

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ-ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»**

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗΣ
ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥ ΥΠΟΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΟΥ
ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ
ΛΕΚΑΝΗ ΤΟΥ ΒΟΙΩΤΙΚΟΥ ΚΗΦΙΣΟΥ**

Μαρία Ι. Κοψιάτη

Αθήνα, Μάρτιος 2009

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»**

Επιβλέπων : Καθηγητής Δ. Κουτσογιάννης

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία με τίτλο «Διερεύνηση στρατηγικών παραμετροποίησης υδρογεωλογικού υπομοντέλου του λογισμικού ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ – Εφαρμογή στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού» αποτελεί τη διπλωματική εργασία του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων».

Το θέμα της αφορά μια υδρολογική λεκάνη για την οποία έχουν εκπονηθεί πολλές μελέτες και έχουν γίνει αρκετές διαφορετικές προσεγγίσεις για την πρόβλεψη των μηχανισμών συμπεριφοράς του υδρολογικού κύκλου της, καθώς πρόκειται για περιοχή με ιδιαίτερα και πολύπλοκα μορφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά και έντονες ανθρωπογενείς επιδράσεις.

Στο σημείο αυτό, λοιπόν, θα ήθελα να ευχαριστήσω κυρίως τον καθηγητή Ε.Μ.Π. – επιβλέποντα της εργασίας μου, κ. Δημήτρη Κουτσογιάννη, που μου ανέθεσε και εμπιστεύθηκε την ενασχόληση με ένα τέτοιο θέμα, αλλά και για τις κατευθύνσεις που έδωσε για μελέτη τόσο κατά την εκπόνηση της εργασίας όσο και κατά τη διάρκεια των μαθημάτων του μεταπτυχιακού κύκλου σπουδών.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αντρέα Ευστρατιάδη για τη βοήθειά του συνολικά στην εκπόνηση της εργασίας, τις κατευθύνσεις, τις γνώσεις και τις εμπειρίες που μου μετέδωσε από τη δική του διδακτορική διατριβή στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού και τη λειτουργία του υπολογιστικού πακέτου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.

Επίσης, θα ήταν παράλειψη να μην αναφέρω τον Αντώνη Κουκουβίνο για τη βοήθειά του στην εφαρμογή των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών και τη σύνδεσή του με το λογισμικό ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, τον Στέφανο Κοζάνη για την εγκατάσταση του εν λόγω λογισμικού, αλλά και τον Νίκο Μαμάση, λέκτορα Ε.Μ.Π., για τις απαντήσεις του σε ερωτήματά μου σχετικά με λειτουργικά προβλήματα των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών.

Σημαντικές για τη βελτίωση των αποτελεσμάτων υπήρξαν και οι υποδείξεις του Βαγγέλη Ρόζου ως προς τη λειτουργία του λογισμικού ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ και κυρίως τη σχηματοποίηση και παραμετροποίηση του υπόγειου μοντέλου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Γιώργο Κοψιάυτη για τη συμβουλευτική του επέμβαση στα θέματα γεωλογίας και υδρογεωλογίας της λεκάνης, τα οποία αποτέλεσαν αντικείμενο προβληματισμού, ιδιαίτερα κατά τη σχηματοποίηση του υδροφορέα της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|------------|
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | vi |
| ABSTRACT | vii |
| 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 1 |
| 1.1. Στόχος της εργασίας..... | 1 |
| 1.2. Διάρθρωση και περιεχόμενο της εργασίας..... | 2 |
| 2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ | 4 |
| 2.1. Γεωμορφολογία..... | 5 |
| 2.1.1. Όρη..... | 5 |
| 2.1.2. Πεδιάδες..... | 6 |
| 2.1.3. Υδρογραφικό δίκτυο..... | 7 |
| 2.1.4. Λίμνες..... | 7 |
| 2.2. Γεωλογία..... | 8 |
| 2.2.1. Γεωλογικοί σχηματισμοί..... | 9 |
| 2.2.2. Τεκτονική..... | 10 |
| 2.3. Υδρογεωλογία..... | 13 |
| 2.3.1. Υδρογεωλογικές λεκάνες..... | 13 |
| 2.3.2. Υδροφορία στους γεωλογικούς σχηματισμούς..... | 14 |
| 2.3.3. Καρστικά φαινόμενα..... | 18 |
| 2.3.4. Διαφυγές υπογείων υδάτων εκτός λεκάνης..... | 20 |
| 2.3.5. Πηγές..... | 21 |
| 3. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ | 28 |
| 3.1. Γενικά..... | 28 |
| 3.2. Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων..... | 29 |
| 3.3. Βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων..... | 32 |
| 3.4. Επαλήθευση (validation) υδρολογικών ομοιωμάτων..... | 35 |
| 3.5. Μοντέλα προσομοίωσης κίνησης των υπόγειων νερών..... | 36 |
| 3.5.1. Ροή στα υπόγεια ύδατα..... | 36 |
| 3.5.2. Κατηγορίες μοντέλων υπόγειων νερών..... | 39 |
| 3.6. Αρχή φειδωλής παραμετροποίησης..... | 48 |

| | |
|--|-----------|
| 4. ΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ..... | 49 |
| 4.1. Συλλογή των διαθέσιμων δεδομένων εισόδου..... | 50 |
| 4.1.1. Επιφανειακό σύστημα..... | 50 |
| 4.1.2. Υπόγειο σύστημα..... | 50 |
| 4.1.3. Υδροσύστημα..... | 50 |
| 4.1.4. Χρονοσειρές..... | 50 |
| 4.2. Σχηματοποίηση και προσομοίωση του επιφανειακού συστήματος..... | 51 |
| 4.3. Σχηματοποίηση και προσομοίωση του υπόγειου υδροφορέα..... | 53 |
| 4.4. Σχηματοποίηση και προσομοίωση της κατανομής των υδατικών πόρων..... | 55 |
| 4.5. Χρήση των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών..... | 56 |
| 4.5.1. Επιφανειακό σύστημα..... | 56 |
| 4.5.2. Υπόγειο σύστημα..... | 56 |
| 4.5.3. Υδροσύστημα..... | 57 |
| 4.6. Εκτίμηση των παραμέτρων του ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ..... | 58 |
| 5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΒΟΙΩΤΙΚΟΥ ΚΗΦΙΣΟΥ..... | 59 |
| 5.1. Παλαιότερες εφαρμογές μοντέλων στην περιοχή μελέτης..... | 59 |
| 5.1.1. Εφαρμογή μοντέλου MODFLOW..... | 59 |
| 5.1.2. Εφαρμογή υπολογιστικού συστήματος ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ..... | 61 |
| 5.1.3. Σύγκριση εφαρμογών – Σκοπός της παρούσας εφαρμογής..... | 64 |
| 5.2. Σχηματοποίηση του μοντέλου της λεκάνης απορροής..... | 69 |
| 5.2.1. Χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών..... | 69 |
| 5.2.2. Σχηματοποίηση επιφανειακού συστήματος..... | 81 |
| 5.2.3. Σχηματοποίηση υπόγειου συστήματος..... | 82 |
| 5.2.4. Υδροσύστημα..... | 84 |
| 5.3. Βαθμονόμηση και επαλήθευση..... | 85 |
| 5.3.1. Δεδομένα εισόδου..... | 85 |
| 5.3.2. Παράμετροι μοντέλου..... | 87 |
| 5.3.3. Αρχικές συνθήκες..... | 88 |
| 5.3.4. Οριακές συνθήκες..... | 89 |
| 5.3.5. Διαδικασία χειροκίνητης – αυτόματης βαθμονόμησης..... | 90 |
| 5.3.6. Περιγραφή δοκιμών..... | 95 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 5.3.7. | Επιλογή καλύτερης βαθμονόμησης | 100 |
| 5.3.8. | Σύγκριση αποτελεσμάτων προσεγγίσεων | 115 |
| 6. | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 116 |
| 7. | ΑΝΑΦΟΡΕΣ..... | 122 |

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή έχει ως περιοχή μελέτης τη λεκάνη απορροής του ποταμού Βοιωτικού Κηφισού στην Περιφέρεια Στερεάς Ελλάδας. Ο Βοιωτικός Κηφισός πηγάζει από το όρος Παρνασσός και εκβάλλει στη λίμνη Υλίκη, σχηματίζοντας ένα υδρογραφικό δίκτυο που διατρέχει τους νομούς Φθιώτιδας, Φωκίδας και Βοιωτίας.

Η λεκάνη απορροής του ποταμού έχει αποτελέσει αντικείμενο αρκετών μελετών στο παρελθόν όσον αφορά τα γεωλογικά και υδρογεωλογικά της χαρακτηριστικά, ενώ έχουν γίνει και προσομοιώσεις των διεργασιών του υδρολογικού κύκλου της με την εφαρμογή διαφόρων μοντέλων (π.χ. υδρογεωλογικό μοντέλο Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., MODFLOW, ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ).

Το αντικείμενο της εργασίας είναι η αναπαράσταση όλων των διεργασιών του υδροσυστήματος της λεκάνης, συμπεριλαμβανομένων και των διαδικασιών διαχείρισης των υδατικών αποθεμάτων της, μέσω της εφαρμογής ενός μοντέλου προσομοίωσης. Όλες οι διαδικασίες σχηματοποίησης του υδροφορέα και εφαρμογής της προσομοίωσης γίνονται ακολουθώντας την αρχή της οικονομίας στον αριθμό των εκτιμώμενων παραμέτρων, αλλά και τη διατήρηση των φυσικών χαρακτηριστικών της λεκάνης στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό.

Η προσομοίωση πραγματοποιείται με το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, το οποίο περιλαμβάνει ένα καταναμημένο, εννοιολογικό μοντέλο που αναπαριστά τις επιφανειακές διεργασίες, ένα επίσης καταναμημένο, εννοιολογικό μοντέλο για την προσομοίωση των διαδικασιών του υπόγειου συστήματος, καθώς και ένα μοντέλο λειτουργίας. Το τελευταίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό αφού περιλαμβάνει όλες τις ανθρώπινες παρεμβάσεις στη λεκάνη (αρδύσεις, απολήψεις νερού από γεωτρήσεις, κάλυψη υδρευτικών αναγκών κλπ.), ενώ δίνει και τη δυνατότητα θέσεως στόχων που ικανοποιούνται βάσει προτεραιότητας. Το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ συγκεντρώνει αρκετά πλεονεκτήματα, όπως είναι η εξέταση επιφανειακών και υπόγειων διεργασιών σε αλληλεπίδραση, η ομαδοποίηση των παραμέτρων με στόχο τη μείωση του συνολικού αριθμού τους, η εφαρμογή ενός διαχειριστικού συστήματος για τα υδατικά αποθέματα της λεκάνης (απαραίτητο σε λεκάνες απορροής με έντονες τις ανθρώπινες επεμβάσεις), αλλά και η δυνατότητα εφαρμογής αυτόματης – χειροκίνητης βαθμονόμησης με επέμβαση του χρήστη όπου κρίνεται σκόπιμο.

Στην παρούσα εργασία, πραγματοποιείται ομαδοποίηση των παραμέτρων του υπόγειου συστήματος, και συγκεκριμένα της υδραυλικής αγωγιμότητας και του πορώδους, βάσει της διαπερατότητας των γεωλογικών σχηματισμών της λεκάνης, οι οποίοι χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες (διαπερατοί, ημιπερατοί και αδιαπέρατοι σχηματισμοί). Το αποτέλεσμα είναι η εφαρμογή ενός μοντέλου με μείωση του συνολικού αριθμού των παραμέτρων σχεδόν κατά το ήμισυ σε σχέση με προηγούμενες προσεγγίσεις, με ικανοποιητικά αποτελέσματα βαθμονόμησης και επαλήθευσης.

ABSTRACT

Boeoticos Kephisos river basin, located at the Eastern Sterea Hellas region, is the study area of the current thesis. The Boeoticos Kephisos river stems from the Mt Parnassos and flows into the Lake Hylike, forming a hydrographic network which extends to the Fthiotida, Fokida and Boeotia counties. The geological basin of the area consists of heavily karstified limestone, mostly developed on the mountains, flysch and alluvial deposits, lying in the plain areas. Due to its hydrogeological features the area is characterized by a considerable groundwater yield. The main discharge points are springs, located at the middle and upper parts of the basin. A considerable amount of water is also discharged into the sea, which is difficult to quantify.

Several studies have been performed in the Boeoticos Kephisos basin, regarding its geological and hydrogeological features, while several models have been proposed in order to simulate the hydrological cycle, e.g. the study performed on behalf of the Hellenic Ministry for the Environment, Physical Planning and Public Works, research work based on MODFLOW which was performed by Nalbandis *et al.* (2000, 2002) and the model developed by Efstratiadis *et al.* (2006) and Efstratiadis (2008) based on HYDROGEIOS.

The current thesis aims to extend previous studies on the area. The prime objective of this study is the development of a model, which will represent all the hydrosystem procedures of the Boeoticos Kephisos watershed. The model development is based on two simple principles: ensure consistency with the physical characteristics of the system, while keeping the number of parameters as low as possible. The GIS-based computer software HYDROGEIOS is used, which provides a holistic framework combining both hydrological and hydrogeological data of a river basin. The HYDROGEIOS modeling framework has the ability to incorporate decision-dependent abstractions and interactions between surface and groundwater flows, on the basis of a semi-distributed configuration.

A semi-distributed approach and a monthly simulation time step are adopted. Multiple levels of schematization and parameterization of the surface system are utilized, by combining multiple levels of geographical data. The study area surface is divided in thirteen sub-basins (compared to five in Efstratiadis, 2008) and as a result more branches from the river network are considered. The groundwater flow field is divided in 40 irregular shaped cells. Four of these cells are located outside of the river basin to simulate underground leakages to adjacent basins or to the sea. Several factors are considered in the cell formulation. An effort is made to maintain homogeneity within the cell, regarding its hydrogeological features and avoid abrupt slope changes. The spatial distribution of the springs is also taken into account, as they usually indicate a change in the physical characteristics and groundwater flow.

Using a fine cell system would lead to a large number of parameters. Consequently, the intergraded surface water – groundwater approach applied in the current study, would lead to time consuming and computationally intensive simulations. To avoid this problem, a permeability based cell grouping is adopted. Three groups are finally formed (permeable, impermeable and semi permeable) and a unique value for the hydraulic conductivity and the porosity is implemented in each one of them. For the aforementioned schematization, a total number of 64 parameters is required (16 for the groundwater system).

A model calibration is then performed, based on monthly precipitation and potential evapotranspiration data of a five-year period. The models are validated on the following five-year period. Computed data at six control points (spring locations) and at the basin outlet are used to calculate several performance criteria. The hydrographs from the computed data are compared to the corresponding hydrographs from the measured data. Due to the complexity of the model and the multiple sources of uncertainty, it was not possible to achieve credible results in a few runs and the final result was reached gradually: starting from a relatively good solution, the number of the unknown parameters is reduced, in order to focus on those of significant importance or uncertainty. User intervention proved to be of critical importance during the calibration procedure, since small changes in the boundary conditions of the cells or the water levels improved model performance and its predictive capacity. In each run an optimization module, based on the evolutionary annealing-simplex method is implemented.

Regarding the simulation results, the model developed in the current study provided satisfactory performance in most regions of the Boeotikos Kephisos basin. Increasing the model performance, while ensuring model parsimony and consistency with physical processes was a prime objective of the current thesis, but it was proved a rather difficult task. Specifically, the difficulties in quantifying the parameters and boundary conditions in the cells which contain springs amplified the model uncertainty and highlighted the high complexity of the karst system.

Overall, due to the size of the study area and the number of the related parameters the model is vulnerable to various uncertainty sources and as a result the problem becomes ill-posed. To reduce the degree of uncertainty, an effort was made to incorporate all available data in the model through the appropriate parameters. Further analysis on daily basis would provide more accurate results, while sensitivity analysis of the parameters would assist the researchers to focus on factors of significant importance.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Στόχος της εργασίας

Η παρούσα εργασία αφορά τη λεκάνη απορροής του ποταμού Βοιωτικού Κηφισού στην περιοχή της Στερεάς Ελλάδας. Συγκεκριμένα, μέσω της χρήσης του υπολογιστικού συστήματος ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, γίνεται μια προσπάθεια προσομοίωσης των μηχανισμών του υδρολογικού κύκλου της περιοχής μελέτης. Η αναπαράσταση του υδρολογικού κύκλου αφορά τόσο τις επιφανειακές όσο και τις υπόγειες διεργασίες, ενώ επιπλέον, το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ δίνει την πολύ σημαντική δυνατότητα ένταξης στην προσομοίωση και των διαδικασιών διαχείρισης των υδατικών αποθεμάτων της λεκάνης με ανθρώπινες παρεμβάσεις.

Η λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού έχει προσομοιωθεί στο παρελθόν με την εφαρμογή διαφόρων μοντέλων, όπως με το μοντέλο MODFLOW στα πλαίσια μελέτης του Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε (Περλέρος, 1998) και ερευνητικών εργασιών του Ε.Μ.Π. (Ναλμπάντης κ.ά., 2000 και 2002), με μοντέλο συνδυασμένης αναπαράστασης επιφανειακών και υπόγειων εργασιών (Rozos et. al., 2004) και με το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, επίσης στα πλαίσια ερευνητικού έργου του Ε.Μ.Π. (Ευστρατιάδης κ.ά., 2006). Η πιο πρόσφατη και ολοκληρωμένη προσέγγιση έγινε από τους Efstratiadis et. al. (2008) και Ευστρατιάδη (2008).

Η εργασία αυτή αποτελεί μια επιπλέον προσέγγιση όσον αφορά την προσομοίωση της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, κατά την οποία εφαρμόζεται και πάλι το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ. Η προσέγγιση με το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ εξετάζει πιο ολοκληρωμένα την περιοχή μελέτης, καθώς περιλαμβάνει επιφανειακό μοντέλο, υπόγειο μοντέλο και μοντέλο υδροσυστήματος, σε αντίθεση με παλαιότερες προσεγγίσεις (MODFLOW κλπ.), η οποία εξέταζε κυρίως το υπόγειο σύστημα. Όσον αφορά την εφαρμογή του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, η διαφορά της παρούσας προσέγγισης από τις πρόσφατες του 2008, έγκειται σε μια προσπάθεια λεπτομερούς μεν αναπαράστασης των φυσικών χαρακτηριστικών της λεκάνης, με μικρότερο όμως αριθμό παραμέτρων που απαιτείται να εκτιμηθούν. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά το επιφανειακό σύστημα, η λεκάνη του ποταμού χωρίζεται σε περισσότερες υπολεκάνες (13 υπολεκάνες στην παρούσα εφαρμογή, 5 υπολεκάνες στην προηγούμενη) και συνεπώς, περισσότερους κλάδους ποταμού (12 παρούσα εφαρμογή έναντι 4 στην προηγούμενη). Όσον αφορά το υπόγειο σύστημα, ο υδροφορέας διαμερίζεται σε περισσότερα κύτταρα (40 στην παρούσα εφαρμογή, από τα οποία τα 4 κύτταρα αναπαριστούν διαφυγές υδάτων εκτός της λεκάνης, ενώ στην προηγούμενη εφαρμογή τα αντίστοιχα νούμερα είναι 30 και 2).

Σύμφωνα με τα προαναφερόμενα στοιχεία, φαίνεται αρχικά η λεπτομερέστερη διαμέριση του επιφανειακού και του υπόγειου συστήματος να δίνει μεγαλύτερο αριθμό παραμέτρων. Στην

πραγματικότητα, όμως, υπάρχει στο συγκεκριμένο μοντέλο, δυνατότητα μείωσης του αριθμού τους με ομαδοποίηση. Η ομαδοποίηση επιλέγεται να γίνει βάση της διαπερατότητας των κυττάρων του υδροφορέα, στις τρεις ομάδες των διαπερατών, ημιπερατών και αδιαπέρατων σχηματισμών. Στη συνέχεια, σε κάθε ομάδα κυττάρων δίνεται μία μόνο τιμή της επιλεγόμενης παραμέτρου (υδραυλικής αγωγιμότητας και πορώδους). Τελικά, ο συνολικός αριθμός παραμέτρων περιορίζεται σε 64 (μόνο 16 για το υπόγειο σύστημα). Στην προηγούμενη προσέγγιση, εκτιμάται μία τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας και μία τιμή του πορώδους σε κάθε κύτταρο του υδροφορέα. Αυτή είναι μια πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση, αφού σε κάθε κύτταρο, στην πραγματικότητα, οι τιμές των παραμέτρων επηρεάζονται από ιδιαίτερες συνθήκες (ανάγλυφο, υδροπερατότητα, γεωλογικές ανωμαλίες, ρήγματα κλπ.) που πιθανόν διαφέρουν από αυτές των γειτονικών κυττάρων. Όμως, η μη ομαδοποίηση των παραμέτρων οδηγεί στην εκτίμηση περισσότερων παραμέτρων (συνολικά 106 παράμετροι, από τις οποίες οι 64 αφορούν το υπόγειο σύστημα).

1.2. Διάρθρωση και περιεχόμενο της εργασίας

Η εργασία αυτή περιλαμβάνει πέντε συνολικά κεφάλαια, από τα οποία το πρώτο αποτελείται από την παρούσα εισαγωγή. Το περιεχόμενο των υπολοίπων κεφαλαίων συνοπτικά περιγράφεται ακολούθως.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η περιοχή μελέτης ως προς τη γεωμορφολογία της, τη γεωλογία και την υδρογεωλογία. Η αναφορά στη γεωμορφολογία περιλαμβάνει περιγραφή του αναγλύφου της λεκάνης, της εμφάνισης των κυριότερων ορεινών όγκων και των πεδινών περιοχών, καθώς και της εμφάνισης επιφανειακών υδροφορέων όπως οι λίμνες Υλίκη και Παραλίμνη στην έξοδο της λεκάνης και οι κλάδοι του Βοιωτικού Κηφισού. Όσον αφορά τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής, περιγράφεται η ανάπτυξη των διαφορετικών γεωλογικών σχηματισμών στις διάφορες θέσεις της λεκάνης, ενώ γίνεται αναφορά και στα βασικά τεκτονικά χαρακτηριστικά (π.χ. ρήγματα) που σε κάποιο βαθμό μπορούν να επηρεάσουν την υπόγεια ροή και την εκδήλωση πηγών. Τέλος, γίνεται αναφορά στην υδρογεωλογία της λεκάνης, καθώς κυρίως βάσει αυτής γίνεται η ομαδοποίηση των παραμέτρων του υπόγειου μοντέλου. Στις σχετικές ενότητες, περιγράφεται η κίνηση του νερού στις διάφορες κατηγορίες γεωλογικών σχηματισμών, με ιδιαίτερη αναφορά στην εμφάνιση καρστικών φαινομένων, ένα χαρακτηριστικό των εδαφών γύρω από τις προσχωματικές πεδιάδες της λεκάνης στο οποίο οφείλεται η εμφάνιση σημαντικών συγκροτημάτων πηγών, καθώς και η απρόβλεπτη συχνά συμπεριφορά των υπογείων υδάτων.

Στο τρίτο κεφάλαιο της εργασίας, γίνεται μια γενική περιγραφή των μοντέλων και της χρήσης τους στην υδρολογία, αφού το αντικείμενο της εργασίας περιλαμβάνει την προσομοίωση της περιοχής μελέτης με ένα υδρολογικό μοντέλο. Αναφέρονται οι βασικές κατηγορίες τους, ενώ περιγράφονται οι δύο κύριες

διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την εφαρμογή τους, δηλαδή η βαθμονόμηση τους και η επαλήθευση. Τέλος, επειδή βασικό κομμάτι της εργασίας περιλαμβάνει τη σχηματοποίηση του υπόγειου υδροφορέα και μια διερεύνηση στις παραμέτρους του υπόγειου μοντέλου, κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια ιδιαίτερη αναφορά στους βασικούς νόμους (εξισώσεις κίνησης κλπ.) που διέπουν την κίνηση των υπογείων υδάτων και στις κυριότερες κατηγορίες μοντέλων υπόγειων υδάτων που εφαρμόζονται σήμερα. Στα μοντέλα αυτά υπεισέρχονται οι εξισώσεις που περιγράφουν την ροή των υδάτων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, περιγράφεται ξεχωριστά το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της λεκάνης. Συγκεκριμένα, αναφέρονται αρχικά τα δεδομένα εισόδου που απαιτούνται για το επιφανειακό σύστημα, το υπόγειο και το υδροσύστημα αντίστοιχα. Στη συνέχεια, περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο σχηματοποιείται ο επιφανειακός και υπόγειος υδροφορέας, καθώς και η κατανομή των υδατικών πόρων της λεκάνης τα επιμέρους μοντέλα που μπορεί να συνδυάσει (επιφανειακό, υπόγειο και μοντέλο υδροσυστήματος). Ακολουθεί αναφορά στη βασική ιδιότητα του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ να συνεργάζεται με τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών και στον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται η εισαγωγή γεωγραφικών και άλλων φυσικών χαρακτηριστικών της λεκάνης από ένα Γ.Σ.Π. στο μοντέλο. Στο τέλος του κεφαλαίου, αναφέρονται οι παράμετροι που εκτιμώνται με το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ για κάθε ένα από τα συστήματα που προσομοιώνει.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας, περιγράφεται αναλυτικά η εφαρμογή του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ στη λεκάνη απορροής του Βοιωτικού Κηφισού. Στο πρώτο υποκεφάλαιο, κρίνεται σκόπιμο να γίνει αναφορά σε παλαιότερες προσεγγίσεις που έγιναν για προσομοίωση της λεκάνης, τόσο με το μοντέλο MODFLOW όσο και με το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, με διαφορετική, όμως, σχηματοποίηση του επιφανειακού και υπόγειου υδροφορέα και διαφορετικές παραμέτρους. Γίνεται σύγκριση αυτών των δύο βασικών προσεγγίσεων, ενώ αναφέρεται και ο σκοπός και τα χαρακτηριστικά της παρούσας προσέγγισης. Στο επόμενο υποκεφάλαιο, περιγράφεται η σχηματοποίηση της λεκάνης απορροής με τη χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών με εκτενή αναφορά στα κριτήρια διαμέρισης του υπόγειου υδροφορέα. Στο τρίτο υποκεφάλαιο, περιγράφεται αναλυτικά η λειτουργία του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ. Αναφέρονται τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου (χρονοσειρές), οι παράμετροι του μοντέλου για το επιφανειακό και υπόγειο σύστημα, καθώς και ο καθορισμός των αρχικών και οριακών συνθηκών του μοντέλου. Τέλος, περιγράφεται η διαδικασία των δοκιμών που έγιναν και αιτιολογούνται οι αλλαγές και επεμβάσεις στις μεταβλητές του μοντέλου, μέχρι την επιλογή της πιο ικανοποιητικής λύσης.

Στο τέλος της εργασίας, αναφέρονται τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν από τη σχηματοποίηση του υδροφορέα, την προσομοίωση της λεκάνης απορροής και την προσπάθεια που γίνεται για λεπτομερή περιγραφή των φυσικών χαρακτηριστικών της με πιο περιορισμένο αριθμό παραμέτρων. Η εργασία ολοκληρώνεται με παράθεση του πίνακα αναφορών.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας είναι η λεκάνη απορροής του ποταμού Βοιωτικού Κηφισού. Ο Βοιωτικός Κηφισός, μήκους 95 km περίπου, ονομάζεται έτσι για να διακρίνεται από τον ομώνυμο ποταμό της Αττικής. Πηγάζει από τον Παρνασσό στους πρόποδες του Νομού Φωκίδος (ονομάζεται και Φωκικός Κηφισός), διασχίζει τη Βοιωτική Πεδιάδα και φτάνει μέχρι τη λίμνη Υλίκη (Εγκυκλοπαίδεια Δομή, 2004, σ. 432).

Η λεκάνη απορροής έχει έκταση περίπου 1930 km² και βρίσκεται κυρίως στο Ν. Βοιωτίας, ενώ μικρά τμήματα του δυτικού άκρου της καταλαμβάνουν εκτάσεις των Ν. Φωκίδας και Φθιώτιδας (Εικόνα 1). Περιβάλλεται από ορεινούς όγκους και συγκεκριμένα, τις οροσειρές Καλλιδρόμου και Χλωμού στα βόρεια, τα όρη Πτώο και Σφίγγιο στα δυτικά, τον Παρνασσό και τον Ελικώνα στα νότια (Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ., 1974). Στο ανατολικό τμήμα της λεκάνης βρίσκεται το λεκανοπέδιο της Κωπαΐδας (Εικόνα 2), που περιλαμβάνει την επιμήκη πεδιάδα της Δαύλειας – Χαιρώνειας στα δυτικά, την πεδιάδα του Ορχομενού συνέχεια αυτής προς τα ανατολικά και ολόκληρη την περιοχή που κατείχε η λίμνη Κωπαΐδα και η οποία αποξηράνθηκε το 1931 (Πάπυρος Larousse Britannica, 2007, σ. 52). Η έξοδος της λεκάνης καταλήγει λίγο πριν τη λίμνη Υλίκη και το νοτιοανατολικό όριό της συνορεύει με το Θηβαϊκό πεδίο.

Αμέσως παρακάτω ακολουθεί αναλυτικότερη περιγραφή της υπό μελέτη περιοχής. Γίνεται αναφορά τόσο στο υδρογραφικό της δίκτυο όσο και στους γεωλογικούς σχηματισμούς, οι οποίοι συνδέονται άμεσα με την εμφάνιση των υπογείων και πηγαίων υδάτων.



Εικόνα 1: Η λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού. Φαίνεται ο διαχωρισμός της σε υπολεκάνες, ο Βοιωτικός Κηφισός, οι πόλεις και κομποπόλεις της περιοχής. (Προέλευση: ΥΠΑΝ κ.ά., 2003, μετά από προσαρμογή.)

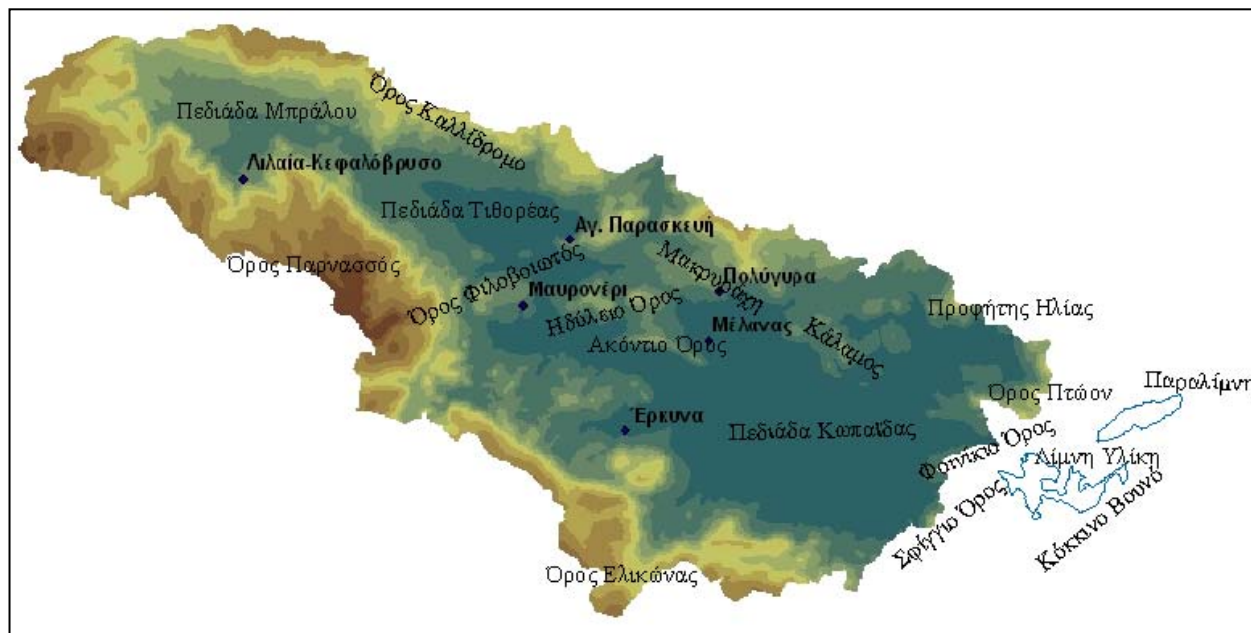
2.1. Γεωμορφολογία

Η διαμόρφωση του αναγλύφου της περιοχής επηρεάζει δραστικά την υδροφορία που εμφανίζεται, υπόγεια και επιφανειακή, και για το λόγο αυτό περιγράφεται αναλυτικά ακολούθως:

2.1.1. Όρη

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού περιβάλλεται από μεγάλους ορεινούς όγκους (Εικόνα 2). Στο νοτιοδυτικό τμήμα της λεκάνης υψώνεται ο Παρνασσός (2.457 m) με τον κύριο όγκο του στο νομό Βοιωτίας και ένα τμήμα στο νομό Φωκίδας. Νοτιοανατολικά του Παρνασσού και στην περιοχή της Βοιωτίας, υψώνεται το όρος Ελικώνας ή αλλιώς «όρος των Νυμφών». Η περιοχή αυτή των οροσειρών παρουσιάζει τα μεγαλύτερα υψόμετρα και κλίσεις σε όλη τη λεκάνη απορροής. Από την περιοχή αυτή προέρχονται κυρίως οι βωξίτες της Βοιωτίας (Εγκυκλοπαίδεια Δομή, 2004, σ. 432).

Στο βορειοδυτικό τμήμα της λεκάνης υψώνεται το όρος Καλλίδρομο (1.419 m) εντός του Νομού Φθιώτιδας και ανατολικότερα αυτού το όρος Χλωμό, στα όρια των Νομών Βοιωτίας και Φθιώτιδας.



Εικόνα 2: Το ανάγλυφο του εδάφους της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού. Σημειώνονται οι βασικές πηγές της περιοχής, καθώς και τα κυριότερα όρη και πεδιάδες.

Στην ανατολική περιοχή της λεκάνης το ανάγλυφο παρουσιάζεται ηπιότερο. Στο ανατολικό όριο της λεκάνης συναντώνται τα όρη Πτώον ή Πελαγία (726 m) στα βόρεια και Σφίγγιον (565 m) και

Φοινίκιον στα νότια, τα οποία ουσιαστικά χωρίζουν την περιοχή της Κωπαΐδας από τις λίμνες Υλίκη και Παραλίμνη.

Η θέση των προαναφερόμενων οροσειρών και βουνών ακολουθεί τα όρια της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, περιβάλλοντας τις πεδινές περιοχές κατά μήκος των οποίων ρέει το ποτάμι.

2.1.2. Πεδιάδες

Η λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού περιλαμβάνει τρεις πεδινές περιοχές από τα βοριοδυτικά προς τα νοτιοανατολικά, όπου και βρίσκεται η έξοδός της: την πεδιάδα μεταξύ Μπράλου και Αμφίκλειας, την πεδιάδα της Τιθορέας έως το Ανθοχώρι και το λεκανοπέδιο της Κωπαΐδας που με τη σειρά του περιλαμβάνει την επιμήκη πεδινή περιοχή από τη Δαύλεια έως τον Ορχομενό και την περιοχή της αποξηραμένης λίμνης Κωπαΐδας (Εικόνα 2).

Η πεδιάδα μεταξύ Μπράλου και Αμφίκλειας βρίσκεται μεταξύ των μεγάλων οροσειρών Παρνασσού και Καλλίδρομου και είναι η μικρότερη σε έκταση και ψηλότερη γεωγραφικά πεδινή περιοχή από τις προαναφερόμενες.

Νοτιοανατολικότερα βρίσκεται η πεδιάδα της Τιθορέας, η οποία βόρεια και νότια περιορίζεται επίσης από τον Παρνασσό και το Καλλίδρομο όρος. Η επικοινωνία της με τις ανάντη και κατάντη πεδινές περιοχές (Αμφίκλειας και Κωπαΐδας αντίστοιχα) γίνεται μέσω μικρών και στενών πεδινών περιοχών που περιορίζονται από μικρά βουνά που αποτελούν πρόποδες των μεγάλων οροσειρών.

Ακολουθεί στα ανατολικά η στενή πεδινή περιοχή μεταξύ Δαύλειας – Χαιρώνειας και Ορχομενού που περιβάλλεται από τα όρη Ηδύλειο και το Ακόντιο στα βόρεια (πρόποδες του Χλωμού όρους) και Προφήτη Ηλία στα νότια, στην περιοχή του Θουρίου.

Η περιοχή της αποξηραμένης λίμνης περιβάλλεται από το Χλωμό όρος στα βόρεια, τον Ελικώνα στα Νότια και τα όρη Σφίγγιο και Πτώον στα ανατολικά. Πρόκειται για εύφορη περιοχή που αποξηράνθηκε το 1931. Η παλιά λίμνη είχε βάθος περίπου 3 m και καταλάμβανε έκταση 250.000 στρεμμάτων. Η αποξήρασή της έγινε μέσω μιας κεντρικής διώρυγας που καταλήγει στη λίμνη Υλίκη. Στην κεντρική διώρυγα κατέληγαν αποστραγγιστικές διώρυγες από όλη την έκταση της περιοχής συνολικού μήκους περίπου 1000 km. Σήμερα αρδεύονται και καλλιεργούνται περίπου 240.000 στρέμματα (Πάπυρος Larousse Britannica, 2007, σ. 52).

Νοτιοανατολικά της Κωπαΐδας βρίσκεται το λεκανοπέδιο των Θηβών που μαζί με την πεδιάδα Σχηματαρίου και Τανάγρας φτάνει έως τον Ευβοϊκό Κόλπο. Μεταξύ της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού και του Θηβαϊκού πεδίου παρεμβάλλεται το όρος Πτώον στα βόρεια και το Σφίγγιον στα νότια.

2.1.3. Υδρογραφικό δίκτυο

Η διαμόρφωση του αναγλύφου της περιοχής μελέτης ευνοεί τη συγκέντρωση και ροή μεγάλης ποσότητας επιφανειακών υδάτων, σχηματίζοντας το ένα υδρογραφικό δίκτυο με κύριο ποταμό τον Βοιωτικό Κηφισό και αρκετούς παραποτάμους και χειμάρρους, συνολικού μήκους 152,7 km. Ο Βοιωτικός Κηφισός πηγάζει από τον Παρνασσό, στην περιοχή της Φωκίδας. Μάλιστα στην περιοχή αυτή είναι γνωστός ως Φωκικός Κηφισός (Εγκυκλοπαίδεια Δομή). Ο κύριος κλάδος του, που έχει μήκος περίπου 95 km, ξεκινάει από την περιοχή της Γραβιάς και περνάει μέσα από τις πεδινές περιοχές από μεταξύ Γραβιάς και Αμφίκλειας, την πεδιάδα της Τιθορέας (έως το Ανθοχώρι), συνεχίζει περνώντας από τη στενή περιοχή Χαιρώνειας έως τον Ορχομενό (μεταξύ του όρους Ακοντίου και περιοχής Θουρίου), όπου και εισέρχεται στην περιοχή της Κωπαΐδας. Εκεί ρέει με κατεύθυνση ΒΔ - ΝΑ, κοντά στους πρόποδες του Ελικώνα, και από το ύψος της Αλιάρτου συνεχίζει με κατεύθυνση ΝΔ – ΒΑ μέσω συγκεντρωτικής τάφρου (μήκους 29,3 km). Η τάφρος αυτή καταλήγει στην κεντρική τάφρο (μήκους 15,9 km) που έχει κατασκευαστεί στην κεντρική περιοχή της Κωπαΐδας και οδηγεί τα νερά στη σήραγγα Καρδίτσας (μήκους 2,8 km) και τελικά στη λίμνη Υλίκη.

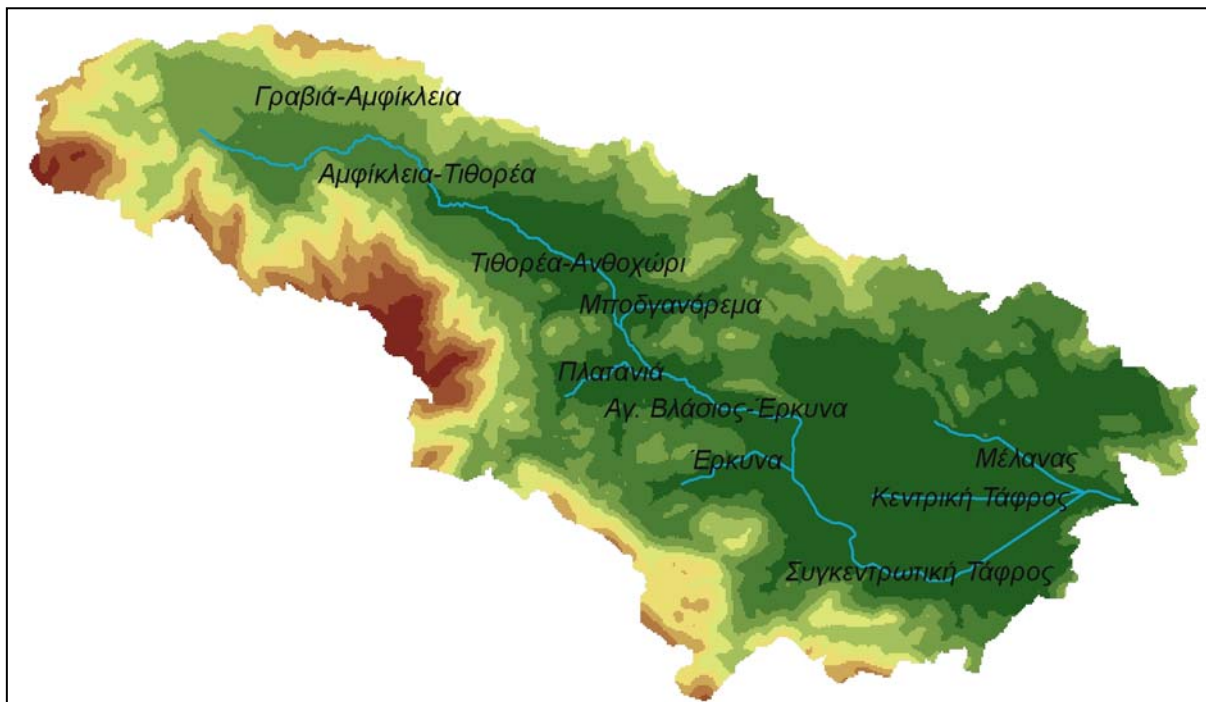
Στο Βοιωτικό Κηφισό καταλήγουν πολλοί μικρότεροι κλάδοι, με κυριότερο τον Μέλανα ή Μαυροπόταμο, μήκους 12,8 km, που πηγάζει από το όρος Ακόντιο, όπου εκδηλώνονται και οι ομώνυμες πηγές, και ρέει στην πεδιάδα της Κωπαΐδας πριν καταλήξει στην κεντρική τάφρο που προαναφέρθηκε. Επίσης, σημαντικοί είναι οι χείμαρροι Χάραδρος (ή Κακόρρεμα), Πίνδος, Πλατανιά, μήκους 8,8 km, Μόρνος (ή Μελαναίο), Προβατιά (Εγκυκλοπαίδεια Χάρη Πάτση), Μπογδανόρεμα, μήκους 8,1 km, και Έρκυνα, μήκους 9,6 km, οι πηγές του οποίου υδροδοτούν τη Λειβαδιά. Οι κυριότεροι παραποτάμοι που σχηματίζονται από όλους τους χειμάρρους, αποστραγγίζοντας τα επιφανειακά νερά των γύρω περιοχών και τα νερά που προέρχονται από εκδήλωση πηγών οδηγώντας τα στον Κηφισό, φαίνονται παρακάτω (Εικόνα 3).

2.1.4. Λίμνες

Μετά την έξοδο της λεκάνης απορροής του Βοιωτικού Κηφισού σχηματίζεται η λίμνη Υλίκη (ή Λίκερη αρχ. Άρμα), περίπου 7 km βόρεια των Θηβών (Εικόνα 2). Περιβάλλεται από το όρος Πτώον στα βόρεια και Σφίγγιον και Φοινίκιον στα νότια, τα οποία και τη χωρίζουν από την πεδιάδα της Κωπαΐδας, ενώ στα νότια και νοτιοανατολικά από τους πρόποδες του Μεσσαπίου Όρους. Έχει έκταση 22 km² και βρίσκεται σε υψόμετρο 60 – 78m (Εγκυκλοπαίδεια Χάρη Πάτση, 1966, σ. 665). Σημαντικός όγκος υδάτων του Βοιωτικού Κηφισού καταλήγει στην Υλίκη, ενώ μελέτες έχουν δείξει ότι δεν αποκλείεται και η υπόγεια ροή υδάτων προς τη λίμνη.

Τα νερά της Υλίκης μεταφέρονται στην Αθήνα για ύδρευση. Στη θέση αυτή λειτουργεί το αντλιοστάσιο Βίλιζας για τη μεταφορά υδάτων στο υδραγωγείο Κακοσάλεσι – Λίμνης Μαραθώνα.

Βορειοανατολικά της Υλίκης σχηματίζεται μια δεύτερη μικρότερη λίμνη που ονομάζεται Παραλίμνη (ή Ουγγρία ή αρχ. Τρεφία ή Τροφία ή Τεφρία). Βρίσκεται σε υψόμετρο 52 m και η έκτασή της φτάνει τα 15 km². Η Υλίκη και η Παραλίμνη βρίσκονται σε επικοινωνία και μέσω φυσικών ρωγμών στη βόρεια ακτή της Υλίκης, αλλά και μέσω διώρυγα μήκους 2,5 km (Πάπυρος Larousse Britannica, 2007, σ.52). Τελικά, τα νερά της Παραλίμνης καταλήγουν στον βόρειο Ευβοϊκό Κόλπο μέσω της σήραγγας Ανθηδόνας.



Εικόνα 3: Το ανάγλυφο της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού και οι βασικοί κλάδοι του υδρογραφικού δικτύου.

2.2. Γεωλογία

Σκόπιμο είναι να γίνει αναφορά στους ποικίλους γεωλογικούς σχηματισμούς που εμφανίζονται στην περιοχή της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, καθώς η παρουσία τους διαμορφώνει και την υδρογεωλογία της περιοχής, η οποία περιγράφεται στην επόμενη ενότητα. Σύμφωνα με «Υδρογεωλογική μελέτη Κωπαϊδικού Πεδίου και Βοιωτικού Κηφισού» του Υπουργείου Γεωργίας (1971, σ. 11), ο σχηματισμός της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού οφείλεται σε τεκτονικές επιδράσεις, ρήγματα και μεταπτώσεις και οι σχηματισμοί που συναντώνται κυρίως είναι οι ακόλουθοι:

2.2.1. Γεωλογικοί σχηματισμοί

▪ Τεταρτογενείς σχηματισμοί (προσχώσεις)

Περιλαμβάνουν τους εξής σχηματισμούς:

- i. Λατυποπαγές με ερυθρά ασβεστική συνδετική ύλη. Έχει πάχος περίπου 1 m και καλύπτει τους ασβεστόλιθους γεμίζοντας τα σπασίματά τους. Συναντάται στην περιοχή του Κερατοβουνίου, κοντά στο Θούριο, απέναντι από το όρος Ακόντιο.
- ii. Ερυθρές αργίλους, με πολυάριθμα γωνιώδη τεμάχια από ασβεστόλιθους και κερατόλιθους που καλύπτουν τα ασβεστολιθικά ανάγλυφα της περιοχής.
- iii. Ποτάμιες προσχώσεις. Αποτελούνται κυρίως από λεπτά υλικά αργίλου, ανάμεσα στα οποία συχνά εμφανίζονται ασβεστολιθικά χαλίκια, ψηφίδες και άμμοι.

Τέτοιου είδους προσχώσεις εμφανίζονται στην περιοχή της Κωπαΐδας. Η λεκάνη της Κωπαΐδας συνορεύει νοτιοανατολικά με το Θηβαϊκό πεδίο, από το οποίο χωρίζεται με κώνους αποθέσεως.

▪ Σχηματισμοί του Τριτογενούς (νεογενή ιζήματα)

Πρόκειται για μάργες και ασβεστόλιθους κυρίως, τοποθετημένων επάνω από φλύσχη. Επίσης, μπορεί να είναι αποθέσεις που αποτελούνται από άμμους και κροκαλοπαγή. Τέτοιου είδους αποθέσεις συναντώνται ανατολικά του ασβεστολιθικού όγκου Κραβασαράς και καταλαμβάνουν τα ανώτερα στρώματα των νεογενών αποθέσεων. Στη μελέτη, επίσης, αναφέρεται ότι σύμφωνα με τον Philipson (1962) έχει ενδιαφέρον η εμφάνιση νεογενούς σχηματισμού στη νότια περιοχή της λεκάνης Κωπαΐδας και στις περιοχές Λιβαδειάς, Κορωνίας (νοτιοανατολικά της Λιβαδειάς) και Θηβών σε υψόμετρο γύρω στα 360 m. Οι σχηματισμοί αυτοί δεν εμφανίζονται σε άλλα κράσπεδα της λεκάνης παρά μόνο βορειοανατολικά, εκτός των ορίων του νομού Βοιωτίας.

▪ Φλύσχη

Οι σχηματισμοί του φλύσχη χωρίζονται στις ακόλουθες βαθμίδες:

- i. Ερυθροί μαργαϊκοί σχιστόλιθοι με ασβεστολιθικές ενστρώσεις.
- ii. Μαργαϊκοί σχιστόλιθοι τεφροπράσινου χρώματος με ψαμμιτικές ενστρώσεις.
- iii. Κροκαλοπαγές κυρίως με ασβεστολιθικές κροκάλες και με λιγότερες κροκάλες οφιολιθικών πετρωμάτων.

Ο φλύσχη αυτός που συναντάνται στη νοτιοδυτική περιοχή της λεκάνης απορροής της Κωπαΐδας, ανήκει στη ζώνη Παρνασσού – Γκιώνας.

▪ **Ασβεστόλιθοι του Άνω Κρητιδικού**

Εμφανίζονται στην περιοχή του Κερατοβουνίου, Καραμούζας και Σιρμινίτσας και στα υψώματα που υπάρχουν ανατολικά αυτών μέχρι Μελισσού. Επίσης, στα νότια του ρήγματος Σούρπη και στα όρια της λίμνης Υλίκης. Σε αυτούς τους σχηματισμούς εμφανίζονται αντίκλινα, πτυχές με κατεύθυνση από ΒΔ προς ΝΑ, καθώς και σημαντικά ρήγματα (Σούρπης, Χωστίων και Ζηρικού) που συχνά τέμνονται με τις πλευρές των αντικλίνων.

▪ **Ασβεστόλιθοι του Κάτω Κρητιδικού (εν μέρει Άνω Ιουρασικού – Τιθώνιον)**

Πρόκειται για λευκούς ασβεστόλιθους που τοποθετούνται επάνω από τους Ιουρασικούς και εμφανίζονται στα ανατολικά του Ανθοχωρίου και βόρεια του χωριού Τσάρισι. Παρουσιάζονται, επίσης, στην περιοχή Βρασταμιτών – Πέτρας με τη μορφή λεπτού στρώματος επικείμενου σε φλύσχη με διερρηγμένη επαφή.

▪ **Σχιστοκερατόλιθοι**

Εμφανίζονται κυρίως στα βορειοδυτικά της Κωπαΐδας και στα βόρεια του όρους Ακόντιο που οι σχηματισμοί του είναι ασβεστολιθικοί. Επίσης, παρουσιάζονται στη νοτιοδυτική πλευρά του Κερατοβουνίου, στους πρόποδες του.

▪ **Τριαδικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες**

Ένας ασβεστολιθικός όγκος, ύψους 1260 m, υπάρχει βόρεια της Δομβραίνης, κοντά στη Λιβαδειά, ενώ στη νοτιοδυτική του παρυφή βρέθηκαν υπερκείμενα στρώματα ασβεστολίθων Λιασίου. Το δυτικό τμήμα των ασβεστολίθων θεωρείται επώθηση.

Σε γενικές γραμμές, περιμετρικά της Κωπαΐδας εμφανίζονται κυρίως ασβεστόλιθοι και φλύσχης. Οι σχηματισμοί του φλύσχη παρουσιάζονται ιδιαίτερα διαβρωμένοι με βαθιές και απότομες κοιλάδες, αλλά απαλές τις γενικές γραμμές. Αντίθετα, στις περιοχές με ασβεστολιθικούς σχηματισμούς, εμφανίζονται λιγότερες κοιλάδες και πιο ανοικτές.

2.2.2. Τεκτονική

Όσον αφορά την τεκτονική της περιοχής, τα χαρακτηριστικότερα φαινόμενα που έχουν παρατηρηθεί είναι τα εξής (Υπουργείο Γεωργίας, 1971, σ. 16):

- **Επώθηση ασβεστολιθικών σχηματισμών που ανήκουν στη ζώνη Ανατολικής Ελλάδας, σε φλύσχη της ζώνης Παρνασσού – Γκιώνας.**

Σύμφωνα με τη σχετική μελέτη του Υπουργείου Γεωργίας, τέτοιου είδους επωθήσεις εμφανίζονται στην περιοχή του Ακραιφνίου και της Μονής Πελαγίας, στα βορειοανατολικά της Κωπαΐδας (Petrascheck, 1963, σ. 132) με επαφή γύρω από το όρος «Μεγάλο Βουνό» (Πτώο Όρος), καθώς και σε άλλες θέσεις, λιγότερο όμως ξεκάθαρα. Επίσης, ανώμαλη επαφή φλύσχη – ασβεστολίθων εμφανίζεται στον ανατολικό Παρνασσό, δυτικά και νότια της Αμφίκλειας και της Αγίας Μαρίνας. Στη μελέτη του Υπουργείου Γεωργίας αναφέρεται ότι η φορά των επιπτευτικών γεγονότων είναι από Ν προς Β στην περιοχή του Ακραιφνίου και από Α προς Δ στην περιοχή από τα υψώματα Βυζαντίου προς τον Κοκκινόβραχο, Άγιο Σώστη, Αγία Ελεούσα, Στρούλλογγο και Άγιο Ιωάννη, δηλαδή προς τη βορειοανατολική πλευρά του Πτώου Όρους (Τάταρης και Κούνης, 1969, σ. 145). Μάλιστα, αναφέρεται ότι υπάρχει επιπτευτικό ρήγμα στη βόρεια πλευρά του Πτώου έως την περιοχή Σκροπονέρια, η παρουσία του οποίου συνδέεται με τη βύθιση όλης της βόρειας περιοχής.

- **Κατακόρυφη τεκτονική – συστήματα ρηγμάτων.**

Σε αυτά οφείλεται ο σχηματισμός της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού και της τάφρου της Κωπαΐδας. Εμφανίζονται δύο βασικά συστήματα ρηγμάτων και μεταπτώσεων. Στο πρώτο, που έχει κατεύθυνση ΑΒΑ – ΔΒΔ, εμφανίζεται μεγάλη μετάπτωση στα ανατολικά της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, και συγκεκριμένα στην Παραλίμνη, στα νότια του Πτώου Όρους, και στο βορειοδυτικό παλιό κόλπο της Κωπαΐδας (βύθισμα Τοπόλια), καθώς και το βύθισμα Λιβαδειά – Πετρομαγούλα. Στο δεύτερο, που έχει κατεύθυνση ΔΒΔ – ΑΝΑ, οφείλονται οι μεταπτώσεις στα όρη Ακόντιο και Κερατοβούνι. Στο ίδιο σύστημα ανήκουν τα ρήγματα από Θούριο προς Χαιρώνεια έως το βόρειο άκρο της Κωπαΐδας στον κόλπο Τσαμαλή. Στη μελέτη του Υπουργείου Γεωργίας αναφέρεται, επίσης, ότι το όρος στην περιοχή του Θουρίου είναι αντίκλινο κατεύθυνσης ΒΔ – ΝΑ, με ρήγματα στη νοτιοδυτική πλευρά με τα οποία και καλύπτεται η σχέση με το γειτονικό φλύσχη (Παπαδόπουλος, Scanvic, 1966, σ. 13). Αποτέλεσμα αυτών των διαρρήξεων ήταν οι κατακόρυφες μετακινήσεις και μεταπτώσεις των ασβεστολίθων της περιοχής με άλμα μεγαλύτερο των 100 m. Η ανώμαλη επαφή των μεσαίων και ανώτερων στρωμάτων του φλύσχη στην ίδια περιοχή (ψαμμίτες και κροκαλοπαγή αντίστοιχα), δείχνει ότι ανάλογες μεταπτώσεις έχουν συμβεί και στους σχηματισμούς αυτούς. Οι διαρρήξεις αυτές είναι ακόμα πιο έντονες στην περιοχή της Λοκρίδας. Η ίδια μελέτη αναφέρει ότι νεότερες, πολύ σημαντικές, διαρρήξεις από ρήγματα εμφανίζονται, επίσης, στους Τριαδικούς και Κρητιδικούς ασβεστόλιθους στα ανατολικά της Κωπαΐδας, στα δυτικά του χωριού Νέο Κόκκινο, καθώς και στις γειτονικές λίμνες Υλίκη και Παραλίμνη (Petrascheck, 1963, σ. 142).

Τα πιο μεγάλα από τα προαναφερόμενα ρήγματα άρχισαν να εξελίσσονται από το Πλειόκαινο και οι διαρρήξεις πληρώθηκαν από ιζήματα της αντίστοιχης εποχής, ενώ ρήγματα της ίδιας διεύθυνσης

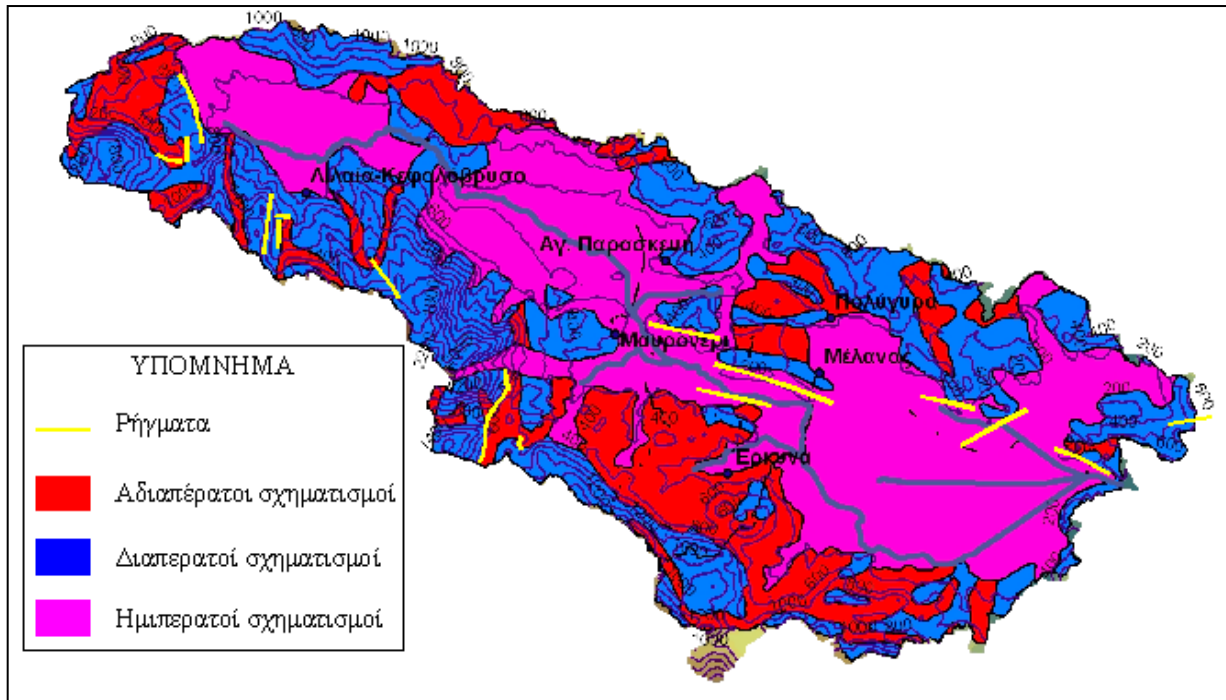
δημιουργήθηκαν και αργότερα, όπως εκείνα κατά τη διεύθυνση Λιβαδειάς – Θηβών, λόγω των οποίων καταβυθίζεται προς την Κωπαΐδα η βορειοδυτική πλευρά.

Όσον αφορά τη λεκάνη της Κωπαΐδας, σχηματίστηκε λόγω ρηγμάτων και μεταπτώσεων που τοποθετούνται χρονικά μετά το Πλειόκαινο (Εικόνα 4). Στη μελέτη του Υπουργείου Γεωργίας αναφέρεται ότι αυτές εμφανίζονται στα βόρεια, δυτικά και νότια του Κωπαϊδικού πεδίου σε υψόμετρα 220 – 280 m και 150 m από τη στάθμη της θάλασσας (Philippson, 1962). Αυτό επιβεβαιώνεται και από την επαφή των αλλουβιακών προσχώσεων που έχουν σχηματιστεί στη λεκάνη της Κωπαΐδας, με τους ασβεστολιθικούς σχηματισμούς που εμφανίζονται στα τοιχώματα γύρω από τη λεκάνη. Χαρακτηριστική είναι η εμφάνιση πηγών στις θέσεις των μεταπτώσεων, που είναι προαλλουβιακές, όπως θα αναφερθεί αναλυτικότερα στην περιγραφή της υδρογεωλογίας της περιοχής.

Πολύ ενδιαφέρουσα είναι, επίσης, η άποψη του Philippson (1962) σύμφωνα με την οποία η πορεία των ποταμών της περιοχής μελέτης μπορεί να επηρεάστηκε σημαντικά από μια νεότερη φάση διαρρήξεων στη λεκάνη της Κωπαΐδας. Λόγω των διαδικασιών αυτών, είναι πιθανό ο Κηφισός να άρχισε να ρέει και μέσα στο βύθισμα του Κωπαϊδικού πεδίου, ενώ πριν έρεε ανατολικά και τελικά κατέληγε στη θάλασσα. Το ίδιο θεωρήθηκε ότι συνέβη και με άλλους κοντινούς ποταμούς, οι οποίοι σταμάτησαν να επικοινωνούν με τη θάλασσα, τουλάχιστον επιφανειακά.

Τελικά, προκύπτει ότι κατά το Πλειόκαινο η λίμνη Κωπαΐδα είχε μεγαλύτερη έκταση που εκτεινόταν από τη Λιβαδειά έως τη Θήβα. Η έκταση αυτή περιορίστηκε σημαντικά λόγω βυθίσματος της λεκάνης που συνέβη στους αλλουβιακούς χρόνους.

Όσον αφορά την περιοχή του Ελικώνα, η ζώνη Παρνασσού – Γκιώνας στα δυτικά της Κωπαΐδας χαρακτηρίζεται βαρεία τεκτονική (γερμανικού τύπου). Εμφανίζονται μεταπτώσεις με διεύθυνση Β – Ν ή Α – Δ (με απόκλιση προς ΝΑ – ΒΔ), αντίκλινα και ελαφρά σύγκλινα, συχνά αντεστραμμένα, οπότε ο φλύσχος υπόκειται των παλαιότερων ασβεστολιθικών σχηματισμών. Στα ανατολικά του Ελικώνα, έχουν δημιουργηθεί ρήγματα, βορειοανατολικά του χωριού Σούρπη, δυτικά του χωριού Ελικώνα (Ζιρίκι) και στο Δίστομο.



Εικόνα 4: Η λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού όπως διαχωρίζεται σε γεωλογικούς σχηματισμούς διαφορετικής διαπερατότητας. Σημειώνονται τα βασικότερα ρήγματα της περιοχής (Προέλευση: Παπαγιαννοπούλου κ.ά., 1971, μετά από προσαρμογή).

2.3. Υδρογεωλογία

2.3.1. Υδρογεωλογικές λεκάνες

Οι περισσότερες υδρογεωλογικές λεκάνες της περιοχής μελέτης, εμπίπτουν εντός της υδρολογικής λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, που περιλαμβάνει και το Κωπαϊδικό πεδίο (Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., 1974, σ.12). Η υδρολογική λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, όπως προαναφέρθηκε, εκφορτίζεται μέσω της σήραγγας Καρδίτσας, στα ανατολικά, ενώ είναι κλειστή στα βόρεια και νότια όπου υπάρχουν μεγάλοι ορεινοί όγκοι. Στην παρούσα εργασία, θεωρείται ότι οι ορεινοί αυτοί όγκοι (Παρνασσός – Καλλίδρομο και Ελικώνας) αποτελούν και φυσικά όρια των υδρογεωλογικών λεκανών. Στην πραγματικότητα υπάρχουν απόψεις που υποστηρίζουν την επικοινωνία του Παρνασσού με τον Κορινθιακό κόλπο, καθώς στις ακτές του εκδηλώνονται πηγές που εκφορτίζουν πολύ μεγάλες ποσότητες υδάτων, οι οποίες πιστεύεται ότι προέρχονται από τον εν λόγω ορεινό όγκο.

Συχνά, σε πολλές μελέτες που έχουν γίνει για τη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, διαχωρίζονται τρεις βασικές περιοχές της: οι περιοχές του άνω, μέσου και κάτω ρου. Ο διαχωρισμός αυτός αφορά

περισσότερο την υδρογεωλογία της περιοχής, αλλά χρησιμοποιείται και για την περιγραφή της θέσης πηγών, κλάδων του ποταμού κλπ. Το όριο των περιοχών άνω και μέσου ρου βρίσκεται στη χαράδρα που σχηματίζεται μεταξύ της Αμφίκλειας και του Μοδίου, ανάμεσα στις πεδιάδες Μπράλου – Αμφίκλειας και Τιθορέας. Αντίστοιχα, το όριο των περιοχών μέσου και κάτω ρου βρίσκεται σε μια δεύτερη χαράδρα μεταξύ του Μαυρονερίου και του Ανθοχωρίου εκεί που ξεκινάει η στενή πεδινή περιοχή μεταξύ της πεδιάδας της Τιθορέας και της λεκάνης της Κωπαΐδας. Μάλιστα, στις θέσεις αυτές είναι ιδιαίτερα μεγάλες οι διηθήσεις των επιφανειακών υδάτων του ποταμού σε βαθμό που να μηδενίζεται σχεδόν η παροχή του (Ευστρατιάδης, 2008, σ. 275).

Οι υδρογεωλογικές λεκάνες χωρίζονται σε δύο βασικές ομάδες, του Παρνασσού και του Ελικώνα (Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., 1974, σ. 12). Η υδρογεωλογική λεκάνη Παρνασσού περιλαμβάνει τις εξής υπολεκάνες:

- Υπολεκάνες Άνω Ρου: Πρόκειται για τις υπολεκάνες Αγίας Ελεούσας, Λιλαίας και Γραβιάς.
- Υπολεκάνες Μέσου και Κάτω Ρου: Πρόκειται για τις υπολεκάνες Σφάκας – Πολυγύρας, Μαυρονερίου και Ακοντίου.

Η υδρογεωλογική λεκάνη Ελικώνα περιλαμβάνει αντίστοιχα, τις υπολεκάνες Λιβαδειάς και Αλιάρτου.

Όλες οι προαναφερόμενες υδρογεωλογικές λεκάνες σχηματίζονται κατά κύριο λόγο μέσα σε ασβεστολιθικούς σχηματισμούς, καρστικοποιημένους, και εκφορτίζονται μέσω πηγών υπερπλήρωσης που εκδηλώνονται στις παρυφές, συνήθως, των ορεινών όγκων. Προτείνεται, μάλιστα, εκμετάλλευση των υδροφόρων στρωμάτων που αναπτύσσονται στις λεκάνες αυτές μέσω υπερετήσιας αναρρύθμισης των πηγών (Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., 1974, σ. 12).

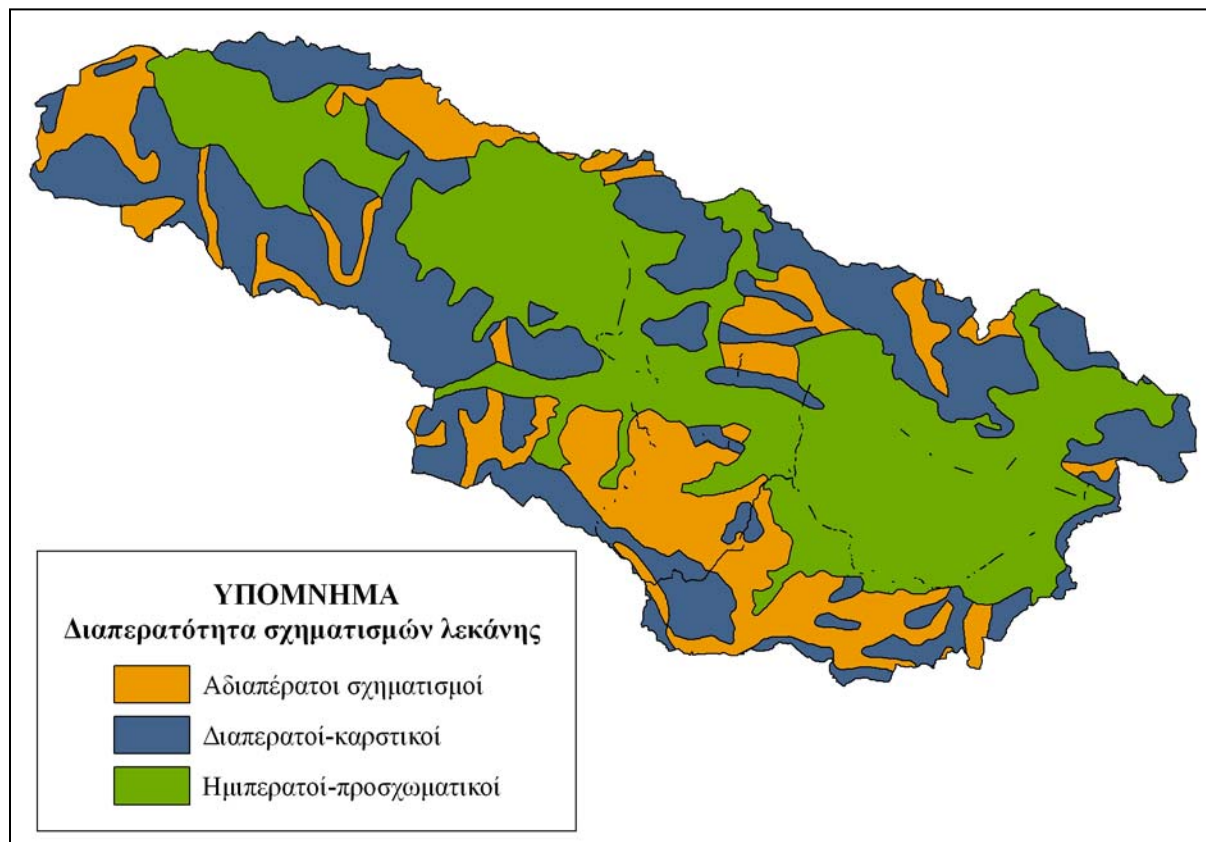
2.3.2. Υδροφορία στους γεωλογικούς σχηματισμούς

Το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής μελέτης είναι αρκετά πολύπλοκο, παρουσιάζοντας σχηματισμούς υδροπερατούς, έντονα καρστικοποιημένους σε πολλές περιοχές, ημιπερατούς, αλλά και αδιαπέρατους (Εικόνα 5).

Υδρογεωλογική μελέτη έχει δείξει ότι σημαντικοί υδροφόροι ορίζοντες εμφανίζονται εντός καρστικοποιημένων ασβεστολίθων και των μεγάλων σε έκταση αλλουβιακών σχηματισμών που εντοπίζονται στις πεδινές περιοχές της λεκάνης του Κηφισού. Στην πρώτη περίπτωση, σημαντικό ρόλο παίζουν τα φαινόμενα επώθησης, λόγω των οποίων ασβεστολιθικές μάζες έχουν επικαθήσει σε μη μαργαϊκό φλύσχη, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μεταξύ τους υδροφόρων στρωμάτων. Μάλιστα, είναι συνηθισμένο φαινόμενο σε τέτοιες περιπτώσεις, η εμφάνιση πηγών στα σημεία επαφής των δύο σχηματισμών. Κάτι τέτοιο συμβαίνει σε αρκετές θέσεις της περιοχής της λεκάνης, για παράδειγμα γύρω από την Κωπαΐδα, όπως περιγράφεται σε επόμενη ενότητα. Όσον αφορά τους αδιαπέρατους

σχηματισμούς, αυτοί δεν είναι υδροφόροι εκτός από την περίπτωση που έχουν διαρρηχθεί τα κροκαλοπαγή ή ψαμμιτικά στρώματά τους. Βέβαια, ακόμα και σε αυτή την περίπτωση σχηματίζονται υδροφορείς μικρού πάχους και διαστάσεων με τοπική σημασία (Υπουργείο Γεωργίας, 1971, σ. 39).

Η παρουσία αυτών των σχηματισμών στην περιοχή της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω:



Εικόνα 5: Η περιοχή μελέτης περιλαμβάνει τρία είδη γεωλογικών σχηματισμών βάσει της υδροπερατότητάς τους (Πρόελευση: Παγούνης κ.ά., 1994, μετά από προσαρμογή).

▪ **Υδροπερατοί σχηματισμοί**

Πρόκειται για ασβεστόλιθους διαρρηγμένους και αποκαρστωμένους, δολομιτικούς ασβεστόλιθους και δολομίτες. Τέτοιου είδους σχηματισμοί, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, έχουν εντοπιστεί στις περιοχές Κερατοβουνίου, Καραμούζας και Σιρμινίτσας, στο χωριό Σούρπη και στα όρια της λίμνης Υλίκης, στα ανατολικά του Ανθοχωρίου, στην περιοχή Βρασταμιτών – Πέτρας, βόρεια του όρους Ακόντιο, βόρεια της Δομβραίνης κοντά στη Λιβαδειά, καθώς και περιμετρικά της Κωπαΐδας σε συνδυασμό με φλύσχη. Οι

σχηματισμοί αυτοί εμφανίζονται διάσπαρτα στα όρια της λεκάνης και σε μεγάλη έκταση στα βορειοδυτικά και δυτικά της (όπως γύρω από τις πηγές Μαυρονερίου) (Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., 1998, σ. 7).

Η υδροφορία των ασβεστολίθων οφείλεται στην εμφάνιση ρηγμάτων, διακλάσεων και μεταπτώσεων, μέσω των οποίων διηθούνται και κινούνται τα όμβρια ύδατα και όχι στην ίδια τη σύστασή τους που είναι συμπαγής. Στην περιοχή μελέτης, η παρουσία έντονων καρστικών φαινομένων έχει σαν αποτέλεσμα πολύ διαπερατούς ασβεστολιθικούς σχηματισμούς, ακόμα και σε σύγκριση με τους αλλουβιακούς, με γεωτρήσεις που δίνουν μεγάλες παροχές χωρίς να πέφτει σημαντικά η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα (Υπουργείο Γεωργίας, 1971, σ. 39).

Επίσης, ένα ακόμη στοιχείο που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι υπάρχουν πλούσιοι υδροφόροι ορίζοντες στις ασβεστολιθικές περιοχές της λεκάνης, π.χ. γύρω από την Κωπαΐδα, είναι το γεγονός ότι η περιοχή μελέτης ανήκει γεωλογικά στη ζώνη Ανατολικής Ελλάδας, με τους κρητιδικούς και τριαδικούς ασβεστόλιθους να κυριαρχούν. Οι σχηματισμοί αυτοί θεωρούνται ιδιαίτερα ευνοϊκοί ως προς τη δημιουργία υπόγειων υδροφορέων (Υπουργείο Γεωργίας, 1971, σ. 39). Η ίδια μελέτη του Υπουργείου Γεωργίας αναφέρει ότι η υδροφορία σε αυτούς τους σχηματισμούς είναι τέτοια που εξισορροπεί τις ακανόνιστες βροχοπτώσεις (Barbeau, κ.ά., 1964).

▪ **Ημιπερατοί σχηματισμοί**

Πρόκειται για λιμναίες χειμαρρικές και ποτάμιες αποθέσεις υλικών με διαφορετική συνεκτικότητα, όπως πηλός, άμμος, κροκάλες κλπ.

Εμφανίζονται είτε ως τριτογενείς είτε ως τεταρτογενείς σχηματισμοί όπως προαναφέρθηκε, στην περιοχή του Κερατοβουνίου, κοντά στο Θούριο, ανατολικά του ασβεστολιθικού όγκου Κραβασαράς, στη λεκάνη της Κωπαΐδας, αλλά και νότια αυτής, στις περιοχές της Λιβαδειάς, της Κορωνίας (νοτιοανατολικά της Λιβαδειάς) και των Θηβών.

Γενικά, οι ημιπερατοί σχηματισμοί εμφανίζονται στις πεδινές περιοχές όπου ρέει ο Βοιωτικός Κηφισός, όπως στην πεδιάδα μεταξύ Μπράλου και Αμφίκλειας, στην πεδιάδα της Τιθορέας, στην πεδινή περιοχή Δαύλειας – Χαιρώνειας και φυσικά στην πεδιάδα της Κωπαΐδας. Σε μεγαλύτερη έκταση εντοπίζονται στην περιοχή του κάτω ρου (Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., 1998, σ. 7) και τοπικά στις θέσεις που προαναφέρθηκαν.

Το πάχος αυτών των προσχωματικών σχηματισμών εντός των οποίων εμφανίζεται υδροφορία, ποικίλει. Σε ορισμένες περιοχές όπως στην Χαιρώνεια και στα Τοπόλια, έχει εκτιμηθεί ότι είναι μερικές εκατοντάδες μέτρα (250 m και 143 m αντίστοιχα). Γενικά, σύμφωνα με τους Barbeau κ.ά. (1964) στα ανώτερα στρώματα αυτών των σχηματισμών η υδροφορία είναι δεν είναι σημαντική τόσο γιατί τα υδροφόρα στρώματα περιορίζονται εντός των αργίλων, όσο και γιατί η επανατροφοδότησή τους από κατείδυση της βροχής είναι μικρή. Ο εμπλουτισμός τους γίνεται κυρίως μέσω της επαφής τους με τους

ασβεστολιθικούς σχηματισμούς στις θέσεις μεταπτώσεων, αλλά και μέσω των πηγαιών υδάτων που ρέουν μέσα από τις προσχώσεις, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την περιοχή της Κωπαΐδας (Υπουργείο Γεωργίας, 1971, σ. 39).

Επίσης, αναφέρονται οι κάτωθι περιοχές αλλουβιακών σχηματισμών με βάση τον προαναφερόμενο διαχωρισμό της λεκάνης απορροής του Βοιωτικού Κηφισού σε τρεις περιοχές, του άνω, του μέσου και του κάτω ρου:

- i. Περιοχή του κάτω ρου:** Πρόκειται κυρίως για τα κροκαλοπαγή υδροφόρα στρώματα της λεκάνης Κωπαΐδας, τα οποία παρεμβάλλονται μεταξύ μαργών. Οι γεωτρήσεις που έγιναν στις παρυφές και στο μέσο της λεκάνης έδωσαν παροχές μόνο στην πρώτη περίπτωση, γεγονός που επιβεβαιώνει την τροφοδότηση αυτών των αλλουβιακών σχηματισμών από τους γειτονικούς ασβεστόλιθους.
- ii. Περιοχή του μέσου ρου:** Πρόκειται για την περιοχή κοντά στο Κηφισσοχώρι, Ανθοχώρι κλπ. Στην περιοχή υπάρχουν υδροφόροι ορίζοντες σε διάφορα βάθη. Στα μικρότερα βάθη η ύπαρξή τους διαπιστώνεται από μεγάλο αριθμό φρεάτων που φτάνουν στα 10 – 12 m κάτω από το έδαφος. Οι βαθύτεροι βρίσκονται στην περιοχή της Χαιρώνειας, όπου γεωλογική τομή έδειξε ότι λόγω παρουσίας αργίλλων και ψαμμιτικών και κροκαλοπαγών στρώσεων, δεν επανατροφοδοτούνται. Πιο συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι μόνο τα ανώτερα κροκαλοπαγή στρώματα ήταν υδροφόρα.
- iii. Περιοχή του άνω ρου:** Περιλαμβάνει κυρίως τεταρτογενείς αποθέσεις με μικρό πάχος, επικείμενων στους σχηματισμούς φλύσχη. Λόγω της μικρής παροχής των φρεάτων, εκτιμάται ότι λαμβάνει χώρα κυρίως κάθετη διήθηση των κατακριμνήσεων και πλευρική τροφοδοσία από χειμάρρους που ρέουν εντός φλύσχη, ενώ δεν υπάρχει τροφοδοσία από τους ασβεστόλιθους. Μάλιστα στην περιοχή της Γραβιάς οι στάθμες των γεωτρήσεων είναι διαφορετικές από αυτές των φρεάτων και μεταξύ τους δεν υπάρχει υψομετρική σύνδεση.

▪ **Πρακτικά στεγανοί σχηματισμοί**

Πρόκειται για πετρώματα όπως είναι οι αργιλομαργαϊκοί σχιστόλιθοι, οι σχιστοψαμμίτες και τα εκρηξιγενή πετρώματα. Οι σχηματισμοί φλύσχη, που εμφανίζονται κυρίως στις λεκάνες Πλατανιάς και Αγίου Βλασίου στα νοτιοανατολικά της λεκάνης, είναι πιθανό να αποτελούνται από εναλλαγές τέτοιων πετρωμάτων.

Εμφανίζονται τόσο στους ορεινούς όγκους της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, όπως στον Παρνασσό στην περιοχή της Καλοσκοπής και στη βόρεια και βορειοανατολική πλευρά του Ελικώνα, αλλά και διάσπαρτα σε άλλες περιοχές της λεκάνης, όπως στα βόρειά της, κοντά στην περιοχή του Μοδίου και βορειοδυτικά της Κωπαΐδας και του Ορχομενού, μεταξύ του Ακοντίου, του Ηδυλείου Όρους και της Μακρυρράχης.

Σε νεογενή πετρώματα, όπως μάργες, δεν εμφανίζεται υδροφόρος ορίζοντας (Υπουργείο Γεωργίας, 1971, σ. 39).

2.3.3. Καρστικά φαινόμενα

Σε πολλές από τις περιοχές της λεκάνης απορροής του Βοιωτικού Κηφισού εμφανίζεται έντονη καρστικοποίηση των ασβεστολιθικών σχηματισμών, η οποία επηρεάζει σημαντικά την κατεύθυνση της υπόγειας ροής και ευθύνεται σε μεγάλο βαθμό για την εμφάνιση πηγών μεγάλης παροχής σε αρκετές θέσεις της λεκάνης.

Στη σχετική μελέτη του Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. (1998, σ. 7) αναφέρεται μάλιστα, ότι η καρστικοποίηση αυτή φτάνει σε βάθος τα 150 – 400 m. Επιπλέον, επισημαίνεται ότι στις πεδινές περιοχές, οι σχηματισμοί αυτοί καλύπτονται από τις προσχωσιγενείς αποθέσεις, ενώ τοπικά από αδιαπέρατο φλύσχη ή από άλλα πετρώματα σχιστοκερατολιθικής διάπλασης.

Για το θέμα των καρστικών σχηματισμών, η μελέτη του Υπουργείου Γεωργίας (1971, σ. 44) αναφέρει αντίστοιχα ένα διαχωρισμό τους σε τρεις τύπους (Sweeting, 1963) με βάση τη γεωμορφολογία τους:

- **Νέο καρστ**

Έχει σχηματιστεί σε περιοχές με μεγάλο υψόμετρο, άνω των 1200 – 2000 m, που είναι καλυμμένες με χιόνι για μεγάλο χρονικό διάστημα και δέχονται μεγάλες κατακρημνίσεις. Ο ρυθμός κατείδωσης του νερού είναι γρήγορος και τα νερά στο υπέδαφος ακολουθούν ρήγματα, μεταπτώσεις ή κινούνται μεταξύ στρωμάτων, χωρίς να ακολουθούν κάποια αναμενόμενη πορεία. Οι ψηλότερες περιοχές της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, με τα προαναφερόμενα υψόμετρα, βρίσκονται κυρίως στα δυτικά και νότια της, στους ορεινούς όγκους του Παρνασσού και του Ελικώνα.

- **Ωριμο καρστ**

Εμφανίζεται με τη μορφή κλειστών βυθισμάτων (πόλγες) με ποικίλα μεγέθη και μορφές, που μπορεί να φτάνουν τα 3 – 4 km σε μήκος και τα 1 – 2 km σε πλάτος και καλύπτονται από αλλουβιακές προσχώσεις ή τη λεγόμενη «κόκκινη γη» (terra – rossa). Συνήθως, αυτές οι πόλγες τροφοδοτούν υπόγειους αγωγούς με τη μορφή σπηλαίων (καρστικά έγκοιλα), τα οποία συχνά αναπτύσσονται οριζόντια, ενώ η ροή των υπογείων υδάτων μοιάζει με επιφανειακή.

- **Επαναεάζον καρστ**

Δημιουργείται από ώριμο καρστ που έχει υποστεί διαρρήξεις λόγω τεκτονικών κινήσεων. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η διακοπή των αγωγών – καρστικών έγκοιλων, οι οποίοι

αποστραγγίζονται και γεμίζουν με «κόκκινη γη», η δημιουργία νέων αγωγών κατά μήκος των τεκτονικών γραμμών και η εκδήλωση πολλών μικρών πηγών λόγω της διακοπής των αγωγών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι πηγές Λιλαίας – Κεφαλόβρυσου στα βορειοδυτικά της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, στις παρυφές του Παρνασσού, όπου εκδηλώνονται πέντε νεότερες κοντινές πηγές σε σχέση με τη μία κύρια πηγή παλαιότερων εποχών.

Ο εντοπισμός των καρστικών σχηματισμών μπορεί να γίνει μέσω μιας σειράς χαρακτηριστικών του εδάφους, τα οποία αναφέρονται αναλυτικά στην προαναφερθείσα μελέτη :

- **Φαινόμενα διαλύσεως**

Παρουσιάζονται στους ασβεστολιθικούς σχηματισμούς ως αυλακώσεις, κοιλότητες ιδιότροπης μορφής ή ημιτονοειδείς προεξοχές. Αντιπροσωπευτική είναι η περιοχή του Ακοντίου Όρους και του Κερατοβουνίου, καθώς και οι παρυφές της Κωπαΐδας όπου υπάρχουν ασβεστόλιθοι (Barbeau, 1966).

- **Φαινόμενα ανακρυσταλλώσεως**

Παρουσιάζονται στους διαλελυμένους ασβεστόλιθους υπό μορφή ασβεστίτη. Έχουν την εμφάνιση ρωγμών, πλάτους μεγαλύτερου του 1 m, που έχουν πληρωθεί με ασβεστίτη και συναντώνται κυρίως ανατολικά του Ακοντίου Όρους.

- **Σχηματισμός ασβεστολιθικού λατυποπαγούς**

Εμφανίζεται σε ρήγματα των κλιτύων ασβεστολιθικών όγκων ή σε στους κώνους απόθεσης χειμάρρων. Ο σχηματισμός του ήταν αποτέλεσμα τεκτονικών κινήσεων που δεν οδηγούσαν σε πλήρη θραύση πετρωμάτων, αλλά σε ρήγματα που επέτρεπαν τη ροή των υδάτων και συνεπώς τη δημιουργία σπηλαίων και ρωγμών λόγω διάλυσης. Πρόκειται για επιφανειακούς σχηματισμούς που εντοπίζονται κυρίως στις βόρειες και βορειοανατολικές παρυφές της Κωπαΐδας με τη μορφή καταβοθρών και σπηλαίων.

Όσον αφορά τις καταβόθρες που προαναφέρθηκαν, πρόκειται για έγκοιλα που έχουν σχηματιστεί σε ασβεστολιθικούς σχηματισμούς και εμφανίζονται κυρίως στην περιοχή της Κωπαΐδας, όπου πριν την αποξήρανσή της, αποστράγγιζαν σημαντικό μέρος των υδάτων της. Αναφέρεται ότι εντοπίζονται 24 μεγάλες καταβόθρες στα βόρεια της λίμνης και συγκεκριμένα, ανατολικά του χωριού Πύργος, οι οποίες σχηματίστηκαν λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας των υδάτων σε CO₂ που διέλυσε τους ασβεστολιθικούς σχηματισμούς (Philippson, 1962).

Τελικά, τα νερά που εισρέουν στις καταβόθρες εμφανίζονται και πάλι στα βορειοδυτικά της λίμνης, πίσω από τα χαμηλά βουνά που οριοθετούν τις παρυφές της, στην περιοχή της Λάρυμνας ή του Σκροπονερίου μέσω πηγών. Εκτιμάται ότι μέρος της ποσότητας των αποστραγγιζόμενων υδάτων

διαφεύγει υπόγεια στον Ευβοϊκό Κόλπο (Υπουργείο Γεωργίας, 1971, σ. 44). Στην ίδια μελέτη αναφέρεται ένας διαχωρισμός των καταβόθρων σε ομάδες σύμφωνα με τον F. Kraus (1892):

- Καταβόθρες στην περιοχή Στροβικίου, στα βόρεια της Κωπαΐδας, που εκβάλλουν στον κόλπο Αταλάντης.
- Καταβόθρες στα βορειοανατολικά της Κωπαΐδας, που εκβάλλουν στον όρμο Λάρυμνας.
- Καταβόθρες της περιοχής Καρδίτσας, που εκβάλλουν στον όρμο Σκροπονερίου μέσω 9 πηγών.
- Καταβόθρες μεταξύ Καρδίτσας και Μουλκίου, που οδηγούν τα νερά υπόγεια στην Υλίκη.
- Μία καταβόθρα εντός της αποξηραμένης λίμνης, στο βράχο Γλα που παλαιότερα ήταν νησί.

2.3.4. Διαφυγές υπογείων υδάτων εκτός λεκάνης

Η σύγκριση της παροχής των πηγών, μέσω των οποίων αποστραγγίζονται οι καρστικοποιημένοι, υδροφόροι σχηματισμοί της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, με τη μεγάλη έκταση των περιοχών που αποστραγγίζουν, δημιούργησε ερωτήματα σχετικά με πιθανές διαφυγές των υπογείων υδάτων από τη λεκάνη. Από μελέτες του Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. προκύπτει ότι υπάρχουν τρεις πιθανές ζώνες διαφυγών τόσο στον Ευβοϊκό Κόλπο, όσο και στην πεδιάδα της Θήβας, όπως περιγράφεται αμέσως παρακάτω.

Η εκτίμηση του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.) για το προαναφερόμενο φαινόμενο, είναι ότι πιθανότατα νερά που διηθούνται στην περιοχή του Μοδίου (βορειοδυτικά της λεκάνης) κινούνται υπόγεια προς τις πηγές που βρίσκονται κοντά στον Ευβοϊκό κόλπο (Καμένα Βούρλα, Θερμοπύλες), όπως αναφέρεται σε Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων για τη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού (Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., 1993). Βέβαια, αυτή ήταν μια αρχική εκτίμηση, του 1986, που αφορούσε τα νερά των πηγών Μέλανα, Μαυρονερίου και Πολυγύρας. Στην ίδια μελέτη επισημαίνεται ότι τελικά οι διαφυγές ήταν πολύ μεγαλύτερες από την παροχή των πηγών αυτών (Παγούνης κ.ά., 1993).

Επίσης, αναφέρεται και μία δεύτερη ζώνη διαφυγών προς τον Ευβοϊκό Κόλπο και τις πηγές της Τραγάνας και της Λάρυμνας, η οποία επιβεβαιώνεται αφενός από το γεγονός ότι ανατολικά των προαναφερόμενων πηγών, από το Χλωμό Όρος μέχρι τη σήραγγα Καρδίτσας, δεν εκδηλώνονται άλλες αξιόλογες πηγές, αφετέρου από νεότερες απόψεις του Ι.Γ.Μ.Ε. σύμφωνα με τις οποίες αναπτύσσεται ζώνη διαφυγών στον Ευβοϊκό Κόλπο στα βόρεια της Κωπαΐδας.

Η τρίτη ζώνη διαφυγών τοποθετείται στην λεκάνη των Βαγίων, στα νοτιοανατολικά της λεκάνης απορροής, όπου πιθανώς καταλήγει και τμήμα των εκφορτίσεων του Ελικώνα. Εκτιμάται ότι οι διαφυγές καταλήγουν στο Θηβαϊκό πεδίο που βρίσκεται νοτιοανατολικά της λεκάνης Βαγίων. Μάλιστα, υδρογεωτρήσεις που έγιναν από το Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. στην περιοχή του Σφίγγιου Όρους, έδειξαν στάθμη υπόγειου ύδατος στα +40 m (απόλυτο υψόμετρο), η οποία είναι συμβατή με τη λίμνη Υλίκη. Άλλωστε, το

Θηβαϊκό Πεδίο βρίσκεται σε επικοινωνία με τη λίμνη Υλίκη που δέχεται τα νερά της υδρολογικής λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού και ίσως σε αυτή την επικοινωνία οφείλεται το γεγονός ότι οι υπόγειοι υδροφορείς της περιοχής δεν είναι πλούσιοι (Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., 1974, σ. 12).

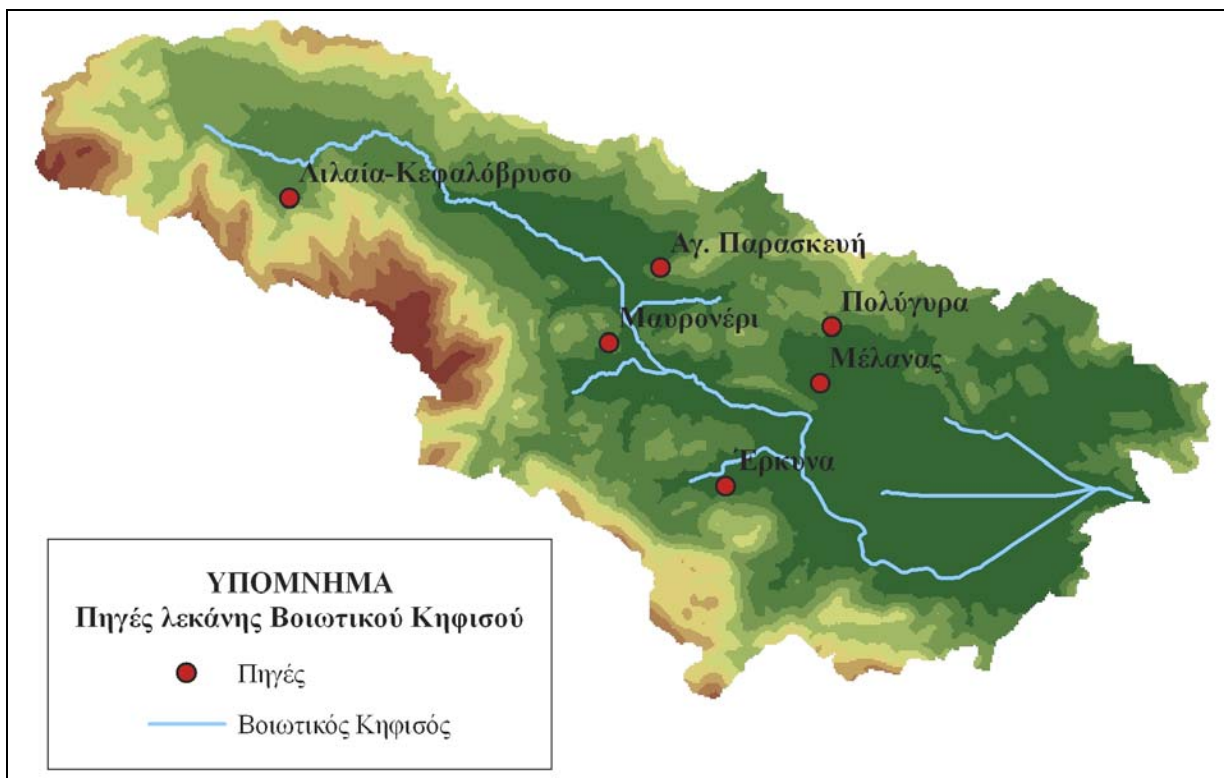
Τέλος, εμφανίζεται και μια επιφανειακή αποστράγγιση προς τον Ευβοϊκό Κόλπο μέσω της καταβόθρας του Αγίου Ιωάννη, στα βορειοανατολικά της Κωπαΐδας, στην οποία κατέληγαν τα νερά του Μέλανα ποταμού πριν την εκτροπή τους στη σήραγγα Καρδίτσας (Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., 1993).

2.3.5. Πηγές

Γενικά, οι πηγές εκδηλώνονται σε θέσεις όπου ο υδροφόρος ορίζοντας φτάνει με κάποιο τρόπο μέχρι την επιφάνεια του εδάφους, είτε πρόκειται για σημεία επαφής διαπερατών σχηματισμών (π.χ. ασβεστόλιθος) με αδιαπέρατους (π.χ. φλύσχης), όπου το νερό δεν κατεισδύει και αναγκάζεται να βγει στην επιφάνεια (πηγές επαφής), είτε πρόκειται για γεωλογικά φαινόμενα π.χ. μεταπτώσεις, ρήγματα, καρστ που οδηγούν τα υπόγεια ύδατα στην επιφάνεια κλπ.

Στην περιοχή μελέτης, εκδηλώνονται αρκετές πηγές σημαντικής παροχής, τόσο στις παρυφές μεγάλων ασβεστολιθικών όγκων (π.χ. Παρνασσός) όσο και στις πεδινές περιοχές γύρω από τη λεκάνη της Κωπαΐδας. Στη μελέτη του Υπουργείου Γεωργίας (1974, σ. 48) αναφέρεται ότι κατά μήκος της νότιας πλευράς του Ακοντίου Όρους εκδηλώνονται πηγές που φαίνεται να συνδέονται με μεταπτώσεις (Barbeau κ.ά., σ. 8). Οι πηγές αυτές αναφέρεται ότι ανήκουν στην κατηγορία των καρστικών πηγών υπερπλήρωσης που δημιουργήθηκαν όταν ο υδροφόρος ορίζοντας των καρστικών σχηματισμών ήρθε σε επαφή με τις προσχώσεις της Κωπαΐδας. Οι προσχώσεις, έχοντας σαφώς μικρότερη διαπερατότητα, επέτρεψαν τη διέλευση μικρότερου ποσοστού ύδατος, με αποτέλεσμα το υπόλοιπο να ανέλθει στην επιφάνεια μέσω των μεταπτώσεων.

Στην παρούσα εργασία έχουν ληφθεί υπόψη οι έξι σημαντικότερες πηγές της λεκάνης, που εκδηλώνονται στην περιοχή του άνω και κυρίως του μέσου ρου του Βοιωτικού Κηφισού (Εικόνα 6). Επισημαίνεται ότι σε αρκετές περιπτώσεις πρόκειται για συγκροτήματα πηγών, καθώς συχνά οι καρστικοί σχηματισμοί επιτρέπουν την άνοδο των υπογείων υδάτων στην επιφάνεια σε πολλές κοντινές θέσεις. Επίσης, λόγω της μεγάλης παροχής των πηγών, σχηματίζονται και τα ομώνυμα ποτάμια που αποτελούν κλάδους του Βοιωτικού Κηφισού, όπως ο ποταμός Μέλανας. Οι πηγές αυτές περιγράφονται αμέσως παρακάτω:



Εικόνα 6: Οι μεγαλύτερες πηγές της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού. Σε ορισμένες θέσεις η υδροφορία είναι αρκετά πλούσια και τα σημεία του χάρτη αντιπροσωπεύουν στην πραγματικότητα συγκροτήματα πηγών.

- **Πηγή Λιλαία – Κεφαλόβρυσο**

Η πηγή Λιλαία, εκδηλώνεται στην περιοχή του άνω ρου, στα νοτιοανατολικά της πεδινής περιοχής Γραβιάς – Αμφίκλειας, κοντά στους πρόποδες του Παρνασσού. Βρίσκεται κοντά στο ομώνυμο χωριό (ή Κάτω Αγόριανη) που πήρε το όνομά του από την Αρχαία Φωκική πόλη Λίλαια, όνομα μιας από τις Ναϊάδες, κόρες του Κηφισού (Πάπυρος Larousse Britanica, 2007). Στην περιοχή του Παρνασσού εμφανίζονται και άλλες εκφορτίσεις σε κοντινές περιοχές, εκτός από τη Λιλαία (Εικόνα 7), όπως στο Πολύδροσο (Σουβάλα) και στον Επτάλοφο ή Άνω Αγόριανη (π.χ. το ανατολικό και δυτικό Κεφαλόβρυσο) (Εικόνες 8 - 9). Στους υπολογισμούς που περιγράφονται σε επόμενα κεφάλαια, θεωρείται μια θέση εκφόρτισης για την περιοχή του άνω ρου με υψόμετρο στα 300 m, δηλαδή στους πρόποδες του Παρνασσού. Από τις καρστικές πηγές που εκδηλώνονται στις θέσεις αυτές τροφοδοτείται ο κλάδος του Βοιωτικού Κηφισού μεταξύ Γραβιάς και Αμφίκλειας.



Εικόνα 7: Οι πηγές Λιλαίας. (Πηγή:
<http://dim-lilaias.fok.sch.gr/images/121.JPG>)



Εικόνα 8: Πηγές λίγο έξω από το Πολύδροσο ή
Σουβάλα. (Πηγή:
http://www.agrotravel.gr/agro/Documents/Agrotravel/paths/sterea%20ellada/pezoporikidiadromi16/photo?image_scale=popup)

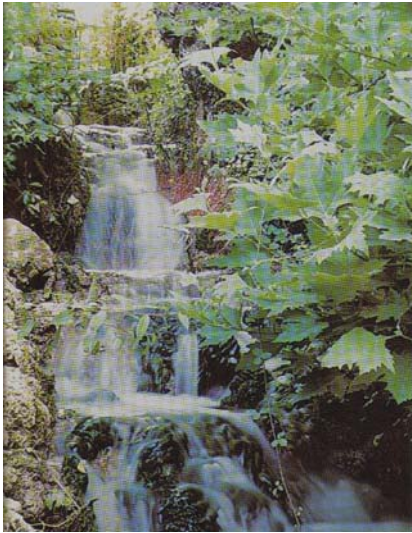


Εικόνα 9: Καρστική πηγή στην περιοχή του άνω ρου του Βοιωτικού Κηφισού (Πηγή:
http://www.agrotravel.gr/agro/Documents/Agrotravel/paths/sterea%20ellada/troupa/photo?image_scale=popup)

▪ Πηγή Μαυρονερίου

Οι πηγές Μαυρονερίου εκδηλώνονται στις παρυφές του Φιλοβοιωτικού Όρους, στους πρόποδες του Παρνασσού, βορειοανατολικά της Δαύλειας (Εικόνες 10 – 11). Πρόκειται για πηγή υπερπλήρωσης στην οποία καταλήγουν ύδατα που αφενός οδηγούνται εκεί μέσω των καρστικών ασβεστολίθων του προαναφερόμενου ορεινού όγκου και αφετέρου εγκλωβίζονται εκεί λόγω των ημιδιαπερατών τεταρτογενών σχηματισμών της πεδιάδας μεταξύ Δαύλειας και Ορχομενού. Η ετήσια παροχή της φτάνει

τα $52,9 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., 1974, σ. 12). Οι πηγές βρίσκονται στην περιοχή του μέσου ρου σε υψόμετρο 120 m.



Εικόνα 10: Μία από τις πολλές πηγές της περιοχής.

(Πηγή: <http://zeus2008-elladara.blogspot.com/2008/05/blog-post.html>)



Εικόνα 11: Η περιοχή όπου πηγάζει το Μαυρονέρι σε περίοδο ξηρασίας (Δεκέμβριος 2001). Διακρίνονται οι ασβεστολιθικοί σχηματισμοί στη γύρω περιοχή. (Πηγή: Ευστρατιάδης, προσωπική επικοινωνία)

▪ **Πηγές Αγίας Παρασκευής**

Εκδηλώνονται στα ανατολικά της πεδιάδας Τιθορέας στους πρόποδες ασβεστολιθικού όγκου, στα νοτιοανατολικά του όρους Καλλίδρομο. Τα νερά των πηγών που ρέουν επιφανειακά προφανώς τροφοδοτούν το τμήμα του Βοιωτικού Κηφισού μεταξύ Τιθορέας και Ανθοχωρίου, καθώς και παραπόταμο με το όνομα Μπογδανόρεμα. Ανήκουν και αυτές στην περιοχή του μέσου ρου του Βοιωτικού Κηφισού και βρίσκονται σε υψόμετρο 130 m.

▪ **Πηγές Μέλανα**

Πρόκειται για πηγές υπερπλήρωσης που τροφοδοτούνται από νερά που συγκεντρώνονται στους καρστικοποιημένους ασβεστολιθικούς σχηματισμούς του Ακοντίου όρους, της Μαυροράχης και του Υφαντείου όρους. Οι ημιδιαπερατοί σχηματισμοί της Κωπαΐδας και οι πρακτικά στεγανοί σχηματισμοί γύρω από το χωριό Παύλον, δεν επιτρέπουν τη διέξοδο των υδάτων απευθείας στις πεδινές περιοχές της λίμνης. Μαζί με τις πηγές Μαυρονερίου αποτελούν τις μεγαλύτερες πηγές της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού με ετήσια παροχή $109,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., 1974, σ. 12). Οι πηγές Μέλανα ανήκουν στην περιοχή του κάτω ρου του Βοιωτικού Κηφισού και βρίσκονται σε υψόμετρο 100 m. Αναφέρεται, μάλιστα, ότι το συγκρότημα των πηγών Μέλανα αποτελείται από 70 περίπου πηγές που εκτείνονται από την Ακιδάλια κρήνη (ή πηγή των Χαρίτων) (Εικόνες 12 – 13) που είναι η βασικότερη και βρίσκεται στον

Ορχομενό, έως το χωριό Διόνυσος, βορειοδυτικά του Ορχομενού. Από τις πηγές αυτές τροφοδοτείται ο ομώνυμος ποταμός, που ονομάζεται αλλιώς και Μαυροπόταμος από τα σκούρα νερά του, κάτι που οφείλεται στην πλούσια βλάστηση που υπάρχει κατά μήκος του (Εικόνες 14 – 15). Ο Πausanias αναφέρει ότι ήταν το μοναδικό πλωτό ποτάμι στην Ελλάδα, ενώ τεχνικά έργα είχαν πραγματοποιηθεί ήδη από την 3^η χιλιετία π.Χ. από το λαό των Μινυών (πηγή στο διαδίκτυο: www.orchomenos.gr). Σήμερα, τα νερά του Μέλανα περνάνε στην πεδιάδα της Κωπαΐδας, όπου χρησιμοποιούνται για άρδευση, και όπου ίσως κάποια ποσότητα χάνεται σε καταβόθρες που υπάρχουν στα βόρεια της αποξηραμένης λίμνης (στην περιοχή του Κάστρου, βόρεια του χωριού Κόκκινο). Τελικά, τα εναπομείναντα ύδατα συγκεντρώνονται στη Συγκεντρωτική Διώρυγα και καταλήγουν στη Διώρυγα Καρδίτσας.



Εικόνα 12: Η Ακιδαλία κρήνη αναβλύζει με φυσαλίδες και τροφοδοτεί τον ποταμό Μέλανα.

(Πηγή: www.orchomenos.gr/ORCHOMENOS/LEV01/P.P.O/TOUR/akid/akidalia01.htm)



Εικόνα 13: Η Ακιδαλία κρήνη τη δεκαετία του 1950.



Εικόνα 14: Πηγές του Μέλανα ποταμού στους πρόποδες του Ακοντίου Όρους.

(Πηγή: www.orchomenos.gr/ORCHOMENOS/LEV01/P.P.O/TOUR/melas/melas00.htm)



Εικόνα 15: Ο Μέλανας ποταμός στην πεδιάδα της Κωπαΐδας.

▪ Πηγές Πολυγύρας

Είναι καρστικές πηγές που βρίσκονται βόρεια των πηγών Μέλανα. Πηγάζουν και αυτές από τους καρστικούς ασβεστολιθικούς σχηματισμούς στους πρόποδες του Υφαντείου όρους, στα βορειοδυτικές παρυφές της Κωπαΐδας και τα νερά τους καταλήγουν και στο Μέλανα ποταμό. Ανήκουν στην περιοχή του κάτω ρου και τοποθετούνται σε υψόμετρο 95m περίπου. Οι μηχανισμοί εκφόρτισης είναι παρόμοιοι με αυτούς των πηγών Μέλανα, αλλά θεωρείται ότι η γεωλογία της περιοχής δεν επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ τους (Ευστρατιάδης, 2008, σ.288).

▪ Πηγές ποταμού Έρκυνα

Πρόκειται για τις πηγές της Κρύας στη Λιβαδειά, οι οποίες τροφοδοτούν την Έρκυνα, παραπόταμο του Βοιωτικού Κηφισού, που διασχίζει τη Λιβαδειά και τελικά καταλήγει στη Συγκεντρωτική Τάφρο (Εικόνες 16 – 18). Οι πηγές εκδηλώνονται στους πρόποδες του Ελικώνα, στην περιοχή του κάτω ρου του Βοιωτικού Κηφισού, σε υψόμετρο περίπου 200 m. Σύμφωνα με τη μυθολογία, η Έρκυνα ήταν κόρη του Μάντη Τροφονίου και κρατούσε πάντοτε στα χέρια της μια χήνα. Όταν κάποτε η χήνα χάθηκε, η Έρκυνα ψάχνοντας οδηγήθηκε σε ένα σπήλαιο όπου και βρήκε τη χήνα πίσω από μια πέτρα. Ανασηκώνοντας την πέτρα ξεχύθηκε νερό και η Έρκυνα μεταμορφώθηκε στο ομώνυμο ποτάμι (Εικόνα 19). Η ετυμολογία του ονόματος οδηγεί στο ρήμα είργνυμι που σημαίνει εμποδίζω την έξοδο (Πηγή στο διαδίκτυο: www.viotiablogs.gr/).



Εικόνα 16: Η γέφυρα των Πηγών στη Λιβαδειά. Ποταμός Έρκυνα. (Πηγή: www.akazoo.gr/Media/ContentDetail.aspx?node=photos&photoId=cd6fe4b3-d31e-4cd5-a42a-13b26e7b312f)



Εικόνα 17: Το μεσαιωνικό γεφύρι, όπως είναι σήμερα. (Πηγή: gwyneed.blogspot.com/2008/04/blog-post_15.html)



Εικόνα 18: Οι πηγές της Κρύας στη Λιβαδειά που τροφοδοτούν τον ποταμό Έρκυνα. (Πηγή: www.freestuff.gr/postcards/thumbnails.php?album=7)



Εικόνα 19: Προτομή της Έρκυνας από την οποία πήρε το όνομά του ο ποταμός. (Πηγή: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/70/Livadia_evlahos.jpg)

3. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

3.1. Γενικά

Ένα υδρολογικό μοντέλο περιλαμβάνει ένα σύνολο μαθηματικών μετασχηματισμών που έχουν στόχο την αναπαράσταση των φυσικών διεργασιών του υδρολογικού κύκλου, χρησιμοποιώντας μετρήσεις πεδίου και κατάλληλες υποθέσεις για τους φυσικούς μηχανισμούς. Έτσι, τελικά εκτιμώνται ποσοτικά υδρολογικές μεταβλητές που δεν είναι δυνατό να μετρηθούν στο πεδίο. Πιο συγκεκριμένα, ένα υδρολογικό μοντέλο μπορεί να περιγράψει είτε ένα μεμονωμένο γεγονός (π.χ. αιχμή πλημμύρας) είτε τη διαχρονική εξέλιξη ισοζυγίου πεπερασμένης χωρικής ενότητας (π.χ. μιας λεκάνης απορροής). Στην πρώτη περίπτωση, η προσομοίωση βασίζεται σε εμπειρικές μεθόδους και μπορεί να αγνοεί βασικές υδρολογικές διαδικασίες (π.χ. εξάτμιση), με χαρακτηριστικό παράδειγμα τη μέθοδο του μοναδιαίου υδρογραφήματος. Στη δεύτερη περίπτωση οι μετασχηματισμοί στηρίζονται σε μεγάλο βαθμό στη φυσική πραγματικότητα, την οποία περιγράφουν με μαθηματικές σχέσεις, διαφορικές εξισώσεις κλπ. (Ευστρατιάδης, 2008, σ. 207).

Με ένα υδρολογικό μοντέλο μπορεί να προσομοιώνεται η κίνηση είτε επιφανειακών υδάτων σε μία λεκάνη απορροής, είτε υπόγειων υδάτων σε έναν υδροφορέα ή ακόμα και των δύο μαζί αν το ζητούμενο είναι η διαχείριση των υδάτων στο υδρολογικό σύστημα μιας περιοχής.

Όσον αφορά τα επιφανειακά ύδατα, η προσομοίωση γίνεται σε επίπεδο λεκάνης απορροής ή και υπολεκανών. Κατά την αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών περιγράφεται η μετατροπή των κατακρημνίσεων σε απορροή, η οποία αποτελεί μεταβλητή του μοντέλου και μέσω αυτής ελέγχεται η προσαρμογή του.

Η προσομοίωση της κίνησης των υπογείων υδάτων γίνεται στα όρια του υδροφορέα. Συνήθως, στην περίπτωση αυτή γίνεται διαχωρισμός τους σε χωρικές μονάδες, τα κύτταρα, με διάφορα κριτήρια (διαπερατότητες γεωλογικών σχηματισμών, όρια υδρογεωλογικών λεκανών, ανάγλυφο του εδάφους κλπ.), όπως περιγράφεται αναλυτικότερα σε επόμενη ενότητα. Τα δεδομένα εισόδου είναι οι διάφορες φορτίσεις του υδροφορέα, από κατεισδύσεις, απολήψεις μέσω γεωτρήσεων κλπ. και οι αρχικές και οριακές συνθήκες. Έλεγχος προσαρμογής μπορεί να γίνει από μετρήσεις πιεζομετρίας ή εκφορτίσεις πηγών.

Τέλος, υπάρχουν και οι περιπτώσεις που απαιτείται προσομοίωση της κίνησης επιφανειακών και υπόγειων υδάτων μαζί, όπως στην περιοχή μελέτης, όπου η υπόγεια ροή επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την απορροή της λεκάνης στην έξοδο, τις εκφορτίσεις των πηγών, αλλά και επηρεάζεται από την κατείδυση των επιφανειακών υδάτων που είναι διαφορετική κατά μήκος των κλάδων του ποταμού ή μεταξύ περιοχών διαφορετικής διαπερατότητας. Η συνδυασμένη προσομοίωση έχει το πλεονέκτημα ότι είναι αρκετά αντιπροσωπευτική του πραγματικού υδρολογικού συστήματος και διαφέρει από τα μοντέλα

υπογείων νερών ως προς την κατείσδυση που δεν αποτελεί εξωτερική φόρτιση αλλά εκτιμάται από το μοντέλο. Τα τελευταία χρόνια εξελίσσεται η ανάπτυξη και λειτουργία μοντέλων που συνδυάζουν όχι μόνο κίνηση επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, αλλά και μηχανισμούς μεταφοράς φερτών υλικών, ρύπων, κλιματικά φαινόμενα κλπ. (Rozos et al, 2004).

Ένα μοντέλο υδρολογικής προσομοίωσης, όπως αυτό που εφαρμόστηκε στην περιοχή μελέτης, γενικά μπορεί να περιγραφεί με μία σχέση μη γραμμικού μετασχηματισμού, σαν την ακόλουθη που αναφέρεται από τον Ευστρατιάδη (σ. 207, 2008):

$$y = h(s_0, x, \theta) \quad (0.1)$$

όπου:

y: είναι οι αποκρίσεις της λεκάνης, όπως η απορροή στην έξοδο, οι εκφορτίσεις των υπόγειων νερών (π.χ. σε πηγές) κλπ.,

s_0 : οι αρχικές και οριακές συνθήκες του φυσικού συστήματος (π.χ. οι στάθμες των υπογείων νερών),

x: είναι οι φορτίσεις του συστήματος (π.χ. χρονοσειρές βροχόπτωσης, δυναμική εξατμοδιαπνοή, απολήψεις νερού από γεωτρήσεις, αρδευτικά συστήματα κλπ.) και

θ : τα χαρακτηριστικά μεγέθη του συστήματος, τα οποία είτε προέρχονται από μετρήσεις πεδίου (όπως η έκταση των υπολεκάνων ή τα μήκη των ρεμάτων) είτε προκύπτουν έμμεσα (παράμετροι μοντέλου). Το ζητούμενο και στις δύο περιπτώσεις είναι να περιγράψουν ρεαλιστικά τις ιδιότητες του φυσικού συστήματος.

3.2. Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων

Τα υδρολογικά μοντέλα χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες σύμφωνα με τη Μιμίκου (σ.9, 2006):

- Σύμφωνα με τη χωρική κλίμακα της περιοχής μελέτης χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες (Gupta et al., 2003):
 - i. **Αδιαμέριστα ή συγκεντρωτικά (lumped)**. Σε τέτοιου είδους υδρολογικά μοντέλα η υδρολογική λεκάνη θεωρείται ενιαία χωρική ενότητα (με μία τιμή κάθε παραμέτρου, όπως βροχόπτωση ή θερμοκρασία, σε όλη τη λεκάνη). Εκτιμάται η απορροή στην έξοδο της λεκάνης με προσομοίωση των βασικών συνιστωσών του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης.
 - ii. **Ημικατανεμημένα (semi – distributed)**. Στην περίπτωση αυτή η υδρολογική λεκάνη διαχωρίζεται σε υπολεκάνες μεγάλης έκτασης. Μπορεί να είναι φυσικές υπολεκάνες ή περιοχές με κοινά χαρακτηριστικά. Στην περίπτωση αυτή, πρέπει να εισάγονται διαφορετικά δεδομένα (π.χ. βροχόπτωσης) για κάθε υπολεκάνη χωριστά. Λόγω της διαμέρισης δίνεται και η δυνατότητα

υπολογισμού διόδευσης της πλημμύρας όταν φυσικά οι χρονοσειρές που διατίθενται είναι μικρής κλίμακας.

- iii. **Κατανεμημένα (distributed)**. Στην περίπτωση αυτή, εφαρμόζεται στην επιφάνεια της λεκάνης ένας κάρναβος, όχι απαραίτητα ορθογωνικός ή με ισομεγέθη ή γεωμετρικά τμήματα, που την χωρίζει σε υποπεριοχές, οι οποίες ονομάζονται κύτταρα. Τα κύτταρα δεν έχουν φυσική σημασία, όπως οι υπολεκάνες, αλλά οριοθετούν περιοχές ομοιογενείς και ισότροπες. Και στην περίπτωση αυτή, εισάγονται στο μοντέλο προσομοίωσης διαφορετικές χρονοσειρές για κάθε κύτταρο και χρησιμοποιούνται διαφορετικές παράμετροι.
 - iv. Τέλος, αναφέρεται και μια ενδιάμεση κατηγορία μοντέλων προσομοίωσης που ονομάζονται **ημιαδιαμέριστα (semi – lumped)** και τοποθετούνται ανάμεσα στα αδιαμέριστα και τα ημικατανεμημένα. Στην περίπτωση αυτή, να μεν η λεκάνη χωρίζεται σε περιοχές που δέχονται διαφορετικές χρονοσειρές, αλλά χρησιμοποιούνται ενιαίες παράμετροι.
- Όσον αφορά τη χρονική κλίμακα, τα υδρολογικά μοντέλα χωρίζονται σε:
 - i. **Μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος (event)**. Αναφέρονται σε ένα μεμονωμένο γεγονός, δηλαδή ένα επεισόδιο βροχής.
 - ii. **Συνεχή (continuous)**. Τα μοντέλα αυτά λειτουργούν σε συνεχή χρόνο χρησιμοποιώντας χρονοσειρές ημερήσιες, ετήσιες κλπ.
- Η χρονική κλίμακα εξαρτάται από το σκοπό που εξυπηρετεί το υδρολογικό μοντέλο. Συνήθως, για την περιγραφή πλημμυρικών γεγονότων χρησιμοποιούνται μικρότερες κλίμακες, για παράδειγμα ημερήσιες χρονοσειρές, ενώ για τη διαχείριση υδρολογικών συστημάτων απαιτούνται μεγαλύτερες κλίμακες, π.χ. μηνιαίες. Η λήψη των κατάλληλων χρονοσειρών αποτελεί ένα πρόβλημα στη χρήση των υδρολογικών μοντέλων, καθώς συχνά υπάρχουν προβλήματα τόσο στην κάλυψη μιας περιοχής από όργανα μέτρησης, όσο και στην καταγραφή των μετρήσεων. Ένα δείγμα που δεν έχει την απαιτούμενη μικρή διακριτότητα ή δεν είναι σωστά χρονισμένο, μπορεί να μην περιγράφει αξιόπιστα ένα υδρολογικό φαινόμενο, π.χ. μια πλημμύρα (Ευστρατιάδης, 2008, σ. 211).
- Σε σχέση με τη δομή των μεταβλητών τους τα υδρολογικά μοντέλα διακρίνονται σε:
 - i. **Προσδιοριστικά (deterministic)**. Αυτού του είδους τα μοντέλα έχουν συμπεριφορά που προσομοιάζει τους πραγματικούς φυσικούς μηχανισμούς και η λειτουργία τους στηρίζεται στον προσδιορισμό των φυσικών παραμέτρων του υδρολογικού συστήματος. Η προσομοίωση στην περίπτωση αυτή καλείται παραμετρική (Μιμίκου, 2006, σ.274). Στις μεταβλητές των προσδιοριστικών μοντέλων δεν υπάρχει στοχαστική δομή. Τα εννοιολογικά μοντέλα και τα μοντέλα φυσικής βάσης που θα περιγραφούν παρακάτω είναι προσδιοριστικά.
 - ii. **Στοχαστικά (stochastic)**. Στην περίπτωση αυτή το φυσικό σύστημα αναπαριστάται από ένα ισοδύναμο στατιστικό σύστημα για το οποίο προσδιορίζονται στατιστικές παράμετροι.

Βασίζονται στη θεωρία των στοχαστικών ανελίξεων και από τις μεταβλητές του συστήματος τουλάχιστον μία έχει στοχαστική δομή, δηλαδή λαμβάνεται υπόψη η χρονική αλληλεπίδραση. Για την εκτίμηση των παραμέτρων του υδρολογικού συστήματος λαμβάνονται υπόψη τα στατιστικά χαρακτηριστικά των παρατηρημένων μεγεθών και όχι τα ίδια τα μεγέθη. Υπάρχουν και τα στατιστικά μοντέλα για τις περιπτώσεις των υδρολογικών φαινομένων που είναι ανεξάρτητα από κάθε άλλη εμφάνισή τους. Τα μοντέλα αυτά βασίζονται στην επαγωγική στατιστική. Τα στατιστικά και στοχαστικά μοντέλα ονομάζονται και πιθανοτικά και χαρακτηριστικό τους είναι η ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας των προγνώσεων και όχι η μονοσήμαντη εκτίμηση μεταβλητών. Έχουν το πλεονέκτημα ότι με την εκτίμηση των στατιστικών χαρακτηριστικών διατηρούν μια συνέπεια με τα φυσικά χαρακτηριστικά του υδροσυστήματος (Salas et al., 1980).

- Τέλος, όσον αφορά τον τρόπο με τον οποίο προσεγγίζονται οι φυσικές διεργασίες τα υδρολογικά μοντέλα χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:
 - i. **Φυσικής βάσης (physically based).** Τα μοντέλα προσομοίωσης αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούν τις εξισώσεις που ισχύουν και περιγράφουν ένα φυσικό φαινόμενο (π.χ. εξισώσεις κορεσμένης και ακόρεστης ροής κλπ.) αναπαριστώντας υδρολογικές διεργασίες σε μικρή κλίμακα. Γι' αυτό και πρόκειται εκ των πραγμάτων για κατανεμημένα μοντέλα προσομοίωσης. Δεδομένου ότι δε βασίζονται σε μετρήσεις παροχής και πιεζομετρίας, είναι κατάλληλα για εκτίμηση μεγεθών σε λεκάνες στις οποίες δεν είναι δυνατή η λήψη μετρήσεων. Έχουν, όμως, το μειονέκτημα ότι τα δεδομένα πρέπει να προέρχονται από μικρή χωρική κλίμακα, λόγω της πυκνής διαμέρισης, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα τα εκτιμώμενα μεγέθη να είναι πολλά. Το πλήθος αυτό είναι αποτέλεσμα της φυσικής ετερογένειας των υδρολογικών μηχανισμών σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τα μεγέθη αυτά αντιπροσωπεύουν ακριβώς αυτές τις φυσικές ιδιότητες. Για το λόγο αυτό, τα μοντέλα φυσικής βάσης δεν χρησιμοποιούνται για πρόγνωση απορροής, αλλά για εξειδικευμένες εκτιμήσεις (σχετιζόμενες π.χ. με το κλίμα, τις χρήσεις γης κλπ.) σε συνδυασμό με υδροδυναμικά μοντέλα για μεταφορά φερτών, ρύπων κλπ.
 - ii. **Εννοιολογικά (conceptual).** Ο υδρολογικός κύκλος αναπαριστάται με τη βοήθεια ιδεατών στοιχείων, το κάθε ένα από τα οποία προσομοιώνει μια στοιχειώδη διαδικασία του φυσικού φαινομένου (Μιμίκου, 2006, σ. 9). Η αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών μπορεί να γίνει στη χωρική κλίμακα που επιλέγεται σε κάθε περίπτωση. Έχουν το πλεονέκτημα ότι περιγράφουν με απλό και αντιπροσωπευτικό τρόπο πολύπλοκους φυσικούς μηχανισμούς σε χωρικές ενότητες με ανομοιογένεια, χωρίς να έχουν πλήρη φυσική ερμηνεία. Παρ' όλα αυτά ερευνητές θεωρούν ότι και τα κατανεμημένα μοντέλα μπορεί να είναι εννοιολογικά, αλλά στη χωρική μονάδα όπου οι εδαφικές ιδιότητες μπορούν να θεωρηθούν ισότροπες και η ίδια

ομογενής, καθώς είναι επίφοβη η γενίκευση σημειακών φυσικών νόμων στην επιφάνεια της λεκάνης ή υπολεκάνης (Beven, 1989).

- iii. **Εμπειρικά ή μαύρου κουτιού (empirical ή black box).** Χρησιμοποιούν παραμέτρους που δεν έχουν φυσική σημασία. Οι εσωτερικές διεργασίες που διέπουν τη σχέση εισόδου (κατακρήμνιση) και εξόδου (απορροή, εξάτμιση) δεν είναι γνωστές (Μιμίκου, σ. 9, 2006). Επειδή οι εξισώσεις δεν αναπαριστούν τις ενδιάμεσες διεργασίες του υδρολογικού κύκλου είναι δυνατή η περιγραφή πολύπλοκων συστημάτων με μικρό υπολογιστικό φόρτο. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων μοντέλων είναι τα νευρωνικά δίκτυα για βραχυπρόθεσμη πρόγνωση πλημμυρικών φαινομένων, τα μοντέλα γενετικού προγραμματισμού που χρησιμοποιούν γενετικούς αλγόριθμους, το Μοναδιαίο Υδρογράφημα κλπ. (π.χ., Brath et al., 2002).

3.3. Βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων

Η βαθμονόμηση ή ρύθμιση μοντέλου (calibration) είναι μια διαδικασία προσαρμογής των παραμέτρων του, ώστε τα συνθετικά αποτελέσματα που δίνει να συγκλίνουν με τις αντίστοιχες μετρήσεις και το μοντέλο να αναπαριστά όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά τις φυσικές διεργασίες του υδρολογικού συστήματος (Μιμίκου, 2006, σ. 277). Δεν πρόκειται απλώς για εμπειρική, εκ των προτέρων εκτίμηση των παραμέτρων, αλλά για εφαρμογή συστηματικής διαδικασίας προσαρμογής της τιμής τους στα μετρημένα δεδομένα του υδροσυστήματος. Αυτή η συστηματική διαδικασία απαιτεί όσο το δυνατόν περισσότερες χρονοσειρές απόκρισης, ώστε να είναι δυνατός ο έλεγχος των αποτελεσμάτων με τα πραγματικά δεδομένα. Η διαδικασία της βαθμονόμησης αν και αρχικά εφαρμοζόταν σε εννοιολογικά μοντέλα, τελικά είναι χρήσιμη σε όλες τις κατηγορίες των μοντέλων, καθώς το ζητούμενο είναι οι υπολογισμένες τιμές των παραμέτρων να προσεγγίζουν τις μετρημένες (Ευστρατιάδης, 2008, σ. 217).

Όσον αφορά τη διαδικασία της βαθμονόμησης διακρίνονται τρεις κατηγορίες:

- **Εμπειρική**

Σε αυτού του είδους τη βαθμονόμηση η επιλογή του συνδυασμού των παραμέτρων βασίζεται στην εμπειρία του υδρολόγου, γεγονός που ενισχύει τη σχέση των παραμέτρων με τα φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης. Έχει το μειονέκτημα ότι είναι επίπονη και υποκειμενική όσον αφορά την επιλογή τους, η οποία δε βασίζεται σε αριθμητικά κριτήρια σφάλματος.

- **Αυτόματη**

Στην περίπτωση αυτή καθορίζεται ένα μέτρο ικανοποιητικής προσαρμογής των προσομοιωμένων στις παρατηρημένες τιμές. Διατυπώνεται, δηλαδή, ένα πρόβλημα γραμμικής βελτιστοποίησης, στο οποίο οι παράμετροι το μοντέλου είναι και οι μεταβλητές ελέγχου και προκύπτουν μετά από βελτιστοποίηση.

Μειονέκτημα της αυτόματης βαθμονόμησης είναι η εξάρτηση των αποτελεσμάτων από το μέτρο προσαρμογής και διάφορες πηγές αβεβαιότητας, ενώ σε αντίθεση με την εμπειρική βαθμονόμηση είναι αντικειμενική και ευκολότερη. Αυτό που απαιτεί προσοχή στην αυτόματη βαθμονόμηση είναι ο εντοπισμός και αποφυγή «εικονικά» ικανοποιητικών αποτελεσμάτων που όμως δεν έχουν φυσική σημασία, σαν συνέπεια των αβεβαιοτήτων που αναφέρθηκαν.

▪ Ημιαυτόματη βαθμονόμηση

Συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της εμπειρικής και της αυτόματης, δηλαδή την αντικειμενικότητα, την ευκολία των διαδικασιών και τη δυνατότητα επέμβασης του υδρολόγου στη διαδικασία βελτιστοποίησης και στις συνθήκες του προβλήματος. Χρησιμοποιείται κυρίως σε σύνθετα υδροσυστήματα.

Υπάρχουν παρ' όλα αυτά απαιτήσεις που πρέπει να ισχύουν για οποιαδήποτε κατηγορία βαθμονόμησης. Συγκεκριμένα, είναι βασικό μετά τη βαθμονόμηση, το υδρολογικό μοντέλο να μπορεί να εφαρμοστεί για οποιοσδήποτε χρονοσειρές δεδομένων, εκτός των ιστορικών, και φυσικά η αναπαράσταση των σταδίων του υδρολογικού κύκλου που αφορούν την περιοχή μελέτης να βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στη φυσική πραγματικότητα. Το τελευταίο θα πρέπει να ισχύει και για τις βελτιστοποιημένες παραμέτρους του μοντέλου.

Ένα μέτρο σφάλματος της βαθμονόμησης, που δείχνει πόσο προσεγγίζουν οι προσομοιωμένες τιμές τις μετρημένες, είναι ο συντελεστής προσδιορισμού (determination coefficient) ή επεξηγούμενη διασπορά (explained variance) ή ισοδύναμα ο δείκτης αποτελεσματικότητας (efficiency ή αλλιώς δείκτης Nash - Sutcliffe) (Nash and Sutcliffe, 1970) που δίνεται από τη σχέση:

$$EFF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^T (y_i - y'_i)^2}{\sum_{i=1}^T (y_i - \bar{y})^2} \quad (0.2)$$

όπου:

y_i , είναι η παρατηρημένη χρονοσειρά,

\bar{y} , η μέση τιμή της,

y'_i , είναι η προσομοιωμένη χρονοσειρά και

T, αφορά το χρονικό διάστημα για το οποίο γίνεται ο έλεγχος.

Όσον αφορά τις τιμές που παίρνει ο δείκτης αποτελεσματικότητας, αυτές είναι από $-\infty$ έως 1 και διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις:

- i. Αν $EFF = 1$, πρόκειται για την ιδανική περίπτωση που η προσομοιωμένη και η παρατηρημένη χρονοσειρά ταυτίζονται και η προσαρμογή του μοντέλου στις πραγματικές τιμές είναι τέλεια.
- ii. Αν $0 < EFF < 1$, το πόσο καλή εκτιμήτρια είναι η προσομοιωμένη χρονοσειρά y_i' σε σύγκριση με την μέση τιμή \bar{y} της παρατηρημένης, εξαρτάται από το πόσο κοντά στο 1 βρίσκεται η τιμή του EFF . Σύμφωνα με τους Freer et. al. (1996) μία τιμή του EFF κοντά στο 0,8 – 0,9 θεωρείται πολύ καλή όσον αφορά την προσαρμογή των αποτελεσμάτων του μοντέλου στις παρατηρημένες τιμές, ενώ κοντά στο 0,3 είναι οριακά αποδεκτή (Ευστρατιάδης, 2008, σ. 220). Βέβαια, στην πρώτη περίπτωση, καθώς και σε εκείνη που $EFF = 1$ υπάρχει περίπτωση τα αποτελέσματα να φαίνονται ικανοποιητικά χωρίς να είναι, λόγω διαφόρων πηγών αβεβαιότητας και σφαλμάτων, όπως ήδη αναφέρθηκε.
- iii. Αν $EFF < 0$, σημαίνει ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου δεν είναι αξιόπιστα.
- iv. Αν $EFF = 0$, σημαίνει ότι οι y_i' και \bar{y} είναι ισοδύναμες εκτιμήτριες.

Υπάρχουν και άλλα μέτρα σφάλματος της βαθμονόμησης (Ευστρατιάδης κ.ά., 2006, σ. 61), όπως η μεροληψία, το σφάλμα αναπαραγωγής μηδενικής ροής και το σφάλμα αναπαραγωγής τάσης.

Η μεροληψία (bias) ελέγχει το πόσο κοντά στη μέση παρατηρημένη τιμή της απόκρισης της λεκάνης, βρίσκεται η αντίστοιχη μέση προσομοιωμένη τιμή, ώστε να μπορεί να αναπαραχθεί το ιστορικό υπερετήσιο υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης. Δίνεται από τη σχέση:

$$BIAS = \frac{\bar{y} - \bar{y}'}{\bar{y}} \quad (0.3)$$

όπου

\bar{y}' , η μέση τιμή της προσομοιωμένης χρονοσειράς και

\bar{y} , η αντίστοιχη μέση τιμή της παρατηρημένης χρονοσειράς.

Όταν η αποτελεσματικότητα είναι ίση με τη μονάδα, τότε η μεροληψία μηδενίζεται. Το αντίστροφο δεν ισχύει και έτσι, ένα μοντέλο μπορεί να αναπαράγει με μεγάλη ακρίβεια τη μέση τιμή της παρατηρημένης χρονοσειράς, χωρίς ωστόσο να προσαρμόζεται καλά, όπως συμβαίνει όταν $y_i' = \bar{y}$.

Επίσης, το υπολογιστικό πακέτο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ χρησιμοποιεί δύο ακόμη εμπειρικούς δείκτες ως κριτήρια προσαρμογής, οι οποίοι αναλύονται ακολούθως:

Το σφάλμα των μηδενικών τιμών ελέγχει αν το μοντέλο αναπαράγει φαινόμενα διακοπής της ροής ή μηδενίζει αδικαιολόγητα την παροχή ποταμού ή πηγής. Είναι χρήσιμο σε περιπτώσεις που οι μετρήσεις είναι αραιές. Δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$z_i = \begin{cases} y_i, & \text{αν } y'_i = 0 \\ y'_i, & \text{αν } y_i = 0 \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (0.4)$$

Το σφάλμα αναπαραγωγής τάσης είναι χρήσιμο για τον έλεγχο του μοντέλου στην περίπτωση που κάνει μη ρεαλιστική αναδιανομή των υπογείων υδάτων στα κύτταρα (αποθήκευση υδάτων ή ταπείνωση στάθμης σε δεξαμενή), ώστε να γίνει εύκολη αναπαραγωγή των παρατηρημένων αποκρίσεων σε άλλες θέσεις του συστήματος. Το αποτέλεσμα είναι οι χρονοσειρές αποθήκευσης να παρουσιάζουν θετική ή αρνητική τάση χωρίς φυσική σημασία. Ο έλεγχος της τάσης γίνεται με τον δείκτη Kendall:

$$k = \frac{4p}{n(n-1)} - 1 \quad (0.5)$$

όπου

p είναι ο αριθμός των περιπτώσεων που ισχύει $x_i > x_{i+1}$. Διακρίνονται οι ακόλουθες περιπτώσεις;

- $k = 1$, όταν οι τιμές της χρονοσειράς αυξάνουν,
- $k = -1$, όταν οι τιμές μειώνονται σταθερά,
- $k = 0$, όταν οι τιμές εναλλάσσονται σταθερά.

Συχνά, δίνεται μία τιμή k_0 (π.χ. $\approx 0,30$), που όταν το $|k| > k_0$, θεωρείται ότι η τάση είναι αδικαιολόγητα υψηλή. Τελικά, για τον έλεγχο χρησιμοποιείται η σχέση:

$$e_T = \begin{cases} k, & \text{αν } |k| > k_0 \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (0.6)$$

Το σφάλμα αυτό δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για τα υπόγεια κύτταρα που αντιπροσωπεύουν τις διαφυγές της λεκάνης (παρουσιάζουν πάντα θετική τάση) ή περιέχουν πηγές, καθώς και σε κύτταρα που επικοινωνούν με τα προαναφερόμενα.

3.4. Επαλήθευση (validation) υδρολογικών μοντέλων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ένας από τους σκοπούς της σωστής βαθμονόμησης είναι η αξιόπιστη λειτουργία του μοντέλου σε οποιοσδήποτε χρονοσειρές εφαρμοστούν σε αυτό, προηγούμενες ή επόμενες της ιστορικής χρονοσειράς. Για να διαπιστωθεί ότι επιτυγχάνεται αυτό, εφαρμόζεται η διαδικασία της επαλήθευσης (validation). Κατά τη διαδικασία αυτή, εφαρμόζεται το κριτήριο προσαρμογής που εφαρμόστηκε στη βαθμονόμηση και ελέγχεται για τις βέλτιστες παραμέτρους που προέκυψαν από αυτή και πραγματικές χρονοσειρές που ανήκουν σε μεταγενέστερη περίοδο από αυτές τις βαθμονόμησης. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή σαν διαχωρισμός δεδομένων (data – split) και απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή είναι οι παράμετροι του μοντέλου να μην είναι διαχρονικά μεταβαλλόμενες (Klimes, 1986).

3.5. Μοντέλα προσομοίωσης κίνησης των υπόγειων νερών

Κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια ιδιαίτερη αναφορά στα μοντέλα κίνησης υπόγειων νερών, καθώς στην παρούσα εργασία εφαρμόζεται στη λεκάνη απορροής του Βοιωτικού Κηφισού ένα υδρολογικό μοντέλο προσομοίωσης που αναπαριστά και τους μηχανισμούς κίνησης του νερού στον υδροφορέα. Άλλωστε, τα υπόγεια και τα επιφανειακά νερά βρίσκονται συχνά σε αλληλεπίδραση είτε μέσω τροφοδοσίας των υδροφορέων από επιφανειακές συγκεντρώσεις νερού (ποτάμια, λίμνες) και το αντίστροφο, είτε μέσω εμφάνισης των υπογείων υδάτων στην επιφάνεια με τη μορφή πηγών. Και αν με κάποιο τρόπο ελεγχθεί η στάθμη σε μια επιφανειακή συγκέντρωση υδάτων, λόγω αυτής της υδραυλικής επικοινωνίας μεταβάλλεται και η στάθμη του υπόγειου υδροφορέα ή αντίστροφα (Νάνου, 2006, σ. 3).

3.5.1. Ροή στα υπόγεια ύδατα

- **Νόμος Darcy**

Όσον αφορά την κατανομή του υπόγειου νερού στον υδροφορέα, διακρίνονται δύο οριζόντιες ζώνες από την επιφάνεια και προς τα κάτω: η ζώνη αερισμού, στην οποία οι πόροι του εδάφους περιέχουν νερό, αέρα και υδρατμούς και η ζώνη κορεσμού, όπου οι πόροι του εδάφους είναι γεμάτοι νερό. Η διαχωριστική επιφάνεια είναι μία ελεύθερη επιφάνεια νερού ή ένα αδιαπέρατο εδαφικό στρώμα. Στην πρώτη περίπτωση πρόκειται για την κατηγορία των φρεάτιων ή μη περιορισμένων υδροφορέων, ενώ στη δεύτερη για τους περιορισμένους ή υπό πίεση υδροφορείς. Σε κάθε περίπτωση πάντως, στην υδρολογία ως υπόγειο νερό νοείται το νερό που υπάρχει στην κορεσμένη ζώνη (Νάνου, 2006, σ. 10–16). Στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού όλοι οι υδροφορείς θεωρούνται φρεάτιοι.

Οι κατακρημνίσεις, από τη στιγμή που θα κατεισδύσουν στο έδαφος, μπορεί να κινούνται κατακόρυφα μέσα στην ακόρεστη ζώνη – η βασική ροή θεωρείται ότι γίνεται μέσα σε αυτήν – ή στην κορεσμένη με την επίδραση της βαρύτητας. Η δεύτερη περίπτωση κίνησης είναι και αυτή που αναπαριστά το μοντέλο στις υπόγειες διεργασίες. Για την περιγραφή της ροής του νερού σε υπόγειους υδροφορείς γίνονται διάφορες παραδοχές, καθώς η πολυπλοκότητα των ορίων των σχηματισμών μέσω των οποίων κινείται το υπόγειο νερό, δεν επιτρέπει μικροσκοπική μελέτη και εφαρμογή των εξισώσεων κίνησης Navier – Stokes. Συνήθως γίνεται μακροσκοπική προσέγγιση και τελικά εξετάζεται μία μέση ροή σε συνεχές μέσο. Το μέγεθος που ενδιαφέρει στη μελέτη αυτής της ροής είναι η παροχή του νερού, δηλαδή το γινόμενο της επιφάνειας μέσα από την οποία διέρχεται το νερό με μία ταχύτητα που υπολογίζεται από το νόμο Darcy. Η εξίσωση Darcy για την κίνηση νερού σε συνεχές μέσο θεωρείται ισοδύναμη των εξισώσεων κίνησης Navier – Stokes (Νάνου, 2006, σ. 28–33). Ο νόμος Darcy για ομογενές πορώδες μέσο εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$Q = KE(\phi_1 - \phi_2) / L \quad (0.7)$$

όπου:

Q (m³/s): Είναι η παροχή του νερού μέσα στο πορώδες μέσο.

E (m²): Είναι η επιφάνεια –διατομή μέσα από την οποία διέρχεται το νερό.

ϕ_1, ϕ_2 (m): Είναι τα πιεζομετρικά φορτία στην αρχή και τέλος της διαδρομής του νερού.

L (m): Είναι το μήκος της διαδρομής που ακολουθεί το νερό.

$(\phi_1 - \phi_2)/L$: Είναι η υδραυλική κλίση J . Ο νόμος του Darcy εκφράζει τελικά, την αναλογία των απωλειών ενέργειας ανά μονάδα μήκους που διανύει το υπόγειο νερό μέσα στον υδροφορέα, καθώς κινείται από θέσεις υψηλής σε θέσεις χαμηλής ενεργειακής στάθμης, προς την ταχύτητα στρωτής ροής του.

K (m/s): Είναι ο συντελεστής αναλογίας των απωλειών ενέργειας προς την ταχύτητα ροής του νερού. Είναι γνωστός σαν υδραυλική αγωγιμότητα ή συντελεστής διαπερατότητας και περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω.

▪ Υδραυλική αγωγιμότητα

Η υδραυλική αγωγιμότητα K είναι βαθμωτό μέγεθος που δείχνει το πόσο εύκολα το υπόγειο νερό διέρχεται από τους εδαφικούς πόρους. Εξαρτάται και από τις ιδιότητες του πορώδους μέσου και του ρευστού. Η εξάρτηση αυτή φαίνεται από μία πειραματική σχέση του Nutting (1930) που δίνεται παρακάτω (Νάνου, 2006, σ. 35):

$$Q = KE(\phi_1 - \phi_2) / L \quad (0.8)$$

όπου:

κ (m²): Είναι η φυσική διαπερατότητα του εδάφους. Εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων του πορώδους μέσου (συνήθως τη διάμετρο d_{10}), αλλά και τη διάταξή τους, δηλαδή το πορώδες n , ενώ μπορεί να μεταβάλλεται και με το χρόνο (αν επιδρούν δυνάμεις συμπύκνωσης του εδάφους λόγω εξωτερικών φορτίσεων, αν μεταφέρεται αργιλικό υλικό που φράσσει του πόρους του εδάφους σταδιακά κλπ.).

γ (N/m³): Είναι το ειδικό βάρος του ρευστού γενικά.

μ (N s/m²): Είναι το δυναμικό ιξώδες του ρευστού. Μαζί με το ειδικό βάρος δείχνουν πώς επιδρούν οι ιδιότητες του ρευστού στην υδραυλική αγωγιμότητα.

Συνοπτικά, και βάσει των εμπειρικών σχέσεων, η υδραυλική αγωγιμότητα K εξαρτάται από τις ιδιότητες του ρευστού (στην προκειμένη περίπτωση του νερού), το μέγεθος και τη διάταξη των κόκκων του πορώδους μέσου, αλλά και ειδικές τοπικές συνθήκες που μπορεί να ισχύουν στις διάφορες περιοχές του υδροφορέα. Ενδεικτικά, οι τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας που δίνονται σε πίνακα του Bear (1979) για διαφορετικούς τύπους εδαφών (Νάνου, 2006, σ. 36) είναι:

- Αδιαπερατά εδάφη: $10^{-11} - 10^{-6}$ cm /s.
- Ημιπερατά εδάφη: $10^{-6} - 10^{-2}$ cm /s.
- Διαπερατά εδάφη: $10^{-2} - 100$ cm /s.

▪ Πορώδες

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ροή των υπογείων υδάτων διαμέσου των διαφόρων εδαφικών σχηματισμών εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από το πορώδες τους. Συνήθως, σαν πορώδες εννοείται το ολικό πορώδες (porosity) n που δίνεται από τη σχέση:

$$n = V_v / V_T \quad (0.9)$$

όπου:

V_v : Είναι ο όγκος των κενών του εδαφικού δείγματος.

V_T : Είναι ο συνολικός όγκος του δείγματος.

Το πορώδες εκφράζεται σαν ποσοστό και εξαρτάται από τη φύση του εδάφους, τη γεωλογία της περιοχής και τις φορτίσεις που δέχεται το έδαφος και επηρεάζουν τη διάταξη των κόκκων και τα διάκενά τους. Όσον αφορά τα διάκενα, οι διαστάσεις τους ποικίλουν από κλάσμα του μικρού (microns) έως 2 – 3 cm. Ανάλογα με το είδος του γεωλογικού σχηματισμού, η τιμή του πορώδους μπορεί να κυμαίνεται και να παίρνει σχεδόν μηδενική τιμή για βράχους κρυσταλλικούς ή πολύ συμπυκνωμένους και μαλακούς, έως περίπου 60% για πιο πρόσφατα ιζηματογενή εδάφη.

Πιο αντιπροσωπευτικό μέγεθος της κίνησης του υπόγειου νερού μέσω ενός εδαφικού σχηματισμού είναι το ενεργό πορώδες, που ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των διακένων που είναι γεμάτα με νερό προς το συνολικό όγκο του δείγματος (Νάνου, 2006, σ. 22 – 24).

▪ Ειδική παροχή

Μια διαφορετική έκφραση του νόμου του Darcy είναι η παρακάτω:

$$q = KJ \quad (0.10)$$

όπου:

q ($m^3/s/m^2$): Είναι ο όγκος του ρευστού (νερού στην παρούσα εργασία) ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα επιφάνειας στην οποία η ροή είναι κάθετη. Το μέγεθος αυτό είναι γνωστό σαν ειδική παροχή.

Η ειδική παροχή αποτελεί ένα μέτρο της ταχύτητας των υπογείων υδάτων που διέρχονται από το συνολικό όγκο του εδαφικού δείγματος σε μία διεύθυνση x , ενός ισότροπου μέσου, σύμφωνα με τη σχέση:

$$q = -K \frac{\partial h}{\partial x} \quad (0.11)$$

όπου το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ότι η ροή ακολουθεί τη φορά κατά την οποία μειώνεται το πιεζομετρικό φορτίο. Επισημαίνεται στο σημείο αυτό, ότι η πραγματική ταχύτητα του υπόγειου νερού εξαρτάται από το επιφανειακό πορώδες n_e , δηλαδή το ποσοστό επιφάνειας που καταλαμβάνουν τα διάκενα στην επιφάνεια από την οποία περνάει το νερό (Κουτσογιάννης κ.ά., σ. 356, 1999). Μάλιστα η σχέση που τη συνδέει με την ειδική παροχή είναι:

$$u_x = q_x / n_e \quad (0.12)$$

Έχει ήδη αναφερθεί ότι ο νόμος του Darcy ισχύει για περίπτωση στρωτής ροής. Ενδιαφέρον, όμως, παρουσιάζει η περίπτωση που κάτι τέτοιο δεν μπορεί να συμβεί, όπως στην περίπτωση κίνησης του νερού μέσα από καρστικούς σχηματισμούς, φαινόμενο που συναντάται πολύ συχνά στη λεκάνη απορροής του Βοιωτικού Κηφισού. Σε τέτοια περίπτωση, οι μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν την κίνηση των υπογείων υδάτων πρέπει να αλλάξουν, καθώς η σχέση ειδικής παροχής και υδραυλικής αγωγιμότητας παύει να είναι γραμμική (Νάνου, σ. 33, 2006):

$$\left. \begin{aligned} J_x &= -\frac{\partial \phi}{\partial x} \\ J_y &= -\frac{\partial \phi}{\partial y} \\ J_z &= -\frac{\partial \phi}{\partial z} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \bar{q} = K\bar{J} = -K \cdot \text{grad} \phi \quad (0.13)$$

Στην περίπτωση που η υδραυλική αγωγιμότητα σε κάθε σημείο του υδροφορέα εξαρτάται από τη διεύθυνση της ροής, δηλαδή ο υδροφορέας είναι ανισότροπος, τότε θα έχει τη γενική μορφή (Νάνου, σ. 61, 2006):

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \Rightarrow q_i = K_{ij} J_j \quad (0.14)$$

3.5.2. Κατηγορίες μοντέλων υπόγειων νερών

Η κίνηση των υπογείων υδάτων σε έναν υδροφορέα μπορεί να περιγραφεί και με τις τρεις κατηγορίες μοντέλων που αναφέρθηκαν σε προηγούμενες ενότητες, δηλαδή τα εννοιολογικά, τα φυσικής βάσης και μαύρου κουτιού. Όσον αφορά τα μοντέλα μαύρου κουτιού, η σχέση μεταξύ δεδομένων εισόδου

και εξόδου προσδιορίζεται με μία συνάρτηση, ενώ στα εννοιολογικά μοντέλα χρησιμοποιούνται διαφορικές εξισώσεις με αναλυτική λύση, πλεονεκτώντας ως προς το μικρό αριθμό παραμέτρων. Τέλος, στα μοντέλα φυσικής βάσης επιλέγεται μία διαφορική εξίσωση που επιλύεται με μερικές παραγώγους (π.χ. ανάπτυγμα Taylor κλπ.). Η επίλυση των μοντέλων αυτών απαιτεί χρονοβόρους υπολογισμούς, αλλά υπάρχει σύνδεση με τη φυσική πραγματικότητα λόγω της διάθεσης παραμέτρων από μετρήσεις πεδίου (Ευστρατιάδης, σ. 19, 2006).

Παρακάτω, γίνεται αναφορά στα συνηθέστερα είδη μοντέλων που χρησιμοποιούνται σήμερα (Μαντόγλου, 2004) και επιδέχονται αριθμητική επίλυση. Τα μοντέλα αυτά, χρησιμοποιούν κυρίως την εξίσωση Darcy ή και άλλες διαφορικές εξισώσεις.

▪ Μοντέλα ενός κυττάρου

Σε ένα τέτοιο μοντέλο, η υδρολογική λεκάνη αντιμετωπίζεται συνολικά σαν ένα κύτταρο, δηλαδή μία χωρική μονάδα, η οποία δέχεται τις διάφορες φορτίσεις και εκφορτίζεται (Εικόνα 20). Εφαρμόζεται η εξίσωση διατήρησης της μάζας του νερού με τη μορφή:

$$A \cdot S \left(\frac{dh}{dt} \right) = A \cdot (N - q) + Q_y + Q_p \quad (0.15)$$

όπου:

$A [L^2]$: είναι η επιφάνεια της λεκάνης απορροής.

S : είναι η μέση αποθηκευτικότητα του υδροφορέα, η οποία στους φρεάτιους υδροφορείς λαμβάνεται ίση με το ενεργό πορώδες. Η αποθηκευτικότητα ορίζεται σαν τον όγκο νερού ΔV που απομακρύνεται από έναν υδροφορέα ανά μονάδα οριζόντιας επιφάνειας F και ανά μονάδα μείωσης του υδραυλικού ύψους Δh (Κουτσογιάννης κ.ά., σ. 362, 1999) και δίνεται από τη σχέση $S = \Delta V / F / \Delta h$.

$h [L]$: είναι το μέσο βάθος ροής στο φρεάτιο υδροφορέα στο χρόνο t .

$N [L/T]$: είναι η βροχόπτωση στη λεκάνη απορροής, η οποία θεωρείται κατανομημένη στην επιφάνεια.

$Q_y [L^3/T]$: αφορά τεχνητή τροφοδοσία του υδροφορέα π.χ. μέσω πηγαδιών, άρδευσης κλπ.

$Q_p [L^3/T]$: αφορά τις απολήψεις νερού από τον υδροφορέα μέσω πηγαδιών και γεωτρήσεων.

$q [L/T]$: είναι η απορροή ανά μονάδα επιφάνειας της λεκάνης, που οφείλεται σε εκφόρτιση πηγών, ποταμών κλπ.

Η παραπάνω εξίσωση τελικά επιλύεται με αναλυτικές ή αριθμητικές μεθόδους. Οι παράμετροι της εξίσωσης, όπως η αποθηκευτικότητα S υπολογίζονται με βαθμονόμηση του μοντέλου και με γνωστό το αρχικό βάθος ροής h_0 μπορούν να υπολογιστούν και τα υπόλοιπα βάθη.

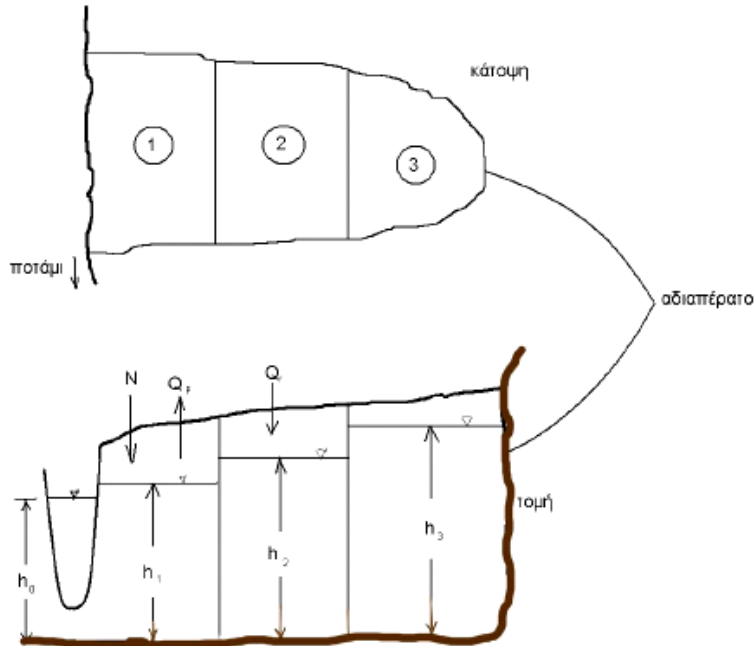


Εικόνα 20: Αναπαράσταση του υδροφορέα και της υπόγειας δεξαμενής σε μοντέλο ενός κυττάρου (Πηγή: Μαντόγλου, 2004).

▪ Μοντέλα πολλών κυττάρων

Στην περίπτωση αυτή, η λεκάνη απορροής χωρίζεται σε περισσότερες από μία χωρικές μονάδες – κύτταρα. Η μορφή των κυττάρων και οι φορτίσεις είναι παρόμοιες με αυτές που περιγράφηκαν στην προηγούμενη περίπτωση, με τη διαφορά ότι εδώ υπάρχει ροή νερού μεταξύ των κυττάρων (Εικόνα 21). Οι παραδοχές και τα στάδια με τα οποία γίνεται η προσέγγιση αυτή είναι τα εξής:

- i. Γίνεται παραδοχή ότι υπάρχει ροή μεταξύ των κυττάρων, όχι όμως μέσα στο κύτταρο.
- ii. Σε κάθε κύτταρο ισχύουν μέσες ομοιόμορφες συνθήκες.
- iii. Σε κάθε κύτταρο εφαρμόζεται η εξίσωση διατήρησης μάζας, δηλαδή θεωρείται ότι η διαφορά της μάζας νερού που εισέρχεται στο κύτταρο και της μάζας που εξέρχεται από αυτό, ισούται με τη μεταβολή της μάζας νερού στο κύτταρο.
- iv. Για τη ροή μεταξύ των κυττάρων εφαρμόζεται ο νόμος του Darcy.
- v. Ισχύει ότι όσο περισσότερα είναι τα κύτταρα στα οποία χωρίζεται ο υδροφορέας, τόσο μειώνονται τα σφάλματα διακριτοποίησης.



Εικόνα 21: Αναπαράσταση του υδροφορέα σε μοντέλο πολλών κυττάρων (Πηγή: Μαντόγλου, 2004).

Για την επίλυση του μοντέλου, θεωρείται ότι ο όγκος νερού που αποθηκεύεται σε ένα κύτταρο δίνεται από τη σχέση:

$$V_i = S_i A_i h_i \quad (0.16)$$

Η εξίσωση διατήρησης μάζας που εφαρμόζεται σε κάθε κύτταρο είναι:

$$S_i A_i \frac{dh_i}{dt_i} = N_i A_i + Q_{ri} - Q_{pi} + Q_{i-1,i} \quad (0.17)$$

όπου:

$Q_{i-1,i}$ είναι η παροχή που δέχεται το κύτταρο i από το προηγούμενο κύτταρο $i - 1$. Η τιμή της προκύπτει από το νόμο Darcy ίση με:

$$Q_{ij} = T_{ij} W_{ij} \frac{h_i - h_j}{L_{ij}} \quad (0.18)$$

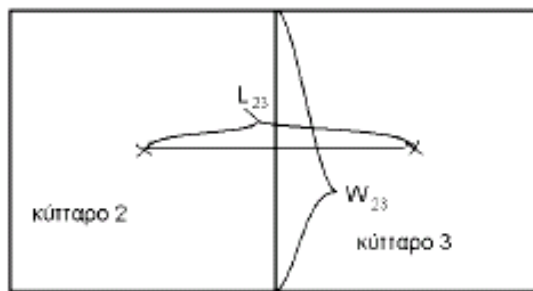
όπου:

$T_{i-1,i}$ [$L^2 T^{-1}$]: είναι η μέση «αντιπροσωπευτική» μεταφορικότητα μεταξύ των κυττάρων $i - 1$ και i . Η μεταφορικότητα T είναι μία παράμετρος που συνδέεται με την υδραυλική αγωγιμότητα K με τη σχέση $T = K b$, όπου b είναι το πάχος του στρώματος μέσω του οποίου περνάει το νερό, εφόσον πρόκειται για ομογενές και ισότροπο μέσο (Κουτσογιάννης, κ.ά., σ. 365, 1999). Στην περίπτωση, όμως, που ο υδροφορέας δεν είναι ομογενής, η μεταφορικότητα δεν έχει την ίδια τιμή σε κάθε σημείο του υδροφορέα και υπολογίζεται με τον αριθμητικό, αρμονικό ή γεωμετρικό μέσο όρο των μεταφορικότητων των κυττάρων $i - 1$ και i από τις εξής σχέσεις:

$$T_{ij} = \begin{cases} \frac{T_i + T_j}{2}, & \text{αριθμητικός} \\ \frac{2T_i T_j}{T_i + T_j}, & \text{αρμονικός} \\ \sqrt{T_i T_j}, & \text{γεωμετρικός} \end{cases} \quad (0.19)$$

$W_{i-1,i} [L]$: είναι το πλάτος που έχει ο υδροφορέας στο όριο των κυττάρων $i-1$ και i (Εικόνα 22).

$L_{i-1,i} [L]$: είναι η απόσταση των κέντρων των κυττάρων.



Εικόνα 22: Κάτοψη δύο γειτονικών κυττάρων. Σημειώνονται τα χαρακτηριστικά τους μεγέθη, πλάτος του κοινού ορίου και απόσταση των κέντρων τους (Πηγή: Μαντόγλου, 2004).

Τελικά, προκύπτει ένα σύστημα εξισώσεων που με τη μορφή πινάκων καταλήγει στην παρακάτω σχέση:

$$\frac{\underline{\underline{B}}}{\Delta t} \underline{\underline{h}}^{t+\Delta t} = f^t + \left(\frac{\underline{\underline{B}}}{\Delta t} - \underline{\underline{C}} \right) \underline{\underline{h}}^t \quad (0.20)$$

όπου:

$\underline{\underline{B}}$: είναι διαγώνιος πίνακας τα στοιχεία του οποίου είναι το γινόμενο $S A$.

$\underline{\underline{C}}$: είναι τριδιαγώνιος συμμετρικός πίνακας με τις ειδικές αντιστάσεις του υδροφορέα.

f : είναι πίνακας στήλη που περιέχει τις διεγέρσεις (forcing) του συστήματος λόγω των εξωτερικών φορτίσεων από τη βροχόπτωση, τις τεχνητές φορτίσεις του υδροφορέα, τις απολήψεις νερού και των εκφορτίσεων της λεκάνης, καθώς και τις οριακές συνθήκες που αφορούν το αρχικό βάθος ροής h_0 .

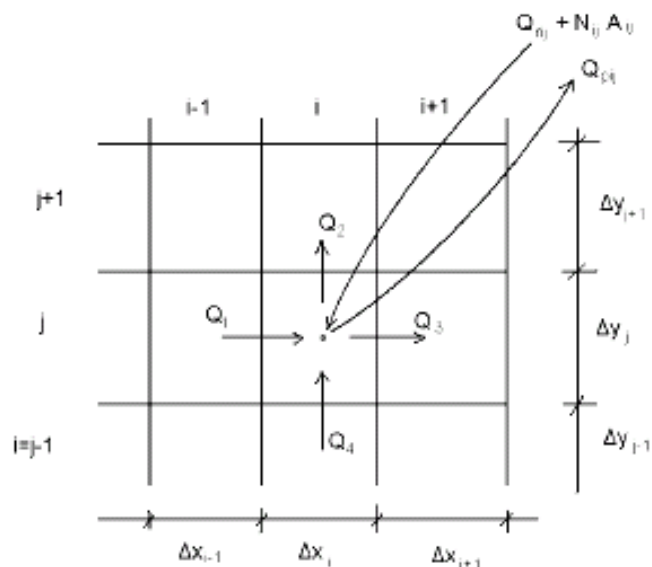
Επισημαίνεται, ότι όλα τα παραπάνω είναι στοιχεία που εκτιμώνται κατά την εφαρμογή του μοντέλου που χρησιμοποιείται για τη λεκάνη απορροής του Βοιωτικού Κηφισού. Όπως θα περιγραφεί σε επόμενο κεφάλαιο, το μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι πολυκυτταρικό και υπολογίζονται τόσο οι

αποστάσεις των κέντρων βάρους των κυττάρων, όσο και τα μήκη των μεταξύ τους ορίων. Η διαφορά είναι ότι στις παραμέτρους του μοντέλου περιλαμβάνεται η υδραυλική αγωγιμότητα K και όχι η μεταφορικότητα T . Όσον αφορά το είδος του μέσου όρου του K , τελικά επιλέγεται ο αρμονικός που συνήθως δίνει καλύτερες προσεγγίσεις.

Η σύγχρονη άποψη είναι ότι ο νόμος του Darcy δεν ενδείκνυται για τη σχηματοποίηση καρστικών υδροφορέων και την αναπαραγωγή των χρονοσειρών εκφόρτισης πηγών και στάθμης υδάτων (Rozos et al., 2006). Παρακάτω αναλύονται μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα μοντέλα υπογείων υδάτων, όπως είναι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών που χρησιμοποιείται από το μοντέλο MODFLOW.

▪ **Πεπερασμένες διαφορές**

Στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, γίνεται διακριτοποίηση της διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει τη ροή του νερού, στο χώρο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 23. Ο διαχωρισμός γίνεται σε ορθογώνια στοιχεία, όχι απαραίτητα ίσων διαστάσεων, και το πιεζομετρικό φορτίο ϕ αντιστοιχεί σε σημεία που ονομάζονται κόμβοι. Οι κόμβοι μπορεί να αντιστοιχούν στο κέντρο κάθε ορθογώνιου στοιχείου ή στα σημεία που τέμνονται οι γραμμές που τα ορίζουν.



Εικόνα 23: Διακριτοποίηση του υδροφορέα σε ορθογώνια στοιχεία για την κατασκευή της διαφορικής εξίσωσης στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών (Μαντόγλου, 2004).

Στην πρώτη περίπτωση, τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν είναι το πιεζομετρικό φορτίο του κάθε ορθογωνίου ϕ_{ij} , καθώς και το εμβαδόν του ορθογωνίου $A_{ij} = \Delta x_i \Delta y_j$. Εφαρμόζεται και εδώ η εξίσωση διατήρησης της μάζας, που θα έχει την εξής μορφή:

$$A_{ij} S_{ij} \frac{\phi_{ij}^{t+\Delta t} - \phi_{ij}^t}{\Delta t} = Q_{1ij} + Q_{2ij} - Q_{3ij} - Q_{4ij} + Q_{rij} - Q_{p_{ij}} + N_{ij} A_{ij} \quad (0.21)$$

Η γενική εξίσωση που δίνει την παροχή είναι:

$$Q_{ij} = T_{i-\frac{1}{2},j} \frac{\phi_{i-1,j} - \phi_{i,j}}{\left(\frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2}\right)} \Delta y_j \quad (0.22)$$

και η μεταφορικότητα υπολογίζεται με τον αρμονικό μέσο όρο:

$$T_{i+\frac{1}{2},j} = \frac{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}}{\frac{\Delta x_i}{T_{ij}} + \frac{\Delta x_{i+1}}{T_{i+1,j}}} \quad (0.23)$$

Ο δείκτης της μεταφορικότητας δείχνει ότι υπολογίζεται στη σύνδεση των ορθογωνίων $i-1, j$ και i, j . Οι υπολογισμοί απλοποιούνται σημαντικά όταν τα ορθογώνια στοιχεία έχουν τις ίδιες διαστάσεις, οπότε η προηγούμενη σχέση γίνεται:

$$T_{i+\frac{1}{2},j} = \frac{2T_{ij}T_{i+1,j}}{T_{ij} + T_{i+1,j}} \quad (0.24)$$

Η ίδια σχέση εφαρμόζεται και για την υδραυλική αγωγιμότητα. Ο υπολογιστικός φόρτος της μεθόδου αυξάνεται στην περίπτωση των φρεάτιων υδροφορέων λόγω της εξάρτησης της μεταφορικότητας από το βάθος ροής ($T = K h$), οπότε και απαιτείται εφαρμογή επαναληπτικής μεθόδου σε κάθε t .

Τελικά, όπως και στην περίπτωση των πολυκυτταρικών μοντέλων, προκύπτει το παρακάτω σύστημα εξισώσεων υπό μορφή πινάκων:

$$\underline{\underline{C}}\phi + \underline{\underline{B}}\frac{d\phi}{dt} = \underline{\underline{f}} \quad (0.25)$$

όπου στους πίνακες B και C περιέχονται οι παράμετροι του υδροφορέα.

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών, για την οποία εφαρμόζεται η παραπάνω εξίσωση, έχει το πλεονέκτημα σε σχέση με τη μέθοδο των πολυκυτταρικών μοντέλων ότι είναι πιο ακριβής, ενώ επιτρέπει και εκτίμηση των σφαλμάτων.

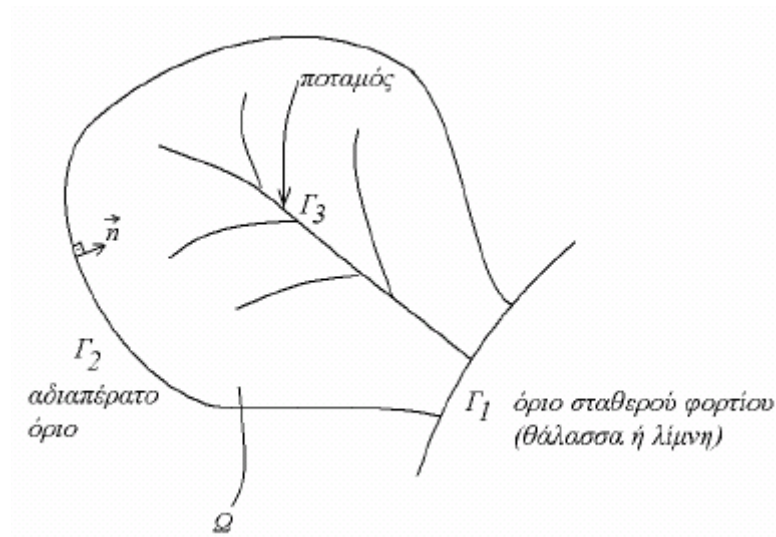
Ένα από τα πιο γνωστά μοντέλα που εφαρμόζουν τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, είναι το MODFLOW, το οποίο έχει εφαρμοστεί και στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, όπως περιγράφεται στην ενότητα 5.1.

▪ Πεπερασμένα στοιχεία

Η μέθοδος αυτή αντιμετωπίζει το πρόβλημα των άπειρων τιμών του πιεζομετρικού φορτίου σε ένα συνεχές πεδίο τιμών, με την εφαρμογή ενός πεπερασμένου συνόλου γνωστών συναρτήσεων μέσω της οποίας παραμετροποιούνται τα πιεζομετρικά φορτία (3.26).

$$\hat{\phi}(\underline{x}) = \sum_{j=1}^M a_j \phi_j(\underline{x}) \quad (0.26)$$

Στην παραπάνω σχέση, οι άγνωστες παράμετροι που πρέπει να υπολογιστούν συμβολίζονται με a . Οι αρχικές και οριακές συνθήκες του προβλήματος σημειώνονται στην Εικόνα 24.



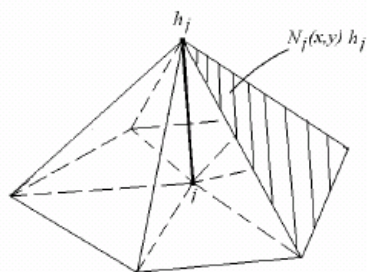
Εικόνα 24: Αρχικές και οριακές συνθήκες στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Μαντόγλου, 2004).

Η γενική εξίσωση που δίνει τη ροή είναι:

$$S \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\phi' - \phi}{\sigma'} + Q \quad (0.27)$$

όπου το Q συμβολίζει την καθαρή εισροή νερού στον υδροφορέα (πηγές, πηγάδια κλπ.).

Δε θα γίνει εκτενέστερη αναφορά στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, επισημαίνεται όμως, ότι η διακριτοποίηση του υδροφορέα συνήθως γίνεται με τρίγωνα (μέθοδος Galerkin), που σε τρισδιάστατο σύστημα έχουν τη μορφή πρίσματος – πυραμίδας (Εικόνα 25).



Εικόνα 25: Η διακριτοποίηση του υδροφορέα στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων γίνεται σε πρίσματα – πυραμίδες στις τρεις διαστάσεις και σε τρίγωνα σε δύο (Μαντόγλου, 2004).

Τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων εφαρμόζει το μοντέλο FEFLOW. Τα μοντέλα που χρησιμοποιούν τις μεθόδους πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων απαιτούν χρονοβόρους υπολογισμούς, κυρίως λόγω των πολυάριθμων κυττάρων στα οποία χωρίζεται ο υδροφορέας, ενώ πρόβλημα δημιουργεί συχνά και η έλλειψη ορισμένων δεδομένων (Ευστρατιάδης, σ. 20, 2006).

3.6. Αρχή φειδωλής παραμετροποίησης

Ο βασικότερος, ίσως, στόχος της εφαρμογής ενός μοντέλου είναι η τήρηση της αρχής της φειδωλής παραμετροποίησης (principle of parsimony). Πάντοτε υπάρχει η περίπτωση της εκτίμησης μικρού ή μεγάλου αριθμού παραμέτρων (υπο – παραμετροποίηση και υπέρ – παραμετροποίηση αντίστοιχα), κάτι που συνδέεται με αβεβαιότητα όσον αφορά την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του μοντέλου.

Η υπο – παραμετροποίηση μπορεί να οφείλεται σε απλουστευμένη προσομοίωση των διεργασιών του υδρολογικού κύκλου ή ακόμη και παράλειψη ορισμένων από αυτές ή και σε χρήση χρονικής κλίμακας μικρότερης από την απαιτούμενη (Ευστρατιάδης, 2008, σ. 229). Συνήθως, συνοδεύεται από μεγάλη απόκλιση παρατηρημένων και μετρημένων τιμών.

Στην υπερ – παραμετροποίηση ενός μοντέλου, θεωρείται λανθασμένα ότι η εκτίμηση μεγάλου αριθμού παραμέτρων μπορεί να οδηγήσει σε αποτελέσματα μεγάλης ακρίβειας, ενώ αντίθετα και στην περίπτωση αυτή αυξάνει η αβεβαιότητα, αφού τα διαθέσιμα δεδομένα δεν επαρκούν για την επίλυση της στοχικής συνάρτησης με πολλούς βαθμούς ελευθερίας (Rosbjerg and Madsen, 2005). Έτσι, οι υπολογισμοί αυξάνονται σημαντικά, τα κριτήρια προσαρμογής δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα και τελικά προκύπτουν αρκετές παραπλήσιες ικανοποιητικές λύσεις, δείγμα τοπικών ακρότατων της στοχικής συνάρτησης.

Και στις δύο περιπτώσεις, το μοντέλο δε μπορεί να θεωρηθεί ευσταθές και απαιτείται η εκτίμηση του μικρότερου δυνατού αριθμού παραμέτρων που μπορούν να υποστηρίξουν τα διαθέσιμα δεδομένα για τη ρύθμιση του μοντέλου (Box and Jenkins, 1976). Αυτό ακριβώς ορίζει η αρχή της φειδωλής παραμετροποίησης, η οποία αποτελεί στόχο της παρούσας εργασίας, όπως περιγράφεται στην ενότητα 5.1.3.

4. ΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ

Το υπολογιστικό σύστημα ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ χρησιμοποιείται για την προσομοίωση των μηχανισμών του υδρολογικού κύκλου μιας περιοχής (επιφανειακή και υπόγεια υδρολογία), αλλά και των διαδικασιών διαχείρισης των υδατικών αποθεμάτων της. Το μοντέλο αναπτύχθηκε στα πλαίσια ερευνητικού έργου του ΕΜΠ (Ευστρατιάδης κ.ά., 2006), ενώ η πλέον πρόσφατη έκδοσή του παρουσιάζεται από τους Ευστρατιάδη (2008) και Efstratiadis et al. (2008).

Βάσει της κατηγοριοποίησης των υδρολογικών μοντέλων που αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, όσον αφορά τη χωρική κλίμακα, κατατάσσεται στα ημι – κατανεμημένα μοντέλα (semi – distributed), καθώς η περιοχή μελέτης διακριτοποιείται σε χωρικές ενότητες που ονομάζονται Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης (Μ.Υ.Α.) και είναι περιοχές που με κοινά γεωμορφολογικά και φυσιογραφικά χαρακτηριστικά. Αυτή είναι και βασική διαφορά με άλλα ημικατανεμημένα μοντέλα που σαν χωρική μονάδα λαμβάνουν την υπολεκάνη. Στην περιοχή μελέτης επιλέγονται συγκεκριμένα σημεία – κόμβοι του υδροσυστήματος στους οποίους γίνεται εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου (Ευστρατιάδης κ.ά., σ. 21, 2006). Κόμβοι μπορεί να είναι σημεία που ορίζουν τους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου και μπορεί ανάντη κάθε κόμβου να οριοθετείται και η αντίστοιχη υπολεκάνη.

Όσον αφορά τη χρονική κλίμακα, το μοντέλο χαρακτηρίζεται συνεχές (continuous) αφού εισάγονται σε αυτό χρονοσειρές μηνιαίες ή ημερήσιες. Στη δεύτερη περίπτωση δίνεται και η δυνατότητα εφαρμογής μεθόδων διόδευσης για μελέτη πλημμυρικών φαινομένων και υστέρησης της ροής.

Για την προσομοίωση των φυσικών διεργασιών του υδρολογικού κύκλου γίνεται μια προσέγγιση τόσο φυσικής βάσης όσο και εννοιολογική. Η προσέγγιση φυσικής βάσης έγκειται στο γεγονός ότι η χωρική κλίμακα που χρησιμοποιείται (Μ.Υ.Α.) είναι μικρή. Παρ' όλα αυτά, στο μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ δεν μεταφέρεται και το μειονέκτημα των μοντέλων φυσικής βάσης που αφορά το μεγάλο αριθμό εκτιμώμενων παραμέτρων. Σε αυτό παίζει ρόλο η ταυτόχρονα εννοιολογική φύση του μοντέλου που συσχετίζει τις υδρολογικές διεργασίες με τα γεωμορφολογικά και φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης. Έτσι, ο αριθμός των εκτιμώμενων παραμέτρων μειώνεται σημαντικά, αφού τα εκτιμώμενα μεγέθη δεν αφορούν κάθε υπολεκάνη, αλλά τις Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης (Ευστρατιάδης κ.ά., σ. 21, 2006).

Το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ έχει δύο πολύ σημαντικές ιδιότητες. Η πρώτη αφορά τη συνεργασία του με Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών για την είσοδο πληροφοριών που αφορούν την επιφανειακή και υπόγεια υδρολογία της περιοχής. Η δεύτερη σχετίζεται με το γεγονός ότι εκτός από τις φυσικές διεργασίες του υδρολογικού κύκλου, λαμβάνει υπόψη και την επίδραση των ανθρωπογενών επεμβάσεων (αρδευτικά

έργα, έργα εκτροπής, γεωτρήσεις, απολήψεις νερού) στα υδατικά αποθέματα της λεκάνης απορροής, με αποτέλεσμα να αποτελεί χρήσιμο εργαλείο σε θέματα διαχείρισης υδατικών πόρων.

Η εφαρμογή του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, όπως περιγράφεται από τους Ευστρατιάδη κ.ά. (2006), συνοπτικά περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

4.1. Συλλογή των διαθέσιμων δεδομένων εισόδου.

4.1.1. Επιφανειακό σύστημα

Όσον αφορά την προσομοίωση του επιφανειακού συστήματος, απαιτούνται δεδομένα σχετικά με την τοπογραφία της περιοχής (ψηφιακό μοντέλο εδάφους), το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής, τις χρήσεις γης, τις εδαφικές κλίσεις και τους γεωλογικούς σχηματισμούς για το σχεδιασμό των μονάδων υδρολογικής απόκρισης και τις υπολεκάνες. Επίσης, εισάγονται και δεδομένα σχετικά με βροχομετρικούς ή άλλους σταθμούς (με συντεταγμένες, υψόμετρα κλπ.). Ειδικά, οι σταθμοί μέτρησης βροχόπτωσης χρησιμοποιούνται και για τον υπολογισμό της επιφανειακής βροχόπτωσης.

4.1.2. Υπόγειο σύστημα

Απαιτούνται δεδομένα όπως η διακριτοποίηση του υδροφορέα σε κύτταρα (cells), οι πηγές που πιθανώς εκδηλώνονται στη λεκάνη (με υψόμετρα και συντεταγμένες) και οι γεωτρήσεις που έχουν διανοιχτεί.

4.1.3. Υδροσύστημα

Τα δεδομένα εισόδου αφορούν τη διαχείριση των υδατικών αποθεμάτων της λεκάνης που γίνεται μέσω των απολήψεων νερού, λειτουργίας γεωτρήσεων, διανομής του νερού με αρδευτικά συστήματα, λειτουργίας υδραγωγείων κλπ. ανάλογα με τις χρήσεις γης σε κάθε λεκάνη απορροής και τις ανάγκες ύδρευσης.

4.1.4. Χρονοσειρές

Στο μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ εισάγονται χρονοσειρές που σχετίζονται και με τα τρία προαναφερόμενα συστήματα. Οι χρονοσειρές αυτές αφορούν τις κατακρημνίσεις στη λεκάνη και την εξατμοδιαπνοή, που καταγράφονται από τους σταθμούς, τις εκφορτίσεις των πηγών, την πιεζομετρική στάθμη του υδροφορέα, την απορροή των υδατορευμάτων σε θέσεις – κόμβους της λεκάνης, τις ανάγκες σε νερό που καλύπτουν τα υδατικά αποθέματα σε διάφορες θέσεις απόληψης κλπ. Οι διαθέσιμες

χρονοσειρές πρέπει να καλύπτουν αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο στη διαδικασία της βαθμονόμησης όσο και της επαλήθευσης. Με το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ είναι δυνατή η αξιοποίηση και χρονοσειρών με μικρό χρονικό βήμα (π.χ. ημερήσιο) για την εφαρμογή διαδικασιών διόδευσης.

Η προετοιμασία των δεδομένων εισόδου συνδέεται με τη χρήση των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (Γ.Σ.Π.), με τη μετατροπή των γεωγραφικών, γεωμορφολογικών και υδρολογικών πληροφοριών σε θεματικά επίπεδα. Στη συνέχεια εισάγονται με τη μορφή βάσης δεδομένων στο υπολογιστικό πακέτο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.

4.2. Σχηματοποίηση και προσομοίωση του επιφανειακού συστήματος

Το επιφανειακό σύστημα περιλαμβάνει το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής που αποτελείται από το κύριο υδατόρευμα και τους κλάδους που συμβάλλουν σε αυτό. Στη συμβολή κάθε κλάδου με το κύριο υδατόρευμα τοποθετείται και ένας κόμβος. Οι κόμβοι είναι σημεία στα οποία γίνεται έλεγχος της λειτουργίας του μοντέλου, και εκτός από σημεία συμβολής των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου μπορεί να είναι συγκεκριμένα σημεία της λεκάνης, όπως θέσεις πηγών, μετρητικών σταθμών, απόληξης και εισροής νερού κλπ. Ανάντη κάθε κόμβου σχηματοποιείται και μια υπολεκάνη. Οι βασικοί κανόνες σχηματοποίησης είναι:

- Σε κάθε υπολεκάνη αντιστοιχεί ένας κλάδος του υδατορεύματος.
- Κατάντη κάθε κόμβου πρέπει να ξεκινάει μόνο ένας κλάδος του υδρογραφικού δικτύου.
- Ανάντη του ακραίου κόμβου σχεδιάζεται υπολεκάνη χωρίς κλάδο του υδατορεύματος, για την οποία θεωρείται ακαριαία συγκέντρωση των υδάτων στον κόμβο.

Επίσης, το επιφανειακό σύστημα περιλαμβάνει και τις Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης (Μ.Υ.Α.). Ο όρος Μονάδα Υδρολογικής Απόκρισης αναφέρεται σε ένα σύνολο περιοχών της λεκάνης απορροής, οι οποίες έχουν κοινά υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, και η λειτουργία της προσομοιώνεται εννοιολογικά με τη λειτουργία μιας δεξαμενής εδαφικής υγρασίας, που περιγράφεται παρακάτω (Ευστρατιάδης κ.ά., 2004, σ. 163). Τα χαρακτηριστικά αυτά μπορεί να σχετίζονται με την εδαφική κλίση, τη διαπερατότητα των γεωλογικών σχηματισμών, την κάλυψη του εδάφους κλπ. Έτσι, κατά τη σχηματοποίηση της λεκάνης απορροής μπορεί να προκύψουν διάφορες κατηγορίες Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης, σε κάθε κατηγορία, όμως, οι αντίστοιχες παράμετροι του μοντέλου θα έχουν την ίδια τιμή. Στο μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ δημιουργούνται με την ένωση θεματικών επιπέδων με διαφορετικές πληροφορίες για τη λεκάνη απορροής, έτσι ώστε να συνδυαστούν τα χαρακτηριστικά των επιπέδων. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται αναλυτικότερα στη χρήση των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών. Σύμφωνα με τον Ευστρατιάδη (2008, σ. 259) το πλεονέκτημα της σχηματοποίησης και

λειτουργίας των Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης είναι η μείωση των μεταβλητών ελέγχου που απαιτούνται για την παραμετροποίηση του υδροσυστήματος, ακόμη και αν γίνει λεπτομερής διακριτοποίηση της λεκάνης.

Η προσομοίωση των διεργασιών του επιφανειακού συστήματος στο μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ έχει εννοιολογικό χαρακτήρα. Πιο συγκεκριμένα, οι διαδικασίες του υδρολογικού κύκλου αναπαρίστανται με τη λειτουργία μιας δεξαμενής εδαφικής υγρασίας στην οποία μπορεί να γίνεται εισροή νερού μέσω των κατακρημνίσεων, να υπάρχουν απώλειες λόγω εξατμοδιαπνοής, καθώς και να εκρέουν ύδατα πλευρικά ή κατακόρυφα ή λόγω υπερχείλισης. Υπάρχει, επίσης, και η δυνατότητα αποθήκευσης μιας ποσότητας υδάτων.

Τα δεδομένα του συστήματος αυτού είναι η κατακρήμνιση P και η εξατμοδιαπνοή E_p , για τις οποίες εισάγονται οι αντίστοιχες χρονοσειρές. Τα ζητούμενα μεγέθη για ένα χρονικό διάστημα t είναι η απορροή Q , η πραγματική εξατμοδιαπνοή E , η κατείδυση G από τη δεξαμενή στον υπόγειο υδροφόρα (που αποτελεί δεδομένο για το μοντέλο του υπόγειου συστήματος) και η εδαφική υγρασία στο χρόνο $t + 1$. Τα μεγέθη αυτά σχηματίζουν και την εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης (4.1) που λύνεται βήμα προς βήμα. Επιμέρους μεγέθη των ζητούμενων, είναι η άμεση απορροή Q_D , η ροή λόγω κορεσμού του εδάφους Q_S , η υποδερμική ροή Q_i , η άμεση εξατμοδιαπνοή E_D και η εδαφική εξατμοδιαπνοή E_S .

$$S_{t+1} = S_t + P_t - Q_t - E_t - G_t \quad (0.28)$$

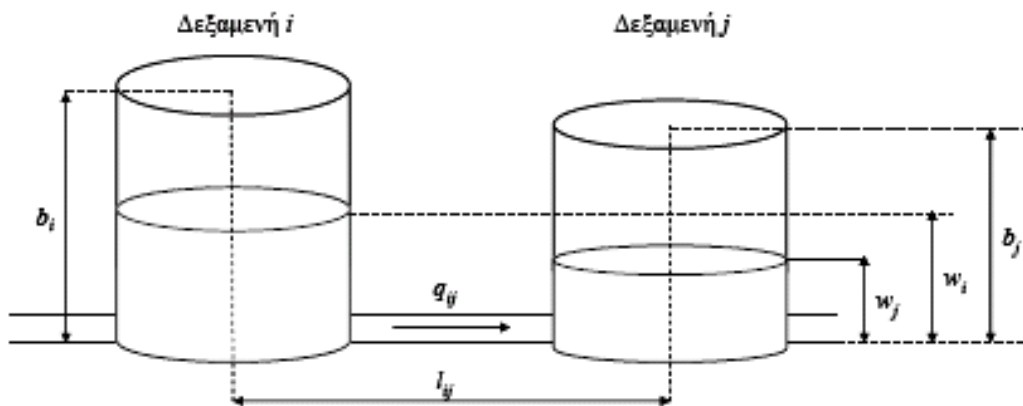
Το μοντέλο του επιφανειακού συστήματος έχει σαν αρχική συνθήκη το απόθεμα S_0 που έχει αρχικά η δεξαμενή της εδαφικής υγρασίας και υπολογίζει έξι παραμέτρους, οι οποίες έχουν διαφορετική τιμή για κάθε Μονάδα Υδρολογικής Απόκρισης. Οι παράμετροι αυτές αφορούν: τη χωρητικότητα της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας S_{max} , τη χωρητικότητα κατακράτησης της βροχής R , το ποσοστό περίσσειας βροχόπτωσης c που αποτελεί την άμεση απορροή, το ελάχιστο όριο εδαφικής υγρασίας κ μετά το οποίο αρχίζει η υποδερμική ροή, το ρυθμό εκφόρτισης της δεξαμενής για δημιουργία πλευρικής ροής (υποδερμικής) που ονομάζεται συντελεστής στείρευσης λ και το ρυθμό εκφόρτισης της δεξαμενής για δημιουργία κατείδυσης που ονομάζεται συντελεστής στείρευσης μ . Τα μεγέθη S_{max} και R έχουν διαστάσεις ύψους βροχής, τα μεγέθη c και κ είναι αδιάστατα και τα μεγέθη λ και μ έχουν διαστάσεις αντίστροφου χρόνου. Επίσης, υπολογίζεται και μία παράμετρος για κάθε κλάδο του υδρογραφικού δικτύου, που ονομάζεται συντελεστής διήθησης δ και είναι μέγεθος αδιάστατο. Το ποσοστό της παροχής που διηθείται, τροφοδοτεί τον υπόγειο υδροφόρα.

Στην προσομοίωση του επιφανειακού συστήματος δεν θα γίνει περαιτέρω αναφορά, καθώς στην παρούσα εργασία η διερεύνηση έγινε στο στάδιο προσομοίωσης του υπόγειου υδροφόρα και της κίνησης των υπογείων υδάτων.

4.3. Σχηματοποίηση και προσομοίωση του υπόγειου υδροφορέα

Για την προσομοίωση της κίνησης των υπογείων υδάτων εφαρμόζεται η προσέγγιση των πολυκυτταρικών μοντέλων (ενότητα 3.5). Συγκεκριμένα, ο υδροφορέας διακριτοποιείται σε χωρικές μονάδες που ονομάζονται κύτταρα. Το μοντέλο υδρόγειος προσφέρει το πλεονέκτημα σχηματοποίησης του υδροφορέα με κύτταρα πολυγωνικά και όχι υποχρεωτικά ορθογωνικά που ακολουθούν τις κύριες διευθύνσεις ροής. Με τον τρόπο αυτό αφενός προσαρμόζονται καλύτερα τα κύτταρα στα ανομοιομορφα όρια του υδροφορέα, αφετέρου υπάρχει η δυνατότητα να ληφθεί υπόψη σε μεγαλύτερο βαθμό η φυσική πραγματικότητα στο εσωτερικό του (π.χ. τα όρια των κυττάρων ταυτίζονται ευκολότερα με όρια συγκεκριμένων γεωλογικών σχηματισμών, υδρογεωλογικών λεκανών κλπ.).

Όπως και στην περίπτωση του επιφανειακού συστήματος, έτσι και στο υπόγειο, γίνεται μια εννοιολογική προσομοίωση σύμφωνα με την οποία σε κάθε κύτταρο αντιστοιχεί μια υπόγεια δεξαμενή (Εικόνα 26). Κάθε δεξαμενή δέχεται τα ύδατα που κατεισδύουν από την δεξαμενή εδαφικής υγρασίας και είναι επιφανειακά κατανεμημένα, τα νερά που κατεισδύουν γραμμικά από τους κλάδους του υδατορεύματος, ενώ μπορεί να απομακρύνεται ποσότητα υδάτων από τη λειτουργία γεωτρήσεων. Η άνω επιφάνεια κάθε δεξαμενής ταυτίζεται με τα όρια του αντίστοιχου κυττάρου, ενώ θεωρείται ότι δύο γειτονικές δεξαμενές ενώνονται με αγωγό μέσω του οποίου μετακινούνται τα υπόγεια ύδατα.



Εικόνα 26: Στο υπολογιστικό πακέτο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, σε κάθε υπόγειο κύτταρο αντιστοιχεί μια δεξαμενή που δέχεται τα ύδατα που κατεισδύουν από τις δεξαμενές εδαφικής υγρασίας του επιφανειακού συστήματος, καθώς και τα ύδατα γειτονικών υπόγειων δεξαμενών (Πηγή: Ευστρατιάδης κ.ά., 2006).

Η κίνηση των υπογείων υδάτων γίνεται μεταξύ των υπόγειων δεξαμενών, πάντα από τη δεξαμενή υψηλότερης στη δεξαμενή χαμηλότερης στάθμης, και διέπεται από το νόμο Darcy (ενότητα 3.5.1). Σε κάθε δεξαμενή περιλαμβάνονται τα ακόλουθα μεγέθη:

F_i [L^2]: είναι η επιφάνεια της βάσης κάθε δεξαμενής, που είναι ίση με το εμβαδόν του αντίστοιχου κυττάρου,

w_i [L]: είναι η στάθμη των υπογείων υδάτων σε κάθε δεξαμενή,

$w_{i, \max}$ [L]: είναι η στάθμη της οροφής της υπόγειας δεξαμενής,

$w_{i, \min}$ [L]: είναι η στάθμη του πυθμένα της υπόγειας δεξαμενής,

l_{ij} [L]: είναι η απόσταση των κέντρων βάρους δύο γειτονικών κυττάρων i και j , η οποία θεωρείται ίση με το μήκος του αγωγού μέσω του οποίου μετακινούνται τα ύδατα,

A_{ij} [L^2]: είναι η κορεσμένη διατομή του αγωγού που ενώνει δύο γειτονικές δεξαμενές,

β_{ij} [L]: είναι το μήκος του κοινού ορίου δύο γειτονικών κυττάρων,

h_i [L]: είναι το υδραυλικό φορτίο σε κάθε δεξαμενή και

K_{ij} [LT^{-1}]: η υδραυλική αγωγιμότητα που προκύπτει σαν μέσος όρος των αντίστοιχων υδραυλικών αγωγιμοτήτων των γειτονικών κυττάρων i και j .

Υπάρχουν και ορισμένες ειδικές κατηγορίες κυττάρων για τα οποία ισχύουν ορισμένοι επιπλέον κανόνες. Οι περιπτώσεις αυτές είναι οι κάτωθι:

- Η πρώτη αφορά κύτταρα στα οποία υπάρχουν πηγές, μέσω των οποίων εκφορτίζεται ο υδροφορέας. Στις περιπτώσεις αυτές, ο πυθμένας της δεξαμενής βρίσκεται στο ύψος της θέσης εκφόρτισης.
- Η δεύτερη αφορά τις διαφυγές υπογείων υδάτων από τη λεκάνη. Τα υπόγεια ύδατα μπορεί να φεύγουν από τη λεκάνη με διάφορους τρόπους π.χ. μέσω καταβοθρών και να καταλήγουν είτε στη θάλασσα, είτε σε επιφανειακούς υδροφορείς, όπως λίμνες, είτε σε γειτονικές λεκάνες. Στην περίπτωση αυτή, το κύτταρο που σχεδιάζεται στην περιοχή των διαφυγών και εξωτερικά των ορίων της λεκάνης, θεωρείται ότι αντιστοιχεί σε δεξαμενές πολύ μεγάλων διαστάσεων, ώστε η στάθμη τους σε κάθε περίπτωση να παραμένει σταθερή.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί (ενότητα 3.5), στην επίλυση των πολυκυτταρικών μοντέλων εφαρμόζεται ο νόμος του Darcy, με την παρακάτω μορφή:

$$Q_{ij} = K_{ij} A_{ij} \frac{h_i - h_j}{L_{ij}} \quad (0.29)$$

όπου:

η υδραυλική αγωγιμότητα K_{ij} υπολογίζεται με τον τύπο του αρμονικού, γεωμετρικού ή αριθμητικού μέσου όρου, ενώ το υδραυλικό φορτίο h_i δίνεται από την παρακάτω σχέση (ανάλογα με το αν ο υδροφορέας είναι φρεάτιος ή περιορισμένος):

$$h_i = \begin{cases} w_i^{\min} + w_i, & w_i \leq b_i \\ w_i^{\min} + (w_i - b_i)\theta, & w_i > b_i \end{cases} \quad (0.30)$$

Στην παραπάνω σχέση, b_i είναι το πάχος του υδροφορέα και θ ο λόγος της ειδικής απόδοσης προς την αποθηκευτικότητα του.

Στη συνέχεια διατυπώνονται οι εξισώσεις συνέχειας και επιλύεται το σύστημα γραμμικών εξισώσεων που προκύπτει.

Οι παράμετροι που εκτιμώνται με το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ για το υπόγειο σύστημα είναι η υδραυλική αγωγιμότητα K και το πορώδες n . Επομένως, για κάθε κύτταρο υπολογίζονται δύο παράμετροι (υδραυλική αγωγιμότητα και πορώδες) και για κάθε πηγή μία (υδραυλική αγωγιμότητα).

4.4. Σχηματοποίηση και προσομοίωση της κατανομής των υδατικών πόρων

Το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, εκτός από την προσομοίωση των φυσικών διεργασιών του υδρολογικού κύκλου, δίνει τη δυνατότητα αναπαράστασης έργων που έχουν γίνει για τη διαχείριση των υδατικών αποθεμάτων μιας λεκάνης. Κάτι τέτοιο είναι χρήσιμο, αφενός γιατί κυρίως σε διαταραγμένες λεκάνες με ανεξέλεγκτες απολήψεις, είναι απαραίτητη η εκτίμηση των μελλοντικών υδατικών αναγκών και της δυνατότητας κάλυψής τους από τα αποθέματα της λεκάνης, αφετέρου δεν υπάρχουν ιστορικές μετρήσεις για αυτές τις απολήψεις.

Για τη σχηματοποίηση του υδροσυστήματος χρησιμοποιούνται οι παρακάτω συνιστώσες:

- Κόμβοι: είναι θέσεις όπου υπάρχει ζήτηση και προσφορά νερού ή που αλλάζουν τα χαρακτηριστικά μεγέθη του δικτύου.
- Ομάδες γεωτρήσεων: είναι συστήματα μέσω των οποίων αντλούνται υπόγεια ύδατα. Έχουν συγκεκριμένη αντλητική ικανότητα.
- Υδραγωγεία: πρόκειται για αγωγούς, ανοιχτούς ή κλειστούς, μέσω των οποίων γίνεται μεταφορά νερού ανάμεσα σε δύο κόμβους. Έχουν συγκεκριμένη παροχετευτικότητα.
- Στόχοι: αφορούν τους λειτουργικούς περιορισμούς του συστήματος.

Τα δεδομένα εισόδου του υδροσυστήματος είναι η απορροή στις υπολεκάνες, η αποθήκευση υπογείων υδάτων και οι εισροές από εξωτερικές πηγές. Τα άγνωστα μεγέθη είναι οι παροχές στα γραμμικά στοιχεία του υδροσυστήματος (κλάδοι υδρογραφικού δικτύου και υδραγωγεία), οι απολήψεις νερού από κόμβους και συστήματα γεωτρήσεων και οι απώλειες από διήθηση νερού του υδρογραφικού δικτύου. Αυτές είναι και οι μεταβλητές του υδατικού ισοζυγίου.

Οι περιορισμοί – κανόνες που θέτονται κατά την εκτίμηση των ζητούμενων μεγεθών είναι οι ακόλουθοι:

- Σε κάθε κόμβο να ισχύει η εξίσωση συνέχειας.
- Να ικανοποιούνται οι στόχοι του υδροσυστήματος κατά προτεραιότητα.

- Το κόστος λειτουργίας του υδροσυστήματος (μεταφορά νερού, άντληση κλπ.) να είναι κατά το δυνατόν ελάχιστο.

Όπως και στο προαναφερόμενο επιφανειακό σύστημα, έτσι και η λειτουργία του υδροσυστήματος δε θα αναλυθεί περαιτέρω, καθώς η έρευνα που έγινε στην παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στην προσομοίωση του υπόγειου συστήματος.

4.5. Χρήση των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών

Έχει ήδη αναφερθεί η σχέση και συμμετοχή των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών στη σχηματοποίηση του υδροσυστήματος μιας λεκάνης, ώστε να λειτουργήσει το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ. Ακολουθεί μια συνοπτική αναφορά των εργασιών που γίνονται σταδιακά, με τις δεδομένες και παραγόμενες γεωγραφικές πληροφορίες (πρωτογενή και παραγόμενα δεδομένα αντίστοιχα, σε σημειακή, γραμμική, πολυγωνική ή ψηφιακή μορφή). Επισημαίνεται ότι τα στοιχεία κάθε κατηγορίας δεδομένων περιέχονται ομαδοποιημένα σε ένα επίπεδο πληροφορίας (θεματικό επίπεδο). Τα επίπεδα αυτά μπορούν να συνδυάζονται με διάφορους τρόπους και να προκύπτουν νέα επίπεδα με διαφορετικές πληροφορίες.

4.5.1. Επιφανειακό σύστημα

Τα πρωτογενή δεδομένα μπορεί να περιλαμβάνουν τα όρια της περιοχής μελέτης (πολυγωνικά δεδομένα), ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM, ψηφιδωτής μορφής), καθώς και τις θέσεις των πηγών, γεωτρήσεων, σταθμών μέτρησης (σημειακά δεδομένα). Επίσης, μπορεί να περιλαμβάνονται δεδομένα σχετικά με την κάλυψη γης, της διαπερατότητας των σχηματισμών, τις εδαφικές κλίσεις κλπ. (πολυγωνικά δεδομένα). Από τα διαθέσιμα αυτά δεδομένα και με τη χρήση κατάλληλων εργαλείων που προσφέρουν τα διάφορα πακέτα λογισμικού, είναι δυνατή η δημιουργία των εξής γεωγραφικών πληροφοριών: της διεύθυνσης και συγκέντρωσης της ροής, των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου με πυκνότητα που εξαρτάται από το όριο – κατώφλι τιμών που θα δώσει ο χρήστης (μικρότερο κατώφλι – πυκνότερο υδρογραφικό δίκτυο), των κόμβων του υδρογραφικού δικτύου, των υπολεκανών και των Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης (M.Y.A.). Ειδικά για την παραγωγή των M.Y.A. συνδυάζονται τα επίπεδα πληροφορίας με τις κλίσεις, τις διαπερατότητες ή άλλα χαρακτηριστικά που επιλέγει ο χρήστης.

4.5.2. Υπόγειο σύστημα

Τα επιπλέον πρωτογενή δεδομένα που ενδεχομένως είναι διαθέσιμα για την σχηματοποίηση του υπόγειου συστήματος μπορεί να είναι τα όρια του υδροφορέα (πολυγωνικά δεδομένα). Από το σύνολο των δεδομένων στοιχείων που έχουν αναφερθεί, μπορεί πλέον να γίνει διαμέριση του υπόγειου

υδροφορέα σε κύτταρα και να υπολογιστούν τα μήκη των πλευρών τους (ακμές), τα κέντρα βάρους τους, οι αποστάσεις μεταξύ των κέντρων βάρους, αλλά και να εκτιμηθούν τοπολογικές σχέσεις, όπως ποια κύτταρα βρίσκονται εκατέρωθεν μιας ακμής κλπ.

Για την προσομοίωση της τροφοδοσίας του υδροφορέα από την επιφανειακά κατανεμημένη κατείσδυση γίνεται ένωση των επιπέδων των κυττάρων, υπολεκανών και Μ.Υ.Α. γιατί από την επιφάνεια κάθε κυττάρου εισέρχονται στη δεξαμενή ύδατα, που κατεισδύουν κατακόρυφα από μια επιφάνεια της λεκάνης. Η επιφάνεια αυτή και η διαδικασία κατείσδυσης αναπαριστώνται με εννοιολογική δεξαμενή εδαφικής υγρασίας, η οποία αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη κατηγορία Μ.Υ.Α. που με τη σειρά της βρίσκεται σε συγκεκριμένη υπολεκάνη. Για την προσομοίωση της τροφοδοσίας του υδροφορέα από τη γραμμική κατείσδυση από τα υδατορεύματα, βρίσκονται τα κοινά σημεία των κυττάρων με τους κλάδους του υδατορεύματος. Τέλος, όσον αφορά τις απολήψεις υπογείων υδάτων μέσω γεωτρήσεων, υπολογίζονται επίσης τα κοινά σημεία των κυττάρων με τις γεωτρήσεις.

4.5.3. Υδροσύστημα

Εκτός των προαναφερόμενων πρωτογενών δεδομένων, χρήσιμα πρωτογενή στοιχεία είναι αυτά που σχετίζονται με τα αρδευτικά συστήματα της περιοχής μελέτης (γραμμικά δεδομένα). Για το υδροσύστημα παράγονται πληροφορίες που δίνουν τα τμήματα του αρδευτικού δικτύου με τους κόμβους στα άκρα τους.

Απαραίτητη σε όλες τις προηγούμενες ενέργειες είναι η εφαρμογή της διαδικασίας γεωαναφοράς, έτσι ώστε τα πρωτογενή και παραγόμενα δεδομένα να έχουν πραγματικές συντεταγμένες σε ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο σύστημα αναφοράς (συνήθως στο Ελληνικό Γεωγραφικό Σύστημα Αναφοράς, Ε.Γ.Σ.Α. '87). Την προετοιμασία όλων των γεωγραφικών πληροφοριών, ακολουθεί η εισαγωγή τους στο μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ. Για να γίνει αυτό, απαιτείται αρχικά αποθήκευσή τους σε μία βάση δεδομένων (*.mdb) του λογισμικού πακέτου Access. Στη συνέχεια, τα δεδομένα της γεωγραφικής βάσης μεταφέρονται σε μία βάση του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ μέσω της εφαρμογής ESRIHydrogeios που συνοδεύει το υπολογιστικό πακέτο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ. Στη βάση του μοντέλου εισάγονται επίσης και οι χρονοσειρές, οι στόχοι κλπ. Τα δεδομένα που μεταφέρονται τελικά στη βάση του μοντέλου φαίνονται στον ακόλουθο Πίνακα 1:

Πίνακας 1: Τα αρχεία που εισάγονται από τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών στο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ

| Δεδομένα που εισάγονται στο μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ από Γ.Σ.Π. | Περιγραφή δεδομένων |
|---|--|
| Borehole | Γεωτρήσεις |
| Spring | Πηγές |
| Network_Segment | Κλάδοι υδρογραφικού δικτύου |
| Junction_Point | Κόμβοι |
| Subbasin | Υπολεκάνες |
| GWB_Cell | Κύτταρα υπόγειου υδροφορέα |
| GWB_Cell_Edge | Ακμές υπογείων κυττάρων |
| GWB_Cell_Center_Distance | Αποστάσεις κέντρων βάρους υπογείων κυττάρων |
| HRU_AGGR | Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης (M.Y.A. ή HRU) |
| HRU_Subbasin_AGGR | Ένωση υπολεκανών και M.Y.A. |
| Subbasin_HRU_GWB_Cell_AGGR | Ένωση υπολεκανών, M.Y.A. και υπογείων κυττάρων |
| Network_GWB_Cell_AGGR | Ένωση υπογείων κυττάρων και υδρογραφικού δικτύου |

4.6. Εκτίμηση των παραμέτρων του ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ

Όπως ήδη αναφέρθηκε, το μοντέλο υπολογίζει τις τιμές 6 παραμέτρων (R , S_{\max} , μ , λ , κ , c) για κάθε M.Y.A., 1 παραμέτρου (συντελεστής δ) για κάθε κλάδο του υδρογραφικού δικτύου και 2 παραμέτρων (K , n) για κάθε υπόγεια δεξαμενή, με μεταβλητές απόκρισης, τις χρονοσειρές παροχής κατάντη των κόμβων του υδρογραφικού δικτύου, των πηγών και της στάθμης των υπόγειων δεξαμενών.

Ο τελικός αριθμός των παραμέτρων προκύπτει σημαντικά μεγάλος με αποτέλεσμα να δυσκολεύει η διαδικασία βαθμονόμησης. Για το λόγο αυτό, γίνεται χρήση πολλαπλών μέτρων προσαρμογής με στόχο την αναπαραγωγή διαφορετικών χαρακτηριστικών των μεταβλητών απόκρισης του μοντέλου και την αποτελεσματική αναζήτηση της βέλτιστης λύσης. Στο υπολογιστικό πακέτο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ δίνεται η δυνατότητα επιλογής διαφόρων κριτηρίων καλής προσαρμογής, τα οποία έχουν αναλυθεί στην ενότητα 3.3. Τελικά, για κάθε μεταβλητή και κάθε κριτήριο, εισάγεται ένας μη αρνητικός συντελεστής βάρους. Η στοχική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι ένα μέτρο σφάλματος, καθολικό, που προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους τιμών κριτηρίων και των μεταβλητών, πολλαπλασιασμένων με τους συντελεστές βάρους. Στόχος είναι η εκτίμηση των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων, με ελαχιστοποίηση της τιμής της στοχικής συνάρτησης.

5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΒΟΙΩΤΙΚΟΥ ΚΗΦΙΣΟΥ

5.1. Παλαιότερες εφαρμογές μοντέλων στην περιοχή μελέτης

Η λεκάνη απορροής του Βοιωτικού Κηφισού είναι μια περιοχή που παρουσιάζει ενδιαφέρον, καθώς αποτελεί ένα πολύπλοκο υδροσύστημα, με αλληλεπιδράσεις επιφανειακών και υπογείων υδάτων και πολλές ανθρωπογενείς επεμβάσεις, που επηρεάζουν σημαντικά το υδατικό ισοζύγιο της περιοχής. Τα υδάτινο δυναμικό της λεκάνης είναι αξιόλογο και οφείλεται τόσο στα επιφανειακά ύδατα του Βοιωτικού Κηφισού, όσο και στις εκφορτίσεις μεγάλων πηγών σε διάφορες θέσεις της λεκάνης. Από την άλλη μεριά, μεγάλη ποσότητα των υδατικών αποθεμάτων χρησιμοποιείται για άρδευση (καλλιεργήσιμες εκτάσεις Κωπαΐδας κλπ.) και ύδρευση (και της Αθήνας, μέσω των εισροών από το ποτάμι στην Υλίκη και των γεωτρήσεων Βασιλικών – Παρορίου στην περιοχή του μέσου ρου της λεκάνης, στο όρος Ακόντιο). Για την κάλυψη αυτών των αναγκών κατασκευάστηκαν αρδευτικά δίκτυα, υδραγωγεία και συγκροτήματα γεωτρήσεων για αντλήσεις, με μόνη περίπτωση επανατροφοδότησης του υδροφορέα από τις κατασκευές αυτές, τη διήθηση ποσότητας των υδάτων που χρησιμοποιούνται για άρδευση.

Τέτοιου είδους πολύπλοκα υδροσυστήματα είναι συνήθως αναγκαίο να εντάσσονται, για τη σωστή διαχείριση των υδατικών τους αποθεμάτων, σε Συστήματα Λήψης Αποφάσεων (Decision Support Systems), τα οποία εμφανίστηκαν σαν ρουτίνες προσομοίωσης και βελτιστοποίησης (Nalbantis et al., 2002). Και πιο συγκεκριμένα, για τη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού έγιναν διάφορες προσεγγίσεις με χρήση μοντέλων για την πρόβλεψη των υδατικών αποθεμάτων και την απορροή της λεκάνης στη έξοδο της σήραγγας Καρδίτσας στην Υλίκη. Αμέσως παρακάτω περιγράφονται δύο βασικές προσεγγίσεις που έγιναν στο παρελθόν με διαφορετικούς τύπους υδρολογικών μοντέλων (MODFLOW και ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ), από τη σύγκριση των οποίων προκύπτει το που υστερεί ή υπερτερεί κάθε μία από αυτές. Ακολουθεί σύντομη αναφορά στους στόχους της παρούσας εργασίας και στις διαφορές που έχει από την πιο πρόσφατη προσέγγιση (Ευστρατιάδης, 2008) που έγινε επίσης με το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.

5.1.1. Εφαρμογή μοντέλου MODFLOW

Η πρώτη προσέγγιση, όπως ακολούθως περιγράφεται (Περλέρος κ.ά., 2008), έγινε με χρήση του μοντέλου MODFLOW της αμερικάνικης εταιρείας USGS, ένα καταναμημένο, στοχαστικό μοντέλο με δεδομένα εισόδου τις μετρήσεις κατακρημνίσεων της λεκάνης, μετεωρολογικές μεταβλητές, παροχές στην έξοδο της λεκάνης και στοιχεία από γεωτρήσεις.

Το μοντέλο MODFLOW δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης ενός καρστικοποιημένου υδροφορέα, όπως είναι αυτός της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, εκτεταμένου και με πολλούς αγωγούς. Η διαμέρισή του έγινε με κάναβο διαφορετικών διαστάσεων κελιών, για την καλύτερη αναπαράσταση των φυσικών ιδιοτήτων του υδροφορέα. Συγκεκριμένα, ο κάναβος ήταν αραιότερος κοντά στα όρια των περιοχών (κελιά διάστασης 800 x 800 m) και πυκνότερος (150 x 150 m) γύρω από τις θέσεις που παρουσίαζαν μεγαλύτερο ενδιαφέρον, π.χ. πηγές. Τελικά, προέκυψε κάναβος με 7252 κελιά. Όσον αφορά την ανάπτυξη του υδροφορέα σε βάθος, θεωρήθηκε ένα υδροφόρο στρώμα.

Η περιγραφή της κίνησης του νερού έγινε με διαφορική εξίσωση που στη γενική της μορφή αναπαριστά τρισδιάστατη κίνηση του νερού μέσα σε πορώδες μέσο για μη μόνιμη ροή (5.1). Για την επίλυσή της εφαρμόστηκε η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (ενότητα 3.5.2) και συγκεκριμένα η μέθοδος Pre Conjugate Gradient. Οι κόμβοι στους οποίους εφαρμόστηκε η εξίσωση, θεωρήθηκαν στο κέντρο του κάθε κελιού, ενώ σαν αρχικές συνθήκες δόθηκαν οι τιμές του πιεζομετρικού φορτίου και της παροχής.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (0.31)$$

Στην παραπάνω εξίσωση είναι:

K: η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας σε ορθογώνιο σύστημα για ροή στις κύριες διευθύνσεις,

h: το πιεζομετρικό φορτίο,

W: μέγεθος που αφορά την παρουσία πηγών ή καταβοθρών και

S: η ειδική αποθήκευση.

Μελετήθηκε η περίπτωση κυρίως φρεάτιου υδροφορέα και θεωρήθηκε υπό πίεση μόνο στις επιφάνειες που βρίσκεται κάτω από προσχώσεις.

Σχετικά με τα γεωγραφικά δεδομένα που εισήχθησαν στο μοντέλο και καθόρισαν και τη δημιουργία ζωνών στον κάναβο, αυτά αφορούσαν τα όρια των γεωλογικών στρωμάτων, των υδραυλικών ιδιοτήτων, τις θέσεις των γεωτρήσεων. Όπως και στο μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, τα δεδομένα αυτά προέκυψαν από επεξεργασία άλλων στοιχείων και χαρτών, όπως ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής, χάρτες με τα όρια των υδρολογικών και υδρογεωλογικών λεκανών, τους γεωλογικούς σχηματισμούς κλπ.

Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν χρονοσειρές βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμοδιαπνοής για τον υπολογισμό της κατεΐσδυσης που αποτέλεσε δεδομένο εισόδου στο μοντέλο, καθώς και χρονοσειρές εκφόρτισης των πηγών. Και τέλος, επειδή η εφαρμογή του μοντέλου αφορούσε και διαχειριστικά θέματα των υδάτων, χρησιμοποιήθηκαν και στοιχεία σχετικά με τις αρδεύσεις στην περιοχή μελέτης, τις ποσότητες νερού που αντλούνται από γεωτρήσεις, τις ποσότητες που απαιτούνται για ύδρευση κλπ.

Για τη σχηματοποίηση του υδροσυστήματος, θεωρήθηκε υδραυλική επικοινωνία μεταξύ υδροφορέα και Βοιωτικού Κηφισού, η οποία εξαρτήθηκε από τη στάθμη του υδροφορέα, τη στάθμη του ποταμού και ένα συντελεστή αγωγιμότητας της κοίτης C. Η τιμή του που επηρεάζεται από την υδραυλική αγωγιμότητα της κοίτης και τις διαστάσεις του υδροφορέα. Επίσης, δόθηκαν αρχικές τιμές (διαφορετικές για κάθε ζώνη του υδροφορέα) από μετρήσεις πεδίου στις υδραυλικές ιδιότητες του υδροφορέα (αποθηκευτικότητα S, ειδική απόδοση S_y , μεταφορικότητα T).

Επίσης, η σχηματοποίηση του μοντέλου περιλάμβανε και τον καθορισμό των εξωτερικών διεγέρσεων του συστήματος μέσω παραμέτρων που ορίζουν οριακές συνθήκες. Σαν εξωτερικές διεγέρσεις θεωρήθηκαν οι ποσότητες νερού που διακινούνται μεταξύ κελιών του κανάβου και εξωτερικών περιοχών και σχετίζονται με εκφόρτιση πηγών, απολήψεις νερού, επαναφόρτιση υδροφορέα με κατείσδυση κατακρημνισμάτων.

Η βαθμονόμηση του μοντέλου έγινε σε δύο στάδια. Στο πρώτο, προσομοιώθηκε η ροή στον υδροφορέα σε συνθήκες μόνιμης ροής (steady state) και στο δεύτερο έγινε αξιοποίηση των αποτελεσμάτων σε συνθήκες μη μόνιμης ροής (transient state). Στο σύνολο της διαδικασίας έγινε βελτιστοποίηση με δοκιμές (trial and error) τόσο της τιμής του συντελεστή αγωγιμότητας, όσο και των υδραυλικών ιδιοτήτων του υδροφορέα, με στόχο την προσέγγιση των μετρημένων διακινούμενων ποσοτήτων νερού από τον υδροφορέα στο ποτάμι και αντίστροφα, καθώς και της μετρημένης στάθμης του υδροφορέα σε διάφορα σημεία.

Η βαθμονόμηση και στα δύο στάδια έγινε για χρονικό διάστημα πενταετίας (1984 – 1989) με διαφορετική όμως ανοχή σφάλματος στην εκτίμηση της στάθμης του υδροφορέα. Συγκεκριμένα, στο πρώτο στάδιο τέθηκε ανοχή ίση με 0,01 m και στο δεύτερο 0,001 m (σαφώς αυστηρότερη). Και για τα δύο στάδια, η προσαρμογή του μοντέλου θεωρήθηκε ικανοποιητική, λαμβάνοντας πάντοτε υπόψη τα δεδομένα και τους στόχους της μελέτης.

Τα κριτήρια καλής προσαρμογής, κοινά και για τα δύο στάδια, ήταν η αναπαραγωγή μετρημένων τιμών στάθμης στα αντίστοιχα σημεία ελέγχου και η επίτευξη ικανοποιητικού υδατικού ισοζυγίου.

5.1.2. Εφαρμογή υπολογιστικού συστήματος ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ

Η πιο πρόσφατη και ολοκληρωμένη υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού με το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, συνοπτική περιγραφή της οποίας ακολουθεί, έγινε από τον Ευστρατιάδη (2008, σ. 269 – 351).

Όπως και στην περίπτωση του μοντέλου MODFLOW, προκειμένου να γίνει η σχηματοποίηση του επιφανειακού και υπόγειου συστήματος, καθώς και του υδροσυστήματος, απαιτήθηκε η εισαγωγή γεωγραφικών δεδομένων μετά από επεξεργασία με Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών.

Όσον αφορά το επιφανειακό σύστημα, το υδρογραφικό δίκτυο διαιρέθηκε σε τέσσερα τμήματα, ενώ η λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού διαιρέθηκε σε 4 αντίστοιχες υπολεκάνες και μία επιπλέον στα ανάντη του σχηματοποιημένου υδρογραφικού δικτύου. Επίσης, για το σχεδιασμό των Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης επελέγησαν δύο εδαφικά χαρακτηριστικά, η κλίση και η υδατοπερατότητα, οι οποίες επηρεάζουν την ταχύτητα πλημμυρικής απόκρισης και την κατείσδυση αντίστοιχα. Για την κλίση του εδάφους ορίστηκαν δύο κατηγορίες, χαμηλής και υψηλής κλίσης, με όριο το 10%, ενώ για την υδατοπερατότητα ορίστηκαν τρεις κατηγορίες, διαπερατών, ημιπερατών και αδιαπέρατων σχηματισμών. Τελικά, από το συνδυασμό της κλίσης και της υδατοπερατότητας προέκυψαν έξι κατηγορίες Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης, ενώ από το συνδυασμό των πέντε υπολεκανών και των έξι κατηγοριών Μ.Υ.Α. προέκυψαν 30 κατηγορίες περιοχών της λεκάνης.

Τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου αυτού είναι η βροχόπτωση και η δυνητική εξατμοδιαπνοή σε κάθε υπολεκάνη, ενώ από την εφαρμογή προκύπτει η πραγματική εξατμοδιαπνοή, η επιφανειακή απορροή, η κατείσδυση και η αποθήκευση εδαφικής υγρασίας. Τελικά, σε κάθε κόμβο μεταφέρεται συγκεντρωμένα, η απορροή που έχει ολοκληρωθεί στην επιφάνεια της υπολεκάνης μαζί με την εκροή των πηγών.

Όσον αφορά το υπόγειο σύστημα, γίνεται διαχωρισμός του υδροφορέα σε 30 κύτταρα. Η διαμέριση δεν έχει, γενικά, καμία φυσική αντιστοιχία, ενώ προκύπτει μεγάλος αριθμός παραμέτρων (τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας και πορώδους για κάθε κύτταρο). Το αποτέλεσμα είναι να προσεγγίζεται με μέθοδο τύπου «μαύρου κουτιού» το υπόγειο σύστημα της λεκάνης (υπερ-παραμετροποίηση). Από τα κύτταρα αυτά, τα δύο αντιστοιχούσαν σε υπόγειες διαφυγές από τη λεκάνη προς τον Ευβοϊκό Κόλπο. Επίσης, η σχηματοποίηση του υπόγειου συστήματος περιέλαβε και την τοποθέτηση των έξι μεγάλων πηγών της περιοχής μελέτης: Λιλαία – Κεφαλόβρυσο, Μαυρονέρι, Αγία Παρασκευή, Μέλανας, Πολυγύρα και Έρκυνα.

Για την επίλυση του μοντέλου υπόγειου συστήματος, υπολογίζεται η φόρτιση του κυττάρου, που προκύπτει από το άθροισμα κατείσδυσης και διήθησης με αφαίρεση των αντλήσεων (εδώ υπεισέρχεται επίλυση του μοντέλου του υδροσυστήματος). Δεδομένα εισόδου είναι οι στάθμες του κάθε κυττάρου του υδροφορέα, οι παροχές των πηγών και οι διαφυγές από τη λεκάνη.

Όσον αφορά τη σχηματοποίηση του υδροσυστήματος, ελήφθησαν υπόψη οι ανθρώπινες παρεμβάσεις που έχουν γίνει στη λεκάνη και οι κύριες χρήσεις νερού. Τα υδατικά αποθέματα της λεκάνης χρησιμοποιούνται κυρίως για άρδευση, είτε μέσω έργων που έχουν γίνει από τοπικούς οργανισμούς εγγείων βελτιώσεων είτε από ιδιωτικές γεωτρήσεις. Επίσης, ποσότητες νερού από γεωτρήσεις (Βασιλικών – Παρορίου) και την Υλίκη μεταφέρονται στο υδρευτικό σύστημα της Αθήνας. Με βάση τα προαναφερόμενα, έγινε η σχηματοποίηση του υδροσυστήματος με τη δημιουργία σημειακών και γραμμικών στοιχείων. Τα σημειακά αφορούν κόμβους (11 σε αριθμό) κατά μήκος του ποταμού, τα οποία

αντιστοιχούν σε εξόδους υπολεκανών, θέσεις συγκέντρωσης απολήψεων από γεωτρήσεις, αρδευόμενες περιοχές κλπ. Τα γραμμικά στοιχεία είναι κλάδοι είτε του Βοιωτικού Κηφισού είτε υδραγωγείων για απολήψεις νερού (έργα εκτροπής για άρδευση της περιοχής κάτω ρου, αρδευτικά κανάλια Κοπαΐδας, υδραγωγείο Υλίκης). Υπάρχουν, τέλος, και έξι εννοιολογικές ομάδες γεωτρήσεων (συνολικά 54) που τροφοδοτούν τους κόμβους. Τελικά, καθορίζονται έξι κατηγορίες λειτουργικών στόχων (ύδρευση, ελάχιστη παροχή από υδραγωγείο Υλίκης, αρδεύσεις) που με σειρά προτεραιότητας ικανοποιεί το μοντέλο.

Για την επίλυση του μοντέλου του υδροσυστήματος, μεταφέρεται η συγκεντρωμένη ροή σε κάθε κόμβο και φτάνει στην έξοδο της λεκάνης με ενδιάμεσες απολήψεις από γεωτρήσεις και υδραγωγεία.

Φαίνεται από τα παραπάνω ότι και τα τρία μοντέλα συνδέονται, καθώς δεδομένα εξόδου του ενός αποτελούν δεδομένα εισόδου του άλλου. Προκύπτει, δηλαδή, ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού που επιλύεται μέσω εφαρμογής εξελικτικού αλγορίθμου ανόπτησης – απλόκου, με επαναληπτική διαδικασία και θέτοντας μια ανοχή για την απόκλιση των τιμών.

Οι χρονοσειρές που χρησιμοποιήθηκαν σαν περίοδος ελέγχου του μοντέλου, αφορούσαν το διάστημα 1984 – 1994. Από το διάστημα αυτό, τα πρώτα 5 έτη χρησιμοποιήθηκαν για βαθμονόμηση και τα επόμενα 5 για επαλήθευση.

Οι παράμετροι του μοντέλου που προέκυψαν από αυτή την προσέγγιση ήταν 104 και αναλυτικότερα:

- 4 συντελεστές διήθησης (ένας για κάθε τμήμα του Βοιωτικού Κηφισού),
- 36 παράμετροι για τις Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης [6 παράμετροι (ενότητα 4.2) για κάθε μία από τις 6 κατηγορίες Μ.Υ.Α],
- 58 παράμετροι για τα υπόγεια κύτταρα [2 παράμετροι (υδραυλική αγωγιμότητα και πορώδες) για κάθε ένα από τα 28 κύτταρα και 2 τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας για τα 2 κύτταρα διαφυγών] και
- 6 παράμετροι για τις πηγές (υδραυλική αγωγιμότητα).

Εκτός από τις παραμέτρους του μοντέλου, απαιτείται και ο υπολογισμός ακόμη 60 άγνωστων μεταβλητών που αφορούν τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος και είναι:

- 30 μεταβλητές που αφορούν την αρχική στάθμη εδαφικής υγρασίας στην αντίστοιχη εδαφική δεξαμενή (1 δεξαμενή για κάθε περιοχή που προκύπτει από το συνδυασμό 5 υπολεκανών και 6 κατηγοριών Μ.Υ.Α.) και
- 30 μεταβλητές που αφορούν την αρχική στάθμη κάθε υπόγειας δεξαμενής.

Στις μεταβλητές αυτές, δόθηκαν τιμές εμπειρικά για να αποφευχθεί επιπλέον υπολογιστικός φόρτος και αβεβαιότητες στους προσδιορισμούς.

Τα κριτήρια προσαρμογής του μοντέλου σχετίζονται με μέτρα προσαρμογής των προσομοιωμένων στις παρατηρημένες τιμές, όπως η αποτελεσματικότητα, η μεροληψία και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα

αναπαραγωγής μηδενικών τιμών (ενότητα 3.3). Σημεία ελέγχου είναι οι έξι μεγάλες πηγές και η έξοδος της λεκάνης. Επίσης, υπάρχουν και ορισμένα εμπειρικά μέτρα ελέγχου υπερετήσιας διακύμανσης μη μετρούμενων αποκρίσεων.

Όσον αφορά τη διαδικασία βαθμονόμησης, έγινε αρχικά βελτιστοποίηση των παραμέτρων του επιφανειακού μοντέλου και της παραμέτρου της υδραυλικής αγωγιμότητας από το υπόγειο μοντέλο, ώστε αρχικά να γίνει μια καλή προσέγγιση των μετρημένων αποκρίσεων στην έξοδο της λεκάνης και στη συνέχεια της εκφόρτισης των πηγών και με στόχο οι προσομοιωμένες τιμές να βρίσκονται κοντά στη φυσική πραγματικότητα. Στη συνέχεια, έγινε σταδιακή βελτίωση των ορισμένων παραμέτρων κατά ομάδες, λαμβάνοντας υπόψη ποια μεγέθη επηρεάζουν οι διάφορες παράμετροι.

Τελικά, η εφαρμογή του μοντέλου έδωσε πολύ καλή προσαρμογή στο υδρογράφημα που προέκυψε από μετρήσεις στην έξοδο της λεκάνης, με το δείκτη αποτελεσματικότητας να φτάνει το 0,87 και το 0,76 στις περιόδους βαθμονόμησης και επαλήθευσης αντίστοιχα. Στα υπόλοιπα σημεία ελέγχου (πηγές), η ποιότητα της προσαρμογής ποικίλει και κρίνεται πάντα σε συνδυασμό με τα διαθέσιμα δεδομένα, τις φυσικές ιδιαιτερότητες (πολύπλοκοι μηχανισμοί λειτουργίας καρστικών πηγών) και ειδικές συνθήκες που επηρέασαν τις κατακρημνίσεις και συνεπώς την υδρολογική δίαιτα ορισμένων πηγών (π.χ. χιονοπτώσεις). Συγκεκριμένα προέκυψαν οι τιμές:

- Πηγές Λιλαία – Κεφαλόβρυσο: 0,806 για τη βαθμονόμηση και 0,607 για την επαλήθευση.
- Πηγές Μαυρονερίου: 0,693 για τη βαθμονόμηση και 0,601 για την επαλήθευση.
- Πηγές Αγίας Παρασκευής: 0,724 για τη βαθμονόμηση.
- Πηγές Έρκυνα: 0,431 για τη βαθμονόμηση και 0,458 για την επαλήθευση.
- Πηγές Μέλινα: 0,265 για τη βαθμονόμηση και 0,095 για την επαλήθευση.
- Πηγές Πολυγύρας: 0,372 για τη βαθμονόμηση.

5.1.3. Σύγκριση εφαρμογών – Σκοπός της παρούσας εφαρμογής

Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν, η προσομοίωση της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού έγινε μέσω δύο διαφορετικών προσεγγίσεων. Η πρώτη προσέγγιση έγινε με την εφαρμογή του μοντέλου MODFLOW, που περιλαμβάνει ανεξάρτητα μοντέλα για την προσομοίωση των επιφανειακών και υπόγειων διεργασιών, και η δεύτερη με την εφαρμογή του υπολογιστικού πακέτου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, που συνδυάζει τρία μοντέλα που βρίσκονται σε αλληλεπίδραση και αναπαριστούν τις επιφανειακές διεργασίες, τις υπόγειες και τις διαδικασίες κατανομής νερού αντίστοιχα.

Μετά την περιγραφή των διαδικασιών που περιλαμβάνει κάθε προσέγγιση, κρίνεται σκόπιμο να συγκριθούν οι δύο εφαρμογές, καθώς και να γίνει μια αναφορά στα χαρακτηριστικά της παρούσας εφαρμογής.

Συγκρίνοντας, τις δύο προσεγγίσεις προκύπτουν τα εξής (Nalbantis et al., 2007):

- Το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ περιλαμβάνει τρία μοντέλα (επιφανειακού συστήματος, υπόγειου συστήματος και υδροσυστήματος) τα οποία τα εξετάζει σε αλληλεπίδραση, κάτι που συμφωνεί με τις φυσικές διεργασίες (π.χ. το υπόγειο σύστημα μέσω των πηγών ενισχύει την επιφανειακή απορροή, ενώ το επιφανειακό μπορεί να τροφοδοτεί τις υπόγειες δεξαμενές μέσω κατείσδυσης από τους κλάδους του ποταμού). Αντίθετα, το μοντέλο MODFLOW δεν παρουσιάζεται το ίδιο ευέλικτο, καθώς δε θεωρεί αλληλεπίδραση επιφανειακών και υπόγειων διεργασιών και επιπλέον προαπαιτεί γνώση των απολήψεων νερού.
- Το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ είναι χρήσιμο σε περιπτώσεις διαταραγμένων λεκανών με πολλά τεχνικά έργα, ανθρώπινες επεμβάσεις, απολήψεις κλπ., καθώς συνεργάζεται με Συστήματα Διαχείρισης Αποφάσεων για τον έλεγχο των υδατικών αποθεμάτων μιας λεκάνης. Θεωρείται, λοιπόν, δεδομένη η επιρροή των επεμβάσεων αυτών στις φυσικές διεργασίες. Το μοντέλο MODFLOW μειονεκτεί ως προς αυτό, αφού χρησιμοποιεί διαφορετικά μοντέλα για τις φυσικές διεργασίες και τις διαδικασίες διαχείρισης του νερού.
- Όσον αφορά τα δεδομένα που εισάγονται σε κάθε μοντέλο, το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ έχει το πλεονέκτημα ότι δέχεται εκτός από τις χρονοσειρές και γεωγραφικές πληροφορίες (κατάλληλα μετασηματισμένες) επεξεργασμένες σε κάποιο Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών, γεγονός που βοηθάει στην αναπαράσταση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της εξεταζόμενης κάθε φορά λεκάνης.
- Όσον αφορά τη σχηματοποίηση του υπόγειου συστήματος, στο μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ γίνεται με πολυγωνικά κύτταρα, σε αντίθεση με το MODFLOW που η διαμέριση γίνεται με ορθογωνικά. Τα πολυγωνικά κύτταρα αναπαριστούν καλύτερα τα όρια του υδροφορέα ή των γεωλογικών και γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών που λαμβάνονται υπόψη, έτσι ώστε η σχηματοποίηση να είναι περισσότερο συνεπής με τα φυσικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Επιπλέον, η ημικατανεμημένη σχηματοποίηση του MODFLOW, αν και λαμβάνει υπόψη τις φυσικές ιδιαιτερότητες του υδροφορέα μέσω ζωνοποίησης των κυττάρων, δίνει πολύ μεγάλο αριθμό κυττάρων που αυξάνουν τον υπολογιστικό φόρτο για την εκτίμηση των παραμέτρων κάθε κυττάρου. Συγκριτικά, αναφέρεται ότι για την λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, τα κύτταρα που εξετάζει το ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ και το MODFLOW είναι 30 και 7252 αντίστοιχα.
- Το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ εισάγοντας την έννοια των Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης επιτρέπει στις παραμέτρους του μοντέλου να έχουν φυσική συνέπεια, ενώ προσδιορίζονται καλύτερα οι αβεβαιότητες. Επίσης, δίνει τη δυνατότητα ομαδοποίησης των παραμέτρων, εφαρμόζοντας έτσι την αρχή της φειδωλότητας.
- Όσον αφορά τη βαθμονόμηση των δύο μοντέλων, η προσέγγιση με το MODFLOW εφαρμόζει αυτόματη αλγοριθμική διαδικασία σε δύο στάδια που μοιάζει με διαδικασία «μαύρου κουτιού», με αποτέλεσμα οι παράμετροι να μην έχουν πάντα φυσική σημασία, η επαλήθευση να μην είναι καλή

κλπ. Στο μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ εφαρμόζεται μια υβριδική χειροκίνητη και αυτόματη βαθμονόμηση, δηλαδή μια σύνθετη στρατηγική που μετά την αυτόματη διαδικασία πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, επιτρέπει την επέμβαση του χρήστη που με βάση της εμπειρίας του μπορεί να αλλάζει τα όρια των παραμέτρων, τα βάρη των κριτηρίων ή να βάζει ποινές, ώστε τα αποτελέσματα να είναι περισσότερο ρεαλιστικά.

Στην παρούσα εργασία, όπως έχει ήδη αναφερθεί, εφαρμόζεται το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, διατηρώντας σε εφαρμογή όλα τα πλεονεκτήματα που έχει στην προσομοίωση ενός υδροσυστήματος. Η διαφορά του σε σχέση με την πιο πρόσφατη εφαρμογή (Ευστρατιάδης, 2008), έγκειται στο διαφορετικό αριθμό υπολεκανών του επιφανειακού συστήματος, καθώς και σε μία προσπάθεια περαιτέρω μείωσης των παραμέτρων του υπόγειου συστήματος, μέσω ομαδοποίησής τους, ενισχύοντας, έτσι, την αρχή της φειδωλότητας παραμέτρων, χωρίς η προσομοίωση να απομακρυνθεί από τη φυσική πραγματικότητα. Ο Perrin et al. (2000) αναφέρει ότι σχετικά με την επίδραση του αριθμού των παραμέτρων στα αποτελέσματα ενός μοντέλου, έχουν γίνει διάφορες μελέτες, από τις οποίες αποδείχτηκε ότι υπερβολικά μεγάλος αριθμός παραμέτρων αποτελεί πηγή αβεβαιότητας. Και πιο συγκεκριμένα, ότι τα πολύπλοκα μοντέλα υπερτερούν όσον αφορά τη βαθμονόμηση, όχι όμως και ως προς την επαλήθευση (Perrin et al., 2001). Βέβαια, επισημαίνει ότι μόνο ο αριθμός των παραμέτρων δεν καθορίζει το αποτέλεσμα του μοντέλου, καθώς σημαντικό ρόλο παίζει και η δομή του (μεταβλητές, εξισώσεις, παραμετροποίηση κλπ.), παρ' όλα αυτά, όμως, είναι καλό να γίνεται προσπάθεια εφαρμογής μοντέλων με μικρό αριθμό παραμέτρων. Από εκεί και πέρα, υπάρχει δυνατότητα μεγαλύτερης ακρίβειας προσδιορισμού τους με χρήση συμπληρωματικών στην κύρια δομή μοντέλων, βάσει πάντοτε της ιδιαιτερότητας κάθε προβλήματος που εξετάζεται.

Τελικά, στην παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκε εκ νέου σχεδιασμός των υπολεκανών, των κοινών περιοχών τους με τις Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης, καθώς και των κυττάρων του υπόγειου υδροφορέα. Οι υπολεκάνες αυξήθηκαν από 5 σε 13 και τα υπόγεια κύτταρα, από 30 σε 40, από τα οποία τα 4 αφορούν διαφυγές της λεκάνης.

Τα κριτήρια σχεδιασμού των κυττάρων είναι τόσο η υδατοπερατότητα των σχηματισμών της λεκάνης, όσο και το ανάγλυφο της περιοχής. Επίσης, τοπικά λαμβάνεται υπόψη η παρουσία ρηγμάτων που ενδεχομένως επηρεάζουν τη ροή μεταξύ γειτονικών κυττάρων και τις οριακές συνθήκες (αδιαπέρατα όρια), καθώς και η σχέση υδρολογικών και υδρογεωλογικών λεκανών. Σε γενικές γραμμές, γίνεται προσπάθεια η διαμέριση του υδροφορέα να σχετίζεται με τα φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης. Επιπλέον, μετά από έρευνα σε παλαιότερες γεωλογικές και υδρογεωλογικές μελέτες, προστίθενται υπόγειες διαφυγές της λεκάνης στο γειτονικό Θηβαϊκό πεδίο και προς την Υλίκη (ενότητα 2.3.4). Όσον αφορά τις υπολεκάνες χρησιμοποιείται διαμέριση με μεγαλύτερο αριθμό υπολεκανών από εκείνον του

Ευστρατιάδη (2008) και περισσότερους κλάδους του Βοιωτικού Κηφισού, επίσης με στόχο την λεπτομερέστερη περιγραφή των χαρακτηριστικών της λεκάνης και των ιδιαίτερων συνθηκών που επικρατούν σε κάθε κλάδο του ποταμού (π.χ. διαφορετική διήθηση).

Όσον αφορά το μοντέλο διαχείρισης των υδάτων, δε γίνεται καμία επέμβαση στην παρούσα εργασία και δεν εξετάζεται περαιτέρω.

Μετά τη σχηματοποίηση του επιφανειακού και υπόγειου συστήματος με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω, ακολουθεί χρήση της δυνατότητας που προσφέρει το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ για ομαδοποίηση συγκεκριμένων παραμέτρων με στόχο τη μείωση του πλήθους τους. Για το σκοπό αυτό, γίνεται ομαδοποίηση των υπογείων κυττάρων σε τρεις κατηγορίες με βάση τη διαπερατότητα των γεωλογικών σχηματισμών που επικρατούν στην επιφάνεια κάθε κυττάρου (υδροπερατοί, ημιπερατοί και αδιαπέρατοι). Σε κάθε μία κατηγορία δίνονται κοινές τιμές στην υδραυλική αγωγιμότητα και το πορώδες, σε αντίθεση με την προηγούμενη προσέγγιση (Ευστρατιάδης, 2008), όπου κάθε κύτταρο είχε διαφορετική τιμή των παραμέτρων αυτών. Το αποτέλεσμα είναι περίπου ο υποδιπλασιασμός του συνολικού αριθμού των παραμέτρων του συστήματος και η μείωση κατά 83% των παραμέτρων του υπόγειου μοντέλου.

Η νέα σχηματοποίηση του επιφανειακού συστήματος, με περισσότερες υπολεκάνες, έχει σα συνέπεια την αύξηση του αριθμού των υποπεριοχών που προκύπτουν από το συνδυασμό υπολεκάνων και Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης, όχι όμως και των παραμέτρων, οι οποίες παραμένουν όσες και στην προηγούμενη προσέγγιση. Έτσι, με λιγότερες παραμέτρους επιτυγχάνεται έλεγχος της απορροής σε περισσότερες θέσεις ελέγχου, ενώ επιτυγχάνεται ακριβέστερη περιγραφή του πεδίου βροχής.

Ακολουθεί πίνακας (Πίνακας 2) με τα βασικότερα σημεία σύγκρισης των τριών προσεγγίσεων, ενώ στις επόμενες ενότητες, γίνεται ανάλυση της διαδικασίας σχηματοποίησης και παραμετροποίησης του μοντέλου, καθώς και περιγραφή της διαδικασίας βαθμονόμησης και των αποτελεσμάτων της.

Πίνακας 2: Σύγκριση των τριών προσομοιώσεων της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού.

| Σημεία σύγκρισης | Εφαρμογή MODFLOW (Περλέρος κ.ά., 1998) | Χρήση υπολογιστικού πακέτου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ (Ευστρατιάδης, 2008) | Χρήση υπολογιστικού πακέτου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ (Παρούσα εφαρμογή) |
|----------------------|---|--|--|
| Περιοχή μελέτης | Καρστικός υδροφορέας, στο πεδινό τμήμα του άνω, μέσου και κάτω ρου | Λεκάνη, υδροφορέας και υδροσύστημα σε αλληλεπίδραση | Λεκάνη, υδροφορέας και υδροσύστημα σε αλληλεπίδραση |
| Είδος μοντέλου | Κατανεμημένο | Εννοιολογικό, ημικατανεμημένο | Εννοιολογικό, ημικατανεμημένο |
| Εξωτερικές φορτίσεις | Κατείσδυση (ως ποσοστό κατακρημνίσεων) και απολήψεις (εντάσσονται οι ανθρώπινες επεμβάσεις) | Βροχόπτωση, δυνητική εξατμοδιαπνοή και υδατικές ανάγκες | Βροχόπτωση, δυνητική εξατμοδιαπνοή και υδατικές ανάγκες |

| Επιφανειακό σύστημα | | | |
|-------------------------------------|---|--|---|
| Μοντελοποίηση | Εντάσσεται στις εξωτερικές φορτίσεις | Δεξαμενές εδαφικής υγρασίας | Δεξαμενές εδαφικής υγρασίας |
| Σχηματοποίηση | – | 5 υπολεκάνες, 4 κλάδοι υδατορευμάτων | 13 υπολεκάνες, 12 κλάδοι υδατορευμάτων |
| Παραμετροποίηση | – | 6 Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης (3 κατηγορίες περατότητας, 2 κατηγορίες κλίσεων εδάφους), με 6 παραμέτρους ανά ΜΥΑ | 6 Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης (3 κατηγορίες περατότητας, 2 κατηγορίες κλίσεων εδάφους), με 6 παραμέτρους ανά ΜΥΑ |
| Σύνολο παραμέτρων | | 36 | 36 |
| Αρχικές συνθήκες | – | 30 στάθμες δεξαμενών εδαφικής υγρασίας (μηδενικές) | 78 στάθμες δεξαμενών εδαφικής υγρασίας (μηδενικές) |
| Υπόγειο σύστημα | | | |
| Μοντελοποίηση | Ορθογωνικά κύτταρα (MODFLOW) | Πολυγωνικά κύτταρα και αντίστοιχες υπόγειες δεξαμενές | Πολυγωνικά κύτταρα και αντίστοιχες υπόγειες δεξαμενές |
| Σχηματοποίηση | 7252 κύτταρα, μεγέθους από 800 × 800 m έως 150 × 150 m (πιο πυκνές ζώνες κοντά σε σημαντικές πηγές) | 28 κύτταρα διαφόρων μεγεθών, 2 κύτταρα διαφυγών, 6 πηγές (χάραξη χωρίς φυσική ερμηνεία) | 36 κύτταρα διαφόρων μεγεθών, 4 κύτταρα διαφυγών, 6 πηγές (χάραξη με βάση τη γεωλογία και το ανάγλυφο) |
| Παραμετροποίηση | Ζωνοποίηση υδαταγωγιμότητας και υδροχωρητικότητας | Διαφορετικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας και πορώδους ανά κύτταρο (δεν χρησιμοποιείται το πορώδες σε κύτταρα διαφυγών και πηγές) | Τρεις κατηγορίες υδραυλικής αγωγιμότητας και πορώδους για τυπικά κύτταρα, διαφορετικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας για κύτταρα διαφυγών και πηγές |
| Σύνολο παραμέτρων | 6 | 64 | 16 |
| Αρχικές συνθήκες | Υδαταγωγιμότητα και συντ/στές υδροχωρητικότητας από δοκιμαστικές αντλήσεις, πιεζομετρικά φορτία | 30 στάθμες υπόγειων δεξαμενών (χονδροειδής ορισμός με βάση την τοπογραφία) | 36 στάθμες υπόγειων δεξαμενών (ορισμός με βάση την πιεζομετρία και τοπογραφία) |
| Μοντελοποίηση υδροσυστήματος | | | |
| Μοντελοποίηση | Εντάσσεται στις εξωτερικές φορτίσεις | Αρδεύσεις, απολήψεις γεωτρήσεων, ύδρευση | Αρδεύσεις, απολήψεις γεωτρήσεων, ύδρευση |
| Βαθμονόμηση | Χειροκίνητη, οπτική σύγκριση χρονοσειρών πιεζομετρίας | Χειροκίνητη – Αυτόματη (Υβριδική), προσαρμογή σε υδρομετρήσεις υδατορευμάτων και πηγών | Χειροκίνητη – Αυτόματη (Υβριδική), προσαρμογή σε υδρομετρήσεις υδατορευμάτων και πηγών |
| Υπολογιστικός φόρτος προσομοίωσης | Πολύ μεγάλος, λόγω του πλήθους των κυττάρων (επίλυση με σχήμα πεπερασμένων διαφορών) | Πολύ μικρός (περίπου 1 sec ανά προσομοίωση) | Ανεπαίσθητα μεγαλύτερος, λόγω του μεγαλύτερου αριθμού υπολεκανών |

5.2. Σχηματοποίηση του μοντέλου της λεκάνης απορροής

5.2.1. Χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών

Η εφαρμογή Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (Γ.Σ.Π.) είναι απαραίτητο στάδιο πριν τη χρήση του υπολογιστικού συστήματος ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, όσον αφορά την προετοιμασία γεωγραφικών δεδομένων που σε κατάλληλη μορφή πρέπει να εισαχθούν στη συνέχεια στο σύστημα, για τη δημιουργία του μοντέλου της υπό μελέτη περιοχής. Με τη βοήθεια των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών υπολογίζονται ή σχεδιάζονται βασικά στοιχεία της υδρολογίας και υδρογεωλογίας της περιοχής (ο Βοιωτικός Κηφισός, οι πηγές, οι περιοχές διαφορετικής διαπερατότητας, η διακριτοποίηση του υπόγειου πεδίου ροής κλπ.) σε ξεχωριστά θεματικά επίπεδα (layers), τα οποία μπορεί να είναι σημειακά, γραμμικά ή πολυγωνικά. Παράλληλα, κάθε ένα από τα επίπεδα συμπληρώνεται με βασικές γεωγραφικές και τοπογραφικές πληροφορίες υπό μορφή πίνακα (π.χ. εμβαδό, περίμετρο, συντεταγμένες, ονοματολογία κλπ.), καθώς και πληροφορίες που δείχνουν τη σχέση μεταξύ των οντοτήτων κάθε θεματικού επιπέδου (π.χ. κοινές πλευρές πολυγώνων, αποστάσεις των κεντροειδών τους κλπ.), αλλά και τη σχέση οντοτήτων που ανήκουν σε διαφορετικά επίπεδα (π.χ. κοινές επιφάνειες πολυγώνων). Το λογισμικό πακέτο που χρησιμοποιήθηκε για τις παραπάνω διαδικασίες είναι το ArcGIS 9.2x.

Η δημιουργία του μοντέλου της λεκάνης απορροής του Βοιωτικού Κηφισού με το υπολογιστικό σύστημα ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, περιλαμβάνει τρεις συνιστώσες (Ευστρατιάδης, 2008, σ.286): το μοντέλο επιφανειακής υδρολογίας, το μοντέλο υπόγειας υδρολογίας και το μοντέλο λειτουργίας του υδροσυστήματος). Για το λόγο αυτό, κρίνεται σκόπιμο η παρακάτω περιγραφή των διαδικασιών που εκτελέστηκαν με τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, να γίνει για κάθε ένα από τα προαναφερόμενα μοντέλα χωριστά. Οι βασικές γεωγραφικές πληροφορίες (βροχομετρικοί σταθμοί, πηγές, ψηφιακό μοντέλο εδάφους, όρια λεκάνης κλπ.) για την περαιτέρω σχεδίαση είναι αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στις προηγούμενες προσεγγίσεις (Ευστρατιάδης κ.ά., 2006 και Ευστρατιάδης, 2008).

▪ Μοντέλο επιφανειακής υδρολογίας

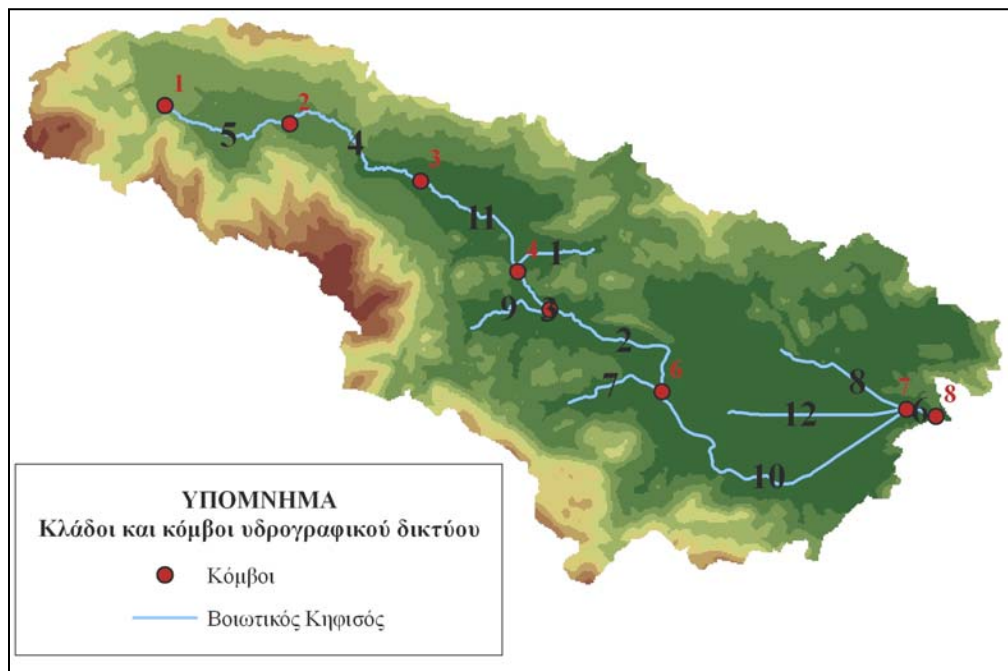
Η λειτουργία του μοντέλου επιφανειακής υδρολογίας προϋποθέτει τα εξής:

i. Υπολογισμό της διεύθυνσης ροής, των κλάδων και των κόμβων του υδρογραφικού δικτύου:

Οι υπολογισμοί βασίζονται στην τοπογραφία της περιοχής μελέτης (χρησιμοποιείται ψηφιακό μοντέλο εδάφους - DEM) και μέσω του λογισμικού ArcGIS 9.2x δημιουργούνται κλίμακες που δείχνουν τη διεύθυνση ροής των υδάτων, τη συγκέντρωση ροής και τελικά το υδρογραφικό δίκτυο με κατάταξη των κλάδων του (Πίνακας 3). Ακολούθως, σχεδιάζονται οι κόμβοι του υδρογραφικού δικτύου (Εικόνα 27).

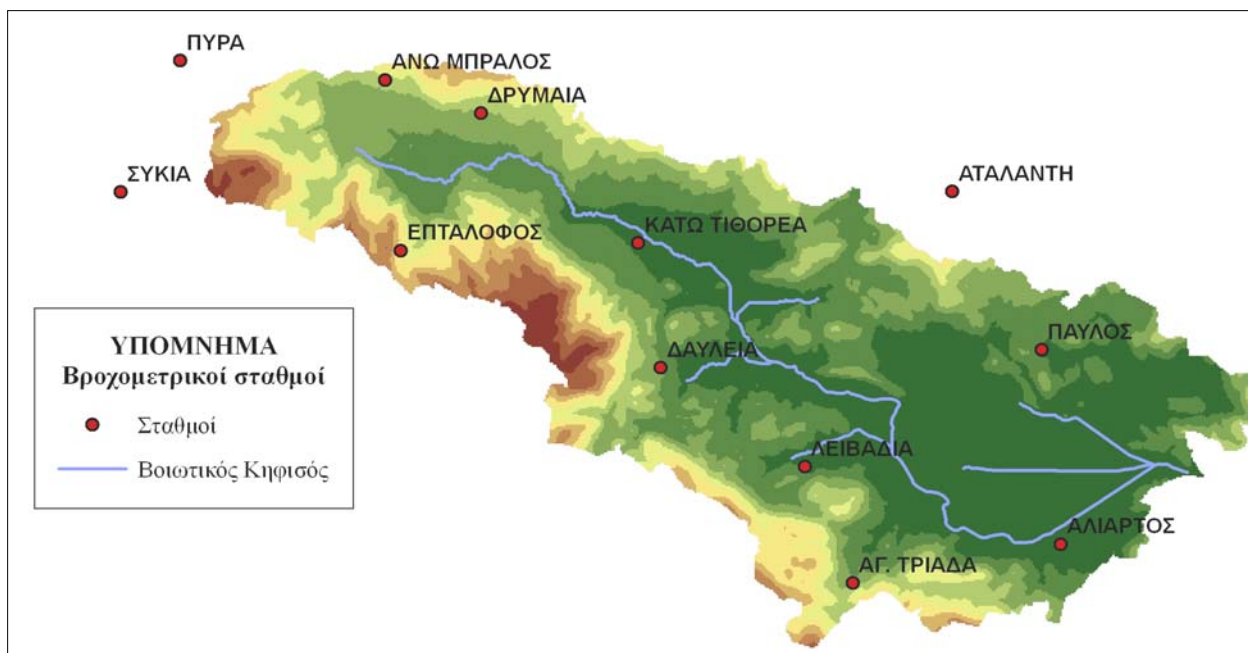
Πίνακας 3: Οι 12 κλάδοι του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης.

| Τμήματα υδρογραφικού δικτύου | Όνομα | Τμήματα υδρογραφικού δικτύου | Όνομα |
|------------------------------|---------------------|------------------------------|-----------------|
| 1 | Μπογδανόρεμα | 7 | Έρκυνα |
| 2 | Άγιος Βλάσιος – | 8 | Μέλανας |
| 3 | Ανθοχώρι – Άγιος | 9 | Πλατανιά |
| 4 | Αμφίκλεια – Τιθορέα | 10 | Συγκεντρωτική |
| 5 | Γραβιά – Αμφίκλεια | 11 | Τιθορέα – |
| 6 | Διώρυγα Καρδίτσας | 12 | Κεντρική Τάφρος |



Εικόνα 27: Με τα κόκκινα νούμερα σημειώνονται οι κόμβοι του υδρογραφικού δικτύου και με τα μαύρα οι κλάδοι του. Τα ονόματα των κλάδων φαίνονται στον πίνακα 2.

ii. **Τοποθέτηση των πηγών και των βροχομετρικών σταθμών στη λεκάνη απορροής:** Με τη βοήθεια των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών, σχεδιάστηκαν στην λεκάνη απορροής του Βιοιωτικού Κηφισού τα σημεία στα οποία αντιστοιχούν τα έξι βασικά συστατικά πηγών, που αποτελούν και κόμβους ελέγχου του υδροσυστήματος, καθώς και οι 12 σταθμοί για λήψη βροχομετρικών στοιχείων (Εικόνα 28).



Εικόνα 28: Οι βροχομετρικοί σταθμοί στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης.

- iii. **Σχεδιασμό υπολεκανών απορροής:** Από τους κόμβους και τους κλάδους του Βοιωτικού Κηφισού σχεδιάζονται στη συνέχεια οι υπολεκάνες της περιοχής μελέτης. Για τη λεκάνη απορροής του Βοιωτικού Κηφισού προκύπτουν 13 υπολεκάνες (Εικόνα 29).

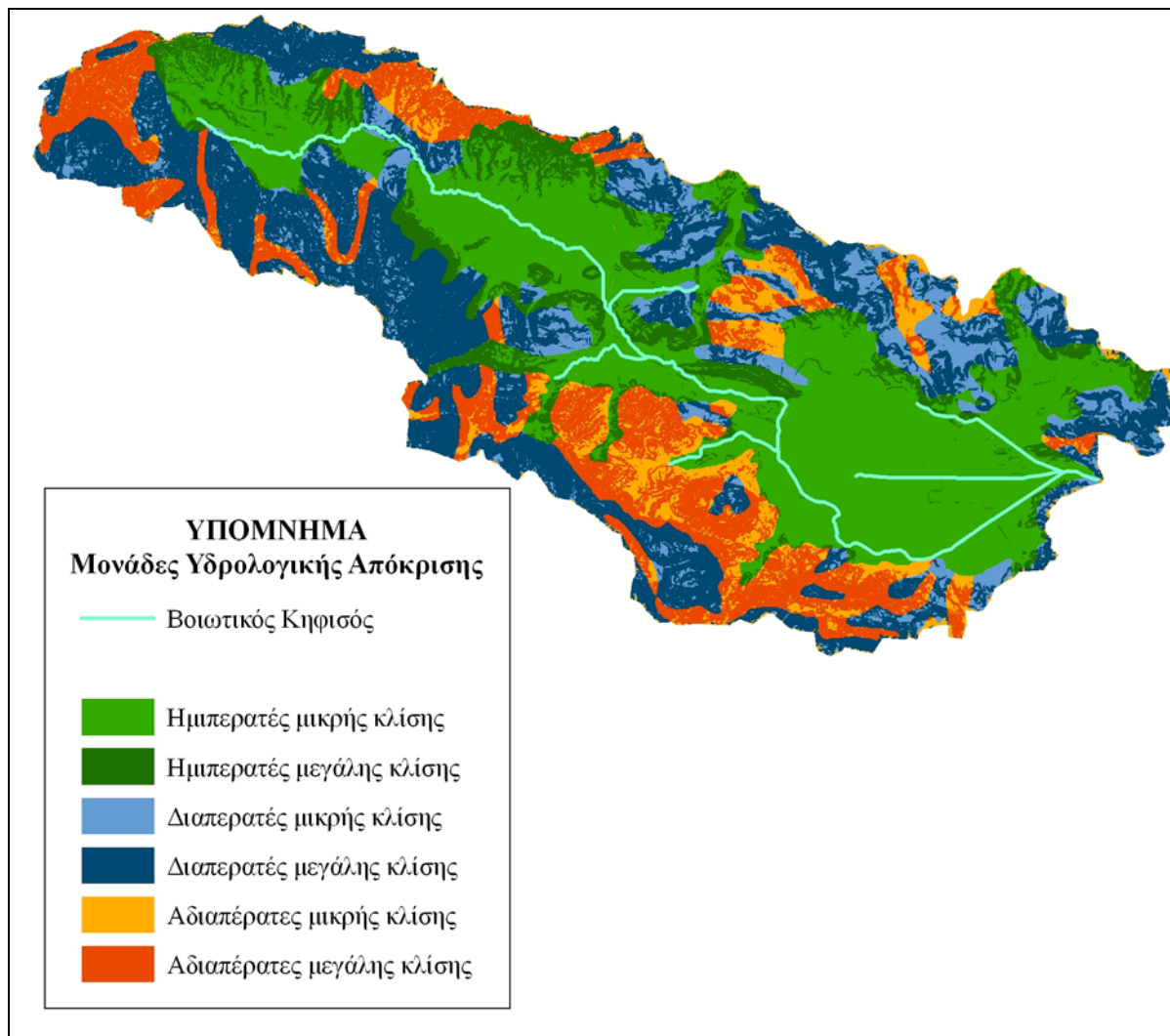


Εικόνα 29: Η λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού χωρίζεται σε 13 υπολεκάνες.

iv. Σχεδιασμό Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης – M.Y.A. (H.R.U. – Hydrological Response Units): Οι M.Y.A. προκύπτουν από συνδυασμό χάρτη γεωλογικών σχηματισμών της λεκάνης, διαφορετικής διαπερατότητας, με χάρτη κλίσεων εδάφους. Συγκεκριμένα, γίνεται διάκριση τριών κατηγοριών όσον αφορά την υδροπερατότητα των γεωλογικών σχηματισμών, δηλαδή σε αδιαπέρατους, διαπερατούς και ημιπερατούς (Εικόνα 5) και δύο κατηγοριών όσον αφορά την κλίση του εδάφους, δηλαδή σε υψηλή και χαμηλή κλίση με όριο διαχωρισμού την κλίση 10%. Τελικά, προκύπτουν από το συνδυασμό αυτών των χαρακτηριστικών, έξι κατηγορίες M.Y.A. (Εικόνα 30) ως εξής:

- Περιοχές αδιαπέρατων σχηματισμών με μικρή εδαφική κλίση (M.Y.A. 1).
- Περιοχές αδιαπέρατων σχηματισμών με μεγάλη εδαφική κλίση (M.Y.A. 2).
- Περιοχές διαπερατών σχηματισμών με μικρή εδαφική κλίση (M.Y.A. 3).
- Περιοχές διαπερατών σχηματισμών με μεγάλη εδαφική κλίση (M.Y.A. 4).
- Περιοχές ημιπερατών σχηματισμών με μικρή εδαφική κλίση (M.Y.A. 5).
- Περιοχές ημιπερατών σχηματισμών με μεγάλη εδαφική κλίση (M.Y.A. 6).

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 30, στις προσχωματικές (ημιπερατές) περιοχές οι μεγαλύτερες κλίσεις εμφανίζονται περιμετρικά, δηλαδή στα όρια των πεδιάδων. Όσον αφορά τις διαπερατές και αδιαπέρατες περιοχές, σε όλο το νότιο τμήμα της λεκάνης, όπου υπάρχουν οι μεγάλοι ορεινοί όγκοι του Παρνασσού και του Ελικώνα, οι περιοχές έχουν μεγάλη κλίση. Το ίδιο συμβαίνει και στην περιοχή του όρους Καλλίδρομο στα βορειοδυτικά της λεκάνης. Οι πιο ομαλές κλίσεις εμφανίζονται στις βορειοανατολικές ορεινές περιοχές της λεκάνης, στα βόρεια της Κωπαΐδας.



Εικόνα 30: Οι έξι κατηγορίες Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης της λεκάνης απορροής. Τα πιο σκούρα χρώματα σε κάθε κατηγορία διαπερατότητας αντιστοιχούν στις περιοχές με τις μεγαλύτερες κλίσεις.

- v. **Σχεδιασμό κοινών περιοχών υπολεκανών και Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης:** Στην περίπτωση αυτή, έγινε συνδυασμός των περιοχών που καταλαμβάνει κάθε υπολεκάνη με τις περιοχές που αντιστοιχούν σε κάθε κατηγορία Μονάδας Υδρολογικής Απόκρισης. Τελικά, προέκυψε χάρτης της λεκάνης απορροής του Βοιωτικού Κηφισού με τις υποπεριοχές κάθε μία από τις οποίες έχει δύο χαρακτηριστικά: την υπολεκάνη στην οποία ανήκει και την Μ.Υ.Α που χαρακτηρίζει τη διαπερατότητα και την κλίση της.
- vi. **Υπολογισμό μέσου υψομέτρου κάθε υπολεκάνης:** Είναι απαραίτητος, καθώς υπεισέρχεται στον υπολογισμό του συντελεστή υψομετρικής αναγωγής κάθε υπολεκάνης που με τη σειρά του απαιτείται για την εκτίμηση της μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης. Οι υπολογισμοί έγιναν επίσης

μέσω του λογισμικού ArcGIS 9.2x βάσει της διαθέσιμης υψομετρικής πληροφορίας (ψηφιακό μοντέλο εδάφους – DEM) και της περιοχής κάθε υπολεκάνης (Πίνακας 4).

Πίνακας 4: Μέσο, μέγιστο και ελάχιστο υψόμετρο υπολεκανών, όπως προέκυψαν από χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών.

| Υπολεκάνη | Zmin (m) | Zmax (m) | Zmeso (m) |
|-----------|----------|----------|-----------|
| 1 | 136.88 | 965.28 | 341.47 |
| 2 | 131.07 | 2122.43 | 349.55 |
| 3 | 118.25 | 351.81 | 175.72 |
| 4 | 161.90 | 2395.56 | 781.59 |
| 5 | 117.07 | 550.57 | 203.74 |
| 6 | 118.07 | 1044.08 | 240.39 |
| 7 | 119.07 | 554.10 | 191.96 |
| 8 | 118.25 | 2212.14 | 580.07 |
| 9 | 117.07 | 1429.83 | 399.21 |
| 10 | 118.07 | 1531.38 | 438.06 |
| 11 | 118.07 | 314.35 | 118.73 |
| 12 | 367.24 | 2176.74 | 1024.68 |
| 13 | 284.45 | 1793.92 | 715.47 |

vii. Ολοκλήρωση σημειακής βροχόπτωσης στην επιφάνεια κάθε υπολεκάνης (Μέθοδος Thiessen):

Η μέθοδος Thiessen ανήκει στις μεθόδους άμεσης ολοκλήρωσης αφού χρησιμοποιούνται οι τιμές των σημειακών μετρήσεων, στην προκειμένη περίπτωση των 12 βροχομετρικών σταθμών. Συγκεκριμένα, γίνεται εκτίμηση της επιφανειακής βροχόπτωσης κάθε υπολεκάνης με γραμμικό συνδυασμό των σημειακών βροχοπτώσεων που καταγράφει κάθε σταθμός ο οποίος βρίσκεται μέσα στην υπολεκάνη ή στην κοντινότερη απόσταση σε αυτήν, σε σχέση με τους υπόλοιπους. Κάθε υπολεκάνη χωρίζεται σε ζώνες επιρροής, κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχεί και σε ένα βροχομετρικό σταθμό. Η ζώνη κάθε σταθμού αποτελείται από σημεία που απέχουν από το σταθμό τη μικρότερη απόσταση σε σχέση με τους υπόλοιπους (Κουτσογιάννης κ.ά., 1999, σ. 129 – 133). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται αφενός γιατί είναι από τις απλούστερες για τον υπολογισμό επιφανειακής βροχόπτωσης, αφετέρου γιατί με τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών η σχηματοποίηση των ζωνών είναι εύκολη και γρήγορη (Εικόνα 31). Επιπλέον, η επιφανειακή ολοκλήρωση κρίνεται απαραίτητη δεδομένων των μεγάλων υψομετρικών διαφορών τόσο των περιοχών των υπολεκανών όσο και των θέσεων των σταθμών. Τα δεδομένα που απαιτούνται είναι οι συντεταγμένες της θέσης κάθε σταθμού (σε ΕΓΣΑ '87) και τα όρια της περιοχής κάθε υπολεκάνης.



Εικόνα 31: Σχεδιασμός των πολυγώνων Thiessen σε κάθε υπολεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού. Κάθε χρώμα αντιστοιχεί στην περιοχή επιρροής ενός σταθμού. Τα χρώματα στο εσωτερικό κάθε υπολεκάνης δείχνουν από ποιους σταθμούς επηρεάζεται.

- viii. **Υπολογισμό επιφανειακής βροχόπτωσης κάθε υπολεκάνης:** Επειδή συνήθως η υψομετρική κατανομή των βροχομετρικών σταθμών δεν είναι αντιπροσωπευτική της λεκάνης απορροής, δηλαδή το μέσο υψόμετρό της (Πίνακας 5) δεν ταυτίζεται με το μέσο υψόμετρο των σταθμών (Πίνακας 5), απαιτείται διόρθωση του επιφανειακού ύψους βροχής. Η διόρθωση γίνεται πολλαπλασιάζοντας το επιφανειακό ύψος βροχής της λεκάνης με ένα συντελεστή υψομετρικής αναγωγής (Πίνακας 6), βάσει των παρακάτω τύπων (Κουτσογιάννης κ.ά., 1999, σ. 131 – 143):

$$\lambda = 1 + \beta(z_s - z_\sigma) / h_s \quad (0.32)$$

όπου:

λ: ο συντελεστής υψομετρικής αναγωγής,

β: η βροχομετρική βαθμίδα που λαμβάνεται ίση με 0,809 (Ευστρατιάδης, 2008),

z_s : το μέσο υψόμετρο της υπολεκάνης, που υπολογίζεται μέσω των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (λογισμικό πακέτο ArcGIS 9.2x), (Πίνακας 3).

z_σ : το μέσο σταθμισμένο υψόμετρο των σταθμών που προκύπτει από τη σχέση

$$z_\sigma = \sum_{i=1}^k w_i z_i \quad (0.33)$$

όπου:

w_i : ο συντελεστής Thiessen κάθε σταθμού που επηρεάζει την αντίστοιχη υπολεκάνη,

z_i : το σημειακό υψόμετρο του βροχομετρικού σταθμού,

k : ο αριθμός των βροχομετρικών σταθμών,

h_s : η επιφανειακή μέση ετήσια βροχόπτωση της υπολεκάνης που προκύπτει από τη σχέση:

$$h_s = \sum_{i=1}^k w_i h_i \quad (0.34)$$

όπου:

h_i : το σημειακό ετήσιο ύψος βροχής για κάθε βροχομετρικό σταθμό i .

Στην περίπτωση της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού υπολογίζεται ένας συντελεστής για κάθε μία από τις 13 υπολεκάνες. Οι καταγεγραμμένες σημειακές μετρήσεις των βροχομετρικών σταθμών αντιστοιχούν στα υδρολογικά έτη από 1969 έως 2000 (Ευστρατιάδης, 2008). Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι είναι σημαντική η υψομετρική διαφορά μεταξύ μέσου υψόμετρου υπολεκάνης και μέσου σταθμισμένου υψόμετρου των σταθμών, γεγονός που δικαιολογεί την ανάγκη εκτίμησης του συντελεστή υψομετρικής αναγωγής (εξαίρεση αποτελεί η υπολεκάνη 13 με διαφορά της τάξης των 20 m).

Πίνακας 5: Υψόμετρο βροχομετρικών σταθμών.

| Σταθμός | Υψόμετρο (m) |
|--------------|--------------|
| Λιβαδειά | 175,6 |
| Δαύλεια | 277,4 |
| Κάτω Τιθορέα | 168,3 |
| Αταλάντη | 78,1 |
| Επτάλοφος | 950,0 |
| Δρυμαία | 502,6 |
| Παύλος | 212,7 |
| Αλάρτος | 105,0 |
| Αγία Τριάδα | 458,0 |
| Συκιά | 707,8 |
| Άνω Μπράλος | 610,0 |
| Πύρα | 1137,1 |

Πίνακας 6: Η τιμή της βροχοβαθμίδα και του συντελεστή υψομετρικής αναγωγής κάθε υπολεκάνης, όπως υπολογίστηκε με τη μέθοδο Thiessen.

| Υπολεκάνες | Βροχοβαθμίδα | Συντελεστής υψομετρικής αναγωγής |
|------------|--------------|----------------------------------|
| 1 | 0,809 | 1,259 |
| 2 | 0,809 | 1,187 |
| 3 | 0,809 | 0,898 |
| 4 | 0,809 | 1,477 |
| 5 | 0,809 | 1,021 |
| 6 | 0,809 | 1,066 |
| 7 | 0,809 | 1,122 |
| 8 | 0,809 | 1,317 |
| 9 | 0,809 | 1,239 |
| 10 | 0,809 | 1,150 |
| 11 | 0,809 | 0,962 |
| 12 | 0,809 | 1,118 |
| 13 | 0,809 | 0,981 |

▪ **Μοντέλο υπόγειας υδρολογίας**

Για τη δημιουργία του μοντέλου υπόγειας υδρολογίας απαιτούνται οι παρακάτω εργασίες μέσω των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών:

i. Σχεδιασμός των κυττάρων υπογείων νερών: Για την προσομοίωση της κίνησης των υπογείων υδάτων σχεδιάζονται κύτταρα – δεξαμενές μέσα στα οποία συγκεντρώνονται τα υπόγεια ύδατα μετά από κατείσδυση των κατακρημνίσεων ή των επιφανειακά κινούμενων υδάτων και στη συνέχεια αποθηκεύονται, εμφανίζονται ξανά στην επιφάνεια μέσω πηγών ή κινούνται μεταξύ των κυττάρων βάσει αρχικών και οριακών συνθηκών και των παραμέτρων που ορίζονται (διαπερατότητα, πορώδες κλπ.). Στη λεκάνη απορροής του Βοιωτικού Κηφισού έχουν σχεδιαστεί 40 κύτταρα από τα οποία τα 4 αντιπροσωπεύουν τις διαφυγές της λεκάνης προς τη θάλασσα ή άλλες πεδινές περιοχές. Για το σχεδιασμό τους λαμβάνονται υπ’ όψη τόσο οι διαπερατότητες των γεωλογικών σχηματισμών όσο και το ανάγλυφο του εδάφους, σε συνδυασμό με τις ιδιαίτερες γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στις διάφορες περιοχές της λεκάνης. Ο σχεδιασμός γίνεται με τη βοήθεια των λογισμικών πακέτων AutoCAD 2000 και ArcGIS 9.2x.. Όσον αφορά την τελική χάραξη των κυττάρων επισημαίνονται τα εξής (Εικόνα 32):

- Η σχεδίαση σε σχέση με τη διαπερατότητα γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε εντός των ορίων των κυττάρων να διατηρείται μια ομοιογένεια ως προς τους γεωλογικούς σχηματισμούς. Πολύ μικρές επιφάνειες ενός σχηματισμού εντός μια ευρύτερης επιφάνειας ενός άλλου, δε θεωρείται ότι επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά που προσδίδει στη ροή ο μεγαλύτερης επιφάνειας

σηματισμός. Άλλωστε, γίνεται προσπάθεια η διαμέριση του υδροφορέα να ακολουθεί τη φυσική πραγματικότητα χωρίς να είναι υπερβολικά λεπτομερής.

- Ο τελικός διαχωρισμός περιλαμβάνει 9 αδιαπέρατα κύτταρα, 9 ημιπερατά και 18 διαπερατά. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί των διαπερατών κυττάρων είναι κατά κύριο λόγο καρστικοποιημένοι (Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., 1998). Το ποσοστό της κάθε κατηγορίας σχηματισμών στο σύνολο της επιφάνειας της λεκάνης παρατίθεται ακολούθως:
- Επίσης, σε αρκετές περιπτώσεις τα όρια των κυττάρων ταυτίζονται με ρηξιγενείς ζώνες (Εικόνα 4). Η παρουσία ενός ρήγματος μπορεί να σημαίνει την εκδήλωση μιας πηγής ή ακόμη και τη διακοπή της ροής, οπότε πιθανότατα να χρειάζεται να οριστεί στις συνθήκες του μοντέλου ένα αδιαπέρατο όριο. Στην προκειμένη περίπτωση τέτοια όρια υπάρχουν στη βορειοδυτική πλευρά της λεκάνης στις παρυφές του Παρνασσού (μεταξύ των κυττάρων 1 – 4, 4 – 5 και 8 – 9), στη νότια πλευρά της στους πρόποδες του Ελικώνα (μεταξύ των κυττάρων 19 – 20), καθώς και στις κεντρικές προσχωματικές περιοχές, όπως στα πλευρικά όρια της στενής πεδινής περιοχής μεταξύ Δαύλειας και Ορχομενού (μεταξύ των κυττάρων 22 – 23, 24 – 23 και 28 – 23) και κοντά στην περιοχή εκβολής του ποταμού στην Υλίκη (κύτταρα 35 – 36). Η πιθανότητα ύπαρξης αδιαπέρατου ορίου μεταξύ των κυττάρων αυτών λαμβάνεται υπόψη στις δοκιμές του μοντέλου.
- Όσον αφορά τα κύτταρα στην επιφάνεια των οποίων εκδηλώνονται πηγές, ο σχεδιασμός γίνεται έτσι ώστε η θέση της πηγής να βρίσκεται στα όρια του κυττάρου, προς την κατεύθυνση που συγκεντρώνεται η ροή. Αυτό σημαίνει ότι η υπόγεια δεξαμενή εκφορτίζεται και μέσω της πηγής. Σε αρκετές περιπτώσεις τίθεται αδιαπέρατο όριο μεταξύ της πλευράς που εκδηλώνεται η πηγή και του γειτονικού κυττάρου. Κάτι τέτοιο συμφωνεί και με τις πιθανές φυσικές συνθήκες, δεδομένου ότι οι πηγές υπερχειλίσσης παρουσιάζουν παρόμοιο μηχανισμό λειτουργίας. Επισημαίνεται ότι οι πέντε από τις πηγές της λεκάνης εκδηλώνονται εκεί που καρστικοί σχηματισμοί συναντάνε τις προσχωματικές περιοχές.
- Γύρω από τη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού σχεδιάζονται και 4 κύτταρα που αντιπροσωπεύουν τις διαφυγές της λεκάνης. Τα κύτταρα 37 και 38 στα βόρεια, συνδέονται με υπόγειες διαφυγές της λεκάνης προς τον Ευβοϊκό Κόλπο, ενώ τα κύτταρα 39 και 40 στα νοτιοανατολικά, αντιπροσωπεύουν υπόγειες διαφυγές προς την Υλίκη και τη λεκάνη των Βαγίων (πριν το Θηβαϊκό πεδίο) αντίστοιχα (ενότητα 2.3.4). Τα κύτταρα αυτά θεωρείται ότι έχουν πολύ μεγάλη βάση, ώστε η στάθμη να μπορεί να θεωρηθεί σταθερή. Δεν έχουν φυσική σημασία.
- Κατά τη σχεδίαση των κυττάρων, εκτός από τα όρια των γεωλογικών σχηματισμών, λαμβάνεται υπόψη και το ανάγλυφο του εδάφους, δηλαδή οι εδαφικές κλίσεις, οι αλλαγές του υψομέτρου, τα όρια των ορεινών και τα όρια των πεδινών περιοχών (Εικόνα 33). Αν και αυτή η μορφολογία

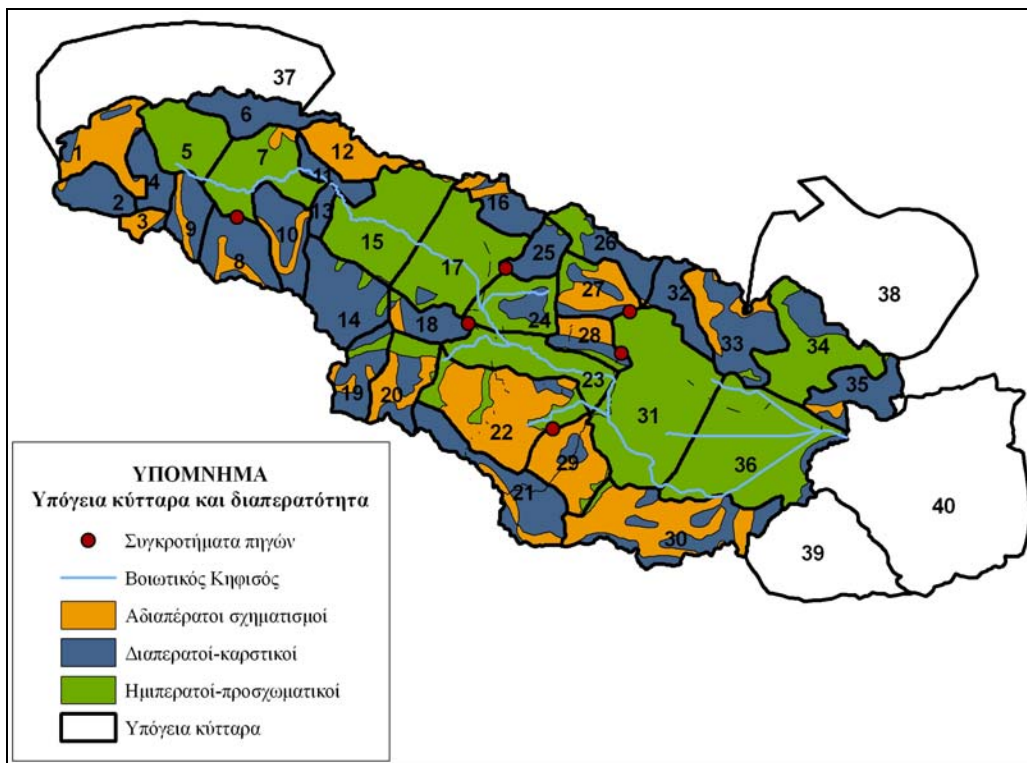
αφορά την επιφάνεια του εδάφους, ωστόσο δεν πρέπει να παραβλεφθεί, καθώς επηρεάζει τις ταχύτητες ροής, την κατεύθυνση της ροής και συνεπώς το διαθέσιμο χρόνο για κατείσδυση των υδάτων που τροφοδοτούν τις υπόγειες δεξαμενές. Γενικά, είναι επιθυμητή η ομοιογένεια στο εσωτερικό του κυττάρου ως προς τις κλίσεις, ώστε να επικρατούν οι ίδιες συνθήκες κατείσδυσης. Επίσης, σε ορισμένες περιπτώσεις επιλέγεται το όριο του κυττάρου να συμπίπτει με τον άξονα της αντικλινικής δομής του αναγλύφου, αφού εκατέρωθεν του άξονα αυτού η επιφανειακή ροή ακολουθεί αντίθετη κατεύθυνση και η κατείσδυση πιθανόν τροφοδοτεί διαφορετικές δεξαμενές. Τα κύτταρα σχεδιάζονται έτσι ώστε εντός των ορίων τους να περικλείονται μόνο ορεινές ή μόνο πεδινές περιοχές, χωρίς να είναι υπερβολικά λεπτομερής η διαμέριση της λεκάνης και χωρίς να αποφεύγονται, σε ορισμένες περιπτώσεις, οι μεγάλες υψομετρικές διαφορές στο εσωτερικό ορισμένων κυττάρων.

- Τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό, δηλαδή η διαπερατότητα και το ανάγλυφο του εδάφους, είναι συχνά αντικρουόμενα. Έτσι, όταν το πρώτο κριτήριο υπερισχύει του δεύτερου, το αποτέλεσμα είναι τα όρια του κυττάρου να μη συμπίπτουν με τα όρια της υδρολογικής λεκάνης της περιοχής, ενώ όταν πρέπει να υπερισχύσει το δεύτερο κριτήριο (π.χ. λόγω μεγάλων υψομετρικών διαφορών) δημιουργούνται κύτταρα που δεν έχουν παντού τα ίδια υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά.

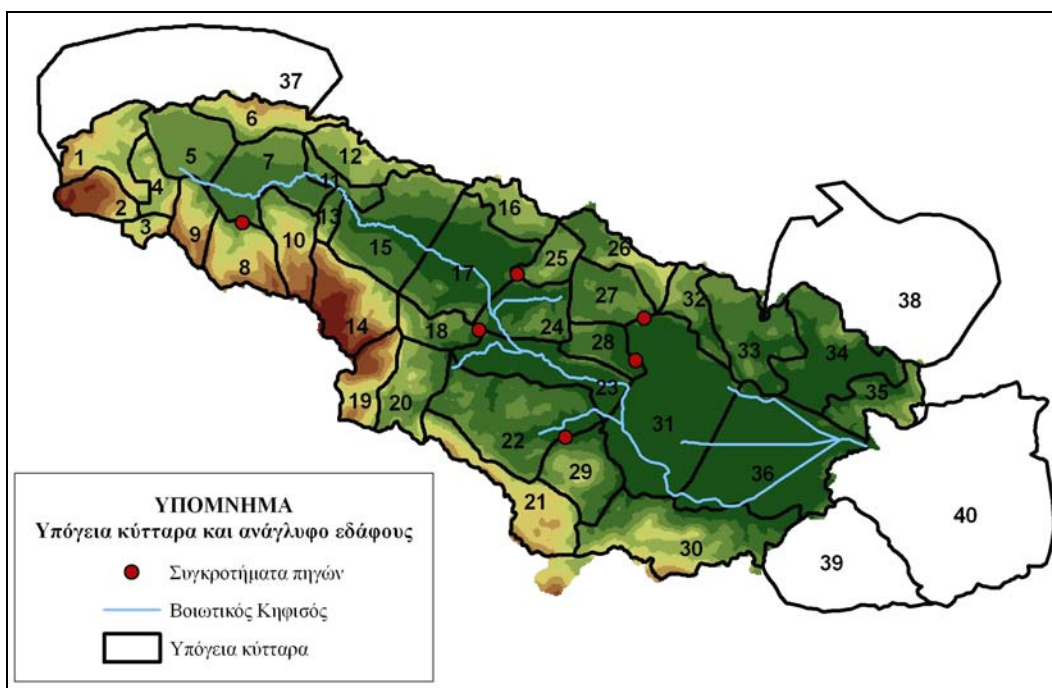
ii. Σχεδιασμός των κέντρων βάρους των κυττάρων και υπολογισμός των μεταξύ τους αποστάσεων: Η σχεδίαση των σημείων και ο υπολογισμός των αποστάσεων γίνεται μέσω των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (λογισμικό πακέτο ArcGIS 9.2x). Τα στοιχεία χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για την προσομοίωση του υδροσυστήματος.

iii. Υπολογισμός του μήκους κάθε πλευράς των κυττάρων: Παράλληλα καθορίζεται και η σχέση κάθε πλευράς με τα γειτονικά κύτταρα (δηλαδή ποια κύτταρα βρίσκονται εκατέρωθέν της). Όπως και η προηγούμενη εργασία, έτσι και αυτή είναι απαραίτητο στάδιο για την μετέπειτα προσομοίωση.

iv. Σχεδιασμός κοινών περιοχών των κυττάρων, Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης (Μ.Υ.Α.) και υπολεκανών: Προκύπτουν υποπεριοχές της λεκάνης απορροής που συνδυάζουν τρία χαρακτηριστικά, την υπολεκάνη, τη Μ.Υ.Α. και το κύτταρο υπογείων υδάτων στα οποία ανήκουν. Ο διαχωρισμός αυτός σε περιοχές είναι απαραίτητος για την προσομοίωση του υδροσυστήματος με το υπολογιστικό σύστημα ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.



Εικόνα 32: Για το σχεδιασμό των υπογείων κούτταρων ελήφθη υπόψη η υδροπερατότητα των γεωλογικών σχηματισμών.



Εικόνα 33: Ο σχεδιασμός των υπογείων κούτταρων έγινε και βάσει του αναγλύφου του εδάφους.

- **Μοντέλο λειτουργίας υδροσυστήματος**

Γενικά, αυτό που ενδιαφέρει στο στάδιο αυτό είναι η σχηματοποίηση του αρδευτικού συστήματος με τη μορφή αγωγών, ο σχεδιασμός των κόμβων των αρδευτικών αγωγών, καθώς και των συγκροτημάτων γεωτρήσεων από τα οποία γίνονται απολήψεις νερού. Επιπλέον, καθορίζεται η σχέση μεταξύ γεωτρήσεων και κυττάρων υπογείων νερών, ώστε να προκύπτει από ποιες υπόγειες δεξαμενές γίνεται άντληση υδάτων.

Στην παρούσα εφαρμογή, από τα σχετικά με το υδροσύστημα στοιχεία, εισάγονται στο μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ μόνο τα συγκροτήματα των γεωτρήσεων. Τα στοιχεία αυτά προέρχονται από τον Ευστρατιάδη (2008).

5.2.2. Σχηματοποίηση επιφανειακού συστήματος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην ενότητα 5.2.1, τα δεδομένα των γεωγραφικών πληροφοριών που προέκυψαν από τη χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών, εισάγονται στο μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, αφού μεταφερθούν πρώτα σε βάση δεδομένων του λογισμικού πακέτου Access. Για τη σχηματοποίηση του επιφανειακού συστήματος εισάγονται τα ακόλουθα δεδομένα:

- **Πηγές**

Η λεκάνη απορροής του Βοιωτικού Κηφισού περιλαμβάνει τα έξι συγκροτήματα των πηγών: Λιλαίας – Κεφαλόβρυσου, Μαυρονερίου, Μέλανα, Αγίας Παρασκευής, Πολυγύρας και Έρκυνας.

- **Κλάδοι υδρογραφικού δικτύου**

Ο Βοιωτικός Κηφισός περιλαμβάνει 12 βασικούς κλάδους, κάθε ένας από τους οποίους διατρέχει μια υπολεκάνη. Κάθε ένας από τους κλάδους αυτού χωρίζεται σε μικρότερα τμήματα, συνολικά 29, που τροφοδοτούν διαφορετικά κύτταρα.

- **Κόμβοι**

Στα σημεία συμβολής βασικών κλάδων του υδρογραφικού δικτύου, στα σημεία τομής με τα όρια υπολεκανών, τοποθετείται και ένας κόμβος. Συνολικά, στο υδρογραφικό δίκτυο του Βοιωτικού Κηφισού τοποθετούνται 12 κόμβοι (Πίνακας 7).

- **Υπολεκάνες**

Η λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού χωρίζεται συνολικά σε 13 υπολεκάνες. Μόνο η υπολεκάνη 12 (Εικόνα 29) δεν περιλαμβάνει κάποιο κλάδο του υδρογραφικού δικτύου, διότι εκεί η απορροή γίνεται

μέσω διάσπαρτων χειμάρρων, χωρίς να σχηματίζεται ξεκάθαρος κλάδος του ποταμού. Τα στοιχεία των υπολεκανών που εισάγονται φαίνονται στον Πίνακα 7:

Πίνακας 7: Στοιχεία των υπολεκανών της περιοχής μελέτης.

| Υπολεκάνη | Κόμβος εξόδου | Κλάδος υδρογραφικού δικτύου | Περίμετρος (km) | Επιφάνεια (km ²) |
|-----------|---------------|-----------------------------|-----------------|------------------------------|
| 1 | 4 | 1 | 58.7 | 149.1 |
| 2 | 4 | 11 | 69.9 | 163.0 |
| 3 | 5 | 3 | 13.7 | 7.3 |
| 4 | 3 | 4 | 69.3 | 201.5 |
| 5 | 6 | 2 | 48.1 | 71.0 |
| 6 | 7 | 8 | 105.4 | 317.3 |
| 7 | 8 | 6 | 13.3 | 8.8 |
| 8 | 5 | 9 | 66.9 | 175.2 |
| 9 | 6 | 7 | 47.4 | 93.9 |
| 10 | 7 | 10 | 106.5 | 237.0 |
| 11 | 7 | 12 | 61.7 | 168.1 |
| 12 | 1 | 0 | 44.2 | 101.9 |
| 13 | 2 | 5 | 84.0 | 235.7 |

▪ Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης

Όπως έχει προαναφερθεί, η λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού χωρίζεται σε υποπεριοχές που ανήκουν σε έξι κατηγορίες με κριτήρια την διαπερατότητα των γεωλογικών σχηματισμών (υψηλή, μέση, χαμηλή) και την κλίση του εδάφους (μεγάλη, μικρή). Οι περιοχές της ίδιας κατηγορίας είναι διάσπαρτες μέσα στη λεκάνη και δεν συνορεύουν υποχρεωτικά.

▪ Ένωση υπολεκανών και Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης

Κάθε υποπεριοχή της λεκάνης που ανήκει σε μια από τις έξι κατηγορίες των Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης αποκτά και ένα επιπλέον χαρακτηριστικό που αφορά την υπολεκάνη στην οποία ανήκει. Τελικά, δημιουργούνται 78 δεξαμενές εδαφικής υγρασίας (13 υπολεκάνες και 6 Μ.Υ.Α.), σύμφωνα με την περιγραφή του ημικατανεμημένου, εννοιολογικού μοντέλου του επιφανειακού συστήματος.

5.2.3. Σχηματοποίηση υπόγειου συστήματος

▪ Κύτταρα Υπόγειου Υδροφορέα

Ο υπόγειος υδροφορέας χωρίζεται σε 40 κύτταρα. Τα 36 βρίσκονται εντός της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού και τα 4 αντιπροσωπεύουν δεξαμενές μέσω των οποίων τα υπόγεια νερά

εκφορτίζονται στη θάλασσα, στην Υλίκη και σε πεδινές περιοχές εκτός λεκάνης. Τα κριτήρια σχεδιασμού έχουν ήδη αναφερθεί στην ενότητα 5.2.1. Στον ακόλουθο πίνακα (8) περιέχονται τα κύτταρα του υδροφορέα και η επιφάνειά τους:

Πίνακας 8: Διαστάσεις των υπογείων κυττάρων του υδροφορέα της λεκάνης.

| Υπόγειο κύτταρο | Περίμετρος (km) | Επιφάνεια (km ²) | Υπόγειο κύτταρο | Περίμετρος (km) | Επιφάνεια (km ²) |
|-----------------|-----------------|------------------------------|-----------------|-----------------|------------------------------|
| 1 | 40.0 | 49.0 | 21 | 51.9 | 63.7 |
| 2 | 22.3 | 29.0 | 22 | 49.5 | 111.4 |
| 3 | 14.2 | 10.2 | 23 | 45.6 | 62.4 |
| 4 | 25.6 | 23.2 | 24 | 28.5 | 46.2 |
| 5 | 30.1 | 50.7 | 25 | 22.0 | 23.9 |
| 6 | 38.4 | 37.2 | 26 | 36.9 | 37.7 |
| 7 | 42.0 | 67.0 | 27 | 27.3 | 43.2 |
| 8 | 29.6 | 45.5 | 28 | 24.2 | 27.1 |
| 9 | 22.9 | 27.4 | 29 | 30.3 | 50.2 |
| 10 | 30.3 | 41.2 | 30 | 64.6 | 112.1 |
| 11 | 25.0 | 16.6 | 31 | 55.4 | 158.2 |
| 12 | 33.4 | 35.6 | 32 | 31.6 | 29.1 |
| 13 | 14.1 | 9.8 | 33 | 45.2 | 67.9 |
| 14 | 33.7 | 61.9 | 34 | 52.9 | 81.4 |
| 15 | 44.1 | 92.4 | 35 | 38.4 | 39.7 |
| 16 | 28.4 | 30.6 | 36 | 58.7 | 149.2 |
| 17 | 45.4 | 92.5 | 37 | 83.0 | 216.9 |
| 18 | 24.6 | 27.0 | 38 | 78.9 | 250.1 |
| 19 | 28.7 | 35.7 | 39 | 48.0 | 117.6 |
| 20 | 32.1 | 45.0 | 40 | 84.3 | 326.7 |

▪ **Αποστάσεις κέντρων βάρους υπογείων κυττάρων**

Στο μοντέλο Υδρογείος εισάγονται, επίσης, τα δεδομένα των αποστάσεων που έχει το κέντρο βάρους κάθε κυττάρου από τα υπόλοιπα. Η απόσταση αυτή αντιπροσωπεύει το μήκος του αγωγού μέσω του οποίου μετακινούνται τα ύδατα από τη μία υπόγεια δεξαμενή στην άλλη.

▪ **Ακμές υπογείων κυττάρων**

Εισάγονται στο μοντέλο τα μήκη των ακμών κάθε κυττάρου. Από τα δεδομένα αυτά φαίνεται, επιπλέον, ποια κύτταρα έχουν κοινά όρια. Στο σχετικό αρχείο της βάσης δεδομένων του μοντέλου ορίζονται τα πιθανά αδιαπέρατα όρια μεταξύ δύο γειτονικών κυττάρων.

- **Ένωση υπογείων κυττάρων, υπολεκανών και Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης**

Η λεκάνη του ποταμού χωρίζεται σε υποπεριοχές κάθε μια από τις οποίες ανήκει σε μία από τις 13 υπολεκάνες, σε μία από τις 6 κατηγορίες Μ.Υ.Α και τροφοδοτεί μία από τις 40 δεξαμενές του υπόγειου υδροφορέα. Τα δεδομένα αυτά εισάγονται στο μοντέλο του υπόγειου συστήματος.

- **Ένωση υπογείων κυττάρων και κλάδων υδρογραφικού δικτύου**

Οι υπόγειες δεξαμενές, εκτός από την κατείσδυση των κατακρημνισμάτων, τροφοδοτούνται και από την κατείσδυση των επιφανειακών υδάτων του υδρογραφικού δικτύου. Η κατείσδυση αυτή είναι πολύ διαφορετική από περιοχή σε περιοχή της λεκάνης, π.χ. πολύ μεγάλη στην περιοχή μεταξύ Δαύλειας και Ορχομενού, ώστε η ροή να μειώνεται πολύ, περίπου 25 – 30% (Ευστρατιάδης κ.ά., 2004). Είναι αναγκαία, λοιπόν, η εισαγωγή δεδομένων σχετικών με το ποια από τα 36 κύτταρα τροφοδοτούν τα 29 τμήματα του υδρογραφικού δικτύου.

5.2.4. Υδροσύστημα

- **Γεωτρήσεις**

Στο μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ περιλαμβάνονται 52 γεωτρήσεις απόληψης νερού. Οι περισσότερες από αυτές έχουν διανοιχθεί στην περιοχή Τιθορέας – Ανθοχωρίου, καθώς και λίγο κατάντη της περιοχής της Γραβιάς. Εισάγονται τα σχετικά δεδομένα, με τις συντεταγμένες κάθε γεώτρησης και το όνομά της.

- **Κόμβοι υδροσυστήματος**

Οι θέσεις – κόμβοι του υδροσυστήματος φαίνονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα (9) :

Πίνακας 9: Οι κόμβοι του υδροσυστήματος για το αντίστοιχο μοντέλο του ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.

| α/α | Κόμβος | Περιγραφή |
|-----|------------------------|---|
| 1 | Γραβιά | Έξοδος ανάντη υπολεκάνης |
| 2 | Αμφίκλεια | Ανάντη χαράδρας Αμφίκλειας (περιοχή διαφυγών) |
| 3 | Τιθορέα | Κατάντη χαράδρας Αμφίκλειας |
| 4 | Ανθοχώρι | Συμβολή με χείμαρρο Μπογδανόρεμα |
| 5 | Άγιος Βλάσιος | Συμβολή με χείμαρρο Πλατανιάς |
| 6 | Συμβολή Έρκυνα ποταμού | Συμβολή με ποταμό Έρκυνα |
| 7 | Συμβολή Μέλανα ποταμού | Σημείο εκτροπής Μέλανα στη Διώρυγα Καρδίτσας |
| 8 | Σήραγγα Καρδίτσας | Έξοδος υδροσυστήματος |
| 9 | Βασιλικά – Παρόρι | Κόμβος συγκέντρωσης απολήψεων από γεωτρήσεις ΕΥΔΑΠ |
| 10 | Άρδευση άνω ρου | Άρδευόμενες περιοχές Γραβιάς, Λιλαίας, Αμφίκλειας |
| 11 | Άρδευση μέσου ρου | Άρδευόμενες περιοχές Ελάτειας, Τιθορέας, Ανθοχωρίου |
| 12 | Άρδευση κάτω ρου | Άρδευόμενες περιοχές Αγίου Βλασίου έως Ρωμαϊκού |

| | | |
|----|------------------------------|---|
| 13 | Άρδευση Λιβαδειάς | ΤΟΕΒ Λιβαδειάς, Έρκυνα |
| 14 | Άρδευση Κάστρου | Κάστρο – Κόκκινο |
| 15 | Άρδευση Ορχομενού – Κωπαΐδας | Άρδευόμενες περιοχές ΤΟΕΒ Ορχομενού και Οργανισμού Κωπαΐδας |
| 16 | Ακόντιο | Κόμβος συγκέντρωσης απολήψεων από γεωτρήσεις ΥΠ.ΓΕ. |

5.3. Βαθμονόμηση και επαλήθευση

5.3.1. Δεδομένα εισόδου

Τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ είναι αφενός τα επεξεργασμένα με Γ.Σ.Π. γεωγραφικά στοιχεία (υπολεκάνες, κύτταρα κλπ.) που από μία βάση δεδομένων (vklifisos.mdb) μεταφέρονται στους πίνακες του μοντέλου και αφετέρου οι διάφορες χρονοσειρές που αφορούν τα υδρολογικά έτη από 1984 έως 1994.

Όσον αφορά τα γεωγραφικά δεδομένα συνοπτικά φαίνονται στον Πίνακα 10.

Σχετικά με τις χρονοσειρές, εισάγονται τα εξής μετρημένα στοιχεία:

- Οι χρονοσειρές μέσης μηνιαίας βροχόπτωσης από μετρήσεις των 13 σταθμών της περιοχής μελέτης. Οι αρχικές σημειακές μετρημένες τιμές έχουν ήδη διορθωθεί με το συντελεστή υψομετρικής αναγωγής, όπως περιγράφηκε στην ενότητα 5.2.1.
- Οι 13 χρονοσειρές μηνιαίας δυνητικής εξατμοδιαπνοής (σε ισοδύναμο ύψος νερού). Μαζί με τις χρονοσειρές βροχόπτωσης αποτελούν τις φορτίσεις των υπολεκανών.
- Οι μηνιαίες χρονοσειρές εκφόρτισης στην έξοδο της Σήραγγας Καρδίτσας, καθώς και στις 6 μεγάλες πηγές της λεκάνης (Λιλαία – Κεφαλόβρυσο, Μαυρονέρι, Αγία Παρασκευή, Μέλανας, Πολυγύρα, Έρκυνα). Χρησιμοποιούνται στο στάδιο της βαθμονόμησης (1984 – 1990) και επαλήθευσης (1991 – 1994) του μοντέλου.
- Οι μηνιαίες χρονοσειρές που δίνουν ζήτηση νερού για άρδευση στον άνω, μέσο και κάτω ρου του Βοιωτικού Κηφισού. Οι μηνιαίες αυτές τιμές ζήτησης, όπως και των επόμενων χρονοσειρών, θεωρούνται σταθερές για κάθε περίοδο ελέγχου (Ευστρατιάδης, 2008, σ. 298).
- Οι μηνιαίες χρονοσειρές που δίνουν τις απαιτήσεις νερού για άρδευση της λεκάνης της Κωπαΐδας (εκτάσεις Κωπαΐδας, Λειβαδιάς και Κάστρου).
- Η μηνιαία χρονοσειρά που αφορά τις απαιτούμενες ποσότητες νερού που μεταφέρονται από τις γεωτρήσεις της περιοχής του Διστόμου (Βασιλικών – Παρορίου) στο Μόρνο.
- Οι χρονοσειρές απαιτήσεων νερού για άρδευση της Κωπαΐδας που αντλούνται από τις γεωτρήσεις στο όρος Ακόντιο.
- Η χρονοσειρά που δίνει τη μέγιστη απόληψη από την πηγή Έρκυνα για υδροδότηση της Λιβαδειάς.

Εκτός από τα γεωγραφικά δεδομένα και τις χρονοσειρές, στο μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ εισάγονται και αρχεία σχετικά με τις παραμέτρους του. Τα αρχεία αυτά αφορούν την χειροκίνητη βαθμονόμηση, καθώς είναι τα μόνα στα οποία ο χρήστης μπορεί να επεμβαίνει και να αλλάζει τα όρια και τις τιμές των παραμέτρων, να ομαδοποιεί τις τιμές τους κλπ. Τέλος, στη βάση του μοντέλου συμπεριλαμβάνεται και πίνακας σχετικός με τα κριτήρια προσαρμογής του μοντέλου (συντελεστές βάρους κλπ.), στον οποίο επιτρέπεται, επίσης, η επέμβαση από το χρήστη του μοντέλου.

Πίνακας 10: Τα αρχεία δεδομένων που εισάγονται στο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ από τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών

| Δεδομένα εισόδου στο μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ (vkifisos.mdb) | | |
|--|--------------------------|--|
| Πίνακες μοντέλου Υδρόγειος | Πίνακες από GIS | Περιγραφή |
| Επιφανειακό μοντέλο | | |
| Borehole | Borehole_I | Γεωτρήσεις |
| Segment_Node | RWB_Node | Κόμβοι υδρογραφικού δικτύου |
| Network_Segment | RWB | Κλάδοι υδρογραφικού δικτύου |
| Subbasin | Subbasin | Υπολεκάνες |
| HRU_AGGR | HRU | Μονάδες υδρολογικής απόκρισης |
| HRU_Subbasin_AGGR | HRU_Subbasin | Union Subbasin – HRU |
| Υπόγειο μοντέλο | | |
| Spring | Spring_I | Πηγές |
| GWB_Cell | GWB_Cell | Υπόγεια κελιά |
| GWB_Cell_Center_Distance | GWB_Cell_Center_Distance | Αποστάσεις μεταξύ των κέντρων των κελιών |
| GWB_Cell_Edge | GWB_Cell_Edge | Πλευρές υπογείων κελιών |
| Subbasin_HRU_GWB_Cell_AGGR | Subbasin_HRU_GWB_Cell | Union Subbasin – HRU – υπόγεια κελιά |
| Network_GWB_Cell_AGGR | RWB_GWB_Cell | Union υπόγεια κελιά – κλάδοι υδρογραφικού δικτύου |
| Μοντέλο υδροσυστήματος | | |
| Borehole_Group | | Συγκροτήματα γεωτρήσεων |
| Junction_Point | | Κόμβοι υδροσυστήματος |
| Irrigation_Nodes | | Κατανάλωση νερού για άρδευση |
| Aqueduct_Segment | | Επιφανειακές απολήψεις νερού για άρδευση (κλάδοι αρδευτικού δικτύου) |
| Λοιπά στοιχεία (παραμέτροι κλπ.) | | |
| Scenarios | | Γενικά στοιχεία για το μοντέλο |
| Scenarios_Objectives | | Συντελεστές βάρους (μεροληψία, αποτελεσματικότητα κλπ.) |
| Scenarios_Parameters | | Παράμετροι μοντέλου |
| Targets | | Στόχοι υδροσυστήματος |
| Timeseries | | Χρονοσειρές |

5.3.2. Παράμετροι μοντέλου

Στις παραμέτρους του μοντέλου δίνεται μια αρχική τιμή πριν γίνει ο προσδιορισμός τους με τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Οι παράμετροι αυτοί είναι:

- Για το επιφανειακό μοντέλο:
 - 12 συντελεστές διήθησης δ , για τους 12 κλάδους του υδρογραφικού δικτύου.
 - 36 παράμετροι που αφορούν τις Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης. Συγκεκριμένα, εκτιμώνται 6 παράμετροι ($R, S_{max}, \mu, \lambda, \kappa, c$) για κάθε μία από τις 6 Μ.Υ.Α.
- Για το υπόγειο μοντέλο οι παράμετροι αφορούν την υδραυλική αγωγιμότητα K και το πορώδες n . Στα πλαίσια μείωσης του αριθμού των παραμέτρων που υπολογίζει το μοντέλο, χρησιμοποιείται η δυνατότητα που δίνει για ομαδοποίησή τους. Η ομαδοποίηση γίνεται στα κύτταρα του υπόγειου υδροφορέα βάσει της διαπερατότητάς τους, ενός χαρακτηριστικού που επηρεάζει την ταχύτητα ροής του νερού μεταξύ των γειτονικών κυττάρων. Τελικά, ο υδροφορέας χωρίζεται σε τρεις ομάδες, των διαπερατών, ημιπερατών και αδιαπερατών κυττάρων (Εικόνα 5, 32). Σε κάθε ομάδα δίνεται μία τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας και μία τιμή του πορώδους. Εκτός της ομαδοποίησης παραμένουν τα 4 κύτταρα που αντιστοιχούν στις διαφυγές εκτός της λεκάνης. Επίσης, στο μοντέλο του υπόγειου συστήματος υπεισέρχονται και οι παράμετροι της υδραυλικής αγωγιμότητας για κάθε μία από τις πηγές. Η παράμετρος του πορώδους έχει έννοια μόνο για τα 36 κύτταρα του υδροφορέα της λεκάνης και όχι για τις πηγές και τα κύτταρα των διαφυγών. Τελικά, οι παράμετροι του υπόγειου μοντέλου είναι οι κάτωθι:
 - 3 παράμετροι για την υδραυλική αγωγιμότητα κάθε μιας από τις τρεις ομάδες κυττάρων (διαπερατών, αδιαπερατών, ημιπερατών).
 - 4 παράμετροι για την υδραυλική αγωγιμότητα των τεσσάρων κυττάρων που αναπαριστούν διαφυγές της λεκάνης.
 - 6 παράμετροι για την υδραυλική αγωγιμότητα των έξι μεγάλων πηγών της λεκάνης.
 - 3 παράμετροι για το πορώδες κάθε ομάδας κυττάρων.

Σύμφωνα με τα προαναφερόμενα, ο αριθμός των παραμέτρων του επιφανειακού μοντέλου είναι 48 και του υπόγειου μοντέλου μόνο 16. Συνολικά, επομένως, το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ προσδιορίζει τις τιμές 64 παραμέτρων, αριθμός σημαντικά μικρότερος του αριθμού των παραμέτρων (106) της πιο πρόσφατης προσέγγισης που έγινε για τον Βοιωτικό Κηφισό (Ευστρατιάδης, 2008). Η διαφορά επικεντρώνεται στο υπόγειο μοντέλο, όπου οι παράμετροί του μειώθηκαν κατά 50.

5.3.3. Αρχικές συνθήκες

Ορισμένα μεγέθη του επιφανειακού και υπόγειου συστήματος που δεν υπόκεινται στη διαδικασία βελτιστοποίησης και στα οποία δίνονται απευθείας αρχικές τιμές. Αυτά είναι:

- 78 μεταβλητές που δείχνουν την αρχική στάθμη εδαφικής υγρασίας σε κάθε εδαφική δεξαμενή. Ο αριθμός των παραμέτρων προκύπτει από το συνδυασμό των 13 υπολεκανών με τις έξι κατηγορίες υπολεκανών.
- 40 μεταβλητές που ορίζουν την αρχική στάθμη των υδάτων σε κάθε υπόγεια δεξαμενή.

Ο συνολικός αριθμός αυτών των μεταβλητών (118) υπερβαίνει σημαντικά τον αντίστοιχο αριθμό της προηγούμενης προσέγγισης, όπου εκτιμήθηκαν μόλις 60 αρχικές στάθμες. Η αρχική στάθμη των εδαφικών δεξαμενών είναι μηδενική (ξηρές συνθήκες το μήνα Οκτώβριο που ξεκινάει το υδρολογικό έτος), ενώ για την αρχική στάθμη των υπόγειων δεξαμενών λαμβάνεται υπόψη πιεζομετρικός χάρτης μελέτης του Υπουργείου Γεωργίας (1971). Απαιτείται, επίσης, να δοθεί το υψόμετρο του πυθμένα και της οροφής κάθε υπόγειας δεξαμενής. Η εκτίμηση των μεγεθών αυτών γίνεται εμπειρικά, βάσει του αναγλύφου, όπου υπολογίζεται το μέσο, ελάχιστο και μέγιστο υψόμετρο του εδάφους επάνω από κάθε δεξαμενή, αλλά και σύμφωνα με τις μετρήσεις πιεζομετρίας, για όσες περιοχές είναι διαθέσιμες. Έτσι, τα υψόμετρα οροφής και πυθμένα ορίζονται βάσει ορισμένων γενικών κανόνων:

- Η οροφή της δεξαμενής δεν υπερβαίνει το ελάχιστο υψόμετρο του εδάφους.
- Ο πυθμένας αρχικά ορίζεται σε βάθος περίπου 200 m κάτω από την οροφή στα κύτταρα των πεδινών περιοχών και περίπου 400 m κάτω από την οροφή στα κύτταρα των ορεινών περιοχών που οι υψομετρικές διαφορές του εδάφους εντός των ορίων του ίδιου κυττάρου είναι πολύ μεγαλύτερες.
- Δεν είναι απαραίτητο οι γειτονικές υπόγειες δεξαμενές να βρίσκονται σε πλευρική επαφή, γεγονός που διευκολύνει σημαντικά την αναπαράσταση του υδροφορέα στα όρια των ορεινών περιοχών της λεκάνης (Παρνασσός, Ελικώνα), όπου συμβαίνει η μια υπόγεια δεξαμενή να βρίσκεται κάτω από ορεινό όγκο μεγάλου υψομέτρου και η γειτονική της κάτω από κοιλάδα του ποταμού με πολύ χαμηλότερο υψόμετρο. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η ανάγκη πλευρικής επαφής θα οδηγούσε σε δεξαμενές πολύ μεγάλων διαστάσεων (ύψους) και σε σημαντικά μεγάλες στάθμες νερού, οι οποίες θα έρεαν με ταχύτητα προς τα κύτταρα των προσχωματικών περιοχών.
- Οι γειτονικές δεξαμενές των κυττάρων των ορεινών περιοχών γενικά βρίσκονται σε επαφή, ενώ αποδεσμεύονται από τις δεξαμενές των κυττάρων των πεδινών περιοχών με τις οποίες συνορεύουν. Στις πρώτες δίνονται μικρές αρχικές στάθμες, αφενός λαμβάνοντας υπόψη τις μεγάλες κλίσεις της επιφάνειας, που οδηγούν σε μικρή κατείσδυση των κατακρημνίσεων και αφετέρου το γεγονός ότι εκ των πραγμάτων η κατείσδυση είναι μικρή στα αδιαπέρατα βραχώδη εδάφη των ορεινών όγκων (π.χ. Ελικώνας στα νότια της λεκάνης). Έτσι, κατά κάποιο τρόπο τα ορεινά κύτταρα λειτουργούν σαν

δεξαμενές που αφού δεν έχουν επαφή με τα κατάντι κύτταρα, μεταφέρουν τα ύδατα που συγκεντρώνονται σε αυτές στα κατάντη μέσω αγωγών και με σχετικά μεγάλες ταχύτητες.

- Στις δεξαμενές που βρίσκονται κάτω από τους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου δίνονται διαστάσεις τέτοιες, ώστε οι δεξαμενές να είναι σε επαφή, χωρίς μεγάλες υψομετρικές διαφορές όπου αυτό είναι εφικτό. Η ίδια τακτική ακολουθείται και στις αρχικές στάθμες, ώστε η ροή να είναι ομαλή, χωρίς συσσώρευση μεγάλων όγκων νερού που πρέπει να μεταφερθούν απότομα σε κατάντη δεξαμενές, που είναι σχεδόν άδειες. Σε όσες δοκιμές του μοντέλου συνέβη κάτι τέτοιο, τα αντίστοιχα διαγράμματα αποθήκευσης νερού δεν ήταν ομαλά και συνήθως παρουσίαζαν μεγάλη συσσώρευση υδάτων που δεν μπορούσαν να διοχετευτούν στις επόμενες δεξαμενές, απότομη αύξηση της αποθήκευσης στην αρχή και πτώση στη συνέχεια ή και σχεδόν μηδενική αποθήκευση υδάτων.
- Σε κάθε περίπτωση, είτε οι δεξαμενές των κυττάρων βρίσκονται σε επαφή είτε όχι, η ροή γίνεται πάντοτε από τις δεξαμενές υψηλότερης προς τις δεξαμενές χαμηλότερης στάθμης. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο οι αρχικές στάθμες των δεξαμενών να ορίζονται έτσι ώστε να μειώνονται από τα ορεινά προς τα πεδινά κύτταρα και από τα ανάντη προς τα κατάντη της ροής του Βοιωτικού Κηφισού. Οι χαμηλότερες, επομένως, αρχικές στάθμες δεξαμενών δίνονται στην περιοχή της λεκάνης της Κωπαΐδας και σε ορισμένα κύτταρα από τα οποία διαφεύγουν ύδατα εκτός της λεκάνης (π.χ. βόρεια της Κωπαΐδας προς τον Ευβοϊκό Κόλπο).

5.3.4. Οριακές συνθήκες

Εκτός των παραπάνω αρχικών συνθηκών που ορίζονται, καθορίζονται και κάποιες οριακές συνθήκες που αφορούν το μοντέλο του υπόγειου συστήματος και συγκεκριμένα, τη θεώρηση αδιαπέρατων ορίων μεταξύ γειτονικών κυττάρων. Όπου υπάρχει αδιαπέρατο όριο μεταξύ δύο γειτονικών κυττάρων, η ροή μεταξύ τους αποκλείεται. Τέτοια όρια αρχικά τέθηκαν:

- Στην επαφή αδιαπέρατων με διαπερατούς ή προσχωματικούς σχηματισμούς.
- Στα όρια των κυττάρων που υπάρχει κάποιο μεγάλο ρήγμα.
- Στα όρια μιας υδρογεωλογικής λεκάνης που φαίνεται να τροφοδοτεί μια πηγή μεγάλης παροχής, ώστε να μη διαφεύγουν ύδατα σε άλλες δεξαμενές.
- Στα όρια κυττάρων όπου εκδηλώνονται καρστικές πηγές και υπάρχει και αδιαπέρατος γεωλογικός σχηματισμός. Με τον τρόπο αυτό γίνεται προσπάθεια αναπαράστασης του μηχανισμού λειτουργίας της πηγής επαφής, όπου τα ύδατα που κινούνται μέσα στον υδροφορέα συναντούν κάποιον αδιαπέρατο σχηματισμό και αναγκάζονται να εκδηλωθούν επιφανειακά.
- Στα όρια καρστικών και προσχωματικών περιοχών π.χ. γύρω από τη λεκάνη της Κωπαΐδας, όπου όταν τα υπόγεια ύδατα από τις καρστικές περιοχές συναντούν τις μικρότερης διαπερατότητας προσχώσεις,

ανεβαίνουν στην επιφάνεια μέσω μεταπτώσεων. Με τον τρόπο αυτό περιγράφεται ο μηχανισμός αρκετών πηγών που εκδηλώνονται στην περιοχή μελέτης.

Στις δοκιμές του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ χρειάζεται τα όρια της αρχικής υπόθεσης να αλλάξουν, καθώς εκτιμάται ταυτόχρονα και το αποτέλεσμα της δοκιμής (οι πηγές ως σημεία ελέγχου) και εξετάζονται και τα διαγράμματα αποθήκευσης των κυττάρων, όπου μια προβληματική συμπεριφορά της ροής σε κάποιο κύτταρο δημιουργεί την ανάγκη νέας υπόθεσης και νέων τοπικών οριακών συνθηκών.

5.3.5. Διαδικασία χειροκίνητης – αυτόματης βαθμονόμησης

▪ Γενικά

Μετά την εισαγωγή των δεδομένων και τον καθορισμό των αρχικών και οριακών συνθηκών ακολουθεί η βαθμονόμηση του μοντέλου. Για την επίλυση της στοχικής συνάρτησης χρησιμοποιείται ο εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτησης – απλόκου (Ευστρατιάδης, 2001 και Efstratiadis et al., 2002). Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιείται συνήθως σε προβλήματα μη γραμμικής βελτιστοποίησης συνοδευόμενα από δυσκολίες που οφείλονται στα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης και η λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού είναι σίγουρα περιοχή με όχι ομοιόμορφα χαρακτηριστικά (μεγάλες υψομετρικές διαφορές, έντονα καρστικοποιημένα εδάφη, μεγάλοι ορεινοί όγκοι και στενές κοιλάδες, ρήγματα κλπ.).

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η βαθμονόμηση του μοντέλου γίνεται για τα υδρολογικά έτη 1984 έως 1990. Τα υπόλοιπα έτη έως το 1994 χρησιμοποιούνται για την επαλήθευση. Ξεκινώντας με τις δοκιμές για τη βαθμονόμηση (calibration) καθορίζεται και ο αριθμός τους. Στην προκειμένη περίπτωση, ορίζεται η επαναληπτική διαδικασία αναζήτησης βέλτιστων τιμών των μεταβλητών να σταματάει στις 5000 δοκιμές. Στη συνέχεια της διαδικασίας, επιλέγονται οι παράμετροι του μοντέλου των οποίων οι τιμές θα εκτιμηθούν και ομαδοποιούνται όπου αυτό κρίνεται σκόπιμο (με κατάλληλη σημείωση στα αρχεία της βάσης δεδομένων του μοντέλου). Μετά τη βαθμονόμηση, ακολουθεί το στάδιο της προσομοίωσης του μοντέλου για όλο το χρονικό διάστημα ελέγχου που έχει καθοριστεί. Έτσι, δίνεται τελικά μια τιμή της συνάρτησης για τη βαθμονόμηση του μοντέλου (calibration) και μια τιμή για τη διαδικασία της επαλήθευσης (validation). Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία αυτή, μπορούν πλέον να ελεγχθούν τα κριτήρια προσαρμογής και να συγκριθούν τα διαγράμματα που προκύπτουν από τις χρονοσειρές εισόδου και εξόδου στα επτά σημεία ελέγχου της λεκάνης (έξοδος της λεκάνης στη Σήραγγα Καρδίτσας και οι έξι μεγάλες πηγές).

Όσον αφορά τα κριτήρια προσαρμογής, εκτιμάται η αποτελεσματικότητα, η μεροληψία για τον έλεγχο αναπαραγωγής των εξής παρατηρημένων μεγεθών: της μέσης τιμής, της τυπικής απόκλισης και του συντελεστή μεταβλητότητας, ένας όρος ποινής για την αναπαραγωγή τάσης και ένας όρος ποινής για την αναπαραγωγή μηδενικής ροής (ενότητα 3.3). Για κάθε κριτήριο προσαρμογής μπορεί να καθοριστεί

και ένας μη αρνητικός συντελεστής βάρους. Στις δοκιμές που έγιναν, δόθηκαν συντελεστές βάρους στο κριτήριο της αποτελεσματικότητας, της μεροληψίας μέσης τιμής και του όρου ποινής για την αναπαραγωγή μηδενικής ροής, όμοια με αυτούς που τέθηκαν από τον Ευστρατιάδη (2008). Οι συντελεστές αυτοί έμειναν σταθεροί σε όλες τις δοκιμές. Επίσης, συντελεστές βάρους ορίστηκαν και στην ποινή για την αναπαραγωγή τάσης σε κάποια από τα υπόγεια κύτταρα. Αυτό κρίθηκε απαραίτητο σε ορισμένες περιπτώσεις μετά από έλεγχο των διαγραμμάτων αποθήκευσης των υδάτων, από τα οποία φαινόταν αδικαιολόγητη ανύψωση ή υποβιβασμός της στάθμης της δεξαμενής.

Τελικά, η τιμή της στοχικής συνάρτησης προκύπτει ως άθροισμα των επιμέρους τιμών των κριτηρίων προσαρμογής και των μεταβλητών (πολλαπλασιασμένων με τους συντελεστές βάρους). Το ζητούμενο είναι η ελαχιστοποίηση της τιμής της συνάρτησης με τις βέλτιστες τιμές των μεταβλητών. Η συνάρτηση αυτή αποτελεί ένα καθολικό μέτρο επίδοσης του μοντέλου.

▪ Χειροκίνητη - αυτόματη βαθμονόμηση

Σε κάθε επαναληπτική διαδικασία του μοντέλου μπορεί να επιλέγονται διαφορετικές μεταβλητές για βελτιστοποίηση, π.χ. αρχικά οι παράμετροι του υπόγειου μοντέλου (υδραυλική διαπερατότητα ή πορώδες) και στη συνέχεια εκείνες των επιφανειακών υδάτων (όλων ή ορισμένων Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης, π.χ. μόνο των αδιαπέρατων κλπ.) ή και να γίνεται συνδυασμός τους. Η πιο σημαντική δυνατότητα που δίνει το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ είναι η επέμβαση του χρήστη στη διαδικασία της βαθμονόμησης. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί η εμπειρία του στην εξέταση των υδρολογικών ή υδρογεωλογικών διαδικασιών, καθώς και η γνώση της περιοχής μελέτης που έχει και η οποία μπορεί να εξηγήσει επαρκώς περίεργα και μη αναμενόμενα φαινόμενα που δείχνουν τα προσομοιωμένα διαγράμματα του μοντέλου. Όταν ολοκληρώνεται μια διαδικασία βαθμονόμησης, είναι απαραίτητος ο έλεγχος των διαγραμμάτων και των κριτηρίων προσαρμογής στις θέσεις ελέγχου του μοντέλου, αλλά και των διαγραμμάτων που δίνει το μοντέλο για κάθε υπόγειο κύτταρο. Τα διαγράμματα αυτά συχνά δείχνουν ανοδικές και καθοδικές τάσεις στις στάθμες των υπόγειων δεξαμενών ή αποκλίσεις των προσομοιωμένων από τα μετρημένα μεγέθη (απορροή μεγαλύτερη ή μικρότερη από την αναμενόμενη, αδικαιολόγητο στέρεμα πηγών κλπ.). Και δεδομένου ότι η έντονη καρστικοποίηση των σχηματισμών της λεκάνης και οι μη επαρκείς μετρήσεις (πιεζομετρία κλπ.) δεν επιτρέπουν γνώση των συνθηκών υπόγειας ροής, η χειροκίνητη επέμβαση στη διαδικασία βαθμονόμησης έχει ως στόχο την ομαλή διαμόρφωση των προαναφερόμενων διαγραμμάτων και την αποφυγή τάσεων και «παράξενης» ροής υδάτων.

Η επέμβαση αυτή στην παρούσα εφαρμογή έγκειται στα εξής:

- i. Επιλογή των παραμέτρων που κάθε φορά θα εκτιμώνται από το μοντέλο στο στάδιο της βαθμονόμησης. Κατά την εκτέλεση των δοκιμών μέχρι να επιτευχθεί η βέλτιστη λύση, επιλέγονται για εκτίμηση άλλοτε όλες οι παράμετροι μαζί (και του επιφανειακού και του υπόγειου συστήματος)

και άλλοτε ορισμένες από αυτές μεμονωμένα. Η συνήθης διαδικασία που εφαρμόζεται στην προκειμένη περίπτωση, είναι οι δοκιμές να ξεκινούν με επιλεγμένες τις παραμέτρους του υπόγειου συστήματος. Γίνεται ρύθμιση με τις παραμέτρους των πηγών συνολικά είτε σε ομάδες ανάλογα με τη θέση τους στη λεκάνη απορροής (π.χ. ανάντη και κατόντη), την ποσότητα υδάτων που εκφορτίζουν (π.χ. οι βασικότερες πηγές Μέλανας και Μαυρονέρι) ή σε συνδυασμό με τα κοντινά κύτταρα διαφυγών της λεκάνης. Επίσης, εκτιμώνται οι παράμετροι της υδραυλικής αγωγιμότητας (προκύπτουν τρεις τιμές του K , μία για κάθε ομάδα σχηματισμών) και του πορώδους κατά τον ίδιο τρόπο (με ομαδοποίηση). Σε αρκετές δοκιμές, εκτιμώνται ταυτόχρονα οι παράμετροι της υδραυλικής αγωγιμότητας, του πορώδους και της κατείσδυσης, παρ' όλο που ανήκει στις παραμέτρους του επιφανειακού συστήματος, γιατί η κατείσδυση επηρεάζει άμεσα τις ποσότητες υδάτων που θα κινηθούν υπόγεια. Στη συνέχεια, μπορεί να γίνει και πάλι ρύθμιση του μοντέλου με τις παραμέτρους του πορώδους και των πηγών σε συνδυασμό, καθώς η εκφόρτιση των πηγών εξαρτάται από το πορώδες του εδάφους. Η διαδικασία περιλαμβάνει και ρύθμιση του μοντέλου με τις επιφανειακές παραμέτρους, είτε στο σύνολό τους είτε σε ομάδες βάσει των κατηγοριών των Μ.Υ.Α. (π.χ. μόνο οι παράμετροι των διαπερατών περιοχών) ή ορισμένων κλάδων του ποταμού (π.χ. οι κλάδοι που παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες απώλειες).

- ii. Αλλαγή των αρχικών συνθηκών που αφορούν τις διαστάσεις των υπογείων δεξαμενών σε κάποιο ενδιάμεσο στάδιο της βαθμονόμησης. Μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών του μοντέλου, ελέγχονται τα αποτελέσματά του, όσον αφορά τα διαγράμματα αποθήκευσης υδάτων στις υπόγειες δεξαμενές, αλλά και τα διαγράμματα εκφόρτισης των πηγών σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μετρημένα. Κατά τον έλεγχο αυτό παρατηρούνται σε ορισμένες περιπτώσεις κυττάρων μεγάλες ανυψώσεις και ταπεινώσεις της στάθμης που δείχνουν μη ομαλή υπόγεια ροή. Παρατηρούνται οι εξής περιπτώσεις:
- Απότομη και μεγάλη ανύψωση της στάθμης της δεξαμενής στην αρχή της ροής και στη συνέχεια πτώση που φτάνει συχνά μέχρι πλήρη εκφόρτιση. Τέτοια συμπεριφορά μπορεί να παρουσιάζεται σε κύτταρα όμορα με εκείνα των μεγάλων ορεινών όγκων της λεκάνης. Αν η αρχική στάθμη των κυττάρων των ορεινών περιοχών είναι μεγάλη είναι πιθανό τα κατόντη κύτταρα να δέχονται αφενός μεγάλες ποσότητες υδάτων στην αρχή και αφετέρου με μεγάλη ταχύτητα λόγω της υψομετρικής διαφοράς. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με επέμβαση στην αρχική στάθμη των «ορεινών» κυττάρων και μείωσή της ή και μηδενισμό της (για μείωση της μεταφερόμενης ποσότητας υδάτων) ή και με υποβιβασμό του πυθμένα της δεξαμενής (για μείωση της ταχύτητας ροής). Στο σημείο αυτό, πρέπει να επισημανθεί ότι η ιδιαιτερότητα της λεκάνης απορροής, η οποία παρουσιάζει μεγάλες υψομετρικές διαφορές ή απότομες εναλλαγές υψομέτρου, δεν επιτρέπει πολλές φορές την επαφή των υπόγειων δεξαμενών στα όρια ορεινών και πεδινών περιοχών. Για το μοντέλο, παρ' όλα αυτά, δεν είναι αναγκαία αυτή η επαφή των δεξαμενών,

καθώς μπορεί να αντιμετωπίσει τα ορεινά κύτταρα σαν δεξαμενές που μεταφέρουν τα ύδατα κατάντη μέσω αγωγού, απαλλάσσοντας το χρήστη από τον καθορισμό δεξαμενών πολύ μεγάλου ύψους. Επαφή των υπόγειων δεξαμενών υπάρχει απαραίτητα στα κύτταρα που ακολουθούν τη συγκεντρωμένη απορροή της λεκάνης κατά μήκος του Βοιωτικού Κηφισού.

- Διαγράμματα σαν τα προαναφερόμενα παρουσιάζονται κάποιες φορές, επίσης, και στα ίδια τα κύτταρα των ορεινών περιοχών. Κάτι τέτοιο μπορεί να σημαίνει ότι είναι μεγάλη η κατείδυση στα κύτταρα αυτά, οπότε γεμίζουν οι δεξαμενές στην αρχή και στη συνέχεια εκφορτίζονται. Σε τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να γίνει ρύθμιση του μοντέλου μόνο με τις παραμέτρους της κατείδυσης για τις Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης που αντιστοιχούν στις αδιαπέρατες περιοχές, δεδομένου ότι πολλά από τα κύτταρα αυτά έχουν αδιαπέρατους σχηματισμούς και τα νερά ρέουν κυρίως επιφανειακά. Ακόμα μπορεί να γίνει συνδυασμός των παραμέτρων αυτών με τις παραμέτρους του πορώδους ή της υδραυλικής αγωγιμότητας των υπογείων κυττάρων. Βέβαια, ένα τέτοιο διάγραμμα μπορεί να δικαιολογείται σε ορεινά κύτταρα με έντονα καρστικοποιημένους σχηματισμούς, οπότε δεν μπορεί να προβλεφθεί απόλυτα ο μηχανισμός κίνησης των υδάτων.
- Επίσης, υπάρχει η περίπτωση κατά την οποία τα διαγράμματα αποθήκευσης υδάτων μιας δεξαμενής παρουσιάζουν αντίθετη συμπεριφορά από αυτή που περιγράφηκε παραπάνω. Συγκεκριμένα, δείχνουν να έχουν ανοδική τάση, που σημαίνει συνεχή αποθήκευση υδάτων, τα οποία δεν μεταφέρονται στα γειτονικά κύτταρα ή τουλάχιστον μεταφέρονται με πολύ μικρή ταχύτητα. Τέτοια συμπεριφορά παρουσιάζουν ορισμένα κύτταρα των πεδινών περιοχών από τις οποίες διέρχονται κλάδοι του ποταμού. Μια επέμβαση προς τη διόρθωση τέτοιων διαγραμμάτων, είναι η αλλαγή των αρχικών διαστάσεων των δεξαμενών, έτσι ώστε οι δεξαμενές των γειτονικών κυττάρων να βρίσκονται σε επαφή, οι στάθμες και οι πυθμένες των δεξαμενών να υποβιβάζονται κατά την κατεύθυνση της υπόγειας ροής και επιπλέον οι στάθμες των γειτονικών κυττάρων να μην διαφέρουν σημαντικά. Βέβαια, σε τέτοιες περιπτώσεις υπεισέρχεται και η εμπειρία του χρήστη ή η γνώση που έχει για την περιοχή, όσον αφορά το πόσο αναμενόμενη μπορεί να είναι η συμπεριφορά της υπόγειας ροής σε ένα κύτταρο. Ενδεικτικά αναφέρεται η περιοχή των κυττάρων 13 και 15 (εικόνα 32), κοντά στην Αμφίκλεια, πριν την πεδιάδα της Τιθορέας. Εκεί, οι υψομετρικές διαφορές είναι μεγάλες, ο Βοιωτικός Κηφισός περνάει μέσα από βαθιά χαράδρα και η επιφανειακή του ροή χάνεται για να εμφανιστεί και πάλι λίγο παρακάτω. Αυτή η στενή περιοχή την οποία αντιπροσωπεύει το κύτταρο 13, ανήκει στους καρστικοποιημένους σχηματισμούς της λεκάνης. Επομένως, οι απώλειες του ποταμού στη θέση αυτή είναι μεγάλες, κάτι που δεν μπορεί να μη ληφθεί υπόψη τόσο στα όρια που τίθενται στην επιφανειακή παράμετρο του αντίστοιχου

- κλάδου, όσο και στην ερμηνεία της αποθήκευσης υδάτων της υπόγειας δεξαμενής που πιθανόν είναι αυξημένη.
- Επίσης, αλλαγή στις αρχικές συνθήκες μπορεί να γίνει και όσον αφορά τις δεξαμενές που αντιστοιχούν στις πηγές. Σε κάποιες δοκιμές τα προσομοιωμένα διαγράμματα δείχνουν ότι η πηγή στερεύει και δεν συγκεντρώνει ύδατα προς εκφόρτιση. Ένα τέτοιο φαινόμενο μπορεί να απαιτεί υποβιβασμό του πυθμένα της δεξαμενής ώστε να συγκεντρώνεται επαρκής ποσότητα υδάτων, δεδομένου ότι από τα διαγράμματα εκφόρτισης των μετρήσεων είναι γνωστές οι περίοδοι που η πηγή ενδεχομένως στέρευσε (π.χ. περίοδοι ξηρασίας). Επιπλέον, η επέμβαση μπορεί να αφορά μείωση της στάθμης των υδάτων σε περίπτωση που φαίνεται ότι οι προσομοιωμένες τιμές ξεπερνούν τις μετρημένες.
 - Τέλος, η χειροκίνητη επέμβαση στο μοντέλο μπορεί να αφορά και τα μέγιστα και ελάχιστα όρια των παραμέτρων του επιφανειακού και υπόγειου μοντέλου. Για παράδειγμα, το αποτέλεσμα μιας δοκιμής μπορεί να δώσει πολύ μικρές τιμές στο συντελεστή διήθησης ενός κλάδου του Βοιωτικού Κηφισού για τον οποίο είναι γνωστό ότι παρουσιάζει μεγάλες απώλειες (π.χ. στο τμήμα Αμφίκλειας – Τιθορέας). Σε μια τέτοια περίπτωση ενδείκνυται η αύξηση του κάτω ορίου της παραμέτρου, ώστε το μοντέλο να αναγκαστεί να δώσει μεγαλύτερες τιμές, οι οποίες βρίσκονται πιο κοντά στη φυσική πραγματικότητα.
- iii.** Ένα άλλο είδος επέμβασης αφορά τις οριακές συνθήκες του μοντέλου. Οι περιπτώσεις που απαιτείται τέτοια αλλαγή είναι οι εξής:
- Υπάρχει περίπτωση ένα αδιαπέρατο όριο που έχει τεθεί, να παρεμποδίζει τη ροή οδηγώντας σε συγκέντρωση υδάτων σε όλα τα ανάντη κύτταρα.
 - Σε κάποιες δοκιμές, ορισμένες πηγές δείχνουν να στερεύουν ή να μην έχουν επαρκή ποσότητα υδάτων και τα προσομοιωμένα διαγράμματα να μην φτάνουν τις μέγιστες τιμές των μετρημένων. Ένα τέτοιο φαινόμενο παρουσιάστηκε στην πηγή της Αγίας Παρασκευής. Τότε, μπορούν να τεθούν αδιαπέρατα όρια στα γειτονικά κύτταρα της πηγής τα οποία την τροφοδοτούν, ώστε να δημιουργείται ένα είδος τοπικής υδρογεωλογικής λεκάνης. Έτσι, όλες οι κατεισδύσεις των κατακρημνισμάτων από τα κύτταρα αυτά οδηγούνται στο κύτταρο της πηγής αυξάνοντας την παροχή της.
- iv.** Τέλος, επέμβαση στη διαδικασία της βαθμονόμησης γίνεται και με αλλαγές στους συντελεστές βάρους των κριτηρίων προσαρμογής ή με καθορισμό ποινών. Στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού εκτός από τον καθορισμό των συντελεστών βάρους που τίθενται αρχικά, απαιτείται και καθορισμός ποινών τάσης (trend penalty) σε ορισμένα κύτταρα που παρουσιάζουν σταθερά σε συνεχόμενες δοκιμές ανοδικές ή καθοδικές τάσεις. Τέτοια ποινή ορίστηκε αρχικά στα κύτταρα 5, 7, 15 και 17, καθώς και στη συνέχεια στα 30, 31 και 36. Τα πρώτα αντιστοιχούν στις πεδινές περιοχές της λεκάνης

(πεδιάδες Μπράλου και Τιθορέας), όπου εκεί κατά κύριο λόγο παρουσιάζονται ανυψωτικές τάσεις στις στάθμες των δεξαμενών και φαίνεται να μην μπορούν να «διώξουν» ύδατα στα γειτονικά κύτταρα. Τα δεύτερα αντιστοιχούν στην περιοχή της Κωπαΐδας και στη νότια ορεινή περιοχή. Από τα διαγράμμάτα τους προκύπτει ότι οι υπόγειες δεξαμενές διώχνουν αμέσως τα νερά τους στα γειτονικά κύτταρα της λεκάνης ή στα κύτταρα διαφυγών.

5.3.6. Περιγραφή δοκιμών

Ακολούθως περιγράφεται συνοπτικά η διαδικασία των δοκιμών του μοντέλου, κυρίως όσον αφορά τις χειροκίνητες επεμβάσεις που έγιναν. Περιγράφονται μόνο οι δοκιμές εκείνες που οδήγησαν σε σημαντική βελτίωση των αποτελεσμάτων του μοντέλου και αιτιολογούνται οι επιλογές που έγιναν για να δώσει το μοντέλο τη μικρότερη τιμή της στοχικής συνάρτησης με αρχικές και οριακές συνθήκες που περιγράφουν κατά το δυνατόν τη φυσική πραγματικότητα.

Δοκιμή 1:

Ορίζονται αδιαπέρατα όρια μεταξύ του κυττάρου της πηγής Έρκυνας και των γειτονικών κυττάρων που βρίσκονται σε χαμηλότερο ύψος, ώστε η δεξαμενή της πηγής να αποθηκεύει νερά για εκφόρτιση (κύτταρα 22, 29 και 29, 31). Επίσης, απομονώθηκε το κύτταρο 30 από την νοτιοδυτική περιοχή της Κωπαΐδας (κύτταρο 31), ώστε η υπόγεια ροή των υδάτων που κατεισδύουν σε αυτό να μοιράζεται στην πηγή Έρκυνα και στις διαφυγές της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού προς την λεκάνη των Βαγιών.

Δοκιμή 2:

Τίθεται αδιαπέρατο όριο μεταξύ των κυττάρων 20 και 22, ώστε το κύτταρο 20 που βρίσκεται ψηλότερα, να τροφοδοτεί μόνο το κύτταρο 19 και το κύτταρο της πηγής Μαυρονερίου, η οποία είναι πηγή μεγάλης παροχής και το προσομοιωμένο διάγραμμα εκφόρτισης πρέπει να φτάνει τις μέγιστες τιμές του μετρημένου.

Δοκιμή 3:

Ορίζεται αδιαπέρατο όριο μεταξύ των κυττάρων 25 και 27 που αντιστοιχούν στις πηγές Αγίας Παρασκευής και Πολυγύρας, έτσι ώστε τα υπόγεια νερά των δύο κυττάρων να εκφορτίζονται μόνο στις αντίστοιχες πηγές τους. Το όριο αυτό αποτελεί κατά κάποιο τρόπο όριο των υδρογεωλογικών λεκανών που τροφοδοτούν τις πηγές. Επίσης, αυξήθηκε η στάθμη του κυττάρου 26 που τροφοδοτεί την πηγή Αγίας Παρασκευής, ώστε να αυξηθεί η ποσότητα των υδάτων εκφόρτισης.

Δοκιμή 4:

Από τα διαγράμματα αποθήκευσης των υδάτων των κυττάρων 5, 7, 15 και 17, φαίνεται ότι οι υπόγειες δεξαμενές τους συγκεντρώνουν πολλά ύδατα που δεν βρίσκουν διέξοδο ή κινούνται με πολύ μικρή ταχύτητα. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με το γεγονός ότι οι σχηματισμοί των περιοχών αυτών είναι προσχωματικοί και συνεπώς θα έπρεπε να γίνεται σχετικά εύκολα η υπόγεια ροή. Επισημαίνεται, επίσης,

ότι οι υπόγειες δεξαμενές δεν γεμίζουν μόνο από την κατείσδυση των κατακρημνίσεων και τη μεταφορά υδάτων από τα γειτονικά κύτταρα, αλλά επιπλέον δέχονται τις απώλειες των κλάδων του Βοιωτικού Κηφισού που διέρχεται από τις πεδινές περιοχές της επιφάνειας. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της ανοδικής τάσης της στάθμης, ορίζεται ποινή (trend penalty) ίση με τη μονάδα και για τα τέσσερα κύτταρα.

Δοκιμή 5:

Στη δοκιμή αυτή δεν άλλαξε κάτι ως προς τις αρχικές και οριακές συνθήκες, αλλά η ρύθμιση έγινε με τις παραμέτρους της υδραυλικής αγωγιμότητας των προσχωματικών περιοχών και των πηγών Μέλανα και Μαυρονερίου, ώστε να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα συγκέντρωσης υδάτων στις δεξαμενές των ημιπερατών, πεδινών κυττάρων και να αποφορτιστεί ποσότητά τους μέσω των δύο μεγαλύτερων συγκροτημάτων πηγών.

Δοκιμή 6:

Επίσης, το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στα προαναφερόμενα κύτταρα με προσχωματικούς σχηματισμούς που συνέχισαν να συγκεντρώνουν μεγάλες ποσότητες υδάτων. Συγκεκριμένα, αντιμετωπίστηκαν ως καρστικά (η παράμετρος της υδραυλικής αγωγιμότητας τους συμπεριλήφθηκε στην ομάδα των καρστικών σχηματισμών), ώστε να αυξηθούν οι ταχύτητες ροής. Επίσης, αυξήθηκε και ο συντελεστής βάρους τους (έγινε 1,5), με στόχο το μοντέλο να «αναγκαστεί» να διορθώσει τα διαγράμματά τους και στη συνέχεια να γίνει ρύθμισή του με τις παραμέτρους μόνο των πηγών που ενδεχομένως τα υδρογραφήματά τους αλλάξουν προς το χειρότερο.

Δοκιμή 7:

Ακολούθησε ρύθμιση του μοντέλου με τις παραμέτρους της υδραυλικής αγωγιμότητας των διαπερατών κυττάρων και των μεγάλων πηγών της λεκάνης (Μαυρονέρι, Μέλανας, Πολυγύρα και Αγία Παρασκευή) που επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την υπόγεια ροή.

Επίσης, αλλάζουν οι αρχικές στάθμες των κυττάρων, βάσει των μέσων τιμών στάθμης που προκύπτουν από τα αντίστοιχα διαγράμματα των προηγούμενων δοκιμών του μοντέλου. Το μοντέλο θα πρέπει να ρυθμιστεί με τις αρχικές τιμές στάθμης που έχουν προκύψει από τις διαθέσιμες μετρήσεις πιεζομετρίας, τη μελέτη του αναγλύφου της λεκάνης ή άλλες παρατηρήσεις. Το πρόβλημα είναι ότι οι μετρήσεις αυτές περιορίζονται μόνο σε ένα τμήμα του μέσου ρου της λεκάνης, ενώ επίσης μικρό είναι και το χρονικό διάστημα της βαθμονόμησης. Έτσι, υπάρχει πιθανότητα σφαλμάτων κατά τη βαθμονόμηση του μοντέλου και για το λόγο αυτό γίνεται μια προσπάθεια ρύθμισης του μοντέλου με τις μέσες τιμές στάθμης, δηλαδή με τις τιμές στις οποίες προσπαθεί να ισοροπήσει.

Δοκιμή 8:

Επειδή το μοντέλο φαίνεται να δίνει μεγάλη επιφανειακή απορροή στη λεκάνη (η τιμή της συνάρτησης σφάλματος για την επαλήθευση είναι μεγάλη), επιλέγεται να ρυθμιστεί με τις παραμέτρους

του επιφανειακού συστήματος, ώστε να μειωθεί η απορροή. Συγκεκριμένα, επιλέγονται οι συντελεστές κατείδυσης και απορροής (infiltration coefficient και runoff coefficient) και επιπλέον, μειώνονται τα άνω όρια τους (από 5% σε 3%) κυρίως για τις προσχωματικές περιοχές.

Δοκιμή 9:

Μετά την τελευταία ρύθμιση του μοντέλου προκύπτει ότι δεν υπάρχει διακύμανση στο υδρογράφημα της πηγής Μαυρονερίου. Μια επέμβαση που γίνεται είναι η μείωση του υψομέτρου της πηγής, ώστε να γίνεται μεγαλύτερη εκφόρτιση υδάτων από το στόμιο της πηγής. Επίσης, ανυψώνονται οι πυθμένες των γύρω δεξαμενών που τροφοδοτούν την πηγή (15, 17, 20 και 22), ενώ παύει να είναι αδιαπέρατο το όριο των κυττάρων 20 και 22, ώστε το πρώτο κύτταρο να διοχετεύει νερά και στο δεύτερο και να βοηθήσει προς την κατεύθυνση δημιουργίας διακύμανσης στο υδρογράφημα της πηγής (π.χ. να μπορεί και να στερεύει κάποιους μήνες ή να μειώνεται η στάθμη των υδάτων). Στη συνέχεια, η ρύθμιση του μοντέλου μπορεί να γίνει μόνο με τις παραμέτρους των πηγών (π.χ. του Μαυρονερίου) ή και σε συνδυασμό με την παράμετρο του πορώδους για διαπερατά εδάφη, δεδομένου ότι ο μηχανισμός λειτουργίας των πηγών επηρεάζεται από την καρστικοποίηση του εδάφους (π.χ. η πηγή Μέλανας εκδηλώνεται στους πρόποδες του Ακοντίου Όρους, περιοχή με έντονα τα φαινόμενα καρστ). Το πορώδες επιλέγεται για επηρεάζει την υπόγεια ροή (μπορεί να την καθυστερήσει ή να την εμποδίσει) και συνεπώς τη διακύμανσή της. Στη ρύθμιση υπεισέρχονται στη συνέχεια και οι παράμετροι τις κατείδυσης σε συνδυασμούς με τις προαναφερόμενες παραμέτρους.

Δοκιμή 10:

Για να έχει διακύμανση η πηγή Μέλανα, γίνεται αλλαγή στο ύψος του πυθμένα των δεξαμενών των κυττάρων 28 (πηγή Μέλανας) και του γειτονικού 23 που αντιστοιχεί στην προσχωματική πεδιάδα μεταξύ Δαύλειας και Ορχομενού. Με τον τρόπο αυτό μέρος των υδάτων της πηγής μεταφέρεται στη δεξαμενή της στενής πεδιάδας.

Δοκιμή 11:

Για να γίνεται ευκολότερα η υπόγεια ροή στα κύτταρα του άνω ρου (1 έως 13) και να μην παρουσιάζονται ανοδικές τάσεις στα διαγράμματα αποθήκευσης υδάτων, πραγματοποιούνται μικρές αλλαγές στις αρχικές συνθήκες που αφορούν τις διαστάσεις των δεξαμενών (πυθμένας και στάθμες). Στη συνέχεια ρυθμίζεται το μοντέλο με τις παραμέτρους του επιφανειακού συστήματος και το συντελεστή διήθησης των ανάντη κλάδων (του άνω ρου) που παρουσιάζουν και τις μεγαλύτερες απώλειες.

Δοκιμή 12:

Γίνεται προσπάθεια βελτίωσης της διακύμανσης της πηγής Πολυγύρας (κύτταρο 27). Στις μέχρι τώρα δοκιμές θεωρείται ότι εκδηλώνεται μέσω αδιαπέρατων σχηματισμών (φλύσχη), παρ' όλο που η περιοχή του Ακοντίου είναι καρστικοποιημένη. Η επιλογή αυτή έγινε γιατί όπως φαίνεται από τον χάρτη των γεωλογικών σχηματισμών (Εικόνα 32), στο κύτταρο 27 φαίνεται να υπερισχύουν οι αδιαπέρατοι σχηματισμοί. Συνεπώς, η μικρή τιμή του πορώδους πιθανότατα εμποδίζει την εμφάνιση διακύμανσης, η

οποία υπάρχει σύμφωνα με τις μετρημένες τιμές. Ένας τρόπος αντιμετώπισης είναι να μεταφερθεί η πηγή στο κύτταρο 32, στο σημείο που οριακά έρχεται σε επαφή με το κύτταρο 27. Στο κύτταρο 32 κυριαρχούν οι καρστικοί σχηματισμοί. Τελικά, η επιλογή αυτή απορρίπτεται γιατί δημιουργεί μεγαλύτερα προβλήματα στα υδρογραφήματα των άλλων κυττάρων.

Δοκιμή 13:

Στα πλαίσια βελτίωσης της διακύμανσης της Πολυγύρας, απομονώθηκε το κύτταρο 32 από το γειτονικό 26 με αδιαπέρατο όριο, ώστε το 26 να μην τροφοδοτεί το κύτταρο της πηγής αυξάνοντας έτσι την απορροή. Επίσης, πρόβλημα φαίνεται να υπάρχει και στην πηγή Μέλανα, το προσομοιωμένο υδρογράφημα της οποίας δεν προσεγγίζει το αντίστοιχο μετρημένο και επιπλέον, δε δίνει ικανοποιητική διακύμανση. Για το λόγο αυτό τίθενται αδιαπέρατα όρια μεταξύ του κυττάρου 23 που αντιστοιχεί στη στενή πεδιάδα Δαύλειας – Ορχομενού και τα γειτονικά κύτταρα 28 (της πηγής) και το ανάντη 24 (που τροφοδοτεί πλέον μόνο το κύτταρο της πηγής).

Δοκιμή 14:

Τα προβλήματα εντοπίζονται στα υδρογραφήματα των πηγών Αγίας Παρασκευής και Πολυγύρας. Το πρώτο δεν προσεγγίζει καθόλου τις μέγιστες τιμές παροχής που εμφανίζονται σε δύο περιόδους του συνόλου των μετρήσεων. Το δεύτερο παρουσιάζει μια μέση διακύμανση που δεν «πιάνει» τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές της μετρημένης παροχής. Η επέμβαση που γίνεται αφορά τις οριακές συνθήκες. Συγκεκριμένα, τοποθετείται αδιαπέρατο όριο μεταξύ των κυττάρων 26 και 27, ώστε το κύτταρο 26 να τροφοδοτεί μόνο την πηγή Αγίας Παρασκευής αυξάνοντας την εκφόρτιση. Αυτό συμφωνεί και με το γεγονός ότι το όριο των δύο κυττάρων αποτελεί και επαφή διαπερατού με αδιαπέρατο σχηματισμό, ο οποίος μπορεί να εμποδίζει την υπόγεια ροή. Επίσης, αδιαπέρατο όριο τίθεται μεταξύ των κυττάρων 24 και 27. Έτσι, το κύτταρο 24 τροφοδοτεί μόνο το κύτταρο της πηγής Μέλανα, ενώ η πηγή Πολυγύρας εκφορτίζει μόνο τις κατεισδύσεις του ίδιου της του κυττάρου (στόχος η μεγαλύτερη διακύμανση του υδρογραφήματος). Τέλος, μπαίνει ποινή (trend penalty) στο κύτταρο 30, το οποίο παρουσιάζει συνεχώς καθοδική τάση στο διάγραμμα αποθήκευσης.

Δοκιμή 15:

Από τα αποτελέσματα του μοντέλου και την επεξεργασία τους με το λογισμικό Microsoft Excel, φαίνεται η κατείσδυση της λεκάνης να είναι μεγαλύτερη από την εξάτμιση. Η αλλαγή που γίνεται αφορά τα όρια των παραμέτρων του επιφανειακού μοντέλου, της κατείσδυσης (μείωση του άνω ορίου) και της συγκράτησης εδαφικής υγρασίας (αύξηση του κάτω ορίου). Επίσης, μειώνεται η στάθμη του κυττάρου της πηγής Λιλαίας, ώστε το προσομοιωμένο υδρογράφημα να προσεγγίζει τις χαμηλότερες μετρημένες τιμές.

Δοκιμή 16:

Επειδή και πάλι το κύτταρο 15 (βορειοδυτική περιοχή της πεδιάδας Τιθορέας) δείχνει να συγκεντρώνει σημαντική ποσότητα υδάτων, γίνεται ρύθμιση του μοντέλου τόσο με τις παραμέτρους του πορώδους και της κατείσδυσης, όσο και με την παράμετρο του συντελεστή διήθησης για τους κλάδους του ποταμού στην περιοχή Γραβιάς – Αμφίκλειας, καθώς και στην περιοχή της Τιθορέας – Ανθοχωρίου και του συντελεστή επιφανειακής απορροής. Η ρύθμιση γίνεται σταδιακά για κάθε ομάδα Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης (διαπερατές, αδιαπέρατες και ημιπερατές περιοχές). Επίσης, μειώνεται το άνω όριο του συντελεστή διήθησης γιατί η εκτίμηση της αντίστοιχης παραμέτρου δίνει τιμές που πλησιάζουν κατά πολύ το όριο αυτό. Τιμές κοντά στη μέγιστη δείχνουν μεγάλες απώλειες υδάτων από τους κλάδους του ποταμού, οι οποίες καταλήγουν στη δεξαμενή του κυττάρου 15.

Δοκιμή 17:

Μια άλλη επέμβαση που αφορά το κύτταρο 15, είναι η άνοδος του πυθμένα της δεξαμενής σε μεγαλύτερο υψόμετρο και ο υποβιβασμός του πυθμένα του κυττάρου 14 που το τροφοδοτεί. Στόχος των αλλαγών είναι μια ομαλότερη υπόγεια ροή με μικρότερες ταχύτητες, έτσι ώστε η προβληματική δεξαμενή να προλαβαίνει να «διώχνει» τα νερά που δέχεται προς τα κατάντη κύτταρα. Επισημαίνεται, ότι λόγω και του αναγλύφου, οι δεξαμενές των κυττάρων 13, 15 και 14 παρουσιάζουν μεγάλες υψομετρικές διαφορές που μεταβάλλονται δύσκολα και οριακά, ώστε να μην επηρεαστούν οι συνθήκες υπόγειας ροής σε όλη τη λεκάνη. Επιπλέον, τη φόρτιση της δεξαμενής του 15 φαίνεται να την επηρεάζει ο μηχανισμός υπόγειας ροής στο κύτταρο 13, το οποίο αντιπροσωπεύει μια έντονα καρστικοποιημένη περιοχή, ρηγματωμένη, με μεγάλες απώλειες του αντίστοιχου κλάδου του Βοιωτικού Κηφισού. Το μοντέλο ρυθμίζεται με τις παραμέτρους των πηγών, των κυττάρων των διαφυγών, αλλά και των συντελεστών διήθησης των γύρω κλάδων του ποταμού.

Δοκιμή 18:

Στα πλαίσια αντιμετώπισης του ίδιου προβλήματος μειώνεται και η υψομετρική διαφορά των πυθμένων των δεξαμενών του κυττάρου 15 με το κατάντη κύτταρο 17 που ανήκει στη νοτιοανατολική περιοχή της πεδιάδας Τιθορέας.

Δοκιμή 19:

Επειδή το υδρογράφημα της πηγής Αγίας Παρασκευής εξακολουθεί να μην πιάνει τις μέγιστες μετρημένες τιμές σε δύο υδρολογικές περιόδους (είναι οι δύο μεγαλύτερες παροχές που έδωσε ποτέ η πηγή μέσα στο διάστημα των μετρήσεων), γίνεται προσπάθεια διόρθωσης με το να συμπεριληφθεί η παροχή της πηγής στην παροχή του αντίστοιχου κυττάρου 25, το οποίο και απομονώθηκε με αδιαπέρατο όριο από το ανάντη κύτταρο 26 που το τροφοδοτεί. Τελικά, η επιλογή αυτή απορρίπτεται, καθώς βελτιώνει το υδρογράφημα του κυττάρου, αλλά αυξάνει αρκετά την τιμή της βαθμονόμησης, η οποία δεν μειώνεται σημαντικά ούτε και με τη ρύθμιση του μοντέλου στη συνέχεια με άλλες παραμέτρους.

Δοκιμή 20:

Μια ακόμη αλλαγή αφορά τις ρυθμίσεις του προγράμματος μοντέλου και συγκεκριμένα τον αριθμητικό επιλυτή του προβλήματος υπόγειας ροής. Στις μέχρι τώρα δοκιμές επιλέχθηκε διαδικασία με την οποία οι εξισώσεις συνέχειας εφαρμόζονται συνολικά (implicit). Επειδή αυτή η διαδικασία είναι πιο ασταθής, επιλέγεται πλέον διαδικασία με την οποία εξετάζονται οι υπόγειες δεξαμενές χωριστά, δηλαδή ελέγχεται που δίνει νερό η πρώτη δεξαμενή, στη συνέχεια η δεύτερη κλπ. (explicit). Επίσης, επιλέγεται μεγαλύτερη κατάτμηση του μηνιαίου χρονικού βήματος προσομοίωσης (από 2 σε 5). Ακολουθεί ρύθμιση του μοντέλου με τις παραμέτρους των πηγών, του συντελεστή διήθησης και της κατείσδυσης.

5.3.7. Επιλογή καλύτερης βαθμονόμησης

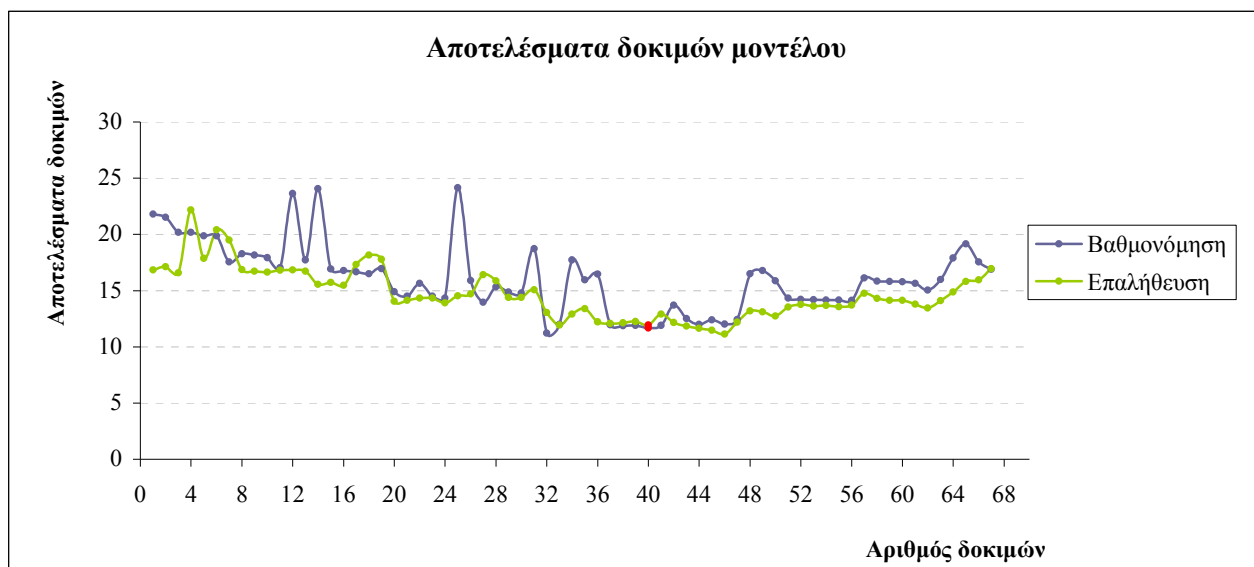
Ο κύκλος όλων των δοκιμών που έγιναν μέχρι το σημείο αυτό δίνει και το καλύτερο αποτέλεσμα βαθμονόμησης και επαλήθευσης του μοντέλου, που θα παρουσιαστεί εκτενέστερα παρακάτω. Πραγματοποιούνται και άλλες δοκιμές με στόχο τη βελτίωση των διαγραμμάτων αποθήκευσης ορισμένων κυττάρων, όπως το 15, οι οποίες όμως αν και βελτιώνουν τη λειτουργία της αντίστοιχης δεξαμενής, δίνοντας ομαλά διαγράμματα, ωστόσο αυξάνουν την τιμή της στοχικής συνάρτησης και την απόκλιση των προσομοιωμένων υδρογραφημάτων των πηγών από τα μετρημένα. Για το λόγο αυτό, δεν κρίνεται σκόπιμο οι δοκιμές αυτές να αναλυθούν περαιτέρω. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι μία από τις αλλαγές που βελτιώνει σημαντικά τη λειτουργία του συγκεκριμένου κυττάρου (15) είναι ο αποκλεισμός της επικοινωνίας με το κύτταρο 16 προς το οποίο διώχνει νερά. Η λύση αυτή, όμως, αφενός δημιουργεί τα γενικότερα προβλήματα που προαναφέρθηκαν, αφετέρου δεν μπορεί να είναι γνωστό το πόσο συμφωνεί με τις πραγματικές συνθήκες ροής, δεδομένου ότι πρόκειται για πολύπλοκους υπόγειους μηχανισμούς. Για τους λόγους αυτούς και απορρίπτεται.

Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 34) απεικονίζονται τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών που έγιναν για τη ρύθμιση του μοντέλου. Αυτή που τελικά επιλέγεται αντιστοιχεί στο νούμερο 40 και δίνει τιμή βαθμονόμησης 11,684 και τιμή επαλήθευσης 11,922. Οι υπόλοιπες απορρίφθηκαν για λόγους όπως:

- Μικρή τιμή βαθμονόμησης αλλά με σημαντική απόκλιση από την τιμή της επαλήθευσης και το αντίστροφο.
- Πολύ μικρή απόκλιση τιμών βαθμονόμησης και επαλήθευσης, αλλά μεγάλη τιμή της στοχικής συνάρτησης.
- Είναι πιθανό οι τιμές βαθμονόμησης και επαλήθευσης να είναι μικρές και να συγκλίνουν, αλλά σε κάποιο από τα επιμέρους διαγράμματα των σημείων ελέγχου, να μην είναι καλή η ταύτιση προσομοιωμένων και μετρημένων τιμών. Στην περίπτωση αυτή ίσως προτιμηθεί ένα αποτέλεσμα του μοντέλου που δίνει λίγο μεγαλύτερη τιμή της στοχικής συνάρτησης, αλλά οι τιμές των κριτηρίων

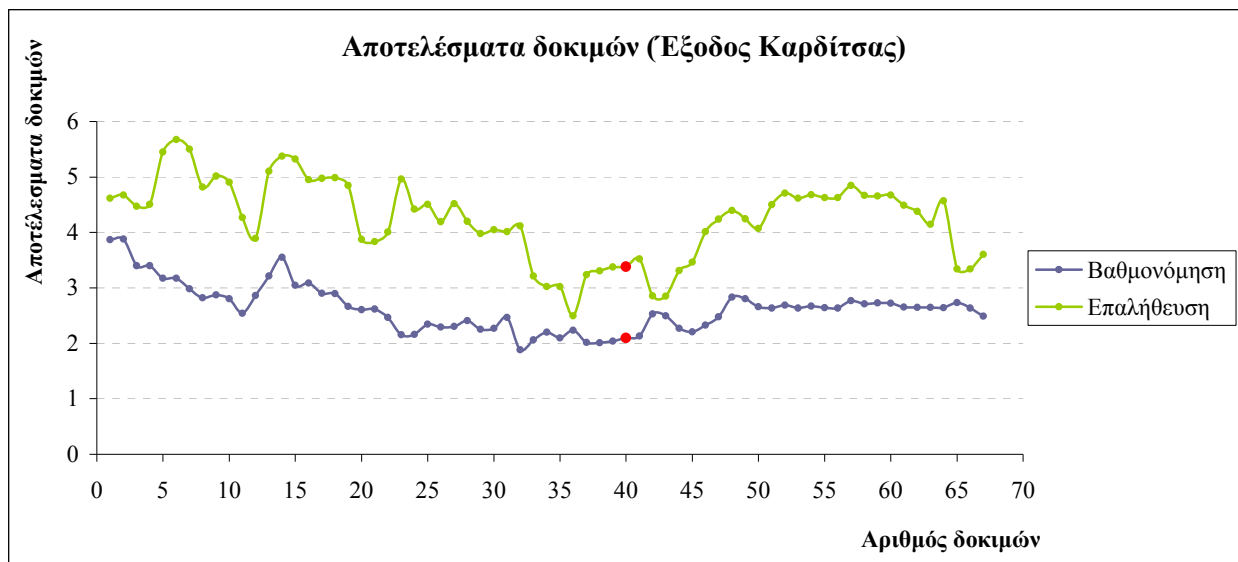
προσαρμογής (π.χ. η αποτελεσματικότητα) είναι εξίσου καλές για όλα τα σημεία ελέγχου ή τουλάχιστον για τα σημαντικότερα από αυτά. Για παράδειγμα, μπορεί να είναι σημαντικότερη η μεγάλη τιμή της αποτελεσματικότητας στην έξοδο της λεκάνης, σε σχέση με μια μεγάλη τιμή της σε μια πηγή που οι υπάρχουσες μετρήσεις ενδέχεται να είναι ελλειπείς ή ο μηχανισμός λειτουργίας της είναι πολύπλοκος και όχι πλήρως γνωστός.

Γενικά, παρατηρείται μείωση της τιμής της στοχικής συνάρτησης καθώς προχωράει η ρύθμιση του μοντέλου, με εξαίρεση κάποια ακρότατα που στη συνέχεια βελτιώνονται ή απορρίπτονται. Η καθοδική σε γενικές γραμμές τάση που παρουσιάζει το γράφημα (έως τη δοκιμή 44 περίπου) δείχνει την αξία της χειροκίνητης – αυτόματης βαθμονόμησης, όπου οι συνεχείς επεμβάσεις του χρήστη λειτουργούν προς την κατεύθυνση της βελτίωσης. Άλλωστε και οι μεγάλες τιμές της βαθμονόμησης αντιστοιχούν συνήθως στην πρώτη δοκιμή μετά από μια επέμβαση στις αρχικές και οριακές συνθήκες του μοντέλου. Με περαιτέρω ρύθμιση του μοντέλου, η τιμή αυτή μειώνεται και δίνει καλύτερα αποτελέσματα από τις προηγούμενες δοκιμές. Μετά τη δοκιμή 48 παρατηρείται αύξηση των τιμών βαθμονόμησης και επαλήθευσης. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν κάποιες επεμβάσεις στις συνθήκες του μοντέλου, οι οποίες παρά τη ρύθμιση δεν οδήγησαν σε καλό αποτέλεσμα και τελικά απορρίφθηκαν.

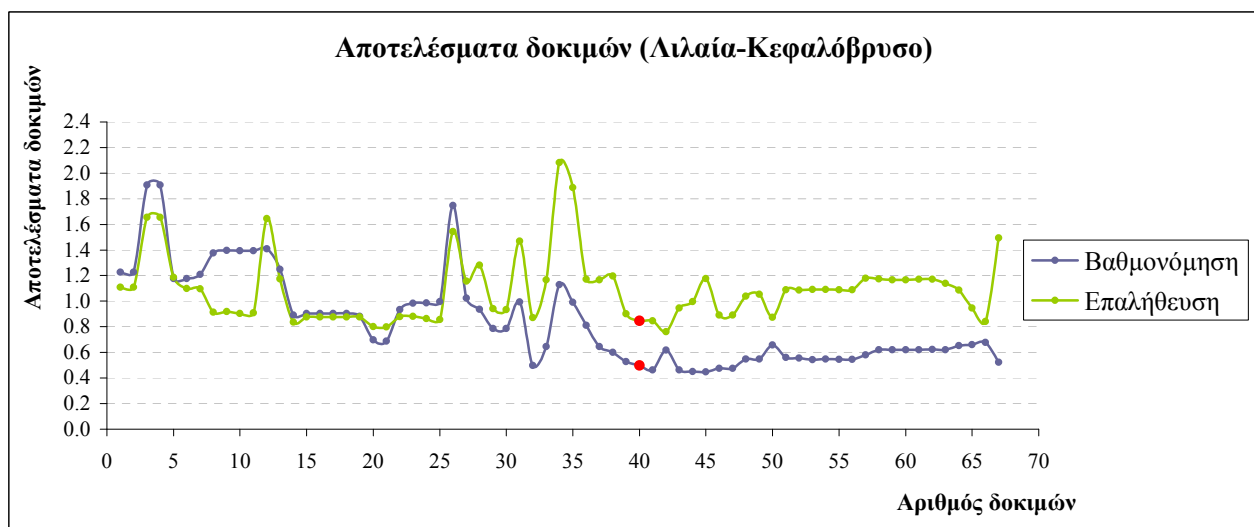


Εικόνα 34: Οι τιμές του μέτρου επίδοσης του μοντέλου για τη βαθμονόμηση και την επαλήθευση που προέκυψαν από το σύνολο δοκιμών του μοντέλου. Με κόκκινο σημειώνεται η δοκιμή που τελικά επελέγη ως αυτή που έδωσε το καλύτερο αποτέλεσμα.

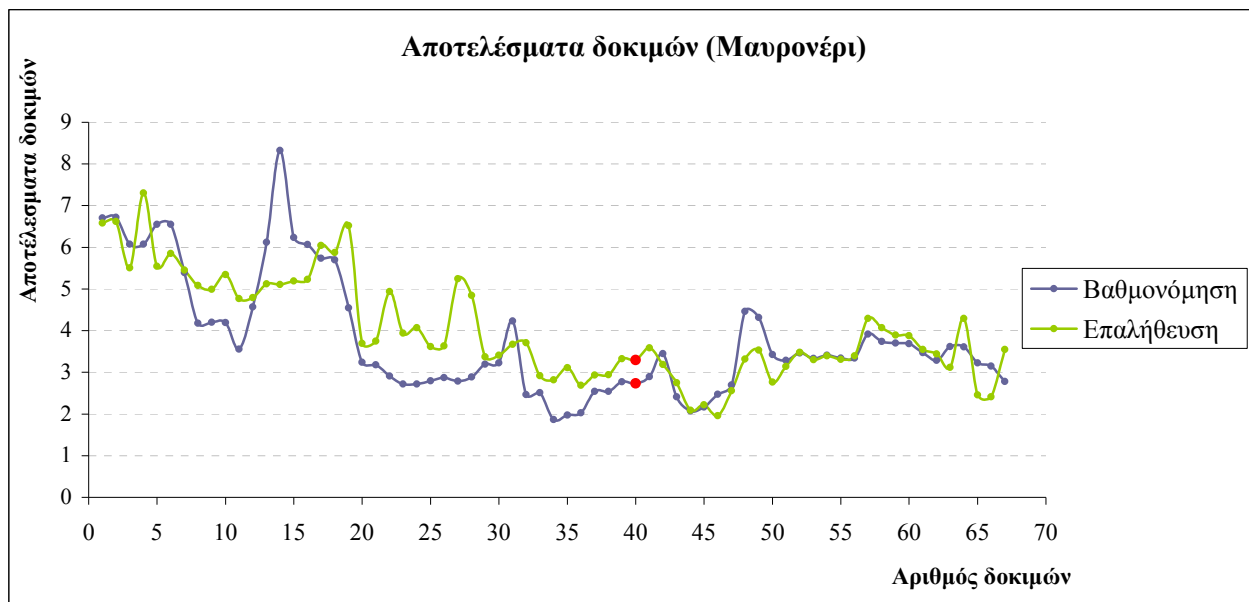
Ακολουθούν παρόμοια διαγράμματα με το συνολικό αριθμό δοκιμών για ορισμένα σημεία ελέγχου της λεκάνης (Εικόνες 35 – 38):



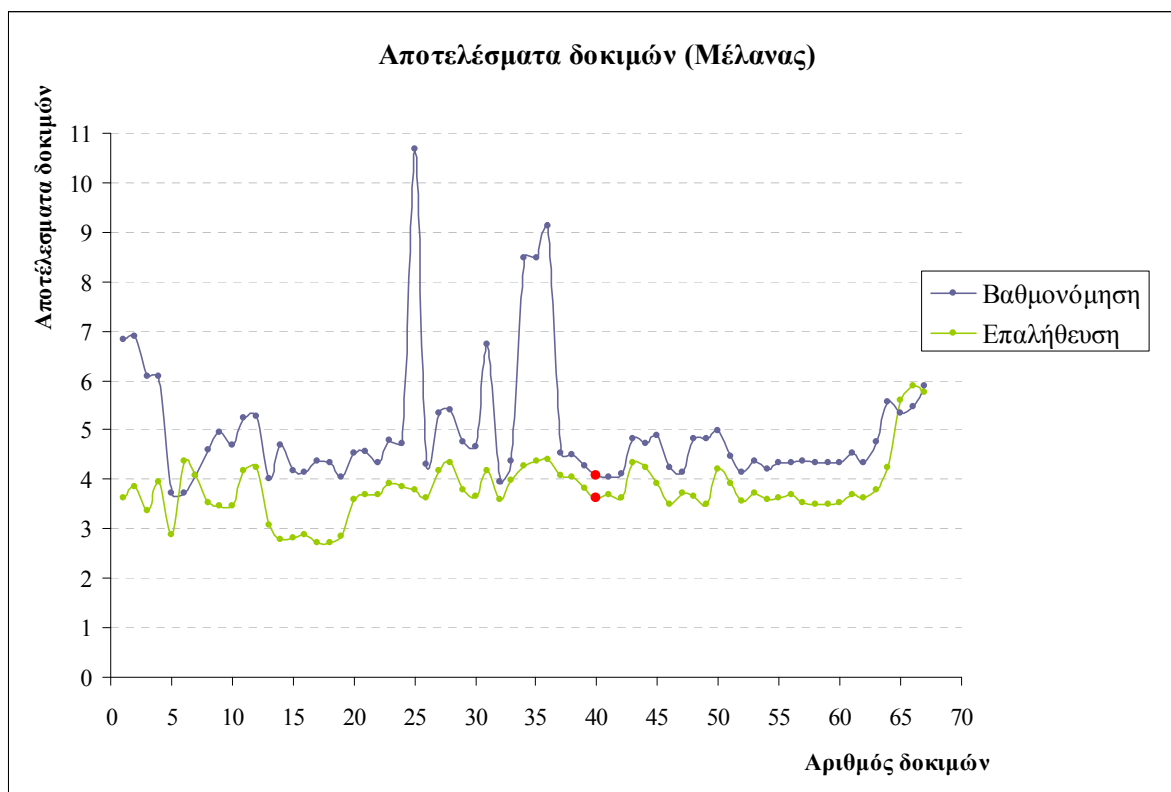
Εικόνα 35: Οι τιμές του μέτρου επίδοσης του μοντέλου για το σύνολο δοκιμών στην έξοδο Καρδίτσας. Με κόκκινο σημειώνεται η δοκιμή με το καλύτερο αποτέλεσμα.



Εικόνα 36: Οι τιμές του μέτρου επίδοσης του μοντέλου για τη βαθμονόμηση και επαλήθευση στο σύνολο δοκιμών στις πηγές Λιλαία – Κεφαλόβρυσο. Με κόκκινο σημειώνεται η δοκιμή με το καλύτερο αποτέλεσμα.



Εικόνα 37: Τα αποτελέσματα βαθμονόμησης και επαλήθευσης (μέτρο επίδοσης) για το σύνολο δοκιμών του μοντέλου στην πηγή Μαυρονερίου. Με κόκκινο σημειώνεται η δοκιμή με το καλύτερο αποτέλεσμα.

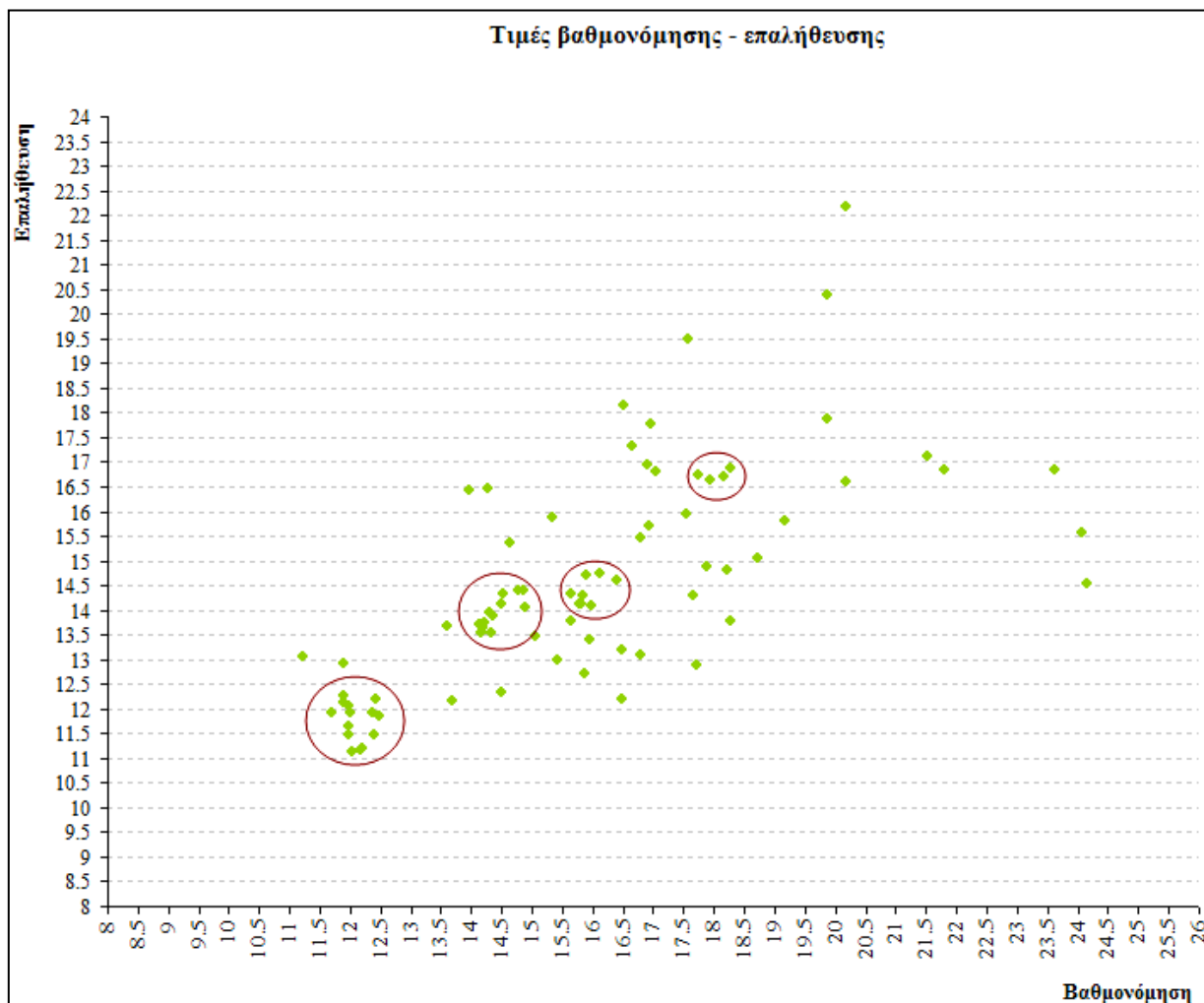


Εικόνα 38: Τα αποτελέσματα βαθμονόμησης και επαλήθευσης (μέτρο επίδοσης) για το σύνολο δοκιμών του μοντέλου στις πηγές Μέλανα. Με κόκκινο σημειώνεται η δοκιμή με το καλύτερο αποτέλεσμα.

Από τα παραπάνω διαγράμματα, φαίνεται ότι στις περισσότερες θέσεις ελέγχου υπάρχει απόκλιση μεταξύ των τιμών βαθμονόμησης και επαλήθευσης, με μικρές εξαιρέσεις. Αυτό επιβεβαιώνει σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως στις καρστικές πηγές Μέλινα, το γεγονός ότι πέρα από την κατάλληλη επιλογή παραμέτρων ή τις κατάλληλες διορθωτικές επεμβάσεις του χρήστη του μοντέλου, οι πολύπλοκοι μηχανισμοί των υδρολογικών διεργασιών μπορούν να επηρεάσουν το αποτέλεσμα της ρύθμισης χωρίς να είναι δυνατή η πρόβλεψη ή η κατανόησή τους. Έτσι, πέρα από ένα σημείο είναι δύσκολο οι όποιες διορθώσεις και δοκιμές να έχουν σημαντικά βελτιωτικό αποτέλεσμα, τουλάχιστον όσον αφορά τα διαθέσιμα δεδομένα έρευνας και μετρήσεων.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί (Εικόνα 39) παρουσιάζονται οι τιμές της βαθμονόμησης σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές επαλήθευσης. Παρατηρείται ότι υπάρχουν τέσσερις περιοχές του διαγράμματος, όπου τα αποτελέσματα βρίσκονται πολύ κοντά. Οι περιοχές αυτές αντιστοιχούν σε κάποιο αποτέλεσμα εφαρμογής του μοντέλου, το οποίο στη συνέχεια με μικρές διορθώσεις, βελτιώνεται σταδιακά. Από τις περιοχές αυτές ενδιαφέρον παρουσιάζει η πρώτη (κοντά στην αρχή των αξόνων), η οποία περιέχει μία δεκάδα, περίπου, καλών αποτελεσμάτων, μεταξύ των οποίων η δοκιμή που επιλέχθηκε. Στην περιοχή αυτή όλες οι λύσεις δίνουν καλύτερο αποτέλεσμα και στη βαθμονόμηση και στην επαλήθευση, ενώ μεταξύ τους είναι μαθηματικά ισοδύναμες. Αυτό σημαίνει ότι, μεταξύ δύο τέτοιων λύσεων, η μία υπερτερεί ως προς το αποτέλεσμα της βαθμονόμησης και η άλλη ως προς την επαλήθευση. Για την επιλογή της «καλύτερης», απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση, με βάση άλλα κριτήρια και την υδρολογική εμπειρία.

Στον Πίνακα 11 περιέχονται συγκεντρωμένα τα καλύτερα αποτελέσματα των δοκιμών που ανήκουν στην ομάδα που προαναφέρεται (Εικόνα 39), ώστε να μπορεί να γίνει άμεση σύγκρισή τους. Η πρώτη δοκιμή (με έντονους χαρακτήρες) είναι αυτή που επιλέγεται ως η «καλύτερη».



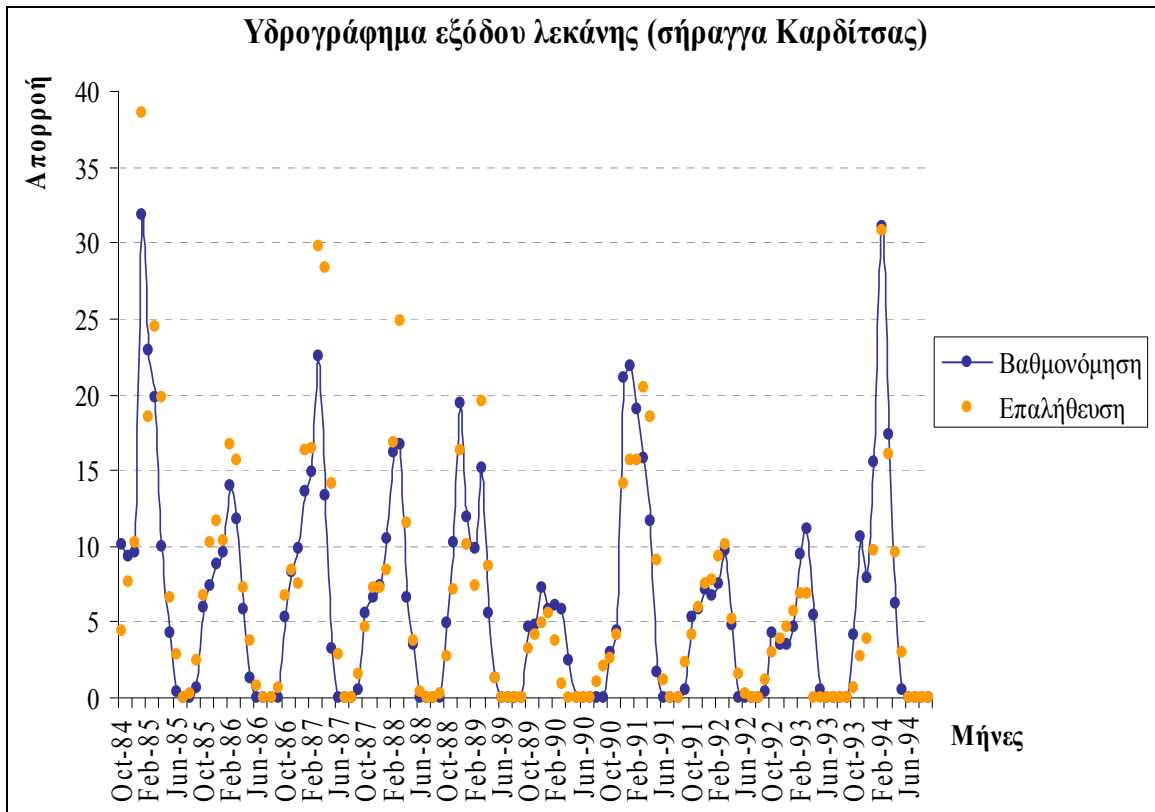
Εικόνα 39: Διάγραμμα τιμών επαλήθευσης – βαθμονόμησης (μέτρο επίδοση μοντέλου) για τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν. Με κύκλους σημειώνονται ομάδες αποτελεσμάτων με παραπλήσιες τιμές. Από την ομάδα με τα καλύτερα αποτελέσματα (πιο κοντά στην αρχή των αξόνων) επιλέγεται τελικά μία δοκιμή ως βέλτιστη.

Ακολουθούν τα υδρογραφήματα μετρημένων και προσομοιωμένων τιμών για κάθε ένα από τα σημεία ελέγχου του Βοιωτικού Κηφισού, όπως προέκυψαν από το βέλτιστο αποτέλεσμα της εφαρμογής του μοντέλου. Τα διαγράμματα αφορούν την έξοδο της λεκάνης απορροής (Εικόνα 40), καθώς και τις πηγές Λιλαία – Κεφαλόβρυσο, Μέλανας, Αγία Παρασκευή, Έρκυνα, Μαυρονέρι και Πολυγύρα (Εικόνες 41 - 46). Επίσης, για κάθε σημείο ελέγχου παρατίθενται και οι τιμές των κριτηρίων προσαρμογής (Πίνακες 12 - 18). Σε ορισμένα κριτήρια προσαρμογής δεν υπάρχουν τιμές λόγω της έλλειψης μετρήσεων κατά τα έτη '92 και '93.

Πίνακας 11: Οι τιμές βαθμονόμησης και επαλήθευσης (καθολικό μέτρο επίδοσης) και αποτελεσματικότητας στα σημεία ελέγχου για τις 11 καλύτερες δοκιμές.

| Δοκιμή | Αποτέλεσμα μοντέλου (μέτρο επίδοσης) | | Αποτελεσματικότητα στα σημεία ελέγχου | | | | | |
|--------|---|---------------|---------------------------------------|--------------|----------------------|--------------|--------------|--------------|
| | | | Έξοδος λεκάνης | | Λιλαία - Κεφαλόβρυσο | | Μαυρονέρι | |
| | Βαθμονόμηση | Επαλήθευση | Βαθμ/ση | Επαλήθευση | Βαθμ/ση | Επαλήθευση | Βαθμ/ση | Επαλήθευση |
| 1 | 11.684 | 11.922 | 0.859 | 0.765 | 0.752 | 0.581 | 0.571 | 0.360 |
| 2 | 11.897 | 12.257 | 0.866 | 0.769 | 0.737 | 0.553 | 0.562 | 0.339 |
| 3 | 11.966 | 12.075 | 0.868 | 0.780 | 0.683 | 0.427 | 0.508 | 0.359 |
| 4 | 11.878 | 12.144 | 0.869 | 0.775 | 0.707 | 0.413 | 0.508 | 0.360 |
| 5 | 12.357 | 11.916 | 0.813 | 0.798 | 0.778 | 0.503 | 0.407 | 0.367 |
| 6 | 12.189 | 11.187 | 0.814 | 0.809 | 0.778 | 0.498 | 0.185 | 0.317 |
| 7 | 12.179 | 11.179 | 0.813 | 0.809 | 0.778 | 0.498 | 0.186 | 0.318 |
| 8 | 11.980 | 11.468 | 0.815 | 0.790 | 0.778 | 0.454 | 0.507 | 0.493 |
| 9 | 12.393 | 11.486 | 0.840 | 0.756 | 0.780 | 0.420 | 0.565 | 0.517 |
| 10 | 12.028 | 11.142 | 0.829 | 0.686 | 0.763 | 0.559 | 0.549 | 0.608 |
| 11 | 12.423 | 12.190 | 0.832 | 0.670 | 0.763 | 0.559 | 0.530 | 0.454 |

| Δοκιμή | Αποτελεσματικότητα στα σημεία ελέγχου | | | | | | | |
|--------|---------------------------------------|------------|--------------|--------------|---------------|--------------|---------------|------------|
| | Αγία Παρασκευή | | Έρκυνα | | Μέλανας | | Πολυγύρα | |
| | Βαθμ/ση | Επαλήθευση | Βαθμ/ση | Επαλήθευση | Βαθμ/ση | Επαλήθευση | Βαθμ/ση | Επαλήθευση |
| 1 | 0.367 | - | 0.402 | 0.245 | -0.022 | 0.092 | -0.024 | - |
| 2 | 0.429 | - | 0.448 | 0.177 | -0.071 | 0.048 | -0.143 | - |
| 3 | 0.461 | - | 0.337 | 0.362 | -0.129 | -0.021 | -0.023 | -0.023 |
| 4 | 0.458 | - | 0.343 | 0.351 | -0.125 | -0.010 | 0.001 | - |
| 5 | 0.376 | - | 0.465 | 0.031 | -0.197 | -0.071 | -0.080 | - |
| 6 | 0.302 | - | 0.465 | 0.036 | -0.158 | -0.012 | -0.051 | - |
| 7 | 0.293 | - | 0.465 | 0.036 | -0.156 | -0.010 | -0.041 | - |
| 8 | 0.180 | - | 0.465 | 0.037 | -0.103 | -0.024 | -0.065 | - |
| 9 | 0.255 | - | 0.417 | 0.307 | -0.224 | 0.019 | -0.335 | - |
| 10 | 0.217 | - | 0.410 | 0.225 | -0.062 | 0.128 | -0.121 | - |
| 11 | 0.191 | - | - | - | -0.036 | 0.071 | -0.204 | - |



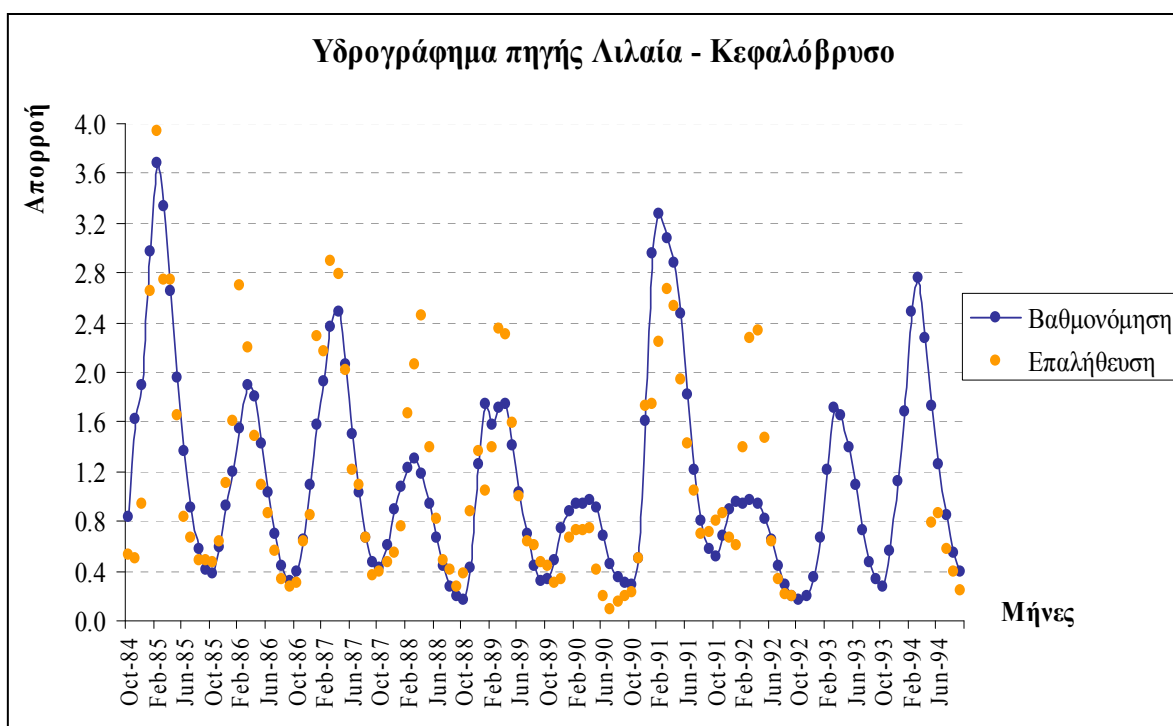
Εικόνα 40: Διάγραμμα προσομοιωμένων – μετρημένων τιμών στην έξοδο της λεκάνης.

Όσον αφορά τα υδρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης απορροής, στη σήραγγα Καρδίτσας (Εικόνα 40), παρατηρείται πολύ ικανοποιητική προσαρμογή των προσομοιωμένων τιμών, κυρίως των χαμηλών και των μηδενικών. Εξίσου καλή είναι η προσαρμογή και των υψηλών τιμών με εξαίρεση κάποιες μεμονωμένες μετρήσεις των ετών '85 και '87. Αυτό επιβεβαιώνεται και από την τιμή της αποτελεσματικότητας του μοντέλου που κυμαίνεται γύρω στο 0,86 (ικανοποιητικά κοντά στη μονάδα) για την τιμή της βαθμονόμησης και 0,76 για την τιμή της επαλήθευσης. Έτσι, αναπαριστά πολύ καλά τις μηνιαίες διακυμάνσεις της παροχής με μέγιστες τιμές τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο και τις ελάχιστες τους καλοκαιρινούς μήνες.

Πίνακας 12: Οι τιμές των κριτηρίων προσαρμογής στην έξοδο της λεκάνης.

| Κριτήρια προσαρμογής | Βαθμονόμηση | Επαλήθευση | Συντελεστής βάρους |
|-------------------------------------|-------------|------------|--------------------|
| Αποτελεσματικότητα μοντέλου | 0,859 | 0,765 | 8,0 |
| Μεροληψία μέσης τιμής | -0,101 | 0,187 | 0,1 |
| Μεροληψία τυπικής απόκλισης | -0,144 | 0,210 | 0,0 |
| Μεροληψία συντ/στή μεταβλητότητας | -0,049 | 0,019 | 0,0 |
| Σφάλμα αναπαραγωγής μηδενικών τιμών | 0,960 | 1,482 | 1,0 |
| Ποινή αναπαραγωγής τάσης | 1,174 | 0,000 | 0,0 |

Επίσης, καλή προσαρμογή στις μετρημένες τιμές παρουσιάζει και το υδρογράφημα του συγκροτήματος των πηγών Λιλαία – Κεφαλόβρυσο (Εικόνα 41) με αποτελεσματικότητα 0,752 όσον αφορά τη βαθμονόμηση, αλλά μικρότερη τιμή στην επαλήθευση, δηλαδή 0,581. Το προσομοιωμένο υδρογράφημα δεν προσεγγίζει πολύ καλά τις μέγιστες μετρημένες τιμές των ετών '86 και '88 – '89, ενώ προβλήματα υπάρχουν και στα υδρολογικά έτη με ελλείψεις μετρήσεων ('92 έως Απρίλιο του '94). Το χαρακτηριστικό των ετών '92 και '93 ήταν οι μεγάλες χιονοπτώσεις, για τις οποίες, όμως, δεν υπάρχουν αξιόπιστες μετρήσεις (Ευστρατιάδης, 2008, σ. 306). Οι ελλείψεις αυτές προφανώς επηρεάζουν το αποτέλεσμα της επαλήθευσης. Πρέπει, παρ' όλα αυτά, να παρατηρηθεί ότι το προσομοιωμένο υδρογράφημα, ακόμα και όταν δεν προσεγγίζει τις μετρημένες τιμές, αναπαριστά την αναμενόμενη μηνιαία διακύμανση της παροχής.

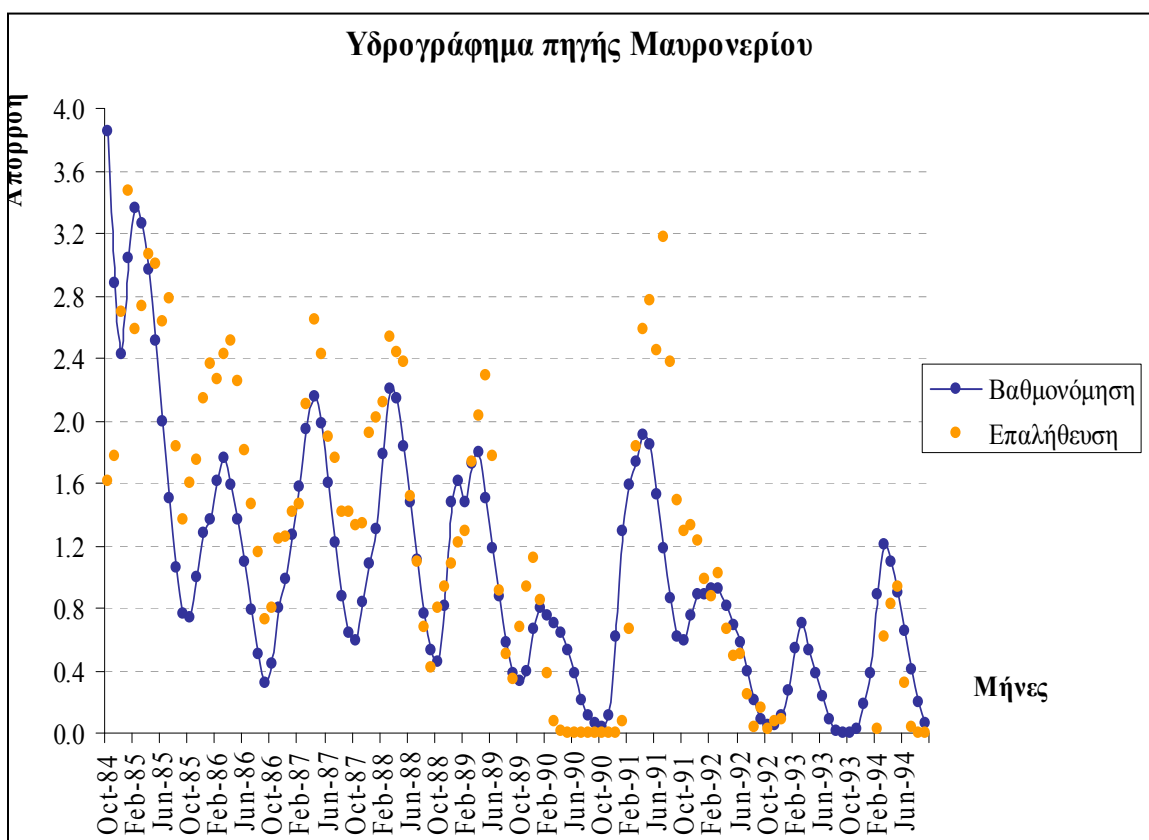


Εικόνα 41: Διάγραμμα προσομοιωμένων – μετρημένων τιμών στις πηγές Λιλαία - Κεφαλόβρυσο.

Πίνακας 13: Οι τιμές των κριτηρίων προσαρμογής για τις πηγές Λιλαία – Κεφαλόβρυσο.

| Κριτήρια προσαρμογής | Βαθμονόμηση | Επαλήθευση | Συντελεστής βάρους |
|-------------------------------------|-------------|------------|--------------------|
| Αποτελεσματικότητα μοντέλου | 0,752 | 0,581 | 2,0 |
| Μεροληψία μέσης τιμής | 0,012 | 0,069 | 0,1 |
| Μεροληψία τυλικής απόκλισης | -0,239 | -0,035 | 0,0 |
| Μεροληψία συντ/στή μεταβλητότητας | -0,248 | -0,098 | 0,0 |
| Σφάλμα αναπαραγωγής μηδενικών τιμών | - | - | 1,0 |
| Ποινή αναπαραγωγής τάσης | 0,000 | 0,000 | 0,0 |

Το προσομοιωμένο υδρογράφημα της πηγής Μαυρονερίου (Εικόνα 42) παρουσιάζει λιγότερο ικανοποιητική προσαρμογή σε σχέση με τα προηγούμενα. Η τιμή της αποτελεσματικότητας για τη βαθμονόμηση είναι 0,571 και για την επαλήθευση 0,360. Το υδρογράφημα της προσομοίωσης ακολουθεί γενικά τη διακύμανση των μετρημένων τιμών, δείχνει όμως να υστερεί ως προς τις μέγιστες τιμές κάθε έτους. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρουσιάζονται τα υδρολογικά έτη '85 και '91 – '92, ενώ στα υπόλοιπα η προσαρμογή είναι σχετικά ικανοποιητική. Μεγάλες αποκλίσεις ως προς τις χαμηλές τιμές υπάρχουν το έτος '93, λόγω έλλειψης μετρήσεων. Βέβαια, υπάρχει πιθανότητα η διαμόρφωση του μετρημένου υδρογραφήματος να οφείλεται και στον πολύπλοκο μηχανισμό λειτουργίας της πηγής, που επηρεάζεται από το καρστικοποιημένο εδαφικό υπόβαθρο της λεκάνης, και έτσι να υφίστανται παράγοντες που δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη από το μοντέλο.

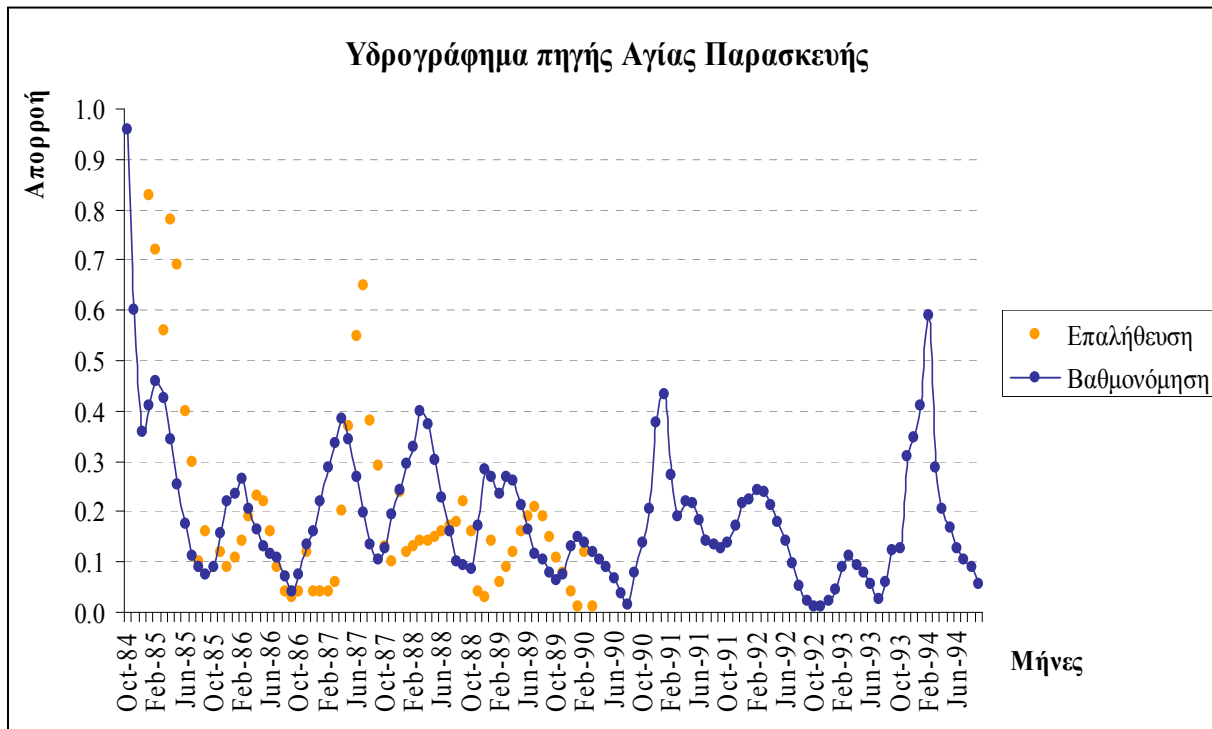


Εικόνα 42: Διάγραμμα προσομοιωμένων – μετρημένων τιμών στην πηγή Μαυρονερίου.

Πίνακας 14: Οι τιμές των κριτηρίων προσαρμογής για τις πηγές Μαυρονερίου.

| Κριτήρια προσαρμογής | Βαθμονόμηση | Επαλήθευση | Συντελεστής βάρους |
|-------------------------------------|--------------------|-------------------|---------------------------|
| Αποτελεσματικότητα μοντέλου | 0,571 | 0,360 | 2,0 |
| Μεροληψία μέσης τιμής | -0,124 | 0,165 | 0,1 |
| Μεροληψία τυπικής απόκλισης | -0,184 | -0,433 | 0,0 |
| Μεροληψία συντ/στή μεταβλητότητας | -0,068 | -0,513 | 0,0 |
| Σφάλμα αναπαραγωγής μηδενικών τιμών | 0,466 | 0,499 | 4,0 |
| Ποινή αναπαραγωγής τάσης | 1,742 | 0,000 | 0,0 |

Η πηγή της Αγίας Παρασκευής (Εικόνα 43) είναι από τις πιο προβληματικές όσον αφορά την έλλειψη μετρήσεων, καθώς στοιχεία υπάρχουν έως και το Μάρτιο του '90. Η τιμή της αποτελεσματικότητας της βαθμονόμησης είναι 0,367. Το προσομοιωμένο υδρογράφημα δεν προσεγγίζει τις μέγιστες τιμές απορροής που έχουν καταγραφεί, ενώ η διακύμανσή του δείχνει να εκδηλώνεται με μια «υστέρηση» σε σχέση με τη διακύμανση του μετρημένου υδρογραφήματος. Επισημαίνεται πάντως ότι η υστέρηση αυτή, για τα έτη '87 και '88 φαίνεται να συμπίπτει με την αναμενόμενη χρονικά περίοδο εμφάνισης της μέγιστης απορροής (τους πρώτους μήνες της άνοιξης), ενώ αντίθετα η μέγιστες μετρημένες τιμές παρουσιάζονται τους καλοκαιρινούς μήνες ή τους πρώτους φθινοπωρινούς. Και δεδομένου ότι από τα βροχομετρικά στοιχεία δεν προκύπτει κάποιο ιδιαίτερο μετεωρολογικό φαινόμενο (π.χ. μεγάλες βροχοπτώσεις την άνοιξη προς το καλοκαίρι), ίσως θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και εδώ ο μηχανισμός λειτουργίας της πηγής, η οποία εκδηλώνεται σε καρστικά εδάφη. Η καθυστερημένη εμφάνιση μέγιστης μετρημένης απορροής για το έτος '89, ίσως εξαρτάται από μια σχετικά μεγάλη για την καλοκαιρινή εποχή βροχόπτωση που συνέβη το μήνα Ιούλιο.

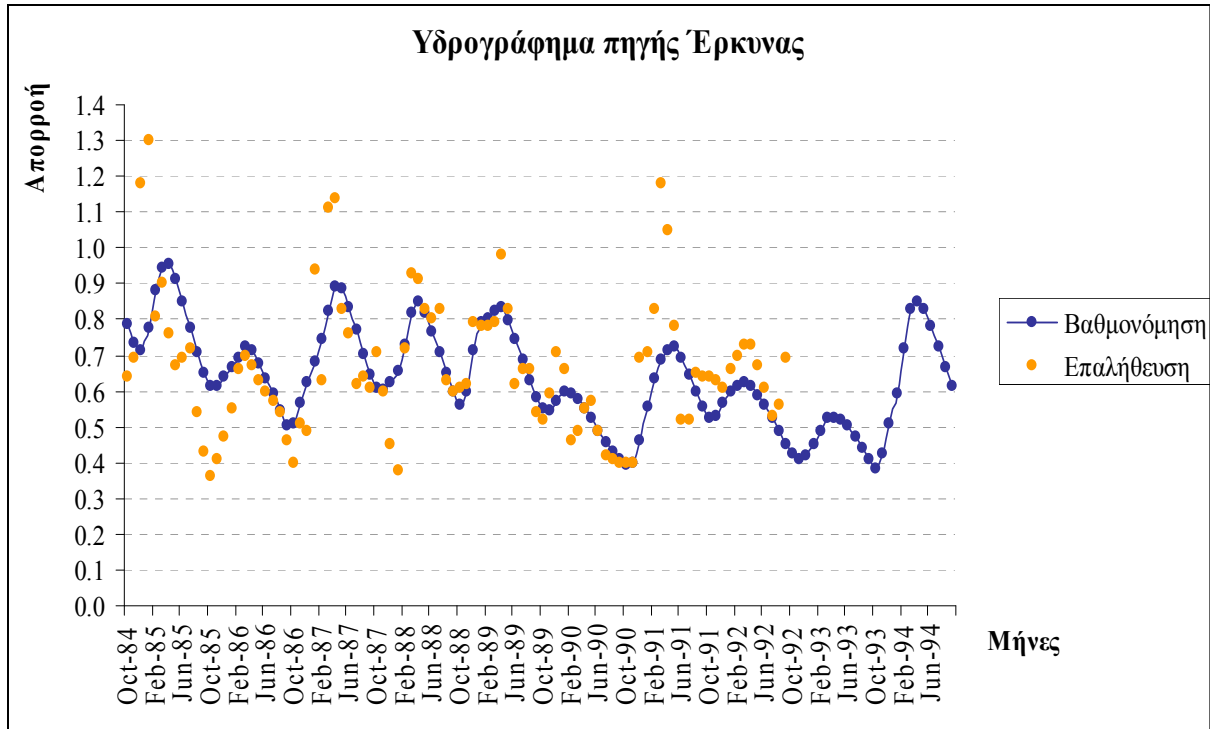


Εικόνα 43: Διάγραμμα προσομοιωμένων – μετρημένων τιμών στην πηγή Αγίας Παρασκευής.

Πίνακας 15: Οι τιμές των κριτηρίων προσαρμογής για τις πηγές Αγίας Παρασκευής.

| Κριτήρια προσαρμογής | Βαθμονόμηση | Επαλήθευση | Συντελεστής βάρους |
|-------------------------------------|-------------|------------|--------------------|
| Αποτελεσματικότητα μοντέλου | 0,367 | - | 1,0 |
| Μεροληψία μέσης τιμής | 0,035 | - | 0,1 |
| Μεροληψία τυπικής απόκλισης | -0,526 | - | 0,0 |
| Μεροληψία συντ/στή μεταβλητότητας | -0,542 | - | 0,0 |
| Σφάλμα αναπαραγωγής μηδενικών τιμών | - | - | 1,0 |
| Ποινή αναπαραγωγής τάσης | 1,865 | 0,000 | 0,0 |

Για την πηγή Έρκυνα (Εικόνα 44) δεν υπάρχουν μετρήσεις από το υδρολογικό έτος '92 και μετά. Η βαθμονόμηση του μοντέλου κρίνεται αρκετά ικανοποιητική με τιμή αποτελεσματικότητας ίση με 0,402 και αντίστοιχη τιμή για την επαλήθευση (0,245). Για τα υπόλοιπα έτη, η προσαρμογή του προσομοιωμένου διαγράμματος στο μετρημένο γίνεται αρκετά καλά, ακολουθώντας τη διακύμανσή του, χωρίς όμως να φτάνει τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές απορροής που έχουν καταγραφεί.



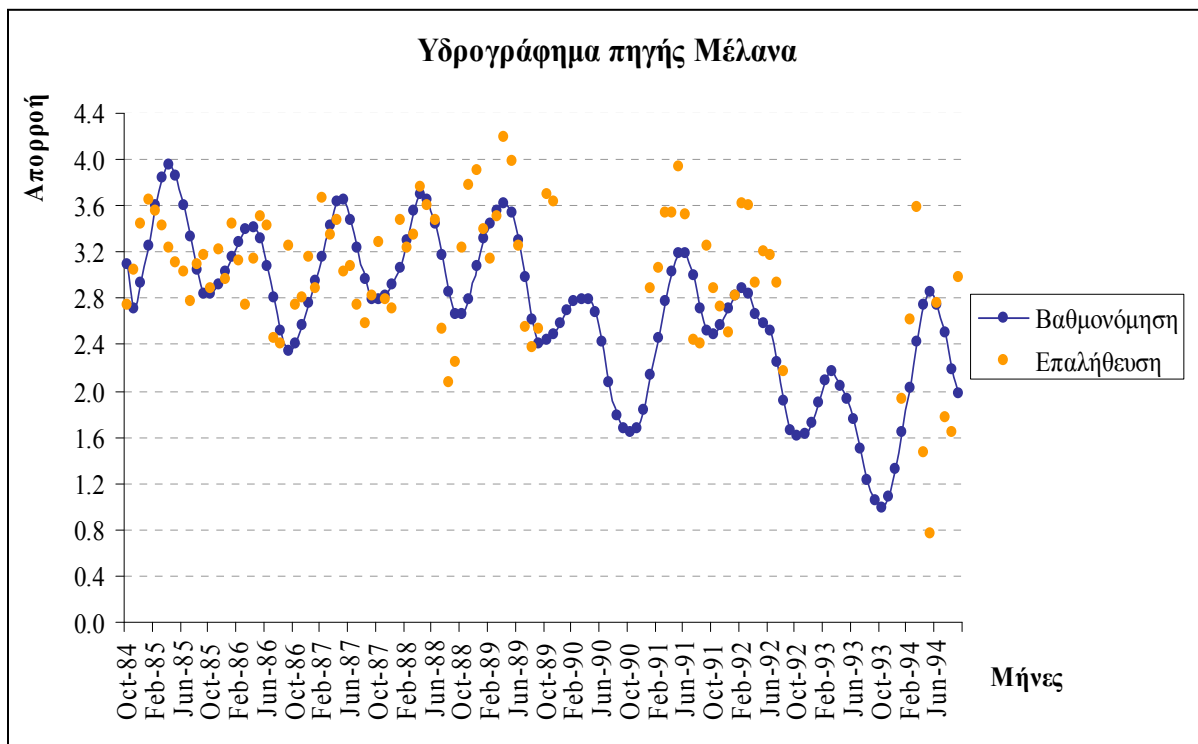
Εικόνα 44: Διάγραμμα προσομοιωμένων – μετρημένων τιμών στην πηγή Έρκυνα.

Πίνακας 16: Οι τιμές των κριτηρίων προσαρμογής για την πηγή Έρκυνα.

| Κριτήρια προσαρμογής | Βαθμονόμηση | Επαλήθευση | Συντελεστής βάρους |
|-------------------------------------|-------------|------------|--------------------|
| Αποτελεσματικότητα μοντέλου | 0,402 | 0,245 | 1,0 |
| Μεροληψία μέσης τιμής | 0,068 | -0,099 | 0,1 |
| Μεροληψία τυπικής απόκλισης | -0,403 | -0,479 | 0,0 |
| Μεροληψία συντ/στή μεταβλητότητας | -0,442 | -0,422 | 0,0 |
| Σφάλμα αναπαραγωγής μηδενικών τιμών | - | - | 1,0 |
| Ποινή αναπαραγωγής τάσης | 0,000 | 1,052 | 0,0 |

Οι διαθέσιμες μετρήσεις για την πηγή Μέλανα (Εικόνα 45) είναι ελλιπείς για τα υδρολογικά έτη '89 και '92. Τα αποτελέσματα του μοντέλου δίνουν αρνητική τιμή αποτελεσματικότητας για τη βαθμονόμηση και πολύ χαμηλή θετική για την επαλήθευση. Το προσομοιωμένο υδρογράφημα, με εξαίρεση τα έτη για τα οποία δεν είναι διαθέσιμες μετρήσεις, ακολουθεί σε γενικές γραμμές τη διακύμανση του αντίστοιχου μετρημένου, συχνά, όμως, δεν προσεγγίζει τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές του. Αυτή η συμπεριφορά κρίνεται ικανοποιητική, δεδομένου ότι στην πλειοψηφία των δοκιμών δεν επιτυγχάνεται θετική τιμή της αποτελεσματικότητας ή τουλάχιστον όχι πολύ μεγαλύτερη της μηδενικής τιμής. Η δυσκολία αυτή είναι βέβαιο ότι έγκειται στο γεγονός ότι η πηγή Μέλανας, που παρουσιάζει εξαιρετικά μεγάλες παροχές σε σχέση με τις υπόλοιπες πηγές, βρίσκεται σε ιδιαίτερα καρστικοποιημένη

περιοχή που συνορεύει και με αδιαπέρατους και με προσχωματικούς σχηματισμούς και η λειτουργία της είναι πολύ δύσκολο να προβλεφθεί. Άλλωστε, από τα διαθέσιμα βροχομετρικά στοιχεία φαίνεται ότι τα ύψη βροχής ακολουθούν τις αναμενόμενες τάξεις μεγέθους και στις συνηθισμένες χρονικές περιόδους για ένα υδρολογικό έτος.



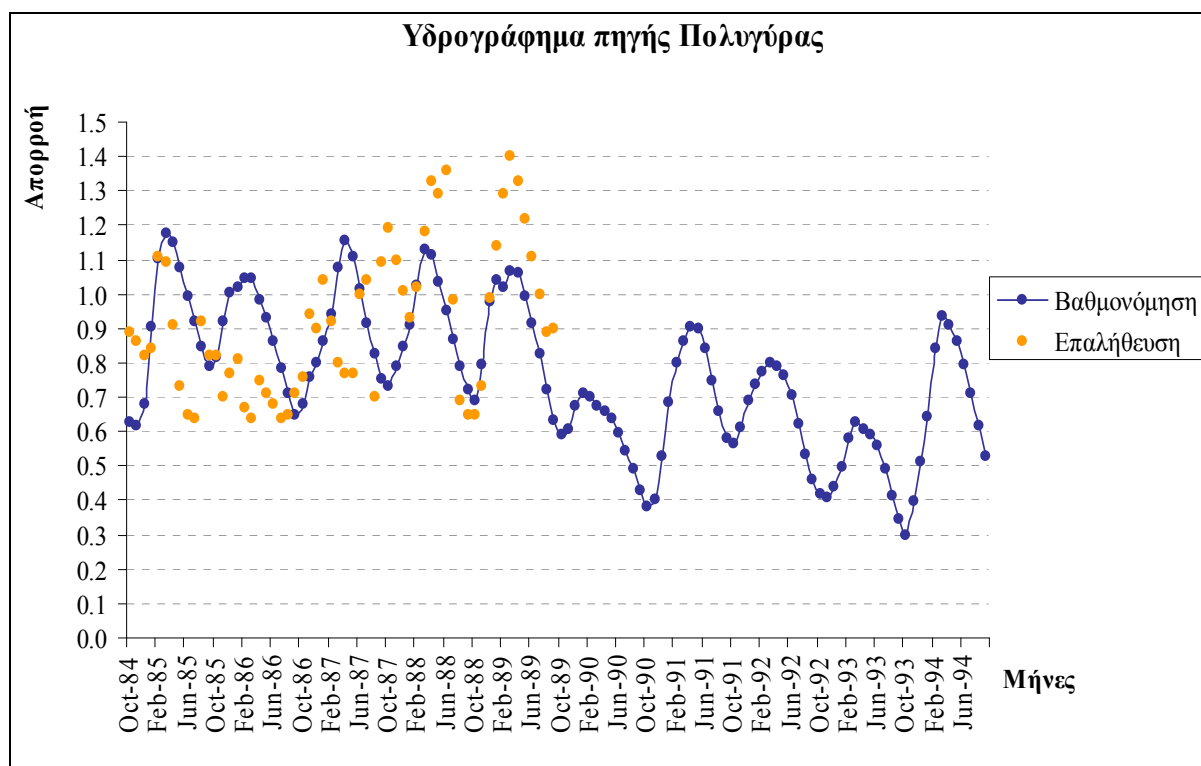
Εικόνα 45: Διάγραμμα προσομοιωμένων – μετρημένων τιμών στην πηγή Μέλανα.

Πίνακας 17: Οι τιμές των κριτηρίων προσαρμογής για τις πηγές Μέλανα.

| Κριτήρια προσαρμογής | Βαθμονόμηση | Επαλήθευση | Συντελεστής βάρους |
|-------------------------------------|-------------|------------|--------------------|
| Αποτελεσματικότητα μοντέλου | -0,022 | 0,092 | 4,0 |
| Μεροληψία μέσης τιμής | -0,004 | -0,049 | 0,1 |
| Μεροληψία τυπικής απόκλισης | -0,239 | -0,530 | 0,0 |
| Μεροληψία συντ/στή μεταβλητότητας | -0,236 | -0,506 | 0,0 |
| Σφάλμα αναπαραγωγής μηδενικών τιμών | - | - | 1,0 |
| Ποινή αναπαραγωγής τάσης | 1,012 | 0,000 | 0,0 |

Τέλος, όσον αφορά την πηγή Πολυγύρας, οι μετρήσεις της απορροής είναι διαθέσιμες μόνο μέχρι το υδρολογικό έτος '88. Η αποτελεσματικότητα του μοντέλου για τη διαδικασία βαθμονόμησης έχει αρνητική τιμή, κοντά στο 0. Το προσομοιωμένο διάγραμμα (Εικόνα 46) παρουσιάζει μια ομαλή γενικά διακύμανση για όλα τα έτη, με χαμηλότερες όμως τιμές για την περίοδο που δεν υπάρχουν μετρήσεις.

Αντιθέτως, το υδρογράφημα που προκύπτει από τις μετρήσεις δεν είναι ομαλό, παρουσιάζοντας μικρές τιμές της απορροής για τα έτη '85 και '86. Όπως συμβαίνει και με την πηγή Μέλανα, η Πολυγύρα εκφορτίζεται επίσης μέσω καρστικών σχηματισμών που βρίσκονται ανάμεσα σε αδιαπέρατους εδάφη και τις προσχώσεις της Κωπαΐδας, έχοντας μια εξίσου πολύπλοκη λειτουργία. Επιπλέον, οι βροχοπτώσεις στην περιοχή της λεκάνης που εκδηλώνεται η πηγή δεν παρουσιάζουν κάτι το ιδιαίτερο ως προς το ύψος βροχής ή τη χρονική περίοδο που συμβαίνουν, ώστε να δικαιολογείται η ασυνήθιστη μορφή του υδρογραφήματος, όπως θα συνέβαινε για παράδειγμα σε μια παρατεταμένη περίοδο ξηρασίας ή άλλα έκτακτα φαινόμενα.



Εικόνα 46: Διάγραμμα προσομοιωμένων – μετρημένων τιμών στην πηγή Πολυγύρας.

Πίνακας 18: Οι τιμές των κριτηρίων προσαρμογής για τις πηγές Πολυγύρας.

| Κριτήρια προσαρμογής | Βαθμονόμηση | Επαλήθευση | Συντελεστής βάρους |
|-------------------------------------|-------------|------------|--------------------|
| Αποτελεσματικότητα μοντέλου | -0,024 | - | 1,0 |
| Μεροληψία μέσης τιμής | -0,035 | - | 0,1 |
| Μεροληψία τυπικής απόκλισης | -0,349 | - | 0,0 |
| Μεροληψία συντ/στή μεταβλητότητας | -0,326 | - | 0,0 |
| Σφάλμα αναπαραγωγής μηδενικών τιμών | - | - | 1,0 |
| Ποινή αναπαραγωγής τάσης | 1,109 | 0,000 | 0,0 |

Στη δοκιμή αυτή που επιλέγεται ως το καλύτερο αποτέλεσμα του μοντέλου, υπάρχουν και επτά κύτταρα στα οποία έχουν τεθεί ποινές αναπαραγωγής τάσης. Τα κύτταρα αυτά είναι τα: 5, 7, 15, 17, 30, 31 και 36. Μετά τη ρύθμιση του μοντέλου εμφανίζουν πολύ ικανοποιητική διακύμανση στάθμης. Το κύτταρο 15 που εμφάνιζε ανοδική τάση στο σύνολο σχεδόν των δοκιμών του μοντέλου, θεωρείται ότι βελτιώθηκε επαρκώς, καθώς η αποθήκευση της αντίστοιχης υπόγειας δεξαμενής αν και σχετικά αυξημένη παρουσίασε σημαντική διακύμανση σε όλη τη χρονική περίοδο για την οποία ρυθμίστηκε το μοντέλο.

5.3.8. Σύγκριση αποτελεσμάτων προσεγγίσεων

Ακολουθεί πίνακας (19) με τις τιμές αποτελεσματικότητας βαθμονόμησης και επαλήθευσης, συγκεντρωτικά, για τα σημεία ελέγχου του μοντέλου για τις δύο προσεγγίσεις που έγιναν για την προσομοίωση της λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού (Ευστρατιάδης, 2008 και παρούσα εργασία). Σε γενικές γραμμές, οι τιμές που προέκυψαν από την εργασία αυτή είναι μικρότερες σε σχέση με τη μελέτη του 2008 (Ευστρατιάδης) στις θέσεις των πηγών, αλλά σχεδόν ίδιες για την έξοδο της λεκάνης απορροής (σήραγγα Καρδίτσας).

Οι τιμές αυτές κρίνονται αρκετά ικανοποιητικές δεδομένης αφενός της πολυπλοκότητας των μηχανισμών των υδρολογικών διεργασιών, αφετέρου της τήρησης της αρχής της φειδωλής παραμετροποίησης (principle of parsimony) που υλοποιήθηκε με ομαδοποίηση των παραμέτρων του υπόγειου συστήματος.

Πίνακας 19: Σύγκριση των τιμών αποτελεσματικότητας βαθμονόμησης και επαλήθευσης των δύο προσεγγίσεων με το υπολογιστικό πακέτο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.

| Σημεία ελέγχου του μοντέλου | Αποτελέσματα βαθμονόμησης | | Αποτελέσματα επαλήθευσης | |
|--------------------------------|---------------------------|------------------|--------------------------|------------------|
| | Μελέτη 2008 | Παρούσα εφαρμογή | Μελέτη 2008 | Παρούσα εφαρμογή |
| Έξοδος λεκάνης | 0,87 | 0,859 | 0,76 | 0,765 |
| Πηγές Λιλαίας | 0,806 | 0,752 | 0,607 | 0,581 |
| Μαυρονέρι | 0,693 | 0,571 | 0,601 | 0,360 |
| Αγία Παρασκευή | 0,724 | 0,367 | - | - |
| Έρκυνα | 0,431 | 0,402 | 0,458 | 0,245 |
| Μέλανας | 0,265 | -0,022 | 0,095 | 0,092 |
| Πολυγύρα | 0,372 | -0,024 | - | - |

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εφαρμογή αναπτύσσονται σε πέντε διαφορετικούς άξονες. Ο πρώτος αφορά τα βασικά σημεία σύγκρισης των δύο κυριότερων προσεγγίσεων που έχουν γίνει για την προσομοίωση της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού και εξηγεί γιατί το υπολογιστικό πακέτο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ υπερτερεί. Ο δεύτερος αναλύει τις κατευθύνσεις της παρούσας εργασίας και εξηγεί σε ποιες βελτιώσεις αποβλέπει σε σχέση με την προηγούμενη εφαρμογή του ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ. Στον τρίτο άξονα γίνεται αναφορά στα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου, ενώ στον τέταρτο αναπτύσσονται οι δυσκολίες που παρουσιάστηκαν τόσο κατά την προετοιμασία των δεδομένων όσο και κατά τη διαδικασία της εφαρμογής. Τέλος, προτείνονται κατευθύνσεις για πιθανή περαιτέρω διερεύνηση και επισημαίνονται οι ανάγκες σε δεδομένα και πληροφορίες που αν ήταν διαθέσιμα θα βοηθούσαν σημαντικά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

1. Για τη συγκεκριμένη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού έχουν γίνει στο παρελθόν αρκετές μελέτες προσομοίωσης των διεργασιών του υδρολογικού κύκλου με διάφορα μοντέλα προσομοίωσης. Οι πιο πρόσφατες και πλήρεις είναι δύο και χρησιμοποιούν το μοντέλο MODFLOW (Ναλμπάντης κ.ά., 2000 και 2002) και το υπολογιστικό πακέτο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ (Ευστρατιάδης κ.ά., 2006 και 2008) στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος του Ε.Μ.Π. Το ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, που χρησιμοποιείται και στην παρούσα εργασία, δείχνει να πλεονεκτεί στα εξής σημεία:
 - Το μοντέλο MODFLOW μελετά κυρίως την υπόγεια υδρολογία της λεκάνης, χωρίς οι επιφανειακές και υπόγειες διεργασίες να βρίσκονται σε αλληλεπίδραση, ενώ δύσκολα εντάσσονται οι ανθρώπινες επεμβάσεις (απολήψεις μέσω γεωτρήσεων, αρδεύσεις κλπ.) που επηρεάζουν το υδατικό ισοζύγιο.
 - Η χρήση του MODFLOW απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό φόρτο λόγω της διαίρεσης της περιοχής σε ένα πλήθος ορθογωνίων κανάβου που συχνά συνοδεύονται από ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων που πρέπει να εκτιμηθούν.
 - Στα πλαίσια του υπολογιστικού πακέτου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, η περιοχή μελέτης προσομοιώνεται με δύο μοντέλα που βρίσκονται σε αλληλεπίδραση και αναπαριστούν τις επιφανειακές και τις υπόγειες διεργασίες αντίστοιχα, καθώς και με ένα μοντέλο υδροσυστήματος, στο οποίο υπεισέρχεται η επίδραση των επεμβάσεων που έχουν γίνει στη λεκάνη για τη διαχείριση των υδατικών αποθεμάτων της (άντληση υδάτων για ύδρευση και άρδευση από γεωτρήσεις και λειτουργία υδραγωγείων και αρδευτικών συστημάτων).
 - Στο πακέτο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ υπάρχει δυνατότητα θέσεως στόχων, χρήσιμων σε συστήματα λήψης αποφάσεων.

- Το ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ συνεργάζεται με Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών για την εισαγωγή γεωγραφικών πληροφοριών που προσφέρουν πιστότερη αναπαράσταση των φυσικών χαρακτηριστικών της λεκάνης.
 - Στο ίδιο υπολογιστικό πακέτο δίνεται δυνατότητα ομαδοποίησης των παραμέτρων των μοντέλων, ώστε ο αριθμός τους τελικά να είναι ανεξάρτητος του βαθμού λεπτομέρειας στη διαμέριση της λεκάνης για ρεαλιστικότερη περιγραφή των χαρακτηριστικών της.
 - Στα πλαίσια εφαρμογής του ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ δίνεται η δυνατότητα χειροκίνητης – αυτόματης βαθμονόμησης του μοντέλου. Έτσι, ο χρήστης επεμβαίνει στη διαδικασία ρύθμισης μέσω των αρχικών και οριακών συνθηκών ή των επιλεγόμενων παραμέτρων, αξιοποιώντας την εμπειρία του στην ερμηνεία των υδρολογικών διαδικασιών και τις γνώσεις του για τις φυσικές ιδιαιτερότητες της περιοχής μελέτης.
2. Η προσέγγιση που γίνεται με αυτή την εργασία επιδιώκει αφενός την προσομοίωση των επιφανειακών και υπόγειων διεργασιών με τρόπο που να πλησιάζει περισσότερο τη φυσική πραγματικότητα, αφετέρου την εκτίμηση σαφώς μικρότερου αριθμού παραμέτρων σε σχέση με την προηγούμενη εφαρμογή (2008). Οι διαφορές των δύο προσεγγίσεων συνοψίζονται στα εξής:
- Στην παρούσα εφαρμογή σχεδιάζονται (σε Γ.Σ.Π.) 13 υπολεκάνες, έναντι 5 στην προηγούμενη προσέγγιση και 40 κύτταρα, έναντι 30 αντίστοιχα. Επίσης, στα 2 κύτταρα που στη μελέτη του 2008 αντιπροσωπεύουν υπόγειες διαφυγές της λεκάνης στον Ευβοϊκό Κόλπο, προστίθενται 2 επιπλέον για τις διαφυγές στην Υλίκη και το Θηβαϊκό Πεδίο.
 - Επιπλέον, αξιοποιείται η δυνατότητα ομαδοποίησης των παραμέτρων, ώστε να μειωθεί σημαντικά ο αριθμός τους. Η ομαδοποίηση στο υπόγειο μοντέλο εφαρμόζεται στις παραμέτρους της υδραυλικής αγωγιμότητας και του πορώδους και γίνεται βάσει των γεωλογικών χαρακτηριστικών των κυττάρων σε τρεις ομάδες (αδιαπέρατων, ημιπερατών και διαπερατών σχηματισμών). Στο επιφανειακό μοντέλο η ομαδοποίηση γίνεται στις 6 κατηγορίες Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης, όπως και στην προηγούμενη προσέγγιση.
 - Ο τελικός αριθμός των παραμέτρων που εκτιμώνται στην εργασία αυτή είναι 64 από τις οποίες οι 48 ανήκουν στο επιφανειακό μοντέλο και οι 16 στο υπόγειο. Οι αντίστοιχες παράμετροι της προηγούμενης προσέγγισης είναι 104 συνολικά, 40 επιφανειακές και 58 υπόγειες. Με τον τρόπο αυτό διατηρείται η αρχή της φειδωλότητας ως προς τον προσδιορισμό των παραμέτρων, αφού μεγάλος αριθμός τους μπορεί να αποτελέσει παράγοντα αβεβαιότητας (Perrin, et. al., 2001). Επιπλέον, τόσο ο σχεδιασμός των υποπεριοχών όσο και η επιλογή των παραμέτρων δεν απομακρύνονται από τη φυσική πραγματικότητα.
3. Το βασικότερο αντικείμενο διερεύνησης της παρούσας εργασίας ήταν ο κατάλληλος διαχωρισμός των υπογείων κυττάρων, ώστε να ικανοποιείται κατά το δυνατόν ο στόχος της φειδωλής

παραμετροποίησης του μοντέλου. Για τη διευκόλυνση της διαδικασίας διερεύνησης, αξιοποιήθηκαν οι δυνατότητες των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών, ενώ για το διαχωρισμό ελήφθησαν υπόψη τα εξής χαρακτηριστικά και γενικοί κανόνες:

- Τα όρια των διαφορετικής διαπερατότητας σχηματισμών της λεκάνης (επηρεάζουν τα όρια των υδρογεωλογικών λεκανών).
- Το ανάγλυφο του εδάφους της περιοχής μελέτης (καθορίζει τα όρια των υδρολογικών λεκανών).
- Σημαντικά ρήγματα της περιοχής.
- Οι θέσεις των πηγών (τοποθετούνται στα όρια των κυττάρων).
- Η ομοιογένεια των γεωλογικών σχηματισμών στο εσωτερικό του κάθε κυττάρου. Η προσπάθεια για ομοιογένεια αυξάνει τον αριθμό των κυττάρων και απαιτεί πολυγωνικά κύτταρα για καλύτερη προσαρμογή.
- Οι μικρές υψομετρικές διαφορές στο εσωτερικό του κυττάρου, ώστε να υπάρχει ομοιογένεια και ως προς τις υδρολογικές συνθήκες (κατείσδυση κλπ.).

Τα παραπάνω οδήγησαν:

- Σε αριθμό κυττάρων ελάχιστα μεγαλύτερο από εκείνο της προηγούμενης προσέγγισης, αλλά προσαρμοσμένων πολύ περισσότερο στη φυσική πραγματικότητα.
- Σε πολύ μικρότερο αριθμό παραμέτρων, που ήταν και το ζητούμενο, καθώς τα χαρακτηριστικά των κυττάρων και η ομοιογένεια των συνθηκών στο κάθε κύτταρο, βοηθούν την ομαδοποίησή τους και οδηγούν σε μείωση των παραμέτρων του υπόγειου συστήματος κατά 83%.

Η ίδια προσπάθεια ενσωμάτωσης στο μοντέλο υπόγειου συστήματος, φυσικών χαρακτηριστικών της λεκάνης και ρεαλιστικών ή μετρημένων τιμών διαφόρων μεταβλητών, γίνεται και στον καθορισμό των αρχικών συνθηκών που αφορούν τις διαστάσεις και στάθμες των υπόγειων δεξαμενών. Συγκεκριμένα, ελήφθησαν υπόψη τα εξής:

- Στοιχεία πιεζομετρίας από χάρτη μελέτης του Υ.Ε.Β.
- Το γεγονός ότι η ροή γίνεται από δεξαμενή υψηλότερης σε δεξαμενή χαμηλότερης στάθμης.
- Οι δεξαμενές γειτονικών κυττάρων της προσχωματικής περιοχής όπου ρέει ο Βοιωτικός Κηφισός πρέπει να βρίσκονται σε επαφή. Αυτό δεν είναι απαραίτητο μεταξύ δεξαμενών ορεινών και πεδινών περιοχών.
- Οι στάθμες δεν πρέπει να είναι πολύ μεγάλες στα ορεινά κύτταρα, γιατί οι κατάντη δεξαμενές δέχονται απότομα και με ταχύτητα μεγάλες ποσότητες υδάτων (απότομη άνοδος και πτώση στην αρχή του διαγράμματος αποθήκευσης υδάτων).

Όσον αφορά τις συνθήκες αδιαπέρατων ορίων μεταξύ των κυττάρων αυτές ορίζονται:

- Σε θέσεις μεγάλων ρηγμάτων βάσει τεκτονικού χάρτη Υ.Ε.Β.
- Μεταξύ διαπερατών – αδιαπέρατων σχηματισμών.

- Σε κύτταρα όπου υπάρχουν πηγές επαφής (συνήθως μεταξύ αδιαπέρατου – καρστικού σχηματισμού ή καρστικού – μικρότερου πορώδους προσχωματικού).
 - Σε όρια που σχηματίζουν πιθανές υδρογεωλογικές λεκάνες (π.χ. που τροφοδοτούν πηγές), ώστε να παρεμποδίζεται διαφυγή υδάτων σε άλλες λεκάνες.
 - Γενικά σε κατάλληλα όρια, όταν μια δεξαμενή δείχνει αδικαιολόγητη ανοδική ή καθοδική τάση αποθήκευσης υδάτων.
4. Όσον αφορά τα αποτελέσματα εφαρμογής του μοντέλου στην παρούσα εργασία επισημαίνονται τα εξής:
- Η βαθμονόμηση του μοντέλου γίνεται βάσει μετρημένων στοιχείων απορροής των υδρολογικών ετών 1984 έως 1990, ενώ η επαλήθευσή του με τα διαθέσιμα στοιχεία των ετών 1991 έως 1994.
 - Ο έλεγχος προσαρμογής του μοντέλου στις μετρήσεις αυτές γίνεται σε επτά σημεία της λεκάνης και συγκεκριμένα στην έξοδό της (σήραγγα Καρδίτσας) και στα έξι μεγάλα συγκροτήματα πηγών που εκδηλώνονται στην επιφάνεια της λεκάνης και είναι οι πηγές Λιλαία – Κεφαλόβρυσο, Μαυρονέρι, Αγία Παρασκευή, Έρκυνα, Μέλανας και Πολυγύρα.
 - Από το μεγάλο αριθμό δοκιμών που έγιναν, το αποτέλεσμα που χαρακτηρίζεται ως το καλύτερο, δείχνει ότι το μοντέλο προσαρμόζεται πολύ ικανοποιητικά στα μετρημένα στοιχεία. Ο δείκτης αποτελεσματικότητας είναι υψηλός, γύρω στο 0,8 τόσο για τη βαθμονόμηση όσο και για την επαλήθευση.
 - Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με αυτά της προηγούμενης μελέτης, προκύπτει ότι οι τιμές βαθμονόμησης και επαλήθευσης κυμαίνονται στα ίδια περίπου επίπεδα για την έξοδο της λεκάνης, αλλά είναι μικρότερες σε ορισμένες πηγές στην παρούσα εργασία. Αυτό, όμως, αφενός αντισταθμίζεται από το γεγονός της μείωσης του συνολικού αριθμού παραμέτρων του μοντέλου περίπου κατά 61,5% (ειδικά του υπόγειου μοντέλου, μείωση κατά 83%) αφετέρου συνδέεται με τις ιδιαίτερες υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής (έντονη καρστικοποίηση, ρήγματα, μεταπτώσεις, εναλλαγές γεωλογικών σχηματισμών κλπ.) που οδηγούν σε πολύπλοκους μηχανισμούς λειτουργίας των πηγών, τα χαρακτηριστικά των οποίων συνήθως δεν είναι γνωστά. Δεδομένης, επομένως, της άγνοιας που υπάρχει όσον αφορά τις συνθήκες υπόγειας ροής, είναι πολύ δύσκολο το μοντέλο να προσεγγίσει τη συμπεριφορά των πηγών, παρ' όλο που έχει λάβει υπόψη όλα τα προαναφερόμενα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά.
5. Τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής του Βοιωτικού Κηφισού (γεωλογικά, υδρογεωλογικά, ανάγλυφο κλπ.) είναι και ο κύριος παράγοντας δυσκολίας τόσο στο στάδιο της σχηματοποίησης του επιφανειακού και υπόγειου συστήματος, όσο και στο στάδιο βαθμονόμησης και επαλήθευσης του μοντέλου. Συγκεκριμένα:

- Το έντονο ανάγλυφο της περιοχής και οι εναλλαγές ορεινών περιοχών και πεδιάδων ή κοιλάδων, δημιουργούν δυσκολίες στο σχεδιασμό των κυττάρων και τη διαστασιολόγηση των υπόγειων δεξαμενών. Συνέπεια είναι οι διαφορετικές συνθήκες κατείσδυσης εντός των ορίων της ίδιας επιφάνειας, σε αρκετά κύτταρα του υπόγειου υδροφορέα.
 - Στις ορεινές περιοχές, λόγω κλίσης ή βραχωδών σχηματισμών, η κατείσδυση είναι μικρή και οι ταχύτητες επιφανειακής ροής μεγαλύτερες. Για το λόγο αυτό, τέτοιες περιοχές θα πρέπει να διαχωρίζονται από τις υπόλοιπες, όπου ροή και κατείσδυση είναι ομαλότερες.
 - Ιδιαίτερες συνθήκες υπόγειας ροής ισχύουν, επίσης, στα κύτταρα που αντιστοιχούν σε καρστικούς σχηματισμούς. Πρέπει, επομένως, ο διαχωρισμός να γίνει με τέτοιο τρόπο, ώστε η ανάπτυξη των γεωλογικών σχηματισμών σε κάθε κύτταρο να είναι όσο το δυνατόν ομοιογενής, χωρίς, όμως, η διαμέριση αυτή να δημιουργεί πληθώρα ομοιόμορφων κυττάρων που αυξάνουν τις παραμέτρους του μοντέλου και το ρεαλισμό του μοντέλου.
 - Η παρουσία των καρστικών σχηματισμών επηρεάζει τα προσομοιωμένα υδρογραφήματα των πηγών, τα οποία σε ορισμένες περιπτώσεις αποκλίνουν από τα μετρημένα. Απαιτούνται, συνεπώς, πολλές δοκιμές ρύθμισης του μοντέλου με διάφορες παραμέτρους και με την αλλαγή κάθε φορά ενός συγκεκριμένου χαρακτηριστικού (αδιαπέρατο όριο, αρχική στάθμη υπόγειας δεξαμενής κλπ.), ώστε να φανεί πιο χαρακτηριστικό της λεκάνης ή ποια παράμετρος δημιουργεί ευαισθησία στο μοντέλο.
 - Οι προσπάθειες για διερεύνηση, δυστυχώς περιορίζονται από την έλλειψη μετρήσεων απορροής στις περισσότερες από τις πηγές, συχνά ακόμα και για 2 – 3 συνεχόμενα υδρολογικά έτη.
6. Φτάνοντας στο τέλος της εργασίας, έπειτα από ένα μεγάλο αριθμό δοκιμών και διερεύνηση του βαθμού στον οποίο τα χαρακτηριστικά της λεκάνης επηρεάζουν την επιφανειακή και υπόγεια ροή, προκύπτουν ορισμένες κατευθύνσεις για περαιτέρω διερεύνηση, όπως:
- Διαμέριση του υπόγειου υδροφορέα που θα λαμβάνει υπόψη κυρίως το ανάγλυφο της λεκάνης, διαχωρίζοντας τα κύτταρα σε ζώνες ορεινών και πεδινών περιοχών με σαφή όρια, ελαχιστοποιώντας έτσι τις υψομετρικές διαφορές εντός της περιοχής του κάθε κυττάρου. Η ομαδοποίηση των παραμέτρων μπορεί να γίνει βάσει αυτού του χαρακτηριστικού.
 - Διαμέριση του υπόγειου υδροφορέα σε κύτταρα βάσει των γεωλογικών σχηματισμών, η οποία θα είναι πιο αδρομερής ή πιο λεπτομερής από αυτήν της παρούσας εργασίας.
 - Ρύθμιση του μοντέλου με ημερήσιο χρονικό βήμα, το οποίο παρουσιάζει με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τη δίαιτα της απορροής.

Σε κάθε περίπτωση, πάντως, είναι αναγκαία περισσότερα και πιο συστηματικά διαθέσιμα στοιχεία από μετρήσεις της απορροής και των κατακρημνίσεων της λεκάνης (βροχοπτώσεις, χιονοπτώσεις), μετρήσεις πιεζομετρίας σε όλες τις πεδινές της εκτάσεις και διαρκής επικαιροποίηση των στοιχείων που

αφορούν τις ανθρώπινες επεμβάσεις στη λεκάνη (αριθμός γεωτρήσεων, απολήψεις νερού, νέες καλλιέργειες και αρδευτικές ανάγκες κλπ.).

7. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Ελληνική βιβλιογραφία

- Barbeau J., *Μελέτη μερικών καρστικών φαινομένων* (Τριμ. Έκθεση υπ' αριθ. 4), Υπουργείο Γεωργίας Υ.Ε.Β., 1966.
- ΔΟΜΗ, Εγκυκλοπαίδεια, *Βοιωτία* (λήμμα), Τόμος 5, σελίδες 432 - 436, Αθήνα, 2004.
- ΕΤΜΕ: Αντωνίου – Πέππας και Συν/τες Ε.Ε., ENVECO Α.Ε., Β. Περλέρος, Τεύχος Παραρτημάτων, *Μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων αρδευτικών και υδρευτικών έργων στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού*, Ανάθεση Υπουργείου Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, Αθήνα, 1993.
- Ευστρατιάδης Α., Α. Κουκουβίνος, Ε. Ρόζος, Α. Τέγος, και Ι. Ναλμπάντης, Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου προσομοίωσης υδρολογικών – υδρογεωλογικών διεργασιών λεκάνης απορροής «Υδρόγειος», *Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ)*, Ανάδοχος: ΝΑΜΑ Σύμβουλοι Μηχανικοί και Μελετητές Α.Ε., Τεύχος 4α, 103 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2006.
- Ευστρατιάδης Α., Ι. Ναλμπάντης, Ε. Ρόζος, Μοντέλο προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου στη λεκάνη Βοιωτικού Κηφισού – Υλίκης, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 21, 196 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2004.
- Ευστρατιάδης Α., *Μη γραμμικές μέθοδοι βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων*, Διδακτορική Διατριβή, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2008. (Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση <http://www.itia.ntua.gr/el/docinfo/838/>).
- Ευστρατιάδης, Α., *Διερεύνηση μεθόδων αναζήτησης ολικού βελτίστου σε προβλήματα υδατικών πόρων*, MSc thesis, 139 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάιος 2001.
- Κουτσογιάννης Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999 (Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση <http://www.itia.ntua.gr/g/docinfo/115/>).
- Λαδόπουλος Π., Ν. Χωραφάς, Έκθεση Υδατικού Ισοζυγίου, Πρώτη φάση μελέτης, *Μελέτη υδατικού ισοζυγίου μετά υδρογεωλογικής ερεύνης κοιλάδος Βοιωτικού Κηφισού και πεδιάδος Κωπαΐδος και Θηβών*, 62 σελίδες, Ανάθεση Υπουργείου Δημοσίων Έργων, Αθήνα, 1974.
- Μαντόγλου Α., *Μοντέλα Προσομοίωσης της Κίνησης Υπόγειων Νερών*, Σημειώσεις για το Μάθημα «Υδρολογία Υπόγειων Νερών και Μεταφορά Ρύπων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2008.
- Μιμίκου Μ., *Τεχνολογία Υδατικών Πόρων*, Έκδοση 3, 592 σελίδες, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2006.
- Ναλμπάντης Ι., και Ε. Ρόζος, Σύστημα προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου στη λεκάνη Β. Κηφισού, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της*

Αθήνας, Τεύχος 10, 72 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2000 (Διαθέσιμο στο διαδίκτυο στη διεύθυνση <http://www.itia.ntua.gr/getfile/417/1/documents/report10.pdf>).

Νάνου – Γιάνναρου Α., Εισαγωγή στα υπόγεια νερά, 174 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αθήνα, 2006.

Παγούνης Μ., Θ. Γκέρτσος, *Αποτελέσματα υδρογεωλογικής αναγνώρισης κοινοτήτων Αγ. Τριάδας και Αγ. Άννας*, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, 1998.

Παπαγιαννοπούλου Α., Α. Λέτσιος, *Υδρογεωλογική μελέτη Κωπαϊδικού Πεδίου και Βοιωτικού Κηφισού*, 144 σελίδες, Υπουργείο Γεωργίας Υ.Ε.Β., Αθήνα, 1971.

Παπαδόπουλος Ν., I. Scanvic, *Φωτογεωλογική μελέτη του ανατολικού άκρου της λεκάνης της Κωπαΐδος*, 1966.

ΠΑΠΥΡΟΣ LAROUSSE BRITANNICA, Εγκυκλοπαίδεια, *Κωπαΐδα* (λήμμα), Τόμος 32, σελίδες 52-52, Αθήνα, 2007.

Petrascheck W., *Τα κοιτάσματα σιδηρονικελιούχων μεταλλευμάτων της Λοκρίδος*, Ι.Γ.Ε.Υ. Γεωλ. Γεωφ. Μελ. III, Αθήνα, 1963.

Περλέρος Β., ΕΤΜΕ: Πέππας – Αντωνίου και Συν/τες Ε.Ε., Π. Μπότσογλου, Α. Σταματοπούλου, ENVECO A.E. – Delft Hydraulics, *Υδρογεωλογικό μοντέλο πηγών Βοιωτικού Κηφισού, Φάση Β', Μελέτη διαχείρισης υδατικών πόρων των λεκανών απορροής του Βοιωτικού Κηφισού και των λιμνών Υλίκης και Παραλίμνης*, Ανάθεση Υπουργείου Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, Αθήνα, 1998.

Τάταρης Α. Και Γ. Κούνης, *Η γεωλογική ενότητα των προνεογενών – μεσοζωϊκών σχηματισμών Αττικής – Βοιωτίας – Λοκρίδος και τμήματος της Β.Α. Πελοποννήσου*, Δελτ. Ελλην. Γεωλ. Τ. VII, σ.137 – 154, 1969.

ΧΑΡΗ ΠΑΤΣΗ, Νέα Ελληνική Εγκυκλοπαίδεια, *Βοιωτία* (λήμμα), Τόμος 8, σελίδες 665 - 672, Αθήνα, 1966.

Διεθνής βιβλιογραφία

Barbeau J., Zervoyannis, Kokoris., Prodrromo, Etude Hydrogeologique du Bassin de Kopais – Athenes 6, XII, 1964.

Bear, J., *Hydraulics of Groundwater*, New York, McGraw-Hill Book Company, 1979.

Beven, K. J., Changing ideas in hydrology – The case of physically-based models, *Journal of Hydrology*, 105, 157-172, 1989.

Brath, A., A. Montanari, and E. Toth, Neural networks and non-parametric methods for improving real-time flood forecasting through conceptual hydrological models, *Hydrology and Earth System Sciences*, 6, 627-639, 2002.

Box, G. E. P., and G. M. Jenkins, *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, Holden-Day, San Francisco, 1976.

- Efstratiadis A., I. Nalbantis, A. Koukouvinos, E. Rozos, and D. Koutsoyiannis, HYDROGEIOS: A semi – distributed GIS – based hydrological model for modified river basins, *Hydrology and Earth System Sciences*, 12, 989 – 1006, 2008 ([http://www.itia.ntua.gr/el/docinfo/787/.](http://www.itia.ntua.gr/el/docinfo/787/))
- Efstratiadis, A., and D. Koutsoyiannis, An evolutionary annealing-simplex algorithm for global optimisation of water resource systems, *Proceedings of the Fifth International Conference on Hydroinformatics*, Cardiff, UK, 1423–1428, International Water Association, 2002.
- Freer, J., K. J. Beven and B. Ambrose, Bayesian estimation of uncertainty in runoff prediction and the value of data: an application of the GLUE approach, *Water Resources Research*, 32(7), 2161-2173, 1996.
- Giustolisi, O., and D. Laucelli, Improving generalization of artificial neural networks in rainfall-runoff modelling, *Hydrological Sciences Journal*, 50(3) 439-457, 2005.
- Gupta, H. V., Khodatalab, N., Wagener, T. and S. Sorroshian, Advances in semi-distributed watershed modeling, EGS-AGU-EUG Joint Assembly, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 5, Nice, April 2003, European Geophysical Society, American Geophysical Union, 2003.
- Klemes, V., Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences. Journal*, 31, 13–24, 1986.
- Kraous F., *Sumpfund Seebildungen in Griechenland*, Mitt D. Geogr. Gessel. Nr. 7, 8 – Wien, 1892.
- Nalbantis I., A. Efstratiadis, and D. Koutsoyiannis, On the use and misuse of semi-distributed rainfall – runoff models, *XXIV General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics*, Perugia, International Union of Geodesy and Geophysics, International Association of Hydrological Sciences, 2007 ([http://www.itia.ntua.gr/el/docinfo/744/.](http://www.itia.ntua.gr/el/docinfo/744/))
- Nalbantis I., E. Rozos, G. M. T. Tentes, A. Efstratiadis, and D. Koutsoyiannis, Integrating groundwater models within a decision support system, *Proceedings of the 5th Interantional Conference of European Water Resources Association: “Water Resources Management in the Era of Transition”*, edited by G. Tsakiris, European Water Resources Association, Athens, 2002. (<http://www.itia.ntua.gr/el/docinfo/549/>)
- Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe, River flow forecasting through conceptual models, I, A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290, 1970.
- Perrin C., C. Michel, V. Andreassian, Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments, *Journal of Hydrology*, 242, 275 – 301, 2001.
- Phillipson A., *Die friechischen landschaften Ph. I, Teil II. Frankfurt am Main*, 1962.
- Rosberg, D., and H. Madsen, Concepts of hydrologic modelling, in: *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, Chapter 10, John Wiley & Sons, 2005.
- Rozos, E., A. Efstratiadis, I. Nalbantis, and D. Koutsoyiannis, Calibration of a semi-distributed model for conjunctive simulation of surface and groundwater flows, *Hydrological Sciences Journal*, 49 (5), 819 – 842, 2004.

- Rozos, E., and D. Koutsoyiannis, A multicell karstic aquifer model with alternative flow equations, *Journal of Hydrology*, 325 (1 – 4), 340 – 355, 2006.
- Salas, J. D., J. W. Delleur, V. Yevjevich, and W. L. Lane, *Applied Modeling of Hydrologic Time Series*, Water Resources Publications, Littleton, Colorado, 1980.
- Sweeting M., *Report on the Geomorphogeny of the Parnassos – Chion – Region of Greece*, F.A.O. UNSF Groundwater Project – I.F.E.Y., 1963.