μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν μέρος του Fname.

Το GWM χρησιμοποιεί και τα δύο αρχεία εξόδου GLOBAL και LIST (Για περισσότερες λεπτομέρειες ανέτρεξε στο κεφάλαιο «Αρχεία εξόδου» σε επόμενη ενότητα). Οπότε, και τα δύο αυτά αρχεία πρέπει να υπάρχουν στο αρχείο name. Η καταγραφή του GLOBAL πρέπει να είναι η πρώτη εγγραφή χωρίς σχόλιο στο αρχείο, και η εγγραφή του LIST η δεύτερη. Μια ακόμα γραμμή πρέπει να εισαχθεί για να δείξει ότι η διαδικασία GWM είναι ενεργή. Η γραμμή πρέπει να διευκρινίσει το Ftype **GWM** (τα έντονα γράμματα δείχνουν μια λέξη-κλειδί του MODFLOW). Το αρχείο που προσδιορίζεται σε αυτή την εγγραφή περιέχει όλη την πληροφορία που χρειάζεται το GWM για να τρέξει.

Ένα παράδειγμα είδους εισαγόμενων εγγραφών των GLOBAL, LIST, και GWM είναι:

GLOBAL	1	global.gwm
LIST	6	list.gwm
GWM	55	input.gwm

4.4.2 Αρχεία της διαδικασίας GWM

Στα αρχεία εισόδου της διαδικασίας GWM περιλαμβάνεται το GWM file, και αρκετά αρχεία υποστήριξης. Το αρχείο GWM χρησιμοποιείται για να ενεργοποιεί τη διαδικασία GWM και για να αναγνωρίζει τα αρχεία που θα ανοιχτούν για την εκτέλεση του GWM. Τέσσερα είδη πληροφοριών καταγράφονται στα αρχεία εισόδου (input files) για το πρόβλημα διαχείρισης: οι μεταβλητές απόφασης, η αντικειμενική συνάρτηση, οι περιορισμοί, και η λύση και οι παράμετροι ελέγχου των αποτελεσμάτων. Εκτός από το αρχείο GWM, όλα τα άλλα αρχεία εισόδου διαβάζονται το κάθε ένα ξεχωριστά από τη μονάδα 99 της FORTRAN: Κάθε αρχείο ανοίγεται από τη μονάδα 99 λίγο πριν την ανάγνωση των δεδομένων εισόδου και κλείνει αμέσως μετά την ανάγνωση τους.

Στο μεγαλύτερο μέρος της, η γενική δομή των μορφών των δεδομένων εισόδου για τα αρχεία της GWM διαδικασίας είναι σύμφωνα με άλλες του MODFLOW. Οι χρήστες προτείνεται να ανατρέξουν στις οδηγίες του MODFLOW όπως δίνονται από τους Harbaugh and others (2000). Τα δεδομένα εισόδου κάθε αρχείου της διαδικασίας GWM ομαδοποιείται από αριθμημένα στοιχεία τα οποία αποτελούνται από μεταβλητές εισόδου. Το πρώτο στοιχείο σε κάθε αρχείο εισόδου είναι το 0 (#Text), που μπορεί να χρησιμοποιηθεί προαιρετικά για σχόλια. Κάποια στοιχεία που αποτελούνται από αρκετές μεταβλητές

μπορούν να επαναληφθούν πολλές φορές. Τα δεδομένα εισόδου για κάθε στοιχείο πρέπει να ξεκινάνε από μία νέα καταγραφή (γραμμή). Κάθε γραμμή έχει ανώτερο όριο 199 χαρακτήρων. Μια μεταβλητή εισόδου μπορεί να εμπεριέχει περισσότερες από μία τιμές. Οι μεταβλητές καθορίζονται εφόσον πρώτα παρατεθούν όλα τα στοιχεία.

Κάθε μεταβλητή εισόδου έχει έναν τύπο δεδομένων, που μπορεί να είναι πραγματικοί (Real), ακέραιοι (Integers), ή χαρακτήρες (Characters). Οι ακέραιοι είναι νούμερα που δεν πρέπει να έχουν υποδιαστολή ή εκθέτη. Οι πραγματικοί αριθμοί μπορούν να έχουν μία υποδιαστολή και έναν εκθέτη: αν η υποδιαστολή δεν περιλαμβάνεται στην τιμή που εισάγεται, τότε αυτή υποτίθεται ότι είναι στη δεξιά πλευρά αυτής. Οποιαδήποτε εκτυπώσιμος χαρακτήρας επιτρέπεται σαν μεταβλητή χαρακτήρα. Σε αντίθεση με τη διαδικασία GWF, μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν από το GWM και αρχίζουν με τα γράμματα I-N δεν είναι απαραίτητα ακέραιοι και εκείνες που αρχίζουν με τα γράμματα A-H και O-Z δεν είναι κατ' ανάγκη πραγματικοί αριθμοί. Οι τύποι δεδομένων ορίζονται για κάθε μεταβλητή εισόδου.

Για το αρχείο εισόδου GWM χρησιμοποιείται ελεύθερη μορφοποίηση. Με την ελεύθερη μορφή, οι τιμές δεν απαιτείται να καταλαμβάνουν ένα σταθερό αριθμό στηλών ανά εγγραφή. Κάθε τιμή μπορεί να καταλαμβάνει μία ή περισσότερες στήλες. Ωστόσο οι τιμές πρέπει να συμπεριληφθούν με την προβλεπόμενη σειρά. Οι γειτονικές τιμές πρέπει να χωρίζονται μεταξύ τους με ένα ή περισσότερα κενά, ή ένα κόμμα συνδυασμένο με κενά. Επίσης, όταν χρησιμοποιείται ελεύθερη μορφή, μία αριθμητική τιμή μηδέν πρέπει να απεικονίζεται με το χαρακτήρα 0 και όχι με ένα ή περισσότερα κενά.

Οι μονάδες μέτρησεις που χρησιμοποιούνται στο GWM πρέπει να είναι σύμφωνες με τις μονάδες που χρησιμοποιήθηκαν σε άλλα αρχεία εισόδου δεδομένων του MODFLOW.

4.4.2.1 Περιγραφή των επιλεγμένων συνθηκών, επιλογών, και μεταβλητών στο GWM

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες από τις συνθήκες, τις επιλογές, και τις μεταβλητές του GWM ώστε ο χρήστης να βοηθηθεί στην προετοιμασία των αρχείων εισόδου. Οι μεταβλητές του προγράμματος θα φαίνονται με απλά κεφαλαία γράμματα και τα ονόματα των αρχείων με έντονα κεφαλαία γράμματα.

Τα πρόσημα των μεταβλητών απόφασης παροχής και των εξωτερικών μεταβλητών και οι συντελεστές τους: Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, όλες οι μεταβλητές απόφασης (παροχής και εξωτερικές) στο GWM αντιμετωπίζονται σαν θετικές τιμές, είτε αντιπροσωπεύουν άντληση, εμπλουτισμό, εξαγωγή, ή εισαγωγή νερού. Μία μεταβλητή απόφασης παροχής (flow-rate decision variable) καθορίζεται από την μεταβλητή εισόδου FTYPE στο αρχείο (**DECVAR**) μεταβλητών απόφασης: Αν η FTYPE είναι W, η μεταβλητή αφορά άντληση (withdrawal). Αν είναι I, η μεταβλητή αφορά εμπλουτισμό (injection). Επειδή ο χρήστης αποφασίζει κάθε φορά ποια μεταβλητή θα αναφέρεται σε άντληση και ποια σε εμπλουτισμό, το GWM θα γνωρίζει πως να αντιμετωπίσει εσωτερικά την κάθε μεταβλητή απόφασης. Οπότε, όταν καθορίζονται η ελάχιστη ή μέγιστη τιμή παροχής σε μία θέση (μεταβλητές

εισόδου FVMIN και FVMAX) και η παροχή αναφοράς για την μεταβλητή (μεταβλητή εισόδου FVREF), θα πρέπει να χρησιμοποιούνται τιμές μεγαλύτερες του 0 και για άντληση και για εμπλουτισμό. Ομοίως, το GWM θα γνωρίζει αν μία εξωτερική απόφαση παροχής είναι μία εισαγωγή ή μία εξαγωγή νερού προσδιορίζοντας τη μεταβλητή εισόδου ETYPE στο αρχείο **DECVAR**: Αν η ETYPE είναι IM, τότε η μεταβλητή αφορά μία πηγή (εισαγωγή) νερού. Αν είναι EX, η μεταβλητή αναφέρεται σε εξαγωγή νερού. Ως εκ τούτου, ο χρήστης θα πρέπει να καθορίσει τιμές μεγαλύτερες από 0 για τις ελάχιστες (EVMIN) και τις μέγιστες (EVMAX) παροχές και για τους δύο τύπους των εξωτερικών μεταβλητών απόφασης.

Κατά τον προσδιορισμό των συντελεστών της αντικειμενικής συνάρτησης στο αρχείο της **OBJFNC**, για τις μεταβλητές απόφασης με μεταβλητές εισόδου FVOBJC, EVOBJC, και BVOBJC, ο χρήστης πρέπει να προσδιορίσει το πρόσημο κάθε συντελεστή ώστε η αντικειμενική συνάρτηση να πάρει την επιθυμητή μορφή. Για παράδειγμα, αν η αντικειμενική έχει στόχο να μεγιστοποιήσει το οικονομικό όφελος από την άντληση ή την εισαγωγή νερού από μία λεκάνη, και το όφελος είναι 1\$ ανά μονάδα νερού που αντλείται σε μία συγκεκριμένη θέση αλλά το κόστος εισαγωγής από μία εξωτερική μεταβλητή είναι 1\$ ανά μονάδα εισαγωγής, τότε ο χρήστης πρέπει να καθορίσει έναν θετικό συντελεστή για την άντληση και έναν αρνητικό για την εξωτερική μεταβλητή. Το ίδιο σκεπτικό ισχύει και για γραμμικά αθροιστικούς περιορισμούς που βρίσκονται στο αρχείο **SUMCON**. Για παράδειγμα, αν σε ένα πρόβλημα που η διαφορά της κατ'όγκον παροχής ανάμεσα σε μία εισαγωγή Im_I και μία εξαγωγή Ex_I νερού πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση μιας συγκεκριμένης τιμής b , τότε ο χρήστης θα ορίζε έναν περιορισμό με θετικό τον συντελεστή της μεταβλητής εισαγωγής και έναν αρνητικό συντελεστή στην μεταβλητή της εξαγωγής, δηλαδή θα ήταν, $Im_I - Ex_I \geq b$.

Κατώτατα όρια για τις μεταβλητές απόφασης παροχής και για τις εξωτερικές μεταβλητές απόφασης:

Δύο προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τα κατώτατα όρια για τις μεταβλητές απόφασης παροχής και για τις εξωτερικές μεταβλητές απόφασης, ανάλογα με το αν οι μεταβλητές απόφασης έχουν συσχετιστεί με δυαδικές μεταβλητές. Εάν μια μεταβλητή απόφασης παροχής ή μία εξωτερική μεταβλητή απόφασης έχει συνδεθεί με μια δυαδική μεταβλητή (δηλαδή ισχύουν οι Εξ. 4.15 και 3.16), τότε μπορούν να οριστούν μη μηδενικά κατώτερα όρια στο αρχείο των περιορισμών (**VARCON**) χρησιμοποιώντας τις μεταβλητές εισόδου FVMIN για μεταβλητές απόφασης παροχής και EVMIN για εξωτερικές μεταβλητές απόφασης.

Αν μία μεταβλητή απόφασης, είτε παροχής είτε εξωτερική, δεν έχει συνδεθεί με κάποια δυαδική μεταβλητή (δηλαδή ισχύουν οι Εξ. 4.13 και 4.14), τότε το κατώτερο όριο της μεταβλητής πρέπει να οριστεί ίσο με 0 χρησιμοποιώντας τις μεταβλητές του αρχείου **VARCON**, FVMIN και EVMIN. Ωστόσο σε αυτή την περίπτωση, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ορίσει ένα μη μηδενικό κατώτερο όριο με τη χρήση των γραμμικά αθροιστικών περιορισμών. Δηλαδή, θα ορίσει τις μεταβλητές FVMIN και EVMIN ίσες με 0 και μετά στο αρχείο **SUMCON** θα καθορίσει έναν γραμμικά

αθροιστικό περιορισμό. Για παράδειγμα, μία ελάχιστη τιμή άντλησης $1000 \text{ ft}^3/\text{d}$ για την υποτιθέμενη μεταβλητή απόφασης παροχής Q_I μπορεί να οριστεί στο αρχείο **SUMCON** με χρήση της Εξίσωσης 4.18: $Q_I \geq 1000$.

Δευτερεύουσες πιέσεις και παροχές αναφοράς: Σε προηγούμενη παράγραφο (Κεφάλαιο 4.2.1.1) επισημάνθηκε ότι στο **GWM** ο χρήστης μπορεί να ορίσει παροχές άντλησης ή εμπλουτισμού σε πηγάδια που δεν συμπεριλαμβάνονται στη λύση διαχείρισης (unmanaged wells). Αυτές οι παροχές αναφέρονται ως δευτερεύουσες πιέσεις (background stresses), και ορίζονται από τα πακέτα **WEL** ή **MNW** της διαδικασίας **GWF** του **MODFLOW**. Μετά τον προσδιορισμό τους από αυτά τα πακέτα οι παροχές δεν αλλάζουν κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του **GWM**.

Οι παροχές αναφοράς πρέπει να οριστούν στο **GWM** για κάθε μεταβλητή απόφασης παροχής όταν υπάρχουν περιορισμοί στην πτώση του υδραυλικού φορτίου (drawdown constraints, Εξ. 4.22, 4.23) και περιορισμοί στην εξάντληση της παροχής ποταμού (streamflow-depletion constraints, Εξ. 4.28, 4.29). Οι παροχές αναφοράς ορίζονται με τη χρήση της μεταβλητής εισόδου **FWREF** στο αρχείο των περιορισμών **VARCON**. Ας σημειωθεί, ωστόσο, ότι ο χρήστης μπορεί να ορίσει έμμεσα μια παροχή αναφοράς σαν δευτερεύουσα, με τη χρήση ενός μη ελεγχόμενου πηγαδιού σε ένα από τα δύο πακέτα **WEL** ή **MNW**. Σε αυτή την περίπτωση, για κάθε μεταβλητή απόφασης που έχει παροχή αναφοράς σε ένα από τα δύο αυτά πακέτα, η μεταβλητή **FWREF** πρέπει να τεθεί ίση με 0.

Μεταβλητές που συνδέονται με τον υπολογισμό των συντελεστών απόκρισης: Ο χρήστης πρέπει να ορίσει ένα σύνολο από μεταβλητές εισόδου που θα χρησιμοποιήσει το **GWM** για να υπολογίσει τους συντελεστές απόκρισης. Οι περισσότερες από αυτές τις μεταβλητές προσδιορίζονται στο αρχείο των παραμέτρων που ελέγχουν τη λύση και τα αποτελέσματα (**SOLN**). Οι πρώτες από αυτές τις μεταβλητές είναι οι μεταβλητές διαταραχής (perturbation variables, η δ^0 είναι για γραμμικά προβλήματα και οι $\delta_{initial}$, $\delta_{minimum}$ και δ_{scale} για μη γραμμικά προβλήματα). Για γραμμικές συνθέσεις, η μεταβλητή δ^0 στην Εξίσωση 4.33 πρέπει να οριστεί από τη μεταβλητή **DELTA**. Η μεταβλητή αυτή μπορεί να έχει μία θετική ή μία αρνητική τιμή: μια θετική τιμή σημαίνει αύξηση στην παροχή (αναφέρεται σαν υπολογισμός των εμπρός διαφορών) ενώ μία αρνητική σημαίνει μείωση στην παροχή (αναφέρεται σαν υπολογισμός των πίσω διαφορών). Επιπρόσθετα, η **DELTA** δεν περιορίζεται ανάμεσα στις τιμές +1.0 και -1.0. Ο χρήστης ίσως χρειαστεί να πειραματιστεί με διάφορες τιμές της μεταβλητής **DELTA** σε ένα σύνολο από εκτελέσεις του **GWM** ώστε να μπορέσει να βρει την πιο κατάλληλη τιμή που ταιριάζει στο εκάστοτε πρόβλημα. Οδηγίες για την επιλογή της **DELTA** δόθηκαν και σε προηγούμενο κεφάλαιο (4.3.1.2).

Αν ο χρήστης επιλέξει στο αρχείο **SOLN** τον τύπο λύσης **SLP** (δηλαδή, επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης με διαδοχικό γραμμικό προγραμματισμό), τότε οι τρεις μεταβλητές διαταραχής $\delta_{initial}$, $\delta_{minimum}$ και δ_{scale} της Εξίσωσης 4.49 πρέπει να οριστούν από τις μεταβλητές εισόδου **DINIT**, **DMIN**, και **DSC** αντίστοιχα. Η επιλογή της **DINIT** ($\delta_{initial}$) ακολουθεί την ίδια λογική όπως η επιλογή της **DELTA** στη

γραμμική περίπτωση (βλέπε το κεφάλαιο “ Ορθότητα και ακρίβεια των συντελεστών απόκρισης”). Η τιμή της DMIN ($\delta_{minimum}$) πρέπει να επιλέγεται τέτοια ώστε η τελική τιμή διαταραχής να είναι αρκετά μεγάλη για να παράξει αρκετά δεκαδικά ψηφία στο μητρώο απόκρισης, και αρκετά μικρή για να διασφαλίσει μία ακριβή προσέγγιση για τη μη-γραμμική απόκριση. Μία αρχική εκτίμηση που προτείνεται για την DMIN είναι 0.5% της τιμής της αναμενόμενης βέλτιστης λύσης. Ο συντελεστής κλιμάκωσης DSC (δ_{scale}) κανονικά ορίζεται να είναι μεγαλύτερος του 1.0 έτσι ώστε ο η παράμετρος διαταραχής να μειώνεται καθώς αυξάνονται οι επαναλήψεις. Μία τιμή ίση με 5.0 έχει αποδειχθεί ότι δίνει καλά αποτελέσματα. (Minihane, 2002). Όπως και με την επιλογή της DELTA, έτσι και εδώ ο χρήστης μπορεί να χρειαστεί να πειραματιστεί με διάφορες τιμές των DINIT, DMIN, και DSC μέχρι να προσδιορίσει ποιές από αυτές ταιριάζουν καλύτερα στο πρόβλημα.

Όλων των ειδών οι λύσεις απαιτούν για κάθε μεταβλητή απόφασης παροχής τον ορισμό ενός μέγιστου ορίου στην παροχή άντλησης ή εμπλουτισμού (η μεταβλητή Qw_n^u) ώστε να υπολογιστούν οι τιμές διαταραχής $Qw_{\Delta n}$ (Εξ. 4.33 για γραμμικές συνθέσεις) ή Qw_n^v (για μη γραμμικές συνθέσεις). Οι μέγιστες τιμές των μεταβλητών απόφασης παροχής ορίζονται στο αρχείο **VARCON** με τη μεταβλητή FVMAX.

Όλων των ειδών οι λύσεις απαιτούν επίσης για κάθε μεταβλητή απόφασης παροχής τη διευκρίνιση εκείνων των παροχών άντλησης ή εμπλουτισμού που αποτελούν τις τιμές βάσης και χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των συντελεστών απόκρισης (δηλαδή, τις Qw^0). Για λόγους ευκολίας υπάρχουν δύο επιλογές για τον καθορισμό των Qw^0 . Ποια από τις δύο θα επιλέξει ο χρήστης καθορίζεται στο αρχείο **SOLN** από τη μεταβλητή εισόδου IBASE : αν η IBASE τεθεί 0, τότε στο αρχείο **VARCON** θα επιλεγεί η μεταβλητή FVREF για να καθορίσει την παροχή βάσης για κάθε μεταβλητή απόφασης. Αν η IBASE τεθεί 1, τότε στο αρχείο **SOLN** θα επιλεγεί η μεταβλητή FVBASE να καθορίσει την παροχή βάσης για κάθε μεταβλητή απόφασης.

Έλεγχος της ακρίβειας του συντελεστή απόκρισης: Οι χρήστες του GWM πρέπει να δίνουν μεγάλη προσοχή στην ακρίβεια του μητρώου με τους συντελεστές απόκρισης. Ένα βοηθητικό εργαλείο αξιολόγησης της ακρίβειας του μητρώου των συντελεστών απόκρισης, περιλαμβάνεται στα αποτελέσματα του GWM και είναι ο μέσος αριθμός των δεκαδικών ψηφίων του μητρώου. Ο αριθμός των δεκαδικών ψηφίων εκτιμάται διαιρώντας την αλλαγή που προκαλείται στο σύστημα από τη διαταραχή, με το κριτήριο σύγκλισης του υδραυλικού φορτίου (head-convergence criterion) που χρησιμοποιείται κατά τη διαδικασία ροής. Από το λόγο που προκύπτει ο αριθμός των ψηφίων αριστερά της υποδιαστολής χρησιμοποιείται σαν μέτρο του αριθμού των δεκαδικών ψηφίων. Αυτός ο λόγος υπολογίζεται από τη μεταβλητή HCLOSE της διαδικασίας GWF για να αναπαριστά το κριτήριο σύγκλισης του υδραυλικού φορτίου. Για να έχει νόημα αυτός ο λόγος, πρέπει να καθοριστεί καταλλήλως. Όταν χρησιμοποιούνται διάφορα πακέτα επίλυσης της διαδικασίας της ροής όπως το PCG (Preconditioned Conjugate-Gradient) ή το DE4 (Direct Solver), ο

χρήστης πρέπει να διασφαλίζει ότι η τιμή τη μεταβλητής HCLOSE έχει ουσιαστική αξία.

Επειδή τα υδραυλικά φορτία θα τείνουν να ανταποκρίνονται ελάχιστα κατά τη διάρκεια άντλησης από μεταβλητές απόφασης παροχής που βρίσκονται μακριά, οι αντίστοιχοι συντελεστές απόκρισης θα είναι μικροί και ίσως έχουν χαμηλή ακρίβεια. Όσο άλλες μεταβλητές απόφασης παροχής παράγουν σημαντικές αποκρίσεις, το μητρώο απόκρισης θα είναι επαρκώς ακριβές για να επιτύχει λύση. Το πακέτο RMS ελέγχει κάθε στήλη του παραγόμενου μητρώου απόκρισης. Πρέπει τουλάχιστον ένας συντελεστής απόκρισης κάθε στήλης να έχει επαρκή ακρίβεια για να προβλέψει μία ουσιαστική απόκριση. Με άλλα λόγια, κάθε μεταβλητή απόφασης πρέπει να έχει επαρκή αριθμητική επίδραση σε τουλάχιστον έναν περιορισμό. Ο έλεγχος αυτός διεξάγεται προϋποθέτοντας ότι ο αριθμός των δεκαδικών ψηφίων του λόγου που υπολογίζει η μεταβλητή HCLOSE, είναι μεγαλύτερος ή ίσος της μεταβλητής NSIGDIG που έχει καθορίσει ο χρήστης, για τουλάχιστον μία καταχώρηση της στήλης. Αν μία στήλη δεν ικανοποιεί αυτό τον έλεγχο, τότε το GWM μπορεί αυτόματα να την υπολογίσει πάλι με μία νέα τιμή διαταραχής (perturbation value).

Διόρθωση μίας αποτυχημένης εκτέλεσης της διαδικασίας GWF: Η διαδικασία GWF μπορεί να αποτύχει κατά τη διάρκεια ενός βασικού τρεξίματος (base-condition run) ή σε ένα από τα τρεξίματα της διαταραχής (perturbation runs). Αυτό μπορεί να οφείλεται σε πολλούς λόγους, όπως ότι απέτυχε να συγκλίνει ο αλγόριθμος επίλυσης της διαδικασίας GWF, ή όταν ένα κελί χωρίς υδραυλικό φορτίο περιλαμβάνεται σε ένα περιορισμό, ή όταν το GWM εντοπίζει ότι η περοσομοιωμένη τιμή διαταραχής είναι ανεπαρκής ή ανακριβής. Αν η διαδικασία ροής αποτύχει κατά τη διάρκεια ενός βασικού τρεξίματος για τους τύπους επίλυσης NS, MPS, ή LP, τότε το πρόγραμμα θα τερματιστεί. Αυτό θα συμβεί αν οι τιμές βάσης των μεταβλητών απόφασης παροχής που έχουν δοθεί από το χρήστη δεν μπορέσουν να οδηγήσουν σε επιτυχημένη εκτέλεση του προγράμματος. Σε αυτή την περίπτωση, ο χρήστης πρέπει να τροποποιήσει τις πιέσεις της βασικής κατάστασης (base-condition stresses) και (ή) τους παραμέτρους επίλυσης της διαδικασίας GWF ώστε να βελτιωθεί η σύγκλιση και (ή) η σταθερότητα του μοντέλου. Ωστόσο για τον τύπο επίλυσης SLP, οι συντελεστές απόκρισης παράγονται από ένα διαφορετικό σύνολο αρχικών παροχών άντλησης και εμπλουτισμού για κάθε επανάληψη του αλγόριθμου SLP. Αυτό ο τύπος επίλυσης αφορά μη γραμμικές συνθέσεις οι οποίες δεν εξετάζονται εδώ.

Η διαδικασία της προσομοίωσης μπορεί επίσης να αποτύχει κατά τη διάρκεια ενός τρεξίματος όπου υπολογίζεται η διαταραχή. Αυτό μπορεί να συμβεί λόγω κακής επιλογής της τιμής διαταραχής στις Εξισώσεις 4.33 ή 4.48. Σε αυτή την περίπτωση το GWM μπορεί να ρυθμίσει αυτόματα την τιμή διαταραχής και να εκτελέσει ξανά τη διαδικασία ροής. Δύο είναι οι προκαθορισμένες από το χρήστη μεταβλητές εισόδου που ελέγχουν τη ρύθμιση της τιμής διαταραχής σε περίπτωση που αποτύχει η διαδικασία ροής. Η πρώτη παράμετρος, PGFACT, κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0 και 1. Το GWM ανάλογα με τον τύπο του σφάλματος, είτε θα αυξήσει είτε θα μειώσει την τιμή διαταραχής. Μια προτεινόμενη τιμή της PGFACT είναι 0.5 η οποία αν

χρησιμοποιηθεί θα οδηγήσει σε διπλασιασμό ή υποδιπλασιασμό της τιμής διαταραχής για κάθε διαδοχική προσπάθεια δημιουργίας της. Η τιμή διαταραχής για κάθε μεταβλητή απόφασης παροχής ρυθμίζεται ανεξάρτητα, έτσι ώστε να μην επηρεάζεται από τις υπόλοιπες μεταβλητές. Η δεύτερη παράμετρος, NPGNMX, είναι ο μέγιστος αριθμός των προσπαθειών που γίνονται ώστε να ρυθμιστεί η τιμή διαταραχής για μια συγκεκριμένη μεταβλητή απόφασης. Αν ξεπεραστεί αυτή η τιμή για οποιαδήποτε μεταβλητή απόφασης, τότε ο αλγόριθμος θα τερματιστεί.

Στις μη γραμμικές συνθέσεις όπου χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος SLP, ο αλγόριθμος simplex μπορεί να καθορίσει, για κάθε επανάληψη του SLP, εάν το γραμμικό πρόβλημα είναι ανέφικτο ή απεριόριστο. Αυτό δε σημαίνει απαραίτητα, ότι το πραγματικό πρόβλημα είναι όντως ανέφικτο ή απεριόριστο. Αντίθετα, μπορεί να σημαίνει ότι το συγκεκριμένο σύνολο των συντελεστών απόκρισης που υπολογίστηκε παράγει για αυτή την επανάληψη, ένα ανέφικτο ή απεριόριστο σύνολο περιορισμών. Κατά τη διάρκεια μιας SLP επανάληψης, όταν ένα γραμμικό πρόγραμμα αποτύχει, το πακέτο RMS επαναλαμβάνει την επανάληψη, υπολογίζοντας τους συντελεστές απόκρισης με διαφορετική τιμή διαταραχής. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται πάνω από NINFMX φορές (το NINFMX καθορίζεται από τον χρήστη). Αν σε κανένα από τα NINFMX γραμμικά προβλήματα δεν βρεθεί λύση, τότε το πακέτο RMS συμπεραίνει ότι το αρχικό πρόβλημα είναι ανέφικτο ή απεριόριστο και ο αλγόριθμος τερματίζεται.

4.4.2.2 Το αρχείο GWM

Κατά την εκτέλεση του GWM διαβάζονται τα ακόλουθα στοιχεία. Τα στοιχεία πρέπει να αναγράφονται με τη σειρά που φαίνεται απρακάτω. Οι τιμές με έντονα γράμματα είναι οι λέξεις κλειδιά και μπορούν να είναι είτε με μικρά είτε με κεφαλαία γράμματα. Επίσης φαίνονται και οι οδηγίες εισόδου για τα αρχεία που είναι μετά από κάθε λέξη κλειδί. Κάθε τρέξιμο του GWM προϋποθέτει τον ορισμό ενός αρχείου τύπου: **DECVAR**, **OBJFNC**, **VARCON**, και **SOLN**. Τα αρχεία **SUMCON**, **HEDCON**, και **STRMCON** είναι προαιρετικά. Το GWM επιλέγει αυτόματα τις μονάδες αυτών των αρχείων, ώστε να μη το κάνει ο χρήστης κάθε φορά.

Στοιχεία εισόδου:

0. #Text

1. Κάθε πρόβλημα διαχείρισης πρέπει να περιλαμβάνει ένα αρχείο το οποίο θα παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις μεταβλητές απόφασης και θα διαβάζεται από το αρχείο του οποίου το όνομα έχει καθοριστεί από το Fname:

DECVAR Fname

2. Κάθε πρόβλημα διαχείρισης πρέπει να περιλαμβάνει ένα αρχείο το οποίο θα παρέχει πληροφορίες σχετικά με την αντικειμενική συνάρτηση και θα διαβάζεται από το αρχείο του οποίου το όνομα έχει καθοριστεί από το Fname:

OBJFNC Fname

3. Κάθε πρόβλημα διαχείρισης πρέπει να περιλαμβάνει ένα αρχείο το οποίο θα παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές των μεταβλητών απόφασης παροχής και των εξωτερικών μεταβλητών απόφασης και θα διαβάζεται από το αρχείο του οποίου το όνομα έχει καθοριστεί από το Fname:

VARCON Fname

4. Κάθε πρόβλημα διαχείρισης μπορεί επίσης να περιλαμβάνει μέχρι και τρία επιπλέον αρχεία που θα παρέχουν πληροφορίες σχετικά με άλλα είδη περιορισμών που επιτρέπονται από το GWM (summation constraints, head constraints, and streamflow constraints). Αυτά τα αρχεία καθορίζονται από τις ακόλουθες εγγραφές, οι οποίες μπορεί να αναγράφονται με οποιαδήποτε σειρά:

SUMCON Fname

HEDCON Fname

STRMCON Fname

5. Κάθε πρόβλημα διαχείρισης πρέπει να περιλαμβάνει ένα αρχείο το οποίο θα παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις παραμέτρους της λύσης και του ελέγχου των αποτελεσμάτων και θα διαβάζεται από το αρχείο του οποίου το όνομα έχει καθοριστεί από το Fname:

SOLN Fname

Επεξήγηση μεταβλητών:

Text - είναι μια μεταβλητή χαρακτήρα (199 χαρακτήρες) που ξεκινά από τη στήλη 2. Οποιοσδήποτε χαρακτήρας μπορεί να συμπεριληφθεί στο text. Ο χαρακτήρας "#" πρέπει να είναι στη στήλη 1. Οι γραμμές που ξεκινούν με "#" περιορίζονται μόνο στις πρώτες γραμμές του αρχείου. Το κείμενο εκτυπώνεται, όταν διαβαστεί το αρχείο. Το σημείο μηδέν μπορεί να επαναληφθεί πολλές φορές.

Fname - είναι μια μεταβλητή χαρακτήρα που καθορίζει το όνομα ενός υπάρχοντος αρχείου. Μπορούν να καθοριστούν και διαδρομές αρχείων ως τμήμα του Fname.

4.4.2.3 Το αρχείο των μεταβλητών απόφασης (DECVAR)

Αυτό το αρχείο καθορίζει της μεταβλητές απόφασης ενός προβλήματος διαχείρισης. Υπάρχουν τρία είδη μεταβλητών απόφασης.

- Το πρώτο είναι οι παροχές (είτε άντλησης είτε εμπλουτισμού) για κάθε θέση πηγαδιού που συμμετέχει στη διαχείριση (managed well site). Για κάθε θέση πηγαδιού μπορεί να έχουν καθοριστεί περισσότερες από μία παροχές σαν μεταβλητές απόφασης (flow-rate variables). Επιπρόσθετως, μία παροχή, σαν μεταβλητή απόφασης, μπορεί να εκτείνεται σε περισσότερα από ένα κελιά και μπορεί να είναι ενεργή σε περισσότερες από μία περιόδους άντλησης (stress periods).

- Το δεύτερο είδος μεταβλητών απόφασης είναι οι εξωτερικές παροχές (external flow rates) που μπορεί να δηλώνουν εισαγόμενη ή εξαγόμενη ποσότητα νερού στο κύριο σύστημα του μοντέλου. Οι μεταβλητές αυτές δεν έχουν άμεση επίδραση στις μεταβλητές κατάστασης του συστήματος και δεν αναφέρονται σε κάποια συγκεκριμένη θέση μέσα στο μοντέλο.
- Το τρίτο είδος μεταβλητών απόφασης είναι οι δυαδικές μεταβλητές (binary variables) που χρησιμοποιούνται για να ορίσουν την κατάσταση στην οποία βρίσκεται κάθε μεταβλητή απόφασης (παροχής ή εξωτερικής παροχής) ως ενεργή (για παράδειγμα, το εργοστάσιο έχει κατασκευαστεί) ή ανενεργή (το εργοστάσιο δεν έχει κατασκευαστεί). Οι δυαδικές μεταβλητές μπορούν να έχουν είτε την τιμή 0 (ανενεργή θέση) είτε την τιμή 1 (ενεργή θέση). Μία ή περισσότερες μεταβλητές απόφασης (παροχής ή εξωτερικής παροχής) μπορούν να συνδεθούν με κάθε δυαδική μεταβλητή.

Στοιχεία εισόδου:

0. #Text

1. IPRN

2. NFVAR NEVAR NBVAR

3a. Οι ακόλουθες καταγραφές διαβάζονται για κάθε μία από τις NFVAR μεταβλητές απόφασης:

FVNAME NC LAY ROW COL FTYPE FSTAT WSP

3b. Αν στη σειρά 3a $NC > 1$, τότε η παρακάτω σειρά διαβάζεται NC φορές και οι τιμές των LAY, ROW, και COL που διαβάστηκαν στη σειρά 3a αγνοούνται:

RATIO LAY ROW COL

4. Η ακόλουθη σειρά διαβάζεται για κάθε μία από τις NEVAR εξωτερικές μεταβλητές απόφασης:

EVNAME ETYPE ESP

5. Η ακόλουθη σειρά διαβάζεται για κάθε μία από τις NBVAR δυαδικές μεταβλητές απόφασης:

BVNAME NDV BVLIST

Επεξήγηση μεταβλητών:

Text - είναι μια μεταβλητή χαρακτήρα (199 χαρακτήρες) που ξεκινά από τη στήλη 2. Οποιοσδήποτε χαρακτήρας μπορεί να συμπεριληφθεί στο text. Ο χαρακτήρας "#" πρέπει να είναι στη στήλη 1. Οι γραμμές που ξεκινούν με "#" περιορίζονται μόνο στις πρώτες γραμμές του αρχείου. Το κείμενο εκτυπώνεται, όταν διαβαστεί το αρχείο. Το σημείο μηδέν μπορεί να επαναληφθεί πολλές φορές.

IPRN – ακέραια μεταβλητή που περιγράφει το είδος της πληροφορίας εισόδου που θα αναγράφεται στο αρχείο των αποτελεσμάτων GLOBAL. Η IPRN μπορεί να είναι ή 0 ή 1. Όταν είναι ίση με το 0, τότε στο αρχείο GLOBAL αναγράφεται μια ελάχιστη ποσότητα πληροφορίας σχετικά με τις μεταβλητές απόφασης. Όταν είναι ίση με το 1,

τότε στο αρχείο GLOBAL αναγράφονται αναλυτικές λεπτομέρειες σχετικά με τις μεταβλητές απόφασης.

NFVAR – ακέραια μεταβλητή ίση με τον αριθμό των μεταβλητών απόφασης που αφορούν παροχή. Η NFVAR πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 0. Μόνο μία μεταβλητή απόφασης παροχής μπορεί να οριστεί για μία συγκεκριμένη θέση πηγαδιού και για ένα συγκεκριμένο σύνολο περιόδων άντλησης, με την εξαίρεση ότι και οι δύο τύποι παροχής - άντλησης (FTYPE=W) και εμπλουτισμού (FTYPE=I) – μπορούν να οριστούν για την περιοχή.

NEVAR - ακέραια μεταβλητή ίση με τον αριθμό των μεταβλητών απόφασης που αφορούν εξωτερική παροχή. Η NEVAR πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση του 0.

NBVAR - μεταβλητή ίση με τον αριθμό των δυαδικών μεταβλητών απόφασης. Η μεταβλητή NBVAR πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση του 0. Αν είναι ίση με 0, τότε στο πρόβλημα διαχείρισης δεν περιλαμβάνονται δυαδικές μεταβλητές.

FVNAME – είναι μία μεταβλητή χαρακτήρων (μέγιστο μήκος 10 χαρακτήρες) και αποτελεί ένα μοναδικό όνομα μιας μεταβλητής απόφασης παροχής. Δεν επιτρέπονται κενά μεταξύ των χαρακτήρων του ονόματος. Το τέλος του ονόματος ορίζεται από ένα κενό διάστημα.

NC – είναι μία ακέραια μεταβλητή ίση με τον αριθμό των κελιών του μοντέλου που καταλαμβάνει μια μεταβλητή απόφασης παροχής. Η μεταβλητή NC πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση του 1. Αν ισούται με 1, τότε όλο η ποσότητα νερού της μεταβλητής απόφασης FVNAME που αντλείται ή διοχετεύεται αφορά το μοναδικό κελί LAY, ROW, COL. Αν είναι μεγαλύτερη του 1, τότε η παροχή που υπολογίστηκε για τη μεταβλητή απόφασης FVNAME διανέμεται στα NC κελιά που ορίζονται στην γραμμή 3b.

LAY, ROW, COL – είναι ακέραιες μεταβλητές ίσες με τον αριθμό του στρώματος (layer), της σειράς (row), και της στήλης (column) του κελιού όπου θα υπάρχει μία μεταβλητή απόφασης FVNAME.

FTYPE - είναι μια μεταβλητή χαρακτήρων που δηλώνει αν μία μεταβλητή απόφασης αφορά μία θέση άντλησης ή μία θέση εμπλουτισμού. Αν η FTYPE είναι W, τότε η θέση χρησιμοποιείται για άντληση νερού. Αν είναι I, τότε η θέση χρησιμοποιείται για εμπλουτισμό με νερό. Αν στη θέση πηγαδιού επιτρέπονται και η άντληση και ο εμπλουτισμός, τότε πρέπει να οριστούν δύο μεταβλητές απόφασης για αυτή τη θέση, μία που θα αφορά άντληση νερού (δηλαδή, με FTYPE = W) και μία που θα αφορά εμπλουτισμό με νερό (δηλαδή, με FTYPE = I).

FSTAT – είναι μια μεταβλητή χαρακτήρων που δείχνει αν οι μεταβλητές απόφασης θα συμπεριληφθούν στο πρόβλημα διαχείρισης. Αν η FSTAT είναι Y, τότε η μεταβλητή απόφασης θα είναι διαθέσιμη. Αν είναι N, τότε η μεταβλητή απόφασης δεν θα είναι διαθέσιμη στο πρόβλημα διαχείρισης οπότε δεν θα υπολογιστεί παροχή άντλησης ή εμπλουτισμού για αυτή τη θέση. Για γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης, η FSTAT μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αφαιρέσει ένα πηγάδι από το σύνολο των υποψήφιων μεταβλητών απόφασης χωρίς να χρειάζεται να υπολογίσει ξανά το μητρώο με τους συντελεστές απόκρισης (σε αυτή την περίπτωση, IRM = 0, βλέπε και τις οδηγίες που δίνονται στο κεφάλαιο «Αρχείο λύσεων και παραμέτρων που ελέγχουν τα αποτελέσματα»)

WSP – είναι μια σειρά χαρακτήρων (με μήκος μέχρι 120) που δηλώνει τις περιόδους άντλησης που είναι συνδεδεμένες με την μεταβλητή απόφασης FVNAME. Για όλες τις περιόδους άντλησης της μεταβλητής WSP μία μόνο παροχή θα καθοριστεί από το GWM. Στην ακολουθία της WSP δεν πρέπει να περιέχονται καθόλου κενά. Πολλαπλές περιόδους

άντλησης μπορούν να παρατεθούν με τη χρήση της άνω και κάτω τελείας (:) ή της παύλας (-).
Για παράδειγμα,

- 1 σημαίνει ότι η περίοδος άντλησης 1 είναι η μόνη περίοδος που συνδέεται με τη μεταβλητή απόφασης,
- 1:3 σημαίνει ότι η παροχή είναι η ίδια για τις περιόδους 1 και 3, και
- 1-12 σημαίνει ότι η παροχή είναι η ίδια για όλες τις περιόδους 1 μέχρι 12.

RATIO – είναι μία πραγματική μεταβλητή. Είναι το ποσοστό παροχής της μεταβλητής απόφασης FVNAME που διανέμεται στο κελί LAY, ROW, COL. Το άθροισμα των RATIO πρέπει να είναι ίσο με 1.0 για όλα τα NC κελιά της FVNAME. Αν το άθροισμα δεν είναι 1.0, τότε το GWM ξαναπολογίζει αυτό το ποσοστό για κάθε κελί διαιρώντας τη τιμή του RATIO για κάθε κελί με την τιμή του RATIO για όλα τα κελιά του FVNAME.

EVNAME – είναι μια μεταβλητή χαρακτήρα (μέγιστο μήκος 10 χαρακτήρων) που αποτελεί ένα μοναδικό όνομα της εξωτερικής μεταβλητής απόφασης. Δεν επιτρέπονται κενά στο όνομα. Το τέλος του ονόματος ορίζεται από ένα κενό διάστημα.

ETYPE – είναι μια μεταβλητή χαρακτήρων που δείχνει αν η μεταβλητή απόφασης εξωτερικής παροχής αφορά εισαγωγή (source of water) ή εξαγωγή νερού (sink of water). Αν η ETYPE είναι IM, τότε η εξωτερική παροχή αφορά εισαγωγή νερού στο σύστημα. Αν είναι EX, τότε αφορά εξαγωγή νερού από το σύστημα. Και οι δύο τύποι μεταβλητών εξωτερικής παροχής μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα πρόβλημα διαχείρισης.

ESP – είναι μια σειρά χαρακτήρων (με μήκος μέχρι 120) που δηλώνει τις περιόδους άντλησης που είναι συνδεδεμένες με την μεταβλητή απόφασης EVNAME. Για όλες τις περιόδους άντλησης της μεταβλητής ESP μία μόνο παροχή θα καθοριστεί από το GWM. Στην ακολουθία της ESP δεν πρέπει να περιέχονται καθόλου κενά. Πολλαπλές περιόδους άντλησης μπορούν να παρατεθούν με τη χρήση της άνω και κάτω τελείας (:) ή της παύλας (-).
Για παράδειγμα,

- 1 σημαίνει ότι η περίοδος άντλησης 1 είναι η μόνη περίοδος που συνδέεται με τη μεταβλητή απόφασης,
- 1:3 σημαίνει ότι η παροχή είναι η ίδια για τις περιόδους 1 και 3, και
- 1-12 σημαίνει ότι η παροχή είναι η ίδια για όλες τις περιόδους 1 μέχρι 12.

BVNAME – είναι μία μεταβλητή χαρακτήρα (μέγιστο μήκος 10 χαρακτήρων) που αποτελεί ένα μοναδικό όνομα της δυαδικής μεταβλητής απόφασης. Η χρήση των μεταβλητών BVNAME, NDV, και BVLIST επιτρέπει στο χρήστη να συνδέσει μία ή περισσότερες FVNAME ή EVNAME μεταβλητές απόφασης με μία μόνο δυαδική μεταβλητή αναγνώρισης. Για παράδειγμα, ο χρήστης μπορεί να θέλει να ορίσει 12 μεταβλητές απόφασης που να αντιπροσωπεύουν τις μηνιαίες παροχές άντλησης για μία θέση πηγαδιού. Αν οποιαδήποτε από τις 12 μεταβλητές απόφασης επιλεγεί στη βέλτιστη λύση, τότε πρέπει να προκύψει ένα κόστος εγκατάστασης που θα συνδέεται με τη δυαδική μεταβλητή για τη θέση του πηγαδιού.

NDV – είναι μία ακέραια μεταβλητή ίση με τον αριθμό των μεταβλητών απόφασης, είτε παροχής είτε εξωτερικής παροχής, που συνδέονται με τη δυαδική μεταβλητή BVNAME.

BVLIST – είναι μια λίστα των μεταβλητών απόφασης παροχής και εξωτερικής παροχής που συνδέονται με τη δυαδική μεταβλητή BVNAME. Ο κατάλογος καταρτίζεται από τα ονόματα αυτών των μεταβλητών, FVNAME και EVNAME, που ορίζονται στις

γραμμές 3α και 4. Κάθε μεταβλητή χαρακτήρα της λίστας πρέπει να χωρίζεται από τις άλλες με ένα κενό, και το σύνολο των μεταβλητών που θα είναι στη λίστα αυτή πρέπει να είναι ίση με NDV. Στη λίστα μπορούν να υπάρχουν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί μεταβλητών απόφασης, ανεξάρτητα των θέσεων των πηγαδιών και των περιόδων άντλησης.

4.4.2.4 Το αρχείο της αντικειμενική συνάρτησης (OBJFNC)

Σε αυτό το αρχείο καθορίζεται ο τύπος της αντικειμενικής συνάρτησης που θα επιλυθεί, καθώς και οι συντελεστές που σχετίζονται με κάθε μεταβλητή απόφασης. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν είναι απαραίτητο να περιέχονται όλες οι μεταβλητές απόφασης στην αντικειμενική συνάρτηση. Με άλλα λόγια, κάποιες συνθέσεις διαχείρισης θα έχουν αντικειμενικές συναρτήσεις που δεν θα εμπεριέχουν όλες τις μεταβλητές απόφασης του προβλήματος.

Στοιχεία εισόδου:

0. #Text

1. IPRN

2. OBJTYP FNTYP

3. NFVOBJ NEVOBJ NBVOBJ

4. Η ακόλουθη σειρά επαναλαμβάνεται για κάθε μία από τις NFVOBJ μεταβλητές απόφασης που αφορούν παροχή:

FVNAME FVOBJC

5. Η ακόλουθη σειρά επαναλαμβάνεται για κάθε μία από τις NEVOBJ μεταβλητές απόφασης που αφορούν εξωτερική παροχή:

EVNAME EVOBJC

6. Η ακόλουθη σειρά επαναλαμβάνεται για κάθε μία από τις NBVOBJ δυαδικές μεταβλητές απόφασης:

BVNAME BVOBJC

Επεξήγηση μεταβλητών:

Text - είναι μια μεταβλητή χαρακτήρα (199 χαρακτήρες) που ξεκινά από τη στήλη 2. Οποιοσδήποτε χαρακτήρας μπορεί να συμπεριληφθεί στο text. Ο χαρακτήρας "#" πρέπει να είναι στη στήλη 1. Οι γραμμές που ξεκινούν με "#" περιορίζονται μόνο στις πρώτες γραμμές του αρχείου. Το κείμενο εκτυπώνεται, όταν διαβαστεί το αρχείο. Το σημείο μηδέν μπορεί να επαναληφθεί πολλές φορές.

IPRN – ακέραια μεταβλητή που περιγράφει το είδος της πληροφορίας εισόδου που θα αναγράφεται στο αρχείο των αποτελεσμάτων GLOBAL. Η IPRN μπορεί να είναι ή 0 ή 1. Όταν είναι ίση με το 0, τότε στο αρχείο GLOBAL αναγράφεται μια ελάχιστη ποσότητα πληροφορίας σχετικά με τις μεταβλητές απόφασης. Όταν είναι ίση με το 1, τότε στο αρχείο GLOBAL αναγράφονται αναλυτικές λεπτομέρειες σχετικά με τις μεταβλητές απόφασης.

OBJTYP – είναι μια μεταβλητή χαρακτήρων που ορίζει αν η αντικειμενική συνάρτηση πρέπει να μεγιστοποιηθεί ή να ελαχιστοποιηθεί. Η OBJTYP θα είναι MIN (για ελαχιστοποίηση) ή MAX (για μεγιστοποίηση).

FNTYP – είναι μια μεταβλητή χαρακτήρων που ορίζει τον τύπο της αντικειμενικής συνάρτησης. Προς το παρόν ένας μόνο τύπος αντικειμενική συνάρτησης είναι διαθέσιμος και αυτός είναι του σταθμισμένου αθροίσματος των μεταβλητών απόφασης. Οπότε ο χρήστης θα βάλει σε αυτή τη μεταβλητή WSDV (Weighted sum of decision variables).

NFVOBJ – είναι μία ακέραια μεταβλητή που δηλώνει τον αριθμό των μεταβλητών απόφασης παροχής που εμπεριέχει η αντικειμενική συνάρτηση και πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση με την τιμή της μεταβλητής NFVAR που καθορίστηκε στο αρχείο **DECVAR**.

NEVOBJ - είναι μία ακέραια μεταβλητή που δηλώνει τον αριθμό των μεταβλητών απόφασης εξωτερικής παροχής που εμπεριέχει η αντικειμενική συνάρτηση και πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση με την τιμή της μεταβλητής NEVAR που καθορίστηκε στο αρχείο **DECVAR**.

NBVOBJ - είναι μία ακέραια μεταβλητή που δηλώνει τον αριθμό των δυαδικών μεταβλητών απόφασης που εμπεριέχει η αντικειμενική συνάρτηση και πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση με την τιμή της μεταβλητής NBVAR που καθορίστηκε στο αρχείο **DECVAR**.

FVNAME – είναι μια μεταβλητή χαρακτήρων (μέγιστο μήκος 10 χαρακτήρες) και αποτελεί ένα από τα ονόματα των μεταβλητών απόφασης παροχής. Καθεμιά από αυτές τις μεταβλητές FVNAME πρέπει να έχουν καθοριστεί και στο αρχείο **DECVAR**. Το όνομα μια μεταβλητής απόφασης παροχής επιτρέπεται να υπάρχει μόνο μία φορά στο αρχείο **OBJFNC**.

FVOBJC – είναι μία πραγματική μεταβλητή που αποτελεί τον συντελεστή της κάθε FVNAME μεταβλητής απόφασης παροχής. Για παράδειγμα, η FVOBJC θα μπορούσε να είναι το κόστος ανά μονάδα όγκου νερού που αντλείται ή διοχετεύεται σε μία θέση που περιλαμβάνεται στη λύση διαχείρισης.

EVNAME – είναι μια μεταβλητή χαρακτήρων (μέγιστο μήκος 10 χαρακτήρες) και αποτελεί ένα από τα ονόματα των μεταβλητών απόφασης εξωτερικής παροχής. Καθεμιά από αυτές τις μεταβλητές EVNAME πρέπει να έχουν καθοριστεί και στο αρχείο **DECVAR**. Το όνομα μια μεταβλητής απόφασης εξωτερικής παροχής επιτρέπεται να υπάρχει μόνο μία φορά στο αρχείο **OBJFNC**.

EVOBJC – είναι μία πραγματική μεταβλητή που αποτελεί τον συντελεστή της κάθε EVNAME μεταβλητής απόφασης εξωτερικής παροχής. Για παράδειγμα, η EVOBJC θα μπορούσε να είναι το κόστος ανά μονάδα όγκου νερού που με την εξωτερική μεταβλητή.

BVNAME – είναι μια μεταβλητή χαρακτήρων (μέγιστο μήκος 10 χαρακτήρες) και αποτελεί ένα από τα ονόματα των δυαδικών μεταβλητών απόφασης. Καθεμιά από αυτές τις μεταβλητές BVNAME πρέπει να έχουν καθοριστεί και στο αρχείο **DECVAR**. Το όνομα μια

δύαδικής μεταβλητής απόφασης επιτρέπεται να υπάρχει μόνο μία φορά στο αρχείο **OBJFNC**.

BVOBJC – είναι μία πραγματική μεταβλητή που αποτελεί τον συντελεστή της κάθε **BVNAME** δύαδικής μεταβλητής απόφασης. Για παράδειγμα, η **BVOBJC** θα μπορούσε να είναι το κόστος εγκατάστασης της διαχειριζόμενης περιοχής. Στην κοινή τους χρήση οι δύαδικές μεταβλητές έχουν θετικούς συντελεστές όταν η **OBJTYP** είναι **MIN** και αρνητικούς όταν η **OBJTYP** είναι **MAX**. Αυτό διασφαλίζει ότι οι δύαδικές μεταβλητές θα είναι ενεργές μόνο αν και οι αντίστοιχες μεταβλητές απόφασης (είτε παροχής είτε εξωτερικής παροχής) είναι ενεργές.

4.4.2.5 Αρχεία περιορισμών

Υπάρχουν 4 γενικοί τύποι περιορισμών που χρησιμοποιούνται στο **GWM** για ένα πρόβλημα διαχείρισης: οι περιορισμοί που θέτουν άνω και κάτω όρια στις τιμές των μεταβλητών απόφασης (αρχείο **VARCON**), οι γραμμικά αθροιστικοί περιορισμοί (αρχείο **SUMCON**), οι περιορισμοί στα υδραυλικά φορτία (αρχείο **HEDCON**), και οι περιορισμοί στην παροχή ποταμών (αρχείο **STRMCON**). Ένα αρχείο **VARCON** πρέπει να υπάρχει σε κάθε πρόβλημα διαχείρισης. Τα υπόλοιπα τρία αρχεία είναι προαιρετικά. Παρακάτω περιγράφονται μόνο να τα αρχεία **VARCON** και **HEDCON**.

4.4.2.5.1 *Αρχείο περιορισμών στις τιμές των μεταβλητών απόφασης (VARCON file)*

Το αρχείο **VARCON** χρησιμοποιείται για να θέσει τις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές των μεταβλητών απόφασης που αφορούν παροχή και εξωτερική παροχή, καθώς και τις παροχές αναφοράς που θα χρησιμοποιήσει το **GWM** κατά την πρώτη εκτέλεση του. Θα πρέπει να υπάρχουν καταγραφές για όλες τις μεταβλητές απόφασης **NFVAR** και **NEVAR** που καθορίστηκαν στο αρχείο **DECVAR**.

Στοιχεία εισόδου:

0. #Text

1. IPRN

2. Η ακόλουθη σειρά διαβάζεται για κάθε **NFVAR** μεταβλητή απόφασης:

FVNAME FVMINFVMAX FVREF

Η ακόλουθη σειρά διαβάζεται για κάθε **NEVAR** μεταβλητή απόφασης:

EVNAME EVMIN EVMAX

Επεξήγηση μεταβλητών:

Text - είναι μια μεταβλητή χαρακτήρα (199 χαρακτήρες) που ξεκινά από τη στήλη 2. Οποιοσδήποτε χαρακτήρας μπορεί να συμπεριληφθεί στο **text**. Ο χαρακτήρας **"#"** πρέπει να είναι στη στήλη 1. Οι γραμμές που ξεκινούν με **"#"** περιορίζονται μόνο στις πρώτες γραμμές του αρχείου. Το κείμενο εκτυπώνεται, όταν διαβαστεί το αρχείο. Το σημείο μηδέν μπορεί να επαναληφθεί πολλές φορές.

IPRN – ακέραια μεταβλητή που περιγράφει το είδος της πληροφορίας εισόδου που θα αναγράφεται στο αρχείο των αποτελεσμάτων **GLOBAL**. Η **IPRN** μπορεί να είναι ή 0 ή 1. Όταν είναι ίση με το 0, τότε στο αρχείο **GLOBAL** αναγράφεται μια ελάχιστη

ποσότητα πληροφορίας σχετικά με τις μεταβλητές απόφασης. Όταν είναι ίση με το 1, τότε στο αρχείο GLOBAL αναγράφονται αναλυτικές λεπτομέρειες σχετικά με τις μεταβλητές απόφασης.

FVNAME – είναι μια μεταβλητή χαρακτήρων (μέγιστο μήκος 10 χαρακτήρες) και αποτελεί ένα από τα ονόματα των μεταβλητών απόφασης παροχής. Καθεμιά από αυτές τις μεταβλητές FVNAME πρέπει να έχουν καθοριστεί και στο αρχείο **DECVAR**. Το όνομα μιας μεταβλητής απόφασης παροχής επιτρέπεται να υπάρχει μόνο μία φορά στο αρχείο **VARCON**.

FVMIN, FVMAX – είναι πραγματικές μεταβλητές ίσες με την ελάχιστη (FVMIN) και τη μέγιστη (FVMAX) παροχή που επιτρέπεται να έχει η μεταβλητή απόφασης. Οι τιμές αυτές των FVMIN και FVMAX πρέπει να είναι μεγαλύτερες του 0. Το GWM θα γνωρίζει από τη μεταβλητή FTYPE του αρχείου **DECVAR** ποιες τιμές αφορούν άντληση και ποιες εμπλουτισμό. Η FVMIN πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση της FVMAX. Να σημειωθεί ότι μία μη μηδενική τιμή της FVMIN δηλώνει ότι η μεταβλητή απόφασης έχει συνδεθεί στο αρχείο **DECVAR** με μία δυαδική μεταβλητή. Αν η μεταβλητή απόφασης δεν έχει συνδεθεί με μία δυαδική μεταβλητή, τότε η μη μηδενική τιμή της FVMIN αγνοείται από το GWM. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να καθορίσει ένα μη μηδενικό κάτω όριο για μία μεταβλητή απόφασης παροχής που δεν είναι συνδεδεμένη με μία δυαδική χρησιμοποιώντας έναν αθροιστικά γραμμικό περιορισμό (βλέπε περιγραφή του αρχείου **SUMCON**).

FVREF – είναι μία πραγματική μεταβλητή ίση με την παροχή της μεταβλητής απόφασης που χρησιμοποιεί το GWM για να υπολογίσει τις τιμές αναφοράς των μεταβλητών κατάσταση. Σε αυτές περιλαμβάνονται τα υδραυλικά φορτία σε θέσεις που υπόκεινται σε περιορισμούς πτώσης τους (αν χρησιμοποιούνται τέτοιου είδους περιορισμοί, βλέπε οδηγίες για το αρχείο **HEDCON**) και οι τιμές αναφοράς παροχών των ποταμών σε θέσεις που υπόκεινται σε περιορισμούς στην παροχή τους (αν χρησιμοποιούνται τέτοιου είδους περιορισμοί, βλέπε οδηγίες για το αρχείο **STRMCON**). Επίσης η FVREF μπορεί να υπολογίσει τις βασικές συνθήκες για τον υπολογισμό του μητρώου απόκρισης (βλέπε την περιγραφή της μεταβλητής IBASE στο αρχείο **SOLN**). Αν δεν εισαχθεί τιμή στη μεταβλητή FVREF, τότε παίρνει την τιμή 0.

EVNAME - είναι μία μεταβλητή χαρακτήρων (μέγιστο μήκος 10 χαρακτήρες) και αποτελεί ένα από τα ονόματα των εξωτερικών μεταβλητών απόφασης. Καθεμιά από αυτές τις μεταβλητές EVNAME πρέπει να έχουν καθοριστεί και στο αρχείο **DECVAR**. Το όνομα μιας εξωτερικής μεταβλητής απόφασης επιτρέπεται να υπάρχει μόνο μία φορά στο αρχείο **VARCON**.

FVMIN, FVMAX – είναι πραγματικές μεταβλητές ίσες με την ελάχιστη (EVMIN) και τη μέγιστη (EVMAX) παροχή που επιτρέπεται να έχει η εξωτερική μεταβλητή απόφασης. Οι τιμές αυτές των EVMIN και EVMAX πρέπει να είναι μεγαλύτερες του 0. Το GWM θα γνωρίζει από τη μεταβλητή ETYPE του αρχείου **DECVAR** ποιες τιμές αφορούν εισαγωγή και ποιες εξαγωγή νερού. Η EVMIN πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση της EVMAX. Να σημειωθεί ότι μία μη μηδενική τιμή της EVMIN δηλώνει ότι η μεταβλητή απόφασης έχει συνδεθεί στο αρχείο **DECVAR** με μία δυαδική μεταβλητή. Αν η μεταβλητή απόφασης δεν έχει συνδεθεί με μία δυαδική μεταβλητή, τότε η μη μηδενική τιμή της EVMIN αγνοείται από

το GWM. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να καθορίσει ένα μη μηδενικό κάτω όριο για μία εξωτερική μεταβλητή απόφασης που δεν είναι συνδεδεμένη με μία δυαδική χρησιμοποιώντας έναν αθροιστικά γραμμικό περιορισμό (βλέπε περιγραφή του αρχείου **SUMCON**).

4.4.2.5.2 Αρχείο περιορισμών στα υδραυλικά φορτία (**HEDCON file**)

Στο αρχείο αυτό καθορίζονται οι περιορισμοί για τα υδραυλικά φορτία στα κελιά του μοντέλου. Σε αυτούς περιλαμβάνονται οι περιορισμοί στις ανώτερες και κατώτερες τιμές των υδραυλικών φορτίων (head-bound constraints), οι περιορισμοί στην πτώση του υδραυλικού φορτίου (drawdowns), οι περιορισμοί στη διαφορά του υδραυλικού φορτίου μεταξύ δύο διαφορετικών κελιών του μοντέλου (head differences), και οι περιορισμοί στην κλίση του υδραυλικού φορτίου μεταξύ δύο κελιών του μοντέλου (gradients).

Στοιχεία εισόδου:

0. #Text

1. IPRN

2. NHB NDD NDF NGD

3. Η ακόλουθη σειρά διαβάζεται για κάθε NHB περιορισμό:

HBNAME LAYH ROWH COLH TYPH BND NSP

4. Η ακόλουθη σειρά διαβάζεται για κάθε NDD περιορισμό:

DDNAME LAYD ROWD COLD TYPD BND NSP

5. Η ακόλουθη σειρά διαβάζεται για κάθε NDF περιορισμό:

HDIFNAME LAY1 ROW1 COL1 LAY2 ROW2 COL2 HD NSP

6. Η ακόλουθη σειρά διαβάζεται για κάθε NGD περιορισμό:

GRADNAME LAY1 ROW1 COL1 LAY2 ROW2 COL2 LEN GRADNSP

Επεξήγηση μεταβλητών:

Text - είναι μια μεταβλητή χαρακτήρα (199 χαρακτήρες) που ξεκινά από τη στήλη 2. Οποιοσδήποτε χαρακτήρας μπορεί να συμπεριληφθεί στο text. Ο χαρακτήρας "#" πρέπει να είναι στη στήλη 1. Οι γραμμές που ξεκινούν με "#" περιορίζονται μόνο στις πρώτες γραμμές του αρχείου. Το κείμενο εκτυπώνεται, όταν διαβαστεί το αρχείο. Το σημείο μηδέν μπορεί να επαναληφθεί πολλές φορές.

IPRN – ακέραια μεταβλητή που περιγράφει το είδος της πληροφορίας εισόδου που θα αναγράφεται στο αρχείο των αποτελεσμάτων GLOBAL. Η IPRN μπορεί να είναι ή 0 ή 1. Όταν είναι ίση με το 0, τότε στο αρχείο GLOBAL αναγράφεται μια ελάχιστη ποσότητα πληροφορίας σχετικά με τις μεταβλητές απόφασης. Όταν είναι ίση με το 1, τότε στο αρχείο GLOBAL αναγράφονται αναλυτικές λεπτομέρειες σχετικά με τις μεταβλητές απόφασης.

NHB – είναι μία ακέραια μεταβλητή ίση με τον αριθμό των περιορισμών στο υδραυλικό φορτίο που πρέπει να ικανοποιεί το μοντέλο διαχείρισης.

NDD – είναι μία ακέραια μεταβλητή ίση με τον αριθμό των περιορισμών στην πτώση του υδραυλικού φορτίου που πρέπει να ικανοποιεί το μοντέλο διαχείρισης.

NDF – είναι μία ακέραια μεταβλητή ίση με τον αριθμό των περιορισμών στη διαφορά του υδραυλικού φορτίου μεταξύ δύο διαφορετικών κελιών του μοντέλου που πρέπει να ικανοποιεί το μοντέλο διαχείρισης.

NGD – είναι μία ακέραια μεταβλητή ίση με τον αριθμό των περιορισμών στην κλίση του υδραυλικού φορτίου μεταξύ δύο κελιών του μοντέλου που πρέπει να ικανοποιεί το μοντέλο διαχείρισης.

Περιορισμοί στις ανώτερες και κατώτερες τιμές των υδραυλικών φορτίων (head-bound constraints):

HBNAME – είναι μια μεταβλητή χαρακτήρα (μέγιστο μήκος 10 χαρακτήρων) που αποτελεί ένα μοναδικό όνομα του περιορισμού. Δεν επιτρέπονται κενά στο όνομα. Το τέλος του ονόματος ορίζεται από ένα κενό διάστημα.

LAYH, ROWH, COLH – είναι ακέραιες μεταβλητές ίσες με τον αριθμό του στρώματος (layer), της σειράς (row), και της στήλης (column) του κελιού όπου θα υπάρχει ο περιορισμός.

TYPH – είναι μια μεταβλητή χαρακτήρων που καθορίζει τον τύπο του περιορισμού. Υπάρχουν δύο επιλογές:

LE: το υδραυλικό φορτίο που θα προκύψει πρέπει να είναι μικρότερο ή ίσο της τιμής που έχει η μεταβλητή BND.

GE: το υδραυλικό φορτίο που θα προκύψει πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο της τιμής που έχει η μεταβλητή BND.

BND – είναι μία πραγματική μεταβλητή ίση με το προκαθορισμένο άνω ($h_{i,j,k,t}^u$) ή κάτω ($h_{i,j,k,t}^l$) όριο της τιμής του υδραυλικού φορτίου στο κελί του μοντέλου για το τέλος της περιόδου άντλησης (Εικ. 4.1Α).

NSP – είναι μία ακέραια μεταβλητή που δηλώνει την περίοδο άντλησης για την οποία ισχύει ο περιορισμός. Εάν ο περιορισμός ισχύει για περισσότερες περιόδους, τότε πρέπει να υπάρχει ξεχωριστή καταχώρηση για κάθε μία περίοδο άντλησης.

Περιορισμοί στην πτώση του υδραυλικού φορτίου (drawdown constraints):

DDNAME - είναι μια μεταβλητή χαρακτήρα (μέγιστο μήκος 10 χαρακτήρων) που αποτελεί ένα μοναδικό όνομα του περιορισμού. Δεν επιτρέπονται κενά στο όνομα. Το τέλος του ονόματος ορίζεται από ένα κενό διάστημα.

LAYD, ROWD, COLD – είναι ακέραιες μεταβλητές ίσες με τον αριθμό του στρώματος (layer), της σειράς (row), και της στήλης (column) του κελιού όπου θα υπάρχει ο περιορισμός.

TYPH – είναι μία μεταβλητή χαρακτήρων που καθορίζει τον τύπο του περιορισμού. Υπάρχουν δύο επιλογές:

LE: η πτώση του υδραυλικού φορτίου που θα προκύψει πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση της τιμής που έχει η μεταβλητή BND.

GE: η πτώση του υδραυλικού φορτίου που θα προκύψει πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση της τιμής που έχει η μεταβλητή BND.

BND – είναι μία πραγματική μεταβλητή ίση με το προκαθορισμένο άνω ($dd_{i,j,k,t}^u$) ή κάτω ($dd_{i,j,k,t}^l$) όριο της τιμής πτώσης του υδραυλικού φορτίου στο κελί του μοντέλου για το τέλος της περιόδου άντλησης (Εικ. 4.1B).

NSP – είναι μία ακέραια μεταβλητή που δηλώνει την περίοδο άντλησης για την οποία ισχύει ο περιορισμός. Εάν ο περιορισμός ισχύει για περισσότερες περιόδους, τότε πρέπει να υπάρχει ξεχωριστή καταχώρηση για κάθε μία περίοδο άντλησης.

Περιορισμοί στη διαφορά του υδραυλικού φορτίου μεταξύ δύο διαφορετικών κελιών του μοντέλου (head-difference constraints):

HDIFNAME - είναι μια μεταβλητή χαρακτήρα (μέγιστο μήκος 10 χαρακτήρων) που αποτελεί ένα μοναδικό όνομα του περιορισμού. Δεν επιτρέπονται κενά στο όνομα. Το τέλος του ονόματος ορίζεται από ένα κενό διάστημα.

LAY1, ROW1, COL1 – είναι ακέραιες μεταβλητές ίσες με τον αριθμό του στρώματος (layer), της σειράς (row), και της στήλης (column) του κελιού της αντίστοιχης πρώτης θέσης, $(i, j, k)_1$ όπου θα υπάρχει ο περιορισμός στη διαφορά του υδραυλικού φορτίου (Εικ. 4.1C).

LAY2, ROW2, COL2 – είναι ακέραιες μεταβλητές ίσες με τον αριθμό του στρώματος (layer), της σειράς (row), και της στήλης (column) του κελιού της αντίστοιχης δεύτερης θέσης, $(i, j, k)_2$ όπου θα υπάρχει ο περιορισμός στη διαφορά του υδραυλικού φορτίου (Εικ. 4.1C). Το GWM απαιτεί το υδραυλικό φορτίο στη δεύτερη θέση να είναι μικρότερο από αυτό της πρώτης κατά μία ελάχιστη ποσότητα HD.

HD – είναι μία πραγματική μεταβλητή ίση με την προκαθορισμένη διαφορά των υδραυλικών φορτίων, $(hdif_{i,j,k,t})_{1,2}$, ανάμεσα στο πρώτο και στο δεύτερο κελί του μοντέλου κατά το τέλος της περιόδου άντλησης (Εικ. 4.1C).

NSP – είναι μία ακέραια μεταβλητή που δηλώνει την περίοδο άντλησης για την οποία ισχύει ο περιορισμός. Εάν ο περιορισμός ισχύει για περισσότερες περιόδους, τότε πρέπει να υπάρχει ξεχωριστή καταχώρηση για κάθε μία περίοδο άντλησης.

Περιορισμοί στην κλίση του υδραυλικού φορτίου μεταξύ δύο κελιών του μοντέλου (gradient constraints).

GRADNAME - είναι μια μεταβλητή χαρακτήρα (μέγιστο μήκος 10 χαρακτήρων) που αποτελεί ένα μοναδικό όνομα του περιορισμού. Δεν επιτρέπονται κενά στο όνομα. Το τέλος του ονόματος ορίζεται από ένα κενό διάστημα.

LAY1, ROW1, COL1 – είναι ακέραιες μεταβλητές ίσες με τον αριθμό του στρώματος (layer), της σειράς (row), και της στήλης (column) του κελιού της αντίστοιχης πρώτης θέσης, $(i, j, k)_1$ όπου θα υπάρχει ο περιορισμός στην κλίση του υδραυλικού φορτίου (Εικ. 4.1D).

LAY2, ROW2, COL2 – είναι ακέραιες μεταβλητές ίσες με τον αριθμό του στρώματος (layer), της σειράς (row), και της στήλης (column) του κελιού της αντίστοιχης δεύτερης θέσης, $(i, j, k)_2$ όπου θα υπάρχει ο περιορισμός στην κλίση του υδραυλικού φορτίου (Εικ. 4.1D). Το GWM απαιτεί το υδραυλικό φορτίο στη δεύτερη θέση να είναι μικρότερο από αυτό της πρώτης.

LEN – είναι μία πραγματική μεταβλητή ίση με την απόσταση ανάμεσα στα δύο κελιά (Δx , βλέπε 4.1D).

GRAD – είναι μία πραγματική μεταβλητή ίση με την προκαθορισμένη κλίση, $(grad_{i,j,k,t})_{1,2}$, ανάμεσα στο πρώτο και στο δεύτερο κελί του μοντέλου κατά το τέλος της περιόδου άντλησης (Εικ. 4.1D).

NSP – είναι μία ακέραια μεταβλητή που δηλώνει την περίοδο άντλησης για την οποία ισχύει ο περιορισμός. Εάν ο περιορισμός ισχύει για περισσότερες περιόδους, τότε πρέπει να υπάρχει ξεχωριστή καταχώρηση για κάθε μία περίοδο άντλησης.

4.4.2.6 Αρχείο λύσεων και παραμέτρων που ελέγχουν τα αποτελέσματα (SOLN)

Το αρχείο SOLN καθορίζει πολλές μεταβλητές που ελέγχουν τον αλγόριθμο λύσης του προβλήματος βελτιστοποίησης και τον τύπο και την ποσότητα των αποτελεσμάτων που καταγράφονται στα αρχεία αποτελεσμάτων (output files).

Στοιχεία εισόδου:

0. #Text

1. SOLNTYP

Αν η SOLNTYP είναι NS τότε:

2a. DELTA

2b. NSIGDIG NPGNMX PGFACT

2c. RMNAME

Πήγαινε στην καταχώρηση 6a.

Αν η SOLNTYP είναι MPS τότε:

3a. DELTA

3b. NSIGDIG NPGNMX PGFACT

3c. MPSNAME

Πήγαινε στην καταχώρηση 6a.

Αν η SOLNTYP είναι LP τότε:

4a. IRM

4b. LPITMAX BBITMAX

4c. DELTA

4d. NSIGDIG NPGNMX PGFACT

4e. BBITPRT RANGE

Διαβάζεται η ακόλουθη καταχώρηση αν η IRM ισούται με 0 ή 1:

4f. RMNAME

Πήγαινε στην καταχώρηση 6a.

Αν η SOLNTYP είναι SLP τότε:

5a. SLPITMAX LPITMAX BBITMAX

5b. SLPVCRIT	SLPZCRIT	DINIT	DMIN	DSC
5c. NSIGDIG	NPGNMX	PGFACT	AFACT	NINFMX
5d. SLPITPRT	BBITPRT	RANGE		

6a. IBASE

Αν η IBASE ισούται με 1, διαβάζεται η ακόλουθη καταχώρηση για κάθε NFVAR μεταβλητή απόφασης:

6b. FVNAME FVBASE

Επεξήγηση μεταβλητών:

Text - είναι μια μεταβλητή χαρακτήρα (199 χαρακτήρες) που ξεκινά από τη στήλη 2. Οποιοσδήποτε χαρακτήρας μπορεί να συμπεριληφθεί στο text. Ο χαρακτήρας "#" πρέπει να είναι στη στήλη 1. Οι γραμμές που ξεκινούν με "#" περιορίζονται μόνο στις πρώτες γραμμές του αρχείου. Το κείμενο εκτυπώνεται, όταν διαβαστεί το αρχείο. Το σημείο μηδέν μπορεί να επαναληφθεί πολλές φορές.

SOLNTYP – είναι μία μεταβλητή χαρακτήρων. Η SOLNTYP μπορεί να είναι μία από τις μεταβλητές NS, MPS, LP, ή SLP:

NS: δεν θα βρεθεί λύση στο πρόβλημα διαχείρισης. Το GWM θα υπολογίσει το μητρώο απόκρισης και στη συνέχεια θα το καταγράψει στο αρχείο με το όνομα RMNAME στη γραμμή 2c. Έπειτα το GWM θα τερματιστεί.

MPS: δεν θα βρεθεί λύση στο πρόβλημα διαχείρισης. Το GWM θα καταγράψει τη διατύπωση του προβλήματος διαχείρισης σε μορφή MPS (Mathematical Programming System) στο αρχείο με το όνομα MPSNAME στη γραμμή 3c. Έπειτα το GWM θα τερματιστεί.

LP (με ή χωρίς δυαδικές μεταβλητές): Το πρόβλημα βελτιστοποίησης θα επιλυθεί με τη χρήση του γραμμικού προγραμματισμού, ή, για προβλήματα με δυαδικές μεταβλητές, με χρήση του γραμμικού προγραμματισμού και της μεθόδου branch and bound. Η μεταβλητή LP κανονικά χρησιμοποιείται όταν το μοντέλο ροής περιέχει μόνο γραμμικά χαρακτηριστικά (βλέπε κεφάλαιο «Επίλυση προβλημάτων διαχείρισης υπόγειων υδάτων με το GWM»). Διαφορετικά, αν ο χρήστης κάνει χρήση της μεταβλητής LP ενώ υπάρχουν και μη γραμμικά στοιχεία στο πρόβλημα, τότε αυτό αναγκαστικά θα επιλυθεί σαν να ήταν γραμμικό. Σε αυτή την περίπτωση, η λύση του προβλήματος θα προκύψει από ένα και μοναδικό μητρώο απόκρισης. Αυτή η επιλογή πρέπει να χρησιμοποιείται προσεχτικά γιατί μπορεί να οδηγήσει σε ανακριβή αποτελέσματα αν υπάρχουν σημαντικές μη γραμμικές αποκρίσεις.

SLP (με ή χωρίς δυαδικές μεταβλητές): Το πρόβλημα βελτιστοποίησης θα επιλυθεί με τη χρήση διαδοχικού (επαναληπτικού) γραμμικού προγραμματισμού, ή, για προβλήματα με δυαδικές μεταβλητές, με χρήση του διαδοχικού γραμμικού προγραμματισμού και της μεθόδου branch and bound.

Αν η SOLNTYP είναι NS:

DELTA – είναι μια πραγματική μεταβλητή ίση με την παράμετρο διαταραχής δ^0 (Εξ. 4.33) η οποία καθορίζει το μητρώο απόκρισης. Η τιμή της DELTA πολλαπλασιάζεται

με την τιμή FVMAX της κάθε μεταβλητής απόφασης παροχής ώστε να προκύψουν οι αντίστοιχες τιμές διαταραχής. Μία θετική τιμή της DELTA σημαίνει ότι έχουμε υπολογισμό των συντελεστών συσχέτισης με τη μέθοδο των εμπρός διαφορών (αυτό σημαίνει άξηση της παροχής), ενώ μια αρνητική σημαίνει χρήση της μεθόδου των πίσω διαφορών (αυτό σημαίνει μείωση της παροχής).

NSIGDIG – είναι μια ακέραια μεταβλητή ίση με τον ελάχιστο αριθμό των δεκαδικών ψηφίων που θα έχει κάθε τιμή στο μητρώο απόκρισης. Για κάθε τιμή που βρίσκεται σε στήλη του μητρώου, υπολογίζεται ο λόγος της διαφοράς στην παρατηρούμενη κατάσταση προς την μεταβλητή HCLOSE. Αν ο μεγαλύτερος λόγος που θα προκύψει στη στήλη είναι μικρότερος από τα NSIGDIG δεκαδικά ψηφία, τότε η διαδικασία θεωρείται ότι απέτυχε.

NPGNMX – είναι μια ακέραια μεταβλητή ίση με το μέγιστο αριθμό των προσπαθειών που θα γίνουν ώστε να έχουμε μία πετυχημένη εκτέλεση της διαδικασίας ροής. Αποτυχημένη προσπάθεια μπορούμε να έχουμε κατά της διάρκεια εύρεσης είτε των αρχικών τιμών της ροής είτε των τιμών διαταραχής. Όταν ανιχνεύεται το σφάλμα εκτέλεσης, τότε η αυτόματη επαναφορά των παροχών των μεταβλητών απόφασης μπορεί να επιτύχει λύση. Η NPGNMX ελέγχει τον μέγιστο αριθμό προσπαθειών για την προσαρμογή των διαταραχών (που ελέγχονται από την PGFACT) ή την προσαρμογή των αρχικών τιμών (που ελέγχονται από την AFACT).

PGFACT – είναι μία πραγματική μεταβλητή ίση με τον σταθερού μήκους βήματος συντελεστή προσαρμογής που χρησιμοποιείται κατά την αποτυχία της διαταραχής. Η PGFACT πρέπει να είναι μεταξύ των τιμών 0 και 1. Προτείνεται η χρήση της τιμής 0.5.

RMNAME – είναι το όνομα του αρχείου (ή διαδρομή αρχείου) στο οποίο θα γράφεται το μητρώο απόκρισης.

Αν η SOLNTYP είναι MPS:

DELTA – είναι μια πραγματική μεταβλητή ίση με την παράμετρο διαταραχής δ^0 (Εξ. 4.33) η οποία καθορίζει το μητρώο απόκρισης. Η τιμή της DELTA πολλαπλασιάζεται με την τιμή FVMAX της κάθε μεταβλητής απόφασης παροχής ώστε να προκύψουν οι αντίστοιχες τιμές διαταραχής. Μία θετική τιμή της DELTA σημαίνει ότι έχουμε υπολογισμό των συντελεστών συσχέτισης με τη μέθοδο των εμπρός διαφορών (αυτό σημαίνει άξηση της παροχής), ενώ μια αρνητική σημαίνει χρήση της μεθόδου των πίσω διαφορών (αυτό σημαίνει μείωση της παροχής).

NSIGDIG – είναι μια ακέραια μεταβλητή ίση με τον ελάχιστο αριθμό των δεκαδικών ψηφίων που θα έχει κάθε τιμή στο μητρώο απόκρισης. Για κάθε τιμή που βρίσκεται σε στήλη του μητρώου, υπολογίζεται ο λόγος της διαφοράς για την παρατηρούμενη κατάσταση προς την μεταβλητή HCLOSE. Αν ο μεγαλύτερος λόγος που θα προκύψει στη στήλη είναι μικρότερος από τα NSIGDIG δεκαδικά ψηφία, τότε η διαδικασία θεωρείται ότι απέτυχε.

NPGNMX – είναι μια ακέραια μεταβλητή ίση με το μέγιστο αριθμό των προσπαθειών που θα γίνουν ώστε να έχουμε μία επιτυχημένη εκτέλεση της

διαδικασίας ροής. Αποτυχημένη προσπάθεια μπορούμε να έχουμε κατά της διάρκειας εύρεσης είτε των αρχικών τιμών της ροής είτε των τιμών διαταραχής. Όταν ανιχνεύεται το σφάλμα εκτέλεσης, τότε η αυτόματη επαναφορά των παροχών των μεταβλητών απόφασης μπορεί να επιτύχει λύση. Η NPGNMX ελέγχει τον μέγιστο αριθμό προσπαθειών για την προσαρμογή των διαταραχών (που ελέγχονται από την PGFACT) ή την προσαρμογή των αρχικών τιμών (που ελέγχονται από την AFACT).

PGFACT – είναι μία πραγματική μεταβλητή ίση με τον σταθερού μήκους βήματος συντελεστή προσαρμογής που χρησιμοποιείται κατά την αποτυχία της διαταραχής. Η PGFACT πρέπει να είναι μεταξύ των τιμών 0 και 1. Προτείνεται η χρήση της τιμής 0.5.

MPSNAME - είναι το όνομα του αρχείου (ή διαδρομή αρχείου) στο οποίο θα γράφεται η διατύπωση του προβλήματος σε μορφή MPS.

Αν η SOLNTYP είναι LP:

IRM – είναι μία ακέραια μεταβλητή που μπορεί να πάρει τις τιμές 0, 1, ή 2. Οι τιμές αυτές καθορίζουν το αν θα υπολογιστεί το μητρώο απόκρισης ή αν θα διαβαστεί από ένα αρχείο εισόδου και το αν θα αποθηκευτεί. Η τιμή 0 σημαίνει ότι το μητρώο απόκρισης έχει προκύψει από προηγούμενη εκτέλεση του προγράμματος και θα διαβαστεί από το αρχείο με το όνομα RMNAME στη γραμμή 4f. Αν το μητρώο έχει υπολογιστεί ήδη τότε αυτή η επιλογή μειώνει κατά πολύ το χρόνο που απαιτείται για την επίλυση του GWM. Η τιμή 1 δηλώνει ότι το μητρώο θα υπολογιστεί από το GWM και θα γραφτεί στο αρχείο με το όνομα RNAME στη στήλη 4f. Η τιμή 2 δηλώνει ότι το μητρώο απόκρισης θα υπολογιστεί από το GWM και δε θα γραφτεί σε αρχείο.

LPITMAX – είναι μία ακέραια μεταβλητή. Η τιμή της δείχνει το μέγιστο αριθμό επαναλήψεων που επιτρέπεται να πραγματοποιήσει ο επιλυτής του γραμμικού προγράμματος. Αυτό το μέγιστο όριο αποτρέπει τον επιλυτή από το να κάνει επαναλήψεις επ' αόριστον σε περίπτωση που δεν μπορεί να συγκλίνει σε μία λύση. Εάν χρησιμοποιείται γραμμικός επιλυτής και επιτευχθεί η τιμή LPITMAX, τότε το πρόγραμμα τερματίζει, και το αρχείο αποτελεσμάτων (output file) θα δείξει ότι ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων έχει ξεπεραστεί. Μία τυπική τιμή για την LPITMAX είναι δέκα φορές των αριθμός των περιορισμών.

BBITMAX – είναι μια ακέραια μεταβλητή. Η BBITMAX έχει νόημα μόνο εάν το πρόβλημα διαχείρισης περιέχει μία ή περισσότερες δυαδικές μεταβλητές, αλλιώς, η τιμή της αγνοείται. Η BBITMAX είναι ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων που επιτρέπεται να πραγματοποιήσει ο επιλυτής της μεθόδου branch and bound. Κάθε επανάληψη αποτελείται από μία λύση του γραμμικού προγράμματος. Αν επιτευχθεί η τιμή της BBITMAX, τότε το πρόγραμμα τερματίζεται, και το αρχείο αποτελεσμάτων (output file) θα δείξει ότι ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων έχει ξεπεραστεί.

DELTA – είναι μια πραγματική μεταβλητή ίση με την παράμετρο διαταραχής δ^0 (Εξ. 4.33) η οποία καθορίζει το μητρώο απόκρισης. Η τιμή της DELTA πολλαπλασιάζεται με την τιμή της FVMAX της κάθε μεταβλητής απόφασης που αφορά παροχή ώστε να

προκύψουν οι αντίστοιχες τιμές διαταραχής. Μία θετική τιμή της DELTA σημαίνει ότι έχουμε υπολογισμό των συντελεστών συσχέτισης με τη μέθοδο των εμπρός διαφορών (αυτό σημαίνει αύξηση της παροχής), ενώ μια αρνητική σημαίνει χρήση της μεθόδου των πίσω διαφορών (αυτό σημαίνει μείωση της παροχής).

NSIGDIG – είναι μια ακέραια μεταβλητή ίση με τον ελάχιστο αριθμό των δεκαδικών ψηφίων που θα έχει κάθε τιμή στο μητρώο απόκρισης. Για κάθε τιμή που βρίσκεται σε στήλη του μητρώου, υπολογίζεται ο λόγος της διαφοράς για την παρατηρούμενη κατάσταση προς την μεταβλητή HCLOSE. Αν ο μεγαλύτερος λόγος που θα προκύψει στη στήλη είναι μικρότερος από τα NSIGDIG δεκαδικά ψηφία, τότε η διαδικασία θεωρείται ότι απέτυχε.

NPGNMX – είναι μια ακέραια μεταβλητή ίση με το μέγιστο αριθμό των προσπαθειών που θα γίνουν ώστε να έχουμε μία επιτυχημένη εκτέλεση της διαδικασίας ροής. Αποτυχημένη προσπάθεια μπορούμε να έχουμε κατά της διάρκεια εύρεσης είτε των αρχικών τιμών της ροής είτε των τιμών διαταραχής. Όταν ανιχνεύεται το σφάλμα εκτέλεσης, τότε η αυτόματη επαναφορά των παροχών των μεταβλητών απόφασης μπορεί να επιτύχει λύση. Η NPGNMX ελέγχει τον μέγιστο αριθμό προσπαθειών για την προσαρμογή των διαταραχών (που ελέγχονται από την PGFACT) ή την προσαρμογή των αρχικών τιμών (που ελέγχονται από την AFACT).

PGFACT – είναι μία πραγματική μεταβλητή ίση με τον σταθερού μήκους βήματος συντελεστή προσαρμογής που χρησιμοποιείται κατά την αποτυχία της διαταραχής. Η PGFACT πρέπει να είναι μεταξύ των τιμών 0 και 1. Προτείνεται η χρήση της τιμής 0.5.

BBITPRT – είναι μία ακέραια μεταβλητή που ορίζει το αν τα αποτελέσματα που περιγράφουν τις λεπτομέρειες του αλγόριθμου branch and bound που επίλυει προβλήματα δυαδικών μεταβλητών θα γραφτούν στο αρχείο GLOBAL. Η τιμή 1 δηλώνει πως θα δημιουργηθούν ενώ η τιμή 0 πως όχι. Για προβλήματα με πολλές δυαδικές μεταβλητές, το αρχείο αυτό μπορεί να είναι πολύ μεγάλο. Αν το πρόβλημα διαχείρισης δεν εμπεριέχει δυαδικές μεταβλητές, η τιμή αυτή αγνοείται.

RANGE – είναι μία πραγματική μεταβλητή που δείχνει την κατάσταση της ανάλυσης εύρους (range analysis). Η τιμή 1 δηλώνει ότι θα γίνει αυτή η ανάλυση και τα αποτελέσματα της θα γραφτούν στο αρχείο GLOBAL. Η τιμή 0 δείχνει ότι δεν θα γίνει καμία ανάλυση. Η ανάλυση εύρους βασίζεται στην υπόθεση ότι το πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι αυστηρώς γραμμικό με συνεχείς μεταβλητές. Αν υπάρχουν δυαδικές μεταβλητές ή μη γραμμικές αποκρίσεις, τότε η ανάλυση εύρους μπορεί να είναι ανακριβής.

RMNAME – είναι το όνομα αρχείου (ή διαδρομή αρχείου) από το οποίο θα διαβάζεται το μητρώο απόκρισης αν η IRM είναι 0 και το όνομα αρχείου (ή διαδρομή αρχείου) στο οποίο θα γράφεται το μητρώο απόκρισης αν η IRM είναι 1.

Αν η SOLNTYP είναι SLP:

SLPITMAX - είναι μια ακέραια μεταβλητή. Η τιμή της ισούται με τον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων που μπορεί να πραγματοποιήσει ο αλγόριθμος του διαδοχικού

γραμμικού προγραμματισμού (sequential linear-programming algorithm). Αν επιτευχθεί αυτή η τιμή, τότε το πρόγραμμα τερματίζεται, και το αρχείο αποτελεσμάτων (output file) θα δείξει ότι ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων έχει ξεπεραστεί.

LPITMAX – είναι μία ακέραια μεταβλητή. Η τιμή της δείχνει το μέγιστο αριθμό επαναλήψεων που επιτρέπεται να πραγματοποιήσει ο επιλυτής του γραμμικού προγράμματος. Αυτό το μέγιστο όριο αποτρέπει τον επιλυτή από το να κάνει επαναλήψεις επ' αόριστον σε περίπτωση που δεν μπορεί να συγκλίνει σε μία λύση. Εάν χρησιμοποιείται γραμμικός επιλυτής και επιτευχθεί η τιμή LPITMAX, τότε το πρόγραμμα τερματίζει, και το αρχείο αποτελεσμάτων (output file) θα δείξει ότι ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων έχει ξεπεραστεί. Μία τυπική τιμή για την LPITMAX είναι δέκα φορές των αριθμός των περιορισμών.

BBITMAX – είναι μια ακέραια μεταβλητή. Η BBITMAX έχει νόημα μόνο εάν το πρόβλημα διαχείρισης περιέχει μία ή περισσότερες δυαδικές μεταβλητές, αλλιώς, η τιμή της αγνοείται. Η BBITMAX είναι ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων που επιτρέπεται να πραγματοποιήσει ο επιλυτής της μεθόδου branch and bound. Κάθε επανάληψη αποτελείται από μία λύση του γραμμικού προγράμματος. Αν επιτευχθεί η τιμή της BBITMAX, τότε το πρόγραμμα τερματίζεται, και το αρχείο αποτελεσμάτων (output file) θα δείξει ότι ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων έχει ξεπεραστεί.

SLPVCRT – είναι μία πραγματική μεταβλητή. Η τιμή της είναι το κριτήριο σύγκλισης ϵ_1 , που είναι ο πρώτος από τους δύο κανόνες τερματισμού όταν γίνεται χρήση του αλγόριθμου διαδοχικού γραμμικού προγραμματισμού. Ο κανόνας αυτός ικανοποιείται όταν οι μεταβολές στις τιμές όλων των μεταβλητών απόφασης παροχών σε σχέση με την προηγούμενη επανάληψη είναι μικρότερη από ένα ποσοστό, ϵ_1 , του μεγέθους των μεταβλητών απόφασης παροχής στην τρέχουσα επανάληψη.

SLPZCRT - είναι μία πραγματική μεταβλητή. Η τιμή της είναι το κριτήριο σύγκλισης ϵ_2 , που είναι ο δεύτερος από τους δύο κανόνες τερματισμού όταν γίνεται χρήση του αλγόριθμου διαδοχικού γραμμικού προγραμματισμού. Ο κανόνας αυτός ικανοποιείται όταν η μεταβολή στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, Z , είναι μικρότερη από ένα ορισμένο ποσοστό, ϵ_2 , της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης.

DINIT, DMIN, DSC – είναι πραγματικές μεταβλητές που ελέγχουν την τιμή της μεταβλητής διαταραχής που χρησιμοποιείται για να υπολογίσει τους συντελεστές απόκρισης. Η DINIT είναι η μεταβλητή διαταραχής που χρησιμοποιείται για την πρώτη επανάληψη, η DMIN είναι η μικρότερη μεταβλητή διαταραχής, και η DSC είναι η παράμετρος που ελέγχει το ρυθμό μεταβολής της παραμέτρου διαταραχής. Οι DINIT και DMIN πρέπει να έχουν το ίδιο πρόσημο. Οι θετικές τιμές των DINIT και DMIN δηλώνουν ότι ο υπολογισμός των συντελεστών απόκρισης γίνεται με τη μέθοδο των εμπρός διαφορών (που σημαίνει αύξηση στην παροχή), ενώ οι αρνητικές με τη μέθοδο των πίσω διαφορών (που σημαίνει μείωση στην παροχή). Η DSC πρέπει να είναι πάντα θετική.

NSIGDIG – είναι μια ακέραια μεταβλητή ίση με τον ελάχιστο αριθμό των δεκαδικών ψηφίων που θα έχει κάθε τιμή στο μητρώο απόκρισης. Για κάθε τιμή που βρίσκεται σε στήλη του μητρώου, υπολογίζεται ο λόγος της διαφοράς για την παρατηρούμενη κατάσταση προς την μεταβλητή HCLOSE. Αν ο μεγαλύτερος λόγος που θα προκύψει στη στήλη είναι μικρότερος από τα NSIGDIG δεκαδικά ψηφία, τότε η διαδικασία θεωρείται ότι απέτυχε.

NPGNMX – είναι μια ακέραια μεταβλητή ίση με το μέγιστο αριθμό των προσπαθειών που θα γίνουν ώστε να έχουμε μία πετυχημένη εκτέλεση της διαδικασίας ροής. Αποτυχημένη προσπάθεια μπορούμε να έχουμε κατά της διάρκεια εύρεσης είτε των αρχικών τιμών της ροής είτε των τιμών διαταραχής. Όταν ανιχνεύεται το σφάλμα εκτέλεσης, τότε η αυτόματη επαναφορά των παροχών των μεταβλητών απόφασης μπορεί να επιτύχει λύση. Η NPGNMX ελέγχει τον μέγιστο αριθμό προσπαθειών για την προσαρμογή των διαταραχών (που ελέγχονται από την PGFACT) ή την προσαρμογή των αρχικών τιμών (που ελέγχονται από την AFACT).

PGFACT – είναι μία πραγματική μεταβλητή ίση με τον σταθερού μήκους βήματος συντελεστή προσαρμογής που χρησιμοποιείται κατά την αποτυχία της διαταραχής. Η PGFACT πρέπει να είναι μεταξύ των τιμών 0 και 1. Προτείνεται η χρήση της τιμής 0.5.

AFACT – είναι μία πλασματική μεταβλητή ίση με την παράμετρο χαλάρωσης (relaxation parameter) που χρησιμοποιείται για να καθορίσει μία προσωρινή αρχική λύση όταν αποτύχει η αρχική εκτέλεση του προγράμματος. Η AFACT ελέγχει την παρεμβολή μεταξύ της τρέχουσας αρχικής λύσης και της πιο πρόσφατης επιτυχημένης αρχικής λύσης. Η τιμή της πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1. Μία τιμή κοντά στο 0 σημαίνει ότι η προσωρινή αρχική λύση είναι κοντά στην πρόσφατη, ενώ μία τιμή κοντά στο 1 ότι είναι κοντά στην προηγούμενη. Προτείνεται η χρήση της τιμής 0.5.

NINFMX – είναι μια ακέραια μεταβλητή που ορίζει τον μέγιστο αριθμό των διαδοχικών ανέφικτων επαναλήψεων που θα είναι αποδεκτές από τον αλγόριθμο SLP πριν αυτός τερματίσει.

SLPITPRT - είναι μια ακέραια μεταβλητή που ορίζει το αν τα αποτελέσματα που περιγράφουν τις λεπτομέρειες του αλγόριθμου διαδοχικών επαναλήψεων θα γραφτούν στο αρχείο GLOBAL. Η τιμή 1 δηλώνει πως θα δημιουργηθούν αυτά τα αποτελέσματα, ενώ η τιμή 0 πως όχι.

BBITPRT – είναι μία ακέραια μεταβλητή που ορίζει το αν τα αποτελέσματα που περιγράφουν τις λεπτομέρειες του αλγόριθμου branch and bound που επίλυει προβλήματα δυαδικών μεταβλητών θα γραφτούν στο αρχείο GLOBAL. Η τιμή 1 δηλώνει πως θα δημιουργηθούν αυτά τα αποτελέσματα, ενώ η τιμή 0 πως όχι. Για προβλήματα με πολλές δυαδικές μεταβλητές, το αρχείο αυτό μπορεί να είναι πολύ μεγάλο. Αν το πρόβλημα διαχείρισης δεν εμπεριέχει δυαδικές μεταβλητές, η τιμή αυτή αγνοείται.

RANGE – είναι μία πραγματική μεταβλητή που δείχνει την κατάσταση της ανάλυσης εύρους (range analysis). Η τιμή 1 δηλώνει ότι θα γίνει αυτή η ανάλυση και τα αποτελέσματα της θα γραφτούν στο αρχείο GLOBAL. Η τιμή 0 δείχνει ότι δεν θα γίνει καμία ανάλυση. Η ανάλυση εύρους βασίζεται στην υπόθεση ότι το πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι αυστηρώς γραμμικό με συνεχείς μεταβλητές. Αν υπάρχουν δυαδικές μεταβλητές ή μη γραμμικές αποκρίσεις, τότε η ανάλυση εύρους μπορεί να είναι ανακριβής.

IBASE – είναι μία ακέραια μεταβλητή ίση με 0 ή 1 που δείχνει την προέλευση των τιμών των μεταβλητών απόφασης παροχής που θα χρησιμοποιηθούν σαν το βασικό τρέξιμο (base run). Για τα προβλήματα που επιλύονται με τον αλγόριθμο SLP, οι τιμές αυτές είναι το σημείο εκκίνησης για τον επαναληπτικό αλγόριθμο. Μία τιμή IBASE ίση με το 0 υποδηλώνει ότι οι παροχές αναφοράς (FVREF) που ορίζονται για κάθε μεταβλητή απόφασης παροχής στο αρχείο VARCON θα χρησιμοποιηθούν στο βασικό τρέξιμο (και η καταχώρηση δb δεν είναι απαραίτητη). Μία τιμή IBASE ίση με το 1 δείχνει ότι οι παροχές που προσδιορίζονται για κάθε μεταβλητή απόφασης από το FVBASE στην γραμμή δb θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του τρεξίματος βάσης.

FVNAME – είναι μια μεταβλητή χαρακτήρων (μέγιστο μήκος 10 χαρακτήρες) και αποτελεί ένα από τα ονόματα των μεταβλητών απόφασης παροχής. Καθεμιά από αυτές τις μεταβλητές FVNAME πρέπει να έχουν καθοριστεί και στο αρχείο **DECVAR**. Το όνομα μιας μεταβλητής απόφασης παροχής επιτρέπεται να υπάρχει μόνο μία φορά στο αρχείο **SOLN**.

FVBASE - είναι μια πραγματική μεταβλητή ίση με ένα ποσοστό της μεταβλητής απόφασης παροχής. Αυτές οι τιμές χρησιμοποιούνται από GWM για τον υπολογισμό του βασικού τρεξίματος. Αν χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος επίλυσης SLP, οι τιμές αυτές είναι το σημείο εκκίνησης για τον επαναληπτικό αλγόριθμο.

4.4.3 Αρχεία εξόδου

Πάντα δύο αρχεία εξόδου παράγονται μετά την εκτέλεση του GWM: ένα αρχείο GLOBAL και ένα αρχείο LIST. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει να παραχθούν άλλα δύο επιπλέον αρχεία (βλέπε τις οδηγίες για τις μεταβλητές RMNAME και MPSNAME για το αρχείο SOLN), ένα που θα περιέχει τα μητρώα απόκρισης και ένα που θα έχει τις διατυπώσεις των προβλημάτων σε μορφή MPS. Τα αρχεία GLOBAL και LIST χρησιμοποιούνται με ένα τρόπο που να είναι παρόμοιος με τη χρήση τους και από εφαρμογές του MODFLOW οι οποίες περιλαμβάνουν την εκτίμηση παραμέτρων και την ανάλυση ευαισθησίας (Harbaugh and others, 2000). Τα περισσότερα από τα αποτελέσματα ενός συγκεκριμένου τρεξίματος του GWF βρίσκονται στο αρχείο LIST. Τα δεδομένα εισόδου που περιλαμβάνει το αρχείο LIST είναι η σειρά κατανομής των πληροφοριών, οι υδραυλικές ιδιότητες των προσομοιούμενων υδροφορέων, και οι αρχικές και οριακές συνθήκες. Τα αποτελέσματα από την διαδικασία GWF περιλαμβάνουν τα υπολογισμένα υδραυλικά φορτία, τις πτώσεις στάθμης, και όρους ογκομετρικού προϋπολογισμού. Κάθε φορά που απαιτείται ένα νέο τρέξιμο του προγράμματος για την υπόγεια ροή το αρχείο LIST διαγράφεται και δημιουργείται εκ νέου.

Το αρχείο GLOBAL περιέχει πληροφορίες που αφορούν το σύνολο ενός τρεξίματος του GWM. Οι πρώτες πληροφορίες που καταγράφεται περιέχουν τα όνοματα και τους τύπους των αρχείων του MODFLOW που ανοίγει το αρχείο NAME, τις πληροφορίες για την χωρική και χρονική διακριτοποίηση του μοντέλου που διαβάζονται από το αρχείο διακριτοποίησης (DIS) του MODFLOW, και τα δεδομένα εισόδου του επιλεγμένου πακέτου επίλυσης του MODFLOW. Το υπόλοιπο αρχείο GLOBAL αποτελείται από δεδομένα εισόδου, πληροφορίες και αποτελέσματα από την εκτέλεση του GWM. Το πρώτο μέρος της ενότητας που αφορά το GWM αποτελείται από δεδομένα τα οποία επαναλαμβάνονται από τα αρχεία εισόδου. Η ποσότητα των δεδομένων εισόδου που τυπώνεται εξαρτάται από την τιμή της IRPN που έχει καθορίσει ο χρήστης στα αρχεία εισόδου του GWM. Επίσης τυπώνονται πληροφορίες σχετικά με το μέγεθος του προβλήματος διαχείρισης, που αποτελείται από τον αριθμό των μεταβλητών απόφασης και των περιορισμών.

Το επόμενο μέρος της ενότητας GWM («Αλγόριθμος επίλυσης») παρέχει πληροφορίες για τη διαδικασία επίλυσης του προβλήματος διαχείρισης. Πρώτον, αναφέρονται τα αποτελέσματα της διαδικασίας GWF για τη βασική εκτέλεση του προβλήματος, συμπεριλαμβάνοντας και την κατάσταση του κάθε περιορισμού. Η κατάσταση του κάθε περιορισμού αναφέρεται ως "satisfied" (ικανοποιείται) "not met" (δεν ικανοποιείται) "near-binding" (σχεδόν δεσμευτικός). Το GWM θεωρεί έναν περιορισμό near-binding αν η αριστερή και η δεξιά πλευρές του περιορισμού συμφωνούν κατά πέντε τουλάχιστον ψηφία. Στη συνέχεια παρέχονται πληροφορίες για την προσομοίωση της ροής που είναι απαραίτητες για να παραχθεί το μητρώο απόκρισης, συμπεριλαμβάνοντας τις τιμές διαταραχής που χρησιμοποιούνται σε κάθε υποψήφιο πηγάδι και πληροφορίες για τον αριθμό των δεκαδικών ψηφίων στο μητρώο απόκρισης. Αν το πρόβλημα δεν είναι γραμμικό ή περιλαμβάνονται σε αυτό δυαδικές μεταβλητές (ή αν κάποια από τις μεταβλητές SLPITPRT ή BBITPRT έχει οριστεί ίση με 1), τότε σε αυτό το σημείο θα έχουμε επιπλέον λεπτομερείς πληροφορίες για τη πρόοδο των επαναλήψεων που είναι απαραίτητες για την επίλυση του προβλήματος. Αν το πρόβλημα περιέχει δυαδικές μεταβλητές, τότε στα αποτελέσματα θα έχουμε τη λύση του προβλήματος διαχείρισης που έχει υπολογιστεί για κάθε επανάληψη (υποπρόβλημα) του αλγόριθμου branch and bound. Οι λύσεις χαρακτηρίζονται ως "relaxed" (χαλαρή) "current best solution" (τρέχουσα καλύτερη λύση) "feasible" (εφικτή) "infeasible" (ανέφικτη). Για κάθε λύση, αναφέρονται το όνομα της μεταβλητής απόφασης (είτε παροχής, είτε εξωτερικής) και η τιμή της για την τρέχουσα λύση, όπως και η κατάσταση της κάθε δυαδικής μεταβλητής.

Το τελευταίο μέρος της ενότητας GWM ("Ground-Water Management Solution") παρέχει πληροφορίες σχετικά με την επίλυση του προβλήματος της διαχείρισης, συμπεριλαμβανομένης της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, τις βέλτιστες τιμές για κάθε μία από τις μεταβλητές απόφασης, καθώς και τους δεσμευτικούς περιορισμούς. Αν και τα γραμμικά προγράμματα έχουν συχνά πολλούς περιορισμούς, μόνο ένα υποσύνολό τους τυπικά ελέγχει τη βέλτιστη λύση. Αυτοί οι περιορισμοί που περιορίζουν την τιμή της

αντικειμενικής συνάρτησης λέγεται ότι είναι δεσμευτικοί (binding constraints), επειδή εμποδίζουν τις μεταβλητές απόφασης να λάβουν τιμές που βελτιώνουν περαιτέρω την αντικειμενική συνάρτηση, και, ως εκ τούτου, δεσμεύουν τη λύση. Στη βέλτιστη λύση, οι περιορισμοί ανισότητας που ικανοποιούνται σαν ισότητες είναι δεσμευτικές. Αντίθετα, μη δεσμευτικοί περιορισμοί (nonbinding constraints) δεν επηρεάζουν τις βέλτιστες τιμές των μεταβλητών απόφασης και θα μπορούσαν να αφαιρεθούν από τη διατύπωση χωρίς να αλλάξει η λύση.

Κάθε περιορισμός συνδέεται με μία τιμή που ονομάζεται shadow price (ή αλλιώς διπλή μεταβλητή) η οποία παρέχει πληροφορίες σχετικά με την επίδραση που έχουν μικρές μεταβολές στη τιμή του συντελεστή ο οποίος βρίσκεται στο δεξιό μέλος του περιορισμού, στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Οι shadow prices δείχνουν την οριακή αύξηση του οφέλους που προκύπτει από τη «χαλάρωση» κάθε συντελεστή του περιορισμού. Όταν η τιμή του δεσμευτικού περιορισμού που βρίσκεται στο δεξιό μέλος αυξηθεί κατά μία μονάδα, η αντικειμενική συνάρτηση θα μεταβληθεί κατά μία τιμή που δίνεται από τη shadow price. Αυτό σημαίνει ότι η βέλτιστη λύση είναι αρκετά ευαίσθητη σε περιορισμούς που έχουν υψηλές shadow prices. Αντιθέτως, μη δεσμευτικοί περιορισμοί έχουν μηδενικές shadow prices, καθώς μικρές μεταβολές των τιμών τους δεν έχουν καμία επίδραση στην αντικειμενική συνάρτηση. Οι τιμές shadow καταγράφονται μαζί με τη λίστα των δεσμευτικών περιορισμών στο αρχείο GLOBAL.

Οι τιμές shadow δηλώνουν την τοπική ευαισθησία της βέλτιστης λύσης στο δεξιό μέλος των περιορισμών και είναι έγκυρες όσο οι μεταβολές στους περιορισμούς δεν αλλάζουν τη βάση της βέλτιστης λύσης. Για τα προβλήματα διαχείρισης που επιλύονται από το πακέτο RMS του GWM, η βάση αποτελείται από το σύνολο των μεταβλητών απόφασης (παροχής και εξωτερικών) που έχουν τιμές μεταξύ των μέγιστων και των ελάχιστων ορίων τους στη βέλτιστη λύση, καθώς και από ένα σύνολο μεταβλητών (slack variables) που συνδέονται με τους μη δεσμευτικούς περιορισμούς. Η ανάλυση εύρους (range analysis) χρησιμοποιείται για να καθορίσει το εύρος των τιμών μέσα στο οποίο η τιμή shadow είναι έγκυρη. Η ανάλυση εύρους παρατίθεται μετά τη λίστα με τους δεσμευτικούς περιορισμούς εφόσον η μεταβλητή εισόδου RANGE στο αρχείο SOLN έχει οριστεί 1. Αυτή η ανάλυση υπολογίζει το εύρος μέσα στο οποίο η τιμή στο δεξιό μέλος του περιορισμού μπορεί να ποικίλει χωρίς να μεταβάλλεται η βάση της βέλτιστης λύσης, εφόσον όλοι οι άλλοι παράμετροι του μοντέλου διαχείρισης παραμένουν σταθεροί. Η ανάλυση επίσης καθορίζει ποιες μεταβλητές απόφασης και (ή) ποιοι περιορισμοί θα εισέρχονται και θα εξέρχονται από τη βάση, όταν η τιμή στο δεξιό μέλος αυξάνεται ή μειώνεται πέρα από το εύρος της.

Μια ανάλυση εύρους επί των συντελεστών της αντικειμενικής συνάρτησης επίσης πραγματοποιείται και καταγράφεται, εφόσον το έχει ζητήσει ο χρήστης. Σε αυτή την ανάλυση, καθορίζεται το εύρος μέσα στο οποίο οι συντελεστές μπορούν να ποικίλουν χωρίς να αλλάξει η βάση της βέλτιστης λύσης. Αν και η βέλτιστη βάση παραμένει αμετάβλητη, αν οι συντελεστές της αντικειμενικής συνάρτησης

παραμείνουν μέσα στα καθορισμένα εύρη τους, οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης και οι τιμές shadow σαν συναρτήσεις των συντελεστών, θα επηρεαστούν από τις μεταβολές. Ο συντελεστής της ανάλυσης εύρους επίσης καθορίζει ποιες μεταβλητές απόφασης και (ή) ποιοι περιορισμοί θα εισέρχονται και θα εξέρχονται από τη βάση, όταν η τιμή στο δεξί μέλος αυξάνεται ή μειώνεται πέρα από το εύρος της. Εκτός από τις πληροφορίες σχετικά με την ανάλυση εύρους, παρέχονται και τα απομειωμένα κόστη που συνδέονται με κάθε μεταβλητή απόφασης. Το μειωμένο κόστος (reduced cost) κάθε μεταβλητής απόφασης που δεν είναι μέρος της βάσης της βέλτιστης λύσης (nonbasic variables) είναι η ποσότητα με την οποία θα χρεωθεί η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης εφόσον αυτή η μεταβλητή γίνει βασική (basic variable). Για παράδειγμα, αν μία μη βασική μεταβλητή απόφασης έχει τιμή 0 και έπρεπε να τεθεί στη βέλτιστη λύση με μία μηδενική τιμή, η αντικειμενική συνάρτηση θα υποβαθμίζονταν - θα αυξάνονταν για ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης και θα μειώνονταν για ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης - κατά μία ποσότητα ίση με το μειωμένο κόστος της μεταβλητής. Το κόστος αυτό για κάθε μεταβλητή απόφασης στη βέλτιστη βάση είναι 0.

Επειδή η ανάλυση εύρους προϋποθέτει συνεχείς μεταβλητές και γραμμικούς περιορισμούς, είναι απολύτως έγκυρη μόνο για γραμμικά και για χωρίς δυαδικές μεταβλητές προβλήματα. Μπορεί να είναι ικανοποιητικά ακριβής για προβλήματα με ήπια μη-γραμμικότητα. Αν υπάρχουν δυαδικές μεταβλητές, τότε η ανάλυση εύρους μπορεί να καταγραφεί. Ωστόσο, πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή. Η καταγεγραμμένη ανάλυση εύρους βασίζεται στο τελικό γραμμικό πρόγραμμα που λύνεται κατά τη διάρκεια του αλγόριθμου branch and bound και δεν περιλαμβάνει τις μεταβολές στις δυαδικές μεταβλητές οι οποίες μπορεί να προκληθούν όταν οι συντελεστές του δεξιού μέλους και οι συντελεστές της αντικειμενικής συνάρτησης αλλάξουν. Η πιο ολοκληρωμένη ανάλυση εύρους, παρουσία των δυαδικών μεταβλητών, μπορεί να επιτευχθεί λύνοντας το πρόβλημα σαν να ήταν ένα μη δυαδικό-γραμμικό πρόβλημα απομακρύνοντας από αυτό τις ανενεργές μεταβλητές της ροής.

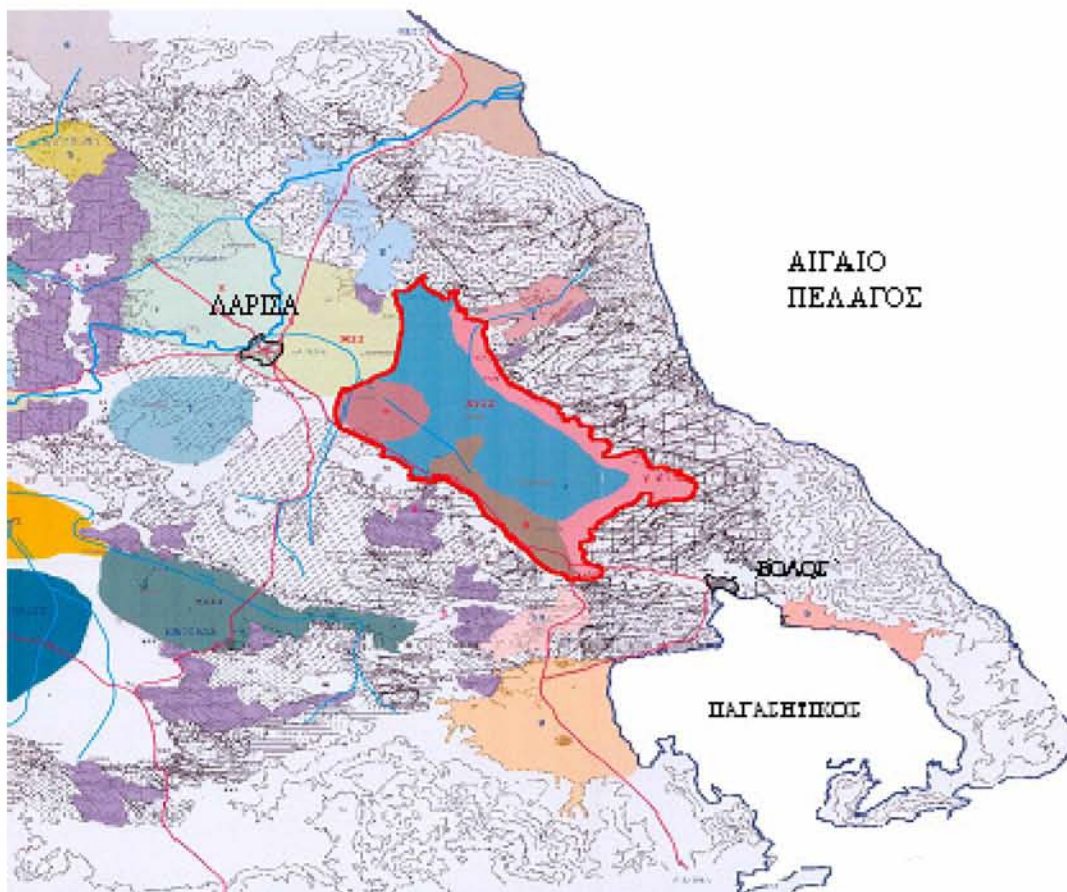
Το τελευταίο βήμα για μία επιτυχημένη εκτέλεση του GWM είναι μία τελευταία εκτέλεση της διαδικασίας GWF χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες παροχές που έχει καθορίσει ο αλγόριθμος επίλυσης. Χρησιμοποιώντας αυτές τις παροχές το αρχείο LIST θα περιέχει αποτελέσματα από τη διαδικασία GWF. Το αρχείο GLOBAL θα έχει την τελική κατάσταση των περιορισμών. Μία πετυχημένη εκτέλεση του προγράμματος θα πρέπει να αναφέρει ότι όλοι οι περιορισμοί έχουν ικανοποιηθεί (satisfied) ή είναι σχεδόν δεσμευτικοί (near-binding). Γίνεται διάκριση μεταξύ των δεσμευτικών περιορισμών και των σχεδόν δεσμευτικών περιορισμών. Κατά την επίλυση του γραμμικού προγράμματος, το οποίο περιέχει μια προσέγγιση στη διαδικασία GWF, ορισμένοι περιορισμοί θα είναι δεσμευτικοί, δηλαδή, θα ικανοποιούνται σαν αυστηρές ισότητες. Ωστόσο, όταν η διαδικασία GWF λειτουργεί με τις βέλτιστες παροχές, αυτοί οι ίδιοι περιορισμοί μπορεί να μην είναι ακριβώς δεσμευτικοί. Αυτό μπορεί να προκύψει από μη γραμμικές αποκρίσεις στη διαδικασία GWF και περιορισμούς στην ακρίβεια του υπολογισμού των υδραλικών φορτίων.

Επιπρόσθετα, μερικοί περιορισμοί που δεν είναι αυστηρά δεσμευτικοί στο γραμμικό πρόγραμμα, μπορεί να είναι σχεδόν δεσμευτικοί κατά τη διαδικασία GWF. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχουν διαφορές μεταξύ του συνόλου των περιορισμών που αναφέρονται σαν δεσμευτικοί (binding) στο γραμμικό πρόγραμμα και εκείνων που αναφέρονται σαν σχεδόν δεσμευτικοί (near-binding) στο τελικό αποτέλεσμα της GWF διαδικασίας.

5 ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ-ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΗΣ ΚΑΡΛΑΣ

5.1 Παρουσίαση της προσομοιωμένης περιοχής

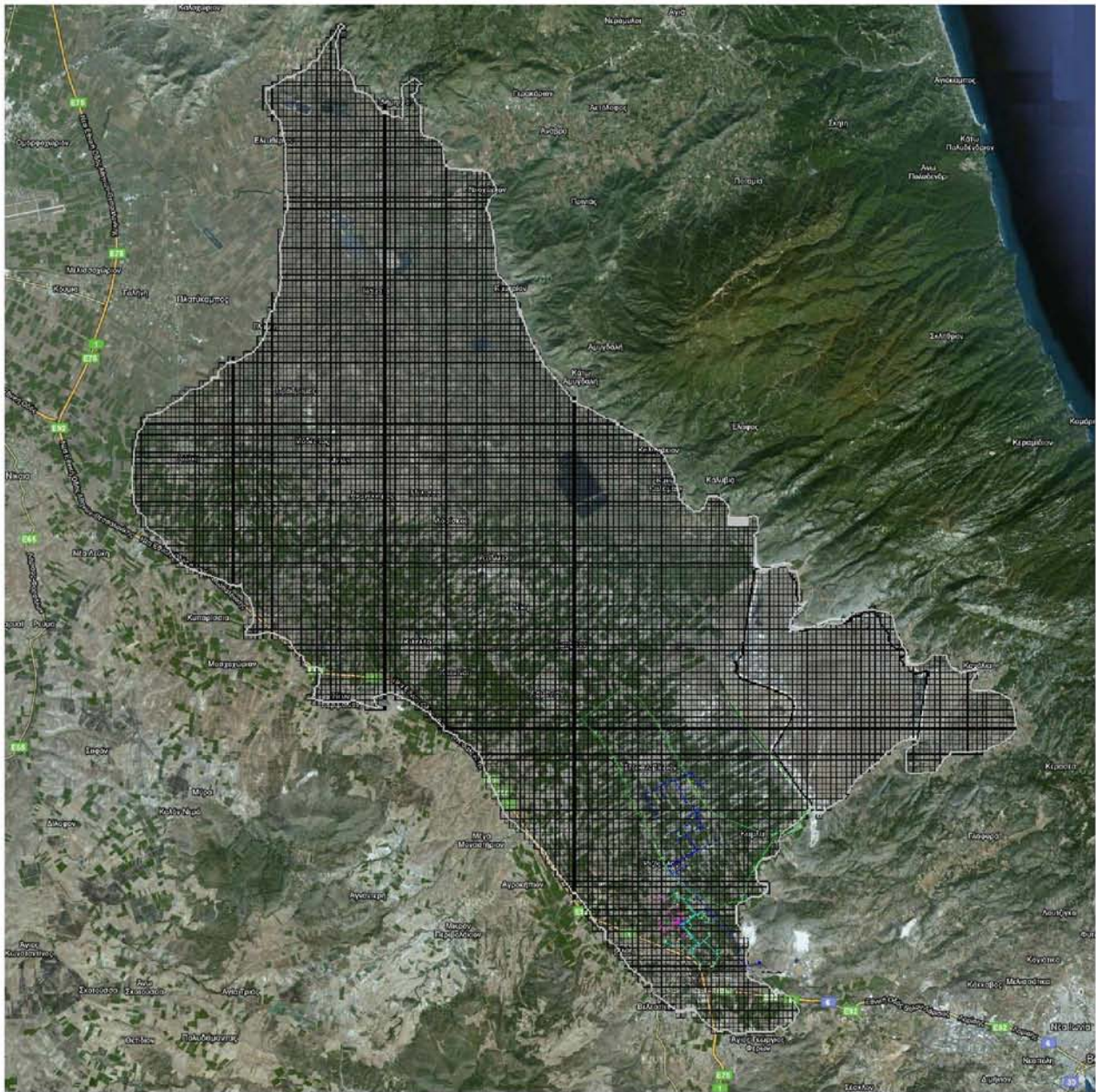
Η προσομοιούμενη περιοχή αντιστοιχεί στον υπόγειο υδροφόρο της λεκάνης της Κάρλας της οποίας τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 1 (Εικ. 5.1).



Εικόνα 5.1: Η προσομοιωμένη περιοχή του Υπόγειου Υδροφορέα σε σχέση με την ευρύτερη περιοχή (Σιδηρόπουλος Π., 2007)

Όσον αφορά το οριζόντιο επίπεδο, ο υδροφόρος της λεκάνης της Κάρλας έχει σχετικά απλή δομή και περιέχει τέτοιες δραστηριότητες που συνεπάγονται κατανάλωση υπόγειου νερού (ύδρευση, άρδευσης κλπ). Λόγω της γενικής παραδοχής των υφιστάμενων μελετών σχετικά με την ανυπαρξία υδραυλικής επικοινωνίας μεταξύ καρστικών κρασπέδων και προσχωματικών υδροφοριών, το ενδιαφέρον περιορίστηκε στην πεδινή περιοχή της λίμνης και συγκεκριμένα στον υδροφόρο ορίζοντα των σύγχρονων προσχωματικών αποθέσεων. Ουσιαστικά πρόκειται για τέσσερις ζώνες υδροφορίας της υδρογεωλογικής λεκάνης της Ανατολικής Θεσσαλίας,

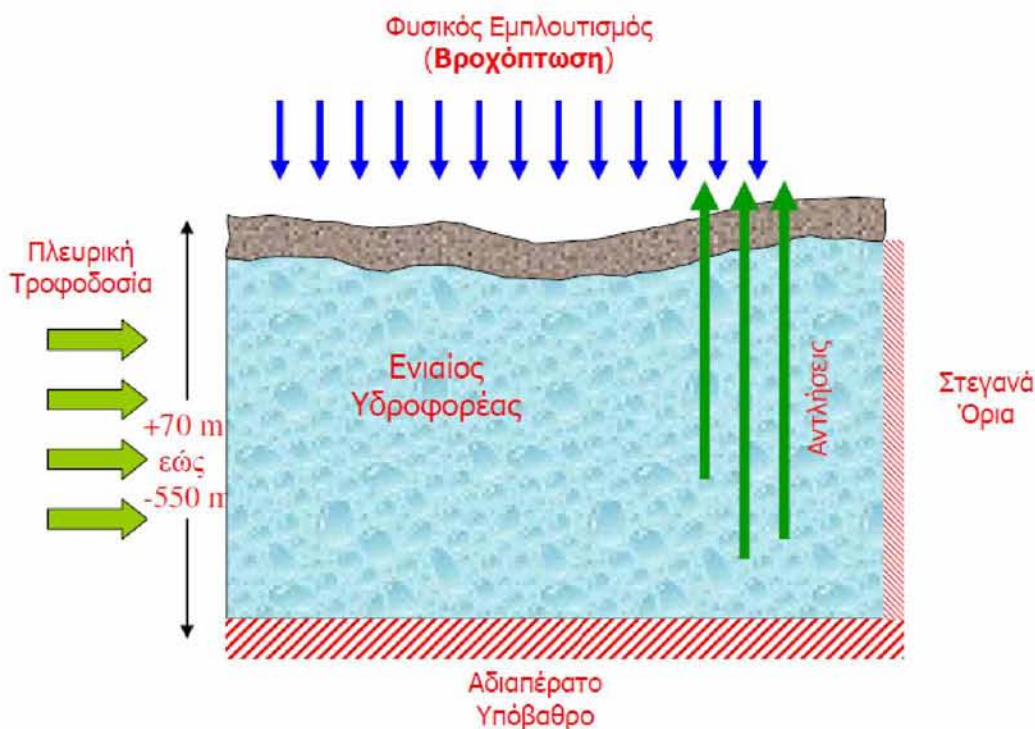
οι οποίες αντιμετωπίστηκαν ως ενιαίος υδροφορέας, εξαιτίας της πιεζομετρικής τους συνέχειας και χάριν απλούστευσης του προβλήματος. Τα όρια της παριστάνονται με την κόκκινη συνεχή γραμμή (Εικ. 5.2).



Εικόνα 5.2: Η προσομοιωμένη περιοχή του Υπόγειου Υδροφορέα σε σχέση με την ευρύτερη Λεκάνη και ο κάναβος του μοντέλου (Σιδηρόπουλος Π., 2007).

Όσον αφορά το κατακόρυφο επίπεδο, αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο ότι διακρίνονται τρεις τύποι υδροφορέων: οι αργιλοαμμώδεις λιμναίες αποθέσεις, οι αδρομερείς προσχώσεις και τα κορήματα με τα μάρμαρα (Μπεζές 2004). Οι τρεις παραπάνω υδροφόροι ορίζοντες είναι τοποθετημένοι ο ένας επάνω στον άλλο (επάλληλοι ορίζοντες). Η προσομοίωση περιορίστηκε στα δύο πρώτα στρώματα γιατί η υδραυλική επικοινωνία αυτών των δύο πρώτων υδροφορέων με τον υδροφορέα των μαρμάρων είναι αρκετά μικρή σε σχέση με την μεταξύ τους υδραυλική επικοινωνία και επιπλέον ο υδροφορέας των μαρμάρων δεν συνεισφέρει στις

απολήψεις των γεωτρήσεων, για τις αρδευτικές και υδρευτικές ανάγκες. Όμως και αυτοί οι δύο υδροφορείς προσομοιώθηκαν στο MODFLOW με ένα κατακόρυφο επίπεδο (layer) και αντιμετωπίστηκαν σαν ένας ενιαίος υδροφορέας (Εικ. 5.3). Αυτό έγινε επειδή ο υδροφορέας των αργιλοαμμωδών λιμναίων αποθέσεων εναποτίθεται πάνω σε αυτόν των αδρομερών προσχώσεων, η υδραυλική τους επικοινωνία είναι σημαντική, ώστε να επιτρέπει αυτή τη θεώρηση και τέλος τα υδρογεωλογικά τους χαρακτηριστικά δε διαφέρουν και πολύ.



Εικόνα 5.3: Τομή της προσομοιούμενης περιοχής, όπως αυτή αναπαρίσταται από το εννοιολογικό μοντέλο που καταρτίστηκε (Σιδηρόπουλος Π., 2007)

5.2 Παράμετροι και δεδομένα που εισήχθησαν στο μοντέλο προσομοίωσης του υπόγειου υδροφορέα

Η αριθμητική προσομοίωση για τη διαχείριση του υδροφορέα της Κάρλας έγινε με βάση έτοιμο (στημένο) μοντέλο με τον κώδικα MODFLOW. Σε αυτό εισήχθησαν αρκετά νέα δεδομένα και παράμετροι της περιοχής λόγω της ύπαρξης του ταμειυτήρα και των νέων υδρευτικών γεωτρήσεων. Παρακάτω θα παρουσιαστούν όλα αυτά τα δεδομένα.

Στο μοντέλο προσομοίωσης υπάρχουν οι οριακές συνθήκες:

- Συνθήκες Newman: Εντοπίζονται κατά μήκος του ανατολικού ορίου της περιοχής (τμήμα ορίου AB, Εικόνα 5.5), λόγω παρουσίας στεγανών σχηματισμών (γενεύσιοι, αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι). Συγκεκριμένα, οι συνθήκες αυτές είναι μηδενικής ροής (no flow boundary).
- Συνθήκες Cauchy: Εντοπίζονται κατά μήκος των δυτικών παρυφών της περιοχής προσομοίωσης και συγκεκριμένα εκφράζουν ροή εξαρτώμενη

από το εκάστοτε υδραυλικό φορτίο, χρησιμοποιώντας το πακέτο General Head Boundary. Η ροή αυτή προέρχεται από την πλευρική τροφοδοσία από τη ζώνη ανάπτυξης των πλειοκαινικών λόφων και των κώνων κορημάτων που σχηματίζουν οι παραπόταμοι του Πηνειού.

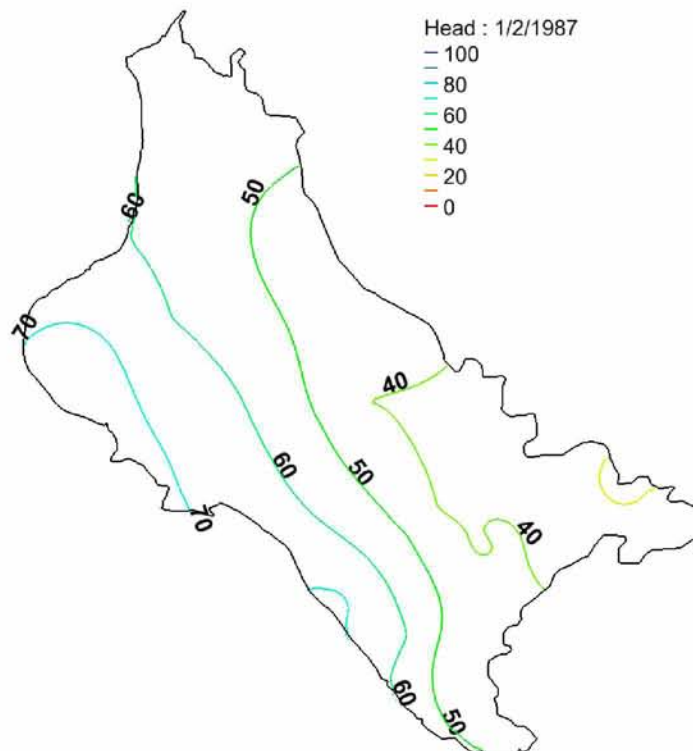
Η περίοδος προσομοίωσης είναι από την 1^η Ιανουαρίου 1987 έως την 1^η Ιανουαρίου 2012. Ως αρχική συνθήκη επιλέχθηκε η 1^η Ιανουαρίου 1987. Η επιλογή οφείλεται στο γεγονός ότι ήδη από τα μέσα της δεκαετίας του '80 και έπειτα, οι συνέπειες της υπεραντλησης είναι εμφανής στον υπόγειο υδροφόρο. Με άλλα λόγια η περίοδος του καθεστώτος υπερεκματάλλευσης του υπόγειου υδροφόρου ξεκινά αμέσως μετά από αυτήν την περίοδο. Στη Εικόνα 5.4 παρουσιάζεται η απεικόνιση του υπόγειου υδροφόρου με τα αρχικά υδραυλικά ύψη (1/1/1987).

Χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις από 27 πηγάδια παρατήρησης. Τα πηγάδια μέτρησαν το βάθος που παρατηρήθηκε ο υπόγειος υδροφόρος και με αφαίρεση από το υψόμετρο της περιοχής προέκυψαν τα αρχικά απόλυτα ύψη, όπως φαίνονται στον Πίνακα 5.1, ενώ οι θέσεις στους φαίνονται στην Εικόνα 5.5.

Πηγάδι	X	Y	Αρχικά Ύψη (m)
P6L	637874	4394211	52.82
LB310	649089	4371386	48.93
AD15	653522.3	4370390	40.8
SR63a	652594.2	4364801	34.68
SR63b	652600	4364806	44.45
AG17a	649002	4366046	59.82
AD13a	653349.3	4370961	43.15
PZ15	650170.5	4372364	40.62
AD13	653227.5	4370877	37.2
AG14	644246	4376506	51.66
SR43	643202	4370724	64.4
SR32	637576.8	4375596	68.35
SR31	640758.1	4378887	58.33
PZ67	641486	4380913	54.2
402	650046.8	4381276	43.69
SR66	646465.5	4378039	39.8
PZ50	638888	4387371	53.12
P17L	631492	4383752	67.52
PZ7	642281.8	4391853	56.5
SR30	632522.3	4380364	72.95
AD11	636705.3	4382399	59.9
PZ68	645376.4	4367725	71.77
E3	654937	4361328	47.98
LB202	653280	4378456	34.25
PZ65	660104.5	4373872	27.78
PZ45	644182	4388225	41.08
PZ64	657371.6	4375602	32.45

Πίνακας 5.1: Πηγάδια παρατηρήσεις των αρχικών υψών της 1ης Ιανουαρίου 1987.

Το ανάγλυφο της περιοχής εισήχθη από αρχείο GIS (Μουστάκα Ε., 2002), ενώ όσο αφορά τον αδιαπέραστο πυθμένα πάρθηκε από το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη της SOGREAH 1974.



Εικόνα 5.4: Αρχικά ύψη για την 1η Ιανουαρίου 1987.

Η υδραυλική επικοινωνία με το γειτονικό υπόγειο υδροφόρα, στα δυτικά προσομοιώθηκε από το πακέτο General Head Boundary με μικρό συντελεστή υδραυλικής επικοινωνίας. Στο ανατολικό όριο λόγω της παρουσίας μεγάλων αδιαπέρατων σχηματισμών, όπως αυτός του φλύσχη, οι εισροές νερού είναι μηδενικές.

Για τον προσδιορισμό της υδραυλικής σύνδεσης του ταμιευτήρα με τον υδροφόρα απαιτείται μία μέθοδο υπολογισμού της ποσότητας του νερού που διαρρέει προς τον υπόγειο υδροφόρα διαμέσου των ιζημάτων του πυθμένα του ταμιευτήρα. Ο παραπάνω υπολογισμός αποτελεί εφαρμογή του Νόμου του Darcy και έγινε με το πακέτο του Modflow, Lake (LAK3). Αντιθέτως με το πακέτο GHB όπου η στάθμη του ταμιευτήρα είναι δεδομένη και το Modflow υπολογίζει τη ροή που απαιτείται για να διατηρηθεί η στάθμη αυτή, με το πακέτο Lake (LAK3) το Modflow υπολογίζει τη στάθμη του ταμιευτήρα βάσει του υδατικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα. Το LAK3 χρησιμοποιείται για προσομοιώσεις τόσο σε συνθήκες δυναμικής ισορροπίας όσο και σε μεταβαλλόμενες συνθήκες. Η σύνδεση μεταξύ ταμιευτήρα και υπόγειου υδροφόρα γίνεται υπολογίζοντας στο τέλος κάθε χρονικού βήματος ένα υδατικό ισοζύγιο για τη λίμνη, το οποίο είναι ανεξάρτητο από το υδατικό ισοζύγιο

του υπόγειου υδροφορέα. Το πακέτο LAK3 υπολογίζει τη στάθμη βάσει του υδατικού ισοζυγίου και την γεωμετρία του ταμιευτήρα και χρησιμοποιεί για δεδομένα τη βροχόπτωση, την επιφανειακή απορροή, τις απολήψεις και την υδραυλική αγωγιμότητα, η οποία είναι και η παράμετρος για την οποία ρυθμίστηκε το μοντέλο. Η ρύθμισή του έγινε για την περίοδο 1987-2044 με βάση τις στάθμες του ταμιευτήρα, όπως υπολογίστηκαν από το σύστημα προσομοίωσης που συνδυάζει το μοντέλο UTHBAL με ένα μοντέλο ισοζυγίου ταμιευτήρα (UTHRL) και την εκτιμημένη ζήτηση νερού για άρδευση. Η ροή μεταξύ του υπόγειου υδροφορέα και του ταμιευτήρα καθορίζεται από την αγωγιμότητα του υδροφορέα και τη διαρροή (thickness) του πυθμένα (Sidiropoulos *et al.*, 2008).

Για την εύρεση των προσομοιούμενων στάθμων του ταμιευτήρα, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο UTHRL το οποίο προσομοιώνει τη λειτουργία ταμιευτήρα και υπολογίζει την μοντέλου είναι να προσομοιωθεί η λειτουργία του ταμιευτήρα και να υπολογιστεί η ποσότητα νερού που μπορεί να διαθέσει σε κάθε χρονική στιγμή. Σύμφωνα με το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε, ως δεδομένα εισόδου εισάγονται τα βροχομετρικά δεδομένα μιας χρονικής περιόδου, τα δεδομένα εξατμισοδιαπνοής για την ίδια περίοδο, ο ωφέλιμος όγκος του ταμιευτήρα και οι επιθυμητές απολήψεις (Τσακίρης Γ., 1995). Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, ως δεδομένα εισόδου εισάγονται οι εισροές ενός σημαντικού αριθμού ετών (ή αν κριθεί απαραίτητο παράγονται από το υπάρχον δείγμα συνθετικά δεδομένα με τα ίδια στατιστικά χαρακτηριστικά). Η γενική εξίσωση που περιγράφει τη λειτουργία ενός ταμιευτήρα με χρονικό βήμα το μήνα είναι η εξής:

$$V_i = V_{i-1} + Q_i - E_i - A_i - Y_i \quad \text{Εξ. 5.1}$$

όπου:

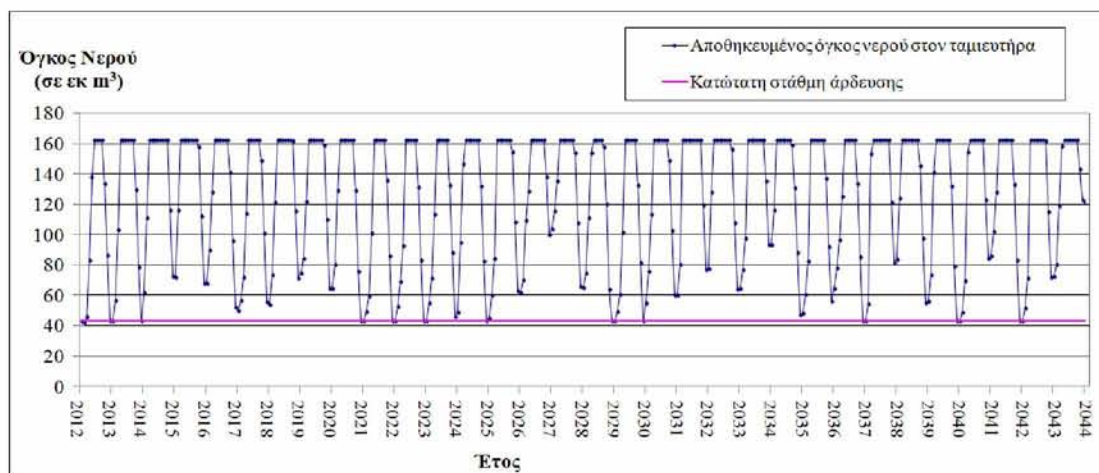
V_i, V_{i-1} ο αποθηκευμένος όγκος νερού στον ταμιευτήρα τους μήνες i και $i-1$ (hm^3),

Q_i η εισροή στον ταμιευτήρα το μήνα i (hm^3),

E_i η καθαρή απώλεια του ταμιευτήρα το μήνα I (hm^3),

A_i η πραγματική απόληψη κατά το μήνα i (hm^3),

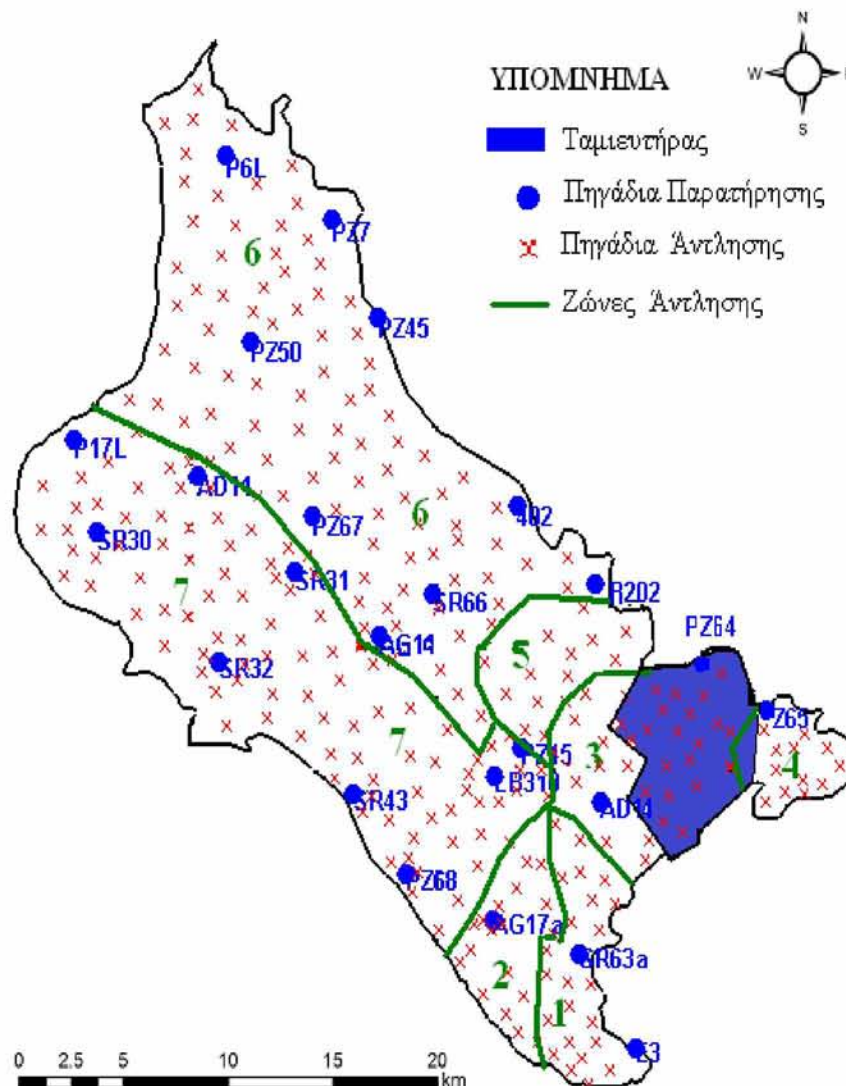
Y_i η υπερχειλίση κατά το μήνα i (hm^3).



Εικόνα 5.5: Διάγραμμα λειτουργίας του ταμιευτήρα της Κάρλας (Sidiropoulos P. et al., 2008).

Η εκροή από τον υπόγειο υδροφόρα οφείλεται στο μεγαλύτερο βαθμό από την υπεράντληση των γεωτρήσεων και σε ένα πολύ μικρό ποσοστό στην κίνηση του νερού προς το γειτονικό υδροφόρα.

Το πεδίο μελέτης χωρίστηκε σε επτά ζώνες άντλησης (Εικ. 5.5) σύμφωνα με τη «Μελέτη Επαναδημιουργίας Λίμνης Κάρλας – Υποστηρικτική Υδρογεωλογική Μελέτη, 1999», εκ των οποίων οι πέντε ανήκουν στο Νομό Μαγνησίας, ενώ οι άλλες δύο ζώνες ανήκουν στο Νομό Λαρίσης.



Εικόνα 5.6: Ο υπόγειος υδροφόρεας της λίμνης Κάρλας με τις ζώνες άντλησης, τα πηγάδια παρατήρησης και τα πηγάδια άντλησης (Σιδηρόπουλος Π. και Μυλόπουλος Ν., 2012).

Ο διαχωρισμός αυτός λαμβάνει υπόψη τόσο τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά των υπογείων υδροφοριών, όπως επίσης και τα όρια των παλαιών κοινοτήτων της περιοχής.

Ο διαχωρισμός του Νομού Λαρίσης έγινε σε δύο ζώνες διότι στη ζώνη 7 η άρδευση και η ύδρευση γίνεται εξ' ολοκλήρου από γεωτρήσεις, ενώ στη ζώνη 6 ανήκει η περιοχή του ΤΟΕΒ Πηνειού.

Ο αριθμός των γεωτρήσεων δεν ανταποκρίνεται στον πραγματικό αριθμό αυτών που υπάρχουν σε όλη τη περιοχή μελέτης, αφού ο αριθμός αυτών είναι πραγματικά τεράστιος (έως και 40000 σύμφωνα με προφορικές πηγές). Η συντριπτική τους πλειοψηφία είναι παράνομες και τον ακριβή αριθμό τους δεν γνωρίζουν ούτε καν οι αρμόδιες υπηρεσίες. Αυτό όμως που είναι γνωστό είναι η συνολική παροχή που αντλείται για κάθε ζώνη, αλλά και ένα εύρος της παροχής που μπορεί να αντλήσει μια γεώτρηση. Η τελευταία έχει να κάνει με τη γεωμορφολογία της ζώνης.

Στον Πίνακα 5.2 δίδονται η αντλούμενη, από τον υπόγειο υδροφόρεα, ποσότητα νερού για άρδευση και ύδρευση για την περίοδο προσομοίωσης, και η έκταση των ζωνών άντλησης.

Ζώνη Άντλησης	Έκταση (h)	Μέσες Ετήσιες Απολήψεις (10 ⁶ m ³)
1	3620	18 – 23
2	1490	2.5 – 3.6
3	3500	4.5 - 6.0
4	4500	1.8 - 2.5
5	1500	1.5 – 2.0
6	21000	35 – 40
7	14400	53 – 56

Πίνακας 5.2: Ζώνες άντλησης και οι αντίστοιχες αντλούμενες ποσότητες.

Στη **Ζώνη 1** εκτάσεως περίπου 36267 στρεμμάτων περιλαμβάνει την περιοχή ανατολικά των χωριών Στεφανοβίκειου – Ριζόμυλου – Βελεστίνου. Αντλούνται από τον υπόγειο υδροφόρεα από $18 \cdot 10^6$ έως $23 \cdot 10^6$ m³. Η ζώνη αυτή ανήκει στην περιοχή της τρίτης ομάδας πιεζόμετρων – όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 1 – στην οποία η πτώση είναι μεγάλη και έντονη. Οι παροχές των γεωτρήσεων είναι αρκετά μεγάλες, ώστε σε περιόδους μη αιχμής να αντλούν 100 m³/h, ενώ έχουν καταγραφεί παροχές της τάξεως των 300 m³/h σε περιόδους αιχμής. Εδώ υπάρχουν και οι 10 υδρευτικές γεωτρήσεις της ΔΕΥΑΜΒ.

Η **Ζώνη 2** εκτάσεως 14910 στρεμμάτων περιλαμβάνει τα Δ-ΝΔ περιθώρια της ζώνης 1 με όριο τη νοητή γραμμή μεταξύ των χωριών Μέγα Μοναστήρι – Χλόη – Βελεστίνο - Αγ. Γεώργιος. Αντλούνται από τον υπόγειο υδροφόρεα από $2,5 \cdot 10^6$ έως $3,6 \cdot 10^6$ m³. Ανήκει και αυτή στην τρίτη ομάδα πιεζόμετρων. Οι παροχές των γεωτρήσεων δεν είναι μεγάλες, με αυτές να φτάνουν σε ώρες μη αιχμής τα 30 m³/h και σε ώρες αιχμής να μην ξεπερνούν τα 100 m³/h.

Οι **Ζώνες 3** και **5** περικλείουν την περιοχή που οριοθετείται από τα χωριά Κανάλια – Στεφανοβίκειου – Σωτήριου – και νοτίως Καλαμακίου, εκτάσεως 79931 στρεμμάτων. Αναπτύσσονται μικρού δυναμικού υπόγειες υδροφορίες στις σύγχρονες αποθέσεις. Ανήκουν στη δεύτερη ομάδα πιεζομέτρων, στην οποία η πτώση είναι μεγάλη, αλλά όχι έντονη. Στις δύο αυτές ζώνες, εξ' αιτίας του μικρού γενικά δυναμικού των υπογείων υδροφοριών οι παροχές άντλησης των γεωτρήσεων δεν είναι μεγάλες. Έτσι στη Ζώνη 3 αντλούνται από $4,5 \cdot 10^6$ έως $6,0 \cdot 10^6$ m³ με παροχή γεωτρήσεων στα 35 m³/h σε ώρες μη αιχμής και στα 105 m³/h ώρες αιχμής. Στη Ζώνη 5 αντλείται παροχή από $1,5 \cdot 10^6$ έως $2,0 \cdot 10^6$ m³ με παροχή γεωτρήσεων στα 20 m³/h σε ώρες μη αιχμής και στα 60 m³/h ώρες αιχμής.

Η **Ζώνη 4** περιλαμβάνει τον κώνο του ρέματος Ξεριά και των άλλων ρεμάτων στην περιοχή Καναλιών, εκτάσεως 15000 στρεμμάτων. Ανήκει και αυτή στην δεύτερη ομάδα πιεζομέτρων. Αντλούνται από τα υπόγεια νερά περίπου $1,8 \cdot 10^6$ έως $2,5 \cdot 10^6$

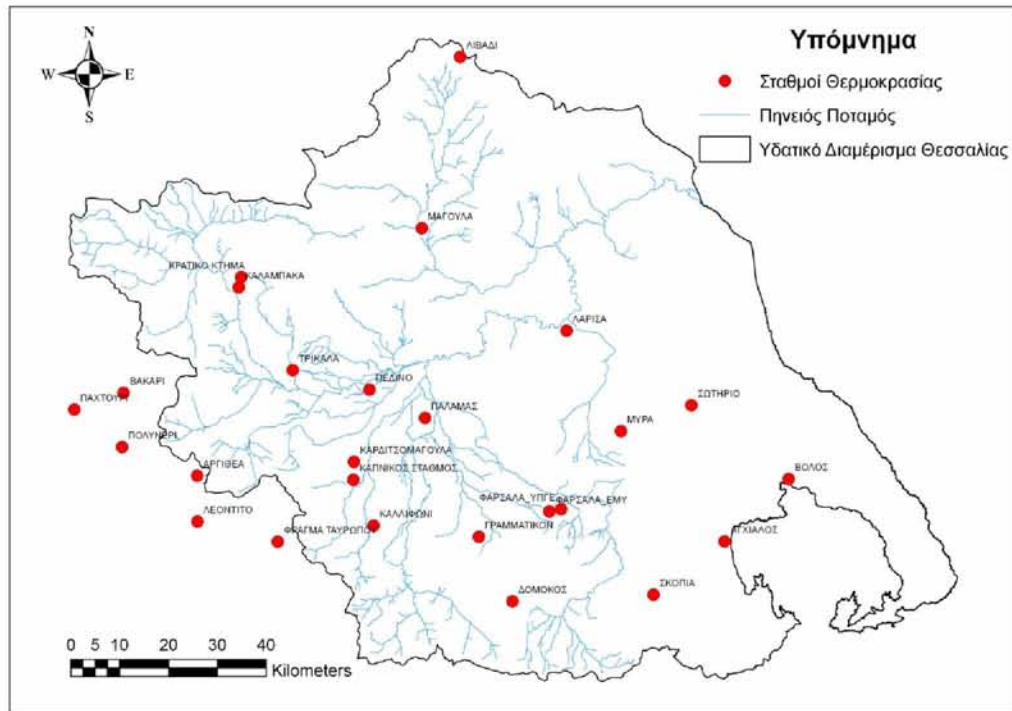
m^3 . Οι γεωτρήσεις δίνουν μικρές παροχές της τάξεως των $20 m^3/h$ σε ώρες μη αιχμής $70 m^3/h$ ώρες αιχμής.

Η **Ζώνη 6** οριοθετείται από τα χωριά - νοτιώς του Καλαμακίου – Αρμένιο – Σωτήριο – Νίκη – Αχίλλειον – Γλαύκη – Ελευθέριο – Δήμητρα και Νεοχώρι. Έχει έκταση 210263 στρεμμάτων και το βόρειο τμήμα της ανήκει στην πρώτη ομάδα πιεζομέτρων, ενώ το νότιο στη δεύτερη. Είναι η περιοχή η οποία αρδεύεται από το ΤΟΕΒ Πηγείου. Η ποσότητα που αντλείται είναι από των $35 \cdot 10^6 m^3$ έως $40 \cdot 10^6 m^3$. Οι παροχές των γεωτρήσεων κυμαίνονται από $55 m^3/h$ έως και $220 m^3/h$.

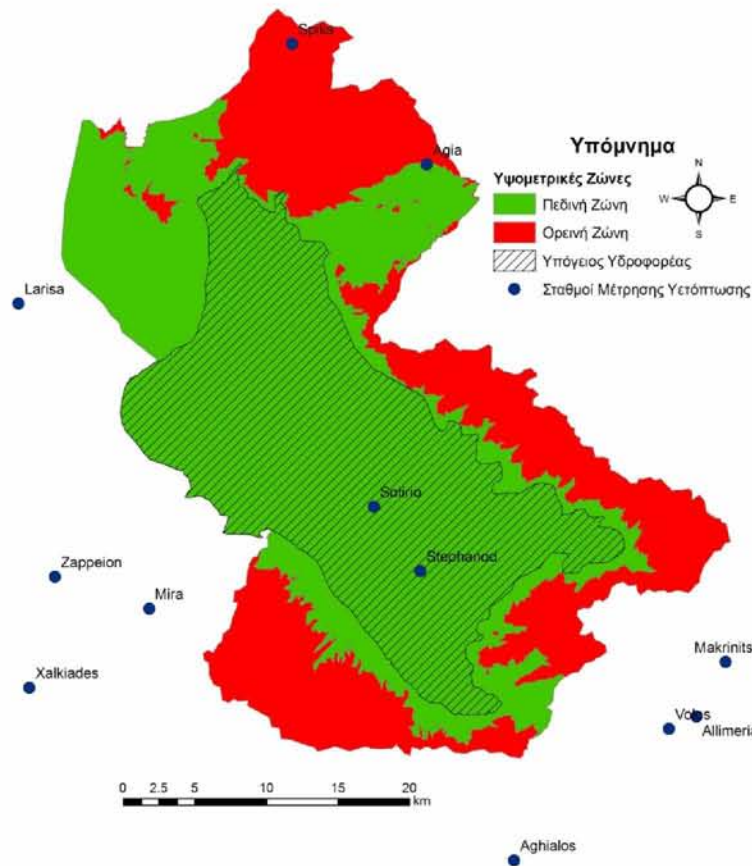
Τέλος η **Ζώνη 7**, εκτάσεως 143840 στρεμμάτων, αποτελεί την πιο επιβαρυνόμενη περιοχή της πεδιάδας της Κάρλας. Οι ανάγκες για άρδευση και ύρδευση καλύπτονται αποκλειστικά από γεωτρήσεις. Ανήκει στην τρίτη ομάδα πιεζομέτρων και συναντώνται οι μεγαλύτερες ταπεινώσεις που τους καλοκαιρινούς μήνες φτάνουν και τα 100 m. Αυτό όμως οφείλεται στο γεγονός ότι το βάθος του υδροφορέα είναι αρκετά μεγάλο, μιας και από τη μελέτη της SOGREAH 1974, ο αδιαπέρατος πυθμένας φτάνει στα -550 m (απόλυτο υψόμετρο). Αντλούνται από $53,0 \cdot 10^6 m^3$ έως $56,0 \cdot 10^6 m^3$. Οι παροχές των γεωτρήσεων κυμαίνονται από $70 m^3/h$ έως και $220 m^3/h$.

Αφέθηκε για το τέλος η παρουσίαση των υδραυλικών παραμέτρων του υδροφόρου στρώματος, όπως αυτές προκύπτουν από τις βιβλιογραφικές αναφορές που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση. Ο συντελεστής αποθήκευσης (Specific Storage) ελήφθη ίσος με 0.02 και ο συντελεστής απόδοσης (Specific Yield) ίσος με 0.1 (SOGREAH 1979, Δ. Κωνσταντινίδης – Π. Περγιαλιώτης 1984, Constandinidis 1978).

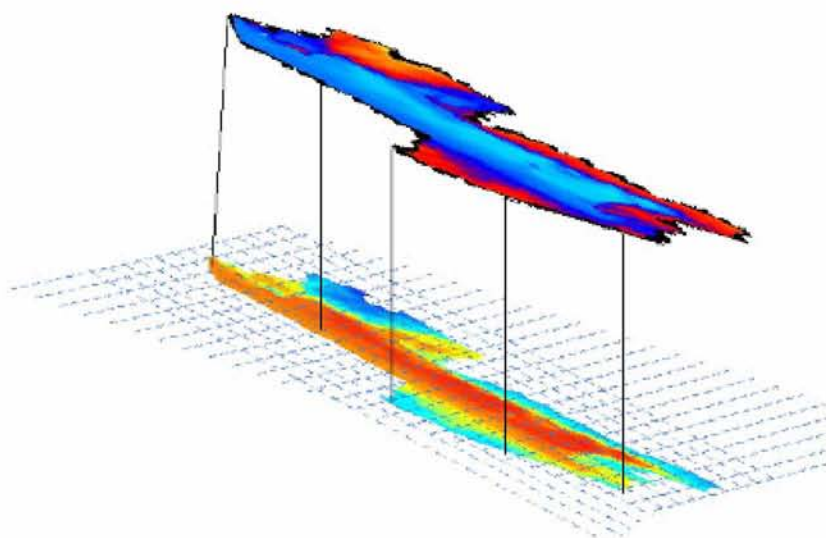
Η κατείδυση εισήχθη μηνιαίως στο μοντέλο και προέρχεται από το υδρολογικό μοντέλο UTHBAL. Το εννοιολογικό μοντέλο (UTHBAL) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της επιφανειακής απορροής (Λουκάς και συνεργάτες, 2003). Ως δεδομένα εισόδου δέχεται την υετόπτωση, την θερμοκρασία, και τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή και υπολογίζει διάφορες υδρολογικές παραμέτρους μεταξύ αυτών την επιφανειακή απορροή, την υπόγεια κατείδυση, την εδαφική υγρασία, την πραγματική εξατμισοδιαπνοή, κ.ά. Το μοντέλο μπορεί να εφαρμοσθεί σε διάφορες χωρικές διακριτοποιήσεις δηλαδή ως ενιαίο, κατανεμημένο και ημι-κατανεμημένο μοντέλο. Με το μοντέλο αυτό είμαστε σε θέση να έχουμε εκτίμηση της επιφανειακής απορροής, της κατείδυσης και της ποιότητας τους με τις οποίες θα συνδέεται με τα μοντέλα υπόγειας υδρολογίας και μοντέλου ταμιευτήρα, αντίστοιχα.



Εικόνα 5.7: Σταθμοί μέτρησης μέσης θερμοκρασίας στην ευρύτερη περιοχή μελέτης (Sidiropoulos P. et al, 2011).



Εικόνα 5.8: Σταθμοί μέτρησης νετόπτωσης στην ευρύτερη περιοχή μελέτης (Sidiropoulos P. et al, 2011).



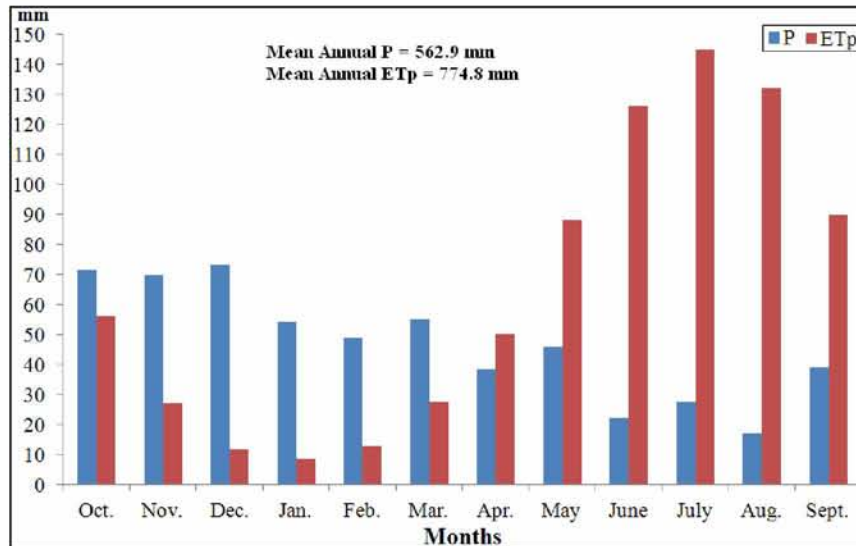
Εικόνα 5.9: Σύνδεση επιφανειακού και υπόγειου μοντέλου σε ημι-κατανεμημένη μορφή (Sidiropoulos P. et al, 2011).

Months	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	March	April	May	June	July	Aug.	Sept.
Simulated Mean Values (mm)	2.49	2.89	3.47	4.74	12.05	20.88	20.71	9.1	3.19	2.33	1.8	1.46
Observed Mean Values (mm)	3.19	3.79	5.14	6.35	14.15	19.95	18.88	5.78	3.08	2.68	2.15	2.06

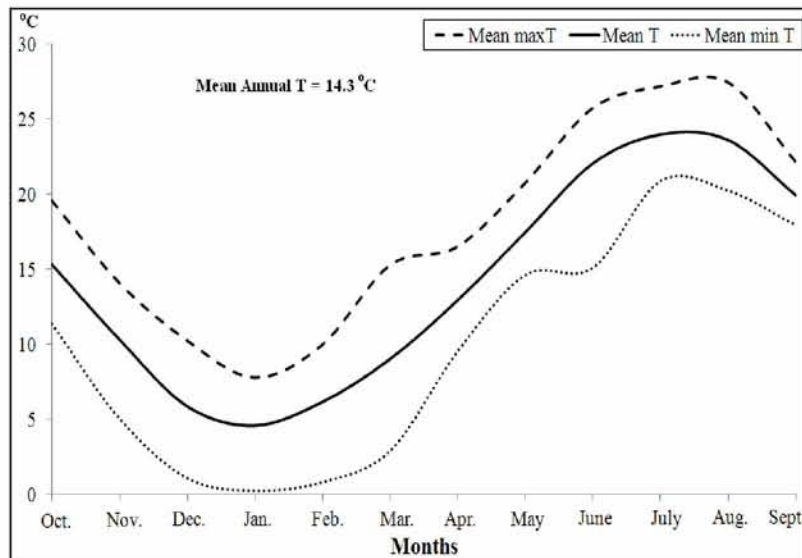
Πίνακας 5.3: Προσομοιωμένες μέσες μηνιαίες τιμές απορροής από UTHBAL σε σύγκριση με τις παρατηρούμενες (Sidiropoulos P. et al, 2011).

Συντελεστής δυναμικής τήξης χιονιού Cm	Curve Number CN	Συντελεστής κατείδωσης K ($0 \leq K \leq 1$)	Συντελεστής πραγματικής εξατμισοδιαπνοής a ($0 \leq a \leq 1$)	Συντελεστής ενδιάμεσης απορροής β ($0 \leq \beta \leq 1$)	Συντελεστής βασικής απορροής γ ($0 \leq \gamma \leq 1$)
0.119	52.52	0,72	0,65	0,01	0,646

Πίνακας 5.4: Παράμετροι UTHBAL για τη πεδινή ζώνη έπειτα από τη ρύθμιση του (Sidiropoulos P. et al, 2011).

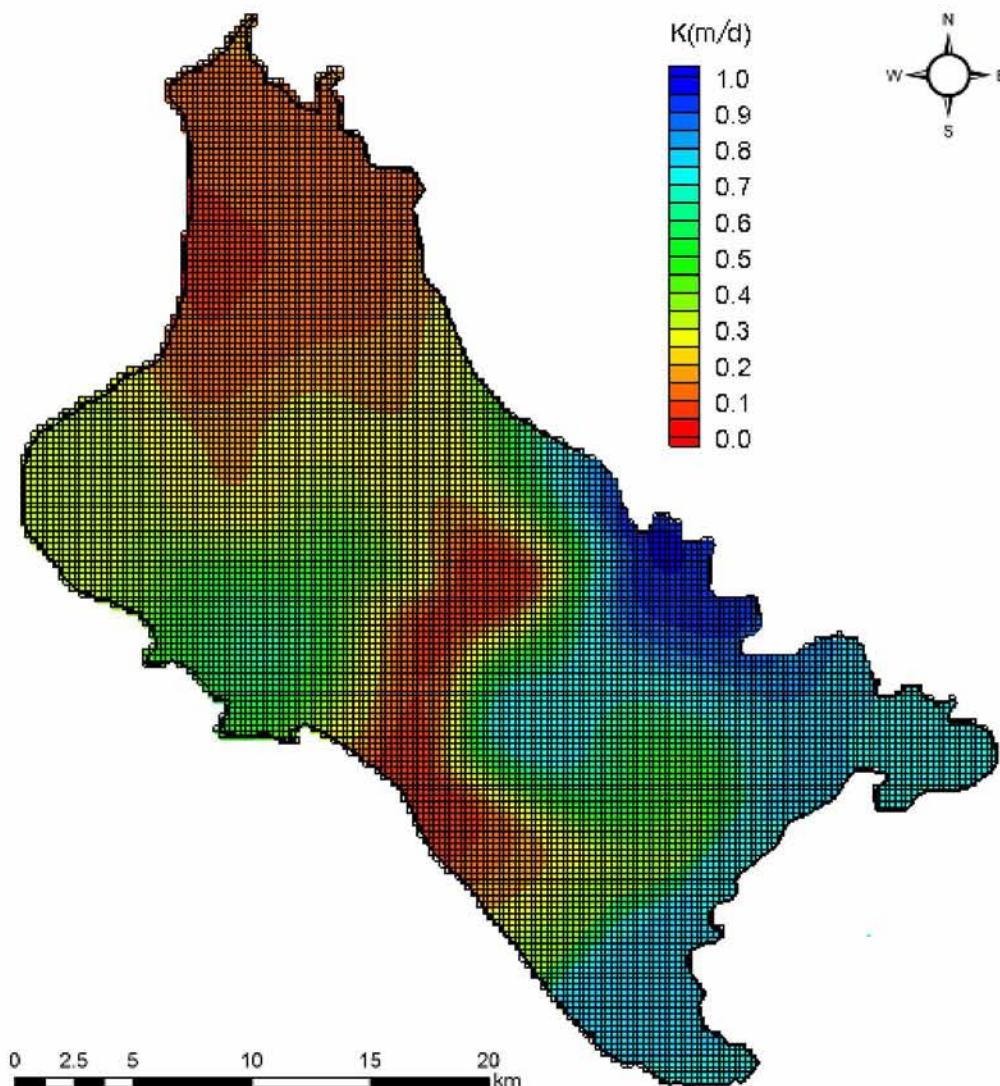


Εικόνα 5.10: Τιμές P , ET_p για όλη τη λεκάνη απορροής για τα έτη 1960-2012 (Sidiropoulos P. et al, 2011).



Εικόνα 5.11: Τιμές μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας για όλη τη λεκάνη απορροή για τα έτη 1960-2012 (Sidiropoulos P. et al, 2011).

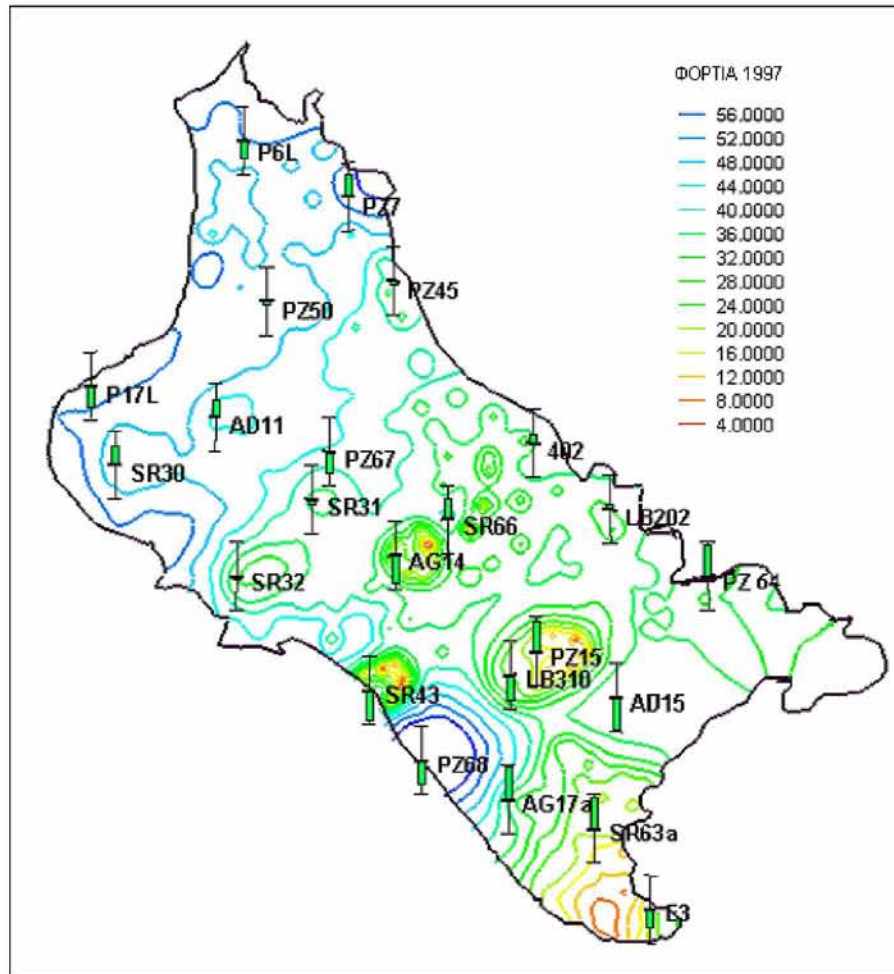
Η υδραυλική αγωγιμότητα ήταν η παράμετρος για την οποία ρυθμίστηκε το MODFLOW και ήταν η μόνη από τις υδρογεωλογικές παραμέτρους που κατανέμεται χωρικά, ενώ οι άλλοι είχαν την ίδια τιμή σε όλη την περιοχή. Η γεωστατιστική προσέγγιση Simple Kriging χρησιμοποιήθηκε για τη χωρική κατανομή (Εικ. 5.11) των 15 στοιχείων διασποράς της υδραυλικής αγωγιμότητας.



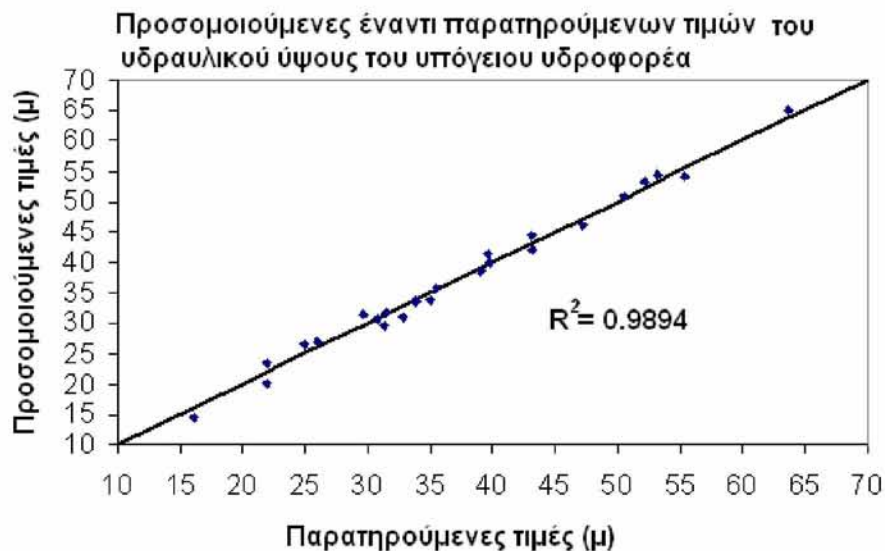
Εικόνα 5.12: Ο κάρναβος του υπόγειου υδροφορέα της λίμνης Κάρλας και ο χάρτης της κατανεμημένης υδραυλικής αγωγιμότητας σε m/d (Sidiropoulos P. et al, 2011).

5.3 Ρύθμιση του μοντέλου προσομοίωσης του υπόγειου υδροφορέα.

Οι παρατηρούμενες τιμές των υδραυλικών υψών για το τέλος της περιόδου προσομοίωσης προέρχονται από τα ίδια πηγάδια παρατήρησης, που προήλθαν και τα αρχικά ύψη. Δίπλα σε κάθε πηγάδι παρατήρησης παριστάνεται και το εκτιμώμενο σφάλμα της παρατηρημένης τιμής του υδραυλικού φορτίου του. Η απεικόνιση του υπόγειου υδροφορέα για την 1/1/1997 φαίνεται στην Εικόνα 5.12 και η γραφική απόδοση του συντελεστή προσδιορισμού (coefficient of determination, R^2), που είναι στατιστική παράμετρος μόνο μορφής, στην Εικόνα 5.13. Σύμφωνα με το σχήμα αυτό η σύγκλιση μεταξύ παρατηρούμενων και υπολογισμένων τιμών είναι ικανοποιητική.

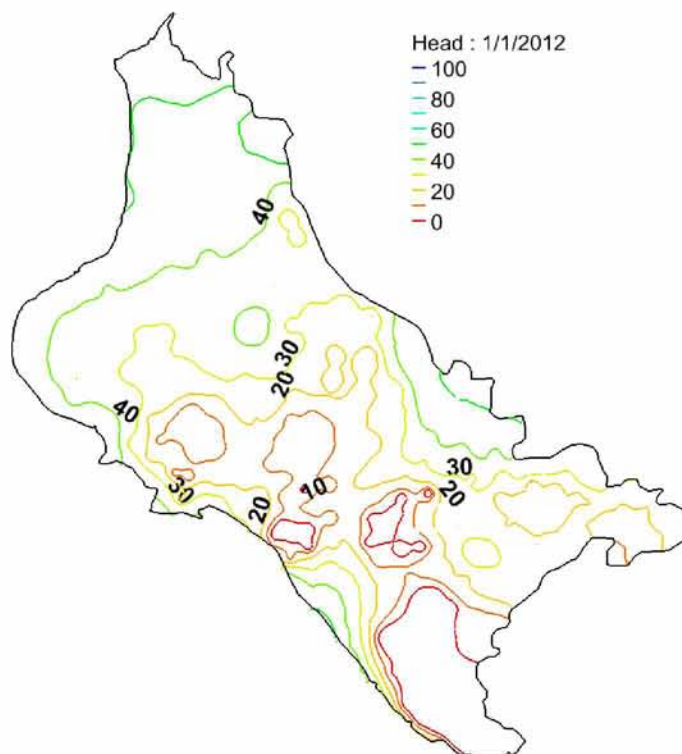


Εικόνα 5.13: Απεικόνιση του υπόγειου υδροφορέα της λίμνης Κάρλας για την 1η Ιανουαρίου 1997 σύμφωνα με τις παρατηρούμενες τιμές (Σιδηρόπουλος Π., 2007).



Εικόνα 5.14: Παρατηρούμενες έναντι προσομοιούμενες τιμές των υδραυλικών υψών του υδροφορέα για τη ρύθμιση του μοντέλου κατά τη δεκαετία '87-'97 (Σιδηρόπουλος Π., 2007).

Στη Εικόνα 5.14 παρουσιάζεται η απεικόνιση του υπόγειου υδροφόρου με τα υδραυλικά ύψη κατά την 1/1/2012.



Εικόνα 5.15: Υδραυλικά ύψη για την 1η Ιανουαρίου 2012.

5.4 Παράμετροι και δεδομένα που εισήχθησαν στο μοντέλο βελτιστοποίησης του προβλήματος διαχείρισης

Η διαχείριση του προβλήματος της υποβάθμισης του υδροφόρου ορίζοντα θα γίνει επιλύοντας ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με τη χρήση του μοντέλου GWM. Το GWM είναι μία προσθήκη για το MODFLOW που χρειάζεται μια λύση του για να μπορέσει να έχει τα απαραίτητα δεδομένα για την εκτέλεση του (για λεπτομέρειες βλέπε Κεφάλαιο 4). Κατά τη βελτιστοποίηση του προβλήματος διαχείρισης, όπως προαναφέρθηκε, η συνεισφορά του ταμιευτήρα θεωρείται δεδομένη, όπως προβλέπει το χρονοδιάγραμμα του έργου ανασύστασης της λίμνης Κάρλας (Κεφάλαιο 1.6). Οπότε για τις υπόλοιπες υδατικές ανάγκες σε άρδευση και ύδρευση, στόχος είναι η εύρεση εκείνων των βέλτιστων τιμών άντλησης που θα τις ικανοποιούν, υποκείμενοι σε κάποιους περιορισμούς, αλλά ταυτόχρονα η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα την 1/1/2044 (έτος-στόχος) να έχει επανέλθει σε μία συγκεκριμένη τιμή (στάθμη-στόχος).

Ένα μαθηματικό μοντέλο διαχείρισης και λήψης αποφάσεων, όπως το GWM, αποτελείται από τρία στοιχεία: τις μεταβλητές απόφασης (decision variables), την αντικειμενική συνάρτηση (objective function) και ένα σύνολο από περιορισμούς (constraints).

Οι μεταβλητές απόφασης είναι οι παροχές άντλησης των γεωτρήσεων (αρδευτικές και υδρευτικές) οι οποίες θα μετέχουν τελικά στο πρόβλημα διαχείρισης.

Πρώτα απ' όλα πρέπει να καθοριστούν ποιές γεωτρήσεις θα συμμετέχουν στο πρόβλημα ώστε στο τέλος το GWM να δώσει τη βέλτιστη τιμή άντλησης για κάθε μία από αυτές. Αρχικά πρέπει να εκτελεστεί μία φορά το MODFLOW από τις 1/1/1987 έως τις 1/1/2044 για να δώσει όλα τα απαραίτητα δεδομένα που χρειάζεται το GWM και να βγάλει ποιες από τις γεωτρήσεις θα έχουν να δώσουν νερό κατά το έτος-στόχο 2044, έχοντας όμως πριν μηδενίσει τις παροχές άντλησης (ώστε το GWM, να είναι αυτό που θα καθορίσει τις τιμές των παροχών μέσω της διαδικασίας βελτιστοποίησης) των επιλεγμένων γεωτρήσεων για την περίοδο διαχείρισης 1/1/2012 έως 1/1/2044. Οι γεωτρήσεις εκείνες που κατά την 1/1/2044 θα έχουν στάθμη υδροφόρου ορίζοντα μεγαλύτερη της στάθμης που έχουμε θέση ως στόχο, θα εισαχθούν στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Αυτές οι γεωτρήσεις εισάγονται στο αρχείο DECVAR.

Η αντικειμενική συνάρτηση (αρχείο OBJFNC) μεγιστοποιεί το σταθμισμένο άθροισμα των μεταβλητών απόφασης υποκείμενη όμως σε κάποιους περιορισμούς. Έχει τη μορφή:

$$\text{Maximize} \sum_{n=1}^N 1.0Q_{w_n} T_{Q_{w_n}} \quad \text{Εξ. 5.2}$$

Εδώ όλες οι γεωτρήσεις συμμετέχουν όλες κατά το ίδιο χρονικό διάστημα και με ίδιο σταθμισμένο συντελεστή ίσο με 1.0 οπότε η αντικειμενική συνάρτησης γίνεται:

$$\text{Maximize} \sum_{n=1}^N 1.0Q_{w_n} \quad \text{Εξ. 5.3}$$

Όπου:

Q_{w_n} οι παροχές άντλησης των γεωτρήσεων

$T_{Q_{w_n}}$ η συνολική διάρκεια της ροής στη θέση του πηγασιού n

Οι περιορισμοί αφορούν περιορισμούς στο ύψος του υδραυλικού φορτίου στο ρυθμό άντλησης νερού ανά γεώτρηση. Οι περιορισμοί στο υδραυλικό φορτίο (αρχείο HEDCON) είναι στη θέση της γεώτρησης και πρέπει κατά την 1/1/2044 η τιμή που θα προκύψει να είναι μεγαλύτερη ή ίση από αυτή που θέλουμε να ανέλθει ο υδροφόρος ορίζοντας. Έχουν την παρακάτω μορφή:

$$h_{i,j,k,t} \geq h_{i,j,k,t}^l \quad \text{Εξ. 5.4}$$

Όπου:

$h_{i,j,k,t}$ υδραυλικό φορτίο στη θέση περιορισμού i, j, k για την περίοδο άντλησης t ,

$h_{i,j,k,t}^l$ το καθορισμένο ανώτερο όριο του υδραυλικού φορτίου στη θέση περιορισμού i, j, k για την περίοδο άντλησης t .

Στο ρυθμό άντλησης έχει τεθεί για όλες τις γεωτρήσεις ως μέγιστη η 2.000 m³/d και ελάχιστη η τιμή 0 (αρχείο VARCON). Έχει δηλαδή τη μορφή:

$$0 \leq Qw_n \leq Qw_n^u, \quad \text{Εξ. 5.5}$$

Όπου:

Qw_n οι παροχές άντλησης των γεωτρήσεων

Qw_n^u το καθορισμένο ανώτερο όριο των παροχών άντλησης των γεωτρήσεων

Το αρχείο NAME περιέχει τα ονόματα των περισσότερων αρχείων εισόδου και εξόδου που χρησιμοποιεί το MODFLOW, και αποφασίζει ποιες από τις επιλογές του θα είναι ενεργοποιημένες

Το αρχείο GWM χρησιμοποιείται για να ενεργοποιεί τη διαδικασία GWM και για να αναγνωρίζει τα αρχεία που θα ανοιχτούν για την εκτέλεση του GWM. Τέσσερα είδη πληροφοριών καταγράφονται στα αρχεία εισόδου (input files) για το πρόβλημα διαχείρισης: οι μεταβλητές απόφασης, η αντικειμενική συνάρτηση, οι περιορισμοί, και η λύση και οι παράμετροι ελέγχου των αποτελεσμάτων.

Το αρχείο SOLN καθορίζει πολλές μεταβλητές που ελέγχουν τον αλγόριθμο λύσης του προβλήματος βελτιστοποίησης και τον τύπο και την ποσότητα των αποτελεσμάτων που καταγράφονται στα αρχεία αποτελεσμάτων (output files). Επειδή πρόκειται για ένα μη γραμμικό πρόβλημα η προσέγγιση βασίζεται στον αλγόριθμο διαδοχικού γραμμικού προγραμματισμού (SLP) και αναφέρεται ως προσέγγιση SLP. Βασίζεται στις επαναλαμβανόμενες γραμμικοποιήσεις των μη γραμμικών χαρακτηριστικών του προβλήματος διαχείρισης, και υλοποιείται με επανυπολογισμό του μητρώου απόκρισης για κάθε διαδοχικό γραμμικό πρόγραμμα. Εισήχθησαν τα εξής δεδομένα:

- SLPITMAX=500, LPITMAX=1000, BBITMAX=0
- SLPVCRIT=1.0, SLPZCRIT=0.01, DINIT=0.25, DMIN=0.5, DSC=2
- NSIGDIG=1, NPGNMX=10, PGFACT=0.8, AFACT=0.5, NINFMX=500, CRITMFC=0
- SLPITPRT=1, BBITPRT=0, RANGE=0
- IBASE=0

Πάντα δύο αρχεία εξόδου παράγονται μετά την εκτέλεση του GWM: ένα αρχείο GLOBAL και ένα αρχείο LIST. Τα περισσότερα από τα αποτελέσματα ενός συγκεκριμένου τρεξίματος του GWF βρίσκονται στο αρχείο LIST. Εδώ βρίσκονται και τα αποτελέσματα από την διαδικασία GWF που περιλαμβάνουν τα υπολογισμένα υδραυλικά φορτία. Το αρχείο GLOBAL περιέχει πληροφορίες που αφορούν το σύνολο ενός τρεξίματος του GWM. Εδώ αναφέρονται και τα αποτελέσματα της διαδικασίας GWF για τη βασική εκτέλεση του προβλήματος, συμπεριλαμβάνοντας και την κατάσταση του κάθε περιορισμού. Στο τελευταίο μέρος της ενότητας GWM ('Ground-Water Management Solution') παρέχει πληροφορίες σχετικά με την επίλυση του προβλήματος της διαχείρισης, συμπεριλαμβανομένης της τιμής της αντικειμενικής

συνάρτησης, τις βέλτιστες τιμές για κάθε μία από τις μεταβλητές απόφασης, καθώς και τους δεσμευτικούς περιορισμούς.

Έτσι παίρνοντας το πλήθος των γεωτρήσεων και τις αντίστοιχες βέλτιστες παροχές άντλησης από το GWM μπορούμε να τις εισάγουμε εκ νέου στο MODLFLOW ώστε να προσομοιώσουμε τη λειτουργία του συστήματος, συγκρίνοντας για κάθε εναλλακτικό σενάριο διαχείρισης τις συνολικές απολήψεις αλλά και τις στάθμες του υδροφόρου ορίζοντα την 1/1/2044. Ένα ακόμα σημαντικό στοιχείο που παίρνουμε είναι και ο συνολικός ανανεώσιμος όγκος για την περίοδο διαχείρισης.

5.5 Εναλλακτικά σενάρια διαχείρισης

Όπως φαίνεται από τις Εικόνες 5.4 και 5.14 η ταπείνωση του υδροφορέα λόγω της υπερεκμετάλλευσης του κατά το διάστημα 1/1/1987 έως 1/1/2012 (περίοδο προσομοίωσης) είναι μεγάλη. Ειδικά σε ορισμένες περιοχές όπως στη ζώνη άντλησης 1 το φαινόμενο είναι πολύ έντονο. Αυτό σε συνδυασμό με την προγραμματισμένη εγκατάσταση 40 νέων υδρευτικών γεωτρήσεων της ΔΕΥΑΜΒ σε 3 φάσεις στη ζώνη 1, θα επιδεινώσει την κατάσταση ακόμα περισσότερο (Σιδηρόπουλος Π, Μυλόπουλος Ν. και Λουκάς Α., 2009).

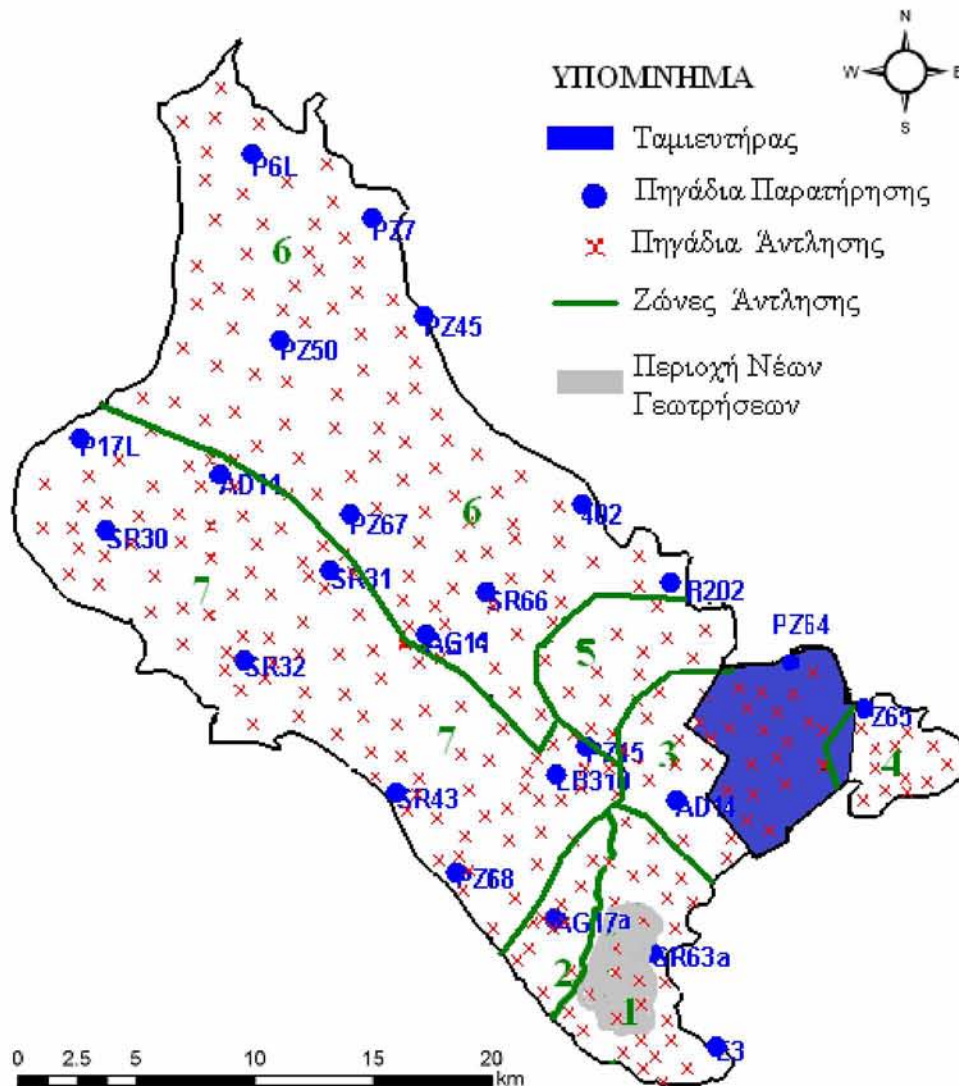
Volumetric Budget 1987-2012	
Πηγές ανανέωσης και γειτονικές εισροές	1198,51 hm ³
Αντλούμενο	2554,11 hm ³
Μη ανανεώσιμο υπόγειο νερό	1355,60 hm ³

Πίνακας 5.5: Υδατικό ισοζύγιο για την περίοδο προσομοίωσης 1987-2012.

Σύμφωνα με τις μελέτες οι γεωτρήσεις αυτές θα εγκατασταθούν στη ζώνη άντλησης 1 σε τρεις φάσεις. Οι 14 γεωτρήσεις της Α1 φάσης ξεκινούν τη λειτουργία τους την 1/1/2012, οι 17 της Α2 φάσης την 1/1/2022 και οι τελευταίες 9 της Β φάσης την 1/1/2030 (Εικ. 5.7). Οι υδρογεωτρήσεις (50 στο σύνολο μαζί με τις παλιές) θα είναι ικανές να τροφοδοτήσουν την πόλη του Βόλου (παροχή άντλησης $q=50\text{m}^3/\text{ώρα}$, χρόνος άντλησης 18 ώρες ημερησίως) μέχρι 45.000 m^3 την ημέρα ή $10.600.000\text{ m}^3$ ετησίως με ποιοτικώς άριστο νερό. Η ποσότητα αυτή υπερβαίνει κατά 55% τη σημερινή ποσότητα που προέρχεται από τις υδρογεωτρήσεις ($6.840.000\text{ m}^3$) που υδρεύουν τη μείζονα περιοχή του πολεοδομικού συγκροτήματος Βόλου.

Αντλήσεις (hm ³)	Α΄ ΦΑΣΗ				Β΄ ΦΑΣΗ		
	2012	1 ^ο Στάδιο	2022	2 ^ο Στάδιο	2030	2044	
Άρδευση		3.9	3.9	0			
Υδρευση	Οικισμοί	1	2	2			
	ΔΕΥΑΜΒ	Υπάρχουσες	10 γεωτρήσεις --> 2.1	10 γεωτρήσεις --> 2.1	10 γεωτρήσεις --> 2.1		
		Νέες	14 γεωτρήσεις --> 3.5	31 γεωτρήσεις --> 6.8	40 γεωτρήσεις --> 11.6		
Σύνολο		10.5	14.8	15.7			

Πίνακας 5.6: Προγραμματισμός γεωτρήσεων για τη ζώνη 1 του υπόγειου υδροφόρου.



Εικόνα 5.16: Η περιοχή εγκατάσταση των νέων υδρευτικών γεωτρήσεων της ΔΕΥΑΜΒ στη λεκάνη της Κάρλας.

	Γεωτρήσεις	X	Y
A1 ΦΑΣΗΣ	G1	651896	4360867
	G2	651433	4361847
	G3	651536	4362280
	G4	651846	4362611
	G5	652033	4362769
	G6	652188	4362397
	G7	652513	4361230
	G8	652327	4360802
	G9	652702	4361538
	G10	651548	4361551
	G11	651172	4361959
	G12	650970	4362244
	G13	651564	4362586
	G14	651544	4362950
A2 ΦΑΣΗΣ	G15	650994	4363089
	G16	651029	4363288
	G17	650634	4363333
	G18	650769	4363089
	G19	651059	4363515
	G20	651572	4363263
	G21	651267	4362815
	G22	650730	4365700
	G23	651043	4363857
	G24	651471	4366081
	G25	652094	4365981
	G26	652654	4365603
	G27	652349	4365417
	G28	651527	4364981
	G29	651364	4364553
	G30	651905	4365407
	G31	650970	4365461
B ΦΑΣΗΣ	G32	651300	4365674
	G33	651752	4365936
	G34	651551	4365976
	G35	650279	4367392
	G36	650971	4367754
	G37	651329	4367889
	G38	651924	4368192
	G39	652196	4367614
	G40	649988	4367212

Πίνακας 5.7: Οι υδρευτικές γεωτρήσεις της ΔΕΥΑΜΒ ανά φάση εγκατάστασης.

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν δέκα σενάρια διαχείρισης με στόχο τη βέλτιστη απόδοση των ανανεώσιμων υπόγειων υδάτων της λεκάνης της λίμνης Κάρλας. Για την κάλυψη των αρδευτικών και υδρευτικών αναγκών της περιοχής αλλά ταυτόχρονα, και την ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα ώστε να υπάρχουν τα

αναγκαία αποθέματα νερού για το μέλλον. Τα σενάρια διαχείρισης πραγματοποιήθηκαν για την χρονική περίοδο 2012-2044, εκμεταλλευόμενοι την πλήρη λειτουργία του ταμιευτήρα (Πίνακας 5.8).

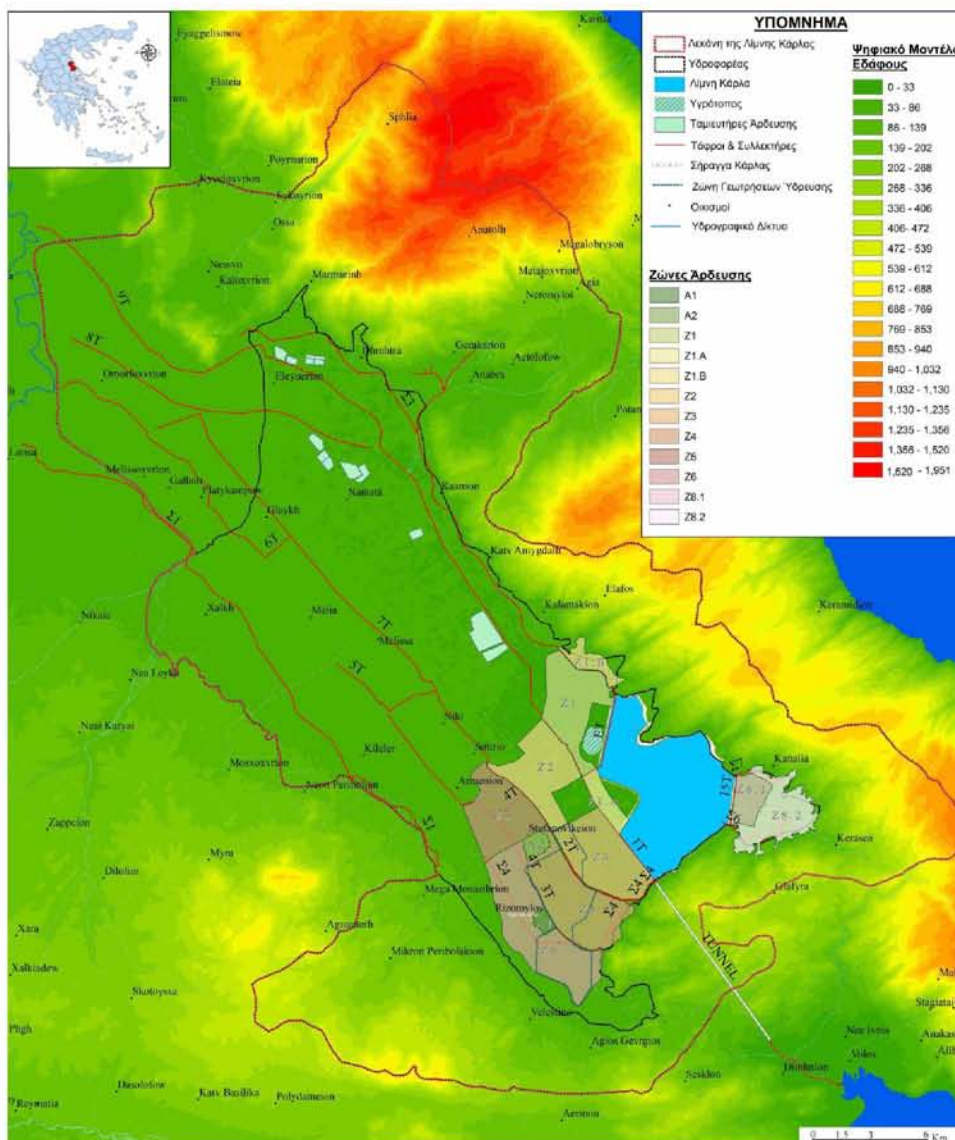
Στο συνδυαστικό μοντέλο, οι εισροές προέρχονται, από την κατείδυση λόγω της βροχόπτωσης, από τη διαρροή του ταμιευτήρα προς τον υδροφόρα και από τις πλευρικές εισροές στο δυτικό όριο του, ενώ οι εκροές τις ποσότητες που αντλούνται από τις γεωτρήσεις.

Κατά την περίοδο διαχείρισης 1/1/2012 έως 1/1/2044 για όλα τα σενάρια διαχείρισης γίνονται οι εξής παραδοχές:

1. Οι παλιές 10 υδρευτικές γεωτρήσεις D δε συμμετέχουν στο πρόβλημα βελτιστοποίησης οπότε λειτουργούν κανονικά σύμφωνα με το χρονοδιάγραμμα.
2. Η έναρξη λειτουργίας του ταμιευτήρα κατά την 1^η Ιανουαρίου 2012 θα σημάνει την εξυπηρέτηση των αρδευτικών ζωνών σε νερό μόνο από τον ταμιευτήρα. Οπότε οι αρδευτικές γεωτρήσεις άντλησης σε αυτές τις ζώνες σταματούν να λειτουργούν και δε συμμετέχουν στο πρόβλημα βελτιστοποίησης (Εικ. 5.16). Άρα το ίδιο ισχύει και για τις γεωτρήσεις της ζώνης άντλησης 4.
3. Οι αρδευτικές γεωτρήσεις της ζώνης άντλησης 1 σταματούν τη λειτουργία τους σύμφωνα με το χρονοδιάγραμμα της μελέτης έργων ενίσχυσης της ύδρευσης της μείζονος περιοχής Βόλου και άρα δε συμμετέχουν στο πρόβλημα βελτιστοποίησης.
4. Οι αρδευτικές γεωτρήσεις που βρίσκονταν στην περιοχή του ταμιευτήρα καταργούνται και άρα δε συμμετέχουν στο πρόβλημα βελτιστοποίησης (ζώνη άντλησης 3).
5. Η κατείδυση λόγω της ύπαρξης του ταμιευτήρα αυξάνει τη συνολική κατείδυση στην εν λόγω περιοχή. Αυτή η συνεισφορά εκτιμάται με μέση ετήσιο όγκο που φτάνει τα $18 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ (Sidiropoulos P., Folia S., Mylopoulos N. and Loukas A., 2008).

<p>ΟΜΑΔΑ Α: Εξετάζεται η επιρροή των νέων υδρευτικών γεωτρήσεων της ΔΕΥΑΜΒ</p>	Σενάριο 1^ο	Υδρευτικές ανοικτές με στάθμη το 2044 ίση με 0	<ul style="list-style-type: none"> • Οι παλιές 10 υδρευτικές γεωτρήσεις λειτουργούν κανονικά σύμφωνα με το χρονοδιάγραμμα • Οι αρδευτικές ζώνες εξυπηρετούνται αποκλειστικά από τον ταμιευτήρα • Οι αρδευτικές γεωτρήσεις της ζώνης 1 καταργούνται • Οι αρδευτικές γεωτρήσεις της ζώνης 3 (ταμιευτήρας) καταργούνται • Η διήθηση από τον ταμιευτήρα είναι 18 hm³/y
	Σενάριο 2^ο	Υδρευτικές κλειστές με στάθμη το 2044 ίση με 0	
	Σενάριο 3^ο	Υδρευτικές ανοικτές με στάθμη το 2044 ίση με αυτή του 1987	
	Σενάριο 4^ο	Υδρευτικές κλειστές με στάθμη το 2044 ίση με αυτή του 1987	
<p>ΟΜΑΔΑ Β: Εξετάζονται σενάρια αλλαγής θέσης των υδρευτικών γεωτρήσεων της ΔΕΥΑΜΒ σε άλλες ζώνες άντλησης</p>	Σενάριο 5^ο	Υδρευτικές στη ζώνη 2 με στάθμη το 2044 ίση με 0	<p>Όλες οι παραπάνω παραδοχές συν:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Οι 40 νέες υδρευτικές γεωτρήσεις εισάγονται στο GWM σαν μεταβλητές απόφασης • Μετακινούνται τηρώντας ανά ομάδα τις μεταξύ τους αποστάσεις • Οι 40 νέες υδρευτικές γεωτρήσεις δεν μετακινούνται στις ζώνες 6 και 7 • Μόνο οι αρδευτικές γεωτρήσεις της ζώνης 6 και 7 εισάγονται στο GWM σαν μεταβλητές απόφασης • Σενάρια διαχείρισης για μετακίνηση των υδρευτικών γεωτρήσεων στις ζώνες 2 και 1 με στάθμη το 2044 ίση με αυτή του 1987 δεν εξετάζονται
	Σενάριο 6^ο	Υδρευτικές στη ζώνη 4 με στάθμη το 2044 ίση με 0	
	Σενάριο 7^ο	Υδρευτικές στη ζώνη 4 με στάθμη το 2044 ίση με αυτή 1987	
	Σενάριο 8^ο	Υδρευτικές στη ζώνη 5 με στάθμη το 2044 ίση με 0	
	Σενάριο 9^ο	Υδρευτικές στη ζώνη 5 με στάθμη το 2044 ίση με αυτή 1987	
	Σενάριο 10^ο	Υδρευτικές στη ζώνη 1 με στάθμη το 2044 ίση με 0	

Πίνακας 5.8: Εναλλακτικά σενάρια διαχείρισης.



Εικόνα 5.17: Ζώνες άρδευσης της λεκάνης της Κάρλας (Σιδηρόπουλος Π. και συνεργάτες, 2012)

Τα σενάρια διαχείρισης χωρίζονται σε δύο ομάδες και παρουσιάζονται παρακάτω.

5.5.1 Σενάρια διαχείρισης Ομάδας Α

Στην Ομάδα Α εξετάζεται η επιρροή των υδρευτικών γεωτρήσεων της ΔΕΥΑΜΒ στο υδατικό ισοζύγιο κατά την περίοδο διαχείρισης, για τις δύο διαφορετικές επιθυμητές στάθμες «στόχους» του υδροφόρου ορίζοντα για το έτος 2044. Αναλυτικά:

Σενάριο 1^ο : Υδρευτικές ανοικτές με στάθμη το 2044 ίση με 0.

Σενάριο 2^ο : Υδρευτικές κλειστές με στάθμη το 2044 ίση με 0.

Σενάριο 3^ο : Υδρευτικές ανοικτές με στάθμη το 2044 ίση με αυτή του 1987.

Σενάριο 4^ο : Υδρευτικές κλειστές με στάθμη το 2044 ίση με αυτή του 1987.

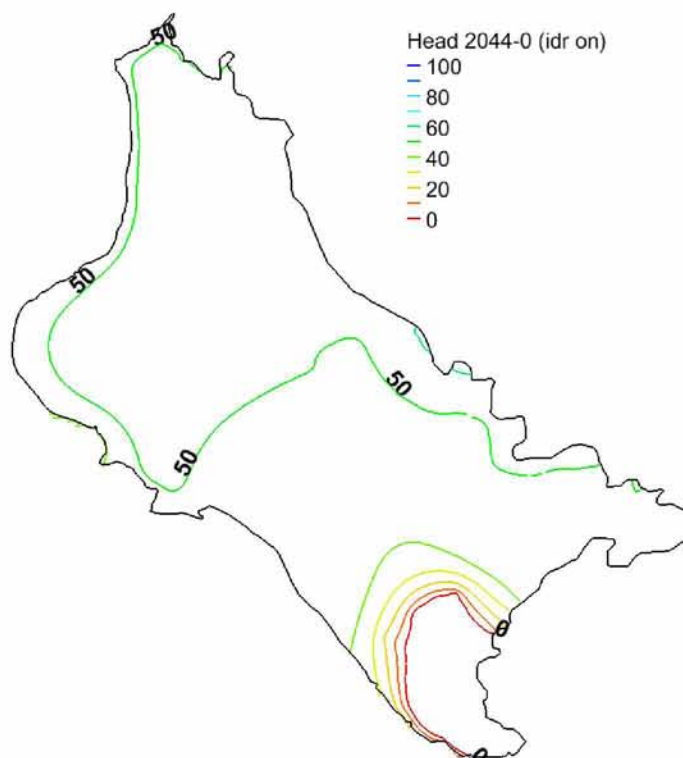
Ουσιαστικά τα παραπάνω σενάρια δεν αποτελούν σενάρια διαχείρισης αλλά κρίνονται απαραίτητα διότι θα δείξουν την επιρροή των νέων υδρευτικών γεωτρήσεων στον υπόγειο υδροφόρο της περιοχής κατά τη διάρκεια της περιόδου διαχείρισης, και θα αποτελέσουν κριτήριο για την επιλογή των σεναρίων διαχείρισης της Ομάδα Β.

Στη λύση διαχείρισης συμμετέχουν μόνο αρδευτικές γεωτρήσεις.

5.5.1.1 1^ο Σενάριο διαχείρισης

Σε αυτό το σενάριο υπάρχουν τα εξής δεδομένα:

- Επιτρέπεται η λειτουργία των νέων υδρευτικών γεωτρήσεων σύμφωνα με το χρονοδιάγραμμα της ΔΕΥΑΜΒ
- Η επιθυμητή στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για την 1/1/2044 ορίζεται η επιφάνεια της θάλασσας (0m).



Εικόνα 5.18: Χάρτης με τα απόλυτα υδραυλικά ύψη για την 1η Ιανουαρίου 2044 για το 1^ο Σενάριο.

Ζώνη Άντλησης	Έκταση (h)	Γεωτρήσ εις
1	620	0
2	1490	5
3	3500	0
4	4500	0
5	1500	2
6	21000	56
7	14400	59
Σύνολο	47010	122

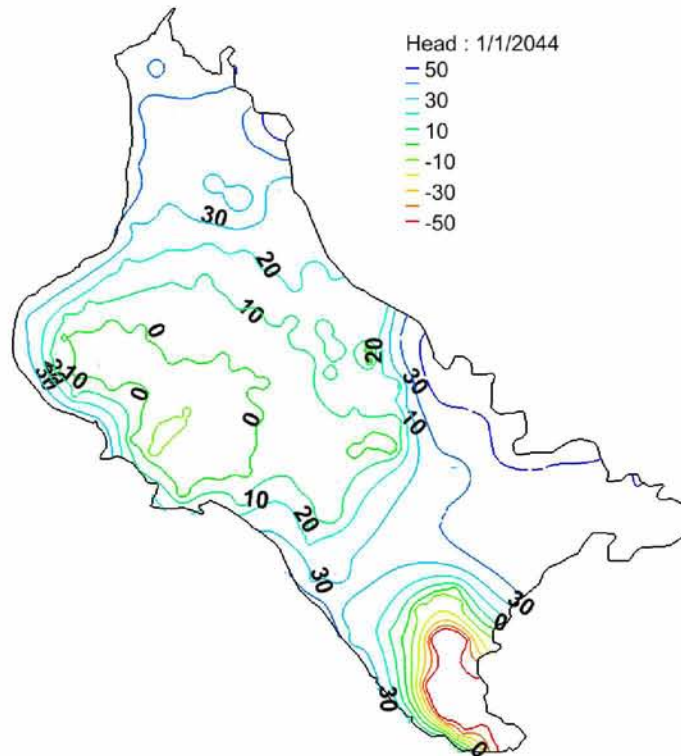
Πίνακας 5.9: Πλήθος αρδευτικών γεωτρήσεων ανά ζώνη άντλησης που θα εισαχθούν στο GWM για το 1^ο Σενάριο.

Ζώνες άντλησης		1	2	3	4	5	6	7	Σύνολο
Μέση ετήσια απόληψη για την περίοδο 2012-2044 (hm ³) Σενάριο 1	Γεωτρήσεις	0	5	0	0	2	56	54	117
	Άρδευση	0	2,3570	0	0	1,3365	24,6471	24,6871	53,028
Συνολική απόληψη για την περίοδο 2012-2044 (hm ³) Σενάριο 1	1696,8854								

Πίνακας 5.10: Πλήθος αρδευτικών γεωτρήσεων μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης ανά ζώνη άντλησης και οι αντίστοιχες απολήψεις νερού για το 1^ο Σενάριο.

Μέσος ετήσιος ανανεώσιμος όγκος για την περίοδο 2012-2044 (hm ³)	58,285
Συνολικός ανανεώσιμος όγκος για την περίοδο 2012-2044 (hm ³)	1865,124

Πίνακας 5.11: Μέσος ετήσιος και ο συνολικός ανανεώσιμος όγκος νερού για το 1^ο Σενάριο.

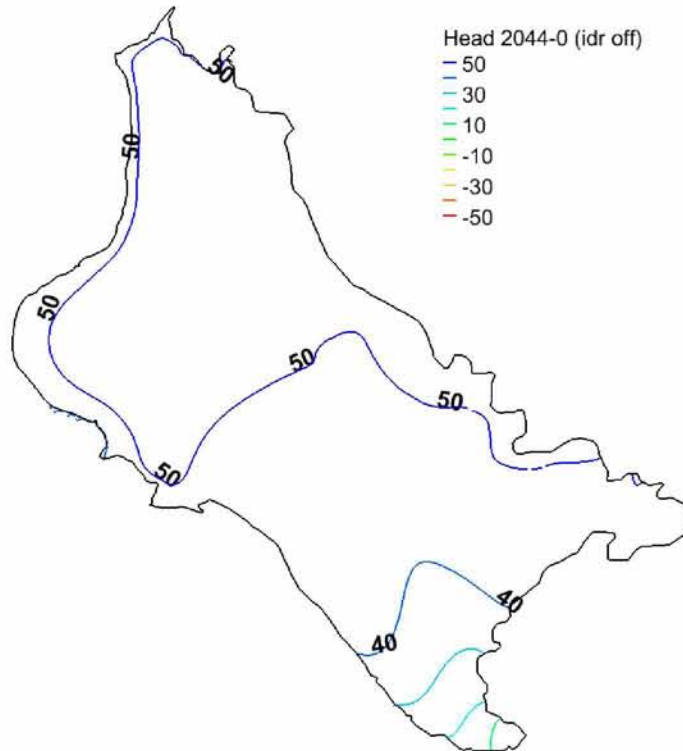


Εικόνα 5.19: Χάρτης των απόλυτων υδραυλικών υψών για την 1η Ιανουαρίου 2044 με τις βέλτιστες παροχές για το 1^ο Σενάριο.

5.5.1.2 2^ο Σενάριο διαχείρισης

Σε αυτό το σενάριο υπάρχουν τα εξής δεδομένα:

- Ακυρώνεται η λειτουργία των νέων υδρευτικών γεωτρήσεων σύμφωνα με το χρονοδιάγραμμα της ΔΕΥΑΜΒ
- Η επιθυμητή στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για την 1/1/2044 ορίζεται η επιφάνεια της θάλασσας (0m).



Εικόνα 5.20: Χάρτης με τα απόλυτα υδραυλικά ύψη για την 1η Ιανουαρίου 2044 για το 2^ο Σενάριο.

Ζώνη Αντλησης	Έκταση (h)	Γεωτρήσεις
1	620	0
2	1490	5
3	3500	0
4	4500	0
5	1500	2
6	21000	56
7	14400	59
Σύνολο	47010	122

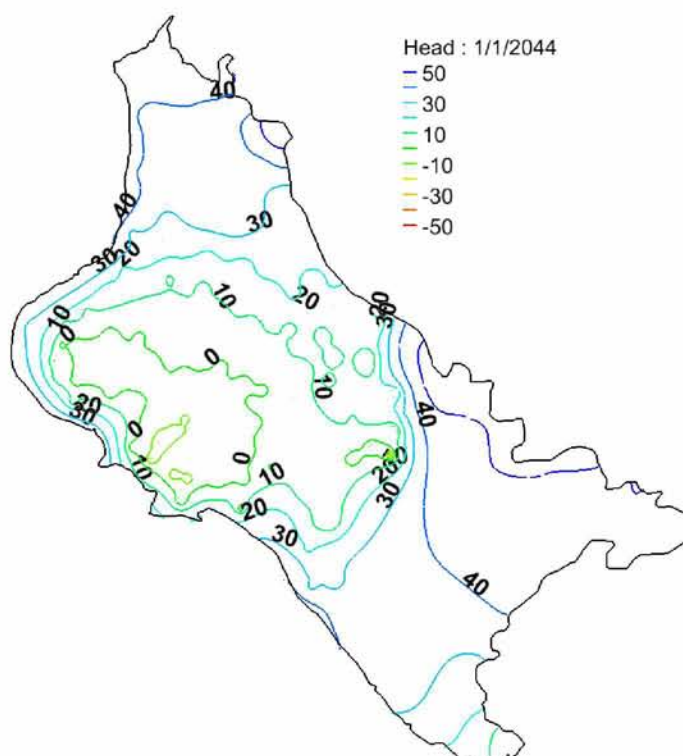
Πίνακας 5.12: Πλήθος αρδευτικών γεωτρήσεων ανά ζώνη άντλησης που θα εισαχθούν στο GWM για το 2^ο Σενάριο.

Ζώνες άντλησης		1	2	3	4	5	6	7	Σύνολο
Μέση ετήσια απόληψη για την περίοδο 2012-2044 (hm ³) Σενάριο 2	Γεωτρήσεις	0	5	0	0	2	56	54	117
	Άρδευση	0	2,3684	0	0	1,3462	24,6582	24,7193	53,092
Συνολική απόληψη για την περίοδο 2012-2044 (hm ³) Σενάριο 2	1698,9487								

Πίνακας 5.13: Πλήθος αρδευτικών γεωτρήσεων μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης ανά ζώνη άντλησης και οι αντίστοιχες απολήψεις νερού για το 2^ο Σενάριο.

Μέσος ετήσιος ανανεώσιμος όγκος για την περίοδο 2012-2044 (hm ³)	54,236
Συνολικός ανανεώσιμος όγκος για την περίοδο 2012-2044 (hm ³)	1735,555

Πίνακας 5.14: Μέσος ετήσιος και ο συνολικός ανανεώσιμος όγκος νερού για το 2^ο Σενάριο.

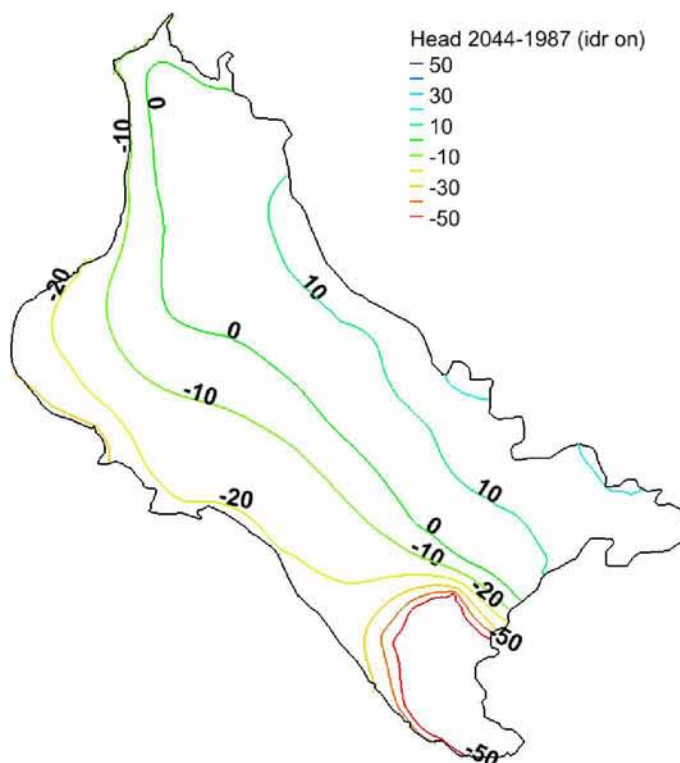


Εικόνα 5.21: Χάρτης των απόλυτων υδραυλικών υψών για την 1η Ιανουαρίου 2044 με τις βέλτιστες παροχές για το 2^ο Σενάριο.

5.5.1.3 3^ο Σενάριο διαχείρισης

Σε αυτό το σενάριο υπάρχουν τα εξής δεδομένα:

- Επιτρέπεται η λειτουργία των νέων υδρευτικών γεωτρήσεων σύμφωνα με το χρονοδιάγραμμα της ΔΕΥΑΜΒ
- Η επιθυμητή στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για την 1/1/2044 ορίζεται ίση με τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα κατά την 1/1/1987 (Εικ. 5.4).



Εικόνα 5.22: Χάρτης με τη διαφορά των απόλυτων υδραυλικών υψών μεταξύ της 1ης Ιανουαρίου 2044 και 1ης Ιανουαρίου 1987 για το 3^ο Σενάριο.

Ζώνη Αντλησης	Έκταση (h)	Γεωτρήσεις
1	620	0
2	1490	0
3	3500	2
4	4500	5
5	1500	2
6	21000	41
7	14400	1
Σύνολο	47010	51

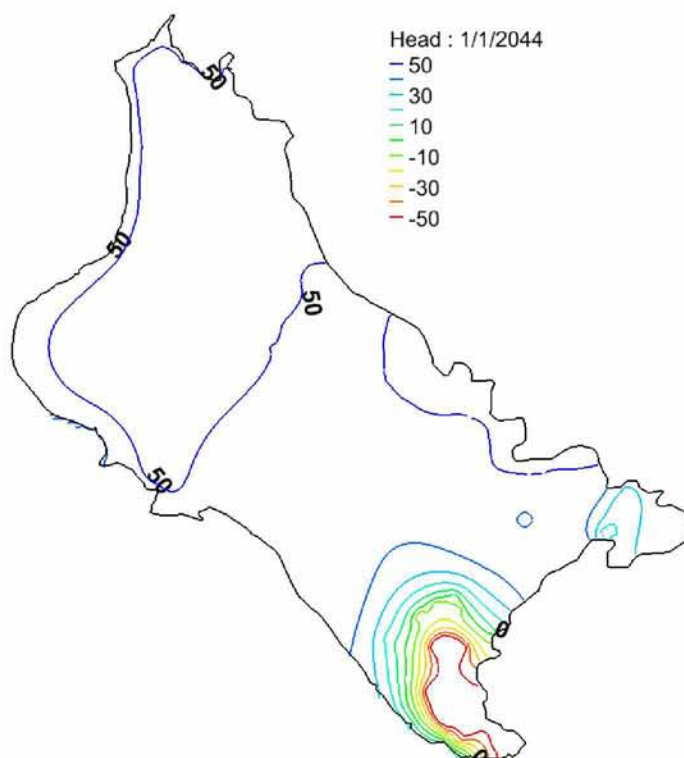
Πίνακας 5.15: Πλήθος αρδευτικών γεωτρήσεων ανά ζώνη άντλησης που θα εισαχθούν στο GWM για το 3^ο Σενάριο.

Ζώνες άντλησης		1	2	3	4	5	6	7	Σύνολο
Μέση ετήσια απόληψη για την περίοδο 2012-2044 (hm ³) Σενάριο 3	Γεωτρήσεις	0	0	2	4	0	33	0	39
	Άρδευση	0	0	0,7293	1,3492	0	3,6999	0	5,778
Συνολική απόληψη για την περίοδο 2012-2044 (hm ³) Σενάριο 3	1698,9487								

Πίνακας 5.16: Πλήθος αρδευτικών γεωτρήσεων μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης ανά ζώνη άντλησης και οι αντίστοιχες απολήψεις νερού για το 3^ο Σενάριο.

Μέσος ετήσιος ανανεώσιμος όγκος για την περίοδο 2012-2044 (hm ³)	50,544
Συνολικός ανανεώσιμος όγκος για την περίοδο 2012-2044 (hm ³)	1617,393

Πίνακας 5.17: Μέσος ετήσιος και ο συνολικός ανανεώσιμος όγκος νερού για το 3^ο Σενάριο.

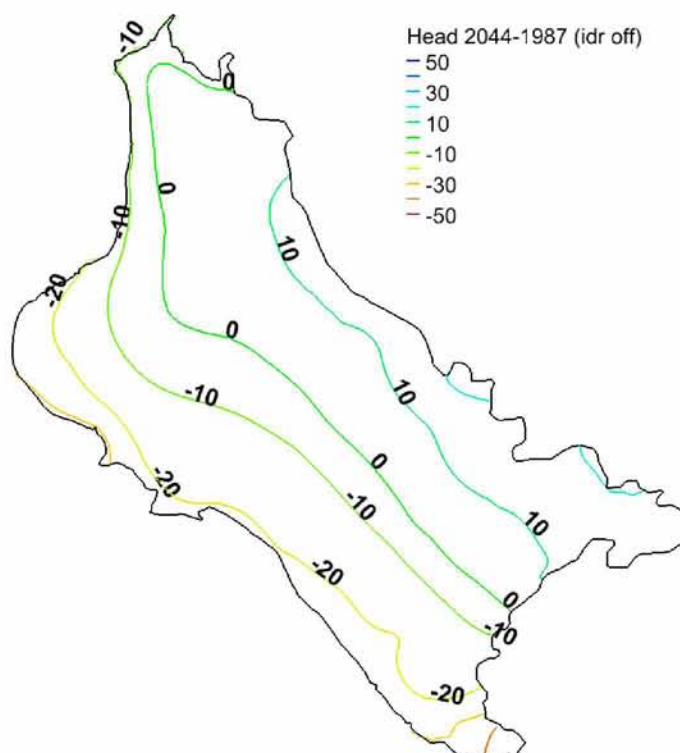


Εικόνα 5.23: Χάρτης των απόλυτων υδραυλικών υψών για την 1η Ιανουαρίου 2044 με τις βέλτιστες παροχές για το 3^ο Σενάριο.

5.5.1.4 4^ο Σενάριο διαχείρισης

Σε αυτό το σενάριο υπάρχουν τα εξής δεδομένα:

- Ακυρώνεται η λειτουργία των νέων υδρευτικών γεωτρήσεων σύμφωνα με το χρονοδιάγραμμα της ΔΕΥΑΜΒ
- Η επιθυμητή στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για την 1/1/2044 ορίζεται ίση με τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα κατά την 1/1/1987 (Εικ. 5.4).



Εικόνα 5.24: Χάρτης με τη διαφορά των απόλυτων υδραυλικών υψών μεταξύ της 1ης Ιανουαρίου 2044 και 1ης Ιανουαρίου 1987 για το 4^ο Σενάριο.

Ζώνη Αντλησης	Έκταση (h)	Γεωτρήσεις
1	620	0
2	1490	0
3	3500	2
4	4500	5
5	1500	2
6	21000	41
7	14400	1
Σύνολο	47010	51

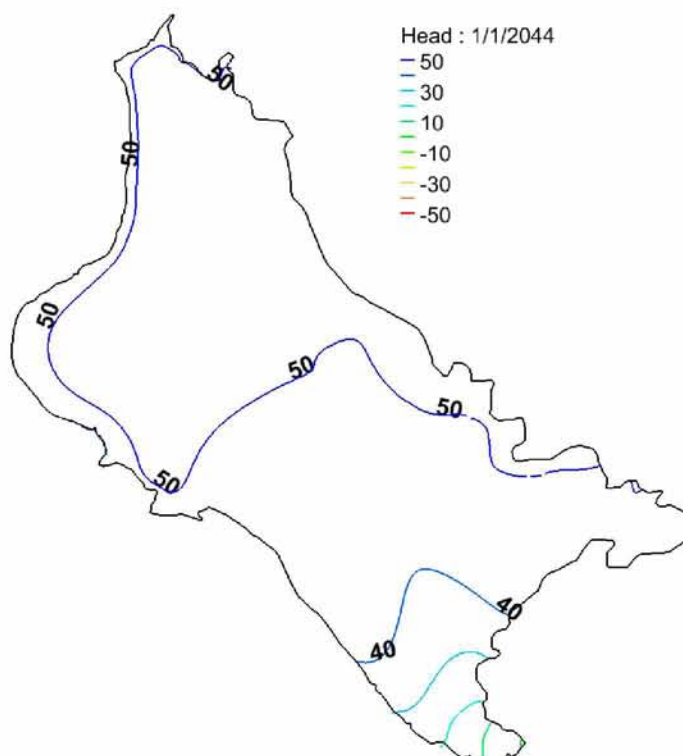
Πίνακας 5.18: Πλήθος αρδευτικών γεωτρήσεων ανά ζώνη άντλησης που θα εισαχθούν στο GWM για το 4^ο Σενάριο.

Ζώνες άντλησης		1	2	3	4	5	6	7	Σύνολο
Μέση ετήσια απόληψη για την περίοδο 2012-2044 (hm ³) Σενάριο 4	Γεωτρήσεις	0	0	2	4	0	34	0	40
	Άρδευση	0	0	0.9437	1,3281	0	3,8242	0	6,096
Συνολική απόληψη για την περίοδο 2012-2044 (hm ³) Σενάριο 4	1698,9487								

Πίνακας 5.19: Πλήθος αρδευτικών γεωτρήσεων μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης ανά ζώνη άντλησης και οι αντίστοιχες απολήψεις νερού για το 4^ο Σενάριο.

Μέσος ετήσιος ανανεώσιμος όγκος για την περίοδο 2012-2044 (hm ³)	46,659
Συνολικός ανανεώσιμος όγκος για την περίοδο 2012-2044 (hm ³)	1493,094

Πίνακας 5.20: Μέσος ετήσιος και ο συνολικός ανανεώσιμος όγκος νερού για το 4^ο Σενάριο.



Εικόνα 5.25: Χάρτης των απόλυτων υδραυλικών υψών για την 1η Ιανουαρίου 2044 με τις βέλτιστες παροχές για το 4^ο Σενάριο.

5.5.2 Σενάρια διαχείρισης Ομάδας Β

Στην Ομάδα Β εξετάζονται σενάρια αλλαγής θέσης των νέων υδρευτικών γεωτρήσεων της ΔΕΥΑΜΒ σε άλλες ζώνες άντλησης για δύο διαφορετικές στάθμες του υδροφορέα, για το έτος 2044. Αναλυτικά:

Σενάριο 5^ο : Υδρευτικές στη ζώνη 2 με στάθμη το 2044 ίση με 0.

Σενάριο 6^ο : Υδρευτικές στη ζώνη 4 με στάθμη το 2044 ίση με 0.

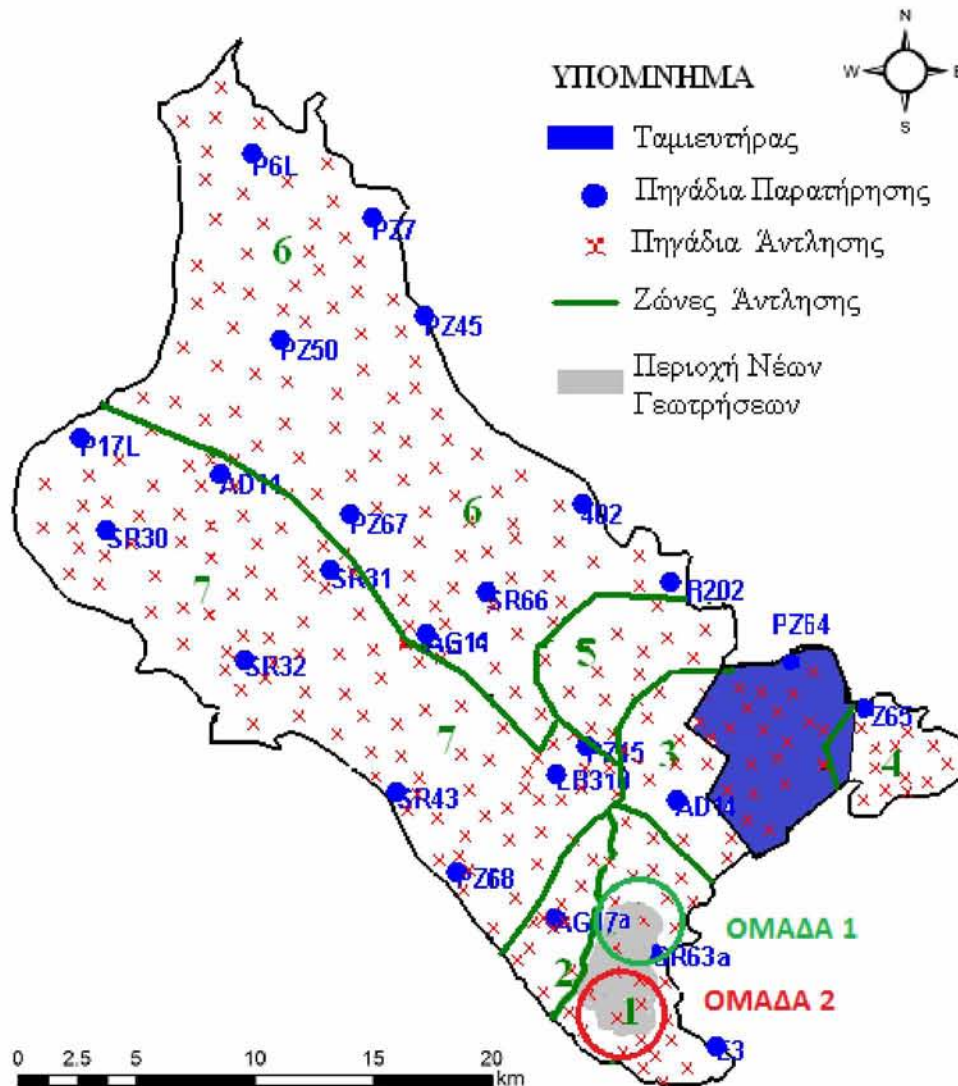
Σενάριο 7^ο : Υδρευτικές στη ζώνη 4 με στάθμη το 2044 ίση με αυτή του 1987.

Σενάριο 8^ο : Υδρευτικές στη ζώνη 5 με στάθμη το 2044 ίση με 0.

Σενάριο 9^ο : Υδρευτικές στη ζώνη 5 με στάθμη το 2044 ίση με αυτή του 1987.

Σενάριο 10^ο : Υδρευτικές στη ζώνη 1 με στάθμη το 2044 ίση με 0.

Ουσιαστικά τα παραπάνω σενάρια εξετάζουν το κατά πόσο η ενδεχόμενη αλλαγή θέσης των γεωτρήσεων επηρεάζει τη στάθμη του υδροφορέα στη λεκάνη αλλά πιο πολύ τη βέλτιστη αντλούμενη ποσότητα υπόγειου ύδατος στα πλαίσια της μελλοντικής διαχείρισης του υδροφορέα. Η μετακίνηση των υδρευτικών γεωτρήσεων γίνεται με των εξής τρόπο: Πρώτα χωρίζονται σε δύο ομάδες (Εικ. 5.25) και στη συνέχεια μετακινούνται στην αντίστοιχη ζώνη άντλησης, διατηρώντας όμως σε κάθε ομάδα τις μεταξύ τους αποστάσεις, όπως προβλέπει η κείμενη νομοθεσία περί αποστάσεων γεωτρήσεων.



Εικόνα 5.26: Οι νέες υδρευτικές γεωτρήσεις της ΔΕΥΑΜΒ όπως χωρίστηκαν για τη μετακίνηση τους σε άλλες ζώνες άντλησης στη λεκάνη της Κάρλας.

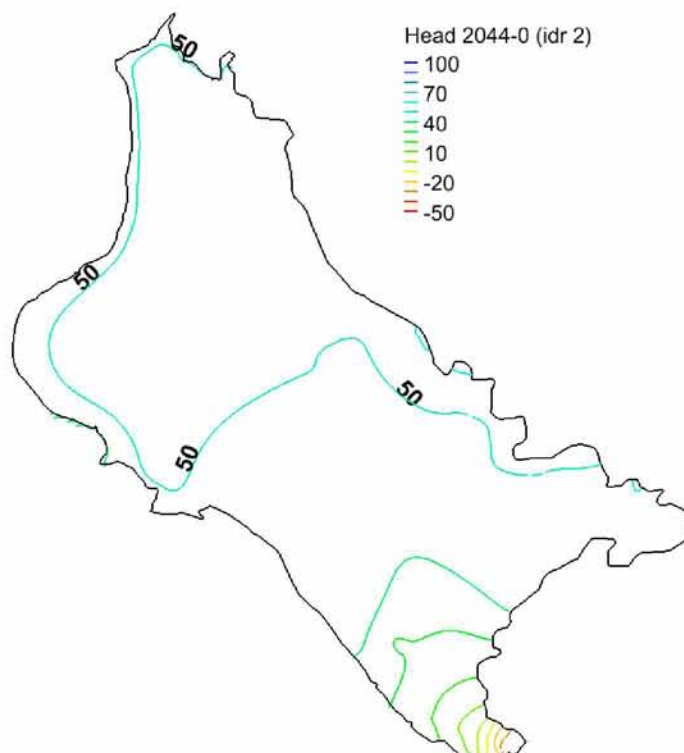
Πέρα από τις 5 παραδοχές που περιγράφηκαν παραπάνω για αυτή την ομάδα ισχύουν επιπλέον:

1. Στη λύση διαχείρισης συμμετέχουν οι 40 νέες υδρευτικές της ΔΕΥΑΜΒ.
2. Δε συμμετέχουν οι ζώνες άρδευσης 5 και 2 στη λύση διαχείρισης. Δηλαδή συμμετέχουν μόνο οι αρδευτικές στις ζώνες 6 και 7.
3. Οι υδρευτικές δεν μετακινούνται στις ζώνες 6 και 7 επειδή το νέο αρδευτικό δίκτυο της Κάρλας δεν τις καλύπτει (Εικ. 5.25).
4. Τα σενάρια «Υδρευτικές στη ζώνη 2 με στάθμη το 2044 ίση με αυτή του 1987» και «Υδρευτικές στη ζώνη 1 με στάθμη το 2044 ίση με αυτή του 1987» δεν εξετάζονται καθώς σε αυτές, οι γεωτρήσεις ύδρευσης δεν έχουν να δώσουν νερό το 2044 (Εικ. 5.21).

5.5.2.1 5^ο Σενάριο διαχείρισης

Σε αυτό το σενάριο υπάρχουν τα εξής δεδομένα:

- Μετακινούνται οι νέες υδρευτικές γεωτρήσεις στη ζώνη άντλησης 2.
- Η επιθυμητή στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για την 1/1/2044 ορίζεται η επιφάνεια της θάλασσας (0m).



Εικόνα 5.27: Χάρτης με τα απόλυτα υδραυλικά ύψη για την 1η Ιανουαρίου 2044 για το 5^ο Σενάριο.

Ζώνη Αντλησης	Έκταση (h)	Γεωτρήσεις
1	620	0
2	1490	40
3	3500	0
4	4500	0
5	1500	0
6	21000	56
7	14400	59
Σύνολο	47010	155

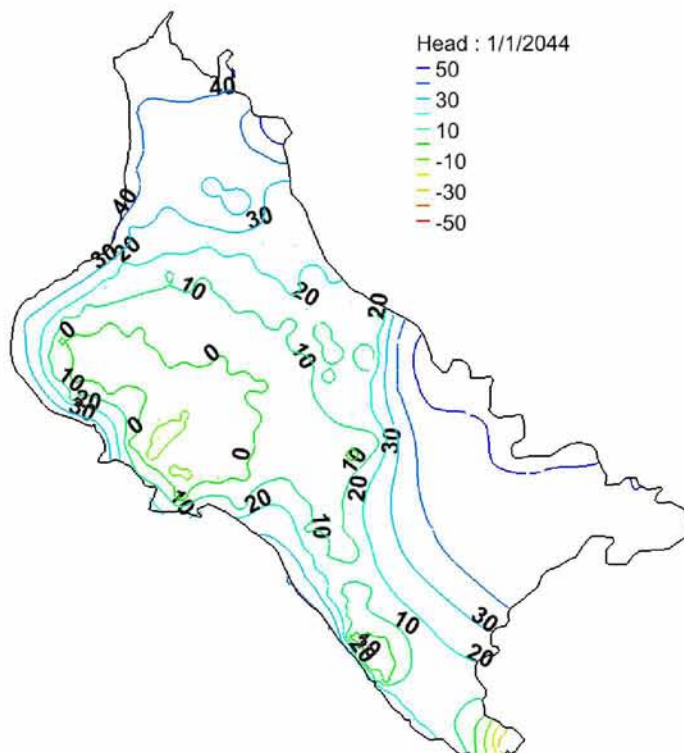
Πίνακας 5.21: Πλήθος αρδευτικών γεωτρήσεων ανά ζώνη άντλησης που θα εισαχθούν στο GWM για το 5^ο Σενάριο.

Ζώνες άντλησης		1	2	3	4	5	6	7	Σύνολο
Μέση ετήσια απόληψη για την περίοδο 2012-2044 (hm ³) Σενάριο 5	Γεωτρήσεις	0	40	0	0	0	56	54	150
	Άρδευση	0	0	0	0	0	25,2466	24,5007	49,747
	Υδρευση	0	9,7853	0	0	0	0	0	9,785
Συνολική απόληψη για την περίοδο 2012-2044 (hm ³) Σενάριο 5		1591,9130							1905,044
		313,1306							

Πίνακας 5.22: Πλήθος αρδευτικών γεωτρήσεων μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης ανά ζώνη άντλησης και οι αντίστοιχες απολήψεις νερού για το 5^ο Σενάριο.

Μέσος ετήσιος ανανεώσιμος όγκος για την περίοδο 2012-2044 (hm ³)	59,744
Συνολικός ανανεώσιμος όγκος για την περίοδο 2012-2044 (hm ³)	1911,798

Πίνακας 5.23: Μέσος ετήσιος και ο συνολικός ανανεώσιμος όγκος νερού για το 5^ο Σενάριο.

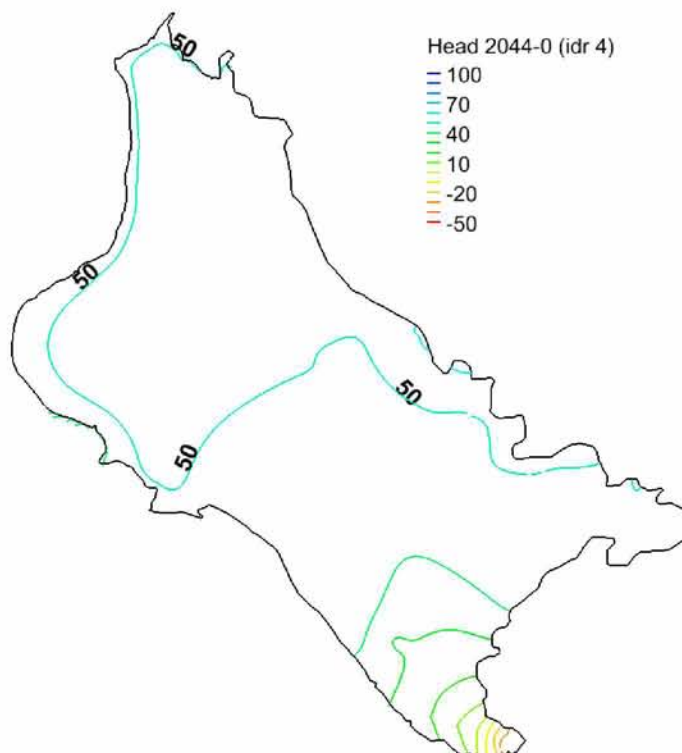


Εικόνα 5.28: Χάρτης των απόλυτων υδραυλικών υψών για την 1η Ιανουαρίου 2044 με τις βέλτιστες παροχές για το 5^ο Σενάριο.

5.5.2.2 6^ο Σενάριο διαχείρισης

Σε αυτό το σενάριο υπάρχουν τα εξής δεδομένα:

- Μετακινούνται οι νέες υδρευτικές γεωτρήσεις στη ζώνη άντλησης 4.
- Η επιθυμητή στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για την 1/1/2044 ορίζεται η επιφάνεια της θάλασσας (0m).



Εικόνα 5.29: Χάρτης με τα απόλυτα υδραυλικά ύψη για την 1η Ιανουαρίου 2044 για το 6^ο Σενάριο.

Ζώνη Αντλησης	Έκταση (h)	Γεωτρήσεις
1	620	0
2	1490	0
3	3500	0
4	4500	40
5	1500	0
6	21000	56
7	14400	59
Σύνολο	47010	155

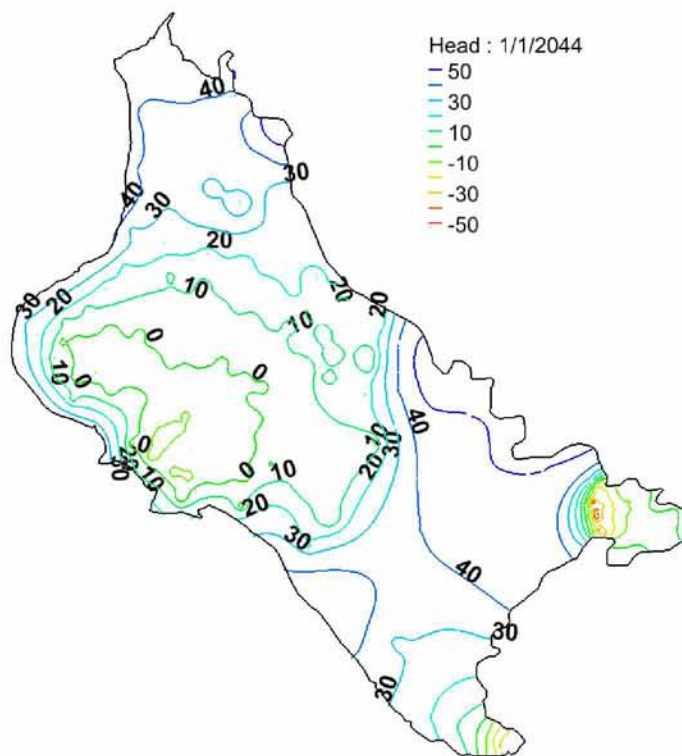
Πίνακας 5.24: Πλήθος αρδευτικών γεωτρήσεων ανά ζώνη άντλησης που θα εισαχθούν στο GWM για το 6^ο Σενάριο.

Ζώνες άντλησης		1	2	3	4	5	6	7	Σύνολο
Μέση ετήσια απόληψη για την περίοδο 2012-2044 (hm ³) Σενάριο 6	Γεωτρήσεις	0	0	0	39	0	56	54	149
	Άρδευση	0	0	0	0	0	25,2593	24,9405	50,200
	Υδρευση	0	0	0	4,7825	0	0	0	4,783
Συνολική απόληψη για την περίοδο 2012-2044 (hm ³) Σενάριο 6		1606,3929							1759,433
		153,0405							

Πίνακας 5.25: Πλήθος αρδευτικών γεωτρήσεων μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης ανά ζώνη άντλησης και οι αντίστοιχες απολήψεις νερού για το 6^ο Σενάριο.

Μέσος ετήσιος ανανεώσιμος όγκος για την περίοδο 2012-2044 (hm ³)	54,090
Συνολικός ανανεώσιμος όγκος για την περίοδο 2012-2044 (hm ³)	1730,884

Πίνακας 5.26: Μέσος ετήσιος και ο συνολικός ανανεώσιμος όγκος νερού για το 6^ο Σενάριο.

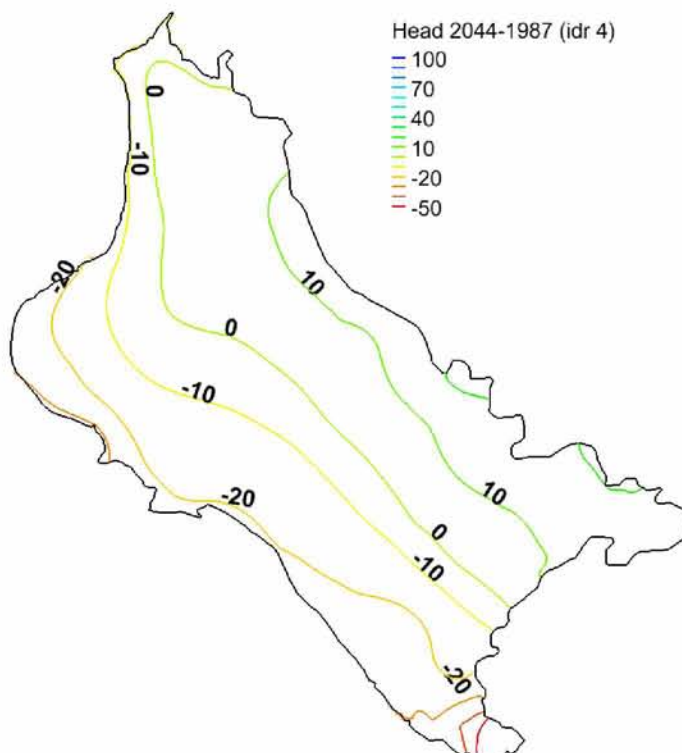


Εικόνα 5.30: Χάρτης των απόλυτων υδραυλικών υψών για την 1η Ιανουαρίου 2044 με τις βέλτιστες παροχές για το 6^ο Σενάριο.

5.5.2.3 7^ο Σενάριο διαχείρισης

Σε αυτό το σενάριο υπάρχουν τα εξής δεδομένα:

- Μετακινούνται οι νέες υδρευτικές γεωτρήσεις στη ζώνη άντλησης 4.
- Η επιθυμητή στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για την 1/1/2044 ορίζεται ίση με τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα κατά την 1/1/1987 (Εικ. 5.4).



Εικόνα 5.31: Χάρτης με τη διαφορά των απόλυτων υδραυλικών υψών μεταξύ της 1ης Ιανουαρίου 2044 και 1ης Ιανουαρίου 1987 για το 7^ο Σενάριο.

Ζώνη Άντλησης	Έκταση (h)	Γεωτρήσεις
1	620	0
2	1490	0
3	3500	0
4	4500	40
5	1500	0
6	21000	41
7	14400	1
Σύνολο	47010	82

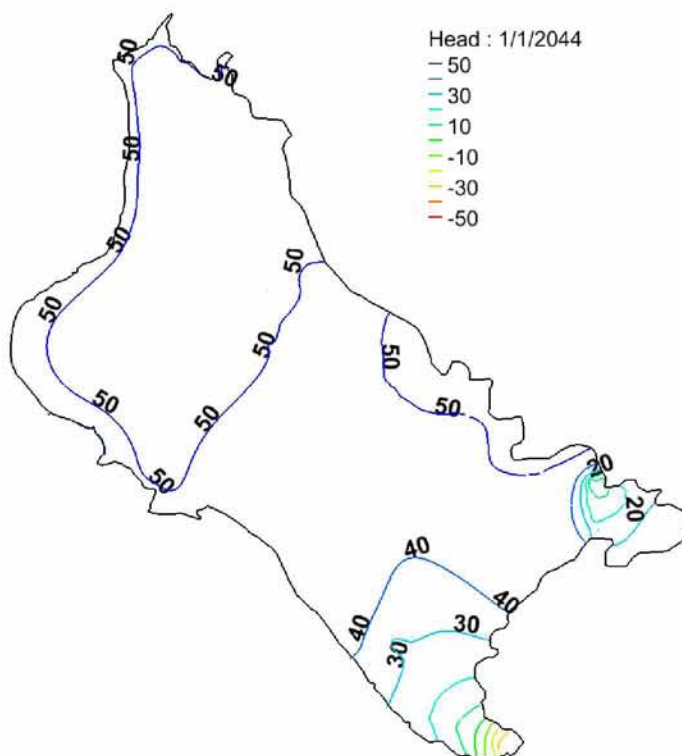
Πίνακας 5.27: Πλήθος αρδευτικών γεωτρήσεων ανά ζώνη άντλησης που θα εισαχθούν στο GWM για το 7^ο Σενάριο.

Ζώνες άντλησης		1	2	3	4	5	6	7	Σύνολο
Μέση ετήσια απόληψη για την περίοδο 2012-2044 (hm ³) Σενάριο 6	Γεωτρήσεις	0	0	0	28	0	34	0	62
	Άρδευση	0	0	0	0	0	3,7399	0	3,740
	Υδρευση	0	0	0	2,1702	0	0	0	2,170
Συνολική απόληψη για την περίοδο 2012-2044 (hm ³) Σενάριο 6	119,6768								189,122
	69,4451								

Πίνακας 5.28: Πλήθος αρδευτικών γεωτρήσεων μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης ανά ζώνη άντλησης και οι αντίστοιχες απολήψεις νερού για το 7^ο Σενάριο.

Μέσος ετήσιος ανανεώσιμος όγκος για την περίοδο 2012-2044 (hm ³)	47,441
Συνολικός ανανεώσιμος όγκος για την περίοδο 2012-2044 (hm ³)	1518,119

Πίνακας 5.29: Μέσος ετήσιος και ο συνολικός ανανεώσιμος όγκος νερού για το 7^ο Σενάριο.

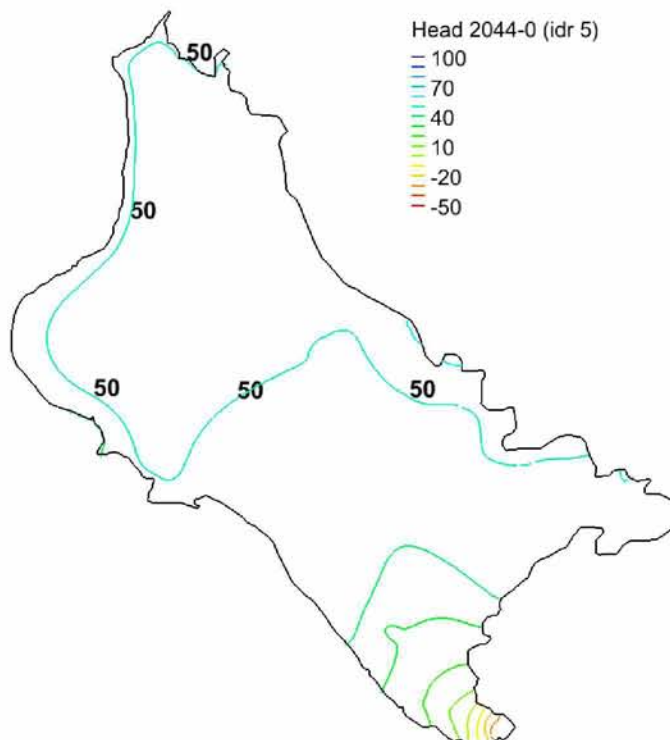


Εικόνα 5.32: Χάρτης των απόλυτων υδραυλικών υψών για την 1η Ιανουαρίου 2044 με τις βέλτιστες παροχές για το 7^ο Σενάριο.

5.5.2.4 8^ο Σενάριο διαχείρισης

Σε αυτό το σενάριο υπάρχουν τα εξής δεδομένα:

- Μετακινούνται οι νέες υδρευτικές γεωτρήσεις στη ζώνη άντλησης 5.
- Η επιθυμητή στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για την 1/1/2044 ορίζεται η επιφάνεια της θάλασσας (0m).



Εικόνα 5.33: Χάρτης με τα απόλυτα υδραυλικά ύψη για την 1η Ιανουαρίου 2044 για το 8^ο Σενάριο.

Ζώνη Άντλησης	Έκταση (h)	Γεωτρήσεις
1	620	0
2	1490	0
3	3500	0
4	4500	0
5	1500	40
6	21000	56
7	14400	59
Σύνολο	47010	155

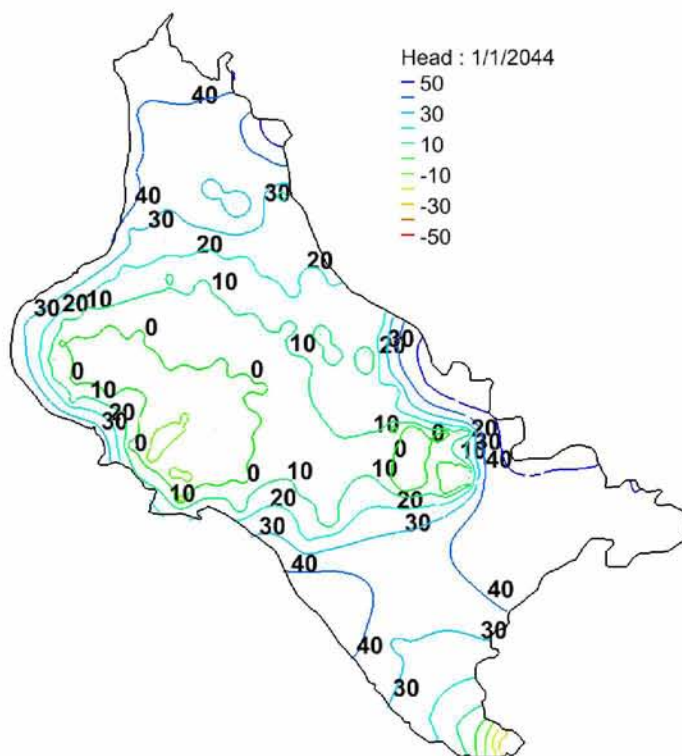
Πίνακας 5.30: Πλήθος αρδευτικών γεωτρήσεων ανά ζώνη άντλησης που θα εισαχθούν στο GWM για το 8^ο Σενάριο.

Ζώνες άντλησης		1	2	3	4	5	6	7	Σύνολο
Μέση ετήσια απόληψη για την περίοδο 2012-2044 (hm ³) Σενάριο 6	Γεωτρήσεις	0	0	0	0	34	56	54	144
	Άρδευση	0	0	0	0	0	24,3141	24,5394	48,853
	Υδρευση	0	0	0	0	6,1116	0	0	6,112
Συνολική απόληψη για την περίοδο 2012-2044 (hm ³) Σενάριο 6		1563,3111							1758,883
		195,5722							

Πίνακας 5.31: Πλήθος αρδευτικών γεωτρήσεων μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης ανά ζώνη άντλησης και οι αντίστοιχες απολήψεις νερού για το 8^ο Σενάριο.

Μέσος ετήσιος ανανεώσιμος όγκος για την περίοδο 2012-2044 (hm ³)	54,091
Συνολικός ανανεώσιμος όγκος για την περίοδο 2012-2044 (hm ³)	1730,905

Πίνακας 5.32: Μέσος ετήσιος και ο συνολικός ανανεώσιμος όγκος νερού για το 8^ο Σενάριο.

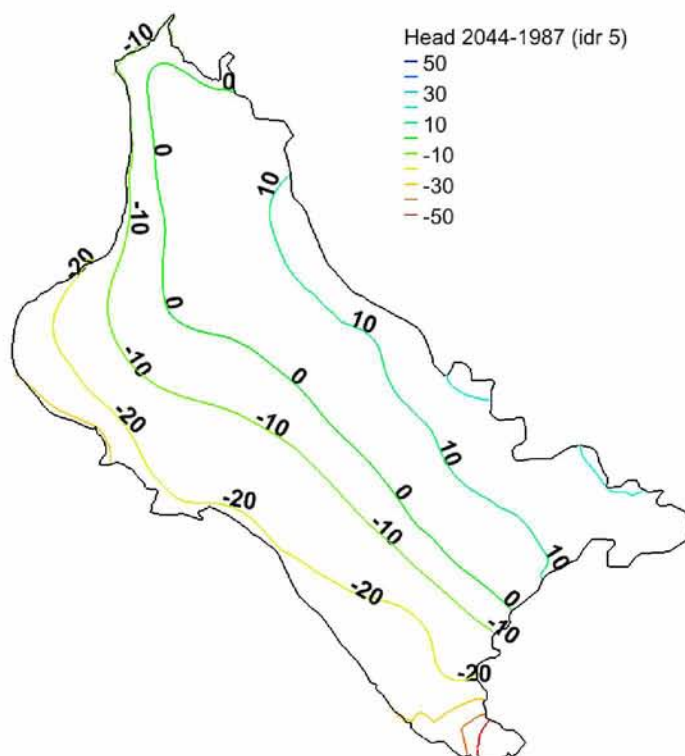


Εικόνα 5.34: Χάρτης των απόλυτων υδραυλικών υψών για την 1η Ιανουαρίου 2044 με τις βέλτιστες παροχές για το 8^ο Σενάριο.

5.5.2.5 9^ο Σενάριο διαχείρισης

Σε αυτό το σενάριο υπάρχουν τα εξής δεδομένα:

- Μετακινούνται οι νέες υδρευτικές γεωτρήσεις στη ζώνη άντλησης 5.
- Η επιθυμητή στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για την 1/1/2044 ορίζεται ίση με τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα κατά την 1/1/1987 (Εικ. 5.4).



Εικόνα 5.35: Χάρτης με τη διαφορά των απόλυτων υδραυλικών υψών μεταξύ της 1ης Ιανουαρίου 2044 και 1ης Ιανουαρίου 1987 για το 9^ο Σενάριο.

Ζώνη Άντλησης	Έκταση (h)	Γεωτρήσεις
1	620	0
2	1490	0
3	3500	0
4	4500	0
5	1500	40
6	21000	41
7	14400	1
Σύνολο	47010	82

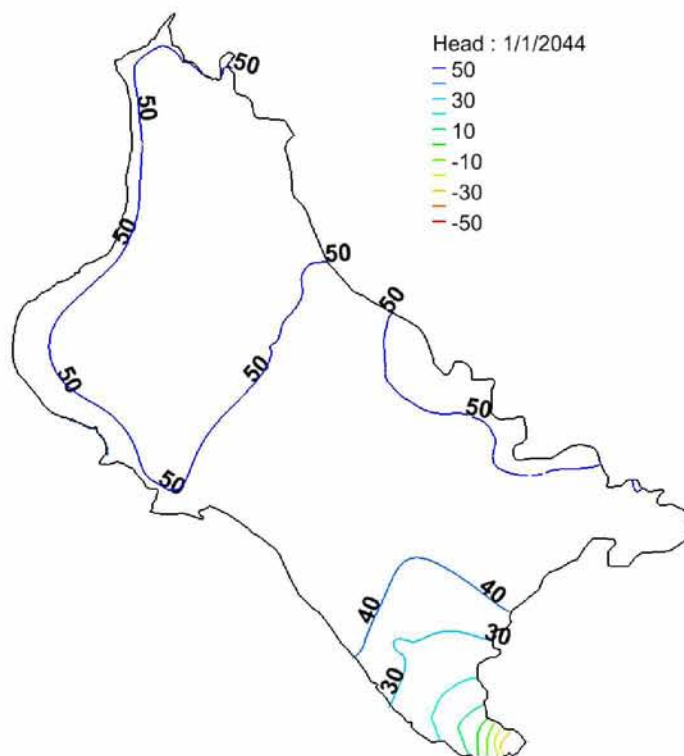
Πίνακας 5.33: Πλήθος αρδευτικών γεωτρήσεων ανά ζώνη άντλησης που θα εισαχθούν στο GWM για το 9^ο Σενάριο.

Ζώνες άντλησης		1	2	3	4	5	6	7	Σύνολο
Μέση ετήσια απόληψη για την περίοδο 2012-2044 (hm ³) Σενάριο 6	Γεωτρήσεις	0	0	0	0	1	34	0	35
	Άρδευση	0	0	0	0	0	3,7222	0	3,722
	Υδρευση	0	0	0	0	0,0942	0	0	0,094
Συνολική απόληψη για την περίοδο 2012-2044 (hm ³) Σενάριο 6	119,1092								122,124
	3,0144								

Πίνακας 5.34: Πλήθος αρδευτικών γεωτρήσεων μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης ανά ζώνη άντλησης και οι αντίστοιχες απολήψεις νερού για το 9^ο Σενάριο.

Μέσος ετήσιος ανανεώσιμος όγκος για την περίοδο 2012-2044 (hm ³)	47,441
Συνολικός ανανεώσιμος όγκος για την περίοδο 2012-2044 (hm ³)	1518,111

Πίνακας 5.35: Μέσος ετήσιος και ο συνολικός ανανεώσιμος όγκος νερού για το 9^ο Σενάριο.

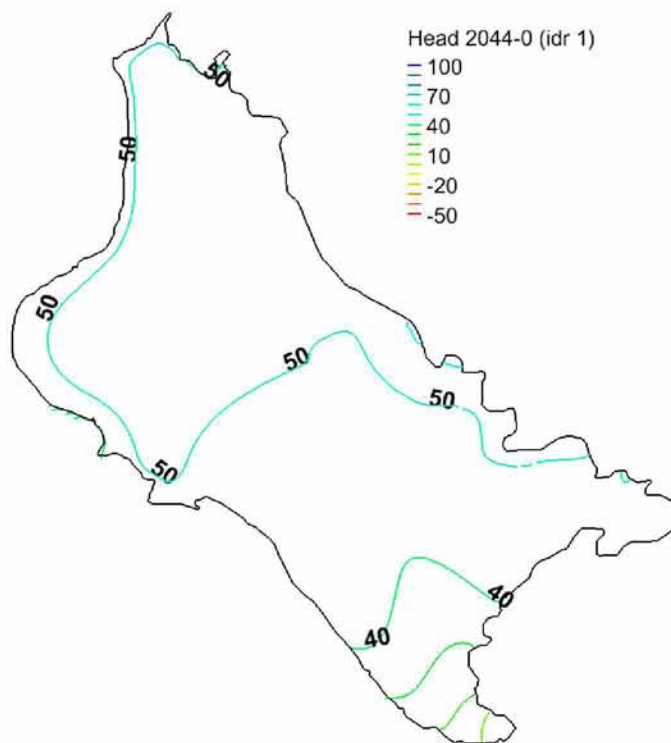


Εικόνα 5.36: Χάρτης των απόλυτων υδραυλικών υψών για την 1η Ιανουαρίου 2044 με τις βέλτιστες παροχές για το 9^ο Σενάριο.

5.5.2.6 10^ο Σενάριο διαχείρισης

Σε αυτό το σενάριο υπάρχουν τα εξής δεδομένα:

- Μετακινούνται οι νέες υδρευτικές γεωτρήσεις στη ζώνη άντλησης 1.
- Η επιθυμητή στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για την 1/1/2044 ορίζεται η επιφάνεια της θάλασσας (0m).



Εικόνα 5.37: Χάρτης με τα απόλυτα υδραυλικά ύψη για την 1η Ιανουαρίου 2044 για το 10^ο Σενάριο.

Ζώνη Άντλησης	Έκταση (h)	Γεωτρήσεις
1	620	40
2	1490	0
3	3500	0
4	4500	0
5	1500	0
6	21000	56
7	14400	59
Σύνολο	47010	155

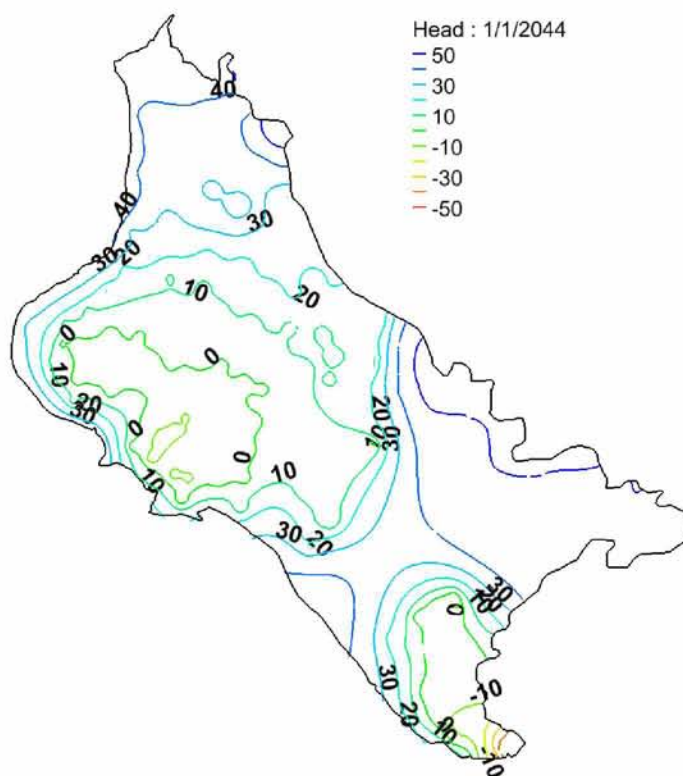
Πίνακας 5.36: Πλήθος αρδευτικών γεωτρήσεων ανά ζώνη άντλησης που θα εισαχθούν στο GWM για το 10^ο Σενάριο.

Ζώνες άντλησης		1	2	3	4	5	6	7	Σύνολο
Μέση ετήσια απόληψη για την περίοδο 2012-2044 (hm ³) Σενάριο 6	Γεωτρήσεις	32	0	0	0	0	56	54	150
	Άρδευση	0	0	0	0	0	25,2574	24,9156	50,173
	Υδρευση	5,4941	0	0	0	0	0	0	5,494
Συνολική απόληψη για την περίοδο 2012-2044 (hm ³) Σενάριο 6	1605,5358								1781,346
	175,8097								

Πίνακας 5.37: Πλήθος αρδευτικών γεωτρήσεων μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης ανά ζώνη άντλησης και οι αντίστοιχες απολήψεις νερού για το 10^ο Σενάριο.

Μέσος ετήσιος ανανεώσιμος όγκος για την περίοδο 2012-2044 (hm ³)	55,240
Συνολικός ανανεώσιμος όγκος για την περίοδο 2012-2044 (hm ³)	1767,677

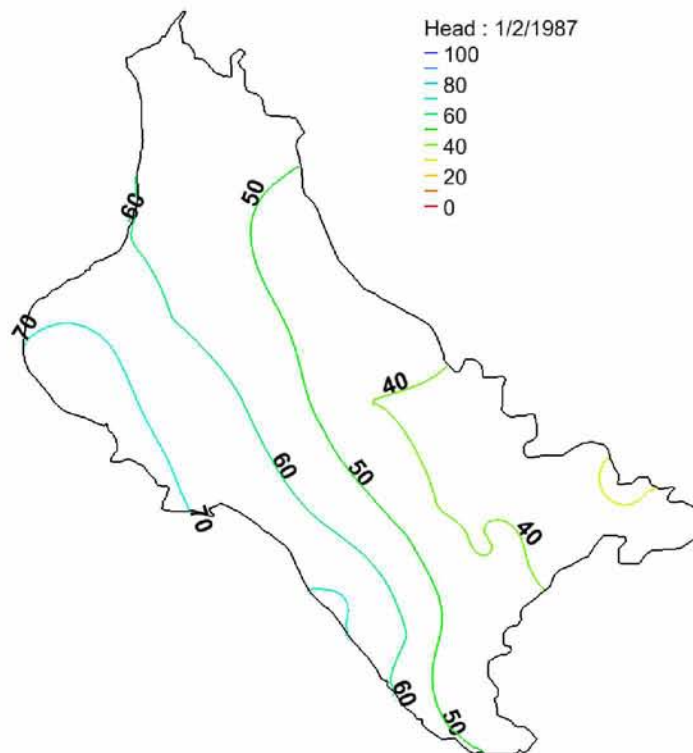
Πίνακας 5.38: Μέσος ετήσιος και ο συνολικός ανανεώσιμος όγκος νερού για το 10^ο Σενάριο.



Εικόνα 5.38: Χάρτης των απόλυτων υδραυλικών υψών για την 1η Ιανουαρίου 2044 με τις βέλτιστες παροχές για το 10^ο Σενάριο.

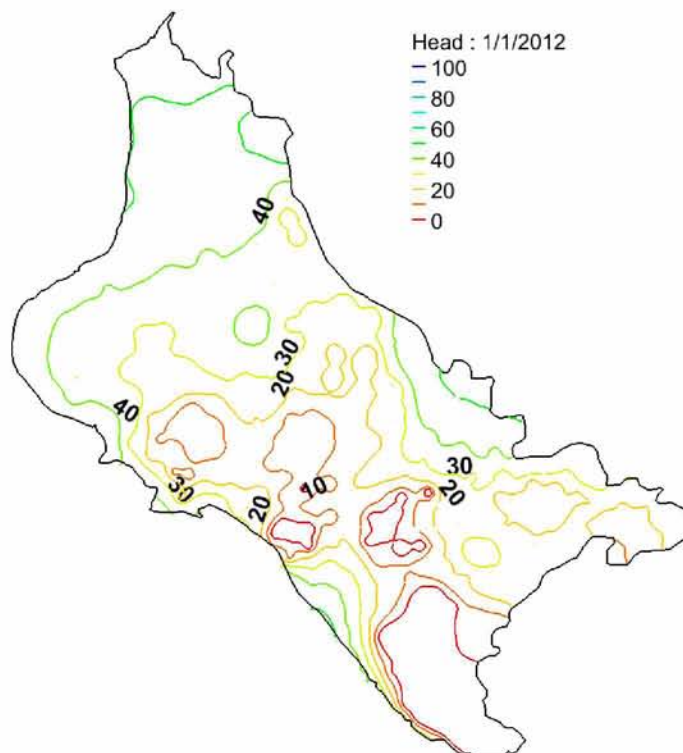
6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το μοντέλο έτρεξε αρχικά για την ιστορική περίοδο 1987-2012, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, χωρίς τη λειτουργία του ταμιευτήρα. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω είναι η απεικόνιση των υδραυλικών φορτίων για τα έτη 1987 και 2012, καθώς και το υδατικό ισοζύγιο του υδροφορέα.



Εικόνα 6.1: Χάρτης με τα αρχικά υδραυλικά ύψη για το έτος 1987.

Ο συνολικός ανανεώσιμος όγκος που προέρχεται από πηγές ανανέωσης και γειτονικές εισροές είναι 1198.51 hm^3 και η αντλούμενη είναι 2554.11 hm^3 για αυτή την περίοδο. Οπότε η διαφορά 1355.60 hm^3 αντλούνταν από μη ανανεώσιμες πηγές του υδροφορέα, κάτι το οποίο οδήγησε και στην υπερεκμετάλλευση του. Φαίνεται ξεκάθαρα και από τη σύγκριση των Εικόνων 6.1 και 6.2. Η διαφορά στο υδραυλικό φορτίο είναι κοντά στα 100 m στις γειτονικές περιοχές των αρδευτικών πηγαδιών.



Εικόνα 6.2: Χάρτης με τα υδραυλικά ύψη για το έτος 2012.

Για την περίοδο διαχείρισης 2012-2044, το μοντέλο έτρεξε για 10 διαφορετικά σενάρια τα οποία χωρίστηκαν σε δύο ομάδες. Στην Ομάδα Α εξετάστηκε το κατά πόσο η λειτουργία των νέων υδρευτικών πηγαδιών στη ζώνη 1 επηρεάζουν τον υδροφόρα για δύο διαφορετικές στάθμες του, για το έτος 2044. Στη λύση διαχείρισης συμμετέχουν όλες οι αρδευτικές εκτός εκείνων που είναι στη ζώνη 1 και στις αρδευτικές ζώνες (εφόσον έχουν να δώσουν νερό) αλλά δε συμμετέχουν οι υδρευτικές γεωτρήσεις. Στην Ομάδα Β εξετάζονται σενάρια αλλαγής θέσης των νέων υδρευτικών πηγαδιών σε άλλες ζώνες για δύο διαφορετικές στάθμες του υδροφόρα, για το έτος 2044. Στη λύση διαχείρισης συμμετέχουν όλες οι νέες υδρευτικές (εφόσον έχουν να δώσουν νερό) και οι αρδευτικές στις ζώνες 6 και 7. Τα σενάρια διαχείρισης συνοψίζονται παρακάτω:

Ομάδα Α

Σενάριο 1 : Υδρευτικές ανοικτές με στάθμη το 2044 ίση με 0.

Σενάριο 2 : Υδρευτικές κλειστές με στάθμη το 2044 ίση με 0.

Σενάριο 3 : Υδρευτικές ανοικτές με στάθμη το 2044 ίση με αυτή του 1987.

Σενάριο 4 : Υδρευτικές κλειστές με στάθμη το 2044 ίση με αυτή του 1987.

Ομάδα Β

Σενάριο 5 : Υδρευτικές στη ζώνη 2 με στάθμη το 2044 ίση με 0.

Σενάριο 6 : Υδρευτικές στη ζώνη 4 με στάθμη το 2044 ίση με 0.

Σενάριο 7 : Υδρευτικές στη ζώνη 4 με στάθμη το 2044 ίση με αυτή του 1987.

Σενάριο 8 : Υδρευτικές στη ζώνη 5 με στάθμη το 2044 ίση με 0.

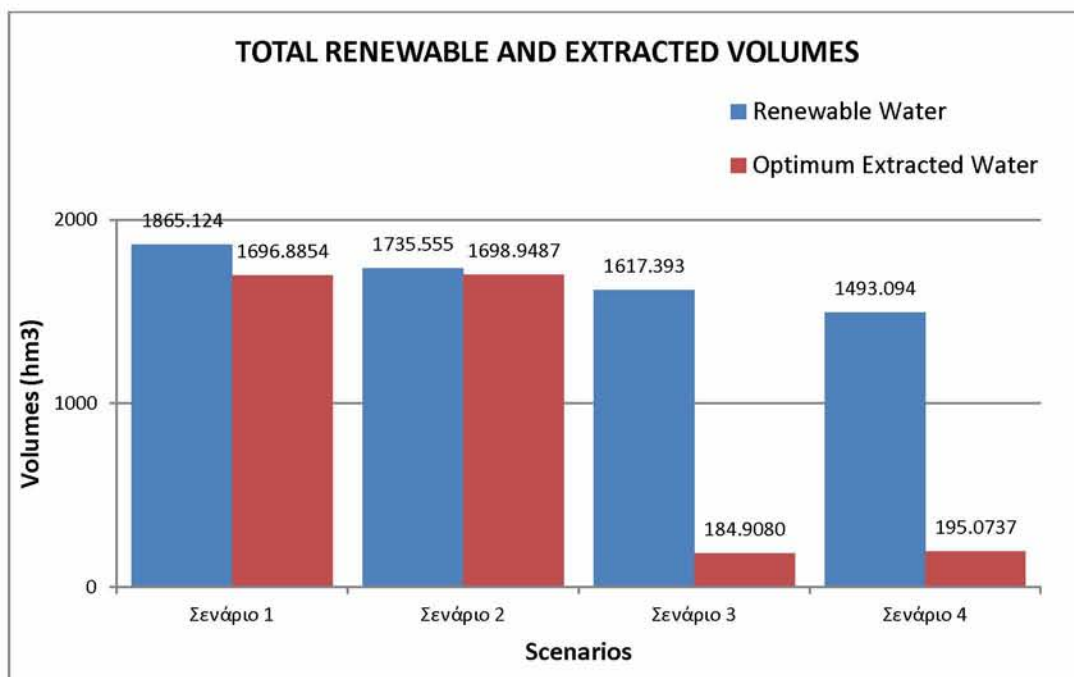
Σενάριο 9 : Υδρευτικές στη ζώνη 5 με στάθμη το 2044 ίση με αυτή του 1987.

Σενάριο 10 : Υδρευτικές στη ζώνη 1 με στάθμη το 2044 ίση με 0.

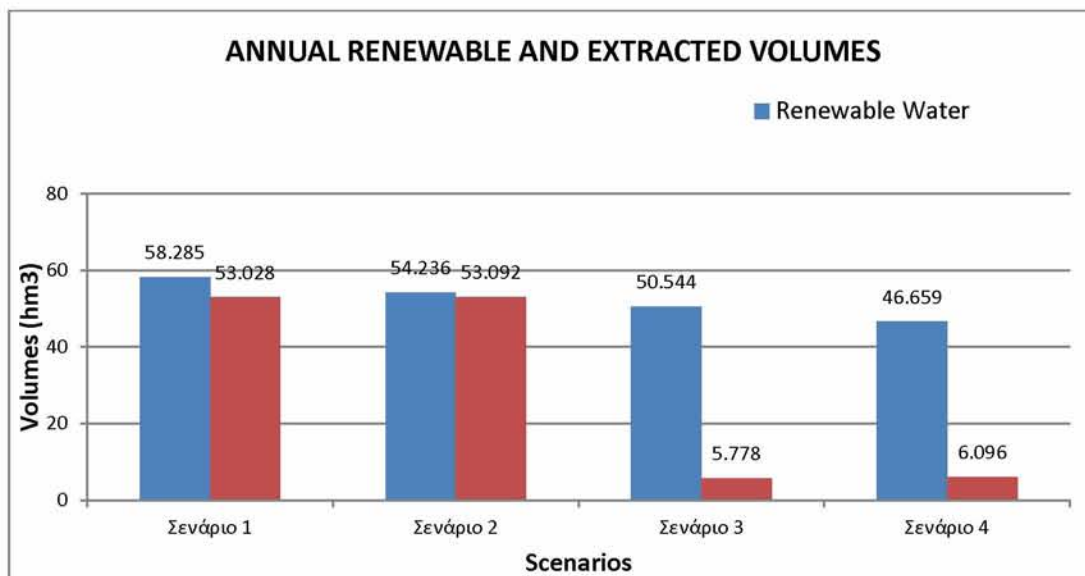
Σε όλα τα παραπάνω σενάρια, τα πηγάδια άντλησης που είναι στη ζώνη 1 και στις αρδευτικές ζώνες δεν συμμετέχουν στη λύση διαχείρισης καθώς θεωρείται πως οι περιοχές αυτές καλύπτουν τις αρδευτικές τους ανάγκες από τον ταμιευτήρα.

Στην **Ομάδα Α** διαπιστώνουμε πως για μηδενική στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για το έτος 2044 η λειτουργία των υδρευτικών γεωτρήσεων στη ζώνη 1 ελάχιστα επηρεάζει την ποσότητα του αντλούμενου νερού άρδευσης καθώς οι αρδευτικές γεωτρήσεις σε αυτή τη ζώνη είναι έτσι και αλλιώς κλειστές λόγω της μεγάλης υποβάθμισης της από την υπεράντληση. Όσον αφορά την ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα, η στάθμη του στη ζώνη 1, φτάνει την επιθυμητή μόνο όταν κλείσουν οι υδρευτικές γεωτρήσεις (Σενάριο 2).

Τα ίδια ισχύουν και για στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για το έτος 2044 ίση με αυτή του 1987, μόνο που εδώ η λειτουργία των αρδευτικών γεωτρήσεων αποφέρει πολύ μικρές παροχές. Αυτό συμβαίνει γιατί οι στάθμες του 1987 ήταν πολύ υψηλές και σε ορισμένες περιοχές ο υδροφορέα πρέπει να ανυψωθεί έως και 100 m (στη ζώνη 1) με αποτέλεσμα το διαθέσιμο αντλούμενο νερό άρδευσης να είναι λίγο. Τέλος, υπάρχει και μία μεταβολή στον ανανεώσιμο όγκο νερού η οποία οφείλεται στην αντίστοιχη μεταβολή της ποσότητας του νερού που εισρέει στον υδροφορέα από τις γειτνιαζουσες περιοχές, άρα επηρεάζει την υδρολογική συμπεριφορά του και κατά συνέπεια την υδραυλική του επικοινωνία με τον γειτονικό υδροφορέα.



Εικόνα 6.3: Συνολικοί όγκοι ανανεώσιμου και αντλούμενου νερού που προέκυψαν από τις βέλτιστες παροχές ανά σενάριο διαχείρισης για την Ομάδα Α.



Εικόνα 6.4: Ετήσιοι όγκοι ανανεώσιμου και αντλούμενου νερού που προέκυψαν από τις βέλτιστες παροχές ανά σενάριο διαχείρισης για την Ομάδα Α.

Στην **Ομάδα Β** διαπιστώνουμε πως για μηδενική στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για το έτος 2044 η μεταφορά των υδρευτικών γεωτρήσεων επηρεάζει σημαντικά το υδατικό ισοζύγιο του υδροφορέα (Εικ 6.5 και 6.6). Για να γίνουν κατανοητές οι μεταβολές αυτές θα χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω πίνακες:

	Ταξινόμηση κατά φθίνουσα ποσότητα νερού	Υδραυλικό φορτίο	Ποσότητα νερού από πηγές ανανέωσης
Ζώνες	↓	5	2
		4	1
		2	5
		1	4

Πίνακας 6.1: Γραφική απεικόνιση δεδομένων για την Ομάδα Β.

	Ταξινόμηση κατά φθίνουσα ποσότητα νερού	Αντλούμενη ποσότητα νερού ύδρευσης	Αντλούμενη ποσότητα νερού άρδευσης	Συνολική ποσότητα άντλησης
Ζώνη όπου είναι οι υδρευτικές	↓	2	4	2
		5	1	1
		1	2	4
		4	5	5

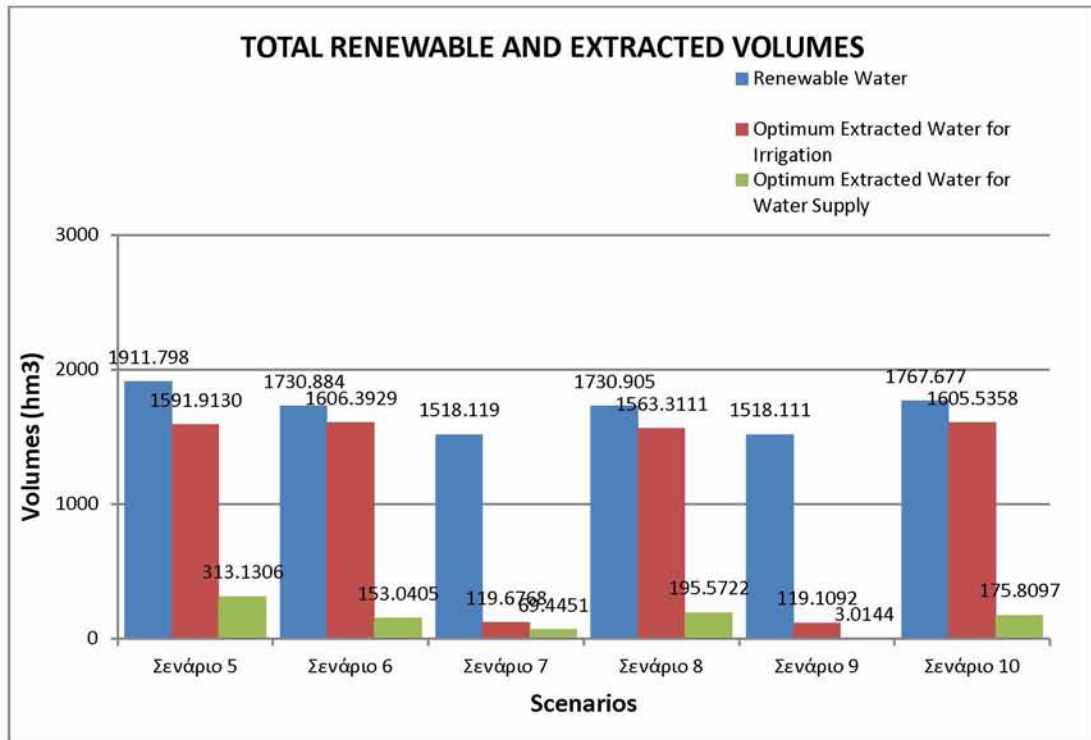
Πίνακας 6.2: Γραφική απεικόνιση αποτελεσμάτων για την Ομάδα Β.

Ο Πίνακας 6.1 μας δείχνει ποιες ζώνες άρδευσης είχαν τον υψηλότερο υδρόφορο ορίζοντα κατά το έτος 2012 και ποιές την μεγαλύτερη ποσότητα νερού από ανανεώσιμες πηγές κατά την περίοδο διαχείρισης 2012-2044.

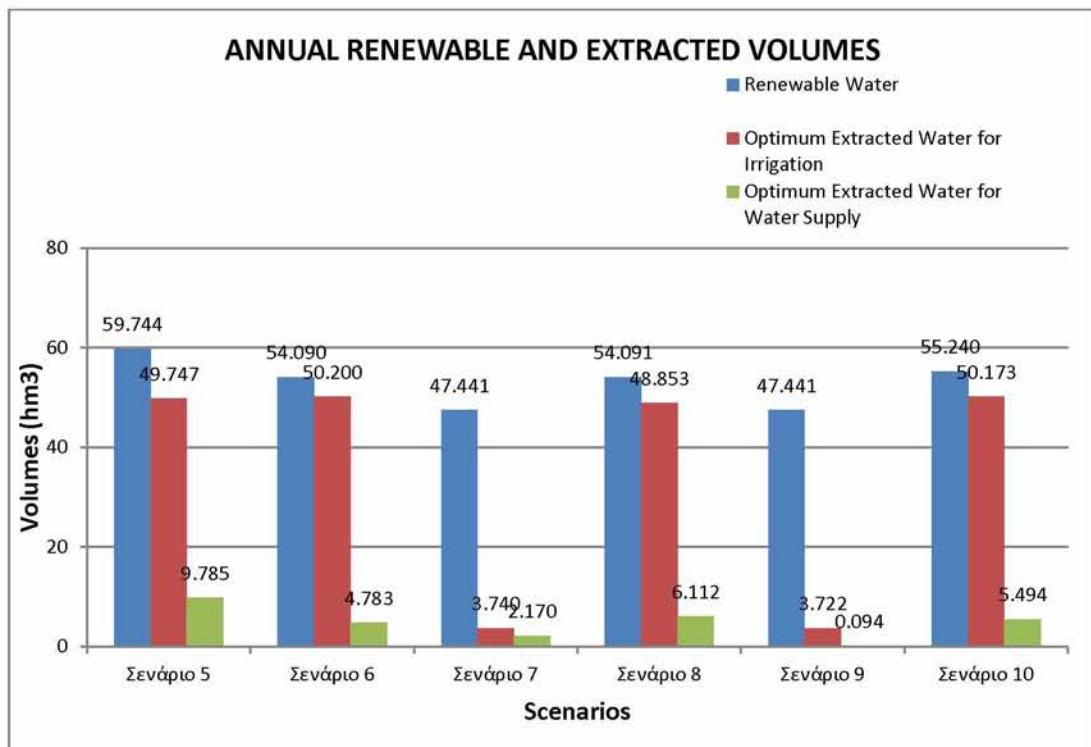
Ο Πίνακας 6.2 μας δείχνει πώς κάθε φορά η μετακίνηση των υδρευτικών γεωτρήσεων στις ζώνες 1, 2, 4, 5 επηρεάζει την ποσότητα απολήψεων από τον υπόγειο υδροφόρο. Για παράδειγμα εάν οι υδρευτικές γεωτρήσεις εγκατασταθούν στη ζώνη 2 (Σενάριο 5) τότε η αντλούμενη ποσότητα νερού ύδρευσης θα ήταν μεγαλύτερη ($9,785 \text{ hm}^3/\text{έτος}$) απ' ό,τι αν μετακινούνταν σε κάποια άλλη ζώνη. Αν εγκατασταθούν στη ζώνη 5 τότε η αντλούμενη ποσότητα νερού ύδρευσης θα ήταν δευτέρα μεγαλύτερη κατά σειρά ($6,112 \text{ hm}^3/\text{έτος}$) κ.ο.κ.

- Όσον αφορά τις αντλούμενες ποσότητες νερού άρδευσης και ύδρευσης μπορούμε να εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:
 1. Η μετακίνηση των υδρευτικών γεωτρήσεων στη ζώνη 2 επιτυγχάνει τη μέγιστη άντληση νερού για ύδρευση τηρώντας παράλληλα τον περιορισμό της μηδενικής στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα για το έτος 2044. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ζώνη 2 έχει τη μεγαλύτερη εισροή νερού από τον γειτονικό υδροφόρο ορίζοντα (conductance = 0.237 έως 0.264) απ' ό,τι στις ζώνες 4 και 5 (conductance = 0.0), παρόλο ότι η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα στις τελευταίες είναι υψηλότερη (λιγότερο υποβαθμισμένες από την υπεράντληση). Αυτό άλλωστε φαίνεται και από τον Πίνακα 6.1 όπου η ζώνη 2 έχει τη μεγαλύτερη ποσότητα νερού από πηγές ανανέωσης.
 2. Στη ζώνη 5, είχαμε τον υψηλότερο υδροφόρο ορίζοντα οπότε οι υδρευτικές σε αυτή δίνουν μεγαλύτερες παροχές απ' ό,τι στις ζώνες 1 και 4.
 3. Όσον αφορά την αντλούμενη ποσότητα νερού άρδευσης από τις ζώνες 6 και 7, το σκηνικό αλλάζει. Η μετακίνηση των υδρευτικών σε μακρινές ζώνες (1 και 4) σε σχέση με τις 6 και 7 όπου λειτουργούν οι αρδευτικές γεωτρήσεις, δίνει μεγαλύτερες παροχές άντλησης για άρδευση απ' ό,τι όταν μετακινούνται στις γειτνιάζουσες (2 και 5). Δηλαδή στις ζώνες 2 και 5 υπάρχουν πολύ κοντά και αρδευτικές γεωτρήσεις, οπότε αυτές δεν έχουν μεγάλη απόδοση.
 4. Η μεγαλύτερη ποσότητα νερού (για άρδευση και ύδρευση) επιτυγχάνεται εάν μετακινήσουμε τις υδρευτικές γεωτρήσεις στη ζώνη 2 και έπειτα στη ζώνη 1.

Στις Εικόνες 6.5 και 6.6 απεικονίζονται και γραφικά οι ποσότητες νερού (σε hm^3) ανά σενάριο.

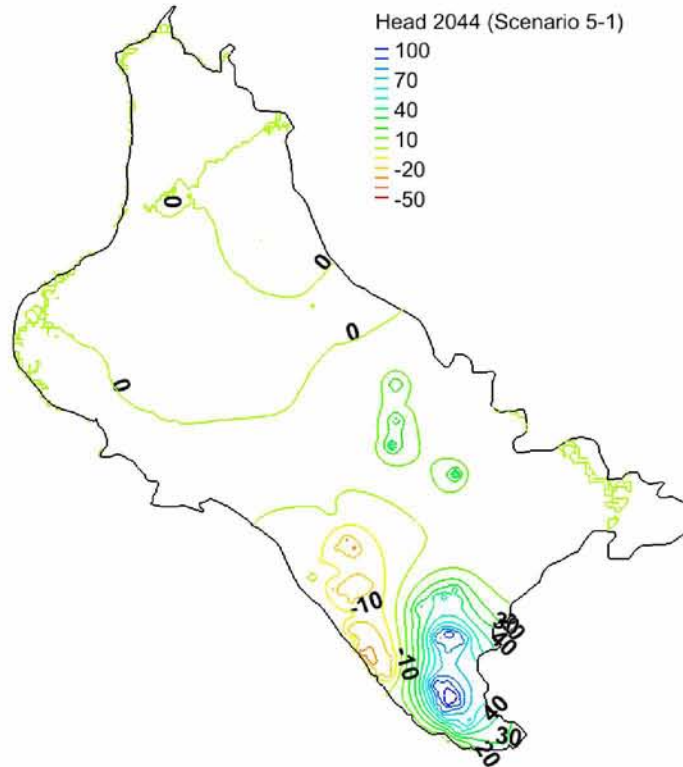


Εικόνα 6.5: Συνολικοί όγκοι ανανεώσιμου και αντλούμενου νερού που προέκυψαν από τις βέλτιστες παροχές του GWM ανά σενάριο διαχείρισης για την Ομάδα Β.

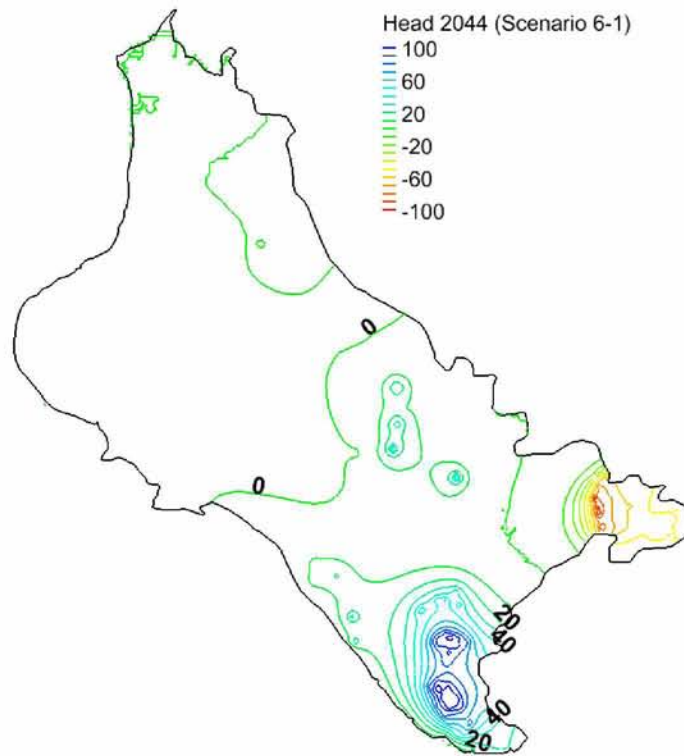


Εικόνα 6.6: Ετήσιοι όγκοι ανανεώσιμου και αντλούμενου νερού που προέκυψαν από τις βέλτιστες παροχές του GWM ανά σενάριο διαχείρισης για την Ομάδα Β.

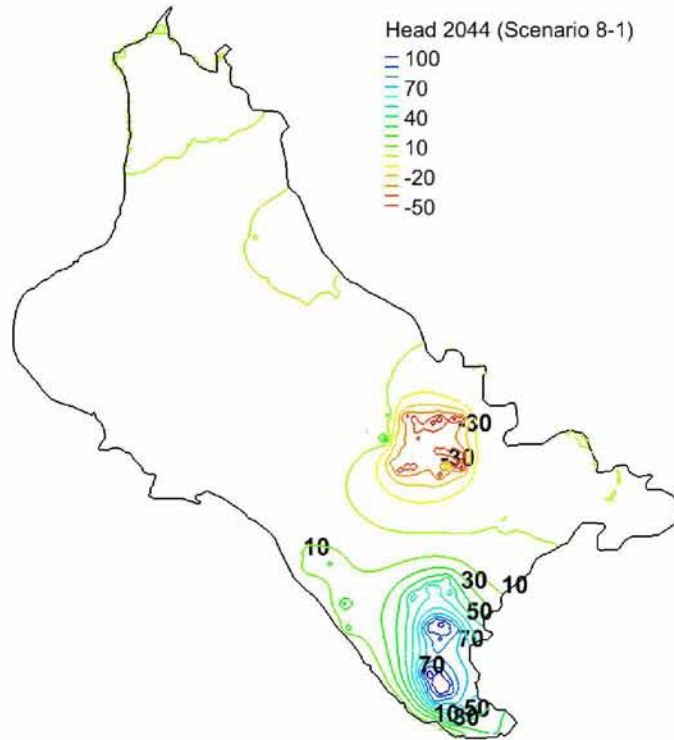
- Όσον αφορά την ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα, έχοντας σαν μέτρο σύγκρισης το σενάριο διαχείρισης 1, όπου οι υδρευτικές γεωτρήσεις δεν είναι μέρος της διαχείρισης, μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:
 1. Απο τη σύγκριση των σεναρίων 5, 6, 8, 10 με το σενάριο 1, όπου οι υδρευτικές γεωτρήσεις δεν είναι μέρος της διαχείρισης, προκύπτει ότι η εφαρμογή της διαδικασίας της βελτιστοποίησης, έχει σαν αποτέλεσμα την γρηγορότερη ανύψωση του υδροφορέα στη στάθμη 0 για το 2044 (Εικ. 6.7 έως 6.10).
 2. Οι διαφορές στη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα μεταξύ των σεναρίων εντοπίζονται σε εκείνες τις ζώνες όπου βρίσκονται και αντλούν νερό οι γεωτρήσεις. Δηλαδή στις περιοχές όπου εγκαθίστανται οι νέες γεωτρήσεις υπάρχει πτώση του υδραυλικού ύψους. Σε όλες τις άλλες περιοχές οι διαφορές είναι σχεδόν μηδενικές.
 3. Η πιο ικανοποιητική επαναφορά του υδροφορέα στη στάθμη 0 λαμβάνει χώρα στα σενάρια 5 και 8 (Εικ. 5.27 - ζώνη άρδευσης 2 με μεγάλη εισροή νερού και Εικ. 5.33 - ζώνη άρδευσης 5 με το μεγαλύτερη στάθμη υπόγειου νερού).
 4. Για το σενάριο 10 η στάθμη στη ζώνη άρδευσης 1 παραμένει πολύ κάτω από το 0 (έως και -50 m) παρόλη την ανύψωση της κατά την περίοδο διαχείρισης (Εικ. 5.37). Ωστόσο είναι εμφανές πως από τη σύγκριση με το σενάριο 1 (Εικ. 6.10), η εισαγωγή των υδρευτικών γεωτρήσεων στο πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι ένα ισχυρό εργαλείο για την ανάκαμψη του υπόγειου υδροφορέα.
 5. Στο σενάριο 6 έχουμε τοπική υποβάθμιση της στάθμης του υδροφορέα στη μικρής έκτασης ζώνη 4, λόγω της μεγάλης πυκνότητας των γεωτρήσεων (Εικ. 5.29).



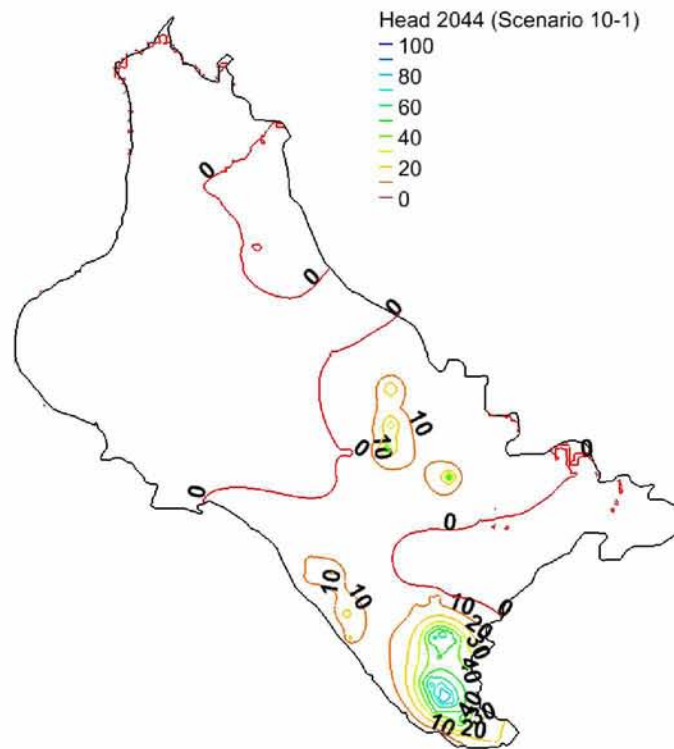
Εικόνα 6.7: Μεταβολή του ύψους του υπόγειου υδοφορέα για το 2044 όταν εκτελείται το 5ο σενάριο διαχείρισης σε σχέση με το 1ο σενάριο διαχείρισης.



Εικόνα 6.8: Μεταβολή του ύψους του υπόγειου υδοφορέα για το 2044 όταν εκτελείται το 6ο σενάριο διαχείρισης σε σχέση με το 1ο σενάριο διαχείρισης.



Εικόνα 6.9: Μεταβολή του ύψους του υπόγειου υδοφορέα για το 2044 όταν εκτελείται το 8ο σενάριο διαχείρισης σε σχέση με το 1ο σενάριο διαχείρισης.



Εικόνα 6.10: Μεταβολή του ύψους του υπόγειου υδοφορέα για το 2044 όταν εκτελείται το 10ο σενάριο διαχείρισης σε σχέση με το 1ο σενάριο διαχείρισης.

Στην **Ομάδα Β** διαπιστώνουμε πως για στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για το έτος 2044 ίση με αυτή του 1987, η μετακίνηση των υδρευτικών γεωτρήσεων δεν έχει ιδιαίτερη επίδραση στο ισοζύγιο του υδροφορέα καθώς ο στόχος επίτευξης τόσο υψηλών στάθμεων επαναφοράς σε συνδυασμό με τις αναγκαίες απολήψεις, είναι ανέφικτος.

- Όσον αφορά τις αντλούμενες ποσότητες νερού άρδευσης και ύδρευσης μπορούμε να εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:
 1. Στις ζώνες 1 και 2 είναι αδύνατη η μετακίνηση των νέων γεωτρήσεων καθώς η διαφορά των υδραλικών υψών μεταξύ της 1ης Ιανουαρίου 2044 και 1ης Ιανουαρίου 1987 είναι αρνητική, λόγω της μεγάλης υπεράντλησης που λάμβανε χώρα στην περιοχή εδώ και χρόνια (Εικ. 5.21). Το συμπέρασμα αυτό έρχεται να ενισχύσει την εργασία των Σιδηρόπουλος, 2009 (Π. Σιδηρόπουλος, Ν. Μυλόπουλος Ν. και Λουκάς Α. (2009). « Προσομοίωση της επίδρασης των νέων υδρευτικών γεωτρήσεων στον υδροφορέα της Κάρλας », Κοινό Συνέδριο: 11ο της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (ΕΥΕ), 7ο της Ελληνικής Επιτροπής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων (ΕΕΔΥΠ), Βόλος, Ελλάδα) καθιστώντας αδύνατη την επανάκαμψη του υδροφορέα στη ζώνη 1 σε πρότερη κατάσταση.
 2. Η μετακίνηση τους στη ζώνη 4 (Σενάριο 7) θα έδινε μία μικρή παροχή άντλησης σε σχέση με τη μετακίνηση τους στη ζώνη 5 (Σενάριο 9), επειδή η πρώτη βρίσκεται μακρύτερα από τις αρδευτικές γεωτρήσεις, οι οποίες και θα αντλούσαν την περισσότερη ποσότητα υπόγειου νερού.
- Όσον αφορά την ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα:
 1. Η εικόνα των δύο υδροφορέων είναι παρόμοια αν εξαιρέσουμε τη ζώνη 4, όπου για το σενάριο 7 βρίσκεται πιο χαμηλά λόγω της ύπαρξης των υδρευτικών σε αυτή.
 2. Στη ζώνη 5, όπου για το σενάριο 9 βρίσκονται οι υδρευτικές, δεν υπάρχουν διαφορές λόγω της μηδενικής παροχής άντλησης.

Εάν οι παροχές των νέων υδρευτικών γεωτρήσεων λειτουργήσουν κανονικά σύμφωνα με το χρονοδιάγραμμα της ΔΕΥΑΜΒ, τότε η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα στη ζώνη 1 είναι αδύνατο να ανέλθει στη στάθμη 0 το 2044 (Σενάριο 1) , πόσο μάλλον στη στάθμη του 1987 (Σενάριο 3), ακυρώνοντας την ευεργετική λειτουργία του ταμειυτήρα και οδηγώντας σε μεγαλύτερες πτώσεις στάθμης από τις σημερινές. Οπότε η ανάκαμψη του υδροφορέα είναι εφικτή και στις δύο στάθμες, μόνο εάν ακυρωθεί η λειτουργία τους (Σενάρια 2 και 4). Όμως η ανάκαμψη του σε στάθμες ίσες με αυτές του έτους 1987, θα επιφέρει ελάχιστες απολήψεις για άρδευση (Σενάριο 4).

Εάν οι παροχές των νέων υδρευτικών γεωτρήσεων εισαχθούν στο πρόβλημα βελτιστοποίησης σαν μεταβλητές απόφασης, υποκείμενοι σε περιορισμούς ως προς τον μέγιστο ρυθμό άντλησης αλλά και ως προς το μέγιστο υδραυλικό φορτίο, τότε ο υπόγειος υδροφορέας μπορεί στο μέλλον να ανακάμψει σε μία βιώσιμη στάθμη. Αυτό καταδεικνύει τη μεγάλη σημασία ενός ολοκληρωμένου σχεδίου διαχείρισης των

υδατικών πόρων στην περιοχή, με ταυτόχρονη βιώσιμη λειτουργία του νέου ταμιευτήρα της Κάρλας. Τα σενάρια μετακίνησης αυτών έγιναν με σκοπό την ανακούφιση της ζώνης 1 από την υπεράντληση αλλά και τη διερεύνηση εναλλακτικών θέσεων με υψηλότερη στάθμη υδροφόρου ορίζοντα και με ευνοϊκότερες υδρογεωλογικές συνθήκες, στις οποίες ενδεχομένως να είχαν και καλύτερη απόδοση παροχής, πάντα όμως με γνώμονα την αειφορική διαχείριση του υδροφορέα σε μελλοντική περίοδο. Η πιο ικανοποιητική επαναφορά του υδροφορέα στη στάθμη 0 λαμβάνει χώρα στα Σενάρια 5 και 8 (Εικ. 6.7 και 6.9 αντίστοιχα). Λαμβάνοντας όμως υπόψιν και την ικανοποίηση των αρδευτικών και υδρευτικών αναγκών σε νερό από τις απολήψεις, η εγκατάσταση των υδρευτικών γεωτρήσεων στη ζώνη 2 (Σενάριο 5) αποτελεί την καλύτερη λύση, λόγω της μεγαλύτερης ποσότητας νερού που εισρέει σε αυτή από γειτονικούς υδροφόρους ορίζοντες αλλά και της μικρότερης υποβάθμισης που έχει υποστεί. Έτσι επιτυγχάνεται η μέγιστη άντληση νερού για ύδρευση (Εικ. 6.5 και 6.6), τηρώντας παράλληλα τον περιορισμό της μηδενικής στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα για το έτος 2044 (Εικ. 5.28). Αντιθέτως η παραμονή τους στη ζώνη 1 (Σενάριο 10) παρόλη την ανύψωση της στάθμης που επιτυγχάνεται, μέσω των βέλτιστων παροχών άντλησης, αφήνει τον υδροφόρο ορίζοντα πολύ κάτω από το 0 (Εικ. 5.38), κάτι το οποίο επιβεβαιώνει για ακόμη μία φορά τον ισχυρισμό ότι η ζώνη 1 είναι ακατάλληλη για την εγκατάσταση οποιασδήποτε επιπλέον γεώτρησης. Για στάθμη ίση με αυτή του 1987 (Σενάρια 7 και 9), η μετακίνηση των υδρευτικών γεωτρήσεων δεν έχει ιδιαίτερη επίδραση στο ισοζύγιο του υδροφορέα καθώς ο στόχος επίτευξης τόσο υψηλών στάθμεων επαναφοράς σε συνδυασμό με τις αναγκαίες απολήψεις, είναι ανέφικτος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Γ.Γ.Δ.Ε./ Γ.Δ.Υ.Ε. Διεύθυνση Εγγειοβελτιωτικών Έργων (Δ7), 2010. *Σύστημα διαχείρισης νερών, εδαφών και οικοσυστημάτων Κάρλας*.

Γκούμας Κ., 2005. *Οι αρδεύσεις στη Θεσσαλική πεδιάδα: Επιπτώσεις στα υπόγεια και επιφανειακά νερά*. Υδατικοί Πόροι και Γεωργία (39-53).

ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε., 2001. *Συμπληρωματικές περιβαλλοντικές δράσεις του κανονισμού 2078/92 Ε.Ο.Κ. – Μελέτη φυσικών πόρων και παραγόντων που επιδρούν στην απόδοση και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των καλλιεργειών της Θεσσαλίας*. Λάρισα

Κωνσταντινίδης Δ., Περγαλιώτης Π., 1984. *Ανάπτυξη υπόγειων υδάτων Θεσσαλίας. Μαθηματικά Μοντέλα. Αναρίθμηση των μοντέλων υπόγειων υδροφορέων*. Υπουργείο Γεωργίας. Αθήνα.

Λουκάς Α., Βασιλειάδης Λ., Μπαστρογιάννης Ν., 2003. *Υδρολογική Προσομοίωση Υδατικού Ισοζυγίου Λεκάνης Απορροής Γερμασόγειας, Κύπρος*. Πρακτικά Ημερίδας Μελέτες και Έρευνες Υδατικών Πόρων στον Κυπριακό Χώρο, Λευκωσία, Κύπρος, σελ. 83-114.

Μαρίνος Π., 2005. *Οριστική μελέτη ταμιευτήρα Κάρλας και συναφών Έργων – Έργα Ταμιευτήρα*. ΥΠΕΧΩΔΕ.

Μουστάκα Ε., 2002. *Διαχείριση Υδατικών Πόρων της υπό ανασύστασης Λίμνης Κάρλας με χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών*. Διπλωματική εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Θ.

Μουστάκα Ε., 2003. *Διαχείριση Υδατικών Πόρων του Ταμιευτήρα της Κάρλας με χρήση ενός Προσδιοριστικού και ενός Στοχαστικού Μοντέλου Προσομοίωσης*. Μεταπτυχιακή εργασία, τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.

Μπεζές Κ., 2004. *Μελέτη έργων ενίσχυσης της ύδρευσης της μείζονος περιοχής Βόλου – Υδρογεωλογική Μελέτη*. ΥΠΕΧΩΔΕ.

Παπανίκος Ν., 2008. *Ολοκληρωμένη διαχείριση των υδατικών πόρων στην υπό επανασύσταση λίμνη Κάρλα Θεσσαλίας*. Μεταπτυχιακή Διατριβή. Τμήμα Γεωπονίας, Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Σιδηρόπουλος Π., 2007. *Στοχαστική Προσομοίωση του Υπόγειου Υδροφορέα Της Λίμνης Κάρλας*. Μεταπτυχιακή εργασία, τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Θ. Βόλος.

Σιδηρόπουλος Π, Μυλόπουλος Ν. και Λουκάς Α., 2009. *Προσομοίωση της επίδρασης των νέων υδρευτικών γεωτρήσεων στον υδροφορέα της Κάρλας*. Κοινό Συνέδριο: 11ο της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (ΕΥΕ), 7ο της Ελληνικής Επιτροπής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων (ΕΕΔΥΠ), Βόλος, Ελλάδα.

Σιδηρόπουλος Π. και Μυλόπουλος Ν., 2012. *Στοχαστική βελτιστοποίηση σε υδροφορέα υπό καθεστώς υπερ-εκμετάλλευσης: Η περίπτωση της λίμνης Κάρλας*, 2^ο Κοινό Συνέδριο: 12^ο της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (ΕΥΕ), 8ο της Ελληνικής Επιτροπής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων (ΕΕΔΥΠ), Πάτρα, Ελλάδα, 11-13 Οκτωβρίου 2012.

Σιδηρόπουλος Π. και Μυλόπουλος Ν., Λουκάς Α. και Βασιλειάδης Λ., 2012. *Αειφορική και ολοκληρωμένη διαχείριση του υπόγειου υδροφορέα της λίμνης Κάρλας με τη λειτουργία του ταμιευτήρα*, 1^ο Περιβαλλοντικό Συνέδριο Θεσσαλίας, Σκιάθος, Ελλάδα, 8-10 Σεπτεμβρίου 2012.

Τσακίρης, Γ., 1995. “*Υδατικοί Πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία*”. Εκδόσεις Συμμετρία, σελ. 675.

Υπουργείο Παιδείας δια βίου μάθησης και θρησκευμάτων, Επιχειρησιακά προγράμματα «Ανταγωνιστικότητα & Επιχειρηματικότητα» Περιφερειών σε Μετάβαση, ΕΣΠΑ 2007-2013. *Ανάπτυξη ολοκληρωμένου συστήματος παρακολούθησης και διαχείρισης ποσότητας και ποιότητας υδατικών πόρων αγροτικών λεκανών απορροής υπό συνθήκες κλιματικής αλλαγής. Εφαρμογή στη λεκάνη απορροής της λίμνης Κάρλας [ΥδροΜέντωρ]*, Ετήσια έκθεση προόδου 2012.

ΥΠΕΧΩΔΕ, Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων, Διεύθυνση Εγγειοβελτιωτικών Έργων, 1999. *Επαναδημιουργία Λίμνης Κάρλας: Περιβαλλοντική Τεχνική Έκθεση, Μελέτη Κόστους - Οφέλους και Υποστηρικτικές Μελέτες, Παράρτημα ΙΙΙ.2, Υποστηρικτική Υδρογεωλογική Μελέτη*. Αθήνα.

Ψιλοβίκος Α.Α., 1999. *Βέλτιστη διαχείριση υπόγειων υδροφορέων. Συγκριτική αξιολόγηση με τις μεθόδους γραμμικού και μη γραμμικού προγραμματισμού*. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα αγρονόμων & τοπογράφων μηχανικών, Α.Π.Θ.

Abd-Elhamid, H.F., Javadi, A.A., 2011. *A Cost-Effective Method to Control Seawater Intrusion in Coastal Aquifers*. *Water Resources Management* 25 (11), pp. 2755-2780.

Ahlfeld D.P., Heidari M., 1994. *Applications of optimal hydraulic control to groundwater systems*. *J. Water Resources Planning Management Div., Am. Soc. Civ. Eng.* 120: 350–365.

Ahlfeld D.P., Barlow P. M., Mulligan A. E. *GWM—A Ground-Water Management Process for the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model (MODFLOW-2000)*. Open-File Report 2005-1072.

Ahlfeld, D.P., and Mulligan, A.E., 2000, *Optimal management of flow in groundwater systems*: San Diego, CA, Academic Press, 185 p.

Ahlfeld, D.P., and Riefner, Guy, 2003, *Documentation for MODOFC—A program for solving optimal flow control problems based on MODFLOW simulation, version 2.3*: Amherst, MA, University of Massachusetts, Department of Civil and Environmental Engineering, 48 p.

Ahlfeld, D.P., 2004. *Algorithm for groundwater management formulations with head dependent boundary conditions*. *Developments in Water Science* 55 (PART 2) , pp. 1193-1200.

Almasri, M.N., Kaluarachchi, J.J., 2005. *Multi-criteria decision analysis for the optimal management of nitrate contamination of aquifers*. *Journal of Environmental Management* 74 (4) , pp. 365-381.

Amlan D. and Datta B., 2001. *Application of optimisation techniques in groundwater quantity and quality management*. Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences 26 (PART 4) , pp. 293-316.

Andreu, J., Ferrer-Polo, J., Pérez, M.A., Solera, A., 2009. *Decision support system for drought planning and management in the Jucar River Basin, Spain*. 18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation: Interfacing Modelling and Simulation with Mathematical and Computational Sciences, Proceedings , pp. 3223-3229.

Ayvaz Tamer, M., Karahan, H., 2008. *A simulation/optimization model for the identification of unknown groundwater well locations and pumping rates*. Journal of Hydrology 357 (1-2) , pp. 76-92.

Bhattacharjya, R.K., Datta, B., 2005. *Optimal management of coastal aquifers using linked simulation optimization approach*. Water Resources Management 19 (3) , pp. 295-320.

Belaine, G., Peralta, R.C., Hughes, T.C., 1999. *Simulation/optimization modeling for water resources management*. Journal of Water Resources Planning and Management 125 (3) , pp. 154-161

Bharati, L., Rodgers, C., Erdenberger, T., Plotnikova, M., Shumilov, S., Vlek, P., Martin, N., 2008. *Integration of economic and hydrologic models: Exploring conjunctive irrigation water use strategies in the Volta Basin*. Agricultural Water Management 95 (8) , pp. 925-936.

Candela, L., Wallis, K.J., Mateos, R.M., 2008. *Non-point pollution of groundwater from agricultural activities in Mediterranean Spain: The Balearic Islands case study*. Environmental Geology 54 (3) , pp. 587-595.

Chang, Y.-L., Tsai, T.-L., Yang, J.-C., Tung, Y.-K., 2007. *Stochastically optimal groundwater management considering land subsidence*. Journal of Water Resources Planning and Management 133 (6) , pp. 486-498.

Chang, Y.-L., Huang, C.-Y., Tsai, T.-L., Chen, H.-E., Yang, J.-C., 2011. *Optimal groundwater quantity management for land subsidence control*. Proceedings of the IASTED International Conference on Environmental Management and Engineering, EME 2011, pp. 38-45.

Chaolun, B., He, B., Gao, R., Wang, L., 2008. *Pumping decisions for sustainable development of groundwater resources in areas of grassland degradation: A case study in Lanqi Banner, Inner Mongolia, China*. Hydrogeology Journal 16 (6) , pp. 1101-1111.

Cheng, A.H.-D., Halhal, D., Naji, A., Ouazar, D., 2000. *Pumping optimization in saltwater-intruded coastal aquifers*. Water Resources Research 36 (8) , pp. 2155-2165.

Chiu, Y.-C., Nishikawa, T., Yeh, W.W., 2010. *Optimal pump and recharge management model for nitrate removal in the warren groundwater basin, California*. Journal of Water Resources Planning and Management 136 (3) , art. no. 009003QWR , pp. 299-308.

Chu, X., Mariano, M.A., Shao, J., Xu, J. 2001. *Conjunctive water resources supply-demand management model of Baotou City, China*. IAHS-AISH Publication(272) , pp. 159-166.

Costandinidis D. 1978. *Hydrodynamique d'un systeme aquifere heterogene, Hydrogeologie de la Thessalie Orientale*. Doctora D'Etat, Grenoble.

Das, A., Datta, B., 2001. *Application of optimisation techniques in groundwater quantity and quality management*. Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences 26 (PART 4) , pp. 293-316.

Das Gupta, A., Jayakrishnan, R., Onta, P.R., Ramnarong, V., 1995. *Assessment of groundwater quality for the Bangkok aquifer system. Models for assessing and monitoring groundwater quality*. Proc. symposium, Boulder, 1995 227 , pp. 3-10.

Demirbas, K., Altan-Sakarya, A.B., Önder, H., 2012. *Optimal dewatering of an excavation site*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management 165 (6) , pp. 327-337.

Emch, P.G., Yen, W.W.-G., 1998. *Management model for conjunctive use of coastal surface water and ground water*. Journal of Water Resources Planning and Management 124 (3) , pp. 129-138.

Fayad, H., Peralta, R.C., Forghani, A., 2012. *Optimizing reservoir-stream-aquifer interactions for conjunctive use and hydropower production*. Advances in Civil Engineering 2012 , art. no. 910203.

Ferreira, J., Cunha, M.C., Vieira, J., Monteiro, J.P., 2009. *Optimized exploitation of aquifers: Application to the Querença- Silves aquifer system*. WIT Transactions on Ecology and the Environment 125 , pp. 3-11.

Finney, B.A., Samsuhadi, Willis, R., 1992. *Quasi three-dimensional optimization model of Jakarta basin*. Journal of Water Resources Planning & Management 118 (1), pp. 18-31.

Fisher A, D., Gorelick, S.M., 1985. *Hydraulic gradient control for groundwater contaminant removal*. Journal of Hydrology 76 (1-2) , pp. 85-106.

Gerakis P.A., 1992. *Conservation and Management of Greek Wetlands*. Proceedings of a Greek Wetlands Workshop held in Thessaloniki, 17-21 April, Greece.

Gill, P.E., Murray, Walter, and Wright, M.H., 1981. *Practical optimization*. New York, Academic Press, 401 p.

Gorelick S. M., 1982. *A model for managing sources of groundwater pollution..* Water Resources Research 18: 773–781.

Gorelick S. M., Remson I., 1982. *Optimal location and management of waste disposal facilities affecting groundwater quality*. Water. Resour. Bulletin 18: 43–51.

Gorelick, S. M., 1983. *A review of distributed parameter groundwater management modeling methods*, Water Resources Research 19(2), 305–319.

Gorelick, S.M., 1990. *Large scale nonlinear deterministic and stochastic optimization: Formulations involving simulation of subsurface contamination*. Mathematical Programming 48 (1-3) , pp. 19-39.

Greenwald, R.M., 1998. *Documentation and user's guide—MODMAN, an optimization module for MODFLOW, version 4.0*: Freehold, NJ, HSI GeoTrans, 112 p.

Hallaji, K., Yazicigil, H., 1996. *Optimal management of a coastal aquifer in southern Turkey*. Journal of Water Resources Planning and Management 122 (4) , pp. 233-244.

Halford, K.J., and Hanson, R.T., 2002. *User guide for the drawdown-limited, multi-node well (MNW) package for the U.S. Geological Survey's modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, versions MODFLOW-96 and MODFLOW-2000*: U.S. Geological Survey Open-File Report 02-293, 33 p.

Harbaugh A.W. and Michael G. McDonald, 2000. *User's Documentation for MODFLOW-2000, an update to the U.S. Geological Survey Modular Finite-Difference Ground-Water Flow Model*, United States Government Printing Office, Washington.

He, L., Huang, G.H., Lu, H.W., 2009. *A coupled simulation-optimization approach for groundwater remediation design under uncertainty: An application to a petroleum-contaminated site*. Environmental Pollution 157 (8-9) , pp. 2485-2492.

Heidari M., 1982. *Application of linear systems theory and linear programming to groundwater management in Kansas*. Water Resour. Bulletin 18: 1003–1012.

Hillier, F.S., and Lieberman, G.J., 2001. *Introduction to operations research (5th ed.)*: New York, McGraw-Hill Publishing, 954 p.

Lall, U., Santini, M.D., 1989. *An optimization model for unconfined stratified aquifer systems*. Journal of Hydrology 111 (1-4) , pp. 145-162.

Larson, K.J., Basagaoglu, H., Mariño, M., 2001. *Numerical simulation of land subsidence in the Los Banos-Kettleman City Area, California*. Contribution - University of California, Water Resources Center (207) , pp. X-73.

Lefkoff, L.J., Gorelick, S.M., 1986. *Design and cost analysis of rapid aquifer restoration systems using flow simulation and quadratic programming*. Ground Water 24 (6) , pp. 777-790.

Lemoine, Pierre H., Reichard, Eric G., Remson, Irwin, 1986. *Efficient response matrix method for coupling a groundwater simulator and a regional agricultural management model*. Water Resources Bulletin 22 (3) , pp. 417-423.

Li, J., Shi, L., Li, B., Liu, J., 2012. *Study on allocation analysis of water resources in Qaidam Basin*. International Symposium on Geomatics for Integrated Water Resources Management, GIWRM 2012 , art. no. 6349574.

Liu, J., Zheng, C., Zheng, L., Lei, Y., 2008. *Ground water sustainability: Methodology and application to the North China Plain*. Ground Water 46 (6) , pp. 897-909.

Loukas A., Mylopoulos N., Kokkinos K., Sidiropoulos P., Vasiliades L. and Liakopoulos A. (2008). *The effect of spatial discretization in integrated modeling of surface and groundwater hydrology through OpenMI*. International Interdisciplinary Conference on Predictions for Hydrology, Ecology and Water Resources Management – Using Data and Models to Benefit Society, Prague, Czech Republic.

Martínez, Y., Albiac, J., 2004. *Agricultural pollution control under Spanish and European environmental policies*. Water Resources Research 40 (10) , pp. W105011-W1050112.

Miller, S.A., Johnson, G.S., Cosgrove, D.M., Larson, R., 2003. *Regional scale modeling of surface and ground water interaction in the Snake River Basin 2003*. Journal of the American Water Resources Association 39 (3) , pp. 517-528.

Minihane, M.R., 2002. *Stream-aquifer interactions and a water supply management model*: Amherst, MA, University of Massachusetts Department of Civil and Environmental Engineering, Masters Thesis, 161 p.

Mylopoulos, Y.A., Theodosiou, N., Mylopoulos, N.A., 1999. *A stochastic optimization approach in the design of an aquifer remediation under hydrogeologic uncertainty*. Water Resources Management 13 (5) , pp. 335-351.

Nishikawa, T., 1998. *Water-resources optimization model for Santa Barbara, California*. Journal of Water Resources Planning and Management 124 (5) , pp. 252-263.

Onta, P.R., Gupta, A.D., 1995. *Regional management modeling of a complex groundwater system for land subsidence control*. Water Resources Management 9 (1) , pp. 1-25.

Park C.-H., Aral M.M., 2003. *Multi-objective optimization of pumping rates and well placement in coastal aquifers*. Journal of Hydrology 290 (2004) 80–99.

Peña-Haro, S., Pulido-Velazquez, M., Sahuquillo, A., 2009. *A hydro-economic modelling framework for optimal management of groundwater nitrate pollution from agriculture*. Journal of Hydrology 373 (1-2) , pp. 193-203.

Peralta R.C., Datta B., 1990. *Reconnaissance - level alternative optimal groundwater use strategies*. J. Water Resources. Planning Manage. Div., Am. Soc. Civ. Eng 116: 676–692.

Peralta, R.C., 2004. *Simulation/Optimization MOdeling System (SOMOS)*. Logan, UT, Utah State University Department of Biological and Irrigation Engineering, accessed July 28, 2004, at <http://www.engineering.usu.edu/bie/>

Peralta, R., Kalwij, I.M., 2004. *Mathematically optimizing water management*. Proceedings of the 2004 World Water and Environmental Resources Congress: Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management , pp. 3553-3560.

Pisinaras, V., Petalas, C., Tsihrintzis, V.A., Zagana, E., 2007. *A groundwater flow model for water resources management in the Ismarida plain, North Greece*. Environmental Modeling and Assessment 12 (2) , pp. 75-89.

Psilovikos A.A., Tzimopoulos C., 1998. *Pumping cost analysis in groundwater management, using the MODMAN (modflow management) model*. International Conference on Computational Methods in Water Resources, CMWR 1 , pp. 27-34.

Psilovikos, A.A., 1999. *Optimization models in groundwater management, based on linear and mixed integer programming. An application to a Greek hydrogeological basin*. Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere 24 (1-2) , pp. 139-144.

Psilovikos, A.A., 2006. *Response matrix minimization used in groundwater management with mathematical programming: A case study in a transboundary aquifer in Northern Greece*. Water Resources Management 20 (2) , pp. 277-290.

Pulido, M., Andreu, J., Sahuquillo, A., Pinilla, V., Sánchez, A., Capilla, J., Paredes, J., 2002. *Optimization of water resources management under aquifer overexploitation conditions: The Adra - Campo de Dalías system, Spain*. Water Studies 10 , pp. 87-99.

Pulido-Velazquez, D., Ahlfeld, D., Andreu, J., Sahuquillo, A., 2008. *Reducing the computational cost of unconfined groundwater flow in conjunctive-use models at basin scale assuming linear behaviour: The case of Adra-Campo de Dalías*. Journal of Hydrology 353 (1-2) , pp. 159-174.

Rejani, R., Jha, M.K., Panda, S.N., Mull, R., 2008. *Simulation modeling for efficient groundwater management in balasore coastal basin, India*. Water Resources Management 22 (1) , pp. 23-50.

Ricciardi, K.L., Pinder, G.F., Karatzas, G.P., 2007. *Efficient groundwater remediation system design subject to uncertainty using robust optimization*. Journal of Water Resources Planning and Management 133 (3) , pp. 253-263.

Riefner, R.G., and Ahlfeld, D.P., 1996. *The impact of numerical precision on the solution of confined and unconfined optimal hydraulic control problems*. Hazardous Waste and Hazardous Materials, v. 13, no. 2, p. 167-176.

Rosenwald G. W., Green D. W., 1974. *A method for determining the optimum location of wells in a reservoir using mixed-integer programming*. Soc. Res. Eng. J. 14: 44-54.

Safavi, H.R., Bahreini, G.R. 2009. *Conjunctive simulation of surface water and ground water resources under uncertainty*. Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B: Engineering 33 (1) , pp. 79-94.

Saffi, M., Cheddadi, A., 2007. *Explicit algebraic influence coefficients: A one-dimensional transient aquifer model*. Hydrological Sciences Journal 52 (4) , pp. 763-776.

Sedki, A., Ouazar, D., 2010. *Hybrid particle swarm and neural network approach for streamflow forecasting*. Mathematical Modelling of Natural Phenomena 5 (7) , pp. 132-138.

Schrage, M., 1991. *Computer tools for thinking in tandem*. Science 253 (5019) , pp. 505-507.

Shen, W.-B., Dong, D.-M., Yu, M.-Q., 2004. *Optimal groundwater management model in a two-aquifer system*. Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management 8 (2) , pp. 119-127.

Shi, F., Zhao, C., Sun, D., Peng, D., Han, M., 2012. *Conjunctive use of surface and groundwater in central Asia area: A case study of the Tialan River Basin*. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment 26 (7) , pp. 961-970.

Schoups, G., Addams, C.L., Minjares, J.L., Gorelick, S.M., 2006. *Sustainable conjunctive water management in irrigated agriculture: Model formulation and application to the Yaqui Valley, Mexico*. Water Resources Research 42 (10) , art. no. W10417.

Sidiropoulos P., Folia S., Mylopoulos N. and Loukas A., 2008. *A coupled surface hydrology-lake-groundwater modeling framework for the lake Karla basin*. PRE9: Protection and Restoration of the Environment, Kefalonia, Greece.

Sidiropoulos P., Mylopoulos N. and Loukas A., 2011. *Optimal groundwater resources, management of an overexploited aquifer under global change*. Water Engineering and Management in a Changing Environment Catania, June 29 – July 2, 2011.

SOGREAH - GRENOBLE 1974. *Μελέτη αναπτύξεως υπογείων υδάτων πεδιάδος Θεσσαλίας. Τελική έκθεση, R 11971*, Υπουργείο Γεωργίας, Διεύθυνση Γεωργ. Αναπτ. & YEB.

Taghavi, S.A., Howitt, R.E., Marino, M.A., 1994. *Optimal control of groundwater quality management: nonlinear programming approach*. Journal of Water Resources Planning & Management - ASCE 120 (6) , pp. 962-982.

Theodossiou, N.P., 2004. *Application of non-linear simulation and optimisation models in groundwater aquifer management*. Water Resources Management 18 (2) , pp. 125-141.

Tung, C.-P., Chou, C.-A., 2004. *Pattern classification using tabu search to identify the spatial distribution of groundwater pumping*. Hydrogeology Journal 12 (5) , pp. 488-496.

Uddameri, V., Kumar, D., 2006. *Development and application of a multimedia model to assess fate and transport of organic chemicals in a South Texas Lake*. Contaminated Soils, Sediments and Water: Success and Challenges , pp. 145-162.

Willis R, Liu P., 1984. *Optimisation model for groundwater planning*. J. Water Resour. Planning Manage. Div., Am. Soc. Civ. Eng. 110: 333–347.

Yang, C., Chen, J., Tu, X., 2008. *A multi-objective evolutionary algorithm of marriage in honey bees optimization based on the local P*. IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline) 17 (1 PART 1).

Yeh, W.W.-G., 1992. *Systems analysis in ground-water planning and management*. Journal of Water Resources Planning & Management - ASCE118 (3) , pp. 224-237.

Zalidis G., and A. Gerakis, 1999. *Research Evaluating Sustainability of Watershed Resources Management through Wetland Functional Analysis*. Environmental Management Vol. 24, No. 2, pp. 193-207.

Zalidis G., V. Takavakoglou, A. Panoras, G. Bilas, S. Katsavouni, 2005. *Re-Establishing a Sustainable Wetland at Former Lake Karla, Greece, Using Ramsar Restoration Guidelines*. Environmental Management Vol. 34, No. 6, pp. 875–886.

Zheng, Chunmiao, and Wang, P.P., 2002. *MGO—A Modular Groundwater Optimizer incorporating MODFLOW and MT3DMS, Documentation and user's guide*. Tuscaloosa, AL, The University of Alabama and Groundwater Systems Research Ltd., 118 p.

Zhou, X., Chen, M.,Liang, C., 2003. *Optimal schemes of groundwater exploitation for prevention of seawater intrusion in the Leizhou Peninsula in southern China*. Environmental Geology43 (8) , pp. 978-985.