



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**ΠΟΛΥΚΥΤΤΑΡΙΚΟ
ΜΟΝΤΕΛΟ
ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ**

Γεώργιος Μ. Τέντες

**ΕΠΙΣΤΗΜΗ
&
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ**

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2001

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΕΠΙΚ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Δ. ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟΣ ΣΥΜΒΟΥΛΟΣ: ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ι. ΚΟΥΜΑΝΤΑΚΗΣ**

Πρόλογος

Η ενασχόληση μου με το θέμα της προσομοιώσεως φυσικών διεργασιών με μαθηματικά μοντέλα ξεκίνησε μόλις το 1999, με την εισαγωγή του στον μεταπτυχιακό κύκλο σπουδών του ΕΜΠ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων». Καθοριστικό ρόλο στην επαφή αυτή με το αντικείμενο έπαιξαν τα μαθήματα Υδρολογίας, Υδραυλικής των υπογείων νερών και κυρίως το μάθημα του επίκουρου καθηγητή Δημήτρη Κουτσογιάννη και των συνεργατών του «Βελτιστοποίηση συστημάτων διαχείρισης υδατικών πόρων». Ο καθηγητής Ι. Κουμαντάκης επέμενε στην ενασχόληση μου με ένα νέο για μένα αντικείμενο, και του χρωστώ πολλά για αυτό, και ο Δημήτρης Κουτσογιάννης ήταν αυτός που δέχθηκε να επιβλέψει την εκπόνηση της παρούσας, επίβλεψη που απεδείχθη εξόχως κουραστικό έργο. Σε αυτόν τον άνθρωπο λοιπόν ανήκουν οι περισσότερες ευχαριστίες και η όποια αναγνώριση.

Ένα ακόμη ευχαριστώ ανήκει στον υποψήφιο διδάκτορα Βαγγέλη Ρόζο του οποίου η υλικοτεχνική συνδρομή και οι διακριτικές παρατηρήσεις βοήθησαν στην σωστή οργάνωση του πρωτογενούς υλικού. Ευχαριστίες επίσης και στον Νίκο Μαμάση, διότι στερήθηκε τον φορητό του υπολογιστή έναν ολόκληρο μήνα, προκειμένου να ολοκληρωθεί επιτυχώς η παρούσα. Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στην Άσπα για την απεριόριστη υπομονή της.

Γεώργιος Τέντες
Θάσος, 28/9/2001

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος

Περιεχόμενα

Περίληψη

Extended abstract

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο της εργασίας.	.....1
1.2 Περιοχή μελέτης – Ιστορικό.	.....2
1.3 Συμβολή της εργασίας.	.....3
1.4 Διάρθρωση της εργασίας.	.....4

2. ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ ΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΑΡΣΤΙΚΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ

2.1. Γενικά.	.....5
2.2. Προσομοίωση υδρολογικών διεργασιών στα υπόγεια νερά.	.....6
2.3. Ανάλυση αποφορτίσεως υπογείου υδροφορέα με αδιαμέριστο μοντέλο.	.....16
2.4. Καθορισμός του εύρους προγνώσεων που προκύπτει από εναλλακτικές ρυθμίσεις.	.....21
2.5. Μοντέλο για την προσομοίωση διασποράς ρύπου σε εκμεταλλευτόμενο υδροφορέα.	.....23
2.6. Μοντέλα ποιότητας υπογείων νερών.	.....26
2.7. Το μοντέλο BEMER.	.....30

3. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ 4Xcell.

3.1. Γενικά.	.....33
3.2. Επιφανειακή υδρολογία.	.....34
3.3. Υπόγεια υδρολογία – Υδρογεωλογία.	.....40

3.4. Βαθμονόμηση του μοντέλου.	.....45
4. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	
4.1. Γενικά.	.....50
4.2. Επιφανειακή υδρολογία.	.....50
4.3. Υπόγεια υδρολογία – Υδρογεωλογία.	.....55
4.4. Υδρογεωλογικό μοντέλο πηγών Βοιωτικού Κηφισού.	.....66
5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 4Xcell ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	
5.1. Γενικά.	.....71
5.2. Κατάστρωση.	.....71
5.3. Ρύθμιση.	.....82
5.4. Αποτελέσματα.	.....84
5.5. Επαλήθευση.	.....96
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	.....102
Δημοσιεύσεις	.....106
<u>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</u>	
Πρωτογενή στοιχεία	
Γραφήματα	
Χάρτης	

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η σύνθεση και κατασκευή ενός ημι-κατανεμημένου υδρολογικού μοντέλου, το οποίο θα περιγράφει ταυτοχρόνως υπόγεια και επιφανειακά νερά, με κύρια έμφαση στα υπόγεια. Το μοντέλο εφαρμόζεται στην υδρολογική λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού ποταμού, προκειμένου να προσομοιώσει τις υδρολογικές διεργασίες και να δώσει στοιχεία για το υδατικό ισοζύγιο.

Στην προσομοίωση υδρολογικών συστημάτων, κυριαρχούν δύο κύρια είδη μοντέλων. Τα αδιαμέριστα και τα πλήρως κατανεμημένα. Τα πρώτα, καταφέρνουν συνήθως χονδροειδείς προσεγγίσεις της λειτουργίας ενός συστήματος και αποφεύγονται ολοένα και περισσότερο. Στην βιβλιογραφία αναφέρονται συνήθως περιπτώσεις κατασκευής και χρήσεώς τους ως προσταδίων για την κατασκευή άλλων συνθετότερων μοντέλων. Από πλευράς μαθηματικών δεν είναι ουδόλως απαιτητικά, διότι κάνουν χρήση απλών ισοζυγίων. Επιπλέον δεν απαιτούν πληθώρα δεδομένων και χρονοσειρών για την ρύθμισή τους. Τα δεύτερα είναι ιδιαίτερος διαδεδομένα στην προσομοίωση υπογείων υδροφορέων και τυγχάνουν της προτιμήσεως του επιστημονικού κοινού διεθνώς. Όσον αφορά το μαθηματικό τους μέρος, εφαρμόζουν μερικές διαφορικές εξισώσεις και χρησιμοποιούν αριθμητικές μεθόδους για την επίλυσή τους. Έχουν ανάγκη από λεπτομερείς πληροφορίες για το σύστημα που προσομοιώνουν και μεγάλου μήκους χρονοσειρές μετρήσεων, προκειμένου να ρυθμιστούν σωστά. Παρ' όλα αυτά, όταν ρυθμιστούν επαρκώς, είναι πολύ αποτελεσματικά και παρέχουν πληροφορία για κάθε σημείο του μελετώμενου χώρου.

Το μοντέλο που κατασκευάσθηκε, με την ονομασία 4Xcell είχε σαν στόχο του να καλύψει την περιοχή μεταξύ των δύο παραπάνω ειδών μοντέλων. Είναι ένα ημι-κατανεμημένο μοντέλο που αφορά την προσομοίωση υδρολογικών λεκανών με καρστικό υπόγειο υδροφορέα και την ταυτόχρονη αντιμετώπιση των επιφανειακών και υπογείων υδάτων. Το υπό μελέτη σύστημα χωρίζεται σε μία σειρά ενοτήτων και καθεμία από αυτές αντιμετωπίζεται με αδιαμέριστο τρόπο. Έτσι, αφ' ενός επιτυγχάνεται μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα απ' ό,τι με ένα αδιαμέριστο μοντέλο, αφ' ετέρου δεν απαιτείται μεγάλη πυκνότητα πληροφορίας και δεν προκύπτουν

πολύπλοκα μαθηματικά προβλήματα, όπως με ένα αριθμητικό, κατανεμημένο μοντέλο.

Δεδομένα εισόδου στο 4Xcell είναι χρονοσειρές βροχοπτώσεως, δυνητικής εξατμοδιαπνοής και αντλήσεων από τον υπόγειο καρστικό υδροφόρο. Στην έξοδο λαμβάνονται οι χρονοσειρές της πραγματικής εξατμοδιαπνοής, της διακυμάνσεως της εδαφικής υγρασίας, της κατεισδύσεως, της παροχής του ποταμού σε διάφορα σημεία και των διακυμάνσεων στις στάθμες του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Ακόμα είναι δυνατή η σύνταξη υδατικών ισοζυγίων. Η κατάστρωση του μοντέλου είναι ιδιαίτερος απλή και γίνεται σε λογιστικό φύλλο (spreadsheet) τύπου Excel, σε προσωπικό ηλεκτρονικό υπολογιστή. Για την ρύθμιση του μοντέλου χρειάζονται χρονοσειρές υδρομετρήσεων σε κομβικά σημεία του ποταμού και χρονοσειρές αντίστοιχης περιόδου για τις στάθμες των υδροφόρων. Η επίλυση των μαθηματικών εξισώσεων, οι οποίες αποτελούν σχεδόν κατ' αποκλειστικότητα εφαρμογή του νόμου του Darcy, γίνεται με αλγόριθμο βελτιστοποίησης, που υλοποιείται με «επιλυτή» που είναι ενσωματωμένος στο Excel.

Το 4Xcell ρυθμίστηκε στην λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού για την περίοδο 10/1984 – 9/1989, με μηνιαίες χρονοσειρές. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται έχουν φυσικό νόημα και οι τιμές που προέκυψαν ήταν απολύτως λογικές. Η απόκλιση στις στάθμες δεν ξεπέρασε το 0.3 m ενώ στις παροχές τα 3.5 hm³ ανά μήνα. Η προσαρμογή του μοντέλου ήταν ικανοποιητική. Η επαλήθευση του μοντέλου έγινε για διάφορες πενταετείς περιόδους μεταξύ 10/1967 – 9/1987 και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι παρά την περιορισμένη περίοδο ρυθμίσεως, το μοντέλο έχει την δυνατότητα να αναπαραγάγει τις μετρημένες χρονοσειρές με ικανοποιητική προσέγγιση.

Σε γενικές γραμμές φαίνεται ότι το μοντέλο 4Xcell επιτυγχάνει την ικανοποιητική προσομοίωση των υδρολογικών διαδικασιών της λεκάνης. Μπορεί να ρυθμιστεί σχετικά εύκολα και, με μικρό υπολογιστικό κόπο και χρόνο, να δώσει επαληθεύσιμα ρεαλιστικά αποτελέσματα.

Extended Abstract

1. Introduction

Modelling the hydrological processes in a river basin, has been one of the main problems of hydrology. Several kinds of models have been developed. In this thesis, a semi-distributed model 4Xcell is developed. This was created for the simultaneous simulation of evapotranspiration, runoff and karstic groundwater flow in a basin. It requires the division of the area into regions of a more or less continuous aquifer, the simulation of which is based on quadruple cells. 4Xcell uses the user-friendly environment of MS Excel. It is calibrated by means of a Solver and the results include time series for the aquifer water levels, the groundwater storage, the actual evapotranspiration and the total runoff at the outlet. It can be used on daily, monthly or annual basis.

4Xcell has been applied to the basin of Viotikos Kifissos in Central Hellas. It was calibrated for a five-year period and verified for several other five-year periods.

2. Model types

Hydrological models are usually classified into three major categories: lumped, semi-distributed, and fully distributed, which are represented by single-cell, multi-cell and numerical-method models respectively.

In single-cell models the whole hydrological system is represented by a rectangular or abstract-shaped cell, with an area equal to the area of the system (Bear, 1979). Mathematically, the main equation is that of mass balance. Rainfall is distributed into infiltration, moisture and direct runoff. The total flow at the exit of the system depends on the total head in the main aquifer. The use of such a model is limited to preliminary studies, or studies of sub-basins.

In multi-cell models, the hydrological system is divided into a number of units, each represented by one or more cells (Bear, 1979). Each of the cells is treated as in the single-cell model, and mass exchange, following Darcy's law, is present between cells. For this reason, it is also called semi-distributed. Multi-cell models are useful tools for the thorough study of river basins, extended aquifers etc. They do not provide detailed information but help in understanding the mechanism of water resources distribution.

Numerical models are the most widely developed and used models nowadays. They use mathematical methods to reduce partially differential equations to algebraic equations (Latinopoulos, 1986). The usual tools to achieve this are finite elements and finite differences. The study area is divided into small cells, which can have standard or variable dimensions. The provided information regards all factors of the hydrological cycle and their value in each of the cells. It strongly depends on available time series quantity and quality. The numerical models require a lot of preparation, computer memory and calculation time, but they can be very accurate if properly developed.

3. The 4Xcell model.

The presented model is based on the multi-cell, semi-distributed approach. The main goals are the following:

- Model structure as close as possible to the physical structure of the hydrological system.
- Combination of surface and groundwater hydrological representation.
- Fast model set-up, calibration and updating.
- Easy adjustment to any hydrological basin, in a friendly computational environment.

The 4Xcell model requires the division of the studied area into two or more units of quadruple cells (fig.1). The three of these cells represent the ground and the underground zone and the fourth represents the part of the river included in the unit. The surface hydrological system includes the river and the upper parts of the other three cells (soil layer), which serve as the soil moisture zone. The groundwater system consists of the lower part of the three cells (aquifer layer). These cells are positioned vertically to the river flow direction. The central simulates the valley part of the aquifer and the side-cells the mountain aquifer.

The interaction between rainfall and soil moisture zone follows the Thornthwaite simple model (Koutsoyiannis - Xanthopoulos, 1997). The soil moisture zone is regarded as a tank (fig. 2), whose area is equal to the area of the cell. A standard percentage of the tank content is percolated into the karstic aquifer. When the tank is full, the surplus water goes to the river. The parameters for this sub-model are the storage capacity K_i of the zone and

the factor $Perc_i$, which indicates the percentage of tank content that percolates into the aquifer layer.

The mass exchange in the aquifer system, as well as the mass transport to and from the river, is based on Darcy's law. The aquifer layers and the river are cells with transmissivity T , storativity S , length and width L and W . The values of L and W depend on the characteristics of the basin. The river transmissivity is ∞ and its storativity is 1, whereas those of the other cells are determined at model fitting phase. The water level of the river is set in a fixed value equal to the average level of the river crossing the unit. The water levels of the side-cells are also subject to calibration. The values of groundwater storage in time $t = 0$ are calculated by multiplication of the water level time series first value by storativity S and area A .

The model is constructed in the Excel sheets and it does not make use of any VBA program or function. Thus, it responds very quickly to any change of data or equation. The equations being solved by means of an explicit method. The calibration uses a combination of the "trial and error" method and the Excel Solver optimisation method, to minimize the objective function F ; F is the sum of the root mean square (RMS) errors for the time series of water level and runoff, each multiplied by a constant or variable factor.

4. Study area: Viotikos Kifissos basin.

The 4Xcell model was used for simulating the hydrological system of the Viotikos Kifissos river basin in Greece. This is a 2037 km² basin with a main stream (Viotikos Kifissos) 102 km long. From a geological point of view, it consists of schists, limestones and ofiolites, and the groundwater circulates in a more or less continuous karstic aquifer.

The basin was divided into three units from up-stream down (Upper Course, Middle Course, Lower Course). 27 time series were available for the needs of calibration. Water level time series were available for 2 wells in the Upper Course unit, 4 wells in the Middle Course unit and 4 wells in the Lower Course unit. Water flow measurements were performed in 11 stations spread in the basin, from which 6 time series were created (3 for the average water level of the units respectively and 3 for the exit of each unit's sub-basin). Rainfall and potential evapotranspiration time series were taken from a pre-existing model (Perleros et al, 1998).

5. 4Xcell on Viotikos Kifissos basin

The 4Xcell model was set-up in 4 Excel sheets. The Generalised Reduced Gradient non linear solver was used for the optimization. The Solver tendency to find local and not global minima, lead to several different sets of parameter values; each set represents a different scenario for the basin characteristics. The basic differences among these scenarios refer to the parameters of the Thornthwaite model and the water level in the side aquifer (which regulates the losses towards the sea).

Two criteria were adopted in order to evaluate the results of 4 main scenarios. The first one, C, equals to the value of the objective function calculated for standard weighting factors, and the second, G, expresses the number of the observed time series maxima, that are successfully simulated by the model. Two scenarios were the most significant. $\Sigma 001$, which had the minimum G, and $\Sigma 002$, which had the minimum C. In both models the water level RMS error does not exceed 30 cm, but in the $\Sigma 002$ scenario the fluctuation of the flow rate does not follow the observed time series in the Upper Course and Lower Course units.

The results, according to the $\Sigma 001$ scenario, were the following:

- Ground moisture zone: great thickness and slow percolation were noticed, due to the fact that extended alluvial aquifers are included in this zone.
- Water level at side-aquifers: some of them are lower than the central water level, indicating great underground losses to the sea.
- Transmissivities: they are between 4000 and 31000 m²/month, owing to the extended karstification. They are between calculated limits of earlier studies (Perleros et al, 1998).
- Storativities: they are between expected limits (Kallergis, 1986).
- Output time series: these are actual evapotranspiration, ground moisture, percolation, underground losses to the sea, average water levels, basic and flood runoff (fig. 3-8).
- Water balance: on a five-year basis, it shows that rain is divided to an expected 60% evapotranspiration, a rather unexpected 23% losses to the sea, and an 18% total runoff (fig. 9).

The results of the 4Xcell model, using the fitted parameter values, were verified for the periods 10/1967-9/1972, 10/1972-9/1977, 10/1977-9/1982, 10/1982-9/1987. The runoff RMS error was very similar to the error of the calibration period, although the value of the G criterion was not very satisfactory as seen in the comparison of calculated and observed total runoff (fig. 10). Although there were no data for the water level, the produced time series seem reasonable. There has also been a success in the produced time series for the other output.

6. Conclusions

The 4Xcell model was constructed in order to be used as an alternative, in the cases where the available data for the basin and its aquifer are not such that would allow the use of fully distributed models. This semi-distributed model is not limited only to water balance equations, but it uses Darcy's law to express mass exchange between cells. The case study showed that 4Xcell can be easily adjusted to a basin, and that the MSEExcel environment makes calibration and verification easy.

The resulting parameter values cannot be applied in any specific local area of the studied basin, but they give useful information about the general behaviour of each of the basin's components.

Regarding the Viotikos Kifissos basin, the 4Xcell model application described the distribution of the water resources, on annual and 5 year basis, as well as a rough idea about the storativities and the transmissivities variation throughout the region. The results of the calibration show that the model is set on a very realistic theoretical platform, and that even with incomplete input data, adequate accuracy can be achieved. The results of the model verification emphasise the latter, as well as the need for longer period calibration.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Αντικείμενο της εργασίας.

Το μοντέλο 4Xcell αναπτύχθηκε προκειμένου να διερευνηθεί η δυνατότητα ποσοτικής περιγραφής των γενικών χαρακτηριστικών των συνολικών υδρολογικών διεργασιών σε μία καρστική λεκάνη, με την χρήση ενός σχετικώς απλουστευμένου τρόπου προσέγγισης. Το μοντέλο εφαρμόζεται στην υδρολογική λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού. Στόχος του δεν είναι να υποκαταστήσει τα πλήρη λεπτομερή μοντέλα που έχουν συνταχθεί για την λεκάνη, ούτε να κομίσει νέα θεωρητική γνώση στον τομέα της προσομοιώσεως. Οι ανάγκες που φιλοδοξεί να εξυπηρετήσει αφορούν διαχείριση μεγάλων υδρολογικών-υδρογεωλογικών ενοτήτων με συνδυασμένη χρήση επιφανειακής και υπόγειας πληροφορίας, παρέχοντας, μετά από σωστή ρύθμιση, προγνώσεις για την εξέλιξη της στάθμης υπογείου νερού και των διαθέσιμων παροχών ποταμού, καθώς και εκτιμήσεις για τις επιπτώσεις εναλλακτικών πολιτικών απολήψεως νερού. Συγκεκριμένοι στόχοι που φιλοδοξεί να επιτύχει το μοντέλο 4Xcell οι εξής:

- Κατά το δυνατόν φυσική αντιστοιχία των στοιχείων του μοντέλου με την δομή και τις οντότητες της λεκάνης.
- Συνδυασμό, κατά την ρύθμιση, επιφανειακής και υπόγειας υδρολογικής πληροφορίας.
- Γρήγορη επίλυση και ενημέρωση των αρχείων.
- Εύκολη κατάστρωση και χρήση για οποιαδήποτε υδρολογική λεκάνη, σε φιλικό υπολογιστικό περιβάλλον.

Κατά την φάση κατασκευής του μοντέλου διερευνήθηκαν διάφορες εναλλακτικές μορφές του, άλλες με μικρή, άλλες με μεγαλύτερη επιτυχία. Στην ανά χείρας εργασία περιγράφεται η τελευταία μορφή του μοντέλου, η οποία είναι αυτόνομη και ολοκληρωμένη, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν υπάρχουν περιθώρια περαιτέρω βελτιώσεων.

1.2. Περιοχή μελέτης - Ιστορικό.

Όπως προαναφέρθη, το μοντέλο που κατασκευάστηκε εφαρμόστηκε στην υδρολογική λεκάνη ενός ελληνικού ποταμού, του Βοιωτικού Κηφισού. Η περιοχή είναι ιδιαίτερης σημασίας, τόσο για την ελληνική αγροτική οικονομία, όσο και για την υδροδότηση της πρωτεύουσας Αθήνας. Η Εταιρεία Υδρεύσεως και Αποχετεύσεως Πρωτευούσης (Ε.ΥΔ.Α.Π.) έχει κατασκευάσει σειρά γεωτρήσεων γύρω από το ποτάμι, οι οποίες χρησιμεύουν για την ενίσχυση του υδροδοτικού συστήματος της πόλεως των Αθηνών, σε περιόδους λειψυδρίας.

Η μελέτη της συγκεκριμένης λεκάνης έχει ξεκινήσει από τις αρχές του 20ου αιώνα με την εγκατάσταση δικτύου βροχομετρικών σταθμών σε διάφορα σημεία της. Αργότερα εγκαταστάθηκαν και σταθμοί υδρομετρήσεων σε κομβικά σημεία της κοίτης του ποταμού. Επίσης, τα 10-15 τελευταία χρόνια έχει αρχίσει συστηματική καταγραφή της στάθμης κάποιων γεωτρήσεων του ΙΓΜΕ και άλλων φορέων. Στα πλαίσια της γεωλογικής χαρτογραφώσεως της χώρας, έχει συνταχθεί γεωλογική - υδρογεωλογική μελέτη για την περιοχή (Παγούνης κ.α., 1986) καθώς και γεωλογικοί χάρτες σε κλίμακα 1:50000.

Το Υπουργείο Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων (Υ.Π.Ε.ΧΩ.Δ.Ε.) έχει αναθέσει σε διάφορους μελετητές (Περλέρους κ.α., 1998. Ναλμπάντης-Ρόζος, 2000, κλπ) την εκπόνηση μελετών για την διαχείριση των επιφανειακών και υπογείων υδάτων μέσα από μοντέλα προσομοιώσεως. Στοιχεία από αυτές έχουν χρησιμοποιηθεί τόσο για την θεωρητική τεκμηρίωση και κατασκευή του μοντέλου, όσο και για την ρύθμισή του.

Οι διάφορες μελέτες έδειξαν πως πρόκειται για μία υδρολογική λεκάνη με καρστικούς κυρίως υδροφορείς, πολλές καρστικές πηγές και έναν μεγάλο αλλουβιακό υδροφόρο ορίζοντα στο υπέδαφος της αποξηραμένης λίμνης Κωπαΐδας. Ιδιαίτερη αβεβαιότητα επικρατεί για τις διαρροές από τους υδροφορείς προς την θάλασσα, ενώ η πιεζομετρία στο εσωτερικό της λεκάνης έχει περιγραφεί και μελετηθεί επαρκώς.

1.3. Συμβολή της εργασίας.

Είναι γνωστό πως η χρήση των μοντέλων προσομοιώσεως είναι πολύ διαδεδομένη στην εποχή μας, της οποίας η αυξανόμενες ανάγκες οδηγούν σε ολοένα και πιο πολύπλοκα νοητικά κατασκευάσματα. Η ανά χείρας εργασία έρχεται να προστεθεί στις έως τώρα εκπονημένες μελέτες της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, όχι ανασυνθέτοντας πράγματα ήδη γνωστά, αλλά ούτε και προσθέτοντας έναν ακόμη βαθμό δυσκολίας στο εγχείρημα της υδρολογικής προσομοιώσεως. Με την σύνθεση παραδοσιακών μεθόδων και υπό το πρίσμα της λογικής «όλα σε ένα», συνεισφέρει, τόσο στον τομέα της υδρολογικής προσομοιώσεως εν γένει, όσο και στην καλύτερη γνώση της περιοχής εφαρμογής.

Από την μία πλευρά, το επίτευγμα είναι η επιστροφή στην κατασκευή απλών αλλά λειτουργικών μοντέλων προσομοιώσεως. Τα μοντέλα αυτά συνδυάζουν επιφανειακά και υπόγεια νερά, δεν απαιτούν εξειδικευμένα μαθηματικά, και πολύ περισσότερο δεν απαιτούν σημαντικό υπολογιστικό χρόνο και κόπο. Μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν σε οποιαδήποτε λεκάνη και περιορίζουν την ανάγκη για δεδομένα. Διότι, μπορεί μεν να απαιτούν στοιχεία για πολλές υδρολογικές παραμέτρους, όμως μπορούν να λειτουργήσουν με μικρές χρονοσειρές και με οποιοδήποτε χρονικό βήμα υπολογισμών. Ένα προσόν τους δέ, που επαληθεύεται στην πράξη, είναι η μικρή επιρροή που έχουν στο αποτέλεσμα οι ανακρίβειες στις μετρήσεις ή στην γνώση των στοιχείων της λεκάνης. Οι προσεγγίσεις που γίνονται από το μοντέλο είναι τέτοιες που αφομοιώνουν οποιαδήποτε απόκλιση από την πραγματικότητα μπορεί να προκύψει από κακές καταγραφές, έλλειψη μετρήσεων, ατελή γεωλογική χαρτογράφηση κλπ.

Από την άλλη, σημαντική είναι και η συνεισφορά στο επίπεδο γνώσεως αυτής καθεαυτής της υδρολογικής λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού. Ειδικότερα, προέκυψαν στοιχεία για την διαρροή προς την θάλασσα, όπως η τάξη μεγέθους και οι ευρύτερες θέσεις όπου εκδηλώνονται απώλειες. Ακόμα έγινε φανερό το μέγεθος της κατεισδύσεως και της πραγματικής εξατμοδιαπνοής. Τέλος κατέστη δυνατή η ενδεικτική πρόγνωση της εξελίξεως του υδατικού δυναμικού της λεκάνης με μέθοδο φιλική στον χρήστη και γρήγορη στην παραγωγή αποτελεσμάτων.

1.4. Διάρθρωση της εργασίας.

Στα κεφάλαια της εργασίας αυτής παρατίθενται όλα εκείνα τα στοιχεία που θα βοηθήσουν τον αναγνώστη να κατανοήσει τα πρωτότυπα σημεία της. Η θεωρητική βάση για την κατασκευή ενός υδρολογικού μοντέλου δίνεται στο 2ο κεφάλαιο, το οποίο ακολουθεί την σύντομη αυτή εισαγωγή. Εκεί παρουσιάζονται τα διάφορα είδη μοντέλων που βρίσκονται εν χρήση για την συνδυασμένη προσομοίωση επιφανειακών και υπογείων υδάτων, καθώς και περιπτώσεις εφαρμογής τους σε διεθνές και εθνικό επίπεδο.

Ακολουθεί η περιγραφή και ανάλυση του κατασκευασθέντος μοντέλου 4Xcell, ως προς τις δύο συνιστώσες του, επιφανειακή και υπόγεια (κεφάλαιο 3). Παρουσιάζεται επίσης και η μέθοδος βαθμονομήσεως του, με έτοιμο υπολογιστικό πακέτο του εμπορίου.

Στο 4ο κεφάλαιο γίνεται μία λεπτομερής παρουσίαση της υδρολογικής λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού ποταμού, από υδρολογικής και γεωλογικής απόψεως. Σχολιάζεται δέ και εφαρμογή μοντέλου προσομοιώσεως στις καρστικές πηγές της λεκάνης.

Στο 5ο κεφάλαιο απαριθμούνται και ερμηνεύονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου 4Xcell στην λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, μαζί με σχολιασμό του τρόπου εγκαταστάσεως και των δυσχερειών που συναντήθηκαν κατά την ρύθμιση.

Στο 6ο και τελευταίο κεφάλαιο, εξάγονται συμπεράσματα για την λειτουργικότητα του μοντέλου 4Xcell, τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά του, όπως επίσης και για τις δυνατότητες βελτιώσεώς του.

Μέσα στο κείμενο ενσωματώνονται ενδεικτικοί πίνακες από την κατάσταση, λειτουργία και τα αποτελέσματα του μοντέλου, ενώ οι πλήρεις πίνακες και χρονοσειρές εισόδου - εξόδου δίνονται στο παράρτημα.

2. ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ ΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΑΡΣΤΙΚΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ

2.1. Γενικά.

Ανέκαθεν οι επιστήμονες είχαν την πρόθεση να κατασκευάσουν μαθηματικά μοντέλα για την προσομοίωση των υδρολογικών συστημάτων. Η ανάγκη για δημιουργία υδρολογικών μοντέλων, τα οποία να περιλαμβάνουν και την υπόγεια υδρολογία, έχει οδηγήσει σε όλο και πιο πολύπλοκα μοντέλα. Ακόμα πιο πολύπλοκα είναι τα μοντέλα προσομοιώσεως αποκλειστικώς υπόγειων υδροφόρων οριζόντων και της συμπεριφοράς τους.

Η γνώση ξεκινά από τα πλέον απλά μοντέλα του ενός κυττάρου (single cell models), όπου ο υδροφορέας αντιμετωπίζεται σαν δεξαμενή με εισόδους και εξόδους. Χαρακτηρίζονται και ως αδιαμέριστα (Κουτσογιάννης – Ξανθόπουλος, 1997), διότι δεν απαιτούν κατάτμηση του υπό μελέτη συστήματος. Επέκταση αυτών (Bear, 1979) αποτελούν τα πολυκυτταρικά μοντέλα (multicell models). Σε αυτά ο υδροφορέας ή οι υδροφορείς χωρίζονται σε μικρό αριθμό κυττάρων-δεξαμενών, τα οποία επικοινωνούν μεταξύ τους. Η επίλυση αυτών γίνεται με υπολογισμούς κατά σταθερά συνήθως χρονικά βήματα και χωρίζονται σε ρητά (explicit), πεπλεγμένα (implicit) και μεικτά. Είναι γνωστά και ως ημι-κατανεμημένα μοντέλα, διότι μέσα από αυτά γίνεται κατάτμηση του συστήματος σε αυτοτελείς (αδιαμέριστες ενότητες).

Εξέλιξη των πολυκυτταρικών μοντέλων αποτελούν τα πολύ διαδομένα πλέον αριθμητικά μοντέλα (κατανεμημένα), τα οποία διαμερίζουν το υπό μελέτη σύστημα σε μικρές αλληλοεπηρεαζόμενες οντότητες. Οι μαθηματικές εξισώσεις ροής που προκύπτουν επιλύονται με μεθόδους όπως τα πεπερασμένα στοιχεία ή οι πεπερασμένες διαφορές (Λατινόπουλος, 1986).

Η βιβλιογραφία πάνω στις τελευταίες μεθόδους είναι πλούσια και, εκτός από αναλυτικές και προσεγγιστικές μεθόδους για την αντιμετώπιση κάθε τύπου υδροφορέα, περιλαμβάνει μεθόδους επιλύσεως, και έτοιμο λογισμικό για την γρήγορη εισαγωγή και επεξεργασία των δεδομένων. Αντιθέτως, εξ αιτίας της ανάγκης για μεγάλη λεπτομέρεια, έχουν εγκαταλειφθεί οι μέθοδοι πολυκυτταρικών και κυρίως μονοκυτταρικών μοντέλων.

Από πλευράς αρθρογραφίας, το τοπίο είναι παρόμοιο. Τα πολυκυτταρικά μοντέλα χρησιμοποιούνται σε μικρή κλίμακα, και συνήθως σε περιπτώσεις καρστικών υδροφορέων, όπως είναι και ο υδροφορέας της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, χωρίς να λείπουν και προσομοιώσεις πορωδών ή μεικτών υδροφορέων (Pozdniakov – Shestakov, 1998). Από πλευράς διεθνούς εμπειρίας, αξιόλογα αδιαμέριστα και ημι-κατανεμημένα μοντέλα, που συνδυάζουν και την παρακολούθηση της διαδόσεως ρύπων έχουν εφαρμοστεί μεταξύ άλλων στον υδροφορέα Edwards, Τέξας, Η.Π.Α. (Barett- Chaberneau, 1997) και στην Ανατολική Μασσαχουσέτη, Η.Π.Α. (Gelhar-Wilson, 1974).

2.2. Προσομοίωση υδρολογικών διεργασιών στα υπόγεια νερά

Σε μία πραγματεία του στα ζητήματα των υπογείων νερών, ο Bear (1979) αναλύει όλες τις γνωστές μεθόδους προσομοιώσεως των υπογείων υδροφορέων. Έτσι, τα συνηθέστερα μοντέλα χωρίζονται σε:

1). Μονοκυτταρικά και πολυκυτταρικά μοντέλα. Πρόκειται για απλά αδιαμέριστα ή ημι-κατανεμημένα μοντέλα, βασισμένα στον νόμο του Darcy και σε εξισώσεις διατήρησης της μάζας. Τα μοντέλα των δύο αυτών τύπων έχουν βαρύνουσα σημασία για την εργασία αυτή και για τον λόγο αυτό εξετάζονται ξεχωριστά παρακάτω.

2). Αναλυτικά μοντέλα μερικών διαφορικών εξισώσεων. Τυπικό παράδειγμα εξισώσεως τέτοιων μοντέλων, για υδροφορέα υπό πίεση, είναι η:

$$\text{div}' (\mathbf{T} * \text{grad}\Phi) + N (x, y, t) = S * \partial\Phi/\partial t,$$

όπου \mathbf{T} είναι η μεταβιβαστικότητα του υδροφορέα, Φ το πιεζομετρικό φορτίο, N ο εμπλουτισμός και S η αποθηκευτικότητα. Η εξίσωση δέ αυτή λαμβάνει διάφορες μορφές μερικής διαφορικής αναλόγως με το είδος της ροής. Για την ανάπτυξη τέτοιων εξισώσεων έχουν γίνει οι εξής παραδοχές:

(α) Οριζόντια ροή σε υπό πίεση (περιορισμένο) υδροφορέα.

(β) Ισότροπος υδροφορέας, αλλά όχι και ομογενής (φυσικά είναι εύκολη η επέκταση και σε ανισότροπο υδροφορέα). Η μεταβιβαστικότητα $T = T(x, y)$ είναι μία συνεχής συνάρτηση με συνεχείς στον χώρο πρώτες παραγώγους.

(γ) Η αποθηκευτικότητα S οφείλεται σε ελαστικές ιδιότητες του υδροφορέα και του νερού, όμως το νερό θεωρείται σχεδόν ασυμπίεστο.

(δ) Η ροή υπακούει στον νόμο του Darcy.

Εξ αιτίας όλων αυτών των παραδοχών, η διατύπωση ενός προβλήματος ροής μέσω μερικών διαφορικών εξισώσεων και αρχικών και οριακών συνθηκών αποτελεί ένα μαθηματικό μοντέλο του φυσικού φαινομένου. Είναι σπάνιο αν όχι απίθανο σε περιπτώσεις πρακτικού ενδιαφέροντος να διατίθενται στοιχεία οριακών και αρχικών συνθηκών ώστε να είναι εφικτή η επίλυση τέτοιων εξισώσεων. Είναι αδύνατον να βαθμονομηθούν τέτοια μοντέλα με στοιχεία για το πιεζομετρικό φορτίο ϕ . Γι' αυτό τα μοντέλα αυτά, που προβλέπουν τι θα συμβεί σε έναν υδροφορέα σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου και του χρόνου, αν και είναι πολύ λεπτομερή, δεν είναι καθόου ευέλικτα και πρακτικά.

3). Αριθμητικά μοντέλα. Οι αριθμητικές μέθοδοι, βασιζόμενες σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές, είναι σήμερα το κυριότερο εργαλείο για την επίλυση προβλημάτων προγνώσεως για υπόγεια νερά μεγάλης κλίμακας. Σχετίζονται άμεσα με την επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων. Στις αριθμητικές μεθόδους περιλαμβάνονται οι μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών, πεπερασμένων στοιχείων (Bear, 1979) και οριακών στοιχείων (Λατινόπουλος 1986).

Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών στηρίζεται στην αρχή ότι το πρώτο βήμα στην αριθμητική επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων είναι η εξίσωση να αντικατασταθεί από μία ομάδα εξισώσεων αλγεβρικών διαφορών. Αυτές είναι σχέσεις μεταξύ τιμών ανεξαρτήτων μεταβλητών, π.χ. της Φ , σε γειτονικά σημεία του x χώρου, όπου το x δηλώνει την διανυσματική θέση στο οριοθετημένο σύστημα συντεταγμένων και το t τον χρόνο. Έτσι, η συνεχής μεταβλητή $\Phi = \Phi(x, t)$, που εμφανίζεται σε μία μερική διαφορική εξίσωση, αντικαθίσταται από μία διακριτή μεταβλητή. Η ομάδα των εξισώσεων που δημιουργείται, επιλύεται αριθμητικώς σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, ώστε να λάβει τιμές εξαρτημένης μεταβλητής πάνω σε προκαθορισμένο αριθμό διακριτών σημείων του υπό έρευνα x χώρου. Συνοπτικά, οι

χρονικές παράγωγοι υπολογίζονται με τρεις τρόπους: Με χρήση τιμών από το προηγούμενο χρονικώς βήμα, με χρήση τιμών από το επόμενο χρονικώς βήμα και με χρήση τιμών και από τα δύο προαναφερόμενα με συγκεκριμένο συντελεστή βαρύτητας για το καθένα. Οι μέθοδοι καλούνται αντιστοίχως (Λατινόπουλος, 1986) ρητές (explicit schemes - backward simulation of time derivative), πεπλεγμένες (implicit scheme - forward simulation of time derivative) και μεικτές (Crank-Nicolson scheme - equal weighting factors). Το ρητό σχήμα είναι το ευκολότερο αλλά και το πιο ασταθές. Τα άλλα είναι περισσότερο σταθερά, αλλά δυσκολότερα στην κατάστρωση και την επίλυση.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι νεώτερη από την προηγούμενη και έχει προέλθει από την ανάγκη για επίλυση συστημάτων: (α) με ακανόνιστα και πολύπλοκα γεωμετρικά όρια πεδίου, (β) με συνδυασμούς οριακών συνθηκών, (γ) με μεγάλη λεπτομέρεια στους υπολογισμούς, λόγω της δυνατότητας πυκνώσεως του καννάβου χωρίς πρόσθετο υπολογιστικό κόπο. Ο πρωταρχικός ρόλος κάθε ειδικής τεχνικής που στηρίζεται στην θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων είναι ο μετασχηματισμός της διαφορικής εξίσωσης με μερικές παραγώγους σε μία ολοκληρωματική εξίσωση που θα περιλαμβάνει μόνο πρώτης τάξεως παραγώγους. Μετά από αυτό είναι δυνατή η αριθμητική ολοκλήρωση σε μικρά στοιχεία, στα οποία έχει χωριστεί το συνολικό πεδίο.

Αξίζει να γίνει αναφορά σε μία ακόμα αριθμητική μέθοδο, αυτή των συνοριακών στοιχείων. Η βασική αρχή της μεθόδου είναι η κατάστρωση ενός επικαμπυλίου ολοκληρώματος στα όρια ενός πεδίου R που περικλείεται από καμπύλη C . Με αυτό υπολογίζονται τιμές της μεταβλητής σε κάθε σημείο της καμπύλης, οπότε μετά είναι πολύ εύκολο να υπολογισθούν οι τιμές της σε κάθε εσωτερικό σημείο του χώρου.

Από την άλλη πλευρά τέτοιες μέθοδοι μπορούν να ιδωθούν όχι σαν αριθμητικά εργαλεία, αλλά σαν αυτοτελή μαθηματικά μοντέλα (Bear, 1979), αφού απαιτούν πρόσθετες υποθέσεις και παραδοχές σε σχέση με αυτές των μερικών διαφορικών εξισώσεων. Εξάγονται δέ απευθείας, θεωρώντας το υδατικό ισοζύγιο ενός όγκου ελέγχου, με την παραδοχή π.χ. της ομοιόμορφης κλίσεως μεταξύ κομβικών σημείων.

(4) Μέτωπα και διεπιφάνειες. Πρόκειται για ειδική κατηγορία μοντέλων, που μελετούν την διείδυση υγρών διαφόρων τύπων σε νερό και τα οποία σχηματίζουν σαφώς διακριτά και συνήθως στενά μέτωπα ή διεπιφάνειες αναμίξεως με αυτό. Τα μοντέλα αυτά έχουν να κάνουν με την μεταφορά ρύπων και δεν εξετάζονται εδώ.

Μονοκυτταρικά και πολυκυτταρικά μοντέλα για υπόγειους υδροφορείς.

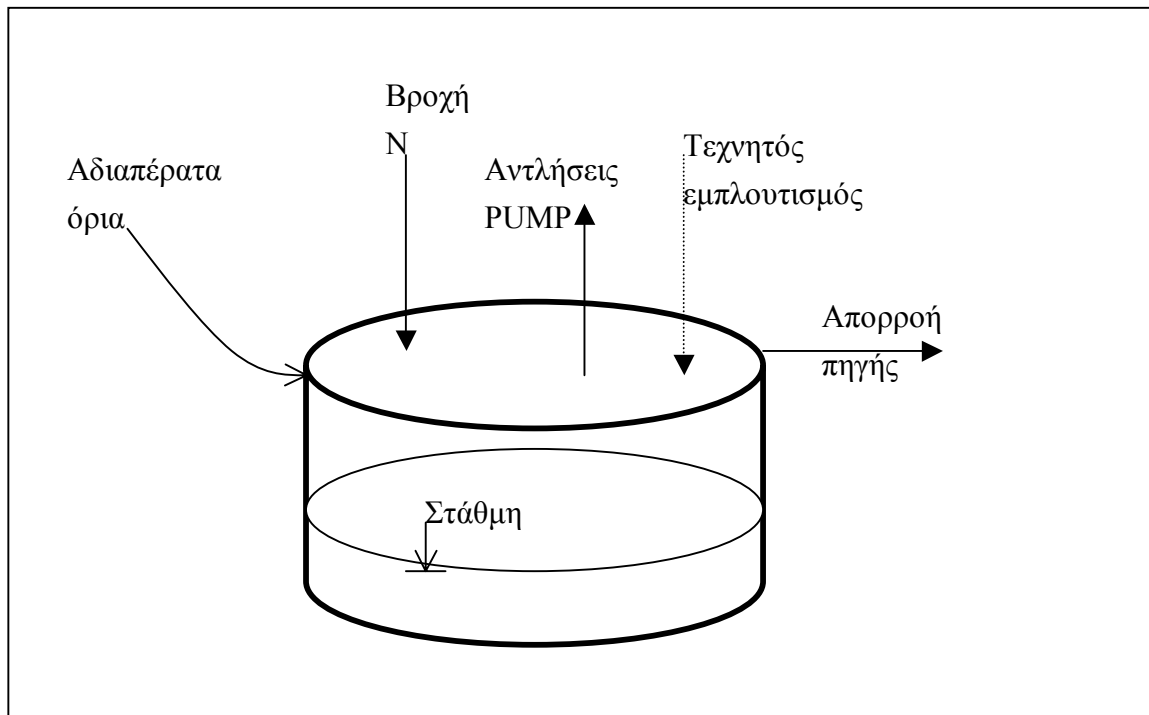
Ο απλούστερος τύπος μοντέλου είναι αυτός που σε μία ολόκληρη λεκάνη αντιστοιχεί ένα μοναδικό κύτταρο (single cell model). Φυσικά σε αυτήν την περίπτωση υποτίθεται ότι οι μέσες καταστάσεις, όπως π.χ. μέση στάθμη υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, αρκούν για να περιγράψουν το φαινόμενο (σχήμα 1). Το υδατικό ισοζύγιο για κύτταρο με έκταση A και αδιαπέρατα όρια συντάσσεται ως εξής:

$$\Delta t * [A * (N + R - P) - Q] = A * S * \{ h_{|t+\Delta t} - h_{|t} \} \quad (1)$$

όπου η περίοδος υπολογισμού είναι από t έως $t + \Delta t$, S είναι η αποθηκευτικότητα (αδιάστατη), N είναι η τροφοδοσία από ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (όγκος ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου, L/T), R είναι η τεχνητή τροφοδοσία (όγκος ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου, L/T), P είναι ο ρυθμός αντλήσεως (όγκος ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου, L/T), Q είναι ο ρυθμός εκφορτίσεως (όγκος ανά μονάδα χρόνου, L^3/T) και $h_{|t}$ είναι η μέση στάθμη (μονάδα μήκους, L) την χρονική στιγμή t . Πρέπει δέ να γίνει η παραδοχή ότι οι N , R , P , Q μένουν σταθερές κατά την διάρκεια του Δt . Διαφορετικά, πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι μέσες τιμές τους στο Δt . Συχνά η παροχή Q θεωρείται συνάρτηση του h .

Οι άγνωστες παράμετροι που καλείται κανείς να προσδιορίσει κατά την ρύθμιση του μοντέλου είναι συνήθως οι S και N , ενώ κάποιες φορές ζητείται και η συνάρτηση $Q = Q(h)$. Ως γνωστές, τότε, λαμβάνονται οι τιμές των h , R , P για μία σειρά βημάτων στο παρελθόν (ιστορικές χρονοσειρές). Εάν στην πραγματικότητα η περιοχή δεν παρουσιάζει ομοιομορφία στις παραμέτρους, για κάθε βήμα, τότε ο μέσος όρος υπολογίζεται χωρίζοντας αυτήν σε υποπεριοχές A_1, A_2, \dots με ομοιογενή συμπεριφορά. Οπότε:

$$h = (\sum_i h_i * \Delta A_i) / A \quad \text{κλπ.}$$



Σχήμα 1. Υδρολογικό μονοκυτταρικό μοντέλο, για την προσομοίωση επιφανειακών ή υπογείων υδατικών συστημάτων.

Άλλου είδους μονοκυτταρικό μοντέλο μπορεί να κατασκευασθεί για την περίπτωση που χρειάζεται να υπολογισθούν οι εισροές ή και οι εκροές στα όρια του κυττάρου, εάν π.χ. αυτό αποτελεί μέρος ενός ευρύτερου υπογείου υδροφορέα. Τότε στο πρώτο μέλος της (1) προστίθεται η πλευρική εισροή και αφαιρείται η πλευρική εκροή από το κύτταρο, η οποία μπορεί να υπολογισθεί εύκολα εάν το όριο του κυττάρου χωρισθεί σε i τμήματα. Συνεπώς:

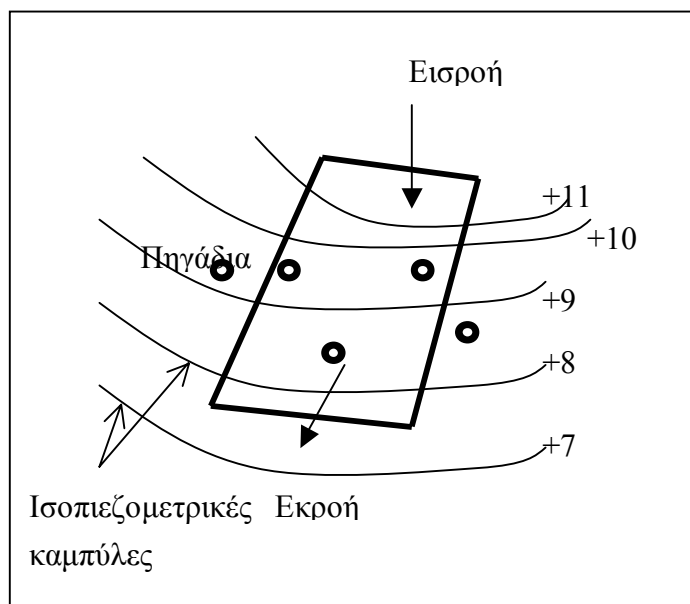
$$\Delta t * [A * (N + R - P) - Q + \sum_i (W_i * T_i * J_i)] = A * S * \{ h_{|t+\Delta t} - h_t \} \quad (2),$$

όπου W_i , T_i , J_i είναι το μήκος, η μέση μεταβιβαστικότητα και η μέση υδραυλική κλίση στο τμήμα i του ορίου (σχήμα 2).

Είναι ευνόητο ότι και άλλα στοιχεία υδατικού ισοζυγίου μπορούν να προστεθούν στην γενική μορφή του μονοκυτταρικού μοντέλου, όπως:

1. Εξατμοδιαπνοή, που μπορεί να είναι και συνάρτηση του h , εάν η ελεύθερη στάθμη είναι πολύ κοντά στην επιφάνεια,
2. Διήθηση από τεχνητά ρέματα νερού ή αποβλήτων που διασχίζουν την περιοχή,
3. Αποστράγγιση,
4. Διαρροές από κάποιο σύστημα υδρεύσεως,

5. Επιστροφή ποσότητας νερού από την άρδευση, που μπορεί να είναι και ποσοστό των αντλήσεων, ή από άλλες δεξαμενές (π.χ. λιμνοδεξαμενές, σηπτικές δεξαμενές κλπ),
6. Εισροές ή διαρροές από τον μελετώμενο υδροφόρα μέσω ημιπερατών στρωμάτων.



Σχήμα 2. Υδρολογικό μονοκυτταρικό μοντέλο με όρια χωρισμένα σε τμήματα για τον καλύτερο υπολογισμό των εισροών και των εκροών.

Τα μονοκυτταρικά μοντέλα χρησιμοποιούνται επίσης και για την παρακολούθηση και προσομοίωση μεμονωμένων διαλυμένων στο υπόγειο νερό ουσιών (π.χ αλάτων ή ραδιενεργών) ή του TDS (ολικά διαλυμένα στερεά). Όπως στο ποσοτικό ισοζύγιο, έτσι και εδώ θεωρείται ένα ισοζύγιο κάποιου άλατος μέσα αποκλειστικώς στην κορεσμένη ζώνη. Εκτός εάν υπάρχει ειδικός λόγος, λαμβάνονται υπ' όψιν οι εισροές και οι εκροές αλατότητας μόνο σε αυτήν την ζώνη. Εάν η κίνηση του άλατος ξεκινά από την επιφανειακή ζώνη (αλατότητα στον φυσικό εμπλουτισμό, διαρροές από σηπτικές δεξαμενές ή Χ.Υ.Τ.Α. κλπ), οπότε και υφίσταται ροή αυτού και στην ακόρεστη ζώνη, μαζί με χημικές αντιδράσεις και συνοδευόμενη από διάβρωση, είναι δυνατόν να κατασκευασθεί ξεχωριστό μοντέλο. Η έξοδος αυτού θα ληφθεί ως είσοδος για το άλλο.

Είναι γεγονός πως όσα περισσότερα στοιχεία υδατικού ισοζυγίου εισάγονται στο μοντέλο, τόσο μεγαλύτερη είναι η αριθμητική αβεβαιότητα για το μέγεθος και την

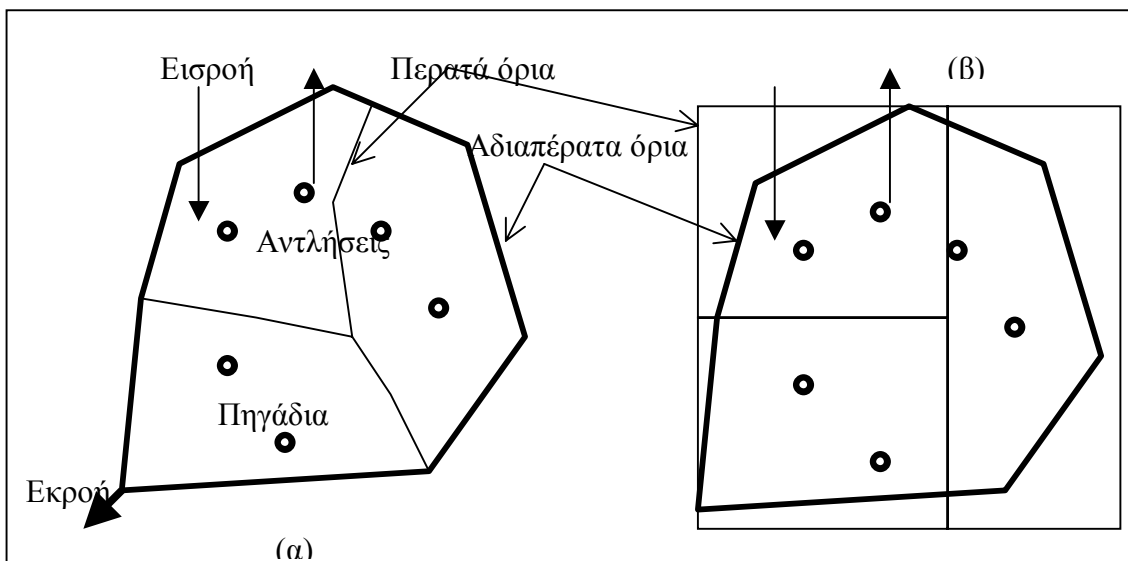
συμπεριφορά τους. Γι' αυτό και απαιτείται ο προσδιορισμός τους μέσα από την ρύθμιση του μοντέλου.

Παρά την απλότητά του, το μονοκυτταρικό μοντέλο αποδεικνύεται ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο, ειδικώς στα πρώτα στάδια αναπτύξεως και διαχείρισεως, όπου τα δεδμένα είναι σπάνια και αποσπασματικά. Εκεί ο μελετητής ενδιαφέρεται περισσότερο για την συνολική εικόνα (μέση στάθμη υπογείων υδάτων) της ερευνώμενης περιοχής και για την λήψη γενικών αποφάσεων και λιγότερο για την λεπτομερή γνώση τοπικών φαινομένων.

Η βασική αρχή που διέπει το μονοκυτταρικό μοντέλο, βρίσκεται πίσω και από το πολυκυτταρικό (multicell model). Σε αυτήν την περίπτωση, ο υδροφορέας διαιρείται σε σχετικώς μικρό αριθμό κυττάρων, συνήθως τετραγωνικής μορφής (σχήμα 3). Πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στον μικρό αριθμό κυττάρων προκειμένου να είναι σαφής ο διαχωρισμός από τις μεθόδους-μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών, όπου επίσης υπάρχουν κύτταρα. Η διαφορά είναι ότι στις δεύτερες η ύπαρξη κυττάρων χρησιμεύει στο να προσεγγιστούν κάποιες μερικές παράγωγοι, και κατά συνέπεια, όσο μικρότερη είναι η διαμέριση (άρα περισσότερα τα κύτταρα) τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια και διακριτική ικανότητα επιτυγχάνεται. Φυσικά εδώ εισέρχεται η ανάγκη για περιορισμό στο κόστος, στον υπολογιστικό χρόνο και τα υπολογιστικά συστήματα.

Στην “πολυκυτταρική” προσέγγιση, όπου τα κύτταρα που προσομοιώνουν την συμπεριφορά ενός μεγάλου υδροφορέα μπορεί να είναι ακόμα και δύο, η λογική είναι τελείως διαφορετική. Στην πραγματικότητα κατασκευάζονται ισοζύγια, όπως αυτά των εξισώσεων (1) και (2), για κάθε ένα από τα κύτταρα. Όπως και προηγουμένως προϋποτίθεται ότι μέσα σε κάθε στοιχείο δεν λαμβάνει χώρα καμία ροή, όμως λαμβάνεται υπ' όψιν ροή στα κοινά όρια γειτονικών στοιχείων. Για το καθένα από αυτά γίνονται δεκτές μόνο μέσες τιμές κάθε υδραυλικής παραμέτρου, και μέση στάθμη. Μεταξύ κυττάρων που εφάπτονται η μεταφορά μάζας υλοποιείται σαν γραμμική ροή από δεξαμενή σε δεξαμενή.

Έτσι, παρόλο που τελικά μπορεί τα αριθμητικά σχήματα που θα δημιουργηθούν να προσεγγίζουν την μερική διαφορική εξίσωση και το πολυκυτταρικό μοντέλο (εκφραζόμενο σαν μαθηματική εξίσωση) να εμφανίζονται σαν παρεμφερείς αλγεβρικές εξισώσεις, όμως η αφετηρία τους και οι αρχές πάνω στις οποίες θεμελιώνονται είναι διαφορετικές.



Σχήμα 3. Πολυκυτταρικό μοντέλο υπογείου υδροφορέα, με κύτταρα ακαθορίστου (α) και ορθογωνικού (β) σχήματος.

Το σχήμα 4 δείχνει ένα λεπτομερέστερο πολυκυτταρικό μοντέλο με κύτταρα τετραγωνικού σχήματος.

Το υδατικό ισοζύγιο για το i,j κύτταρο, για την χρονική περίοδο από t έως $t + \Delta t$, έχει ως εξής (Bear, 1979):

$$\Delta t * (Q_x|_{i-1/2,j} - Q_x|_{i+1/2,j} + Q_y|_{i,j-1/2} - Q_y|_{i,j+1/2} + R_{i,j} - P_{i,j} + N_{i,j}) = S_{i,j} * \Delta x_i * \Delta y_i * (\Phi_{i,j}^{t+\Delta t} - \Phi_{i,j}^t) \quad (3)$$

όπου:

Q_x και Q_y είναι ο ρυθμός ροής συνολικώς στον χρόνο t εγκάρσια στα όρια των κυττάρων (θετικός όταν η ροή είναι ομόρροπη προς θετικό ημιάξονα - διαστάσεις L^3/T). Στις συνήθεις περιπτώσεις υπολογίζεται βάσει του νόμου του Darcy.

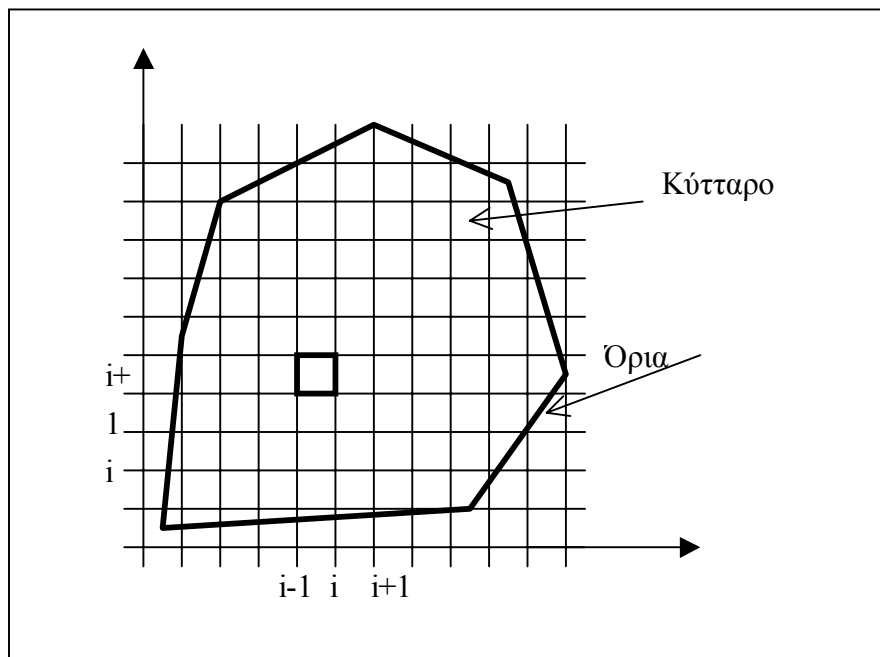
$R_{i,j}$ και $N_{i,j}$ είναι ο ρυθμός τροφοδοσίας, τεχνητός και φυσικός αντιστοίχως, στο κύτταρο i,j κατά το διάστημα Δt (διαστάσεις L^3/T).

$P_{i,j}$ είναι ο ρυθμός αντλήσεως στο κύτταρο i,j κατά το Δt (διαστάσεις L^3/T).

$S_{i,j}$ είναι η μέση αποθηκευτικότητα του υδροφορέα στο κύτταρο i,j (αδιάστατη).

$\Phi_{i,j}$ είναι το πιεζομετρικό φορτίο στο κελί i,j την χρονική στιγμή t (διαστάσεις L).

Ισχύει και εδώ ότι στο ισοζύγιο μπορούν να προστεθούν και δευτερεύοντα στοιχεία (επιστροφή από αρδεύσεις, διαρροές κλπ).



Σχήμα 4. Λεπτομερές πολυκυτταρικό μοντέλο με τετράγωνα κύτταρα και λεπτομερή διαμέριση.

Για τους υδροφορείς με διαρροές πρέπει να προστεθεί ένας επιπλέον όρος, για να εκφράσει εκροή ή εισροή στο κύτταρο $\Delta x_i \Delta y_j$.

Σε μία τέτοια προσέγγιση, οι ιδιότητες του υδροφορέα είναι συνδεδεμένες με τα κύτταρα, π.χ. οι μεταβιβαστικότητες είναι $T_{i,j}$, $T_{i,j-1}$, $T_{i,j+1}$ κλπ. Όμως, για να εκφραστούν τα Q σε συνάρτηση με τα Φ είναι απαραίτητες οι τιμές του T στα όρια μεταξύ κυττάρων. Αυτές είτε θεωρούνται δεδομένες εξ αρχής είτε υπολογίζονται από τις ίδιες τις τιμές των κυττάρων. Γενικώς, συνιστώνται οι εξής μέθοδοι υπολογισμού (Bear, 1979):

$$\text{Αριθμητικός μέσος: } T_{i+1/2,j} = 0.5 * (T_{i+1,j} + T_{i,j})$$

$$\text{Γεωμετρικός μέσος: } T_{i+1/2,j} = (T_{i+1,j} * T_{i,j})^{0.5}$$

$$\text{Αρμονικός μέσος: } T_{i+1/2,j} = (\Delta x_i + \Delta x_{i+1}) / ((\Delta x_i / T_{i,j}) + (\Delta x_{i+1} / T_{i+1,j})) \quad (4)$$

Η τελευταία περίπτωση είναι περισσότερο ακριβής αφού λαμβάνει υπ' όψιν την ίδια την ροή από το ένα κύτταρο στο άλλο και συμπεριφέρεται καλύτερα στην περίπτωση ακραίων τιμών μεταβιβαστικότητας.

Έτσι η (3) μπορεί να εκφραστεί με την μορφή (Bear, 1979):

$$\begin{aligned}
 & T_{i-1/2,j} \Delta y_j \frac{\Phi_{i-1,j}^t - \Phi_{i,j}^t}{(\Delta x_i + \Delta x_{i-1})/2} + T_{i+1/2,j} \Delta y_j \frac{\Phi_{i+1,j}^t - \Phi_{i,j}^t}{(\Delta x_i + \Delta x_{i+1})/2} + \\
 & T_{i,j-1/2} \Delta x_j \frac{\Phi_{i,j-1}^t - \Phi_{i,j}^t}{(\Delta y_i + \Delta y_{i-1})/2} + T_{i,j+1/2} \Delta x_j \frac{\Phi_{i,j+1}^t - \Phi_{i,j}^t}{(\Delta y_i + \Delta y_{i+1})/2} + \\
 & + N_{i,j} + R_{i,j} - P_{i,j} = S_{i,j} \Delta x_i \Delta y_j \frac{\Phi_{i,j}^{t+\Delta t} - \Phi_{i,j}^t}{\Delta t}
 \end{aligned}$$

Το μαθηματικό μοντέλο αποτελείται από η εξισώσεις σαν την τελευταία, μία για κάθε κύτταρο με ειδική προσοχή σε αυτά που βρίσκονται στα όρια.

Η επιλογή των Δx_i και των Δy_j , δεν είναι άσχετη με την επιλογή του Δt . Αποδεικνύεται πως υπάρχει και εδώ, όπως και στην μέθοδο πεπερασμένων διαφορών, ένα κριτήριο σταθερότητας, το οποίο δίνεται από την σχέση:

$$(T / S) * [\Delta t / (\Delta x)^2 + \Delta t / (\Delta y)^2] \leq 0.5$$

Σε γενικές γραμμές, με δεδομένες τιμές του Φ στον χρόνο t για όλα τα κύτταρα, είναι εφικτό να λυθούν όλες οι εξισώσεις και να υπολογιστούν οι τιμές Φ στον χρόνο $t + \Delta t$.

Η επιλογή του μεγέθους και του αριθμού των κυττάρων για δεδομένο υδροφορέα εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

(α) Την χρήση του μοντέλου: Εάν το μοντέλο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την λήψη διαχειριστικών αποφάσεων, για παράδειγμα ένταση αντλήσεων ή τεχνητού εμπλουτισμού, τα κύτταρα θα πρέπει να είναι συμβατά με την φύση των αποφάσεων αυτών, π.χ. να γίνεται διαχωρισμός σε διαχειριστικές υποπεριοχές. Εκεί όπου οι

αποφάσεις πρέπει να στηρίζονται σε λεπτομερέστερα και ακριβέστερα στοιχεία, είναι δυνατόν να γίνει πιο λεπτομερής διαμέριση.

(β) Διαθεσιμότητα πληροφοριών για τις υδραυλικές παραμέτρους και την μεταβλητότητά τους στον χώρο. Σε περιοχές με περισσότερες διακυμάνσεις, η ακρίβεια είναι δυνατόν να αυξηθεί αν χρησιμοποιηθούν μικρότερα κύτταρα. Το ίδιο ισχύει και για την πιεζομετρία, στις περιοχές όπου οι κλίσεις είναι μεγάλες. Είναι αυτονόητο πως σημαντικό ρόλο στην επιλογή των ορίων των κυττάρων παίζει η γεωλογία (π.χ. ρηξιγενείς ζώνες, επαφές στρωμάτων κλπ).

(γ) Η διαθεσιμότητα χρονοσειρών διαμορφώνει καθοριστικά τον αριθμό των κυττάρων. Είναι χωρίς νόημα το να επιλέξει κανείς μεγάλο πλήθος χωρίς να έχει τις απαιτούμενες ιστορικές χρονοσειρές για να ρυθμίσει το μοντέλο. Στην περίπτωση που διατίθενται στάθμες σε κάποιες γεωτρήσεις συνήθως τεχνική είναι να κατασκευάζονται πολύγωνα Thiessen και να λαμβάνονται ως κύτταρα στο μοντέλο (αν φυσικά δεν συντρέχουν άλλοι λόγοι για ειδικές επιλογές).

(δ) Η τεχνική που θα χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του συστήματος εξισώσεων που θα προκύψει. Πρέπει δηλαδή το τελικό μαθηματικό πρόβλημα να μπορεί να επιλυθεί σε λογικό χρόνο από τα διαθέσιμα υπολογιστικά συστήματα.

(ε) Το τελικό κόστος προκειμένου να βρεθεί η λύση, το οποίο φυσικά εξαρτάται από τον αριθμό των κυττάρων.

Πρέπει και εδώ να σημειωθεί ότι πολυκυτταρικά μοντέλα χρησιμοποιούνται και στην προσομοίωση διαδόσεως ρύπου, βασιζόμενα στις ίδιες αρχές με αυτές που διέπουν τα μονοκυτταρικά μοντέλα (Λατινόπουλος, 1986). Είναι σαφές ότι δεν μπορούν να βγουν συμπεράσματα για την ποιότητα νερού σε τοπικό επίπεδο (π.χ. σε συγκεκριμένη γεώτρηση) αλλά μόνο μέσες τιμές για τις διάφορες ενότητες που θα επιλεγούν.

2.3. Ανάλυση αποφορτίσεως υπογείου υδροφορέα με αδιαμέριστο μοντέλο.

Οι Pozdniakov – Shestakov (1998) πρότειναν ένα αδιαμέριστο μοντέλο ισοζυγίου υπογείων νερών, το οποίο επιτρέπει την εκτίμηση των μεταβολών στην αποφόρτιση σε σύγκριση με τις μεταβολές στην τροφοδοσία, αναφορικώς με τις υδραυλικές παραμέτρους ενός υπογείου υδροφορέα. Οι μεταξύ αυτών σχέσεις

αναλύονται για περιπτώσεις τόσο ντετερμινιστικών όσο και στοχαστικών προσεγγίσεων. Το μοντέλο εφαρμόστηκε σε κοιλάδα ποταμού στην περιοχή του Τατζικιστάν, ανεξάρτητης δημοκρατίας της Κεντρικής Ασίας, προκειμένου να μελετηθεί η χρονική μεταβολή των αποφορτίσεων των υπογείων υδάτων.

Το αδιαμερίστου τύπου μοντέλο για την υπόγεια ροή είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για τις περιπτώσεις όπου η υπεδαφική ροή μπορεί να θεωρηθεί ότι λαμβάνει χώρα σε δύο ζώνες (σχήμα 5).

Η πρώτη ζώνη είναι αυτή της τροφοδοσίας, η οποία συχνά καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος ενός ελεύθερου υδροφόρου ορίζοντα, όσον αφορά το εμβαδόν του. Σε αυτήν, η συνολική ροή κάθετα σε εγκάρσια τομή του υδροφορέα αυξάνεται με την κλίση κάθετα στην τομή. Η δεύτερη ζώνη είναι συνήθως πιο περιορισμένη σε έκταση και αφορά το τμήμα του υδροφορέα από το οποίο γίνεται εκφόρτιση, π.χ. προς ένα ποτάμι. Το μέγεθος της αποφορτίσεως εξαρτάται από την κλίση του πιεζομετρικού φορτίου, δηλαδή με την διαφορά του υδραυλικού φορτίου του υπογείου και του επιφανειακού νερού, μαζί με την υδραυλική αντίσταση του στρώματος που φιλοξενεί το ρέμα.

Ντετερμινιστικό μοντέλο: Η εξίσωση που κρύβεται πίσω από το μοντέλο είναι η (Pozdniakov-Shestakov, 1998):

$$dQ_d / dt = \alpha (Q_r - Q_d),$$

$$\alpha = (S * F * R)^{-2},$$

$$R = R_r + R_d.$$

Εδώ η σταθερά α είναι μία παράμετρος που εξαρτάται από τις υδραυλικές αντιστάσεις του υδροφορέα (R_r) και των ζωνών αποφορτίσεως (R_d), καθώς και από την αποθηκευτικότητα (S) του υδροφόρου σχηματισμού. Ακόμα, Q_d είναι η παροχή αποφορτίσεως, Q_r είναι η παροχή τροφοδοσίας και F είναι η έκταση του υδροφορέα. Η παράμετρος α μπορεί να εκτιμηθεί από βαθμονόμηση της παραπάνω διαφορικής εξίσωσης με μετρημένες τιμές τροφοδοσίας και αποφορτίσεως του πραγματικού υδραυλικού συστήματος. Για την μονοδιάστατη περίπτωση του σχήματος υπάρχει και αναλυτική επίλυση, με την σχέση να διαμορφώνεται σε:

$$\partial h / \partial t = \alpha * \nabla^2 h + w * S^{-1},$$

$$\alpha = T * S^{-1}.$$

Όπου h είναι το υδραυλικό φορτίο, T είναι η μεταβιβαστικότητα του υδροφορέα, S είναι η αποθηκευτικότητα του υδροφορέα και w ο ρυθμός διηθήσεως. Διάφορες οριακές συνθήκες μπορούν να διαμορφωθούν, για τις περιπτώσεις π.χ. αδιαπέρατων ορίων σε σημεία του υδροφορέα ή αλληλεπίδραση με κάποιο ποτάμι κλπ, ώστε το μοντέλο να είναι ρεαλιστικό.

Στοχαστικό μοντέλο: Στο κομμάτι αυτό του μοντέλου, χρησιμοποιείται μία τυχαία στοχαστική διαδικασία για να χαρακτηρίσει την χρονική διακύμανση της φορτίσεως και της αποφορτίσεως του υπογείου υδροφορέα. Για να καθορισθεί η στοχαστική σχέση μεταξύ της αποφορτίσεως και μιας δεδομένης συναρτήσεως της τροφοδοσίας, επιστρατεύεται η θεωρία της συσχετίσεως. Αντίστοιχα μοντέλα έχουν εξετασθεί από τους Flores (1978) και Gelhar (1993), ενώ ο Privalsky (1981) βρήκε αναλυτική λύση για το ισοδύναμο μαθηματικό πρόβλημα της χρονικής μεταβολής της στάθμης μιας λίμνης σε σχέση με μία υποθετική στοχαστική μεταβολή στην εξάτμιση και την βροχόπτωση.

Υποτίθεται λοιπόν ότι η τροφοδοσία του υπογείου υδροφορέα είναι μία τυχαία διαδικασία, γνωστή σαν διαδικασία Markov, με μέση τιμή Q_r και εκθετική συνάρτηση συνδιασποράς:

$$\text{Cov}_r(t, t') = \sigma_r^2 * \exp(-\beta * |t - t'|),$$

όπου σ_r^2 είναι η διασπορά της τροφοδοσίας, $|t - t'|$ είναι το χρονικό βήμα, και β είναι η παράμετρος συσχετίσεως. Σύμφωνα με την γραμμικότητα του αδιαμερίστου μοντέλου, η αναμενόμενη μέση αποφόρτιση πρέπει να είναι ίση με την μέση αναμενόμενη φόρτιση.

Η εφαρμογή έδειξε ότι η χρονοσειρά εξόδου (αποφόρτιση) για δεδομένη χρονοσειρά εισόδου (τροφοδοσία), όπως υπολογίζεται από αυτό το μοντέλο, είναι σημαντικά εξομαλυμένη. Ο βαθμός εξομαλύνσεως σχετίζεται άμεσα με την σταθερά αποφορτίσεως α . Το κύριο πλεονέκτημα του μοντέλου βρίσκεται στην δυνατότητα να

συνδεθεί η μεταβλητότητα της εξόδου με τις υδρολογικές παραμέτρους του υδροφόρου, μέσω μιας και μόνο σταθεράς.

ΣΧΗΜΑ 5

2.4. Καθορισμός του εύρους προγνώσεων που προκύπτει από εναλλακτικές ρυθμίσεις.

Σημαντικό στοιχείο για την κατασκευή ενός μοντέλου υπογείων νερών είναι η επιλογή των τιμών των παραμέτρων. Η παραδοσιακή προσέγγιση οδηγεί στην επιλογή μιας τιμής για κάθε παράμετρο, δηλαδή μιας λύσης. Το ότι οι παράμετροι ενός μοντέλου είναι περισσότερο ενεργές οντότητες του μοντέλου και λιγότερο απολύτως μετρήσιμα μεγέθη, καθώς και η εγγενής αβεβαιότητα κατά την διαδικασία κατασκευής του μοντέλου, οδηγούν στο γνωστό γενικά συμπέρασμα ότι υπάρχουν περισσότερες από μία λύσεις του συστήματος. Οποιαδήποτε πρόγνωση προκύπτει από μία λύση και μόνο, δεν θα πρέπει να θεωρείται κατάλληλη, παρά θα πρέπει να αναζητώνται προγνώσεις παρμένες από εναλλακτικές βαθμονομήσεις του μοντέλου. Οι Brooks κ.α. (1994) παρουσίασαν μία μέθοδο για να βρísκεται το ευμενέστερο και το δυσμενέστερο σενάριο προγνώσεως από τις διάφορες αποδεκτές λύσεις, που την εφάρμοσαν σε μία πραγματική περίπτωση.

Η εφαρμογή αφορούσε τον υδροφόρο ορίζοντα κάτω από την αστική περιοχή του Birmingham της Αγγλίας, ο οποίος συνεχώς ανεβαίνει εξ αιτίας της μείωσης των αντλήσεων σε σχέση με τον ρυθμό αντλήσεως των δεκαετιών 1940, 1950. Βασίζεται δέ, σε υπάρχον μοντέλο, βαθμονομημένο με την μέθοδο “δοκιμής και σφάλματος” για την περίοδο 1850 - 1989. Σκοπός του μοντέλου αυτού ήταν να προβλέψει την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα έως το έτος 2020, και ιδιαιτέρως να υποδείξει περιοχές όπου έως το 2020 η στάθμη θα έφθανε έως και 5 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Ο σκοπός της μελέτης αυτής ήταν, σε μοντέλα με περιορισμένα ιστορικά δεδομένα, η εύρεση του φάσματος εκείνου των προγνώσεων που ταιριάζουν καλύτερα με τα δεδομένα αυτά. Επελέγησαν μονοπαραμετρικά κριτήρια αφ’ ενός για την προσαρμογή (fitting) του μοντέλου, F , και αφ’ ετέρου για τα προγνωσμένα φορτία του μοντέλου της εφαρμογής, W . Τα δύο κριτήρια, F και W , χρησιμοποιήθηκαν σε διαδικασίες αναζητήσεως (search routines) για να προκύψει ένα φάσμα προγνώσεων, με την εύρεση μεγίστου και ελαχίστου W , με αποδεκτές τιμές F .

Η έρευνα περιορίστηκε σε περιπτώσεις που οι τιμές των παραμέτρων γεωλογικής δομής και πλευρικών ορίων για τις εναλλακτικές ρυθμίσεις έμεναν σταθερές. Οι τιμές για τις παροχές αντλήσεων, και τις στάθμες νερού στα ποτάμια και

τις λίμνες θεωρήθηκαν γνωστές και έτσι οι αναζητήσεις για λύσεις περιορίστηκαν στις παραμέτρους:

R - τροφοδοσία,

S - αποθηκευτικότητα,

T - μεταβιβαστικότητα,

L - αγωγιμότητα υδατορεύματος.

Τα κριτήρια (αντικειμενικές συναρτήσεις) ήταν μάλλον υποκειμενικά, υποδεικνύοντας ότι η επιλογή μεταξύ μοντέλων βασίζεται κυρίως στην εμπειρία και την υποκειμενική κρίση. Έτσι:

$$F = (\sum (h_i - m_i)^2) + 10 * (h_n - m_n)^2,$$

$$W = \sum \max (h_j + 5 - g_j, 0),$$

Όπου h_k είναι το υπολογισμένο φορτίο στον κόμβο k , m_k είναι το μετρημένο φορτίο στον k , και το i είναι από 1 έως το 65, που είναι ο αριθμός των κομβικών σημείων, το n αντιπροσωπεύει συγκεκριμένο ημείο με μεγάλη βαρύτητα (=10), g_j είναι το απόλυτο υψόμετρο του εδάφους στον κόμβο j , ο οποίος αντιστοιχεί στην πρόβλεψη j . Το 5 υποδεικνύει ότι το κριτήριο του βάθους είναι τα 5m από την επιφάνεια, κάτι το οποίο εξαρτάται απολύτως από την εφαρμογή. Με εφαρμογή μεθόδων simplex ελαχιστοποιείται η συνάρτηση:

$$f_{\text{worst}}(F, W) = \exp(F - \beta) - W,$$

όπου το β είναι μία υποκειμενικώς επιλεγμένη σταθερά που αντιπροσωπεύει το αποδεκτό επίπεδο για το fitting του F , και μεγιστοποιείται η συνάρτηση:

$$f_{\text{best}}(F, W) = \exp(F - \beta) + W.$$

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του μοντέλου έδειξαν ότι σε περιοχές με αβεβαιότητα, όσον αφορά συγκεκριμένα στοιχεία του ισοζυγίου, πρόγνωση

προερχόμενη από μία λύση ενός μοντέλου δεν είναι αρκετή, και ότι πράγματι ανάλυση τέτοιου είδους είναι απαραίτητη για την λήψη ρεαλιστικών σεναρίων.

2.5. Μοντέλο για την προσομοίωση διασποράς ρύπου σε αξιοποιούμενο υδροφορέα.

Οι Barrett – Charbeneau (1997) περιγράφουν το υδρολογικό σύστημα που σχετίζεται με την περιοχή Barton Springs, που είναι τμήμα του υδροφόρου ορίζοντα Edwards, και παρουσιάζει ένα ημι-κατανεμημένο μοντέλο, ικανό να αναπαράγει ιστορικές τάσεις για μετρημένες στάθμες και αποφορτίσεις πηγών. Η τροφοδοσία του υδροφορέα έχει υπολογιστεί βάσει μελέτης των απωλειών από υδατορρεύματα που τέμνουν εγκάρσια την ζώνη τροφοδοσίας και βάσει εκτιμήσεων της διήθησης. Χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις παροχής σε κάθε χαράδρα, πάνω και κάτω από την ζώνη τροφοδοσίας, προκειμένου να υπολογιστεί η σχέση μεταξύ ροής πάνω από την ζώνη τροφοδοσίας και του ρυθμού τροφοδοσίας. Το μοντέλο υπογείων νερών περιλαμβάνει πέντε κύτταρα, με καθένα να αντιστοιχεί σε καθέναν από τους υδροφόρους ορίζοντες των πέντε χειμάρρων, και αναπτύχθηκε για να υποστηρίξει τους διαχειριστικούς στόχους της πόλης City of Austin (σχήμα 6). Το μοντέλο διαφέρει από προηγούμενα μοντέλα στο ότι οι ιδιότητες των υδροφορέων μέσα στα κύτταρα είναι δυνατόν να διαφοροποιούνται κατακορύφως. Κάθε κύτταρο αντιμετωπίζεται σαν δεξαμενή με συγκεκριμένο εμβαδόν και το πιεζομετρικό φορτίο ενός μοναδικού φρέατος του κυττάρου χρησιμοποιήθηκε για να καθορίσει τις συνθήκες μέσα σε αυτό. Η απλή αναπαράσταση του υδρολογικού συστήματος έδωσε αποτελέσματα συγκρίσιμα με αυτά των κλασικών μοντέλων υπογείων νερών με λιγότερες απαιτήσεις για δεδομένα και λιγότερες παραμέτρους για βελτιστοποίηση.

Το μοντέλο έχει το χαρακτηριστικό ότι σχετικά λίγα κύτταρα χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τον υδροφορέα, γεγονός που έκανε ευκολότερη την βαθμονόμησή του. Η απόκριση των διαφόρων πηγαδιών στην τροφοδοσία ενισχύει την χρήση μεγάλων κυττάρων. Πηγάδια σε περιοχές πολλά μίλια μακριά από τους χειμάρρους που τροφοδοτούν τον υδροφόρο ορίζοντα έδειξαν γρήγορη άνοδο στάθμης συγχρόνως με πηγάδια πολύ κοντά σε αυτούς. Το τμήμα του υδροφορέα Edwards που βρίσκεται στην περιοχή του Barton Springs λαμβάνει το μέγιστο της

τροφοδοσίας του από τα πέντε κύρια ρέματα. Η σχετικά ομοιόμορφη τοποθέτηση των ρεμάτων ενίσχυσε την άποψη για ανάπτυξη μοντέλου πέντε κυττάρων.

Οι διαφορές του εν λόγω μοντέλου από προηγούμενα μοντέλα καρστικών υδροφορέων είναι αρκετές και σημαντικές. Αντί να αυξηθεί ο αριθμός των κυττάρων προκειμένου να ληφθούν καλύτερα αποτελέσματα κατά την προσομοίωση, οι προβλέψεις του μοντέλου βελτιώθηκαν με το να επιτραπεί η μεταβολή των υδραυλικών παραμέτρων κατά την κατακόρυφη έννοια μέσα σε κάθε κύτταρο. Συγκεκριμένα, η ειδική παροχή και η υδραυλική αγωγιμότητα των κυττάρων είναι συναρτήσεις του υψομέτρου. Στο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε μικρό βήμα (ημερήσιο), το οποίο αύξησε την ακρίβεια του μοντέλου και επέτρεψε την ρητή λύση των κύριων εξισώσεων.

Η ροή μεταξύ των στοιχείων του μοντέλου γίνεται με βάση τον νόμο του Darcy. Η υδραυλική αγωγιμότητα αποδόθηκε στα όρια των στοιχείων, και για τον υπολογισμό της μεταβιβαστικότητας χρησιμοποιήθηκε το κορεσμένο τμήμα του στοιχείου στα ανάντη. Όλα τα εξωτερικά όρια αντιμετωπίζονται σαν όρια μηδενικής ροής και έτσι υπάρχουν μόνο τέσσερα όρια με ροή. Η παροχή κάθετα σε κάθε ένα από αυτά είναι:

$$Q_G = K * w * b * (\Delta h * L^{-1})$$

όπου w είναι το πλάτος του ορίου Δh είναι η διαφορά πιεζομετρικού φορτίου κάθετα στο όριο, b είναι το κορεσμένο πάχος του κυττάρου στα ανάντη και L είναι η απόσταση μεταξύ των φρεάτων των κυττάρων.

Κάθε κύτταρο χωρίστηκε σε δύο ή τρία οριζόντια στρώματα διαφορετικών υδραυλικών ιδιοτήτων, με τιμές προαποφασισμένες και όχι προς βελτιστοποίηση. Οι παράμετροι προς βελτιστοποίηση είναι η υδραυλική αγωγιμότητα και η ειδική παροχή.

Το μοντέλο υπολογίζει την κατάσταση του υδροφορέα, χρησιμοποιώντας ημερήσιο ισοζύγιο μάζας για κάθε κύτταρο. Για τους υπολογισμούς, υποτίθεται ότι τα όρια της επιφάνειας κάθε στοιχείου συμπίπτουν με τα όρια του χειμάρρου που το τροφοδοτεί. Λόγω του μικρού βήματος η επίλυση έγινε με χρήση της μεθόδου του Euler και με ρητό τρόπο. Η ακρίβεια του μοντέλου εξετάστηκε με αρκετά κριτήρια.

ΣΧΗΜΑ 6

Η βέλτιστη λύση καθορίστηκε από την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος του τετραγωνικού σφάλματος για τις στάθμες και τις παροχές των πηγών.

Κάθε φορά που αντιμετωπίζεται ένα σύνθετο πρόβλημα μοντελοποίησης η φυσική τάση είναι να αναπτύσσονται πολύπλοκα μοντέλα. Παρά τούτο, η συγκεκριμένη μελέτη έδειξε ότι ένα πολύ απλό μοντέλο μπορεί να παράσχει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την συμπεριφορά ενός συστήματος. Επιπροσθέτως, ένα μοντέλο τέτοιου τύπου δεν επηρεάζεται από την απουσία λεπτομερούς γνώσεως των προνομιακών ροών και ασυνεχειών σε μικροσκοπική κλίμακα. Ενώ κάποιοι δίνουν μεγαλύτερη βαρύτητα στις προγνώσεις που γίνονται από λεπτομερή μοντέλα, το μοντέλο αυτό παρέχει ένα χρήσιμο εργαλείο, εύκολο στην κατανόηση και την χρήση, με αποτελέσματα που είναι σαφή και δεν οδηγούν σε παρερμηνείες.

2.6. Μοντέλα ποιότητας υπογείων νερών.

Οι Gelhar και Wilson (1974) ανέπτυξαν ένα γενικευμένο μοντέλο υπογείων νερών για να υπολογίζουν τα ισοζύγια νερού και διαλυτών ταυτοχρόνως, μέσα σε έναν φρεάτιο υδροφόρο ορίζοντα. Η βάση για μία τέτοια αδιαμέριστου τύπου προσέγγιση είναι η σύγκριση με την θεωρητική ανάλυση της δυναμικής των υπογείων νερών και των διαλυμάτων σε ένα κατανεμημένο μοντέλο υδροφορέα. Η βασική συμπεριφορά του μοντέλου χαρακτηρίζεται από δύο χρόνους αποκρίσεως: ο ένας σχετίζεται με την υδραυλική και ο άλλος με το διάλυμα.

Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται εδώ σε μακροχρόνιες αλλαγές σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης. Έτσι, έχει επιλεγεί ένα ιδεατό μοντέλο, βασισμένο στην λογική της δεξαμενής πλήρους αναμίξεως, τεχνικής που από παλαιά εχρησιμοποιείτο στην ανάλυση των επιφανειακών συστημάτων. Η είσοδος-εισροή μίας μάζας νερού ή ρυπαντή αντισταθμίζεται από μία αλλαγή στην αποθήκευση και μία έξοδο-εκροή. Εφ' όσον το σύστημα θεωρείται πλήρους αναμίξεως, η έξοδος περιέχει τον ρυπαντή στην ίδια συγκέντρωση που τον περιέχει και η δεξαμενή. Αυτή η απλοποίηση του φυσικού συστήματος σε γραμμικό μοντέλο δεξαμενής κρίνεται αρκετή για μία αρχική προσέγγιση ενός τέτοιου προβλήματος και μπορεί να αποδειχθεί πολύ πιο πρακτική για την καθημερινή χρήση από τα εξειδικευμένα μοντέλα.

ΣΧΗΜΑ 7

Μία απλή παρουσίαση υπόγειας ροής σε ένα φρεάτιο υδροφορέα (σχήμα 7) μπορεί να είναι σε μορφή ισοζυγίου η εξής:

$$n \, dh/dt = -q + \varepsilon + q_r - q_p$$

όπου h είναι το μέσο πάχος της κορεσμένης ζώνης, n είναι το μέσο ενεργό πορώδες του υδροφόρου σχηματισμού, q είναι η φυσική εκροή από τον υδροφορέα ανά μονάδα εμβαδού, ε είναι ο ρυθμός φυσικής τροφοδοσίας, q_r είναι ο τυχόν τεχνητός εμπλουτισμός ανά μονάδα επιφανείας, q_p ο ρυθμός αντλήσεως ανά μονάδα επιφανείας και t ο χρόνος. Η εκροή μπορεί να προσεγγισθεί από μία γραμμική σχέση της μορφής:

$$q = a (h - h_0),$$

στην οποία το a είναι σταθερά εκροής και το h_0 είναι μία στάθμη αναφοράς, όπου η εκροή θεωρείται μηδενική, και μπορεί να είναι και χρονικώς μεταβαλλόμενη. Εάν ληφθεί υπ' όψιν και το ισοζύγιο μάζας ενός ρύπου λαμβάνεται και μία τρίτη σχέση που συμπληρώνει το μοντέλο:

$$n * h * dc/dt + (\varepsilon + q_r + knh) * c = \varepsilon * c_0 + q_r c_r,$$

όπου $c(t)$ είναι η μέση συγκέντρωση του ρύπου κάθε χρονική στιγμή, c_0 και c_r οι συγκεντρώσεις αυτού στην φυσική και τεχνητή τροφοδοσία αντιστοίχως και k είναι σταθερά για την αποσύνθεση του ρύπου.

Δόθηκαν διάφορες αναλυτικές και αριθμητικές λύσεις, αναλόγως με τις οριακές και άλλες συνθήκες. Αποδεικνύεται δέ ότι η παράμετρος a συνδέεται με τις υδραυλικές παραμέτρους του υδροφορέα με τις σχέσεις:

$$a = 3 * T * L^{-2} \quad \text{και}$$

$$a = 0.25 * \pi^2 * T * L^{-2},$$

για συνθήκες σταθερής και μεταβαλλόμενης ροής αντιστοίχως, όπου L είναι το μήκος του υδροφορέα όπως φαίνεται στις ενδεικτικές τομές που ακολουθούν.

Το μοντέλο βρίσκει εφαρμογή στην προσομοίωση της επίδρασης στα υπόγεια νερά της περιοχής της ανατολικής Μασσαχουσέτης των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής, των αλάτων που χρησιμοποιούνται για λειώσιμο του πάγου στους αυτοκινητοδρόμους. Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, κρίνεται ότι έρχονται σε συμφωνία με τις παρατηρημένες τάσεις της τελευταίας δεκαπενταετίας από την δημοσίευση. Ακόμα, εξετάζονται όλες οι εναλλακτικές χρήσεις χημικών ουσιών για το λειώσιμο του πάγου των αυτοκινητοδρόμων και η ευαισθησία των υδραυλικών παραμέτρων στις μεταβολές αυτών.

Η εφαρμογή αυτής της τεχνικής προσομοιώσεων σε επίπεδο λεκάνης για την συγκεκριμένη δραστηριότητα καταδεικνύει ότι μπορεί να αποτελέσει μία καλή βάση για μακροχρόνια αξιολόγηση της ρυπάνσεως των υπογείων νερών. Με κατάλληλα δεδομένα για τις εισόδους και τις υδραλικές παραμέτρους των υδροφορέων για κάθε συγκεκριμένη τοποθεσία, αυτή η γενική τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την λήψη αποφάσεων και την προστασία των υπογείων νερών σε τοπικό ή και εθνικό επίπεδο.

Όσον αφορά την εφαρμογή στους αυτοκινητοδρόμους της ανατολικής Μασσαχουσέτης, η σύγκριση μεταξύ των καταγραφών από πηγάδια και των αποτελεσμάτων της προσομοιώσεως δείχνει ότι το μοντέλο αναπαράγει την γενικότερη συμπεριφορά του υδροφόρου ορίζοντα. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η πυκνότητα του οδικού δικτύου, καταγραφές βροχής και κάποια στοιχεία χρήσεων γης. Το πορώδες είχε μία σταθερή τιμή και ακόμα θεωρήθηκε σταθερός ο χρόνος, ο απαιτούμενος για την διήθηση μέσα από την ζώνη εδαφικής υγρασίας και την προσέγγιση του υδροφόρου ορίζοντα. Τα αποτελέσματα έδειξαν τις ίδιες αιχμές στο τέλος του χειμώνα και την αρχή της ανοίξεως, καθώς και την ίδια ταπείνωση στην αρχή της περιόδου ξηρασίας που άρχισε το 1965. Όμως, το μοντέλο δεν μπορεί να προσομοιώσει την πολύ μικρή τροφοδοσία του φθινοπώρου, που είναι εμφανής κάποιες χρονιές, διότι τέτοια δυνατότητα δεν δόθηκε εξαρχής.

2.7. Το μοντέλο BEMER.

Το μοντέλο BEMER (Μπεζές, 1991) είναι ένα αδιαμέριστο μοντέλο που έχει χρησιμοποιηθεί σε μελέτες στην Ελλάδα. Προσομοιώνει τις διαδικασίες μετατροπής της βροχής σε παροχή, σε καρστικές υδρολογικές λεκάνες. Η λειτουργία του μοντέλου βασίζεται στην μετακίνηση ποσοτήτων νερού μεταξύ των πέντε (5) δεξαμενών που περιλαμβάνει. Φαίνεται να υπάρχει αντιστοιχία ανάμεσα στην δομή και λειτουργία του μοντέλου και την δομή και λειτουργία της υδρολογικής λεκάνης. Οι πέντε δεξαμενές διατάσσονται σε τρεις ζώνες - επίπεδα (σχήμα 8). Έχει εφαρμοστεί και σε ημερήσια και σε μηνιαία έκδοση.

Στο ανώτερο επίπεδο βρίσκεται η πρώτη δεξαμενή RE-1, η οποία έχει σαν στόχο να προσομοιάζει την λειτουργία των επιφανειακών στρωμάτων του εδάφους, που δέχονται την βροχή και το χιόνι, αποβάλλουν την εξατμοδιαπνοή, δημιουργούν την επιφανειακή απορροή και διηθούν μέσα στο υπέδαφος ποσότητες νερού.

Στο μεσαίο επίπεδο του μοντέλου βρίσκονται τρεις δεξαμενές RE-2, RE-3, RE-4, καθεμία από τις οποίες αντιστοιχεί σε ένα τμήμα μη κορεσμένης και κορεσμένης ζώνης (συλλήβδην) του καρστικού συστήματος, όπου αποθηκεύεται η μεγαλύτερη ποσότητα από το νερό που συγκρατείται μέσα σε μία υδρολογική λεκάνη. Αυτές οι δεξαμενές τροφοδοτούνται με τις ποσότητες νερού που τους παρέχονται από την RE-1. Γίνεται αποθήκευση των ποσοτήτων αυτών και συγχρόνως αργή εκφόρτιση προς την δεξαμενή της κατώτερης βαθμίδας. Η ταχύτητα εκφορτίσεως και η κατανομή της τροφοδοσίας στις τρεις δεξαμενές είναι ρυθμιζόμενη, ώστε το σύνολο της εξερχόμενης από αυτές παροχής να πλησιάζει την παροχή του πραγματικού υδρολογικού συστήματος.

Στο κατώτερο επίπεδο, μία πέμπτη δεξαμενή (RE-5) συλλέγει το νερό από το μεσαίο επίπεδο και τα οδηγεί στην έξοδο, η οποία μπορεί να αντιστοιχεί σε μία καρστική πηγή, στο σημείο υδρομέτρησης κάποιου ποταμού κλπ.

Ο υπολογισμός του ισοζυγίου γίνεται κατά βάση στην δεξαμενή RE-1. Η μέση βροχόπτωση υπολογίζεται με την μέθοδο Thiessen ή κάποια άλλη και η δυνητική εξατμοδιαπνοή με την μέθοδο Thornthwaite. Υπάρχουν δέ αρκετές παράμετροι που ρυθμίζουν: την μέγιστη κατακρατούμενη ποσότητα νερού, την μέγιστη διηθούμενη ποσότητα νερού, την ταχύτητα δημιουργίας ελλείμματος νερού κατά την θερινή περίοδο, την ταχύτητα απορρόφησης των βροχών από την

δεξαμενή, την θερμοκρασία κάτω από την οποία αρχίζει η τήξη του χιονιού κλπ. Αποτέλεσμα των παραπάνω υπολογισμών που γίνονται στην δεξαμενή RE-1 είναι να παραχθεί η κατείσδυση. Μία παράμετρος (EKT) φροντίζει ώστε η κατείσδυση να κατανεμηθεί, μέσα στο ίδιο χρονικό βήμα, στις δεξαμενές RE-2, RE-3, RE-4.

Οι δεξαμενές του μεσαίου επιπέδου έχουν στην βάση τους από μία έξοδο, απ' όπου εκρέει σε κάθε βήμα ποσότητα νερού ENF, ανάλογη του περιεχομένου της (H) και του συντελεστή εκφορτίσεως της δεξαμενής (K). Συνήθως η RE-2 έχει τον μεγαλύτερο K και η RE-4 τον μικρότερο. Το άθροισμα των παροχών των τριών δεξαμενών ισοδυναμεί με την παροχή εκφορτίσεως της υδρολογικής λεκάνης και λαμβάνεται υδρογράφημα που συγκρίνεται με το πραγματικό, ώστε να ρυθμιστούν οι παράμετροι EKT, K(1), K(2), K(3).

Η δεξαμενή RE-5 αποθηκεύει προσωρινώς (εάν χρειαστεί) την ποσότητα του νερού που εκφορτίζεται από τις τρεις προηγούμενες και αφαιρεί τις ενδεχόμενες αντλήσεις ή διαχωρίζει το υδρογράφημα σε δύο υδρογραφήματα, που αντιστοιχούν σε πηγές βάσεως και υπερχειλίσεως ενός καρστικού συστήματος.

Το μοντέλο BEMER έχει εφαρμοστεί, μεταξύ άλλων, στις καρστικές πηγές και στην λεκάνη του φράγματος του ποταμού Λούρου (Μπεζές, 1991).

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του στις υπολεκάνες των καρστικών πηγών του Λούρου, σύμφωνα με τον Μπεζέ (1991), κρίνονται ικανοποιητικά και δίνουν ικανοποιητικές εξηγήσεις για την αποθήκευση και την κυκλοφορία υπογείων υδάτων εκεί, σε συνδυασμό και με την γεωλογική δομή. Η εφαρμογή του σε ολόκληρη την λεκάνη του ποταμού Λούρου, αν και οδηγεί σε συμπεράσματα πάνω στα ίδια θέματα, κατ' ουσίαν δίνει μόνο την δυνατότητα για απλό σχολιασμό επί της κατανομής των βροχοπτώσεων σε απορροή και κατείσδυση, χωρίς περισσότερες λεπτομέρειες. Τέτοιου είδους αδυναμίες είναι δικαιολογημένες, διότι το μοντέλο BEMER δεν κάνει διακριτοποίηση της λεκάνης και καταφέρει μία χονδροειδή μόνο αναπαράσταση της κατανομής της βροχής.

Σε γενικές γραμμές, καλύτερα λειτούργησε το ημερήσιο μοντέλο, ενώ το μηνιαίο σε κάποιες εφαρμογές (λεκάνη Αράχθου) δεν κατέστη δυνατόν να ρυθμιστεί.

ΣΧΗΜΑ 8

3. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ 4Xcell

3.1. Γενικά

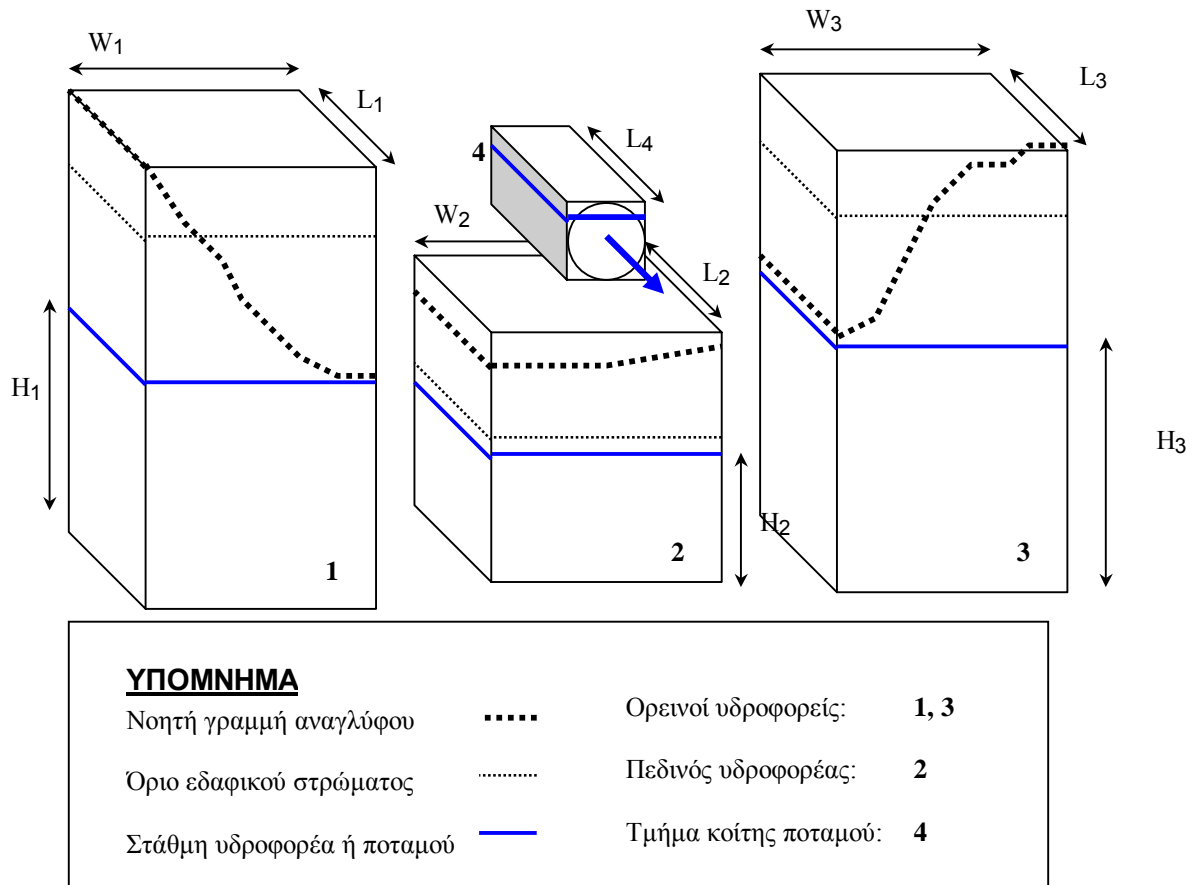
Στα πλαίσια της προσομοιώσεως ενός μεγάλου υδρολογικού συστήματος όπως είναι μία υδρολογική λεκάνη και οι υδροφορίες αυτής, κατασκευάστηκε πολυκυτταρικό μοντέλο, το οποίο έλαβε την ονομασία 4Xcell.

Η βασική του αρχή, στην οποία οφείλει και την ονομασία του, είναι ότι χρησιμοποιεί τετραπλά κύτταρα για να προσομοιώσει την δομή της υδρολογικής λεκάνης και τις αλληλεπιδράσεις επιφανειακών και υπογείων υδάτων. Η περιοχή χωρίζεται σε νοητές αλληλοεπηρεαζόμενες οντότητες που η λειτουργία καθεμιάς προσομοιώνεται από ένα κύτταρο. Η κατασκευή του μοντέλου είναι τέτοια που το περιορίζει στο είδος των υδρολογικών λεκανών, οι οποίες μπορεί να θεωρηθεί ότι έχουν έναν ενιαίο καρστικό υδροφόρο στο υπέδαφός τους, όπως είναι η λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού. Η δομή του μοντέλου δίνεται στο σχήμα 9.

Για την εφαρμογή του μοντέλου 4Xcell απαιτείται ο διαμερισμός της λεκάνης σε αριθμό ενότητων, χωρίς να αποκλείεται και ο ορισμός μίας και μοναδικής ενότητας. Τα κριτήρια για την επιλογή του αριθμού αυτών είναι αφ' ενός η λεπτομέρεια που ζητείται κατά την προσομοίωση και αφ' ετέρου η διαθεσιμότητα χρονοσειρών και η κατανομή τους στον χώρο και τον χρόνο. Τα τρία αντιστοιχούν στον υπόγειο υδροφόρο και τα χαρακτηριστικά τους ορίζονται με κριτήρια μόνο μορφολογικά, αφού ο υδροφόρος σχηματισμός υποτίθεται ενιαίος κάτω από κάθε ενότητα, ενώ το επιπλέον κύτταρο προσομοιώνει το τμήμα της κοίτης του ποταμού που βρίσκεται μέσα στην ενότητα.

Δεδομένα εισόδου στο μοντέλο 4Xcell είναι χρονοσειρές για την βροχόπτωση και την δυνητική εξατμοδιαπνοή (ημερήσιες, μηνιαίες ή άλλες), καθώς και χρονοσειρές παροχών αντλήσεως. Στην έξοδο λαμβάνονται χρονοσειρές για την πραγματική εξατμοδιαπνοή, την εδαφική υγρασία, την στάθμη του υπογείου καρστικού υδροφόρου ορίζοντα, την παροχή του ποταμού και τις διαρροές προς την θάλασσα.

Στις παραγράφους που ακολουθούν, περιγράφεται με αναλυτικό τρόπο η δομή του μοντέλου και η μέθοδος προσομοίωσης όσον αφορά την επιφανειακή και την υπόγεια υδρολογία.



Σχήμα 9. Η δομή του μοντέλου 4Xcell.

3.2. Επιφανειακή υδρολογία.

Προκειμένου να γίνει προσομοίωση του επιφανειακού υδρολογικού συστήματος έγιναν οι ακόλουθες παραδοχές:

- Η ζώνη εδαφικής υγρασίας είναι ομοιόμορφη σε κάθε κύτταρο, ανεξαρτήτως των λιθολογικών σχηματισμών που μπορεί να περιλαμβάνει στην πραγματικότητα.
- Το ποτάμι αλληλεπιδρά μόνο με τον καρστικό υδροφορέα και όχι με την ζώνη εδαφικής υγρασίας.

- Από την στιγμή που μία ποσότητα νερού φθάνει σε στοιχείο του υδρογραφικού δικτύου, οδηγείται ακαριαία στον κύριο κλάδο (δεν προλαβαίνει να κατεισδύσει).
- Το νερό στο κάθε τμήμα του ποταμού ταξιδεύει με τέτοια ταχύτητα, ώστε να φθάνει στην έξοδο της λεκάνης σε χρόνο πολύ μικρότερο από το βήμα των υπολογισμών. Συμβατικά λοιπόν ορίζεται ότι το βήμα υπολογισμού δεν μπορεί να είναι μικρότερο από μία ημέρα.
- Ο ποταμός δέχεται αμελητέα ποσότητα άμεσης βροχοπτώσεως.
- Η εξατμοδιαπνοή από το υδάτινο σώμα του ποταμού (δυναμική και πραγματική) έχει συμπεριληφθεί στην εξατμοδιαπνοή της ζώνης εδαφικής υγρασίας.

Τα τρία από τα τέσσερα κύτταρα (εκτός από το κύτταρο του ποταμού) που περιλαμβάνονται σε μία ενότητα αποτελούνται από δύο στρώματα: Το ανώτερο, που εις το εξής θα αναφέρεται ως **εδαφικό** στρώμα, και το κατώτερο, που εις το εξής θα αναφέρεται ως **υδροφόρο** στρώμα.

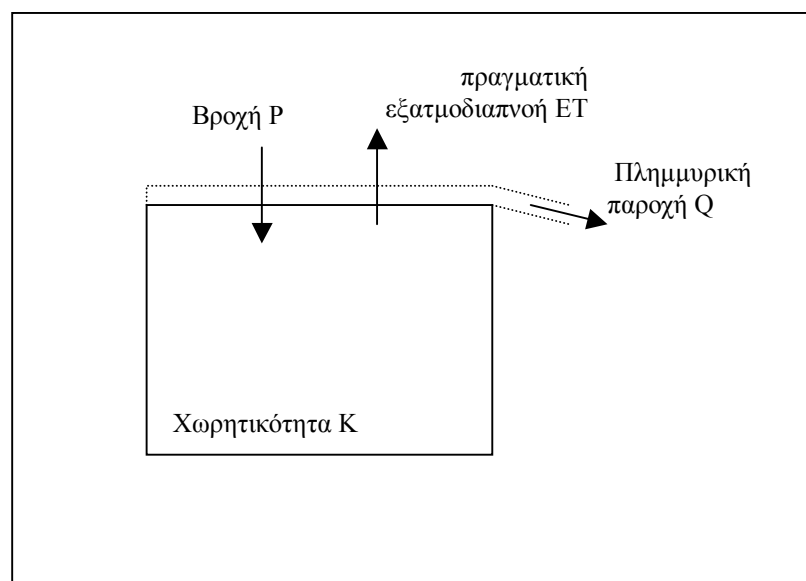
Το επιφανειακό υδρολογικό σύστημα αντιπροσωπεύεται από το εδαφικό στρώμα κάθε κυττάρου και από το τέταρτο απλό κύτταρο. Κάθε εδαφικό στρώμα είναι άμεσος δέκτης της βροχοπτώσεως την οποία κατανέμει σε εδαφική υγρασία, κατείσδυση και εξατμοδιαπνοή. Η λειτουργία του έχει ως βάση το απλό μοντέλο εδαφικής υγρασίας του Thornthwaite, το οποίο αναπτύσσεται στην συνέχεια. Πρέπει να σημειωθεί ότι λαμβάνεται υπ' όψιν κίνηση του νερού μόνο από το εδαφικό προς το υδροφόρο στρώμα και όχι αντιστρόφως. Τα εδαφικά στρώματα της ίδιας ή διαφορετικών ενοτήτων δεν επικοινωνούν μεταξύ τους. Από την άλλη πλευρά το κύτταρο του ποταμού δέχεται την υπερχείλιση της ζώνης εδαφικής υγρασίας, καθώς και το πλεόνασμα των διαφόρων υδροφορέων.

Το μοντέλο υδατικού ισοζυγίου του Thornthwaite. Το απλό και διαδομένο μοντέλο του Thornthwaite, όπως τροποποιήθηκε από τον Alley (Κουτσογιάννης – Ξανθόπουλος, 1997), βασίζεται πρωτίστως στην εξομίωση της υδρολογικής λειτουργίας της λεκάνης απορροής με τη λειτουργία μιας απλής δεξαμενής (σχήμα 10). Το απόθεμα S της δεξαμενής αναπαριστά την

αποθήκευση της εδαφικής υγρασίας. Η δεξαμενή υπερχειλίζει όταν το απόθεμα υπερβεί τη χωρητικότητα της δεξαμενής K . Η υπερχείλιση αναπαριστά την επιφανειακή απορροή. Κατά συνέπεια, σύμφωνα με το εν λόγω μοντέλο, επιφανειακή απορροή πραγματοποιείται μόνο όταν γεμίσει η δεξαμενή ή αλλιώς, κορεστεί το έδαφος από υγρασία.

Για την υπολογιστική λειτουργία του μοντέλου, θεωρείται γνωστή σε κάθε χρονική περίοδο n η βροχόπτωση P_n και η δυνητική εξατμοδιαπνοή E_{pn} , καθώς και η αποθήκευση στο τέλος της προηγούμενης περιόδου S_{n-1} . Τα εξαγόμενα του μοντέλου είναι η πραγματική εξατμοδιαπνοή E_n , η επιφανειακή απορροή Q_n καθώς και η αποθήκευση S_n στο τέλος της τρέχουσας περιόδου.

Σε περιόδους που η βροχόπτωση είναι μεγαλύτερη από τη δυνητική εξατμοδιαπνοή τότε η πραγματική εξατμοδιαπνοή ταυτίζεται με τη δυνητική. Το περίσσειμα αποθηκεύεται ως εδαφική υγρασία, εφόσον δεν έχει κορεστεί το έδαφος. Όταν κορεστεί, η ποσότητα που δε μπορεί πλέον να αποθηκευτεί, απορρέει επιφανειακά.



Σχήμα 10. Το απλό μοντέλο εδαφικής υγρασίας του Thornthwaite (Κουτσογιάννης - Ξανθόπουλος, 1997) και οι παράμετροι της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας.

Σε περιόδους που η βροχόπτωση είναι μικρότερη από τη δυνητική εξατμοδιαπνοή, η πραγματική εξατμοδιαπνοή είναι μικρότερη από τη δυνητική. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι κατ' αρχήν όλη η ποσότητα της

βροχόπτωσης εξατμίζεται και επίσης, εφόσον υπάρχει αποθηκευμένη εδαφική υγρασία, εξατμίζεται και ένα επιπλέον μέρος από αυτήν. Ο ρυθμός της επιπλέον εξατμοδιαπνοής είναι ανάλογος της διαφοράς $E_{pn} - P_n$ καθώς και της εδαφικής αποθήκευσης και ειδικότερα του λόγου S/K .

Η ανωτέρω λειτουργία του μοντέλου, είναι δυνατόν να κωδικοποιηθεί με τον ακόλουθο μαθηματικό τρόπο (Κουτσογιάννης-Ξανθόπουλος, 1997):

$$i. \quad P_n \geq E_{pn}$$

$$S_n = \min (S_{n-1} + P_n - E_{pn}, K)$$

$$Q_n = \max (S_{n-1} + P_n - E_{pn} - K, 0)$$

$$ii. \quad P_n < E_{pn}$$

$$S_n = S_{n-1} \exp((P_n - E_{pn}) K^{-1})$$

$$Q_n = 0$$

Σε κάθε περίπτωση η εξατμοδιαπνοή προκύπτει αμέσως από την :

$$E_n = (S_{n-1} - S_n) + P_n - Q_n$$

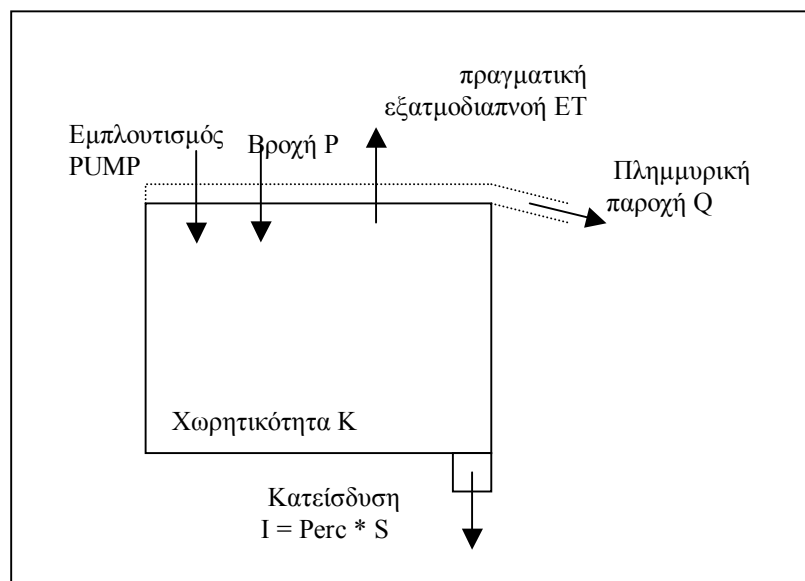
Συμπερασματικά, το απλό μοντέλο Thornthwaite με δεδομένα εισόδου τη βροχόπτωση και τη δυνητική εξατμοδιαπνοή δίνει ως εξόδους την απορροή και την πραγματική εξατμοδιαπνοή, χρησιμοποιώντας μία μόνο παράμετρο, τη χωρητικότητα K της εδαφικής δεξαμενής. Τυπικά, η χωρητικότητα αυτή, ανηγμένη σε ισοδύναμο ύψος, κυμαίνεται ανάμεσα στα 0.100-0.200 mm (Κουτσογιάννης – Ξανθόπουλος, 1997). Εάν υπάρχουν δεδομένα απορροής, η παράμετρος μπορεί να εκτιμηθεί σε τρόπο, ώστε η σειρά τιμών της επιφανειακής απορροής που εξάγεται από το μοντέλο να συμφωνεί κατά το δυνατό με τη μετρημένη σειρά απορροής.

Το μοντέλο τυπικά λειτουργεί σε μηνιαία κλίμακα και είναι κατάλληλο μόνο για «απλές» λεκάνες που πληρούν κάποιες προϋποθέσεις, και ειδικότερα για λεκάνες χειμαρρικής δίαιτας χωρίς θερινές απορροές, αλλά και χιονοπτώσεις. Πάντως μπορεί να τροποποιηθεί ώστε να καλύπτει και την περίπτωση λεκανών με χιονόπτωση.

Στο μοντέλο 4Xcell προστίθενται δύο επιπλέον λειτουργίες. Αυτή της τροφοδοσίας του υπογείου υδροφόρου ορίζοντα από διαφυγές της ζώνης

εδαφικής υγρασίας και αυτήν του τεχνητού εμπλουτισμού (σχήμα 11). Ένας συντελεστής Perc (αδιάστατος), αναλαμβάνει τη μεταφορά ενός σταθερού κάθε φορά ποσοστού ($100 \cdot \text{Perc} \%$) του περιεχομένου της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας προς τον υδροφόρο ορίζοντα. Ως εμβαδόν του εδαφικού στρώματος λαμβάνεται το εμβαδόν του κυττάρου στο οποίο ανήκει χωρίς να εξετάζεται η φυσική του αντιστοιχία με αλλουβιακές ή άλλες προσχώσεις. Ο τεχνητός εμπλουτισμός προέρχεται από την διήθηση του νερού των αρδεύσεων εντός της ζώνης εδαφικής υγρασίας. Το μέρος του νερού που αντλείται από τον υπόγειο υδροφόρο και δεν χρησιμοποιείται εκτός λεκάνης, καταλήγει τελικώς στην ζώνη αυτή, από όπου εξατμίζεται και διαπνέεται.

Το ποτάμι είναι ακόμα ένα στοιχείο της επιφανειακής υδρολογίας. Σε κάθε ενότητα περιλαμβάνεται ένα τμήμα μόνο της κοίτης του ποταμού, το οποίο και αντιπροσωπεύεται από ένα απλό κύτταρο. Η μόνη διάσταση του κυττάρου που ενδιαφέρει είναι το μήκος του κι αυτό γιατί ρυθμίζει την αλληλεπίδρασή του με τα άλλα στοιχεία.



Σχήμα 11. Το απλό μοντέλο εδαφικής υγρασίας του Thornthwaite, όπως συμπληρώθηκε για τις ανάγκες του μοντέλου 4Xcell, με την επιστροφή των αντλούμενων ποσοτήτων για τοπικές αρδεύσεις (PUMP) και την κατείδυση μέρους του αποθηκευμένου νερού προς τον υπόγειο υδροφόρο.

Η αλληλεπίδραση του ποταμού με την ζώνη εδαφικής υγρασίας έχει ήδη περιγραφεί. Όμως ο ποταμός δέχεται ποσότητες νερού και από τον υδροφόρο ορίζοντα. Η ροή αυτή ρυθμίζεται κάθε φορά από την διαφορά στάθμης μεταξύ του υδροφόρου ορίζοντα και ενός επιπέδου στάθμης του ποταμού. Για κάθε ενότητα υπολογίζεται το μέσο επίπεδο στάθμης του ποταμού H_{Ri} , με γραφικές ή μαθηματικές μεθόδους, το οποίο μένει σταθερό και ανεξάρτητο από την παροχή του ποταμού. Από το πιεζομετρικό φορτίο του υδροφορέα και βάσει του νόμου του Darcy, υπολογίζεται η εισροή ή η εκροή από το ποτάμι (η αλληλεπίδραση αυτή περιγράφεται λεπτομερέστερα στην παράγραφο 3.3).

Χαρακτηριστικά μεγέθη για τον ποταμό είναι:

- το μήκος L_i που θεωρείται γνωστό και μετρείται από τοπογραφικό χάρτη,
- το μέσο επίπεδο στάθμης H_{Ri} , σταθερό,
- η μεταβιβαστικότητα T_i : η τιμή της είναι θεωρητικώς άπειρη,
- η αποθηκευτικότητα S_i : βάσει του ορισμού της για πορώδη μέσα, θα πρέπει να ληφθεί ίση με την μονάδα.

Δεδομένα εισόδου για κάθε κύτταρο ποταμού αποτελούν οι εκφορτίσεις της ζώνης εδαφικής υγρασίας της ενότητας, οι εισροές και εκροές προς τον υδροφόρο ορίζοντα (θετικές οι μεν, αρνητικές οι δε) και η έξοδος του ανάντη τμήματος ποταμού. Έξοδο αποτελεί μία τιμή παροχής, η οποία διαβιβάζεται στο κατάντη τμήμα ποταμού. Η τιμή αυτή της παροχής μπορεί να εκφραστεί και σε μονάδες όγκου και έχοντας υπ' όψιν την χρονική διάρκεια του βήματος υπολογισμού, να δίνει μία ισοδύναμη παροχή. Σε κάθε περίπτωση όμως πρέπει να είναι θετική ή μηδέν και όχι αρνητική.

Η παραδοχή της μεγάλης ταχύτητας ροής, έχει σαν συνέπεια το νερό να χρειάζεται πολύ μικρό χρονικό διάστημα να διατρέξει την κοίτη του ποταμού, έως την έξοδο. Έτσι κάθε ποσότητα που εκρέει από μία έξοδο κυττάρου γίνεται είσοδος στο κατάντη αυτό κύτταρο μέσα στο ίδιο χρονικό βήμα και όχι σε κάποιο επόμενο.

3.3. Υπόγεια υδρολογία - Υδρογεωλογία.

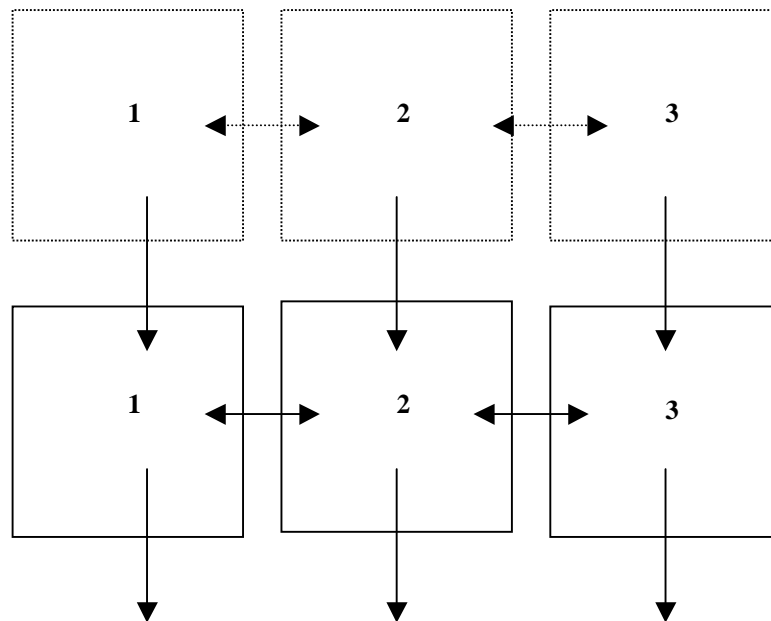
Ο καρστικός υδροφορέας όλης της λεκάνης διαιρείται και αυτός στον ίδιο αριθμό ενοτήτων με το επιφανειακό σύστημα. Η προσομοίωσή του στηρίζεται στις εξής παραδοχές:

- i. Οι καρστικοί ασβεστόλιθοι που δομούν την περιοχή, αν και ανήκουν σε διαφορετικές γεωτεκτονικές ζώνες και έχουν διαφορετικό δευτερογενές πορώδες και βαθμό καρστικοποίησης, επικοινωνούν υδραυλικά. Συνεπώς μέσα σε κάθε κύτταρο το υπόγειο νερό διατηρεί ενιαία στάθμη.
- ii. Οι τυχόν στεγανοί σχηματισμοί που μπορεί να εμφανίζονται είτε επιφανειακά, είτε σαν ενστρώσεις (μικρού ή μεγάλου πάχους), σε καμμία περίπτωση δεν δημιουργούν αδιαπέρατα όρια μεταξύ των υπογείων δεξαμενών.
- iii. Τα κύτταρα που προσομοιώνουν τα τμήματα του ποταμού έχουν τις ίδιες ιδιότητες με τα κύτταρα του υδροφορέα, με την διαφορά ότι έχουν άπειρη μεταβιβαστικότητα και μοναδιαία αποθηκευτικότητα.
- iv. Στα κύτταρα που αντιστοιχούν σε ορεινούς όγκους θεωρείται ότι υπάρχει σχηματισμός στάθμης, όσο και αν αυτό μπορεί κάποιες φορές να αποκλίνει από την πραγματικότητα. Αυτό σημαίνει ότι οι τυχόντες επικρεμάμενοι υδροφορείς θεωρούνται ενσωματωμένοι σε αυτόν τον, άλλοτε πραγματικό και άλλοτε συμβατικό, υδροφορέα.
- v. Δεν γίνεται διάκριση μεταξύ των διαφόρων ειδών υδροφορέων (υπό πίεση, ελεύθεροι, μερικώς υπό πίεση κλπ). Ο υδροφορέας κάθε κυττάρου έχει το πιεζομετρικό του φορτίο και την μεταβιβαστικότητά του, ενώ η αποθηκευτικότητα S ισοδυναμεί με το ενεργό πορώδες.

Κάθε ενότητα περιλαμβάνει τρία κύτταρα –συν το επιπλέον του ποταμού (βλ. προηγούμενη παράγραφο)-, όπως φαίνεται και στην σχηματική παράσταση των τμημάτων του μοντέλου (σχήμα 12). Το υδροφόρο στρώμα καθενός από αυτά τα στοιχεία είναι και ένα τμήμα του υπογείου υδροφορέα.

Τα στοιχεία έχουν γραμμική διάταξη, καθέτως στην διεύθυνση ροής. Το κεντρικό υδροφόρο στρώμα αντιστοιχεί στο τμήμα του υπογείου υδροφορέα που βρίσκεται κάτω από την πεδινή έκταση της ενότητας. Το

αλλαγή του σχήματος στην συμπεριφορά κάθε κυττάρου κρίνεται ως ήσσονος σημασίας.



Σχήμα 13. Η δομή του υπογείου υδροφορέα σε κάτοψη, όπως προσομοιώνεται στο μοντέλο 4Xcell. 1,3 – ορεινός υδροφορέας, 2 – πεδινός υδροφορέας. Τα βέλη δείχνουν την μεταφορά μάζας μεταξύ κυττάρων.

Όσον αφορά το ύψος κάθε ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου στρώματος και την θέση του στον χώρο χρειάζεται να ορισθεί μία και μόνη σταθερά: το επίπεδο βάσεως κάθε καρστικού τμήματος. Αυτό είτε είναι γνωστό από την υδρογεωλογική μελέτη, οπότε για κάθε κύτταρο είναι διαφορετικό, είτε λαμβάνεται το ίδιο για καθένα από αυτά, σε βάθος που δεν θα επηρεάσει το αποτέλεσμα. Το ύψος δεν χρειάζεται να ορισθεί, διότι το πιεζομετρικό φορτίου αφήνεται ελεύθερο να κυμανθεί σε όποιο επίπεδο το οδηγήσει η επίλυση.

Κάθε κύτταρο από τα προαναφερόμενα έχει πεπερασμένες διαστάσεις, οι οποίες και ρυθμίζουν την επικοινωνία του με τα υπόλοιπα, την στάθμη μέσα σε αυτό, καθώς και την χωρητικότητά του. Καθένα ορίζεται από τις εξής παραμέτρους (από τα ανάντη προς τα κατόντη):

Επιφάνεια

A_i ,

πλάτος	W_i ,	
μήκος	L_i ,	όπου $L_i = A_i * W_i^{-1}$
απόλυτο υψόμετρο βάσεως	Z_i ,	
μεταβιβαστικότητα	T_i ,	
αποθηκευτικότητα	S_i ,	
πιεζομετρικό φορτίο	H_i .	

Οι τέσσερις πρώτες ορίζονται από την αρχή, ενώ οι υπόλοιπες τρεις είναι προς βελτιστοποίηση.

Η υδραυλική επικοινωνία μεταξύ των τριών κυττάρων, αλλά και σε σχέση με τα ανάντη και κατόντη αυτών, γίνονται κατά τον νόμο του Darcy:

$$Q_{i \rightarrow j} = T_{ij} * w_{ij} * D_{ij}^{-1} * \Delta H_{ij} \quad (1)$$

Όπου $Q_{i \rightarrow j}$ είναι η παροχή από το κύτταρο i στο κύτταρο j , T_{ij} η μεταβιβαστικότητα για την διαδρομή από το κύτταρο i στο j , w_{ij} το πλάτος της επαφής του i με το j (δηλαδή το μικρότερο από τα w_i και w_j), L_{ij} η απόσταση από το κέντρο του i στο κέντρο του j και ΔH_{ij} η διαφορά πιεζομετρικού φορτίου των κυττάρων i και j . Διευκρινίζεται ότι στην (1) το w_{ij} και το D_{ij} μπορεί να είναι οποιοδήποτε από τα W_{ij} και L_{ij} , αναλόγως με το αν η ροή γίνεται καθέτως ή παραλλήλως προς την διεύθυνση ροής του ποταμού.

Η μεταβιβαστικότητα T_{ij} υπολογίζεται από μία εκ των σχέσεων που δίνει ο Bear (1979, σελ. 448). Συνιστάται ο τύπος του αρμονικού μέσου στην κανονική του μορφή:

$$T_{ij} = (0.5 * L_i + 0.5 * L_j) / ((0.5 * L_i / T_i) + (0.5 * L_j / T_j)) \quad (2)$$

ή στην απλοποιημένη για ισεμβαδικά τετραγωνικά κύτταρα μορφή:

$$T_{ij} = 2 / ((1 / T_i) + (1 / T_j)) \quad (3)$$

Η σχέση (3) μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για μη ισεμβαδικά κύτταρα, χωρίς αξιολογικό σφάλμα, αρκεί οι διαστάσεις των δύο κυττάρων να έχουν συγκρίσιμα μεγέθη.

Η ίδια σχέση (1) ισχύει και για την ροή από κάποιον υδροφορέα προς το ποτάμι. Με γνωστά τα χαρακτηριστικά του κυττάρου του ποταμού, δηλαδή άπειρη μεταβιβαστικότητα και γνωστό μήκος, υπολογίζεται πρώτα η κοινή μεταβιβαστικότητα με το κύτταρο του υδροφορέα. Η σχέση (3) για $T_j \rightarrow \infty$ δίνει $T_{ij} = 2 * T_i$. Αυτή είναι μία πολύτιμη παρατήρηση, η οποία έρχεται σε συμφωνία με την έννοια της άπειρης μεταβιβαστικότητας, η οποία δηλώνει ότι η παροχή στο ποτάμι εξαρτάται μόνο από την μεταβιβαστικότητα του υδροφορέα. Ως οριζόντια απόσταση του υδροφορέα από τον ποταμό λαμβάνεται μόνο το ήμισυ της διάστασης του υδροφορέα κατά μήκος της ροής (είτε πρόκειται για W είτε για L).

Κατά τους υπολογισμούς της ροής από το ένα στρώμα στο άλλο ή στο ποτάμι, και για λόγους απλοποιήσεως, αγνοούνται εντελώς τα εδαφικά στρώματα.

Βασικό χαρακτηριστικό των υδροφόρων στρωμάτων είναι η υδραυλική τους επικοινωνία με την θάλασσα ή και με εξωτερικές λεκάνες. Αυτή δεν είναι προνόμιο όλων, αλλά μόνο αυτών που έχουν κατάλληλη θέση. Έτσι από την αρχή πρέπει να προσδιορίζεται ποιων κυττάρων η επικοινωνία με την θάλασσα θα ληφθεί υπ' όψιν. Άλλωστε, είναι πιθανόν ότι σε κάποια από αυτά το μοντέλο δεν επαληθεύσει, κατά την ρύθμισή του, τέτοιες διαρροές.

Η διαρροή από τα περιφερειακά κύτταρα (ορεινοί υδροφορείς) είναι σύνηθες φαινόμενο. Ως αποτέλεσμα έχει την πτώση στάθμης και αυτή με την σειρά της μειώνει την τροφοδοσία στο κέντρο της ενότητας. Όταν όμως η στάθμη σε ένα τέτοιο υδροφορέα βρεθεί χαμηλότερα απ' ότι στον κεντρικό υδροφορέα, τότε λαμβάνει χώρα μεταφορά μάζας από το κέντρο προς την περιφέρεια και από εκεί στην θάλασσα.

Για τον υπολογισμό των διαρροών προς την θάλασσα, αρκεί να εισαχθούν στο μοντέλο η πιεζομετρία σε ένα παραθαλάσσιο σημείο για κάθε κύτταρο και η οριζόντια απόσταση αυτού από το σημείο. Οι τιμές της πιεζομετρίας αυτές, θεωρούνται σταθερές για όλη την περίοδο προσομοιώσεως του μοντέλου, για λόγους απλότητας στην κατάστρωση και τους υπολογισμούς. Και εδώ δεσπόζει ο νόμος του Darcy, καταλλήλως διαμορφωμένος για ροή από ένα κύτταρο προς μία δεξαμενή απείρων διαστάσεων, όπως και στην περίπτωση της ροής προς το ποτάμι.

Συμπερασματικά, η αντιμετώπιση του ποταμού σαν ανεξαρτήτου κυττάρου, είχε ως αποτέλεσμα την ισοδυναμία από πλευράς ροής των τεσσάρων στοιχείων που αποτελούν το σύστημα υδροφορέας-ποτάμι, με την υπαγωγή όλων στον νόμο του Darcy. Σε διαφορετική περίπτωση θα ήταν απαραίτητες ειδικές υδραυλικές εξισώσεις, κάτι που θα έκανε το προς επίλυση πρόβλημα πολυπλοκότερο.

3.4. Ρύθμιση μοντέλου 4Xcell.

Οι μέθοδοι ρυθμίσεως των παραμετρικών μοντέλων, ιδιαίτερα των πολύπλοκων παραμετρικών μοντέλων συστήματος, είναι αρρήκτως συνδεδεμένες με την ύπαρξη μεγάλων συστημάτων ηλεκτρονικών υπολογιστών. Η βαθμονόμηση του μοντέλου 4Xcell στηρίζεται στον ταυτόχρονο έλεγχο των παροχών στην έξοδο κάθε ενότητας και της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα στο κεντρικό κύτταρο κάθε ενότητας. Αυτό προϋποθέτει την διαθεσιμότητα χρονοσειρών σε μία τουλάχιστον γεώτρηση στο πεδινό τμήμα κάθε ενότητας και στην έξοδο του ποταμού. Η ανάλυση που ακολουθεί περιορίζεται στην έκδοση του 4Xcell για μηνιαίες χρονοσειρές: ανάλογα ισχύουν και για άλλους τύπους.

Το πρώτο ερώτημα, στο οποίο ο χρήστης του μοντέλου καλείται να απαντήσει, είναι το ποιες είναι οι αρχικές συνθήκες. Ζητούνται δηλαδή, για κάθε κύτταρο, ο αρχικός όγκος νερού στο εδαφικό στρώμα (ζώνη εδαφικής υγρασίας), αφ' ενός, και στο υδροφόρο στρώμα, αφ' ετέρου. Στο ποτάμι οι αρχικές συνθήκες δεν έχουν νόημα αφού σε κάθε βήμα ο όγκος νερού που περνάει από την κοίτη είναι ανεξάρτητος από τον αντίστοιχο του προηγούμενου βήματος.

Η αρχική τιμή της εδαφικής υγρασίας δίνεται αφότου γίνουν μερικές επιλύσεις του μοντέλου, και παρατηρώντας την διακύμανση της εδαφικής υγρασίας. Ως αρχική τιμή τελικά, μετά από δοκιμές κατά την διάρκεια της επιλύσεως, επιλέγεται μία όσο πιο κοντινή γίνεται στον μέσο όρο των αντίστοιχων μηνών των υπολοίπων ετών. Έτσι μετά από οποιαδήποτε λύση πρέπει να ξαναγίνεται έλεγχος για την προσαρμογή των αρχικών τιμών της εδαφικής υγρασίας.

Η αρχική τιμή για την ποσότητα νερού σε πεδινό υδροφορέα δίνεται αν κάθε τέτοιο τμήμα θεωρηθεί ότι βρίσκεται σε κατάσταση δυναμικής ισορροπίας (dynamic steady state), με στάθμη στο ίδιο απόλυτο υψόμετρο με την πρώτη στάθμη της αντίστοιχης χρονοσειράς. Ο όγκος τότε του νερού ισούται με:

$$V_u^{t=0} = H.OBS_u^{t=1} * A_u * S_u,$$

Όπου u είναι το αναφερόμενο κύτταρο πεδινού αποκλειστικώς υδροφόρου στρώματος, $H.OBS_u$ είναι η παρατηρημένη στάθμη στο u , A_u είναι το εμβαδόν του u , S_u η αποθηκευτικότητα του u και t ο αύξων αριθμός του χρονικού βήματος που διανύεται.

Τέλος, για την αρχική ποσότητα νερού στους ορεινούς υδροφορείς, καθότι δεν διατίθενται χρονοσειρές, επιλέγεται η λύση της χρήσης επιπλέον παραμέτρων προς βελτιστοποίηση. Έτσι ορίζονται ο λόγος λ_B και ο λόγος λ_N για κάθε πλευρικό υδροφόρο στρώμα (αντιστοίχως προς B και προς N), που δίνουν την πιεζομετρία την χρονική στιγμή $t=0$ συναρτήσει της πιεζομετρίας στον πεδινό υδροφόρο ορίζοντα την στιγμή $t=1$. Δηλαδή:

$$V_u^{t=0} = \lambda_B * H.OBS_v^{t=1} * A_u * S_u \text{ ή } V_u^{t=0} = \lambda_N * H.OBS_v^{t=1} * A_u * S_u,$$

Όπου u αφορά μόνο πλευρικά υδροφόρα στρώματα και v το αντίστοιχο κεντρικό καθενός.

Το επόμενο ζήτημα που ανακύπτει είναι για τον αριθμό των παραμέτρων. Ο τελικός αριθμός των παραμέτρων που βελτιστοποιούνται εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την έκταση των χρονοσειρών και την ποσότητα των διαθεσίμων στοιχείων. Επειδή συνήθως αυτά είναι λίγα, στόχος είναι ο περιορισμός του, χωρίς να αλλοιωθεί σημαντικά η αποτελεσματικότητα. Αναλυτικά, οι παράμετροι που εμφανίζονται στο μοντέλο είναι οι εξής:

1/. Χωρητικότητα εδαφικού στρώματος πάνω από κάθε κύτταρο υπογείου υδροφορέα (K_u): 3 παράμετροι για κάθε ενότητα (μετρημένες σε μονάδες μήκους, m).

2/. Σταθερά κατεισδύσεως εδαφικού στρώματος πάνω από κάθε κύτταρο υπογείου υδροφορέα ($PERC_u$): 3 παράμετροι για κάθε ενότητα (αδιάστατες).

3/. Μεταβιβαστικότητα των κυττάρων που αντιστοιχούν σε υπογείους υδροφορείς (T_u): 3 παράμετροι για κάθε ενότητα (μετρημένες σε $m^2/month$).

4/. Αποθηκευτικότητα των κυττάρων που αντιστοιχούν σε υπογείους υδροφορείς (S_u): 3 παράμετροι για κάθε ενότητα (αδιάστατες).

5/. Λόγοι λ_B και λ_N για τους υδροφορείς των ορεινών όγκων: 2 παράμετροι για κάθε ενότητα.

Είναι προφανές ότι σε πλήρη ανάπτυξη του 4Xcell οι παράμετροι κάθε ενότητας είναι συνολικώς 16. Η επίλυση όμως ενός προβλήματος με τόσες πολλές παραμέτρους θα απαιτούσε χρονοσειρές με πάνω από 300 μετρήσεις για κάθε ενότητα. Γι' αυτό συνιστάται η μείωσή τους στο 1/3ή και σε λιγότερες, αναλόγως με τα διαθέσιμα δεδομένα.

Η αντικειμενική συνάρτηση F προκύπτει από τα σφάλματα κάθε χρονοσειράς με τεχνική αποδόσεως συντελεστών βάρους. Έτσι η συνάρτηση σφάλματος κάθε χρονοσειράς, e_1, \dots, e_n (όπου n ο αριθμός των διατιθεμένων χρονοσειρών), διαθέτει και έναν συντελεστή βάρους, wf_1, \dots, wf_n , ο οποίος ορίζεται κάθε φορά από τον χρήστη και μπορεί να μεταβάλλεται, αναλόγως με το που θέλει ο χρήστης να οδηγήσει την επίλυση. Έτσι:

$$F = \sum_n (e_i * wf_i).$$

Επειδή η F είναι κατ' ουσίαν μία συνάρτηση σφάλματος στόχος είναι η ελαχιστοποίησή της με αλλαγή των παραμέτρων του προβλήματος. Η ομάδα (ή οι ομάδες) παραμέτρων που ελαχιστοποιεί την F ονομάζεται λύση του προβλήματος.

Η ρύθμιση του μοντέλου γίνεται με δύο μεθόδους (Μιμίκου, 1994): με εισαγωγή τιμών από τον χρήστη, εις το εξής αναφερόμενη ως «δοκιμαστική

μέθοδος», και με υπολογιστικό εργαλείο, εις το εξής αναφερόμενη ως «αυτοματοποιημένη μέθοδος» με επιλυτή (solver) . Ωστόσο υπάρχει και μία τρίτη που συνδυάζει τις δύο προηγούμενες.

Αρχικώς δίνονται δοκιμαστικά αυθαίρετες τιμές, που όμως πρέπει με βάση την εμπειρία του μελετητή να είναι λογικές και αναμενόμενες κατά περίπτωση. Στην συνέχεια λειτουργεί το μοντέλο και παράγει συνθετικές εξόδους που συγκρίνονται με τις μετρημένες. Χρησιμοποιείται η εμπειρία του μελετητή για την διάγνωση των αιτίων που προκαλούν ενδεχόμενη ασυμφωνία μετρημένων και συνθετικών εξόδων, με βάση τα ορισμένα κριτήρια (π.χ. μηνιαίοι όγκοι). Έτσι διορθώνονται κάποιες τιμές, επαναλειτουργεί το μοντέλο και ούτω καθεξής μέχρις ότου ικανοποιηθεί κάποιο συμβατικό κριτήριο συγκλίσεως. Η δοκιμαστική μέθοδος αποδεικνύεται πολύ χρονοβόρα και με φτωχά αποτελέσματα από πλευράς συγκλίσεως, αφού εντοπίζει μόνο τοπικές βέλτιστες λύσεις. Όμως δίνει την ευκαιρία στον χρήστη να κατανοήσει την λειτουργία κάθε παραμέτρου και πώς αυτή επηρεάζει την αντικειμενική συνάρτηση.

Η αυτοματοποιημένη ρύθμιση γίνεται με διαδικασία ενσωματωμένη στο πρόγραμμα, χωρίς ενδιάμεση παρέμβαση του μελετητή. Τα πλεονεκτήματα της αυτοματοποιημένης ρυθμίσεως σε σχέση με την δοκιμαστική είναι τα εξής (Μιμίκου, 1994):

1. Είναι πολύ μειωμένη η σημασία της εμπειρίας του μελετητή.
2. Είναι αντικειμενική και όχι υποκειμενική όπως η δοκιμαστική, με αποτέλεσμα την δυνατότητα συσχέτισεως των τιμών των παραμέτρων με τα φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης.
3. Υπάρχει μεγαλύτερη ταχύτητα συγκλίσεως των τιμών των παραμέτρων.
4. Είναι λιγότερο επίπονη.

Από την άλλη πλευρά, τα μειονεκτήματα που έχει είναι:

1. Το πρόγραμμα ρυθμίσεως είναι ογκωδέστερο, πολυπλοκότερο και λιγότερο ταχύ.
2. Οι μαθηματικές σχέσεις του προγράμματος και η αλληλουχία τους είναι πιο πολύπλοκη και η παρέμβαση για πιθανή αλλαγή τους είναι από δύσκολη έως και αδύνατη.

3. Προϋποθέτει σαφείς και καθορισμένους κανόνες για την ρύθμιση.

Η αυτοματοποιημένη ρύθμιση μπορεί να αρχίσει να εφαρμόζεται από ένα σύνολο αρχικών τιμών παραμέτρων, που όμως έχουν εκτιμηθεί από μία αρχική δοκιμαστική διαδικασία ρυθμίσεως, που οδήγησε στην περιοχή του βελτίστου κριτηρίου ακριβείας. Το περιβάλλον όπου καταστρώθηκε το μοντέλο διευκολύνει αυτήν την ημι-αυτοματοποιημένη διαδικασία ρυθμίσεως. Για το περιβάλλον Excel διατίθεται μία σειρά από επιλυτές, με κυριότερους τον κλασικό και τον προχωρημένο. Ο πρώτος διαθέτει μέθοδο γραμμικού προγραμματισμού, μη γραμμικού προγραμματισμού και τετραγωνικού προγραμματισμού για την επίλυση παραμετρικών προβλημάτων, και βρίσκεται σε όλες τις εκδόσεις του προγράμματος. Ο δεύτερος είναι ο πλέον εξελιγμένος και διαθέτει ισχυρότερες μεθόδους μη γραμμικού (GRG – Non linear) και τετραγωνικού προγραμματισμού, και επιπλέον επίλυση με εξελικτικό αλγόριθμο (Evolutionary Algorithm).

Ο επιλυτής του Excel, μετά από την επισήμανση του ακροτάτου συντάσσει τρεις αναφορές: την απάντηση, που περιλαμβάνει τις επιλεγμένες τιμές παραμέτρων, την ανάλυση ευαισθησίας, για το πόσο επηρεάζεται η αντικειμενική συνάρτηση από μικρές μεταβολές των τιμών αυτών και την ανάλυση ορίων, όπου φαίνεται η συμπεριφορά της αντικειμενικής συναρτήσεως στα όρια των τιμών των παραμέτρων. Καθεμία από αυτές μπορεί να δώσει χρήσιμα στοιχεία για την ευαισθησία του μοντέλου σε κάθε παράμετρο και την επιρροή των οριακών τιμών των παραμέτρων στην αντικειμενική συνάρτηση.

4. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ (Λεκάνη Βοιωτικού Κηφισού)

4.1. Γενικά

Η λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού έχει συνολική έκταση περίπου 2037 km². Ως έξοδος της θεωρείται η διώρυγα της Καρδίτσας, η οποία οδηγεί τα επιφανειακά νερά προς την λίμνη Υλίκη. Το συνολικό μήκος του κυρίου κλάδου του ποταμού, συμπεριλαμβανομένων και τοπικών διακοπών της κοίτης, εκτιμάται στα 102 km. Μέσα στην λεκάνη ρέουν πολλοί μικροί παραπόταμοι του Κηφισού, μάλλον εποχιακοί, με σημαντικότερο τον Μέλανα ποταμό. Σε μεγάλα τμήματα της διαδρομής της η κοίτη είναι διευθετημένη και τα επιφανειακά νερά χρησιμοποιούνται για άρδευση.

Από τις αρχές του 20ου αιώνα έχει εγκατασταθεί δίκτυο σταθμών όπου γίνονται μετρήσεις βροχοπτώσεων και παροχών. Ακόμα διατίθενται σποραδικές υδρομετρήσεις για μερικές από τις σημαντικότερες πηγές της λεκάνης.

4.2. Επιφανειακή υδρολογία.

4.2.1. Βροχοπτώσεις – Εξατμοδιαπνοή.

Οι μετρημένες βροχοπτώσεις λαμβάνονται απ' ευθείας ανηγμένες σε μηνιαίες τιμές από τους Περλέρο κ.α. (1998). Τα στοιχεία, που δίνονται στο παράρτημα, έχουν υποστεί επεξεργασία ειδικώς για να χρησιμοποιηθούν σε μοντέλα της εν λόγω λεκάνης, με την μέθοδο Sacramento. Έτσι έγιναν υπολογισμοί με αναγωγή υψομέτρου για καθεμία από τις υπολεκάνες (Άνω, Μέσου και Κάτω Ρου) και προέκυψαν τρεις χρονοσειρές από τον 10/1967 έως τον 9/1994.

Με την ίδια μέθοδο εκτιμήθηκε η μηνιαία εξατμοδιαπνοή (δυναμική και πραγματική) για κάθε υπολεκάνη. Έτσι, τελικώς, κατέστη δυνατόν να δοθούν τιμές καθαρής μηνιαίας βροχοπτώσεως για κάθε τμήμα. Η ακριβής διαδικασία υπολογισμού δεν είναι δημοσιευμένη, όμως είναι σαφές ότι για την εδαφική υγρασία χρησιμοποιείται ένας δείκτης Φ (σταθερός), ο οποίος λαμβάνεται ίσος με 40 mm ανά μήνα, κοινός για όλες τις ενότητες. Εάν η τιμή της

βροχοπτώσεως είναι πάνω από τον Φ, τότε η καθαρή βροχόπτωση είναι η διαφορά της βροχοπτώσεως από την δυναμική εξατμοδιαπνοή. Στην αντίθετη περίπτωση η καθαρή βροχόπτωση είναι μηδενική.

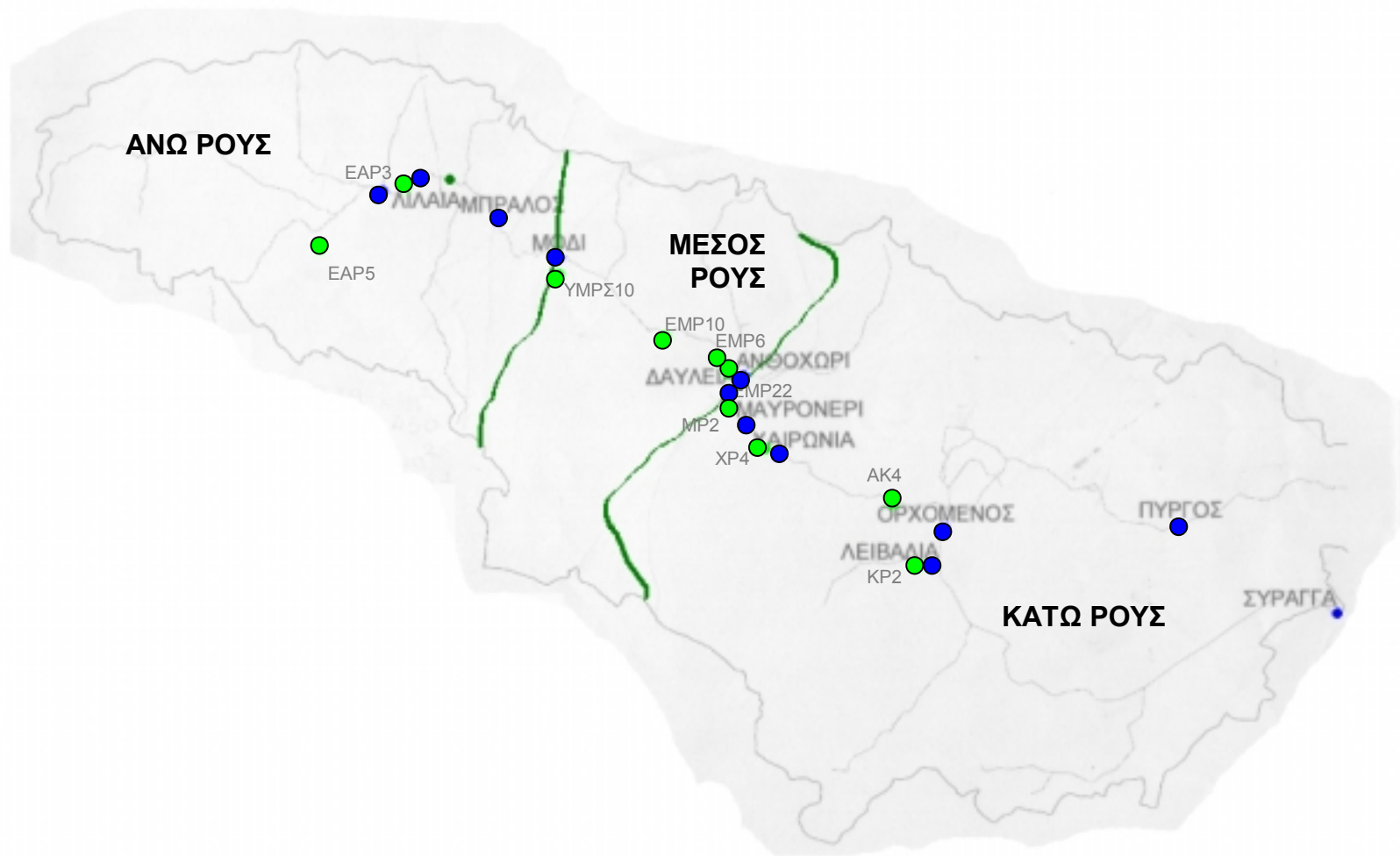
Η αμφισβιτήσιμη εγκυρότητα του παραπάνω υπολογισμού της καθαρής βροχοπτώσεως, καθώς και οι ανάγκες των μοντέλων που κατασκευάστηκαν οδήγησαν σε αχρησία τις τιμές καθαρής βροχοπτώσεως και σε ανάπτυξη ξεχωριστού μοντέλου εδαφικής υγρασίας, που αναλύεται στην παράγραφο 4.2.

4.2.2. Υδρομετρήσεις.

Στην λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού υπάρχουν συνολικώς 11 σημεία υδρομετρήσεων (σχήμα 14), τα εξής:

1. Παπαλουκά,
2. Μπράλος,
3. Μόδι,
4. Ανθοχώρι,
5. Δαύλεια Σταθμός,
6. Μαυρονέρι Δαύλειας,
7. Χαιρώνεια-Αγ. Βασίλειος,
8. Ορχομενός Γέφυρα,
9. Λειβαδιά Γέφυρα,
10. Πύργος Γέφυρα,
11. Διώρυγα Καρδίτσας.

Για όλους τους σταθμούς υπάρχουν υδρομετρήσεις για τυχαία επιλεγμένες ημερομηνίες κάθε έτους. Μάλιστα, λίγες φορές για την ίδια ημερομηνία υπάρχουν μετρήσεις σε περισσότερους από έναν σταθμό. Έχει γίνει επεξεργασία των μετρήσεων και έχουν αναχθεί σε τιμές στιγμιαίας παροχής. Οι μετρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν και στην μελέτη των Παγούνη κ.α. (1994). Επιπλέον, για την διώρυγα της Καρδίτσας υπάρχουν μηνιαίες παροχές από το 1909 έως το 1994, καθώς και υπολογισμένες ημερήσιες (Ναλμπάντης κ.α., 2000).



Σχήμα 14. Σκαρίφημα της υδρολογικής λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού. Διακρίνονται τα όρια της λεκάνης (υδροκρίτης) με μαύρη παχειά γραμμή, το υδρογραφικό δίκτυο (γκρίζα λεπτή γραμμή) και τα όρια των επιλεγμένων ενοτήτων (πράσινη παχειά γραμμή). Ακόμα με πράσινους και μπλε κύκλους αντιστοίχως δίνονται οι θέσεις των υδρογεωτρήσεων και οι θέσεις υδρομετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν, με το τοπωνύμιο ή τον κωδικό τους.

4.2.3. Επεξεργασία υδρομετρήσεων.

Κύριος στόχος της επεξεργασίας των υδρομετρήσεων ήταν η αναγωγή των στιγμιαίων τιμών παροχής σε μηνιαίες. Ο τρόπος που επελέγη για να γίνει αυτή η αναγωγή, ήταν αφ' ενός η συσχέτιση των ημερησίων τιμών στους σταθμούς ενδιαφέροντος με αυτές της Καρδίτσας, και αφ' ετέρου η χρήση του συντελεστή συσχέτισεως για υπολογισμό των μηνιαίων παροχών.

Ειδικότερα, η διαδικασία που εφαρμόστηκε είχε ως εξής: Πρώτα υπολογίσθηκαν οι συντελεστές γραμμικής συσχέτισης R_i καθενός από τους 10 σταθμούς (εσωτερικούς της λεκάνης) με τις εκροές της διώρυγας Καρδίτσας. Προκειμένου να γίνει η συσχέτιση εντοπίσθηκαν οι ημερομηνίες των οποίων οι μετρήσεις συνέπιπταν με ημέρες μετρήσεων της Καρδίτσας και χωρίσθηκαν σε θερινή και χειμερινή περίοδο. Κατόπιν υπολογίσθηκαν οι όροι της εξίσωσης γραμμικής συσχέτισης (πίνακας 1).

Πίνακας 1. Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της γραμμικής συσχέτισεως των στιγμιαίων υδρομετρήσεων των 10 υδρομετρικών σταθμών με τις αντίστοιχες υδρομετρήσεις στην διώρυγα της Καρδίτσας.

Περίοδος	Θερινή				Χειμερινή				Ετήσια		
	R	A	B	.n	R	A	B	.n	R	A	B
Παπαλουκάς	0.981	0.377	-1385	7	1.000	0.784	15646	2	0.946	0.563	-3645
Μπράλος	0.330	0.095	495	4	-1.000	-0.339	32341	2	0.191	0.024	1079
Μόδι	0.989	0.093	116	3	0.907	0.557	23033	4	0.945	0.519	-4648
Ανθοχώρι	0.991	0.362	-3179	8	0.966	0.432	23017	5			
Δαύλεια σταθμός	0.925	0.468	-192	12	0.948	0.535	25138	13			
Μαυρονέρι Δαύλειας	0.895	0.115	3361	6	0.947	0.144	-336	8			
Χαιρώνια – Αγ. Βασίλειος	0.976	0.498	6540	8	0.878	0.656	18631	17			
Ορχομενός Γέφυρα	0.987	0.444	4850	10	0.954	0.586	11155	19			
Λειβαδιά Γέφυρα	0.825	0.075	1262	20	0.785	0.098	9407	20			
Πύργος Γέφυρα	0.733	0.043	4863	31	0.287	0.044	23578	25			

R είναι ο συντελεστής συσχέτισεως, A και B είναι ο συντελεστής διεύθυνσεως και ο σταθερός όρος αντιστοίχως, στην γραμμική εξίσωση $y = A * x + B$. Το πλήθος των στοιχείων βάσει των οποίων έγινε η συσχέτιση είναι n .

Είναι φανερό πως οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης των σταθμών με την έξοδο της λεκάνης είναι ικανοποιητικές ως προς το πρακτικό κριτήριο του 0.80, εκτός από την περίπτωση του δευτέρου σταθμού (Μπράλος). Η συσχέτιση των τριών πρώτων σταθμών, ούτως ή άλλως, αποδείχθηκε πλασματική και προβληματική, διότι, παρά την πληθώρα των στιγμιαίων μετρήσεων, πολύ λίγες συμπίπτουν χρονικά με στιγμιαίες τιμές στην διώρυγα. Στην περίπτωση αυτή αναζητήθηκε εναλλακτική μέθοδος συσχέτισης.

Συσχετίστηκαν γραμμικά με σταθμούς μη προβληματικούς, για τους οποίους συνέπιπταν περισσότερες ημερομηνίες μετρήσεων και έτσι η συσχέτιση με την Καρδίτσα έγινε με έμμεσο τρόπο. Για τους σταθμούς 3 και 4 (Μόδι και Ανθοχώρι) ο συντελεστής συσχέτισης για ευθεία της μορφής $y=Ax$ ανήλθε στο $R=0.97$ και ο συντελεστής A ήταν $A=1.3253$. Έτσι οι μηνιαίες τιμές που προέκυψαν από την συσχέτιση του σταθμού 4 με την Καρδίτσα, πολλαπλασιάστηκαν με το A και προέκυψαν οι μηνιαίες απορροές για τον σταθμό 3.

Με τις προηγούμενες μεθόδους ξεπεράστηκε με ορθολογικό τρόπο το πρόβλημα ασυμφωνίας των δεδομένων. Φυσικά εισάγεται στο πρόβλημα ένας βαθμός αβεβαιότητας, ο οποίος στην παρούσα φάση κρίνεται ως ήσσονος σημασίας.

Ένα δεύτερο πρόβλημα που προέκυψε είναι αυτό της βασικής ροής του ποταμού κατά τους θερινούς μήνες. Η σήραγγα της Καρδίτσας φράζεται τα καλοκαίρια και έτσι δεν υπάρχουν στοιχεία για την βασική μηνιαία ροή των τριών υδρομετρικών σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο του μοντέλου. Έτσι δημιουργήθηκε μία εικονική, σταθερή βασική απορροή, με μηνιαία παροχή, η οποία υπολογίσθηκε σαν μέσος όρος των στιγμιαίων μετρήσεων κάτω από $5000 \text{ m}^3/\text{h}$ κάθε θερινής περιόδου για τους σταθμούς Μοδίου, Δαύλειας και Γέφυρας Λεβαδειάς –η τελευταία εξ αιτίας ελλείψεως στοιχείων για την θερινή περίοδο στην Καρδίτσα, οπότε φράσσεται η διώρυγα-.

Για τον Άνω ρου: $Q = 0.38 \text{ m}^3/\text{s}$

Για τον Μέσο ρου: $Q = 0.59 \text{ m}^3/\text{s}$

Για τον Κάτω ρου: $Q = 0.83 \text{ m}^3/\text{s}$.

Αν οι τιμές αναχθούν σε θερινούς μήνες, λαμβάνεται η ελάχιστη απορροή κατά την θερινή περίοδο. Είναι ευνόητο πως δεν είναι παρά ενδεικτικές, αλλά εικάζεται ότι δεν απέχουν πολύ από την πραγματικότητα.

4.3. Υπόγεια Υδρολογία – Υδρογεωλογία.

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφεται η περιοχή ενδιαφέροντος από υδρογεωλογικής απόψεως. Σχολιάζεται η υπάρχουσα βιβλιογραφία, καθώς και τα δεδομένα που διατίθενται για χρήση στο μοντέλο από πλευράς υπογείων νερών. Τέτοια είναι οι χρονοσειρές σταθμομετρήσεων σε συγκεκριμένες γεωτρήσεις, πιεζομετρικοί χάρτες συντεταγμένοι σε διάφορες χρονικές περιόδους και αποτελέσματα από παλαιότερα μοντέλα.

Η βιβλιογραφία και η γνώση γύρω από την γεωλογία της ευρύτερης περιοχής του Βοιωτικού Κηφισσού, συμπυκνώνεται σε τρία μεγάλα ερευνητικά έργα. Το πρώτο είναι η γεωλογική χαρτογράφηση σε κλίμακα 1:50000 από το Ι.Γ.Μ.Ε. Το δεύτερο είναι η σύνταξη υδρογεωλογικών χαρτών για κάποιες από τις χαρτογραφημένες περιοχές. Τρίτο, και σημαντικότερο, είναι η εκπόνηση προγράμματος υδρογεωλογικής μελέτης της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού (Παγούνης κ.α. 1994).

Η γεωλογική χαρτογράφηση καλύπτεται από 8 φύλλα χάρτη με τοπογραφικό υπόβαθρο 1:50000, της Γ.Υ.Σ., χαρτογραφημένα σε διάφορες χρονικές περιόδους από το 1975 και μετά. Απεικονίζει, με τρόπο αρκετά ακριβή για τις ανάγκες του μοντέλου, την επιφανειακή εξάπλωση των γεωλογικών σχηματισμών, περιγράφει με επάρκεια την δομή και τις ιδιότητές τους, και δίδει γεωλογικές τομές που βοηθούν αρκετά στην κατανόηση της τεκτονικής δομής του υπεδάφους.

Οι υδρογεωλογικοί χάρτες κατατάσσουν τα πετρώματα βάσει των υδρογεωλογικών τους παραμέτρων, κυρίως ποιοτικά, όπως αυτές εμφανίζονται από επί τόπου μελέτη, αντλητικές δοκιμές αλλά και από την βιβλιογραφία. Επιπλέον δίδουν και μία καλή εικόνα της πιεζομετρίας και της υπόγειας ροής κάποια, δυστυχώς άγνωστη, χρονική περίοδο, υπό τύπον στιγμιοτύπου. Το πρόβλημα είναι ότι αυτοί οι χάρτες καλύπτουν το ΝΑ τμήμα της λεκάνης (φύλλα Θήβαι και Βάγια), που είναι μάλλον ασήμαντο σε έκταση.

Η υδρογεωλογική έρευνα έχει προχωρήσει αρκετά (Παγούνης κ.α., 1994) και διαθέτει υδρογεωλογικούς χάρτες και τομές (βλ. παράρτημα), υδρογραφήματα καρστικών πηγών, πλήρεις περιγραφές σχηματισμών και τεκτονικών δομών. Ακόμα, προσφέρει στοιχεία για την υδρογεωλογική συμπεριφορά των πετρωμάτων, τον αριθμό των υδροφόρων οριζόντων στις διάφορες περιοχές καθώς και αλληλεπιδράσεις υπόγειων και επιφανειακών υδάτων. Διάφορες, υδρογεωλογικές πληροφορίες έχουν ληφθεί από τοπικού χαρακτήρα εργασίες (π.χ. Τέντες, 1999).

Όπως προαναφέρθη, η λεκάνη περιλαμβάνεται χαρτογραφικά στα εξής φύλλα 1:50000 του Ι.Γ.Μ.Ε.:

Αμφίκλεια,
Ελάτεια,
Αταλάντη,
Λάρυμνα,
Δελφοί,
Λεβαδειά,
Βάγια,
Θήβαι.

Το κύριο μέρος της λεκάνης βρίσκεται στα φύλλα Αμφίκλεια, Ελάτεια, Δελφοί, Λεβαδειά και Βάγια.

Στις σελίδες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι σχηματισμοί που εμφανίζονται στην ευρύτερη περιοχή, καθώς και στοιχεία για τα πάχη, την επιφανειακή και την υπόγεια εξάπλωση των σχηματισμών αυτών, συμφώνως προς τα στοιχεία της χαρτογραφήσεως.

Φύλλο Αμφίκλεια

Παρατηρείται εμφάνιση αποθέσεων τεταρτογενών ιζημάτων σε συνολική έκταση 114 km², με μικρό σχετικά πάχος, της τάξης των 20 m. Παραλλήλως, έντονη είναι η παρουσία νεογενών αποθέσεων (μάργες, άργιλοι, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή) με πάχος άνω των 200 m, στα βόρεια κράσπεδα, με πιθανή προέκταση κάτω από μεγάλο μέρος των τεταρτογενών. Η συνολική έκταση δεν είναι μεγαλύτερη από 100 km².

Επιφανειακώς κυριαρχούν οι ασβεστόλιθοι διαφόρων ηλικιών, με διάφορους βαθμούς διαρρήξεων και καρστικοποίησης. Η ύπαρξη πολλών ασβεστολιθικών οριζόντων, τόσο στην ζώνη Παρνασσού όσο και στην Υποπελαγονική, προκαλεί αμφιβολία για το συνολικό πάχος των σχηματισμών, το οποίο κατά θέσεις μπορεί να ξεπερνάει τα 250 m.

Σε μία έκταση μεγαλύτερη από 36 km², υπάρχει εμφάνιση σχιστοκερατολίθων με οφιολίθους. Οι σχηματισμοί αυτοί είναι εν γένει υδατοστεγανοί, παρόλα αυτά μπορούν εδώ να αγνοηθούν διότι βρίσκονται στα βορειότερα όρια της λεκάνης του Κηφισσού, στο Όρος Καλλίδρομο, και σε μεγάλα υψόμετρα.

Σε διάφορα σημεία υπάρχουν διάσπαρτες εμφανίσεις δολομιτών, οι οποίοι αποτελούν το υπόβαθρο της Υποπελαγονικής ζώνης.

Ο φλύσχος δεν έχει έντονη επιφανειακή εξάπλωση και όπου εμφανίζεται υπογείως δημιουργεί φυσικά όρια σε υδροφόρους σχηματισμούς.

Φύλλο Ελάτεια

Επιφανειακώς, στο φύλλο αυτό, κυριαρχούν οι τεταρτογενείς αποθέσεις ιζημάτων με πάχος της τάξεως των 20 m. Η εξάπλωσή τους είναι περίπου 120 km². Κατά θέσεις και κάτω από αυτά συναντώνται τα συμπαγή ιζήματα του νεογενούς, με αργίλους, μάργες, κροκαλοπαγή, ψαμμίτες και μαργαϊκούς ασβεστολίθους. Το πάχος τους ξεπερνά ακόμα και τα 250 m, ενώ συναντώνται, είτε υπογείως είτε επιφανειακώς, σε έκταση συγκρίσιμη με τα τεταρτογενή.

Έντονη είναι η παρουσία του φλύσχη, ιδιαίτερος δέ στο ΝΑ τμήμα, όπου σώμα πάχους μεγαλύτερου από 400 m δημιουργεί υδατοστεγανό φράγμα μέσα στον κρητιδικό ασβεστόλιθο.

Οι ασβεστόλιθοι κυριαρχούν κάτω από τα ιζήματα, με πολύ μεγάλη εξάπλωση και άγνωστο βάθος. Η έκταση της καρστικοποίησης ποικίλει ανάλογα με την ηλικία (μεγαλύτερη στους ιουρασικούς, μικρότερη στους κρητιδικούς), ενώ σε πολλές περιπτώσεις εμφανίζονται εμβόλιμες σχιστοκερατολιθικές διαπλάσεις με οφιολίθους. Αυτές λειτουργούν ως υδατοστεγανά ή ημιστεγανά στρώματα με αποτέλεσμα οι καρστικές υδροφορίες να είναι υπό πίεση.

Στο ΒΔ τμήμα εμφανίζονται και οι οφιόλιθοι, οι οποίοι, αν και κατεξοχήν στεγανοί σχηματισμοί, σε διάφορες περιοχές εμφανίζουν ανεπτυγμένο δευτερογενές πορώδες, φιλοξενώντας αξιόλογες υδροφορίες (συνήθως έως $10 \text{ m}^3/\text{h}$). Η επιφανειακή τους εξάπλωση προσεγγίζει τα 30 km^2 , και το βάθος τους είναι άγνωστο. Μιάς και εμφανίζονται στα βόρεια όρια της λεκάνης μπορούν να θεωρηθούν ως φυσικά σύνορα των καρστικών υδροφορέων.

Φύλλο Αταλάντη

Στο τμήμα που περιλαμβάνεται στην λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού τα τεταρτογενή ιζήματα καλύπτουν επιφανειακά έκταση 35 km^2 . Το πάχος των ιζημάτων δεν ξεπερνά τα 20 m. Η μεγαλύτερη έκταση καλύπτεται από ασβεστολίθους και επιφανειακά, αλλά και κάτω από τα τεταρτογενή. Το πάχος αυτών ξεπερνά κατά θέσεις τα 350 m. Απαντώνται καθόλου έως ολοκληρωτικά αποκαρστωμένοι, με την καρστικοποίηση να ξεκινά σε μεγάλα βάθη (π.χ. στους ιουρασικούς κάτω από τα 250 m). ΒΔ του χωριού Παύλος, είναι έντονη η εμφάνιση σχιστοκερατολιθικών ενστρώσεων με οφιόλιθους μέσα στους ασβεστολίθους, με αποτέλεσμα άλλοτε την δημιουργία υδροφόρων υπό πίεση και άλλοτε την ανυπαρξία υδροφοριών.

Ανατολικότερα εμφανίζονται οι οφιόλιθοι, οι οποίοι είναι στεγανά πετρώματα και αποτελούν φυσικά όρια για τους υδροφόρους.

Φύλλο Λάρυμνα

Στο τμήμα του φύλλου που ανήκει στην λεκάνη του Κηφισού κυριαρχούν οι ασβεστόλιθοι (ιουρασικής ηλικίας) οι οποίοι φράσσονται προς Β από δολομίτες και έχουν πάχος που φθάνει τα 400 m. Οι δολομίτες αποτελούν και το υπόβαθρο των ασβεστολίθων. Κρίνοντας από τα προηγούμενα φύλλα, συμπεραίνεται ότι η έκταση της αποκάρσωσης και η ανάπτυξη δευτερογενούς πορώδους είναι μεγάλη.

Τα τεταρτογενή ιζήματα εδώ έχουν μικρά πάχη (κάτω από 15 m) και η εξάπλωσή τους είναι πολύ μικρή (περίπου 15 km^2).

Φύλλο Δελφοί

Το φύλλο αυτό βρίσκεται Ν του φύλλου Αμφίκλεια. Κυριαρχούν καθολικά οι ασβεστόλιθοι, οι οποίοι και φθάνουν έως την θάλασσα. Η υδραυλική επικοινωνία με την θάλασσα θεωρείται δεδομένη και αυτή είναι και το φυσικό όριο.

Φύλλο Λεβαδειά

Στο φύλλο αυτό, ο ποταμός διασχίζει τεταρτογενείς, αλλουβιακές αποθέσεις και προσχώσεις με πάχος της τάξης των 20 m. Η επιφανειακή τους εξάπλωση αγγίζει τα 28 km².

Οι ασβεστόλιθοι εξαπλώνονται επιφανειακώς και κυρίως υπογείως σε πολλή μεγάλη έκταση, εκτεινόμενοι και κάτω από τα όρια της υδρολογικής λεκάνης.

Αξιοσημείωτο είναι πως ο φλύσχος απλώνεται σε επιφάνεια που ξεπερνά τα 130km², και καλύπτει αντίστοιχο μέρος των ασβεστολίθων, δημιουργώντας υπό πίεση υδροφορείς, όπου το πάχος του είναι μικρό. Αντιθέτως, όπου το πάχος του είναι μεγάλο και φαινομενικά μπορεί να ξεπερνά και τα 400 m, οι υδροφορείς είναι μικρές ή ανύπαρκτες.

Φύλλο Βάγια

Σε μία έκταση 250 km², απλώνεται η λεκάνη - πεδιάδα της Κωπαΐδας. Αποτελείται από αλλουβιακά ιζήματα πάχους αρκετών μέτρων, των οποίων υπόκεινται σειρές ασβεστολίθων διαφόρων ηλικιών με δολομιτικό υπόβαθρο. Οι ασβεστόλιθοι εμφανίζονται στα κράσπεδα και τους γύρω ορεινούς όγκους αναμειγμένοι με τον φλύσχη. Αυτός δημιουργεί στεγανά ή ημιπερατά στρώματα, θέτοντας κάποια τμήματα υδροφορέων μερικώς υπό πίεση.

Στο ΝΑ τμήμα εμφανίζονται συμπαγή ιζήματα (κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, άμμοι, πηλοί κλπ). Το φαινόμενό τους πάχος είναι μεγαλύτερο των 200 m. Οπωσδήποτε κάποιοι οριζόντες τους είναι υδατοπερατοί και υδροφορούν (Παγούνης κ.α., 1994).

Εφ' όσον τα όρια των ασβεστολίθων προς Ν είναι δυσδιάκριτα θεωρείται σκόπιμο να οριστεί αυτό κάτω από την κορυφογραμμή που διέρχεται από την κορυφή Γκραμπάλα, με την υπόθεση ότι η πιεζομετρική επιφάνεια έχει κλίση 0⁰ (είναι δηλαδή οριζόντια).

Φύλλο Θήβαι

Το φύλλο Θήβαι περιλαμβάνει ελάχιστα km² της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού. Σε αυτά κυριαρχούν οι ασβεστόλιθοι, οι οποίοι υπογείως συνδέονται με τις λίμνες Υλίκη και Παραλίμνη. Οι λίμνες και η υδραυλική επικοινωνία με αυτές δεν εξετάζεται εδώ.

Υδρογεωλογικός χάρτης λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού.

Το 1993, το Ι.Γ.Μ.Ε. εξέδωσε υδρογεωλογικό χάρτη της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού και της περιβάλλουσας περιοχής σε κλίμακα 1:150000. Ο χάρτης (Παγούνης, 1994) είναι βασισμένος κυρίως στα προαναφερόμενα γεωλογικά φύλλα 1:50000 και δευτερευόντως στα Ερυθραί, Ελευσίνα, Καπαρέλλι, Χαλκίδα. Αν και δεν είναι σαφές για ποια εποχή και ποια χρονολογία είναι κατασκευασμένος ο υδρογεωλογικός χάρτης, ωστόσο δίνει πολύτιμα στοιχεία για την συμπεριφορά των διαφόρων σχηματισμών και την θέση σημαντικών υδραυλικών ορίων.

Το βόρειο τμήμα της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού παρουσιάζει πιεζομετρικές γραμμές κάθετες στον υδροκρίτη, γεγονός που υποδηλώνει την παράλληλη με αυτόν κίνηση των υπογείων νερών. Συνεπώς, είναι λογικό το συμπέρασμα ότι προς Β και από τον Άνω Μπράλλο έως τον Παύλο Βοιωτίας, οι γεωλογικοί σχηματισμοί δεν δέχονται τροφοδοσία από το εξωτερικό της λεκάνης. Μάλιστα δέ, στεγανά πετρώματα υπάρχουν και μέσα στα όρια της λεκάνης (βλ. γεωλογικό χάρτη στο παράρτημα).

Το νότιο τμήμα της υδρολογικής λεκάνης αποτελείται από σχηματισμούς υδροπερατούς έως πολύ υδροπερατούς σχηματισμούς, με υδροφορίες άλλοτε ελεύθερες, άλλοτε υπό πίεση - εξ αιτίας στεγανών υπερκειμένων. Από την εικονιζόμενη στον χάρτη πιεζομετρία φαίνεται ότι υπάρχει υδραυλική επικοινωνία με την θάλασσα, όπου και εκφορτίζονται οι ασβεστόλιθοι, η οποία παρατηρείται στο ανατολικό κομμάτι (Α της ευθείας Προδρόμου - Ευαγγελιστριάς). Το δυτικότερο κομμάτι και μέχρι το Δίστομο παρουσιάζει ροή νερού προς το υπέδαφος της λεκάνης. Η αιτία είναι ο ορεινός όγκος του Ελικώνα, ο οποίος προφανώς φέρει μεγάλο υδραυλικό φορτίο που εκτονώνεται προς Β στην λεκάνη και προς Ν στην θάλασσα. Δυτικότερα του Διστόμου δεν δίνονται στοιχεία πιεζομετρίας, όμως είναι

λογικό να υποτεθεί από τον Παρνασσό τροφοδοσία προς την λεκάνη -κατ' αναλογία με τον Ελικώνα- καθώς και εκροές προς την θάλασσα.

Εντός της λεκάνης φαίνεται πως σε κάθε τμήμα του ποταμού διαμορφώνονται και διαφορετικές υδρολογικές συνθήκες. Στον Άνω Ρου το ποτάμι δεν φαίνεται να αλληλεπιδρά με τον καρστικό υδροφόρο. Αντιθέτως, δείχνει τροφοδοτείται από τις υδροφορίες των αλλουβιακών προσχώσεων, κάποιοι ορίζοντες των οποίων απομονώνουν από το καρστικό σύστημα. Οι πιεζομετρικές κλίσεις στους ασβεστολίθους είναι απότομες και υποδεικνύουν αποστράγγιση προς τον Μέσο Ρου με μεγάλες τιμές μεταβιβαστικότητας. Από την άλλη πλευρά, στον Μέσο Ρου οι κλίσεις είναι πολύ πιο ήπιες και δείχνουν ομαλή ροή προς τον Κάτω Ρου.

Σε γενικές γραμμές, οι λιθολογικοί σχηματισμοί που συγκροτούν την περιοχή, κατά σειρά ηλικίας είναι οι ακόλουθοι:

- *Ανώτερο Παλαιοζωικό*. Περιλαμβάνει αργιλικούς – ψαμμιτικούς σχιστολίθους, γραουβάκες και κροκαλοπαγή, μεταξύ των οποίων παρεμβάλλονται βασικά πετρώματα και ενστρώσεις λεπτοπλακωδών ασβεστολίθων. Μεγάλη σχετικώς επιφανειακή ανάπτυξη παρουσιάζουν στην βόρεια βουνοπλαγιά του Χλωμού όρους, στην περιοχή της Αταλάντης, μάλλον ως συνέχεια της εκτεταμένης τους παρουσίας κάτω από τους σχηματισμούς του Τριαδικού (Παγούνης, 1994), όπως στην περίπτωση του Παύλου Βοιωτίας.
- *Μεσοζωικό*. Αντιπροσωπεύεται κατά κύριο λόγο από ασβεστολίθους και δολομίτες, και δευτερευόντως από φλύσχη, φλυσχοειδές και σχιστοψαμμιτοκερατολίθους. Οι δολομίτες παίζουν τον ρόλο στεγανού υποβάθρου και υπερκείμενοι αυτών είναι ασβεστόλιθοι έως και μεσοϊουρασικής ηλικίας. Το πάχος αυτού του πακέτου είναι 300-700 m. Ανάλογα με την γεωτεκτονική ζώνη, οι υπερκείμενοι σχηματισμοί είναι είτε καρστικοί ασβεστόλιθοι μαζί με οφιολιθικά σώματα (Καλλίδρομο, Χλωμός-Πτώο-Κτυπάς, Κωπαΐδα), είτε βωξιτοφόροι ασβεστόλιθοι (Παρνασσός, Ελικώνας). Οι πρώτοι έχουν πάχος της τάξεως των 200 m, ενώ οι δεύτεροι έχουν πάχη που κυμαίνονται από 100 m έως 300 m. Οι περιδοτίτες, οι σχηματισμοί της

σχιστοψαμμιτοκερατολιθικής διαπλάσεως με οφιολίθους και τα κροκαλοπαγή καταλαμβάνουν μικρότερες εκτάσεις, κυρίως στο ανατολικό τμήμα (π.χ. πυθμένας Υλίκης-Παραλίμνης), σε τμήμα του υποβάθρου της Κωπαΐδας, αλλά και σε άλλα βυθίσματα – μέσος και άνω Ρους, πεδιάδα Θηβών (Παγούνης, 1994). Ο φλύσχης αντιπροσωπεύεται από αργιλομαργαϊκούς σχιστολίθους, ψαμμίτες και κροκαλοπαγή, με ενστρώσεις και φακούς σχιστολίθων. Παρατηρείται τόσο στα ανατολικά τμήματα όσο και στην ζώνη Παρνασσού.

- *Νεογενές*. Παρουσιάζουν μεγάλη ανάπτυξη σε τμήματα της οροσειράς Καλλιδρόμου – Χλωμού όρους, στις περιοχές Μπράλλου, Δρυμαίας, Ελάτειας, Καλοποδίου, Κολάκας, Μαρτίνου κλπ. Ακόμα επεκτείνονται προς ΝΔ και περιλαμβάνουν τις λεκάνες Μπράλλου, Ελάτειας και Κωπαΐδας, κάτω από τις τεταρτογενείς αποθέσεις. Γενικά διακρίνονται σε 2 συστήματα: το κατώτερο σύστημα αντιπροσωπεύεται από εναλλασσόμενα στρώματα κροκαλοπαγών, αργίλων, ψαμμιτών, μαργών και μαργαϊκών ασβεστολίθων. Το πάχος του κυμαίνεται από 50-170 m. Στο ανώτερο σύστημα διακρίνονται κροκαλοπαγή, άργιλοι, πηλοί, εναλλασσόμενοι με ψαμμίτες και άμμους. Παρατηρούνται κατά τόπους σαν νησίδες στην ορεινή περιοχή Καλλιδρόμου-Χλωμού.

- *Τεταρτογενές*. Πρόκειται για αποθέσεις χειμάρων και κλειστών λεκανών, δηλαδή κροκαλοπαγή ανάμεικτα με λεπτόκοκκο υλικό (άμμους, αργίλους κλπ). Το πάχος τους δεν ξεπερνά τοπικά τα 30 m.

Κατά τον Παγούνη (1994), η γεωλογική-τεκτονική δομή της περιοχής χαρακτηρίζεται από την πτύχωση και την διάρρηξη των πετρωμάτων, αλλά και από την κλιμακωτή τοποθέτηση των διαφόρων τεμαχών κατά μήκος της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού. Οι πολλαπλές παρεμβολές των υδατοστεγανών σχηματισμών στα ασβεστολιθικά τεμάχη είχαν σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ποικίλων γεωμορφολογικών δομών και ειδικότερα την διαμόρφωση πολλαπλών υδρογεωλογικών ενοτήτων, οι οποίες μπορεί να είναι ανεξάρτητες ή και να επικοινωνούν μεταξύ τους.

Οι ασβεστόλιθοι αποτελούν τον κύριο γεωλογικό σχηματισμό της λεκάνης (~40% της έκτασης επιφάνειας), μέσα στον οποίο διαμορφώνονται

υδροφόροι ορίζοντες. Το συνηθέστερο μοντέλο είναι η ύπαρξη ανώτερου υδροφόρου ορίζοντα μέσα σε τεταρτογενείς αποθέσεις και νεογενή, καθώς και ενός κατώτερου (κυρίου) καρστικού υδροφόρου ορίζοντα μέσα σε ασβεστολίθους διαφόρων ηλικιών και τύπων. Σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί και η ανώτερη υδροφορία να φιλοξενείται σε ασβεστολίθους (επικεκρεμάμενη). Ο κύριος υδροφόρος είναι άλλοτε ελεύθερος, άλλοτε υπό πίεση. Η κατάσταση του εξαρτάται από το αν υπόκειται στεγανού στρώματος και αν έχει καλή τροφοδοσία από τα ανάντη. Σε πολλά σημεία της λεκάνης αναπτύσσονται πηγές υπερχειλίσεως διαφόρων δυναμικοτήτων (π.χ. Επτάλοφος, Πολύδροσο, Λιλαία, Μαυρονέρι κλπ).

Ιδιαίτερη μνεία πρέπει να γίνει στις υποθαλάσσιες και παράκτιες εκροές των καρστικών υδροφοριών. Αυτές που εδώ ενδιαφέρουν περισσότερο είναι του Κορινθιακού κόλπου. Είναι κυρίως διάσπαρτου τύπου και σε ελάχιστες θέσεις εμφανίζονται αξιόλογες σημειακές εκφορτίσεις (π.χ. Κύρρας, Ιτέας, Ζάλτσας, Αλυκής κλπ). Οι παροχές εμφανίζουν μεγάλες διακυμάνσεις κατά την διάρκεια του έτους και το μέτωπο υφαλμύρισης έχει προχωρήσει μέχρι και 15 km από την ακτή προς την ενδοχώρα.

Γεωφυσική έρευνα. Γεωφυσικές έρευνες στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης έδωσε τα ακόλουθα ενδεικτικά πάχη σχηματισμών (Παγούνης, 1994):

- Περιοχή Υψηλάντη – Πέτρα - Μάζι. Επιφανειακοί σχηματισμοί μικρού πάχους, φλύσσης, ασβεστόλιθοι σε βάθος μεγαλύτερο των 400 m.
- Περιοχή Βάγια. Αποθέσεις κατά τόπους έως 100 m. Μάργες με πάχη έως και 200 m. Καρστικοποιημένοι ασβεστόλιθοι από 400-600 m βάθος στο βόρειο τμήμα.
- Περιοχή Ελαιώνας-Άρμα. Αποθέσεις με πάχος από 300 m έως 350m. Υπέρκεινται ασβεστολίθων με άγνωστο πάχος.
- Περιοχή πεδιάδα Κωπαϊίδας. Στρώματα άμμων και κροκαλών σε βάθη 50m-260 m. Ενδιαφέρων καρστικός υπό πίεση υδροφόρος ορίζοντας σε βάθη 100-300 m, στις περιοχές Αλιάρτου, Πέτρας, Αγ.

Σπυρίδωνα, Χαιρώνειας κλπ. Γενικά, εκτός από ασβεστολίθους συναντώνται σχιστοκερατολιθικές διαπλάσεις και οφιόλιθοι.

- Περιοχή ορεινή Αγ. Τριάδα, Αγ. Άννα, Κυριάκι, Κολάκα. Πληρωμένο καρστ μέχρι τα 350 m βάθος.

Για την πενταετία 1984-1989 υπάρχουν αρκετά στοιχεία για την ένταση των αντλήσεων από τους υδροφόρους ορίζοντες της περιοχής. Αυτά δίνονται από τον Περλέρο (1998) ως ωριαίες τιμές παροχής και παρουσιάζονται στο παράρτημα. Είναι προφανές από τα μέγιστα και τα ελάχιστα ότι χρήση υπογείων νερών γίνεται μόνο κατά τους θερινούς μήνες, γι' αυτό και τους χειμερινούς η κατανάλωση είναι συνήθως μηδενική.

Η ύπαρξη σταθμομετρήσεων στους υδροφόρους ορίζοντες είναι ζωτικής σημασίας για την εφαρμογή ενός μοντέλου που περιλαμβάνει και υπόγεια νερά. Στην λεκάνη του Κηφισσού έχει γίνει άγνωστος αριθμός γεωτρήσεων και μόνο μερικές δεκάδες είναι καταγεγραμμένες με συστηματικό τρόπο. Για λίγες από αυτές και συγκεκριμένα για τις:

EAP3, EAP5, ΥΜΡΣ10, EMP10, EMP6, EMP22, ΚΡ2, ΜΡ2, ΑΚ4, ΧΡ4

διατίθενται πλήρεις χρονοσειρές, περιορισμένης όμως διάρκειας. Οι θέσεις αυτών φαίνονται στο χάρτη του σχήματος 14. Από τις γεωτρήσεις αυτές 2 βρίσκονται στην ενότητα του Άνω ρου, 4 σε αυτήν του Μέσου ρου και 4 σε αυτή του Κάτω ρου. Οι συστηματικές μετρήσεις ξεκινούν από Οκτώβριο του 1984 και φθάνουν έως Σεπτέμβριο του 1989 και οι τιμές δίνονται στο παράρτημα. Το διάστημα είναι αρκετά μικρό αλλά ικανοποιητικό για την ρύθμιση του μοντέλου.

Σε κάθε ενότητα κατασκευάσθηκε συνθετική χρονοσειρά για τις στάθμες από τις χρονοσειρές των αντιστοίχων γεωτρήσεων. Η κάθε τιμή προέκυπτε σαν αριθμητικός μέσος των τιμών των δύο, προκειμένου για τον Άνω ρου, ή των τεσσάρων, προκειμένου για τον Μέσο και τον Κάτω ρου, τιμών που διατίθενται. Σε περιπτώσεις προβληματικών τιμών έγινε εξομάλυνση. Ενδεικτικά δίνονται οι χρονοσειρές των γεωτρήσεων του Άνω ρου και η συνθετική χρονοσειρά που κατασκευάσθηκε για τις ανάγκες του μοντέλου 4Xcell, πριν και μετά την εξομάλυνση (πίνακας 2).

Πίνακας 2. Παρουσίαση χρονοσειρών στάθμης των τεσσάρων γεωτρήσεων στην ενότητα του Κάτω ρου και της τεχνητής χρονοσειράς που προέκυψε πριν και μετά την εξομάλυνση.

Έτος	μήνας	KP2	MP2	AK4	XP4	Μέσος Όρος	Εξομάλυμένη
		m	m	m	m	m	m
84	10	96.5	120.0	100.5	110.0	106.8	106.8
84	11	94.0	120.0	105.0	112.0	107.8	107.8
84	12	97.5	120.0	105.0	112.0	108.6	108.6
85	1	101.0	120.0	105.0	112.0	109.5	109.5
85	2	104.0	120.0	105.0	112.5	110.4	110.4
85	3	104.0	120.0	105.0	112.5	110.4	110.4
85	4	104.0	120.0	105.0	113.0	110.5	110.5
85	5	104.0	120.0	105.0	112.5	110.4	110.4
85	6	104.0	120.0	105.0	112.0	110.3	110.3
85	7	101.0	120.0	93.0	104.0	104.5	104.5
85	8	98.0	120.0	93.0	103.5	103.6	103.6
85	9	95.0	120.5	97.0	103.0	103.9	103.9
85	10	97.5	120.5	95.0	112.0	106.3	106.3
85	11	100.0	120.5	99.5	112.0	108.0	108.0
85	12	102.0	121.0	104.0	112.0	109.8	109.8
86	1	103.5	121.0	100.0	112.0	109.1	110.0
86	2	105.0	121.0	96.0	112.0	108.5	109.8
86	3	104.5	121.0	91.0	112.0	107.1	109.8
86	4	104.0	121.0	97.0	112.5	108.6	109.8
86	5	100.5	121.0	103.0	113.0	109.4	109.4
86	6	97.5	121.0	96.5	113.0	107.0	107.0
86	7	94.0	121.0	90.0	110.0	103.8	106.0
86	8	97.5	115.0	96.5	111.0	105.0	106.0
86	9	102.0	122.0	103.0	110.0	109.3	109.3
86	10	105.0	122.0	93.0	112.0	108.0	109.3
86	11	105.0	121.5	99.0	112.0	109.4	109.4
86	12	105.0	121.5	105.0	112.0	110.9	110.9
87	1	105.0	121.0	106.0	112.0	111.0	111.0
87	2	104.0	120.0	106.0	112.0	110.5	110.5
87	3	103.0	120.0	106.0	112.0	110.3	110.3
87	4	100.5	119.0	105.5	112.0	109.3	109.3
87	5	97.0	119.0	105.5	112.0	108.4	108.4
87	6	95.0	118.0	105.0	112.0	107.5	107.5
87	7	96.5	119.5	87.0	105.5	102.1	106.0
87	8	98.0	121.0	90.0	107.0	104.0	106.0
87	9	101.0	121.0	103.0	106.5	107.9	107.9
87	10	104.0	121.0	104.0	106.0	108.8	108.8
87	11	104.0	121.5	105.0	107.5	109.5	109.5
87	12	104.0	121.5	105.5	106.5	109.4	109.4
88	1	104.0	121.5	106.0	105.0	109.1	109.1
88	2	104.0	120.0	106.0	103.5	108.4	108.4
88	3	104.0	120.0	106.0	103.5	108.4	108.4
88	4	104.0	120.0	105.5	104.5	108.5	108.4
88	5	104.0	119.5	105.5	104.5	108.4	108.4
88	6	104.0	119.5	105.0	105.5	108.5	106.1
88	7	93.5	119.0	97.5	105.5	103.9	103.9
88	8	85.0	120.0	90.0	106.5	100.4	103.9
88	9	87.0	121.0	105.0	107.5	105.1	105.1
88	10	105.0	121.0	105.0	108.0	109.8	109.8
88	11	105.0	121.0	105.0	108.5	109.9	109.9
88	12	105.0	121.0	105.0	109.0	110.0	110.0
89	1	105.0	121.0	105.5	109.5	110.3	110.3
89	2	105.0	121.0	105.5	110.0	110.4	110.4
89	3	105.0	121.0	105.5	112.0	110.9	110.9
89	4	105.0	121.0	106.0	114.0	111.5	111.5
89	5	105.0	121.0	106.0	105.0	109.3	109.3
89	6	105.0	121.0	106.0	106.0	109.5	105.1

89	7	95.0	117.0	89.0	102.5	100.9	100.9
89	8	85.0	113.5	89.0	99.0	96.6	100.9
89	9	104.0	110.0	104.0	105.0	105.8	105.8

4.4. Υδρογεωλογικό μοντέλο πηγών Βοιωτικού Κηφισού.

Το Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. ανέθεσε σε ομάδα μελετητών (Περλέρος και συνεργάτες, 1998) την κατασκευή μοντέλου για την εις βάθος μελέτη της υδραυλικής συμπεριφοράς των πηγών και της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού. Αυτό το μοντέλο στηρίχθηκε στην προσομοίωση της υδροδυναμικής καταστάσεως μέσα από τον κώδικα MODFLOW της Αμερικανικής Υπηρεσίας Γεωλογικών Ερευνών, με χρήση του παραθυρικού συστήματος GMS 2.1, για εισαγωγή δεδομένων και λήψη αποτελεσμάτων. Το πρόγραμμα στηρίζεται στην αριθμητική επίλυση μιας κύριας διαφορικής εξίσωσης, η οποία προέρχεται από τον συνδυασμό εφαρμογής της εξισώσεως διατηρήσεως της μάζας και του νόμου του Darcy. Πρόκειται για πρόγραμμα που προσφέρει δύναμει τρισδιάστατη προσομοίωση υπόγειας ροής, με κώδικα πεπερασμένων διαφορών και επίλυση εξισώσεων στο κέντρο των κυψελίδων του καννάβου προσομοιώσεως.

Οι στόχοι του μοντέλου, σύμφωνα με τους μελετητές, ήταν οι ακόλουθοι:

1. Διακρίβωση-διερεύνηση των μηχανισμών ροής του υπογείου υδροφόρου συστήματος, όπως αυτοί έχουν προκύψει από τα αποτελέσματα των συμβατικών μεθόδων έρευνας που εφαρμόστηκαν, και αξιολόγηση της σημασίας κάθε μηχανισμού στην εξέλιξη του συστήματος.
2. Εξακρίβωση-διευκρίνιση της σχέσης τροφοδοσίας του υπό μελέτη συστήματος με την επιφανειακή απορροή.
3. Μελέτη επιπτώσεων και αξιολόγηση προτεινομένων εναλλακτικών σεναρίων διαχείρισεως, με σκοπό την εξασφάλιση του υπογείου δυναμικού και την βελτιστοποιημένη εκμετάλλευσή του.

Στην ουσία του, το μοντέλο αφορά την παραμετροποίηση και την οργάνωση των δεδομένων που διατίθενται για την περιοχή ενδιαφέροντος, ώστε να μπορούν να εισαχθούν στο μοντέλο MODFLOW, και να ληφθούν αποτελέσματα σχετικώς με τους προαναφερόμενους τομείς.

Η περιοχή ενδιαφέροντος είναι το κύριο τμήμα της υδρολογικής λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, όπως ορίζεται από τον υδροκρίτη της. Χαρακτηρίζεται δέ από επιμέρους τμήματα: Άνω ρους, Μέσος ρους, Κάτω ρους. Παράλληλα, εξετάζεται η υδραυλική σχέση της με τις παρακείμενες λεκάνες.

Το μοντέλο είναι πλήρως κατανεμημένο και χρησιμοποιεί κάρναβο για να χωρίσει την περιοχή σε στοιχειώδεις κυψελίδες. Η προσομοίωση μιας περιοχής στηρίζεται στην ταυτόχρονη επίλυση μιας ομάδας διαφορικών εξισώσεων για την κάθε στοιχειώδη κυψελίδα. Προς τούτο τίθενται αρχικές οριακές συνθήκες, τόσο στο εσωτερικό, όσο και στα όρια του πεδίου. Συχνά δημιουργούνται επηρεασμοί στα όρια του μοντέλου, που έχουν σαν αποτέλεσμα την μη ρεαλιστική απεικόνιση των πραγματικών συνθηκών λειτουργίας του υπό μελέτη συστήματος.

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης έγινε διάκριση συγκεκριμένων ζωνών υδροφορίας ή διακριτών υδροφόρων οριζόντων. Ακόμα, χρησιμοποιήθηκε τηλεσκοπικός κάρναβος, αραιότερος προς τα όρια της λεκάνης και πυκνότερος προς το εσωτερικό, όπου υπήρχε πληθώρα στοιχείων και ανάγκη για μεγαλύτερη ταχύτητα και ευστάθεια επίλυσης. Οι ακόλουθες τεχνικές χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση προβλημάτων κατά την εισαγωγή και επεξεργασία δεδομένων:

1. Σε περιπτώσεις πλευρικής τροφοδοσίας από κατείσδυση σε περιοχές εκτός μοντέλου, χρησιμοποιήθηκε συστοιχία από εικονικά πηγάδια εισπίεσεως. Πηγάδια (πραγματικά ή εικονικά) χρησιμοποιήθηκαν επίσης στην προσομοίωση σημείων αντλήσεων, εκφορτίσεων πηγών κλπ).

2. Οι υδραυλικές παράμετροι (υδαταγωγιμότητα, συντελεστές υδροχωρητικότητας) έπαιρναν τιμές που κατανέμονταν σε ζώνες μεταβαλλόμενου πάχους και βάθους καρστικοποίησης του συστήματος.

3. Για την αναπαράσταση της κατεισδυσης από βροχόπτωση, έγινε χρήση του πακέτου Recharge, που ενυπάρχει στο πακέτο. Για την προσομοίωση σε συνθήκες μεταβαλλόμενου υδατικού ισοζυγίου (transient state) θεωρήθηκε ότι: για τους θερινούς μήνες, οπότε οι τιμές της πραγματικής εξατμοδιαπνοής είναι υψηλές, συνθήκες κατεισδύσεως δημιουργούνται για τιμές άνω των 40mm ανά μήνα. Για τους χειμερινούς μήνες αφαιρέθηκε από την βροχόπτωση η πραγματική εξατμοδιαπνοή που προκύπτει από το υδρολογικό μοντέλο και θεωρήθηκε ότι κατεισδύει η εναπομένουσα ποσότητα σε ποσοστό 90%, 20% και 5% αντίστοιχα για τους ασβεστολίθους, τις προσχώσεις και τους αδιαπέρατους σχηματισμούς.

4. Για την υδραυλική επικοινωνία μεταξύ καρστ και ποταμού χρησιμοποιήθηκε το πακέτο River του προγράμματος και ορίστηκαν: συντελεστής αγωγιμότητας C, το απόλυτο υψόμετρο της κοίτης και η στάθμη του νερού στην κοίτη για κάθε περίοδο προσομοίωσης. Για τον υπολογισμό της στάθμης του ποταμού σε κάθε περίοδο και κυψελίδα του μοντέλου, ακολουθήθηκε διαδικασία συνθετικής παραγωγής χρονοσειρών.

Η κατανομή των τιμών των υδραυλικών παραμέτρων στην περιοχή που καλύπτει το μοντέλο έγινε κατά ζώνες, που ανταποκρίνονται σε περιοχές μεταβαλλόμενου πάχους και βαθμού καρστικοποίησης του συστήματος.

Η ρύθμιση του μοντέλου γίνεται στα στάδια: (α) Συνθήκες δυναμικά εξισορροπημένου υδατικού ισοζυγίου (dynamic steady state) και (β) Συνθήκες μεταβαλλόμενου υδατικού ισοζυγίου (transient state). Κατά την διαδικασία ρύθμισης κάθε σταδίου, η οποιαδήποτε επιφερόμενη αλλαγή από μεταβολή της τιμής κάποιας παραμέτρου εισαγόταν και στα προηγούμενα στάδια και ελεγχόταν η επίδρασή της σε αυτά. Σε περίπτωση χειροτερεύσεως των αποτελεσμάτων, οι λύσεις αυτές δεν γίνονταν δεκτές. Εξαιρέση στον κανόνα

αυτόν αποτελούσε το στάδιο ρυθμίσεως δυναμικής ισορροπίας, το οποίο παρουσιάζει αδυναμία να προσομοιάσει επακριβώς τους μηχανισμούς λειτουργίας ενός υδρογεωλογικού συστήματος.

Η ρύθμιση του μοντέλου έδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα:

(α) Η μέγιστη απόκλιση μετρηθείσας τιμής από την αντίστοιχη υπολογισθείσα από το μοντέλο τιμή είναι της τάξεως των 5 m, ενώ στα σημεία ιδιαίτερου ενδιαφέροντος (πηγές), η απόκλιση δεν ξεπερνά, κατά κανόνα, το 0.5-1.0 m. Ο έλεγχος των στοιχείων συνθέσεως του υδατικού ισοζυγίου είναι πολύ ικανοποιητικός, τόσο σε απόλυτες τιμές ποσότητας διακινουμένου νερού, όσο και ποιοτικά (σχέση τροφοδοσίας-εκφορτίσεως στις αναμενόμενες περιοχές).

(β) Από την μελέτη των υδρογραφημάτων στα σημεία ελέγχου, προκύπτει ότι το μοντέλο αναπαράγει επαρκώς την πιεζομετρία του υπό μελέτη συστήματος. Παρατηρείται δηλαδή ότι παρακολουθούνται με ικανοποιητική ακρίβεια τόσο οι τάσεις μεταβολής, όσο και οι διακυμάνσεις της πιεζομετρίας. Εξαίρεση αποτελούν οι ακραίες εποχιακές διακυμάνσεις οι οποίες οφείλονται σε τοπικού χαρακτήρα απολήψεις, σε περιόδους αιχμής ή και σε τοπικές μεταβολές των υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών του υπό μελέτη συστήματος.

(γ) Οι τιμές στις ζώνες μεταβιβαστικότητας T όπως προέκυψαν από την τελική ρύθμιση, τόσο στο στάδιο δυναμικής ισορροπίας, όσο και στο στάδιο μεταβαλλόμενης ροής έχουν ιδιαίτερος μεγάλο εύρος από 100 m²/d έως 34,000 m²/d. Η προοδευτική αύξηση από τα ανάντη προς τα κατόντη μπορεί να αποδοθεί είτε στην κατάσταση του καρστ, είτε στην ανάγκη του ίδιου του μοντέλου για μεταβίβαση μάζας προς τα κατόντη. Το καρστ όντως είναι ωριμότερο από την πλευρά της λίμνης Υλίκης, όμως δεν είναι λιγότερο ώριμο στα δυτικά, ενώ υπάρχουν και μεγάλες περιοχές στα ανατολικά με μικρή ανάπτυξη (Τέντες, 1999). Η ιδιότητα αυτή στην πραγματικότητα εξαρτάται από την κατανομή του κάθε είδους ασβεστολίθου στο υπέδαφος της λεκάνης. Παράλληλως, πιθανή αδυναμία του μοντέλου μπορεί να αποτελεί η συσσώρευση μεγάλων μαζών στα ανάντη, ή η αδυναμία κατανομής της βροχής σε υγρασία, κατείσδυση και απορροή.

Σύμφωνα με τους μελετητές: “από την μελέτη των υδρογραφημάτων στα σημεία ελέγχου, προκύπτει ότι το μοντέλο αναπαράγει επαρκώς την

πιεζομετρία του υπό μελέτη συστήματος. Παρατηρείται δηλαδή ότι το μοντέλο παρακολουθεί με ικανοποιητική ακρίβεια τόσο τις τάσεις μεταβολής, όσο και τις διακυμάνσεις της πιεζομετρίας. Εξαίρεση αποτελούν οι ακραίες εποχιακές διακυμάνσεις, οι οποίες οφείλονται σε τοπικού χαρακτήρα απολήψεις σε περιόδους αιχμής, ή/και σε τοπικές μεταβολές των υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών του υπό μελέτη συστήματος.... Σημαντικό στοιχείο εξάλλου του ελέγχου ποιότητας ρύθμισης του μοντέλου αποτελεί και το υδατικό ισοζύγιο που υπολογίσθηκε για όλη την έκτασή του και καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης. Από την μελέτη του ισοζυγίου που προέκυψε από την προσομοίωση προκύπτει ότι πέρα από την ικανοποιητική αναπαράσταση της πιεζομετρίας, το μοντέλο είναι σε θέση να αναπαράγει με επιτυχία και αποδεκτή ακρίβεια την ποσοτική σχέση υδραυλικής επικοινωνίας μεταξύ των πηγών, της βροχόπτωσης του ποταμού, των παρακειμένων υδρογεωλογικών ενοτήτων και των υδροληπτικών έργων με τον υδροφόρο.”

Το “υδρογεωλογικό μοντέλο πηγών Βοιωτικού Κηφισσού” αφορά μία εκτεταμένη περιοχή, την οποία φιλοδοξεί να μελετήσει με μεγάλη ακρίβεια. Είναι λοιπόν αυτονόητο πως η ποιότητα των αποτελεσμάτων είναι ανάλογη με την ύπαρξη μεγάλων και πλήρων χρονοσειρών. Τα αποτελέσματα κρίνονται ως ικανοποιητικά, αφού το μοντέλο ρυθμίστηκε με χρονοσειρές μόλις πέντε (5) ετών.

5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 4Xcell ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

5.1. Γενικά.

Ακολούθως περιγράφεται και αναλύεται λεπτομερώς η εφαρμογή του μοντέλου 4Xcell στην υδρολογική λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού ποταμού.

Η λεκάνη έχει χωριστεί σε τρεις ενότητες, ακολουθώντας την ορολογία της βιβλιογραφίας (Ναλμπάντης κ.α., 2000): Άνω ρους, Μέσος ρους και Κάτω ρους. Τα όρια κάθε ενότητας δίνονται στον χάρτη του σχήματος 14. Βασικό κριτήριο για την επιλογή των ορίων αυτών ήταν η ύπαρξη ζωνών αλλαγής της πιεζομετρικής κλίσεως του καρστικού υδροφόρου ορίζοντα, όπως αυτή αποτυπώνεται στους διαθέσιμους υδρογεωλογικούς χάρτες (Παγούνης κ.α., 1994) σαν στιγμιότυπο (βλ. παράρτημα).

Στην εφαρμογή του μοντέλου στην λεκάνη του Κηφισού, θεωρούνται κοινά χαρακτηριστικά και για τις τρεις δεξαμενές εδαφικής υγρασίας κάθε ενότητας, προκειμένου να μειωθούν οι παράμετροι του συστήματος.

Η ρύθμιση του μοντέλου έγινε με χρονοσειρές 5ετούς διάρκειας, ενώ επαλήθευση του μοντέλου έγινε μόνο για τις χρονοσειρές παροχής και όχι για αυτές της στάθμης, λόγω ελλείψεως συστηματικών σταθμομετρήσεων. Αν η ρύθμιση έγινε με δεδομένα περιορισμένα από ποσοτική άποψη, τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά.

5.2. Κατάστρωση του 4Xcell για την λεκάνη του βοιωτικού Κηφισού ποταμού.

Το μοντέλο 4Xcell έχει ως βασικό στόχο του την απλότητα στην κατάστρωση και την διαδικασία υπολογισμών. Για τον λόγο αυτόν αναζητήθηκε υπολογιστικό περιβάλλον φιλικό προς τον προγραμματιστή, αλλά και τον χρήστη. Το πιο απλό αλλά και πρακτικό αποφασίσθηκε ότι είναι το λογιστικό φύλλο (spreadsheet) Excel, της εταιρείας Microsoft. Αναπτύσσεται σε παραθυρικό περιβάλλον και έχει εύκολη ανταλλαγή δεδομένων με ομοειδή προγράμματα, αλλά και προγράμματα CAD ή GIS.

Η περιγραφή που ακολουθεί αφορά την εφαρμογή του μοντέλου 4Xcell στην υδρολογική λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, αλλά ταυτοχρόνως αποτελεί και

υπόδειγμα για οποιαδήποτε λεκάνη. Υπενθυμίζεται ότι η λεκάνη διαιρέθηκε σε τρεις ενότητες.

Για την κατάστρωση του μοντέλου στο Excel, περιβάλλον λογιστικού φύλλου (spreadsheet) για ηλεκτρονικό προσωπικό υπολογιστή, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα φύλλα. Για τις εξισώσεις του μαθηματικού μοντέλου t είναι ο αύξων αριθμός του βήματος το οποίο διανύεται και u, v μεταβλητές που σημαίνουν κάποιο κύτταρο.

Ιδιαίτερο προβληματισμό προκάλεσε η επιλογή του βήματος επιλύσεως. Η ύπαρξη μηνιαίων στοιχείων για την λεκάνη οδήγησε αρχικώς στην επιλογή μηνιαίου βήματος. Όμως κατά την φάση δοκιμής διαφόρων σταδίων του μοντέλου ξεχωριστά έγινε φανερό ότι το βήμα επέφερε απότομες μεταβολές στις στάθμες και τις παροχές, οδηγώντας σε αστάθεια. Προκειμένου να μην υπάρξει πρόβλημα στην σύγκλιση, έγινε φανερό ότι απαιτείται μικρότερο βήμα.

Η αρχική ιδέα ήταν να χρησιμοποιηθεί κώδικας στην γλώσσα Visual Basic, η οποία λειτουργεί σε περιβάλλον Excel, ώστε κάθε ποσότητα που αναφέρεται σε μηνιαίο βήμα να μπορεί να διαιρείται σε έναν αριθμό μικροτέρων βημάτων. Η αρχική ποσότητα θα μοιραζόταν, δηλαδή, σε k ίσες ποσότητες και οι υπολογισμοί θα γίνονταν με νέο βήμα $1/k$ μηνών (περίπου $30/k$ ημερών). Με αυτήν την μέθοδο η γραμμική μεταβολή από μία κατάσταση $F(x,y,z,...t)$ σε κατάσταση $F(x',y',z',... t+b)$, όπου b το αρχικό μηνιαίο βήμα, θα μετατρεπόταν σε μία σειρά από γραμμικές μεταβολές μικρότερου βήματος. Η συνολική νέα μεταβολή για k τέτοια μικρά βήματα θα προσεγγίζε περισσότερο την πραγματικότητα, όπως μία σειρά από μικρές χορδές προσεγγίζουν ένα τόξο κύκλου.

Το πρόβλημα ήταν ότι η χρήση έστω και του μικρότερου κώδικα για την εκτέλεση υπολογισμών καθιστούσε την διαδικασία επίλυσης του κάθε βήματος και του μοντέλου συνολικά εξαιρετικώς χρονοβόρα. Έτσι αποφασίστηκε ότι η απλούστερη λύση ήταν και η καλύτερη. Έγινε προεπιλογή του βήματος στο $1/10$ του μήνα και όλες οι τιμές βροχής, εξατμοδιαπνοής και αντλήσεων διαιρέθηκαν με το 10. Η περίοδος ρύθμισης του μοντέλου αποτελείτο πλέον από 600 και όχι 60 βήματα.

Στο πρώτο φύλλο γίνεται η αποθήκευση των μετρημένων τιμών για τα διάφορα υδρολογικά γεγονότα που περιλαμβάνονται στο μοντέλο. Δηλαδή σταθμομετρήσεις, υδρομετρήσεις, χρονοσειρές βροχής και δυναμικής εξατμισοδιαπνοής, αντλήσεις, όλες εκφρασμένες σε όγκους νερού (m^3). Εκεί γίνεται

και η επεξεργασία των δεδομένων αυτών, ώστε να αλλαχθεί το μηνιαίο βήμα στο προεπιλεγμένο 1/10 του μήνα. Δημιουργούνται παράλληλες χρονοσειρές των 600 στοιχείων.

Στο δεύτερο φύλλο καταστρώνεται το μοντέλο εδαφικής υγρασίας, όπως έχει περιγραφεί στο σχετικό κεφάλαιο. Στην αρχή δίνονται τα διανύσματα του όγκου της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας πάνω από καθένα από τα δώδεκα κύτταρα, $[K]_{1 \times 12}$ και του συντελεστή κατεισδύσεως κάθε κυττάρου, $[a]_{1 \times 12}$. Ακολούθως διαχωρίζονται πίνακες δώδεκα στηλών, όπου κάθε στήλη αντιστοιχεί και σε ένα κύτταρο του μοντέλου και έχει επικεφαλίδα τους κωδικούς 101-104, 201-204, 301-304. Οι κωδικοί που λήγουν σε 2 αφορούν κύτταρα πεδινών υδροφορέων και αυτοί που λήγουν σε 4 αφορούν τμήματα του ποταμού.

Ο πρώτος πίνακας τιτλοφορείται ΒΡΟΧΗ, $[P]_{600 \times 12}$, και αποτελεί αντίγραφο της χρονοσειράς της βροχοπτώσεως. Ο δεύτερος πίνακας τιτλοφορείται ΕΞΑΤΜΟΔΙΑΠΝΟΗ, $[ET]_{600 \times 12}$, και είναι αντίγραφο της χρονοσειράς της δυνητικής εξατμοδιαπνοής.

Ο τρίτος πίνακας τιτλοφορείται ΠΡΩΤΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ, $[S']_{600 \times 12}$, και λειτουργεί με μία εντολή τύπου IF...THEN...ELSE... και ελέγχει αν η ΕΞΑΤΜΟΔΙΑΠΝΟΗ είναι μικρότερη από την ΒΡΟΧΗ. Εάν ΝΑΙ τότε η ΠΡΩΤΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ είναι ίση με την ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ του προηγούμενου βήματος προσαυξημένη κατά την διαφορά της ΒΡΟΧΗΣ με την ΕΞΑΤΜΟΔΙΑΠΝΟΗ, μέχρι να γεμίσει η δεξαμενή και το υπόλοιπο χάνεται σαν απορροή. Εάν ΟΧΙ τότε η ΠΡΩΤΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ισούται με την προηγούμενη ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ πολλαπλασιασμένη με ένα εκθετικό εξαρτώμενο από την ΒΡΟΧΗ, την ΕΞΑΤΜΟΔΙΑΠΝΟΗ και την χωρητικότητα της αντίστοιχης δεξαμενής εδαφικής υγρασίας. Δηλαδή:

IF $P_{tu} > ET_{tu}$ THEN

$$S'_{tu} = \min(S''_{t-1,u} + P_{tu} - ET_{tu}, K_u)$$

ELSE

$$S'_{tu} = S''_{t-1,u} * \exp((P_{tu} - ET_{tu}) * K^{-1})$$

Ο επόμενος πίνακας τιλοφορείται ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ, $[S'']_{600 \times 12}$, και φιλοξενεί την τιμή της πραγματικής αποθηκείσεως, μετά την κατείσδυση προς τον υδροφόρο ορίζοντα. Κάθε στοιχείο του S''_{tu} προκύπτει από το αντίστοιχο στοιχείο του πίνακα S'_{tu} πολλαπλασιασμένο επί το ποσοστό της εδαφικής υγρασίας που απομένει και δεν κατεισδύει. Δηλαδή:

$$S''_{tu} = S'_{tu} * (1 - a_u)$$

Σε κάθε στήλη του πίνακα S'' πρώτη μπαίνει η επιλεγμένη αρχική τιμή ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΕΩΣ.

Ο πέμπτος πίνακας είναι η ΑΠΟΡΡΟΗ , $[Q]_{600 \times 12}$, προς το ποτάμι και λειτουργεί με εντολές IF...THEN...ELSE.... Εάν η ΒΡΟΧΗ είναι μεγαλύτερη από την ΕΞΑΤΜΟΔΙΑΠΝΟΗ, τότε η ΑΠΟΡΡΟΗ είναι ίση με το περίσσειμα βροχής (αν υπάρχει) μετά την πλήρωση της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας. Εάν ΟΧΙ τότε η ΑΠΟΡΡΟΗ είναι 0. Δηλαδή:

IF $P_{tu} > ET_{tu}$ THEN

$$Q_{tu} = \max (S''_{t-1,u} + P_{tu} - ET_{tu} - K_u , 0)$$

ELSE

$$Q_{tu} = 0$$

Ο τελευταίος πίνακας είναι η καθαρή ΚΑΤΕΙΣΔΥΣΗ, $[PE]_{600 \times 12}$, η οποία προκύπτει σαν διαφορά των δύο τιμών αποθηκείσεως του αυτού και του προηγούμενου βήματος. Συνεπώς:

$$PE_{tu} = \max (S''_{tu} - S''_{t-1,u})$$

Τελικώς, από το δεύτερο λογιστικό φύλλο ως έξοδοι λαμβάνονται η απορροή για κάθε τμήμα κοίτης και η κατείσδυση σε κάθε δεξαμενή.

Στο τρίτο φύλλο γίνεται η κατάστρωση του κυρίου σώματος του μοντέλου που περιλαμβάνει την εισαγωγή αρχικών συνθηκών και εισόδων, την κατάστρωση των εξισώσεων μεταφοράς μάζας, την λήψη των εξόδων (στάθμες, μηνιαίες παροχές ποταμών) καθώς και τον έλεγχο των τιμών και τον υπολογισμό των σχετικών σφαλμάτων.

Στις πρώτες θέσεις του φύλλου δίνονται τα διανύσματα:

1. των εκτάσεων των δώδεκα δεξαμενών $[A]_{1 \times 12}$, σε m^2 .
2. των μηκών των δώδεκα δεξαμενών $[L]_{1 \times 12}$, σε m.
3. του βάθους του καρστικού υποβάθρου $[HKARST]_{1 \times 12}$, σε m.
4. των αποστάσεων των δεξαμενών από την κοντινότερη ακτογραμμή $[SEA]_{1 \times 12}$, σε m.
5. των μεταβιβαστικότητων των δεξαμενών $[T]_{1 \times 12}$, σε $10m^2/month$
6. των αποθηκευτικότητων των δεξαμενών $[S]_{1 \times 12}$, αδιάστατων.
7. των λόγων ΛB_{12} , ΛN_{12} , ΛB_3 , ΛN_3 , αδιάστατων.

Ακόμα υπολογίζεται το διάνυσμα των πλατών των δεξαμενών $[W]_{1 \times 12}$, από την σχέση:

$$W_u = A_u * L_u^{-1}$$

Για βοηθητικούς σκοπούς καταστρώνεται ένα μητρώο συνδέσεων $[LINK]_{12 \times 12}$, όπου $LINK_{uv}$ είναι 1, αν το κύτταρο στην κεφαλίδα της στήλης v συνδέεται με το κύτταρο στην κεφαλίδα της γραμμής u , και είναι 0 στην αντίθετη περίπτωση (Πίνακας 3).

Πίνακας 3. Το μητρώο συνδέσεων του μοντέλου 4Xcell, όπως καταστρώθηκε στο λογιστικό φύλλο Excel για την υδρολογική λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού.

Links	101	102	103	104	201	202	203	204	301	302	303	304
101	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
102	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
103	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
104	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
201	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0
202	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0
203	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
204	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
301	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
302	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
303	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
304	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Βάσει του παραπάνω, κατασκευάζεται το μητρώο $[TXY]_{12 \times 12}$, που υπολογίζει τα στοιχεία TXY_{uv} βάσει της σχέσης του Bear (1979) που αναφέρεται στην παράγραφο 3.3, αν $LINK_{uv} = 1$, και θέτει $TXY_{uv} = 0$ αν $LINK_{uv} = 0$ (Πίνακας 4). Τα υπολογιζόμενα στοιχεία TXY_{uv} δίνουν την φαινόμενη μεταβιβαστικότητα μεταξύ των κελιών που αντιστοιχούν στην γραμμή u και την στήλη v , υπολογιζόμενη όπως έχει προειπωθεί στο οικείο κεφάλαιο. Η σχέση που επελέγη είναι αυτή του αριθμητικού μέσου για ίσου εμβαδού τετραγωνικά κύτταρα. Παρά την απόκλισή της από την πραγματικότητα, αφού η κάθετη απόσταση του κέντρου κάθε κυττάρου από την πλευρά του δεν είναι κοινή για όλα τα κύτταρα, κρίθηκε βολικότερη.

Επόμενο βήμα είναι η κατασκευή του πίνακα των συντελεστών για τον μετέπειτα υπολογισμό της μεταφοράς μάζας νερού μεταξύ γειτονικών κυττάρων, $[TWL]_{12 \times 12}$. Ισχύει :

$$TWL_{uv} = TXY_{uv} * \min(W_u, W_v) * \text{average}(L_u, L_v)^{-1},$$

εάν τα u και v εφάπτονται κατά το πλάτος τους ή

$$TWL_{uv} = TXY_{uv} * \min(L_u, L_v) * \text{average}(W_u, W_v)^{-1}, \text{ και}$$

$$TWL_{uv} = 0, \text{ αν } LINK_{uv} = 0$$

εάν τα u και v εφάπτονται κατά το μήκος τους. Η εντολή average εξασφαλίζει τον ορθό υπολογισμό της κεντρικής αποστάσεως των δύο κυττάρων, βασισμένο στο άθροισμα των μισών των πλευρών τους.

Πίνακας 4. Το μητρώο μεταβιβασιμότητας από κύτταρο σε κύτταρο του μοντέλου 4Xcell, όπως καταστρώθηκε στο λογιστικό φύλλο Excel για την υδρολογική λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού.

ΤΧΥ	101	102	103	104	201	202	203	204	301	302	303	304
101	0	1298	0	2595	792	0	0	0	0	0	0	0
102	0	0	1298	2595	0	792	0	0	0	0	0	0
103	0	0	0	2595	0	0	792	0	0	0	0	0
104	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
201	0	0	0	0	0	570	0	1139	953	0	0	0
202	0	0	0	0	0	0	570	1139	0	953	0	0
203	0	0	0	0	0	0	0	1139	0	0	953	0
204	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
301	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2915	0	5829
302	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2915	5829
303	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5829
304	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Διευκρινίζεται εδώ ότι κύτταρο u είναι το κύτταρο που τίθεται ως κεφαλίδα στην γραμμή u του πίνακα και κύτταρο είναι το κύτταρο που τίθεται ως επικεφαλίδα στην στήλη v .

Ακολούθως, ορίζονται πίνακες διαστάσεων 600x12, οι οποίοι αποτελούν και τα στοιχεία του ισοζυγίου. Αυτοί είναι:

1. πίνακας κατεισδύσεως [ΚΑΤΕΙΣΔΥΣΗ],
2. πίνακας αντλήσεων [PUMP],

3. πίνακας απορροών [ΑΠΟΡΡΟΗ],
4. πίνακας διαρροών [LEAK],
5. πίνακας μεταφορών [TRANSPORT],
6. πίνακας ισοζυγίου [ISO],

Οι πίνακες 1, 2, και 3 αποτελούν μεταφορά των αντιστοίχων πινάκων από τα δύο προηγούμενα φύλλα, οι δέ πίνακες 4, 5 και 6 υπολογίζονται.

Για τις διαρροές κάθε κυττάρου u χρησιμοποιείται το πιεζομετρικό φορτίο του κελιού από το προηγούμενο βήμα, η απόστασή του από την θάλασσα και η μεταβιβαστικότητα του. Οπότε:

$$LEAK_{tu} = T_u * L_u * H_{t-1,u} * SEA_u^{-1}$$

για όλα τα περιφερειακά κύτταρα εκτός των 102, 302 και επιπλέον

$$LEAK_{tu} = T_u * W_u * H_{t-1,u} * SEA_u^{-1},$$

για το 302, που έχει την θάλασσα στα κατάντη.

Για τις μεταφορές από το ένα κύτταρο στο άλλο γίνεται ένας σύνθετος υπολογισμός, μη τυποποιημένος σε αλγόριθμο, ο οποίος εφαρμόζει τον νόμο του Darcy για την επικοινωνία κάθε κελιού με όσα εφάπτονται με αυτό, κατά την παράλληλη ή κάθετη στην ροή του ποταμού διεύθυνση (βλέπε και το διάγραμμα ροής του μοντέλου). Οι σχετικοί τύποι γράφονται στις αντίστοιχες θέσεις του πίνακα μεταφορών και απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή στην σύνταξή τους. Ως τυπικό παράδειγμα αναφέρονται εδώ οι εξισώσεις για τα κύτταρα 301 και 204 (υδροφορέας και ποτάμι αντιστοίχως):

$$\begin{aligned} \text{TRANSPORT}_{301}^t &= \\ &= \text{TWL}_{301.302} * \Delta H_{301.302}^{t-1} + \text{TWL}_{301.201} * \Delta H_{301.201}^{t-1} - \\ &- \max [\text{TWL}_{301.304} * \Delta H_{301.304}^{t-1}, 0] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{TRANSPORT}_{204}^t = \max \{ & \min [\text{TWL}_{202,204} * \Delta H_{202,204}^{t-1}, 0] + \\ & \max [\text{TWL}_{201,204} * \Delta H_{201,204}^{t-1}, 0] + \\ & \max [\text{TWL}_{203,204} * \Delta H_{203,204}^{t-1}, 0] + \\ & \text{TRANSPORT}_{104}^t + Q_{204}^t, 0 \} \end{aligned}$$

Το ισοζύγιο προκύπτει από την άθροιση των αντίστοιχων στοιχείων προηγούμενων πινάκων και της τιμής του στο προηγούμενο χρονικό βήμα υπολογισμών. Δηλαδή:

$$\text{ISO}_{tu} = \text{PE}_{tu} + \text{PUMP}_{tu} + \text{LEAK}_{tu} + \text{TRANSPORT}_{tu} + \text{ISO}_{t-1,u}$$

για όλα τα κύτταρα πλην των 104, 204, 304 που αντιπροσωπεύουν τους ποταμούς, και για τα οποία ισχύει:

$$\text{ISO}_{tu} = \text{TRANSPORT}_{tu}$$

Η τιμή ISO_{tu} αντιπροσωπεύει την έξοδο του μοντέλου και είναι:

η ποσότητα νερού που βρίσκεται αποθηκευμένη στον υδροφορέα u την χρονική στιγμή $\beta * t$, όπου β είναι το χρονικό βήμα, για $u \neq \{104, 204, 304\}$ ή

η ποσότητα νερού που διένυσε το συγκεκριμένο τμήμα του ποταμού 104, 204 ή 304 κατά το χρονικό διάστημα $\{\beta * (t-1), \beta * t\}$.

Ακολουθως οι έξοδοι του μοντέλου ελέγχονται βάσει των παρατηρημένων μηνιαίων χρονοσειρών στάθμης και παροχής (των οποίων το βήμα μπορεί να είναι είτε ημερήσιο, είτε μηνιαίο, είτε εξαμηνιαίο, είτε, ελλείψει στοιχείων, και ετήσιο).

Κατασκευάζεται ο πίνακας $[H]$, όπου μετατρέπονται οι τιμές όγκου υπογείου νερού σε στάθμες, με την χρήση των διανυσμάτων εμβαδού $[A]$, βάθους της βάσεως του καρστ $[HKARST]$ και αποθηκευτικότητας $[S]$. Ισχύει:

$$H_{tu} = \text{HKARST}_u + \text{ISO}_{tu} * (A_u * S_u)^{-1}, \text{ για } u \neq \{104, 204, 304\}.$$

Ο έλεγχος είναι δυνατόν να γίνει μόνο στις στάθμες των πεδινών υδροφορέων, αφού μόνο εκεί υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία από γεωτρήσεις. Προκειμένου τα αποτελέσματα από την επίλυση των 600 βημάτων να μπορούν να ελεγχθούν βάσει των μετρημένων τιμών που ήταν σε μηνιαίο βήμα (60 βήματα μέσα στην περίοδο ρυθμίσεως), οι στάθμες λαμβάνονταν για έλεγχο κάθε 10 βήματα και οι όγκοι απορροής αθροίζονταν κάθε 10 βήματα. Η παραδοχή που έγινε για την τελευταία αυτή άθροιση παροχών, ήταν αυτή του εξαιρετικώς συντόμου χρονικού διαστήματος (τουλάχιστον <12h) για να διατρέξει μία σταγόνα όλο το τμήμα της κοίτης του Βοιωτικού Κηφισού, στην ενότητα όπου έπεσε. Μόνον με αυτήν την παραδοχή κάθε ένα από τα μικρά βήματα είναι ανεξάρτητο και δεν επηρεάζεται από το προηγούμενο. Έτσι στο φύλλο δημιουργούνται :

ο πίνακας [H.CALC]_{60x3}, για τις στάθμες, ο οποίος αντιπαρατίθεται με τον πίνακα [H.OBS]_{60x3} των παρατηρημένων σταθμών.

ο πίνακας [Q.CALC]_{60x3}, για τις τιμές παροχής των ποταμών, ο οποίος αντιπαρατίθεται με τον πίνακα [Q.OBS]_{60x3}, των παρατηρημένων παροχών.

Στο τρίτο φύλλο ακόμα υπολογίζονται τα σφάλματα των υπολογισμένων σε σχέση με τις παρατηρημένες τιμές. Ο υπολογισμός γίνεται με την μέθοδο του μέσου τετραγωνικού σφάλματος. Η αποθήκευση των σφαλμάτων γίνεται σε κατάλληλους πίνακες και τελικώς προκύπτουν: το μέσο τετραγωνικό (RMS) σφάλμα για κάθε χρονοσειρά ξεχωριστά, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα συνολικώς για τις στάθμες (F*) και για τις μηνιαίες παροχές (F**).

Το τέταρτο φύλλο είναι το μέσον επικοινωνίας του μοντέλου με τον χρήστη. Εκεί καταγράφονται αναλυτικώς οι προς βελτιστοποίηση παράμετροι, σε ξεχωριστές στήλες η μέγιστη και η ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή κάθε παραμέτρου και σε μία στήλη οι τιμές των παραμέτρων αυτών (πίνακας 5).

Ακόμα στο ίδιο φύλλο δίνονται τα σφάλματα κάθε χρονοσειράς, e_1, \dots, e_6 , οι συντελεστές βάρους στο σφάλμα κάθε χρονοσειράς, wf_1, \dots, wf_6 , το ζυγισμένο (σταθμισμένο) σφάλμα για τις στάθμες F*, το ζυγισμένο σφάλμα για τις παροχές F**, και υπολογίζεται η αντικειμενική συνάρτηση F.

Πίνακας 5. Καταγραφή των παραμέτρων προς βελτιστοποίηση στο μοντέλο 4Xcell, όπως καταστρώθηκε στο λογιστικό φύλλο Excel για την υδρολογική λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού. Δίνονται τα άνω και κάτω όρια διακυμάνσεώς τους.

Παράμετρος	Τιμή	Μέγιστο	Ελάχιστο
λ_{N12}		0.5	1.5
λ_{B12}		0.5	1.5
λ_{N3}		0.5	1.7
λ_{B3}		0.5	1.5
T_1		0.00001	100000
T_2		0.00001	100000
T_3		0.00001	100000
S_1		0.0001	0.1
S_2		0.0001	0.1
S_3		0.0001	0.1
Perc1		0	0.2
Perc2		0	0.2
Perc3		0	0.2
K_1		0.001	1
K_2		0.001	1
K_3		0.001	1

Η αντικειμενική συνάρτηση δίνεται από το άθροισμα:

$$F = \sum_{i=1}^n e_i * wf_i$$

Όπου οι συντελεστές βάρους μπορεί να είναι σταθεροί ή μεταβλητοί, ακόμα και να διαφέρουν από επίλυση σε επίλυση. Συνιστάται η χρήση μεταβλητών συντελεστών για την επίτευξη γρήγορης συγκλίσεως και σταθερών για την αξιολόγηση του αποτελέσματος (πίνακας 6).

Πίνακας 6. Καταγραφή του πίνακα σφαλμάτων, συντελεστών βάρους και της τιμής της αντικειμενικής συναρτήσεως στο μοντέλο 4Xcell, όπως καταστρώθηκε στο λογιστικό φύλλο Excel για την υδρολογική λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού.

Σφάλμα	RMS		Συντελεστές βάρους				
E	A	B	wf	D	E	H	J
μονάδες	m ²	m ²		-	m ²	-	m ²
e ₁		0.1	wf ₁			250000	
e ₂		0.2	wf ₂			150000	
e ₃		0.1	wf ₃			250000	
e ₄		400000	wf ₄			0.025	
e ₅		1000000	wf ₅			0.025	
e ₆		100000	wf ₆			0.050	
			Αντικειμενική F:				
						Κριτήριο C:	

Η στήλη A έχει προκύψει από τον υπολογισμό του μέσου τετραγωνικού σφάλματος κάθε χρονοσειράς (με συντελεστές βάρους στο σφάλμα των χαμηλών παροχών των ποταμών). Η στήλη B περιλαμβάνει υποθετικές τιμές σφάλματος με τις οποίες συγκρίνεται το αντίστοιχο υπολογιζόμενο σφάλμα της στήλης A. Στην στήλη D συμπληρώνονται οι επιθυμητοί συντελεστές βαρύτητας wf_i, για το σφάλμα κάθε παραγομένης χρονοσειράς. Στην στήλη D γίνεται ο υπολογισμός $E = A * D * B^{-1}$. Το άθροισμα όλων των στοιχείων της D δίνει την τιμή της αντικειμενικής συναρτήσεως. Στην στήλη H δίνονται οι κοινοί για όλες τις επιλύσεις του μοντέλου συντελεστές υπολογισμού του κριτηρίου C. Τέλος στην J υπολογίζονται τα $J = A * H$, των οποίων το άθροισμα δίνει την τιμή του κριτηρίου C.

5.3. Ρύθμιση του 4Xcell για την λεκάνη του βοιωτικού Κηφισού ποταμού.

Η μόνη χρονική περίοδος για την οποία διετίθεντο πλήρεις οι αναγκαίες χρονοσειρές εισόδου για την ρύθμιση του μοντέλου 4Xcell ήταν η περίοδος 1/10/1984 – 30/9/1989. Η πενταετία είναι βεβαίως ανεπαρκής για την σωστή βαθμονόμηση ενός μοντέλου, όμως οι παραδοχές που έγιναν σε συνδυασμό με τον

κατά το δυνατόν περιορισμό του αριθμού των παραμέτρων, δικαιολογούν την προσπάθεια που κατεβλήθη.

Από πλευράς λογισμικού, για την βελτιστοποίηση αρχικώς εξετάσθηκε ο εξελιγμένος επιλυτής και δη ο εξελικτικός αλγόριθμος. Δόθηκαν εντελώς τυχαίες αρχικές τιμές, με τους απαραίτητους περιορισμούς, αλλά ο αλγόριθμος έβρισκε το πρόβλημα πάρα πολύ περίπλοκο και δεν μπορούσε να προχωρήσει σε αναζήτηση λύσεως.

Ακολούθως δοκιμάστηκε ο μη γραμμικός αλγόριθμος. Το μειονέκτημα αυτού του αλγορίθμου έναντι του προηγούμενου είναι ότι δεν μπορεί να εντοπίσει ολικά ακρότατα της αντικειμενικής συναρτήσεως στον πολυδιάστατο χώρο, παρά μόνο τοπικά. Αυτό σημαίνει ότι οι αρχικές τιμές των παραμέτρων παίζουν σπουδαίο ρόλο στην λύση που τελικά θα δοθεί. Η εμπειρία του χρήστη συντελεί έτσι ουσιαστικά στην σύγκλιση και τις λαμβανόμενες τιμές παραμέτρων. Ο αλγόριθμος δούλεψε αποτελεσματικά, και η σύγκλιση επετεύχθη με λιγότερες από 1000 επαναλήψεις. Δοκιμάστηκαν διάφορες ομάδες αρχικών τιμών, τόσο για να φανεί πόσο κοντά στο ολικό βέλτιστο ήταν ο αλγόριθμος, όσο και για να συγκεντρωθούν διάφορες πιθανές λύσεις και να συγκριθούν μεταξύ τους, αφού τέτοια προβλήματα δεν επιλύονται ποτέ με μονοσήμαντο τρόπο.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, κατά την διάρκεια των ρυθμίσεων, έγιναν οι απαραίτητες διορθώσεις στις αρχικές τιμές εδαφικής υγρασίας, και ελέγχθηκαν σενάρια αυξήσεως ή περαιτέρω μειώσεως των παραμέτρων.

Προκειμένου να μεγαλώσει η ταχύτητα συγκλίσεως χρησιμοποιήθηκαν δύο τεχνικές. Πρώτα έγινε ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συναρτήσεως με βελτιστοποίηση των παραμέτρων κατά ομάδες. Δηλαδή, κάποιες τιμές παραμέτρων εκρατούντο σταθερές και ο αλγόριθμος δούλευε με τις υπόλοιπες· ακολούθως οι τελευταίες εκρατούντο σταθερές και ούτω καθεξής. Αργότερα, αντί των σταθερών συντελεστών βάρους wf , στον υπολογισμό της τιμής της αντικειμενικής συναρτήσεως χρησιμοποιήθηκαν μεταβλητοί συντελεστές wf' . Ο υπολογισμός καθενός για την παράμετρο X γινόταν βάσει της σχέσεως:

$$wf'_x = wf * X * K_x^{-1},$$

όπου K_x ήταν σταθερή τιμή, η οποία αφορούσε την μεταβλητή X , και η απόκλιση του X από αυτήν μεγάλωνε αναλογικά τον συντελεστή βάρους.

Παράλληλα, εξ αιτίας της διογκώσεως της βασικής απορροής μετά από λίγες επαναλήψεις και μέχρι την τελική σύγκλιση, ετέθη συντελεστής βάρους (ίσος με 10) στις τιμές μέσου τετραγωνικού σφάλματος κάθε παροχής κάτω από $3 \text{ hm}^3/\text{month}$. Έτσι η βασική απορροή και στις τρεις ενότητες δεν διογκώθηκε εις βάρος των αιχμών.

5.4. Αποτελέσματα του 4Xcell για την λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού ποταμού.

Μετά από βελτιστοποίηση με τον επιλυτή του Excel, καθώς και από δοκιμές ακραίων αρχικών τιμών, ομάδων τυχαίων αρχικών τιμών, καθώς και παράλογων σεναρίων, όπως π.χ. αποθηκευτικότητες κοντά στην μονάδα ή μηδενική κατέισδυση από την ζώνη εδαφικής υγρασίας, προέκυψαν διάφορες λύσεις για τις τιμές των παραμέτρων. Αποδείχθηκε δε, ότι επιλογή παραλόγων αρχικών τιμών εγκλώβιζε τον επιλυτή σε απαράδεκτες λύσεις, δηλαδή σε τοπικά βέλτιστες τιμές της αντικειμενικής συναρτήσεως που δεν είχαν φυσικό νόημα, αλλά και απείχαν πολύ από την βέλτιστη τιμή. Ακόμα σε κάθε επίλυση έγινε χρήση διαφόρων συντελεστών βάρους, προκειμένου να κατευθύνεται η επίλυση σε επιθυμητές περιοχές.

Κάποιες από τις λύσεις κρίθηκε ότι αξίζουν σχολιασμού, παρ' όλο που δεν έδωσαν την βέλτιστη τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση. Έτσι διάφορα σενάρια εξετάστηκαν και την σύγκρισή τους ορίσθηκαν δύο κριτήρια: ένα απόλυτο αριθμητικό κριτήριο C και ένα εμπειρικό κριτήριο G που έχει να κάνει με την ποιότητα της σύγκλισης.

Το πρώτο κριτήριο είναι η τιμή που παίρνει η αντικειμενική συνάρτηση στην συγκεκριμένη λύση που εξετάζεται. Εξ αιτίας του ότι κάθε λύση δεν έχει προκύψει με τους ίδιους συντελεστές βάρους για τον υπολογισμό της αντικειμενικής συναρτήσεως, τα αποτελέσματα δεν είναι αμέσως συγκρίσιμα. Γι' αυτό επελέγησαν συγκεκριμένοι συντελεστές βάρους βάσει των οποίων υπολογίζεται το C (πίνακας 6, στήλη D). Αυτοί οι συντελεστές πολλαπλασιάστηκαν με τις τιμές μέσου τετραγωνικού σφάλματος τις αντίστοιχης χρονοσειράς και το άθροισμα των αποτελεσμάτων δίνει την τιμή του C.

Μεγαλύτερη τιμή του κριτηρίου σημαίνει μεγαλύτερο άθροισμα μέσω των τετραγωνικών σφαλμάτων άρα μεγαλύτερη απόκλιση από την πραγματικότητα στους μηνιαίους όγκους νερού.

Το δεύτερο κριτήριο, το οποίο είναι αυτοσχέδιο και εμπειρικό, έχει να κάνει με την ικανότητα του μοντέλου να παράγει τις αιχμές μιας μετρημένης χρονοσειράς. Ορίζεται από τον λόγο:

$$G = S_M / T_M,$$

όπου: S_M είναι ο αριθμός των παραγομένων από το μοντέλο μεγίστων με αντιστοιχία στα μετρημένα και T_M είναι ο συνολικός αριθμός των μεγίστων της μετρημένης χρονοσειράς.

Όσο ο λόγος G πλησιάζει την μονάδα, τόσο πιο πιστά αποδίδει το μοντέλο την κύμανση των χρονοσειρών. Με αυτόν τον τρόπο, και χωρίς κανείς να ενδιαφέρεται για το πόσο κοντά σε απόλυτη τιμή είναι το παραγόμενο ακρότατο με το μετρημένο, δίνεται μία ένδειξη για την ευελιξία ή την ακαμψία των παραγομένων χρονοσειρών.

Τα αξιόλογα σενάρια που προέκυψαν ήταν δεκαπέντε (15), από τα οποία επελέγησαν τέσσερα (4), στο εξής αναφερόμενα ως Σ001, Σ002, Σ003 και Σ004 (βλ. πίνακα 7). Ακολουθώντας τα σενάρια εξετάζονται κατά ζεύγη προκειμένου να επιλεγεί το πλέον επιθυμητό.

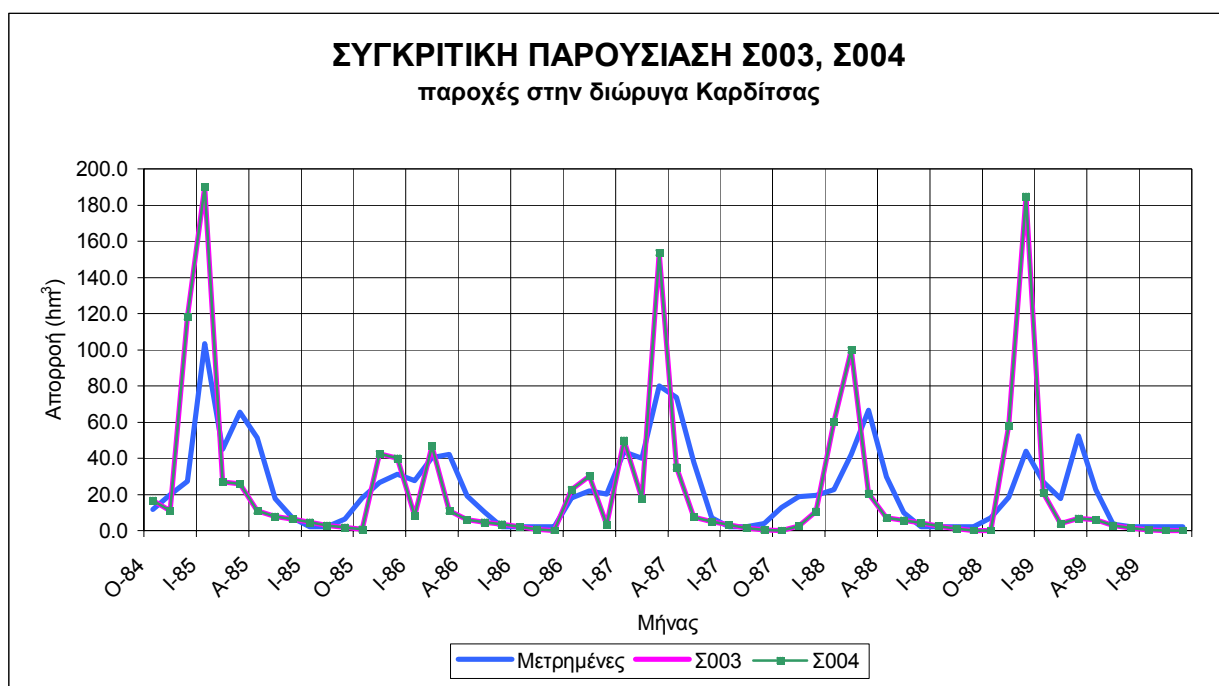
Τα σενάρια Σ001 και Σ003 δίνουν αποτελέσματα που μοιάζουν μεταξύ τους. Οι τιμές των συντελεστών λ και των υδραυλικών παραμέτρων T και S είναι ταυτόσημες. Οι υπόλοιπες, πλην των $Perc1$ και K_1 , κινούνται στην ίδια περιοχή, με μικρές αποκλίσεις. Η K_1 , είναι αρκετά διαφορετική και στο Σ001 είναι περίπου 50% μεγαλύτερη, ενώ η $Perc1$ 50% μικρότερη. Αυτό δημιουργεί και την διαφορά στις τιμές του κριτηρίου C . Ενώ η τιμή του κριτηρίου G είναι κοινή και για τα δύο (0.848), το Σ001 παρουσιάζει μικρότερη τιμή του C (444860 έναντι 517657), και από αυτής της απόψεως είναι προτιμητέο.

Πίνακας 7. Συγκριτική παρουσίαση των εναλλακτικών σεναρίων επιλύσεως του μοντέλου 4Xcell, περιλαμβάνονται οι τιμές των κριτηρίων C και G, καθώς και τις τιμές των παραμέτρων.

Παράμετρος	Μονάδες	Σ001	Σ002	Σ003	Σ004
λ_{N12}	-	1.158	1.185	1.095	1.120
λ_{B12}	-	0.851	0.608	0.937	0.722
λ_{N3}	-	0.901	0.921	0.916	0.892
λ_{B3}	-	1.359	1.350	1.370	1.412
T_1	m ² /month	12387	12387	12387	12190
T_2	m ² /month	4979	4979	4979	4381
T_3	m ² /month	30555	30555	30555	30437
S_1	-	0.049	0.023	0.027	0.028
S_2	-	0.009	0.009	0.009	0.009
S_3	-	0.010	0.009	0.010	0.010
Perc1	-	0.130	0.164	0.200	0.199
Perc2	-	0.011	0.010	0.013	0.013
Perc3	-	0.185	0.165	0.192	0.187
K_1	mm	289	427	200	295
K_2	mm	524	662	517	511
K_3	mm	227	261	220	226
e_1	m	0.258	0.171	0.375	0.180
e_2	m	0.178	0.178	0.316	0.175
e_3	m	0.244	0.245	0.250	0.246
e_4	m	1442223	1852359	1523207	1622490
e_5	m	2442425	1374404	2678766	1990812
e_6	m	3912225	2751849	4181618	3545687
wf_1	-				250000
wf_2	-				150000
wf_3	-				250000
wf_4	-				0.025
wf_5	-				0.025
wf_6	-				0.05
C	m	444860	348895	517657	400538
G	-	0.848	0.696	0.848	0.783

Το σενάριο Σ004 παρουσιάζει τιμή του κριτηρίου C σαφώς μικρότερη από τα δύο προηγούμενα (400538). Όμως έχει πολύ μικρότερη τιμή και στο κριτήριο G, μόλις 0.783. Σε σύγκριση των σεναρίων Σ003 και Σ004 (σχήμα 15), είναι εμφανής η αδυναμία του μοντέλου, και στις δύο περιπτώσεις, να ακολουθήσει την καμπύλη της παροχής.

Είναι σαφές ότι η βέλτιστη τιμή του κριτηρίου C (Σ002) και η βέλτιστη τιμή του G (Σ001) δεν αντιστοιχούν στο ίδιο σενάριο. Το απόλυτο αριθμητικό κριτήριο δεν συνεπάγεται και επιτυχήσση σύμπτωση μετρημένης και τεχνητής χρονοσειράς. Ο επιλυτής έχει την τάση να μειώσει το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, άλλοτε προσεγγίζοντας την πραγματική καμπύλη και άλλοτε εξομαλύνοντας τις αιχμές και μεγαλώνοντας τα ελάχιστα (π.χ. αύξηση παροχής των ποταμών το καλοκαίρι).



Σχήμα 15. Συγκριτικό γράφημα για τις μετρημένες και τις υπολογισμένες από τα σενάρια Σ003 και Σ004 παροχές της διώρυγας Καρδίτσας, όπως αυτές προέκυψαν από εναλλακτικές επιλύσεις του μοντέλου 4Xcell, για την υδρολογική λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού.

Είναι γεγονός ότι η ελαχιστοποίηση του σφάλματος είναι βασικό κριτήριο για την επιτυχία ενός μοντέλου και είναι αδιαμφισβήτητο ότι όσο μικρότερη είναι η

απόκλιση των υπολογισμένων τιμών από τις παρατηρημένες τόσο περισσότερο αξιόπιστα είναι τα αποτελέσματα και η λειτουργία του μοντέλου. Όμως, σε ένα ημι-κατανεμημένο μοντέλο, όπως είναι το 4Xcell, το ζητούμενο δεν είναι η ακριβής απεικόνιση των αιχμών (αυτό απαιτείται από κατανεμημένα και γενικώς πολυκλοκότερα μοντέλα), αλλά η απόκρισή του στα δεδομένα εισόδου, με τρόπο ανάλογο με αυτόν του φυσικού συστήματος. Συνδυάζοντας την κάλυψη αυτής της ανάγκης με το γεγονός της ικανοποιητικής συγκλίσεως στις περισσότερες αιχμές παροχής και την επίτευξη σημαντικής διακυμάνσεως στις στάθμες του υδροφόρου ορίζοντα (κάτι που ελέγχεται από τον χρήστη), το κριτήριο G αποτελεί ένα πρακτικό κριτήριο για την επιλογή, όχι της βέλτιστης, αλλά της ρεαλιστικότερης λύσεως.

Εξετάζοντας κανείς τα αποτελέσματα του σεναρίου Σ001, οδηγείται στα ακόλουθα συμπεράσματα:

(1)- Ζώνη εδαφικής υγρασίας.

Το πάχος της ζώνης εδαφικής υγρασίας είναι σημαντικό και ξεφεύγει από τα πρακτικά όρια που θέτει ο Brutsaert (Κουτσογιάννης - Ξανθόπουλος, 1997), και τα οποία ορίζουν ως συνηθέστερη ανώτερη τιμή τα 200 mm. Εδώ το πάχος στον Άνω ρου είναι κοντά στα 290 mm, στον Κάτω ρου στα 230mm, ενώ στον Μέσο ξεπερνά τα 520mm. Οι πραγματικές χωρητικότητες της ζώνης εδαφικής υγρασίας είναι:

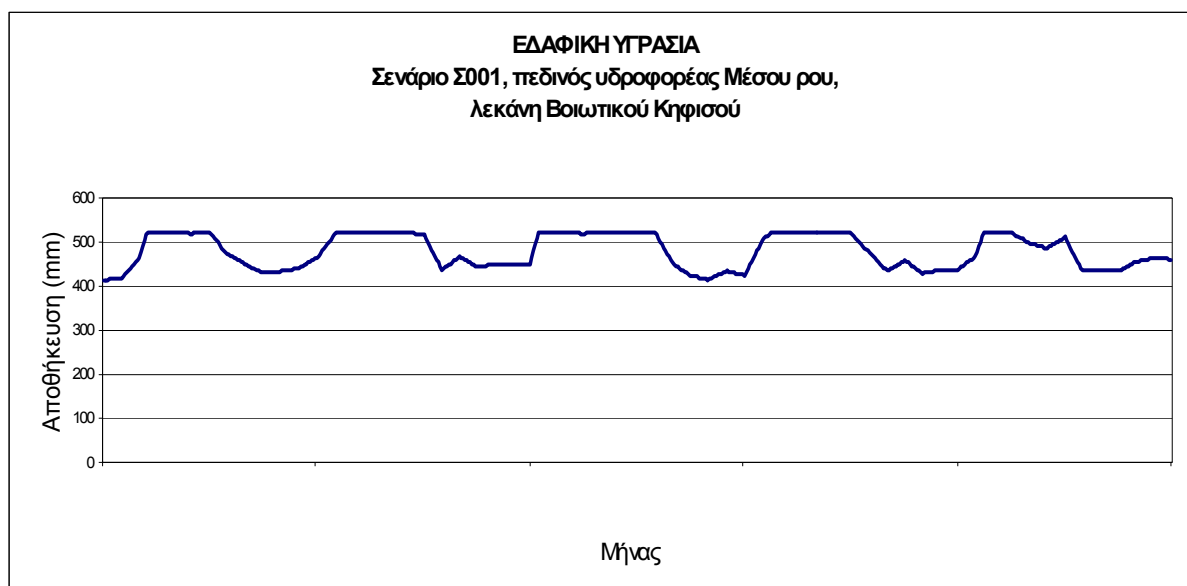
- 130 hm³/month για τον Άνω ρου,
- 239 hm³/month για τον Μέσο ρου,
- 256 hm³/month για τον Κάτω ρου,

δηλαδή η χωρητικότητα της περιοχής της λεκάνης της λίμνης Κωπαΐδας είναι συγκρίσιμη με αυτή του Μέσου ρου, αν και η έκταση της πρώτης είναι υπερδιπλάσια. Το γεγονός κρίνεται άνευ ουσιαστικής σημασίας διότι, στην λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, των καρστικών ασβεστολίθων υπέρκεινται διάφορα στρώματα, άλλα ιζηματογενή υδροπερατά, άλλα ημιπερατά, άλλα στεγανά (που συγκρατούν όμως ποσότητες νερού). Είναι φυσικό ότι η προκύπτουσα τιμή, που αποδίδει την μέση κατάσταση, δεν αποδίδει την αναμενόμενη εικόνα.

Οι ρυθμοί κατεισδύσεως τον κάθε μήνα ξεκινούν από 1.1%, φθάνουν έως 13.0% και κρίνονται ως μικροί. Η μικρότερη τιμή παρατηρείται στον Μέσο ρου και, συνδυαζόμενη με την μεγάλη χωρητικότητα του εδαφικού στρώματος, δημιουργεί μία

ζώνη εκτεταμένης αποθηκείσεως στο κέντρο της λεκάνης. Η μεγαλύτερη τιμή παρατηρείται στον Κάτω ρου και, σε συνδυασμό με την μικρή (βλ. παραπάνω) χωρητικότητα του εδαφικού στρώματος, υποδηλώνει μικρή κατακράτηση στην ανατολική λεκάνη. Βεβαίως, δεν λαμβάνεται υπ' όψιν ως κατείσδυση η ποσότητα που μένει σε τοπικούς αλλουβιακούς υδροφορείς, οι οποίοι αγνοούνται από το μοντέλο.

Η διακύμανση της εδαφικής υγρασίας όπως προκύπτει από την έξοδο του μοντέλου, για το κύτταρο 202, δίνεται ενδεικτικώς σε γράφημα (σχήμα 16). Είναι φανερή η περιοδική εκκένωση και επαναπλήρωση του εδαφικού στρώματος, με περίοδο ενός έτους, καθώς και η μόνιμη υγρασία που είναι της τάξεως των 97 hm^3 , ή 425 mm . Είναι γεγονός πως η τιμή της μόνιμης υγρασίας είναι μεγάλη και ασυνήθιστη, όμως το μοντέλο 4Xcell, από κατασκευής δεν λαμβάνει υπ' όψιν τους αλλουβιακούς υδροφορείς. Συνεπώς η ζώνη εδαφικής υγρασίας ουσιαστικά περιλαμβάνει και τους και τις υδροφορίες που φιλοξενούνται στα ιζήματα.



Σχήμα 16. Γράφημα που αποδίδει την διακύμανση της εδαφικής υγρασίας στο εδαφικό στρώμα του κυττάρου 202, όπως αυτή προέκυψε από το σενάριο Σ001 του μοντέλου 4Xcell, για την υδρολογική λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού.

(2)- Αρχικές στάθμες πλευρικών υδροφόρων.

Η στάθμη που έχουν οι πλευρικοί υδροφόροι ορίζοντες στην αρχή, δίνεται από τους λόγους λ. Αυτοί είναι 1.067 και 0.901, για τους νοτίους ορεινούς όγκους,

καθώς και 0.851 και 1.359 για του βορείους. Αυτό αναλυτικά σημαίνει ότι η πιεζομετρία ανυψώνεται ελαφρώς προς N, εκτός από την περιοχή του Κάτω ρου, όπου ταπεινώνεται. Αυτό σημαίνει ότι απώλειες προς N υπάρχουν παντού, απλώς στον Κάτω ρου το φαινόμενο είναι εντονότερο και η εκροή γίνεται και από τον καρστικό υδροφορέα της πεδιάδας της Κωπαΐδας.

Προς Β η πιεζομετρία είναι αρκετά χαμηλότερη απ' ότι στους κεντρικούς υδροφορείς και συνεχώς αφαιρεί ποσότητες υπογείων νερών από τις πεδιάδες Άνω και Μέσου ρου. Στον Κάτω ρου προκύπτει ιδιαίτερος υψηλή πιεζομετρία κάτι που δεν έχει φυσικό νόημα, όμως προφανώς εξυπηρετεί την επίλυση. Το σενάριο Σ002 δίνει τα ίδια ποιοτικώς αποτελέσματα, κάτι που αποδεικνύει ότι οι συσχετισμοί δεν είναι τυχαίο αποτέλεσμα της επιλύσεως, αλλά ενδεχομένως πηγάζουν από την φύση του μοντέλου και τον μηχανισμό «παραγωγής» των απωλειών.

(3)- Μεταβιβαστικότητες.

Οι μεταβιβαστικότητες σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι $12387 \text{ m}^2/\text{month}$, $4979 \text{ m}^2/\text{month}$ και $30555 \text{ m}^2/\text{month}$ για τις τρεις ενότητες από τα ανάντη προς τα κατόντη (ή 413, 166 και 1019 αντιστοίχως σε m^2/day). Η ενότητα του Μέσου ρου παρουσιάζει την μικρότερη μεταβιβαστικότητα, ενώ την μεγαλύτερη την παρουσιάζει αυτή του Κάτω ρου, πιθανώς λόγω του προχωρημένου καρστ. Και οι τρεις τιμές βρίσκονται στα, πολύ ευρέα ομολογουμένως, όρια που έδωσε το Υδρογεωλογικό μοντέλο πηγών του Βοιωτικού Κηφισού (Περλέρος κ.α., 1998), όμως η κατανομή τους δεν είναι η ίδια. Ούτως ή άλλως, είναι μόνον ενδεικτικές του μέσου όρου σε κάθε ενότητα και δεν έχουν καμμία αξία, αν εφαρμοστούν σε τοπικό επίπεδο.

(4)- Αποθηκευτικότητες.

Η αποθηκευτικότητα στο σενάριο Σ001 είναι μέσα στα φυσιολογικά όρια του καρστ (Καλλέργης, 1986), αφού δεν ξεπερνούν το 5%. Το ίδιο συμβαίνει και στα άλλα τέσσερα σενάρια. Υπενθυμίζεται εδώ ότι η αποθηκευτικότητα αυτή αφορά το τμήμα του καρστικού υδροφορέα που βρίσκεται πάνω από το μέσο επίπεδο της θάλασσας, και στο οποίο βασίστηκε η κατασκευή του μοντέλου 4Xcell. Η ρεαλιστικότητα του

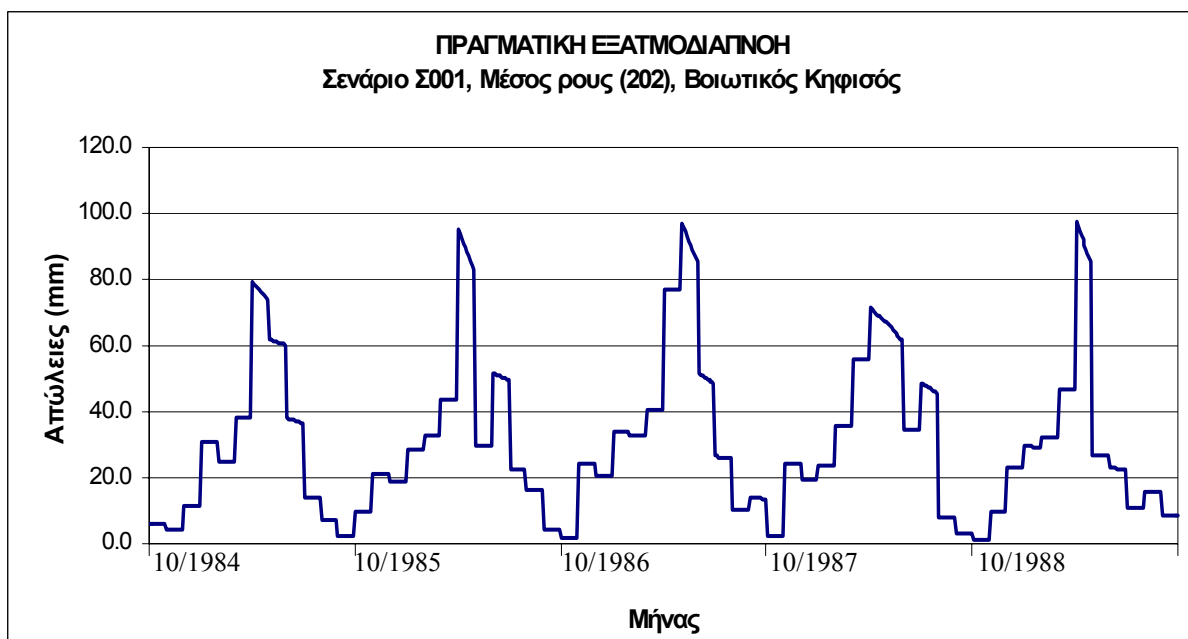
αποτελέσματος οφείλεται εν πολλοίς στα αυστηρά όρια που είχαν εξ αρχής τεθεί στον επιλυτή (μέγιστη τιμή 10%).

(5) - Έξοδος του μοντέλου 4Xcell

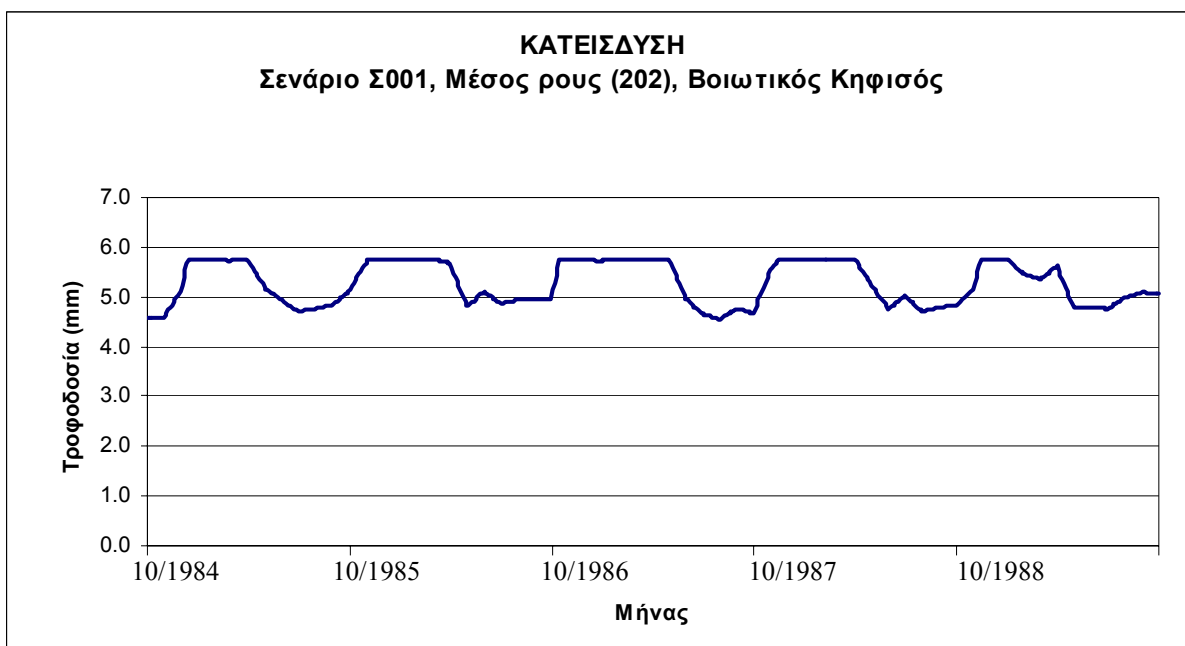
Η έξοδος του μοντέλου δίνει μία σειρά από μηνιαίες χρονοσειρές οι οποίες αφορούν:

- 1/. Την πραγματική εξατμοδιαπνοή (βλ. ενδεικτ. σχήμα 17). Οι τιμές της παρουσιάζουν ετήσια περιοδικότητα. Η μεγαλύτερη αιχμή της πραγματικής εξατμοδιαπνοής για το κύτταρο 202 είναι 21 hm^3 , ενώ η ελάχιστη τιμή 0.3 hm^3 , τους χειμερινούς μήνες. Οι αντίστοιχες τιμές για την δυνητική εξατμοδιαπνοή είναι 23 hm^3 και 0.3 hm^3 αντιστοίχως.
- 2/. Την διακύμανση της εδαφικής υγρασίας. Όπως φαίνεται και από το σχετικό γράφημα (βλ. ενδεικτ. σχήμα 16), η διακύμανση της εδαφικής υγρασίας είναι περιοδική μέσα στο έτος και στην συγκεκριμένη περίπτωση του κυττάρου 202 η μέγιστη είναι 120 hm^3 , η ελάχιστη 95 hm^3 και η μέση 110 hm^3 . Σε γενικές γραμμές οι τιμές της εδαφικής υγρασίας στους πεδινούς υδροφορείς παρουσιάζουν μικρές ανωμαλίες (π.χ. κύτταρο 302), λόγω της επιστροφής των αντλούμενων ποσοτήτων νερού.
- 3/. Την κατείσδυση προς κάθε κύτταρο υδροφορέα (βλ. ενδεικτ. σχήμα 18). Η μέγιστη κατείσδυση κάθε ενότητας συμβαίνει στην πεδιάδα. Έτσι στον Μέσο ρου έχουμε μέγιστη μηνιαία κατείσδυση περίπου 13 hm^3 , από τα οποία τα μισά περίπου κατεισδύουν στον πεδινό υδροφορέα (202).
- 4/. Τις διαρροές από κάθε ενότητα προς την θάλασσα. Ενδεικτικά δίνονται οι συνολικές διαρροές προς την θάλασσα (σχήμα 19), οι οποίες παρουσιάζουν ετήσια περιοδικότητα. Επειδή όμως είναι ευθέως ανάλογες με την στάθμη στον υπόγειο υδροφορέα, η τάση τους είναι να βαίνουν συνεχώς μειούμενες, κατά την διάρκεια της πενταετίας ρυθμίσεως. Η μέγιστη μηνιαία τιμή τους (στην αρχή της πενταετίας) είναι περίπου 32 hm^3 και στο τέλος αυτής 30 hm^3 . Η μείωση βεβαίως είναι αμελητέα σε σχέση με τις εκατοντάδες εκατομμύρια κυβικά που διακυνούνται κάθε μήνα.

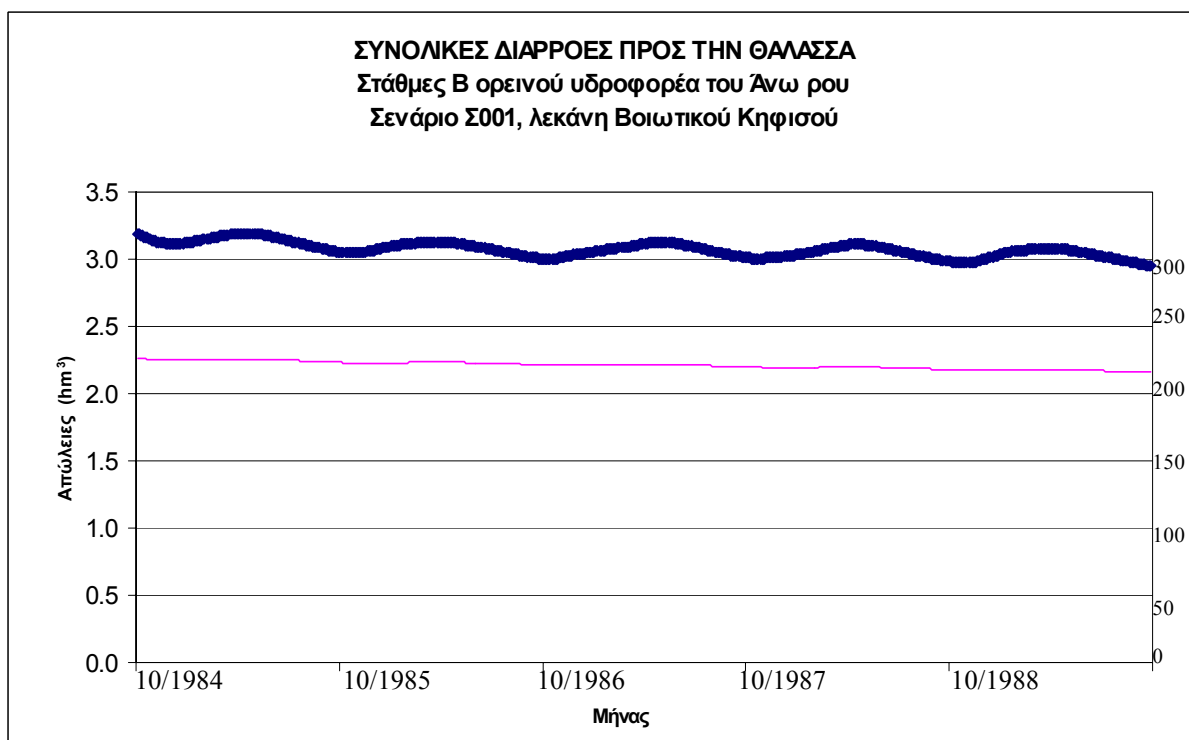
- 5/. Τις στάθμες του καρστικού υδροφορέα στην πεδιάδα κάθε ενότητας (βλ. ενδεικτ. σχήμα 20). Η προσέγγιση στις στάθμες είναι πολύ καθαρή στο παράδειγμα του κυττάρου 202. Η ετήσια διακύμανση παρουσιάζει αμελητέα υστέρηση σε σχέση με την παρατηρημένη χρονοσειρά. Συνολικώς στην λεκάνη το μέσο τετραγωνικό σφάλμα στο απόλυτο υψόμετρο στάθμης δεν ξεπερνά τα 26 cm.
- 6/. Την βασική απορροή και τις πλημμυρικές παροχές του ποταμού (βλ. ενδεικτ. σχήμα 21). Η απόκριση του μοντέλου στα δεδομένα εισόδου είναι αρκετά ικανοποιητική. Μόνο 1 στις 6 αιχμές παροχής δεν αποδίδεται από το μοντέλο, ενώ στις περισσότερες από τις αποδιδόμενες η τιμή αιχμής είναι πολύ κοντά στην μετρημένη. Η βασική απορροή, η οποία είναι αναπόφευκτη στο μοντέλο αυτό, δεν επηρεάζει σημαντικά την γενική εικόνα.



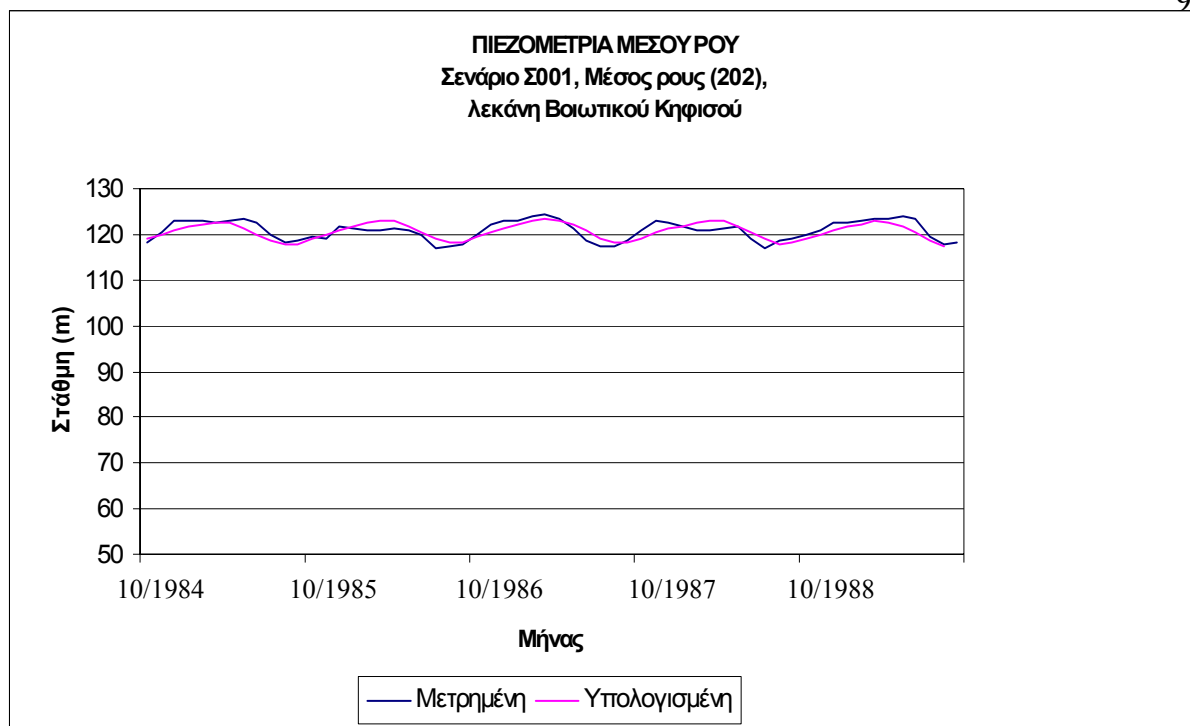
Σχήμα 17. Διακύμανση της πραγματικής εξατμοδιαπνοής, στο κύτταρο 202, όπως προέκυψε από το σενάριο Σ001 του μοντέλου 4Xcell, για την υδρολογική λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού.



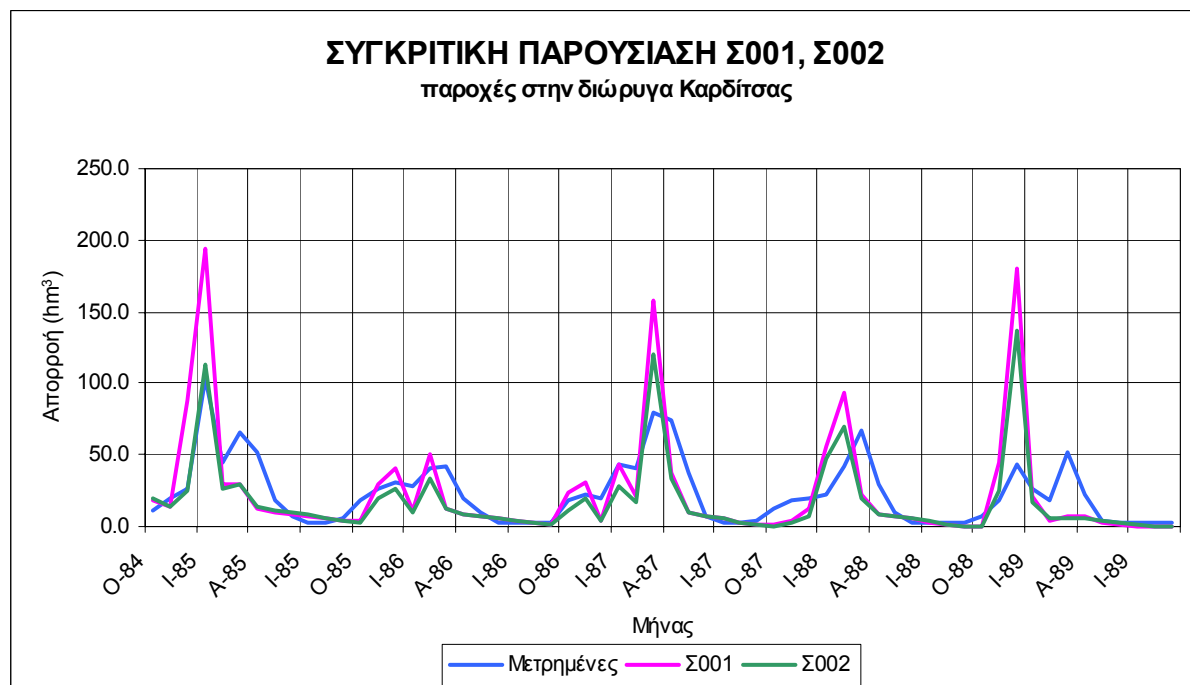
Σχήμα 18. Διακύμανση της κατεισδύσεως, στο κύτταρο 202, όπως προέκυψε από το σενάριο Σ001 του μοντέλου 4Xcell, για την υδρολογική λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού.



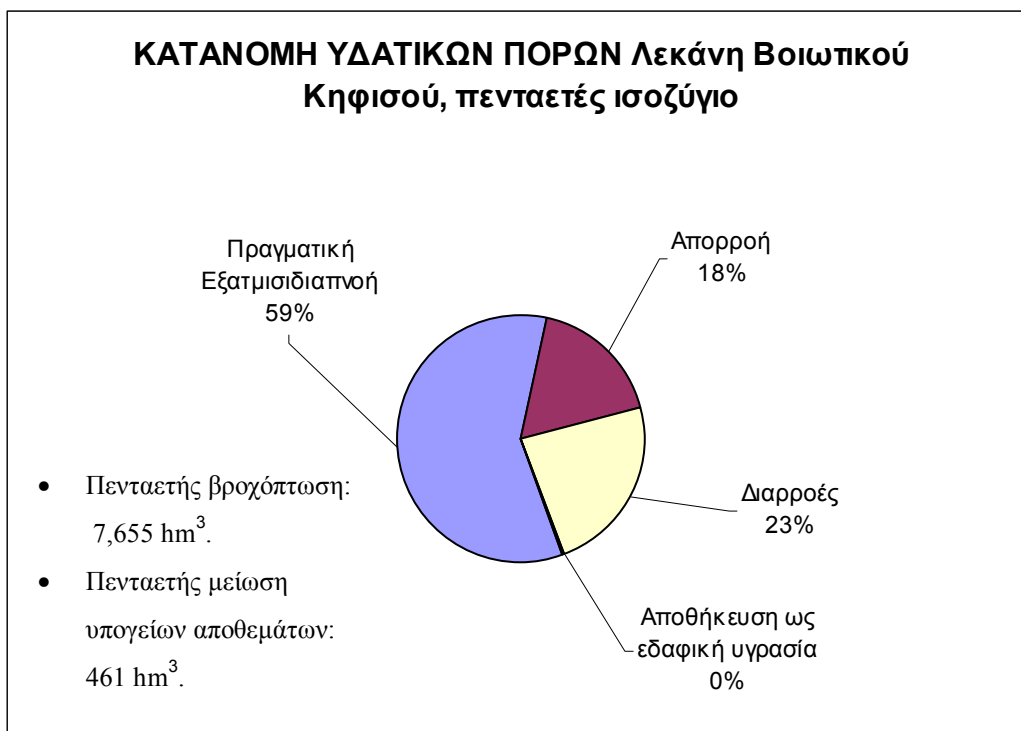
Σχήμα 19. Διακύμανση των συνολικών μηνιαίων διαρροών προς την θάλασσα, όπως προέκυψαν από το σενάριο Σ002 του μοντέλου 4Xcell, για την υδρολογική λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού. Με μπλε γραμμή δίνονται οι απώλειες και με κόκκινη γραμμή δίνεται ενδεικτικώς η αντίστοιχη διακύμανση της στάθμης σε πλευρικό υδροφορέα.



Σχήμα 20. Διακύμανση της μετρημένης και της υπολογισμένης στάθμης, στο κύτταρο 202, όπως η τελευταία προέκυψε από το σενάριο Σ001 του μοντέλου 4Xcell, για την υδρολογική λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού.



Σχήμα 21. Διακύμανση της μετρημένης και της υπολογισμένης παροχής στην διώρυγα της Καρδίτσας, όπως η τελευταία προέκυψε από τα σενάρια Σ001 και Σ002 του μοντέλου 4Xcell, για την υδρολογική λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού.



Σχήμα 22. Σχηματική αναπαράσταση της κατανομής των υδατικών πόρων στην λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, όπως προέκυψαν από το σενάριο Σ001 του μοντέλου 4Xcell.

(6) – Ετήσιο υδατικό ισοζύγιο

Η σύνταξη του ετησίου και του υπερετησίου υδατικού ισοζυγίου είναι ο τελικός σκοπός της δημιουργίας του ημι-κατανεμημένου μοντέλου 4Xcell. Οι συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου (πίνακας 8) είναι η βροχή, η απορροή, η πραγματική εξατμοδιαπνοή, η μεταβολή της αποθηκεύσεως στον υδροφορέα, η μεταβολή της αποθήκευσης στην ζώνη εδαφικής υγρασίας και οι διαρροές προς την θάλασσα.

Οι υδατικοί πόροι μοιράζονται άνισα στο μέρη του συστήματος (σχήμα 22). Η απόδοση του 60% περίπου του νερού στην εξατμοδιαπνοή είναι αναμενόμενο ποσοστό για τα ελληνικά κλίματα (Κουτσογιάννης – Ξανθόπουλος, 1997). Το ποσοστό 18% για την επιφανειακή απορροή είναι αρκετά μικρό. Πρέπει δε να ληφθεί υπ' όψιν ότι αναφέρεται στο όχι μόνο στην βροχή αλλά και στην μεταβολή της υπόγειας αποθηκεύσεως. Ακόμα, 23% της των διαθέσιμων ποσοτήτων (βροχής και αποληψίμων υπογείων νερών) καταλήγει στην θάλασσα, ποσοστό αρκετά σημαντικό. Άξιο λόγου είναι το γεγονός ότι η αποθήκευση στον υπόγειο υδροφορέα μειώνεται 5% - 10% ετησίως, ενώ η αποθήκευση στην ζώνη εδαφικής υγρασίας σε πενταετή

βάση μένει αμετάβλητη. Η τελευταία πρατήρηση λαμβάνει υπ' όψιν μόνο τα αποτελέσματα και όχι την παραδοχή ότι η ζώνη αυτή δεν υφίσταται άντληση.

Πίνακας 8. Οι υδρολογικές συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου όπως προέκυψε από την τελική λύση του μοντέλου 4Xcell για την λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, σε ετήσια και υπερετήσια βάση.

Περίοδος	10/1984- 9/1985	10/1985- 9/1986	10/1986- 9/1987	10/1987- 9/1988	10/1988- 9/1989	10/1984- 9/1989
	1ο	2ο	3ο	4ο	5ο	Μέσος Όρος
Μονάδα	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³
Βροχή	1536	1380	1770	1492	1477	1531
Πραγμ. ΕΤ	-850	-958	-1126	-970	-909	-963
Απορροή	-419	-178	-343	-216	-271	-286
Διαρροές	-377	-370	-368	-366	-363	-369
Διαφ. Αποθηκεύσεως Ζ.Ε.Υ	-55	25	15	-14	-5	-6
Διαφ. Αποθηκεύσεως Υ.Ο	165	100	51	74	72	92
Σύνολο	0	0	0	0	0	0

5.5. Επαλήθευση του μοντέλου 4Xcell στην λεκάνη Βοιωτικού Κηφισού.

Μία από τις σημαντικότερες φάσεις κατά την κατασκευή ενός μοντέλου είναι η επαλήθευσή του, δηλαδή η επιβεβαίωση ότι αναπαριστά με επάρκεια την κατάσταση του υδρολογικού κύκλου στο σύστημα. Ο έλεγχος γίνεται με εφαρμογή στην είσοδο χρονοσειρών κάποιας περιόδου διαφορετικής από την περίοδο βαθμονομήσεως του μοντέλου.

Για την ρύθμιση του μοντέλου 4Xcell στην λεκάνη βοιωτικού Κηφισού χρησιμοποιήθηκαν χρονοσειρές της μοναδικής περιόδου για την οποία υπάρχει πληρότητα στην πληροφορία. Όλες τις άλλες περιόδους, ελλείπουν στοιχεία για την στάθμη του υπογείου καρστικού υδροφορέα. Παρ' όλη την δυσχέρεια, η επαλήθευση έγινε με δεδομένα εισόδου τις μηνιαίες χρονοσειρές βροχοπτώσεως και δυνητικής εξατμοδιαπνοής και δεδομένα ελέγχου την μηνιαία χρονοσειρά παροχής της διώρυγας της Καρδίτσας από 10/1967 έως 9/1987, χωρισμένα σε πενταετίες. Λόγω ελλείψεως δεδομένων για τις αντλήσεις, χρησιμοποιήθηκε η μηνιαία χρονοσειρά της

περιόδου 1/10/1984 – 30/9/1989, ξεκινώντας από 10/1967 και επαναλαμβανόμενη ανά 5 έτη. Ο έλεγχος βασίστηκε αφ' ενός στην σύγκριση της χρονοσειράς παροχής της ενότητας του Κάτω ρου με αυτήν της Καρδίτσας και αφ' ετέρου στην αληθοφάνεια των άλλων χρονοσειρών εξόδου, δηλαδή της εδαφικής υγρασίας και της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα.

Αποφασίσθηκε να γίνει επαλήθευση τόσο του σεναρίου Σ001, όσο και του Σ003, αφού αντιπροσωπεύουν τις δύο διαφορετικές φιλοσοφίες προσεγγίσεως της προσομοιώσεως. Ως μέτρο της ποιότητας της συγκλίσεως χρησιμοποιείται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα στις παροχές εξόδου της διώρυγας Καρδίτσας (πίνακας 9). Στο σχήμα 23 δίνονται οι μετρημένες και οι υπολογισμένες τιμές μηνιαίας παροχής και στα σχήματα 24 και 25 οι υπολογισμένες στάθμες του υδροφορέα και η υπολογισμένη διακύμανση της εδαφικής υγρασίας αντιστοίχως, στο κύτταρο 202 (πεδιάδα Μέσου ρου) την περίοδο 10/1972 –9/1977.

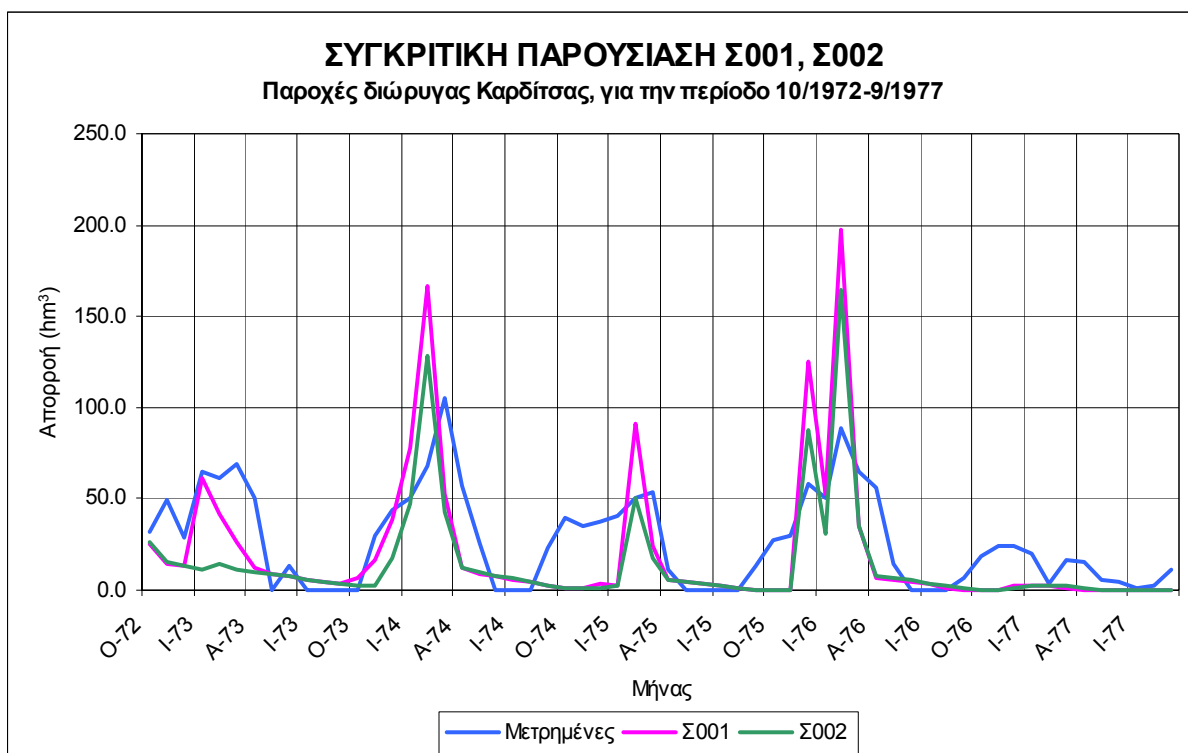
Στις χρονοσειρές παροχών διακρίνεται η επιτυχία του μοντέλου στο να αναπαραστήσει συνεχόμενες αιχμές. Στην περίπτωση του σεναρίου Σ002, το οποίο άλλωστε έχει την μεγαλύτερη αριθμητική ακρίβεια, στην αναπαράσταση των αιχμών παρατηρείται ικανοποιητική σύμπτωση, τόσο ως προς την τιμή αιχμής όσο και ως προς την χρονική στιγμή επισυμβάσεως αυτής, παρ' όλη την αδράνεια που εμφανίζει το σύστημα. Το σφάλμα είναι ελαφρώς μικρότερο από αυτό του σεναρίου Σ001 (3,648,151 έναντι 3,959,162), όμως μεγαλύτερο από το σφάλμα στην περίοδο ρυθμίσεως (2,751,849). Αντιθέτως το Σ001 δίνει σφάλμα συγκρίσιμο με αυτό της περιόδου ρυθμίσεως (3,912,225).

Το μειονέκτημα του Σ002, έναντι του Σ001, είναι η λιγότερο ρεαλιστική προσομοίωση των παροχών εξόδου στον Άνω ρου. Η διαφορά στις στάθμες εντοπίζεται μόνο στην μέση τιμή, η οποία βρίσκεται περίπου στα 120 m, για το Σ001 και στα 114 m, για το Σ002, ενώ η ετήσια διακύμανση αποδίδεται πιστά και από τα δύο σενάρια. Η διακύμανση στην εδαφική υγρασία παρουσιάζει κανονικές και όχι ανώμαλες διακυμάνσεις, και μάλιστα με χαμηλότερα επίπεδα κοντινά στις αρχικές τιμές. Αποδεικνύεται ότι η ρύθμιση της εδαφικής υγρασίας και της αρχικής της τιμής την 1/10/1984 ήταν ορθή. Η διαφορά της τάξεως των 30,000,000 m³ μηνιαίως (+25%) είναι φυσική συνέπεια των διαφορετικών τιμών των παραμέτρων της ζώνης εδαφικής υγρασίας στις δύο περιπτώσεις.

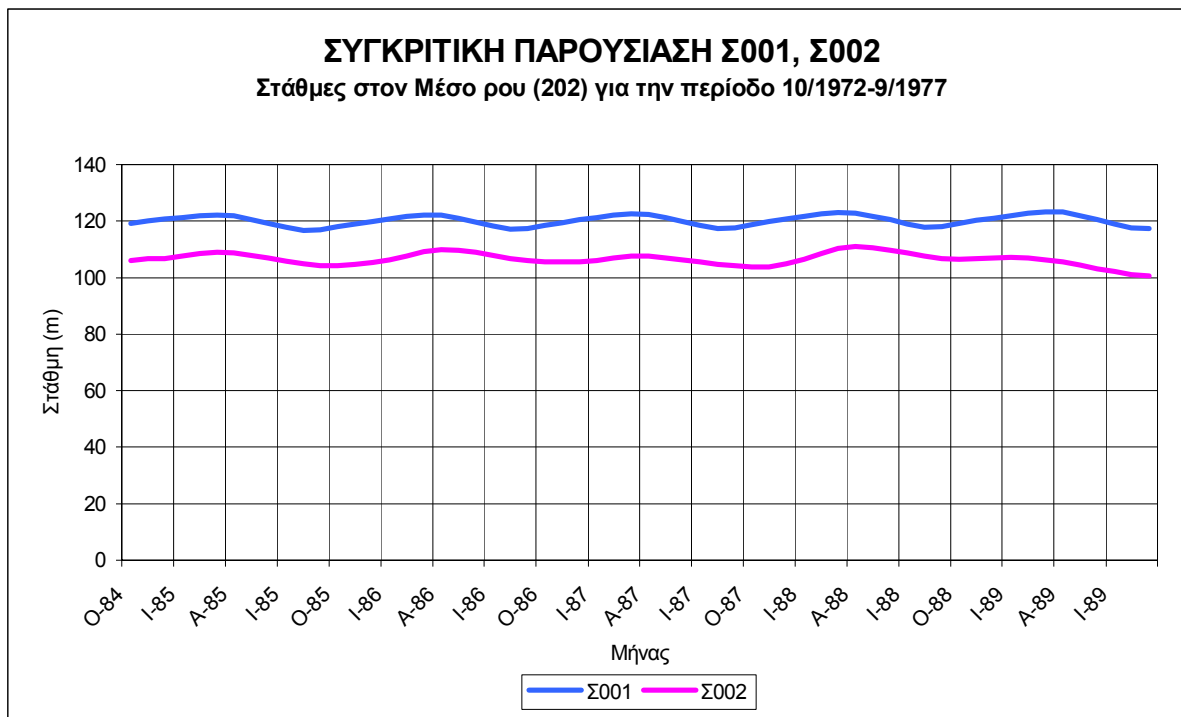
Σε γενικές γραμμές, είναι φανερό ότι η πενταετής περίοδος ρυθμίσεως δεν επαρκεί πλήρως για την ρύθμιση του μοντέλου. Οι διάφορες τάσεις στις μετρημένες χρονοσειρές εξόδου δεν μπορούν να αναπαρασταθούν σωστά από τις συνθετικές χρονοσειρές. Όμως, το γεγονός ότι τα αποτελέσματα είναι ρεαλιστικά, και ότι γίνεται σωστή αναπαράσταση του φυσικού συστήματος, έστω και ελλιπής, δείχνει ότι το μοντέλο αποδίδει.

Πίνακας 9. Τιμές του μέσου τετραγωνικού σφάλματος στις παροχές Καρδίτσας για την περίοδο ρυθμίσεως και την επαλήθευση σε 3 πενταετίες, βάσει των σεναρίων Σ001, Σ002 του μοντέλου 4Xcell, για την υδρολογική λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού.

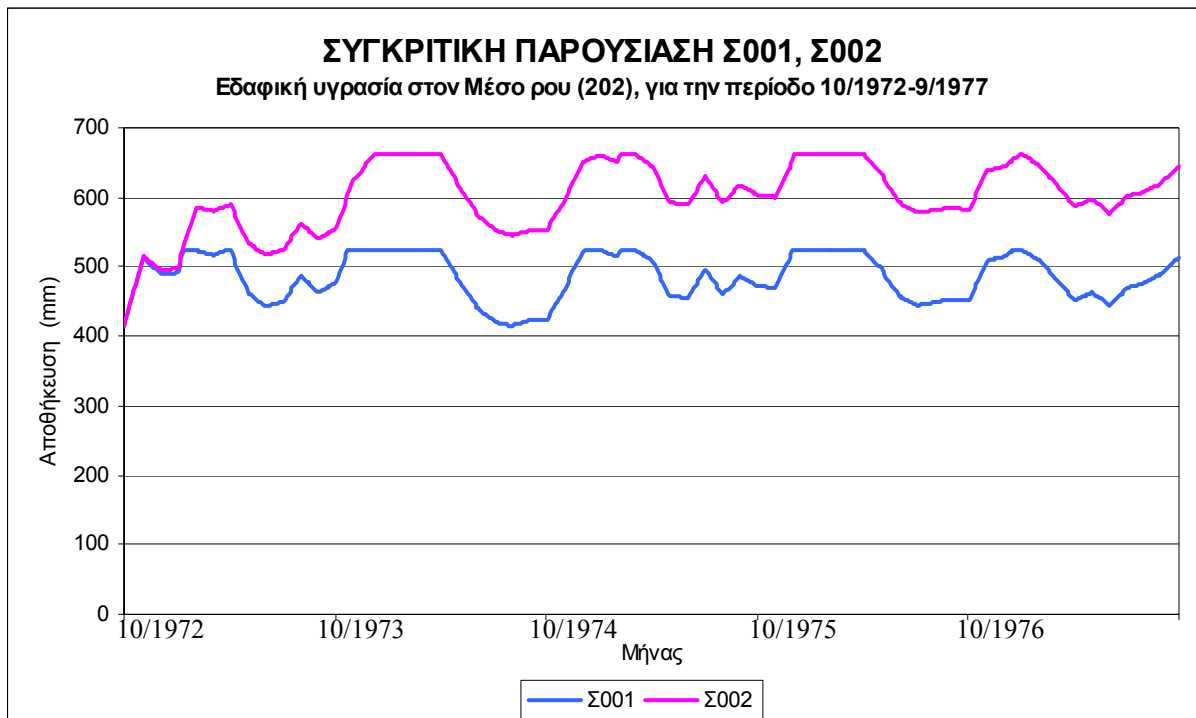
	Μέσο τετραγωνικό σφάλμα παροχής διώρυγας Καρδίτσας	Περίοδος Ρυθμίσεως	Περίοδος ελέγχου	Περίοδος ελέγχου	Περίοδος ελέγχου	Περίοδος Ελέγχου
Σενάριο		10/1984-9/1989	10/1967-9/1972	10/1972-9/1977	10/1977-9/1982	10/1982-9/1987
001		3912225	5824543	3959162	6984489	3909370
002		2751849	4640243	3648151	5601055	2353299



Σχήμα 23. Γράφημα για την υπολογισμένη παροχή του ποταμού στην διώρυγα της Καρδίτσας σε σχέση με την μετρημένη όπως προέκυψε από την επαλήθευση των σεναρίων Σ001, Σ002 του μοντέλου 4Xcell, για την υδρολογική λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, για την περίοδο 10/1972 - 9/1977.



Σχήμα 24. Γράφημα για τις υπολογισμένες στάθμες του καρστικού υδροφορέα της πεδιάδας στον Μέσο ρου (κύτταρο 202), όπως προέκυψαν από την επαλήθευση των σεναρίων Σ001, Σ002 του μοντέλου 4Xcell, για την υδρολογική λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, για την περίοδο 10/1972 - 9/1977.



Σχήμα 25. Γράφημα για την διακύμανση της εδαφικής υγρασίας της πεδιάδας στον Μέσο ρου (κύτταρο 202), όπως προέκυψαν από την επαλήθευση των σεναρίων Σ001, Σ002 του μοντέλου 4Xcell, για την υδρολογική λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, για την περίοδο 10/1972 - 9/1977.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.

Το μοντέλο 4Xcell κατασκευάσθηκε για να χρησιμοποιείται σαν εναλλακτική λύση, στις περιπτώσεις όπου τα διαθέσιμα στοιχεία για τον υδροφορέα και την χωρική και χρονική συμπεριφορά του δεν είναι τέτοια ώστε να επιτρέπουν εφαρμογή πλήρως καταναμημένων μοντέλων. Το ημικαταναμημένο μοντέλο αυτό αξιοποιεί την γεωμετρία της λεκάνης και υδρογεωλογικά στοιχεία για να προσομοιώσει την αλληλεπίδραση του επιφανειακού και του καρστικού συστήματος, μέσα από μία σειρά παραδοχών ομοιογένειας, ισοτροπίας και συνεχούς υπόγεια και επιφανειακής ροής.

Το μοντέλο 4Xcell δεν περιορίζεται μόνο στην χρήση ισοζυγίου μάζας, όπως συνηθίζεται στα ομοειδή μοντέλα, παρά μελετά, με υποτυπώδη τρόπο, και την υπόγεια ροή, χρησιμοποιώντας τον νόμο του Darcy. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για αυτόν τον σκοπό έχουν φυσικό νόημα, γεγονός που διευκολύνει την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Οι τιμές παραμέτρων που προκύπτουν δεν μπορούν να εφαρμοσθούν τοπικώς σε μία περιοχή της λεκάνης, διότι αποτελούν απλώς μέσα μεγέθη τιμών μιας ευρύτερης περιοχής. Όμως, μπορούν να δώσουν στον μελετητή πληροφόρηση για την γενικότερη συμπεριφορά της λεκάνης και τις διαφοροποιήσεις των ιδιοτήτων της σε κλίμακα λεκάνης ή υπολεκάνης απορροής.

Πλεονεκτήματα του μοντέλου αυτού είναι:

- 1) Η εύκολη εφαρμογή του σε κάθε υδρολογική λεκάνη, με αξιοποίηση της γεωμετρίας της.
- 2) Η γρήγορη και φιλική λειτουργία του, τόσο κατά την ρύθμιση, όσο και κατά την χρήση του.
- 3) Η δυνατότητα για εύκολη επέμβαση στους αλγορίθμους υπολογισμών, καθώς και για αναβάθμισή του. Έτσι, είναι δυνατόν να προστίθενται ή να αφαιρούνται παράμετροι (αναλόγως με την διαθεσιμότητα στοιχείων για την ρύθμιση), να γίνεται λεπτομερέστερη κατάτμηση της λεκάνης, να λαμβάνονται υπ' όψιν ή να αγνοούνται χρονοσειρές (π.χ. υδρομετρήσεις καρστικών πηγών), να εισάγονται νέες υπολογιστικές διαδικασίες.
- 4) Το περιβάλλον Excel, στο οποίο εγκαθίσταται το μοντέλο βοηθά την επικοινωνία και ανταλλαγή δεδομένων με ομοειδή προγράμματα ή βάσεις δεδομένων.

- 5) Το 4Xcell βοηθά στην αποτελεσματικότερη υδρολογική διαχείριση του συστήματος, διότι με τα συνηθισμένα στοιχεία επιφανειακής υδρολογίας (χρονοσειρές βροχοπτώσεως, παροχής κλπ), με την δυνατότητα υπολογισμών σε πραγματικό χρόνο και χωρίς ανάγκη για λεπτομερή γνώση υδραυλικών και άλλων παραμέτρων του καρστικού υδροφορέα, περιγράφει με αδρές γραμμές την παρούσα συμπεριφορά και την μέλλουσα απόκριση του συστήματος (διαδικασία προγνώσεως).
- 6) Δίνει μία γενική ιδέα για την σύνολη πιεζομετρική επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα της λεκάνης.

Από την άλλη πλευρά, τα μειονεκτήματα του 4Xcell είναι:

- 1) Οι αρκετά γενικευμένες παράμετροι. Αυτές δεν μπορούν να αποφευχθούν, διότι το μοντέλο είναι ημι-κατανεμημένου τύπου και προσομοιώνει τα φυσικά συστήματα μόνον ως προς την μέση τιμή των υδραυλικών τους παραμέτρων.
- 2) Η χρήση ενιαίων υδροφορέων κάτω από τους ορεινούς όγκους. Η παραδοχή αυτή αντιβαίνει στην πραγματικότητα, η οποία θέλει το υπόγειο υδρολογικό σύστημα πολύ πιο πολύπλοκο στις περιοχές αυτές.
- 3) Η μειωμένης ακριβείας απόκριση στις μηνιαίες παρεχόμενες ποσότητες στις εξόδους των ποταμών, η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη με την ακρίβεια στην αναπαραγωγή των αιχμών των παροχών. Η πράξη έδειξε ότι, από κατασκευής του μοντέλου, οι δύο αυτοί στόχοι φαίνεται πως αντικρούονται.

Η εφαρμογή του μοντέλου 4Xcell στην λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού οδήγησε σε αρκετά και ενδιαφέροντα συμπεράσματα ως προς τις υδρολογικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα εκεί. Η μεγάλη χωρητικότητα της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας δείχνει ότι ετησίως σημαντικές εκμεταλλεύσιμες ποσότητες νερού αποθηκεύονται στους αλλουβιακούς υδροφορείς. Η αξιοποίησή τους θα σήμαινε όμως διαταραχή της υπερετήσιας ισορροπίας στην οποία βρίσκονται αυτοί οι υδροφορείς. Κάτι τέτοιο θα απέβαινε εις βάρος των καρστικών υδροφορέων των οπίων η δίαυτα θα μειωνόταν, αλλά εις όφελος των αποληψίμων ποσοτήτων νερού,

αφού και η εξατμοδιαπνοή θα ελαττωνόταν, και θα αυξανόταν η εισροή νερού προς τα υδροφόρα και τα εδαφικά στρώματα. Ακόμα, είναι φανερό πως, έστω και αν το μοντέλο δεν εντοπίζει με ακρίβεια τις θέσεις διαρροών προς την θάλασσα, υπάρχουν απώλειες σημαντικών ποσοτήτων ετησίως, των οποίων ο μηχανισμός γενέσεως προσομοιώνεται με αρκετά ρεαλιστικό τρόπο.

Οι υδραυλικές παράμετροι δείχνουν ότι παρά την χονδροειδή προσέγγιση του υπογείου υδροφορέα αποδίδονται κάποια στοιχεία που επιβεβαιώνονται και στην πράξη, όπως το προχωρημένο καρστ του Κάτω ρου (μεγάλες μεταβιβαστικότητες) και οι τιμές της αποθηκευτικότητας που κυμαίνονται σε αποδεκτά όρια. Παράλληλα, οι παραγόμενες χρονοσειρές δείχνουν συνεπίεις μεταξύ τους (βλ. το παράδειγμα του σχήματος 22) και οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η αναπαράσταση του μηχανισμού λειτουργίας του υδρολογικού συστήματος είναι ικανοποιητική.

Τέλος από την κατάσταση των ισοζυγίων φαίνεται ότι η λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, εκτός από τις πολύ μεγάλες απώλειες μέσω της εξατμοδιαπνοής, οι οποίες ενισχύονται από τις αντλήσεις για άρδευση, έχει πολλές απώλειες προς την θάλασσα (περίπου 25%) καθώς και μείωση υπογείων αποθεμάτων χρόνο με τον χρόνο. Αυτό σημαίνει ότι η αξιοποιήσιμες ποσότητες υπογείων κυρίως νερών είναι πολύ μικρές σε σχέση με την ετήσια τροφοδοσία συνολικώς του καρστικού υπογείου υδροφορέα.

Το μοντέλο 4Xcell σίγουρα επιδέχεται βελτιώσεις και μπορεί εύκολα να επεκταθεί και σε άλλες περιπτώσεις υδρολογικών συστημάτων. Σταχυολογώντας μπορεί κανείς να σταθεί στα εξής:

- 1) Υπάρχει η δυνατότητα για πιο αναλυτική περιγραφή των υδραυλικών ιδιοτήτων του υδροφορέα, π.χ. με αποθηκευτικότητα που μεταβάλλεται καθ' ύψος μέσα στο υδροφόρο στρώμα κάθε κυττάρου.
- 2) Επίσης, είναι δυνατόν να προστεθεί η αμφίδρομη επικοινωνία της ζώνης εδαφικής υγρασίας με το ποτάμι, αλλά και με τον υπόγειο υδροφορέα. Όπως αναφέρεται στην σχετική παράγραφο, η ζώνη εδαφικής υγρασίας υπερχειλίζει προς το ποτάμι, όμως το ίδιο το ποτάμι θεωρείται ότι δεν την επανατροφοδοτεί. Αυτό μπορεί να αλλάξει με την υιοθέτηση ζωνών κατεισδύσεως στην ζώνη, με την θέσπιση υδραυλικών παραμέτρων μεταβιβαστικότητας και αποθηκευτικότητας.

- 3) Επέκταση του προηγούμενου αποτελεί η παράλληλη προσομοίωση του αλλουβιακού υδροφορέα όπου υπάρχει, είτε ως τμήματος της ζώνης εδαφικής υγρασίας, είτε ως ξεχωριστού υδροφόρου στρώματος.
- 4) Όσον αφορά την ρύθμιση, είναι βολικό η ανάμιξη του μελετητή να γίνει πιο άμεση, θέτοντας συντελεστές βάρους, όχι μόνο στο μέσο τετραγωνικό σφάλμα κάθε χρονοσειράς, αλλά σε επιμέρους τιμές σφάλματος της ίδιας χρονοσειράς. Έτσι η σύγκλιση θα είναι επιτυχέστερη σε τοπικά μέγιστα ή ελάχιστα της επιλογής του μελετητή.

Η πραγματοποίηση των παραπάνω απαιτεί δύο βασικά στοιχεία: μεγάλη εμπειρία από πλευράς μελετητή και μεγάλες διαθέσιμες χρονοσειρές. Το πρώτο διότι η πείρα οδηγεί πάντα σε νέες ιδέες και οι ιδέες σε λύσεις. Το δεύτερο διότι σε κάθε παρέμβαση προστίθενται νέες παράμετροι και αυτές χρειάζονται όλο και περισσότερα δεδομένα εισόδου και ελέγχου.

Συμπερασματικά, το μοντέλο 4Xcell αποτελεί μία συνεισφορά στην απλουστευμένη προσομοίωση επιφανειακών και υπόγειων υδρολογικών συστημάτων, με ποιοτικά και ποσοτικά αποτελέσματα εφάμιλλα των συνθέτων κατανεμημένων αριθμητικών μοντέλων.

Δημοσιεύσεις

Διεθνείς

- Barett, M.E. - Charbeneau R.J., A parsimonious model for simulating flow in a karst aquifer, *Journal of Hydrology* 196 (1997) pp. 47-65.
- Bear J., *Hydraulics of groundwater*, McGraw-Hill 1979.
- Brooks R.J. et al, Determining the range of predictions of a groundwater model which arises from alternative calibrations, *Water Resources Research* vol. 30, No 11, pp 2993-3000, Nov 1994.
- Gelhar L.W. - Wilson J.L., Groundwater quality modeling, *GROUNDWATER* Vol. 12, No5, Nov-Dec 1976.
- Pozdniakov S.P. - Shestakov V.M., Analysis of groundwater discharge with a lumped-parameter model, using a case study from Tadjikistan, *Hydrogeology journal* (1998) 6 pp.226-232
- Sun N.Z. et al, A proposed geological parameterization method for parameter identification in three-dimensional groundwater modeling, *Water Resources Research* vol. 31, No 1, pp 89-102, Jan 1995.

Ελληνικές

- Καλλέργης Γ.Α., *Εφαρμοσμένη Υδρογεωλογία*, Τόμος Β', Τ.Ε.Ε., Αθήνα 1986.
- Κουτσογιάννης Δ. - Ξανθόπουλος Θ., *Τεχνική Υδρολογία*, ΕΜΠ, Τομ. Υδατικών Πόρων, 2^η έκδοση, Αθήνα 1997.
- Κουμαντάκης Ι., *Κεφάλαια Υδρογεωλογίας*, ΕΜΠ, Αθήνα 1981.
- Λατινόπουλος Π.Δ., *Υδραυλική των υπογείων ροών*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Υπηρεσία δημοσιευμάτων, Θεσσαλονίκη 1986.
- Μιμίκου Μ.Α., *Τεχνολογία Υδατικών πόρων*, Παπασωτηρίου, Β' έκδοση, Αθήνα 1994.
- Μπαμπινιώτης Γ., *Λεξικό της Νέας Ελληνικής Γλώσσας*, Κέντρο Λεξικολογίας, Αθήνας 1998.
- Μπεζές Κ.Α., *Εφαρμογή του μοντέλου BEMER στις λεκάνες των ποταμών Λούρου και Αράχθου*, Υ.Β.Ε.Τ., Δ/ση Υδατικού δυναμικού και φυσικών πόρων, Απρίλιος 1991.
- Ναλμπάντης Ι. – Ρόζος Ε., *Σύστημα προσομοιώσεως του υδρολογικού κύκλου στην λεκάνη Βοιωτικού Κηφισού*, Ε.ΥΔ.Α.Π. – Ε.Μ.Π., Αθήνα, Δεκέμβριος 2000.

Νάνου-Γιαννάρου Α., Εισαγωγή στα υπόγεια νερά, ΕΜΠ, Τομέας Υδατικών Πόρων, Σεπτέμβριος 1999.

Παγούνης Μ. – Γκέρτσος Θ. – Γκατζογιάννης Α., Υδρογεωλογική έρευνα λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού, ΙΓΜΕ, Αθήνα 1994.

Περλέρος κ.α., Υδρογεωλογικό μοντέλο πηγών Βοιωτικού Κηφισού, Μελέτη διαχείρισης υδατικών πόρων των λεκανών απορροής του Βοιωτικού Κηφισού και των λιμνών Υλίκης και Παραλίμνης, Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., Νοέμβριος 1998.

Τέντες Γ.Μ., Υδρογεωλογικά προβλήματα και συμβολή διαφόρων μεθόδων έρευνας στην επίλυσή τους, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, τμήμα ΜΜΜ, Αθήνα 1999.